

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月30日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20360389

研究課題名（和文） 海域肥沃化技術の評価ツールの構築

研究課題名（英文） Development of assessment tools for ocean fertilization technologies

研究代表者

多部田 茂 (TABETA SHIGERU)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授

研究者番号：40262406

研究成果の概要（和文）：気候変動、食料危機などに対する解決策のオプションである深層水利用や海洋滋養（施肥）などの海域肥沃化技術の評価ツールを開発した。海域肥沃化の効果や環境影響を評価するために、マルチスケール解析手法や生物・生態系モデルの開発を行い具体的事例に適用した。また、技術導入の社会経済的影響を検討するために、肥沃化技術のポテンシャル評価、水産物を考慮した食料経済モデルの開発、環境・経済指標による技術の評価を行った。

研究成果の概要（英文）：The assessment tools for ocean fertilization technologies such as deep water utilization, ocean nourishment, etc. were developed. In order to evaluate the effects and environmental impacts of the technologies, multi-scale ocean models as well as biological and ecosystem models are developed, which are applied to some case studies. The socio-economic influences due to the introduction of the technologies were also investigated by potential analysis, food economy model, environmental or economic indicators, and so on.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
2009年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	1,700,000	510,000	2,210,000
総計	10,700,000	3,210,000	13,910,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：海洋環境

## 1. 研究開始当初の背景

温暖化や食糧危機などの地球環境問題に対する海洋生態系を利用した対策技術として、中深層水の利用や人工湧昇流、海洋滋養などが提唱されている。前者は栄養塩の豊富な中深層の海水を人工的に有光層に供給することによって、海域の生産性を増強させる技術である。後者は、栄養塩を海洋表層に直

接添加することによって、食糧生産の増大と大気中の二酸化炭素の海洋への吸収の両方の効果を期待する技術である。魚類を中心とした食糧資源の生産増大に加えて、海藻等から海産性バイオマスエネルギーを供給することも提案されている。これらの技術を実用化するためには、その効果を事前に評価する必要があるが、実海域での実験はコストや社

会的受容性の面から必ずしも容易ではない。しかし、例えば人類のエコロジカル・フットプリントが地球の約 1.3 個分になっていることが示すように、陸域の環境容量は既に限界を超えている可能性があり、海洋の大規模利用というオプションの可能性を早急に見極める必要がある。また、有効な知見を得るための適切な実験計画を立てるためにはモデルによる検討を事前に行っておくことが肝要である。

中深層水の汲み上げや人工湧昇流によって海域を肥沃化する場合、栄養塩や有機物の挙動を精度よく解析するためには、装置近傍の複雑な密度流と周辺海域の海流や潮流による物質輸送への影響を考慮した計算を行う必要がある。また、肥沃化技術による食料やバイオマスエネルギーの供給という観点からは、魚類や海藻類が重要であるので、これらを考慮するために生物モデルの拡張が必要である。

## 2. 研究の目的

温暖化、食料危機などの地球環境問題は早急に対策を講じていかねばならない問題であることから、実海域実験や観測による科学的な知見が全て出揃うのを待つだけでなく、現状の知見を集約してモデルによる海域肥沃化技術の FS を早急に行う必要があると考えられる。

そこで本研究では、海域肥沃化技術の評価ツールを構築することを目的とする。具体的には、海域肥沃化の効果や環境影響を評価するための流動・拡散モデルや生物・生態系モデルの開発、および技術導入の社会経済的影響を検討するためのポテンシャル評価や経済モデルの開発を行う。

## 3. 研究の方法

海域肥沃化技術の評価に関して、技術の効果や環境影響を評価するための数値モデルの開発と、技術導入の社会経済的影響を検討するための評価手法の開発を行う。前者については、マルチスケール解析に適した流動・拡散モデルの開発と、生物・生態系モデルの開発を行う。後者に関しては、既存データの整理とシミュレーションによるポテンシャル評価と、技術導入の社会経済的影響を検討するための手法の開発を行う。

(1) 海域肥沃化の効果や環境影響を評価するための数値モデルの開発

①マルチスケール解析に適した流動・拡散モデルの開発では、直交格子による Nested-Grid system を用いた方法と、非構造格子等を用いて静水圧近似計算と非静水圧計算をシームレスに結合して計算をする手法について検討を行い、効率的な計算手法を開発する。

## ②生物・生態系モデルの開発

海域肥沃化の主なターゲットは、食糧・飼料としての魚類と海産性バイオマスエネルギー資源としての藻類の増殖である。魚類に関しては、資源評価に用いられている VPA を肥沃化時の検討に適用するとともに、低次生態系モデルのアウトプットである水質・餌環境と個体群動態モデルを連成することによって魚類の動態モデルを開発する。藻類に関しては、植物プランクトンおよび海藻について、複数種を考慮できかつ深層水や栄養塩添加の効果を検討するためのモデルを構築する。

