

# 海洋観測データの高精度化の取り組み

内田 裕<sup>1)</sup>

## Efforts to increase accuracy of ocean observation data

Hiroshi UCHIDA<sup>1)</sup>

### 1. はじめに

筆者が第 53 回日仏海洋学会賞を受賞した 2024 年は、1872 年から 1876 年にかけて行われた英国軍艦（海洋調査船）チャレンジャー号の世界一周航海による近代的な海洋学の幕開けから 150 周年にあたる (SUMMERBAYES AND THORPE 1996)。この 150 年間に海洋観測技術は大きく発展し、特に最近 30 年間に、海洋大循環に関する高精度な観測が精力的に実施されてきた。筆者は過去 30 年に渡り海洋循環に関わる海洋観測に携わってきた。現在の海洋は今しか観測できないことを念頭に、気候変動研究に耐えうる高品質な海洋観測データの公開を通して、海洋の長期変動に関する研究を行ってきた。本稿では、海洋観測、特に船舶による水温・塩分測定 of 歴史を概観するとともに、この 30 年間に実施してきた海洋観測データ、特に船舶による水温・塩分測定 of 高精度化の取り組みを振り返り、今後の課題を提起する。

### 2. 海水の温度・塩分測定 of 歴史

150 年前のチャレンジャー号による大航海の目的は、海水や堆積物の物理・化学、海中と海底の生物分布などの研究により、イギリスの指導的地位を確保し続けることであった。しかし、真の目的は、海流の原因として当時論争となっていた風成説と対流説のうち対流説（高緯度表層の冷たい海水が沈降し、低緯度表層で浮かび上がってくるという考え）を実証することとされている（友田・高野 1983）。海面から 1700 m までの 8 層で、ストップコック採水器による海水サンプルの採取、ピエゾメータによる圧力（採水深度）測定、ハイドロメータによる比重測定、ミラー・カッセラ水銀温度計による水温測定、海水サンプルの塩分測定（蒸発乾固法）や化学成分分析などが、世界中の海洋で行われた (Fig. 1)。チャレンジャー号の結果から、海水の組成比は世界中どこでも変わらず、塩素量—塩分—密度の関係の妥当性を確認したことの意義は大きく、電気伝導度や屈折率などの化学・物理的手法によって塩分や密度の分布を求められることが証明された。チャレンジャー号による世界一周航海を皮切りに、ドイツやノルウェーによる大調査航海が次々と行われ、海洋調査の大航海時代が幕を開けた（友田・高野 1983）。

1) 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

〒 237-0061 神奈川県横須賀市夏島町 2-15

1) Global Ocean Observation Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2-15 Natsushimacho, Yokosuka, Kanagawa 237-0061, JAPAN

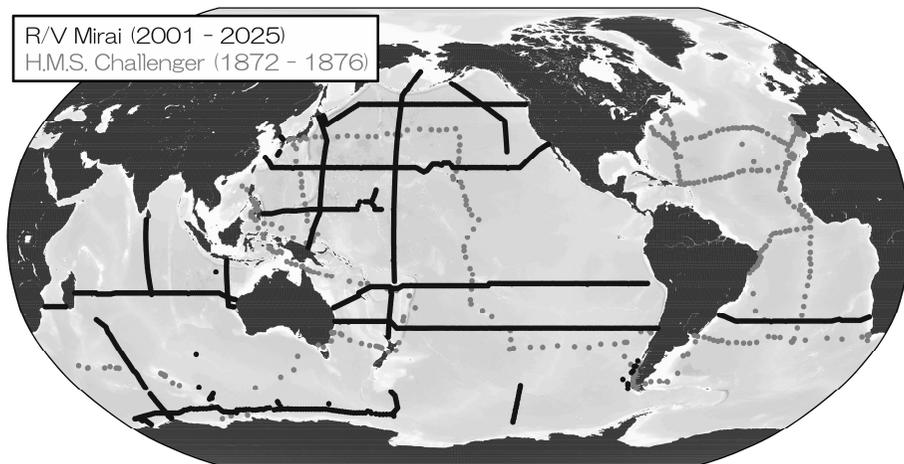


Fig. 1 英国チャレンジャー号による世界一周航海の測点（グレー）と、海洋地球研究船「みらい」による高精度船舶観測測点（黒）。

チャレンジャー号による海洋研究の幕開けと時を同じくして、計量標準分野も幕を開けた。度量衡の国際的な統一を目指して、1875年に国際度量衡局（BIPM）がフランスに設立され、当時17か国の代表によりメートル条約が締結された（日本は1885年にアジアで唯一条約に加盟）。1889年の第一回国際度量衡総会において、国際原器に基づく「メートル」と「キログラム」の定義が宣言され、各原器の一組づつと0.0001℃の桁まで校正値を付された二本の水銀温度計が、BIPMからメートル条約加盟国に配られた。これが国際的に初めての実用温度目盛（水の融解点0℃から水の沸点100℃まで）となった。

