

第6回海洋深層水利用学会賞（2019年度）

自身の海洋深層水利用研究を振り返って

Looking Back on My Researches on Deep Ocean Water Applications

大塚耕司¹

Koji OTSUKA

1. はじめに

このたび、2019年度海洋深層水利用学会賞をいただき、たいへん名誉なことと存じます。関係各位に心より御礼申し上げます。

学会賞の業績題目は「環境影響に配慮した多様な海洋深層水資源の多目的利用の研究と社会への啓蒙活動」であり、推薦理由には、私が行ってきたさまざまな海洋深層水に関する研究を総合的に評価したものであることが記されていた。このことから、本稿においては、自身がこれまでに行ってきた海洋深層水利用研究を一から振り返るとともに、今後の海洋深層水利用研究の方向性について思いを巡らせることにした。なお、個別の研究内容の詳細については参考文献に委ねることとし、ここでは、研究を始めることとなった経緯、マイルポストとなった研究やその背景、簡単な結果の紹介について述べるにとどめる。

2. ハワイから始まった海洋深層水利用研究

2.1 NSFショートコース

私の元々の専門は船舶海洋工学である。博士（工学）の学位も、海底石油掘削のプラットフォームである海洋構造物に働く流体力の研究により1993年に取得したが、その少し前から海洋環境や海洋資源の研究へとテーマを大きく変えようと考えていた。今から思うと、1992年にリオデジャネイロで開催された

国連環境開発会議（地球サミット）に影響を受けていたのかもしれない。そのような折に出会ったのが高橋正征先生の著書「海にねむる資源が地球を救う」（高橋、1991）である。海底石油開発の研究から抜け出し、持続可能な社会に貢献する研究にシフトしたいと思っていた私にとっては、まさに天からの贈り物であった。

さらにタイミングよく、1994年2月に大阪府立大学で行われたシンポジウムの招待講演者として、ハワイ大学自然エネルギー研究所（HNEI, Hawaii Natural Energy Institute）所長のDr. Patrick K. Takahashiが来学し、上記の思いを伝えたところ、同年6月にハワイで開催されたNSF（National Science Foundation）ショートコース「持続可能な資源システム」に参加してはと助言していただき、急遽5日間の研修に加わることとなった。

ショートコースは2日間のフィールドツアーと3日間の座学から構成されていて、海洋深層水だけではなく、バイオマス、風力、地熱、太陽光などの再生可能エネルギー全般が対象となっていた。フィールドツアーでは、マウイ島でバイオマスと太陽光の施設を、ハワイ島で地熱施設とキラウエア火山、それにハワイ自然エネルギー研究所（当時NELH、現NELHA, Natural Energy Laboratory of Hawaii Authority）を視察した。NELHでは、当時試験運転中であった210 kWオープンサイクルOTEC（図1）の見学もあり、プロジェクト責任者であった

¹ 大阪府立大学大学院人間社会システム科学研究科教授（〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-1） Professor, Osaka Prefecture University



図1 210 kW オープンサイクルOTEC施設

Dr. Luis Vegaが案内役であった。その後ハワイ大学マノア校で行われた3日間の座学も含めて、十分な勉強をする間もなく急遽参加した私にとっては目からうろこの連続であった。

2.2 ハワイ大学での研究

NSF ショートコースを経験した翌年、幸いにも文部省からの補助金が得られ、1995年8月から1996年3月までの約7か月間、ハワイ大学マノア校において、Dr. Takahashiの下で研究が行えることとなった。HNEIでは、OTECとバイオマス発電の複合システムの経済性評価を行うことにした。海洋深層水の低温性と富栄養性の両方の特徴を生かした再生可能エネルギーシステムは成り立つのか、という単純な発想であった。

