

第13回流体物性クラブ@JAMSTEC

海水の密度測定の現状と 屈折率測定が開く未来

内田 裕 (JAMSTEC)

1

話の流れ

- 海洋の大循環
- 海洋の観測
- 海水密度の測定

話の途中でも質問を歓迎します！

2



<2004年公開の映画>

2002年南極半島ラーセンB
棚氷の崩壊（12000年の歴史
滋賀県ぐらゐ）

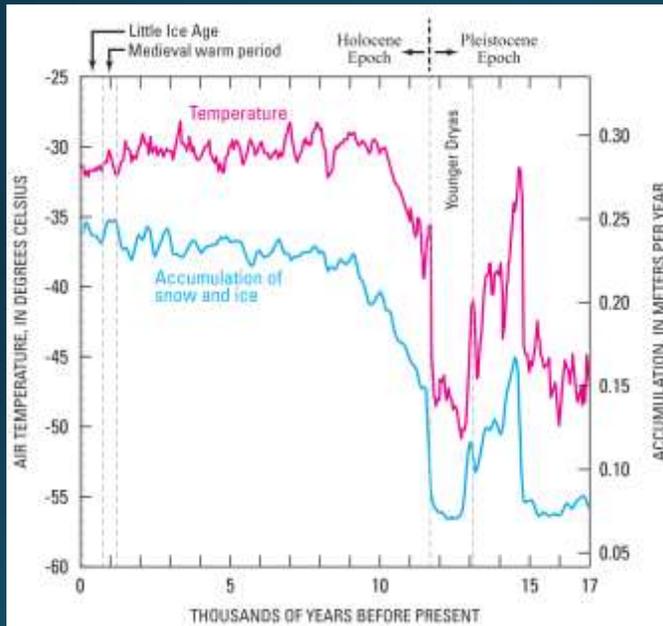
温暖化で北アメリカ大陸の
氷床が融解
大量の淡水が大西洋に流入
し海面の塩分が低下
大西洋の低緯度から高緯度
に運ばれ、グリーンラン
ド沖で沈み込む海水の循
環が停止
低緯度の温かい海水を高緯
度に運べなくなり・・・

3



氷河期の到来・・・

4

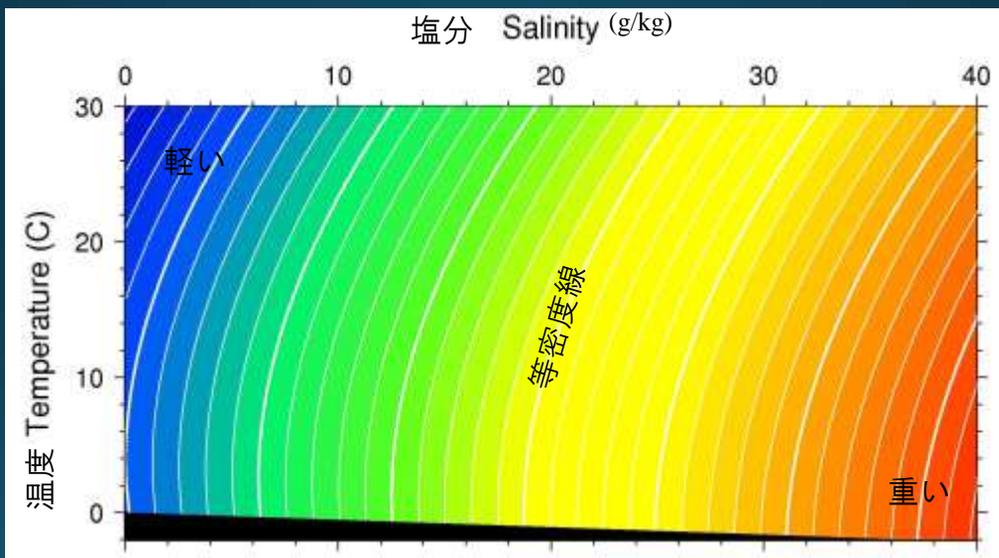


グリーンランドの氷床コアの酸素同位体比から見積もった気温の変化

ヤンガードリアス・イベント
(12800年前、寒の戻り)

