

## 小型BTを利用したまぐろ延縄の水中姿勢の推定

Estimation of Underwater Shape of Tuna Longline by Using Micro-BTs

By

水野 恵介\*・岡崎 誠\*・中野 秀樹\*・岡村 寛\*  
Keisuke MIZUNO\*, Makoto OKAZAKI\*, Hideki NAKANO\* and Hiroshi OKAMURA\*

### ABSTRACT

An estimation method of three dimensional underwater shape of tuna longline is developed by using a set of depth records obtained by micro-BTs (Bathy Thermographs) attached to the main line at an equally spaced interval. The shape of main line is approximated by a chain of unit length lines (folding rule model), and the joint points are placed on the observed depths. Among infinite number of possible shapes, the most likely shape is regarded as the smoothest one which is obtained by numerical optimization algorithm. In order to validate the method, a series of experimental longline operations were conducted repeatedly by using 13-14 micro-BTs for a basket of main line with concurrent oceanographic observations (ADCP and XBT) in the eastern equatorial Pacific Ocean. The shape of the main line can be calculated at arbitrary time during operation. Obtained shapes are consistent with the current structure detected by ADCP. On the equator, the line is blown up strongly by the Equatorial Undercurrent. It is shown that the shape of longline primarily depends upon vertical shear and direction of the current relative to the gear. Time sequence of calculated shape reveals that the periodical oscillation (1-2hours) appeared in a set of depth records for an experiment is caused by the swinging movement of a basket of main line. For formulating the longline shapes, shortening rate of the main line is an important parameter and its precise measurement is desirable.

## はじめに

まぐろ延縄漁業は我が国をはじめ各国により行われており、操業海域は広範囲に及ぶ。この漁業では釣鉤を対象魚の遊泳層付近に設置しなければ漁獲効率が落ちる。このため、操業の際は、浮き縄や枝縄の長さ、浮子の取り付け間隔などの漁具の仕立てを海域や対象魚種に応じて調整するとともに、投縄時には漁具を所定の深度に設置すべく、船速と繰り出し速度を調整して幹縄のたるませ具合（短縮率）を制御するのが普通である。

この場合、短縮率と到達深度との関係は幹縄が鉛直面上でカテナリー（懸垂線）をなすことを前提としている。しかし、海中には流れがあるため、延縄にはいわゆる“ふかれ”が生じ、幹縄の形状は3次的になって鉛直面上のカテナリーよりも浅い深度に落ち着くことが知られている（Hanamoto 1987）。“ふかれ”のため、想定した深度に鉤が入らないケースが現実にかかなりの割合で起こっているとみられる。

“ふかれ”の方向によっては隣接する鉢が接近し、幹縄や枝縄に絡みが生じて作業効率の低下をきたすことがある。また、海面の波浪やうねりによる浮子の上下運動が各部に伝わり、枝縄先端の釣鉤・餌の運動が魚を誘因する効果があると考えられている（田内 1963）が、“ふかれ”による運動も寄与するであろうことは想像に難くない。

このような事情から、“ふかれ”を3次的に明示できる延縄の水中姿勢（縄なり）が任意の時刻で得られ、その変化を視覚的に認識できることが望ましい。これが可能になれば、流れや海上風との比較により“ふかれ”や振動の原因の解明にも寄与できるものと思われる。

縄なりの把握は古くからの問題で、様々な方法により推定の努力がなされてきた。しかし、大別すれば2つのアプローチ方法に分けられる。1つは、延縄に相対的な流れ、すなわち抵抗力や揚力を既知として与えて、これに釣り合う形状を力学的に求める方法と、もう1つは、各部の深度を観測することにより水中姿勢を得る方法である。前者については、盛田（1969）は水槽実験で延縄の模型を作成して調べ、柴田（1963）は延縄に直角・平行な流れに対する延縄の形状を解析的に調べている。後者については、葉室・石井（1958）が延縄に深度計を取り付けてその形状を推定している。また、魚探を使って水中形状を把握する試み（河口ら1962）もなされてきたが、1鉢全体の3次的形状を把握するのは現在でも困難なようである。

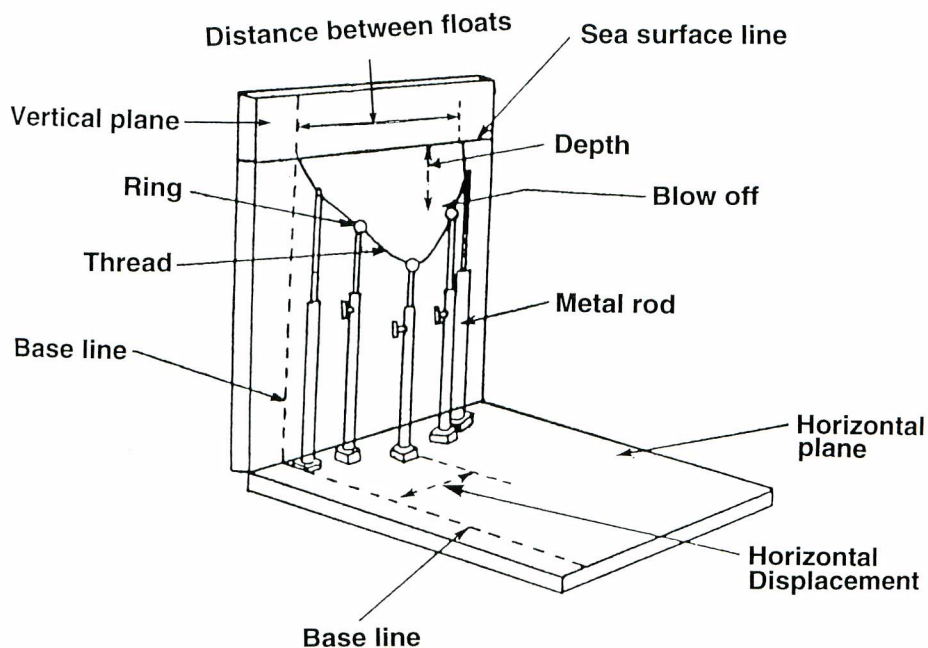
最近、Mizuno et al.（1996）は延縄用の水深水温計（BathyThermograph:BT）を開発した。これは、従来のものより非常に小型・軽量で、データの取り扱いも容易で実用的になっており、多数同時使用が可能になった。これを1鉢の幹縄の各部に取り付ければ、得られた各部の深さのデータから全体の形がかなり詳細に推定できるであろう。

本論文は延縄の3次的な縄なりを決定する方法を提示し、これを実際のデータに応用した結果を検討するものである。まず、縄なりを推定する問題を論じ、その形状の推定を折れ線で近似したモデルを用い一定の条件下で最適値を求める数学的な問題に帰着させた。次に、東部太平洋において調査船による延縄操業の際に水深水温計を幹縄に多数取り付ける実験を3回行い、上記の方法により縄なりを計算した。この得られた縄なりと各実験海域における流れなどの海洋構造とを比較・検討して、この方法が実用的であることを示した。さらに、今後の応用や問題点などを論じた。

### 縄なり問題の整理

海中に設置された延縄の形状は、これに相対的な流れがなければ鉛直面上のカテナリーになる（吉原1954）。しかし、実際には流れにより“ふかれ”が生じるから3次元空間の曲線となる。この時、幹縄に深度計を一定間隔で取り付ければ、これらの点の深度すなわちZ座標が決定できる。ただし、設置時の両端の距離と幹縄自体の長さは既知で、両者の比を短縮率と呼ぶ。このとき、適当な条件のもとにこれらの点のXY座標が決定できれば幹縄の水中形状が推定できることになる。

この問題に対しては、すでに葉室・石井（1958）が延縄の縮尺模型を使って縄なりの再現を試みてい



**Fig 1.** A simulator of longline shape by Hamuro and Ishii (1958).

One basket of longline is reproduced by the 1/1000 scale model. Depth recorders are attached to a few positions on a main line. And obtained depths are reproduced by adjusting the height of the metal rod. The silk thread of the model stands for the main line, and underwater shape of longline can be estimated by placing the metal rods so as to make the shape of thread "natural".

る(図1)．まず延縄に深度計を3ヶ所程度取り付け深度を測定する．この図に示されるように，糸(幹縄の模型)に支持台(深度計の取り付け位置に対応)を取り付け，支持台の高さは深度計の測得値に対応する深度に合わせる．そして，糸全体の形が“自然な曲線”になるように支持台の位置を調整して糸全体の形状が決定される．

この方法は，“自然な曲線”の定義がなされていないので客観性に不満は残るが，問題の本質を端的に表わしている．つまり，これは曲線上に離散的に分布する複数の点があり，これらのZ座標が既知であるとき，幹縄の水中形状推定問題はこれらの点を通る1本の最も滑らかな曲線を決定する問題に置き換えられたことを意味している．

海中には，海流の他に渦，慣性流，内部波その他様々な乱れが存在するから延縄の形状は複雑に変化しているかも知れない．幹縄もこれらの乱れのために弛むこともあろう．しかし，幹縄の一部に張力のかからない状態は安定的に存在できないはずであるし，仮にこれが通常であれば枝縄の絡みが頻発しているはずである．さらに，これまで得られた深度計の記録(葉室・石井1958，藤井・岡本1969，西1990，Mizuno et al. 1996など)の多くは，多少の振動はしながらも比較的一定の深度を保っている．以上から，多くの場合は1鉢の幹縄には極端な屈曲はなく全体的には滑らかな形状をとるものと考えてよいであろう．

よって，各点でZ座標が固定された条件下で形状に関して最も滑らかなものを選べば，実際に近いものが得られるものと考えられる．これが葉室のいう“自然な曲線”の意味であろう．

以上の議論からこの問題は以下のように整理できる．

- 1) 3次元空間に長さが既知の1本の曲線がある．
- 2) その両端は同じ水平面上にあり，両者の直線距離は既知である．
- 3) 曲線上にその長さをN等分するN-1ヶの点をとる．
- 4) これらの点ではZ座標のみ既知である．

