

# 高知県室戸沖の深度 320 m から取水した 海洋深層水の懸濁物質による清浄性評価

Evaluation of cleanliness of deep ocean water pumped from 320 m below  
the surface off Muroto, Kochi Prefecture by suspended particles

菅野 敬<sup>1</sup>, 阿部 祐子<sup>2</sup>, 奥田 一雄<sup>3, 4</sup>, 高橋 正征<sup>3</sup>

Takashi KAN-NO<sup>1</sup>, Yuko ABE<sup>2</sup>, Kazuo OKUDA<sup>3, 4</sup> and Masayuki TAKAHASHI<sup>3</sup>

## Abstract

In order to evaluate suspended particle cleanliness of deep ocean water (DOW), 16 one-month field samples were collected from DOW pumped from 320 m below the surface off the Kochi Prefectural Deep Seawater Research Laboratory from July 2005; surface water (SW) pumped from 5 m below the surface was used as a comparison. Weight of suspended particles filtered onto 0.45  $\mu\text{m}$  Millipore membrane filters was measured. Suspended particles in DOW weighed far less than in SW collected on the same day (14% of those in SW). Weights of suspended particles of DOW were always less than 1 mg/L (0.195–0.993 mg/L, average, 0.550 mg/L). No seasonal patterns were observed in either DOW or SW. Specific filtration speed was 1/3 lower in DOW than SW, and a positive relationship between the amount of suspended particles and the specific filtration speed was only observed for DOW and SW when all the data were analyzed together. Observations of suspended particles collected on Millipore filters by scanning electron microscope revealed that particles found in DOW were small, with few organic aggregates, organic-like films, and planktonic algal cells compared to those of SW. However, trace amounts of chlorophyll *a* (< 4 % of SW) were detected in DOW and other researchers observed planktonic algae (mainly diatoms) when DOW from the present study was cultured under illumination. Consequently, it is important for DOW to be stored under tight darkness to avoid germination of algal seed stock contained in the original DOW.

**Key Words:** deep ocean water, cleanliness, suspended particles, specific filtration coefficient, chlorophyll *a*, planktonic algae.

## 要 旨

海洋深層水（以下、深層水）の清浄性の評価の一部として、懸濁物質の量と質に着目し高知県海洋深層水研究所で取水している深度 320 m の深層水と深度 5 m の表層水について、2005 年 7 月から月 1 回の調査を 16 ヶ月実施した。本研究では孔径 0.45  $\mu\text{m}$  HA ミリポア濾紙に捕集された懸濁物質を主対象とした。同一時期の採取試料の懸濁物質量は常に深層水で表層水よりも少なく平均では表層水の 14% 以下で、深層水と表層水ともに懸濁物質量の季節的な変動は確認できなかった。深層水の懸濁物質量の変動範囲は 0.195~0.993 mg/L（平均 0.550 mg/L）と 1 mg/L 以下であった。濾紙に捕集した懸濁物質粒子の走査型電子顕微鏡観察により、深層水の粒子は表層水に比べ小型であるが有機物集塊並びに有機物由来と思われる膜状物や完全なプランクトン藻類細胞は極めて少なかった。しかし深層水の懸濁物質から表層水の 4 % 以下の微量のクロロフィル *a* が検出されプランクトン藻類のシードストック存在の可能性が示唆された。

**キーワード：**海洋深層水、清浄性、懸濁物質、濾過速度係数、クロロフィル *a*、プランクトン藻類

<sup>1</sup>高知大学大学院理学研究科自然環境科学専攻（〒780-8520 高知県高知市曙町 2-5-1）

<sup>2</sup>高知県海洋深層水研究所（〒781-7101 高知県室戸市室戸岬町字丸山 7156）

<sup>3</sup>高知大学大学院黒潮圏海洋科学研究科（〒783-8502 高知県南国市物部乙 200）

<sup>4</sup>高知大学総合科学系黒潮圏総合科学部門（〒783-8502 高知県南国市物部乙 200）

## 1. はじめに

現在, 海洋深層水(以下, 深層水)には, 低温, 富栄養, ミネラル, 熟成性, 清浄性の5特性が知られている(藤田・高橋 2006). このうち, 清浄性には, 物理学的, 生物学的および化学的な諸性質があり, 具体的な指標としては深層水に含まれる一般生物, 病原・汚染生物, 汚染化学物質, 重金属類, 懸濁物質, 有機物質, 放射性物質などの有無(多少)を考えられている(高橋・池谷 2002).

清浄性は深層水を資源として利用する際に様々なメリットを生む。例えば有用水産生物の飼育や養殖では海水の事前汚染除去処理がほとんど必要なく, 発電所や各種の工場における冷却水としての利用では大型生物の吸い込みや生物付着の問題がほぼ完全に解消できる。飲食品利用での事前汚染除去処理が不要となり, 逆浸透膜処理の際の膜の寿命が長くなるなどのメリットがある。アトピー性皮膚炎の治療の補助剤として深層水が利用されたのも, その清浄性が評価されてのことである(野村ら 1995; Nomura 1996; 関ら 2000).

2000年春より高知県室戸市において海洋深層水の商業用分水が始まり, 深層水の本格的な産業利用が行われるようになった(榎本 2001). そのため, 深層水の清浄性は製品の安全性に直結するといえる。しかし, 冒頭に述べた清浄性の評価を具体的に検討した例は極めて少ない。深層水中の懸濁物質については, その量が表層海水よりも少ないと考えられてはいる(Jacobs and Ewing 1969)が, 量や質およびそれらの時空間的変動に関する知見はほとんど得られておらず(例えば, 矢田・榎本 2004), どの程度の量あるいは質の懸濁物質ならばどの程度の清浄性といえるのかというような基準もない。

そこで, 本研究では高知県海洋深層水研究所で取水している海洋深層水と表層水が含有する懸濁物質の量と性質について周年調査し, 懸濁物質に基づく清浄性の評価を試みた。

## 2. 方 法

### 2.1 試料採取

深層水と表層水の試料採取は2005年7月から2006年10月まで高知県室戸市室戸岬町三津の高知県海洋深層水研究所において, 月1回の頻度で計16回行った。調査日は2005年7月15日, 8月15日, 9月15日, 10月17日, 11月17日, 12月8日, 2006年1月19日, 2月27日, 3月24日, 4月24日, 5月25日, 6月21日, 7月21日, 8月21日, 9月29日および10月18日である。