(2) 技術導入の社会経済的影響を検討するためのポテンシャル評価や経済モデルの開発

### ①ポテンシャル評価

適地選定やポテンシャル評価のために、GIS (地理情報システム) 上に海洋の物理環境、栄養塩、クロロフィル a 分布等のデータベースを構築することによって、対象技術に適した海域の選定や、様々な技術導入シナリオに対する炭素隔離量などの評価を行うためのツールを構築する。

②技術導入の社会経済的影響を検討するための評価手法の開発に関しては、食料経済モデル IFPSIM に水産物を組み込み、海域肥沃化技術が日本の食料経済に与える影響を検討する。また、Ecological Footprint や Triple I などの環境や経済指標を用いて肥沃化技術の持続可能性に関する評価を行う。

## 4. 研究成果

(1) 海域肥沃化の効果や環境影響を評価するための数値モデルの開発

①マルチスケール解析に適した流動・拡散モデルの開発

マルチスケール解析手法としては、直交格子による Nested grid system を用いた方法と、非構造格子系を用いた方法について検討を行った。Nested grid system を用いた方法では、異なる解像度の計算領域を接続して双方向に情報をやりとりしながら計算を行っている。この手法を肥沃化の具体的な手法の一つである深層水を利用した海域肥沃化技術に適用し、密度プルームの海洋中での挙動に関する検討を行った。

また、本研究が対象とするようなマルチスケールの解析には非構造格子系を用いた方が本質的に有利である。ただし、計算コストの面からは装置周辺の複雑な密度流は非静水圧で解き、海流や潮流が支配的な広域は従来の海洋モデルと同様に静水圧近似で解くことが有利である。そこで、非構造格子系において非静水圧と静水圧で解く領域をシームレスに接続して計算する手法を開発した。

まず、非静水圧と静水圧計算の切り替えを行うクライテリアについて、理論的・数値的考察により、現象を支配するパラメータや計算格子サイズとの関係についての整理を行った。次に、その結果に基づいて、解析結果に合わせ時々刻々と静水圧領域と非静水圧領域の接続境界が変化する解適合型接続法による数値モデルの開発を行った。開発したモデルを潮流下での密度噴流や津波伝搬などの具体的な問題に適用し、モデルの性質や有効性を示すとともに、波動理論との比較による理論考察により静水圧近似の具体的な適用基準値の提案を行った。

### ②生物・生態系モデルの開発

肥沃化による食料増産の対象となる魚類について、VPAを用いて海域肥沃化技術の評価に適用可能なマイワシの資源量評価モデルを構築した。提案した順応的な管理方策の有効性について検討した結果、漁獲量のみで資源量の変動傾向を判断するよりも、モデルを用いてRPS（再生産成功率）を求め、これを指標として使ったほうが良いこと、モデルを管理に利用する場合、モデルの推定精度が落ちるような管理手法をとると、かえって結果が悪くなる可能性があることなどを示した。

また、沿岸性魚類を対象として環境選好性を考慮した行動モデルを構築し、水質や餌環境等を評価する低次生態系モデルと統合したシミュレーションを行なった。

生態系モデルに関しては、伊豆大島の深層水取水施設を用いて実際の深層水によるプランクトンの増殖実験を行い、それに基づいて複数種の植物プランクトンおよびそれを起点とする食物連鎖を考慮したモデルを構築した。構築したモデルを用いて深層水を添加した場合の生態系の応答メカニズムの検討を行った。

### ③具体的事例への適用

開発したマルチスケール解析モデルおよび生態系モデルを具体的事例に適用し、計算手法の特性や精度を検討した。

深層水を汲み上げて海洋の表層に供給する肥沃化技術に関しては、深層水の供給頻度や量に関する感度解析を行うとともに、実海域にこの肥沃化技術を適用した場合のシミュレーションを実施した。

また、深層での熱交換を用いた新たな発電所の冷却システムを対象として、深海への熱の供給によって湧昇流が生じる可能性について、水理実験と数値シミュレーションによる検討を行った。さらに生態系モデルと結合したシミュレーションにより、肥沃化効果に

ついても検討を行った。

(2) 技術導入の社会経済的影響を検討するためのポテンシャル評価や経済モデルの開発

### ①ポテンシャル評価

人工湧昇流や海洋滋養など各技術に対して、どの海域が適しているかを評価する指標となるパラメータを検討した。また、日本近海の一次生産力と肥沃化ポテンシャルを評価するためのデータ収集を行ない、簡易的なポテンシャル評価を行った。

