

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 6 月 30 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2011

課題番号：20244074

研究課題名（和文） 地震探査による海底下の固液複合構造と海洋の鉛直混合構造のイメージング

研究課題名（英文） Seismic imaging of solid/fluid structure below and ocean vertical mixing structure above the seafloor

研究代表者

深尾 良夫 (FUKAO YOSHIO)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・チームリーダー

研究者番号：10022708

研究成果の概要（和文）：

海底下地震構造探査を海洋物理的な研究に活かすことを試み以下の結果を得た。1. 南海付加体に発生する超低周波地震が超低速プレート間滑りであると同時にプレート境界の水が関与する水圧破碎現象でもあることを示した。2. 海洋構造イメージングの鮮明度向上法を提案した。3. 北海道沖、伊豆小笠原沖の海洋構造イメージングを行い、黒潮暖水隗リング、M2内部潮汐波、黒潮フロントなどを見出した。4. 特にM2内部潮汐波の大波化と critical layer absorption の証拠を見出した。5. 海洋内部潮汐波と背景内部波動場の相互作用をシミュレーションし潮汐エネルギー散逸を見積もった。

研究成果の概要（英文）：

In an attempt to apply seismic exploration data acquired for submarine crustal structures to imaging of ocean acoustic structure, we obtained the following results. 1. Very-low-frequency earthquakes occurring in the Nankai accretionary prism represent very slow plate-boundary slip as well as hydrofractures involving fluid migration through the plate boundary. 2. We proposed several methods to obtain improved images of ocean structure from seismic exploration data. 3. We analyzed data from off Hokkaido, off Izu-Bonin ridge to detect signals of the Kuroshio warm core rings, M2 internal tides and the Kuroshio front. 4. A detailed analysis was made for the M2 internal tides to find evidence of billows and critical layer absorption. 5. We made a numerical simulation of internal tidal waves interacting with the background field of internal gravity waves to estimate their dissipation rate.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2009年度	15,500,000	4,650,000	20,150,000
2010年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
総計	36,400,000	10,920,000	47,320,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：海底地下構造・海洋循環・海洋構造・海洋内部重力波・黒潮フロント・海洋音響学

1. 研究開始当初の背景

海底下構造調査のための地震反射探査データが海洋内部構造の研究にも使うことができることが示されたのは2003年のことで、このときをもってSeismic oceanographyという分野が生まれたとみなす人が多い。海洋研究開発機構に蓄積されている膨大な地震波探査データと技術的ノウハウとを海洋物理学的研究に活かすことを展望して本研究は着想された。

2. 研究の目的

新型エアガン・ストリーマーシステム、海底地震計アレー及び本計画で用意する海洋物理計測システムを組み合わせた観測を実施することにより海底制御地震学の新展開を図る。具体的には(1)海底巨大地震の断層上盤側の固体/流体複合系の2次元構造を求め、複合系特有の海底地殻現象(海溝付近の超低周波地震など)との関わりを明らかにする。(2)地震探査の折に海洋物理観測を行い得られた音速・密度構造並びに流速・乱流構造と屈折・反射構造とを比較することにより、海洋内部波生成過程及び海洋鉛直混合の実態を明らかにする。

3. 研究の方法

(1)南海付加体の地震波探査構造の知識と付加体内で発生した超低周波(VLF)地震の至近距離観測データとを組み合わせ、VLF地震の震源環境を特に付加体中の水との関わりにおいて明らかにする。

(2)

- ① 海底下構造調査のための地震反射探査の際に併せて温度・塩分・流速などの海洋物理学的測定を並行して実施する。
- ② これらの測定値を音速分布や浮力振動数分布に換算して海洋反射面構造を高精度で求め、その結果を海洋物理学的に解釈するために使用する。
- ③ 上記データを基に海洋内部反射面イメージングを種々の条件下でテストイメージングのための最適条件を探索する。
- ④ 最適条件で得られたイメージ図から海洋物理学的情報を抽出し解析することにより海洋物理学的な新知見を得る。
- ⑤ こうしたSeismic oceanography的な研究と並行して。その結果と対比しうる内部潮汐波に関する海洋物理学的シミュレーション研究を実施する。