5

循環を支配する海水の密度（温度、塩分、圧力の関数）



6

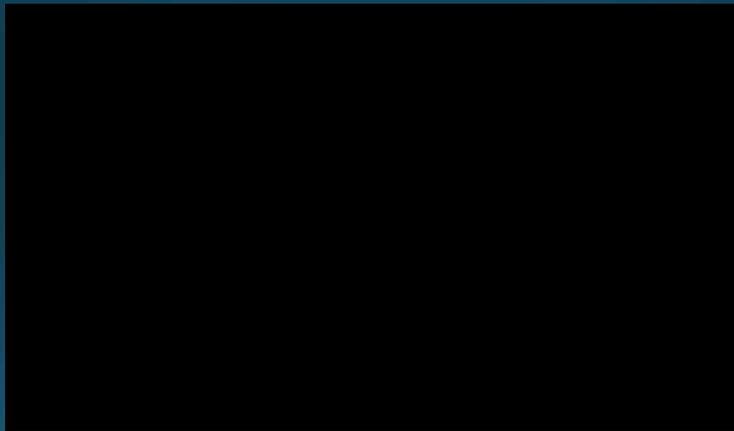
「死のつらら」 ブライニクル 熱と塩分が駆動する対流現象



BBCが南極ロス海で撮影：気温-20℃、海水温-1.9℃

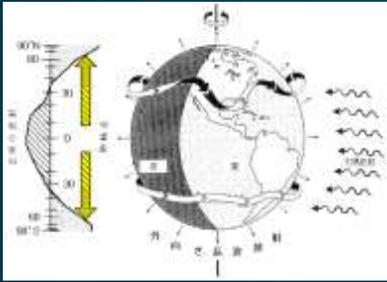
7

「死のつらら」 ブライニクル 熱と塩分が駆動する対流現象

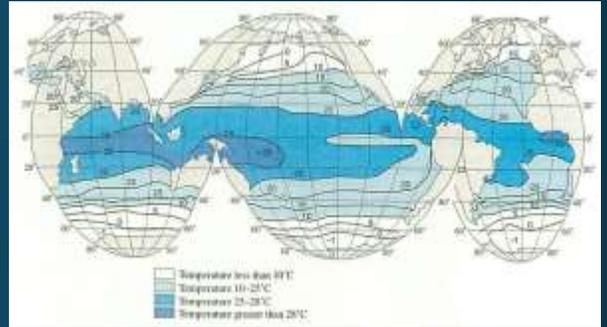


8

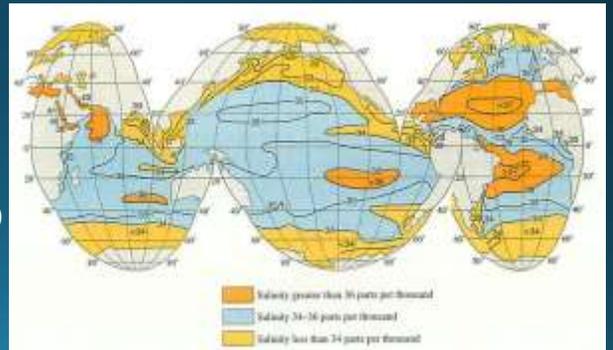
海洋大循環



海面水温
(熱輸送)



海面塩分
(淡水輸送)



9

大規模な対流現象 (海洋大循環)

(2倍速)

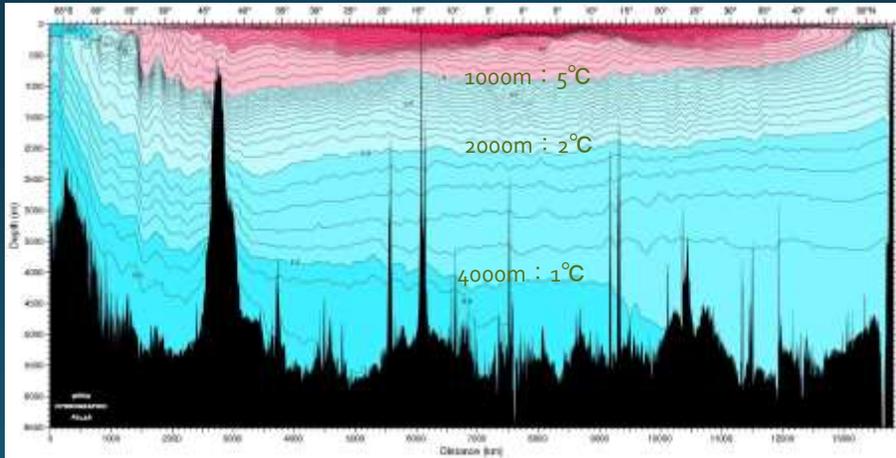
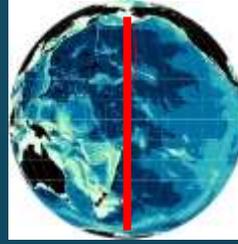


