

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 総合研究報告書

歴史的海洋表層水温観測データの再整備とその気候学的評価 (2-1506)

平成27年度～平成29年度

Improving Database of Historical Ocean Subsurface Temperature Observations and
its Climatological Evaluation

＜研究代表機関＞

国土交通省 気象庁 気象研究所

＜研究分担機関＞

一般財団法人 日本水路協会海洋情報研究センター
国立研究開発法人 海洋研究開発研究機構

＜研究協力機関＞

東北大学 大学院理学研究科
気象庁 地球環境・海洋部
海上保安庁 海洋情報部海洋情報課
鶴見精機株式会社
高知大学
水産総合研究センター中央水産研究所
九州大学大学院理学研究院・地球惑星科学部門

平成30年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 海洋解析と気候変動研究への応用研究	13
(国土交通省 気象庁 気象研究所)	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 海洋観測データベースの再構築と品質保証のための研究	25
(一般財団法人 日本水路協会海洋情報研究センター)	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 データベースの利用と高度化 に関わる研究	38
(国立研究開発法人海洋研究開発研究機構)	
要旨	
1. はじめに	

2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

III. 英文Abstract

..... 50

I. 成果の概要

課題名 2-1506 歴史的海洋表層水温観測データの再整備とその気候学的評価

課題代表者名 石井 正好 (国土交通省 気象庁気象研究所 気候研究部 第四研究室 室長)

研究実施期間 平成27～29年度

累計予算額 49,821千円 (うち平成29年度: 15,186千円)
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 地球温暖化、海洋水温観測、XBT、海洋貯熱量、品質管理、データ利活用、客観解析

研究体制

- (1) 海洋解析と気候変動研究への応用研究 (国土交通省 気象庁 気象研究所)
- (2) 海洋観測データベースの再構築と品質保証のための研究 (一般財団法人 日本水路協会海洋情報研究センター)
- (3) データベースの利用と高度化 に関わる研究 (国立研究開発法人海洋研究開発研究機構)

研究協力機関

東北大学 大学院理学研究科、気象庁 気候情報課・海洋気象課、海上保安庁 海洋情報部海洋情報課、鶴見精機株式会社、高知大学、水産総合研究センター中央水産研究所、九州大学大学院理学研究院・地球惑星科学部門

1. はじめに(研究背景等)

気候変動ならびに地球環境変化に関わる基礎的物理データとして海洋観測データは位置付けられる。しかしながら、海面から数千メートル深までの水温プロファイルを集めた歴史的海洋表層水温観測データベースには看過できない問題が多数指摘されており、長期的な海洋内部の水温変動を観測データから推定した結果には大きな不確実性を伴う。現在、海洋観測データを用いて地球温暖化による海洋への膨大な熱の蓄積などの歴史的推移を推定した結果に基づいて、気候モデルによる気候再現と予測が行われている。この再現と予測結果は、エネルギー・水・炭素循環を量的に捉え、生態系、水産、温暖化予測などの気候応用問題に活用され、そして地球環境保全や災害対策などの施策判断を導く。現状の海洋観測データの不具合がもたらす影響は広範囲に及ぶことから、高精度海洋データベースの構築に向けた早急の対応が必要である。

こうした状況は国際的にも問題視され、高精度国際海洋観測データベース構築プロジェクト (International Quality Controlled Ocean Database: IQuOD) が、日本、ドイツ、オーストラリア、アメリカ、イギリス、インドなどからの研究者により、いくつかの準備会合を経て、2013年に立ち上げられた。日本の海洋観測データ所有数が世界第二位であることから、国際的に連携しながら問題解決を図っていく必要があると考え、準備段階から日本も賛同・参加し、立ち上げに貢献した。また、簡易型水温プロファイル観測装置 (expendable bathythermograph: XBT) で取得された観測データのバイアスの問題とその解決法を提案し、XBT観測のバイアスが全球海洋貯熱量 (Global Ocean Heat Content: GOHC) の推定にもたらす影響などの研究を進めていた。

地球温暖化による地球システムにもたらされた過剰な熱エネルギーの大半は海洋に累積されている。これは主に海面から数千メートル深までの海水温の緩やかな上昇として観測記録に残っている。すなわ

ち、海洋観測データは過去から現在までの地球温暖化の履歴を含んでいる。ここでの全世界海洋の平均水温上昇は、40年間で 0.15°C 程（海面から1500メートルの平均水温）で、この昇温量を観測データから推定するためには、十分な数の高精度の観測データが前もって整備されていなければならない。上述したように、観測データの品質に関わる検討が充分でなく多くの問題が指摘されている。例えば、観測データに含まれる僅かな誤差によって、温暖化しているはずの海洋が寒冷化するという逆の変化を示してしまう。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第五次評価報告書では、GOHC の時系列には大きな不確実性があり、海洋の温暖化の正確な理解が必要であることが指摘されていた。平均海水温上昇を推定する方法論が国際的に標準化されていないことも大きな不確実性の要因の一つである。

海洋観測は高度な専門知識を有する技術作業員によって実施され、ゆっくりと変化する海洋変動の検出のために、海洋観測データには高い精度が要請される。必然、海洋観測データの取扱いは煩雑になる傾向があり、ここに、広範なデータ利活用を阻害している側面が認められる。一方で、気候変動や海洋環境の変遷を理解するためには海洋観測データは基礎的な物理データであるから、広範なデータの利活用が求められる。

以上のことから、本研究では3つのサブテーマを掲げて、上述の海洋観測データに関する問題解決に取り組んだ。各サブテーマでは、それぞれ、国際連携の下で歴史的海洋表層水温データの再整備を行い、海洋データを永続的に高品質に保つための品質管理・データ利用促進システムの開発し、そして現時点における全球海洋貯熱量の大きな不確実性の要因を探り、再整備される海洋データによりどのような改善が期待できるのかについて考察を行った。

本研究の遂行にあたっては、IOC推進協力委員会の海洋情報データ専門部会と海洋観測・気候変動専門部会の下に、歴史的XBTデータ再整備プロジェクトワーキンググループ（XBT-Japan）を2012年に立ち上げて、国内の全ての海洋観測関連機関からの了解を得ながら活動した。

2. 研究開発目的

気候変動に関する政府間パネルの第五次報告書で指摘されているように、全球海洋貯熱量（GOHC）は過去の温暖化の推移を理解するために重要な情報ではあるが、1990年代までは、その推定値に大きな不確実性が見られる。本研究は、この海洋変動の不確実性の低減を目指すもので、ゆくゆくは、良質な観測データに基づいて気候モデルが改良され、モデルによる気候予測の精度が向上し、将来の気候変動に備えた諸々の政策決定の実現へと結びつくものである。

GOHC に内在する不確実性の問題は、GOHC 推定方法の違い、簡易型水温プロファイル観測装置（XBT）のバイアス補正方法の違いが主たる要因となっていると考えられている。さらに、現在の国際的な海洋観測データベースでは品質管理が不十分で、品質管理に必要なメタ情報も十分に収録されていない。このことは、XBT のバイアス補正量を定める上で大きな不確定要因にもなっている。本研究ではこれらの問題の解決に向けた作業と調査を行う。

長期的気候変動の実態解明のために観測データを格子値化した高精度の客観解析方法を高度化して、気候変動シグナルを正確に検出することの可能性について検討する。海面水温解析の高精度化作業でこれまでに得られた経験を踏まえて手法の高度化を試みる。また、採用している解析手法やバイアス補正方法が標準的なものかどうかの判断をするために、国際共同研究で進められる相互比較実験に参加する。

高精度な観測データを収録した新しいデータベースの構築を、各国からの研究者と協力して国際プロジェクト（IQuOD）として推進し、国内機関が行った観測データについてメタ情報を含めてデータベースの再構築する作業を行う。データベースに収録する観測データには、IQUOD と連携して、国際共通の品質管理スキームを開発して適用する。地球環境変動の監視に資する世界的な海洋観測データベースを構築することを最終目標とする。また、国内に埋もれたままとなっている歴史的海洋データを発掘して活用できるようにするための、データレスキューも行う。

過去データについて高品質なデータベースを構築したとしても、データの品質維持と高精度化のための永続的体制が無ければ、低品質の観測データを用いたデータ解析が行われることで誤った気候監視情

報が提供されてしまうおそれがある。実際、XBT の水温バイアスや一部のArgoの不具合を起因とする問題を長い間放置してしまったという、海洋観測関連研究者にとって苦い経験がある。変動の時間スケールの長い海洋の状態を検出するために高い精度が求められる海洋データには、定常的に運用される品質管理体制が必要である。本研究では、歴史的海洋観測データの品質維持と高度利用を可能とする仕組みを開発して、その永続的な活用を検討する。

3. 研究開発の方法

(1) 海洋解析と気候変動研究への応用研究（サブテーマ1）

これまで開発してきた表層水温解析手法を高度化するにあたっては、開発が完了している海面水温解析の手法を適用した。表層水温解析の場合、海洋水温変動を時間スケールの異なる長期トレンドと年々変動成分に分けて独立に解析することで、解析結果の精度の向上を図る。年々変動の推定には経験的直交関数を利用したリコンストラクション法も試みた。GOHC の不確実性を低減するためには、トレンド成分の精度についての吟味が重要である。トレンド成分は5年程度の時間スケールの状態量から推定することで十分であるから、乏しい観測データの期間中でも推定精度を高めることができる。各センターが採用する独自の客観解析手法が独自の評価結果となって、GOHC 推定の不確実性を大きくしているという批判があるので、トレンド成分を求める際には、最も単純な解析手法であるところのボックス平均を採用した。これは、等間隔に区切られた格子内の観測データを算術平均する方法である。ただし、ここでは、観測データの時空間の偏りを最小化し、同じ観測者や同じブイによりデータだけに偏らないようにする前処理を施した観測データを平均することにした。

GOHCの不確実性の低減のために客観解析手法やXBT観測データのバイアス補正方法の標準化が必要であるが、これらについては一機関で問題解決を図るよりは、国際共同研究の下で相互比較実験を行う方が効果的である。国際連携を進め、相互比較実験の仕様を決定し、実験結果の吟味を行う議論の場に参加した。日本、アメリカ、オーストラリア、イギリス、ドイツ、中国などからの研究者が参加して、相互比較実験が実施された。

気候監視のために海洋データをより高度利用できるかどうか検討するために、次の二つのことを行った。一つめは、海洋観測データを陸上の気象要素の推定に活用することを試み、海洋データの更なる価値を引き出す。ここでは、上記した客観解析手法を応用して、同時に海面水温と陸上気温の2変量を客観解析できるスキームを開発し、海洋（陸上気温）観測データの情報を陸上気温（海面水温）の解析に利用できるようにした。二つめは、日本近海が世界的に見て古くから海洋観測データで充実した海域であることから、そのデータ利用を今後進めていくための基礎的な作業や調査を行った。加えて、第二次世界大戦以前に行われた海上気象観測データが電子イメージに収めたままになっていたのを、これを数値データとして読み取り、品質管理を施した。また、かつての日本海軍や水産関係機関が実施した海洋表層水温観測データの品質について、可能な限りのメタデータを収集し、水温観測データのバイアス除去が可能かどうかの調査を行った。

(2) 海洋観測データベースの再構築と品質保証のための研究（サブテーマ2）

主に国内機関が行ってきた海洋観測データを収集し、既存のデータベースを再構築した。これらのデータに品質管理を施し、歴史的観測データの精度を評価する。再構築に際しては、サブテーマ(1)で高精度のデータ解析が可能となるように、鉛直に密な水温観測データをメタ情報と共に整備した。ここでは紙媒体のデータを電子化する作業が行われ、加えて未収集データを発掘し、今回の高精度観測データベースに組み入れるデータレスキューを実施した。再整備と品質管理は、国際高精度海洋データベースプロジェクトと連携して国際標準の品質管理手法を共同開発しながら進めた。

まず、自記紙を一枚ずつスキャナーでラスターライズ(デジタル画像化)し、解像度600dpiのTIFF (Tag Image File Format)形式の画像ファイルとして保存した。これらは自記紙のバックアップコピーも兼ねている。次に、ラスターライズした自記紙の画像ファイルを市販のグラフィックデザインソフトウェア Adobe Illustratorで読み込んでからレイヤーを追加し、そのレイヤー上でペンツールを使って自記紙の

グラフの(0℃, 0m), (30℃, 0m), (30℃, 350m), (0℃, 350m)の四点を後述するアフィン変換の既知値として使用するために、この順でトレースした。ただしこの場合の深度はXBTのプロブタイプがT-6用の自記紙(Chart No. 212777)の場合で、T-6の公称観測最大深度は460mであるのに対し、T-7は760m、T-5が1,830mであることから、それぞれに対応した自記紙の場合は水温をそのままに、それぞれ既知値の深度を750m, 1700mに変更した。さらにレイヤーを追加して、そのレイヤー上で同じくペンツールを使って水温プロファイルを浅い方から深い方に向かって適当な間隔(曲線を直線で近似できる程度の間隔)でトレースした(図(2)-1の赤線)。ここで、XBT観測はチャートレコーダーによって自記紙に記録されるが、トレースの開始点は観測開始時のレコーダー・ペンの初期位置(鶴見精機(TSK)製で(15℃, 0m), Sippican製で(16.7℃, 0m))とし、初期位置がここからずれている場合には原則としてプロファイルの最上部の点をトレース開始位置として、アフィン変換後に補正した。

トレース完了後、プロファイル修正などの再作業に備えてAdobe Illustrator(*.AI)形式で直ちに保存し、さらに「ファイル」メニューの「書き出し」サブメニューにある「書き出し形式」を選び、ファイルの種類として「AutoCAD Interchange File (*.DXF)」を選択してDXF形式のファイルも保存した(注: AIファイル保存後、最初に読み込んだ自記紙画像ファイルのレイヤーを削除してからDXFファイルを保存するとDXFファイルのサイズが小さくなるので後の作業の時間が短縮できる)。

保存したDXFファイルには二種類の線: 最初にトレースした既知値四点からなる線と、水温プロファイルをトレースした折れ線が含まれている。このDXFファイルを読み込んで、既知値を基準点としてアフィン変換し、水温および0mを0秒としたときの経過時間のペアのデータを出力するスクリプトを作成した。さらにこの出力を読み込んでXBTプロブ着水時間ならびに水温計測開始時間を特定して経過時間を補正するスクリプト、経過時間から深度に変換するスクリプト、さらに深度を1m間隔に線形補間したときの水温値を計算するスクリプトもそれぞれ作成した。これらを順に適用することによって、DXFファイルから最終的に1m間隔深度と水温のデータファイルとして出力し、さらに測点名(ID)、観測位置、年月日時刻(GMT)をヘッダ情報として付与し、観測点ごとに保存した。

(3) データベースの利用と高度化に関わる研究(サブテーマ3)

このサブテーマでは、再構築したデータベースを利用者が有効活用できる仕組み、データ収集を円滑にする仕組み、これまでに指摘された海洋データの品質に関わる問題が再発しない仕組みを考案・実現する研究に取り組む。海洋観測データは専門性が高く一般利用者には煩雑な作業を要求するために広範な分野でのデータ活用は滞っている。データ利用促進システムでは、品質管理済みの一般ユーザが利用しやすいデータと品質関連情報の提供を実現する。品質管理システムでは、海洋観測を行いそのデータをデータセンターへ提供する機関との連携も必要である。データの利用者と提供者の利益に配慮することで歴史的データベースの品質が将来も維持され、持続的に安定した環境政策の実現に貢献できる新しい仕組みを開発した。

まず、データベースの管理、維持、利用に関連するシステム開発に必要なコンポーネント開発を行い、それらを統合した実現可能な総合的データサービスの枠組を検討した。データ収集に関わる問題の原因を調査し、それを改善するシステムを設計した。広域高密度海洋観測網を展開するArgo計画(Riser et al., 2017)におけるデータ管理を参考に、このシステムを定常的なデータ品質監視のためのシステムとデータ利用促進システムの2つに分けて設計した。前者には、サブテーマ(2)が提案したメタ情報項目およびそれらに対するフラグを盛り込んだ。現在把握されているデータ品質問題の再発防止のため、さらにデータ品質に関して将来新たな問題が発覚した時いつでも品質管理処理がやり直せるよう、実施した品質管理項目の履歴およびその結果を保存するようにした。また、データ提供促進として、品質管理処理結果をデータ提供者へ提供するように設計した。

(4) 国際プロジェクトとの連携

2013年にオーストラリア連邦科学産業研究機構(ホバート)で第一回国際高精度海洋データベース(International Quality Controlled Ocean Database: IQuOD)会合が開催されて、観測データベース

の再構築を主題とするプロジェクトが立ち上げられた。本研究が開始されて以降、2015年にドイツのハンブルグ大学で開催された第三回会合に参加し、第四回会合は本推進費課題がホストとなって東京開催した。第一回の会合以降、海洋データの収集、品質管理、データベース公開に関わる議論を進めてきている。本研究課題では、整備した国内の観測データを国際的データベースに登録することと、国際協力の下で、品質管理スキームを開発し、国際高精度観測データベースを配布する役割の一端を担うことを計画している。

IQuOD 会合と日時を連続して XBT 科学会合が開催されている。これは XBT 観測データのバイアスを科学的に評価するための研究会合である。XBT観測データのバイアスの成因を分析し、その除去法について水槽実験などを含む広範な視点で議論され、国際的に取り組むべき研究課題の確認をしている。解析手法やバイアス除去法の標準化に向けた議論も同時に進められ、本研究課題の期間中に、相互比較実験が行われた。第四回のIQuOD 会合と一緒に第五回XBT科学会合を東京開催した。

本研究課題の成果は、これらの国際共同研究の中で、共有された。

4. 結果及び考察

(1) 海洋解析と気候変動研究への応用研究

気候変動に関する政府間パネル第五次報告書（IPCC AR5）で指摘された全球海洋貯熱量（GOHC）の歴史的変化に含まれる不確実性を低減するために、海面水温解析で採用されているスキームに基づいた新しいスキームを開発した。

まず、海洋観測の時空間分布の特徴について押さえておく。

海洋内部を観測したデータは、時代とともに数が増加し、深い方まで観測を実施した頻度も高まってきた。1960年代までは、200 m 深までの観測が主流で、XBT 観測が主体となった1970年代以降は450 m、750 m までと深度を増し、2000年代の Argo 観測網が展開されてからは 2000 m までの観測が標準となった。時代の主流であった観測方法によるデータは全世界海洋の40% 以上を被覆している。しかしながら、海洋の平均深度が 4000 mであることを考慮すると、Argo 以前の主要な観測網は海洋のごく表層部を捉えているにすぎない。このような観測網で月々の海洋変動を捉えようとしたときには、海面付近を除いて、観測ノイズで掻き乱されてしまう。しかしながら、数は多くはないが深層までの精密観測は継続的に行われているために、長期間平均した統計量についてはこの限りでなく、例えば 12 ヶ月平均値に対しては、1955年以降の1500m 以浅の各深度において S/N 比は、概ね 1 を超えるようになる。

新しい解析スキームは、GOHCの推定精度を向上するように構成した。結果として、観測データの品質の問題は残るが、現海洋観測データベースに基づく1955年以降のGOHC のトレンドにおける不確実性は、IPCC AR4 で示されたものの三分の一程度になることが分かった。ここでの不確実性としては、サンプリングの多寡にのみ起因する誤差のみを評価している。また、GOHCの推定における大きな不確実性の原因を追究するために、国際共同研究を行い、各国各センターで採用する解析スキームの相違によるものが最も不確実性を高めていることが分かった。最初に述べたトレンドの不確実性には、最も簡単な解析手法を採用することで、複雑な客観解析スキームの各種パラメータに依存するような不確実性のソースとなるものは含まれていない。よって、本研究の成果は、客観性の高いGOHCトレンドの不確実性の推定量を提示したと考えている。ここで考慮されていない観測データの品質による誤差や観測データに含まれるバイアス除去については、高精度観測データベース IQuOD に活動の成果を活用することで、その低減が期待される。

海洋データのさらなる有用性を調べるために、過去150年間の各月の陸上気温と海面水温を同時に推定する解析手法を開発した。この結果、同時に使用することで、海洋の観測データが陸上気温の解析精度を向上させ、大気観測データが海面水温解析精度を向上させることが分かった。したがって、海洋データの整備は海洋のみならず気候システム全体を監視するデータとして重要であるとともに、国内外で現在進められているデータレスキューを成功させることは大きな意義を有する。

日本は比較的古くから海洋での観測を行い、その観測資料を数多く残している。そのうち、かつての

日本海軍の海上気象観測資料がマイクロフィルムとその電子イメージに収められたまま未使用状態にあったため、本課題で、この電子化に取り組んだ。資料は1903年から1944年までのもので、総数は概算で 200 万点と推定される。西太平洋を広範に覆う観測が同時展開されていた。資料には現代の観測とほぼ同じ気象要素および海面水温についての観測が含まれ、数は限られるが、海氷、高層、スコールなどの観測記録も残っている。電子化にあたっては、電子イメージを元に、全主要要素のデータの手入力を業者委託した。数が多いこともあって全ての資料を本研究期間内に電子化することはできなかったが、本作業を通じて、過去資料を整備する際のいくつかの課題があることが分かり、それらに対する対応策を検討しながら、作業を進めた。

電子化作業を全て業者に丸投げしたのではなく、より効率的に電子化を進めるにはどうすれば良いのかについて各作業工程にある課題を検討し、解決した。作業効率を高めるには、事前に、全データを俯瞰する簡易な目録情報を作成しておき、電子化作業で想定される問題を事前に整理しておくことが大切である。また、データ入力作業にはクリアな電子イメージファイルを使用したい。今回使用した電子イメージは、当時の記録媒体のサイズが現在のようにテラバイト単位の大容量のものではなかったために、一つ一つのファイルサイズが制限され、結果として粗い画質の電子イメージとなっていた。このため数値データ化作業の結果、解読不明のものとして処理せざるをえなかった。当初よりイメージが不鮮明であることは分かっていたが、このため比較的鮮明な近側の観測資料から時間を遡るように作業を進めていたものの、結果として適切な判断ではなかった。そこで、予定にはなかったマイクロフィルムからの再電子イメージ化を、作業を適切に実施できる業者を選定して試みた。マイクロフィルムの保存状態は決して良いとはいえないが、現時点でのマイクロフィルムからは、数値データ化作業にたいして申し分の無い電子イメージを作成できることが分かった。このイメージを使用すれば、入力作業の間違いと作業のスピードアップが期待できる。

(2) 海洋観測データベースの再構築と品質保証のための研究

気象庁ならびに海上保安庁海洋情報部からの3621枚の自記紙についてのトレース作業を実施した。南極観測船「ふじ」「しらせ」は海上自衛隊所属であるが、XBT自記紙は海洋情報部倉庫に保管されていたため、ここでは水路部に含めているが、この二隻のデータはJODC (Japan Oceanographic Data Center; 日本海洋データセンター) に未収録であり、したがってWODにも未収録であることから、本課題によって初めて公開される南氷洋・南極海の貴重な水温データとなった。

0m, 5m, 10m, 15m, 20m, …といった、いわゆる標準層と定義されている所定の深度あるいは変曲点(ここでは水温プロファイルの勾配が変わる深度)における水温は観測時に目視で自記紙から読み取られ、その後デジタル化されてJODCのデータベースやWODといった既存のデータベースにはすでに収録されている。本課題でトレースした水温の精度を検証するため、この標準層水温とトレース水温を比較してみると、上層ではよく一致しているが、下層のトレース水温が標準層水温より低い傾向を示していた。そこで、既存標準層水温とトレース水温との差を全測点について標準層毎に比較して、明らかに下層にいくほど標準層水温に比べてトレース水温は小さくなり、400m深においては $0 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内に収まるのはわずか4%ほどでしかないと分かった。このように目視による標準層水温とトレース水温との間に系統的な差が生じていることから、これらはトレース時の誤差に起因するものではなく他に原因があると考えられたために、自記紙に描かれている軸の仕様について調べることにした。その結果、低温側では横軸の目盛り上の水温値がトレース水温より高く、 6°C 付近で最大 0.4°C 高い傾向が見られた。XBTチャートレコーダーの水温記録精度が $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ であることから、この差は容認できないため、トレース水温を補正した。その結果、全ての深度において標準層水温とトレース水温の平均的な差が $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ より小さくなる補正量を求めることができた。

