

海水の光学的特性に関する研究(第7報) —東京湾湾口部～相模灘海域の秋期の光学的環境, 主として透明度とクロロフィル a 濃度の関係—

佐々木保徳*¹ 宗山 敬*¹

東京湾の水と外洋の水との混合する海域の秋期における特徴, 主として, 海洋光学の立場から検討した。

海中光に影響を及ぼすと考えられる諸海況のパラメーターのうち, 特にクロロフィル a 濃度, 一方, 海洋光学上のパラメーターには透明度をとりあげた。両者の関係を示すものとして, $\ln(Z) = 2.43 - 0.474 \ln(\text{Chl-a})$ なる関係式を得た。ただし, Z は透明度(m), Chl-a はクロロフィル a 濃度(mg/m^3)である。また, 各透明度に対応する下向照度消散係数を推定し, 海水とクロロフィル a による寄与に分離することを試みた。その結果, 当海域ではクロロフィル a 濃度 $4 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以上のとき, クロロフィル a による寄与が海水による寄与に対して, 卓越すると考えられる。さらに, 他の海況パラメーターとして, 全懸濁物濃度, 水温, 水色, 塩分量などを測定し, これらの結果から, 東京湾の水は三浦半島南端を迂回し, 西方へ向かう流路をとりながら相模灘へ流出すると考えられた。

Studies on the Optical Properties of Sea Water (Report 7)., Optical Environmental Research of Areas from the Mouth of Tokyo Bay to Sagami Nada in Autumn. Mainly on the Relation of Chlorophyll-a Concentrations and Secchi Disc Depths

Yasunori Sasaki*², and Kei Mineyama*²

This report deals with investigations mainly on autumnal marine optical properties of mixing area where the waters of Tokyo Bay encounters coastal waters of oceanic origin.

Subsurface light behavior is especially affected by the chlorophyll-a concentration among other water quality parameters, and optical characteristics are well reflected in the Secchi disc depth.

Relationships such as

$$\ln(z) = 2.43 - 0.474 \ln(\text{Chl-a})$$

were identified between these two, where z is the Secchi disc depth (m) and Chl-a is the chlorophyll-a concentration (mg/m^3).

*1 海洋保全技術部

*2 Marine Environment Department

It was attempted to distinguish from those of sea-water partial extinction coefficients that could be attributed to concentration of chlorophyll-a after the downward irradiance extinction coefficients were estimated from corresponding Secchi disc depths.

It was noted that in these waters the contribution of chlorophyll-a concentration to the downward irradiance extinction would be more dominant than that of sea water with chlorophyll-a concentration exceeding 4mg/m^3 .

Whereas, total suspended solids concentration, sea surface temperatures, water colors, salinities, etc., were also measured. From the results the waters from Tokyo Bay could be considered to take a westward heading in contact with the southern end of Miura Peninsula to spread into Sagami Nada.

1. まえがき

われわれは過去4年に亘り、東京湾をモデル海域として、海洋遠隔探査技術の開発研究を実施してきた。東京湾は、本来、以下に示すように、複雑な形状をしており、それに伴って、複雑な水理学的な特徴を示す。

- (1) 湾内への水の流入、流出は潮汐の影響を受けやすい。
- (2) 湾内には定常的な流れが明瞭には存在しない（正味の流れは時計回りの流れとなる）。
- (3) 東京湾はやや屈曲し、湾口部に半島と砂嘴が存在するため、外洋との水の交換が比較的行われにくい（特に湾口部では、湾内水と外洋水が混合するとき複雑な海洋構造を呈する）。

さらに沿岸周辺部には、大規模な人口集中地域があるため、産業排水、生活排水、その他の人為的な海洋への流入物によって、富栄養化が促進され、過栄養状態であるとさえ言われている。これらの水理学的条件と人為的条件があいまって、年間を通じて複雑な海況を呈し、その予測はきわめて困難であった。そのため、観測したデータが従来の一般的見解にそぐわない結果を与えることも希ではなかった。

このような状況のもとで、われわれは4年間に亘って東京湾をモデル海域として研究を実施し、平均的な海況特性を光学的立場から捕えることができた。

次の段階として、考えられるものには、内湾の水が外洋へ拡散していく海域がある。東京湾の湾内水は、東京湾湾口部で三浦半島沿いに流出し、ときには相模湾沿岸で赤潮発生の一因となっていると言われている。そのあたりのことについては、まだ詳しい報告を見ない。また、海洋光学の立場からも当海域は非常に興味ある海域であり、海洋遠隔探査技術の開発研究のモデル海域として、とり上げたため、秋期における海洋光学的環境という側面からアプローチした。

本報告のデータは、海洋遠隔探査技術の開発研究でモデルデータ取得のための海洋実験として、東京湾湾口部から相模灘（伊豆大島東方海域）にかけて実施した海域実験データの一部である。

本海洋実験では、航空機搭載のマルチスペクトルスキャナー（MSS）による海面光測定、ヘリコプターおよび船舶上の分光放射輝度計による海面の分光放射輝度測定、船舶上の船上気象測定装置、水中分光放射照度計による海面直上の全下向光測定、水中分光放射照度測定、一般海洋測定および実験補助船による一般海洋測定を同時に実施した。これら一連の測定は資源探査衛星ランドサット-2（LANDSAT-2）の周回に合わせて実施した。

実験期間中、曇天と強風による風浪のため、MSS、分光放射輝度計および水中分光放射照度計による海面光および水中光の測定は、やや不完全な結果となった。そのため、本報告では実験補助

船による測定結果を中心に検討を行い、全般的な検討は別に報告に譲ることにした。

2 目 的

海水中で光の挙動に影響を及ぼすと、考えられる水質上のパラメーターには種々ある。本報告では、特に、

- (1) クロロフィルー a 量
- (2) 全懸濁物量

をとり上げる。東京湾湾口部から相模灘にかけての海域では、全懸濁部中に植物プランクトンの占める比重が特に大きいと考えられる。そのため、本報告では、(2)よりも(1)に比重をおいて検討を行う。

これらと比較検討するための光学上のパラメーターとして、

- (3)透明度

をとり上げる。透明度との関係から求められる照度の全消散は、海水による消散と、クロロフィルー a による消散とに分けて検討し、当海域の光学的特性を明らかにする。合わせて他の報告と比較する。