4. 研究成果

(1)南海付加体の地震波探査構造の情報をフルに取り込んで、付加体内で発生した超低周波(VLF)地震の至近距離における広帯域地震観測データを解析した。陸域のデータか

らは得ることのできない永久変位成分および高周波異常励起成分を見出し、南海付加体に発生する超低周波地震が超低速プレート間滑り(せん断破壊)であると同時に、プレート境界の水の移動が関与する水圧破碎(引っ張り破壊)現象でもあることを示した。

(2)

① 本研究の目的に沿って以下の観測を実施した。

<H22年度>

・KR10-09航海(2010年7月) Yamashita et al. (2011)で解析した北海道沖のA2mcs測線の延長部および三陸沖においてMCS調査を行った。その探査にあわせXBT/XCTD観測を実施した。

・KR10-13航海(2010年12月)八丈島東方~鳥島にかけての実施した500kmにわたるOBS/MCS探査の測線上で数10km間隔でXCTD観測を実施した。また時間変化を見るため複数の観測点で繰り返しXCTD観測を行った。

・KR11-01航海(2011年1月)内部波のparametric subharmonic instabilityが最も卓越すると思われる小笠原東方の北緯28.5度付近を通る南北測線においてMCS探査を実施し、その調査前後でXCTD観測を行った。

・KR11-05航海(2011年3月)KR11-01航海に引き続き小笠原東方の南北測線におけるOBS/MCS探査にあわせてXCP/XCTD観測を実施した。KR11-01とKR11-05航海では同一測線で3つの断面を取得することができ、海洋中の構造変化を捉えることができた。この航海では初めてMCS探査中に1ヶ所でXCTD観測に成功し、XCTDとMCS断面の対比が可能となった。

<H23年度>

・KR11-09航海(2011年10月)従来より高解像可能なMCSシステム(2008)が導入されて初めて南海トラフでMCS探査を実施したため、黒潮に関連した海洋微細構造イメージングを行うためあわせてXBT/XCTD観測を実施した。

・KY12-02航海(2012年2月)新しく導入した高周波エアガンを用いた可搬式MCSシステムを利用した海洋微細構造イメージングを試みるため、南海トラフにおけるMCS探査にあわせXCTD観測を実施した。

② 海底下構造探査のために取得されたデータから海洋物理学的な情報を引き出すために特に問題となる2点について検討を行った。1つは海中音速分布の問題で、鮮明なイメージを得るには例え1点でも数点でも海中温度(+塩分)の鉛直プロファイルの存在が必須であることを示した。もう1つは発振源のショット間隔が短くすると水平スタッキングの効果を越えて海中の残響ノイズが増加しイメージの鮮明度の悪化につながる問題である。この問題に対してはプレスタックマイグレーションを施すことが有効であることを示した。更に同一測線上で条件の異なる発振源と受信

源を用いて複数回の地震探査が行われた結果を比較することにより、どのような解析をすればより鮮明な海洋反射構造イメージが得られるかを明らかにした。

③ こうしたデータ処理技術を用いて北海道沖で水平直径 250km にも及ぶ巨大な黒潮暖水隕リング (WCR) の内部構造イメージを得た。数日を置いて得られたイメージとの比較からこの WCR が回転していることが示唆される。伊豆・小笠原沖においては伊豆・小笠原海嶺に直交する断面に海嶺東側山腹で励起され東向き上方に伸びる M2 内部潮汐波のビームがイメージされ、並行する断面には南方に傾斜する黒潮 (西から東への流れ) のフロントがイメージされた。