トレース水温の精度を検証したのち、深度へは世界共通の方式もしくは最新の研究成果に基づいて変換し、1m間隔深度で水温値を補間し、その上で各プロファイルの品質管理処理を実施した。本研究によって整備された水温データは既存標準層水温データに置き換えて利用できることは上述した通りであるが、既存標準層水温データは各機関からデータ集として出版もしくは国立海洋データセンターに報告さ

れた、いわゆる「機関公式データ」であるので、このような場合にはデータ取得機関（本課題の場合は気象庁または海上保安庁海洋情報部）に通報し、かつJODCを介してWODの修正を依頼した。したがって本課題の成果は既存標準層水温データの品質向上の一助も担っている。

本課題ではさらに国立研究開発法人水産研究・教育機構中央水産研究所（観測当時は水産庁中央水産研究所）から、同研究所所属の蒼鷹丸で実施されたDBT（Digital BathyThermograph）観測の1m間隔水温出力紙を借用し入力作業を行った。DBTは深度センサーを内蔵しているためXBTのような深度変換式は不要であり、データは内部メモリに1m間隔で1000m深まで記録されるが、その出力は紙媒体である。当観測データも標準層水温のみJODC等に報告されていたため、本課題の目的に従って水温プロファイルの鉛直高解像度化を実施した。観測年は1977～1980年、1983年および1985年で、航海数は34、観測点数は1,536点、観測層数は472,436（標準層を含む）であった。これらDBT水温データは、すでに中央水産研究所側で入力済みのデータと統合されたのちに公開される。

本課題によって整備された鉛直高分解能水温データは、既存標準層水温データに比べて観測点数そのものは変わらないものの、観測層数は飛躍的に増加した。例えば気象庁凌風丸によるXBT観測データ数は4倍増となった。南極観測船「ふじ」「しらせ」によるXBT観測記録は初出であるので観測点数714点、および観測層数約765,000は共に純増である。

(3) データベースの利用と高度化 に関わる研究

恒常的な海洋データの品質の維持を実現することを目的に、総合的なデータサービスのためのシステムを、広域高密度海洋観測網を展開するArgo 計画で採用されている先進的観測データ管理を参考に、定常的な海洋データ品質監視のためのシステムとデータ利用促進システムの2つに分けて開発した。

品質監視システムへの入力データとして、JODCで公開されているJODC標準フォーマットファイル（FETI）を採用した。初期の入力データは、日本の機関が観測した水温データとした。また、XBT に関する詳細なメタ情報および各情報のフラグを格納した。本システムは入力データに対して、自動品質管理処理を実施し、実施日および各処理項目の結果を保存する。我々の海洋変動に対する理解は限られているため、データの善し悪しの判断の絶対的基準は無い。また、観測機器固有のバイアスが発見されることもある。こうしたケースに対応するために、システムは品質管理処理の再実行が可能なように、また、品質管理の履歴を保存するように構成され、これにより観測データの品質を高水準に維持・管理できるものとしてある。また、IQuODによる品質管理手法に変更が生じた際にも柔軟にできる。

データ利用促進システムは、データ管理システムによって品質管理を施したデータを一般に公開するシステムを「日本の水温データ公開システム」として、また、IQuOD によって構築されたデータセットの利活用を促進するための「全球水温データ公開システム」を開発した。「日本の水温データ公開システム」には、データ提供者向けに、パスワード制限を設けて、品質管理処理情報を提供する機能を組み込んだ。こうすることで、観測を行った機関による再検証により、データ品質を高められると期待できる。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

現時点でのデータベースに収録されている海洋表層水温データの品質に大きな問題が無いと仮定したとき、全球海洋貯熱量（GOHC）の1955年以降の歴史的変化の推定において見込まれる不確実性は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第五次報告書で指摘された大きな不確実性の三分の一程度になると考えられる。この結果は、GOHC 推定における不確実性の低減の課題の解析手法の標準化の課題解決に貢献するものである。これに加えて国際的高精度海洋観測データベース（IQuOD）が整備されれば、GOHC の不確実性を着実に低減することができる。また、海洋観測データが海洋だけでなく大気変動の再現にとっても重要な役割を果たすことが示されたことは、データレスキュー作業の価値を高め、長期気候変動を高精度に再現する上での海洋データの重要性が高いことを意味する。

本研究で確立したXBT (expendable bathythermograph) 水温記録装置の自記紙記録の読取り方法は、XBT観測および使用機器は全世界で共通であることから、他国においても容易に適用可能で、全球規模での歴史的水温データの発掘・救済に対しての貢献が期待できる。また、歴史的水温プロファイルを鉛直に高分解能で整備したことにより、XBT の深度や水温の系統的誤差を高精度で推定することができるようになり、GOHC の不確実性の低減化に寄与する。さらに、海洋表層混合層の厚さも、より正確に求められることから、生物地球化学分野への応用、例えば表層における二酸化炭素分圧やアルカリ度、栄養塩の各種パラメータの水平分布の高精度な再現(データ空白域における予測)が可能となる。さらに大気海洋相互作用に寄与する海洋表層循環の微細構造の解明にも応用可能である。

観測データは我々の自然に対する理解を進める際に最も信頼性の高い貴重なデータであるから、過去だけでなく今後も、その品質が高水準に維持されていなければならない。海洋観測データユーザの裾野を広げ、利用機会を増やすことで海洋観測データの品質を一層向上させ、問題があれば早期発見することが肝要である。加えて、データサービスが海洋観測データの提供者(観測実施者)との互惠関係を築くことも品質向上のためには不可欠である。本課題で構築する品質管理・利用促進システムはこれらの実現に寄与するものである。

(2)環境政策への貢献

＜行政が既に活用した成果＞

特に記載すべき事項はない。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

本研究で開発した解析データは、IPCC の第五次評価報告書でその不確実性の低減が課題となっているものであり、また当該データの利用範囲が広いことから、報告書の海洋観測、水位変動、十年規模変動予測に関わる記述箇所において参照されると考える。また、気象庁で最新の表層水温の解析システム(Ishii et al., 2017)を現業運用し、定期的に解析データを更新・公開できるような体制づくりを現在進めている。格子点での値に変換された客観解析水温・塩分データプロダクトは国内外の研究者等の利用のために、以下の URL で公開している。

<https://climate.mri-jma.go.jp/pub/ocean/ts/v7.2/>

本課題で再構築した海洋表層水温データベースはIOC/IODEのプロジェクトである IQuOD に取り込まれて国際的プロジェクトとしての地位を確立した。IQuOD は、気候変動のみならず幅広い海洋分野および海上気象分野の自然科学研究に利用されるだけでなく、海上保安庁海洋情報部を通じて海洋政策支援情報ツール(海洋台帳)における基礎資料として、海洋の総合的管理および海洋状況把握(MDA; Maritime Domain Awareness)への活用が見込まれる。

開発したデータ管理システムおよびデータ利用促進システムは、将来的には日本海洋データセンター(JODC)のシステムに組み込まれることを見込んでいる。データ利用促進システムのうち、海洋観測データ利用促進システムについては、IQuOD データベースの利活用促進のために、以下のURLで仮運用中である。

<http://dataview.xbt-japan.org:8080/>

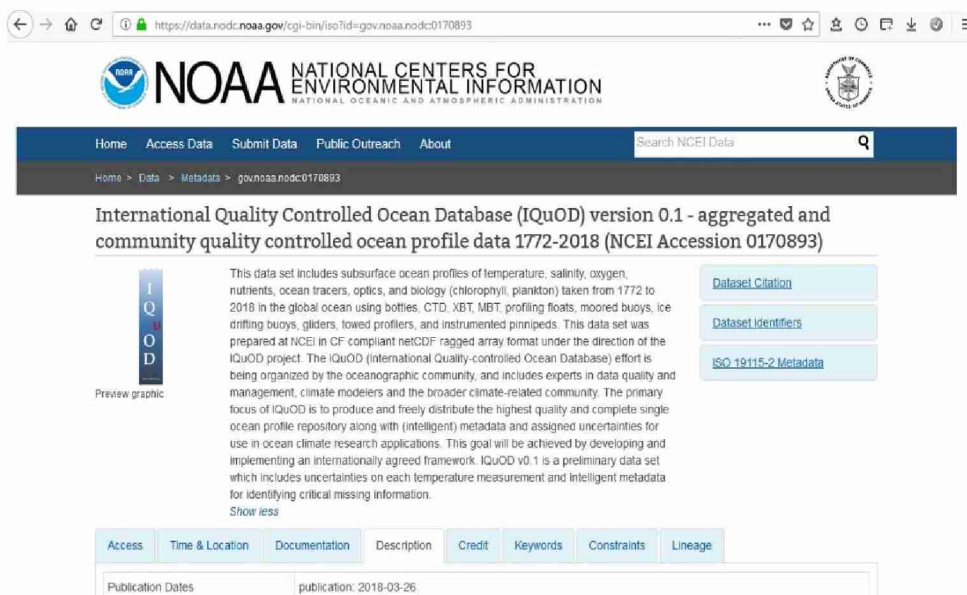
地球環境への適応や温暖化緩和のための施策検討に活用される基礎的気候データを整備したことで、今後の過去の気候変化の理解と予測精度の向上に結びつき、その結果として地球温暖化対策コストの軽減が期待できる。また、温暖化緩和策が着実かつ効果的に進められているか常時監視できる体制を、本研究により確立することができた。また、本研究の成果であるところの全球海洋貯熱量の不確実性の低減と、国際協力によって再整備された高精度海洋データベースは、IPCC の次回評価報告書への貢献が期待できる。

平成30年3月26日、高精度海洋表層水温データベース IQuOD の バージョン 0.1 が公開された。環境省と環境再生保全機構は当該プロダクトのスポンサーとして登録されている。



IQuOD のホームページ 気象研究所ロゴ（上段左から 4 番目）

<http://www.iquod.org/>



IQuOD バージョン 0.1 公開

<https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.nodc:0170893>

6. 研究成果の主な発表状況

（１）主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) E. C. KENT, J. KENNEDY, T. M. SMITH, S. HIRAHARA, B. HUANG, A. KAPLAN, D. E. PARKER, C. P. ATKINSON, D. I. BERRY, G. CARELLA, Y. FUKUDA, M. ISHII, P. D. JONES, F. LINDGREN, C. J. MERCHANT,

S. MORAK-BOZZO, N. A. RAYNER, V. VENEMA, S. YASUI AND H.-M. ZHANG, Bull. Amer. Meteor. Soc., doi: 10.1175/BAMS-D-15-00251.1, 2016

“A call for new approaches to quantifying biases in observations of sea-surface temperature.”

- 2) T. BOYER, C. M. DOMINGUES, S. A. GOOD, G. C. JOHNSON, J. M. LYMAN, M. ISHII, V. GOURETSKI, J. K. WILLIS, J. ANTONOV, S. WIJFFELS, J. A. CHURCH, R. COWLEY, N. BINDOFF, J. Climate, 2016

“Sensitivity of Global Upper Ocean Heat Content Estimates to Mapping Methods, XBT Bias Corrections, and Baseline Climatologies.”

- 3) M. ISHII, Y. FUKUDA, H. HIRAHARA, S. YASUI, T. SUZUKI, AND K. SATO, SOLA, Vol. 13, 163-167, 2017

“Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets.”

- 4) M. PALMER, T. BOYER, R. COWLEY, S. KIZU, F. RESEGNETTI, T. SUZUKI, AND A. THRESHER, J. Atmos. Oceanic Technol., doi:10.1175/JTECH-D-17-0129.1, 2018

“An algorithm for classifying unknown expendable bathythermograph (XBT) instruments based on existing meta data.”

(2)主な口頭発表(学会等)

- 1) T. BOYER, C. M. DOMINGUES, S. A. GOOD, G. C. JOHNSON, J. M. LYMAN, M. ISHII, V. GOURETSKI, J. K. WILLIS, J. ANTONOV, J. A. CHURCH, R. COWLEY, N. BINDOFF, and S. WIJFFELS: AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015

“Sensitivity of Global Upper Ocean Heat Content Estimates to Mapping Methods, XBT Bias Corrections, and Baseline Climatologies.”

- 2) R. COWLEY, M. D. PALMER, C. M. DOMINGUES, J. SPRINTALL, T. SUZUKI, M. ISHII, T. BOYER, G. J. GONI, V. GOURETSKI, A. M. MACDONALD and A. THRESHER: AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015

“Producing a Climate-Quality Database of Global Upper Ocean Profile Temperatures – The IQuOD (International Quality-controlled Ocean Database) Project.”

- 3) Y. FUKUDA, and M. ISHII: SST bias Meeting, Exeter, 2015

“Recent Development in Japan Subsurface Temperature Database Reconstruction Project and Comparison of SST with near surface temperature.”

- 4) M. ISHII: 8th ACRE workshop, University of Chile, Santiago, Chile, 2015

“SOUSEI 150-year Coupled Reanalysis and Japanese Data Rescue Activity.”

- 5) T. KURAGANO, Y. FUJII and M. KAMACHI: Ocean Surface Topography Science Team Meeting, Reston, USA, 2015

“Simple OSE of Argo using space-time scales statistically derived from altimeter data.”

- 6) T. BOYER, C. M. DOMINGUES, S. A. GOOD, G. C. JOHNSON, J. M. LYMAN, M. ISHII, V. GOURETSKI, J. K. WILLIS, J. ANTONOV, S. WIJFFELS, J. A. CHURCH, R. COWLEY, N. BINDOFF: AGU Ocean Science Meeting, New Orleans, USA, 2016

“Sensitivity of Global Upper Ocean Heat Content Estimates to Mapping Methods, XBT Bias Corrections, and Baseline Climatologies.”

- 7) M. ISHII: AMS 28th Conference on Climate Variability and Change, New Orleans, USA, 2016

“SOUSEI 150-year Coupled Reanalysis.”

- 8) M. ISHII: 4th IQuOD Workshop, Tokyo, 2016

“Japanese data rescue activities and related topics.”

- 9) S. KIZU: 4th IQuOD Workshop, Tokyo, 2016

“Update on assessing the Japanese wartime hydrographic survey.”

- 10) S. KIZU: 5th XBT Science Workshop, Tokyo, 2016
 “A review of Japanese PX-40: 16 years with T/V Miyagi Maru.”
- 11) S. KIZU: 5th XBT Science Workshop, Tokyo, 2016
 “Sea tests of XCTDs: how are they different from XBTs?.”
- 12) S. KIZU: IQuOD 3rd Annual Workshop, Hamburg, Germany, 2016
 “Progress in assessing Japanese wartime surveys - struggling with the sampling depths -.”
- 13) H. KUBOTA, J. MATSUMOTO, M. ZAIKI, M. ISHII, R. KUMAZAWA, H. FUDEYASU, T. MIKAMI, J. HAMADA, T. INOUE, S. KOBAYASHI, H. YAMAMOTO, and I. AKASAKA: the 9th ACRE Workshop and Historical Weather and Climate Data Forum, Maynooth, Ireland, 2016
 “Japan Climate Data Project (JCDP) - Data rescue of tropical cyclone landfall in Japan.”
- 14) J. MATSUMOTO, J. HAMADA, T. INOUE, S. KOBAYASHI, H. YAMAMOTO, T. MIKAMI, M. ZAIKI, H. KUBOTA, N. ENDO, J. HIRANO, K. TSUMURA, Y. NYOMURA, J. NISHINA, M. ISHII, and I. AKASAKA: the 9th ACRE Workshop and Historical Weather and Climate Data Forum, Maynooth, Ireland, 2016
 “Data rescue activities in Japan.”
- 15) T. MIYAKE: 4th IQuOD Workshop, Tokyo, 2016
 “Introduction of JODC Historical XBT profile recovery and rescue project in Japan.”
- 16) T. SUZUKI: AGU Ocean Sciences Meeting, New Orleans, USA, 2016
 “Improving Database of Historical Ocean Subsurface Temperature Observations.”
- 17) T. SUGA: 5th IQuOD Workshop Tokyo, 2016
 “GOOS update and IQuOD in the context of Framework for Ocean Observing (FOO).”
- 18) S. YASUI and M. ISHII: the 4th International Workshop on the Advances in the Use of Historical Marine Climate Data (MARCDAT-IV), Southampton, UK, 2016
 “Historical land surface temperature reconstruction with observations over land and oceans.”
- 19) 佐藤佳奈子, 須賀利雄, 石井正好, 中野俊也, 福田和義, 寄高博行, 勢田明大, 気象学会2015春季大会 (2015)
 「海洋観測データサービスの現状と展望」
- 20) 小山博司, 石井正好, 山本広志, 木本昌秀: 日本気象学会2016年秋季大会 (2016)
 「日本域の歴史的観測データのデジタル化」
- 21) M. ISHII: Conference on Regional Sea-Level Changes and Coastal Impacts, New York, USA, 2017
 “Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation.”
- 22) 石井正好, 釜堀弘隆: 日本地理学会2017年春季学術大会 (2017)
 「過去150年間の気候再解析と大気海洋データレスキュー」
- 23) 木津昭一: 日本海洋学会2017年度秋季大会 (2017)
 「旧海軍水路部による第二次大戦期の水温一斉観測について」
- 24) 木津昭一: 日本海洋学会2017年度秋季大会 (2017)
 「XCTD の塩分バイアスについて」
- 25) 鈴木亨: 日本海洋学会2017年度秋季大会 (2017)
 「International Quality-Controlled Ocean Database (III) 歴史的XBTデータ再整備における各種補正」
- 26) 安井, 壯一郎, 石井正好: 東アジア域における大気循環の季節内変動に関する研究集会 (2016)
 「海面水温と陸上気温の同時解析」
- 27) S. HOSODA and XBT-Japan project team: 2018 Ocean Sciences Meeting, Portland, OR, USA, 2018
 “The data management system for historical XBT profile data including rescued one.”
- 28) T. SUZUKI and XBT-Japan project team: 2018 Ocean Sciences Meeting, Portland, OR, USA, 2018
 “Improving Database of Historical Ocean Subsurface Temperature Observations (II).”

7. 研究者略歴

研究代表者

石井 正好

気象庁気象大学校卒業、博士(理学、東京大学)

現在、気象庁気象研究所 気候研究部 第四研究室室長

研究分担者

1) 倉賀野 連

気象庁気象大学校卒業、博士(理学、東北大学)

気象庁気象研究所 海洋研究部 部長

現在、東京理科大学理学部応用物理学科非常勤講師

2) 鈴木 亨

東京水産大学(現 東京海洋大学) 水産学部海洋環境工学科卒業

東京水産大学大学院水産学研究科博士後期課程修了、博士(水産学)

財団法人日本水路協会 海洋情報研究センター 研究開発部 主任研究員

現在、一般財団法人日本水路協会 海洋情報研究センター 副所長

3) 佐藤 佳奈子

東北大学理学部宇宙地球物理学科卒業

東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士後期課程修了

国立研究開発法人海洋研究開発機構 技術主任

現在、環境省水・大気環境局水環境課海洋環境室 海岸漂着物対策第二係長

4) 須賀 利雄

東北大学理学部卒業

東北大学大学院理学研究科博士課程修了

東北大学理学部助手

東北大学大学院理学研究科准教授

現在、東北大学大学院理学研究科教授・国立研究開発法人海洋研究開発機構招聘上席研究員

5) 増田 周平

京都大学理学部卒業

京都大学大学院理学研究科博士課程修了

地球フロンティアシステム 招聘研究員

(独) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域 海洋データ同化研究チーム 主任研究員・チームリーダー

現在、(国) 海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター 海洋循環研究グループ 主任研究員・グループリーダー

6) 細田 滋毅

北海道大学大学院地球環境研究科博士課程修了

海洋科学技術センター 海洋観測研究部 研究員

独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境観測研究センター 研究員

独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域 技術研究主任

独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域 チームリーダー代理

国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球環境観測研究開発センター グループリーダー代理

II. 成果の詳細

II-1 海洋解析と気候変動研究への応用研究

気象庁気象研究所

気候研究部 第四研究室

海洋研究部

石井 正好

倉賀野 連 (平成27年度)

研究協力

気象庁

地球環境・海洋部 海洋気象課

同

地球環境・海洋部 気候情報課

東北大学大学院理学研究科

海上保安庁 海洋情報部 海洋情報課

鶴見精機株式会社

中野 俊也

福田 義和 (平成27年度)

安井 宗一郎 (平成28～29年度)

木津 昭一

三宅 武治、宗田 幸次

雨池 健一

平成27～29年度累計予算額：27,740千円（うち平成29年度：7,776千円）

[要旨]

IPCC報告書や多くの論文に引用されている海洋表層水温客観解析データを高精度化し、客観解析データの信頼性を定量的に評価した情報も付加した、環境研究への応用も容易でかつ効果的に利用可能なデータベースを作成した。精度については未解決の課題がある現時点での観測データを用いて、全球海洋貯熱量の推定精度の、時空間のサンプリングの粗密に依存する不確実性はどれくらいあるのかを推定したところ、気候変動に関する政府間パネル 第五次評価報告書の不確実性の三分の一程度と大きく減少することが分かった。高精度の観測データが整備されることになれば、全球海洋貯熱量の信頼性は更に向上するものと期待できる。また、歴史的観測データを整備することの重要性を理解するために、過去150年間の各月の陸上気温と海面水温を同時に推定する解析手法を開発した。この結果、同時に陸上気温と海面水温の観測データを使用することで、海洋の観測データが陸上気温の解析精度を向上させ、大気の観測データが海面水温解析精度を向上させることが分かった。ここでの結論は、データレスキューを実施することの意義を高めるものであるといえる。さらに、未整備となっている戦前の日本海軍による、海面水温データを含む海上気象観測データのデジタル化作業を行った。この作業により、全データの半数が数値データ化されるとともに、過去のデータについての効率的な電子化作業をするためのノウハウを蓄積することができた。加えて、日本の機関が観測した1930年頃からの日本周辺海域における海洋観測データを有効活用するために、メタ情報の収集し、その品質と精度について考察を行った。

[キーワード]

海洋表層水温、客観解析、海洋貯熱量、地球温暖化、不確実性

1. はじめに

地球温暖化により地球システムにもたらされた過剰な熱エネルギーの大半は海洋に累積され、過去から現在までの地球温暖化の記録となって残っている。全球海洋貯熱量（GOHC）の時系列はその実態を理解するのに役立つ。しかしながら、世界の各機関による推定結果は相当にばらついており、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第五次評価報告書では、その不確実性の大きさが問題であると指摘された。大きな不確実性の原因がどこにあるのかを解明することと、GOHCの不確実性を低減させる努力が求められている。

現在のArgo ブイを展開した海洋観測システムはほぼ全世界の海洋を覆っており、海洋内部の状況が

詳らかになっているが、それ以前の海洋観測網は貧相である。長期に亘る海洋の温暖化シグナルを抽出するときには、慎重に海洋データの吟味を行わなければならない。また、近年、世界の主要な観測データベースに保存されている海洋観測データの品質を疑問視する声が高まり、2010年ごろから、高品質の海洋観測データベースを整備する国際的な動きが生れた。この契機となったのは、その数年前に、簡易型の水溫プロファイル観測（XBT）に含まれる観測データのバイアスを放置すると、全球海洋貯熱量の時系列に説明困難な不自然な山谷が現われてしまうという問題提起（Gouretski and Koltermann 2007）であった。同時にその解決方法（Wijffeks et al. 2008 ; Ishii and Kimoto 2009 ; Levitus et al. 2009）の是非や、全球海洋貯熱量を推定する解析方法の標準化を巡って国際的な議論が高まってきた。

