

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：82706

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22106007

研究課題名（和文）黒潮・親潮続流域における相互作用の現場観測

研究課題名（英文）In situ observations of air-sea interaction in the Kuroshio-Oyashio Extension region

研究代表者

川合 義美（KAWAI, Yoshimi）

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・主任研究員

研究者番号：40374897

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 181,300,000円

研究成果の概要（和文）：黒潮・親潮続流域において水温前線が大気を与える影響、及び海洋前線や水塊の形成・維持過程を現場観測を基に明らかにすることを目的として、船舶による大気・海洋集中観測や係留ブイ観測を実施した。初夏（梅雨期）の黒潮続流前線や晩冬期の亜寒帯前線が大気境界層や下層雲の高度差、下層の気圧勾配を生じさせることを示した。準定常ジェットによる亜寒帯への水塊輸送や表層栄養塩の変動を明らかにした。また、黒潮続流南側における冬季混合層の短い時間スケールでの時間発展や、サブメソスケールでの亜寒帯系水塊の南方への輸送過程を観測で捉えた。

研究成果の概要（英文）：Intensive atmosphere-ocean observations were conducted in the Kuroshio-Oyashio Extension region using research vessels and a moored buoy in order to clarify impacts of the sea surface temperature fronts on the atmosphere, and formation and maintenance processes of the oceanic fronts and water masses.

We showed that both the Kuroshio Extension front in early summer (Baiu/Meiyu season) and the Subarctic front in late winter caused differences in height of the atmospheric boundary layer and low-level clouds across the fronts, as well as cross-frontal pressure gradients. We also clarified variations of water mass transport and nutrients in the surface layer caused by the quasi-stationary jet. Our observations also captured temporal changes of the wintertime ocean mixed layer on a short time scale, and transportation of subarctic water masses to the south of the Kuroshio Extension.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海洋物理・陸水学 自然現象観測・予測 気象学 気候変動 大気海洋相互作用 海面熱フラックス  
水温フロント メソスケール

### 1. 研究開始当初の背景

黒潮統流やメキシコ湾流のような西岸境界流、あるいは中規模渦等に対応した局在化した海洋の熱源に対する中緯度大気の応答が、2000年代に入り衛星観測や高解像度数値モデルにより徐々に明らかになってきた。中緯度海洋の気候変動に対する役割を解明する上でこのテーマは突破口となるキーの一つであり国際的に注目を集めているが、まだ端緒についたばかりで未解明の部分が多い。その理由の一つとして現場観測が決定的に欠如していることが挙げられ、観測の大幅な強化が急務となっている。

研究代表者・分担者のこれまでの研究により、黒潮等の暖流から放出される熱が中緯度の大気場に重要な影響を与え得ることや、黒潮統流の水温前線は大気境界層やその上層にまで影響を及ぼしていることなどが示されている。これらは黒潮・親潮統流域が"気候のhot spot"であり、ここでの大気海洋間熱交換が気候変動を解明する重要なキーであることを示している。しかしまだ限られた観測データや数値モデルの解析に留まっており、例えば水温前線に伴う小さいスケールでの海面気圧の応答や、海洋の水塊形成・輸送過程などはまだよく分かっていない。

中緯度域の西岸境界流周辺における海洋循環と海面熱フラックスに着目した集中観測研究は海外ですでにいくつか行われている。例えば、CLIVAR (気候変動及び予測可能性研究計画) に支持される形で北西大西洋では CLIMODE (CLIVAR MOde water Dynamics Experiment) と呼ばれる集中観測プログラムが2009年にかけて実施され、また南西太平洋でも SPICE (Southwest Pacific ocean circulation and Climate Experiment) が進行中である。世界で最も海面熱交換量の大きい"気候のhot spot"を含む北西太平洋域は日本が中心となって研究を推進することが国際的にも強く求められている。

