

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05652

研究課題名(和文) 北太平洋中央モード水のサブダクションとその十年規模変動

研究課題名(英文) Subduction of North Pacific Central Mode Water and its decadal variability

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：黒潮続流の北側で起こる中央モード水(モード水 = 巨大な体積を持つ、鉛直一様な水の塊)の沈み込みと、それが北太平洋亜熱帯循環の主密度躍層下部の物理・生物地球化学的構造に及ぼす影響を、船舶、アルゴフロート、衛星海面高度計による観測データの解析により調べた。白鳳丸の2航海で実施した高解像度観測から、各モード水の形成とフロント・渦との関係を明らかにするとともに、渦-渦相互作用に伴う新たなモード水沈み込みのメカニズムを提示した。気象庁137E定線の解析により亜熱帯モード水の物理・生物地球化学特性の10年規模変動と長期変化を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

巨大な体積を持つモード水は、熱の偏差や二酸化炭素等の物質とともに海面から海洋内部に沈み込むことで、気候変動や海洋内部の物質循環に大きな影響を与えている。そのため、各モード水がどこで沈み込み、その後海洋内部をどのように循環し、最終的に海面にどのように再出現するのか(あるいはしないのか)、またそれらがどのように時間変動するのかを解明することが重要である。本研究は未解明の点が多い、本州東方域からの中央モード水の沈み込みの実態とメカニズムを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Subduction of Central Mode Water (a mode water is a voluminous, vertically homogeneous water mass) north of the Kuroshio Extension and its impact on the physical and biogeochemical structure in the lower permanent pycnocline of the North Pacific subtropical gyre were examined through analyses of observation data by research vessels, Argo profiling floats, and satellite altimeter. High-resolution hydrographic observations that we performed in two cruises of R/V Hakuho-maru clarified the relation between the formation of mode waters and fronts/eddies, and presented a new mechanism of mode water subduction in association with eddy-to-eddy interaction. Analyses of the 137E section by the Japan Meteorological Agency clarified decadal variability and long-term change of physical and biogeochemical properties of Subtropical Mode Water.

研究分野：海洋物理学

キーワード：中央モード水 サブダクション 十年規模変動 フロント・中規模渦

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

黒潮続流の南北両側では冬季に大量の熱が大気に放出され、深さ数百 m に達する厚い混合層が形成される。この混合層は春以降、季節密度躍層の下に、密度鉛直一様層として特徴づけられるモード水 (MW) として残り、その一部は永年密度躍層へとサブダクトする (図 1)。莫大な体積を持つ MW の形成・輸送・散逸過程とその時間変動を正確に把握することは、気候変動や物質循環変動を解明するうえで大変重要である。

研究代表者は過去 10 年間、黒潮続流周辺海域における各 MW の形成、サブダクションとその時間変動の解明を進めてきた。黒潮および黒潮続流の南で形成される亜熱帯モード水 (STMW) については、黒潮続流、黒潮再循環、中規模渦およびそれらの時間変動と密接にリンクした、新たな形成・循環像を確立した。とりわけ Oka et al. (2015) では、太平洋十年規模振動 (PDO) とその遅延応答である黒潮続流の十年規模変動に関連して STMW のサブダクションが大きく変動し、下流域亜表層の物理構造のみならず生物地球化学的構造をも変化させているという斬新な分野横断的關係を示した。

一方、黒潮続流の北側では、亜寒帯フロントの南で移行領域モード水 (TRMW) と重いタイプの中央モード水 (D-CMW)、黒潮分岐フロントの南で軽いタイプの中央モード水 (L-CMW) が形成され (Oka and Suga, 2005)、サブダクトしたのち亜熱帯循環の主密度躍層下部を輸送される。近年のアルゴフロート観測網構築により、これらの水塊の形成域に相当する深い冬季混合層が日本のすぐ東まで広がっていることが示されたが (Oka et al., 2011a)、形成域西部 (140-170E) の深い冬季混合層は高気圧性渦の中で選択的に形成されているようであり (Kouketsu et al., 2012)、それが CMW のサブダクションにどう寄与しているのかは未解明である。また、フロントに沿った東向きの大規模スケールのサブダクションに加え、フロントを横切る南向きの中規模スケールのサブダクションが起こることが船舶観測から示されたが (Oka et al., 2009, 2014)、その実態や大規模スケールのサブダクションとの関係は未解明である。