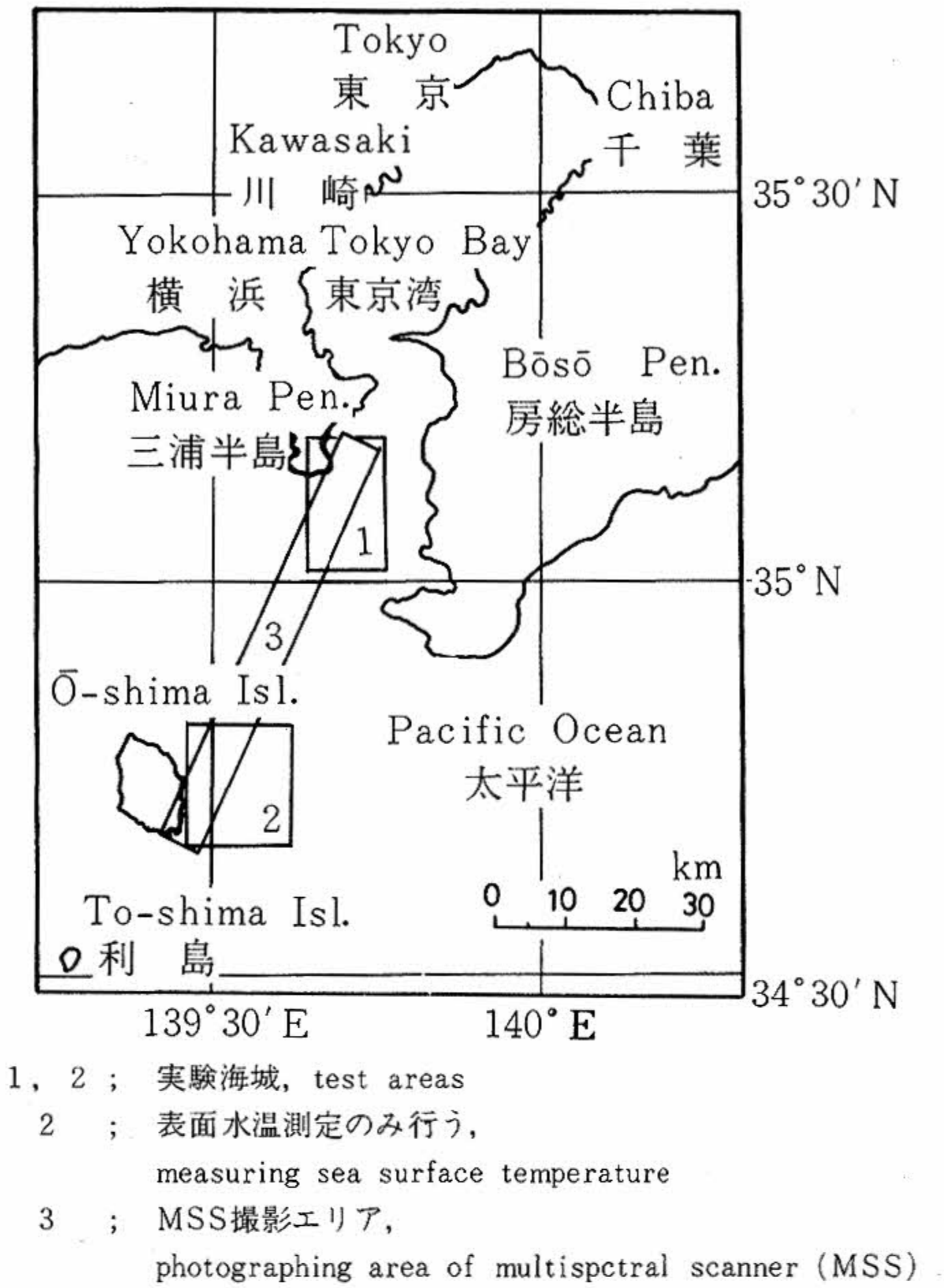


図1 実験海域 (1980年10月23日~24日)
Test areas (Date; 23~24 Oct. 1980)

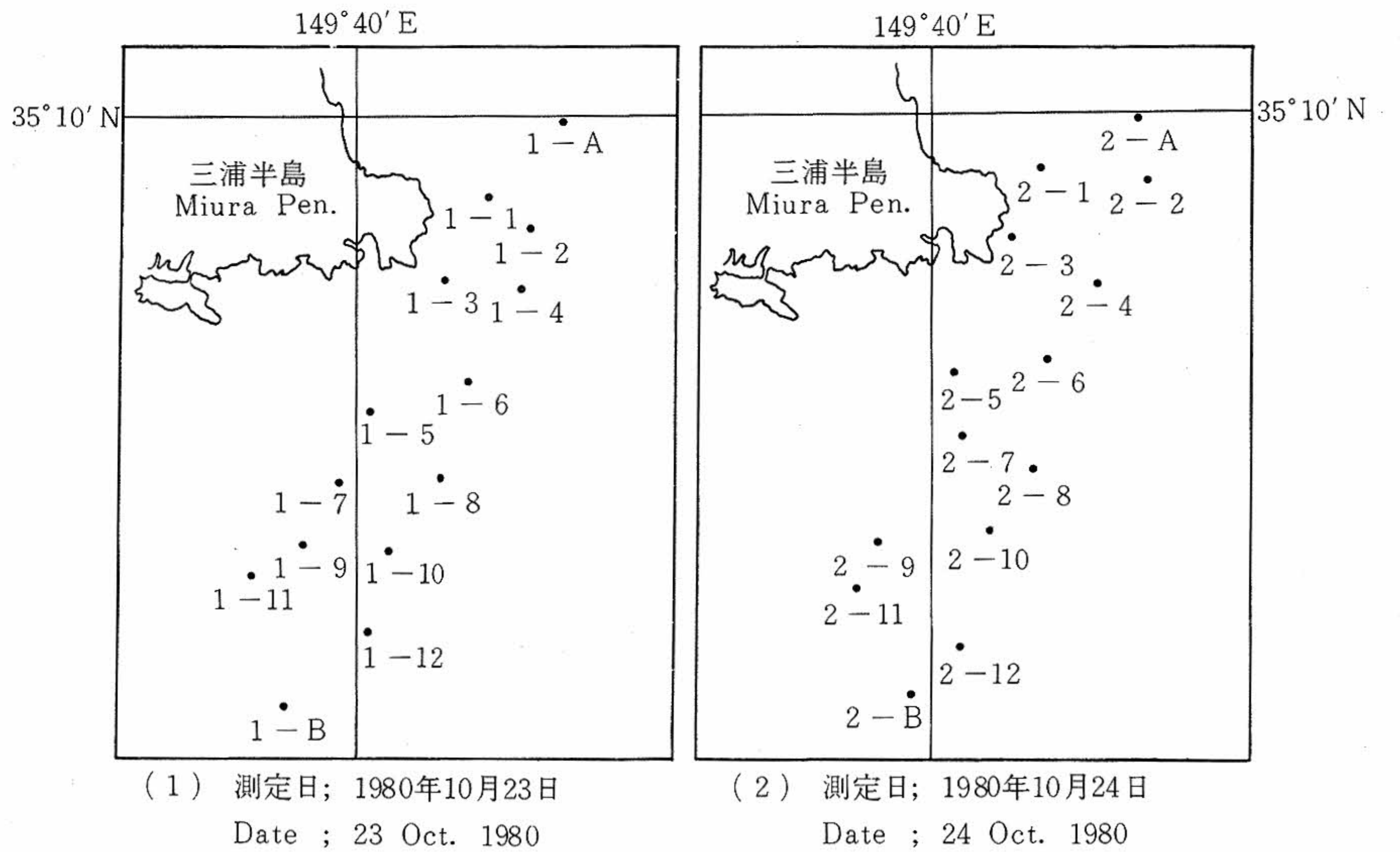


図2 測定点
Station

表1 測定点および測定時刻

Stations and times of measurements

測 定 点 symbol of station	測 定 時 刻 time of measurement	方 位 point of the compass
(1) 1980年10月23日, 23 Oct. 1980		
1 — A	12 : 42	35°09'57"N, 139°43'02"E
1 — B	10 : 20	03'01"N, 38'58"E
1 — 1	12 : 25	09'02"N, 41'59"E
1 — 2	12 : 50	08'39"N, 42'36"E
1 — 3	12 : 12	08'02"N, 41'20"E
1 — 4	12 : 30	07'56"N, 42'28"E
1 — 5	11 : 42	06'30"N, 40'13"E
1 — 6	12 : 04	06'51"N, 41'40"E
1 — 7	11 : 22	05'40"N, 39'45"E
1 — 8	11 : 42	05'43"N, 41'54"E
1 — 9	11 : 00	04'55"N, 39'25"E
1 — 10	11 : 12	04'24"N, 40'30"E
1 — 11	10 : 30	04'34"N, 38'28"E
1 — 12	10 : 50	03'53"N, 40'10"E
(2) 1980年10月24日, 24 Oct. 1980		
2 — A	12 : 08	35°09'57"N, 139°43'02"E
2 — B	10 : 17	03'07"N, 39'44"E
2 — 1	11 : 35	09'35"N, 41'38"E
2 — 2	12 : 45	09'06"N, 43'12"E
2 — 3	11 : 25	08'39"N, 41'12"E
2 — 4	12 : 23	07'56"N, 42'28"E
2 — 5	11 : 05	06'55"N, 40'20"E
2 — 6	11 : 55	07'04"N, 41'43"E
2 — 7	10 : 48	06'09"N, 40'27"E
2 — 8	11 : 22	05'55"N, 41'30"E
2 — 9	10 : 35	05'25"N, 39'25"E
2 — 10	10 : 55	05'01"N, 40'52"E
2 — 11	10 : 15	04'22"N, 38'56"E
2 — 12	10 : 36	03'44"N, 40'30"E

表2 気象および海象条件
Meteorological and oceanographic conditions

測定地点	測定時刻	天候 [雲量 (%)]	気 温	湿 度	風 向	風 速	波 浪
symbol of station	time of measurement	weather [cloud amout(%)]	atmospheric temperature (°C)	relative humidity (%)	wind direction (°)	wind veloctiy (m/sec)	wave-height (cm)
(1) 1980年10月23日, 23 Oct. 1980							
1-A	12 : 42	曇 (80) cloudy	16.6	42	30	2	40
1-5	11 : 42	曇 (80) cloudy	16.4	57	30	7	40
1-11	10 : 30	曇 (80) cloudy	16.0	61	50	8	80
(2) 1980年10月24日, 24 Oct. 1980							
2-A	12 : 08	曇 (100) cloudy	16.8	74	30	8	70
2-5	11 : 05	曇 (90) cloudy	16.0	75	10	4	60
2-11	10 : 15	曇 (90) cloudy	15.8	73	10	9	120

