
報 告

気象庁における WOCE（世界海洋循環実験計画）ワнтаイム測線の再観測について

中野 俊也*

要 旨

気象庁は、地球温暖化将来予測の不確実性を低減するために重要とされる、海洋の炭素循環の変動とそのメカニズム解明に貢献するため、海洋気象観測船における観測監視体制を強化した。その一つとして 1990 年代に実施された世界海洋循環実験計画（WOCE: World Ocean Circulation Experiment）各層観測プログラム（WHP）のワнтаイム測線の再観測を実施することとし、2010 年には WHP-P9（東経 137 度線）を、2011 年には WHP-P13（東経 165 度線）の観測を実施した。また、観測データには、追跡可能性と比較可能性の確保、及び不確かさを付加することにより、国際水準の観測データとなるよう、測定手順とデータ処理方法の見直しを行った。

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 4 次評価報告書（2007）は「気候システムの温暖化には疑う余地がない」と結論づけ、地球温暖化の原因は「20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどは、人為起源の温室効果ガス濃度の観測された増加によってもたらされた可能性が非常に高い」とした。そして、気温上昇の将来予測については、気候システムの数多くの要素を組み込んだ気候予測モデルによって二酸化炭素（CO₂）排出シナリオごとの予測値が示されたが、モデル間の幅（不確かさ）は大きいものとなっている。この不確実性を低減するためには、地球表面の 70% を占め、大気の約 1000 倍の熱容量を持ち、約 50 倍の CO₂ を蓄え、更に地球の気候システムに加えられた熱の約 80% と人間活動によって排出された CO₂ の約 30% を吸収している

海洋の循環や熱輸送量、更に炭素循環過程を、より詳細に気候予測モデルに組み込むことが重要である。

そこで気象庁では、2010 年（平成 22 年）度から、炭素循環の変動とそのメカニズム解明に重点をおき、海洋気象観測船「凌風丸」と「啓風丸」に、海水中の全炭酸等の二酸化炭素関連物質を精度良く効率的に測定する各種測定装置を整備・更新し、観測監視体制を強化した。その一つとして、1990 年代に気象庁も参加した世界海洋循環実験計画（WOCE : World Ocean Circulation Experiment）の中核であった WOCE 各層観測プログラム（WHP: WOCE Hydrographic Programme）のワнтаイム観測（WOCE の期間中に特別に高精度、高密度の観測を 1 回実施する）と同様、「陸から陸まで」「海面から海底直上まで」の観測を、年 1 測線ずつ国際的な取組みの一環として実施することとした。

* 地球環境・海洋部海洋環境解析センター

また、観測データを国際水準のものとするため、測定及びデータ処理方法については、全球海洋各層観測調査プログラム (GO-SHIP : Global Ocean Ship-based Hydrographic Investigations Program) による海洋観測マニュアル (GO-SHIP, 2010) に準拠した。そして、国際的な計測標準を用いることにより、「比較可能性 (comparability)」と「追跡可能性 (traceability)」を明示的に確保し、「不確かさ (uncertainty)」を付加できるようにした。

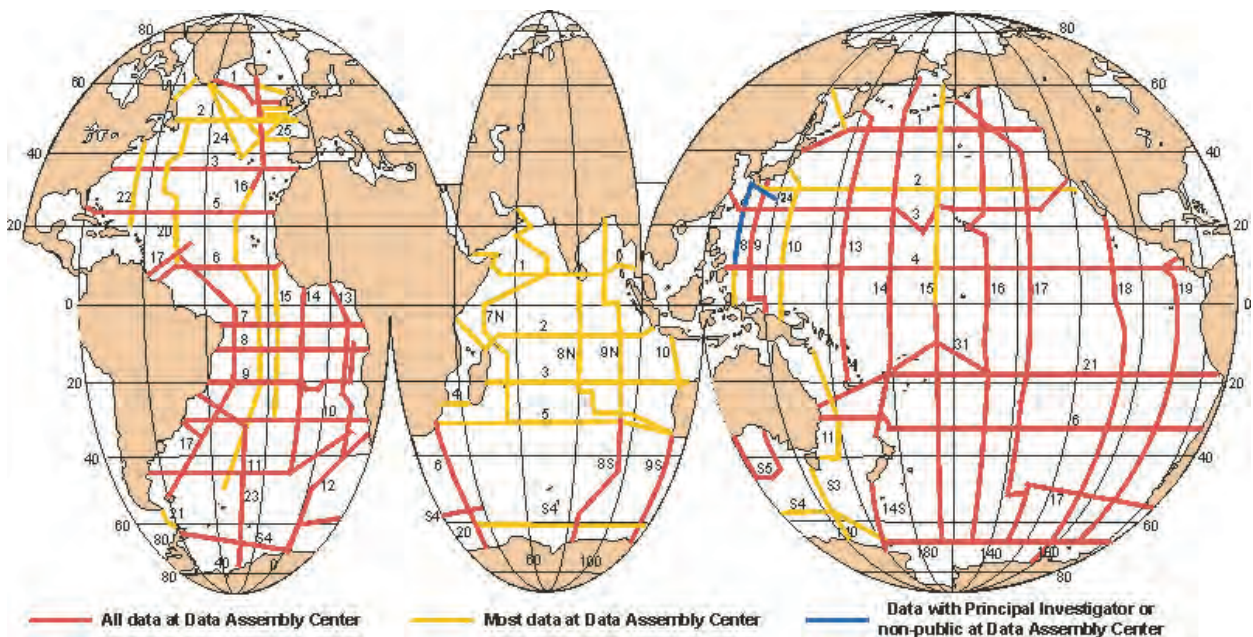
本報告では、第2章で「WOCE以降の各層観測に関する国際的な動向」について、第3章で測定データにおける「比較可能性と追跡可能性の確保、不確かさの付加の重要性」について述べる。第4章で2010年と2011年に実施した「WHP-P9・P13再観測の概要」を示し、第5章で「CTDO₂データの補正結果」を紹介する。そして、第6章で「再観測から得られたものと今後について」述べる。

2. WOCE以降の各層観測に関する国際的な動向

WOCEは、1990～2002年の間に実施された国際プロジェクトで、前半の1990～1997年が「気候変動予測を目的とする海洋モデルの検証に必要なデータ収集期間」とされ、同期間におけ

る中心的な取り組みがWHPワントタイム観測である(第1図)。気象庁では、1994年にWHP-P9(東経137度線)と1995年にP24(九州南東沖線)ワントタイム観測を実施した。WOCEは、2002年11月に米国で開催されたコンファレンス「WOCE and BEYOND (http://woce.nodc.noaa.gov/woce_conf2002/index.htm)」で終了し、収集した観測データの他、大洋ごとに断面図等のアトラス(http://www-pord.ucsd.edu/whp_atlas/index.html)がとりまとめられた。WOCEに関する気象庁の取組みについては金子(1998; 2002)に、WHP-P9の観測データを用いた解析結果についてはKaneko *et al.* (1998; 2001)を参照していただきたい。また国内の取組みについては、月刊海洋「海洋大循環」(号外 No.4, 1993)と「海洋大循環(2)―研究の進展―」(号外 No.9, 1995)にまとめられている。

WOCEの他にも、1990年代に海洋の炭素循環を対象としたプロジェクトである全球海洋フラックス合同研究計画(JGOFS: Joint Global Ocean Flux Study)により、気候にとって海洋の重要性が認識され、「気候に関する海洋観測システム第1回国際会議」(OceanObs'99: 1999年10月にフランスで開催)において、全球における永続的なWHP型の海洋観測を実施することが提案され