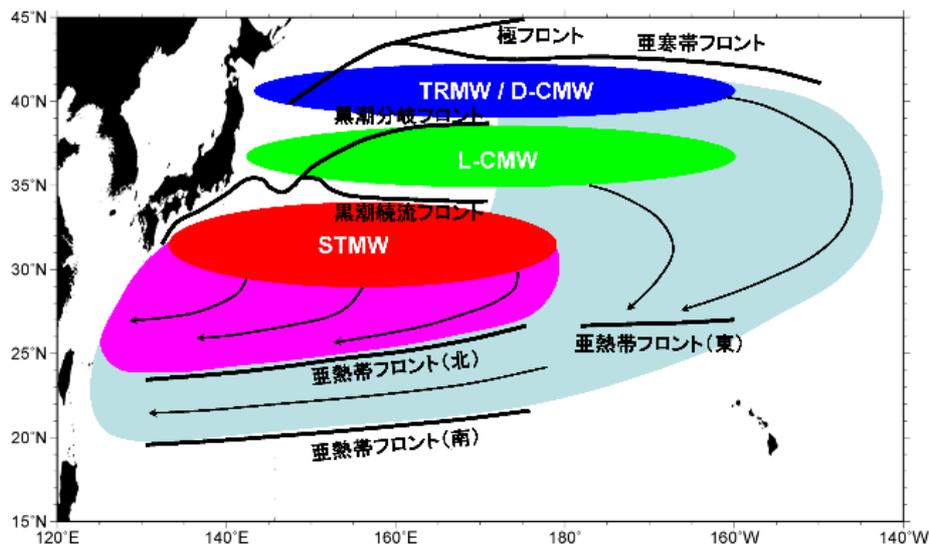


図 1 各モード水の形成域 (赤・緑・青の塗りつぶし)、サブダクション後の広がり (ピンク・水色 + 矢印) と各フロント (黒線) の位置関係 (Oka and Qiu, 2012 を改変)

2. 研究の目的

そこで本研究では、自ら実施した高解像度船舶観測、および気象庁の観測船・アルゴフロート・衛星観測などにより得られたデータの解析に基づき、様々なスケールで起こる CMW の形成・サブダクションとその時間変動をメカニズムとともに解明し、CMW の循環の変動が亜熱帯循環の主密度躍層下部の物理的・生物地球化学的構造に及ぼす影響を明らかにする。具体的には、

テーマ 1: 形成域西部における CMW の形成・輸送・散逸過程

テーマ 2: 様々なスケールで起こる CMW のサブダクションの実態

テーマ 3: CMW のサブダクションの 10 年規模変動

をターゲットとする。

3. 研究の方法

テーマ 1 と 2 に関連し、2013 年 4 月の白鳳丸 KH-13-3 航海と 2016 年 6 月の白鳳丸 KH-16-3 航海で行った高解像度 CTD/XCTD 観測の解析を行った。観測は、TRMW/D-CMW 形成域と L-CMW 形成域の西側部分を横断するよう、41N と 37.5N にそって行われ、経度 1 度ごとに CTD 観測が、CTD 測点の間を埋めるように経度 10 分ごとに XCTD 観測が行われた (図 2)。

テーマ 2 に関連し、2018 年 1 月に新青丸 KS-18-1 航海を、同年 4 月に新青丸 KS-18-4 航海を実施し、黒潮続流の南において、高解像度の CTD/XCTD/UVMP 観測を行った。

テーマ 3 に関連し、2000～2019 年にアルゴフロートによって得られた水温・塩分データと、1967 年以降気象庁が年 2 回の船舶観測を続けている東経 137 度定線のデータを解析した。