また、一般的海況パラメーターである。

- (4) 水温
- (5) 水色
- (6) 塩分

もとり上げ、当海域の特性を検討する。

3. 測定

3.1 測定点および測定日時

図1 および図2に測定点を示す。

表1には各測定点の位置および測定日時、表2にはいくつかの測定点における海象、気象上の観測結果を示す。

3.2 測定項目および測定方法

測定項目および測定方法は以下に示す。

- (1) 水温……………棒状水銀温度計
- (2) 水色……………フォーレル水色計
- (3) 透明度……………セッキ透明度板
- (4) 塩分量……………サリノメーター
- (5) 全懸濁物量……………メンブランフィルター
(Mettler Type H16
による汙過法)
- (6)クロロフィルー a 量…吸光光度法 (日立 124
型分光光度計)
- (7)全有機炭素量……………Oceanography
International製 TOC
(全有機炭素) 計

4. 結果および考察

表3には各測定項目の結果を示す。

図3～図8は表3中の値をもとにして作成した等水温、等水色、等透明度、等塩分量、等懸濁物量および等クロロフィルー a 濃度の分布図である。

これらの図からわかるように、東京湾から流出する水は、三浦半島の先端を迂回して相模灘へ流出することが認められる。また、透明度、塩分量、水色などから、測定点Bの付近では、東京湾から流出した水が外洋水で希釈されている。

図9はクロロフィルー a 濃度と透明度の関係を示す。

図中の曲線は、最小自乗法で求めたクロロフィル濃度と透明度の関係を示す回帰曲線であり、その関係式を次に示す。

$$\ln(Z)=2.43-0.474 \ln(\text{Chl}-a) \quad (1)$$

$$\text{または、} Z=11.4 \cdot (\text{Chl}-a)^{-0.474}$$

Zは透明度、Chl-a はクロロフィル a 濃度である。

R.E.Carlson¹⁾ (1977) は、次式を報告している。

$$\ln(Z)=2.04-0.67 \ln(\text{Chl}-a)$$

ただし、これは湖沼についての式であり、プランクトンの種類をはじめとして、すべての点で海洋とは異なるので、一概には比較できない。しかし、ほぼ同様の傾向を示すものと考えてよいであろう。

透明度水深における下向照度を I_z 、海面直下における下向照度を I_0 とすれば、照度消散係数(拡散消散係数) Rは、次のようになる。

$$R=\frac{-\ln(I_z/I_0)}{Z} \quad (2)$$

一般には $I_z/I_0=0.1$ の場合が多いが、Carlson らは $I_z/I_0=0.2$ としている。

図10には(2)式から求めた消散係数をクロロフィルー a 濃度に対してプロットしたものである。

一般に、この海域において光の消散に最も大きく寄与するものは植物プランクトンである。動物プランクトンは植物プランクトンに比べて量的には少ない。さらに非生物性懸濁物を無視すると、全消散係数 Rは、次のようになる。

$$R=R_w+R_c \cdot C \quad (3)$$

ただし、 R_w は海水による部分消散係数、 C はクロロフィルー a 濃度、 R_c は単位クロロフィルー a 濃度あたりの消散係数の変化率である。

クロロフィルー a 濃度に比例して変化するものによる寄与は R_c に含まれ、クロロフィルー a 濃度に全く無関係なものによる寄与は R_w に含まれる。物質についての明確な区分は現在にはできない。

図10には(3)式の R_w と R_c とを最小自乗法で求めた回帰直線を示す。 I_z/I_0 の値として 0.1、または 0.2 のいずれを用いるかによって、 R_w と R_c の値は異なる。