上記1)から4)の条件で全体の形状が最も滑らかな曲線を見つけ，これを求める縄なりとすればよい．

## 折り尺モデルとその分割数

上記の曲線を決定するためには線上に無限にある点の座標が決まらなくてはならない．よって，これらの座標を決める関数が必要となる．いいかえれば，曲線を表すモデルを選択しなくてはならない．

最も簡単なモデルは直線(一次関数)である．1本の曲線は十分細かい間隔で分割すれば線分の集まりとして近似できる．つまり，折り尺のような，長さの等しい線分が順番につながったものとする．この曲線(実は線分の集まり)は線分の節点に対応する離散的なN+1ヶの点の座標の集まり

$$P_i = (X_i, Y_i, Z_i) \quad (i=0, 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

で表わすことができる．図2上はN=4の場合を示したものである．ただし， $P_0$ を原点にとり，X軸は他端 $P_N$ に向ってとる．簡単のため線分の長さは単位=1とする．両端 $P_0, P_N$ の座標は，それぞれ $P_0 = (0, 0, 0)$ ， $P_N = (KN, 0, 0)$ である．ただし，Kは延縄の短縮率で既知の係数である． $Z_i$ は観測により求められる．

1つの線分をベクトル $\vec{V}_i$ と見れば、この曲線は $N$ ヶの単位ベクトルの集まりとみなすことができる。図2下に示すように、このベクトルの座標を球面座標で表わせば、

$$\vec{V}_i = \vec{P}_i - \vec{P}_{i-1} = (\cos\phi_i \cos\theta_i, \cos\phi_i \sin\theta_i, \sin\phi_i) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

と表わされる。ここで、 $\phi_i, \theta_i$ はベクトルとXY平面およびXZ平面となす角である。

ただし、 $-90^\circ < \phi_i < 90^\circ$ 、かつ、 $-180^\circ < \theta_i < 180^\circ$ とする。観測から深度 $Z_i$ が得られるから $\phi_i$ が決定でき、 $\sin\phi_i$ および $\cos\phi_i$ の値は決定できる。これらの定数をそれぞれ $d_i, r_i$ とおくと上式は

$$\vec{V}_i = (r_i \cos\theta_i, r_i \sin\theta_i, d_i) \quad (3)$$

となる。よって、延縄の形状は $N$ ヶの $\theta_i$ の組で表すことができる。よって、 $P_0$ を原点にとり $P_N$ が

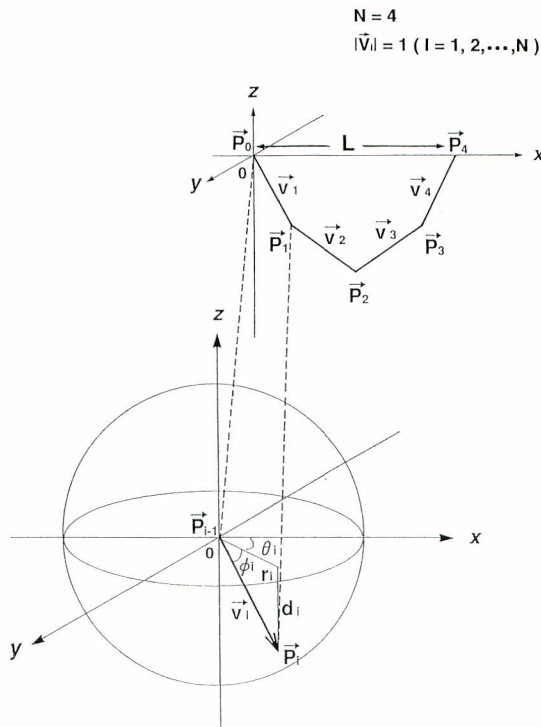


Fig 2. Upper panel; A folding rule model to simulate line shapes.

For simplicity, the model having four line segments (unit vector  $\vec{V}_1$  through  $\vec{V}_4$ ) is displayed. Position vectors  $\vec{P}_0 \sim \vec{P}_4$  denotes the location of joints. Distance from  $\vec{P}_0$  to  $\vec{P}_4$ , which is equivalent to shortening rate, is determined by observation.

Lower panel; Detailed explanation of  $\vec{V}_1$ .

The vector is the expressed by latitude( $\phi$ ) and longitude( $\theta$ ). Note that the latitude is given by the observed depth  $d_i$ . Only longitude( $\theta$ ) is needed to be found. A set of  $\theta$ s which makes total line smoothest can be calculated by numerical method.

( $KN, 0, 0$ )にある条件下で最も滑らかな形状をとる $\theta_i$ の組を求めれば縄なりが推定できたことになる. 詳しい計算方法は付録Aを参照にされたい.

折り尺モデルは分割された線分の集まりであるから, 最良の推定でも幹縄がなす曲線との間にいくらかの誤差はまぬがれない. 分割数を増やすほど縄なりは詳しく推定できるであろう. しかし, いたずらに増やしても計算量が増えるだけで, 得られる結果は大差ないかも知れない. さらに, 分割数を増加することは深度のデータをとる水深水温計を増やすことであるからコストが嵩んでくる. この意味では, できるだけ少ない分割数で縄なりを再現することが望ましいが, 実際の程度の分割数でよいかを評価する必要がある.

この問題は, 既知の縄なりに対して, 最小二乗法の意味で最も良く近似された折り尺モデルが持つ誤差を評価できれば良い. 縄なりの全ての場合を扱うことはできないが, 一般性を持つ代表的な形状を選べばおおよその目安になると考え, ここでは鉛直面上にあるカテナリー曲線を真の縄形状と仮定して検討した. 図3に誤差の概念図を示す. これは, カテナリーと分割数2の場合の最も近似度の良い折り尺モデルが示されている. 両者が一致しないのは曲線を直線で近似したこと以外に, 折り尺モデルでは節点の深度が対応するカテナリーの点と同じ深度に決められていることが原因である. カテナリー曲線の端点から中央までの距離と, モデルの端から節点までの距離はともに単位だから, モデルは鉛直面(XZ面)から少し離れざるを得ない.

原点からカテナリーと直線のそれぞれの線に沿って同じ距離にある点同士の組を考えれば, 両者の平均的な距離が折り尺モデルの近似度を示す. この計算は複雑だから, 簡単のため離散的に折り尺の節点で両者の距離を計算して, その二乗平均を折り尺モデルの誤差と見なした. これを一般的な分割数で計算する方法を付録B2に示した.

ここでは, 分割数が2, 4, 6のとき, 短縮率を実用的な0.6から0.9の間で0.1毎に変化させ相対誤差を求めた(図4). この図からわかるように, 相対誤差は, 予想されたように分割数が増加するほど急激に小さくなる. また, 短縮率が大きいほど幹縄の形が直線に近づくから誤差が小さくなるのがわかる. 分割数の決定は, どの程度の誤差まで許容するかによる. 1鉢の幹縄の長さを500m(深縄の場

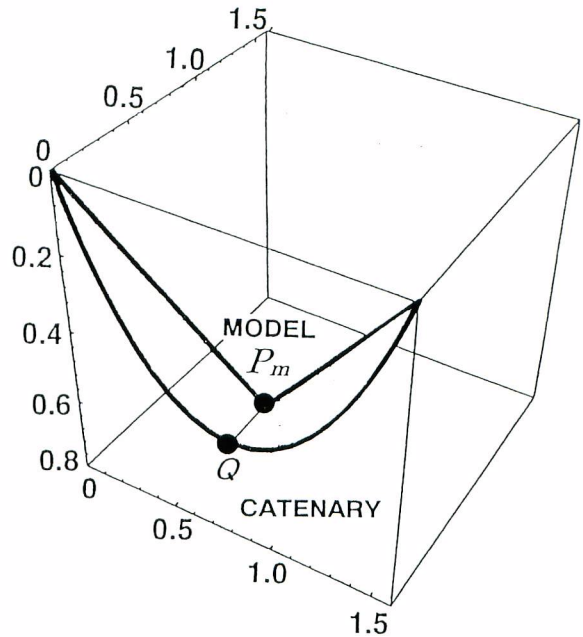


Fig 3. Difference of catenary and the fitted folding rule model.

The model consists of only two line segments for simplicity.

The joint part of the model has the same depth as the middle point of the catenary (depth observation point). A pair of points P and Q locates in a same distance from the origin along the lines respectively.

Length PQ denotes the difference of the location of the two points. Averaged distance of PQ is the error of the fittest model.

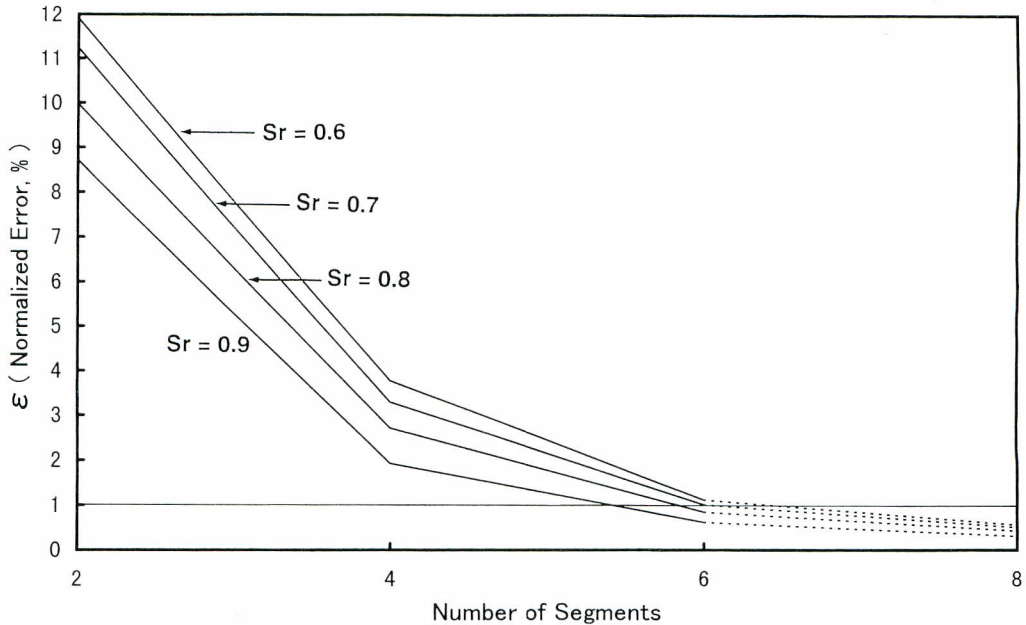


Fig 4. Normalized error of fitted folding rule model in terms of number of segments (2,4,6) in the case of different shortening rate (0.6-0.9, denoted hysr).