10

海洋大循環

太平洋の水温南北断面

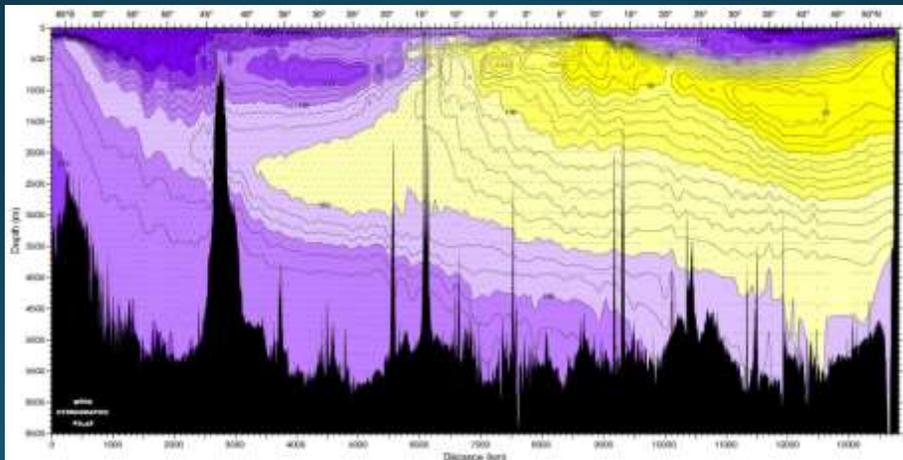
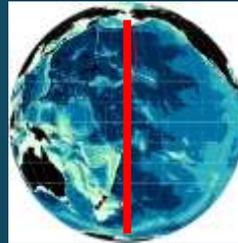
表面：30°C



11

海洋大循環

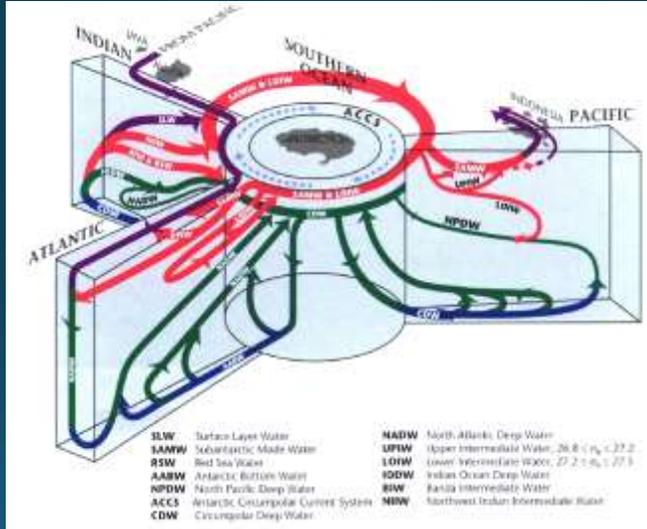
溶存酸素の南北断面
(トレーサーとしても利用)



