

海洋深層水の使用可能量および 価格に関する一考察

Consumable Capacity and Price of Deep Ocean Water

大塚 耕司¹・板東 晃功²・松本 吉倫²

Koji OTSUKA, Akiyoshi BANDO and Yoshitsugu MATSUMOTO

Abstract

Consumable capacity and price of deep ocean water (DOW) were investigated on the assumption that the demand of the deep ocean water significantly increases in all over the world. In the first part of this paper, the limiting rate of upwelling DOW to the total flux of source water, which is assumed to be 3.3 % of the total flux, was determined on the basis of a natural fluctuation. The consumable capacities of DOW for several application sites were individually obtained using this limiting rate. In the second part of this paper, an economic analysis of a DOW distribution system, which consists of a floating-type upwelling system, three land-based storage systems and several shuttle tankers, was carried out. The results showed that the obtained break-even point price of the DOW is reasonable in comparison with the price of the public service water.

Key Words: *Deep ocean water, consumable capacity, thermohaline circulation, break-even point price*

1. 緒 言

海洋深層水は、1881年にD'Arsonvalによって温度差発電の冷熱源として資源価値が見出されて以来、その特性（低温安定性、富栄養性、清浄性等）を活かした様々な利用方法が提案されており、現在では多目的、多段階利用を行うことのできる再生型資源として広い分野で注目されるに至っている。特に最近では、冷熱利用や水産分野での利用の枠を超え、数々の食品や化粧品などが商品化されており、東京や大阪などの大消費地でも深層水製品が手に入るようになった。

深層水の多方面での利用が進展している一方、大規模取水の実証研究も行われるようになってきている。インドでは、佐賀大学の研究グループと共同で2000年完成を目処に1 MWクラスのOTEC実証プラント船の建造が進んでいる¹⁾。また日本では、

日量100万トンの取水を想定した深層水利用システムに関する大型研究プロジェクトが平成11年度よりスタートしている²⁾。CO₂排出規制の実施により自然エネルギー利用の促進が各国で重要課題となっていることや、食糧危機の観点から外洋での一次生産量アップに関する議論が行われていることも考え合わせると、深層水の需要が今後ますます増大するであろうことは想像に難くない。

しかし、ほとんど全ての再生型資源がそうであるように、深層水も無制限に消費すれば地球環境に少なからず影響を与えることになる。また、たとえ資源量が豊富で付加価値の高いものであったとしても、他の資源（例えば石油や石炭など）と比べて採集・分配コストが非常に高ければ経済的な推進力が失われるだけでなく、地域間の不平等（南北問題など）が生じてしまう恐れもある。

そこで本研究では、近い将来深層水が大量消費さ

¹大阪府立大学大学院工学部研究科（〒599-8531大阪府堺市学園町1-1）

²大阪府立大学大学院生（〒599-8531大阪府堺市学園町1-1）

れることを前提に、深層水の持続可能な消費量と原材料としての深層水の価格について、現有のデータを基に考察する。

2. 深層水の使用可能量

(1) 再生型資源と自然エネルギー

深層水は、グローバルな視点から見れば大規模な熱塩循環の一部として考えられることから、他の自然エネルギーと同様再生型資源（Renewable Resource）であると捉えられている。自然エネルギーには様々なものがあるが、Table-1 に示すように海洋温度差エネルギーも含めてそのほとんどが太陽エネルギーを起源とするものである。これら自然エネルギーの容量も見積もられているが、その多くは単にエネルギーの存賦量を計算したものであり、持続可能な消費量を計算したものはほとんどない。現在の地球の気候を決定している要素は、風や海流などの自然エネルギーであり、その原動力が太陽エネルギーなのであるから、これらのエネルギーを無制限に電力として変換すれば、当然気候変動が生じることになる。また、グローバルな気候変動が生じないレベルでも、リージョナルな環境の変化やそれに伴う生態系への影響について議論することは重要であろう。

