

平成22年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2005～2009

課題番号：17101001

研究課題名（和文） 希ガスをトレーサーとした太平洋における海洋循環の解明

研究課題名（英文） Study on ocean circulation in the Pacific using noble gas tracers

研究代表者

佐野 有司（SANO YUJI）

東京大学・海洋研究所・教授

研究者番号：50162524

研究成果の概要（和文）：太平洋深層の海洋循環を調べるため、新たに高精度の分析システムを構築し、ヘリウム同位体比の分布図を作成した。西部北太平洋では、深さ 2500m では低緯度の西向流はフィリピン海に流れ込む一方、3000m ではマリアナ弧に沿って北に向きを変えることを明らかにした。ヘリウムの異常が少ない深さ 4000m でも、係留系によって北向きの流れが確認できた。これらの観測結果は高解像度の診断的数値シミュレーションの結果と一致した。

研究成果の概要（英文）：We have carried out high-quality observations of geochemical tracers such as helium isotopes as well as hydrographic data and direct current measurements to infer deep current routes in the Pacific. In the western North Pacific, there is a westward flow at 2500 m deep going to the Philippine Sea while northward current along the Marina Arc is dominant at 3000 m deep. At deeper than 4000m where helium isotope anomaly is not found, we have discovered a northward flow by direct current measurements. These observations are consistent with a result of high-resolution numerical simulation.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	61,800,000	18,540,000	80,340,000
2006年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2007年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2008年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2009年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
総計	82,200,000	24,660,000	106,860,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：海洋科学、地球化学、海洋物理・陸水学、地球観測、環境変動

1. 研究開始当初の背景

北大西洋北部及び南極大陸周辺において大気からの冷却によって海洋深層に沈み込んだ海水は、南極海を循環してインド洋や太平洋に流れ込み、各大洋の深層を北上しながら

ら上昇する。こうした全球規模の海洋熱塩循環は大まかには 1960 年代に確立された。しかしその詳細な経路や流量について、特に太平洋における実態は今日においても未解明の点が多く、また、研究手法による循環像の

差異が大きい。

たとえば、海洋化学的循環像は、海水中の溶存物質の濃度分布などから導かれ、ブロッカーのコンベアベルトモデルに代表されるように空間的・時間的に平均的な流れを表す。一方、海洋物理学的循環像は、流速計による直接測流や地衡流を仮定した力学的手法に基づき、局所的・瞬間的な流れを表す。

循環像の乖離を防ぐため、化学と物理の学際的共同研究により、どちらから見ても確からしい循環像が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、太平洋深層における海洋循環の実態を、希ガスをトレーサーとして用いることで海洋化学的に解明する。海底火山を源とするヘリウム3は2000~3000mの深さの循環を調べるには最適である。高精度の分析システムを確立し、多数の海水試料を分析することで、分布図を作成し循環を明らかにする。

それ以深は、係留観測によって流速を得る。係留系は海底上に設置するため、海底から遠い深度は測り難く、ヘリウム3と係留観測は相補的である。逆に、ヘリウム3は深海では場所による濃度差が小さいため、それを人工的に投入し追跡を行うことで輸送や拡散の推定が可能かどうかを探る。

最終的に、数値シミュレーションを実施することで、これら観測で得られた循環の検証を行う。そして、海洋化学と海洋物理学、観測的研究と数値的研究といった複数の異なる視点から、総合的な考察を行うことで、信頼における循環像を構築する。

3. 研究の方法

(1) ヘリウム分析システムの作成・確立

ヘリウム同位体用質量分析計を購入し、研究対象に合った設定の最適化、精度の評価を行った。そして海水から溶存ヘリウムを抽出・精製し分析するシステムを構築した。まず大気試料や火山ガス、標準海水を用いてシステムの評価を行い、分析法を確立してから海水試料の測定を実施した。

