

再生可能資源としての海洋深層水的重要性

Importance of Deep Ocean Water as a Renewable Resource

大塚耕司¹

Koji OTSUKA¹

Abstract

Deep ocean water (DOW) is seawater found at depth of several-hundred meters or deeper, and has attracted special interest as one of the renewable resources with great potential, since the large amount of cold and stable DOW is renewed in thermohaline circulation such as great global conveyor. DOW has also been focused as important resource for enhancing marine primary production, because DOW contains much inorganic nutrients, such as nitrogen, phosphorus and silica. In this paper, we describe fundamental features of DOW, and introduce the state-of-the-art of DOW applications, such as ocean thermal energy conversion (OTEC), air conditioning, fisheries application, agricultural application, freshwater production, and so forth. We discuss about the renewability and capacity of the DOW from the viewpoint of sustainability.

Key Words: Deep Ocean Water, Renewable Resources, Low Temperature, Moderate Nutrient Concentration, Low Viable Bacterial Count

要 旨

深度数百メートル以深に存在する海洋深層水は、低温安定性、富栄養性、清浄性という特徴を持ち、水、食糧、エネルギーすべてを生産できる海水資源として注目されている。しかも、低温安定性は地球規模での熱塩循環によって、富栄養性と清浄性は生物ポンプによってそれぞれ維持されているので、枯渇することのない再生可能資源であるといえる。ここでは、海洋深層水の基本的な性質とその成因について解説するとともに、水、食糧、エネルギー生産を含む海洋深層水のさまざまな利用法について紹介する。さらに、海洋深層水の再生産量と使用可能量について考察することによって、持続可能社会実現に際しての海洋深層水の資源価値を示す。

キーワード：海洋深層水、再生可能資源、低温安定性、富栄養性、清浄性

1. 緒 言

産業革命以降急激に増加した世界人口は、図1に示すように、2020年には78億人に達している(FAOSTAT)。Meadows *et al.* (2004) は、2002年の段階で、システムダイナミックス理論を用いたシミュレーション結果から、このまま人口増加が進み、かつ何も対策を立てなければ2025年には一人当たりの食糧やエネルギー供給量は減少に転じると予測し

た。現在、気候変動対策を始め持続可能な開発に向けたさまざまな政策が行われているものの、経済活動や個々の生活について大幅な変革がなければ、気候変動や資源枯渇が避けられないことは容易に想像がつく。

海洋には地球全体に存在する水および炭素の97%および85%がそれぞれ存在する。生物の体を構成する主要な物質のほとんどが海洋に存在しているということになる。従来、水、食糧、エネルギーは

¹ 大阪府立大学 (〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-1)

主として陸域において生産されてきたが、爆発的に増加した人口を支えていくためには、今後は海洋資源利用が不可欠になるであろう。

深度数百メートル以深に存在する海洋深層水は、低温安定性、富栄養性、清浄性という特徴を持ち、水、食糧、エネルギーすべてを生産できる海水資源として注目されている。しかも、低温安定性は地球規模での熱塩循環によって、富栄養性と清浄性は生物ポンプによってそれぞれ維持されているので、枯渇することのない再生可能資源であるといえる。ここでは、海洋深層水の基本的な性質とその成因について解説するとともに、水、食糧、エネルギー生産を含む海洋深層水のさまざまな利用法について紹介する。さらに、海洋深層水の再生産量と使用可能量について考察することによって、持続可能社会実現に際しての海洋深層水資源の重要性を示すこととする。

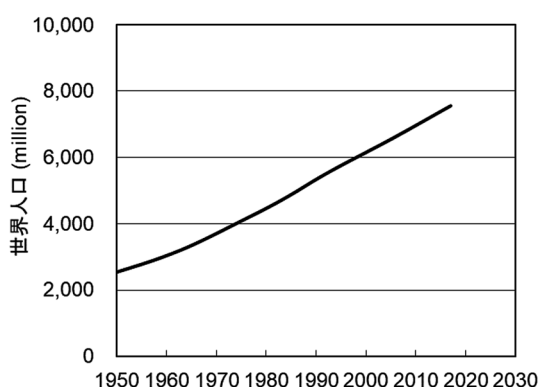


図1 世界人口の推移 (FAOSTAT)