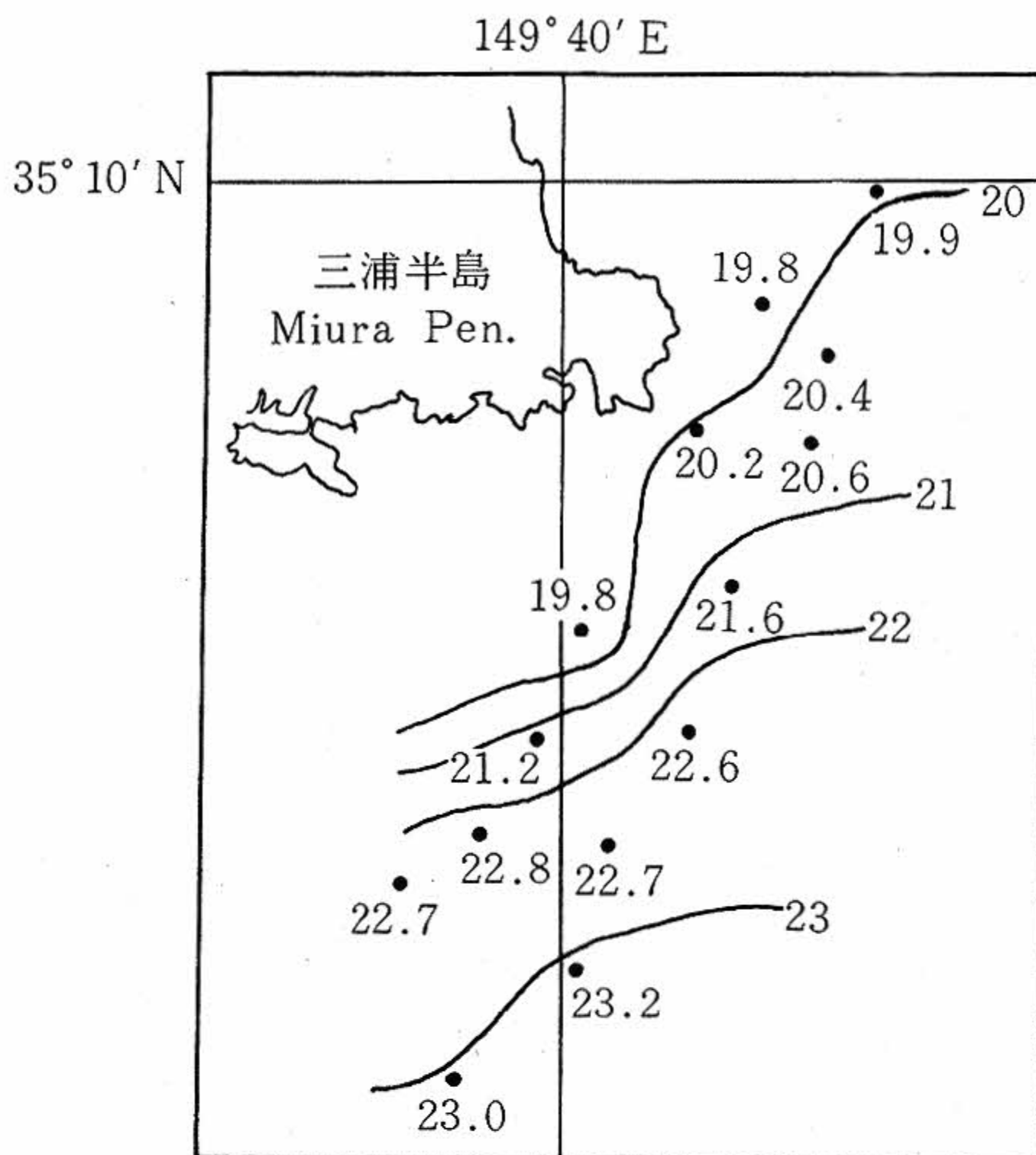
また、(2)式は(1)式と(3)式から、次のようになる。

$$Z=\frac{-\ln(I_z/I_0)}{R_w+R_c \cdot C} \quad (4)$$

表3 測定結果

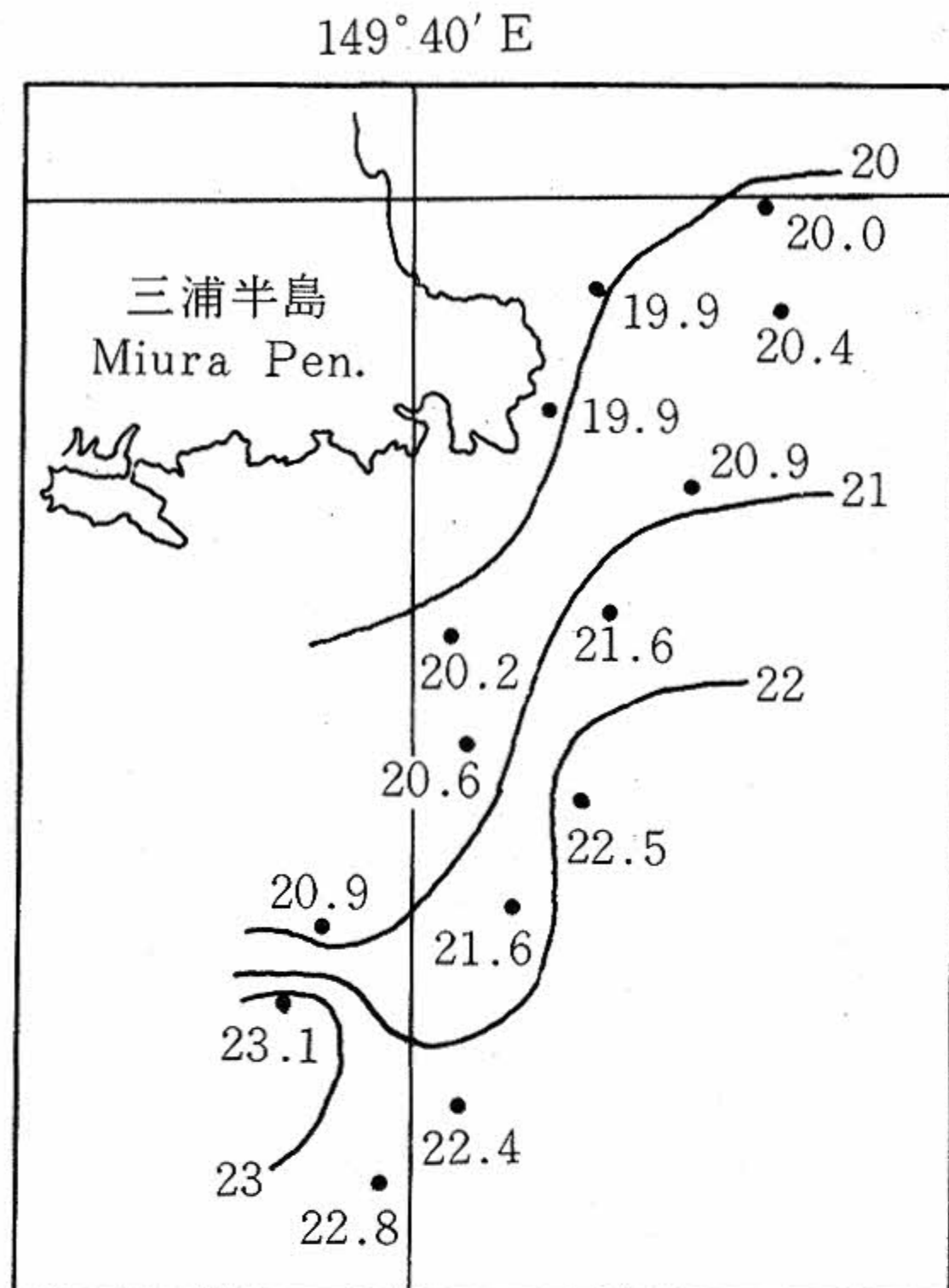
Results of the experimental measurement.

測定点 symbol of station	水温 sea surface temperature (°C)	水色 water color	透明度 secchi disc depth (m)	塩分量 salinity (‰)	SS (ppm)	クロロフィルa chloro- phyll-a (mg/m ³)	TOC (ppm)
(1) 1980年10月23日, 23 Oct. 1980							
1 - A	19.9	8	4.5	32.649	5.02	8.869	1.6
1 - B	23.0	4	11.6	34.009	1.14	0.590	1.1
1 - 1	19.8	5	4.3	32.831	8.10	7.912	—
1 - 2	20.4	9	4.3	32.745	3.96	8.255	—
1 - 3	20.2	6	4.6	32.928	2.93	5.470	—
1 - 4	20.6	9	4.6	32.860	5.00	8.661	—
1 - 5	19.8	5	4.6	32.976	5.35	8.467	—
1 - 6	21.6	8	4.8	33.686	2.95	3.981	1.2
1 - 7	21.2	5	6.2	33.234	3.79	5.666	—
1 - 8	22.6	5	13.7	34.126	1.27	1.033	—
1 - 9	22.8	4	12.0	34.111	3.28	0.673	—
1 - 10	22.7	4	13.5	34.148	4.85	0.497	1.1
1 - 11	22.7	3	14.0	34.211	3.02	0.540	—
1 - 12	23.2	4	14.0	34.189	2.29	0.693	—
(2) 1980年10月24日, 24 Oct. 1980							
2 - A	20.0	9	4.5	33.075	8.12	10.143	1.3
2 - B	22.8	5	10.0	34.262	2.73	0.827	1.2
2 - 1	19.9	8	3.8	32.841	5.33	8.591	—
2 - 2	20.4	8	3.9	33.312	6.46	5.277	—
2 - 3	19.9	9	4.1	32.713	7.66	5.971	—
2 - 4	20.9	8	4.6	33.356	7.40	4.614	—
2 - 5	20.2	8	5.4	32.898	7.70	5.435	—
2 - 6	21.6	6	7.5	33.844	7.65	1.977	1.0
2 - 7	20.6	7	6.2	33.177	4.72	6.810	—
2 - 8	22.5	6	10.3	34.038	5.33	0.876	—
2 - 9	20.9	7	9.0	33.541	3.97	4.602	—
2 - 10	21.6	4	6.7	33.729	3.86	4.099	1.1
2 - 11	23.1	6	13.0	34.235	3.15	0.860	—
2 - 12	22.4	4	12.2	34.111	2.59	0.856	—