深層水(取水深度320m)と表層水(取水深度5m)は, 研究所内にあるポンプピットから汲み上げ, コンクリート製貯水槽に一時貯留される前の試水をそれぞれ直接ポリタンクに採取し傍らの実験室で直ちに処理した。

### 2.2 懸濁物質量の定量

採取直後の深層水(20L)と表層水(5L)をそれぞれ秤量済みミリポア濾紙(Millipore membrane filter, type HA, 0.45μm, 濾紙直径47mm)上に吸引ポンプ(General Electric A-C motor)で吸引濾過して懸濁物質を集め, 吸引濾過後に蒸留水数mLで濾紙を2回洗浄して塩分を除いた。濾過後, 濾紙はプラスチックシャーレに入れデシケーター中で数日間乾燥して重量が安定した後に重量測定し, 濾過前に測定しておいた濾紙重量を差し引いて懸濁物質量を求めた。ミリポア濾紙は試料の濾過前に数mLの蒸留水を濾過して水溶性成分を除去してから, 乾燥機(YAMATO, モデルDX-58)内で65°C 10時間以上乾燥し濾紙重量を測定した。なお本研究で対象としている懸濁物質は孔径0.45μm HAミリポア濾紙に捕集されたもので, 濾紙を通過する超微細粒子については考慮しなかった。

### 2.3 濾過速度係数の測定

2005年11月から2006年10月までの12回, 深層水と表層水をそれぞれ1Lプラスチックボトルに5本ずつ採取し, 研究所内の実験室で事前に蒸留

水を濾過して水溶性成分を除去したミリポア濾紙 ( $0.45\text{ }\mu\text{m}$ ) で直ちに濾過した。濾過はミリポア吸引濾過ポンプを用い、 $700\text{ mmHg}$  の定圧で  $1\text{ L}$  ずつ  $5\text{ L}$  の試水を順次同一濾紙で濾過し要した時間をストップウォッチで計測した。濾過水量が少ないために濾過抵抗は小さく、濾過負荷によるポンプの異常加熱は認められなかった。

水中の懸濁物質によって濾過速度が影響を受けて速度が制限される場合、その影響は濾過水量が増大するにつれて次第に累積するので、懸濁物質の濾過速度への影響を濾過速度係数 ( $\alpha$ ) とすると以下のようないくつかの関係が想定される。

$$T_{x+1} = T_x \exp[\alpha(L_{x+1} - L_x)] \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

式中の  $T_x$  は濾過時間 (秒)、 $\alpha$  は濾過速度係数 ( $\text{L}^{-1}$ )、 $L_x$  は濾過水量 (L) である。本研究では式 1 を用いて各月の濾過速度係数を算出した。

#### 2.4 クロロフィル $a$ とフェオ色素の定量

深層水と表層水をそれぞれ  $500\text{ mL}$  ずつ採取し直ちに Whatman GF/F ガラス繊維濾紙 (平均孔径  $0.5\text{ }\mu\text{m}$ ) で吸引濾過した。濾過後は濾紙を折り畳んでプラスチック色素抽出管に入れ、アルミホイルで遮光して抽出処理まで冷凍保存した。クロロフィルなどは  $90\%$  アセトン  $6\text{ mL}$  で一晩以上冷暗抽出し蛍光法により濃度を定量した。測定ではアセトン抽出液を試験管に入れ蛍光光度計 (Turner Design) で蛍光値 ( $F_0$ ) を読み取り、ついで  $5\%$  希塩酸を数滴滴下混合して数分以上経過してから蛍光値 ( $F_a$ ) を測定した。蛍光光度計の標準化のためのクロロフィル  $a$  は紅藻類イソハナビ (*Erythrocaldia subintegra*) 培養藻体から  $90\%$  アセトンで抽出し、分光光度法 (Strickland and Parsons 1968) で濃度を決定した。クロロフィル  $a$  の定量には SCOR/UNESCO (Strickland and Parsons 1968) の式を用いた。

#### 2.5 走査型電子顕微鏡による懸濁物質の観察

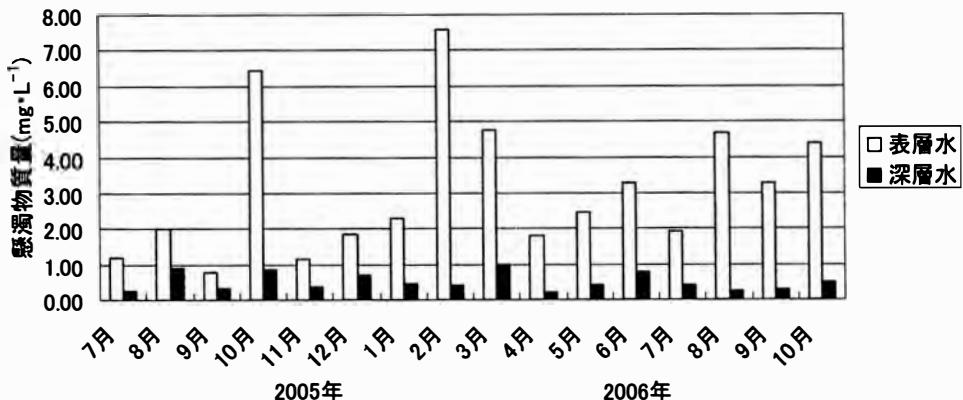
2.2 で懸濁物質を定量したミリポア濾紙の中心部を  $7 \sim 8\text{ mm}$  四方に切り、直接手で触れないよう

にしてカーボン両面テープ (日新 EM SEM 用導電性) で SEM 試料台 (日新 EM Type CA) に接着した。次いでイオンスパッター (JEOL JFC-1500) で金を  $10\text{ nm}$  の厚さに蒸着後、埃などが付着しないようにプラスチックシャーレに入れて保存し走査型電子顕微鏡 (SEM, JEOL JSM-5300LV S) で観察した。観察は  $2000$  倍または  $3500$  倍で撮影した写真をさらに  $4$  倍に拡大して印画紙に焼き付けて行った。その場合、非常に微細な粒子や泥や糞などのやわらかい粒子は、濾紙に付着して定型をなしていないために無視し、プランクトン藻類の完全な細胞と破片と思われるものを細胞粒子として抽出し、およその面積を測り計数した。この際、藻体がそれぞれ重なり合っている場合は写真で確認できる範囲で測定した。深層水と表層水の SEM 写真から、これら細胞粒子以外の懸濁粒子の観察では、深層水  $20\text{ L}$  と表層水  $5\text{ L}$  を濾過した場合、ミリポア濾紙上で様々な形をした懸濁粒子が重なり合って個々の粒子の識別が難しいため、濾過水量を  $0.5\text{ L}$  に減らして集めた懸濁粒子を観察した。その際、ミリポア濾紙の素材粒子による混乱をさけるために、面積が  $5\text{ }\mu\text{m}^2$  以下の微細な懸濁粒子は避けて大型粒子に着目した。しかし、実際の海水中の懸濁粒子はここで無視した微小な懸濁粒子が圧倒的に多く、先述した細胞粒子以外は優占粒子の性格を捉えているとはいえない。

