

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03969

研究課題名(和文) 地球温暖化による北太平洋亜熱帯循環の変化とその気候への影響の解明

研究課題名(英文) Change in the North Pacific subtropical gyre due to global warming and its climatic influence

研究代表者

小橋 史明 (Kobashi, Fumiaki)

東京海洋大学・学術研究院・教授

研究者番号：80377077

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)：海洋観測資料および気候モデルにより再現された過去気候の大規模アンサンブル資料を解析し、北太平洋亜熱帯水温躍層とモード水の長期変化を調べた。地球温暖化により北米大陸西岸沖から亜熱帯循環の南側にかけての領域において主水温躍層が有意に深化していることを発見し、水温躍層付近の循環が弱まっていることを示唆した。これに加え、亜熱帯モード水と中央モード水に関連する上部水温躍層と主水温躍層の変化を見出し、モード水が特に表層の水温変動に大きな影響を与えていることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

北太平洋亜熱帯循環は地球温暖化によりすでに変化している可能性が本研究により初めて示された。さらに、モード水の変動が水温躍層内に水温偏差を形成することを見出し、気候モデルにおけるモード水の現実的な再現が将来予測において重要であることを指摘した。これら得られた成果は、地球温暖化に起因する将来予測に大きく寄与することが期待される。

研究成果の概要(英文)：Analyzing historical hydrographic observations and large ensemble data of the past climate simulation based on climate models, we examine the change in the North Pacific subtropical thermocline and mode waters. We found that the main thermocline becomes deeper in the area off the North America continent and along the southern side of the subtropical gyre, which suggests that the lower subtropical gyre has weakened due to global warming. In addition, we found changes in the thermocline in association with subtropical mode water and central mode water and showed the importance of mode waters especially in the changes in the surface temperature.

研究分野：海洋物理学

キーワード：亜熱帯循環 地球温暖化 水温躍層 モード水

1. 研究開始当初の背景

北太平洋亜熱帯循環は、黒潮や黒潮続流などの海流から成る大規模な時計回りの循環である(図1)。この循環は、西側で暖水を極方向へ運び、大量の熱と水蒸気を大気へ放出した後、中央から東側において冷やされた海水を赤道方向へ運ぶことにより、海盆規模の熱輸送と中緯度の気候形成において重要な役割を担っている。この亜熱帯循環は、地球温暖化により今世紀末までに大きく変化することが気候モデルにより予測されている(Wang et al. 2015)。一方、現在に至るまでの亜熱帯循環の長期変化の実態は必ずしも解明されていない。

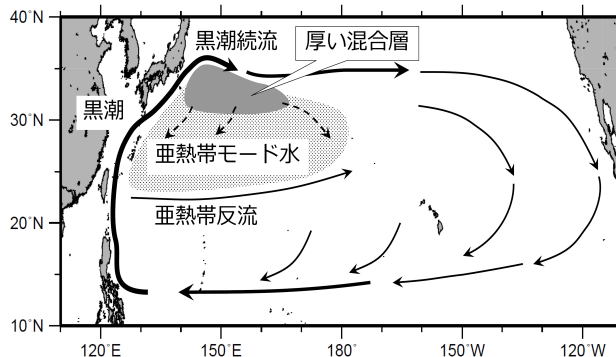


図1. 亜熱帯循環と亜熱帯モード水の分布

日本の東方沖を流れる黒潮続流の海域では、冬季の活発な海面冷却により、水温が鉛直にほぼ一様となる混合層が厚く発達する(図1)。この混合層の水は、亜熱帯モード水として、亜表層に沈み込む。亜熱帯モード水は、冬季混合層の熱偏差を水温躍層内に伝えるほか、鉛直一様な低渦位の海水の輸送を通して、亜熱帯モード水の分布域の南端に沿って亜熱帯前線や亜熱帯反流を形成することが知られている(図1; Kobashi and Kubokawa 2012)。亜熱帯モード水の水温は、温暖化により長期的に上昇している(Sugimoto et al. 2017)ことが指摘されているが、このような亜熱帯モード水の変化が亜熱帯の水温躍層にどのような影響を与えているかについては未解明である。

2. 研究の目的

歴史的海洋観測資料および数値モデルのデータを統合的に解析し、北太平洋亜熱帯循環の過去の長期変化の実態を明らかにし、地球温暖化の影響を捉えることを目指す。本研究では、亜熱帯循環の指標として主水温躍層の深度に着目する。そして、観測資料の解析から北太平洋のモード水の長期変動を検出し、モード水の変動の実態を明らかにするとともに、水温躍層の変動との関連を調査する。

