

海洋深層水の清浄性

Cleanliness of deep ocean water

高橋 正征¹・池谷 透¹

Masayuki Mac TAKAHASHI and Tohru IKEYA

Abstract

Within 3 major characteristics of low temperature, rich nutrients and cleanliness of deep ocean water, cleanliness is reviewed based upon information reported in the world in the following 7 aspects; 1) biological, 2) contamination of pathogenic and polluted organisms, 3) chemical pollutants, 4) suspended matter, 5) organic matter, 6) heavy metals, and 7) radioactive materials. Possible advantages of resource utilization of deep ocean water supported by each aspect of cleanliness are described, and probable changes of cleanliness during various storages of deep ocean water are also mentioned.

Key Words: *deep ocean water, cleanliness, organisms, pathogenic and polluted organisms, chemical pollutants, suspended matter, organic matter, heavy metals, radioactive materials*

要 旨

海洋深層水の3大特性の一つである清浄性に関して、内外の知見の整理を試みた。ここでは、清浄性を 1) 一般生物, 2) 病原・汚染生物, 3) 汚染化学物質, 4) 懸濁物質, 5) 有機物, 6) 重金属類, 7) 放射性物質の7項目に分けて検討した。各項目では、海洋深層水のもつている特性を整理し、深層水を利用する際の効果について例をあげた。さらに、深層水を保存する際の清浄性の変化についても取り上げた。

キーワード：海洋深層水、清浄性、生物、病害・汚染生物、汚染化学物質、懸濁物質、有機物、重金属類、放射性物質

1. はじめに

水深約 200 m 以深の海洋深層水（以下、深層水）には、現在、低温（エネルギー）・富栄養（栄養塩類）・清浄性が三大特性として知られており、この他にミネラル（各種金属を含む）、塩、水などを含み、また、周年安定性などの特性がある（高橋・井関, 2000）。この内、清浄性や周年安定性は低温や富栄養といった資源特性とは違って単独での利用価値はなく、深層水のもつている資源利用の際に付加

価値をつける効果がある。例えば、海水を飲食物、医薬治療、化粧品、あるいは各種生物の飼育や培養などに利用しようとする場合、表層水は汚染の心配があるので、濾過や殺菌などの前処理が必要になるが、深層水ではそうした前処理がほとんどいらないために、利用が容易で処理費用もからない、といった点である。中でも、飲食物、医薬治療、化粧品などでは高い清浄性が要求されるので深層水利用は有利である。さらに、低温や富栄養といった資源の事業利用では、その多くが大量の深層水を必要とする

¹東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学系 (〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1)

が、そうした利用に比べて飲食物、医薬治療、化粧品、洗浄水などでは、必要水量が必ずしも多くない。したがって、現在、日本で開発・普及している日量数 1000 トン以下の中・小規模取水施設での深層水資源の事業利用では清浄性が特に重要になる。

深層水の清浄性としては、現在、次の 7 項目が考えられる；1) 一般生物、2) 病害・汚染生物、3) 汚染化学物質、4) 懸濁物質、5) 有機物、6) 重金属類、7) 放射性物質。ここでは深層水を資源として利用することに着目して、清浄性の上記 7 項目のそれぞれについてこれまでに得られている知見を整理する。

2. 一般生物の清浄性

海洋には、バクテリア・植物・動物・菌類・ウイルスといった様々な生物が生活している。1900 年頃までは、深海は無生物・無菌と考えられていたが、調べていくうちに深海底までどこにも生物の分布していることが明らかになった（西村、1981）。しかし、生物量の大部分は表層付近に集中していて深層水中の生物密度は著しく低い。深層水では一般生菌数の培養結果がよく取り上げられる。国内の深層水の取水地域では、表層水に比べて、深層水の一般生菌数が 1/10 程度になるという報告が多い。一般生菌数は水の汚染をチェックするために開発された方法で、深層水のような清浄性の高い水域の評価には必ずしも適しているとはいえない。測定結果のばらつきも大きく、同時に測定した表層水に比べた相対的な少なさ程度の指標である。測定の時期や場所が異なった分析結果の比較は難しい場合が多い。微生物の研究手法は最近大きく進展しているので（海洋出版（株）、2000），深層水の微生物的清浄性についてよりはっきりした指標を検討し、それに最適の分析手法を利用して評価することが望まれる。

深層水の生物的清浄性を示すには、海水中の生物を直接採取して分析することが必要で、その例が図 1 である。海水中では一般に 100 m 以深では水深が深くなるほど生物量は少なくなる。中部太平洋で実測された水深 50 m の植物プランクトン、バクテリア、動物プランクトンの生物量は、それぞれ 1-

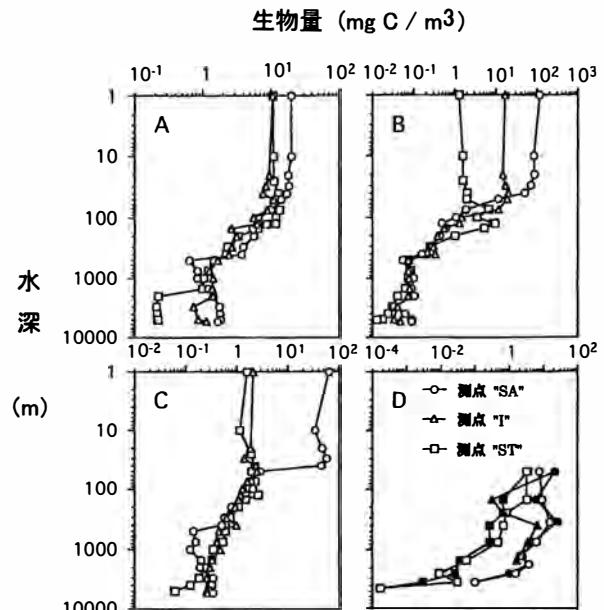


図-1 西部北太平洋外洋におけるバクテリア (A), 植物プランクトン (B), 原生動物プランクトン (C), 後生動物プランクトン (D) の生物量の鉛直分布。測点 SA は 155°E 44°N, T は 147°E 39°N, ST は 147°E 25°N. 白抜きのシンボルは昼間、黒抜きのシンボルは夜間採取結果を表す。（山口ら、未発表データ）

