

小田原沖海洋深層水の栄養塩類特性について

Characteristics of Nutritional Variations in the Odawara Sea Area
of the Sagami Bay Deep Seawater

木下 淳司¹・近 磯晴²・宮原 司³

Junji KINOSHITA, Isoharu KON and Tukasa MIYAHARA

Abstract

In order to investigate the seasonal variations of the nutrients of the deep seawater (DSW) from Sagami Bay, we collected water samples from the depths of 0, 100, 200, 300 and 400m, from July 1999 to January 2000, off Odawara.

Temperature, salinity, concentrations of total inorganic nitrogen (TIN), phosphate ($\text{PO}_4\text{-P}$) and silicate ($\text{SiO}_4\text{-Si}$) at 400 m depth were $8.9 \pm 1.4^\circ\text{C}$, $34.36 \pm 0.06\text{psu}$, $25.1 \pm 4.8 \mu\text{M}$, $1.8 \pm 0.3 \mu\text{M}$, $50.1 \pm 11.2 \mu\text{M}$ on average, respectively. N: P ratios were approximately 14 under 200 m depth. Concentrations of TIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ and $\text{SiO}_4\text{-Si}$ were high in July and August 1999 and January 2000, when the North Pacific intermediate water prevailed. From October to December 1999, possible effects by the Kuroshio current became strong, and the concentrations of all nutrients determined were low compared those determined in the former period.

These results indicate that concentrations of nutrients of deep seawater could fluctuate in relatively large extent due to possible temporal variations of the Kuroshio current and the North Pacific intermediate water in Sagami Bay.

As temperature, salinity and concentrations of nutrients of DSW in Sagami Bay were comparable to those at the Cape Murotomisaki and Suruga Bay, which is low temperature, high nutrients and temporally stable of those characteristics, the DSW of Sagami Bay seems to have suitable characteristics for applying business uses of DSW.

Key Words: deep seawater, Sagami Bay, Odawara, nutrients, variations

和文要旨

相模湾西部小田原沖は、水深が深く首都圏における海洋深層水取水適地である。本海域における海洋深層水の栄養塩類特性の鉛直構造と季節変化を知るために、1999年7月から2000年1月にかけて水深400mまでの水温、塩分、および栄養塩類濃度の経月変化を調査した。栄養塩類濃度は水深に比例して高くなった。400m深の平均値と標準偏差は、水温 $8.9 \pm 1.4^\circ\text{C}$ 、塩分 $34.36 \pm 0.06\text{psu}$ 、全無機窒素態栄養塩類 (TIN) $25.1 \pm 4.8 \mu\text{M}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ $1.8 \pm 0.3 \mu\text{M}$ および $\text{SiO}_4\text{-Si}$ $50.1 \pm 11.2 \mu\text{M}$ であった。N/P比は200m以深では14台で安定していた。栄養塩類濃度は低温、低塩分の亜寒帯系中層水が卓越した1999年7、8月と2000年1月に高まり、高温、高塩分の黒潮系水が卓越した1999年10~12月には低くなっていた。このことから栄養塩類濃度は海況の影響を受けて変動すると推定されたが、海洋深層水の利用を図る上では、今回得られた測定値は室戸沖や駿河湾で得られた値に近い低温、富栄養および安定性を示すものであった。

キーワード：海洋深層水、相模湾、小田原、栄養塩類、海況変動

¹神奈川県水産総合研究所相模湾試験場 (〒250-0021 神奈川県小田原市早川1-2-1) [神水研業績 No. 01-101]

²(株)水土舎 (〒214-0038 神奈川県川崎市多摩区生田8-11-11)

³(株)東京久榮 (〒103-0027 東京都中央区日本橋3-1-15)

1. はじめに

水深 1000 m 以上の相模湾海谷を有する相模湾は、首都圏における海洋深層水取水適地である。中でも相模湾西部の小田原沖は相模湾海谷が距岸約 5 km まで迫り、海岸線から 2 km 程度で水深 300 m に達することから、全国的にみて最も経済的に有利な取水地点の一つと考えられる。

相模湾西部海域は、神奈川県内の沿岸漁業の中心であり、定置網漁業を主体として、刺網、釣り等の漁業が活発に行われている。また首都圏へのアクセスもよく、周辺には日本有数の観光地である箱根、伊豆等が控えているという地理的好条件に加え、水産加工等の食品関係産業が盛んなことによって、都市近郊型としての海洋深層水利用形態が期待できる。