(2) 現場観測による海洋循環の把握（化学観測、物理観測）

東京大学海洋研究所運用の研究船白鳳丸および淡青丸の公募に申請をすることで、多数の海洋観測に参加した。表1に示すように、研究期間の2005~2009年度で計12回、前年の2004年度はその準備として2回の航海に参加した。本研究の対象である太平洋のほか、予備的調査として沖縄トラフや日本海、インド洋など、広い海域で多数の海水試料を得た。

化学観測では、CTD（伝導度・温度・深度計）を用いて水温・塩分等を測定し、深度別にニスキン採水器を用いて海水試料を採取

した。試料は、研究室に持ち帰り、上記(1)のシステムにより溶存ヘリウム同位体分析を行った。測定した全てのデータに基づき、ヘリウム同位体比の分布図を作成し、流れを推定した。

物理観測では、CTDに降下式ADCP（音響ドップラー流速計）を組み合わせ、水温・塩分等とともに流速を測定した。時系列データの取得のため、三陸沖に流速計とCTDを取り付けた係留系を3系設置した。2005年12月（KH-05-4）に設置し、2007年5月（KH-07-1）と2008年10月（KH-08-3）に再設置した。流速計の平均流速の分布図を作成し、循環像を調べた。

航海番号	化学	物理	調査海域
KH-04-4	○	○	西部北太平洋
KH-04-5	○		南太平洋
KT-05-11	○		日本海
KH-05-2	○		中央太平洋
KH-05-4		○	西部北太平洋
KH-06-2	○		フィリピン海
KH-06-4	○		インド洋
KH-07-1	○	○	北太平洋
KT-08-4	○		沖縄トラフ
KT-08-9	○		鹿児島湾
KT-08-17	○	○	三陸沖
KH-08-3	○	○	西部北太平洋
KT-09-7	○	○	三陸沖
KH-09-5	○		インド洋

表1 本研究に関連する研究航海の一覧
航海番号のKHは白鳳丸、KTは淡青丸を表す

(3) 数値海洋循環モデルの開発と実施

観測海域以外の広域的な循環像を把握し、上記(2)で得られた循環像を検証するため、数値モデルによるシミュレーションを実施した。熱塩循環は鉛直拡散係数や海面フラックスなど、現在では不確定な要素に大きく依存するため、水温・塩分は予報計算せず、観測データを用い、流速場のみを計算する診断的手法を採用した。診断的モデルは計算時間が短くてすむため解像度を高くでき、深層の流れに重要な海底地形を細かく分解できるメリットもある。

全球を水平0.25度格子、海面から深さ7000mまでを46層に分けた解像度を持つ数値モデルを作成し、気候学的年平均の海上風応力データセットと水温・塩分データセットを与えて流速を計算した。

(4) ヘリウム人工投入による流動観測

海中には1kgあたりフェムトモルと極微量にしか存在しないヘリウム3を深さ4000mに人工的に投入し、その後の広がりから流動を推定することを試みた。その概要を図1に示す。同様の研究についてはこれまでに報告

例がないのでまずガスを深層に注入するための装置の作成から始め、水槽での試験を行った。

0.5mol のヘリウム 3 を 2008 年 7 月 (KT-08-17) に三陸沖の係留点に投入した。投入直後と翌日に投入点の周辺で、そして約 3 ヶ月後 (KH-08-4) と 10 ヶ月後 (KT-09-7) に観測範囲を広げて海水を採取し、ヘリウム同位体比を分析した。