2. 海洋深層水の基本的性質と成因

典型的な北太平洋海域における、水温、硝酸塩濃度 (藤田・高橋, 2006), および生菌数 (Naganuma *et al.*, 1990) の鉛直分布を図2に示す。表層の混合層における水温は20℃前後あるが、深度500 mから1,200 mにかけて低下し、1,200 m以深では5℃以下で安定する。硝酸塩は表層でほぼゼロとなっているが、深度が増すにつれ増加し、800 m以深では0.5 mg/l程度となっている。生菌数は表層から急激に減少し、深度100 mでほぼゼロとなっている。鉛直分布に多少の違いはあるものの、世界中どの海域でも深度数百メートル以深の海水は、共通してこのような低温安定性、富栄養性、清浄性という大きな特徴を持っており、このような性質を持つ海水を資源利用の観点から海洋深層水 (Deep Ocean Water, DOW) と呼んでいる。

地球規模での海水の対流を熱塩循環という。熱塩循環のうち最も大規模な海洋大循環では、図3に示すように、グリーンランド沖と南極大陸周辺でそれぞれおよそ20 Mt/sが沈降する。この冷たく重い海水は地球の自転に影響され、深層循環となって大西洋からインド洋、太平洋へと分配されてやがて表層に上がってくる (Stommel and Arons, 1960)。つまり、海洋深層水の低温安定性は、このような大規模な熱塩循環によって再生されているのである。

一方、富栄養性と清浄性は生物ポンプと呼ばれる海洋生態系の物質循環によって再生されている。

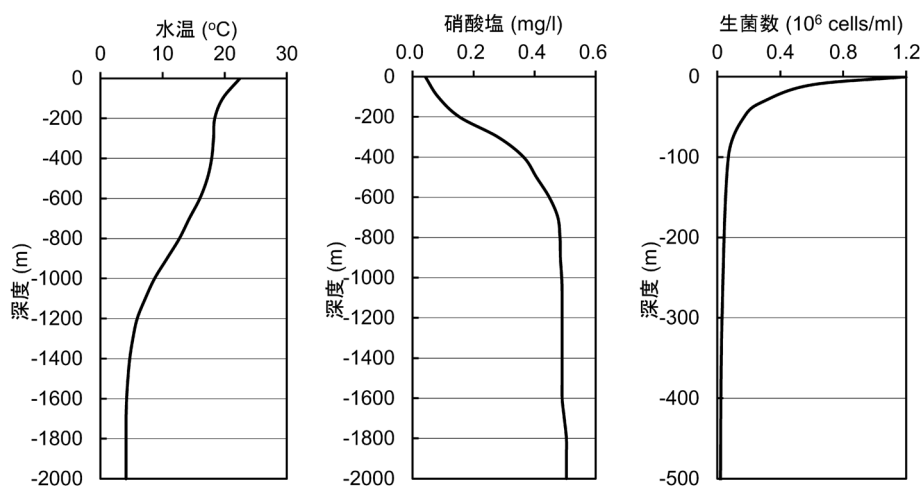


図2 北太平洋海域における水温 (左)、硝酸塩 (中)、生菌数 (右) の鉛直分布 (藤田・高橋, 2006; Naganuma *et al.*, 1990)

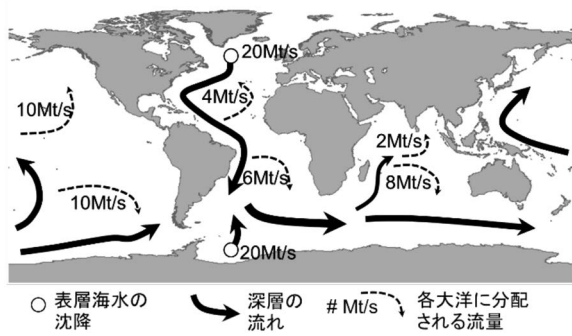


図3 地球規模の熱塩循環のモデル (Stommel and Arons, 1960)

