

平成 30 年 8 月 31 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26610146

研究課題名(和文) エクマンパンピング駆動モデル: 熱帯海洋変動の原因解明における基盤概念と技術の創出

研究課題名(英文) Ekman-pumping forced model: Basic concept and implementation for causality understanding of tropical ocean variability

研究代表者

見延 庄士郎 (Minobe, Shoshiro)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：70219707

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：海洋変動の原因を理解するために重要なエクマン・パンピングは、赤道ではその値が発散するために、赤道域の現象には利用されてこなかった。本研究ではこの困難を解決するために、エクマン・パンピングを外力として用いるエクマン・パンピング駆動モデルおよびそのアジョイント後方積分版を、世界で初めて提案し、作成した。さらに、エクマン・パンピング駆動モデルを用いた数値実験を行い、その結果、赤道の上層海洋変動については、インド洋が太平洋よりも赤道外の寄与が大きいこと、インド洋ダイポールモード現象については規模が大きなイベントには赤道外のエクマン・パンピングが重要であること、などの知見を得た。

研究成果の概要(英文)：Ekman pumping is a fundamental tool for understanding the causality in ocean variability except for the equator, where Ekman pumping becomes infinity. We have solved this difficulty by proposing and producing Ekman-pumping forced model for the first time and its adjuring backward integration version. By conducting a series of numerical experiments, we have found that off-equatorial Ekman pumping contribute more strongly in the Indian Ocean rather than in the Pacific Ocean for the equatorial upper layer thickness variability. Also, off-equatorial Ekman pumping contributes more for large-magnitude events of Indian Ocean dipole mode than for small magnitude events.

研究分野：気候力学

キーワード：エクマンパンピング アジョイント 熱帯海洋 領域駆動実験

1. 研究開始当初の背景

風が海洋に引き起こす表面付近の鉛直流速であるエクマン・パンピングは、中高緯度の海洋変動の因果関係を議論する上で不可欠であり、100年以上に渡って海洋物理学の重要概念である。しかしエクマン・パンピングは、赤道でゼロとなるコリオリパラメータを分母に含む式で表されるために、赤道では発散し、その結果エクマン・パンピングを赤道近傍では利用することができなかった。このことは、熱帯海洋の変動の原因を理解する上で重要な制約となってきた。

2. 研究の目的

しかし、エクマン・パンピングの値自身は赤道で発散するものの、エクマン・パンピングが赤道波を駆動する効果は有限になるはずであり、このことからエクマン・パンピングを駆動力として海洋数値モデルに用いることができるとの着想を得た。そこでこの研究では、世界で初めてエクマン・パンピングの全球シームレスな利用を可能とする新しい海洋モデルである、エクマン・パンピング駆動モデルを提案し、作成する。このモデルを用いて、熱帯海洋の変動が、どこのエクマン・パンピングによって生ずるかを明らかにする。さらに、因果関係をより効果的に追及するために、時間を逆方向に積分するアジョイント版エクマン・パンピング駆動モデルをも提示、作成する。

3. 研究の方法

本研究の方法は主として三つの部分からなる。第一に、エクマン・パンピング駆動モデルを作成し活用する。基礎となるエクマン・パンピング駆動モデルの概念図を図1に示す。第二に、このエクマン・パンピング駆動モデルに基づき、時間を逆方向に積分するアジョイント版エクマン・パンピング駆動モデルをも作成する。第三に、エクマン・パンピング駆動モデルで仮定する、風応力が海洋に支配的な影響をもたらすという前提がどの程度成り立つかを、領域海洋数値モデルROMSを用いて調査する。