3. 研究の方法

本研究では主に2つの海洋観測資料を解析した。一つは、1965年以降の10年毎の水温平均データセット World Ocean Atlas 2018 (WOA) である。北太平洋では1965年以降比較的観測データが存在し、過去約50年間の海洋の長期変化を捉えることができる。もう一つは、気象庁の東経137度定線観測資料である。亜熱帯モード水の分布域を南北に横断する東経137度線に沿って、日本南岸から熱帯域まで年2回冬季と夏季に観測が行われている。本研究では、1972年に始まった夏季の観測データを主に解析した。WOAとは異なり年々の変動を分解できるため、風により励起される自然変動の影響を推定することにより、温暖化の信号をより適切に抽出できると期待される。

観測資料に加えて、気候モデル Community Earth System Model (CESM) により再現した過去(1920 - 2005年)気候の大規模アンサンブル資料(Large Ensemble, 42メンバー; Kay et al. 2015)を解析した。長期変化の検出は、海洋が持つ数十年規模の自然変動の影響を受ける。アンサンブル平均を用いることにより、自然変動の影響を小さく抑え、温暖化による長期変化を見積もる。

4. 研究成果

(1) 主水温躍層深度の長期変化

主水温躍層はおよそ10等温線と一致するため、10等温線を指標に用いて主水温躍層深度の長期変化を調べた。WOAの水温データの解析から、亜熱帯循環の中央部から南西部にかけて主水温躍層の深化傾向が見られた。主水温躍層の深化傾向は、CESMの大規模アンサンブル資料から計算したアンサンブル平均にも見られ、北米大陸西岸沖から亜熱帯循環の南側にかけて有意な変化が見られた。この海域では、アンサンブルのスプレッドが小さく、海洋の自然変動は小さい。風に起因する自然変動が長期トレンドの見積もりに与える影響を低減するため、各メンバーにおいて、風強制に対する水温躍層の応答を、線形傾圧ロスビー波モデルを用いて解析的に計算し、水温躍層の変動から風強制成分を除去した。この水温躍層深度の偏差データから、長期トレンドのアンサンブル平均を計算した(図2)。その結果、特に亜熱帯循環南側における水温躍層の深化傾向が明瞭となり、およそ10年で0.5 - 1.0 m程度の割合で深化していることが明らかとなった。これは、水温躍層の深化傾向が自然変動の影響でなく、地球温暖化に起因することを示している。

亜熱帯循環の主水温躍層は、循環中央部で深く周囲に向かって浅くなるボウル状の構造をしている(図2)。水温躍層の深化傾向は、躍層が浅いところで大きく、水温躍層の水平勾配が緩やかになることを意味する。つまり、水温躍層の深度付近では、亜熱帯循環が弱化していることを示唆する。このような躍層と循環の変化は、気候モデルによる将来予測(Wang et al. 2015)と整合しており、温暖化による循環系の変化がすでに顕在化している可能性を示している。同様の結果は、海洋再解析データ SODA(Giese and Ray 2011)の解析からも確認された。

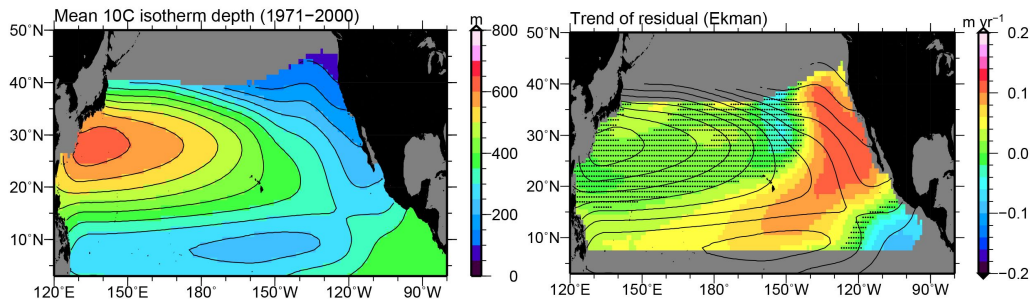


図2. 1971 - 2000年間の平均の主水温躍層深度(左図)および1920 - 2005年間の主水温躍層深度のトレンド(右図)のアンサンブル平均。トレンドは線形ロスビー波モデルにより推算した風強制による水温躍層変動を除去した時系列から計算。ハッチは95%信頼限界でトレンドが有意でない領域。

(2) モード水の高温化傾向と水温躍層の長期変化

WOAの解析から、亜熱帯の広い海域で表層の水温が上昇していること、特に、亜熱帯モード水と中央モード水の分布域において昇温が大きいことを示した(図3)。モード水は、上部水温躍層と主水温躍層の間に分布する。モード水分布域の上部水温躍層では、昇温傾向が大きい一方で、亜熱帯モード水の下の主水温躍層では、逆に低温化傾向が見られた。これらの傾向は、等温面の深度変化と整合的であり、上部水温躍層の高温化は等温面の深化と関係し、主水温躍層の低温化は等温面の浅化と関係することがわかった。