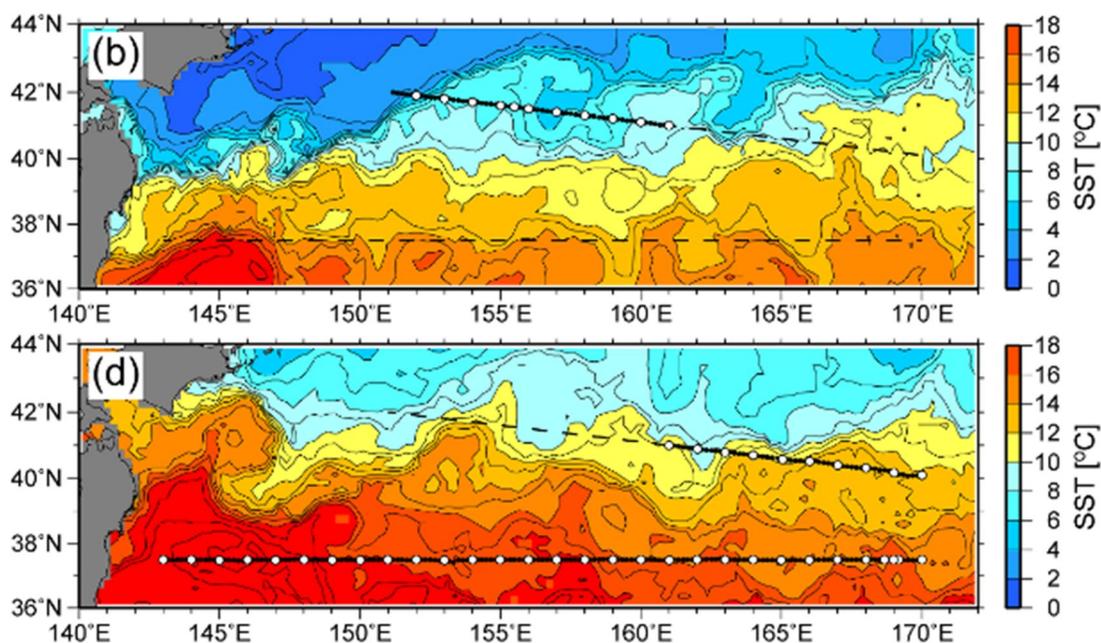


図 2 2013 年 4 月の KH-13-3 航海(上)と 2016 年 6 月の KH-16-3 航海(下)の CTD(白丸)ならびに XCTD(黒丸)測点。背景は航海期間中の海面水温分布を表す(Oka et al., 2020 を改変)

4. 研究成果

(1) テーマ 1 に関連し、KH-13-3 と KH-16-3 航海の 2 測線のデータから、形成直後の CMW と TRMW の詳細な構造が得られた(図 3)。41N 測線では、極フロントの東で TRMW と D-CMW が、亜寒帯フロントの南側のみならず北側においても形成していた。ただし、黒潮分岐フロントの南側にあたる部分では、代わりに D-CMW と L-CMW が形成していた。37.5N 測線では、158°15'E で測線を横切る黒潮分岐フロントの東側では D-CMW と L-CMW が形成していたが、黒潮分岐フロントの西側ではモード水の形成はほとんど見られなかった。これらの結果は 2003 年春の複数船舶観測に基づく TRMW/CMW 形成の描像(Oka et al., 2014)と概ね整合的であり、日本に近い西側の海域では TRMW/CMW は黒潮続流から切離した暖水渦の中でしか形成しないということを示唆している。そのような渦の中での TRMW/CMW の形成、その時間変動、そしてそれらが東側の海域で起こる TRMW/CMW の形成にどう寄与しているのかを調べるのが今後の重要テーマである。以上の結果を Oka et al. (2020)で発表した。