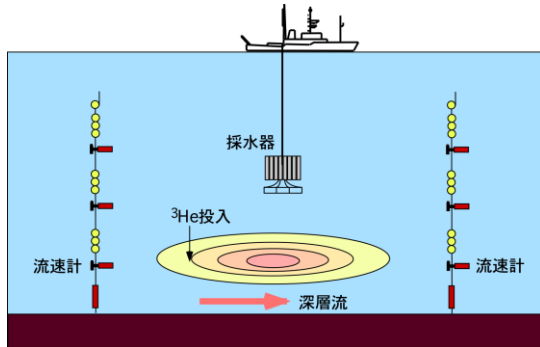


図 1. ヘリウム投入実験の概要図

4. 研究成果

(1) ヘリウム分析システムの作成・確立

海中のヘリウム同位体比を従来の装置よりも高感度・高精度で測定するために、新しい希ガス用質量分析計(イギリス GV 社製: HELIX SFT)を導入した。この装置を調整した結果、約 0.1ccSTP の空気試料の繰り返し測定で、精度約 0.1~0.2% (1σ の誤差) を達成した。これは世界最高レベルの分析精度である。その後、大気と溶解平衡にした標準海水を用いて分析システムを評価した。温度の違う 2 種類の海水試料を分析したところ、誤差の範囲内で文献値とよく合っていることを確認した。

(2) 海水ヘリウム同位体の分布図作成

本研究で得られた試料データとこれまでに報告されているデータを合わせて太平洋におけるヘリウム同位体比の分布図を作成した。得られた分布図のうち西部北太平洋の深さ 2500m と 4000m のものを図 2 に示す。フィリピン海や北太平洋低緯度域で大気より 20% 以上高い同位体比が観測されたが、中緯度域では観測されなかった。このことから東太平洋海膨を起源に持つマントルヘリウムを含むプルームは、マリアナ弧にぶつかって北上するのではなく、ヤップ弧とマリアナ弧の間を通過してフィリピン海に深層水が流れ込んでいることが示唆される。一方、深さ 3000m の分布図から、低緯度の北太平洋を西向きに流れてきた深層水は、マリアナ弧で北に向きを変えていることが示唆される。深さ 4000m ではヘリウム 3 の主なソースがないため場所による違いが明確でなく、同位体比か