100 mgC.m^{-3} , $10\text{--}20 \text{ mgC.m}^{-3}$, $1\text{--}50 \text{ mgC.m}^{-3}$ で、全生物量はおよそ $20\text{--}200 \text{ mgC.m}^{-3}$ である。 500 m と 5000 m で 4 グループの全生物量を比べるとそれぞれの水深で $2\text{--}20 \text{ mgC.m}^{-3}$ と $0.2\text{--}2 \text{ mgC.m}^{-3}$ でおよそ 1 術ずつ少なくなっている（山口ら、未発表資料）。ちなみに、海洋の魚類などの生物量は、表層も深層もここで述べるプランクトン量に比べて桁ちがいに少ない。深層水の一般生物の少なさは、後述する有機物や懸濁物質の清浄性と密接に関係している。というのは、生物の生活に必要な餌である有機物生産は、光到達の関係で表層 150 m 程度まででしか行われないためである（高橋ら、1996）。さらに、表層 100 m 程度は太陽光で暖められていて、昼夜の温度差や風などにより、ごく一部が鉛直攪乱を受ける程度で、低温の深層水の上に表層水がのって蓋をしているような状態である。こうした水柱構造も表層水と深層水の活発な物質交換や生物移動を妨げ、結果として深層水の生物量を少なくしている。

したがって、真光層以深（分解層）の生物はせいぜい 150 m 程度の真光層（生産層）の生産物のおこぼれに依存して生活している。その量は、真光層の全生産の 20% 程度である（Berger *et al.*, 1989）。

海の平均水深は約 3800 m なので、深層の広大な水柱内に広がる分解層に生物が分散して生活しているために生物密度が小さくなる。これが深層水中での生物が少なく、生物的清浄性の高くなる理由である。深層水は生物が少ないためにごく簡単な濾過処理で生物をほぼ完全に取り除き、生物的清浄性を高めることが容易にできる。深層水の生物の清浄性は、水深が深いほど高くなるが、しかし、海底近くでは生物量は若干増加する。

天然水は海水を含めて、容器に入れておくと数時間でバクテリアの増殖することが知られている (ZoBell, 1946)。これは瓶効果、あるいは壁面効果とよばれ、容器の壁面に有機物が吸着し、それを水中のバクテリアが利用して増殖するためと考えられている。深層水も例外ではないが、後述するように深層水中には容易に分解する有機物が極めて少ないので、増殖できるバクテリア量が限られ、深層水を瓶に入れて保存するとバクテリアは増えるが增加生物量はごく少ないレベルで頭打ちになる。

深層水の生物的清浄性は、深層水の原水を直接使用する際の‘持ち込み生物’による汚染が少ないで、港湾での水産物の洗浄、水産生物の増養殖、などの直接利用に適している。また、建物を空調する際の清水冷却でも、海水配管、特に熱交換器内の汚染が深層水の生物的清浄性によって大幅に低減される。深層水の原水は、孔径数 μm の濾過膜を通して、バクテリア以外の生物は除かれるし、 $0.2 \mu\text{m}$ 程度の膜で濾過すればほとんどのバクテリアを除くことができ、しかもいすれの濾過処理も深層水では比較的容易なので、飲食物・医薬治療・化粧水などにも安心して使うことができる。

3. 病害・汚染生物の清浄性

生物的清浄性には、上述の一般生物に加えて、さらに病原・汚染生物など特定生物の混在問題がある。海産魚介類や人体の病原生物には、ウイルス・カビ・原生動物などが含まれる (多賀, 1974)。こちらの方は必ずしも生物量の大小ではなく、その存在の有無が問題になる。この場合の汚染源は陸域がほとんどなので、陸域の影響を受けにくい深層水は病害・

汚染生物で汚れることは稀である。ただし、汚染物質の投棄処分などが行われた海域では注意が必要になる。特に、広い塩分範囲で増殖の可能な塩分耐性をもった微生物は深層水の低温・高圧環境下で長く生存する可能性がある (大和田, 2002; Hill *et al.*, 1993)。

病害・汚染生物は $0.2 \mu\text{m}$ 程度の細かい濾過膜で原水を濾過することにより、ウイルスなどの超微細なものを除けば除去される。海水の脱塩処理などに用いられている逆浸透膜で濾過 (RO 濾過) すればウイルスを含めてすべての病害・汚染生物が除かれる。RO 濾過を複数回行えば完全である。濾過処理は汚染の著しい表層水では費用がかかり容易ではないが、深層水では仮に濾過処理するとしても目詰まりが表層水に比べて軽微なので事前の処理などを簡素化できる。実際に RO 濾過で深層水を脱塩している既存施設では、簡単なネット濾過によって肉眼で見える生物などを事前除去している程度である。

