

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2012～2016

課題番号：24121002

研究課題名(和文) 海洋物理構造からの新海洋区系と流動

研究課題名(英文) New ocean ecological provinces from physics

研究代表者

伊藤 幸彦 (Itoh, Sachihiko)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：80345058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 44,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、モード水や中規模渦等の海洋物理過程の分布域が新しい海洋区系として区分されるという仮説に基づき、これを実証するために観測と既往資料の解析により物理構造を精査し、モデルによって生態系への影響を評価した。

作業仮説に関わる事例として海域ごとの観測および既往資料解析を進め、得られた結果を検証するための生態系モデル計算を行い、またこれらの結果に基づいて海洋物理過程に基づく海洋区系の提案を行った。この物理過程に基づく海洋区は、クロロフィルa・栄養塩ベースの区系と良い対応関係を示した。以上のことから、本研究により物理的側面からの新しい海洋像と、生態系諸過程とのリンケージが示されたと評価された。

研究成果の概要(英文)：The present study investigated the physical structure of the global ocean through observation and data analysis, and evaluate their impacts on ecosystems using numerical models, based on an assumption that the mode waters and mesoscale eddies distinguish marine biogeography. Observations and data analyses especially focused on the western North Pacific, and ecosystem models are used to examine and interpret the results derived from the observations and the data analyses. New ocean provinces were then proposed based on physical oceanography, which clearly corresponds to provinces defined through chlorophyll a and nutrient concentrations. In conclusion, the present study contributed to present a new ocean paradigm from the physical aspect and the linkage between the physical and ecosystem processes.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海洋物理 中規模渦 モード水 栄養塩供給

1. 研究開始当初の背景

海洋の物理構造は、太陽放射や大陸配置の不均一性、およびそれらに伴う大気の変動により、空間的に大きな差異を呈する。低緯度域の貿易風（北半球で北東風、南半球で南東風）、中緯度域の偏西風（西風）、高緯度域の極東風（東風）に駆動される風成海洋循環は、日射の南北勾配や大陸の存在と相まって、大洋を南北方向には熱帯、亜熱帯、亜寒帯、極域に区分し、また西部に強流帯（西岸境界流）、東部に湧昇帯を形成する。このような物理的平均場は、栄養塩類や生物相を水平的に循環させ、また海面混合層や密度躍層の季節的な変動を介して生態系諸過程にも直接的な影響がある。このため、海盆スケールの海流系（例えば北太平洋亜熱帯域を時計回りに循環する亜熱帯循環）は、生元素と生物相の分布および一次生産の季節変動に基づいた古典的海洋区分の基礎となってきた。

近年、物理観測網とシミュレーション技術の発展によって、上記の物理的平均場に見出される循環系より時空間スケールの小さい現象が熱や物質の輸送に本質的な役割を果たしていること、またそれらの存在頻度が海盆スケールで見て一様ではないことが明らかになってきた。例えば、北大西洋亜熱帯循環の 18°C 水に代表されるモード水は、冬季の海面にできる深い混合層が春季以降に亜表層に沈み込んだものである。このモード水が熱や二酸化炭素等の溶存気体、陸域から大気を経由して供給されたダスト、さらには層の厚さそのものを水平・鉛直的に輸送することで、表層の生物生産を含め海盆スケール循環系内の物質循環に海域差をもたらしていることが最近の観測・モデル研究から示唆されている。

また、海洋には水平スケール数十～百 km 程度の中規模渦が数多く存在する。中規模渦の流動に伴って生じる水平的な混合は、熱や物質の輸送過程として重要であり、また渦流が強ければ中心部に水塊を保持する傾向が強くなり、渦の移動が直接的に熱や物質、生物相を輸送する。さらには、中規模渦の発達・減衰や、風との相互作用過程で生じる鉛直流が、栄養塩の鉛直輸送を通して生物生産に重要な役割を果たしていることが観測から示唆されている。

モード水や中規模渦は、それぞれ固有の水温・塩分特性を有し、また栄養塩類や浮遊生物を水平的・鉛直的に輸送する。従って、それらの分布や出現頻度が海盆スケールで見ても一様ではないことは、分布域/高出現頻度域内外で物質循環過程が異なることを示唆する。ところが、モード水や中規模渦の分布や変動特性、空間構造については、衛星による海面高度の動態、個別の Argo フロートによる観測、限定された海域での船舶観測結果はあるものの、海盆以上のスケールで観測が実施されたことは本研究以前にはない。また、生物生産の様式に強く関係する鉛直混合

