は　し　が　き

金沢工業大学「電気・光・エネルギー（EOE）応用研究センター」は，文部科学省により平成 20 年度から実施された「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」に選定され，その補助金を受けて平成 23 年 4 月に設立された。当該研究センターの設立に伴い，施設と装置の整備を平成 24 年 3 月に完了すると共に，5 年間の研究計画に基づいて，研究プロジェクト:「電磁界変換技術の産学知識融合と構造化教育の統合工学研究開発（強電磁界から弱電磁界まで）」が活動を開始し，以下の三つの研究課題,

研究課題［Ⅰ］:　高電界エネルギー変換・応用システムの開発研究

研究課題［Ⅱ］:　磁気応用エネルギー変換・貯蔵・環境保全技術の開発研究

研究課題［Ⅲ］:　光・電子デバイス・システムの開発研究

に鋭意取り組んできた。過去 5 年間の研究活動で得られた成果は，いずれも強電磁界から弱電磁界の広範囲な領域に跨る重要かつ貴重な基盤技術要素であり，応用と実用化の可能性が高く産業界からも大いに注目されるに至った。これらの研究成果は，4 冊の「研究成果報告書（Vol. 1～Vol. 4）」に纏められ刊行されている。

本研究センターは，当初より産学連携と人材育成の観点から産学間に必要な「共同と共創」の精神を持ち，様々な強弱電磁界エネルギー変換に必要な基盤技術の創製と社会への還元，および大学と企業の「緊密な連携」の下に社会が求める人材を養成することを目的としている。研究期間内には，西川 勝委員長他，碩学の 3 名からなる「外部評価委員会」を設け，平成 25 年 7 月に本研究センターの進捗状況をご視察頂き，専門の立場から適切なご評価と貴重なご意見，ご指導を頂いた。研究センターの設立から 5 年間に渡り，学外研究機関，民間企業，学内研究室間の研究協力体制の強化，国内外の著名な講師による講演会などを実施し，研究活動と並行して修士・博士課程学生，学部学生，企業の若手技術者の人材育成に努めてきました。平成 27 年度が本研究センター事業活動の最終年度となるに当たり，ここに「研究成果最終報告書」を取り纏める次第である。

過去 5 年間の研究活動によって獲得できた多くの成果は，いずれも強弱電磁界エネルギー変換に関する基盤技術から実用的応用技術に跨る。しかし，技術の進歩は日進月歩であるので，今後も研究を続行し，これまでに本研究センターで築いてきた産学連携体制の循環ループを更に活性化すると共に人材育成の構造化システムの更なる充実を図って行く。また，これまでに獲得した多くの研究成果をより発展させ，社会的ニーズに適合した実用的研究の推進と社会への還元を目指し邁進して行く。

なお，本報告書は，研究課題［Ⅰ］～［Ⅲ］の研究成果を順次纏めて記載し，各研究課題の最後に過去 5 年間の研究成果リストをそれぞれ収録した。

１．研究組織，研究施設･設備および評価体制

当該「電気・光・エネルギー（EOE）応用研究センター」の研究組織，主要施設・設備と使用者数・利用時間，および研究評価体制について以下に記載する。

１．１　研究組織

EOE 応用研究センターは，以下に示す研究員 12 名で構成されている。

＜研究代表者（所長兼務）＞：工学部・教授・工学博士　　花岡 良一

＜研究員＞

工学部・教授・工学博士	花岡　良一	
工学部・教授・工学博士	宮城　克徳	
工学部・教授・工学博士	金丸　保典	
工学部・教授・工学博士	深見　正	（第 1 グループ長）
工学部・教授・工学博士	小原　健司	
工学部・教授・工学博士	南　内嗣	
工学部・教授・工学博士	山口　敦史	
工学部・教授・工学博士	坂本　康正	（第 2 グループ長）
工学部・教授・工学博士	宮田　俊弘	
工学部・教授・工学博士	島　和男	
工学部・准教授・工学博士	大澤　直樹	
工学部・准教授・工学博士	深田　晴己	

＜共同研究員＞

富山工業高等専門学校　教授　　西　敏行

＜派遣研究員＞

石川県警察本部刑事部科学捜査研究所　　山本 博法

当該研究センターを組織化し円滑に運営する目的で，各々の研究員には，それぞれ役割が決められ，その責任を担う体制が整えられている。これらの役割分担と責任体制については，図 1.1-1 の「役割分担組織図」として示す通りである。研究代表者（花岡良一）は，当該研究センターの所長を兼務し，センター内の研究管理，予算配分管理（大学研究支援課と連動），センター内環境・安全管理，大学への提出書類管理など，センター内全体の総括的役割と責任を担っている。また，プロジェクトの研究体制として，研究課題［Ⅰ］～［Ⅲ］は，以下の 2 グループで組織化され，研究員は明確な役割分担と責任の下に運営されている。

＜第１グループ＞　：**【研究課題［Ⅰ］】**および**【研究課題［Ⅱ］】**

＜第２グループ＞　：**【研究課題［Ⅲ］】**

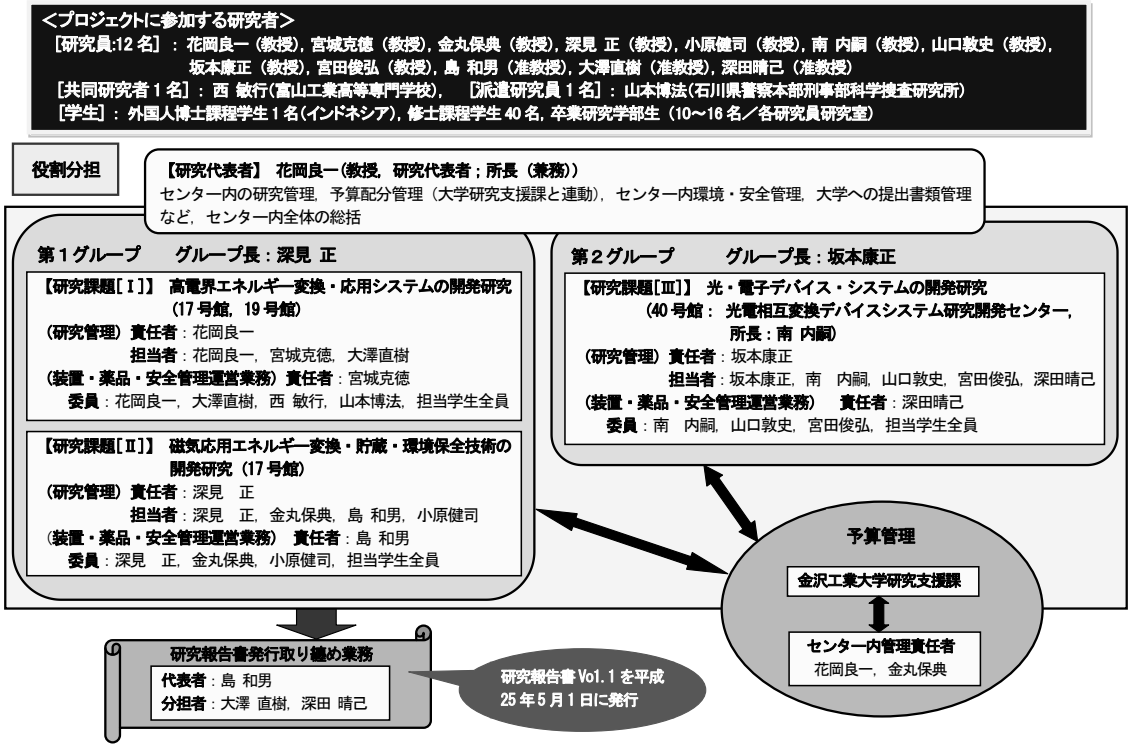


図 1.1-1　EOE 応用研究センター役割分担組

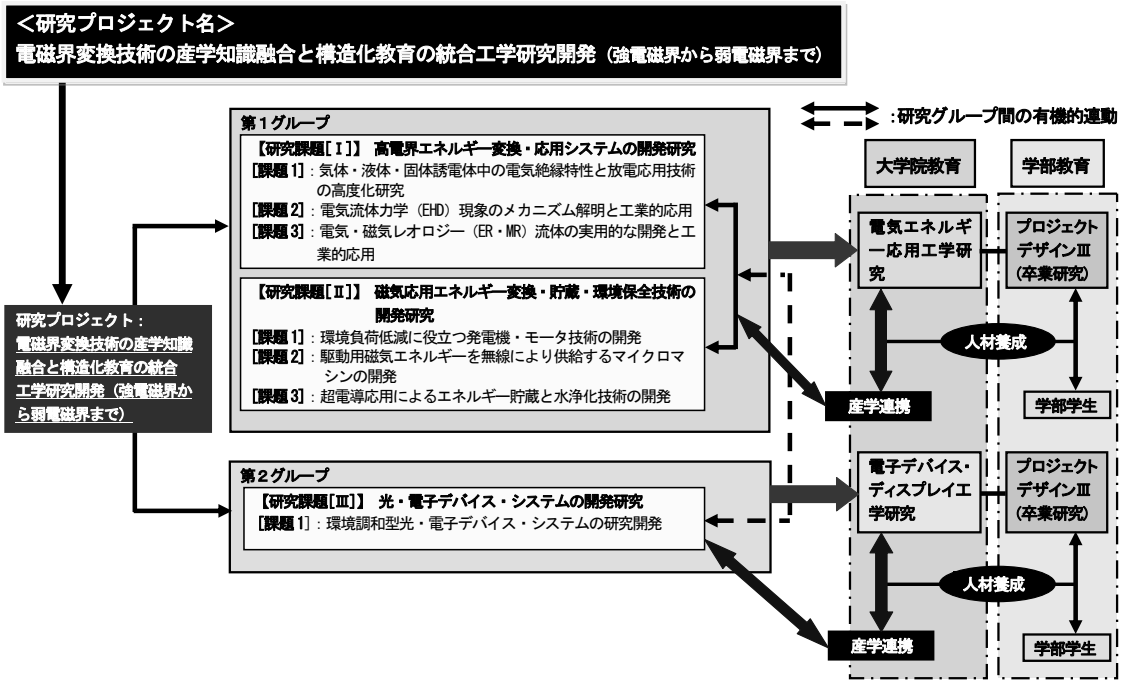


図 1.1-2　プロジェクトの研究体制と大学院・学部教育，産学連携との

研究プロジェクトに参加する研究者として，上記 12 名の研究員以外に，共同研究者

1 名，派遣研究員 1 名を外部から受け入れ，研究課題に取り組んでいる。また，PD と RA はいないが，大学院生（修士課程学生：約 40 名，外国人博士課程学生 1 名（インドネシア：2015 年 9 月学位取得）），および卒業研究学部生（10～16 名／各研究員研究室）が，研究に取り組んでいる。なお，上記研究課題は，本学の大学院教育カリキュラム「電気電子工学専攻」の専修科目：「電気エネルギー応用工学研究」および「電子デバイス・ディスプレイ工学研究」および学部教育カリキュラム「プロジェクトデザインⅢ」と直結し，修士・博士課程学生，学部学生の指導を通じて，チーム間の相互乗入れ的連携体制となっており，その中に関連企業との共同研究を通じた人材交流が進められている。図 1.1-2 は，プロジェクトの研究体制と大学院・学部教育，産学連携との関連を示す。また，産学連携研究に関するアーキテクト的支援は，金沢工業大学「研究支援課」が担っており，大学と産業界を結ぶ窓口として，社会や企業のニーズを的確に把握し，共同研究，委託研究など，産学連携による研究活動の推進に努めている。

１．２　主要施設・設備と使用者数・利用時間

当該研究センターは，17 号館，19 号館，40 号館に跨り，研究・教育に必要な面積は十分確保され，設備の整備も行き届いており高い頻度で活用されている。

〇〈17 号館〉：**【研究課題［Ⅰ］】**および**【研究課題［Ⅱ］】**の研究に使用されている。

研究施設の面積：2482 m^2（26 室），

使用者数：研究所員 7 名（大学院生：約 25 名/年，学部生：約 77 名/年）

設備の名称（利用時間数）：

「電気絶縁・EHD・ER・MR 特性評価システム」（平均 25 時間／週）

「磁気応用エネルギー変換機器評価システム」（平均 27 時間／週）

〇〈19 号館〉：高電圧実験棟として，**【研究課題［Ⅰ］】**の高電圧利用研究課題に使用されている。

研究施設の面積：340 m^2（4 室），

使用者数：研究所員 3 名（大学院生：約 5 名/年，学部生：約 12 名/年）

設備の名称（利用時間数）：

「電気絶縁・EHD・ER・MR 特性評価システム」（平均 18 時間／週）

〇〈40 号館〉：**【研究課題［Ⅲ］】**の研究に使用されている。

研究施設の面積：2548 m^2（25 室），

使用者：研究所員 5 名（大学院生：約 10 名/年，学部生：約 55 名/年）

設備の名称（利用時間数）：

「光半導体素子・デバイス開発評価システム」（平均 24 時間／週）

１．３　自己評価および外部評価体制

＜自己評価＞

当該研究センターでは，**【研究課題［Ⅰ］】～【研究課題［Ⅲ］】**の各研究課題を遂行する中で，学生と研究員が一体となり，定期的にセンター内会議や学生による研究成果報告会などを開催し，研究の進捗状況や問題点の明確化とその解決に取り組みながら自己評価を行ってきた。また，関連企業の技術者との間で研究成果報告や新たな提案に関する議論を繰り返してきた。これらの活動によって，技術的なシーズはかなり確立され出願特許件数も増加の傾向を維持しており，応用範囲の拡大にも繋がっている。センター内でのミーティングやこれまでに築いてきた産学連携体制は，研究の活性化と人材育成、並びに科学技術の発展に直結するものと考えており，今後も持続して行く所存である。

＜外部評価＞

EOE 応用研究センターの目標を達成する上で，研究活動，研究体制等の状況について総合的な評価を行い，漸進的な改善と成果の向上，並びに研究活動の活性化を図る目的として，碩学の外部評価委員 4 名で構成される「外部評価委員会」を設置し， 平成 25 年 7 月に評価委員会を開催した。実施されている研究課題［Ⅰ］，［Ⅱ］，［Ⅲ］について，プロジェクトリーダより進捗状況の説明後，研究センターの学部・大学院生を中心としたポスターセッションを行い，研究装置・設備，研究状況などを視察して頂いた。その後，全研究所員同席の下で個々の研究状況ならびに研究所全体の状況を対象とした質疑応答を適宜行った。最後に，評価委員長より貴重な提言・提案を頂いた。以下に「外部評価委員」と「評価委員会報告書の概要」について記載する。

＜外部評価委員名簿＞

委員長：西川　勝　（東京大学名誉教授，文部科学省 技術参与，原子力安全研究協会 海外原子力情報センター主任研究員

委　員：酒井　洋輔（北海道大学名誉教授，北海道大学キャリアセンター長，日本溶接協会 北海道地区溶接技術検定委員会 委員長

委　員：三木　一郎（明治大学理工学部教授・理工学部長，明治大学常任理事（学務担当），電気規格調査会 電気一般部会部会長・規格役員会理事

委　員：中西洋一郎（静岡大学名誉教授、静岡大学・客員教授）

外部評価委員会委員長から頂いた評価委員会の評価内容を以下に添付する。

平成２５年７月２７日

金沢工業大学　電気・光・エネルギー（EOE）応用研究センター
外部評価委員会　評価報告書

委員長	西川　勝	東京大学名誉教授、文部科学省 技術参与、原子力安全研究協会 海外原子力情報センター主任研究員
委　員	酒井　洋輔	北海道大学名誉教授、北海道大学キャリアセンター長、日本溶接協会 北海道地区溶接技術検定委員会委員長
委　員	三木　一郎	明治大学理工学部教授・理工学部長、明治大学常任理事（学務担当）、電気規格調査会 電気一般部会部会長・規格役員会理事
委　員	中西洋一郎	静岡大学名誉教授、静岡大学･客員教授

平成 25 年 7 月 27 日（土）に電気・光・エネルギー（EOE）応用研究センターの外部評価委員会を開催した。同研究センターにおいて実施されている三つのプロジェクトについて、研究所員代表者から平成 23 年度･24 年度の研究成果、進捗状況の概略説明があった。その後、研究所内の大学院生を中心としたポスターセッションによって、研究成果内容の詳細な説明と質疑応答がなされた。また、当該研究センターの装置・設備を視察するとともに、全研究所員に個々の研究状況ならびに研究所全体の状況を対象とした質疑応答を適宜行なった。

本報告書は、これら一連の聴取に基づいた EOE 応用研究センターの評価を行い、その結果を評価委員全員の討議の下に纏めたものである。なお、評価内容の承認は、評価委員長に一任された。

代表　**評価委員長**：西川　勝　印

評価委員　：酒井　洋輔

評価委員　：三木　一郎

評価委員　：中西洋一郎

以下に，貴研究センターの活動状況について評価を行った結果を項目別に記載する。

平成２５年７月２７日

金沢工業大学　電気・光・エネルギー（EOE）応用研究センター
所長　花岡良一　殿

評価委員長：西川　勝

研究所評価について

以下に，貴研究所の活動状況について評価を行った結果を項目別に記載する。

Ⅰ．研　究

Ⅰ-1. 各プロジェクト研究の進捗状況について：

●プロジェクト１：高電界エネルギー変換・応用システムの開発研究

●プロジェクト２：磁気応用エネルギー変換・貯蔵・環境保全技術の開発研究

●プロジェクト３：光・電子デバイス・システムの開発研究

（相当する記号を○で囲む）

(A) 優	B：良い	C：普通	D：やや低い	E：かなり低い

コメントをお書き下さい。

・順調に進捗していると認められる。

・必要な設備・計器等が十分に備えられており、且つ有効に活用されている。

Ⅰ-2. 研究内容・成果（論文・学会発表・特許）について

●論文

（相当する記号を○で囲む）

A：非常に活発である	(B)：活発である	C：普通	D：やや低い
E：かなり低調			

●学会発表

（相当する記号を○で囲む）

(A)：非常に活発である	B：活発である	C：普通	D：やや低い
E：かなり低調			

●特許出願

（相当する記号を○で囲む）

(A)：非常に活発である	B：活発である	C：普通	D：やや低い
E：かなり低調			

コメントをお書き下さい。

・学生も含めて、研究成果の公表も活発であるが、一層の論文発表が望ましい。

Ⅰ-3. 研究所予算以外の外部資金について

（相当する記号を○で囲む）

A：かなり充足している	(B)：充足している	C：普通	D：やや不十分	
E：かなり不十分				

コメントをお書き下さい。

・外部資金導入、使用状況、貢献度など、研究所責任者の把握が望ましい。

・科研費A，B（基盤研究・若手研究）獲得の努力が望ましい。

Ⅰ-4. 今後の見通しについて

（相当する記号を○で囲む）

A：大いに期待できる	(B)：期待できる	C：普通	D：やや悪い	
E：かなり悪い				

コメントをお書き下さい。

・特にコメントはなし。

Ⅱ．教　育

●修　士

（相当する記号を○で囲む）

(A)：教育効果が十分上がっている　B：教育効果が上がっている　C：普通 D：教育効果がやや不十分　E：教育効果が全く見られない，今後の改善を必要とする。

●博　士

（相当する記号を○で囲む）

A：十分育成されている　B：育成されている　(C)：普通　D：育成がやや不十分　E：全く不十分である，今後の改善を必要とする。

コメントをお書き下さい。

・博士学生については人数が少なく、育成状況の判断ができないが、私立大学としては普通レベルと思われる。

Ⅲ．博士研究員

（相当する記号を○で囲む）

A：是非補充が必要である　B：補充が好ましい　(C)：現状でよい D：あまり補充の必要を感じない　E：全く補充の必要性を感じない。

コメントをお書き下さい。

・特にコメントはなし。

Ⅳ. 外部との連携

Ⅳ-1. 地域との連携・産学連携について

（相当する記号を○で囲む）

(A): 非常に活発　B：活発　C：普通　D：やや不十分 E：全く不十分

Ⅳ-2. 他研究グループとの協力、連携について

（相当する記号を○で囲む）

A：非常に活発である　(B) 活発である　C：普通　D：やや不十分 E：全く不十分

Ⅳ-3. 世界への展開

（相当する記号を○で囲む）

A：既に活発に展開している　(B) 現状でも可能性は十分にある　C：更なる展開によっては可能性がある　D：可能性は低い　E：可能性を全く見いだせない，さらに努力すべきだ

コメントをお書き下さい。

・海外研究機関との学術上の交流の活発化が望ましい。

V. 体制・運営

V-1. 研究所内

（相当する記号を○で囲む）

(A)：非常に良く整備されている　B：整備されている　C：普通 D：あまり整備されていない　E：全く整備されていない，改善すべきだ

V-2. 大学と研究センターとの関連

（相当する記号を○で囲む）

(A) 大学との連携が非常に良い　B：良い　C：現状でよい　D：大学との連携が余り見られない　E：全く連携が見られない，改善すべきだ

V-3. 公開発表会、講演会、講演など対外的活動

（相当する記号を○で囲む）

A：十分活発に行われている　(B) 活発に行われている　C：普通 D：やや不十分である　E：全く不十分である，改善すべきだ

コメントをお書き下さい。

・今後も大学の手厚い支援が望ましい。

全体的評価

（相当する記号を○で囲む）

A：現時点で十分満足できる　　(B)：現時点で満足できる　　C：普通（平均的）　　D：やや不十分である，改善が好ましい　　E：現時点では全く不満足である，改善すべきだ

コメントをお書き下さい。

・現時点でも満足できるが、より一層、教育・研究活動の飛躍を期待する。

2. 研究プロジェクトの目的・意義

現代産業の基幹をなす強電磁界から弱電磁界に至る広範囲なエネルギー変換技術は，環境適合型社会形成と密接に関連して取り組むべき重要な課題であり，21 世紀の我が国にとって「人づくり」と「イノベーション」に大きく貢献できる分野である。本研究の目的は，産学連携と人材育成の観点から産学間に必要な「共同と共創」の精神を持ち，様々な強弱電磁界エネルギー変換に必要な基盤技術の創製と社会への還元，および大学と企業の「緊密な連携」の下に社会が求める人材を養成することにある。これは，大学から企業への技術移転だけでなく，産学共同研究による知識創出とそれに付随する人材の養成，並びに研究成果を社会に戻す循環ループが構築できることに大きな意義がある。

現代社会が抱える経済発展と地球環境維持との矛盾を解決するための「持続可能な開発」という概念は，今や世界的共通課題となっている。これを実現するための最大の要素は「科学技術の役割」であるが，21 世紀に大学の取り組むべき課題の一つとして，研究と社会が密接な接点を持ち，双方向に進歩しながら研究成果を社会に還元する構造

の循環ループと科学と人間の距離を短縮する「知の構造化」の構築が強く求められる。更に，問題発見能力，課題設定能力に優れ，かつ独創的開発能力だけでなく研究開発のマネジメント能力も備えた「ケーススタディ型人づくり」が益々重要視される。電気・光・エネルギー応用研究センターは，電気・電子工学，材料物性工学，光・電子デバイス工学を中心とした分野の広範囲な研究領域を統合化し，産学連携を積極的に推進して研究成果の属性から価値，価値から実体，そして社会への還元が持続的に実現できる産学間の立体的循環ループの構築，およびその過程でグローバルな競争社会を生き抜ける専門性と総合化技術を使いこなせるクリエイティブかつ研究開発のアーキテクト的能力を持ち，技術者倫理を弁えた高度研究者・専門職業人の養成を目指す。当該研究プロジェクトの各研究課題に取り組む中で産学連携体制を整え，教育との平衡を保ちながら研究者養成と高度専門職業人養成を図り，環境に適合した様々な強弱電磁界エネルギー変換技術基盤の構築と社会への還元を目指すことは，今後の技術社会発展に極めて重要である。

3. 本研究プロジェクトの主な研究成果内容

平成 23 年度～平成 27 年度の研究期間で得られた研究成果は極めて多く，研究プロジェクトは，ほぼ申請時の計画通りに遂行された。当該研究センターと企業との連携状況は順調に進んでおり，金沢工業大学研究支援課との協力体制の下，実質的には 15 企業と緊密な連携を持った共同研究が実施されている。また，本学大学院教育カリキュラム「電気電子工専攻」の専修科目：「電気エネルギー応用工学研究」と「電子デバイス・ディスプレイ工学研究」は，当該プロジェクトと直結して修士および博士課程学生，学部学生の研究，および関連企業との人材交流を通じ，産学における人材育成システムが構築されている。更に，人材育成の一環として，国内外の外部講師による専門特別講演会がこれまでに 12 回実施されている。このような取り組みによって人材は着実に育っており，特にプロジェクトに取り組んでいる学生の希望就職率は 100[%]を達成している。過去 5 年間に取り組んできた 3 つの研究課題：［Ⅰ］高電界エネルギー変換・応用システムの開発研究，［Ⅱ］磁気応用エネルギー変換・貯蔵・環境保全技術の開発研究，［Ⅲ］光・電子デバイス・システムの開発研究では，総合して学術論文（査読有：77 編），学会発表（401 件），図書（17 件），新聞報道（24 件），特許出願（26 件）などの研究成果を挙げている。これらの研究分野は多岐に跨るが，以下に，研究課題［Ⅰ］～［Ⅲ］で獲得した主な研究成果の内容を，研究課題毎に年度を追って記載する。

3．1　研究課題[Ⅰ]：高電界エネルギー変換・応用システムの開発研究

［課題 1］　気体・液体・固体誘電体中の電気絶縁特性と放電応用技術の高度化研究

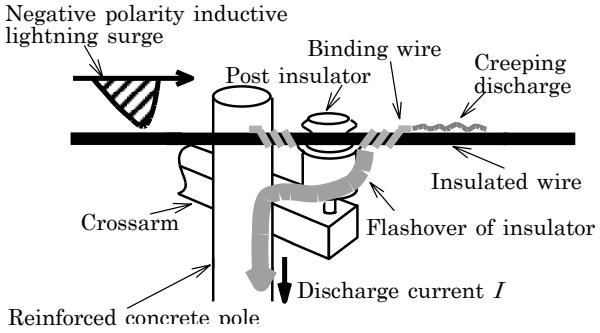
本研究は，気体・液体・固体中およびそれらの界面で発生する放電現象を基礎的な見

地から調べ，そのメカニズムを検討することによって，電力設備や機器などの絶縁設計分野や放電応用分野に貢献することを目的とする。特に，電力配電系統の絶縁電線表面で発生する誘導雷沿面放電現象，大気中のバリア放電とその応用，油中の沿面放電現象と新規絶縁油の開発･応用，放電を利用したナノ粒子分散技術を重点的研究対象とした。

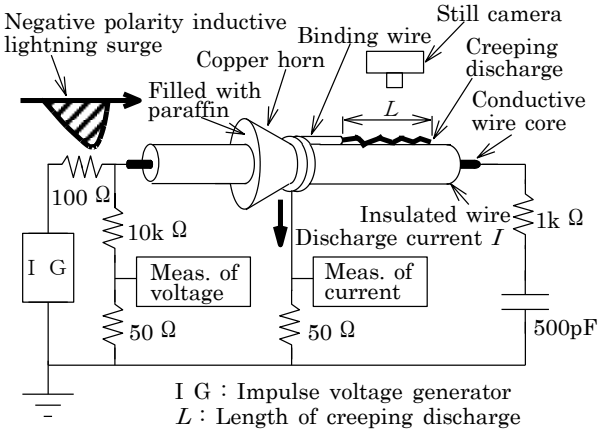
（１）架空絶縁電線表面のインパルス沿面放電に関する研究

市街地に見られる高圧架空配電系統における誘導雷事故の軽減は，社会的安全性の見地から極めて重要な課題の一つである。自然界の雷に起因する電線表面の沿面放電は，直撃雷，誘導雷に関わらず発生し，配電線に対する雷災害原因の一つに挙げられる。現在，高圧配電線の事故に対し，雷によって誘起される事故の確率は高く，さらに自然災害全般から見ても半数以上の事故が雷に起因している。沿面放電に起因する絶縁破壊事故を防止するには，その発生阻止や進展長抑制の方策を確立することが重要である。そのためには，沿面放電の特性を解明し，放電進展モデルを構築することが必要不可欠であるが，沿面放電現象の時間的変化課程は極めて複雑なメカニズムを有する。

＜平成23～24年度＞



(a)　電柱の電線支持部



(b)　実験回路図

図 3.1-1　電柱の電線支持部とそれを模擬した実験回路図

高速度イメージコンバータカメラを用いて沿面放電現象を詳細に観測し，進展様相の時間的変化過程を明確にできたので，これまで未解明であった負極性沿面放電の円弧状ジャンプ現象発生から進展停止に至るまでの進展モデルを提案して，進展様相の変化過程の全メカニズムを解明した。一方，雷撃時の対地雷放電電流波形は多種多様であり，波頭長（以後，T_fと記す）が 100.0[μs]を越えるものから 1.0[μs]以下の急峻なものまで存在する。配電線への誘導雷サージは，このような雷電流によって発生するので，長い波頭長を有する誘導雷サージ（T_f ≧10.0[μs]）の場合における沿面放電の進展長特性，進展様相を詳細に観測し，標準雷サージ（1.2/50[μs]）の場合と比較・検討した。図 3.1-1 は，電柱の電線支持部およびその部分を模擬した実験回路の概略図を示す。

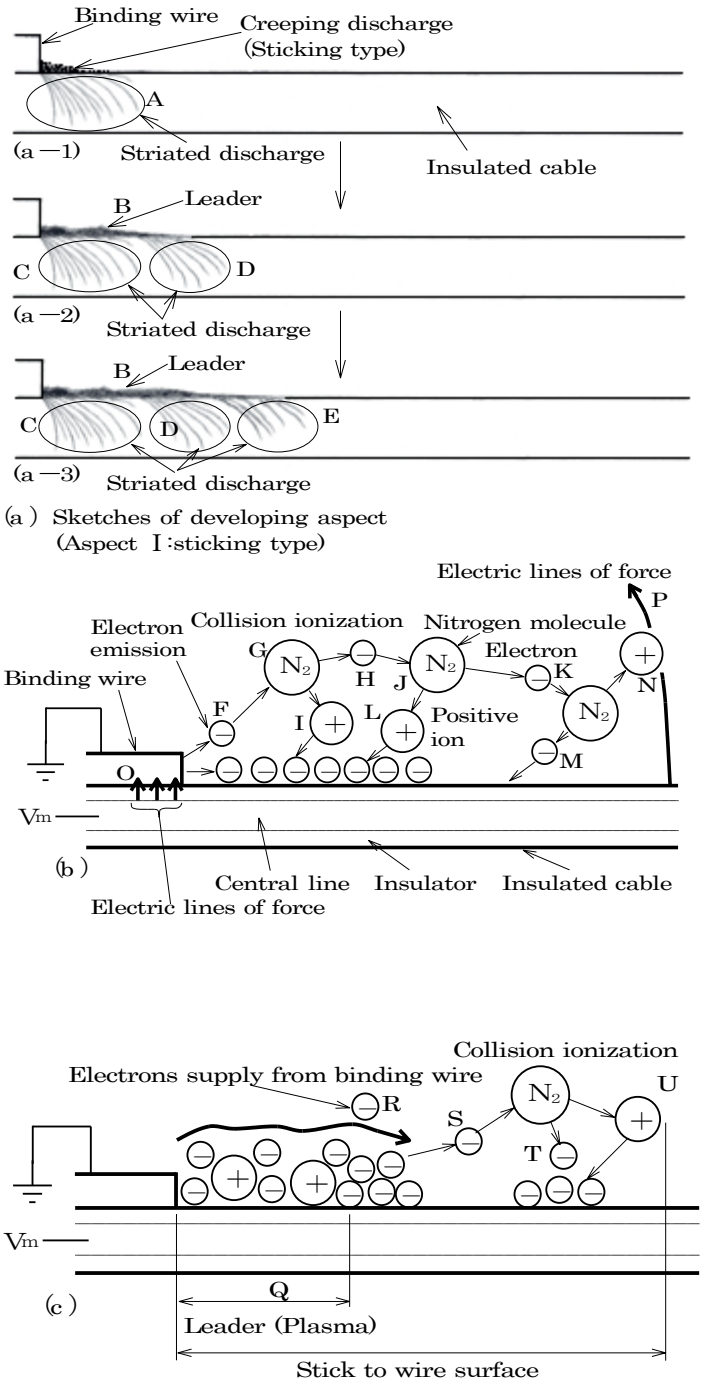
(A)　負極性沿面放電の進展モデルの構築

負極性沿面放電で発生する密着型，円弧状ジャンプ型，および離散的ジャンプ型の放電進展モデルを提案し，電界計算からその妥当性を検討した。それぞれのタイプの複合放電進展モデルは，図 3.1-2(a), (b), (c)にそれぞれ示される。

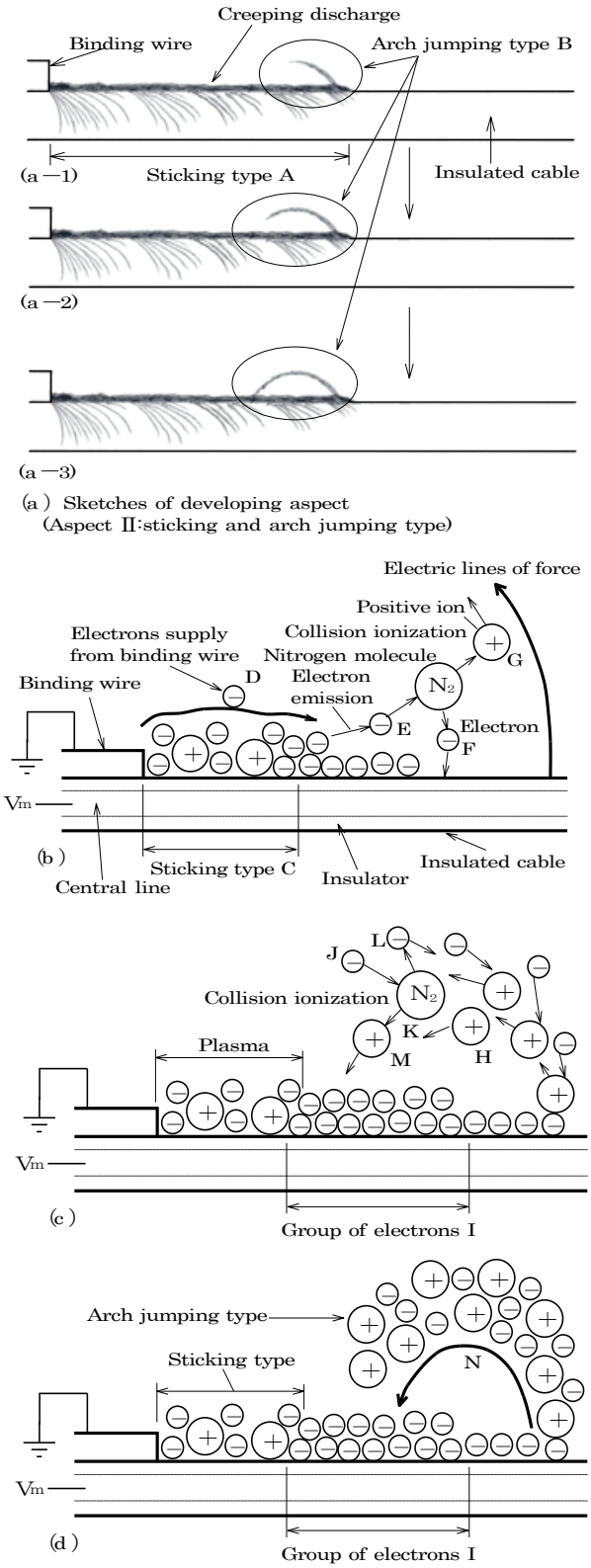
① 負極性沿面放電で観測される円弧状ジャンプ型放電と離散的ジャンプ型放電に関して，前者から後者への移行過程，進展メカニズムが詳細に明らかになった。進展様相の変化は，心線電位によって作られる電線表面電界に影響された正イオンの挙動に起因すると結論される。

② 正イオンの挙動に関して，電線表面電界と移動度から，移動速度と移動距離を概算した。その結果，考察した正イオン移動距離と観測結果はほぼ一致する。これより，進展モデルの妥当性が検証できた。

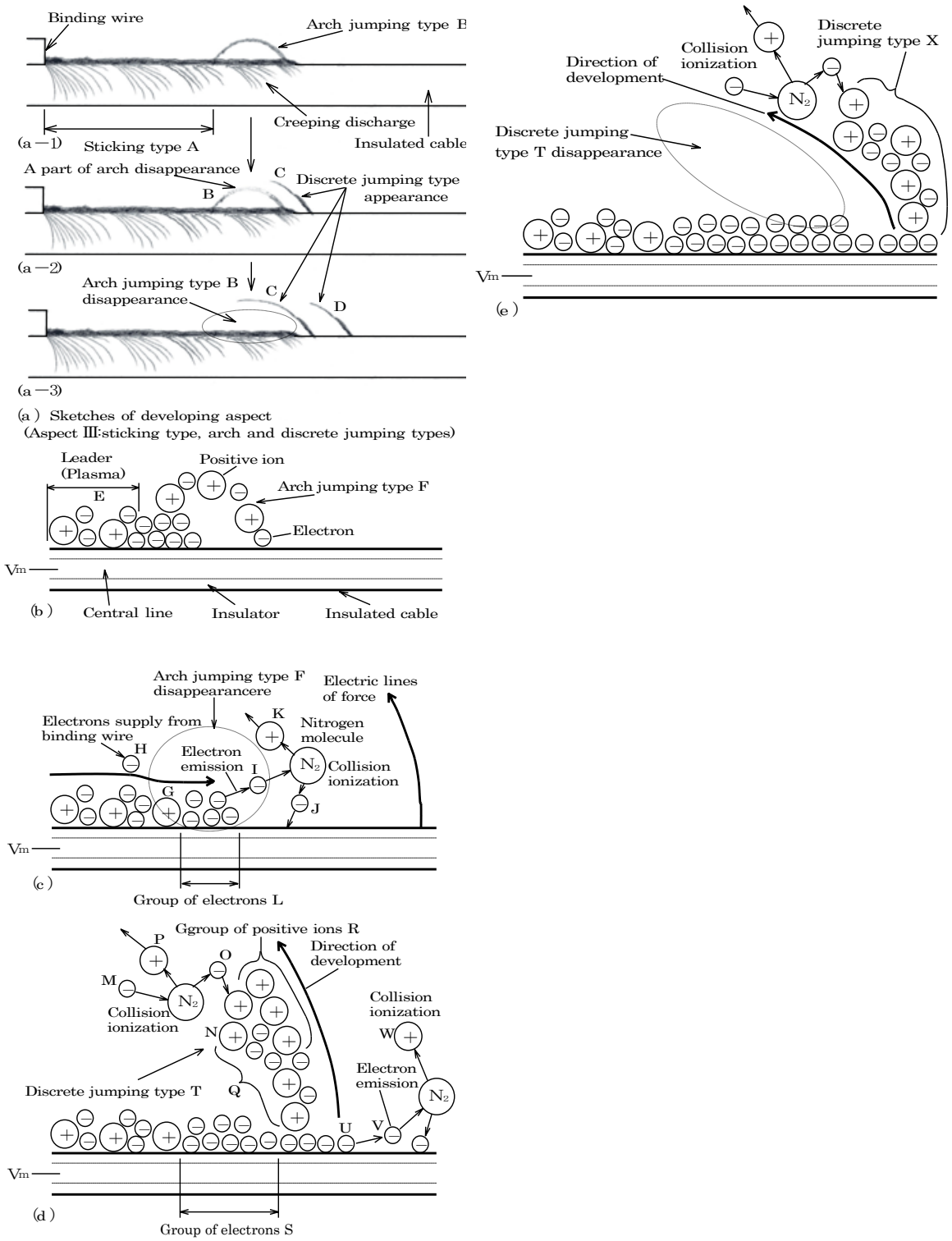
③ 提案した負極性沿面放電の円弧状ジャンプ型と離散的ジャンプ型放電の進展モデルと既に報告された密着型放電の進展モデルにより，負極性沿面放電に現れる進展様相の複雑な推移の全貌が解明できた。これにより，進展開始から停止に至るまでの全進展モデルが完成した。



(a)　V_m＝40[kV]で現れる密着型放電様相の概観図とその進展モデル



(b)　V_m＝50[kV]で現れる密着型と円弧状ジャンプ型が混在する放電様相の概観図とその進展モデル



(c)　V_m＝80[kV]で現れる密着型，円弧状ジャンプ型，および離散的ジャンプ型が混在する放電様相の概観図とその進展モデル

図 3.1-2　負極性沿面放電の様相概観図とその進展モデル

本研究の成果より，誘導雷サージに起因した負極性沿面放電は，正イオンの挙動を制御すれば，進展長の抑制またはその制御が可能である。ここで提案した進展モデルは，印加電圧波高値や波頭長が異なる場合の進展モデル構築にも適用可能である。また，進展メカニズムが解明されたことにより沿面放電進展長の抑制方策の構築にも貢献できる。沿面放電進展長の抑制は，電線被覆弱点部の検査範囲の縮小を可能にし，絶縁電線表面以外で発生する沿面放電進展メカニズムの解明にも繋がる。

(B)　誘導雷サージの広範囲な波頭長に対する沿面放電現象

誘導雷サージの波頭長 T_f を広範囲に変化させた場合における正および負極性沿面放電の進展長，進展様相を詳細に調べ，T_f ≧10.0[μs]の場合の進展特性を解明し，以下の新しい知見を得た。図 3.1-3 は，正・負極性沿面放電の進展長と印加電圧の関係を示す。また，図 3.1-4 は，正・負極性沿面放電の進展様相を示す

（ｉ）正極性沿面放電の場合

① 進展長について：T_f の値に関わらず印加電圧波高値の上昇とともに進展長は，単調に増加する。T_f ≧10.0[μs]の場合，同一印加電圧波高値で比較すると，T_fが長くなるにつれて進展長は減少する。

② 　進展様相について：電線表面を細かくジャンプしながら進展し，T_f により進展様相は変化しない。

③ 電流波形について：T_f ＜10.0[μs]の場合，放電電流は連続的となり，その進展も連続的となる。T_f ＝10.0[μs]の場合，放電電流は連続的または間欠的となり，その進展も両者が混在する。T_f ＞10.0[μs]の場合，放電電流は間欠的となり，その進展も間欠的となる。

③ 　進展速度について：T_fの増加とともに進展速度は減少する。T_f ＜10.0[μs]では，負極性沿面放電よりも進展速度は速くなるが，T_f ≧10.0[μs]では，負極性沿面放電の進展速度とほぼ同一となる。

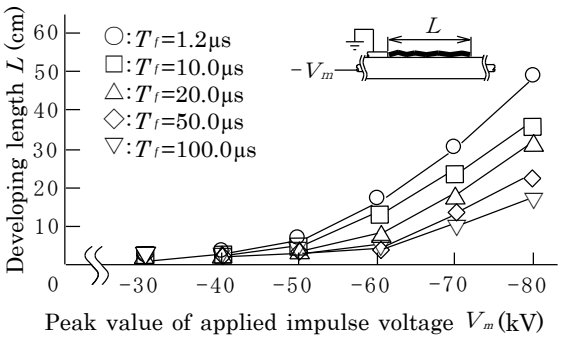
（ⅱ）負極性沿面放電の場合

① 進展長について：T_f ≧10.0[μs]の場合，進展長の減少領域は現れず，印加電圧波 高値の上昇とともに単調に増加するようになる。

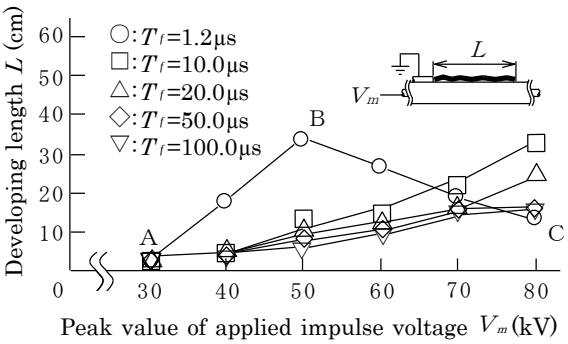
② 進展様相について：T_f ≧10.0[μs]の場合，電線表面に密着して進展し，T_f ＝1.2[μs]のときに放電先端で発生するジャンプ現象は発生しない。

③ 電流波形について:正極性沿面放電の場合と同様の傾向を示し,T_f ＜10.0[μs]の場合，放電電流は連続的となり，その進展も連続的となる。T_f ＝10.0[μs]の場合，放電電流は連続的または間欠的となり，その進展も両者が混在する。T_f ＞10.0[μs]の場合，放電電流は間欠的となり，その進展も間欠的となる。

④ 進展速度について：正極性沿面放電の場合と同様の傾向を示し，T_f の増加とともに進展速度は減少する。

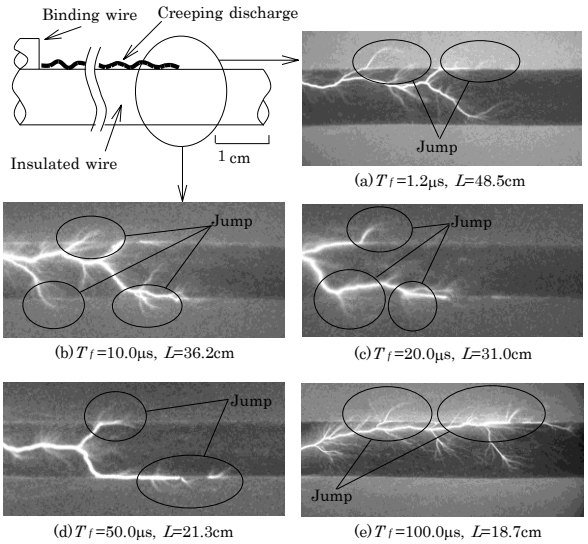


(a)　正極性沿面放電

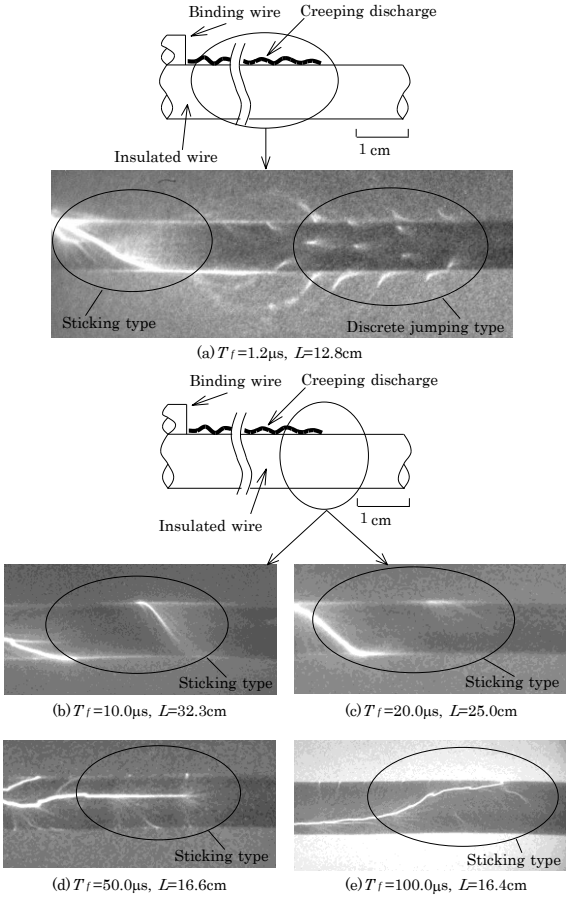


(b)　負極性沿面放電

図 3.1-3　沿面放電の進展長と印加電圧の関係



(a)　正極性沿面放電先端の様相（V_m＝80[kV]）



(b)　負極性沿面放電の様相（V_m＝80[kV]）

図 3.1-4　沿面放電の進展様相

＜平成25～26年度＞

サージ電圧波高値 V_m=90～140[kV]，波頭長 T_f =1.2，2.0，4.0，6.0，8.0[μs]において，電線表面が湿潤状態おける負極性沿面放電の進展特性を解明した。図 3.1-5 は，実験系

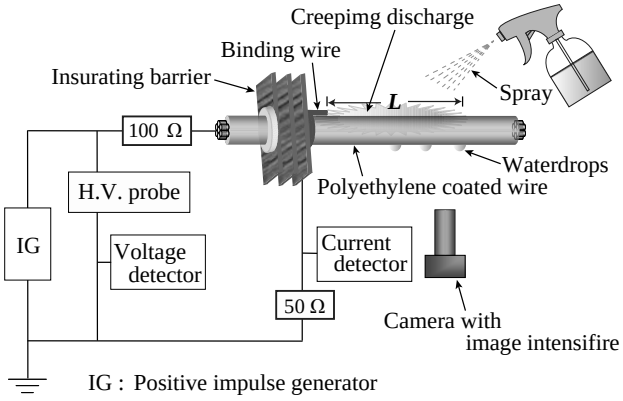


図 3.1-5　湿潤状態の沿面放電を調べるための実験系

の概略図を示す。また，負極性沿面放電進展時において，電線下部に付着している水滴表面から発生する垂直放電の存在を見い出し，これが負極性沿面放電の進展に及ぼす影響を検討した。

(A)　電線表面が湿潤状態にある場合の負極性沿面放電現象

① 電線表面が乾燥状態では，印加電圧波頭長 T_f=1.2～8.0[μs]のいずれにおいても進展長の減少領域が現れるが，湿潤状態では減少領域は現れず，印加電圧波高値の上昇とともに常に増加する。また，印加電圧波高値 V_m が，V_m≧+90[kV]以上になると，図 3.1-6 に示すように，進展長が急増する。これは，湿潤状態の場合，放電先端がジャンプせずに常に電線および水滴に密着して進展し，かつ水滴表面から発生する垂直放電により沿面放電先端の衝突電離が活発化するためである。また，負極性沿面放電先端が電線表面や水滴表面に密着して進展するのは，沿面放電先端の衝突電離で生じた正イオンが水滴に吸着されるためである。図 3.1-7 と図 3.1-8 は，放電様相を示す。

② 電線表面が湿潤状態のとき，図 3.1-9 に示すように，沿面放電電流の流出時間が大幅に増加することが明らかになった。

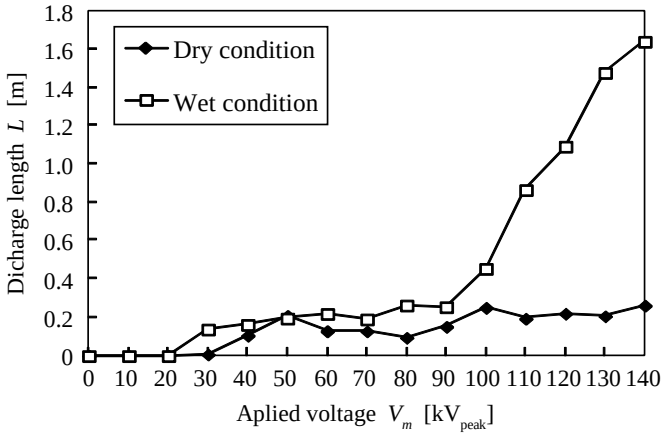
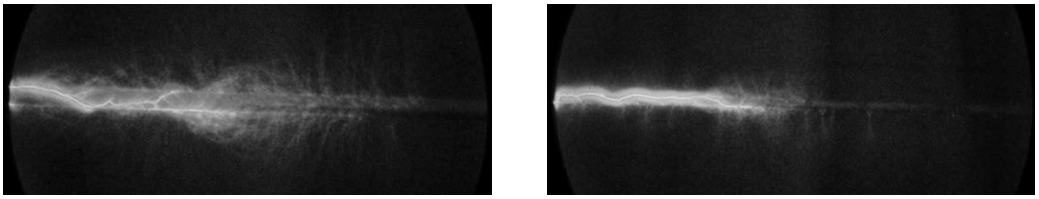


図 3.1-6　乾燥状態と湿潤状態における負極性沿面放電の進展長と印加電圧の関係



(a)　乾燥状態　　(b)　湿潤状態

図 3.1-7　乾燥状態と湿潤状態における負極性沿面放電先端の代表的な様相（V_m＝90[kV]）

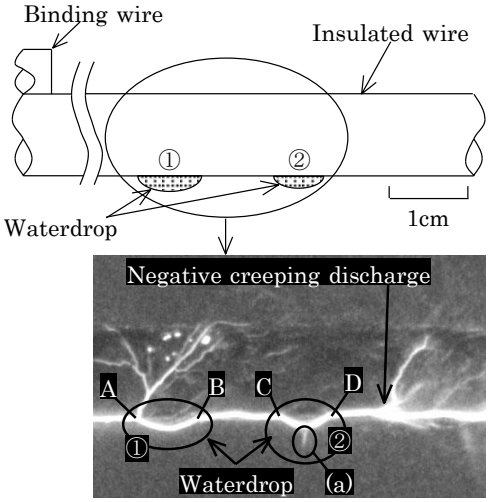
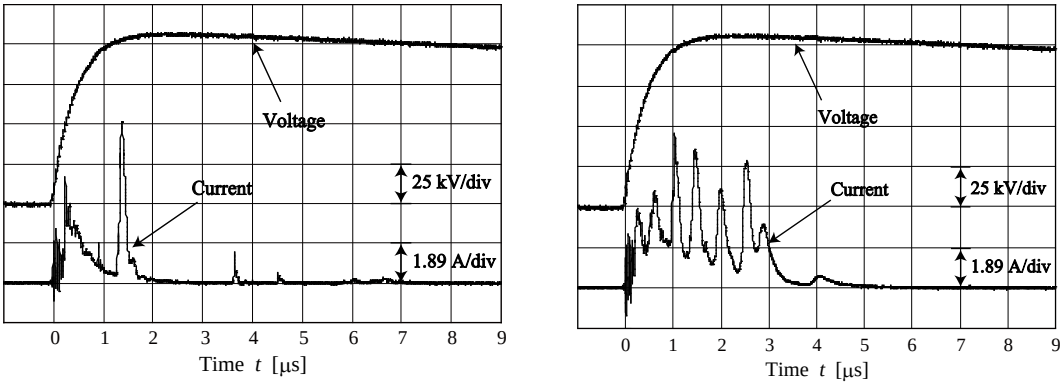


図 3.1-8　水滴表面を進展する負極性沿面放電の様相
（V_m＝80[kV]）



(a)　乾燥状態　　(b)　湿潤状態

図 3.1-9　乾燥状態と湿潤状態における負極性沿面放電の
印加電圧と放電電流波形（V_m＝110[kV]）

(B)　電線表面が湿潤状態における負極性沿面放電と垂直放電の関連

水滴表面で生じる垂直放電は正極性コロナ放電であり，印加電圧の波高値 V_m が，V_m ≧+85[kV]で発生する。垂直放電は，図 3.1-10 に示すように，水滴表面の頭頂部から発生し，負極性沿面放電の到達よりも早いタイミングで発生することが分った。これにより，発生した垂直放電は，負極性沿面放電の進展を助長するように働くことが明らかになった。これは，負極性沿面放電先端で加速を増した電子の活発な衝突電離が，V_m≧+90[kV]における進展長の急増現象として現れる原因である。

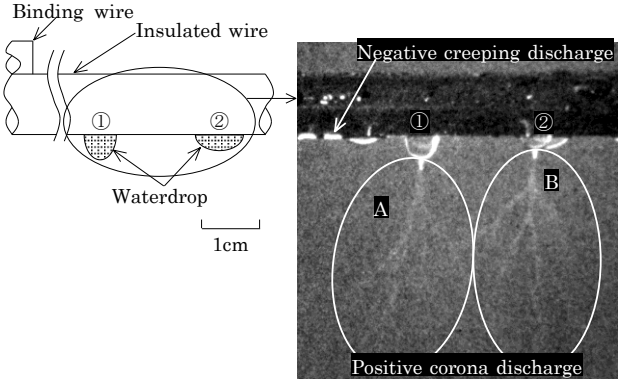


図 3.1-10　水滴表面から発生する垂直放電の代表例

＜平成26～27年度＞

サージ電圧波高値 V_m=90～140[kV]において，波頭長 T_f ≧10.0[μs]の場合の沿面放電進展長特性，進展様相を詳細に観測し，誘導雷サージが標準波（1.2/50[μs]波）の場合と比較, 検討した。また, 正極性沿面放電の観測は, これまで印加電圧の波高値 V_m≦80[kV]に限って実施されてきたが，実際には V_m＞80[kV]の誘導雷サージも存在する。これまで不明であっ V_m＞80[kV]の領域における正極性沿面放電の進展長特性および進展様相を詳細に観測し，既報とは異なる特異な現象を明らかにした。

（A）　正極性沿面放電の場合

① 放電進展長: T_f の値に関わらず印加電圧波高値の上昇とともに進展長は，単調に増加する。T_f ≧10.0[μs]の場合，同一印加電圧波高値で比較すると，T_f が長くなるにつれて進展長は減少する。また，図 3.1-11 に示すように，誘導雷サージに起因する電線表面電界 Ew が，Ew≧36[kV/cm]（V_m≧95[kV]）において，進展長が緩やかに増加する放電領域（放電 1）と急増する放電領域（放電 2）の 2 通りが存在する。放電 2 の発生頻度は，V_m の上昇と共に増加する。進展長が急増する原因は，心線電位の上昇により電線表面から負極性コロナ放電が発生し，正極性沿面放電の進展を助長するように作用するためである。

② 放電進展様相: 電線表面を細かくジャンプしながら進展し，T_f により進展様相は変化しない。放電は，電線表面を細かく枝分かれしながら進展し，上記①中の放電 2 の発光強度は，図 3.1-12 に示すように，放電 1 より強い。これは，電線表面から発生する負極性コロナ放電により正極性沿面放電先端の電離作用が活発化することによる。更に，Ew≧36[kV/cm]では電線表面から周囲の空間に向かって垂直に長さ約 1[cm]の針状負極性コロナ放電が発生する。負極性コロナ放電の発生頻度は，V_m の上昇と共に増加する。

③ 放電電流: T_f ＜10.0[μs]の場合, 放電電流は連続的となり, その進展も連続的となる。

T_f ＝10.0[μs]の場合，放電電流は連続的または間欠的となり，その進展も両者が混在する。T_f ＞10.0[μs] の場合，放電電流は間欠的となり，その進展も間欠的となる。また，図 3.1-13 に示すように，上記①中の放電 2 では，Ew=36[kV/cm[に達するまでの約 1[μs]の間，放電 1 と同様の電流が流れる（1 次電流）。Ew=36[kV/cm]に達すると，放電電流は 2 倍程度に急増する（2 次電流）。この 2 次電流の発生は，電線表面の負極性コロナ放電が，沿面放電先端で電離作用を活発化させることに起因する。

④ 放電進展速度: T_fの増加とともに進展速度は減少する。T_f ＜1.2[μs]では，負極性沿面放電よりも進展速度は速くなるが，T_f ≧1.2[μs]では、負極性沿面放電の進展速度とほぼ同一となる。

⑤ この結果から，心線電位の上昇に伴う正極性沿面放電の進展モデルを提案した。

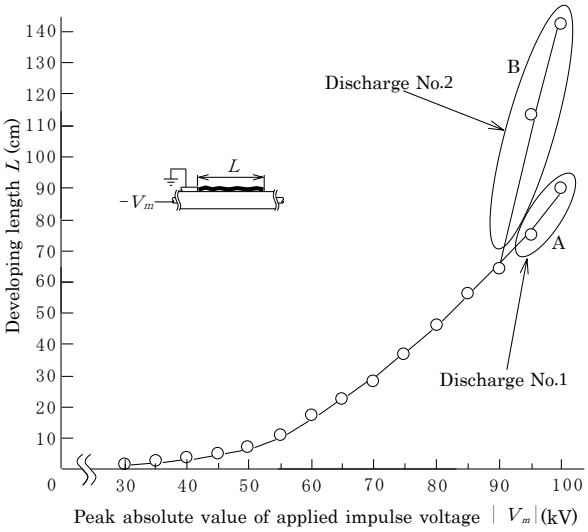


図 3.1-11　正極性沿面放電の進展長と印加電圧の関係

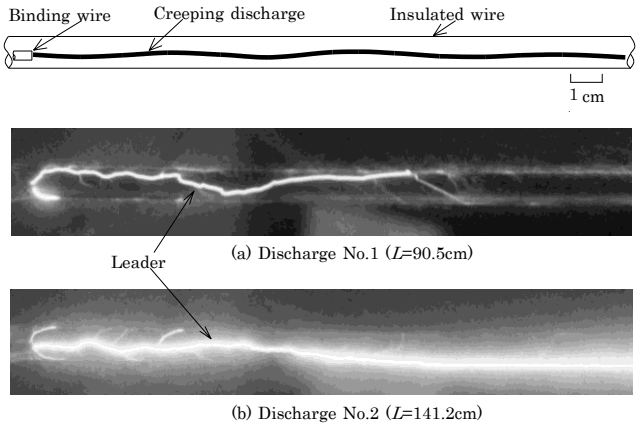


図 3.1-12　正極性沿面放電における放電 1 と放電 2 の進展様相

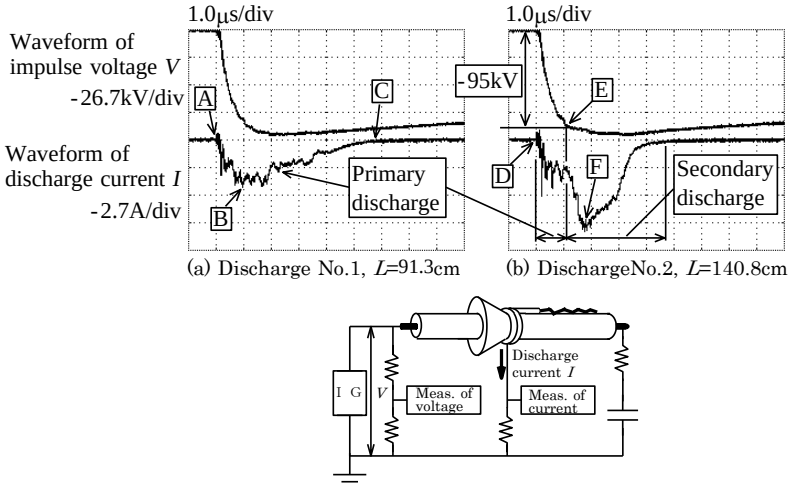


図 3.1-13　正極性沿面放電における放電 1 と放電 2 の放電電流（V_m＝100[kV]）

(B)　負極性沿面放電の場合

① 放電進展長: T_f ≧10.0[μs]の場合，進展長の減少領域は現れず，印加電圧波高値の上昇とともに単調に増加するようになる。

② 放電進展様相: T_f ≧10.0[μs]の場合，電線表面に密着して進展し，T_f ＝1.2[μs]のときに放電先端で発生するジャンプ現象は発生しない。

③ 放電電流: 正極性沿面放電の場合と同様の傾向を示し T_f ＜10.0[μs]の場合，放電電流は連続的となり，その進展も連続的となる。T_f ＝10.0[μs]の場合，放電電流は連続的または間欠的となり，その進展も両者が混在する。T_f ＞10.0[μs]の場合，放電電流は間欠的となり，その進展も間欠的となる。

④ 放電進展速度: 正極性沿面放電の場合と同様の傾向を示し，T_f の増加とともに速度は減少する。

（２）大気中のバリア放電とその応用に関する研究

(A)　大気圧均一 DBD の発生メカニズムの解明

電極間に誘電体（バリア）を挿入して交流高電圧を印加すると，フィラメント放電（Filamentary Discharge: FD と略する）の集合体が電極間に発生する。この放電は，誘電体バリア放電（Dielectric Barrier Discharge: DBD と略する）と呼ばれる。DBD はオゾン生成や表面改質などへ応用され，今後は排ガス浄化への応用も期待されている。

DBD 装置を用いて大気圧中で発生する均一放電には，大気圧グロー放電（Atmospheric Pressure Glow Discharge: APGD と略する）と大気圧タウンゼント放電（Atmospheric Pressure Townsend Discharge: APTD と略する）がある。ここで，APGD は，（1）1[kHz]以上の高周波電界を放電装置に印加する，（2）プラズマの原料ガスに He などの希ガスを用いる，（3）少なくとも一枚の誘電体を電極間に挿入する，という条件で発生する。一

方，APTD は，（1）高純度の窒素ガスを用いる，（2）少なくとも一枚の誘電体を電極間に挿入する，という条件で発生する。しかし，窒素ガス中に酸素ガスが数[ppm]でも原料ガスに含まれると均一放電モードが FD モードに転移してしまうことから，均一放電は，オゾン生成や排ガス中の NOx 処理に従来の均一 DBD は適用できなかった。近年，DBD 装置のバリア材料にアルミナ（型番：A473，京セラ株式会社）を用いることにより，大気圧空気，窒素，酸素中などで均一なバリア放電を発生させることに成功した。しかし，その均一 DBD の放電形態や発生メカニズムについては不明な点が多かった。

＜平成23～24年度＞

（Ｉ）大気圧均一 DBD の種類特定

高速度ビデオカメラ，暗視装置付き静止カメラ，高圧容器などを使用して，大気圧から 0.17[MPa]までの空気や純酸素中で発生する DBD の発光や電流波形を調べた。得られた成果を以下に要約する。

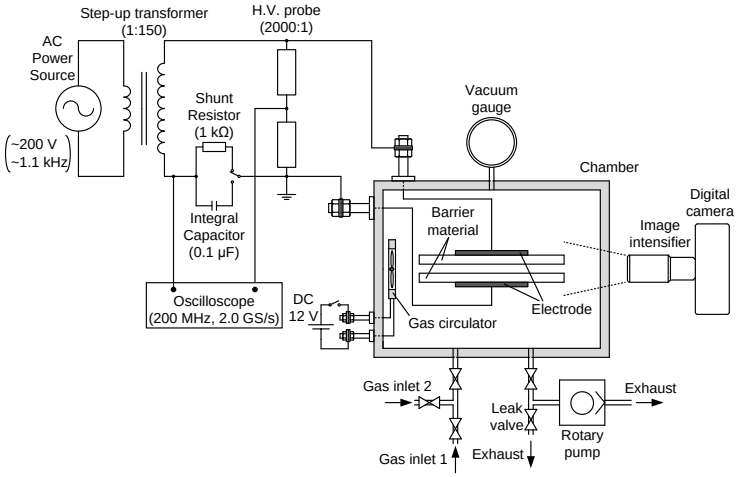


図 3.1-14　バリア放電の観測システム

① 図 3.1-14 に示す実験システムを構築した。システムは，インバータ式の交流電源（NF 回路設計ブロック社製，4210，容量 1[kVA]），試験用変圧器（山菱電機社製，YHT-15K-0.5K，変圧比 1:150），高電圧プローブ（パルス電子技術社製，EP-50K，分圧比 2000:1），電流測定用抵抗（30[kΩ]または 10[kΩ]），電荷（電流の積分値）測定用積分コンデンサ（0.1[μF]），イメージインテンシファイア（浜松ホトニクス社製，Model-C5100）を付けたデジタルカメラ（ニコン社製，D200），高速度カメラ（Photron 社製，FASTCAM-512PCI），オシロスコープ（Tektronix 社製，TDS-2024B）で構成される。

② 図 3.1-15 に示すように，京セラ社製 A473 アルミナ（以後，A473 バリアと呼ぶ）を使用すると発生する均一 DBD の発光は，陽極側の誘電体表面に近づくほど強く，

横方向には一様になる。

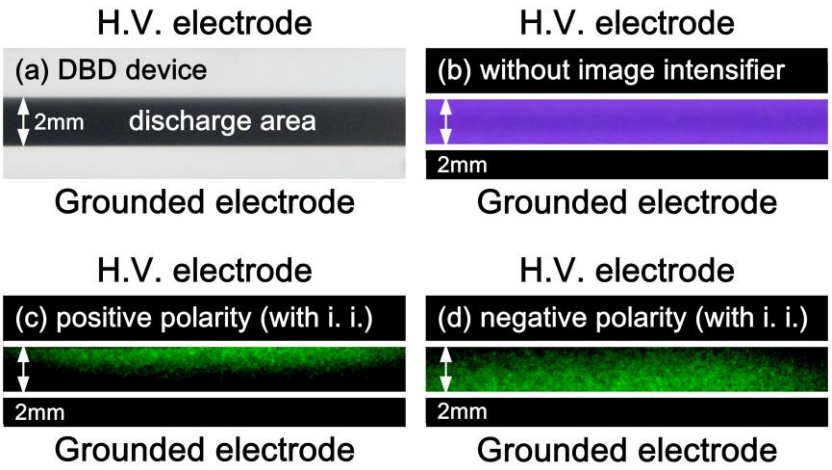


図 3.1-15　大気圧空気中における均一放電

③　図 3.1-16 に示すように，半周期に一回だけ連続的な電流が流れ，FD の場合の特徴的な無数のパルス電流は見られない。これらの電流波形は，Naudé らが報告している 500[Hz]で発生した窒素ガス中の APTD の電流波形と類似している。また，ギャップの放電維持電圧が大気圧空気の絶縁破壊電圧とよく一致している。

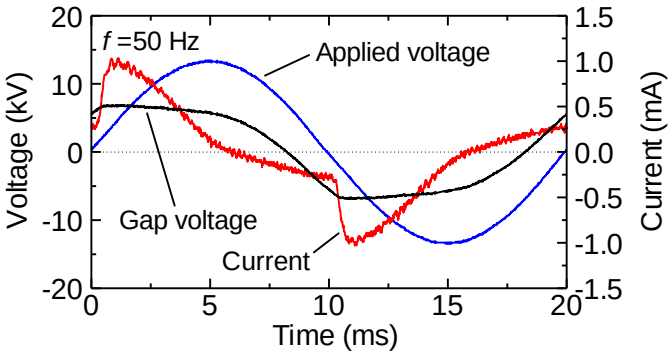


図 3.1-16　印加電圧，ギャップ電圧，および電流波形

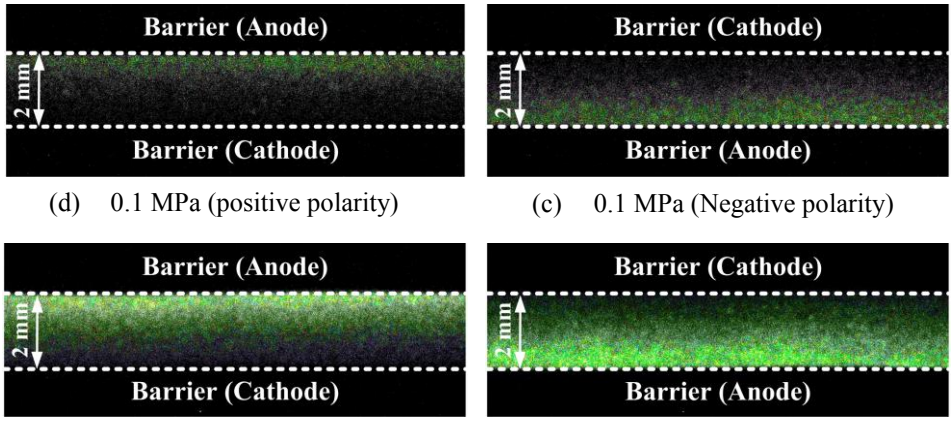
以上の研究から，この大気圧均一 DBD は，先の半サイクルで陽極側のアルミナに一様に残留した電子が，次の半サイクルで逆極性の電界印加となるため，一斉に陽極側に移動するとき生じる電子なだれと，それによりガス空間で生じる正イオンが陰極側のアルミナに衝突するとき生じる二次電子放出に支配されるタウンゼント放電，すなわち APTD となることが明らかにされた。

（Ⅱ）APTD の発生メカニズム解明

従来，タウンゼント放電は，高純度の窒素ガス中や低気圧状態にしなければ発生しなかった。高純度窒素ガス中では，窒素の準安定分子が結合性電離を起こし，次の電子なだれに必要な種電子を多量に供給できるため，放電が均一化される。一方，低気圧状態では，電子なだれが半径方向に拡散しやすいため放電が均一化される。ここでは，純酸素や空気中で発生する新しい APTD の発生メカニズムを解明するために，放電が均一化され難い高気圧乾燥空気中（0.17[MPa]）で実験を行った。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-17 に示すように，発生した均一 DBD の発光は，陽極側の誘電体表面に近づくほど強く，横方向には一様になり，大気圧空気中の特性と同じであった。また，図示しないが，ギャップの放電維持電圧が高気圧乾燥空気の絶縁破壊電圧と一致した。これらのことから，A473 バリアを使用すれば，高気圧タウンゼント放電（High Pressure Townsend Discharge: HPTD）を発生できることが分

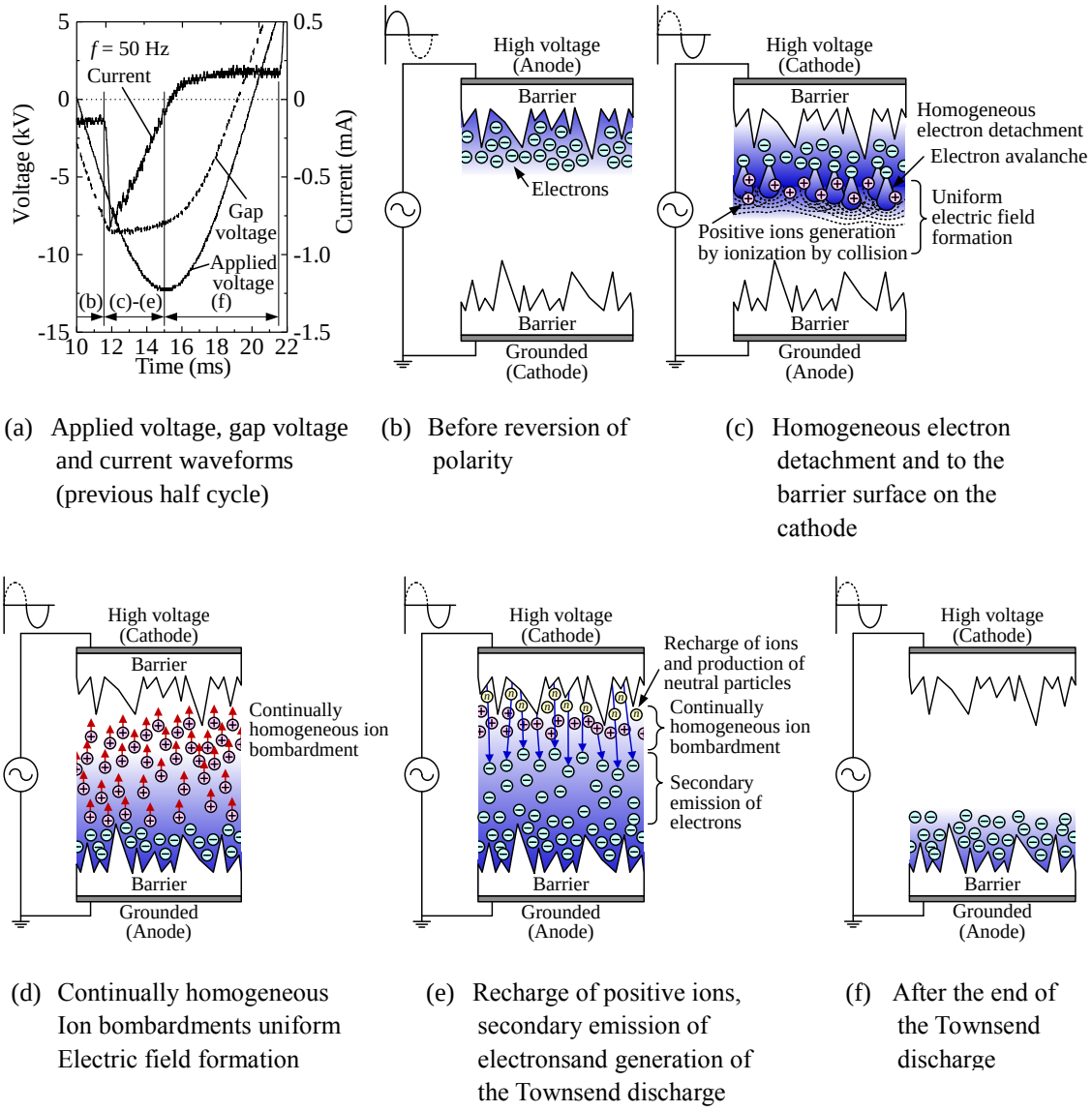
② 高気圧空気中でも TD を発生できたことから，純酸素や空気中で発生する新しい APTD の発生メカニズムは，陽極側のアルミナバリアに一様に残留した電子が，次の半サイクルで逆極性の電界印加となるため，一斉に陽極側に脱離するときに生じる現象であると考えられる。図 3.1-18 は，予想される新しい APTD の発生モデル図を示す。