(1) 測定日; 1980年10月23日

Date ; 23 Oct. 1980

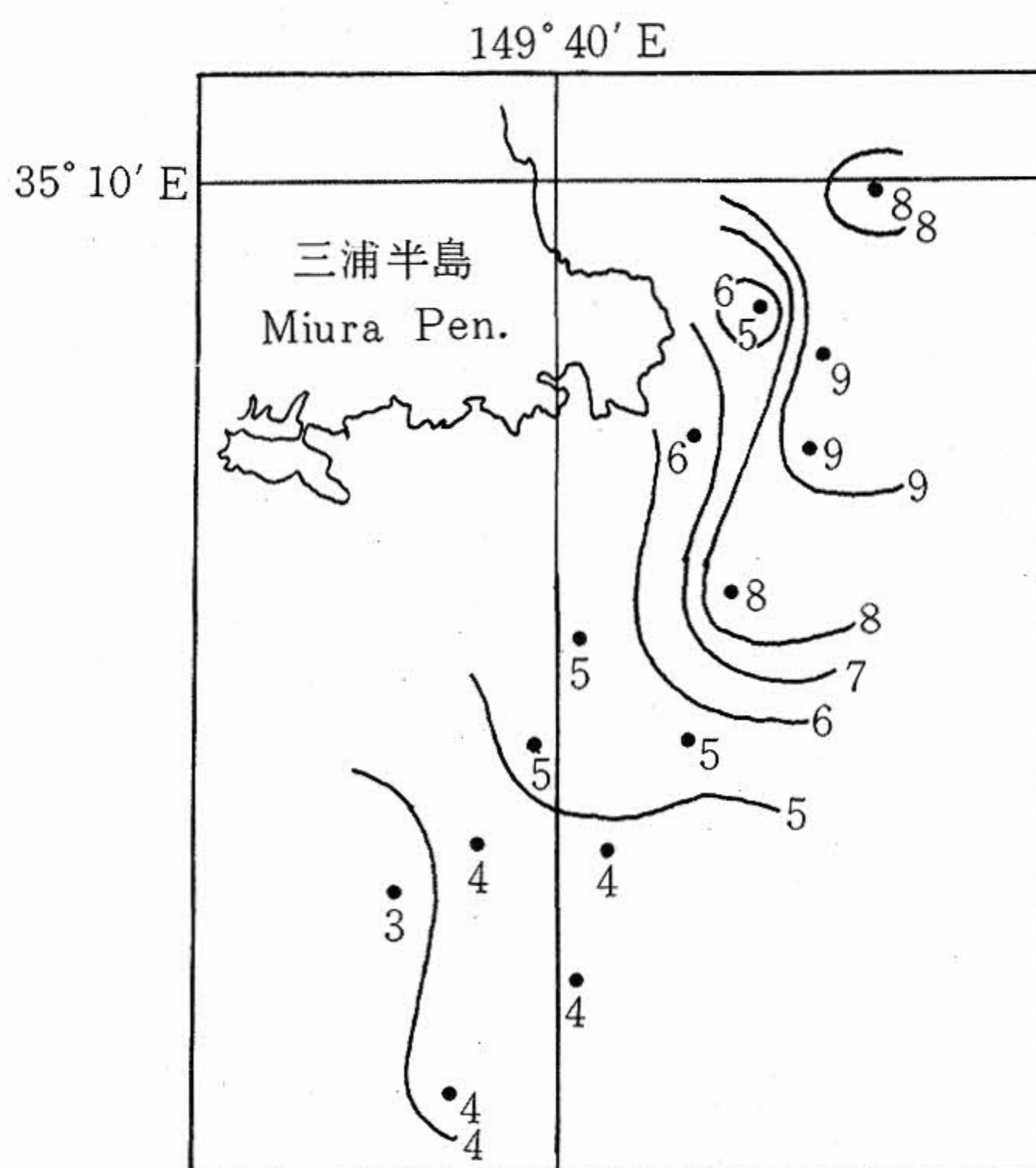


(2) 測定日; 1980年10月24日

Date ; 24 Oct. 1980

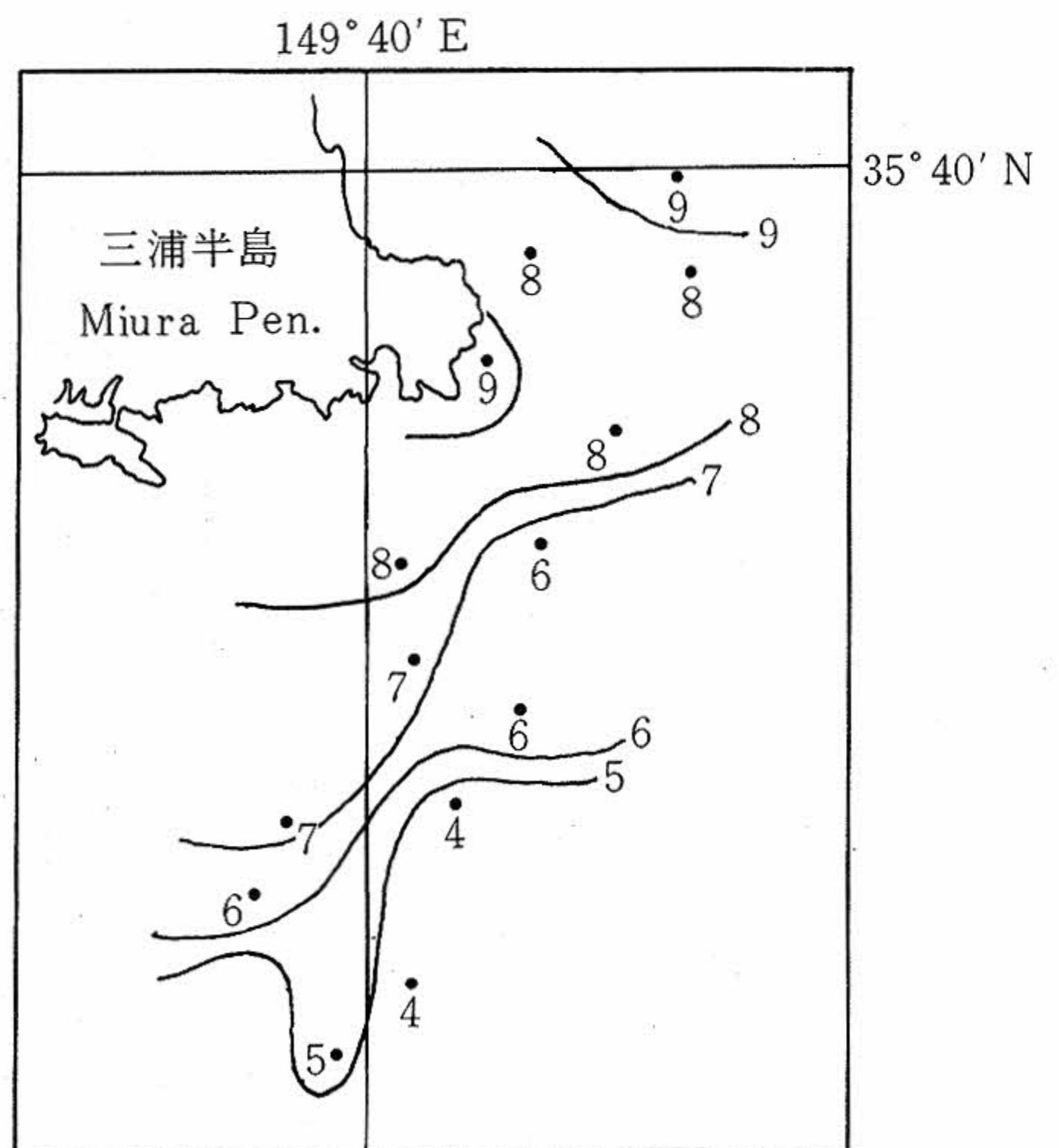
図3 水温分布 (°C)

