# 深海無人探査機用テザーケーブルの捻れに関する理論的研究

矢野 裕亮<sup>\*1</sup> 高川 真一<sup>\*1</sup>

深海調査においては,長尺のケーブルを用いる機会が非常に多いが,大部分のケーブルで捻れが発生し,運用上苦慮す ることが多い。海洋科学技術センターでは,1985年に3,000m級無人探査機"ドルフィン3K"の試運転時を開始した時点からこ の問題に直面しており,後に製作されたケーブルによっては,捻れ量の少ないものもあるが,根本的なケーブル捻れの発生 メカニズムについては,明らかになっていなかった。

本研究においては、一部に近似式が入るものの、ケーブルが滑車によって曲げられた場合のストランド軌道の数理的解析手法を確立し、JAMSTECで運用実績のあるケーブルに対して本手法を適用した。実海域計測結果と理論計算結果はよく一致しており、ROV運用中に発生するケーブル捻れの原因が、ケーブル曲げにより引き起こされるストランド軌道長の変化であることを見いだした。特にストランド間の隙間の大小は、ケーブル捻れの方向とその程度に大きく影響を与えることを見いだした。

キーワード: テザーケーブル, ストランド, ケーブル捻れ, トルクバランス, フリーフォール

# Theoretical study on rotation of a tether cable for remotely operated vehicle

Yusuke YANO<sup>\* 2</sup> Shinich TAKAGAWA<sup>\* 2</sup>

Remotely Operated Vehicle (ROV) uses long tether cable for power supply and signal communication between a ROV and its support vessel. However there have been many accidents on this tether cable, such as kink and disconnection caused by rotation of the cable.

The tether cable is usually a torque balance type with its strength members of inner/outer layer braided reverse direction each other. However, even if a torque balance of the cable is perfect, cable rotation occurs in most ROVs while paying in/out of a tether cable into the ocean.

In this research, calculation method of strand track of a tether cable bent on a sheave was established. Applying this calculation method, the mechanism of cable rotation was found to be the change of track length caused by bending of a cable on sheaves. Comparison of the calculated results and measured data of JAMSTEC ROVs shows this calculation method to be very good to explain the rotation phenomena.

Keywords : Tether cable, Strand, Cable rotation, Torque balance, Free-fall

<sup>\*1</sup> 海洋科学技術センター 深海地球ドリリング計画推進室

<sup>\* 2</sup> Japan Marine Science and Technology Center, OD21 Program Department

#### 1. はじめに

深海科学調査や海底通信ケーブルの敷設などにおいて は、有索海中ロボット(ROV)や曳航体などケーブルによって 支援母船と繋がれた型式の無人探査機が広く使用されて いる。これらの無人探査機では、スラスタ駆動のための動 力源や操縦・制御や搭載テレビカメラの情報伝送を、支援母 船との間で常に行う必要があり、母船から下ろされた細長 ケーブル(テザーケーブル)は、ROV運用のためには不可欠 な命綱であると言える。このケーブルにより、電力や通信量 の制限を受けることなくROVを運用することができるが、同 時にケーブルが介在することによる運動拘束やケーブル捻れ に起因する事故など課題も多く、ケーブルのキンクや破断な どは、今日でもROVに関連するトラブルの大部分を占める。

10,000m級無人探査機「かいこう」の開発においては,フ リート角(船上の滑車ヘケーブルが出入りする角度)がケー ブル捻れに影響しているとの推定から,フリート角がほぼ0 度となる滑車装置が設けられた。しかしその効果はほとん ど確認できず,「かいこう」No.1ケーブルでは,繰り出す際に 外層ストランドが弛む方向に100m当たり約1回転の捻れが 発生した。

このようなケーブル捻れは、海洋科学技術センター運 用のROVに限らず、諸外国で製作・運用されている汎用 ROVにおいても多数発生している。ROVの運用者は原 因究明のための調査を実施するよりも、機器を復旧して 運用休止期間を短縮するために、事故発生の度にケーブ ルの不具合部分(通常、捻れが蓄積するROV近傍の部分) を切断・再接合することでこのトラブルに対処している のが現状である。

このため同型式のROVが開発されて長い年月が経つ が,ケーブル捻れの明確な発生原因については解明されて おらず,非捻回ケーブルの設計法は今日でも確立されてい ない。

#### 1.1. ROV運用中のケーブル捻れ現象

本報告で記述するケーブル捻れとは、ケーブル製造後の 残留捻れのことを意味するものではない。図1は、ケーブル フリーフォール試験の概念図であり、図2は、計測結果の一 例である。この試験ではケーブルの先端にフラックスゲート コンパスを組み込んだ錘を吊り下げ、海中に繰り出した ケーブルの長さとそれに対応するコンパスの指示角度を計 測している。計測された単位長さ当たりのケーブルの回転 数と繰り出し/巻き取り速さの間に明確な関連はない。注 目すべき点は、所定長さを繰り出して、静定した後にケーブ ルを巻き取る過程で発生する錘の回転である。

ケーブルが残留捻れを含んでいると仮定しても,所定長 さ繰り出して静定した時点では,ケーブル上の各点で巻き 付けピッチは,トルクバランスに応じて変化しているはずで あり,トルクはケーブル全長に渡り完全にバランスしていると 考えられる。しかしこのケーブルを巻き取ると,ケーブル単 位長さあたり一定の回転が入ることが確認されており,前 述で100mあたりの回転数とはこの値を意味する。また,繰





