

---

Tome 8

Mai 1970

Numéro 2

---

う み

La mer

昭和 45 年 5 月

日 仏 海 洋 学 会

La Société franco-japonaise  
d'océanographie  
Tokyo, Japon

# 日 仏 海 洋 学 会

## 編 集 委 員 会

委員長 今村 豊 (東京水産大学)  
委員 星野通平 (東海大学) 井上 実 (東京水産大学) 川原田 裕 (気象庁) 西村 実 (東海大学) 大柴五八郎 (理化学研究所) 杉浦吉雄 (気象研究所) 高木和徳 (東京水産大学) 高野健三 (理化学研究所) 富永政英 (埼玉大学) 宇野 寛 (東京水産大学) 渡辺精一 (理化学研究所)

## 投 稿 規 定

1. 報文の投稿者は原則として本会会員に限る。
2. 原稿は簡潔にわかりやすく書き、図表を含めて印刷ページで12ページ以内を原則とする。原稿は、東京都千代田区神田駿河台2-3 日仏会館内 日仏海洋学会編集委員会宛に送ること。
3. 編集委員会は、事情により原稿の字句の加除訂正を行なうことがある。
4. 論文には必ず約500字の和文の要約をつけること。
5. 図および表は必要なもののみに限る。図はそのまま版下になるように縮尺を考慮して鮮明に黒インクで書き、論文の図および表には必ず英文 (または仏文) の説明をつけること。
6. 初校は原則として著者が行なう。
7. 報文には1編につき50部の別刷を無料で著者に進呈する。これ以上の部数に対しては、実費 (送料を含む) を徴収する。

---

Rédacteur en chef Yutaka IMAMURA (Tokyo University of Fisheries)  
Comité de rédaction Michihei HOSHINO (Tokai University) Makoto INOUE (Tokyo University of Fisheries) Yutaka KAWARADA (Meteorological Agency) Minoru NISHIMURA (Tokai University) Gohachiro OSHIBA (Institute of Physical and Chemical Research) Yoshio SUGIURA (Meteorological Research Institute) Kazunori TAKAGI (Tokyo University of Fisheries) Kenzo TAKANO (Institute of Physical and Chemical Research) Masahide TOMINAGA (Saitama University) Yutaka UNO (Tokyo University of Fisheries) Seiichi WATANABE (Institute of Physical and Chemical Research)

## RECOMMANDATIONS A L'USAGE DES AUTEURS

1. Les auteurs doivent être, en principe, des Membres de la Société franco-japonaise d'océanographie. Néanmoins, les notes des savants étrangers à la Société seront acceptées, si elles sont présentées par un Membre.
2. Les notes ne peuvent dépasser douze pages. Les manuscrits, dactylographiés sur papier fort, doivent être envoyés au Comité de rédaction de la Société franco-japonaise d'océanographie, c/o Maison franco-japonaise, 2-3 Kanda, Surugadai, Chiyoda-ku, Tokyo.
3. Le Comité de rédaction se réserve le droit d'apporter, le cas échéant, des modifications mineuses aux manuscrits ainsi que de demander aux auteurs de les corriger.
4. Des résumés en langue japonaise ou langue française sont obligatoires.
5. Les figures au trait seront tracées à l'encre de Chine noire sur papier blanc ou sur calque. Les légendes des figures et des tableaux sont indispensables.
6. Les premières épreuves seront corrigées, en principe, par les auteurs.
7. Un tirage à part des articles en cinquante exemplaires est offert gratuitement aux auteurs. Ceux qui en désirent un plus grand nombre peuvent les faire établir à leurs frais.

## 円形水槽による魚の遊泳速度の測定—III\*

光によるカタクチイワシの遊泳行動

井 上 実\*\*

### Observation on the Swimming Speed of Fish in an Annular Trough—III

Swimming Performance of Anchovy by Light

Makoto INOUE

**Abstract:** To measure the swimming speed of anchovy *Engraulis japonica* in an annular trough, the effect of visual screen and current had been tested in the previous study. In the present paper, the effect of light is examined both independently of the visual screen or current, and dependently of them. The source of light is two miniature bulbs of two watt, which are suspended at points symmetrical with respect to the trough, and rounded at the same speed of the visual screen.

When the light is supplemented to the visual screen and current, the rheotropic movement of any test fish is released easily compared with the case of only visual screen or current and even the case of the combination of the both stimuli, and a disorder of the performance is not seen in the laps of time. For such a phototropic fish as anchovy this method may be effective to measure the swimming speed in the annular trough.

#### 1. 緒 言

円形水槽を用い魚の遊泳速度を測定する際、実験に用いたすべての魚に対して遊泳行動を起こさせ、その行動を長時間持続させることは重要な問題である。著者ら<sup>1)2)</sup>が行なった過去二つの実験のいずれにおいても、円形水槽の水路に入れた魚がすべて、直ちに遊泳行動を起すとは限らず、刺激（水流、シマ模様）に対し、負の反応、ないし無反応を示す魚が時々観察された。しかし、前回の実験<sup>2)</sup>で、カタクチイワシの遊泳行動を観察した際、シマ模様の刺激と水流刺激に、さらに、光刺激を加えると、遊泳行動を起しやすいことが予測された。

本実験では、カタクチイワシ *Engraulis japonica*

に対する光刺激の効果を確かめると共に、これら各刺激の組合せから、もっとも効果的に遊泳行動を起させる方法を検討した。

#### 2. 装 置

装置は前報<sup>2)</sup>に示したものと同様であるが、簡単に装置の概略を示すと次の通りである。水路の幅は 10 cm、水路外周の直径は 112 cm、内周の直径 102 cm で、水は水路に高さ 7.5 cm まで入れた。シマ模様は、白い厚紙に幅 4 cm の黒い紙を 12 cm の間隔で貼ったものを、水路の外側に巡らした。水路の内側のシマ模様は、外側のシマ模様にくらべ、黒、白のシマの幅、およびその間隔は多少縮められており、底面のシマ模様は、内側、外側のシマ模様連結のために放射状になっている。光源は水路上、対称の位置の 2 箇所水面 5 cm の高さにある笠つき豆電球 (2 W) で、それ

\* 1970 年 3 月 19 日受理

\*\* 東京水産大学 Tokyo University of Fisheries

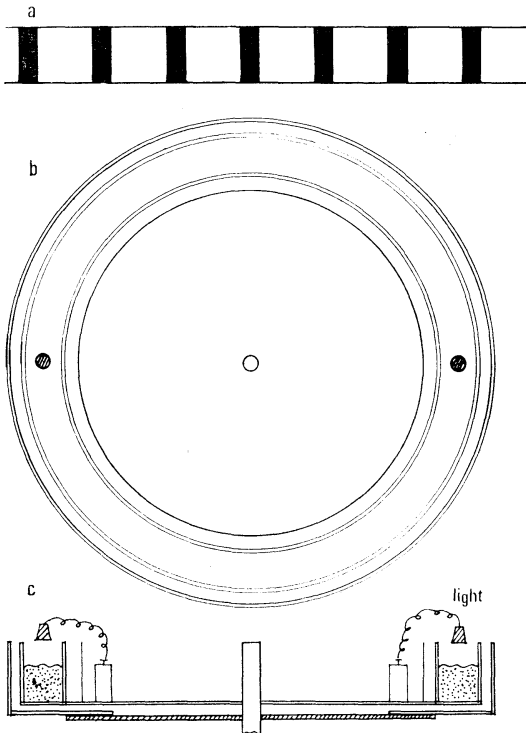


Fig. 1. Outline of the trough.

a, visual screen for outside wall; b, top view of the through; c, side view of the trough.

ぞれ 3 V の乾電池を電源とした。(Fig. 1) 光はシマ模様と同速度で同方向へ回転する。光の明るさは、東芝照度計 (9 号型) による測定では、水路に 7.5 cm まで海水を入れた場合、電球直下の水路底面で 22 lux, それより 22 cm 離れた所で 2 lux であった。

水路, シマ模様および光は 1/2 HP のモーターで回転させ, それらの回転方向は左右いずれにも自由に, また, その速度も加減速器で調節できるようにした。シマ模様および光の回転速度は 10~70 cm/sec, 水流は水路の回転によって起し, 水路に水を 7.5 cm まで入れた場合 20~25 cm/sec であった。

### 3. 実験魚

本実験は 1968 年 6 月 29 日から 7 月 5 日まで行なわれた。この実験に使用された魚は, 東京湾のイワシ巾着網漁業で漁獲された体長 10 cm 内外の

カタクチイワシで, 漁獲直後, イケス網に収容し, 館山湾で畜養したものである。(以下, 魚というのはカタクチイワシのことである) これらの一部を直径約 1.0 m の竹籠に移し, 東京水産大学館山実習場の棧橋沖へ曳航し浮べておき, その中から約 50~60 尾ずつ 1~2 日目ごとに, 同場研究室前の屋外コンクリート水槽 (4×5×1.5 m) に移す。実験ごとに, その水槽からナイロン製のたも網によって 5~10 尾ずつ取り出し, 外傷がなく, 鱗の剝離の少ない体色の鮮やかなもの 1 尾を選び, 実験装置の遊泳水路内に入れた。

装置への順応中に, この魚が異常な状態, たとえば, 頭部を水路の内壁や底面につけて不自然な遊泳状態を示した場合や, 水流を起し, シマ模様や光を回転させても, 遊泳行動を示さない魚は, 新しい魚に取り替えた。

本実験に使用した魚は, 漁獲後約 8 日間イケス網の中で畜養したもので, イケスの中では右回りに遊泳していた。イケス付近の水温は 22°C, 屋外コンクリート水槽の水温は 20°~22°C, 実験水路内の水温は 21°~22°C であった。

### 4. 実験方法

本実験の目的は, シマ模様, 光, 水流の組合せ, および, それらの回転速度がどのようなであれば, 最も望ましい遊泳行動 (魚が刺激に反応し, 長時間の遊泳を行なうこと) が得られるかを定めることである。この問題に関し, BRETT *et al.*,<sup>3)</sup> JOHNS<sup>4)</sup>, INOUE<sup>1)</sup> の研究から, 遊泳能力のすぐれた魚は, シマ模様の回転方向に頭を向けて泳ぐのが普通であり, これに水流が加わった場合は, シマ模様の回転方向と反対の方向から水が流れてくるようにすると, 魚の走流性を最も強く起こさせる組合せとなるので, 光を加えた場合も, 光とシマ模様は同方向に, 水流はその反対方向にした。

回転速度に関し, あらかじめ各種の組合せで観測を行なった結果, シマ模様および光の回転速度約 36 cm/sec, 水流約 20 cm/sec の際, 魚の遊泳状態の個体差は比較的少なかったので, 今回はこの速度を採用した。また, 実験魚はイケスの中で



常に右回りに回っていたので、前報<sup>2)</sup>の結果から、シマ模様、光は右回りに、水は左方向に流した。光刺激を用いる時は、実験室を暗室にした。

## 5. 結 果

本実験は、水流だけの影響を調べた実験 I と、各刺激の組合せによる実験 II~IV とからなる。実験 II, 光と水流の組合せ。実験 III, シマ模様と水流の組合せ。実験 IV, シマ模様と水流の組合せ。

### 実験 I. 水流刺激による走流性

魚の走流性は、一部は視覚によるもので、一部は接触刺激（水圧感覚も含める）によるものである。この実験では、シマ模様あるいは光を加えず、水流刺激だけによる走流性を調べ、以後の実験結果との比較検討の資料とした。

透明なアクリル製の水路の内、外側および底面を白色厚紙で被い、外部との視覚上の関係を断ち、魚が泳ぎながら目標を定める可能性を少なくした。しかし、本実験の円形水路は半円のものに接合したもので、その接着部には人間の肉眼で明瞭に認められる縦線が、水路の対称位置の内壁と外壁に2本ずつ入っており、同様に、白色厚紙の継ぎ目も2箇所あり、魚は遊泳中しばしばこれらを目標に定めたように見える。また、水路のアクリルや厚紙上のしみなども、時には目標になるようであった。

魚1尾を選び、水路に入れてから5分間環境に順応させた後、水路を回転させ、魚が水流に向けて泳ぎ出し、流速が一定になってから測定を開始する。流速は20.6 cm/secである。この場合、魚は次のいずれかの行動をとる。i) 向流して水路中を前進する、ii) 向流せず、水流と共に流れる、iii) 向流しながらも、水流に流される。

観測は5分間を単位とし、1分ごとに前述のいずれかの行動を示している魚の水路中の回転数を測る。Table 1で、(+)はi)、(-)はii)、(±)はiii)の場合を示す。第1回目の観測が終ると、水路の回転を止める。水流は次第に弱まり、水流の停止と共に魚の遊泳行動は停止する。それから

1分間の休止時間をおき、第2回目の観測を始める。このような観測を5尾の実験魚につき2回ずつ計10回行ない、その結果をTable 1に示す。No. 1の実験魚は第1回のTrialで、最初の1分間で水路を $4\frac{1}{4}$ 回流されている。これは、魚が一度も向流ないし停止せず、水流と共に流された状態である。次の1分間で、 $3\frac{1}{4}$ 回流されているが、前の1分間より少ないのは、この間一点に停止した時間があるからである。次の3分目にはやや前進したが、全体としては流され、次の4分目も同様で、5分目は全然流されていない。この魚の、2回目のTrialでは、4分目まではかなり速い速度で前進を続け、最後の1分間に後退している。

全体をみれば、魚が流水中に示す状態、i)、ii)、iii)はNo. 1, No. 2の魚ではTrialごとに異なっている。また、どの実験魚でもTrialごとの行動の傾向には多少の違いがあり、1分ごとの観測では、観測ごとの違いはさらに明瞭になっている。このことから、魚が水流に対して示す反応行動には個体差があり、また、同じ魚でも時間経過によって違いがでてくることがわかる。ここでいう、時間経過による違いは、遊泳に伴う疲労度を意味するのではなく、時々刻々に変る視覚的環境の変化によるものであろう。魚が遊泳中、はっきりとした目標を定めると、それから流されまいとする遊泳状態が見られる。その目標がアクリル水路の継ぎ目や水路上のしみなどであれば、それらは移動するので、魚はその目標と共に前進するであろう。また、その目標が厚紙の継ぎ目や厚紙上のしみなどであれば、それらは移動しないので、魚はその目標と共に留まるであろう。そして、移動目標にせよ、固定目標にせよ、目標が一度視界からはずれると、次の目標をなかなか定め得ず、その結果水流に流されてしまうのであろう。事実、連続した目標で明瞭に認められるシマ模様と水流との組合せによる実験(Table 3参照)によると、1分ごとの行動の変動は余り見られず、水流刺激だけによる遊泳行動との違いは明らかである。

### 実験 II. 光と水流の組合せ

本実験でも、厚紙により実験魚が遊泳中に目標

Table 1. Observation on the rounding number of anchovy by current stimulus.

Fish	Body length cm	Trial	Observation*	1	2	3	4	5
			Rounding number of fish					
1	11.2	1	(+)	0	0	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{3^2}{3}$
			(-)	$4\frac{1}{4}$	$3\frac{1}{4}$	3	2	0
			(±)	0	0	0	0	0
		2	(+)	9	$7\frac{4}{5}$	7	$5\frac{1}{3}$	$1\frac{2}{3}$
			(-)	0	0	0	0	2
			(±)	0	0	0	0	0
2	10.9	1	(+)	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	0	$2\frac{1}{4}$
			(-)	$1\frac{4}{5}$	2	$3\frac{1}{4}$	0	1
			(±)	0	0	0	$1\frac{3}{4}$	0
		2	(+)	$3\frac{2}{3}$	$1\frac{1}{2}$	0	$1\frac{1}{4}$	$\frac{1}{3}$
			(-)	0	$\frac{1}{2}$	4	0	0
			(±)	0	0	0	0	0
3	10.2	1	(+)	$\frac{1}{4}$	0	0	0	0
			(-)	0	$\frac{3}{4}$	$3\frac{3}{4}$	3	2
			(±)	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{2}{3}$
		2	(+)	0	0	0	0	0
			(-)	$3\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	0	1	1
			(±)	1	$1\frac{1}{5}$	$1\frac{2}{3}$	$2\frac{1}{2}$	3
4	10.5	1	(+)	0	0	$\frac{1}{6}$	0	0
			(-)	0	0	0	0	0
			(±)	$\frac{2}{3}$	1	$1\frac{1}{6}$	1	$1\frac{1}{5}$
		2	(+)	$\frac{1}{5}$	0	0	0	$\frac{1}{5}$
			(-)	0	3	0	0	0
			(±)	0	$\frac{1}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{4}{5}$	0
5	9.8	1	(+)	8	$\frac{2}{3}$	$4\frac{1}{3}$	12	$11\frac{1}{3}$
			(-)	0	0	0	0	$\frac{1}{5}$
			(±)	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$	0	0	0
		2	(+)	$6\frac{1}{4}$	$7\frac{1}{5}$	6	$2\frac{4}{5}$	$\frac{1}{4}$
			(-)	1	0	$\frac{4}{5}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{3}$
			(±)	0	0	0	0	0

\* Means a continuous observation on the rounding number of fish in every one minute for five minutes; (+) swimming ahead against current, (-) being streamed with current, and (±) being streamed against current.

を定めぬようにした。

水路に魚を入れ、光を点灯し、5分間順応させ、光をゆっくりと右方向へ回転させる。水路に入れた魚は、すべて光に追従するとは限らず、光に無反応の魚が3尾に1尾の割合でみられたが、それらは新しい魚に取り替え、上記のとおり扱いを繰り返す、光によく反応する魚を選んだ。本実験に用いた魚は3尾である。

光の回転によく追従する魚を選んだ後、観測を開始する。観測時間は5分間で、1分ごとに魚の回転数を計る。第1回の観測は、光だけの刺激で水流を加えない。光の回転数は毎分6.3回である。光の回転と魚の遊泳が同調せず、光域内から魚が脱落すると、魚の遊泳行動は止まるが、それはわずかの間で、再びもう1個の光が魚の視覚に入る

と、遊泳し始める。その結果、魚の回転は多くの場合、光の回転より少なくなる。光を止めると魚は直ちに遊泳を止める。魚が静止してから1分間の休止時間を与え、再び第2回の観測を行なう。

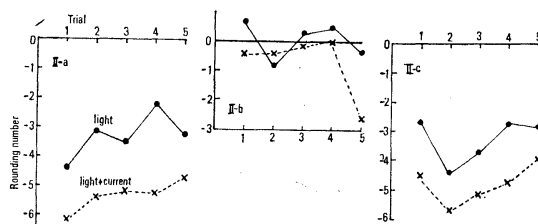


Fig. 2. Rounding number of anchovy by light stimulus, and light+current stimuli for five minutes.

Rounding number shows the difference from 6.3 times which is the rounding number of light in one minute.

Table 2. Observation on the rounding number of anchovy by light stimulus, and light+current stimuli in every one minute for five minutes. — means the fact that the fish swim with losing ground for one minutes.

Fish	Body length cm	Stimuli		Light					Light+Current						
		Trial	Ob.*	1	2	3	4	5	Ave.	1	2	3	4	5	Ave.
a	10.8	1		-4.6	-4.8	-3.3	-3.8	-4.0	-4.3	-6.8	-6.8	-6.3	-5.5	-6.3	-6.3
		2		-3.0	-3.0	-3.5	-3.3	-3.6	-3.1	-5.8	-5.5	-5.0	-5.5	-5.1	-5.4
		3		-3.0	-3.1	-3.0	-3.5	-4.5	-3.4	-4.0	-5.5	-5.5	-5.6	-5.5	-5.2
		4		-1.5	-2.6	-2.1	-2.6	-1.8	-2.1	-4.0	-5.6	-5.3	-5.6	-6.3	-5.3
		5		-2.3	-3.0	-3.3	-3.8	-2.5	-3.0	-3.3	-4.0	-5.5	-5.3	-5.5	-4.7
b	11.3	1		1.2	0.2	1.0	0.7	0.7	0.7	-0.3	-0.8	-1.0	0.4	-0.3	-0.4
		2		1.0	-2.3	-2.0	-2.0	1.3	-0.8	0	0	-0.8	-0.5	-0.5	-0.4
		3		1.2	1.5	-0.1	-1.5	0.5	0.3	0	-0.6	-0.3	0.2	0	-0.1
		4		1.2	1.4	0	0	0	0.5	0.9	0.2	0	-0.5	0.7	-0.0
		5		0.7	-3.0	-0.8	1.5	0.2	-0.3	-0.6	-3.3	-5.8	-1.8	-1.8	-2.6
c	10.2	1		-5.5	-6.3	-0.5	0	-1.3	-2.7	-4.5	-4.8	-5.0	-4.2	-4.0	-4.5
		2		-4.6	-4.0	-4.5	-4.3	-4.6	-4.4	-5.8	-5.3	-5.6	-5.3	-6.7	-5.7
		3		-5.9	-3.0	-2.8	-3.3	-3.5	-3.7	-4.5	-4.9	-5.3	-5.5	-5.2	-5.1
		4		-1.8	-7.7	-3.5	-3.1	-2.3	-2.7	-3.8	-4.8	-4.8	-5.0	-4.3	-4.7
		5		-3.3	-2.3	-2.1	-3.6	-2.8	-2.8	-4.0	-4.5	-4.0	-4.0	-2.9	-3.9

\* Ob. = Observation

この観測では光を再び右方向へ回転させ、魚が光に追従した時に、水路を左方向に回転し、水流を加え、魚の遊泳状態が安定してから5分間の観測を行なう。この場合、魚は次のいずれかの行動をとる。i) 水流に面し、ほぼ一点に留まる、ii) 水流に面し、水路中を前進する、iii) 水流に面し、水流に流され後退する。魚が ii), iii) の行動を示した場合は、魚の回転数を数えた。i) の場合は時間の経過だけを見る。

第2回目の観測が終了すると、光と水路の回転を同時に止める。水流は次第に弱まり、魚の遊泳行動は水流の停止と共に停る。魚が停止してから1分間の休止時間をおき、再び光だけを右回りに回転させる。

このように、光だけと、光+水流を与える観測を1実験魚に対し、交互に5回ずつ繰り返した。

Table 2 の数値は、1分ごとの魚の回転数より光の1分間の回転数 6.3 回を減じたもので、この値が 0 に近い値ほど、魚は光によく追従したことになる。Fig. 2 は Table 2 の1分ごとの回転数の平均値を、観測回数ごとに示したものである。

実験 II-a,b,c (Fig. 2) は、流速 20.6 cm/sec、光の回転速度 36.0 cm/sec の条件下で、体長 10.8, 11.3, 10.2 cm の魚によって得られた結果である。実験 II-b の魚の行動は光の回転によく同調してい

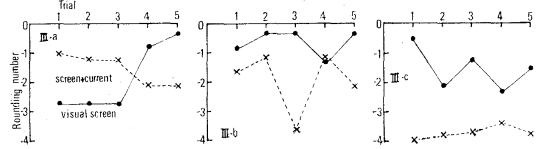


Fig. 3. Rounding number of anchovy by visual screen stimulus, and visual screen+current stimuli for five minutes.

Table 3. Observation on the rounding number of anchovy by visual screen stimulus and visual screen+current stimuli.

Fish	Body length cm	Stimuli		Visual screen					Visual screen+Current						
		Trial	Ob.*	1	2	3	4	5	Ave.	1	2	3	4	5	Ave.
a	10.5	1		-3.8	-2.5	-3.1	-2.8	-1.3	-2.7	-1.0	-0.7	-0.5	-1.5	-1.5	-1.0
		2		0.3	-4.3	-3.6	-0.8	-5.0	-2.7	-1.1	-0.5	-1.6	-1.3	-1.5	-1.2
		3		-3.4	-2.4	-2.3	-6.9	-3.6	-2.7	-0.7	-1.2	-1.3	-1.5	-1.3	-1.2
		4		-0.1	-1.3	-1.5	-0.1	-0.8	-0.8	-2.6	-2.5	-2.3	-1.3	-1.8	-2.1
		5		-0.5	-0.3	0	-0.3	-0.3	-0.3	-2.5	-2.6	-2.0	-1.8	-1.6	-2.1
b	9.7	1		-1.8	-0.5	-0.5	0.2	-0.8	-0.7	-0.6	-1.0	-3.1	-1.6	-1.9	-1.6
		2		-0.5	-2.3	0.3	0.5	0.7	-0.3	-1.0	-0.4	-1.3	-2.0	-1.1	-1.1
		3		-0.8	-0.5	-0.1	-0.1	0	-0.3	-0.6	-3.1	-1.6	-10.0	-2.0	-3.6
		4		-0.6	-1.8	-0.3	-0.7	-2.9	-1.2	-1.5	-1.7	-1.6	0.2	-0.6	-1.1
		5		-0.8	0.2	-0.3	-0.7	0	-0.3	-2.8	-2.5	-2.5	-1.3	-1.5	-2.1
c	9.5	1		-0.4	-0.5	-0.7	-0.2	-0.5	-0.5	-3.5	-4.0	-4.5	-4.0	-4.0	-4.0
		2		-2.5	-2.4	-3.4	-1.5	-1.1	-2.1	-3.3	-4.0	-3.6	-3.8	-4.3	-3.8
		3		-2.3	-2.8	-1.5	-1.3	-0.7	-1.7	-3.6	-3.6	-3.8	-3.9	-3.8	-3.7
		4		-2.2	-4.2	-2.4	-1.5	-1.4	-2.3	-3.2	-3.7	-3.5	-3.8	-3.0	-3.4
		5		-0.5	-1.0	-1.0	-1.2	-3.9	-1.5	-3.3	-3.8	-3.8	-4.0	-4.3	-3.8

\* Ob.=Observation

るが、二つの実験では光の回転より遅れている。3尾の魚について共通していえることは、光だけの場合の方が、光+水流の場合より、光の回転に追従する行動が明らかである。観測を繰り返すことによる魚の疲労度は、この図からは考えられない。

**実験 III. シマ模様と水流の組合せ**

実験 II と同様な方法で、シマ模様だけの場合と、シマ模様+水流の場合について、魚の遊泳行動を比較した。この実験の結果は Table 3 に示され、1分ごとの回転数の平均値は Fig. 3 に示される。実験 III-a,b,c に用いた魚の体長は、それぞれ 10.5, 9.7, 9.5 cm である。シマ模様の回転数は 36.0 cm/sec, 流速は 20.6 cm/sec である。なお、すべてがシマ模様刺激に直ちに反応せず、光刺激の場合と同様、3尾に1尾の割で反応を示さなかった。

実験 III-a (Fig. 3) で、シマ模様刺激だけを与えた場合では、シマ模様+水流刺激の場合より、シマ模様の回転に追従する割合はやや低い。しかし、実験 III-b,c (Fig. 3) では、前者の場合の方が回転数が大きい。これは光刺激だけと、光+水流刺激の比較の場合と同様の結果である。

**実験 IV. シマ模様+光と水流の組合せ**

実験 II, III と同様、3尾の魚を用いて観測した

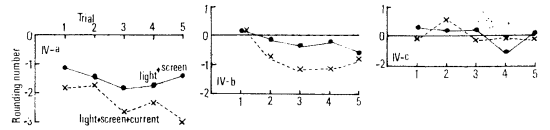


Fig. 4. Rounding number of anchovy by visual screen+light stimuli, and visual screen+current stimuli for five minutes.

Table 4. Observation on the rounding number of anchovy by light+visual screen stimuli and light+visual screen+current stimuli.

Fish	Body length cm	Stimuli Trial	Ob.*	Light+Visual screen					Light+Visual screen+Current						
				1	2	3	4	5	Ave.	1	2	3	4	5	Ave.
a	9.8	1		-1.4	-1.2	-1.4	-1.5	-0.3	-1.1	-2.2	-1.3	-1.3	-2.0	-2.3	-1.8
		2		-1.0	-1.3	-1.5	-1.5	-1.4	-1.4	-2.0	-1.8	-1.6	-1.5	-1.8	-1.7
		3		-1.2	-1.3	-2.0	-2.1	-2.3	-1.8	-1.8	-2.1	-3.4	-3.1	-3.0	-2.6
		4		-1.5	-1.8	-2.7	-1.3	-1.4	-1.7	-2.6	-2.8	-2.0	-2.3	-2.0	-2.3
		5		-1.5	-1.1	-1.0	-1.3	-1.3	-1.4	-3.0	-3.8	-2.8	-2.6	-3.0	-3.0
b	10.4	1		0.6	0	0.5	-0.2	-0.4	0.1	0.3	1.0	0	-0.8	-0.1	0.1
		2		-0.2	0.2	-0.3	-0.3	0	-0.1	-0.4	-1.1	-0.6	-0.3	-1.2	-0.7
		3		-0.3	0	0	-1.3	0	-0.3	-0.8	-2.5	-1.3	-0.2	-0.6	-1.1
		4		-0.1	0	-0.1	0	-0.9	-0.2	-0.3	-0.9	-2.0	-0.8	-1.3	-1.1
		5		0.2	0.2	-0.2	-2.0	-0.6	-0.6	-0.6	0	-2.1	-1.0	-0.1	-0.7
c	10.7	1		0	-0.2	0.9	0.5	0.4	0.3	0	0	0	-0.1	0	-0.0
		2		-0.1	0.5	0.5	0.2	0	0.2	0.2	1.0	0.3	0.7	0.7	0.6
		3		0	0	0.5	0.7	-0.2	0.2	-0.1	0	-0.2	0	-0.1	-0.1
		4		-0.3	-2.1	0	0	0	-0.5	0	0	0	0.1	0	0.0
		5		0	0	0	0	0.2	0.0	0	0	0	-0.1	0	-0.0

\* Ob.=Observation

が、本実験では水路に入れた魚は、3尾とも直ちにシマ模様+光の刺激に反応した。実験 IV-a,b,c (Fig. 4) に用いた魚の体長は、それぞれ 9.8, 10.4, 10.7 cm, シマ模様+光の回転速度 30.6 cm/sec, 流速 20.6 cm/sec である。1分間ごとの魚の回転数を Table 4 に示し、Fig. 4 にはその平均値を示す。

実験 IV-a, b では、実験 II, III の場合と同様、水流を加えない方が、シマ模様+光の回転に比較的よく同調するが、実験 IV-c ではほとんど差がない。全体的に、実験 II, III (Figs. 2, 3) とくらべ、魚の回転数は高く、Trial ごとの回転数の変動も、1分間観測ごとの変動も少ない。(Tables 2,3,4) すなわち、シマ模様+光は1分間に 6.3 回の割合で回転しているが、魚も常にそれと同じ、ないし、やや遅れながら、5分間同速度で泳ぎ続けた。

## 6. 考 察

本実験は、生態学の面から追究すべき問題を含んでいるが、ここでは、主として遊泳速度の測定の問題に焦点をあわせた。

円形水槽による遊泳速度の測定に際し必要なことは、i) 実験魚に遊泳行動を起こさせること、ii) 遊泳中はどの実験魚にも一様な行動をとらせること、iii) できる限り遊泳中の魚を一点に留まらせることの3点である。著者の前回の実験<sup>2)</sup>で、シマ模様+水流による測定では、カタクチイワシは10尾に7尾の割合で遊泳行動を起こしたものが、これに光を加えると10尾中9ないし10の割合で起こすことがわかった。本実験でも実験 IV で、シマ模様+光+水流では無反応の魚は見られなかったから、走光性のある魚の遊泳速度の測定には光刺激を加えることは、遊泳行動の誘発の上で効果がある。従って、i) の点に関しては光利用は十分の効果をもつ。次に、ii) の点に関しては、Fig. 2, 3, 4 の比較から、光+シマ模様が一番遊泳中に一様な行動をとらせやすいことになる。これは、1分間ごとの観測値 (Tables 2, 3, 4) から判断できる。iii) の点は、魚が水流に向い一点に留まっている場合が一番観測しやすいので、長時間に亘る遊泳速度の測定、ないし、耐久力の測定では、光+シマ模様の方法では常に光とシマ模様の回転に追従

して魚も前進するので好ましくない。しかし、カタクチイワシの最大遊泳速度は 100 cm/sec を超えるが、本装置の水流の最高の限界が 55 cm/sec (水深 7.5 cm の場合) であるので、水流中の一点に留めて測定する方法では測れない。従って、光を用いる場合、水流にさからい前進させ、前進速度+流速で最大遊泳速度を測定せざるを得ない。巡航速度 curising speed の測定では、光を用いるよりシマ模様+水流の方法がよいことになる。しかし、この場合でも各実験魚に対し、流速やシマ模様の速度を一定にして、どの魚にも一様な行動をとらせることは困難で、もし、一点に留めさせようとするならば、実験魚ごとに速度の条件を変化させることが必要で、シマ模様の速度は 36 cm/sec より、かなり遅くする必要がある。

光刺激でもシマ模様刺激でも、それらが単独の場合には魚は光あるいはシマ模様の回転へ同調する傾向が強く、水流が加わると、向流のまま一点に留まる傾向が強くなる。前者の場合は、保目標性ないし刺激相称性による行動で、後者の場合はそれらに水流による接触刺激が加わったものであるが、それにより回転数が少なくなるのは、単に水流の抵抗の影響と考えるべきか、接触刺激にそのような効果があると考えべきか明らかでない。しかし、Table 1 でも明らかのように、水流だけの刺激ではそのような効果はみられないので、水流による抵抗が回転数を減少したと考えてよいであろう。

## 7. 要 約

1) 円形水槽により、カタクチイワシの遊泳速度を測定するのに、光刺激を用いると、どのような効果があるかを、シマ模様、水流との組合せにより調べた。光源には水路上2箇所、2Wの豆電球を吊した。

2) 水路中に目標がなく、水流刺激だけの場合は、魚の行動は安定せず、水流に流されやすい。

3) 光刺激だけでも、魚は光に追従して回るが、その回転は光の回転に同調しない。水流が加わると回転はさらに遅れる。シマ模様刺激の場合も同様である。

4) シマ模様, 水流に光を加えると, シマ模様と水流の場合より, どの実験魚に対しても遊泳行動を容易に起こさせることができ, 時間経過による行動の変化も少ない。しかし, 水路中の一点に留めることはできない。

#### 謝 辞

本実験に当り, 測定の援助をして下さった本学学生宮坂紘一, 井上喜洋, 見崎情人の3君に感謝の意を表する。

#### 文 献

- 1) INOUE, M. (1967): Observation on the swimming speed of fish in an annular trough—I. Effect of visual screen on goldfish. *La mer* (Bulletin de la Société franco-japonaise d'océanographie), **5**(4), 237-243.
- 2) INOUE, M. and K. MIYASAKA (1968): Observation on the swimming speed of fish in an annular trough—II. Swimming performance of anchovy by its rounding direction. *La mer*, **6**(4), 237-242.
- 3) BRETT, J. R., M. HOLLANDS and D. F. ALDERDICE (1958): The effect of temperature on the cruising speed of young sockeye and coho salmon. *Jour. Fish. Res. Bd. Canada*, **15**(4), 587-605.
- 4) JOHNS, E. R. H. (1963): The reaction of fish to moving background. *Jour. Exp. Biol.*, **40**, 437-446.

## Lag Joint Probability, Higher Order Covariance Function and Higher Order Spectrum\*

Yutaka NAGATA\*\*

**Abstract:** Statistical distributions of records of oceanographical and geophysical phenomena are more or less skewed and peaked. If a given time series is not Gaussian, its statistical properties cannot be described completely by its power spectrum only.

As an approach to describe a non-Gaussian properties of time series, HASSELMAN *et al.* (1962) studied the bispectra of ocean waves in shallow water. Trispectrum and other multi-dimensional spectra can be defined in the similar way, but are impractical because we need huge time for computing these multi-dimensional spectra. As a second approach, one-dimensional higher order spectra can be defined by the Fourier transforms of higher order covariance functions which are used in the analysis of turbulent field by FRENKIEL *et al.* (1967) and VAN ATTA *et al.* (1968). As a third approach, we define the lag joint probability density,  $P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\}$ , by the probability that the value of the time series lies between  $\eta_1 \pm \frac{1}{2}d\eta$  at a time  $t$  and lies between  $\eta_2 \pm \frac{1}{2}d\eta$  at the time  $t+\tau$ . This lag joint probability density gives also good measure of non-Gaussian properties of the time series.

The basic properties of these higher order expressions of three types and their mutual relations are discussed in this paper. The discussion is restricted to mathematical aspect of the problem, and the practical applications of the results will appear in a separate paper.

### 1. Introduction

Statistical distributions of records of oceanographical and geophysical phenomena are more or less skewed and peaked because of the non-linearity of the phenomena themselves and the recording systems. Records of ocean waves in shallow water, water temperature variations due to internal waves measured at a fixed point, and the vertical temperature gradient in the oceanic thermocline as a function of depth (COX *et al.*, 1969) are typical examples of such skewed time series. If a given time series is not Gaussian, its statistical properties cannot be described completely by its power spectrum only.

In order to describe non-Gaussian properties of a time series, we need to use some spectra of higher order. As an approach to such a non-Gaussian time series, HASSELMANN *et al.* (1962) studied the third moment and bispectra of ocean waves in shallow water. In the similar way trispectrum and higher multi-dimensional spectra can be defined. In the analysis of tur-

bulent field, FRENKIEL *et al.* (1967) and VAN ATTA *et al.* (1968) calculated one-dimensional higher order covariance functions. As a second approach, one-dimensional higher order spectra can be defined by the Fourier transforms of these higher order covariance functions.

Another method may be derived from expanding the concept of the probability density. We define the lag joint probability density,  $P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\}$ , by the probability that the value of the time series lies between  $\eta_1 \pm \frac{1}{2}\delta\eta$  at a time  $t$  and lies between  $\eta_2 \pm \frac{1}{2}\delta\eta$  at the time  $t+\tau$ . The behavior of the joint probability density should give a good measure of non-Gaussian properties of the time series. It will be shown that the lag joint probability density has close relation with one-dimensional higher order covariance functions.

The purpose of this paper is to study the basic properties and mutual relations of these higher order expressions. Gram-Charlier's and Maclaurin's expansions of the quantities under consideration are assumed, a priori, to converge. This corresponds to the assumption that the

\* Received April 30, 1970

\*\* Geophysical Institute, University of Tokyo



given time series is quasi-linear and quasi-Gaussian. The bispectrum for greatly skewed time series of several models will be given in a separate paper. I restrict the discussion in this paper to mathematical aspects of the problem, though this study was initiated from the analysis of the vertical temperature gradient in the oceanic thermocline. The practical application of the results in this paper will also appear in a separate paper.

## 2. Lag joint probability density

We consider a stationary quasi-Gaussian time series  $\eta(t)$  with zero mean,  $\eta(t) \equiv 0$ , and denote its probability density as  $P_1\{\eta\}$ , and lag joint probability density at a time lag  $\tau$  as  $P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\}$ . By assuming ergodicity, we can define  $m, n$ -th order covariance functions by

$$R_{m,n}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \eta^m(t) \cdot \eta^n(t+\tau) dt. \quad (1)$$

The higher order covariance functions are closely related with the lag joint probability density;

$$R_{m,n}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_1^m \cdot \eta_2^n \times P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} d\eta_1 d\eta_2. \quad (2)$$

In particular,

$$R_{0,0}(\tau) = \int \int P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} d\eta_1 d\eta_2 = 1 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} R_{m,0}(\tau) &= R_{0,m}(\tau) \\ &= \int \int_{-\infty}^{\infty} \eta_1^m P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} d\eta_1 d\eta_2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \eta_1^m P_1\{\eta_1\} d\eta_1 = M_m, \end{aligned} \quad (4)$$

where  $M_m$  is the  $m$ -th moment of  $P_1\{\eta\}$ . Note that  $M_0=1$  and  $M_1=0$ .

From Eqn. (1), we obtain the relation;

$$R_{m,n}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_1^m \cdot \eta_2^n P_2\{\eta_1, \eta_2; 0\} d\eta_1 d\eta_2 = M_{m+n}. \quad (5)$$

This indicates that singularity of  $P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\}$  exists at  $\tau=0$ . First, we shall check the functional form of  $P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\}$  at  $\tau=0$ . If we consider the characteristic function  $\hat{P}_2(a, b; \tau)$ ;

$$\begin{cases} \hat{P}_2(a, b; \tau) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} e^{-2\pi i(a\eta_1 + b\eta_2)} d\eta_1 d\eta_2 \\ P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{P}_2(a, b; \tau) e^{2\pi i(a\eta_1 + b\eta_2)} da db. \end{cases} \quad (6)$$

we can express  $\hat{P}_2(a, b; \tau)$  as a Maclaurin's expansion;

$$\begin{aligned} \hat{P}_2(a, b; \tau) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{m!n!} \frac{\partial^{m+n} \hat{P}_2(0, 0; \tau)}{\partial a^m \partial b^n} a^m b^n \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-2\pi i)^{m+n}}{m!n!} R_{m,n}(\tau) a^m b^n \end{aligned} \quad (7)$$

because

$$\begin{aligned} &\frac{\partial^{m+n} \hat{P}_2(0, 0; \tau)}{\partial a^m \partial b^n} \\ &= \left[ (-2\pi i)^{m+n} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_1^m \eta_2^n P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} \times e^{-2\pi i(a\eta_1 + b\eta_2)} d\eta_1 d\eta_2 \right]_{a=b=0} \\ &= (-2\pi i)^{m+n} \int \int \eta_1^m \eta_2^n P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} d\eta_1 d\eta_2 \\ &= (-2\pi i)^{m+n} R_{m,n}(\tau). \end{aligned}$$

At  $\tau=0$ , by substituting  $R_{m,n}(\tau)$  in Eqn. (7) by Eqn. (5), we obtains

$$\hat{P}_2(a, b; 0) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-2\pi i)^n}{n!} M_n(a+b)^n.$$

Then, from Eqn. (6), we can derive the following relation;

$$\begin{aligned} &P_2\{\eta_1, \eta_2; 0\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-2\pi i)^n}{n!} M_n(a+b)^n \times e^{2\pi i(a\eta_1 + b\eta_2)} da db \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} e^{2\pi i \cdot \frac{\eta_1 - \eta_2}{2} (a-b)} d(a-b) \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-2\pi i)^n}{n!} M_n(a+b)^n \times e^{2\pi i \cdot \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} (a+b)} d(a+b) \\ &= \delta(\eta_1 - \eta_2) \cdot P_1\left\{ \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

It is noted that  $\sum \frac{(-2\pi i)^n}{n!} M_n a^n$  is the Maclaurin's expansion of the characteristic function of  $P_1\{\eta\}$ . Therefore,  $P_2\{\eta_1, \eta_2; 0\}$  has the value only on a line  $\eta_1 = \eta_2$  and this value is equal to that of the probability density  $P_1\{\eta\}$ . The limiting form of  $P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\}$  for  $\tau \rightarrow 0$  will be discussed in the later section.