塩分については、塩素量の分析値と塩素量—塩分の関係式から推定されていたが、欧州の多くの国による海洋調査がさかんになるにつれ、塩分値の比較可能性を確保する必要性が生じた。そこで、1899年に国際海洋探査委員会（ICES）設立のための準備会議が開催され、クヌーセン（デンマークの海洋学者）により標準海水調達のための国際機関の提案がなされた。そして、1900年にクヌーセンが製造し塩素量の値が付された標準海水バッチ VI（80本）が世界初の塩分測定用国際標準海水としてドイツ・フィンランド・ノルウェー・ロシア・スウェーデン・デンマークに配布された。

その後、1906年のバッチ P1 から現在まで（最新のバッチは2024年の P169）、塩分測定用の唯一の国際標準海水（現在の IAPSO 標準海水）として世界各国に供給され続けている（JENKINS AND WILLIAMS 2025）（日本においては、1939年の第二次世界大戦開戦により欧州から標準海水の入手が困難になった。そこで、1942年から1980年代まで日本独自の標準海水を製造することで戦中・戦後の塩分測定の比較可能性を確保し続けた [UCHIDA 2025]）。

第二次世界大戦終結後は、およそ10年毎に国際的な大規模船舶観測プログラムが実施されてきた（1950年代の国際地球観測年 [IGY]、1960年代の国際インド洋調査 [IIOE]、1970年代の地球化学的大洋縦断研究 [GEOSECS]、1980年代の南大西洋ベンチレーション実験 [SAVE]）。この間、海洋観測機器の開発が大きく進展した。1930年代から開発が始まった電気伝導度塩分計は、現在世界標準として用いられている塩分計（カナダ Guildline 社 AUTOSAL 8400B）の原型が1970年代に開発され、1980年代に AUTOSAL 8400A が完成した。海洋の鉛直分布を測定可能な電気伝導度・水温・水深計（CTD）についても、1970年代には米国 Neil Brown 製 CTD MK IIIB が、1980年代には米国 Sea-Bird Electronics 製 CTD が開

発された (SHKVORETS 2025)。また、海水の状態方程式の作成に必要な海水密度の測定に用いられる卓上型振動式密度計が 1969 年に開発された (PICKER ET AL. 1974)。

電気伝導度計が普及するにつれ、塩素量から求めた塩分と電気伝導度から求めた塩分の差が無視できなくなった。そこで、1978 年に電気伝導度に基づく塩分 (実用塩分) が定義され、1980 年に実用塩分に基づく海水の状態方程式 (EOS-80) が国際的に合意された。また、標準海水バッチ P91 (1980 年) から認証値が電気伝導度比に変更された。これにより、採水試料に対する塩素量の測定値から求める鉛直方向に離散的な塩分データに代わり、CTD を用いた鉛直方向に連続的な水温・塩分データが利用できるようになった。

1980 年代に現在の水温・塩分測定機器の原型が利用可能になり、海水の国際状態方程式が整備されたことを背景に、1980 年代後半から 1990 年代にかけて、世界海洋循環実験計画 (WOCE) が実施された (SIEDLER ET AL. 2001)。全球的な海洋循環像と海洋循環による熱・物質輸送量を明らかにするために、世界中の海洋を岸から岸まで縦・横断する多数の測線を設け、世界中の観測研究機関が協力して海面から海底直上までの船舶 CTD 採水観測 (WHP) が行われた。WHP では、測定値の要求精度 (現在の拡張不確かさ) として圧力 3 dbar, 水温 2 mK, 塩分 0.002 g/kg が設定された。2000 年代になると、WHP の再観測が行われ (Fig. 1), 海洋循環や貯熱量などの時間変化の検出が試みられ、全球海洋各層観測調査プログラム (GO-SHIP) として国際的に大規模な船舶 CTD 採水観測が継続されている。GO-SHIP の CTD 観測においても、WHP と同じ要求精度が継承されている (HOOD 2010)。

### 3. CTD 観測データの高精度化

筆者は、1993 年から九州大学大学院で海洋研究を開始した。1992 年に人工衛星海面高度計 TOPEX/POSEIDON (T/P) の打ち上げが成功し、世界中で WOCE に関する観測が開始された時期であった。九州大学では、WOCE の一環として、

四国沖の T/P の軌道に沿った黒潮を横断する測線で、船舶による繰り返し水温・塩分断面観測、係留流速計時系列観測、係留倒立音響測深器時系列観測、人工衛星海面高度計観測などを組み合わせた黒潮流量を評価する観測 (ASUKA) を開始したところであった。国内の研究機関・大学・官庁などが ASUKA 測線上で実施した船舶観測データの品質管理を担当した (UCHIDA ET AL. 2008; UCHIDA AND IMAWAKI 2008)。各機関から提供されたデータを元に、水温—塩分 (T-S) 関係の比較から系統誤差の有無を評価し補正した。1990 年代当初は Neil Brown 製 CTD が主流であったが、米国 Sea-Bird Electronics (SBE) 製 CTD が普及し始めた頃であった。Neil Brown 製 CTD ではひずみゲージ式圧力センサーのヒステリシス補正や水温センサーと電気伝導度センサーの応答速度の違いの補正が必要であったが、SBE 製 CTD ではヒステリシスが小さい水晶振動式圧力センサーを採用し、ダクト内に配置された水温・電気伝導度センサーに水中ポンプを用いて一定流速の海水を導入することで精密な応答速度・測定タイミングの補正が可能で、SBE が提供する処理ソフトを用いた標準処理のみで、非常に高品質な (ノイズが少ない) データが得られた。ただし、黒潮の流量評価においては、水温や塩分の正確さはあまり重要ではなく、データ提供機関毎に品質管理のレベルは様々であった。

