[一般論文]

石油化学工業パイプライン修理における スパイラル流通線のメカニズム ——ロープの位置決めと安定性の解析——

大隅角治¹⁾, 程 晓明²⁾, 松前祐司³⁾, 橋本文作²⁾, 鹿毛 聡²⁾, 堀井清之^{3)*}

¹⁾ 東亜機械工業(株), 752 山口県下関市長府扇町 1-49

²⁾ 早稲田大学理工学部, 169 東京都新宿区大久保 3-4-1

³⁾ 白百合女子大学文学部, 182 東京都調布市緑ヶ丘 1-25

(平成 3 年 12 月 18 日受理)

石油化学工業のパイプライン修理には通線工事が伴う。スパイラル流発生ノズルによる効率的な通線技術を開発したことを前報で述べた。本報はスパイラル流通線におけるパイプライン内のロープの位置決めとその安定性を解析するものである。

従来の乱流による通線ではロープがパイプラインの半径方向でランダムに振動するのに対し、スパイラル流通線ではロープがパイプラインの軸を中心とする円柱面上に位置決めされ、安定したら旋運動を行う。

スパイラル流通線では、ロープに加わる半径方向の静圧力こう配と半径速度による形状抗力からなる求心力と旋回運動による遠心力とが、パイプラインの半径方向のある位置で力学的に釣り合い、ロープが常にその位置からなる定位円上に保持される。このスパイラル流による位置決め作用は、ロープの自励振動や管壁との衝突、摩擦現象を効果的に抑え、通線に伴うエネルギーの損失を低減させ、高い通線能力をもたらしたものである。

1. 緒 言

圧気方式によるロープのパイプライン通線は、圧縮空気が持つエネルギーをロープの運動エネルギーに変換することによって実現する。通線能力はこのエネルギーの変換効率や通線に伴うエネルギーの損失によって定められる。前者は、ロープに働く流体の動力学作用効果に依存しており、後者は主に管壁摩擦による空気流の圧力損失、ロープが管壁と接触することによって生ずる摩擦損失や管壁との衝突によって発生する運動量の損失等に左右される。

従来の圧気通線に関する研究では、通線能力が空気圧力¹⁾に依存するとしている。しかしながら、スパイラル流による通線では、この圧力も通線能力に関与するが、空気流れの構造とロープの挙動がさらに深く関与することがわかった^{2)~6)}。

従来の圧気通線は、乱流エゼクターを用いて行われており、パイプ内の空気流はレイノルズ数の高い乱流である。乱流に生じる流体力は、パイプの半径方向においてロープをランダムに振動させるため、ロープと管壁との接触、摩擦現象が発生する。ロープと管壁との接触は、摩擦損失をもたらすだけでなく、両者の衝突によってロープの運動量が損失され、結果として通線能力の低下を招く。

一方、スパイラル流通線では、乱流を秩序のあるスパイラル流に制御することによって、ロープをパイプの軸を中心とする円柱面上に位置決めし、ロープは安定したら旋運動を行う。スパイラル流によるロープの位置決め作用は、ロープのランダムな振動を効果的に抑え、管壁に接触する確率を大幅に減少し、結果として通線能力を向上させたものである。

本研究は、スパイラル流によるロープのパイプ内の位置決め作用とその安定性のメカニズムを実験と理論解析によって明らかにするものである。本文では、まずパイプ内におけるスパイラル流の流れパターンを計測し、そしてスパイラル流によるロープの位置決め効果を乱流のそれと比較した。最後にスパイラル流によるロープの位置決めと安定性のメカニズムを理論解析によって明らかにする。

2. 実験および結果

2.1 実験装置および方法

本実験は、圧気通線に用いられる流れパターンとパイプ内におけるロープの位置決めとの関係を明らかにするものである。実験は、通常乱流エゼクターとスパイラルノズルを用いて行った。Fig. 1 に実験装置を示す。

通常乱流エゼクターは、コアンダタイプのものであり、出口の直径は 20 mm である。一方、スパイラルノズルは、Fig. 2 に示すような環状スリットに漸縮小管を接続した構造となっている。ノズルの入口と出口の直径はそれぞれ 40 mm, 20 mm であり、長さは 85 mm である。環状スリット幅は 0.2 mm であり、噴出角度は 90°である。ノズル内壁の漸縮小構造はFig.

