

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^{*1} 高川 真一^{*1}

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^{*2} Shinich TAKAGAWA^{*2}

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

* 1 海洋科学技術センター 深海地球ドリリング計画推進室

* 2 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、スラスト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(船上の滑車へケーブルが入り出す角度)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ても仮定しても、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

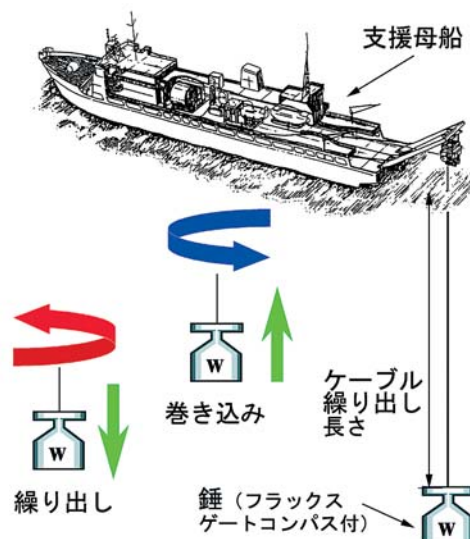


図1 ケーブルフリーフォール試験

Fig. 1 Cable free-fall test

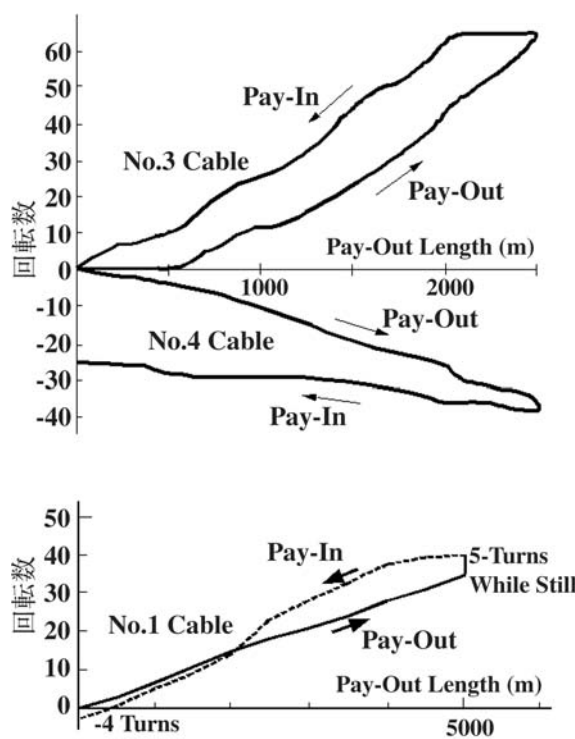


図2 “ドルフィン3K” No.3, No.4ケーブル (上)と“かいこう” No.1 ケーブルの捻れ計測結果 (下)

Fig. 2 Measured rotation of ROV Dolphin3K-No.3&No.4 cable (Above Fig.), ROV Kaiko-No.1 cable (Below Fig.)

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 $\div$ 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(上图)と一般ケーブル(下图)
Fig. 3 Cable with slip restriction (Above Fig.) and normal cable (Below Fig.)