比較的大量の海水を必要とする港湾での水産生物の選別や魚市場などの清浄洗浄水として病害・汚染生物を含まない深層水の利用は適している。これには、後述する深層水の懸濁物質や分解しやすい有機物の少ないと大きなメリットになる。また、クルマエビなどで特に問題になっている沿岸水域のウイルス汚染には、ウイルスに感染していない親エビを確保して、病原ウイルスの混在しない海水で飼育することによって、ウイルス感染のない種苗生産が可能である。実際、沖縄県海洋深層水研究所で最近成功し事業利用に入った (玉城, 2002)。同様の問題は、他の水産生物の種苗生産でも起こりうるので、病害・汚染生物の対策として深層水の清浄性の持つ効果は大きい。病害・汚染生物を含まない深層水は、飲食物・医薬治療・化粧水などにも安心して利用できる。

4. 汚染化学物質の清浄性

これまで数多くの化学物質が人工的に合成されて利用、あるいは人間活動で発生し、その一部が自然界に散逸しているが、問題となるのは残留性有機汚染物質 (POPs, persistent organic pollutants) と

それ以外のいわゆる環境ホルモンなどである。

POPsにはPCB (polychlorinated biphenyl)類やDDT (dichloro-diphenyl-trichloro-ethane)類などの工業や農薬利用目的で人工的につくられた物質と、ダイオキシンのように意図しないで人工的にできてしまう物質とがある。POPsは1992年にリオデジャネイロで開かれた国連環境会議で注目され、その後、6回の国際会議を経て、2001年5月に残留性有機汚染物質国際条約(POPs条約)が世界130カ国の参加の下に採択された。日本は残念ながらまだ調印はしていない。POPs条約では、製造・使用を原則禁止するものとして、アルドリン、クロルデン類、ディルドリン、エンドリン、ヘptaクロル、マイレックス、トキサフェン、PCB類の8種類と、マラリア対策用として例外的に製造・使用を制限するDDT類、非意図的生成物質のダイオキシンとジベンゾフランの2種類、非意図的あるいは意図的に生成されるヘキサクロロベンゼンの合計12種類を決めている。これらに対しては当面は排出削減を目標としている。さらに、同条約ではPOPsを含む廃棄物や保存の適正処理も義務づけている。POPs認定化合物は将来増えていく可能性が高い。

こうしたPOPsなどの一部は農地・ゴルフ場・森林・牧場・空き地などに撒かれた殺虫剤や除草剤に含まれていて、それが土壤を経由して河川・湖沼・ダム・地下水に入って飲料水や農畜産物に回り、一部は海に入る。また、ゴミ消却の灰や、他の産業廃棄物が地中埋設され、それらに含まれていたPOPsなどが染み出して同じく土壤から水系へと入ってくる。大気を経由して塵や雨とともに地上に降ってきて水系に入るPOPsなどもある。今や、日本列島全体が、程度の違いはあってもこれらのPOPsなどによって汚染を受けていることが推察される。しかも土壤を経由した水系汚染は汚染土を除かない限り解決できず、実際問題としていたん汚染してしまった大量の土壤汚染を人の手で短時間に取り除くことは不可能である。土壤中のPOPsなどの汚染化物質がたどりつく先は海である。

POPsなどの中にはダイオキシンのように人体にとって安全濃度は存在しないと考えられている物質

もある。また、脂肪に溶ける物質は生物濃縮を受けることになり、その場合は肉食動物の体内に高濃度に蓄積される。海水のPOPsなどの分析結果は少ないが、それらをみると深層水では検出限界以下の微量な場合の多いことがうかがわれる。陸上に汲み上げて利用する際には、海底近くの水や懸濁物質中のPOPsなどの濃度が高くなりやすいので、注意が必要である。

表1は高知県海洋深層水研究所で汲み上げている深層水と表層水の一部のPOPs濃度の測定例である(立川, 1998)。比較として高知港の分析値も示した。PCBsが高知港の表層海水中からはかなりの濃度で検出されているが、研究所の表層水と深層水(322mと340m)では検出されていない。DDTsは高知港の表層水からは研究所表層水の6倍強、深層水の10数倍が検出されている。上記のPOPs条約の該当物質には入っていないが、HCHs(BHCs, 有機塩素系農薬で、イネにつく害虫のニカメイガの防除薬剤として1960年代に西日本の水田に多量に散布されたが、1970年代始めに使用中止になった。)は高知港、深層水研究所の表層水と深層水の両方から濃度は低いが検出されている。

環境ホルモン物質の可能性が指摘されている船底塗料のブチルスズ化合物濃度の分析結果を表2に示した。高知港の表層水の一部からは検出されているが、深層水研究所の表層水、深層水共に検出限界以下である。

上述の結果を見る限り、深層水中の汚染化学物質は検出不能か、あったとしても超微量である。POPsなどは通常の水道水の浄水処理では取り除くことができないし、超微量でも飲み続けると健康障

表-1 海水中の有機塩素化合物の濃度(立川, 1998)

	PCBs (pg/L)	HCHs (pg/L)	DDTs (pg/L)
高知港 表層水	380	190	52
高知県海洋深層水研究所 表層水	<40	90	7.7
混合水(322m + 340m)	<40	170	4.3
322m	<40	150	3.6
340m	<40	180	3.4
検出限界	40	--	--

表-2 海水中のブチルスズ化合物の濃度（立川, 1998）

	BTs (pg/L)			
	MBT	DBT	TBT	総濃度
高知港 表層水（造船所前）	60	77	100	240
表層水（埠頭）	<10	14	11	25
表層水（河口）	<10	<4.0	<10	n.d.
高知県海洋深層水研究所 表層水	<10	<4.0	<10	n.d.
混合水（322 m + 340 m）	<10	<4.0	<10	n.d.
322m	<10	<4.0	<10	n.d.
340m	<10	<4.0	<10	n.d.
検出限界	10	4.0	10	