(2) 深層水のエネルギー量

深層水の使用可能量に関する従来の研究は、温度

差発電を行った場合の潜在エネルギー量を見積もったものがほとんどである。Zener ら³⁾は、温度差発電の適地を赤道を挟む南北緯 20 度以内の地帯とし、そこで発電を行った場合に表層の温度の低下が 1℃まで許されると仮定して、600 億 kW という数字を出している。また Wick ら³⁾は厚さ 100 m の表層水と深さ 400 m の深層水の平均温度差が 12℃、その持つ熱エネルギーが 15×10^{23} Jであることを示し、上下の海水が完全に入れ替わるのに要する時間 1,000 年を再生のための時間と考えて、500 億 kW を算出した。しかし実際に電力として取り出せるのは熱効率の制限を 5% とすると 25 億 kW となる。さらに Avery ら⁴⁾は、赤道付近に温度差発電の適地ゾーンを設定し、そこに 32 km 四方に一つの割合で 200 MW クラスの OTEC 施設を設置するとして、100 億 kW と見積もっている。

これらの数字を深層水の取水量として換算するとどうなるであろうか。例えば Wick らの見積もりに対して 1 MW あたりに 3 T/sec の深層水が必要であるとして計算すると、8.3 MT/sec の取水量となる。これは海洋大循環のスタート地点であるグリーンランド沖とウェッデル海で低温高塩分水が沈み込んでいる量 40 MT/sec の約 20% に相当する。高野⁵⁾は、海洋大循環の原動力である熱塩循環が地球の気候と密接に関連していることを指摘し、気候変動によって海洋大循環そのものが止まってしまうことのない範囲を消費の限界として、生成量の 10%、つまり 4 MT/sec を提案している。

(3) 自然の変動

深層水を再生型資源と位置付けたとき、その資源のリザーバーとしての容量（存在量）を基準にするのではなく、高野のようにフラックス（流量）の安定性を基準にするという考え方は重要である。しかし、海洋大循環が安定して持続するための条件を知るには、気温、水温、降雨量、氷床の増減などと海洋大循環との関係の解明、さらには大気-海洋大循環を正確にシミュレートできる全球モデルの開発を待たなければならない。現在このような試みは各地で行われているものの、信頼できるデータが得られ

Table-1 Natural energy technologies and their sources

Source	Natural Energy Technology
Solar Energy	Solar Photovoltaics
	Solar Thermal Energy Conversion
	Biomass Conversion
	Wind Energy Conversion
	Hydropower Conversion
	Wave Energy Conversion
	Ocean Current Energy Conversion
	Ocean Thermal Energy Conversion
Tidal Energy	Tidal Energy Conversion
Geothermal Energy	Geothermal Energy Conversion

るまでにはまだ相当の時間がかかりそうである。そこで、本研究では「自然の変動の範囲内での取水であれば循環流の持続を妨げない」という仮定を一つの根拠として、深層水の持続可能な消費量を見積もることとした。

非常に長い時間スケールで見れば、地球の気候は実に劇的な変化をしている。過去3万年間の海水表面水温も1世紀ほどの間に数℃もの変動がごく当たり前に起こっており⁶⁾、地球の気候が本来大きなゆらぎを持っていることが理解できる。ところが、約1万年前から続いている間氷期では、非常に安定した気候が続いており、北大西洋表面水温で0.5℃程度、地球平均気温でも2℃程度の変動でおさまっている⁶⁾。このような安定した気候は生物の環境適応を容易にし、人類にとっても定住の習慣と農耕技術の発達という結果をもたらしている。そこで、本研究で考える自然の変動も、数万年という時間スケールではなく、現在まで1万年間続いている安定期におけるものとして考える。

(4) 深層水の持続可能な消費量

熱塩循環の時間的な変動を示す貴重なデータとして、東京大学気候システム研究センター（CCSR）の阿部⁷⁾による北大西洋深層水（NADW）の今後140年間における子午面流量のシミュレーション結果があげられる。これを見ると、CO₂増加による気候変動がないとした条件で、平均流量が約28 Sv（1 Sv = 10⁶ m³/sec）、平均値周りの変動が標準偏差ではば0.97 Svと読み取ることができる（Fig. 1）。この結果から類推すれば、海洋大循環の自然