筆者は 2001 年に海洋科学技術センター (現在の海洋研究開発機構 [JAMSTEC]) に就職し、海洋地球研究船「みらい」を用いて、1990 年代に実施された大洋を縦横断する WHP 再観測に従事し、CTD 観測責任者を担当した (Fig. 1)。当時、WHP 再観測の先駆けとして、1999 年に北太平洋 47 度を横断する測線 P01 再観測が行われ、1985 年の WHP データとの比較から海盆全体に及ぶ大規模な底層昇温 (10 年当たり 2 mK 程度) が発見された (FUKASAWA ET AL. 2004)。このような海洋深層の僅かな変化を検出するために高精度な CTD データが必要とされた。「みらい」では、水温センサー (SBE 3) と電気伝導度センサーが 2 セット搭載された SBE 製 CTD を用いていた。

CTD 圧力センサーは、JAMSTEC において、圧力校正の一次標準器と同じ原理の重錘型圧力天秤を用いて毎年校正されていた。SBE 3 は、センサー製造元の SBE において、WHP 再観測の直前・直後に校正された。電気伝導度センサー補正用の採水試料に対する塩分測定には、最も精度が高い塩分計（カナダ Guildline 製 AUTOSAL 8400B）が用いられた（KAWANO ET AL. 2006a）。このように、高精度 CTD データを取得するための万全の体制が整えられていた。

「みらい」への初めての乗船航海は、2001 年に JAMSTEC が初めての本格的な高精度船舶観測として実施した WHP P17N 再観測であった。CTD データの品質管理の手始めに 2 台の SBE 3 の水温差を確認したところ、0.5 mK 程度の振幅を持つ差の振動に加え、観測前後のメーカー校正から見積もったセンサーの時間ドリフトでは説明できない、圧力に依存した 1 mK 程度の系統差が見られた（UCHIDA ET AL. 2015）。これらの水温データの不確かさは、深層の微小な変化（例えば 10 年当たり 2 mK の底層昇温）に比べて無視できない大きさだった。

圧力に依存した水温センサーの系統差については欧米の一部の機関ではすでに知られており、1997 年に SBE 製深海用基準温度計（SBE 35, Serial no. 3）を用いた SBE 3 の現場校正を検討した記事（WOCE ニュースレター）が報告されていた。そこで、急遽 2003 年の CTD 観測から SBE 35 を導入した（Fig. 2）。JAMSTEC が所有する 11 台の SBE 3 の圧力特性を評価したところ、6000 m あたり 0~2 mK 程度（最大で 5 mK）の圧力依存の存在が明らかになった（UCHIDA ET AL. 2007）。ただし、基準とする SBE 35 の圧力特性は不明だったため、実験室で SBE 3 の圧力特性を評価し、SBE 35 には圧力依存が無いことを間接的に確かめた（UCHIDA ET AL. 2015）。また、SBE 35 を産業技術総合研究所計量標準総合センター（NMIJ）が管理する温度の国家標準（ITS-90 の定点セル：水の三重点とガリウムの融解点）と比較することで、SBE による校正との整合性を確認した（UCHIDA ET AL. 2015）。論文執筆にあたり SBE

とトレーサビリティに関する議論の結果、2011 年に SBE の定点セルがアメリカ国立標準技術研究所（NIST）にトレーサブルなものに更新された（それ以前に使用していた水の三重点セルの 2011 年時点のバイアスは -0.13 mK 程度と評価された [UCHIDA ET AL. 2015 参照]）。

水温差の振動は CTD の水中での姿勢変化と相関があり、ダクト内の流速変化による、水温センサー・プローブ周りの摩擦熱の大きさの変化に起因するものと考えられた（UCHIDA ET AL. 2015）。そこで、2002 年に CTD 採水器フレームをアルミ製からステンレス製に変更し重量を増やし、フレームに回転抑止版を取り付けて採水器フレームの動揺軽減を図った。また、2015 年に、はなゆう製水中スリッピング・スィベルを CTD と水中ケーブルの間に導入した。メーカーと共同で信頼性向上のための改良を繰り返し、2017 年から安定運用が可能になり、CTD の姿勢変化が劇的に減少した（UCHIDA ET AL. 2018）。