り出しと巻き取りではケーブル単位長さあたりの回転数は 変化しないが,回転方向は逆になる。(図2参照)

この現象は, 垂直に繰り出されたケーブルを回転させる ためのトルクの不均衡が存在しないという非常に不可解な 現象である。このためケーブル捻れ現象に対する根本的な 対策を取ることができず, 試行錯誤の連続でケーブルの製 作と捻れ特性の確認が繰り返されてきた。

# 1.2. ずれ防止加工によるケーブル捻れ防止効果

ケーブルの捻れ現象は, 滑車とケーブルそれぞれ単独の 要因ではなく, 両者の相互作用が相当程度関係しているように思われる。

著者らは、このような状況を認識した上で、直線状態の ケーブルと滑車によって曲げられたケーブルでは、ストランド の軌道が変化することに着目し、この軌道変化がケーブル捻 れを発生させる原因となっているのではないかと推定した。

ケーブルが滑車で曲げられる際に、内層/外層ストラン ドが長手方向にずれるとすれば、これを吸収するために ケーブルが捻れることが考えられる。この仮説を検証する ために, かいこうNo.1ケーブルのサンプルを用いて, 内層と 外層ストランドの一部を接着剤で帯状に接合した試験ケー ブルを製作した。(図3参照)ケーブル上にこのような異方性 がある場合、この接合部は次第に曲げの外側に移行するこ とが簡単な理論的考察から推定された。このため実験開 始時には、接合部分を曲げの外側に配置し、図4に示すよ うな試験機を用いて、周期的なケーブル曲げ試験を実施し た。図5は試験結果を示しており、ずれ防止機構の有無に より、 捻れ状況には歴然とした違いが現れることが確認さ れた。ずれ防止機構を施さないケーブルでは、100mあたり 1回転に相当する捻れ(15度/4m ≒ 360度/100m)が計測され たが, ずれ防止機構を施した試験ケーブルでは, 捻れは発 生しなかった。ずれ防止機構を施さない結果は、図2に示 すフリーフォール試験での計測結果とほぼ同程度の回転量 であった。

ドルフィン3KのNo.3, No.4ケーブルは, ケーブル表面にゴ ムの皮膜層があるため, 上記のようなずれ防止加工を施す ことはできなかったが, 未処理のケーブルを用いて同様の 試験を実施すると,図5に示しているのと同様の捻れが発 生することが確認された。



図3 ずれ防止機構を有するケーブル(上図)と一般ケーブル(下図) Fig. 3 Cable with slip restriction (Above Fig.) and normal cable (Below Fig.)



図4 ケーブル曲げ試験機 Fig. 4 Cable rotation measurement system



図5 ケーブル曲い 試験液によるストラント 9 ル防止液体の試験結末 Fig. 5 Test results of slip restriction effect by cable rotation measurement system

このような試験結果から,ケーブル繰り出し/巻き取り中 に発生するケーブル捻れは,ケーブルが滑車を通過して曲 げられる際に,内層/外層ストランド層にずれが生じ,この ずれを吸収するために捻れが発生するという考えに至っ た。このため著者らは,この考えを理論的に明確にするこ とを目的に,更なる検討を進めた。

# 2. ストランド軌道変化とケーブル捻れの因果関係

二重鎧装トルクバランスケーブルの内層/外層ストランド は、動力線や信号線等の縒りも含めて総合的にトルクがバ ランスするように互いのストランドを反対方向に巻き付ける 構成となっている。隣接するストランド同士は、完全に密着 しているのではなく、曲げや捻りに対する柔軟性を与える ために若干の隙間を持たせて巻き付けてある。(図6参照)

ケーブルが直線状態のストランド軌道は、ケーブルの長 手方向に対して一定の螺旋軌道を描いているが、ケーブル が滑車で曲げられた場合には、ストランド同士の隙間を埋 めることにより曲げの内側にストランドが寄ってくる。このた め単純に一定傾斜の螺旋軌道と滑車の円形を重ね合わせ た軌道になるのではなく、直線状態とは異なる軌道を描く ことになる。本報告では、このように互いに密着しているス トランドを"密着ストランド"と表現する。

このように曲げの内側では、ストランド同士が互いに近接 して密着状態を形成するが、曲げの外側に進んだある点 で、ストランドは隣接するストランドから離れることになる。 その後曲げの最外縁を通過して再び内側に進行し、再び ある点で密着ストランドとなる。この互いに離れたストラン ドを"自由ストランド"と表現する。

前述の通り, 滑車で曲げられたケーブルは, 直線状態とは 異なる軌道となるため, 軌道長も変化することになる。著者 らはこの内層/外層ストランド軌道長の変化がトルクバランス の不均衡を誘発していると推定し, この実証のために滑車で 曲げられたケーブルのストランド軌道を求める計算手法の確 立を進め, このケーブル捻れのメカニズムの解明を試みた。



図6 二重鎧装トルクバランスケーブルの構造 Fig. 6 Structure of doubly layered torque balance cable

#### 3. 計算記号

本報告で用いる記号は、図7、図8及び図9に示す通りで ある。なお、下添字 "i"は内層ストランド、また "o"は外層ス トランドを示す。また、下添字 "s"は直線状態のケーブルを、 また "c"は滑車によってケーブルが曲げられている状態を 示す。