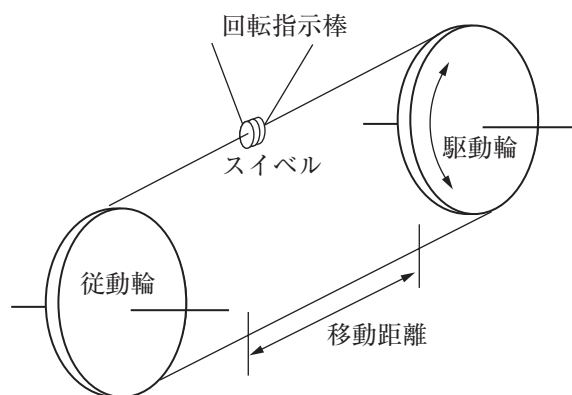


図4 ケーブル曲げ試験機
Fig. 4 Cable rotation measurement system

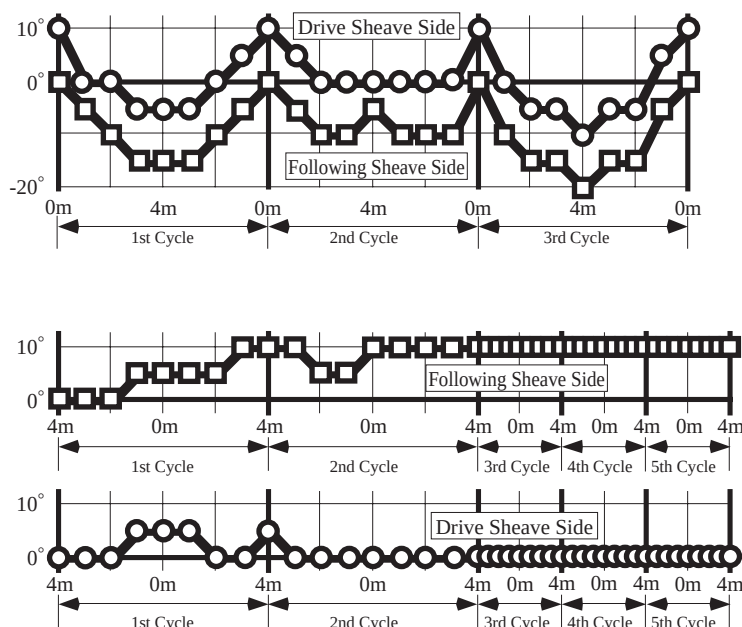


図5 ケーブル曲げ試験機によるストランドずれ防止機構の試験結果
Fig. 5 Test results of slip restriction effect by cable rotation measurement system

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

二重鉛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経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、曲げや捻れ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。

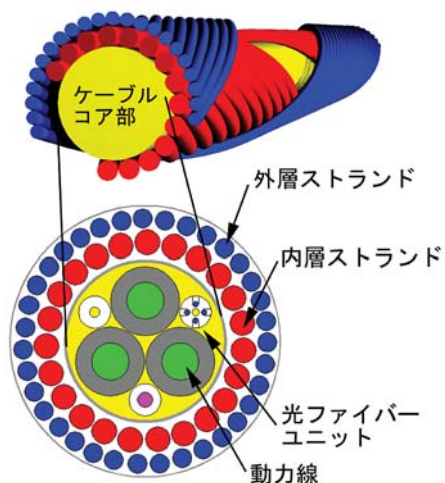


図6 二重鉛装トルクバランスケーブルの構造
Fig. 6 Structure of doubly layered torque balance cable

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_s : ストランド本数

L: ストランド長(弧長)

$ds = (dx^2 + dy^2 + dz^2)^{1/2}$

$\mathbf{b} = (x_b, y_b, z_b)$: ストランド軌道の陪法線ベクトル

$\mathbf{N} = (x_N, y_N, z_N)$: ストランド巻き付き曲面の法線ベクトル

$\mathbf{n} = (x_n, y_n, z_n)$: ストランド軌道の法線ベクトル

$\mathbf{t} = (x_t, y_t, z_t)$: 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
 $\theta=0$