If the given time series does not include extremely low frequency components, two samples  $\eta_1$  and  $\eta_2$  taken at a large interval can be assumed to be independent of each other. Thus,  $P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\}$  for  $\tau \rightarrow \infty$  is given by

$$P_2\{\eta_1, \eta_2; \infty\} = P_1\{\eta_1\} \cdot P_1\{\eta_2\} .$$

Then, the corresponding characteristic function  $\hat{P}_2(a, b; \infty)$  is

$$\begin{aligned} \hat{P}_2(a, b; \infty) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_1\{\eta_1\} P_1\{\eta_2\} e^{-2\pi i(\eta_1 a + \eta_2 b)} d\eta_1 d\eta_2 \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-2\pi i)^{m+n}}{m! n!} M_m \cdot M_n a^m b^n . \end{aligned}$$

Comparing this formula with Eqn. (7), we have

$$R_{m,n}(\infty) = M_m \cdot M_n \quad (m, n = 0, 1, 2 \dots) \quad (9)$$

Therefore, all of higher order covariance functions tend to approach constant values as  $\tau \rightarrow \infty$ , unless the time series contains very low frequency components.

### 3. Gram-Charlier's expansion of the lag joint probability density

The expansion form of  $\hat{P}_2(a, b; \tau)$  in Eqn. (7) is not convenient because Fourier transform of each term does not give a continuous function. It is possible to rearrange the expression as a sum of two-dimensional Hermite polynomials. Since Fourier transform of infinite series of Hermite polynomials gives infinite series of Hermite polynomials, such rearrangement means that the original lag joint probability density  $P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\}$  is expanded in two-dimensional Gram-Charlier's series.

$$P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_{m,n}(\tau)}{m! n!} \varphi^{(m,n)}(\eta_1, \eta_2), \quad (10)$$

where

$$\varphi(\eta_1, \eta_2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\eta_1^2 + \eta_2^2)}, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \varphi^{(m,n)}(\eta_1, \eta_2) &= (-1)^{m+n} H_m\left(\frac{\eta_1}{\sigma}\right) H_n\left(\frac{\eta_2}{\sigma}\right) \varphi(\eta_1, \eta_2) \quad (12) \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_1^2 P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} d\eta_1 d\eta_2 \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_2^2 P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} d\eta_1 d\eta_2 . \end{aligned}$$

Then, coefficients  $C_{m,n}(\tau)$  are obtained from the orthogonality of Hermite polynomials with a weighted function  $e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\eta_1^2 + \eta_2^2)}$

$$\begin{aligned} C_{m,n}(\tau) &= (-1)^{m+n} \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_m\left(\frac{\eta_1}{\sigma}\right) H_n\left(\frac{\eta_2}{\sigma}\right) P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} d\eta_1 d\eta_2 . \end{aligned} \quad (13)$$

The coefficients up to the fourth order are as follows;

$$C_{0,0}(\tau) = 1 \quad C_{1,0}(\tau) = 0, \quad C_{0,1}(\tau) = 0 \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{2,0}(\tau) &= \frac{R_{2,0}(\tau)}{\sigma^2} - 1 = 0 \\ C_{1,1}(\tau) &= R_{1,1}(\tau) / \sigma^2 \\ C_{0,2}(\tau) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{3,0}(\tau) &= -R_{3,0}(\tau) / \sigma^3 = -\gamma \\ C_{2,1}(\tau) &= -R_{2,1}(\tau) / \sigma^3 \\ C_{1,2}(\tau) &= -R_{1,2}(\tau) / \sigma^3 \\ C_{0,3}(\tau) &= -R_{0,3}(\tau) / \sigma^3 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} C_{4,0} &= \frac{R_{4,0}(\tau)}{\sigma^4} - 3 = \delta \\ C_{3,1} &= \frac{R_{3,1}(\tau)}{\sigma^4} - 3 \frac{R_{1,1}(\tau)}{\sigma^2} \\ C_{2,2} &= \frac{R_{2,2}(\tau)}{\sigma^4} - 1 \\ C_{1,3} &= \frac{R_{1,3}(\tau)}{\sigma^4} - 3 \frac{R_{1,1}(\tau)}{\sigma^2} \\ C_{0,4} &= \frac{R_{0,4}(\tau)}{\sigma^4} - 3 = \delta \end{aligned} \right\} , \quad (17)$$

where  $\gamma = M_3/\sigma^3$  is the skewness of  $P_1\{\eta\}$  and  $\delta = \frac{M_4}{\sigma^4} - 3$  is the excess of the kurtosis compared to Gaussian process.

The expansion form in Eqn. (10) is not convenient to investigate the characteristics of the lag joint probability density near  $\tau=0$ , and to discuss the lag joint probability density for Gaussian case. Considering the form of  $P_2\{\eta_1, \eta_2; 0\}$  in Eqn. (8), we introduce a new coordinate system  $(\eta_+, \eta_-)$  defined by

$$\left. \begin{aligned} \eta_+ &= \frac{1}{2}(\eta_1 + \eta_2) \\ \eta_- &= \frac{1}{2}(\eta_1 - \eta_2) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

and the corresponding joint probability density  $P_2^*\{\eta_+, \eta_-; \tau\}$ ;

$$P_2^*\{\eta_+, \eta_-; \tau\} d\eta_+ d\eta_- = \frac{1}{2} P_2\{\eta_1, \eta_2; \tau\} d\eta_1 d\eta_2 .$$

Then, the Gram-Charlier's expansion of  $P_2^*\{\eta_+, \eta_-; \tau\}$  is given by

$$\begin{aligned} P_2^*\{\eta_+, \eta_-; \tau\} &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{C_{m,n}^*(\tau)}{m! n!} \varphi^{(m,n)}(\eta_+, \eta_-; \tau), \quad (19) \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} \phi(\eta_+, \eta_-; \tau) &= \frac{1}{2\pi\sigma_+(\tau)\sigma_-(\tau)} e^{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{\eta_+}{\sigma_+(\tau)}\right)^2 + \left(\frac{\eta_-}{\sigma_-(\tau)}\right)^2\right]} \\ & \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi^{(m,n)}(\eta_+, \eta_-; \tau) &= (-1)^{m+n} \\ & \times H_m\left(\frac{\eta_+}{\sigma_+(\tau)}\right) H_n\left(\frac{\eta_-}{\sigma_-(\tau)}\right) \phi(\eta_+, \eta_-; \tau) \quad (21) \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} \sigma_+^2(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_+^2 P_0^* d\eta_+ d\eta_- \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \left(\frac{\eta_1 + \eta_2}{2}\right)^2 dt \\ &= \frac{1}{2} [\sigma^2 + R_{1,1}(\tau)] \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_-^2(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_-^2 P_2^* d\eta_+ d\eta_- \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \left(\frac{\eta_1 - \eta_2}{2}\right)^2 dt \\ &= \frac{1}{2} [\sigma^2 - R_{1,1}(\tau)]. \quad (23) \end{aligned}$$

The coefficients  $C_{m,n}^*(\tau)$  can be obtained by

$$\begin{aligned} C_{m,n}^*(\tau) &= (-1)^{m+n} \\ & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H_m\left(\frac{\eta_+}{\sigma_+}\right) H_n\left(\frac{\eta_-}{\sigma_-}\right) P_2^* d\eta_+ d\eta_-. \quad (24) \end{aligned}$$

Since  $\bar{\eta}_+ = \bar{\eta}_- = 0$  from  $\bar{\eta}_1 = \bar{\eta}_2 = 0$ , it is clear that

$$C_{0,0}^*(\tau) = 1 \quad \text{and} \quad C_{1,0}^*(\tau) = C_{0,1}^*(\tau) = 0. \quad (25)$$

we define higher order covariance functions  $R_{m,n}^*(\tau)$  for the new coordinate by

$$\begin{aligned} R_{m,n}^*(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \eta_+^m \cdot \eta_-^n P_2^*(\eta_+, \eta_-; \tau) d\eta_+ d\eta_- \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \left(\frac{\eta_1 + \eta_2}{2}\right)^m \left(\frac{\eta_1 - \eta_2}{2}\right)^n dt, \quad (26) \end{aligned}$$

where  $\eta_1 = \eta(t)$  and  $\eta_2 = \eta(t+\tau)$ . Then the second order coefficients are

$$\begin{cases} C_{2,0}^*(\tau) = \frac{R_{2,0}^*(\tau)}{\sigma_+^2(\tau)} - 1 = 0 \\ C_{0,2}^*(\tau) = \frac{R_{0,2}^*(\tau)}{\sigma_-^2(\tau)} - 1 = 0 \end{cases} \quad (27)$$

and

$$\begin{aligned} C_{1,1}^*(\tau) &= \frac{R_{1,1}^*(\tau)}{\sigma_+(\tau)\sigma_-(\tau)} \\ &= \frac{1}{\sigma_+(\tau)\sigma_-(\tau)} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \left(\frac{\eta_1 + \eta_2}{2}\right) \left(\frac{\eta_1 - \eta_2}{2}\right) dt \\ &= \frac{1}{4\sigma_+(\tau)\sigma_-(\tau)} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} (\eta_1^2 - \eta_2^2) dt = 0. \quad (28) \end{aligned}$$

Therefore, the expansion in the new coordinate system includes no second order terms. Instead, the standard deviations along  $\eta_+$ - and  $\eta_-$ -axis are the function of the lag  $\tau$ . Comparing Eqns. (22) and (23), we can interpret that the auto-covariance function  $R_{1,1}(\tau)$  is a measure of exchange of the second moment between  $\eta_+$ -axis and  $\eta_-$ -axis.

When  $\tau \rightarrow 0$ ,  $\sigma_+^2(\tau) \rightarrow \sigma^2$  and  $\sigma_-^2(\tau) \rightarrow 0$ ,

$$\begin{aligned} \lim_{\tau \rightarrow 0} \phi(\eta_+, \eta_-; \tau) &= \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_+} e^{-\frac{\eta_+^2}{2\sigma_+^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_-} e^{-\frac{\eta_-^2}{2\sigma_-^2}} \\ &= \delta(\eta_-) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\eta_+^2}{2\sigma^2}}. \quad (29) \end{aligned}$$

This result agrees with the expression (8) for the Gaussian Process. Using the relations (18) and (19), Eqn. (20) can be rewritten as

$$\begin{aligned} \phi(\eta_+, \eta_-; \tau) &= \frac{1}{2\pi\sigma^2(1-R_{1,1}^2/\sigma^4)^{1/2}} \\ & \times \exp\left[-\frac{1}{2(1-R_{1,1}^2/\sigma^4)} \left\{ \left(\frac{\eta_+}{\sigma}\right)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. - 2R_{1,1}(\tau) \frac{\eta_+\eta_-}{\sigma^2} + \left(\frac{\eta_-}{\sigma}\right)^2 \right\}\right]. \quad (30) \end{aligned}$$

Eqn. (30) shows that the basic weight function turns out to be the lag joint probability density for Gaussian process (F. N. FRENKIEL *et al.*, 1967). Therefore, the Gram-Charlier's expansion in (19) is much more convenient than that in (10).

#### 4. Third order covariance function, third order spectrum and bispectrum

The third order coefficients of the expansion (19) can be calculated from Eqns. (24) and (26);

$$\begin{cases} C_{3,0}^*(\tau) = -R_{3,0}^*(\tau)/\sigma_+^3(\tau) \\ \quad = -\frac{1}{4\sigma_+^3(\tau)} [\sigma^3\gamma + 3S_{2,1}(\tau)] \\ C_{2,1}^*(\tau) = -R_{2,1}^*(\tau)/[\sigma_+^2(\tau)\sigma_-(\tau)] \\ \quad = -\frac{1}{4\sigma_+^2(\tau)\sigma_-(\tau)} Q_{2,1}(\tau) \quad (31) \\ C_{1,2}^*(\tau) = -R_{1,2}^*(\tau)/[\sigma_+(\tau)\sigma_-^2(\tau)] \\ \quad = -\frac{1}{4\sigma_+(\tau)\sigma_-^2(\tau)} [\sigma^3\gamma - 3S_{2,1}(\tau)] \\ C_{0,3}^*(\tau) = -R_{0,3}^*(\tau)/\sigma_-^3(\tau) \\ \quad = \frac{3}{4\sigma_-^3(\tau)} Q_{2,1}(\tau), \end{cases}$$

where

$$\begin{cases} S_{2,1}(\tau) = \frac{1}{2} [R_{2,1}(\tau) + R_{1,2}(\tau)] \\ Q_{2,1}(\tau) = \frac{1}{2} [R_{2,1}(\tau) - R_{1,2}(\tau)] \end{cases} \quad (32)$$

The cross terms of the third order coefficient cannot be eliminated by rotating the axes, unlike for the case of the second order. Therefore, the lag joint probability density up to the third order cannot be expressed by a product of two one-dimensional probability densities.

In Eqn. (31),  $C_{3,0}^*(\tau)$  and  $C_{1,2}^*(\tau)$  include  $S_{2,1}(\tau)$  only, and  $C_{2,1}^*(\tau)$  and  $C_{0,3}^*(\tau)$  include  $Q_{2,1}(\tau)$  only. So, we can divide third order terms into two parts; symmetrical part as a function of  $S_{2,1}(\tau)$  and asymmetrical part as a function of  $Q_{2,1}(\tau)$ .  $S_{2,1}(\tau)$  and  $Q_{2,1}(\tau)$  can be interpreted as measures of exchange of the third order moments between  $C_{3,0}^*(\tau)$  and  $C_{1,2}^*(\tau)$  and between  $C_{2,1}^*(\tau)$  and  $C_{0,3}^*(\tau)$ , respectively.

It should be noted that, in Eqn. (31) we have only two independent third order covariance functions  $S_{2,1}(\tau)$  and  $Q_{2,1}(\tau)$ . If we define the third order spectrum  $F_{2,1}(\omega)$  by

$$\begin{aligned} F_{2,1}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{2,1}(\tau) e^{-i2\pi\omega\tau} d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{2,1}(\tau) \cos 2\pi\omega\tau d\tau \\ &\quad + i \int_{-\infty}^{\infty} Q_{2,1}(\tau) \sin 2\pi\omega\tau d\tau, \end{aligned} \quad (32)$$

$F_{2,1}(\omega) d\omega$  should be interpreted as the contribution to the mean cube  $\bar{\gamma}_1^3$  from the frequency range  $(\omega - \frac{1}{2}d\omega, \omega + \frac{1}{2}d\omega)$ . Since  $S_{2,1}(0) = \sigma^3\gamma$  and  $Q_{2,1}(0) = 0$ , the effective contribution to the mean cube  $\bar{\gamma}_1^3$  comes only from the real and symmetrical part.

The third moment or the skewness of a time series generally results from the second order interaction among three frequency components whose frequencies,  $\omega_1, \omega_2$  and  $\omega_3$ , satisfy the interaction relation  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 0$ . Since there are two independent frequencies in this interaction, the one-dimensional spectrum  $F_{2,1}(\omega)$  can give only limited informations about the second order interactions. The more complete information is given by the bispectrum  $B(\omega_1, \omega_2)$  (HASSELMANN *et al.*, 1962);

$$\begin{cases} B(\omega_1, \omega_2) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau_1, \tau_2) e^{-2\pi i(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \\ S(\tau_1, \tau_2) \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(\omega_1, \omega_2) e^{2\pi i(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} d\omega_1 d\omega_2 \end{cases} \quad (33)$$

where  $S(\tau_1, \tau_2)$  is the mean third order product and

$$S(\tau_1, \tau_2) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \eta(t)\eta(t+\tau_1)\eta(t+\tau_2) dt. \quad (34)$$

Since  $R_{2,1}(\tau) = S(0, \tau) = S(\tau, 0)$ , we obtain the relation between the third order spectrum and the bispectrum;

$$F_{2,1}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\omega, \omega') d\omega' \quad (35)$$

Therefore, the one-dimensional third order spectrum represents the integrated bispectrum along a frequency line. As seen in Eqn. (32), the third order spectrum is complex and it contains all the independent third order covariance functions  $S_{2,1}(\tau)$  and  $Q_{2,1}(\tau)$ . Therefore, another one-dimensional third order spectrum which may be defined as the integration of the bispectrum along another line in  $\omega_1, \omega_2$ -plane cannot be independent of the third order spectrum defined in Eqn. (32). Unfortunately the real part of  $B(\omega_1, \omega_2)$  is not positive definite unlike the power spectrum. Even if  $F_{2,1}(\omega)$  is very small for a certain frequency  $\omega_0$ , we cannot conclude that the frequency component of  $\omega_0$  does not play an important role in constructing the skewness. For example, a large positive contribution from some frequency pair  $(\omega_0, \omega'_0)$  can be canceled out by very small negative bispectral values along  $\omega_1 = \omega_0$  except at the point  $(\omega_0, \omega'_0)$ .

Though the one-dimensional third order spectrum gives much less information than the bispectrum, the third order spectrum is quite useful for practical applications because the time necessary for computing the third order spectrum is much smaller than that for the bispectrum. When the power spectrum of a given time series contains several prominent peaks, the third order spectrum is particularly helpful to check whether or not the interactions between the peaks exist or to check if wave components of peak frequencies are independent

of each other. Also, the imaginary part of the third order spectrum can be used to detect the asymmetry and non-stationarity of the given time series.

### 5. Fourth order covariance function, fourth order spectrum and trispectrum

The fourth order coefficients of the (20) can also be calculated from Eqns. (24) and (26);

$$\left. \begin{aligned} C_{4,0}^*(\tau) &= \frac{1}{\sigma_+^4(\tau)} \cdot \frac{1}{8} [M_4 + 4S_{3,1}(\tau) \\ &\quad + 3S_{2,2}(\tau)] - 3 \\ C_{3,1}^*(\tau) &= \frac{1}{\sigma_+^3(\tau)\sigma_-(\tau)} \left[ \frac{1}{4} Q_{3,1}(\tau) \right] \\ C_{2,2}^*(\tau) &= \frac{1}{\sigma_+^2(\tau)\sigma_-^2(\tau)} \cdot \frac{1}{8} [M_4 \\ &\quad - S_{2,2}(\tau)] - 1 \\ C_{1,3}^*(\tau) &= \frac{1}{\sigma_+(\tau)\sigma_-^3(\tau)} \left[ -\frac{1}{4} Q_{3,1}(\tau) \right] \\ C_{0,4}^*(\tau) &= \frac{1}{\sigma_-^4(\tau)} \cdot \frac{1}{8} [M_4 - 4S_{3,1}(\tau) \\ &\quad + 3S_{2,2}(\tau)] - 3 \end{aligned} \right\} (36)$$

where  $S_{3,1}(\tau)$  and  $S_{2,2}(\tau)$  are independent fourth order symmetrical covariance functions and  $Q_{3,1}(\tau)$  is the fourth order asymmetrical covariance function;

$$\left. \begin{aligned} S_{3,1}(\tau) &= \frac{1}{2} [R_{3,1}(\tau) + R_{1,3}(\tau)] \\ Q_{3,1}(\tau) &= \frac{1}{2} [R_{3,1}(\tau) - R_{1,3}(\tau)] \\ S_{2,2}(\tau) &= R_{2,2}(\tau) \end{aligned} \right\} (37)$$

Thus, coefficients  $C_{3,1}^*(\tau)$  and  $C_{1,3}^*(\tau)$  represent asymmetrical parts of the lag joint probability density of the fourth order, and  $Q_{3,1}(\tau)$  is a measure of the exchange of the fourth moment between these two coefficients.  $S_{3,1}(\tau)$ , which appears only in  $C_{4,0}^*(\tau)$  and  $C_{0,4}^*(\tau)$ , is a measure of the exchange of the fourth moment between  $C_{4,0}^*(\tau)$  and  $C_{0,4}^*(\tau)$ . The role of  $S_{3,1}(\tau)$  is, therefore, somewhat similar to that of  $R_{1,1}(\tau)$  in the second order coefficients, which is a measure of the exchange of the second moment between coefficients along  $\eta_+$ - and  $\eta_-$ -axis. Another symmetrical covariance function  $S_{2,2}(\tau)$  is a measure of more complicated exchange among three coefficient  $C_{4,0}^*(\tau)$ ,  $C_{0,4}^*(\tau)$  and  $C_{2,2}^*(\tau)$ . When  $S_{2,2}(\tau)$  increase,  $C_{4,0}^*(\tau)$  and  $C_{0,4}^*(\tau)$  gain the fourth moment

while  $C_{2,2}^*(\tau)$  loses the fourth moment.

For the fourth order, we have three independent covariance functions. Using these fourth order covariance functions and the lower order covariance functions, we can construct the lag joint probability density to the fourth order accuracy. This means that, if we consider spectra of real numbers, there are only three (or one complex and one real) one-dimensional fourth order spectra which are independent of each other. The fourth order spectrum of complex numbers can be defined in the same way as the third order spectrum.

$$\begin{aligned} F_{3,1}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{3,1}(\tau) e^{-2\pi i \omega \tau} d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{3,1}(\tau) \cos 2\pi \omega \tau d\tau \\ &\quad + i \int_{-\infty}^{\infty} Q_{3,1}(\tau) \sin 2\pi \omega \tau d\tau \end{aligned} \quad (38)$$

and

$$\begin{aligned} F_{2,2}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{2,2}(\tau) e^{-2\pi i \omega \tau} d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{2,2}(\tau) \cos 2\pi \omega \tau d\tau. \end{aligned} \quad (39)$$

Since  $R_{2,2}(\tau) = S_{2,2}(\tau)$  is symmetrical,  $F_{2,2}(\omega)$  has the real part only.

The fourth moments or the kurtosis of a time series generally results from the third order interactions among four frequency components, whose frequencies,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  and  $\omega_4$ , satisfy the interaction relation  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 0$ . We need to calculate the trispectrum to represent the contribution to the fourth moment from each set of the interacting frequency components. The trispectrum  $D(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  and the mean fourth order products  $T(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$  are defined as;

$$\left. \begin{aligned} D(\omega_1, \omega_2, \omega_3) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \\ &\quad \times e^{-2\pi i(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2 + \omega_3 \tau_3)} d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 \\ T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(\omega_1, \omega_2, \omega_3) \\ &\quad \times e^{2\pi i(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2 + \omega_3 \tau_3)} d\omega_1 d\omega_2 d\omega_3 \end{aligned} \right\} (40)$$

and

$$\begin{aligned} T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \eta_+(t) r(t - \tau_1) \eta_-(t - \tau_2) \eta_-(t - \tau_3) dt \end{aligned} \quad (41)$$

From these definitions, we have the following relations;

$$\begin{cases} R_{3,1}(\tau) = T(\tau, 0, 0) = T(0, \tau, 0) \\ \qquad \qquad \qquad = T(0, 0, \tau) \end{cases} \quad (42)$$

$$\begin{cases} R_{2,2}(\tau) = T(\tau, \tau, 0) = T(\tau, 0, \tau) \\ \qquad \qquad \qquad = T(0, \tau, \tau). \end{cases} \quad (43)$$

We can obtain the relation between  $F_{3,1}(\omega)$  and  $D(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  from Eqns. (38), (40) and (42);

$$F_{3,1}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D(\omega, \omega', \omega'') d\omega' d\omega'', \quad (44)$$

where  $D(\omega, \omega', \omega'')$  can be replaced by  $D(\omega', \omega, \omega'')$  or  $D(\omega', \omega'', \omega)$ . Thus one of the fourth order spectra,  $F_{3,1}(\omega_0)$ , represents the trispectrum integrated on the plane  $\omega_1 = \omega_0, \omega_2 = \omega_0$  or  $\omega_3 = \omega_0$ . According to Eqn. (44),  $F_{3,1}(\omega)$  can be interpreted as the contribution to the mean fourth power  $\bar{\gamma}^4$  from the frequency range  $(\omega - \frac{1}{2}d\omega, \omega + \frac{1}{2}d\omega)$ . In the same way as for the third order spectrum  $F_{2,1}(\omega)$ , the net contribution to  $\bar{\gamma}^4$  from the imaginary part of  $F_{3,1}$  is zero, because  $Q_{3,1}(0) \equiv 0$ . Though  $\int_{-\infty}^{\infty} R_e\{F_{3,1}(\omega)\}d\omega (= \bar{\gamma}^4)$  must be positive, the real part of  $F_{3,1}(\omega)$  can be negative for some frequencies. However, if a given time series is Gaussian, then  $F_{3,1}^G(\omega) = 3\sigma^2 F_{1,1}(\omega) \geq 0$  as will be discussed in the next section. Therefore, if the time series is quasi-Gaussian,  $F_{3,1}(\omega)$  may be assumed positive for the entire frequency range.

Another independent fourth order spectrum  $F_{2,2}(\omega)$  has the real part only and is positive definite, since this is the power spectrum of the time series  $\gamma^2(t)$ . From Eqns. (39), (40) and (43), we have

$$F_{2,2}(\omega_1 + \omega_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} D(\omega_1, \omega_2, \omega_3) d(\omega_1 - \omega_2) d\omega_3. \quad (45)$$

Therefore,  $F_{2,2}(\omega_0)$  represents the integrated trispectrum on the plane  $\omega_1 + \omega_2 = \omega_0$ . From the symmetrical properties of the trispectrum, integrations on the planes  $\omega_1 + \omega_3 = \omega_0$  or  $\omega_2 + \omega_3 = \omega_0$  give the same fourth order spectrum  $F_{2,2}(\omega_0)$ . The representation of the trispectrum for quasi-Gaussian and quasi-linear process is given in Appendix I. If the time series is exactly Gaussian,  $D(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  has the real part only, and its value appears only on the three planes  $\omega_1 + \omega_2 = 0, \omega_2 + \omega_3 = 0$  and  $\omega_3 + \omega_1 = 0$ . Even if

the time series is not Gaussian, the contributions to the trispectrum from the first order interactions between the second order terms and between the first order and the third order terms appear only on these three planes. The other part of the trispectrum represents purely the third order interactions among the four first order terms. As discussed above,  $F_{2,2}(\omega)$  is given by the integration of the trispectrum on the plane which is parallel to one of the specific planes  $\omega_1 + \omega_2 = 0, \omega_2 + \omega_3 = 0$  or  $\omega_3 + \omega_1 = 0$ . Since  $F_{2,2}(\omega)$  is independent of  $F_{3,1}(\omega)$ , some structure of the three-dimensional trispectrum may be detected by comparing  $F_{3,1}(\omega)$  and  $F_{2,2}(\omega)$ .

**6. Gaussian process, excess covariance functions and excess higher order spectra**

As discussed in Section 2, the lag joint probability density  $P_2^G\{\eta_+, \eta_-; \tau\}$  for a random Gaussian process is expressed by

$$P_2^G\{\eta_+, \eta_-; \tau\} = \frac{1}{2\pi\sigma_+(\tau)\sigma_-(\tau)} e^{-\frac{\eta_+^2}{2\sigma_+^2(\tau)} - \frac{\eta_-^2}{2\sigma_-^2(\tau)}}$$

and all the coefficients  $C_{m,n}^*(\tau)$  except  $C_{0,0}^*(\tau)$  in the expansion (19) must be zero. For the third order coefficients, we have the following relations from Eqn. (31)

$$\left. \begin{aligned} \sigma^3 \gamma^G + 3 S_{2,1}^G(\tau) &= 0 \\ Q_{2,1}^G(\tau) &= 0 \\ \sigma^3 \gamma^G - 3 S_{2,1}^G(\tau) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

and so

$$\gamma^G = 0, S_{2,1}^G(\tau) = 0 \text{ and } Q_{2,1}^G(\tau) = 0, \quad (46)$$

where the superscript  $G$  indicates the Gaussian case. Therefore, all the third order covariance functions for the Gaussian process are zero. If a non-zero value exists, it comes from the non-Gaussian part of the time series.

For the fourth order coefficients, from Eqn. (36), we have

$$\begin{cases} M_4^G + 4 S_{3,1}^G(\tau) + 3 S_{2,2}^G(\tau) = 6(\sigma^2 + R_{1,1}(\tau))^2 \\ M_4^G - S_{2,2}^G(\tau) = 2(\sigma^2 - R_{1,1}(\tau))(\sigma^2 + R_{1,1}(\tau)) \\ M_4^G - 4 S_{3,1}^G(\tau) + 3 S_{2,2}^G(\tau) = 6(\sigma^2 - R_{1,1}(\tau))^2 \\ Q_{3,1}^G(\tau) = 0 \end{cases}$$

and so

$$\left. \begin{aligned} M_4^G &= 3\sigma^4 \\ S_{3,1}^G(\tau) &= 3\sigma^2 R_{1,1}(\tau) \\ S_{2,2}^G(\tau) &= 2R_{1,1}^2(\tau) - \sigma^4 \\ Q_{3,1}^G(\tau) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (47)$$

Therefore, the fourth order spectra for the

Gaussian process are given as functions of the standard deviation  $\sigma$  and the power spectrum  $F_{1,1}(\omega)$  as follows;

$$\left. \begin{aligned} F_{3,1}^G(\omega) &= 3\sigma^2 F_{1,1}(\omega) \\ F_{2,2}^G(\omega) &= 2 \int_{-\infty}^{\infty} F_{1,1}(\omega') F_{1,1}(\omega - \omega') d\omega' \\ &\quad + \sigma^4 \delta(\omega) \end{aligned} \right\} \quad (48)$$

These relations can also be derived from the integration of the trispectrum for the Gaussian process (See Appendix I).

If we want to discuss the deviation from the Gaussian process, it is convenient to define the excess fourth order covariance functions and the excess fourth order spectra, as follows;

$$\left. \begin{aligned} S_{3,1}^E(\tau) &= S_{3,1}(\tau) - S_{3,1}^G(\tau) \\ S_{2,2}^E(\tau) &= S_{2,2}(\tau) - S_{2,2}^G(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (49)$$

and

$$\left. \begin{aligned} F_{3,1}^E(\omega) &= F_{3,1}(\omega) - F_{3,1}^G(\omega) \\ F_{2,2}^E(\omega) &= F_{2,2}(\omega) - F_{2,2}^G(\omega) \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

If the time series is Gaussian, all the fifth order covariance functions are zero. If the time series is skewed and the third order covariance functions are not zero, the fifth order covariance functions are not zero and can be divided into two parts; the part dependent on the third order covariance functions and the part independent of the third order covariance functions. If the lag joint probability density  $P_2^*(\eta_+, \eta_-; \tau)$  can be expressed exactly by the expansion up to the fourth order;

$$\begin{aligned} P_2^*(\eta_+, \eta_-; \tau) &= \frac{1}{2\pi\sigma_+\sigma_-} e^{-\frac{\eta_+^2}{2\sigma_+^2} - \frac{\eta_-^2}{2\sigma_-^2}} \left[ 1 + \sum_{n=0}^3 \frac{1}{n!(3-n)!} C_{n,3-n}^* \tau^n \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=0}^4 \frac{1}{n!(4-n)!} C_{n,4-n}^* \tau^n \right] \quad (51) \end{aligned}$$

then the corresponding fifth order covariance functions are given by Eqns. (24) and (26). The results do not depend on the fourth order terms and

$$\left. \begin{aligned} M_5^D &= 10\sigma^5\gamma \\ S_{4,1}^D(\tau) &= \frac{R_{4,1}(\tau) + R_{1,4}(\tau)}{2} \\ &= 6\sigma^2 S_{2,1}(\tau) + 4\sigma^3\gamma R_{1,1}(\tau) \\ S_{3,2}^D(\tau) &= \frac{R_{3,2}(\tau) + R_{2,3}(\tau)}{2} \\ &= \sigma^5\gamma + 3\sigma^2 S_{2,1}(\tau) \\ &\quad + 6R_{1,1}(\tau) S_{2,1}(\tau) \\ Q_{4,1}^D(\tau) &= \frac{R_{4,1}(\tau) - R_{1,4}(\tau)}{2} \end{aligned} \right\} \quad (52)$$

$$\left. \begin{aligned} &= 4\sigma^2 Q_{2,1}(\tau) + 2R_{1,1}(\tau) Q_{2,1}(\tau) \\ Q_{3,2}^D(\tau) &= \frac{R_{3,2}(\tau) - R_{2,3}(\tau)}{2} \\ &= 3R_{1,1}(\tau) Q_{2,1}(\tau) \end{aligned} \right\},$$

where the superscript  $D$  indicates the part dependent on the lower-order covariance functions. Therefore, we can define the excess fifth order covariance functions by

$$\left. \begin{aligned} S_{4,1}^E(\tau) &= S_{4,1}(\tau) - S_{4,1}^D(\tau) \\ S_{3,2}^E(\tau) &= S_{3,2}(\tau) - S_{3,2}^D(\tau) \\ Q_{4,1}^E(\tau) &= Q_{4,1}(\tau) - Q_{4,1}^D(\tau) \\ Q_{3,2}^E(\tau) &= Q_{3,2}(\tau) - Q_{3,2}^D(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

Using the same technique, we can divide any higher order covariance function into two parts;

$$R_{m,n}(\tau) = R_{m,n}^D(\tau) + R_{m,n}^E(\tau) \quad (54)$$

where  $R_{m,n}^D(\tau)$  depends on the lower order covariance functions and  $R_{m,n}^E(\tau)$  is the excess higher order covariance functions which are independent of any of the lower order covariance functions. These excess higher order covariance functions, or their Fourier transforms, *i.e.* the excess higher order spectra would give a good measure of the higher order interactions.

### 7. Limiting form of $P_2^*(\eta_+, \eta_-; \tau)$ as $\tau \rightarrow 0$

We showed in Section 1 that the lag joint probability density for  $\tau=0$  can be represented by

$$P_2^*(\eta_+, \eta_-; 0) = \frac{1}{2} \delta(\eta_-) \cdot P_1(\eta_+).$$

In this section, we will discuss how the lag joint probability density becomes this form when  $\tau$  approaches zero, and check whether the lag joint probability density for finite values of  $\tau$  can be expressed by a simple product of two one-dimensional probability densities as that for  $\tau=0$ .

By using the results in Appendix II, we can expand  $R_{m,n}^*(\tau)$  to the fourth order in the MacLaurin's series;

$$\left. \begin{aligned} R_{2,0}^*(\tau) &= \sigma_+^2(\tau) \\ &= \sigma^2 + \frac{1}{4} A_2 \tau^2 + \frac{1}{48} A_4 \tau^4 + 0(\tau^6) \\ R_{0,2}^*(\tau) &= \sigma_-^2(\tau) \\ &= -\frac{1}{4} A_2 \tau^2 - \frac{1}{48} A_4 \tau^4 + 0(\tau^6) \\ R_{1,1}^*(\tau) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (55)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{3,0}^*(\tau) &= M_3 + \frac{3}{8}B_2\tau^2 + \frac{1}{32}B_4\tau^4 + 0(\tau^6) \\ R_{2,1}^*(\tau) &= \frac{1}{24}B_3\tau^3 + \frac{1}{480}B_5\tau^5 + 0(\tau^7) \\ R_{1,2}^*(\tau) &= -\frac{1}{8}B_2\tau^2 - \frac{1}{96}B_4\tau^4 + 0(\tau^6) \\ R_{0,3}^*(\tau) &= -\frac{1}{8}B_3\tau^3 - \frac{1}{160}B_5\tau^5 + 0(\tau^7) \end{aligned} \right\} (56)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{4,0}^*(\tau) &= M_4 + \frac{1}{2}D_2\tau^2 \\ &\quad + \left(\frac{1}{48}D_4 + \frac{1}{64}E_4\right)\tau^4 + 0(\tau^6) \\ R_{3,1}^*(\tau) &= \frac{1}{24}D_3\tau^3 + \frac{1}{480}D_5\tau^5 + 0(\tau^7) \\ R_{2,2}^*(\tau) &= \frac{1}{12}D_2\tau^2 + \frac{1}{96}E_4\tau^4 + 0(\tau^6) \\ R_{1,3}^*(\tau) &= -\frac{1}{24}D_3\tau^3 - \frac{1}{480}D_5\tau^5 + 0(\tau^7) \\ R_{0,4}^*(\tau) &= \left(-\frac{1}{48}D_4 + \frac{1}{64}E_4\right)\tau^4 \\ &\quad + \frac{1}{6!}\left(-\frac{1}{2}D_6 + \frac{3}{8}E_6\right)\tau^6 + 0(\tau^8) \end{aligned} \right\} (57)$$

where

$$\left. \begin{aligned} A_l &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} R_{1,1}(\tau) \right]_{\tau=0} \\ B_l &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} R_{2,1}(\tau) \right]_{\tau=0} \\ &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau_1^l} S(\tau_1, \tau_2) \right]_{\tau_1=\tau_2=0} \\ D_l &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} R_{3,1}(\tau) \right]_{\tau=0} \\ &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau_1^l} T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \right]_{\tau_1=\tau_2=\tau_3=0} \\ E_l &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} R_{2,2}(\tau) \right]_{\tau=0} \end{aligned} \right\} (58)$$

and in particular

$$\left. \begin{aligned} E_2 &= \frac{4}{3}D_2 \\ E_4 &= 6 \left[ \frac{\partial^4}{\partial \tau_1^2 \partial \tau_2^2} \right. \\ &\quad \left. \times T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \right]_{\tau_1=\tau_2=\tau_3=0} - \frac{2}{3}D_4 \\ E_6 &= -10 \left[ \frac{\partial^6}{\partial \tau_1^3 \partial \tau_2^3} \right. \\ &\quad \left. \times T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \right]_{\tau_1=\tau_2=\tau_3=0} - 2D_6 \end{aligned} \right\} (59)$$

where  $S(\tau_1, \tau_2)$  and  $T(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$  are the mean

third product and the mean fourth product, respectively. So,  $\tau \rightarrow 0$ ,

$$R_{2,0}^*(\tau) \rightarrow \sigma^2, \quad R_{3,0}^*(\tau) \rightarrow M_3, \quad R_{4,0}^*(\tau) \rightarrow M_4$$

and all the other covariance functions becomes zero.

However, the behavior of the coefficients  $C_{m,n}^*(\tau)$  near  $\tau=0$  is more complicated because many of them have the denominator  $\sigma_-(\tau)$  which also becomes zero as  $\tau \rightarrow 0$ . After some troublesome calculations, we obtain the third and fourth order coefficients to the second order accuracy of  $\tau$  as follows;

$$\left. \begin{aligned} C_{3,0}^*(\tau) &= -\frac{M_3}{\sigma^3} \left[ 1 + \frac{3}{8} \left( \frac{B_2}{M_3} - \frac{A_2}{\sigma^2} \right) \tau^2 \right] \\ C_{2,1}^*(\tau) &= \frac{1}{12\sigma^2\sqrt{A_2}} B_3 \tau^2 \\ C_{1,2}^*(\tau) &= -\frac{B_2}{2\sigma A_2} \left[ 1 + \left( \frac{1}{12} \frac{B_4}{B_2} - \frac{1}{8} \frac{A_2}{\sigma^2} - \frac{A_4}{A_2} \right) \tau^2 \right] \\ C_{0,3}^*(\tau) &= -\frac{B_3}{(\sqrt{A_2})^3} \left[ 1 + \left( \frac{1}{20} \frac{B_5}{B_3} - \frac{3}{2} \frac{A_4}{A_2} \right) \tau^2 \right] \end{aligned} \right\} (60)$$

and

$$\left. \begin{aligned} C_{4,0}^*(\tau) &= \frac{M_4}{\sigma^4} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{D_2}{M_4} - \frac{A_2}{\sigma^2} \right) \tau^2 \right] - 3 \\ C_{3,1}^*(\tau) &= -\frac{1}{12\sigma^3\sqrt{A_2}} D_3 \tau^2 \\ C_{2,2}^*(\tau) &= -\frac{1}{3} \frac{D_2}{\sigma^2 A_2} \\ &\quad \times \left[ 1 + \left( \frac{1}{8} \frac{E_4}{D_2} - \frac{1}{4} \frac{A_2}{\sigma^2} - \frac{A_4}{A_2} \right) \tau^2 \right] - 1 \\ C_{1,3}^*(\tau) &= \frac{1}{3} \frac{D_3}{\sigma(\sqrt{A_2})^3} \\ &\quad \times \left[ 1 + \left( \frac{1}{20} \frac{D_5}{D_3} - \frac{1}{8} \frac{A_2}{\sigma^2} - \frac{3}{2} \frac{A_4}{A_2} \right) \tau^2 \right] \\ C_{0,4}^*(\tau) &= \frac{4}{7} \frac{D_4 - 7E_4}{A_2^2} \\ &\quad + \left\{ \frac{4D_6 - 3E_6}{360A_2^2} - \frac{1}{14} \frac{A_4}{A_2} \frac{8D_4 - 7E_4}{A_2^2} \right\} \end{aligned} \right\} (61)$$

Therefore, only  $C_{2,1}^*(\tau)$  and  $C_{3,1}^*(\tau)$  becomes zero as  $\tau \rightarrow 0$ .