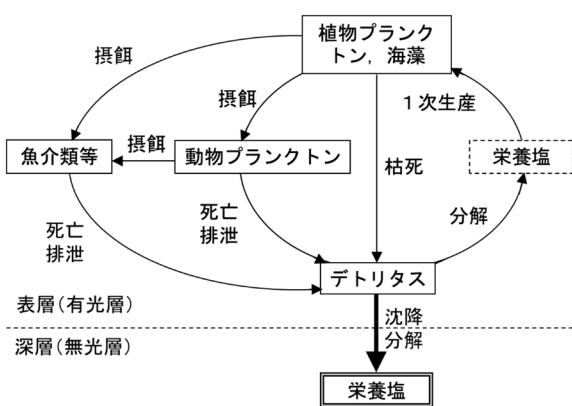


図4 生物ポンプの概念

図4に示すように、光の届く表層（有光層）では、陸域などから運ばれた栄養塩を使って植物が光合成を行う。これを一次生産という。それらの一部は枯れて死ぬが、一部は動物プランクトンや魚介類などに捕食される。動物の糞や死骸などはデトリタスと呼ばれるが、これらは微生物によって分解されて元の無機栄養塩に戻る。有光層ではまた一次生産に使われるが、デトリタスが沈降して光の届かない深度まで達すると分解だけが進み、栄養塩濃度は高くなる。また、無機物だけとなっているので、微生物の数も極端に少なくなる。これが富栄養性と清浄性が再生されるしくみである。

3. 海洋深層水の利用法

海洋深層水は、低温安定性、富栄養性、清浄性という3つの特徴を持っている。低温安定性を利用すれば表層海水と深層海水の温度差を利用した発電が、富栄養性を利用すれば人工湧昇を起こすことに

表1 海洋深層水の3大特徴とさまざまな利用法

利用法	低温	富栄養	清浄
海洋温度差発電	○		
海洋肥沃化		○	
淡水生産			○
冷房	○		
水産利用	○	○	○
農業利用	○		○
医療・健康・美容			○
飲食品			○

よって海洋における食糧生産が、清浄性を利用すれば高効率な海水淡水化が行える。すなわち、人口爆発によって近い将来資源不足になると予想されている、水、食糧、エネルギーのすべてを一つの資源から生産できるのである。さらにこれらの利用法以外にも、表1に示すように、3つの特徴をそれぞれ生かしたさまざまな利用法が開発されている。以下、各利用技術の概要と利用例について紹介する。

3.1 海洋温度差発電

海洋温度差発電 (Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC) は、図5に示すように、作動流体を温かい表層水で蒸発させ、冷たい深層水で凝縮させることにより、ランキンサイクルを回して発電を行う技術である (Avery and Wu, 1994)。海洋温度差発電の技術には、大きく分けてアンモニアなどの低沸点の媒体を用いるクローズド・サイクルと、表層海水を低圧チャンバーで直接蒸発させるオープン・サイクルがある。オープン・サイクルでは、一旦蒸発させた表層海水を凝縮する際の副産物として淡水が得られるのが特徴である。

現在2基の100 kW クローズド・サイクル OTEC が試験運用されている。そのうちの1基は、沖縄県久米島にある沖縄県海洋深層水研究所 (取水深度 600 m, 取水量 13,000 t/d) に設置されていて、2013 年から稼働している (図6)。もう1基はハワイ島コナにある Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority (NELHA, 取水深度 900 m, 取水量 540,000 t/d) に設置されていて、2015 年から稼働している (図7)。