従前より、海面水溫や海洋表層水溫解析方法を提案しその客観解析データを国内外に配布してきた。それらの経験を生かして、このサブテーマに取り組むことにした。

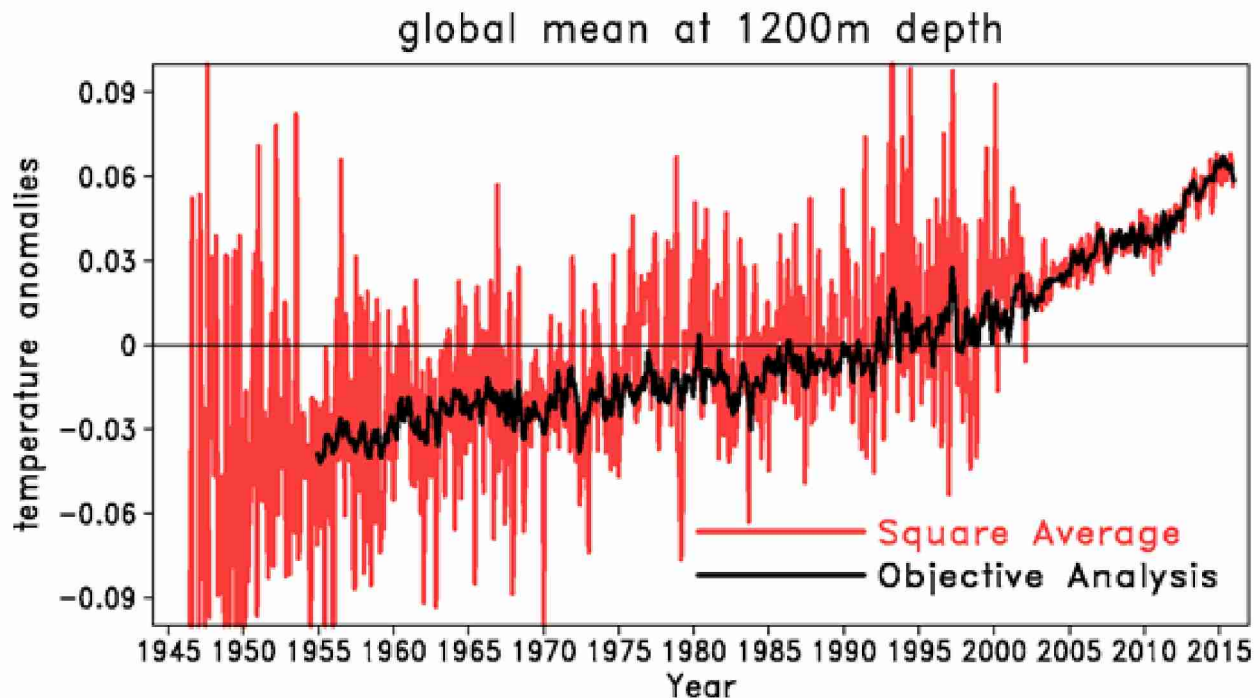
2. 研究開発目的

本課題では、これまでの解析方法を改良して、GOHC を高精度で推定できるようにすることを主目的とする。これにより、IPCC の第五次報告書で指摘された GOHC の不確実性に低減に貢献する。また、海洋データを、海洋の状態を理解するだけでなく、長期的気候監視のために高度利用する可能性について検討する。これらの客観解析プロダクトを作成して、地球温暖化の監視強化や気候モデルの高精度化に貢献できるようにする。これらのプロダクトは、データの利用者にとって、観測データそのものよりも簡単に扱うことができるものであり、温暖化対策のための環境、防災等の調査にも容易に活用できる。また、1930年ごろからの世界的に見て日本周辺海域に潤沢に分布する海洋観測データや旧日本海軍が実施した海上気象観測データを有効活用するための基礎的調査を行う。

3. 研究開発方法

これまで開発してきた表層水溫解析手法を高度化するにあたっては、開発が完了している海面水溫解析の手法（Hirahara et al. 2014）を適用した。表層水溫解析の場合、海洋水溫変動を時間スケールの異なる長期トレンドと年々変動成分に分けて独立に解析することで、解析結果の精度の向上を図る。年々変動の推定には経験的直交関数を利用したリコンストラクション法も試みる。GOHC の不確実性を低減するためには、トレンド成分の精度についての吟味が重要である。トレンド成分は5年程度の時間スケールの状態量から推定することで十分であるから、乏しい観測データの期間中でも推定精度を高めることができる。各センターが採用する独自の客観解析手法が独自の評価結果となって、GOHC 推定の不確実性を大きくしているという批判があるので、トレンド成分を求める際には、最も単純な解析手法であるところのボックス平均を採用した。これは、等間隔に区切られた格子内の観測データを算術平均する方法である。ただし、ここでは、観測データの時空間の偏りを最小化し、同じ観測者や同じブイによりデータだけに偏らないように前処理を施した観測データを平均することにした。今回は、全てのボックスの大きさは同じで、緯度 5度、経度 5 度のサイズに設定している。

図(1)-1 は、ボックス平均された深さ1200 m における全海洋月平均水溫の時系列である。後述するように、時代とともに海洋観測の形態は変遷してきているが、Argo 観測網が展開された2003年ごろの前と後では、月々の水溫変動の様相が大きく変わっている。ボックス平均値では、観測データが少ないと観測データのサンプリングが少ないことによるノイズが凌駕して、適切な全海洋平均値を適切に推定することは困難である。一方、上述した客観解析を施すことにより、ノイズを十分に抑えた出力が得られることを図から読み取ることができる。ボックス平均した月々の値は変動が大きいものの、遠目で図を眺めれば、年を経るごとに、1200 m 深における水溫は徐々に上昇してきている傾向を読み取ることができる。



図(1)-1 ボックス平均された深さ1200 m における全海洋月平均水温（℃）の時系列（赤）。黒い線は客観解析値を全球海洋平均したもの。

GOHCの不確実性の低減のために客観解析手法や XBT 観測データのバイアス補正方法の標準化が必要であるが、これらについては一機関で問題解決を図るよりは、国際共同研究の下で相互比較実験を行う方が効果的である。国際連携を進め、相互比較実験の仕様を決定し、実験結果の吟味を行う議論の場に参加した。日本、アメリカ、オーストラリア、イギリス、ドイツ、中国などからの研究者が参加して、相互比較実験が実施された。

気候監視のために海洋データをより高度利用できるかどうか検討するために、次の二つのことを行った。一つめは、海洋観測データを陸上の気象要素の推定に活用することを試み、海洋データの更なる価値を引き出す。ここでは、上記した客観解析手法を応用して、同時に海面水温と陸上気温の二変量を客観解析できるスキームを開発し、海洋（陸上気温）観測データの情報を陸上気温（海面水温）の解析に利用できるようにした。二つめは、日本近海が世界的に見て古くから海洋観測データで充実した海域であることから、そのデータ利用を今後進めていくための基礎的な作業と調査を行った。第二次世界大戦以前に行われた海上気象観測データが電子イメージに収めたままになっていたもので、これを数値データとして読み取り、品質管理を施した。また、かつての日本海軍や水産関係機関が実施した海洋表層水温観測データの品質について、可能な限りのメタデータを収集し、水温観測データのバイアス除去が可能かどうかの調査を行った。

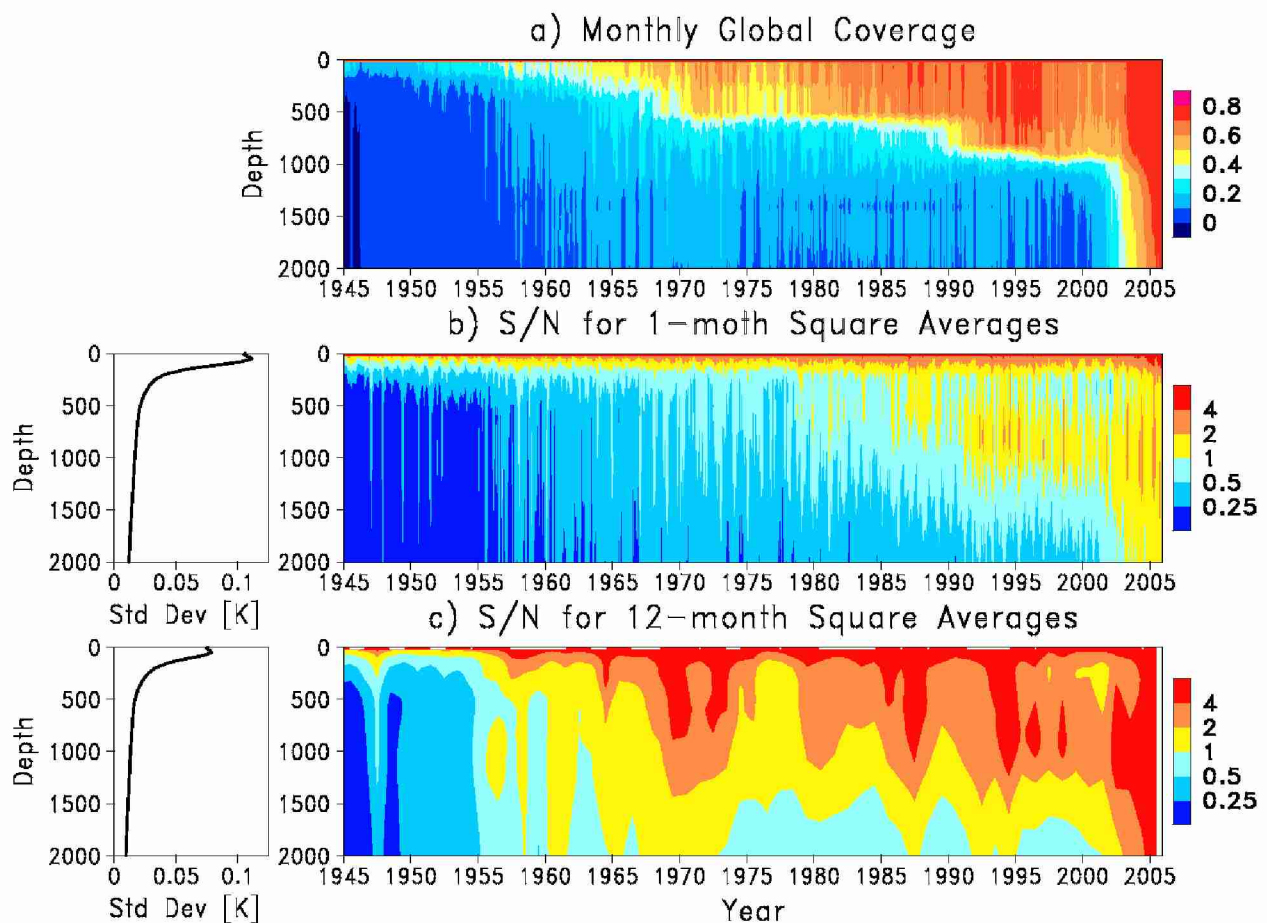
4. 結果及び考察

4.1 表層水温解析の高度化

表層水温をトレンド成分と年々変動に分けて解析するスキームを開発し、現在の海洋データベースでは GOHC の不確実性はどの程度に見込まれるかについて調査した。この結果は論文に纏めて報告された (Ishii et al. 2017)。

海洋内部を観測したデータは、時代とともに数が増加し、深い方まで観測を実施した頻度も高まって

きた(図(1)-2a)。1960年代までは、200 m 深までの観測が主流で、XBT 観測が主体となった1970年代以降は450 m、750 m までと深度を増し、2000年代の Argo 観測網が展開されてからは 2000 m までの観測が標準となった。図から、時代の主流であった観測方法によるデータは全世界海洋の 40% 以上を被覆しているのが分かる。しかしながら、海洋の平均深度が 4000 m であることを考慮すると、Argo 以前の観測網は海洋のごく表層部を捉えているにすぎない。このような観測網で月々の海洋変動を理解しようとしたときには、海面付近のものを除いて、観測ノイズで掻き乱されてしまう (図(1)-2b)。一方で、観測数は多くはないが深層までの精密観測は継続的に行われているために、長期間平均した統計量についてはこの限りでなく、例えば 12 か月平均値に対しては、1955年以降の1500m 以浅の各深度において S/N 比は、概ね 1 を超えるようになる (図(1)-2c)。これは、図(1)-1 の時系列を遠目で見るとということと同等である。



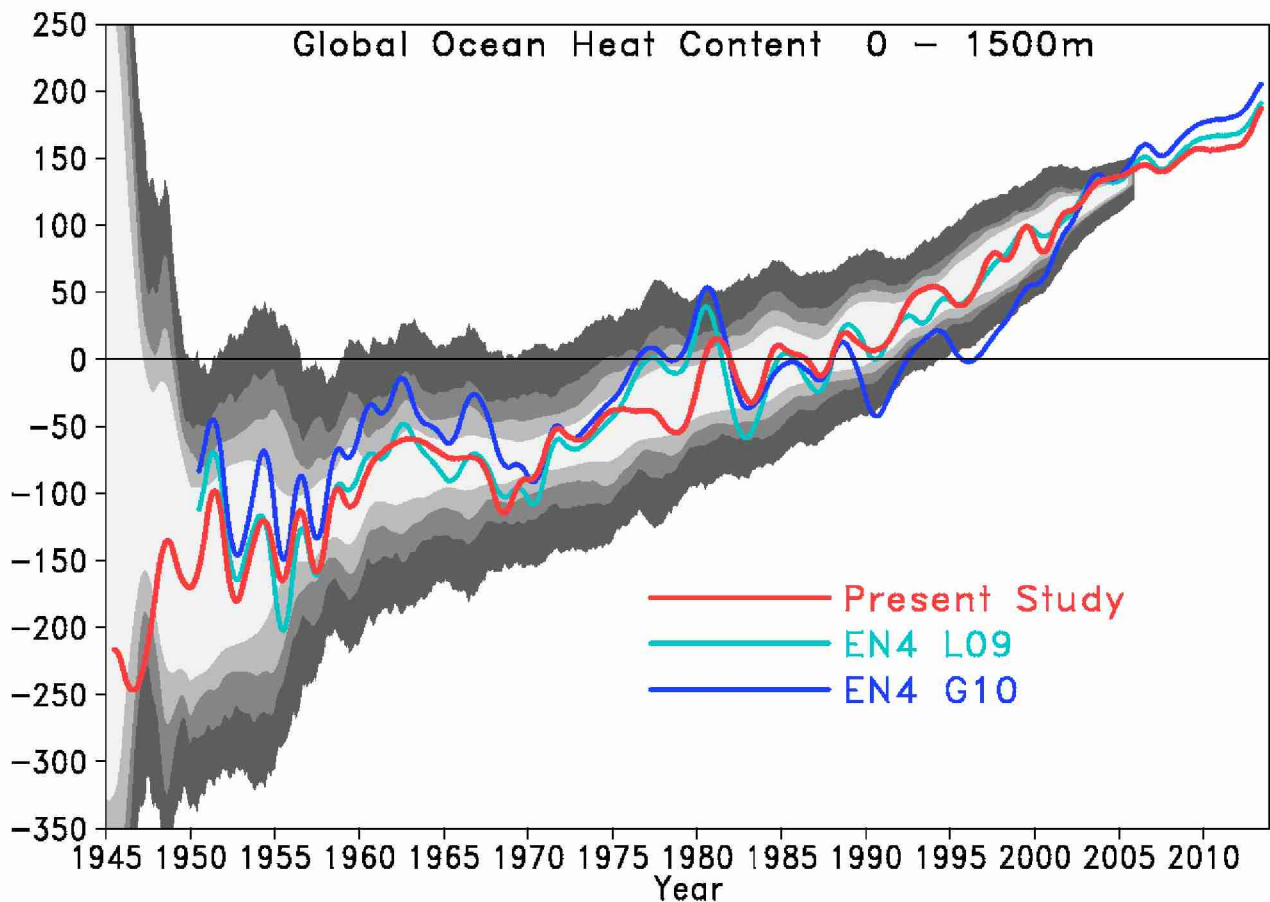
図(1)-2 a) 各深度における観測データの全球海洋被覆率。b) 月平均全球平均水温についてのシグナル・ノイズ比。左側のプロファイルは各深度の全球平均水温の標準偏差である。c) 12か月平均値に対するシグナル・ノイズ比と標準偏差

トレンド成分の推定では、まず、全球の海洋を、水平方向には 1 度×1 度の箱型格子に、海面から150 mまでの鉛直方向には24層に分割して、それぞれの区域毎かつ月毎に観測データを平均した。1500m までのデータを全球域で積算平均した水温値 (GVAT) を、各月における GOHC 推定値の代理とした。ここでは、時空間のサンプリングエラーが最小となるような工夫を施している。また、GVAT に定数を掛けたものが実際の GOHC とほぼ一致することと、観測データの無い格子を考慮しなくても一定の観測データがあればGOHC の推定誤差以内に収まることを確認した。Argo 観測が有効な 2006年から2015年までの観測で行った海洋表層水温解析結果を真として、それ以前の各年代の観測データの分布に合うように、同10年間の観測データを選んで、再度、同期間について解析を行い、真値と比較をし、観測データが乏しい

期間の不確実性を推定した。

図(1)-3 が GOHC とその推定誤差である。GOHC を各月で求めようとする大きな不確実性を覚悟しなければならない（最も濃い陰影）が、平均する時間平均を伸ばすことにより不確実性は減少していくのが分かる。真値と定めた期間が10年程度しかないので、実際には 1年平均したGOHCの不確実性まで評価した。トレンドは5年程度の平均で定義できるので、理論的に推定される、5 年平均GOHCの不確実性は、1年平均の半分程度となる。更に、この量はIPCC 第五次報告書の不確実性の推定量の約三分の一程度になることも分かる。ここでは、サンプリングの多寡にのみ起因する誤差のみを評価していることに注意されたい。

やはり現時点での海洋観測データベースの精度は高くはないのではないか、ということは、使用する観測データやバイアスの補正方法の違う観測データベースを使用した結果との比較から理解できる。図中の色を付けた実線で示される時系列を比べれば、本研究で求めたもの（赤）と品質管理や補正方法の異なる観測データによる解析結果（青と水色）の間には、ときおり一年平均GOHCの不確実性を超えてしまう期間がある。これらの差の原因を説明するのは現時点では困難であるが、観測データの不具合と関連するものである可能性が高いと考えている。



図(1)-3 全球海洋貯熱量の時系列。海面から1500m 深までの客観解析水温データを積算して求めた。赤は今回の解析、青・水色は、英国ハドレーセンターで品質管理され、2種類の異なる観測バイアス補正を採用したデータベースによる解析である。陰影は、5ヶ月、15ヶ月、2.5年、5年平均値に対する推定誤差を示す。

上記の解析結果を示した図では、解析方法の違いについては考慮されていない。バイアス補正方法も含めて解析手法の違いが GOHC の推定にどのような影響を及ぼしているかについては、別途、国際共同研究の枠組みの中で行われた。それまでの研究では、世界の各センターが採用するバイアス補正方法の

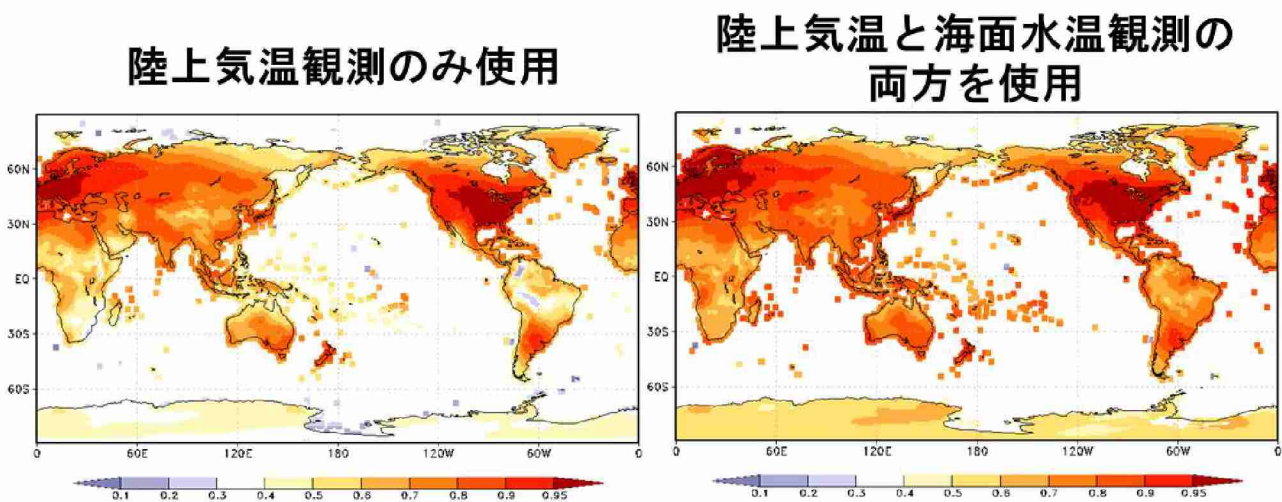
違いに着目していたが、今回、包括的に GOHC の不確実性の原因を調査して、各機関で採用する解析手法の違いによるものが最も大きいことが分かった (Boyer et al. 2016)。海面水温観測データのバイアス補正については、別途、英国ハドレーセンター他との共同研究を行い、その成果は論文に纏められた (Kent et al. 2017)。

本研究の中で、国際高精度観測データベースの品質に関わる評価まで行うことはできなかった。IQuOD の中で品質管理手順の標準化作業が遅れたことも一因である。今後、整備された高品質データベースを使用して GOHC の精度評価を行い、観測データの品質が GOHC にもたらす不確実性の評価を行うこととする。

4.2 海洋観測データの高度利用に向けて

海洋観測データと大気観測データを組み合わせて過去の気候変動を精度良く理解できるシステムの開発を行った。海洋観測データは海洋変動のみするためにだけ使用するものではなく、気象要素の理解にも役立つと考え、海面水温と地上気温観測を同時に使用して、海面水温と地上気温を同時に客観解析することで得られる恩恵について調査した。

結果の一部を図(1)-4 に示す。左側の図が1880年の陸上気温の観測のみ使用した場合の客観解析結果の信頼性を相関係数で表したものである。当時、陸上気温観測データが充実しているアメリカ大陸やヨーロッパ域などでは、信頼性の高い解析結果が得られる一方、データが乏しいアフリカ、南米のアマゾン域、そして高緯度域での解析精度は低い。これに対して、陸上気温観測データに加えて海面水温観測データを同時に使用して客観解析を行ったところ、陸上気温の再現精度は、全陸上域で高まるという、右側の図の結果が得られた。同様の恩恵は海面水温の再現でも確認された。詳細は別途論文に取り纏めて報告する。

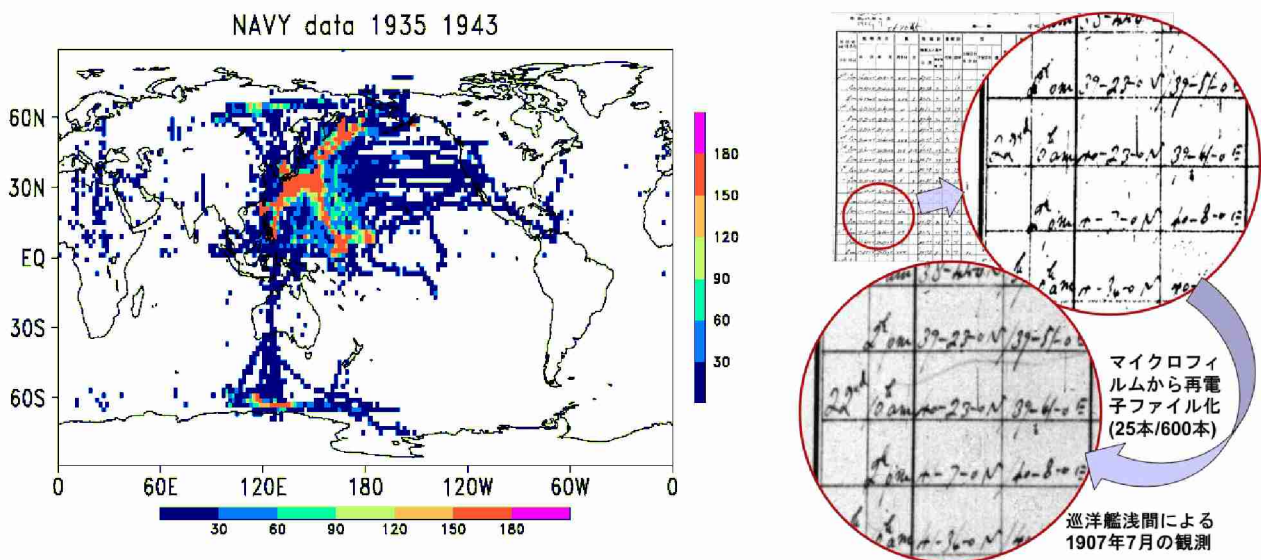


図(1)-4 陸上気温の解析に、陸上気温と海面水温データを使用した場合の期待される陸上気温の解析精度 (右)。精度は真値との相関係数。左図は陸上気温の観測データを用いた場合。