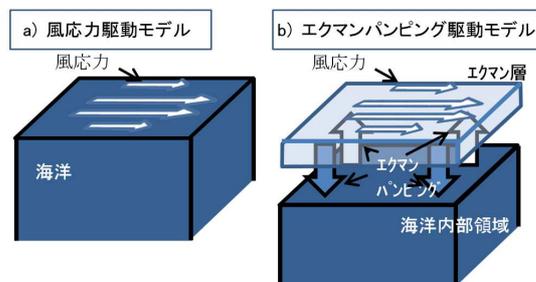


図 1. (a) 従来の風応力駆動モデルと、(b)本研究で提案するエクマン・パンピング駆動モデルの概念図。エクマン・パンピング駆動モデルでは、任意領域でエクマン・パンピングを on/off することが可能であり、変動原因の切り分けが明確にできる。

4. 研究成果

(1)エクマン・パンピング駆動モデル

①方程式系の導出

エクマン・パンピング駆動モデルの方程式系を、熱帯海洋でよく利用される1.5層線形海洋数値モデルに基づいて定式化を行って、微分方程式系を得た。さらにその微分方程式に基づき、差分方程式を導いた。

②必要な格子解像度の評価

エクマン・パンピング駆動モデルが正しい結果を与えるためには、同モデルが赤道域の力学で重要な、赤道ケルビン波、第一および第三南北モード赤道ロスビー波を適切に表現できる必要がある。そこで、①の差分方程式を用いて、南北格子解像度を変化させて、一様東西風応力によって励起される赤道波動の振幅を評価した。その結果高次モードほど狭い格子解像度が必要であり、第三南北モード赤道ロスビー波で誤差を10%以下に抑えるためには、無次元化された南北格子解像度が0.2以下、有次元では緯度0.5度以下の解像度が必要であることが明らかになった。

③エクマン・パンピング駆動モデルの作成と風応力駆動モデル結果の比較

エクマン・パンピング駆動モデルを Fortran program として作成した。全球熱帯海洋(南緯30度～北緯30度)をモデル領域とし、南北境界付近にスポンジ層を設け、格子解像度は0.5度とした。

エクマン・パンピング駆動モデルが有用であるためには、同モデルは通常風応力駆動モデルの結果を、再現できなくてはならない。そこで、エクマン・パンピング駆動モデルと風応力駆動モデルとを観測された風応力で駆動し、両者の比較を上層の層厚について行った。両モデルの結果はほぼ同一であり、エクマン・パンピング駆動モデルが、正しい積分結果を与えることが確認できた。

④領域駆動実験の妥当性の検証

エクマン・パンピング駆動モデルが風応力駆動モデルよりも有用であるのは、外力(エクマン・パンピング)を与える領域を一部に限定する領域駆動実験で、有意義な情報を得ることができるためである。風応力駆動モデルでも、外力(風応力)を一部領域に限定すること自体はできる。しかしその領域分割を南北方向に行うと、その領域境界にそって非常に大きな人工的なエクマン・パンピングが生じてしまうので、有意義な情報を得ることが困難であると予想される。そこでこの予想が実際に成り立っているのかを、エクマン・パンピング駆動モデルと風応力駆動モデルとで、領域駆動モデル実験を行って調べた。

図2に示すように、風応力駆動モデルでの領域駆動実験では、分割境界である南緯5度、北緯5度付近で人工的に大きな変動が生じて

しまい、領域駆動実験によって有意義な結果を得ることが困難である。一方、エクマン・パンピング駆動モデルではそういった困難が生じず、領域駆動モデル実験から有効な情報を引き出すことができる。

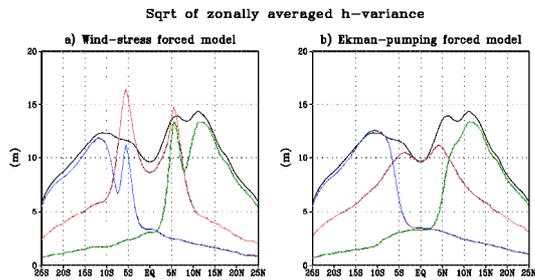


図 2. (左)風応力駆動モデルと(右)エクマン・パンピング駆動モデルでの、各実験における上層層厚の分散の東西平均の平方根。黒線は全領域駆動実験の結果である。青が南緯 5.5 度以南のみ、赤が南緯 5.5 度から北緯 5.5 度の間、緑が北緯 5.5 度以北のみに外力を与えた領域駆動実験の結果である。