Contour maps of sea surface temperature



(1) 測定日; 1980年10月23日

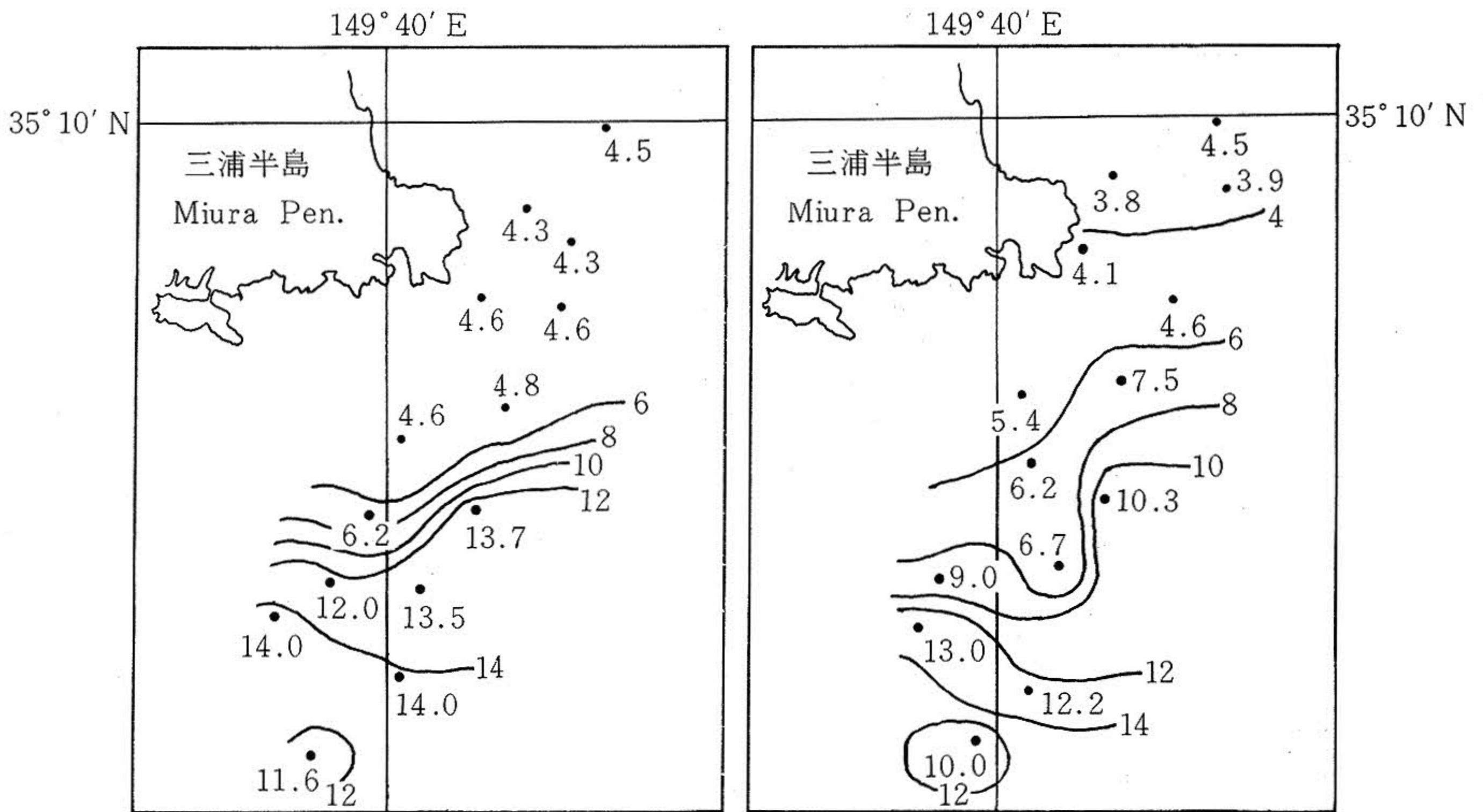
Date ; 23 Oct. 1980



(2) 測定日; 1980年10月24日

Date ; 24 Oct. 1980

図4 水色分布, Contour maps of water color



(1) 測定日; 1980年10月23日

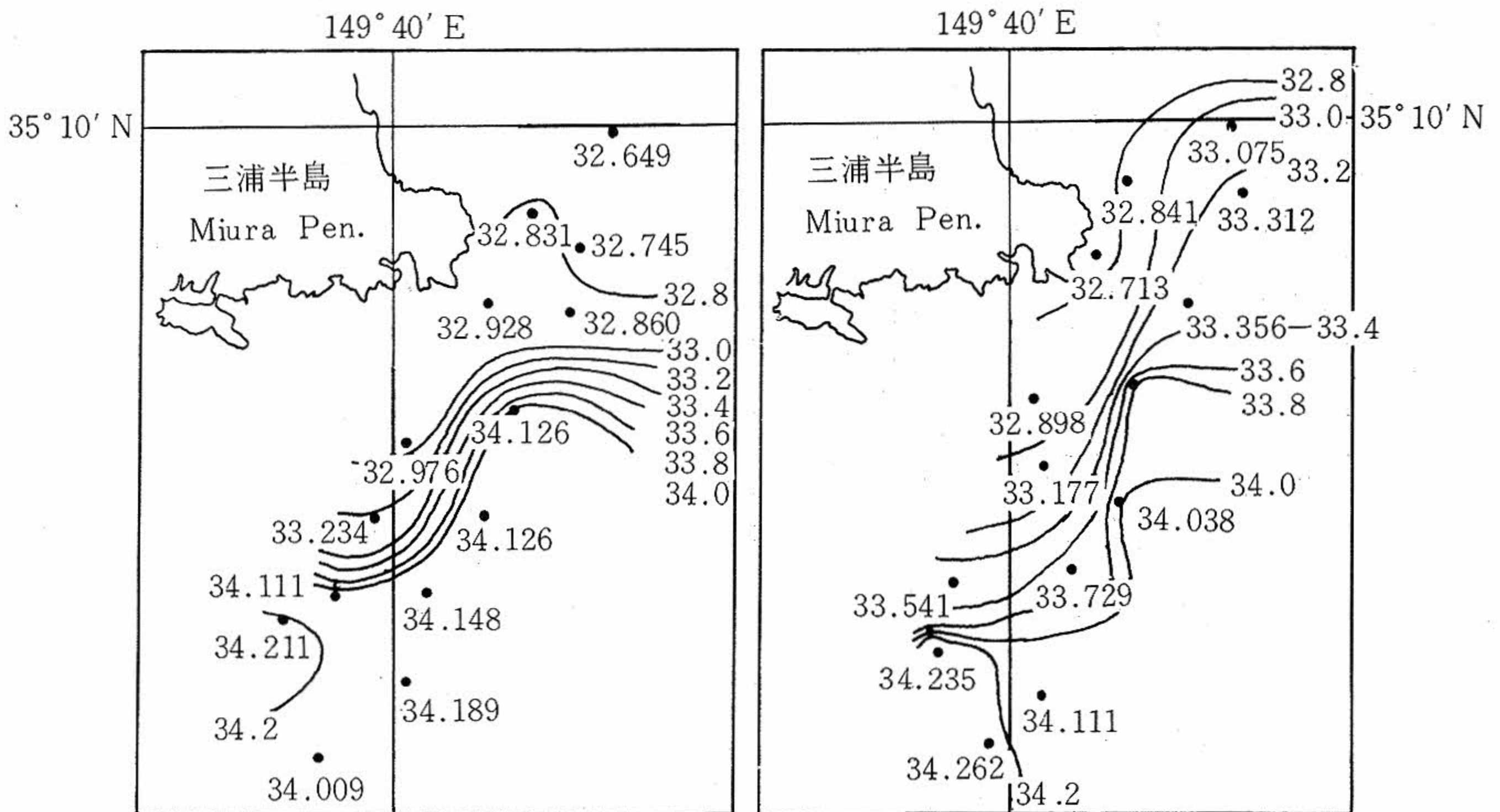
Date ; 23 Oct. 1980

(2) 測定日; 1980年10月24日

Date ; 24 Oct. 1980

図5 透明度分布 (m)

