

システム開発

14 - F - 11

# 駆動軸等動力伝達システムの高効率化に 関するフュージビリティスタディ

報 告 書

- 要 旨 -

平成15年 3月

財団法人 機械システム振興協会  
学校法人 金沢工業大学

## 序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、都市、防災、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには技術開発力の強化に加えて、多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢の変化に対応するため、財団法人機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとにシステム技術開発調査研究事業、システム開発事業、新機械システム普及促進事業等を実施しております。

このうち、システム技術開発調査研究事業及びシステム開発事業については、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長：放送大学教授 中島 尚正氏）を設置し、同委員会のご指導のもとに推進しております。

本「駆動軸等動力伝達システムの高効率化に関するフェージビリティスタディ」は、上記事業の一環として、当協会が学校法人金沢工業大学に委託し、実施した成果をまとめたもので、関係諸分野の皆様方のお役に立てれば幸いです。

平成15年 3月

財団法人機械システム振興協会

## はじめに

省エネルギーは全人類の喫緊の課題であり、その解決のため従来も車体の軽量化等の努力がなされてきた。今回これまであまり注目されなかった自動車等の駆動軸等動力伝達システムの高効率化による省エネルギーの可能性について、(財)機械システム振興協会の委託により研究の機会を与えられたことは幸いであった。

駆動軸等の部品それ自身はあまり大きくないが、その特徴は回転速度の高いことにあり、回転の加減速の際の加速度は大きい。しかも加減速は頻繁に行われる。このため駆動軸系の軽量化のメリットは大きいと考えられる。

この問題について、(1) 動力伝達システムの技術動向及び特許の調査、(2) 動力伝達システムの高効率化に資する鋼材(マルエージング鋼)の開発、(3) 適用化研究、の3つの面から研究を行い、成果を得たので報告する。

平成15年 3月

プロジェクトリーダー  
金沢工業大学  
副学長 堀 幸 夫

# 目 次

1 . スタディの目的	1
2 . スタディの実施体制	2
3 . スタディ成果の要約	5
第 1 章 動力伝達システムの技術動向及び特許の調査	5
1 . 1 動力伝達システム効率化技術	5
1 . 2 摩擦低減技術	9
1 . 3 無段変速機 CVT 技術	11
1 . 4 軽量化材料	14
第 2 章 動力伝達システムの高効率化に資する鋼材の開発	17
2 . 1 高強度鋼への延性付加プロセス最適条件の研究	17
2 . 2 最適候補プロセス（複数）による鋼材試作	18
2 . 3 鋼材の機械特性評価及び組織分析評価	24
第 3 章 適用化研究	29
3 . 1 自動車への適用と効果	29
3 . 2 ライフサイクル・アセスメント（LCA）	34
3 . 3 ニューコンセプト・ビークル	37
3 . 3 . 1 将来輸送システムへの期待とその目的・用途	37
3 . 3 . 2 目的・用途に適合するコンセプト	39
3 . 3 . 3 空飛ぶ自動車	42
3 . 3 . 4 動力伝達システム - 空飛ぶ自動車のドライブトレイン	45
3 . 3 . 5 鋼材開発目標への反映	47
4 スタディの今後の課題及び展開	49
あしがき	51

## 1. スタディの目的

地球温暖化問題が世界的に注目を集めるなど、わが国においても省エネルギーが重要な課題となっている。エネルギー供給構造が脆弱なわが国において、運輸部門は我が国エネルギー需要の1/4を占め、更に他部門を圧して消費量を伸ばす傾向にある（エネルギー消費1997年/1975年比、全体1.46倍、産業部門1.16倍、運輸部門1.95倍）。輸送部門中、自動車（乗用車）がエネルギー消費の46%を占め、トラック、バスを加えると88%に達する。また、今後経済活動の活性化、生活の質向上のために輸送機器の高速化、利便性が進められ、自動車（乗用車）輸送では年率1.7%の伸びが予測されている。わが国経済への影響を抑えつつ、運輸部門のエネルギー需要を抑制するためには、自動車一台ごとの燃費を向上させる必要がある。

自動車の燃費向上の取り組みのうち、自動車軽量化については、高張力鋼を利用したULSAB (Ultra Light Steel Auto-Body) プロジェクトや、アルミニウムの車体への成形など多くの取り組みがなされている。しかし、エンジンの動力をタイヤへ伝えるトランスミッション、プロペラシャフト、デフ、アクスルシャフト等の動力伝達部については、その効率を向上させることによって、燃費を向上できるにもかかわらず、十分な取り組みがなされず、今後の対応が必要となっている。

最新の技術動向や特許を調査して開発の方向性を把握することが重要である。動力伝達システムでは、回転や往復運動を行う機器が多く、システムでの効率化、摺動部のフリクション改善、部品の質量軽減による車体加速エネルギー及び回転慣性質量運動エネルギーの低減、が重要な燃費向上技術である。特に、システム効率化の有望な方法として注目されている無段変速機CVTは、材料の強度、耐久性等の限界から適用できる車種が軽自動車に限られている。中・大型車用CVT技術開発の現状及び開発の方向性は重要な調査課題である。

自動車の燃費向上の取り組みのうち、軽量化については高張力鋼（強度800MPa級）やアルミニウム合金（比重2.8と軽量）の車体への適用による燃費改善が実用化の段階を迎えている。しかし、強度が非常に高い反面、伸びが少なく、加工性の悪さや衝突エネルギー吸収性能が悪いため使用されないでいるマルエージング鋼がある。この鋼材に延性を付加し、高張力鋼やアルミニウム合金より更に軽量化が可能で、複合材料に匹敵できる新鋼材（強度2,000MPa級）として実用化を図ることは一層の燃費向上に有効である。

本スタディでは、回転や往復運動を行う機器が多く、燃費向上に研究開発要素を残す動力伝達システムの最新技術動向及び特許を調査し、開発の方向性を見出すとともに、高張力鋼やアルミニウム合金を凌駕し、複合材料に匹敵する新鋼材の研究開発を行うことを目的とする。

## 2. スタディの実施体制

### (1) 実施体制（委員会の設置等）と役割分担

実施体制を図2-1に示す。図に示すように財団法人機械システム振興協会内に、「総合システム調査開発委員会」を設置し、また委託を受けた金沢工業大学の管理体制の下で、高性能鋼材開発グループと適用化研究グループから成る調査開発実施委員会を設置した。この実施委員会を中核に産学連携共同体制でスタディを実施した。高性能鋼材開発グループでは大学研究者が提示する最適プロセスに基づき、企業が目標とする新鋼材の試作を行い、サンプルを大学に送り大学研究者が組織分析を行った。適用化研究グループでは、開発される新鋼材を自動車に適用した場合の軽量化、燃費向上効果を試算した。更に、自動車だけでなく、軽量化が必須である将来輸送システムへの適用効果および成立性の検討を行った。

### 駆動軸等動力伝達システムの高効率化に係る研究開発 産学連携共同研究開発体制

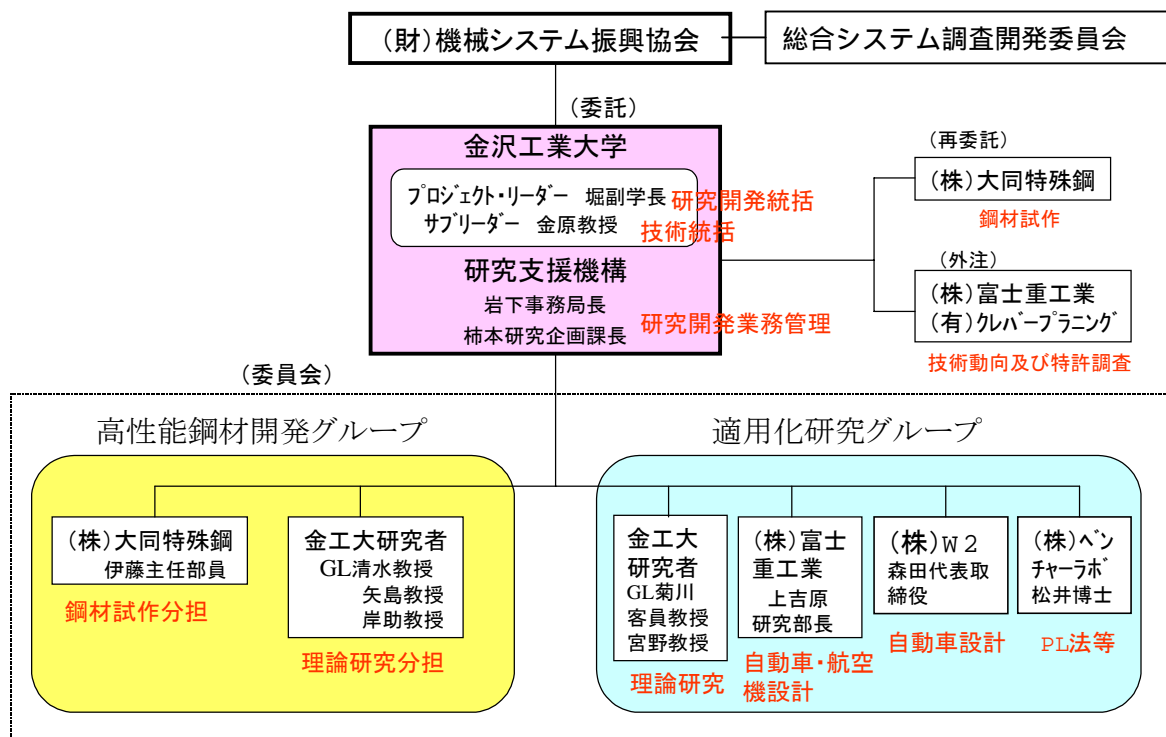


図 2-1 スタディの実施体制

( 2 ) 総合システム調査開発委員会委員名簿

( 順不同・敬称略 )

委員長	放送大学 教養部 教授	中 島 尚 正
委 員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤 正 巖
委 員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣 田 薫
委 員	東京大学大学院 工学系研究科 助教授	藤 岡 健 彦
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 つくば東事業所 管理監	野 崎 武 敏
委 員	独立行政法人産業技術総合研究所 つくば中央第2事業所 管理監	太 田 公 廣

(3) 委員会名簿

表 2-1 委員会名簿

	研究分担	氏名	所属	住所	
1	プロジェクトリーダー	堀 幸夫	金沢工業大学 副学長	〒107-0052 東京都港区赤坂 2-17-41	
2	サブリーダー	金原 勲	金沢工業大学 教授 高度材料科学研究開発 センター研究員	〒924-0838 石川県松任市八束穂 8-1	
3	高性能 鋼材開 発グループ	グループリーダー 清水 謙一	金沢工業大学 教授 高度材料科学研究開発 センター研究員	〒924-0838 石川県松任市八束穂 8-1	
4	プロジェクト	理論研究	矢島 善次 郎	金沢工業大学 教授 高度材料科学研究開発 センター研究員	〒924-0838 石川県松任市八束穂 8-1
5			岸 陽一	金沢工業大学 助教 授、高度材料科学研究 開発センター研究員	〒924-0838 石川県松任市八束穂 8-1
6		薄板試作	伊藤 幸生	大同特殊鋼(株)技術開発 研究所企画室 主任部 員	〒457-8545 名古屋市南区大同町 2-30
7	適用化 グループ	グループリーダー 菊川 廣繁	(財)日本航空機開発協 会第一企画室 構造開 発グループリーダー 金沢工業大学 客員教 授	〒105-0001 東京都港区虎ノ門 1-2-3 虎ノ門第一ビル	
8	適用化 グループ	長期耐久性	宮野 靖	金沢工業大学 教授 高度材料科学研究開発 センター研究員	〒924-0838 石川県松任市八束穂 8-1
9		飛行設計 & 航空法	上吉原 行 夫	富士重工業(株) 航空宇 宙カバニ- 技術開発セ ンター研究部長	〒320-8564 栃木県宇都宮市陽南 1-1-11
10		自動車設計 &航空法	森田 忠	(株)ブリュ-ツ- 代表取締役	〒197-0814 東京都あきる野市二宮 1096-5
11	適用化 グループ	環境対策 PL 法等	松井 醇一	(株)ハ-ンチャー-ラボ テクニカビゲーター	〒603-8044 京都市北区上賀茂畔勝街 62

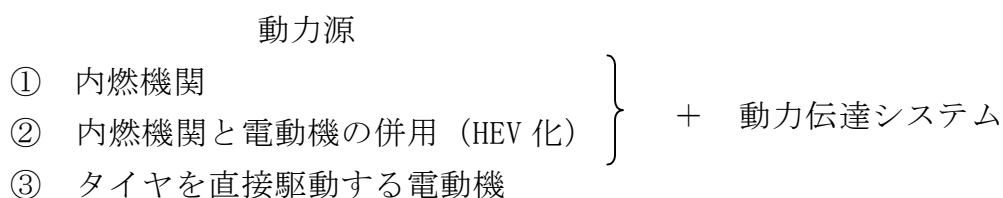
12	事務局	岩下信正	金沢工業大学 常任理事 研究支援機構事務局 局長	〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇 が丘 7-1
13		柿本昭博	金沢工業大学 研究支援機構事務局 研究企画課長	〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇 が丘 7-1