⑤領域駆動モデル実験による各海盆の赤道応答の特徴

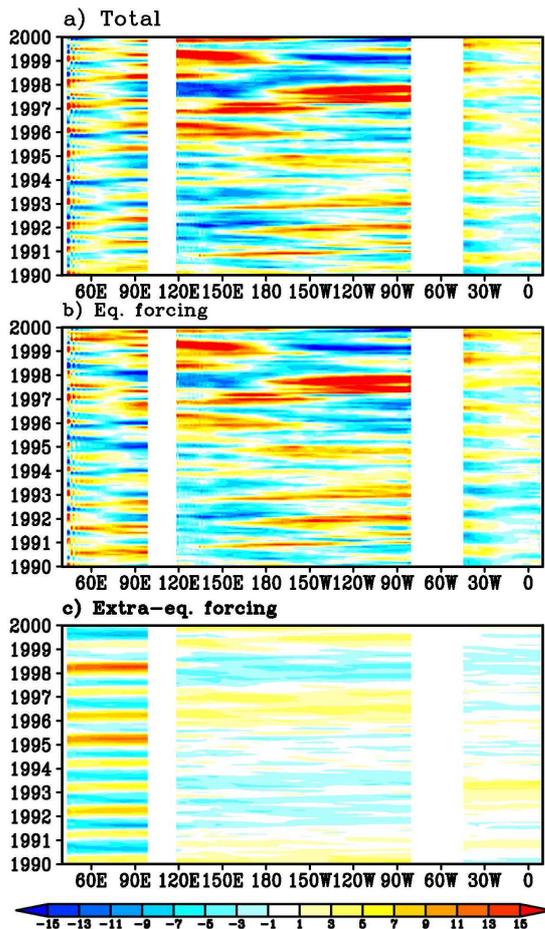


図 3.(上)全領域駆動実験, (中)赤道域(南緯 5 度から北緯 5.5 度)駆動実験, および(下)赤道外(南緯 5.5 度以南および北緯 5.5 度以北)駆動実験における, 上層層厚の偏差 (平均値からのずれ)。

エクマン・パンピング駆動モデルの領域駆動実験で、赤道における上層層厚変動を調査した。図 3 に示すように、赤道域と赤道外の外力 (エクマン・パンピング) の寄与を比較すると、太平洋の変動は赤道域のエクマン・パンピングが支配的である一方、インド洋では赤道外と赤道域のエクマン・パンピングが同程度の影響をもたらすという、海盆によって明瞭な違いがあることが明らかになった。

⑥インド洋ダイポール・モードへの赤道域と赤道外の影響

⑤で赤道域と赤道外で同程度の寄与が見出されたインド洋において、もっとも興味深い海洋変動はインド洋ダイポール現象である。そこでインド洋ダイポール現象に対して、どこのエクマン・パンピングが重要であるのかを調査した。ただし本来インド洋ダイポール現象を代表するダイポール・モード指数は、ダイポールの西極 (50°E—70°E, 10°S—10°N) と東極 (90°E—110°E, 10°S—Eq.) の表面水温差で定義されるが、本研究で用いているエクマン・パンピング駆動モデルでは海面水温を変数としてもたないため、同領域の上層層厚差によって、層厚ダイポール・モード指数を定義する。全領域駆動実験で求めた層厚ダイポール・モード指数と観測されたダイポール・モード指数とは相関係数が 0.66 と高く、層厚ダイポール・モード指数は代替の指数として妥当である。

領域駆動実験結果(図 4)は、1994, 1997, 2007 年の強いダイポール現象では、赤道域外の寄与が比較的大きかったことを示している。さらにこの赤道域外の寄与が、ダイポールの東西どちらの極への影響を通じて現れているのかを調べたところ、西の極を通じてであることが明らかになった。

