

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

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：22106008

研究課題名（和文）大洋スケール大気海洋相互作用

研究課題名（英文）Basin scale atmosphere and ocean interaction

研究代表者

見延 庄士郎（Minobe, Shoshiro）

北海道大学・理学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：70219707

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 83,910,000円

研究成果の概要（和文）：中緯度海洋が大気の様々な現象に影響を与えていることを、数値計算とデータ解析を組み合わせ、北西太平洋上の梅雨明け、台風の経路と強度、ヨーロッパ・ブロッキングとそれに伴う異常低温、などについて発見した。高度10mでの海上表面風について、全球の主要な中緯度海流域で気圧調整メカニズムが働いていることを見出し、また時間平均場の海上表面風のメカニズムを同定する診断方法を開発して気圧調整メカニズムともう一つの重要なメカニズムである鉛直混合メカニズムが共存していることを初めて定量的に示した。また黒潮続流にjet-trappedロスビー波が生じていることを初めて観測から示し、その日本沿岸水位への影響を見出した。

研究成果の概要（英文）：By using numerical modelling and data analysis, we have discovered the mid-latitude ocean influences on a wide range of atmospheric phenomena, including termination of Baiu rain season over the northwestern North Pacific, the route and strength of tropical cyclones, Europe blocking and its impact on cold spells. We have found that the pressure adjustment mechanism works over major western boundary currents in the mid-latitudes globally. We have developed a new diagnostic method that enable us to determine mechanisms near surface (10 m altitude) winds for time-mean field, and have showed that both the pressure adjustment mechanism and the vertical mixing mechanism working but differently. Also, we have reported for the first time that observed decadal variability of the Kuroshio Extension is due to the jet-trapped Rossby wave, and that the decadal Kuroshio Extension changes impact Japanese coastal sea-level.

研究分野：気象学・海洋物理学

キーワード：大気海洋相互作用 黒潮続流 メキシコ湾流 梅雨明け 台風 ブロッキング 表面風速 jet-trapped ロスビー波

1. 研究開始当初の背景

我々が先導して、黒潮・黒潮続流およびメキシコ湾流などの大規模海流が、年平均または季節平均では自由対流圏にまで顕著な影響を与えていることが示されていた。海洋が自由対流圏に影響することは、社会生活にも重要な大気現象のほとんどは対流圏で生じるので、それらの大気現象にも海洋が影響する可能性を示すものであった。しかし、海洋が具体的にどの大気現象にどのように影響を及ぼすのかは分かっていなかった。

また海洋が大気に与える影響の中でも、高度 10 m の表面風速については、ある程度研究が進んでいた。これは 1999 年打ち上げの QuikSCAT 衛星によって、海上の表面風を高い空間解像度で観測することが可能となり、海洋の流れ、特に莫大な熱を低緯度から中緯度に運び黒潮やメキシコ湾流が、表面風に強く影響していることが明らかになったためである。しかし、そのメカニズムには気圧調整メカニズムと鉛直混合メカニズムという二つの仮説が提出されており、どちらがより妥当な仮説であるのかに議論が戦わされていた。

さらに大気にもまた海洋生態系にも重要な、黒潮続流の変動のメカニズムはいくつかの仮説が数値計算結果から提出されていたが、現実の黒潮続流の変動メカニズムは不明であった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、海洋が大気に及ぼす未知の影響を様々な大気現象について発見することと、すでに発見がなされていた現象についてはそのメカニズムを明らかにすることを主たる目的とした。またあわせて海流の変動特性とそのインパクトを、特に黒潮続流に注目して明らかにしようとした。

3. 研究の方法

研究は数値計算の実行および、大規模データの解析によって行った。

数値計算に用いたモデルは主として、地球シミュレータ用全球大気モデル AFES、同全球大気海洋結合モデル CFES、各種領域大気モデルである。いくつかの研究では、大気が海洋を感じる物理量である海洋表面水温を変化させた実験を行った。特に AFES では、緯度経度 0.5 度の格子解像度で、観測された海洋表面水温データで駆動する 20 年の数値積分と、黒潮・親潮を含む北西太平洋で平滑化した海洋表面水温データで駆動する 20 年の数値積分、およびメキシコ湾流を含む北大西洋で平滑化した海洋表面水温データで駆動する 20 年の数値積分を実行した。この解像度での 20 年以上の長期積分による平滑化実験は、海洋表面水温が大気の様々に側面に与える影響を明らかにする上で重要な研究データであり、海外の研究者にも我々のデータが活用されている。