- R:滑車ピッチ円半径
- p:ストランドピッチ
- D:ストランド素線外径
- r:ストランド巻き付き半径
- N<sub>s</sub>:ストランド本数
- L:ストランド長(弧長)
- $ds = (dx^2 + dy^2 + dz^2)^{1/2}$
- **b** = (x<sub>b</sub>, y<sub>b</sub>, z<sub>b</sub>): ストランド軌道の陪法線ベクトル
- N = (x<sub>N</sub>, y<sub>N</sub>, z<sub>N</sub>): ストランド巻き付き曲面の法線ベクトル
- **n** = (x<sub>n</sub>, y<sub>n</sub>, z<sub>n</sub>): ストランド軌道の法線ベクトル
- **t** = (x<sub>t</sub>, y<sub>t</sub>, z<sub>t</sub>): ストランド軌道の接線ベクトル
- z:ケーブル捻れ
- ξ: 陪法線からケーブル中心に向かう角度
- λ:ストランド/ケーブル長比
- ρ:ストランドの曲率半径.1/ρは同曲率
- θ: ストランドヘリカルコイルの座標角度. 滑車溝の谷底が θ=0
- ♦:滑車中心から図った進行角度
- Θ:ストランドの法線ベクトルとストランド巻き付き曲面の法 線ベクトルのなす角度



Fig. 7 Cross section of cable and symbols



Fig. 8 Coordinate syste

# 4. 軌道計算手法

図8に示されるx-y-z座標系において、ストランドの中 心座標を

 $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \{ (\mathbf{R} - \mathbf{r}\cos\theta)\cos\phi, (\mathbf{R} - \mathbf{r}\cos\theta)\sin\phi, \mathbf{r}\sin\theta \}$ (1)

と表すと、ストランドの弧長の微小分ds =  $(dx^2 + dy^2 + dz^2)^{1/2}$ を用いて、接線ベクトル  $\mathbf{t} = (x_t, y_t, z_t)$ の成分であるdx/ds, dy/ds, dz/dsは、それぞれ以下のようになる:

 $\begin{aligned} dx/ds &= \{rsin\theta cos\phi - (R - rcos\theta)sin\phi(d\phi/d\theta)\}/A \\ dy/ds &= \{rsin\theta sin\phi + (R - rcos\theta)cos\phi(d\phi/d\theta)\}/A \\ dz/ds &= rcos\theta/A \end{aligned}$ 

但し  $A = \{r^2 + (R - r \cos \theta)^2 (d\phi/d\theta)^2\}^{1/2}$ 

またこれらの二階微分d<sup>2</sup>x/ds<sup>2</sup>, d<sup>2</sup>y/ds<sup>2</sup>, d<sup>2</sup>z/ds<sup>2</sup>はそれぞれ 以下のようになる:

$$\begin{split} d^{2}x/ds^{2} &= \{r^{3}cos\theta cos\phi - 2r^{3}sin\theta sin\phi(d\phi/d\theta) \\ &+ rcos\phi(R - rcos\theta)(Rcos\theta - 2r)(d\phi/d\theta)^{2} \\ &- rsin\theta sin\phi(R - rcos\theta)^{2}(d\phi/d\theta)^{3} \\ &- cos\phi(R - rcos\theta)^{3}(d\phi/d\theta)^{4} \\ &- r^{2}sin\phi(R - rcos\theta)(d^{2}\phi/d\theta^{2}) \\ &- rsin\theta cos\phi(R - rcos\theta)^{2}(d\phi/d\theta)(d^{2}\phi/d\theta^{2})\}/B \\ d^{2}y/ds^{2} &= \{r^{3}cos\theta sin\phi + 2r^{3}sin\theta cos\phi(d\phi/d\theta) \\ &+ rsin\phi(R - rcos\theta)(Rcos\theta - 2r)(d\phi/d\theta)^{2} \\ &+ rsin\theta cos\phi(R - rcos\theta)^{2}(d\phi/d\theta)^{3} \\ &- sin\phi(R - rcos\theta)^{3}(d\phi/d\theta)^{4} \\ &+ r^{2}cos\phi(R - rcos\theta)(d^{2}\phi/d\theta^{2}) \\ &- r sin\theta sin\phi(R - rcos\theta)^{2}(d\phi/d\theta) (d^{2}\phi/d\theta^{2})\}/B \\ d^{2}z/ds^{2} &= \{-r^{3}sin\theta - rcos\theta(R - rcos\theta)^{2}(d\phi/d\theta)(d^{2}\phi/d\theta^{2}) \\ &- rRsin\theta(R - rcos\theta)(d\phi/d\theta)^{2}\}/B \end{split}$$



図9 隣接ストランドとの接触点の計算方法 Fig. 9 Calculation method of contact point with the neighboring strand

但しB = { $\mathbf{r}^2$  + (R -  $\mathbf{r}\cos\theta$ )<sup>2</sup>(d $\phi$ /d $\theta$ )<sup>2</sup>}<sup>2</sup>

これらを用いると、曲率半径をpとして曲率1/pは以下のようになる。

 $1/\rho = \{(d^2x/ds^2)^2 + (d^2y/ds^2)^2 + (d^2z/ds^2)^2\}^{1/2}$ 

この軌道面の法線ベクトルは以下のように表される単位 ベクトルである。

$$\mathbf{N} = (\mathbf{x}_{\mathrm{N}}, \mathbf{y}_{\mathrm{N}}, \mathbf{z}_{\mathrm{N}}) = (\cos\theta\cos\phi, \, \cos\theta\sin\phi, \, -\sin\theta) \tag{4}$$

