

## 曲がり部を有する管路における通信ケーブルの 送通過程に関する一検討\*

霜 幸雄<sup>\*1</sup>, 富田 侑嗣<sup>\*2</sup>  
佐藤 恵一<sup>\*3</sup>, 堀井 清之<sup>\*4</sup>

### A Study on Installation Process of Telecommunication Wire into Conduit with Bends

Yukio SHIMO<sup>\*5</sup>, Yuji TOMITA,  
Keiichi SATO and Kiyoshi HORII

<sup>\*5</sup> NTT-ME Hokuriku Co., Ltd, 1-43-1 Masuizumi, Kanazawa-shi, Ishikawa, 921-8025 Japan

Modeling of phenomena and derivation of basic equations have been described about the installation of parachute attaching telecommunication cable in the conduit with bends using spiral airflow. It was clarified that in the bends relatively high friction force generated by contacting and/or attaching the cable to the conduit (pipe) wall in a limited distance yield to a "jump" in the tensile force exerting the cable. At the same time, the evaluation of the friction coefficient between the cable (and/or parachute) and the pipe wall was based upon the hypothesis that an efficient installation of the telecommunication cable using the spiral airflow owed to its reducing effect of the friction force. Through the analysis conducted, the availability of the numerical simulation was demonstrated.

**Key Words:** Spiral Airflow, Telecommunication Wire Installation, Parachute, Conduit with Bends, Modeling of Cable Motion

#### 1. 緒 言

ビルや一般住宅などに用いられている配管への配線方法としては、スチールワイヤや合成樹脂ワイヤを管路内に押し込み、その先端に通信線を付けて引き戻すといった方法が従来、おもに使用されてきた。このような方法は、短く、真つすぐな管路へのみ適用可能であり、曲がり部がある場合はジョイントボックスなどを用いて難点を解消させてきた。しかしながら、配線ケーブルが高度情報化社会への実現に向けてメタルケーブルから光ファイバケーブルへと変更されるに伴い、配管に対しても曲がり部があってもジョイントボックスなどを用いない経済的かつ効率的な配線方法が要求されてきている。

これらへの解決方法の有力なものとして、管路に空気を流してケーブルを直接搬送する方法<sup>(1)(2)</sup>が検討されたが、この場合、直線流(本論文では通常使用され

る旋回なしの流れを直線流と呼ぶ)状態を用いるため激しい乱れを有する流れとなり、ケーブルは管内壁とこすり合い曲がり部で止まってしまう、その送通距離を伸ばすことが困難になっている。

これに対して、著者らは環状の空気流入部とそれに続く漸縮小のコーン状ノズル部をもつ空気流発生装置<sup>(3)</sup>を考案した。この装置ではコアンダ効果を利用することにより空気流の逆流防止を可能にすると同時にノズルによってスパイラルフロー<sup>(4)</sup>を発生することができた。さらに送通効率を高めるために、リード線またはケーブルの先端にパラシュートを付けて搬送することを試み<sup>(5)</sup>、従来に比べて約2倍の搬送力と送通距離、さらに曲がり部を有するような管路内への送通にも実用上成功している。

本研究では、曲がり部を有する管路でのスパイラルフローを用いたパラシュート方式のケーブル送通機構が十分に明らかにされていないことを踏まえ、この種の管路における送通過程のモデル化と基礎式の定式化を行った。さらに数値解析によるシミュレーションを試み、送通過程のモデル化および導出した基礎式の妥当性などを確かめた。

\* 原稿受付 2000年5月10日。

<sup>\*1</sup> 正員, NTT-ME 北陸(☎921-8025 金沢市増泉1-43-1)。

<sup>\*2</sup> 正員, 九州工業大学(☎804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)。