以上により、「みらい」の高精度船舶 CTD 観測による深海（2000 m 以深）の水温測定の不確かさは 0.7 mK と見積もられた（UCHIDA ET AL. 2015）。これにより、「みらい」の 2 回の CTD 観測による 1 mK の水温差の検出が可能になり、全球的な海洋底層の大規模な昇温現象を明らかにした（KAWANO ET AL. 2006b, 2010; KOUKETSU ET AL. 2011）。

塩分については、通常、採水サンプルに対する分析値を用いて電気伝導度センサーを補正する。補正式・補正方法に関する工夫はあるものの、分析値の正確さが CTD 塩分データの品質を決定する。2010 年に海水の状態方程式が EOS-80 から国際海水熱力学方程式（TEOS-10）（IOC ET AL. 2010）に改訂されたことを機に、TEOS-10 の評価のために海水密度の直接測定に取り組むとともに（UCHIDA ET AL. 2011）、塩分分析も担当することになった。塩分の分析手法自体は確立されていたが、塩分計の校正に用いる IAPSO 標準海水（約 1 年毎に新しいバッチが製造される）のバッチ間オフセットの評価（KAWANO ET AL. 2006a）を引き継いだ（UCHIDA ET AL. 2025b）。実用塩分が導入

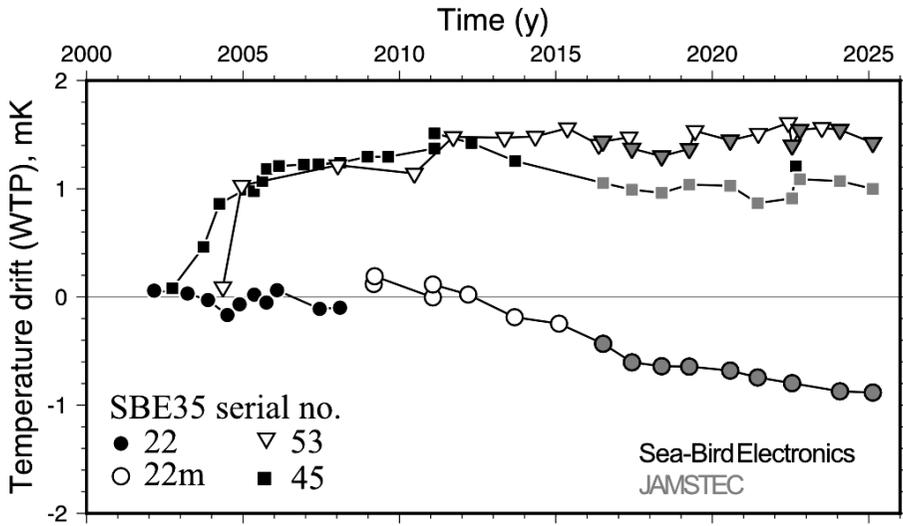


Fig. 2 海洋研究開発機構 (JAMSTEC) が所有する深海用基準温度計 (SBE 35) の校正履歴 (水の三重点セルで評価したセンサーの時間ドリフト)。Serial no. 22 は 2009 年にプローブを交換したため、交換後を 22m と表記。グレーは JAMSTEC が所有する水の三重点セルでの評価結果。Serial no. 45 は 2022 年に耐圧容器を交換したことにより約 0.2 mK のオフセットが生じた。

された 1980 年以降は、 $\pm 0.002$  程度のバッチ間オフセットの存在が示唆され (Fig. 3)、北太平洋の時系列観測点で蓄積された船舶 CTD 塩分データにバッチ間オフセット補正を適用することで、北太平洋底層 (等温度面上) の低塩化 (10 年あたり  $-0.0006$  g/kg) を初めて検出した (UCHIDA ET AL. 2020)。しかし、バッチ間の相対的なオフセットを繋ぎ合わせてオフセット・テーブルを拡張し続ける方法では、オフセット推定誤差が蓄積する懸念があった。

2010 年からの海水密度測定の取り組みの一環として、密度計の校正に必要な海水密度標準物質の開発を開始し、海水密度に関連した実用塩分、炭酸系成分 (アルカリ度、全炭酸)、および、栄養塩類 (ケイ酸塩、硝酸塩) が安定なマルチパラメータ標準海水 (MSSW) を完成させた (UCHIDA ET AL. 2025a)。合わせて、IAPSO 標準海水の海水密度に関連した海水特性値の安定性を評価した (UCHIDA ET AL. 2025c)。これらの結果から、IAPSO 標準海水の実用塩分が時間とともに増加

(1 年あたり  $0.0001$  g/kg) していることを発見し、塩分増加トレンドを考慮してバッチ P29 (1959 年) から P167 (2023 年) までの切れ目のないバッチオフセットを再評価した (Fig. 3) (UCHIDA ET AL. 2025d)。北太平洋時系列観測点の船舶 CTD 塩分データに再評価したバッチオフセット補正を適用すると、UCHIDA ET AL. (2020) で発見した北太平洋底層の低塩化は IAPSO 標準海水の塩分増加トレンドに起因した人工的なもので、実際には等温度面上で 10 年あたり  $0.00029$  g/kg の高塩化を明らかにした (UCHIDA ET AL. 2025d)。