Limiting values of these coefficients as  $\tau \rightarrow 0$  are

$$\left. \begin{aligned} C_{3,0}^*(\tau) &\rightarrow -\frac{M_3}{\sigma^3} = -\gamma \\ C_{2,1}^*(\tau) &\rightarrow 0 \\ C_{1,2}^*(\tau) &\rightarrow -\frac{1}{2\sigma} \frac{R_{1,2}''(0)}{R_{1,1}''(0)} \\ C_{0,3}^*(\tau) &\rightarrow -R_{2,1}'''(0)/(R_{1,1}''(0))^{3/2} \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned}
 C_{4,0}^*(\tau) &\rightarrow \frac{M_4}{\sigma^4} - 3 = \delta \\
 C_{3,1}^*(\tau) &\rightarrow 0 \\
 C_{2,2}^*(\tau) &\rightarrow \frac{-1}{3\sigma^2} \frac{R''_{3,1}(0)}{R''_{1,1}(0)} - 1 \\
 C_{1,3}^*(\tau) &\rightarrow \frac{1}{3\sigma} \frac{R'''(0)}{(R''_{1,1}(0))^{3/2}} \\
 C_{0,4}^*(\tau) &\rightarrow \frac{4}{7} \frac{\{R''''_{3,1}(0) - 7R''''_{2,2}(0)\}}{(R''_{1,1}(0))^2} - 3
 \end{aligned} \right\}$$

So, if the time series is not Gaussian, the lag joint probability density usually has cross terms of  $\eta_+$  and  $\eta_-$  for any small value of  $\tau$ . It can be written in a simple product only at  $\tau=0$ .

**Acknowledgements**

The author wishes to express his thanks to Prof. C. S. COX, Prof. R. W. PREISENDORFER and Mr. Peter HACKER for their helpfull advices and discussions. This work was completed while

the author was staying at Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego. The research was supported by the U. S. Office of Naval Research under contract with the University of California, Nonr 2216(23).

**References**

COX, C. S., Y. NAGATA and T. R. OSBORN (1969): Oceanic fine structure and internal waves. *Bulle. Jap. Soc. Fish. Oceanogr. Special Number, Prof. Uda's Commemorative Papers*, 67-72.  
 FRENKIEL, F. N., and P. S. KLEBANOFF (1967): Higher-order correlations in a turbulent field. *Physics of Fluids*, 10(3), 507-520.  
 HASSELMANN, K., W. MUNK and G. MACDONALD (1962): *Bispectra of Ocean Waves. Time Series Analysis*, Chapter 8, 125-139, John & Wiley.  
 VAN ATTA, C. W. and W. Y. CHEN (1968): Correlation measurements in grid turbulence using digital harmonic analysis. *Jour. Fluid Mech.*, 34(3), 497-515.

**Appendix I**

**Trispectrum of quasi-linear, quasi-Gaussian process**

We consider a stationary random process as a function of time,  $\eta(t)$ , which can be expressed in terms of the component  $dz(\omega)$  of the Fourier-Stieltjes representation;

$$\eta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} dz(\omega) e^{i\omega t} \quad (1)$$

The spectrum  $F(\omega)$ , bispectrum  $B(\omega_1, \omega_2)$  and the trispectrum  $D(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  are defined as the contributions to  $\overline{\eta^2}$ ,  $\overline{\eta^3}$  and  $\overline{\eta^4}$  from the two, three and four Fourier components, respectively, whose resultant frequencies are zero,

$$\begin{aligned}
 \langle dz(\omega_1) dz(\omega_2) \rangle &= F(\omega_1) d\omega_1 \text{ if } \omega_1 + \omega_2 = 0 \\
 &= 0 \text{ if } \omega_1 + \omega_2 \neq 0 \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \langle dz(\omega_1) dz(\omega_2) dz(\omega_3) \rangle &= B(\omega_1, \omega_2) d\omega_1 d\omega_2 \text{ if } \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 0 \\
 &= 0 \text{ if } \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 \neq 0 \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \langle dz(\omega_1) dz(\omega_2) dz(\omega_3) dz(\omega_4) \rangle &= D(\omega_1, \omega_2, \omega_3) d\omega_1 d\omega_2 d\omega_3 \\
 &\text{if } \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 0 \\
 &= 0 \text{ if } \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 \neq 0. \quad (4)
 \end{aligned}$$

Here, we limit our discussion to the quasi-linear, quasi-Gaussian process that can be ex-

panded in a series of a perturbation parameter  $\epsilon$ ;

$$\eta(t) = \eta^{(1)}(t) + \eta^{(2)}(t) + \eta^{(3)}(t) + \eta^{(4)}(t) + \dots, \quad (5)$$

where  $\eta^{(n)}(t) = O(\epsilon^n)$  and  $\overline{\eta^{(n)}} = 0$ .

We assume that the first order term  $\eta^{(1)}(t)$  is Gaussian and that the higher order terms can be expressed in terms of the first order term as;

$$\begin{aligned}
 \eta^{(n)}(t) &= \int_{-\infty}^t \dots \int_{-\infty}^t G^{(n)}(t-t_1, t-t_2, \dots, t-t_n) \\
 &\times \eta^{(1)}(t_1) \eta^{(1)}(t_2) \dots \eta^{(1)}(t_n) dt_1 \dots dt_n \quad (6)
 \end{aligned}$$

By using the Fourier-Stieltjes representation

$$\eta^{(n)}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} dz^{(n)}(\omega) e^{i\omega t}. \quad (7)$$

We can transform Eqn. (7) to

$$\begin{aligned}
 dz^{(n)}(\omega) &= \int \dots \int K^{(n)}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \\
 &\times dz^{(1)}(\omega_1) dz^{(1)}(\omega_2) \dots dz^{(1)}(\omega_n), \quad (8)
 \end{aligned}$$

where  $K^{(n)}$  is the Fourier transform of  $G^{(n)}$  ( $G^{(n)}$  is set to zero for negative arguments).

The bispectrum to the fourth perturbation order is discussed by HASSELMANN *et al.* (1962).

It was shown that, for a quasi-nonlinear, quasi-Gaussian process, the bispectrum is a direct measure of the second-order interaction coefficients.

Here, we consider the spectrum up to the fourth perturbation order and the trispectrum up to the sixth perturbation order. Since  $\eta^{(1)}$  is Gaussian and since we assumed that the higher order terms can be expressed by Eqn. (6), odd order terms in the expansions of the spectrum and trispectrum vanish. Then, we can expand the spectrum and the trispectrum as follows;

$$F(\omega)d\omega = F^{(2)}(\omega)d\omega + F^{(4)}(\omega)d\omega + \dots \quad (9)$$

$$\begin{aligned} D(\omega_1, \omega_2, \omega_3) &= D^{(4)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)d\omega_1d\omega_2d\omega_3 \\ &+ D^{(6)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)d\omega_1d\omega_2d\omega_3 + \dots \quad (10) \end{aligned}$$

The first term  $F^{(2)}(\omega)d\omega$  of the expansion in (9) is given by

$$F^{(2)}(\omega)d\omega = \langle dz^{(1)}(\omega)dz^{(1)}(-\omega) \rangle \quad (11)$$

and represents the power spectrum of Gaussian part. The second term  $F^{(4)}(\omega)d\omega$  can be divided into three parts;

$$\begin{aligned} F^{(4)}(\omega)d\omega &= F^{(2,2)}(\omega)d\omega \\ &+ F^{(1,3)}(\omega)d\omega + F^{(3,1)}(\omega)d\omega, \quad (12) \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} F^{(2,2)}(\omega)d\omega &= \langle dz^{(2)}(\omega)dz^{(2)}(-\omega) \rangle \\ F^{(1,3)}(\omega)d\omega &= \langle dz^{(1)}(\omega)dz^{(3)}(-\omega) \rangle \\ F^{(3,1)}(\omega)d\omega &= \langle dz^{(3)}(\omega)dz^{(1)}(-\omega) \rangle. \quad (13) \end{aligned}$$

Therefore, the spectrum of the fourth perturbation order results from the first order interactions between second order components and between first and third order components.

The first term  $D^{(4)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)d\omega_1d\omega_2d\omega_3$  in the expansion (10) is given by

$$\begin{aligned} D^{(4)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)d\omega_1d\omega_2d\omega_3 &= \langle dz^{(1)}(\omega_1)dz^{(1)}(\omega_2) \\ &\times dz^{(1)}(\omega_3)dz^{(1)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle. \quad (14) \end{aligned}$$

The right side average of the equation has non-zero value only when  $\omega_1+\omega_2=0$ ,  $\omega_2+\omega_3=0$ , or  $\omega_3+\omega_1=0$ . Then, we have

$$\begin{aligned} D^{(4)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) &= \delta(\omega_1+\omega_2)F^{(2)}(\omega_1)F^{(2)}(\omega_3) \\ &+ \delta(\omega_2+\omega_3)F^{(2)}(\omega_2)F^{(2)}(\omega_1) \\ &+ \delta(\omega_3+\omega_1)F^{(2)}(\omega_3)F^{(2)}(\omega_2) \quad (15) \end{aligned}$$

$D^{(4)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  represents the contribution to the trispectrum from the Gaussian part.

The second term  $D^{(6)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)d\omega_1d\omega_2d\omega_3$  in

(10) may be divided into two part as

$$\begin{aligned} D^{(6)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) &= D^{(1,1,2,2)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)d\omega_1d\omega_2d\omega_3 \\ &+ D^{(1,1,1,3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)d\omega_1d\omega_2d\omega_3, \quad (16) \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} D^{(1,1,2,2)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)d\omega_1d\omega_2d\omega_3 &= \langle dz^{(1)}(\omega_1)dz^{(1)}(\omega_2)dz^{(2)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(2)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\ &+ \langle dz^{(1)}(\omega_1)dz^{(2)}(\omega_2)dz^{(1)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(2)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\ &+ \langle dz^{(2)}(\omega_1)dz^{(1)}(\omega_2)dz^{(1)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(2)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\ &+ \langle dz^{(1)}(\omega_1)dz^{(2)}(\omega_2)dz^{(2)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(1)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\ &+ \langle dz^{(2)}(\omega_1)dz^{(1)}(\omega_2)dz^{(2)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(1)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\ &+ \langle dz^{(2)}(\omega_1)dz^{(2)}(\omega_2)dz^{(1)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(1)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \quad (17) \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned} D^{(1,1,1,3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)d\omega_1d\omega_2d\omega_3 &= \langle dz^{(1)}(\omega_1)dz^{(1)}(\omega_2)dz^{(1)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(3)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\ &+ \langle dz^{(1)}(\omega_1)dz^{(1)}(\omega_2)dz^{(3)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(1)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\ &+ \langle dz^{(1)}(\omega_1)dz^{(3)}(\omega_2)dz^{(1)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(1)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\ &+ \langle dz^{(3)}(\omega_1)dz^{(1)}(\omega_2)dz^{(1)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(1)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle. \quad (18) \end{aligned}$$

First, we consider the first term of  $D^{(1,1,2,2)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)d\omega_1d\omega_2d\omega_3$ .

$$\begin{aligned} &\langle dz^{(1)}(\omega_1)dz^{(1)}(\omega_2)dz^{(2)}(\omega_3)dz^{(2)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\ &= \langle \int \int K^{(2)}(\omega_A, \omega_B)K^{(2)}(\omega_A', \omega_B')dz^{(1)}(\omega_1) \\ &\quad \omega_A + \omega_B = \omega_3 \\ &\quad \omega_A' + \omega_B' = -\omega_1 - \omega_2 - \omega_3 \\ &\quad \times dz^{(1)}(\omega_2)dz^{(1)}(\omega_A)dz^{(1)}(\omega_B) \\ &\quad \times dz^{(1)}(\omega_A')dz^{(1)}(\omega_B') \rangle \quad (19) \end{aligned}$$

Since no solution exists for the following equations

$$\left. \begin{aligned} \omega_A + \omega_B &= \omega_3 \\ \omega_A' + \omega_B' &= -\omega_1 - \omega_2 - \omega_3 \\ \omega_1 + \omega_A &= 0 \\ \omega_2 + \omega_A' &= 0 \\ \omega_B + \omega_B' &= 0 \end{aligned} \right\}$$

this term has non-zero value only when  $\omega_1+\omega_2=0$ . Then, we have

$$\begin{aligned} &\langle dz^{(1)}(\omega_1)dz^{(1)}(\omega_2)dz^{(2)}(\omega_3) \\ &\times dz^{(2)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \langle d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_1)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_2) \rangle \cdot \langle d\mathcal{Z}^{(2)}(\omega_3) \\
&\quad \times d\mathcal{Z}^{(2)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\
&= \delta(\omega_1+\omega_2)F^{(2)}(\omega_1)\langle d\mathcal{Z}^{(2)}(\omega_3)d\mathcal{Z}^{(2)}(-\omega_3) \rangle \\
&= \delta(\omega_1+\omega_2)F^{(2)}(\omega_1)F^{(2,2)}(\omega_3). \quad (20)
\end{aligned}$$

From the symmetricity of Eqn. (17), we can represent  $D^{(1,1,2,2)}$  as;

$$\begin{aligned}
D^{(1,1,2,2)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) &= \delta(\omega_1+\omega_2)[F^{(2)}(\omega_1)F^{(2,2)}(\omega_3) \\
&\quad + F^{(2)}(\omega_3)F^{(2,2)}(\omega_1)] \\
&+ \delta(\omega_2+\omega_3)[F^{(2)}(\omega_2)F^{(2,2)}(\omega_1) \\
&\quad + F^{(2)}(\omega_1)F^{(2,2)}(\omega_2)] \\
&+ \delta(\omega_3+\omega_1)[F^{(2)}(\omega_3)F^{(2,2)}(\omega_2) \\
&\quad + F^{(2)}(\omega_2)F^{(2,2)}(\omega_3)]. \quad (21)
\end{aligned}$$

Next, we consider the first term of  $D^{(1,1,1,3)}$  ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ) $d\omega_1d\omega_2d\omega_3$  in (18). The first term is

$$\begin{aligned}
&\langle d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_1)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_2)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_3)d\mathcal{Z}^{(3)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\
&= \langle \iint_{\omega_A+\omega_B+\omega_C=-\omega_1-\omega_2-\omega_3} K^{(3)}(\omega_A, \omega_B, \omega_C)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_1)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_2) \\
&\quad \times d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_3)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_A)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_B)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_C) \rangle. \quad (22)
\end{aligned}$$

The right side of this equation includes six first order components. Non-zero contributions are obtained only when these six components can be divided into three pair and their frequencies in each pair satisfy the interaction condition  $\omega+\omega'=0$ . We have the solutions of two types; (A) each pair contains one of the fixed frequencies  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ , and (B) one of the pairs consists from two of the fixed frequencies.

For Case A, by substituting  $\omega_A=-\omega_1$ ,  $\omega_B=-\omega_2$  and  $\omega_C=-\omega_3$  in the representation (22), we have

$$\begin{aligned}
&\langle d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_1)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_2)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_3)d\mathcal{Z}^{(3)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\
&= \langle K^{(3)}(-\omega_1, -\omega_2, -\omega_3) \cdot d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_1)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_2) \\
&\quad \times d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_3)d\mathcal{Z}^{(1)}(-\omega_1)d\mathcal{Z}^{(1)}(-\omega_2)d\mathcal{Z}^{(1)}(-\omega_3) \rangle \\
&= F^{(2)}(\omega_1)F^{(2)}(\omega_2)F^{(2)}(\omega_3)K^{(3)}(-\omega_1, -\omega_2, -\omega_3) \\
&\quad \times d\omega_1d\omega_2d\omega_3.
\end{aligned}$$

Then, from the symmetricity of Eqn. (18), we have

$$\begin{aligned}
D_A^{(1,1,1,3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) &= F^{(2)}(\omega_1)F^{(2)}(\omega_2)F^{(2)}(\omega_3)K^{(3)}(-\omega_1, -\omega_2, -\omega_3) \\
&+ F^{(2)}(\omega_1)F^{(2)}(\omega_2)F^{(2)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \\
&\quad \times K^{(3)}(-\omega_1, -\omega_2, \omega_1+\omega_2+\omega_3) \\
&+ F^{(2)}(\omega_1)F^{(2)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3)F^{(2)}(\omega_3) \\
&\quad \times K^{(3)}(-\omega_1, \omega_1+\omega_2+\omega_3, -\omega_3) \\
&+ F^{(2)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3)F^{(2)}(\omega_2)F^{(2)}(\omega_3) \\
&\quad \times K^{(3)}(\omega_1+\omega_2+\omega_3, -\omega_2, -\omega_3), \quad (23)
\end{aligned}$$

where  $D_A^{(1,1,1,3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  is the contribution to

the bispectrum from Case A.

For Case B, we have the solution for  $\omega_1+\omega_2=0$ ,  $\omega_2+\omega_3=0$  and  $\omega_3+\omega_1=0$ . Then the representation (22) becomes.

$$\begin{aligned}
&\langle d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_1)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_2)d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_3)d\mathcal{Z}^{(3)}(-\omega_1-\omega_2-\omega_3) \rangle \\
&= \delta(\omega_1+\omega_2)\langle d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_1)d\mathcal{Z}^{(1)}(-\omega_1) \\
&\quad \times d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_3)d\mathcal{Z}^{(3)}(-\omega_3) \rangle \\
&+ \delta(\omega_2+\omega_3)\langle d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_2)d\mathcal{Z}^{(1)}(-\omega_2) \\
&\quad \times d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_1)d\mathcal{Z}^{(3)}(-\omega_1) \rangle \\
&+ \delta(\omega_3+\omega_1)\langle d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_3)d\mathcal{Z}^{(1)}(-\omega_3) \\
&\quad \times d\mathcal{Z}^{(1)}(\omega_2)d\mathcal{Z}^{(3)}(-\omega_2) \rangle \\
&= \{\delta(\omega_1+\omega_2)F^{(2)}(\omega_1)F^{(1,3)}(\omega_3) \\
&\quad + \delta(\omega_2+\omega_3)F^{(2)}(\omega_2)F^{(1,3)}(\omega_1) \\
&\quad + \delta(\omega_3+\omega_1)F^{(2)}(\omega_3)F^{(1,3)}(\omega_2)\}d\omega_1d\omega_2d\omega_3.
\end{aligned}$$

From the symmetricity of Eqn. (18), we have the

$$\begin{aligned}
D_B^{(1,1,1,3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) &= \delta(\omega_1+\omega_2)\{F^{(2)}(\omega_1)[F^{(1,3)}(\omega_3)+F^{(3,1)}(\omega_3)] \\
&\quad + F^{(2)}(\omega_3)[F^{(1,3)}(\omega_1)+F^{(3,1)}(\omega_1)]\} \\
&+ \delta(\omega_2+\omega_3)\{F^{(2)}(\omega_2)[F^{(1,3)}(\omega_1)+F^{(3,1)}(\omega_1)] \\
&\quad + F^{(2)}(\omega_1)[F^{(1,3)}(\omega_2)+F^{(3,1)}(\omega_2)]\} \\
&+ \delta(\omega_3+\omega_1)\{F^{(2)}(\omega_3)[F^{(1,3)}(\omega_2)+F^{(3,1)}(\omega_2)] \\
&\quad + F^{(2)}(\omega_2)[F^{(1,3)}(\omega_3)+F^{(3,1)}(\omega_3)]\}. \quad (24)
\end{aligned}$$

As seen in expressions (15), (21) and (24),  $D^{(4)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ ,  $D^{(1,1,2,2)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  and  $D_B^{(1,1,1,3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  are completely determined by power spectrum, and their contributions to the trispectrum appear only on three planes  $\omega_1+\omega_2=0$ ,  $\omega_2+\omega_3=0$  and  $\omega_3+\omega_1=0$ . From Eqns. (9) and (12), we have the relation

$$\begin{aligned}
F(\omega_1)F(\omega_2) &= [F^{(2)}(\omega_1)+F^{(4)}(\omega_1)+\dots] \\
&\quad \times [F^{(2)}(\omega_2)+F^{(4)}(\omega_2)+\dots] \\
&= F^{(2)}(\omega_1)F^{(2)}(\omega_2)+F^{(2)}(\omega_1)[F^{(2,2)}(\omega_2) \\
&\quad + F^{(1,3)}(\omega_2)+F^{(3,1)}(\omega_2)] \\
&+ F^{(2)}(\omega_2)[F^{(2,2)}(\omega_1)+F^{(1,3)}(\omega_1) \\
&\quad + F^{(3,1)}(\omega_1)]+\dots
\end{aligned}$$

So, the total contribution  $D^S(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  from these three terms can be represented simply by

$$\begin{aligned}
D^S(\omega_1, \omega_2, \omega_3) &= D^{(4)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)+D^{(1,1,2,2)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) \\
&\quad + D_B^{(1,1,1,3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3) \\
&= \delta(\omega_1+\omega_2)F(\omega_1)F(\omega_3)+\delta(\omega_2+\omega_3)F(\omega_2)F(\omega_1) \\
&\quad + \delta(\omega_3+\omega_1)F(\omega_3)F(\omega_2). \quad (25)
\end{aligned}$$

Since we can replace  $F^{(2)}(\omega)$  in the expression (23) by  $F(\omega)$  within the accuracy of six perturbation order, we have the final representation of the trispectrum for the quasi-linear quasi-Gaussian process as follows;

$$\begin{aligned}
 D(\omega_1, \omega_2, \omega_3) &= \delta(\omega_1 + \omega_2)F(\omega_1)F(\omega_3) + \delta(\omega_2 + \omega_3)F(\omega_2)F(\omega_1) \\
 &\quad + \delta(\omega_3 + \omega_1)F(\omega_3)F(\omega_2) \\
 &\quad + F(\omega_1)F(\omega_2)F(\omega_3)K^{(3)}(-\omega_1, -\omega_2, -\omega_3) \\
 &\quad + F(\omega_1)F(\omega_2)F(-\omega_1 - \omega_2 - \omega_3) \\
 &\quad \quad \times K^{(3)}(-\omega_1, -\omega_2, \omega_1 + \omega_2 + \omega_3) \\
 &\quad + F(\omega_1)F(-\omega_1 - \omega_2 - \omega_3)F(\omega_3) \\
 &\quad \quad \times K^{(3)}(-\omega_1, \omega_1 + \omega_2 + \omega_3, -\omega_3) \\
 &\quad + F(-\omega_1 - \omega_2 - \omega_3)F(\omega_2)F(\omega_3) \\
 &\quad \quad \times K^{(3)}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3, -\omega_2, -\omega_3) \\
 &\quad + 0(\varepsilon^8). \tag{26}
 \end{aligned}$$

Unlike the bispectrum (HASSELMANN *et al.*, 1962), trispectral values are influenced from the lower order spectrum. However, this influence appears only three planes  $\omega_1 + \omega_2 = 0$ ,  $\omega_2 + \omega_3 = 0$  and  $\omega_3 + \omega_1 = 0$ . Therefore, we can easily obtain the direct measure of the third order interactions except on these three planes. Or, if the power spectrum is known up to the fourth perturbation accuracy, we can eliminate the influence of the power spectrum from the trispectrum. Like the bispectrum, only the combination of the third order interaction coefficient  $K^{(3)}(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  can be determined from the trispectrum because of the symmetry conditions in the trispectrum.

In the end of this appendix, we shall estimate the contributions  $F_{3,1}^p(\omega)$  and  $F_{2,2}^p(\omega)$  to the one-dimensional fourth order spectra  $F_{3,1}(\omega)$  and  $F_{2,2}(\omega)$  from power spectrum  $F_{1,1}(\omega)$ . From Eqn. (25), we have

$$\begin{aligned}
 F_{3,1}^p(\omega_1) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} D^s(\omega_1, \omega_2, \omega_3) d\omega_2 d\omega_3 \\
 &= \int [F(\omega_1)F(\omega_3) + F(\omega_3)F(\omega_1) \\
 &\quad + \sigma^2 \delta(\omega_3 + \omega_1)F(\omega_1)] d\omega_3 \\
 &= 3\sigma^2 F(\omega_1) \tag{27}
 \end{aligned}$$

and

$$\begin{aligned}
 F_{2,2}^p(\omega_1) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2} D^s\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}, \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}, \omega_3\right) \\
 &\quad \times d\omega_1 d\omega_2 \\
 &= \frac{1}{2} \iint \delta(\omega_1) F\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right) F(\omega_3) d\omega_1 d\omega_2 \\
 &\quad + \frac{1}{2} \iint \delta\left(\frac{\omega_1 - \omega_2 + 2\omega_3}{2}\right) \\
 &\quad \quad \times F(\omega_3) F\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right) d\omega_1 d\omega_2 \\
 &\quad + \frac{1}{2} \iint \delta\left(\frac{\omega_1 + \omega_2 + 2\omega_3}{2}\right) F\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right) \\
 &\quad \quad \times F\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}\right) d\omega_1 d\omega_2. \tag{28}
 \end{aligned}$$

If we transfer the coordinate system in the first and second terms in Eqn. (28) by

$$\begin{cases} \omega_A = \omega_1 \\ \omega_B = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \\ \omega_C = \omega_3 \end{cases}$$

and in the third term by

$$\begin{cases} \omega_{A'} = \omega_1 \\ \omega_{B'} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \\ \omega_{C'} = \omega_3 \end{cases}$$

then we have

$$\begin{aligned}
 F_{2,2}^p(\omega_1) &= \iint [\delta(\omega_A)F(\omega_B)F(\omega_C) \\
 &\quad + \delta(\omega_B + \omega_C)F(\omega_B)F(\omega_A - \omega_B)] d\omega_B d\omega_C \\
 &\quad + \iint \delta(\omega_{B'} + \omega_{C'})F(\omega_{B'})F(\omega_{A'} - \omega_{B'}) d\omega_{B'} d\omega_{C'} \\
 &= \sigma^4 \delta(\omega_1) + 2 \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega')F(\omega_1 - \omega') d\omega'. \tag{29}
 \end{aligned}$$

Of course, if a time series is Gaussian,  $F_{3,1}^p(\omega)$  and  $F_{2,2}^p(\omega)$  give the fourth order spectra for the Gaussian process themselves.

## Appendix II

### Maclaurin's expansion of mean Higher order products and higher order covariance functions

#### 1. Mean higher order products

We consider a stationary time series  $\eta(t)$  normalized as  $\langle \eta(t) \rangle = 0$ . The auto-covariance function, the mean third product, and the mean fourth product are defined as follows;

$$R(\tau) = \langle \eta(t) \cdot \eta(t+\tau) \rangle \quad (1)$$

$$S(\tau_1, \tau_2) = \langle \eta(t) \cdot \eta(t+\tau_1) \cdot \eta(t+\tau_2) \rangle \quad (2)$$

$$T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = \langle \eta(t) \cdot \eta(t+\tau_1) \cdot \eta(t+\tau_2) \cdot \eta(t+\tau_3) \rangle, \quad (3)$$

where  $\langle \rangle$  denotes time average.

Maclaurin's expansion of the covariance function  $R(\tau)$  is

$$R(\tau) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} R^{(n)}(0) \cdot \tau^n, \quad (4)$$

where

$$\begin{aligned} R^{(n)}(0) &= \left[ \frac{\partial^n}{\partial \tau^n} R(\tau) \right]_{\tau=0} \\ &= \langle \eta(t) \cdot \frac{\partial^n}{\partial t^n} \eta(t) \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Since we are considering a stationary time series, we have the symmetry relation for the auto-covariance function;

$$\begin{aligned} R(\tau) &= \langle \eta(t) \cdot \eta(t+\tau) \rangle \\ &= \langle \eta(t-\tau) \cdot \eta(t) \rangle = R(-\tau) \end{aligned} \quad (6)$$

and so

$$R'(0) = R'''(0) = \dots = R^{(2n-1)}(0) = \dots = 0.$$

We obtain

$$\begin{aligned} \langle \eta \cdot \eta' \rangle &= \langle \eta \cdot \eta''' \rangle = \dots \\ &= \langle \eta \cdot \eta^{(2m-1)} \rangle = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

or, generally we have

$$\begin{aligned} \langle \eta^{(2m)} \cdot \eta^{(2n+1)} \rangle &= 0 \\ &\text{for } m, n = 0, 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (8)$$

This is because we can replace  $\eta$  by its higher derivatives in (7).

Two-dimensional Maclaurin's expansion of the mean third product  $S(\tau_1, \tau_2)$  is

$$\begin{aligned} S(\tau_1, \tau_2) &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{m!n!} S^{(m,n)}(0,0) \tau_1^m \cdot \tau_2^n, \end{aligned} \quad (9)$$

where

$$\begin{aligned} S^{(m,n)}(0,0) &= \left[ \frac{\partial^{(m+n)}}{\partial \tau_1^m \partial \tau_2^n} S(\tau_1, \tau_2) \right]_{\tau_1=\tau_2=0} \\ &= \langle \eta(t) \cdot \frac{\partial^m}{\partial t^m} \eta(t) \cdot \frac{\partial^n}{\partial t^n} \eta(t) \rangle. \end{aligned} \quad (10)$$

From the stationarity of the time series, we have

$$\begin{aligned} \langle \eta(t) \cdot \eta(t+\tau_1) \cdot \eta(t+\tau_2) \rangle &= \langle \eta(t) \cdot \eta(t+\tau_2) \cdot \eta(t+\tau_1) \rangle \\ &= \langle \eta(t-\tau_1) \cdot \eta(t) \cdot \eta(t+\tau_2-\tau_1) \rangle. \end{aligned} \quad (11)$$

Therefore, the symmetry relations for the mean third product are

$$S(\tau_1, \tau_2) = S(\tau_2, \tau_1) = S(-\tau_1, \tau_2 - \tau_1). \quad (12)$$

These symmetry relations imply that all of the coefficients are not independent of each other. By putting Eqn. (9) into Eqn. (12), we have the following relations;

$$S^{(l,m)}(0,0) = S^{(m,l)}(0,0) \quad (13)$$

and

$$\begin{cases} S^{(1,0)}(0,0) = 0 \\ S^{(2,0)}(0,0) = -2S^{(1,1)}(0,0) \\ S^{(3,0)}(0,0) = -2S^{(2,1)}(0,0) \\ S^{(4,0)}(0,0) = -2S^{(3,1)}(0,0) = 2S^{(2,2)}(0,0) \\ S^{(5,0)}(0,0) = -2S^{(4,1)}(0,0) = 10S^{(3,2)}(0,0). \end{cases} \quad (14)$$

Thus, the expansion of  $S(\tau_1, \tau_2)$  to the fifth order is

$$\begin{aligned} S(\tau_1, \tau_2) &= S(0,0) + \frac{1}{2!} S^{(2,0)}(0,0) (\tau_1^2 - \tau_1 \tau_2 + \tau_2^2) \\ &+ \frac{1}{3!} S^{(3,0)}(0,0) (\tau_1^3 - 3\tau_1^2 \tau_2 - 3\tau_1 \tau_2^2 + \tau_2^3) \\ &+ \frac{1}{4!} S^{(4,0)}(0,0) (\tau_1^4 - 12\tau_1^3 \tau_2 + 12\tau_1^2 \tau_2^2 - 12\tau_1 \tau_2^3 + \tau_2^4) \\ &+ \frac{1}{5!} S^{(5,0)}(0,0) (\tau_1^5 - 60\tau_1^4 \tau_2 + 12\tau_1^3 \tau_2^2 + 12\tau_1^2 \tau_2^3 \\ &\quad - 60\tau_1 \tau_2^4 + \tau_2^5). \end{aligned} \quad (15)$$

Using Eqn. (10), Eqn. (13) can be rewritten as follows;

$$\left\{ \begin{aligned} \langle \eta^2 \cdot \eta' \rangle &= 0 \\ \langle \eta^2 \cdot \eta'' \rangle &= -2 \langle \eta \cdot (\eta')^2 \rangle \\ \langle \eta^2 \cdot \eta''' \rangle &= -2 \langle \eta \cdot \eta' \cdot \eta'' \rangle \\ \langle \eta^2 \cdot \eta'''' \rangle &= -2 \langle \eta \cdot \eta' \cdot \eta''' \rangle = \langle \eta \cdot (\eta'')^2 \rangle \\ \langle \eta^2 \cdot \eta^{(5)} \rangle &= -2 \langle \eta \cdot \eta' \cdot \eta'''' \rangle \\ &= 10 \langle \eta \cdot \eta'' \cdot \eta'''' \rangle. \end{aligned} \right. \quad (16)$$

The three-dimensional Maclaurin's expansion of  $T(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$  is

$$T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{l! m! n!} \times T^{(l,m,n)}(0, 0, 0) \tau_1^l \tau_2^m \tau_3^n, \quad (17)$$

where

$$T^{(l,m,n)}(0, 0, 0) = \left[ \frac{\partial^{l+m+n}}{\partial \tau_1^l \partial \tau_2^m \partial \tau_3^n} \times T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \right]_{\tau_1=\tau_2=\tau_3=0} = \langle \eta \cdot \eta^{(l)} \cdot \eta^{(m)} \cdot \eta^{(n)} \rangle. \quad (18)$$

The fourth-covariance function has the following symmetry relation;

$$T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = T(\tau_1, \tau_3, \tau_2) = T(\tau_2, \tau_1, \tau_3) = T(-\tau_1, \tau_2 - \tau_1, \tau_3 - \tau_1). \quad (19)$$

From Eqns. (17) and (19), we have

$$\begin{aligned} T^{(l,m,n)}(0, 0, 0) &= T^{(l,n,m)}(0, 0, 0) \\ &= T^{(m,l,n)}(0, 0, 0) = T^{(m,n,l)}(0, 0, 0) \\ &= T^{(n,l,m)}(0, 0, 0) = T^{(n,m,l)}(0, 0, 0), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{aligned} T^{(1,0,0)}(0, 0, 0) &= 0 \\ T^{(2,0,0)}(0, 0, 0) &= -3T^{(1,1,0)}(0, 0, 0) \\ T^{(3,0,0)}(0, 0, 0) &= -3T^{(2,1,0)}(0, 0, 0) \\ &= 3T^{(1,1,1)}(0, 0, 0), \end{aligned} \right. \quad (21)$$

and

$$\left\{ \begin{aligned} T^{(4,0,0)}(0, 0, 0) + 3T^{(3,1,0)}(0, 0, 0) &= 0 \\ T^{(3,1,0)}(0, 0, 0) + T^{(2,2,0)}(0, 0, 0) \\ + 2T^{(2,1,1)}(0, 0, 0) &= 0. \end{aligned} \right. \quad (22)$$

As seen in Eqn. (22), we need two independent coefficients to represent the fourth order terms in the expansion. If we choose  $T^{(4,0,0)}(0, 0, 0)$  and  $T^{(2,2,0)}(0, 0, 0)$  as these two coefficients, the expansion of  $T(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$  to the fourth order is;

$$\begin{aligned} T(\tau_1, \tau_2, \tau_3) &= T(0, 0, 0) + \frac{1}{6} T^{(2,0,0)}(0, 0, 0) \{3(\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2) \\ &\quad - 2(\tau_1\tau_2 + \tau_2\tau_3 + \tau_3\tau_1)\} \\ &+ \frac{1}{6} T^{(3,0,0)}(0, 0, 0) \{\tau_1^3 + \tau_2^3 + \tau_3^3 - \tau_1^2\tau_2 - \tau_1^2\tau_3 \\ &\quad - \tau_2^2\tau_3 - \tau_2^2\tau_1 - \tau_3^2\tau_1 - \tau_3^2\tau_2 + 2\tau_1\tau_2\tau_3\} \\ &+ \frac{1}{24} T^{(4,0,0)}(0, 0, 0) \{\tau_1^4 + \tau_2^4 + \tau_3^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &- \frac{4}{3} (\tau_1^3\tau_2 + \tau_1^3\tau_3 + \tau_2^3\tau_3 + \tau_2^3\tau_1 + \tau_3^3\tau_1 + \tau_3^3\tau_2) \\ &+ 2(\tau_1^2\tau_2\tau_3 + \tau_2^2\tau_3\tau_1 + \tau_3^2\tau_1\tau_2) \} \\ &+ \frac{1}{4} T^{(2,2,0)}(0, 0, 0) \{\tau_1^2\tau_2^2 + \tau_2^2\tau_3^2 + \tau_3^2\tau_1^2 \\ &\quad - \tau_1^2\tau_2\tau_3 - \tau_2^2\tau_3\tau_1 - \tau_3^2\tau_1\tau_2\}. \end{aligned} \quad (24)$$

Eqns. (21) and (22) can be rewritten by Eqn. (18);

$$\begin{aligned} \langle \eta^3 \cdot \eta' \rangle &= 0 \\ \langle \eta^3 \cdot \eta'' \rangle &= -3 \langle \eta^2 \cdot (\eta')^2 \rangle \\ \langle \eta^3 \cdot \eta''' \rangle &= -3 \langle \eta^2 \cdot \eta' \cdot \eta'' \rangle = 3 \langle (\eta')^3 \rangle \\ \langle \eta^3 \cdot \eta'''' \rangle &= -3 \langle \eta^2 \cdot \eta' \cdot \eta'''' \rangle \\ \langle \eta^2 \cdot \eta' \cdot \eta'''' \rangle &+ \langle \eta^2 \cdot (\eta'')^2 \rangle \\ &+ 2 \langle \eta \cdot (\eta')^2 \cdot \eta'' \rangle = 0. \end{aligned} \quad (25)$$

For discussing the limiting form of  $P_2^*\{\eta_+, \eta_-, \tau\}$  as  $\tau \rightarrow 0$ , we need the sixth order expansion coefficients of  $T(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$ . Eqn. (20) holds for any order of coefficients. Additional relations among the sixth order coefficients are derived from similar but troublesome calculations;

$$\begin{aligned} T^{(5,1,0)}(0, 0, 0) &= -\frac{1}{3} T^{(6,0,0)}(0, 0, 0) \\ T^{(4,2,0)}(0, 0, 0) &= -T^{(3,3,0)}(0, 0, 0) \\ T^{(4,1,1)}(0, 0, 0) &= \frac{1}{6} T^{(6,0,0)}(0, 0, 0) \\ &\quad - \frac{1}{2} T^{(3,3,0)}(0, 0, 0) \\ T^{(3,2,1)}(0, 0, 0) &= 0 \\ T^{(2,2,2)}(0, 0, 0) &= -\frac{1}{18} T^{(6,0,0)}(0, 0, 0) \\ &\quad + \frac{1}{6} T^{(3,3,0)}(0, 0, 0). \end{aligned} \quad (26)$$

It should be noted that we have only two independent coefficients among 25 sixth-order coefficients.