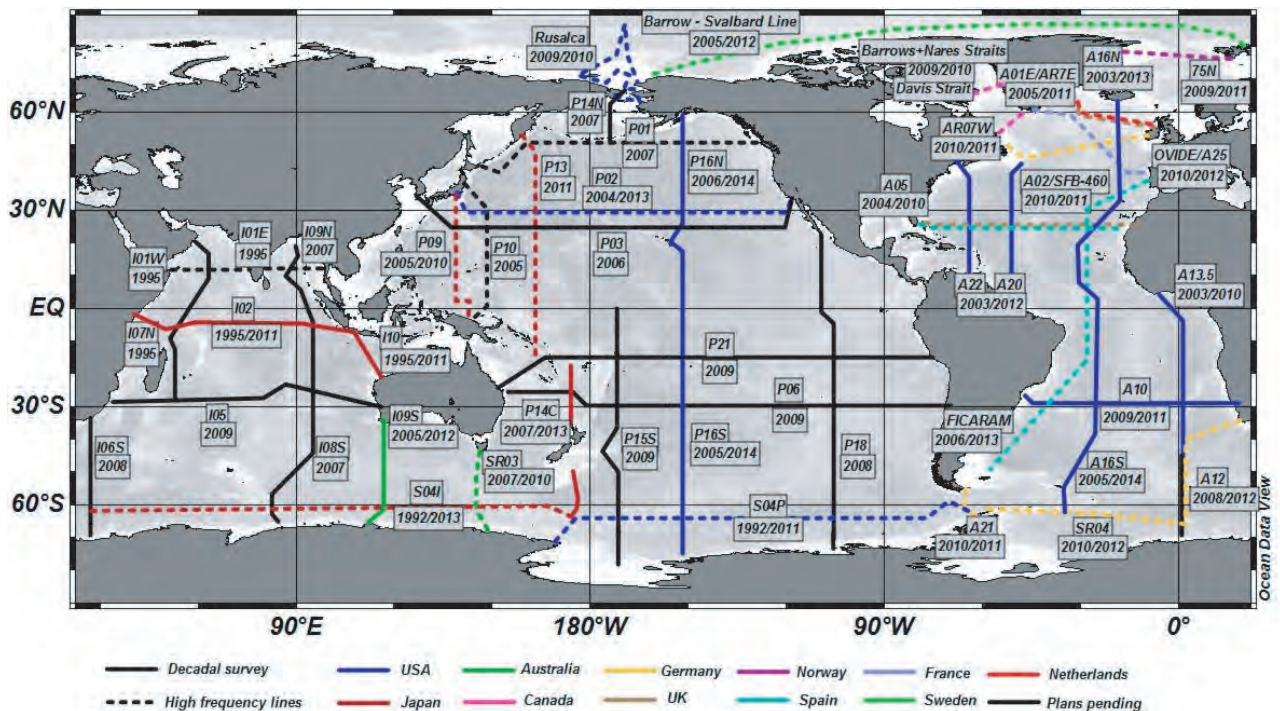
第1図 WHPワントタイム測線

た (Gould *et al.*, 2001). これは、全球の WHP ワンタイム測線の中から重要と考えられる 36 測線を選択し、約 10 年間隔での繰り返し観測 (再観測: revisit) することにより WHP ワンタイム観測と同様の確度 (水温 0.002°C, 塩分 0.002) をもつデータを蓄積し、海洋における CO₂ 蓄積や深層までの循環の変化を検出しようとするものである (第 2 図). その後、WOCE/JGOFS によって、海洋における人為起源 CO₂ 蓄積量や、熱・淡水の南北輸送量が精度良く定量化された結果が出され、IPCC に貢献したことからも、一層 WHP 測線の再観測が重要視された。

WHP タイプの海盆スケールでの表層から海底までの精度良い観測を約 10 年間隔で実施することは、海洋の質量・物質輸送量の推算だけでなく、深・底層の海水特性の変化を捉えるという点でも重要である。それは、地球上の全ての海水が 0.001°C 上昇しただけでも全大気のがんが 1°C 上昇することと同じ熱量をもっていることを考えれば、もし深・底層における水温に千分の数度でも有意な長期変化が確認されれば、全球規模の熱塩循環の変化すなわち大気と海洋の直接的な熱交換の変化を議論するうえで重要となるからである。

WHP 再観測の具体的な取組みについては、国際海洋炭素観測調整計画 (IOCCP: International Ocean Carbon Coordination Project) において各国の観測計画を調整して全球をカバーしようとしており、気候変動及び予測可能性研究計画 (CLIVAR: Climate Variability and Predictability Study) が終わる 2011 年までを一区切りとしている。それ以降については、IOCCP の中に立ち上げられた GO-SHIP に引き継がれる。

なお、国内における WHP 再観測は、海洋科学技術センター (現:海洋研究開発機構 (JAMSTEC: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) が、既に実施している。1999 年に「北太平洋亜寒帯循環と気候変動に関する国際共同研究 (SAGE: Subarctic Gyre Experiment)」において、P1 (北緯 47 度線) と P17N を水産庁「開洋丸」、JAMSTEC「みらい」及びカナダの IOS (Institute of Ocean Science) が共同で行った。2000 年代に入り、JAMSTEC「みらい」により、南大洋を一周した BEAGLE (Blue Earth Global Expedition) 航海で P6, A10, I3/I4 測線 (2003 年 8 月～2004 年 2 月), P10 (東経 149 度線: 2005 年), P3 (北緯 24 度線: 2005 年), P1 (北緯 47 度線: 2007 年),



第 2 図 GO-SHIP 測線

P14 (東経 179 度線 : 2007 年), 及び P21 (南緯 17 度線 : 2009 年) を実施している (<http://www.jamstec.go.jp/iorgc/ocorp/data/post-woce.html>).

3. 比較可能性と追跡可能性の確保, 不確かさの付加の重要性

WOCE においては, 測定方法や分析方法を統一するためのマニュアル (WOCE Operational Manual, 1990) を作成し, 測定の確度 (accuracy) や精度 (precision) 等を定義し, それにもとづいて観測を行い, データの品質管理を行った. 確度については, 「標準とされる (物質の) 値と一致する度合い」とされたが, 値付けされている国際的に統一された標準がない測定項目が多かった. そこで, 各機関の国際相互比較によって求めようとしたが, 取組みは十分だったとはいえない. 精度については, 「同じサンプルの測定がその平均値と一致する度合い」とされ, 1 本の採水器からの複数のサンプルを分析する方法 (replicate) と, 同じ深さでの 2 本の採水器からのサンプルを分析する方法 (duplicate) による二重測定における差から見積った. この目標値については, 測線での最大値を基準として設定されたが, 海域によって最大値が異なることから絶対的な評価はできなかった.

実際, 深層 (3000m 以深) では時間変化は小さく, 異なる時期に, 異なる機関が行った観測データでも差は小さいと考えられていたが, 測線が交差する測点のデータを比較した結果, 測定値に系統的な差があった. したがって, 解析する際には, 統一的に扱うことは難しく, 深層における時間変化は小さいと仮定した統計的な手法を用いて, 航海間のデータの補正が行われた (Gouretski and Janke, 2001 ; Johnson *et al.*, 2001).

ここで, 測定結果の信頼性をどのように評価・表現するかについて述べておく. これまでの方法には, 「真値」や「測定誤差」といった原理的に不可知な量が持ち込まれており, 国や技術分野によって異なる幾つかの考え方が存在し混乱していた. そこで, 1970 年代後半に国際度量衡委員会 (CIPM : Comite' international des poids et mesures. 英語表記では International Committee of

Weights and Measures) が, この問題を提起し, 計測に関わる幾つかの国際機関が関与して, 測定結果の信頼性の評価と表現の統一的な方法を定める作業が行われた. その成果が, 1993 年に国際標準化機構 (ISO) 等を含む 7 つの国際機関の名前で出版された「計測における不確かさの表現のガイド (GUM : Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)」である (詳細な解説は, 独立行政法人産業技術総合研究所計量標準研究センターの <http://www.nmij.jp/library/uncertainty/> を参照). ここには, 知ることができる値 (測定値) は「真値」ではなく「真値に最も近いであろうと思われる推定値」であり, この「推定値」の周りに測定値が「ばらついている」ということが示されている. すなわち, 測定値には必ず「不確かさ」があり, この「不確かさ」は, 国家標準又は国際標準と切れ目のない比較の連鎖としてつながっていなければならないとされている.