* 連絡先

本稿はスパイラル流による通線に関する研究において“The Rope Passing Method for Repair of Petrochemical Pipeline with Spiral Flow” (Sekiyu Gakkaishi, 33, (5), 291 (1990)) に続く第 3 報です。

Fig. 1 Test Rig

Fig. 2 Spiral-flow Nozzle

2 に示す関数曲線に従って加工されている。

圧縮空気はノズルの空気取り入れ口①を通して、バッファースペース②に入る。そして、環状スリット③を通して、ノズルへ流れ込み、コアンダ効果によってノズルの内壁④に沿って出口⑤へ流れ出す。圧縮空気が円環状スリットから急噴出することによって発生する半径方向の乱れ成分や、コアンダ効果とノズル内壁の形状によって形成する半径と軸速度パターンおよびノズルの漸縮小構造等によって、初期旋回流が発生し増強され、スパイラル流へと遷移する³⁾。

管内の流れパターンを計測し、そしてロープの挙動を観測するにはノズルの出口に長さ 2,200 mm、直径 22 mm のアクリル製透明管を接続した。計測は流れに影響を与えることのないレーザードップラー流速計 (He-Ne Laser 10 mW KANOMAX 社製) を用いて行った。受光器は S/N 比の高い前方散乱型を用いた。シーディングとして、加圧方式によって発生させた水微粒子を利用した。微粒子の粒径が $4\mu\text{m}$ 前後にそろっているため、高い計測精度を得ることができた。

一方、透明管の内壁ではレーザー光線の乱反射が強く、S/N 比は劣化する。特にレーザービームを管軸に対し垂直になるように設置して、旋回と半径方向の速度成分を計測する場合は、管壁の厚みによる屈折の影響が大きく、計測信号を正確に得ることができない。この問題を解決するために、計測点に円周方向に沿ってスリットを設けた。空気漏れによって流れパターンが変化しないように、スリットを透明アクリルでふさいだ。

管内のロープの挙動を観測するために、直径 3 mm の木綿製ロープ ($2.25\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$) を用いた。また、空気流量によるロープの位置決めへの影響を調べるために、圧縮空気の供給量を $Q_1 = 0.077\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, $Q_2 = 0.096\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$, $Q_3 = 0.135\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ にそれぞれ設定した。

2.2 実験結果

2.2.1 直管内のスパイラル流パターン

直管内のスパイラル流パターンに関する計測実験は、Fig. 1 に示す実験装置を用いてノズル出口から 300 mm (P1), 1,000 mm (P2), 1,800 mm (P3) 離れた 3 カ所で行われた。

Figs. 3, 4, 5 は、各計測位置における軸速度 v_z 、半径速度 v_r および旋回速度 v_θ が管の半径方向における分布を示している。各計測位置における各流れ成分の挙動を比較してみると、スパイラル流は管軸方向において微小ながら減衰していくことがわかる。(P1) 地点における旋回速度の最大値 $v_{\theta m}$ が $6.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ であるのに対し、1.5 m 先の (P3) 地点では旋回速度の最大値 $v_{\theta m}$ が $6.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ となっている。その他の各成分も同じような傾向を示していることから、スパイラル流は強い持続性を持っていることがわかる。

Fig. 3 Radial Distribution of Axial Velocity

Fig. 4 Radial Distribution of Radial Velocity

Fig. 5 Radial Distribution of Swirl Velocity

Fig. 6 Rope Motion in Spiral Flow

Fig. 7 Rope Motion in Turbulent Flow (1)