<sup>\*3</sup> 正員, 金沢工業大学(☎921-8812 野々市町扇が丘7-1)。

<sup>\*4</sup> 正員, 白百合女子大学(☎182-0001 調布市緑ヶ丘1-25)。

E-mail: simo@me-hqs.hokuriku.west.ntt.co.jp

## 2. 曲がり部を有する管路における 通線過程の基礎式

スパイラルフローによる曲がり部をもつ管路へのケーブル送通について検討する。ただし、本解析の目的は、全体を完全にシミュレートすることではなく、曲がり部における送通過程をモデル化することとスパイラルフローを用いた通線性が摩擦減少効果の仮定の下に説明しうることを示すことにある。設定したおもな仮定は、次のとおりである。(1)ノズル出口における圧力は通線中を通して一定である。(2)スパイラルフローは、その強度に応じて摩擦減少効果をもち、下流方向に指数関数的に減衰する。なお、ここで対象とするスパイラルフローの旋回は比較的弱いものでありスワール数  $S=0.3$  程度と評価される<sup>(4)</sup>。ここに、 $S=0.5G/(1-G^2/4)$ 、 $G=V_{\theta \max}/V_{z \max}$  で、 $V_{z \max}$  と  $V_{\theta \max}$  はそれぞれ軸方向および旋回方向の最大速度成分である。

**2.1 気流の方程式** 管内の気流は、等温で圧力波の伝ば速度に比して十分遅いとすれば、気流に関する連続および運動方程式は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\lambda \rho u^2}{2D_c} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $\lambda$  は管摩擦係数であり、レイノルズ数  $Re = \rho u D_c / \mu$  の関数である。また、 $\rho$  は気体の密度、 $\mu$  は気体の粘度、 $t$  は時間、 $x$  は管路軸に沿っての距離、 $u$  は管を通過する気体の平均速度、 $p$  は圧力である。 $D_c$  は等価管路直径であり、管の断面においてケーブルが存在しないとき、 $D_c$  は管の直径  $D$  に等しい。ケーブルが存在する場合、 $D_c = D - d_w$  である。ここに、 $d_w$  はケーブルの直径である。

ここに、空気が完全ガスとすれば状態方程式から  $p = \rho RT = \rho u_c^2$  であり、 $u_c = \sqrt{RT}$  は等温での圧力波の伝ば速度で、 $R$ : ガス定数、 $T$ : 絶対温度である。ゆえに、 $u \ll u_c$  とすれば、式(2)において

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho u^2 \ll \frac{\partial}{\partial x} \rho u_c^2 = \frac{\partial p}{\partial x}$$

であるから、圧力項に比べ小さいとして無視した。このとき式(1)、(2)は水撃方程式と同形であり、特性曲線法で数値計算される。計算では初期条件として、計算始めで管内の圧力は大気圧、流速は零とした。境界条件は管入口で圧力一定(供給空気圧)とし、管出口でも圧力一定で大気圧とした。曲がり部における気流の圧力降下量は、Ito<sup>(6)</sup>による公式を用いて計算する。

パラシュートは移動境界であり、その前後の気体流の条件は時刻  $t$  で求められているパラシュート速度  $\dot{Z}$ 、パラシュート前後の圧力差  $\Delta p$  によって与えられる。以上より、微小時間  $\Delta t$  後の  $t + \Delta t$  における管入口とパラシュート後面間およびパラシュート前面と管出口間の気体流がそれぞれの与えられた境界条件の下で計算される。これより  $t + \Delta t$  でのパラシュート前後差圧  $\Delta p$  が求められ、この  $\Delta p$  によってパラシュートとケーブルを  $\Delta t$  の間移動させる。パラシュート前面が管出口に達すると計算終了とした。

**2.2 パラシュートとケーブルの運動方程式** パラシュートの運動方程式は、次式で与えられる。

$$m \frac{d\dot{Z}}{dt} = F_p - R_p - I - mg \cos \theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、ケーブルの方程式は、次式のようなになる。

$$\frac{d(\sigma \dot{Z})}{dt} = F_w - R_w + I - \sigma g Z \cos \theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $m$  はパラシュートの質量、 $\sigma$  はケーブルの線密度、 $Z$  はケーブルの送通長さ、 $\dot{Z}$  はパラシュートの速度、 $I$  はパラシュートに作用するケーブルの張力、 $\theta$  は管の鉛直との傾き角を表す。そして  $R_p$  および  $R_w$  はそれぞれパラシュートおよびケーブルに働く摩擦力である。 $F_p$ 、 $F_w$  はパラシュートとケーブルに作用する流体力で2.4節で与えられる。ここに、添字  $p$  はパラシュート、 $w$  はケーブルを表す。なお、ケーブル先端とパラシュートの動きは連動しており(3)、(4)両式を組合せることにより  $I$  は消去され、 $\dot{Z}$  に関する微分方程式となる。