Contour maps of Secchi disc depth



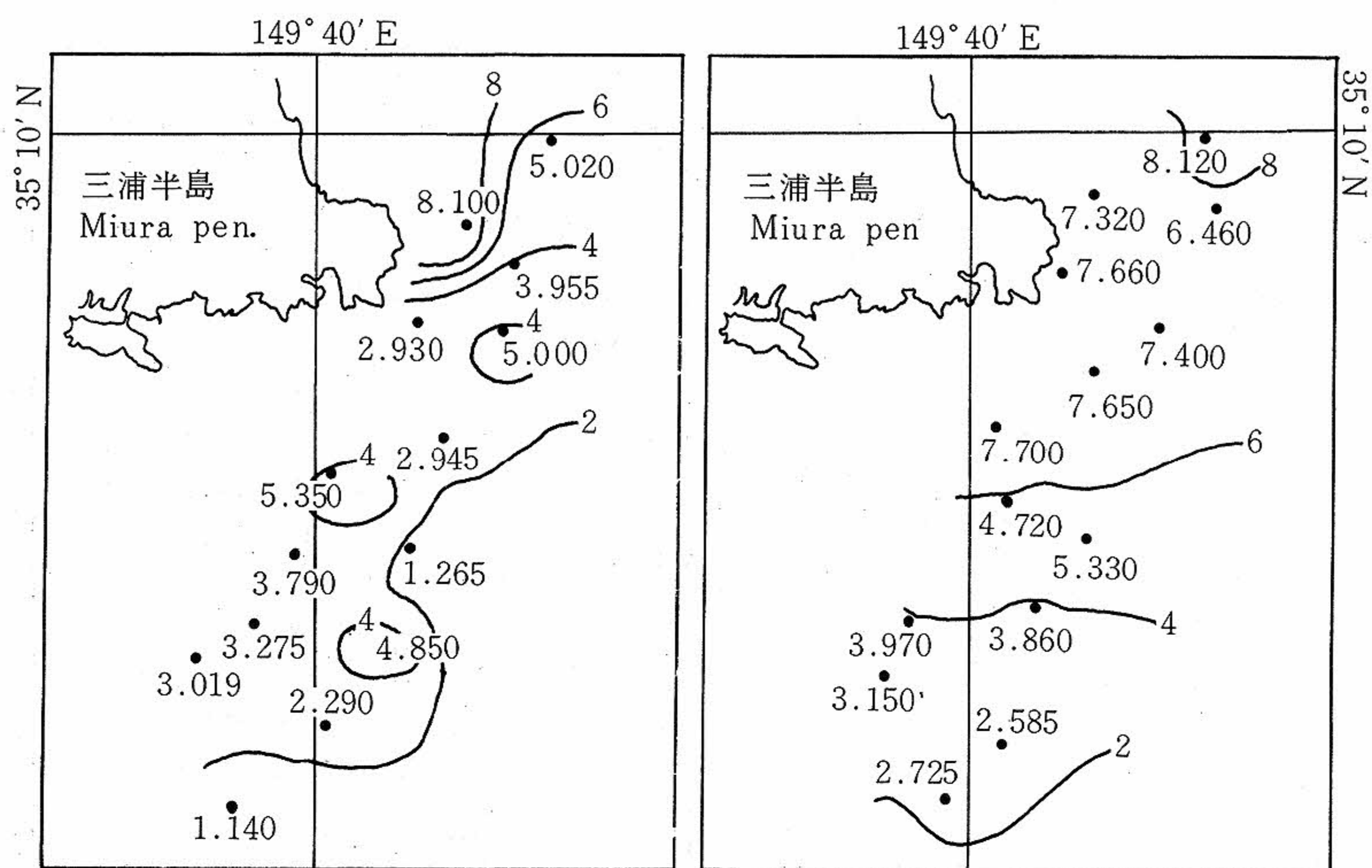
(1) 測定日; 1980年10月23日

Date ; 23 Oct. 1980

(2) 測定日; 1980年10月24日

Date ; 24 Oct. 1980

図6 塩分分布図 (%), Contour maps of salinity



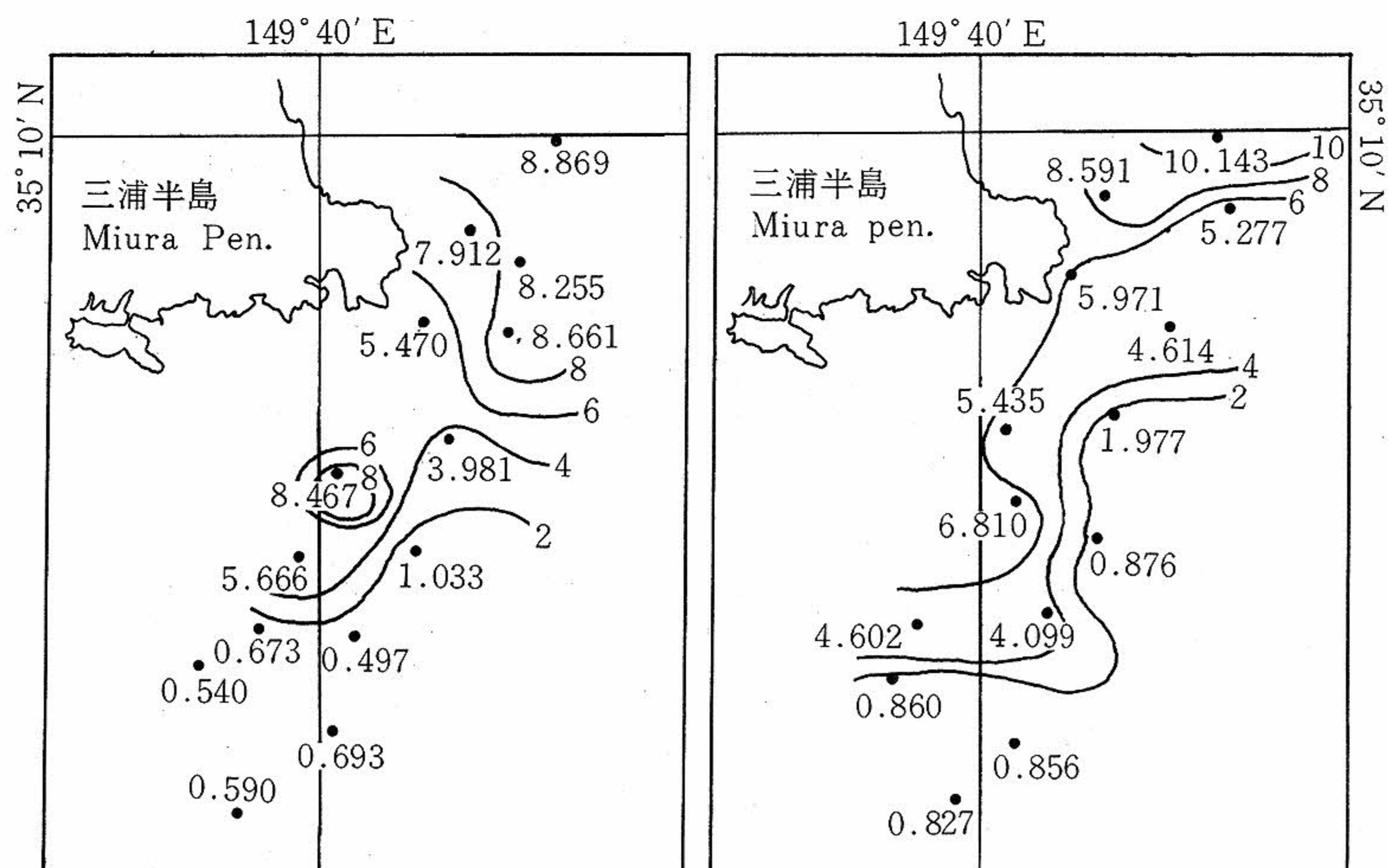
(1) 測定日; 1980年10月23日

Date : 23 Oct. 1980

(2) 測定日; 1980年10月24日

Date ; 24 Oct. 1980

図7 懸濁物濃度分布 (ppm), Contour maps of suspended-solids concentration(ppm)



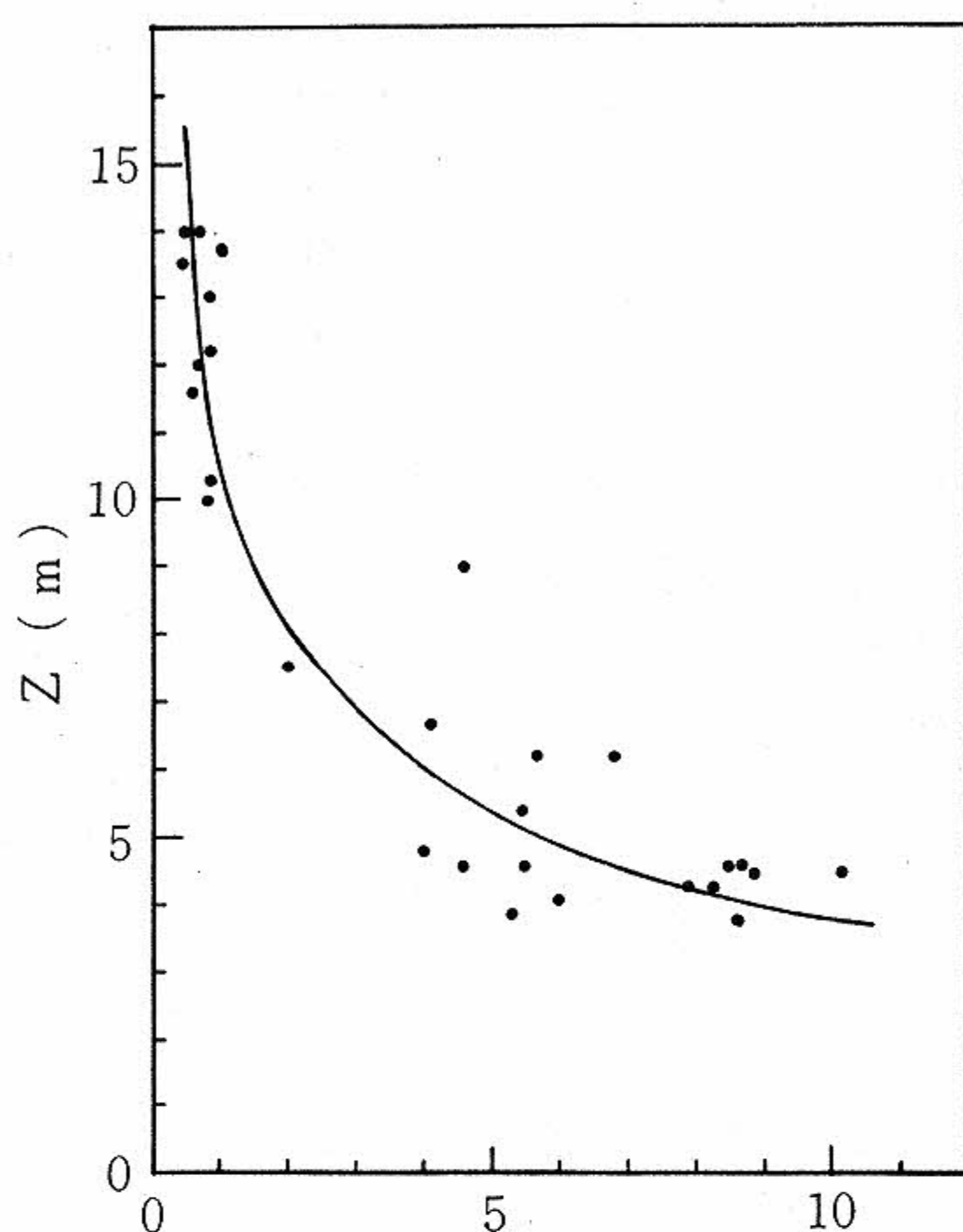
(1) 測定日; 1980年10月23日

Date ; 23 Oct. 1980

(2) 測定日; 1980年10月24日

Date ; 24 Oct. 1980

図8 クロロフィル a 濃度分布 (mg/m²), Contour maps of chlorophyll-a concentration



$\ln(Z) = 2.43 - 0.474 \ln(\text{Chl-a})$
 Z ; 透明度 (セッキ板深度),
 transparency (secchi disc depth)
 Chl-a ; クロロフィル-a濃度,
 chlorophyll-a concentration