### 3. スタディ成果の要約

## 第1章 動力伝達システムの技術動向および特許の調査

### 1. 1 動力伝達システムの効率化技術

近年、環境、エネルギー課題解決のために、動力源として電動機と内燃機関を併用するハイブリッド車（HEV）が市販され、10～15年先には燃料電池車が普及すると予想される状況にある。一方、自動車の燃費向上において軽量化が最重要課題であることを考慮すると、動力伝達システムとして、下記の3つの動力源を候補にしたものが想定される。



上記の動力伝達システムは、変速機、プロペラシャフト、差動装置、アクスルシャフトで構成されるが、本項の効率化では、変速機の効率向上、HEV化、電動機によるタイヤの直接駆動を取り上げ、次項の摩擦低減において、変速機の摩擦低減とプロペラシャフト、差動装置、アクスルシャフトの効率化を扱う。

#### （1）変速機構の効率化

変速機の効率向上の内容には、3つの視点がある。1つは、変速機能による間接的な効率向上に関するものであり、一定の走行負荷に対して、動力源を高効率点で運転できるようにすることである。2つ目は、動力伝達系要素である変速機にとって直接的な伝達効率の向上である。3つ目は、前の2者を掛けあわせた総合的な効率向上であり、自動車全体の燃費効率向上に対する変速機の寄与率（燃費向上寄与率）である。

上記3つの視点に沿って、効率化技術の内容を具体的に説明する。

#### ①変速機能に伴う効率化

一般的に、内燃機関は低負荷域、高回転域で熱効率が低い傾向にあるが、所定の走行負荷に対して変速比を調整することによって、内燃機関を熱効率の高い点で運転することが可能となる。このためには、有段変速機に対する多段化あるいは無段変速機における変速比幅の拡大、効率向上を最大限に引き出すための変速機と動力源の協調制御が必要とされる。

現在、手動変速機（MT）においては6段化が、トルクコンバータを用いた自動変速機（AT）では5～6段化が普及し、8段ATも提案されている。MT、ATの多段化では、コンパクト性、コスト、伝達効率の観点から、変速段数に応じて増加する各構成要素をどのようにレイアウトするかということが最重要課題である。継合要素の少ない歯車列が提案される一方で、変速機の軸長を短縮するために、軸受けの小型化、一つで2つ分の機能を発揮させる構造を持たせた継合要素、更には、断面を扁平にしたトルクコンバータ等が実用化されたり提案されている。要素の小型化やトルクコンバータの扁平断面の採用に当たっては、軸受け内の応力や摩擦力の数値解析、トルクコンバータ内流れの3次元数値解析によって仕様の最適化が行われている。

一方、無段変速機（CVT）に関しては、種々の方式が既に実用化されているが、更に、理想の変速機として変速比幅が無限大の無断変速機に関するアイデアが提案されている。

変速機と動力源との協調制御に関しては、ATにおけるスリップロックアップ制御が実用化されているが、最良燃費点で常に動力源を運転するためには、変速機の入出力トルクに関するリアルタイム情報が必須となり、高価なセンサを用いずに、いかに廉価にリアルタイム情報を得るかが課題となっている。

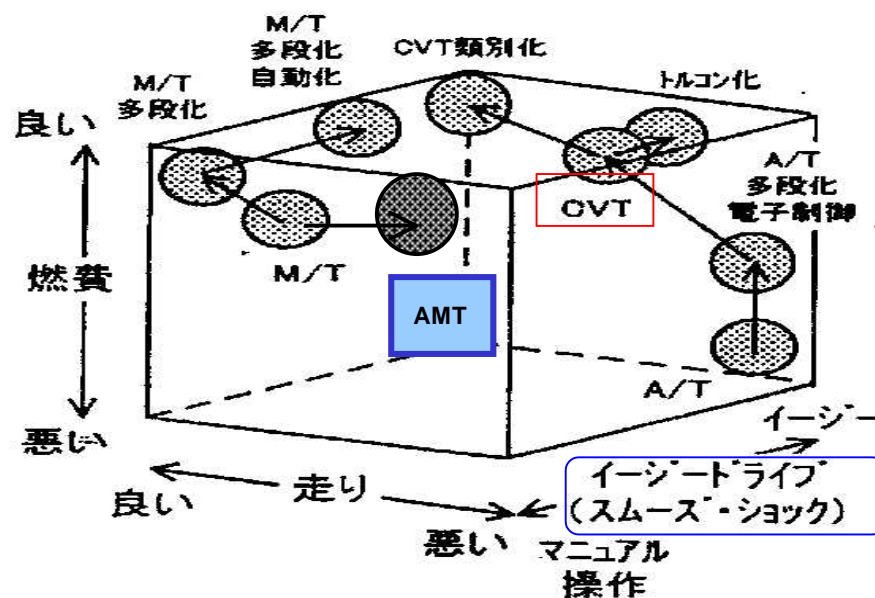
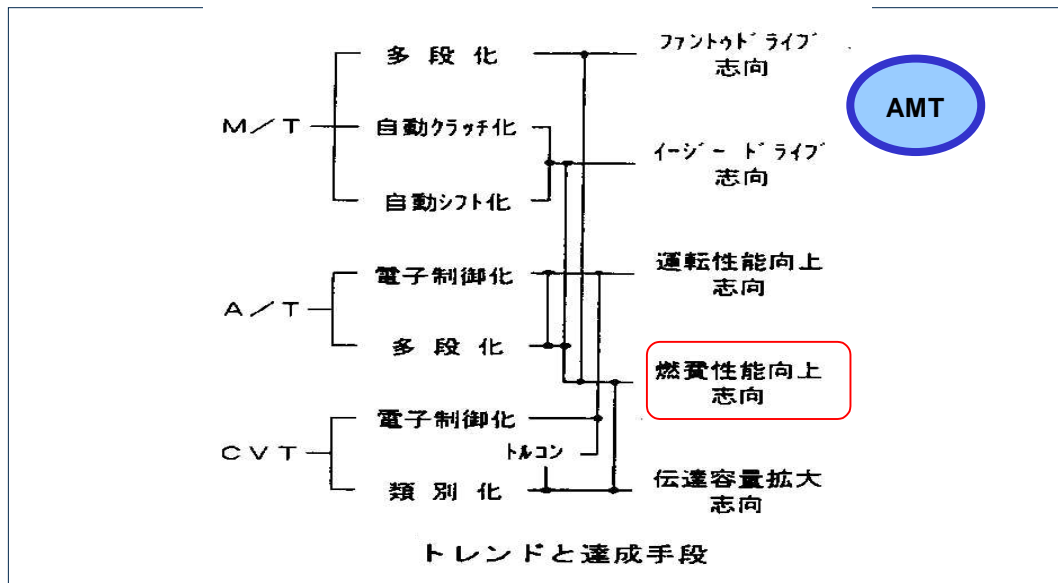
## ②伝達効率向上

変速機の伝達効率向上のためには、それぞれの変速機における機械的運動部や流体運動部における動力伝達損失を低減する必要がある。伝達系が歯車・歯車軸だけで構成されるMTでは、長年にわたる歯車系の最適化によって伝達効率は既に98%近く達しており、向上代は少ないとされるが、構成要素の多いAT、CVTの伝達効率はかなり低いので、大幅な向上が期待されている。向上技術詳細は、次項で扱う。

## ③燃費向上寄与率

自動車用自動変速としてATが普及してきたが、最近、欧州小型車向けに、変速操作系を自動化したMTでオートメーティッドMT又はオートマティックシフトMTと称されるAMTが実用化されている。又、CVTは、ベルト式、チェーン式、ハーフトロイダル式が実用化されており多彩である。こうした中で、燃費寄与率、変速操作の簡便性、コンパクト性、コストの観点から変速機の格付けがなされ、図1.1-1に示されるように自動車の車格に応じた棲み分けが存在している。今後の技術向上如何では、この棲み分けが変わる能性もある。特にAMTの格付けがどうなるか注目されている。すなわち、AMTの狙いは、効率に関してはMT、変速の質に関してはATと同程度にすることであるが、現在市場に導入されているものはクラッチが一つのタイプで、燃費はMT並みであるが変速の質

はATより劣っている。変速の質を向上した次世代のAMTとして、ボルグワーナ社からクラッチを2つ持つタイプが提案されている。2つのクラッチで不十分であればクラッチ等の要素を増やすことになるが、ホンダ社の平行歯車式ATの構造に近づくことになり、AMTとしての存在意義は薄れてくる。AMTの将来性は、変速の質を向上しつつ、クラッチの数をATよりも大幅に減らせるかどうかにかかっている。



トレンドに対する位置付け

図 1.1-1 自動車の動力伝達変速機の種類と各変速機の技術開発志向

## (2) 電気推進機構の併用 (HEV 化)

HEV は、内燃機関と電動機の役割分担の観点からシリーズ方式、パラレル方式に大別されるが、シリーズタイプとパラレルタイプを併用できる構造のシリーズ・パラレル併用方式も実用化されている。いずれの HEV においても狙いは、大幅なエネルギー効率の向上で、15%~50%の燃費向上が報告されている。

HEV による燃費向上要因

- ①内燃機関を熱効率の悪い領域で運転させないようにすること。
- ②減速時のエネルギー回生
- ③停車時のアイドルストップ

(HEV では、質の高い再始動性が確保しやすい。)

大幅な燃費向上が得られる HEV 化は、従来の内燃機関だけのシステムに較べて、一般的に重量とコストの上昇を招く。従って、目標燃費向上代に対して重量増とコストアップをバランスさせた HEV システムの選択が重要であり、最適評価技術が求められている。パラレル、シリーズ方式に関しては、走行モード燃費に対するシミュレーションの発表例は多いが、重量とコストを含んだ最適化事例はまだ発表されていない。

一方、HEV の効率化には、廉価でコンパクトな個々の構成要素 (電動機、充・発電システム、動力制御システム) に関するハード、ソフト両面の技術開発が求められており、トヨタ社、ホンダ社から具体的な発表がなされている。又、電源の高圧化は電気系全体の効率や軽量化をもたらすことから、重量が増加しやすい HEV において、従来の 12V 電源系に替わる車両 42V 電源系を前提にした車両電気系の開発が必要とされている。

## (3) 電動機によるタイヤの直接駆動

現在市販されている自動車では、動力源とタイヤが遠く離れている。このため動力源とタイヤを繋ぐための中間駆動系としてプロペラシャフト、差動装置、アクセルシャフトが存在し、動力伝達損失を発生させている。中間要素をなくし、タイヤを直接電動機で駆動するインホイールモータ駆動システムが、重量軽減と伝達効率の向上の点から燃費向上策として期待されている。

電動機をタイヤに取り付け、サスペンション系のばね下荷重を増やすと車両特性が損なわれるため、インホイールモータ駆動システムの開発では、軽量、コンパクトな電動機の開発とばね下荷重の増加に対応するサスペンション制御系の開発が最大課題である。最近の発表事例としては、ブリジストン社のものがある。又、インホイールモータ駆動システムでは、各輪の駆動力を協調して制御する協調制御が必須となる。いろいろな運転状況、環境下でも安定な制御が得られる高度な協調制御の開発が求められている。

## 1. 2 摩擦低減技術

動力伝達システムは、クラッチ、変速機、プロペラシャフト、差動装置、アクセルシャフトによって構成されるが、各構成要素の運動部分では、機械的な摩擦による駆動損失と潤滑油(冷却油)やオイルミスト等の流体を攪拌することによる駆動損失(スピンドロス)が生じている。摩擦発生個所を摩擦損失の形態別に整理したものが表 1.2-1 である。

表 1.2-1 における摩擦力発生個所は①歯車系、②AT系固有系、③CVT固有系、④推進軸系に区分できるので、各区分毎に摩擦低減技術を説明する。

表 1.2-1 摩擦損失発生個所

動力伝達システム 要素	摩擦損失の形態	
	機械的摩擦	流体の攪拌
クラッチ		・流体継ぎ手内のオイル
変速機	<ul style="list-style-type: none"> <li>・歯車系(歯面、軸受け)</li> <li>(+ベルトチェン式 CVT)</li> <li>・ベルト&amp;プーリ系</li> <li>(プーリ軸、ベルトチェン・プーリ面)</li> <li>(+トラクション式 CVT)</li> <li>・摩擦車&amp;デイス系</li> <li>(コン軸、摩擦車&amp;コン面)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・湿式クラッチと冷却油(歯車油)</li> <li>・湿式ブレーキと冷却油(歯車油)</li> <li>・トルコン内のオイル</li> <li>・歯車、ベルト・チェーンと潤滑(冷却)油</li> </ul>
プロペラシャフト	・継ぎ手部軸受け	
差動装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・歯車歯面</li> <li>・歯車軸受け</li> </ul>	・歯車と潤滑(冷却)油
アクセルシャフト	・継ぎ手部軸受け	