**2.3 パラシュート周りの流れ** 気流はパラシュートの位置において不連続に変化すると考える。そこで、パラシュートの前後での流速に関する境界値が必要になり、次式により与えられる。

まず、気流の質量保存則によりパラシュート前後で次式が成立する。

$$(A - A_w) \rho_R (u_R - \dot{Z}) = \rho (A - A_c) u_s \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$A \rho_F (u_F - \dot{Z}) = \rho (A - A_c) u_s \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $\rho = (\rho_F + \rho_R)/2$ 、 $A$  は管の断面積、 $A_w$  はケーブルの断面積、 $A_c$  はパラシュートの実質断面積で、 $\rho_F$ 、 $\rho_R$  はそれぞれパラシュート前後での気体密度、 $u_F$ 、 $u_R$  はそれぞれパラシュート前後の気流速度、そして  $u_s$  はパラシュートから漏れていく気流速度で、次式により与えられる。

$$u_s = \frac{1}{(1-s)\sqrt{\xi}} \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $s$  はパラシュート実質断面積と管断面積の比 ( $A_c/A$ ) であり、 $\xi$  は圧力降下係数<sup>(7)</sup> で次式で与えら

れる。

$$\xi = \frac{6s}{(1-s)^2} \frac{1}{Re^{*1/2}} \dots\dots\dots(8)$$

ここに、レイノルズ数  $Re^*$  は  $Re^* = u_s d / \nu$  で定義され、 $d$  はパラシュートの繊維直径、 $\nu$  は気体動粘度である。

**2・4 流体力** 流体による推進力  $F_p$ 、 $F_w$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$F_p = A_c \Delta p \dots\dots\dots(9)$$

$$F_w = \int_0^z \tau_i \pi d_w dx \dots\dots\dots(10)$$

ここに、 $\Delta p$  はパラシュート前後の圧力差  $\Delta p = p_R - p_F$ 、添字  $R$  および  $F$  は後部、前部を表している。また、 $\tau_i$  はケーブルが受ける壁面せん断応力であり、図1に模式的に示されるように圧力こう配による定常な同心環状流によるせん断応力  $\tau_a$  と管内ケーブルの同心直線運動によるせん断応力  $\tau_q$  との和として計算される。すなわち

$$\tau_i = \tau_a + \tau_q \dots\dots\dots(11)$$

であり、 $\tau_a$ <sup>(8)</sup> と  $\tau_q$  は、次のようになる。

$$\tau_a = \lambda_a \left\{ -\frac{1+k}{4 \ln k} - \frac{k^2}{2(1-k)} \right\} \frac{1}{8} \rho u_a |u_a| \dots\dots\dots(12)$$

$$\tau_q = \frac{2\mu \dot{Z}}{kD \ln k} \dots\dots\dots(13)$$

なお、 $k = d_w / D$  であり、円環状流路における管摩擦係数  $\lambda_a$  はレイノルズ数  $Re = (1-k) \rho u_a D / \mu$  の関数で次式で与えられる。 $u_a$  は円環流による平均速度である。

一方、 $u_q$  をケーブルの同心直線運動による気流の平均速度とすると、クエット流れの式から、

$$u_q = -\left( \frac{1}{2 \ln k} + \frac{k^2}{1-k^2} \right) \dot{Z} \dots\dots\dots(14)$$