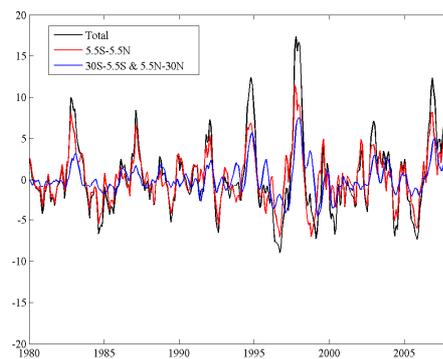


図 4. 全領域駆動モデル実験(黒), 赤道域駆動モデル実験 (赤), 赤道外駆動モデル実験 (青) における層厚ダイポール指数。

⑦南北東西領域分割駆動実験

⑤と⑥の領域駆動実験は、南北方向に領域を駆動したものであったが、さらに東西方向の領域分割も行い、海盆間を越えて異なる領域の影響がどのように及ぶかを調査した。領域の分割は、南北は南緯 5.5 度、北緯 5.5 度

で区切り、東西は、インド洋、西太平洋、東太平洋を区分することとした。太平洋とインド洋は、インドネシア通過流域で接続されているため、相互に影響を及ぼす可能性がある。この南北・東西領域分割実験の結果、太平洋の外力がインド洋に及ぼす影響は、逆にインド洋の外力が太平洋に及ぼす影響に比べてはるかに大きいことが明らかになった(図5)。太平洋からインド洋への影響をもたらす上で、特に西部赤道太平洋域のエクマン・パンピングが重要である。またこの太平洋からインド洋への影響は、南インド洋で強く北インド洋では弱い。この特徴は波動伝播で理解でき、太平洋から伝播した信号が南インド洋に入り、その後オーストラリア西岸に沿って沿岸ケルビン波として伝播しつつ西側にロスビー波を放出するためにこの特徴がもたらされる。特に太平洋からの影響が強いのは、オーストラリアの西岸である。オーストラリアの西岸には、ニンガルーニーニョと呼ばれる、大気海洋相互作用現象が生じることが知られており、そのきっかけのひとつは太平洋からの波動伝播にあると考えられている。この結果は、ニンガルーニーニョを引き起こす太平洋の寄与には西部赤道太平洋が支配的な役割を果たしていることを意味している。

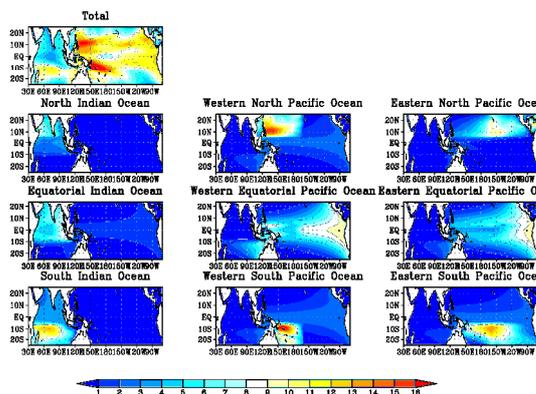


図 5.9 分割領域駆動実験における、層厚の標準偏差。駆動領域はそれぞれのパネルに示している。

(2) エクマン・パンピング駆動モデルアジョイント後方積分版を用いた感度解析

特定の海域や現象に与える外力の影響を調べるには、アジョイント(随伴)モデルを用いた感度解析による逆問題的なアプローチが有効である。そこで本研究では、随伴エクマン・パンピング駆動モデルを開発し、その動作検証を行った。

適当な評価関数のエクマン・パンピング流速に関する感度は、予報変数に関する評価関数の感度を「外力」として、随伴エクマン・パンピング駆動モデルを後方に時間積分することにより求められる。

データ同化の場合、評価関数は観測値と予報値の差を定量化したものであるが、感度解

析の場合には、例えば「ある海域で平均した予報変数」として定義される。また、データ同化とは異なり、降下法により評価関数を最小化するわけではないので、前方・後方時間積分を繰り返す必要はない。

