

懸濁粒子数から見た「室戸海洋深層水」の 清浄性と安定性

Cleanliness and Stability of Muroto Deep Seawater Examined
by Analysis of Suspended Particles

矢田 修一¹・榎本 恵一¹

Shuichi YADA and Keiichi ENOMOTO

Abstract

The cleanliness and stability of Muroto deep seawater were examined throughout the year. Surface and deep seawater samples were collected monthly from January 2000 to December 2000 on the surface or from a depth of 320 m off the coast of Cape Muroto at the Kochi Prefectural Deep Seawater Laboratory. The numbers and sizes of suspended particles in the seawater samples were analyzed using a particle analyzer. In the deep seawater, the numbers of particles with diameters of 1 - 50 μm were 334 - 844/ml (yearly average of 549/ml) and those with diameters of 10 - 50 μm were only 10 - 28/ml (yearly average of 19.4/ml). Particle numbers of the deep seawater varied slightly from month to month, but no seasonal variations were observed. On the other hand, the numbers of particles with diameters of 1 - 50 μm in the surface seawater samples were 1445 - 7289/ml (yearly average of 4416/ml) and showed clear seasonal variations. The particle numbers of the surface seawater were high in spring and summer, but low in winter. These results demonstrate that the Muroto deep seawater is cleaner and more stable in suspended particles contained than the surface seawater, and therefore it is better use for industrial uses, particularly for those having filtration processes.

Key Words: *deep seawater, suspended particles, particle analyzer, seasonal variations*

要 旨

「室戸海洋深層水」の清浄性と安定性を、海水中の懸濁粒子数を測定することにより検証した。2000年1月～12月にわたって深層水及び表層水を高知県海洋深層水研究所において毎月採水し、粒子アナライザーを用いて試料海水中の懸濁粒子数とその粒径を測定した。深層水は、同研究所の取水設備を用い、室戸岬沖水深320mから汲み上げられたものを使用した。解析の結果、深層水中の粒径1～50 μm の懸濁粒子数は、334～844個/ml（年平均値549個/ml）であり、そのうち粒径10～50 μm の粒子数は、10～28個/ml（年平均値19.4個/ml）と極めて少なかった。また、深層水中の懸濁粒子数の季節的な変動は認められなかった。それに対して、対照とした表層水中の粒径1～50 μm の懸濁粒子数は、1445～7289個/ml（年平均値4416個/ml）と深層水中の粒子数の約8倍に達し、春から夏に増加し、冬に減少する明らかな季節変動を示した。これらの結果より、「室戸海洋深層水」は表層水に比べて清浄であり、しかもその清浄性は年間を通じて安定していることが明らかとなり、濾過工程の必要な深層水の産業利用での有用性が示された。

キーワード：海洋深層水、懸濁粒子、粒子アナライザー、季節変動

¹高知工科大学（〒782-8502 高知県香美郡土佐山田町宮ノ口185）
Kochi University of Technology

1. はじめに

海洋深層水（以下、深層水と略す）は、低温性、栄養塩の豊富さ、清浄性が特徴とされている。これらの特性を活かして、深層水は、飲料水・食品・化粧品等の原料として、あるいは養魚や藻類の培養に盛んに用いられるようになった（中島，2002）。このように産業資源としての深層水の重要性は、近年格段に増しており、その清浄性についても高い関心が持たれている。深層水の清浄性の指標として、高橋・池谷（2002）は、病原・汚染生物、汚染化学物質、懸濁物質等の7項目を挙げている。室戸海洋深層水中の病原微生物については石井ら（2001）によって、また環境汚染物質については隅田ら（2002）、石井ら（2001）、田尾ら（2001）によって調査され、病原微生物が検出されないこと、環境汚染物質が低いレベルにあることが報告されている。

