

## 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

## Theoretical Study on Rotation of Doubly Layered Torque Balanced Cable

高川 真一\*

Shinichi TAKAGAWA

## 1. はじめに

JAMSTECでは1970年代中頃から深海曳航体(最大潜航深度約6,000 m)の開発と運用を開始したが、トルクバランスを取ったはずのケーブル(図1参照)に捻れ問題が生じて、その扱いに苦慮してきた。大水深ROVとして1985年に開発されたドルフィン3K(最大潜航深度3,300 m)は、試運転の際にやはりケーブルが捻れ、ケーブルを構成するストランド(抗張力体)の配列が大きく乱れて座屈したことが度々あり、さらには支援母船上でこのROVをケーブルでつり上げようとしたところケーブルがROVとの付け根で切れてROVを甲板に落とすという事故も起こしている。その後の試行錯誤のケーブル開発の結果、同ROV用のNo. 3ケーブルではROVを繰り出す際に100 m当たり約3回捻れる程度に収まり、次のNo. 4ケーブルでは方向は逆であるが100 m当たり約1回捻れる程度にまで収まってきた(図2参照)。

ドルフィン3KのNo. 4ケーブルが製作されているのとはほぼ同時期に開発が開始されたROV「かいこう」(最大潜航深度11,000 m)計画では、捻れの原因が船上の滑車の傾斜角(Fleet Angle; 滑車を作る平面に対してケーブルが出入りする角度)が影響しているのではないかとの考えから、傾斜角が0°となる滑車装置(図3)を設けたがその効果はほとんど見えず、「かいこう」No. 1ケーブルでは100 m当

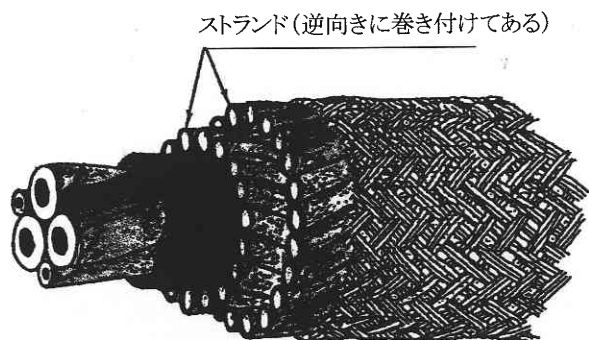


図1 二重鎧装ケーブルの代表的構造

たり約1回の捻れが入った(図4参照)。

現在用いている「かいこう」No. 2ケーブルでは、この捻れは非常に小さくなり、約400 mにつき1回の捻れに収まっている。

ここで言う「ケーブルの捻れ」とは製造後の残留捻れのことを言っているのではない。図2や図4に示しているのはフリーフォールと呼んでいる実測データの一部であり、ケーブル先端にコンパスを組み込んだ錘をつり下げ、海中に繰り出したケーブルの長ささとそれに対応するコンパスの指示角度変化を見るものである。注目すべきは、所定長さ繰り出して静定した後にケーブルを巻き取る過程の下端の錘あるいはコンパスの回転である。ケーブルは残留捻れが仮に在ったとしても、静定した時点では完全に除去されているはずであり、トルクはケーブル上各点で完全にバランスしていることとなる。しかしこのケーブルを巻き取ると、単位長さ当たり一定回数の回転が入ることが分かる。