2.2.2 流れパターンとロープの管内挙動

Fig. 6 は (P2) 地点におけるスパイラル流によるロープの位置決め作用を示している。ノズル出口の最大軸速度 v_{zmax} は $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ であり、ロープの直径は 3 mm である。ロープが管軸を中心とする円柱面上に位置決めされ、管壁と接触することなく安定した緩やかなら旋運動を行う。

一方、通常乱流エゼクターを用い、出口最大軸速度 v_{zmax} を $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ に設定した場合、(P2) 地点におけるロープの挙動は Fig. 7 に示されている。乱流に生じる流体力の働きにより、ロープがランダムに振動し、管壁と接触しながら不規則なノコ

Fig. 8 Rope Motion in Turbulent Flow (2)

ギリ波形を呈している。Fig. 8 は、ロープの挙動を $1/60$ 秒間隔で撮影した連続写真である。管内におけるロープの空間位置が乱流による流体力の作用を受けて激しく変動していることがわかる。

2.2.3 空気流量によるロープの位置決めへの影響

Fig. 9 は (P2) 地点における空気流量によるロープ位置決めへの影響を示している。空気流量の変化に伴いロープの空間位置が変化するが、いずれも安定したら旋運動を呈している。なお本実験では、空気流量を $Q=0.135 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ 以上に設定すると、ロープはほぼ管軸付近に位置決めされることが観測された。

3. 理論解析

スパイラル流通線におけるロープのら旋状運動の発生原因を明らかにするために、スパイラル流によるロープの位置決めとその安定性のメカニズムについて解析を試みた。

3.1 仮定

本解析では前章の実験結果に従い、次のような仮定を設定した。

- [仮定 1] 管内の流れは軸対称の定常流である。
- [仮定 2] 各流れパターンは管軸方向において減衰しないものと見なす。
- [仮定 3] ロープの直径は管径と比べ十分小さいため、流れへの影響を無視する。
- [仮定 4] ロープは均質で十分柔らかくかつ軽いので、重力の影響を無視する。

Fig. 9 Rope Motion in Spiral Flow by Change in Flow Rate

3.2 スパイラル流によるロープの位置決めメカニズム

解析はまず直管の半径方向におけるロープの位置決めメカニズムを示し、そしてロープのらせん運動の発生メカニズムを明らかにする。

3.2.1 半径方向におけるロープの位置決めメカニズム

スパイラル流はその旋回速度や半径速度の分布、および半径方向の圧力こう配から、直管内のロープを半径方向の一定位置に位置決めする性質を持っている。

Fig. 10 に示すように、軸方向に単位長さを持つ半径 R_c のロープが管軸に垂直する任意断面 s 上の点 a (z, r) にある。仮に点 a における空気流の旋回速度は $v_{\theta a}$ とし、かつロープは同じ $v_{\theta a}$ で旋回している（空気流との相対旋回速度がゼロである）とすれば、ロープが直管の半径方向において以下のような力を受ける。

1) 遠心力 $\rho_c \pi R_c^2 v_{\theta a}^2 / r$

ロープが $v_{\theta a}$ で旋回運動を行うので、外向きの遠心力が発生する。ここでは ρ_c はロープの密度である。

2) 半径速度による形状抗力 $C_d \rho v_{ra\delta}^2 2R_c / 2$

スパイラル流の半径速度 v_r が軸中心に向かうので、ロープは内側向きの形状抗力を受ける。ここで、 C_d は抗力係数であり、 ρ は空気密度である。 $v_{ra\delta}$ は a 点における流れの半径速度 v_{ra} とロープとの相対速度である。

3) 半径方向の静圧こう配による ΔF_a

Fig. 10 Positioning Effect and Stability on Radial Direction

旋回速度と軸速度の分布により、管内静圧は管軸中心において最も低くなるような分布となる。この半径方向の圧力こう配によってロープは内側向きの力を受ける。 ΔF_a は Eq. (1) のように計算される（Appendix 参照）。

$$\Delta F_a = \frac{dP_a}{dr} \pi R_c^2 \quad (1)$$

仮にロープが管の半径方向において静止しているとすれば（したがって $v_{ra\delta} = v_{ra}$ ）， a 点においてはロープに作用する遠心力、形状抗力および静圧力が力学的に釣り合う状態にあり、Eq. (2) が成り立つ。

$$\frac{dP_a}{dr} = \rho_c \frac{v_{\theta a}^2}{r} - \rho \frac{C_d v_{ra}^2}{\pi R_c} \quad (2)$$