図2に示すように、OTEC用に汲み上げた深層水の一部を冷房に使い、OTECからの排水は淡水化に使用したのち、ジャイアントケルプの養殖に使用する。収穫したジャイアントケルプはバイオマス発電に利用するというもので、このシステムをIOBS (Integrated OTEC/Biomass System) と名付けた。OTEC、冷房、海水淡水化、ジャイアントケルプを用いたバイオマス発電の個々のシステムはそれぞれ既往知見があったので、それらを組み合わせることで全体システムの評価を行うこととした。最適な発電バランスを求めたところ、100 MWクラスであれば、OTEC : Biomass = 68 MW : 32 MWが最もコストが低くなるという結果となった (Otsuka, 1997)。

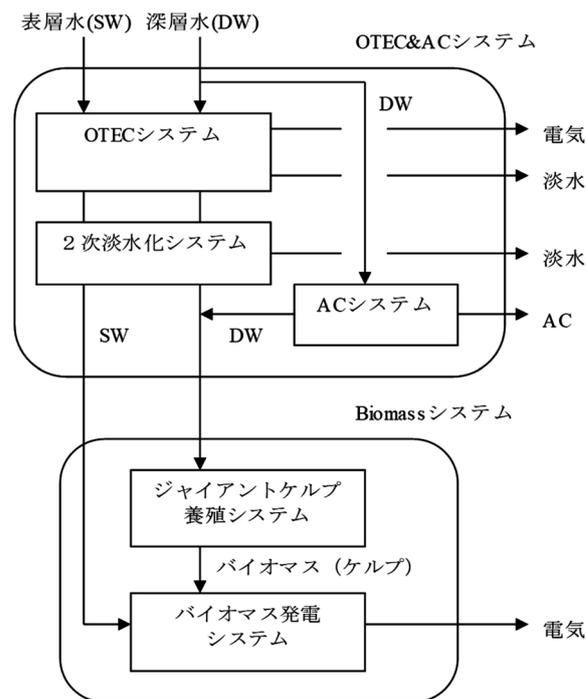


図2 IOBSの概念図

3. 海洋深層水ブームとその反動

3.1 海洋産業研究会の自主調査研究事業

ハワイでの研究生活を終えて帰国した1996年は、高知県海洋深層水研究所での民間への分水が行われて海洋深層水商品が世に出始めたところである。さまざまな商品開発が行われて、それがマスコミに次々と取り上げられ、海洋深層水ブームとなっていた。このころも私の幸運は続いていた。たまたま国際学会で同じ部屋の発表者であった梶川武信先生(当時湘南工科大学)に声を掛けられ、その縁で海洋産業研究会自主調査研究事業「海洋深層水多角利用研究」のメンバーに加えていただけることになった。そして、このメンバーであった高橋正征先生とついにお会いできた。私が海洋深層水の研究を始めるきっかけとなった本の著者に最初にお会いしたときは望外の喜びであった。私が国内において海洋深層水研究者として仲間入りできたのは、この自主調査研究事業に参画できたおかげである。中原裕幸常務理事、大貫麻子氏をはじめ海洋産業研究会の方々にはたいへんお世話になった。

表1 各大洋における海洋深層水使用可能量

	深層水流量	深層水使用可能量	
	(Mt/s)	(Mt/s)	(Mt/d)
北太平洋	10	0.30	26,000
南太平洋	10	0.30	26,000
北大西洋	4	0.12	10,000
南大西洋	6	0.18	16,000
北インド洋	2	0.06	5,000
南インド洋	8	0.24	21,000

3.2 海洋深層水利用可能量の推定

さて、海洋深層水ブームの続きであるが、マスコミの中には、怪しい「魔法の水」というようなニュアンスで報道するものもあり、海洋深層水利用に逆風が吹き始めた。一部の科学者からは、まじめに研究している我々も「怪しい連中」として見られるようになり、一般人からも、使用量が増えれば海洋環境が破壊されるといったクレームが直接私の手元に届くようになった。このような批判に科学的根拠を示して反論する必要性を強く感じ、海洋深層水が「再生可能資源」であることを示すとともに、その再生産量を基準として「使用可能量」を具体的な数字で示すことを試みるに至った。