合この程度)とすれば、分割数を6以上にすれば、いずれの短縮率でも平均誤差はほとんど1%以内(5 m)に収まることになる.目的にもよるが、この程度の誤差は実用上差し支えないと思われる.

## 実 験

遠洋水産研究所は1996年5~8月に照洋丸(1,362トン)を用いて「東太平洋まぐろはえなわ調査および北太平洋西部亜熱帯循環系に関する調査」を実施し、延べ11回の延縄操業を行った.このうち、上記の縄なり推定方法の実用性を調べるため3回の操業において実験を行った(以後、実験1~3とする).各実験の実施期間や場所等の明細を表1に示し、漁具の仕立を表2に示す.

操業は54鉢13本付けで行なわれたが、実験は各回とも5鉢目に、図5中で黒丸に示したように幹縄と枝縄との連結部および枝縄と釣元ワイヤーとの連結部全て各々1つずつ水深水温計を取り付けた.さらに浮き縄と幹縄との連結部にも取り付け、10秒間隔で水深・水温データを取得した.

使用した水深水温計は村山電機製SBT-500で、仕様等についてはMizuno et al. (1996)を参照されたい.各水深水温計は水中重量35gで、この重量では縄なりに影響を及ぼさないものとした.これらは、一連の実験の前後にCTD(Sea Bird社製;SBE911plus)の枠にまとめて取り付け500mまで設定し、深度・温度についてCTDの値と比較して、各水深水温計毎に一次回帰式を求めて補正を行なった.補正後の深度精度は各水温計とも±1.5m以内に収った.

実験は東太平洋海域で行ない、鉛直的な流れのシアーに対する縄なりの応答を調べるため、流れの様相の異なる場所で行なわれた(図6).図中には大局的な操業位置(図6a)と、個々の実験における

**Table 1.** Outline of experiments

Experiment 1	
Date/Time(Local Time)	1996/07/01 04:40-19:25
Location(Start/End)	0°30.5'N,100°10.0'W-0°42.0' N,100°05.1' W
Longline spec.	54 baskets,13 branch lines/basket
Experimental basket	#4
Sea-surface Wind	Calm
Wave Height	0m
Experiment 2	
Date/Time(Local Time)	1996/07/03 04:33 - 1996/07/03 18:23
Location(Start/End)	5°21.2'S,102°06.7'W-5°23.2'S,102°02.9'W
Longline Spec.	54 baskets,13 branch lines/basket
Experimental basket	#4
Sea-surface Wind	ESE/3
Wave Height	1m
Experiment 3	
Date/Time(Local Time)	1996/07/04 04:32 - 1996/07/04 19:27
Location(Start/End)	6°29.9'S,103°22.3'W-6°30.3'S,103°27.5'W
Longline Spec.	54 baskets,13 branch lines/basket
Experimental basket	#4
Sea-surface Wind	E/5
Wave Height	2m

**Table 2.** Specification of a basket of longline

	Dimension	density/weight	material
Main line	53m*x0.42cm $\phi$	1.4	SuperMansen
Float line	25m*x0.42cm $\phi$	1.4	SuperMansen
Branch line	20m*x0.45cm $\phi$	1.6	Tetron
Lashing	10m*x0.20cm $\phi$	6.8	iron
Wire	2m*x0.10cm $\phi$ (#30)	6.8	iron
Float	30cm $\phi$	30kg**	plastic
Hook	-	20g	iron
Snap	-	40g	iron

\*a basket

\*\*buoyancy



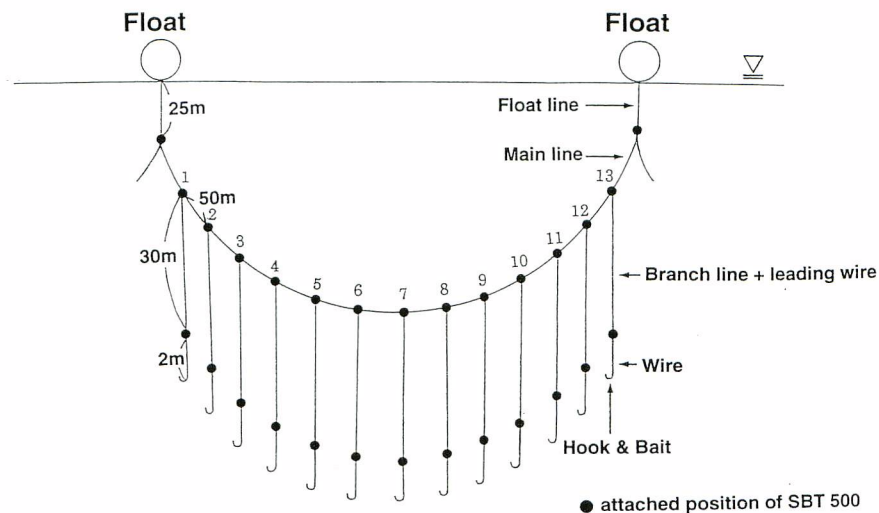


Fig 5. Configuration of one basket of a longline.

Solid circles denote the positions where micro-BTs are attached.

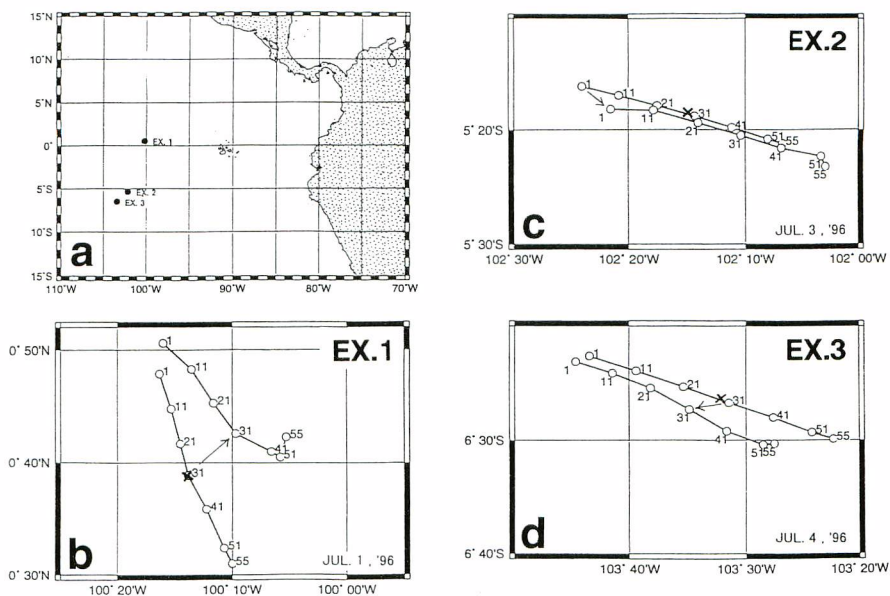


Fig 6. Experimental area and the drift of the longline.

Panel a; Location of Experiment 1-3.

Panel b; Drift of the longline for Experiment 1.

Launched and retrieved positions for every ten floats are shown (open circles). The arrow shows drifting direction schematically, and the cross mark (x) denotes the position of XBT observation.

Panel c; Same as panel b but for Experiment 2.

Panel d; Same as panel c but for Experiment 3.

投縄時と揚縄時の10鉢毎の位置（GPSによる）を示した（図6 b～d）.

なお、各実験海域ではADCP（RD社製；75KHz）による流れの観測を行い、水深16m以深400m付近までの8m毎の層における5分間の平均の流向・流速を連続的に測定した.

さらに、投縄中に1回XBT（鶴見精機製；T-7（760m））による水温観測を実施した.

短縮率は縄なりを計算するための重要なパラメーターである.しかし、この実験では各浮子の位置データを連続的に取得する手段が無く、投縄・揚縄時の船位データや船速と幹縄の繰り出し速度から推定した.

船位データから推定する方法では、図6 b～dに示された各浮子の位置はそれぞれ測定時刻が異なるから、そのまま浮子間の距離とするのは問題がある.よって、図7に模式的に示した方法で補正した.すなわち、浮子Aの投入時刻 $t$ 、位置 $P(t)$ 、および回収時の時刻・位置からこの間の平均移動速度（ $\vec{V}$ ）がわかる.浮子Aから $\Delta t$ 遅れて、浮子Bがある位置 $Q(t+\Delta t)$ に投入された時には、浮子Aはすでに投入点 $P(t)$ にはなく、そこから $\vec{V}\Delta t$ だけ移動していることになる.よって、同時性を考慮すれば、浮子B投入時点では両者の距離は $PQ$ ではなく、 $\vec{V}\Delta t$ だけ補正が必要である.回収時も同様な方法で補正できる.各実験では10鉢毎の投・揚縄時の浮子の位置・時刻のデータから上記のように補正した浮子間の距離を使って短縮率を計算した（表3）.この表では参考のため、投縄時の幹縄の繰り出し速度と船速の比から推定した短縮率も示した.以下、個々の実験結果について述べる.

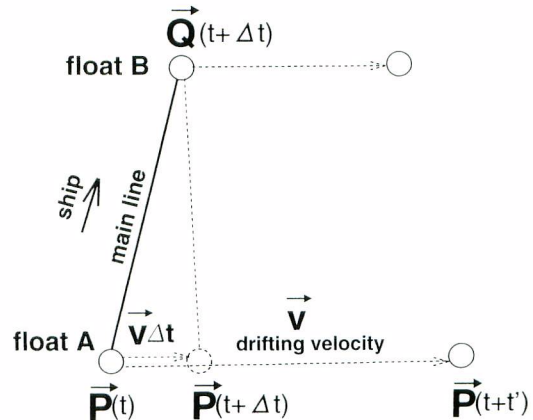


Fig 7. Estimation of concurrent distance of float A and B.