### 3. 結 果

#### 3.1 懸濁物質量

$0.45\text{ }\mu\text{m}$  ミリポア濾紙上に捕集された深層水と表層水の懸濁物質量の測定結果が図 1 である。同一採集日で比較すると、常に表層水の方が深層水よりも懸濁物質量が多く、平均すると表層水  $3.12\text{ mg/L}$ 、深層水  $0.500\text{ mg/L}$  で、深層水中の懸濁物質量は表層水の  $14\%$  以下と少なかった。さらに表層水の懸濁物質量は最大  $7.59\text{ mg/L}$  と最小  $0.76\text{ mg/L}$  で  $10$  倍の差があったが、深層水は最大  $0.993\text{ mg/L}$  と最小  $0.195\text{ mg/L}$  で差は半分 (約  $5$  倍) で、表層水に比べて量の変動が小さかった。表層水は

図1 表層水と深層水の  $0.45\text{ }\mu\text{m}$  ミリポア濾紙捕集懸濁物質量の月変動

2005年10月17日に  $6.43\text{ mg/L}$ , 2006年2月27日に  $7.60\text{ mg/L}$ , 3月24日に  $4.76\text{ mg/L}$ , 8月21日に  $4.66\text{ mg/L}$ , 10月18日に  $4.41\text{ mg/L}$  と,  $4\text{ mg/L}$  以上の高濃度の懸濁物質量が測定された。深層水および表層水の懸濁物質量の変動にははっきりとした季節性は認められなかった。

今回の表層水の観測においては、高濃度を記録した2005年10月17日の前月にあたる9月15日に最小値  $0.760\text{ mg/L}$  が得られ、また翌月の11月17日に  $1.15\text{ mg/L}$  の2番目の最小値を記録した。一方、深層水においては、 $0.45\text{ }\mu\text{m}$  ミリポア濾紙に捕集される深層水の懸濁物質量は最大でも  $1\text{ mg/L}$  を超えることはなかった。しかし、サンプリング日の異なった結果を比べると、例えば2005年8月15日、10月17日および2006年3月24日の深層水は2005年9月15日の表層水 ( $0.760\text{ mg/L}$ ) よりも懸濁物質量が多く、頻度は多くはないが、深層水が表層水よりも常に懸濁物質量が少ないと限らなかった。

表層水と深層水の懸濁物質量の任意直線回帰解析の結果、 $y = 0.0401x + 0.379$  の関係が得られたが、プロットは分散し相関係数は  $r^2 = 0.0951$  で、表層水と深層水の懸濁物質量の月毎の変動には関係が認められなかった。

### 3.2 濾過速度係数

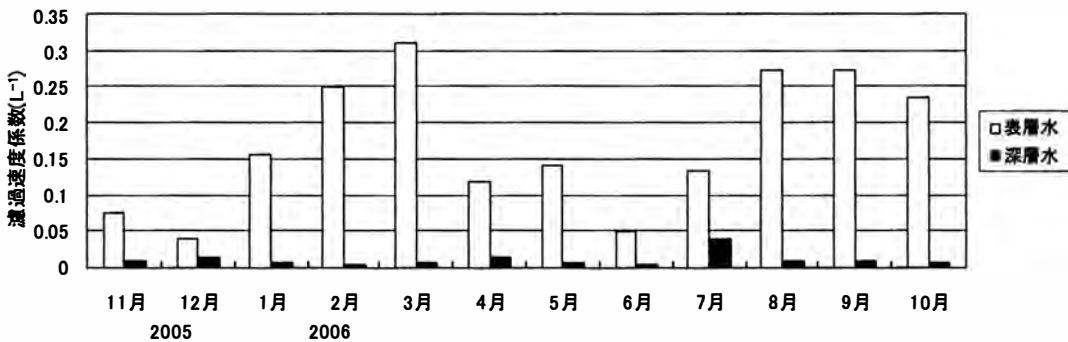
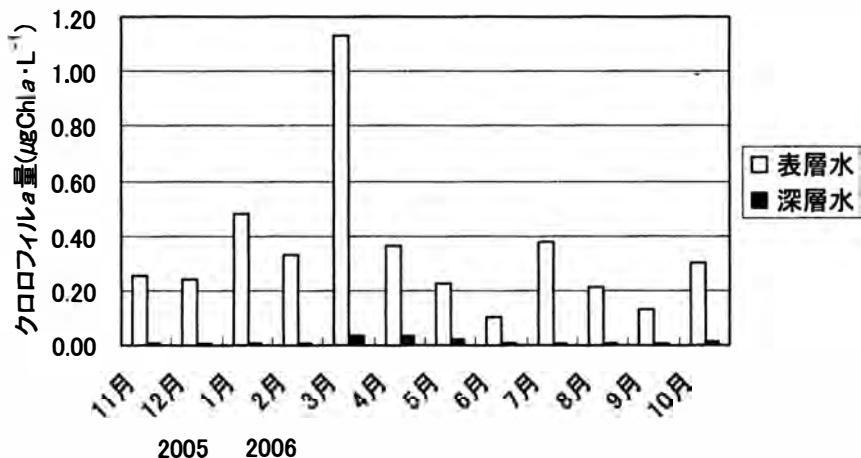
$0.45\text{ }\mu\text{m}$  ミリポア濾紙を用いて測定した濾過時間は、式(1)の関係によく適合した。得られた濾過速度係数の結果が図2である。深層水は最大  $0.0464$

