

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03752

研究課題名（和文）深海環境変化に基づく地球温暖化の解明

研究課題名（英文）Clarification of global warming based on changes in the deep ocean

研究代表者

内田 裕（Uchida, Hiroshi）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門（海洋観測研究センター）・主任研究員

研究者番号：00359150

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）：観測データに基づき深層循環弱化的証拠を明らかにすることを目的として、太平洋の深層循環の経路に沿う海溝とその周辺で船舶観測を実施した。海溝底までの水温・塩分・溶存酸素等の観測に加え、世界で初めて屈折率密度センサーによる海水密度測定に成功した。また、塩分測定用標準海水のオフセットを評価・補正することで、北太平洋深層の20年間の低塩分化トレンド（ -0.0006 g/kg/decade）の検出に初めて成功した。これは、南極周辺の深層水形成量の減少と関係すると示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化により海洋深層でも温暖化が報告されており、数値実験から南極周辺の深層水形成量の減少が北太平洋深層を昇温させるという説がある。深層循環弱化的証拠を明らかにするには、深海の微小な変化を検出する必要がある。現状の測定分解能よりも高い測定が期待される、屈折率密度センサーによる深海の海水密度の精密測定に、世界で初めて成功した。また、塩分測定用標準海水の認証値のずれを評価し補正することで、北太平洋深層の20年間の低塩分化トレンドの検出に初めて成功した。これらの成果は、深海環境変化のモニタリングに道を開くものである。

研究成果の概要（英文）：To clarify evidence of slowing thermohaline circulation based on the observational data, we conducted ship-based temperature, salinity, and dissolved oxygen measurements in super-deep trenches with their surroundings along the pathway of the deep circulation. We successfully measured seawater density in the deep ocean for the first time by using the refractive index density sensor. We also evaluated and corrected the batch-to-batch offsets of the Standard Seawater for salinity measurement and found recent freshening (-0.0006 g/kg/decade) in the deep North Pacific for the first time, which might be related to a reduction of the formation rate of Antarctic Bottom Water.

研究分野：海洋物理学

キーワード：海溝 温暖化 低塩分化 低酸素化 深層循環弱化的

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気候変動に関する政府間パネル第5次評価報告書では、地球温暖化は疑う余地がなく、700 m 以浅の海洋表層に加え 3000 m 以深の海洋深層でも温暖化が報告されている。南極周辺で大気により冷やされた海水は沈み込み、太平洋・インド洋・大西洋の各大洋の深層を深層流として北上していく。形成域に近い南極周辺の深層では、大規模な水温上昇(温暖化)に加え南極氷床の融解によると考えられる低塩分化も明らかになってきた。一方、数値実験で北太平洋深層の昇温現象の原因を調べると、南極アデリー海岸沖で沈み込む深層水の量が減少し、その情報が海洋波動として深層流の経路に沿って伝搬することで、約 50 年という極めて短い時間スケールで深層水の量を減少させるという説が示された。気候変動に対する海洋の役割を正しく理解するには、深層循環を含む海洋全層の熱や物質の輸送量を把握する必要がある。しかし、深層流の流量の直接測定は困難なため、数値実験で示された深層循環の弱化を捉えた観測研究は無い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、観測データに基づき深層循環弱化の証拠を明らかにすることである。高精度船舶観測(WOCE 再観測)データから、北太平洋の深層では、昇温に加え(極めて小さいが有意な)低酸素化が明らかになってきた。この昇温は深層水の量が減少したことによると考え、深層水の海水特性の南北分布から昇温に対応する酸素変化を求めると、観測された低酸素化の約半分を説明できた。従って、低酸素化の残り半分は深層循環の弱化によって深層水の滞留時間が増加し、微生物による有機物の分解で消費されたと推定できる。同様の昇温・低酸素化は、北西太平洋海盆と接続する伊豆・小笠原海溝内でも見られることが新しい研究船「かいめい」による海溝底までの観測で分かってきた。そこで、太平洋では深層循環の経路に沿って海溝が存在することに着目する。海盆域から海溝に流入する深層水は、海溝内で水平・鉛直的に一様に分布するので、海溝内の観測データから、短期変動の影響を受けずに深層流の海水特性変化を推定することができる。