Float A is launched at time  $t$ , and retrieved at  $t+t'$ . The averaged drifting speed ( $\vec{V}$ ) is  $(\vec{P}(t+t') - \vec{P}(t))/t'$ . When float B is launched at time  $t+\Delta t$  at position  $Q(t+\Delta t)$ , the position of float A ( $\vec{P}(t+\Delta t)$ ) is estimated to be at  $\vec{P}(t) + \vec{V}\Delta t$ . Concurrent distance of float A and B at time  $t+\Delta t$  can be estimated.

Table 3. Shortening rates

Expiement#	Launching	Retrieving	*
1	0.79	0.82	(0.85)
2	0.86	0.82	(0.83)
3	1.01	0.86	(0.95)

\*Values in parenthesis are estimated by the ratio of averaged releasing speed of main line and ship speed relative to water.

実験 1

延縄の漂移 (図 6 b) は、全体として北東に流れるとともに左回りに回転している。海上風は無風のため、これは東向きの赤道潜流の影響と考えられる。この海流は赤道に近い程流れが速いので、左回りの回転は水平シアーすなわち相対渦度を反映しているものと思われる。

XBTによる水温鉛直プロファイルとADCPによる流れの鉛直分布を図8に示す。流れは投縄中に計測されたデータを各層で平均したものである。表層50mまでは北向きの流れが卓越している。これは水温躍層深度とほぼ一致している。それ以深は90m深を中心に60~160mで東向きの流れが卓越している。水温には70~100m深の間に赤道潜流の特徴である13ないし14℃台の比較的均一な層 (Equatorial 13°C Water, Montgomery and Stroup 1975) が見られる。流れの構造は表層の北向流とその下の赤道潜流 (東向流) の間に顕著な二層構造を示し、鉛直シアーが強いことがわかる。

幹縄に取り付けた15本の水深水温計により得られた時間・深度データを図9に示す。浮き縄下端はほとんど深度の変化が無く安定している。しかし、その他の部分は一旦深くまで沈降した (8時; 現地時間, 以下同じ) 後、一定の深度まで上昇して9時以降は安定な深度を保っている。最も沈降した時点では中央部の7番プラン (幹縄の7番プランとの連結部; 以下同じ) で最深とはならず、9番プランの位置が最も深くなっており、左右非対称になっていることがわかる。安定化後は中央で最も深くなり比較的良い対称性を示している。

EXPERIMENT 1

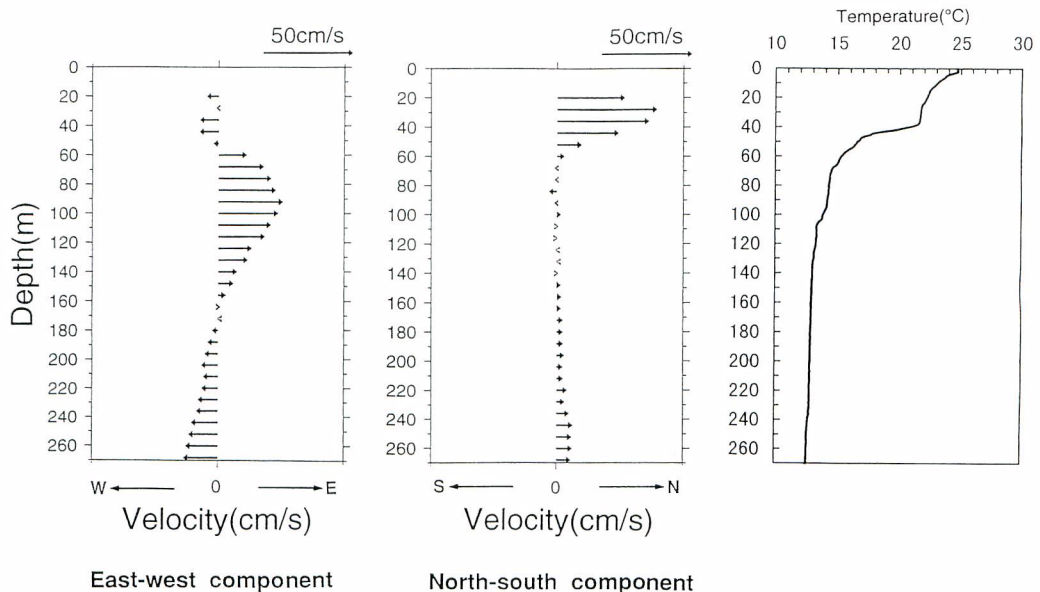
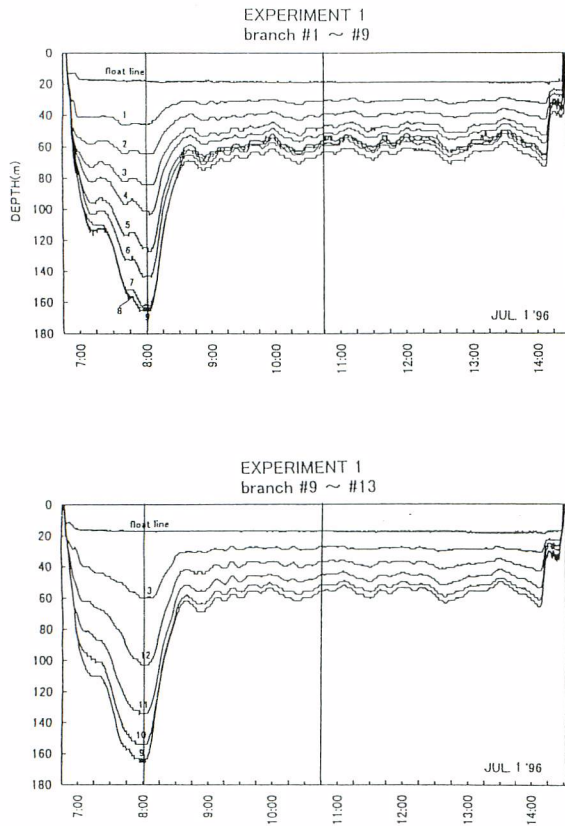


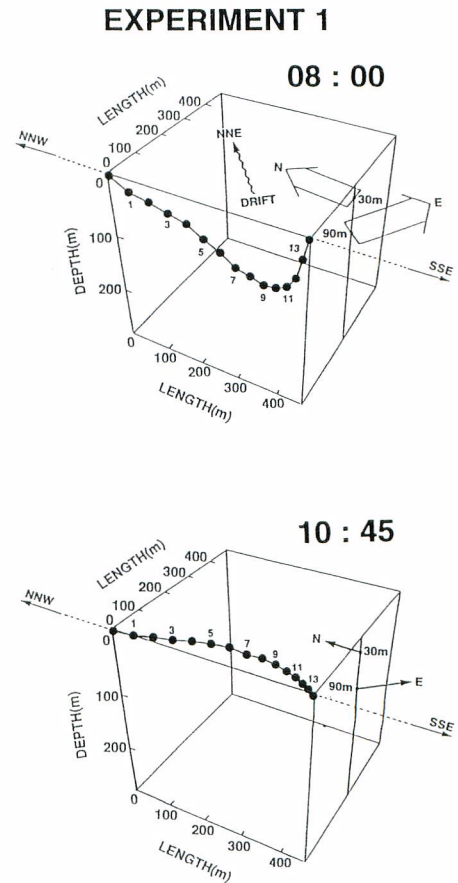
Fig 8. Vertical profiles for Experiment 1.

Left/middle panels; Averaged vertical profiles of zonal/meridional components of current measured by ADCP during the setting of the longline for Experiment 1. Depth of each bin has 8m thickness and starts from 16m, and the arrows are placed in the middle of bins.

Right panel; A vertical temperature profile obtained by XBT whose position is shown in figure 6.



**Fig 9.** Time/depth records of micro-BTs attached to the joint part of main line and branch line for Experiment 1. The sampling interval is 10 seconds. Records for branch line number 1-9 (9-13) are shown in an upper (lower) panel. Two vertical lines shows the times displayed in the next figure.



**Fig 10.** Calculated three dimensional main line shapes for Experiment 1 at 08:00 (upper panel) and 10:45 (lower panel). In each panel, depths shallower than the end of float line (i.e. 20m) are not displayed. Vertical scale are two times as large as horizontal ones. Solid circles denote the positions where micro-BTs are attached, and the numbers adscribed to solid circle indicate the branch line number. Deployed direction of main line is shown. Longline drift and upper/lower layer currents are shown schematically (upper panel), and upper/lower layer currents relative to longline are also shown (lower panel).