海洋深層水の再生産量を熱塩循環流量と定義し、その自然変動量（流量の3%）を基準として海洋深層水使用可能量を試算した。その結果、表1に示すように、例えば北太平洋であれば、日量26,000 Mt、すなわち260億トンが使用可能となり、日量13,000トン取水している沖縄県海洋深層水研究所と同規模の施設が、200万個作ることが可能という結果となった（大塚ら、2000；大塚，2017）。

4. 国家プロジェクトでの経験

4.1 日本海洋開発産業協会のプロジェクト

海洋深層水利用に対する逆風を抑えたのが、同時にスタートした2つの大型国家プロジェクト（いずれもプロジェクトリーダーは高橋正征先生）ではないかと考えている。これに参画した多くの海洋研究者が科学的な知見を得ることとなり、成果が出るにつれ、海洋深層水の資源価値について正しい理解が広がったように思う。

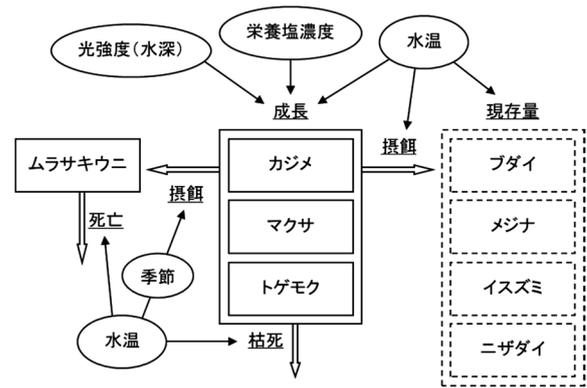


図3 室戸岬周辺藻場生態系モデルの概念図

その国家プロジェクトの一つは、日本海洋開発産業協会（JOIA）が新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の補助を受けて1999年から5年間実施した「エネルギー使用合理化海洋資源活用システム開発事業」である。主たる目的は、火力発電所の冷却水を中心とする海洋深層水大規模利用システムに関する基礎技術を確立することであり、600 MWの火力発電所で日量100万トンの海洋深層水を取水することを想定した、さまざまな研究開発が行われた。

私は主に海洋深層水の大量取放水による環境影響評価に関する研究（Otsuka *et al.*, 2005a）に参画し、特に海洋深層水放流による磯焼け修復効果評価に注力した。この研究では、高知県海洋深層水研究所がある室戸岬周辺海域を対象海域として、現地調査と生物実験の結果を基に藻場生態系モデル（図3）を構築し、放水口周辺沿岸で約1.6 kmにわたってカジメ藻場が再生される可能性を示した（Otsuka *et al.*, 2005b; 大塚，2006）。このテーマについてはプロジェクト修了後も大阪府立大学で独自に研究を続け、藻食魚類の放流水からの忌避行動モデルの構築、磯焼け修復を効果的に行うための閉鎖構造物の評価などを行っている（Matsui *et al.*, 2011）。

4.2 マリノフォーラム21のプロジェクト

もう一つのプロジェクトは、マリノフォーラム21（MF21）が水産庁の補助を受けて2000年から5年間実施した「深層水活用型漁場造成技術開発事業」である。ここでは、海洋深層水の汲み上げによって一



図4 設置航海出発直前の海洋肥沃化装置「拓海」（手前に伸びているパイプが海洋深層水取水管）

次生産を向上させ、漁場を造成する技術の開発を目的としている。特に、海洋肥沃化効果を実海域で実証することに重きが置かれ、大内一之氏（大内海洋コンサルタント）を開発責任者として、相模湾中央部において、深度200 mから日量10万トンの海洋深層水を取水し、有光層内に深層水と表層水の混合水を密度流として滞留させる海洋肥沃化装置「拓海」が開発された（図4）。

私は、博士号取得まで専門としていた海底石油掘削技術に関する研究の知見を活かして、主に海洋深層水取水管の開発に携わり、石油掘削ライザーとは異なる、下端フリーの条件における大容量管内流の影響について、水槽実験や数値計算を用いて検討した（板東ら、2001）。