ϕ : 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

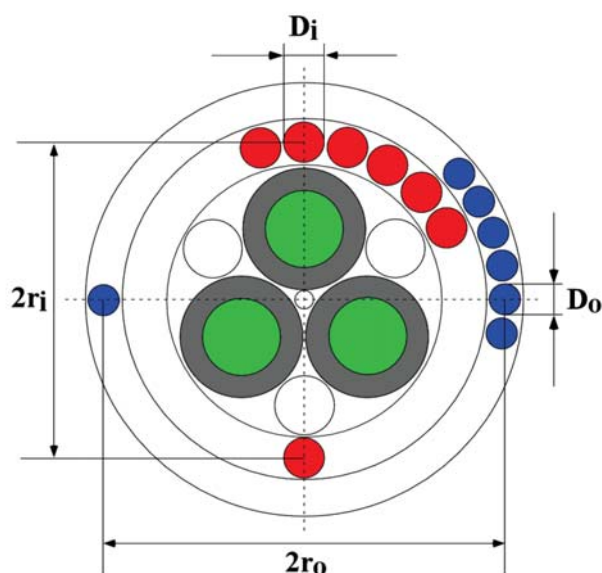


図7 ケーブル断面と記号の取り方
Fig. 7 Cross section of cable and symbols

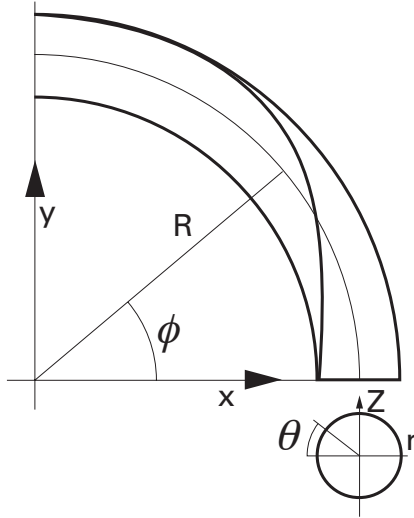


図8 座標系
Fig. 8 Coordinate syste

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

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

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：

$$\begin{aligned} dx/ds &= \{r\sin\theta\cos\phi - (R - r\cos\theta)\sin\phi(d\phi/d\theta)\}/A \\ dy/ds &= \{r\sin\theta\sin\phi + (R - r\cos\theta)\cos\phi(d\phi/d\theta)\}/A \\ dz/ds &= r\cos\theta/A \end{aligned} \quad (2)$$

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

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

$$\begin{aligned} d^2x/ds^2 &= \{r^3\cos\theta\cos\phi - 2r^3\sin\theta\sin\phi(d\phi/d\theta) \\ &\quad + r\cos\phi(R - r\cos\theta)(R\cos\theta - 2r)(d\phi/d\theta)^2 \\ &\quad - r\sin\theta\sin\phi(R - r\cos\theta)^2(d\phi/d\theta)^3 \\ &\quad - \cos\phi(R - r\cos\theta)^3(d\phi/d\theta)^4 \\ &\quad - r^2\sin\phi(R - r\cos\theta)(d^2\phi/d\theta^2) \\ &\quad - r\sin\theta\cos\phi(R - r\cos\theta)^2(d\phi/d\theta)(d^2\phi/d\theta^2)\}/B \\ d^2y/ds^2 &= \{r^3\cos\theta\sin\phi + 2r^3\sin\theta\cos\phi(d\phi/d\theta) \\ &\quad + r\sin\phi(R - r\cos\theta)(R\cos\theta - 2r)(d\phi/d\theta)^2 \\ &\quad + r\sin\theta\cos\phi(R - r\cos\theta)^2(d\phi/d\theta)^3 \\ &\quad - \sin\phi(R - r\cos\theta)^3(d\phi/d\theta)^4 \\ &\quad + r^2\cos\phi(R - r\cos\theta)(d^2\phi/d\theta^2) \\ &\quad - r\sin\theta\sin\phi(R - r\cos\theta)^2(d\phi/d\theta)(d^2\phi/d\theta^2)\}/B \\ d^2z/ds^2 &= \{-r^3\sin\theta - r\cos\theta(R - r\cos\theta)^2(d\phi/d\theta)(d^2\phi/d\theta^2) \\ &\quad - rR\sin\theta(R - r\cos\theta)(d\phi/d\theta)^2\}/B \end{aligned} \quad (3)$$