海洋深層水を利用する場合、取水海域の水質について十分な観測を行うことが望ましい。これまで神奈川県では 1964 年より毎月 1 回、相模湾全域で海洋観測を実施してきた。これらのデータを基に相模湾の水塊区分を行った（図 1）。相模湾内水は性質の異なる各種水塊によって構成され、概ね 250 m 以浅には河川系水（A）、東京湾系水（B）、表層混合層水（C）および黒潮系沖合水（D）、250~1000 m 深にはオホーツク海を起源とする亜寒帯系中層水（E）、1000 m 以深には大西洋のグリーンランド沖および南極海を起源とする深層水（F）が層重している（岩田 1979）。概ね 100 m 以浅に分布する各種水塊の水温、塩分は季節によって大きく変わることが、100 m 以深になると季節変化は小さくなる。250 m 以浅に分布する黒潮系沖合水の塩分は高く、その中心は 100 m 深付近にみられ、水温 13~17°C、塩分 34.5psu 以上の値を示す。亜寒帯系中層水の特徴は塩分が低いことであり、その中心は 500 m 深付近にあって水温 6°C 台、塩分 34.2~34.3psu である。

相模湾における栄養塩類濃度の鉛直分布については、鎌谷ら（2000）が数年にわたる毎月 1 回の定点観測データを解析し、栄養塩類濃度は水深に比例して高くなり、さらに湾内の栄養塩類環境が珪藻類の増殖に適していることを明らかにした。また相模

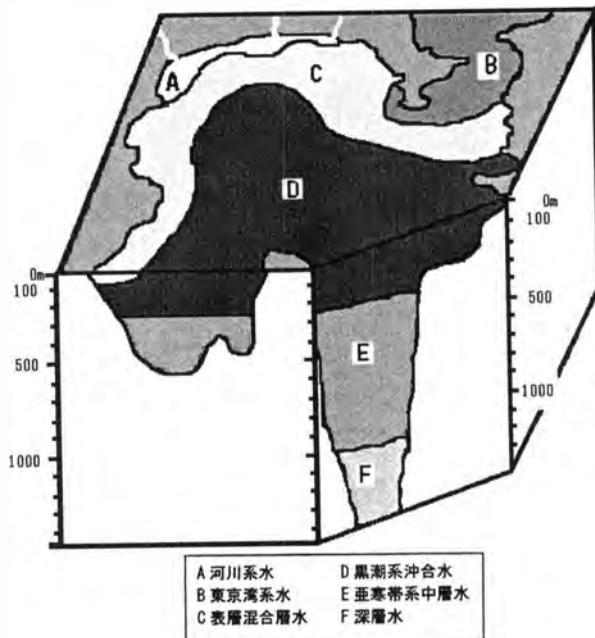


図-1 相模湾の水塊区分

湾の沖合に位置する三宅島周辺海域では亜表層海洋深層水の局地性湧昇がみられ、湧昇した亜表層海洋深層水は周辺海域の生物生産を高め、漁場形成に好影響を及ぼしていることが明らかとなっている（中島・豊田 1989）。

しかしこれらはいずれも海洋深層水の陸上での利用を前提にした調査ではなかったため、海岸線から 5 km 以内といった、ごく沿岸域における海洋深層水の水質とその変動に関する知見は少ない。そこで本研究では、小田原沖の海洋深層水に関する水温、塩分および栄養塩類濃度の分布特性を調査し、その鉛直構造の季節変化および海況変動との関連性等について検討した。

2. 方法

1999 年 7 月から 2000 年 1 月にかけて、毎月 1 回（99 年 9 月は欠測），小田原沖に St. 1~3 を設け、神奈川県漁業調査船うしお（19 t）により調査を行った（図 2）。水温および塩分は各 St. においてアレック電子製 STD で測定した。St. 3 では水深 0 m から 400 m（底層）まで、0 m は直接採水、100 m 以深はナンセン式転倒採水器により 100 m 間隔で採水した。St. 1 および St. 2 は底層のみで採水した。採水はすべて STD による観測と同時に行った。底層については可能な限り海底直上 10 m