MF21のプロジェクトはその後第2フェーズとして継続されることとなり、2005年から3年間「海洋肥沃化システム技術確立事業」が実施された。ここでは、海洋深層水取水量が「拓海」の10倍規模で取水の動力に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、フィージビリティスタディと環境影響評価によって「実用機」の社会受容性を示すことが主たる目的となった。私は、CO₂排出量のLCA（Life Cycle Assessment）手法を応用し、生物生産性のある土地面積として環境負荷を評価する指標であるEcological Footprintを用いた環境影響評価を担当した（Otsuka, 2007）。

5. 包括的環境影響評価という武器を得て

5.1 包括的環境影響評価指標Triple I

包括的環境影響評価指標Triple Iは、日本船舶海洋工学会のIMPACT研究会により開発された指標で、前述のEcological Footprintと経済性評価、それに生態リスクを組み合わせることによって、環境面と経済面を一つの指標で評価することのできる指標である（大塚、2011a, 2011c）。同研究会は、研究段階にある生態リスク計算の項目を除いた、式（1）で示される簡易版包括的環境影響評価指標Triple I lightも発表しており、後述する評価は、このTriple I lightを用いて行った。

$$III_{light} = (EF - BC) + \gamma(C - B) \quad (1)$$

ここでEFはEcological Footprint (gha), BCはBiocapacity (gha), γ は世界の総EFと総GDPの比 EF_{world} / GDP_{world} , C, Bはそれぞれ経済的なコスト、ベネフィット (¥) である。これらの数値はいずれも年間の値であり、 III_{light} の値が負であれば持続可能、正であれば持続不可能と判断される。

MF21のプロジェクトでは、フィージビリティスタディと環境影響評価を別々に行ったが、この指標を用いることで、それらを統合した包括的な評価が可能となり、社会受容性をより単純な数値として示すことができるようになった。

5.2 海洋肥沃化装置の包括的環境影響評価

上述の簡易版包括的環境影響評価指標Triple I lightを用いて、プロトタイプの海洋肥沃化装置「拓海」と、その10倍規模の「実用機」を評価した結果が、それぞれ図5, 6である（大塚・大内、2008; 大塚、2011b）。

いずれの図においても、稼働年数が短い場合には初期コストや建造等に伴うCO₂排出量の割合が相対的に大きくなり、EFや γC の値が非常に大きくなっている。図5に示す拓海の場合には、稼働年数を20年としてもTriple I lightが正の値となっており、持続可能ではない装置ということになる。一方図6に示した実用機の場合、稼働年数が4年を超えた時