ここでは、 P_a が a 点における静圧であり、 v_{ra} が a 点における空気流の半径速度である。ロープの存在による静圧こう配に対する影響を無視すれば、半径方向における静圧こう配と空気流れの旋回による遠心力との関係から Eq. (3) が存在する。

$$\frac{dP_a}{dr} = \rho \frac{v_{\theta a}^2}{r} \quad (3)$$

Eq. (3) を Eq. (2) に代入すれば、Eq. (4) が得られる。

$$(\rho_c - \rho) \frac{v_{\theta a}^2}{r} = \rho \frac{C_d v_{ra}^2}{\pi R_c} \quad (4)$$

ロープが常に直管の半径方向において静止状態を保つ条件は Eq. (4) を満たすことである。Eq. (4) を満たす半径位置 r は空気流の旋回速度、半径速度およびロープの幾何形状、物性値に依存する。**Fig. 4** に示すように内壁近傍を除いて、 v_r が半径 r にほぼ比例して増加するため、Eq. (4) を満たす半径位置 r は内壁近傍を除く管内の全域において唯一、一カ所であり、流れの軸対称性から一つの定位円を形成する。

3.2.2 らせん運動の発生メカニズム

スパイラル流通線では、空気流の軸速度成分と旋回速度成分がロープをある方向に配置する作用を持っている。この配向性は、上述のようなスパイラル流による半径方向の位置決め作用とともに、連続かつ安定したロープのらせん運動を実現したのである。

Fig. 11 Positioning Effect on Axial and Swirl Direction

[仮定 2] に従い、スパイラル流が軸方向において減衰しないとすれば、直管のいたるところで Eq. (4) を満足する定位円が同じであり、ロープはその定位円からなる定位円柱面上に位置決めされる。定位円柱面上においては軸速度と旋回速度はいたるところで一定である。以下では、この定位円柱面を Fig. 11 に示すような平面 Ψ に展開し、ロープへの配向作用を明らかにする。

仮にロープは円柱面において Fig. 11 に示したような初期位置を持つものとする。ロープを微小線分 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_i, \dots, l_n$ に分解し、その z 軸との交角をそれぞれ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_n$ とする。

ロープの各微小線分は、流れにより動力学的作用力を受けて運動する。ロープに加わる流体力には、ロープ表面の法線方向に加わる形状抗力と接線方向に生じる摩擦抗力がある。ここでは、ロープの法線方向の運動のみについて考える。

微小線分 l_i の軸速度と旋回速度がそれぞれ v_{czi} と $v_{c\theta i}$ であるとすれば、ロープと流れとの相対速度は Eq. (5) に示される。

$$v_{fczi} = v_z - v_{czi} \quad (5)$$

$$v_{fc\theta i} = v_\theta - v_{c\theta i} \quad (6)$$

よって、微小線分 l_i の法線方向に加わる形状抗力は Eq. (7) によって与えられる。

$$F_{ni} = \frac{1}{2} C_d \rho \cdot 2R_c l_i \cdot (v_{fc\theta i} \cdot \cos \alpha_i - v_{fczi} \cdot \sin \alpha_i)^2 \quad (7)$$