強度については、直接観測が極めて限られており、空間分布や物理過程そのものに不明な点が多い。このため、中規模現象分布の偏在性が物質循環・生態系諸過程へ影響を及ぼしていることは想定されるものの、定量的な評価はなされていなかった。

2. 研究の目的

そこで本研究計画班では、「モード水形成、中規模渦等の海洋物理過程が特異な生物・化学過程を励起し、その分布域が新しい区系として明瞭に区分される」という作業仮説を立て、(1)現場観測、(2)既往データの解析、(3)生態系モデリングの3つのアプローチによりこれを実証した。

3. 研究の方法

物理観測を実施するモデル海域として、中規模渦が多く存在し中央モード水形成・変質が生じているとされる西部北太平洋の黒潮・親潮域に焦点をあてた。渦の変動を捉える高頻度/高解像度観測により、この海域の中規模渦・モード水内外の物理・化学・生物過程の連関を精査し、得られた知見の普遍性/特異性を既往資料の解析と生態系モデルにより検討した。また、2013、2014 年度に白鳳丸により実施される太平洋南北横断観測では、高解像度の物理観測を通して太平洋の海洋物理構造およびそれに伴う生態系区分を検討、物理観測結果の提供を通して他班と連携し、最終的に海洋区系の提案を行った。

4. 研究成果

本研究計画班は、「モード水形成、中規模渦等の海洋物理過程が特異な生物・化学過程を励起し、その分布域が新しい区系として明瞭に区分される」という作業仮説を検証しつつ、新しい海洋区系を提案することが目的であった。黒潮・親潮海域の中規模渦、混合層発達過程に伴って形成される各種モード水を事例とした観測・生態系モデリング・既往データ解析による過程研究から、クロロフィル *a* 濃度に指標される植物プランクトン分布、栄養塩輸送、生物生産過程への役割を解明したほか、他の研究項目と連携して実施した太平洋縦断航海において混合層と中規模渦の広域的な分布とクロロフィル *a* 濃度との対応を明らかにするなど、作業仮説は明快に支持された。

過程研究から得た知見に基づき、中規模渦、モード水形成過程を含む海洋物理過程が栄養塩輸送に果たす役割を指標化し、太平洋を対象とした新しい海洋区系を提案した。さらに、生元素循環および生態系の長期変動解明を担当する A02-3 班と連携のもと、海洋物理過程に基づく区系をクロロフィル *a*・栄養塩ベースの区系と比較・照合しつつ、提案区系を全球に拡張した。以上のように、当初の目的は、観測とモデリング、データ解析による作業仮説仮説の検証と、物理過程に基づく太

平洋新海洋区系の提案で達成され、さらに物理過程と生物地球化学過程をつなぐ全球区系の提案まで達することができた。

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 38 件)

