

平成30年 5月17日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K17756

研究課題名(和文) 過去100年の亜熱帯モード水水温の構築：海洋温暖化評価と数十年周期変動機構解明

研究課題名(英文) Temperature of North Pacific subtropical mode water over the past 100 years: ocean warming and decadal-scale variations

研究代表者

杉本 周作 (Shusaku, Sugimoto)

東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教

研究者番号：50547320

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：世界中の研究機関から収集した水温データを用いて、北太平洋亜熱帯モード水水温の長期変化・長期変動を調べた。その結果、亜熱帯モード水はこの100年で1度を超える速いペースで昇温していることを発見した。そして、亜熱帯モード水水温は混合層深度発達に伴うエントレインメント過程により約10年周期で変動することがわかった。さらに、数値実験により、亜熱帯モード水を取り込んだ暖水渦に起因した気温上昇は上空4000mにまで及ぶことを見出した。

研究成果の概要(英文)：I investigated long-term behavior of the subtropical mode water (STMW) in the North Pacific, using historical temperature profiles from academic institutions from around the world. I showed that the STMW has markedly warmed over the past one hundred years, the warming rate of which is estimated as 1.13 ± 0.27 °C per century. The STMW temperature has significant decadal (about 10 year) variations, which is formed by a vertical entrainment process associated with a deepening of mixed layer depth during winter. By conducting atmospheric model experiments, I found that significant warming due to the eddies with the STMW extend not only into the near-surface atmosphere but also into the high altitude, reaching about 4000m.

研究分野：海洋物理学

キーワード：亜熱帯モード水 海洋温暖化 10年規模変動 CMIP5 再解析データ 領域大気モデル 大気海洋相互作用

1. 研究開始当初の背景

水温の鉛直勾配の極小層として特徴づけられる北太平洋亜熱帯モード水(以下、亜熱帯モード水)は、冬に黒潮続流南方域の深い混合層内で形成され、春以降に亜表層へ沈み込み、移流することで亜熱帯循環系の広範囲に分布する(図1)(Masuzawa 1969等)。そして、この亜熱帯モード水は、渦位の輸送を通して海洋表層の成層構造や循環に影響すること(Kubokawa 1999等)や、二酸化炭素輸送に重要な役割を果たすこと(Takahashi *et al.* 2009)などが指摘されている。このように亜熱帯モード水は、気候変化・気候変動を理解する上で重要な水塊である。

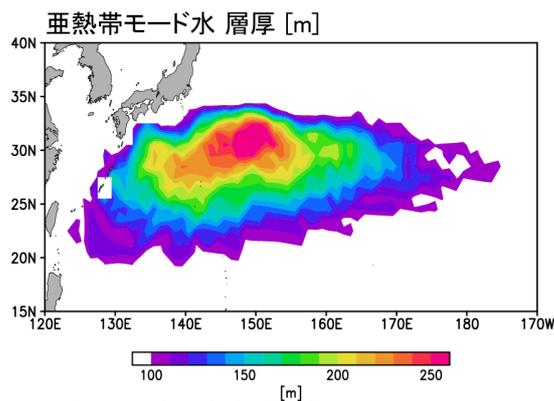


図1. 水温・塩分気候値データ(World Ocean Atlas 2013: Locarnini *et al.* 2013; Zweng *et al.* 2013)から同定した夏の亜熱帯モード水の層厚分布。単位はm。

既存の研究により、亜熱帯モード水の水温は約10~20年周期で変動すると報告されている(Yasuda and Hanawa 1997等)。また、亜熱帯モード水形成域の海面水温は、この100年で約1.3°Cも上昇しているため(Wu *et al.* 2012)、亜熱帯モード水の昇温も顕著であることが想定される。

亜熱帯モード水水温の時間変化・変動に関する研究は、主に格子化水温データセットを用いて行われてきた。ただ、格子化データの利用はXBT観測が広範囲に展開された1970年以降に制限される。それゆえに、長期におよぶ亜熱帯モード水水温の変化・変動の実態は未だ解明されていない。