3. 研究の方法

本研究では、海洋研究開発機構や気象庁をはじめ、各国が協力して実施している高精度船舶観測(WOCE 再観測)データ等の歴史的データの解析と、新たに実施する海溝等での超高精度観測データから、深層循環弱化の証拠を明らかにする。実施する観測航海では、塩分・溶存酸素の超高精度化を目指す。具体的には、高い次元で測定値の比較可能性の確保を目指した密度・溶存酸素測定用標準海水、および、現状の電気伝導度塩分計(測定精度は 1 mg/kg 程度)よりも高い精度での測定が期待できる屈折率密度計を導入する。これらの観測データを元に、海盆と各海盆に接続する海溝内の水温、塩分、溶存酸素等の長期変化を明らかにする。塩分の超高精度観測から、北太平洋底層における南極氷床融解の影響の検出可能性を検討するとともに、将来の影響評価に向けた基礎データを蓄積する。

4. 研究成果

気候変動に対応した深海の低塩分化を検出するための、ブレイクスルーとなりうる2つの革新技术を開発した。1つは、既存の塩分計より測定分解能が高い屈折率測定に基づく海水密度センサーと、10年スケールで密度・塩分が安定なマルチパラメータ標準海水である。

海水の塩分は、通常、電気伝導度の測定に基づき求めているが、電気伝導度は塩分よりも温度の変化に対する感度が高く、温度変化の影響を精密に補正する必要がある。一方、海水の屈折率は、密度と密接な関係があり、塩分と線形的な関係にある。そのため、古くから屈折率に基づく海水密度測定が注目されてきた。最近になって、実用的な屈折率海水密度センサーが入手可能になったが(NOSS, NKE Instrumentation 社)、測定可能レンジは 2000 m までで、測定分解能は電気伝導度計よりも 1 桁低い。

本研究では、世界で初めて、屈折率海水密度センサーによる水深 2000 m 以深(9400 m の海溝底まで)の海水密度の測定に成功した(図 1)。絶対塩分に換算した測定分解能は 0.00015 g/kg で、世界標準の電気伝導度塩分計 AUTOSAL 8400B の分解能(0.0002 g/kg)よりも高い。

現状の塩分測定では、塩分測定用標準海水(IAPSO 標準海水)を基準に塩分計を校正する。しかし、深海の塩分変化を検出するには、IAPSO 標準海水のバイアス(± 0.002 g/kg 程度)が無視できない。このバイアスを IAPSO 標準海水の認証値のバイアスとみなしてバッチ間のオフセット

トを評価することで、長期に渡る測定値の比較可能性を確保した(図2)。

北太平洋の深層循環の終着点にあたる、西部北太平洋の観測地点(K2:北緯47度、東経160度)で蓄積された観測データに、本研究で求めたIAPSO標準海水のバッチ間オフセットを適用し、深層(水深約4700m)における塩分変化を調べた。その結果、長期(20年)に渡る等温度面上での低塩分化トレンド(10年当たり -0.0006 ± 0.0001 g/kg)の検出に初めて成功した(図3)。

水温と塩分の関係は、その海水(水塊)の特性(形成時の状態や他の海水との混合などによる変遷)を示す。北太平洋深層の昇温は、深層循環の弱화에起因した等密度面の降下で説明されてきたが、その場合、水温-塩分関係は変化しない。本研究で発見した等温度面上での低塩分化は水温-塩分関係の変化(水質変化)を表す。この低塩分化は、氷床融解で低塩分化した南極周辺の深層水が、深層循環により100年程度かけて北太平洋深層に運ばれたものと説明できる。

IAPSO標準海水については、認証値のバイアスだけでなく、輸送や保管環境によるガラス瓶との相互作用で標準海水の塩分が変質する可能性も指摘されている。本研究で開発したマルチパラメータ標準海水は、密度・塩分が少なくとも7年間安定している(Uchida et al., 2020, doi:10.1175/JTECH-D-19-0184.1)。均質性・安定性向上のために改良を加えた最新ロットでは、極めて高い塩分の安定性(2年間の標準偏差は 0.0001 g/kg)が得られた。

開発したマルチパラメータ標準海水を用いて、屈折率海水密度センサーの校正と、IAPSO標準海水のバイアス補正を行うことで、極めて高い塩分トレーサビリティの確保が可能になるものと期待される。これらの成果は、気候変動に対応した深海環境変化のモニタリングに道を開くものである。