害の可能性のあるものが多い。POPsなどで汚染していても、人が感じる味には一切影響しない。したがって、おいしい水だからといって安心はできない。万一、深層水中に POPsなどの汚染化学物質が存在したとしても、RO 濾過処理で取り除くことができる。しかし、その場合には濃縮水側に POPsなどは濃縮されて残るので注意が必要である。

深層水の汚染化学物質の清浄性は、原水を飲料水・医薬治療・化粧水などに直接利用する際に特に有利である。また、RO 濾過処理する場合でも、原水の汚染が低いことは大きな強みである。水産生物の増養殖では、生物濃縮の可能性があるので、汚染化学物質のほとんど無い深層水は他の水に比べて優れている。

5. 懸濁物質の清浄性

懸濁物質は、水中に含まれる粒状物質で、生物と非生物の懸濁粒子がある。SS (suspended solid) 量や濁度として測定される。SS 量は、一定量の海水をミリポア（Millipore）などのメンブラン濾紙（濾紙の目合は $0.45\text{ }\mu\text{m}$ や $0.8\text{ }\mu\text{m}$ などを利用する）で濾しとて、濾過前後の濾紙の重量を測定して、その差から求める。沿岸表層水では数～数 10 mg/L 程度の場合が多く、濁水では $>100\text{ mg/L}$ となる (Robertson *et al.* 1998)。200 m 以深の SS 量は表層に比べて変動が小さく、量も少ない傾向が見られるが (Sherrell *et al.* 1998; Chronis *et al.*, 2000)，深層水中の SS 量に関するデータはほとんどないために詳しいことは分からぬ。また、

陸地近くでは河川からの供給や海底に堆積した移動性有機泥などにより、高濁度層の見られる場合がある。McCave *et al.* (2001) がアイルランド南西海域で調べた結果によると、海底付近には SS 濃度の高い高濁度層が陸地よりの浅海部から水深 4000 m 以深まで続いて見られ、そこでは底層の SS 濃度が最も高くその影響は海底上数 100 m 上層までおよんでいる。さらに、途中の水深でも、陸域から沖合に向かって数 100 m の幅で高い SS 層の見られることが報告されている。したがって、陸域から河川などによって懸濁物質の供給される海域では、懸濁物質濃度の把握ならびに取水口の敷設方式の検討が必要である。

深層水の資源利用では懸濁物質自体や、懸濁物質の含有物が問題になる。福岡市や沖縄県宜野湾市では、表層海水を RO 濾過処理して水道水を造っているが、RO 濾過処理する前に水中の懸濁物質除去のための前処理（濾過）装置に、RO 濾過処理装置と同程度の設備費用と運転費用がかかっている。しかし、深層水ではごく簡単な前処理のみで RO 濾過処理が可能である。

水産生物の増・養殖、港湾での水産生物の畜養・洗浄、水族館などの生物の飼育水として、懸濁物質の少ない深層水は使い勝手がよい。飲食物・医薬利用・化粧品などでも、懸濁物質の少ない深層水は利用の際の手間が少ない。また、上述したように、RO 濾過処理で淡水をつくる場合には、深層水を使うと費用がかなり少なくてすむことが既存の施設の運転実績から明らかになっている。

6. 有機物の清浄性

海水中には、炭素量として大気中の二酸化炭素と同程度の量の炭素が有機物として存在する。海水中の有機物は溶存と粒状に分けて考えられるが、その場合、物理・化学的な溶存の定義とは異なって、分析方法によって定義されている。つまり、平均的な孔経がおよそ $0.7\text{ }\mu\text{m}$ の濾紙（ガラス繊維濾紙 Whatman GF/F 濾紙など）を通過するものを溶存、通過しないで濾紙上に集まつたものを粒状と区別している。以上の区分に従うと、海水中の有機物の

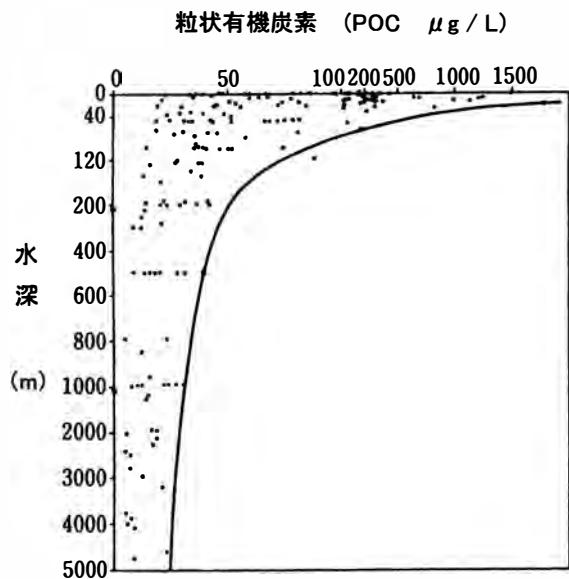


図-2 太平洋における粒状有機炭素の鉛直分布
(Romankevich, 1977 鈴木, 1997 から転載)

90%以上が溶存になる。生きた生物はすべて粒状有機物に含まれるが、実際に粒状有機物で生物が占める割合はごく一部である。

図2は、太平洋での粒状有機物の分析例である。表層では $300\text{--}1500 \mu\text{gC/l}$ 程度の範囲にあるが、水深 100 m 以深で急速に減少し、深層水中では $50 \mu\text{gC/l}$ 以下と表層の $1/5$ から $1/30$ 程度になる（鈴木, 1997）。