ら流れの推定はできない。

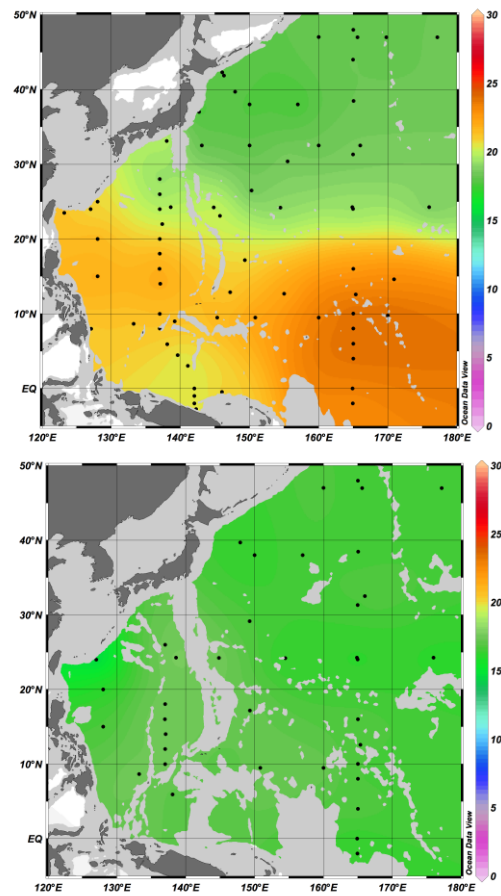


図 2. 深さ 2500m (上) と 4000m (下) の $\delta^3\text{He}$ 分布

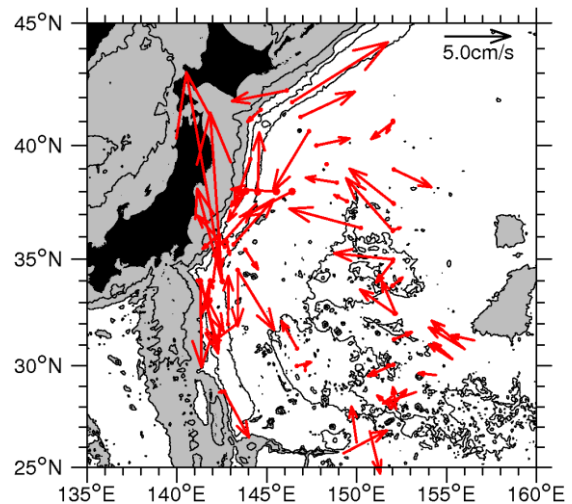


図 3. 係留流速データによる深さ 4000m 付近の平均流速の分布

(3) 係留観測と CTD 観測

三陸沖で得た 3 年間の時系列データでは、大きな流速変動を示した。スペクトル解析の結果、卓越周期は 100 日程度であり、1 年程

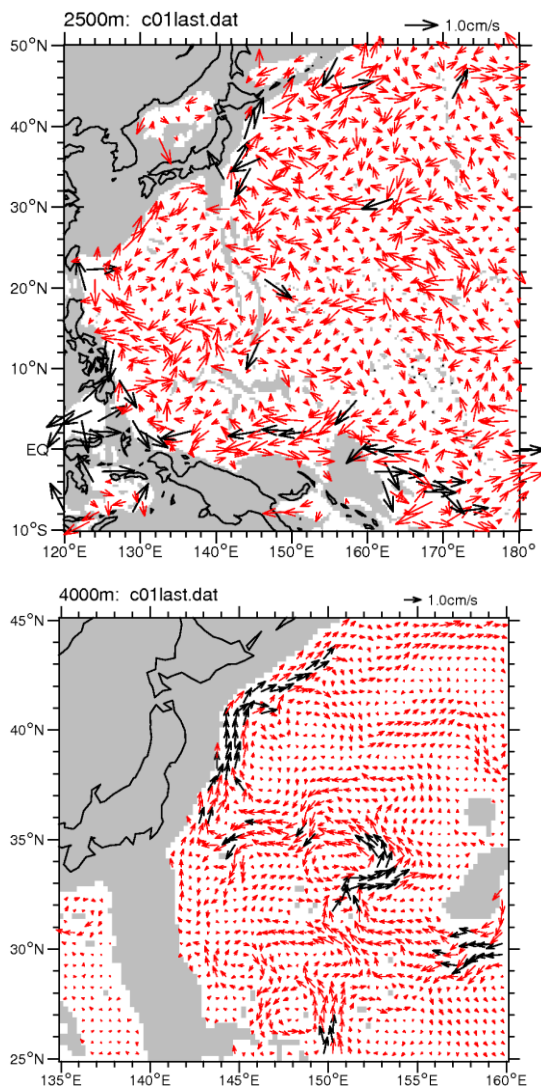


図4. 診断的シミュレーションによる深さ2500m(上)と4000m(下)の流速分布

度の期間で平均を取れば、変動成分はほぼ消える。同じ地点で10年前の1996~1997年の平均流とほとんど一致することから、1年程度の長期平均した流速は極めて安定していることが確かめられた。

観測年による差異が小さいことから、過去の他機関のデータも含めて描いた深さ4000m付近での流速の分布図を作成した。図3では、図の南東付近から北上した深層流が北緯30~40度付近に西向きに流れ、また、日本のすぐ東に連なる海溝の西斜面に南下流、東斜面には北上流がある。係留系は部分な海域ではあるが、ヘリウムで推定できない深さの循環が明らかになった。

CTDと降下式ADCPのデータから鉛直拡散係数を推定する試みを行った。鉛直拡散係数は熱塩循環の強さを決める上で、きわめて重要な指標であり、それを観測的に決めることは将来の数値モデルの精度を高める意味でも

極めて重要である。およそ2000m以深ではデータの精度のため、十分な推定値は求められなかったが、ハワイ海嶺などの大規模な地形付近では大きく、日本近海の高層付近では大洋底部分に比べて顕著な差はないなどの結果が得られた。

(4) 診断的数値シミュレーション

シミュレーションで得られた流速を図2および図3のスケールに合わせて描いたものを図4に示す。

深さ2500mでは、北緯15度付近に西向きの流れがあり、ヘリウムがフィリピン海へ輸送される観測結果と一致する。フィリピン海流入後、南西諸島沿いに北上し、日本付近に至る。これはヘリウム3が高い部分に合致する。