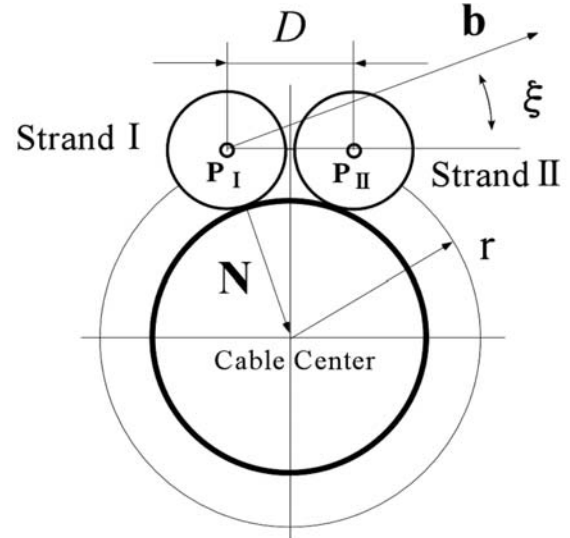


図9 隣接ストランドとの接触点の計算方法
Fig. 9 Calculation method of contact point with the neighboring strand

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

これらを用いると、曲率半径を ρ として曲率 $1/\rho$ 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。

$$\mathbf{N} = (x_N, y_N, z_N) = (\cos\theta\cos\phi, \cos\theta\sin\phi, -\sin\theta) \quad (4)$$

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 $\mathbf{n} = (d^2x/ds^2, d^2y/ds^2, d^2z/ds^2)$ とストランドヘリカルコイル面の法線ベクトル $\mathbf{N}$ の方向は一致し、これがこの条件下での最短軌道となる。 $\rho\mathbf{n}$ が単位ベクトルとなるので、内積 $\rho\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}$ は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \rho(r\cos\theta\cos\phi d^2x/ds^2 + \cos\theta\sin\phi d^2y/ds^2 \\ - \sin\theta d^2z/ds^2) = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

これをさらに書き下すと

$$\begin{aligned} \{r^2 + (R - r\cos\theta)^2(d\phi/d\theta)^2\} \times \\ [r(R - r\cos\theta)(d^2\phi/d\theta^2) \\ + \sin\theta\{2r^2 + (R - r\cos\theta)^2(d\phi/d\theta)^2\}(d\phi/d\theta)]^2 = 0 \\ \therefore r(R - r\cos\theta)(d^2\phi/d\theta^2) \\ + \sin\theta\{2r^2 + (R - r\cos\theta)^2(d\phi/d\theta)^2\}(d\phi/d\theta) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

が得られ、この二階微分方程式は、

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

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 $\cos\theta$ 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、 $\mathbf{pn} \cdot \mathbf{N}$ 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 $\mathbf{P}_I$ を選ぶと、その点における接線ベクトル $\mathbf{t}_I$ と巻き付き曲面法線ベクトル $\mathbf{N}_I$ 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 $\mathbf{b}_I$ は、以下のように計算することができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_I &= \mathbf{N}_I \times \mathbf{t}_I = (x_b, y_b, z_b), \\ x_b &= \{r\sin\phi + (R - r\cos\theta)\sin\theta\cos\phi(d\phi/d\theta)\}/K \\ y_b &= \{-r\cos\phi + (R - r\cos\theta)\sin\theta\sin\phi(d\phi/d\theta)\}/K \\ z_b &= (R - r\cos\theta)\cos\theta(d\phi/d\theta)/K \end{aligned} \quad (8)$$

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

これらを用いると、隣接ストランドとの密着点 $\mathbf{P}_{II}(x_{II}, y_{II}, z_{II})$ は、二つの法線 $\mathbf{N}_I$ と $\mathbf{b}_I$ が作る平面内で $\mathbf{P}_I(x_I, y_I, z_I)$ 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：

$$(x_{II}, y_{II}, z_{II}) = (x_I, y_I, z_I) + D\cos\xi_I\mathbf{b}_I + D\sin\xi_I\mathbf{N}_I \quad (9)$$