上記で100 m当たり何回転と言っているのはこの数字のことである。また、巻き出しと巻き取りで単位長さ当たりの回転数は変化しないが回転方向が逆になる。

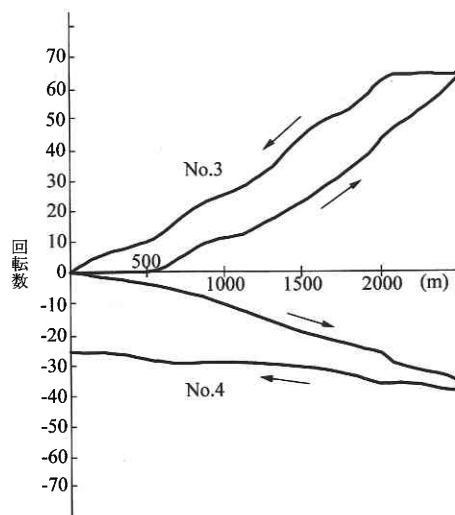


図2 非拘束鉛直展張におけるROVドルフィン3KケーブルNo. 3 &amp; No. 4の回転状況

\*東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター

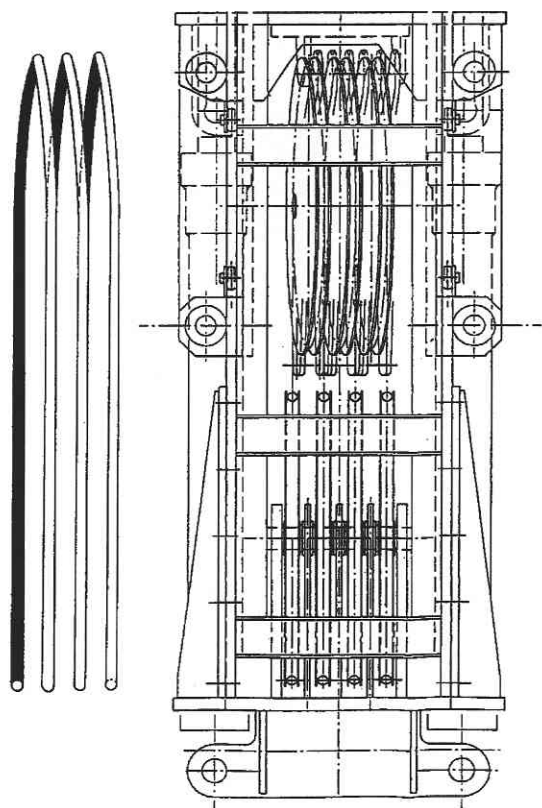


図3 11,000 mROV「かいこう」で用いられたフリート角0のラム式上下動吸収装置。上部滑車が傾けられており、滑車が作る空間面内でケーブルが走るようにしてある。

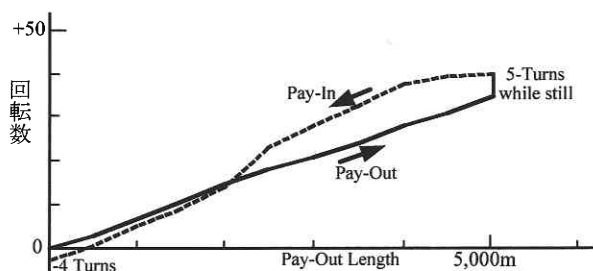


図4 11,000 mROV「かいこう」No. 1ケーブルの非拘束鉛直展張における回転状況

この現象はケーブルを回そうとするアンバランスなトルクがどこにあるのか分からないため、結局試行錯誤の連続でケーブルの製作と捻れ性能の確認が繰り返されていた。前記「かいこう」No. 2ケーブルは確かに捻れ回数が従来のもより格段に少ないが、このケーブルは真直時のトルクバランスを極力完全に取ることを目標に製作されたものであり、捻れのメカニズムを解明した上で製作されたものではない<sup>1)</sup>。従って今後新たにケーブルを製作する必要がある場合、果たしてこのNo. 2ケーブルと同等以上の捻れ特性の優れたケーブルが製作できるかどうかの保証は全くないのが実情である。