投入から15分毎に各水深水温計の深度データを使って上で述べた計算方法に従って各時刻における縄なりを推定した。短縮率は投縄から揚縄まで一定とし、表3から投・揚縄時の平均値を採用した。図10に最深部に到達した8時(上段)、浅部で安定している10時45分における縄なり(下段)のみを示す。上段の図中にはADCPで測定された表層と下層の流れの中心部(30m, 90m)、および延縄の漂移が模式的に示されている。また、各層の流れから延縄の漂移速度を引けば延縄に相対的な流れが得られるから、これを下段の図中にベクトルで示した。

幹縄は8時頃に最も深くまで到達し、最深部(9番プラン)では165mに達した。この時の縄なりは右側に偏っているのがわかる(図10上)。延縄は南南東から北北西に設置されたため、これに対して東流する赤道潜流(90m付近が最も強い)が斜めに流れており、この流れの方向が偏りを生んでいるとみられる。

一方、10時45分の縄なりは、大きな“ふかれ”が生じていることがわかる(図10下)。幹縄中央部(7番プラン)の到達深度は70m付近である。ここは水温躍層深度および表層流と赤道潜流との流れの境界の下側にあり、赤道潜流にさらされている。従って、延縄自身の実際に感じる流れは、60~70m深にある幹縄中央部(5~9番プラン)は東向きであり、その両側で表層付近の部分は北向きである。各部で受ける流れによる力の方向は異なるが、“ふかれ”は主に中央部の東向きの力により起こっているであろう。また、縄なりで左右の偏りが小さいのは、上層と下層の力がほぼ釣り合っているであろう。

実験2

延縄は全体に0.4ノット程度の速度で東南東に流されている(図6c)。海上風は比較的弱く(風力3)漂移と逆方向であり、漂移に対する影響は小さいようである。ADCPによる流れの鉛直分布(図11)

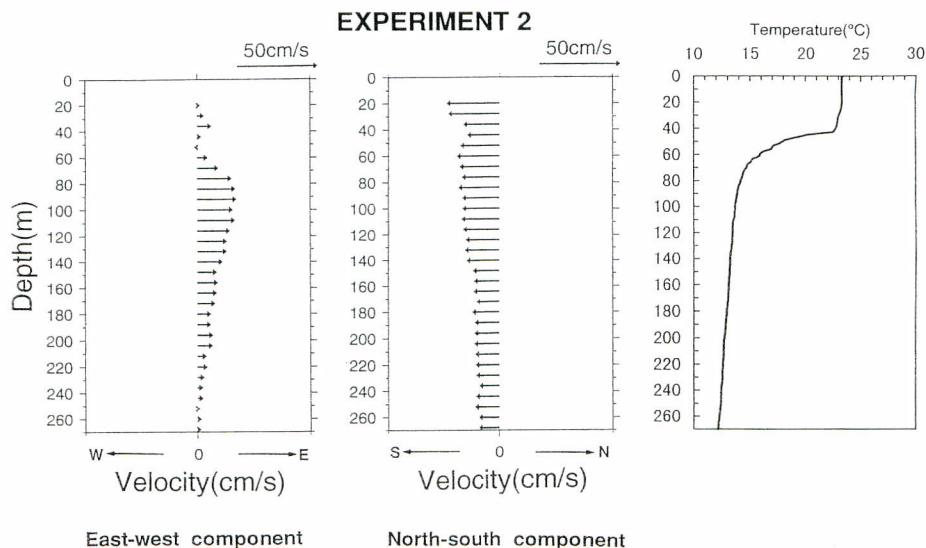


Fig 11. Vertical profiles for Experiment 2.

Left/middle panels; Averaged vertical profiles of zonal/meridional components of current measured by ADCP during the setting of longline for Experiment 2. Depth of each bin is 8m starting from 16m, and the arrows are placed in the middle of bins.

Right panel; Vertical temperature profile obtained by XBT. The position is shown in figure 6.

によれば、深度により多少ことなるが、200m深まではおおむね南東方向の流れになっており、延縄の漂移とはほぼ一致する。ただ、流れの鉛直シアは東西・南北成分とも実験1よりも明らかに小さい。

流速の東西成分は表面から水温躍層のある60m付近まではほぼゼロで、それ以深は東向きとなって、90m付近を最大に、200m以深までゆるやかに減少している。この流れは赤道潜流と似て表面下で東流成分が卓越しているが、この海域は5°S付近にあり、表面下で東向成分が卓越するところから、subsurface countercurrent (Tsuchiya 1975) と考えられる。これは赤道潜流を挟んで対称に南北緯5度付近の表面下にある幅の狭い流れで、東部太平洋では赤道潜流とはっきり分離し、流れの中心は赤道潜流よりも少し深い (Tsuchiya 1975)。最近ではこの流れの詳細な空間構造がADCPによりとらえられている (図12, 渡辺・水野 1993)。今回とらえた流れは上記の subsurface countercurrent の南側のものであろう。

幹縄に取り付けられた14本の (片側の浮き縄下端には付けず) 水深水温計で得られた時間・深度データを図13に示す。浮き縄下端の深度はここでもほとんど変化しない。投入後20分程度で全体に一定の深度に到達し、その後は比較的安定した深度を維持している。ただし、1~2時間周期の振動があり、9時15分頃に最も深くなっている。この場合は中央部 (7番) が最も深くまで達しており、その左右はおおむね対称的な深度になっている。

前回と同様に投入後の15分毎に縄なりを推定した。短縮率は実験1と同様に投・揚縄時の平均値をと

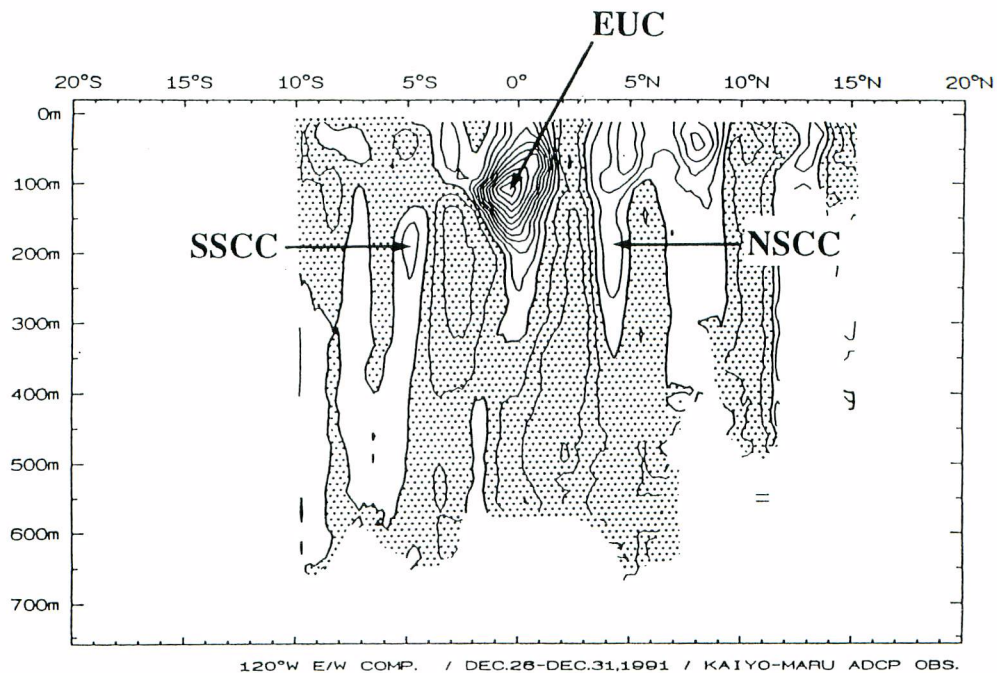
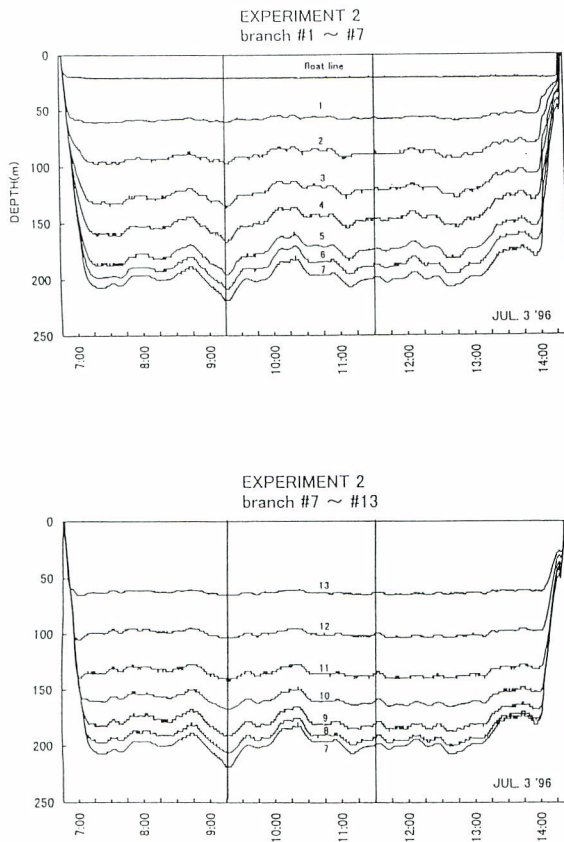
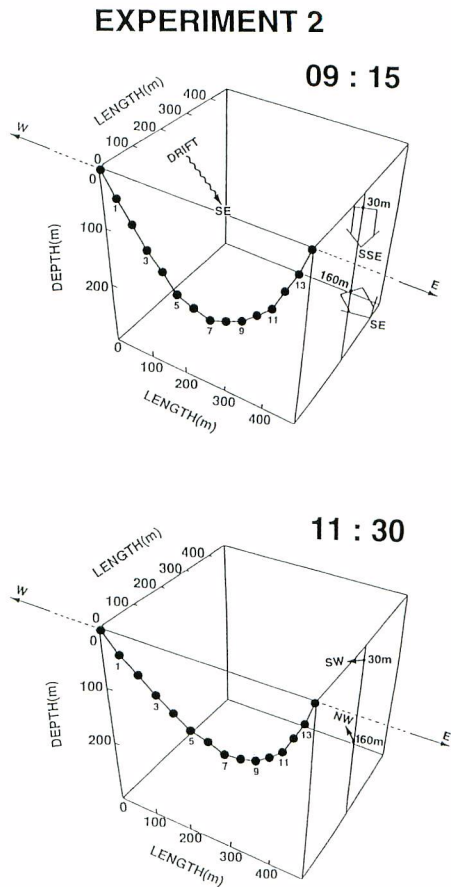


Fig 12. Zonal component of the current along 120°W obtained by ADCP (Watanabe and Mizuno 1993).

Contour interval is 10cm/s and shading areas indicate westward velocity. Eastward currents are labeled SSCC (Southern Subsurface CounterCurrent), EUC (Equatorial UnderCurrent) and NSCC (Northern Subsurface CounterCurrent) are labeled.



**Fig 13.** Time/depth records of micro-BTs attached to the joint part of main line and branch line in Experiment 2. The sampling interval is 10 seconds. Records for branch line number 1-7 (7-13) are shown in an upper (lower) panel. Two vertical lines shows the times displayed in the next figure.