線分 l_i の法線方向に形状抗力が働かないのは、Eq. (8) を満たす場合である。

$$\tan \alpha_i = \frac{v_{fc\theta i}}{v_{fczi}} \quad (8)$$

Eq. (8) の条件を満たさない限り、ロープの微小線分が常に形状抗力を受けることになる。形状抗力の働きによって、最終的にロープの各微小線分は Eq. (8) を満足するようになる。また、ロープと流れとの間に相対速度が存在する限り、ロープが流れにより抗力を受け、流れに対して相対運動を行う。このようにして、ロープの各微小線分は流れによる動力学的作用によって最終的に α_i は Eq. (9) を満たすようになる。

$$\alpha_E = \alpha_i = \arctan \frac{v_\theta}{v_z} \quad (9)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

スパイラル流はロープに対し、常に Eq. (9) を満たすように働きかけることから、 α_E をスパイラル流によるロープの配向角度と呼ぶこととする。ロープは最終的にこの配向角度に沿って一直線となるように位置決めされる。

Fig. 11 に示す平面 Ψ を再び定位円柱面に戻せば、平面上の一直線が円柱面において螺旋状分布となる。すなわち、ロープの螺旋運動は上述のような流体力の作用効果から形成されているのである。

3.3 スパイラル流によるロープの安定性メカニズム

前節の解析では、スパイラル流通線におけるロープの螺旋運動の発生原因が明らかになったが、安定したら螺旋運動を維持するにはロープを常に定位円柱面上に拘束する必要がある。すなわち、ロープは定位円柱面上において安定でなければならない。

3.3.1 安定性の概念

力学系における安定性の解析は、振子運動に見られるように平衡点から離れた運動が最終的にどのような軌道をたどるのかを議論すれば足りる。Eq. (4) に示された定位条件を満たす半径位置（定位円）を平衡点とすれば、ロープの安定性についての議論はロープが平衡点から離れた（外乱等で）時どのような運動を行うかが焦点となってくる。ロープが常に定位円上に位置決めされるには、時間の経過とともにロープが平衡点に戻らなければならない。

3.3.2 安定性の解析

Fig. 10 に示したように、もし外乱等の原因でロープが $a(z, r)$ 点における角運動量を持ったまま半径方向に δ だけ離れた $b(z, r+\delta)$ 点までに移動したとすれば、ロープに作用する各力の釣り合いが崩れて、半径方向にロープが移動する。

軸方向に単位長さを持つロープの点 b における運動方程式は Eq. (10) に示される。

$$\rho_c \pi R_c^2 \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \rho_c \pi R_c^2 \frac{v_{\theta a}^2}{r + \delta} - \pi R_c^2 \frac{dP_b}{dr} - \frac{1}{2} \rho C_d \cdot v_{rb\delta}^2 2R_c \quad (10)$$

Eq. (10) の左辺はロープの質量と加速度の積であり、右辺の第 1 項は旋回による遠心力で、第 2 項は半径方向の静圧こう配による力で、第 3 項は半径速度による形状抗力である。 $v_{\theta a}^2$ はロープが a 点における角運動量を保持したまま b 点に移動した時の旋回速度成分であり、Eq. (11) によって求められる。

$$v_{\theta a}^2 = \frac{r}{r + \delta} v_{\theta a}^2 \quad (11)$$

一方、 $v_{rb\delta}$ は b 点におけるロープと流れとの半径方向の相対速度であり、 b 点における流れの半径速度 v_{rb} との間に Eq. (12) の関係が存在する。

$$v_{rb\delta}^2 = v_{rb}^2 + \frac{d\delta}{dt} \quad (12)$$

なお、Eq. (10) の P_b は b 点における静圧であり、半径方向における流れの旋回による遠心力との関係から、Eq. (13) が存在する。

$$\frac{dP_b}{dr} = \rho \frac{v_{\theta b}^2}{r + \delta} \quad (13)$$

Eqs. (4), (11), (12), (13) を Eq. (10) に代入し, $\rho_c \gg \rho$ の関係に留意して整理すれば, Eq. (14) が得られる。

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\rho C_d}{\rho_c \pi R_c} \left(v_{ra}^2 - v_{rb}^2 - 2v_{rb} \frac{d\delta}{dt} - \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right) \quad (14)$$