大型藻類利用に関しては、日本近海の一次生産力や栄養塩分布の特性を調査し、それに基づいて海産バイオマスのポテンシャルの検討を行った。また、文献調査により海藻モデルのパラメータを収集し、日本沿岸の代表的な種のモデルを構築した。同時に日本沿岸の藻場および磯焼けに関するデータの整理を行い、海域肥沃化を含めた対策の効果に関する検討およびそれに伴う炭素固定ポテンシャルの評価を行った。

### ②技術導入の社会経済的影響を検討するための評価手法の開発

肥沃化が食糧需給に与える影響を検討するために、価格均衡を用いた食料経済モデルIFPSIMに水産物を組み込み、海域肥沃化技術が日本の食料経済に与える影響を検討した。人口やGDP、または穀物生産力等のシナリオにかかわらず、今後日本の動物性タンパク源の自給率は低位水準にとどまると予測され、それを回避するための手段として水産物の増産が効果的であることが示された。また、海域肥沃化は資源量が低位水準にある品目に対して行うのが効果的であり、その需給を大幅に改善できる可能性が示唆された。

環境や経済指標を用いた技術の評価については、Ecological Footprintによって養殖を含む海洋食料生産の評価を行った。また、包括的環境影響評価指標として提案されているTriple Iを用いて人工湧昇流技術の持続可能性を評価した。Ecological Footprintの算出では、人工湧昇流技術による二酸化炭素排出や生産力増加の直接的な影響を考慮した場合と、他産業への波及効果や漁獲増加による食料代替効果の間接的影響を考慮した場合について検討を行った。また、環境負荷と経済価値の換算係数 $\gamma$ に関する考察を行い、限界削減費用およびGDPの産業分類により $\gamma$ を計算する手法を提案した。新たに提案した $\gamma$ を用いたTriple Iによると、評価対象とした人工湧昇流技術は、食料代替の間接影響を考慮すると持続可能であった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

- ① 北澤大輔 : エコロジカル・フットプリントの海洋食料生産への適用、地球環境、査読有、Vol.16(1)、2011、25-32
- ② H. Yoshimoto, S. Tabeta : A Study on the Scaling of Ecological and Economic Values in the Inclusive Impact Index、Proceedings of the 21st International Offshore And Polar Engineering Conference、査読有、Vol.1、2011、804-809
- ③ 多部田茂、吉本治樹 : Triple I の課題と環境-経済統合係数に関する考察、第 22 回海洋工学シンポジウム講演論文集、査読無、2011、4p
- ④ 北澤大輔、清水裕介、多部田茂、加藤孝義 : 沿岸・沖合養殖のエコロジカル・フットプリントの比較、第 22 回海洋工学シンポジウム講演論文集、査読無、2011、5p.
- ⑤ 吉本治樹、多部田茂、白田慶一郎 : 海底マウンドによる人工湧昇流技術の包括的環境影響評価、日本船舶海洋工学学会論文集、査読有、Vol. 11、2010、221-227
- ⑥ 長谷部雅伸、多部田茂 : 静水圧・非静水圧領域を動的に接続した流動モデルの密度流問題への適用、土木学会論文集 B2、Vol.66(1)、査読有、66、2010、346-350
- ⑦ T. Kinoshita、S. Tabeta、N. Tanabe : Slow jet plume due to submarine groundwater discharge、Geophysical Research Letters、査読有、Vol.36、5p.、2009
- ⑧ 清水康弘、多部田茂、木下嗣基 : 食料経済モデルによる海域肥沃化の効果の検討、日本船舶海洋工学学会論文集、査読有、Vol. 9、2009、29-36
- ⑨ S. Tabeta、T. Kinoshita、Y. Shimizu : Simulations of Supply and Demand of Marine Products by Food Economy Model、The Pacific Congress on Marine Science and Technology: 2008 Refereed Publication、査読有、2009、31-39
- ⑩ 長谷部雅伸、多部田茂 : 海水流動モデルにおける静水圧・非静水圧領域の動的接続、土木学会論文集 B2、査読有、Vol. 65(1)、2009、426-430

[学会発表] (計 19 件)

- ① 本宮佑規、多部田茂 : 伊勢湾におけるマアナゴ動態モデルの構築、第 15 回アナゴ漁業資源研究会、2011 年 12 月 7 日、横浜市漁協柴支所(横浜市)
- ② 佐藤慎一、多部田茂、尾崎雅彦 : 取排水