一方、溶存有機物は、生成されてから分解されるまでの時間（回転速度）の違いから3つに分けられる。第1は、回転速度が分～日の生物分解を受けやすい（腐りやすい）易分解有機物で、アミノ酸や糖などが代表的である。第2は、回転速度が月～年のやや分解しにくい弱難分解有機物、そして第3が回転速度で数100年～数1000年の分解しにくい強難分解有機物である。図3に示したように、表層から深層まで強難分解溶存有機物がおよそ 0.5 mgC/l 程度ほぼ均一に含まれていて、海水中の有機物の90%以上を占めている。 ^{14}C で測定された有機物の年代測定結果によれば、分解しにくい有機物の平均年齢は4000～6000年である。表層から水深500 m付近までは、弱難分解有機物が分布し、表層ほど濃度が高く、最も多いところでは 0.5 mgC/l 程度にまで達する。しかし、弱難分解溶存有機物は深くなると濃度が急速に低下して、水深1000 m以深ではごく微量になる。易分解溶存有機

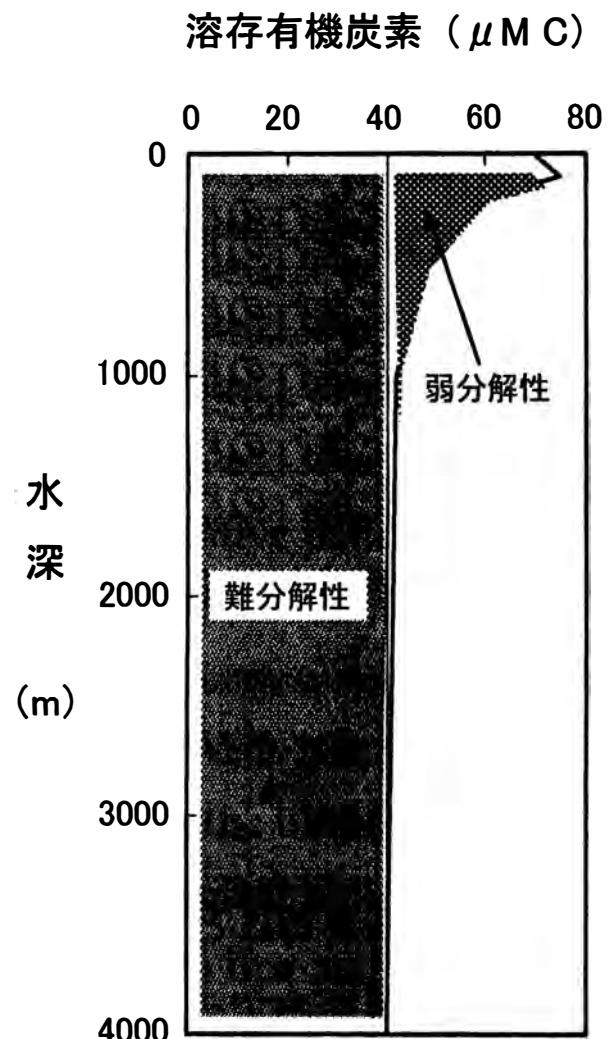


図-3 外洋域における溶存有機炭素の鉛直分布の概念
(Ogawa and Tanoue, 2003).

物は、極めて微量で、大部分が水深数100 mより浅いところに主としてみられる。水深300 m以深の深層水には易分解有機物はほとんど存在しない。

RO濾過処理によって、深層水中的有機物は分解性の強弱に関係なく懸濁と溶存の両方が完全に除かれる。その際に、濃縮水側に有機物は濃縮される。

深層水のもっている粒状有機物の清浄性は、深層水を利用する上で、先に述べた生物的清浄性と同じような利用価値がある。粒状有機物には生物遺骸・糞などの固体廃棄物・溶存有機物の集塊などが含まれるが、深層水にはそれらが極めて少なく、原水そのままの利用でも問題が少ない。簡単な濾過処理をして利用すれば完璧である。一方、溶存有機物は深層水中に表層水と同程度の量が含まれているが、それらは難分解性なので利用の際にはほとんど問題がない。それ以上に、腐りやすい溶存・粒状有機物が

含まれない深層水は利用しやすい。ただし、深層水の中でも 1000 m 以浅のものは、弱分解性溶存有機物の濃度が 1000 m 以深よりも多いので、その点の配慮が必要である。

7. 重金属類の清浄性

深層水に限らず、海水中には重金属類だけでなくほとんどすべての元素が溶けこんでいる。しかし、表 3 に示したように、1 kg (1 リットルとほぼ同じ) の海水中に含まれている平均濃度は、元素の重量で g 単位で含まれているものは塩素・ナトリウム・マグネシウムの 3 種類、mg 単位のものは硫黄・カルシウム・カリウム・臭素・炭素・窒素・ストロンチウム・ホウ素・酸素・珪素・フッ素の 11 種類で、その他は μg , ng, pg といった超微量である。量の多い元素は、表層でも深層でも濃度はほとんど同じである。濃度の低い元素では、1) 全層均一、2) 表層に少なく深層に多い、3) 表層で多く深層で少ない、などの鉛直分布の違いが見られる。表層に少ない元素の多くは、生物に利用される元素である。日本の水道基準に照らしてみると、海水中のナトリウム・塩素・カルシウム・カリウムは基準を大幅に超えている。若干基準を超えていたのが、ホウ素・フッ素とウランである。水道基準にとりあげられているその他のカドミウム・水銀・セレン・鉛・ヒ素・六価クロム・亜鉛・鉄・銅・マンガン・ニッケル・アンチモン・モリブデンは、いずれも基準値を大幅に下回っている。また、ここで示した数値は海水平均であるが深層水だけを考えても傾向は変わらない。以上のように、深層水中の重金属類濃度は汚染による危険性という点では問題はない。