GO-SHIP 観測マニュアルは, WOCE 以降開発され現在世界的に使用されている測器や最新の分析手法によるデータ取得と処理方法をまとめたものである. ここでは, GO-SHIP 観測マニュアルに基づく, 主要な観測項目の測定とデータ処理及び補正方法について述べる.

水温については, 現在世界標準の測器として使用されている米国 Sea-Bird 社製の水温センサー (SBE3plus) は, WOCE のときに使用していた米国 Neil Brown 社製や米国 FSI 社製の水温センサーより時間的に安定しているが, 圧力依存性や摩擦熱の影響があることわかってきた (Budeus and Schneider, 1998 ; Uchida *et al.*, 2007). そこで, 水の三重点 (0.01°C ; 273.16K) とガリウムの融点 (29.7646°C) を用いて校正され, 更に時間的安定性が SBE3plus より優れた深海用標準温度計 (米国 Sea-Bird 社製 SBE35) による採水時に取得されるデータを基準とし, SBE3plus の値を, Uchida *et al.* (2007) の方法によって補正することが推奨されている (McTaggart *et al.*, 2010).

塩分 (S) は, 認証値が付いている標準海水 (Standard Sea Water : SSW) があるので, あるバッチの SSW を基準としたオフセットを求め, 過去に遡って補正することが可能である (青山,

2005 ; Kawano *et al.*, 2006). なお, 2009 年 6 月に開催された Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) の総会において, 新たな海水の状態方程式 (Thermodynamic Equation of Seawater 2010 : TEOS-10) の採用が承認された. この中で, 塩分については, 従来の実用塩分スケール (Practical Salinity Scale 1978 : PSS-78) から絶対塩分 (Absolute Salinity) に変更された. 現在のところ測定方法は従来どおりであるが, 塩分の定義が変わっていることへの対応について, 今後注意しておく必要がある (河野, 2010).

炭酸系のうち全炭酸 (DIC) とアルカリ度 (TA) については, スクリップス海洋研究所 (SIO : Scripps Institution of Oceanography) の Dickson 博士による認証参照物質 (CRM : Certified Reference Material) があるので, この測定値に基づく品質管理が可能である. 一方, pH については, まだ標準物質がなく, 現在開発中である.

栄養塩 (Nut) については, 認証値はまだ付加されていないが, 均一性 (同じロットでの値のばらつき) と保存性 (時間変化) が確認された, 栄養塩測定用海水標準物質 (RMNS : Reference Materials for Nutrients in Seawater) が開発された (Aoyama and Hydes, 2010). したがって, 濃度の異なる数本の RMNS を毎測点測定すれば, 航海を通じた測定の「不確かさ」を見積ることができ, 他機関の RMNS の測定値との差がわかれば直接比較が可能となる. また将来, これまでに使用した各ロットの値が確定すれば, 過去に遡って測定値を補正することも可能となる. 現在, 持続的な活動の場である「国際栄養塩スケールパネル (International Nutrients Scale System (INSS) Panel)」の設立が, 海洋研究科学委員会 (SCOR : Scientific Committee on Oceanic Research) に提案されている.

溶存酸素 (DO) の標準物質については, 現在開発中である. そこで, 1 次標準としてヨウ素酸標準液を, 米国国立標準技術研究所 (NIST : National Institute of Standards and Technology) の標準物質に対して追跡可能なヨウ素酸カリウム (KIO_3) 標準物質を用いて作製することで他機関との比較性が確保できる. 現在, JAMSTEC で作

製された標準液との相互比較を行うこととしており, この相互比較を今後も継続していくことで, 気象庁と JAMSTEC のデータについては直接比較可能である.

上記の方法に準拠している気象庁が行う観測は, 国際水準として認知され, 他国・他機関のデータと組合せて解析できるデータを取得することとなる. これは, 国際共同としての実効性のある貢献と同時に, 国際データセットを業務へ活用するための資格を得ることにもなる.

4. WHP-P9・P13 再観測航海の概要

2010 年度は 1994 年に気象庁「凌風丸」によって実施した WHP-P9 (東経 137 度線) を, 2011 年度は 1991/1993 年に東京大学海洋研究所 (現大気海洋研究所)「白鳳丸」と 1992 年に米国海洋大気庁太平洋海洋環境研究所 (NOAA/PMEL : National Oceanic and Atmospheric Administration/Pacific Marine Environmental Laboratory)「R/V John Vickers」による WHP-P13 (東経 165 度線) の再観測を実施した. 両航海の航跡図を第 3 図に示す.

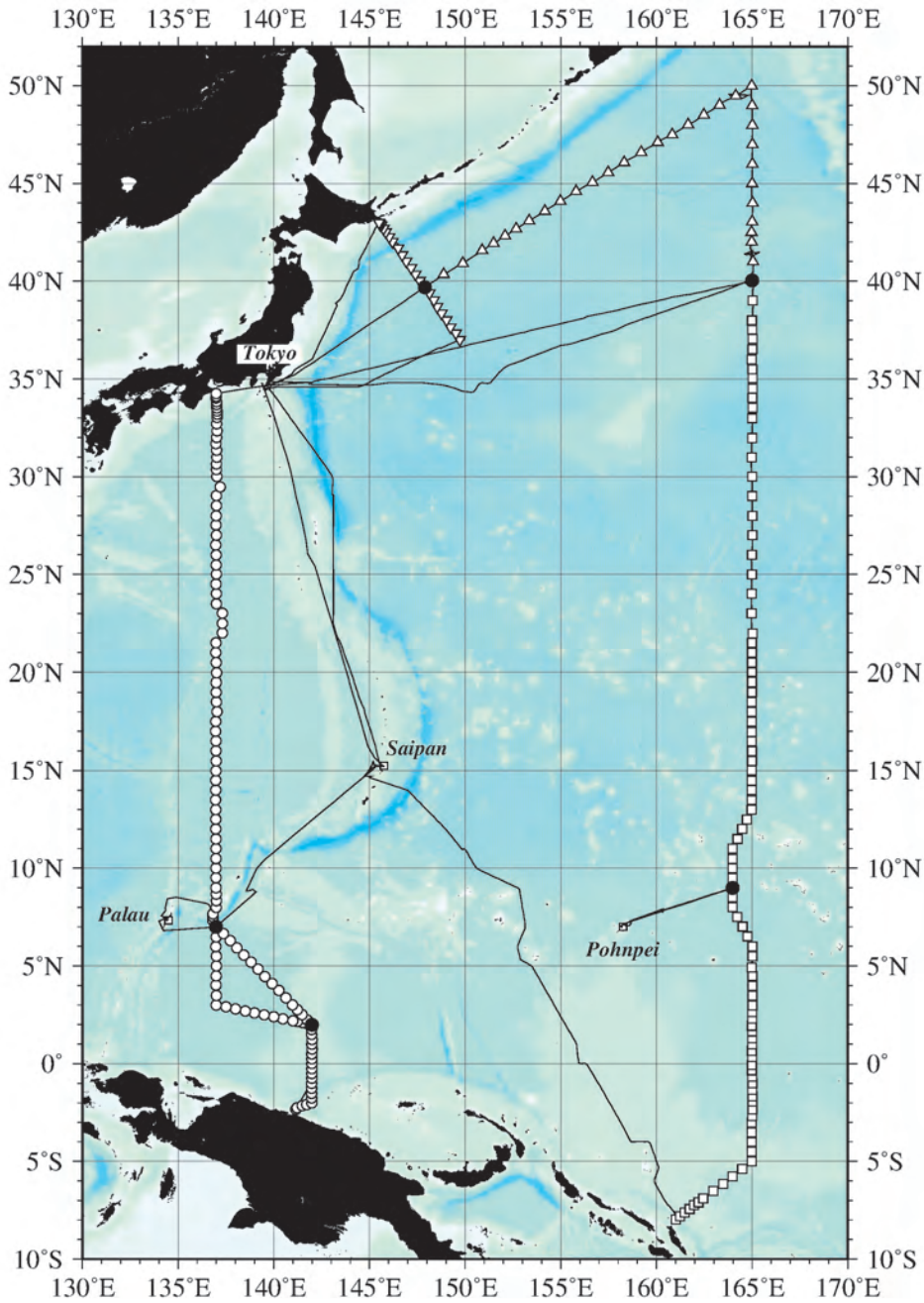
P9 再観測は, RF10-05 次航海 (2010 年 7 月 6 日～9 月 6 日までの 53 日間) で行った. CTD (電気伝導度水温水深計 : Conductivity Temperature Depth profiler) 観測は 124 測点である. 時期的に台風の影響が心配されたが, 航海中台風が発生することなく, 順調に観測を行うことができた.