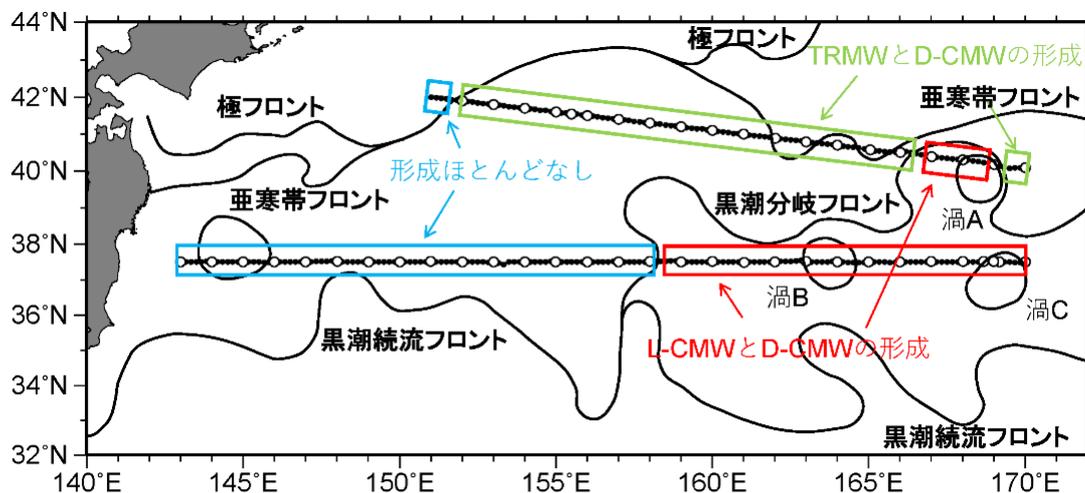


図 3 KH-13-3 航海と KH-16-3 航海の 2 測線におけるモード水の形成とフロント・渦との関係を描いた模式図(Oka et al., 2020 を改変)

(2) テーマ 2 に関連し、KH-13-3 と KH-16-3 航海の 2 測線において、CTD/XCTD の鉛直プロフィールでモード水のコア (渦位極小) が鉛直方向に複数重なっている構造が見られた。この構造は STMW では報告されてきたが (Oka et al., 2011b など)、TRMW/CMW での報告は初めてである。複数コア構造は、2013 年 4 月に観測された 41N 測線西側部分、ならびに、2016 年 6 月に観測された両測線の黒潮分岐フロントより南側の部分 (とりわけ 3 つの暖水渦の中) で多く見られた。前者の複数コア構造は、形成直後の深い冬季混合層が水平移流、傾圧不安定、対象不安定などによって崩れることにより形成されたものと考えられた。後者の複数コア構造についてはさらに、衛星海面高度計データやアルゴフロートデータを用いた詳細な解析を行った。その結果、3 つの渦 (図 3 の渦 A・B・C) が分離と合併を繰り返す過程で渦と渦の間、あるいは渦と周辺領域の間で低渦位水が交換され、複数構造を生み出したということが明らかとなった。これはモード水のサブダクションの新たなメカニズムを示唆しており、理論やモデルによるさらなる研究が望まれる。以上の結果を Oka et al. (2020) で発表した。

(3) テーマ 3 に関連し、アルゴフロートデータと気象庁 137E 定線のデータの解析を行ったものの、CMW の 10 年規模変動に関しては研究期間内に論文の形でまとめることができなかった。その大きな理由として、主密度躍層上部の STMW の 10 年規模変動と長期変化に関して顕著な結果が得られたことが挙げられる。

50 年間の 137E 線における水温・塩分データの解析により、亜熱帯域の主密度躍層上部の塩分が 10 年規模で変動し、同時に過去 20 年間大きく低下していることが示された。前者の 10 年規模変動は PDO ならびに黒潮続流の 10 年規模変動と関連していると考えられる。後者の低塩化トレンドに関しては原因を解明するには至らず、今後さらなる研究が望まれる。以上の結果を Oka et al. (2017) で発表した。

50 年間の 137E 線における水温・塩分・溶存酸素・栄養塩・炭酸系データの解析により、PDO ならびに黒潮続流の 10 年規模変動と関連した STMW の物理・化学特性の 10 年規模変動 (Oka et al., 2015 で発見) が、過去 40 年間にわたって続いていることを明らかにし、結果を Oka et al. (2019) で発表した (図 4)。

137E 線のデータを解析する過程で、この定線に関する過去 50 年間で 100 本を超える先行研究をレビュー論文の形でまとめる必要性を感じ、Oka et al. (2018) を執筆した。