\*差動装置には、多板の摩擦板を用いたタイプなどいろいろあるが、コンベンショナルなものだけについて記した。

### (1) 歯車系

歯車系の摩擦発生要因は、歯車諸元以外としては歯車の歯面粗さや歯形精度に起因するものと、歯車軸の平行度、食い違い度に起因するものがある。前者による摩擦の低減は加工精度の向上に尽き、高精度の加工技術、加工機の開発が必要とされる。後者に関しては、歯車、歯車軸、軸受け、歯車ケースの剛性を所定値に保つことや熱変形への対策が求められる。歯車-歯車軸-軸受け系の動的剛性は数値計算で求まるようになったが、実働状況下での平行度、食い違い度の確認には、温度条件を入れて歯車ケースを含む変速機全体の動解析が必要とされる。この動解析での計算量は膨大で、信頼性も低く発表事例は少ない。

一方、歯車軸受けに関しても、軸受け部の摩擦発生メカニズムに基づいた摩

擦力の解析が行われ、軸受けタイプ毎の仕様の最適化が実施され5～20%の低減が期待されている。

## (2) AT 固有系

従前のATに関する解析によると、動力損失の内訳においてトルクコンバータ伝達損失が60%弱、オイルポンプ駆動損失が15%、湿式クラッチ、湿式ブレーキ等の摩擦要素が10%強を占める。トルクコンバータの伝達効率向上では、トルクコンバータ内流れの数値解析による最適化が行われたり、トルク増幅の不要な条件でトルクコンバータの機能をバイパスさせるロックアップクラッチの採用が普及し、ロックアップ条件を軽負荷、低回転域まで広げるためのエンジンとの協調制御(スリップロックアップ制御)が実用化されている。

又、オイルポンプの駆動損失を低減するために、オイルポンプ仕様の最適化と共にオイルポンプ負荷の低減や負荷に応じた油圧制御を可能とする可変容量化が進んでいる。更に、摩擦要素における引きずり抵抗の低減策として、摩擦板表面のウェーブ高さや摩擦板間の隙間の最適化が図られている。

一方、ATの多段化においては、損失源となる摩擦要素数をできるだけ少なくした歯車列構造が注目されている。

## (3) CVT 固有系

ベルト/チェーン式CVTに関して、金属ベルト、乾式ベルト、チェーンそれぞれのタイプにおける動力伝達、変速メカニズムが解明されつつある。この過程でベルト/チェーンとプーリ間の摩擦、ベルト内部摩擦の発生メカニズムも徐々に解明されている。従来は、試行錯誤的に摩擦損失を低減してきたが、今後は、これらのメカニズムに基づいたベルト仕様(ブロック、リング)やプーリ側圧制御に関する摩擦低減策が提案されるものと期待されている。又、プーリ側圧制御において油圧負荷の低減にも関係しており重要である。

トラクション式CVTでは、摩擦車軸受けが大きな摩擦源である。摩擦車軸受けの潤滑油がトラクション油であり、油膜せん断抵抗が大きいことが原因である。軸受け部の擦力の解析に基づいた軸受け仕様の最適化が試みられている。

## (4) 推進軸系

自動車用推進軸の殆んどは等速ジョイントであるが、等速ジョイント内部力解析から得られた知見や有限要素法(FEM)を用いた応力解析によって、等速ジョイント内のボールの小径化、数の増加、トラックオフセット量の最適化が図られている。

## 1. 3 無段変速機C V T技術

### (1) 地球環境問題からパワートレインに要求される事項

日本自工会（JAMA）の掲げている乗用車の燃費（CO<sub>2</sub>）の自主改善目標の2003年中間目標値は、165～175 g/km、2009年最終目標値は140 g/kmである。この値は欧州、韓国とほぼ同一レベルとなっており、各国が歩調を合わせている。

### (2) 新エンジン技術

欧州の新エンジン技術の普及予測によれば、2010年頃ガソリンエンジンの直噴化は50%、それ以外は動弁系を中心とした種々の可変技術が組合わされ多様化しているとしている。HEV（High Efficiency Vehicle）は2010年ではガソリン車の約10%と普及度が低い。また、欧州ではディーゼルエンジンが35%占めている点に大きな特徴がある。ちなみに日本ではディーゼルエンジンの割合は7～8%と予測されている。

### (3) トランスミッション（TM：Transmission）のトレンド

- ① 欧州のTMの普及予測によれば、2010年にはC V T（Continuously Valuable Transmission）は10%前後であり、自動MT（AMT：Automatic Manual Transmission）が30%と拡大し、ATもやや増加する。（ATは数年でほとんどなくなるとする別の予測もある。）欧州ではMT車、AMT車を合わせると70%以上となる。
- ② 国内乗用車TM技術の予測によれば、2010年にC V Tは25%に拡大する。日本の場合は欧州と異なりATが70%近く占め、MT車は5%程度である。このトレンドの差は、欧州が低燃費・コスト面から従来MTに外付けでAMT化する傾向が大であるのに対し、日本国内はATがベースでイーゼードライブからC V Tへ進んでいく傾向が強いことによる。このようにC V Tの導入トレンドは、欧州と日本で相当異なることを念頭におく必要がある。

### (4) ドライブトレインの変遷

- ・ 今日の自動変速機の原型と考えられるものは、1940年にGMがオールズモビルに搭載して発売したハイドラマチックである。
- ・ ベルト方式C V Tは、1984年スバルが開発したジャスティにバンドーネ社の金属ベルトC V Tが使用され、これを皮切りに日本での開発が進み、各自動車メーカーとも2リッタークラスまでのC V T搭載を発表している。
- ・ トロイダルC V Tは1877年に原理が公開され、その後自動車への搭載が

試みられたが、大量に実用化されるには至らなかった。1999年に日産が世界に先駆けてトロイダルCVT搭載車を実用化した。

#### (5) 各種TMの概略

- ・ 自動車の出現と同時に一旦はATが試みられたが、やがてMTが主流となっていた。以降MTは多段変速化の方向に進んでいる。
- ・ 一方、変速操作の煩わしさから再度ATが現れ、多段変速化に続き電子制御が図られている。MTの自動化としては、自動クラッチや自動変速システムが採用され製品化されている。
- ・ CVTも、古くからスムーズな加速と動力性能の高性能化を狙った製品化の動きがあったが、近年環境保護の高まりにより高燃費効率が着目され、製品化され出した。
- ・ また、ファントムドライブ志向から、ATをマニュアル操作させたり、CVTを有段化する傾向も出てきている。

#### (6) 「CVT」 & 「MTの自動化」の将来と課題

- ・ 変速機のトレンドは、(1)燃費性能向上志向、(2)イージードライブ志向、(3)運転性能志向、(4)ファントムドライブ志向、(5)伝達容量拡大志向、に大別することができる。
- ・ また、志向するトレンドを達成するための方策として、MTは(1)多段化、(2)自動クラッチ化、(3)自動変速化、ATは(1)多段化、(2)電子制御化、CVTにおいては(1)電子制御化、(2)変速機構部の類別化、が進んでいる。
- ・ 各々の変速機を、走り、イージードライブ、および燃費効率の3次元で位置付けすると、CVTがすべてのトレンドで最良であるが、MTの多段化+自動化もCVTに近い位置付けになる。将来、CVTとMTの自動化がシェアを広げることが予想される。
- ・ 近年、環境意識の高まりにより、車に対して「燃料消費削減」の要求が厳しくなっている。一方で車の基本性能である「走りの性能」も、よりレベルの高いものが要求されている。これらを両立させ得る技術の一つとして無段変速機(CVT)が注目されている。
- ・ 燃費、運転性の向上のため、ベルト式CVTが排気量2リッタークラスまでの前輪駆動車へ採用されている。一方、3リッタークラスの後輪駆動車への搭載を目的に、ダブルキャビティタイプのハーフトロイダルCVTが開発された。

#### (7) ベルトCVTに関する特許調査

オランダのファンダーネ社が20年前に自動車用金属ベルトを開発した。それ以降、マルエージング製CVTベルトはファンダーネ社の独占となり、今日までに至っているが、この特許が近々切れるということで、日本の自動車メーカー各社がベルトCVTの開発に乗り出しているところである。しかし、ファンダーネ社が1991年から平成2001年の10年間に出願しているCVTに関する特許件数は24件にも登っている。これを回避しながら自社技術を開発するのは大変なことと予想される。

## 1. 4 軽量化技術

### (1) マルエージング鋼の軽量化材料としての可能性

マルエージング鋼は比強度 25km を持ち、航空機用軽量化材料である複合材料やチタン合金と拮抗した軽量化特性を有する。また、現自動車鋼材及びアルミ合金に比べ、はるかに高い強度を持つ。しかし、各種軽量化材料について比強度と比衝突エネルギー吸収率の関係を比較すると、マルエージング鋼は比衝突エネルギー吸収能力が現用鋼材やアルミ合金に比べ劣る。従って、延性を改善して衝突エネルギー吸収能力を高めることによりその適用範囲は大きく広がる可能性があると考えられる。

### (2) マルエージング鋼の歴史

1958 年米国の INCO 社によりマルエージング鋼が開発された。1960 年代はマルエージング鋼のブームがおこり、各種の派生鋼が生まれている。1970 年代には、その強靱化の解明に関する系統的な研究が日本で行われている。しかし、成分組成として非常に高価な元素を多量に使っていること、その製造プロセスの複雑さにより、もう 1 つ大ヒットするには至っていない。

### (3) マルエージング鋼の製造方法

マルエージング鋼の特徴は何といても  $200\text{Kg}/\text{mm}^2$  内外の強度を有し、他の材料には見られない優れた靱性を有する点である。これを実現するには、成分組成も重要であるが、破壊の起点となる非金属介在物や不純物をできるだけ少なくするようコントロールすることが求められる。

溶解は、通常真空誘導溶解と真空アーク再溶解の 2 重溶解法を採用する。溶解段階での注意点として、不純物としての P、S などを厳しく制限しており、特に S は Ti の硫化物として粒界に炭化物と共に析出した場合、破壊靱性上よくないことがミクロ破面 (fractography) などで確かめられている。

### (4) マルエージング鋼の実用化例

高比強度と高硬度、さらに優れた加工性が必要な用途に用いられている。具体的には、①超音速機などに用いる外装板、昇圧機などの板材、②ヘリコプター着陸装置部品、航空機着陸時の制止フックなど、③ロケット用モーターケース (ボディ)、深海船の耐圧殻、押出用ラム、その他ファスナー、接合管、シャフトなどの部品、④小型高速機械に使用されるテンションボルトやバネ材、⑤固体燃料ロケット、ウラン濃縮超高速遠心分離機、各種金型、⑥ゴルフのフェース、等である。

#### (5) マルエージング鋼の特性

- ・ マルエージング鋼の基本組成は Fe-18Ni-8Co-5Mo-0.5Ti-0.2Al で、無 C で多量の Ni、Co、Mo、Ti を添加し、マルテンサイト組織から金属間化合物を微細に析出して強靱性を高めた超強力鋼 (ultra high strength steel) の一種である。金属間化合物としては、Ni<sub>3</sub>(Al, Ti) や Ni<sub>3</sub>Mo、Ni<sub>3</sub>Nb を微細分散析出させている。超強力鋼中で強度と靱性のバランスが最も優れた鋼種で、引張強さを 140~280Kg/mm<sup>2</sup> に制御した一連の鋼種が開発されている。
- ・ この鋼種の特徴は、①高引張強さ、②高靱性、③熱処理容易 (高温加熱を必要としない)、④質量効果がない、⑤熱処理変形が小、⑥冷間加工性良好、⑦溶接性良、などである。

#### (6) マルエージング鋼の強度・延性改善の指導指針

現在実験的に求められているマルエージング鋼の極限強度は約 350Kgf/mm<sup>2</sup> であるが、将来この強度をどこまで高められるか、またそのためにはどの組織因子を制御しなければならないかについては次の様に考えられている。

マルエージング鋼では、臨界粒径  $d_c$ 、破壊靱性値  $K_{1c}$  および引張り強さ  $\sigma_u$  の間には、
$$d_c = 0.2 (K_{1c} / \sigma_u)^2 \quad \dots\dots(1)$$

の関係が得られている。この式は、低応力破壊を阻止するには、(1)式で表わされる臨界粒径  $d_c$  以下に結晶粒を微細化しなければならないことを示している。すなわち、高強度化 ( $\sigma_u$  の増加) に伴い、破壊靱性値は急激に低下 ( $K_{1c}$  の減少) するので、高強度材では低応力破壊を引き起こさないようにするための臨界粒径  $d_c$  はどんどん小さくなっていくことを示している。従って、結晶粒の微細化が非常に重要である。