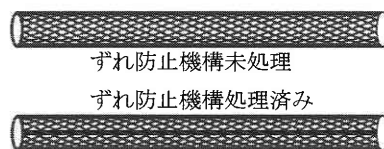


図5 内外層ストランドずれ防止機構無しと有りのケーブル：下の図にある帯状の線が接着剤塗布部



図6 ケーブル捻れ試験：スィベル部分を両輪間で往復させて回転角度指示器の振れを読みとる

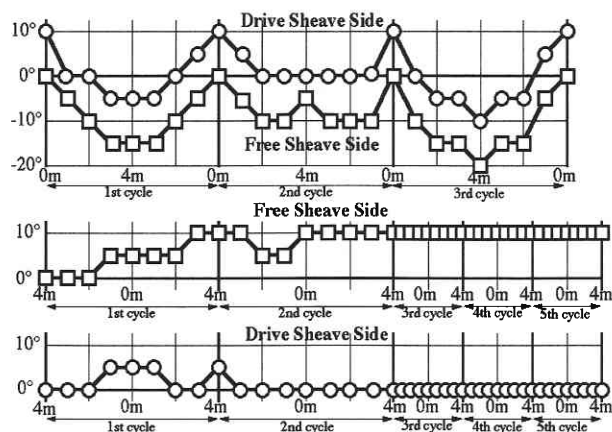


図7 ケーブル捻れ試験器によるストランドずれ防止機構の影響確認試験結果

これらの捻れ状況を考えていくと、滑車やケーブルそれぞれ単独の問題ではなく、滑車とケーブルの相互作用が相当関係しているように思われてくる。筆者はこのような状況を認識した上で、ケーブルが真直な時と滑車上で曲げられている場合とでストランドの軌道が異なってくることに着目し、この影響の有無を調べることによってケーブルが捻れることを説明できないかと考えた。

すなわち、ケーブルが滑車で曲げられる際に外層ストランドと内層ストランドがケーブル長手方向に少しずれるためにこの捻れが発生するのではないかと考えて、「かいこう」No. 1ケーブル試作品から切り出した試験ケーブルを用いて、このずれが生じないようケーブル内外層ストランドの一部を図5に示すように帯状に接着剤で接合したものを作り、そして図6のような方法でケーブルを繰り返し滑車に出し入れしてみた。結果は図7に示すようにずれ防止未処理のものとは処理済みのものでは、歴然たる違いが現れた。すなわちずれを防止したものでは捻れが生じなかつ

## 研 究 速 報

た. また未処理のものの捻れは当該ケーブルの実運用時と同じでほぼ 100 m につき 1 回転であった ( $15^\circ/4 \text{ m} \div 360^\circ/100 \text{ m}$ ).

ドルフィン 3 K の No. 3 & No. 4 ケーブルはケーブル表面にゴムの被覆層があるために上記のようなストランドのずれ防止処理ができなかったが, 未処理のままでは同じような試験をすると明らかに図 2 に示しているのと同じ捻れが入ることが確認された.

これらの試験から, 運転中にケーブルが捻れるのは, ケーブルが滑車を通過して曲げられる際に内外ストランド層にずれが生じ, この結果として捻れると考えるに至った.

## 2. 基本的考え方

二重鎧装ケーブルのストランドは, 全体のトルクがバランスするように互いに反対方向に巻き付けてある二重構造になっている. これらのストランドは互い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ってケーブルに巻き付けてある. これらのストランドの軌道は, ケーブルが真直である時は, ケーブルの長手方向に対して一定傾斜の螺旋軌道を描いている. しかしケーブルが滑車で曲げられた時には, ストランド同士の隙間を埋める形で曲げの内側にストランドが寄って来て密着する (密着ストランド). その結果として残っている隙間が余って広くなってくるため, 曲げの外側に行ったある場所でストランドは互いに離れ (自由ストランド), そのまま曲げの最外縁を通過し, 再び内側に入って来てある場所で密着ストランドになる.

滑車で曲げられたケーブルでは, 直線状態のケーブルとは異なってこのような軌道を取るために, 軌道長も変わって来ることになる. そして軌道長の変化の仕方が内外ストランドで同じでなければ, この不均衡を解消するためにケーブルが捻れることになる.

そこで滑車で曲げられたケーブルのストランドの軌道を求める手法について検討を進め, これを用いてケーブルの捻れを説明する理論の検討を進めた.

## 3. 記 号

本論文で用いる記号は下記ならびに図 8 ならびに図 9 に示す通りとする. なお, 下添え字  $i$  は内層ストランド, 下添え字  $o$  は外層ストランドを示す. また下添え字  $s$  は直線状態を, 下添え字  $c$  は滑車でケーブルが曲っている状態のストランドを示す.

$R$  : 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

$r$  : ストランドヘリカルコイル中心線半径

$N$  : ストランド本数

$l$  : ストランド長 (弧長)