( $\text{L}^{-1}$ ) と最小  $0.00320\text{ (L}^{-1}\text{)}$  で平均  $0.0305\text{ (L}^{-1}\text{)}$ 、表層水では最大  $0.313\text{ (L}^{-1}\text{)}$  と最小  $0.0404\text{ (L}^{-1}\text{)}$  で平均  $0.114\text{ (L}^{-1}\text{)}$  が得られ、深層水の濾過速度係数は平均で表層水の  $1/3$  以下であることが確認された。最大と最小の幅も深層水では  $1.45$  倍であるが、表層水は  $7.75$  倍の大きな変動が認められ、濾過速度係数でも深層水は表層水に比べて小さく比較的安定していた。

また、濾過速度係数も同一月を比べると常に表層水の方が高かったが、別の月と比べると2006年7月の深層水は2005年12月の表層水よりも高くなっていた。このように、懸濁物質量と同じく、濾過速度係数でも周年を通して常に深層水の方が低いというわけではなかった。ただし深層水の濾過速度係数は2005年7月だけが  $0.037\text{ L}^{-1}$  で突出して高く、その他の月は  $0.0126\text{ L}^{-1}$  以下の小さい値を示した。

表層水の濾過速度係数が年平均値  $0.15\text{ (L}^{-1}\text{)}$  を大きく上回るのは、1月、2月、3月、8月、9月および10月、 $0.05\text{ (L}^{-1}\text{)}$  以下の小さい月は12月および6月で、それだけでみると晩冬から初春および晩夏から初秋に高く、初冬と初夏に低かった。深層水では、どちらかといえば表層水とは逆の傾向がうかがえた。

深層水と表層水の濾過速度係数の任意直線回帰解析の結果、 $y = -0.020x + 0.013$  の関係が得られたが、プロットは分散し、相関係数は  $r^2 = 0.0421$  となり、両者には対応関係は認められなかった。

図2 0.45 μm ミリポア濾紙を用いて求めた表層水と深層水の濾過速度係数 ( $\alpha$ ) の月変動図3 表層水および深層水のクロロフィル *a* 量の周年変動

### 3.3 懸濁物質量と濾過速度係数の関係

0.45 μm ミリポア濾紙に捕集された表層水中の懸濁物質量と濾過速度係数の原点直線回帰解析の結果,  $y = 0.0489x$  の関係が得られ, 相関係数は  $r^2 = 0.422$  で, 濾過速度は懸濁物質量にある程度比例して変化する可能性が示唆された。

一方, 0.45 μm ミリポア濾紙に捕集された深層水中の懸濁物質量と濾過速度係数では, 表層水と同様の原点回帰解析の結果,  $y = 0.016x$  の関係が得られたが, 相関係数は  $r^2 = -0.279$  となり, 両者の相関は低かった。これにより, 0.45 μm ミリポア濾紙で得られた深層水の懸濁物質は, 少なくとも 1 mg/L 以下では濾過速度に直接影響を及ぼさないことが示唆された。

### 3.4 クロロフィル *a* 量とフェオ色素量

図3に, 2005年11月から2006年10月までの12回のサンプリングで測定したクロロフィル *a* 量の周年変動を示した。深層水からもクロロフィル *a*

が検出されたが, その量は少なく, 最大 0.0334 μg Chla/L, 最小 0.00476 μg Chla/L, 平均 0.0127 μg Chla/L で, 年間の変動幅は約 7 倍であった。一方, 表層水中のクロロフィル *a* 濃度は最大 1.13 μg Chla/L, 最小 0.100 μg Chla/L, 平均 0.346 μg Chla/L で, 変動幅は約 11 倍となり, 平均濃度は深層水の約 27 倍であった。さらに, 深層水のクロロフィル *a* 濃度は, 最大でも表層水の最低値の 1/3 程度と低かった。表層水のクロロフィル *a* 濃度が平均を大きく上回ったのは1月と3月で, 特に3月が顕著であった。一方, 深層水のクロロフィル *a* 濃度は3月, 4月および5月に他の時期よりも高い値を示した。

深層水と表層水のクロロフィル *a* 濃度の関係を任意直線回帰解析した結果,  $y = 0.0255x + 0.0039$  の関係が得られ,  $r^2 = 0.416$  の弱い正の相関が確認された。深層水中のクロロフィル *a* 濃度は表層水中のクロロフィル *a* 濃度にある程度比例して変化する可能性が示唆された。

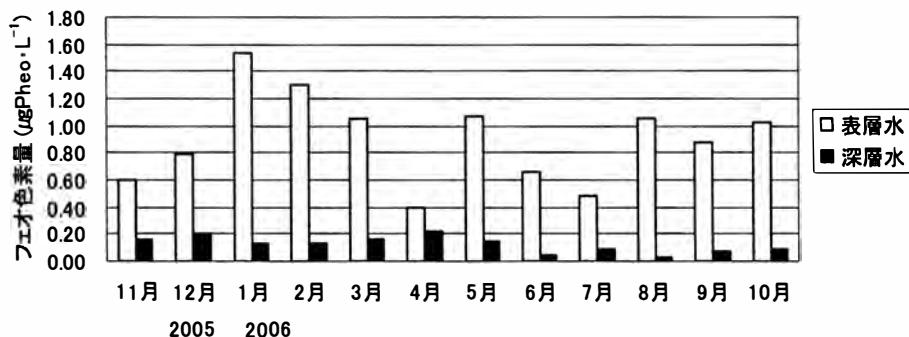


図4 表層水と深層水のフェオ色素量の月変動

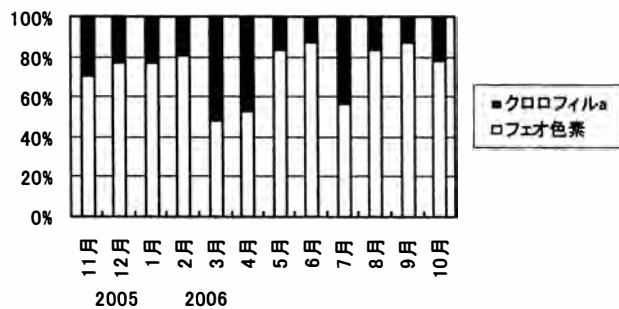


図5 表層水のクロロフィルaとフェオ色素の割合の月変動 (100%はクロロフィルaとフェオ色素の積算)