**Fig 14.** Calculated three dimensional main line shapes for Experiment 2 at 09:15 (upper panel) and 11:30 (lower panel). In each panel, depths shallower than the end of float line (i.e.20m) are not displayed. Vertical scale are two times as large as horizontal ones. Solid circles denote the positions where micro-BTs are attached, and the numbers adscribed to solid circle indicate the branch line number. Deployed direction of main line is shown. Longline drift and upper/lower layer currents are shown schematically (upper panel), and upper/lower layer currents relative to longline are also shown (lower panel).

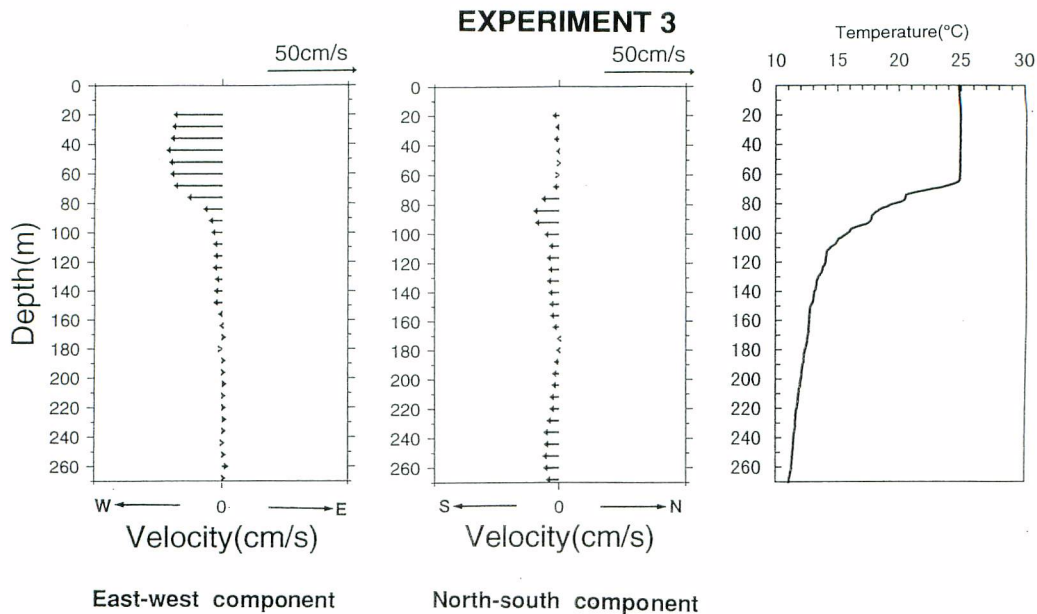
り0.84として操業中は一定とした。図14は最深部に到達した9時15分と平均的な深さにある11時30分のもののみを示す。模式的に示された表層と下層の流れおよび漂移ともども似た方向を示し、上下のシアも小さい。また、延縄に相対的な流れは表層・下層とも小さい。幹縄の形状は、両者とも200m近くに達し、“ふかれ”が小さい。これは、上下の流速のシアが小さいことによるものであろう。

図13では全体的に同位相の深度変化がみられたが、縄なりでみれば、9時15分では比較的鉛直面に近い状態にあり、11時30分にはやや“ふかれ”が生じている。15分毎の縄なりを連続的に見ると（図示せず）全体がプランコ状に揺れており、これが図13に現れる1ないし2時間程度の周期的な上下動の原因と考えられる。

### 実験 3

延縄は、全体に西へ向かい、1番の浮子はほぼ西へ0.2ノットの速さで漂移している。この海域の緯度（6°30′ S付近）を考慮すると、西向きの流れは南赤道海流と考えられる。

投縄中の流速および水温の鉛直プロファイルを図15に示す。東西成分が卓越し、南北成分は南向きだが非常に小さい。東西成分は表層70mまでは比較的一様に西向きの30cm/s程度の大きさだが、それ以下は急速に小さくなっている。これは水温鉛直プロファイルとよく対応しており、70m付近までは表層混合層がよく発達し、この中では一様な流れとなり70~100m深の水溫躍層より下では流れがほとんど

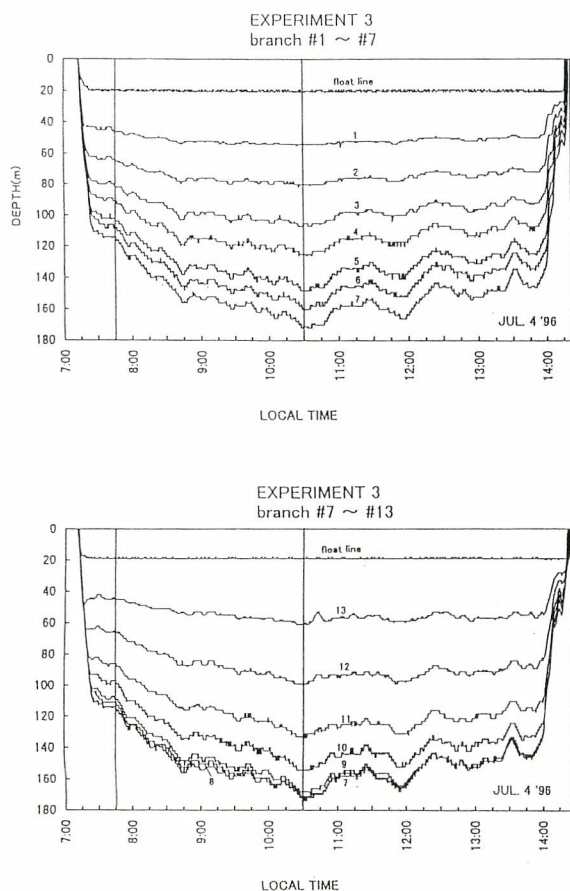


**Fig 15.** Vertical profiles for Experiment 3.

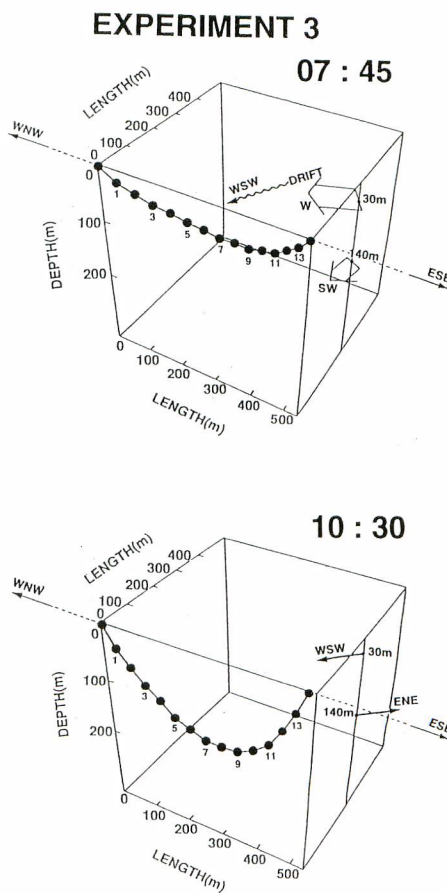
Left/middle panels; Averaged vertical profiles of zonal/ meridional components of current measured by ADCP during the setting of the longline for Experiment 3. Depth of each bin is 8m starting from 16m, and the arrows are placed in the middle of bins.

Right panel; A vertical temperature profile obtained by XBT. The position is shown in figure 6.





**Fig 16.** Time/depth records of micro-BTs attached to the joint part of main line and branch line in Experiment 3. The sampling interval is 10 seconds. Records for branch line number 1-7 (7-13) are shown in an upper (lower) panel. Two vertical line shows the times displayed in the next figure.



**Fig 17.** Calculated three dimensional main line shapes for Experiment 3 at 07:45 (upper panel) and 10:30 (lower panel). In each panel, depths shallower than the end of float line (i.e.20m) are not displayed. Vertical scale are two times as large as horizontal ones. Solid circles denote the positions where micro-BTs are attached, and the numbers adscribed to solid circle indicate the branch line number. Deployed direction of main line is shown. Longline drift and upper/lower layer currents are shown schematically (upper panel), and upper/lower layer currents relative to longline are also shown (lower panel).

みられない。

幹縄に取り付けた15本の水深水温計の時間・深度データを図16に示す。前と同様に浮き縄下端の深度はほとんど変化がみられない。ただし、水深記録はかなり特徴的である。すなわち、投入後15分である程度の深度に達したものの、その後ゆっくりと深度を増し、3時間15分後の10時30分頃に最深部に達し、以後再びゆっくりと上昇する傾向が見られる。操業を通しておおむね中央部（7番ブラン）が最も深くまで達しているが、その前後では後半（8～13番ブラン）の方が深く、左右の偏りが生じている。

投入後15分毎の縄なりを推定した。この実験では投縄時の短縮率が1を越えてしまい理論上あり得ない値になっている。よって、GPSの値は採用せず、船速と投縄速度の比から推定した値（0.95）を採用して操業中一定とした。ただし、この値は他の実験の値よりかなり大きい。

図17は投縄後深度を増しつつある7時45分と、最も深く達した10時30分の縄なりを示す。いずれの縄なりも、向って右側へ偏りを生じている。表層と下層の流れにシアアがあり、延縄の漂移はおおよそ両者の中間的な方向へ向かっている。延縄に相対的な流れは表層と下層で逆向きになり、幹縄下部が右方向に偏るような配置になっているのがわかる。

しかしながら到達深度は両者で大きく異なっている。7時45分のもの（図上段）は、“ふかれ”があまり見られないのに浅く、幹縄がかなり強く張られて投入されたことを示す。一方、10時30分（下段）のものはかなり沈んでいる。

図を注意して見ると、この右端の点の位置が少し左にずれている。短縮率を与えられた時、制約条件を満たす最適解は存在しないことを意味する。実際に沈んだのは観測データから確かであるが、与えられた短縮率のもとに観測値（ $d_i$ のセット）を満たす滑らかな曲線を見いだすのが困難になっていることを示す。恐らく、実際の短縮率はここで想定した値（0.95で操業中一定）よりも小さいものと考えられる。実際、GPSで得られた揚げ縄時の短縮率（表3参照）は小さくなっている。