深さ4000mでは、南から北上してきた深層流は北緯20度付近では西端と東端の2本の分枝に分かれて北上し、両者は北緯35度付近で合流した後、西向きに流れ、日本東方から千島列島沿いに北上する。係留流速計で得られた海溝西側の南下流はモデルには現れていないが、モデル解像度の問題と考えられ、その他の点では、モデルは係留結果をよく再現する。

(5) ヘリウム人工注入による流動観測

投入直後に投入深度である深さ4000mでヘリウム3の大きな異常が見られたが、海水試料がボンベに残っていたヘリウム3に汚染されていた可能性が高いことがわかった。3ヶ月後、10ヶ月後の観測では目立った異常は見られず、採水点とは別の方向に流された可能性がある。今後も研究航海利用し継続的に調査する予定である。

(6) まとめと議論

本研究では、観測が難しい海洋深層に焦点をあて、海洋化学と海洋物理学、あるいは観測とモデルという異なる手法により多面的な研究を行った。

ヘリウム同位体は深さ2000~3000mの循環を明らかにし、係留流速観測はその下の4000mの循環を明らかにした。両者は適用可能な深さに違いがあるため、相補的な関係であった。

両者の直接的な比較のため、ヘリウム同位体を人工的に深海に注入し追跡することを試みた。本研究では実験は失敗であったが、現在、未解明な深層での輸送や拡散の推定に有用な手法と思われる。

診断的シミュレーションの結果は、ヘリウム同位体比の分布図や係留流速計の平均流速像に合致した。ここには示さないが、中央海嶺上のヘリウム同位体比マッピングもシミュレーションと合うことも確認した。

化学的知見と物理的知見をお互いに十分に比較できる状態が整ってきたと言え、これらの結果は、学会発表や雑誌論文に両分野の共著で発表した。海洋化学と海洋物理学の共同作業は海洋科学における独創性・新規性において格段の発展をもたらす可能性を秘めている。

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 30 件)

- ① Kawabe, M. and Fujio, S. Pacific Ocean circulation based on observation. *Journal of Oceanography* **66**, 389-403, 2010, 査読有.
- ② Yanagimoto, D., Kawabe, M. and Fujio, S. Direct velocity measurements of deep circulation southwest of the Shatsky Rise in the western North Pacific. *Deep-Sea Research I* **57**, 328-337, 2010, 査読有.
- ③ Takahata, N., Tokutake, T., Shirai, K., Fujio, S., Tanaka, K. and Sano, Y. Helium isotopes of seawater in the Philippine Sea and the western North Pacific. *Geochemical Journal* **44**, 2010, 掲載確定, 査読有.
- ④ Sano, Y., Furukawa, Y. and Takahata, N. Atmospheric helium isotope ratio: possible temporal and spatial variations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **74**, 2010, 掲載確定, 査読有.
- ⑤ Sano, Y., Tokutake, T., and Takahata, N. Accurate measurement of atmospheric helium isotopes. *Analytical Sciences* **24**, 521-525, 2008, 査読有.
- ⑥ Takahata, N., Sano, Y., Horiguchi, K., Shirai, K. and Gamo, T. Helium isotopes of seawater in the Japan Sea. *Journal of Oceanography* **64**, 293-301, 2008, 査読有.
- ⑦ Gamo, T., Kato, Y., Hasumoto, H., Kakiuchi, H., Momoshima, N., Takahata, N. and Sano, Y. Geochemical implications for the mechanism of deep convection in a semi-closed tropical marginal basin: Sulu Sea. *Deep Sea Research II* **54**, 4-13, 2007, 査読有.
- ⑧ Tanaka, K. Effects of the Earth's rotation and bottom slope on density current descending a sloping bottom. *Journal of Geophysical Research*, **111**, C11018, doi:10.1029/2006JC003677, 2006, 査読有.
- ⑨ 高畑直人, 清田馨, 佐野有司. ヘリウム同位体を用いた深層循環の研究. 月刊海洋 **38**, 370-375, 2006, 査読無.
- ⑩ 佐野有司, 高畑直人, 清田馨. 日本近海のヘリウム同位体比. 月刊海洋 号外**39**, 45-52, 2005, 査読無.
- ⑫ Sano, Y. and Takahata, N. Measurements of

noble gas solubility in seawater by a quadrupole mass spectrometer. *Journal of Oceanography* **61**, 465-473, 2005, 査読有.