この等温度面上の高塩化トレンドからの差の標準偏差を、「みらい」による海洋深層での塩分測定の不確かさとみなせば、その拡張不確かさは  $0.00082$  g/kg と見積もられ、「みらい」の 2 回の CTD 観測による  $0.0012$  g/kg の塩分差の検出が可能になった。

このように水温と塩分の精密な評価が可能になったことで、北太平洋底層の T-S 関係の時間変化の特徴が明らかになり、変化のメカニズム (深

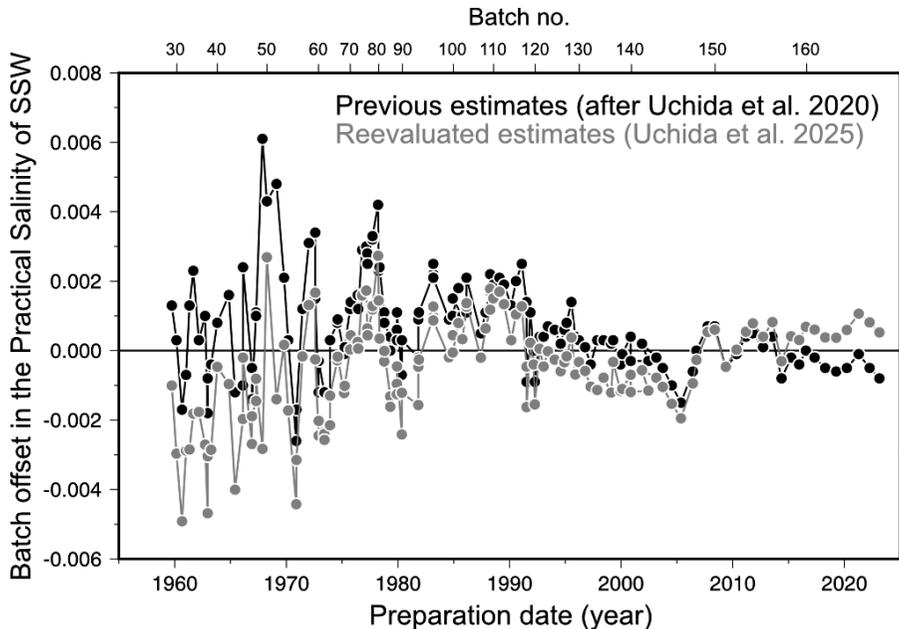


Fig. 3 IAPSO 標準海水の認証値（実用塩分）のバッチ間オフセット。黒丸は従来の評価値、グレーは IAPSO 標準海水の高塩化トレンド（1 年あたり 0.0001 g/kg）を考慮して再評価したもの。1980 年以前のバッチの認証値は塩素量で与えられるため、バッチ間オフセットのばらつきは、塩素量認証値の不確かさに加え、塩素量—塩分の関係式の不確かさに起因している。

層循環の弱化, MASUDA ET AL. 2010) の解明に迫れるようになった (UCHIDA ET AL. 2025d)。

密度については、TEOS-10 の発効を受け、TEOS-10 の検証と将来の改定に備えて海水密度の直接測定に取り組んだ。密度の測定に広く用いられている振動式密度計による海水密度測定には、密度計の非線形性に起因する誤差 ( $-0.01 \text{ kg/m}^3$  程度) があることを示唆した (UCHIDA ET AL. 2011)。この問題を解決するために標準海水の密度を密度の国家標準にトレーサブルに絶対測定が可能、海水測定に特化した液中秤量装置を開発した (KAYUKAWA AND UCHIDA 2021)。液中秤量装置を用いて MSSW の密度を認証し、MSSW を用いて振動式密度計を校正することで、海水サンプルの密度の高精度な測定が可能になる。ただし、振動式密度計の測定分解能は塩分計 (AUTOSAL 8400B) で求められる密度の分解能より一桁低い。そこで、塩分計と同等の測定分解

能で 10,000 m まで測定が可能、分光干渉法に基づく屈折率密度センサーを開発した (UCHIDA ET AL. 2019)。

これらの塩分・密度に関する取り組みを基に、TEOS-10 の維持・管理・改訂を担う海水特性に関する IAPSO/SCOR/IAPWS 合同委員会 ([https://www.teos-10.org/about\\_JCS.htm](https://www.teos-10.org/about_JCS.htm)) の委員として、TEOS-10 の高精度化にも取り組んでいる。

#### 4. CTD 観測データのさらなる高精度化を目指して

2019 年に国際単位系 (SI) の定義が大きく改定された。SI の基本単位はすべてキログラム原器のような人工物から普遍的な定数 (例えば、キログラムはプランク定数、ケルビンはボルツマン定数) で定義されることになった。実際には、プランク定数はキログラム原器等に基づき決定され、NMIJ の測定値と科学技術データ委員会 (CO-