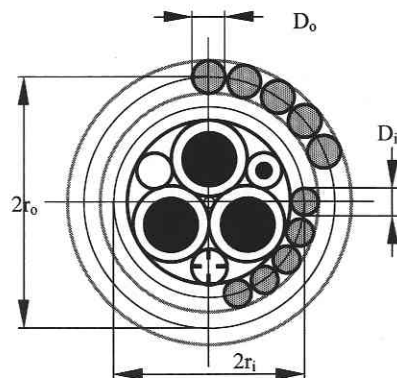


図 8 ケーブル断面と記号の取り方

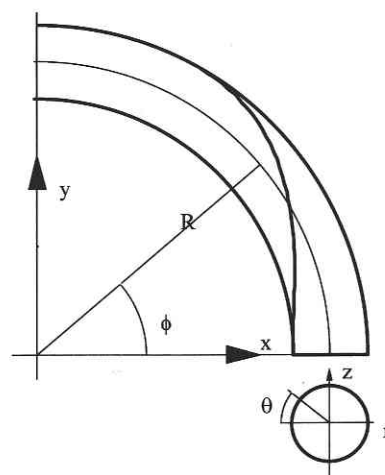


図 9 座標系

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

$\mathbf{b} = (x_b, y_b, z_b)$  : ストランド軌道の陪法線ベクトルならびにその成分表示

$\mathbf{N} = (x_N, y_N, z_N)$  : ストランドヘリカルコイル面の法線ベクトルならびにその成分表示

$\mathbf{n} = (x_n, y_n, z_n)$  : ストランド軌道の法線ベクトルならびにその成分表示

$\mathbf{t} = (x_t, y_t, z_t)$  : ストランド軌道の接線ベクトルならびにその成分表示

$z$  : ケーブル捻れ

$\xi$  : 陪法線からケーブル中心に向かう角度

$\lambda$  : ストランド/ケーブル長比

$\rho$  : ストランドの曲率半径.  $1/\rho$  は同曲率

$\theta$  : ストランドヘリカルコイルの座標角度. 滑車溝の谷底が  $\theta = 0$

$\phi$  : 滑車中心から図った進行角度

## 4. 自由ストランド軌道

図 9 に示す  $x$ - $y$ - $z$  直交座標系においてストランド中心の

座標を

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

と表すと、曲率  $1/\rho$  は

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

と表される。

一方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：

$$\mathbf{N} = (x_N, y_N, z_N) = (\cos \theta \cos \phi, \cos \theta \sin \phi, -\sin \theta) \cdots \cdots (3)$$

自由ストランドであれば、近隣の他のストランドから横方向に押されることはないので張力のみが作用することになり、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  $\mathbf{N}$  は方向が一致する。 $\rho \mathbf{n}$  が単位ベクトルになるので、内積  $\rho \mathbf{n} \cdot \mathbf{N}$  は、

$$\rho \mathbf{n} \cdot \mathbf{N} = \rho (\cos \theta \cos \phi \frac{d^2x}{ds^2} + \cos \theta \sin \phi \frac{d^2y}{ds^2} - \sin \theta \frac{d^2z}{ds^2}) = 1 \cdots \cdots (4)$$

である。そしてこの式は最終的に

$$r(R - r \cos \theta) \{ \frac{d^2\phi}{d\theta^2} + \sin \theta \{ 2r^2 + (R - r \cos \theta)^2 (\frac{d\phi}{d\theta})^2 \} \} \frac{d\phi}{d\theta} = 0 \cdots \cdots (5)$$

となり、更にこの二階微分方程式は

$$\frac{d\phi}{d\theta} = \pm r / [ (R - r \cos \theta) \{ Cr^2 (R - r \cos \theta)^2 - 1 \}^{1/2} ] \cdots \cdots (6)$$

となって一階微分方程式に変換され、容易に積分できて軌道が求まる。ここで  $C$  は積分定数であり、境界条件を定めれば決まる。

## 5. 密着ストランド軌道

密着ストランドの隣接ストランドとの密着点は以下のようにして求められる：

ストランド上の点  $\mathbf{P}_I(x_I, y_I, z_I)$  を選ぶとその点におけるストランドの接線ベクトル  $\mathbf{t}_I$ 、軌道面の法線ベクトル  $\mathbf{N}_I$  が定まるので、この二つのベクトルを用いてその陪法線ベクトル  $\mathbf{b}_I$  は  $\mathbf{b}_I = \mathbf{N}_I \times \mathbf{t}_I = (x_b, y_b, z_b)$  で与えられる。

隣接ストランドの密着点  $\mathbf{P}_{II}(x_{II}, y_{II}, z_{II})$  は、二つの単位ベクトル  $\mathbf{N}_I$  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 ( $r$ ) 離れている点として、以下のように求められる：

$$(x_{II}, y_{II}, z_{II}) = (x_I, y_I, z_I) + D \cos \xi_I \mathbf{b}_I + D \sin \xi_I \mathbf{N}_I \cdots \cdots (7)$$