深層水と表層水のフェオ色素の周年変動の結果が図4である。フェオ色素は、深層水では最大  $0.221 \mu\text{g Pheo/L}$ 、最小  $0.0315 \mu\text{g Pheo/L}$ で、年間の変動幅は約7倍、平均は  $0.125 \mu\text{g Pheo/L}$ でクロロフィルa量の約10倍となった。一方、表層水では最大  $1.54 \mu\text{g Pheo/L}$ 、最小  $0.394 \mu\text{g Pheo/L}$ で、変動幅は約4倍、平均は  $0.904 \mu\text{g Pheo/L}$ でクロロフィルa量の3倍弱に留まった。また、年間平均で比較すると、表層水のフェオ色素量は深層水の約7倍で、上述のクロロフィルa量(27倍)に比べると差は小さかった。フェオ色素でも、クロロフィルaと同様、深層水で得られた値はすべて表層水の最低値を下回った。表層水のフェオ色素濃度が平均値より大幅に高かった月は、1月、2月、3月、5月、8月および10月で、低かったのは4月および7月であった。これに対して深層水のフェオ色素濃度の方が高かった月は、11月、12月、3月、4月および5月で、低かった月は6月であった。

表層水と深層水のフェオ色素量の任意直線回帰解析の結果、 $y = -0.029x + 0.151$  の関係が得られ、相関係数は  $r^2 = 0.0258$  で相関はみられなかった。

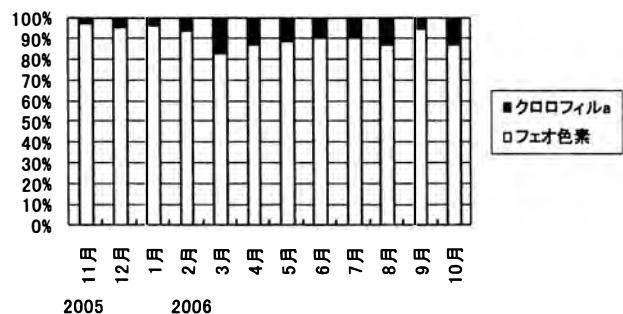


図6 深層水のクロロフィルaとフェオ色素の割合の月変動 (100%はクロロフィルaとフェオ色素の積算)

表層水のフェオ色素とクロロフィルaの割合の周年変動を示したのが図5である。表層水では、クロロフィルaの割合は一定せずに13~50%の間に変動し、3、4、7月が40%以上の高い値を占め、5、6、9月が20%以下の低い値を占めたが、特に明らかな周期性は見られなかった。

深層水のフェオ色素とクロロフィルaの割合を図6に示した。表層水に比べるとクロロフィルaの割合は表層水に比べて著しく低く、しかも3~17%を変動した。特に5%以下のクロロフィルaの低い月は11月、12月および1月に集中しており、3~10月までは、9月を除くと概ね10%以上であった。

### 3.5 懸濁物質量とクロロフィルa量

表層水、深層水ごとに  $0.45 \mu\text{m}$  ミリポア濾紙に捕集された懸濁物質量とクロロフィルa量の相関を、示した結果が図7と図8である。表層水は  $r^2 = 0.0423$  で相関は見られなかった。また、深層水についても  $r^2 = 0.0507$  となり相関は確認できなかった。

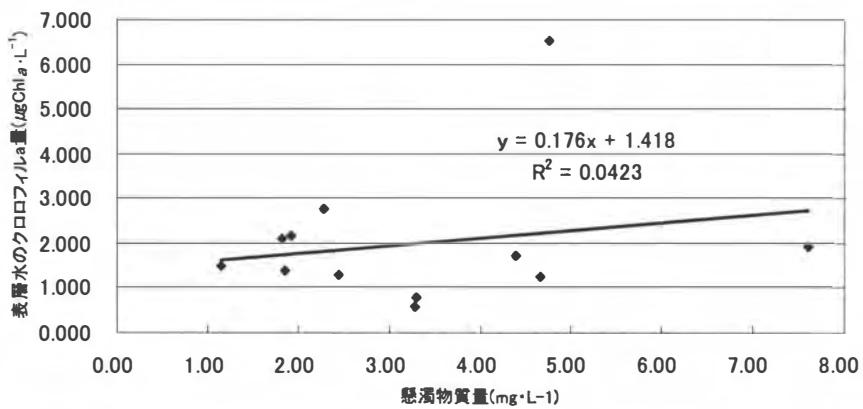


図7 表層水の0.45 µm ミリポア濾紙捕集懸濁物質量とクロロフィルa量の関係

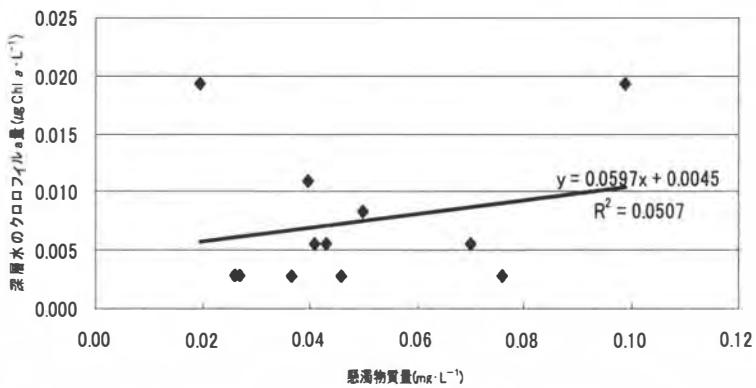


図8 深層水の0.45 µm ミリポア濾紙捕集懸濁物質量とクロロフィルa量の関係

### 3.6 走査型電子顕微鏡による懸濁物質の観察

表層水5 Lと深層水20 Lをそれぞれ0.45 µm ミリポア濾紙で濾過して懸濁物質を集め、それを走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した結果を図9および図10にそれぞれ示した。濾過試水量は深層水が表層水に比べて4倍多かったが観察される深層水の

懸濁物質は数が少なく、かつ粒子も小さかった。プランクトン藻類に着目すると、深層水では図9のように完全な藻類細胞はほとんどみられず、円石藻のEmiliania属と思われるコッコリスの破片が多く観察された。そのほかにも、Biddulphia属、Skeletonema属、Bacteriastrum属などの珪藻の破片と思