データ解析では、高解像度の衛星データ、観測データを数値モデルに統合することで得られる現業解析・再解析データなどを駆使し、またこれらのデータと数値計算を組み合わせることで研究を行った。特に大気海洋相互作用のグローバル解析に使われたことがなかった、衛星搭載赤外サウンダのデータを解析するなど、国際的にも先端的なデータ解析を行った。

4. 研究成果

(1) 大気の大気現象への海洋の影響

北西太平洋の梅雨明けへの影響

北西太平洋上での梅雨明けに対して、黒潮・親潮続流に伴う海面水温前線がもたらす影響について、再解析データ JRA-25 と地球シミュレータ用全球大気モデル AFES、同全球大気海洋結合モデル CFES を用いて解析を行った。梅雨前線の上昇流を誘起する対流圏中層の西風ジェットに伴う暖気移流が海面水温前線の南側に位置する梅雨明け前は、暖かい海面から梅雨前線への水蒸気供給が多く、梅雨前線の降水帯が維持されるが、ジェットの北上と共に暖気移流帯が海面水温前線の北側に移動すると、海面からの水蒸気供給が急激に減少し、降水帯が衰退し梅雨明けがもたらされることを明らかにした(図 1)。この成果は研究開始当初には予想できなかったものである。

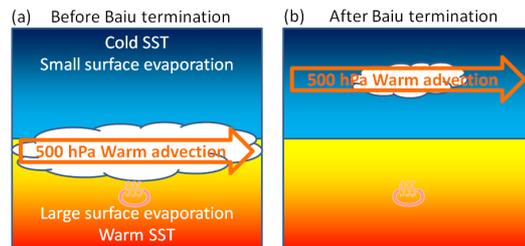


図 1. (a) 梅雨明け前、(b) 梅雨明け後の海面水温前線、梅雨前線、対流圏中層の暖気移流の模式図。(Kuwano-Yoshida, Taguchi & Xie, 2013)

台風経路への影響

北太平洋は熱帯低気圧活動がもっとも盛んな場所である。台風の経路は、転向せずに中国大陸へ上陸するものと、転向して日本列島に接近するものに大別される。台風は海洋から供給される水蒸気をエネルギー源としているために、海面水温の影響を大きく受け、台風の強度および経路が地球温暖化によってどのように変化するのかに国際的にも注目が高まっている。

そこで図 2 の外枠を計算領域として、領域モデル実験を実施した。海面水温に対する台風の応答を調べるため、海面水温を領域内で一様に 2K 上昇(下降)した暖水(冷水)実験も実施した。

図 2 は標準実験、暖水実験、および冷水実験における 2004 年 8 月 28 日に発生し日本に

大きな被害をもたらした台風 Songda (18号) の経路を示す。実験開始から3日程度はほぼ同じ台風経路であった。その後、実験によって経路は大きく異なっており、暖水実験では北上の時期が標準実験よりも早く、冷水実験では台風はそのまま西進して中国大陸へ上陸した。標準実験は観測における Songda と同様に日本の南西で転向し、日本に上陸した。台風を中心気圧低下は、暖水実験で最も大きく、冷水実験で最も小さかった。

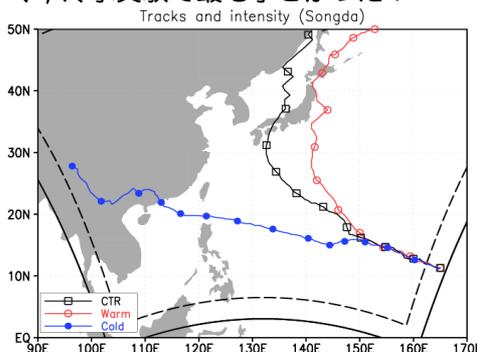


図 2. 領域モデルで計算された熱帯低気圧 Songda の中心位置。赤丸は暖水実験、青丸は冷水実験、および黒四角は標準実験である。実線枠はモデル境界を点線枠はモデル内部領域の境界を示す。(Katsube & Inatsu, 2016)