ここで  $\xi_I$  は図 10 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  $\xi_I$  を調整してケーブル芯中心からの距離を軌道面半径  $r$  と同じにする。具体的には、 $y_{II}/x_{II} = \tan \phi_{II}$  であるので、

$$(x_{II} - R \cos \phi_{II})^2 + (y_{II} - R \sin \phi_{II})^2 + z_{II}^2 = r^2 \cdots \cdots (8)$$

を満たすように  $\xi_I$  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、

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

$$\therefore D \cos \xi_{II} \mathbf{b}_{II} + D \sin \xi_{II} \mathbf{N}_{II} + D \cos \xi_{II} \mathbf{b}_{II} + D \sin \xi_{II} \mathbf{N}_{II} = 0 \cdots \cdots (9)$$

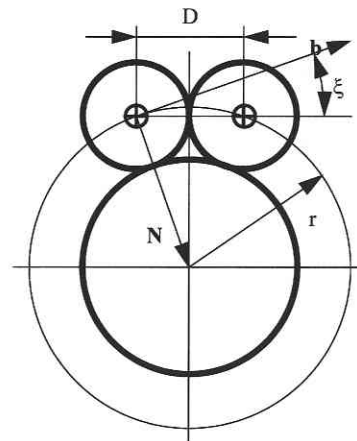


図 10 密着ストランドの計算手法

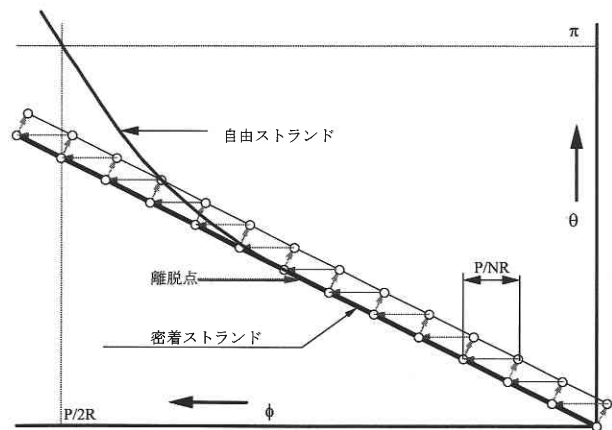


図 11 密着ストランド算出方法。原点を起点（第1点）とし、その密着点を求めて、この点を  $p/NR$  送って第2点とする。これを繰り返す。原点では対称性のために2階微分係数を0とする

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、

$$(\cos \xi_I \mathbf{b}_I + \sin \xi_I \mathbf{N}_I) \times \mathbf{N}_{II} + \cos \xi_{II} \mathbf{t}_{II} = 0 \cdots \cdots (10)$$

$\mathbf{t}_{II}$  から密着点の座標と傾斜 ( $d\phi/d\theta$ ) も求まる。

密着ストランドの軌道を求めるには、今求めた隣接ストランドの密着点  $\mathbf{P}_{II}$  を活用する。すなわち、ストランド I と隣接ストランド II は位相角分 ( $=p/RN$ ：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) ずれており、密着点  $\mathbf{P}_{II}$  をこの位相角分だけ前に送ると、この点はストランド I 上の先に進んだ点になる。以下同様にして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 11 参照)。

## 6. ストランド軌道の計算

滑車により曲げられたケーブルのストランドの軌道を密着ストランドと自由ストランドの組み合わせで表すに当たっ

## 研 究 速 報

ては、自由ストランドが  $\theta = \pi$  (半周) の時に通過する  $\phi_\pi$  がピッチ角 (直線状態のストランドのピッチ長を滑車半径で割った値  $= p/R$ ) の半分に一致するようにする。具体的には以下のような演算方法を採用している:

- (1) 前章の密着点演算手法によって密着ストランド軌道を順次求めつつ、端点の座標ならびにその傾斜の値を用いて自由ストランドとしての軌道を (6) 式により求め、 $\phi_\pi$  と  $p/2R$  の大小関係を調べる。
- (2)  $\phi_\pi > p/2R$  となる直前の端点から始まる密着ストランドについて両端の座標ならびに傾斜から  $(\theta, \phi)$  座標において3次式で近似し、 $\phi_\pi = p/2R$  となる自由ストランドの始点を求める。