日本は比較的古くから海洋表層観測を行ってきており、現在、その観測資料が数多く残っている。その中で、かつての日本海軍の海上気象観測資料がマイクロフィルムとその電子イメージに収められたまま未使用状態にあったため、本課題で、その電子化に取り組んだ。資料は1903年から1944年までの期間に行われた観測データで、観測地点の総数は概算で 200万点と推定される。西太平洋を広範に覆う観測が展開されていた (図(1)-5)。資料には現代とほぼ同じ気象要素および海面水温についての観測が含まれ、数は限られるが、海水、高層、スコールなどの観測記録も残っている。電子化にあ

たっては、電子イメージを元に、全主要要素のデータの手入力を業者委託した。数が多いこともあって全ての資料を本研究期間内に電子化することはできなかったが、本作業を通じて、過去資料を整備する際のいくつかの課題があることが分かった。これらに対する対応策を検討しながら、作業を進めた。

電子化作業を全て業者に丸投げしたのではなく、より効率的に電子化を進めるにはどうすれば良いのかについて各作業工程にある課題の解決を試みた。この結果、作業効率を高めるには、事前に、全データを俯瞰する簡易な目録情報を作成しておき、電子化作業で想定される問題を事前に整理しておくことが重要であることが分かった。また、データ入力作業にはクリアな電子イメージファイルを使用したい。今回使用した電子イメージは、当時の記録媒体のサイズが現在のようにテラバイト単位の大容量のものではなかったために、一つ一つのファイルサイズが制限され、結果として粗い画質の電子イメージとなっていた。このため数値データ化作業の結果、解読不明のものとして処理せざるをえないものが多数生じてしまった。当初よりイメージが不鮮明であることは分かっていたが、このため比較的鮮明な近側の観測資料から時間を遡るように作業を進めていたものの、結果として適切な判断でとはならなかった。そこで、予定にはなかったマイクロフィルムからの再電子イメージ化を、作業を適切に実施できる業者を選定して試みた。マイクロフィルムの保存状態は決して良いとはいえないが、現時点でのマイクロフィルムからは、数値データ化作業にたいして申し分の無い電子イメージを作成できることが分かった。このイメージを使用すれば、入力作業の間違いと作業のスピードアップが期待できる。

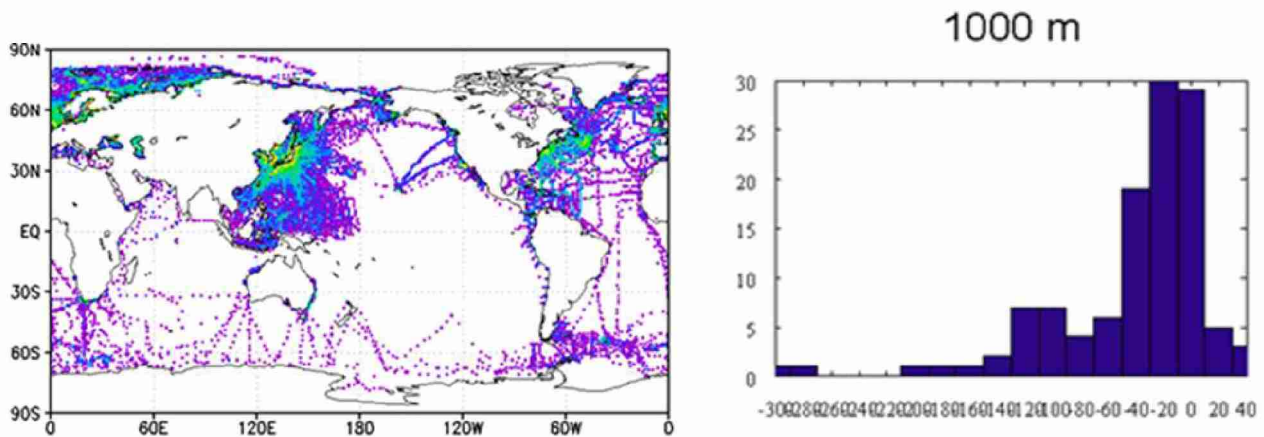


図(1)-5 電子化された日本海軍による海面水温と海上気象観測データの分布(左)。今回、全データの 50 % を完了した。左図は再電子イメージ化された観測シートの例。

図(1)-6 の日本近海の1930年からの11年間の表層観測データの分布を見ても分かるとおり、日本近海では世界的に見て高頻度の海洋観測が古くから行われてきた。日本近海に限れば、100年スケールの観測データによる海洋変動の理解が可能である魅力的な状況であるが、実際には、古い観測データの品質についての理解が極めて不足しているために、観測データを有効活用することは簡単ではない。

本課題では、過去資料の文献を収集し、データの品質についての可能な限りの理解を深める努力を行ったが、満足できる結果にはならなかった。一例を挙げる。より近代の観測データと比較から、海洋丸の1949～1953年のデータは実際より浅く報じられていたのではないかと推論された(図(1)-6 右)が、同様の誤差が他の観測データに共通してあるものかどうかは分からない。他のアプローチの検討を進める必要がある。また、これだけの誤差があったとしても理解できる海洋変動の抽出など、依然として試

みるべき課題は残されていると考える。



図(1)-6 1930年から1940年の海洋水温観測データの分布（左）と海洋丸の1949～1953年の1000m水温観測深度に見込まれる誤差の頻度分布（右）

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

現時点でのデータベースに収録されている海洋表層水温データの品質に大きな問題が無いと仮定したとき、全球海洋貯熱量（GOHC）の1955年以降の歴史的変化の推定において見込まれる不確実性は、IPCC第五次報告書で指摘された大きな不確実性の三分の一程度になると考えられる。この結果は、GOHC推定における不確実性の低減の課題の解析手法の標準化の課題解決に貢献するもので、これに加えて高精度の観測データが整備されれば、GOHCの不確実性を着実に低減することができる。また、海洋観測データが海洋だけでなく大気変動の再現にとっても重要な役割を果たすことが示されたことは、データレスキュー作業の価値を高め、長期気候変動を高精度に再現する上での海洋データの重要性が高いことを意味する。

(2) 環境政策への貢献

地球環境への適応や温暖化緩和のための施策検討に活用される基礎的気候データを整備したことで、今後の過去の気候変化の理解と予測精度の向上に結びつき、その結果として対策コストの軽減が期待できる。また、温暖化緩和策が着実かつ効果的に進められているか常時監視できる体制を、日本においても確立することができた。さらに、海洋データを容易に活用できる環境整備することで海洋環境研究が加速すると考える。

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究で開発した解析データは、IPCCの歴年の報告書でその不確実性の低減が課題となっているものであり、また当該データの利用範囲が広いことから、報告書の海洋観測、水位変動、十年規模変動予測に関わる記述箇所において参照されたと考える。今回の解析プロダクトは国内外の研究者等の利用のために公開した。また、気象庁で解析システムを現業運用し、定期的に解析データを更新・公開できるような体制づくりを現在進めている。

6. 国際共同研究等の状況

1) 海洋表層水温解析相互比較

米国国家海洋大気庁 Tim Boyer、英国ハドレーセンター Mathew Palmer、豪州連邦科学産業研究機構 Catia Domingues 他が参加し、解析データの交換を行い、相互比較し海洋変動の再現性を調査している。毎年開催される XBT 科学会合で、研究の進捗が報告され議論が行われている。

2) 国際気候研究プログラム (WCRP) 海面水位変動

WCRP が掲げる 7 つの重要課題の一つである水位変動の理解に関わる国際研究である。仏国国立宇宙センター Anny Cazenave 主導のもと、海洋、氷床、地殻変動に関わる70名の研究者が参加している。この中で海洋水温(密度)変化による海水位上昇の過去の推移に関わる研究に参与する。1990年代の半ばから現在までの観測データに基づく海面水位変動の実態について纏めた論文を最近投稿した。

3) 米国気象学会誌別冊「気候の状態」(毎年)での全球海洋貯熱量の状態に関わる報告

米国国家海洋大気庁の Gregory Johnson が主導して、更新した全球海洋貯熱量の時系列を元に、最近までの海洋変動の状況について報告している (Johnson et al. 2015, 2016, 2017)。世界10機関で実施された観測データ解析を報告書に纏めている。

4) その他

解析結果を、国内外の研究者や国家機関に提供している。最新解析結果についての論文の引用は未だ無いが、旧バージョンの論文については 400件以上の引用が確認されている。大半のものについては国際共同研究の体裁をとってはいないが、データを公開することで、データを利用した人からの建設的意見が得られ、この結果解析手法の高度化につながっている

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) E. C. KENT, J. KENNEDY, T. M. SMITH, S. HIRAHARA, B. HUANG, A. KAPLAN, D. E. PARKER, C. P. ATKINSON, D. I. BERRY, G. CARELLA, Y. FUKUDA, M. ISHII, P. D. JONES, F. LINDGREN, C. J. MERCHANT, S. MORAK-BOZZO, N. A. RAYNER, V. VENEMA, S. YASUI AND H.-M. ZHANG, Bull. Amer. Meteor. Soc., doi: 10.1175/BAMS-D-15-00251.1, 2016
 “A call for new approaches to quantifying biases in observations of sea-surface temperature.”
- 2) T. BOYER, C. M. DOMINGUES, S. A. GOOD, G. C. JOHNSON, J. M. LYMAN, M. ISHII, V. GOURETSKI, J. K. WILLIS, J. ANTONOV, S. WIJFFELS, J. A. CHURCH, R. COWLEY, N. BINDOFF, J. Climate, 2016
 “Sensitivity of Global Upper Ocean Heat Content Estimates to Mapping Methods, XBT Bias Corrections, and Baseline Climatologies.”
- 3) M. ISHII, Y. FUKUDA, H. HIRAHARA, S. YASUI, T. SUZUKI, AND K. SATO, SOLA, Vol. 13, 163-167, 2017
 “Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets.”

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 石井正好, 海洋学会ニュースレター (JOS News Letter), 7-8. 第6巻、第3号 (2016)
 国内・国際海洋データベース再構築プロジェクト: XBT Japan と IQuOD.

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) T. BOYER, C. M. DOMINGUES, S. A. GOOD, G. C. JOHNSON, J. M. LYMAN, M. ISHII, V. GOURETSKI, J. K. WILLIS, J. ANTONOV, J. A. CHURCH, R. COWLEY, N. BINDOFF, and S. WIJFFELS: AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015

- “Sensitivity of Global Upper Ocean Heat Content Estimates to Mapping Methods, XBT Bias Corrections, and Baseline Climatologies.”
- 2) R. COWLEY, M. D. PALMER, C. M. DOMINGUES, J. SPRINTALL, T. SUZUKI, M. ISHII, T. BOYER, G. J. GONI, V. GOURETSKI, A. M. MACDONALD and A. THRESHER: AGU Fall Meeting, San Francisco, 2015
“Producing a Climate-Quality Database of Global Upper Ocean Profile Temperatures – The IQuOD (International Quality-controlled Ocean Database) Project.”
 - 3) Y. FUKUDA, and M. ISHII: SST bias Meeting, Exeter, 2015
“Recent Development in Japan Subsurface Temperature Database Reconstruction Project and Comparison of SST with near surface temperature.”
 - 4) M. ISHII: 8th ACRE workshop, University of Chile, Santiago, Chile, 2015
“SOUSEI 150-year Coupled Reanalysis and Japanese Data Rescue Activity.”
 - 5) T. KURAGANO, Y. FUJII and M. KAMACHI: Ocean Surface Topography Science Team Meeting, Reston, USA, 2015
“Simple OSE of Argo using space-time scales statistically derived from altimeter data.”
 - 6) T. BOYER, C. M. DOMINGUES, S. A. GOOD, G. C. JOHNSON, J. M. LYMAN, M. ISHII, V. GOURETSKI, J. K. WILLIS, J. ANTONOV, S. WIJFFELS, J. A. CHURCH, R. COWLEY, N. BINDOFF: AGU Ocean Science Meeting, New Orleans, USA, 2016
“Sensitivity of Global Upper Ocean Heat Content Estimates to Mapping Methods, XBT Bias Corrections, and Baseline Climatologies.”
 - 7) M. ISHII: AMS 28th Conference on Climate Variability and Change, New Orleans, USA, 2016
“SOUSEI 150-year Coupled Reanalysis.”
 - 8) M. ISHII: 4th IQuOD Workshop, Tokyo, 2016
“Japanese data rescue activities and related topics.”
 - 9) S. KIZU: 4th IQuOD Workshop, Tokyo, 2016
“Update on assessing the Japanese wartime hydrographic survey.”
 - 10) S. KIZU: 5th XBT Science Workshop, Tokyo, 2016
“A review of Japanese PX-40: 16 years with T/V Miyagi Maru.”
 - 11) S. KIZU: 5th XBT Science Workshop, Tokyo, 2016
“Sea tests of XCTDs: how are they different from XBTs?.”
 - 12) S. KIZU: IQuOD 3rd Annual Workshop, Hamburg, Germany, 2016
“Progress in assessing Japanese wartime surveys – struggling with the sampling depths -.”
 - 13) H. KUBOTA, J. MATSUMOTO, M. ZAIKI, M. ISHII, R. KUMAZAWA, H. FUDEYASU, T. MIKAMI, J. HAMADA, T. INOUE, S. KOBAYASHI, H. YAMAMOTO, and I. AKASAKA: the 9th ACRE Workshop and Historical Weather and Climate Data Forum, Maynooth, Ireland, 2016
“Japan Climate Data Project (JCDP) – Data rescue of tropical cyclone landfall in Japan.”
 - 14) J. MATSUMOTO, J. HAMADA, T. INOUE, S. KOBAYASHI, H. YAMAMOTO, T. MIKAMI, M. ZAIKI, H. KUBOTA, N. ENDO, J. HIRANO, K. TSUMURA, Y. NYOMURA, J. NISHINA, M. ISHII, and I. AKASAKA: the 9th ACRE Workshop and Historical Weather and Climate Data Forum, Maynooth, Ireland, 2016
“Data rescue activities in Japan.”
 - 15) T. MIYAKE: 4th IQuOD Workshop, Tokyo, 2016
“Introduction of JODC Historical XBT profile recovery and rescue project in Japan.”
 - 16) S. YASUI and M. ISHII: the 4th International Workshop on the Advances in the Use of Historical Marine Climate Data (MARCDAT-IV), Southampton, UK, 2016
“Historical land surface temperature reconstruction with observations over land and oceans.”
 - 17) 小山博司、石井正好、山本広志、木本昌秀：日本気象学会2016年秋季大会（2016）
「日本域の歴史的観測データのデジタル化」

- 18) M. ISHII: Conference on Regional Sea-Level Changes and Coastal Impacts, New York, USA, 2017
“Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation.”
- 19) 石井正好、釜堀弘隆：日本地理学会2017年春季学術大会（2017）
「過去150年間の気候再解析と大気海洋データレスキュー」
- 20) 木津昭一：日本海洋学会2017年度秋季大会（2017）
「旧海軍水路部による第二次大戦期の水温一斉観測について」
- 21) 木津昭一：日本海洋学会2017年度秋季大会（2017）
「XCTD の塩分バイアスについて」
- 22) 安井, 壯一郎、石井正好：東アジア域における大気循環の季節内変動に関する研究集会（2016）
「海面水温と陸上気温の同時解析」

（3）知的財産権

特に記載すべき事項はない。

（4）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 科学技術週間一般公開 「地球温暖化の監視」（2017年4月19日，気象研究所，聴衆約 20 名）にて講演
- 2) 神戸開港150周年記念海フェスタ神戸、海の総合展セミナー「地球温暖化を測る～神戸からの貢献～」（神戸市主催，2017年7月22日，神戸ポートターミナル，聴衆約15名）にて講演

（5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（6）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Boyer, T., C. M. Domingues, S. A. Good, G. C. Johnson, J. M. Lyman, M. Ishii, V. Gouretski, J. K. Willis, J. Antonov, S. Wijffels, J. A. Church, R. Cowley, N. Bindoff, 2016: Sensitivity of Global Upper Ocean Heat Content Estimates to Mapping Methods, XBT Bias Corrections, and Baseline Climatologies. *J. Climate*, 29, 4817-4842.
- 2) Gouretski, V. and K. P. Koltermann (2007): How much is the ocean really warming. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L01610, doi:10.1029/2006GL027834.
- 3) Hirahara, S., M. Ishii, and Y. Fukuda, 2014: Centennial-scale sea surface temperature analysis and its uncertainty. *J. Climate*. 27, 57-75.
- 4) Ishii, M., Y. Fukuda, H. Hirahara, S. Yasui, T. Suzuki, and K. Sato, 2017: Accuracy of Global Upper Ocean Heat Content Estimation Expected from Present Observational Data Sets. *SOLA*, Vol. 13, 163-167.
- 5) Ishii, M. and M. Kimoto, 2009: Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections. *J. Oceanogr.* 65, 287-299.
- 6) Johnson, G. C., J. M. Lyman, T. Boyer, C. M. Domingues, J. Gilson, M. Ishii, R. Killick, D. Monselesan, and S. E. Wijffels, 2017: Ocean heat content [in “State of the Climate in 2016”]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 98 (8), S66-S69.
- 7) Johnson, G. C., J. M. Lyman, T. Boyer, C. M. Domingues, M. Ishii, R. Killick, D. Monselesan, and S. E. Wijffels, 2016: Ocean heat content [in “State of the Climate in 2015”]. *Bull.*

- Amer. Meteor. Soc., 97 (8), S66-S70.
- 8) Johnson, G.C., J.M. Lyman, J. Antonov, N. Bindoff, T. Boyer, C.M. Domingues, S.A. Good, M. Ishii, and J.K. Willis (2015): Ocean heat content. In State of the Climate in 2014, Global Oceans. Bull. Am. Meteorol. Soc., 96(7), S64-S66, S68.
 - 9) Kent, E. C., J. Kennedy, T. M. Smith, S. Hirahara, B. Huang, A. Kaplan, D. E. Parker, C. P. Atkinson, D. I. Berry, G. Carella, Y. Fukuda, M. Ishii, P. D. Jones, F. Lindgren, C. J. Merchant, S. Morak-Bozzo, N. A. Rayner, V. Venema, S. Yasui and H.-M. Zhang, 2017: A call for new approaches to quantifying biases in observations of sea-surface temperature. Bull. Amer. Meteor. Soc., 98, 1601-1616.
 - 10) Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, H. E. Garcia, and A. V. Mishonov, 2009: Global ocean heat content 1955-2008 in light of recently revealed instrumentation problems. Geophys. Res. Lett., 36, L07608.
 - 11) Wijffels, S., J. Willis, C. M. Domingues, P. Baker, N. J. White, A. Cronell, K. Ridgway and J. A. Church (2008): Changing expendable bathythermograph fallrates and their impact on estimates of thermosteric sea level rise. J. Climate, 21, 5657-5672.

Ⅱ－２ 海洋観測データベースの再構築と品質保証のための研究

一般財団法人日本水路協会 海洋情報研究センター 鈴木 亨

平成27～29年度累計予算額：13,119千円（うち平成29年度：3,510千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

気候変動の解明、特に海洋貯熱量の推定および予測には高品質な海洋表層水温データが不可欠であるが、歴史的観測資料は紙媒体であり、1980年代後半までのXBT観測の場合は自記紙に描かれた水温図から浅海部で5～10m毎、深海部で50～100m毎の深度における水温を目視で読み取っていた。そこで気象庁および海上保安庁が実施したXBT観測の自記紙を可能な限り発掘・収集し、一般的に普及しているハードウェア・ソフトウェアを利用して効率的に水温プロファイルをデジタルトレースして現在の観測機器と同等の鉛直分解能である1m間隔水温データを取得する手法を開発した。深海部のトレース水温が目視による既存水温より低くなる傾向が見られたことから、自記紙の特性を解明してトレース水温を補正して品質管理することにより約3,300測点の鉛直高分解能水温データが既存データに代えて利用可能なことが示され、かつ観測層数は約160万増加した。さらに南極観測船による南氷洋における約700測点、約76万層数のXBT水温記録を新たに発掘し、水産庁による日本周辺海域における約1,536測点、約47万層数のDBT観測記録も追加した。本成果はIOC/IODEのWorld Ocean DatabaseやIQuODといった国際プロジェクトに供出され、気候変動研究等に幅広く利用される。

〔キーワード〕

海洋表層水温、XBT、デジタル化、データベース、品質管理

1. はじめに

海洋水温観測データは、気候変動ならびに地球環境変化に関わる基礎的な物理データとして位置づけられる。しなしながら近年、海面から数千メートル深までの水温プロファイルを集めた海洋水温観測データベースには看過できない問題が多数指摘され、したがって長期的な海洋水温の変動を推定した結果には大きな不確実性が伴っていると考えられている。こうした状況は国際的にも問題視されていることから、海洋観測データベースの再構築に向けた国際プロジェクト(IQuOD (International Quality Controlled Ocean Database; 国際高品質管理海洋データベースおよびその構築活動))が開始された。IQuODの開発基盤であり、かつ海洋観測データベースとして国内外で最も利用されているWOD (World Ocean Database; 世界海洋データベース)に占める我が国のデータ数の割合は米国に次いで世界第二位であり、特に北西太平洋域におけるその重要性は極めて高く、我が国では本研究課題のサブリーダーおよび研究分担者らが中心となってIQuODの発足および運営に大きく寄与してところである。

2. 研究開発目的

海洋水温観測データを用いて地球温暖化に伴う海洋への膨大な熱の貯蓄などの経年変化を推定した結果に基づき、気候の再現と予測が気候モデルによって行われる。再現および予測の結果はエネルギー・水・炭素循環を量的にとらえ、生態系、水産、温暖化予測などの気候応用問題に活用され、さらに地球環境保全や災害対策などの施策判断を導く。したがって現状の海洋水温観測データに含まれる不確実性がもたらす影響は広範囲に及ぶため、事態の緊急性は高い。そこで本課題では、国内の海洋調査研究機関により得られた海洋観測データのうち、最も観測数の多い海面から数百メートル深までを集めた海洋表層水温データベースの再構築を行った。特に1970年代から1980年代後半にかけてのXBT (eXpendable BathyThermograph) 機器による海洋表層水温観測結果は自記紙上にグラフとして描かれるため、当時は所定のあるいは変曲点における深度の水温値しか読み取られていない。そこで、これら歴史的な水温図(プ

ロファイル)を鉛直方向に密にトレースして最近の観測機器と同等の鉛直分解能を持たせることにより、より精度の高い海洋貯熱量の再現および推定の用に資するための海洋表層水温データベースとして再構築することが本課題の目的である。

3. 研究開発方法

国内の海洋調査研究機関のうち、気象庁ならびに海上保安庁海洋情報部(観測当時は水路部)が保管していたXBT観測の自記紙を拝借してデジタイズ作業を実施した。

まず、自記紙を一枚ずつスキャナーでラスターライズ(デジタル画像化)し、解像度600dpiのTIFF (Tag Image File Format)形式の画像ファイルとして保存した。これらは自記紙のバックアップコピーも兼ねている。