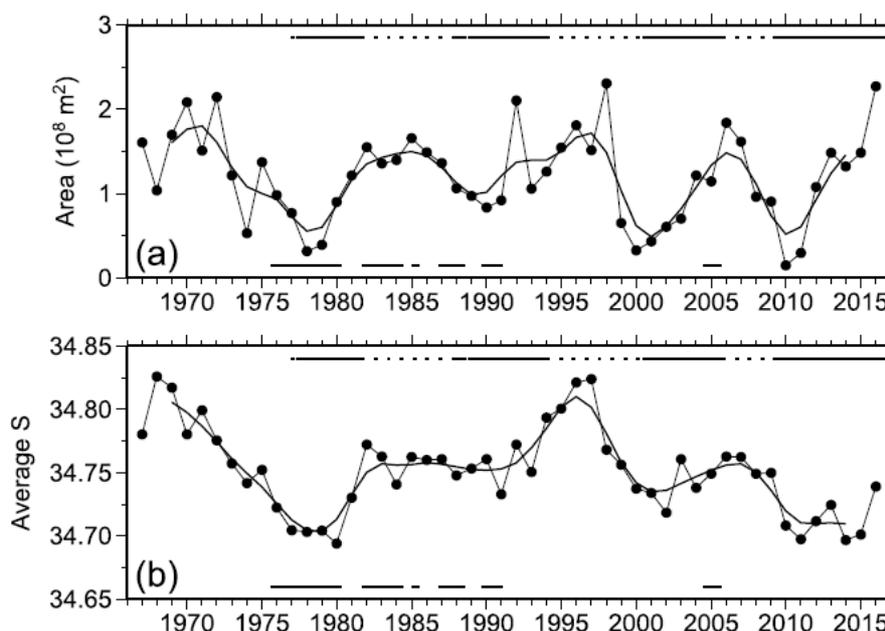


図 4 冬の 137E 定線における STMW の (上) 断面積と (下) 平均塩分の時間変動 (Oka et al., 2019)

< 引用文献 >

Oka, E., S. Kouketsu, D. Yanagimoto, D. Ito, Y. Kawai, S. Sugimoto, and B. Qiu, 2020: Formation of Central Mode Water based on two zonal hydrographic sections in spring 2013 and 2016. *Journal of Oceanography*, in press.

Oka, E., K. Yamada, D. Sasano, K. Enyo, T. Nakano, and M. Ishii, 2019: Remotely forced decadal physical and biogeochemical variability of North Pacific Subtropical Mode Water over the last 40 years. *Geophysical Research Letters*, **46**, 1555-1561.

Oka, E., M. Ishii, T. Nakano, T. Suga, S. Kouketsu, M. Miyamoto, H. Nakano, B. Qiu, S. Sugimoto, and Y. Takatani, 2018: Fifty years of the 137E repeat hydrographic section in the western North Pacific Ocean. *Journal of Oceanography*, **74**, 115-145.

Oka, E., S. Katsura, H. Inoue, A. Kojima, M. Kitamoto, T. Nakano, and T. Suga, 2017: Long-term change and variation of salinity in the western North Pacific subtropical gyre revealed by 50-year long observations along 137E. *Journal of Oceanography*, **73**, 479-490.

Oka E., B. Qiu, Y. Takatani, K. Enyo, D. Sasano, N. Kosugi, M. Ishii, T. Nakano, and T. Suga, 2015: Decadal variability of Subtropical Mode Water subduction and its impact on biogeochemistry. *Journal of Oceanography*, **71**, 389-400.

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**, 521-534.

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**, 63-77.

Oka, E., and B. Qiu, 2012: Progress of North Pacific mode water research in the past decade. *Journal of Oceanography*, **68**, 5-20.

Oka, E., T. Suga, C. Sukigara, K. Toyama, K. Shimada, and J. Yoshida, 2011b: "Eddy resolving" observation of the North Pacific Subtropical Mode Water. *Journal of Physical Oceanography*, **41**, 666-681.

Oka, E., S. Kouketsu, K. Toyama, K. Uehara, T. Kobayashi, S. Hosoda, and T. Suga, 2011a: Formation and subduction of Central Mode Water based on profiling float data, 2003-08. *Journal of Physical Oceanography*, **41**, 113-129.