# 4.1. 自由ストランド軌道

前述のとおり,自由ストランドは隣接するストランドと接触し ていないため,横方向からの力は受けず,張力のみが作用 する。このためストランドの法線ベクトル n = (d<sup>2</sup>x/ds<sup>2</sup>, d<sup>2</sup>y/ds<sup>2</sup>, d<sup>2</sup>z/ds<sup>2</sup>)とストランドへリカルコイル面の法線ベクトルNの方向 は一致し,これがこの条件下での最短軌道となる。pnが単 位ベクトルとなるので,内積pn・Nは以下のようになる。

$$\rho (rcos \theta cos \phi d^{2}x/ds^{2} + cos \theta sin \phi d^{2}y/ds^{2} - sin \theta d^{2}z/ds^{2}) = 1$$
これをさらに書き下すと

$$\{r^{2} + (R - r\cos\theta)^{2}(d\phi/d\theta)^{2}\} \times [r(R - r\cos\theta)(d^{2}\phi/d\theta^{2}) + sin\theta\{2r^{2} + (R - r\cos\theta)^{2}(d\phi/d\theta)^{2}\}(d\phi/d\theta)]^{2} = 0$$

 $\therefore \mathbf{r}(\mathbf{R} - \mathbf{r}\cos\theta)(d^2\phi/d\theta^2)$  $+ \sin\theta\{2\mathbf{r}^2 + (\mathbf{R} - \mathbf{r}\cos\theta)^2(d\phi/d\theta)^2\}(d\phi/d\theta) = 0$  (6) が得られ,この二階微分方程式は,

$$d\phi/d\theta = \pm r/(R - r\cos\theta) \{ Cr^2(R - r\cos\theta)^2 - 1 \}^{1/2}$$
(7)

となって、一階微分方程式に変換され、容易に積分できて ストランド軌道を求めることができる。

ここでCは積分定数であり、境界条件によって決定することができる。

一方, 隣接するストランドと接触して, 横方向の力を受け ている場合は, (5) 式の内積は1とはならない。そこでこれ をcosΘとしてΘを求めれば, この値はストランドの法線が, 真下からどれだけずれているかの指標となる。

### 4.2. 密着ストランド軌道

隣接するストランド同士が密着している場合は, pn・Nの 内積は1にはならず, (7)式を適用して軌道を求めることは できない。このため密着ストランドの場合には,別の条件を 設定して軌道を計算する必要がある。

密着ストランド上の任意の点P<sub>1</sub>を選ぶと,その点における接線ベクトルt<sub>1</sub>と巻き付き曲面法線ベクトルN<sub>1</sub>を解析的に求めることができる。この2つのベクトルを用いて,その陪法線ベクトルb<sub>1</sub>は,以下のよう計算することができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_{I} &= \mathbf{N}_{I} \times \mathbf{t}_{I} = (x_{b}, y_{b}, z_{b}), \\ & x_{b} = \{rsin\phi + (R - rcos\theta)sin\theta cos\phi(d\phi/d\theta)\}/K \\ & y_{b} = \{-rcos\phi + (R - rcos\theta)sin\theta sin\phi(d\phi/d\theta)\}/K \\ & z_{b} = (R - rcos\theta)cos\theta(d\phi/d\theta)/K \end{aligned}$$
(8)

但しK = { $\mathbf{r}^2$  + (R -  $\mathbf{r}\cos\theta$ )<sup>2</sup>( $d\phi/d\theta$ )<sup>2</sup>}<sup>1/2</sup>

これらを用いると,隣接ストランドとの密着点 $P_{II}(x_{II}, y_{II}, z_{II})$ は,二つの法線 $N_I$ と $b_I$ が作る平面内で $P_I(x_I, y_I, z_I)$ からストランド直径分(D)離れ,かつケーブル芯中心から軌道面半径(r)離れている点であり,以下のように求められる:

$$(\mathbf{x}_{\mathrm{II}}, \mathbf{y}_{\mathrm{II}}, \mathbf{z}_{\mathrm{II}}) = (\mathbf{x}_{\mathrm{I}}, \mathbf{y}_{\mathrm{I}}, \mathbf{z}_{\mathrm{I}}) + \mathbf{D}cos\xi_{\mathrm{I}}\mathbf{b}_{\mathrm{I}} + \mathbf{D}sin\xi_{\mathrm{I}}\mathbf{N}_{\mathrm{I}}$$
(9)

ここで $\xi_i$ は図9に示すように $N_i$ - $b_i$ 平面において $b_i$ からケーブル中心方向に下る角度を表している。演算においてはこの値を調整してケーブル芯中心からの距離を巻き付け半径と等しくする。具体的には, $y_{II}/x_{II} = tan\phi_I$ であるので,

$$(\mathbf{x}_{\rm II} - \mathbf{R}cos\phi_{\rm II})^2 + (\mathbf{y}_{\rm II} - \mathbf{R}sin\phi_{\rm II})^2 + \mathbf{z}_{\rm II}^2 = \mathbf{r}^2$$
(10)