The above relations can be written in terms of the fourth-order products of  $\eta$  and their derivatives. The following relation would be most interesting;

$$\langle \eta \cdot \eta' \cdot \eta'' \cdot \eta'''' \rangle = 0. \quad (27)$$

## 2. Higher order covariance functions

Higher order covariance functions are defined by

$$R_{m,n}(\tau) = \langle \eta^m(t) \cdot \eta^n(t+\tau) \rangle. \quad (28)$$

So, their Maclaurin's expansions are

$$R_{m,n}(\tau) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{l!} R_{m,n}^{(l)}(0) \cdot \tau^l, \quad (29)$$

where

$$R_{m,n}^{(l)}(0) = \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} R_{m,n}(\tau) \right]_{\tau=0}. \quad (30)$$

Here, we need expansions of the first six covariance functions,  $R_{1,1}(\tau)$ ,  $R_{2,1}(\tau)$ ,  $R_{1,2}(\tau)$ ,  $R_{3,1}(\tau)$ ,  $R_{2,2}(\tau)$ , and  $R_{1,3}(\tau)$ . Coefficients of expansion of these covariance functions can be represented by  $R^{(m)}(0)$ ,  $S^{(m,n)}(0,0)$ , and  $T^{(l,m,n)}(0,0,0)$  which were given in the previous section. For simplicity, we denote these as  $R_0^{(m)}$ ,  $S_0^{(m,n)}$ , and  $T_0^{(l,m,n)}$ . Then, we have

$$R_{1,1}^{(l)}(0) = R_0^{(l)} \quad (31)$$

$$\left\{ \begin{aligned} R_{2,1}^{(l)}(0) &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} \langle \eta^2(t) \cdot \eta(t+\tau) \rangle \right]_{\tau=0} \\ &= \langle \eta^2 \cdot \eta^{(l)} \rangle = S_0^{(l,0)} \\ R_{1,2}^{(l)}(0) &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} \langle \eta(t) \cdot \eta^2(t+\tau) \rangle \right]_{\tau=0} \\ &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} \langle \eta(t-\tau) \cdot \eta^2(t) \rangle \right]_{\tau=0} \\ &= (-1)^l \langle \eta^2 \cdot \eta^{(l)} \rangle = (-1)^l S_0^{(l,0)} \end{aligned} \right. \quad (32)$$

$$\left\{ \begin{aligned} R_{3,1}^{(l)}(0) &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} \langle \eta^3(t) \cdot \eta(t+\tau) \rangle \right]_{\tau=0} \\ &= \langle \eta^3 \cdot \eta^{(l)} \rangle = T_0^{(l,0,0)} \\ R_{1,3}^{(l)}(0) &= \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} \langle \eta(t) \cdot \eta^3(t+\tau) \rangle \right]_{\tau=0} \\ &= (-1)^l \langle \eta^3 \cdot \eta^{(l)} \rangle = (-1)^l T_0^{(l,0,0)}. \end{aligned} \right. \quad (33)$$

If neither of  $m$  and  $n$  are one, calculation of coefficients for  $R_{m,n}(\tau)$  is more complicated. Here we calculate only  $R_{2,2}(\tau)$ . By using the Taylor's expansion of  $\eta^2(t-\tau)$ , we have

$$R_{2,2}^{(l)}(0) = \left[ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} \langle \eta^2(t) \cdot \eta^2(t+\tau) \rangle \right]_{\tau=0}$$

$$\begin{aligned} &= \left\{ \frac{\partial^l}{\partial \tau^l} \langle \eta^2 \cdot \left[ \eta^2 + 2\eta\eta' \cdot \tau + \frac{2}{2!}(\eta'\eta' + \eta\eta'')\tau^2 \right. \right. \\ &+ \frac{1}{3!}(6\eta' \cdot \eta'' + 2\eta \cdot \eta''')\tau^3 \\ &+ \frac{1}{4!}(6\eta'' \cdot \eta''' + 8\eta'\eta'''' + 2\eta\eta''''')\tau^4 \\ &+ \dots \dots \left. \left. \right] \right\}_{\tau=0}. \end{aligned} \quad (34)$$

Then, we obtain

$$\left\{ \begin{aligned} R_{2,2}(0) &= \langle \eta^4 \rangle = T_0 \\ R'_{2,2}(0) &= 2\langle \eta^3 \cdot \eta' \rangle = 2T_0^{(1,0,0)} = 0 \\ R''_{2,2}(0) &= 2\langle \eta^2 \cdot (\eta')^2 \rangle + 2\langle \eta^3 \eta'' \rangle \\ &= 2T_0^{(2,1,0)} + 2T_0^{(2,0,0)} = \frac{4}{3} T_0^{(2,0,0)} \\ R'''_{2,2}(0) &= 6\langle \eta^2 \cdot \eta' \cdot \eta'' \rangle + 2\langle \eta^3 \cdot \eta''' \rangle \\ &= 6T_0^{(2,1,0)} + 2T_0^{(3,0,0)} = 0 \\ R''''_{2,2}(0) &= 6\langle \eta^2 (\eta'')^2 \rangle + 8\langle \eta^2 \cdot \eta' \cdot \eta'''' \rangle \\ &\quad + 2\langle \eta^3 \cdot \eta'''' \rangle \\ &= 6T_0^{(2,2,0)} + 8T_0^{(3,1,0)} + 2T_0^{(4,0,0)} \\ &= 6T_0^{(2,2,0)} - \frac{2}{3} T_0^{(4,0,0)} \\ R^{(6)}_{2,2}(0) &= 20\langle \eta^2 \cdot \eta'''' \cdot \eta'''' \rangle + 30\langle \eta^2 \cdot \eta'' \cdot \eta'''' \rangle \\ &\quad + 12\langle \eta^2 \cdot \eta' \cdot \eta^{(5)} \rangle + 2\langle \eta^3 \cdot \eta^{(6)} \rangle \\ &= 20T_0^{(3,3,0)} + 30T_0^{(4,2,0)} + 12T_0^{(5,1,0)} + 2T_0^{(6,0,0)} \\ &= -10T_0^{(3,3,0)} - 2T_0^{(6,0,0)} \end{aligned} \right. \quad (35)$$

$R_{2,2}^{(5)}$  is obviously zero from the symmetrical property of  $R_{2,2}(\tau)$ . Thus, we can expand  $R_{2,2}(\tau)$  to the sixth order as follows;

$$\begin{aligned} R_{2,2}(\tau) &= M_4 - \frac{1}{2!} \left[ \frac{4}{3} T_0^{(2,0,0)} \right] \tau^2 \\ &+ \frac{1}{4!} \left[ 6T_0^{(2,2,0)} - \frac{2}{3} T_0^{(4,0,0)} \right] \tau^4 \\ &- \frac{1}{6!} \left[ 10T_0^{(3,3,0)} - 2T_0^{(6,0,0)} \right] \tau^6 + 0(\tau^8) \end{aligned} \quad (36)$$

## 二次元おくれ確率, 高次自己相関および高次スペクトルについて

永 田 豊

要旨: 海洋学的, 地球物理学的現象の記録は, 現象あるいは観測システムの非線型性のため, その分布関数が多かれ少なかれ必ずずんだり, とがったりしている。ガウス分布をしない時系列については, 通常のパワースペクトルのみではその統計的性質を完全に記述することは出来ず, より高次のモーメントについて考えて行かねばならない。高次のスペクトルとしてはバイスペクトル, トリスペクトルといった多次元スペクトルを考えるのが最も合理的であるが, これ等は多次元のため計算するのに多くの時間を要するし, 得られた結果の表現もやっかいである。従って, 場合によっては一次元の高次スペクトルを考える方が実用的であるわけで, ここでは一次元の高次自己相関, 高次スペクトルの基礎的な性質を二次元に拡張した自己相関関数, すなわち二次元おくれ確率との関係において, また多次元スペクトルとの関係において論じたものである。ここでは議論は数学的な側面に限られており, 実際の海洋学的現象の時系列への応用は別の論文で行なう予定である。



シ ン ポ ジ ウ ム

深海用計測器の繫留法に関するシンポジウム\*

Symposium sur le mouillage des appareils  
Scientifiques à grande profondeur

日 時: 昭和44年12月18, 19日

場 所: 東京大学海洋研究所

12月18日

- 開会の辞 奈須紀幸(東大海洋研)
1. 浮き上り方式 南雲昭三郎(東大地震研)
2. 浮き上り方式その他 渡辺精一(理 研)
3. 浮き上り方式について 安井正(舞鶴海気)
4. 外国の例 高野健三(東大海洋研)
5. アンカード・ブイ方式  
海底地震計の設置作業  
(計画と準備) 佐藤孫七・小林平八郎  
(東海大・海洋)

12月19日

6. 海象・気象ロボット・  
ブイの繫留の一例 赤松英雄(気象庁)
7. 自動観測用ブイの  
繫留について 岩佐欽司(水路部)
8. 十勝沖および積丹沖に  
おける海底地震計の設  
置方法 坂尻直己・田望・  
堀田宏(北大・理)
9. 海底地震計とブイ・  
テクノロジー 島村英紀・浅田敏  
(東大・理)
10. 海底地震計の繫留 南雲昭三郎(東大地震研)
11. 白鳳丸の錨繫留法に関  
する一考察 白沢高康(東大海洋研)
12. 定浮標方式海底地震計  
の装置と海上作業につ  
いて 飯沼龍門・吉田弘  
(気象庁)
- 閉会の辞 高野健三(東大海洋研)

\* 東京大学海洋研究所主催の研究集会の一つでの講演内容である。研究集会の開催は、海洋物理としてははじめてのことであったが、多数の参加者により活発な討論が行なわれ、意義の深い集会だったようである。それぞれ原稿の長さを揃えようとはしなかったので長短いろいろである。佐藤孫七、小林平八郎両氏からは長文の報告を頂いたが、全体の量を考えてここではその要旨だけにとどめた(全文は本誌次号に掲載の予定)。討論内容も印刷の予定であったが、止むを得ない事情により割愛した。なお、1969年度には海洋物理として、このほかに「海中の光に関するシンポジウム」を開いた。その内容は本誌次号にのせて頂くことになるだろう。(高野健三 記)

# 1. 浮き上り方式

南雲昭三郎\*

## Récupération par déclencheur

Shozaburo NAGUMO

1. この報告では浮き上り方式海底観測の例として、TEXAS INSTRUMENT 社の海底地震計<sup>1)</sup> および SCRIPPS INSTITUTION の底層流観測計<sup>2)</sup> の方式を紹介した。

### 2. 浮き上り方式の要素

浮き上り方式の要素としては、(1) 浮力体、(2) アンカー切離し機構、(3) 超音波呼出し機構、(4) 海面回収機構が挙げられる。

### 3. TEXAS INSTRUMENT 社の海底地震計の浮き上り方式

1) 浮力体としては高張力アルミニウム合金 (7178T-6) の中空球形容器を使用している。内径 36.75", 外径 40.00"。使用深度は 11,500 P.S.I. (25,000 ft)。計器を含めた全重量 1,240 lbs アンカーとして 300 lbs の鋳鉄を使用している。このアンカーを切離すと、約 200 lbs の浮力を生ずる。浮き上り速度約 400 ft/min, 落下速度約 360 ft/min である。

観測点に来ると、海底地震計を船外に振出し、海中に投下する。海底地震計は自由落下し海底に着底する。海底で完全自動記録を行なう。適当な観測期間の後、観測船から超音波信号にて呼出しをかける。海底地震計は信号を受信、解読するとアンカーを切離し、自分の浮力で浮き上る。海面に浮上した地震計からはラジオビーコンや閃光を発射する。観測船はそれらを追跡して回収する。

2) アンカー切離し機構としては、独特な機械的装置を使用している。最終段の張力を受持っているヒューズを電流によってとばすと、アンカーが外れる仕掛けになっている。

3) 浮き上り指令は三段構えである。船からの超音波信号による方法、刻時用時計による方法、専用の時計による方法の三つである。

超音波方式は船に装備された送信機一発振器、海底地震計に装備された受波器—増幅器、信号解読装置、パルス発生器から構成される。送信側の電力は 300 V, 約 2A であり、発振器は Ba Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> である。船からケーブルで曳航する。呼出し信号は 5.9 kc~6.5 kc の二つの周波数を 1 秒間づつ交互に 5 回発信させる。受信側において一つの周波数は ON, もう一つの周波数は OFF に作用して、矩形波パルス群を作る。5 箇のパルスが揃った時にリレーが動作するようになっている。海底地震計側の受信器用ハイドロホンには特に高感度のもが開発され、8,000 m の深海でも感度よく動作するように作られている。

4) 海面回収装置としては約 26 MC のラジオビーコンおよびクセノン閃光灯を使用している。

1966 年 10 月~12 月、南千島海溝付近において合計 18 箇の海底地震計を展開し、14 箇を回収した。この海域はロランの精度が悪く、主に星で船位決定を行なった。深海の回収が特に悪いということはない。海溝の急傾斜面は回収率が悪い。海面状況が悪い時は、超音波呼出しの反応に長い時間かかった。回収に要する時間をあらかじめ決めることはなかなかむずかしい。

海底地震計に対する浮き上り方式としては、地面との結合が悪くなるという欠点がある。本体が浮力体であり、元来浮き上るものをアンカーでおさえているため、共振のような振動が誘起されやすい。地震計を浮力体から離し、たとえばアンカーの方に取り付けるとか、というような工夫が必要であろう。

回収率としては最終的には 78% であったが、この内超音波呼出しによる回収率は  $\frac{10}{18} \times 100 = 55\%$  であり、残りは時計仕掛けで回収された。

### 4. SCRIPPS INSTITUTION の底層流測定器

浮力体としては ALCOA 社製の内径 22" の高張力アルミ球を二箇使用している。使用深度は 7,800 P. S. I.

\* 東京大学地震研究所 Earthquake Research Institute, University of Tokyo

(530 気圧)、浮力は 48 kg/1 容器、計器の総重量は 230 kg、残浮力は 20 kg にとっている。アンカーとしては電池を使用し、浮上る時に切り捨てて来る。

切離し機構は BENDIX 社のソレノイド型ピストンと EXPLODING BOLT を併用している。

超音波呼出し機構としては 14~15 kc の 3 箇の周波数の中、二つを 0.33 sec づつ交互に 5 秒間発信し、15 秒ごとに繰り返す。二つの周波数が受信されると切離し機構が動作するようになっている。発振器への入力は約 100 W である。

海面浮上後の回収は 4.4 MC と 27 MC のラジオビーコンとクセノン閃光灯を使用している。

## 5. 長所、短所

長所としては繫留ロープ不要のため (1) 深海オペレーションが簡単になる。特に設置が簡単になる。(2) 航行船舶の邪魔にならない。(3) 天候に災されない。短所としては (1) 回収時の船の行動計画に充分の余裕が必要となる。これには専用船が望ましく、多くのパーティーが合乗りする船だと時間の調整に苦しむ。(2) 海底地震計用としては大地との結合が難しい。

## 文 献

- 1) R. A. ARNETT (1965): Ocean-Bottom Seismograph. Proc. IEEE, **53**(12), 1899-1905.
- 2) F. E. SNODGRASS (1968): Deep Sea Instrument Capsule. Science, **162**, 78-87.

## 2. 浮き上り方式その他

渡 辺 精 一\*

### Récupération par déclencheur

Seiichi WATANABE

#### 1. はじめに

海洋に設置した計測器を回収するには水面ウキを付けた繫留装置が最も簡単であることは明らかであるが、近年水中ウキを浮上させるために必要な解放装置や超音波ビーコン、ラジオビーコンなど発見装置の発達により、水中ウキを付けた繫留方式もかなり使用されるようになってきた。

中層あるいは海底に浮き上りウキを置き、水面ウキのない繫留方式は次のような利点を持つと考えられる。

1) 海上の航路に妨害を与えない。しかし、設置と回収の作業の間には影響があるし、信号命令解放装置に有害となるかも知れない雑音の多い航路は避くべきである。

2) 故意又は過失により人為的な損害を受けにくい。しかし、トロール、巻網漁法などによる偶発的な損害は有り得る。

3) 波浪の影響をほとんど受けない。波の運動は深さ

と共に急激に減少するから、表層以下に設置された繫留装置は波浪に対して安全である。

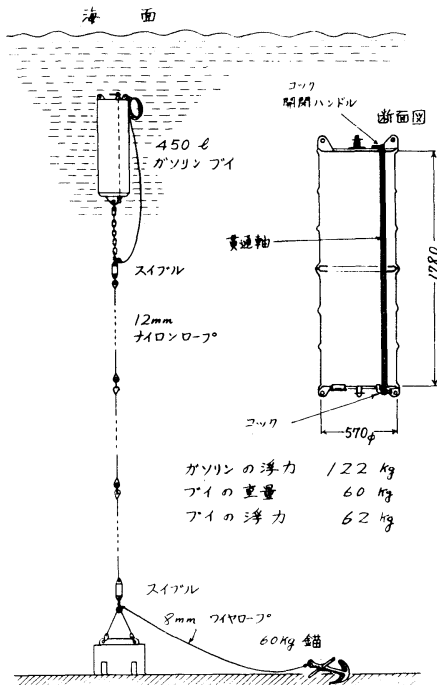
このような理由からわれわれが10年程前に試みた浮き上り方式と簡単な水中ウキ方式および最近の進歩した繫留装置の概要について述べ、おわりに信号命令解放装置の信頼度に関する Woods Hole 海洋研究所の試験報告の一部に言及する。

#### 2. 水中ウキ方式

1) 簡単な水中ウキ方式<sup>1)</sup> われわれが 1,000 m 以上の深海の繫留装置を必要としたのは、1 年間に亘る室内のシミュレーターによる試験の後、同様の試料を海底に沈め、数か月後これを回収して実際に海底付近の海水に曝された試料に関するデータを得るためである。その当時外洋に適する水面ウキ方式の参考例が見当らなかったため、前述のような理由からも長期間安全と思われる浮き上り方式と次に述べる水中ウキ方式を採ったのである。

水中ウキは 200 l ドラム缶 2 個を隔壁を切り取って接続し、これにガソリンを満したものである (第 1 図)。

\* 理化学研究所 The Institute of Physical and Chemical Research



第1図 ガソリンを入れたドラム缶の水中ウキ。

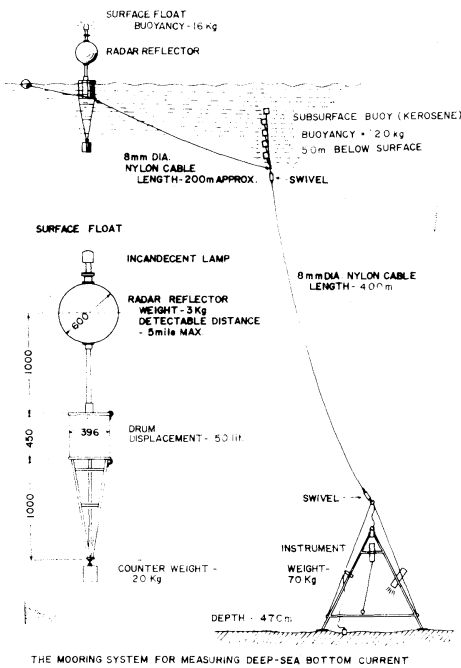
置した。設置場所は沿岸や島の見通し線により決定したが、約1カ月ごとの繫留確認の際にも見通し線により50~100m程度の誤差で設置地点に近づくことができ、数十分間の音響測深機による探知で必ず水中ウキの直上に位置することができた。装置の回収は2艘の船によるドラッグで行なう。短期間設置と回収を行なった後、約1カ年の繫留を続け、その間毎月の探知で完全な繫留を確認したが、その後流失した。原因はナイロンロープの生物による被害か、ガソリンの漏洩によるのかは不明である。この装置は簡単ながら、海岸の見通し線やビーコンなど音響装置による位置確認ができれば有用な方法だと思われる。

2) 浮標を付けた水中ウキ方式<sup>2)</sup> 水中ウキの利点と水面浮標による回収の便利さを兼ね、繫留ロープの重量は水中ウキで支え、長いロープを付けた小型の回収用浮標を水面上に浮かせておく方式である。この方式の最も簡単な繫留装置(第2図)を用いて、われわれは過去3年間底層流の測定を行なっている。その要項は、ロープ: 8mm 編組ナイロンロープ、1,500~2,000m、経験した最大深度 1,340m、水中ウキ: 20l ポリエチレン瓶に灯油を入れたもの5個、全浮力は約20kgで、5個に分散すると小型船における人力操作が容易である。水面ウキ: 50l ドラム缶を利用し、下部に脚とおもり、上部にコーナフレクター、夜間点灯ホトリレー付きストロボ標識灯が付いている。錨その他の固定具は特に設けず水中重量約70kgの流速計取り付け三脚だけが海底に着座する。

この水中ウキはいかなる深さに対しても信頼度が高く、しかも廉価である。ウキの浮力と価格を示すアルキメデスナンバー (Sterling ポンド÷浮力ポンド) は後に述べる J. A. KNAUSS<sup>3)</sup> が底層流測定の浮き上り方式に用いたガラス球ウキの0.9に対して、灯油入りポリエチレン瓶は0.16ぐらいである。

### 3. 浮き上り方式の例

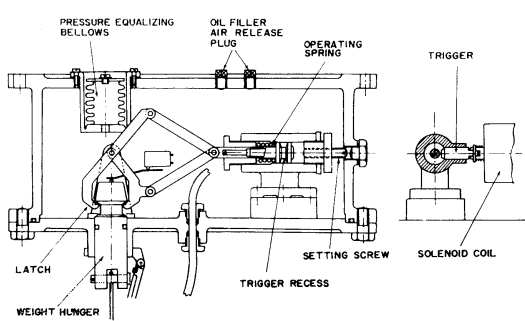
1) 試作繫留方式 前述の水中ウキ方式を使用する前に浮き上り方式を試作した。その一つの方式は最大重量450kgの試料を最長期間200日、最大深度2,000mの海底に設置し、時限装置により設定された期間後自動的におもりをはずして浮上させようとするものである。浮き上りウキの浮力材は約2,750lのガソリンで、タンクの重量を差し引いて約780kgの浮力が得られる。第3、4図はその解放装置を示したもので、沈下用おもりをひっかけているリンクと爪のしくみは、作動ばねが縮んだ



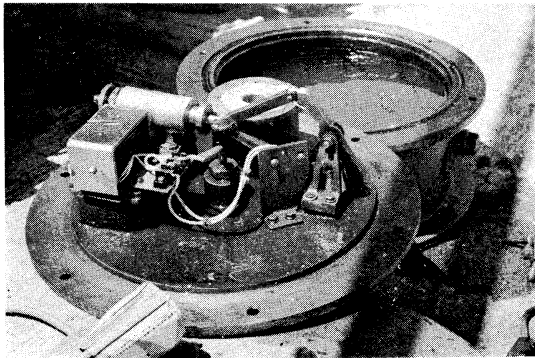
THE MOORING SYSTEM FOR MEASURING DEEP-SEA BOTTOM CURRENT

第2図 底層流測定に用いている浮標付き水中ウキ方式。

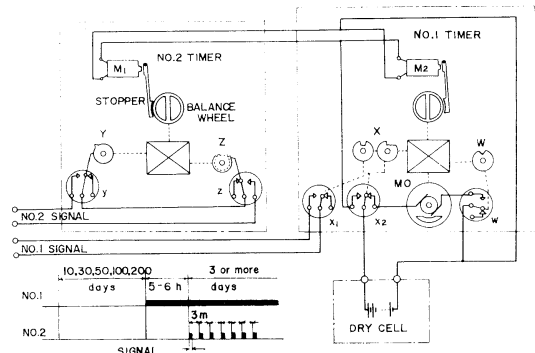
ウキの浮力は約60kgで、これを長さ900mの12mmナイロンロープで水面下約100mに位置するように設



第3図 浮き上り方式の解放装置。



第4図 浮き上り方式の解放装置。

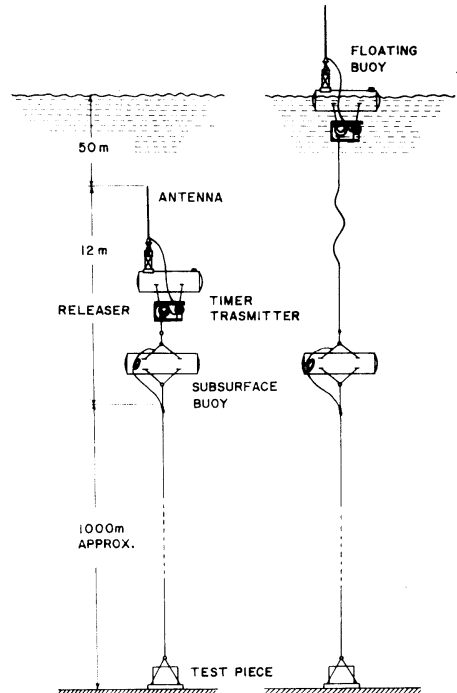


第5図 時限装置回路図と信号電流の形式。

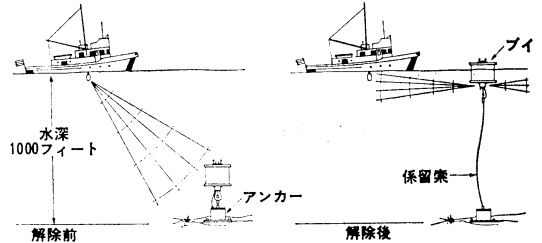
状態でトリガーが止められている。時限装置からの信号電流でソレノイドコイルの鉄心が吸引されてトリガーがはずれると作動ばねで爪が開きおもりがはずれる。

時限装置はあらかじめ設定された時間（最大200日）が経過すると解放装置のコイルに送る信号電流と、5~6時間経過してから短波送信機1分作動、2分休止のリレー用電流を送る。第5図に示すような時計、カム、スイッチ、電源、モーターを含む回路である。

陸上における作動試験を繰り返した後、水深50mにおいて1時間設定の沈下、浮上試験を行なって目的通り



第6図 ロープを繰り出す浮き上り方式

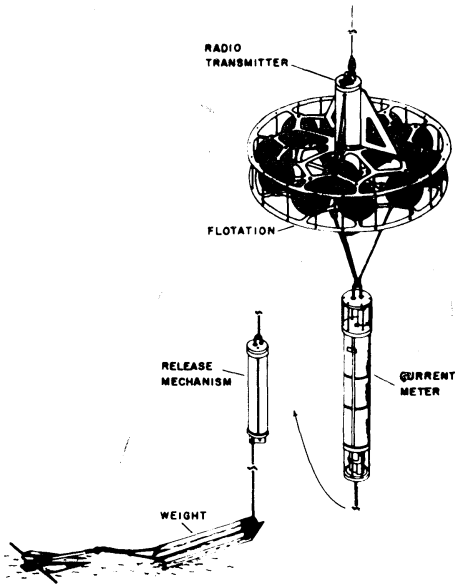


自動浮上式マーキング・ブイ・システム ARB

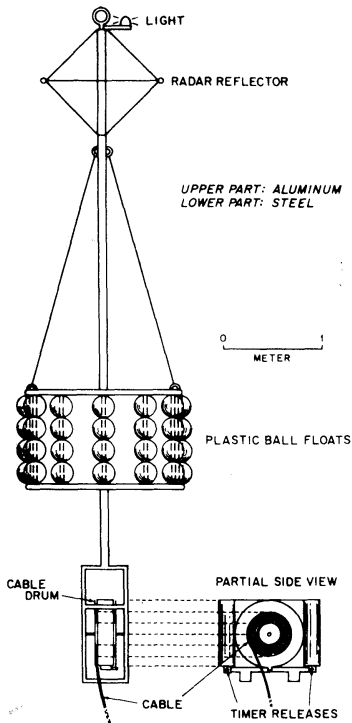
第7図 ハネウエル社の音響信号解放浮き上り方式。の作動を確認したが、その後水深1,000mの実験では装置を失った。

次に第6図に示すようなロープを繰り出して水中ウキを浮上させる方式を試作した。水中ウキは繫留用ワイヤロープを支えるウキと時限解放装置によりロープを繰り出して浮上する浮き上りウキより成る。後者には時限装置、解放装置、短波送信機、電源、繰り出しロープを巻いたドラムなどを載せている。さきの浮き上り方式と同様、浅海の予備試験ではうまく作動したが、本実験では浮上予定日に台風が通過し、3日後に捜索したが発見できず、時限装置による浮き上り方式の最大の欠点を体験した。

2) ハネウエル社の音響信号解放浮き上り方式<sup>4)</sup> 第7図に示したこの方式のおもな目的は、海底のボーリン

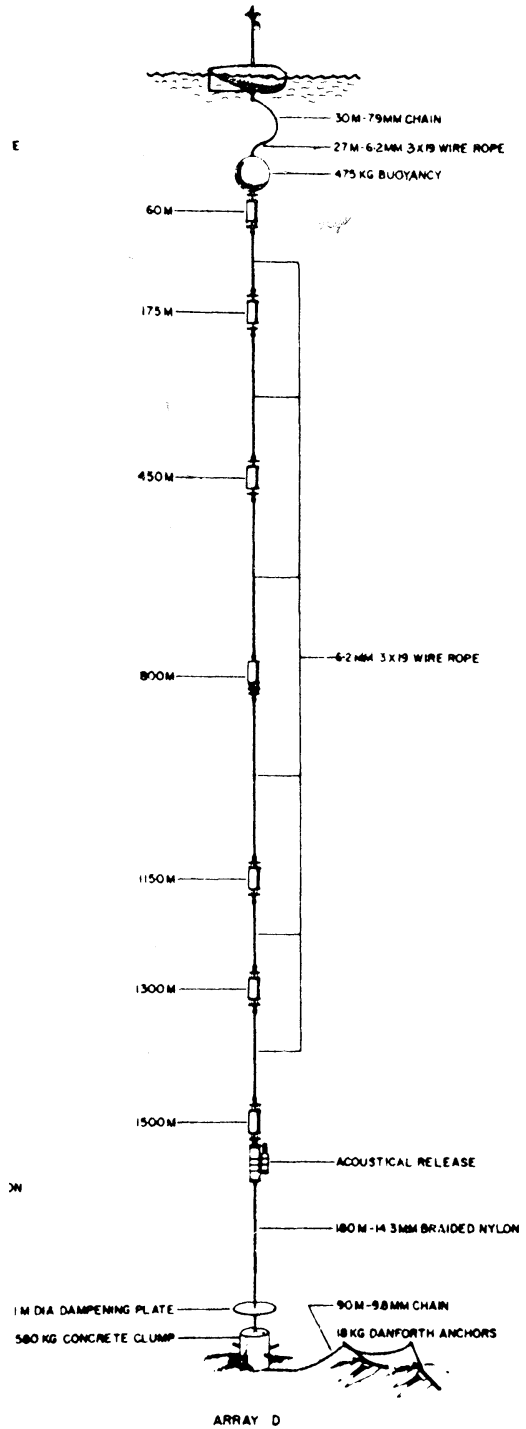


第8図 J. A. KNAUSS の浮き上り方式。



SUBSURFACE BUOY WITH A RADAR REFLECTOR AND TWO TIMER RELEASES CONTROLLING A CABLE DRUM. WHILE THE SUBSURFACE FLOAT IS RISING, THE CABLE IS REELED OFF THE DRUM.

第9図 Gerold SIEDLER の浮き上り方式。



第10図 US Naval Oceanographic Office の繋留装置。

グロの位置の再発見など海洋開発用であるが、海底に設置する観測機器にも利用できる。66コードの浮上命令信号を船から送り、解放するとキャニスターからロープを繰り出してウキは海面に浮上する。ウキより超音波信号を放射し、送受信機、送受波器、増幅器から成る船上の追尾機シーキャンナーでウキから放射される超音波信号を感知しつつ接近してウキを発見する。

3) J. A. KNAUSS の浮き上り方式 第8図は Geodyne 社のガラス球ウキと時限解放装置を流速計に取り付けて底層流測定に使用した浮き上り方式である。この解放装置は140日以内の設定された時間が経過すると、火薬を発火させて解放する方式である。

4) Gerold SIEDLER の浮き上り方式<sup>5)</sup> 1967年ドイツの Meteor 号による東大西洋の海山調査において用いられた繫留装置はポルトガル Vincete 岬西方の水深2,450 m の地点に設置された。浮き上り装置は第9図に示すように水深300 m 以内に位置する水中ウキに時限解放装置と300 m のロープを巻いたドラムを付けており、われわれの試作第2号機と同様の方式である。

繫留装置はラジオビーコン付き水面ウキと水中ウキを組み合わせた1列と前記浮き上りウキ、計測機、水中ウキを接続した1列を、海底を横にはわせたロープで接続する方式である。

5) US Naval Oceanographic Office の水面浮標、浮き上り方式<sup>6)</sup> 北大西洋の南西水深5,000~6,000 m の海域において1964~1966年に亘って行なった繫留装置のうちの一つを第10図に示す。設置はウキを始めにしている方式を採り、最後に投入したおもりと錨の早過ぎる沈降をおさえるために直径1 m の抵抗板を付けている。回収に際して海底固定具を切り離すために Ocean Research Equipment 製の 210BT 型音響命令信号による解放装置が付けられているが、この他の繫留装置には時限解放装置が付けられた。これは同じ解放装置2個の内いずれが作動しても鎖がはずれるようにして失敗を防止している。しかし、時限解放は天候海況に無関係に作動する欠点があり、この繫留装置も解放当日はハリケーンが来襲し、3日後ようやく現場付近を捜索したが、装置は水深1,240 m の海域まで漂流して装置の下部が海底にひっかかって止まっていた。

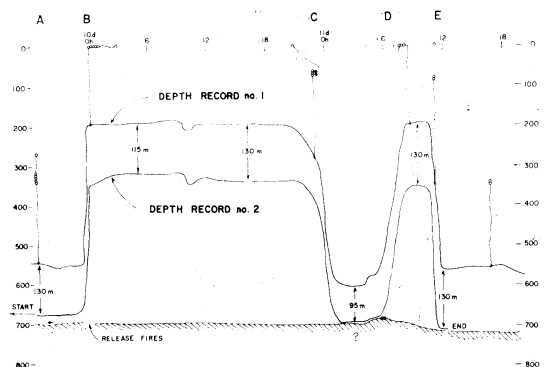
#### 4. 音響命令信号による解放装置の信頼度<sup>7)</sup>

解放装置は、浮き上り方式には不可欠の装置であるが水面ウキ方式でも水深数千mに達する海域の流速、温度その他の垂直分布を測定するために短かいロープ、大浮

力の水面ウキ、重量と把握力の大きな海底固定具を使用した繫留方式には、海底固定具を切り離して回収を容易にするため解放装置が用いられる場合もある。

時計あるいは金属の腐食により設定時間が経過すれば作動する解放装置は前述の例のように、海況によっては回収作業を解放直後に行なうことができず流失することがある。それで命令信号による解放装置が確立されればこれが最も望ましい方式となるであろう。アメリカでは Ocean Research Equipment Corp. (ORE) の他数社の製品が入手できるが、これらの装置の信頼度はどの程度であろうか。その機構に差はあっても、基本的な必要条件是命令信号による確実な作動と命令信号がない場合にトリガーをはずしてしまう不確実な感受性の二つである。Woods Hole 海洋研究所 R. H. HEINMILLER による音響解放方式に関する報告の中に第1表および第11図に示すようなデータがある。

ORE 社の解放装置の命令信号は搬送周波数、変調周波数、信号持続時間の要素から成り、この信号によってフラッシュユニットの如き大電流を起動させ、火薬に点火して装置は解放される。実際に大洋において予備的に使用した34の繫留装置の解放作動状態は第1表に示すとおりで、23は命令通りに作動したが、11は解放しなかった。Stns. 195, 231は時限装置による解放、Stns. 214, 216は不当な大きさのつり環のため機械的には失敗したが火薬は命令により発火、Stns. 254, 258a, MIT はピストン“O”リングの反転故障はあったが命令により発火し音響信号による作動はうまく行っている。しかしStns. 234, 235は音響ビーコンにより繫留は完全であったことが確認されており、その損失は解放作動の失敗が原因である。また Stns. 193, 251, 252b, 258bは音響信号による解放に失敗し時限解放装置でようやく回収している。Stn. 255は何回も信号を送った後に解放、Stn. 257は船



第11図 命令前に解放されて漂流した繫留装置。

第1表 Woods Hole 海洋研究所で設置した34の繫留装置の解放装置の作動成績。

Station #	Location	Days at sea	Surface or subsurface	Release #	Response		Notes
					Command	Timer	
179	D	27	SS	13	yes	—	
183	D	2	SS	17	yes	—	
184	D	56	SS	17	yes	—	
189	D	56	SS	17	yes	—	
192	D	43	SS	16	yes	—	
193	D	139	S	28	no	yes	
195	J	77	S	28	—	yes	
201	D	32	S	32	yes	—	
203	D	67	SS	32	yes	—	
205	H	44	SS	30	yes	—	
208	D	2	S	40	yes	—	
210	D	38	S	30	yes	—	
212	D	61	SS	43	yes	—	
214	D	2	S	49	yes	—	Release fitted with wrong sling rings
216	D	2	S	47	yes	—	” ” ” ” ” ” ”
220	D	59	S	47	yes	—	
231	D	1	S	49	—	yes	
234	G	55	SS	17	no	—	Beacon signal indicates mooring intact
235	H	(lost) 54	SS	71	no	—	” ” ” ” ” ” ”
239	SS1	(lost) 50	S	69	yes	—	
242	D	50	S	69	yes	—	
243	D	51	SS	72	yes	—	
244	SS3	9	S	49	yes	—	
246	H	51	SS	77	no	no	
249	D	8	SS	47	yes	—	
250	D	8	SS	78	yes	—	
251	D	8	SS	79	no	yes	
252	D	8	SS	81	no	no	(Two releases on mooring)
				82	no	yes	
254	D	7	SS	79	no	no	Piston o-rings reversed
255	D	1	SS	82	yes	—	Took numerous tries to fire
257	Gulf of Maine	1	S	80	yes	—	Refused to fire until hauled up just under ship
258	D	1	S	80	no	no	(Two releases on moorings)
				82	no	yes	O-rings reversed
M.I.T. “Anchor Drop Exp. #1”					no	—	O-rings reversed
M.I.T. “Anchor Drop Exp. #2”					yes	—	O-rings reversed

のそばまで引き上げてやっと解放した。

次に命令を出す前に何かの原因で解放してしまった例としては、1967年デンマーク海峡に設置した水中ウキ方式があり、第11図は後にドラグによって回収した繫留装置の深度計の記録から漂流の状態を示したものである。図のAは設置状態を示し、鉄製の球形ウキは6個、上下の深度計の間隔は130mである。Bは何かの原因で解放装置が作動してウキは水面まで浮上した。4日間経過後Cにおいてウキ1個流失、2個浸水のため繫留装置は

沈み、下部深度計は海底に達したが上部深度計は95m上方にあることを示す。Dにおいてウキは水面まで浮上したが、これは浸水したウキが流失したためである。Eはウキが1個流失したため繫留装置は沈み、下部深度計は間もなく記録を終っている。この装置がドラグにより回収されたとき、付いていた2個のウキには打傷がひどく、流失したウキはこの海域に多いパックアイスによるものであり、その雑音が解放装置を作動させた可能性が強い。



音響命令信号解放装置には以上の例のように不良あるいは不確実な要素を多く含んでいることがわかったので、その後メーカーからも技術者が参加して Woods Hole 海洋研究所では、積算時間、発信位置など信号の条件を変えて大がかりな試験を行なった。はじめに浮き上り方式の利点をあげたが、それは信頼度と安全保障に懸念のない解放装置が完成されたときに言えることである。

文 献

- 1) 佐々木忠義, 渡辺精一 (1966): 深海底層流の測定について (II). 「うみ」, 4(1), 48-58.
- 2) 佐々木忠義, 渡辺精一 (1967): 深海底層流の連続測定について「うみ」, 5(1), 67-75.
- 3) J. A. KNAUSS (1965): A technique for measuring deep ocean currents close to the bottom with an unattached current meter and some preliminary reports. Jour. Mar. Res., 23(3), 237-245.
- 4) 渡辺 徹 (1968): 海洋開発用自動制御機器「海洋開発」, 1(1), 123-135.
- 5) Gerold SIEDLER (1967): Mooring systems used in the Western Atlantic. Transactions 2nd International Buoy Technology Symposium, 77-83.
- 6) Louis A. BANCHERO (1967): Deep ocean mooring of temperature and current measuring systems. *ibid*, 37-55.
- 7) R. H. HEIMMILLER (1968): Acoustic Release Systems. Woods Hole Oceanographic Institution Reference No. 68-48, 1-19.

### 3. 浮き上り方式について

安 井 正\*

#### Récupération par déclencheur

Masashi YASUI

深海において海洋測器を繫留する方法として、海面に標識としてのブイを置くか否かによって二つの方式が考えられる。このうち、ブイを置かない方法を総称して“浮きあがり方式”と呼ぶこととする。このどちらを使用するかについては目的による。たとえば観測資料を real time で陸上の基地乃至センターへ送りこもうという現業的用法の場合には、ブイ方式によらざるを得ないが、次に両方式のそれ以外の利害得失について記しておく。

	ブイ方式	浮きあがり方式
利	(1) 測器の位置を常に眼で確認しておれるので安心感がある。	(1) 眼に見えるところに何もなければ、他人の好奇心をひかず、盗難のおそれが少ない。
点	(2) Primitive な部品のみで繫留を行ない得る。	(2) 表面海流や風の影響を受けず、流失の危険が少ない。 (3) 設置・回収に労力少なくまた特殊操船の技術を要しない。

	ブイ方式	浮きあがり方式
欠	(1) ブイが眼につくため、他人の好奇心をひき盗難にあいやすい。	(1) 測器の位置を確認できず不安感が大きい。(Acoustic transponder を取り付けることにより常時確認は可能)。
点	(2) 表面海流や風の影響を受け、流失の危険が大きい。	(2) 繫留に要する部品として、複雑な機構のものを要する。
	(3) 設置・回収に労力大きく、特殊な操船技術を要する。	(3) 船位を正確に決定する必要がある。

要するにブイ方式と浮きあがり方式とは、利害が相反することになる。

このような討論をする場合に一番問題になるのは回収率であるが、これに関する限りアメリカの例では、圧倒的に浮きあがり方式の方が良い。すなわち、浮きあがり方式の回収率は 75% と言われているのに対し、ブイ方式では 45% にすぎないと言われている (BRADNER 氏の私信による)。筆者の経験によれば、ラモント地質研

\* 舞鶴海洋気象台 現在は気象大学校 Maizuru Marine Observatory, present address: Meteorological College

究所の観測船 R. D. コンラッド号においては、ピストンコアによる採泥作業中に一種の浮きあがり方式により、海底表層堆積物を獲みとったり、海底写真をとったりしているが、76回沈めて回収に失敗したのは1例にすぎず、その1例も予防可能な原因によるものであった。

この方式による場合の必要部品は、(1) 浮力体、(2) 錘切りはなし装置、(3) 位置確認装置、(4) 位置通報装置、(5) 方位発見装置などが必要である。

浮力体は一番問題が多いが、今のところガラス球、アルミ球が使われるが、さらに、水深の深いところで使用する場合には、ガソリンを充満させたポリエチレン瓶や合成ゴム製気球などが用いられている。

錘切りはなし装置としては、あらかじめ定めた符号の超音波信号を観測船から発射して切りはなし装置 (Acoustic release)、内蔵した時計によりあらかじめ設定された時間経過後に切りはなし装置、あらかじめ実験的に定められた太さの Mg の棒の海水中での腐食を利用して一定時間後に切りはなし装置 (Electro chemical timer)、食塩の塊を錘として使用しその溶解により自動的に自重が減ずる方法の四法が利用されており、実際には安全のためこれらを全部または二、三種併用している。

位置確認装置は必ずしも必要ではないが、標識が直接眼で見えないことに起因する不安感を取り除くために、繫留した測器に超音波の発信器または応答発信器を取りつけて、表面で聴取し安心感を高めるのに利用される。

位置通報装置としては、浮上後の測器の位置を搜索船に知らせるための無線電波発信器 (Radio beacon transmitter) とストロボフラッシュ (Xenon flasher) が利用されている。

方位発見装置としては、浮上測器に取り付けられた無線電波発信器の波長がある程度長い場合にはいわゆる方探 (Beam direction finder) が、また波長が短く方探が有効でない場合には位相型方探 (Pulse beacon direction finder) が用いられている。

これらを利用して、アメリカにおいては real time の

観測を必要としない研究用の中層流流測計、海底地震計、海底地磁気計、地電流計からさらに海底カメラ、濁度計にいたるまで浮きあがり方式により深海に繫留観測されている。

以上にあげた必要部品については、M. T. S. Bulletin, Ocean Engineering, Under Sea Technology 等といった雑誌にたくさん広告が出ており、O. R. E., E. M. I., Prodeline 等の会社が競って標準品を製作販売しており今からでも浮きあがり方式を行なうことは可能である。今後研究用の real time でなくてよい繫留には、この方法によるべきであると考えられる。

往々にしてわが国においては、外国において既に標準品として市販されているものの試作実用化に著しい勢力が割愛されてしまって、肝心の新しい着想の開発とか目的とする資料の集積とかといった面がややもすると疎になる傾向がなきにしもあらずである。この点については大いに心すべきものと思う。

## 文 献

一般的なものとして

SCHICK, G. B., J. D. ISAACS and M. H. SESSIONS (1968): Autonomous instruments in oceanographic research. Trans. 4th Nat. I. S. A. Marine Sc. Inst. Symp., held at Cocoa Beach, Florida, U.S.A., in Jan. 21-24, 1968.

SILVERSTEIN, A. and F. G. SALTON (1964): Automatic Instrumented diving assembly. Trans. 1964 Buoy Tech. Symp., held at Washington, D.C., in Mar. 24-25, 1964.

特殊なものについて

VAN DORN, W. G. (1953): The marine release-delay timer. Oceanogr. Equipment Rep., No. 2, SIO ref. 53-23.

EZELL, G. D. (1967): Historical review of the development of a deep sea ocean bottom seismograph system. Trans. 3rd Ann. MTS Conf., held at San Diego, in June 5-7, 1967.