2. 研究の目的

上記未解明点は、地上気温や海面水温に比べ、海洋内部の水温データが極めて少ないことに起因する。そこで、本研究課題では、水産研究教育機構・中央水産研究所(旧水産庁中央水産研究所)により近年発掘された1910年以降の水温データを世界で初めて使用し、世界各国研究機関所有の水温データとの統合を果たすことで100年におよぶ亜熱帯モード水水温の長期時系列の作成を目指す。そして、亜熱帯モード水を突破口にし、観測資料(海面水温・海面高度等)、大気再解析データ、モデル出力値(過去海洋再現実験等)を併用

することで海洋数十年周期変動の機構解明、および海洋温暖化の実態解明を果たす。さらに、大気モデル実験を実施することで、亜熱帯モード水水温変化に起因する局所大気応答を明らかにすることで、気候学の新たなパラダイムの創出を試みる。

3. 研究の方法

亜熱帯モード水の抽出・混合層深度等の同定には、中央水産研究所所有の水温データ、World Ocean Database 2013(Boyer *et al.* 2013)・JODCに蓄積されている水温データ、およびJAMSTECのAQC Argoデータの水温プロファイルを用いた。個々の水温プロファイルに本研究独自に品質管理を行った後に、秋間法(Akima 1970)により鉛直方向に1m間隔に補間した。さらに、7種類の海面水温データ(Kaplan *et al.* 1998, Rayner *et al.* 2003, Minobe and Maeda 2005, Rayner *et al.* 2006, Reynolds *et al.* 2007, Smith *et al.* 2008, Huang *et al.* 2015)、フランスの研究機関(AVISO)が整備・公開している人工衛星観測海面高度計データ、3種類の大気再解析データセット(Compo *et al.* 2011, Kobayashi *et al.* 2015, Hersbach *et al.* 2015)を使用した。領域大気モデルは気象庁開発の非静力学大気モデル(JMA-NHM:Saito *et al.* 2006, 2007)を用いた。

4. 研究成果

(1) 亜熱帯モード水の顕著な昇温

世界中から収集した水温プロファイルから、水温・水温鉛直勾配・層厚の観点で亜熱帯モード水を厳密に同定した。そして、本研究独自に開発した観測地点・観測時期の偏りの影響除去アルゴリズムを適用することで、世界最長の亜熱帯モード水水温の時系列を作成した(図2)。

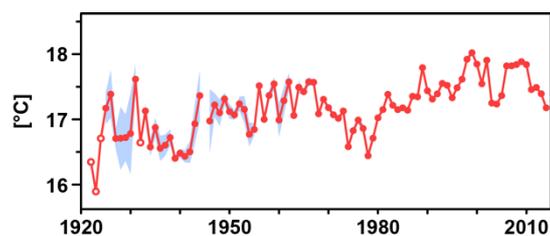


図2. 亜熱帯モード水水温の時系列。陰影は信頼区間90%を示す(5点以上の観測データが存在した年が対象)。白丸はデータが5点未満の年を表す。

図2より、亜熱帯モード水はこの100年で顕著に昇温していることがわかった。そこで、亜熱帯モード水水温の上昇率を見積もった結果、100年あたり $1.04 \pm 0.19^\circ\text{C}$ の速さで上昇していることがわかった。これは、観測数が多い1948年以降でも同程度(100年あたり $1.13 \pm 0.27^\circ\text{C}$)であった。この亜熱帯モード水水温の上昇率は、モード水が分布する亜熱帯循環域の海面水温の上昇率の約2倍の大き

さであった(100年あたり0.4~0.6°C上昇)。つまり、亜熱帯域では、亜表層ほど水温上昇が顕著であることを発見した。

亜熱帯モード水水温の上昇要因を同定するために、モード水形成域である黒潮続流南方域の海面水温変化を調べた。その結果、モード水形成域の冬季海面水温の上昇率は100年あたり0.8~1.2°Cと実に大きく、亜熱帯モード水水温上昇率と概ね整合していることがわかった。すなわち、亜熱帯モード水形成域での顕著な水温上昇が、春以降のサブダクション・移流過程を通して亜熱帯域亜表層水温の顕著な上昇をもたらしたと指摘した。そこで、この仮説の妥当性を検証するために、IPCC 第5次評価報告書で利用されたCMIP5(Taylor *et al.* 2012)のHistorical runの22モデルの出力値を解析した。その結果、モデルの水温上昇率は観測資料解析結果に比べて若干小さいものの、亜熱帯モード水形成域水温の上昇率は亜熱帯域亜表層水温の上昇率と良い対応関係にあることがわかった(図3)。