(d) 0.1 MPa (positive polarity)　(c) 0.1 MPa (Negative polarity)

(a) 0.17 MPa (positive polarity)　(b) 0.17 MPa (Negative polarity)

図 3.1-17　高気圧乾燥空気中での均一 DBD



(a) Applied voltage, gap voltage and current waveforms (previous half cycle)

(b) Before reversion of polarity

(c) Homogeneous electron detachment and to the barrier surface on the cathode

(d) Continually homogeneous Ion bombardments uniform Electric field formation

(e) Recharge of positive ions, secondary emission of electronsand generation of the Townsend discharge

(f) After the end of the Townsend discharge

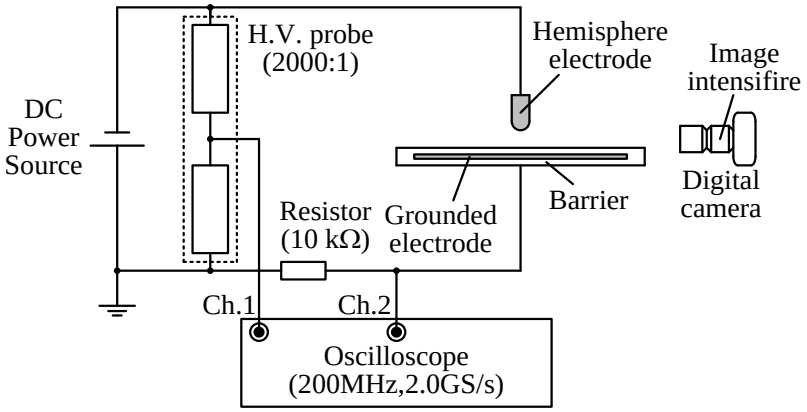
図 3.1-18　空気中の APTD 発生モデル

＜平成25年度＞

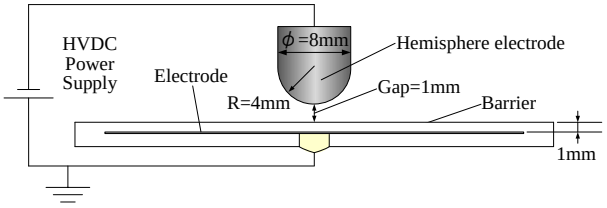
APTD の発生メカニズム解明

昨年度までの研究によって，大気圧空気や酸素中で発生する APTD は，誘電体表面に蓄積される電子の量や分布を制御すれば発生可能であることを明らかにできた。本年度は，その発生メカニズムに関連する誘電体表面の電子の蓄積量や帯電の消滅を明らかにするために，半球棒電極と APTD を発生できるバリア（A473 バリア）や FD しか発生できないバリア（京セラ社製 A440 アルミナを使用したバリア。以後，A440 バリアと呼ぶ）で覆った平板電極からなる電極系と表面電位計で構成される実験システムを構築し，負極性のコロナ放電で負に帯電させたバリア表面の電荷蓄積や消滅の状態を明らか

にした。また，放電発光をイメージインテンシファイア付き静止カメラで観測した。得られた成果を以下に要約する。



(a) 実験回路図



(b) 放電電極系

図 3.1-19　実験システムの概略図

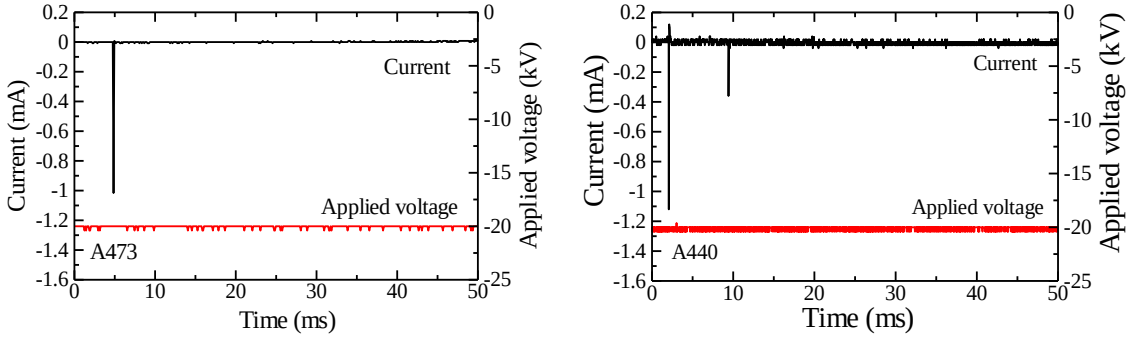
表 3.1-1　バリア材料の特徴

Material code	A473	A440
Discharge mode	APTD	FD
Main material	Al_2O_3	
Purity	92%	
Surface roughness	0.390μm	0.410μm

① 図 3.1-19(a), (b)に示す実験システムを構築した。システムは，直流高圧安定化電源（パルス電子技術社製，型番 : HDV-30K10SUD）と表面電位計（TREK 社製，型番 : MODEL 341HV）で構成される。表面電位が高いほど誘電体表面に多量の電子が蓄積されると考えた。実験では，表 3.1-1 に示すバリア材料を用いた。この材料は，アルミナの純度，比誘電率および表面粗さがほぼ均一と言う特徴を持つ。

② 図 3.1-20 に示すように，APTD を発生できる A473 バリアを用いた場合，コロナ放

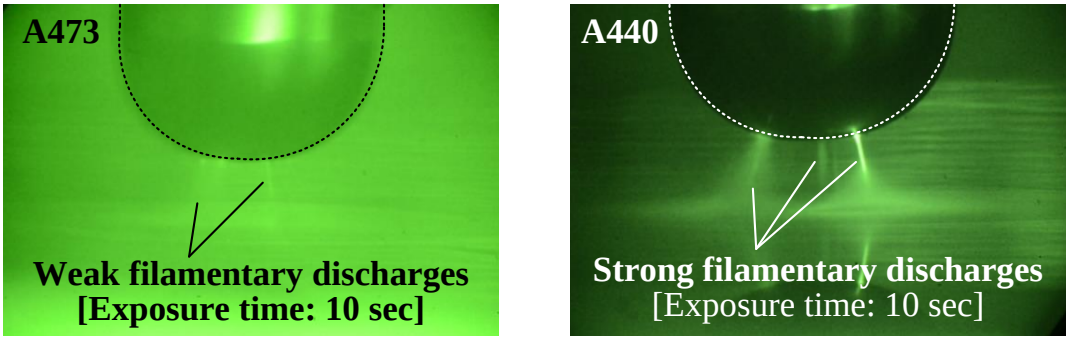
電発生時の電流パルスの本数は，FD しか発生できないバリアに比べて少ないこと，および 1 発のパルス電流値が大きいことを確認した。



(b)　A473 barrier　　(a)　A440 barrier

図 3.1-20　電流・電圧波形の代表例

③　図 3.1-21 に示すように，A440 バリアを用いた場合，半球棒電極とバリアの間で発生した FD の発光は強かった。しかし，A440 バリアを用いた場合，FD の発光はかなり弱かった。



(b)　A473 alumina barrier　　(a)　A440 alumina barrier

図 3.1-21　放電様相の代表例

④　図 3.1-22 に示すように，半球棒電極に-30[kV]の電圧を 30[s]印加したとき，A473 バリアの表面電位は-14[kV]となったが，A440 バリアの表面電位は-2.2[kV]であった。このことから，APTD を発生できるバリアには，バリア表面に電子を蓄積しやすい性質があることがわかった。

⑤　図 3.1-23 に示すように，　A473 バリアの表面電位は，300[s]経過しても-0.83[kV]であったが，A440 バリアの表面電位は，160[s]で 0[V]となった。

⑥　図 3.1-24 に示すように，A473 バリアの時定数は 20[s]から 60[s]であったが，A440

バリアの時定数は約 10[s]と小さかった。APTD を発生できるバリアには，バリア表面に蓄積された電子を維持しやすい性質があることがわかった。

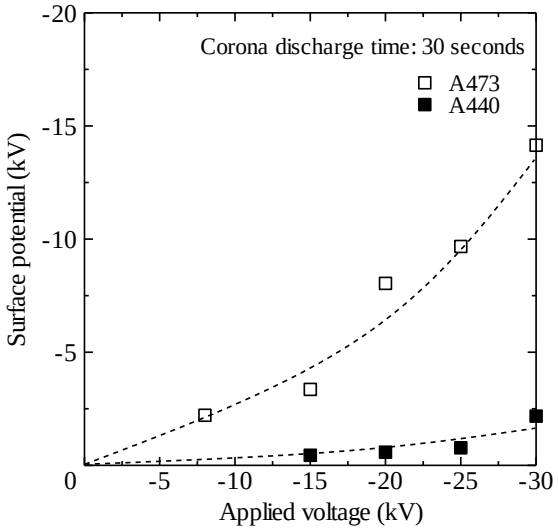


図 3.1-22　印加電圧と表面電位の関係

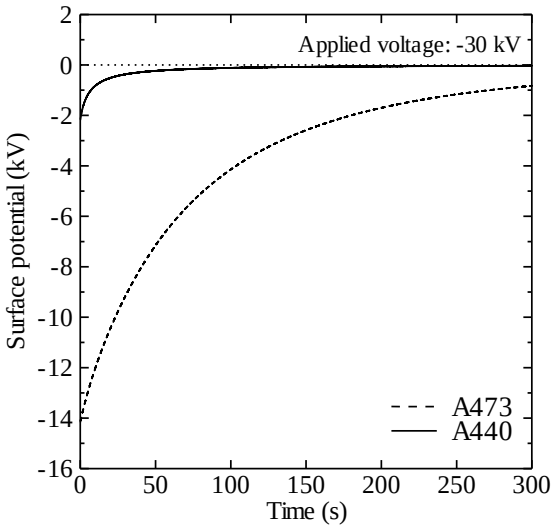


図 3.1-23　表面電位減衰特性

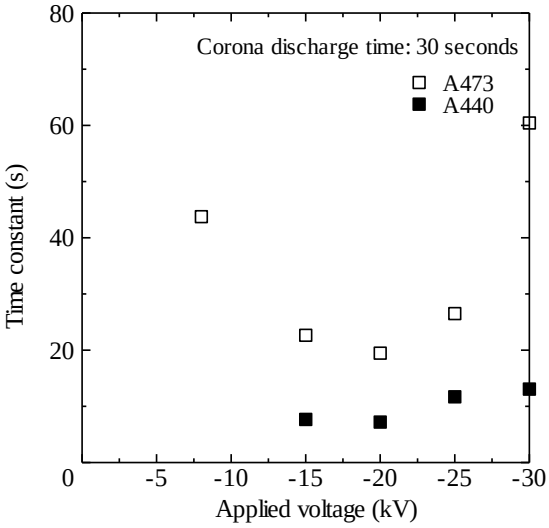


図 3.1-23　時間減衰図から求めた時定数時定数の印加電圧依存性

＜平成26年度＞

APTD の発生メカニズム解明

本年度は，昨年度に構築した表面電位計測システムに電動アクチュエータと表面電位計を組み合わせ，帯電分布計測システムを構築した。負極性のコロナ放電で負に帯電させたバリア表面の電子蓄積分布を測定した。得られた成果を以下に要約する。

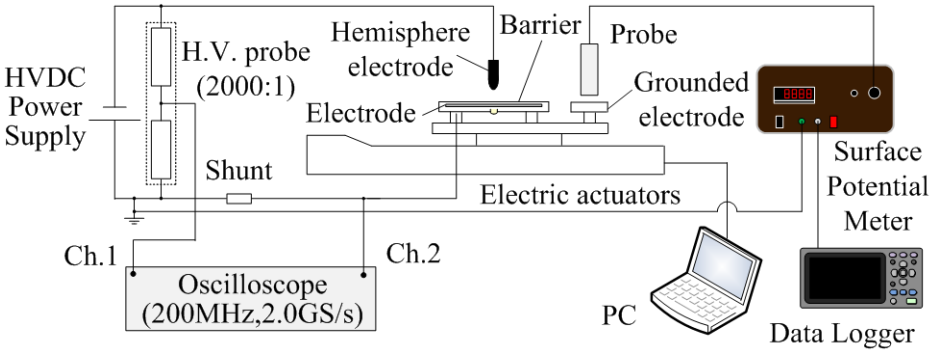
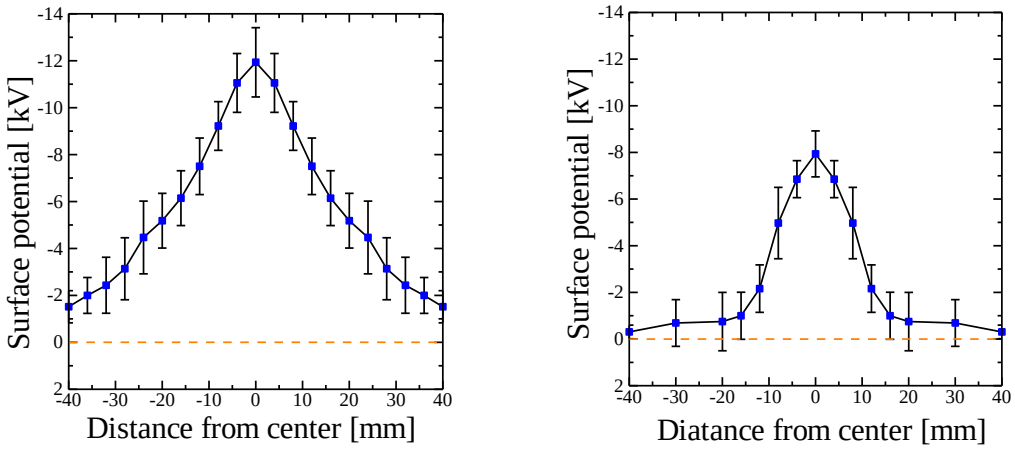


図 3.1-24　表面電位スキャンシステム

① 図 3.1-24 に示す帯電分布計測システムを構築した。システムには，電動アクチュエータ（SMC 社製，型番：LEFS16A-200-S36N）とメモリハイロガー（HIOKI 社製，型番：LR8431）が追加されている。

② 図 3.1-25 に示すように，負極性のコロナ放電で発生させた電子を付着させた A473 バリアの表面電位は，コロナ放電の照射位置である誘電体中心部で最高となり，中心部から離れると低くなった。また，中心部から 40[mm]離れた位置の表面電位は -1.5[kV]であった。また，負極性のコロナ放電で発生させた電子を付着させた A440 バリアの表面電位は，A473 バリアと同様，誘電体中心部で最高となったが，誘電体中心部から離れると急激に低下し，20[mm]位置で約-1[kV]になった。

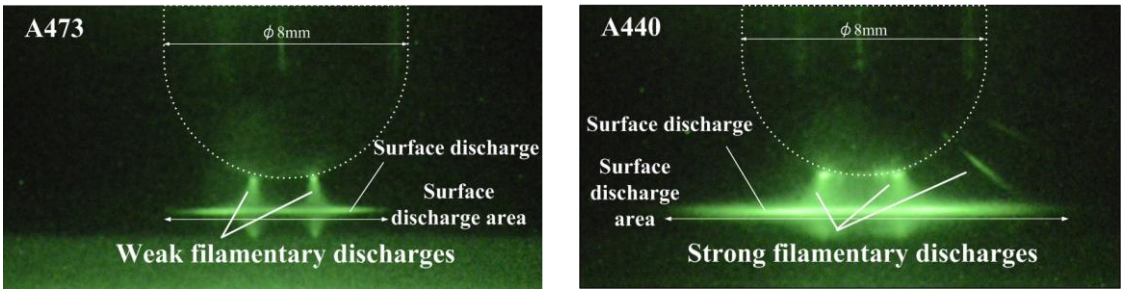


(a)　A473 barrier　　(b)　A440 barrier

図 3.1-25　表面電位分布の計測結果

③ 図 3.1-26 に示すように，放電はギャップで発生するフィラメント状の放電と誘電体表面で発生する沿面放電で構成されており，誘電体に蓄積した電子の量が多くなるほど発光が弱くなった。これは，誘電体表面に付与された多量の電子によってギャ

ップの電界が弱められたためである。



(a)　A473 barrier　　(b)　A440 barrier

図 3.1-26　放電様相の代表例

以上の研究により，空気中で APTD を発生させるには，誘電体表面に付与される電子の量が多く，径方向に広がりやすい性質を有するバリアが必要である可能性を明らかにできた。

＜平成27年度＞

APTD の発生メカニズム解明

誘電体表面における蓄積電子の移動現象について定性的に説明する為に，本年度は，A473 バリアと A440 バリアの表面抵抗率を測定し比較した。また，APTD の発生にはバリア表面に蓄積された電子の一様性が重要と思われるが，昨年度までの実験システムではそれを測定できなかった。新たに開発した同期開閉装置を交流高電圧電源に組み込み，APTD 発生直後のバリア表面に蓄積された電子の一様性を明らかにした。得られた成果を以下に要約する。

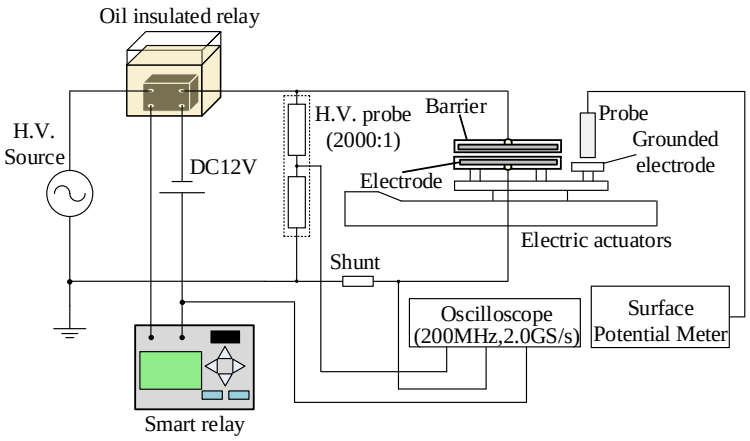


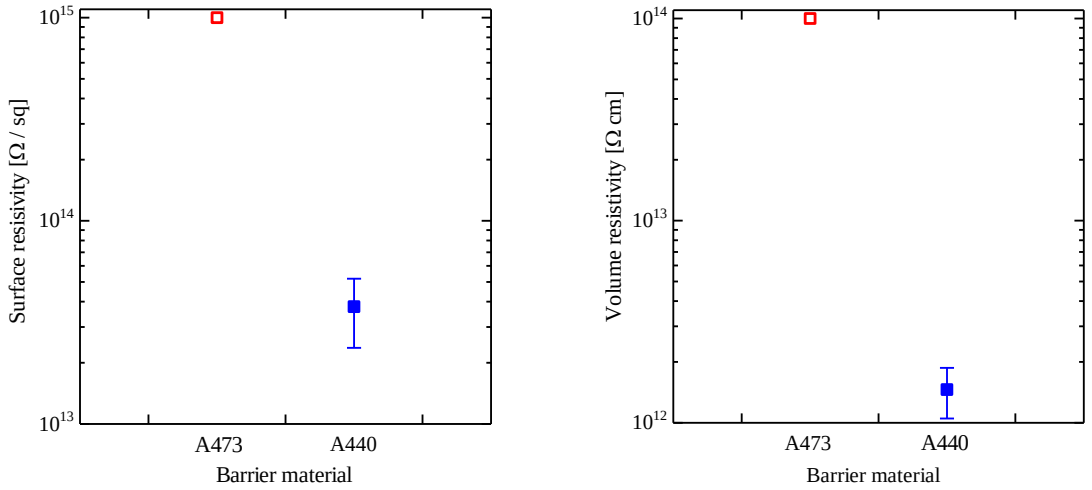
図 3.1-27　同期開閉装置を組み込んだ実験システム

①　図 3.1-27 に示すような表面電位計測システムを構築した。システムは，交流高電圧

を発生するネオントランス（61-15296，ダイヘン），電圧位相の検出と遮断指令を発生するスマートリレー，高電圧を遮断する電磁リレー，電動アクチュエータならびに各種測定器で構成されている。

② 図 3.1-28 に示すように， APTD を発生できないバリアの表面抵抗率は 3.14×10^{13} [Ω/sq]であり，APTD を発生できるバリアの表面抵抗率は 10^{15}[Ω/sq]以上であることがわかった。このことから，APTD を発生できるバリアでは，表面抵抗率が高いため蓄積した電荷が半径方向に逃げずに，多量の荷電粒子が蓄積されたと考えられる。

③ 図 3.1-29 に示すように，APTD 発生直後は，バリア表面に電子が一様に蓄積される様子を明らかにできた。これは，バリア表面に蓄積された電子が陰極を一様に出発することと，それによって平等電界がギャップに形成されることを意味する。



(a) 表面抵抗率　　(b) 体積抵抗率

図 3.1-28　表面抵抗率と体積抵抗率の測定結果

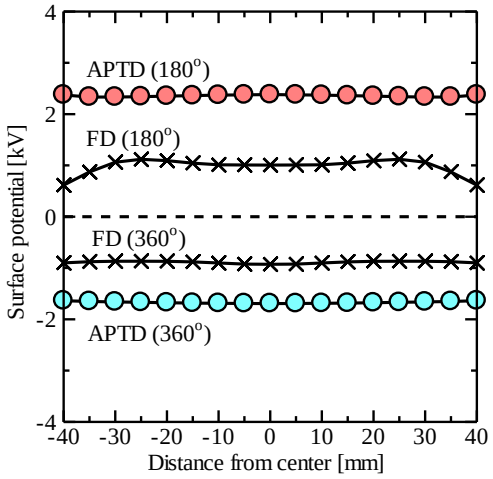


図 3.1-29　同期開閉装置を用いたときの表面電位分布の測定結果

（B1） 大気圧均一 DBD（APTD）を用いた空気・酸素原料オゾン発生器のオゾン生成特性

＜平成23～24年度＞

従来の DBD と均一 DBD でオゾン生成実験を行い，単位容積当たりの原料ガスに注入される電気エネルギーを変えた時のオゾン濃度やオゾン生成効率を比較した。得られた成果を以下に要約する。

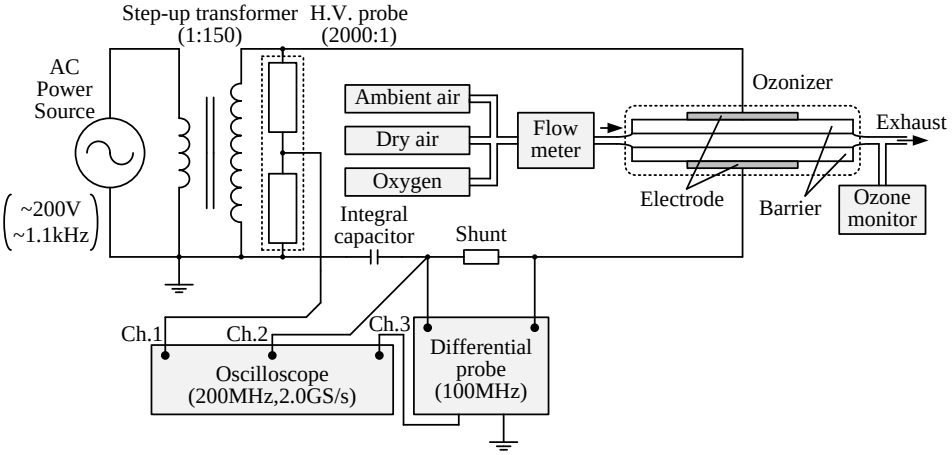
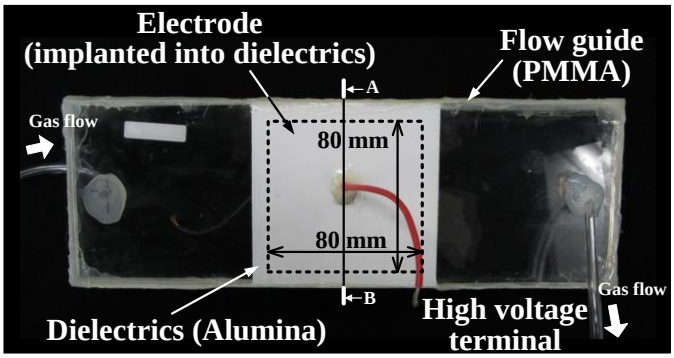


図 3.1-30　オゾン発生特性の実験・評価システム

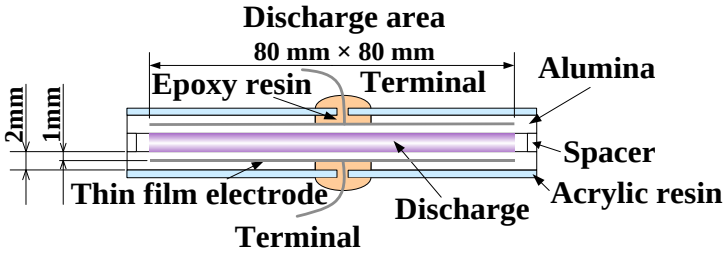
① 図 3.1-30 に示す実験システムを構築した。システムは, オゾン発生器（オゾナイザ），流量計（堀場エステック社製，SEF-51），流量調整器（キーエンス社製，FD-C1）紫外線吸収式のオゾンモニタ（荏原実業社製，EG-3000B/01），インバータ式の交流電源（NF 回路設計ブロック社製，4210，容量 1[kVA]），高周波変圧器（山菱電機社製, YHT-15K-0.5K, 変圧比 1:150）, 高電圧プローブ（日新パルス電子社製, EP-50K, 分圧比 2000:1），電流測定用抵抗，電荷測定用コンデンサで構成される。

② 図 3.1-31 に示すようなオゾナイザを製作した。電極のサイズは 80[mm]×80[mm]であり，電極の厚みは 0.01[mm]である。また，誘電体のサイズは 100[mm] × 100[mm]であり, その厚みは 1.0[mm]である。バリア放電装置は, 図 3.1-31(a)に示すように，アクリル樹脂製のフローガイドの中に設けられている。図 3.1-31(b)は，A-B 断面図である。タングステン製の薄膜電極（面積 6400[mm^2]）は空気よりも絶縁耐力の高いアルミナで覆われているので, 電極端部での異常放電を防止できる仕組みになっている。なお，誘電体と電極は，自然冷却のみで特別な冷却機構は設けていない。

③ 図 3.1-32 に示すように，従来の DBD を用いた空気原料オゾン発生器では，注入エネルギーを大きくするとオゾン生成効率は急激に低下したが，APTD を用いたオゾン発生器では, 注入エネルギーを大きくしてもオゾン生成効率はほとんど低下しなかった。一方，従来の DBD を用いた酸素原料オゾン発生器では，オゾン生成効率

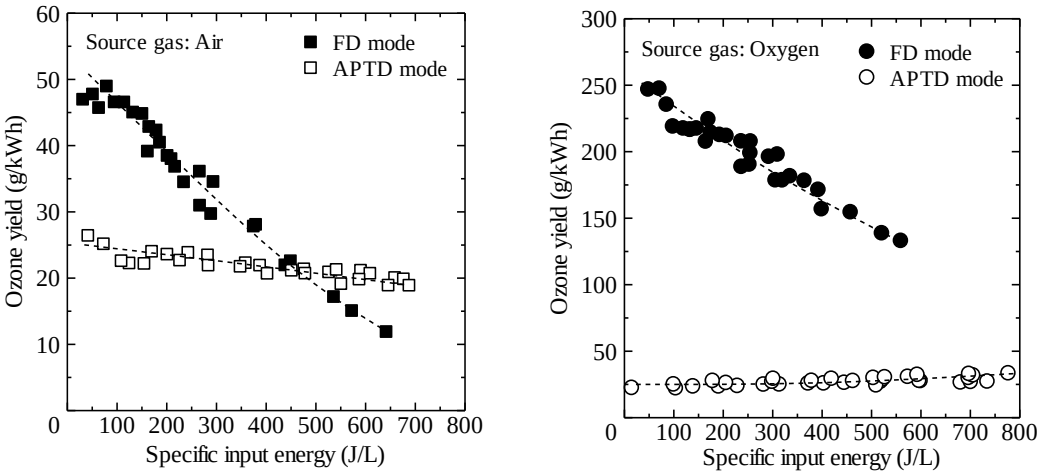


(a)　Photograph of APTD ozonizer



(b)　Cross sectional view along A-B

図 3.1-31　オゾナイザの外観と断面図



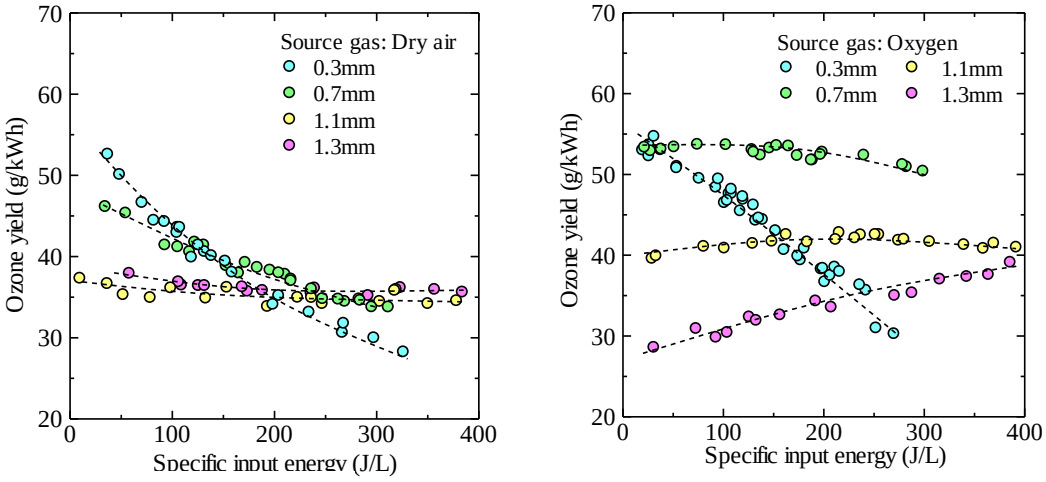
(a)　空気原料　　(b)　酸素原料

図 3.1-32　放電モードの影響

は約 250[g/kWh]であったのに対し，APTD を用いた酸素原料オゾン発生器では，オゾン生成効率は約 25[g/kWh]であった。

④　図 3.1-33 に示すように，空気原料オゾン発生器のギャップ長を 2[mm]から 0.3[mm]まで短くし，APTD の換算電界を 125[Td]から 200 [Td]に高くすると，注入エネルギ

ーの少ない領域では，原料ガスの種類に関係なくオゾン生成効率は 55[g/kWh]に向上できたが，注入エネルギーを多くするとオゾン生成効率は急激に低下した。また，酸素原料オゾン発生器では，注入エネルギーの少ない領域において，短ギャップ化によって換算電界が高くなり，電子衝突による酸素分子の励起反応と解離反応が活発に起きたためオゾン生成効率が高くなった。一方，注入エネルギーの多い領域では，励起酸素原子によるオゾン分解反応や放電空間の温度上昇によるオゾン熱分解反応が活発になりオゾン生成効率が低くなった。



(a)　空気原料　　(b)　酸素原料

図 3.1-33　ギャップ長の影響

＜平成25年度＞

昨年度までに，FD モードや APTD モードのバリア放電をオゾン生成に用いたときのオゾン生成特性を明らかにしてきた。放電電力と流量の比で求められる注入エネルギーが 420[J/L]よりも少ない条件では，APTD を用いるよりも FD を用いる方がオゾン生成効率は高かった。しかし，注入エネルギーがそれを越えると，FD を用いるよりも APTD を用いる方がオゾン生成効率は高くなった。一般に，ギャップ長やガス圧力を最適化することでオゾン生成効率を向上できることが報告されている。本年度は，放電場のガス圧力を 0.2[MPa]（絶対圧力）まで高くできる APTD 方式の空気原料オゾン発生装置（ギャップ長：2[mm]）を用いてガス圧力がオゾン生成特性に及ぼす影響を調べた。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-34 に示すオゾン生成・評価実験システムを構築した。図 3.1-35 は，使用するバリア放電装置である。

② 図 3.1-36 にに示すように，すべてのガス圧力条件において，注入エネルギーを多くするとオゾン濃度は高くなった。同一注入エネルギー条件（例えば，300[J/L]）でデータを整理すると，ガス圧力を 0.1[MPa]から 0.2[MPa]に高くするとオゾン濃度は

1086[ppm]から 940[ppm]に低下した。これは，図 3.1-37 に示すように，ガス圧力の低下による換算電界強度 *E*/*n* の上昇により，オゾンの原料となる酸素分子の電子衝突解離反応が活発に起きるようになったためである。

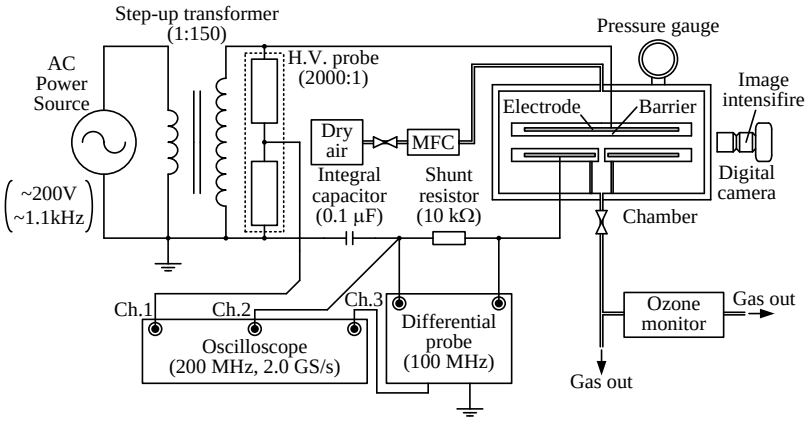
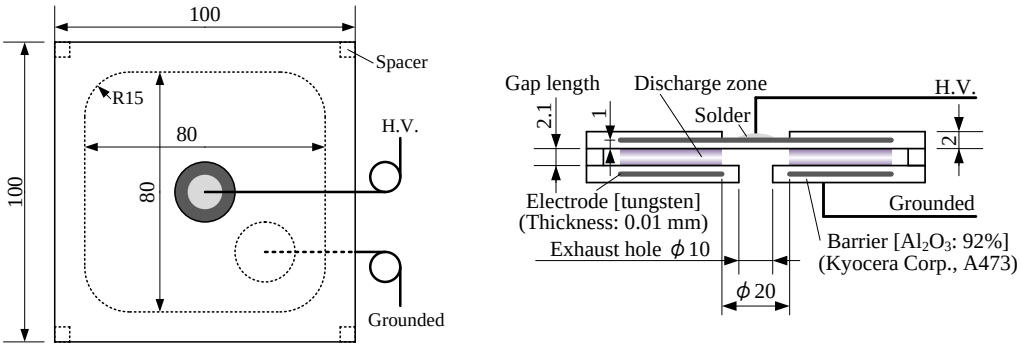
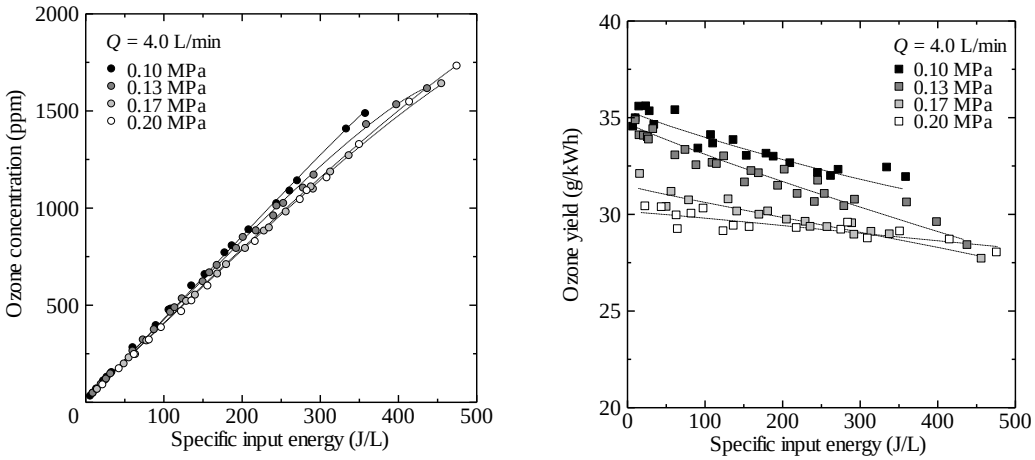


図 3.1-34　高圧オゾン発生器



(b)　Top view　　(a)　Side view

図 3.1-35　オゾン発生用バリア放電装置



(a)　オゾン濃度　　(b)　オゾン生成効率

図 3.1-36　オゾン濃度と生成効率

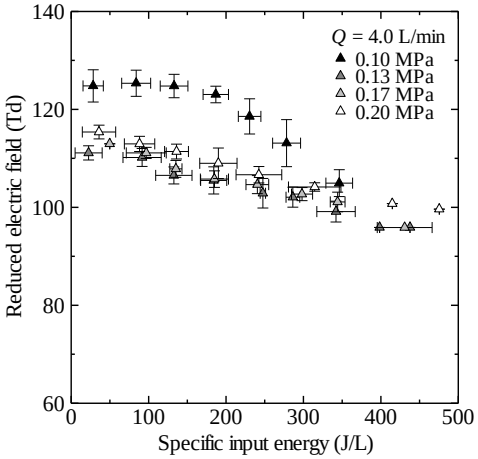


図 3.1-37　換算電界の計算結果

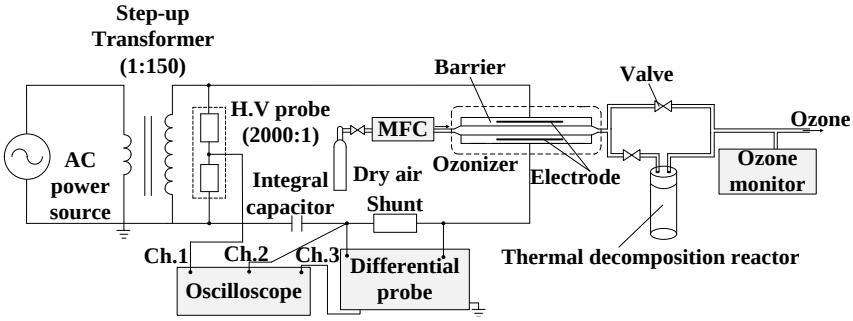
オゾン生成効率に着目すると, 換算電界強度の低い APTD は空気原料オゾン発生器に置いて，副生成物の一つである NOx の発生を抑制できる可能性が高いことから，次年度以降は NOx レスオゾン発生器の研究に注力することにした。

（B2） 均一 DBD（APTD）を用いた NOx レスオゾン発生器の原理検証 ＜平成23～24年度＞

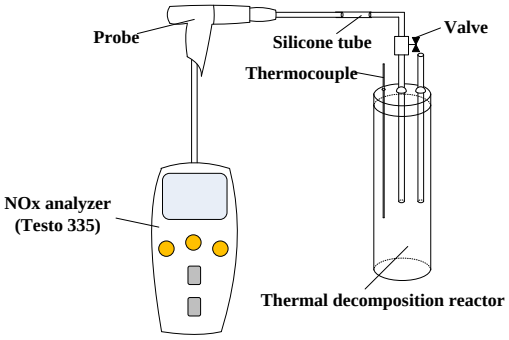
空気を原料にしてオゾンを作ると, 酸素分子だけではなく空気中の窒素分子も電子衝突により解離し窒素ラジカルとなる。この窒素ラジカルが酸素ラジカルや酸素分子と結合すると，人体に有害な自然分解できない NOx となる。ここで，酸素の解離エネルギーの閾値は 6.1[eV]と 8.4[eV]であるが，窒素の解離エネルギーの閾値は 9.76[eV]と高いことが分かっている。このことから，従来の DBD で発生する FD 先端の換算電界は 500-800[Td]であるが，新しい APTD の換算電界が約 120[Td]と低いことをオゾン発生器に応用すれば，オゾンガス中の NOx 発生を抑制できると思われる。ここでは，NOx 濃度測定器や光路ガスセルを備えた FT-IR ガス分析システムを用いて，オゾンガスに含まれる副生成物を分析した。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-38 に示すような実験システムを構築した。システムでは，オゾナイザで生成され，ステンレス製の充填容器に蓄えられたオゾンガスを 250[°C]以上に加熱し，オゾンを熱分解させてから半導体センサ式の NOx 計を使用することにより，半導体センサ式の NOx 計を故障させることなく NOx 濃度を測定できる。また，熱分解装置の代わりに光路長 1[m]または 3[m]のガスセルを有するフーリエ変換型赤外分光光度計（Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR）が接続可能である。

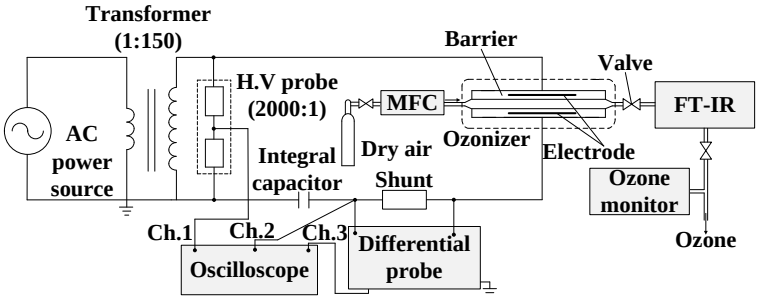
② APTD を用いた空気原料オゾン発生器では，図 3.1-39 示すように，NOx の排出量を 64[%]～76[%]低減できることが分かった。



(a)　実験システムの概略図



(b)　NOx 系を用いた濃度測定法



(c)　FTIR を備えた実験システムの概略図

図 3.1-38　オゾンガス中の NOx 濃度測定システム

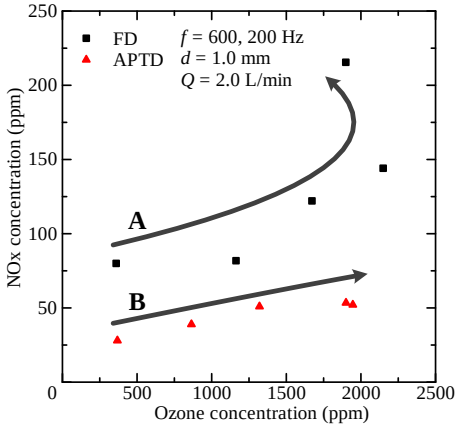


図 3.1-39　オゾン濃度と NOx 濃度の関係

③　ガスセルを有する FTIR を用いた実験において，オゾンガスに含まれる NOx は，図 3.1-40 に示すように，N_2O や N_2O_5 であることが分かり，半導体センサ式 NOx 計の測定結果と異なる結果となった。また，APTD を用いると，HNO_3，N_2O_5 ならびに N_2O の発生を抑制できることが確認できた。

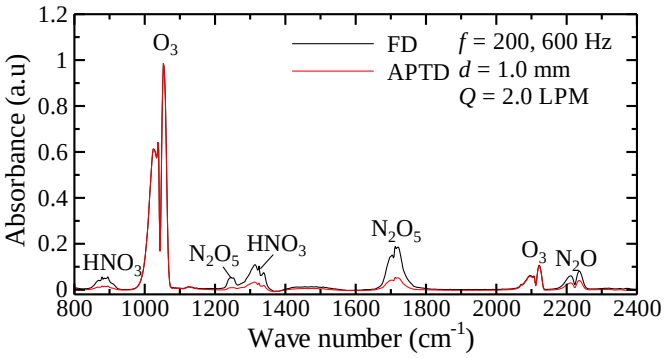


図 3.1-40　オゾン濃度と NOx 濃度の関係

＜平成25年度＞

昨年度の研究において，NOx 濃度が定電位電解式 NOx 計による測定結果と FTIR によるオゾンガス副生成物の分析結果が異なった理由を明らかにするために，オゾン発生器の下流にニクロム線と燃焼管からなる電気ヒータを設置し，ヒータへの投入電流を変えることにより，オゾンの熱分解率を任意の値に調整したときの NOx 成分を調べた。得られた成果を以下に要約する。

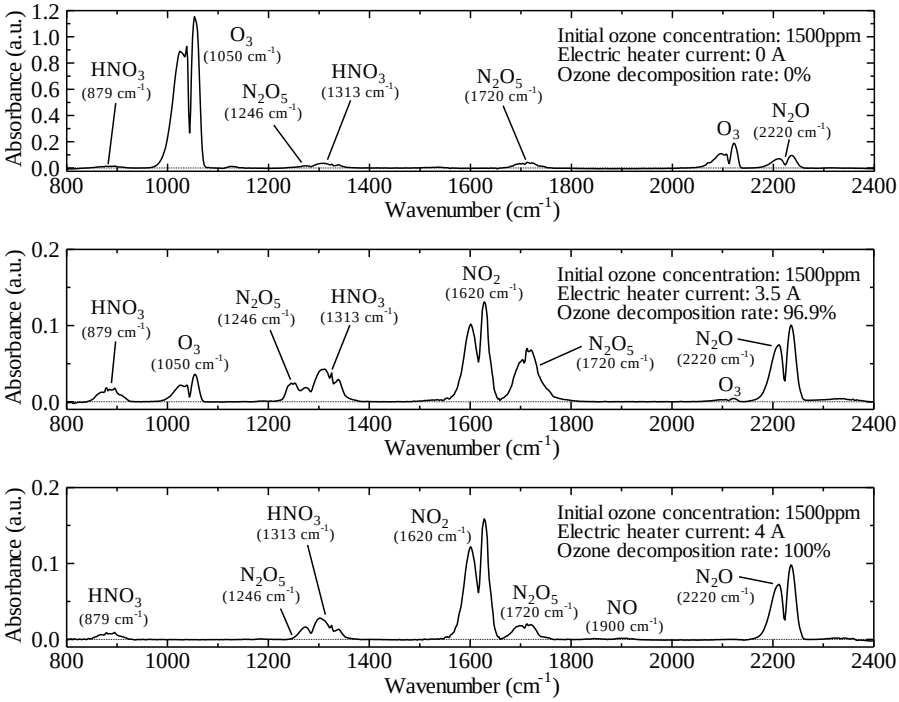


図 3.1-41　オゾン分解特性

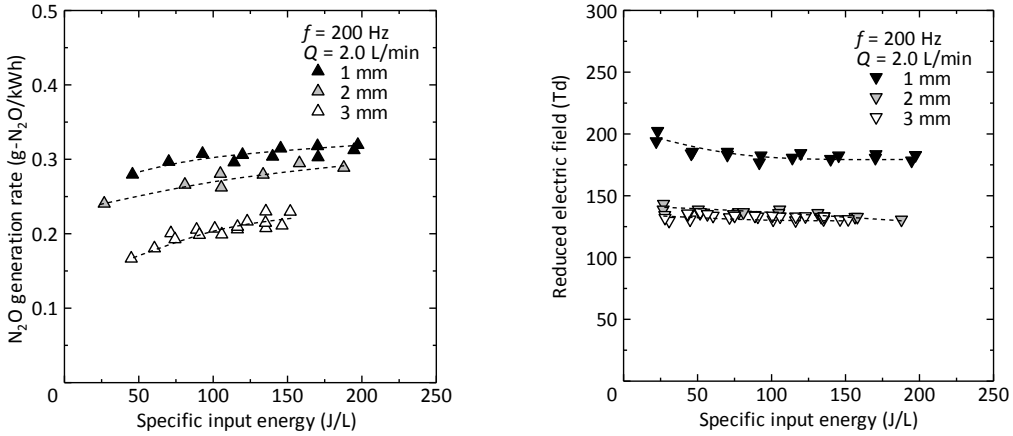
① 図 3.1-41 に示すように，電気ヒータの温度を高くしオゾンの熱分解率を 96.9[%]にすると，N_2O_5 の吸光度は低下し，NO_2 が発生することを確認した。更に電気ヒータの温度を高くしオゾンの熱分解率を 100%にすると，N_2O_5 の吸光度は更に低下し，NO_2 に加えて NO（波数：1900[cm^{-1}]）も発生することを確認した。

② オゾンガスを加熱分解して作ったゼロオゾンガス中の NO と NO_2 濃度を定電位電解式の NOx 計を使用して測定した結果と FTIR を用いてオゾンガスに含まれる副生成物を分析した結果が異なる原因は，オゾンを加熱分解する過程において，N_2O_5 が NO や NO_2 に分解された為であることが確認できた。

＜平成26年度＞

本年度は，各種標準ガスを用いて副生成物の検量線を作り，N_2O の定量分析および副生成物の更なる発生抑制法を研究した。また，実用化を目指し，原料空気の湿度の影響を調べた。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-42 に示すように，ギャップ長を 1[mm]から 3[mm]にすると N_2O 発生率が 0.3[g/kWh]から 0.2[g/kWh]に低下した。これは，ギャップを長くすることで換算電界が 180[Td]から 120[Td]に低下し，電子衝突による窒素分子の解離や励起を抑制できたためである。

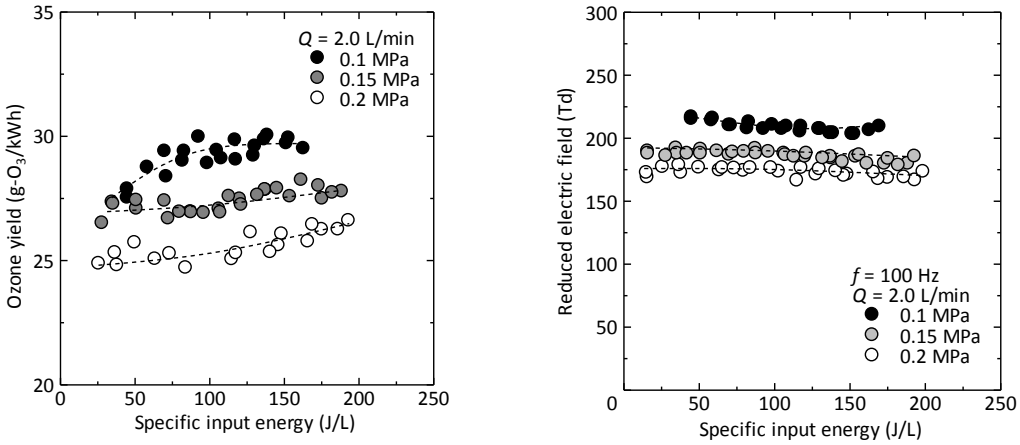


(a) N_2O の発生率　　(b) 換算電界

図 3.1-42　オゾン分解特性

② 図 3.1-43 に示すように，ガス圧力を 0.1[MPa]から 0.2[MPa]に高くすると，オゾン生成効率は低下したが，同一オゾン生成量に対する N_2O の発生量は低下した。これは，換算電界が低下した為である。

③ 図 3.1-44 に示すように，オゾン生成効率の低下分と N_2O 発生率の低下分をまとめたものである。高圧力による N_2O 低減効果は，注入エネルギーが大きくなる（オゾン濃度が高くなる）ほど大きくなった。



(a)　N_2O の発生率　　(b)　換算電界

図 3.1-43　N_2O の発生率と換算電界の計算結果（ガス圧力の影響）

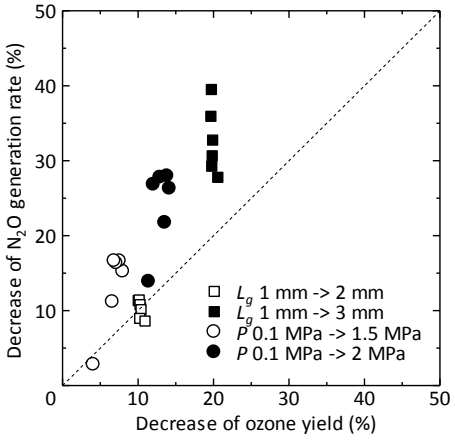


図 3.1-44　オゾン生成効率の低下と N_2O 生成率の低下（まとめ）

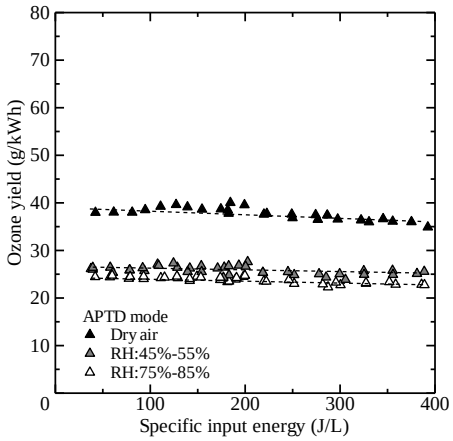


図 3.1-45　湿度の影響

④　図 3.1-45 に示すように, 原料空気の湿度を変えたときのオゾン生効率を示している。原料空気の湿度を高くするとオゾン生成効率が低下したが，APTD の特徴である注入エネルギーを多くしてもオゾン生成効率が低下しない性質は変わらなかった。

＜平成27年度＞

空気の主成分は酸素（21[vol%]）と窒素（78[vol%]）である。バリア放電空間に空気を流すとオゾンが発生するが, 窒素分子への電子衝突によって窒素ラジカルや窒素の励起種も発生する。窒素ラジカルや窒素の励起種が空気中の未反応の酸素分子と結合すると，人体に有害で自然分解できない NOx が発生する。これまでに，オゾン生成に APTD を使用すると，窒素酸化物の発生を抑制できることが分かった。また，広い放電ギャップや高い放電場ガス圧力を採用して換算電界（一つの平均自由行程中に電子が電界から

得るエネルギー）を小さくすると，N_2O の発生を更に低減できることが分かった。昨年度は，空気中の湿度がオゾン生成効率に及ぼす影響を明らかにしたが，N_2O の発生に及ぼす影響は明らかでない。また，APTD を使用したオゾン発生器の原料ガス最適化ができていない。本年度は，窒素ガスと酸素ガスの分圧をパラメータにしたときのオゾン生成特性と副生成物発生特性を調べ，APTD を使用したオゾン発生器に最適な原料ガスを明らかにした。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-46 に示すように，同一注入エネルギーにおいて，湿度を高くすると N_2O 発生率が上昇した。N_2O は，窒素の励起種（$N_2(A^3\Sigma_u^+)$）と空気中の酸素分子が反応して発生することから，水分の混入によって放電空間中の電子の運動エネルギーが低くなり，衝突解離されるはずであった窒素分子が励起状態にとどまったことが原因として考えられる。

② 図 3.1-47 に示すように，通常のバリア放電式オゾン発生器では，オゾンの原料が最も多い純酸素のときにオゾン発生効率が最大となるのに対し，APTD では，窒素（80 [vol%]）と酸素（20[vol%]）の混合ガスにおいて，オゾン生成効率が最も高くなった。APTD では，衝突解離されるはずであった窒素分子が励起状態にとどまることから，オゾン生成に必要な O ラジカルが窒素の励起種からも生成されたためと考えられる。

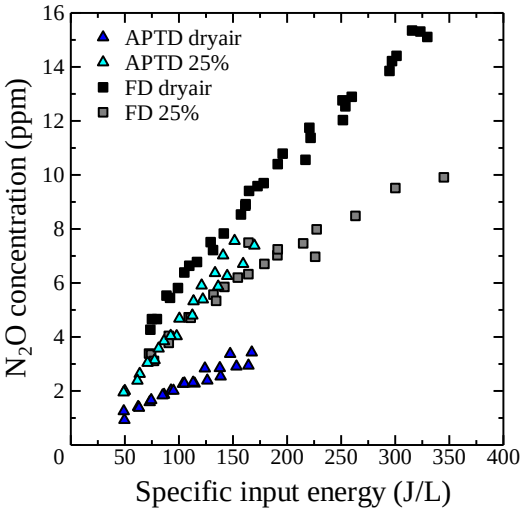


図 3.1-46　原料空気中の湿度を変えたときの N_2O 濃度

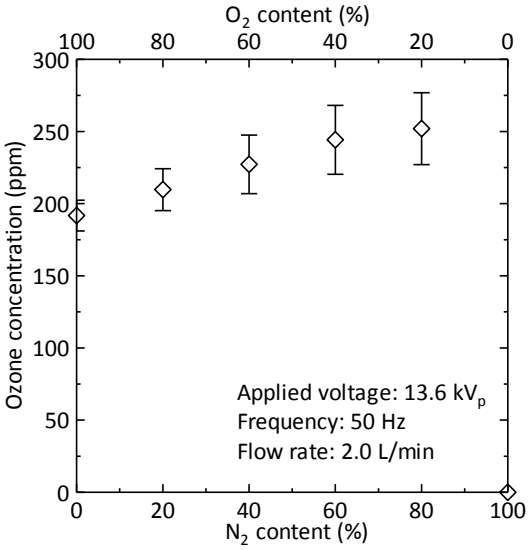


図 3.1-47　オゾン濃度（酸素濃度依存性）

以上の研究から，APTD を用いたオゾン発生器では，除湿した空気を原料ガスとして使用すると，副生成物の発生が抑制され，高いオゾン生成効率が実現できることが分かった。

（C） 複合材料用炭素繊維の表面改質

＜平成25年度＞

大気圧空気プラズマを用いて炭素繊維（Carbon Fiber: CF）そのものに親水性の官能基を付与することができれば，溶融した PP 樹脂が繊維の表面にボイド無く流れ込み，界面接着力を改善できると考えた。今年度は，バイレック試験法やマルチチャンネル分光器を利用して，大気圧空気プラズマ処理による開繊 CF の親水性向上の効果や親水性発現のメカニズムについて実験を行った。得られた成果を以下にまとめる。

① バリア放電による CF の大気圧空気プラズマ処理装置が，図 3.1-48 に示すように構築された。このシステムは，1.5[mm]のギャップを有する誘電体バリア放電装置に挿入した開繊 CF（図 3.1-49）を処理できる。

② 図 3.1-50 に示すように，導電性を有する CF をバリア間に挿入しても，DBD が安定に発生することを確認した。

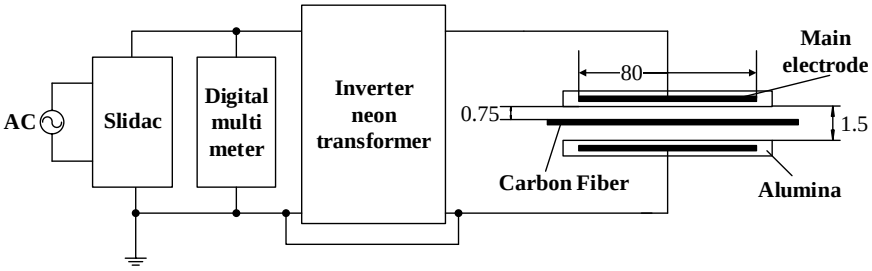


図 3.1-48　炭素繊維の大気圧プラズマ処理装置

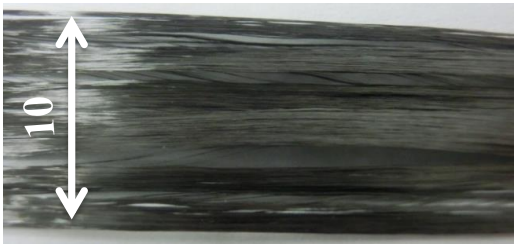


図 3.1-49　開繊 CF（東レ社製，T-700CF12K）

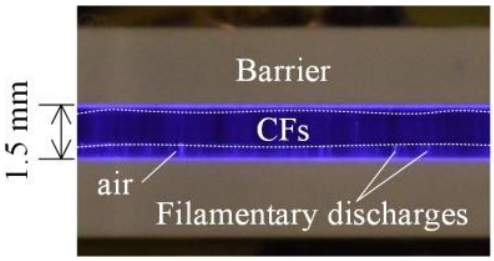


図 3.1-50　大気圧空気プラズマによる CF 処理

③ 図 3.1-51 に示すように，プラズマ処理していない CF の吸水量は 45.3[mg]（標準偏差：7.22[mg]）であったのに対し，1800[s]処理した CF の吸水量は 65.4[mg]（標準偏差：11.2[mg]）に増えた。このことから，大気圧空気プラズマ処理による CF の親水性向上を確認できた。

④ 図 3.1-52 に示すように，バリア放電からは，OH ラジカル（波長：315[nm]付近）や O ラジカル（波長：747[nm]，777[nm]，844[nm]付近）の発光を確認できた。

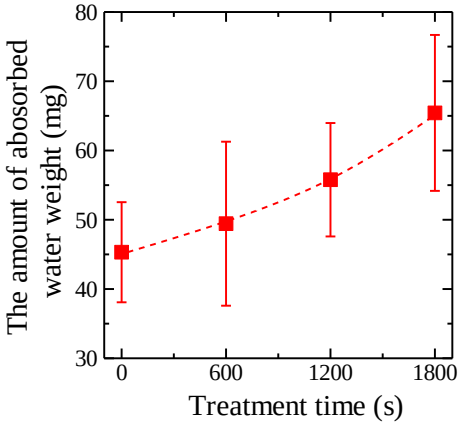


図 3.1-51　プラズマ処理時間と吸水量の関係

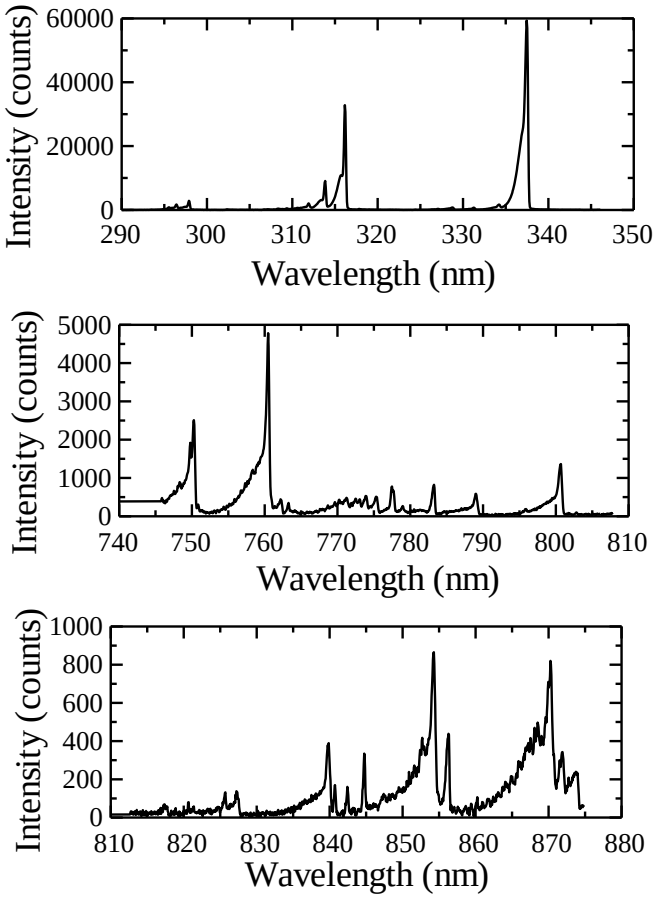


図 3.1-52　マルチチャンネル分光器（PMA-50）による発光分析

以上の研究から，大気圧空気プラズマ処理により CF の親水性が向上したのは，プラズマ中の O ラジカルや OH ラジカルにより，親水性の極性基であるヒドロキシル基（-OH）やカルボキシル基（-COOH）が CF 表面に導入された為と思われる。

＜平成26年度＞

昨年度は，室内空気プラズマ処理によって，CF の接着力に影響を与える吸水量が増加することを確認した。しかし，吸水量増加のメカニズムを明らかにしていない。そこで，本年度は，X 線光電子分光法（X-ray Photoelectron Spectroscopy: XPS）を用いて CF 表面に導入された極性基を調べた。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-53 と図 3.1-54 に示すように, 未処理の CF 表面には, C-C or C-H（C1 ピーク），C-O（C2 ピーク），C=O（C3 ピーク，カルボニル基），O-C=O（C4 ピーク，カルボキシル基）が存在することを確認した。これは，CF にサイジング剤（O や H を含む高分子化合物）が塗布されていた為である。

② 室内空気プラズマ処理により，C1 ピークと C2 ピークが減少することを確認した。これは, サイジング剤への電子衝突や発生した O ラジカルや OH ラジカルの強い酸化力によって，サイジング剤を構成する分子の結合が切断された為である。

③ 室内空気プラズマ処理により，C3 ピークと C4 ピークが増加することを確認した。これは，放電で発生した O ラジカルや OH ラジカルの強い酸化力により，CF またはサイジング剤表面にカルボニル基やカルボキシル基が付与された為である。

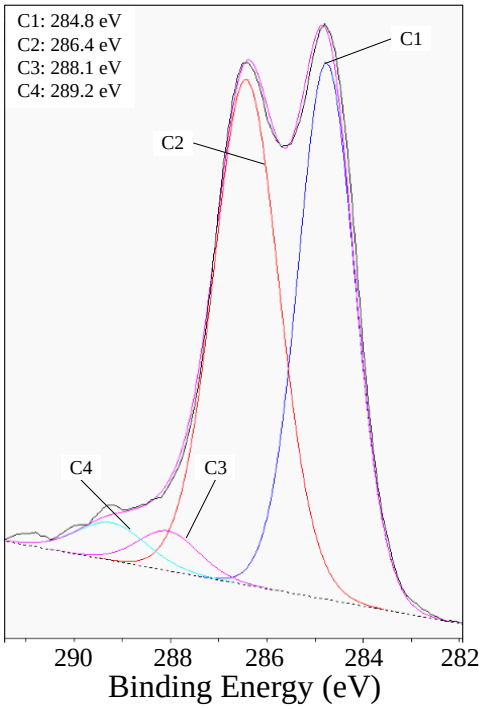


図 3.1-53　未処理の CF

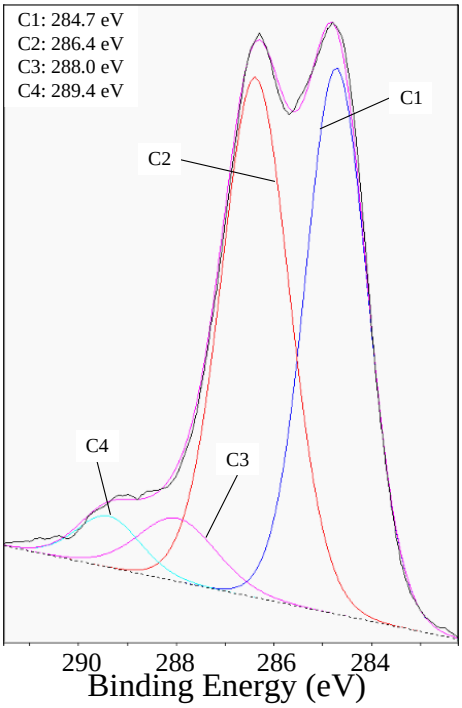


図 3.1-54　60 s 処理後の CF

以上の研究から，親水性の向上は，カルボニル基やカルボキシル基が付与された為であることが明らかにされた。

＜平成27年度＞

昨年度は，DBD で発生した O ラジカルや OH ラジカルの強い酸化力により，CF またはサイジング剤の表面にカルボニル基やカルボキシル基を付与できること，および親水性が向上することを明らかにした。一方，過度の DBD 処理は，CF の強度を低下させる可能性がある。また，親水性の向上によって，CF/PP の界面接着力が改善することを明らかにする必要がある。本年度は，DBD 処理による CF の劣化，および最適化された条件でプラズマ処理した CF と未処理の PP フィルムで成型した CFRTP の界面接着力を調べた。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-55 は，新たに開発した CF の連続プラズマ処理装置のプロトタイプ概略図を示す。長尺の繊維でもプラズマ処理が可能となった。

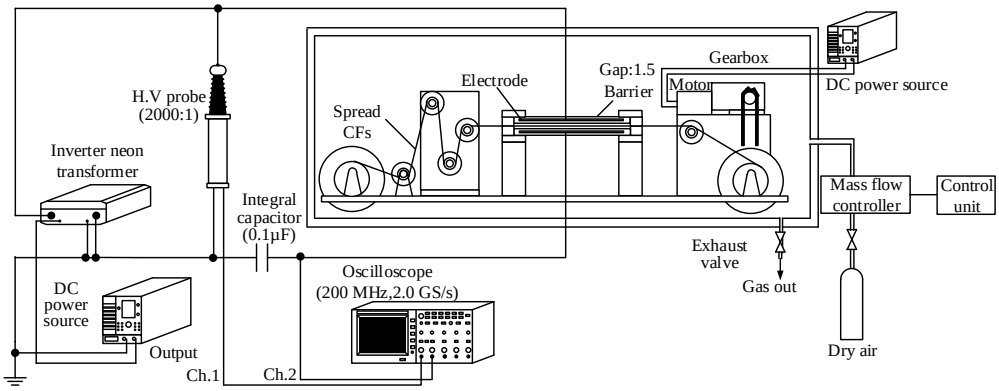


図 3.1-55　CF の連続プラズマ処理装置（プロトタイプ）

② 図 3.1-56 に単 CF の引張強度の処理時間・電力依存性を示す。プラズマ空間に存在する高エネルギー電子の衝突や，高い酸化還元電位を持つオゾン，O ラジカル，OH ラジカルによる酸化によって CF の引張強度が低下することを確認した。

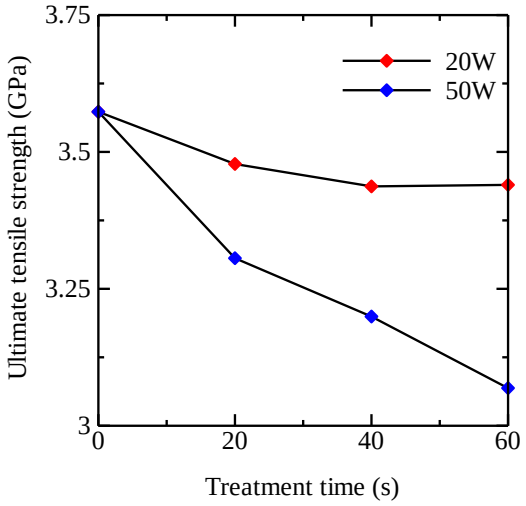


図 3.1-56　単 CF の引張強度と処理時間・電力依存性

③　図 3.1-57 に示す界面直角方向引張試験により，大気圧空気プラズマ処理が界面接着力に及ぼす影響を調べた結果，図 3.1-58 に示すように，小さい電力で短時間のプラズマ処理された CF の CF/PP の界面接着力は向上した。また，大きい電力で長時間プラズマ処理された CF では，図示しないが，CF/PP 界面の剥離と，CF の割ける現象が同時に起きることを確認した。

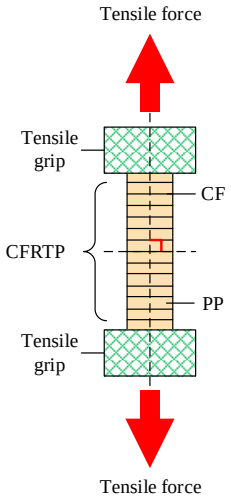


図 3.1-57　界面直角方向引張試験

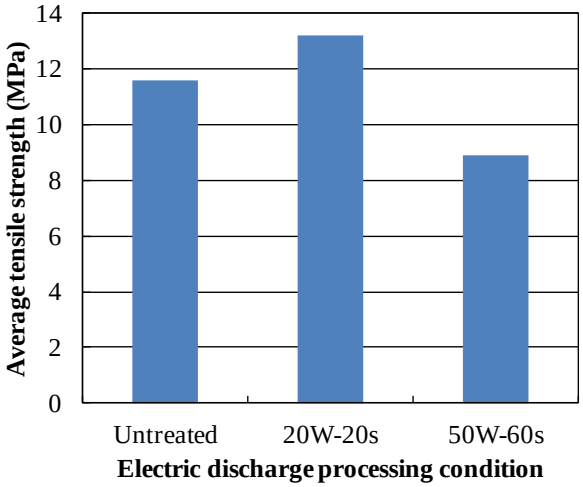


図 3.1-58　界面接着力へのプラズマ処理の効果

以上の研究から，CF/PP の界面接着力を強度させるには，弱い放電で短時間の表面処理を施すことが重要であることが分かった。

（D）　低温プラズマと脱硝触媒を併用した低温度ディーゼルエンジン排ガス中の NOx 除去

＜平成23～24年度＞

触媒充填低温プラズマリアクタにおける低温プラズマの種類には，沿面放電を利用する方式や DBD を利用する方式が提案されている。前者は，高電圧電極がリアクタのガス流路を占有しないため，触媒の充填量を多くできるが，触媒全体にプラズマを発生できないため触媒の活性化が不十分になる可能性がある。一方，後者は，高電圧電極がリアクタのガス流路を占有するため，触媒の充填量を少なくしなければならないが，触媒全体にプラズマを発生できるため，全ての触媒を活性化できる可能性がある。しかし，どちらの触媒充填プラズマリアクタが NOx 除去に適しているかは明らかにされていない。ここでは，沿面放電や DBD を利用した 2 種類の触媒充填プラズマ装置を作成し，NOx 測定器を使用して，2.4[kVA]ディーゼルエンジン発電機の排ガスに含まれる NOx 除去性能を調べた。得られた成果を以下に要約する。

①　図3.1-59に示すシステムを構築した。ディーゼルエンジンの容量は2.4[kVA]である。

発電機に接続された電気負荷の容量を変えることにより排ガス中の NOx 濃度を任意の値に調整できる。図 3.1-60 は，リアクタの断面図と放電写真を示す。

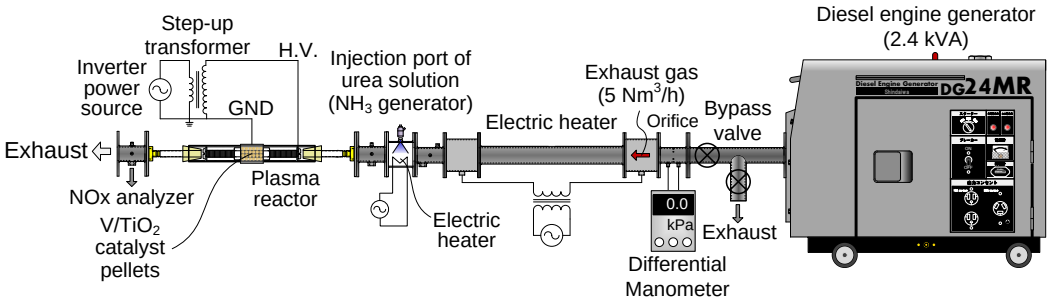
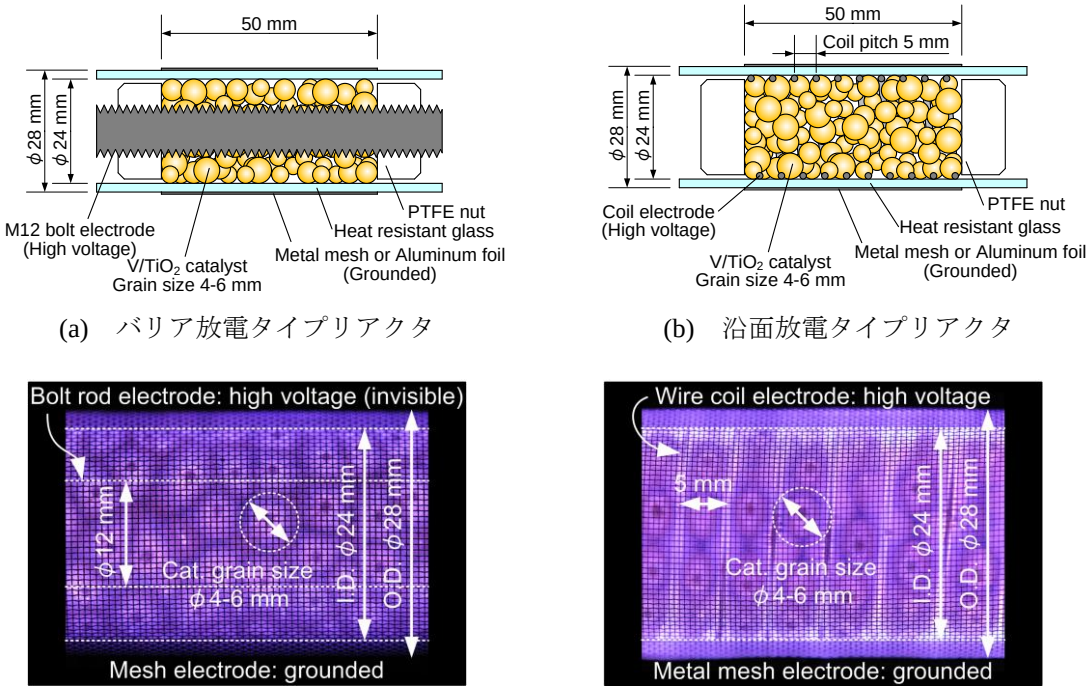