④ 特に M2 内部潮汐波のビームについて詳しい解析を行った。波線理論を用いてビーム経路を計算すると深さ 600m 以上では観測と理論は良く一致するが、より浅い所では観測ビームは理論ビームよりもより水平近い角度で東に伸びていく。この傾向を黒潮流の影響と考え、黒潮の鉛直流速データを用いて波線を再計算すると観測ビームとの非常によい一致が得られた。また深さ 900m 以浅では観測ビームが上下非対称に大きく波打つのが見られ、内部潮汐波が大波化し碎波するまでになっていることが示唆される。内部潮汐波のエネルギー散逸機構として碎波及び critical layer absorption が寄与していることが推測される。

⑤ 数値実験により海底地形の凹凸上で深海乱流が強く励起される場所が、半日周期の内部潮汐によってファインスケールの鉛直ストレインが周期的に強められる場所と一致していることが明らかにし、深海乱流の励起に parametric subharmonic instability の機構が主要な役割を果たしていることを確認した。上述の数値実験と併せて、深海乱流の強度をファインスケールの鉛直ストレインを用いて予報する実験式を求めた。また、超深海における海底地形の凹凸から鉛直上方へ伝播する内部潮汐波と「深海の背景場に存在する内部波」との非線形相互作用に関する高精度の数値実験を行った。その結果、この非線形相互作用を通じて海底地形の凹凸上で励起される鉛直乱流拡散の強度は従来推察されてきたものよりも鉛直方向に急激に減衰すること、すなわち、境界乱流混合のホットスポットは従来推察されてきたものよりも海底地形凹凸の近傍に限定される形で存在していることを明らかにすることができた。

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 9 件)

① Sugioka, H., T. Okamoto, T. Nakamura,

Y. Ishihara, A. Ito, K. Obana, M. Kinoshita, K. Nakahigashi, M. Shinohara, Y. Fukao, Tsunamigenic potential of the shallowest subduction plate boundary inferred from seismic slip, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo1466, 1-3, 2012.

② Niwa, Y., and T. Hibiya, Estimation of baroclinic tide energy available for deep ocean mixing based on three-dimensional global numerical simulations, *Journal of Oceanography*, 67, 493-502, doi:1.1007/s10872-011-0052-1, 2011.

③ Iwamae, N., and T. Hibiya, Numerical study of tide-induced mixing over rough bathymetry in the abyssal ocean, *Journal of Oceanography*, 68, 195-203, doi:10.1007/s10872-001-0088-2, 2011.

④ Yamashita, M., K. Yokota, Y. Fukao, S. Kodaira, S. Miura, K. Katsumata, Seismic reflection imaging of a Warm Core Ring south of Hokkaido, *Exploration Geophysics*, 42, 18-24, doi:10.1071/EG11004, 2011.

⑤ Yokota, K., K. Katsumata, M. Yamashita, Y. Fukao, S. Kodaira, and S. Miura, Seismic Oceanography: physical oceanography using MCS data, *Oceanography in Japan*, 19, 6, 317-326, 2010.

⑥ Sugioka, H., Y. Fukao, and T. Kanazawa, Evidence for infragravity wave-tide resonance in deep oceans, *Nature com.*, 1, doi:10.1038/ncomms1083- 2010.

⑦ Minamo, S., T. Tsuji, T. Noguchi, K. Shiraishi, T. Matsuoka, Y. Fukao, and G. Moore, Estimation of detailed temperature distribution of sea water using seismic oceanography, *BUTSURI TANSA*, 62, 6, 509-520, 2010.

⑧ Fukao, Y., K. Nishida, and N. Kobayashi, Seafloor topography, ocean infragravity waves and background Love and Rayleigh Waves, *J. Geophys. Res.*, 115, B04302, doi:10.1029/2009JB006678, 2010.

⑨ Iwamae, N., T. Hibiya, and M. Watanabe, Numerical study of the bottom-intensified tidal mixing using an "eikonal approach", *J. Geophys. Res.*, 114, C05022, doi: 10.1029/2008JC005130, 2009.