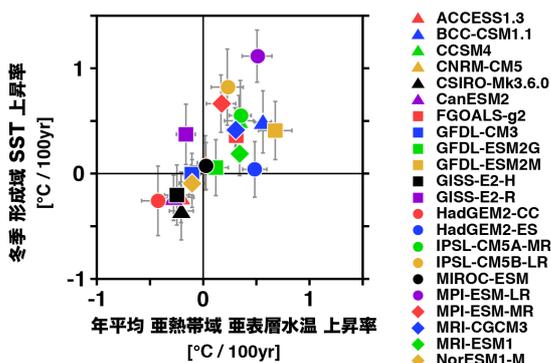


図3. CMIP5 historical runの22モデル出力値から求めた年平均亜熱帯域亜表層水温上昇率と冬季亜熱帯モード水形成域海面水温上昇率の対応関係。上昇率は1920年以降を対象に算出している。

次に、亜熱帯モード水形成域での冬季海面水温上昇要因の示唆を得るために、大気海洋間熱交換関係を検証した。その結果、亜熱帯モード水形成域では海から大気に向けて放出される熱が、過去100年間で増加傾向にあることがわかった。すなわち、モード水形成域での海面水温上昇は大気海洋間の熱交換では説明できない。それゆえに、亜熱帯モード水形成域での顕著な水温上昇は、地球温暖化下での黒潮強化に伴う熱移流増加の影響を示唆した。

亜熱帯モード水水温上昇に起因する海水位上昇率を熱力学的に見積もった結果、得られた上昇率は100年あたり約80mmであった。この上昇率は、地球温暖化に伴う亜熱帯域での海水位上昇率の約50%を説明できる量であった。

一連の研究成果は、地球温暖化下での海洋による熱の吸収・蓄積過程解明に資する重要な手掛かりになる。

(2) 亜熱帯モード水渦への大気応答解明

日本東岸沖には、亜熱帯モード水を取り込んだ暖水渦(直径300km・厚さ500m程度)が多く分布する。この暖水渦は、大気への熱放出等を通して上空大気場に影響を及ぼすことが期待される。そこで、JMA-NHMを用いて日本東岸沖に暖水渦を与えた実験(Eddy run: 周囲に比べて海水温が3°C高い直径300kmの渦を4つ配置; 図4a参照)と与えない実験(Non-Eddy run)を実施し、得られた出力値を比較・検討することで暖水渦が大気場に果たす役割の同定を行った。