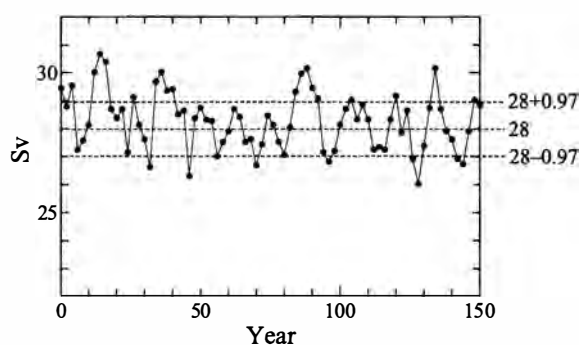


Fig. 1 Simulated long term flux of NADW⁷⁾

の変動は流量の約3.3%ということになり、深層水使用可能限界はこの3.3%を一応の基準として算出できることになる。

海洋大循環を深層水の起源と見れば、生成量40 MT/secの3.3%である1.3 MT/secが使用可能量ということになる。しかし、海洋大循環に属する深層水は大西洋、インド洋、太平洋とそれぞれに分配されて運ばれていくので、その使用可能量も海域ごとに見積もる必要がある。また、現在高知と富山で取水されている深層水は海洋大循環を起源とするものではなく、それぞれ北太平洋中層水（NPIW）と日本海固有水（JSPW）であるので、これらの流量（あるいは生成量）を基準に計算する必要がある。

海洋大循環の各海域への分配量は、生成量を1としたとき、大西洋1/4、インド洋1/4、太平洋1/2であると言われており⁸⁾、それに40 MT/secを掛けると大西洋とインド洋が10 MT/sec、太平洋が20 MT/secということになる。また、Yasudaら⁹⁾によると、日本東部海域で生成されるNPIWは約17.8 MT/secで、そのうち亜寒帯循環によって日本沿岸に戻ってくる流量は約12 MT/secと推測されている。JSPWに関しては、水深1,000 m以下の深層水は過去50年くらい形成されておらず、水深1,000 m以上の中層水が冬季の対流によってウラジオストック沖で形成されていると考えられている¹⁰⁾。この中層水の生成量に関する定量的な推定はまだ行われていないが、表層海流の流量が対馬海峡で2.2 MT/sec、津軽海峡で1.4 MT/sec程度であることから、ここでは便宜的にその差0.8 MT/secを基準として考えることにする。

以上のようにして求めた流量に対して、3.3%の取水を許すと仮定して各海域の深層水使用可能量を求めたものをTable 2に示す。表中には日量に換算した使用可能量も示している。この単位はMT/dayであるので、日量100万トン規模の取水施設を何個設置できるかという数字として見ることができる。なおJSPWについては基準となる流量の根拠が薄いので参考としてカッコ書きで記してある。この結果を見ると、インド洋では日量100万トン規模の取水施設が約3万個設置できることに

Table-2 Consumable capacity of deep ocean water

Region	Flux (MT/sec)	Consumable capacity	
		(MT/sec)	(MT/day)
Pacific Ocean	20	0.66	57,000
Atlantic Ocean	10	0.33	28,000
Indian Ocean	10	0.33	28,000
NPIW	12	0.40	35,000
JSPW	(0.8)	(0.026)	(2,300)

なり、インド政府が提案している5 MW クラスの OTEC 施設（ほぼ日量 100 万トンに相当）1,000 基の設置は、十分許容範囲内であると言える。

3. 深層水の価格

(1) 深層水取水－分配システム

深層水その他分野での利用・研究が展開されると、現在のような取水地での使用に止まらず、各地で深層水そのものを手に入れたという要求が出てくるであろう。また、食品や化粧品などの商品化が進めば、東京や大阪などの大消費地での需要も必然的に増すと考えられる。

著者ら¹¹⁾は、1 箇所大量取水－分散利用の形態がありえるものとして、洋上型大規模取水システムと複数の陸上施設、それを結ぶシャトルタンカーで構成される、洋上－陸上ハイブリッド型深層水利用システムの提案を行っている。ここでは、Fig.-2 に示すような、駿河湾に洋上型深層水取水施設を設置し、シャトルタンカーで大消費地である東京、名古屋、大阪の中継(備蓄)基地に供給するシステムを想定し、深層水 1 トンあたりの損益分岐価格の計算を行った。ただし、システムを考えるに当たり、以下のような設定を行っている。