ここで ξ_I は図9に示すように $\mathbf{N}_I$ - $\mathbf{b}_I$ 平面において $\mathbf{b}_I$ 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、 $y_{II}/x_{II} = \tan\phi_{II}$ であるので、

$$(x_{II} - R\cos\phi_{II})^2 + (y_{II} - R\sin\phi_{II})^2 + z_{II}^2 = r^2 \quad (10)$$

を満たすように ξ_I を調整する。

一方、この関係は $\mathbf{P}_{II}(x_{II}, y_{II}, z_{II})$ 側から見れば、この点で $\mathbf{N}_{II}$, $\mathbf{b}_{II}$ を定めることにより、

$$\begin{aligned} (x_I, y_I, z_I) &= (x_{II}, y_{II}, z_{II}) - D\cos\xi_{II}\mathbf{b}_{II} - D\sin\xi_{II}\mathbf{N}_{II} \\ &= (x_{II}, y_{II}, z_{II}) + D\cos\xi_{II}\mathbf{b}_{II} + D\sin\xi_{II}\mathbf{N}_{II} \end{aligned} \quad (11)$$

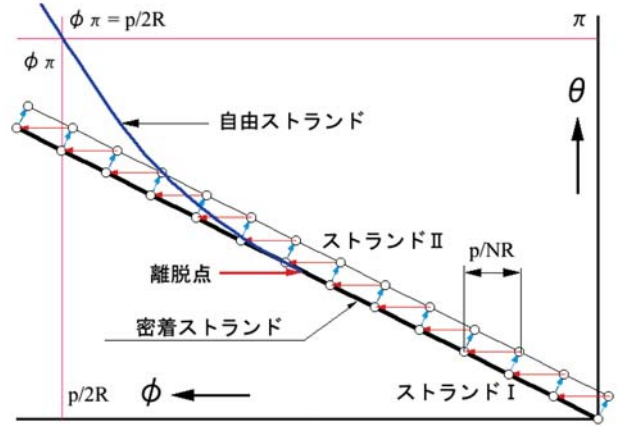


図10 ストランド軌道の計算方法

Fig. 10 Calculation method of strand track

となる。従って、

$$D\cos\xi_I\mathbf{b}_I + D\sin\xi_I\mathbf{N}_I + D\cos\xi_{II}\mathbf{b}_{II} + D\sin\xi_{II}\mathbf{N}_{II} = 0 \quad (12)$$

この式に右側から $\mathbf{N}_{II}$ を掛けるベクトル積を作ると、 $\mathbf{b}_{II} \times \mathbf{N}_{II} = \mathbf{t}_{II}$ 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、

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

ここで得られる $\mathbf{t}_{II}$ と $\mathbf{t}_I$ 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 $\mathbf{P}_{II}(x_{II}, y_{II}, z_{II})$ を、位相角分(=p/R/N_s: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($d\phi/d\theta$)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 $(\theta, \phi) = (0, 0)$ とする。
- (2) 第1点における傾斜 $d\phi/d\theta$ を任意に(例えば直線時のストランド傾斜)与える。
- (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($f = \sum a_i \theta^N$)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) $(\theta, \phi) = (0, 0)$ を境にして θ の+側と-側とは軌道は対称になるので、 $(\theta, \phi) = (0, 0)$ 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 $d\theta/d\theta$ 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、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 $\theta=\pi$ 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 $\theta=\pi$ まで走らせ、 $\theta=\pi$ における ϕ_π を求める。
- (2) この ϕ_π が $\phi_\pi = p/2R$ 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 ϕ_π を求め、この ϕ_π 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 θ_i を変えながら、 $\phi_\pi = p/2R$ となる点 θ_{ic} を求める。
- (3) これにより、密着ストランド軌道は $\langle 0, \theta_{ic} \rangle$ 間、 $\langle \theta_{ic}, \pi \rangle$ が自由ストランド軌道となる。なお $\theta>\pi$ 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、 λ を設定する。ケーブルが直線状態であればこの λ_0 は、