P13 再観測は, RF11-06 次～11-08 次の 3 航海に分けて行った (11-06 次航海 : 2011 年 5 月 15 日～5 月 31 日までの 17 日間, 11-07 次航海 : 6 月 4 日～6 月 27 日までの 24 日間, 11-08 次航海 : 7 月 5 日～9 月 5 日までの 63 日間). CTD 観測点は, それぞれの航海で 22 測点, 33 測点, 96 測点の合計 151 測点である. 11-06 次航海では, CTD を降下中に漁網が引っかかったため, 1 測点で海底直上までの観測と予定していた採水ができなかった. 11-07 次航海では, 2 回にわたり観測海域を発達した低気圧が通過した影響で, 観測時間が不足し, 予定していた測点のうち 9 測点を取りやめ, 計画していた北緯 38 度までの観測が北緯 40 度までの観測となった. このため 11-08 次航海は, 観測時間不足となり, 最初から 13 測点を取りや

める計画に変更して出港し、その後は計画どおり観測を行った。

観測項目は、水温、塩分 (S)、溶存酸素 (DO)、栄養塩 (Nut)、全炭酸 (DIC)、アルカリ度 (TA)、pH、CFC-11、CFC-12、植物色素 (クロロフィル a、フェオフィチン) で、使用した測定装置を第 1 表に示す。また、各測点で深度及び濃度に偏り

がないように、各 2 層程度の replicate と duplicate の採水分析を行い、繰り返し測定結果の不確かさを求めた。航海の航程間及び WHP 測線の同じ位置の測点データとの比較も行った。データは、航海をつうじて測定した計測標準の測定結果をもとに、補正及び品質管理 (フラグ付け) を実施した。S、Nut、及び炭酸系 (DIC、TA、pH) の分析で



第 3 図 凌風丸 10-05 次航海 (P9 再観測) と 11-06 ~ 08 次航海 (P13 再観測) の航跡図。

- : 10-05 次航海の観測点, ▽ : 11-06 次航海の観測点, △ : 11-07 次航海の観測点, □ : 11-08 次航海の観測点,
- : 航海間, 航程間で 2 ~ 3 回の観測を行った観測点を示す。

は、第 2 表の標準海水を使用した。なお、DO と Nut に関する分析手順とデータ処理方法等については、本特集号の宮尾他 (2013) を参照していただきたい。

CTD システムの外観と各センサーを取付けた様子を写真 1 に示す。今回導入した CTD システムでの大きな特徴は、採水器を 24 本掛けから 36

本掛けにしたことである。WHP タイプにおける海底直上までの観測では、2000m 以深の採水層間隔を 250m とする必要がある。そのため、1 回の CTD 観測 (1 キャスト) では採水層が不足する。この問題を解決する方法としては、1 測点で 2 回の CTD 観測 (2 キャスト) を実施すれば良いが、1 測点での観測時間が増加し、P13 のように長い

第 1 表 観測項目と測器の一覧

Type/Method	Remarks
Hydrographic measurements	
CTD system	
(deck unit)	SBE11plus Sea-Bird Electronics Inc. (USA)
(underwater unit)	SBE9plus Sea-Bird Electronics Inc. (USA)
(Temperature sensor)	SBE3plus Sea-Bird Electronics Inc. (USA)
(Conductivity sensor)	SBE4C Sea-Bird Electronics Inc. (USA)
(Deep Ocean Standards)	SBE35 Sea-Bird Electronics Inc. (USA)
(Dissolved oxygen sensor)	RINKOIII JFE Advantech (Japan)
(Altimeter)	PSA-916D Teledyne Benthos (USA)
(Water sampler:36-position)	SBE32 Carousel Sea-Bird Electronics Inc. (USA)
(Water sampling bottle)	10L Niskin water sampler General Oceanics Inc.
Lowered ADCP	WH-300kHz Teledyne RD Instruments (USA)
Salinity	AUTOSAL 8400B Guildline (Canada)
Dissolved oxygen	DOT-01X KIMOTO ELECTRIC Co.,Ltd (Japan)
Nutrients	Autoanalyzer3 BLTEC K. K. (Japan)
Dissolved Inorganic Carbon (DIC)	DIC: Coulometric titration method
Total Alkalinity (TA)	TA: Spectrophotometric determination using indicator dye Nippon ANS Co. (Japan)
pH	Spectrophotometric determination using indicator dye Nippon ANS Co. (Japan)
CFC-11, 12	Purge and trap extraction and ECD-GC determination method GL Sciences Inc. (Japan)
Phytopigment (chlorophyll-a and	10AU Field Fluorometer Turner Designs (USA)
Underway measurements	
Shipboard ADCP	Ocean Surveyor 38kHz Teledyne RD Instruments (USA)
pCO ₂	Underway pCO ₂ analysis with equilibrator Nippon ANS Co. (Japan)
In Vivo Chlorophyll-a	10AU Field Fluorometer Turner Designs (USA)

第 2 表 P9, P13 再観測航海で使用した標準海水のロット番号

分析の要素	標準海水のロット番号
S	P9: P152 (IAPSO SSW) P13: P153 (IAPSO SSW)
Nut	P9 : BA, AX, BE, AZ (RMNS: KANSO Technos) P13 : BS, BT, BE, BF (RMNS: KANSO Technos)
DIC	P9: 93, 99, 101 (CRM: Prof. Dickson of SIO)
TA	(98: pHのみに使用)
pH	P13: 103, 105, 107, 110 (CRM: Prof. Dickson of SIO)

測線では観測時間が不足する．そこで，1 測点 1 キラストとするためには，36 本掛け採水器の導入が不可欠であると判断した．しかし，「凌風丸」・「啓風丸」の格納庫のスペース，ケーブルの太さとウィンチの能力の問題から，1 周 36 本掛けの採水器を導入することは難しい．他機関の状況を調査したところ，現在 NOAA や SIO が，採水器を互い違いに取り付けるタイプで観測を行っているという情報があり，気象庁でもこの方式を採用した（写真 2）．

採水層については，全測点基準層で固定ではなく，Swift (2010) を参考に，基準とする採水層とそれに対し採水層を上・下にずらした二つの採水スキームによる，三つの採水スキームを 3 測点ごとに繰り返す方法を採用した（第 4 図）．この方法の利点は，南北断面の場合，北赤道海流の海域である亜熱帯循環南部のように密度構造の鉛直勾配が大きく，しかも南北勾配が大きな空間分布の

変化が大きい海域における観測層の分布の表現が良くなることである．更に，亜熱帯循環の密度構造を考慮し，P9, P13 ともに 20° N より南では，基準となる採水層に 350m, 450m を追加した．また P13 では，亜寒帯域における特徴的な海洋構造である，水温の鉛直構造が逆転する中冷・中暖