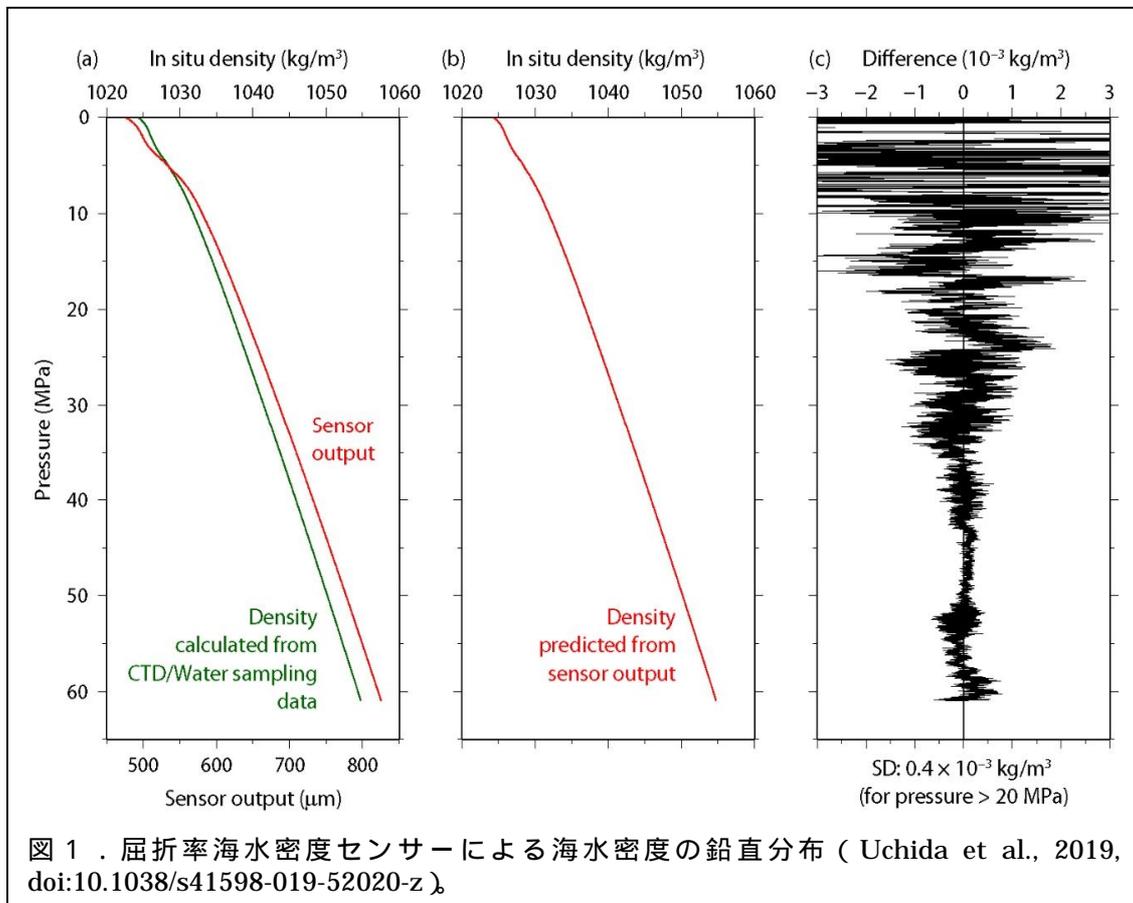


図1. 屈折率海水密度センサーによる海水密度の鉛直分布 (Uchida et al., 2019, doi:10.1038/s41598-019-52020-z)。