マルエージング鋼の強度、延性と結晶粒径との関係を見ると、一定組成で結晶粒径のみを変化させた場合、ある臨界粒径より粗粒になると低応力破壊が発生することが理解できる。また、延性の劣化を阻止するには更に結晶粒を細かくした臨界粒径を確保する必要があることが分かる。すなわち、合金の強度が高くなるほど、延性の劣化を抑制し低応力破壊の発生を阻止するためには、ますます結晶粒を微細にしなければならない。従って、将来マルエージング鋼の強度をどこまで高められるかは、ひとえに結晶粒をどこまで細粒化できるかにかかっている。400Kgf/mm<sup>2</sup> の引張強さを得るには 2  $\mu$ m、450Kgf/mm<sup>2</sup> には 0.5  $\mu$ m 程度まで結晶粒を微細化しなければならないと予測されている。

#### (7) マルエージング鋼の組織制御に関する指導指針

マルエージング鋼の強度・延性改善による指導指針より、低応力破壊を阻止して高強度化を図るには  $0.2 (K_{1c} / \sigma_u)^2$  で表される臨界粒径以下に結晶粒を微細化しなければならないことが示された。この結晶粒を微細化するという

ことは、まさに組織制御を駆使することに他ならず、強度・延性改善と組織制御は密接な関係にある。延性と靱性とでは組織の影響が異なること、更に高強度下で靱性を向上させるには、同時に延性も改善しなければならない。これを満足させるには“残留析出物がない状態で微細なマルテンサイト組織”に調整する必要がある。

マルエージング鋼における強靱性向上のための組織調整は、マルテンサイト変態の前と後に行う場合に大別される。マルテンサイト変態の前には高温での加熱または加工により、結晶粒径（前オーステナイト粒径）、残留析出物、転位組織を調整することができ、変態後には冷間加工により転位組織を、時効により析出組織を調整することができる。析出組織については、従来の研究において最高時効組織で最も優れた強度と靱性の組合せが得られることが明らかになっている。

延性と靱性に対する組織因子の影響が異なる点に着目し、高強度下において延性と靱性を同時に改善できる三つの処理方法、(1)加工熱処理、(2)冷間加工ー再結晶処理、(3)繰返し熱処理、がある。組織制御のポイントは、どの強度レベルではどの処理方法を用いるのかという選択基準の指針を得ることにある。

#### (8) 厚物部品の加工技術動向

熱間加工の際の圧延終了温度は重要な因子で、高過ぎると延性・靱性が低下する。厚肉材の場合には、この熱脆化とバンド組織による脆化が起りやすいため、マルエージング鋼を厚肉部品として利用するのはかなり困難であると考えられてきた。しかし、Ni量20%近傍では、オーステナイトの冷却によってスタートしたマルテンサイトの変態の終了温度 $M_f$ は約120℃と常温以上である点に特徴がある。これによって、10℃/min程度の空冷温度で十分にマルテンサイト変態が生じるので、いわゆる質量効果は極めて少ない。これは厚物を製造する場合に過冷されると、内部と外部の温度差による熱応力に起因する割れ問題が除かれることを意味し利点である。この知見を利用して圧肉材に加工熱処理を施すと角棒圧延の方が板圧延よりも強度が高く、延性も優れるという厚物部品加工の可能性を示唆する結果が得られている。

一方、薄肉材として使用される場合、溶体処理後冷間加工を施すことにより、オースフォーミングとほぼ同様な機構により強靱化がなされている。構造物として多く使用される厚肉材の場合には、冷間加工を活用する方法は無理であり、加工熱処理による強靱化に頼らざるを得ない点が欠点となる。

#### (9) マルエージング鋼の特許調査

1990年から2002年9月公開までを対象にマルエージング鋼の検索を実施した。全ヒット件数は24件あった。製造プロセスからの特許マップを作

成してみると、次のことが分かる。

- ・ 最近の特徴として、自動車メーカーからの窒化処理に関するものが目立つ。これはCVTベルトの疲労強度向上を目的としたものと推察される。
- ・ 素材メーカーからの出願内容も疲労強度を向上させることを目的としたものが多い。企業の出願割合は、日立金属 4 件、大同特殊鋼 3 件、住友特殊金属 3 件、住友金属工業 3 件、本田技研工業 3 件、日本製鋼所 2 件となり、素材メーカーがマルエージング鋼に注目していることが分かる。
- ・ 製品としては、CVT用ベルトの他に金型、ゴルフのクラブヘッド等が対象となっている。

## 第2章 動力伝達システムの高効率化に資する鋼材の開発

### 2. 1 高強度鋼への延性付加プロセス最適条件の研究

引張強さが980MPa (100kgf/mm<sup>2</sup>) 級以上のいわゆる超高張力鋼を合金成分の含有量から分類すると、(1)低合金鋼、(2)中合金鋼および(3)高合金鋼の3種類に大別でき、また組織的に分類すると、(1)微細析出炭化物を含んだ焼き戻しマルテンサイト組織、(2)特殊複合析出炭化物による2次強化組織および(3)微細金属間化合物の析出による時効硬化組織に大別できる。それぞれの分類の3番目の高合金鋼および金属間化合物の析出による時効硬化組織は対応していて、マルエージング鋼がその代表である。マルエージング鋼はその応力-ひずみ曲線から分かるように、比例限が高く、加工硬化度が比較的小さく、降伏点と引張強さとの差は少ないが伸びが比較的大きいと言う特徴を持っている。また、マルエージング鋼は強靱であるばかりでなく、炭素含有量が少ないために成形性、溶接性あるいは被切削性なども優れていて熱処理に伴う寸法変化が少ないなど、今までのどの鋼種よりも多くの長所を有している。しかしながら、マルエージング鋼は他の強靱鋼に比して延性が比較的良好とはいえ、用途によってはまだ延性に不安が残されており、また本研究のように動力伝達システムの高効率化に使用するためには延性を格段に向上させる必要がある。このような要請のもとに、マルエージング鋼の延性向上を目的とした研究に着手することにした。

マルエージング鋼は極低炭素のラス・マルテンサイト中に、Ni、Mo、TiあるいはAlなどの金属元素を成分とする金属間化合物を微細に析出させることにより強化しているが、鋼の強化機構としては、この時効析出強化のほかにも(1)2相化による強化、(2)結晶粒微細化による強化、(3)転位導入による強化、等の方法がある。マルエージング鋼の本来の強化機構である金属間化合物の時効析出硬化機構に加えて、前述の3つの強化機構を重ね合わせると、一層の強化は勿論のこと延性の向上も期待できるので、マルエージング鋼の延性改善を試みた。改善結果は引張試験による機械特性評価と透過電子顕微鏡観察によるナノ・スケールの組織学的評価によって判断することにした。

## 2. 2 最適候補プロセス（複数）による鋼材試作

マルエージング鋼の強度、延性に及ぼす組織の影響を調査するために、マルエージング鋼の冷間圧延（冷延）および熱処理条件を変動させ、種々の組織を得ることを狙った小規模試作を行う。

### （1）溶解

主成分はすべてほぼ狙い通りの値が得られており、不純物であるC、P、S、O、Nもすべて非常に低い。

主成分：Fe-18.3 Ni-4.8 Mo-8.7 Co-0.2 Al-0.4 Ti (mass%)

不純物成分：C=0.003、P=0.002、S<0.001、O<0.001、N<0.001 (mass%)

### （2）分塊・圧延

高速四面鍛造機による分塊、ステッセルミルによる熱間圧延では疵の発生もなく、加工性は良好であった。また加工温度の実績も熱延時の終止温度が650℃～700℃と設定していた950℃に比べ低くなった以外はほぼ狙い通りであった。

### （3）冷延1

減面率を25%、50%、75%の3水準で冷延しマイクロ組織と硬さを調査した結果、組織は減面率50%以上でほぼ均一に微細化しており、減面率50%で均一な予歪が導入できると考えられる。（写真2.2-1、図2.2-1）

### （4）熱処理

熱処理温度は700℃から50℃おきに900℃までの5水準と820℃の計6水準とし、熱処理時間1h、冷却は水冷として熱処理をし、熱処理後のマイクロ組織と硬さを調査した結果、750℃以上で再結晶し始め820℃でほぼ全体が再結晶組織を呈し、それ以上の温度では熱処理温度が高くなるにつれ結晶粒が粗大化していた。（写真2.2-2）

以上の結果から冷延の減面率は均一な微細粒が得られる50%とし、熱処理条件は整細粒が得られる820℃/1h/ACとした。

### （5）冷延2

減面率を25%、50%、75%の3水準で冷延し、マイクロ組織と硬さを調査した結果、冷延1の結果も同様であるが、本鋼種は80%の減面率を加えても硬さの上昇は60HV程度と低く、加工硬化は非常に小さい。また減面率の増加とともに圧延方向に伸長した組織を呈する。

## (6) 時効処理

時効処理温度は 450°C から 50°C おきに 700°C までの 6 水準とし、熱処理時間は 3 h、冷却は WC として熱処理をし、熱処理後のマイクロ組織と硬さを調査した結果、硬さが最も高くなる条件が 500°C であり、残留  $\gamma$  量の最も多い条件が 650°C であった。

(写真 2.2-3、図 2.2-2、図 2.2-3)

以上から冷延の減面率は 50% とし、時効処理は硬さのピークである 500°C および硬さは低いが高延性の残留  $\gamma$  量の最も多い 650°C を選定し、冷延 3 に供した。

## (7) 冷延 3

減面率を 25%、50% の 2 水準 (75% までは圧延不可) で冷延し、マイクロ組織と硬さを調査した結果、500°C 時効処理材は 50% まで冷延では硬さに顕著な差は認められなかった。650°C 時効処理材は 60% まで冷延したが 500°C 時効処理材の硬さが得られなかった。

(写真 2.2-4、図 2.2-4)

## (8) まとめ

特殊精錬を行い非常に高い清浄度を有するマルエージング鋼を溶製し、冷間圧延、熱処理を組み合せ、種々のマイクロ組織を有するサンプルを試作した。

冷間圧延については組織均一性確保のため減面率を 50% 以上とすることが、また軟化・整細粒を得る熱処理では 820°C/1h/WC の条件が好適と判断した。

また時効処理については最も大きな硬さが得られる 500°C/3h/WC および高延性相であるオーステナイト相を微細に析出させることが可能な 650°C/3h/WC の計 2 水準を高強度、高延性が得られる候補条件として選定した。



熱延まま (板厚 6 mm)



減面率 25% (板厚 4.5 mm)



減面率 50% (板厚 3 mm)



減面率 75% (板厚 1.5 mm)

写真 2.2-1 冷延 1 の縦断面マイクロ組織 ( $\times 400$ )

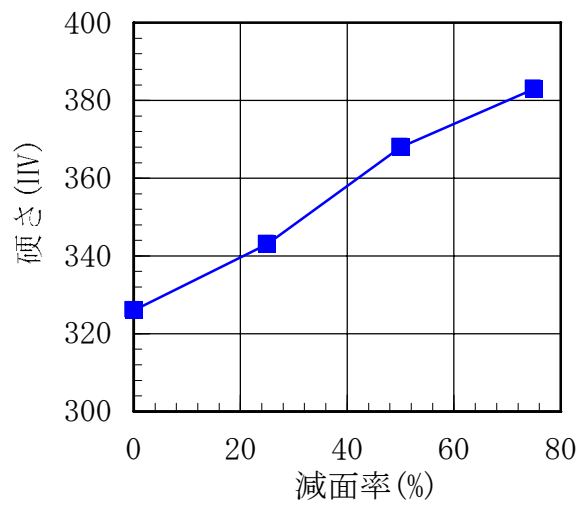


図 2.2-1 減面率と硬さの関係



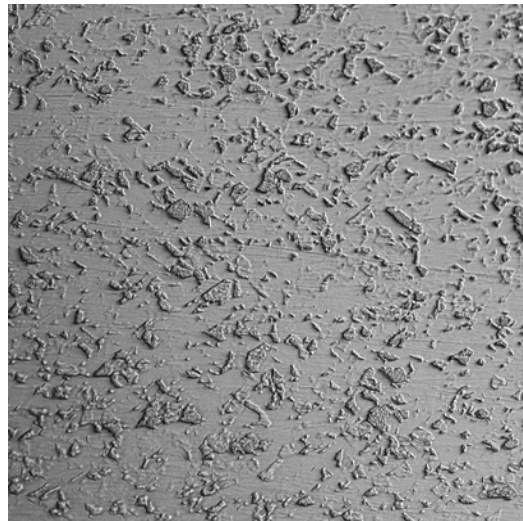
700°C/1h/WC



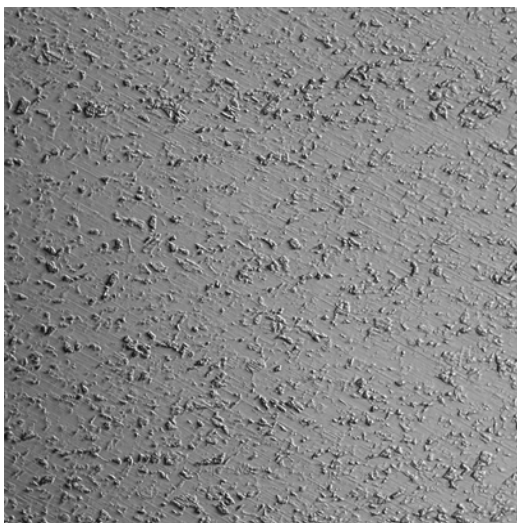
820°C/1h/WC



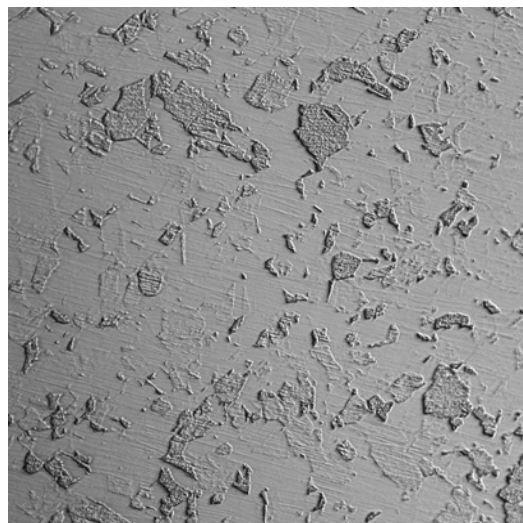
750°C/1h/WC



850°C/1h/WC



800°C/1h/WC



900°C/1h/WC

写真 2.2-2 減面率50%冷延1後の熱処理条件別の縦断面マイクロ組織 (×400)