モデル領域・解像度などは、結果(1)で用いたエクマン・パンピングモデルと同様である。

動作検証のため、ある海域で1ヶ月平均した境界面変位、として評価関数を定義した。この場合、「最後」の1ヶ月間のみその海域内で境界面変位に関する評価関数の感度が値を持ち、それ以外および他の変数に関する感度は常にゼロとなる。

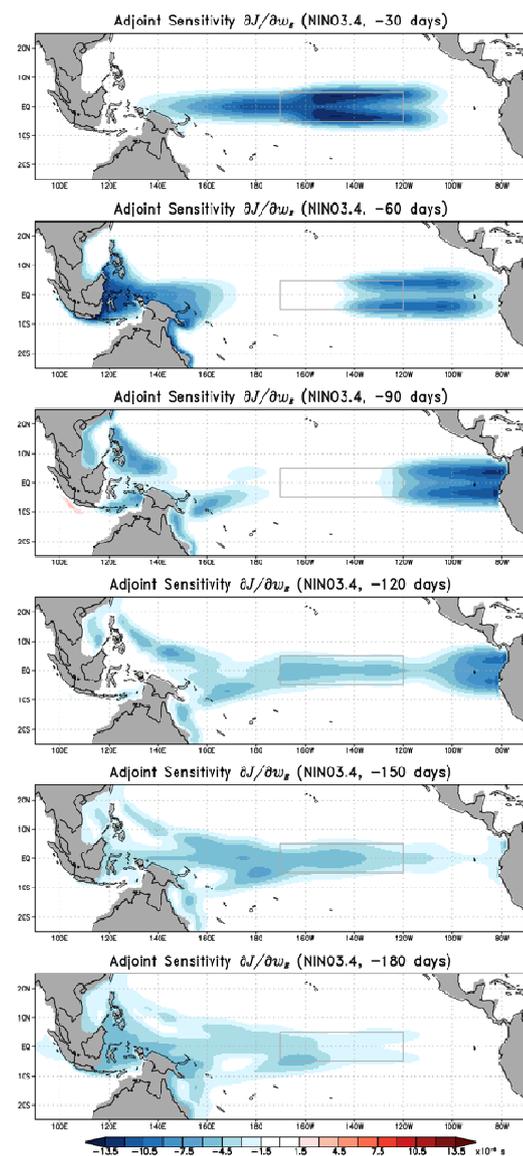


図 6 NINO3.4 海域(矩形で示す)で1ヶ月平均した境界面変位に対するエクマン・パンピング流速の感度の後方時間発展。上から、30 日前、60 日前、90 日前、120 日前、150 日前、180 日前。

熱帯太平洋の NINO3.4 (170°W—120°W, 5°S—5°N) を対象海域とした場合の、エクマン・パンピング流速に関する評価関数の感度

の後方時間発展を図6に示す。これは、対象時刻に対象海域での境界面変位を増大させるためには、各々の時刻でどこにエクマン・パンピング流速を与えるのが効果的か、を表しており、ほぼ全域で負なのはエクマン沈降流に対応する。高い感度が、西進する随伴赤道ケルビン波や東進する随伴ロスビー波として伝播した後、それぞれ西岸・東岸で反射する様子が示されている。

次に、インド洋のダイポール・モード指数の西極(50°E—70°E, 10°S—10°N)と東極(90°E—110°E, 10°S—Eq.)を対象海域とした場合の感度の後方時間発展を示す。この系は線形のため、結果を重ね合わせることが可能であり、図7に西極と東極に対する感度の差を示す(すなわち、水温を層厚で読み替えた場合のダイポール・モード指数に対する感度に相当する)。西極に対する感度が、半年ほど前の東極付近で比較的高いことは興味深い。また、ソマリア沖でのエクマン・パンピング流速は、時期によってダイポール・モード指数を高くも低くもなしうることを示唆される。