$u$  は式(1)~(2)から計算されるので、軸速度  $u_a$  は  $u = u_a + u_q$  の関係により決定される。なお  $Re \geq 2000$  ではおおそ乱流になるので、その領域では上記のモデルは流れを完全には表現しないが、ここでは近似的に  $\tau_a$  のみに乱流を考慮することとし、 $\lambda_a$  を次の実験式<sup>(9)</sup>で与える。

$$\lambda_a = 0.22(1-k)^{0.1} Re^{-0.2} \dots\dots\dots(15)$$

なお、層流の場合は次式となる。

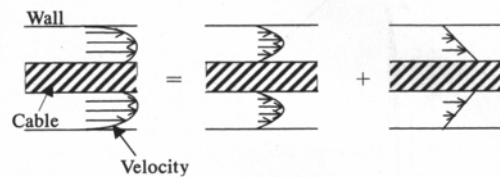


Fig.1 Schematic showing air velocity distribution around a cable in the conduit

$$\lambda_a = \frac{64(1-k^2)/Re}{1+k^2 + \{(1-k^2)/\ln k\}} \dots\dots\dots(16)$$

**2・5 摩擦力** パラシュートとケーブルに作用する固体摩擦力は、それぞれ次のように置く。

$$R_p = f_p A_p |\Delta p| \dots\dots\dots(17)$$

$$R_w = \int_0^z f_w \sigma g dx \dots\dots\dots(18)$$

ここで、 $A_p$  は管内壁とパラシュートの接触面積であり、 $A_p = \pi D l$  で表され、 $l$  はパラシュートと管の接触長さである。 $\sigma$  はケーブルの線密度、 $g$  は重力の加速度である。また、 $f_w$  および  $f_p$  は、それぞれケーブルとパラシュートの管内壁とのクーロン摩擦係数であり、本研究ではこの両者を等しく  $f_w = f_p$  と仮定している。

**2・6 スパイラルフローにおける摩擦力** ケーブルの送通におけるスパイラルフローの効果は二とおり考えられる。一つは摩擦力を減少させること、もう一つは流体力を増すことである。スパイラルフローには空気流と管との摩擦も減少させている可能性もあり、これらのことにより、より大きな流体力を創りだしている<sup>(10)</sup>。しかしながら、送通の初期段階においてはケーブルに及ぼす流体力の割合は小さい。したがって、送通初期段階におけるスパイラルフローのおもな効果は、管壁との間に働く摩擦力を減少させることであると考えられる。ここで、スパイラルフローの旋回が下流方向に指数関数的に減衰し、摩擦係数  $f_w$  あるいは  $f_p$  が次式で  $f_s$  の形で与えられると仮定する。

$$f_s = f \{1 - \exp(-S_N \cdot x^*)\} \dots\dots\dots(19)$$

ここで、 $f$  は通常の直線流 ( $S_N = \infty$ , 旋回なし) 時のケーブルあるいはパラシュートと管内壁とのクーロン摩擦係数であり  $x^* = x/L$ 、 $L$  は管路の長さ、そして  $S_N$  はスパイラルの減衰係数である。この  $S_N$  値として、後述される本論文の計算ではスパイラルフローを使ったケーブルの送通の実験データから 1.6 と設定した。しかし、 $S_N$  の値をより適合させるためには、さらに詳細な研究と議論が必要と考えられる。Baker<sup>(11)</sup> は回転流の減衰を指数関数で表したが、ここでは前述のようにスパイラルフローにおけるケーブルの摩擦係数も指数関数によって表せると仮定した。スパイラルフローは、直線流に比して急しゅんな軸速度分布と乱れの比較的少ない速度をもつため、ケーブルは管の軸中心付近に比較的安定的に位置付けられ、低い  $S_N$  値をもつと評価できる。

3. 曲がり部およびパラシュート部における送通過程のモデル化

3・1 曲がり部における送通実験 曲がり部における送通過程をモデル化するためにケーブルの運動をビデオ観察した。観察は図2に示すような1箇所の曲がり部をもち全長8.3 m、管径22 mm、曲がり部の曲率半径110 mmの管路で行われた。観察位置は空気発生装置から4.0~4.3 mの曲がり部位置である。このときの供給空気圧  $P_a$  は245 kPaでナイロンロープ直径2 mm(線密度  $1.8 \times 10^{-3}$  kg/m)にパラシュート<sup>(3)</sup>(直径28 mm)を付けて行った。