台風が暖水実験で強化されることは、海洋表面水温が高まった結果、海洋から台風に供給されるエネルギーが水蒸気を介して強まったと理解できる。経路が大きく変化した理由は、この強化された台風が作り出す大気循環が台風を動かしていることが、詳しい解析によって明らかになった。実験を行った他の台風についても、標準実験よりも暖水実験で北上が強まる傾向があり、これらの結果は地球温暖化によって台風が北上し日本に上陸する割合が高まることを示唆している。この成果は研究開始当初には予想できなかったものである。

ヨーロッパ・ブロッキングへの影響

ブロッキングとは偏西風帯において、高気圧が停滞する現象であり、しばしば異常気象の原因となる。このブロッキングに海洋表面水温が及ぼす影響を明らかにするために、大気大循環モデル AFES の標準実験と、北西大西洋域で海面水温を平滑化した実験を比較し、ヨーロッパ・ブロッキングに与える影響を調査した。この平滑化は、メキシコ湾流の影響を捉えるために行っている。標準実験は、平滑化した海洋表面水温を用いた実験よりも、より現実的なブロッキング現象の空間分布および頻度を再現した(図.3)。また標準実験の方が平滑化実験よりも、ブロッキング現象にともなうヨーロッパにおける気温の異常低温もよりよく表現した。これらの結果は

ヨーロッパ・ブロッキングには、メキシコ湾流が重要であることを示唆している。この成果は研究開始当初には予想できなかったものである。

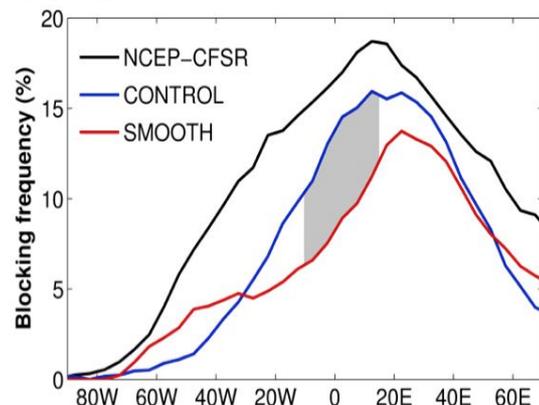


図 3. ヨーロッパ・ブロッキングの頻度。黒線は観測データ、青線は標準実験、赤線は北大西洋平滑化実験を示している。陰影は標準実験と平滑化実験の差が統計的に有意であることを意味している。(O'Reilly, Minobe, & Kuwano-Yoshida, 2016)

(2) 海洋に対する大気表面風応答 全球衛星データ解析

すでに我々は、気圧調整メカニズムが重要であるなら、表面風速の水平発散収束と、海面気圧のデコボコ(気圧のラプラシアン)とがよく対応することを提案していた。このメカニズムでは、大気の下層温度が海洋表面水温によって強く影響され、暖かい海面水温上で暖気が、冷たい海面水温上で寒気が形成される。暖気は軽く、寒気は重いために、暖気下では海面気圧が低く、寒気下では気圧が高くなる。この海面気圧の勾配を下るように表面風が動こうとして、気圧が高い(デコ)場所では風が離れる水平発散が、気圧が低い(ボコ)場所には風が集まる水平収束が生じる。このようにして、表面風速の水平発散収束と海面気圧のデコボコが対応することが予想される。この対応がメキシコ湾流域について成り立つことを、数値モデルを用いた同化データの解析によって、我々が見出していた。しかし、純粋な観測データで、しかも全球について検証することは行われていなかった。その理由は、検証に必要な空間解像度で、海面気圧を観測することが不可能であるためである。海面気圧の観測は衛星ではできず、船舶でなされているため、海面気圧データの解像度が低いのである。