- ・各備蓄施設の容量はシャトルタンカー 3 杯分の貯蔵が可能であるとし、運搬・備蓄中の深層水の保冷措置は行わない。
- ・シャトルタンカーの運用としては、東京、大阪が往復、給放水でそれぞれ 1 日、計 4 日の工程で、4 隻のローテーションとし、名古屋はその半分の工程、2 隻のローテーションとする。すなわち

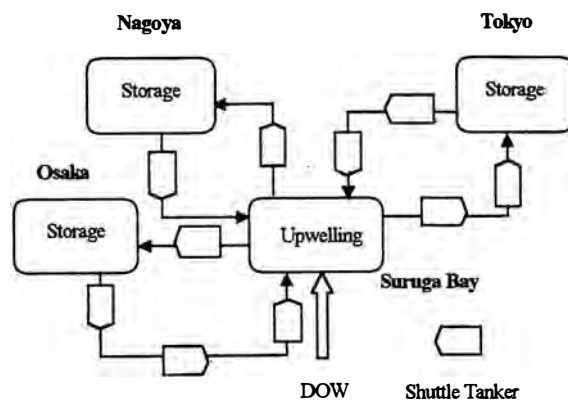


Fig.-2 Conceptual diagram of DOW distribution system

10 隻のシャトルタンカーを使用する。ただし日量 100 万トン取水の場合は上記工程を全て 2 隻一組で取り扱うとし、計 20 隻のシャトルタンカーを使用する。

- ・脱塩処理などの精製は行わず、清浄性については、光を遮断することで藻類・細菌類の繁殖を防ぐことが可能であるとする。

(2) システムのコストおよび損益分岐価格

深層水取水量 Q (T/day) と資本回収年数 k (year) を系統的に変化させたときの深層水の損益分岐価格 P (¥/T) を求めた。なお各システムのコストは以下の仮定を用いて計算した。

a) 初期投資コスト (Capital Cost)

著者ら¹¹⁾は、Table-3 に示すように、いくつかの OTEC 施設の初期コストについてのデータを整理しているが、このデータを用いて最小二乗近似することによって、洋上型取水施設の初期コスト CC_F (M¥, Million ¥), および東京、名古屋、大阪の 3 ヶ所に設置する陸上備蓄施設の初期コスト CC_L (M¥) を取水量の関数として以下の近似式より算出した。なお、1 MW の OTEC には 260,000 T/day の深層水が必要であると仮定している。

$$CC_F = 0.4123Q^{0.6184} \quad (1)$$

$$CC_L = 3 \times 0.1761 (Q/3)^{0.6564} \quad (2)$$

ここで、洋上型の CWP コストは陸上型で見積もられたコストの 20 % になると仮定し、陸上備蓄基地のコストは CWP コストを差し引いたデータを用い

Table-3 Estimated capital costs of various OTEC plants¹¹⁾

Type	Name	OTEC size (MW)	Upwelling size (T/day)	Structure & pump cost (M\$)	CWP cost (M\$)	Total Cost (M\$)
Land-based	Vega 1	1	260,000	4.4	12.3	16.7
	Nihous	1	260,000	6.0	9.9	15.9
	French	5	1,300,000	33.6	20.5	54.1
	Vega 2	10	2,600,000	15.0	60.0	75.0
	OTC	40	10,400,000	69.9	84.7	154.6
	Vega 3	50	13,000,000	75.0	120.0	195.0
Floating-Type	SOLARAMCO	40	10,400,000	77.2	15.1	92.3
	George	46	11,960,000	54.8	10.9	65.7
	Vega 4	50	13,000,000	90.0	40.0	130.0
	Andersons	100	26,000,000	82.5	6.9	89.4
	TRW	100	26,000,000	116.4	41.5	157.9
	EUROCEAN	100	26,000,000	118.4	9.5	127.9
	CMU	100	26,000,000	153.6	8.4	162.0
	Japanese	100	26,000,000	116.0	49.4	165.4

Table-4 Capital costs of various oil tankers¹²⁾

Deadweight (T)	Capital cost (M¥)
40,000	3,000
95,000	3,800
130,000	5,000
280,000	8,000