一方、深層水中の懸濁物質が表層水に比べて少ないことは、経験的に知られていたが（中島，2002）、粒子数の長期にわたる定量的測定は行われてこなかった。しかし、深層水を一つの工業原料として捉えた時、深層水中の微細懸濁粒子を定量的に測定し、年間を通じた深層水中の粒子数の変動を知ることは必須であると考えられる。深層水をそのまま使用する場合は言うまでもないが、特に食品や化粧品製造のために逆浸透膜を用いて深層水を淡水化する場合には、深層水中の懸濁粒子が少ないことが重要な条件となる。原水中の粒径 $100\ \mu\text{m}$ 程度以上の大型懸濁粒子は簡単な濾過や沈殿操作により除去できるが、これらの操作によっては除去しにくい粒径数十 μm 以下の微細懸濁粒子数によって逆浸透処理の効率は大きく影響される。逆浸透に用いる原水中の懸濁物質の多寡は、fouling index (FI) によって評価されている。これは、孔径 $0.45\ \mu\text{m}$ の精密膜を用いて、 $206\ \text{KPa}$ の圧を加えながら原水を濾過したとき、最初の $500\ \text{ml}$ の原水の濾過に要する時間 (t_1) と、 15 分間濾過を続けた後に $500\ \text{ml}$ の原水を濾過するとき要する時間 (t_2) から得られる値であり、下式によって求められる。

$$FI = \{1 - (t_1/t_2)\} \times (100/15)$$

懸濁物質によって濾過膜の孔がふさがれると FI の値は増大する。逆浸透に使用する原水の FI は 5 以下が望ましいとされているが、一般に海洋深層水は前処理なしでそのまま使用できるほどの清浄性を有している。例えば、駿河湾の水深 $600\ \text{m}$ から得られる海洋深層水の FI は 3.6 と報告されている（土肥・松本，2000）。一方、逆浸透を用いて表層海水を淡水化する福岡市などの施設では、逆浸透前の懸濁物質を除く前処理に、逆浸透処理と同程度の費用を要するという（高橋・池谷，2002）。そこで本研究では、海洋深層水の清浄性の指標としての懸濁粒子数、特に実用上問題となる $1\sim$ 数十 μm の粒径を有する粒子に着目し、液体中に分散する微細粒子の大きさとその数を短時間でモニターできる粒子アナライザーを用いて、一年間にわたり深層水中の懸濁粒子数を測定した。

2. 材料と方法

2.1 深層水試料の採取と物理化学的性質の測定

試料とする深層水は、2000年1月から同年12月まで毎月中旬に高知県海洋深層水研究所（室戸市三津）の取水施設ポンプピット内の取水管より直接採取した。これは沖合約 $2\ \text{km}$ 、水深 $320\ \text{m}$ に設置された取水口から取水管を経て取水されたものである。試料海水は、冷却保存し、採水から4時間以内に粒子数を測定した。また、採水現場において深層水の水温、pH、塩分を測定した。測定には携帯式測定器（堀場製作所 水質チェッカー U-10型）を用いた。また、深層水の比較対照として、海洋深層水研究所前の海面から取水管を経て採取された表層水についても同じ項目を測定した。

2.2 粒子アナライザーによる懸濁粒子の測定

清浄な容器に採取した深層水または表層水各 $5\ \text{ml}$ を、粒径 $1\sim$ $50\ \mu\text{m}$ の粒子測定用センサーを装着した粒子アナライザー（CLIMET CI-1000）を用いて測定した。この装置は、海水中の懸濁粒子がセンサー内の光ビームを遮ることを利用して、懸濁

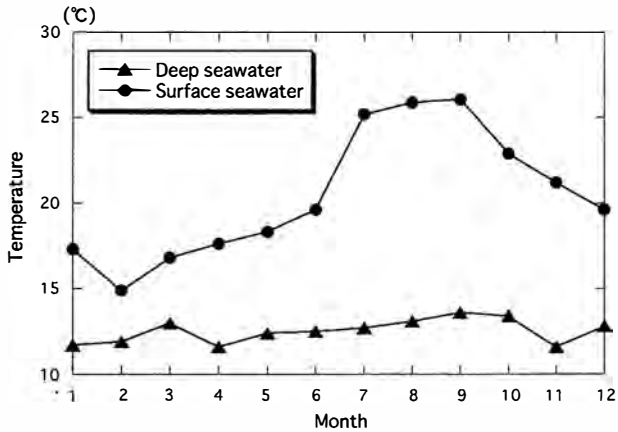


Fig. 1 Temperature changes in the deep and surface seawaters collected monthly at the outlet of pumping station of the Kochi Prefectural Deep Seawater Laboratory on the dates shown in Table 1.