12

海洋大循環（オーバーターン）

インド洋



太平洋

大西洋

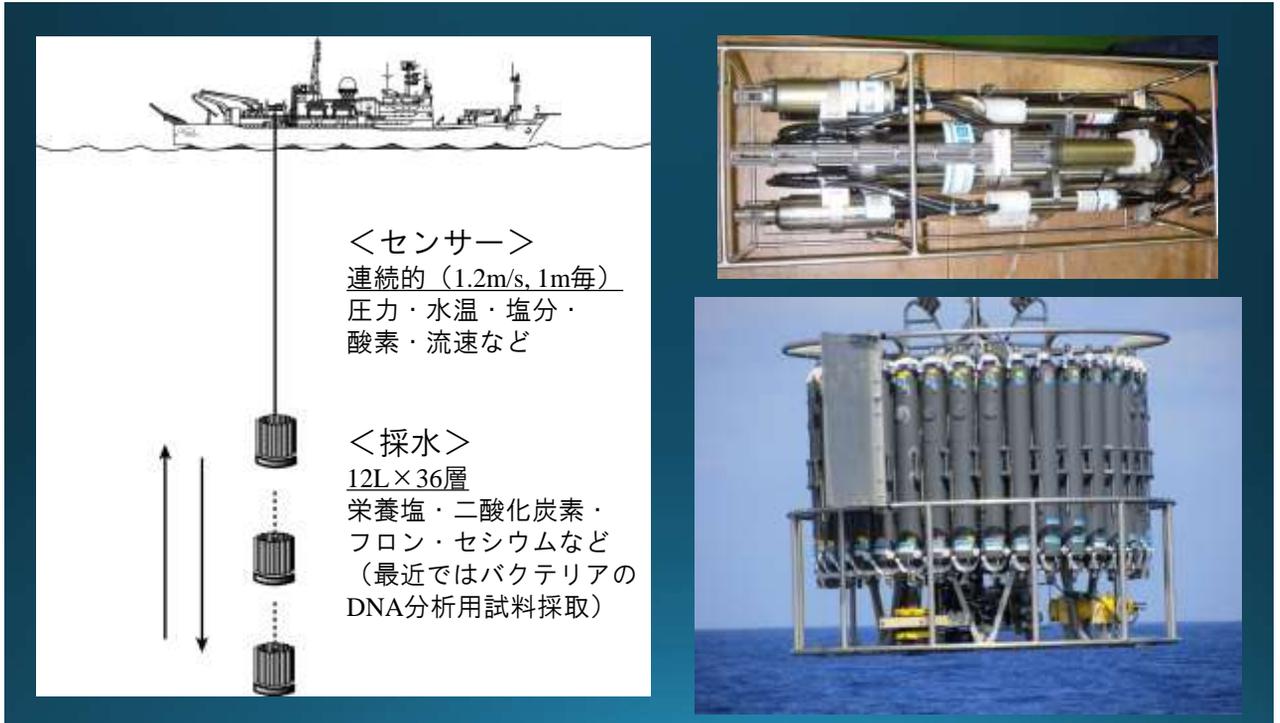
13

海洋の観測

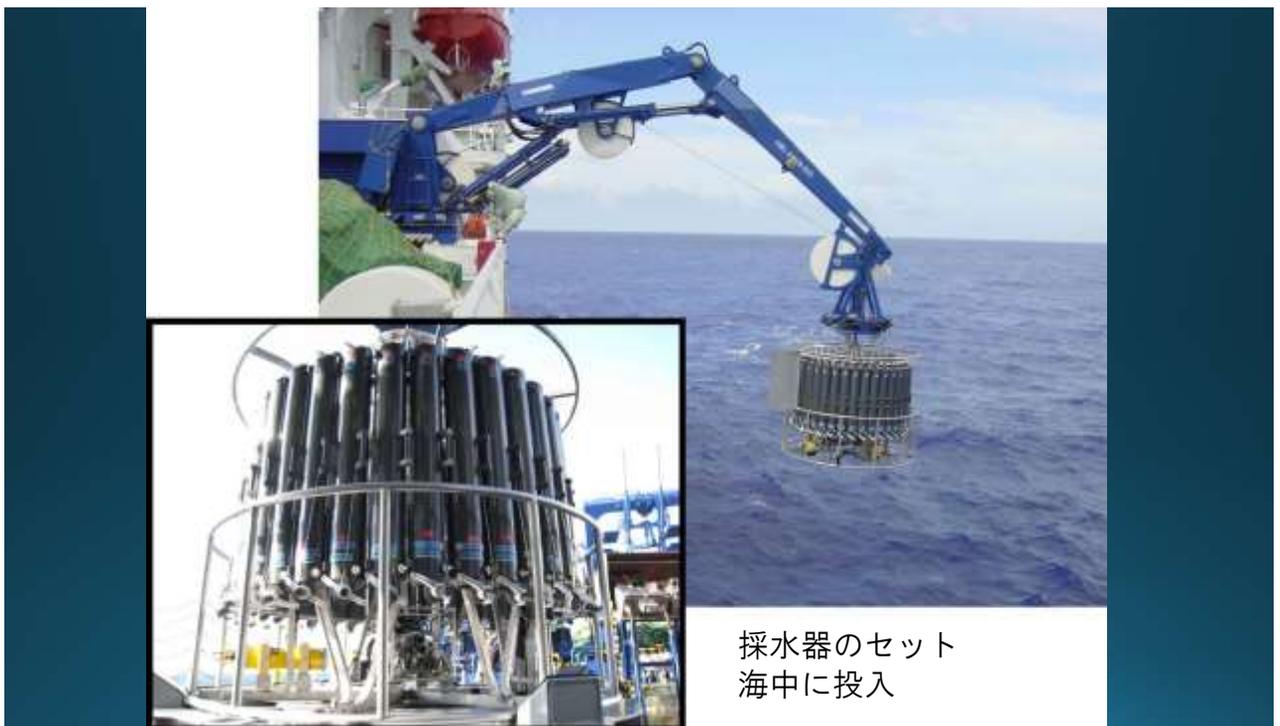
