

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20404007

研究課題名（和文）永久塩泉による海洋深層水湧昇と海洋表層緑化メカニズムの解明

研究課題名（英文）Clarification on mechanisms of fertilization at ocean surface and upwelling of deep sea water by perpetual salt fountain

研究代表者

圓山 重直 (MARUYAMA SHIGENAO)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：80173962

研究成果の概要（和文）：

本研究では、海洋砂漠と言われる海洋の栄養塩が少ない海域に栄養分に富む海洋深層水を大規模にくみ上げて、その海域を局所的に富栄養化し、環境にどのような影響を与えるかを解明することを目的とする。マリアナ海域でのフィールド実験で得られた実験データを基に海洋緑化の実現性を検証した。衛星データを基に、パイプの軌跡に沿ってクロロフィル濃度変化量を積分することにより海洋深層水汲み上げによってクロロフィル濃度が増加していることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

The objective of this study is clarification on mechanisms of fertilization at ocean surface and upwelling of deep sea water by perpetual salt fountain. The possibility on fertilization of ocean was evaluated through the analysis of observation data from satellite. As a result, the increment of chlorophyll concentration was confirmed by line integration of variation of chlorophyll concentration on trajectory of pipe.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2009年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
総計	12,800,000	3,840,000	16,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：永久塩泉、海洋深層水、海洋緑化、海洋生物生産向上

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者が参加した「横断的手法による21世紀の海洋利用技術創出に関する委員会(1998-1999)」で、新しい海洋利用とその問題点が議論され、海洋の食糧問題や二酸化炭素隔離、新しい産業の創出などが提言された。その議論の中で、ストンメルの原理を利用した海洋深層水汲み上げによって、栄養塩が乏しい海洋表層を緑化する提案が研究代表者

によってなされた。従来、海洋深層水の汲み上げは、ポンプなど機械的に行われており、海洋に大規模に展開するためには耐久性やコストの面で困難を伴う。さらに、低温の海洋深層水を低温状態で汲み上げてもまた沈降するなどの問題もある。ストンメルの原理は、それらを解消するものであるが、まだ実験的には実証されていなかった。

圓山研究代表者らは、海洋深層水汲み上げ

技術に関する室内実験及び数値解析を行い、永久塩泉の原理による深層水の湧昇が可能であることを実証した。さらに、東京大学海洋研究所と共同で海洋における実証実験の検討を行った。海洋深層水の湧昇を計測する方法を開発し、東京大学海洋研究所の共同研究テーマとしてマリアナ海溝上で海洋実験を行った。2002年8月の実験では湧昇速度の測定に世界で初めて成功し、管中心で約2.5mm/s (210m/day)の流速を観測したその成果はJournal of Oceanographyに発表され大きな反響を得ている (S. Maruyama, K. Tsubaki, K. Taira and S. Sakai, Artificial Upwelling of Deep Seawater Using the Perpetual Salt Fountain for Cultivation of Ocean Desert, Journal of Oceanography, (2004), Vol. 60, pp 563-568.)。

この実験で、測定された流速では管内は層流と予測されるにもかかわらず、物質拡散が分子拡散に比べ10万倍程度大きく、ある種の乱流であることが明らかとなった。海洋実験の熱流体輸送は、従来の機械工学ではスケールが大きすぎるメガスケールの熱流体輸送現象が起きていることが予想され、その未解明な点が本研究で明らかになると予想される。

さらに、表層付近に汲み上げた海洋深層水の拡散機構解明が海洋緑化計画に大きな影響を与えることが考えられる。さらに研究代表者らは、実験データより推定した等価渦拡散係数を用いて自然対流シミュレーションを行った結果、実験の汲み上げとほぼ等しい結果を得ている。