この問題を、海面気圧に代えて衛星で観測できる気温データを使うことで解決した。2002年に打ち上げられた Aqua 衛星に搭載されている大気赤外サウンダデータを、大気海洋相互作用の全球解析に世界で初めて利用し、気温が気圧にもたらす影響の代表量として、大気下層の 1000 hPa と 850 hPa の等圧面間の厚さを求めた。下層大気が暖かいほど大気下層の厚さは厚く、海面気圧は低くなるこ

とが期待される。実際に、黒潮・親潮流域をはじめとして、中緯度の主要な海流域で、年平均の表面風の水平収束と海面気圧のラプラシアンとの間に、よい関係が成り立つことを世界で初めて見出した(図4)。この結果は、気圧調整メカニズムが広範に成立していることを意味している。

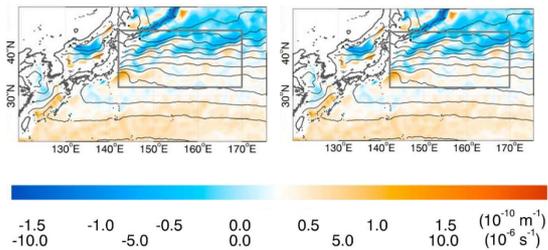


図4. 大気下層 1000 hPa と 850hPa の間の厚さ(左, カラーバーの数値は上側)と, 表面風の水平収束(右, カラーバーの数値は下側). (Shimada & Minobe 2012)

定量的なメカニズムの決定

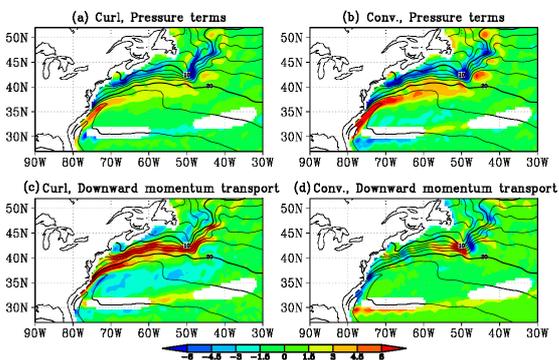


図5. 圧力項による, 0-100 m で鉛直年平均を行った風運動量の(a)回転成分と(b) 収束発散成分成分への寄与と, 鉛直混合項による(c)回転成分と(d)収束発散成分への寄与(カラー, $10^{-6} \text{ kg s}^{-1}$). 等値線は海洋表面温度である. (Takatama et al., 2013)

表面風のメカニズムをより定量的に理解するために、我々は、新たな診断方法を開発し、それを領域大気モデルの出力に適用することで、時間平均場についてはどうメカニズムを同定するかという問題を基本的に解決した。この診断方法は、大気境界層の最下部にあたる接地境界層におおむね対応する表面から高度 100 m まで鉛直および時間平均をした運動量（平均風速にほぼ比例）およびその回転成分と収束・発散成分を、1) 圧力調節に起因する項, 2) 鉛直混合に起因する項, 3) 水平移流に起因する項の3つの線形重ね合わせで表現する。線形重ね合わせで表せるということは、非常に強力であり、上記のメカニズムの同定を完全に行うことができるようになったのである。

この診断方法を数値計算と組み合わせることで、メキシコ湾流域の年平均風は、図5に示すように圧力調整メカニズムが収束発散成分について支配的な役割を果た

す一方、鉛直混合メカニズムが回転成分を支配し、移流項の寄与は小さいことが明らかになった。この結果は、二つのメカニズムの両方が、ただし異なる風の運動成分に重要であることを意味している。

大気大循環モデルと大気海洋結合大循環モデルにおける表面風応答の違い

鉛直混合メカニズムによれば、海洋表面水温勾配を横切って風が吹く (crosswind) 場合には風応力の水平回転が生じ、海洋表面水温勾配を下る方向に風が吹く (downwind) 場合には風応力の発散が、それぞれ生じることになる。これらの変数間の回帰直線の傾きは結合係数と呼ばれ、大気海洋間の結合の強さを表す指標として用いられている。