〔学会発表〕 (計 10 件)

① Fukao, Y., T. Hori and S. Kodaira, The 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki Earthquake:

- Joint occurrence of tectonic stress-driven and lithostatic stress-driven slips along the plate boundary, American Geophysical Union, 2011年12月7日, Moscone Convention Center サンフランシスコ.
- ② 山下幹也・深尾良夫・勝又勝郎・海宝由佳・三浦誠一・小平秀一, 反射法地震探査を用いた小笠原海嶺周辺における海洋微細構造イメージング, 海洋調査技術学会, 2011年11月1日, 海上保安庁海洋情報部, 東京.
- ③ Fukao, Y. and VLF seminar group, Occurrence of very-low-frequency earthquakes along the decollement of the Nankai trough as evidenced by broadband ocean bottom seismometer observations, Asia Oceania Geosciences Society, 2011年8月10日, Taipei International Convention Center, 台北.
- ④ Hibiya, T., Assessment of fine-scale parameterization of diapycnal diffusivity near mixing hotspots, International Union of Geodesy and Geophysics, 2011年6月29日, Melbourne, Australia.
- ⑤ Hibiya, T., Y. Sugiyama, Y. Niwa, Numerically reproduced internal wave spectra in the deep ocean, International Union of Geodesy and Geophysics, 2011年6月28日, Melbourne, Australia.
- ⑥ 山下幹也, 横田華奈子, 深尾良夫, 小平秀一, 三浦誠一, 勝又勝郎, 反射法地震探査から得られた海洋微細構造の特徴, 物理探査学会第123回学術講演会, 2010年 9月29日, 東北大学
- ⑦ 山下幹也, 横田華奈子, 深尾良夫, 小平秀一, 三浦誠一, 勝又勝郎, 反射法地震探査の音源が海洋微細構造イメージングに与える影響, 物理探査学会第122回学術講演会, 2010年 5月31日, 早稲田大学
- ⑧ 横田華奈子, 勝又勝郎, 山下幹也, 日比谷紀之, 深尾良夫, 小平秀一, 三浦誠一, 海洋の中・深層における反射法地震データを用いたfine-scaleのストレインの見積もり, 2010年度日本海洋学会春季大会, 2010年 3月28日, 東京海洋大学品川キャンパス.
- ⑨ Yokota, K., K. Katsumata, T. Hibiya, M. Yamashita, Y. Fukao, S. Kodaira, and S. Miura, Fine-scale strain distribution estimated by Multi-Channel Seismic data, 2010 Ocean Sciences Meeting, 2010年 2月

24日, オレゴン学会センター, ポートランド, アメリカ合衆国

- ⑩ Hibiya, T., M. Nagasawa, and Y. Niwa, Theoretical and observational studies of the global distribution of diapycnal diffusivity in the deep ocean, The 15th Pacific Asian Marginal Seas (PAMS) Meeting, 2009年 4月24日, ノボテルアンバサダーホテル, 釜山, 韓国.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

深尾 良夫 (FUKAO YOSHIO)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球ダイナミクス領域・チームリーダー
研究者番号: 10022708

(2) 研究分担者

日比谷 紀之 (HIBIYA NORIUKI)
東京大学・理学研究科・教授
研究者番号: 80192714

(3) 連携研究者

山下幹也 (YAMASITA MIKIYA)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球ダイナミクス領域・技術研究副主任
研究者番号: 00415978

勝又勝郎 (KATSUMATA KATSURO)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球ダイナミクス領域・主任研究員
研究者番号: 80450774

三浦誠一 (MIURA SEIICHI)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球ダイナミクス領域・チームリーダー
研究者番号: 00371724

小平秀一 (KODAIRA SHUICHI)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球ダイナミクス領域・チームリーダー
研究者番号: 80250421

横田華奈子 (YOKOTA KANAKO)
大成建設株式会社
研究者番号: 00553083