## 2. 研究の目的

海洋砂漠と言われる海洋の栄養塩が少ない海域に栄養分に富む海洋深層水を大規模にくみ上げて、その海域を局所的に富栄養化し、この海域に海洋の森を作る可能性を検討し、この大規模海洋深層水くみ上げが、環境にどのような影響を与えるかを解明する。流体力学と海洋物理、海洋生物学と熱工学を融合したメガスケール熱流体力学の新たな展開により、深層水の無動力汲み上げ機構の解明を行い、富栄養海洋深層水によって海洋砂漠を緑化するための基礎研究を行う。つまり、未だに未解明な海洋深層水汲み上げ機構と深層水拡散現象を明らかにするために以下の研究を行う。

- (1)未だに定量的に明らかになっていないストンメルの原理による海洋深層水汲み上げの熱流体現象解明と、汲み上げた海洋深層水の海洋拡散を海洋実験で明らかにする。
- (2)海洋深層水の管内流動と汲み上げられた海洋深層水の拡散を大規模コンピュータシミュレーションで明らかにし、海洋緑化計画の可能性について検討する。

(3)本システムを大規模に展開する場合の技術的可能性を検討するとともに、海洋深層水の拡散と植物プランクトン増殖の関係を明らかにし、海洋深層水の大規模汲み上げが海洋環境に与える影響を検討する。

## 3. 研究の方法

本研究では、調査研究実施地域を図に示すマリアナ海溝海域 (12° 58' N, 143° 27' E) に定め、ストンメルの原理による海洋深層水汲み上げの熱流体現象解明を検証実験で明らかにする。両海域の温度・塩分濃度分布はストンメルの原理による湧昇が起りやすい分布となっており、検証実験の段階では最もふさわしい研究実施地域であると考えられるため上記地点に定めた。旅行経路は海路で実施領域に入る。

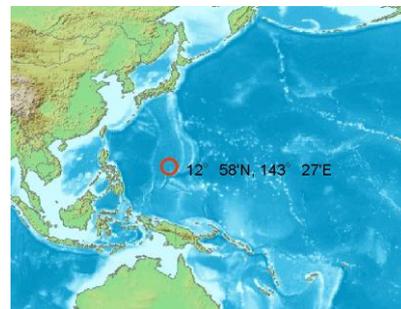


図 調査研究実施地域 マリアナ海溝

海洋深層水汲み上げ実験装置の開発と湧昇速度計測システムの検討を行い、実験装置を製作する。また、大規模数値シミュレーションによって実際の海域における海洋深層水汲み上げ速度や流速分布の計算を行う。

## 4. 研究成果

まず、海洋深層水汲み上げ装置と計測法に関する検討として、永久塩泉の原理による海洋深層水の汲み上げ技術の確立を目的とした、全自動海洋深層水汲み上げ装置と計測手法を構築した。さらに、湧昇流の流速測定方法を検討し、高深度の実験に耐え得る計測システムを構築した。次に深層水汲み上げ装置及び計測手法の実証実験として、小型船舶を用いて仙台湾内において製作した実験装置及び計測手法の評価試験を行った。製作した実験装置及び計測システムの信頼性を海洋実験において確認し、単独パイプを用いて、湧昇流の速度を測定した。併せて、海洋実験における海流を考慮した湧昇パイプ形状についても実験的検討を行い、水槽実験を実施することで、パイプ断面の最適形状を決定した。

マリアナ海域における海洋実験に向けた数値解析的アプローチとして、海洋深層水の表層拡散現象のシミュレーションを単独のパイプのケースについて行った。これまでの

実験で得られた湧昇速度をパイプ出口境界条件として与え、汲み上げられた海洋深層水が表層近傍でどのように拡散するかを複数の乱流モデルを用いてスーパーコンピュータで三次元数値解析した。結果として、湧昇した海洋深層水は表層にてわずかながらに沈降し、その後深度を保ちながら下流方向に移流していくことがわかった。つまりは、海洋深層水は湧昇後沈降することなく海洋表層域にとどまり、拡散していくということが明らかとなった。これらの知見を生かして、海洋深度方向の塩分・温度分布から、海洋深層水の表層滞留及び拡散が可能な海域を選定し、その一つとしてオーストラリア西部の海域について現地調査を行った。パース大学にて海洋学を専攻している研究者と当該海域における湧昇可能性の検討を行った。