「みらい」



14



15



16

採水ビンの準備



17

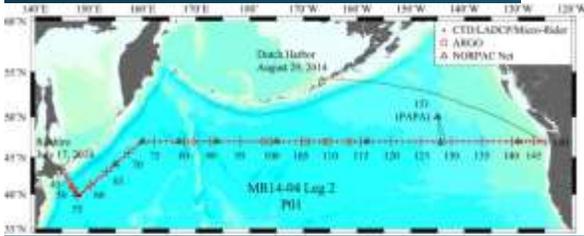
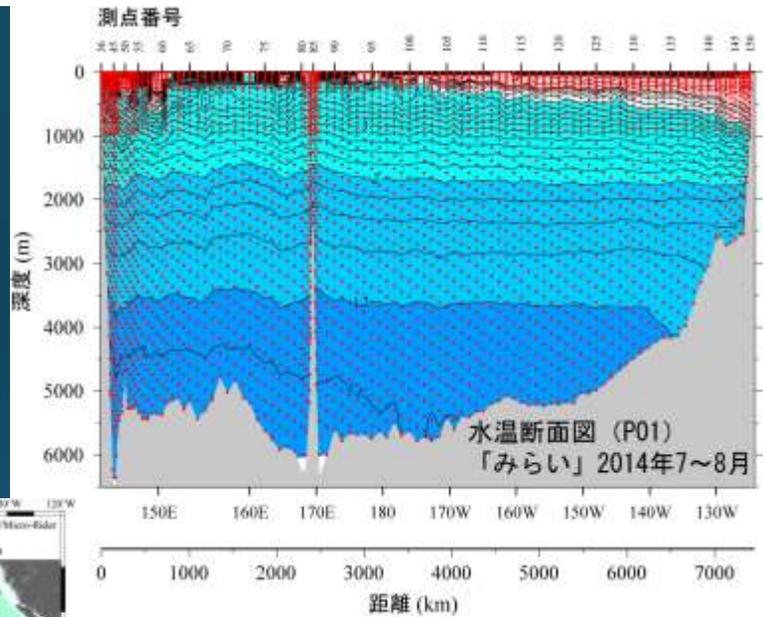