を満たすようにξιを調整する。

一方,この関係は**P**<sub>II</sub>(x<sub>II</sub>, y<sub>II</sub>, z<sub>II</sub>)側から見れば,この点で N<sub>II</sub>, **b**<sub>II</sub>を定めることにより,

$$\begin{aligned} (\mathbf{x}_{\mathrm{I}}, \, \mathbf{y}_{\mathrm{I}}, \, \mathbf{z}_{\mathrm{I}}) &= (\mathbf{x}_{\mathrm{II}}, \, \mathbf{y}_{\mathrm{II}}, \, \mathbf{z}_{\mathrm{II}}) - \mathbf{D}cos\xi_{\mathrm{I}}\mathbf{b}_{\mathrm{I}} - \mathbf{D}sin\xi_{\mathrm{I}}\mathbf{N}_{\mathrm{I}} \\ &= (\mathbf{x}_{\mathrm{II}}, \, \mathbf{y}_{\mathrm{II}}, \, \mathbf{z}_{\mathrm{II}}) + \mathbf{D}cos\xi_{\mathrm{II}}\mathbf{b}_{\mathrm{II}} + \mathbf{D}sin\xi_{\mathrm{II}}\mathbf{N}_{\mathrm{II}} \end{aligned}$$



図10 ストランド軌道の計算方法 Fig. 10 Calculation method of strand track

となる。従って,

$$Dcos\xi_{I}\mathbf{b}_{I} + Dsin\xi_{I}\mathbf{N}_{I} + Dcos\xi_{II}\mathbf{b}_{II} + Dsin\xi_{II}\mathbf{N}_{II} = 0$$
(12)

この式に右側から $N_{II}$ を掛けるベクトル積を作ると,  $b_{II} \times N_{II} = t_{II}$ として, その点におけるストランドの接線ベクト ルを得ることができる。すなわち,

$$(\cos\xi_{\rm I}\mathbf{b}_{\rm I} + \sin\xi_{\rm I}\mathbf{N}_{\rm I}) \times \mathbf{N}_{\rm II} + \cos\xi_{\rm II}\mathbf{t}_{\rm II} = 0$$
(13)

ここで得られるt<sub>u</sub>とt<sub>i</sub>は平行ではなく, 捻れの位置関係にある。

ストランドI上の任意の点において,密着する隣接ストラ ンドIIとの密着点を求め,その点**P**<sub>II</sub>(x<sub>II</sub>, y<sub>II</sub>, z<sub>II</sub>)を,位相角分 (=p/R/N<sub>s</sub>:ストランドピッチ長を滑車のピッチ円半径ならび にストランド本数で除した角度)だけ進めると,この点はス トランドI上の先に進んだ点になる。以下,同様にこの操作 を繰り返せば,密着状態のストランドIの軌道が求まる(図10 参照)。またこれにより,一本のストランド軌道の2点の座標 (θ, φ)と両点での傾斜(dφ/dθ)が求まる。

この演算で最も重要な点は,最初に与える2点の位置が 正確でなければ,その後の演算で得られる他の点は,すべ て不正確になってくることである。そこで最初に与える2点の 位置を正確に求めるために,次のような手順で計算する。

- (1) 第1点を (θ, φ) = (0, 0) とする。
- (3)第1点における位置と傾斜から,この点の密着点の位置 と傾斜を求め,この点を位相角度だけ送って,これを第 2点とする。
- (4) この2点間の軌道(第1節間軌道)を多項式(f=∑a<sub>i</sub>θ<sup>N</sup>)で 与える。両端点における座標と傾斜の4条件があるの で,係数が4つの3次式となる。
- (5)(θ, φ) = (0, 0)を境にして θ の + 側と 側とでは軌道は対称になるので,(θ, φ) = (0,0)は変曲点でなければならない。 すなわちこの点における多項式の二階微分係数 = 2次の 項の係数は0でなければならない。この条件により(2)の

第1点におけるd0/d0が定まり、軌道の多項式が定まる。

- (6)第2点に対する密着点を位相角だけ進めて,第3点とし, この間を第2節間軌道とする。軌道は,両端の位置と傾 斜,ならびに始点における2階微分係数は少なくとも合 わせなければならないので,係数が5つの4次式となる。
- (7)第2節間軌道を位相角分戻した軌道は、第1節間軌道と 全区間にわたり密着しているはずである。しかし演算 上は両端での密着は保証しているものの、中間での密 着は何ら考慮していない。また第1節間軌道を3次式で 表し、第2節間軌道を4次式で表すと、中間部での密着 に関する検討(融通性)が全くできない。
- (8)そこで(4)における第1節間軌道多項式を4次式とし、1 自由度増やしておく。そして(6)で第2節間軌道は4次式 で表しておき、両者の密着の誤差の二乗和(第1節間軌 道を適当に分割し、各点から第2節間軌道に向けての 密着点を求め、この点と第2節間軌道との距離の二乗値 を足しあわせる)が最小になるよう第1節間軌道の第4次 の係数を調整して定める。
- (9)これにより第1節と第2節の節間軌道が確定するので,第 3節間軌道を定めるために第2節終点=第3点に対する密 着点を求め,位相角度分送ってこれを第4点とする。第3 節始点における2階微分係数を第2節終点の値と合わせ るので,4次式で表せるが,1自由度余裕を取って5次式 とし,第5次の係数を調整して第3節間軌道と第2節間軌 道の密着の誤差の二乗和が最小になるように与える。
- (10)以下, (9)を順次繰り返す。