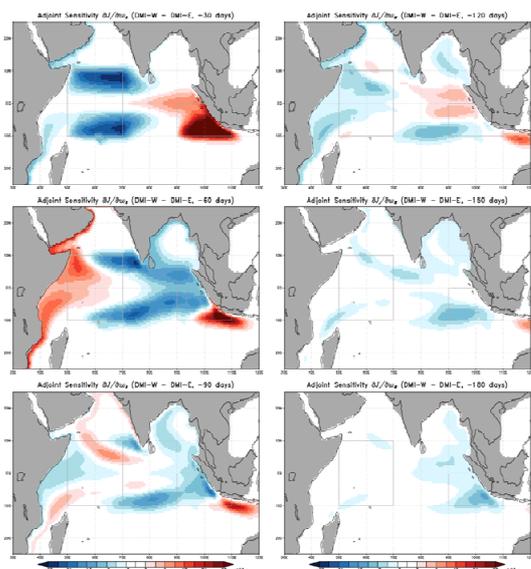


図7 図6に同じ。ただし、DMIの西極と東極に対する感度の差。

(3) 領域海洋モデルを用いた東西領域駆動実験

(1)(2)で開発したエクマン・パンピング駆動モデルおよびエクマン・パンピング駆動モデルアジョイント後方積分版は、1.5層モデルで表現できる現象についてはその原因を明らかにする上で強力な道具である。しかし1.5層モデルで表現しえない、傾圧不安定などによって海洋に内在する変動が生じていることには注意が必要である。そこで内在的な変動と、風応力などによる外部強制変動の相対的な寄与を、インド洋を対象とした領域海洋モデルROMSを用いたアンサンブル実験で

調査した。

その結果、経年変動については、内在的な変動は赤道付近では、100 m水温変動の分散の20-30%しか説明せず、大部分は強制変動によって生じていることが明らかになった。特に強制変動の寄与が大きいのは、赤道波が伝播する赤道域と沿岸ケルビン波が伝播する東岸付近である。ただし、東西流速は水温に比べて内在変動の寄与が大きい。また、経年変動よりも時間スケールが短い季節内変動については、内在変動の寄与がより大きくなるが明らかになった。このことは、エクマン・パンピング駆動モデルおよび風応力駆動モデルの基礎となる1.5層モデルが有用な領域と対象は、時間スケールが長いほど広く、特に波動伝播が卓越する領域ほど有用性が高いことが示された。

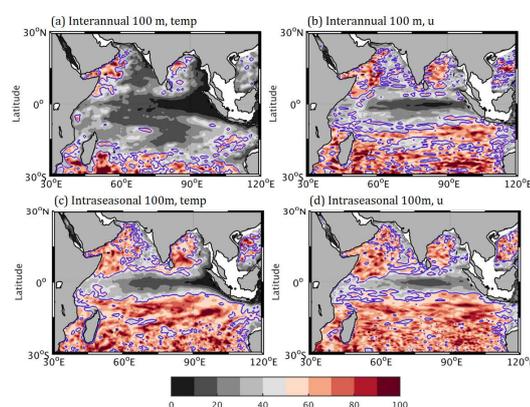


図8. インド洋水深100 mでの(上)経年変動と(下)季節内変動における、(左)水温および(右)東西流速についての、内在的な変動が説明する割合。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

1. 小守 信正、榎本 剛、三好 建正、山崎 哲、吉田 聡、田口 文明、全球大気海洋結合モデルを用いた実験的アンサンブル大気再解析、月刊 海洋、査読無、Vol.59、2017、pp93-97
2. Shoshiro Minobe, Mio Terada, Bo Qiu, Niklas Schneider, Western Boundary Sea Level: A Theory, Rule of Thumb, and Application to Climate Models, Journal of Physical Oceanography, 査読有、Vol.47、2017、pp957-977, doi: 10.1175/JPO-D-16-0144.1
3. Takamitsu Ito, Shoshiro Minobe, Matthew C. Long, Curtis Deutsch, Upper ocean O2 trends: 1958-2015, Geophysical Research Letters, 査読有、Vol.44、2017、pp4214-4223, doi: 10.1002/2017GL073613
4. Matthew Newman, Michael A. Alexander, Toby R. Ault, Kim M. Cobb, Clara Deser, Emanuele Di Lorenzo, Nathan J. Mantua,