採水開始
(次の測点に移動)
採水サンプルの分析

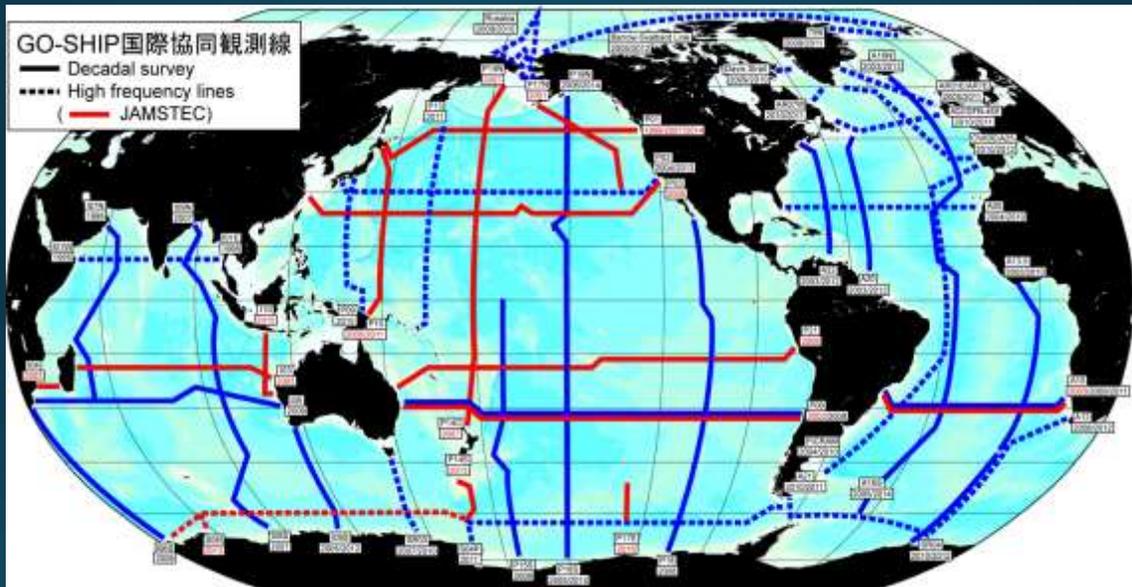
18

観測例

- 2014年7—8月
- 45日間
- 116測点
- 約4300採水層

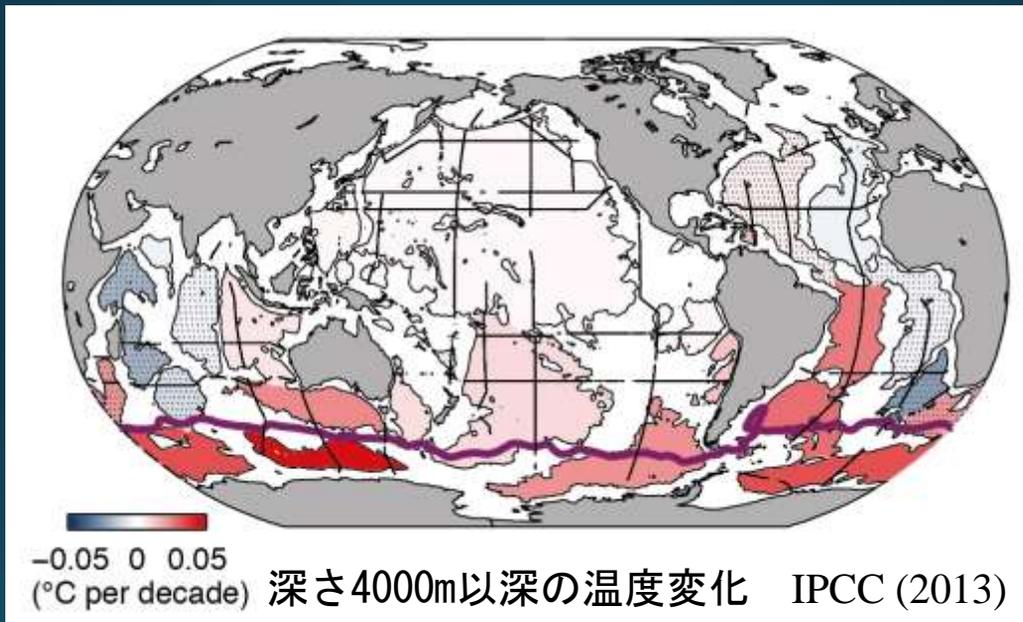


19



1990年代に観測した測線の再観測

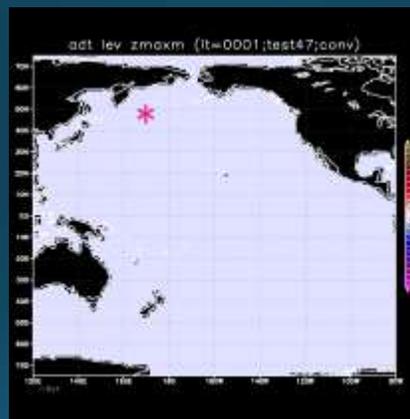
20



北太平洋で10年当たり 0.002°C (2mK) 程度の変化

21

底層昇温の原因



昇温の原因を数値モデルを使って調べると、約40年前に南極のアデリー海岸沖で作られる冷たい海水の量が減ったという情報が等密度面の上下動（波動）として伝播

22

海水密度（水温、塩分） 溶存酸素の高精度測定

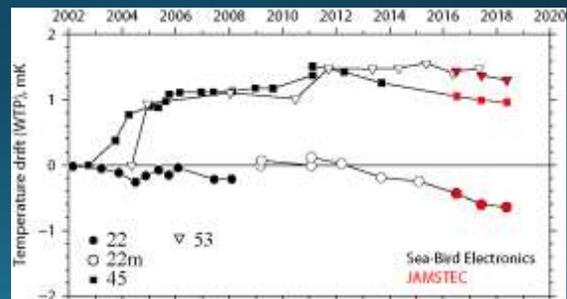
23

水温データの高精度化

- 温度の国家標準を用いた深海用基準温度計の不確かさ評価
→ 産総研温度標準研究グループとの共同研究
- 深海用基準温度計の現場および実験室での圧力依存性評価
- 船舶CTD観測による水温測定の不確かさ： 0.7 mK



SBE社CTDと深海用基準温度計（SBE35）



深海用基準温度計の経時変化（水の三重点：0.01°C）

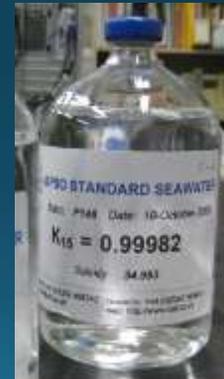