その結果の一例を図3に示す。ここに、 $F_p$ は高速ビデオのフレーム速度を表す。図3から曲がり部においてケーブルが管壁面に沿って有限な長さにわたって密着していることが確認できる。また、この曲がり部を通過するときのスパイラルフローによるケーブルに働くけん引力も計測した。計測は図2に示すようなテンションメータを固定し、ケーブルの先端にパラシュートを付けて行った。その結果、図4に示すように

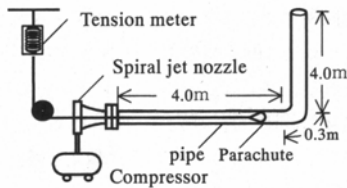
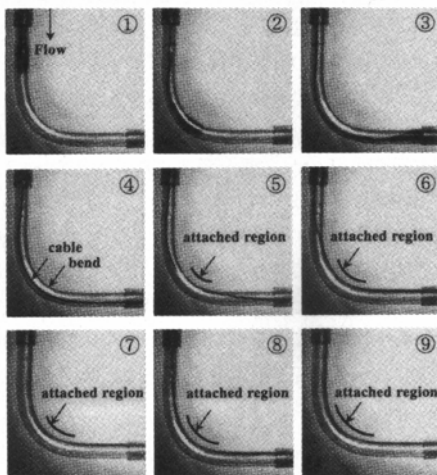


Fig. 2 Measurement system of drag force in parachute system



$P_a=245\text{kPa}$ ,  $F_p=4500$  frames/s

Fig. 3 Cable motion in pipe bend using spiral flow

曲がり部を通過する点で張力は約15%低下すること、すなわち曲がり部における摩擦力により張力に不連続的な跳びが存在することを指摘できる。

3・2 曲がり部におけるケーブル張力 ケーブルに対して、曲がり部において摩擦力の不連続性(跳び  $\Delta R_b$ )があるとみなし、これを式(4)の右辺に考慮する。 $\Delta R_b$ を求めるため、曲がり部におけるケーブルの通線過程をモデル化すると図5のようになり、次式が与えられる。

$$T^+ \cos 45^\circ + T^- \cos 45^\circ = N \dots\dots\dots(20)$$

$$T^+ = T^- + f_b N \dots\dots\dots(21)$$

式(20)、(21)より

$$T^+ = \frac{\sqrt{2} + f_b}{\sqrt{2} - f_b} T^- \dots\dots\dots(22)$$

ただし  $0 < f_b < \sqrt{2}$  である ( $T^+ > T^-$ )。

よって、曲がり部での張力の跳び  $\Delta R_b$  は次式で表される。

$$\Delta R_b = T^+ - T^- = f_b N = \frac{2f_b}{\sqrt{2} - f_b} T^- \dots\dots(23)$$

ここで、 $T^+$ : 曲がり部下流側でのケーブル張力、 $T^-$ : 曲がり部上流側でのケーブル張力、 $N$ : ケーブルがバンドを押し付ける力、 $f_b$ : ケーブルと曲がり部壁面間の摩擦係数である。

4. 送通シミュレーション

送通シミュレーションは図6(a)に示すように垂直

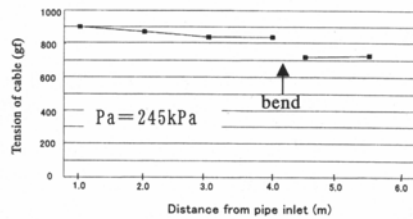


Fig. 4 Tension jump in bend portion

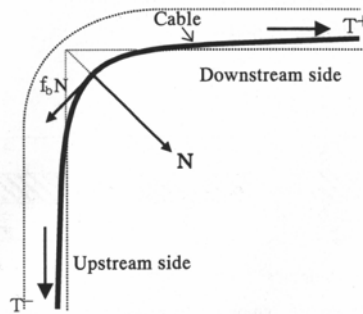


Fig. 5 Modeling of a cable in bend

部分1箇所と三つの曲がり部をもつ管路に対して行った。送通試験用管路は長さ5mの直管3本と長さ15mの直管1本の全長30mからなり、管径は16mm、曲がり部の曲率半径はいずれも90mmである。入口部での空気供給圧力を245kPa、空気流量を65l/minとし、ケーブルは直径1.8mmで線密度 $10.1 \times 10^{-3}$  kg/mとした。