## 4. 外国の例

高野 健 三\*

### Historique à Woods Hole

Kenzo TAKANO

Woods Hole 海洋研究所が1960年にサボニアス流速計の製作に着手してから、流速計などの繫留法についていろいろな研究が続けられてきた。繫留ロープが切れて流れた場合、原因がわからないままに終るのがふつうであるが、漂流中の一部が運よく拾ひあげられることもあり、原因究明の貴重な資料となる。

金属のロープには三つの大きな弱味、疲労、電蝕、よぢれがある。電蝕はロープ全体をプラスチックで包んでしまへば（端末の処理に多少問題はあがるが）防げる。よぢれのエネルギーがロープになるべく貯へられないやうに工夫することはできるが、よぢれを完全に抑へることは無理である。流れや波によって大小の荷重がロープに繰り返し加へられ、疲労する。1965年来の回収率は繫留期間が2週間以内ならばほぼ100%であるが、2週間でこえると急に悪くなる。疲労を小さくする工夫がない限り、繫留期間は2週間でこえないことが望ましい。

合成繊維のロープにはこれらの弱味はないが、魚にかみ切られやすい。主水温躍層の深さまで、あるひは少なくとも200mまでは金属のロープを使ふことが、魚の害を防ぐ点からだけ見れば望ましい。

さらによい方法は、浮きを海面に浮かべないで、水中浮きを海面下数10mから200~300mに沈め、海底近くにはおもり切りはなし装置をつけておくことである。測

定終了後、おもりを切りはなしして浮上させ、回収する。この方法は魚の害や盗難を防ぐのに役立つが、測定そのものの質を高めるのにも大いに役立つ。深さが増すと流れや波の力が小さくなるため、水中浮きの動きが小さくなる。そこで、下に吊下げられてゐる計測器の動きも小さくなるからである。

合成繊維のロープは複雑な弾性りれきを示す。使用中にいろいろな力を受けて、伸びちぢみがおきるが、元の長さに戻らないため、次第に長くなってゆく傾向がある。そのため、特に海面に浮きを出しておく方式では、浮きの水平方向の運動が容易になり、よい記録が得られなくなる。さういふわけで、伸びの大きいポリプロピレンは深海繫留には使はない方がよい。

ガラス繊維のロープは性能ではナイロンロープにまさるやうであるが、値段が高すぎる。

記録張力計を使用して、張力、風速、流速の間にどういふ関係があるのか調べられた。浮きを最初に海面に放出し、いかりやおもりを最後に海中に投下する方式をとってゐるので、いかりやおもりが海底につく直前に張力は最大となることが多い。

ロープが切れた場合に張力計が回収された例は少ないが、ロープ（鉄、合成繊維）の最大破断張力よりもずっと小さな張力で切れてゐる。最大破断張力よりも50%も大きい張力がかかって切れなかった例もある。

シャックルやスィヴルについてもいろいろな試験が行はれた。

\* 東京大学海洋研究所 現在は理化学研究所 Ocean Research Institute, University of Tokyo  
Present address: The Institute of Physical and Chemical Research

## 5. アンカード・ブイ方式海底地震計の設置作業 (計画と準備)

佐藤 孫七\* 小林 平八郎\*

### Observation séismique par la bouée mouillée (plan et préparatoire)

Magoshichi SATO et Heihachiro KOBAYASHI

海上保安庁水路部測量船「明洋」及び東海大学調査船「東海大学丸Ⅱ世」で、東京大学地震研究所の海底地震計の設置及び回収作業を行なって来た。作業を行なうためのムアリング設置計画及びこれに付随する準備について報告する。

海底地震観測のためのブイをムアリングするには、OBS (海底地震計) 本体の形状、設置海域、海底の状態、治安状況、作業船の能力、設置期間、ムアリングの目的等を十二分に調査し、これらの情報を十分に生かして、作業計画を作成する。実作業に当っては、設置作業員に周知徹底させる。

ムアリングロープ; 海の深さ、潮流の強弱により索の長さが決められ、OBS 本体、錨、チェーン、ワイヤー等の海水中の総重量の 6~7 倍の破断強度を持つロープ径とした。ロープの種類は、経年変化の少ないもの、屈曲に対し強度低下のないもの、海藻、貝等の付着が少なく、又これら付着に依り化学変化をロープが受けない、キンクが起きない、伸張残存強度のあるロープを選び使用した。

錨; ムアリングアンカーとして、唐人アンカーを用いた。岩礁などにからまっても、はずせるような装置を付けた。錨の把駐力は、底質により異なるが、錨の重さの

3倍~7倍として使用した。

浮標; 表面主ブイ、補助ブイ、ラジオブイを使用した。主ブイには、ムアリングロープよりの荷重を上回る浮力を持ち、ブイが半分に破壊されて、漏水しても、浮力がなくならない、堅固で軽い、とり扱いやすい、流体抵抗の少ない、洋上で安定性がある、ブイ自体の回転があまり生じない、海水、空の色と判別しやすい色、夜も視認出来る、レーダー、方向探知機等で存在が確認出来るものを使用した。このブイの総重量 70 kg 程度、浮力 1,000 kg のものを使用した。ブイには設置機関名及び観測期間、設置目的を記入した。

設置作業員はその作業員の経験と能力によって作業配置を決定し、作業員には機動性を持たせるために、作業進行程を図及び説明文を付け、設置期日より十分前に手わたし、作業内容を周知徹底させた。

作業中の応急対策具として、ストッパー、ハンマー、スパナ、スナッチブロック、雑索など十分用意した。

OBS 設置位置には、ロラン、レーダー、方向探知器、六分儀、時刻儀、測深儀、海図を用い、OBS 本体の設置位置と、ブイの設標位置を測定した。

ブイを設置するに当り、水路通報を海上保安庁に依頼し、設置海域の漁業組合に、ブイ設置の目的、期間、位置及びブイの形状を記入したポスターを送付した。

\* 東海大学海洋学部 The College of Marine Science and Technology, Tokai University



のもので破断力が6~8トンある。この合成繊維ロープを使用するにあたって最も注意しなければならないのは両端のアイを作った場合のシンプルは絶対、金属製のハート型シンプルを使用してはならないことで、この実験にはナイロン製の円形シンプルを特注して使用した。また、ワイヤー・ロープに近いナイロン・ロープの50m位は比重を1.5以上に増すために鉛のチップを編みこんだものを使用して、ブイの上下運動に追従しやすくし、シーブルなどに絡みつくのを予防した。また、合成繊維ロープの接合は必ずスプライス接合をする。シャックル類はBB型のものが良い。

次に実際に繫留作業を行なう順序を列記してみよう。

(1) アンカー(ダンフォース型のものが良いがストックレス・アンカーでも良い)、チェーン(スタット付)、コンクリート・ブロックを接続して外舷に沿って簡単にロープで固縛しておく。(2) パイレン・ロープ(比重0.91)、ナイロン・ロープ(比重1.14)の順に絡まないように整理してデッキにならべる。(3) ナイロン・ロープ、シーブル、ワイヤー、チェーンの順に接続し、チェーンの上端はBB型の大型シャックルにより、ブイの下端のアイ

に接続する。水温計ケーブルはチェーンに沿わせて余裕をもって取り付け。 (4) 以上の準備が完了したならばブイを母船より海面に降し、内火艇で曳行して母船より離す。(5) 母船から離れるにしたがってチェーン、ワイヤー、ナイロン・ロープ、パイレン・ロープの順に繰り出す。(6) 大体300~400mブイが母船から離れたら、母船は微速で前進し、潮上に向かう。この間、ロープは順々に繰り出し、最後にチェーン、アンカーを固縛していたロープを切断して海中に投下する。アンカーが沈下中、ブイはゆっくり投下点に近寄ってくる。また、パイレン・ロープは海面に浮んでいるので良く沈下の模様がわかる。ブイが静止した時がアンカーが着底した時である。この模様は内火艇から良く観察できる。

以上でブイの繫留の一例を示したが、まだまだ未知の要素があり、完全とは言えない。実験を繰り返して最良の方法をみつきたい。また、海域が異なれば使用するロープの種類や方法も異なることであろう。このためには海況の観測や変動についても前もって調査しておく必要がある。

## 7. 自動観測用ブイの繫留について

岩 佐 欽 司\*

### Mouillage d'une bouée pour la mesure automatique

Kinji IWASA

#### 1. ま え が き

最近、内外の各方面で海洋の開発、利用がとりあげられるようになり、海洋の観測データを収集、解析して公表する必要性が生じてきた。従来の観測船、船艇および航空機などによる観測は観測期間中における移動体によるものであって、海上の気象や海象のような時間的変化の著しい現象を連続して的確に把握できないばかりでなく、多くの人員と経費を必要とする。

そこで総合的かつ系統的な海洋の情報収集のために自動観測用ブイが必要となり、関係各機関において研究、

開発、実用化が進められている。

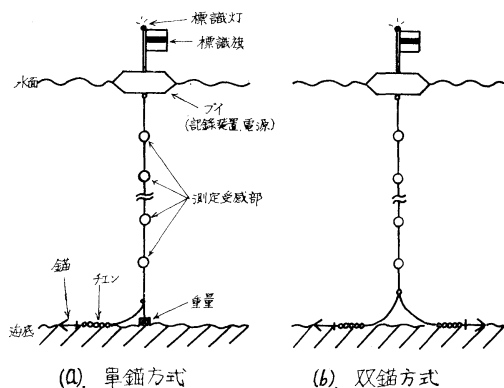
海上保安庁水路部では以上の見地から海象観測用の各種のブイを開発し、実用に供しているもので、これらのブイの繫留によってえられた繫留方式、繫留に使用する錨ならびに繫止索などについてその概要を以下簡単に述べ、大型化すると予想される自動観測用ブイの繫留のための参考とした。

#### 2. 繫留方式について

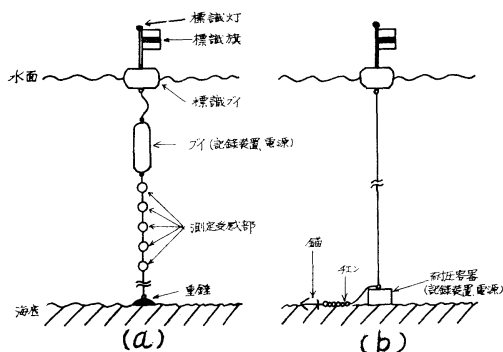
一般に自動観測用ブイの繫留方式は、大別してSlack-wireシステム、Taut-wireシステム、海底繫留方式、自由落下、自己浮上方式の四つに分けて考えられる。

Slack-wireシステムとは第1図(a)に示してあるよう

\* 海上保安庁水路部 Hydrographic Division, Maritime Safety Agency



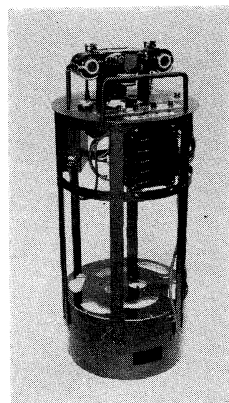
第1図 Slack-wire システム。



第2図 (a) Taut-wire システム, (b) 海底錨留方式。

に錨、チェーン、重錘、ロープ、ワイヤーなどを使用して海面に浮上しているブイを錨留する方式で、浮上しているブイの中に記録装置、電源などが内蔵してあり、錨留に使用しているロープ、ワイヤーに沿って測定受感部が取り付けられているものである。この方式は海面にブイが浮上しているため波浪による動揺や海潮流、風の影響によるブイの振れ回りなどが考えられるが、錨留方式が簡単なため多くのブイの錨留に使用されている。第1図(a)に示してあるものは単錨方式であって、自記観測器による海潮流観測の場合を例にとると、観測期間が短期で最大流速5ノット以下の海域ではこの方式が、観測期間が長期で最大流速5ノット以上の海域では第1図(b)に示してある双錨方式が望ましい。この錨留方式には海潮流観測用のブイ、無線によるテレメータリング<sup>4)2)</sup>を利用したブイ、記録式のブイ<sup>3)</sup>などがある。

Taut-wire システムとは第2図(a)に示してあるように重錘または特殊錨、ロープ、ワイヤーなどを使用して記録装置、電源などを内蔵したブイを水中に錨留し、水面には小型の標識ブイを浮上させる方式であり、錨留に使用しているロープ、ワイヤーに沿って測定受感部が取



第3図 記録式水温ブイ記録装置。

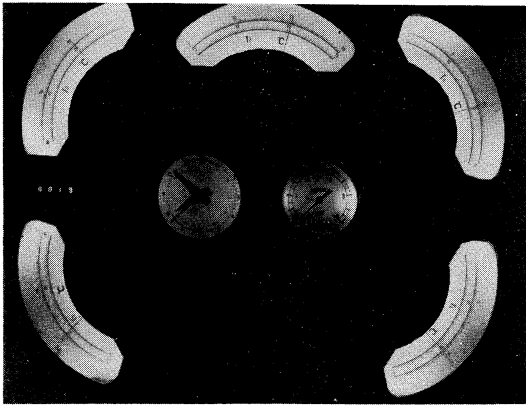
付けてある。この方式はブイを海面下50m位まで沈めれば、波浪による動揺はほとんどなくなり内蔵した記録装置などは非常に安定する。しかし、海潮流による流体抵抗のためブイの定置水深が変化することがあるので、ブイの中で水深を測定する必要がある。

この錨留方式のブイは、海上保安庁水路部が開発し八丈島、三宅島の水深100mおよび200mの地点に錨留してある、各層の水温を連続観測する多層水温連続観測装置<sup>4)5)</sup>や水深300mの地点において海面下50mにブイを錨留し水深の異なる5層(海面下50, 100, 150, 200, 250m)の水温をブイの中に内蔵してあるカメラで連続撮影記録する記録式水温ブイ<sup>6)</sup>などがある。第3図に記録式水温ブイの記録装置を、第4図にその記録例を示してある。

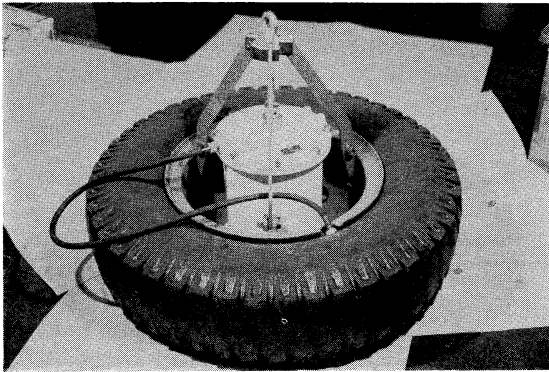
海底錨留方式とは第2図(b)に示してあるように記録装置、電源などを内蔵した耐圧容器をロープ、ワイヤーを使用して海底まで降下させて定置し、ロープ、ワイヤーは一度錨およびチェーンを取ってから海面に浮上している標識ブイに連結する方式であり主として海底上の観測に使用される。

この錨留方式には海洋中の潮汐を観測する目的で開発した水深150mの地点に錨留する海中観潮器<sup>7)</sup>や海底地震計などがある。しかし、この方式は海底地形などによっては耐圧容器が水平にならないなどの欠点がある。第5図に海中観潮器の外観を示してある。

自由落下、自己浮上方式とは記録装置、電源などを内蔵した耐圧容器を重錘を取り付けて船上から海中に投下し、自由落下で海底に錨留するものである。この方式の回収は、マグネシウムスイッチあるいは時間スイッチで重錘を切り放す方法や船からの超音波を受信、解読して重錘を切り放す方法があり、いずれも切り放し後容器の



第4図 記録式水温ブイ記録例。



第5図 海中験潮器。

浮力によって浮上させて行なうものである。

この方式は海底地震計などの繫留に使用されているが、回収率が100%とは言えないので、わが国においての実用例は少ない。

### 3. 繫留に使用する錨について

一般に錨には古代の四爪錨から多くの種類があるが、現在では無かん錨 (Stockless anchor) と有かん錨 (Stock anchor または Common anchor) の2種類がある。有かん錨は古代から使用された型で、錨のききは良好であるが、少し大型になれば取扱いが面倒で、格納するのも不便なため大型錨はほとんど無かん錨である。無かん錨の錨のききは有かん錨に及ばないから、無かん錨は有かん錨より約25%重いものが要求される。材質は有かん錨では普通鍛鋼製、無かん錨では鋳鋼製であるが無かん錨の錨幹 (Shank) だけは鍛鋼製のことが多い。

海中に錨を投入すれば、その錨冠 (Crown) はまず海底に達して錨幹が倒れ、有かん錨では錨かん (Stock) の一端が海底に接しかつ錨爪 (Bill または pea) が海底をかく

状態となり、また無かん錨では錨掌 (Fluke または palm) が海底に横たわり同じく海底にかき込む状態となる。一般に錨が海底をかく力を把駐力 (Holding power) と言って、錨の重さが定まっていれば、海底の底質によって左右されるものである。今海中に投げられた錨の把駐力を  $P$ 、海中における錨の重さを  $W$ 、錨の把駐係数を  $\lambda$  とすれば次式がえられる。

$$P = \lambda W$$

ここで  $\lambda$  は実験によってえられるもので海底の底質によって第1表<sup>7)</sup>のように見てさしつかえない。

第1表

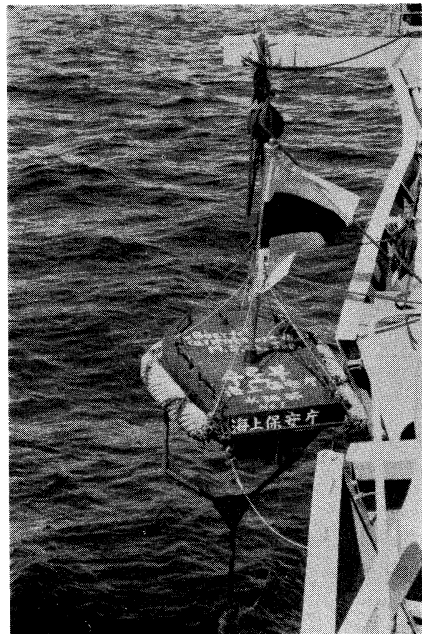
把駐係数	底質						
	軟泥	硬泥	砂泥	砂	貝砂	砂礫	平岩
$\lambda$	10	9	8	7	7	0	5

錨の把駐力は海底において索にかかる張力より常に大きいことが必要である。今索の一点にかかる張力を  $T$  とし、勾配角  $\theta$  の点における張力と索が水平となる点の張力との相対比を表わす値を  $\alpha$  とすれば、錨の重量の最低限界は

$$W = \frac{\alpha}{\lambda} T$$

で与えられる。この重量に満たない錨を使用する場合に走錨の危険性がある。

海上保安庁水路部で自記験流器による海潮流観測用ブイ (第6図、長さ 1,300 mm、幅 1,000 mm、高さ 405 mm、



第6図 海潮流観測用ブイ。



浮力 400 kg) の繫留に使用している錨は Head Stock anchor で錨の材質は、本体鋳鋼製、錨かん鍛鋼製であり、総重量 31 kg、錨幹を除いた重量 20 kg、錨幹の長さ 0.945 m、錨腕の長さ 0.565 m、耐力試験荷重 0.62 ton である。

4. 繫留索について

繫留に使用する索には、ワイヤーロープ、ロープなどがあるがここではワイヤーロープの性質の概要について述べることにする。

一般に海中におけるワイヤー類の形状および状態を考えるのに必要な主要性質はワイヤーの直径、単位長さの海水中の重さ、切断力の三つである。この直径と海水中の重さおよび切断力の関係について、7本線および19本線6つ撚り麻心入りの例を第2表に示す。

第 2 表

直径 mm	W kg/m	W <sub>b</sub> ton					
		A	B	C	D	E	F
6	0.125	1.63	1.84	2.04	2.23	2.41	
8	0.222	2.90	3.27	3.63	3.96	4.28	4.51
12	0.491	6.53	7.35	8.17	8.90	9.64	10.14

東京製鋼製作 7本線および19本線6つ撚り中心麻入り

W: 水中重量 kg/m

W<sub>b</sub>: 保証切断力 ton

A: ペーテントスチール

B: インブルーブドペーテントスチール

C: マイルドプラウスチール

D: インブルーブドプラウスチール

E: エキストラインブルーブドプラウスチール

F: ハイカーボンスチール

1. キンクについて

ワイヤーは通常撚りの過程によって製造されるが新品の場合はこの撚りのために相当の内部応力があり使用の都度多少減少することは考えられるが、海中に放出されたワイヤーが外力の関係で一部張力がなくなると内部応力のためにループの状態になる可能性が強いと考えなければならない。ワイヤーがこのようにループ状になることを一般にキンクと言う。ループが重複すると糸がからんだようになりこれを解くことは極めて困難であり、ワイヤーは使用に耐えなくなり、このまま張力を加えるとワイヤーの切断力は減少して切断する。従って、ワイヤーの使用に当っては常に全長にわたって張力が加わって

いる状態を保持するようしなければならない。例えば切断力 5.02~4.60 ton の 8 mm ワイヤーはキンクの状態では 3.32 ton で切断した。この結果から見てもキンクの状態では切断力が 60~70% に低下すると推定される。

2. 撚り戻りについて

撚りの過程によって製造されたワイヤーは張力を加えると撚りが戻る。海中に重錘を取り付けたワイヤーを吊下げると、ワイヤーは長さの方向の軸心の回りに回転する。荷重が増加するにつれて回転数も増加するのはこの撚りによるものであり、張力と回転数の関係は製作技術によるので数値関係はないものと考えられる。19本線6つ撚り麻心入り 8 mm ワイヤーで実験した例を第3表に示す。

ただし、ワイヤーの索長は 1,520 mm とした。

第 3 表

引張力 ton	回転数	引張力 ton	回転数
0	0	1.6	7.07
0.2	0.40	1.8	7.27
0.4	1.02	2.0	8.31
0.6	3.10	2.2	9.02
0.8	4.24	2.4	9.03
1.0	5.17	2.6	9.09
1.2	6.00	2.8	9.28
1.4	6.19	3.0	9.30

3. Edge 効果について

ワイヤーの引張りの方向に直角に Knife edge で横圧を加えると通常ワイヤーは Knife edge の圧力点にて切断するが Knife edge の状態や横圧によって引張りの切断力が Knife edge がない場合に比しどの程度減少するかを調べて見ると edge 角度 90° では切断力は約 60% 減少する。

5. あとがき

以上簡単に自動観測用ブイの繫留について述べたが、ブイの繫留には錨、チェーン、ワイヤー、ロープ等を操作する場合が多く、その役割は極めて重要である。

特に海中におけるワイヤー類の形状や状態は極めて複雑であるため、ワイヤー類の切断によりブイを亡失した例は極めて多く、またこれらの取扱い特に切断の際には非常に危険を伴うものであるから、この問題については今後できるだけ追求する所存である。

## 参 考 文 献

- 1) 岩佐欽司: 自動海象観測装置について, 沿岸海洋研究ノート第2巻1号 (1963).
- 2) 岩佐欽司: 自動海象観測装置について, 水路要報第78号.
- 3) 科学技術庁研究調整局, 昭和39年度沿岸海湾の海象に関する総合研究報告書 (1965).  
科学技術庁研究調整局, 昭和40年度沿岸海湾の海象に関する総合研究報告書 (1966).
- 4) 科学技術庁研究調整局, 昭和40年度黒潮共同調査に関する特別研究報告書 (1966).
- 5) 科学技術庁研究調整局, 昭和41年度黒潮共同調査に関する総合研究報告書 (1967).
- 6) 科学技術庁研究調整局, 昭和43年度日本海に関する総合研究報告書 (1969).
- 7) 横田利雄: 船舶運用学 (操船編) (1953).

## 8. 十勝沖および積丹沖における海底地震計の設置方法

坂尻直己\* 田 望\* 堀田 宏\*\*

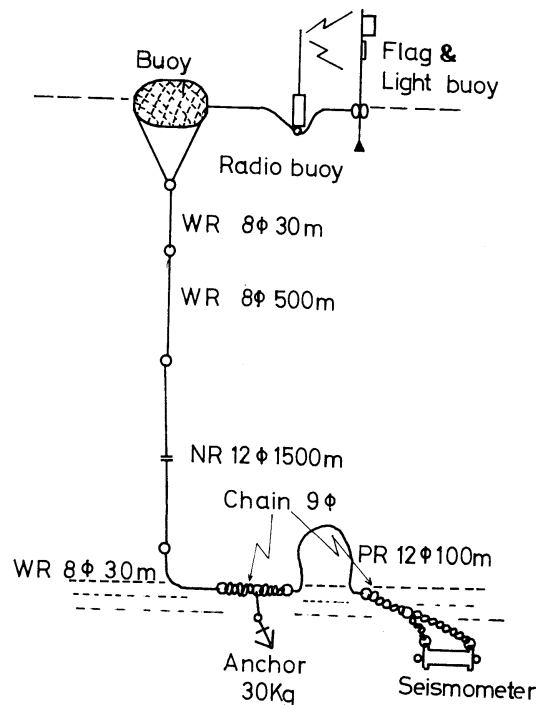
## Installation d'un séismographe au large de Tokachi et de Shakotan

Naomi SAKAZIRI, Nozomu DEN et Hiroshi HOTTA

1969年 UMP(国際地球内部開発計画)による深海地震探査を北海道十勝沖および青森県沖の海域で行なうにあたり, 北海道大学においても海底地震計の試作が計画された。海底地震計は地震探査測線が交差する水深1,500mの位置に設置することを目的とした。さらに地震計を設置, 回収する船はチャーターした捕鯨船を使用するため, 甲板上での作業をできるだけ容易にするように小型・軽量であることが望まれた。これらを考慮して耐圧容器は鉄製の外径 18 cm, 内径 16 cm, 長さ約 90 cm, 重量約 70 kg の円筒形のものを採用した。その中に地震計 (上下動) 一成分, 増幅器, 記録器, 電源等を収めた。地震計, 記録器等を収めた時の総重量は約 85 kg となり密度は約  $4 \text{ g/cm}^3$  である。この海底地震計の大きさ, 重量は甲板上で2名程度によって比較的簡単に取り扱えるものである。

海底地震計を繫留するロープ・ブイ・システムは既に多くの海底地震計を設置している東京大学地震研究所の南雲教授等の助言を得て, ほぼその方式にならった。海底地震計本体が比較的小型・軽量であるため, ロープ・システムも径の細いものを使うことができた (第1図)。メイン・ブイ, ラジオ・ブイ, ライト・ブイの接続は大洋漁業の長田昭二船長等の助言により, 東大地震研究所

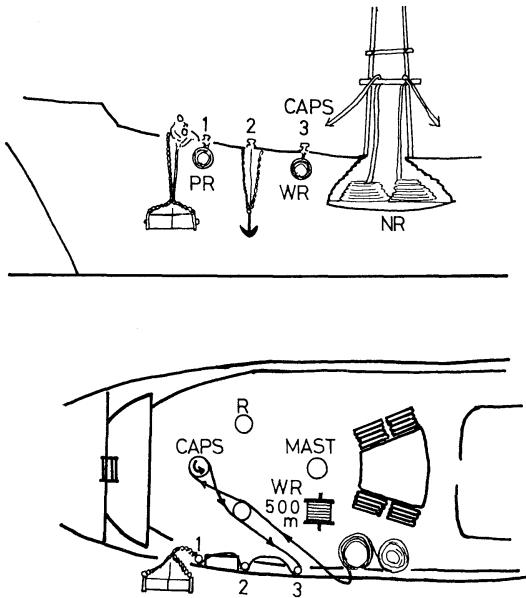
の方式とは多少変えられている。これはラジオ・ブイ送信機の電源がほぼ48時間しかもたないことから観測の途中で電池交換のためいったん船上に揚収しなければならないことと, 設置時の作業を容易にしたいためであった。



第1図 海底地震計の繫留システム。

\* 北海道大学理学部 Faculty of Science, Hokkaido University

\*\* 現在は理化学研究所 Present address: The Institute of Physical and Chemical Research



第2図 海底地震計の作業要領説明図。

1. 12 mm $\phi$  100 m のパイレンロープ
2. アンカーおよびチェーン
3. 8 mm $\phi$  30 mm $\phi$  のワイヤーロープ

海底地震計の設置作業は第2図の様に進められた。海底地震計から1,500 m のナイロン・ロープまではすべてあらかじめ甲板上でシーヴル或いはシャックルで留められ舷側から吊される(第2図)。1,500 m のナイロン・ロープはドラムからはずされ甲板上に輪にして置かれてお

り、その一端はキャプスタンおよびローラーを通した後③のワイヤーロープに接続されている。他端はメイン・ブイ側のワイヤーロープに接続されている。海底地震計本体は2名の甲板員によって捨てロープを使って吊り下げられ水中に下される。その後は海底地震計の自由落下に従って順次①、②、③の吊り紐を切り放した。メイン・ブイ側のワイヤーロープは作業の進行に合わせてドラムからはずされ、50 m 程残っている所でいったん止められる。そこでワイヤーロープはメイン・ブイに接続されメイン・ブイは舷側に吊り下げられる。再びロープが繰り出され、張った時にメイン・ブイを吊っている紐を切り放す。その後、ロープの張りを見ながら順次ラジオ・ブイ、ライト・ブイを放し作業は終了した。作業の所要時間は海底地震計本体が水面に着いた時から約20分であった。作業当時の天候、風向、風力はB. C., 120°, 3であった。設置後約50時間で電池交換のためラジオ・ブイまでを船上に揚収した。ブイの浮き状況は良好であったがメイン・ブイとラジオ・ブイを接続していたナイロン・ロープ(12 mm $\phi$ )はラジオ・ブイの金属部分に当り切断される寸前であった。再び設置した後はすべて良好な状態が保たれていた。

積丹沖では水深116 m の大陸棚上に設置した。この際には12 mm $\phi$  のナイロン・ロープを二重にし400 m として、ワイヤーロープを使用しなかった。作業要領は十勝沖の場合と全く同様であった。

## 9. 海底地震計とブイ・テクノロジー

島村英紀\* 浅田敏\*

### Séismographe à fond océanique et technologie de bouée

Hideki SHIMAMURA et Toshi ASADA

#### 1. 海底地震計の概要

海底地震計は海底面におかれて、海底下からきた地震波をとらえるものである。このため、ブイ・テクノロジーの面からみれば、海底面と“重い結合”をする必要があると同時に、ブイや繋留ロープのゆれは、地震記録に

\* 東京大学理学部 Faculty of Science, University of Tokyo

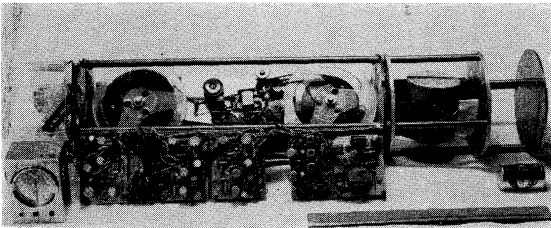
とつての雑音になる可能性がある、という二つの制約をもっている。

従来の海底地震計は大型のもので、重さも大きかった。また、接地の姿勢も制御する必要があった。これらの理由のために、海底地震計の設置・回収は、大型の船にとってさえも大作業であった。

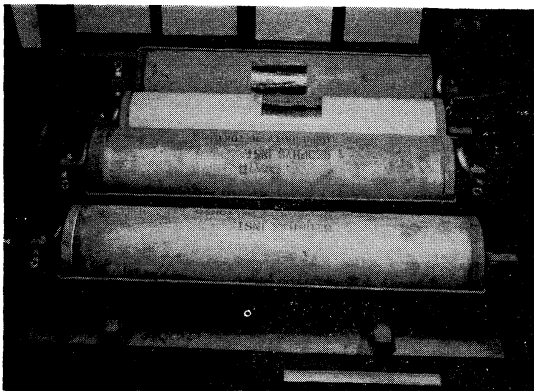
われわれの海底地震計は、いかに軽く、小さく(そし

て安価に) するかという点から設計をはじめた。もし地震計が小型になれば、第一に小さな船で多数個でもあつかえることになるし、また天候や海況などの条件にめぐまれないときでも、観測のチャンスがふえることになる。また第二には、ブイ・テクノロジーの面でも、繫留ロープが細いものですみ、そのため海流による抵抗がへり、ひいては流失の危険がへったり、ブイが小さいものですむ利点をもつ。

また、われわれの地震計は、海底での姿勢を問わない設計がなされた。(第1図) このため、地震計のセンサーは耐圧容器のなかでジンバル機構に吊られ、またデータレコーダーその他のメカニクスは姿勢差のない動作をするようにつくられた。そのうえ、海中を自由落下したときの接地時の衝撃にも耐えられるように丈夫になっている。(第2図)



第1図 海底地震計の測器。5秒から100 Hzの周波数帯域を7日半記録することができる。左から順に水晶時計、直接アナログ録音方式データレコーダーとエレクトロニクス、地震計センサー、電池部分である。直径14.3 cm、長さ70 cmの円筒型の中におさまられ、重さは約10 kgである。なおこの測器は、1カ月間記録用に改造することもできる。



第2図 海底地震計の耐圧容器。軟鋼製、耐圧8,000 mで重量73 kg(空中)である。手前から三番目のものはFRP樹脂で試作した耐圧容器で、重量は鉄の1/3になる。FRPは深海ブイの材料としても有望である。

これらの設計がおこなわれたために、われわれの海底地震計は、ブイ・テクノロジーに課せられるべき課題が、かなりの程度にまで減少したものと考えてよいと思われる。

なお、われわれの海底地震計は、従来のものにくらると高感度であり、また記録できる周波数帯域も100 Hzまでと高くなっている。このため極めて小さい地震(極微小地震)をとらえて解析することが可能であり、また一方では、数多くの地震をとらえることによって海底での観測時間を短縮する(そして、ブイ・テクノロジーの負担をへらす)ことも可能である。

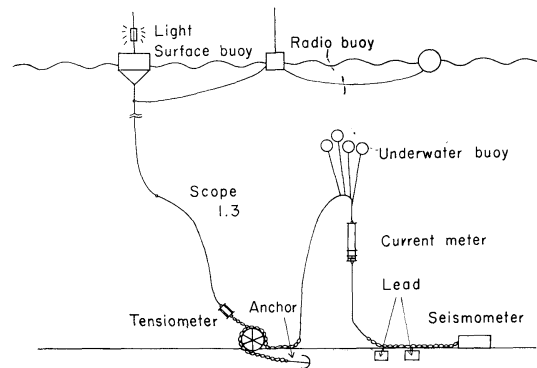
## 2. 海底地震計の設置と繫留

われわれの海底地震計は1969年7月、舞鶴海洋気象台の清風丸によって鳥取沖で1点観測、同11月に東大海洋研の淡青丸によって新島沖で3点観測をそれぞれおこなった。また同じく11月には、淡青丸によって大島沖で、投込み式設置法のテストをおこなって成功した。

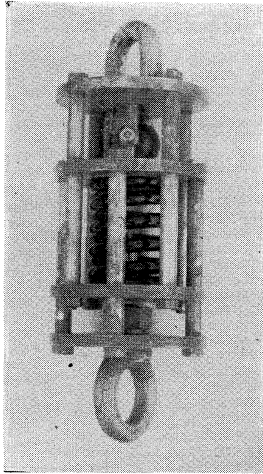
鳥取沖と新島沖の合計4観測点は、いずれも深海流速計とともに繫留をおこない、アンカード・ブイ方式をとった。(第3図) 水深は800 m~1,000 mで、スコープ\*は3.1であった。(\*ロープ長さ/水深の比)

繫留方法についてここではくわしくは述べないが、結果について注目されたことをいくつか述べる。

その一つは、鳥取沖の場合に、夏にしてはめずらしく海況が悪く、レーダーレフレクターが倒れ、ブイの一部がなくなるほどであったのに、ブイやロープの動きが地震記録にあたえたノイズは、その回数も大きさも、きわめて小さかったことである。これは海底に一べん錘りをとった繫留方法によるためであろう。



第3図 新島沖観測点での繫留図。深海流速計とともに繫留し、結果は満足すべきものであった。張力計も設置されている。



第4図 ロープ張力計。自動車のバネをつかい、アクリル円筒にひっかき記録をとる。

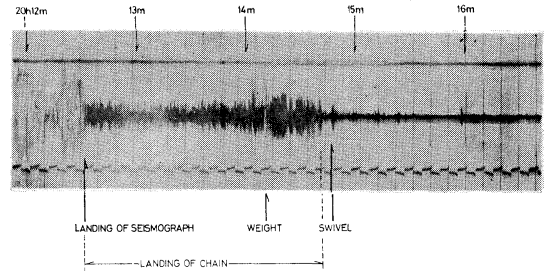
また、その数少ないノイズも、海底地震計の記録周波数帯域が広いために、他のノイズと明瞭に区別することができた。

もう一つは新島沖の場合の第三設置点についてであった。この点は、海底の錘り部分に、ダンフォース・アンカーを用いずに、20 kg の錘りと 20 m のチェーンだけを使ってみた。

ところが、この地震計は、回収地点や地震計の記録から考えると、1 日の観測期間中に約 0.5 マイルほど海底をひきずられたらしいことがわかった。そして、そのひきずられ方は、きわめて滑らかなものであったと考えられる。この例からみると、かなり重い錘り、またはある種のアンカーは、繫留に必要であると思われる。

新島沖の観測では、繫留ロープにかかる張力の変動の極大値を記録できる張力計を製作してロープにとりつけた。(第4図) 簡単な張力計であるが、ブイ・テクノロジーを科学的に進めるためには役立つだろう。くわしい結果はここでは述べない(文献)が、今回の繫留の最大張力は、繫留に使われた12ミリナイロンロープに許された張力を十分に下まわるものであった。将来、この張力計についての経験がふえれば、繫留ロープに必要な太さ、観測機器の設置・回収法などについて有用なデータが蓄えられるであろう。

ところで、海底地震計そのものも、ブイ・テクノロジーを進歩させるための有用な測器の一つである。というのは、われわれの海底地震計は、地震計にくわえられた加速度を非常に広いダイナミックレンジで記録できる一種の加速度計でもあり、また一方、最大日差 0.05 秒と



第5図 鳥取沖での着底加速度記録。午後8時12分から15分にわたって、地震計を先頭に順に着底していったことがわかる。

いう正確な水晶時計もそなえている。このため、地震計、およびそれに付属した器具類の着底時刻、離底時刻などや、海中や海底で受けた外力などを精密に知ることができる。

第5図は、鳥取沖の観測時の着底の前後の記録である。地震計を先頭に、チェーン、オモリ、スイブル、ポリプロピレンのロープの順に、清風丸から吊りさげていって着底したありさまがよくよみとれる。なおこの数分後には、分離リングやダンフォース・アンカーの着底も、同じように記録されている。

### 3. 投げ込み式設置法

従来わが国では、ブイをつかう海中・海底測器を設置するときには、海底に置くものから順に船からくりだしていき、最後にブイをつけて放す方式がもっぱらとられていた。

ところがブイ式測器の設置法では、これとまったく逆のこともおこなえる。それは船からまずブイをおろし、順にロープをくりだしながら船を走らせていき、最後に測器やオモリを投下する方式である。この方式の特長は、作業が早く、また簡単であること、ウインチ類のない小型の船でも設置ができること、それに海況が悪くても設置作業がおこなえることである。

われわれの海底地震計は、この後者の設置方式もとれるように、海底での姿勢を問わず、またタフに作られた。このため、第1回のテストとして、大島沖で、この投げ込み方式の設置をおこなった。

このテストにあたって懸念された心配は、地震計を投下したのち、地震計(と錘り)は重量が大きいためにほとんど垂直に落下し、一方でロープの端につけられたブイは地震計のひっぱるロープにひきずられて、非常な勢いで水面上を滑走して、ある場合には、ブイが破損したりあるいはロープがブイとからまって切れるのではない

か、ということであった。

投げ込み方式のテストは、懸念派の人たちがリーダーマストに登って注視するうちにおこなわれた。しかし幸いにして、ブイは白波をけたてて走ることはなく、その近づき方はおだやかなもので、このテストは成功した。なお、着底時間からきめた地震計の落下速度は、200m/分であり、地震計、チェーン、スィブルなどの損傷はまったくなかった。したがって、この設置法は有望なものと考えられる。

#### 4. 自己沈下・自己浮上方式地震計

地震計、底層流測定装置、底層採水器など海底付近で作業するための測器は、原理的にはブイやロープはいらぬものであり、自己沈下・自己浮上方式が現在もっている欠点を克服することができれば、場合によっては、アンカード・ブイ方式よりもぞましいことがある。たとえば、設置と回収の作業の簡単さはこの方式の最大の利点である。(くわしくは本シンポジウムの安井正 (p. 103-104) などを参照されたい)

われわれは、地震計を自己浮上型にするための設計と製作を、現在おこなっている。このために、地震計は極限まで軽く、また小さくしなければならない。また信頼

できるリリース装置(錘り切りはなし用)、深海ブイ、海面へ出たときの標識(電波、閃光、目視用)などもつくられている。

将来、これら自己浮上方式の装置が完全なものになったときには、海底地震計、底層流測定装置などの設置にはアンカード・ブイ方式をとる必要がなくなるかもしれない。また、サテライト・ナビゲーションを用いて、船位が超精密に決められるようになれば、海面上に顔を出し、とかくトラブルのもとになるブイを用いずに、海底近くにロープを水平に這わせただけで、回収時にはそのロープを船からひっかけてあげるといふ、新しい“ブイ”テクノロジーが主流になる時代も、そう遠くないように思われる。

#### 文 献

- 島村英紀・浅田 敏・高野健三 (1970): 海底での極微小地震観測. うみ (日仏海洋学会誌). 8(1), 6-12.  
 RYKUNOV, L. N. and V. V. SEDOV (1967): An Ocean-Bottom Seismograph. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 8, (English Transl.) 537-541.  
 南雲昭三郎 (1967): 海底地震計. 地震, 20(4), 104-107.  
 窪内洋子・島村英紀・高野健三 (1970): 簡易ロープ張力計. うみ, 8(1), 13-17.