図 3.1-59　触媒充填低温プラズマリアクタを装着したディーゼルエンジン発電機



(a)　バリア放電タイプリアクタ

(b)　沿面放電タイプリアクタ

(c)　バリア放電タイプリアクタの放電

(d)　沿面放電タイプリアクタの放電

図 3.1-60　リアクタの断面図と放電写真

② 図 3.1-61 に示すように，沿面放電を利用したリアクタの NOx 除去率は 16[%]であり，そのときの NOx 除去効率は 2.4[g/kWh]であったが，DBD を併用したリアクタの NOx 除去率は 22[%]であり，そのときの NOx 除去効率は 11[g/kWh]であった。以上のことから，触媒の充填量が少なくても，DBD を利用する方式の方が NOx 除去に適していることが分かった。

③ 図 3.1-62 に示すように，リアクタを長くし，放電空間や充填できる触媒量を多くす

ると，NOx 除去性能が向上することが分かった。これは，排ガスのリアクタ滞留時間が長くなり，多くの NO が低温の脱硝触媒で除去され易い NO_2 に酸化されたこと，および DBD で活性化した触媒の量が多くなった為と思われる。

④ 図 3.1-63 に示すように，触媒サイズを変えても NOx 除去性能に違いは現れなかった。これは，触媒の粒子径を小さくして触媒の表面積を増やしても，電界緩和効果により放電が弱くなり，触媒があまり活性化されない為と思われる。

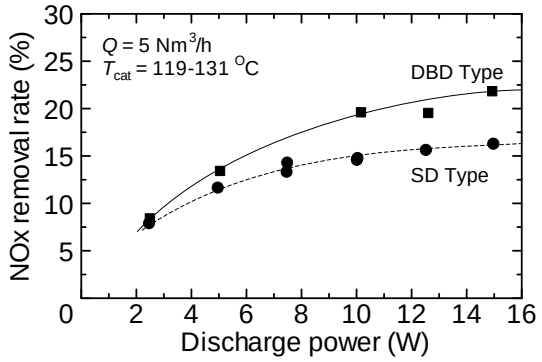


図 3.1-61　NOx 除去率と放電電力の関係

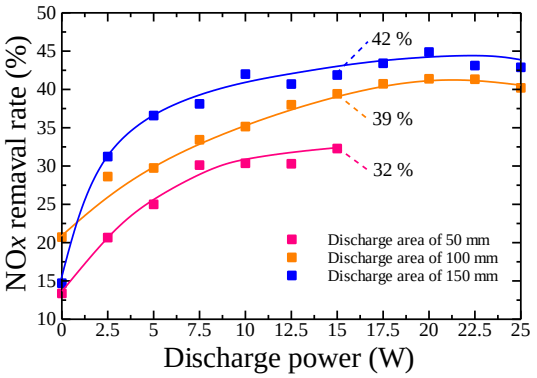
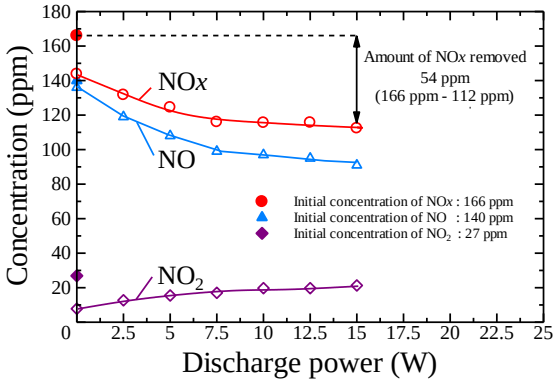
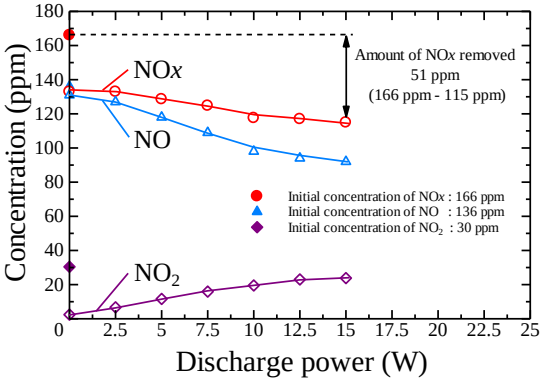


図 3.1-62　NOx 除去率
（リアクタ長の影響）



(a)　触媒直径：4～6 [mm]



(b)　触媒直径：2～4 [mm]

図 3.1-63　触媒サイズの影響

＜平成25年度＞

（Ｉ）触媒充填低温プラズマリアクタによる NOx 除去メカニズムの解明

昨年度までの研究より，高電圧電極がリアクタのガス流路を占有するため，触媒の充填量を少なく必要があった。しかし，触媒全体にプラズマを発生できる DBD を併用したリアクタが NOx 除去に適することが分かった。本年度は，そのリアクタを用いて，担持金属の有無，還元剤であるアンモニア（濃度：410[ppm]）添加の有無ならびに触媒の種類を変えることにより，NOx 除去に不可欠な因子の特定を試みた。実験では，不

純物やススによるリアクタの劣化を防止するために，模擬ディーゼルエンジン排ガス（NO 濃度：202[ppm]，NO_2 濃度：3[ppm]，O_2 濃度：15[%]，N_2 バランス）を用いた。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-64 に示すように，模擬ディーゼルエンジン排ガスを用いたプラズマ支援尿素 SCR システムを構築した。リアクタの温度は，恒温容器内の高温ガス流によって調整される。

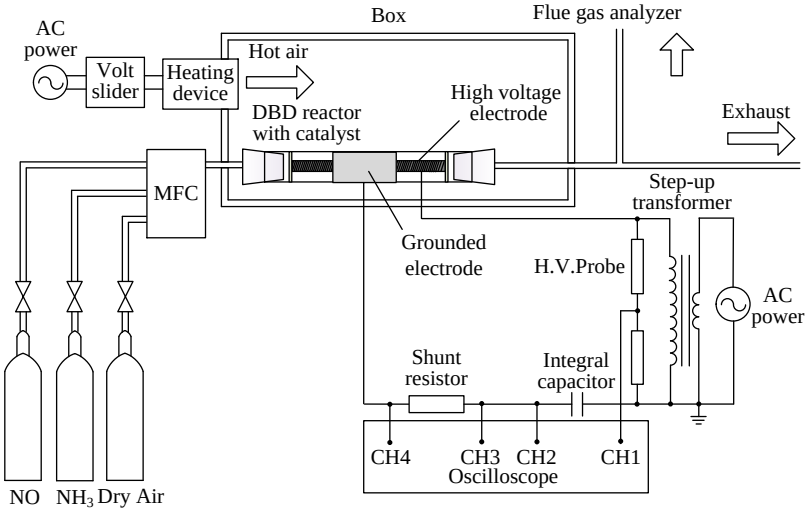


図 3.1-64　模擬ディーゼルエンジン排ガス中の NOx 除去実験システム

② 図 3.1-65 に示すように，アナタース型の TiO_2（粒子直径：4～6[mm]）のみでは，温度を高くしても NH_3 を添加した模擬排ガス中の NOx 濃度を低減できないが，バナジウム（V）を担持すると NOx 濃度は 205[ppm]から 170[ppm]に除去されることを確認した。

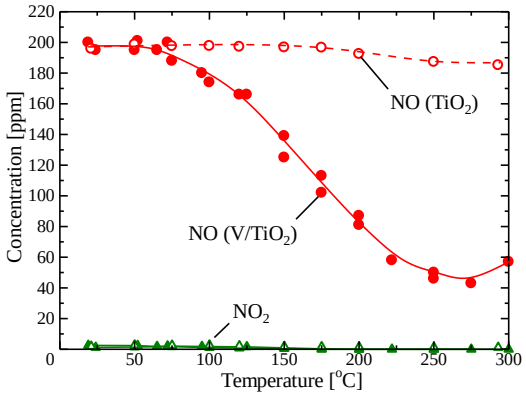
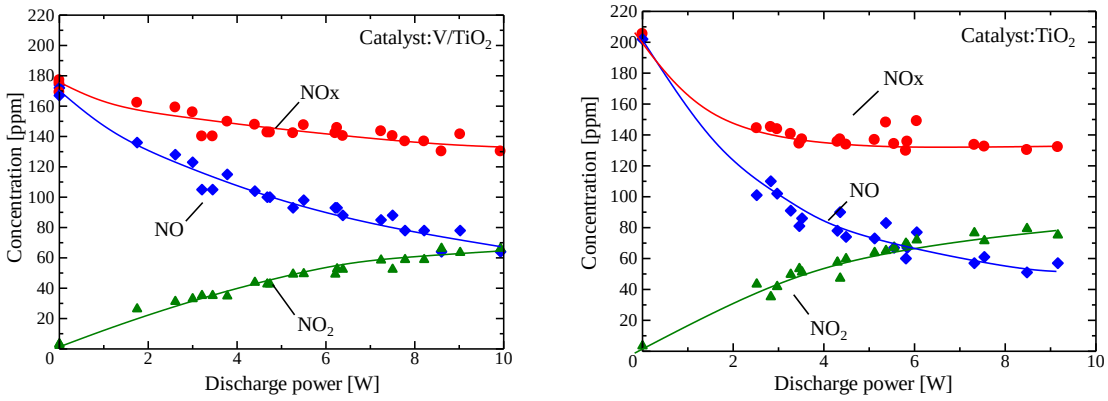


図 3.1-65　プラズマを併用しないときの NOx 除去性能

③ 図 3.1-66 に示すように。V/TiO_2 触媒を充填したリアクタでは，放電電力を大きくす

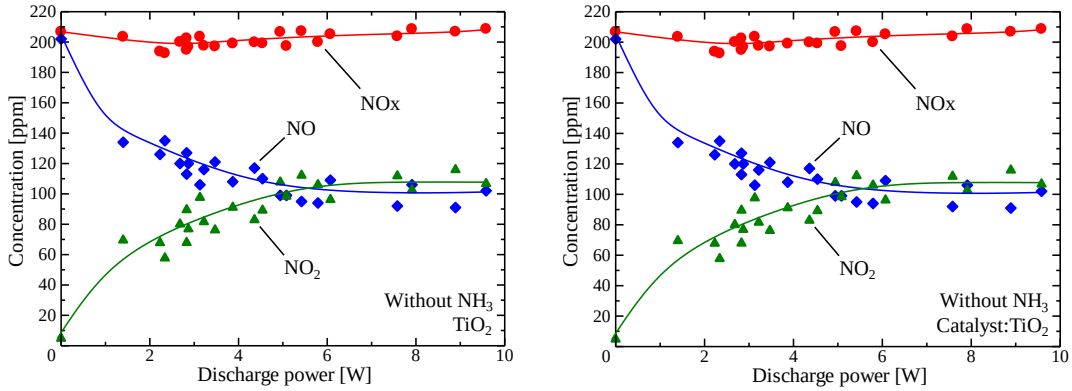
ると NOx 濃度が 205[ppm]から 14[ppm]まで低下した。一方，TiO_2 触媒でも，放電電力を大きくすると NOx 濃度が 205[ppm]から 132[ppm]に低下した。



(a)　V/TiO_2　　(b)　TiO_2

図 3.1-66　触媒種類の影響

④　図 3.1-67 に示すように，　NH_3 を添加しない模擬排ガスでは，TiO_2 触媒とバリア放電を併用しても NOx 濃度を低減できなかったことから，TiO_2 触媒でもバリア放電の併用により NOx 濃度が減少したのは，光触媒効果によるものではないことが明らかになった。また，NH_3 を添加した模擬排ガスでは，ガラスビーズ（SiO_2）とバリア放電を併用しても NOx 濃度を低減できなかったことから，プラズマ支援尿素 SCR 法による NOx 濃度減少は，排ガス中の NOx が硝酸アンモニウムにならず，プラズマと触媒によって分解されていることが明らかになった。



(a)　V/TiO_2 触媒+アンモニア添加なし　　(b)　SiO_2 触媒+アンモニア添加なし

図 3.1-67　プラズマ支援尿素 SCR 法による NOx 除去メカニズム解明のための実験

以上の研究より，プラズマ支援尿素 SCR 法に必要な因子は，NH_3 と TiO_2 であることが明らかになった。

（Ⅱ）触媒充填低温プラズマリアクタの高性能化

平成 23～24 年度の研究より，DBD を併用したリアクタが NOx 除去に適していることが分かった。

＜平成25年度＞

印加電圧波形を変えて，NOx 除去性能の違いを調べた。実験では，正弦波交流電圧（数百 Hz まで）の交流高電圧を触媒充填プラズマリアクタに印加し続けた場合，および約 80[kHz]の高周波高電圧（1 サイクルのみ）を間欠的にリアクタに印加し続けた場合の NOx 除去性能を調べた。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-68 に示すように，放電電力を大きくすると，NOx 濃度を 60[ppm]低減できた。また，繰返し印加回数を 10[kHz]にすると，NOx 濃度を 54[ppm]低減できた。これは，高周波高圧電源（PHF-2K）の繰返し印加回数が減ることにより，放電でき

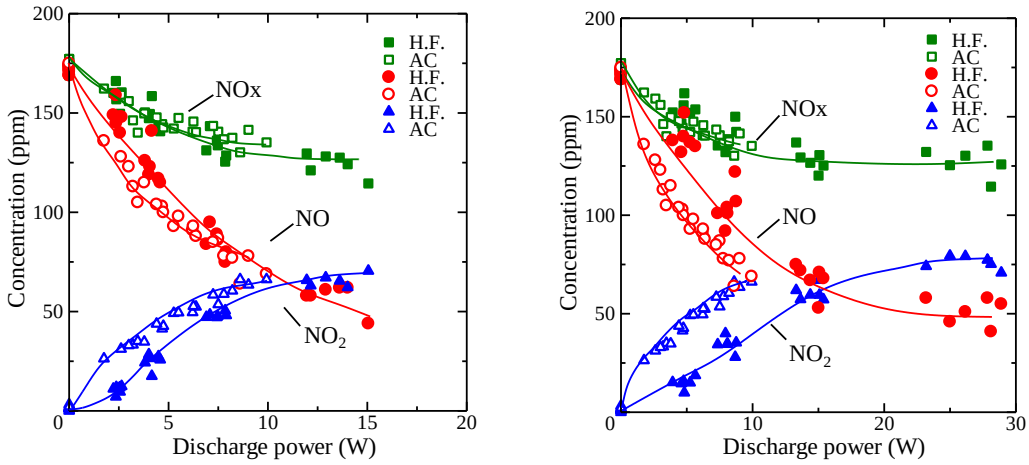


図 3.1-68　NOx 除去実験結果（繰返し周波数の影響）

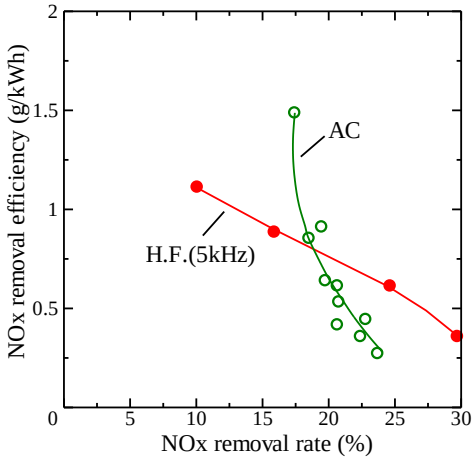


図 3.1-69　NOx 除去率と NOx 除去効率の関係

た各種ラジカルによって，触媒で除去され易い NO_2 が触媒で除去され難い NO になるのを抑制できた為と思われる。また，同一放電電力では，高周波電源を使用した方が酸化性能は低下したが，NOx 濃度に違いは現れなかったことから，NO 濃度と高周波高電圧の使用により，NO から NO_2 への酸化反応だけではなく，放電でできた N ラジカルによる NO の直接還元と思われる反応の発生が確認できた。

② 図 3.1-69 に示すように，0～30[%]の NOx 除去率における NOx 除去効率は，正弦波交流よりも高周波高電圧のほうが最高で約 0.5[g/kWh]向上することが分かった。

＜平成26年度＞

昨年度までに，プラズマ支援尿素 SCR 法に必要な因子は，NH_3 と TiO_2 であることを明らかにできた。本年度は，脱硝触媒に使用される TiO_2 の比表面積を変えたときの NOx 除去性能を調べた。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-70 に示すように，バナジウム担持割合が同じ場合，TiO_2 の比表面積が大きいほど，O ラジカルやオゾンによる NO から NO_2 への酸化と脱硝触媒による NO_2 の分解除去性能が向上した。

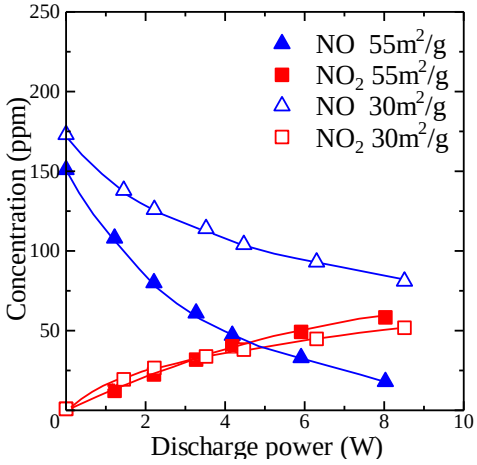
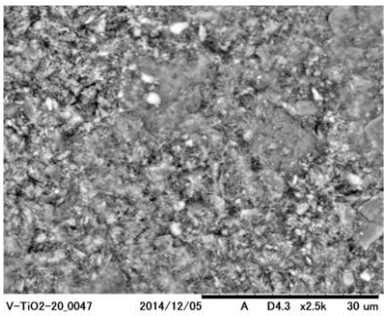
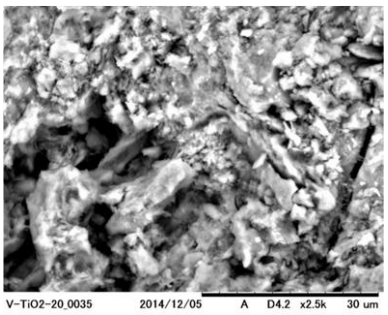


図 3.1-70　比表面積の影響



(a)　30 [m^2/g]



(b)　55 [m^2/g]

図 3.1-71　電子顕微鏡による触媒表面の観察

② 図 3.1-71 に示すように，TiO_2 の比表面積が大きいほど，バナジウム担持後の触媒表面の凹凸が大きくなることを卓上電子顕微鏡（日立ハイテク, TM3000）にて確認した。

＜平成27年度＞

昨年度は，V の担持割合が同じ場合，TiO_2 の比表面積が大きいほど，NO から NO_2 への酸化と脱硝触媒による NO_2 の分解除去性能が向上することを明らかにした。本年度は，脱硝触媒に担持される V の割合が NOx 除去性能に及ぼす影響を明らかにした。得られた成果を以下に要約する。

① 図 3.1-72 に示すように，同一放電電力では，V の担持割合が高くなるほど NOx 濃度が低くなることが分かった

② 表 3.1-2 に示すように，V の担持割合を高くするとプラズマによる触媒の低温活性化効果が低くなる傾向を示した。

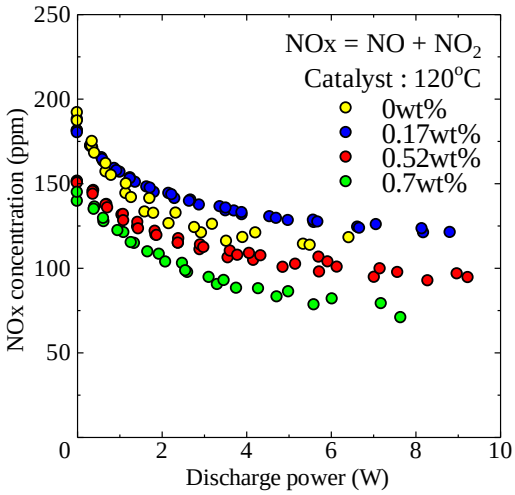


図 3.1-72　担持割合の影響

表 3.1-2　低温活性化効果

	V の担持割合（wt%）			
	0	0.17	0.52	0.7
触媒単独@120 °C (ppm)	200	200	168	153
触媒@120 °C +プラズマ @6W (ppm)	113	127	103	79
低温活性化効果（°C)	－	88	57	65

（３）植物系代替絶縁油の電気絶縁特性に関する研究

過去 100 年以上に渡って，電力変圧器を始めとする油入高電圧機器の内部絶縁には，絶縁油とプレスボードの複合絶縁系が採用されてきた。特に，化石資源ベースの鉱油は，電気絶縁・冷却媒体として優れた性能を持つことから最も広く用いられた。しかし，鉱油は比誘電率，引火点が比較的低く，僅かな毒性があり，生分解性も低い。さらに，近年では原油資源の枯渇による供給不安，硫化銅腐食，燃焼時の大気汚染や漏油による環境汚染などの問題から，地球環境の悪化が懸念され，鉱油に代わる環境適応性の絶縁油として，植物由来の絶縁油に関心が寄せられ，それらの電気絶縁特性が重要視されている。一方，上記のような複合絶縁系の絶縁油／固体誘電体界面は，誘電率整合が難しく雷サージなどの過電圧により沿面放電が進展し易い電気的弱点部となる。それゆえ，絶縁油／固体誘電体界面で生じる油中沿面放電は，電力機器内部の絶縁設計に対して理解すべき重要な現象である。本研究では，代替絶縁油として有力と思われる菜種油およびパームヤシ脂肪酸エステル（PFAE）油に着目し，常温，常圧条件下で，絶縁油／プレスボード界面を進展する種々の沿面放電特性を計測し，鉱油中の特性と比較しながら検討してきた。

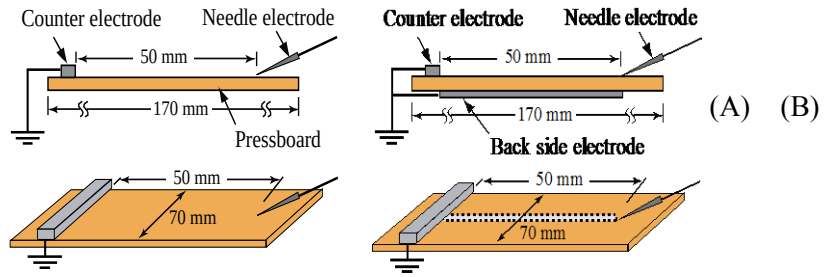
＜平成23～24年度＞

雷サージなどの侵入による油入変圧器内部の沿面フラッシオーバは複雑な経路をたどり，高電界領域，比較的低い電界領域，固体誘電体間の隙間，固体誘電体の貫通破壊などを経由する場合が多い。油中沿面放電現象をより深く理解するために，PFAE 油中に浸した固体誘電体板間の狭い隙間（この場合，二つの界面（固体／絶縁油／固体）が存在する）を進展するインパルス沿面放電の振る舞いとフラッシオーバ電圧の関連性を調べた。表 3.1-3 は，供試絶縁油の代表的な物性値を示す。この研究では，図 3.1-73 に示すように，2 種類の電極構成：「絶縁油／プレスボードの単一界面を持つ Model Ⅰ」と「固体誘電体板間に狭い隙間を設けた Model Ⅱ」が使用され，Model Ⅱにおける固体誘電体板間の間隔 ΔD は，0.1～2.0[mm]の範囲としている。プレスボードの片面には針電極と対向電極（接地電極）が取り付けられ，裏面に背後電極（BSE：接地した銅棒）が

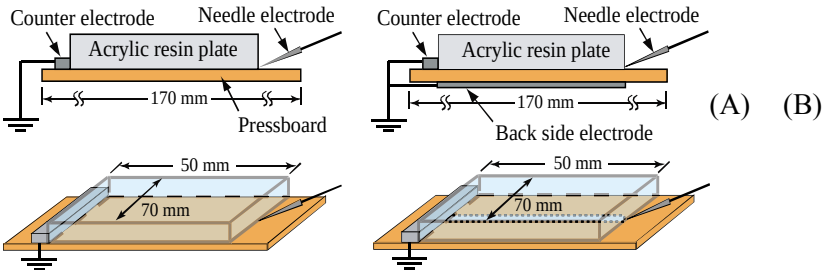
表 3.1-3　供試絶縁油の代表的な物性値

Physical properties	PFAE oil	Mineral oil	Electrical properties	PFAE oil	Mineral oil
Density (15℃) g/cm^3	0.86	0.88	Breakdown voltage kV/2.5mm (Moisture level: 10 ppm or less)	81	70-75
Kinetic viscosity (40℃) mm^2/s	5.06	8.13			
Pour point ℃	-32.5	-45.0	Relative permittivity (80℃)	2.95	2.2
Flash point ℃	176	152			
Toxicity	non-toxic	slightly toxic	Dissipation factor: tan d (80℃)	3.1×10^{-3}	5.0×10^{-4}
Ability to biodegradability	high	low	Volume resistivity (80℃) W·cm	7.1×10^{12}	7.6×10^{15}
Water saturation (20℃) ppm	high (~2500)	low (~80)			

有るものと無いものを準備した。針電極に波高値 V_p=0～±140[kV]（±1.2/50[μs]と±1.2/1000[μs]）の雷インパルス電圧を印加して沿面放電を発生させた。図 3.1-74 は，沿面放電特性を調べるために構築した実験系の概略図を示す。



(a)　Model Ⅰ



(b)　Model Ⅱ

図 3.1-73　電極構成の概略

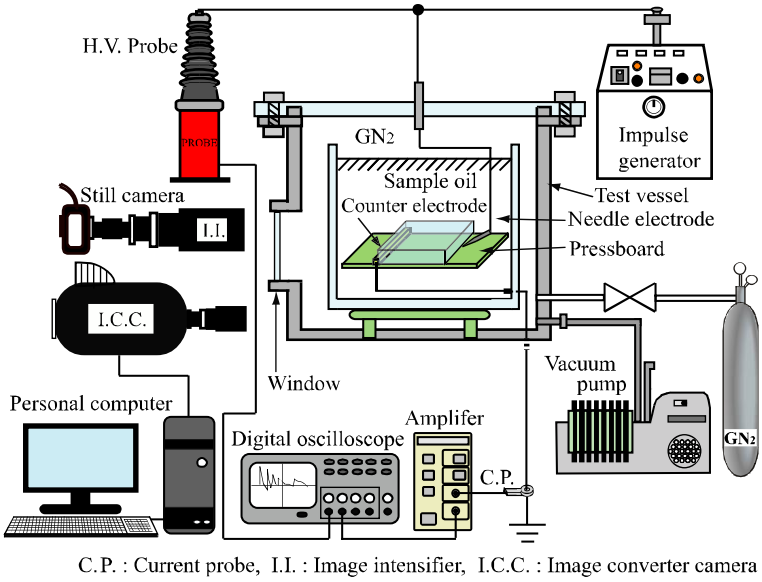


図 3.1-74　実験系の概略図

研究の結果，以下の新しい知見を得た。

(A)　Model Ⅰの沿面放電特性

図 3.1-75 は，放電進展長 L_m と印加電圧 V_p（ピーク値）の関係を示す（Model Ⅰ）。

① PFAE 油と鉱油の両者において，正極性ストリーマは，同一印加電圧で負極性ストリーマより長く進展する。

② BSE が存在すると両極性のストリーマは拡張され，フラッシオーバ電圧は BSE の無い場合より低くなる。

③ 印加電圧の波尾長が長い場合，両極性のストリーマはより成長する。

④ PFAE 油中のストリーマ進展長は，鉱油中よりやや短いが，フラッシオーバ電圧は，両絶縁油で大体同じである。

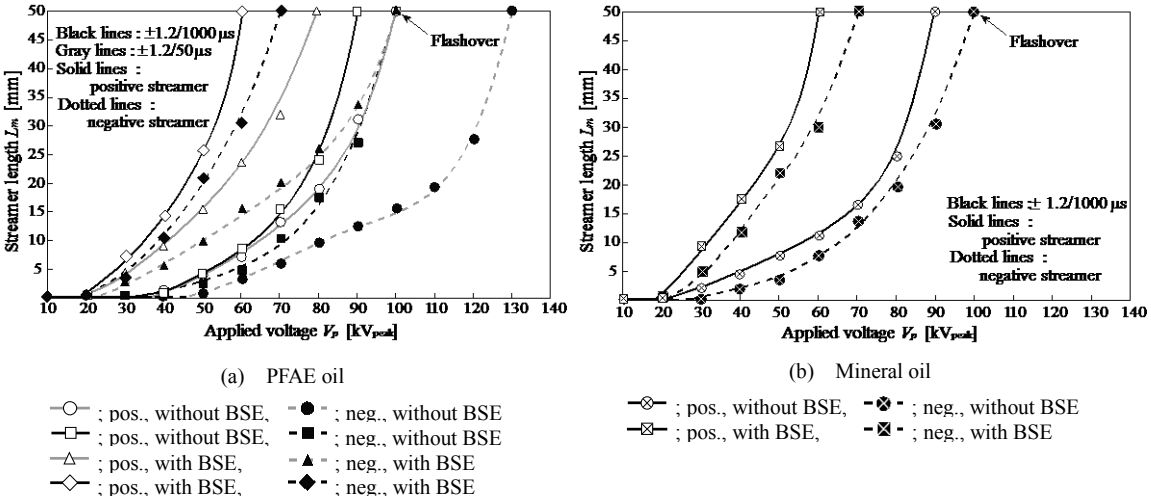


図 3.1-75　放電進展長 L_m と印加電圧 V_p の関係（Model Ⅰ : ΔD=0.1 mm）

(B)　Model Ⅱの沿面放電特性（固体誘電体板間の間隔；0.1 [mm]の場合）

図 3.1-76 は，放電進展長 L_m と印加電圧 V_p（ピーク値）の関係を示す（Model Ⅱ）。

① PFAE 油と鉱油の両者において，BSE が無い場合，ストリーマの進展長は極めて短く，フラッシオーバ電圧は非常に高い。

② BSE を設けることによって，両極性のストリーマ進展長は大きく拡張され，フラッシオーバ電圧は BSE が無い場合より極めて低くなる。さらに，この場合，同一印加電圧で負極性ストリーマの進展長は正極性ストリーマより長くなり，Model Ⅰの場合とは逆の関係となる。これは，狭い隙間を進展するストリーマの特徴であることが分かった。

③ 狭い隙間を進展するストリーマの成長は, Model Ⅰの場合に比べて大きく抑制され，放電電流パルスは，印加電圧の波尾長でも長く持続して発生する。そのため，スト

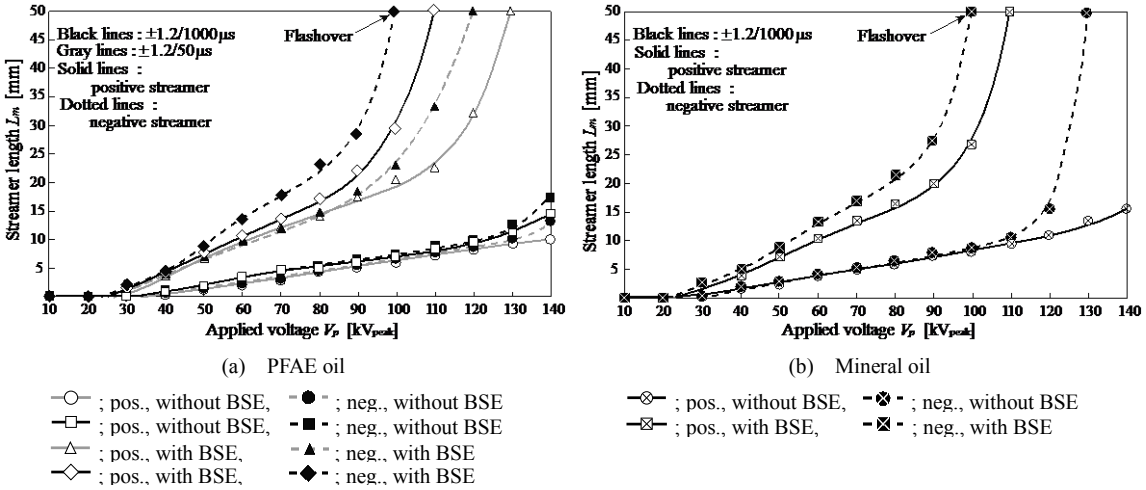


図 3.1-76　放電進展長 L_m と印加電圧 V_p の関係（ModelⅡ: ΔD=0.1

リーマの進展速度は減速する。この効果は正極性ストリーマにおいて顕著である。

(C)　ModelⅡにおける固体誘電体板間の間隔と沿面放電特性の関連性

図 3.1-77 は，PFAE 油中におけるフラッシオーバ電圧 V_f と固体誘電体板間の間隔 ΔD の関係を示す。

① PFAE 油と鉱油の両者において，ストリーマ進展長とフラッシオーバ電圧 V_f は，誘電体板間の間隔 ΔD によって，特異な極性効果を示す。

③ ΔD= 0.1～1.0[mm] における負極性ストリーマの進展長は，同一印加電圧でいつも正極性ストリーマより長くなる。

④ ΔD= 2.0[mm] において，負極性ストリーマの進展長は，正極性ストリーマより短くなる。これは，固体／絶縁油の単一界面（Model Ⅰ）を進展する沿面放電と同じ関係である。

⑤ フラッシオーバ電圧は，ΔD＜～1.2[mm]の範囲において負極性電圧で低く，ΔD＞～1.2[mm]の範囲において正極性電圧で低くなる。

⑥ ΔD=0.1～1.0[mm] におけるストリーマ進展長の極性効果は，誘電体板間の狭い間隔に起因する。特に，正極性ストリーマの成長は，狭い間隔内で油領域が制限されるために抑制される。

⑥ 正極性ストリーマの平均速度は，ΔD の減少と共に減速されるが，負極性ストリーマの速度は，ΔD とは無関係に大体一定である。

⑦ PFAE 油中におけるストリーマ成長とフラッシオーバ電圧は，鉱油中のそれらとほぼ同じ程度である。

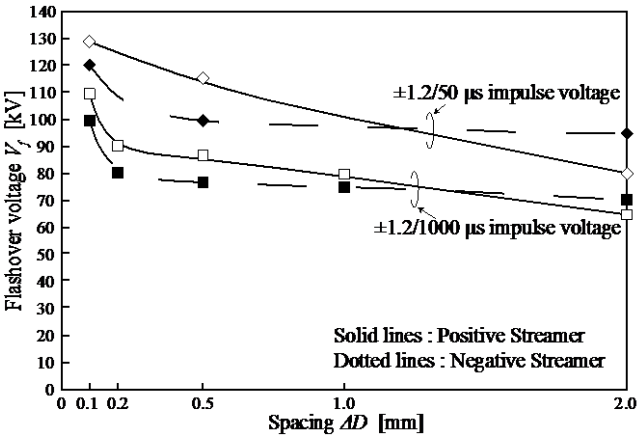


図 3. 1-77　V_f と ΔD の関係（PFAE 油，Model Ⅱ）

以上の研究成果は, 代替絶縁油を用いた環境適合型油入電力機器の新規絶縁設計において重要であり，考慮すべきである。

＜平成25～26年度＞

代替絶縁油（パームヤシ脂肪酸エステル（PFAE）油と菜種油（原油））および鉱油中の絶縁油／プレスボード界面を進展する交流沿面放電特性をより詳細に計測し検討した。本研究の遂行によって，60[Hz]，0～ 45[kV_{rms}]の交流高電圧 V_{rms} 印加時のストリーマの形状と進展長，ストリーマ速度，放電電流，プレスボード表面のトラッキング，プレスボード貫通破壊に関する特性が明確になった。電極系として，図 3.1-78 に示すように，高密度プレスボードの片面に高電圧電極としてタングステン製針電極（先端曲率半径：約 30[μm]）が取り付けられた。なお，この研究では，表面フラッシオーバを避ける為，針電極に対抗したカウンター電極は設けていない。また，プレスボードの裏面には接地された直径 2[mm]の銅製棒が，背後電極（BSE: Back side electrode）として取り付けられた。また，図 3.1-79 は，沿面放電特性を調べるために構築した実験系の概略図を示す。

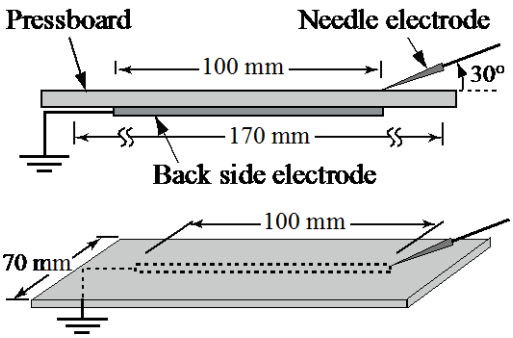


図 3.1-78　電極構成の概略

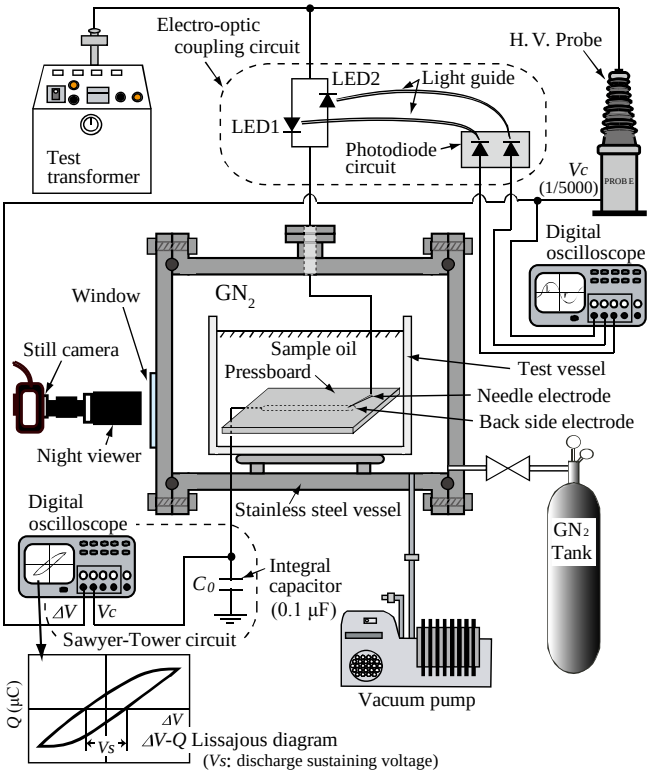


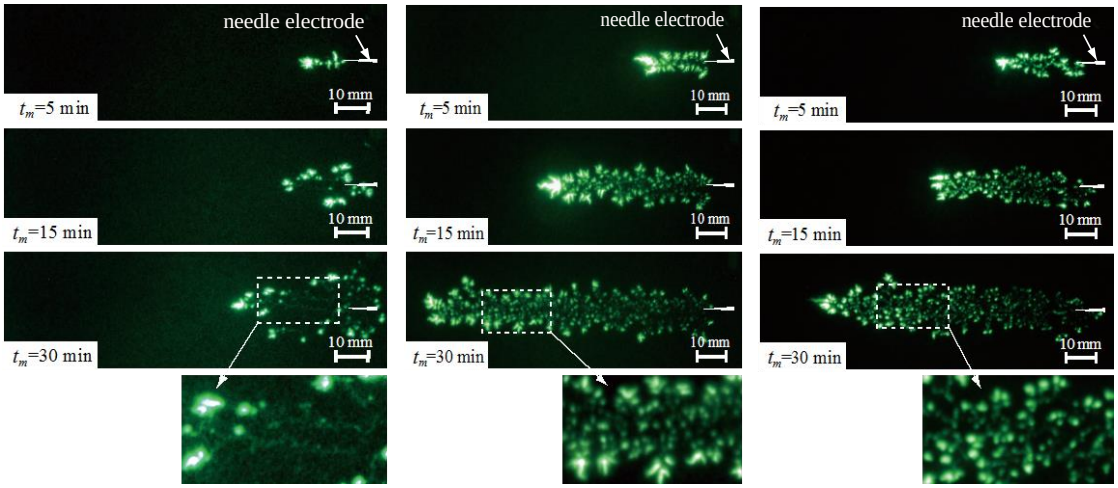
図 3.1-79　実験系の概略図

得られた結果は，以下のように要約される。

① PFAE 一定値の印加電圧において，図 3.1-80 に示すように，沿面ストリーマは，多くの枝分れを持つ形状で，　プレスボード表面上をゆっくりと進展する。

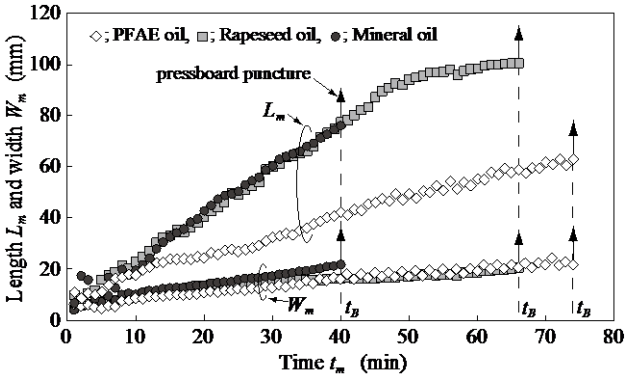
② ストリーマがプレスボード表面を進展する時，電離領域を示す輝点がストリーマ分岐頂点で観測される。菜種原油と鉱油中の輝点は，PFAE 油中のそれより明るい。また，菜種原油と鉱油中のストリーマは，多くの細い枝分れを有し，その先端での発光スポット数も多いが，PFAE 油中では，枝分れの少ない比較的太い幹を持つストリーマが進展する。

③ ストリーマは，　BSE に沿う方向へ進展し易く，BSE の効果を明確に表わす。また，一定電圧を印加した時間 t_m にほぼ比例して進展する。図 3.1-81 は，BSE に平行方向のストリーマ進展長 L_m および垂直方向の進展幅 W_m と t_m の関係を示す。それぞれのカーブの傾きは，ストリーマの平均進展速度を表す。菜種原油と鉱油中のストリーマ進展速度（BSE に平行方向の速度）は，PFAE 油中の速度よりも速い。また，菜種原油と鉱油中のストリーマ進展長は，同じ印加電圧と放電時間で比較して，PFAE 油中のそれより長い。

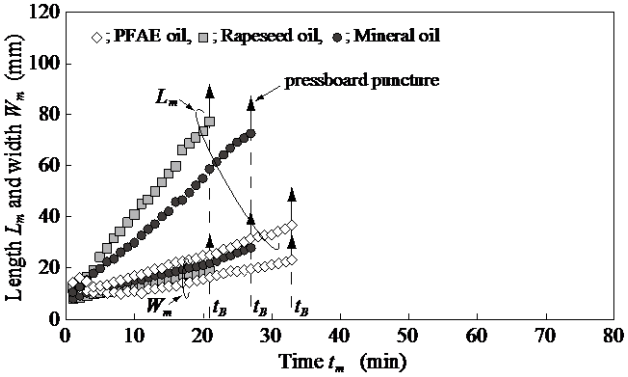


(a)　PFAE 油　　(b)　菜種油　　(c)　鉱油

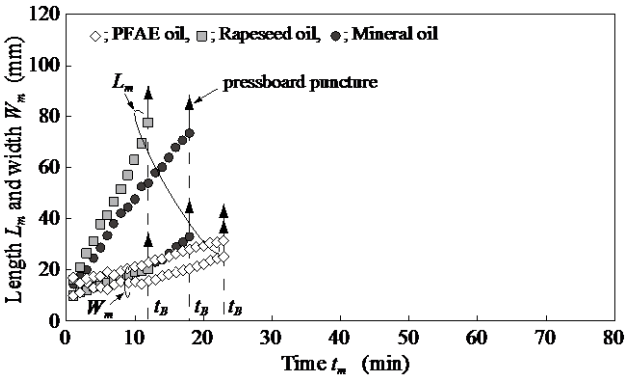
図 3.1-80　沿面ストリーマの進展様相（V_{rms}=35 kV）



(a)　V_{rms}=30 kV



(b)　V_{rms}=35 kV



(c)　V_{rms}=40 kV

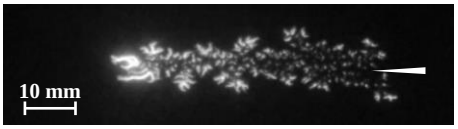
図 3.1-81　L_m および W_m と t_m の関係

④ 放電後の油中ガス分析（DGA）から得られたガス成分は，表 3.1-4 に示される。アセチレン（C_2H_2）ガスの生成は，ストリーマチャンネル上またはその付近の局部的温度が，放電エネルギーによって少なくとも 500℃以上に上昇することを暗示する。

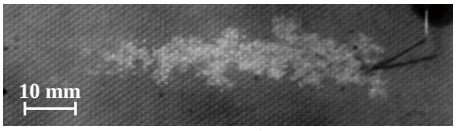
表 3.1-4　油中の溶解ガス分析（V_{rms}=30 [kV]）

Dissolved gases		H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CO	CO_2	N_2
Limit of quantitation		5	1	1	1	0.2	2	2	50
Rapeseed oil	t_m= 5 min	6	1	1	1	5	8	117	63601
	t_m=20 min	12	3	3	3	15	17	263	61536
Mineral oil	t_m= 5 min	5	2	1	2	8.4	3	178	65823
	t_m=20 min	22	11	3	4	29	4	212	67690

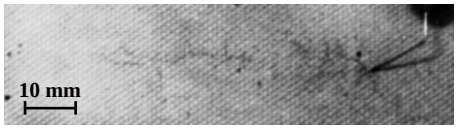
*t_m: Discharge duration　　unit: (ppm)



(a)　沿面放電（V_{rms}=35 kV, t_m=15 min.）



(b)　放電進展後の白色痕跡



(c)　プレスボード表面のトラッキング

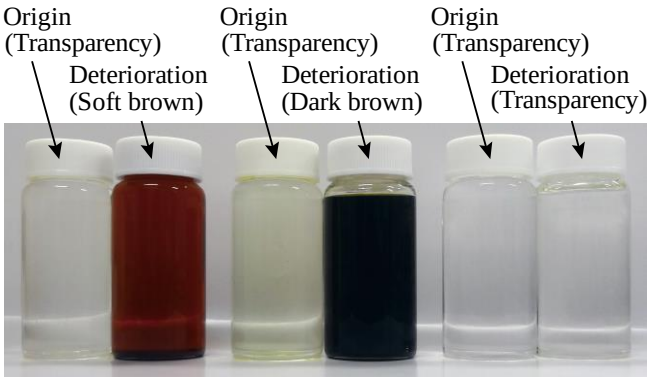
図 3.1-82　プレスボード表面の沿面放電，白色痕跡，およびトラッキングパターン

⑤ 図 3.1-82 に示すように，放電様相とほぼ同じパターンの白色痕跡が，ストリーマの成長と同時に現れる。これは，電気的・熱的効果で発生したガスによるプレスボードの乾燥プロセスに起因する。また，沿面放電進展後のプレスボード表面には，導電性の炭化炉を示すトリー状の黒色トラッキングが残される。交流沿面放電は，このようなトラッキンングによって極めて進展し易くなる。

＜平成26～27年度＞

油入変圧器は，一般に約 30 年以上の稼働寿命が要求されるが，経年に伴い絶縁物の劣化が進み，これに加えて雷サージなどの異常電圧または外部短絡時の電磁機械力などによる電気的・機械的ストレスは，絶縁物の絶縁耐力を低下させ電気絶縁破壊を起こす確率を増す。菜種油と PFAE 油は，今後益々の実用化と普及が望めるが，油入変圧器内部の複合絶縁系は，経年により劣化を伴う。沿面放電現象に関する変圧器の経年劣化の影響を報告している研究では，現在のところセルロース材料等の劣化効果に関するものが多く，絶縁油自体の劣化に注目した報告は非常に少ない。そこで，熱加速劣化した菜種油，鉱油，および PFAE 油のサンプルを共同研究企業にご提供頂き，交流沿面放電特性を劣化油と新油中で詳細に計測し比較・検討した。電極系と実験系は、平成 25～26 年度の研究と同様である。また，針電極に印加する 60[Hz]交流高電圧は，0～40[kV_{rms}]の範囲である。劣化絶縁油の供試サンプルは，酸価値が 0.3[mgKOH/g]に統一されている。この酸価値は，鉱油使用変圧器を通常運転した場合の期待寿命（約 30 年）を経過した絶縁油のそれに相当する。

図 3.1-83 は，新油と劣化油の写真を示す。劣化サンプル油に関して，新油の菜種油と鉱油は透明であるのに対し，劣化菜種油は濃い茶色，劣化鉱油は薄い茶色に変化した。また，PFAE 油は，新油と劣化油いずれも透明であり，着色の変化は見られなかった。表 3.1-5 は，新油と劣化油の主な特性を示す。サンプル油の含有水分量は，いずれも 100



(a) Mineral oil (b) Rapeseed oil (c) PFAE oil

図 3.1-83 新油と劣化油の供試サンプ

表 3.1-5　新油と劣化油の主な特性

Physical and electrical properties	Mineral (*O-oil)	Mineral (*D-oil)	Rapeseed (*O-oil)	Rapeseed (*D-oil)	PFAE (*O-oil)	PFAE (*D-oil)
Density (20℃) g/cm^3	0.88	0.88	0.92	0.94	0.86	0.86
Kinetic viscosity(40℃) mm^2/s	8.13	8.64	36.0	76.2	5.10	5.10
Breakdown voltage kV/2.5mm	70-75	62	74	63	81	76
Relative permittivity (80℃)	2.20	2.17	2.86	4.39	2.92	2.92
Dissipation factortan δ (80℃)	1.0×10^{-3}	5.0×10^{-3}	8.3×10^{-2}	3.5×10^{-1}	8.5×10^{-3}	1.0×10^{-2}
Volume resistivity(80℃) Ω·cm	7.6×10^{15}	4.4×10^{12}	4.4×10^{12}	3.1×10^{10}	2.1×10^{13}	4.1×10^{12}

*O-oil: Original oil, D-oil: Deteriorated oil

[ppm]以下である。菜種油の動粘度は, 劣化により鉱油に比べて非常に高くなるが, PFAE 油の動粘度は，新油と劣化油の差が見られない。また，菜種油，鉱油，PFAE 油の劣化によって，いずれの絶縁油も誘電損失は増加し，体積抵抗と絶縁破壊電圧は減少する。

交流高電圧をタングステン製針電極（先端曲率半径：約 50[μm]）に印加し，劣化油中の沿面ストリーマ形状，ストリーマ進展長と進展速度，放電電流，放電エネルギーなどの特性を新油中の特性と比較し検討し，以下の知見を得た。

① 図 3.1-84 は，新油と劣化油中の交流沿面放電様相（V_{rms}=35[kV]）を電圧印加時間 t_m の関数として示す。いずれの絶縁油も劣化の有無に関わらず，ストリーマは基本的に背後電極に平行と垂直方向へ徐々に進行する。放電の様相は，多くの細い枝分れとその先端の輝点によって特徴づけられる。輝点は，ストリーマの分岐枝先端に位置し，それらは電離領域を示している。ストリーマは，背後電極に垂直よりも平行方向に進展して行く。

② 図 3.1-85 は, 新油と劣化油中におけるストリーマ進展長 L_m（BSE に平行方向の長さ）と電圧印加時間 t_m の関係を示す。劣化した鉱油と菜種油中における沿面ストリーマの進展は，新油中より助長され，ストリーマ進展速度も速くなる。一方，PFAE 中では，新油と劣化油の進展長に大きな差は見られず，ストリーマ進展速度の差も殆どない。同一の印加電圧値におけるストリーマ進展の割合を各種絶縁油で比較すると，菜種油（劣化油）＞鉱油（劣化油）＞菜種油（新油）＞鉱油（新油）＞PFAE 油（新油，劣化油）の順となる。

③ 放電電流は，図 3.1-86 に示すように，新油と劣化油いずれも多数の急峻パルスを伴うが，劣化した鉱油と菜種油中の電流パルスは，同一の印加電圧値の下で新油より非常に大きくなる。これに伴い放電エネルギーも上昇する（図 3.1-87 参照）。一方，PFAE 油では，新油と劣化油におけるそれらの差は小さい。なお，放電エネルギー J_i (J/s)は，図 3.1-79 の実験系におけるソーヤ・タワー回路から得られる *V-Q* リサージュ図形によって計測された。

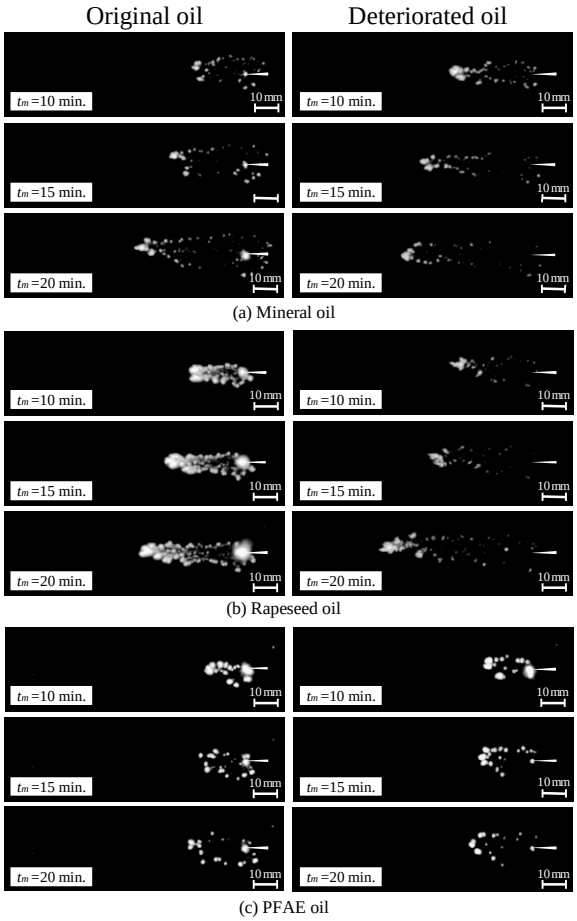
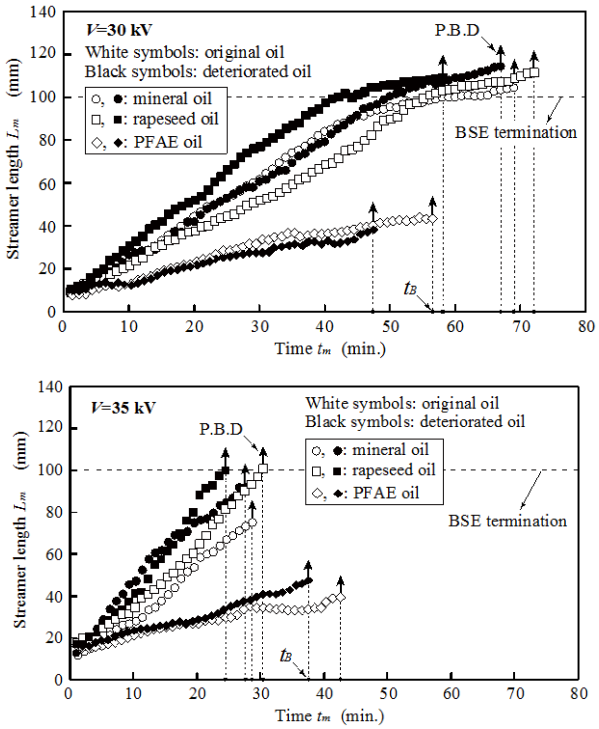


図 3.1-84　新油と劣化油の沿面ストリーマ進展様相（V_{rms}=35 kV）



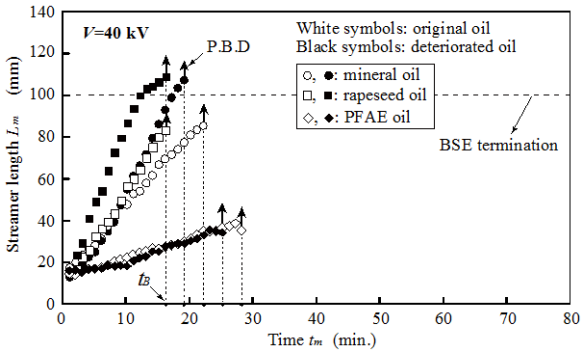
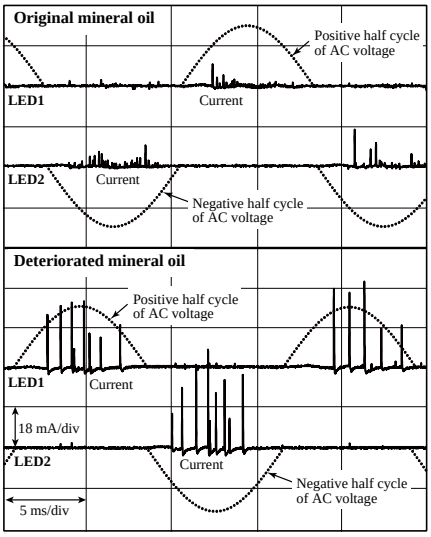
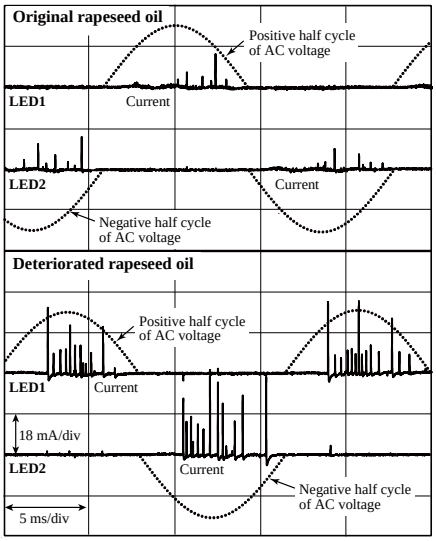


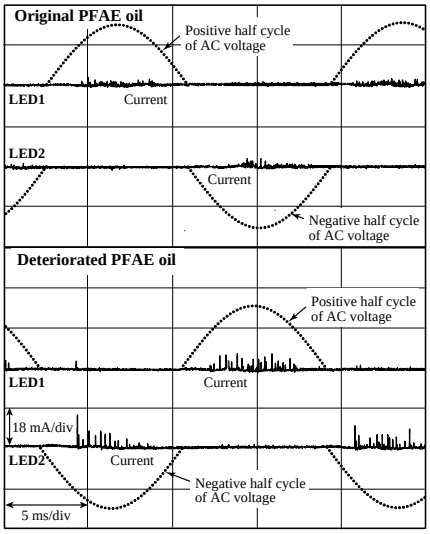
図 3.1-85　新油と劣化油中の L_m と t_m の関係



(a)　鉱油



(b)　菜種油



(c)　PFAE 油

図 3.1-86　新油と劣化油中の放電電流波形

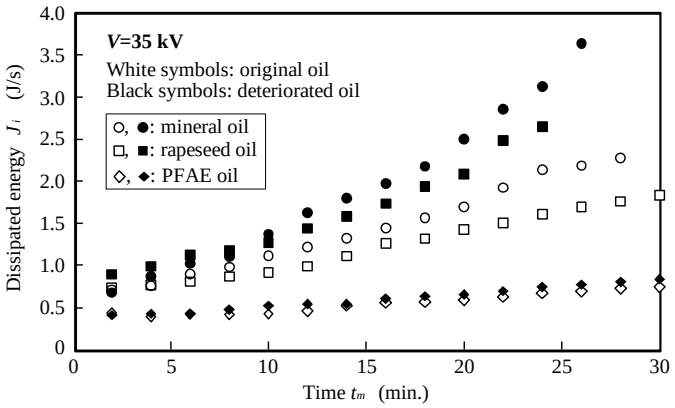


図 3.1-87　新油と劣化油中の沿面放電に伴う放電エネルギー
（J_i と t_m の関係）

これらの結果を総合的に評価して，PFAE 油は沿面放電特性に及ぼす油の劣化効果が非常に小さく，油入電力機器の電気絶縁設計の観点から，機器の小型・軽量化および長寿命化に有利であると言え，環境適合型の次世代絶縁油として有望である。

（４）ナノ粒子の均一分散化に関する研究

カーボンナノチューブ（CNT）やカーボンブラック（CB）などのナノ粒子は，機械的，電気的，および物理的に極めて優れた特性を持つことから，ナノコンポジット材料や電気的ナノデバイスなど，様々な分野への応用が期待される。しかし，生産時のナノ粒子は，通常，粒子間に働くファンデルワースル引力により強固な凝集体を形成する。この状態は，ナノ粒子を応用する上で大きな障害となるめ，ナノ粒子凝集体を均一に分散する技術が基本的に必要不可欠である。しかし，ナノ粒子凝集体の均一分散化は容易ではなく，従来のナノ粒子分散技術は，超音波を利用した酸処理分散と界面活性剤・添加物処理分散に関するものが多い。しかし，酸による分散法はナノ粒子の構造を破壊する可能性があり，また，界面活性剤や添加物よる分散は，ナノ粒子表面に吸着する成分が，場合によっては粒子本来の特性を損なう可能性がある。更に，分散に要する時間も長く効率が悪いことが指摘されている。

＜平成23～24年度＞

酸や界面活性剤その他の添加物をまったく使用せずに，有機溶媒中でバリア放電を発生させ，CNT の凝集体を分散する手法を開発した。この技術では，短時間の放電処理によって，分散効果が得られるので，非常に効率的である。連続的な液体中バリア放電は，有機溶媒（オクチルアルコール：2-ethyl-1-hexanol または 2-octanol）に多層カーボンナノチューブ（MWCNT）の凝集体を懸濁し，その中に設置した針－平板電極系に 60 [Hz]交流高電圧を印加することにより得られ，その放電エネルギーで MWCNT 凝集体

を分散する。また，バリアとなる固体誘電体表面上に孤立金属板（以後，IMP（Isolated metal plate）と記す）を設けると，より強い放電が電極間に生じ，MWCNT の分散効果が向上することが分かった。以下に研究成果を要約する。

図 3.1-88 は，実験装置の概略図を示し，表 3.1-6 は，供試溶媒の主な物性値を示す。

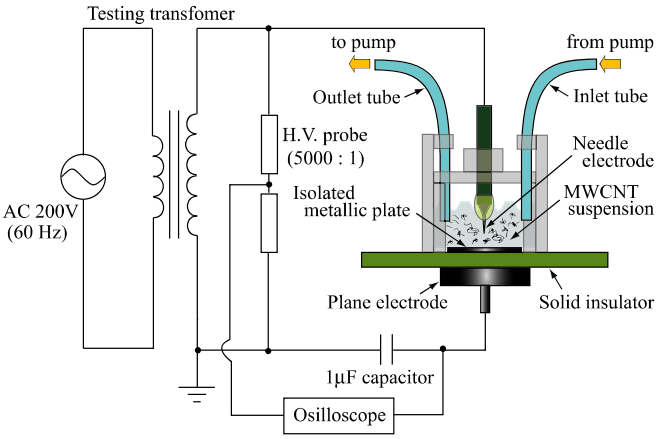


図 3.1-88　ナノ粒子分散に使用した実験系の概略図

表 3.1-6 供試溶媒の主な物性値

Properties	2-octanol $CH_3(CH_2)_5CH(OH)CH_3$		2-ethyl-1-hexanol $CH_3(CH_2)_3CH(C_2H_5)CH_2OH$	
Molecular weight	130.23	g/mol	130.23	g/mol
Melting point	-38.6	℃	-76	℃
Boiling point	179	℃	184 - 185	℃
Flash point	74	℃	85	℃
Water solubility (20 ℃)	0.1g/100mL		0.1g/100mL	
Density (20 ℃)	0.819	g/mL	0.833	g/mL
Breakdown voltage	~ 49	kV_{rms}/2.5mm	~ 54	kV_{rms}/2.5mm

図 3.1-89 は，バリア放電の様相を示す。また，図 3.1-90 は，放電処理前後の MWCNT 懸濁液を示す。

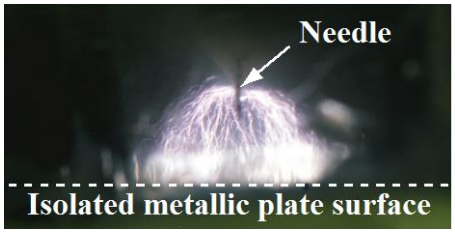


図 3.1-89　バリア放電の様相（V=40 kV_{rms}）

(a) 放電処理前　(b) 放電処理後（1 日経過後）

図 3. 1-90　放電処理前後の MWCNT 懸濁液（放電処理時間：90 min.，分散媒：2-octanol）

以下に研究成果を要約する。

① CNT の分散効果は，60 分以上の放電処理により良好に得られる。また，放電によって溶媒の改質成分が MWCNT 表面の修飾効果をもたらすことが示唆される。放電処理を施すことにより，MWCNT 凝集体が一様に分散するため，懸濁液は透明から黒色に変化する。

② 約 10-20[μm]サイズの MWCNT 凝集体は，放電処理によって良く解きほぐされることが SEM より確認できた。SEM 観測によれば，MWCNT の切断や破砕のような形状変化は見当たらないことから，MWCNT 粒子は，放電エネルギーにより，粒子を大きく損なうこと無く分散されていると判断できる。

③ オクチルアルコール中に分散された MWCNT は，図 3.1-91 に示すように，C-H 結合と C=O 結合を有する官能基が修飾される。放電処理前後の MWCNT を FTIR 分析した結果, バリア放電処理時間を増加すると共に, スペクトル吸収帯 2964[cm^{-1}]と 1741 [cm^{-1}]の増加が見られた（2964[cm^{-1}]と 1741[cm^{-1}]の吸収帯は，それぞれ，MWCNT 表面の C-H 結合と C=O 結合（二重結合）を表す)。

④ 一度分散した CNT は，長時間（少なくとも 48 時間以上）静置してもほとんど再凝集しない。オクチルアルコール中に放電分散した MWCNT は，正極性に帯電することが分かった。これは，放電によって，CNT 表面にゼータ電位が現れたことを示唆し，これが CNT の再凝集を防いでいるものと考えられる。

⑤ 液体中のバリア放電技術は，CNT 以外のナノ粒子（Al, Cu, Ni, CB など）を分散する場合にも有効であることが分かった。

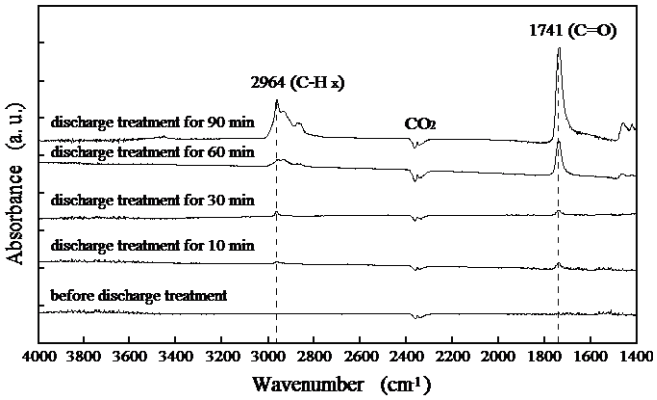


図 3.1-91　バリア放電処理前後におけるの MWCNTs の FTIR スペクトル

＜平成25年度＞

ナノ粒子分散技術をさらに追及し，分散精度を向上するためのセル設計を行い，これによって分散した粒子の特性を調べた。図 3.1-92 は，新規に設計・試作したバリア放電分散セルの外観模式図を示す。また，放電分散中は，図 3.1-93 に示すように，パイプを通して CNT 懸濁液を循環した。更に，フッ素系液体（HFC43-10 と HFE7600）を用い

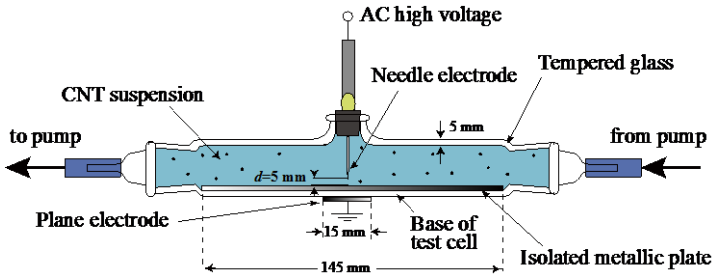


図 3.1-92　新規に設計・試作したバリア放電分散セルの外観模式図

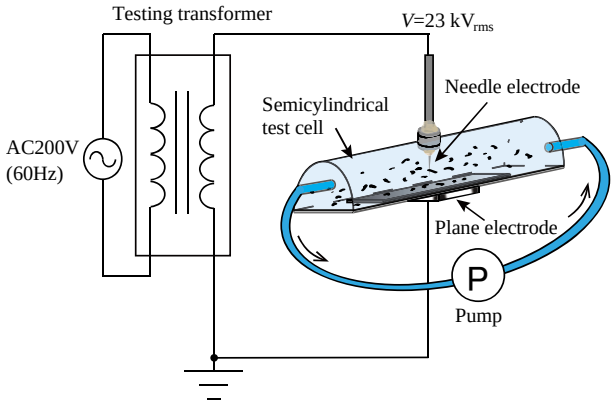
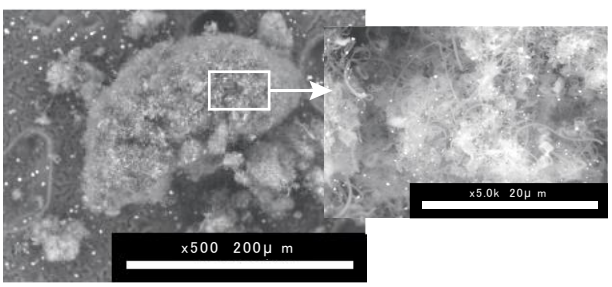


図 3.1-93　CNT 懸濁液の循環系

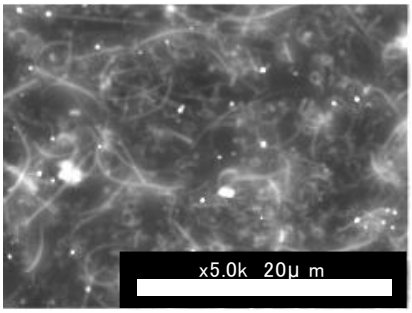
た分散も試みた。以下に研究成果を要約する。

① MWCNT の良好な分散効果は，溶媒にオクチルアルコール（2-octanol および 2-ethyl-1-hexanol）と HFE7600 を用いて，60 分以上の放電処理を施すことにより得られる。針電極に交流電圧 25[kV_{rms}]（60[Hz]）を印加してバリア放電を発生させると，その強い放電エネルギーによって，MWCNT の凝集体は効率的にほぐされる。放電処理により，MWCNT 凝集体が一様に分散するため，懸濁液は透明から黒色に変化する。また，放電によって溶媒の分解成分が MWCNT 表面に修飾される。

② 分散した MWCNT を SEM で観測した。SEM 観測写真に代表例は，図 3.1-94 に示



(a) 放電処理前



(b) 60 min.の放電処理後

図 3.1-94　MWCNT の代表的 SEM 画像

される。その結果，オクチルアルコール中では，MWCNT 凝集体が放電処理によって，ほぼ均一に分散されることが分かった。また，HFE7600 中では，放電処理しても，約 10-20[μm]サイズの凝集体が残り，均一な分散が得られず，溶媒によって分散性は異なることが分かった。なお，いずれの場合も，SEM 観測からは，CNT の破壊的損傷は確認されなかった。

③ 放電処理前後における MWCNT の修飾官能基を FTIR で分析した。分散溶媒は，オクチルアルコール（2-octanol および 2-ethyl-1-hexanol,），フッ素系液体（HFC43-10 および HFE7600）である。図 3.1-95 は，バリア放電処理前後におけるの MWCNTs の FTIR スペクトルを示す。放電処理前の MWCNT には，必然的に検出される CO_2

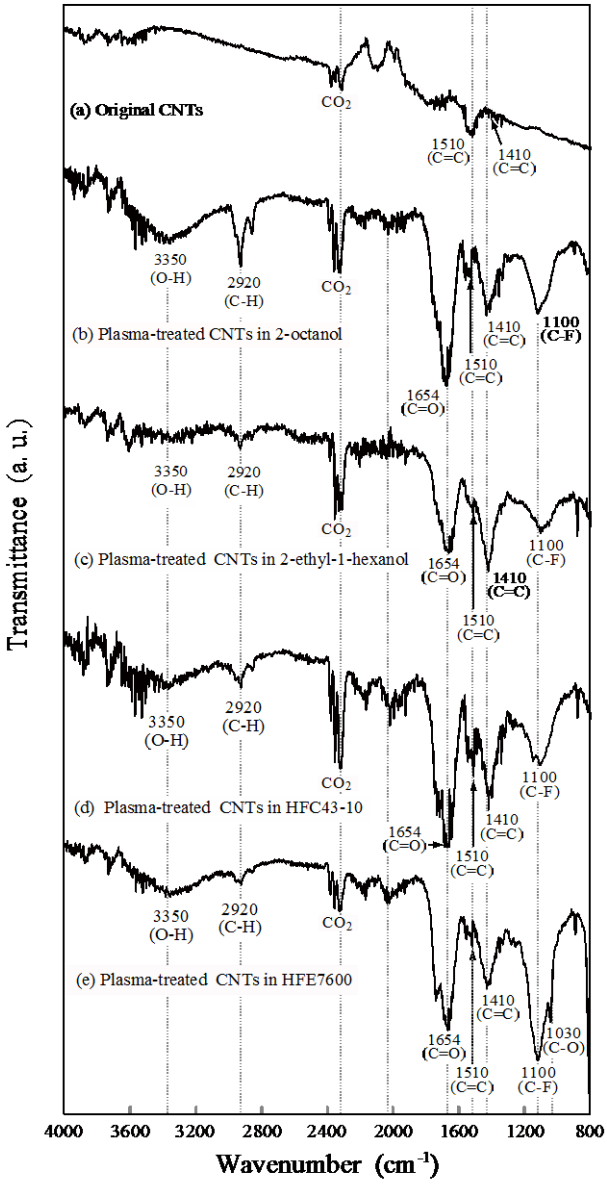


図 3.1-95　バリア放電処理前後におけるの MWCNTs の FTIR スペクトル

を除くと，1510[cm^{-1}] と 1410[cm^{-1}]の透過のみが見られる。この 2 つの透過帯はいずれも C=C 結合を有する分子が MWCNT 表面に存在することを示す。また，放電処理後の MWCNT には，C=C 結合の他にも多くの透過帯が見られる。4 種類全ての溶媒で，C=O 結合を示す 1654[cm^{-1}]や C-H 結合を示す 2920[cm^{-1}]，O-H 結合を示す 3100- 3600[cm^{-1}]が見られる。加えて，フッ素系液体（HFC43-10 と HFE7600）では，C-F 結合を示す 1100[cm^{-1}]が見られる。放電分散処理を施した MWCNT は，これらの分子結合が含まれる何らかの官能基により修飾されていることが分かった。