まず数値シミュレーションと同じ条件でのモデル実験による計測結果を示す。ゲージ圧245kPaの空気をスパイラルフロー発生ノズル<sup>(12)</sup>を用いて供給したとき、送通時間は約5sで貫通した。なお、このときパラシュートを付けない場合は送通に3min要した。しかし、同じ条件で $S_N = \infty$ に対応する直線流を使った場合、ケーブルは管内壁とこすり合いパラシュートは曲がり部などで停止し管路を貫通することはできなかった。

ついで、上述の条件の下で送通シミュレーションを試みた。計算結果の一例として図7に直線流を用いたときの空気とパラシュートの速度を示す。ここでは、式(19)において $S_N = \infty$ 、つまり $f_s = f$ である。これ

によると、通線はパラシュートが3番めの曲がり部に達する前に止まっていることがわかる。空気流とケーブルの動きに対する曲がり部の影響は明白である。図8には $S_N = 1.6$ (図9参照)のスパイラルフローの場合を示す。このとき送通は完了している。管の入口と出口での空気速度の差は空気密度の差による。以上の結果より、式(19)におけるスパイラルフロー減衰係数 $S_N$ の大きな効果が確かめられる。図9は、この減衰係数 $S_N$ に対するパラシュートの管出口までの到達時間をプロットしたものである。これより、 $S_N$ が2より大きいと送通効率が急激に悪くなることがわかる。このような数値解析結果から、スパイラルフローによる摩擦力軽減効果により送通距離が大きく変化することが確認できた。

これらの結果は上述のシミュレーション結果とよく符合しており、曲がり部におけるケーブルのテンションの跳びそしてスパイラルフローによる摩擦減少効果に関するモデル化が十分な妥当性を有することがわかる。

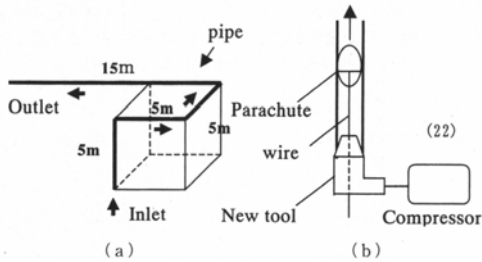


Fig. 6 Typical pipe and flow system

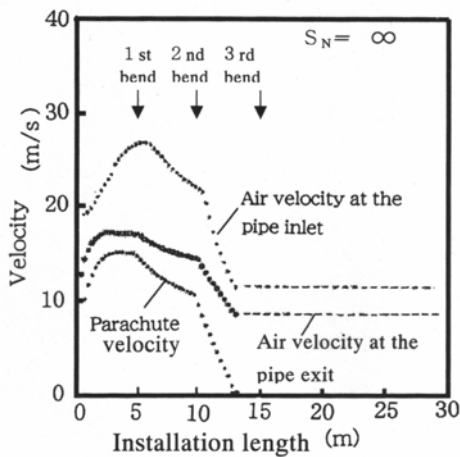


Fig. 7 Numerical simulation of air and parachute motion for a conventional turbulent flow