第8章でも述べるがケーブルに捻れが入るとピッチは変わってくる。そこでこの計算においては、最初は捻れが入っていない状態におけるピッチ長を与えておき、捻れが入るのであればそれに対応したピッチ長を与えることになる。

## 7. 捻 れ 回 数

量的な回転数を考えるために“ストランド/ケーブル長比”として  $\lambda$  を設定する。ケーブルが直線状態であればこの  $\lambda_s$  は、

$$\lambda_s = (p^2 + 4\pi^2 r^2)^{1/2} / p \cdots \cdots (11)$$

で表される。滑車で曲げられたケーブルの場合はケーブル中心線上弧長でピッチ長分進んだ際のストランド長とピッチ長との比  $\lambda_c (= l_c/p : l_c = \text{ストランド長})$  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  $\lambda_s$  だけ滑車に入ろうとするのに対し、滑車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、 $\lambda_s \neq \lambda_c$  であり、ケーブルの出入りに際して  $\Delta\lambda = \lambda_s - \lambda_c$  だけストランド長に過不足が生ずる。

内外層ストランド双方で考えると、それぞれ  $\Delta\lambda_i = \lambda_{si} - \lambda_{ci}$ ,  $\Delta\lambda_o = \lambda_{so} - \lambda_{co}$  の過不足が生ずることになる。 $\Delta\lambda_i \neq \Delta\lambda_o$  であれば内外層の長さに差が出てくる (すなわち、「ずれ」) ので何らかの形でこの差を吸収しなければならない。

この差を吸収するのがケーブルの捻れであると考え。ただ、ケーブルは滑車に強く押し付けられているので滑車上でケーブルが捻れる訳には行かない。したが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。

今仮に  $\Delta\lambda_o > \Delta\lambda_i$  とすると、滑車上では外層ストランドの方が内層ストランドより余っている。このケーブルが滑車に入る際には余りを吸収するために直線状態のケーブルの外層ストランドのピッチが短くな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は、外層ストランドのピッチが長くなる方向に直線部分のケーブルが捻れることになる。

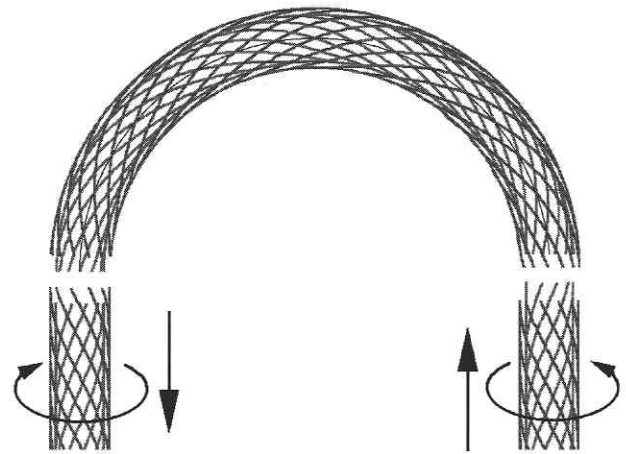


図12  $\Delta\lambda_o > \Delta\lambda_i$  外層右回りケーブルの捻れ。回転方向は出入り共に進行方向右回りとなる。

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）に捻れてあるとすると、滑車の入口側では右回り（時計回り）として観察される。一方滑車の出口側でも進行方向に右回り（時計回り）にケーブルが回ることになる。これは実際の観察とも合致している。またトルクと言う観点からも、余った方のストランドは張力が小さくなり、結果としてそのストランドのピッチが短くなる方向に回ると言える (図12参照)。

この時の捻れは以下のように演算される。

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:

$$\begin{aligned} p_o'^{-1} &= p_o^{-1} + z^{-1} \\ p_i'^{-1} &= p_i^{-1} - z^{-1} \cdots \cdots (12) \end{aligned}$$

ここで  $z$  は図2や図4に見られるように1回転/100mm  $= 1 \times 10^{-5}$  回転/mm のオーダーであり、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、 $z$  の符号は正の時外層ストランドのピッチが短くなる方向に捻れることを (12) 式が示している。

捻りによる直線部分の内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 (11) 式より、

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

となる。ここで  $z$  が小さいことを用いて  $\lambda'_{si} + \lambda_{si} \approx 2\lambda_{si}$  としている。