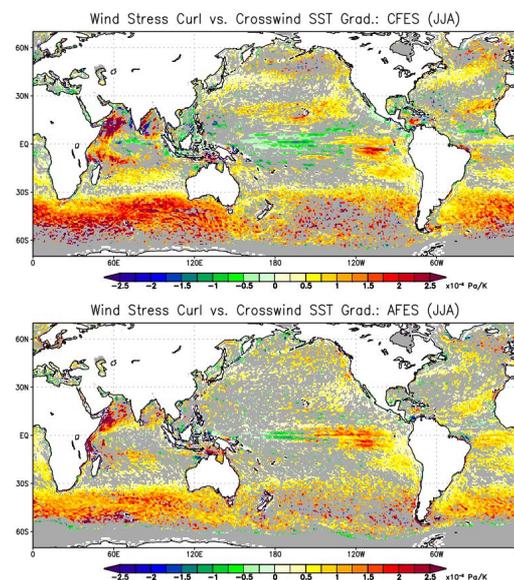


図6 crosswind 方向の海洋表面水温勾配と風応力の水平回転成分との結合係数 [$10^{-2} \text{ Pa K}^{-1}$]. 海水域および統計的に有意でない海域は欠損値(灰色)としている。(上)大気海洋結合モデル CFES,(下)大気大循環モデル AFES の北半球夏季(6~8月)での平均値である。

我々は比較的高解像度の大気海洋結合モデル CFES および大気大循環モデル AFES の結合係数を比較し、その空間分布を調べた。例として、北半球の夏季(6~8月)における crosswind 方向の海洋表面水温勾配と風応力の水平回転の結合係数を図6に示す。CFES における結合係数は、衛星観測から推定された値と比較的近いのに対し、AFES では値がかなり小さく、また統計的に有意な海域も狭い。この結果から、広く受け入れられている理解とは異なって、結合係数には大気モデルで表現されている海洋から大気への影響だけでなく、結合モデルでのみ表現される大気から海洋への影響も重要な役割を果たしていることが示唆される。

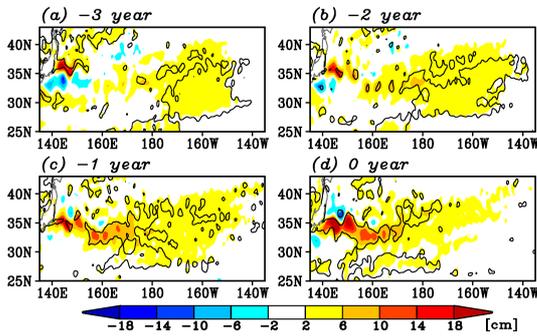


図 7. 北太平洋東部に生じた海面水位変化が西方伝播する様子。カラーは黒潮続流域における海面水位の第 1 主成分時系列に対する回帰係数で、等値線は統計的に有意な領域を表す。黒潮続流ジェットが変動する(a)3 年前、(b)2 年前、(c)1 年前、(d)同時期 (Sasaki, Minobe, & Schneider, 2013)

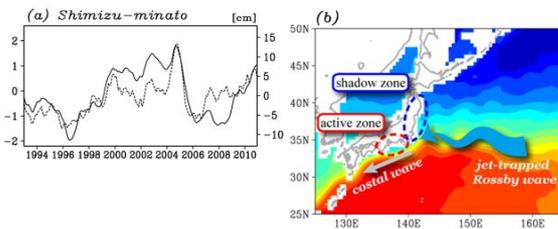


図 8. (a)清水港の水位と(実線・右軸)と西部北太平洋の代表的な海面高度時系列(点線・左軸)。後者の時系列は、西部北太平洋の衛星計測の海面高度と日本沿岸での海面高度観測データとの特異値分解解析で得られた。(b)ジェット補足ロスビー波が日本沿岸に入射すると、日本南岸に沿って南に伝播し関東南部・東海・中部などの海面水位に影響を与えることの模式図(Sasaki, Minobe, & Miura 2014)。

(3) 黒潮・黒潮続流の変動

黒潮続流の jet-trapped ロスビー波

黒潮続流の変動は気候および海洋生態系に与える影響が注目されている。その変動のメカニズムとして我々は、強く狭い黒潮続流ジェットに捕捉されて流れの向きとは逆に西に伝播する jet-trapped ロスビー波の存在が、理論的な研究および数値計算データの解析から提案していた。しかし、現実の太平洋の黒潮続流において jet-trapped ロスビー波が重要な役割を果たしているかどうかは、研究がなされていなかった。