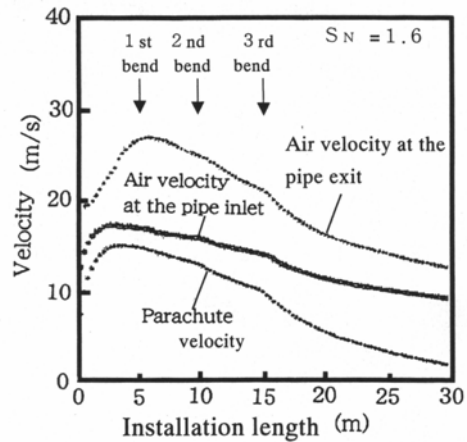


Fig. 8 Numerical simulation of air and parachute velocities for a spiral flow

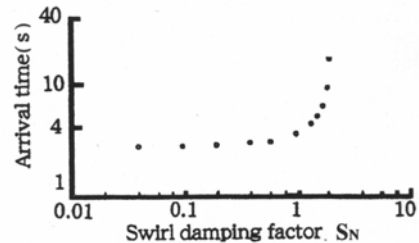


Fig. 9 Arrival time of cable vs. swirl damping factor

## 5. 結 論

通信ケーブル敷設において重要な曲がり部を有する一般管路へのスパイラルフローを用いたケーブル送通機構の解明を目的として、実験的および数値的検討を行った。本論文の主要な結果をまとめると次のようになる。

(1) 曲がり部を有する管路でのスパイラルフローを用いたパラシュート方式の通信ケーブル送通に關し、現象のモデル化と基礎方程式の定式化を行った。

(2) 曲がり部においては、ケーブルの管壁への付着が有限長さにわたり生じることにより比較的大きな摩擦力が発生する。そのためケーブル張力に曲がり部での跳びが引き起こされることを実験的に示した。

(3) スパイラルフローを用いた通信ケーブル送通の有効性がその摩擦力軽減効果にあるとの仮定の下に、ケーブルあるいはパラシュートと管内壁間の摩擦係数を評価し数値シミュレーションによりその有効性を示した。

## 文 献

- (1) Hornung, S., Cassidy, S. A., Yennadiou, P. and Reeve, H. M., The Blown Fiber Cable, *IEEE J. Sel Areas Commun.*, 4-5(1986), 679-685.
- (2) 神崎英明・大前和哉・芦野正俊・田山幸雄・神田幹雄・宮島幸男・大谷寛・鳥居昭彦・日野連海, エアブロンファイバ (ABF) システムの開発, 古川電工時報, 85(1989), 55-61.
- (3) Horii, K., Matsumae, Y., Ohsumi, K., Cheng, X. M., Kage, S. and Hashimoto, B., Novel Optical Fiber Installation by Use of Spiral Airflow, *Trans. ASME, J. Fluid Eng.*, 114(1992), 375-378.
- (4) Horii, K., Matsumae, Y., Cheng, X. M., Takei, M., Yasukawa, E. and Hashimoto, B., Focusing Phenomenon and Stability of Spiral Flow Jet, *Trans. Jpn. Soc. Aero. Space Sci.*, 33-102(1991), 141-153.
- (5) 霜幸雄・佐藤恵一・堀井清之, スパイラルジェット利用流体搬送方式通信ケーブルに関する研究 (パラシュート併用形), 噴流工学, 16-3(1999), 4-12.
- (6) Ito, H. Pressure Losses in Smooth Pipe Bends, *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, 82(1960), 131-143.
- (7) Wieghard, K. E. G., On the Resistance of Screens, *Aeronaut. Q.*, 4-2(1953), 186-192.
- (8) Knudsen, J. G. and Katz, D. L., *Fluid Dynamics and Heat Transfer*, Int. Student Ed., (1958), 91, Mc Graw-Hill Book Company.
- (9) Knudsen, J. G. and Katz, D. L., *Fluid Dynamics and Heat Transfer*, Int. Student Ed., (1958), 198, Mc Graw-Hill Book Company.
- (10) Peterson, C. W., The Fluid Physics of Parachute Inflation, *Physics Today*, August, (1993), 32-39.
- (11) Baker, D. W., Decay of Swirling, Turbulent Flow of Incompressible Fluids in Long Pipes, Ph. D., Thesis, University of Maryland, (1967).
- (12) 程曉明・松前裕司・橋本文作・鹿毛聡・大隈角治・堀井清之, 石油化学工業パイプライン修理に用いる通線ノズル内の流れ, 石油学会誌, 35-5(1992), 382-389.