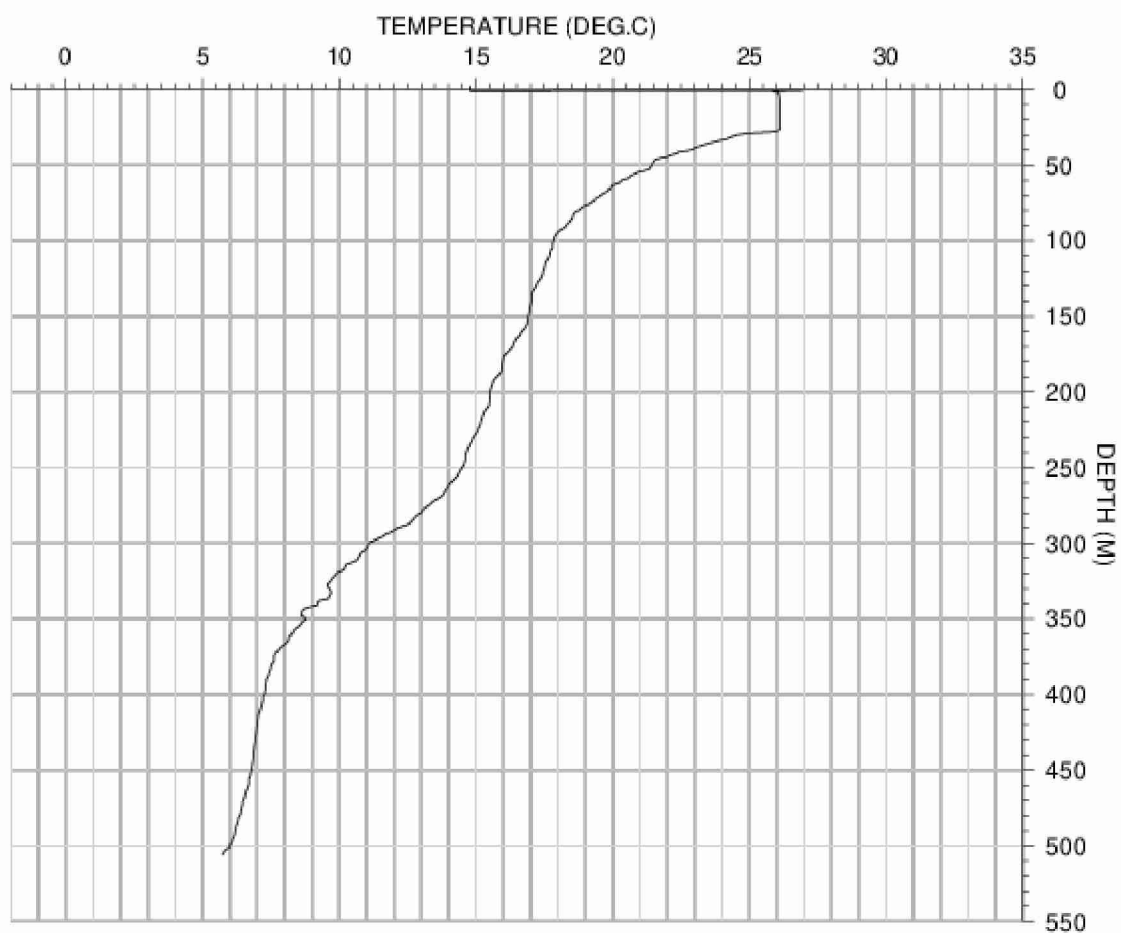
次に、ラスターライズした自記紙の画像ファイルを市販のグラフィックデザインソフトウェアAdobe Illustratorで読み込んでからレイヤーを追加し、そのレイヤー上でペンツールを使って自記紙のグラフの(0°C, 0m), (30°C, 0m), (30°C, 350m), (0°C, 350m)の四点を後述するアフィン変換の既知値として使用するために、この順でトレースした(図(2)-1の黒線)。ただしこの場合の深度はXBTのプロブタイプがT-6用の自記紙(Chart No. 212777)の場合で、T-6の公称観測最大深度は460mであるのに対し、T-7は760m、T-5が1,830mであることから、それぞれに対応した自記紙の場合は水温をそのままに、それぞれ既知値の深度を750m, 1700mに変更した。さらにレイヤーを追加して、そのレイヤー上で同じくペンツールを使って水温プロファイルを浅い方から深い方に向かって適当な間隔(曲線を直線で近似できる程度の間隔)でトレースした(図(2)-1の赤線)。ここで、XBT観測はチャートレコーダーによって自記紙に記録されるが、トレースの開始点は観測開始時のレコーダー・ペンの初期位置(鶴見精機(TSK)製で(15°C, 0m), Sippican製で(16.7°C, 0m))とし、初期位置がここからずれている場合には原則としてプロフィールの最上部の点をトレース開始位置として、アフィン変換後に補正した。



図(2)-1: ラスターライズしたXBT自記紙(TSK/Sippican Chart No. 212777)上の既知値(基準点)四点のトレース結果(黒色)と水温プロフィールのトレース結果(赤線)(気象庁凌風丸1986年9月14日の観測)

トレース完了後、プロファイル修正などの再作業に備えてAdobe Illustrator(*.AI)形式で直ちに保存し、さらに「ファイル」メニューの「書き出し」サブメニューにある「書き出し形式」を選び、ファイルの種類として「AutoCAD Interchange File (*.DXF)」を選択してDXF形式のファイルも保存した(注: AIファイル保存後、最初に読み込んだ自記紙画像ファイルのレイヤーを削除してからDXFファイルを保存するとDXFファイルのサイズが小さくなるので後の作業の時間が短縮できる)。

保存したDXFファイルには二種類の線: 最初にトレースした既知値四点からなる線と、水温プロファイルをトレースした折れ線が含まれている。このDXFファイルを読み込んで、既知値を基準点としてアフィン変換し、水温および0mを0秒としたときの経過時間のペアのデータを出力するスクリプトを作成した。さらにこの出力を読み込んでXBTプローブ着水時間ならびに水温計測開始時間を特定して経過時間を補正するスクリプト、経過時間から深度に変換するスクリプト、さらに深度を1m間隔に線形補間したときの水温値を計算するスクリプトもそれぞれ作成した。これらを順に適用することによって、DXFファイルから最終的に1m間隔深度と水温のデータファイルとして出力し、さらに測点名(ID)、観測位置、年月日時刻(GMT)をヘッダ情報として付与し、観測点ごとに保存した(図(2)-2)。



図(2)-2: 図(2)-1のトレース結果を変換して出力した水温-深度データのプロット図

4. 結果及び考察

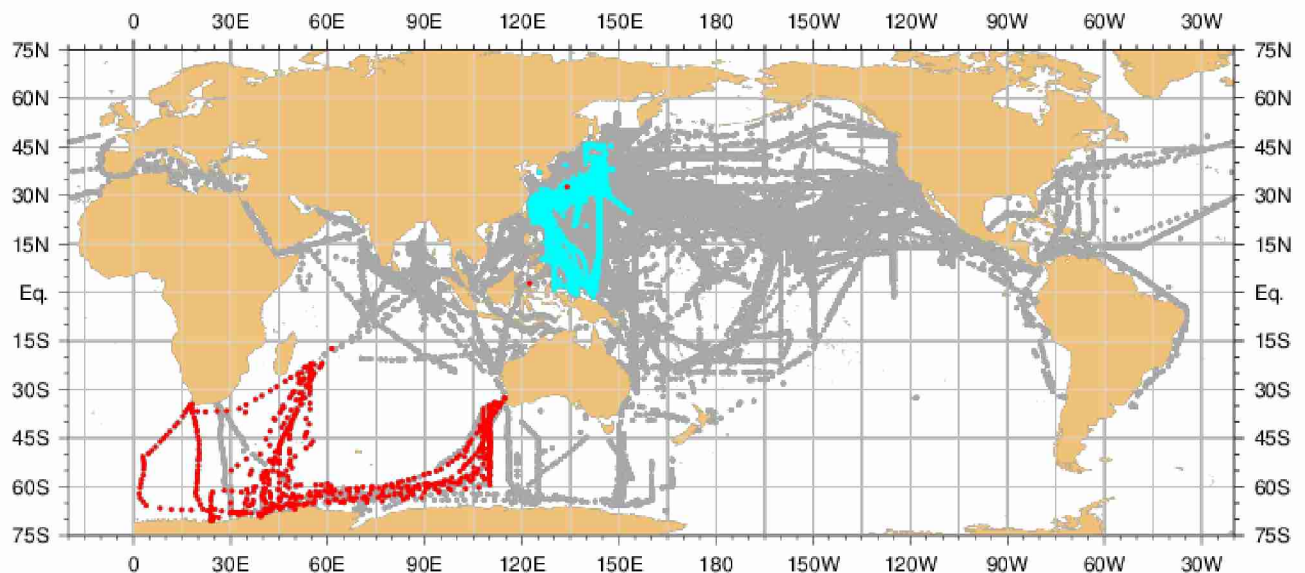
気象庁ならびに海上保安庁海洋情報部から拝借してトレース作業を実施した自記紙の枚数(観測数)および測点位置図は表(2)-1, 図(2)-3の通りである。南極観測船「ふじ」「しらせ」は海上自衛隊所属であるが、XBT自記紙は海洋情報部倉庫に保管されていたため、ここでは水路部に含めているが、この二隻のデータはJODC(Japan Oceanographic Data Center; 日本海洋データセンター)に未収録であり、したがってWODにも未収録であることから、本課題によって初めて公開される南氷洋・南極海の貴重な水温データである。

図(2)-3でも示したように、0m, 5m, 10m, 15m, 20m, …といった、いわゆる標準層と定義されている

所定の深度あるいは変曲点(ここでは水温プロファイルの勾配が変わる深度)における水温は観測当時に目視で自記紙から読み取られ,その後デジタル化されてJODCのデータベースやWODといった既存のデータベースにはすでに収録されている。本課題でトレースした水温の精度を検証するため,この標準層水温と図(2)-2で示したトレース水温を比較してみると(図(2)-4参照),上層ではよく一致しているが,下層のトレース水温が標準層水温より低い傾向を示していた。そこで,既存標準層水温とトレース水温との差を全測点について標準層毎に比較してみると(図(2)-5参照),明らかに下層にいくほど標準層水温に比べてトレース水温は小さくなり,400m深においては $0 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内に収まるのはわずか4%ほどでしかない。

表(2)-1:気象庁および海上保安庁海洋情報部(観測当時は水路部)から拝借してトレース作業した自記紙の内訳

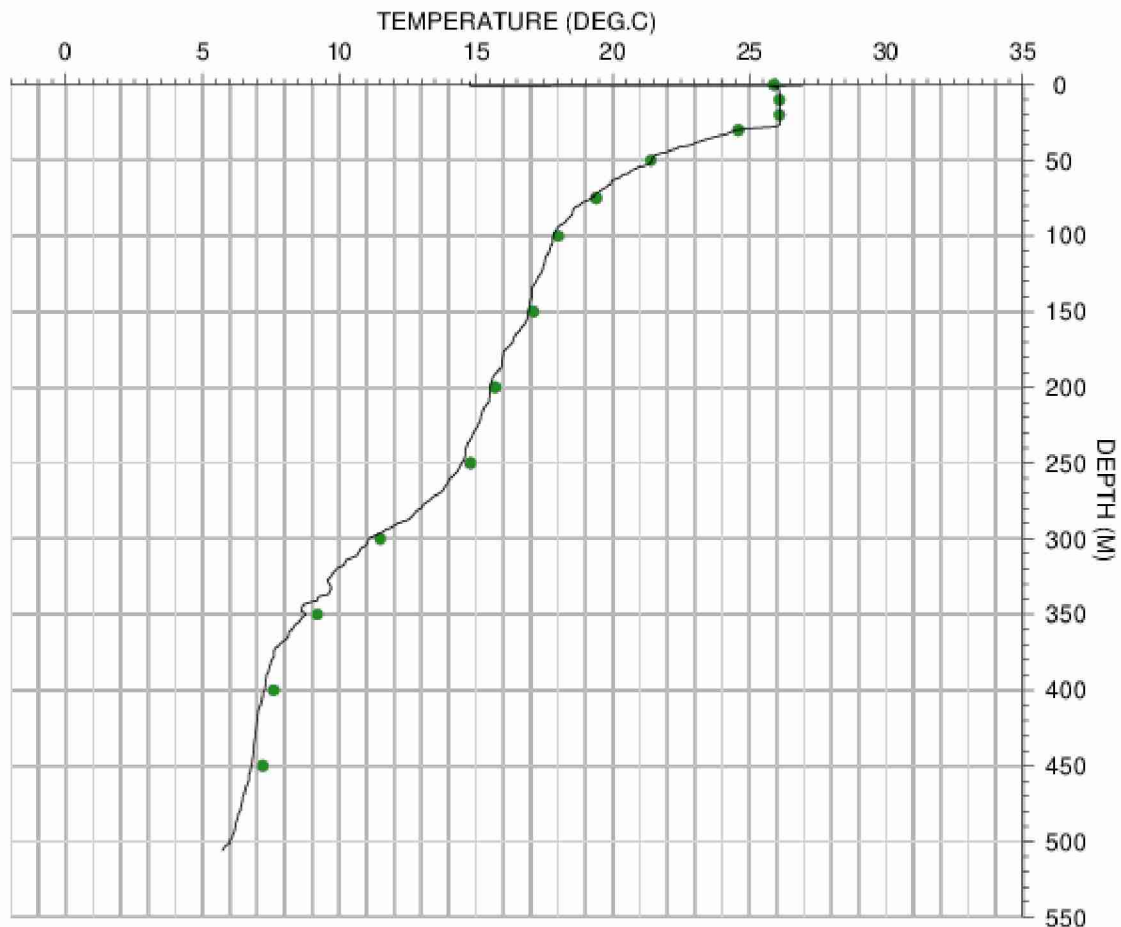
機関名・船舶名・観測年		航海数	測点数 (T-6)	測点数 (T-7)	測点数 (T-5)
気象庁		46	1,428	57	0
凌風丸	1977, 1980-1987	43	1,412	57	0
啓風丸	1984	3	16	0	0
海上保安庁水路部		43	2,193	0	389
昭洋	1985, 1987	10	572	0	0
拓洋	1986-1989	12	893	0	0
明洋	1989, 1991	3	86	0	0
海洋	1985, 1986, 1988	8	316	0	0
南極観測船「ふじ」	1976-1983	7	236	0	221
南極観測船「しらせ」	1983-1986	3	90	0	167
合計		89	3,621	57	389



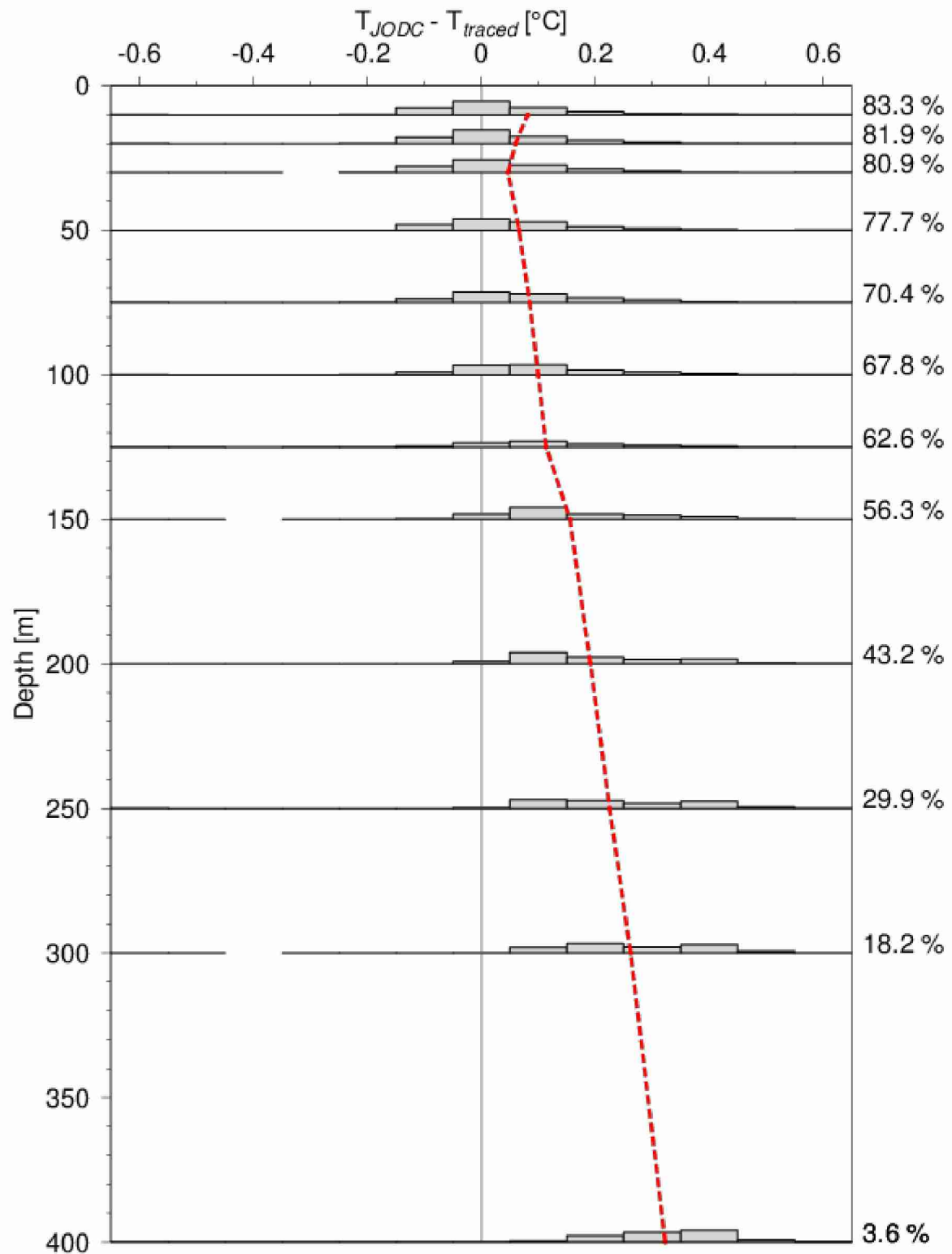
図(2)-3: 本課題でトレースを実施した XBT 観測点分布図(灰色:既存標準層データ, 青:気象庁および海上保安庁海洋水路部, 赤: 砕氷船「ふじ」「しらせ」)

このように目視による標準層水温とトレース水温との間に系統的な差が生じていることから,これらはトレース時の誤差に起因するものではなく,他に原因があると考えられる。そこで,自記紙に描かれている軸の仕様について調べることにした。XBT の観測深度はプローブ着水時からの経過時間から変換される。XBT 製造会社である Sippican 社(現在 Lockheed Martin Sippican)が提示する深度変換式 $D = 6.472t - 2.16 \times 10^{-3}t^2$ (ここで D は深度(m), t はプローブ着水時からの経過時間(秒))は時間の二次関数であるのに対し,自記紙に水温プロファイルを描く XBT 水温記録装置(チャートレコーダーMK-2A)の自記紙

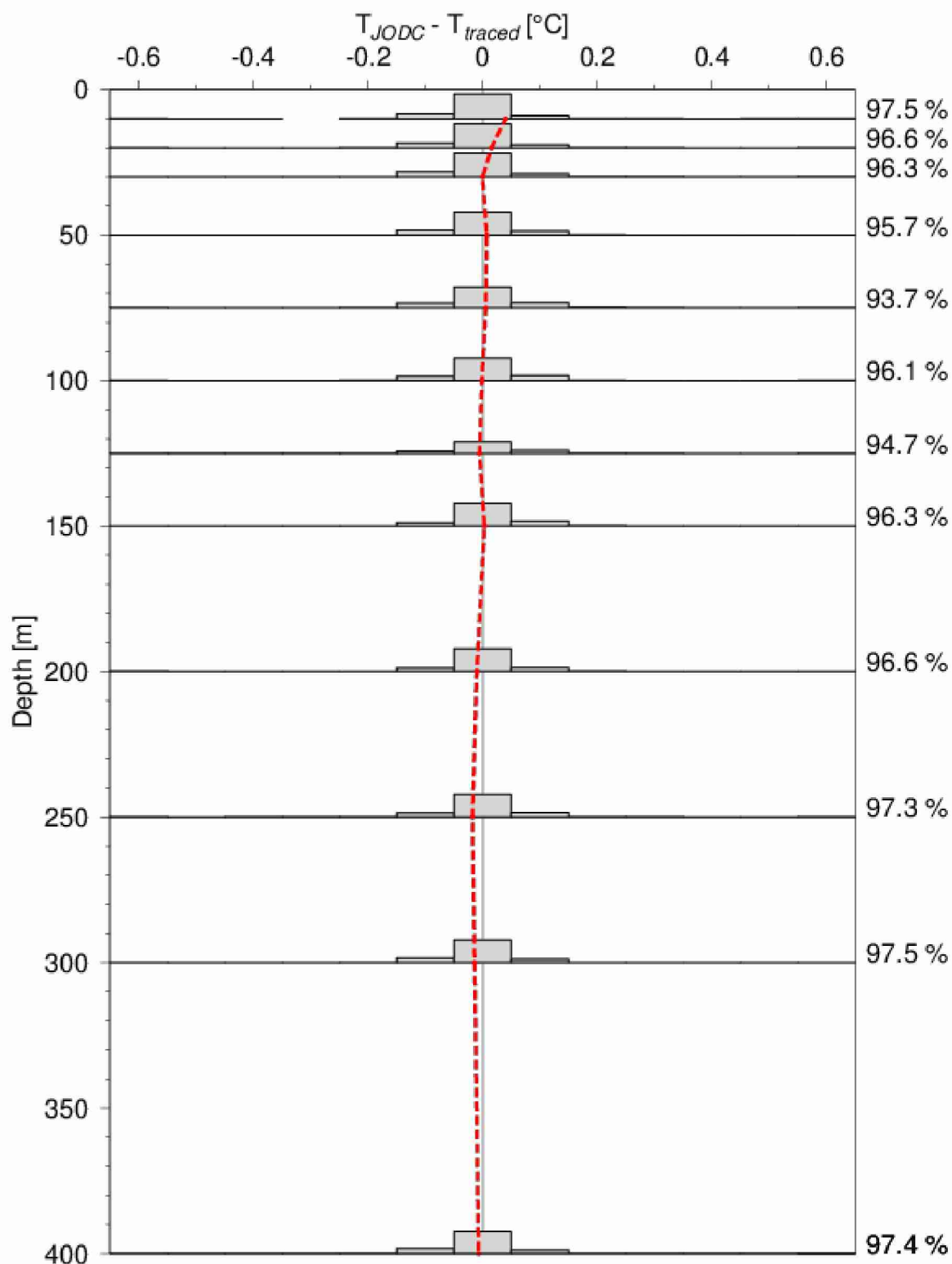
の巻取り速度は一定であるので、自記紙の深度を示す縦軸はこの深度変換式に従って下層ほど軸目盛の間隔が広がっている。一方、水温は $T=63.2204-11.9493R+1.1025R^2-0.0552171R^3+0.0010914R^4$ (ここで、 T は水温(°C), R は XBT プローブ内のサーミスタ抵抗値(k Ω))で示される抵抗値の四次関数で求められることから、横軸の目盛り間隔もまた一定ではないと想像されるが、この仕様については非公開情報であることが判明した。そこで、上述した水温プロファイルを追跡手順と同様に、プロファイルではなく横軸を目盛り間隔に従ってトレースすることで、自記紙の横軸の仕様を明らかにすることを試みた。トレース誤差を考慮して任意に百枚選んだ自記紙の横軸を追跡してアフィン変換した結果を見ると(図(2)-6(左)), 低温側では横軸の目盛り上の水温値がトレース水温より高く、6°C付近で最大0.4°C高い傾向が見られた。XBT チャートレコーダーの水温記録精度が $\pm 0.1^\circ\text{C}$ であることから、この差は容認できない。そこで、これらの差の平均値を0.5°C間隔で計算し(図(2)-6の赤線), 得られた曲線の特性を考慮して $-2\sim 7^\circ\text{C}$, $7\sim 16^\circ\text{C}$, $16\sim 27^\circ\text{C}$, $27\sim 31^\circ\text{C}$, $31\sim 35^\circ\text{C}$ の五つの水温域に分け、それぞれの水温範囲内でトレース水温を横軸の水温値に近似する二次曲線の係数を計算し(図(2)-6(右)), この近似式を適用してトレース水温を補正した。その結果, 図(2)-7に示すように、全ての深度において標準層水温とトレース水温の平均差は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ より小さく、また93%以上が $0\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に収まったことから、線形変換したトレース水温に対するこの補正は極めて有効であり、既存標準層水温データに置き換えて各種解析に使用可能であると言える。