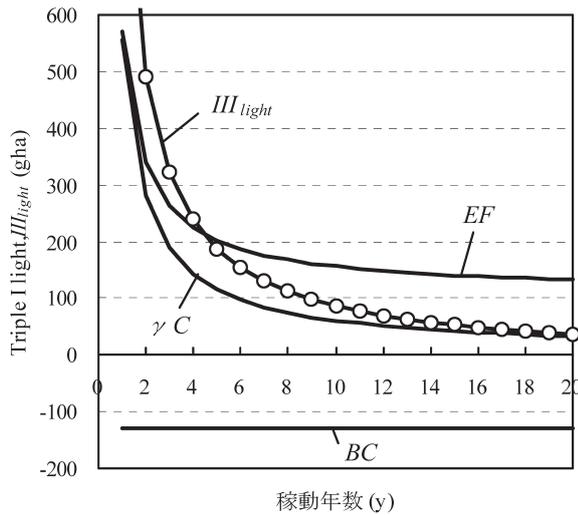


図5 「拓海」のTriple I lightと各成分

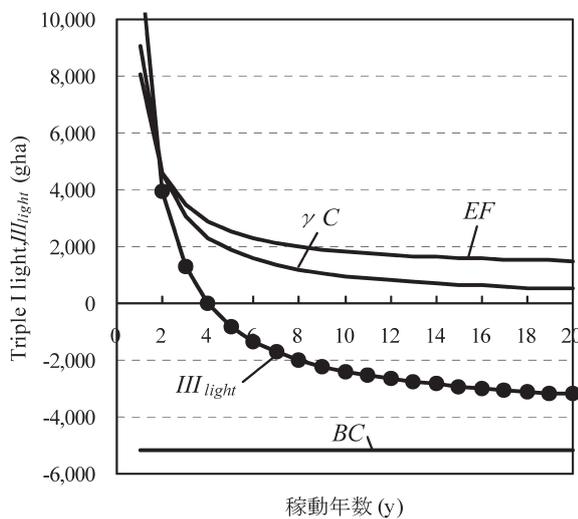


図6 「実用機」のTriple I lightと各成分

点でTriple I lightが負の値となっており、十分持続可能な装置であると評価できる。このような大きな評価の違いは、大型化、大水深化によって年間の魚類生産量(BC増加量)を大幅に増やしたこと、OTECを導入したことにより運用段階でのCO₂排出がほぼゼロになったことに主因がある。

5.3 海洋深層水多目的利用の包括的環境影響評価

沖縄県の久米島では、現在稼働中の100 kW OTEC 実証プラントを1 MW規模に拡大し、これに伴い海洋深層水の取水量を10倍以上に増やすとともに、発電利用後の海水を水産養殖や農業・地域冷房などへ複合利用する「久米島モデル」が提案されている。私は現在、この「久米島モデル」の社会受容性を包

表2 久米島モデルと現状とのTriple I lightの比較

	久米島モデル	現状	差
EF (gha)	705	3,088	-2,383
C (B¥)	3.12	2.04	1.08
B (B¥)	2.24	0.99	1.25
(C-B) (B¥)	0.89	1.05	-0.16
γ (C-B) (gha)	2,033	2,417	-384
III _{light} (gha)	2,738	5,505	-2,767

括的環境影響評価指標を用いて評価することに注力している。今のところ、複合施設として、クルマエビ養殖、ウミブドウ養殖、農業利用、地域冷房まで考慮できているが(大田ら, 2017; 大塚ら, 2019)、今後はカキ養殖施設も考慮した評価を行いたいと考えている。

表2に現時点でのTriple I lightの計算結果を示す。ディーゼル発電からOTECに切り替えたことで「久米島モデル」のEFが大幅に減少している。また、クルマエビの販売増によりBが増加することで赤字幅は現状より抑えられている。この結果、Triple I lightの値は「久米島モデル」の方が低くなり、現状に比べて約2,800 gha削減できるという結果となった。なおこの値は、約2,200 ha(甲子園球場560個分)の植林を行ったことに相当する。

6. おわりに

本文では紙面の制約上紹介しなかったが、その他の研究として、海洋深層水を水源とする上水供給システムに関するフィージビリティスタディ(飲料水の価格推定ならびにCO₂排出量を指標としたLCA)も行っている(松本・大塚, 2002; 大塚・松本, 2003)。これらを含めて自身の研究を振り返ってみると、一貫して、海洋深層水を水・食糧・エネルギー供給というインフラのための再生可能資源として探求してきたことがわかる。世界人口80億人時代が目前に迫り、水・食糧・エネルギーの世界的な不足が現実味を帯びてきている現在、この方向性は間違っていないと確信している。

さらに今後の方向性を考えるうえで新型コロナウイルスによる影響も無視してはならない。世の中のしくみが大きく変化したことに加え、我々の価値観

も大きく変化したからである。

まず病や死に対する距離感が変化した。近年、これほど多くの人が病や死の恐怖を身近に感じることはなかったのではないか。もちろん、紛争地域や発展途上国では従来から多くの人が恐怖にさらされてきたが、今回はニューヨークでさえも恐怖は現実となった。今まで死とは無縁と思っていた人も、生きることの意味を一度は考えたのではないか。

また、最近の潮流であったグローバリズムやモビリティの波が、感染症の壁により完全に跳ね返されたことも大きい。誰でもどこへでも気軽に移動でき、世界が画一化されるような世の中には当分戻らないであろう。そのような状況で、よりローカルな集団としての帰属意識が世界中で高まったように思う。その究極が家族の価値観の変化ではないか。世界ではロックダウン期間中、日本では緊急事態宣言期間中、家族で過ごすことの価値や幸福感について、皆が何らかの考えを巡らしたことであろう。