商業規模の OTEC としては、1,000 kW 規模の洋上型 OTEC が韓国で建造され、2020 年にキリバス共和

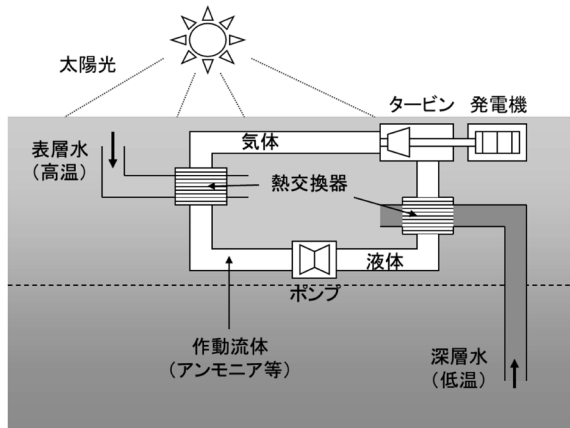


図5 海洋温度差発電（クローズド・サイクル）の原理



図8 相模湾で実験中の海洋肥沃化装置「拓海」



図6 沖縄県久米島で稼働中の100 kW OTEC実験プラント



図7 ハワイ島コナで稼働中の100 kW OTEC実験プラント

国に移設予定であったが、コロナ禍の影響で移設延期のままとなっている。その他、ナウル、マレーシア、インドネシアでも OTEC 開発の構想が進められており、今後アジア、太平洋島嶼国における OTEC 展開が期待される場所である。

3.2 海洋肥沃化

海洋深層水を利用した海洋肥沃化の実験は、科学

技術庁の科学技術振興調整費を得て、1989～1990年に富山湾で初めて行われた。「豊洋」と名付けられた海洋深層水取水装置により、深度220 mから26,000 t/dの海洋深層水を取水し、52,000 t/dの表層水と混合して海面に散水して肥沃化を試みたが、散布した混合水の拡散速度や沈降速度が速く、十分な肥沃化効果を確認するまでには至らなかった（井関・大内、2017）。

これに対し、マリノフォーラム21が水産庁の補助を受けて2000～2004年に実施した「深層水活用型漁場造成技術開発事業」では、相模湾中央部において、「拓海」と名付けられた海洋肥沃化装置により、深度200 mから100,000 t/dの海洋深層水を取水し、300,000 t/dの表層水と混合して中密度層に水平に拡散させる方法で行われた（図8）。放水された混合水は有効層内に留まることが確認されたが、やはり拡散速度が速いために肥沃化効果は明確には確認できなかった。その後第2フェーズとして2005～2007年に実施された「海洋肥沃化システム技術確立事業」では、「拓海」の10倍規模の取水量で、動力にOTECを利用することを想定した「実用機」の概念設計が行われ、経済面と環境面を統合した総合評価が行われ、「実用機」が持続可能な装置であるという評価結果が示された（大塚・大内、2008）。

3.3 淡水生産

海水淡水化技術は、図9に示すように、大きく蒸留法と膜法に分類される。蒸留法では温度を上げる昇温法と圧力を下げる減圧法があるが、オープン・

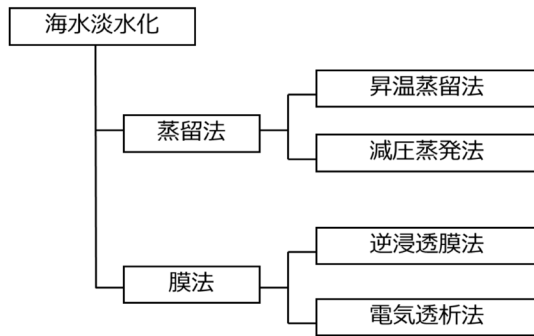


図9 海水淡水化技術の分類



図10 ハワイ島コナにある飲料水生産工場の逆浸透膜ユニット

サイクルOTECでは、減圧法によって副産物としての淡水が得られる。一方膜法のうち逆浸透膜 (RO) 法では純水が生産され、電気透析 (ED) 法ではマグネシウムやカルシウムなどが残った脱塩水が生産されるが、市販の飲料水の中にはこれらの性質をうまく使って硬度調節して売り出しているものもある。膜法における海洋深層水利用のメリットは清浄性により膜交換などのメンテナンスが大幅に軽減されることであり、コストダウンにつながる。日本を始めハワイ (図10)、台湾、韓国でも、海洋深層水取水地ではほぼ例外なく飲料水が生産されている。脱塩水の生産の過程でミネラル塩も生産されるが、これらの水や塩を用いた数々の食品も生産販売されている。