＜平成26年度＞

ナノ粒子の分散度と分散安定性をさらに向上するため, 電界強度を利用した分散法を新たに開発した。本研究では, 次のように命名した 2 種類の方法 : 放電分散法（Discharge dispersion method (DDM)）, および電界分散法（Field dispersion method (FDM)）を開発し, 有機溶媒（2-ethyl-1-hexanol）中に懸濁した MWCNTs の分散評価を行った。ここで, DDM はバリア放電に基づく分散法であり, MWCNT の分散と同時に再凝集性の防止に着眼したものである。また，FDM は電界の効果による分散法であり，MWCNT のより微細な分散度を得ることに着眼したものである。分散性の向上は，DDM と FDM の併用によって得られることを新たに見出した。得られた結果は，以下のように要約される。

図 3.1-96 は, 新たに設計試作した FDM 分散セルの概略図を示す。また, 図 3.1-97 は, DDM と FDM の分散状況を示す。

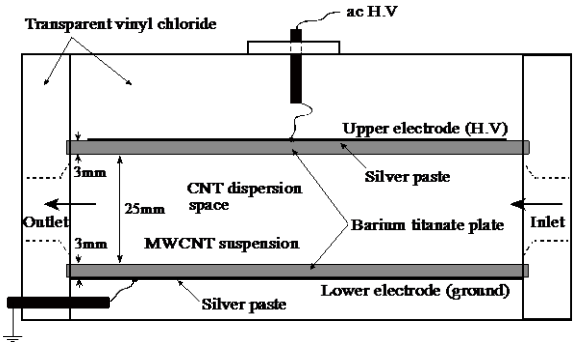
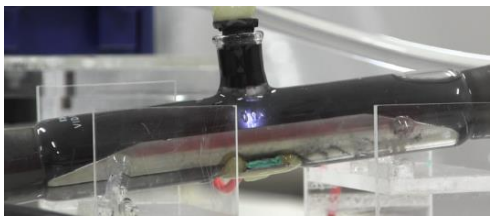
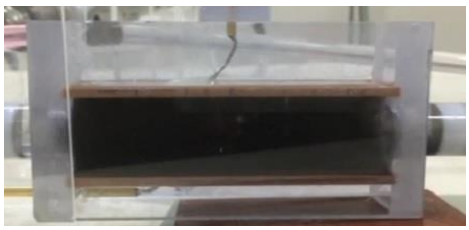


図 3.1-96　FDM 分散セルの概略図



(a)　DDM による分散（18 s 経過後）



(b)　FDM による分散（10 s 経過後）

図 3.1-97　DDM と FDM の分散状況

以下に研究成果を要約する。

① MWCNT 懸濁液の分散性は，懸濁液のレーザビーム透過強度比から評価された。図 3.1-98 に示すように, DDM と FDM の併用によって処理された懸濁液のビーム透過強度比は，DDM または FDM のみで処理されたそれよりも小さかった。すなわち，MWCNT の分散度と分散安定性は，DDM と FDM の併用によって改善されることが明確にされた。

② SEM 観測によって，図 3.1-99 に示すように，MWCNT の凝集体は，DDM と FDM の併用によって良く解されることが明らかとなった。また，SEM 観測からは，CNT の切断など，破壊的損傷は確認されなかった。

③ FTIR 分析を行った結果，図 3.1-100 に示すように，DDM と FDM の併用によって処理された MWCNT 表面は，カルボニル基（C=C），カルボキシル基（O-H），アルキル基（C-H），C-O 結合などのグループによって化学的に修正されることが分かった。

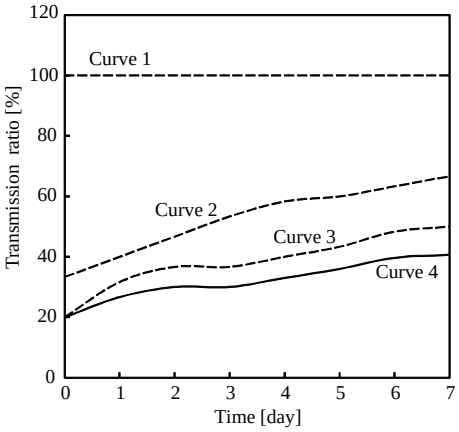
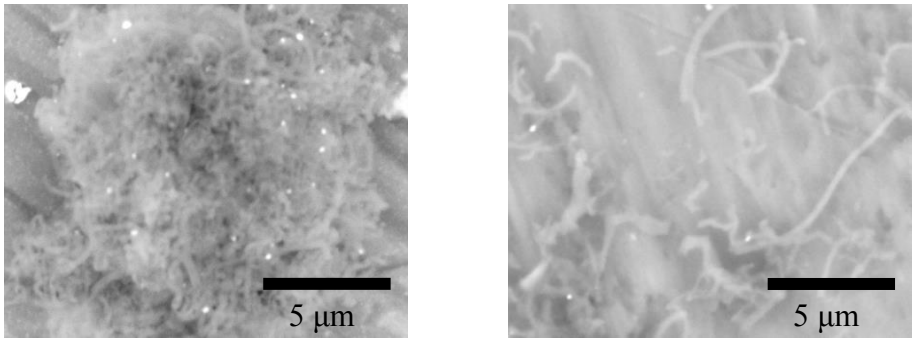


図 3.1-98　レーザビーム透過強度比の比較
Curve1: 電気的処理前，Curve2: FDM 処理後，Curve3: DDM 処理後，Curve4: FDM と DDM の併用による処理後



(a)　放電処理前　　(b)　FDM と DDM の併用による処理後

図 3.1-99　MWCNT の代表的 SEM 画像

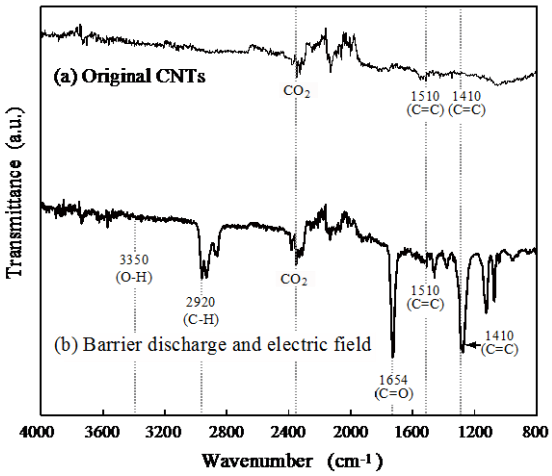


図 3.1-100　バリア放電処理前後におけるの MWCNTs の FTIR スペクトル

＜平成27年度＞

CNT 応用の一つとして，本研究の粒子分散手法を用いて得た MWCNTs をフィラーとし，エポキシナノコンポジットを作製して，その機械的応力（引張強度）試験を行った。なお，分散媒は，2-ethyl-1-hexanol である。以下に研究成果を要約する。

① JIS-K7161-1BA（ISO-527-1）基づいて，MWCNTs をフィラーとしたエポキシナノコンポジットを作製し，引張試験により応力強度を CNT フリーエポキシレジンと比較して評価した。図 3.1-101 は，各種 MWCNT 濃度に対するコンポジットの外観を示す。また，図 31-102 は，各コンポジットの最大引張応力 T_s と CNT 濃度ϕの関係を示す。DDM, FDM, および DDM と FDM の併用によってそれぞれ分散した MWCNTs を 2 液混合型エポキシ樹脂に混合したコンポジット材料において，最大引張応力 T_m は CNT 濃度ϕ=0.01-0.02[wt%]で得られた。T_m の値は，CNT フリーエポキシレジンの最大引張応力 T_{0m} と比較し，各分散法によって以下のような相違が現れた。

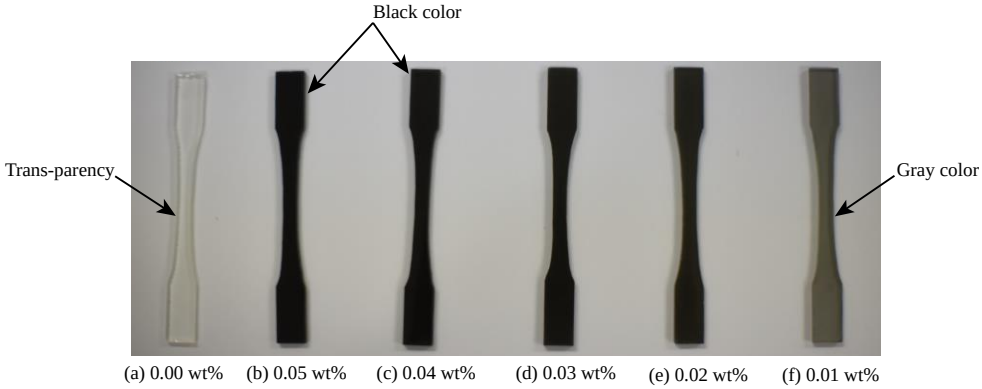


図 3.1-101　各種 MWCNT 濃度に対するコンポジットの外観

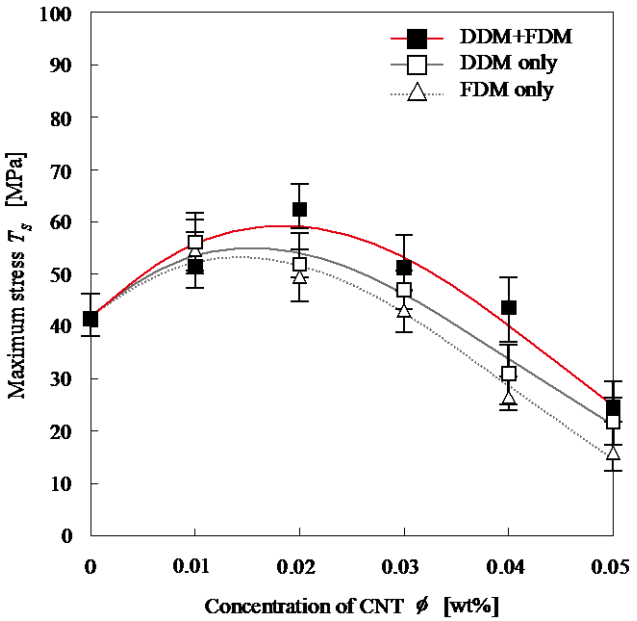


図 3.1-102　各コンポジットの最大引張応力 T_s と CNT 濃度ϕの関係

・DDM 分散の場合：T_m=56.1[MPa]（ϕ=0.01[wt%]），$T_m/T_{0m}\approx 1.30$

・FDM 分散の場合：T_m=54.7[MPa]（ϕ=0.01[wt%]），$T_m/T_{0m}\approx 1.26$

・DDM と FDM の併用分散の場合：T_m=62.4[MPa]（ϕ=0.02[wt%]），$T_m/T_{0m}\approx 1.43$

また，各分散法によって最大破断応力 T_B は，CNT フリーエポキシレジンの最大破断応力 T_{0B} と比較して以下のような結果を得た。

・DDM 分散の場合：T_B=48.0[MPa]（ϕ=0.01[wt%]），$T_B/T_{0B}\approx 1.39$

・FDM 分散の場合：T_B=47.4[MPa]（ϕ=0.01[wt%]），$T_B/T_{0B}\approx 1.37$

・DDM と FDM の併用分散の場合：T_B=53.8[MPa]（ϕ=0.02[wt%]），$T_B/T_{0B}\approx 1.56$

DDM と FDM を併用することにより CNT の分散率が向上し，コンポジット内部で MWCNT とマトリクスの結合が強化され，コンポジットの引張強度および破壊強度が最も高くなる。

② CNT 濃度ϕが 0.03[wt%]以上のコンポジットでは，その引張応力が濃度の増加に伴い減少傾向を示した。これは，分散した CNT がコンポジットを構成するエポキシ主剤と硬化剤との間に入り込み，分子結合を阻害しているためと考えられる。それ故，過剰な CNT の添加は，コンポジットの引張応力を低下させる。

本研究では，CNTs の分散溶媒として 2-ethyl-1-hexanol を用いたが，今後は CNT の広範囲な応用を考慮し，より低い沸点の溶媒を選択して粒子分散を試みる。現在，その分散媒として，HFC-52-13p が適合することを見い出している。また，今後はコンポジット材料として，エラストマーナノコンポジットも研究対象とする。

［課題 2］　電気流体力学（EHD）ポンピング現象のメカニズム解明とその工業的応用

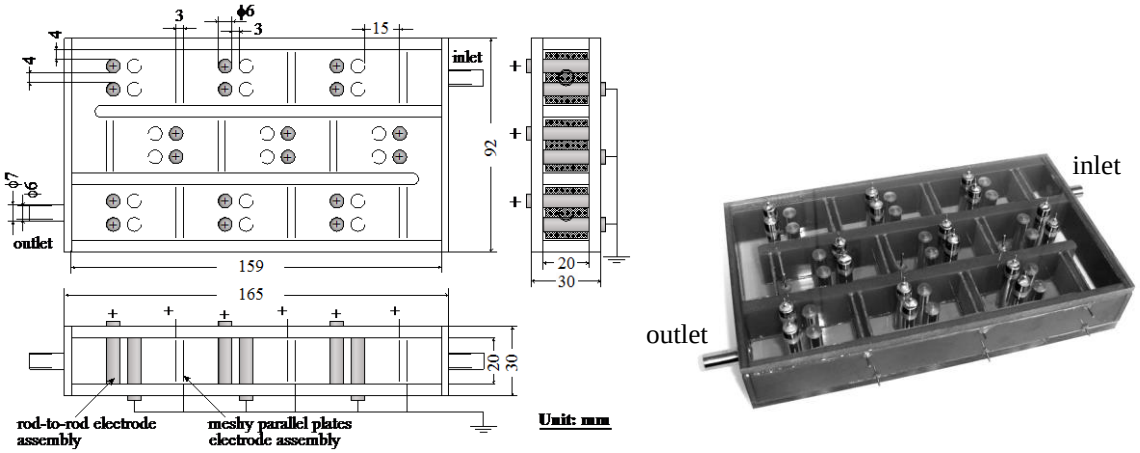
電気磁気学と流体力学の境界分野である EHD ポンピングのメカニズムと実用的な電極系の構築，ならびに伝熱促進や冷却システムなどの熱伝達・熱交換技術を開発し実用化を目指す。

＜平成23～24年度＞

(A)　EHD ポンプの実用的メカニズムと電極系の設計

「伝導ポンピング」と呼ばれる EHD ポンピングのメカニズムが，これまでの研究から提案された。これは，解離性の弱導電性液体中で，液体分子（または不純物分子）の解離と再結合反応が電界によって不平衡化し，電極付近に形成されるヘテロチャージ層と電極との間に働く引力に起因した圧力が流動を生じさせると言う原理に基づく。このメカニズムでは，電極から液体中への電荷注入機構が含まれず，作動液体の長期使用に対して電気的劣化が少なく実用的であると言える。作動液体としては，基本的に電界の印加によって液体中に解離現象が生じる弱導電性液体を必要とし，フッ素系の冷媒（2,3-Dihydrodecafluoropenten : HFC43-10, hydro-fluoroether: HFE7600 等）が適する。

このメカニズムに基づいて，ポンピング圧力が大きくコンパクト化できる新しい電極系の開発に取り組み，平等電界（または対称電界）分布を形成する平行棒電極とメッシュ平板電極を組み合わせたコンパクトな電極構成を考案し，図 3.1-103 に示すような「平行棒電極とメッシュ平板電極の 9 対直列型 EHD ポンプ」を設計･試作した。



(a)　平行棒電極とメッシュ平板電極の 9 対直列型 EHD ポンプの設計

(b)　EHD ポンプのプロトタイプ

図 3.1-103　設計・試作した EHD ポンプ

＜理論的検討＞

計測した電極間の電位分布を用いて圧力ヘッドを理論的に導き，実験結果と比較し検討した。一般に，圧力ヘッドは(3.1)式と(3.2)式で表される。

$$p_a = \frac{\varepsilon}{2}\left(\zeta_a{}^2 - 1\right)E_{(a_a)}{}^2 \qquad (3.1\text{-}1)$$

$$p_c = \frac{\varepsilon}{2}\left(\zeta_c{}^2 - 1\right)E_{(a_c)}{}^2 \qquad (3.1\text{-}2)$$

ここで，p_a は高電圧側電極方向に働く圧力，p_c は接地電極側方向へ働く圧力をそれぞれ示す。ε は液体の誘電率，ζ は電界増大係数，E は平均電界を示す。本研究の電極系において，$E_{(aa)}=E_{(ac)}$，$\zeta_a > \zeta_c$ の関係が成り立つので，合成圧力は (3.3) 式となる。

$$p = p_a - p_c \approx \frac{\varepsilon}{2}\left(\zeta_a{}^2 - \zeta_c{}^2\right)E_{(a_a)}{}^2 \qquad (3.1\text{-}3)$$

また，各電極に働く力 f は，両電極において次のように解析される。平行棒電極の場合，電極表面の電界はほぼ放射状に形成される。電界の影響によって棒電極に働く力 f_R は（3.４）式のように示される。

$$f_R = 2\int_0^{\theta_0}\int_0^{L} p_R \cos\theta r_0 d\theta dz$$

$$= \varepsilon\left(\zeta_{aR}{}^2 - \zeta_{cR}{}^2\right)r_0 L \sin\theta_0 E_{R(a_a)}{}^2 \qquad (3.1\text{-}4)$$

ここで，r_0 は棒電極の半径を示し，L は棒電極の z 方向の長さを示す。

メッシュ平行板電極の場合，電極表面の電界はほぼ均一(平等電界)に形成されるので，メッシュ電極全面に働く力 f_P は （3.5）式のように示される。

$$f_P = p_P S_P = \frac{\varepsilon}{2}\left(\zeta_{aP}{}^2 - \zeta_{cP}{}^2\right)S_P E_{P(a_a)}{}^2 \qquad (3.1\text{-}5)$$

ここで，S_P はメッシュ電極の表面積を表す。

これらの力は液体の流れ方向と同様，高電圧側電極(正極性電極)方向に働く。その結果，電極表面に作用する平均圧力 P_{ave} は，f_R/S_R（または f_P/S_P）からそれぞれ求められる。2 種類の電極（平行棒電とメッシュ平行板電極）をそれぞれ 9 個直列に配置したときの圧力 P（または力 f ）は，各電極で発生した圧力 P（または力 f ）の合計となる。ここで示した圧力 P は，実験から得られた圧力ヘッド P_E を表す。

電極表面付近の電界増大係数 ζ は，測定電位分布からヘテロチャージ層の厚さ a の位置における電界強度とその点での理論値との比から求められる。ヘテロチャージ層の厚さ a は，単位時間にイオンが拡散するデバイ長のオーダと考えられ，（3.6）式のように表わされる。

$$a = \tau_e \mu E_0 \qquad (3.1\text{-}6)$$

ここで，τ_eは電荷の緩和時間を示す（作動液体 HFE43-10 では約 0.025[s]）。μはイオン移動度を表す。μの値はイオン種が明確ではないので明らかではないが，一般に液体中のイオン移動度は約 10^{-9}～10^{-7}[m^2/V・s]の範囲にある。本解析では，負イオンの移動度を$\mu_-=1\times10^{-8}$[m^2/V・s]，正イオンの移動度を$\mu_+=7\times10^{-9}$[m^2/V・s]と仮定した。

以上の解析より，圧力ヘッドを定量的に算出することができる。表 3.1-7 は，印加電圧 V_0=10[kV]と 15[kV]の場合において算出した EHD ポンピングに関する各種パラメータと圧力ヘッドの結果，および実験から得た圧力ヘッドを示す。理論値と実験値は大体一致する。

表 3.1-7　圧力ヘッドの理論値と実験値の比較

Single rod-to-rod electrode assembly (Theoretical)			Single meshy parallel plates electrode assembly (Theoretical)		
	V=10 kV	V=15 kV		V=10 kV	V=15 kV
a_a (mm)	0.41	0.61	a_a (mm)	0.42	0.63
a_c (mm)	0.29	0.43	a_c (mm)	0.29	0.44
ζ_{aR}	4.75	4.10	ζ_{aP}	4.93	4.00
ζ_{cR}	4.20	3.50	ζ_{cP}	4.36	3.38
$E_{R(a_a)}$ (kV/m)	1.63×10^6	2.45×10^6	$E_{P(a_a)}$ (kV/m)	1.67×10^6	2.51×10^6
f_R (N)	0.064	0.127	f_P (N)	0.143	0.278
p_{ave} (kPa)	0.339	0.673	p_{ave} (kPa)	0.601	1.168

Pressure generated by combination of both electrode assemblies				
	V=10 kV		V=15 kV	
	Theoretical P (kPa)	Experimental P_E (kPa)	Theoretical P (kPa)	Experimental P_E (kPa)
Single pair	0.940	0.97	1.841	1.93
Nine pairs	8.460	8.96	16.569	17.65

この EHD ポンプのポンピング能力は，以下に示される（作動液体として HFC43-10 を用いた場合）。

① ポンピング圧力 P_Eは印加電圧 V_0の二乗に比例して増加し，一定電圧の下で，圧力 P_Eは電極対数に比例して増加する。V_0=18[kV]において，P_Eは約 25.3[kPa]である。

③ 流量 Q は V_0に比例して増加する。また，一定電圧の下で，流量 Q は電極対数の増加に伴って増加するが，その増加率は電極対数と共に減少する。これは液体循環駆動時の流体摩擦損失による。V_0=18[kV]において，Q は約 5.3[l/min]である。

④ 伝導電流 I は V_0に比例して増加し，一定電圧の下で，電極対数の増加と共に一定割合で増加する。V_0 =18[kV]において，電流 I は約 410[μA]であり，消費電力 W は約 7.4[W]である。

⑤ V_0=18[kV]におけるポンプ効率は約 32[%]であり，同程度の容量を持つ電磁ポンプに匹敵する。

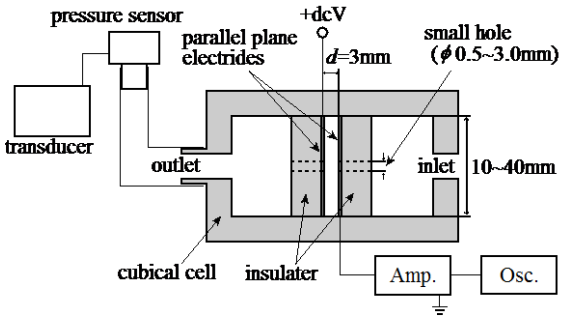
⑥ 一定電圧の下で発生する P_Eの安定性は非常に良く，V_0=15[kV]において P_E =18[kPa]

の値を 3 時間以上安定に維持できる。

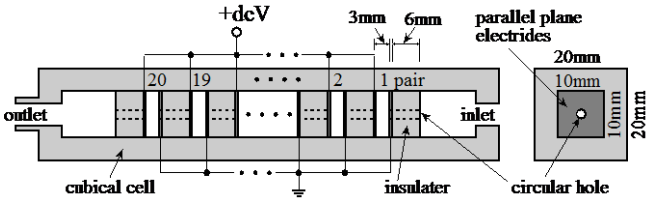
なお, 上記の理論的検討において, 正・負解離イオン移動度を適当な値に仮定すれば, 圧力ヘッドの理論結果は，実験結果とほぼ一致する。

(B)　圧力増強用 EHD ポンプの設計

平板電極の中心部に小穴を設けた平行平板対向電極系を 20 対直列に接続した EHD ポンプを新たに設計・試作した。この EHD ポンプは，伝導ポンピングのメカニズムで作動し，流量を得ることはできないが，大きな圧力ヘッド（ポンプ圧力）を得ることがで

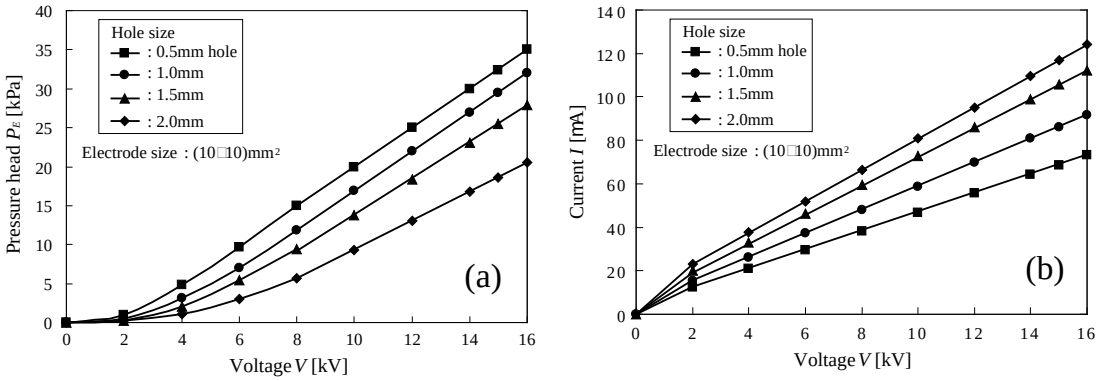


(a)　1 対の電極系からなる EHD ポンプ



(b)　20 対直列型 EHD ポンプ

図 3.1-104　設計・試作した圧力増強用 EHD ポンプ



(a)　圧力ヘッドと印加電圧の関係　　(b)　伝導電流と印加電圧の関係

図 3.1-105　20 対直列型 EHD ポンプの特性

きる。図 3.1-104 は，設計・試作した EHD ポンプの概略図を示す。また，図 3.1-105 は，20 対直列型 EHD ポンプの圧力特性と電流特性を示す。対直列型 EHD ポンプの圧力特性と電流特性を示す。

圧力増強用 EHD ポンプの特性は，以下のように要約される。

① 圧力ヘッドは，平板電極に開けた小穴の直径を小さくすれば増強する。また，平板電極の面積は圧力ヘッドに影響を与えない。これらは電極の小型化に有効である。

② 平行平板対向電極を直列接続することにより，圧力ヘッドの向上が期待できるが，直列接続による電極間の相互作用に圧力ヘッドのロスがあるため, 圧力ヘッドは電極対数に単に比例しない。

④ 作動液体に HFE7600 を用い，平板電極に開けた小穴の直径 0.5[mm]および電極サイズ(10×10)[mm^2]とした 1 対の平行平板対向電極系を 20 対直列接続した EHD ポンプにおいて，印加電圧 V_0=16[kV]で，定常状態の圧力ヘッド P_E は約 35[kPa]であり，その時の電流 I は約 70[μA]，消費電力 W は約 1.1[W]である。

⑦ 圧力ヘッドは，小穴直径 1.5[mm]以下の電極で，時間と共に徐々に上昇した後，僅かに減少して定常値となる。圧力ヘッドの変動は，電圧印加後 10～20 分の間で落ち着き，それ以降は定常値が維持される。また，電圧印加後の電流変動は，時間と共に徐々に減少し 40 分以降はほぼ一定値となる。

（C）液体循環型冷却装置の試作と熱源冷却性能評価

試作した前述の EHD ポンプ（平行棒電極とメッシュ平板電極の 9 対直列型 EHD ポンプ）を液体駆動源とした「液体循環型冷却システム」を設計・試作し，熱源の冷却性能について検討した。試作した液体循環型冷却システムは，基本的に図 3.1-106 に示すように，「EHD ポンプ導入液体容器」，「熱交換器（熱源）」，「サーモクーラー」で構成され，それぞれ絶縁チューブで接続されている。EHD ポンプで駆動した液体は，チュー

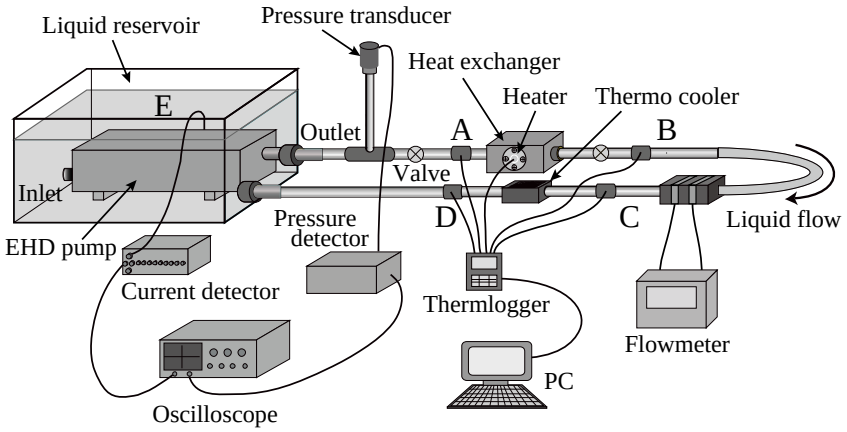
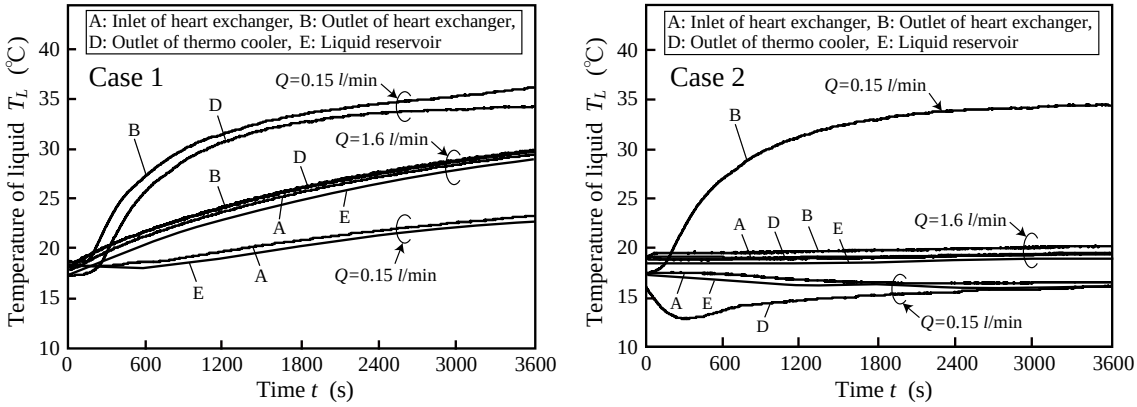


図 3.1-106　液体循環型冷却システムの概略



(a) サーモクーラーOFF　(Case 1)　　(b) サーモクーラーON　(Case 2)

図 3.1-107　サーモクーラーON と OFF における液体循環系各所の温度変化

ブを通して循環し，サーモクーラーを介して熱交換器内の熱源を冷却する仕組みになっており，循環系の各所；熱源部，熱交換器の入出力部，サーモクーラーの入出力部に熱電対を取り付けて温度の変化を調べた。また，同時に EHD ポンプ導入容器内の液体温度も調べた。なお、作動液体は，HFE7600 を用いた。

図 3.1-107 は，EHD ポンプによる熱源の冷却性能として，サーモクーラーの ON，OFF に対する液体循環系の各所温度変化を示す。以下に研究成果を要約する。

① EHD ポンプに流れる電流値は，液体の温度が変化しても変動することなく安定である。

② 熱源部の過熱直後 100 秒まで，熱源温度の急激な上昇が見られるが，それ以後の温度変化はほとんど無く飽和する。すなわち，熱源部の熱抑制効果は，熱源部を加熱し始めて約 100 秒後から現れる。

② EHD ポンプを駆動せずに，サーモクーラーを OFF，熱源のみを ON した場合，熱源温度は，3600 秒後に 91[℃]まで上昇した。EHD ポンプで液体を循環し，サーモクーラーを ON した場合，この温度上昇は大きく抑制され，熱源温度を 65[℃]に抑えることができた。両者間の温度差は 26[℃]であり，十分な冷却効果が得られる。

④ 熱交換器効率は，流量が小さくなると高くなる。また，サーモクーラーの ON 時における熱交換器効率は，サーモクーラーの OFF 時よりも高い。これは，サーモクーラーの起動によって，熱源の冷却効果が増すためである。

従来，EHD ポンプは電磁ポンプに比べ，騒音が少なく，小型化が可能であり構造が簡単でメンテナンスフリーであるという利点を持つ。加えて，本研究で用いた EHD ポンプは伝導電流が安定しており，消費電力も小さく，加熱部の十分な冷却効果が得られることを実験によって明らかにした。

＜平成25～26年度＞

伝導ポンピングの詳細なメカニズムを追及するためには，正・負解離イオンの移動度を正確に知る必要がある。これまでの研究において，静電界が平等（または対称）の電極形状でも，陽極と陰極付近の電界分布は，互いに非対象となる。これは，両電極付近に形成されるヘテロチャージ層のアンバランスを意味しており，これによって，一方向の流動（ポンピング）が生じる。このようなヘテロチャージ層のアンバランスは，正・負解離イオン移動度の相違よると推測される。本研究では，弱導電性液体中の正・負解離イオン移動度の計測法を検討し，電極系の設計・試作および移動度の明確化に取り組んだ。

イオン移動度の計測法は，基本的に飛行時間法（Time of flight method）に基づく。通常，この方法は，液体中に平行平板電極を配置し，低電界を印加した状態で，片方の電極から単一極性の荷電粒子（電子またはイオン）を注入し，その荷電粒子が電極間（ドリフト空間）を飛行する時間を測定して移動度 μ を算出する方法である。しかし，本研究の場合，電界の印加によって，正，負解離イオンが同時に発生し，互いに反対極性の電極方向へ移動するため，通常の電極構成では，正，負解離イオンの移動度を分離して計測することは不可能である。それゆえ，解離イオン移動度計測のための電極系を，図 3.1-108 に示すように，新たに設計・試作した。

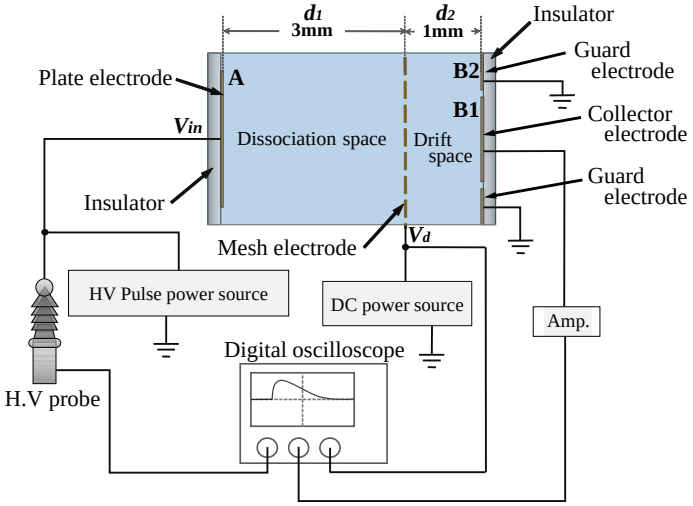


図 3.1-108　正，負解離イオン移動度計測に用いた電極系と実験系

電極系とイオン移動度計測法は，以下のように説明される。

（ｉ）解離イオンを発生させる領域とイオンのドリフト空間を分離し，ドリフト空間に侵入した正または負極性の解離イオンのみを飛行時間法で計測する。

（ⅱ）平行平板電極の間に 1 枚の金属メッシュを挿入する。一方の平板電極 A は高電圧電極であり，高電圧パルス（振幅：数[kV]，パルス幅：数十[ms]）が印加される。メ

ッシュ電極には，数[V]の直流電圧が印加される。従って，平板電極 A とメッシュ電極間が，解離イオン発生領域である。また，対抗した片方の平板電極 B1（コレクタ電極）は，増幅器を介して接地され，メッシュ電極とコレクタ電極間が，イオンドリフト空間になる。なお，B2 はガード電極である。

（iii）平板電極 A に高電圧パルスを印加すると，解離イオン発生領域に正，負解離イオンが同時に発生し，それらは互いに反対極性の電極方向へ移動する。その中で，メッシュ電極に到達した正または負極性の単極イオンは，メッシュ電極を通して流出すると同時に，一部はメッシュ孔を通過して，ドリフト空間に流入し，ドリフト電界によってコレクタ電極へドリフトする。このとき，コレクタ電極に流れる電流の時間変化（電流波形）をデジタルオシロスコープで計測し，イオン移動度 μ を次式から求める。

$$\mu=d_2^2/(V_d \cdot t_d)=d_2/(E_d \cdot t_d) \qquad (3.1\text{-}7)$$

ここで，t_d はイオンのドリフト時間，d_2 はギャップ長，V_d は印加電圧，E_d はドリフト電界を表す。

上記の計測法によって得られた正, 負解離イオン移動度に関して, 以下の結果を得た。測定に使用した作動液体は，HFC43-10 と HFE7600 であり，いずれも伝導ポンピングに基づく EHD 液体ポンピングに適する液体である。HFC43-10 中の正イオン移動度は「8.67×10^{-10}[m^2/Vs]」および負イオン移動度は「1.13×10^{-9}[m^2/Vs]」，並びに HFE7600 中の正イオン移動度は「8.83×10^{-10}[m^2/Vs]」 および負イオン移動度は「1.62×10^{-9}[m^2/Vs]」であった。イオン移動度のこれら値は, 流動の効果を含まない真の移動度と見なされる。

＜理論的検討＞

計測した正，負解離イオン移動度に関する理論的解析を行った。本研究で使用した作動液体（HFC43-10：化学式 $CH_3CHFCHFCF_2CF_3$）は，多くのフッ素（F）結合を含んでいる。また，液体の表面張力が小さいので O_2 分子を取り込み易い。これらの電気的負性原子は，電界の印加によって F^-，O_2^-などの負イオンを形成し易いため，正極性の電極付近に偏在する可能性がある。

従来，原子（または分子）がイオンを形成するメカニズムは様々であり，関与するパラメータ（例えば，イオン種による相違，電界依存性，母体となる液体分子の構成，不純物の種類など）も非常に多い。本研究では，液体中の電界による解離イオンを対象にしており，そこには必ず電気伝導が介在し，解離メカニズムとして知られている。これに関しては，Onsager の理論)が署名である。Onsager の理論はイオン対（A^+, B^-）の解離割合 α_d が電界強度 E の増加に伴って増加すると言う概念に基づき，次式のように表される。

$$\alpha_d=\alpha_0 F_{(E)} \qquad (3.1\text{-}8)$$

ここで，α_0 は温度のみに依存する初期の解離割合を示す。$F_{(E)}$は電界強度 E に依存する係数であり，強い電界中では次式の関係がある。

$$F_{(E)} \sim \exp\left\{\frac{2e(eE)^{\frac{1}{2}}}{(4\pi\varepsilon)^{\frac{1}{2}}kT}\right\} \tag{3.1-9}$$

ここで，e は電子の電荷量，ε は液体の誘電率，k はボルツマン定数，T は温度を表す。また，イオン A^+ と B^- の濃度 n は，平衡状態で次式の関係となる。

$$n = [A^+] = [B^-] = \left(\frac{\alpha_d}{\alpha_r}[A^+B^-]\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.1-10}$$

ここで，$[A^+, B^-]$はイオン対の濃度を表し，α_r は再結合係数を表す。また，平等電界において，解離イオンによる電流密度 J は次式で表される。

$$J = e(\mu_+ + \mu_-)nE = \sigma E \tag{3.1-11}$$

ここで，μ_+ と μ_- は，それぞれイオン A^+ と B^- の移動度，σ は導電率を表す。従って，σ は上記の関係を導入して，次式のように表される。

$$\sigma \sim e(\mu_+ + \mu_-)\left(\frac{\alpha_0}{\alpha_r}[A^+B^-]\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left\{\frac{2e^{\frac{3}{2}}E^{\frac{1}{2}}}{(4\pi\varepsilon)^{\frac{1}{2}}kT}\right\} \tag{3.1-12}$$

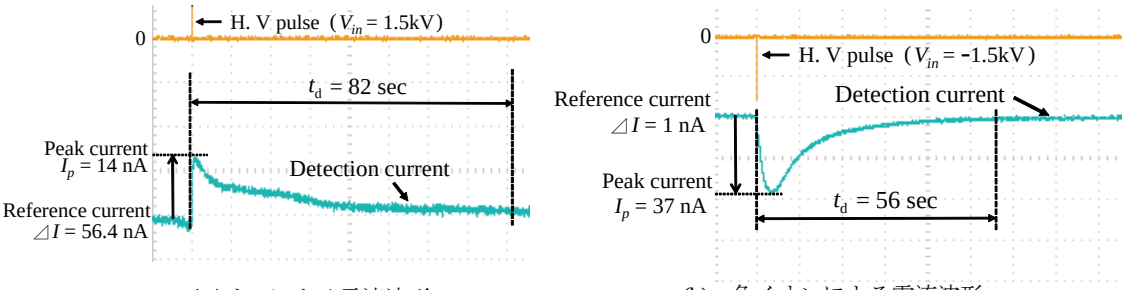
この式は，解離イオンによる導電率の電界依存性を示し，これが sub-ohmic な伝導特性になることを表している。これは，ハロゲン原子であるヨウ素の含有溶液などでは，電界と電流の関係が実験結果と良く合致するものの, 酸素による電流とは相関関係が得られないことが報告されている。すなわち，この理論は，イオン対の最も単純な形の解析であり, 三重イオン対などの複雑な液体分子構成や酸素などのようにイオンダイポールクラスタを形成し得る分子に対しては必ずしも合致しない。本研究で用いた HFC43-10 は，如何なる種類のイオン対を形成しているか，解離したフッ素イオンの結合状態は何か, およびこの液体に混入した酸素が持つクラスター分子の種類や個数などに関する詳細な情報は不明である。

一方，伝導ポンピングに基づいた圧力ヘッドの考察において，平成 23～24 年度の研究では，HFC43-10 中の解離した負イオン移動度は $\mu_-=1\times10^{-8}$[m^2/V・s] ，正イオン移動度は $\mu_+=7\times10^{-9}$ [m^2/V・s]と推測された。しかし，これらの値は，EHD ポンピングによる速い流速が存在する状態において導出されたものであるので, 真の移動度よりも相当大きな値，所謂，EHD 移動度に相当するものと考えられる。HFC43-10 は，フッ素(F)，炭素(C)，水素(H)，および酸素(O)の原子結合から構成されているので，分子の解離によって発生する正・負イオンは，それぞれ異なる大きなクラスター状態となって移動するものと考えられる。従って，真の解離イオン移動度（流動の影響を受けない値）は，上記の推測値よりかなり小さくなると考えられる。

＜平成26～27年度＞

昨年度までのイオン移動度計測法と理論的考察を踏まえて，正・負解離イオン移動度の更なる計測を行い，解離イオン移動度の明確化に取り組んだ。また，EHD ポンピングの実用化を目指す上で，更なるポンピング圧力の向上が望まれるので，電界の印加によって解離イオンが増加する作動液体を新規に選定し，伝導ポンピングに基づく EHD ポンピングの強化を図った。得られた成果を以下に要約する。

① HFC43-10 中において，図 3.1-109 に示すように，正イオンのドリフト時間は t_d =82 [sec]，負イオンのドリフト時間は t_d=56[sec]となる。従って，(3.7)式より，解離イオン移動度は，正イオン移動度 μ_+=8.13×10^{-10}[m^2/V・s]，および負イオン移動度 μ_- =1.19×10^{-9}[m^2/V・s)として得られる。負イオンのドリフト時間は，正イオンのそれより短い。これは，HFC43-10 の解離において，負イオン種のクラスターより正イオン種のクラスターの方が大きい（または分子量が大きい）ことを示し，移動度は正イオン種より負イオン種の方が大きくなる。また，高電圧パルス印加直後の電流ピーク値 I_P は，正イオンより負イオンの方が大きい。すなわち，高電圧パルスの印加によって解離した負イオン種は，正イオン種よりドリフト空間へ侵入する数が多い。



(a)　正イオンによる電流波形
(V_{in} =+1.5 kV, T_{in} =50 ms, E_d =+15 kV/m)

(b)　負イオンによる電流波形
(V_{in} =－1.5 kV, T_{in} =50 ms, E_d =－15 kV/m)

図 3.1-109　正，負解離イオンによる代表的な電流波

② HFC43-10 に 1-propanol または 2-propanol を 0.25[wt%]，0.50[wt%]，0.75[wt%]濃度でそれぞれ添加した供試作動液体を新規作製し，EHD ポンピング圧力を計測した。評価用の EHD ポンプは，図 3.1-104(a)に示した平行平板電極（中心の孔直径 1.2[mm]）である。用いた作動液体は，いずれも HFC43-10 単体中で発生する圧力ヘッド P_0 より高い値を示した。特に，1-propanol を HFC43-10 に 0.50[wt%]で混合した作動液体で最も高い圧力ヘッドが得られ，V=7[kV]において P_H≈ 0.85[kPa]であった。この圧力ヘッド値は，同一印加電圧における P_0 値の約 1.55 倍に相当する。なお，作製した作動液体は，いずれも負極性電極側から正極性電極側へ流動する。これより，液体中で発生した負の解離イオンが，液体流動を支配していることが示される。

［課題 3］　電気・磁気レオロジー（ER・MR）流体の実用的な開発とその工業的応用

ER・MR 材料は，電界・磁界の印加により見かけの粘度（または降伏応力）を可逆的に制御できる新機能性知的材料である。本研究では，動力を電気的にアクティブ制御するための要素として ER 流体の高性能化を進め，実用的システムへの応用に向けた特性評価を行う。また，磁気的なアクティブ制御要素として，環境に優しい MR 流体の高性能化を進める。特に，植物油ベースのキャリア流体（分散媒）をチキソトロピー化して粒子分散安定性を格段に向上させる手法の高度化に取り組む。

＜平成23～24年度＞

(A)　ER 流体の新規作成とその応用に関する研究

無機物単体（六角形平板の合成アルミナ結晶）からなる粒径 1[μm]程度の ER 粒子懸濁 ER 流体は，応力特性の安定性，耐久性，及び温度特性に優れることが，これまでの研究から明らかにされている。この ER 流体の ER 効果（降伏応力）は，最大 1[kPa]程度であるが，粘弾性体としての要素を持ち，1 自由度振動系の応力制御ができることから，振動無共振装置の開発が可能である。しかし，応用範囲の拡大には，更に大きな ER 効果の発現が望まれるため，ER 効果増強型の ER 粒子開発に取り組んだ。粒子が有する特性とその作製手法を検討した結果，粒子径をナノサイズにまで縮小し，粒子自体にアルキル基，ヒドロキシル基，カルボニル基などのラジカルや各種イオンを付与することにより，高いダイポールモーメントが発生して，粒子間の引力が増強できるという着想に至った。このような ER 粒子の作製には，通常の機械的作製法（例えば，ジェット気流攪拌法など）は適用できないため，化学的合成法を用いることにした。提案した方法はゾルーゲル法であり，酸化チタンベースの ER 粒子を合成して ER 効果を調べた。ER 粒子の試作例を表 3.1-8 に示す。

表 3.1-8　酸化チタンベース ER 粒子作成例

作製過程	内容
1	溶液 1：オルトチタン酸エチル($Ti(OC_2H_5)_4$) 60[m ℓ]にエタノール(C_2H_5OH) 420[mℓ]を加え，さらに塩酸を加えて，pH 値を pH2.42 に調整する。
2	溶液 2：純水(H_2O) 80[mℓ]にエタノール(C_2H_5OH) 300[mℓ]を加える。
3	溶液 3：純水(H_2O) 100[mℓ]に酢酸カルシウム一水和物($Ca(CH_3COO)_2H_2O$) を 38[g]を加える。
4	スターラーで攪拌しながら溶液 1 に溶液 2，溶液 3 の順で加える
5	混合した溶液がゲルになるまで攪拌する
6	作製したゲルを 1 週間熟成させる

7	ゲルを 50℃で真空熱乾燥し，白色の粒子を作製する
8	作製した粒子をろ過器でろ過して 2[ℓ]の純水(H_2O)で洗浄する。この行程を 7 回行なう
9	80[℃]で 24 時間，熱乾燥を行う
10	60[℃]で真空熱乾燥をした後，これを乳鉢で粉砕する

ER 流体は，動粘度 100[mm^2/s]のジメチルシリコーン油（DS 油）に，作製した ER 粒子を粒子重量濃度 30[wt%]で分散することにより作製した。また，界面活性剤（OS-100）を重量濃度 1[wt%]で添加した ER 流体も作製し，ER 効果の静的特性と動的特性をそれぞれ計測して評価し，以下の結果を得た。

① ER 粒子を作製するに当たり，酢酸カルシウム一水和物，および酢酸アンモニウムは添加物として有効である。添加物の混合により，ER 粒子に各種イオンが付与される。

② ゾルーゲル法を用いる場合，ゲルを 1 週間熟成させると，ゲルが収縮する。この熟成によって酸化チタンにイオンが強く付着すると考えられるので，ゲルの熟成と乾燥は十分行う必要がある。

③ ゲルの真空熱乾燥は乾燥時間の短縮に繋がる。しかし，高温ではゲルがセラミックス化するので，乾燥温度は十分配慮すべきである。（本研究では，50[℃]で真空熱乾燥した。）

④ ER 流体へ界面活性剤を添加すると，粒子表面に吸着層ができ，DS 油と粒子のぬれが良くなるため，分散効果やせん断応力の応答性が向上し，過電流防止効果が見込める。しかし，界面活性剤は，ER 粒子との相性もあるので，必ずしも分散効果や応答性の向上に繋がるとは限らない。

⑤ OS-100 を用いた ER 流体において，印加電界 3 [kV/mm]時の発生応力は，静的試験で 800 [Pa]～1000[Pa]程度，動的試験で 1200 [Pa]～1300[P]a 程度の ER 効果を発揮する。

(B) MR 流体の高性能化とその応用に関する研究

MR 流体の最大の欠点とされてきた粒子沈降（粒子分散安定性）の問題は，キャリア流体にキソトロピー性を付与することによって解決できた。流体のキソトロピー性は，キャリア流体にチキソトロピー添加剤であるスメクタイト（SAN）を混入することによって得ることができた。このチキソトロピー性流体に，鉄粉を任意の濃度で混入すれば MR 流体が完成する。この MR 流体を「チキソトロピー性 MR 流体」と命名した。本研究で作成したチキソトロピー性 MR 流体は，キャリア流体として菜種エステル油を用い，これにスメクタイト（SAN316）を混入し，十分に撹拌してチキソトロピー性流体を作製した後，平均粒径 6.5[μm] の CS 鉄粉（BASF 製）を 81[wt%]の濃度で混入して撹拌

することにより得た。この MR 流体は，粒子分散安定性および再分散安定性に極めて優れ，図 3.1-110 に示す MR 流体応力測定装置で伝達トルクの値を測定した結果，50～60 [N・m]の最大伝達トルクを発揮し，磁界強度によってアクティブ制御できる。図 3.1-111 は，伝達トルクと磁界強度の関係を示す。達成した伝達トルク値は，実用レベルに十分達していると言える。なお，MR 流体応力測定装置は，本研究において設計・試作した装置であり，3.75[kW]（5 馬力）のトラクションドライブモータに MR クラッチを連結した構造で，最大測定応力は 95[N・m]である。

図 3.1-110　MR 流体応力測定装置

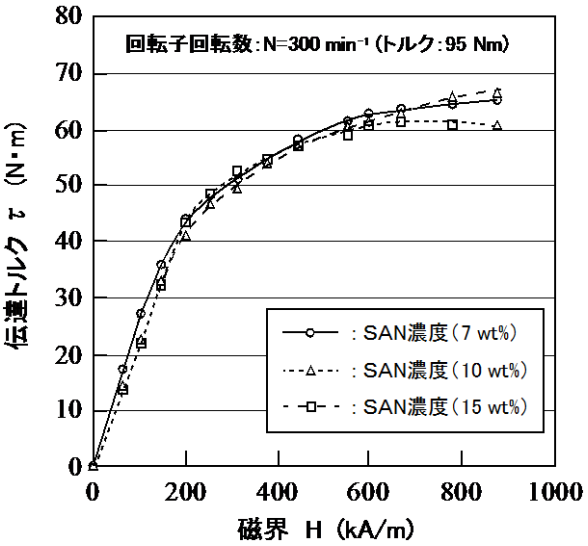


図 3.1-111　伝達トルクと磁界強度の関係（平均粒径 6.5[μm] の CS 鉄粉，粒子濃度：81[wt%]）

＜平成25～26年度＞

（A） ER 流体の新規作成とその応用に関する研究

昨年度までに作製した ER 粒子を更に改良する目的で，酢酸ナトリウム三水和物を追加して ER 粒子の作製を試みた。その結果，酢酸カルシウム一水和物と酢酸ナトリウム三水和物の組み合わせは，ER 流体の ER 効果向上に有効であると考えられるが，次の問題が提起された。すなわち，粒子を粉砕する際、乳鉢を使用しているが，この方法では粒子の不均一化が問題となる。また，十分に乾燥していない粒子を粉砕しても良質の粒子が得られないことが分かった。更に、粉砕法では，粒子径をナノサイズまで縮小することが出来ないので改善を要する。

一方，関連企業との共同研究として，従来の無機・有機複合 ER 粒子（以前に開発した ER 粒子：粒径 10[μm]程度）を用い，ER 流体をゲル化した機能性エラストマー（ERG）を開発し，更に ERG の改良素材（EAM: Electro Attractive Material），すなわち，ERF の

分散質を樹脂に分散させ，シート化した機能性素材の開発を進めた。この素材を平板電極にはさみ，電界を印加すると ER 効果が発揮することが明らかになった。これを利用したブレーキの開発に着手した。

(B)　MR 流体の高性能化とその応用に関する研究

チキソトロピー性 MR 流体に関しては, 環境に優しい MR 流体として実用化レベルに漕ぎ付けることができた。次の段階として，創製した MR 流体(粒子濃度：81[wt%])を利用した応用装置の検討を開始した。初めに MR 流体の基本的な応用装置の一つとして, 小型の MR クラッチを取り上げ，その設計と試作に取り組んだ。第 1 段階で試作した MR クラッチでは，伝達トルクの値がかなり小さく，MR 流体に加わる磁界不足のため未完成であったので，第 2 段階では伝達トルクの向上を図り，部分的な改良を行った。すなわち，励磁コイルの取り付け部分を絶縁性の素材（アクリル樹脂）に変更し，より強い磁界が MR 流体に加わる構造にした。図 3.1-112 は，第 2 段階で設計・試作した MR クラッチの構造を示し，図 3.1-113 は，伝達トルクと励磁電流の関係を示す。第 2

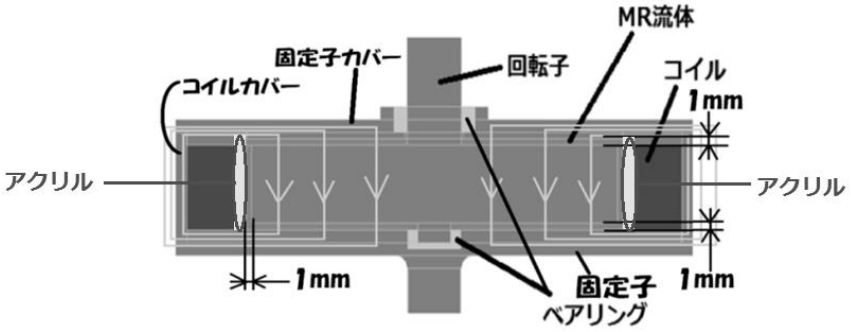


図 3.1-112　　MR クラッチの構造(概略図)

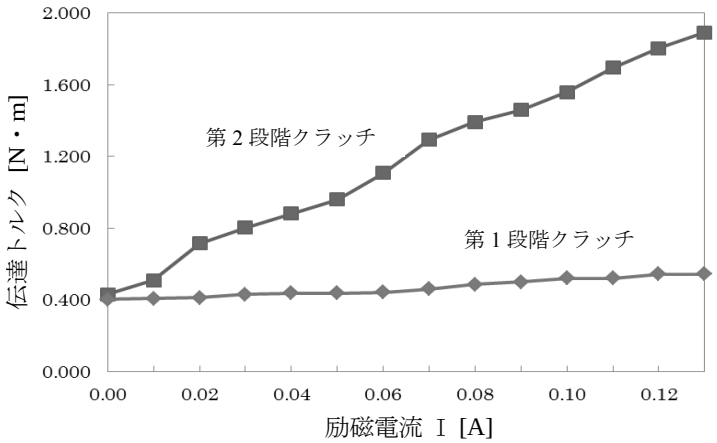


図 3.1-113　伝達トルクと励磁電流の関係
（駆動用電動機回転数:100[rpm]，励磁コイル巻き数：300 回）

段階の MR クラッチは，第 1 段階のそれより伝達トルクが高く改良はされたが，伝達トルクの値は MR クラッチの実用的性能から見てまだ小さいので，更なる改善が必要であると結論された。

＜平成26～27年度＞

(A)　ER 流体の新規作成とその応用に関する研究

課題として挙げられたナノ ER 粒子の分散性を向上する目的で，昨年度までと同様の手法で得た ER 粒子に界面活性剤（オレイン酸または OS-100）を添加した ER 流体を作製し，その応力特性を調べた。その結果として，以下のような問題点が新たに判明した。

界面活性剤を添加して作製した ER 流体の粒子分散性は向上する。しかし，この ER 流体は，過電流が流れて所定の電界を得るための電圧が印加できず，ER 効果は界面活性剤を用いない場合よりむしろ低下した。界面活性剤は粒子にイオンを付与することにより，粒子同士の凝集を防いでいることから，粒子分散安定性は向上するが，イオンの付与により ER 流体の電気絶縁性が低下し，電界の印加によって過電流（イオン電流）が流れ，ER 効果の向上が阻害されるものと考察された。この結果から，ER 流体に界面活性剤を用いても，伝達応力の向上には繋がらないと結論された。今後は，従来の ER 粒子（有機・無機複合粒子（粒径約 10 μm）または板状アルミナ粒子（粒径約 2 μm 以下）など）とゾルーゲル法によって得た ER 粒子の複合系からなる ER 流体について，ER 効果の向上を図ることを提案し，更なる検討を進める予定である。

一方，関連企業との共同研究によって，ERG の改良素材（EAM: Electro Attractive Material）を利用したブレーキが開発された。その原理は，多段ディスクブレーキの固定側ディスクに EAM を張り付け，回転側ディスクとの間に EAM を挟み，電圧の印加によりブレーキ力を発生する。発生する力は，印加電圧で制御できるが，内蔵した遊星歯車機構のギヤ比により大きな力に変換できる。図 3.1-114 は，開発された EAM ブレーキのプロトタイプとその仕様を示す。

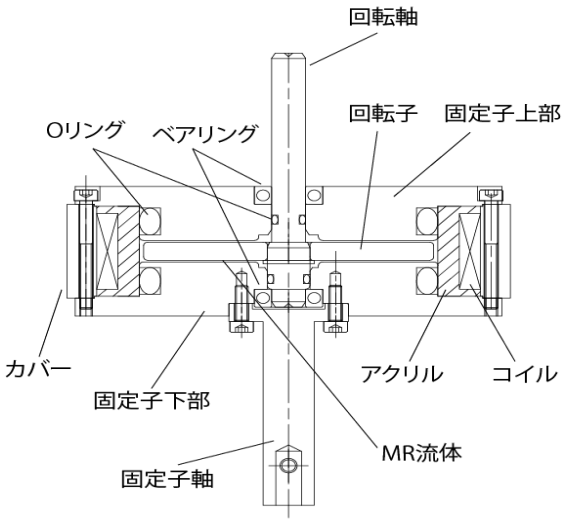
[仕様]
直径: 80[mm]、高さ: 30[mm]
発生ブレーキトルク:40[N・m]
消費電力: 4[W]（最大トルク発生時）

図 3.1-114　EAM ブレーキのプロトタイ

ER 流体の改良素材を開発し，これを用いた実用的装置の創製は，ER 流体の分野においてこれまでに類を見ない成果と言える。開発された EAM ブレーキは，今後，様々な制御分野（例えば、ロボット工学分野、いりょう・福祉分野など）への利用が大いに期待される。

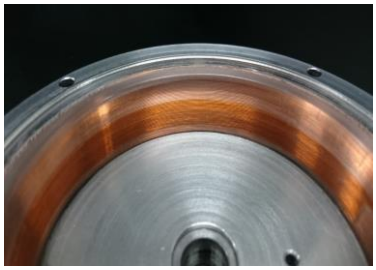
(B)　MR 流体の高性能化とその応用に関する研究

これまでに開発したチキソトロピー性 MR 流体は，既に特許も取得し，実用化レベルに達していると認められたので，平成 27 年初頭から実用 MR 流体として，共同研究企業（かんでんエンジニアリング（株））から販売されるに至った。



(a) 断面図

(b) 内部構造



(c) 励磁巻線

図 3.1-115　MR クラッチの断面図，内部構造，および励磁巻線

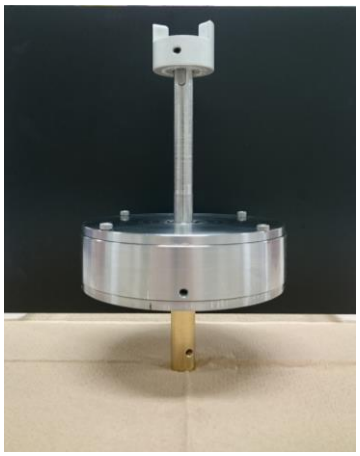
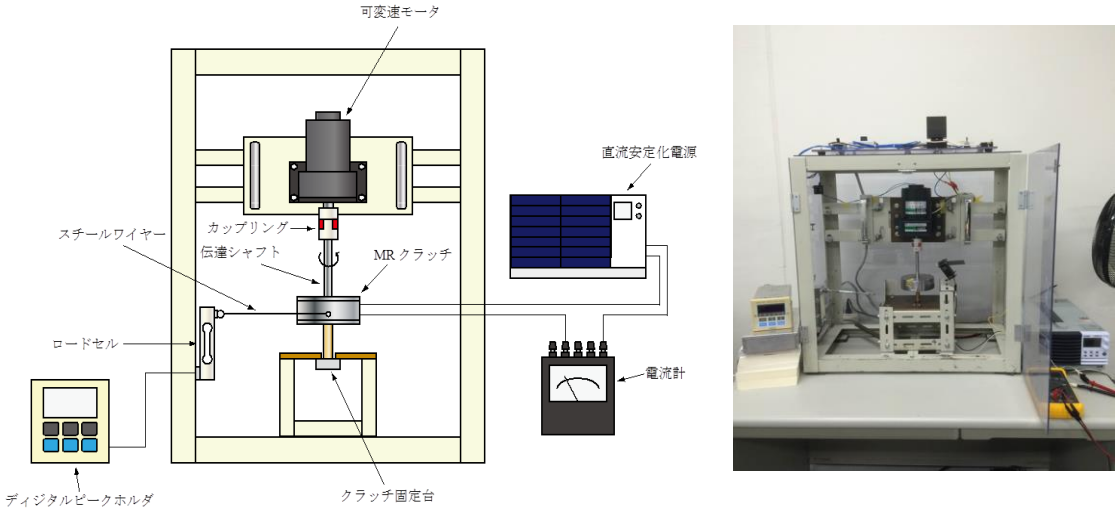


図 3.1-116　MR クラッチの外観

一方，創製した MR 流体の応用装置として，昨年度までに設計・試作した小型の MR クラッチは，まだ完成の域に達していないので，コイルの太さと許容電流値，固定子・回転子の形状と構造などを再度検討し直し，第 3 段階 MR クラッチとして新たに設計・試作した。図 3.1-115 は，MR クラッチの断面図，内部構造，および励磁巻線を示し，図 3.1-116 は，試作した MR クラッチの外観を示す。

内部構造は，固定子と回転子からなり，固定子の周囲には磁束を発生させるための励磁コイルが巻かれている。コイルは，直径 0.29[mm]のポリエステル被膜 PEW（Polyester Enamel Wire）線であり，巻き数は第 2 段階 MR クラッチとの特性比較のため 300 回に統一した。回転子の厚さは 4[mm]である（第 2 段階 MR クラッチの 1/3）。また，磁界



(a)　伝達応力測定装置の概略図　　(b)　伝達応力測定装置の外

図 31-117　伝達応力測定装置の概略図と外観

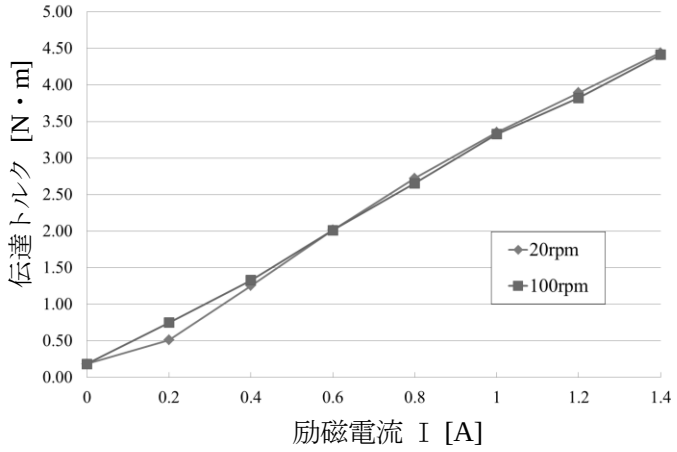


図3.1-118　励磁電流と伝達トルクの代表的な関係
（駆動用電動機回転数: 20[rpm], 100[rpm], ）

発生用の励磁巻線を規則的に巻くことによって漏れ磁束を極力低減し，MR 流体に作用する磁束密度の有効性を向上させた。回転子の直径は *D*=68[mm]，固定子と回転子の間のギャップ長は *d*=2[mm]である。固定子側には 1.5[mm]の溝を設け，O リングを取り付けて，MR 流体の漏れを完全に防止した。磁路を形成する部分の素材はすべて，透磁率が高く磁気損失の少ない S45C（機械構造用炭素鋼：炭素鋼含有 0.45[%]）を用いた。
MR 効果が及ぶギャップ内の磁束密度は，励磁電流 0～1.4[A]でほぼ線形的に 0～190[mT]の範囲で変化する。なお，クラッチの伝達応力を計測する際に用いた回転子駆動用の電動機（100[V]，40[W]，10.0[μF]コンデンサ駆動）は，減速ギアと併用して駆動力を増すようにした。図 3.1-117 は，伝達応力測定装置の概略図と外観を示し，図 3.1-118 は，励磁電流と伝達トルクの代表的な関係を示す。第 3 段階 MR クラッチでは，励磁電流 0～1.4[A]の範囲で，伝達トルク 0～4.5[N・m]の制御ができる。また，伝達トルクは，駆動用電動機回転数に殆ど影響しない。このクラッチは，励磁コイルの巻き数を変化できるように設計したので，今後，巻き数を変化して磁界強度と伝達トルクの関係を明確にする。

＜研究課題[Ｉ]の研究成果リスト(＊：当該研究課題と直接的に関連した成果)

○雑誌論文

*1. 襲雷時に発生する架空絶縁電線表面の正極性沿面放電現象：西 敏行，花岡良一，Fri Murdiya，宮城克徳，電学論 B, (査読有), Vol. 136, No. 4, pp. 439-446 (2016)

*2. Creeping Discharge Developing on Vegetable-Based Oil/Pressboard Interface under AC Voltage: F. Murdiya, R. Hanaoka, H. Akiyama, K. Miyagi, K. Takamoto, T Kano, IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., (査読有), Vol. 21, No. 5, pp. 2102-2110, (2014)

*3. 湿潤状態における架空絶縁電線表面の負極性沿面放電現象: 西 敏行, 花岡良一, F. Murdiya, 宮城克徳，電学論 B，(査読有), Vol. 134, No. 5, pp. 419-426, (2014)

*4. Progresses of Fundamental Research and Application of Atmospheric Pressure Townsend Discharge: N. Osawa, Y. Yoshioka, J. of Adv. Oxid. Technol., (査読有), Vol. 17, No. 2, pp. 217-229 (2014)

*5. Influence of Measurement Parameters on Frequency Response Analysis Diagnosis of Oil-Immersed Transformer, T. Sano, K. Miyagi, Elect. Eng. in Japan, (査読有), Vol. 186, No. 1, pp. 18-25, (2014)

*6. 大気圧空気や酸素中で発生する均一バリア放電によるオゾン生成: 大澤直樹，守本祐生，吉岡芳夫，花岡良一，電学論 A, (査読有), Vol. 134, No. 2, pp. 98-104 (2014)

*7. Thermal aging characteristics of insulation paper in mineral oil in overloaded operation of transformers, K. Miyagi, E. Oe, N. Yamagata, H. Miyahara, Elect. Eng. in Japan, (査読有), Vol. 182, No. 2, pp. 1-8 (2013)

*8. Properties of Creeping Streamer Progressed in Dielectric Barrier with Narrow Gap in PFAE Oil: F. Murdiya, R. Hanaoka, R. Hashi, K. Miyagi, H. Koide, J. of Energy and Power Eng., (査読有), Vol. 7, pp. 1257-1264 (2013)

*9. 架空絶縁電線表面の沿面放電と誘導雷サージ波頭長の関係: 西 敏行，花岡良一，高田新三，電学論 B，(査読有), Vol. 133，No. 3，pp.277-285 (2013)

*10. Generation of high pressure homogeneous barrier discharge in air: N. Osawa, A. Takashi, Y. Yoshioka, R. Hanaoka, Eur. Phys. J. Appl. Phys., (査読有) , Vol. 61, No. 2, 24317 (2013)

*11. Investigation on Reactor Configuration of Non Thermal Plasma Catalytic Hybrid Method for NOx Removal of Diesel Engine Exhaust: N. Osawa, T. Suetomi, Y. Hafuka, K. Tsuha, Y. Yoshioka, R. Hanaoka, Int. J. Plasma Environ. Sci. & Technol., (査読有) , Vol. 6, No. 2, pp.119-124 (2012)

*12. Generation of uniform discharge by dielectric barrier discharge device in atmospheric-pressure air: N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka, Y. Mochizuki, K. Kobayashi, Y, Yamada, Elect. Eng. in Jpn., (査読有), Vol. 180, No. 4, pp.1– 9 (2012)

*13. Generation of Low-Frequency Homogeneous Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure: N. Osawa, Y. Yoshioka, IEEE Trans. on Plasma Sci., (査読有), Vol. 40, No. 1, pp.2–8 (2012)

*14. PFAE 油中の誘電体板隙間を進展する沿面放電の特性: 碓氷拓郎，花岡良一，高田新三，金丸保典，小出英延，仲神芳武，電学論 A, (査読有), Vol.131, No.10, pp. 817-823 (2011)

*15. EHD による液体引出し現象の動的挙動: 花岡良一，水野孝宣，高田新三，深見 正，安齋秀伸，電学論 A, (査読有), Vol.131, No.10, pp. 824-831 (2011)

*16. 架空絶縁電線表面の負極性沿面放電に現れる進展様相の推移: 西 敏行，花岡良一，高田新三，電学論 B, (査読有), Vol.131, No.9, pp. 786-792 (2011)

*17. 液体誘電体中の放電現象、EHD、ER・MR 応用技術調査専門委員会レポート: 花岡良一，電学論 A, (査読無), Vol.131, No.1, pp. 57 (2011)

*18. Effect of Barrier Discharge on Homogeneous Dispersion of Carbon Nanotubes in Octyilalcohol: Y.