マリアナ海域での海洋実験を行った。実験には 300m のパイプを用いた。約 1 か月の漂流後に回収し、データ解析を行った。この実験で得られた結果によりパイプ内の自然対流の様子が波浪などの振動により大きく変わることを示した。また衛星のデータを解析することにより一次生産性が向上していることを示した。

さらに、実海域へのパイプの実用的な展開を目指し、佐渡島近海において、新型パイプの展開実験を行った。30m 程度のパイプをコンテナに詰め、コンテナの落下とブイの浮力によりパイプを海中で垂直に設置するという方法を試みた。耐水圧カメラにより水中におけるパイプの展開の挙動を観察し、設置方法およびパイプ内への海水の流入挙動を検証した。

また、マリアナ海域でのフィールド実験で得られた実験データを基に海洋緑化の実現性を検証した。衛星データを基に、パイプの軌跡に沿ってクロロフィル濃度変化量を積分することにより海洋深層水汲み上げによってクロロフィル濃度が増加していることを明らかにした。さらに、パイプ内の流動については、スーパーコンピュータによるシミュレーションを行い、波浪による振動や海流の変化といった海域条件がパイプ内の拡散過程に影響を及ぼし、結果として内部の流動様相を変化させることを明らかにした。流速によってパイプ内の拡散が変化するモデルを導入し、パイプ内流速分布の新たな予測方法を検証した。

#### 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 2 件)

1. S. Maruyama, T. Yabuki, T. Sato, K. Tsubaki, A. Komiya, M. Watanabe, H.

Kawamura, K. Tsukamoto, Evidences of increasing primary production in the ocean by Stommel's perpetual salt fountain, Deep-Sea Research Part I, 査読有, Vol. 58, pp. 567-574, 2011.

2. N. Williamson, A. Komiya, S. Maruyama, M. Behnia and S. W. Armfield, Nutrient Transport from an Artificial Upwelling of Deep Sea Water, Journal of Oceanography, 査読有, Vol. 65, pp. 349-359, 2009.

[学会発表] (計 7 件)

1. A. Komiya, M. Watanabe, T. Yabuki, S. Maruyama, Effect of eddy diffusivity on the upwelling flow rate of perpetual salt fountain, The 21st International Symposium on Transport Phenomena, 2010年11月3日, Kaohsiung, Taiwan.
2. T. Yabuki, S. Mauryama, M. Watanabe, A. Komiya, Oceanic productivity enhanced by perpetual salt fountain during ocean experiments -estimation based remote sensing and numerical simulation, The 7th International Conference on Flow Dynamics, 2010年11月3日, Sendai, Japan.
3. 渡邊幹人, 矢吹崇, 小宮敦樹, 円山重直, 海洋実験及び海洋観測データによる永久塩泉の可能性, 日本機械学会東北支部第45期総会・講演会, 2010年3月12日, 仙台.
4. T. Yabuki, S. Maruyama, M. Watanabe, and A. Komiya, In Situ Observation and Remote Sensing during Ocean Experiments of Perpetual Salt Fountain, The Ninth International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration, 2009年11月5日, 仙台.
5. M. Chisaki, S. Maruyama, M. Perrette, A. Komiya and T. Yabuki, A Comparison for Diffusion Process of Artificial Upwelling of Nutrient-rich Seawater Simulation by k- Model and Large Eddy Simulation, the Second International Forum on Heat Transfer, 2008.9.17, Tokyo, Japan.
6. 佐藤鉄哉・知崎正純・小宮敦樹・円山重直, 永久塩泉による管内湧昇量の予測法の提案, 第45回日本伝熱シンポジウム, 2008.5.22, つくば.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

圓山 重直 (MARUYAMA SHIGENAO)  
東北大学・流体科学研究所・教授  
研究者番号：80173962

### (2) 研究分担者

小宮 敦樹 (KOMIYA ATSUKI)  
東北大学・流体科学研究所・准教授  
研究者番号：60371142

矢吹 崇 (YABUKI TAKASHI)  
東北大学・流体科学研究所・  
産学官連携研究員  
研究者番号：60451514