図(2)-4: トレース水温(黒色; 図(2)-3と同様)と目視で読み取られた既存標準層水温(緑丸)との比較図



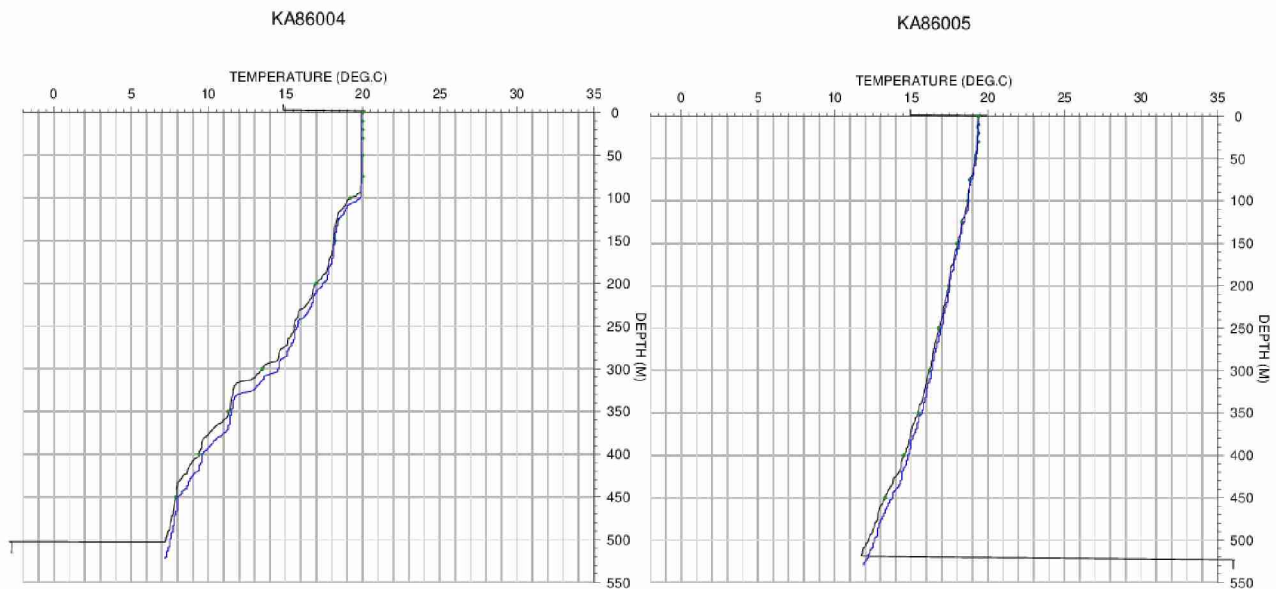
図(2)-5: 各標準層における既存標準層水温(T_{JODC})とトレース水温(T_{traced})との差を全測点で計算した分布図(赤線は各標準層における平均差を, 右縦軸の数値は水温差が $0 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内にある割合を示す)



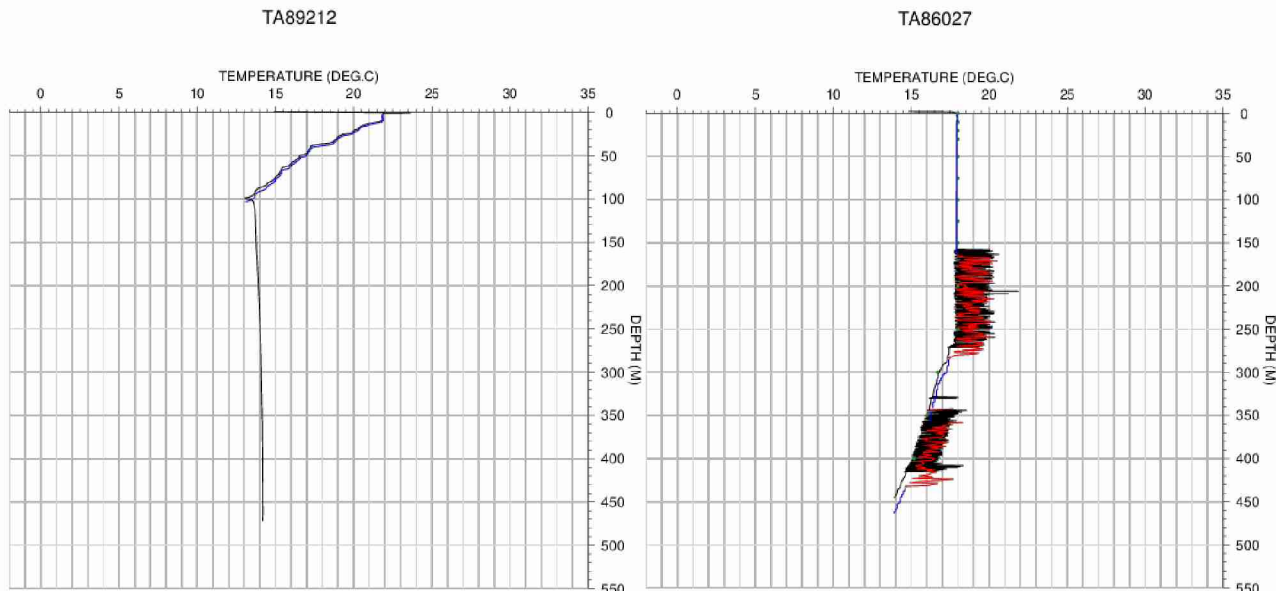
図(2)-6: トレース水温を近似式で補正した後に比較した結果(様式は図(2)-5と同様)

トレース水温の精度を検証したのち、深度はT-6およびT-7に関してはHanawa *et al.* (1995)¹⁾による式を、T-5に関してはKizu *et al.* (2005)²⁾を適用して変換し、1m間隔深度で水温値を補間し、その上各プロファイルの品質管理処理を実施した。例えば、図(2)-7のようなワイヤ切断による水温異常値はデータ変換処理時に自動的に削除した。また、プローブ着底に伴う連続した一定水温値は、着底もしくはそれと疑われる深度以深を目視で削除し(図(2)-8左)、電気ノイズ等の外部要因によると思われるノイズやスパイク状の水温値には「疑わしい」もしくは「不良」を意味するフラグ値を付与した(図(2)-8右)。また、観測時に自記紙とペンの初期位置がずれていた場合でも上述したように変換処理の過程でプローブ

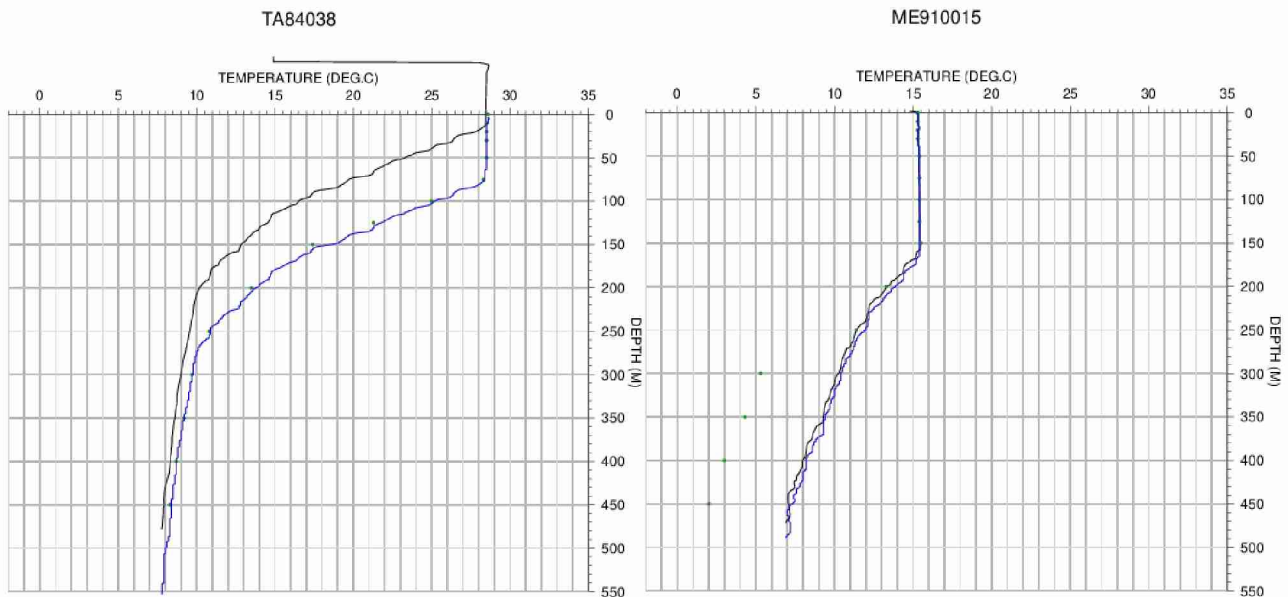
着水時間と観測開始時間を特定することにより正しい深度に変換できる(図(2)-9左)。なお、各図の緑丸が既存標準層水温データを示しているが、図(2)-9右の300m以深に見られる標準層水温データは明らかな入力ミスである。本課題によって整備された水温データは既存標準層水温データに置き換えて利用できることは上述した通りであるが、既存標準層水温データは各機関からデータ集として出版もしくは国立海洋データセンターに報告された、いわゆる「機関公式データ」であるので、このような場合にはデータ取得機関(本課題の場合は気象庁または海上保安庁海洋情報部)に通報し、かつJODCを介してWODの修正を依頼した。したがって本課題の成果は既存標準層水温データの品質向上の一助も担っている。



図(2)-7: ワイヤ切断による水温異常値の検出ならびに異常値削除の例(黒線: メーカーの深度変換式で深度に変換したトレース水温, 青色: H95適用および品質管理後の1m間隔水温)



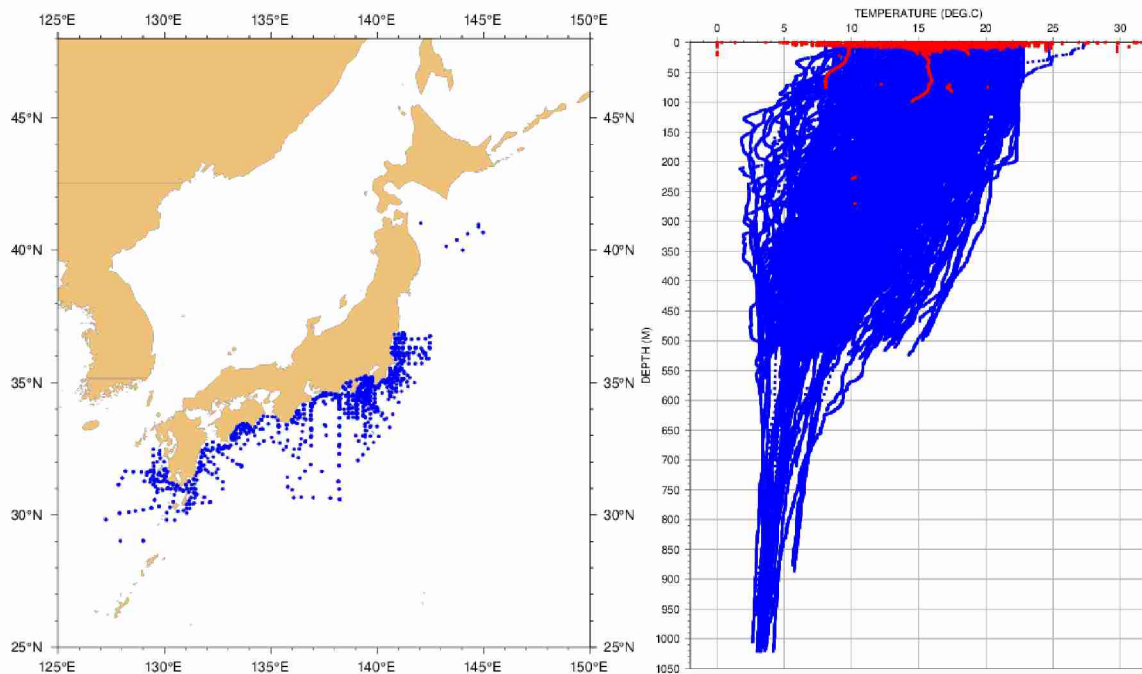
図(2)-8: 着底による不良水温値の削除(左)および電気ノイズ等に起因する水温に「疑わしい」フラグを付与した例(右の赤線)



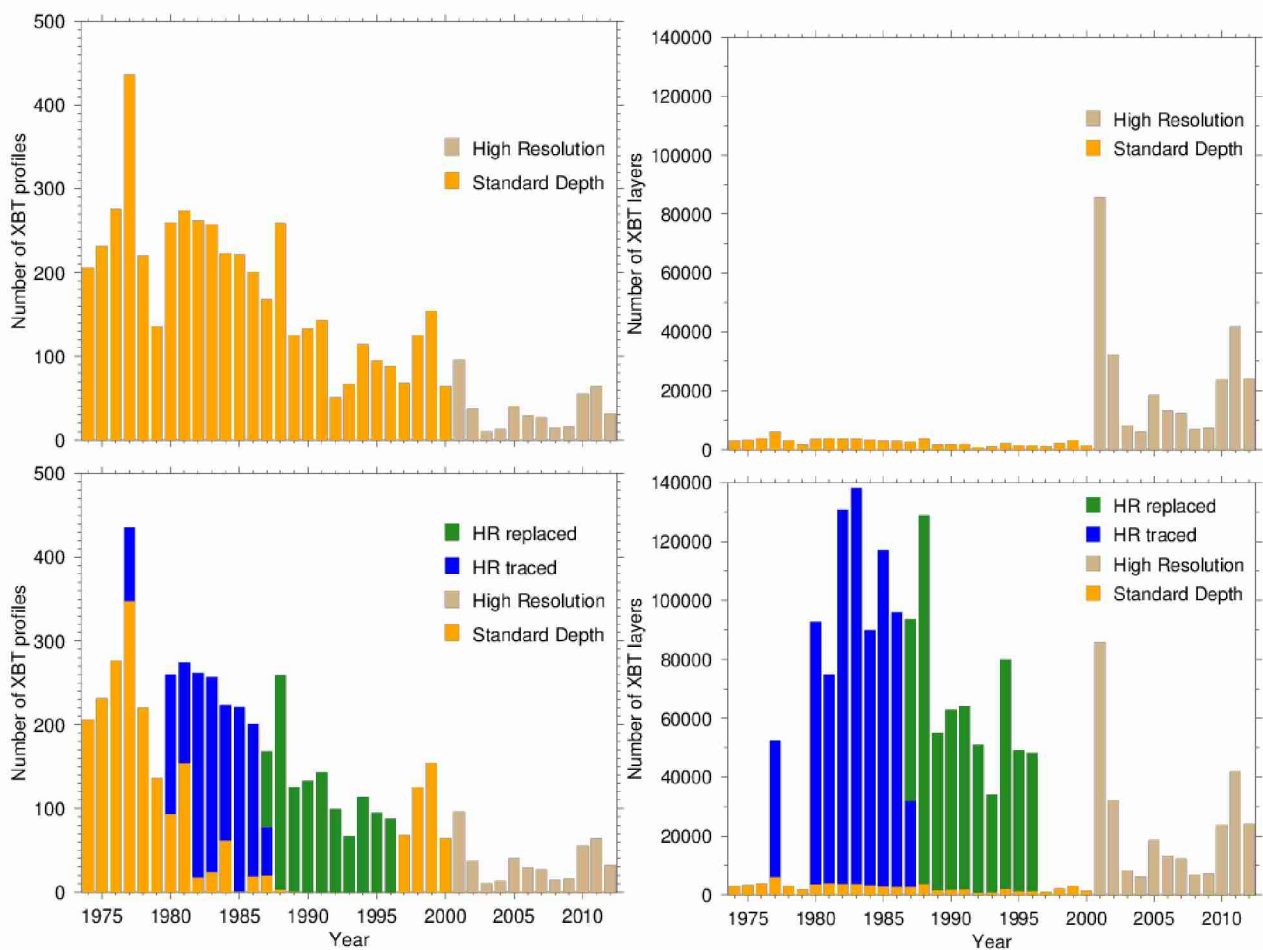
図(2)-9: 補正により正しく深度変換された水温プロファイルの例(左)および既存標準層水温データ中の入力ミスが検出された例(右; 300m以深の0~5℃の間に見られる緑丸)

本課題ではさらに国立研究開発法人水産研究・教育機構中央水産研究所(観測当時は水産庁中央水産研究所)から、同研究所所属の蒼鷹丸で実施されたDBT (Digital BathyThermograph; (株)鶴見精機ではMICOM-Bathythermograph(マイコンBT)という製品名で販売していた) 観測の1m間隔水温出力紙を借用し入力作業を行った。DBTは深度センサーを内蔵しているためXBTのような深度変換式は不要であり、データは内部メモリに1m間隔で1000m深まで記録されるが、その出力は紙媒体である。当観測データも標準層水温のみJODC等に報告されていたため、本課題の目的に従って水温プロファイルの鉛直高解像度化を実施した。観測年は1977~1980年、1983年および1985年で、航海数は34、観測点数は1,536点、観測層数は472,436(標準層を含む)であった。その観測点分布および水温データを図(2)-10に示す。なおDBT観測では海面から数m深までは水温が安定しない場合があるため、品質管理処理時に目視で「疑わしい」フラグを付与した。これらDBT水温データは、すでに中央水産研究所側で入力済みのデータと統合されたのちに公開される。

本課題によって整備された鉛直高分解能水温データは、既存標準層水温データに比べて観測点数そのものは変わらないものの、観測層数は飛躍的に増加した。例として気象庁凌風丸によるXBT観測データの年推移を比較してみると(図(2)-11)、本課題で鉛直高分解能水温プロファイルと差し替えた観測点数は、標準層水温4,857点中1,473点、増加した観測層数は約775,000、また気象庁に保管されていたがJODCには未報告だったデジタルコンバーター出力による1m間隔水温プロファイルを収集して差し替えた観測点数は1,209点、増加観測層数は約620,000となり、本課題実施前の観測層数約351,000の5倍(4倍増)となった。1997~2000年の411観測点分は課題実施期間中では未収集となってしまったが、これを加えるとさらなる観測層数の増となる。海上保安庁海洋情報部(南極観測船を除く)分では、標準層水温の総測点数55,953点に対し、鉛直高分解能水温プロファイルと差し替えられた観測点数は表(2)-1の通り1,867点で約3%、観測年での比較では約10%に相当し、観測層数の増加は約908,000で総観測層数約11,317,000に対して8%増にとどまった。これは総測点数に対して発掘された自記紙が少なかったことに加えて、デジタルコンバーター出力による1m間隔水温プロファイルが1993年以降すでに充分収録されていたことによるものである。しかしながらもともと標準層水温プロファイルしかなかった1980年代において鉛直高分解能水温プロファイルによって観測層数が増加した意義は大きい。なお南極観測船「ふじ」「しらせ」によるXBT観測記録は初出であるので観測点数714点、および観測層数約765,000は共に純増である。



図(2)-10: 中央水産研究所蒼鷹丸のよるDBT観測位置図(左)および全水温データ(右; 赤は「疑わしい」フラグを付与した水温)



図(2)-11: 気象庁凌風丸のXBT観測点数(左)および観測層数(右)の年変位(上段が本課題実施前, 下段青色が本課題で鉛直高分解能水温プロファイルと差し替えた観測点数(左)および増加した観測層数(右), および下段緑色がデジタルコンバーター出力による1m間隔水温プロファイルに差し替えた観測点数(左)および増加した観測層数(右)を示す)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

XBT水温記録装置で自記紙に水温グラフが描かれていた1970～1980年代においては、所定の深度(標準層)における水温を目視で読み取るしか方法がなかったが、自記紙さえ保存されていれば、現在広く一般に普及しているパーソナルコンピュータならびにソフトウェアを利用して容易に当時の水温プロファイルをトレースでき、現在の観測機器と同等の鉛直分解能を持った水温データとして再構築することが可能であることが示された。XBT観測および使用機器は全世界で共通であることから、本課題で確立した手法は他国においても容易に適用可能であり、全球規模での歴史的水温データの発掘・救済に対して多大な貢献が期待できる。また、歴史的水温プロファイルの鉛直分解能化が可能となり、実際に海洋表層水温データベースの再構築がなされたことによって、XBTの系統的誤差の補正手法を直接適用することにより、その年代においてより高精度かつ不確実性の少ない海洋貯熱量の再現が可能となる。また、従来は線形補間で見積もられていた海洋混合層の厚さがより正確に求められることで、生物地球化学分野への応用、例えば表層におけるpCO₂やアルカリ度、栄養塩の各種パラメータの水平分布の高精度な再現(データ空白域における予測)が可能となる。さらに海洋中における微細構造の解明にも応用可能である。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本課題で再構築した海洋表層水温データベースはIOC/IODEのプロジェクトIQuODに取り込まれ、気候変動のみならず幅広い海洋分野および海上気象分野の自然科学研究に利用されるだけでなく、海上保安庁海洋情報部を通じて海洋政策支援情報ツール(海洋台帳)における基礎資料として、海洋の総合的管理および海洋状況把握(MDA; Maritime Domain Awareness)への活用が見込まれる。

6. 国際共同研究等の状況

本課題と関連の深いIQuOD (International Quality Controlled Ocean Database; 国際高品質管理海洋データベースおよびその構築活動)は、もとはXBTの系統的誤差および深度変換式に関するワークショップ(AOML/NOAA(マイアミ, 米国, 2008), ハンブルグ大学(ドイツ, 2010))に端を発して海洋データクリーンアップ構想へと発展したのち、CLIVAR GSOP(気候変動および予測可能性研究計画の全球統合・観測パネル)の支援を得て2013年CSIRO(ホバート, オーストラリア)で開催されたワークショップを第一回会合と位置付けた。こうした国際連携における研究活動の流れを受けて、我が国ではIOC協力推進委員会(事務局:国立研究開発法人海洋研究開発機構)の海洋観測・気候変動専門部会および海洋情報・データ専門部会の下に歴史的XBTデータ再整備作業部会(通称XBT-Japan)を2012年9月に設置して対応することになり、本課題の研究代表者ならびに研究分担者、研究協力者の多くが部会メンバーとしてIQuODの設立および運営に密接に関わってきている。2014年NOAA(シルバースプリング, 米国)での第二回会合においてIOC/IODE (UNESCO国際海洋学委員会海洋データ・情報交換プログラム)にプロジェクト設立を提案することになったため、従前からIODのいくつかのプログラムの活動に関わってきた本課題研究分担者が申請書を作成し、IOC/IODE第23回総会(ブルージュ(ベルギー; 2015))に提出した結果、多くの国の賛同を得てIOC/IODEプロジェクトおよび運営グループ設置が勧告された。同時にSCOR (ICSU海洋研究科学委員会)の新規作業部会への申請書も提出され、2015年12月に第148作業部会として承認された。本課題の研究分担者および研究協力者は運営グループおよび作業部会のメンバーとして選出されている。本課題実施期間中においては2015年ハンブルグ大学(ドイツ)での第三回会合に出席し、2016年10月に第四回会合を東京で開催してIQuODの進捗に貢献することができた。また、この間にIQuOD初版の刊行に向け、不明なメ

タデータ，特にXBTの系統的誤差補正に必要なXBTプローブタイプの推定方法に関するタスクチームに参画し，共著で原著論文を発表した。本課題で再構築された鉛直高分解能水温プロファイルを含む海洋表層水温データベースはIQuOD次版に取り込まれる予定であり，また引き続きIQuODの運営，特に自動および専門的品質管理処理手法の確立に関して積極的に参画していく。なお，IOC/IODE第25回総会は2019年2月に東京で，IQuOD第五回会合は2018年4月にオステンデ(ベルギー；IOC/IODE事務局)開催され，次回会合は2019年に北京もしくは青島での開催案が中国から提示され承認された。

一方，IQuODの発端となったXBTワークショップの方は，2011年7月に第一回科学ワークショップをオーストラリアで開催して以来，2016年10月に第五回ワークショップを，2018年4月に第六回ワークショップをIQuOD会合に引き続いて開催しており，本課題の成果に関連して情報交換を継続しているところである。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) PALMER, M. D., TIM BOYER, REBECCA COWLEY, SHOICHI KIZU, FRANCO RESEGHETTI, TORU SUZUKI, AND ANN THRESHER, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, doi:10.1175/JTECH-D-17-0129.1, 2018:
“An Algorithm for Classifying Unknown Expendable Bathythermograph (XBT) Instruments Based on Existing Metadata.”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 鈴木 亨：第70回日本海洋調査技術連絡会，新潟市，2015
「歴史的海洋表層水温観測データの再整備について」
- 2) 鈴木 亨：第69回西日本海洋調査技術連絡会，長崎市，2015
「歴史的海洋表層水温観測データの再整備について」
- 3) 鈴木 亨：第65回東北海区海洋調査技術連絡会，塩釜市，2016
「歴史的海洋表層水温観測データの再整備について」
- 4) Toru Suzuki, M. Ishii, K. Sato, S. Kizu, T. Nakano, H. Yoritaka, Y. Karigome, Y. Shimizu, K. Amaike, T. Suga, and Y. Michida: 2016 Ocean Science Meeting, New Orleans, LA, USA, 2016 (Poster session)
“Improving Database of Historical Ocean Surface Temperature Observations”
- 5) 鈴木 亨：日本海洋学会2016年度秋季大会，鹿児島大学郡元キャンパス，鹿児島市，2016
「International Quality-controlled Ocean Database (II) 歴史的XBTデータの再整備」
- 6) Toru Suzuki: International Conference on Marine Data and Information Systems, Gdansk, Poland, 2016 (Poster session)
“XBT Data Management and Quality Control in Japan (II) Improving Database by Historical XBT System”
- 7) 鈴木 亨：日本海洋学会2017年度秋季大会，仙台国際センター，仙台市，2017
「International Quality-Controlled Ocean Database (III) 歴史的XBTデータ再整備における各種補正」
- 8) Toru Suzuki and XBT-Japan Project Team: 2018 Ocean Sciences Meeting, Portland, OR, USA, 2018 (Poster session)

“Improving Database of Historical Ocean Subsurface Temperature Observations (II)”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Hanawa, K., P. Raul, Rick Baily, A. Sy, and M. Szabados: A new depth-time equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBT), *Deep Sea Res.*, Part I, **42**, 1423-1451, doi:10.1016/0967-0637(95)97154-Z, 1995.
- 2) Kizu S., H. Yoritaka and K. Hanawa: A New Fall Rate Equation for T-5 Expendable Bathythermograph (XBT) by TSK, *J. Oceanogr.*, **61**, No.1, 115-121, 2005.