写真 2 CTD 投入前の 36 本掛け採水器

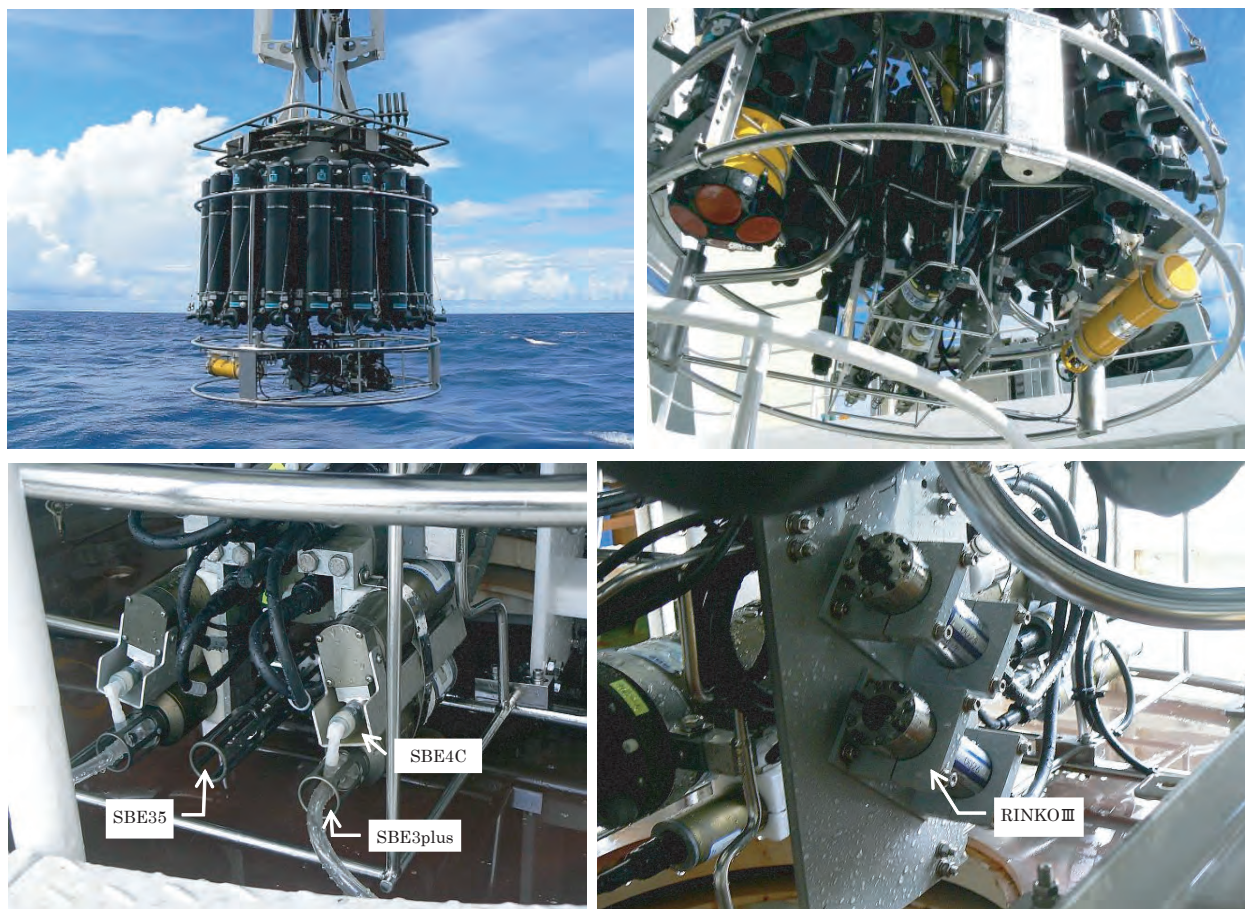
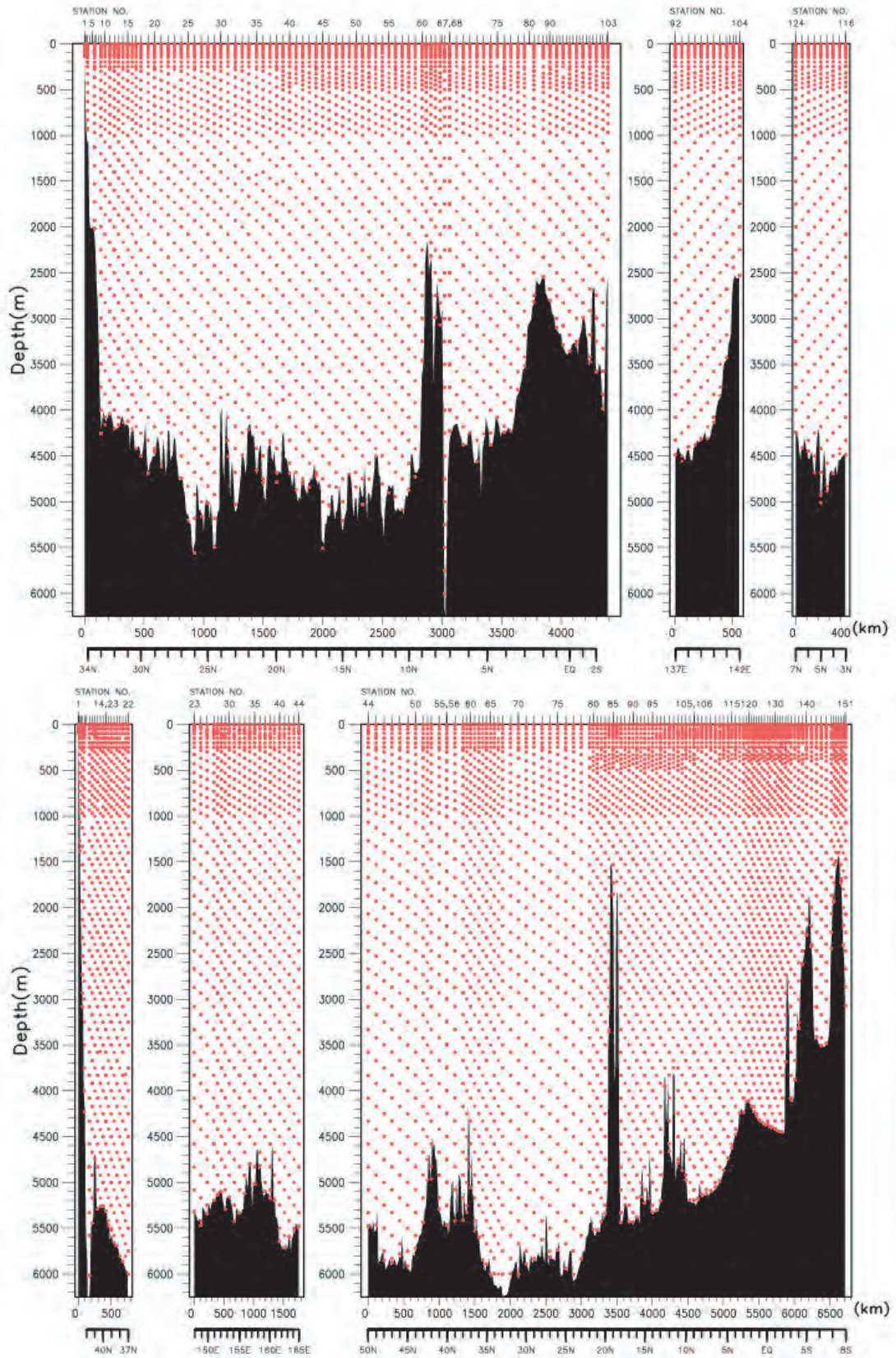


写真 1 左上:CTD システム投入前，右上:下から見た CTD システム，左下:水温 (SBE3plus)，電気伝導度 (SBE4C)，深海用高精度水温計 (SBE35)，右下:溶存酸素センサー (RINKO III)



第4図 (上) 凌風丸 10-05 次航海 (P9 再観測) の採水層と, (下) 11-06 ~ 08 次航海 (P13 再観測) の採水層

構造 (永田他, 1992) を考慮し, 降下時の水温プロファイルをみながら, 25m, 75m, 125m を任意に追加した.