### 2. 研究の目的

本課題は日本東方の黒潮・親潮統流域を対象として、主にメソ・サブメソスケールでの大気と海洋の相互作用過程を現場観測で捉え、また、これが気候場に与える影響等を、モデル研究を実施する領域内の他班と連携しながら明らかにすることを目的とする。具体的には、水温前線が雲や大気に与える影響、及び海洋前線や水塊の形成・維持過程を詳細に把握する。

### 3. 研究の方法

(1) 黒潮統流及び亜寒帯の水温前線周辺で複数の船舶による大気・海洋観測を実施し、水温前線に対する大気応答の詳細を明らかにする。更に領域内での連携により、取得された観測データと数値モデルを用いて当該海域の観測の有無が予報に与える影響等を明らかにする。

(2) 黒潮・親潮統流域に係留していた2台の係留ブイに加え、平成24年度から25年度にかけての集中観測期間中にブイを1台追加し計3台での連続気象・海洋観測を実施する。これにより水温前線周辺での海上気温、海面気圧等の変動を調べ、また、人工衛星データの検証を行う。更に水温前線付近における水塊の形成・変質過程を調べる。

(3) 船舶、水中グライダー及びアルゴフロートを用いて前線付近の海洋微細構造を観測し、前線の形成・維持過程や、大気強制に対する海洋の応答、海洋物質循環への影響等を調査する。

### 4. 研究成果

(1) 黒潮統流の水温前線が初夏の下層雲や気圧場に与える影響等を明らかにすることを目的として、2012年7月2~7日に黒潮統流を横切る東経143度線上で3隻の研究船による集中観測航海を実施した。3隻同時の観測により、大気下層及び海洋表層の南北構造とその時間変化の両方を捉えるという前例の無い観測に成功した。南寄りの風から北寄りの風が変わって約半日で下層雲高度に明瞭な南北コントラストが形成されること、北寄りの風の時にコントラストがより明瞭になること(図1)、水温前線の南北で下向き長波放射が平均で約20W/m<sup>2</sup>異なること、更に、初夏でも水温前線が水平気圧勾配を生じさせることなどを明らかにした。下層雲高度の南北変化が水温前線によるものであることは、数値モデルによる海面水温平滑化実験によりこれを裏付けた。

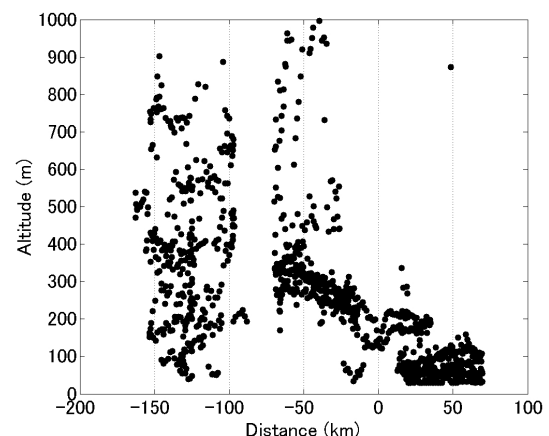


図1. 北寄りの風が吹いている時の雲底高度(5分平均値)の分布。7月2日03時~6日15時(日本時間)。横軸は水温前線を基準とした南北方向の距離(横軸、正は北)。

また、現実の海面水温勾配が一般に広く利用されている客観解析データと比べてかなりシャープであり、水温前線が数日程度の短い時間で南北に変位することを本観測で捉えた。高解像度海洋モデルおよび人工衛星観測を合わせた解析により、観測された前線の

変位は、黒潮続流の小蛇行が下流方向へ伝播することにより起こっていたこと、さらに、小蛇行の峰の西側では、蛇行に伴う非地衡的な慣性流により、黒潮続流の運ぶ暖水が、主水温躍層より上層で黒潮続流を離れて北側へ広がることを明らかにした。このように北側へ運ばれた暖水は、暖水渦や暖水ストリーマーに発達する事例が見られ、暖水渦や暖水ストリーマーの形成において、小蛇行に伴う慣性流が重要な役割を果たすことを示した。この海域の暖水渦は、海洋から大気へ放出される熱量の年々変動や海洋構造に大きな影響を及ぼしていることから、大気海洋相互作用の観点からも重要な成果と考えられる。