3.4 冷房

低温の海水を冷媒として用いた冷房は各地で実用化されている。海洋深層水を通水したパイプを直接使用する方法もあるが、配管部分のメンテナンスの容易さを考慮して、海洋深層水と2次冷媒としての淡水



図11 ハワイ島コナで行われているエゾアワビと餌料用大型海藻の混合養殖

の間で熱交換を行い、淡水をビルディング内に送る方法も広く普及している。後者の例として、フランス領タヒチのボラボラ島にあるインターコンチネンタル・ホテルでは、全館海洋深層水を用いた冷房を導入したことにより電力消費量の90%削減を実現している。また、富山県にある株式会社ウーケでは、パックごはんの製造工場全館を海洋深層水で冷房し、その過程で昇温した海洋深層水をアワビの養殖に用いている。

3.5 水産利用

水産利用では海洋深層水の低温安定性を活かした水温コントロールや清浄性を活かした発病リスクの軽減が大きな利点とされている。陸上養殖としては、高知県室戸市におけるスジアオノリの養殖、沖縄県久米島におけるウミブドウやクルマエビの養殖、ハワイ島コナにおけるスピルリナ (微細藻類)、ロブスター、エゾアワビと餌料用大型海藻の混合養殖 (図11) などが代表例として挙げられる。このほか、台湾や韓国でもさまざまな水産物の養殖が行われており、そのうちの多くはすでに商業化されている。また、沖縄県久米島では、マガキの陸上養殖を海洋深層水で行うことで、貝毒の心配のない「あたらないカキ」を生産する試みが行われている。さらに、北海道羅臼漁港では、海洋深層水水を利用した魚介類の鮮度保持が行われているほか、漁港内を清浄な海洋深層水を使って洗浄するシステムを導入し、HACCP認証を得ている。



図12 沖縄県久米島で行われている海洋深層水を使った野菜の栽培

3.6 農業利用

農業利用としては、土壤に海洋深層水を通水させたパイプを張り巡らせることにより、土壤の冷却と露結による水分添加を行う技術がNELHAで開発され (Daniel, 1992), その技術を応用して、沖縄県久米島では亜熱帯では作付けが難しいハウレンソウなどの栽培が行われている (図12)。また希釈した海洋深層水を直接作物に与えて塩分ストレスや発病抑制効果を期待した栽培も行われており、富山県のトマト、高知県のナス、神奈川県のカベツなどが例として挙げられる。

3.7 その他の利用法

海洋深層水の医療、健康、美容利用は日本で初めて注目された利用法である。世界初の海洋深層水風呂施設が1998年に富山県滑川市でオープンし、現在は全国6か所で運営されている。硬度調節した飲料水の動脈硬化抑制効果や免疫力向上効果なども臨床データにより徐々に明らかとなっている。化粧品への利用も高知県室戸市で初めて行われ、現在では日本のみならず、台湾 (図13) や韓国でも商品化されている。

このほか、日本酒やジュースなどの飲料、パンや豆腐、練りもの、干物などの食品、味噌や醤油などの調味料、入浴剤など、多岐にわたる海洋深層水商品が開発されている。

このように、海洋深層水は多くの利用法があり、しかも低温安定性を利用した後の水を使って富栄養



図13 DOW cosmetics shop in Hualien, Taiwan

性や清浄性を利用するといった多段利用が可能である。沖縄県久米島では、このような多目的多段利用の構想が検討されており、現在の取水量13,000 t/dの10倍以上の取水施設を設置し、1,000 kW規模の海洋温度差発電を中心として、水産利用や地域冷房などさまざまな産業利用を行う「久米島モデル」の実現を目指している。

4. 海洋深層水の持続可能性

海洋深層水の大規模利用により、地球環境にどの程度影響を与えるかということを正確に予測するのは容易ではないが、ここでは、熱塩循環の自然の流量変動を拠り所として、持続可能な使用量を考えてみる。熱塩循環の流量変動を示す貴重なデータの一つに、東京大学気候システム研究センターによる北大西洋深層水の子午面流量の長期変動予測 (阿部, 1997) がある。これによると、平均流量が約28 Mt/s、平均値周りの変動が標準偏差で0.97 Mt/s、すなわち平均流量の約3%が自然変動の範囲となっている。この流量の3%を根拠として、前述の海洋大循環による流量から各大洋の海洋深層水使用可能量を求めたものが表2である。