付近で採水するようにした。採水した試料はミリポア社製メンブレンフィルター（孔径 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ ）でろ過した後凍結保存し、後日分析に供した。栄養塩類の分析は、窒素およびリンについては海洋観測指針（1990）に基づき、 $\text{NH}_4\text{-N}$ はインドフェノール法、 $\text{NO}_2\text{-N}$ はナフチルエチレンジアミン法、 $\text{NO}_3\text{-N}$ は Cu-Cd カラム還元を行った後、 $\text{NO}_2\text{-N}$ と同様に分析した。 $\text{PO}_4\text{-P}$ はモリブデンブルー法によった。分析装置はブランルーベ社製オートアナライザー TRAACCS-800 を使用した。 $\text{SiO}_4\text{-Si}$ は JIS K0101 (1991) に基づき、モリブデンブルー法により日本分光製吸光度計 UV-550 で分析した。

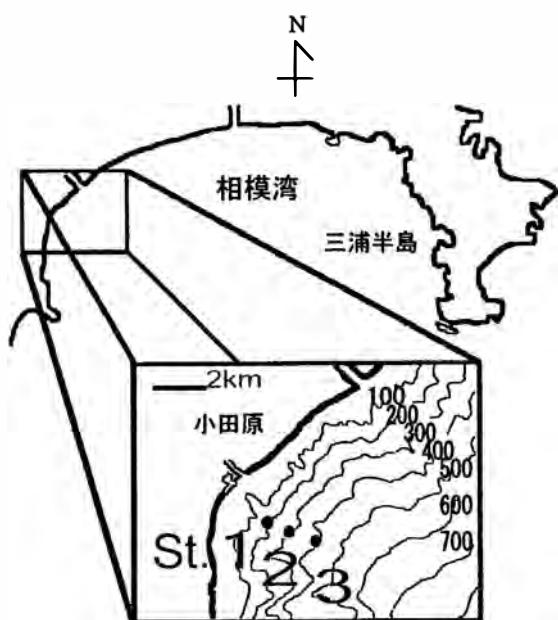
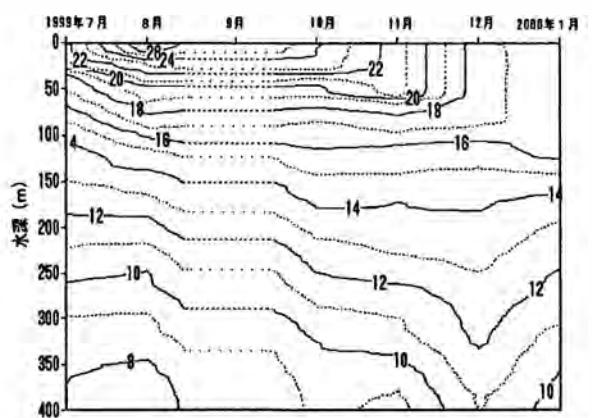


図-2 観測点図

3. 結果および考察

3.1 水温・塩分の経月変化

小田原沖 St. 3 における水温鉛直分布の経月変化を図 3 に示した。0 m における水温の変化は大きく、最高（8月の 27.2°C ）と最低（1月の 15.6°C ）の差は 11.6°C であった。100 m 以深になると、最高と最低の差は小さくなり、100 m 深では約 2°C 、200 m では約 1.5°C となった。7月から10月にかけて、30 m 深を中心に水温躍層が形成されたが、10月以降表面水温の低下に伴う鉛直混合により、水温躍層の崩壊が始まり、11月には表面から 50 m 深までの水温がほぼ一様になった。12月にはさら

図-3 St. 3 における水温 ($^{\circ}\text{C}$) の鉛直分布の経月変化

に鉛直混合が強まり約 70 m 深まで、1月には 100 m 深まで一様な水温になり、季節的な水温躍層は崩壊した。100 m 以深での季節変化は小さいものの、7、8月には 350 m 深付近まで 8°C 以下の冷たい海水が上昇するような状況がみられた。続いて 10~12 月には水深 100~300 m にかけて $10\sim14^{\circ}\text{C}$ の比較的暖かい水温の層が厚みを増し、その後 2000 年 1 月には再び 10°C 以下の冷たい海水が 350 m 以深に上昇する等の変動がみられた。神奈川県の相模湾沿岸定線観測の結果によれば、成層構造が顕著な 7~8 月には水深 200 m から 400 m の水温は低くなり、成層構造が崩壊する 1~3 月には高くなるのが一般的であるが、今回の小田原沖の観測値はこれに準じた傾向を示していた。

塩分の鉛直分布の経月変化を図 4 に示した。30 m 深付近を中心に水温躍層が形成されていた 7~8 月には、概ねこれ以浅に塩分が低い河川系水が分布していた。これより下層では 100 m 深を中心とした水深 70~150 m に、34.5 psu 以上の黒潮系水が分布していた。150 m 以深になると塩分は低下し、