また、深層水の資源性などの評価のために、国内の何ヵ所かで深層水中の含有元素類の分析結果が出されているが、mg/kg もしくは mg/L 以上の比較的濃度の高い元素類以外の評価は難しい。というものは、機器による試料分析そのものは正確であっても、海水中の濃度が低く、さらに分析器で分析するまでの試料採取・保存などの過程で汚染を受けて濃度が高くなってしまう元素類が多いからである。

さらに、陸水でも徹底的に分析すれば、海水同様

表-3 海水中に含まれる元素の平均濃度 (Nozaki, 1997)

	g/kg 以上の元素	ng/kg 以上の元素	ng/kg 以下の元素
Cl	19,350,000,000	Ni	480
Na	10,780,000,000	Zn	350
Mg	1,280,000,000	Kr	310
		Cs	306
mg/kg 以上の元素		Cr	212
S	898,000,000	Sb	200
Ca	412,000,000	Ne	160
K	399,000,000	Se	155
Br	67,000,000	Cu	150
C	27,000,000	Cd	70
N	8,720,000	Xe	66
Sr	7,800,000	Fe	30
B	4,500,000	Al	30
O	2,800,000	Mn	20
Si	2,800,000	Y	17
F	1,300,000	Zr	15
		Tl	13
$\mu\text{g}/\text{kg}$ 以上の元素		W	10
Ar	620,000	Re	7.8
Li	180,000	He	7.0
Rb	120,000	Ti	6.5
P	62,000	La	5.6
I	58,000	Ge	5.5
Ba	15,000	Nb	<5.0
Mo	10,000	Hf	3.4
U	3,200	Nd	3.3
V	2,000	Pb	2.7
As	1,200	Ta	<2.5
		Ag	2.0
		Co	1.2
		Ga	1.2
		Er	1.2
		Yb	1.2
		Dy	1.1

(単位は ng/kg (約 1 L))

にはほとんどの元素を検出することができ、表 3 のような多様な元素を含むのは海水だけとは限らない。深層水に含まれる元素で、原水をそのまま利用して意味がありそうなのは、1 リットルに 1 mg 以上含まれる、すなわち多い方の上位 14 種類の元素である。原水を薄めた場合、あるいは原水を淡水に加えた場合には、効果のありそうな元素の数は薄めた分少なくなる。

すべての元素は RO 濾過処理することによって比較的簡単に深層水から除くことができる。その場合、当然のことながら元素類は濃縮水側に濃縮されて残る。したがって、脱塩処理した深層水は純水に近く、ミネラルはほとんど含まない。ただし、RO 膜の材質や運転条件によって、脱塩処理が徹底せず、水道水質基準を上回る場合もあるので注意が必要である。脱塩海水や淡水のミネラル調整、あるいはミネラル強化は、特定の限られたいくつかの元素だけならば

薬品添加で可能であるが、多くのミネラルの調整は薬品類ではできない。その場合は、濾過した深層水の原水を一定量加えるのが手っ取り早い。しかし、深層水にはかなりの NaCl が含まれているために、飲料水利用などの目的には原海水は最大でも 0.2% 程度しか加えられない。この程度の海水添加では Mg・Ca・K の濃度は一般の水道水かそれ以下の低濃度である。電気透析で原海水中の NaCl などを減らしたり、あるいは海水を濃縮して NaCl を除いた後のにがり成分を用いると、Mg・Ca などのミネラル分を多く調整することができる。ただし、健康によいとされる Ca:Mg 元素重量比の 2:1 に対して（安井, 2000），海水中の Ca:Mg 比は 1:3 と逆になっていて Mg が過多であるので、その点についての検討が課題である。

8. 放射性物質の清浄性

放射性物質は天然に存在するが、ここで問題となるのは原子力発電・原子力潜水艦や核実験などの人間活動によって局地的または世界的規模で放出された人工放射性物質である（セシウム-137、ストロンチウム-90、プルトニウム-239, 240、クリプトン-85など）。人工放射性物質のうち、最も存在量の多いセシウム-137 の世界の海洋表層での分布を見ると、チェルノブイリ原発事故と英・仏国の大核燃料再処理施設の排液の影響が北部大西洋の沿岸域を中心に現れているものの、海洋への主な供給源は大気圏内核実験による大気からの降下である（Livingston and Povinec, 2000）。核実験が行われたのは主に 1950 年から 1960 年代はじめまで 1980 年以後は新たなものではなく、その影響は年々小さくなっている（中西, 1996；Livingston and Povinec, 2000）。降下放射性物質のうち、水溶性の性格が強いストロンチウム-99 やセシウム-137 は表層水で最も濃度が高く深層水ではごく低濃度である。ただし、粒状物質に吸着されやすいプルトニウム-239, 240 は粒状物質の沈降によって比較的速く深層水にまで到達し、表層より、むしろ、水深 300～1000 m で濃度が最も高く、海底付近でも再び濃度の増加が見られる（Bowen *et al.* 1980；Livingston and Povinec,

2000）。ストロンチウム-97 やセシウム-137 の場合も、生物に取り込まれ、糞粒として沈降すると考えられ、鉛直方向への移動は海水の混合速度より速い（Avery, 1996）。今後は、海域によって海洋投棄された放射性廃棄物などの影響にも注意する必要がある（ビイ・オール, 1994）。