次に、年々変動を分解できる気象庁東経137度定線観測資料を用いて、風により励起される水温躍層の自然変動の影響を調べた。東経137度においても、亜熱帯モード水の高温化と主水温躍層の深度における低温化のトレンドが見られた。線形傾圧ロスビー波モデルを用いて、風強制による主水温躍層変動を推算し、観測された主水温躍層深度の変動から風強制成分を取り除いた。この水温躍層深度の偏差成分は、明瞭な長期トレンドを示し、特に2000年以降に大きく浅化していたことが明らかになった。この主水温躍層の浅化は、亜熱帯モード水の高温化傾向と類似しており、モード水の昇温化との関係が示唆された。

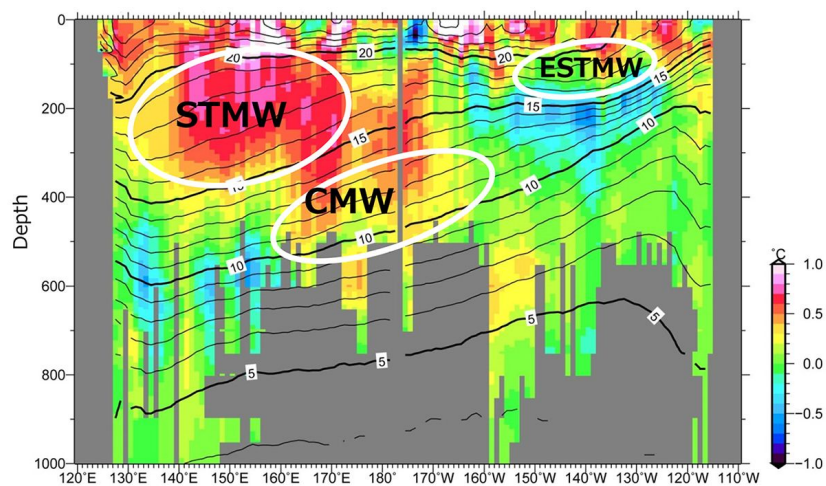


図3. WOAデータから計算した北緯28.5度に沿う1995 - 2012年と1965 - 1984年の平均水温の差。等値線は気候値。白丸はモード水のおよその位置を表す。STMWは亜熱帯モード水、CMWは中央モード水、ESTMWは東部亜熱帯モード水。

(3) モード水の厚さの変動が水温躍層に及ぼす影響

亜熱帯モード水の変動が水温躍層に及ぼす影響を調べるために、東経 137 度定線観測資料を解析した。ここでは、長期トレンドではなく、限られた長さの時系列からロバストな結果を得るために、十年規模変動に着目して、亜熱帯モード水と水温躍層の変動の関係を調べることにした。

亜熱帯モード水は北緯 20 - 32 度に分布し、亜熱帯モード水の厚さにはおよそ 9 - 15 年周期の変動が見られた。この亜熱帯モード水の変動は、上部水温躍層と主水温躍層の等密度面深度の変動とそれぞれ有意な負相関と弱い正相関を示した。つまり、亜熱帯モード水が厚く低渦位の時は、上部水温躍層が浅化し、亜熱帯モード水の上部から海面付近にかけて正の密度(低温)偏差が現れる(図 4)。一方、主水温躍層は亜熱帯モード水が厚い時に深化する傾向が見られた。このモード水に対する水温躍層の変動は、先行研究により提案されている傾圧第 2 モード調節(Xie et al. 2011)と整合する。風により励起される傾圧第 1 モードロスビー波と東経 137 度における等密度面深度の変動との関係を調べた結果、亜熱帯モード水の海域では、特に上部水温躍層の変動はロスビー波よりも亜熱帯モード水の影響を強く受けていることがわかった。

亜熱帯モード水の分布域の南端では、上部水温躍層が北に向かって浅くなり、亜熱帯前線を形成する。本研究では、密度の水平南北勾配を前線強度と定義して、亜熱帯モード水の変動と亜熱帯前線の変動との関係を調べた。亜熱帯前線の強度には、およそ 8 - 15 年の周期変動が卓越し、亜熱帯モード水の厚さの変動周期とおよそ一致する。亜熱帯前線の強度変動は、主に等温面の南北勾配の変動に起因し、亜熱帯モード水が厚くなると上部水温躍層の南北勾配が通常よりも大きくなり、亜熱帯前線が強化することが明らかになった(図 4)。亜熱帯前線の十年規模変動の分散のおよそ 40 - 50% は亜熱帯モード水の変動で説明される。

これらの結果は、地球温暖化によるモード水の高温化と形成量の減少が、亜熱帯表層水温や亜熱帯前線の長期変化に大きな影響を与えることを示唆している。気候モデルにおけるモード水の現実的な再現が温暖化の将来予測において重要であると考えられる。