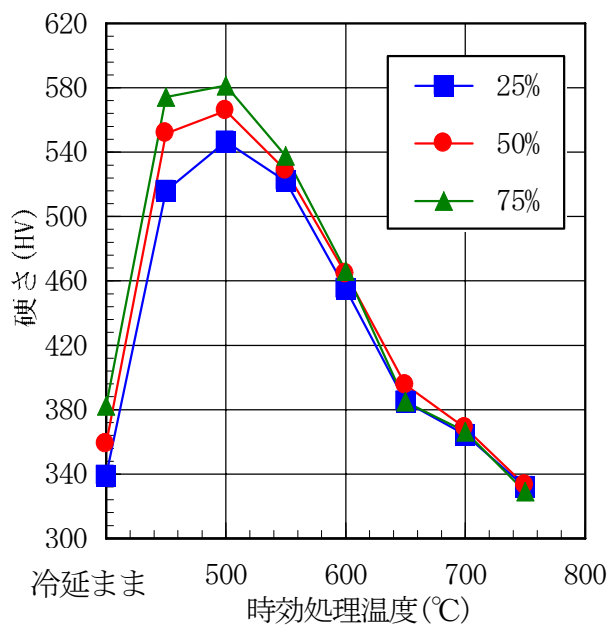


図 2. 2-2 時効処理温度と硬さの関係

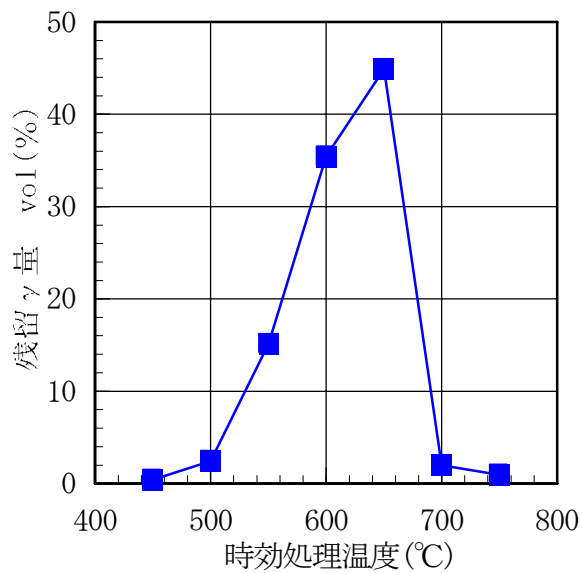
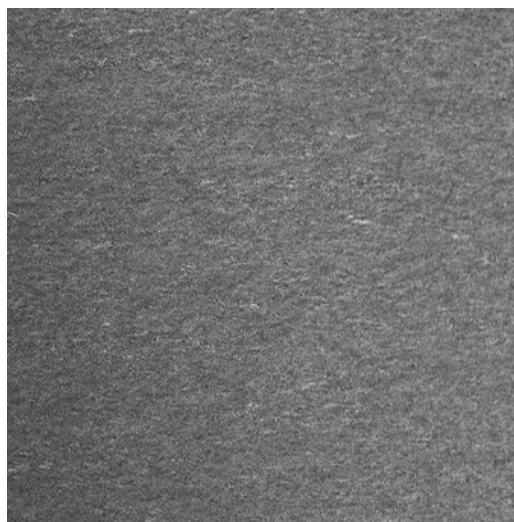


図 2. 2-3 時効処理温度と残留  $\gamma$  量の関係



500°C / 3 h / WC



650°C / 3 h / WC

写真 2. 2-3 減面率 50%冷延 2 後の時効処理条件別の縦断面マイクロ組織 ( $\times 400$ )

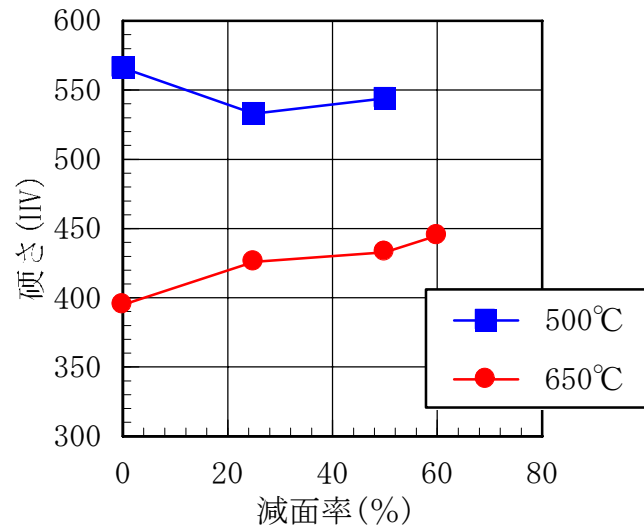
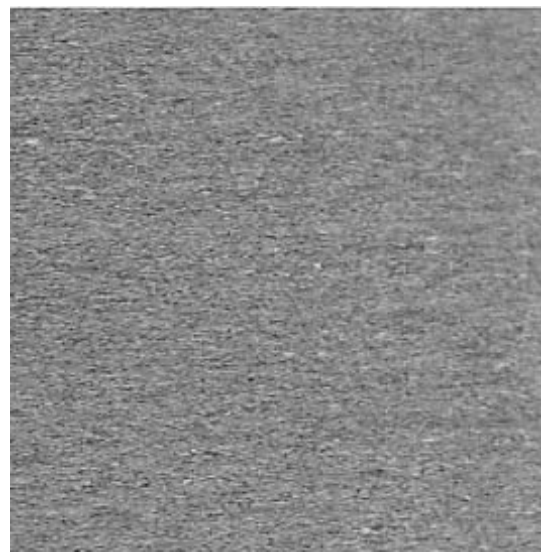


図 2.2-4 減面率と硬さの関係



500°C時効—減面率25%



650°C時効—減面率25%



500°C時効—減面率50%



650°C時効—減面率50%

写真 2.2-4 冷延3の縦断面マイクロ組織 (×400)

## 2. 3 鋼材の機械特性評価及び組織分析評価

### 2. 3. 1 評価試験方法

本実験で使用する延性付加マルエージング鋼の鋼塊は、Ti、Mo などの介在物形成元素量の適性化のために真空誘導炉溶解で一次溶解し、ついで Ni、Co、Mo などの高延性相分散型複合組織化のために消耗電極式真空アーク溶解で 2 次溶解し、更に O、N、P、S などの不純物元素を低減するためにエレクトロスラグ炉で再溶解する真空 3 重溶解法により溶製した。

溶塊から熱間圧延用ステッケルミルを用いて板に成形した後、図 2.3-1 に示したような加工と熱処理を施し、本研究で意図した降伏強度の更なる上昇と延性の向上のために、2 相化とマルテンサイト相の微細化および転位の導入を図った。この図の S、C、G で記号した時効処理材の機械特性および微視組織を観察調査するが、その他の A、B、D、E、F、H で記号した材料についても同様の観察を行って、強度の上昇と延性の向上の組織学的原因を追求する。

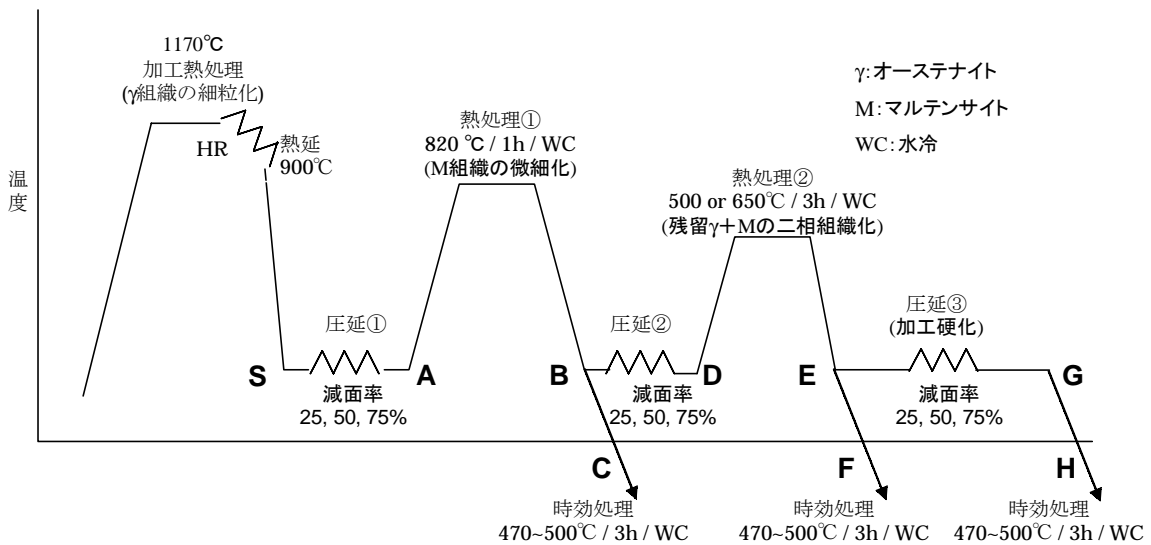


図 2.3-1 延性付加マルエージング鋼作製のための最適候補プロセス概略図

#### (1) 引張試験

JIS 13B 号試験片 (板幅 12.5mm、標点間距離 50mm) を用い、JIS Z 2241 に準拠して行った。試験平行部にはひずみゲージを貼り付け、引張試験機の荷重出力とひずみゲージのひずみ出力から応力-ひずみ線図を作成し、引張強度特性を評価した。

#### (2) 電子顕微鏡観察

微細組織は、日本電子製 JEM-2000FX II 型の透過型電子顕微鏡を用いて、加速電圧 200kV で観察した。観察用薄膜は、直径 3mm、厚さ 0.15mm の円盤状試験

片を作製した後、凹面研磨してから精密イオンポリッシング装置を使用して穿孔・薄膜化した。

## 2. 3. 2 試験結果と考察

### (1) 引張試験結果

本実験に供した引張試験片は図 2.3-1 における S (試験片厚さ：6mm) 状態のもの、それを冷間圧延して試験片厚さを 4.5mm、3mm、1.5mm に減じた 3 種類の A 状態の圧延材を 820℃で中間加熱処理した後、室温に冷却してマルテンサイトを生成させてから 485℃で時効処理した 3 種類の C 状態のもの、及び A 状態の圧延材を 820℃で中間加熱処理した後、室温に冷却してマルテンサイトを生成させ更に圧延→熱処理→圧延した G 状態 (最終板厚 1.125mm 及び 0.75mm) である。得られた試験結果の一覧を表 2.3-1 にまとめて示す。Code 欄の記号は (図 2.3-1 中に記す S、A、B 等の工程記号) - (試験片板厚) を示している。加工熱処理とその後の冷間加工と時効処理で得られた C 状態試験片は、初期状態 (S) に比べ加工硬化及び析出硬化されているが、最大で 8.4%もの破断伸びを示しており、非常に延性に富んでいることが分かる。加工と熱処理を加えてさらに薄くした G 状態試験片では約 4%もの破断伸びが確保され、C 状態試験片と同等もしくは若干高い引張強度が得られており、初期目標である高強度かつ高延性の薄板が得られたことになる。