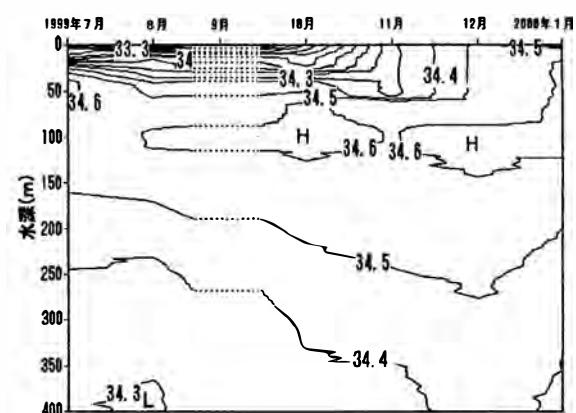


図-4 St. 3 における塩分 (psu) の鉛直分布の経月変化

200 m 深では 34.45~34.56 psu, 300 m 深では 34.33~34.49 psu, 400 m 深では塩分が最も低くなり, 34.29~34.45 psu の範囲であった。12月を中心に 400 m 深まで 34.45 psu 以上の高塩分が観測された。この時水温も高くなつており、高温・高塩分の黒潮系水が相模湾奥まで分布したこと示唆している。

3.2 栄養塩類濃度の経月変化

小田原沖 St. 3 における硝酸、亜硝酸およびアンモニア態窒素濃度の平均値と標準偏差を表 1 に示した。NO₃-N の割合が最も高く 0 m は 76%, 400 m 深は 98% であり、水深に比例して占める割合が増加した。

栄養塩類濃度の鉛直変化 (St. 3) を図 5 に示した。このうち窒素三態は TIN として示した。栄養塩類濃度は 100 m 以深ではそれぞれ水深に比例して高くなつていて。これらの平均値は TIN が 0 m から 400 m 深まで 100 m 間隔で、4.3, 9.1, 14.9,

表-1 St. 3 における NH₄-N, NO₂-N および NO₃-N の濃度 (μM)

水深 (m)	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N
0	0.7±0.5	0.3±0.3	3.2±3.3
100	0.4±0.1	0.2±0.2	8.4±2.3
200	0.5±0.1	0.2±0.2	14.3±2.8
300	0.5±0.2	0.4±0.3	18.4±4.6
400	0.4±0.1	0.1±0.1	24.6±4.8

(平均±標準偏差)

19.3, 25.1 μM , PO₄-P が 0.24, 0.61, 1.0, 1.4, 1.8 μM , SiO₄-Si が 10.6, 12.0, 22.8, 34.9, 50.0 μM であった。

栄養塩類濃度の経月変化 (St. 3) を図 6 に示した。0 m では成層が形成されていた 7 月から 10 月にかけて低く、11 月以降高くなる傾向があった。100 m 深ではこれ以深と比べて、栄養塩類濃度は低いものの経月変化は小さかった。水深 200 m から 400 m にかけて栄養塩類濃度は類似した経月変化を示し、ともに 7, 8 月が高く、10 月以降降低となり、12 月に最低となった。TIN, PO₄-P および SiO₄-Si 濃度の変動幅はそれぞれ 200 m 深が 11.4~19.2, 0.74~1.3 および 19.3~29.6 μM , 300 m 深が 14.2~25.6, 0.90~1.8 および 25.4~48.2 μM , 400 m 深が 17.1~30.4, 1.3~2.2 および 33.2~63.9 μM であった。

St. 3 における N/P 比と Si/P 比を表 2 に示した。N/P 比は 0 m では月ごとの変動が大きかったが、200 m 以深では 14 台を示した。Si/P 比は 0 m では変動が大きかったが 100 m 以深では水深に従って増加した。

今回の調査期間中、小田原沖海洋深層水の栄養塩類濃度は、最低値と最高値で 2 倍弱の変動幅を示しており、従来言われてきたような一定値を示すものではなかった。しかし栄養塩類濃度が最も低かった 1999 年 12 月の値を、中島 (1988) による海洋