Ishibashi, R. Hanaoka, N. Osawa, S. Takata, Y. Kanamaru, H. Anzai, Int. J. of Plasma Environ. Sci. & Technol., (査読有), Vol.15, No.1, pp. 62-67 (2011)

*19. 油入変圧器の周波数応答分析診断に関する測定パラメータの影響: 佐野貴弘, 宮城克徳, 電学論 A, (査読有), Vol.131, No.10, pp.811-816 (2011)

*20. FRA 診断に及ぼす測定パラメータの影響 －変圧器診断のための New Technology－: 宮城克徳, 電気評論, (査読有), Vol.96, No.8, pp.75-79 (2011)

*21. 変圧器過負荷運転時の油中劣化指標成分に関する研究: 宮原秀幸, 宮城克徳, 大江悦男, AE パワーレビュー, (査読無), Vol.4, pp.17-20 (2011)

*22. 変圧器過負荷を考慮した絶縁紙の油中加熱劣化特性の検討: 宮城克徳, 大江悦男, 山形直樹, 宮原秀幸, 電学論 A, (査読有), Vol.131, No.6, pp.421-426 (2011)

*23. Evaluation of Aging for Thermally Upgraded Paper in Mineral Oil: K. Miyagi, E. Oe, N. Yamagata, J. Int. Council on Elect. Eng., (査読有), Vol.1, No.2, pp.181-187 (2011)

*24. Comparison of Ozone Generation Characteristics by Filamentary Discharge Mode and Townsend Discharge Mode of Dielectric Barrier Discharge in Oxygen: Y. Nakai, A. Takashi, N. Osawa, Y. Yoshioka, R, Hanaoka, J. Chem. Chem. Eng., (査読有), Vol. 5, No. 12, pp.1107–1111 (2011)

*25. Comparison of the ozone generation efficiency by two different discharge modes of dielectric barrier discharge: N. Osawa, H. Kaga, Y. Fukuda, S. Harada, Y. Yoshioka, R. Hanaoka, Eur. Phys. J. Appl. Phys., (査読有), Vol. 55, No. 1, 13802 (2011)

○学会発表

＜国際会議プロシーディング＞

*1. M. Tanaka, N. Osawa, T. Kitagawa, T. Okumura, M. Onodera, T. Nagano, M. Orito, M. Kanesaki, H. Saito, S. Osawa: Trial to Improve Interfacial Bonding in Carbon Fiber Reinforced Polypropylene Using Atmospheric Pressure Plasma Treatment, 14th Jpn. Int. SAMPE Symp. & Expo. (JISSE), Ishikawa, Japan (2015)

*2. M. Tanaka, N. Osawa, T. Kitagawa, M. Kanesaki, H. Saito, S. Osawa: Improvement in interfacial bonding between carbon fibers and polypropylene matrix by atmospheric pressure plasma treatment, 14th Jpn.– Eur. Symp. on Composite Materials, Ishikawa, Japan (2015)

*3. N. Osawa, T. Tsuji, Y. Yoshioka: (Invited) Decrease of By-Products Generation in Air-fed Ozone Generator by Homogeneous Dielectric Barrier Discharge, 3rd Int. Conf. on Photocatalytic and Adv. Oxid. Technologies for Treatment of Water, Air, Soil and Surfaces, Gdansk, Poland p. 24, (2015)

*4. K. Takamoto, S. Nishikawa, Y. Oura, K. Miyagi, R. Hanaoka: Beneficial Effect of Natural Ester Fluids for Lifetime Extension of Transformers, 19th Int. Symp. on High Voltage Eng., Pilsen, Czech Republic No. 181 (2015)

*5. T. Fujisawa, F. Murdiya, R. Hanaoka, K. Miyagi, K. Takamoto, S. Nishikawa, H. Kaneda: Creeping Discharge Characteristics over Aged Rapeseed and Mineral Oils / Pressboard Interface under AC Divergent Field, 19th Int. Symp. on High Voltage Eng., Pilsen, Czech Republic, No. 191 (2015)

*6. H. Sawazaki, Y. Hirano, R. Hanaoka, K. Miyagi, N. Osawa, Y. Kanamaru, H. Anzai: Electrical Dispersion of CNTs in Organic Solvent: Combination Effect of Barrier Discharge and Electric Field, 19th Int. Symp. on High Voltage Eng., Pilsen, Czech Republic, No. 196 (2015)

7. D. Misaki, S. Kamimura, Y. Okada, N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka, H Yanase, H. Hatakenaka, K. Okamoto: Effect of The Thickness and The Relative Permittivity of Epoxy Resin Coating on The Hemispherical Tip Electrode to The First Flashover Voltage in Pressurized Dry Air, 19th Int. Symp.

on High Voltage Eng., Pilsen, Czech Republic, No. 234 (2015)

*8. N. Osawa, Y. Yoshioka: Ozone and by-products generation characteristics by novel air-fed ozone generator which combines homogeneous discharge and filamentary discharge, 22nd Int. Symp. on Plasma Chem., Antwerp, Belgium (2015)

*9. N. Osawa, Y. Yoshioka: (Invited) NOx Removal from Diesel Engine Exhaust Gases by Non Thermal Plasma Catalytic Method, Int. Conf. Adv. Oxid. Technol. for Treatment of Water, Air and Soil, San Diego, USA, p. 59 (2014)

*10. N. Osawa, Y. Yoshioka: Ozone Generation Performance by Dielectric Barrier Discharge Type Air-fed Ozone Generator Which Combines Homogeneous Discharge and Filamentary Discharge, 14th Int. Symp. High Press. Low Temp. Plasma Chem. (HAKONE XIV), Oral-04-21, Zinnowitz, Germany (2014)

*11. Y. Yoshioka, N. Osawa: Investigation of Asymmetrical Barrier Discharge Phenomena, 14th Int. Symp. High Press. Low Temp. Plasma Chem. (HAKONE XIV), Oral-01-03, Zinnowitz, Germany (2014)

*12. K. Itoh, T. Yamazaki, R. Hanaoka, Y. Katagiri, K. Miyagi, Y. Kanamaru, K. Takamoto, T. Kano: Attempts to Measure Ion Mobilities in EHD Liquids by the Time-of-Flight Method, 18th Int. Conf. Dielectrics Liquid, Bled, Slovenia, pp. 1-4, (2014)

*13. T. Kitagawa, T. Kakami, N. Osawa, M. Tanaka, H. Saito, Y. Yoshioka: Investigation on Endurance of Hydrophilic Property of Carbon Fibers Treated by Air Dielectric Barrier Discharge, 41st IEEE Int. Conf. Plasma Sci. (ICOPS), 3P-78, Washington D.C., USA (2014)

*14. T. Tsuji, Y. Morimoto, D. Funaki, N. Osawa, Y. Yoshioka: Decrease in Dinitrogen Monoxide (N_2O) Generation of Air-fed Ozone Generator Using Atmospheric Pressure Townsend Discharge, 41st IEEE Int. Conf. Plasma Sci. (ICOPS), 3P-70, Washington D.C., USA (2014)

*15. Y. Yoshioka, N. Osawa: Transient Phenomena Observed before an Atmospheric Pressure Townsend Discharge Is Established, 8th Asia-Pacific Int. Sympo. on the Basics and Appl. of Plasma Technol. (APSPT-8), Hsinchu, Taiwan, p.101 (2013)

*16. N. Osawa, Y. Yoshioka: (Invited) Progresses of Fundamental Research and Application of Atmospheric Pressure Townsend Discharge, 19th Int. Conf. on Advanced oxidation Technologies for Treatment of Water, Air and Soil (AOTs-19), San Diego, USA, pp. 28-29 (2013)

*17. F. Murdiya, R. Hanaoka, R. Hashi, K. Miyagi, K. Takamoto, H. Kaneda, S. Nishikawa, H. Koide: AC Creeping Discharge over Pressboard Surface in Vegetable-based Oils, Int. Symp. on High Voltage Eng. (ISH 2013), Seoul, Korea, No. OE6-01, pp. 1314-1319 (2013)

*18. S. Hashimoto, R. Hanaoka, A. Kono, K. Miyagi, N. Osawa, Y. Kanamaru, H. Anzai: Ingredient of CNTs Dispersed by Barrier Discharge in Organic Solvents, Int. Symp. on High Voltage Eng. (ISH 2013), Seoul, Korea, No. PE-08, pp. 1477-1482 (2013)

*19. K. Takamoto, Y. Oura, R. Hanaoka, K. Miyagi: Precision Improvement of Dissolved Gas Analysis in Oil for Transformer by Stripping Extraction Method, Int. Symp. on High Voltage Eng. (ISH 2013), Seoul, Korea, No. OF1-01, pp. 1732-1737 (2013)

*20. N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: Investigation of ozone yield of air fed ozonizer by high pressure homogeneous dielectric barrier discharge, 31st Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG-2013), Granada, Spain (2013)

*21. T. Kabeya, N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: Instability of Homogeneous Barrier Discharge in Humid Air, N_2 and O_2 at Atmospheric Pressure, IEEE Pulse Power & Plasma Sci. Conf. (PPPS-2013), San Francisco, USA, P1-41, p.1 (2013)

*22. Y. Morimoto, N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: Reduction of Generation of By-products by Homogeneous Barrier Discharge Type Air Fed Ozonizer, IEEE Pulse Power & Plasma Sci. Conf. (PPPS-2013), San Francisco, USA, P1-42, p.1 (2013)

*23. S. Nagahama, Y. Nakai, N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: Surface Potential Measurement of Two Kinds of Alumina Barriers Which Generate Different Barrier Discharge Modes, IEEE Pulse Power & Plasma Sci. Conf. (PPPS-2013), San Francisco, USA, P1-43, p.1 (2013)

24. N. Osawa, K. Sato: Implementation of self-motivated coursework of electric power generation engineering, 9th Int. CDIO Conf., Massachusetts, USA, 166 (2013)

*25. R. Hashi, T. Usui, R. Hanaoka, K. Miyagi, F. Murdiya, H. Koide: Properties of Creeping Streamer Progressed Dielectric Barrier with Narrow Gap in PFAE Oil, Int. Conf. on Elect. Eng. (ICEE2012), Kanazawa, Japan, No. P-FS2-7, pp. 1524-1529 (2012)

*26. H. Akiyama, R. Hanaoka, S. Takata, Y. Kanamaru, T. Nishi: Properties of Negative Creeping Discharge along Aerial Insulated Wire under Wet Condition, Int. Conf. on Elect. Eng. (ICEE2012), Kanazawa, Japan, No. P-FS2-8, pp. 1530-1534 (2012)

*27. R. Hanaoka, Y. Toda, Y. Kanamaru, N. Osawa, T. Fukami, H. Anzai: Cooling Effect of Heating Element Based on EHD Pump-Drive Liquid Circulation, Int. Symp. on Electrohydrodynamics (ISEHD2012), Gdańsk, Poland, CD-ROM (2012)

*28. T. Sano, K. Miyagi: Influence Factors on FRA Waveforms, Proc. of the 2012 Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD2012), Bali, Indonesia, pp. 601-604 (2012)

*29. Y. Yoshioka and N. Osawa: Unusual ozone formation characteristics by an atmospheric pressure Townsend discharge using an alumina barrier discharge device, 18th Int. Conf. Advanced Oxidation Technol. For Treatment of Water, Air and Soil (AOTs-18), Invited, 128, Florida, USA, p.97 (2012)

*30. N. Osawa, A. Takashi, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: Generation of high pressure homogeneous dielectric barrier discharge in air, 13th Int. Symp. on high pressure low temperature plasma chem. (HAKONE XIII), Kazimierz Dolny, Poland, pp.94-98 (2012)

*31. Y. Yoshioka, N. Osawa: Investigation of a homogeneous discharge generated in a barrier discharge device using alumina, 13th Int. Symp. on high pressure low temperature plasma chem. (HAKONE XIII), Kazimierz Dolny, Poland, pp.318-322 (2012)

*32. N. Osawa, T. Suetomi, Y. Hafuka, K. Tsuha, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: Investigation on Reactor Configuration of Non Thermal Plasma Catalytic Hybrid Method for NOx Removal of Diesel Engine Exhaust, 8th Int. Symp. Non-Thermal / Thermal Plasma Pollution Control Technol. & Sustainable Energy (ISNTP-8), Camaret-sur-mer, France (2012)

*33. A. Takashi, N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: Analysis of Ozone Yield of Two Ozonizers with Different Gap Spacing, 8th Int. Symp. Non-Thermal / Thermal Plasma Pollution Control Technol. & Sustainable Energy (ISNTP-8), Camaret-sur-mer, France (2012)

*34. Y. Yoshioka, N. Osawa: Discussion of discharge current of barrier discharge, 7th Asia-Pacific Int. Symp. Basics and Appl. of Plasma Technol. (APSPT-7), Taipei, Taiwan (2012)

*35. Y. Ishibashi, R. Hanaoka, S. Takata, Y. Kanamaru, H. Anzai: Properties of Epoxy Resin Composit Containing CNTs Dispersed by Barrier Discharge, Proc. of IEEE Int. Symp. on Electrets (ISE14), Montpellier, France, pp. 163-164 (2011)

*36. R. Hanaoka, K. Kuge, S. Takata, Y. Kanamaru, T. Fukami: Properties of Pressure Reinforced Compact EHD Pump, Proc. of IEEE Int. Symp. on Electrets (ISE14), Montpellier, France, pp. 235-236 (2011)

*37. T. Kobayashi, Y. Mametani, T. Sano, Y. Ogawa, K. Miyagi, Y. Shirasaka: Using GDA and FRA to Develop New Technology for the Diagnosis of Areas Subject to Abnormal Overheating on Actual Transformers, CIGRE SC A2 & D1 Joint Colloquium 2011, PS1-O-19, Kyoto, Japan (2011)

*38. K. Miyagi, K. Wakimoto: Global Trend on New Insulating Liquids for Electrical Insulation Properties, Proc. of 2011 Int. Symp. on Elect. Insulating Materials (ISEIM2011), Kyoto, Japan, pp.440-443 (2011)

*39. K. Miyagi, T. Wakimoto: Evaluation of humidity correction factor for DC disruptive discharge voltages, Proc. 17th Int. Symp. on High Voltage Eng. (ISH2011), Hannover, Germany, C-029 (2011)

*40. T. Sano, K. Miyagi: Evaluation of measurement parameters on FRA characteristics for Transformers, Proc. 17th Int. Symp. on High Voltage Eng. (ISH2011), Hannover, Germany, F-038 (2011)

*41. T. Suetomi, Y. Morishita, T. Shobo, N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: NOx Removal Performance by Barrier Discharge and V/TiO_2 SCR Catalyst -Effect of Catalyst Size and Discharge Area-, Proc. 2nd Int. Symp. New Plasma and Elect. Discharge Appl. Dielectric Materials (2nd ISNPEDADM), Noumea, New Caledonia (2011)

*42. A. Takashi, Y. Nakai, N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: Investigation of Ozone Yield by Homogeneous Barrier Discharge, Proc. 2nd Int. Symp. New Plasma and Elect. Discharge Appl. Dielectric Materials (2nd ISNPEDADM), Noumea, New Caledonia (2011)

*43. N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: Comparison of NOx Removal Performance from Simulated Diesel Exhaust Gas by Townsend Type Barrier Discharge and Filamentary Type Barrier Discharge, Proc. 20th Int. Symp. Plasma Chem. (ISPC-20), Philadelphia, USA (2011)

*44. Y. Nakai, A. Takashi, N. Osawa, Y. Yoshioka, R. Hanaoka: Comparison of Ozone Generation Characteristics by Filamentary Discharge Mode and Townsend Discharge Mode of Dielectric Barrier Discharge in Oxygen, Proc. 20th Int. Symp. Plasma Chem. (ISPC-20), Philadelphia, USA (2011)

＜国内学会講演発表＞

*45. 花岡良一，鈴木貴志: 機能性流体とその応用，電学全国大会シンポジウム，宮城，2-S1-2 (2016)

46. 安齋秀伸，下大川丈晴，花岡良一，三井和幸: EHD 現象とその応用，電学全国大会シンポジウム，宮城，2-S1-3 (2016)

*47. 本田竜一，森勇人，山本周平，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 誘電体バリア放電における放電モードと表面電位分布の時間減衰特性の関係，電学全国大会，宮城，第一分冊 1-070，p. 85 (2016)

*48. 森勇人，山本周平，本田竜一，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 誘電体バリア放電における放電モードと壁電荷の関係，電学全国大会，宮城，第一分冊 1-071，pp. 86-87 (2016)

*49. 土田康平，谷口公基，小林和貴，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: プラズマ支援尿素 SCR システムにおける V/TiO_2 触媒の V 担持割合と低温活性化の効果，電学全国大会，宮城，第一分冊 1-077，pp. 95-96 (2016)

*50. 大澤直樹，早水伸伍，鈴木千紘，辻貴文，吉岡芳夫，大西克利，夷藤喜造: バブリング法を用いたゾン水生成における注入オゾンガス濃度と水温の関係, 電学プラズマ/放電/パルスパワー合同研究会資料，宮崎，pp. 1-5 (2015)

51. 小柳洋介，山本博法，宮城克徳，花岡良一，鈴木貴志，高本 清: 植物由来エステル系絶縁油と鉱油のブレンド検討—電気絶縁の基礎特性—，第 35 回 絶縁油分科会研究発表会要旨集，京都，No. 5，pp. 21-26 (2015)

*52. 奥村拓己，山本侑汰，田中基嗣，金崎真人，斉藤博嗣，北川智隆，大澤直樹，大澤敏: CF/PP 複合材料の界面接着性に及ぼす大気圧プラズマ処理条件の影響，日本複合材料学会第 40 回複合材料シンポジウム，石川 (2015)

53. 柳瀬博雅，畠中勇人，岡本健次，御前太貴，岡田恵拓，上村周作，大澤直樹，花岡良一，吉岡芳夫: 乾燥空気と固体絶縁物を用いた複合絶縁における初回絶縁破壊電圧の固体絶縁物の誘電率の効果，電学 A 部門大会，石川，p.70 (2015)

54. 小柳洋介，藤澤拓弥，宮城克徳，花岡良一: 植物由来エステル系絶縁油と劣化鉱油のブレンド調査—電気絶縁の基礎特性—，電学 A 部門大会，石川，p. 95 (2015)

*55. 山本博法，藤澤拓弥，小柳洋介，花岡良一，宮城克徳，高本 清，西川精一，金田尚士: インパルスバリア放電による菜種油中の溶解ガス性分の分析，電学 A 部門大会，石川，p. 226 (2015)

*56. 平野靖奈，澤崎広和，花岡良一，宮城克徳: 有機溶媒中に懸濁した CNT の電気的分散法，電学 A 部門大会，石川，p. 244 (2015)

*57. 本田竜一，内田万奈斗，長浜清香，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 誘電体バリア放電におけるバリア材料の表面抵抗値と放電モードの関係，電学 A 部門大会，石川，p.256 (2015)

*58. 辻貴文，関塚文也，蟹谷 遼，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 均一放電やフィラメント放電を用いたオゾン発生器におけるオゾン・N_2O 生成特性のガス圧力依存性，電学 A 部門大会，石川，p.258 (2015)

*59. 土田康平，谷口公基，小林和貴，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: プラズマ支援尿素 SCR 法における V/TiO_2 触媒の V 担持割合と NOx 除去性能の関係, 電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A1-4 (2015)

*60. 折戸雅俊，北川智隆，永野知也，大澤直樹，田中基嗣，斉藤博嗣，大澤敏: 大気圧プラズマ処理による炭素繊維の引張強度変化, 電気関係学会北陸支部連合大会, 石川, A1-10 (2015)

*61. 石田 圭，西 敏行，花岡良一: 架空絶縁電線表面に発生する沿面放電進展基本特性（直撃雷の場合），電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A2-9 (2015)

*62. 平野靖奈，澤崎広和，花岡良一，宮城克徳，大澤直樹: 有機溶媒中の電気的 CNT 粒子分散，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A2-10 (2015)

63. 増井秀好，上田優貴，御前太貴，大澤直樹，花岡良一，吉岡芳夫，畠中勇人，柳瀬博雅，岡本健次，中島昌俊: 乾燥空気と固体絶縁物の複合絶縁系における絶縁物の帯電による沿面フラッシオーバー特性の変化，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A2-11 (2015)

64. 小柳洋介，藤澤拓弥，高橋和麿，大雲信幸，宮城克徳，花岡良一，脇本 聖: 天然エステル（大豆油）と鉱油のブレンド調査—電気絶縁の基礎特性—，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A2-12 (2015)

65. 今村悠平，宮沢健太，藤澤拓弥，宮城克徳，花岡良一: 標準雷インパルス電圧印加における海塩汚損がいし沿面放電特性の極性効果，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A2-13 (2015)

*66. 山本博法，藤澤拓弥，Fri Murdiya，花岡良一，宮城克徳，西川精一，高本 清，金田尚士: 菜種油中バリア放電時のストリーマの進展様相，電学全国大会，東京，第 1 分冊，p. 129 (2015)

*67. 早水伸伍，鈴木千紘，辻貴文，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧タウンゼント放電を用いたオゾン発生器におけるオゾン生成効率の湿度依存性，電学全国大会，東京，第 1 分冊，pp. 166-167 (2015)

*68. 辻貴文，早水伸伍，鈴木千紘，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 均一放電を用いた空気原料オゾナイザにおけるオゾン・N_2O 濃度のガス圧力依存性，電学全国大会，東京，第 1 分

冊，pp. 168-169 (2015)

*69. 小林和貴，坂口諒，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: V/TiO_2 触媒を用いたプラズマ支援尿素 SCR 法における NOx 除去性能の向上，電学全国大会，東京，第 1 分冊，pp. 171-172 (2015)

70. 御前太貴，岡田恵拓，上村周作，大澤直樹，花岡良一，吉岡芳夫，畠中勇人，柳瀬博雅，岡本健次: 乾燥空気と固体絶縁物を用いた複合絶縁における初回絶縁破壊電圧の固体絶縁物被覆厚・ギャップ長依存性，電学全国大会，東京，第 6 分冊，pp. 35-36 (2015)

71. 大澤直樹: 金沢工業大学における教員の協働におけるアクティブラーニング（特別講演），山口大学，山口，(2015. 8.6)

*72. 花岡良一: 磁気粘性流体（磁性流体／ＭＲ流体）活用のための合成・評価・制御法（特別講演），サイエンス＆テクノロジー，東京，(2015. 7.31)

*73. 花岡良一: 植物由来絶縁油と鉱油中の沿面放電現象（特別講演），九州工業大学，福岡，(2015. 3.9)

*74. 長浜清香，内田万奈斗，本田竜一，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧空気中での均一バリア放電の発生メカニズムの解明－誘電体表面上の蓄積電荷量と放電モードの関係－，電学プラズマ/パルスパワー/放電合同研究会資料，PST-14-84 / PPT-14-68 / ED-14-154, pp. 61-65 (2014)

*75. 澤崎広和，花岡良一，宮城克徳，安齋秀伸，河野照彦: CNT のバリア放電分散とＣＮＴ含有コンポジットの機械的特性，電気学会放電研究会資料，京都，ED-14-054, pp. 13-18 (2014)

*76. 片桐優太，花岡良一，宮城克徳，伊藤健吾，狩野孝明: EHD ポンピングに起因した解離イオンの移動度測定，電学放電研資，京都，ED-14-055, pp. 19-24 (2014)

*77. 藤澤拓弥，山本博法，F. Murdiya，花岡良一，宮城克徳: 菜種油中のコロナ放電による溶解ガス成分の分析，第 34 回絶縁油分科会要旨集，京都，No.6, pp. 39-44, (2014

78. 御前太貴，栗原孝志，小木曽大亮，宮崎拓海，大澤直樹，吉岡芳夫，畠中勇人，山田直人，中島昌俊: 絶縁物コーティング厚を変えたときの高気圧乾燥空気の絶縁破壊特性，電学 B 部門大会，京都，pp. 4-3-3 - 4-3-4 (2014)

*79. 藤澤拓弥，山本博法，F. Murdiya，花岡良一，宮城克徳: 植物油中の交流沿面放電による放電電力の経時変化，電学 A 部門大会，長野，p. 97 (2014)

*80. 北川智隆，吉川裕規，大澤直樹，田中基嗣，斉藤博嗣，大澤敏: 室内空気バリア放電を用いた炭素繊維の親水性向上と表面分析，電学 A 部門大会，長野，p. 277 (2014)

81. 大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧乾燥空気中におけるデュアルモードバリア放電の基本特性，電学 A 部門大会，長野，p. 82 (2014)

82. 大澤直樹: 学生のモチベーションと理解度の向上を目的とした「総合力」ラーニング型授業の実施とその効果　－座学・演習，定期的なフィードバック，学生による発表会の統合－，北信越工学教育協会会報，第 62 号，pp. 45-48 (2014)

*83. 山本博法，藤澤拓弥，F. Murdiya，花岡良一，宮城克徳，西川精一，高本 清，金田尚士: コロナ放電により菜種油中に溶解したガス成分の分析，電学全国大会，愛媛，第 5 分冊，p. 342 (2014)

*84. 大澤直樹，守本祐生，船木大輔，辻 貴文，吉岡芳夫，花岡良一: 空気原料オゾナイザにおけるオゾンガス中の NOx 濃度測定法の検討，静電気学会春期講演会，東京，pp. 29-30 (2014)

85. 宮城克徳: 新しい絶縁液体／絶縁材料に関する国内外技術状況，石油学会絶縁油分科会研究発表会要旨集，京都，No. 10，pp. 52-61 (2013)

*86. F. Murdiya, R. Hashi, R. Hanaoka, K. Miyagi, S. Nishikawa, K. Takamoto, H. Kaneda: Dissolved Gas Analysis (DGA)under Impulse Voltage in Rapeseed Oil，石油学会絶縁油分科会研究発表会

要旨集，京都，No. 5, pp. 23-30 (2013)

*87. 吉田拓磨，金子 陽，高橋宏貴，唐澤 諒，坂本佳隆，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: プラズマ支援尿素 SCR 法によるディーゼルエンジン排ガス中の NOx 除去メカニズムに関する研究 －触媒の種類と還元剤の影響－，放電学会年次大会，東京，pp. 23-28 (2013)

88. 御前太貴，大澤直樹，吉岡芳夫: 二室構造熱パッファ式ガス遮断器における熱パッファ室内整流板の構造因子と電流零点におけるガス吹付け特性の関係，放電学会年次大会，東京，pp. 79-80 (2013)

*89. 吉田拓磨，高橋宏貴，金子陽，唐澤 諒，坂本佳隆，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: プラズマ支援尿素 SCR 法による模擬ディーゼル排ガス中の NOx 除去，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A1-16 (2013)

*90. 辻 貴文，船木大輔，守本祐生，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: NOx 濃度測定のためのオゾン熱分解装置におけるオゾン分解特性，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A1-17 (2013)

*91. 北川智隆，各務健弘，大澤直樹，田中基嗣，斉藤博嗣，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧プラズマによる開繊炭素繊維の親水性向上，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A1-18 (2013)

*92. 長浜清香，有北晃悠，田中恭平，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: バリア放電のモードと誘電体表面電位の関係，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A1-20 (2013)

*93. 福田章悟，F. Murdiya，花岡良一，西 敏行: 架空絶縁電線表面湿潤状態における負極性沿面放電特性，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A2-18 (2013)

*94. 藤澤拓弥，山本博法，福田章悟，花岡良一，F. Murdiya，宮城克徳: 交流高電圧による鉱油及び菜種油中のコロナ放電，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，A2-19 (2013)

95. 金森慎平，花岡良一，F. Murdiya，宮城克徳: 光電変換法を用いたナノコンポジット材料のトリー電流測定，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，D-11 (2013)

*96. 大倉 卓，花岡良一: チタン系粒子分散型 ER 流体の界面活性剤による静的特性への影響について，電気関係学会北陸支部連合大会，石川，D-12 (2013)

*97. 大澤直樹，守本祐生，吉岡芳夫，花岡良一: 空気原料オゾナイザで生成されたオゾンガス中の NOx 濃度測定法の検討，電学 A 部門大会，神奈川，12-E-a1-2，p.401 (2013)

*98. 山本博法，花岡良一，F. Murdiya，宮城克徳: 固体バリアのある PFAE 油中を進展する沿面放電，電学 A 部門大会，神奈川，12-E-a2-1, p.406 (2013)

99. 吉村太希，小橋好充，加藤 聰，大澤直樹，花岡良一: ガソリン機関のノッキング抑制を目的とした非平衡プラズマによる炭化水素燃料の改質に関する研究，日本機械学会北陸信越支部第 50 期総会・講演会 講演論文集，福井，No.137-1, 1402 (2013)

*100. 花岡良一: 液体中バリア放電を利用したナノ粒子の均一分散化（特別講演），早稲田大学，東京 (2013)

*101. 橋本翔平，花岡良一，宮城克徳，河野昭彦，安齊秀伸: バリア放電を利用した CNT の分散における電極形状の効果，電学全国大会，愛知， (2013)

*102. 山本博法，端 良太，F. Murdiya，花岡良一，宮城克徳，西川精一，高本 清，金田尚士: インパルスアーク放電により菜種油中に溶解したガス成分の分析，電学全国大会，愛知，(2013)

*103. 吉田拓磨，長塚幸弘，西澤隼，末冨貴之，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: V/TiO_2 触媒を充填したバリア放電装置によるディーゼルエンジン排ガス中の NOx 除去 —触媒充填量と放電領域長の影響—，電学全国大会，愛知， (2013)

*104. 守本祐生，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧タウンゼント放電を用いた空気原料オ

ゾナイザにおけるオゾンガス中の副生成物，電学全国大会，愛知，(2013)

*105. 吉村太希，小橋好充，加藤　聰，大澤直樹，花岡良一：ガソリン機関のノッキング抑制を目的とした非平衡プラズマによる炭化水素燃料の改質に関する研究，日本機械学会北陸信越支部第 50 期総会・講演会　講演論文集，福井，　No.137-1，1402 (2013)

*106. 端 良太，花岡良一，山本博法，高本　清，西川精一，金田尚士，宮城克徳: 交流沿面放電により菜種油中に溶解したガス成分の分析，第 32 回絶縁油分科会研究発表会要旨集，京都，No. 6, pp. 28-32 (2012)

*107. 守本祐生，大塚宏輝，高橋宥貴，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 空気原料オゾナイザの放電モードと NOx 生成特性の関係，電学パルスパワー／放電合同研会資，佐賀，PPT-12-93 / ED-12-90, pp.11-16 (2012)

*108. 山本博法，端 良太，辻 裕貴，橋本翔平，宮城克徳，花岡良一: 標準雷インパルス放電に対する回転球体法の防護特性に関する一考察，電学 B 部門大会，北海道，pp. 11-12 (2012)

109. 伊東 了，平間淳司，花岡良一，得永嘉昭，會澤康治，松井良雄: 高電界下における植物体の生育制御システムの再構築，日本生物環境工学会 2012 大会, 50 周年記念大会講演要旨，東京，No. B55，pp. 88-89 (2012)

*110. 山本博法，端 良太，花岡良一，高田新三，高本 清，金田尚士: 絶縁油中を進展する交流沿面放電の特性，電学全国大会，第 1 分冊，広島，pp. 1-051 (2012)

*111. 端 良太，山本博法，宮城克徳，花岡良一: 菜種油中の交流沿面放電による放電エネルギーの経時変化，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，A-42 (2012)

*112. 辻 裕貴，金森慎平，花岡良一，宮城克徳，大澤直樹: CNT コンポジットのトリーイング特性と絶縁強度，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，A-43 (2012)

*113. 菅原佑介，橋本翔平，花岡良一，宮城克徳，河野照彦: 曲げ応力に関する多層カーボンナノチューブ（MWCNT）の影響，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，A-44 (2012)

*114. 山口貴弘，大倉 卓，花岡良一: チタン系粒子分散型 ER 流体の動的特性について，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，A-47 (2012)

*115. 宮城克徳，大江悦男: 油中加熱劣化特性に及ぼすクラフト紙とアミン添加紙のハイブリッド効果，電学全国大会，広島，第 5 分冊，p. 193 (2012)

116. 水本悠介，大澤直樹，吉岡芳夫，浦井一，小泉眞，筑紫正範: ノズルアブレーションを考慮した自力消弧形ガス遮断器の圧力解析法と熱ガス流解析法を用いた熱パッファ室内圧力特性の検討，放電学年次大会，東京，C-2-4，pp.56-60 (2012)

*117. 守本祐生，大塚宏輝，高橋宥貴，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 熱分解を用いたオゾンガス中の NOx 濃度測定法の検討，電学 A 部門大会，秋田，p.278 (2012)

*118. 中井雄輝，壁谷智和，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: セラミックス誘電体の成分と大気圧空気中でのバリア放電の関係，電学 A 部門大会，秋田，p.299 (2012)

*119. 大澤直樹，尚亜美，吉岡芳夫，花岡良一: 圧力 0.1-0.17MPa における乾燥空気中での均一バリア放電の発生，電学 A 部門大会，秋田，p.300 (2012)

*120. 壁谷智和，中井雄輝，長浜清香，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 湿度を含んだ各ガス中における大気圧均一バリア放電の安定性，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，A-4 (2012)

*121. 長浜清香，壁谷智和，中井雄輝，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 湿度および空気の流量が大気圧均一バリア放電の安定発生に与える影響，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，A-5 (2012)

*122. 高橋宥貴，大塚宏輝，尚亜美，守本祐生，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 水冷式 APTD オゾナイザによるオゾン生成特性，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，A-15 (2012)

*123. 朝倉麻衣，渡辺俊，千葉開，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧空気プラズマ処理による筆状 PBT の表面改質，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，A-16 (2012)

*124. 中井雄輝，壁谷智和，二之夕健，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 誘電体バリア放電における誘電体表面材料と放電モードとの関係，電学全国大会，広島，第 1 分冊，pp.57-58 (2012)

*125. 末冨貴之，津波光作，羽深泰士，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: V/TiO_2 触媒を充填したバリア放電装置における触媒粒子径と NOx 除去性能の関係，電学全国大会，広島，第 1 分冊，pp.67-68 (2012)

*126. 守本祐生，岡本賢治，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧タウンゼント放電型オゾナイザのガス温度とオゾン生成特性の関係，電学全国大会，広島，第 1 分冊，pp.112-113 (2012)

*127. 尚亜美，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 酸素原料 APTD オゾナイザにおけるオゾン生成特性と換算電界の調査，電学全国大会，広島，第 1 分冊，pp.115-116 (2012)

128. 大澤直樹，水上拓哉，水本悠介，吉岡芳夫，浦井一，小泉眞，筑紫正範: 自力消弧形ガス遮断器の熱パッファ室形状とガス吹付け特性に関する基礎的検討，電学全国大会，広島，第 6 分冊，pp.486-487 (2012)

*129.戸田康雅，藤澤智彦，花岡良一，高田新三，安齋秀伸: EHD ポンプを用いた液体循環系による被加熱部の冷却効果，電学放電研資，京都， ED-11-051, pp. 19-23 (2011)

*130. 端　良太，碓氷拓郎，花岡良一，高本　清，西川精一，金田尚士，山本博法，高田新三: 菜種油中のバリア放電による溶解ガス成分の分析，電学放電研資, 京都， ED-11-053, pp. 29-33 (2011)

*131. 宮村篤史，宮城克徳，大江悦男，福田伸二: 浄油機によるアセチレンガス発生に関する検討，第 31 回石油学会絶縁油分科会研究発表会，京都，pp. 12-17 (2011)

*132. 宮城克徳，脇本聖，大江悦男: 新しい絶縁液体の電気絶縁・材料特性に関する最近の動向，電学放電研資，京都，ED-11-048，pp. 1-6 (2011)

*133. 吉岡芳夫，大澤直樹: アルミナを用いたバリア放電装置で発生する均一放電現象の考察，電学パルスパワー／放電合同研会誌，千葉，PPT-11-45 / ED-11-93，pp.19-24 (2011)

*134. 大澤直樹，尚　亜美，守本祐生，岡本賢治，中井雄輝，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧空気や酸素中で発生する均一バリア放電によるオゾン生成，電学パルスパワー／放電合同研会誌，千葉，PPT-11-47 / ED-11-95，pp.31-36 (2011)

*135. 千葉　開，小木涼太，大澤直樹，吉岡芳夫: 大気圧均一バリア放電によるパラ系アラミド繊維の表面改質，電学プラズマ研会誌，富山，PST-11-021，pp.11-15 (2011)

*136. 藤澤勇輝, 西 敏行, 花岡良一, 高田新三: 架空絶縁表面湿潤状態における沿面放電現象，電学 A 部門大会，XIII-6，pp. 314 (2011)

*137. 二宮康郎，山口貴弘，花岡良一，高田新三: チタン系粒子を用いた分散系 ER 流体の特性，電学 A 部門大会，XX-8,pp. 419 (2011)

138. 伊東 了，木邑勇介，平間淳司，花岡良一，得永嘉昭，會澤康治，松井良雄: 直流高電界下におけるカイワレ大根の発芽および生長実験，日本生物環境工学会，札幌大会講演要旨，北海道，No. P46, pp. 286-287 (2011)

*139. 今井哲哉，高田新三，花岡良一，深見 正，島 和男，高本 清，金田尚士: 環境に優しい MR 流体とクラッチへの応用，第 35 回日本磁気学会学術講演概要集, 新潟, No.2pC-3, pp. 252 (2011)

*140. 山本博法，碓氷拓郎，端 良太，花岡良一，高田新三，小出英延: PFAE 油中の固体絶縁物界面を進展する沿面放電，電学全国大会，大阪，第 1 分冊，pp. 1-071 (2011)

*141. 千葉　開，大澤直樹，吉岡芳夫，堀邊英夫，花岡良一: 大気圧均一バリア放電処理した繊

維の表面分析，電学 A 部門大会，東京，P-13，p.41 (2011)

*142. 中井雄輝，壁谷智和，二之夕健，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧空気中での均一バリア放電の安定発生領域の拡大法の研究，電学 A 部門大会，東京，P-14，p.42 (2011)

*143. 尚　亜美，守本祐生，岡本賢治，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧均一バリア放電を用いたオゾナイザギャップ長とオゾン生成効率の関係，電学 A 部門大会, 東京, P-15, p.43 (2011)

*144. 末冨貴之，羽深泰士，津波光作，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: V/TiO_2 触媒を充填したバリア放電装置の放電領域と NOx 除去性能の関係，電学 A 部門大会, 東京, P-16, p.44 (2011)

145. 水本悠介，金築明憲，大澤直樹，吉岡芳夫，浦井一，筑紫正範: セルフブラスト形 GCB の熱パッファ室形状とガス吹付け圧力特性の関係，電学 B 部門大会，福井，pp.17-18 (2011)

*146. 大澤直樹，山本博法，花岡良一，小出英延: パームヤシ脂肪酸エステル絶縁油を燃料として用いた時のディーゼルエンジン排気ガス中の NOx，電学 D 部門大会，沖縄，pp.209-210 (2011)

*147. 守本祐生，岡本賢治，尚亜美，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧均一バリア放電型オゾナイザのギャップ長とオゾン生成特性の関係，電気関係学会北陸支部連合大会，福井，A-3 (2011)

*148. 壁谷智和，二之夕健，中井雄輝，大澤直樹，吉岡芳夫，花岡良一: 大気圧均一バリア放電の安定発生領域と電極の構造因子の関係，電気関係学会北陸支部連合大会, 福井, A-4 (2011)

○図 書

1. 「紛体・微粒子分析テクニック事例集」, 第 17 節 バリア放電技術によるナノ粒子分散化と SEM 観測および IR を用いた組成分析，花岡良一, (株)技術情報協会， pp.122-123 (2015. 11)
2. 電子機器発火：液体・固体誘電体材料の絶縁破壊・劣化メカニズム，花岡良一,（株）技術情報協会，pp. 258-264, (2014. 7 発刊)
3. 液体誘電体の新規開発による環境適合型絶縁設計技術，花岡良一,（株）技術情報協会：「封止技術」＜先端エレクトロニクス分野＞封止･シーリングの材料設計とプロセス技術, No. 1723, pp. 226-231，(2013. 8 発刊)
4. 電気学会 125 年史，A 部門 2 編，基礎: 「11. 液中の放電」: 花岡良一，pp. 244-245， 2013 年 10 月 11 日
5. 放電ハンドブック（第 7 版), 第 3 編，第 10 章, 10.8 節: 花岡良一，オーム社, (2013.4)
6. 高電圧工学: 花岡良一，森北出版，202 頁, (2012.3; 第 1 版第 3 刷発行)
7. 基礎からの高電圧工学: 花岡良一，石田隆弘，日新出版，204 頁, (2010.4 初版発行)

○新聞報道等

*1. かんでんエンジ，年内出荷；車・家電・免震向け開拓：菜種油で磁気粘性流体: 花岡良一，高本 清， 日刊工業新聞，2014 年 2 月 26 日

*2. 磁気粘性流体を共同開発：植物由来の油活用：菜種油で磁気粘性流体: 花岡良一，高本 清，電気新聞，2014 年 1 月 20 日

*3. 「粘度変わる流体」植物油で: 花岡良一，高本 清， 北國新聞，2014 年 1 月 20 日

*4. 植物由来の MR 流体を開発 ; 免震装置にも活用へ: 花岡良一, 高本 清， 建設工業新聞, 2014 年 1 月 20 日

5. 「渋澤賞」受賞: 花岡良一，日本電気協会，第 58 回渋澤賞，2013 年 11 月 3 日

*6. 産学連携 Vol.2＜シーズ技術＞世界最先端の大気圧低温プラズマ処理装置の開発: 大澤直樹,

北陸経済研究, No.406, pp.42-43 (2012)

○特 許

*1. 発明の名称: フィラー分散液の製造方法および製造装置
発明者: 安齋秀伸，花岡良一，下大川丈晴，寺坂澄孝，出願人：藤倉化成㈱，三洋金属工業株式会社
出願日，出願番号等：2015 年 08 月 21 日，特願 2015-164004

*2. 発明の名称: 磁気レオロジー流体
発明者: 花岡良一，高田新三，深見 正，高本 清，金田尚士，出願人：金沢工業大学，(株)かんでんエンジニアリング
出願日，出願番号等： 2012 年 10 月 3 日 特願：2012-174168 ，2013 年 12 月 20 日（特許査定済）

*3. 発明の名称: EHD Pump with Electrode Arrangement
発明者: R. Hanaoka, S. Takata, T. Fukami，出願人：金沢工業大学
出願日，出願番号等：2012 年 3 月 29 日, (US Patent)，特許第 7914262b2

*4. 発明の名称: 電気流体力学ポンプ
発明者: 花岡良一，高田新三，深見 正，出願人：金沢工業大学
出願日，出願番号等：平成 24 年 9 月 14 日， 特願：2006-325678， 特許第 5083751

*5. 発明の名称: 磁気レオロジー流体
発明者: 花岡良一，高田新三，深見 正，高本 清，金田尚士，出願人：金沢工業大学，(株)かんでんエンジニアリング
出願日，出願番号等：平成 24 年 10 月 3 日， 特願：2012-174168

*6. 発明の名称: フィラー分散液の製造方法
発明者: 安齋秀伸，桜井宏治，花岡良一，出願人：藤倉化成（株）
出願日，出願番号等：平成 24 年 3 月 1 日， 特願：2010-184112， 特公：2012-040507

*7. 発明の名称: 電気流体力学ポンプ
発明者: 花岡良一，高田新三，深見 正，出願人：金沢工業大学
出願日，出願番号等：平成 23 年 6 月 17 日，特許第 4759671 号

３．２　研究課題[Ⅱ]：磁気応用エネルギー変換・貯蔵・環境保全技術の開発研究

[課題 1]　環境負荷低減に役立つ発電機・モータ技術の開発

本研究では，風力発電・マイクロ水力発電・電気自動車（EV）・ハイブリッド自動車（HEV）などの新エネルギー分野に適合した新構造の回転機（発電機・電動機）を開発した。また，その製造・使用・廃棄段階に至る一連の省エネルギー・省資源化が実現でき，かつ用途に応じた回転機の設計技術を構築した。

（１）　電力・産業・車両用新型回転機の研究

(A)　磁束変調同期機の開発

風力発電・マイクロ水力発電・EV・EHV などの新エネルギー分野において，多極同期機が広く用いられている。一般的な多極同期機は固定子に電力の出し入れを行う電機子巻線を備え，回転子には磁束を発生する界磁磁極が設けられている。界磁磁極の形式には，電磁石式と永久磁石式の 2 種類がある。

本課題では，回転子構造を簡素化してより汎用性を高めた，新構造の電磁石式および永久磁石式の多極同期機を考案した。この多極同期機は，固定子に電機子巻線と界磁磁極（電磁石あるいは永久磁石）の両方を備え，回転子には巻線や永久磁石を持たない。動作原理は，界磁磁極による固定子起磁力を回転子の突極（パーミアンス変化）により変調して主磁束（回転磁界）をつくり，これと電機子電流との間で同期トルクを発生するものである。このため，考案した多極同期機を磁束変調同期機（Flux-Modulating Synchronous Machine: FMSM）と呼称している。この FMSM は，我々と東芝三菱電機産業システム㈱の技術者が独自に考案したものであり，平成 27 年 7 月に特許登録となり，すでに権利化している。

＜平成23～25年度＞

第 1 に，電磁石式の FMSM について，その原理と発電機動作時の特性を，試作による実験と有限要素解析（FEA）により明らかにした。以下の結果を得た。

① FMSM は，固定子側からブラシレス構造で界磁制御ができ，トルク脈動が小さく，電圧波形のひずみ率も低いことが分かった。

第 2 に，MW 級風力発電機への適用を前提に，体格と増速比の異なる 2 台の 2MW 級 FMSM を設計し，これらの電気特性を FEA によるシミュレーションで評価し，以下の結果を得た。図 3.2-1 は，試作機 I（80 極，電磁石式）の構造を示し，最大出力および最大効率と回転速度の関係が図 3.2-2 に示される。

② 既存の永久磁石式同期発電機（IPMSM）より 1 割程度体格を大きくすることで，同程度の出力と 90[%]以上の効率が得られることが分かった。

③ 大容量化に伴い出力に対して界磁銅損（励磁容量）の割合が小さくなり，FMSM が

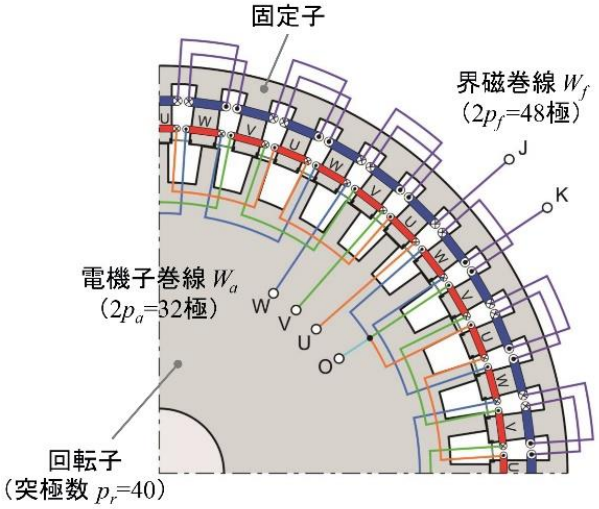


図 3.2-1　試作機 I（80 極, 電磁石式）の構造

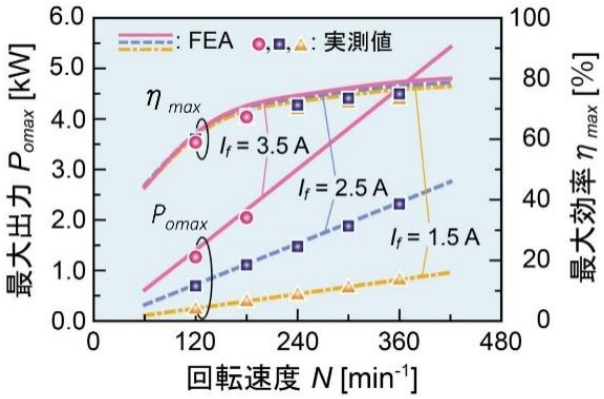


図 3.2-2　試作機 I の最大出力と最大効率

大容量機に適していることも確認できた。

＜平成24～26年度＞

発電機動作時の解析に加えて，電磁石式および永久磁石式の FMSM について，電動機動作時の特性を調査し，トルクの発生メカニズムやベクトル制御時の特性を明らかにした。以下に研究成果を要約する。なお，図 3.2-3 は，試作機Ⅱ（30 極，電磁石式）の構造を示し，トルクおよび効率と q 軸電流の関係が図 3.2-4 に示される。また，図 3.2-5 は，試作機Ⅲ（30 極，永久磁石式）の構造を示し，トルクおよび効率と q 軸電流の関係が図 3.2-6 に示される。

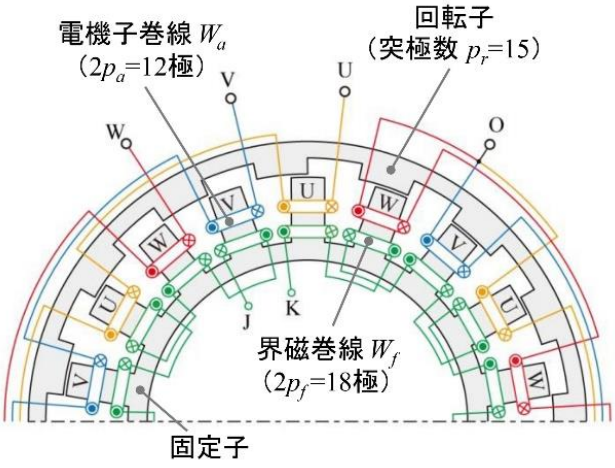


図 3.2-3　試作機Ⅱ(30 極，電磁石式)の構造

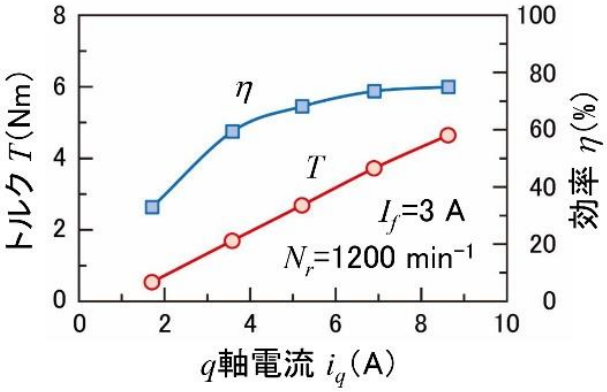


図 3.2-4　試作機Ⅱのトルクと効率

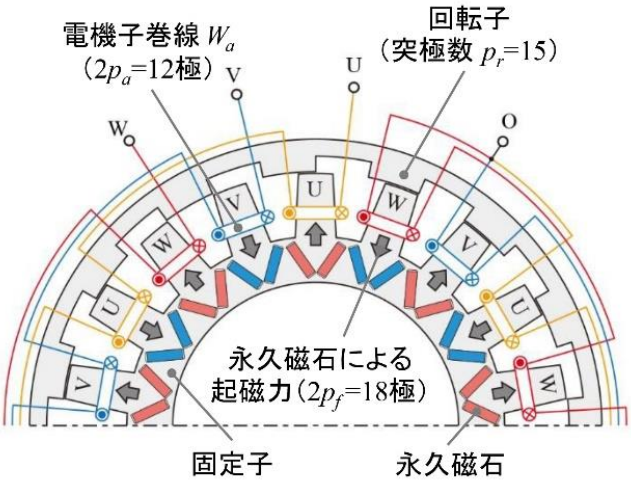


図 3.2-5　試作機Ⅲ(30 極，永久磁石式)の構造

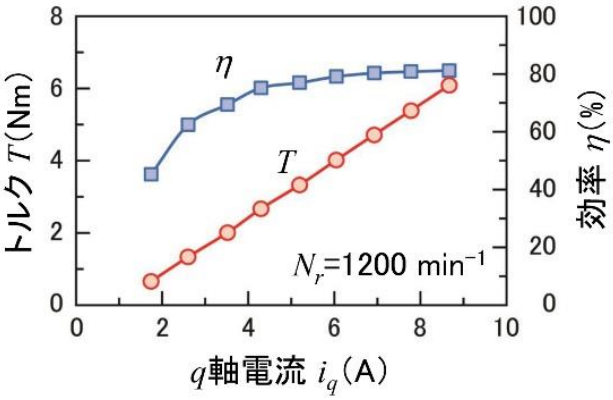


図 3.2-6　試作機Ⅲのトルクと効率

① FMSM のインダクタンス特性は，円筒形同期電動機と類似の特性を持つことが分かった。

② d, q 軸巻線を電機子巻線がつくる回転磁界と同じ電気角速度で回転する座標上に取ってベクトル制御すると，FMSM のトルクを，直流電動機と同様に，電機子電流と界磁電流の大きさによって直接制御できることが分かった。

＜平成27年度＞

EV・HEV 用電動機への適用を前提に，50[kW]級 FMSM を設計し，FEA によって既存の永久磁石式同期電動機（IPMSM）とその特性を比較した。その結果，FMSM は，永久磁石を使わずに IPMSM の約 9 割の最大トルクを発生でき，電流位相を調整すると，トルク脈動を IPMSM と同程度に低減できることが分かった。今後，低速運転時や高速運転時の損失・効率を分析し，実用化のための技術課題などを明らかにする。

(B)　自転車用発電機の開発

現在，自転車のハブ発電機には，単相外転型クローポール発電機が使われている。しかし，低速で駆動するため多極構造となり，発電機本体が大型化している。そこで，平成 25 年度から自転車のハブ発電機の小形化の研究に着手した。

＜平成25～26年度＞

固定子構造を変えずに多極化が可能な磁束スイッチ発電機に注目し，ハブ発電機としての可能性を FEA によるシミュレーションで検討し，以下の結果を得た。

① 固定子と回転子の極数を同一に選定し，オープンスロット構造を採用することにより，正弦波・高出力の外転型単相磁束スイッチ発電機が得られることが判明した。

② しかし，磁束スイッチの原理では，既存のハブ発電機と同一体積で外径を 30[%] 縮小するのが限界であることがわかった。従って，この原理ではハブ発電機の小形化

は望めない。新たな原理に基づく発電機の検討が必要であることが分かった。

＜平成26～27年度＞

磁束スイッチ発電機とは異なる原理に基づく新構造発電機を考案し，以下の結果を得た。

第 1 に，磁束スイッチ発電機の構造に，誘導子形高周波発電機の複数突極構造を取り入れた新構造の発電機を考案し，本構造の特許を出願した。固定子に突極を複数設けることによって高周波数の電力を得やすくなっているため，高出力化が期待できる。既存のハブ発電機より外径を 37[%] 縮小したモデルを設計し，FEA によってこの出力を計算した。

① 既存機よりも低い出力しか得られなかった。本構造の場合には本体の大幅な小形化は難しいことがわかった。

第 2 に，磁束反転発電機の原理を応用した新構造の発電機を考案し，本構造の特許を出願した。固定子に突極を複数設けることによって高周波数の電力を得やすくなっているため，高出力化が期待できる構造である。既存のハブ発電機より外径を 37[%] 縮小したモデルを設計し，FEA によってこの出力を計算した。

② 本構造の場合は，市販の既存機を越える高い出力が得られることが分かった。これは，ハブ発電機本体の大幅な小形化を実現し得る成果である。

③ 平成 27 年度はこの試作機の寸法設計も実施した。

今後は，本機を試作して実機検証する予定であり，学会等への公表を予定している。

(C) 磁石補助突極形同期機の開発

突極形同期機は，風力発電機・水力発電機・エンジン発電機・産業用電動機などに使用される重要な機器である。しかし，本機には，磁極胴部の磁気飽和によって端子電圧が制限され，無用な界磁起磁力を消費すると言う問題がある。この問題を改善するために，磁極片の間に永久磁石（PM）を挿入した新構造の PM 補助突極形同期機（PMa-SM）の実用化を目指して研究を進めてきた。平成 22 年度までに，PM の挿入によって，定常時の端子電圧および出力が向上することが分かっている。突極形同期機の出力が向上すれば，同期機を小型化，軽量化することが可能となる。

しかし，本機の実用化に向けて，次のような問題点が残されていた。

第 1 の問題点： PMa-SM の出力を向上するために最適な構造・寸法の検討が不十分であった。

第 2 の問題点：これまでは定格回転速度における発電機運転時の検討のみであり，電動機運転時の検討，特に高速回転時の検討ができていなかった。

第 3 の問題点：過渡時に大電流が流れる三相突発短絡が起こると，PMa-SM の構造によっては PM が不可逆減磁する場合があることが，有限要素解析（FEA）によって明ら

かになっている。しかし，実機試験による FEA の計算精度確認ができていなかった。

第 4 の問題点： PMa-SM を実用化するには，設計した PMa-SM の定常時と過渡時の特性を，計算時間の長い FEA を用いずに簡単な計算のみで把握できることが望ましいので，過去に磁気回路を用いた PMa-SM の定常特性計算法を構築した。しかし，過渡特性の計算法は構築されていなかった。

＜平成23～25年度＞

第 1 の問題点である定常時の出力向上について研究した。PM やロータ構造の変更によって，PM の挿入による出力向上効果を更に約 9[%]向上した構造を考案し，FEA と実験によってこれを実証した。

① 効率はわずかではあるが向上した。FEA により PMa-SM 内部の物理現象を明らかにした。さらに，コンピュータを用いて PMa-SM の回転子形状の最適化を行った。

② 図 3.2-7 に示すように，最適化によって人手による試行錯誤では思いつかないような構造が考案された。

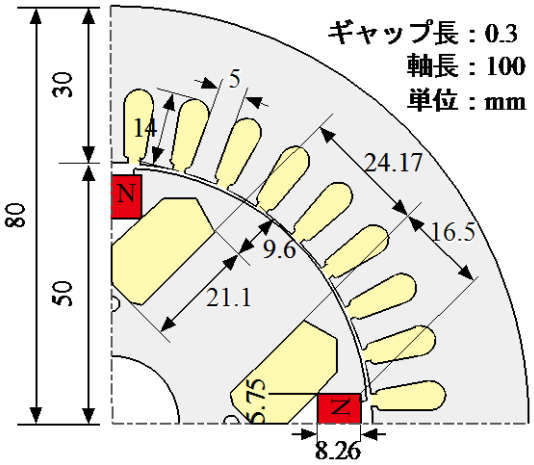


図3.2-7　最適化によって得られたPMa-SMの断面構造

③ 考案した PMa-SM を試作し，実験と FEA によって特性を明らかにした。最適化によって，ほぼ性能向上の限界に達している回転子形状を見出すことができた。

また，第 3 の問題点である過渡時の現象については，平成 23 年度に研究し，以下の結果を得た。

第 1 に，実機による三相突発短絡試験を行い，過渡時の FEA の計算精度を評価した。

④ 短絡前端子電圧が低い場合について，図 3.2-8 に示すように，過渡解析の精度が高いことが分かった。

⑤ 短絡前端子電圧が高い試験条件では，不可逆減磁が生じる心配のない従来 SM を対

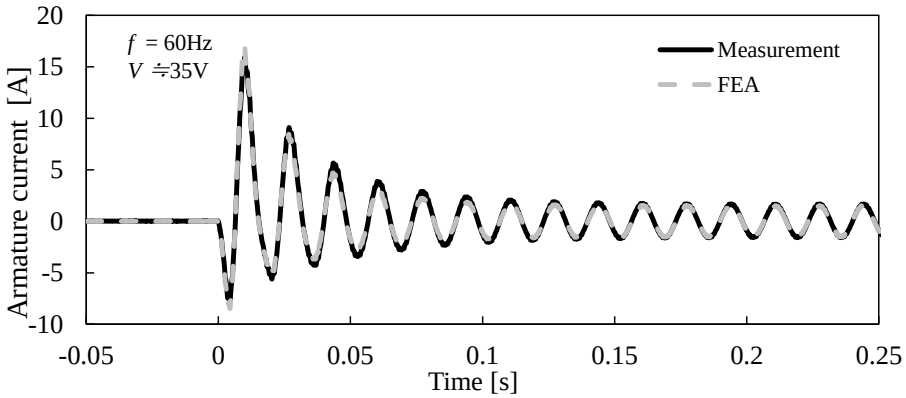


図 3.2-8　**過渡時の電機子電流波形**

象にして FEA の計算精度を評価した。突発短絡後 1 周期目の解析精度はやや劣るが突発短絡後 2 周期目以降の解析精度は高かった。1 周期目の解析精度が劣る原因は，機内に著しく強い磁気飽和が生じるためと考えられる。

第 2 に，FEA により PM の減磁評価を行い，次の結果を得た。

⑥ PM の大部分で不可逆減磁が起こるのは，短絡前端子電圧が 0.50[p.u.]前後であることを見出した。短絡前端子電圧 0.29[p.u.]未満の試験条件で，実際に PMa-SM 実機を用いて三相突発短絡試験を行った結果，PM の不可逆減磁は起らず，FEA の結果が裏付けられた。

＜平成24～27年度＞

第 2 の課題である電動機運転時に関する研究を行った。ベクトル制御実験と FEA を用いて，従来 SM と PMa-SM の電動機動作における特性を比較し，電動機における PM 挿入の効果を検討した。定格速度 1800[min^{-1}]の 2.8 倍の 5000[min^{-1}]まで駆動させることができ，これによって以下の結果を得た。

① 低速回転時には，PM 挿入効果によって PMa-SM の出力が従来の SM よりも大幅に向上した。

② 高速回転時には，磁気飽和が生じないため PM 挿入の効果が自然に消えて，可変磁力機と同様の界磁弱め効果が生じ，PM による磁束が弱め界磁制御を邪魔しないことが分かった。従って，PMa-SM は低速から高速に至るまで高い性能が得られることが分かった。

第 4 の問題点である磁気回路を用いた PMa-SM の過渡特性計算法は，平成 25～26 年度に構築し，以下の結果を得た。

③ FEA に比べて計算時間を 9 割以上短縮することができた。

④ あまり磁気飽和していない条件における三相突発短絡の場合，磁気回路計算が実験や FEA とよく一致し，計算精度が良好であることが分かった。

（２）**回転機の物理現象解明と設計法の高度化研究**

(A)　同期機の塊状磁極の近似モデルによる表面損失の基礎研究

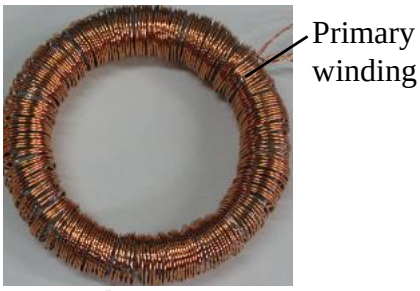
塊状磁極同期機は，産業用電動機やタービン発電機などに広く用いられている。本機では運転中，塊状磁極部分に表面損失が生じ，それにより熱が発生する。これによる温度上昇が過大にならないように構造設計することが重要である。表面損失過大の対策として磁極表面に溝（グルーブ）を施す方法がある。しかし，このグルーブの表面損失低減のメカニズムが十分に解明されていない。これが解明できれば，表面損失の計算精度の向上や新構造同期機の考案に繋がる。平成 22 年度までに，グルーブ付き塊状磁極同期機の近似モデルとして環状試料を採用し，表面損失の測定を行い，グルーブの効果を調べた。しかし，FEA 解析による表面損失の評価・分析が十分に行われていなかった。このため表面損失の低減原理が十分に明らかにされていなかった。

＜平成23～25年度＞

ヒステリシスを考慮した FEA の解析方法改良を行った。これを用いて，グルーブ寸法のパターンを増やした解析を行い，グルーブの効果を評価・分析した。また，測定結果と解析結果を比較し，計算精度を調査した。得られた結果は以下に要約される。

① ヒステリシスを考慮した解析の表面損失が実測とほぼ一致した。また，ヒステリシスを無視した解析の場合には，実測と著しく異なることが分かった。

② 表面損失の解析には，ヒステリシスの考慮が重要であることを明らかにした。図 3.2-9 は，環状試料の外観を示し，3.2-10 は，表面損失の結果を示す。ヒステリシスを無視した解析の精度が劣る原因は，マイナーループの傾きの過大評価による表皮深さの過小評価が，渦電流損失の誤差に繋がったためである。



Outer diameter: 110 mm
Inner diameter: 90 mm
Height: 22 mm
Material: SS400

図 3.2-9　環状試料の外観

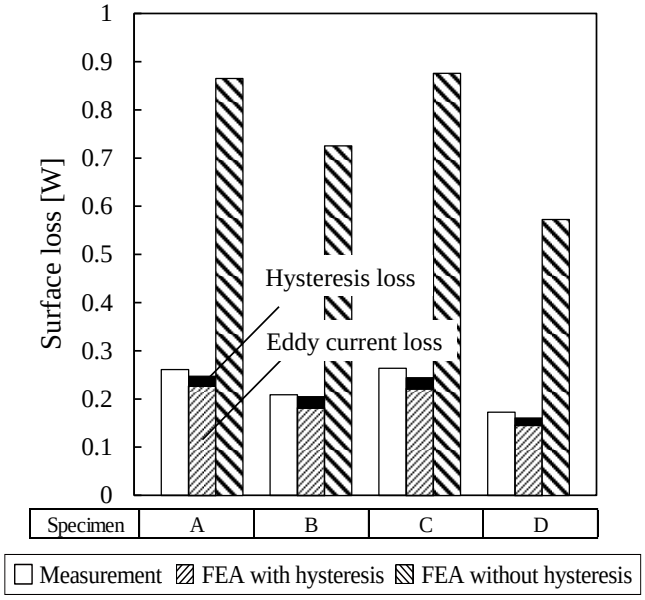


図 3.2-10　表面損失の結果

③ 更なる解析を進め，グルーブの形状と渦電流表皮深さとの関係を分析することにより，表面損失の発生原理を一部明らかにした。グルーブの効果は，グルーブ寸法とマイナーループの傾きによって得られた表皮深さとの大小関係に依存することが分かった。

これらの検討を進める中で，解析に入力する励磁電流波形の初期位相のみを変えると，解析結果の表面損失が幾分異なる値になる現象を新たに発見した。この現象が解析上の不備によるものか，実物の環状試料においても実際に生じるものなのかが不明である。

＜平成26年度＞

前年度の上記問題点に取り組み，以下の結果を得た。実験において，解析と同条件で励磁電流波形の初期位相を変える測定方法を考案し，表面損失測定を行った。

① 実物の環状試料においても，初期位相を変えると表面損失値が変わることを明らかにした。この原因は，初期位相が変わると，ヒステリシス現象によって試料内部の偏磁状態が変わる為と考えられる。

(B)　同期機の塊状磁極における表面損失の現象解明と設計法高度化

前記(A)の研究では，実機の塊状磁極の近似モデルである環状試料を用いて基礎研究を進めた。これは，塊状磁極では磁束の流れが複雑で現象分析が困難な上に，表面損失の正確な測定が困難で解析精度が不明の為である。しかし，設計法の高度化を目指す為には，環状試料だけでなく，実機の塊状磁極自体に生じる表面損失現象の分析も当然ながら必要である。そこで，これについて研究を進めた。平成 22 年度までに，塊状磁極に発生する磁束密度の大きさや向き，電流密度などは解析した。ただし，この実機解析は，解析プログラムの都合によりヒステリシスを無視した有限要素解析であり，グルーブの無い場合のみであった。

＜平成23～24年度＞

解析の実施による物理現象の解明に取り組み，以下の結果を得た。

① 負荷解析では，無負荷解析に比べ表面損失が約 4 倍も増加した。負荷時に大きく損失が増加したのは，磁極の磁気飽和により表皮深さが著しく増加したためである。

② 無負荷時の磁束密度ベクトルは，径方向成分の直流磁束に周方向成分の交流磁束が重畳している。一方で，定格負荷時の磁束密度ベクトルは径方向成分と周方向成分の両方で交流磁束に直流磁束が重畳した状態になることが分かった。

＜平成25～27年度＞

前年度までに得られた FEA 結果を実験によって検証した。定格負荷時を含む各種負荷時において，表面損失を実測する方法を新たに考案し，以下の結果を得た。

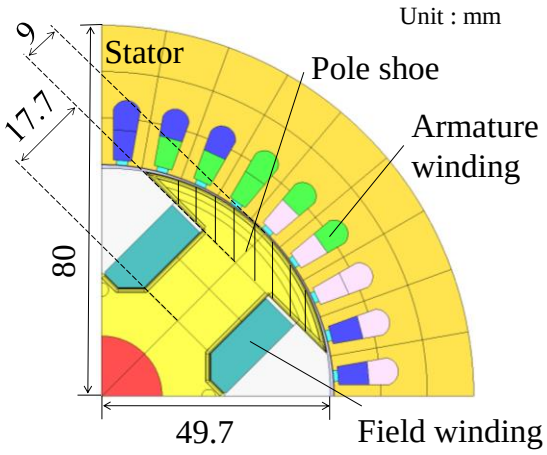


図 3.2-11　実験対象機の断面図

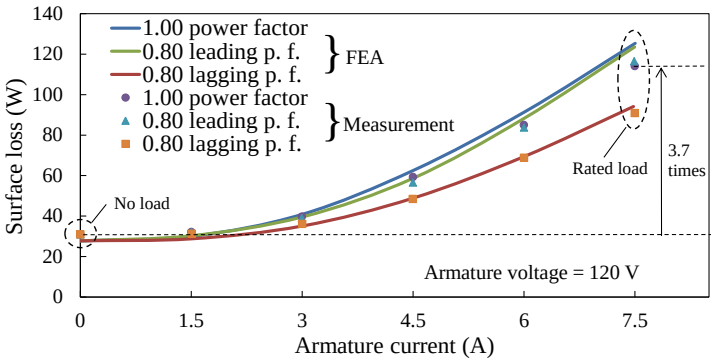


図 3.2-12　無負荷時と負荷時の表面損失

① 無負荷時に比べ定格負荷時に表面損失が約 4 倍も増加するという現象は，実験によっても確かに生じることを明らかにした。図 3.2-11 は, 実験対象機の断面図を示し，図 3.2-12 は，無負荷時と負荷時の表面損失を示す。また，FEA 値が実験値とよく一致することが分かった。ヒステリシスを考慮していないにもかかわらず，両者がよく一致するのは，磁気飽和が強くなるほどマイナーループの軌道が初期磁化曲線に近づくためと推測される。

FEA および Maxwell 方程式の近似解による機内磁束と渦電流を詳細な分析は，平成 25～26 年度に実施し，以下の結果を得た。

② 表面損失が無負荷時に比べて負荷時の方が大きい理由を理論的に明らかにした。すなわち，磁極表面における脈動磁束密度と渦電流密度は無負荷時と負荷時で大差ない。

③ 磁極内部への脈動磁束密度と渦電流密度の表皮深さは，磁気飽和の強い負荷時の方

が無負荷時よりも数倍大きい。これは表面損失が大きい原因である。

④ 負荷時の損失を下げるには，磁気飽和を低減するために磁極片の厚みを増やす方法が有効である。磁極片の厚みを増すことによって，負荷時の損失を低減できることは，FEA 解析によって確認された。

また，平成 26～27 年度には，実機の磁極表面にグルーブを施した 3 次元有限要素メッシュを作成して FEA 解析を行い，グルーブが表面損失にどのような影響を与えるかを研究し，以下の結果を得た。

⑤ グルーブのピッチが短いほど表面損失低減効果が得られることなどが分かった。

⑥ この研究結果を実測によって検証する為に，5 種類の異なるグルーブ寸法を持つ実機とその比較用としてグルーブの無い実機を試作した。このうちグルーブの無い実機について，表面損失の測定を開始している。今後，5 種類のグルーブ付き実機の測定を遂行し，FEA との比較によって解析精度の検証や物理現象の分析を行う。

(C) 同期機の面内渦電流損失に関する現象解明と設計法高度化

電力用タービン発電機などの同期機では，軸方向へ向かう磁束が固定子鉄心端部の鋼板を通り，鋼板の面内に大きな渦電流が流れ，面内渦電流損が生じる。これは固定子鉄心端部の温度を上昇させ，機器の特性に影響を及ぼすことがある。そのため，同期機の設計においては，面内渦電流損を精度よく計算することが望ましい。しかし，同期機実機では，面内渦電流損のみの測定が困難であることから，解析によって面内渦電流損のみの計算精度を評価することも困難である。

そこで，この問題を改善する為に，平成 22 年度までに磁束の流れが単純で，ほぼ面内渦電流損のみが測定できる新構造の試験器を考案・製作した。本試験器を用いて，実験と FEA 解析を行い，FEA による面内渦電流損の計算精度を評価し，試験器の面内渦電流現象を明らかにすることを目的として研究を進め，この研究成果に基づいて，同期機設計法の高度化を目指す。

＜平成23～25年度＞

図 3.2-13 に示される上記試験器を用いて，実験と 3 次元 FEA を行い，FEA による面内渦電流損の計算精度を評価し，面内渦電流現象を分析した。試料としては，35H210 を対象とした。得られた結果は，以下に要約される。

① 面内渦電流損測定法の妥当性を検証し，測定精度が良好であることを明らかにした。図 3.2-14 に示されるように，面内渦電流損を FEA によって精度よく計算できることを明らかにした。

② 解析結果から，10[Hz]と 50[Hz]の場合に，面内渦電流が，試料鋼板側面から見て理論表皮深さよりも深いところまで流れることが分かった。この理由は，渦電流の流

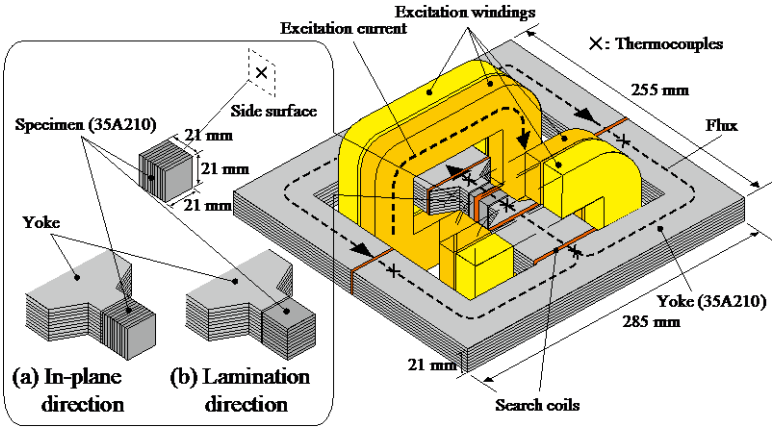


図 3.2-13　面内渦電流損計測用試験器の概略図

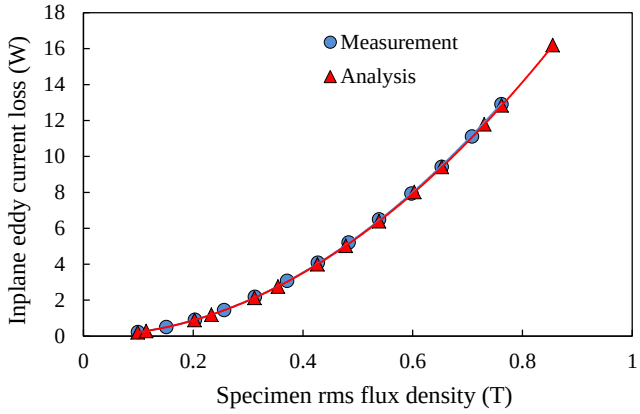


図 3.2-14　面内渦電流損失

れが試料鋼板側面からの表皮深さではなく，試料鋼板平面からの表皮深さによって決まるためである。

③ 励磁電流と面内渦電流の位相差が 90°に近く，励磁電流による外部からの磁束が，面内渦電流によって余り妨げられずに通ることが分かった。すなわち，抵抗支配の特性になっている。これは，積層間の絶縁層による磁気抵抗が大きいために，励磁電流と面内渦電流の相互リアクタンスが小さいことに原因がある。

④ 周波数 500[Hz]においては 10[Hz]や 50[Hz]に比べると，試料鋼板側面からみた渦電流の浸透深さが浅くなることが分かった。これは，鋼板厚さの半分と理論表皮深さが近い値になることによる。

⑤ 励磁電流と面内渦電流の位相差が 180°であり，試料磁束密度が渦電流によって大きく妨げられることが分かった。これは，周波数が大きくなって励磁電流と面内渦電流の相互リアクタンスが大きくなることに原因がある。すなわち，このときの渦電流は，リアクタンス支配特性になっている。

試料 50H400 の面内渦電流現象分析については，平成 25 年度に実施され，以下の結果を得た。

⑥ 50H400 の場合には，周波数 50[Hz]において既に，35H210 の周波数 500[Hz]における上記現象が幾分生じることが分かった。これは，35H210 に比べて 50H400 は鋼板厚さと導電率と占積率がいずれも大きいために，励磁電流と面内渦電流の相互リアクタンスが大きくなり，渦電流の等価抵抗が小さくなる為である。すなわち，リアクタンス支配特性になり易くなる。

以上の研究より，面内渦電流の現象解明と計算精度向上を目指した研究の基礎となる重要な測定データと知見が得られた。

(D) 産業用同期電動機の過負荷および始動特性の計算精度向上

過負荷時や始動時の特性解析方法の研究は，平成 27 年度から開始された。産業用の同期電動機として，塊状の突極形同期機が広く利用されている。本機では，しばしば全電圧始動方式が採用される。本機において，その設計段階で過負荷時や始動時の特性解析精度を向上すれば，より高性能な電動機が製造可能となる。すなわち，過負荷時の解析精度が向上すれば，出力密度が高く，低コストな電動機の設計に繋がる。始動時の解析精度が向上すれば，始動トルクが大きく，始動電流や磁極損失の少ない高性能な電動機の設計ができる。

＜平成27年度＞

定格電圧 120[V]，定格電流 7.5[A]の突極形塊状磁極同期機を対象にして，150[V]までの過電圧や 19.5[A]までの過電流を印加した過負荷時の測定と FEA を実施し，次の結果を得た。

① 過電流時においては，FEA の計算精度が比較的良好であることが分かった。過電圧時については，測定がうまく行っていない可能性があり，引き続き再測定を実施し，今後，学会等への公表を予定している。

② 本機を対象にして，全電圧始動時の測定設備を構築し，測定を実施した。全電圧始動に成功し，測定データを得ることができた。しかし，始動直後の電圧低下が大きいという問題点が残された。今後，測定方法を改良し，測定と同条件で FEA 解析を実施して，その計算精度を検証する予定である。

これらの成果は，今後，学会等への公表を予定している。

［課題 2］ 駆動用磁気エネルギーを無線により供給するマイクロマシンの開発

現在，エレクトロニクス，半導体と言った新しい技術の発展に従い，工業製品が大量生産され，かつ安価になってきた。大量かつ安価にコンピュータなどの複雑な製品を製作するには，機器の小型化（すなわちマイクロ化）が必要となり，モータなど動力を発

生するものも小型・軽量化が求められている。しかし，マイクロ化が進むに当って，物体を小さくすることだけであればマイクロメートル，ナノメートル単位まで小さくすることは可能であるが，安定した出力が持続的に発生できる機構を，そのまま物理的に小さくすることのみでは，ミリ単位のものでもかなり困難である。従来の考えとは異なる機構で，安定な動作を得るマイクロマシンが必要となっている。

本研究では，細管内で駆動するマイクロポンプに着目し，小型冷却装置などへの応用を可能とするアクチュエータの研究を行ってきた。動力が無線で供給できれば，壁内の配管や体内へのドラッグデリバリーが可能となり，応用分野の拡大が期待できる。小型アクチュエータの構造や動作を明らかにし，その特性を明確にして行く。

＜平成23～25年度＞

図 3.2-15 は，試作したマイクロポンプの動作原理を示す。図 3.2-16 に示す 520[turn]の電磁石を駆動源として用いる。交流電源より印加電圧 14[V_{rms}]，周波数 35～70[Hz]の範囲で駆動させ，水の流れる動作を検証した。