Arthur J. Miller, Shoshiro Minobe, Hisashi Nakamura, Niklas Schneider, Daniel J. Vimont, Adam S. Vimont, Adam S. Phillips, James D. Scott², and Catherine A. Smith, The Pacific Decadal Oscillation, Revisited, *Journal of Climate*, 査読有, 2016, Vol. 29, pp4399-4427, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0508.1

[学会発表] (計 27 件)

1. Nobumasa Komori, Bunmei Taguchi, Akira Kuwano-Yoshida, Takeshi Doi, Masami Nonaka, Experimental seasonal climate prediction using CFES: Preliminary results, 2018 Ocean Sciences Meeting (国際学会), 2018
 2. Chorong Lee, Shoshiro Minobe, Yoshi N. Sasaki, Intraseasonal variability of upwelling in the equatorial Indian Ocean, Meeting on Perspectives in Computational Atmosphere and Ocean Science and 8th OFES International Workshop (国際学会), 2017
 3. Nobumasa Komori, Bunmei Taguchi, Akira Kuwano-Yoshida, Takeshi Doi, Masami Nonaka, Experimental seasonal climate prediction using CFES: Preliminary results, JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会), 2017
 4. Shoshiro Minobe, Causality linkages in atmosphere, ocean and marine ecosystem over the North Pacific: Modes, processes and prediction, International symposium "Drivers of dynamics of small pelagic fish resources (招待講演) (国際学会), 2017
 5. 寺田美緒, 見延庄士郎, CMIP5 モデルにおいて東部熱帯太平洋の湧昇流に将来変化をもたらすメカニズム, 2017 年度日本海洋学会秋季大会, 2017
 6. 小守信正, 田口文明, 吉田聡, 土井威志, 野中正見, 全球大気海洋結合モデル CFES を用いた実験的季節予測システムの開発, 日本海洋学会 2017 年度秋季大会, 2017
 7. Nobumasa Komori, Takeshi Enomoto, Takemasa Miyoshi, Akira Yamazaki, Akira Kuwano-Yoshida, Bunmei Taguchi, Ensemble-based experimental atmospheric analysis using a global coupled atmosphere-ocean GCM, CLIVAR 2016 Open Science Conference (国際学会), 2016
 8. Nobumasa Komori, Takeshi Enomoto, Takemasa Miyoshi, Akira Yamazaki, Akira Kuwano-Yoshida, Bunmei Taguchi, Ensemble-based experimental atmospheric analysis using a global coupled atmosphere-ocean GCM, 5th International Symposium on Data Assimilation (国際学会), 2016
 9. 小守信正, 見延庄士郎, 熱帯海洋でのエクマン・パンピング駆動モデル IV: アジロイント後方積分版を用いた感度解析, 2016 年度日本海洋学会秋季大会, 2016
 10. 見延庄士郎, 熱帯海洋でのエクマン・パンピング駆動モデル III インド洋・太平洋相互作用, 日本海洋学会春季大会, 2016
 11. 李チョロン・見延庄士郎・佐々木克徳, A preliminary results of Indian Ocean Dipole in 2015, 日本海洋学会春季大会, 2016
 12. Shoshiro Minobe, Spatio-temporal structure of upwelling in an eddy resolving quasi-global GCM, 3rd International Symposium, Effects of Climate Change on the World's Oceans, 2015
 13. N. Komori, T. Enomoto, T. Miyoshi, A. Yamazaki, and B. Taguchi, Development of an ensemble-based data assimilation system with a coupled atmosphere-ocean GCM, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, 2014
 14. N. Komori, T. Enomoto, T. Miyoshi, A. Yamazaki, and B. Taguchi, Development of an ensemble-based data assimilation system with a coupled atmosphere-ocean GCM, AOGS 11th Annual Meeting, 2014
 15. 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 (招待講演), 2014
6. 研究組織
- (1)研究代表者
見延庄士郎 (MINOBE SHOSHIRO)
北海道大学・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