粒子の大きさとその数を測定するものである。同一試料の3回測定の平均値を利用した。

3. 結果

3.1 深層水の物理化学的性質とその安定性

深層水の塩分と pH は1年を通じて安定しており、年平均値はそれぞれ 32.9 psu と pH 7.74 であった。深層水の塩分は表層水の値（年平均値 33.0 psu）とほとんど差は無かった。深層水の pH は表層水の pH（年平均値 pH 8.13）より約 0.4 低い値を示した。取水ピットでの深層水の温度は 11.6 ~ 13.6 °C（年平均値 12.5 °C）であり、年間を通じて比較的安定していた（Fig. 1）。それに対して表層水は2月の最低温度 14.9 °C から9月の最高温度 26.1 °C まで季節変動を示した（年平均値 20.5 °C）。

3.2 深層水中の懸濁粒子の測定

粒子アナライザーによる計測結果から、粒径 1 ~ 50 μm の範囲を 1 μm ごとの区分に分割し、それぞれの区分の粒子数を求めた。深層水試料中の各区分の粒子数は、粒子数を対数で表すと、粒径が 1 μm から 50 μm へと大きくなるにつれ、ほぼ直線的に減少した（Fig. 2）。また、季節による変動は少なく、1月と7月の深層水試料を比較した場合、ほぼ同様の粒径分布が得られた（Fig. 2）。通年での粒子数の変化を調べると、深層水中の粒径 1 ~ 50 μm の懸濁粒子数は 334 ~ 844 個/ml（年平均値 549 個/

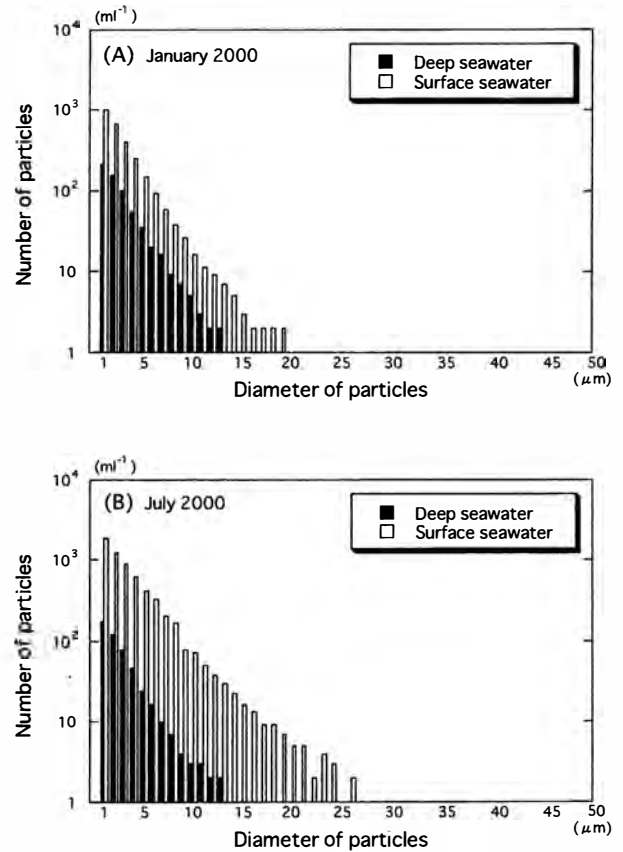


Fig. 2 Size distributions of suspended particles in the deep and surface seawater samples collected at the Kochi Prefectural Deep Seawater Laboratory. The seawater samples collected on January 19 (A) and July 10 (B) were analyzed using a particle analyzer.

ml) であった（Table 1）。粒子数は月ごとに若干の変動を示したが、明らかな季節の変動は見られなかった。粒径 10 ~ 50 μm の比較的大型の粒子数は 10 ~ 28 個/ml（年平均値 19.4 個/ml）と粒径 1 ~ 50 μm の全粒子数の 3.5% を占めるに過ぎず、極めて少なかった。

これと対照的に、表層水の粒径 1 ~ 50 μm の懸濁粒子数は 1445 ~ 7289 個/ml（年平均値 4416 個/ml）であり、深層水の粒子数の約 8 倍であった。また、春から秋にかけて多く、冬に少ないという明瞭な季節変動が認められた（Table 1）。表層水中の粒径 10 ~ 50 μm の粒子数の全粒子数に占める割合は年平均値 3.6% で、深層水の場合とほとんど差はなかったが、7月の表層水試料の粒径分布からは、1月に比べて粒径 10 ~ 50 μm の大型粒子の多い傾向が見られた（Fig. 2(B)）。この傾向は3月から9月にかけて見られ、表層水中の粒径 10 ~ 50 μm の粒子が全粒子数に占める割合は、8月を除いて全粒

Table 1 Number of suspended particles in the deep and surface seawater samples collected from the Kochi Prefectural Deep Seawater Laboratory.