DATA) の特別調整値がほぼ一致していることから (藤井 2019), 国内においては, 定義改定による質量標準の不連続は生じない。また, 新しい定義に従った熱力学温度を実現するための方法では ITS-90 の定点温度値は厳密 (不確かさは無い) とされ, 定義改定が ITS-90 の温度値または実現の不確かさに影響を与えないとされている (CCT 2019)。したがって, 質量と温度に関する従来のトレーサビリティ体系が直ちに影響を受けることは無いが, 室温付近で ITS-90 は熱力学温度と約 0.004 K ずれていることが明らかになるなど (FISCHER ET AL. 2011), 計量標準分野の研究動向を注視する必要がある。

海水の温度測定においては, 引き続き, ITS-90 の定義定点 (水の三重点とガリウムの融解点) に基づくトレーサビリティの確保が必要で, 特に, 海洋深層の微小な変化の検出には水の三重点の正確さが重要である。水の三重点ガラスセルからの不純物の溶出により, 水の三重点温度は低下する (10 年当たりの温度変化はホウケイ酸ガラス製セルで  $-0.13 \sim -0.08$  mK, 石英製セルで  $-0.02$  mK) (UCHIDA ET AL. 2015 参照)。石英製セルを用いた直接または間接的な機関間比較 (センサー製造元や NMIJ と JAMSTEC との間の比較) を実施しているが, セルの長期間の使用においては国家標準に基づく定期的な校正や新替えを検討する必要がある。

水温センサーの圧力特性評価にも課題が残る。圧力特性の評価に広く利用されてる SBE 35 は製造中止になり新規購入ができない。そのため, 通常用いられる CTD 水温センサー (SBE 3) の実験室での圧力特性評価装置を開発中である。今後, 圧力特性評価サービスの実施, メーカーへの技術移転, あるいは, 圧力特性を評価した水温センサーを用いた国際的なラウンドロビン試験 (各機関が実施する CTD 観測においてセカンダリー水温センサーとして使用することで, 各機関が所有する水温センサーの圧力依存特性を評価する) が必要と考えられる。

水温センサーや電気伝導度センサーのヒステリシス (圧力や水温変化に対する動的応答) につい

ては, その存在については認知されているものの, センサー毎に個体差があることや, その精密な評価が難しいことなどから, 現状ではほとんど考慮されていない。「みらい」CTD 観測においては, 極端に大きなヒステリシスを持つセンサーは使用しないようにしているが, 測定精度が向上するにつれ無視できない問題となってきた。通常, センサー校正用の海水サンプル採取や深海用基準温度計 (SBE 35) による測定は巻き上げ時 (アップ・キャスト) に行われ, アップ・キャストで求めた現場校正結果を繰り出し時 (ダウン・キャスト) の連続データに適用している。そのため, センサーのヒステリシスにより CTD 連続データが系統誤差を持つ可能性がある。今後, センサーのヒステリシスの精密な評価・補正方法を確立する, あるいは, CTD 連続データとしてアップ・キャストのデータの利用を検討する必要がある。

塩分については, 測定分解能向上のための技術革新や絶対塩分を測定可能なセンサーの開発が必要である。例えば, 北太平洋底層の水温と塩分の 100 km あたりの南北変化は, それぞれ, 2 mK と 0.0002 g/kg であるが, SBE 製 CTD の水温と塩分の測定分解能は, それぞれ, 0.2 mK と 0.0004 g/kg であり, 水温・塩分の南北変化の大きさに対して塩分の測定分解能が一桁足りない (UCHIDA ET AL. 2019)。また, TEOS-10 の塩分として絶対塩分が採用されたが, 絶対塩分を海洋の現場で直接測定可能なセンサーが実用化されていないため, 従来の電気伝導度センサーで求める実用塩分と絶対塩分との差 (主にアルカリ度偏差とケイ酸塩に起因) である絶対塩分アノマリーを推定する経験式が用いられている (IOC ET AL. 2010)。この絶対塩分アノマリー推定式は主に外洋域深層の値を対象にしており, 河川水の影響が大きい沿岸域や北極海の表層では誤差が大きい。そのため, 屈折率の測定に基づく密度 (絶対塩分) センサーの利用が期待されている。海水の屈折率測定の歴史は古く, チャレンジャー号が世界一周航海を行っていた 1877 年に最初の測定が行われた (LE MENN AND NAIR 2022)。その後現在にいたるまで複数の研究者が屈折率密度センサーの開発に挑戦

してきたが、電気伝導度センサーに匹敵するような実用化には至っていない。

筆者が開発した屈折率密度センサー (UCHIDA ET AL. 2019) は、最高精度の塩分計 (AUTOSAL 8400B) に匹敵する測定分解能を有するが、実用化のためには温度依存性や校正に関する問題を解決する必要がある。また、2005年のノーベル物理学賞受賞技術である光周波数コムなどの最新の光学技術を用いることで、従来よりも測定分解能が一桁高い、ブレイクスルーとなりうる屈折率密度センサーの実現に期待している。