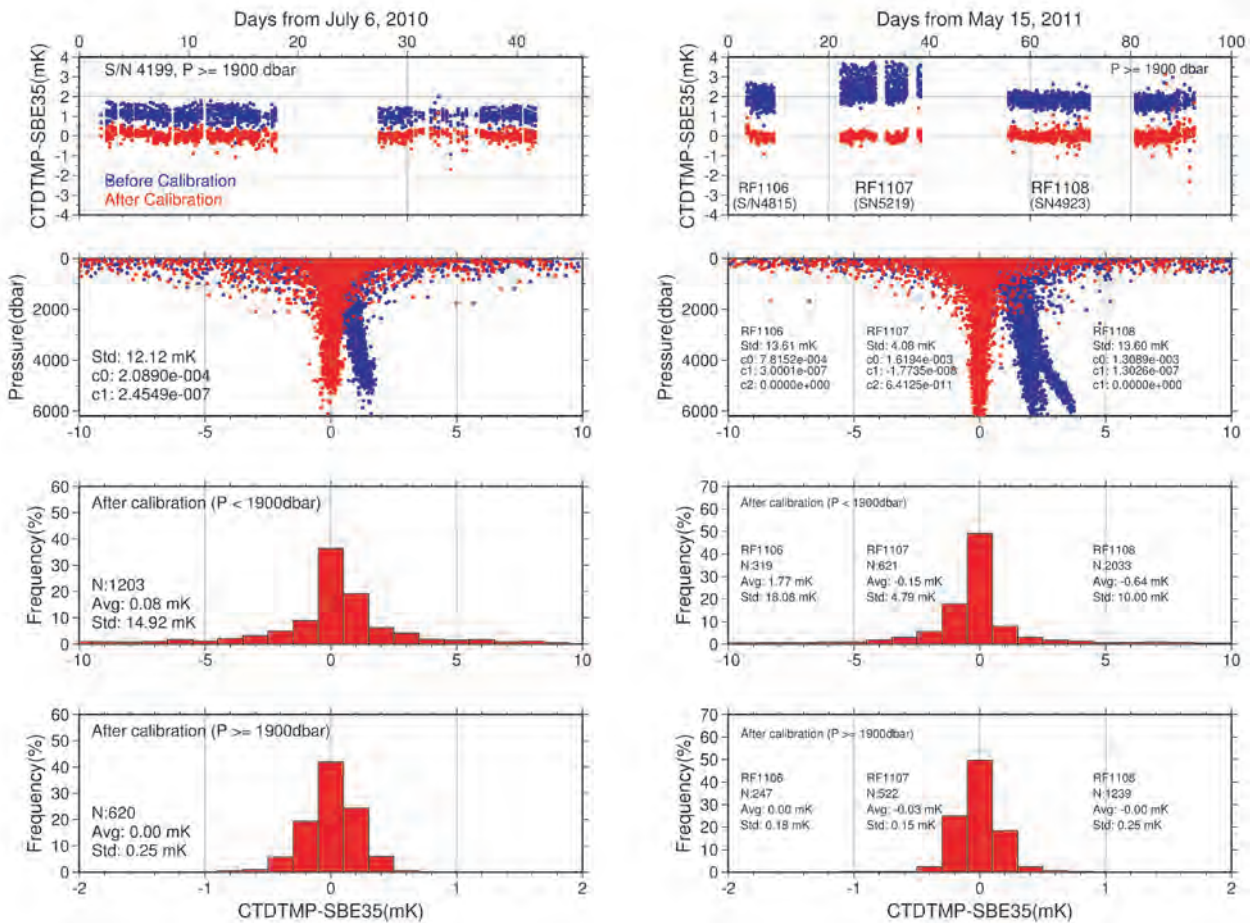
5. CTD₀₂ データの補正結果

ここでは, CTD データの補正結果について示す. まず, CTD の各センサー (圧力, 水温, 電気伝導度) は, 年 1 回陸上でキャリブレーションを行い, 補正係数を算出する. この際, 長年の使用によりセンサーの劣化や特性が変化している可能性があるため履歴を作成し, できるだけ新しく変化が小さく問題のないセンサーを使用した.

圧力センサーについては, 航海中の大気圧と空中での CTD の圧力値を比較し, 時間変化がないか確認を行った. これは CTD 観測では, 最大 6000dbar の加圧と減圧を繰り返すことから, CTD

投入時と揚収時の圧力の差が生じる可能性があるためである. また, 長年使用している圧力センサーでは, 揚収後の圧力値が投入前の圧力値に戻らず差が大きくなっていくという報告がある. このようなセンサーによるデータを用いて, 海面から海底までの厚さを求めると誤差が大きくなる. このことは, 長期的な水位変化を見積る際に問題となるため, 今後注意しておく必要がある.

水温センサーについては, 第 3 章で述べた方法に従い, SBE35 を基準として補正を行った. SBE3plus による個体差はあるが, 約 2 ~ 3mK/6000dbar の差がある (第 5 図). この差は, 4000m 以深の深・底層水の水温変化の議論をする場合には, 非常に重要である. ただし, この補正も, SBE35 に圧力依存性がないものと仮定しての比較なので, SBE35 と SBE3plus の組合せを変



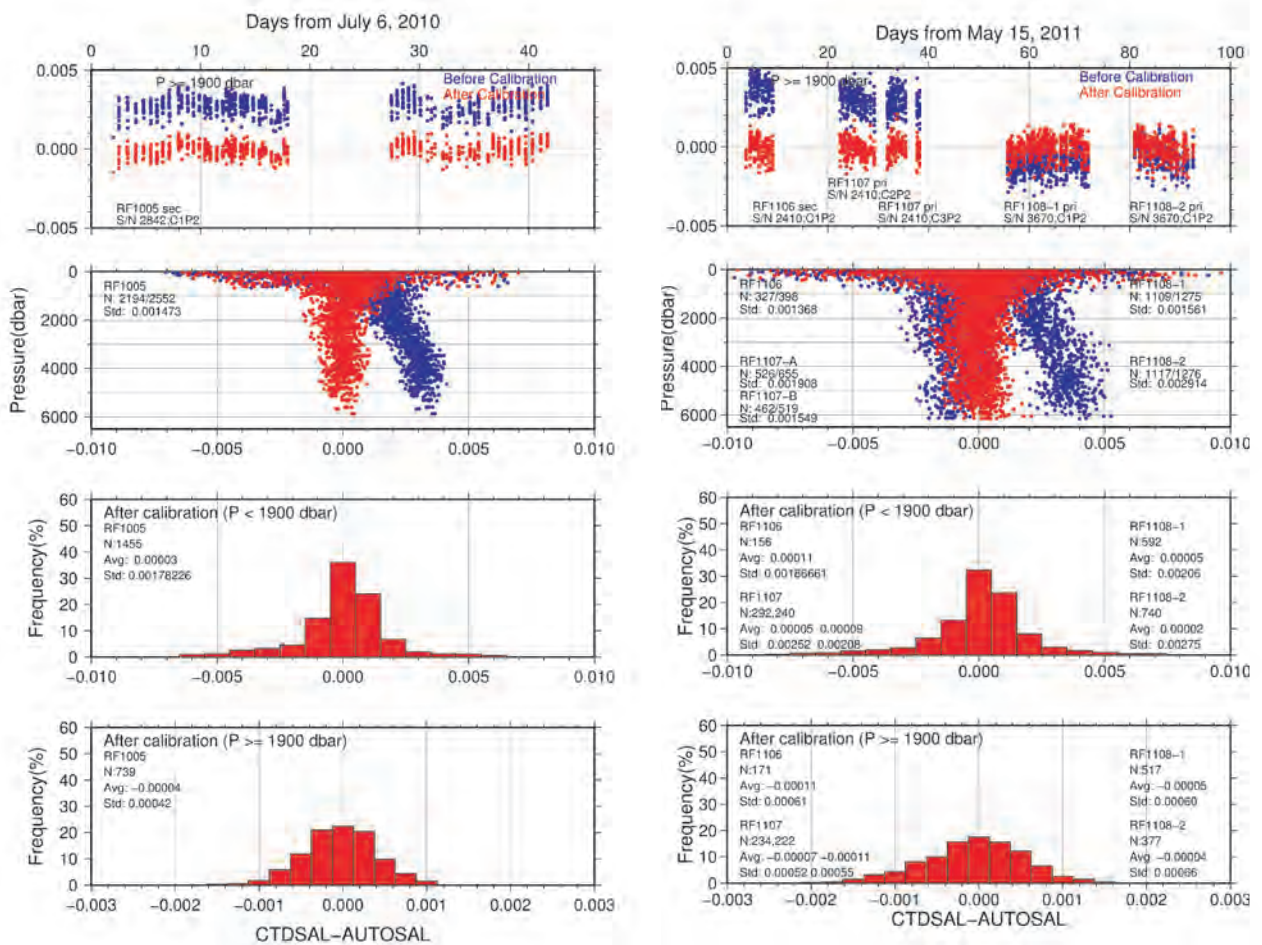
第 5 図 (左) 凌風丸 10-05 次航海 (P9 再観測) と (右) 11-06 ~ 08 次航海 (P13 再観測) の水温補正結果
 青は補正前, 赤は補正後. 上から, SBE3plus と SBE35 との差についての時間変化, 圧力座標, 1900dbar 以浅のヒストグラム, 及び 1900dbar 以深のヒストグラムを示す.