## 10. 海底地震計の繫留

南 雲 昭 三 郎\*

### Mouillage d'un séismographe à fond océanique

Shozaburo NAGUMO

1. 東京大学地震研究所で行なっている海底地震計の繫留について紹介を行なった。地震研究所では長年海底地震計の開発を進め、基本的問題を解決して来た。1965年いよいよ本格的な観測実験を相模湾水深 1,000 m にて行なうことになった。海上保安庁水路部測量船明洋の佐藤孫七船長の御指導により、繫留システムの製作が行なわれ、東京大学海洋研究所研究船“淡青丸”にて実験が行なわれた。次いで 1966 年“明洋”にて同じく相模湾にて約20日間の繫留が行なわれた。これらの繫留システム

は相模湾にて約1カ月程度の短期間繫留という条件の下のものであった。これは主に経費の都合であった。1969年には大巾な改造が行なわれ、同じく佐藤孫七船長によって、海洋研究所“白鳳丸”、東海大学“東海大学丸II世”の大型船による、深海および1カ月以上長期間全天候に耐える繫留システムが設計・製作され、実際の観測が行なわれた。

#### 2. 構 成

海底地震計の繫留システムは繫留および回収システムと呼ばれる方がより適当であろう。単なる繫留だけでな

\* 東京大学地震研究所 Earthquake Research Institute, University of Tokyo

く、回収のための装置が多数組み込まれている。

海底地震計の繫留システムは、地震計本体、アンカー、表面ブイと、その間の接続ロープ類とから構成される。

地震観測のための設置が他の海底観測と異なる所は、大地との結合がよくなければならぬことであり、又繫留ロープによる雑振動や、底層流による雑振動がきわめて少くなければならない。又、設置位置の精度が必要である。特に震源分布を決めようとする場合は、三点観測網の一辺の長さの約 0.5% 程度の精度が必要である。

3. 実 例

Fig. 1 は相模湾中央部付近水深約 0.9 km の地点で 1966年“明洋”で行なった折の繫留ロープシステムである。ほぼ水深に見合うワイヤーロープを使用し、残りはハイゼックスロープで浮上るようにしてある。回収の折使用する先取りロープ類が完備されている。経費の安い、夏の内海、短期間向きのシステムである。地震計の総重量約 250 kg, ワイヤの強度約 3 t である。

Fig. 2 は、1969年夏“東海大学丸II世”にて、金華山沖にて約 1 カ月間繫留を行なった際のロープシステム図である。ロープ類の強度は約 6 t にとつてある。ロープ類の比重調整のためテトロン・ナイロン・パイレンロ

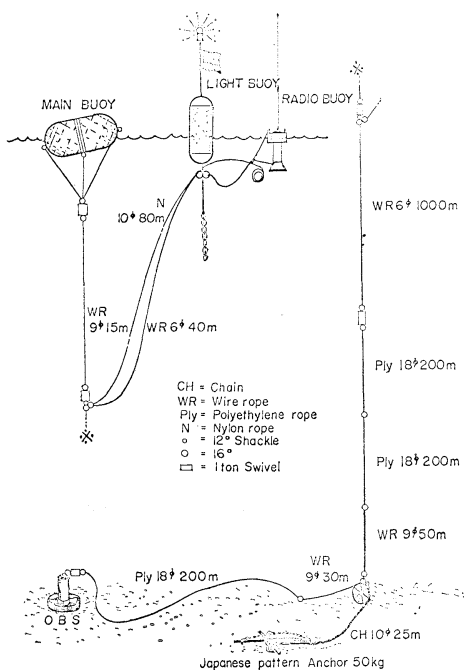


Fig. 1. Rope-Buoy system for mooring and recovering of the ocean-bottom seismograph, used in 1966 at the Sagami-bay by M/S “Meiyō”.

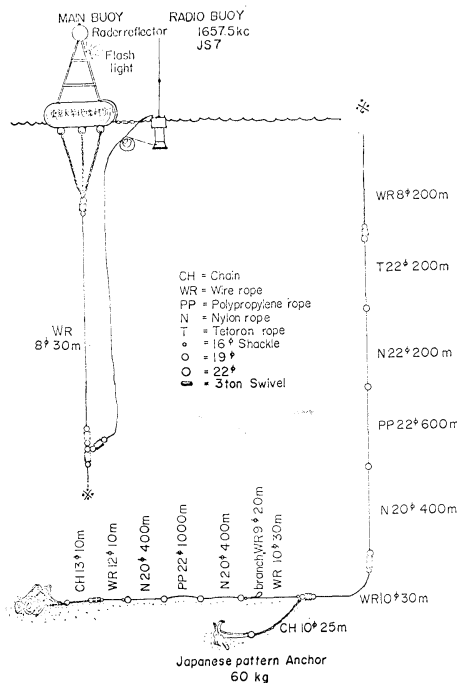


Fig. 2. Rope-Buoy system for mooring and recovering of the ocean-bottom seismograph, used in 1969 off Kinkazan by M/S “Tokai-Daigaku Maru II”.

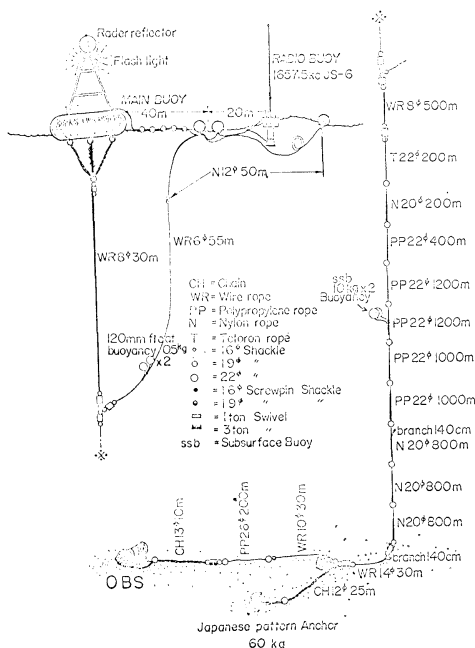


Fig. 3. Rope-Buoy system for mooring and recovering of the ocean-bottom seismograph, used in 1969 at the off side of the Japan trench near the Erimo seamount by M/S “Hakuho Maru”.

ープの組合わせが行なわれている。回収を確実にするための Back Up Line が設けられた。約 1 mile の長さにならぬよう配慮してある。Back Up Line の回収には、海底電線用のギフォードグラブネル、オージナリアンカーを使用した。

Fig. 3 は 1969 年 5 月“白鳳丸”にて日本海溝外側、太平洋海盆上 (水深 5,600 m) に行なった折のロープシステムである。ロープ類の強度は約 6 t, 地震計荷重は約 300 kg。設置作業はウインチで行なった。

#### 4. 今後の問題

海底地震計の繫留回収ロープシステムとしては、(1) 確実な回収が行なわれること、(2) 研究船の行動スケジュールがかなり細かに予定出来ること、(3) 敷設・回収作業が安全かつ能率的に行なえること等の考慮が必要である。

強度の問題として、現在約 1 t の全引揚げ荷重に対して、破断強度を 6 t にとっている。引揚げ荷重としては (1) 地震計重量、(2) アンカーチェーン等の先端荷重、(3) アンカー引抜荷重、(4) ロープ周囲圧抵抗、(5) ロープ潮流抵抗、(6) 繫船抵抗等が考慮されている。その他、動的荷重として、(1) ロープ繰出し、巻き上げ時の起動、停止に伴うショック、(2) うねりによる船の上昇、下降の荷重、(3) 水切り時の荷重、等がある。又 (1) ロープジャミング等ロープを損める危険、(2) 繰返し使用によるロープの損傷、疲労等による強度低下、(3) 合成ロープ使用基準として常用荷重を破断強度の 1/2 にとること等が考慮されねばならない。その他未知の環境条件がある。これらの多くは今後の正確な計量が必要である。

繫留ブイ方式の欠点は、航行船舶の邪魔になること、盗難等による事故が多いこと、天候風浪による損傷の危険があること等がある。今後の改良すべき点としては表

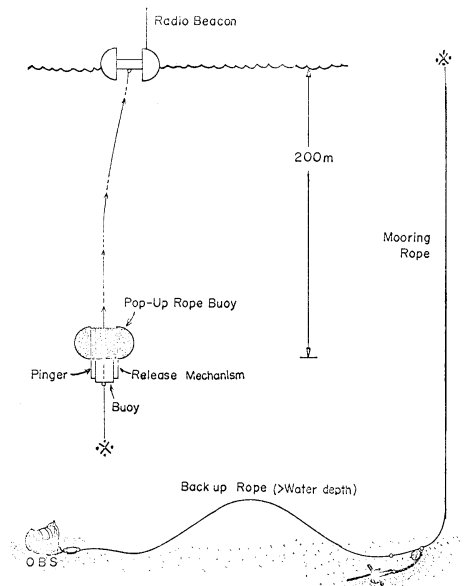


Fig. 4. Schematic diagram of the self-floating buoy-rope system for recovering the ocean-bottom seismograph.

面ブイをやめて、その代りに中間ブイを用い、回収時に先取りロープを浮上らせる方式が考えられる。この方式はすでに約10年程前理化学研究所によって試みられた方式であるが、何とか実用的にしたいものである。一例を Fig. 4 に模式的に示す。先取りロープをつけた浮ワクを表面から約 200 m 下に沈めておく。主に流し網、巻き網漁業とぶつからないようにするためである。又、繫留は 1,000 m 以深とし、底曳漁業とかち合わないようにする。中間ブイを大きくとり、又ピンガーをつけ、魚探にて位置を発見出来るようにする。Back Up Line は約 1 mile 以上長くとり、万一の場合はドレッジする。時計仕掛で、回収時に先取りロープは海面に浮上って来る。

#### 参考文献

- Preliminary Cruise Results of RV Hakuho-Marui, Cruise No. KH-69-2 (April-June, 1969), Ocean Res. Inst., Univ. Tokyo, 1970.



## 11. 白鳳丸の錨繫留法に関する一考察

白 沢 高 康\*

### Note sur l'ancrage du Hakuho-maru

Takayasu SHIRASAWA

白鳳丸を錨泊させ観測作業を行なう場合、錨泊にさいし、まず考慮すべきことは、(1) 錨泊可能水深の限度をどの程度と考慮したらよいか、(2) 船の安全繫止に影響を及ぼす外力(風、海潮流)の限度をどの程度と考慮したらよいか、(3) 船のふれ回り運動が観測に及ぼす影響を抑止するためには、いかなる錨泊法を考慮したらよいか、についてである。

#### 1. 錨泊可能水深の限度について

1) 一般に船舶運用の常識として、通常の状態における安全繫留のための所要錨鎖伸出力は  $3D+90$  m (D: 水深) が目安とされている。この算式を本船に適用するにさいし、本船装備片舷錨鎖量(注1)から、水深は70m がその安全限度であるといえる。

しかしながら観測作業を行ないうる天候の条件のもとでは、この安全度を若干ゆるめることによって、揚錨機の捲揚能力(注2)からこの限度を拡大させることが可能である。この場合の錨泊可能水深限度は、錨の重量(注3)、錨鎖の重量(注4)、ホースパイプにおける摩擦抵抗(注5)、船体ピッチング運動を考慮したとしても、100m をその限度と考察することが妥当であろう。

(注1: 300m, 注2: 13t, 注3: 2.3t, 注4: 1.43t, 注5: 荷重の30%~40%)

2) 上記の可能水深限度は、特殊な操法を用いることにより、さらに拡大することが可能である。若干の錨泊の安全性は失うが、観測作業を行ないうる天候の条件範囲をさらに限定したもとは、錨鎖2~3節のあとにワイヤロープを接続させることによって、揚錨機の捲揚能力にかかる負担を軽減することになるので、その錨泊可能水深の限度はゆるめられるが、実際の運用条件としての作業場のスペースおよび格納上の制約のため、本方法

による錨泊可能水深の限度は200m と考えることが妥当であろう。

#### 2. 外的影響に対応する安全繫留の限度について

1) 船の安全繫留に及ぼす外力としての海潮流の流圧は

$$D = \frac{\rho \omega}{2} C_D \cdot S \cdot V \omega^2$$

$\rho \omega$ : 水の密度(海水で  $104.5 \text{ (kg g}^2/\text{m}^4)$ )

$C_D$ : 抵抗係数

$S$ : 船体の浸水表面積 ( $\text{m}^2$ )

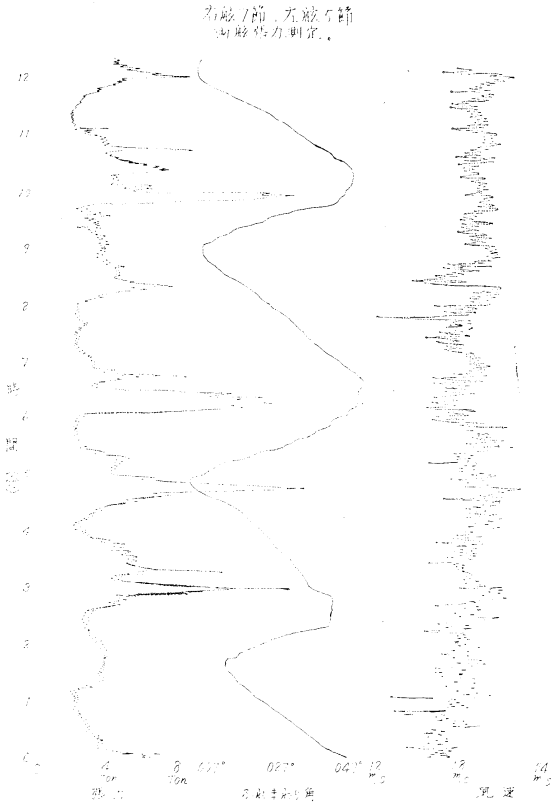
$V \omega$ : 相対流速 ( $\text{m/s}$ )

で示される。今流速5節とすると、本船の受ける流圧は、船首方向から海潮流を受けるとき1.5t、正横方向から受けるとき135tとなるが、一般に錨泊において流圧方向は船首方向から受ける場合が多い。その場合本船の繫止能力から、この程度の値はさしたる影響を受けることを意味しない。

2) 船の繫止能力は錨、錨鎖の各種底質による把駐係数に支配されることが、大であるが、従来の係数値は過大にすぎたのではないかという疑いが最近の解明からあらわれつつあり、一例として底質泥の場合、錨の係数は9から3前後、錨鎖の場合は2から0.75前後へと減速しているといわれる。そこで安全側からみた係数を採用して、本船が安全に錨泊することができる水深限度70m(前記参照)で受ける風圧の限度は風圧計算式から風速20m/s以下である。さらに厳密に言えば錨泊中の船のふれ回りにより錨鎖に与えるショック張力を勘案した場合、その安全限度は一層せばめられ15m/sと推定することが妥当であろう。(参考図: 第1図はショック張力、第2図(A),(B)は船のふれ回り運動一練習船進徳丸の例)

3. 船のふれ回り運動が観測に及ぼす影響を抑止するための錨泊法

\* 東京大学海洋研究所 現在は運輸省航海訓練所  
Ocean Research Institute, University of Tokyo  
Present address: Institute for Sea Training, the  
Ministry of Transportation

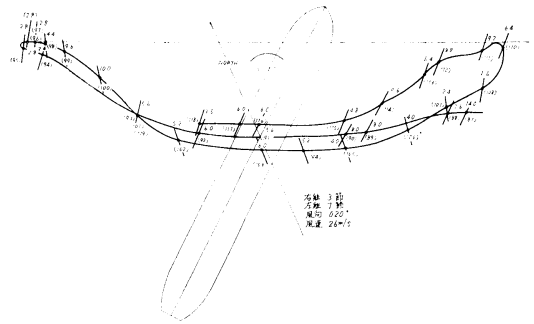


第1図 右舷7節, 左舷5節, 両舷張力測定。

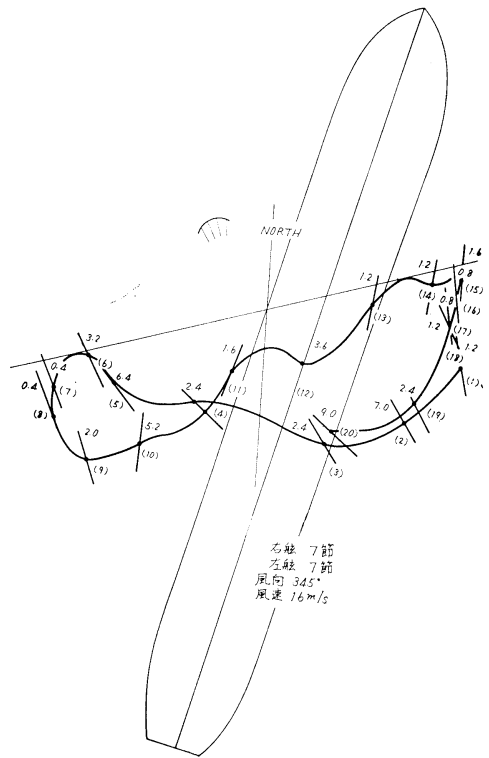
1) 船の振れ回り運動を抑止する方法として風速 25 m/s 以下の場合, 振れ止め錨泊法があるが, さらにその効用をたかめるための方法として, 両舷錨鎖を等長で使用する二錨泊法, あるいはハンマロック錨泊法がある。

第2図 (A), (B) の示す運動の振幅は風速が大きくなるにつれて, 大となるが図(A)の場合, 船体の最大移動速度は 0.64 m/s, 図(B)のそれは 0.66 m/s である。この両者はいずれも振れ回りを抑止する方法を採用しており, 船が単錨泊の場合, その移動速度はさらに大となることは自明である。

2) このような振れ回り運動が観測作業に及ぼす影響を考慮し, 上記の方法においてもなお振れ回りが止まなければ, その影響をもっとも軽減させるためには馬つなぎ錨泊法による船固めを考慮しなければならない。この



第2図 (A) 船体軌跡。



第2図 (B) 船体軌跡。

方法によれば, ワイヤロープの使用荷重がその安全限度となる。すなわち風速 11 m/s, 海潮流 1.2 節がその限度と考察されよう。

## 12. 定浮標方式海底地震計の装置と海上作業について

飯沼龍門\* 吉田弘\*

## Installation d'un séismographe par bouée mouillée

Tatsuto IINUMA et Hiromu YOSHIDA

## 1. まえがき

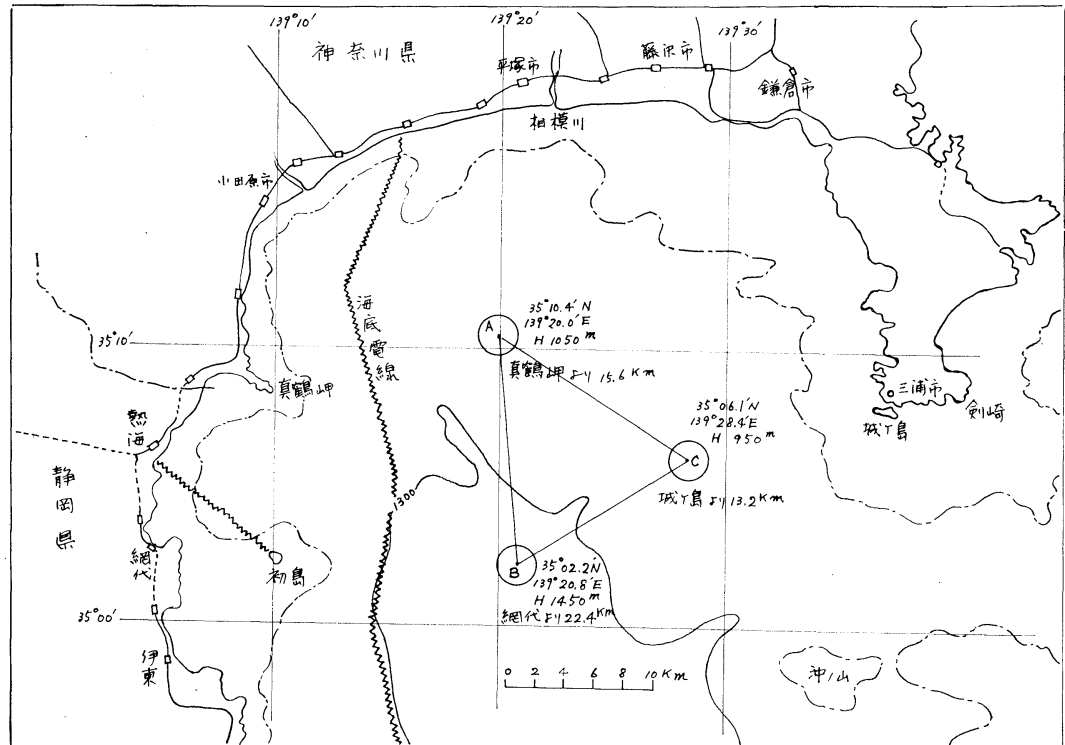
東京大学地震研究所で開発研究して来た定浮標方式をベースとして、定常的な地震観測に適合するよう連続記録時間の延長を計ると共に、繫留装置の安定度の向上、敷設用装置の1部開発実験をテストする目的の海底地震観測装置を1969年3月、5基作製した。

これらの装置の試験観測を1969年3月中旬第1図の相模湾内水深約1,100 m及び1,500 mのA・Bの2地点で3日間の第1次試験観測を実施した。3月12日、大島北端で実施したTNT 500 kgの爆破による人工地震動

を海底及び陸上(真鶴)でそれぞれとらえた。引き続き、1969年7~9月の2日間にわたり相模湾内水深900 m・1,100 m・1,500 mのA・B・Cの3地点で本装置の性能一杯にあたる連続1カ月(800時間)ずつ各2回の海底地震観測を実施した。このうち主として繫留装置と海上作業等について二、三述べる。

## 2. 海底地震観測装置のあらまし

本装置は一般の小型作業船(100トン級)で10トン以上のウインチとデリックを装備していれば操作出来るこ



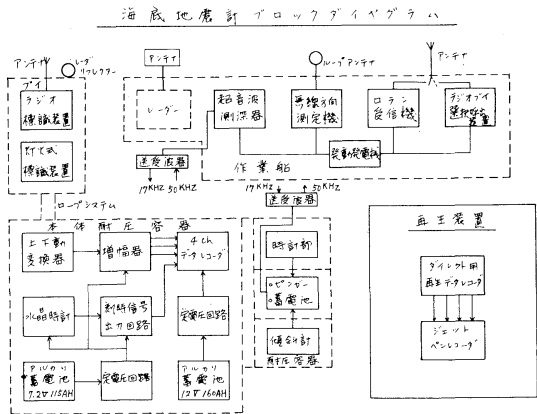
第1図 相模湾内の海底地震計敷設予定図。

\* 気象庁地震課 Earthquake Section, Japan Meteorological Agency

とを目標とした。装置は第2図のブロックダイアグラムの通り、地震計本体・繫留装置・敷設用測定装置及び記録再生装置より構成されている。外観及びロープシステムの概要は第3図の通りである。

1) 地震計本体

- 変換器: 成分 上下動1成分
- 感度 1 V/cm/sec
- 水平装置 ジンバル釣り傾斜角20°まで修正
- 増幅器: 記録形式 速度形
- 倍率 80・60・40 db 3ステップ 2段階



第2図 海底地震計のブロックダイアグラム。

切り替え

- レコーダー: テープ速度 0.015 inch/sec
- 記録時間 800時間
- テープ 3600 feet
- リール 10inch (25.5 cm)
- 記録方式 交流バイパス直接記録
- 周波数 1~20Hz
- 電力 12 V・70 mA

2) 繫留装置

ロープシステムは主として化繊のエイトロープを使用、海面近くのみをスチールワイヤーとした。ロープ系の破断力は約6トンで装置の水中全重量の約5倍に相当する。

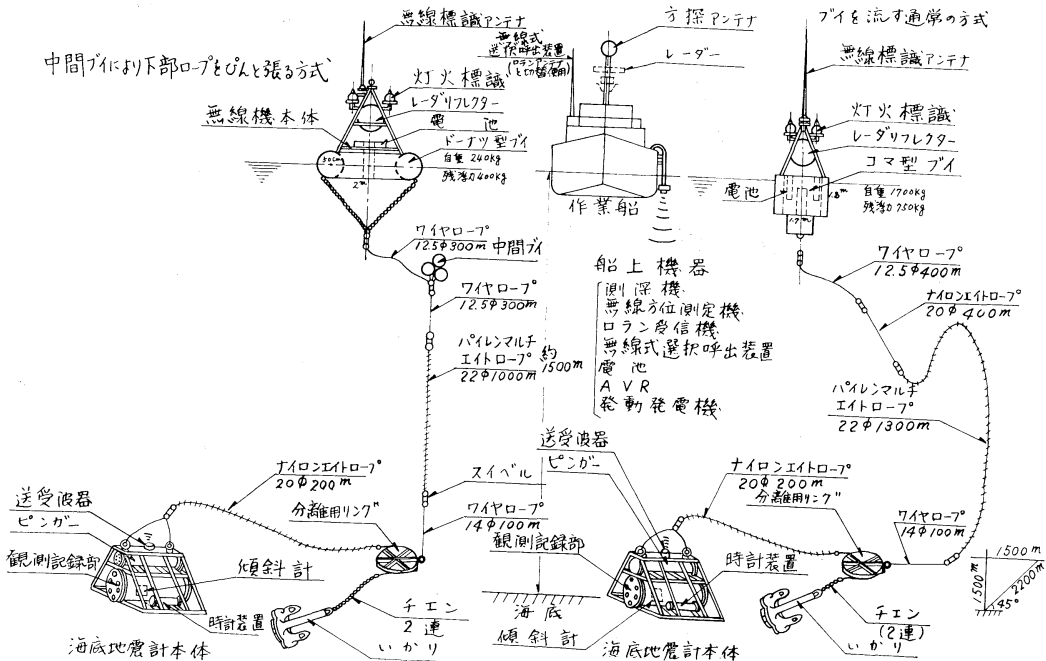
繫留用ブイには、鉄製標識型と、耐蝕アルミ製ドーナツ型の二通りを製作して性能テストを実施した。

3) 敷設用装置

地震計本体にソナーピンガーを取り付けこれに傾斜警報装置を付属させ作業の安全確実と着底状況の確認をはかる様にした。

4) 再生装置

磁気テープは長時間化をはかるためダイレクト方式とした。このため S/N の向上には再生時のテープの送り速度を早くする必要があるので記録時の100倍・50倍・



第3図 海底地震計の概要図。

25倍とした。一方、速度に応じて周波数が上昇するのでインク書きとしては 1,000 Hz までの能力を持つジェットペンレコーダを使用した。

### 3. 繫留装置

ブイについては、前述の通り海上保安庁等で使用している鉄製の標識型のブイと、耐蝕アルミ製の2種類を作製してテストした。

第1表 ブイの規格。

型式	大きさ	自重	残浮力	水面以下 断面積	摘要
標識型	W1.7m H5.0m	1750kg	750kg	1.2 m <sup>2</sup>	6 mm 鉄板 1 部ウレタン充填
ドーナツ 型	W2.0m H2.5m	240kg	400kg	0.5 m <sup>2</sup>	耐蝕アルミ・ ウレタン充填

ブイの概要は第1表の通りで、大きさ、重量、水流抵抗面積等ではドーナツ型がすぐれている。しかし、荷重のない場合の浮心と重心の間隔が短かく波によっては転覆のおそれがあった。しかし、荷重をかけたためもあり海上では波に乗り標識型に比較してローリングもピッチングも小さく、非常に安定していた。船上の作業の容易さも含めて外洋の観測用ブイとしては非常に良好であった。

ロープシステムの水面付近のスチールワイヤー 400 m が3月のテストでは一部にキックが起きたので三つに切りそれぞれスィブルを入れた。

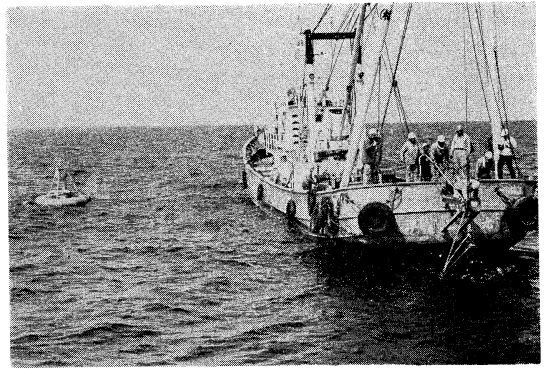
化繊ロープには当初ハート形のシンプルを使用したのが1回の使用でゆるくなり先端がロープに直接あたり、これによる切断のおそれがあるため、7~9月の観測には円形の深溝のシンプルを特注して取り替えた。

### 4. 海上作業

海底地震計を設計する段階で作業船の作業能力と海上測定器の装備についても討議した。すなわち海底地震計としては完全なものであっても、敷設と揚収がともなって始めて目的を達することが出来るからである。第4図は海上での敷設作業中の作業船洋丸である。海底地震計を目的の位置に敷設するためには船の正確な位置と水深とが必要である。

位置測定には 1969 年3月のテスト時はハイドロジスト測量を利用した。

しかし、7月のテストにはハイドロジスト測量の使用が出来なかったため、ラジオブイの発信器を真鶴と伊東の港外に繫留して方向探知機により位置の測定を試み



第4図 作業船(90トン)による海底地震計の敷設作業。ただし、実際に行なった結果は方向探知機の誤差の修正が悪く使用出来なかった。

第5~8図は作業船に装備されていた、小型レーダーにより湾内の岬又は島を目標として2~3点の距離を測定して位置を決定した航跡図である。7月の第1回のA点の敷設作業では潮流が早く第5図の点線の様に最大約2ノットの速さで流され本体を水中400mまで(ピンガーにより確認)おろした時に水深650mとなった。作業を一時中止して本体・いかり・分離用リング等水中全重量1.5トンを破断力6トンの化繊ロープで潮流との相対速度約3ノットで予定地点まで65分間の位置修正を実施した。以後流れは90°変り弱くなり予定位置より800m離れた位置に着底した。B点の作業については、A点の経験により風と潮流とを考慮して作業開始地点を選んだが結果的には300mおろした時点で5kmの位置修正を余儀なくした。

敷設時のロープ繰り出し速度はウインチのローラーの大きさと決まり15m/minである。このため1,500mでは100分要する。又、分離用リングとアンカーを投入する際50~60分の作業時間を必要とした。位置修正の時間等を加えて全敷設作業時間は3~5時間を要した。

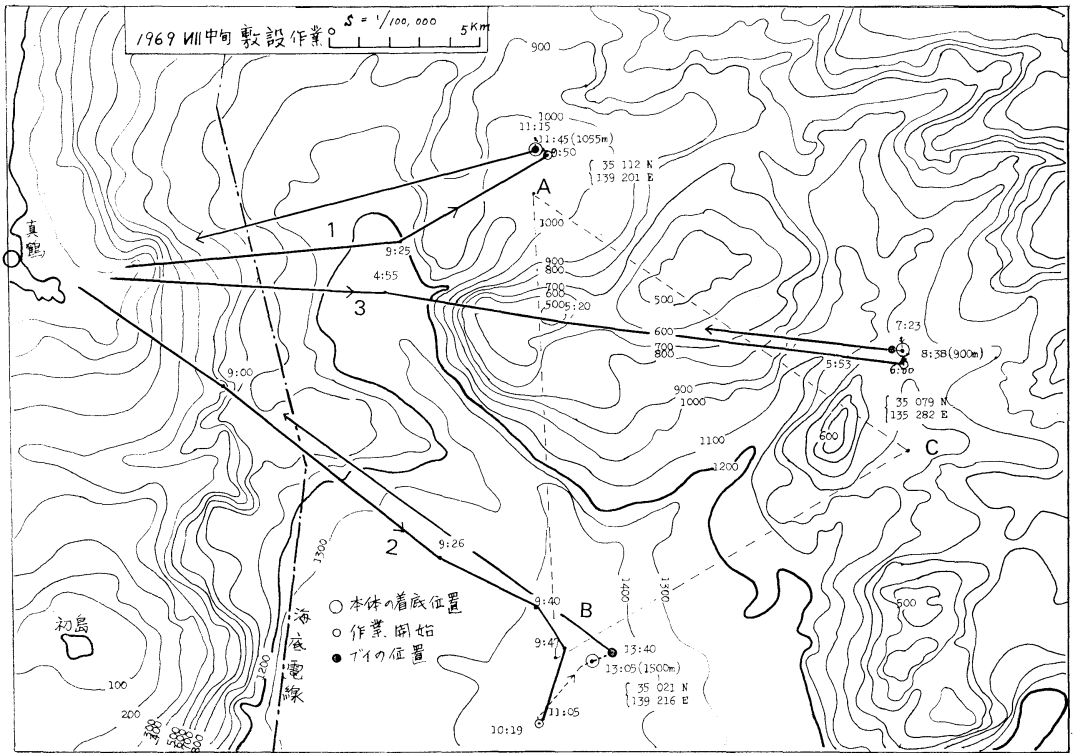
第2回目の敷設作業は潮流にはほとんど流されず3~3.5時間で全作業を完了した。

揚収時のワイヤーの捲上速度は、11m/minで全作業時間は約3.5~5.5時間を要した。

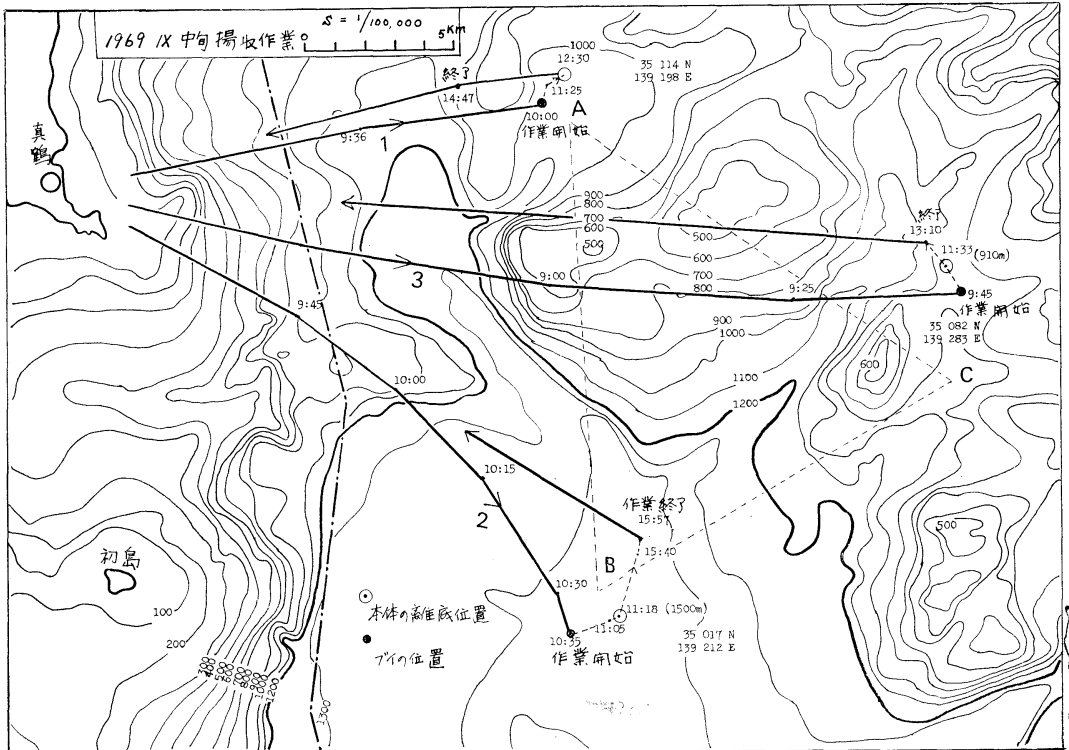
全作業時間と潮流の最大速度は第2表の通りである。レーダーによる位置と測定誤差、本体の着底及び離底時の本体と船の位置の誤差等が加算されて着底時と離底時の見掛上の誤差は300~500mが普通であり爆破等の観測には多少問題となることがわかった。

地震計本体の降下状況を確認するため、本体の一部にソナーピンガーを付属させた。測深器より発信する17





第 7 図



第 8 図

第2表 作業時間と潮流等の表。

回数	地点	水深 (m)	敷設 時間 (時:分)	揚収 時間 (時:分)	敷設揚 収時の 誤差 (m)	最大 潮流 (m/ min)	位置修正	
							距離 (km)	時分 (min)
第1回	A	1050	4:25	5:70	400	60	3.5	65
	B	1450	4:50	5:15	300	50	5.0	60
	C	950	3:56	4:05	500	20	2.0	44
第2回	A	1055	2:48	4:47	300	5	0	0
	B	1500	3:21	5:20	900	20	0	0
	C	900	3:10	3:25	500	10	0.5	11

kHz の超音波を受け別波長の 50 kHz の超音波を打ち返して来ることにより、位置がわかる様にした。しかし、水深 700 m 前後で 50 kHz 波が受信出来なくなった。幸い 17 kHz の波の本体からの反射波が受信出来、着底及び離底の状況と時間をおさえる事が出来たので、ウインチ作業を安全確実とした。

この問題については、1970年に再試験を行なう予定である。

#### 5. 海底における作動状況と地震

第1回 1969年7月中旬～8月中旬の連続作動率はA点 100%・B点 50%・C点 90%であった。B・C点の故障は、アンプ用蓄電池に充電不足の電槽が混入していたためと、レコーダーのモーターのブラッシ不良による停止が原因であった。地震の記録は、1日平均14箇あり、8月12日6時28分のエトロフ沖にあった大規模地震

の発生直前に、同地域で発生した小地震を6箇記録した。第2回8月中旬～9月中旬の連続作動率はA点 0%、B点 100%・C点 100%であった。A点の故障はレコーダーのバイヤス不調であった。この間の記録は、1日平均18箇であった。

#### 6. 結果

定浮標方式の致命的な問題であるブイの流失は、1969年3月13日の台風にも相当する荒天にも無事であったので、一応安全度は確認された。しかし、無人長期地震観測装置の部品に不良があり、最終結果としては70%しか資料が得られなかった。これ等の点についてはさらに検討と改良を加える必要がある。

#### 文 献

- 南雲昭三郎 (1968): 深海底における地震観測. うみ, **6**(1), 66~72.
- 南雲昭三郎 (1968): Improvements of ocean-bottom seismograph construction of a long-life magnetic tape recorder. Bull. Earthqu. Res. Inst., **46**, 861-875.
- 南雲昭三郎ら (1968): 三陸沖の海底地震計で観測された1968年十勝沖地震の前震現象. 地震研究所彙報, **46**, 1355-1368.
- EWING, John and Maurice EWING (1961): A telemetering ocean-bottom seismograph. Jour. of Geophys. Res., **66**, 3863-3878.
- SUTTON, G. H. (1965): Ocean-bottom seismic observatories. Proceeding of the IEEE, 53-12, 1909-1920.



## 日仏海洋学会賞受賞記念講演 日本近海海水の海洋化学的研究\*

——とくに海水中の栄養塩に関して——

杉 浦 吉 雄\*\*

### Recherche chimique des eaux aux environs du Japon

——notamment des sels nutritifs——

Yoshio SUGIURA

日仏海洋学会の創立10周年に当り、学会賞を授与されたことを光栄に存じます。今回の受賞は、日本海洋学会岡田賞に次いで二度目になりますが、受賞に価する数々の会員の中から、私ごときが重ねて選ばれましたことは、全く幸運の一語につきます。

この度、私を推挙して下さいました多くの先輩、同僚はじめ学会員の方々、また、今回の受賞を実現させるために御尽力下さいました受賞候補者推薦委員会の方々に、厚くお礼申し上げます。これに励ましを得て、はなはだ微力ではありますが、今後とも、海洋化学と海洋学の発展のために尽力したいと考えております。

さて、今回の受賞は、1965年以降、日仏海洋学会誌に投稿した9篇と、日本海洋学会誌などに投稿した9篇の論文が、対象となっております。

これらの論文は、海水中の栄養塩の問題、酸素の問題、大気と海洋の間における気体の交換の問題、海水中の鉄とアルミニウムの問題、海水の電気伝導度の問題、海水の水素イオン濃度の問題などを取り扱っています。しかし、ここでは、時間の都合もありますので、栄養塩の話のハイライトと思われる点について、学会の研究発表などではできなかった点も含めて、一通り述べたいと考えています。

海水中の栄養塩については、今世紀のはじめ頃から、確かに、多くの人々が、このお料理に箸をつけています。それでもまだ、何か美味しいところが残っているのではないか。そういう気がしてならなかったのです。

\* 1970年5月28日、日仏会館にて講演 *Résumé de la conférence faite le 28 Mai après la remise du prix de la Société franco-japonaise d'océanographie*

\*\* 気象研究所 Meteorological Research Institute

Fig. 1 は、本州東北方海域における海水のうちで、密度の等しい水だけをとり出し、それらについて、リン酸塩の濃度を塩素量に対してプロットしたものです。塩素量が低くなるにつれて、リン酸塩の濃度が増す傾向がうかがわれます。Fig. 1 の小さな矩形は、塩素量とリン酸濃度の観測値の標準偏差の2倍の長さを相隣る二辺とする矩形です。この中に収める点は、塩素量もリン酸濃度も、それぞれ互に等しい値をもっとみなしても、20回に1回の割でしか誤りを犯さない、ということが出来ます。

塩素量の低い方から高い方へ矩形をずらせます。その際、どの点もすべてこの矩形の中に収ってくればリン酸塩濃度は、塩素量のみで決まると考えてもよいわけです。しかし、事實は Fig. 1 にみられるように、ほとん

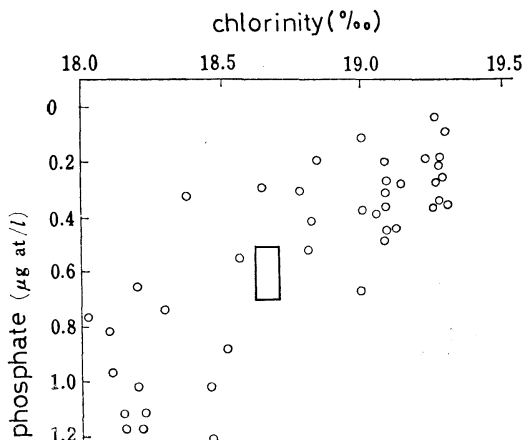


Fig. 1. Relationship between phosphate concentration and chlorinity.