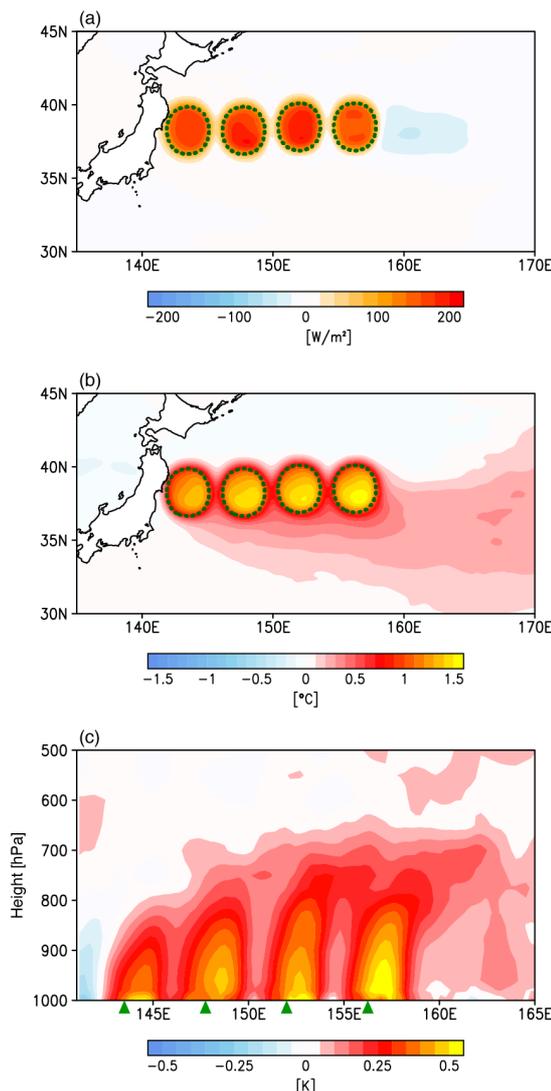


図4. Eddy runとNon-Eddy runの差: (a) 上向き乱流熱フラックス差 [W m^{-2}]、(b) 地表気温差 [$^{\circ}\text{C}$]、(c) 北緯37.75度沿いの気温差 [K]。 (a) (b) の緑破線はEddy runに与えた暖水渦の縁を表し、(c) の緑三角は暖水渦の中心経度を表す。

図4aは上向き乱流熱フラックスのEddy runとNon-Eddy runの差を表す。この図より、暖水渦から大気に向けて多くの熱が放出されており、その差は 200 W m^{-2} にもおよぶことがわかった。そして、海上気温上昇は、暖水渦

上で大きく、 1.5°C におよぶことが見出された(図4b)。そこで、暖水渦の影響が及ぶ高度を調べた。その結果、暖水渦による気温上昇は、海面付近だけではなく、大気境界層高度を越え、遙か上空の高度約4000mにまで及ぶことがわかった(図4c)。

続いて、暖水渦への海上風応答を調べた。実験の結果、暖水渦上ほど海上風が強化されていることがわかった(図5a)。そこで、この海上風強化の物理機構の解釈を得るために診断解析を実施した。その結果、鉛直混合メカニズムにより、上空大気の大きな運動量が下降してきたことが海上風強化の主因であるという結論を得た。そして、この海上風加速は、渦東端で収束場を形成することがわかった(図5b)。この海上風収束は局地的な上昇流を形成し(図5c)、これは境界層高度の直上で最も強く、対流圏上層付近にまで到達するような深い構造を伴うことがわかった。