- [1] Ishizu, M., S. Itoh, K. Tanaka, and K. Komatsu (2017), Influence of the Oyashio Current and Tsugaru Warm Current on the circulation and water properties of Otsuchi Bay, Japan, *Journal of Oceanography*, 73(1), 115-131, doi:10.1007/s10872-016-0383-z. (査読有)
- [2] Kouketsu, S., S. Osafune, Y. Kumamoto, and H. Uchida (2017), Eastward salinity anomaly propagation in the intermediate layer of the North Pacific, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 122(2), 1590-1607, doi:10.1002/2016jc012118. (査読有)
- [3] Kuroda, H., T. Wagawa, S. Kakehi, Y. Shimizu, A. Kusaka, T. Okunishi, D. Hasegawa, and S.-i. Ito (2017), Long-term mean and seasonal variation of altimetry-derived Oyashio transport across the A-line off the southeastern coast of Hokkaido, Japan, *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 121, 95-109, doi:10.1016/j.dsr.2016.12.006. (査読有)
- [4] Sakamoto, T. T., L. S. Urakawa, H. Hasumi, M. Ishizu, S. Itoh, T. Komatsu, and K. Tanaka (2017), Numerical simulation of Pacific water intrusions into Otsuchi Bay, northeast of Japan, with a nested-grid OGCM, *Journal of Oceanography*, 73(1), 39-54, doi:10.1007/s10872-015-0344-y. (査読有)
- [5] Tanaka, K., K. Komatsu, S. Itoh, D. Yanagimoto, M. Ishizu, H. Hasumi, T. T. Sakamoto, S. Urakawa, and Y. Michida (2017), Baroclinic circulation and its high frequency variability in Otsuchi Bay on the Sanriku ria coast, Japan, *Journal of Oceanography*, 73(1), 25-38, doi:10.1007/s10872-015-0338-9. (査読有)
- [6] Inoue, R., V. Faure, and S. Kouketsu (2016), Float observations of an anticyclonic eddy off Hokkaido, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 121(8), 6103-6120, doi:10.1002/2016jc011698. (査読有)
- [7] Inoue, R., M. C. Honda, T. Fujiki, K. Matsumoto, S. Kouketsu, T. Suga, and T. Saino (2016), Western North Pacific Integrated Physical-Biogeochemical Ocean Observation Experiment (INBOX): Part 2. Biogeochemical responses to eddies and typhoons revealed from the S1 mooring and shipboard measurements, *Journal of Marine Research*, 74(2), 71-99. (査読有)
- [8] Inoue, R., and S. Kouketsu (2016), Physical oceanographic conditions around the S1 mooring site, *Journal of Oceanography*, 72(3), 453-464, doi:10.1007/s10872-015-0342-0. (査読有)
- [9] Inoue, R., T. Suga, S. Kouketsu, T. Kita, S. Hosoda, T. Kobayashi, K. Sato, H. Nakajima, and T. Kawano (2016), Western North Pacific Integrated Physical-Biogeochemical Ocean Observation Experiment (INBOX): Part 1. Specifications and chronology of the S1-INBOX floats, *Journal of Marine Research*, 74(2), 43-69. (査読有)
- [10] Itoh, S., H. Kaneko, M. Ishizu, D. Yanagimoto, T. Okunishi, H. Nishigaki, and K. Tanaka (2016), Fine-scale structure and mixing across the front between the Tsugaru Warm and Oyashio Currents in summer along the Sanriku Coast, east of Japan, *Journal of Oceanography*, 72(1), 23-37, doi:10.1007/s10872-015-0320-6. (査読有)
- [11] Itoh, S., A. Kasai, A. Takeshige, K. Zenimoto, S. Kimura, K. W. Suzuki, Y. Miyake, T. Funahashi, Y. Yamashita, and Y. Watanabe (2016), Circulation and haline structure of a microtidal bay in the Sea of Japan influenced by the winter monsoon and the Tsushima Warm Current, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 121(8), 6331-6350, doi:10.1002/2015jc011441. (査読有)
- [12] Kouketsu, S., R. Inoue, and T. Suga (2016), Western North Pacific Integrated Physical-Biogeochemical Ocean Observation Experiment (INBOX): Part 3. Mesoscale variability of dissolved oxygen concentrations observed by multiple floats during S1-INBOX, *Journal of Marine Research*, 74(2), 101-131. (査読有)