4.3. 密着ストランドから自由ストランドへの遷移

第2章でも述べたように,曲げの内側ではストランドは隣 接するストランドと密着状態にある。ストランドは,密着状 態のまま曲げの外側に向かうが,ある点で自由ストランドに 変わりθ=πに到達する。

この密着ストランドから自由ストランドへの遷移点を求め るために,以下のような演算方法を用いる。

- (1)第1節間密着ストランド軌道から始まって,順次節間密着 ストランド軌道を求めるたびに,個々の終点から自由スト ランドをθ=πまで走らせ,θ=πにおけるφ<sub>π</sub>を求める。
- (2)この  $\phi_{\pi} i \phi_{\pi} = p/2R$  となるように,自由ストランドの始点 を調整する。具体的にはまず(1)で示したように密着ス トランドを1節更新する毎に自由ストランドの  $\theta = \pi$  にお ける $\phi_{\pi}$ を求め,この  $\phi_{\pi}$  が p/2R より大きくなった時,その 節間密着ストランド軌道上で自由ストランドの始点  $\theta_{t}$ を 変えながら、 $\phi_{\pi} = p/2R$  となる点  $\theta_{tc}$ を求める。
- (3)これにより,密着ストランド軌道は<0,θ<sub>tc</sub>>間,<θ<sub>tc</sub>,π>が 自由ストランド軌道となる。なお θ>πについては,対称 となる。

第5章でも述べるがケーブルに捻れが入るとピッチ長は 変化する。そこでこの計算においては, 捻れが入っていな い状態におけるピッチ長を初期条件として与え, 捻れが入 る場合には, それに対応したピッチ長を用いることになる。

#### 5. ケーブル回転数計算手法

上記により滑車で曲げられたケーブルのストランド軌道 を計算できるが,前述のとおり,ストランドは作用する張力 によって,ケーブルに柔軟性を与える目的で設けてある隙 間を消費する形で密着して,曲げの内側に寄ってくる。そ して余った隙間の中で自由ストランドとして曲げの外側まで 行く。したがって直線状態のケーブルの各ストランドの螺旋 軌道とは異なった軌道を各ストランドが描くようになる。こ の結果として,ケーブル1ピッチ長を構成するのに必要なス トランドの長さ(=ケーブル単位長さ当たりに必要なストラン ド長さ: "ストランド/ケーブル長比")が直線状態のケーブ ルとは異なってくる。一般的には,隙間を埋めて最短軌道 を取ろうとすることから,滑車で曲げられた方が,直線状態 よりもストランド長さは短くなる。

定量的な回転数を計算するために、"ストランド/ケーブ ル長比"として、入を設定する。ケーブルが直線状態であれ ばこの入。は、

 $\lambda_{\rm s} = (p^2 + 4\pi^2 r^2)^{1/2} / p \tag{14}$ 

で表される。ケーブルが滑車で曲げられた場合には、ケー ブル中心線の弧上をピッチ長分進んだ際のストランド長と ピッチ長との比 $\lambda_c$  (=  $\ell_c/p: \ell_c =$ ストランド長)で与える。直線 状態のケーブルが単位長さ進んで滑車に入ろうとする時、ス トランドは長さ $\lambda_s$ だけ滑車に入ろうとするのに対し、滑車上 ではケーブル単位長さ当たりのストランド長は $\lambda_c$ であって、  $\lambda_s = \lambda_c$ となり、ケーブルの出入りに際して $\Delta \lambda = \lambda_s - \lambda_c$ (>0)だ けストランド長に過不足が生じる。

内外層ストランド双方で考えると、内外層ストランドはそ れぞれ $\Delta\lambda_i = \lambda_{si} - \lambda_{ci}, \Delta\lambda_o = \lambda_{so} - \lambda_{co}$ の過不足が生じることに なる。 $\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_o$ であれば内外層同じ比率で伸びるだけで あるが、同じでなければ内外層の長さに差が出てくる("ず れ"が発生)ので、何らかの形でこの差を吸収しなければ ならなくなる。

この差を吸収するのがケーブル捻れであると考える。ただ,ケーブルが滑車上にある場合,ケーブルは滑車に強く 押し付けられているので捻れることはできない。

従って, 拘束のない直線状態のケーブル部分において のみ吸収が可能である。

仮にΔλ<sub>o</sub> > Δλ<sub>i</sub>とすると, 滑車上では外層ストランドの伸 びの方が, 内層ストランドの伸びより大きくなっている。この ケーブルが滑車に入る際には外層ストランドの進み方が遅 いので, 直線状態のケーブルの外層ストランドが締まる方 向にケーブルが捻れることになる。逆に滑車から出る際に は, 直線状態に戻るに当たっての外層ストランドの縮もうとす る量が内層ストランドのそれより大きいので, 外層ストランド が弛む方向に直線部分のケーブルが捻れることになる。

ケーブルの外層ストランドが進行方向に向かって左回り (反時計回り)に撚ってあるとすると,滑車の入口側では外 層ストランドが締まる方向にケーブルが回ることになるが, 滑車の入口付近では滑車で拘束されているので,結果的 に滑車から離れた場所で右回り(時計回り)として観察され る。一方,滑車の出口側では外層ストランドが弛む方向, すなわち進行方向に右回り(時計回り)にケーブルが回るこ とになる。よってケーブルが滑車を通過する際には,入口 側ならびに出口側とも進行方向に向かって右回転すること になる。これは実際の観察とも合致している。またトルクとい う観点からも,伸びの小さい方あるいは,縮みの大きい方の ストランドに張力が余分にかかり,結果としてそのストランド のよりが解ける方向(弛む)方向に回ると言える(図11参照)