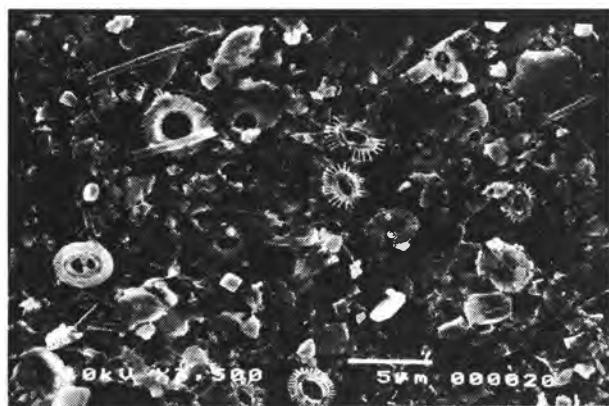


図9 深層水の0.45 µm ミリポア濾紙捕集懸濁粒子のSEM観察写真

写真中央～右の複数見られる歯車状構造がEmiliania属藻類のコッコリス（試料採取は2005年7月15日）

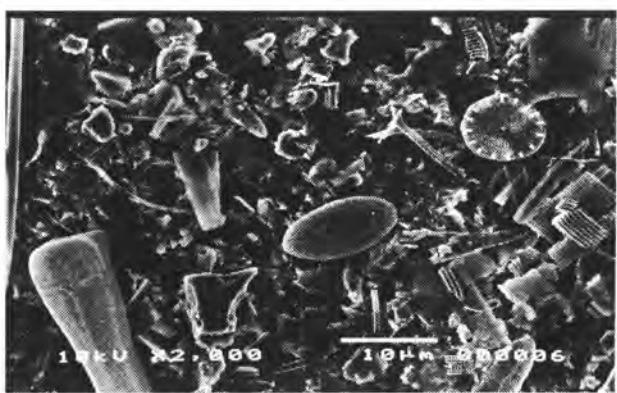


図10 表層水の0.45 µm ミリポア濾紙捕集懸濁粒子のSEM観察写真

写真中央の小判様の珪藻がCocconeis属（試料採取は2005年7月15日）

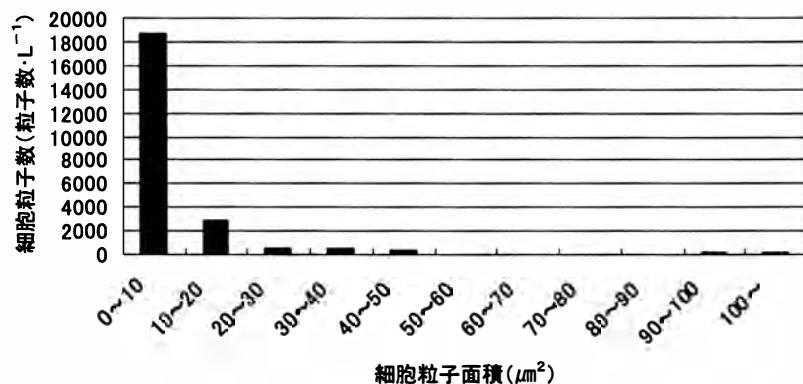


図 11 表層水中のプランクトン藻類の細胞および細胞破片の大きさ (SEM 像の表面積) ごとの細胞粒子数  
試料採取日 ; 2005 年 7 月 15 日, 2006 年 4 月 26 日

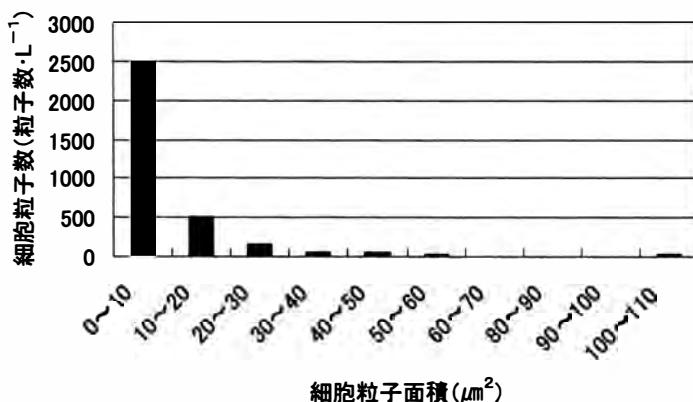


図 12 深層水中のプランクトン藻類の細胞および細胞破片の大きさ (SEM 像の表面積) ごとの細胞粒子数  
試料採取日 ; 2005 年 7 月 15 日, 2006 年 4 月 26 日

われるものも確認された。一方、表層水では、図 10 のように、*Cocconeis* 属の珪藻の細胞がほぼ完全な形で見られ、そのほかの視野には *Chaetoceros* 属、*Linmophora* 属、*Amphora* 属のほぼ完全な細胞粒子が多数観察され、同時に珪藻の殻の破片と思われる様々な形態の細胞粒子が見られた。

深層水と表層水の SEM 写真から測定した細胞粒子（プランクトン藻類の完全な細胞と破片と思われるもの）の面積を、それぞれサイズ分布として図 11 と図 12 に示した。計測した最小細胞粒子（細胞の破片も含む）の大きさは  $0.503 \mu\text{m}^2$  であったが、表層水と深層水ともに  $10 \mu\text{m}^2$  の小さい細胞粒子が圧倒的に多かった。濾紙の一部の写真による計数結果から濾紙全体の細胞粒子数を求め、1 L 中の細胞粒子数に換算した結果は、表層水で 23,400 個/L、深層水では 3,240 個/L で、深層水中の細胞粒子数は表層水に比べて少なかった。また細胞粒子

面積に粒子数を乗じ、さらに総細胞粒子個数で割って求めた平均細胞粒子面積は、表層水が  $14.1 \mu\text{m}^2$ 、深層水は  $9.24 \mu\text{m}^2$  で、表層水に比べて深層水の細胞粒子の大きさは小型であった。

中・大型の非細胞粒子の量は少なかったが、深層水中の  $5 \mu\text{m}^2$  以上の懸濁粒子はミリポアの孔が透けて見える薄い板状の半透明や木くずや破片のような堅さを感じさせた。一方、表層水の中・大型懸濁粒子は、柔らかい塊状で豆腐か白子のような有機物塊、ゼラチン様の薄い粒、いくつもの粒子が重なって雪だるまのように巨大化した粒子塊、湯葉の皮のように濾紙を覆うものなどが観察された。