Fig. 4 の実験結果に示されるように, 半径速度 v_r が管壁の近傍部分を除いて, 半径にはほぼ比例していることから, 近似的に $v_r = Kr$ で表すことができる。よって $v_{rb} = v_{ra} + K\delta$ の関係が存在する。 δ が微小であるため, 上述の関係を Eq. (14) に代入し整理すれば, Eq. (15) が得られる。

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = -\frac{\rho C_d}{\rho_c \pi R_c} \left(2v_{ra} + \frac{d\delta}{dt} \right) \frac{d\delta}{dt} \quad (15)$$

Eq. (15) は, 定位円付近におけるロープの半径方向の運動を表したものである。 $\delta = \delta_0|_{t=0}$ の初期条件でこれを解くと, Eq. (16) が得られる。

$$\delta = -2v_{ra} \ln(1 - C_1 e^{-C_2 t}) \quad (16)$$

$$C_1 = 1 - e^{-\frac{\delta_0}{v_{ra}}}, \quad C_2 = \frac{v_{ra} C_d \rho}{\pi R_c \rho_c}$$

明らかに $t \rightarrow \infty$, $\delta \rightarrow 0$, の関係が成立する。すなわち, 時刻 $t=0$ において, 定位円上から δ_0 だけ離れていた単位長さのロープは, スパイラル流による復元力により, 時間の経過とともに定位円上に呼び戻される。ロープは定位円上において安定である。この復元力は, 旋回と半径速度および半径方向の静圧こう配によって発生されることが明らかである。また, Eq. (16) に示されるように, δ の解軌道は対数関数で表しているためロープは漸近安定である。

上述のようなスパイラル流によるロープの安定作用は管軸方向のいたるところに存在するので, 結果としてロープが定位円からなる円柱面上に拘束される。さらに, Eq. (16) の指数項の係数部分 C_2 の大きさは $\delta \rightarrow 0$ の速度を左右する。半径速度 v_{ra} が大きければ, 係数 C_2 が大きくなり, $\delta \rightarrow 0$ の速度が速くなる。また, ロープの半径 R_c が小さければ, 係数 C_2 が大きくなり, $\delta \rightarrow 0$ の速度が速くなる。すなわち, 大きな半径速度と小さなロープの半径は, ロープの半径方向の位置決めにより強い安定性をもたらす。

4. 結 言

本研究では, スパイラル流通線の高い通線効率を持つ原因を明らかにするために, スパイラル流によるロープの位置決めとその安定性のメカニズムを実験と理論解析を通して明らかにした。スパイラル流による流体制御によって, ロープが管内の定位円柱面に位置決めされ, 安定したら旋運動を形成する。このスパイラル流の位置決め作用は, ロープと管壁との接触, 摩擦現象を効果的に抑え, 通線に伴うエネルギーの損失を低減させたものと思われる。本報で得られた結果を以下に要約する。

- 1) スパイラル流は, その旋回速度と半径速度の分布および半径方向の圧力こう配によって, 管内のロープを管軸を中心とする定位円柱面上に位置決めすることができる。
- 2) スパイラル流は, その軸と旋回速度の分布によって定位円柱面に位置するロープを一定方向に配向する作用を持っている。この配向作用によってロープが旋運動を実現する。

Fig. 12 Pressure Force on Radial Direction of Rope

- 3) スパイラル流は, 直管の半径方向において常にロープを定位円柱面上に拘束し, ロープの直管の半径方向における振動を効果的に抑えることができる。

謝 辞

本研究を行うにあたり, 東京大学の相原康彦教授に種々御助言を頂いた。また実験するにあたり, 新技術事業団の研究助成を頂いた。ここに御礼申し上げます。

Appendix

ロープに作用する静圧力の計算

Fig. 12 に示されるように, a 点における静圧を P_a とすれば, ロープ前後における静圧の差によって圧力がロープに働く。ロープの直径が管路のそれに比べ, 十分小さいという仮定から ξ 点における圧力は Eq. (A-1) によって表される。