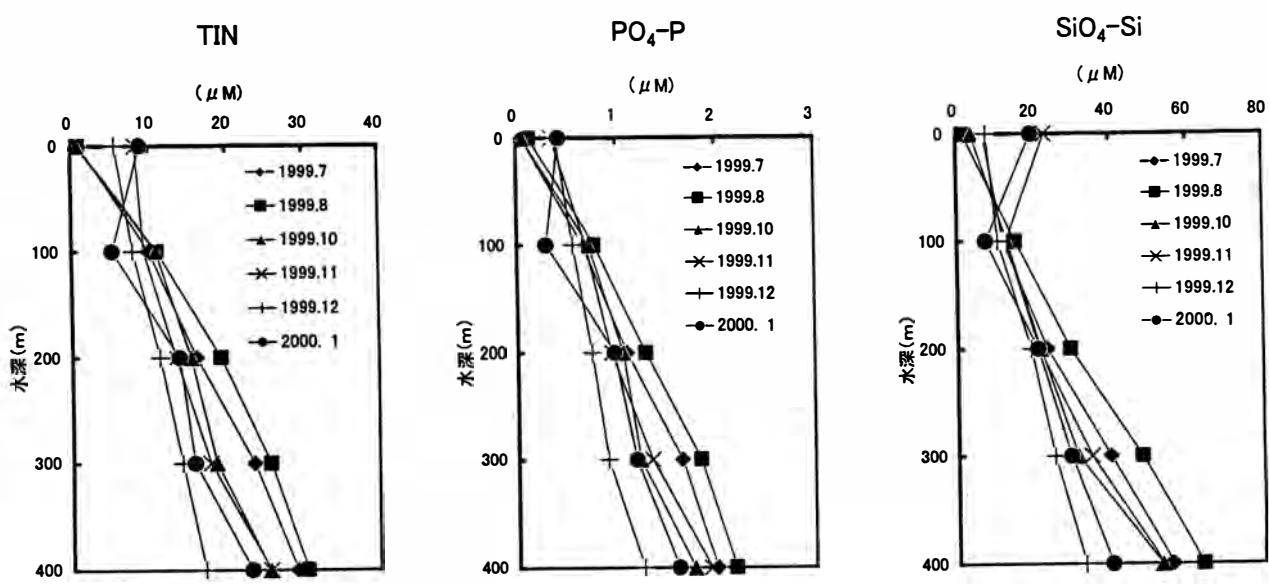


図-5 St. 3 における栄養塩類濃度の鉛直変化

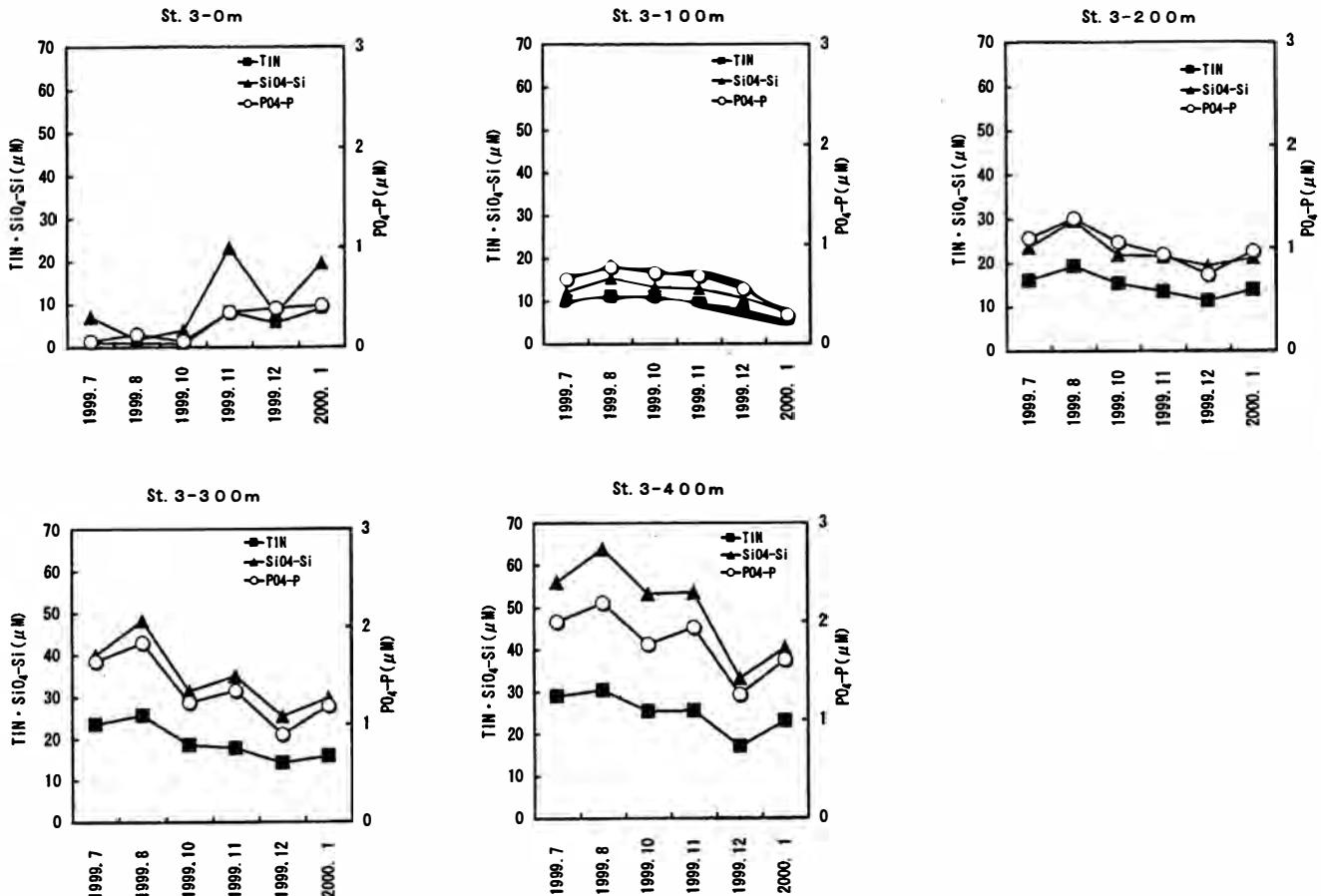


図-6 St. 3 における栄養塩類濃度の経月変化

表-2 St. 3 における深度別 N/P 比および Si/P 比

水深 (m)	N/P	Si/P
0	15.9±5.9	53.0±35.2
100	15.2±1.5	20.3±2.8
200	14.7±0.4	22.6±1.9
300	14.3±1.0	25.8±1.3
400	14.0±0.5	27.7±1.8

(平均±標準偏差)

深層水の栄養塩類濃度と珪藻類 *Skeletonema costatum* の最大収量との関係式に当てはめて見積もったところ、 1×10^5 cells/ml 以上の収量が期待できた。また N/P 比も安定していたため、小田原沖海洋深層水の利用を図る上では、十分な富栄養性と栄養塩類組成比の安定性があると思われる。

3.3 同水深における底層と中層との水質比較

St. 1 の 200 m 深（海底から約 10 m 上）と St. 3 の 200 m 深（海底から約 200 m 上）における水質の比較を図 7（上段）に示した。また St. 2 の 300 m 深（海底から約 10 m 上）と St. 3 の 300 m 深

（海底から約 100 m 上）については図 7（下段）に示した。水温および塩分に関して観測値はほぼ一致していた。栄養塩類濃度については、St. 1 の 200 m 深において、月によっては PO₄-P 濃度が若干高い値があるが、これ以外についてはほぼ同様な値を示した。今回の観測結果からは、底層海底から約 10 m 上と、それと同水深の中層において、海洋深層水の水質の違いは見あたらなかった。

3.4 海況の栄養塩類濃度との対応

水深 200 m 以深における水温および塩分（図 2, 3）と栄養塩類濃度（図 6）との関係をみると、比較的低温、低塩分である 7 月から 8 月にかけて、栄養塩類濃度は高くなっていた。これに対して、水温および塩分が上昇した 10 月以降においては、栄養塩類濃度は低下した。水温および塩分が調査期間中最も高い値となった 12 月（400 m 深の水温は 10.5 °C, 塩分は 34.45 psu）には、栄養塩類濃度が最低となった。