直線ケーブルに単位長さ当たりz回転の捻れが入ると, 内外層ストランドそれぞれのピッチ長は次のようになる:

$$p'_{o}^{-1} = p_{o}^{-1} + z$$

$$p'_{i}^{-1} = p_{i}^{-1} - z$$
(15)



図11 滑車の出入口におけるケーブルの捻れ Fig. 11 Cable rotation at the entrance and exit of sheave ここでzは図2に見られるように1回転/100m = 1×10<sup>5</sup>回転 /mmのオーダーである。またストランドピッチは数十mm~ 数百mmであって、この逆数( $10^2 \sim 10^3$ /mm)と比較しても非 常に小さい。したがって以下の演算では $z^2$ の項は無視でき る程小さいものとして、切り捨てることとする。なお、(15)式 において、zの符号が正の時、外層ストランドが弛む方向に、 内層ストランドが絞まる方向に捻れることを示している。

捻りによる直線部分の内層/外層ストランド長の変化に ついては、捻れが入った時の $\lambda$ を $\lambda$ としてそれぞれを $\Delta\lambda_{si}$ =  $\lambda'_{si}$  -  $\lambda_{si}$ ,  $\Delta\lambda_{so}$  =  $\lambda'_{so}$  -  $\lambda_{so}$ と表すと14式より,

$$\begin{split} \Delta\lambda_{si} &= \lambda'_{si} - \lambda_{si} = (\lambda'_{si}^{2} - \lambda_{si}^{2})/(\lambda'_{si} + \lambda_{si}) \approx (\lambda'_{si}^{2} - \lambda_{si}^{2})/2\lambda_{si} \\ &\approx -4\pi^{2}r_{i}^{2}z/p_{i}\lambda_{si} \\ \Delta\lambda_{so} &= \lambda'_{so} - \lambda_{so} = (\lambda'_{so}^{2} - \lambda_{so}^{2})/(\lambda'_{so} + \lambda_{so}) \approx (\lambda'_{so}^{2} - \lambda_{so}^{2})/2\lambda_{so} \\ &\approx 4\pi^{2}r_{o}^{2}z/p_{o}\lambda_{so} \end{split}$$
(16)

となる。ここで z が小さいことを用いて  $\lambda'_s + \lambda_s \approx 2\lambda_s$  として いる。

図11で示したように内外層ストランド長の差分の吸収は, (17)式が成り立てばよく、その結果ケーブルの捻れ量zは (18)式で表される。

$$\Delta\lambda_{\rm o} - \Delta\lambda_{\rm i} - (\Delta\lambda_{\rm so} - \Delta\lambda_{\rm si}) = 0 \tag{17}$$

$$\therefore \Delta\lambda_{o} - \Delta\lambda_{i} = 4\pi^{2}(r_{o}^{2}/p_{o}\lambda_{so} + r_{i}^{2}/p_{i}\lambda_{si})z \therefore z = (\Delta\lambda_{o} - \Delta\lambda_{i})/4\pi^{2} (r_{o}^{2}/p_{o}^{2}/p_{o}\lambda_{so} + r_{i}^{2}/p_{i}\lambda_{si})$$
(18)

この演算では、捻れていないケーブルが滑車に出入りする際の捻れについて論じているが、出入りに際して捻られる

		D-3K No.3	D-3K No.4	D-3K No.5	かいこう No.1	かいこう No.2	曳航体 同軸	曳航体 光	ハイパー D
ケーブル外径	Ĕ (mm)	30.5	30.3	30.4	44.0	43.7	17.4	17.4	27.71
ストランド ピッチ (mm)	内 層	400	300	282	400	480	125	118	194
	外層	250	245	250	250	380	99	100	173
ストランド 素線径 (mm)	内 層	1.9	2.0	2.2	3.6	3.05	1.84	1.43	1.47
	外 層	1.9	2.5	2.5	4.3	4.55	1.46	1.59	2.01
巻付きピッチ 半径 (mm)	内 層	12.8	12.85	12.9	18.7	18.6	7.78	7.985	12.99
	外層	10.9	10.6	10.55	14.75	14.8	6.13	6.475	11.25
ストランド 本数	内 層	39	35	30	30	36	24	31	50
	外層	33	24	22	20	19	24	23	32
滑車ピッチ円半径 (mm)		462			700		477.5		610.8
捻れ回数/]	捻れ回数/100m		ab1	未計測	ab.+1	ab.+1/4	ab.+0.9	ab.+0.9	未計測
計算結果/100m		2.79	4.28	2.81	2.27	0.22	0.79	0.88	0.46