## 考 察

本研究で対象とした懸濁物質は化学固定せずに  $0.45 \mu\text{m}$  ミリポア濾紙に捕集された粒子であり、超

微小粒子は濾紙を通過しているために海水中の懸濁粒子の全部ではなく、一部を把握していることになる。以上のような制約を前提として月1回の頻度で16回行ったサンプリングの結果を見ると、室戸市三津沖の水深320mから取水した深層水中の懸濁物質濃度は、最大でも1mg/L以下で、最大と最小で約5倍の変動が認められた。本実験と同じ高知県海洋深層水研究所の深層水では、過去にパーティクルカウンターで計測した最大粒子濃度が表層水の約9分の1、細菌を含めた浮遊粒子濃度の年間変動幅が約3倍という報告がある（榎本 2001）が、今回、深層水では表層水と比べて懸濁物質量が少なく、時間変動も比較的小さいことが確かめられた。ただ、採取時の異なった表層水と深層水の懸濁物質量を比較すると、深層水の方が多くなることもあり、その原因も含めて今後の検討が必要である。なお、公表されているハワイ自然エネルギー研究機構の水深915mから汲み上げた深層水の懸濁物質量（suspended solids, ssとして記載されている）は0.34mg/Lで、詳しい測定方法はわからないが、今回、高知県で得られた懸濁物質濃度の範囲に入っている（War, 2006）。ちなみにハワイの表層水における懸濁物質濃度は0.88mg/Lで本実験の表層水の最小値に近い。また、調査した16ヶ月を通して深層水と表層水のいずれにおいても懸濁物質量の変動の周期性は確認できなかった。表層水では、雨による陸からの懸濁物質粒子の供給や生物繁殖による生物由来粒子の増減の影響が当然予想され、それらの時間変動の特徴を考えると、本研究の採水間隔（1ヶ月）では長すぎて変動を捉えていない可能性がある。松永ら（2003）が2001年9月から2003年3月までの1.5年間にわたり、富山県滑川市の県水産試験場に揚水されている深層水（富山湾の深度321mから取水）の水温と硝酸態窒素を連続モニターした結果によれば、数日から1週間程度の頻度で水温が1～2°C上昇し、それに伴って硝酸態窒素濃度が低下しているほか、年に1回程度の2～4°Cの水温上昇と硝酸塩濃度の大きな低下が観察されている。高頻度の水温上昇については、内部波や潮汐、年1回程度の水温上昇については冬型の天候や台風などの

影響の可能性が考えられている。高知県海洋深層水研究所の南約3kmで、深度374mから深層水を揚水しているアクアファームでは、2004年10月20日の台風接近時に濁りが発生し、2、3日後に回復している（未発表）。また、表層での懸濁粒子の増減が深層水に何らかの影響を与えていていることも予想されるが、同じ採取日の深層水と表層水の懸濁物質量の相関の弱さが両者の関係の弱さを反映している可能性があり、深層水中で新たに形成される懸濁物質の検討も必要である。

今回得られた320mの深層水では、懸濁物質量は、最大でも1mg/L以下であったが、他の研究結果（Jacobs and Ewing 1969）から、深度が深くなればさらに少なくなることも推察される。また、同様の水深であっても、水域が異なれば、当然、懸濁物質量は異なることが予想され、今後、各種の情報蓄積し、より一般化した懸濁物質の清浄性の指標つくりが望まれる。

0.45μmミリポア濾紙の濾過時間から求めた深層水の平均濾過速度係数は、表層水の1/3以下で、最大と最小の変化幅も、表層水の7.75倍に対して、深層水は1.45倍あり、深層水の安定性の高いことが確かめられた。周年で眺めると懸濁物質量の場合と同じく深層水が表層水を上回るケースが見られたが、図2から明らかなように、2005年12月と2006年7月以外は深層水が表層水の濾過速度係数( $\alpha$ )の一割にも満たず、深層水は年間を通して表層水よりも濾過しやすいことが確認できた。濾過速度係数が小さく周的により安定していることは、濾過程を経て海洋深層水を利用する際に濾過時間ならびに濾過材の耐久性の向上などの点で大きなメリットになり、濾過速度係数も、このような視点から清浄性の指標としての活用が考えられる。ただし今回の実験で得られた濾過速度係数は過去に調査の報告がなく、今後、室戸でのデータの蓄積はもとより他地域でのデータの蓄積が望まれる。

0.45μmミリポア濾紙を用いた際の濾過速度は、濾過速度係数を指標に考えると同上濾紙が捕集する懸濁物質量に対し、表層水では弱い相関しか認められず、深層水では全く相関が認められなかった。表

層水は懸濁物質を集めた濾過水量と濾過速度測定の試水量を同じ 5 L にしているが, 深層水では懸濁物質量測定のために 20 L, 濾過速度測定のために 5 L と試水量が異なっている。また, 深層水の懸濁物質量は, 1 mg/L 以下と微量で懸濁物質量の変動幅も狭く, こうした条件の違いが相関結果に影響している可能性がある。ただ, 表層水と深層水の双方を一体化して相関解析すると変動幅が拡大し, 深層水の点のばらつきが小さい関係で, 懸濁物質と濾過速度係数との相関が格段に向上した。

本実験の対象海域の真光層は 50 m 以浅と想定され, 周年成層し, 夏期には真光層を中心に温度躍層が発達するため, 水塊の鉛直混合は表層数十 m に限定されている。深層水の取水深度 320 m は真光層のはるか下方に位置し, 真光層との水塊の直接的な混合や循環はない。真光層の光合成生産者であるプランクトン藻類は単細胞か群体をつくり, 活性がなくなると浮遊能力が低下して自重により沈降するが, その速度は速い場合でも 1 m/日程度である (Smayda 1970). これに従うと仮に 50 m から 300 m まで自重により沈降するには 250 日を要することになる。動物プランクトンに捕食されて糞塊になると数 100 m/日で沈降する (Smayda 1970) ため, 数日で 300 m に達するが, その場合はプランクトン藻類は動物プランクトンに食べられて消化管を通って, 糞の中に閉じこめられた状態である。本実験ではクロロフィル *a* の濃度に表層水と深層水の間で弱い相関が見られたのに対し, フェオ色素の濃度では両者に相関はなかった。