表 2.3-1 引張試験結果

Code	引張強さ $\sigma_B$ (MPa)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	破断伸び $\epsilon_f$ (%)
S-6.0	1075	935	13.5
C-4.5	1977	1944	8.4
C-3.0	1915	1877	8.0
C-1.5	1911	1795	5.8
G-1.125	1957	1761	4.2
G-0.75	1988	1766	3.6

### (2) 透過電子顕微鏡観察結果

#### ① S 状態試験片の透過電子顕微鏡観察

この合金に特有なラス・マルテンサイトのラス状組織が大きく乱され、薄膜

化のときの歪み緩和によって生じたと思われる湾曲消衰縞に加えて、複雑な転位組織と隣接結晶粒の方位がわずかに異なるために生ずるモワレ模様が随所に観察されている。この様な欠陥を多く含んだ組織が時効処理における析出挙動にいろいろな形で影響を及ぼし、強度や延性に影響を与えられられる。

別な場所の透過電子顕微鏡組織では、ラス・マルテンサイトはラス状組織があまり乱されておらず、ラス組織が大きくまたラス境界がかなり明瞭に観察されている場合もあった。他の鉄合金のラス・マルテンサイトではその内部に方向性のある配列をした転位が観察されているが、本合金の場合にもそのような転位が観察されている。すなわち、ラス境界が乱された領域と乱されていない領域とが同時に観察されていることになる。

## ② C状態試験片の透過電子顕微鏡観察

結晶粒径あるいは下部結晶粒径が $1\sim 3\mu\text{m}$ に微細化したマルテンサイトが観察されている。それらの中には冷間圧延時に導入された転位と変態転位とが密に絡み合っ観察されている。なお、ラス・マルテンサイト晶内部から撮った制限視野電子回折図形では、電子線入射方向がマルテンサイトの $[111]$ 方向の帯図形が得られた。明視野像には多数の転位が存在するのに関わらず、回折斑点の形状から見て結晶はそれほど乱されていないと判定できる。基地中には長い棒状および短い棒状あるいは点状に析出物が観察されている。析出物からの帯図形は明瞭でないため、それから析出物の結晶構造を同定することは困難であるが、析出物は $a = 0.5064\text{nm}$ 、 $b = 0.4224\text{nm}$ 、 $c = 0.4448\text{nm}$ を格子定数とする、 $\text{Cu}_3\text{Ti}$ 型斜方晶の $\text{Ni}_3\text{Mo}$ 金属間化合物で、形状は析出物の $[100]$ 方向がマルテンサイト地の $[111]$ 方向に平行に伸びた棒状と推察できる。

以上の観察結果から、析出物は棒状の形状を呈していて、 $\text{Ni}_3\text{Mo}$ 金属間化合物と推定される。この棒状析出物結晶の $[100]$ 方向とマルテンサイト地結晶の $[111]$ 方向は平行で、それらの結晶格子間に整合ひずみがあるために、時効処理したC状態のマルエージング鋼は硬化したものと考えられる。時効析出物の結晶構造を明確に同定できれば、整合歪みの度合いも明らかになり硬化度をより定量的に評価することができ、延性向上により有効な加工・熱処理法の開発が可能となろう。今後の重要な研究課題である。

## 2. 3. 3 試験結果のまとめと動力伝達材への応用の可能性

本研究ではマルエージング鋼の強度上昇および延性付加を試み、期待の持てる成果を得ることができた。本研究の終局の目的は駆動軸等動力伝達システムの高効率化に関する研究であり、丸棒マルエージング鋼材の強度上昇および延性付加についても調査しなければならない。しかしながら、押し出しあるいは

引き抜きで得られる丸棒の材料流れや集合組織などは、圧延で得られる板材のそれらとは厳密には異なる点もあるが、熱間加工、室温での冷間加工、中間加熱処理、時効処理の際に起きる微視的現象は棒材と板材とではそれほど違わないと考えられる。したがって、丸棒に対しても適当な断面積減少加工法と本研究が採用したような熱処理法を施せば、強度および延性に富んだマルエージング鋼が得られ、駆動軸材として利用できる可能性も十分にある。

### 3.3 ニューコンセプト・ビークル

#### 3.3.1 将来輸送システムへの期待とその目的・用途

##### (1) わが国輸送システムの現状と改善点

わが国における山間部の交通路は谷間を通る鉄道と道路のみである。従って、山脈を挟んだ町村間の移動は遠回りとなり時間がかかる。広い山間部を有する群馬県、富山県、福井県、岐阜県等の地域では、一世帯当たりの自家用乗用車の保有台数が高く、日常生活における移動が自動車に依存している。山岳地帯が多い日本において、自動車により目的地へ最短距離で移動するためには、山岳高所の道路開通とトンネル貫通が必要である。これは森林等の自然破壊につながる。また、この地域は、空港が少なく航空便による短時間移動が難しい。山間部を効率的に移動できる新しい輸送システムの考案が必要である。

航空路はHub & Spokeの航空路線が整備され、大都市あるいは地方都市と離島町村間は短時間の移動が可能であるが、離島町村間の航空路はほとんど整備されておらず、移動に時間がかかる。離島間の移動は船舶に頼っているが所要時間が長い。

利便性向上のため船便の増大を図ると、港の新設が必要となり珊瑚礁等の自然破壊をもたらす。空港を持つ離島が多いので、それらの空港を直接結び最短距離を高速で移動できる交通手段が望まれる。また、空港に着陸後の利便性も必要で、離島町村間移動しかも戸口から戸口への移動に要する時間を大幅に短縮できることが望ましい。

現在の航空路Hub & SpokeではカバーされないRim, Tireに当たる短距離輸送を補い(図3.3.1-1参照) 枝葉末節に手が届く日常生活の移動及び僻地緊急医療のために最短時間輸送システムを整備することが望まれる。

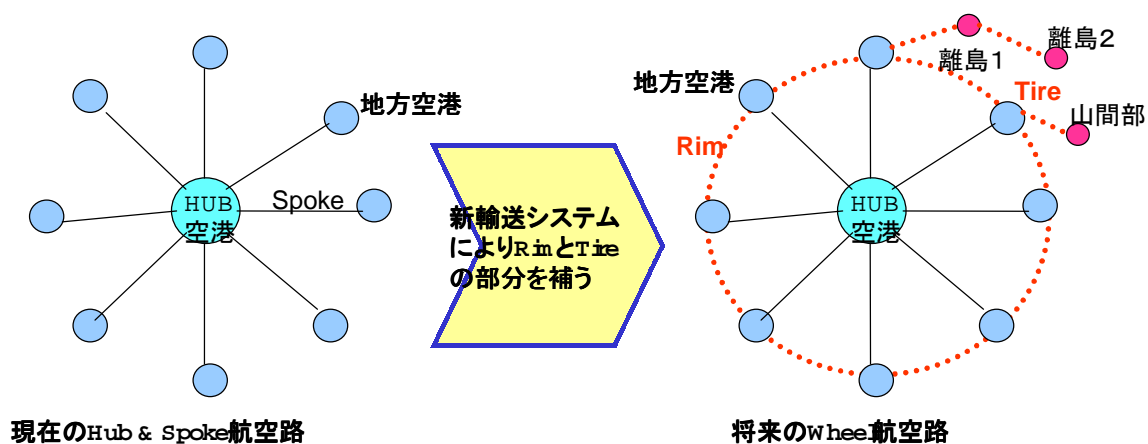


図3.3.1-1 枝葉末節に手が届き僻地緊急医療に役立つ将来航空路

##### (2) 資源保護と環境保全に適合した軽量材料の使用

鉄製の自動車は重くそのまま飛ばせるのには無理がある。航空機の主材料であるアルミニウム合金や、比重の小さいマグネシウム合金やアラミド繊維あるいは炭素繊維で強化し

た複合材料が候補となる。しかし、これらの材料は製造や廃却に多大のエネルギーを必要とし、環境保全や資源保護には向かない。やはり資源が豊富でリサイクルが可能で製造エネルギー消費が少ない鉄系の材料が望ましい。本スタディで研究を行っている比強度が航空機用軽量材料に引けを取らないマルエージング鋼も十分適用可能な材料のひとつとして軽量材料の仲間入りができる。

図3.3.1-2に示す航空機に使われた軽量材料を歴史的に見ると、マグネシウム合金やステンレス鋼は、腐食の問題や加工性が難しいなどの理由から使われなくなり姿を消した。しかし、軽量化の可能性のある材料は、貪欲に何らかの形で適用した歴史がある。現在は、アルミ合金、複合材料、チタン合金などの軽量材料をその特徴を生かして、各々メリットを引き出す材料混在型の構造設計 (multi material design) を行う。これからの新しい輸送システムも、複合材料に匹敵する比強度を持つ新マルエージング鋼を含めて、

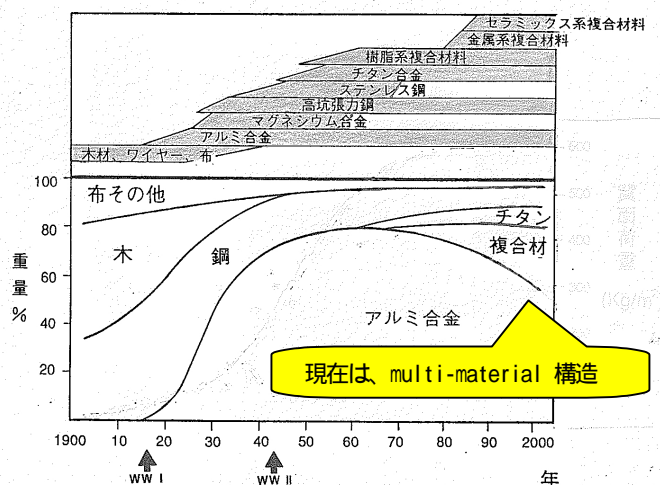


図3.3.1-2 航空機に使われた軽量材料の歴史

軽量化による省エネルギー、環境保全、資源保護、経済性を満足させるためにmulti-material designが必要になる。

### (3) 期待される将来輸送システムの目的と用途

上述の現状と改善点、環境保護と保全から将来輸送システムに期待される目的と用途を次にまとめる。

- ・ 自然環境保全及び資源保護と人間移動の利便性とを適合させた新型輸送手段の構築
- ・ 自動車の鉄、航空機のアルミニウム合金に代わるマルエージング鋼を含め、multi-material designによる最軽量構造の実現と省エネルギーの推進
- ・ 山間部町村および離島町村において、
  - 戸口から戸口への (door to door) **最短距離輸送システム**の創出
  - 僻地緊急医療のため**最速移送システム** (flying doctor) の整備
- ・ 新しいタイプのスポーツ、冒険、レジャー等の生活環境産業の創出
- ・ 自動車および航空機産業の裾野分野である軽自動車および自家用軽飛行機産業を、空陸両形態の融合で活性化し新規産業の創生を図る
- ・ 自動車技術と航空機技術の融合、更に両技術にまたがる高性能軽量材料の開発を通して新しい工学分野の発掘

### 3.3.2 目的・用途に適合するコンセプト

#### (1) 自動車と小型軽飛行機の融合

目的地に最短距離かつ最短時間で移動するには空を飛ぶのが一番適している。しかし、戸口から戸口への移動は自動車が適しているが、自動車は空を飛べない。両条件を満足できる空飛ぶ自動車 (Roadable Aircraft) が、検討を進めている将来輸送システムの目的と用途に適合するコンセプトである。

通常の航空機では離着陸に広大な場所 (空港) が必要で利便性に欠ける。一般の道路や広場で簡単に離着陸するためには、翼面荷重を小さくする必要がある。翼面荷重を小さくすることは大きい翼が必要になり、一般道路を走行する際、邪魔になる。図3.3.2-1に示すように、幅が狭く揚力を出せる新形態小型軽飛行機型、ヘリコプタ型、垂直離着陸 (VTOL) 型の3形態が考えられる。研究が進んでいる米国の検討結果をもとに、最適形態を分析した。