我々は、衛星観測の海面水位のデータを用いて解析を行い、jet-trapped ロスビー波の明瞭な証拠を得た。北太平洋東部での大気変動により生じた海面水位変化が、3~4 年かけて黒潮続流の軸に沿って西方に伝播することで、黒潮続流での十年スケール変動を生じていることを見出した(図 7)。この水位変動が、南北に狭い黒潮続流ジェットに捕捉されていることが、変動が jet-trapped ロスビー波として伝播していることを示している。また、ジェット流が西ほど強く狭いことの影響で、

水位変動も西へ行くにつれて、その南北幅は狭くなり、反対に水位変化の振幅は大きくなる。この jet-trapped ロスビー波は黒潮続流の南北シフトを通じ日本沿岸水位にも影響を与えることを見出した(図 8)。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 65 件)

- 1) O'Reilly, C. H., S. Minobe, A. Kuwano-Yoshida, The influence of the Gulf Stream on wintertime European blocking. *Clim. Dyn.*, 2016, doi:10.1007/s00382-015-2919-0, 査読有, 印刷中
- 2) Ohishi, S., T. Tozuka, N. Komori, Frontolysis by surface heat flux in the Agulhas Return Current region with a focus on mixed layer processed: observation and a high-resolution CGCM. *Clim. Dyn.*, 1-15 2016, doi:10.1007/s00382-016-3056-0, 査読有, 印刷中
- 3) 佐々木 克徳, 西岸境界流およびその続流の変動に関する理論的・解析的研究。海の研究, 25, 2016, 1-16, <http://kaiyo-gakkai.jp/jos/uminokenkyu/vol25/25-1/25-1-sasaki.pdf> 査読有
- 4) Katsube K., M. Inatsu, Response of tropical cyclone tracks to sea surface temperature in the western North Pacific. *J. Climate*. 29, 2016,1955-1975. doi:10.1175/JCLI-D-15-0198.1, 査読有
- 5) Minobe, S., S. Takebayashi, Diurnal precipitation and high cloud frequency variability over the Gulf Stream and over the Kuroshio. *Clim. Dyn.*, 44, 2015, 2079-2095, doi:10.1007/s00382-014-2245-y, <http://hdl.handle.net/2115/61072> 査読有
- 6) Takatama, K. S. Minobe, M. Inatsu, and R. J. Small, Diagnostics for near-surface wind response to the Gulf Stream in a regional atmospheric model. *J. Climate*, 28, 2015, 238-255, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00668.1, <http://hdl.handle.net/2115/59445>, 査読有.
- 7) Sasaki, Y. N., S. Minobe, Y. Miura, Decadal sea level variability along the coast of Japan in response to ocean circulation changes. *J. Geophys. Res. (Oceans)*, 119, 2014, 266-275, doi:10.1002/2013JC009327, <http://hdl.handle.net/2115/56595>, 査読有.
- 8) Kuwano-Yoshida, A. Using the Local Deepening Rate to Indicate Extratropical Cyclone Activity. *SOLA*, 10, 2014, 199-203, doi:10.2151/sola.2014-042, https://www.jstage.jst.go.jp/article/sola/10/10/10_2014-042/article 査読有
- 9) Kuwano-Yoshida A., B. Taguchi, & S.-P. Xie, Baiu rainband termination in atmospheric and coupled atmosphere-ocean models, *J. Climate*, 2013, 26, 10111-10124, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00231.1, <http://www.jamstec.go.jp/jdb/ronbun/Ks0003>