$$\lambda_0 = (p^2 + 4\pi^2 r^2)^{1/2}/p \quad (14)$$

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 $\lambda_c (= \ell_c/p : \ell_c = \text{ストランド長})$ 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 λ_0 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 λ_c であって、 $\lambda_0 \neq \lambda_c$ となり、ケーブルの出入りに際して $\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_c (>0)$ 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。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 $\Delta\lambda_o > \Delta\lambda_i$ 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)に捻ってあるとすると、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：

$$\begin{aligned} p_o'^{-1} &= p_o^{-1} + z \\ p_i'^{-1} &= p_i^{-1} - z \end{aligned} \quad (15)$$

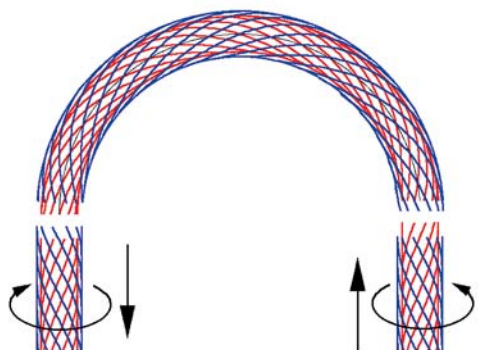


図11 滑車の出入口におけるケーブルの捻れ
Fig. 11 Cable rotation at the entrance and exit of sheave

ここで z は図2に見られるように1回転/100m = 1×10^{-5} 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($10^{-2} \sim 10^{-3}/\text{mm}$)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 λ を λ' 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、

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{si} &= \lambda'_{si} - \lambda_{si} = (\lambda'^2_{si} - \lambda^2_{si})/(\lambda'_{si} + \lambda_{si}) \approx (\lambda'^2_{si} - \lambda^2_{si})/2\lambda_{si} \\ &\approx -4\pi^2 r_i^2 z / p_i \lambda_{si} \\ \Delta\lambda_{so} &= \lambda'_{so} - \lambda_{so} = (\lambda'^2_{so} - \lambda^2_{so})/(\lambda'_{so} + \lambda_{so}) \approx (\lambda'^2_{so} - \lambda^2_{so})/2\lambda_{so} \\ &\approx 4\pi^2 r_o^2 z / p_o \lambda_{so} \end{aligned} \quad (16)$$

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。

$$\Delta\lambda_o - \Delta\lambda_i - (\Delta\lambda_{so} - \Delta\lambda_{si}) = 0 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \therefore \Delta\lambda_o - \Delta\lambda_i &= 4\pi^2 (r_o^2/p_o \lambda_{so} + r_i^2/p_i \lambda_{si}) z \\ \therefore z &= (\Delta\lambda_o - \Delta\lambda_i) / 4\pi^2 (r_o^2/p_o \lambda_{so} + r_i^2/p_i \lambda_{si}) \end{aligned} \quad (18)$$

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

表1 各種テザーケーブルの仕様

Table 1 Specifications of tether cables and calculated results

		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 (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/100m		ab.+3	ab.-1	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