- ⑬ Takahata, N., Agarwal, M., Nishizawa, M., Shirai, K., Inoue, Y. and Sano, Y. Helium-3 plume over the East Pacific Rise at 25°S. *Geophysical Research Letter*, **32**, L11608, 2005, 査読有.
- ⑭ Senjyu T., Y. Isoda, T. Aramaki, S. Otsuka, S. Fujio, D. Yanagimoto, T. Suzuki, K. Kuma and K. Mori. Benthic Front and the Yamato Basin Bottom Water in the Japan Sea. *Journal of Oceanography*, **61**, 1047-1058, 2005, 査読有.

[学会発表] (計 27 件)

- ① 藤尾伸三、川辺正樹、CTD と LADCP による鉛直拡散係数の推定、日本海洋学会春季大会、2009.4.8、東京、日本
- ② 亀田綾乃、高畑直人、北島宏輝、藤尾伸三、田中潔、佐野有司、海洋深層へのヘリウム-3 人為散布による海洋深層流評価の試み、日本地球化学会年会、2009.9.16、広島、日本
- ③ Sano, Y., Tokutake, T., Takahata, N., Shirai, K., Fujio, S. and Tanaka, K. Distribution of helium-3 plume and deep-sea circulation in the northwestern Pacific Ocean. Goldschmidt Conference, 2009.6.23, Davos, Switzerland.
- ④ Sano, Y., Furukawa, Y. and Takahata, N. Accurate measurement of atmospheric helium isotopes. Noble gas workshop (Dingue2009), 2009.6.20, Nancy, France.
- ⑤ 藤尾伸三、柳本大吾、北川庄司、日本海溝周辺における深層流の時間変動、日本海洋学会秋季大会、2008.9.27、呉、日本
- ⑥ Sano, Y., Tokutake, T., Furukawa Y., and Takahata, N. Precise measurement of atmospheric helium isotopes. European Geosciences Union General Assembly, 2008.4.18, Vienna, Austria.
- ⑦ Sano, Y., Takahata, N. and Yamamoto, J. High ³He emanation observed in a forearc region of the Kinki district, SW Japan: Revisited. International Conference on Gas Geochemistry, 2007.10.1, Taipei, Taiwan.
- ⑧ Takahata, N., Kiyota, K., Shirai, K., Nishizawa, M., Sano, Y., and Gamo, T. Distribution of helium-3 plumes and deep-sea circulation in the central Pacific Ocean. Goldschmidt Conference, 2007.8.21, Cologne, Germany.
- ⑨ 高畑直人、清田馨、白井厚太郎、西澤学、佐野有司、蒲生俊敬、南太平洋におけるヘリウム同位体比の分布と深層循環、日本海洋学会春季大会、2007.3.23、東京、日本
- ⑩ Sano, Y., Horiguchi, K., Takahata, N., Shirai, K., Oda, S. and Gamo, T. Helium isotopes of

seawater in adjacent sea of Japan. Goldschmidt
Conference, 2006.8.29, Melbourne, Australia.

[その他]

ホームページ等

<http://cer.aori.u-tokyo.ac.jp/kibanS/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐野 有司 (SANO YUJI)

東京大学・海洋研究所・教授

研究者番号：50162524

(2) 研究分担者

藤尾 伸三 (FUJIO SHINZOU)

東京大学・海洋研究所・准教授

研究者番号：00242173

高畑 直人 (TAKAHATA NAOTO)

東京大学・海洋研究所・助教

研究者番号：90345059

田中 潔 (TANAKA KIYOSHI)

東京大学・海洋研究所・助教

研究者番号：20345060