## 議 論

### 1) 縄なりと流れの構造

上記の3つの実験では、各実験とも水深データセットから14分割の折り尺モデルで15分毎の形状を求めた。得られた形状は、“ふかれ”や左右の非対称性がより明確に表現され、その形状は、漂移とADC Pにより得られた延縄に相対的な流れの構造と矛盾しなかった。また、いずれの実験も延縄の漂移は表層のみでなく漁具の到達深度までの平均的な流れが反映されていることを示した。

実験1では最も“ふかれ”が大きかったが、ここは上層の南赤道海流と下層の赤道潜流が逆方向になる流れの鉛直シアアが大きい所である。一方、実験2では、流れ自体は存在したが上下の流速のシアアが比較的小さいため、縄なりは鉛直面でのカテナリーに近いものとなっている。また、実験3では流速の鉛直シアアが縄なりの水平方向の偏りを生んでいる。各実験とも“ふかれ”は流れの鉛直シアアに依存することが示された。

海上風が浮子を引きずる効果を無視できるとすれば、流れが鉛直的に一樣（シアアなし）な場合は、延縄は全体が流れと共に移動するから延縄に相対的な流れは無く、系にかかる外力は重力と浮力のみになり、その形は鉛直面でカテナリーを為すはずである。一方、鉛直シアアがある場合は延縄の各部は深さ毎に異なった流れを受けるため各部にはこれに対応した抵抗力・揚力がかかるはずだから“ふかれ”が生じることになる。

## 2) 幹縄深度の周期的変化

海面には風浪やうねりがあるから水深水温計はこれを検出するはずである。海面の波浪やうねりによる海面下の圧力変化は、水深の大きい外洋域では深くなるにつれて指数関数的に減少し、一定以上の深さになると検出できなくなる (Sverdrup et al. 1942)。海面で波により浮子が上下すれば、浮き縄や幹縄もこれにつれて上下するから圧力の変化が検出できるはずである。しかしながら3回の実験では、異なる海中でも浮き縄下端の深度はいずれもほとんど一定であった。この原因は測定周期の長さにもあろう。すなわち測定間隔が10秒だから、周期20秒以上のかかなり長周期の大きなうねりでなければとらえられない。さらに、実験海域は比較的平穏な気象であり、各実験とも波高は2 m以内であって、長い周期を持つ波高の大きなうねりは見られなかった。よって、ここでは海面の波の影響はほとんど無かったと考えてよいであろう。

浮き縄連結部の深度が一定であれば、1鉢の幹縄にしてみればその両端を鉛直的に強く束縛されていることを意味する。一方、幹縄の他の部分には数分から数10分周期の振動がみられる。このような振動については、多くの報告があるが (藤井・岡本 1969, 西 1990など)、その原因は明らかではない。この実験では各部がほぼ同位相で振動しており、深くなるほど振幅が大きくなっている。幹縄の1鉢の両端はほぼ固定された状態にあるから、この固定点を通る鉛直面に対して、幹縄各部は直角方向に“ふかれ”があり、その強弱により深度が変化しているものと考えられる。実際15分毎の縄なりを連続して見ると (図示せず)、両端が固定されて垂れ下がった縄が前後に振動するのがわかる。

この縄なりの推定方法に関しては、現場の操業条件や海洋条件と矛盾しないことは確認できたが実証はされていない。今後、船舶から魚探を用いて水中の延縄または水深・水温計の位置を検知し、両端の浮子と船舶の相対位置を測定して水平的な“ふかれ”を測定することが必要であろう。

## 3) 短縮率の精度と計算上の問題点

縄なりを精度よく求めるためには正確な短縮率が必要であるが、これは容易には得られない。各浮子の位置は投入・回収時の船位 (GPS) から得られるが、複数の浮子の位置を同時に測ることはできない。この実験では浮子間の距離は漂移を考慮した補正をほどこして推定した。この方法で得られた短縮率は1を越えることもあったが、繰り出し速度と船速から求めた短縮率と比較して定性的には矛盾は生じなかった。よって、補正は有効と思われるが得られた短縮率の精度を定性的に評価するのは困難である。

短縮率が1を越える値を得たのは、GPSの精度や流れの補正が不十分なためと思われるが、用いた幹縄の伸びによる可能性も捨て切れない。そこで、張力に対する伸びを計測したところ10Kg重に対し約1.5%の伸びであった。流れの無い水中で実験3で用いた短縮率94%のカテナリーをなすと仮定し、表2の延縄各部の諸元をもとに幹縄中央部の張力を計算すると、7.8Kg重と計算された。これでは1%の伸びしか説明できないので、幹縄の伸びの可能性は小さい。

一方、この計算方法においては、観測深度は正しく、折れ線の長さは1であることを前提にして、幹縄両端の距離 (短縮率と同等) が既知の値をとる制約条件の下で折れ線全体の形が最も滑らかとなる最適値を求める。しかし、実際より大きい短縮率を設定すると、幹縄が強く張られたことになるから、到達できる深度が制限されることになる。制限深度に近づけば、計算上の“ふかれ”は小さくならざるを得ない。観測値がその制限深度を越える極端な場合は、式の上からは、“ふかれ”すなわち2節の(3)式のを全て0にしても、付録Aの式(A3)の左辺が右辺に達しない場合に相当する。

これは、実験3の例で実際に起っている。幹繩は当初強く張られて投入されたものの、最大深度に達した時にはかなり弛んだと見られる。計算の上では、短縮率は操業中は一定としたから、最大深度到達時には用いた短縮率は実際より過大になっていると考えられる。計算で得られた繩なりには“ふかれ”がほとんど無く、浮子間の距離も設定したものと異なっており、不適な解であることがわかる。

いずれにせよ繩なりの計算には浮子間の距離の測定精度の向上が必要である。実験3ではGPSによる投縄時・揚縄時の短縮率は15%も異なっている。当面これを1桁精度を上げて1%程度にしたい。このためには、浮子間の距離（通常数100m）から考えて、誤差数m以下の測定精度を持つGPSが必要である。現在は、このようなGPSは高価で一般には利用できないが、近い将来は利用可能になると思われ、GPSを搭載した浮子で実験が可能になるであろう。

#### 4) まぐろ類の遊泳層の把握に関して

従来まぐろ類の遊泳深度の推定には、枝繩別の漁獲資料を調べ、カテナリーの仮定のもとに釣獲のあった枝繩の深度を計算する方法が用いられてきた（花本1974, Suzuki et al. 1977）。この方法による推定精度の向上には、“ふかれ”を評価する必要がある。今回の実験結果では、“ふかれ”は海流の鉛直シアーに依存することが確かめられ、海流の鉛直構造の把握により“ふかれ”を評価する可能性が示された。大まかには平均的な流れの構造がわかればよいであろう。これは、季節別気候値データ（Levitus et al. 1994, Levitus and Boyer 1994など）を利用すれば各深度での平均的な流れが推定できよう。

ただし、延縄は1日以下の操業であり、“ふかれ”の評価には本来はその場所・時刻での海流の情報が必要である。現在では熱帯域の国際的な観測網が整備され、多数の係留ブイが設置されており（McPhaden 1995）、比較的容易に海流の構造を把握できるようになっている。この結果も積極的に利用すべきであろう。

一方、この実験で用いたような水深水温計を装着した枝繩に漁獲があれば直接遊泳層がわかるが、釣獲率から考えれば非常に多くの測定を要する。まぐろ類の遊泳層の把握にはこのような測定を長期的に継続していくことが重要である。

## ま と め

1 鉢の幹繩に等間隔に水深水温計を取り付けて得られたデータから繩なりを3次元的に推定する計算方法を考えた。さらに、最近開発した小型水深水温計を利用して東部熱帯太平洋の異なる海域において延縄操業時に3回の実験を行った。実験データから繩なりを計算するとともに、実験時の海況などを参照しつつ、計算方法の妥当性を検討した。さらに、繩なりとその時間変化の原因を議論した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- 1) 水中の1鉢の幹繩の形状を単位ベクトルを連結した折り尺モデルで表されるものとし、各節点の座標をZ（深度）のみ観測から与え、幹繩両端の距離が観測値に等しいとする制約条件下で、各節点での曲率の平方和を最小とするベクトルのXY座標の組を最適化問題として算出する方法を開発した。
- 2) 幹繩の形状を詳しく近似するには、できるだけ多くの単位ベクトルに分割する必要があるが、実用的な目安として6つ以上の単位ベクトルで近似すれば（幹繩に6本以上の水深水温計を等間隔で取り付ければ）十分な精度と考えられる。

- 3) 3回の実験でいずれも浮き縄下端の深度は時間経過と共にほとんど変化せず、1鉢の幹縄の両端は鉛直的に強く束縛されていた。
- 4) 計算された縄なりと流れの構造とを比較した結果、流れの鉛直シアーの大きい(小さい)時は、“ふかれ”の大きさは大きく(小さく)、シアーの方向により縄なりに左右の偏りが生じることが認められ、この計算の妥当性が示された。
- 5) 幹縄各部で同位相の周期的な深度変化が見られる場合がある。時間を追って連続的に縄なりを計算し、両端の固定点を中心に幹縄全体が前後に揺れ動くことが明らかになった。
- 6) 縄なりの計算には正確な短縮率が必要である。今のところ精度良く浮子間の距離を求めるのは容易ではないが、この問題は将来高精度のGPSを搭載した浮子により解決されよう。

## 謝 辞

縄なりの計算では、遠洋水産研究所の数理解析グループの平松一彦主任研究官には本文を閲読して頂き助言を得、竹内幸夫技官にも有益な議論をして頂いた。さらに、海上実験では照洋丸の山中完一船長以下乗組員の方々および当所浮魚資源部の松永浩昌主任研究官に多大の協力を頂いた。これらの方々に厚くお礼申し上げる。