表1 各種テザーケーブルの仕様 Table 1 Specifications of tether cables and calculated results

備考) D-3K:ドルフィン3K, ハイパーD;ハイパードルフィン







**D-3K-No.5** 図12 矩形断面ストランドのケーブル断面 Fig. 12 Cross section of cables with quadrilateral strand

# 表2 ケーブル断面の測定結果と計算結果

Table 2 Measured data of cross section of cables and calculated results

		D-3K No.4	D-3K No.5	かいこう No.1	
ケーブル外谷	੬ (mm)	30.3	30.4	44.0	
ストランド	内 層	300	282	400	
ピッチ (mm)	外 層	245	250	250	
ストランド	内 層	1.88	1.76	3.5	
厚さ (mm)	外層	· · · · · · · · · · · · · · · ·		4.0	
ストランド幅	内 層	2.1	2.43	3.5	
(mm)	外 層	2.56	2.92	4.1	
巻付きピッチ	内 層	12.48	12.5	18.35	
半径 (mm)	外 層	10.7	10.9	14.7	
コーニンドナギ	内 層	35	30	30	
ストフィト中奴	外 層	24	22	20	
滑車ピッチ円半	<sup>E</sup> 径 (mm)	462	462	700	
捻れ回数/1	.00m	ab1	未計測	ab.+1	
計算結果/1	.00m	-1.03	+1.47	+1.02	

ことから,(18)式で示される捻れが入った状態で滑車に出入りすることになる。したがってこの捻りzが入った(18)式で与えられるピッチを用いて再び同じ演算を行い,滑車上での捻れと(18)式で与えられる捻れが一致するまで繰り返し計算を行い,収束したzの2倍が実際の捻れ回数になる。すなわち,出口側では内層/外層ストランド長差分の吸収にz捻れ,滑車上のケーブル捻れzも解放されるため,全体としての捻れ回転数は2zとなる。入口側でも同じである。

#### 6. 計算結果とJAMSTEC運用ケーブルの計測結果の比較

かいこう-No.1

海洋科学技術センターで運用実績のある深海用テザー ケーブルの仕様及びこれらのデータを用いて行った計算結 果を表1に示す。未計測は別にして、"ドルフィン3K" No.4, NO.5ケーブル及び"かいこう" No.1ケーブルを除くほかの ケーブルについては、計算値と実測値は良く一致している。 このようなケースでは、ストランドが鋼線であるか、あるいは 硬化したケブラFRPをケーブルの芯に巻き付ける方式のも のであって、いずれもストランドは設計値通りのきれいな円 断面のものである。

それに対して、一致しないケースのケーブルは、未硬化の ケブラFRPをケーブルの芯に巻き付けた後に硬化させたも のであって、断面は円形ではなく四角形に近い形状となって いる。(図12参照)このため表1に示してあるデータ(硬化前の 円形断面状態での値)をそのまま用いることは不適当であり、 改めてケーブルのサンプルを用いて数値を計測して再計算 を試みた。(表2,図13"計算値(サンプル計測)"参照)しかし 隣接ストランドとの接触点(高さ)を与える基準が明確ではな いため、参考計算としかならなかった。ただ接触点を適切 に選択することにより、"ドルフィン3K" No.4ケーブルの回転方 向が逆転する現象も再現し得ることが示されている。

#### 7. おわりに

ケーブル繰り出し/巻き取り中に発生するトルクバランス ケーブルの捻れ現象は、以下のプロセスを経て発生するこ とが立証されたと考える:

- (1)ケーブルを構成する抗張力体であるストランドは、ケーブルの柔軟性を確保する目的で隣接ストランド間に若干の隙間を設けている。
- (2) ケーブルが滑車で曲げられると, 張力を受けているスト ランドは, この隙間を消費する形で曲げの内側に集 まってくる。(密着ストランド)
- (3)ある程度曲げの外側まで進行した地点で、ストランドは 隣接ストランドと接触することのない自由ストランド軌道 へと遷移する。





- (4)この結果,ケーブルが直線状態であった時のストランド軌 道とは異なる軌道に変わり,ストランド軌道長も変化する。
- (5) 一般にこの変化の大きさは内層ストランドと外層ストランドで異なる。
- (6)ケーブルが滑車に入る際に、この差異を吸収するため にケーブルがある方向に捻れる。
- (7)ケーブルが滑車から出る際には、入る際と同じくこの差 異を吸収するためにケーブルが同じ方向に捻れる。
- (8)したがってケーブルが滑車を通過する際には、出入りと も同じ方向にケーブルが捻れることになる。

深海調査活動において,長尺のテザーケーブルを用い ることは必要不可欠であり,前述のようなケーブル捻れを最 小限に抑えるようにケーブルを設計する必要がある。ケー ブルが直線状態でのトルクバランスを正確に取るよう設計・ 製作を進めることは,非常に重要であるが,本報告で記述 したようなケーブルが滑車で曲げられた際の内層/外層ス トランドの軌道及び軌道長の変化にも十分注意を払う必要 がある。 8. 参考文献

- 高川真一"二重鎧装トルクバランスケーブルの捻れに関 する理論的研究"資源・素材1998 No.B, pp 103-106 (1998)
- Shinichi Takagawa "Diving to Mariana Trench by KAIKO" PACON International '96 (1996)
- (3) 矢野裕亮,高川真一"二重鎧装トルクバランスケーブルの捻れに関する理論的研究(第2報)"資源・素材2002
   No.B, pp 303-306 (2002)
- Yusuke Yano, Shinichi Takagawa "Theoretical Study on Rotation of Doubly Layered Torque Balance Cable" OCEANS2003 pp 103-106 (2003)
- 5) 浦環, 高川真一"海中ロボット"成山堂書店(1997)
- 小野進"ワイヤロープの微分幾何学的考察"日本応用 数理学会論文誌Vol.3, No.4 pp 387-424 (1993)

(原稿受理:平成15年10月30日)