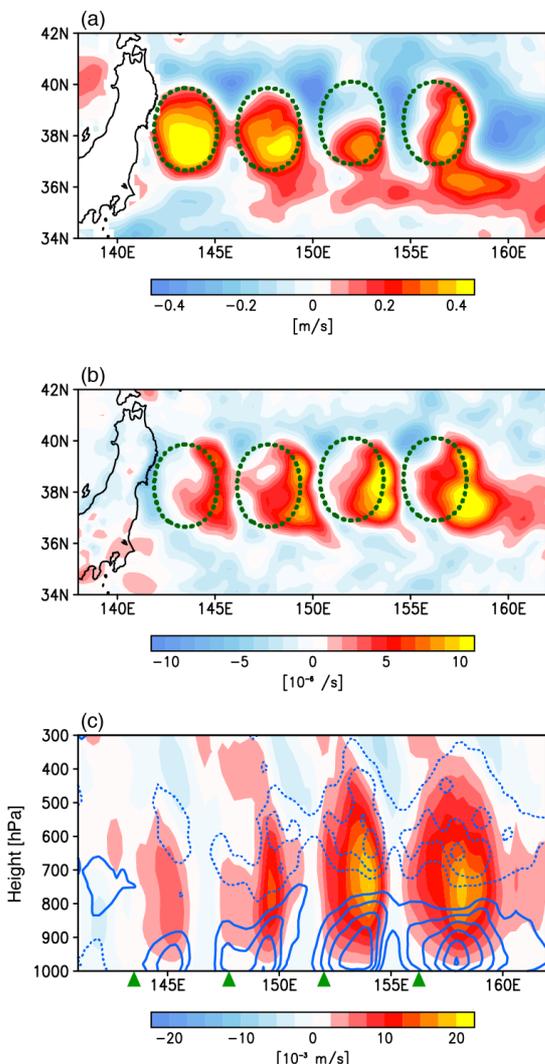


図5. 図4と同様、ただし、(a) 地表風速差 $[\text{m s}^{-1}]$ 、(b) 地表風収束差 $[10^{-6} \text{ s}^{-1}]$ 、(c) 北緯37.75度沿鉛直上向風速差 $[10^{-3} \text{ m s}^{-1}]$ 。(c) の等値線は水平風の収束を表す。

暖水渦分布に伴い渦東端上で形成された上昇流は、境界層高度上の自由大気の雲水量

の増加をもたらし、その結果、雲量および降水量が増加することがわかった。この暖水渦分布に伴う雲量増加は平均値の約10%、降水量増加は約50%と実に大きかった。そして、大量の降水に起因した非断熱加熱が、境界層高度上の自由大気での気温上昇の要因であることを見出した。

以上の数値実験により、亜熱帯モード水の水温分布を反映した暖水渦は、海面付近だけでなく境界層高度を越えて自由大気にまで影響を及ぼすことがわかった。

(3) 亜熱帯モード水水温の10年規模変動

亜熱帯モード水水温は、黒続流南方域での冬の深い混合層内で形成される。そこで、収集した水温プロファイルを用いて、本研究独自に亜熱帯モード水形成域の冬季混合層水温、および冬季混合層深度の時系列を作成した。本研究では、冬季混合層深度を十分に同定できる深さまで観測が実施されている1968年以降を研究対象とした。

亜熱帯モード水形成域での冬季混合層水温は、1990年頃を境に変動の様子が大きく変わることがわかった(図6a)。すなわち、1990年以前では経年変動が著しいのに対し、1990年以降では10年規模変動が卓越する。そこで、この変動要因を解明するために、混合層熱収支解析を実施した。その結果、1990年の前後で水温変動要因が変わることを見出した。すなわち、1990年以前は大陸から吹き出す北西季節風に伴う海洋冷却効果(大気効果)が支配的であるのに対し、1990年以降では海洋成層変化に伴う下層水取り込み過程(海洋効果)が主因であった。

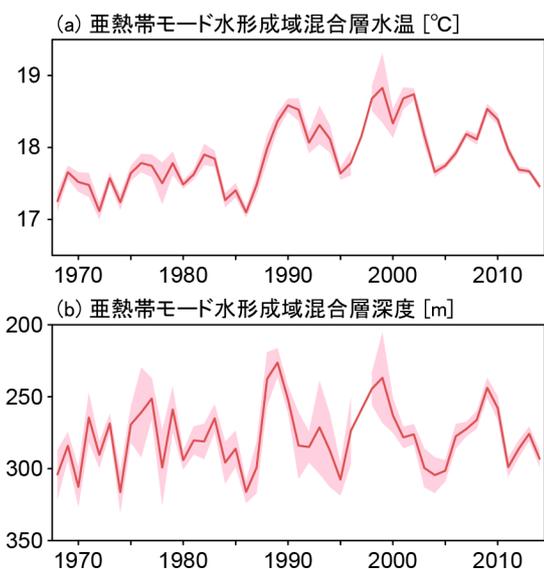


図6. (a) 冬(3月)の亜熱帯モード水形成域混合層水温時系列 $[^{\circ}\text{C}]$ 。陰影は信頼区間10%を表す。(b) (a)と同様、ただし冬季混合層深度時系列 $[\text{m}]$ 。