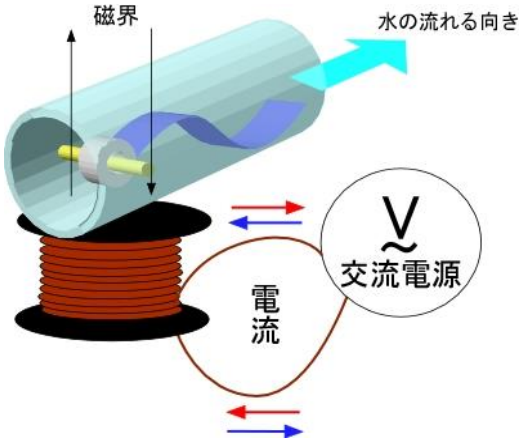


図 3.2-15　マイクロポンプの動作原理

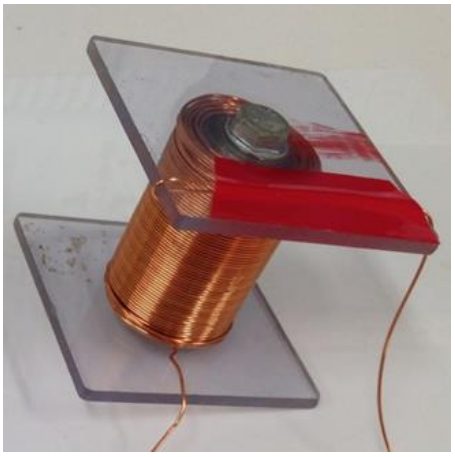


図 3.2-16　電磁石の外観

マイクロポンプの構造は　**図** 3.2-15 のように，内部を工業用の水で満たしたチューブ内にポンプの動力源であるアクチュエータを固定し，そのチューブを電磁石上部に配置する。その時，アクチュエータは電磁石からの磁界により駆動するようになっている。

水流の発生は，以下の原理に基づく。

(ⅰ) 交流電源より電磁石に交流電圧を印加すると電磁石に正・負の交流磁界が発生する。

(ⅱ) この交流磁界によりアクチュエータのリング状小型永久磁石が吸引・反発を繰り返し，正方向と負方向の半回転運動が発生する。

(ⅲ) この半回転往復運動により，リング状小型永久磁石と連動したフィンが上下に運動し，水を後部へ押し出すことによって，水流を発生させることができる。

パイプ内の流速計算方法について，以下に説明する。

(ⅰ) 高速度カメラを用い，撮影対象である 1[mm]角に刻んだ流動体をパイプ内に挿入し，水路内を 1 周する間を高速度カメラで撮影する。

(ⅱ) 流速は，その時にかかった撮影フレーム数から，(3.2-1)式と(3.2-2)式を用いて求める。また，流速の測定精度を上げるため，10 周分の流速を測定し、その平均値で表す。

$$t=X/C \quad [s] \qquad (3.2\text{-}1)$$

$$v=L/t \quad [mm/s] \qquad (3.2\text{-}2)$$

ここで，

t：流動体が測定範囲内を通過する時間 [s]

C：カメラの撮影フレーム [f/s]

X：流動体が測定範囲内を通過する撮影フレーム [f]

v：流速 [mm/s]

L：水路の全長 [mm]

表 3.2-1 と図 3.2-17 は，それぞれ水路長 L が 740[mm]である場合の流速測定結果を示す。

表 3.2-1　流速測定結果(水路長 L=740[mm])

周波数［Hz］	30	40	50	60	70
流速［mm/s］	59.55	74.74	81.37	81.49	52.09

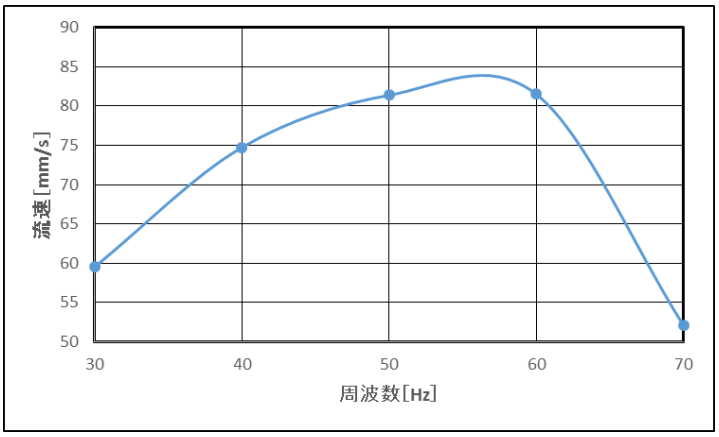


図 3.2-17　流速測定結果(水路長 L=740[mm])

実験の結果、以下の知見を得た。

① 周波数が 50～60[Hz]の時に流速が最大になることが分かった。アクチュエータが水を押し出すのに最適な動きは，50～60[Hz]であり，この周波数において動作の共振点があるものと考えられる。

② さらなる流速の向上には，電磁石の改良，アクチュエータのリング状永久磁石，およびフィン形状の改良が必要であることが分かった。

＜平成26～27年度＞

マイクロポンプを応用して，小型冷却装置の実験を行った。図 3.2-18 は，試作した冷却実験装置の外観を示す。

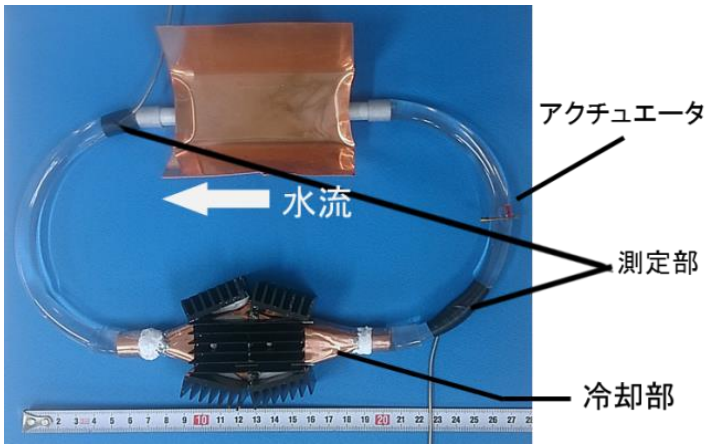


図 3.2-18　冷却実験装置の外観

加熱部と冷却部をパイプで結合し，その内部にアクチュエータを入れ，液体を循環させる。加熱部，冷却部でそれぞれ液温を測定する。冷却部では，放熱効果を上げるため面積の大きな銅製の平板を用いた。水路長 L は 740[mm]である。また，アクチュエータ

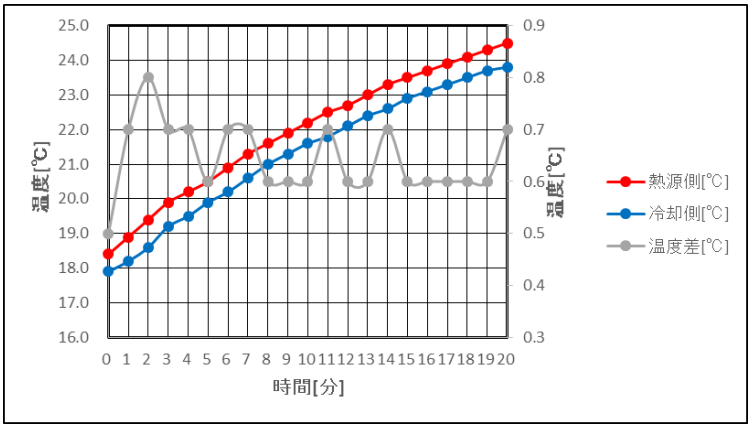


図 3.2-19　冷却実験の結果

を駆動するための電磁石は，520[turn]の電磁石を用い，補強長さ 3[mm]のアクチュエータを使用し，印加電圧は 14[V_{rms}]，周波数は 50[Hz]で実験を行った。図 3.2-19 は，冷却実験の結果（温度と経過時間の関係）を示す。実験の結果、以下の知見を得た。

① 駆動周波数が 50[Hz]の時，0.6～0.8[℃]の冷却効果があることが分かった。温度差が大きくなっていることより，冷却装置として適用できるものと考えられる。

② 外部より無線で小さなリング状永久磁石に磁界を駆動力として与えることにより，マイクロポンプを実現できることが示された。また，その応用として，小型冷却装置の実証実験を行い，良好に動作することを確認した。

現在，実験の精度が一部低いため，高精度化を検討している。

[課題 3]　超伝導応用によるエネルギー貯蔵および水浄化技術の開発

（１）超伝導エネルギー貯蔵装置(SMES)の基本設計と磁界解析

SMES が電力貯蔵技術として提案され，研究された背景には，超伝導マグネット技術が進歩したこととパワーエレクトロニクス技術の発展により大容量交直変換器が実現できるようになったことが挙げられる。電力貯蔵には，スマートグリッドの様に非常に多くの電力貯蔵装置（この場合は蓄電池が主流となる）があるが，ある程度大型の電力貯蔵装置も必要である。大規模 SMES の実現には，現状の技術レベルから克服すべき問題は多いが，SMES により期待される電力系統安定化への適用については，実験的研究で検証されている。SMES は多用途に適応できる電力貯蔵設備であり，電力の効率的安定供給に有益な設備である。

＜平成23～25年度＞

第 1 段階として，基礎的な技術蓄積を積み重ねて行くことが重要であり，その設計指針を必要とする。本研究では，複数のソレノイドコイルを円周上に配置して，トロイド型 SMES を構成する方式を検討した。複数のソレノイドコイルを分割して製作することにより，トロイド型 SMES の製作，運搬，設置にメリットが生まれ，経済的に有利になるものと考える。

インダクタンス L[H]と電流 I[A]は式（3.1）より両方が現実的に構成できる結果として，L＝8000[H]，I=5000[A]とした。

$$W=(1/2)LI^2 \quad [\mathrm{H}] \tag{3.2-3}$$

また，インダクタンス L[H]と総巻き数 N[turn]の関係式は，

$$L=(\mu_0 N^2 S)/l \quad [\mathrm{H}] \tag{3.2-4}$$

となる。ここで，

真空の透磁率：$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$　[H/m]

ソレノイドコイルの断面積：　S [m^2]

平均磁路長：l　[m]

表 3.2-2　コイルの仕様

貯蔵量(全体) [TJ]	300
基数	3000
貯蔵量(一基)[GJ]	100
電流 I [A]	5000
インダクタンス L [H]	8000
トロイド型半径 R [m]	10
平均磁路長 l [m]	62.832
巻数(全体) N [turn]	100000
ソレノイド断面積 S [m^2]	40
ソレノイド半径 r [m]	3.568
線材厚み [m]	0.0107
占有率 [%]	80

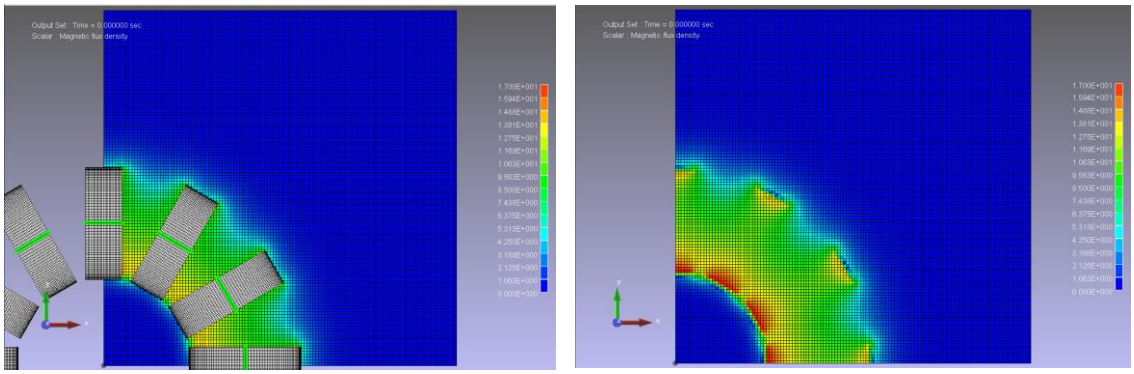
表 3.2-2 は，本研究で設計したコイルの仕様を示す。トロイド型半径 R を 10[m]と想定しているので, 平均磁路長 l [m]は l=62.832[m]となる。インダクタンス L[H]と電流 I[A]と同様にして平均磁路長 l [m]と (3.2-4)式より，総巻き数 N[turn]とソレノイドコイルの断面積 S[m^2]の値を検討し，N＝100000[turn]，S=40[m^2]を得た。

本研究では，フォトン社の有限要素解析ソフト PHOTO-Series（Ver 8.3）を用いて解析した。有限要素法を用いているので，解析領域をメッシュで分割し詳細な部分の解析が可能である。トロイド型 SMES を構成するソレノイドコイルを 4 個から 24 個まで 4 個単位で変化させ磁界・応力の解析を行った。

表 3.2-3 は，ソレノイドコイル数ごとの設計値を示す。超伝導線材料としては，臨界電流密度 [A/cm^2]，外場磁場 [T]，温度 [K]の 3 つの観点から Y 系線材を選定した。

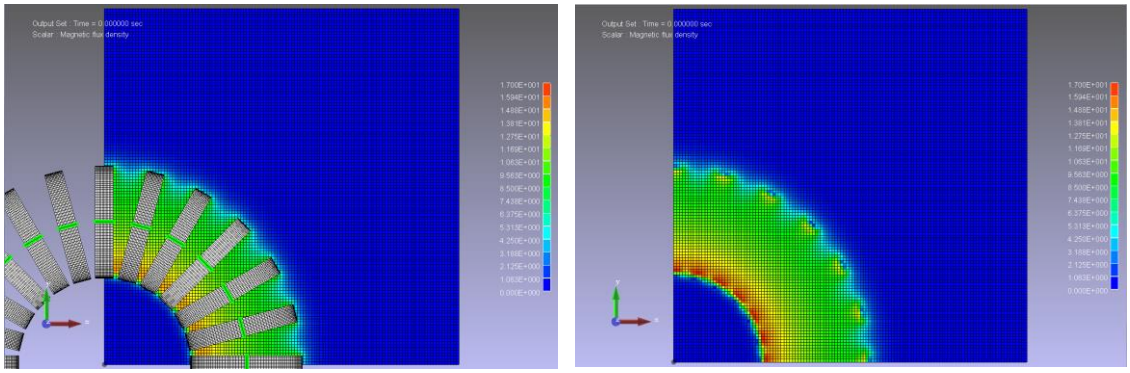
表 3.2-3　分割個数ごとの設計値

コイル個数[個]	4	8	12	16	20	24
角度[°]	90	45	30	22.5	18	15
一個当たりの巻き数Nx[turn]	25000	12500	8333	6250	5000	4167
コイルの高さH[m]	9.68	4.01	2.59	1.93	1.53	1.27
ソレノイド半径 r [m]	3.95					
内半径 R-r [m]	6.05					
幅方向の巻き数[turn]	35.71					
コイルの幅[m]	0.38					
節点電流 I x[A]	1.25×10^8	6.25×10^7	4.17×10^7	3.13×10^7	2.50×10^7	2.08×10^7



(a)　コイル表示あり　　(b)　コイル表示なし

図 3.2-20　磁界解析の結果（コイル: 12 個）



(a)　コイル表示あり　　(b)　コイル表示なし

図 3.2-21　磁界解析の結果（コイル: 24 個）

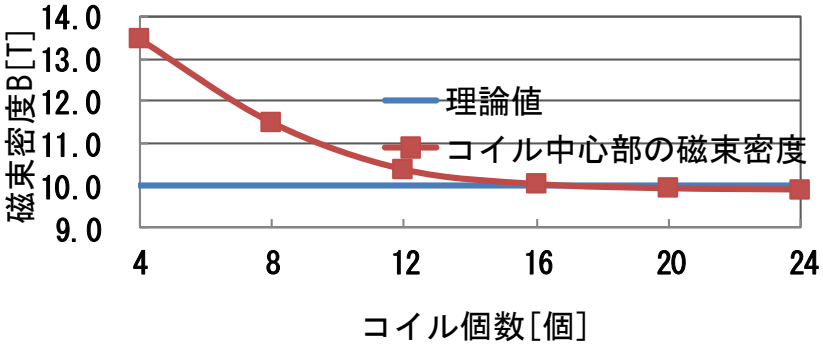


図 3.2-22　トロイド型 SMES の内部磁界とコイル個数の関係

図 3.2-20 と図 3.2-21 は，コイルの分割数が 12 個と 24 個に対する磁界解析の結果をそれぞれ示す。また，図 3.2-22 は，トロイド型 SMES の内部磁界とコイル個数の関係を示す。これらの解析より，以下の知見を得た。

① トロイド型 SMES のコイルの中心磁界は分割個数を増やす事で磁束密度が減少し，理論

値に近づくことが分かった。

＜平成26～27年度＞

昨年度までの解析法に基づいて，コイル個数ごとの距離と磁束密度の関係を明らかにした。

図 3.2-23 は，コイル個数ごとの距離と磁束密度の関係を示す。同図の「一般人立ち入り禁止区域」は 0.5[mT]で，地磁気が約 46[μT]である。

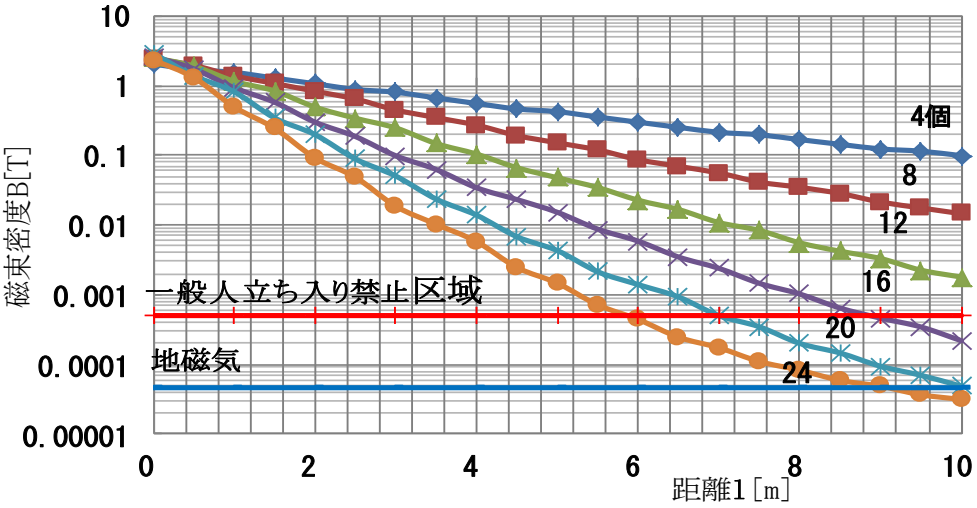


図 3.2-23　コイル個数ごとの距離と磁束密度の関係

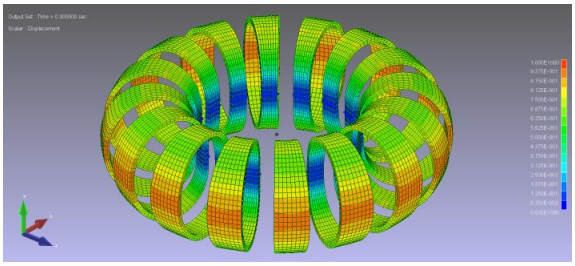
この解析結果から，以下の知見を得た。

① トロイド型コイルの中心から離れると磁束密度が減少する。また，コイル個数を増やすと磁束密度は減少する。

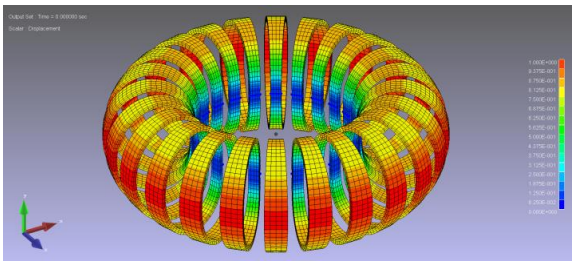
② コイル個数 16 個では，トロイド型外半径から約 9[m]，20 個では約 7[m]，24 個では約 6[m]の位置で，一般人立ち入り禁止区域の磁束密度を下回る。20 個と 24 個では，トロイド型外半径から 10[m]まで離れると，地磁気程度の磁束密度になる。

一方，応力解析では，磁界解析結果を基にソレノイドコイルの分割個数を 16，20，24 個の場合について解析を行った。図 3.2-24 は，分割個数ごとの変位における解析結果を示す。同図(a)は，分割個数 16 個の場合を示し，(b)は，分割個数 24 個の場合を示す。また，図 3.2-25 は，トロイド型 SMES の変位における断面図を示す。同図(a)は，解析前の断面図を示し，(b)および(c)は，コイル個数が 16 と 24 個の場合をそれぞれ示す。

なお，図 3.2-24 および図 3.2-25 において，最大値は 1[m]，最小値は 0[m]として示してある。

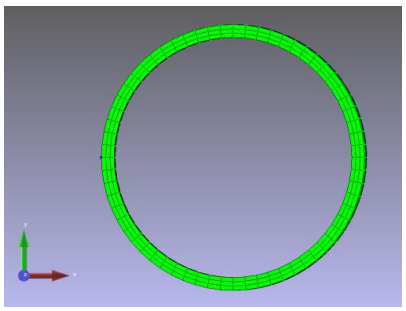


(a)　コイル個数 16 個

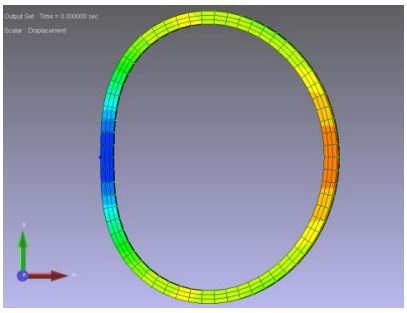


(b)　コイル個数 24 個

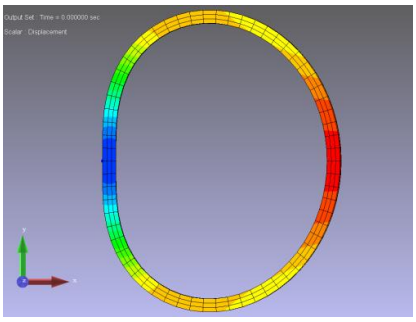
図 3.2-24　分割個数ごとの変位における解析結果



(a)　解析前の形状



(b)　コイル個数 16 個



(c)　コイル個数 24 個

図 3.2-25　コイル個数ごとの距離と磁束密度の関係

以上の解析より，以下の知見を得た。

① 図 3.2-25 より，トロイド型 SMES の断面図は，コイル個数による変位により大きさ

の違いは見られたが，応力により変形したコイルの形は，分割個数とは無関係に上下拡張した。

② 図 3.2-24 の中心部分（青色の部分）および図 3.2-25(b)と(c)の左側部分（青色の部分）は，変位拘束により固定してあり部分であり，解析の前後で設定した場所が動かないように固定してある。磁界解析結果において，一般人立ち入り禁止区域の観点からコイル個数 16 個以上が望ましい。また，応力解析結果においても，変位量の観点から同値のコイル個数 16 個が望ましいものと考えられる。

③ 上記 2 つの解析結果は，本研究の目的である「最適なトロイド型 SMES の設計指針」として，コイル個数が 16 個の時，現状では最適であると言える。

（２）ストロンチウム(Sr)とセシウム(Cs)への磁気種付けに関する実験的検討，および磁化活性汚泥の二次処理水に残留するリン・懸濁物質への磁気分離の適用検討

磁気力を利用して水中の弱磁性微粒子あるいは電離金属イオンを簡易に捕獲する手法としては，それらに直径数十[μm]以上の強磁性粒子を結合（磁気種付け）させることである。

＜平成23～25年度＞

平成 23 年度には，上記の手法を用いて，磁化活性汚泥処理水に含まれる不溶解有機浮遊物質とリンを除去する実験を行い，1,000[m/day]という高速処理が可能なことを見出した。しかし，放射性の ^{90}Sr や ^{137}Cs に対して直接磁気種付けすることは困難なため，3A と 4A および 5A 型ゼオライトの適用を試みた。すなわち，これに強磁性微粒子をゼオライトに担持させ，上記対象物質を吸着させる磁気分離前処理を提案し，これら 3 種類のゼオライトへの吸着実験を行った。

また，平成 24 年度にはセシウムで 3A 型，平成 25 年度にはストロンチウムで 4A 型のゼオライトが最適なことを明らかにした。図 3.2-26 と図 3.2-27 は，セシウム除去率とストロンチウム除去率の実験結果をそれぞれ示す。

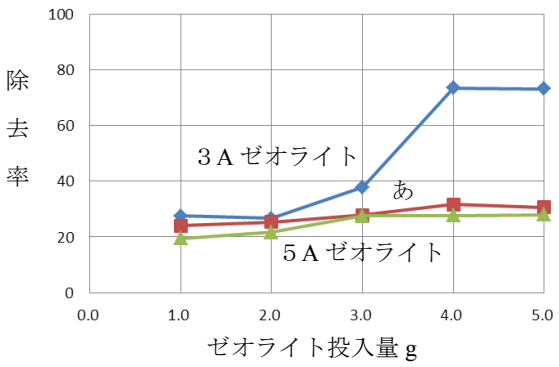


図 3.2-26　セシウム除去率

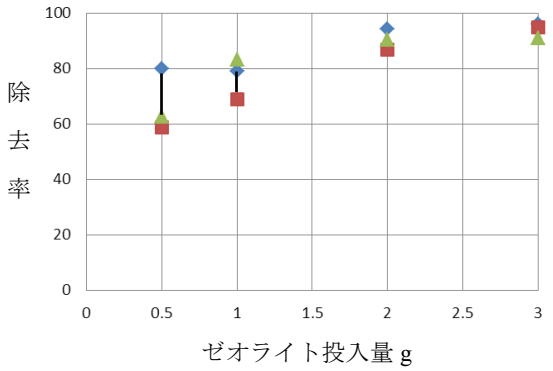


図 3.2-27　セシウム除去率

（3）磁気フィルタ性能に関する理論検討

混合系に対して磁気力を用い，特定物質を分離，濃縮あるいは浄化する技術が磁気分離である。この性能を桁違いに向上させたのが，1970 年代初期に発明された高勾配磁気分離法であった。その後，カオリン粘土精製や鉄鋼排水純化，あるいはガラス研磨廃棄物再資源化などに実用されるようになり，1990 年代半ばに実現された冷凍機冷却型超電導磁石によって，応用領域拡大のための研究開発が活発になった。本研究では，この技術と基礎理論の発展経緯を詳細に調査し，磁気フィルタ性能評価法を理論的に検討した。

＜平成23～25年度＞

被分離物質の磁化率に対する粒径限界と，磁気フィルタへの微粒子吸着パターンを明らかにした。図 3.2-28 は，被分離物質の磁化率に対する粒径限界を示す。

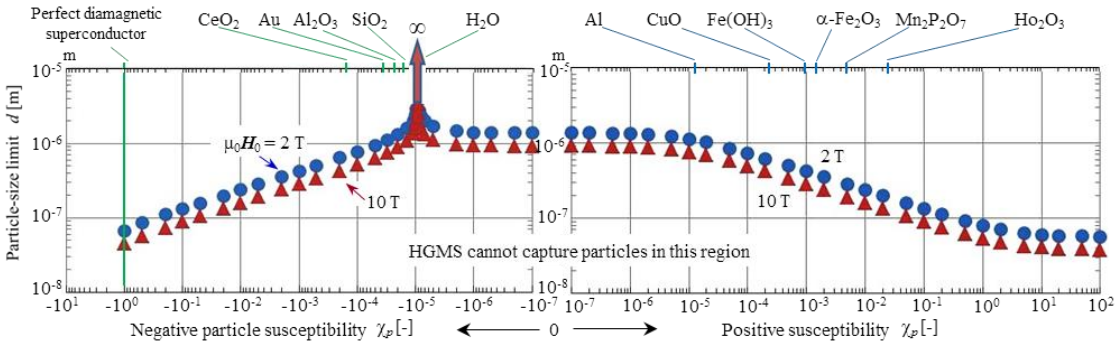


図 3.2-28　被分離物質の磁化率に対する粒径限界

＜平成26～27年度＞

表 3.2-4　放射性セシウム除染システムの概念設計

(a)　計算式と仕様数値および解析結果

1 初段単一磁性線あたりの流入粒子個数 N_{in}

$$N_{in} = \frac{V_0 L_y C_p \rho}{\pi b^2} \quad [個／秒・本] \quad \text{eq. 1}$$

ただし，ρ は一辺 $2a$ の正方形に対する直径 $2a$ の円の占積率

$$\rho = \pi a^2 / 4a^2 = 0.78540 \quad \text{eq. 2}$$

2 単一磁性線の最大捕獲粒子数 N_{max}

$$N_{max} = \frac{\pi\left[R_\zeta^2 - a^2\right]\rho/2}{\pi b^2} \quad [個／本] \quad \text{eq. 3}$$

3 磁気フィルタの閉塞時間 T_{sat}

$$T_{sat} = \frac{N_{max} \cdot X_L}{N_{in}} \quad [秒] \quad \text{eq. 4}$$

no	項目	OHモデル	FUモデル
1	流速 V_0	50 mm/s	20 mm/s
2	外部磁界 H_0	5.0 T	3.0～8.0 T
3	磁性線飽和磁化 M_s	1.6 T	2.0 T
4	磁性線半径 a	500 μm	
5	粒子半径 b	10 μm	
6	粒子捕獲半径 R_ζ	$4a$	$2a$
7	粒子磁化率 χ_p	0.002	0.001
8	粒子濃度 C_p	0.001	0.01
9	磁性線配列の段数 X_L	60 段	50 段
10	分散媒の粘性係数 η	—	0.001 Pa・s
11	分散媒の動粘性率 ν	1.0 mm²/s	—
12	真空の透磁率 μ	$4\pi \times 10^{-10}$ H/mm	

	OHモデル	FUモデル
閉塞時間 T_{sat}	23分34秒	2分27秒

(b)　キャニスタ径と浄化水量および捕獲量の計算

1 浄化水量 Q_w

$$Q_w = V_0 T \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times 10^{-9} \text{ [ton]} \quad \text{eq. 5}$$

ただし，

T [秒]：処理時間，

D [mm]：キャニスタ内径

2 捕獲量 Q_p

$$Q_p = Q_w C_p \times 10^{-3} \text{ [kg]} \quad \text{eq. 6}$$

ただし，

C_p [−]：被捕獲物質の濃度

注意：逆洗時間の考慮なし

内径100mmのキャニスタ使用

時間 T	浄化水量 Q_w	捕獲重量 Q_p
1分	23.56L	23.56g
1時間	1.414ton	1.414kg
1日	33.93ton	33.93kg
1か月	1,018ton	1.018ton
1年	12,380ton	12.38ton

内径200mmなら

時間 T	浄化水量 Q_w	捕獲重量 Q_p
1分	94.25L	94.25g
1時間	5.655ton	5.655kg
1日	135.7ton	135.7kg
1か月	4,072ton	4.073kg
1年	49,540ton	49.54ton

2:1 型粘土鉱物（バーミキュライト）を用いた放射性セシウム除染システムを設定し，

① 磁気フィルタに懸濁試料水を流し始めてから閉塞するまでの時間

② 磁気フィルタ径（キャニスタ径）に対する浄化量

を概算した。すなわちシステムモデルとして，印加磁界 5.0[T]，半径 500[μm]の強磁性線の飽和磁化 1.6[T]，粒子磁化率 0.002，土壌洗浄後のバーミキュライト濃度 0.1[%]，磁気フィルタ段数 60 段，浄化速度（流水速度）50[mm/s]，さらに内径 200[mm]磁気フィルタを採用し，1 年間稼働するものと設定して，表 3.2-4 の結果を得た。すなわち，上記①の時間は，23 分 34 秒であり，②浄化量は，水量約 50,000 トン浄化と約 50 トンのバーミキュライトを回収捕獲可能であり，従って，放射性セシウム除染システムの実現可能性の高いことが明らかにされた。

＜研究課題[Ⅱ]の研究成果リスト＞(＊：当該研究課題と直接的に関連した成果)

○雑誌論文

*1. Magnet Arrangement in Novel Flux-Modulating Synchronous Machines With Permanent Magnet Excitation: T. Fukami, Y. Ueno, K. Shima, IEEE Trans. on Magnetics, (査読有), Vol.51, No.11, Article #: 8206104 (2015)

*2. 永久磁石を用いた磁束変調同期機: 深見 正, 植野祐介, 島 和男, 電学論 D, (査読有), Vol.135, No.11, pp.1070-1076 (2015)

*3. Rotor Shape Optimization for Output Maximization of Permanent Magnet Assisted Synchronous Machines: K. Yamazaki, S. Tamiya, K. Utsuno, K. Shima, T. Fukami, M. Sato, IEEE Trans. on Industry Applications, (査読有), Vol. 51, No. 4, pp. 3077-3085 (2015)

*4. Progress in Magnetic Separation Technology for Processing Large Quantities of Dilute Suspensions: T. Ohara, J. Jpn. Soc. Powder and Powder Metallugy, (査読有), Vol. 61, pp. S139-S144 (2014)

*5. Arsenic Removal from Geothermal Water Using High Gradient Magnetic Separation: T. Ohara, H. Okada, S. Chida, J. Jpn. Soc. Powder and Powder Metallugy, (査読有), Vol. 61, pp. S150-S153 (2014)

*6. Analysis of Eddy-Current Losses in Solid Iron Under DC-Biased Magnetization Considering Minor Hysteresis Loops: K. Shima, T. Fukami, K. Miyata, C. Lee, Y. Furukawa, Elect. Eng. in Japan, (査読有), Vol. 188, No. 3, pp. 56-66 (2014)

*7. 磁束変調同期電動機: 深見 正, 山田知徳, 島 和男, 津田敏宏, 川村光弘, 電学論 D, (査読有), Vol. 134, No. 6, pp. 634-640 (2014)

8. 専門実験・演習 I 「変圧器の特性試験」科目におけるレポート再提出システム導入効果と改善策: 小原健司, 大澤直樹, 島 和男, KIT Progressー工学教育研究, No. 21 (2014)

9. 電気系電気機器科目への e-Learning 導入効果と実施上の課題: 小原健司, 加原智彦, 由本小百合, KIT Progressー工学教育研究, No. 21 (2014)

*10. Output Maximization of Salient-Pole Synchronous Machines by Using Additional Permanent Magnets: K. Yamazaki, S. Tamiya, K. Shima, T. Fukami, M. Sato, IEEJ Journal of Industry Applications, (査読有)Vol. 2, No. 6, pp. 276-282 (2013)

*11. 偏磁下におけるマイナーループを考慮した塊状鉄心渦電流損失解析: 島 和男, 深見 正, 宮田健治, 李 燦, 古川陽子, 電学論 D, (査読有), Vol. 133, No. 2, pp. 231-239 (2013)

*12. 磁束変調同期機の出力特性に及ぼす巻線取り付け位置の影響: 青木裕史, 深見 正, 島 和男, 津田敏宏, 川村光弘, 電学論 D, (査読有), Vol. 132,No. 9, pp. 922-930 (2012)

*13. 永久磁石補助突極形同期機の動作原理に基づく特性算定法: 山崎克巳, 民谷周一, 島 和男, 深見 正, 電学論 D, (査読有), Vol. 132,No. 9, pp. 931-937 (2012)

*14. Demagnetization Analysis of Additional Permanent Magnets in Salient-Pole Synchronous Machines with Damper Bars Under Sudden Short Circuits: T. Hosoi, H. Watanabe, K. Shima, T. Fukami, R. Hanaoka, S. Takata, IEEE Trans. Ind. Electron., (査読有), Vol. 59, No. 6, pp. 2448-2456 (2012)

*15. Estimation of Assist Effects by Additional Permanent Magnets in Salient-Pole Synchronous Generators: K. Yamazaki, K. Nishioka, K. Shima, T. Fukami, K. Shirai, IEEE Trans. Ind. Electron., (査読有), Vol. 59, No. 6, pp. 2515-2523 (2012)

*16. A Multipole Synchronous Machine With Non-Overlapping Concentrated Armature and Field Windings on the Stator: T. Fukami, Y. Matsuura, K. Shima, M. Momiyama, M. Kawamura, IEEE Trans. Ind. Electron., (査読有), Vol. 59, No. 6, pp. 2583-2591 (2012)

*17. Magnetic Circuit Analysis of Permanent-Magnet-Assisted Salient-Pole Synchronous Machines Under Steady States: T. Hosoi, K. Shima, T. Fukami, IEEE Trans. Ind. Applicat., (査読有), Vol. 48, No. 3, pp. 895-902 (2012)

*18. Assessment of Core Losses in a Flux-Modulating Synchronous Machine: T. Fukami, H. Aoki, K. Shima, M. Momiyama, M. Kawamura, IEEE Trans. Ind. Applicat., (査読有), Vol. 48, No. 2, pp. 603-611 (2012)

*19. Modeling of Salient-Pole Synchronous Machines Assisted by Permanent Magnets: K. Yamazaki, S. Tamiya, K. Shima, T. Fukami, K. Shirai, IEEE Trans. Magnetics, (査読有), Vol. 47, No. 10, pp. 3028-3031 (2011)

*20. 大量希薄懸濁系処理への磁気分離技術応用に関する研究開発: 小原健司, 低温工学, (査読有), Vol. 46, No. 11, pp. 617-628 (2011)

○学会発表

＜国際会議プロシーディング＞

*1. T. Fukami, Y. Ueno, K. Shima: Magnet Arrangement in Novel Flux-Modulating Synchronous Machines with Permanent-Magnet Excitation, IEEE International Magnetics Conference, INTERMAG 2015 Beijing, China, EZ-07 (2015)

*2. K. Shima, K. Fujinuki, T. Matsumoto, T. Fukami: Measurement of Surface Losses in Solid Poles of Synchronous Machines Under Load Conditions, IEEE International Magnetics Conference, INTERMAG 2015 Beijing, China, HX-02 (2015)

*3. K. Yamazaki, K. Utsuno, K. Shima, T. Fukami, M. Sato: Rotor Shape Optimization for Output Maximization of Permanent Magnet Assisted Synchronous Machines, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, USA, P4305 (2014)

*4. T. Fukami, T. Masuda, K. Shima: Proposal and Analysis of a Novel Single-Phase, Flux-Switch Alternator with an Outer-Rotor Configuration, IEEE International Magnetics Conference, INTERMAG Europe 2014, Dresden, Germany, GQ-10 (2014)

*5. K. Shima, K. Fujinuki, T. Fukami: Comparison of eddy current losses under no-load and load conditions in solid poles of salient-pole synchronous machines, IEEE International Magnetics Conference, INTERMAG Europe 2014, Dresden, Germany, EQ-04 (2014)

*6. K. Shima, M. Sato, T. Fukami: Reduction Effect of Excitation Losses in a Permanent-Magnet-Assisted Salient-Pole Synchronous Machine with Narrow Pole Bodies, I International Conference on Electrical Machines and Systems 2013 (ICEMS2013), Busan, Korea, No. SMD-0620, pp. 95-100 (2013)

*7. K. Shima, N. Kobayashi, T. Fukami, K. Miyata, C. Lee, Y. Furukawa, A. Komura: Surface-loss analysis in approximate models of grooved solid-pole synchronous machines considering minor hysteresis loops, ISEF 2013 - International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Ohrid, Macedonia, No. PS4-112, pp. 1-6 (2013)

*8. T. Ohara: Progress of Magnetic Separation Technology for Processing Large Quantities of Dilute Suspensions, 11th Int. Conf. Ferrites, Okinawa, Japan, p. 39 (2013)

*9. T. Ohara, H. Okada, S. Chida: Arsenic Removal from Geothermal Water Using High Gradient Magnetic Separation, 11th Int. Conf. Ferrites, Okinawa, Japan, p. 43 (2013)

*10. H. Hayashi, M. Anata, T. Ohara: Particle Capture Performance of HGMS Filters by Use of Both Diamagnetic and Ferromagnetic wires, 11th Int. Conf. Ferrites, Okinawa, Japan, p. 260 (2013)

*11. K. Yamazaki, S. Tamiya, K. Shima, T. Fukami, M. Sato: Output Maximization of Salient-Pole Synchronous Machines by Using Additional Permanent Magnets, Proc. Int. Conf. Elect. Mach. And Syst. (ICEMS), 札幌, No. LS3C-4 (2012)

*12. K. Shima, T. Murai, T. Fukami, Y. Furukawa, A. Komura: Measurement and Analysis of In-Plane Eddy Current in Lamination Steel Using a New Tester, Proc. Int. Conf. Elect. Mach. (ICEM), Marseille, pp. 1769-1775 (2012)

*13. T. Fukami, K. Shima, T. Tsuda, M. Kawamura: Prediction of Field Currents in Flux-Modulating Synchronous Machines Under Loaded Conditions, Proc. Int. Conf. Elect. Mach. (ICEM), Marseille, pp. 439-444 (2012)

*14. K. Yamazaki, K. Shima, T. Fukami: Reduction of Magnetic Saturation by Using Additional Permanent Magnets in Synchronous Machines, Energy Conv. Congr. and Exposition (ECCE), Arizona, pp. 1560-1567 (2011)

*15. T. Fukami, H. Aoki, K. Shima, M. Momiyama, M. Kawamura: Assessment of Core Losses in a Flux-Modulating Synchronous Machine, IEEE Int. Elect. Mach. and Drives Conf. (IEMDC), Niagara Falls, No. PS-03.34, pp. 1514-1519 (2011)

*16. T. Hosoi, K. Shima, T. Fukami: Magnetic Circuit Analysis of Permanent-Magnet-Assisted Salient-Pole Synchronous Machines Under Steady States, IEEE Int. Elect. Mach. and Drives Conf. (IEMDC), Niagara Falls, No. S-06 MA.5, pp. 464-469 (2011)

*17. K. Yamazaki, S. Tamiya, K. Shima, T. Fukami, K. Shirai: Modeling of Salient-Pole Synchronous Machines Assisted by Permanent Magnets, IEEE Int. Magnetics Conf. (Intermag), Taipei, No. CF-11 (2011)

*18. H. Watanabe, K. Shima, T. Fukami, K. Miyata, C. Lee, Y. Furukawa: Finite Element Analysis of Surface Losses in Solid Iron Under DC Biased Magnetization Considering Magnetic Hysteresis, IEEE Int. Magnetics Conf. (Intermag), Taipei, No. AZ-12 (2011)

＜国内学会講演発表＞

19. 小原健司: 発電・送電・電車＋超電導の話,ライセンスアカデミー，富山，(2016.3)

*20. 松本拓也，島 和男，深 見正，宮田健治，李 燦: 塊状鉄心環状試料の初期偏磁状態が表面損失に及ぼす影響, 電気学会研究会資料，秋田，RM-15-124，pp. 79-84 (2015)

21. 尾佐素士，鈴木貫太，小原健司: 超電導マグネットを用いたモーゼ効果の応用に関する研究，第 14 回磁気力制御・磁場応用研究会，金沢，P-6 (2015)

*22. 宮崎安津人，望月寛紀，小原健司: 瞬時的なローレンツ力を利用した導電性金属分離の可能性検討, 第 14 回磁気力制御・磁場応用研究会，金沢，P-7 (2015)

*23. 奥野雅徳，中田悠登，小原健司: インバータ由来伝導性 EMI の低減に必要な LC フィルタの設計と性能評価，第 14 回磁気力制御・磁場応用研究会，金沢，P-8 (2015)

24. 佐藤瞭，西村勇哉，小原健司: 磁気記録媒体への磁場影響, 第 14 回磁気力制御・磁場応用研究会，金沢市，P-9 (2015)

25. 戸塚慶文，松永大，小原健司: 金属球の段階的加速を目指した電磁射出実験, 第 14 回磁気力制御・磁場応用研究会，金沢市，P-10 (2015)

*26. 植野佑介，深見 正，島 和男: HEV 用磁束変調同期機の設計と特性シミュレーション, 電気関係学会北陸支部連合大会，金沢，No. A3-3 (2015)

*27. 小原健司: 磁気分離の基礎Ⅱ,電気学会「除染技術への超電導磁気力制御法の適用」調査専門委員会，金沢，(2015.9)

*28. 植野佑介，深見 正，島 和男: 永久磁石を用いた磁束変調同期機の試作，電気学会研究会資料，大阪，RM-14-124，pp. 79-84 (2014)
*29. 藤抜 翔，松本拓也，島 和男，深見 正: 突極形塊状磁極同期機の負荷時表面損失の測定および現象分析，電気学会研究会資料，大阪，RM-14-123，pp. 73-78 (2014)
30. 阿部茂樹，西谷健志，小原健司: 導電性金属に電磁力を効果的に与えるパルス磁場の検討，第 13 回磁気力制御・磁気応用研究会，宇都宮, P-6 (2014)
*31. 石塚貴久，菅本紘平，竹内俊哉，小原健司: ローレンツ力利用による導電性－非導電性球体の分離，第 13 回磁気力制御・磁気応用研究会，宇都宮, P-7 (2014)
32. 北居直也，吉田極，梶谷昂平，高山俊，小原健司: 空気中の酸素濃度に与える高磁界高勾配磁場の影響に関する実験的検討, 第 13 回磁気力制御・磁気応用研究会, 宇都宮, P-8 (2014)
33. 増田貴文，深見 正，島 和男: 磁束スイッチの原理を利用した自転車用ハブ発電機の設計と特性シミュレーション，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，No. A26 (2014)
*34. 植野佑介，深見 正，島 和男: 磁束変調同期電動機の運転特性，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，No. A30 (2014)
*35. 山中佑士，深見 正，島 和男: 永久磁石形磁束変調同期機における磁石配置が特性に及ぼす影響，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，No. A31 (2014)
*36. 村椿侑人，中橋拡冶，橋 大雅，金丸保典: トロイド型 SMES の磁界および応力解析に関する研究，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，No. A39 (2014)
37. 熊野照久，島 和男，深見 正，山本 修，新 政憲，木村 守: 産業応用フォーラム「特殊同期機の現状と将来動向」構造が特殊な同期機，特殊同期機の現状と将来動向調査専門委員会，東京(2014)
*38. 山崎克巳，宇都野和哉，島 和男，深見 正，佐藤真人: 永久磁石補助突極形同期機における出力最大化のための形状最適化と実機検証，電学全国大会，愛媛，Vol. 5, No. 28, pp. 50-51 (2014)
*39. 深見 正，山田知徳，島 和男，津田敏宏，川村光弘: 外転型磁束変調同期電動機の特性，電気学会研究会資料，仙台，No. RM-13-138, pp. 77-82, (2013)
*40. 山崎克巳，宇都野和哉，島 和男，深見 正，紺谷貞臣，山田知徳: 可変速永久磁石補助突極形同期機の電磁界解析と実機検証，電気学会研究会資料, 仙台, No. RM-13-121, pp. 83-88, (2013)
*41. 小林伸幸，島 和男，深見 正，宮田健治，李 燦，古川陽子，小村昭義: ヒステリシスを考慮したグルーブ付き塊状鉄心の偏磁状態における表面損失解析，電気学会研究会資料，仙台，RM-13-120, pp. 77-82, (2013)
*42. 林 裕之，小原健司: 並流型高勾配磁気分離フィルタの性能解析，第 12 回磁気力制御・磁場応用研究会，神戸, P-18 (2013)
*43. 丸山翔平，今井 達，小原健司: 超電導磁石を用いた鉄球磁気フィルタによるステンレス小片の分離，第 12 回磁気力制御・磁場応用研究会，神戸, P-19 (2013)
44. 黒本英祥，中島徹士，渡辺卓，稲子仁志，大鍛冶泰成，小原健司: 磁気ブレーキを用いた球体分離に関する研究，第 12 回磁気力制御・磁場応用研究会，神戸, P-20 (2013)
45. 中澤弘樹，近藤陽介，小原健司: ろうそく燃焼炎に与える磁場効果に関する実験的研究，第 12 回磁気力制御・磁場応用研究会，神戸, P-21 (2013)
*46. 深田雄斗，日南田拓郎，小原健司: 磁気処理水の検討 : 溶存酸素濃度への磁場印加効果，第 12 回磁気力制御・磁場応用研究会，神戸, P-22 (2013)
47. 梶谷昂平，高山 俊，山上貴大，山田紘之，小原健司: 超電導磁石による高磁界を用いた空

気の酸素富化実験，第 12 回磁気力制御・磁場応用研究会，神戸, P-23 (2013)

*48. 紺谷貞臣，山田知徳，島 和男，深見 正，山崎克巳: 永久磁石補助突極形同期機の電動機駆動試験，電気関係学会北陸支部連合大会，金沢，No. A3-33 (2013)

*49. 山田知徳，深見 正，島 和男: 外転型磁束変調同期機のトルク発生メカニズム，電気関係学会北陸支部連合大会，金沢，No. A3-31 (2013)

*50. 藤抜 翔，島 和男，深見 正: 各種運転状態における塊状磁極同期機の表面損失解析，電気関係学会北陸支部連合大会，金沢，No. A3-31 (2013)

*51. 牧野孝彦，村椿侑人，中村亮士，滝本真也，金丸保典: ユニットコイルを用いたトロイド型 SMES の磁界解析に関する研究，電気関係学会北陸支部連合大会，金沢，No. A3-2 (2013)

52. 島 和男，深見 正: 座学・コンピュータ実習・発表を統合した電気系専門科目の授業改善，工学教育研究講演会，新潟，No. P-03, pp. 702-703 (2013)

*53. 山田知徳, 深見 正, 島 和男: 外転型磁束変調同期機の試作，電学産業応用部門大会, 山口，Vol. 3, No. 19, pp. 147-148 (2013)

*54. 笠原祥宏，深見 正，島 和男，津田敏宏，川村光弘: 磁束変調同期機の特性予測，電気学会全国大会講演論文集，名古屋，Vol. 5, No. 54, (2013)

*55. 山田知徳，深見 正，島 和男，津田敏宏，川村光弘: 磁束変調同期機の dq 軸インダクタンス，電気学会全国大会講演論文集，名古屋，Vol. 5, No. 53 (2013)

*56. 下出均樹，深見 正，島 和男，津田敏宏，川村光弘: 磁束変調同期機の無負荷飽曲線に関する考察，電気学会全国大会講演論文集，名古屋，Vol. 5, No. 52，(2013)

*57. 田村淳二，島 和男，木村　守: 二重給電交流機の実用例，電気学会全国大会講演論文集，名古屋，Vol. S19, No. 4 (2013)

*58. 熊野照久，島 和男，深見 正，山本 修，新 政憲，木村 守: 構造が特殊な同期機，電気学会全国大会講演論文集，名古屋，Vol. S19, No. 2 (2013)

*59. 山崎克巳，民谷周一，島 和男，深見 正，佐藤真人: 永久磁石補助突極形同期機における出力最大化のための形状最適化に関する検討，電気学会全国大会講演論文集, 名古屋, Vol. 5, No. 30, (2013)

*60. 佐藤真人，島 和男，深見 正: 磁極胴部幅を縮小した永久磁石補助突極形同期機の抵抗負荷時における励磁損低減効果，電気学会全国大会講演論文集，名古屋，Vol. 5, No. 29，発表予定 (2013)

*61.山崎克巳，宇都野和哉，島 和男，深見 正: 永久磁石補助突極形同期機の可変速電動機への応用に関する検討，電学回転機研資，大阪，RM-12-76 (2012)

*62. 山崎克巳，民谷周一，島 和男，深見 正: 永久磁石補助突極形同期機における出力向上のための新設計と実機検証，電学回転機研資，東京，RM-12-58，pp. 25-30 (2012)

*63. 下代亮介，富田祥吾，小原健司: セシウムとストロンチウムの磁気種付け法に関する検討，第 11 回磁気力制御・磁気応用研究会，東京, P-1 (2012)

*64. 林 裕之，穴田昌之，小原健司: 並流型多数本磁性線磁気分離フィルタ性能の理論解析，第 11 回磁気力制御・磁気応用研究会，東京, P-2 (2012)

65. 北村裕樹，前田壮太，小原健司: 瞬時的ローレンツ力の効果的発生に関する実験的研究，第 11 回磁気力制御・磁気応用研究会，東京, P-3 (2012)

*66. 小原健司: 磁気分離研究の歴史と最近の動向，第 11 回磁気力制御・磁気応用研究会，東京，講義Ⅴ (2012)

*67. 川上慎太郎，島 和男，深見 正，古川陽子，小村昭義: 新構造の試験器を用いた面内渦電流損失の計算精度評価，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，No. A-38 (2012)

*68. 小林伸幸，島 和男，深見 正，古川陽子，小村昭義: 新構造の面内渦電流損試験器による損失測定方法の妥当性評価，電気関係学会北陸支部連合大会，富山，No. A-37 (2012)

*69. 佐藤真人，島 和男，深見 正: 永久磁石補助突極形同期機の減磁解析の精度評価，電学産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション講演論文集，千葉，No. Y-83 (2012)

*70. 矢野貴史，深見 正，島 和男: 5 相突極形同期機の出力解析，電学産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション講演論文集，千葉，No. Y-82 (2012)

*71. 下出均樹，深見 正，島 和男，津田敏宏，川村光弘: 磁束変調同期機における界磁電流の算定，電学産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション講演論文集，千葉，No. Y-80 (2012)

*72. 山田知徳，深見 正，島 和男，津田敏弘，川村光弘: 外転型磁束変調同期機のトルク解析，電学産業応用部門大会ヤングエンジニアポスターコンペティション講演論文集，千葉，No. Y-79 (2012)

*73. 山崎克巳，民谷周一，島 和男，深見 正: 永久磁石補助突極形同期機における出力向上のための新設計に関する検討，電気学会全国大会講演論文集，広島，Vol. 5, No. 24, pp. 40-41 (2012)

*74. 村井丈夫，島 和男，深見 正,古川陽子,小村昭義: 新構造の試験器を用いた面内渦電流現象の基礎検討，電学マグネティックス研資，大阪，MAG-11-122，pp. 37-42 (2011)

*75. 青木裕史，深見 正，島 和男，津田敏宏，川村光弘: 磁束変調同期機の出力特性に及ぼす電機子巻線取り付け位置の影響

*76. 山崎克巳，民谷周一，島 和男，深見 正: 永久磁石補助突極形同期機の動作原理と特性算定法に関する検討，電学回転機研資，長崎，RM-11-120，pp. 145-150 (2011)

*77. K. Shima, T. Fukami, K. Miyata, C. Lee, Y. Furukawa: Effect of Magnetic Hysteresis on Surface Losses in Solid Iron Under DC-Biased Magnetization, 電学マグネティックス研資，北九州市，MAG-11-19，pp. 37-41 (2011)

*78. 宮澤拓也，松下怜史，小原健司: セシウムとストロンチウムの磁気種付け法に関する検討，第 10 回磁気力制御・磁気応用研究会，大阪, P-9 (2011)

79. 柳村 拓，川端 徹，小原健司: 瞬時的ローレンツ力の効率的発生に関する実験的研究，第 10 回磁気力制御・磁気応用研究会，大阪, P-10 (2011)

*80. 宮本悠平，林 裕之，小原健司: 磁気分離性能の理論解析 : 多数本円柱磁性線の粒子捕獲，第 10 回磁気力制御・磁気応用研究会，大阪, P-11 (2011)

*81. 小原健司: 大量希薄懸濁系処理への磁気分離技術応用に関する研究開発，第 10 回磁気力制御・磁気応用研究会，大阪，講義 I (2011)

*82. 村井丈夫，島 和男，深見 正，古川陽子，小村昭義: 新構造の試験器を用いた有限要素解析による面内渦電流損計算精度の評価，電気関係学会北陸支部連合大会，福井，No. A-50 (2011)

83. 茗荷谷貴幸，岡田淳基，木戸俊一，引田 秀，金丸保典: 渦流探傷法を用いた金属板の探傷に関する研究，電気関係学会北陸支部連合大会，福井，No. A-83 (2011)

*84. 小堀 麦，牧野孝彦，田島大夢，金丸保典: ユニットコイルを用いたトロイド型 SMES の磁界解析に関する研究，電気関係学会北陸支部連合大会，福井，No. A-77 (2011)

85. 西田 翔，島崎芳隆，押田晃暢，金丸保典: 磁性流体を用いた水平・傾斜角の構造と特性に関する研究，電気関係学会北陸支部連合大会，福井，No. A-78 (2011)

86. 浜田祐輔，茗荷谷貴幸，岡田淳基，黒瀬将斗，金丸保典: 渦流探傷法を用いた金属板の探

傷に関する研究，電気関係学会北陸支部連合大会，福井，No. A-79 (2011)

*87. 小林 力，酒井保蔵，サハ・ミヒル・ラル，小原健司: 磁化活性汚泥法からの二次処理水に残留するリン・懸濁物質の高速除去のための磁気分離法の検討，第 84 回 2011 年度春季低温工学・超電導学会，つくば市 (2011.5)

○図 書

1. 技術報告第 1301 号「特殊同期機の現状と将来動向」，特殊同期機の現状と将来動向調査専門委員会（副委員長：深見 正，幹事：島 和男ほか），電気学会，43 頁， (2014. 2)
2. 電気工学ハンドブック（第 7 版）（15 編 10 章：誘導機担当），深見 正，オーム社，ISBN978-4-274- 21382-3，全 2681 頁のうち 794-798 頁執筆担当， (2013. 9)
3. 改訂新版　電験第 3 種ニューこれだけシリーズ③「これだけ機械」，深見 正，深澤一幸，電気書院， ISBN978-4-485-11907-5，全 494 頁，(2013. 5)

○新聞報道等

1. 電気学会・産業応用部門　「部門論文賞」: 島 和男，深見 正，宮田健治，李 燦，古川陽子，電気学会・産業応用部門，2014 年 8 月 27 日

○特 許

*1. 発明の名称: ハイブリッド界磁式ダブルギャップ同期機
発明者: 森剛，中野正嗣，深見正，小山正人，島和男， 出願人：三菱電機㈱，金沢工業大学
出願日，出願番号等： 2016 年 1 月 28 日，特願 2016-013959

*2. 発明の名称: 発電機
発明者: 島 和男，深見 正，藤原岳志，神部拓郎，出願人：金沢工業大学，㈱シマノ
出願日，出願番号等： 2015 年 2 月 9 日，特願 2015-023222

*3. 発明の名称: 発電機
発明者: 島 和男，深見 正，藤原岳志，神部拓郎，出願人：金沢工業大学，㈱シマノ
出願日，出願番号等： 2015 年 2 月 9 日，特願 2015-023223

*4. 発明の名称: 回転電機
発明者: 津田敏宏，川村光弘，深見 正，島 和男，出願人：東芝三菱電機産業システム㈱，金沢工業大学
出願日，出願番号等： 2015 年 2 月 13 日，特許第 5695748 号

*5. 発明の名称: 同期回転機
発明者: 樅山雅俊，川村光弘，深見正，島和男，松浦吉高，出願人：東芝三菱電機産業システム㈱，金沢工業大学
出願日，出願番号等： 2015 年 7 月 17 日，特許第 5778391 号

*6. 発明の名称: 突極形の同期機
発明者: 島 和男，深見 正，花岡良一，高田新三，出願人：金沢工業大学
出願日，出願番号等： 2014 年 4 月 25 日，特許第 5530642 号

*7. 発明の名称: 永久磁石同期回転機
発明者: 深見 正，島 和男，出願人：金沢工業大学
出願日，出願番号等： 2013 年 10 月 1 日特願 2013-206013

*8. 発明の名称: 回転機及び回転機を製造する方法
発明者: 島 和男, 深見 正, 花岡良一, 高田新三, 出願人：金沢工業大学
出願日, 出願番号等：平成 24 年 11 月 2 日, 特許第 5120801 号
*9. 発明の名称: 磁気フィルター
発明者: 加藤誠一, 品川秀行, 木戸義勇, 小原健司, 出願人：(独)物質･材料研究機構
出願日, 出願番号等：平成 23 年 9 月 30 日, 特許第 4831493 号
*10. 発明の名称: 磁気フィルター
発明者: 加藤誠一, 品川秀行, 木戸義勇, 小原健司, 出願人：(独)物質･材料研究機構
出願日, 出願番号等：平成 23 年 9 月 30 日, 特許第 4831494 号
*11. 発明の名称: 磁気フィルター
発明者: 加藤誠一, 品川秀行, 木戸義勇, 小原健司, 出願人：(独)物質･材料研究機構
出願日, 出願番号等：平成 23 年 9 月 30 日, 特許第 4831495 号
*12. 発明の名称: 磁気フィルター
発明者: 加藤誠一, 品川秀行, 木戸義勇, 小原健司, 出願人：(独)物質･材料研究機構
出願日, 出願番号等：平成 23 年 9 月 30 日, 特許第 4831496 号
*13. 発明の名称: 同期回転機
発明者: 樅山雅俊, 川村光弘, 深見 正, 島 和男, 松浦吉高, 出願人：東芝三菱電機産業システム, 金沢工業大学
出願日, 出願番号等：平成 23 年 9 月 1 日, 特開 2011-172369

３．３　研究課題[Ⅲ]：光・電子デバイス・システムの開発研究

[課題 1]　環境調和型光・電子デバイス・システムの研究開発

（１）酸化亜鉛/亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池の基礎的な作製技術に関する研究，および多結晶亜酸化銅シートの作製と新規な高品質酸化物半導体材料に関する研究

p 形伝導性を示す酸化物半導体である Cu_2O は，極めて安価で且つ，無毒であるため太陽電池材料として期待されており，理想的な pn ホモ接合が実現できれば期待される理論変換効率は約 20[%]とされ，これまでも世界中で極めて活発に研究が実施されている。しかし、現在のところ n 形の Cu_2O は作成することが極めて困難であり，良好な pn ホモ接合は実現されていない。従って，p 形の Cu_2O と n 形の半導体を用いたヘテロ接合太陽電池でなければ高い変換効率を達成することは困難である。しかし，高変換効率を達成できる n 形半導体は，材料および作成技術共に確立されていない。また，Cu_2O に関しても，バルク多結晶や薄膜作成は報告されているが，高変換効率を実現できる超高品質 Cu_2O 作成技術は確立されていない。従って，高変換効率を実現できる Cu_2O ヘテロ接合太陽電池を実現するためには，超高品質 Cu_2O 作成技術および高品質 n 形半導体層形成技術の確立，ならびに Cu_2O ヘテロ接合に最適な n 形半導体材料の探索が不可欠である。

当該プロジェクトにおいて達成された最高変換効率の年次推移を図 3.3-1 に示す。同図に示すように，本プロジェクトの実施期間である平成 23～27 年の間に変換効率は約 4 倍向上し，Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池の理論変換効率に迫る高変換効率を実現できた。同図には Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電，池の研究を実施している国内外の主要な研究機関から報告されている変換効率の年次推移も合せて示している。同図から明らかなよ

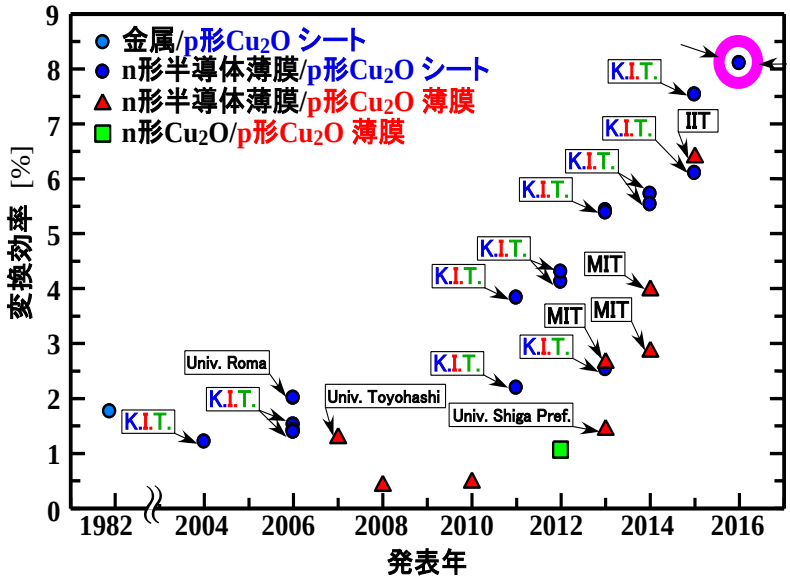


図 3.3-1　Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池の変換効率の年次推移

うに，平成 28 年 3 月現在において，本プロジェクトで実現された変換効率 8.1[%]は世界のトップデータである。以上ことから当該プロジェクトの目標達成率は 100[%]%以上である。以下に各年度に対応した研究成果を記載する。

＜平成23～24年度＞

酸化亜鉛/亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池の基礎的な作製技術においては，(A)熱酸化法による超高品質多結晶 Cu_2O シート作成技術，および(B)パルスレーザー蒸着（PLD）法による酸化亜鉛系薄膜（n 形層及び透明電極層）作成技術をそれぞれ確立し，Cu_2O ヘテロ接合太陽電池を再現性良く作製する技術が確立できた。得られた成果は以下に要約される。

(A)　超高品質多結晶 Cu_2O シート作成技術の確立

高性能の移動度等が期待できる熱酸化法による超高品質バルク多結晶亜酸化銅シート作成技術を確立した。具体的には，脱脂洗浄後の厚さ約 0.5[mm]の銅板を不活性ガスである Ar ガス及び銅の酸化を促進する乾燥空気を使用して雰囲気を制御し，熱処理の温度制御を最適化することにより，図 3.3-2 に示すような超高品質バルク多結晶亜酸化銅シートが実現できた。作成した高品質多結晶亜酸化銅シートは p 形伝導性を示し，ホール移動度 100 [cm^2/Vs]以上の高い移動度が実現できた。

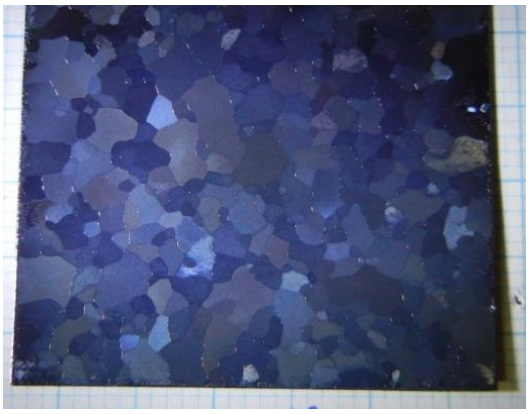


図 3.3-2　高品質多結晶亜酸化銅シート

(B)　パルスレーザー蒸着（PLD）法による酸化亜鉛系薄膜（n 形層及び透明電極層）作成技術の確立並びにヘテロ接合 Cu_2O 太陽電池作製プロセスの確立

本研究では，Cu_2O 基板上に Al 添加 ZnO(AZO)透明導電膜等の酸化亜鉛系薄膜を成膜する方法とて，ArF エキシマレーザーを用いるパルスレーザー蒸着(PLD)法を採用し，PLD 法による高品質酸化亜鉛系薄膜を作成するためのターゲットペレット作成技術，な

らびに各種製膜条件について検討した。

① ZnO 粉末を 3[t/cm^2]のプレス圧でコールドプレス整形し、その後，Ar ガス雰囲気中 1000[℃]で焼結を行うことにより，PLD 法で使用可能な高品質 ZnO 系焼結体ターゲットペレットの作成技術を確立した。

② ZnO 系ターゲットペレットへの ArF エキシマレーザー照射条件を詳細に検討した結果，レーザーエネルギー；200[mJ]，パルス幅；20[ns]，繰り返し周波数；20[Hz]，および基板－ターゲット間距離；40[mm]の条件において，膜厚分布の最も少ない良質な ZnO 系薄膜を形成する技術を確立した。

(C) 酸化亜鉛/亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池の Cu_2O シート表面処理技術の検討および各種 n 形半導体層の検討

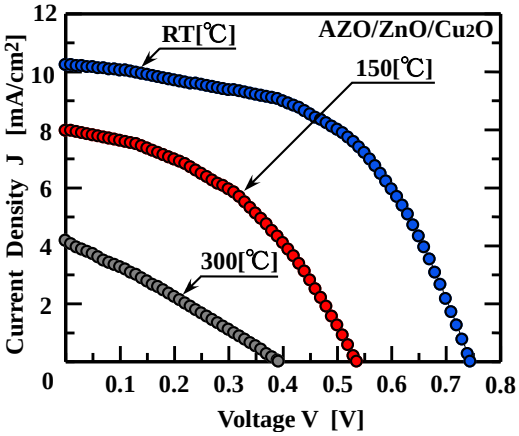


図 3.3-3　J - V 特性の ZnO 薄膜形成温度依存性

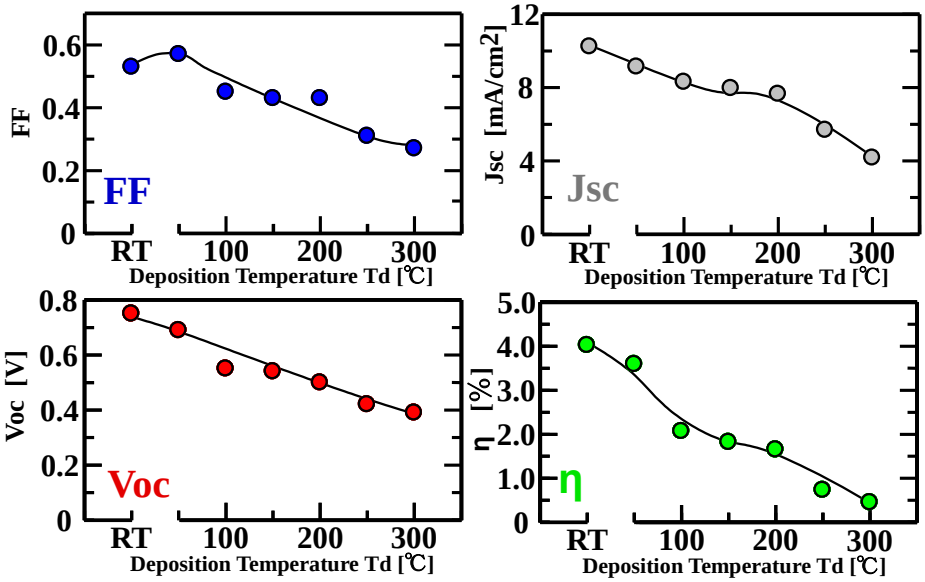


図 3.3-4　太陽電池特性の ZnO 薄膜形成温度依存性

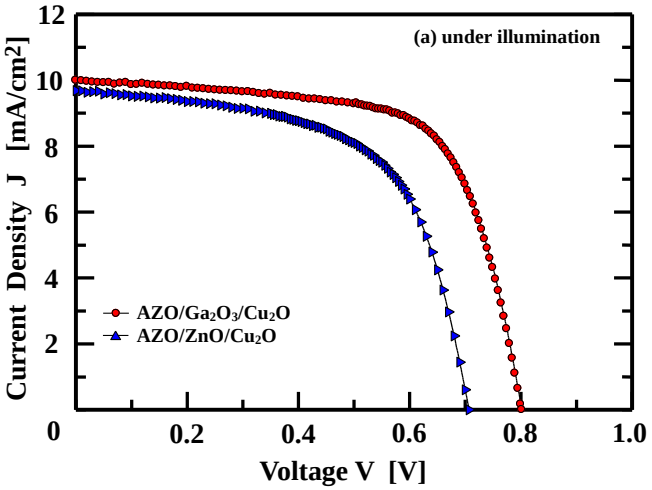
本研究では，作製した p 形多結晶 Cu_2O シート上に PLD 法を用いて，n 形層であるノンドープ酸化亜鉛薄膜の形成技術を詳細に検討した。その結果, 図 3.3-3 に示すように，ノンドープ酸化亜鉛薄膜の形成時の成膜温度が得られる光電変換効率に対して, 極めて大きく影響することを見出した。ノンドープ酸化亜鉛薄膜／亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池の光起電力特性に対しては，成膜温度の低下に伴って光起電力特性が大幅に改善し，成膜温度室温にてノンドープ酸化亜鉛薄膜を形成したノンドープ酸化亜鉛薄膜／亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池において，最高変換効率 4.13[%]の極めて高い変換効率を実現できた（図 3.3-4 参照)。これは，ノンドープ酸化亜鉛薄膜／亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池における世界最高効率である。

＜平成25年度＞

本年度の研究では，昨年度までの研究成果をベースとして，酸化亜鉛／亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池の基礎的な作製技術においては，(A)パルスレーザー蒸着（PLD）法による n 形半導体層材料の探索および成膜技術が確立でき，(B)超高品質 Cu_2O シートの電気的特性制御技術が確立できた。得られた成果は以下に要約される。

(A) パルスレーザー蒸着（PLD）法による n 形半導体層材料の探索および成膜技術の確立

① AZO 層と Cu_2O 層との間に新規な n 形半導体層として故意に不純物を添加していない Ga_2O_3 薄膜を挿入した AZO/Ga_2O_3/Cu_2O ヘテロ接合太陽電池を作製した。Cu_2O



	V_{oc}[V]	J_{sc}[mA/cm^2]	FF	η [%]
AZO/Ga_2O_3/Cu_2O	0.80	9.99	0.67	5.38
AZO/ZnO/Cu_2O	0.71	9.69	0.60	4.13

図 3.3-5　AZO/Ga_2O_3/Cu_2O 太陽電池の典型的な J - V 特性

ヘテロ接合太陽電池においては，光電変換特性は n 形半導体層成膜時の成膜条件 Cu_2O ヘテロ接合界面に与える影響が大きく，特に成膜温度については低ダメージ成膜が実現できる室温（RT）であることが高い変換効率を実現するためには不可欠である。そこで，Ga_2O_3 薄膜は成膜温度を RT とし，成膜時の O_2 ガス圧及び膜厚の最適化を実施した結果, 図 3.3-5 に示すように, O2 ガス圧約 1.7[Pa], 膜厚約 75[nm]で作製した素子において最も優れた特性を実現でき，最高開放端電圧 Voc; 0.8[V], 最高変換効率 η; 5.38[%]を達成した。AZO/Ga_2O_3/Cu_2O ヘテロ接合太陽電池は，他の素子と比較してダーク下における逆方向バイアス時の漏れ電流密度が小さく，極めて優れた特性を実現している。これは，Ga_2O_3/Cu_2O ヘテロ界面が他の構造と比較してヘテロ界面におる欠陥密度等が少なく，結果として再結合等により失われるキャリアの減少が抑制されていることを示唆している。

② 多元系酸化物薄膜を n 形半導体層に用いた Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池の作製。Cu_2O シート上に各種多元系薄膜を n 形半導体層として形成した Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池の太陽電池特性について詳細に検討した。例えば、$Zn_{1-X}Mg_XO$ 薄膜を形成した Al 添加 ZnO(AZO)/n-$Zn_{1-X}Mg_XO$/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池において，Mg 組成 X=0.09 で最も良好な光起電力特性が実現できることを明らかにできた。$(Al_{1-X}Ga_X)_2O_3$ 薄膜では，X の減少に伴って Voc は増加しているが，Jcs，FF および ηは X が約 0.9 以下において X の減少に伴って連続的に減少することを明らかにし，n 形半導体層として室温で形成した多元系酸化物薄膜を用いた Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池において，得られる光起電力特性は多元系酸化物の組成の変化とともに連続的に変化することを明らかにした。

(B) 亜酸化銅シートの抵抗低減技術の確立

熱酸化によって作製した p 形 Cu_2O シートを基板兼活性層として用いる Cu_2O ベースヘテロ接合太陽電池では，Cu_2O シートの厚さと高い抵抗率が直列抵抗を上昇させている。Cu_2O シートの抵抗率制御を目的として，使用する Cu_2O シートの各種熱処理効果を検討した。基板兼活性層である多結晶 p-Cu_2O シートを NaCl 粉末中に埋めた状態で雰囲気制御が可能な電気炉を用いて，Ar 雰囲気中で 100-800[℃]で 1-10[h]熱処理を施すことにより，図 3.3-6 に示すように，正孔密度が大幅に上昇して抵抗率が 10^{-1}[Ω・cm]まで低下した。また，処理温度が 700[℃]までは，移動度を変化させずに抵抗率を 10[Ω・cm]まで低下できた。低抵抗率 Cu_2O を基板に用いて作製した AZO/Ga-Al-O/Cu_2O 太陽電池では FF が改善し，これまでに実現した最も高い変換効率である 5.51[%]を実現できた。