(2) 黒潮続流域に1年限定の予定で設置した係留ブイにより、亜熱帯モード水(深度200m)及びその下層(深度400、600m)の溶存酸素の定点連続データを取得した。これにより、亜熱帯モード水の夏季から冬季にかけての酸素の減少率を正確に評価することができ、また中規模渦の通過に伴う酸素の短時間スケール変動を捉えた。外洋における溶存酸素のこのような高時間分解能の定点連続観測データは世界的にもあまり例がなく非常に貴重である。

更に、海洋混合層が発達する冬季に、混合層下の酸素が混合層内より高くなる特異な現象を捉えた。衛星データや近隣の船舶観測データと併せた解析により、この高酸素濃度のシグナルは低温・低塩・高酸素の性質を持つ黒潮続流北側の表層水塊がフィラメント状となり黒潮続流を横切りながら沈み込んだものと推測された。亜寒帯域を含む黒潮続流の北で大気強制の影響を受けた表層水が亜熱帯域に輸送される過程の一端を明らかにしたものであり、サブメソスケールの水塊輸送過程が海盆スケールの物質輸送や大気海洋相互作用において果たす役割を今後解明するために重要な手掛かりが得られた。

(3) 準定常ジェットは亜寒帯域の水温前線形成や海洋生物資源に重要な意味を持つと考えられる。この準定常ジェットによる水塊輸送や表層栄養塩の変動を、複数年にわたる観測航海を行い、衛星、船舶、係留系、及び水中グライダーによる観測データで調べた。

準定常ジェットは黒潮続流から分岐して暖水を運ぶとともに、親潮が東に向きを変えて流れている亜寒帯海流と並走することで親潮域の栄養塩を取り込み、暖かく栄養塩に富んだ生物生産に最適な環境を構成し、北西太平洋沖合域に生物的ホットスポットを形成していることがわかった。東経147度以東ではジェットの流向は安定しているが、流速には10年スケールの変動が見られ、黒潮続流緯度(蛇行の強度を指標)と高い相関があり、生物生産にも10年スケール変動の影響を及ぼす可能性があることを示した。

(4) 亜寒帯の水温前線が下層大気に与える影響等を明らかにすることを目的として、2013年4月に学術研究船「白鳳丸」による亜寒帯前線域集中観測を実施した。GPSラジオゾンデで観測されたデータを冷水域(海面水温5)と暖水域(10 海面水温>5)に分けて平均すると、境界層で明瞭な差異があることが確認された。暖水側では冷水側に比べて境界層が高く風速が大きくなっていた(図2)。また海面近傍を除いて境界層内の相対湿度は暖水側が高かった。実際に水平方向の海面水温の変化に対応して境界層内の気温にも水平勾配が生じていたことや、暖水ストリーマーに大気が局所的に反応している様子も本観測で確認された。冬季亜寒帯域の水温前線を挟んだ大気の現場観測例は少なく、貴重な観測データが得られた。この観測結果は、高解像度の海面水温を与えた大気再解析データで亜寒帯水温前線に対する大気応答を示したMasunaga et al. (2015)と整合的であり、冬季の亜寒帯においても下層大気は海面水温に敏感に反応していることを明らかにした。

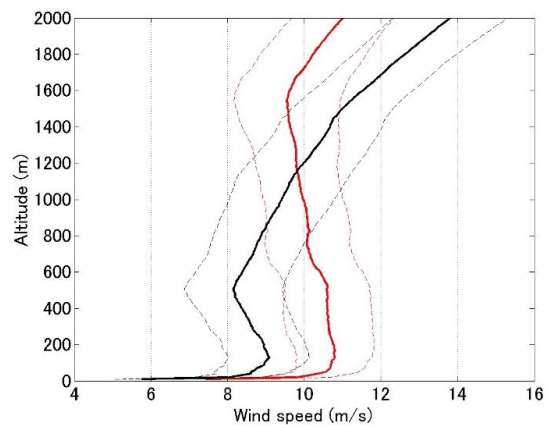


図2. 亜寒帯前線周辺において観測された風速の鉛直分布。赤線は海面水温が5~10の場合(サンプル52個)、黒線は5以下の場合(サンプル47個)の平均。破線は平均値の信頼区間を示す。