- [8486.pdf](#), 査読有
- 10) Satake, Y., M. Inatsu, M. Mori, et al., Tropical cyclone tracking using a neighbor enclosed area tracking algorithm. Mon. Wea. Rev., 141, 2013, 3539-3555, doi:10.1007/s10113-013-0484-9 <http://hdl.handle.net/2115/55290> 査読有
 - 11) Sasaki, H., B. Taguchi, N. Komori, et al., Influence of local dynamical air sea feedback process on the Hawaiian Lee Countercurrent. J. Climate, 26, 2013 7267-7279, doi:10.1175/JCLI-D-12-00586, <http://www.jamstec.go.jp/jdb/ronbun/Ks00033854.pdf> 査読有
 - 12) Sasaki, Y. N., S. Minobe, N. Schneider, N., Decadal response of the Kuroshio Extension jet to Rossby waves: Observation and thin-jet theory. J. Phys. Oceanogr., 43, 2013, 442-456, doi:10.1175/JPO-D-12-096.1, <http://hdl.handle.net/2115/52934>, 査読有.
 - 13) Takatama, K., S. Minobe, M. Inatsu, and R. J. Small, 2012: Diagnostics for near-surface wind convergence/divergence response to the Gulf Stream in a regional atmospheric model. Atmos. Sci. Lett., 13, 16-21. doi: 10.1002/asl.355, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/asl.355/abstract>, 査読論文.
 - 14) Shimada T, S. Minobe, 2011, Global analysis of the pressure adjustment mechanism over sea surface temperature fronts using AIRS/Aqua data. Geophys. Res. Lett., 38, 2011, L06704, doi:10.1029/2010GL046625, <http://hdl.handle.net/2115/47175>, 査読有.

[学会発表](計207件)

- 1) 吉田 聡, 北西太平洋海面水温前線に対する大気応答実験, 日本海洋学会春季大会, 2016年3月15日, 東京大学(東京都文京区), 招待講演.
- 2) 見延 庄士郎, 海洋物理学のフロンティアと未来への試み, 日本海洋学会 2014年度秋季大会, 2014年9月15日, 長崎大学文教キャンパス(長崎県長崎市), 基調講演.
- 3) S. Minobe, Diurnal precipitation variability over the Gulf Stream and the Kuroshio, climate implications of frontal scale air-sea interaction, August 5, 2013, Boulder (USA), 招待公演.
- 4) Sasaki, Y. N. International to decadal variability of the Gulf Stream and Kuroshio Extension jets. PICES-2012 Annual Meeting, October 18, 2012 国際会議場(広島県広島市), 招待講演.
- 5) Minobe, S. Ocean to atmosphere feedback in mid-latitudes over western boundary currents. CLIVAR/WCRP workshop on decadal and multi-decadal variability in Pacific and Indian Ocean. September 4,

2012, 青島(中国), 招待講演.
 [その他]
 ホームページ
http://www.atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp/hotspot/jpn/organization/a03_7.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

見延 庄士郎 (MINOBE SHOSHIRO)
 北海道大学・大学院理学研究院・教授
 研究者番号: 70219707

(2)研究分担者

小守 信正 (KOMORI NOBUMASA)
 国立研究開発法人海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・主任技術研究員
 研究者番号: 80359223

稲津 将 (INATSU MASARU)
 北海道大学・大学院理学研究院・准教授
 研究者番号: 80422450

吉田 聡 (KUWANO-YOSHIDA AKIRA)
 国立研究開発法人海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・研究員
 研究者番号: 90392969

佐々木 克徳 (SASAKI YOSHINORI)
 北海道大学・大学院理学研究院・講師
 研究者番号: 70219707

(3)連携研究者

大淵 済 (OFUCHI WATARU)
 国立研究開発法人海洋研究開発機構・アプリケーションラボ・主任技術研究員
 研究者番号: 30359228

磯口 治 (ISOGUCHI OSAMU)
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙利用ミッション本部・招聘研究員
 研究者番号: 20374895

河本 和明 (KAWAMOTO KAZUAKI)
 長崎大学・水産・環境科学総合研究科・教授
 研究者番号: 10353450

可知 美佐子 (KACHI MISAKO)
 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・第一宇宙技術部門・研究領域主幹
 研究者番号: 00523292

(4)研究協力者

Niklas Schneider
 ハワイ大学・国際太平洋研究センター・教授

Christopher H. O'Reilly
 オックスフォード大学・物理学専攻・研究員

Richard Justin Small
 アメリカ大気研究センター・気候および全球力学研究部・研究者II