9. 深層水の保存と清浄性

深層水は、汲み上げて直ちに使われる場合と、いったん容器などに入れて保存してから使う場合とがあり、特に、後者では保存中の清浄性の変化を考える必要がある。容量 1 トン以上の貯水槽に深層水を直接溜めて、常時一部を使用する場合には、貯水槽の水交換が 1～数日以内で、貯水槽の断熱性がよく、太陽光から遮断されていて、濾過していない大気との直接接触が著しくなければ、清浄性の変化は通常利用にとっては問題にならない。

問題は、1 トン以下の小形容器に溜めこんで保存する場合である。保存の場合は、まず、容器と蓋の内部をあらかじめ洗剤などを使ってよく洗浄しておく必要がある。その際、プラスチック容器は、洗剤でよく洗って灌いだ後に、薄い塩酸溶液に内部を 1 昼夜ほどさらしてから、純水で十分灌ぐ。容器の乾燥中に、空気中のごみや生物が入らないように注意する。金属容器は腐食するので塩酸にさらしてはならない。容器に深層水を入れる際には、深層水で容器と蓋を 3 回以上灌いでから容器を深層水で満たす。

保存中の深層水の清浄性の変化に関する実験報告はまだ見あたらない。予想される問題は、まず、冷凍・冷蔵以外の室温で保存した場合、図 1 に示したように密度は低いが深層水中には植物プランクトン細胞が存在し、その一部は休眠・胞子状態になっている可能性があり、光照射すると増殖を開始し、深層水中の豊富な栄養塩類を利用して高濃度にまで増える可能性が高い。したがって、深層水の、特に非濾過原水の保存では完全暗状態にすることが重要である。植物プランクトンなどの光合成生物が増殖すると、栄養塩類が消費され、有機物が増え、バクテリアや原生動物が増加する。こうした変化が起こるには、1 週間以上保存した場合である。浅い水深

からとった深層水ほど起こりやすく、しかも速やかである。これを避けるためには、光の完全遮断である。しかし、遮光して保存した場合でも、バクテリアの増殖は避けられない。特に、20 L以下の小形容器に深層水を保存すると、壁面に吸着した溶存有機物を利用してバクテリアが増殖する。浅い水深から得られた深層水ほど、易・弱分解性溶存有機物が多く含まれるのでバクテリアの増殖量が多くなる。バクテリアが増殖すると、原生動物プランクトンが増える。しかし、図3に示したように、1000 m以深の深層水では易分解性溶存有機物がほとんど存在しないので、バクテリアの増殖問題とそれにともなう水質変化は少ない。

懸濁物質と溶存・粒状有機物は深層水の保存中に生物活動が進めばそれにともなって変化する。保存中の生物活動をおさえるには、短期間（例えば1週間以内。ただし、冷蔵してもその間に変化は起こる。）ならば冷蔵庫、それ以上の長期間、あるいは生物活動を完全におさえるためには冷凍保存である。汚染化学物質・重金属類・放射性物質は、保存によって大きな変化は起こらない。

10. おわりに

深層水の資源を利用する際に、清浄性の各特性のどれが主として使われているかを整理したものが表4である。利活用は、現在利用されているものの中のいくつかを代表としてとりあげた。病原・汚染生物の清浄性が効果を発揮するのは、水産生物の増養殖と種苗生産で、これらは深層水の直接(50~100%)利用である。一般生物と懸濁物質の清浄性利用は、飲料水や化粧水のための深層水脱塩利用(100%以下)と空調冷却水などである。その他の多くは深層水の直接利用で、使用水量は小~中規模、7つの性質のいずれも同程度で使われているが、実際には使用用途によって各性質の重みが異なっていて、今後の評価が必要である。

昨今、飲食料品などの安全性が問題になる。特に、陸水の汚染の著しさを考えると、陸水の飲食物利用や飲料水（水道水を含める）の安全性の強化のためには、深層水の清浄性とさらには深層水の含むミネラルの利用を広く真剣に考える必要がある。水道水などの水質基準は、基準に入っていない項目が多くあり、しかも基準はどちらかといえば急性毒性に偏っ

表-4 海洋深層水の利用目的別の清浄性特性の意味。

深層水利用目的	使用量 (トン/日)	使用濃度	清浄性特性						
			一般生物	病原・汚染生物	汚染化学物質	懸濁物質	有機物	重金属類	放射性物質
アトピー治療	<1	25~100%	○	○	○	○	○	○	○
食品生産・加工	<1~2000								
飲料水（深層水直接利用）		100%	○	○	○	○	○	○	○
飲料水（深層水脱塩利用）			●	—	—	●	—	—	—
濃縮ミネラル			●	○	○	●	○	○	○
醸造酒類（清酒、ビール）	3~100%		○	○	○	○	○	○	○
発酵食品（醤油、味噌、パン）	100%		○	○	○	○	○	○	○
豆腐	<20%		○	○	○	○	○	○	○
化粧品生産	25								
化粧水（深層水直接利用）	1	5%	○	○	○	○	○	○	○
化粧水（深層水脱塩利用）	24	100%	●	—	—	●	—	—	—
タラソテラピー	100	5~100%	○	○	○	○	○	○	○
蓄冷用水製造	100	50~100%	○	○	○	○	○	○	○
水産物洗浄水	500~600	100%	○	○	○	○	○	○	○
水産生物種苗生産	50~1000	50~100%	●	○	○	○	●	○	○
水産生物増養殖および畜養	100~20000	50~100%	●	○	○	○	●	○	○
空調・発電冷却水・取水設備維持	50~1000000	100%	●	—	—	●	●	—	—