Sample	Date	Number of particles (ml ⁻¹)	
		Diameter	
		1 - 50 μm	10 - 50 μm
Deep seawater	2000/ 1/19	620±27	18.1±3.8
	2000/ 2/17	687±17	24.5±5.9
	2000/ 3/14	709±16	27.8±3.8
	2000/ 4/17	455±18	15.9±3.6
	2000/ 5/16	345±8	10.1±2.6
	2000/ 6/12	463±20	22.3±4.4
	2000/ 7/10	490±18	16.7±4.8
	2000/ 8/ 7	533±9	19.8±3.0
	2000/ 9/19	844±21	26.8±8.9
	2000/10/16	630±27	17.6±6.7
	2000/11/13	334±9	13.7±1.9
	2000/12/11	486±5	19.4±0.4
	Average		549
Surface seawater	2000/ 1/19	2771±17	62.4±4.3
	2000/ 2/17	1445±37	50.6±10.1
	2000/ 3/14	1790±37	71.1±9.9
	2000/ 4/17	4896±56	213±3
	2000/ 5/16	6236±53	311±66
	2000/ 6/12	5689±115	231±51
	2000/ 7/10	6130±101	291±77
	2000/ 8/ 7	5730±45	63.5±9.9
	2000/ 9/19	7289±18	359±93
	2000/10/16	6227±78	137±26
	2000/11/13	2745±172	98±22
	2000/12/11	2048±15	16.8±4.4
	Average		4416

子数の4~5%と、年平均値よりやや高い値を示した。

Fig. 3は懸濁粒子を球体と仮定して各区分の粒子体積を求めたものである。深層水では粒径5~10 μmの粒子区分に体積のピークが見られ、この粒径の粒子が懸濁物質の総量に寄与している割合が大きいことが分かる。1月および7月における深層水試料1L中の粒子の全体積は、それぞれ $3.31 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ と $2.68 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ であり、大きな差はなかった。一方、表層水では、粒径5~10 μmの粒子の他、粒径10~20 μm余の粒子が全体積に占める割合が大きかった。1月および7月における表層水試料1L中の粒子の全体積は、それぞれ $1.56 \times 10^{-1} \text{ mm}^3$ と $7.28 \times 10^{-1} \text{ mm}^3$ であり、それぞれ深層水の4.7倍と27倍であった。

4. 考察

「室戸海洋深層水」は、年間を通じて、塩分及びpHが安定しており、取水ピットでの温度も

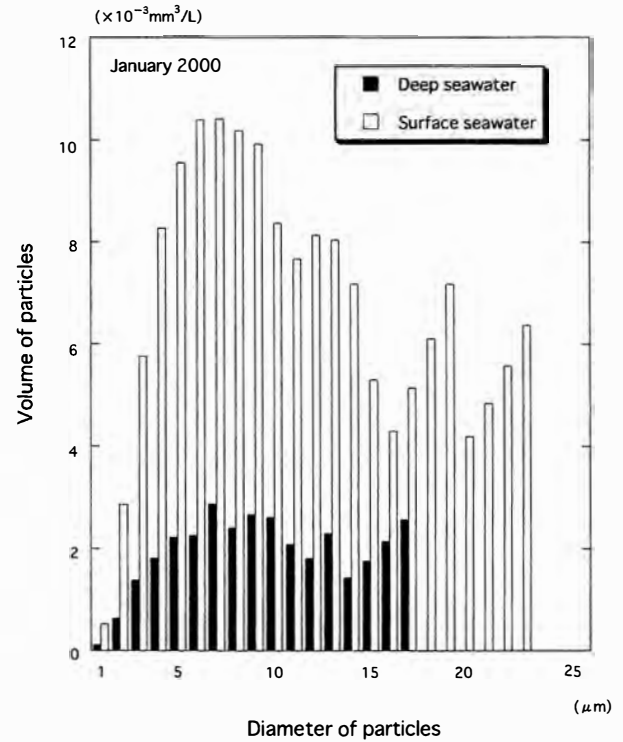


Fig. 3 Volume distributions of suspended particles in the deep and surface seawater samples collected at the Kochi Prefectural Deep Seawater Laboratory. The total volume of particles in each size class was calculated under an assumption of sphere for all particles.