本研究で開発した亜酸化銅シートの抵抗低減技術は，特許出願済み（特願 2014 - 038691）である。

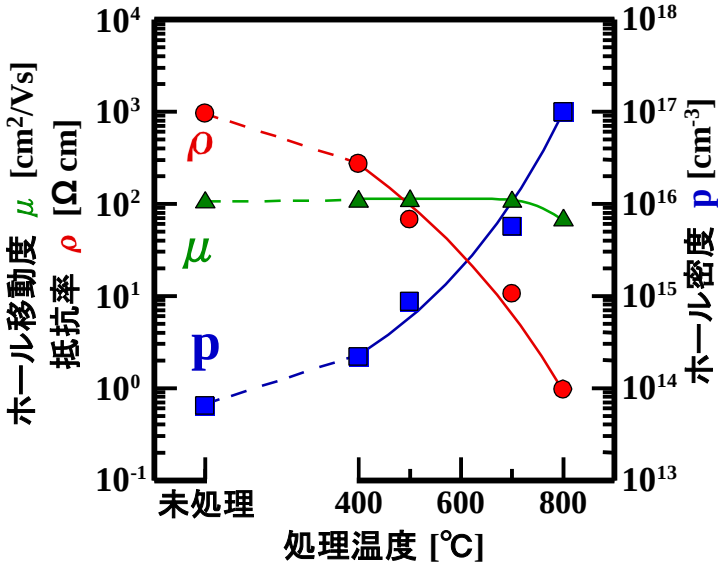


図 3.3-6　Cu_2O:Na シートの電気的特性の熱処理温度依存性

＜平成26年度＞

本年度の研究では，昨年度までの研究成果をベースとして，酸化亜鉛／亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池の基礎的な作製技術においては，(A)パルスレーザー蒸着（PLD）法による各種 n 形半導体層材料にそれぞれ適合する最適成膜条件を明らかにした。(B)平成 25 年度に確立した超高品質 Cu_2O シートの電気的特性制御技術を更に発展させ，最適ドーパント材料の探索ならびに各種ドーパントにそれぞれ適合する最適ドーピング条件を詳細に検討した結果，世界で初めて縮退した低抵抗多結晶 p 形 Cu_2O シートを実現することができ，Cu 等の金属電極とのオーミック接触が実現できた。得られた成果は以下に要約される。

(A)　パルスレーザー蒸着（PLD）法による n 形半導体層材料の探索および成膜技術の確立

多元系酸化物薄膜を n 形半導体層に用いた Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池の作製。Cu_2O シート上に各種多元系薄膜を n 形半導体層として形成した Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池の太陽電池特性について，n 形半導体層形成条件の最適化を詳細に検討した。例えば，Al の最適組成が X=0.025 であることを明らかにした。$Zn_{0.975}Al_{0.025}O$ 薄膜を形成した Al 添加 ZnO(AZO)/$Zn_{0.975}Al_{0.025}O$/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池において，$Zn_{0.975}Al_{0.025}O$ 膜形成時の最適酸素分圧および最適膜厚について検討し，酸素分圧 1.2[Pa]，膜厚約 75[nm]において最も良好な光起電力特性が実現できることを明らかにした。その結果，上記(AZO)/$Zn_{0.975}Al_{0.025}O$/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池において，最高変換効率 5.72[%]を実現できた。また，MgO-Ga_2O_3 系，In_2O_3-Ga_2O_3 系および SnO_2-Ga_2O_3 系についても検討しそれ

ぞれの材料系に適合する最適酸素分圧および最適膜厚を明らかにできた。

(B) 亜酸化銅シートの抵抗低減技術の確立

熱酸化によって作製した p 形 Cu_2O シートを基板兼活性層として用いる Cu_2O ベースヘテロ接合太陽電池では，Cu_2O シートの厚さと高い抵抗率が直列抵抗を上昇させている。平成 25 年度に確立した Cu_2O シートの抵抗率制御技術を更に発展させることを目的とし，ドーパントとして NaCl, NaI, NaF および Na_2CO_3 等の各種 Na 化合物を採用した Cu_2O シートの抵抗率制御を試みた。その結果，Ar 雰囲気中 100-800[℃]で 1-10[h]程度の熱処理を施すことにより，すべての Na 化合物において Cu_2O シートの正孔密度の大な上昇および抵抗率の低減を実現した。特に，Na_2CO_3 をドーパントとして採用し，熱処理温度 800[℃]，処理時間 50[h]の熱処理を施した Cu_2O シートにおいて，図 3.3-7 に示すように，正孔密度 10^{19}[cm^{-3}]台の縮退した p 型 Cu_2O シートの作製に世界で始めて成功した。この低抵抗率 Cu_2O シートは，Cu 等の金属電極と容易にオーミック接触を実現できた。また，低抵抗率 Cu_2O シートを用いて作製した MgF_2/AZO/Ga-Al-O/Cu_2O ヘテロ接合太陽電池において，最高変換効率 6.25[%]を実現できた（図 3.3-8 参照）。一方，Cu_2O シート内に取り込まれている元素について，その種類および含有量当を光電子分光法(XPS)および 2 次イオン質量分析法(SIMS)分析により詳細に検討した。その結果，いずれのドーパントを用いた場合も Cu_2O 内には Na が取り込まれていることが確認できた。これらの分析および X 線回折法による不純物添加 Cu_2O シートの結晶学的特性評価結果から，ホール密度増加のメカニズムとして，Na 原子が格子間に取り込まれ，これにより酸素空孔と会合中心が形成され，酸素空孔によって自己補償されている Cu 空孔を開放してホール密度が増加し，抵抗率が減少すると言うメカニズムを提案している。

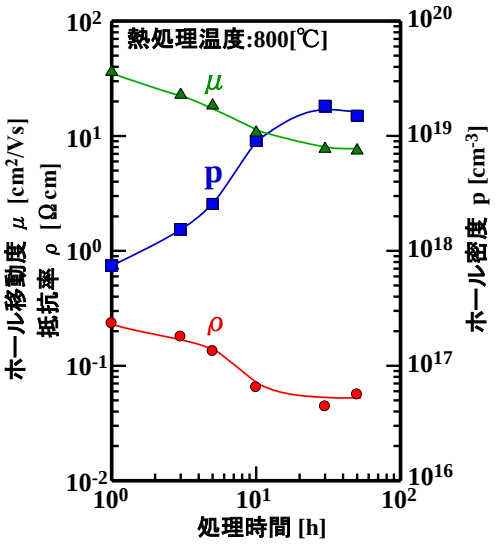
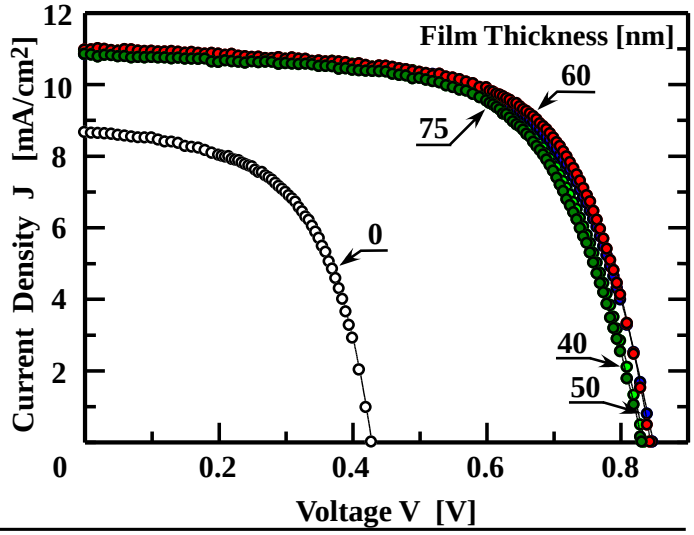


図 3.3-7　Cu_2O:Na シートの電気的特性の熱処時間度依存性



	η [%]	V_{oc}[V]	J_{sc}[mA/cm^2]	FF
MgF_2/AZO/$(Ga_{0.975}Al_{0.025})_2O_3$/$Cu_2O$:Na	6.25	0.84	10.80	0.69
MgF_2/AZO/Ga_2O_3/Cu_2O:Na	5.73	0.81	10.84	0.65
MgF_2/AZO/ZnO/Cu_2O:Na	4.01	0.61	10.62	0.62

図 3.3-8　AZO/Ga-Al-O/Cu_2O:Na 太陽電池の典型的な J - V 特性

＜平成27年度＞

本年度の研究では，昨年度までの研究成果をベースとして，酸化亜鉛／亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池の基礎的な作製技術において，(A)パルスレーザー蒸着（PLD）法による新規な n 形半導体層材料の探索，およびそれぞれの材料に適合する最適成膜条件について検討した。(B)平成 25 年度に確立した超高品質 Cu_2O シートの電気的特性制御技術を駆使して，各種 n 形半導体層材料薄膜に対する Cu_2O シートの電気的特性の影響を詳細に検討し，各種 n 形半導体層材料薄膜に対する Cu_2O シートの最適ドーピング条件を検討した。(C) 実用化に適した安価な成膜技術である電気化学堆積（ECD）法による高品質 Cu_2O 薄膜のエピタキシャル成長技術を確立した。また，不純物添加技術についても検討し，金属塩化物が Cu_2O 薄膜の有効なアクセプタ不純物として働くことを明らかにした。得られた成果を以下に要約する。

(A)　パルスレーザー蒸着（PLD）法による n 形半導体層材料の探索および成膜技術の確立

多元系酸化物薄膜を n 形半導体層に用いた Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池の作製。Cu_2O シート上に各種多元系薄膜を n 形半導体層として形成した Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池の太陽電池特性について，n 形半導体層形成条件の最適化について詳細に検討した。例えば、Al の最適組成が X=0.025 であることを明らかにした。$Ga_{0.975}Al_{0.025}O$ 薄膜を形成した Al 添加 ZnO(AZO)/$Ga_{0.975}Al_{0.025}O$/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池において，$Ga_{0.975}Al_{0.025}O$

膜形成時の最適酸素分圧および最適膜厚について検討した。酸素分圧 1.2[Pa，膜厚約 75[nm]において最も良好な光起電力特性が実現できることを明らかにした。その結果，上記の MgF_2/(AZO)/$Ga_{0.975}Al_{0.025}O$/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池において，最高変換効率 6.25[%]が実現できた。また、新規な n 形酸化物半導体材料として，Zn-Ge-O 薄膜を見出し，当該薄膜の Ge の最適組成が X=0.62 であることを明らかにした。$Zn_{0.38}Ge_{0.62}O$ 薄膜を形成した Ge 添加 ZnO(AZO)/$Zn_{0.38}Ge_{0.62}O$/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池において，$Zn_{0.38}Ge_{0.62}O$ 膜形成時の最適酸素分圧および最適膜厚について検討した。酸素分圧 4.0Pa、膜厚約 60nm において，最も良好な光起電力特性が実現できることを明らかにした。その結果，上記の MgF_2/(AZO)/$Zn_{0.38}Ge_{0.62}O$/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池において，最高変換効率 8.1[%]が実現できた（図 3.3-8 参照）。これは，Cu_2O 系太陽電池おける世界最高変換効率である。

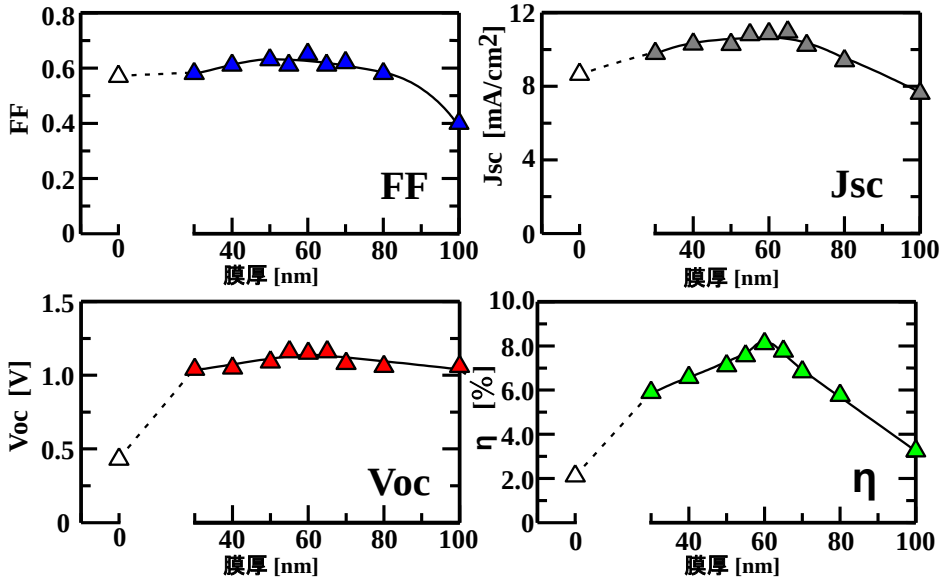


図 3.3-9　MgF_2/(AZO)/$Zn_{0.38}Ge_{0.62}O$/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池の光電変換特性の $Zn_{0.38}Ge_{0.62}O$ 膜厚依存性

(B)　亜酸化銅シートの抵抗低減技術の確立

熱酸化によって作製した p 形 Cu_2O シートを基板兼活性層として用いる Cu_2O ベースヘテロ接合太陽電池では，Cu_2O シートの厚さと高い抵抗率が直列抵抗を上昇させている。平成 25 年度に確立した Cu_2O シートの抵抗率制御技術を更に発展させることを目的として，各種 n 形半導体薄膜に対する最適ドーピング条件について詳細に検討した。その結果，例えば，Al 添加 ZnO(AZO)/ $Ga_{0.975}Al_{0.025}O$/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池に対しては，Na_2CO_3 をドーパントとして採用し，Ar 雰囲気中で 1000[℃]で 1[h]の熱処理を施

した正孔密度 10^{15}[cm^{-3}]台の p 型 Cu_2O シートにおいて最も高い変換効率を実現できることを明らかにした。特に，10^{15}[cm^{-3}]台の p 型 Cu_2O シートを用いた MgF_2/(AZO)/$Ga_{0.975}Al_{0.025}O$/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池においては，Cu_2O 系太陽電池おける世界最高変換効率である最高変換効率 8.1%を実現できた。

(C) 電気化学堆積（ECD）法による、高品質 Cu_2O 薄膜のエピタキシャル成長技術の確立

安価に大面積且つ高速成膜が可能であり，Cu_2O系太陽電池の低コストな実用化技術として有望な電気化学溶液堆積法(ECD)を用いて，ホール密度が10^{15}～10^{19}[cm^{-3}]台に制御されたCu_2O:Na シート上にCu_2O 薄膜のエピタキシャル成長を実現できた。また，エピタキシャル成長させたCu_2O薄膜を活性層に採用するAZO/Cu_2O薄膜/p形Cu_2O:Na太陽電池を作製し光起電力特性について検討した。加えて，ECD 法を用いるCu_2O薄膜への不純物ドーピング技術を確立し，n形化が期待できる不純物を添加して作製したn?形Cu_2O:X薄膜を採用するAZO/n?形Cu_2O:X薄膜/p形Cu_2O:Na太陽電池を作製し光起電力特性を検討した。

ECD 法を用いてホール密度が 10^{15}[cm^{-3}]の Cu_2O:Na シート上に Cu_2O 薄膜を 2[μm]形成し，Cu_2O 薄膜の表面および断面を SEM で観察し、p 形 Cu_2O:Na シート上に Cu_2O 薄膜を形成することに成功した。また，成長させた Cu_2O 薄膜は，X 線回折法を用いて評価し，p 形 Cu_2O:Na シートの面方位である 110 面にエピタキシャル成長していることを明らかにした。また，AZO/n?形 Cu_2O 薄膜/Cu_2O:Na ヘテロ接合太陽電池における n?形 Cu_2O 薄膜の膜厚は 240[nm]で Voc が最大となり，変換効率 3.37[%]を実現した。さらに，不純物 X を添加して作製した AZO/n?形 Cu_2O:X 薄膜/Cu_2O:Na 太陽電池において，最大変換効率 4.21[%]を実現した（図 3.3-10 参照）。

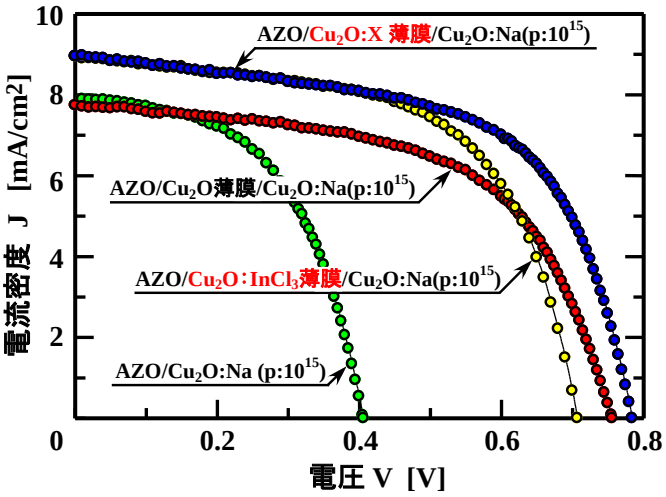


図 3.3-10　AZO/n?形 Cu_2O:X 薄膜/Cu_2O:Na 太陽電池の J - V 特性

（２） $BaTiO_3$セラミックスを基板兼絶縁層とする高輝度無機薄膜 EL ランプの作製に関する研究

近年, 無機 EL 素子の面発光源としての応用が注目されている。無機 EL 素子は薄型, 軽量でかつ耐環境性に優れている特長を活かした環境調和型照明・調光システムへの応用が期待されている。しかし，光源としての無機 EL 素子，すなわち無機 EL ランプを実現するためには, ランプに適した超高安定性及び超寿命並びに各種用途に適合する光源としての発光波長および色純度等を解決できる新しい蛍光体薄膜材料の探索および作製技術の確立が必要不可欠である。

表 3.3-1　年度ごとの開発目標および成果と達成度のまとめ

開発目標	研究開発成果	達成度 [%]
【平成 23～24 年度】 Bi と希土類元素を共添加したバナデートベース酸化物蛍光体薄膜の作製とその PL，EL 特性の検討。	Bi あるいは Bi と Eu を共添加した YVO_4, $GdVO_4$ および $LaVO_4$ 蛍光体薄膜を，コンビナトリアル・マグネトロンスパッタ法を用いて作製し，多色発光 PL を実現した。また，EL 素子においては，1kHz 正弦波交流駆動時に最高 24[cd/m^2]の赤色発光を実現した。	100
【平成 25～27 年度】 Cr 単独もしくは Ce を共添加して作製した新規なペロブスカイト $LaAlO_3$，$LaGaO_3$ および $LaInO_3$ 薄膜の生成。 動作電圧の低減を目的に，多結晶 $Ca_{0.6}Sr_{0.4}$ TiO_3 蛍光体薄膜の PL および EL 特性の検討。 検出器用光源として使用可能な $Y_3Al_5O_{12}$(YAG)等酸化物蛍光体薄膜の PL および EL 特性の検討。	$LaAlO_3$:Ce,Cr，$LaGaO_3$:Ce,Cr および $LaInO_3$:Ce, Cr 薄膜 EL 素子において，波長約 730，700 および 780[nm]付近にピークを持つ PL および EK 発光を実現。 YAG:Bi 薄膜において 276[nm]の励起光照射時において，波長約 302[nm]にピーク波長を有する近紫外領域での発光を実現。 $Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$:Pr,Bi 薄膜を発光層に採用したＥＬ素子では，最高輝度 4.4[cd/m^2]，発光開始電圧約 60[V]の低電圧を実現。 $GdTaO_4$:Bi 蛍光体薄膜を発光層として採用する薄膜 EL 素子において，白色に近い青緑色の発光(x=0.29，y=0.40)を実現。 Bi を共添加した $Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$:Pr,Bi 薄膜において，発光ピーク波長ならびに発光スペクトル形状は，Bi 含有量に加えて熱処理条件等に依存しないことを明らかにした。	100

多色発光ならびに色純度の最適化を目的として，新規な各種酸化物蛍光体薄膜材料の探索，およびそのフォトルミネッセンス（PL）とエレクトロルミネッセンス（EL）特性を詳細に検討した。表 3.3-1 は，年度ごとの開発目標および成果と達成度のまとめを示す。研究成果の詳細については，以下に年度毎に記述する。

＜平成23～24年度＞

多色発光の実現を目的に，Bi と希土類元素を共添加したバナデートベース酸化物蛍光体薄膜を作製し，そのフォトルミネッセンス(PL)およびエレクトロルミネッセンス(EL)特性について詳細に検討した。得られた成果は以下に要約される。

① 膜の不純物含有量を変化させた Bi 添加 YVO_4 および $GdVO_4$，あるいは Bi と Eu を共添加した YVO_4，$GdVO_4$ および $LaVO_4$ 蛍光体薄膜を，コンビナトリアル・マグネトロンスパッタ法を用いて作製し，多色発光 PL が実現できた。また，これらのバナデートベース酸化物蛍光体薄膜を発光層に用いたセラミックス絶縁層形薄膜 EL ランプにおいて，多色発光 EL が実現できた。特に，$GdVO_4$:Bi,Eu 蛍光体薄膜においては，PL および EL 発光ともに緑色から赤までの多色発光を示し，EL 素子においては 1[kHz]正弦波交流駆動時において最高 24[cd/m^2]の赤色発光が実現できた。

② 色純度の高い赤色発光の実現を目的として，新規なペロブスカイト $LaAlO_3$, $LaGaO_3$ もしくは $LaInO_3$ を母体材料とする蛍光体薄膜の開発を実施した。図 3.3-11 に示すような発光中心材料として，Cr 単独もしくは Ce を共添加して作製した $LaGaO_3$：Ce, Cr 蛍光体薄膜を発光層に採用するセラミックス絶縁層型薄膜 EL ランプにおいて，色純度の比較的良好な赤色発光が実現できた。また，Ce を共添加することにより，EL 強度が増大することを見出した。一方，$LaAlO_3$ もしくは $LaInO_3$ に発光中心材料として Cr 単独もしくは Ce を共添加して作製した $LaAlO_3$:Ce, Cr 及び $LaGaO_3$:Ce, Cr 蛍光体薄膜を発光層に採用するセラミックス絶縁層型薄膜 EL ランプにおいて，中心波長約 700[nm]の強い赤色から近赤外発光が実現できた（図 3.3-12 参照）。

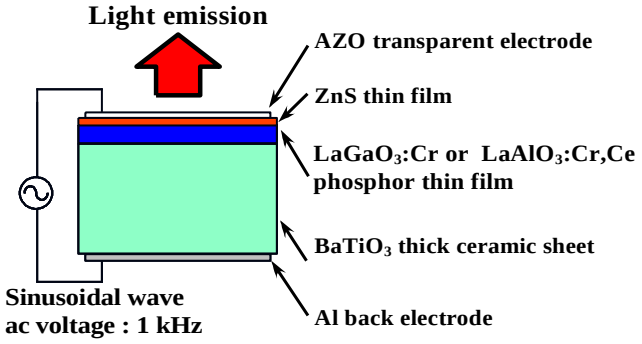


図 3.3-11　EL 素子構造

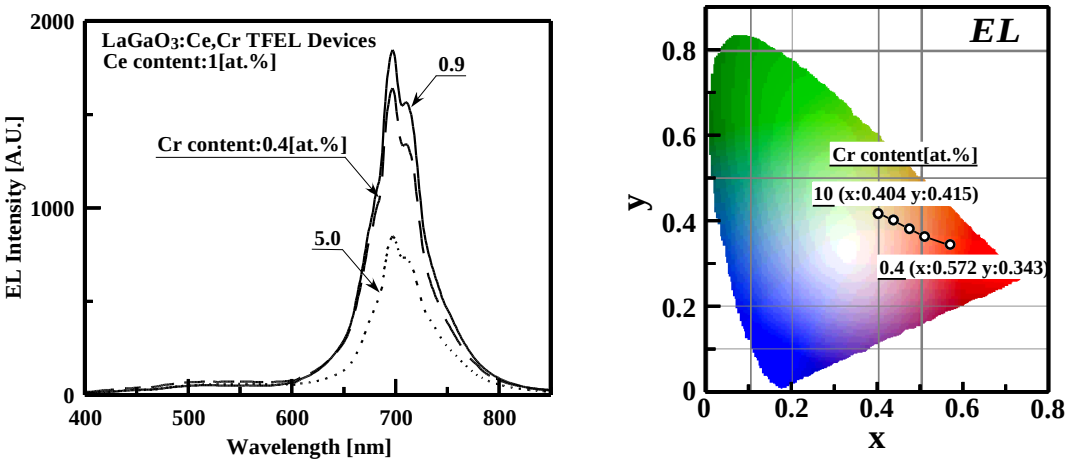


図 3.3-12　$LaGaO_3$：Ce，Cr 蛍光体薄膜 EL ランプの発光特性

＜平成25年度＞

本年度は，昨年度までの研究成果をベースとして，センサー等への応用を目的とし，赤外および紫外を含む多色発光の実現，新規な各種酸化物蛍光体薄膜材料の探索，ならびにそのフォトルミネッセンス（PL）およびエレクトロルミネッセンス（EL）特性を詳細に検討した。得られた成果は以下に要約される。

① 赤外発光の実現を目的に，Cr 単独もしくは Ce を共添加して作製した新規なペロブスカイト $LaAlO_3$，$LaGaO_3$ および $LaInO_3$ を用いたセラミックス絶縁層形薄膜 EL 素子を作製し，その PL および EL 特性について検討して作製条件の最適化を検討した。蛍光体薄膜は，例えば，$LaInO_3$:Ce,Cr 蛍光体薄膜では，$LaInO_3$:Ce(Ce 含有量;(Ce/(La+In+Ce))を 1[at.%])，および $LaInO_3$:Ce,Cr (Ce 含有量 1[at.%], Cr 含有量;(Cr/(La+In+Cr))を 5[at.%])で構成した 2 分割粉末ターゲットを使用するコンビナトリアル・スパッタ成膜法を用いて，スパッタガス Ar，スパッタ圧力 6[Pa]，投入電力 100[W]，基板温度 350[℃]の条件下で，$BaTiO_3$ セラミックシート上に成膜し，その後，Ar ガス雰囲気下 900-1200[℃]で 1[h]の熱処理を施して作製された。熱処理した蛍光体薄膜上に，電子加速層として ZnS 薄膜を形成し，その上に Al ドープ ZnO 透明電極を，$BaTiO_3$ セラミックシート上に Al 背面電極の形成により作製された。EL 素子を用いて 1[kHz]正弦波交流電圧駆動下で評価した。上記の作製条件下で作製した EL 素子において，得られた EL 特性は，$LaAlO_3$:Ce,Cr，$LaInO_3$:Ce, Cr 薄膜 EL 素子において，Ce^{3+}からと思われる波長約 730，700 および 780[nm]付近にピークを持つ発光がそれぞれ観測された。発光ピーク強度および波長は母体材料に依存し,ピーク波長は $LaInO_3$:Ce,Cr 薄膜 EL 素子において，最も長波長側の近赤外領域に観測された（図 3.3-13 参照）。これらは，母体材料が変化したことにより，発光中心の周囲の結晶場が変化した為と考えられる。

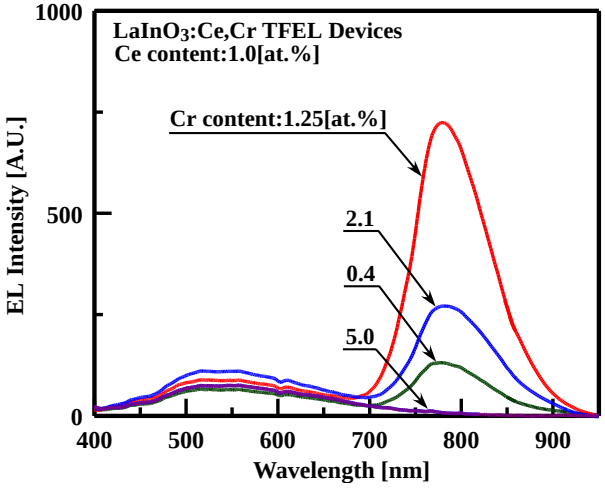


図 3.3-13　$LaGaO_3$：Ce，Cr 蛍光体薄膜 EL ランプの発光特性

② 検出器用光源として使用可能な近紫外から近赤外領域までの様々な波長で発光する新規な薄膜エレクトロルミネッセンス(EL)素子用蛍光体薄膜の開発を目的として，母体材料に Y_2O_3 をベースとした $YTaO_4$, Y_2SiO_5, $Y_3Al_5O_{12}$(YAG),$Y_3Ga_5O_{12}$ 等を用い，発光中心材料として Bi を添加した新規な酸化物蛍光体薄膜を作製すると共に，それらを発光層に採用するセラミックス絶縁層形薄膜 EL 素子を作製し，その PL および EL 特性について検討した。蛍光体薄膜は，Y_2O_3 と Ta_2O_5, SiO_2, Al_2O_3, Ga_2O_3 等の各種酸化物を組み合せた酸化物粉末および発光中心として，例えば、Bi を添加した酸化物蛍光体粉末を 2 分割ターゲットとして用いるコンビナトリアル・スパッタ成膜法を用いて，スパッタガス Ar，スパッタ圧力 6[Pa]，投入電力 100[W]，基板温度 350[℃]の条件下で，$BaTiO_3$ セラミックシート上に成膜し，その後，Ar または Air ガス雰囲気下 900-1200[℃]で 1[h]の熱処理を施した後，PL 評価を行った。EL 特性は，熱処理した蛍光体薄膜上に ITO 透明電極または電子加速層として ZnS 薄膜を成膜後に，AZO または ITO 透明電極を形成し，最後に，$BaTiO_3$ セラミックシート上に Al 背面電極を形成して作製した EL 素子を用い，1[kHz]正弦波交流電圧駆動下で計測し評価した。その結果，例えば，YAG:Bi 薄膜の 276[nm]励起光照射時において，波長約 302[nm]にピーク波長を有する近紫外領域でブロードな発光が観測された（図 3.3-14 参照）。この発光の起源は，中心波長およびスペクトルの形状から，発光中心としてドープした Bi^{3+}であると考えられる。また，PL 強度は，Bi 含有量の増加に伴い増大し，Bi 含有量約 2.4[at.%]において最大となることが明らかになった。また，YAG:Bi 薄膜 EL 素子で波長約 320[nm]を中心とした近紫外領域において，EL が実現できた。これは，現在までに報告されている EL 素子において，最も短波長の発光である。

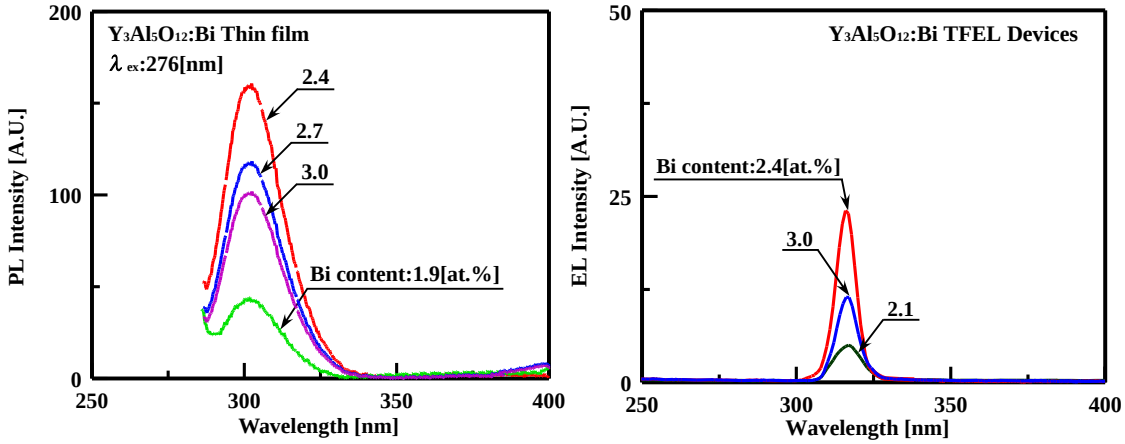


図 3.3-14　$LaGaO_3$：Ce，Cr 蛍光体薄膜 EL ランプの発光特性

＜平成26年度＞

本年度は，昨年度までの研究成果をベースとして，赤外および紫外を含む多色発光ならびに EL ランプへの応用で重要な低駆動電圧化の実現を目的とし，新規な各種酸化物蛍光体薄膜材料の探索，ならびにそのフォトルミネッセンス（PL）およびエレクトロルミネッセンス（EL）特性を詳細に検討した。得られた成果は以下に要約される。

① 無機薄膜 EL 素子は動作電圧が比較的高く，多発光効率が低いことから，TV 用モニター, パソコンやスマートフォン用ディスプレイとしては, 実用化に至っていない。しかし，ペロブスカイト型酸化物蛍光体である $Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$:Pr を用いた単結晶薄膜 EL 素子において, 2[V]程度という極めて低い印加電圧における発光を実現したことが近年報告されている。そこで，本年度は，動作電圧の低減を目的に，多結晶 $Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$ 薄膜に Bi 等の各種発光中心材料を添加した蛍光体薄膜を作製し，それらのフォトルミネッセンス(PL)特性およびエレクトロルミネッセンス(EL)特性を詳細に検討した。Pr 含有量を 0.4[at.%]一定として，Bi を共添加した $Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$:Pr,Bi 薄膜では，波長 275～336[nm]で励起した場合，波長約 610[nm]をピークとするブロードなピークが観測された。発光ピーク波長ならびに発光スペクトル形状は，Bi 含有量に依存しなかったのに対して，発光ピーク強度は，Bi 含有量に強く依存し，Bi 含有量約 0.8[at.%]において最高 PL 強度が実現でき，それ以上の Bi 含有量においては，発光ピーク強度が低下することを明らかにした（図 3.3-15 参照）。これは，Bi を共添加することにより，Bi から Pr へのエネルギー伝達等による Pr 励起効率が向上したことによると考えられる。Bi を共添加した $Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$:Pr,Bi 薄膜を発光層に採用した EL 素子では，Bi 含有量の増加と共に EL 特性が改善し,Bi 含有量 4.2[at.%]において最高輝度 4.4[cd/m^2], 発光開始電圧約 60[V]の低電圧が実現できた（図 3.3-16 参照）。

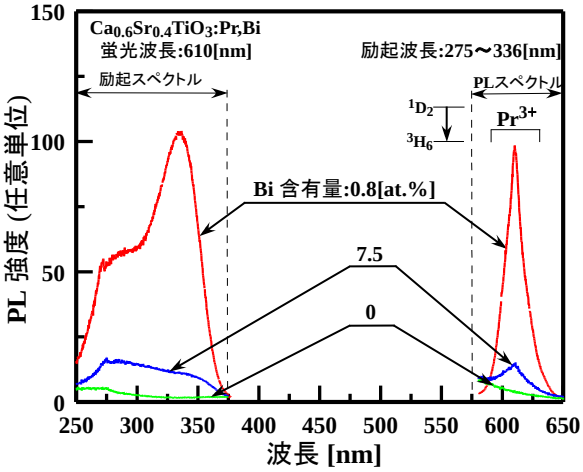


図 3.3-15　$Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$:Pr,Bi 薄膜の PL スペクトルの Bi 含有量依存性

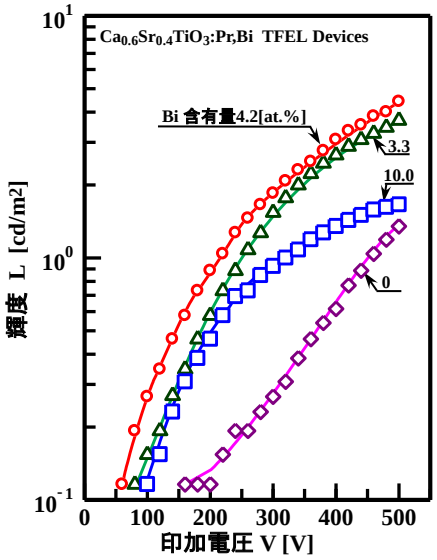


図 3.3-16　$Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$:Pr,Bi 薄膜 EL 素子の L-V 特性に関する Bi 含有量依存性

② 発光色の多色化を目的に，発光中心として Bi を採用し，母体材料として，Bi とイオン半径が近いガドリニウム(Gd)の酸化物である Gd_2O_3 をベースとして，Ta_2O_5 を組み合わせた $GdTaO_4$ を採用する新規な Gd TaO_4:Bi 蛍光体薄膜を作製し，その PL 特性および EL 特性を詳細に検討した。作製した $GdTaO_4$:Bi 薄膜を波長 280[nm]の励起光照射すると，波長約 467[nm]にピークを有するブロードな PL 発光が観測された。また，蛍光波長 467[nm]において，波長約 280[nm]にピークを有するシャープな PLE スペクトルを観測した。上記の PLE スペクトル観測，および PL スペクトルの中心波長と形状から，この発光の起源は，発光中心として添加した Bi^{3+}の $6s^2$-6s6p 遷移であることを明らかにした。また，作製した $GdTaO_4$:Bi 蛍光体薄膜を発光層として

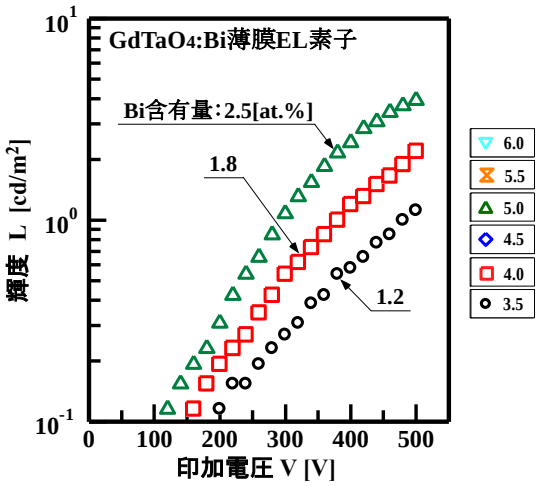


図 3.3-17　薄膜 EL 素子の L - V 特性の Bi 含有量依存性

採用する薄膜 EL 素子を作製し，その EL 特性について検討した。観測された EL の発行色は，Bi 含有量 0.5[at.%]において，白色に近い青緑色の発光(x=0.29，y=0.40)が得られた。また，発光色は，Bi 濃度にほとんど依存しないことを明らかにした。さらに, Bi 含有量約 2.5[at.%]において, 最高輝度約 3.93[cd/m^2]を実現した（図 3.3-17 参照）。

＜平成27年度＞

本年度は，平成 26 年度までの研究成果を更に継続的に発展させることを目的とし，赤外および紫外を含む多色発光，ならびに EL ランプへの応用において重要な低駆動電圧化実現する為，新規な各種酸化物蛍光体薄膜材料の探索，およびそのフォトルミネッセンス（PL）とエレクトロルミネッセンス（EL）特性を詳細に検討した。得られた成果は以下に要約される。

① 無機薄膜 EL 素子は動作電圧が比較的高く，また発光効率が低いことから，TV 用モニター, パソコンやスマートフォン用ディスプレイとしては実用化に至っていない。しかし，近年，ペロブスカイト型酸化物蛍光体である $Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$:Pr を用いた単結晶薄膜 EL 素子において，2[V]程度という極めて低い印加電圧における発光を実現したことが報告されている。本年度は、昨年度から研究している Pr 含有量を 0.4[at.%]一定とし，Bi を共添加した $Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$:Pr,Bi 薄膜に関して，更に詳細な PL 特性および EL 特性を検討した。波長 275～336[nm]で励起した場合，波長約 610[nm]をピークとするブロードなピークが観測された。発光ピーク波長と発光スペクトル形状は, Bi 含有量に加えて熱処理条件等に依存しないことを明らかにした。また，Bi を共添加した $Ca_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$:Pr,Bi 薄膜を，発光層に採用した EL 素子では，EL 特性が熱処理条件に強く依存することが明らかになった。

③ 発光色の多色化を目的に，昨年度の開発で成功した発光中心として Bi を採用し，母体材料として、Bi とイオン半径が近いガドリニウム(Gd)の酸化物である Gd_2O_3 をベースとして, Ta_2O_5 を組み合わせた $GdTaO_4$ を採用する新規な $GdTaO_4$:Bi 蛍光体薄膜の PL および EL 特性について継続的に詳細な検討を行った。作製した $GdTaO_4$:Bi 薄膜において，波長 280[nm]の励起光照射時に，波長約 467[nm]でピークを持つブロードな PL 発光が観測された。これらの PL 特性は，$GdTaO_4$:Bi 薄膜の熱処理条件等に依存することが明らかになった。また,作製した $GdTaO_4$:Bi 蛍光体薄膜を発光層として採用する薄膜 EL 素子を作製し，その EL 特性を検討した。観測された EL 素子の特性は, PL 特性と同様に $GdTaO_4$:Bi 薄膜の熱処理条件等に依存することが明らかになった。

（３）へき開共振器ミラーを有する低コスト・高性能緑色レーザに関する研究

これまでに，窒化物半導体を用いた青紫色レーザや純青色レーザが実用化されているが，緑色レーザは実用化されていない。実用レベルの緑色半導体レーザが実現すれば，光の３原色のすべてが半導体レーザで実現することになり，携帯電話にレーザプロジェクタを搭載されるなど，フルカラー表示の市場が拡大する。窒化物半導体で緑色レーザの実現を難しくしている要因の一つは，ピエゾ電界の存在であり，これを低減する手法として非極性 GaN 基板の利用が注目されている。本研究では，この非極性基板を利用し，かつ低コストレーザのために必須条件となる「へき開共振器ミラー」の利用を両立させるための唯一の解として，低角半極性 GaN 基板を利用した新規なレーザ構造を提案した。平成 23 年度は，このレーザの特性を決める重要な要素である偏光特性を，過去に報告された実験データの解析により，正確に求める方法を考案した（図 3.3-18 参照）。

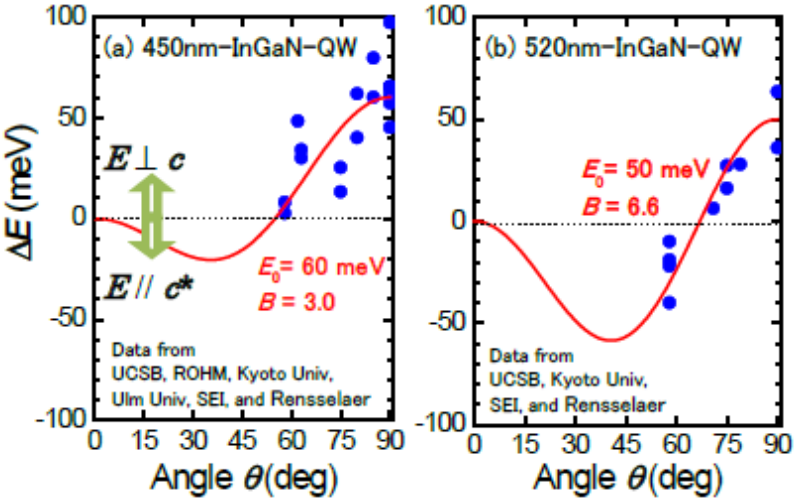


図 3.3-18　過去の文献データから解析した偏光特性
(a)：青色発光 InGaN，　(b)：緑色発光 InGaN の活性層

＜平成24年度＞

本年度は，緑色半導体レーザの構造設計を行うのに不可欠な変形ポテンシャルを第一原理計算によって求める研究を行った。

① 窒化物半導体の変形ポテンシャルは通常のウルツ鉱構造半導体と大きく異なり，擬立方晶近似が成り立たないことが分かった。

② 半導体レーザを作製する際に必要な加工プロセスであるドライエッチングによる活性層の劣化に関する研究を行った。

＜平成25～26年度＞

過去の偏光実験データに基づいて，kp 摂動計算から正確な変形ポテンシャルを予測

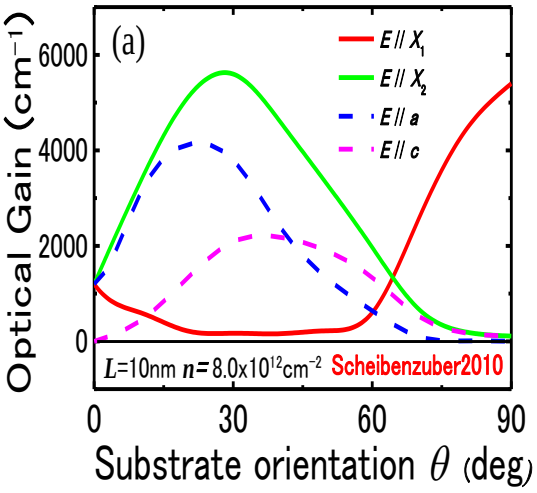


図 3.3-19　緑色半導体レーザの光学利得の基板面方位依存性の計算結果

し，その結果に基づいて緑色半導体レーザの光学利得特性を予測した（図 3.3-19 参照）。

＜平成26～27年度＞

半導体レーザの特性決定に最も重要な要素となる価電子帯構造を調べるために，従来の偏光発光スペクトル測定ではなく，偏光励起スペクトル測定が望ましいことを見出した。これは，InGaN 量子井戸活性層に混晶組成揺らぎが存在するためである。平成 27 年度は，様々な InGaN 量子井戸サンプルに対して，偏光励起スペクトルの測定を行い，従来の偏光発光スペクトル測定と大きく異なる結果を得た。これより，従来考えられてきた価電子帯構造が，必ずしも正しくないことが示唆された（図 3.3-20 参照）。

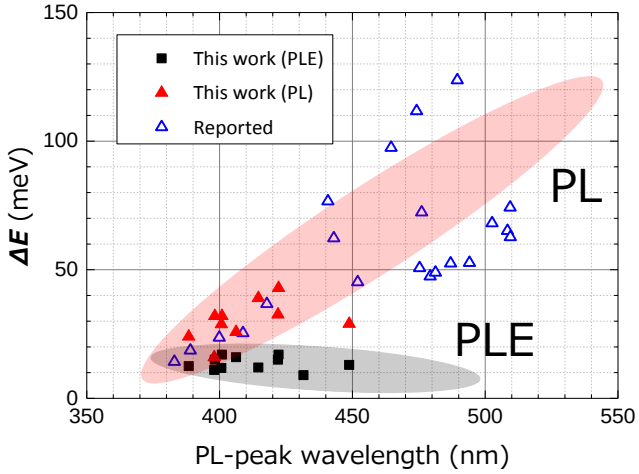


図 3.3-20　無極性 InGaN 量子井戸において偏光発光(PL)スペクトルと偏光励起(PLE)スペクトルから求めた２つの価電子帯分裂エネルギー（ΔE）の比較

（4） 溶液法による酸化物蛍光体薄膜を用いた EL デバイスに関する研究

(A) コンビナトリアル・ディップコート法を用いた酸化物蛍光体材料の開発
＜平成23～25年度＞

低電圧駆動でのエレクトロルミネッセンス（EL）を実現可能な酸化物薄膜 EL デバイスに適応する酸化物蛍光体を開発するには，膨大な種類の構成元素の組み合わせについて検討する必要がある。このような材料を早期に探索するための有効な手法を提案した。具体的には，基板の引き上げ速度を厳密に制御したディップコート法を用いる新規なコンビナトリアル成膜手法を開発した。この手法を用いて，Bi を発光中心とし，母体材料に$(Y_2O_3)_{1-x}$-$(Al_2O_3)_x$ もしくは$(Y_2O_3)_{1-x}$-$(Ga_2O_3)_x$ を使用した多元系酸化物蛍光体薄膜を作製した。その結果，近紫外から青色領域に PL を呈する Bi 付活 Y_2O_3 ベース多元系酸化物蛍光体が得られた。特に，図 3.3-21 に示すように，{$(Y_2O_3)_{1-x}$-$(Ga_2O_3)_x$}:Bi において Ga 組成を最適化することにより，波長約 314[nm]にピークを有する非常に強い近紫外フォトルミネッセンス（PL）を呈する酸化物蛍光体材料を見出した。さらに，波長約 380[nm]をピークとする強い近紫外 PL を呈する Eu^{2+}付活(SrO)-(Al_2O_3)系材料を見出した。

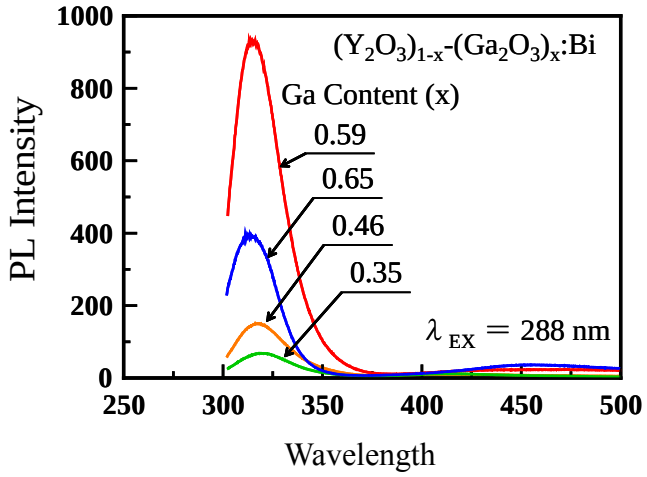


図 3.3-21　$(Y_2O_3)_{1-x}$-$(Ga_2O_3)_x$:Bi 薄膜の PL スペクトル

(B) Eu 付活ガレート系蛍光体薄膜を発光層とした赤色薄膜 EL デバイスの開発
＜平成25年度＞

Ga_2O_3，$MgGa_2O_4$ および $CaGa_2O_4$ を母体とする Eu 付活ガレート系蛍光体薄膜を，スピンコート法により Si 基板上に作製した。その結果，$MgGa_2O_4$:Eu 蛍光体薄膜において膜の表面が均一で亀裂などがなく，かつ強い赤色 PL が得られることが分かった。さらに，$MgGa_2O_4$:Eu 蛍光体薄膜を発光層に使用して作製した薄膜 EL デバイス（SnO_2:Sb

(ATO)透明導電膜（膜厚約 300[nm]）／$BaTiO_3$ 絶縁膜（膜厚約 400[nm]）／$MgGa_2O_4$:Eu 蛍光体薄膜（膜厚約 500[nm]）／Si 基板／背面金属電極）を，正弦波交流電圧（1[kHz]）により駆動した結果，約 75[V]の低電圧において赤色の EL が確認された。

(C)　発光・非発光同時可視化技術を用いた蛍光体材料の開発
＜平成25～27年度＞

蛍光体が吸収したエネルギーは，発光過程による PL もしくは結晶内の欠陥や非発光中心を介した非発光過程による熱（フォノン）として放出される。従来の蛍光体材料の開発は蛍光体からの PL を観測し，その結果をもとに良く光る蛍光体を得るための材料設計と作製条件の最適化が行われてきた。本研究では，蛍光体の光らない過程（非発光過程）に着目し，その原因を明確にすると共に，それを最小化させる新たな手法を提案した。具体的には，図 3.3-22 に示すような蛍光体からの PL 信号と光音響信号を同時に測定できるシステムを構築し，蛍光体からの発光過程と非発光過程の対応関係を明らかにし，非発光過程を特定した。なお，光音響分光法を用いることにより，蛍光体からの局所発熱の応答を直接測定することが可能となる。本システムを使用して，代表的な蛍光体である $Y_3Al_5O_{12}$:Ce（YAG:Ce）蛍光体の測定を実施した。その結果，得られた光音響信号強度と発光強度には，相補的な関係があることが明らかになった。さらに，均一沈殿法による YAG:Ce 蛍光体において，光音響信号を低減させるような作製条件を適用することによって，市販の Ce 付活 YAG 系黄色蛍光体（P46-Y3）と同等の量子効率を有する YAG:Ce 蛍光体を開発することに成功した。

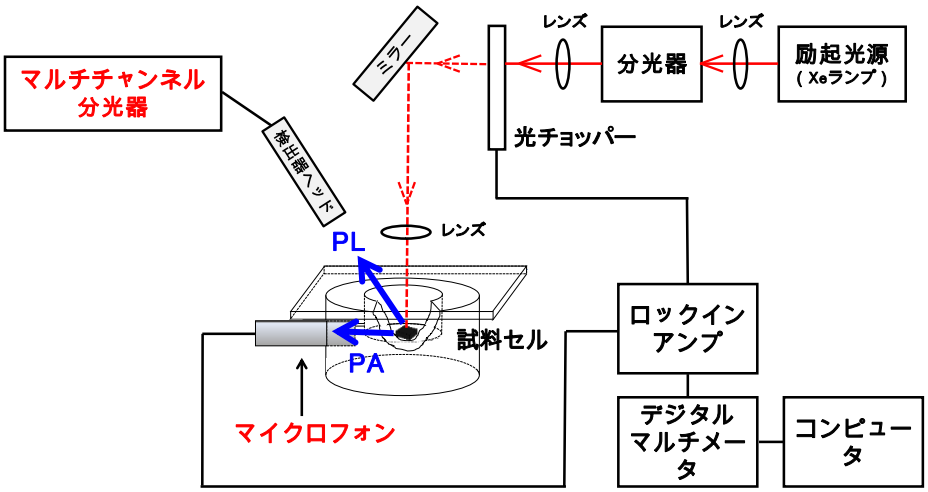


図 3.3-22　発光・非発光同時測定システム

（５）高輝度 LED ランプの駆動回路における高効率化の研究

現在、高輝度 LED ランプの駆動回路には，スイッチングレギュレータが一般的に使用されているが，電磁波ノイズが発生するので医療現場での照明には不向きであった。本研究では、電磁波ノイズが発生し難いシリースレギュレータ方式に注目した。しかし，シリースレギュレータ方式は，突入電流の問題の他に，電源電圧±10[%]の変動に対し全光束が大幅に変動したり，電源効率が低くなったりする欠点があった。
研究から得られた成果は以下に要約される。

＜平成24～25年度＞

シリースレギュレータ方式で，リプルを減少させるために平滑コンデンサの充電電流を時間的に分割する方法を考案した。また，充電は定電流によって行い，突入電流を防止する方法を考案した。また，シリースレギュレータ方式において，LED の点灯する数を電源電圧の変動に応じて自動的に変化させることにより，当初の目的であった電源効率 85[%]を大きく上回る 91[%]という成果を挙げた。さらに，光束は，1000[lm]の目標を大きく上回る 3000[lm]を達成した。さらに，電源電圧±10[%]の変動に対し、光束が蛍光灯よりも安定し，コスト的にも安価な回路が実現できた。

＜平成24年度＞

① LED 点灯数を電源電圧の変動に応じて自動的に変化させる場合，前年度トランジスタを使ったコンパレータからオペアンプを使ったコンパレータに変更した。
② LED 点灯個数の LED に流れる電流をフィードバックする方法に加え，電流，電力もフィードバックする方法を取り入れ，より安定な制御ができるようにした。また，調光機能の取り付けやノイズ対策も万全に行った。

＜平成25年度＞

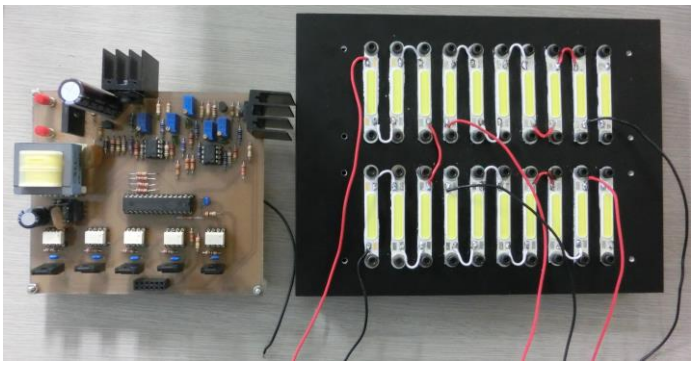


図 3.3-23　作成した回路と LED ライト

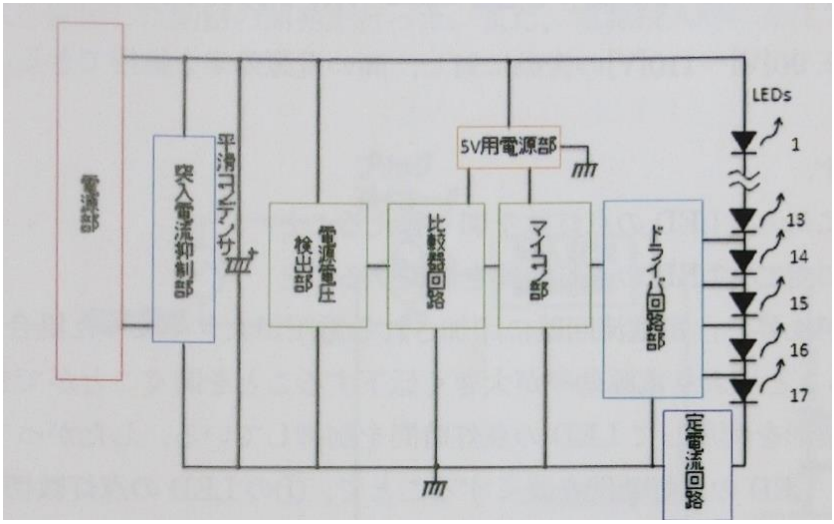


図 3.3-24　LED 駆動回路のブロック図

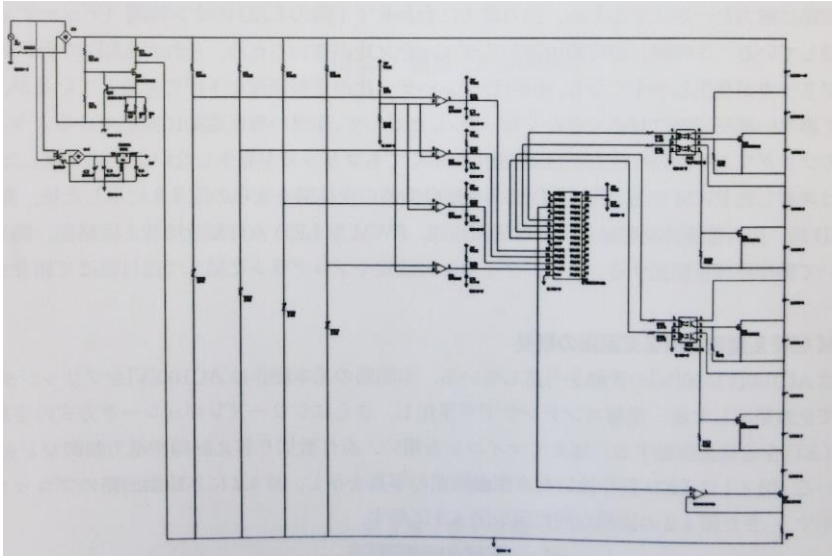


図 3.3-25　LED 駆動回路図

① 電源電圧の変動に対し，LED の点灯個数を切り替えているが，その時に LED が点滅する現象が起きていたので，パルス幅変調で徐々に切り替える方式を採用し，マイコンを使ってコントロールすることによって解決できた。

② 図 3.3-23 は平成 24 年度に作製した回路をしめす。また，図 3.3-24 は，平成 25 年度に作製した LED 駆動回路のブロック図を示し，図 3.3-25 は，図 3.3-24 の実回路図を示す。

（6）　三次元画像表示システムに関する研究

当初の目標は，三次元画像表示システムの開発で，画素数が 1[M]の動画表示を可能

にするためのシステムを構築し，より簡単に画像を作成するためのソフトを開発することであった。しかし，それ以前に画質の改善と構造の改善が先決課題として浮かび上がり，その改善に向けた研究を進めた。表 3.3-2 は，従来の 3D 表示システムと本研究の 3D 表示システにおける表示の比較を示す。得られた成果は以下に要約される。

表 3.3-2　従来の 3D 表示システムと本研究の 3D 表示システにおけるの比較

<table>
<tr><th rowspan="2">作成年度</th><th colspan="2">モノクロ/カラー</th><th colspan="3">画素数</th><th colspan="3">画素ピッチ[mm]</th><th rowspan="2">円盤の直径[mm]</th><th rowspan="2">アレイ群数</th><th rowspan="2">ボリューム周波数[Hz]</th><th rowspan="2">画像データの保存</th><th rowspan="2">動画表示時間</th></tr>
<tr><th>色数</th><th>階調</th><th>垂直</th><th>水平</th><th>奥行</th><th>垂直画素</th><th>水平画素</th><th>奥行画素</th></tr>
<tr><td>平成 23 年度</td><td rowspan="3">フルカラー 1,677 万色</td><td rowspan="3">256</td><td>64</td><td>1500</td><td rowspan="3">14</td><td>2．6</td><td>0．8</td><td>8</td><td>640</td><td>2</td><td>12</td><td rowspan="2">フラッシュメモリ</td><td rowspan="2">2 秒間</td></tr>
<tr><td>平成 24 年度</td><td rowspan="2">128</td><td rowspan="2">1000</td><td rowspan="2">1.63</td><td rowspan="2">0.94</td><td rowspan="2">4</td><td rowspan="2">450</td><td rowspan="2">3</td><td rowspan="2">18</td></tr>
<tr><td>平成 25 年度</td><td>組み込みパソコン内の SSD</td><td>約 1 時間</td></tr>
</table>

＜平成23～24年度＞

従来フルカラー化は実現していたが，平成 23～24 年度にかけて表 3.3-2 に示すように，垂直画素数を 2 倍にし，垂直画素ピッチを 2.6[mm]から 1.63[mm]に狭くした。水平画素数は 1500 画素から 1000 画素に減らしたが，水平画素ピッチは，表示する円周の長さを短くした為，0.8[mm]から 0.94[mm]とそれ程変化していない。また，ボリューム周波数（2 次元でのフレーム周波数）は 12[Hz]から 18[Hz]となり，チラツキが改善できた。

＜平成24年度＞

平成 24 年度，この 3D 表示システムを製作するに当たり，画質を向上させると同時に，システム重量の軽量化と容積のコンパクト化，価格の低コスト化を実現する目標を持って研究した。その結果，重量は 88[kg]から 51[kg]の減量に成功し，容積も 128×10^6～64×10^6[mm^3]と半減できた。また，コストは，回路の工夫と動力部の変更により，使

用する LED 数が 3 倍に増えているにも拘らず，従来（140 万円）より 10 万円安く作製できた。

＜平成25～26年度＞

動画表示時間の長時間化に取り組んだ。すなわち，従来画像データの保存には，フラッシュメモリを用いていたが，2 秒間しか表示できず，広告用としては同じコンテンツの繰り返ししかできなかった。その為，組み込みパーソナルコンピュ―タを表示の回転部に取り付けることにより，1 時間違う画像を表示できるようにした。しかし，実際にパソコンに記録できる形態は，2 次元画像の形態であり，それを 3 次元用に変換する必要があった。また，パソコンの出力も 2 次元用映像信号として出力されるので，その信号を 3 次元用に変換する必要があり，この取り組みに 3 年の歳月を要した。

＜平成27年度＞

本年度は，組み込みパソコンなど回路部品が増えたにもかかわらず，その価格は更にコストダウンでき，130 万円で製作が可能となった。図 3.3-26 は，LED 回転型三次元画像表示システムの外観を示す。

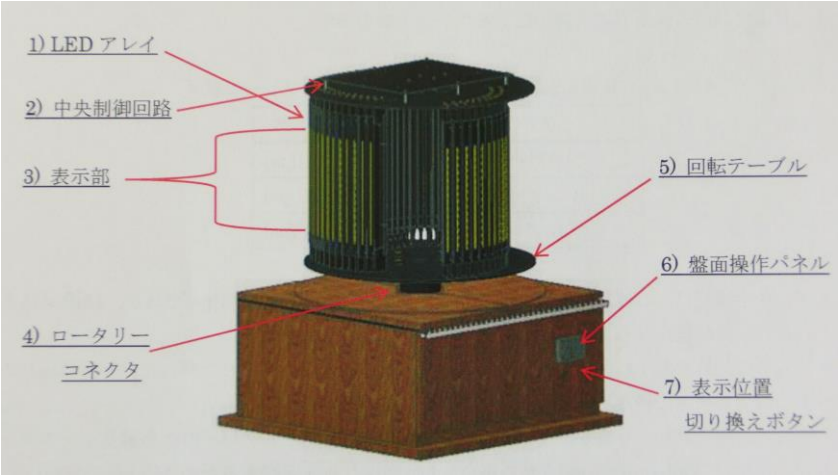


図 3.3-25　LED 回転型三次元画像表示システムの外観

＜研究課題［Ⅲ］の研究成果リスト＞（＊：当該研究課題と直接的に関連した成果）

○雑誌論文

＊1. Heterojunction solar cell with 6% efficiency based on an n-type aluminum–gallium–oxide thin film and p-type sodium-doped Cu_2O sheet: T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, Appl. Phys. Express, (査読有), Vol. 8, 022301 (2015)

＊2. Theoretical Analysis of Optical Polarization Properties in Semipolar and Nonpolar InGaN film Quantum Wells for Precise Determination of Valence-Band Parameters in InGaN Alloy Material: S. Sakai, A. A. Yamaguchi, Physica Status Solidi B, (査読有), Vol. 252, pp. 885-889 (2015)

＊3. Impact of incorporating sodium into polycrystalline p-type Cu_2O for heterojunction solar cell applications: T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, Appl. Phys. Lett., (査読有), Vol. 105, 212104 (2014)

＊4. Cu_2O-based heterojunction solar cells with an Al-doped ZnO/oxide semiconductor/thermally oxidized Cu_2O sheet structure: T. Minami, T. Miyata, Y. Nishi, Solar Energy, (査読有), Vol. 105, pp. 206–217 (2014)

＊5. Efficiency improvement of Cu_2O-based heterojunction solar cells fabricated using thermally oxidized copper sheets: T. Minami, T. Miyata, Y. Nishi, Thin Solid Films, (査読有),Vol. 559, pp. 105-111 (2014)

＊6. 定電流電源型パワーLED ランプ用点灯回路: 佐藤 翔，新元 渉，坂本康正，田村陽一，福田一郎，照明学会誌, (査読有)，第 97 巻，第 5 号，pp.278－281，(2013)

＊7. Efficiency improvement of Cu_2O-based heterojunction solar cells fabricated using thermally oxidized copper sheets: T. Minami, T. Miyata, Y. Nishi, Thin Solid Films, (査読有), Available online 19 November, (2013)

＊8. Effect of the thin Ga_2O_3 layer in n^+-ZnO/n-Ga_2O_3/p-Cu_2O heterojunction solar cells: T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, Thin Solid Films, (査読有), Vol. 549, pp. 65-69 (2013)

＊9. High-Efficiency Cu_2O-Based Heterojunction Solar Cells Fabricated Using a Ga_2O_3 Thin Film as N-Type Layer: T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, Applied Physics Express, (査読有), Vol.6, pp. 044101 (2013)

＊10. Influence of the kind and content of doped impurities on impurity-doped ZnO transparent electrode applications in thin-film solar cells: J. Nomoto, Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami, Thin Solid Films, (査読有), Vol. 534, pp. 426-431 (2013)

＊11. Surface morphologies and optical properties on Si doped InGaN multi-quantum-well grown on vicinal bulk GaN (0001) substrates: C. Sasaoka, F. Miyasaka, T. Koi, M. Kobayashi, Y. Murase, Y. Ando, A. A. Yamaguchi, Jpn. J. Appl. Phys., (査読有), Vol.52, 115601 (2013)

＊12. Fabrication of Low Dislocation Density GaN Template by Nano-channel FIELO Using Nanoimprint Lithography: A. Okada, S. Shoji, H. Shinohara, H. Nishihara, H. Goto, H. Sunakawa, T. Matsueda, A. Usui, A. A. Yamaguchi, J. Mizuno, J. Photopolym. Sci. Technol., (査読有),Vol.26, No.1, pp. 69-72 (2013)

＊13. I GaN lateral overgrowth by hydride vapor phase epitaxy through nanometer-size channels fabricated with nanoimprint lithography : A. Usui, T. Matsueda, H. Goto, H. Sunakawa, Y. Fujiyama, Y. Ishihara, A. Okada, S. Shoji, A. A.Yamaguchi, H. Nishihara, H. Shinohara, H. Goto and J. Mizuno, Jpn. J. Appl. Phys., (査読有), Vol.52, 08JB02 (2013)

＊14. Photoluminescence Study of Plasma-induced Damage to GaInN Single Quantum Well: S. Izumi, M. Minami, M. Kamada, T. Tatsumi, A. A.Yamaguchi, K. Ishikawa, M. Hori, S. Tomiya, Jpn. J. Appl.