えることによる確認が必要である。更に、比較可能性を確保するためには、校正に用いられている水の三重点とガリウムの融点のセルに関する国際比較も必要である。

電気伝導度 (C) センサーについては、AUTOSAL (カナダ Guildline 社製 8400B) による採水分析値との差をもとに補正値を求めるという現場校正を行った。測定で重要なことは、測定室の室温と水槽内温度の管理 (状況の監視) と装置の状態の把握である。そこで、室温と水槽内の温度をモニターするため、高精度の温度計 (カナダ Guildline 社製 Guildline9540) によって室温と水槽内温度をモニターした。装置の安定性については、SSW と 20L ロンテナーに採取した sub 海水をサンプル測定のために定期的に測定した。そして、SSW の時間変化をもとに補正係数を求め、C

センサーを補正した。航海によって異なるセンサーを使用した。最終的な CTD の塩分値と採水分析値の差はほぼ ± 0.001 の範囲に収まっている (第 6 図)。また採水についても、洗いや採水量について個人差がないように徹底した。

溶解酸素 (DO) については、DO センサー (JFE Advantech 社製 RINKO III ; 測定原理等については http://ocean.jfe-advantech.co.jp/html/english_top.htm を参照) の出力値 (0-5V 電圧値) と採水分析値により、Uchida *et al.* (2008) の式にもとづき補正係数を求めた。採水分析値との差は $\pm 1 \mu\text{mol/kg}$ の範囲に収まっている (第 7 図)。DO センサーを導入したことにより、水温、塩分とともに連続した微細な鉛直構造を知ることができるようになったことで、これまでの知見を見直すことになる可能性がある。また、分析値が正常値



第 6 図 (左) 凌風丸 10-05 次航海 (P9 再観測) と (右) 11-06 ~ 08 次航海 (P13 再観測) の塩分補正結果

青は補正前、赤は補正後。上から、SBE4C と採水塩分測定値との差についての時間変化、圧力座標、1900dbar 以浅のヒストグラム、及び 1900dbar 以深のヒストグラムを示す。

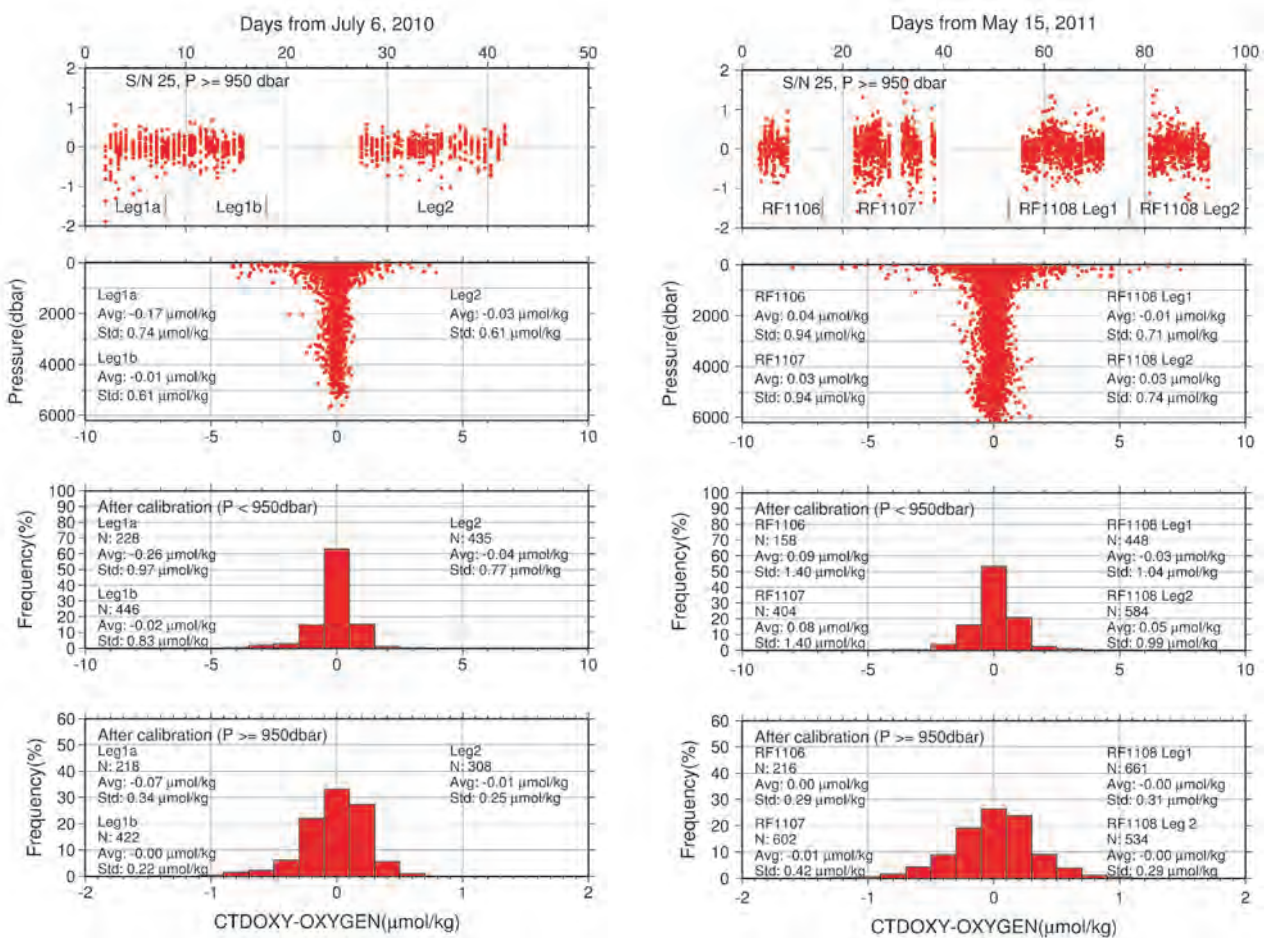
か不良値かという判断する品質管理については、DO センサーの値と比較することで、その判断が容易になった。