このような価値観の変化は、持続可能な社会の構築に向けたインフラ整備の在り方を大きく変えるのではないか。海洋深層水は、持続可能な社会を築くための貴重なインフラ資源であるが、残念ながら世間に広くその価値が認識されているとは言い難い。この一因は化石資源に比べて圧倒的に資源密度が低いことにある。しかし、コロナ禍を経験して価値観が変化したことによって、資源密度は低くても持続可能な資源を選ぶべきという考えは、多くの人々の支持を得るのではないだろうか。ポストコロナ時代の海洋深層水の価値を改めて世に問うてみたい。

参考文献

板東晃功・松本吉倫・大塚耕司 (2001) 海洋深層水取水管の動的挙動解析, 海洋深層水研究, 2(1), 29-38.

Matsui, A., N. Nakatani, K. Otsuka, and T. Katsuragi (2011) A Study on Estimation of Seaweed Bed Restoration Using Deep Ocean Water Discharge with an Enclosed Structure, Proc. of 21st Int. Offshore and Polar Eng. Conf., pp. 887-894.

松本吉倫・大塚耕司 (2002) 海洋深層水大規模取

水—分配システムのフィージビリティスタディ (第1報)—経済性評価—, 海洋深層水研究, 3(1), 21-29.

- 大田宗嗣・大塚耕司・小野奈都美・伊藝 聡・伊佐真賢 (2017) 久米島における海洋温度差発電の包括的環境影響評価, 海洋深層水研究, 18(2), 64.
- Otsuka, K. (1997) Economic Analysis for an Integrated OTEC/Biomass System, Jour. Kansai Soc. of Naval Architects, Japan, 227, pp. 155-167.
- 大塚耕司・板東晃功・松本吉倫 (2000) 海洋深層水の使用可能量および価格に関する一考察, 海洋深層水研究, 1(1), 47-53.
- 大塚耕司・松本吉倫 (2003) 海洋深層水大規模取水—分配システムのフィージビリティスタディ (第2報)—CO₂排出量を指標としたLCA—, 海洋深層水研究, 4(1), 19-27.
- Otsuka, K., T. Ikeda, and M. Hayashi (2005a) Environmental Impact Assessment for Large-Scale DOW Utilization, Proc. of 15th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., 1, pp. 575-581.
- Otsuka, K., K. Takakura, T. Moriyama, and Y. Abe (2005b) Modeling the Seaweed Bed Ecosystem in a Deep Ocean Water Discharged Area, Proc. of 15th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., 1, pp. 697-704.
- 大塚耕司 (2006) 室戸沿岸の磯焼け海域を対象とした海洋深層水放流影響の予測, 水産工学, 43(1), 21-33.
- Otsuka, K. (2007) Ecological Footprint Accounting of TAKUMI, Proc. of 7th ISOPE Ocean Mining Symp., pp. 33-38.
- 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.
- 大塚耕司 (2011a) 包括的環境影響評価の必要性, KANRIN (日本船舶海洋工学会誌), 38, 1-2.
- 大塚耕司 (2011b) Triple Iによる海洋肥沃化装置の評価, KANRIN (日本船舶海洋工学会誌), 38, 11-14.
- 大塚耕司 (2011c) 包括的環境影響評価Triple I, KANRIN (日本船舶海洋工学会誌), 38, 15-18.
- 大塚耕司 (2017) 海洋深層水の使用可能量に関する一考察, 海洋深層水研究, 18(3), 159-160.
- 大塚耕司・森久美紗希・小野奈都美・伊藝 聡・伊佐真賢 (2019) 久米島における海洋深層水多目的利用の包括的環境影響評価, 海洋深層水研究, 20(1), 17.
- 高橋正征 (1991) 海にねむる資源が地球を救う—海洋深層水の利用, あすなろ書房, 東京, 189 pp.