$$P_\xi = P_a + \frac{dP_a}{dr} R_c \cos \theta \quad (A-1)$$

ξ' は ξ の近傍にある点とすれば, $\xi - \xi'$ に加わる圧力 dF は Eq. (A-2) によって表される。

$$dF = (P_a + \frac{dP_a}{dr} R_c \cos \theta) |\xi' - \xi| \quad (A-2)$$

$|\xi' - \xi|$ は ξ' , ξ の距離を表し, 幾何関係から Eq. (A-3) によって計算される。

$$|\xi' - \xi| = \cos \theta \cdot R_c \cdot d\theta \quad (A-3)$$

Eq. (A-2) をロープの右半円に対し積分すれば, 右半円に加わる静圧こう配による圧力は Eq. (A-4) のように得られる。

$$F_{PR} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} dF = 2R_c P_a + \frac{dP_a}{dr} \frac{\pi R_c^2}{2} \quad (A-4)$$

これと同じように, 左半円に加わる静圧こう配による圧力は Eq. (A-5) のように得られる。よって, ロープ全体に加わる圧力 ΔF_a は Eq. (A-6) に表される。

$$F_{PL} = 2R_c P_a - \frac{dP_a}{dr} \frac{\pi R_c^2}{2} \quad (A-5)$$

$$\Delta F_a = F_{PR} - F_{PL} = \frac{dP_a}{dr} \pi R_c^2 \quad (A-6)$$

References

- 1) Hornung, S., Casidy, S. A., Yennadhiou, P., Reeve, M.,

- IEEE J. Sel Areas Commun.*, **4**, (5), 679 (1986).
- 2) Horii, K., Matsumae, Y., Cheng, X. M., Yasukawa, E., Takei, M., Hashimoto, B., *Sekiyu Gakkaishi*, **33**, (5), 291 (1990).
 - 3) Ohsumi, K., Cheng, X. M., Matsumae, Y., Hashimoto, B., Kage, S., Horii, K., *Sekiyu Gakkaishi*, **35**, (5), 382 (1992).
 - 4) Horii, K., Matsumae, Y., Cheng, X. M., Takei, M., Ikeda, Y., *Industrial and Agricultural Application of Fluid Mechanics-ASME*, **86**, 65 (1989).
 - 5) Horii, K., *Mechanical Engineering ASME*, **112**, (8), 68 (1990).
 - 6) Horii, K., Matsumae, Y., Cheng, X. M., Takei, M., Yasukawa, E., Hashimoto, B., *Trans. Jpn. Soc. Aeronautical and Space Science*, **33**, (102), 141 (1991).

Summary

Rope Passing Mechanism for Petrochemical Conduit Repairs — Positioning and Stability —

Kakuji OHSUMI^{†1)}, Xiao Ming CHENG^{†2)}, Yuji MATSUMAE^{†3)}, Bunsaku HASHIMOTO^{†2)},
Satoshi KAGE^{†2)}, and Kiyoshi HORII^{†3)}

^{†1)} Toa Kikai Kogyo Co., Ltd., 1-49 Chofu-Ohgimachi, Shimonoseki, Yamaguchi 752

^{†2)} Waseda University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169

^{†3)} Shirayuri Women's College, 1-25 Midorigaoka, Chofu, Tokyo 182

In the previous paper, rope-installation system has been studied from the view point of fluid deformation in the spiral device. In this paper, positioning and stability in a pipeline has been discussed. By use of a conventional turbulent flow, the rope vibrated toward the radial direction. In contrast, by use of a spiral structure flow, the rope formed a stable rotating motion caused by the balance of three factors: the centripetal

force due to the radial pressure gradient, the drag force acting on the rope due to the radial flow, and the centrifugal force of rope due to the rotating motion. This stable rotation can be achieved by spiral structure flow with steep and high stability axial velocity distribution and the radial velocity component converging at the axis of the pipeline and by special rotating velocity pattern.

Keywords

Pipeline repair, Rope installation, Spiral flow, Positioning, Stability