どこでも、矩形の外にはみ出した点がかかりの数を占めます。つまり、これは、リン酸塩の濃度が塩素量だけでは決まらないことを示しています。それでいながら、点の配列は、何んとなく、塩素量の減少とともにリン酸塩濃度が増す傾向を示しています。以上の点に着目して、私は、この海域の水のリン酸塩濃度は、塩素量に依存する部分としない部分に分けられると考えました。密度が互に等しい水について、塩素量に依存することは、一般的にいうと、水温・塩素量に依存することに当ります。そこで、リン酸塩の濃度は、水温・塩素量に依存する部分と依存しない部分に分けられるということになります。前者を保存性リン酸塩、後者を非保存性リン酸塩と呼びました。前者は、水温・塩素量のように、混合だけで変化します。それに対して、後者は、混合以外の原因によって変化するものです。

Fig. 2 は、Fig. 1 と同じ図ですが、次の点が違います。Fig. 2 では、ただ今、考えている海域における補償深度におよそ該当する 30 m という深さより深い水と浅い水を、それぞれ黒と白のマークで区別しています。補償深度より深い層では有機物の酸化分解が光合成に優越する結果、リン酸塩の濃度は分解の程度に応じて増します。反対に、補償深度より浅い層では、光合成が酸化分解に優越する結果、リン酸塩の濃度は、光合成の程度に応じて減少します。そこで、補償深度より深い層の水については、なるべく低い値を、浅い層の水については、なるべく高い値を、リン酸塩の濃度とするように、一つの直線を引きますと、これは、保存性リン酸塩の濃度と

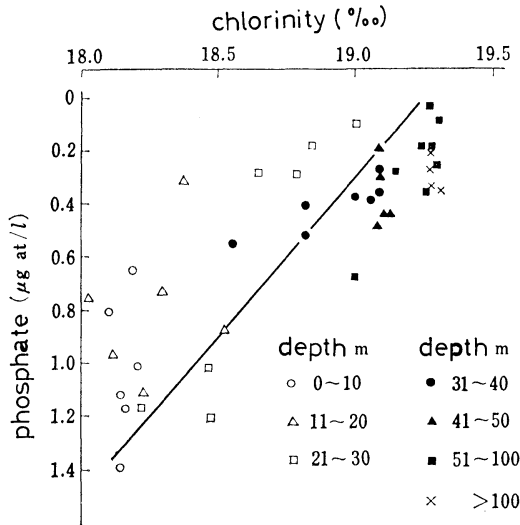


Fig. 2. Relationship between phosphate concentration and chlorinity.

塩素量の関係をだいたい表わすことになると考えられます。

次に、補償深度より浅い層の水 (図中の白いマークの点) について、各点から上述の直線までの鉛直方向の距離が示すリン酸塩の濃度は、光合成に伴って植物プランクトンが摂取するリン酸塩に相当するであろうと考えました。そのような考えのもとに、Fig. 2 の白いマークの各点と直線との鉛直方向の距離に相当するリン酸塩の濃度を、各点の採水深度に対してプロットしました。その結果、Fig. 3 が得られたのです。深さ 10 数 m のところにピークがあります。この形は、<sup>14</sup>C による光合成量の鉛直分布によく似ています。このことは、非保存性リン酸塩の濃度が、光合成という生物活動に依存する量であることを暗示していると思います。補償深度より深い層では、この生物活動は、酸化分解という形をとることが期待されます。その場合、酸化分解に要せられる酸素の量は、AOU (Apparent oxygen utilization) で近似的に表わされます。AOU というのは、溶存酸素の飽和量から観測値をさし引いた量です。

補償深度より深い層の水について、非保存性リン酸塩の濃度を AOI に対してプロットすれば、有機物の酸化分解というプロセスに固有の関係が何か見出せるのでは

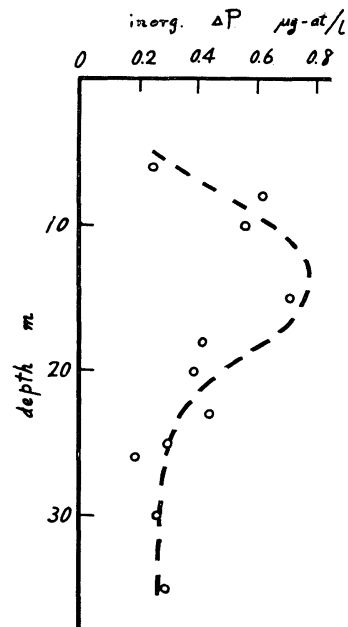


Fig. 3. Vertical distribution of primary production in terms of assimilated-phosphate concentration (inorg.  $\Delta P$ ) on the sigma- $t$  25.0 isopycnal plane.

ないか、と考えました。しかし、非保存性リン酸塩の濃度そのものは、リン酸塩濃度の観測値からすぐにはわかりません。けれども、次のようにすれば、実効上、非保存性リン酸塩濃度を AOU に対してプロットしたのと同じことになる、と考えました。まず、水温・塩素量の等しい水だけを取り出します。それらに関しては、同じ保存性という性質からいって、保存性リン酸塩の濃度も互に等しいのではないかと考えたのです。等しいとしますと、そういう水同志に関するかぎり、リン酸塩の濃度はすべて保存性リン酸塩濃度の、高さの等しい下駄をはいていることとなります。従って、その分だけ図形を平行移動させれば、リン酸塩-AOU プロットは、非保存性リン酸塩-AOU プロットと完全に重なります。そればかりか、このようなリン酸塩-AOU プロットは、保存性リン酸塩の濃度を、水温、塩素量の異なる組合せの水同志の間で、互に比較できるという点で、はじめに考えた非保存性リン酸塩-AOU プロットよりもかえって好都合であります。

Fig. 4 は、黒潮と親潮が出会う海で、リン酸塩濃度を AOU に対して実際にプロットした結果を示しています。結果が予想外に単純なことは、一つの驚きでした。水温・塩素量の組合せごとに、水のグループは、互いにほぼ平行な直線上に乗ることがわかりました。この単純な結果は、問題をさらに続けて考えさせる呼び水になりました。話をその方へ進める前に、一つ、補足させていたきたいことがあります。

今から、7年ほど前に、黒潮地域海洋科学専門家会議というのが、東京であったことは皆様すでに御承知の通りであります。そのとき、黒潮に関する従来の考えを整理するためのシンポジウムが同時に行なわれました。私は、そのとき、話題提供者の1人として、だいたいいま述べましたようなことを話しました。このシンポジウム

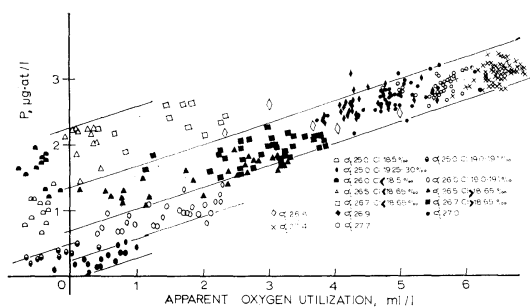


Fig. 4. A phosphate [to AOU] diagram for waters collected in the Oyashio and northern part of Kuroshio.

にはストンメル教授が出席しておりました。彼は、シンポジウムの後で、レッドフィールド教授に私の話を伝えたいから、講演原稿の写しをもらえないか、といわれました。後日、レッドフィールド教授から、私の話に興味をもったという手紙といっしょに、その頃出版されたばかりの「The Sea」(1963年刊)の中の彼の論文の写しをいただきました。感激して彼の論文を読みました。しかし、率直に言って、彼の論文には賛成できませんでした。そのわけを話しましょう。

彼は、海水中における栄養塩相互およびそれらと酸素の変化量の間には、海洋プランクトンの平均組成に近い組成をもつ集団が完全に酸化分解するときに期待できる量的関係が認められると本文の中で述べているのですが、添付の図 (Fig. 5, 6) の中で、彼が示した直線 (図の実線) は、そのような量比を与えておりません。それに反して、私が後で述べますような比率をもつ勾配の直線 (図の破線) をとりますと、それは点の分布の特徴をはるかによく表わすことがわかりました。たとえば、Fig. 5 の黒丸は、1,000 m 以深の水ですが、これなど、かなりよく破線の勾配と一致します。Fig. 5 では、上積みした点ほど保存性硝酸塩の濃度が高いのです。以上に指摘した誤りは、レッドフィールドが、水温・塩素量によ

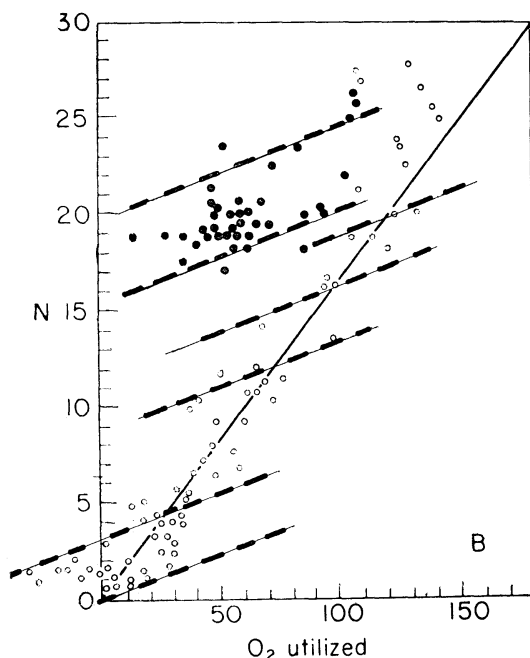


Fig. 5. Relationship between nitrate-N and oxygen utilized (AOU) in  $\mu\text{g at/l}$ . Solid line (REDFIELD) and broken line (SUGIURA).

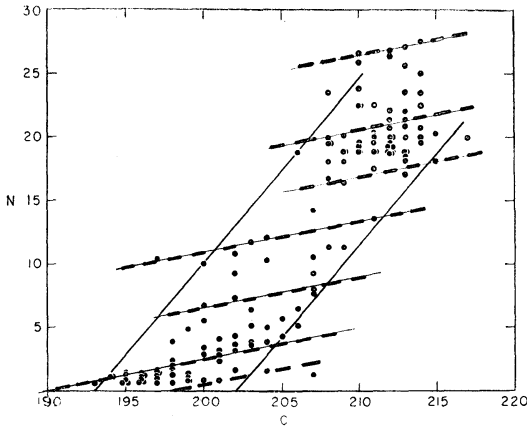


Fig. 6. Relationship between nitrate-N and carbon in  $\mu\text{g at/l}$ . Solid line (REDFIELD) and broken line (SUGIURA).

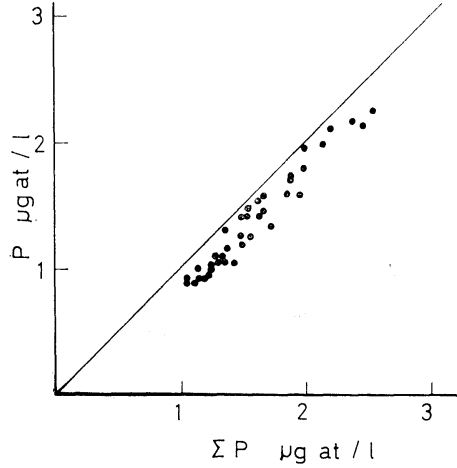


Fig. 7. Relationship between phosphate and total phosphorus concentration in waters off the east of Honshu.

る水の分類という簡単な操作を怠ったためだ、と私は考えています。

話をもとに戻しましょう。AOU の値に大小があるのは、酸化分解の材料になる有機物が、大部分、分解してしまったか、一部分だけに止まっているかの違いによるのだという見方と、もう一つ別の見方ができます。それは、AOU の違いは分解の進行の程度よりはむしろ分解以前にあった有機物の多少によるのだという見方です。実態はこのうちどちらなのでしょう。それは、有機物の中に含まれているリンまでも考慮に入れる、いわゆる全リンと、これまでの話で考えていたような無機のリン酸塩のみを、別々に、AOU の同じ値に対してプロットしてみるとわかります。

AOU が小さいのは、有機物の一部が分解したにすぎないからだというのであれば、全リンの濃度は AOU の値いかにかわらず変わらないが、リン酸塩の濃度は AOU の値とともに増減することになります。一方、AOU の違いは、分解の程度よりむしろ分解以前にあった有機物の量によるのだということであれば、全リンもリン酸塩も、その濃度は AOU の値とともに増減することになります。これら二通りの変化形態に対して、観測事実は後の方と一致しました。それは、Fig. 7 でわかります。これは、無機のリン酸塩の濃度を全リンの濃度に対してプロットしたものです。リン酸塩濃度より全リンの濃度の方がいつもほぼ一定量だけ大きいようにみえます。この結果から、全リン-AOU プロットは、リン酸塩-AOU プロットにほぼ平行で少しばかり上の方に現われることが予想されます。事実も、そのようです。結局、おおかたの海洋の中では、有機物はほとんど分解し

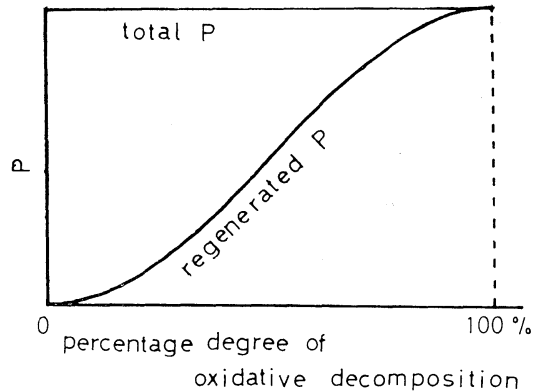


Fig. 8. Relationship between total phosphorus and regenerated phosphorus for each step of oxidative decomposition.

尽していると考えられます。しかし、100%までは分解しておりません。その証拠には、全リン-AOUプロットとリン酸塩-AOUプロットが完全に一致することがありません。80ないし90%くらい分解しているのが、事実のようです。浅い層で AOU の小さい水では、50%程度の分解もあり得るようです。分解の度合は、深い方が進んでいるようです。

以上のようなわけで、私たちが、数100m以深でふつうにみる現象は、有機物の酸化分解に関するかぎり、“is being done”の現象ではなく“has been done”あるいは“was done”の現象であると考えられます。

プランクトンを海水とともに容器に入れて暗所に放置すると、酸化分解が起きます。時々、海水をくみ取って酸素とリン酸塩の濃度を測ります。そしてリン酸塩-AOU

プロットを試みますと、この場合は、点が単純に一つの直線上にのってくることがありません。それは、シグモイド型に近いものになります。(Fig. 8) 少なくとも、それは、勾配の違う直線の組合わせのようにみえます。これに対して、現場の海水の場合は、すでに指摘したように、一つの直線になります。明らかに違います。シグモイド型に近い室内実験のパターンを再生曲線と呼

びましょう。室内実験のときは、全リンの濃度は、実験のはじめから終りまで不変です。これは、さきに挙げた二通りの変化形態のうちのはじめの方に相当します。これに対して、海洋で実際に起きている現象は後の方です。全リンの濃度は AOU の大小に応じ、等しくありません。

次に、海洋で実際に起きている現象と再生曲線の関係について述べましょう。それは、まず Fig. 9 のように

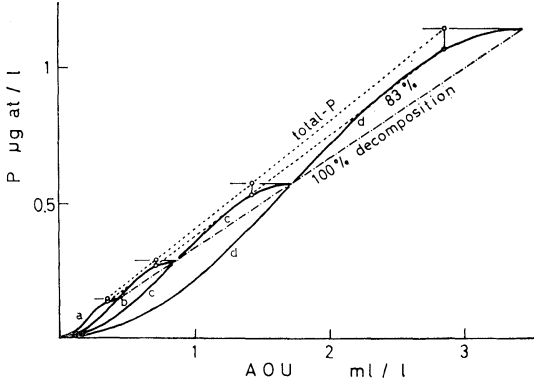


Fig. 9. Relationship among the phosphate to AOU plot (chain for 100% and lower dotted line for 83% decomposition), the total phosphorus to AOU plot (upper dotted line) and the regeneration curve (solid line).

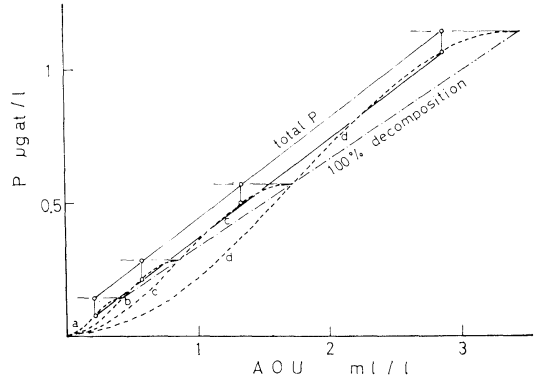


Fig. 10. The requisites for the parallelism between the total phosphorus to AOU plot and the phosphate to AOU plot. Dotted lines show the regeneration curves.

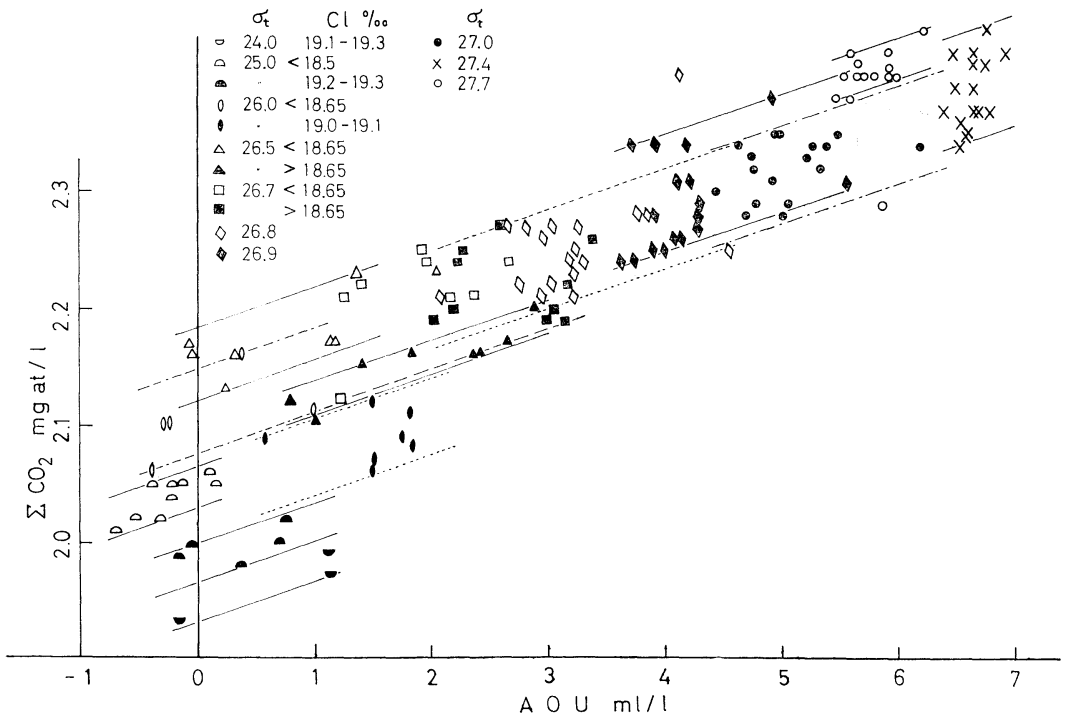


Fig. 11. Relationship between total carbon dioxide and AOU.

考えられます。

Fig. 9 では、4 種類の水を考えています。その有機物含量は 1:2:4:8 で、有機物の主成分の組成は、海洋プランクトンの平均組成に等しいと仮定しましょう。4 種類の水の有機物は、酸化分解に当って、それぞれ別のシグモイド型にそって変化し、AOU のそれぞれの値に対応したリン酸塩濃度を与えます。どの水も 100% 分解した場合には、AOU とリン酸塩濃度が定める四つの点は、もちろん、一つの直線上に並びます。しかし、この場合には、全リン-AOU プロットは、リン酸塩-AOU プロットと完全に重なってしまいますが、実際の観測結果では、そうはなっていません。二つのプロットは、現実には、わずかに距ったほぼ平行の直線となっております。次に、四つの水について、一様に、たとえば 83% ずつ分解したと仮定しますと、二つの直線は、Fig. 9 のように、AOU の増大とともに少しずつ互に遠ざかる末広りの形になります。観測事実のように、二つの直線が平行になるためには、AOU の小さい水ほど酸化分解が若干遅れていることが必要です。Fig. 10 はそれを示しています。こういうことは、現実にはきわめて起こりそうなことであると思います。

酸化分解が 100% 行なわれるとしますと、海水の P と O の原子比は、平均組成をもつ海洋プランクトンが完全に酸化分解するとき期待される P と O の原子比、つまり 1:276 に等しいはずですが、実際には、前述のように、分解が 100% まで行なわれたとは考えられませんから、海水の P:O 比も 1:276 とは少しばかり違う値をとるのではないかと考えられます。Fig. 4 をみますと、

その値は 1:270 くらいに思われます。

Fig. 11 は、黒潮と親潮が出合う海の海水について、全炭酸-AOUプロットの結果を示しています。全炭酸というのは、海水中の重炭酸イオン、炭酸イオン、解離していない炭酸の分子とそれに炭酸ガスを加えたものです。その中では、重炭酸イオンの量が圧倒的に多いのです。Fig. 11 をみますと、この場合も、水温・塩素量の等しい水に関するかぎり、点の配列が一直線をなすことは、リン酸塩-AOUプロットの場合と変わりません。直線の傾きから、海水の C:O の原子比はおよそ 100:270 であることがわかります。

Fig. 12 は、本州東北方海域の水について、硝酸塩-AOUプロットを試みた結果です。この場合も、さきのリン酸塩や全炭酸の場合と同様、水温・塩素量の等しい

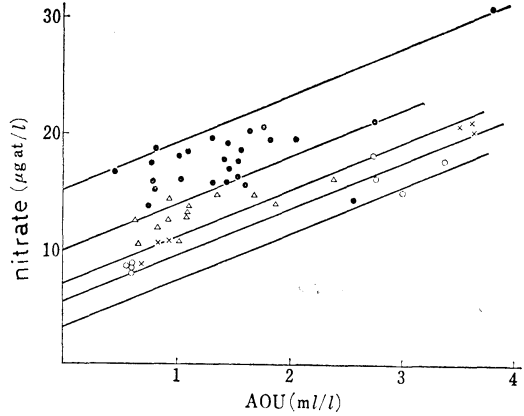


Fig. 12. Relationship between nitrate-N ( $\mu\text{g at/l}$ ) and AOU ( $\text{ml/l}$ ).

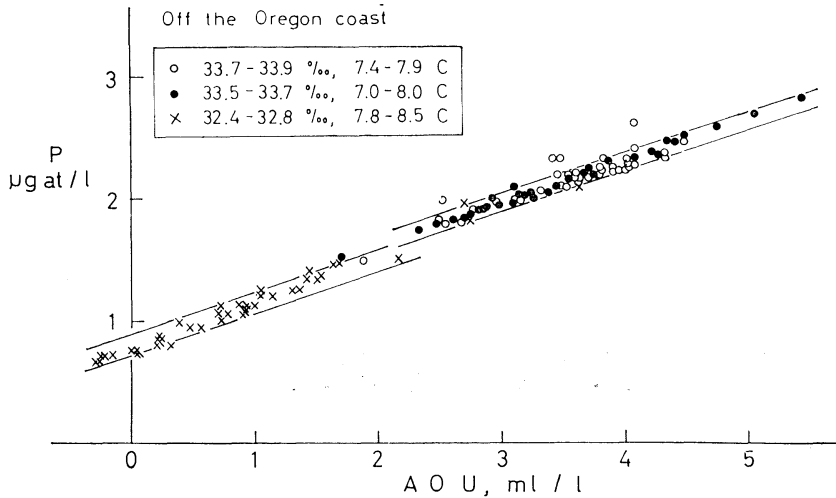


Fig. 13. Relationship between phosphate and AOU off the Oregon coast.

水同志の間では、点の配列は直線となります。直線の傾きから、N:Oの原子比は、12.5:270であることがわかります。結局、Fig. 4, 11, 12の比較によって、海水のP:N:C:Oの原子比はおおよそ1:12.5:100:270であることとなります。平均組成のプランクトンが完全酸化するときには、上の値は、1:16:106:276となります。両者の値の近いことが注目されます。この点からみても、実際の海洋では、平均組成に近い組成の海洋プランクトンが100%近くまで酸化分解していると考えられます。

以上の話は、本州の東北方海域にかぎられておりましたが、海洋の他の場所でも、同様のことが期待できる例として、米国オレゴン州沖での観測結果を示しておきます。Fig. 13がそれを示します。同様のことは、インド洋、南水洋、大西洋の資料についても確かめられました。これらは、また、水温・塩素量による保存性リン酸塩濃度の類別という操作が、普遍的に妥当なものであることを示しているとも考えられます。

Fig. 4やFig. 13から、保存性リン酸塩の濃度  $P_c$  は、 $\{P(\mu\text{g at}/D) - \text{AOU}(\text{ml}/D)/3\}$  で計算できることがわかります。

Fig. 14は、本州東北方海域において、 $\sigma_t$ が26.5と26.7の間にある水の塩素量と保存性リン酸塩の濃度の関係を示しています。点の配列は直線になっています。図では、4種の水を区別していますが、これらの水温と塩素量の間には、Fig. 15の関係があります。Fig. 14と15によって、本州東北方海域では、保存性リン酸塩の濃度は、水温・塩素量の低い水において高く、水温・塩素量の高い水において低いことがわかります。途中の水は、

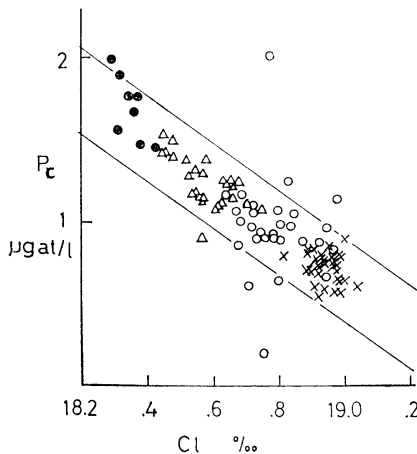


Fig. 14. The relationship between chlorinity (Cl) and conservative phosphate concentration ( $P_c$ ) in waters collected off the northeastern coast of Honshu.

両端の水が混合してできたと考えられます。

ところで、観測網を日本の南方、赤道まで拡大して、その結果をFig. 14の上につけ加えますと、Fig. 16のようになります。これをみますと、追加した点の一部は、本州東北方海域で認められた直線状の  $P_c$ -Clプロットの延長上にきますが、他の一部はその上の方に現われます。延長上にくる水は、本州東北方海域にある混合水の一方の源泉水であると考えられます。その上方を占める水は、本州東北方海域の混合水とは一応無関係でしょう。

これら二つの水の群れが、実際にどんな配置をとるかを調べました。Fig. 17がそれを示します。二つの水の境界は  $8^\circ\text{N}$  付近にあります。これは、北赤道流と赤道反流の境界とほぼ一致することはおもしろいと思います。以上によって、本州東北方海域の混合水の一方の起源は、北赤道流の中に見出されるということがわかります。

最後に一言つけ加えさせていただきます。Fig. 14が示すように、水の保存性リン酸塩の濃度は、混合によっ

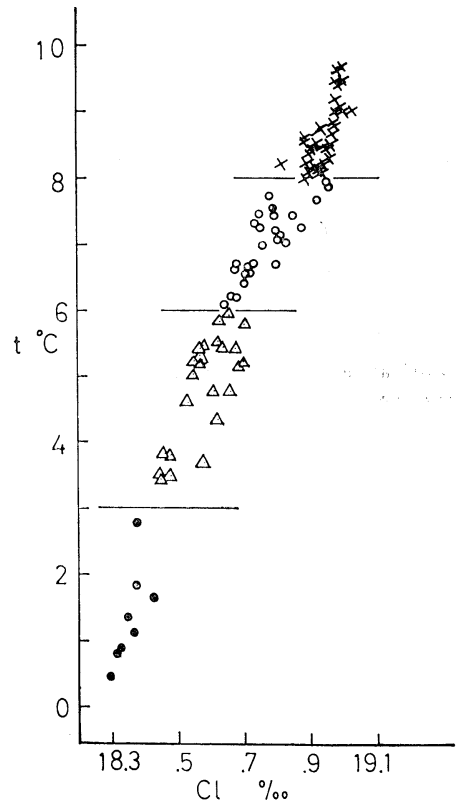


Fig. 15. The T-Cl diagram of waters with the density of  $\sigma_t$  26.5 to 26.7 collected off the northeastern coast of Honshu (the main island of Japan). Waters are classified into four groups according to water temperature.

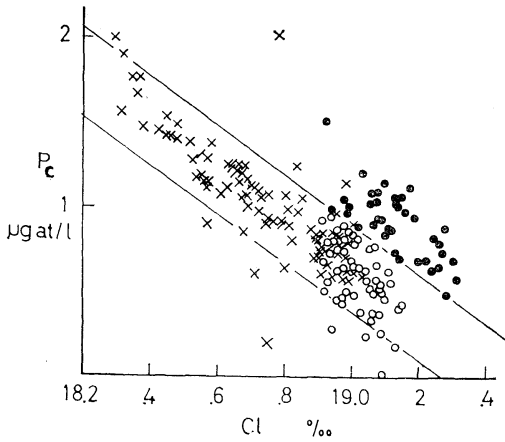


Fig. 16. The relationship between Cl and  $P_c$ . Crosses for waters collected off the northeastern coast of Honshu and circles (black and white) for waters collected off the east coast of the Philippine Islands. The upper straight line of two divides circles into two groups, black and white.

て、次第にその濃度を変えることがわかります。レッドフィールドのいう preformed phosphate について彼が考えているように、固定された値を維持することはできません。この点も、「The Sea」の中のレッドフィールドの論文は訂正を要すると思います。そこで、私は preformed phosphate とはいわず、水温・塩素量だけに依存するという意味で、「保存性リン酸塩」という言葉を用いました。それと対比の意味で、レッドフィールドのいう oxidative phosphate を「非保存性リン酸塩」と呼んだのです。これは、水温・塩素量ではなく AOU に

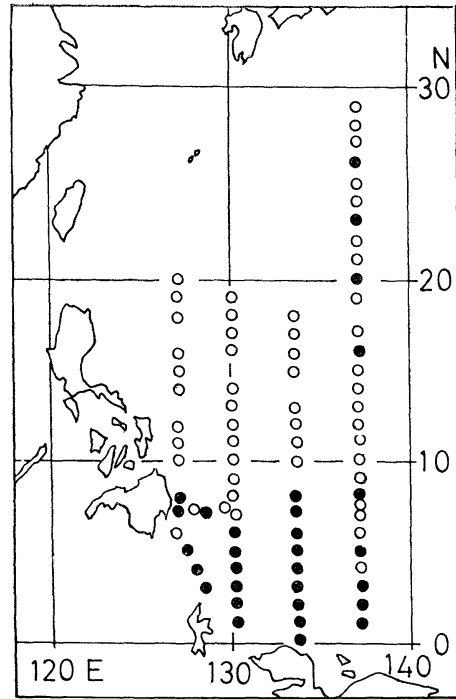


Fig. 17. Distribution of two groups of waters with higher and lower concentration of  $P_c$  on the isopycnal plane of  $\sigma\text{-}t$  26.5 to 26.7.

依存する量です。

保存性リン酸塩も非保存性リン酸塩も、同じくリン酸塩である点では、何も区別することができません。しかし、リン酸塩を、この二つの成分に分割することによって、以上に説明しましたように、栄養塩に対する物理的意味づけが比較的容易になることは否定できません。



## 学 会 記 事

1. 昭和45年4月14日、東方会館（池袋）において、来日された「海洋開発フランス政府代表团」（団長：クネクソ長官 Y. ラ・プレーリー氏外6名）を迎えて本学会主催のレセプションを開催した。
2. 昭和45年5月27日、理化学研究所駒込分所において評議員会が開かれた。
  - 1) 会務および編集報告が行なわれた。
  - 2) 昭和44年度の収支決算および昭和45年度の予算案について審議された。
  - 3) 今村委員長より学会賞受賞候補者の選考経過報告があり、杉浦吉雄氏を推薦したと報告された。学会賞規定により投票の結果、同氏が受賞者と決定した。
  - 4) 学会賞規定により45年度の学会賞受賞候補者推薦委員13名を下記のとおり選出した。  
秋山 勉、有賀祐勝、今村 豊、岩田憲幸、加賀美英雄、梶浦欣二郎、鬼頭正隆、草下孝也、宮崎千博、杉浦吉雄、多賀信夫、高野健三、富永政英（abc順）
  - 5) 45年度の編集委員は、現在の委員がそのまま引き継ぐことになった。
  - 6) 富永委員長より本学会10周年記念事業について報告された。なお、募金などについて検討された。
  - 7) 来る9月13日～25日に東京で開かれる IAPSO 第15回総会の会期中、第1回国際海洋開発展が開かれるが、本学会は協催することにした。
3. 昭和45年5月28日、日仏会館会議室において第11回総会が開かれた。  
佐々木会長の挨拶に引き続き次の報告、審議が行なわれた。
  - 1) 昭和44年度の会務並びに会計報告（大柴常任幹事）が行なわれた。なお、44年度の収支決算（別表）は監事の監査を受けて承認された。  
会員移動：44年度新入会員は正会員24名、賛助会員3社；退会は正会員7名（内死亡1）、賛助会員1社である。  
昭和45年3月31日現在の会員数は名誉会員12名、正会員393名、賛助会員45社である。
  - 2) 今村編集委員長より学会誌第7巻の編集経過報告が行なわれた。  
7巻1号～4号は総ページ数300ページ、その内訳は論文18編（和文5編、英文11編、仏文2編）、寄稿3編、資料5編、シンポジウム1編、総説1編、その他録事などである。

なお、「うみ」1巻1号～7巻4号（昭和38年～44年）の総ページ数は1,522ページで、論文77編（和文25編、英文40編、仏文12編）、寄稿21編、資料38編、総説3編、シンポジウム記録7編、講演記録8編である。

- 3) 今村委員長より学会賞受賞候補者の選考経過報告が行なわれた。
- 4) 富永委員長より本学会10周年記念事業について次の報告があった。  
本学会が45年4月で10周年を迎えるに当たり、8名の委員（加賀美、川原田、大柴、杉浦、高木、高野、富永、山中）が選出され、富永氏が委員長となってその第1回委員会を44年11月4日に、第2回を同11月27日に開いて記念事業の大綱を決めた。そして、学会長と委員長から学会員並びに海洋に関心のある企業宛に記念事業、学会賞基金などに対する寄付を要請し、各位の御協力によりかなりの成果を挙げることができた。学術講演会は45年5月28、29の両日、日仏会館会議室で行なうことにした。  
なお、28日夜はホテルニュージャパンにおいて祝賀記念パーティーを開くことにした。
- 5) 昭和45年度の予算案について審議の結果、別表のとおり承認された。

### 昭和44年度収支決算

#### 収 入

項 目	収入額（円）	備 考
前年度繰越金	0	
会 費	348,300	
賛 助 会 費	370,000	74口
学 会 誌 売 上	54,980	
広 告 料	415,000	
賛 助 費	190,000	
計	1,378,280	

#### 支 出

項 目	支出額（円）	備 考
学会誌等印刷費	1,240,800	第7巻
送 料 通 信 費	79,000	
編 集 費	20,000	
事 務 費	11,000	

交 通 費	17,480
総 会 費	10,000
次 年 度 繰 越 金	0

計 1,378,280

昭 和 45 年 度 予 算 案

収 入

項 目	収 入 額 (円)	備 考
前 年 度 繰 越 金	0	
会 費	360,000	450 名 80 %
賛 助 会 費	400,000	80 口
学 会 誌 売 上	70,000	
広 告 料	480,000	
賛 助 費	160,000	
計	1,470,000	

支 出

項 目	支 出 額 (円)	備 考
学 会 誌 等 印 刷 費	1,305,000	第 8 卷
送 料 通 信 費	80,000	
編 集 費	20,000	
事 務 費	15,000	
交 通 費	20,000	
総 会 費	10,000	
予 備 費	20,000	
計	1,470,000	

4. 総会終了後、引き続き学会賞授与式が行なわれた。  
 昭和 45 年度日仏海洋学会賞受賞者： 杉浦吉雄氏（気象研究所）  
 受賞課題： 日本近海海水の海洋化学的研究(別項推薦理由書参照)
- 1) 佐々木会長より杉浦吉雄博士に賞状、メダルおよび賞金が授与された。
  - 2) 菅原 健博士の祝辞が述べられた。
  - 3) 学会賞授与式終了後、杉浦氏の受賞記念講演が行なわれた。(講演内容は本号に掲載)
5. 5月28日 18.30 よりホテルニュージャパンにおいて祝賀記念パーティーが開かれ、多数参加され盛会であった。
6. 昭和 45 年 5 月 28 日、29 日の両日、日仏会館会議室において本学会 10 周年記念学術研究発表会が開かれ

た。1 題につき約 1 時間を費し十分に討議することができ、多数の参加者を得て有意義であった。

第 1 日

午 前 の 部

座長： 梶浦欣二郎（東大地震研）

1. 波浪スペクトルの船上測定  
 …… 平 啓介・竹田 厚（東大海洋研）
2. ひずんだ時系列の解析について  
 …… 永田 豊（東大・理）

午 後 の 部

座長： 黒木敏郎（東大海洋研）

3. 北太平洋北部における海洋環境研究の進歩と今後の問題…… 辻田時美（北大・水産）
4. 海洋開発と遠洋漁業…… 奈須敬二（遠洋水研）

第 11 回 総 会

学 会 賞 受 賞 記 念 講 演

座長： 三宅泰雄（東教育大）

日本近海海水の海洋化学的研究 …… 杉浦吉雄（気象研）

第 2 日

午 前 の 部

座長： 富永政英（埼玉大・理工）

5. 沿岸波浪と沿岸流の計測…… 岩田憲幸・田中孝紀・藤縄幸雄（防災科技センター）・関本道夫（鶴見精機）・浅田康夫（北辰電機）
6. 南北断面における三次元的海流推算  
 …… 日高孝次（東海大、東大海洋研）

午 後 の 部

座長： 川原田 裕（気象庁）

7. 未熟概念としての水産資源学と漁場学  
 …… 高木和徳（東水大）
8. 動物プランクトンの鉛直移動と水中照度条件との関連に関する研究  
 …… 伊藤克彦・花岡 資（九大・農）

座長： 亀田和久（原研）

9. 海洋における人工放射性物質…… 猿橋勝子（気象研）

座長： 富永政英（埼玉大・理工）

総 合 討 論

7. 下記の諸氏が入会された。

正 会 員

氏 名	所 属	紹 介 者
諏訪部 正	日 大 ・ 工	佐々木忠義
北田 浩三	ユニチカ興発(株)	"
佐藤 道幸	東 理 大 ・ 理	"

氏 名	新住所又は新所属
長谷川俊彦	東 理 大 ・ 理 佐々木忠義
福田 直弘	” ”
森谷 誠生	” ”
8. 会員の住所, 所属の変更。	
氏 名	新住所又は新所属
高橋 正美	神奈川県中郡伊勢原町伊勢原 257 軽部勝蔵方
椎野 季雄	三重県志摩郡阿児町賢島 志摩マリンランド
安永 明生	清水市宮加三 789 鈴木工業 (株)
飯田 宏一 (旧姓渡部)	東京都荒川区町屋 8-3-14 荻原方
井川 良勝	東京都大田区久ヶ原 5-2-13 信和パーツ (株)
内藤 宗一	横浜市鶴見区汐田町 4-157-3
浦 純二	東京都渋谷区渋谷 2-12-6 共栄ビル 日本港湾コンサルタント
御前 洋	西宮市上ヶ原五番町 2-53
小林平八郎	清水市折戸 1,000 東海大学海洋学部
赤松 英雄	舞鶴市北吸 舞鶴海洋気象台
横尾 敏博	清水市折戸 1,000 東海大学海洋学部
川村文三郎	東京都中央区築地 5-3-1 海上保安庁水路部
岩田 憲幸	東京都武蔵野市緑町 2-6 17-19
田崎 邦男	清水市折戸 1,000 東海大学海洋学部
下総 忠敬	東京都港区六本木 4-11-10 六本木 富士ビル 日本テレコム (株)
岩田喜三郎	清水市駒越 458 辻昇方
津川 順司	清水市寿町 2-8
高野 健三	埼玉県北足立郡大和町広沢 2-1 理化学研究所

9. 死 亡

本学会顧問ルネ・カピタン氏は昭和45年5月23日、フランスで逝去された。同氏は昭和32年から35年まで東京の日仏会館学長を勤められた。謹んで御冥福を祈る。

10. 退 会

正会員: 山城宏之, 田中清隆, 丹葉節郎, 福永時男, 南日俊夫

賛助会員: 東京海上火災保険 (株) 東京営業第二部

11. 交換および寄贈刊行物。

- 1) 日仏理工科会誌, 16, 1970.
- 2) 海洋機器開発, 2(2, 3), 1970. (日本船用機器開発協会)

- 3) 神戸海気象報, No. 183.
- 4) 研究実用化報告, 19(2~4), 1970. (電通研)
- 5) 航海, 31号, 1970.
- 6) 海洋観測資料, 昭40年, 44年12月。(舞鶴海気)
- 7) 舞鶴海気要報, 11号, 昭44.
- 8) 東海大海洋学部業績集, 第3集, 昭42~43年度.
- 9) ウォーターレビュー, 2(33~37), 1970. (工業開発研)
- 10) Cahiers Océanogr., XXII<sup>e</sup> Année N° 1~3, 1970.
- 11) Science et Pêche, N° 187 (1969), 188 (1970).
- 12) Revue des Travaux de l'Inst. des Pêches Maritimes, Tome XXXIII Fasc. 4, 1969.
- 13) 神奈川県立博物館調査報告, 1号, 自然科学. 1970.
- 14) 早大理工学部紀要, 33号, 1969.
- 15) 日本海区水研研究報告, 22号, 1970.
- 16) 科学博物館研究報告, 3(1), 1970.
- 17) 表題目次とその索引, 昭44. (日本海区水研)
- 18) 港湾技研資料, No. 97, 98, 1970.
- 19) 港湾技研報告, 9(1), 1970.
- 20) 海洋観測資料, 昭和27年, 42年, 1970. (水産庁)
- 21) 淡水区水研報告, 19(2), 1969.
- 22) 釜山水産大学臨海研研究報告, 3, 1970.