#### 自動車と軽小型飛行機の融合形態

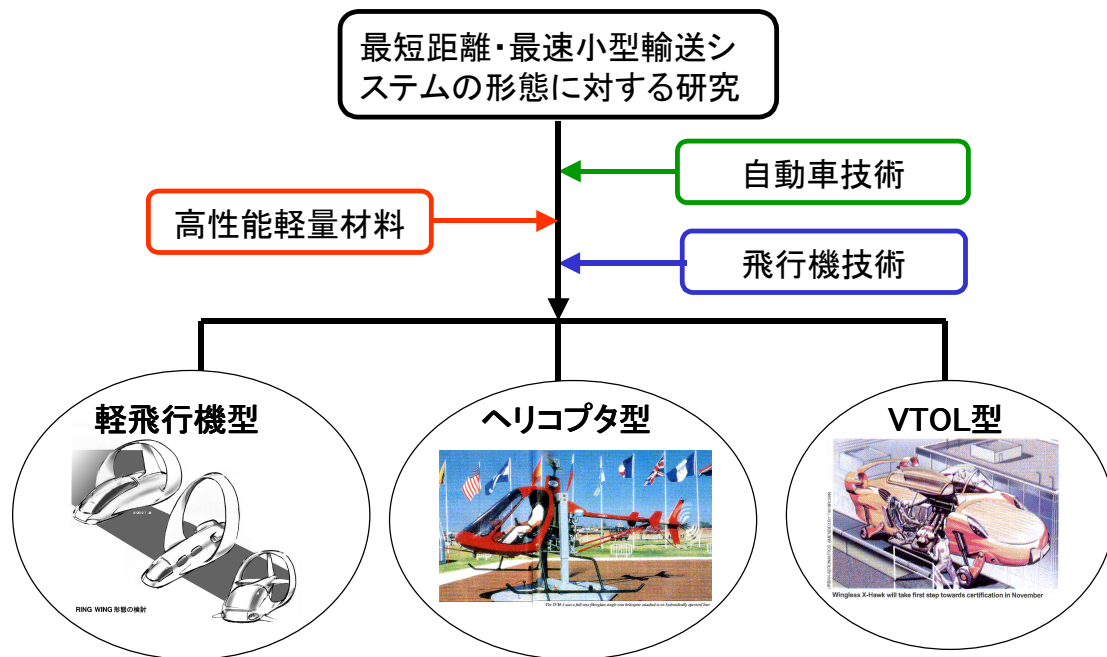


図 3.3.2-1 最短距離・最速自家用小型ビークル・コンセプトの3候補

#### (2) 最適形態の分析

21世紀は、行動範囲の拡大、移動の高速化に伴う生活スタイルの変化に対応して高速自家用ビークルが必要になる。わが国ではほとんど研究が行われていないが、米国ではNASAを中心に活発な研究が展開されている。彼らの研究結果では、乗用車と小型飛行機との両機能を兼ね備えたニュー・コンセプト「空飛ぶ自動車」が有望視されている。本スタディで検討している高効率動力伝達システムと新鋼材の適用対象として、このニュー・コンセ

プト・ビークルは絶好のターゲットである。

まず、移動速度の比較では、ターボファン・エンジンを搭載した高速小型自家用飛行機（Fast Personal Air Vehicle）が、往復距離にかかわらず移動速度が一番速い。往復距離が3000kmを越える遠い場合は、航空会社が運航する定期便が速く便利である。日常頻繁に行う短距離移動では、往復約200km以下のドア・トゥ・ドア移動は自家用自動車が最速、それ以上約740km以下の短時間移動には、レシプロ・エンジンを搭載した低中速小型自家用飛行機（Medium Personal Air Vehicle）が最速である。自動車と小型軽飛行機との両機能を持つ空飛ぶ自動車が、短距離移動の最適形態として期待できる。

ついで、経済性の比較では、定期旅客機の利用は評価項目すべての面で高価である。VTOL型やヘリコプタ型は機体価格が高く、自家用には適さない。また、ターボファンやターボプロップ・エンジン搭載型も機体価格が高価となり個人が購入するには不適である。移動回数が年間50回以下と少ない場合は自家用自動車がライフサイクルコスト上有利であるが、移動回数が年間150回以上と多くなると、レシプロ・エンジンを搭載した小型飛行機が有利となる。移動時間の短縮に大きい価値をおく場合は、自動車とターボファン単発機の組合せ形態が最適である。しかし、移動距離が50km以上、移動回数が年間100回以上を経済的に移動できる移動形態は、自動車とレシプロ単発機の両特性を兼ね備えた空飛ぶ自動車が最適である。

### （3）空飛ぶ自動車の海外での研究状況

米国では、これまで種々形態の空飛ぶ自動車が研究されている。形態を分類すると、次の4種類に分けることができる。

- 翼と自動車の分離型（Break-apart）
- 翼折りたたみ型（Fold-and-Go）
- コンパクト型（Compact）
- 垂直離着陸型（VTOL）

現在NASAの小型自家用機（Personal Air Vehicle Exploration）の研究では、一般道路を走ることができるRoadable Concept（上記分類の ）とVTOL Concept（ ）を中心に研究が行われている。

### （4）空飛ぶ自動車の技術的課題

前述したがVTOL型は機体価格が高価で、とても自家用にはならない。自家用には、低価格のレシプロ単発Roadable Aircraftが適している。その機体のイメージを図3.3.2-2に示す。

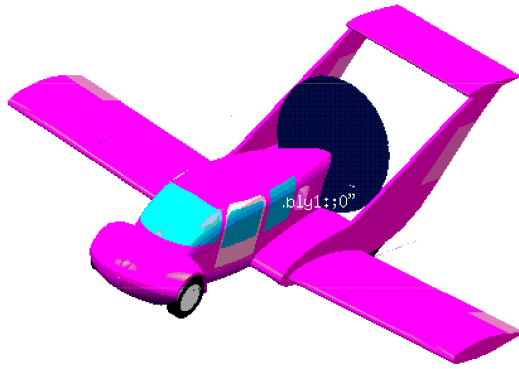


図 3.3.2-2 レシプロ単発 Roadable Aircraft のイメージ

このコンセプトの一つ目の技術課題は、地上走行とプロペラ推進飛行を同時に満たす高効率動力伝達システム (Dual-use drivetrain) である。図 3.3.2-3 にその検討例を示す。

二つ目の技術課題は軽量化である。現在の航空機データから推定した重量推算結果では、設計目標重量 500kg に対し、推算値は 586kg となり成立しない。アルミニウム合金を主材料とした現航空機機体技術に勝る軽量化技術が必要である。

本スタディで検討している高効率動力伝達システムと新鋼材マルエージング鋼を上記 2 技術課題に適用し、Roadable Aircraft の成立性を検討した。その検討結果を次項に示す。

### 3.3.3 空飛ぶ自動車

高強度鋼は、比強度が高張力鋼およびアルミ合金の約2倍、非衝突エネルギー吸収率で高張力鋼およびアルミ合金と同等を想定している。この鋼材は高張力鋼を主に主材料とする自動車とアルミ合金を主材料とする航空機の融合を図るニュー・コンセプト・ビークル＝空飛ぶ自動車を実現させることが期待される。ここでは、空飛ぶ自動車について初期的な実現性のある検討を実施し、形状案を示す。

小型航空機として、また日本の道路交通内で運用できるよう、当初は離陸時500kg以内の機体の成立性を考慮したが、質量成立性は厳しいものであった。そこで、今回の機体の目標となる現実的なイメージを作るため、既存機のデータを勘案した。その結果、全備質量800kgの機体構想の成立性が見通された。検討結果を表3.3.3-1に示す。

表3.3.3-2の検討の前提により、主翼面積16m<sup>2</sup>、2段折りたたみの主翼を持つ形状案を策定した。その形状案を図3.3.3-1に示す。

表3.3.3-2 検討の前提

項目	目標値	備考
全備質量	800kg	2名搭乗仮定
離陸滑走距離	300m	
着陸滑走距離	200m	
地上走行時全幅	2.5m以下	道路交通法による主翼折畳み時

性能について試算を実施した。空力性能を経験的算出法で推算し図3.3.3-2に示すミッションパターンに従い推算。航続距離約250n.mi.の見通しとなった。

実現のために今後残る課題として、推進システムの軽量化、抵抗低減努力による性能向上および航空機、自動車の両方を勘案した法規および安全性について考慮した。

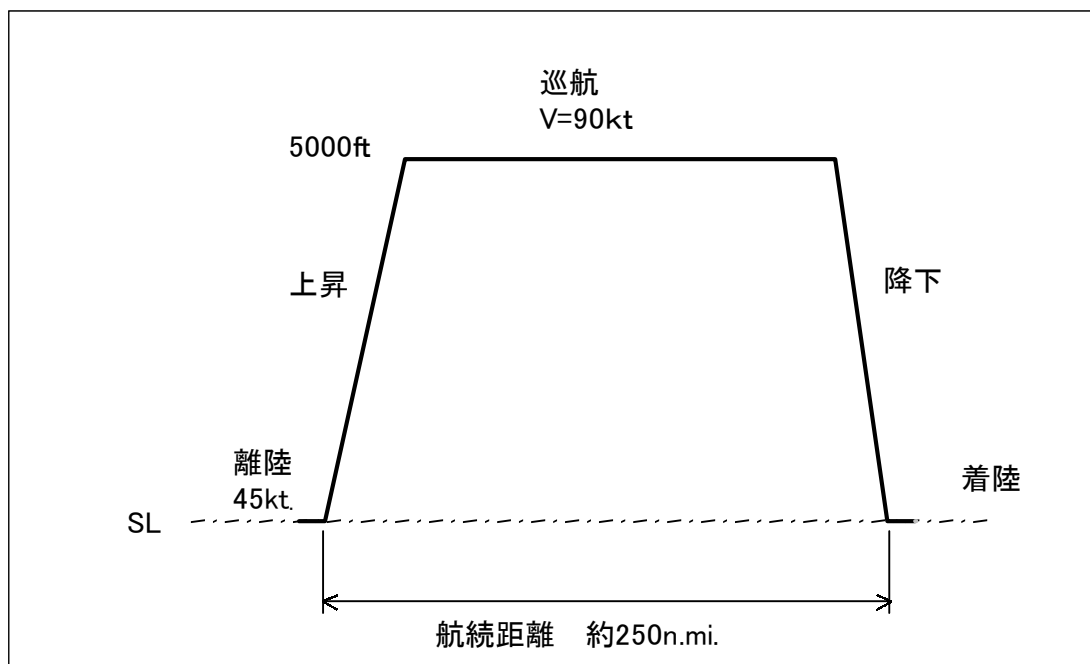


図3.3.3-2 飛行パターン

表3.3.3-1 自動車、航空機の比較

機種 (車種)	空飛ぶ自動車		自動車										航空機					軽飛行機		
	初期 全備 500kgカラ	修正 全備 800kgカラ	アルト (スズキ)	ムーブ (ダイツ)	プレオ (バル)	ヴィッツ (トヨタ)	シビック (ホンダ)	G109B (グロブ)	SF-25C (シャバ)	H-36 (ホマ)	17EII (グアル)	FA-200 (FHI)	セガ172	PA-28 (パイク)						
	500	800	973	1128	1164	1244	1438	850	650	770	850	1150	1111	1110						
全備質量 (kg)	500	800	973	1128	1164	1244	1438	850	650	770	850	1150	1111	1110						
空虚質量 (kg)	346	560	750	900	940	1010	1150	620	435	540	610	620	726	676						
翼面積 (m <sup>2</sup> )	10	16						18.95	18.2	15.2	17.6	14	16.17	15.8						
全幅, 主翼幅 (m)	5.5	10.6	1.475	1.475	1.475	1.660	1.695	17.37	15.3	16	17	9.4	11	10.67						
全長 (m)	5	7	3.395	3.395	3.395	3.640	4.285	7.92	7.6	6.85	7.78	8	8.2	7.25						
アスペクト比	3	7						15.9	12.9	16.8	16.4	6.3	7.5	7.2						
エンジン出力 (hp)	100	160	54	64	64	87	115	90	80	80	90	180	160	160						
(kW)	75	119	40	48	48	65	86	67	60	60	67	134	119	119						
燃料容積 (L)	-8	111	30	36	32	45	50	118.2	55	80	90	197	212	189						
(kg)	-6	80	23	28	24	34	38	85	40	58	65	142	152	136						
燃料質量比	0	0.1	0.024	0.024	0.021	0.028	0.027	0.100	0.061	0.075	0.076	0.123	0.137	0.122						
翼面荷重 (kg/m <sup>2</sup> )	50	50						45	36	51	48	82	69	70						
馬力荷重 (kg/hp)	5	5	18.0	17.6	18.2	14.3	12.5	9.4	8.1	9.6	9.4	6.4	6.9	6.9						
乗員 (人)	2	2	4	4	4	4	5	2	2	2	2	4	4	4						
(kg)	160	160	200	200	200	200	250	145	175	172	175	388	233	298						