### 謝辞

日仏海洋学会賞の受賞は、これまで九州大学・海洋研究開発機構・日仏海洋学会・海水特性に関する IAPSO/SCOR/IAPWS 合同委員会でお世話になりました先生をはじめとする皆様のご指導・ご協力のおかげです。特に、九州大学大学院において、筆者を海洋観測の世界に導き、現場および人工衛星による観測技術やデータ解析など、長きに渡りご指導いただくとともに、大学院時代に日仏海洋学会への入会を勧めていただきました今脇資郎先生に感謝いたします。また、大学院時代から高精度船舶観測の重要性を説かれ、海洋研究開発機構において、「みらい」による高精度な船舶CTD観測や係留観測に従事する機会を与えていただくとともに、CTD観測責任者としての大役を支えていただきました深澤理郎先生に感謝いたします。さらに、観測データのトレーサビリティ確保の重要性を説かれ、マルチパラメータ標準海水の開発に導いていただきました故 青山道夫先生に感謝いたします。日本発の栄養塩標準物質を開発・普及させ、気候変動に関わる栄養塩の変化を明らかにしようとしていた矢先の2022年に急逝されました。青山先生から引き継いだ塩分データのトレーサビリティ確保については大きく発展させることができましたが、水温・塩分以外の観測項目についても、青山先生が目指した世界に近づけるよう観測データの高精度化に努力する所存です。最後に、長期航海の乗船中も家庭を守り、観測・研究に専念できるよう支えてくれた妻 亜

紀子に感謝を述べたいと思います。

### References

- CCT (2019): *Mise-en-pratique* for the realization of the kelvin in the SI. <https://www.bipm.org/utls/en/pdf/si-mep/SI-App2-kelvin.pdf>
- 藤井賢一 (2019): プランク定数にもとづくキログラムの新しい定義. 日本原子力学会誌, 61, 16-20. [https://doi.org/10.3327/jaesjb.61.10\\_716](https://doi.org/10.3327/jaesjb.61.10_716).
- FISCHER, J., M. DE PODESTA, K. D. HILL, M. MOLDOVER, L. PITRE, R. RUSBY, P. STEUR, O. TAMURA, R. WHITE AND L. WOLBER (2011): Present estimates of the differences between thermodynamic temperatures and the ITS-90. *Int. J. Thermophys.* 32, 12-25. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-0922-1>.
- FUKASAWA, M., H. FREELAND, R. PERKIN, T. WATANABE, H. UCHIDA AND A. NISHINA (2004): Bottom water warming in the North Pacific Ocean. *Nature*, 427, 6977, 825-827. <https://doi.org/10.1038/nature02337>.
- HOOD, E. M. (2010): Introduction to the collection of expert reports and guidelines. The GO-SHIP Repeat Hydrography Manual: A Collection of Expert Reports and Guidelines, IOCCP Rep. No. 14, ICPO Publication Series No. 134, Ver. 1.
- IOC, SCOR AND IAPSO (2010): The international thermodynamic equation of seawater - 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (English), 196 pp.
- JENKINS, A. AND R. WILLIAMS (2025): The history of Standard Seawater for salinity measurements. In: Aoyama M., Murata A., Cheong C., editors. Chemical Reference Materials for Oceanography. Springer Oceanography. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8_18).
- KAWANO, T., M. AOYAMA, T. JOYCE, H. UCHIDA, Y. TAKATSUKI AND M. FUKASAWA (2006a): The latest batch-to-batch difference table of standard seawater and its application to the WOCE onetime sections. *J. Oceanogr.*, 62, 777-792, <https://doi.org/>