本実験では, 真光層以深に存在する深層水中からもクロロフィル *a* が検出され, 年間平均すると 0.127  $\mu\text{g Chla/L}$  が得られた。表層水の平均 3.46  $\mu\text{g Chla/L}$  と比べると, 深層水中のクロロフィル *a* は 1/27 で極めて低濃度であった。また, 深層水は最大 0.334  $\mu\text{g Chla/L}$  と最小 0.0476  $\mu\text{g Chla/L}$  で変動幅が約 7 倍, 一方, 表層水は最大 11.3  $\mu\text{g Chla/L}$ , 最小 1.00  $\mu\text{g Chla/L}$  で, 約 11 倍の差が確認された。深層水の取水水深は, 真光層よりはるか下層に存在していて, 光合成に必要な光は届かず, 深層水中にクロロフィル *a* が微量ながら存在してい

ることは興味深い。深層水中で検出されたクロロフィル *a* が健全な植物プランクトン細胞に含まれていたものと考えると, 深層水塊が湧昇などによって真光層内に持ち上がるような機会があれば, 沈降中の植物プランクトンがシードストックとしての役割を果たすと思われる。今回の走査型電子顕微鏡による観察結果では, プランクトン藻類の碎片が多数観察され, 完全な細胞はほとんど見られなかつたが, 本実験施設で得られた深層水数 100 mL を照射培養すると, 珪藻類を主とする藻類群集が繁殖することが別途報告されており (吉本ら 2005), プランクトン藻類のシードストックの存在は間違いない。したがって, 汲み上げた深層水の貯蔵にあたっては, 完全な光遮蔽を心掛けることが重要である。さもないと, 光照射によってプランクトン細胞が発芽・増殖して栄養塩類を吸収し様々な有機物が合成され, それらに依存した動物や従属栄養微生物の繁殖が起り, 生物学的清浄性が激減する。また, 3 月, 4 月, 5 月および 10 月の深層水中のクロロフィル *a* 量が多くなるのは, 春と秋のブルーム期に増殖したプランクトン細胞の沈降の結果の可能性も考えられる。

走査型電子顕微鏡での観察結果によれば, 表層水中には様々なプランクトン藻類の完全細胞が確認されたが, 深層水にはプランクトン藻類の完全細胞数は極めて少なかった。また, 表層水中には珪藻の殻が多く, 一方, 深層水中では珪藻の殻はほとんど見られず, 円石藻のコッコリスが顕著に含まれていた。深層水の取水深度 320 m において表層水と同様に珪藻の殻が分布するのは一般的と考えられるが, 本調査では珪藻の代わりにコッコリスが存在していた。この理由として, 湧昇流が存在するために上から落下する珪藻の殻が取水深度に到達しなかった可能性, また, 逆に, 深層水中のコッコリスがもっと深い水深から湧昇流とともに湧き上がってきた可能性が考えられる。海洋では水深によって流れの方向と強さが異なる移流がしばしばみられ, このような海域では移流によって入ってきた深層水中にその場所の表層水に由来する生物に入る可能性は低い。深層水を濾過した際の濾紙の上に捕集された大きさ 5  $\mu\text{m}^2$

以上のプランクトン藻類以外の比較的大型の懸濁粒子には、薄くて半透明あるいは木片のような比較的堅い印象を受けるものと、量は極めて少ないが塊状の有機物を多く含むと思われる粒子が観察され、一方、表層水を濾過した際の濾紙からは豆腐のように柔らかい印象の多くの有機物塊とゼラチン状で薄くミリポア濾過穴を容易に塞いでしまう懸濁粒子が確認された。同量の海水を濾過しても、表層水のSEM観察写真では深層水と比べて視野一面に広がる懸濁粒子の量が多く、多くの細胞粒子が観察された。本研究では、深層水中には藻類の完全細胞は容易には見出せなかつたが、前述の通り、同一取水地で得られた深層水の照射培養で珪藻類の発生が確認されていることから（吉本ら 2005），深層水の保存には完全遮光が不可欠である。

## 謝 辞

実験施設の使用許可を始め種々便宜を図って戴いた室戸海洋深層水研究所の北村明久所長に深謝する。また、分析実験および走査型電子顕微鏡観察を指導していただいた峯一朗博士と関田諭子博士に感謝する。

## 文 献

- 榎本恵一（2001）細菌類に関わる安全性の評価、3年間全体室戸海洋深層水の特性把握および機能解明、pp. 262-275. 平成10～12年度科学技術総合研究委託費地域先導研究成果報告書、平成3年3月財団法人高知県産業振興センター。
- 藤田大介・高橋正征（編）（2006）海洋深層水利用学～基礎から応用・実践まで～. 成山堂書店、東京。
- 209 pp.
- Jacobs, M. B. and M. Ewing (1969) Suspended particulate matter: concentration in the major oceans. *Science*, 163, 380-383.
- 高知県商工労働部 海洋深層水対策室（2004）<http://www.pref.kochi.jp/~sinsosui/>
- 松永明信・黒川弘子・小善圭一・高柳信孝・大戸幹也・豊田孝義・中島敏光（2003）深度321mから揚水した富山湾滑川海洋深層水中の硝酸塩濃度の時間変動. *海深研*, 4, 67-72.
- 野村伊知郎・森田秀雄・倉繁隆信（1995）海洋深層水によるアトピー性皮膚炎の治療、8施設での臨床効果. *アレルギー*, 44, 399.
- Nomura, I. (1996) Treatment of severe atopic dermatitis by using deep seawater. *IOA Newsletter* 7(3), 1-4.
- 関太輔・豊田雅彦・桧垣修一・諸橋正昭（2000）海洋深層水の皮膚疾患への治療効果の検討. *月刊海洋号外* 22, 117-121.
- Smayda, T. J. (1970) The suspension and sinking of phytoplankton in the sea. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 8, 353-414.
- Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons (1968) A practical handbook of seawater analysis. *Bulletin of Fisheries Research Board of Canada*, No. 167. 311 pp.
- 高橋正征・池谷 透（2002）海洋深層水の清浄性. *海深研*, 3, 91-100.
- War, J. C. (2006) Deep ocean water utilization. Proc. of the international conference on the development and industrial policy of DSW, Taipei, Taiwan. 1-10.
- 吉本典生・深見公雄・大関直幸・高橋正征（2005）海洋深層水の大量排水が日本の沿岸海域に出現する有害・有毒プランクトンを増殖させる可能性. 第9回海洋深層水利用研究会全国大会、室戸市、高知県。
- 矢田修一・榎本恵一（2004）懸濁粒子数からみた「室戸海洋深層水」の清浄性と安定性. *海深研*, 5, 1-6.