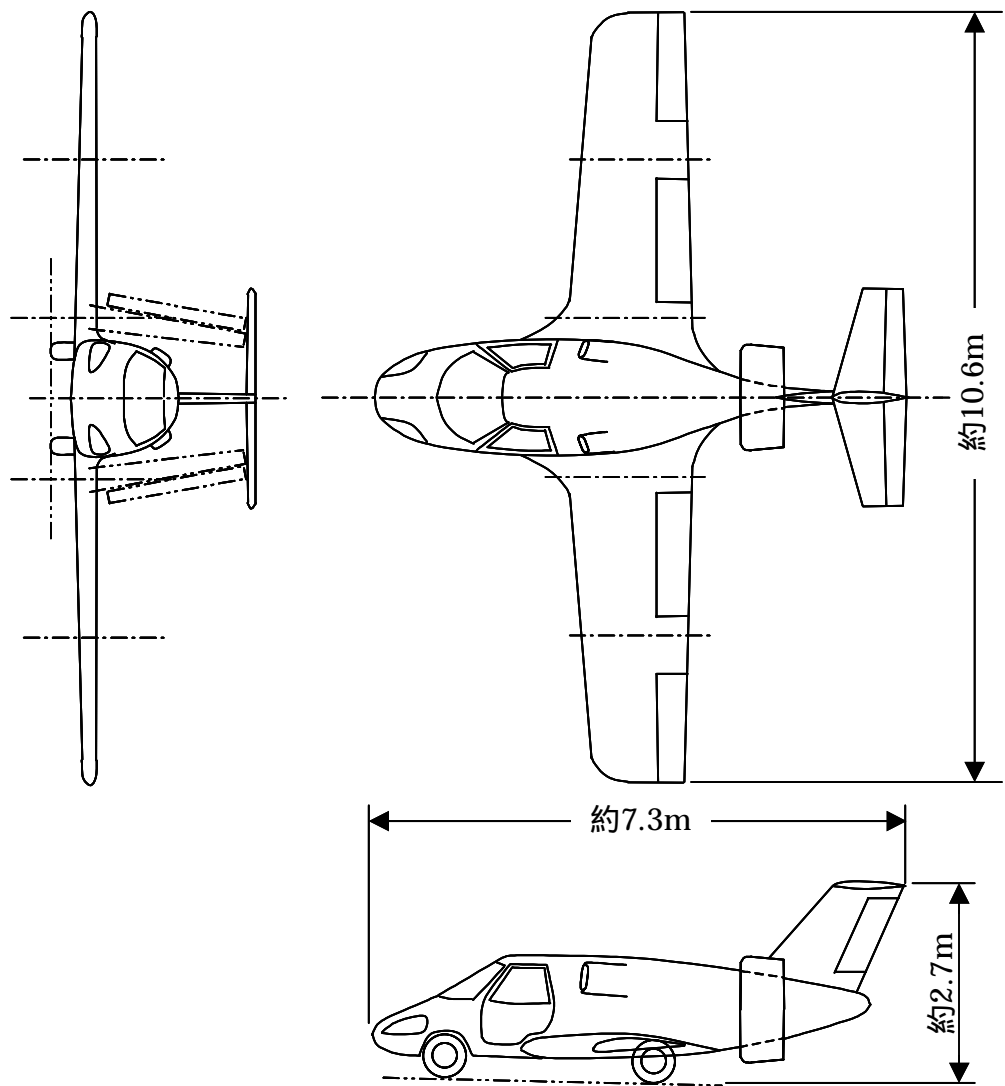


図3.3.3-1 形状案



### 3.3.4 動力伝達システム 空飛ぶ自動車のドライブトレーン

2次元平面の地上を走る自動車でありながら、ある時は3次元の空を飛び、また地上に降り立って走る「空飛ぶ自動車」のような、まったく異なる環境間を移動するコンパウンドビークル(図3.3.4-1参照)の動力伝達システムの計画には、さまざまな要素や問題点が存在する。

#### (1) 空飛ぶ自動車の動力伝達システム

空飛ぶ自動車の動力源およびその伝達機構に関してはいくつかの考え方がある。基本的なものは、1基のエンジンから動力を分岐するもので、プロペラ駆動による飛行と、車輪を駆動して走行を切り替える方式である。

#### (2) 動力伝達機構の選択

これに基づき空飛ぶ自動車に適する動力伝達機構・装置について選択を行った。各形式のうちで、小型飛行機自動車に最も適していると思われるものは動力分岐 ハイブリッドタイプである。



図3.3.4-1 空飛ぶ自動車の検討例

その特徴は、

- ・部品点数が少ない 軽量化、高信頼性、機体構造簡易化
- ・機械要素の除去 効率の落ちるジョイント、ギヤなどの使用率が下がる
- ・走行の制御が楽 増減速、回生、差動
- ・性能向上 燃費向上(発電時定回転)
- ・各種エンジンに対応できる

図3.3.4-2に示す案ではエンジン後端にジェネレータを直接装着し、そのシャフト(ジェネレータ貫通)でプロペラも駆動し飛行する。走行時は電力でホイールモーターを駆動し、作動、回生する。これによって変速・減速・差動装置・クラッチ(走行側)などや走行用操舵機構がなくなり、その分軽量化と信頼性向上につなげることができる。

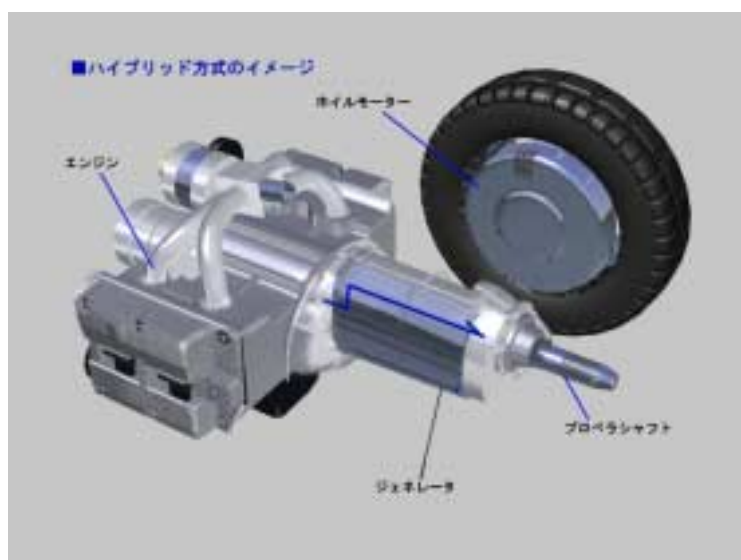


図 3.3.4-2 動力分岐ハイブリッド方式のイメージ

### (3) 飛行機自動車の動力伝達システムのまとめ

可能性のある動力伝達システムを検討したが、空飛ぶ自動車は実現不可能な乗り物ではない。ここでは5年程度以内で実現できるレベルを目標とした案を検討している。従来技術を50、新規技術を50と言ったイメージである。今後はできるだけ従来の自動車、飛行機に性格をあてはめるのではなく、新しい性格を持つ交通機関として開発したいところである。

### (4) 今後の技術課題

#### 空飛ぶ自動車自身の問題点

空飛ぶ自動車の抱える問題点は、技術的な問題に加えて対法律・法規、各種の規則・通達、環境、操縦人口などや、商品としての認識が少ないなど複層的、立体的である。技術的な検討と同じ比重で並行して、それらの問題を整理検討しておく必要がある。

#### 動力伝達系の技術的問題点

技術的な問題点は決定的に難しいものではなく、実現を5年程度内とするならば、実在のエンジンでプロペラを回転させ、(当面)副次的に車輪を駆動できればよい。しかし新たな交通機関としての価値を問うのであれば、駆動系を最適なものとするためにも高効率ジェネレータ、ホイールモーター、電子制御システムなど軽量で信頼性のある部品の開発と、システムとして熟成するところが今後の課題(費用、時間、開発体制)である。

#### 軽量化などの性能向上策

どのような構成をとっても、必ず重量のある金属部品(ギヤ、シャフトなど)が存在する。それらを高強度の軽量化材料を使って最適化設計を行うか置換することで、性能向上が図れる。性能とは、速度や加速力など運動能力ばかりではなく、燃費、騒音、航続力など、乗り物として普及するために必須なアイテムである。

### 3.3.5 鋼材開発目標への反映

降伏応力 1,860Mpa を維持し、薄板の伸び 5 %以上の開発目標は、自動車の軽量化及び燃費低減に十分寄与できる性能である。また、アルミニウム合金を凌駕し、チタン合金や複合材料に匹敵する性能であり、軽量化が必須である航空機や空飛ぶ自動車に適用できる。新しい製造プロセスで試作したマルエージング鋼は、この開発目標を達成しているので、軽量材料として十分活用できる。

## 4 . スタディの今後の課題及び展開

### ( 1 ) 新マルエージング鋼厚物部品の試作

燃費向上を狙ったトランスミッションの高効率化技術開発のひとつに多段化がある。手動変速機MTで現5段から7段へ、自動変速機ATでは現4段から8段への多段化が研究開発されている。多段化はギアの数が増え重量増のペナルティがある。強度が高い新マルエージング鋼を用いれば軽量化ができ、重量増を抑えることができる。ただし、マルエージング鋼の厚物部品は材料生産及び成形加工が難しいので、部品試作により仕上精度及び性能を確認する必要がある。試作する部品は、寸法精度と強度確認を行う変速機のギア（図4.1 参照）及び複雑形状の加工性確認を行うコンロッド（図4.2 参照）が適当である。



図4.1 トランスミッション・ギアの例



図4.2 コンロッドの例

### ( 2 ) Multi-material design の手法開発

軽量化を図り燃費を向上させるには、いろいろな種類の鋼材、アルミニウム合金、マグネシウム合金、チタン合金、複合材料の中から適材を選ぶ必要がある。従って、極端な言い方をすれば、鋼材だけの使用、アルミニウム合金だけの使用という設計では、最適な解は得られない。強度、剛性、耐久性、耐損傷性、成形加工性、コストなど多様な評価を経て材料を決める必要がある。特に、最近では省エネルギー・省資源が要求され、コスト面の評価にはLCA（Life Cycle Assessment）が必須である。最適な解は、いろいろな材料が混在する車体となる事が十分予想でき、最適設計手法としてMulti-material designの開発が必要である。

### ( 3 ) 振動騒音軽減法の技術調査

燃費向上対策としてトランスミッションの多段化が進められている。特に、自動変速機ATではその傾向が強く、コンパクト化及び軽量化がますます必要になる。その結果、剛性不足に陥りやすく振動や騒音レベルが高くなり、乗り心地が悪くなる。軽量化を進めながら、同時に振動騒音レベルを低減する技術につき調査を行い、技術開発の方向を検討する必要がある。

## あとがき

地球温暖化対策の世界的要請により、改めて自動車の軽量化による燃費向上に対する総合的取り組みが急務となっている。本スタディは、ボディ及びシャーシに比べると、これまで比較的手がつけられていなかった駆動軸等動力伝達システムの高効率化に着眼して、高張力鋼やアルミニウム合金より更に軽量化が可能な、マルエージング鋼の改質による自動車適用への可能性について総合的検討を行った。その結果、以下の成果を得ることができた。

### 1) 動力伝達システムの技術動向及び特許の調査

変速機を中心とした動力伝達システムの高効率化技術及び摩擦低減化技術の可能性について技術動向を調査した。とくに、無段変速機(CVT)の技術動向については特許調査を行った。また、マルエージング鋼の強靱化機構についても文献調査を行い、延性付与のための改質指針を得た。

### 2) 動力伝達システムの高効率を目的とした新鋼材の開発

マルエージング鋼の強化機構の組み合わせとその最適化により、加工熱処理とその後の冷間加工および時効処理により、延性に富んだ薄板状の新鋼材を開発した。その機械的特性および組織分析評価により、目標値をクリアできることを示した。また、厚物についても本方法による改質が可能である見通しを得ることができた。

### 3) 適用化研究

新開発マルエージング鋼をボディ及びシャーシに適用すれば軽量化効果は大きい、エンジンおよび駆動系部品に適用しても、回転運動を伴うため軽量化量に比べて燃費低減効果が大きい。また、LCA解析により、素材製造エネルギーが大きくても、走行距離が大きくなると走行エネルギー減少効果が現れてくることを示した。更に、新鋼材を空飛ぶ自動車に適用すれば、800kg程度の重量が実現可能であることを試設計により示した。

以上のように、本スタディでは、いくつかの視点から技術動向調査を行うとともに、実際に改質マルエージング鋼の試作を行い、エンジン及び駆動系部品に適用可能な厚物の製造についても開発指針を与えることができた。今後は、コンロッドやギア等の試作を通して実用化段階にまでステップアップしていくことが可能と考えられる。また、LCAやMulti-material Designによる最適設計手法により、自動車軽量化に対する総合的取り組みにも資するところが大きいと考えられる。

今回のスタディでは(財)機械システム振興協会を始め、様々な方々の応援を頂いて、今後の研究開発に繋がる貴重な糸口を得ることができた。この場を借りて関係各位に改めて感謝申し上げます。

(財)機械システム振興協会 システム開発 14-F-11

駆動軸等動力伝達システムの高効率化に関するフィージビリティスタディ成果報告書

発行 平成15年3月

委託元 (財)機械システム振興協会

発行・編集 スタディ実施委員会

委員長・プロジェクトリーダー 金沢工業大学 副学長 教授 堀 幸夫

編集事務局(受託先)

学校法人 金沢工業大学 研究支援機構事務局

〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1

076-294-6719 Fax 076-294-6721