- g/10.1007/s10872-006-0097-8.
- KAWANO, T., T. DOI, H. UCHIDA, S. KOUKETSU, M. FUKASAWA, Y. KAWAI, AND K. KATSUMATA (2010): Heat content changes in the Pacific Ocean between the 1990s and 2000s. *Deep-Sea Res. II*, **57**, 1141–1151. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2009.12.003>.
- KAWANO, T., M. FUKASAWA, S. KOUKETSU, H. UCHIDA, T. DOI, I. KANEKO, M. AOYAMA, AND W. SCHNEIDER (2006b): Bottom water warming along the pathway of lower circumpolar deep water in the Pacific Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1029/2006GL027933>.
- KAYUKAWA, Y. AND H. UCHIDA (2021): Absolute density measurements for standard seawater by hydrostatic weighing of silicon sinker. *Measurement: Sensors*, **18**, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100200>.
- KOUKETSU, S., T. DOI, T. KAWANO, S. MASUDA, N. SUGIURA, Y. SASAKI, T. TOYODA, H. IGARASHI, Y. KAWAI, K. KATSUMATA, H. UCHIDA, M. FUKASAWA, AND T. AWAJI (2011): Deep ocean heat content changes estimated from observation and reanalysis product and their influence on sea level change. *J. Geophys. Res.: Oceans*, **116**, C03012, <https://doi.org/10.1029/2010JC006464>.
- LE MENN, M. AND R. NAIR (2022): Review of acoustical and optical techniques to measure absolute salinity of seawater. *Frontiers in Marine Science*, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.1031824>.
- MASUDA, S., T. AWAJI, N. SUGIURA, J. P. MATTHEWS, T. TOYODA, Y. KAWAI, T. DOI, S. KOUKETSU, H. IGARASHI, K. KATSUMATA, H. UCHIDA, T. KAWANO AND M. FUKASAWA (2010): Simulated rapid warming of abyssal North Pacific waters. *Science*, <https://doi.org/10.1126/science.1188703>.
- PICKER, P., E. TREMBLAY AND C. JOLICOEUR (1974): A high-precision digital readout flow densimeter for liquids. *J. Solution Chem.*, **3**, 377–384, <https://doi.org/10.1007/BF00646478>.
- SHKVORETS, I. (2025): Salinometry. <https://salinometry.com> (access date: June 26, 2025)
- SIEDLER, G., J. CHURCH AND J. GOULD (eds.) (2001): *Ocean Circulation and Climate: Observing and Modeling the Global Ocean*. 715 pp., Academic Press, San Diego, USA.
- SUMMERHAYES, C. P. AND S. A. THORPE (1996): *Oceanography: an illustrated text*. 352 pp., John Wiley and Sons, New York, USA.
- 友田好文, 高野健三 (1983): 海洋. 地球科学講座, **4**, 261 pp. 共立出版 (株).
- UCHIDA, H. (2025): On Japanese Standard Seawater for salinity measurements used during and after World War II. In: Aoyama M., Murata A., Cheong C., editors. *Chemical Reference Materials for Oceanography*. Springer Oceanography. Springer, Singapore, [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8_11).
- UCHIDA, H., S. IMAWAKI, H. ICHIKAWA AND THE ASUKA GROUP (2008): ASUKA Hydrographic Data Collection, *Reports of Research Institute for Applied Mechanics*, Kyusyu University, **135**, 21–31. <https://doi.org/10.15017/14180>.
- UCHIDA, H. AND S. IMAWAKI (2008): Estimation of the sea level trend south of Japan by combining satellite altimeter data with in situ hydrographic data. *J. Geophys. Res.*, **113**, C09035. <https://doi.org/10.1029/2008JC004796>.
- UCHIDA, H., T. KAWANO, M. AOYAMA AND A. MURATA (2011): Absolute salinity measurements of standard seawaters for conductivity and nutrients. *La mer*, **49**, 119–126.
- UCHIDA, H., T. KAWANO, T. NAKANO, M. WAKITA, T. TANAKA, AND S. TANIHARA (2020): An expanded batch-to-batch correction for IAPSO Standard Seawater. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **37**, 1507–1520, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0184.1>.
- UCHIDA, H., Y. KAYUKAWA AND Y. MAEDA (2019): Ultra high-resolution seawater density sensor based on a refractive index measurement using the spectroscopic interference method. *Sci. Rep.*, **9**, 15482, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52020-z>.
- UCHIDA, H., Y. MAEDA AND S. KAWAMATA (2018): Compact underwater slip ring swivel: Minimizing effect of CTD package rotation on data quality. *Sea Technology*, **59**, 11, 30–32.
- UCHIDA, H., T. NAKANO, J. TAMBA, J.V. WIDIATMO, K. YAMAZAWA, S. OZAWA AND T. KAWANO (2015):

Deep ocean temperature measurement with an uncertainty of 0.7 mK. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **32**, 2199–2210. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0013.1>.

UCHIDA, H., K. OHYAMA, S. OZAWA AND M. FUKASAWA (2007): In situ calibration of the SeaBird 9plus CTD thermometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **24**, 1961–1967. <https://doi.org/10.1175/JTECH2093.1>.

UCHIDA, H., A. MURATA, M. WAKITA, H. MITSUDA, Y. NAGASAWA, T. TANAKA, Y. KAYUKAWA, K. TAKE-DA, K. ITO, T. YOSHIMURA, AND D. SASANO (2025a): Development of Multiparametric Standard Seawater (MSSW) for CO<sub>2</sub> parameters, dissolved oxygen, and density of seawater. In: Aoyama M., Murata A., Cheong C., editors. *Chemical Reference Materials for Oceanography*. Springer Oceanography. Springer, Singapore, [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8_12).

UCHIDA, H., M. OE, AND M. WAKITA (2025b): History of batch-to-batch comparative studies of International Association for the Physical and Sciences of the Oceans standard seawater. In: Aoyama M., Murata A., Cheong C., editors. *Chemical Reference Materials for Oceanography*. Springer Oceanography. Springer, Singapore, [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8_9).

UCHIDA, H., M. WAKITA, A. MAKABE, A. MURATA, AND A. PETROVIC (2025c): Changes of the composition of International Association for the Physical and Sciences of the Oceans standard seawater. In: Aoyama M., Murata A., Cheong C., editors. *Chemical Reference Materials for Oceanography*. Springer Oceanography. Springer, Singapore, [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2520-8_10).

UCHIDA, H., M. WAKITA, M. OE AND F. SANTIAGO-MANDUJANO (2025d): Possible increase in the Practical Salinity of IAPSO Standard Seawater. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-24-0049.1>.