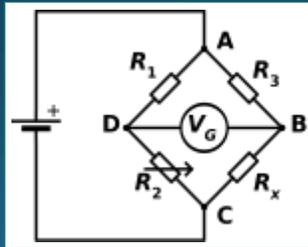
24

塩分データの高精度化

- 電気伝導度塩分計 Guildline社 AUTOSAL 8400B
- IAPSO標準海水 (OSIL社)



ホイートストン・ブリッジ



25

塩分データの高精度化

- 電気伝導度塩分計の校正に使用するIAPSO標準海水のバッチ間オフセットの評価

Kawano et al. (2006)

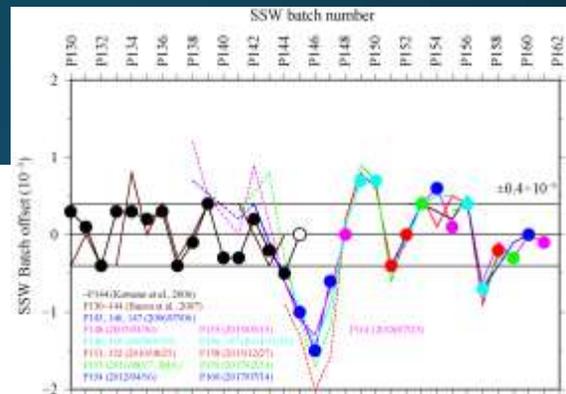
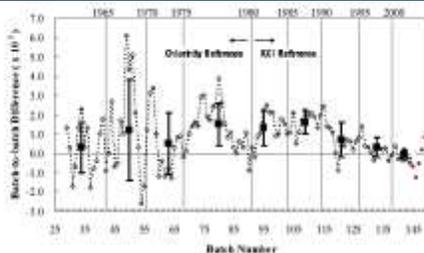


Fig. 5. Batch-to-batch differences with reference to the recent batches. X-axis is batch number of SSW and Y-axis is batch-to-batch difference in salinity. Open diamonds (\diamond) show batch-to-batch difference of each batch and squares show an average over every 5 years. Error bar represents a standard deviation.