Ⅱ－３ データベースの利用と高度化 に関わる研究

国立研究開発法人海洋研究開発機構

地球環境観測研究開発センター
同

須賀 利雄・増田 周平・細田 滋毅
佐藤 佳奈子（平成27～28年度）

平成27～29年度累計予算額：8,962千円（うち平成29年度：3,900千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

恒常的な海洋データの品質の維持を実現することを目的に、総合的なデータサービスのためのシステムを、広域高密度海洋観測網を展開するArgo 計画で採用されている先進的観測データ管理を参考に設計し、定常的な海洋データ品質監視のためのシステムとデータ利用促進システムを開発した。

〔キーワード〕

水温データ，自動品質管理処理，Argoフロートデータ，格子化データ，データ利用促進

１．はじめに

海洋の観測データは海洋観測の機会が少なく非常に重要であるため、国際的なデータ交換の枠組み（IODE: International Oceanographic Data and Information Exchange）で、観測日から一定期間過ぎると、自国の海洋データセンターに集められ、各国の海洋データセンターから米国海洋データセンター（以下、NODC）に集められ公開される仕組みとなっている。観測データの中でも垂表層水温データは海洋貯熱量等海洋の状態を表す指標の元となるデータであり非常に重要で、高い精度が要求される。しかし、NODCに集約された水温データには、重複が多い、メタ情報の収録が不十分であり測器毎の適切な品質管理が不可能なプロファイルデータが多く存在する等品質管理が不十分という問題が存在する。こうした背景から、海洋観測データベースの再構築に向けた国際プロジェクト（IQuOD: International Quality Controlled Ocean Database; 国際高品質管理海洋データベースおよびその構築活動）が2013年から始まった。IQuODに積極的に参画するとともに、その成果を有効に活用し、海洋観測データの精度を継続的に維持していくための取り組みが我が国にも求められている。

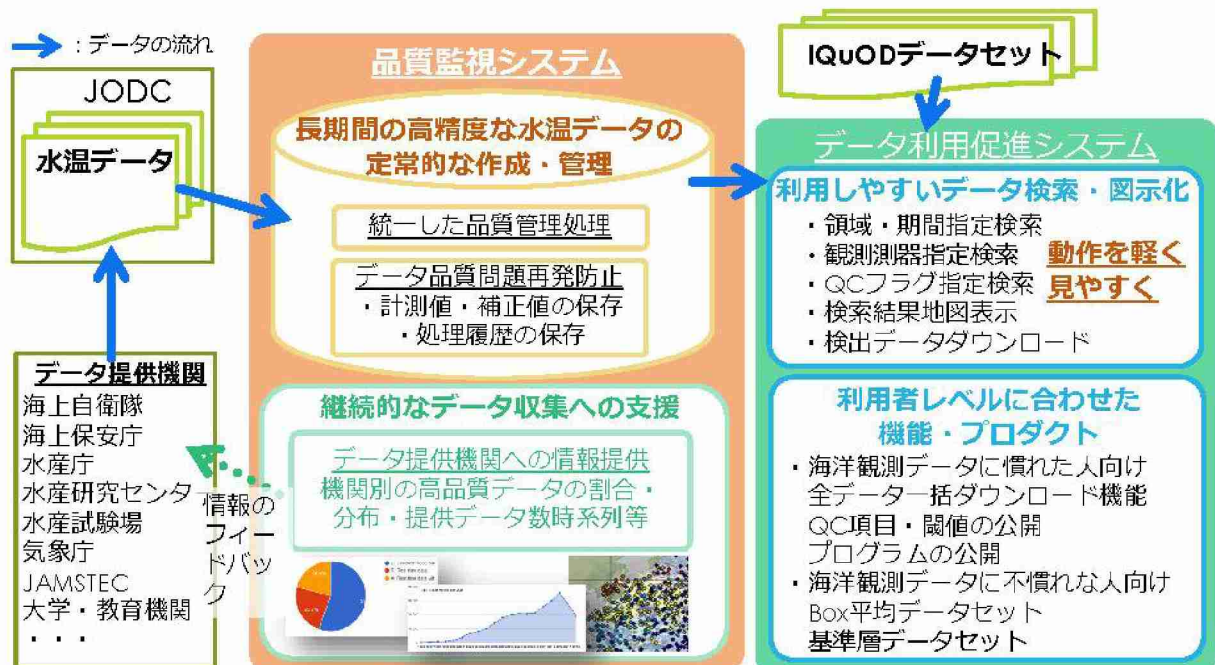
２．研究開発目的

IQuODによって再構築された海洋観測データベースが、我が国において有効に活用されるためには、効果的なデータ提供の仕組みが必要である。また、IODEの枠組みにより、水温データは日本海洋データセンター（以下、JODC）に集まる水温データに対して、IQuODが定めた品質管理手法を継続的・効率的に適用していく仕組みも必要である。一方、上述の海洋観測データに関する問題の再発を防止するためには、データベース構築後も、データの品質を高め維持していく体制が必要である。また、高い精度が求められる海洋データには、他にも増して、専門的な品質管理体制が求められる。

以上の背景のもと、本サブテーマでは、再構築したデータベースを利用者が有効活用できる仕組み、データ収集を円滑にする仕組み、これまでに指摘されている問題が再発しない仕組みを考案・実現する研究に取り組んだ。海洋観測データベースは専門性が高く一般利用者には煩雑な作業を要求する。また、データの収集では提供者の好意に依存する側面がある。データの利用者と提供者の利益に配慮することで歴史的データベースの品質が将来も維持され、持続的に安定した環境政策の実現に貢献すると考えられる。これらの点に配慮して新しい仕組みを開発した。

3. 研究開発方法

データベースの管理、維持、利用に関連するシステム開発に必要なコンポーネント開発を行い、それらを統合した実現可能な総合的データサービスの枠組を検討した。データ収集に関わる問題の原因を調査し、それを改善するシステムを設計した。広域高密度海洋観測網を展開する Argo 計画 (Riser et al., 2017) におけるデータ管理を参考に、このシステムを定常的なデータ品質監視のためのシステムとデータ利用促進システムの2つに分けて設計した(図(3)-1)。前者には、サブテーマ(2)が提案したメタ情報項目およびそれらに対するフラグを盛り込んだ。現在把握されているデータ品質問題の再発防止のため、さらにデータ品質に関して将来新たな問題が発覚した時いつでも品質管理処理がやり直せるよう、実施した品質管理項目の履歴およびその結果を保存するようにした。また、データ提供促進として、品質管理処理結果をデータ提供者へ提供するように設計した。



図(3)-1 品質監視システムとデータ利用促進システムの概念図。

4. 結果及び考察

恒常的な海洋データの品質の維持を実現することを目的に、総合的なデータサービスのためのシステムを、広域高密度海洋観測網を展開するArgo 計画で採用されている先進的観測データ管理を参考に、定常的な海洋データ品質監視のためのシステムとデータ利用促進システムの2つに分けて開発した。

4.1 品質監視システム

本システムへの入力データとして、JODCで公開されているJODC標準フォーマットファイル(FETI)を採用した。初期の入力データは、表(3)-1に示す日本の機関が観測した水温データとした。また、XBT(eXpendable BathyThermograph)に関する詳細なメタ情報(表(3)-2)および各情報のフラグ(表(3)-3)を格納した。

本システムは入力データに対して、自動品質管理処理(表(3)-4)を実施し、実施日および各処理項目の結果を保存する。我々の海洋変動に対する理解は限られているため、データの善し悪しの判断の絶対的基準は無い。また、観測機器固有のバイアスが発見されることもある。こうしたケースに対応するために、システムは品質管理処理の再実行が可能のように、また、品質管理の履歴を保存するように構成され、これにより観測データの品質を高水準に維持・管理できるものとしてある。また、IQuODによる品質管理手法に変更が生じた際にも柔軟にできる。

表(3)-1 データベースへの初期入力データ。

期間	1900年～2015年
空間範囲	全球
測器	14種類
合計測点	7,795,522点

表(3)-2 XBTに関する詳細なメタ情報。

メタ情報	ロット番号, シリアル番号, レコーダー, Chart Number, コンバータ, レシーバー, ランチャー, 投下高度, Digitization Method, Digitization Interval
------	---

表(3)-3 メタ情報のフラグ。

フラグ	意味
0	Confirmed
1	Estimated
2	Questionable
3	Unknown

表(3)-4 自動品質管理処理項目。

	項目
1	日付チェック
2	位置チェック
3	位置海上チェック
4	重複チェック
5	Stuckチェック
6	負の圧力チェック
7	海底深度と観測最深層チェック
8	圧力逆転チェック
9	水温レンジチェック
10	水温鉛直勾配チェック

4.2 データ利用促進システム

4.1のデータ管理システムによって品質管理を施したデータを一般に公開するシステムを「日本の水温データ公開システム」として、また、IQuODによって構築されたデータセットの利活用を促進するための「全球水温データ公開システム」を開発した。「日本の水温データ公開システム」には、データ提供者向けに、パスワード制限を設けて、品質管理処理情報を提供する機能を組み込んだ。こうすることで、観測を行った機関による再検証により、データ品質を高められると期待できる。

4.2.1 日本の水温データ公開システム

本システムでは、期間、緯度範囲、経度範囲を指定することによりデータを検索し、品質管理処理により付与されたプロファイルデータフラグの割合応じて色分けして地図上にプロットすることができる（図(3)-2）。また、表示されたデータを、鉛直分解能および自動品質管理の合格項目を選択して、ダウンロードする機能がある（図(3)-3）。

さらに、データ提供者向けには、プロファイルに含まれる良いフラグの観測層の割合を5段階に分け、下記のカテゴリー毎に円グラフで表示する機能を提供する（図(3)-4, 5, 6, 7）。

- I. 全期間・全測器・全提供機関
- II. 年別

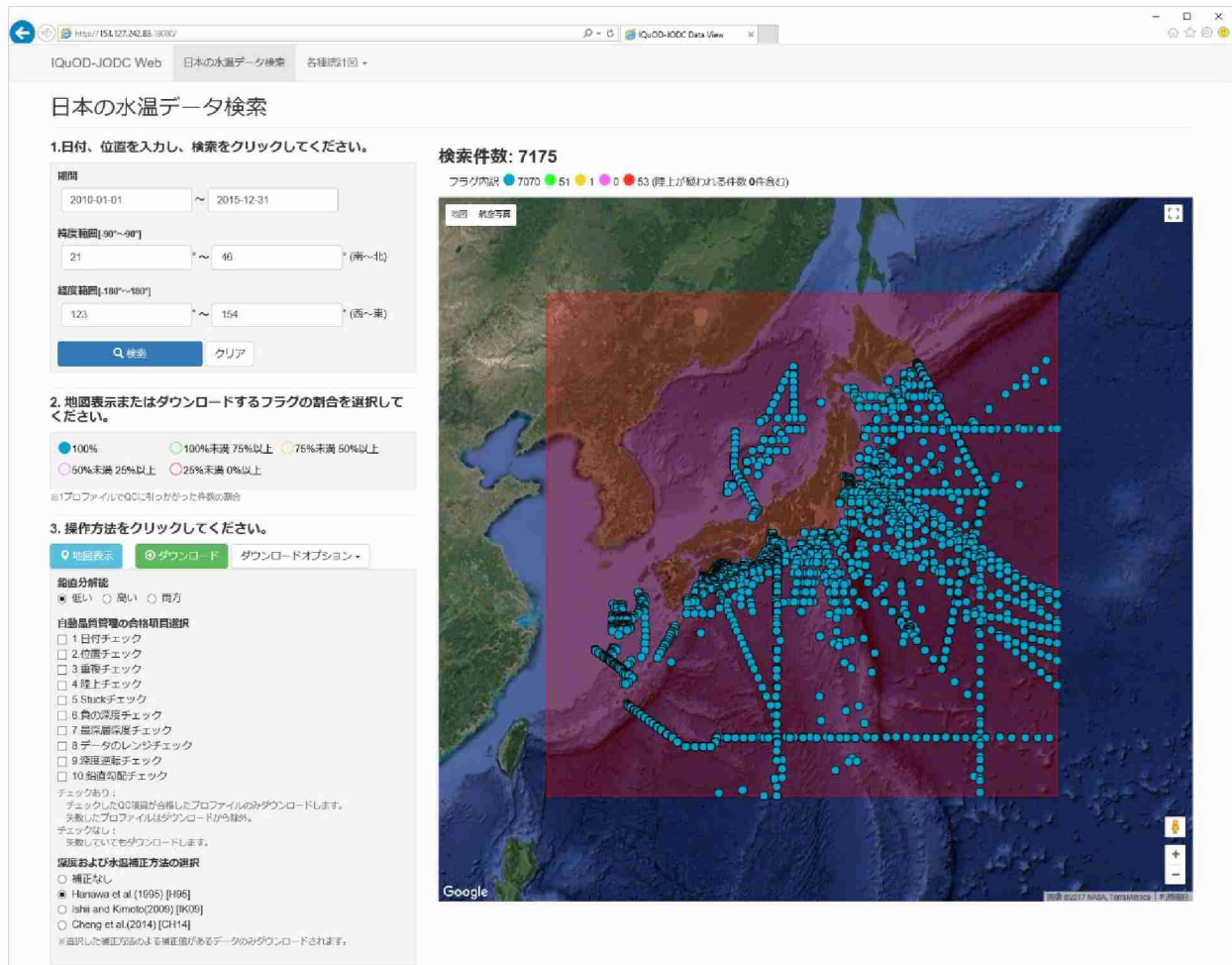
III. データ提供機関別

IV. 測器別

また、水温プロファイル数時系列を測器毎に色分けして、下記のカテゴリー毎に折れ線グラフで表示できる（図(3)－8, 9, 10）。

I. 全提供機関

II. 提供機関別



図(3)-2 日本の水温データ公開システムのトップページと検索結果の例。

3. 操作方法をクリックしてください。

鉛直分解能
☒ 通常 ☐ 高解像度 ☐ 両方

自動品質管理の合格項目選択

- ☒ 1.日付チェック
- ☒ 2.位置チェック
- ☒ 3.重複チェック
- ☒ 4.陸上チェック
- ☒ 5.Stuckチェック
- ☒ 6.負の深度チェック
- ☒ 7.最深层深度チェック
- ☒ 8.データのレンジチェック
- ☒ 9.深度逆転チェック
- ☒ 10.鉛直勾配チェック

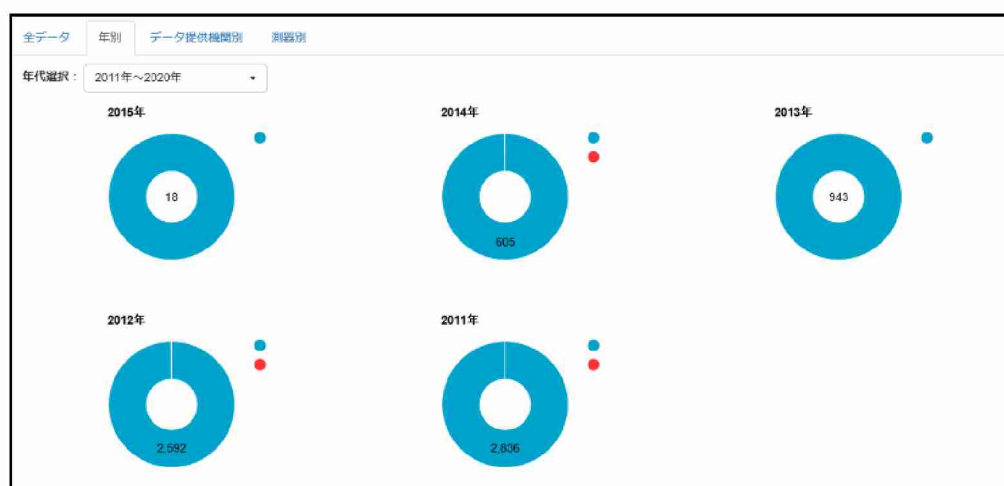
チェックあり：
 チェックしたQC項目が合格したプロファイルのみダウンロードします。
 失敗したプロファイルはダウンロードから除外。

チェックなし：
 失敗していてもダウンロードします。

図(3)-3 ダウンロードオプション。



図(3)-4 各種統計図－フラグ割合－全期間表示。



図(3)-5 各種統計図－フラグ割合－年別表示。

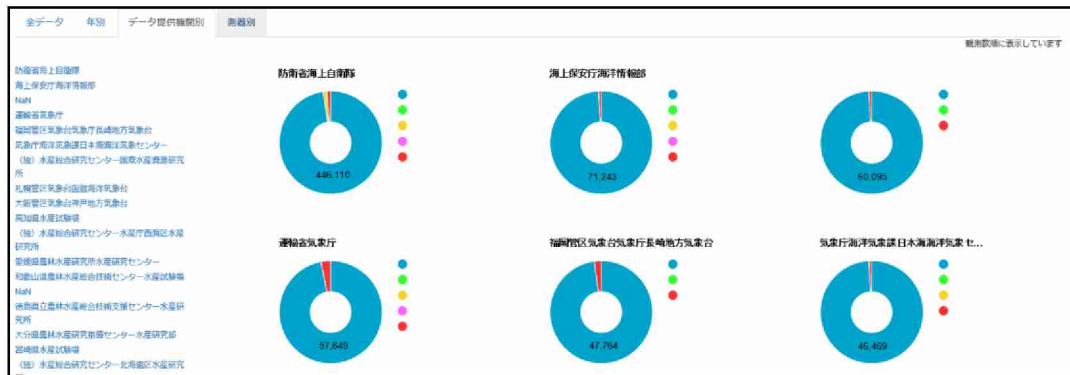


図 (3)-6 各種統計図－フラグ割合－データ提供機関別表示。

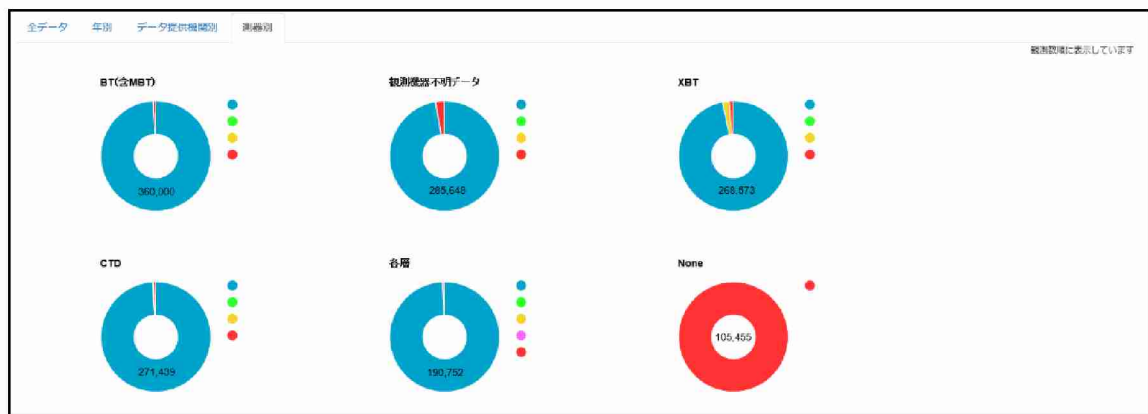


図 (3)-7 各種統計図－フラグ割合－測器別表示。

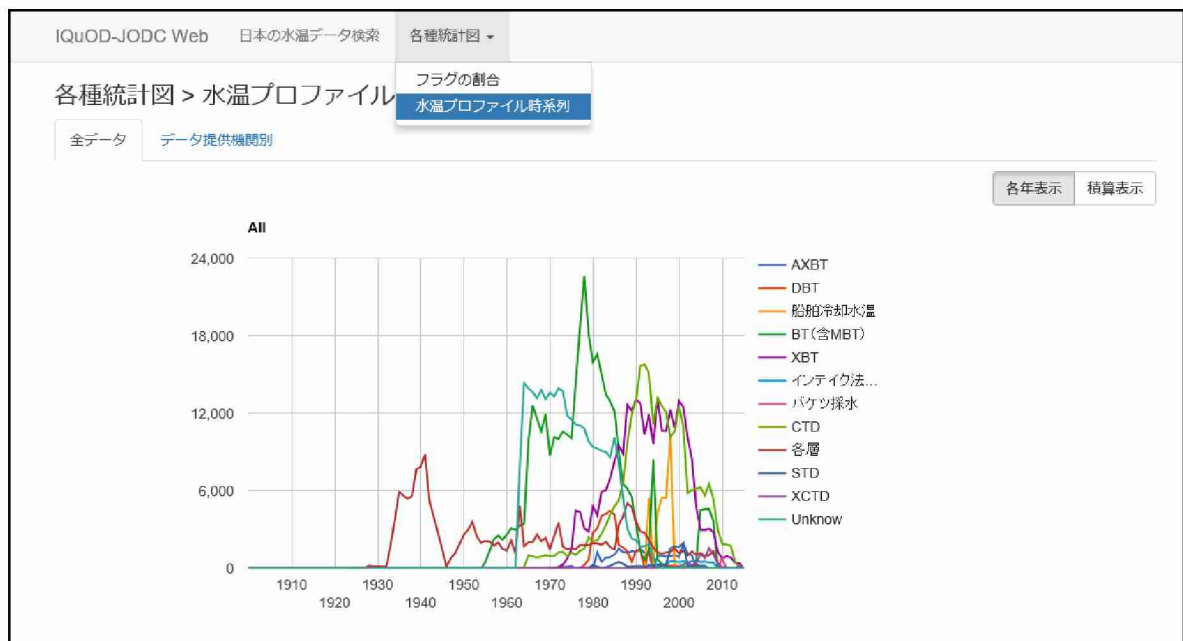
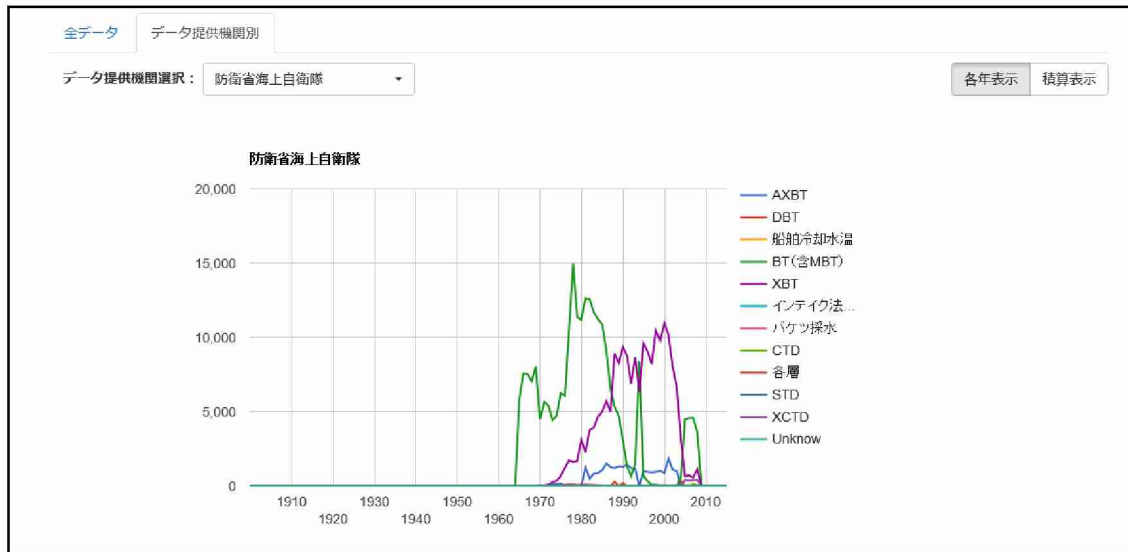
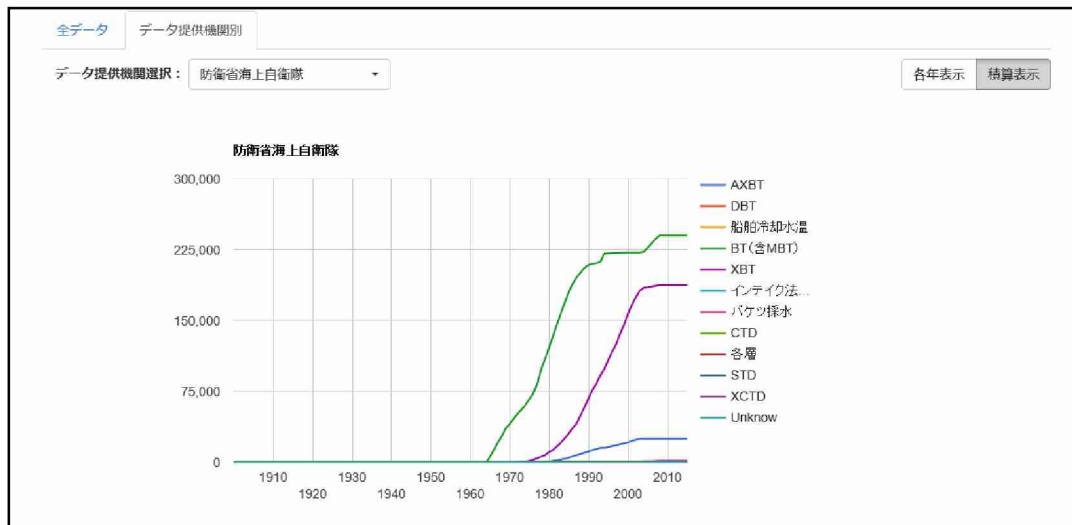