(5) 黒潮続流南側の亜熱帯モード水形成域において、冬季混合層の短い時間スケールでの時間発展を捉えるために、2014年2月21日から3月13日まで、「白鳳丸」による大気・海洋観測を行った。途中、低気圧の荒天により定点離脱を余儀なくされたものの、2月23日深夜から3月2日夕刻までの7日間は北緯32度・東経144度の定点における時系列観測をほぼ連続的に実施することができた。

観測からは、2月24日の1日間に移流により亜表層の水塊構造が入れ替わる様子、24日深夜と25日夕刻の強風によりmixing layer depthが数十mから一気に350mに増加する様子、3月1日には再成層化し、混合層が浅くなった様子などが捉えられた(図3)。今後は、1次元の熱収支解析やエネルギー収支解析を行うとともに、混合層深化・再成層化に伴う栄養塩濃度変化や表層生物生産の変化を含

め、統合的な解析を更に進める。

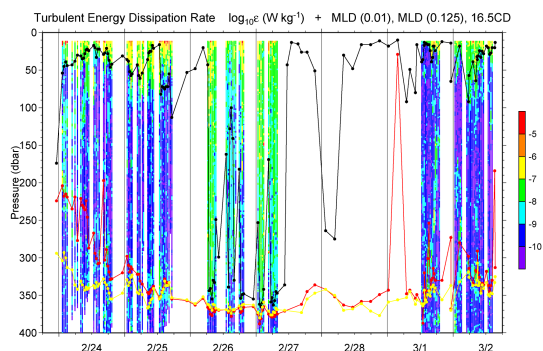


図 3. 乱流計 (Micro Structure Profiler) で測定された乱流エネルギー散逸率 (色)、密度 0.01 で定義された mixing layer depth (黒線)、密度 0.125 で定義された mixed layer depth (赤線) および 16.5 等温線深度 (黄線)。

#### 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 58 件)

Kawai, Y., 他 7 名, Marine atmospheric boundary layer and low-level cloud responses to the Kuroshio Extension front in the early summer of 2012: Three-vessel simultaneous observations and numerical simulations, *Journal of Oceanography*, 2015, 査読有, 印刷中, DOI:10.1007/s10872-014-0266-0

Enomoto, T., S. Yamane, and W. Ohfuchi, Simple sensitivity analysis using ensemble forecasts, *Journal of the Meteorological society of Japan*, 2015, 査読有, 93, 199-213, DOI:10.2151/jmsj.2015-011

Tomita, H., Y. Kawai, 他 3 名, Validation of AMSR2 sea surface wind and temperature over the Kuroshio Extension region, *SOLA*, 2015, 査読有, 11 巻, 43-47, DOI:10.2151/sola.2015-010

Tanimoto, Y., K. Shimoyama, and S. Mori, Continuous daily observation of the marine atmospheric boundary layer over the Kuroshio by a helicopter shuttle service, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 査読有, 2015, 32 巻, 3-21, DOI:10.1175/JTECH-D-14-00067.1

Oka E., K. Uehara, T. Nakano, T. Suga, 他 5 名, Synoptic observation of Central Mode Water in its formation

region in spring 2003, *Journal of Oceanography*, 査読有, 2014, 70 巻, 521-534, DOI:10.1007/s10872-014-0248-2

Nagano, A., K. Uehara, T. Suga, Y. Kawai, 他 2 名, Origin of near-surface high-salinity water observed in the Kuroshio Extension region, *Journal of Oceanography*, 査読有, 2014, 70 巻, 389-403, DOI:10.1007/s10872-014-0237-5

Kawai, Y., H. Tomita, M. F. Cronin, and N. A. Bond, Atmospheric pressure response to mesoscale sea surface temperature variations in the Kuroshio Extension: In situ evidence, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 査読有, 2014, 119 巻, 8015-8031, DOI:10.1002/2013JD021126