Oka E., K. Toyama, and T. Suga, 2009: Subduction of North Pacific central mode water associated with subsurface mesoscale eddy. *Geophysical Research Letters*, **36**, L08607, doi:10.1029/2009GL037540.

Oka, E. and T. Suga, 2005: Differential formation and circulation of North Pacific Central Mode Water. *Journal of Physical Oceanography*, **35**, 1997-2011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Oka, E., S. Kouketsu, D. Yanagimoto, D. Ito, Y. Kawai, S. Sugimoto, and B. Qiu	4. 巻 76
2. 論文標題 Formation of Central Mode Water based on two zonal hydrographic sections in spring 2013 and 2016	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-020-00551-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Oka, E., K. Yamada, D. Sasano, K. Enyo, T. Nakano, and M. Ishii	4. 巻 46
2. 論文標題 Remotely forced decadal physical and biogeochemical variability of North Pacific Subtropical Mode Water over the last 40 years	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1555-1561
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2018GL081330	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Oka Eitarou, Ishii Masao, Nakano Toshiya, Suga Toshio, Kouketsu Shinya, Miyamoto Masatoshi, Nakano Hideyuki, Qiu Bo, Sugimoto Shusaku, Takatani Yusuke	4. 巻 74
2. 論文標題 Fifty years of the 137 °E repeat hydrographic section in the western North Pacific Ocean	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 115-145
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-017-0461-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Inomata, Y., M. Aoyama, T. Tsubono, D. Tsumune, Y. Kumamoto, H. Nagai, T. Yamagata, M. Kajino, T. Tanaka, T. Sekiyama, E. Oka, M. Yamada	4. 巻 189
2. 論文標題 Estimate of Fukushima-derived radiocaesium in the North Pacific Ocean in summer 2012	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 1587-1596
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10967-018-6249-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kumamoto, Y., M. Aoyama, Y. Hamajima, E. Oka, and A. Murata	4. 巻 189
2. 論文標題 Time evolution of Fukushima-derived radiocesium in the western subtropical area of the North Pacific Ocean by 2017	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	6. 最初と最後の頁 2181-2187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10967-018-6133-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Oka, E., S. Katsura, H. Inoue, A. Kojima, M. Kitamoto, T. Nakano, and T. Suga	4. 巻 73
2. 論文標題 Long-term change and variation of salinity in the western North Pacific subtropical gyre revealed by 50-year long observations along 137° E	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 479-490
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-017-0416-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 岡英太郎
2. 発表標題 全球海洋観測システムの発展と今後
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Eitarou Oka and Toshiya Nakano
2. 発表標題 Long-term change and decadal variability in physical and biogeochemical properties of the North Pacific Subtropical Mode Water revealed by 50-year long shipboard observations along 137E
3. 学会等名 Ocean Obs '19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡英太郎・山田広大・笹野大輔・延与和敬・中野俊也・石井雅男
2. 発表標題 遠隔強制による過去40年間の亜熱帯モード水の物理・生物地球化学的十年規模変動
3. 学会等名 2019年度日本海洋学会秋季大会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Eitarou Oka, Shota Katsura, Hiroyuki Inoue, Atsushi Kojima, Moeko Kitamoto, Toshiya Nakano, Toshio Suga
2. 発表標題 Long-term change and variation of salinity in the western North Pacific subtropical gyre revealed by 50-year long observations along 137E
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

白鳳丸KH-13-3次航海 http://ocg.aori.u-tokyo.ac.jp/member/eoka/cruises/kh-13-3/index-jp.html 白鳳丸KH-16-3次航海 http://ocg.aori.u-tokyo.ac.jp/member/eoka/cruises/kh-16-3/index-jp.html 新青丸KS-18-1次航海 https://ocg.aori.u-tokyo.ac.jp/member/eoka/cruises/ks-18-1/index-jp.html 新青丸KS-18-4次航海 https://ocg.aori.u-tokyo.ac.jp/member/eoka/cruises/ks-18-4/index-jp.html ハワイの北の風がコントロールする沖縄の海の酸性化 https://www.aori.u-tokyo.ac.jp/research/news/2019/20190126.html

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考