日仏海洋学会賞受賞候補者推薦理由書

氏 名: 杉浦吉雄 (気象研究所)

題 目: 日本近海海水の海洋化学的研究

推薦理由: 杉浦氏は主に日本近海海水を対象として物質分布のもつ海洋学的意義の解明に努力し、優れた着想と精緻な資料解析とによって多くの重要な事実を明らかにした。最近5年間に発表された論文は「うみ」(日仏海洋学会誌)誌上の9編を含めて14編に達し、その内容は多岐にわたっているが、主なものを要約すれば次の通りである。

- (1) 海水中の栄養塩, 炭酸物質, pH の値が保存性成分と非保存性成分の和として与えられることの確認, および両成分の分離法の指摘。
- (2) これら諸要素と酸素の変化量との間の直線関係の意義の解明。
- (3) これら諸要素の保存性を利用した日本近海水塊の分析。
- (4) 表面水中の pH の酸素の分布に基づく大気・海洋間気体交換の遅れの指摘。
- (5) 鉄, アルミニウム懸濁粒子の分布による海水の流れの追求。

(6) 酸素極小層の形成機構についての新見解と問題点の指摘。

(7) 電気伝導度測定から求めた塩素量と滴定法によって求めた塩素量との差の海洋化学的意義の解明。

以上の成果は海洋化学の進歩に貢献する所が顕著であり、本賞を受けるに十分値する。

学会賞受賞候補者推薦委員会

委員長 今村 豊

### 主要論文

- 1965: On the reserved nutrient matters, うみ, **2**(2), 87-91.
- 1965: Distribution of reserved (preformed) phosphate in the Subarctic Pacific region. *Pap. Met. Geophys.*, **15**(3-4), 208-215.
- 1966: The total carbon dioxide in the ocean. 同上, **16**(3-4), 230-236.
- 1966: Electrical conductivity, chlorinity and salinity. うみ, **4**(3), 184-192.
- 1967: The significance of the difference in conductometric chlorinity minus titrimetric chlorinity. *Rec. Oceanogr. Wks. Jap.*, **9**(1), 55-64.
- 1967: Total carbon dioxide and its bearing on the dissolved oxygen in the Oyashio and in the frontal region of the Kuroshio. *Geochem. Jour.*, **1**(3), 125-130.
- 1968: 日本近海における表面水の AOU の分布とその意義—大気・海洋間における気体交換の遅れ. うみ, **6**(1), 9-16.
- 1968: オレゴン沖の海洋化学. 同上, **6**(2), 105-114.
- 1968: 日本近海における pH の分布とその意義. 同上, **6**(2), 115-119.
- 1968: 日本海における鉄・アルミニウムの分布とその海洋学的意義. 同上, **6**(3), 161-167.
- 1969: On the oxygen—minimum layer in the oceans. 同上, **7**(2), 161-167.
- 1969: Why does the phosphate to AOU plot give a straight line? 同上, **7**(2), 168-170.
- 1969: Identification of the source region of the Kuroshio water by the conservative phosphate concentration. *日本海洋学会誌*, **25**(5), 229-232.
- 1969: 日本海における鉄・アルミニウムの分布とその海洋学的意義—(第2報) 東支那海およびオホーツク海との関係. うみ, **7**(4), 249-253.

### 日仏海洋学会役員

- 顧問 ユベール・ブロッシェ ジャン・デルサルト  
ジャック・ロベール
- 名誉会長 アレクシス・ドランデル
- 会長 佐々木忠義
- 常任幹事 大柴五八郎, 永田 正
- 幹事 阿部友三郎, 石野 誠, 井上 実, 今村 豊  
岩下光男, 宇野 寛, 川原田 裕, 神田献二  
菊地真一, 鬼頭正隆, 草下孝也, 斎藤泰一,  
佐々木幸康, 杉浦吉雄, 高木和徳, 高野健三  
辻田時美, 富永政英, 奈須敬二, 西村 実,  
根本敬久, 半沢正男, 松尾邦之助, 丸茂隆三  
森田良美, 山中鷹之助 (50音順)
- 監事 三宅泰雄 高山重嶺
- 評議員 赤松英雄, 阿部友三郎, 阿部宗明, 新崎盛敏,  
池松正人, 石野 誠, 市村俊英, 井上直一,  
井上 実, 今井丈夫, 今村 豊, 入江春彦,  
岩崎秀人, 岩下光男, 岩田憲幸, 上野福三,  
宇田道隆, 内田清一郎, 宇野 寛, 江上不二夫,  
大内正夫, 大島泰雄, 大柴五八郎, 大村秀雄,  
岡部史郎, 小沢敬次郎, 梶浦欣二郎,  
金谷太郎, 川合英夫, 川上太左英, 川村輝良  
川村文三郎, 川口守一, 川原田 裕, 神田献二,  
菊地真一, 鬼頭正隆, 木村喜之助, 草下孝也,  
楠 宏, 国司秀明, 黒木敏郎, 黒沼勝造,  
久保田 穰, 小林 博, 小牧勇蔵, 近藤 仁,  
西条八束, 斎藤泰一, 斎藤行正, 坂本市太郎,  
佐々木忠義, 佐々木幸康, 猿橋勝子,  
椎野秀雄, 柴田恵司, 下村敏正, 庄司大太郎,  
末広恭雄, 杉浦吉雄, 須藤英雄, 高野健三,  
高橋淳雄, 高山重嶺, 高木和徳, 田畑忠司,  
田村 保, 千葉卓夫, 辻田時美, 土屋靖彦,  
寺本俊彦, 富永政英, 鳥居鉄也, 中井甚二郎,  
中野猿人, 永田 正, 永田 豊, 永野泰一,  
奈須敬二, 奈須紀幸, 新野 弘, 西村 実,  
新田忠雄, 根本敬久, 野村 正, 花岡 資,  
速水頌一郎, 半沢正男, 半谷高久,  
菱田耕造, 日比谷 京, 松山義夫, 平野敏行  
深沢文雄, 福島久雄, 淵 秀隆, 藤田亀太郎  
星野通平, 増沢譲太郎, 松井 魁, 松江吉行  
松尾邦之助, 松崎卓一, 松平近義, 松平康男  
丸茂隆三, 溝口哲夫, 三宅泰雄, 宮崎千博,  
宮崎正衛, 元田 茂, 森川光郎, 森田良美,  
森安茂雄, 安井 正, 矢部 博, 山路 勇,

山中鷹之助, 山中 一, 依田啓二, 渡辺貫太  
郎, 渡辺精一, 渡辺信雄 (50音順)

モーリス・アンコントル, マルセル・ジュク  
ラリウス, イヴ・ド・ムクシー, ロジェ・ペ  
リカ, コンスタンタン・エコノムー

賛 助 会 員

井 出 利 明  
株式会社内田老鶴園新社 内田至  
梅 林 弘 直  
小樽船用電機株式会社  
海上電機株式会社  
日本テレスコム株式会社  
協同低温工業株式会社  
協和商工株式会社  
小松川化工機株式会社  
株式会社光電製作所  
小山 康 三  
株式会社産 研  
三信船舶電具株式会社  
三洋水路測量株式会社  
シュナイダー財団極東駐在事務所  
昭和電装株式会社  
大洋電機株式会社  
株式会社鶴見精機工作所  
帝国酸素株式会社  
東京工材株式会社  
東京レップ株式会社  
株式会社東邦電探  
株式会社ナック  
日本アクアラング株式会社  
日本海事広報協会海の世界編集部  
有限会社日本ダイビングスポーツ  
日本テトラポッド株式会社  
日本無線株式会社  
船用電球株式会社  
有限会社ハラダ電機製作所  
ヒエン電工株式会社  
深 田 多 満 男  
藤 田 潔 潔  
藤 田 峯 雄  
フランス物産株式会社  
古野電気株式会社  
三菱重工業株式会社  
株式会社吉田製作所  
吉野計器製作所  
株式会社離合社  
株式会社渡部計器製作所

釧路市白金町 11  
東京都千代田区九段 1-2-1  
東京都千代田区大手町 2-4 新大手町ビル7階 極東貿易株式会社  
小樽市色内町 1-20  
東京都千代田区神田錦町 1-19  
東京都港区六本木 4-11-10 六本木富士ビル  
東京都千代田区神田佐久間町 1-21 山伝ビル  
東京都豊島区目白 4丁目 24-1  
東京都江戸川区西小松川 1-2645  
東京都品川区上大崎 2-10-45  
東京都文京区本駒込 5-13 英和印刷社  
沼津市千本郷林 1907  
東京都千代田区内神田 1-15  
東京都港区新橋 5-23-7 三栄ビル  
東京都港区芝罘平町 38 日本ガス協会ビル  
高松市福岡町 467  
東京都千代田区神田錦町 3-16  
横浜市鶴見区鶴見町 1506  
神戸市兵庫区高松町 22-1  
東京都中央区築地 4-2 築三ビル  
東京都豊島区池袋 2-1120 ローズマンション 302号  
東京都杉並区上高井戸 5-327  
東京都中央区銀座 1-5-6  
東京都豊島区北大塚 1-16-6 大塚ビル  
東京都港区琴平町 35 船舶振興ビル  
神戸市兵庫区神田町 3  
東京都港区新橋 2-1-13 新橋富士ビル9階  
東京都港区芝桜川町 25 第五森ビル  
東京都目黒区下目黒 1-6-21  
東京都豊島区池袋 8-3292  
堺市松屋町 1-3  
東京都港区芝虎ノ門 8 虎ノ門実業会館 深田サルベージ株式会社  
東京都中央区銀座西 7-6 株式会社ビデオプロモーション  
東京都江東区南砂 1-3-25 株式会社 中村鉄工所  
東京都千代田区神田錦町 1-6 教文館内  
東京都中央区八重洲 4-5 藤和ビル  
東京都千代田区丸の内 2-10  
東京都台東区上野 3-13-9  
東京都北区西ヶ原 1-14  
東京都千代田区神田鍛冶町 1-2 丸石ビル  
東京都文京区向丘 1-7-17

(50音順)

## 71年フランス国際海洋開発会議およびオーシャンエキスポについて

標記のフランス国際海洋開発会議 (COLLOQUE INTERNATIONAL SUR L'EXPLOITATION DES OCÉANS) およびオーシャンエキスポ (OCEANEXPO '71) はフランス運輸省、国立海洋開発センター (CNEXO)、海洋開発科学技術協会 (ASTEО)、新技術国際展示委員会海洋高等研究所 (CEMA) および世界中水連盟 (CMAS) 等のフランス海洋開発諸機関が共催を決定し、昭和46年3月9日より14日の6日間、ポルドー市において大規模に開催の運びとなったものである。

本学会は従来より日仏の海洋水産分野の科学協力、交流親善、共同研究等を促進してきたが、本件に関してはかねてより主催者である CNEXO、ASTEО 等の諸機関および在日フランス大使館より特に協力を要請され、また関係情報資料を得てきたが、この機に臨みより強力な日仏の海洋科学技術協力の実をあげるため最善の努力を傾注することにした。

本会議の議題は、海洋に関連する産業の発展プランを検討するべく企てられており、博覧会の諸部門と相互に関連づけられている。主要部会は組織委員会によって選ばれた報告とその討議にあてられる。各主要部会ごとに総括報告がなされる。さらに技術部会において、開発関係者および建設関係者によるその活動、および成果に関しての特有の諸問題について報告がなされることとなっている。

### 第Iテーマ 沿海地帯の工業開発

**主要部会** 新しい海運の到来に伴う港湾施設の変化の結果として臨海地帯の工業化が現代の特徴となっている。

バルク輸送 (石油・鉱石) および一般貨物輸送《集合単位 (Unités groupées)、コンテナ》の発展は、海洋貿易に新しい局面を開きつつある。大生産単位の構成は、その地理的理由により、工業の集中化を促し、それは港湾地域における都市化の進展を招き、さらにこれらの地域の環境に対して種々の重大な問題をひきおこしている。

港湾の外貌が変わるとともに、その機能も複雑化した。外洋と背後工業地域との接続点としての存在から港湾地域自体が主要な生産地域となりつつある。このことは以下にあげるような種々の影響をもたらしている。

- 巨大輸送単位による海洋交通の集中: 巨大輸送単位の着岸および港内への航門にもとづく水路および気象の問題; 新しい交通制御の方法; 港湾構造および施設の変更; 輸入原材料の取扱いおよび処理・加工
- 工業臨海地という考え方が伝統的な港の概念にとって変わりつつある状況のもとでの沿岸形態および沿岸工事技術の変化: 工業地域の拡張, 海岸の改良, 沿岸防災
- 基本原料の地元生産: 工業用への海水の脱塩化; 大陸棚からえられた原料, 炭化水素資源 (hydrocarbures), 原鉱石の利用または処理・加工

- 工業活動に基づく臨海地帯の公害および汚染の予防: 諸規定, 統御方法; 偶発的な公害を抑圧する可能性

**総括報告** 各国別, ヨーロッパおよび国際的規模における比較ストラテジー

**技術部会** 港湾施設および取扱い設備, 脱塩施設, 公害除去および汚染防止方法に関する諸報告

### 第IIテーマ 水産物の流通と水産養殖の開発

**主要部会** 世界的な食糧不足とこれに伴う食糧供給の量的増加および質的改善の必要にかんがみ, 水産物採取の合理的な開発が要求されており, とくに以下の問題を通じてこれを図る必要がある。

- 魚群 (Populations de poissons) の評価とその消長に影響を及ぼす海洋環境に関する知見
- 数的規模および更新率とに基づく魚群の適正採取
- 魚獲物の保存方法の改善
- 必要性および需要の変化に最も適した直接・間接の消費形態の研究
- 海洋養殖 (海洋動物の人工飼養) 適地の選択に必要な生態学の振興
- 水産物市場への人工養殖生産物の導入
- 水産物の高級化のための濃厚蛋白飼料の使用の可能性

**総括報告** 水産物の採取と販売を, 伸長させるための経済的なストラテジー

**技術部会** 魚群の探知と評価のための新しい技術と設備の導入, 水産企業および漁港の管理, 水産物の主要種目別の市場の規制, および流通経路の組織化に関する報告

### 第IIIテーマ 大陸棚の整備とその産業開発

**主要部会** 大陸棚は, 人類がもっとも直接に到達しうる大洋の地域であり, それ故にその炭化水素資源の鉱脈や鉱産資源をもっとも容易に開発しうる地域である。

現在進みつつある変化によって, 人類が大陸棚を完全

に征服する時が近づきつつある。

- 大陸棚の組織的な調査
- 産業的な規模での海底での人類の作業：種々の深度における活動の方法と技術
- 炭化水素資源、鉱物、その他の資源および有用物質の開発システムの海底への設置
- 難破物 (épaves) の位置の判定と引き揚げの可能性
- 大気圧での有人用または遠隔操作による海中作業用潜水棚
- 海面、海底に関しての位置確定のシステム
- 海底でのエネルギーの供給システム
- 海洋環境および開発条件ならびに使用設備に対するこれらの影響についての知見
- 大陸棚の開発が自然環境の均衡に及ぼす影響についての知見

**総括報告** 大陸棚の産業開発についての比較ストラテジー

**技術部会** 大陸棚の産業開発および使用設備に関する報告

**第 IV テーマ 深海の探査と開発の可能性**

**主要部会** 大洋深部の調査の進展は、長期的にはその開発の見通しへの関心を呼ぶと同時に、当面する技術上の困難な問題の解決によってのみ可能となるものである。

大洋深部の探査の急速なる発展は、科学関係者に対していくつかの新しい疑問を提起するとともに、産業関係者に対してはその開発の技術と装備の実用化をうながしている。

- 大洋の構造および海中環境のダイナミックスとその海底に与える影響についての知見
- 沈積地域 (Zones sédimentaires) および海底構造の解明
- 海洋プログラムの一環として地理的地域ごとの研究 (JOIDES プログラム, 国別, および国際的活動)
- 深部探査のための地質学および地球物理学方法論の開発
- 深部探査技術の開発: 作業艇, 測深機, 深海底のサンプリング, およびボーリングによる採取法
- 来たるべき深海底の開発のための技術上の諸問題
- 石油工業および鉱業の見地からする炭化水素資源の鉱脈, ポリメタル瘤 (Nodules polymétalliques) 等, 深海底の経済的開発の見通し

**総括報告** 深海底の探査および開発準備のストラテジー  
**技術部会** 深海底用設備に関する報告

**第 V テーマ 環境の分析と予測のための海洋測定システム**

**主要部会** 海洋開発事業の発展, 多様化と特殊化は, 海に対してしばしば苛酷な条件を課しがちである。従って, すべての活動の成否は, このような詳しい認識と, より練られた内容をもつ, その見通しとにかかっている。拡散と変化は, 空気と水との間に著しい量のエネルギーと運動量の交換が行なわれる海表面周辺でとくに重要であり, このことは, 海洋・大気間の相互作用の問題をとくに重要なものとしている。

海洋の広大な拡がり, 海水および大気集団の移動, 複雑な現象等は, 有用な認識と言える段階に到達するためには, 諸手段を動員, 結合することを必要としている。このことは, 国際協力によってのみ考えることが可能であり, たとえば国際連合の海洋に関する政府間委員会 (Commission Océanographique intergouvernementale) が世界気象機構 (Organisation Météorologique Mondiale, OMM) および海洋問題に関する政府間諮問機構 (Organisation Maritime Consultative Intergouvernementale, OMCI) との協力のもとに提案した海洋ステーションの世界総合システム (Système Mondiale Intégré de Stations Océaniques, SMISO) が挙げられよう。

- 二国間協力の一例: フランス・ソ連の共同活動, COFRASOV
- 多国間の共同活動: COBLAMED, MEDOC, BOMEX
- 海洋条件および気象条件との関連における石油採掘事業の可能性
- 海洋環境との関連における固定構造の構想の安全条件
- 汚染の移動と拡散: その予測の必要性
- 観測プラットフォームのシステム: 実現上の困難と提起される諸問題

**総括報告** 各国, 二国間および多国間の諸活動の国際段階への統合

**技術部会** 測定システム, 採取機, 浮標, 船舶, 空輸用プラットフォーム, および人工衛星に関する知見交換

会 議 組 織 事 務 局

仮住所; aux soins du CNEXO

Boîte Postale 107—Paris 16<sup>e</sup> FRANCE

### お 知 ら せ

#### フランス政府給費留学生募集

フランス政府は毎年フランス政府給費留学生を募集しているが、1971年度(1971~1972大学年度)留学生として約80名の日本人学生、研究者、専門家を募集する。給費の対象は、文学、人文・社会学、自然科学、医学、工学、芸術などあらゆる分野にわたる。

#### 出願資格

- 出願者の年齢は以下のとおり
  - 第一部門 仏文学、語学専攻(採用人数に制限あり)及び演出は30才未満(1941年1月1日以後出生の者)、現在フランス語の教職にあるか将来その予定であり、外国語としてのフランス語教育法を学ぼうとする者は40才未満(1931年1月1日以後出生の者)
  - 第二部門(人文科学及び第三部門(自然科学、医学、工学)の者は40才未満(1931年1月1日以後出生の者)
- 日本人であって二重国籍を持たない者。
- すでに大学を卒業した者、及び1971年3月卒業見込みの者。  
東京日仏学院、関西日仏学館のフランス文明講座を卒業した者、又はアテネ・フランセのブルヴェを持っている者。外国人学生のためのパリ大学第二課程試験合格者。旧制専門学校卒業生で大学(4年制以上)の専任講師以上の職にある者。医学専攻者は医師国家試験

- 合格者であること。
  - ただし、芸術を専攻する者は学歴を問わない。
- フランスの大学において学習するに足るじゅうぶんな仏語学力を有する者。
  - 心身ともに健全な者。

#### 出願手続

出願者は、国公立大学、日仏会館、アテネ・フランセ、東京日仏学院、関西日仏学館、又は、所属する官庁、会社から推せんされた者でなければならない。そのほか必要と思われる推せん状は、何種類出してもさしつかえない。

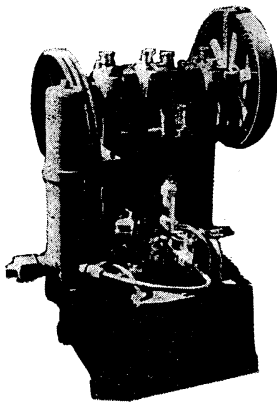
出願書類の提出については以下のとおり:

提出先: 文部省大学学術局長あて  
郵便番号 100 千代田区霞が関 3-2-2  
文部省大学学術局留学生課

受付期間: 1970年9月24日から10月20日まで  
なお、フランス大使館文化部留学生係あてに出願書類の仏文コピーを1部上記期間中に提出のこと。  
選考試験その他手続上の詳細なことは下記へお問合せください。

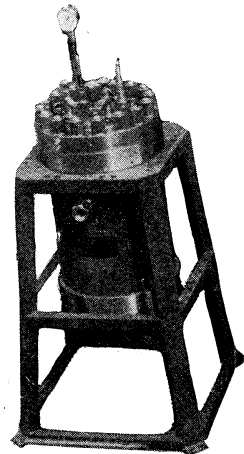
〒101 東京都千代田区神田駿河台 2-3  
日仏会館学長専務室 電話 291-1141

## ヨシダの海洋試験機



超高圧テストポンプ

- 水圧試験装置
- 高圧水圧ポンプ
- 流水実験装置
- 恒温水槽
- 回流水槽
- 衝撃試験機
- 抗張力試験機
- 摩耗試験機



高圧テスト容器

☆その他各種試験機装置設計製作



株式  
会社

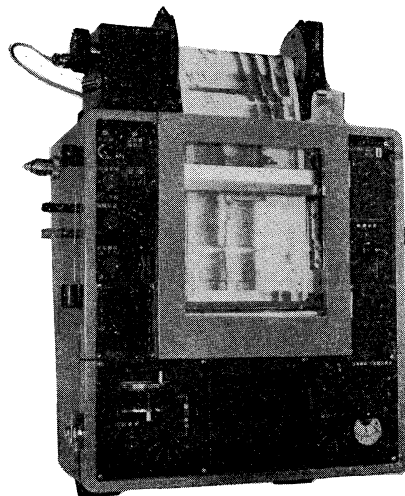
# 吉田製作所

東京都台東区上野3丁目13番9号 電話 (832) 4351~5





自動追尾方式ロラン受信機  
(日, 英, 仏, 加 特許)



ニュービデオグラフ  
トランジスター式, 二周波魚群探知機



## 古野電気株式会社

西宮市芦原町 85 電 (3) 1051

東部支社: 東京都品川区五反田 1~423 Tel. (447) 2311 代表

西部支社: 長崎市大黒町 2~1 Tel. (2) 3261 代表



潜水器具総合メーカー

# 日本ダイビングスポーツ

本 社 神戸市兵庫区神田町 3 番地

TEL 神戸 078 (34) 7959  
9451

# Murayama

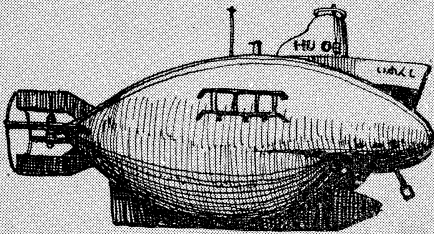
水中濁度計  
水中照度計  
電導度計



株式 村山電機製作所

本社 東京都目黒区五本木 2-13-1  
出張所 名古屋・大阪・北九州

海底資源の開発に活躍—潜水調査船“しんかい”



陸・海・空 世界に伸びる 本 社

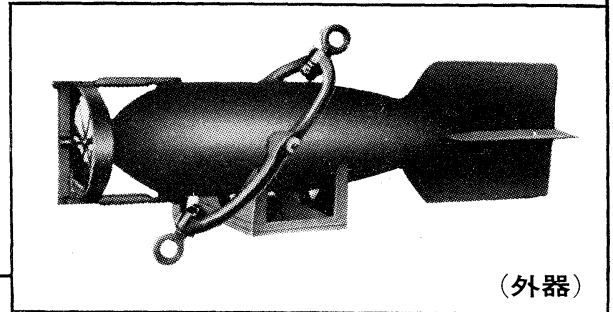
川崎重工

神戸市生田区中町通 2-16-1  
日生川崎ビル 3~7 階  
東京支社 東京都港区芝浜松町 3-5  
世界貿易センタービル

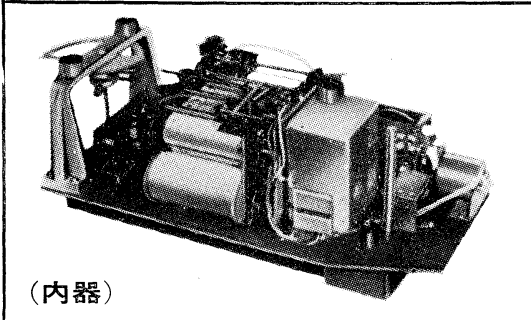
# 長期捲自記流速計

(NC-II)

本流速計は海中に設置し、内蔵した記録器に流速流向を同時に記録するプロペラ型の流速計で約20日間の記録を取る事が出来ます。但し流速は20分毎に3分間の平均流速を又流向は20分毎に一回、共に棒グラフ状に記録しますから読取が非常に簡単なのが特徴となっております。



(外器)



(内器)

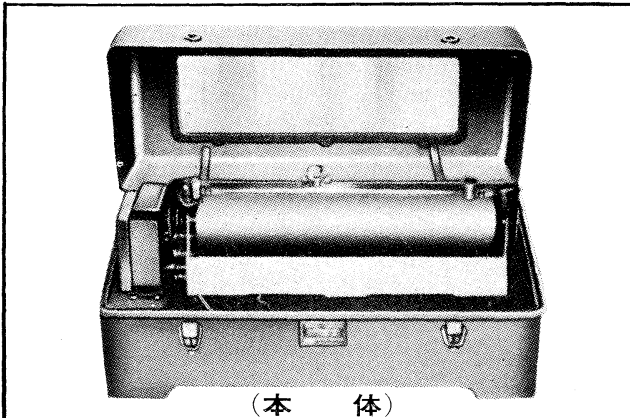
プロペラはA, B, C三枚一組になって居り

A(弱流用).....1m/sec	} 迄で一枚毎に検定 してあります。
B(中流用).....2m/sec	
C(強流用).....3m/sec	

弱流ペラーに依る最低速度は約4cm/secです。

# フース型長期捲自記検潮器

(LFT-III)



(本 体)

営 業 品 目  
 階 段 抵 抗 式 波 高 計  
 ケーブル式波高計  
 フース型検潮器  
 小野式自記流速計  
 自記水位計  
 港施型土圧計  
 理研式水中カメラ  
 その他海洋観測諸計器

協和商工株式会社

東京都豊島区目白4丁目24番地1号  
 TEL (952) 1376代表 〒171

## メルタック

熱溶融型接着剤ですから、溶剤や水を含まないのので乾燥の必要がなく、瞬間的に接着します。

ポリエチレン、アルミ箔等にも良く接着します。

## ポリロック

含浸、注型、充填用として使用される接着性と作業性の良好なシーリング材です。

## ポリワックス

ワックスを主成分とし、各種ポリマーをブレンドした防湿、密封用のシーリングワックスです。

# 東京工材株式会社

東京都中央区築地 4-7-1 TEL (542) 3361 (代)

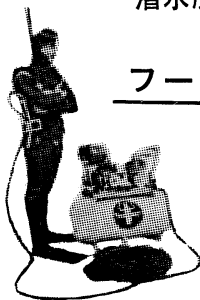
# アクアラング

## aqua-lung



◎ カタログ 進呈 ◎  
潜水服採寸表

### フーカ-潜水具



- 最新式アクアラング器具一式
- フーカ-潜水具  
沿岸工事、水中調査、養魚、養殖、漁業、救難作業等の水中作業に画期的な高能率を示す潜水器具
- ナイロンジャージ付スポンジゴム潜水服  
軽くて強く……保温性がよく……着心地快適
- アクアラング事業部併設  
水中作業のご依頼に応じますのでご照会下さい
- アクアラング講習会常設  
東京にアクアラング訓練用プールを設置

仏国・スピロテック社 日本総代理店  
米国・U.S.ダイバーズ社

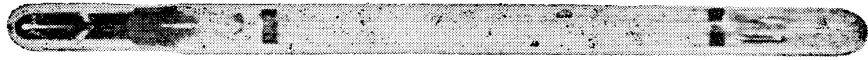
### 日本アクアラング株式会社

九州営業所 福岡市鳥飼1の5の33  
電話 福岡(74)8907  
名古屋営業所 名古屋市中川区東出町3の1  
電話 名古屋(331)5016

東京支社 東京都豊島区北大塚1丁目16の6  
(国電大塚駅前大塚ビル一階)  
電話 東京(918)6526(代表)

本社 神戸市兵庫区高松町22の1  
神戸営業所 (帝國酸素株式会社内)  
電話 神戸(67)5501(大代表)

# REVERSING THERMOMETER



*Protected*



*Unprotected*

Patented parallax-free back scale, opal glass  
back sheath enable precise measurements.  
Write for details



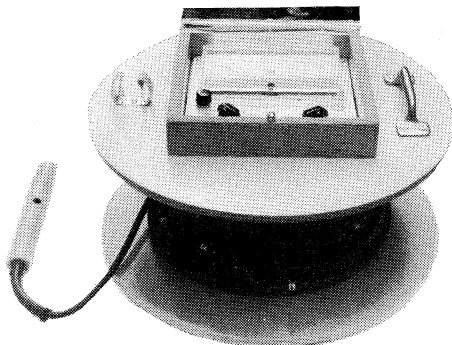
**Yoshino Keiki Co.**

1-14, NISHIGAHARA KITA-KU  
TOKYO JAPAN

Standard Thermometer  
Precise Thermometer  
Mercury Barometer  
Hydrometer



## WHITNEY UNDERWATER METERS



ホイットニー水中温度計

### 製造品目

転倒温度計 各種  
標準温度計 各種  
気象用・理化学用温度計  
ミグスター温度調節器

(カタログ御希望の方は誌名御記入の上 御請求下さい)

水中計器を製作し続けて30有余年  
世界最古の歴史をもつ米國WHITNEY  
UNDERWATER INSTRUMENTS社  
の製品で、河川・湖沼・沿岸海洋研究、水質  
管理等に最適です。

水温計、水中照度計、水中電導度計、  
の各種があります。

特 色：

- 軽量で携行に便利。
- 頑丈で取扱い簡易。
- 導線ケーブル組込みで手軽に捲上げ可。
- 電池で作動。
- ソリッド・ステート回路で長期高精度保持

日本・台湾および韓国総代理店



株式会社 渡部計器製作所  
東京都文京区向丘1-7-17  
TEL (811) 0 0 4 4 (代表) 〒113

Exploiting the Ocean by...

# **T.S.K. OCEANOGRAPHIC INSTRUMENTS**

## **REPRESENTATIVE GROUPS OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS**

This company, manufacturing under the **TSK** label has been developing and supplying oceanographic and limnological instrumentation since 1928. Recognized as a world leader in marine instrumentation, TSK strives to always furnish products of the highest quality and best workmanship.

**T. S—OCEANOGRAPHIC WINCHES**

**T. S—CURRENT METERS**

**T. S—WATER BOTTLES**

**T. S—BOTTOM SAMPLERS**

**T. S—BIOLOGICAL APPARATUS**

**T. S—DEPTH METERS AND RECORDERS**

**T. S—TENSION METERS, CABLE-ANGLE-METERS**

**T. S—SALINOMETERS (E1, E2, E3).**

**T. S—S. T. D. MEASURING SYSTEM**

**T. S—BATHYTHERMOGRAPHS**

**T. S—X. B. T.**

**T. S—SHIP LOGS**

**T. S—TIDE GAUGES**

**T. S—VARIOUS EQUIPMENTS.** (Bottom Finding Pinger),  
(Submarine illuminance meter)

## **THE TSURUMI PRECISION INSTRUMENTS CO., LTD.**

1506 Tsurumi-cho Tsurumi-ku, Yokohama, Japan

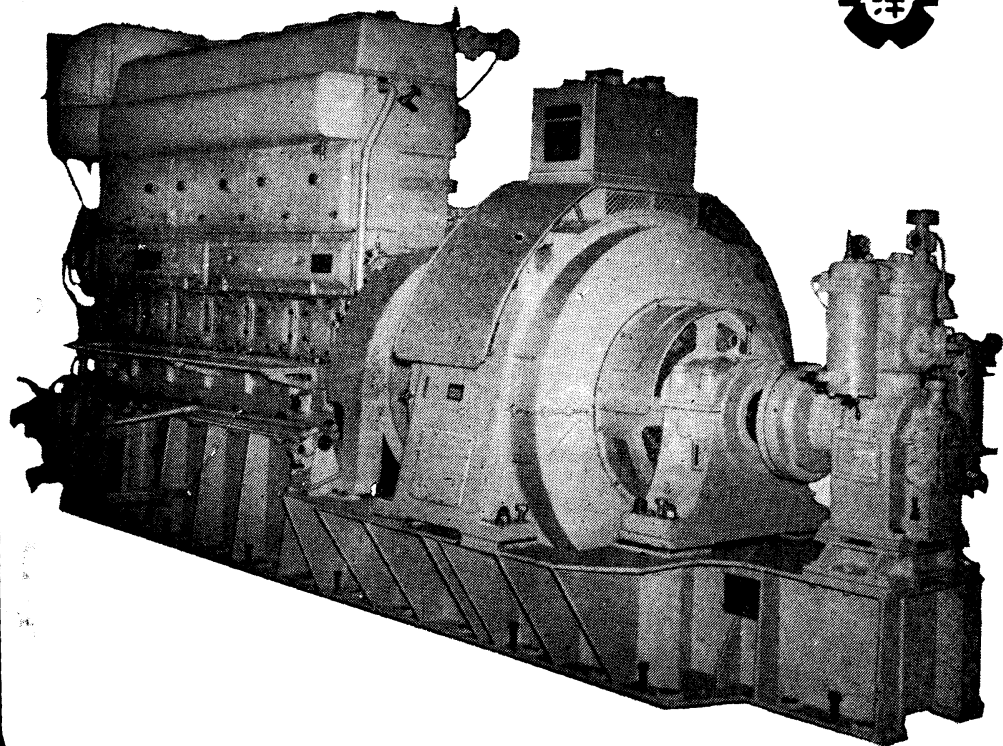
### **CABLE ADDRESS**

TSURUMISEIKI Yokohama

### **TELEPHONE**

Yokohama 521-5252~5

ながい経験と最新の技術を誇る！  
**大洋の船舶用電気機器**



主要生産品目

自励・他励交流発電機  
 直流発電機  
 各種電動機及制御装置  
 船舶自動化装置  
 配電盤

**大洋電機株式会社**

取締役社長 山田沢三

本社 東京都千代田区神田錦町3の16  
 電話 東京 (293) 3 0 6 1 ~ 8  
 岐阜工場 岐阜県羽島郡笠松町如月町18  
 電話 笠松 4 1 1 1 ~ 5  
 伊勢崎工場 群馬県伊勢崎市八斗島町726  
 電話 伊勢崎 1815・1816・1835・816  
 下関出張所 下関市竹崎町399  
 電話 下関 (22) 2 8 2 0・3 7 0 4  
 北海道出張所 札幌市北二条東二丁目 浜建ビル  
 電話 札幌 (25) 6347(23)8061・8261

# 水路測量と土質調査

## *Hydrographic Survey and Marine Geological Survey* **SANYO Hydrographic Survey Co., LTD.**

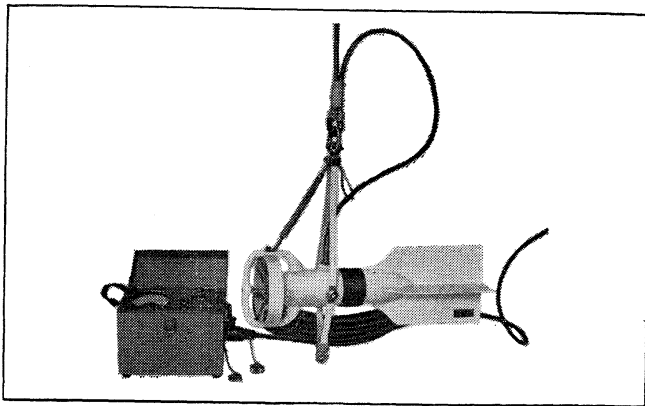
**業務** ① 深淺測量, 底質土質調査, 国土保全測量調査, 海洋資源開発測量調査

防災工事測量調査, マイルポストの測量, 航海保安に必要な調査, 海底ケーブル沈設測量調査, 潮汐, 潮流, 海流, 波浪の観測  
一般海洋観測調査, その他一般海事関係の観測調査および関係業務の技術, 科学的  
研究

**特色** 高性能の精密計測機の整備拡充  
元海上保安庁職員をもつて組織する優秀なる我国唯一の技術陣  
総代理店(連絡先)は全国的組織網を持つ三井物産 K.K の本, 支店出張所

### 三洋水路測量株式会社

東京都港区新橋5丁目23番7号  
電話 (432) 2971~4



Direct-Reading Current &  
Direction Meter

**Model**

# CM-2

Catalogues are to be sent  
immediately upon receipt of  
your order products

**Products**

- KM-2: Direct Reading Knot-Meter for Trawl-Boats to Control Adequate Speed
- ET-5: Electric Meter of Water Temperature
- ECT-5: Electric Conduction and Temperature Meter for Chlorine

## **TOHO DENTAN CO., LTD.**

Office: 1-8-9, Miyamae, Suginami-Ku, Tokyo. Tel. Tokyo (03) 334-3451~3



---

昭和 45 年 5 月 15 日 印刷  
昭和 45 年 5 月 31 日 発行

う み 第 8 卷  
第 2 号

定価 400 円

編集者 今 村 豊  
発行者 佐 々 木 忠 義  
発行所 日 仏 海 洋 学 会  
財団法人 日仏会館内  
東京都千代田区神田駿河台2-3  
郵便番号:1 0 1  
電話 (291) 1 1 4 1  
振替番号:東京 9 6 5 0 3

印刷者 小 山 康 三  
印刷所 英 和 印 刷 社  
東京都文京区本駒込5-13  
郵便番号:1 1 3  
電話 (828) 3 9 3 5

---

# 第 8 卷 第 2 号

## 目 次

原 著	赤松 英雄	107
円形水槽による魚の遊泳速度の測定—III	7. 自動観測用ブイの繫留について…岩佐欽司	108
光によるカタクチイワシの遊泳行動……………	8. 十勝沖および積丹沖における海底地震計	112
……………井上 実	の設置方法…坂尻直己・田 望・堀田 宏	112
69	9. 海底地震計とブイ・テクノロジー……………	113
二次元おくれ確率, 高次自己相関および高次	……………島村英紀・浅田 敏	113
スペクトルについて (英文) ……永田 豊	10. 海底地震計の繫留……………南雲昭三郎	116
78	11. 白鳳丸の錨繫留法に関する一考察……………	119
シンポジウム	……………白沢 高康	119
深海用計測器の繫留法に関するシンポジウム	12. 定浮標方式海底地震計の装置と海上作業	121
1. 浮き上り方式……………南雲昭三郎	について……………飯沼龍門・吉田 弘	121
96	日仏海洋学会賞受賞記念講演	
2. 浮き上り方式その他……………渡辺 精一	日本近海海水の海洋化学的研究—とくに	
97	海水中の栄養塩に関して—……………杉浦 吉雄	127
3. 浮き上り方式について……………安井 正	学会記事……………	135
103		
4. 外国の例……………高野 健三		
105		
5. アンカード・ブイ方式海底地震計の設置		
作業(計画と準備)……………佐藤孫七・小林平八郎		
106		
6. 海象・気象ロボット・ブイの繫留の一例		

## Tome 8 N° 2

### SOMMAIRE

#### Notes originales

Observation on the Swimming Speed of Fish	
in an Annular Trough—III. Swimming	
Performance of Anchovy by Light (en	
japonais)……………Makoto INOUE	69
Lag Joint Probability, Higher Order Covari-	
ance Function and Higher Order Spectrum	
……………Yutaka NAGATA	78

#### Symposium

Symposium sur le mouillage des appareils	
Scientifiques à grande profondeur	
1. Récupération par déclencheur……………	
……………Shozaburo NAGUMO	96
2. Récupération par déclencheur……………	
……………Seiichi WATANABE	97
3. Récupération par déclencheur……………	
……………Masashi YASUI	103
4. Historique à Woods Hole……………	
……………Kenzo TAKANO	105
5. Observation séismique par la bouée	
mouillée (plan et préparatoire)……………	
Magoshichi SATO et Heihachiro KOBAYASHI	106

6. Un exemple du mouillage d'une bouée	
océanographique et météorologique……………	
……………Hideo AKAMATSU	107
7. Mouillage d'une bouée pour la mesure	
automatique……………Kinji IWASA	108
8. Installation d'un séismographe au large	
de Tokachi et de Shakotan……………Naomi	
SAKAZIRI, Nozomu DEN et Hiroshi HOTTA	112
9. Séismographe à fond océanique et tech-	
nologie de bouée……………	
……………Hideki SHIMAMURA et Toshi ASADA	113
10. Mouillage d'un séismographe à fond	
océanique……………Shozaburo NAGUMO	116
11. Note sur l'ancrage du Hakuho-maru……………	
……………Takayasu SHIRASAWA	119
12. Installation d'un séismographe par bouée	
mouillée……………	
……………Tatsuto INUMA et Hiromu YOSHIDA	121

#### Conférence commémorative

Recherche chimique des eaux aux environs	
du Japon—notamment des sels nutritifs—	
……………Yoshio SUGIURA	127
Procès-Verbaux……………	135