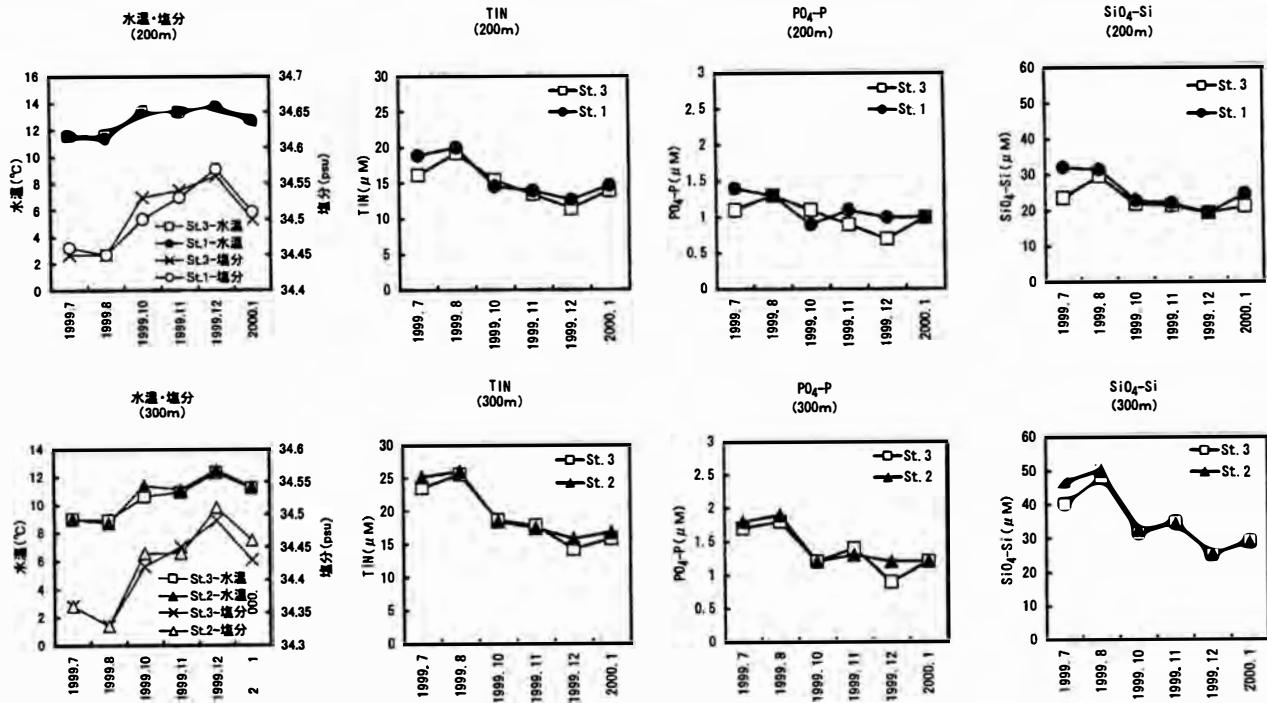


図-7 同水深における底層 (St. 1 および 2) と中層 (St. 3) との水質比較

水温および塩分から、水深 200 m 以深では 7 月から 8 月にかけて亜寒帯系中層水、12 月は黒潮系冲合水の影響が強かったと考えられるため、小田原沖海洋深層水の栄養塩類濃度は亜寒帯系中層水の場合には高く、黒潮系冲合水の場合には低くなることが考えられる。

これまで海洋深層水は、水温、塩分および栄養塩類濃度等の水質特性が比較的安定していると考えられてきたが、近年これらが海況の影響を受けて変動しているとの報告がなされている。高知県海洋深層水研究所 (KAWL) に揚水された海洋深層水の栄養塩類濃度の長期的変動を調査した豊田ら (1998) は、硝酸塩濃度の最高値と最低値の差は $22.8 \mu\text{M}$ 、リン酸塩濃度では $1.9 \mu\text{M}$ と、頻度は小さいものの大きく変動することを明らかにした。同じく室戸沖海洋深層水の水質変動と微細藻類に対する増殖ポテンシャルを調べた深見ら (2000) によれば、調査した月によって得られる微細藻類の収量が比較的大きく変動しており、これが海洋深層水中の DIN 濃度の変動と高い相関を示すことを明らかにした。また稻葉ら (2001) は駿河湾 300 m 層の流動と水温を 15 ヶ月間にわたり連続観測したが、内部潮汐と黒潮変動さらには季節変動が加わり、水温の変動幅

が 5.7°C に及んだと述べている。本研究において小田原沖海洋深層水の水温および塩分と、栄養塩類濃度の変動と対応関係がみられた。このことから低温、低塩分、高栄養塩類濃度という特徴を示す亜寒帯系中層水の上昇や、これとは逆に高温、高塩分、低栄養塩類濃度の黒潮系冲合水の卓越等が、本海域の 200~400 m 深における海洋深層水の変動要因の一つであると考えられる。

3.5 他海域との栄養塩類濃度の比較

これまで他海域から報告された海洋深層水の水温および栄養塩類濃度を、小田原沖の測定値とともに表 3 に示した。正確には水深、調査頻度および手法等が異なるために、それぞれの値を厳密に比較することはできないが、小田原沖の水温は室戸の KAWL 汲み上げ水 (豊田ら 1998)、室戸沖 (中島ら 1998) および駿河湾 (大川ら 2001) に近い値であった。また黒潮に面した海域における栄養塩類濃度の分析値を比較すると、小田原沖の測定値は室戸の KAWL 汎み上げ水より若干低く駿河湾に近い値であった。