て近似した。また、\$1は¥110で換算した。

長塚¹²⁾によると、既存のオイルタンカーの船価と積載量 DW (T) の関係は Table-4 のようになる。このデータを用いて最小二乗近似することにより、シャトルタンカーの船価 CC_S (M¥) を DW ($=Q/3$, ただし日量 100 万トンの場合は $Q/6$) の関数として以下の近似式より求めた。

$$CC_S = n \times 12.52 DW^{0.5099} \quad (3)$$

ここで、 n はタンカーの隻数を表す。

b) 維持・管理コスト (Operation & Maintenance Cost)

洋上取水施設の維持・管理コスト OMC_F (M¥/year) および陸上備蓄施設の維持・管理コスト OMC_L (M¥/year) は、いずれも 1 施設に対する

雇用人数 20 人で、一人当たり 40 万円/月の人件費がかかり¹³⁾、その他の年間費用が初期コストの 5 % かかるとして以下の式で算出した。

$$OMC_F = 20 \times 0.4 \times 12 + 0.05 CC_F \quad (4)$$

$$OMC_L = 3 (20 \times 0.4 \times 12) + 0.05 CC_L \quad (5)$$

シャトルタンカーの維持・管理コスト OMC_S (M¥/year) は、1 隻あたりの乗員数が 20 人で、一人当たり 40 万円/月の人件費がかかり¹³⁾、燃料費を含めたコストが 50 万円/日であるとして¹²⁾以下の式で算出した。

$$OMC_S = n (20 \times 0.4 \times 12 + 0.5 \times 292) \quad (6)$$

ただし、年間稼働日数を 292 日 (稼働率 80 %) としている。

c) 深層水の損益分岐価格

取水一分配された深層水が全て売れるとすると、損益分岐価格 P (¥/T) は次式で計算できる。

$$P = \frac{CC \times CRF + OMC}{292Q} \times 10^6 \quad (7a)$$

$$CC = CC_F + CC_L + CC_S \quad (7b)$$

Table-5 CC and OMC of subsystems for various upwelling sizes

DOW upwelling size (T/day)	Upwelling/Storage Systems		Shuttle Tankers		
	Capital cost $CC_F + CC_L$ (M¥)	O&M cost $OMC_F + OMC_L$ (M¥/year)	Number of tankers n	Capital cost CC_S (M¥)	O&M cost OMC_S (M¥/year)
20,000	359	402	10	11,140	2420
50,000	643	416	10	17,770	2420
100,000	1001	434	10	25,300	2420
200,000	1,556	462	10	36,030	2420
500,000	2,791	524	10	57,480	2420
1,000,000	4,343	601	20	163,700	4840