下層水取り込み過程は混合層が発達する

秋から冬にかけて顕著になる。そこで、冬季混合層深度(図6b)の変動特性を調べた結果、やはり顕著な10年周期変動成分が抽出された。先行研究により、冬季混合層深度の決定には、浮力損失(正味海面熱フラックス)や亜表層成層強度、主水温躍層深度の影響が指摘されている。そこで、冬季混合層深度決定に果たす上記要因の相対的影響を評価するために、鉛直一次元乱流クロージャーモデル(Noh and Kim 1999; Kako and Kubota 2007)を用いて数値実験を行った。その結果、冬季混合層深度変動の主因は主水温躍層深度にあること、そして、この躍層深度は大気強制等の外力にはよらず海洋亜表層成層構造を反映した結果ことがわかった。さらに、この亜表層成層構造は、太平洋中央部でアリュシャン低気圧の南北位置変化に伴い励起された海洋ロスビー波の影響と黒潮続流流路形態変化の影響の組み合わせで説明できることがわかった。

以上の観測資料解析・数値実験により、亜熱帯モード水の水温や形成量の10年規模変動は、亜熱帯モード水形成域の混合層深度と混合層水温が相互に影響を及ぼすことで変動するという自励的変動シナリオを新たに提唱した。これは、北太平洋気候場の10年規模周期変動機構解明に貢献するものである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

1. Sugimoto, S., K. Hanawa, T. Watanabe, T. Suga, and S.-P. Xie, 2017: Enhanced warming of the subtropical mode water in the North Pacific and North Atlantic. *Nature Climate Change*, 7 (9), 656-658, 査読有.
DOI:10.1038/nclimate3371
2. Sugimoto, S., K. Aono, and S. Fukui, 2017: Local atmospheric response to warm mesoscale ocean eddies in the Kuroshio-Oyashio Confluence region. *Scientific Reports*, 7, 11871, 1-6, 査読有.
DOI:10.1038/s41598-017-12206-9
3. Sugimoto, S., and S.-I. Kako, 2016: Decadal variations in wintertime mixed layer depth south of the Kuroshio Extension and its influence on winter mixed layer temperature. *J. Climate*, 29 (3), 1237-1252, 査読有.
DOI:10.1175/JCLI-D-15-0206.1

[学会発表] (計17件)

1. Sugimoto, S., K. Hanawa, T. Watanabe, T. Suga, and S.-P. Xie: Enhanced warming of the subtropical mode water in the North Pacific and North Atlantic. *Ocean Science Meeting 2018*, February 13, 2018.

2. 杉本周作, 青野憲史, 福井真: 日本東岸沖暖水渦が冬季大気場に及ぼす影響. 日本気象学会 2017年度春季大会, 2017年5月27日.

[図書] (計1件)

1. 杉本周作, ベレ出版, 天気と海の関係についてわかっていること知らないこと 第1章 黒潮と空の研究. 2016年, pp. 13-60.

[その他]

報道関連情報

1. 2016年3月28日 日本経済新聞「イワシ久々の豊漁、入荷5年前の3倍 店頭で一割安」(資料提供)
2. 2018年1月21日 NHK Eテレ サイエンスZERO「巨大海流 黒潮」(資料提供)
3. 2018年3月 NHK SHV「屋久島 海から始まる命の物語」(監修・出演・解説)

プレスリリース

1. 2017年9月5日「亜熱帯の海水温100年間で1度上昇 ～世界平均海面水温の2倍の速さで温暖化進行～」東北大学

アウトリーチ活動

1. 杉本周作: 海が気候を変えている? ～海洋学への扉～ (出前授業) 宮城県立宮城第一高等学校 コスモス・カレッジ・インターンシップ、宮城県立宮城第一高等学校、2015年10月2日
2. 杉本周作: 海を学問する ～海と私たちの暮らし～ (出前授業) 岩手県立前沢高等学校 大学模擬授業、一関文化センター、2018年2月23日
3. 杉本周作: 海洋学への招待 ～海が気候を変えている?～ (出前授業) 岩手県立前沢高等学校 大学模擬授業、一関文化センター、2018年2月23日

ホームページ

http://www.pol.gp.tohoku.ac.jp/~sugimoto/main/kaken/2016-2018_wakate/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 周作 (SUGIMOTO SHUSAKU)
東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教
研究者番号: 50547320

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

福井 真 (FUKUI SHIN)
東北大学・大学院理学研究科・研究員