○：深層水を利用するうえで清浄性の直接効果のあるもの

●：深層水を利用するうえで清浄性によって処理の効率化に効果のあるもの

—：無関係

ていて、慢性毒性は基準設定の難しさもあって、十分には考慮されていない。国内の陸水の汚染状況と浄水処理技術の問題もあって、理想よりも現実的に安全性が決められているといった問題もある。飲食物や飲料水の水は、現状の水道などの安全基準で満足するのではなく、関係者はより高度の安全性を追求すべきである。また、タラソテラピーの健康増進効果が知られており、清浄性の高い深層水によるタラソテラピー効果はより大きいことが期待される。深層水を用いたタラソテラピーによって健康維持・増進が図られれば地域環境の質の向上につながる。

文 献

- Avery, S. V. 1996. Fate of caesium in the environment: Distribution between the abiotic and biotic components of aquatic and terrestrial ecosystems. *J. Environ. Radioactiv.*, 30, 139–171.
- ビイ・オール. 1994. 検証・放射性廃棄物. ビイ・オール出版. 14 : 24–25.
- Berger, W. H., V. S. Smetacek and G. Wefer. 1989. Ocean productivity and paleoproductivity- An overview. In *Production of the Ocean: Present and Past.* (eds., W. H. Berger, V. S. Smetacek and G. Wefer) John Wiley & Sons Ltd., pp. 1–34.
- Bowen, V. T., V. E. Noshkin, H. D. Livingston and H. L. Volchok. 1980. Fallout radionuclides in the Pacific Ocean: Vertical and horizontal distributions, largely from GEOSECS stations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 49, 411–434.
- Chronis, G., V. Lykousis, D. Georgopoulos, V. Zervakis, S. Stavrakakis and S. Poulos. 2000. Suspended particulate matter and nepheloid layers over the southern margin of the Cretan Sea (N. E. Mediterranean): seasonal distribution and dynamics. *Prog. Oceanogr.*, 46, 163–185.
- Hill, R. T., I. T. Knight, M. S. Anikis and R. R. Colwell. 1993. Benthic distribution of sewage sludge indicated by *Clostridium perfringens* at a deep-ocean dump site. *Appl. Env. Microbiol.*, 59, 47–51.
- <http://www.mbari.org/chemsensor/>
- 海洋出版(株). 2000. 海洋微生物. 月刊海洋. 号外23. 263頁.
- Livingston, H. D. and P. P. Povinec. 2000. Anthropogenic marine radioactivity. *Ocean Coast. Manage.*, 43, 689–712.
- McCave, I. N., I. R. Hall, A. N. Antia, L. Chou, F. Dehairs, R. S. Lampitt, L. Thomsen, T. C. E. van Weering and R. Wollast. 2001. Distribution, composition and flux of particulate material over the European margin at 47°–50°N. *Deep-Sea Res. II*, 48, 3107–3139.
- 西村三郎. 1981. 地球の海と生命—海洋生物地理学序説. 海鳴社. 東京. 284頁.
- Nozaki, Y. 1997. Updated table (1996 version) of the elements in seawater and its remarks. *Bull. Soc. Sea Water Sci. Jpn.*, 51(5). (中川光司・横山嘉人・中島宏・池上良成. 2000. 海洋深層水のミネラル供給源としての利用. 海洋深層水研究. 1: 1–11. から引用)
- Ogawa, H. and E. Tanoue. 2003 (印刷中). Dissolved organic matter in oceanic seawater. *J. Oceanogr.*
- 大和田紘一. 2002. 清浄海水の資源的特性評価と水質項目. 平成13年度「海洋深層水の資源量に関する研究」成果報告書. (社)資源協会. 39–44頁.
- Robertson, A. I., Dixon, P., Alongi and D. M. 1998. The influence of fluvial discharge on pelagic production in the Gulf of Papua, Northern Coastal Sea. *Est. Coast. Shelf. Sci.*, 46, 319–331.
- Romankevich, E. 1977. *Geochemistry of Organic Matter in the Ocean.* Springer-Verlag, Berlin. 304 pp.
- Sherrell, R. M., M. P. Field and Y. Gao. 1998. Temporal variability of suspended mass and composition in the Northeast Pacific water column: relationships to sinking flux and lateral advection. *Deep-Sea Res. II*, 45, 733–761.
- 鈴木 欽(編). 1997. 海洋生物と炭素循環. 東京大学出版会. 東京. 193頁.
- 多賀信夫(編). 1974. 海洋微生物. 海洋学講座11. 東京大学出版会. 東京. 273頁.
- 高橋正征・古谷研・石丸隆. 1996. 生物海洋学1, 2, 3, 4, 5. 東海大学出版会. 東京. 88, 90, 80, 130, 122頁.
- 高橋正征・井関和夫. 2000. 総論: 21世紀の資源としての海洋深層水. 月刊海洋. 号外22, 5–10.
- 玉城英信. 2002. クルマエビ・母エビ養成に成功. *JADOWA News*, 6(1), 13–14.
- 立川 涼. 1998. 有機塩素化合物から見た海洋環境. 第2回海洋深層水利用研究会全国集会「海洋深層水'98・高知大会」講演要旨集. 1–4頁.
- 中西孝. 1996. 人工放射性同位体を用いた海洋地球化学における分析技術的側面の趨勢. 月刊海洋 28(12), 752–756.
- 安井昌之. 2000. 水とミネラル新常識. 同文書院. 東京. 221頁.
- ZoBell, C. E. 1946. *Marine Microbiology.* Chronica Botanica, Waltham, Mass. 240 pp.