図12で示した内外層ストランド長の差の吸収は、以下の式が成り立てばよい:

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

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

$$\therefore z = (\Delta\lambda_o - \Delta\lambda_i) / \{4\pi^2(r_o^2/p_o\lambda_{so} + r_i^2/p_i\lambda_{si})\} \cdots \cdots (13)$$

ケーブルが滑車に入出入りする際の捻れ量がこの  $z$  であるが、直線状態の時にすでにこの捻れが入っているので、この捻れ  $z$  が入った (12) 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 (13) 式で与えられる捻れが一致するまで繰り返し計算を行う。そして滑車への入りと出でそれぞれ  $z$  の捻れが発生するので全体として  $2z$  が実際の捻れ回数になる。

### 9. 捻れ実測値と計算結果との照合

表 1 は今までに JAMSTEC で用いた深海用テザーケーブルの仕様であり、これらのデータを用いて実際の捻れ計測値と本研究による計算結果とを照合した。表 1 の下から 2 段目が実測値であり、最下段が計算値である。これらのうち、未計測は別にして、ドルフィン 3 K-No. 4 ケーブルならびに「かいこう」No. 1 ケーブルを除くほかのケーブル

については実測値と良く一致している。良く一致するケースでは、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データ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、断面形状は円形ではなく図 13 に示すように四角形に近い断面となっていて、表に示してあるデータ（硬化前の円形断面状態での値）がそのままでは使えない状態である。そこで改めてケーブルのサンプルを用いて数値を計測し、再度計算を試みた。ただ、隣接ストランドの接触位置（高さ）は与える基準が明確ではないため、捻れを直接求めることはできず、逆に接触位置（高さ）を適切に選ぶことによって実際に得られる捻れとなりうることを示す参考計算にしかならなかった。結果を表 2 に示す。ただ、ドルフィン 3 K-No. 4 ケーブルのように回転方向が他のケーブルと逆である現象もありうることを示されている。

表 1 各種テザーケーブルの捻れに関する実測値と本理論計算との比較

ROV		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 同軸ケーブル	曳航体 光ケーブル	ハイパー ドルフィン
ケーブル外径		30.5mm	30.3mm	30.4mm	44.0mm	43.7mm	17.4mm	17.4mm	27.71mm
ストランド ピッチ	外層	400mm	300mm	282mm	400mm	480mm	125mm	118mm	194mm
	内層	250mm	245mm	250mm	250mm	380mm	99mm	100mm	173mm
ストランド 素線径	外層	1.9mm	2.0mm	2.2mm	3.6mm	3.05mm	1.84mm	1.43mm	1.47mm
	内層	1.9mm	2.5mm	2.5mm	4.3mm	4.55mm	1.46mm	1.59mm	2.01mm
巻き付き ピッチ半径	外層	12.8mm	12.85mm	12.9mm	18.7mm	18.6mm	7.78mm	7.985mm	12.99mm
	内層	10.9mm	10.6mm	10.55mm	14.75mm	14.8mm	6.13mm	6.475mm	11.25mm
ストランド 本数	外層	39	35	30	30	36	24	31	50
	内層	33	24	22	20	19	24	23	32
シープピッチ円半径		462mm			700mm		477.5mm		610.755mm
計測結果 (回/100m)		約+3	約-1	未計測	約+1	約+0.25	約+0.9	約+0.9	約+0.5
計算結果 (回/100m)		2.786	4.282	2.808	2.273	0.215	0.7885	0.878	0.4626