Wagawa, T., S. Ito, 他 3 名, Currents associated with the quasi-stationary jet separated from the Kuroshio Extension, *Journal of Physical Oceanography*, 査読有, 2014, 44, 1636-1653, DOI:10.1175/JPO-D-12-0192.1

Tomita, H., S.-P. Xie, H. Tokinaga, and Y. Kawai, Could response to the meandering Kuroshio Extension front, *Journal of Climate*, 査読有, 2013, 26 巻, 9393-9397, DOI:10.1175/JCLI-D-13-00133.1

Oka, E., B. Qiu, S. Kouketsu, K. Uehara, and T. Suga, Decadal seesaw of the Central and Subtropical Mode Water formation associated with the Kuroshio Extension variability, *Journal of Oceanography*, 査読有, 2012, 68 巻, 355-360, DOI:10.1007/s10872-011-0098-0

Kobashi, F., and S.-P. Xie, Interannual variability of the North Pacific Subtropical Countercurrent: Role of local ocean-atmosphere interaction, *Journal of Oceanography*, 査読有, 2012, 68 巻, 113-126, DOI:10.1007/s10872-011-0048-x

Tanimoto, Y., 他 3 名, Sea level pressure minimum along the Kuroshio and its extension, *Journal of Climate*, 査読有, 2011, 24 巻, 4419-4434, DOI:10.1175/2011JCLI4062.1

〔学会発表〕(計 110 件)

Ito, S., Regional models for projections of climate change impacts on small pelagic fishes in the western North Pacific, Third International Symposium "Effects of Climate Change on the World's Oceans", 2015 年 3 月 23 日, Santos (Brazil), 招待講演

Kawai, Y., 他 7 名, Response of low-level clouds to the Kuroshio Extension front in the early summer: Field measurements, 95th AMS Annual Meeting, 2015 年 1 月 5 日, Phoenix (U.S.A.)

Kobashi, F., Y. Onikata, N. Iwasaka, Y. Kawai, E. Oka, K. Uehara, S. Ito, M. Odamaki, and H. Sasaki, Intermittent displacement of the Kuroshio Extension front from the current axis revealed from simultaneous observations by three research vessels and an eddy-resolving ocean general circulation model, 2014 AGU Fall meeting, 2014 年 12 月 18 日, San Francisco (U.S.A.)

Suga, T., 他 2 名, Annual subduction of the North Pacific and its interannual variation, WCRP/CLIVAR Second International Symposium on Boundary Current Dynamics, 2013 年 7 月 9 日, Li Jiang (China), 招待講演

Ito, S., and T. Okunishi, How to model fish migration and distribution under future climate? Workshop on "Global assessment of the implications of climate change on the spatial distribution of fish and fisheries", 2013 年 5 月 22 日, St. Petersburg (Russia), 招待講演

伊藤進一、黒潮・親潮混合域の環境変動のメカニズムと魚類資源に及ぼす影響に関する研究、水産海洋学会創立 50 周年記念大会、2012 年 11 月 17 日、東京大学(東京都文京区)、招待講演

Vincent, F., and Y. Kawai, Ocean mixed layer heat budget east of Japan near the subarctic front, AOGS & AGU (WPGM) Joint Assembly, 2012 年 8 月 16 日, Singapore (Singapore)

谷本陽一、黒潮統流上における大気下層の調節過程、日本気象学会 2012 年春季大会専門分科会「東アジアモンスーンと黒潮」 - 中緯度大気海洋相互作用に着目した新たな研究のパラダイム、2012 年 5 月 26 日、エポカルつくば(茨城県つくば市)、招待講演

Ito, S., Climate induced fluctuation of Japanese sardine, its influence on marine ecosystem and human being, 2nd International Symposium: Effect of Climate Change on the World's Oceans, 2012 年 5 月 16 日, Yeosu (Korea), 招待講演

Kawai, Y., and H. Tomita, Low-level atmospheric response to the sea surface temperature front of the Kuroshio Extension, 2012 Ocean Sciences Meeting, 2012 年 2 月 20 日, Salt Lake City (U.S.A.)