## 付 録

### 付録A. 最も滑らかな幹縄の形状をとる の組の求め方

本文の第3節で述べたように、幹縄の形状は $N$ ヶの単位ベクトルの組

$$\vec{V}_i = (r_i \cos \theta_i, r_i \sin \theta_i, d_i) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (\text{A } 1)$$

からなり、 $N$ ヶの $\theta_i$ で表すことができる。また、両端の座標は既知であり、 $P_0$ は原点で、他端 $P_N$ の座標は $(KN, 0, 0)$ だから、

$$\vec{P}_0 P_N = \sum_{i=1}^N \vec{V}_i = \left( \sum_{i=1}^N r_i \cos \theta_i, \sum_{i=1}^N r_i \sin \theta_i, \sum_{i=1}^N d_i \right) = (KN, 0, 0) \quad (\text{A } 2)$$

の関係がある。よって、 $\theta_i$ に関して、

$$\sum_{i=1}^N r_i \cos \theta_i = KN \quad (\text{A } 3)$$

$$\sum_{i=1}^N r_i \sin \theta_i = 0 \quad (\text{A } 4)$$

が成立する。

一方、最も滑らかな形は各部の屈曲の度合いが全体として最も小さいものと言い換えることができる。屈曲の度合いは曲率で表される。しかし、この折り尺モデルでは折れ線のため直線部の曲率はゼロで、

各節点の曲率は数学的には微分係数が不連続となって曲率が求まらない。従って、ここでは節点 $P_i$ における曲率を近似的に、

$$\left| \vec{V}_i - \vec{V}_{i-1} \right| \quad (\text{A } 5)$$

とする。曲線全体の滑らかさは、最小二乗法と同様に (A 5) 式の平方和を評価し、これが最小になるものが最も滑らかなものとする。この平方和を $T$ とおくと、

$$T = \sum_{i=1}^N \left| \vec{V}_i - \vec{V}_{i-1} \right|^2 = 2(N-1) - 2 \sum_{i=1}^N \vec{V}_i \cdot \vec{V}_{i-1} \quad (\text{A } 6)$$

となり、上式に (A 1) 式を代入して整理すると、

$$T = 2(N-1) - 2d_{i-1}d_i - 2 \sum_{i=1}^N r_{i-1}r_i \cos(\theta_{i-1} - \theta_i) \quad (\text{A } 7)$$

とかけ、この式の右辺第3項のみが変数となる。従って、 $T$ を最小とするためには、

$$\sum_{i=1}^N r_{i-1}r_i \cos(\theta_{i-1} - \theta_i) \quad (\text{A } 8)$$

が最大となる $\theta_i$ の組 ( $i=1, 2, \dots, N$ ) を、(A 3) および (A 4) の制約条件の下で求めればよい。この問題は上記 (A 8) 式で表わされる多変数関数 ( $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ ) が、(A 3), (A 4) の条件下で最大となる時の変数の値を決定することに帰着できる。これは、一般に非線型計画問題とよばれるものの1つである。(A 8) 式が目的関数、(A 3), (A 4) 式が制約条件で、(A 8) 式を最大にする ( $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ ) が最適解である。

これは、一般には解析的に解くことは困難で、数値計算によって解を求める。制約条件つき非線形計画問題の最適値を求めるアルゴリズムは各種あるが、ここでは乗数法 (大野・磯田編 1990: 数値計算ハンドブック) を用いた。

得られたの組は全て符号を変えても式 (A 8) は不変であるから、実際には異符号の2組の解が得られる。これは、“ふかれ”の方向が前後方2通りの縄なりが得られたことになる。いずれの解を採用するかは、その際の流れの状況から判断せざるを得ない。

## 付録B. 折り尺モデルの分割数の目安

単位長の $N$ 本の線分からなる折り尺モデルの全長は $N$ である。この $i$ 番目の線分ベクトルを (A 1) と同様に、

$$\vec{V}_i = (r_i \cos \theta_i, r_i \sin \theta_i, d_i)$$

と書く。 $m$ 番目の節点の位置ベクトル $\vec{OP}_m$ は

$$\vec{OP}_m = \left( \sum_{i=1}^m r_i \cos \theta_i, \sum_{i=1}^m r_i \sin \theta_i, \sum_{i=1}^m d_i \right) \quad (\text{B } 1)$$

と表される。ただし、 $d_i, r_i$ は既知の定数である。

カテナリー上において、原点Oから曲線沿いに距離sの点をQとし、その位置ベクトルを $\vec{OQ}$ とすれば、

$$\vec{OQ} = (f(s), 0, g(s)), \tag{B 3}$$

ただし、

$$f(s) = \frac{1}{a} \log(as - b + \sqrt{(as - b)^2 + 1}) + c,$$

$$g(s) = \frac{1}{a} \cosh(f(s))$$

とかける。ここで、 $a, b, c$ は全体の長さNと短縮率Kから決まる定数である。

$$s = m$$

として、 $P_m$ とQを対応付ければ、両者の座標上の距離 $P_mQ$ は折り尺モデルの節点とこれと対応するカテナリー上の点の距離となる。各節点でその距離の二乗平均をとれば、これは両者の離れ具合のおおまかな目安となろう。実際には節点だけでなく、両者の間の全て対応点間の距離を積分すればよい。ここでは簡単のため厳密性は欠くが、上記の値を離れ具合の指標と見なした。これは、

$$\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N P_m Q^2 = \sum_{m=1}^N \left\{ (f(m) - \sum_{i=1}^m r_i \cos \theta_i)^2 + \sum_{i=1}^m (r_i \sin \theta_i)^2 \right\} \tag{B 4}$$

と表され、その値を $E^2$ とすれば、これは折り尺一本の長さを1とした時の離れ具合の尺度だから分割数によらずカテナリー全体の長さを同じとみなせば、

$$\epsilon_N = \frac{E}{N} \tag{B 5}$$

が指標として用いられる。これは前節の(A 3)および(A 4)の制約条件のもとで、上記指標を最小にする $\theta_i$ の組を求めればよい。近似すべきカテナリーが左右対称だから折り尺も左右対称になるはずである。よって、 $\theta_i$ の組は左右対称( $\theta_i = \theta_{n-i}$ )となり、求める $\theta_i$ の組は実際には分割数の半分でよい。

## 参 考 文 献

藤井一郎・岡本久生 1969：マグロ延縄の水中形状とマグロ・カジキ類の釣獲状況について。三重県浜島水試事業報告，昭和44年度，45-103。

葉室親正・石井謙治 1958：日記式鮪延縄用深さ計による鮪延縄漁具の水中における形状その他についての二、三の考察。漁船研究技報，11，39-119。

花本栄二 1974：メバチに関する水産海洋学的研究 — I，東部熱帯太平洋におけるマグロはえなわの漁獲深度。La mer(日仏海洋学会誌)，12，128-136。

- HANAMOTO, E. 1987 : Effect of Oceanographic Environment on Bigeye Tuna Distribution. Bull. Japan. Soc. Fish. Oceanogr., **51**,(3),203-216.
- 河口 喬太郎・平野正勝・西村実 1962 : 魚群探知機によるマグロ延縄形状の測定. 鮪漁業, (4), 91-109.
- LEVITUS, S., R. BURGETT and T. P. BOYER 1994 : World Ocean Atlas 1994, Volume 3: Salinity. NOAA Atlas NESDIS 3. 111pp.
- LEVITUS, S. and T. P. Boyer 1994 : World Ocean Atlas 1994, Volume 4 : Temperature. NOAA Atlas NESDIS 4. 129pp.
- MCPHADEN, M. J. 1995 : The Tropical Atmosphere and Ocean (TAO) Array is completed. Bull. American Meteorol. Soc., **76**, 739-731.
- MIZUNO, K., M. OKAZAKI, T. WATANABE and S. YANAGI 1996 : A Micro Bathy Thermograph System for Longline Boats in View of Large Scale Ocean Observing System. Bull. Nat. Res. Inst. Far Seas Fish., (33), 1-15.
- MONTGOMERY, R. B. and E. D. STROUP 1975 : Equatorial Waters and Currents at 150° W in July-August 1952. Johns Hopkins Oceanographic Studies, **1**, 68pp.
- 盛田友式 1969 : マグロ延縄漁具に関する研究. 鹿大水紀要, **18**, 145-215.
- 西 徹 1990 : 東部インド洋におけるマグロ延縄による釣針深度の経時変化とキハダ・メバチの釣獲深度. 鹿大水紀要, **39**, 81-98.
- 大野 豊・磯田和男編 1990 : 数値計算ハンドブック, オーム社, 東京, 1153pp.
- 柴田恵司 1962 : 魚群探知機に表れた記録解析の試み-I 鮪延縄の水中形状についての二, 三の知見. 長崎大学水産学部研究報告, (13), 9-17.
- 柴田恵司 1963 : 魚群探知機に表れた記録解析の試み-I 鮪延縄の水中形状の力学的考察及びコントロールについて. 長崎大学水産学部研究報告, (15), 49-57.
- SUZUKI, Z., Y. WARASHINA and M. KISHIDA 1977 : The comparison of catches by regular and deep tuna longline gears in the Western and Central Equatorial Pacific. Bull. Far Seas Fish. Res. Lab., (15), 51-89.
- SVERDRUP, H. U., M. W. JOHNSON and R. H. FLEMING 1942 : The Oceans, their physics, chemistry, and general biology. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J. 1087pp.
- 田内森三郎 1963 : 演習漁業物理学. 恒星社厚生閣, 東京. 116pp.
- TSUCHIYA, M 1975 : Subsurface countercurrents in the eastern equatorial Pacific Ocean. Journal of Marine Research, **33** (Supplement), 145-175.
- 渡辺朝生・水野恵介 1993 : エル・ニーニョ最盛期におけるADCPによる太平洋赤道海域の海流系の観測. 平成3年度開洋丸1次航海調査報告書, 水産庁, 246pp.
- 吉原友吉 1954 : マグロ延縄の漁獲分布-IV, 短縮率計算表及び図表, 日水誌, **19**, (10), 1012-1014.