図9 透明度とクロロフィル-a濃度

Transparency and chlorophyll-a concentration

両辺をクロロフィル-a濃度 C で微分すると、次のようになる。

$$\frac{dz}{dc} = \frac{R_c \cdot \ln(I_z/I_o)}{(R_w + R_c \cdot C)^2} \quad (5)$$

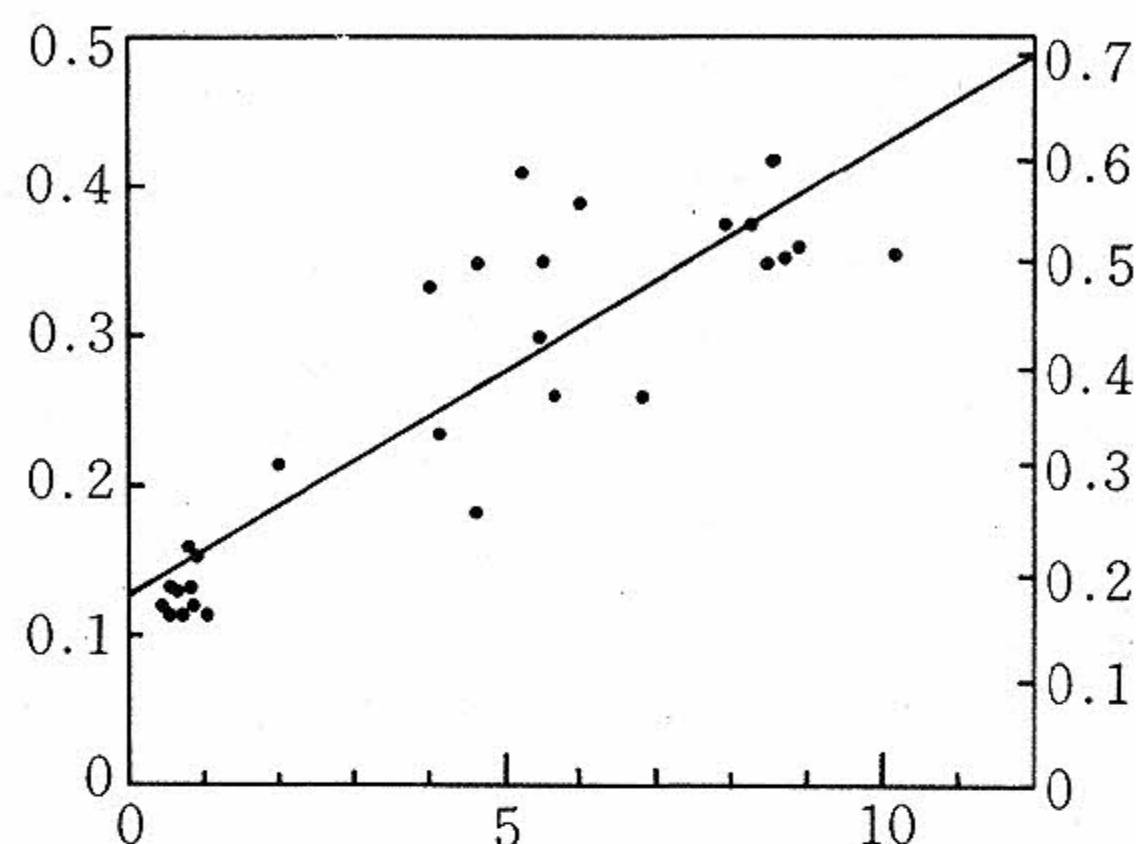
このことから、クロロフィル-a濃度の変化に対する透明度の変化は、クロロフィル-a濃度が小さいほど大きく、大きいほど小さい。クロロフィル-a濃度が非常に高く、 $R_w \ll R_c \cdot C$ としてよいときは、次式が成立つ。

$$Z = [-\ln(I_z/I_o)]/C$$

すなわち、透明度はクロロフィル-a濃度に反比例する。

一方、全消散係数に対するクロロフィル-aの寄与は、次の式によって評価される。すなわち、

$$\begin{aligned}
 F &= \frac{R_c \cdot C}{R_w + R_c \cdot C} \\
 &= \frac{C}{(R_w/R_c) + C} \quad (6)
 \end{aligned}$$



$I_z/I_o = 0.1$; $R = 0.126 + 0.0300C$
 $I_z/I_o = 0.2$; $R = 0.181 + 0.0429C$
 R ; 下向照度消散係数 (m^{-1}) (セッキ板深度から求めた)
 extinction coefficient of downward irradiance (m^{-1})
 (derived from Secchi disc depth)
 C ; クロロフィル-a濃度, chlorophyll-a concentration
 (mg/m^3)

図10 下向照度消散係数とクロロフィル-a濃度

Extinction coefficient of downward irradiance and chlorophyll-a concentration

ここで、 R_w/R_c の値は、 I_z/I_o が 0.1, 0.2 のいずれの場合も同一の値を取り、図10中の式から、この海域ではおよそ 4.2 となる。したがって、(6)式から、つぎの関係が得られる。

$$F = \frac{C}{4.2 + C}$$

すなわち、この海域ではクロロフィル-a濃度が $4.2 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以上になれば、全消散関数はクロロフィル-aの寄与が海水等による寄与をこえることとなる。

さらに透明度の上昇に対して、水色、および懸濁物量の減少、塩分および水温の上昇、また透明度の減少に対して、いずれも、その逆という一般的な関係も認められる。

5. あとがき

本報告の調査海域は、A点からB点までわずか10km程度の小さなものである。

しかし、この海域はクロロフィル-a濃度、全懸濁物量、水温、水色、塩分および透明度のいずれも高い値から低い値まで幅広く分布する。さらに、各測定値の分布は、クロロフィル-a濃度、全懸濁物量および水色にあっては、A点で高く、B点に向かって漸次減少する（水温、塩分および透明度はこの逆となる）という単純な海況を呈し、表層では特に著しく乱れた構造は認められなかった。

そのため、当初のわれわれの予測通りの成果をあげることができたのは幸いと言える。海洋遠隔探査技術の開発研究のように、精度のよい膨大なモデルデータを広域に亘り必要とする研究では、本海域は恰好の場であると言えることができるかも知れない。しかし、今後もデータを充実させる必要があり、一方、東京湾に関するデータの解析が不十分なため、両海域の比較を行うには、さらに努力を傾注する必要がある。

なお、この種の研究は、航空機、ヘリコプター、船舶によるきわめて同時性の高い、良好な気象海象条件下の測定、さらに迅速なる試料の分析、処理が要求されるという特殊性のため、他の海洋実験に類希なる緻密な連撃が必要である。そのため、広域で、しかも外洋域にまで及ぶ海洋実験の実施にあたっては、一般の海洋実験とは異なる面で想像以上の綿密な配慮が必要であることを付記したい。

文 献

- 1) Carlson R. E., 1977, "A trophic state index for lakes", *Limnology and Oceanography* 22(2), 361-369
- 2) Carlson R. E., 1980, "More complications in the chlorophyll-Secchi disc relationship", *Limnology and Oceanography* 25(2), 379-382
- 3) Edmondson W. T., 1980, "Secchi disc and chlorophyll", *Limnology and Oceanography* 25(2), 378-379
- 4) Graham J. J., 1966, "Secchi disc observations and extinction coefficients in the Central and Eastern North Pacific Ocean", *Limnology and Oceanography* 11(1), 184-190
- 5) Holmes R. W., 1970, "The Secchi disc in turbid coastal waters", *Limnology and Oceanography*, 15, 688-694
- 6) Lorenzen M. W., 1980, "Use of chlorophyll-Secchi disc relationships", *Limnology and Oceanography* 25(2), 371-372
- 7) Megard R. O., Settles J. C., Boyer H. A., Combs W. S., 1980, "Light, Secchi disc, and trophic states", *Limnology and Oceanography* 25(2), 373-377
- 8) Smith R. C., 1980, "The optical characterization of natural waters" by means of an "extinction coefficient", *Limnology and Oceanography* 13, 423-429
- 9) Tyler J. E., 1967, "The Secchi disc", *Limnology and Oceanography* 13(1) 1-6
- 10) Yentsch C. S., 1960, "The influence of phytoplankton pigments on the colour of sea water", *Deep-sea Research* 7 (1), 1-9
- 11) 福田雅明, 津田良平, 1980, "透明度測定に関する諸問題", うみ(日仏海洋学会) 18(3), 46-60