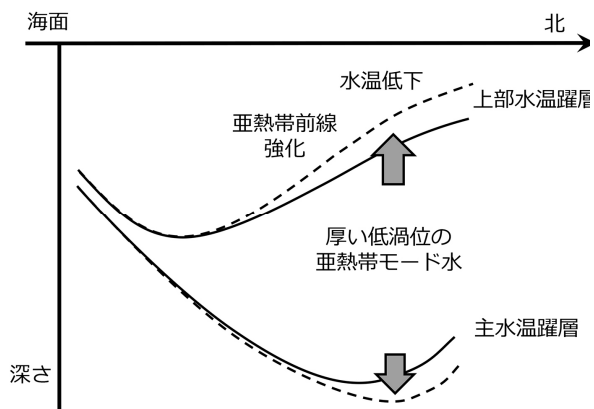


図 4. 亜熱帯モード水と水温躍層の変動の関係の模式図。

< 引用文献 >

- Giese, B. S. and S. Ray, 2011: El Niño variability in simple ocean data assimilation (SODA), 1871-2008. J. Geophys. Res., 116, C02024.
- Kay, J. E., and Coauthors, 2015: The Community Earth System Model (CESM) Large Ensemble Project: A Community Resource for Studying Climate Change in the Presence of Internal Climate Variability. Bull. Amer. Meteor. Soc., 96, 1333-1349.
- Kobashi, F., and A. Kubokawa, 2012: Review on North Pacific Subtropical Countercurrents and Subtropical Fronts: role of mode waters in ocean circulation and climate. J Oceanogr 68, 21-43.
- Sugimoto, S., K. Hanawa, T. Watanabe, T. Suga, and S. Xie, 2017: Enhanced warming of the subtropical mode water in the North Pacific and North Atlantic. Nature Clim. Change, 7, 656-658.
- Wang, G., S. Xie, R. X. Huang, and C. Chen, 2015: Robust Warming Pattern of Global Subtropical Oceans and Its Mechanism. J. Climate, 28, 8574-8584.
- Xie, S., L. Xu, Q. Liu, and F. Kobashi, 2011: Dynamical Role of Mode Water Ventilation in Decadal Variability in the Central Subtropical Gyre of the North Pacific. J. Climate, 24, 1212-1225.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kobashi Fumiaki, Nakano Toshiya, Iwasaka Naoto, Ogata Tomomichi	4. 巻 77
2. 論文標題 Decadal-scale variability of the North Pacific subtropical mode water and its influence on the pycnocline observed along 137°E	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 487～503
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10872-020-00579-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 -

1. 著者名 Ogata, T., and M. Nonaka	4. 巻 125
2. 論文標題 Mechanisms of Long Term Variability and Recent Trend of Salinity Along 137°E	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 e2019JC015290
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019JC015290	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 Kobashi Fumiaki, Usui Norihisa, Akimoto Nanami, Iwasaka Naoto, Suga Toshio, Oka Eitarou	4. 巻 -
2. 論文標題 Influence of North Pacific subtropical mode water variability on the surface mixed layer through the heaving of the upper thermocline on decadal timescales	5. 発行年 2023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/s10872-022-00677-y	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7件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Fumiaki Kobashi, Norihisa Usui, Tomomichi Ogata and Naoto Iwasaka
2. 発表標題 Decadal variability of the North Pacific subtropical mode water and its influence on the thermocline
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小橋史明, 中野俊也, 岩坂直人, 尾形友道
2. 発表標題 北太平洋亜熱帯モード水の十年規模変動が密度躍層に与える影響について
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋元七海, 小橋史明, 岩坂直人
2. 発表標題 北太平洋亜熱帯モード水形成域における冬季海面水温偏差の再出現について
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小橋史明, 中野俊也, 岩坂直人
2. 発表標題 Decadal Variations of North Pacific Subtropical Mode Water and Their Influence on the Downstream Region Observed at the 137 °E Repeat Hydrographic Section
3. 学会等名 2020 Ocean Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小橋史明, 中野俊也, 岩坂直人, 尾形友道
2. 発表標題 北太平洋亜熱帯モード水の十年規模変動が水温躍層の構造に及ぼす影響
3. 学会等名 名古屋大学宇宙地球環境研究所共同利用研究 大気海洋相互作用に関する研究集会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小橋史明, 中野俊也, 岩坂直人
2. 発表標題 東経137 度定線における水温躍層の長期変動
3. 学会等名 大気海洋相互作用研究会主催2019年度山中湖シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾形友道
2. 発表標題 渦解像海洋モデル (OFES) で再現された北太平洋/日本海亜表層の塩分変動
3. 学会等名 東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター研究集会「北太平洋を中心とした中高緯度における海洋変動」
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担 者	尾形 友道 (Ogata Tomomichi) (60716679)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門 (アプリケーションラボ)・研究員 (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------