図 (3)-8 各種統計図－水温プロファイル数時系列－全提供機関。



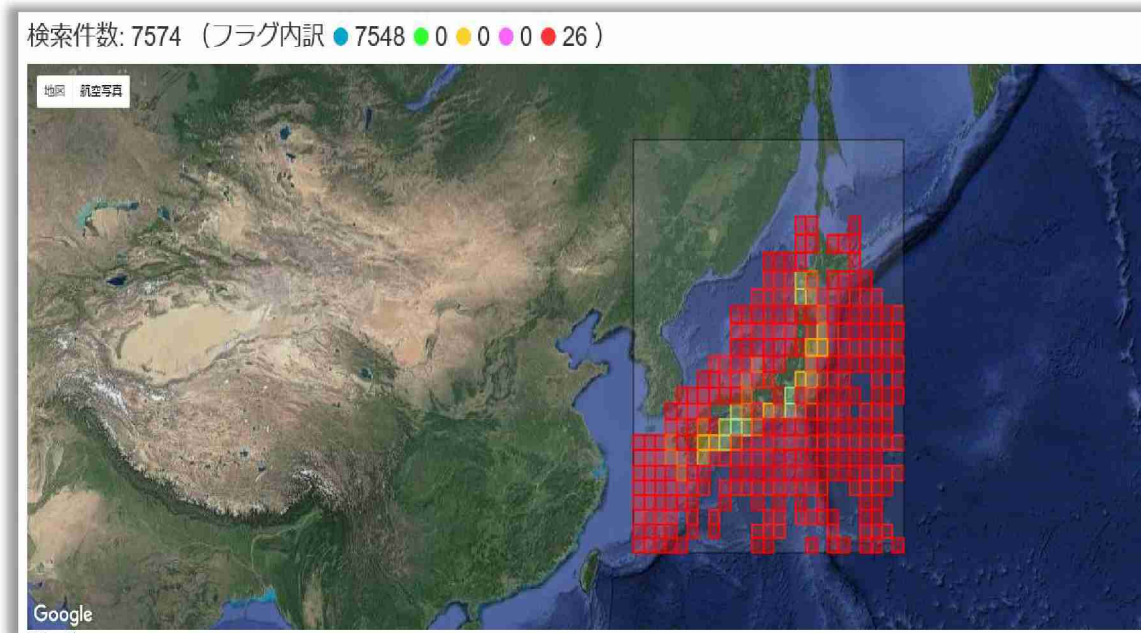
図(3)-9 各種統計図－水温プロファイル数時系列－提供機関別。



図(3)-10 各種統計図－水温プロファイル数時系列－全提供機関－積算表示。

4.2.2 全球水温データ公開システム

本システムでは、空間範囲、期間、測器を指定することによりデータを検索し、1度グリッド内の件数で色分けして地図上にプロットすることができる(図(3)-11)。また、表示されたデータを、CSVファイルまたはNetCDFファイルとしてする機能がある。

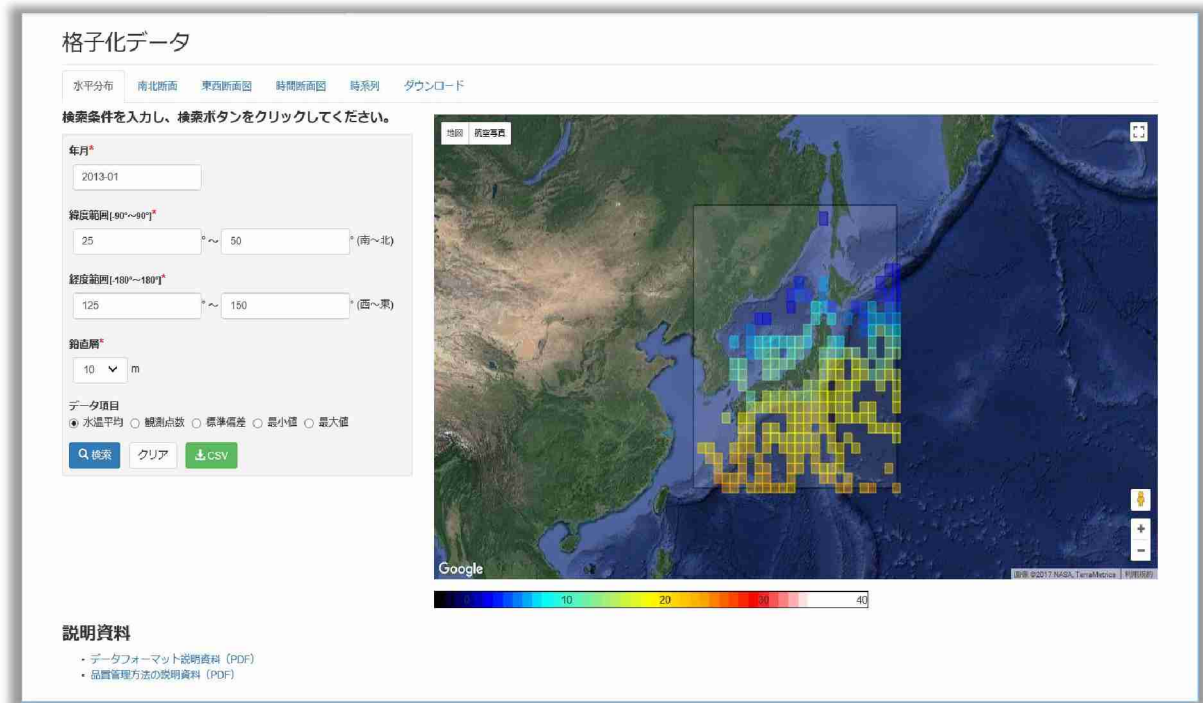


図(3)-11 全球水温データ公開システムの検索結果の例。

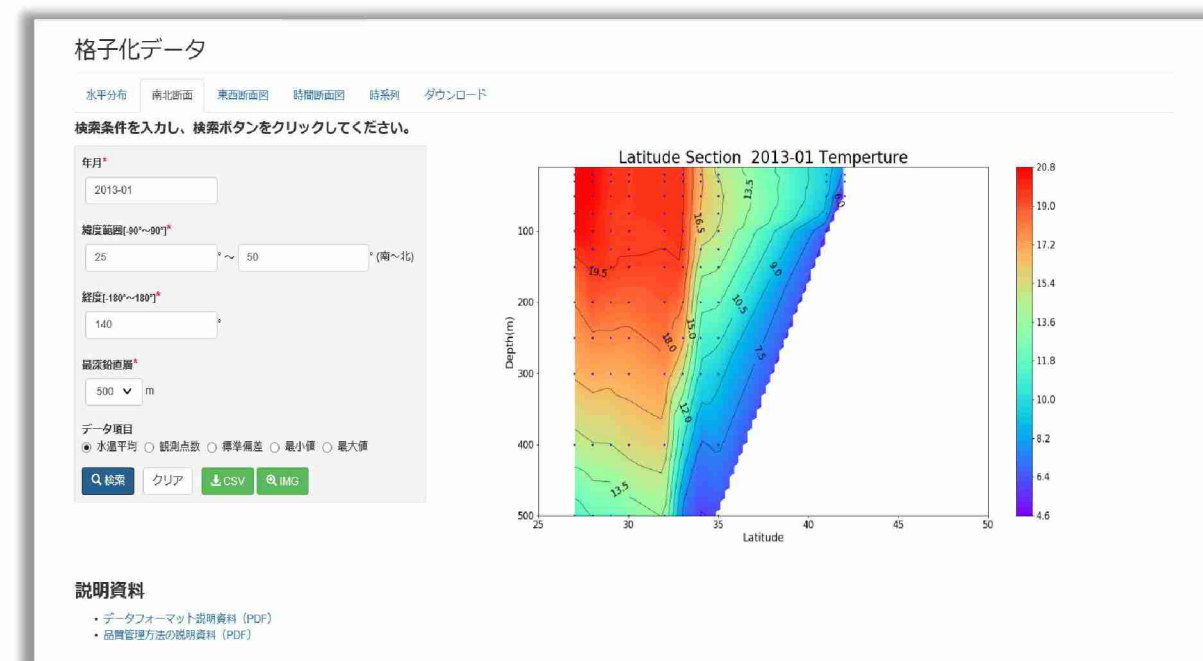
本システムでは、格子化データによる以下の5つのプロダクトを閲覧することができる。

- ① 水温、観測点数、標準偏差値の水平分布図の表示 (図(3)-12)
水平範囲、年月、鉛直層を指定し、水平分布図を表示する機能。
- ② 水温、観測点数、標準偏差値の南北断面図の表示機能 (図(3)-13)
経度(1つ)、緯度(範囲指定)、年月、最深鉛直層を指定し、南北断面図を表示する機能。
- ③ 水温、観測点数、標準偏差値の東西断面図の表示機能 (図(3)-14)
緯度(1つ)、経度(範囲指定)、年月、最深鉛直層を指定し、東西断面図を表示する機能。
- ④ 指定した格子点の水温、観測点数、標準偏差値の時間断面図の表示機能 (図(3)-15)
指定した格子点(緯度, 経度1つずつ)における時間断面図を表示する機能。
- ⑤ 指定した格子点および鉛直層の水温、観測点数、標準偏差値の時系列の表示機能 (図(3)-16)
指定した格子点および鉛直層の時系列を表示する機能。

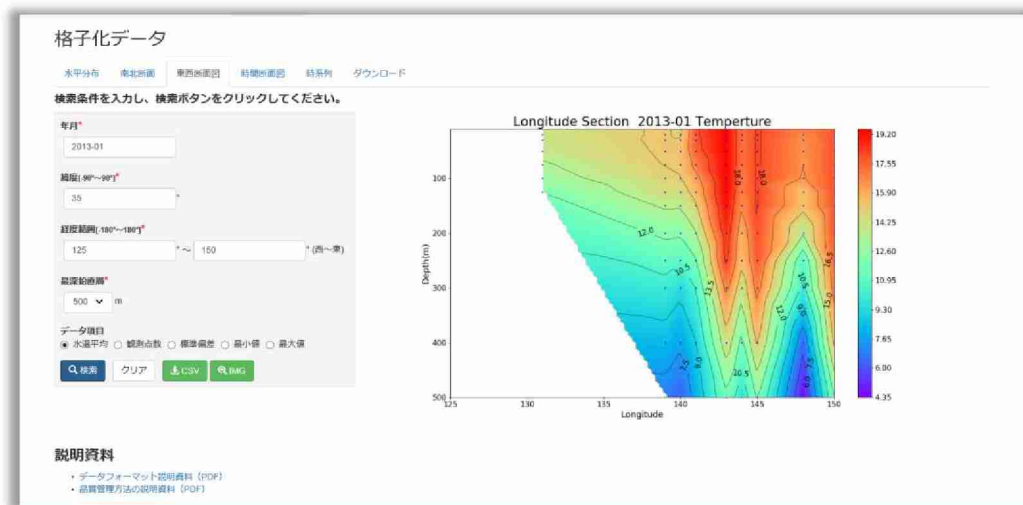
さらに、描画に使用したデータ、およびデータセットをCSVファイルでダウンロードすることができる。



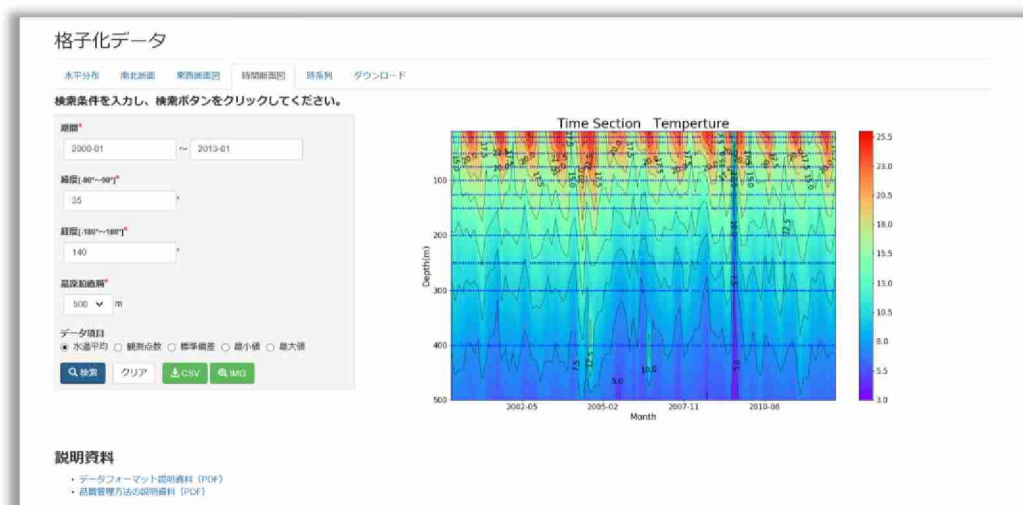
図(3)-12 格子化データの水平分布図。



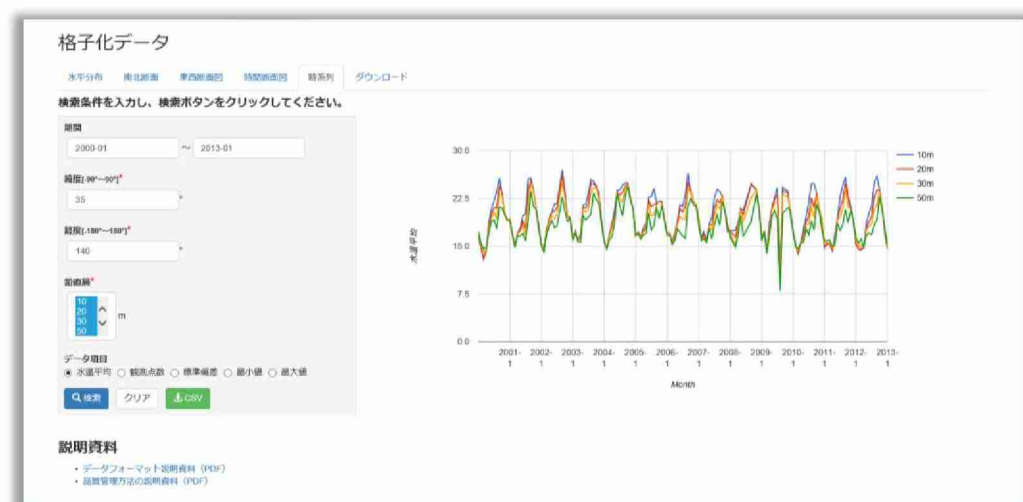
図(3)-13 格子化データの南北断面図。



図(3)-14 格子化データの東西断面図。



図(3)-15 格子化データの時間断面図。



図(3)-16 格子化データの時系列。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

観測データは我々の自然に対する理解を進める際に最も信頼性の高い貴重なデータであるから、過去だけでなく今後も、その品質が高水準に維持されていなければならない。海洋観測データユーザの裾野を広げ、利用機会を増やすことで海洋観測データの品質を一層向上させ、問題があれば早期発見することが肝要である。加えて、データサービスが海洋観測データの提供者（観測実施者）との互惠関係を築くことも品質向上のためには不可欠である。本課題で構築する品質管理・利用促進システムはこれらの実現に寄与するものである。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

本サブテーマで開発したデータ管理システムおよびデータ利用促進システムは、将来的にはJODCのシステムに組み込まれることが見込まれる。データ利用促進システムのうち、全球水温データ公開システムについては、IQuODデータベースの利活用促進のために、以下のURLで仮運用中である。

<http://dataview.xbt-japan.org:8080/>

<http://dv.xbt-japan.org:8080/>

6. 国際共同研究等の状況

本課題と関連の深いIQuOD (International Quality Controlled Ocean Database; 国際高品質管理海洋データベースおよびその構築活動)は、もとはXBTの系統的誤差および深度変換式に関するワークショップ(AOML/NOAA(マイアミ, 米国, 2008), ハンブルグ大学(ドイツ, 2010))に端を発して海洋データクリーンアップ構想へと発展したのち、CLIVAR GSOP (気候変動および予測可能性研究計画の全球統合・観測パネル)の支援を得て2013年CSIRO(ホバート, オーストラリア)で開催されたワークショップを第一回会合と位置付けた。こうした国際連携における研究活動の流れを受けて、我が国ではIOC協力推進委員会(事務局:国立研究開発法人海洋研究開発機構)の海洋観測・気候変動専門部会および海洋情報・データ専門部会の下に歴史的XBTデータ再整備作業部会(通称XBT-Japan)を2012年9月に設置して対応することになり、本課題の研究代表者ならびに研究分担者、研究協力者の多くが部会メンバーとしてIQuODの設立および運営に密接に関わってきている。本サブテーマは、IQuODと連携して、自動および専門的品質管理処理手法の確立に関して積極的に参画しつつ、情報交換を行い、システム開発に反映させてきた。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

特に記載すべき事項はない。

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

(2) 口頭発表 (学会等)

- 1) 鈴木 亨, 石井正好, 木津昭一, 佐藤佳奈子, 中野俊也, 福田和義, 寄高博行, 勢田明大, 清水勇吾, 雨池健一, 須賀利雄, 道田 豊, 気象学会2015春季大会 (2015)
「海洋分野における国際的な歴史的データ発掘・救済プロジェクトの動向」
- 2) 佐藤佳奈子, 須賀利雄, 石井正好, 中野俊也, 福田和義, 寄高博行, 勢田明大, 気象学会2015春季大会 (2015)
「海洋観測データサービスの現状と展望」
- 3) S. Hosoda and XBT-Japan project team, Ocean Sciences Meeting, Portland, USA (2018)
“The data management system for historical XBT profile data including rescued one.”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Riser, S. C., H. J. Freeland, D. Roemmich, S. Wijffels, A. Troisi, M. Belbeoch, D. Gilbert, J. Xu, S. Pouliquen, A. Thresher, P.-Y. Le Traon, G. Maze, B. Klein, M. Ravichandran, F. Grant, P.-M. Poulain, T. Suga, B. Lim, A. Sterl, P. Sutton, K.-A. Mork, P. J. Velez-Belchi, I. Ansorge, B. King, J. Turton, M. Baringer, and S. Jayne, 2016: Fifteen years of ocean observations with the global Argo array, Nature Climate Change 6, 145-153. Argo Data Management Team: Argo user's manual V3.2, Ifremer, DOI:10.13155/29825, 2017.

III. 英文Abstract

Improving Database of Historical Ocean Subsurface Temperature Observations and its Climatological Evaluation

Principal Investigator: Masayoshi ISHII

Institution: Meteorological Research Institute of Japan Meteorological Agency (MRI-JMA)

1-1, Nagamine, Tsukuba-City, Ibaraki 305-0052, JAPAN

Tel: +81-29-853-8595 / Fax: +81-29-853-2552

E-mail: maish@mri-jma.go.jp

Cooperated by: Marine Information Research Center of Japan Hydrographic Association,
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

[Abstract]

Key Words: Global warming, Oceanographic observations, XBT, Ocean heat content, Quality control, Data use, Objective analysis,

Oceanographic observations have very important roles on monitoring global warming, improving climate models for long-term climate predictions, and investigating long-term changes in marine environment. Meanwhile, global ocean heat content (GOHC) time series shown in IPCC 5th assessment (AR5) report were very uncertain particularly in older decades before 2000. The data quality is required to be high enough to understand slowly changing ocean. The large uncertainty is also due to differences in methodology of data mapping and bias collections adopted between centers and institutes.

Responding to criticism of the present ocean database: low quality, insufficient meta data, and etc, a project, international quality controlled Ocean database (IQuOD), was started up in 2013 by representative researchers from Japan, Australia, England, America, and India. This study collaborated with IQuOD and we have reconstructed a data base containing high-precision ocean subsurface temperature observations of Japanese institutes. In particular, expendable bathythermograph (XBT) data of high resolution in the vertical were newly prepared by tracing profiles recorded on data sheets.

Oceanographic data should be kept high quality also in the future. Two systems for promoting data uses and producing information of quality control have been developed for this purpose. The systems serve data with various data format suitable for individual users, and help institutes to improve the quality of ocean measurements. Future activities with these could be beneficial mutually between data observers, distributors, and users.

The ocean data mapping method used for estimating GOHC has been updated, in which the trend and interannual component of temperature variations are separately analyzed. Using the present oceanographic data base, not IQuOD, we obtained a new estimate of GOHC uncertainty: one-third of that shown in IPCC AR5, assuming that present data base contains observations of high quality. After IQuOD is completed, we will certainly obtain GOHC time series which are accurate enough for monitoring global warming.

Through these studies, some observational records newly became available: XBT observations by ice-break ships, Fuji and Shirase, measured in Southern Indian Ocean and

along the Antarctic during the 1980s, and digital bathythermograph observations by the Central Fishery Institute around the 1980. A half of reports of sea surface temperature observations by the former Japanese Navy for the period from 1903 to 1944 were digitized in this study.