Kobashi, F., Interannual variability of the North Pacific Subtropical Countercurrent: Role of local ocean-atmosphere interaction, 2011 AGU Fall meeting, 2011 年 12 月 8 日, San Francisco (U.S.A.), 招待講演

Ito, S., Modelling fish response to climate forcing, CMOS2011(Canadian Meteorological and Oceanographic Society), 2011 年 6 月 6 日, Victoria (Canada), 招待講演

Suga, T., Profiling floats as tools for biogeochemical and biological monitoring, PICES 2010, 2010 年 10 月 28 日, Portland (U.S.A.), 招待講演

〔図書〕(計 4 件)

吉崎正憲、野田彰、秋元肇、阿部彩子、大畑哲夫、金谷有剛、才野敏郎、佐久間弘文、鈴木力英、時岡達志、深澤理郎、村田昌彦、安成哲三、渡邊修一、相木秀則、川合義美、小池真、須賀利雄、永野憲、中村尚、美山透 他、図説地球環境の事典、朝倉書店、2013 年、392

Enomoto, T., et al., Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications (Vol. ), Springer, 2013 年, 509-526

須賀利雄、海はめぐる 人と生命を支える海の科学、地人書館、2012 年、41-60



谷本陽一、地球惑星科学入門、北海道大学出版会、2010年、323-333

〔その他〕

ホームページ

気候系の hot spot (領域全体の紹介)

<http://www.atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp/hotspot/>

JKEO プイウェブサイト

<http://www.jamstec.go.jp/iorgc/ocorp/kt-sfg/data/jkeo>

KY14-09「かいよう」航海日記

<http://ebcrpa.jamstec.go.jp/egcr/j/oal/2014/ky14-09.html>

白鳳丸 KH-13-3 航海ブログ

<http://ocg.aori.u-tokyo.ac.jp/member/eka/kh-13-3/index-jp.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川合 義美 (KAWAI, Yoshimi)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・主任研究員

研究者番号：40374897

### (2) 研究分担者

谷本 陽一 (TANIMOTO, Youichi)

北海道大学・地球環境科学研究科(研究院)・教授

研究者番号：00291568

伊藤 進一 (ITO, Shin-ichi)

東京大学・大気海洋研究所・教授

研究者番号：00371790

富田 裕之 (TOMITA, Hiroyuki)

名古屋大学・地球水循環研究センター・研究員

研究者番号：10435844

岡 英太郎 (OKA, Eitarou)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：60360749

須賀 利雄 (SUGA, Toshio)

東北大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70211977

小橋 史明 (KOBASHI, Fumiaki)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授

研究者番号：80377077

植原 量行 (UEHARA, Kazuyuki)

東海大学・海洋学部・教授

研究者番号：90371939

### (3) 連携研究者

永野 憲 (NAGANO, Akira)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・主任研究員

研究者番号：40421888

小林 大洋 (KOBAYASHI, Taiyo)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・主任技術研究員

研究者番号：10360752

榎本 剛 (ENOMOTO, Takeshi)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：10358765

黒田 寛 (KURODA, Hiroshi)

独立行政法人水産総合研究センター・北海道区水産研究所生産環境部・研究員

研究者番号：30531107

立花 義裕 (TACHIBANA, Yoshihiro)

三重大学・生物資源学研究所・教授

研究者番号：10276785

根田 昌典 (KONDA, Masanori)

京都大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10273434

### (4) 研究協力者

井上 龍一郎 (INOUE, Ryu-ichiro)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・主任研究員

Vincent Faure (FAURE, Vincent)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・ポストドクトラル研究員

茂木 耕作 (MOTEGI, Qoosaku)

独立行政法人海洋研究開発機構・大気海洋相互作用研究分野・研究員

谷口 京子 (TANIGUCHI, Kyoko)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球環境観測研究開発センター・研究技術専任スタッフ