11.6~13.6℃と比較的変化が少ない。粒子アナライザーで計測した懸濁粒子数は月ごとに若干の変動はあるが、季節変動と認められる傾向はなかった。これは表層水の懸濁粒子数が明瞭な季節変動を示したのと対照的であった。また、深層水中における粒径1~50 μmの粒子数の年平均値は549個/mlと、表層水中の約8分の1の低レベルにあった。特に粒径10~50 μmの粒子数は、年平均値19.4個/mlと極めて低レベルにあった。

海水中の懸濁粒子には、海洋の表層で増殖する植物プランクトン等の生物由来の有機および無機物質や、非生物由来の無機物質が含まれる。河川の影響を受ける海域、例えば東シナ海は、陸地から流入する懸濁物質を多量に含んでいる (Hoshika *et al.*, 2003)。プランクトンの遺骸や河川から流入する物質は、懸濁粒子として海底へと沈降、堆積し、しばしば海底近くに高濁度層を形成する。この海洋中の懸濁粒子は、SS (suspended solid) の量や濁度、懸濁態有機炭素 (POC) や懸濁態有機窒素 (PON)

の量として測定される。懸濁態有機炭素の海洋における分布を見ると、太平洋では一般に表層で300～1500 $\mu\text{g C/L}$ 程度であり、水深とともに急速に減少して、200 m 以深では50 $\mu\text{g C/L}$ 以下となり、水深が深くなるにつれ漸減する（高橋・池谷，2002）。Kawahata（2002）は、太平洋上の東経175度の経線に沿って、北緯0～46度までの複数の観測点でPOCを測定し、0～100 mの表層のPOCが7.2～98.1 $\mu\text{g C/L}$ で、緯度や水深による変動が大きいのに対し、水深250 mでは約10～20 $\mu\text{g C/L}$ 前後で、緯度による大きな違いがないことを報告している。海洋深層水取水地の一つである駿河湾では、表層のPOCは50～180 $\mu\text{g C/L}$ と季節や水深による差が大きい、深層水の取水深度である水深300～800 mのPOCは20～70 $\mu\text{g C/L}$ 前後で比較的安定していることが報告されている（エステラ・吉田，2000）。また、安川ら（2002）の報告によると、駿河湾内の海面近くでのPOCは50～80 $\mu\text{g C/L}$ であったが、POC値は水深100 mまで深度とともに低下し、100～1000 mでは安定して20～40 $\mu\text{g C/L}$ 程度であった。それに対して、表層のSS量は0.2～0.3 mg/Lであり、水深が深くなるに従いやや低下するが、測定地点によっては水深400～800 mの海底付近でSS量の増加が観察された。水深200 m以深のSS量は0.1～0.5 mg/Lであった。Nakatsuka *et al.*（2003）は、懸濁粒子濃度が求められるように校正した濁度計を用いて相模湾の水深1500 mまでの懸濁粒子の量を測定した。この場合も水深200 m以深では懸濁粒子濃度は約0.05 mg/L前後と比較的安定していたが、海底近くでは値の上昇が見られた。また、Kitazato *et al.*（2003）は、相模湾の水深350 mに設置されたトラップの堆積物を分析し、有機態炭素と有機物の割合がそれぞれ4.59 ± 1.26%と16.6 ± 2.9%であると報告している。

本研究では、対象とした懸濁粒子の粒径が1～50 μm であり、また測定方法も異なるため、本研究から得られた数値と上記で報告された数値とを直接比較することはできない。しかし、室戸沖は、駿河湾や相模湾と比較して黒潮系の表層水の影響が同

等かそれ以上に大きいことや河川水等の陸水の影響が少ないこと、かつ海底高濁度層の発達が少ないと考えられるために、室戸海洋深層水の懸濁粒子濃度は、上述の駿河湾と相模湾の懸濁粒子濃度を下回っていると推察される。

一方、表層水中の粒径1～50 μm の懸濁粒子の全体積は、冬季（1月）に深層水の約5倍、夏季（7月）には27倍に達し、清浄性と安定性において表層水は深層水より明らかに劣っていた。