表には1秒あたりの使用可能量とともに1日あたりの使用可能量も示している。これを見ると、例えば、北太平洋であれば日量26 Gt、すなわち、260億トンが使用可能 (自然の変動内) ということになる。使用可能総量は年間で38,000 Gtとなり、これをすべて淡水生産 (淡水は海水の6割と換算) に回せば、

表2 海洋深層水の再生産量および使用可能量

海域	再生産量	使用可能量	
	(Mt/s)	(Mt/s)	(Gt/d)
北大西洋	4	0.12	10
南大西洋	6	0.18	16
北インド洋	2	0.06	5
南インド洋	8	0.24	21
北太平洋	10	0.30	26
南太平洋	10	0.30	26

世界の水使用量の約5.7倍の水が生産でき、すべて魚類生産（イワシ生産量に換算）に回せば、世界の漁獲量（養殖を除く）の約4倍の魚類が生産できることになる。

5. 結 言

本稿では、海洋深層水の特徴とその成因について解説するとともに、海洋深層水が、近い将来資源不足が懸念される水、食糧、エネルギーすべてを生産できる資源であり、かつ、低温安定性、富栄養性、清浄性という特徴を活かしたさまざまな利用法が開発されていることを示した。また、海洋深層水が地球規模の熱塩循環により再生産されていることから、その自然変動を根拠に使用可能量を計算し、地球規模での水や食糧の確保という観点からも十分持続可能な資源であることを示した。

今後は、脱炭素の世界的動きやCOVID-19パンデミック後の健康志向の向上により、海洋温度差発電や海洋深層水を利用した健康増進施設・製品などの価値が一層高まるであろう。持続可能社会の構築のためには、海洋深層水の利用拡大が不可欠であると考えらる。

謝 辞

本稿は、2021年9月に行われた海洋エネルギーシ

ンポジウムにて講演した原稿を基に執筆したものである。関係各位に感謝申し上げる。

参考文献

- 阿部彩子 (1997) 大気海洋結合大循環モデルによる地球温暖化等の気候変動研究, 気候研究の最前線, 気候システム研究叢書No. 2, 117-130.
- Avery, W. H. and Wu, C. (1994) Renewable Energy from the Ocean: A Guide of OTEC, Oxford University Press, New York, 446 pp.
- Daniel, T. H. (1992) An Overview of Ocean Thermal Energy Conversion and Its Potential By-Products, Proc. of Pacific Congress on Marine Science and Tech, PACON-92, pp. 263-272.
- Food and Agricultural Organization, FAOSTAT, <http://www.fao.org/faostat/en/#data/OA>, access date: April 18, 2021.
- 藤田大介・高橋正征編著 (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, pp. 15-16.
- 井関和夫, 大内一之 (2017) 海洋深層水の富栄養性を利用した海域肥沃化, 海洋深層水研究, 18 (3), 166-167.
- Meadows, D., Randers, J. and Meadows, D. (2004) Limits to Growth—The 30-Year Update—, Earthscan, New York, 362 pp.
- Naganuma, T., Ikemoto, E., Sukizaki, S., Tsuji, Y. and Hotta, H. (1990) Vertical Distribution of Bacterial Abundance in the Northwest Pacific Ocean, Journal of the Oceanographical Society of Japan, 46, 107-110.
- 大塚耕司・大内一之 (2008) 海洋肥沃化装置の包括的環境影響評価, 日本船舶海洋工学会論文集, 8, 17-25.
- Stommel, H. M. and Arons, A. B. (1960) On the Abyssal Circulation of the World Ocean—II. An Idealized Model of the Circulation Pattern and Amplitude in Oceanic Basins, Deep Sea Research, 6, 217-233.
- Van Ryzin, J. and Leraand, T. (2000) Air Conditioning with Deep Seawater: A Cost-Effective Alternative, Ocean Resource 2000, 37-40.