表-3 海洋深層水水質比較

調査海域と水深	水温 (°C)	硝酸塩 (μM)	リン酸塩 (μM)	珪酸塩 (μM)	調査時期	出典
小田原沖 (300 m)	10.5±1.3	18.4±4.6	1.4±0.3	34.9±8.2	1999.7~2000.1	本研究
小田原沖 (400 m)	8.9±1.4	24.6±4.8	1.8±0.3	50.1±11.2	同上	本研究
KAUL 汲み上げ (320~344 m)	12.8±1.3	25.0±3.8	1.9±0.3	47.5~49.3*	1989.4~1997.3	豊田ら (1998)
室戸岬沖 (451 m)	6.4	32.2	2.3	73.4	1986.11	中島ら (1998)
富山湾 (400 m)	0.3	24.6	1.9	52.9	同上	同上
駿河湾 (400 m)	8	24~32	1.6~1.9	n. d.	1998.7 および 1998.12	大川ら (2001)

*1994.3.14 採水

4. 結 論

小田原沖における海洋深層水の水質は海況等の影響を受けて変動しているが、その測定値は本海域と同様に黒潮の影響を強く受ける室戸岬沖や駿河湾で得られた値に近いものであった。また栄養塩類の富栄養性に関して、TIN, PO₄-P および SiO₄-Si の測定値は植物プランクトンの培養に十分な濃度であった。今回我々が対象とした最も基礎的な観測項目である水温、塩分および栄養塩類濃度からみれば、小田原沖海洋深層水は利活用を図る上で十分な低温、富栄養および安定性を有していると考えられる。

今後は、海洋深層水特性である清浄性についての継続調査をする必要があり、測定項目として溶存有機物、細菌、有害物質等が考えられる。

5. 謝 辞

海洋科学技術センターの中島敏光博士には、海洋深層水の栄養塩類特性に関する貴重な助言を頂きました。株式会社水土舎の木幡孜博士には本論文をまとめるにあたり多くの協力を頂きました。漁業情報サービスセンターの岩田静夫博士には相模湾の海況についてご教示を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。時代の中でも海洋観測を行った神奈川県漁業調査船うしおの榎沢春雄船長、鈴木征仁技師、渡辺泰行技師に感謝いたします。

引用文献

- 1) 深見公雄・松本純・門田司・中野雄也・西島敏隆 (2000) : 海洋深層水の水質変動と微細藻類に対する増殖ポテンシャルの関係. 海深研. 1(1). 28-31.
- 2) 稲葉栄生・勝間田高明・安田訓啓 (2001) : 駿河湾 300 m 層の流動と水温の変動. 海深研. 2(1). 1-8.
- 3) 岩田静夫 (1979) : 平均場から見た相模湾の海況. 15-26 頁. 相模湾資源環境調査報告書 - II. 神奈川県水産試験場・神奈川県水産試験場相模湾支所.
- 4) JIS K 0101 (1991) : 44 シリカ. 191-194 頁. 財団法人日本規格協会.
- 5) 海洋観測指針 気象庁編 (1990) : 8. 8 栄養塩. 177-194 頁. 財団法人日本気象協会.
- 6) 鎌谷明善・奥修・辻久恵・前田勝・山田佳昭 (2000) : 相模湾における栄養塩類の分布と消長. 日水誌. 66 (1). 70-79.
- 7) 中島敏光 (1988) : 海産珪藻 *Skeletonema costatum* の増殖に及ぼす海洋深層水の影響. 日本プランクトン学会報 35(1). 45-55.
- 8) 中島敏光・豊田孝義 (1989) : 深層水人工湧昇. 月刊海洋. 21(10). 618-625.
- 9) 中島敏光・豊田孝義・筒井浩之 (1998) : 室戸岬沖および富山湾海域の海洋深層水の水質特性について. 海洋深層水利用研究会高知大会講演要旨集, 26-27.
- 10) 大川五郎・青木一永・望月秀雄・堀哲郎・久富浩介・中野秀雄 (2001) : 駿河湾海洋深層水の取水管の敷設. 海深研. 2(1). 87-93.
- 11) 豊田孝義・中島敏光・黒山順二 (1998) : KAUL の汲み上げ深層水中の栄養塩類. 海洋深層水利用研究会高知大会講演要旨集, 24-25.

(2001. 12. 17 受付, 2002. 3. 9 受理)