以上の懸濁粒子に関する結果に加え、「室戸海洋深層水」中には病原微生物が認められなかったこと（石井ら2001）や有機スズ化合物（TBT）の濃度が表層水の約20分の1と低く、北太平洋中心部の表層海水中の濃度とほぼ同じであること（田尾ら2001）から、「室戸海洋深層水」は工業原料、特に濾過工程を必要とする場合の原料として適した清浄性と安定性を保持していることが示された。

また、今回の粒子アナライザーを用いた測定によって、この方法が深層水中の低レベルの懸濁粒子数を計測する、定量性及び再現性に優れた方法であることが明らかとなった。さらに、測定にあたって試料を前処理する必要がなく、1回の測定を数分間で終わることができるため、日常的な懸濁粒子数のモニタリングに適していると考えられる。

謝 辞

本研究の推進にあたり、高知県海洋深層水研究所の前所長 谷口道子氏はじめ所員の方々には多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。また、長期間にわたる測定を手伝って頂いた高知工科大学学生の細美乃倫子さん、谷脇礼奈さん、佐古田初音さんに厚く感謝します。本研究は、文部科学省（旧科学技術庁）の平成10～12年度科学技術振興調整費による「地域先導研究（室戸海洋深層水の特性把握および機能解明）」の一環として行われた。

文 献

土肥慎吾・松本豊（2000）：逆浸透膜による深層水の二

- 段階濃縮プロセスの開発と深層水を利用した食品の開発. 99-105 頁. 平成 11 年度駿河湾深層水利用可能性調査報告書. 静岡県.
- エステラ, カサレト ベアトリス・吉田勝美 (2000): プランクトンの動態と役割, 及び水塊指標性. 15-81 頁. 平成 11 年度駿河湾深層水利用可能性調査報告書. 静岡県.
- Hoshika, A., T. Tanimoto., Y. Mishima., K. Iseki and K. Okamura (2003): Variation of turbidity and particle transport in the bottom layer of the East China Sea. *Deep-Sea Res. II*, 50: 443-455.
- 石井隆夫・川田常人・田植栄・近澤紘史・平松佐穂・金田妙子・安岡富久, 千屋誠造・高橋信・干場浩 (2001): 環境汚染物質に関わる清浄性の評価. 251-261 頁. 平成 10 ~ 12 年度科学技術総合研究委託費地域先導研究 研究成果報告書 室戸海洋深層水の特異性把握および機能解明. 財団法人高知県産業振興センター, 高知.
- Kawahata, H. (2002): Suspended and settling particles in the Pacific. *Deep-Sea Res. II*, 49: 5647-5664.
- Kitazato, H., T. Nakatuka., M. Shimanaga., J. Kanda., W. Soh., Y. Kato., Y. Okada., A. Yamaoka., T. Masuzawa., K. Suzuki and Y. Shirayama (2003): Long-term monitoring of the sedimentary processes in the central part of Sagami Bay, Japan: rationale, logistics and overview of results. *Progress in Oceanogr.*, 57: 3-16.
- 中島敏光 (2002): -21 世紀の循環型資源- 海洋深層水の利用. 緑書房, 東京, 263 頁.
- Nakatsuka, T., J. Kanda and H. Kitazato (2003): Particle dynamics in the deep water column of Sagami Bay, Japan. II: seasonal change in profiles of suspended phytodetritus. *Progress in Oceanogr.*, 57: 47-57.
- 隅田隆・渡辺貢・土居聡・谷口道子・田辺信介 (2002): 室戸海洋深層水特性把握調査研究 - I. 環境汚染物質測定結果について. *海洋深層水研究*, 3, 65-69.
- 高橋正征・池谷透 (2002): 海洋深層水の清浄性. *海洋深層水研究*, 3, 91-100.
- 田尾博明・中里哲也・富永衛・宮崎章 (2001): 微量金属化合物の解明. 22-36 頁. 平成 10 ~ 12 年度科学技術総合研究委託費地域先導研究 研究成果報告書 室戸海洋深層水の特異性把握および機能解明. 財団法人高知県産業振興センター, 高知.
- 安川岳志・筒井浩之・三森智裕・黒山順二・豊田孝義・中島敏光 (2002): 駿河湾海洋深層水取水予定海域における海水特性. *海洋深層水研究*, 3, 77-82.
(2003. 8. 4 受付, 2004. 1. 27 受理)