6. 再観測から得たものと今後について

今回の体制強化と再観測の実施によって、追跡可能性と比較可能性を確保し、不確かさを付加するかという課題に対応できる測定手順と観測技術を得ることができた。また再観測の実施により、北西太平洋における長期変動監視のための基準となるデータが取得できた。WHP-P9 と P13 は共に南北測線なので、今後、東西の WHP 測線と組合せた解析により海盆スケールでの変動の実態を知ることが期待される。更に、海盆スケールでの気候変動把握に資する長期モニタリング観測展開に

向けた、将来的な観測計画策定にも役立てることができであろう。

一方、WHP 再観測の実施とともに、近年ヨーロッパと米国のグループを中心にデータ統合作業が盛んである。既に 1990 年代の WOCE と JGOFS における炭酸系データを統合した GLODAP (Global Ocean Data Analysis Project) データセットが完成している。その後、大西洋・北極海・南大洋のデータ統合作業が行われ、各航海間の値を補正するためのオフセット値が付加された CARINA (Carbon dioxide in the Atlantic Ocean) が作成されている。太平洋については、北太平洋海洋科学機関 (PICES : North Pacific Marine Science Organization) の炭素・気候分科会 (S-CC : Section on Carbon and Climate) が中心と



第 7 図 (左) 凌風丸 10-05 次航海 (P9 再観測) と (右) 11-06 ~ 08 次航海 (P13 再観測) の DO センサー補正結果上から、DO センサーと採水測定値との差についての時間変化、圧力座標、1900dbar 以浅のヒストグラム、及び 1900dbar 以深のヒストグラムを示す。

なって作業を進め、2012年にPACIFICA (Pacific Ocean Interior Carbon) が完成した。PACIFICAは、CARINAの手法を継承し、統計的な手法によるオフセット値を求めている。しかし、実際に解析を行ってみると疑問となる値が存在しており悩ましいものである。今後は国際標準を用いた測定を普及させることで、このような苦労を軽減しデータ統合作業も一層進んでいくことを期待したい。

海洋環境解析センターでは、WHPワンタイムと再観測のデータを解析し、「海洋の健康診断表」において、「海洋中の二酸化炭素蓄積量」(http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/a_2/co2_inventory/inventory.html)と「北西太平洋の底層の水温変化」(http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/b_1/deep/137e_deep.html)に関する情報提供を開始した。これらの項目については、定期的実施する高精度観測結果をもとに毎年情報提供できるように、観測内容を工夫して継続していくとともに、海域を拡張し情報を拡充していく予定である。また、再観測のデータは、品質管理が終了のものから、SIOにあるCCHDO (CLIVAR and Carbon Hydrographic Data Office) に提出し、国内外の研究者に使われることになっている。既に提出したWHP-P9再観測のデータについては、数名の研究者から連絡や問合せがあり、例えばPurkey and Johnson (2012) で使用されている。

謝辞

WHP-P9とP13の再観測の実施については、凌風丸の直井利明船長、佐々木修船長、加藤徹船長他乗組員の皆さんの協力に感謝いたします。また、これまでに経験のないハードな観測航海に乗船し、観測データを取得してくれた乗船観測員の皆様に感謝いたします。

参考文献

- 青山道夫 (2005) : 海水中塩分測定用標準のトレーサビリティに関する研究. 平成14年度~平成16年度科学研究補助金 (基盤研究 (C) (2)) 研究成果報告書.
- Aoyama, M., D. J. Hydes (2010) : How do We Improve the Comparability of Nutrient Measurements?, *Comparability of nutrients in the world's ocean.*, M. Aoyama (Chief Editor) , 148pp.
- Budeus, G., W. Schneider (1998) : In-situ temperature calibration: A remark on instruments and methods. *International WOCE Newsletter*, 30, 16-18.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) , *Climate change (2007) : The physical science basis, summary for policymakers*, 18 pp., World Meteorol. Organ., Geneva, Switzerland. (日本語訳は, <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html> に掲載されている)
- 金子郁雄 (1998) : 世界海洋循環実験計画 (WOCE). 測候時報海洋気象特集号, 第65巻特別号, S159-S161.
- Kaneko, I., Y. Takatsuki, H. Kamiya and S. Kawae (1998) : Water property and current distributions along the WHP-P9 section (137°E-142°E) in the western North Pacific. *J. Geophys. Res.* , 103, 12959-12984.
- Kaneko, I., Y. Takatsuki, H. Kamiya (2001) : Circulation of Intermediate and Deep Waters in the Philippine Sea. *J. Oceanogr.*, 57, 397-420.
- 金子郁雄 (2002) : 気象庁によるWOCE (世界海洋循環実験計画) 海洋観測の成果. 測候時報海洋気象特集号, 第69巻特別号, S147-S160.
- 河野健 (2010) : 新しい海水の状態方程式と新しい塩分 (Reference Composition Salinity) の定義について. *海の研究*, 19, 2, 127-137.
- Gould, W. J., J. M. O' Toole, J. Church, S. Rintoul, S. Wijffels, L. Talley, P. Robbins, G. C. Johnson, S. Imawaki, N. Suginoara, K. Hanawa, P. Kolterman, S. Osterhus, H. Freeland, A. Clarke and H. Mercier (2001) : *Hydrographic Section Observations., Observing the Oceans in the 21st Century.*, C. J. Koblinsky and N. R. Smith (Eds.) , 604 pp.
- Gouretski, V. V. , K. Janke (2001) : Systematic errors as the cause for an apparent deep water property variability: global analysis of the WOCE and historical hydrographic data., *Prog. in Oceanogr.*, 48, 337-402.
- Johnson, G. C., P. E. Robbins, G. E. Hufford (2001) : Systematic adjustments of hydrographic sections for internal consistency. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 18, 1234-1244.

- Kawano, T., M. Aoyama, T. Joyce, H. Uchida, Y. Takatsuki and M. Fukasawa (2006) : The Latest Batch-to-batch Difference Table of Standard Seawater and Its Application to the WOCE Onetime Sections. *J. Oceanogr.*, **62**, 777-792.
- Kawano, T. (2010) : Method for Salinity (Conductivity Ratio) Measurement., GO-SHIP Repeat Hydrography Manual : A Collection of Expert Reports and guidelines. IOCCP Report No 14, ICPO Publication Series No. 134, version 1.
- McTaggart, K. E., G. C. Johnson, M. C. Johnson, F. M. Delahoyde, J. H. Swift (2010) : Notes on CTD/O2 Data Acquisition and Processing Using Seabird Hardware and Software (as Available) ., GO-SHIP Repeat Hydrography Manual : A Collection of Expert Reports and guidelines. IOCCP Report No 14, ICPO Publication Series No. 134, version 1.
- 永田 豊・大谷清隆・柏井 誠 (1992) : 北太平洋亜寒帯循環. *海の研究*, **1**, 75-104.
- Purkey, S. G., G. C. Johnson (2012) : Global contraction of Antarctic Bottom Water between the 1980s and 2000s., *J. Climate*. doi:10.1175/JCLI-D-11-00612.1.
- Swift, J. H. (2010) : Reference Quality Water Sample Data: Notes on Data Acquisition., GO-SHIP Repeat Hydrography Manual : A Collection of Expert Reports and guidelines. IOCCP Report No 14, ICPO Publication Series No. 134, version 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.
- Uchida, H., T. Kawano, I. Kaneko, and M. Fukasawa (2008) : In situ calibration of optode-based oxygen sensors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 2271-2281.
- WOCE Operations Manual (1994) : Requirements for WOCE Hydrographic Programme Data Reporting, WHPO Publication 90-1, Revision 2, May 1994, (WOCE Report 67/91) , 144 pp.