備考) D-3K：ドルフィン3K， ハイパーD；ハイパードルフィン

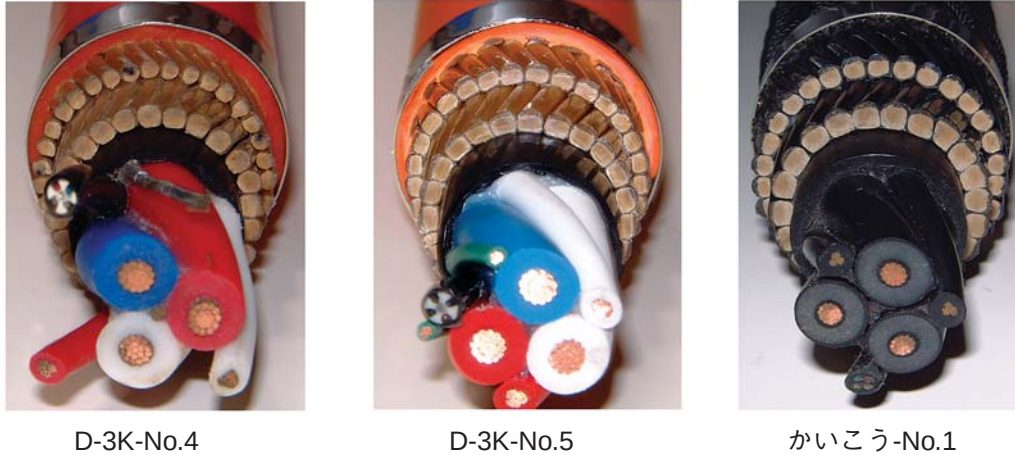


図12 矩形断面ストランドのケーブル断面
Fig. 12 Cross section of cables with quadrilateral strand

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
ケーブル外径 (mm)		30.3	30.4	44.0
ストランド ピッチ (mm)	内 層	300	282	400
	外 層	245	250	250
ストランド 厚さ (mm)	内 層	1.88	1.76	3.5
	外 層	2.28	2.08	4.0
ストランド幅 (mm)	内 層	2.1	2.43	3.5
	外 層	2.56	2.92	4.1
巻付きピッチ 半径 (mm)	内 層	12.48	12.5	18.35
	外 層	10.7	10.9	14.7
ストランド本数	内 層	35	30	30
	外 層	24	22	20
滑車ピッチ円半径 (mm)		462	462	700
捻れ回数/100m		ab.-1	未計測	ab.+1
計算結果/100m		-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入りすることになる。したがってこの捻れ 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

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适当であり、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。

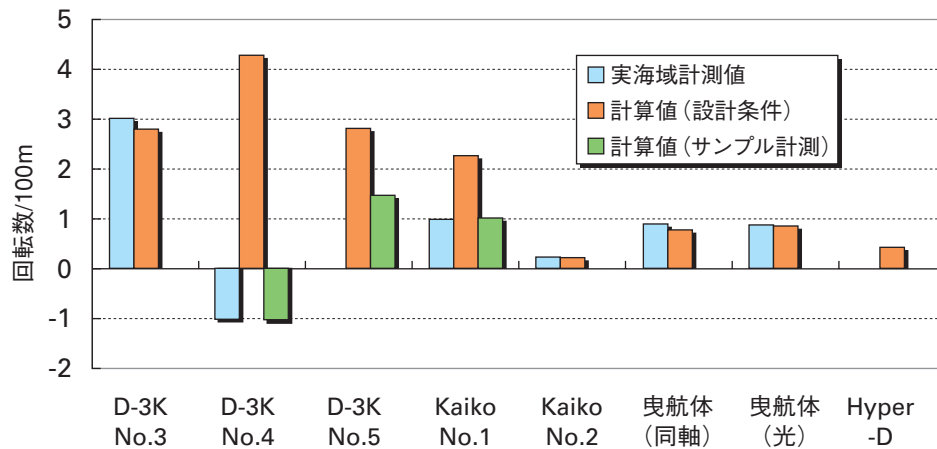


図13 JAMSTEC運用ケーブルの捻れ計測結果と計算結果

Fig. 13 Measured and calculated rotation of cables operated by JAMSTEC

- (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

- 1) 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)
- 2) 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)
- 4) 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)
- 6) 小野進 “ワイヤロープの微分幾何学的考察” 日本応用数学会論文誌Vol.3, No.4 pp 387-424 (1993)

(原稿受理：平成15年10月30日)