の無い発電所冷却水システムに関する基礎研究 第二報：湧昇による肥沃化効果検討のためのモデル構築、日本船舶海洋工学学会講演会、2011 年 11 月 15 日、タワーホール船堀 (江戸川区)

- ③ 服崎耕司、多部田茂 : 日本沿岸の藻場再生による炭素固定のポテンシャル評価、日本船舶海洋工学学会講演会、2011 年 11 月 15 日、タワーホール船堀 (江戸川区)
- ④ M. Shiokari、S. Tabeta : A fundamental study on the effect of ocean fertilization by deep sea water、5th East Asian Workshop for Marine Environments、2011 年 10 月 8 日、東京大学 (柏市)
- ⑤ S. Sato、S. Tabeta、M. Ozaki : A study on the fertilization effect by thermal power plant cooling system using deep sea water、5th East Asian Workshop for Marine Environments、2011 年 10 月 7 日、東京大学 (柏市)
- ⑥ Y. Motomiya、S. Tabeta : Numerical simulation of habitat environment of benthic fish in Ise Bay、5th East Asian Workshop for Marine Environments、2011 年 10 月 7 日、東京大学 (柏市)
- ⑦ 多部田茂、吉本治樹 : Triple I の課題と環境-経済統合係数に関する考察、第 22 回海洋工学シンポジウム、2011 年 8 月 3 日、東京
- ⑧ 北澤大輔、清水裕介、多部田茂、加藤孝義 : 沿岸・沖合養殖のエコロジカル・フットプリントの比較、第 22 回海洋工学シンポジウム、2011 年 8 月 3 日、東京
- ⑨ H. Yoshimoto、S. Tabeta : A Study on the Scaling of Ecological and Economic Values in the Inclusive Impact Index、The 21st International Offshore And Polar Engineering Conference、2011 年 6 月 20 日、Maui, USA
- ⑩ 塩苅恵、多部田茂 : 海洋深層水による海域肥沃化効果の検討、日本船舶海洋工学学会講演会、2011 年 5 月 20 日、福岡県中小企業振興センター(福岡市)
- ⑪ 長谷部雅伸、多部田茂 : 静水圧・非静水圧領域を動的に接続した流動モデルの密度流問題への適用、第 57 回海岸工学講演会、2010 年 11 月 12 日、京都
- ⑫ M. Hasebe、S. Tabeta : Unsteady buoyant jet simulations using dynamic connection scheme of hydrostatic and non-hydrostatic zone、The 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering、2010 年 6 月 8 日、Shanghai, China
- ⑬ S. Tabeta、T. Kinoshita、H. Yoshimoto、Y. Shimizu、Y. Matsuda : DEVELOPMENT OF

- TOOLS TO ASSESS ECOSYSTEM AND ECONOMIC IMPACTS DUE TO OCEAN FERTILIZATION TECHNOLOGIES、The East Asian Seas Congress 2009、2009年11月23日、Manila
- ⑭ 長谷部雅伸、多部田茂：海水流動モデルにおける静水圧・非静水圧領域の動的接続、第56海岸工学講演会、2009年11月19日、水戸
- ⑮ S. Tabeta：ECOLOGICAL AND ECONOMIC MODELLING FOR A COMPREHENSIVE ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF OCEAN FERTILIZATION TECHNOLOGIES、UT-KAIST Joint Symposium、2009年10月16日、柏
- ⑯ 白田慶一郎、多部田茂：海底マウンドによる人工湧昇流技術の Ecological Footprint、第21回海洋工学シンポジウム、2009年8月7日、東京
- ⑰ 松田昌賢、多部田茂：VPAによるマイワシ資源量の順応的管理-海域肥沃化時の検討、日本船舶海洋工学会講演会秋季講演会、2008年11月25日、東京
- ⑱ 白田慶一郎、多部田茂：沿岸海域における魚類の行動モデルの開発、日本船舶海洋工学会講演会秋季講演会、2008年11月25日、東京
- ⑲ S. Tabeta, T. Kinoshita, Y. Shimizu：Development of food economy model to investigate the effect of ocean fertilization、The Pacific Congress on Marine Science and Technology (PACON2008)、2008年6月3日、ホノルル

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

多部田 茂 (TABETA SHIGERU)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・准教授  
研究者番号：40262406

### (2) 研究分担者

木下 嗣基 (KINOSHITA TSUGUKI)  
茨城大学・農学部・准教授  
研究者番号：10313008

北澤 大輔 (KITAXAWA DAISUKE)  
東京大学・生産技術研究所・准教授  
研究者番号：30345128

西 佳樹 (NISHI YOSHIKI)  
横浜国立大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：70470052