Phys., (査読有), Vol.52, 08JL09 (2013)

15. 酸化物半導体-ITO ってなに: 南 内嗣, 応用物理, 82(7), pp. 601-604 (2013)

16. 酸化物半導体を用いた太陽電池の将来像とこれからの研究開発テーマの発掘: 南 内嗣, 研究開発
リーダー, 86, pp. 25-28 (2013)

＊17. The impact of heterojunction formation temperature on obtainable conversion efficiency in n-ZnO/p-Cu_2O solar cells: Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami, Thin Solid Films, (査読有), Vol. 528 , p. 72 (2013)

＊18. GaN lateral overgrowth by hydride vaper phase epitaxy through nanometer-size channels fabricated with nanoimprint lithography: A Usui, H. Goto, Y. Fujiyama, T. Matsueda, H. Sunakawa, Y. Ishihara, A. Okada, S. Shoji, A. A.Yamaguchi, H. Nishihara, H. Shinohara, H. Goto, J. Mizuno, Jpn. J. Appl. Phys., (査読有), Vol. 52, 08JB02 (2013)

＊19. Influence of the Kind and Content of Doped Impurities on Impurity-Doped ZnO Transparent Electrode Applications in Thin-Film Solar Cells: J. Nomoto, Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami, Thin Solid Films, (査読有), Vol. 534 , p. 426-431, (2013)

＊20. Effect of inserting a thin buffer layer on the efficiency in n-ZnO/p-Cu_2O heterojunction solar cells: Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami, J. Vac. Sci. Technol., (査読有), Vol. A 30, 04D103, (2012)

＊21. Influence of Cu_2O surface treatment on the photovoltaic properties of Al-doped ZnO/Cu_2O solar cells: Y. Nishi, T. Miyata, J. Nomoto, T. Minami, Thin Solid Films, (査読有), Vol.520, No.10, pp. 3819-3822, (2012)

＊22. Influence of rapid thermal annealing on surface texture-etched Al-doped ZnO films prepared by various magnetron sputtering methods: T. Minami, T. Hirano, T. Miyata, J. Nomoto, Thin Solid Films, (査読有), Vol.520, No.10, pp. 3803-3807, (2012)

＊23. Comparative study of surface recombination in hexagonal GaN and ZnO surfaces: T. Onuma, N. Sakai, T. Igaki, T. Yamaguchi, A. A. Yamaguchi, T. Honda, J. Appl. Phys., (査読有), Vol. 112, No.6, pp.063509-1-7, (2012)

＊24. Optical Polarization and Anisotropic Gain Characteristics in Semipolar and Nonpolar In GaN Quantum Well Lasers: A. A. Yamaguchi, K. Kojima, Physica Status Solidi (c), (査読有), Vol.9, No.3-4, pp.834-837, (2012)

＊25. Growth and strain characterization of high quality GaN crystal by HVPE: H. Y. Geng, H. Sunakawa, N. Sumi, K. Yamamoto, A. A. Yamaguchi, A. Usui, J. Crystal Growth, (査読有), Vol.350, No.1, pp. 44-49, (2012)

＊26. High-Efficiency Oxide Solar Cells with ZnO/Cu_2O Heterojunction Fabricated on Thermally Oxidized Cu_2O Sheets: T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, J. Nomoto, Appl. Phys. Express, (査読有), Vol.4, No.6, pp.062301-1-3, (2011)

＊27. Color control of emissions from rare earth-co-doped La_2O_3:Bi phosphor thin films prepared by magnetron sputtering: T. Miyata, J. Ishino, K. Sahara, T. Minami, Thin Solid Films, (査読有), Vol.519, No.22, pp. 8095-8099, (2011)

＊28. Preparation of Al-doped ZnO transparent electrodes suitable for thin-film solar cell applications by various types of magnetron sputtering depositions: J. Nomoto, T. Hirano, T. Miyata, T. Minami, Thin Solid Films, (査読有), Vol.520, No.5, pp. 1400-1406, (2011)

＊29. Optical and electrical properties of transparent conducting B-doped ZnO thin films prepared by various deposition methods: J. Nomoto, T. Miyata, T. Minami, J. Vac. Sci. Technol., A, (査読有),

Vol.29, No.4, pp.041504-1-6, (2011)

＊30. Impact of Nonpolar AlGaN Quantum Wells on Deep Ultraviolet Laser Diodes: K. Kojima, A. A. Yamaguchi, M. Funato, Y. Kawakami, S. Noda, J. Appl. Phys., (査読有), Vol.110, No.4, 043115-1-7, (2011)

＊31. Intrinsic Origin of the Breakdown of Quasi-Cubic Approximation in Nitride Semiconductors: Y. Ebihara, K. Kamiya, K. Shiraishi, A. A. Yamaguchi, Physica Status Solidi (c), (査読有), Vol.8, No.7-8, pp.2279-2281, (2011)

＊32. Surface recombination of hexagonal GaN crystals: T. Onuma, N. Sakai, T. Okuhata, A. A. Yamaguchi, T. Honda, Physica Status Solidi (c), (査読有), Vol.8, No.7-8, pp.2321-2323, (2011)

○学会発表

＜国際会議プロシーディング＞

*1. K. Okajima, W. Shimmoto, Y. Sakamoto, Y. Tamura: Low Noise LED Lighting Circuit by Linear Regulator System, The 7th CJK Lighting Conference, Tianjin, China, No.20, pp. 1-4 (2015)

*2. T. Miyata, S. Abe: PL and EL Characteristics in UV to Blue Green Emitting Bi-Activated Y_2O_3-Based Oxide Phosphor Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering, The Int. Display Workshops 2014, Niigata, pp. 541-544, Japan, (2014)

*3. T. Minami, T. Miyata, T. Yamanaka: Influence of Orientation and Size in Crystallite on Various Properties in Al-doped ZnO Films for Solar Cell Transparent Electrode Applications, AVS 61st Int. Symp. & Exhibition, Baltimore, USA (2014)

*4. T. Miyata, Y. Nishi, T. Minami: (Invited talk) Efficiency Improvement of n-Oxide Semiconductor/p-Cu_2O Heterojunction Solar Cells Fabricated on Thermally Oxidized Cu_2O Sheets, CIMTEC 6th Forum on New Materials, Montecatini Terme, Italy, (2014)

*5. T. Minami, T. Miyata: (Invited talk) Light scattering characteristics of surface-textured impurity-doped ZnO films prepared by magnetron sputtering, CECAM Workshop Nanostructured Zinc Oxide and related Materials, Bremen, Germany, (2014)

*6. T. Minami, T. Miyata, T. Yamanaka, J. Nomoto: Optimization of the Light Scattering Characteristics of Surface-textured AZO Films Prepared by Magnetron Sputtering, The Int. Conf. on Metallurgical Coatings and Thin Films, San Diego, USA (2014)

*7. Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami: Optimization of n-Oxide Thin-film Formation in Heterojunction Solar Cells Using Thermally Oxidized p-Cu_2O Sheets, The Int. Conf. on Metallurgical Coatings and Thin Films, San Diego, USA (2014)

*8. S. Sakai, A. A. Yamaguchi, K. Kurihara, S. Nagao: Effects of Alloy Compositional Fluctuation on Optical Polarization Properties in Nonpolar InGaN Quantum Wells, The 10th Int. Symp. on Semiconductor Light Emitting Devices, Kaohsiung, Taiwan, pp. 137-138, (2014)

*9. A. Okada, J. Mizuno, H. Shinohara, H. Goto, T. Matsueda, H. Sunakawa, H. Goto, T. Nakagawa, A. A. Yamaguchi, S. Shoji, A. Usui: UV-NIL Applied Fabrication of High Quality 2-Inch GaN Template Using Nanometer-Size SiO_2 Lattice Mask Structure, 13th Int. Conf. on Nanoimprint and Nanoprint Technology, Kyoto, Japan (2014)

*10. A. A. Yamaguchi, S. Sakai: (Invited) Theoretical Study of Optical Gain Characteristics in InGaN Pure-Green Laser Diodes on Semipolar GaN Substrates, Energy Material Nanotechnology Open

Access Week Meeting, Chengdu, China, pp.72-73, (2014)

*11. S. Sakai, A. A. Yamaguchi: Theoretical Analysis of Optical Polarization Properties in Semipolar and Nonpolar InGaN Quantum Wells for Precise Determination of Valence-Band Parameters in InGaN Alloy Material, Int. Workshop on Nitride semiconductors, Wrocław, Poland (2014)

*12. O. Ueda, A. A. Yamaguchi, S. Tanimoto, S. Nishibori, K. Kumakura, H. Yamamoto: Degradation of InGaN/GaN SQW Structure under Optical Irradiation, Int. Workshop on Nitride semiconductors, Wrocław, Poland (2014)

*13. K. Kurihara, S. Nagao, A. A. Yamaguchi: Emission characteristics of InGaN-MQW structure on m-plane GaN substrates, Int. Work-shop on Nitride semiconductors, Wrocław, Poland (2014)

*14. K. Kojima, A. A. Yamaguchi, M. Funato, Y. Kawakami, S. Noda: (Invited) Optical characteristics of deep ultraviolet nitride semiconductors with various crystal orientations, Int. Union of Materials Research Societies - The IUMRS Int. Conf. in Asia 2014, Fukuoka, Japan (2014)

*15. A. A. Yamaguchi, S. Sakai: Theoretical Prediction of Optical Gain Characteristics in InGaN Green Laser Diodes Fabricated on Low-Angle Semipolar GaN Substrates, 2014 Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices, Kanazawa, Japan, pp. 76-78 (2014)

*16. T. Minami, J. Nomoto, T. Miyata, T. Yamanaka: Influence of Rapid Thermal Annealing Treatment on Various Properties of Texture-Etched Al- or Ga-Doped ZnO Thin Films Deposited by MagnetronSputtering, 60th AVS 2014, Long beach, CA, USA (2013)

*17. T. Minami, T. Miyata: Oxide semiconductor heterojunction solar cells (INVITED), International Workshop on Luminescent Materials 2013 (LumiMat'13), Kyoto, Japan, I-6 (2013)

*18. T. Miyata, Y. Nishi T. Minami: Photovoltaic Properties of Cu_2O-based Heterojunction Solar Cells Fabricated with Various Semiconductors as an n-type Layer (INVITED), 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, Kyoto, Japan, 18a-M1-6 (2013)

*19. T. Minami, Y. Nishi and T. Miyata: Photovoltaic Properties of Al-doped ZnO/n-type semiconductor/p-type Cu_2O Heterojunction Solar Cells (INVITED), ICNFA2013, Coimbatore, India (2013)

*20. T. Minami, T. Miyata, Y. Nishi: Fabrication of High-Efficiency Cu_2O-Based Heterojunction Solar Cells Using Thermally Oxidized Copper Sheets (INVITED), TOEO-8, Tokyo, Japan, pp.14a-I02 (2013)

*21. Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami: Photovoltaic Properties of Cu_2O-Based Heterojunction Solar Cells Fabricated with Multicomponent Oxides As an n-Type Semiconductor Layer, T TOEO-8, Tokyo, Japan, pp.14a-P09 (2013)

*22. J. Nomoto, T. Yamanaka, T. Miyata, T. Minami: Influence of Post-Chemical Etching on the Light Scattering Characteristics of Surface-Textured AZO Films Formed by Magnetron Sputtering Depositions, TOEO-8, Tokyo, Japan, pp.14a-P10 (2013)

*23. T. Miyata, J. Nomoto, T. Fujita, T. Minami: Influence of crystallographical properties on obtainable texture-etched surface structure in transparent conducting impurity-doped ZnO thin films, ICMCTF2013, San Diego, CA, USA (2013)

*24. Y. Nishi, T. Miyata, T.Minami: Effect of the thin Ga_2O_3 layer in n^+-ZnO/n-Ga_2O_3/p-Cu_2O heterojunction solar cells, ICMCTF2013, San Diego, CA, USA (2013)

*25. H. Manabe, H. Goto, H. Sunakawa, T. Matsueda, A. Okada, H. Shinohara, H. Nishihara, H. Goto, J. Mizuno, A. Usui, A. A. Yamaguchi: Direct verification of commonly-used rate-equation model in

III-nitride material by detailed analysis of photoluminescence decay curves, SPIE Photonics West 2014, San Francisco, USA, (2014)

*26. A. Okada, H. Shinohara, H. Goto, H. Goto, H. Sunakawa, T. Matsueda, A. Usui, A. A. Yamaguchi, S. Shoji, and J. Mizuno: High Quality GaN Template of a 2-inch Wafer Using Nanometer-Size SiO_2 Lattice Mask Structure Fabricated by UV Nanoimprint Lithography, 26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference, Sapporo, Japan, (2013)

*27. A. Usui, H. Goto, T. Matsueda, H. Sunakawa, T. Nakagawa, A. Okada, J. Mizuno, A. A. Yamaguchi, H. Shinohara, H. Goto: (invited) Growth of High-Quality GaN Template From Nanometer-Size Lattice Channels By Hydride Vapor Phase Epitaxy, 224th Electrochemical Society Meeting, San Francisco, USA, (2013)

*28. M. Nambu, H. Manabe, A. A. Yamaguchi, H. Goto, H. Sunakawa, T. Matsueda, A. Okada, H. Shinohara, H. Nishihara, H. Goto, J. Mizuno, A. Usui: Two-Dimensional Strain Mapping of GaN Templates Fabricated by Nano-Channel FIELO Method Using Nanoimprint Lithography, 10th International Conference on Nitride Semiconductors, Washington DC, USA, (2013)

*29. A. Okada, S. Shoji, H. Shinohara, H. Nishihara, H. Goto, H. Goto, H. Sunakawa, T. Matsueda, A. Usui, A. A. Yamaguchi, J. Mizuno: Fabrication of Low Dislocation Density GaN Template by Nano-Channel FIELO using Nanoimprint Lithography, The 30th International Conference of Photopolymer Science and Technology, Chiba, Japan, (2013)

*30. H. Goto, T. Matsueda, H. Sunakawa, T. Nakagawa, A. Okada, J. Mizuno, A. A. Yamaguchi, H. Shinohara, H. Goto, A. Usui: Uniform Growth of Thin GaN Layer Through Nanometer-size Lattice Channels by Hydride Vapor Phase Epitaxy, 6th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductor 2013, New Taipei, Taiwan, (2013)

*31. S. Sakai, A. A. Yamaguchi: heoretical Studies on Anisotropic Optical Gain Characteristics in Semipolar-Oriented InGaN Quantum-Well Laser Diodes, 6th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductor 2013, New Taipei, Taiwan, (2013)

*32. A. Minamide, H. Fukada, A. A. Yamaguchi, Y. Tokunaga: Research for engineering applications of laser-induced thermal waves and emergence stress waves, Proc. of Symp. on Ultrasonic Electronics, Kyoto, Japan, pp. 93-94 (2013)

*33. K. Miyakoshi, Y. Sakamoto, I. Fukuda: Turn-type full Color 3-D Display System Using Arrays of LEDs, 2012 SID Int. Symp. & Exhibition, Boston, USA, (2012)

*34. W. Shimmoto, S. Sato, Y. Sakamoto, Y. Tamura: High Efficiency Circuit for the High Power LED Lamp, The 5th Lighting Conf. of China, Japan and Korea, Tokyo, Japan, pp. 219-222 (2012)

*35. J. Nomoto, T. Hirano, T. Miyata, T. Minami: Influence of the Kind and Content of Doped Impurities on Impurity-Doped ZnO Transparent Electrode Applications in Thin-Film Solar Cells, ICMCTF2012, San Diego, USA, C2-2/F4-2-2 (2012)

*36. Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami: The Impact of Heterojunction Formation Temperature on Obtainable Conversion Efficiency in n-ZnO/p-Cu_2O Solar Cells, ICMCTF2012, San Diego, USA, CP-18 (2012)

*37. T. Minami, T. Fujita, T. Miyata, J. Nomoto: Texture-Etched Surface Structure Control of Transparent Conductive Impurity-Doped ZnO Films Deposited by r.f. Power Superimposed d.c. Magnetron Sputtering, 59th AVS Int. Symp. & Exhibition, Tampa, USA, (2012)

*38. Y. Nishi, S. Abe, T. Miyata, T. Minami, N. Ikenaga and O. Ueda: Relationship between Interface Microstructures and Obtainable Photovoltaic Properties in ZnO/Cu_2O Heterojunction Solar Cells, 59th AVS Int. Symp. & Exhibition, Tampa, USA, 2012/10

*39. T. Minami, Y. Nishi, T. Miyata, S. Abe: Photovoltaic Properties in Al-doped ZnO/nondoped Zn1-XMgXO/Cu_2O Heterojunction Solar Cells, PRIME 2012 ECS Int. Meeting, Hawaii, USA, (2012)

*40. T. Miyata, Y. Nishi, T. Mori, T. Minami: Electroluminescence from Cr^{3+} in New Perovskite Thin-Film Phosphors using $LaAlO_3$ and $LaGaO_3$ as the Host, PRIME 2012 ECS Int. Meeting, Hawaii, USA, (2012)

*41. A. A. Yamaguchi (invited): Optical polarization and anisotropic gain characteristics in semipolar and nonpolar InGaN quantum well lasers, Photonics Global Conf. 2012, Singapore, (2012)

*42. A. Okada, H. Shinohara, H. Nishihara, H. Goto, A. Usui, T. Matsueda, H. Goto, Y. Fujiyama, H. Sunakawa, Y. Ishihara, A. A. Yamaguchi, S. Shoji, J. Mizuno: Fabrication of High Quality GaN Template by Nano-channel FIELO Using UV Nanoimprint Lithography for High Efficiency LED, The 11th Int. Conf. on Nanoimprint & Nanoprint Technol., Napa, USA, (2012)

*43. S. Izumi, M. Minami, M. Kamada, T. Tatsumi, A. A.Yamaguchi, K. Ishikawa, M. Hori, S. Tomiya: Photoluminescence study of Plasma induced damage to GaInN SQW, Int. Workshop on Nitride Semiconductors 2012, Sapporo, Japan, (2012)

*44. A. Usui, H. Goto, Y. Fujiyama, T. Matsueda, H. Sunakawa, Y. Ishihara, A. Okada, S. Shoji, A. A. Yamaguchi, H. Nishihara, H. Shinohara, H. Goto, J. Mizuno: GaN lateral overgrowth by HVPE through nanometer-size channels fabricated with nanoimprint lithography, Int. Workshop on Nitride Semiconductors 2012, Sapporo, Japan, (2012)

*45. A. A. Yamaguchi (invited): Physics and advantage of InGaN LDs grown on semipolar and nonpolar surfaces, Workshop on Optical Sci. of Dynamically Correlated Electron Systems in Asia, Tokyo, Japan, (2012)

*46. A. A. Yamaguchi (invited): Optical Properties of III-nitride Materials and Devices, The 2012 Spring Meeting of Material Research Society, Boston, USA, (2012)

*47. A. Usui, H. Sunakawa, N. Sumi, K. Yamamoto, H. Y. Geng, A. A. Yamaguchi (Invited): Reduction of Dislocation Density and Strain by Three-dimensional Islands Growth on TiC Buffer Layer in HVPE-GaN Crystal, SPIE Photonics West 2012, San Francisco, USA, (2012)

*48. A. A. Yamaguchi, K. Kojima (Invited): A new simple theoretical approach to analyze optical polarization properties in semipolar and nonpolar InGaN quantum wells, 5th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS-2011), Toba, Japan, (2011)

*49. N. Sakai, T. Onuma, A. A. Yamaguchi, T. Honda: Surface recombination in polar and nonpolar GaN surfaces, 5th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors (APWS-2011), Toba, Japan, (2011)

*50. A. A. Yamaguchi, K. Kojima: Optical Polarization and Anisotropic Gain Characteristics in Semipolar and Nonpolar InGaN Quantum Well Lasers, The 9th Int. Conf. on Nitride Semiconductors (ICNS-9), Glasgow, UK, (2011)

*51. T. Hirano, Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami: Influence of RTA on Surface Texture-etched AZO Films Prepared by Various Magnetron Sputtering Depositions for Thin-Film Solar Cell Applications, 7th Int. Symp. on Transparent Oxide Thin Films for Electronics and Optics (TOEO-7), Tokyo, Japan, (2011)

*52. I. Fukuda, Y. Sakamoto, T. Ishinabe, T. Uchida: A New Transflective OCB-LCD with In-Cell Compensation Film, 2011 SID Int. Symp. & Exhibition, Los Angeles, USA, (2011)

*53. T. Hirano, Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami: Influence of RTA on Surface Texture-etched AZO Films Prepared by Various Magnetron Sputtering Depositions for Thin-Film Solar Cell Applications, 7th

Int. Symp. on Transparent Oxide Thin Films for Electronics and Optics (TOEO-7), Tokyo, Japan, (2011)

*54. J. Nomoto, T. Miyata, T. Minami: Preparation of Transparent Conducting Al- and B-co-doped ZnO Films with High Carrier Mobility and Near-Infrared Transparency by Magnetron Sputtering, 7th Int. Symp. on Transparent Oxide Thin Films for Electronics and Optics (TOEO-7), Tokyo, Japan, (2011)

*55. J. Nomoto, T. Miyata, T. Minami: Preparation of ZnO Films with High Near-infrared Transparency and Carrier Mobility by Magnetron Sputtering with Optimized Impurity Doping, 7th Int. Symp. on Transparent Oxide Thin Films for Electronics and Optics (TOEO-7), Tokyo, Japan, (2011)

*56. Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami: Influence of Cu_2O Surface Treatment on the Photovoltaic Properties of AZO/Cu_2O Solar Cells, 7th Int. Symp. on Transparent Oxide Thin Films for Electronics and Optics (TOEO-7), Tokyo, Japan, (2011)

*57. T. Miyata, Y. Nishi, J. Ishino, T. Minami: PL and EL Characteristics of Rare Earth-Activated $BaLa_2O_4$ Phosphor Thin Films with or without Co-doping of Bi, he 38th Int. Conf. on Metallurgical coatings & thin films (ICMCTF), San Diego, USA, (2011)

*58. J. Nomoto, T. Hirano, T. Miyata, T. Minami: Preparation of Impurity-Doped ZnO Transparent Electrodes Suitable for Thin-Film Solar Cell Applications by Various Types of Magnetron Sputtering Depositions, The 38th Int. Conf. on Metallurgical coatings & thin films (ICMCTF), San Diego, USA, (2011)

*59. Y. Nishi, T. Miyata, J. Nomoto, T. Minami: High-efficiency Cu_2O-based Heterojunction Solar Cells Fabrication on Thermally Oxidized Copper Sheets, 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Seattle, USA, (2011)

*60. T. Minami, T. Miyata, J. Nomoto (Invited): Impurity-doped ZnO Thin Films Prepared by Physical Deposition Methods Appropriate for Transparent Electrode Applications in Thin-film Solar Cells, E-MRS 2011 Fall Symp., Warsaw, Poland, (2011)

*61. T. Minami, T. Miyata, T. Hirano, Y. Noguchi, J. Nomoto: Influence of Target Type on Surface Texture-etched AZO Films Prepared by Magnetron Sputtering for Solar Cell Transparent Electrode Applications, AVS 58th Int. Symp. & Exhibition, Nashville, USA, (2011)

*62. T. Minami, T. Miyata, Y. Nishi, J. Nomoto: Effect of inserting a thin buffer layer on the efficiency in n-ZnO/p-Cu_2O heterojunction solar cells, AVS 58th Int. Symp. & Exhibition, Nashville, USA, (2011)

*63. J. Nomoto, T. Miyata, T. Hirano, T. Minami: Influence of Doped Al Content on Electrical Properties and Light Management Obtainable by Texture-etched AZO Films Prepared by DC Magnetron Sputtering, AVS 58th Int. Symp. & Exhibition, Nashville, USA, (2011)

*64. Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami: Thin-Film Electroluminescent Devices Fabricated Using Bi- and Eu-Coactivated La_2O_2S Phosphors, The 18th Int. Display Workshops, Nagoya, Japan, (2011)

*65. T. Hirano, Y. Nishi, T. Miyata, T. Minami: PL and EL Characteristics in Eu-Activated Multicomponent Oxysulfide Thin-Film Phosphors Using Various IIa-La-O-S Host Materials, The 18th Int. Display Workshops, Nagoya, Japan, (2011)

*66. T. Miyata, Y. Nishi, T. Minami: PL and EL characteristics in Bi- and rare earth-co-doped $(La_{1-X}Ga_X)_2O_3$ phosphor thin films prepared by magnetron sputtering, SPIE – Smart Material, Nano-, and Micro-Smart Systems 2011, Melbourne, Australia, (2011)

*67. T. Minami, T. Miyata, T. Hirano, J. Nomoto: Reduction of obtainable resistivity in transparent conducting impurity-doped ZnO thin films prepared with a very thin buffer layer by magnetron

sputtering, SPIE - The Int. Soc. for Optical Eng., 8204, (2011)

＜国内学会講演発表＞

*68. 西 祐希, 宮田俊弘, 南 内嗣: （招待講演）n 形酸化物半導体/p 形 Cu_2O シート太陽電池の変換効率改善, 応用電子物性分科会研究会, 京都, pp.27-33 (2015)

*69. 南 内嗣, 宇於崎涼介, 山中俊憲, 西 祐希: （招待講演）多結晶 ZnO 系透明導電膜の現状: 結晶粒界の影響及び応用上の問題点, 日本学術振興会 透明酸化物光・電子材料第 166 委員会第 66 回研究会, 東京, (2015)

*70. 山中俊憲, 宇於崎涼介, 宮田俊弘, 南 内嗣: AZO 透明導電膜における表面テクスチャ構造の制御と最適化, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 11a-D1-4, (2015)

*71. 宇於崎涼介, 山中俊憲, 宮田俊弘, 南 内嗣: 多結晶 AZO 透明導電膜のキャリア輸送現象に対する結晶粒界の影響, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 11a-D1-5, (2015)

*72. 宮田俊弘, 西 祐希, 南 内嗣: 熱酸化 p 形 Cu_2O シートの電気的特性に対する Na 添加の影響, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 11a-D10-3, (2015)

*73. 西 祐希, 宮田俊弘, 南 内嗣: P 形 Na 添加 Cu_2O ベースヘテロ接合太陽電池, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 11a-D10-4, (2015)

*74. 古川恵大, 深田晴己, 山口敦史: 局在発光中心型酸化物蛍光体における光音響信号と PL の関係, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 13p-P18-11, (2015)

*75. 南 内嗣, 西 祐希, 宮田俊弘: （応用物理学会優秀論文賞受賞記念講演）High-Efficiency Cu_2O-Based Heterojunction Solar Cells Fabricated Using a Ga_2O_3 Thin Film as N-Type Layer, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, (2014)

*76. 栗原 香, 長尾 哲, 山口敦史: m 面 GaN 基板上 InGaN 量子井戸の発光特性, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会（LQE）, 大阪, pp. 19-22, (2014)

*77. 坂井繁太, 山口敦史, 栗原 香, 長尾 哲: 非極性 InGaN 量子井戸の偏光特性, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会（LQE）, 大阪, pp. 23-26, (2014)

*78. 南部優賢, 山口敦史, 後藤裕輝, 砂川晴夫, 松枝敏晴, 岡田愛姫子, 篠原秀敏, 後藤博史, 水野 潤, 碓井 彰: ナノインプリントリソグラフィを用いたナノチャネル FIELO 法により作製された GaN テンプレートの 2 次元歪みマッピング, 電子情報通信学会レーザ・量子エレクトロニクス研究会（LQE）, 大阪, pp. 33-38, (2014)

*79. 山口敦史: 光学的評価の基礎と実践, 応用物理学会結晶工学分科会主催第 20 回結晶工学スクール,小金井市, pp. 171-187, (2014)

*80. 山口敦史, 真鍋仁志, 河上航平, 後藤裕輝, 砂川晴夫, 松枝敏晴, 岡田愛姫子, 篠原秀敏, 後藤博史, 水野 潤, 碓井 彰: 窒化物半導体における ABC モデルの時間分解 PL 測定による直接検証, 光電相互変換第 125 委員会本委員会第 225 回研究会・ＪＰＣ産業用 LED 応用研究会「2014 年 7 月定例会」合同研究会, pp. 23-27

*81. 岡島宏太, 坂本康正, 田村陽一: リニアレギュレータを用いた LED 照明用低ノイズ駆動回路の開発, 電気関係学会北陸支部連合大会, 富山, A-15, (2014)

*82. 笹岡稜太, 小原邦夫, 坂本康正: ＬＥＤ回転型３次元画像表示システム—LED アレイの高輝度化—, 電気関係学会北陸支部連合大会, 富山, B-10, (2014)

*83. 小原邦夫, 笹岡稜太, 坂本康正: LED 回転型 3 次元画像表示システム—組み込み PC からの映像出力に対応するシステムの設計—, 電気関係学会北陸支部連合大会, 富山, B-11, (2014)

*84. 宮田俊弘, 山中俊憲, 宇於崎涼介, 南 内嗣: 表面テクスチャ AZO 透明導電膜の光学的特性と電気的結晶学的特性との関係, 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 富山, 8-A-5,

(2014)

*85. 山中俊憲, 宮田俊弘, 南 内嗣: 表面テクスチャ AZO 透明導電膜の作製条件の最適化, 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 富山, 8-A-6, (2014)

*86. 宮田俊弘, 西 祐希, 南 内嗣: 熱酸化 p 形 Cu_2O 薄板への Na 添加効果, 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 富山, 7-D-3, (2014)

*87. 宮田俊弘, 西 祐希, 南 内嗣: Ga-Al-O 多元系酸化物薄膜 n 形半導体層を用いる Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池, 応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 富山, 7-D-4, (2014)

*88. 宮田俊弘, 山中俊憲, 宇於崎涼介, 南 内嗣: 表面テクスチャ AZO 透明導電膜の光吸収と電気的・結晶学的特性との関係, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 19a-A12-4, (2014)

*89. 西 祐希, 宮田俊弘, 南 内嗣: n 形酸化物半導体/p 形 Cu_2O ヘテロ接合における伝導帯不連続, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 18a-A10-4, (2014)

*90. 宮田俊弘, 西 祐希, 南 内嗣: 熱酸化 Cu_2O 薄板の電気的特性とヘテロ接合太陽電池特性との関係, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 18a-A10-5, (2014)

*91. 栗原 香, 長尾 哲, 山口敦史: m 面自立基板上の InGaN 量子井戸層からの発光特性, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 19a-C5-2, (2014)

*92. 坂井繁太, 山口敦史, 栗原 香, 長尾 哲: In 組成の空間的ゆらぎが非極性 InGaN 量子井戸の偏光特性へ及ぼす影響, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 札幌, 19a-C5-3, (2014)

*93. 南 内嗣, 宮田俊弘: 透明導電膜の材料開発と電子ディスプレイ用透明電極への応用（招待講演）, 2014 年電子情報通信学会総合大会, 新潟, C-9-6 (2014)

*94. 南 内嗣, 宮田俊弘, 西 祐希: n 形半導体薄膜／p 形亜酸化銅薄板ヘテロ接合太陽電池（招待講演）, 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム, 神奈川, 17a-F8-2 (2014)

*95. 西 祐希, 宮田俊弘, 南 内嗣: AZO/n 形半導体/Cu_2O ヘテロ接合太陽電池に対する RTA 処理の効果, 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 17p-PG2-13 (2014)

*96. 宮田俊弘, 山中俊憲, 南 内嗣: 不純物添加 ZnO 系透明導電膜のキャリア散乱機構の検討, 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 18a-E10-7 (2014)

*97. 西 祐希, 宮田俊弘, 南 内嗣: 正孔密度を変化させて作製した Cu_2O シートを用いるヘテロ接合太陽電池, 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 20a-E8-6 (2014)

*98. 西 祐希, 宮田俊弘, 南 内嗣: 半導体薄膜/Cu_2O シートヘテロ接合太陽電池の成膜技術と光起電力特性との関係, 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 20a-E8-7 (2014)

*99. 阿部信也, 宮田俊弘: マグネトロンスパッタ成膜法で作製した Bi 添加イットリウムベース酸化物蛍光体薄の PL 及び EL 特性, 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 18a-PG6-10 (2014)

*100. 真鍋仁志, 河上航平, 後藤裕輝, 砂川晴夫, 松枝敏晴, 岡田愛姫子, 篠原秀敏, 後藤博史, 水野潤, 碓井彰, 山口敦史: 窒化物半導体における ABC モデルの時間分解 PL 測定による直接検証, 2014 年第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 神奈川, 20p-E13-7 (2014)

*101. 小島一信, 山口敦史, 船戸充, 川上養一, 野田進: 非極性面窒化物半導体深紫外レーザーの低閾値化に関する理論的検討（招待講演）, レーザ学会学術講演会第 34 回年次大会, 北九州, (2014)

*102. 坂本博紀, 坂本康正: LED 回転型三次元画像表示システムの高精細化, 電気関係学会北陸支部連合大会, 金沢, F2-61 (2013)

*103. 吉川世威一, 坂本康正: 奥行き融合型 3 次元表示装置, 電気関係学会北陸支部連合大会,

金沢，F2-62　(2013)

104. 坂本康正: 電子回路教育での取り組み，電学電子・情報・システム部門大会，北海道北見市，TC7-3，pp.350-355 (2013)

*105. 山中俊憲，宮田俊弘，南 内嗣: ZnO 系透明導電膜のキャリア散乱機構に関する検討，応用物理学会北陸・信越支部学術講演会，野々市，22p-A-5, p.7 (2013)

*106. 阿部信也，宮田俊弘: スパッタ成膜した Bi 添加イットリウムベース酸化物蛍光体薄膜の PL 及び EL 特性，応用物理学会北陸・信越支部学術講演会，野々市，22p-C-3, p.47 (2013)

*107. 坂井繁太，山口敦史: 緑色半導体レーザの低コスト・高性能化に向けた光学利得特性の理論研究，応用物理学会北陸・信越支部学術講演会，野々市, 23a-C-1, p.56 (2013)

*108. 真鍋仁志，河上航平，後藤裕輝，砂川晴夫，松枝敏晴，岡田愛姫子，篠原秀敏，後藤博史，水野潤，碓井彰，山口敦史: 時間分解 PL 測定による GaN のキャリアダイナミクスに関する研究，用物理学会北陸・信越支部学術講演会，野々市, 23a-C-2, p.57 (2013)

*109. 南部優賢，真鍋仁志，山口敦史，後藤裕輝，砂川晴夫，松枝敏晴，岡田愛姫子，篠原秀敏，後藤博史，水野潤，碓井彰: ナノインプリントリソグラフィを用いたナノチャネル FIELO 法により作製された GaN テンプレートの 2 次元歪みマッピング，応用物理学会北陸・信越支部学術講演会，野々市, 23a-C-3, p.58 (2013)

*110. 大西健仁，深田晴己，山口敦史: コンビナトリアル・ディップコート法により作製した Bi 付活 Y_2O_3 ベース多元系酸化物蛍光体薄膜の PL 特性，応用物理学会北陸・信越支部学術講演会，野々市，23a-C-4, p.59 (2013)

*111. 高田奨，中村聡志，深田晴己，宮田俊弘: スピンコート法による Eu または Bi 付活酸化物蛍光体薄膜の作製と評価，応用物理学会北陸・信越支部学術講演会，野々市，23a-C-5,　p.60 (2013)

*112. 阿部信也, 宮田俊弘: スパッタ成膜した Cr,Bi 共添加 $ZnGa_2O_4$ 蛍光体薄膜の EL 特性，第 74 回応用物理学会秋季学術講演会，京田辺，16a-P2-13 (2013)

*113. 山中俊憲，野本淳一，宮田俊弘，南 内嗣: スパッタ法で作製する AZO 透明導電膜の表面テクスチャ構造形成技術の検討，第 74 回応用物理学会秋季学術講演会，京田辺，16p-P8-7 (2013)

*114. 宮田俊弘，西 祐希，南 内嗣: Cu_2O シート型ヘテロ接合太陽電池の光起電力特性に及ぼす n 形半導体層形成条件の影響，第 74 回応用物理学会秋季学術講演会，京田辺，18p-D3-11 (2013)

*115. 坂井繁太，山口敦史: 半極性 InGaN-QWs LD における光学利得の理論研究，第 74 回応用物理学会秋季学術講演会，京田辺，20p-B5-7 (2013)

*116. 大西健仁，深田晴己，山口敦史: コンビナトリアル・ディップコート法を用いて作製した紫外発光 Bi 付活酸化物蛍光体薄膜，第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 京田辺, 16a-P2-12 (2013)

*117. 西 祐希，宮田俊弘，南 内嗣: 熱酸化 Cu_2O シートを用いる AZO/Ga_2O_3/Cu_2O ヘテロ接合太陽電池の高効率化，第 60 回応用物理学関係連合講演会，神奈川, (2013)

*118. 西 祐希，宮田俊弘，南 内嗣: 多元系酸化物薄膜を n 形半導体層に用いた Cu_2O 系ヘテロ接合太陽電池，第 60 回応用物理学関係連合講演会，神奈川, (2013)

*119. 野本淳一，山中俊憲，宮田俊弘，南 内嗣: スパッタ成膜する薄膜太陽電池用 AZO 透明電極の表面テクスチャ構造形成技術の検討，第 60 回応用物理学関係連合講演会，神奈川, (2013)

*120. 阿部信也，宮田俊弘，南 内嗣: スパッタ成膜した新規なペロブスカイト蛍光体薄膜の EL

特性(Ⅱ), 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川, (2013)

*121. 南部優賢, 真鍋仁志, 内田健太, 山口敦史, 後藤裕輝, 砂川晴夫, 松枝敏晴, 岡田愛姫子, 篠原秀敏, 西原浩巳, 後藤博史, 水野潤, 碓井彰: ナノチャンネル FIELO 法により作製した GaN テンプレートの光学特性, 2013 年春季 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川, (2013)

*122. 田中 強士, 深田 晴己, 南 内嗣: コンビナトリアル・ディップコート法を用いて作製した Bi 付活 Y_2O_3 ベース多元系酸化物薄膜, 2013 年春季 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川, (2013)

*123. 深田晴己, 田中強士, 南 内嗣: ディップコート法により作製した階段状酸化物薄膜における膜厚分布の改善, 2013 年春季 第 60 回応用物理学関係連合講演会,神奈川, (2013)

124. 山口敦史（招待講演）: 光学的評価の基礎と実践, 応用物理学会結晶工学分科会主催第 18 回結晶工学スクール, 東京, pp. 153-169 (2012)

*125. 碓井彰, 砂川晴夫, 布田将一, 鷲見紀彦, 耿慧遠, 山口敦史（招待講演）: GaN 系バルク結晶成長における課題と今後の展開, 日本学術振興会「結晶加工と評価技術」第 145 委員会 第 129 回研究会 「窒化物バルク結晶の成長と評価 － 現状と今後の課題 －」, 東京, (2012)

*126. 藤田 強, 野本淳一, 宮田俊弘, 南 内嗣: スパッタ成膜した ZnO 系透明導電膜の表面テクスチャ構造形成と結晶学的特性との関係, 平成 24 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 富山, (2012)

*127. 阿部信也, 西 祐希, 宮田俊弘, 南 内嗣: Cr 及び Ce を共添加した新規なペロブスカイト $LaAlO_3$ 及び $LaGaO_3$ 蛍光体薄膜の EL 特性, 平成 24 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 富山, (2012)

*128. 西 祐希, 宮田俊弘, 南 内嗣: 各種 n 形酸化物半導体層を挿入した AZO/n 形半導体/Cu_2O ヘテロ接合太陽電池, 平成 24 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会, 富山, (2012)

*129. 西 祐希, 阿部信也, 宮田俊弘, 南 内嗣: 各種の介在層を挿入して作製した AZO/Cu_2O ヘテロ接合太陽電池の光起電力特性, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛, (2012)

*130. 宮田俊弘, 西 祐希, 池永訓昭, 上田 修, 南 内嗣: Cu_2O シートを用いるヘテロ接合太陽電池の得られる特性に対する Cu_2O 上への成膜が及ぼす影響, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛, (2012)

*131. 藤田 強, 野本淳一, 宮田俊弘, 南 内嗣: r.f.重畳 DC マグネトロンスパッタ ZnO 系薄膜の表面テクスチャ構造形成と r.f.供給電力との関係, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛, (2012)

*132. 野本淳一, 藤田 強, 宮田俊弘, 南 内嗣: スパッタ成膜 ZnO 系透明導電膜の各種特性に及ぼす熱処理の影響と不純物添加量との関係, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛, (2012)

*133. 宮田俊弘, 南 内嗣: スパッタ成膜した新規なペロブスカイト $LaAlO_3$ 及び $LaGaO_3$ 蛍光体薄膜の EL 特性, 第 73 回応用物理学会学術講演会, 愛媛, (2012)

*134. 宮田俊弘, 南 内嗣: スパッタ成膜した Eu 添加 IIa-La-O-S 蛍光体薄膜の PL 及び EL 特性, 平成 23 年度第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, (2012)

*135. 野本淳一, 平野友康, 宮田俊弘, 南 内嗣, スパッタ ZnO 系透明導電膜の表面テクスチャ構造形成と耐湿特性等との関係, 平成 23 年度第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, (2012)

*136. 野本淳一, 宮田俊弘, 南 内嗣: 薄膜太陽電池用途に対する ZnO 系透明導電膜の最適な添加不純物の検討, 平成 23 年度第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, (2012)

*137. 西 祐希, 阿部信也, 南 内嗣: 介在層として $Zn_xMg_{1-x}O$ 薄膜を用いる AZO/Cu_2O ヘテロ接

合太陽電池, 平成 23 年度第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, (2012)

*138. 平野友康, 野本淳一, 藤田 強, 宮田俊弘, 南 内嗣: スパッタ GZO 及び AZO 透明導電膜の表面テクスチャ構造形成及び得られる光散乱特性, 平成 23 年度第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, (2012)

*139. 尾沼猛儀, 大林亨, 山口智広, 山口敦史, 本田徹: 極性・非極性バルク ZnO 表面における CL スペクトルの比較, 2012 年春季 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, (2012)

*140. 坂井直之, 尾沼猛儀, 山口敦史, 山口智広, 本田徹: Al および AlOx 膜堆積が極性 GaN の PL 強度に与える影響, 2012 年春季 第 59 回応用物理学関係連合講演会, 東京, (2012)

*141. 田中強士, 深田晴己, 南 内嗣: ディップコート法を用いた新規なコンビナトリアル成膜技術, 平成 24 年度 応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会, 富山, pp.39, (2012)

*142. 田中強士, 深田晴己, 南 内嗣: 新規なコンビナトリアル・ディップコーティング法を用いた酸化物蛍光体薄膜の作製, 2012 年秋季 第 73 回応用物理学会学術講演会 講演予稿集, 愛媛, pp. 14-223, (2012)

*143. 山口敦史, 耿慧遠, 砂川晴夫, 石原裕次郎, 松枝敏晴, 碓井彰: 顕微反射スペクトル測定による GaN 基板残留歪みの精密マッピング測定, 電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会, LQE2011(11)-113, 京都, (2011)

*144. 小島一信, 山口敦史, 船戸充, 川上養一,野田進（招待講演）: 非極性面窒化物半導体の光学特性に関する理論的検討, 第 3 回窒化物半導体結晶成長講演会, 福岡, (2011)

*145. 山口敦史, 小島一信（招待講演）: 窒化物半導体の電子状態・光学特性の理論解析とデバイス構造提案, 特定領域研究「窒化物光半導体のフロンティアー材料潜在能力の極限発現ー」最終成果報告公開シンポジウム, 東京, (2011)

*146. 小島一信, 山口敦史, 船戸充, 川上養一, 野田進: AlGaN 量子井戸レーザの設計指針, 特定領域研究 「窒化物光半導体のフロンティアー材料潜在能力の極限発現ー」最終成果報告公開シンポジウム, 東京, (2011)

*147. 海老原康裕, 神谷克政,白石賢二, 山口敦史: 第一原理計算を用いた窒化物半導体の変形ポテンシャルの算出, 特定領域研究 「窒化物光半導体のフロンティアー材料潜在能力の極限発現ー」最終成果報告公開シンポジウム, 東京, (2011)

*148. 西 祐希, 宮田俊弘, 南 内嗣: n-ZnO/p-Cu_2O ヘテロ接合太陽電池における変換効率の改善, 平成 23 年度 応用物理学会 北陸・信越支部, 石川, (2011)

*149. 平野友康, 野本淳一, 宮田俊弘, 南 内嗣: スパッタ成膜する ZnO 系透明導電膜の表面テクスチャ構造形成に対する添加不純物及び成膜温度の影響, 平成 23 年度 応用物理学会 北陸・信越支部, 石川, (2011)

*150. 野本淳一, 平野友康, 宮田俊弘, 南 内嗣: Si 系薄膜太陽電池用 ZnO 系透明電極における最適な不純物添加の検討, 平成 23 年度 応用物理学会 北陸・信越支部, 石川, (2011)

*151. 野口雄介, 野本淳一, 宮田俊弘, 南 内嗣: 異なる不純物を添加した ZnO 系透明導電膜の薄膜太陽電池用透明電極への適合性の検討, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, (2011)

*152. 野本淳一, 平野友康, 宮田俊弘, 南 内嗣: スパッタ成膜された ZnO 系透明導電膜の各種特性に及ぼす不純物添加量の影響, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, (2011)

*153. 平野友康, 野本淳一, 宮田俊弘, 南 内嗣: スパッタ成膜した ZnO 系透明導電膜のエッチングによる表面凹凸構造形成, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, (2011)

*154. 宮田俊弘, 南 内嗣: スパッタ成膜した La_2O_2S 蛍光体薄膜の PL 及び EL 特性, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, (2011)

*155. 西 祐希, 野口雄介, 宮田俊弘, 南 内嗣: 高効率 AZO/ZnO/Cu_2O ヘテロ接合太陽電池の作製, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, (2011)

*156. 尾沼猛儀, 坂井直之, 井垣辰浩, 山口智広, 山口敦史, 本田徹: 六方晶 GaN と ZnO における表面再結合の比較, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, (2011)

*157. 坂井直之, 井垣辰浩, 尾沼猛儀, 山口敦史, 山口智広, 本田徹: 極性および非極性 GaN 表面における表面再結合過程, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, (2011)

*158. 山口敦史, 小島一信: 実験データ解析に基づく非極性 InGaN 量子井戸の偏光特性の予測, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, (2011)

*159. 泉将一郎, 鎌田 満, 南 正樹, 辰巳哲也, 山口敦史, 冨谷 茂隆: 温度可変時間分解 PL 法による GaInN へのプラズマダメージ解析, 2011 年秋季 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形, (2011)

*160. 田中強士, 深田晴己, 南 内嗣: 溶液法により作製した YAG:Ce 蛍光体薄膜の膜特性に及ぼす作製条件の影響, 平成 23 年度 応用物理学会 北陸・信越支部 学術講演会, 石川, pp.51, (2011)

*161. 野本淳一, 平野友康, 宮田俊弘, 南 内嗣: マグネトロンスパッタ法で作製した ZnO 系透明導電膜の電気的特性に対するバッファレイヤー挿入効果, 電子情報通信学会アクティブデバイスと集積化技術－材料デバイスサマーミーティングー, 東京, EMD2011-11, (2011)

*162. 平野友康, 野本淳一, 宮田俊弘, 南 内嗣: マグネトロンスパッタ法による薄膜太陽電池用 AZO 透明導電膜の作製, 電子情報通信学会アクティブデバイスと集積化技術－材料デバイスサマーミーティングー, 東京, EMD2011-13, (2011)

*163. 西 祐希, 野口祐介, 宮田俊弘, 南 内嗣: 高効率 ZnO/Cu_2O ヘテロ接合太陽電池の作製, 電子情報通信学会アクティブデバイスと集積化技術－材料デバイスサマーミーティングー, 東京, EMD2011-14, (2011)

*164. 宮田俊弘, 南 内嗣: Bi と希土類元素を共添加したバナデートベース酸化物蛍光体薄膜の PL 及び EL 特性, 電子情報通信学会アクティブデバイスと集積化技術－材料デバイスサマーミーティングー, 東京, EMD2011-17, (2011)

*165. 宮田俊弘, 南 内嗣（招待講演）: ZnO 系透明導電膜の薄膜 Si 系及び Cu_2O 系太陽電池への応用, 日本真空学会 11 月研究例会, 金沢, (2011)

166. 宮田俊弘, 南 内嗣（招待講演）: TCO 材料の現状, 第 1 回環境・エネルギー・資源シンポジウム−「21 世紀諸問題の解決に向けて」—, 宮崎, (2011)

○図 書

1. 無機材料の表面処理・改質技術と将来展望—金属，セラミックス，ガラスー，南 内嗣, シーエムシー出版, ISBN978-4-7813-1007-7, 全 379 頁，pp.273-280 (2015. 3)
2. 透明導電膜の新展開Ⅲ—ITO とその代替材料開発の現状—，南 内嗣, シーエムシー出版, ISBN978-4-7813-1009-1, 全 304 頁，pp.3-10,132-140,165-180 (2015. 3)
3. 化合物薄膜太陽電池の最新技術Ⅱ，南 内嗣, シーエムシー出版, ISBN978-4-7813-0974-3, 全 299 頁，pp.119-124 (2014. 10)
4. 年後の市場・技術予測とそこから読み解く必然の研究開発テーマ，南 内嗣,（株）技術情報協

会，ISBN978-4861045400，全 433 頁, pp.95-98, (2014. 8 発刊)

5. 電子回路 ―基礎から応用まで―: 坂本康正, 共立出版，ISBN978-4-320-08572-5，全 253 頁，オーム社, (2013.9)
6. Chapter Five－Transparent Conductive Oxides for Transparent Electrode Applications: T. Minami, Semiconductors and Semimetals, Vol. 88, pp. 159-200 (2013)
7. アナログ電子回路: 坂本康正, 栄光書房, 214 頁, (2012. 4)

○新聞報道等

1. 応用物理学会［優秀論文賞］，High-Efficiency Cu_2O-Based Heterojunction Solar Cells Fabricated Using a Ga_2O_3 Thin Film as N-Type Layer: 南 内嗣，西 祐希，宮田俊弘，2014 年 9 月 19 日

*2. ＜シーズ技術＞レーザ光による半導体の品質評価: 山口敦史，北陸経済研究，2014 年 2 月

3. 第 4 回　北陸・信越支部貢献賞: 南 内嗣，応用物理学会，2014 年 2 月 1 日
4. 第 18 回北陸・信越支部発表奨励賞: 南部優賢（院生），平成 25 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会，2014 年 2 月 1 日

*5. ハイパワーLED ランプ用高効率駆動回路: 坂本康正， 佐藤翔， 月刊ディスプレイ（テクノタイムズ社）， (2011 年 5 月)

*6. 銅板と亜鉛を組み合わせた新型太陽電池: 南 内嗣， 宮田俊弘， 日経エレクトロニクス, (平成 23 年 10 月 17 日)

*7. 銅板と亜鉛を組み合わせた新型太陽電池: 南 内嗣， 宮田俊弘， 光文社 FLASH， (平成 23 年 6 月 21 日)

*8. 希少金属を使用しない新型太陽電池: 南 内嗣， 宮田俊弘， 日経産業新聞， (平成 23 年 6 月 15 日)

*9. 多結晶亜酸化銅を使用した高効率太陽電池: 南 内嗣， 宮田俊弘， 日刊工業新聞， (平成 23 年 6 月 8 日)

*10. 亜酸化銅を使用した低コスト太陽電池: 南 内嗣， 宮田俊弘， 北國新聞， (平成 23 年 5 月 28 日)

*11. 亜酸化銅を使用した新型太陽電池: 南 内嗣， 宮田俊弘， 日経新聞， (平成 23 年 5 月 21 日)

*12. 次代を拓く工業材料キーワード 40 -高効率 ZnO/Cu_2O ヘテロ接合太陽電池―エネルギー変換効率向上にメド―: 宮田俊弘， 南 内嗣， 工業材料， (2011)

*13. 窒化物半導体 LED の偏光特性: 山口敦史， 月刊ディスプレイ（テクノタイムズ社）， (2011 年 5 月)

*14. ハイドライド気相成長法による高品質 GaN 結晶の育成: 碓井彰， 砂川晴夫， 鷲見紀彦，山本一富， 耿彗遠， 山口敦史， 「真空」（日本真空協会）， (2011)

○特 許

*1. 発明の名称: 亜酸銅シートの抵抗率制御
発明者: 南 内嗣, 宮田俊弘, 西 祐希，出願人：金沢工業大学
出願日, 出願番号等： 2015 年 2 月 28 日，特願 2014-038691

*2. 発明の名称: 光電変換素子の製造方法「ｐ型半導体層の製造方法およびｐ型半導体層」
発明者: 南 内嗣，西 祐希，宮田俊弘，出願人：金沢工業大学
出願日, 出願番号等：2014 年 3 月 8 日， 特願 2014-038691

*3. 発明の名称: 酸化亜鉛系透明導電膜, マグネトロンスパッタリング用焼結体ターケット，液晶ディスプレイ及びタッチパネル，ならびに酸化亜鉛系透明導電膜を含んでなる機器

発明者: 南 内嗣, 宮田俊弘, 出願人：金沢工業大学
出願日, 出願番号等：2013 年 9 月 20 日, 特願 2013-181145

*4. 発明の名称: 光電変換素子の半導体材料、光電変換素子及びその製造方法
発明者: 南 内嗣, 西 祐希, 宮田俊弘, 出願人：金沢工業大学
出願日, 出願番号等：平成 24 年, 特願 2012-198893

*5. 発明の名称: 光電変換素子の製造方法、光電変換素子およびタンデム型光電変換素子
発明者: 南 内嗣, 宮田俊弘, 出願人：金沢工業大学
出願日, 出願番号等：平成 23 年, 特願 2011-050035

*6. 発明の名称: 透明導電膜の製造方法
発明者: 南 内嗣, 西 祐希, 宮田俊弘, 出願人：金沢工業大学
出願日, 出願番号等：平成 23 年, 特願 2011-170241

4. 研究成果のまとめ（優れた成果）（対応する成果に*印と下線を付す）

【研究課題［Ｉ］】: 高電界エネルギー変換・応用システムの開発研究

［課題１］ 気体・液体・固体誘電体中の電気絶縁特性と放電応用技術の高度化研究

（１）架空絶縁電線表面のインパルス沿面放電に関する研究

① 負極性沿面放電の発生から進展停止に至るモデルを提案し，進展過程の全メカニズムを解明した。また，長い波頭長（≧10.0[μs]）の誘導雷サージによる沿面放電の進展長特性と進展様相を初めて明確にした（雑誌論文*9, *16, 学界発表*1, *108, *136）。

③ サージ電圧波高値 V_m=90～140[kV]，波頭長 T_f =1.2，2.0，4.0，6.0，8.0[μs]において，電線表面が湿潤状態おける負極性沿面放電の進展特性を解明した。また，負極性沿面放電進展時に電線下部の水滴表面から発生する垂直放電の存在を見い出し，放電進展モデルを提案して放電進展との関連性を明確にした（雑誌論文*3, 学界発表*93）。

③ V_m＞80[kV] の領域における正極性沿面放電の進展長特性と進展様相を明らかにし，放電進展モデルの提案によって，そのメカニズムを解明した（雑誌論文*1, 学界発表*61）。

（２） 大気中のバリア放電とその応用に関する研究

① 均一バリア放電（均一 DBD）の放電形態と発生メカニズムの解明，均一 DBD による O_3 生成特性，低温プラズマと脱硝触媒を併用した NOx 除去について新しい知見を得た（雑誌論文*10 - *13, *24, *25, 学界発表*29 - *34, *41 - *44, *103 - *105, *107, *117, *118 - *127, *133 - *135, *141 - *144, *146 - *148, 新聞報道等*6）。

③ 均一 DBD の発生メカニズムを解明し，これによるオゾン生成特性とオゾンガス中の NOx 濃度測定法を確立した。また，DBD による複合材料用炭素繊維の親水性向上および DBD と脱硝触媒を併用した排ガス中の NOx 除去メカニズムを解明した（雑誌論文*4, *6, 学界発表*3, *9, *10, *20, *21, *49, *50, *58, *59, *67 - *69, *74, *84, *87, *89, *90, *92, *97）。

④ 電動アクチュエータと表面電位計を組み合わせた帯電分布計測システムを新たに構築し，負極性コロナ放電によるバリア表面帯電電子の蓄積分布を明らかにした（学界発表*11, *23, *47, *48, *57, *92）。

④ 大気圧空気中タウンゼント放電（APTD）の発生メカニズムを解明し，APTD を応用したオゾン発生器による副生成物の発生抑制，DBD による複合材料用炭素繊維（CF）の表面処理と CF/ポリプロピレン界面制御，および DBD と脱硝触媒を併用した NOx 除去性能の向上を実現した（学界発表*1, *2, *8, *13 - *16, *22, *60, *80, *91, *52）。

（３） 植物系代替絶縁油の電気絶縁特性に関する研究

① 油入電力変圧器内部のフラッシオーバは複雑な経路を辿る場合が多く，その原因を明確化するため，固体誘電体板間の狭い隙間を進展するインパルス沿面放電の振る舞いとフラッシオーバ電圧の関連性を調べ新しい知見を得た。また，電力変圧器の油劣化診断に関して，測定パラメータの影響を明らかにした（雑誌論文*8, *14, *19 - *23, 学界発表*25, *28, *37 - *40, *102, *106, *110, *111, *115, *130 - *132, *140）。

③ 交流高電圧（60[Hz]，0～45[kV_{rms}]）印加時における沿面ストリーマ形状と進展長，ストリーマ速度，放電電流，放電電力，プレスボード表面トラッキング，プレスボード貫通破壊等の沿面放電特性を明確にした。また，放電進展後の油中ガス分析（DGA）により，アセチレン（C_2H_2）ガスの生成を確認し，ストリーマチャンネル上またはその付近の局部的温度が，少なくとも 500℃以上に上昇すること証明するとともに，トラッキングの形成メカニズムを明らかにした（雑誌論文*2, *5, 学界発表*17, *19, *55, *66, *73, *77, *79, *83, *86, *94, *98）。

③ 熱加速劣化法によって酸価値が 0.3mgKOH/g の劣化絶縁油を作製し，交流沿面放電特性に関する絶縁油の劣化効果を明確にした。これらの研究を通じて，PFAE 油は電気絶縁性能と酸化安定性に優れることが立証され，次世代絶縁油として IEC 規格標準化へ踏み出している（雑誌論文*7, 学界発表*4, *5）。

（４） ナノ粒子の均一分散化に関する研究

① 酸や界面活性剤などの添加物を使用せずに，有機溶媒（オクチルアルコール）中のバリア放電を利用した新たな分散方法（放電分散法（DDM））を確立し， カーボンナノチューブ（CNT）が均一分散できることを明確にした（雑誌論文*35, 学界発表*18, *100, *101, *112, *113, 特許出願*6）。

③ 上記の放電分散法（DDM）に加えて，電界分散法（FDM）を新たに開発し，両者の併用によるハイブリッド分散系によってナノ粒子凝集体の分散効果が向上することを明らかにした（学界発表*6, *56, *62, 特許出願*1）。

④ この手法で分散した CNTs をフィラーとするエポキシナノコンポジット（CNT 含有率：0.01-0.03 wt%）の機械的応力（引張強度）は，CNT フリーのエポキシ樹脂より約 1.6 倍向上することを明確にした（学界発表*6, *18, *75）。

［課題２］ 電気流体力学（EHD）ポンピング現象のメカニズム解明とその工業的応用

① 「伝導ポンピング」と命名した EHD ポンピングメカニズムを提案した。これは，解離性の弱導電性液体中で，液体分子（または不純物分子）の解離と再結合反応が電界によって不平衡化し，電極付近に形成されるヘテロチャージ層と電極との間に働く引力に起因した圧力が流動を生じさせると言う原理に基づく。このメカニズムでは，電極から液体中への電荷注入機構が含まれず，作動液体の長期使用に対して電気的劣化が少なく実用的である。作動液体としては，フッ素系の冷媒（HFC43-10，HFE7600 等）が適する。これを利用した「EHD 液体循環型冷却システム」を設計・

試作し，熱源の冷却性能について注目すべき知見を得た（雑誌論文*15, *17, 学界発表*27, *36, *129, 特許出願*3, *4, *7）。

④ 弱導電性液体中の正・負解離イオン移動度の計測法として，飛行時間法（Time of flight method）を改良した新しい計測手法を確立し，EHD ポンピング効果の大きい HFC43-10 中のイオン移動度を明確にした。イオン移動度の明確化は，伝導ポンピングのメカニズムを定量的に考察する上で極めて重要である（学界発表*12, *76）。

［課題３］ 電気・磁気レオロジー（ER・MR）流体の実用的な開発とその工業的応用

ER 流体（ERF）の研究では，

① ゾルーゲル法を用い，酢酸カルシウム一水和物，酢酸ナトリウム三水和物および界面活性剤を添加して作成したチタン系 ER 粒子は，ナノ ERF の ER 効果発現に有効である（学界発表*96）。

② 粒子分散系 ERF の応用として，ERF をゲル化した機能性ゲル（ERG）とその改良素材（EAM（Electro Attractive Material）：ERF の分散質を樹脂に分散させ，シート化した機能性素材）を開発し，これを利用したブレーキを試作した。これは，ERF の応用製品として世界的にも最初の試みであり実用化が見込まれる（学界発表*45）。

MR 流体（MRF）の研究では，

① キャリア流体に菜種エステル油を用い，スメクタイト（SAN316）の混入・拡散により，環境に適合したチキソトロピー性流体からなる MRF を創製し，実用レベルの MR 効果が発現できることを明確にした。この MRF は，関連企業との共同研究として進められ，2015 年から実用化材料として企業販売を開始した（学界発表*17, *72, *114, *137, *139, 特許出願*2, *5, 新聞報道等*1 - *4）。

【研究課題［Ⅱ］】: 磁気応用エネルギー変換・貯蔵・環境保全技術の開発研究

［課題１］ 環境負荷低減に役立つ発電機・モータ技術の開発

（１） 電力・産業・車両用新型回転機の研究

① 固定子に界磁巻線を備え，磁気ギア効果を有する新構造の多極同期機（磁束変調同期機: FMSM）を開発した。4[kVA]，80 極のプロトタイプを製作し，ほぼ正弦波の出力電圧，少ないトルク脈動，広い速度範囲で高効率が得られることを確認した。また，磁石補助突極形同期機の開発を進め，従来の問題点；“磁極胴部の磁気飽和による端子電圧の制限”に関して，PM やロータを変更した構造を考案し，出力向上効果を高め高速運転時の特性を向上した。更に，磁石の不可逆減磁を防ぐための運転制約条件を明らかにした。（雑誌論文*12 - *19, 学界発表*4, *11, *13 - *17, ＊54 - *62, *69 - *73, *75, *76, 特許出願*8, *13）。

② MW 級風力発電機への適用を前提として，サイズと増速比の異なる 2 台の 2[MW] 磁束変調同期機を設計し，電気特性を有限要素法（FEA）で評価した結果，既存の永久磁石式同期発電機（IPMSM）より 1 割程度サイズを増加すれば，同程度の出力と

90[%]以上の効率が得られること，および大容量化に伴い出力に対する界磁銅損（励磁容量）の割合が減少し，FMSM が大容量機に適していることを明確にした。また，電磁石式および永久磁石式 FMSM のインダクタンス特性は，円筒形同期電動機と類似の特性を持ち，トルクは直流電動機と同様に，電機子電流と界磁電流によって直接制御できることが分かった。更に，EV・HEV 用電動機への適用を前提として，50 kW 級 FMSM を設計し，その特性を FEA によって既存の IPMSM と比較・検討した結果，FMSM は永久磁石無しに IPMSM の約 9 割の最大トルクが発生でき，電流位相の調整によりトルク脈動を IPMSM と同程度に低減できることを明確にした（雑誌論文*1 - *3, *7，学界発表*1, *3, *26, *28, *34, *35, *39, *49, *53，特許出願*1 - *4, *5）。

③ 磁極片の間に永久磁石（PM）を挿入した新構造の PM 補助突極形同期機（PMa-SM）を開発し実用化を目指した。実験と FEA による解析を重ね，PMa-SM が低速から高速に至るまで高い性能を示すことを明確にした（雑誌論文*10，学界発表*6，*38, *40, *48，特許出願*6, *7）。

（２） 回転機の物理現象解明と設計法の高度化研究

① 塊状磁極同期機において，磁極表面損失による温度上昇の低減が構造設計上重要な課題であるが，表面損失低減のメカニズムが十分に解明されていなかった。そこで，ヒステリシスを考慮した有限要素法（FEA）を用い，表面損失低減効果の評価・分析を行い，高精度解析の実現により表面損失低減原理を明らかにした。更に，同期機の面内渦電流損の高精度解析を行い，渦電流発生原理を明らかにした（雑誌論文*11, 学界発表*12, *18, *67, *68, *74, *82）。

② 解析の際に励磁電流波形の初期位相のみを変化すると，表面損失が幾分異なる値になる。これを解明するため，実物の環状試料を用いて初期位相を変えたところ表面損失値も変化することが分かった。これは，初期位相の変化に伴うヒステリシス現象による試料内部の偏磁状態の変化に起因することが判明した（雑誌論文*6，学界発表*2, *5, *7, *20, *29, *41, *50, *77）。

［課題２］ 駆動用磁気エネルギーを無線により供給するマイクロマシンの開発

① 本研究のマイクロポンプは，従来空冷で行っている冷却装置を水冷に変え，パイプ内の液体を循環させるものであり，静穏性の確保と冷却効率の向上を図っている。大きさ数[mm]のリング型ネオジウム磁石にフィンを取り付け，これを半往復回転させて，液体をフィンより後方へ掻き出す方法による。アクチュエータの駆動源は，520[turn]の電磁石であり，全長 740[mm]の水路を持つ。駆動源の周波数は 35～70[Hz]の範囲で可変し，水路の流速を測定した。印加電圧は 14[V_{rms}]である。考案したマイクロポンプの動作は高速度カメラで撮影し，動画解析ソフト（TEMA）を用いて動作解析を可能とした。また，マイクロポンプの流速最大周波数は 50[Hz]であることを明らかにした。マイクロポンプの効率は，周波数 50[Hz]で最も高く 11.4[%]であ

った。マイクロポンプの効率向上には，流速が速いこととチューブ内の液体が滞留せずに流れることが必要である。学会等への公表は，今後，逐次予定している。

［課題３］ 超伝導応用によるエネルギー貯蔵および水浄化技術の開発

（１） 超伝導エネルギー貯蔵装置(SMES)の基本設計と磁界解析：

③ 交流電流を直流電流に変換して超電導コイルに流し，磁気エネルギーとして電力を貯蔵する SMES に関して，ユニットコイルを用いたトロイド型 SMES を設計し磁界解析を行った。ソレノイド型コイルの個数を増すと磁束密度が理想的な磁束密度に近づき漏洩磁束が少なくなるので，周辺機器や人体への悪影響を低減できる。一方，ソレノイド型コイル個数を増すことによりコイル部の応力が増し破損に繋がる。従って，SMES の設計には，漏洩磁束と応力の両者を考慮してコイル個数を選定する必要がある。(学界発表*36, *51, *84)。

（１） ストロンチウム(Sr)とセシウム(Cs)への磁気種付けに関する実験的検討，および磁化活性汚泥の二次処理水に残留するリン・懸濁物質への磁気分離の適用検討

① 磁気力を利用して水中の弱磁性微粒子あるいは電離金属イオンを簡易に捕獲する手法は，それらに直径数十[μm]以上の強磁性粒子を結合(磁気種付け)させることである。当該研究では，対象物質である放射性の ^{90}Sr や ^{137}Cs に直接，磁気種付けさせることは困難なため，ゼオライトを用いてこれに対象物質と強磁性微粒子を吸着させた。また，磁化活性汚泥処理水に含まれる不溶解有機浮遊物質とリンを磁気的に除去する手法を実験的に検討し，1,000[mg/day]という高速処理が可能なことを見出した。(雑誌論文*20，学界発表*63, *66, *78, *80, *81, *87)。

④ 放射性セシウム除染に関する磁気分離技術の応用可能性について，システムモデルを印加磁界 5.0[T]，半径 500[μm]の強磁性線の飽和磁化 1.6[T]，粒子磁化率 0.002，土壌洗浄後の 2:1 型粘土鉱物濃度 0.1[%]，磁気フィルタ段数 60 段，浄化速度(流水速度)50[mm/s]として検討した。その結果，磁気フィルタに懸濁試料水を流し始めてから閉塞するまでの時間は 23 分 34 秒，磁気フィルタ径(キャニスタ径)に対する浄化水量は，内径 200[mm]の磁気フィルタ採用で 1 年間稼働すると，約 50,000 トンの水量浄化と約 50 トンの 2:1 型粘土鉱物(常磁性放射性セシウムを吸着した物質)を回収捕獲できることが判明した（雑誌論文*4，*5，学界発表*8，*9，*22，*27, *31, *42)。

（１） 磁気フィルタ性能に関する理論検討：

② 強磁性細線に垂直磁界を加えると，周囲に大きな磁界勾配が発生し，ここへ微粒子懸濁系の液体や気体を導入すると，微粒子に磁気吸引力または反発力が働く。この原理に基づく実際的な磁気フィルタ性能を理論的に検討した。その結果，93[%] 程度の高フィルタ性能を達成するためのフィルタ長(強磁性線の長さ)は，従来の解析結果に比べて半分程度，これ以上高いフィルタ性能を必要とする場合には桁違いの短いもので実現可能なことが明らかにされた。(学界発表*10, *23, *32, *43, *46, *64,

特許出願*9-*12)。

【研究課題[Ⅲ]】: 光・電子デバイス・システムの開発研究

[課題 1] 環境調和型光・電子デバイス・システムの研究開発

(1) 酸化亜鉛/亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池の基礎的な作製技術に関する研究，および多結晶亜酸化銅シートの作製と新規な高品質酸化物半導体材料に関する研究

① 亜酸化銅 Cu_2O は p 形伝導性を示す酸化物半導体である。安価，無毒であることから太陽電池材料として期待され，理想的な pn ホモ接合が実現されれば期待の変換効率(20[%])を達成できると考えられ，世界的に活発な研究が行われている。①酸化亜鉛/亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池の基礎的な作製技術において，熱酸化法による超高品質多結晶 Cu_2O シート作成技術およびパルスレーザー蒸着(PLD)法による酸化亜鉛系薄膜(n 形層および透明電極層)作成技術を確立し, Cu_2O ヘテロ接合太陽電池を再現性良く作製する技術を構築した。また，ノンドープ酸化亜鉛薄膜/亜酸化銅ヘテロ接合太陽電池の世界最高効率が実現できた。(雑誌論文*8 - *10, *17, *19 - *22, *26, *28, *29, 学界発表*35 - *39, *51, *53 - *56, *58 - *63, *67, *105, *114, *117 - *119, *126, *128 - *132, *135 - *138, *148 - *153, *155, *161 - *163, *165, 特許出願*4, *5, *6, 新聞報道等*6 - *12)。

② パルスレーザー蒸着(PLD)法による各種 n 形半導体層材料にそれぞれ適合する最適成膜条件を明らかにした。また，超高品質 Cu_2O シートの電気的特性制御技術を発展させ，世界で初めて縮退した低抵抗多結晶 p 形 Cu_2O シートを作製し，Cu 等の金属電極とのオーミック接触を実現した。更に， 実用化に適した安価な成膜技術として，電気化学堆積(ECD)法による高品質 Cu_2O 薄膜のエピタキシャル成長技術を確立し，金属塩化物が Cu_2O 薄膜の有効なアクセプタ不純物として働くことを明らかにした。この ECD 法を用いて，p 形 Cu_2O:Na シート上にエピタキシャル成長した Cu_2O 薄膜を形成することに成功した。これは，Cu_2O 系太陽電池の低コストな実用化技術として注目される（雑誌論文*1, *3 - *5, *7, 学界発表*2 - *7, *16 - *24, *68 - *73, *75, *84 - *90, *93 - *98, 特許出願*1, *2, *3）。

(2) $BaTiO_3$ セラミックスを基板兼絶縁層とする高輝度無機薄膜 EL ランプの作製に関する研究：

① 無機エレクトロルミネッセンス(EL)素子は，次世代フラットパネルディスプレイの候補の一つである。多色発光ならびに色純度の最適化を目的として，新規な各種酸化物蛍光体薄膜材料の探索およびそのフォトルミネッセンス(PL)とエレクトロルミネッセンス(EL)特性を詳細に検討し，多色発光 PL および EL を実現した。セラミックス絶縁層型薄膜 EL ランプでは, 中心波長約 730[nm]および 780[nm]の強い近赤外発光が実現できた。一方，PL 強度については，Bi 含有量の増加に伴い増大し，Bi 含有量約 2.4[at.%]で最大となることを明らかにした。また、YAG:Bi 薄膜

EL 素子において，波長約 320[nm]を中心とした近紫外領域で EL を実現した。これは，現在までの報告で最も短波長の EL 素子発光である。更に，$GdTaO_4$:Bi 蛍光体薄膜を発光層とした薄膜 EL 素子を作製し，Bi 含有量 0.5[at.%]のとき発光色が白色に近い青緑色（x=0.29、y=0.40）となることを見い出した。発光色は Bi 濃度にほとんど依存しないが，Bi 含有量約 2.5[at.%]で最高輝度約 3.93[cd/m^2]を示した（雑誌論文*27，学界発表*49, *57, *64‐*66, *99, *106, *112, *113, *120, *127, *133, *134, *141, *142, *154, *160, *164）。

（３） へき開共振器ミラーを有する低コスト・高性能緑色レーザに関する研究

① 窒化物半導体を用いた青紫色や純青色レーザは実用化されているが，緑色レーザはまだ実用レベルではない。①窒化物半導体を用いた緑色レーザが実用化されていない要因の一つは，ピエゾ電界の存在である。これを低減する手法として，低角半極性 GaN 基板を利用した新規なレーザ構造を提案した。さらに，kp 摂動を用いて光学利得の偏光依存性を正確に計算する理論手法を構築した。また，標準的窒化物半導体レーザの光学利得が測定可能であることを実証した（雑誌論文*18，*23‐*25, *30‐*32，学界発表*41‐*50, *107, *121, *125, *139, *140, *143‐*147, *156‐*159, 新聞報道等*13, *14）。

② ナノインプリンティング技術を利用し，欠陥密度が低く，かつ低コストな GaN テンプレート基板の作製に成功し，強励起領域における GaN テンプレート基板上素子が，サファイア基板上素子に比べて 2 倍以上の発光効率を示すことを明らかにした。また，混晶組成揺らぎの効果により，「偏光ルミネッセンス測定」による材料パラメータの決定が不正確であることを実験的・理論的に明確にし，「偏光吸収スペクトル測定」または「偏光励起スペクトル測定」によってのみ正しい決定が行えることを明らかにした（雑誌論文＊2，＊11‐＊14，学界発表*8‐*15, *25‐*32, *76‐*80, *91, *92, *100, *101, *108, *109, *115，新聞報道等*2）。

（４） 溶液法を用いた酸化物蛍光体薄膜に関する研究：

① 無機薄膜 EL は，ZnS 系などの硫化物蛍光体薄膜を発光層として，これを二つの絶縁層で挟む二重絶縁層構造が採用される。しかし，デバイスの駆動には高電圧（100～200[V]程度）が必要となり実用上問題となるので，無機薄膜 EL の低電圧駆動による EL 発光の実現を目指した。溶液法（ディップコート法やスピンコート法など）を採用し，低電圧駆動の EL 発光が実現可能な強い PL を有する酸化物蛍光体材料の早期探索手法を提案すると共に材料設計を行った（学界発表*122, *123）。

② $LaInO_3$:Bi 薄膜において，適切な添加物と適量の Bi を使用した原料溶液を用いて，$LaInO_3$ の結晶化と波長約 425[nm]をピークとする強い青色発光を実現した。また，$CaAl_2O_4$:Eu 薄膜において，炭素熱還元処理を施すことにより，波長約 420[nm]をピークとするブロードな青色 PL を実現し，更に，Eu 濃度の最適化により強い青色 PL を実現した（学界発表*74）。

③ スピンコート法により，Ga_2O_3，$MgGa_2O_4$ および $CaGa_2O_4$ を母体とする Eu 付活ガレート系蛍光体薄膜を Si 基板上に作製し，$MgGa_2O_4$:Eu 蛍光体薄膜において強い赤色 PL を得た。また，$MgGa_2O_4$:Eu 蛍光体薄膜を発光層に使用して作製した薄膜 EL デバイスにより，約 75[V]の印加電圧（1[kHz] 正弦波交流）で赤色の EL を得た（学界発表*111）。

④ EL デバイスに適用可能な新規蛍光体材料を開発するため，コンビナトリアル・ディップコート法により Eu または Bi 付活多元系酸化物蛍光体薄膜を作製した結果，Eu^{2+}付活(SrO)-(Al_2O_3)系材料において，波長約 380[nm]ピークの強い近紫外 PL を得た。また，$Y_3Ga_5O_{12}$:Bi 蛍光体において、Bi 含有量の最適化により波長約 314[nm]の非常に強い紫外 PL を得た。更に，光音響分光測定システムを構築し，均一沈殿法による YAG:Ce 蛍光体において，光音響信号を低減させる作製条件の下で，市販の Ce 付活 YAG 系黄色蛍光体（P46）と同等の量子効率を有する YAG:Ce 蛍光体を開発した（学界発表*110, *116）。

（５） **高輝度 LED ランプの駆動回路における高効率化，および三次元画像表示システムに関する研究**

① 一般に，高輝度 LED ランプの駆動回路には，スイッチングレギュレータが用いられるが，電磁波ノイズの発生により医療現場などの照明には不向きであった。①高輝度 LED ランプの駆動回路として，LED の点灯数を自動的に変化させ，電源効率 91%，光束 3000 lm を達成した。また，三次元画像表示システムの画質改善と構造改善を進め，低価格で性能アップすることができた（学界発表*33, *34, *52, *82, *83, *102, *103, 新聞報道等＊5）。

② 電圧変動による LED 点滅現象を削減するため，マイコン搭載制御法を考案し，電源電圧 90[V]～110[V]の変動でもチラツキを感じさせず，電源効率 91[%]～94.3[%]を維持する回路を開発した。また，電流と電力のフィードバック法を採用し，LED 駆動の安定制御を実現すると共に，調光機能とノイズ対策を万全にした（雑誌論文*6, 学界発表*1, *81）。

５．研究成果の副次的効果

当該応用研究センターの研究は，電気・電子工学，材料物性工学，光・電子デバイス工学の分野を中心とした広範囲な領域に跨る。電磁界を利用したエネルギー変換技術（高電界応用技術，磁気応用技術，新素材創製技術，光・電子デバイス応用技術）は現代および将来の社会基盤・産業基盤を支えるキーテクノロジーであり，環境負荷低減と資源・エネルギーの有効利用・安定利用の観点から，その高度化が強く求められる。これまでに蓄積してきた種々のエネルギー変換技術におけるノウハウは，社会が要求する多くの技術シーズを産んでおり，これらを更に発展させさせることによって，更なる特

許出願と研究成果の社会への還元が期待できる。また，産学の緊密な連携の下に将来を担う優秀な人材の養成，並びに人と環境のための「新世代電磁界エネルギー変換システム」の基盤技術が確立できる。

6. 研究課題に関する今後の課題

【研究課題［Ⅰ］】: 高電界エネルギー変換・応用システムの開発研究

［課題１］ 気体・液体・固体誘電体中の電気絶縁特性と放電応用技術の高度化研究

(1) V_m＞80[kV]の誘導雷サージに対する正・負極性沿面放電の挙動とそのメカニズムの更なる検討，および地中電力ケーブルの誘導雷サージに対する沿面放電の影響,

(2) 誘電体バリア放電を利用した高性能なオゾン生成法，炭素繊維とポリプロピレンの表面改質による界面接着力強化法，および高効率 NOx 除去法の完全な構築と実用化検討,

(3) 植物由来の次世代絶縁油中におけるインパルス沿面放電および直流沿面放電の詳細な挙動と特性の解明，(4) 均一分散したカーボンナノ粒子の応用と実用化に関する検討

［課題２］ 電気流体力学（EHD）ポンピング現象のメカニズム解明とその工業的応用：
EHD ポンピングの応用範囲と実用化検討

［課題３］ 電気・磁気レオロジー（ER・MR）流体の実用的な開発とその工業的応用
ER・MR 流体の更なる高性能化とその実用化検討および実用機器の性能評価

【研究課題［Ⅱ］】: 磁気応用エネルギー変換・貯蔵・環境保全技術の開発研究

［課題１］ 環境負荷低減に役立つ発電機・モータ技術の開発

(1) 50[kW]級磁束変調同期機（FMSM）の低速運転時や高速運転時における損失・効率の分析，および実用化技術課題の検討

(2) PM 補助突極形同期機（PMa-SM）において，磁気飽和の強い条件における精度検証，および零相成分を考慮した過渡特性計算法の構築。

(3) 磁極表面に 5 種類のグループを持つ塊状磁極同期機における磁極部表面損失の実測値と FEA 解析との比較による解析精度の検証と物理現象の分析，および表面損失低減可能な新構造の発案

(4) 同期機固定子鉄心端部における面内渦電流損の 2 次元 FEA による近似解析の実現

(5) 塊状突極形同期機の全電圧始動直後に生じる大きな電圧低下の改善,

［課題２］ 駆動用磁気エネルギーを無線により供給するマイクロマシンの開発
マイクロポンプを冷却装置として応用する際に問題となるポンプ効率の向上法検討

［課題３］ 超伝導応用によるエネルギー貯蔵および水浄化技術の開発

(1) SMES で用いるソレノイド型コイル個数の最適設計構築

(2)　磁気分離システムによる放射性土壌除染技術の実用化に向けた検討

【研究課題［Ⅲ］】: 光・電子デバイス・システムの開発研究

［課題 1］ 環境調和型光・電子デバイス・システムの研究開発

(1) 高変換効率を実現できる Cu_2O ヘテロ接合太陽電池の実用化に向けた更なる検討

(2) 無機 EL ランプの実現に向け，蛍光体薄膜材料の探索と作製技術の更なる検討

(3) 窒化物半導体を用いた低コスト緑色半導体レーザの実現と実用化に向けた種々の検討

(4) 高性能環境調和型 EL デバイスの開発による低電圧駆動型 EL 発光の実現と実用化検討

(5) LED 回転型三次元画像表示システムの実用レベル構築。

これらの課題に付いては，研究期間終了後も研究を継続し，社会への還元を目指して取り組んで行く。

7. 結　言

当該研究プロジェクトの研究期間（平成 23 年度～平成 27 年度）に遂行され公表された研究成果は，各研究課題［Ⅰ］，［Ⅱ］，［Ⅲ］ごとに纏めた「成果リスト」のように極めて多い。これまでに鋭意取り組んできた 3 つの研究課題によって構築された成果は，科学技術に変革をもたらし得る重要な要素技術を多く含んでいる。21 世紀の我が国における様々な強弱電磁界利用エネルギー変換技術の将来的ニーズに応え，環境に適した「究極の省エネルギー・完全リサイクル」型産業構造を実現する上で不可欠な「インテリジェント技術」の発信が大いに期待できる。当該研究によって得られた要素技術の構築は，産学連携の下に人材育成と併せて遂行されたものであり，その幾つかは実用化検討に入っている。

今後は，獲得している要素技術を更に拡張し，電力・エネルギー分野，高機能性機器制御分野，半導体デバイス分野，新素材開発分野，ディスプレイ分野，医療福祉分野など幅広い工学分野に普及させると共に，実用化と社会への還元ならびに産学共同による人材育成を主眼として研究を続行する。これによって，産業構造の変革と地域産業への振興を深める発信源となるべく，鋭意研究を重ねて行く所存である。

最後に，研究期間の終了に当たり，当該研究プロジェクトをご採択頂いた「文部科学省」ならびに貴重なご指導頂いた「外部評価委員会」の委員各位に深甚なる謝意を表する。