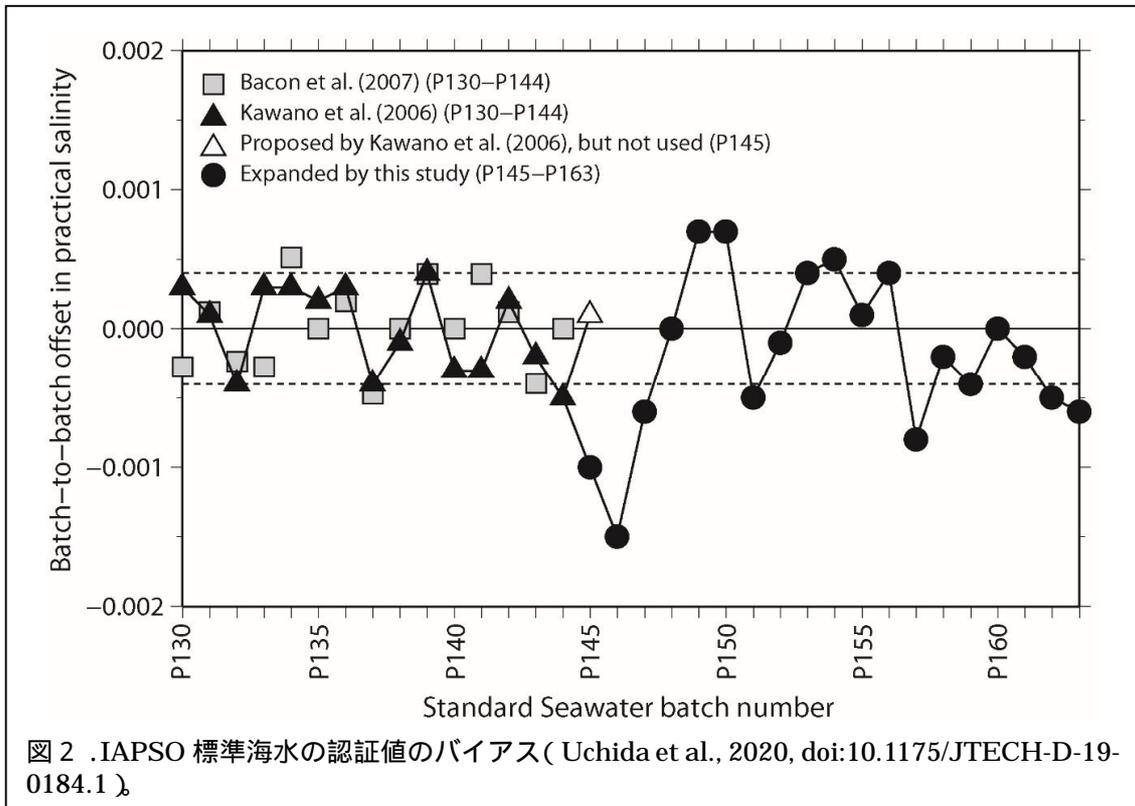


図2 .IAPSO 標準海水の認証値のバイアス (Uchida et al., 2020, doi:10.1175/JTECH-D-19-0184.1)