- [13] Kouketsu, S., H. Kaneko, T. Okunishi, K. Sasaoka, S. Itoh, R. Inoue, and H. Ueno (2016), Mesoscale eddy effects on temporal variability of surface chlorophyll a in the Kuroshio Extension, *Journal of Oceanography*, 72(3), 439-451, doi:10.1007/s10872-015-0286-4. (査読有)
- [14] Takasuka, A., K. Nishikawa, H. Kuroda, T. Okunishi, Y. Shimizu, H. Sakaji, S.-I. Ito, T. Tokai, and Y. Oozeki (2016), Growth variability of Pacific saury *Cololabis saira* larvae under contrasting environments across the Kuroshio axis: survival potential of minority versus majority, *Fisheries Oceanography*, 25(4), 390-406, doi:10.1111/fog.12160. (査読有)
- [15] Doi, T., S. Osafune, N. Sugiura, S. Kouketsu, A. Murata, S. Masuda, and T. Toyoda (2015), Multidecadal change in the dissolved inorganic carbon in a long-term ocean state estimation, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(4), 1885-1900, doi:10.1002/2015ms000462. (査読有)
- [16] Itoh, S., I. Yasuda, H. Saito, A. Tsuda, and K. Komatsu (2015), Mixed layer depth and chlorophyll a: Profiling float observations in the Kuroshio-Oyashio Extension region, *Journal of Marine Systems*, 151, 1-14, doi:10.1016/j.jmarsys.2015.06.004. (査読有)
- [17] Kaneko, H., S. Itoh, S. Kouketsu, T. Okunishi, S. Hosoda, and T. Suga (2015), Evolution and modulation of a poleward-propagating anticyclonic eddy along the Japan and Kuril-Kamchatka trenches, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 120(6), 4418-4440, doi:10.1002/2014jc010693. (査読有)
- [18] Miyake, Y., S. Kimura, S. Itoh, S. Chow, K. Murakami, S. Katayama, A. Takeshige, and H. Nakata (2015), Roles of vertical behavior in the open-ocean migration of teleplanic larvae: a modeling approach to the larval transport of Japanese spiny lobster, *Marine Ecology Progress Series*, 539, 93-109, doi:10.3354/meps11499. (査読有)
- [19] Oozeki, Y., T. Okunishi, A. Takasuka, and D. Ambe (2015), Variability in transport processes of Pacific saury *Cololabis saira* larvae leading to their broad dispersal: Implications for their ecological role in the western North Pacific, *Progress in Oceanography*, 138, 448-458, doi:10.1016/j.pocean.2014.05.011. (査読有)
- [20] Toyoda, T., et al. (S. Kouketsu, 15名中 10 番目) (2015), An improved simulation of the deep Pacific Ocean using optimally estimated vertical diffusivity based on the Green's function method, *Geophysical Research Letters*, 42(22), 9916-9924, doi:10.1002/2015gl065940. (査読有)
- [21] Belkin, I. M., et al. (S. Itoh, 15名中 11 番目) (2014), Fronts, fish, and predators, *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography*, 107, 1-2, doi:10.1016/j.dsr2.2014.07.009. (査読有)
- [22] Boldt, J. L., R. Martone, J. Samhuri, R. I. Perry, S. Itoh, I. K. Chung, M. Takahashi, and N. Yoshle (2014), Developing Ecosystem Indicators for Responses to Multiple Stressors, *Oceanography*, 27(4), 116-133, doi:10.5670/oceanog.2014.91. (査読有)
- [23] Ito, S.-i., T. Okunishi, M. J. Kishi, and M. Wang (2013), Modelling ecological responses of Pacific saury (*Cololabis saira*) to future climate change and its uncertainty, *ICES Journal of Marine Science*, 70(5), 980-990, doi:10.1093/icesjms/fst089. (査読有)
- [24] Itoh, S., Y. Tanaka, S. Osafune, I. Yasuda, M. Yagi, H. Kaneko, S. Konda, J. Nishioka, and Y. N. Volkov (2014), Direct breaking of large-amplitude internal waves in the Urup Strait, *Progress in Oceanography*, 126, 109-120, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.014. (査読有)
- [25] Itoh, S., I. Yasuda, H. Ueno, T. Suga, and S. Kakehi (2014), Regeneration of a warm anticyclonic ring by cold water masses within the western subarctic gyre of the North Pacific, *Journal of Oceanography*, 70(3), 211-223, doi:10.1007/s10872-014-0225-9. (査読有)
- [26] Kouketsu, S., A. Murata, and T. Doi (2013), Decadal changes in dissolved inorganic carbon in the Pacific Ocean, *Global Biogeochemical Cycles*, 27(1), 65-76, doi:10.1029/2012gb004413. (査読有)
- [27] Kouketsu, S., and A. M. Murata (2014), Detecting decadal scale increases in