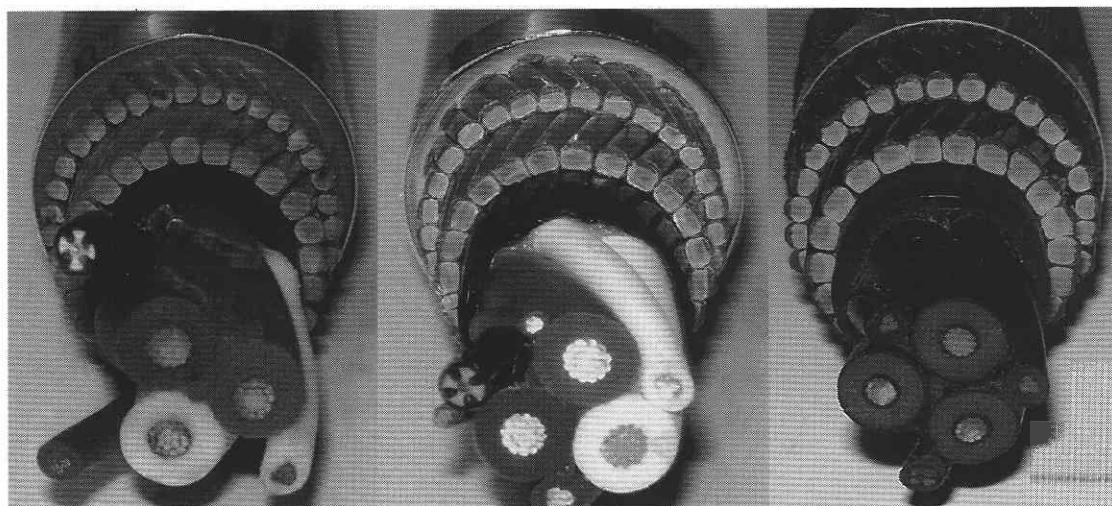


図 13 四角形状になっているストランド (左から D-No. 4, D-No. 5, 「かいこう」No. 1)

表2 ケーブル形状データ修正結果

ROV		D-3k No. 4	D-3K No. 5	「かいこう」 No. 1
ケーブル外径		30.3mm	30.4mm	44.0mm
ストランド ピッチ	外層	300mm	282mm	400mm
	内層	245mm	250mm	250mm
ストランド 厚さ	外層	1.88mm	1.76mm	3.5mm
	内層	2.28mm	2.08mm	4.0mm
ストランド 幅	外層	2.10mm	2.43mm	3.5mm
	内層	2.56mm	2.92mm	4.1mm
巻き付き ピッチ半径	外層	12.48mm	12.5mm	18.7mm
	内層	10.7mm	10.55mm	14.75mm
ストランド 本数	外層	35	30	30
	内層	24	22	20
シーブピッチ円半径		462mm		700mm
計測結果(回/100m)		約-1	未計測	約+1
計算結果(回/100m)		-1.0323	1.4688	1.0195

## 10. ま と め

以上により、トルクバランスを取ったはずの長尺の深海用テザーケーブルが実海域での運用中に捻れる原因が以下のプロセスを経て発生するものであ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) 滑車でケーブルが曲げられると、ストランドは曲げの内側にこの隙間を消費する形で集まってくる（密着ストランド）。
- (3) ある程度曲げの外側に行ったところから、ストランドは隣接ストランドと接触することなく、自由ストランドとしての軌道を描く。

(4) この結果、ストランド軌道はケーブルが直線状態であった時の軌道から変化し、ストランド軌道長も変化する。

(5) 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捻れる。

(7) ケーブルが滑車から出る際には、同じくこの差異を吸収するためにケーブルが入る時と同じ方向に捻れる。

これらから、深海用の長尺のテザーケーブルを設計するに当たっては、トルクバランスを極力正確に取ることはもちろん重要であるが、これを行った上で、(13) 式に現れる  $\Delta\lambda_0 - \Delta\lambda_i$  が極力 0 になるよう設計すれば、運用中に捻れる心配をしなくても良いケーブルを製作することができると言える。

(2004 年 10 月 5 日受理)

## 注

- 1) このケーブルは以下のように考えて製作されている：ケーブルの繰り出し・巻き取りに際してケーブルにかかる張力が変化していくが、それに従ってケーブルの直径が変化し、結果的にトルクバランスが崩れるために捻れが発生すると言う観点から、この変化の影響ができるだけ少なくなるようなストランドピッチを選ぶ。

## 参 考 文 献

- 高川：二重鎧装トルクバランスケーブルの捻じれに関する理論的研究，資源・素材 1998
- 矢野・高川：二重鎧装トルクバランスケーブルの捻じれに関する理論的研究（第2報），資源・素材 2002
- Yano, Y., Takagawa, S.: Theoretical Study on Rotation of Doubly Layered Torque Balanced Cable, Oceans 2003, Sept., San Diego
- 矢野・高川：二重鎧装トルクバランスケーブルの捻じれに関する理論的研究（第3報），資源・素材 2004
- 浦・高川：「海中ロボット」，成山堂書店，1997 年 4 月
- Takagawa, S.: "Diving to Mariana Trench", PACON'96
- 小野：「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, 1993