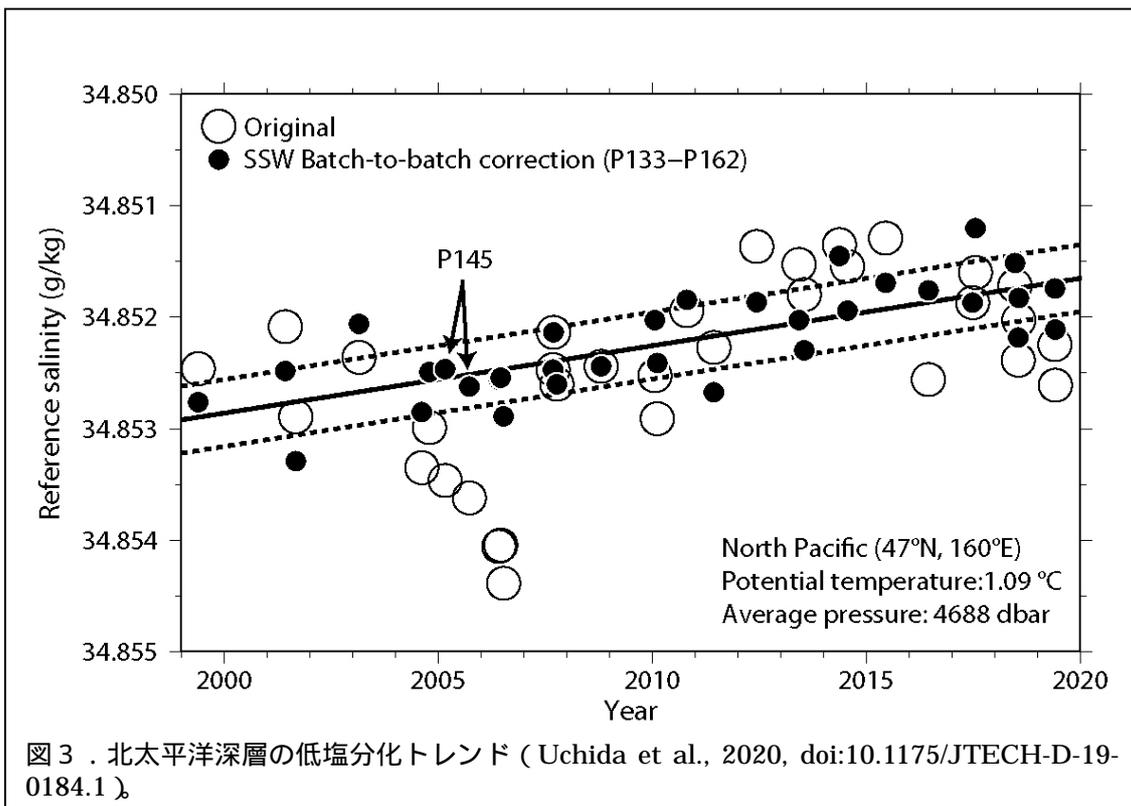


図3 .北太平洋深層の低塩分化トレンド (Uchida et al., 2020, doi:10.1175/JTECH-D-19-0184.1)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Uchida Hiroshi, Kawano Takeshi, Nakano Toshiya, Wakita Masahide, Tanaka Tatsuya, Tanihara Sonoka	4. 巻 37
2. 論文標題 An Expanded Batch-to-Batch Correction for IAPSO Standard Seawater	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Atmospheric and Oceanic Technology	6. 最初と最後の頁 1507 ~ 1520
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1175/JTECH-D-19-0184.1	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 van Haren Hans, Uchida Hiroshi, Yanagimoto Daigo	4. 巻 77
2. 論文標題 Further correcting pressure effects on SBE911 CTD-conductivity data from hadal depths	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 137 ~ 144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-020-00565-3	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 該当する

1. 著者名 村田 昌彦、青山 道夫、チョン 千香子、三浦 勉、藤井 武史、光田 均、北尾 隆、笹野 大輔、中野 俊也、永井 直樹、児玉 武稔、葛西 広海、清本 容子、瀬藤 聡、小笠 恒夫、横川 真一朗、有井 康博、曾根 知実、石川 賀子、芳村 毅、内田 裕、田中 辰弥、粥川 洋平、脇田 昌英	4. 巻 29
2. 論文標題 海水標準物質の現状と将来展望 : 栄養塩CRMをはじめとして	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 海の研究	6. 最初と最後の頁 153 ~ 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5928/kaiyou.29.5_153	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 Hiroshi Uchida, Yohei Kayukawa, Yosaku Maeda	4. 巻 9
2. 論文標題 Ultra high-resolution seawater density sensor based on a refractive index measurement using the spectroscopic interference method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-52020-z	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 Lisa A. Levin. et al., Hiroshi Uchida, et al.	4. 巻 6
2. 論文標題 Global Observing Needs in the Deep Ocean	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 1-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fmars.2019.00241	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

[学会発表] 計6件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 内田 裕、粥川 洋平、前田 洋作
2. 発表標題 屈折率海水密度センサーの開発
3. 学会等名 海とちきゅうのシンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Uchida, Yohei Kayukawa, Yosaku Maeda
2. 発表標題 Ultra high-resolution seawater density sensor based on a refractive index measurement using the spectroscopic interference method
3. 学会等名 27th The International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 内田裕、粥川洋平、前田洋作
2. 発表標題 屈折率密度センサーの開発
3. 学会等名 2019年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Uchida, Yohei Kayukawa
2. 発表標題 Absolute Salinity measurements based on sound velocity and refractive index measurements
3. 学会等名 17th Conference on the International Association for the Properties of Water and Steam (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内田裕
2. 発表標題 塩分測定の現状と高精度化に関する研究
3. 学会等名 2018年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 内田裕
2. 発表標題 マルチパラメータ標準海水開発の状況
3. 学会等名 海水標準物質開発25周年記念シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>データセット:</p> <p>1. The latest batch-to-batch correction table is used to correct salinity data measured by a salinometer calibrated by IAPSO Standard Seawater DOI:10.17596/0001983</p> <p>2. R/V Kaimei Trench Expedition (KATE) Dataset http://www.jamstec.go.jp/iorgc/ocorp/data/kate/</p>

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
研究協力者	中野 俊也 (Nakano Toshiya)		
研究協力者	笹野 大輔 (Sasano Daisuke)		

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