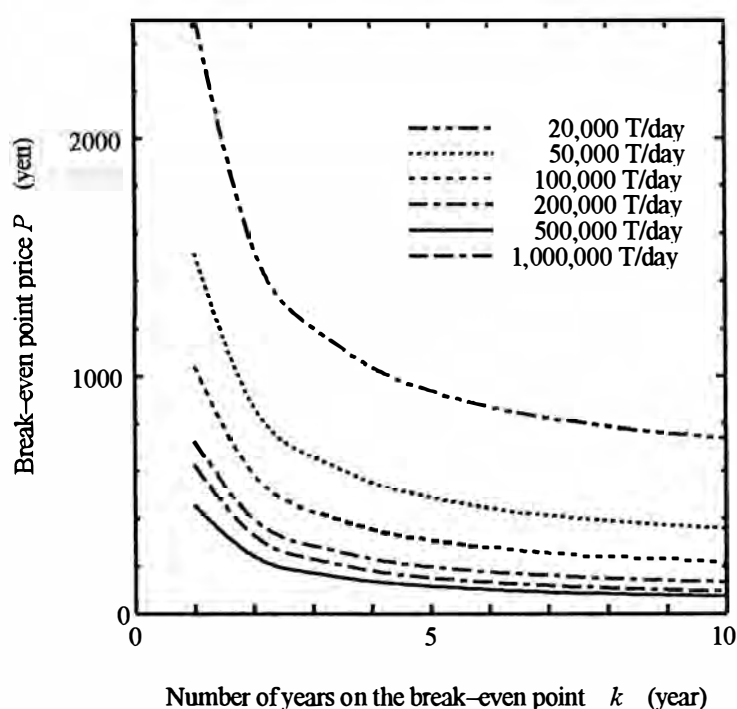


Fig.-3 Break-even point price of DOW for various upwelling sizes

$$OMC = OMC_F + OMC_L + OMC_S \quad (7c)$$

ただし、 $CRF (= i(1+i)^k / [(1+i)^k - 1])$ は資本回収係数、 i は金利で 5% とした。

(3) 計算結果

以上の方法で計算した初期コストと維持・管理コストを、洋上取水施設/陸上備蓄施設とシャトルタンカーに分けて表示したものが Table-5 である。これを見ると、シャトルタンカーの初期コストが非常に大きいことがわかる。また、維持・管理コストはその大部分が人件費であるためにスケールが大き

くなくてもあまり高くないことがわかる。Fig.-2 は、最終的に得られた深層水の損益分岐価格について、取水量ごとにまとめたものを示している。損益分岐価格はスケールが大きくなるほど減少し、取水量が 20 万トン/日付近で収束する。取水量が 50 万トン/日では、資本回収年を 6 年以上にすれば ¥100/T、すなわち ¥0.1/litter 以下となる。参考までに大阪市の水道水の価格（一般家庭で約 ¥0.1/litter、大阪市水道局「水道の便利帳」より）と比較すると、大規模取水では十分に低い価格であるといえる。

4. 結 言

本研究では、将来深層水が大量消費されることを想定して、そのときに問題となるであろう使用可能量および価格について考察した。使用可能量に関しては、海域ごとの熱塩循環の流量（生成量）を基準とし、自然の変動内に取水量を抑えることで持続可能な消費が行えるものと仮定して、太平洋、大西洋、インド洋、および日本沿岸における使用可能量を算出した。また価格に関しては、駿河湾に設置された洋上型取水施設からシャトルタンカーを用いて東京、名古屋、大阪の3個所に深層水を輸送した場合の損益分岐価格を計算し、大規模取水を行えば比較的低価格で深層水を提供できることを示した。これらの結果はいずれも現有の知識を基にして考察したものであり、その中には必ずしも信頼できる科学データに基づいていない部分もある。しかし、このような議論は大量消費を実現する上で不可欠であり、さまざまな側面から検討を重ねていく必要があるように思われる。本報告が今後の研究の一助になれば幸いである。

参考文献

- 1) Ravindran, M.: The Indian 1MW floating OTEC plant – an overview, *Proc. of Int. OTEC/DOWA Conf. '99*, pp. 2-9, 1999.
- 2) 源波修一郎, 川口博靖, 黒川明: 平成11年度エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発全体概要について, 海洋深層水'99 佐賀大会講演要旨集, pp. 20-21, 1999.
- 3) 清水幸丸編著: 自然エネルギー利用学, パワー社, 1990.
- 4) Avery, W.H. and Wu, C.: *Renewable energy from the ocean; a guide of OTEC*, Oxford University Press, 1994.
- 5) 高野健三: 海のエネルギー, 共立出版, 1984.
- 6) Graedel, T.E. and Crutzen, P.J 著, 松野太郎監修: 気候変動-21世紀の地球とその後-, 日経サイエンス社, 1997.
- 7) 阿部彩子: 大気海洋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, 気候システム業書 2, pp. 117-130, 1997.
- 8) 須藤英雄編著: 海から見た地球環境, 成山堂書店, 1994.
- 9) Yasuda, I., Okuda, K. and Shimizu, Y.: Distribution and modification of North Pacific Intermediate Water in Kuroshio-Oyashio inter-frontal zone, *Jour. of Physical Oceanography*, Vol.26, pp. 448-465, 1996.
- 10) 尹宗煥: 日本海固有水について, 海洋深層水'97 富山シンポジウム講演記録集, pp. 11-16, 1998.
- 11) 大塚耕司, 板東晃功, 井上久嗣: 洋上型深層水取水システムの検討, 海洋深層水利用研究会ニュース, 第3巻, 第2号, pp. 9-12, 1998.
- 12) 長塚誠治: 21世紀の海運と造船-世界と日本の動向-, 成山堂書店, 1998.
- 13) 運輸省年間統計, 船員労働統計調査, 1998. 6.

(2000. 2. 29受付)