- anthropogenic CO₂ in the ocean, *Geophysical Research Letters*, 41(13), 4594-4600, doi:10.1002/2014gl060516. (査読有)
- [28] Kumamoto, Y., M. Aoyama, Y. Hamajima, T. Aono, S. Kouketsu, A. Murata, and T. Kawano (2014), Southward spreading of the Fukushima-derived radiocesium across the Kuroshio Extension in the North Pacific, *Scientific Reports*, 4, doi:10.1038/srep04276. (査読有)
- [29] Oka, E., K. Uehara, T. Nakano, T. Suga, D. Yanagimoto, S. Kouketsu, S. Itoh, S. Katsura, and L. D. Talley (2014), Synoptic observation of Central Mode Water in its formation region in spring 2003, *Journal of Oceanography*, 70(6), 521-534, doi:10.1007/s10872-014-0248-2. (査読有)
- [30] Takasuka, A., H. Kuroda, T. Okunishi, Y. Shimizu, Y. Hirota, H. Kubota, H. Sakaji, R. Kimura, S.-I. Ito, and Y. Oozeki (2014), Occurrence and density of Pacific saury *Cololabis saira* larvae and juveniles in relation to environmental factors during the winter spawning season in the Kuroshio Current system, *Fisheries Oceanography*, 23(4), 304-321, doi:10.1111/fog.12065. (査読有)
- [31] Nishikawa, H., I. Yasuda, S. Itoh, K. Komatsu, H. Sasaki, Y. Sasai, and Y. Oozeki (2013), Transport and survival of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) eggs and larvae via particle-tracking experiments, *Fisheries Oceanography*, 22(6), 509-522, doi:10.1111/fog.12041. (査読有)
- [32] Kaneko, H., I. Yasuda, K. Komatsu, and S. Itoh (2013), Observations of vertical turbulent nitrate flux across the Kuroshio, *Geophysical Research Letters*, 40(12), 3123-3127, doi:10.1002/grl.50613. (査読有)
- [33] Kaneko, H., I. Yasuda, K. Komatsu, and S. Itoh (2012), Observations of the structure of turbulent mixing across the Kuroshio, *Geophysical Research Letters*, 39, doi:10.1029/2012gl052419. (査読有)
- [34] Kouketsu, S., H. Tomita, E. Oka, S. Hosoda, T. Kobayashi, and K. Sato (2012), The role of meso-scale eddies in mixed layer deepening and mode water formation in the western North Pacific, *Journal of Oceanography*, 68(1), 63-77, doi:10.1007/s10872-011-0049-9. (査読有)
- [35] Oka, E., B. Qiu, S. Kouketsu, K. Uehara, and T. Suga (2012), Decadal seesaw of the Central and Subtropical Mode Water formation associated with the Kuroshio Extension variability, *Journal of Oceanography*, 68(2), 355-360, doi:10.1007/s10872-011-0098-0. (査読有)
- [36] Okunishi, T., et al. (2012), A modeling approach to evaluate growth and movement for recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western Pacific, *Fisheries Oceanography*, 21(1), 44-57, doi:10.1111/j.1365-2419.2011.00608.x. (査読有)
- [37] Okunishi, T., S.-i. Ito, T. Hashioka, T. T. Sakamoto, N. Yoshie, H. Sumata, Y. Yara, N. Okada, and Y. Yamanaka (2012), Impacts of climate change on growth, migration and recruitment success of Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western North Pacific, *Climatic Change*, 115(3-4), 485-503, doi:10.1007/s10584-012-0484-7. (査読有)
- [38] Ueno, H., I. Yasuda, S. Itoh, H. Onishi, Y. Hiroe, T. Suga, and E. Oka (2012), Modification of a Kenai eddy along the Alaskan Stream, *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 117, doi:10.1029/2011jc007506. (査読有)
- [学会発表](計 10 件)
- [1] Kouketsu, S., Changes in salinity and nutrients along 47°N in the North Pacific, CLIVAR 2016, Sep 15, 2016, Qingdao (China)
- [2] 金子 仁, 2000年代のマサバ資源量に関わる黒潮・親潮・混合水域の環境変動, 日本海洋学会 2015年度秋季大会, 2016年9月12日, 愛媛大学(愛媛県・松山市)
- [3] Kouketsu, S, Decadal changes in dissolved inorganic carbon, IAHS - IAPSO - IASPEI Joint Assembly Symposium Knowledge for the
- [4] Future, 2013年07月25日, Gothenburg (Sweden)
- [5] 金子仁, 釧路沖を北上する高気圧渦の内部構造と伝播特性, 日本海洋学会 2015年度秋季大会, 2015年09月28日, 愛媛大学(愛媛県・松山市)
- [6] Kaneko, H., Evolution and modulation of a poleward-propagating anticyclonic eddy along the Japan and Kuril-Kamchatka trenches, Ocean

Sciences Meeting 2016, 2016 年 02 月 22 日, New Orleans (USA)

- [7] 奥西 武, 黒潮続流南縁における中規模渦周辺の硝酸塩輸送過程, 日本海洋学会 2015 年度秋季大会, 2015 年 9 月 28 日, 愛媛大学 (愛媛県・松山市)
- [8] Kouketsu, S., Decadal changes along 47°N based on hydrographic observations, GAIC 20156, 2015 年 9 月 15 日, Galway (Ireland)
- [9] Itoh, S., Misc layer depth and chlorophyll a, PICES2015, 2015 年 10 月 20 日, Qingdao (China)
- [10] Itoh, S., Mesoscale eddies and mode waters characterize new ocean ecological provinces, NEOPS symposium, 2015 年 12 月 3 日, 東京大学 (東京都・文京区)

〔図書〕(計 1 件)

- [1] 伊藤幸彦 (2013), 黒潮親潮移行域における渦構造と生態系, 水産海洋学入門 第 4.5 節, 130-135, 講談社., pp.319

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 幸彦 (ITO, Sachihiko)
東京大学・大気海洋研究所・准教授
研究者番号: 80345058

(2) 研究分担者

纈纈 慎也 (KOUKETSU, Shinya)
海洋研究開発機構・主任研究員
研究者番号: 30421887

(3) 研究分担者

奥西 武 (OKUNISHI, Takeshi)
水産研究・教育機構・東北区水産研究所・グループ長
研究者番号: 60374576

(3) 連携研究者

金子 仁 (KANEKO, Hitoshi)
水産研究・教育機構・東北区水産研究所・研究支援職員
研究者番号: 30772793