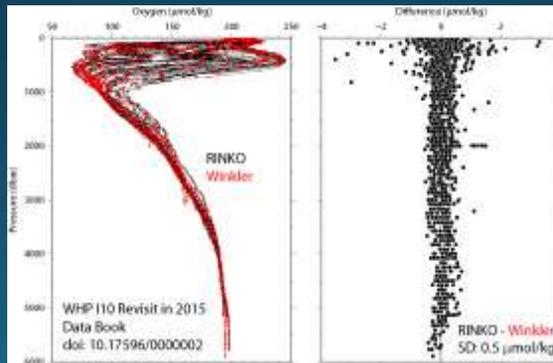
26

溶存酸素データの高精度化

- 高速応答な光学式溶存酸素センサー（RINKO）の導入
- 光学式センサーの補正式、圧力ヒステリシス補正法の確立
→ JFEアドバンテック（株）との共同研究



JFEアドバンテック社
光学式溶存酸素センサー
(RINKO)



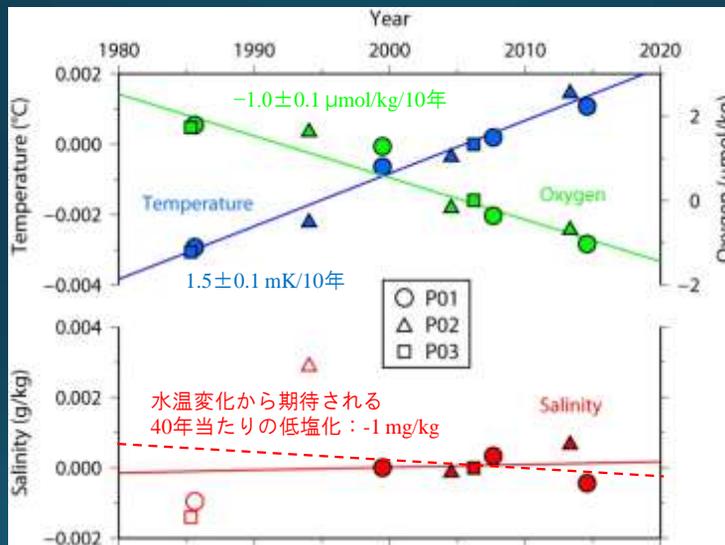
溶存酸素の鉛直分布（左）

ウインクラー分析値と
センサー測定値の差（右）
（差の標準偏差は
0.5 $\mu\text{mol/kg}$ ）

（ウインクラー分析値との
比較から求めた8個の現場
校正係数でセンサーを校正）

27

北太平洋の4000m以深の平均値の長期変化

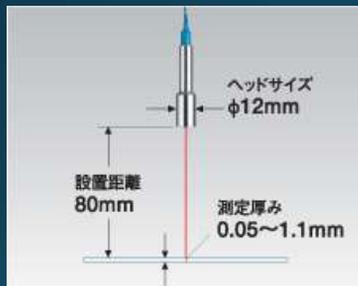


より高精度（高分解能）な塩分測定が必要！

28

屈折率測定が開く未来

- 分光干渉レーザー変位計（厚み計：キーエンス社 SI-F80）
 - 厚み測定の分解能は 1 nm

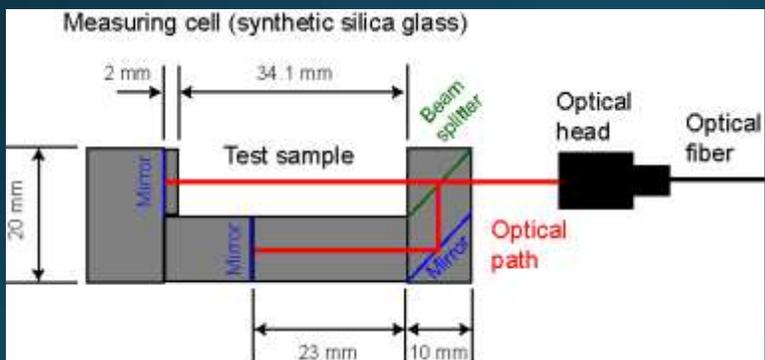


- 屈折率測定に基づく海水密度の超高感度測定
 - 屈折率密度センサーの開発（産総研 粥川さんと共同研究）

29

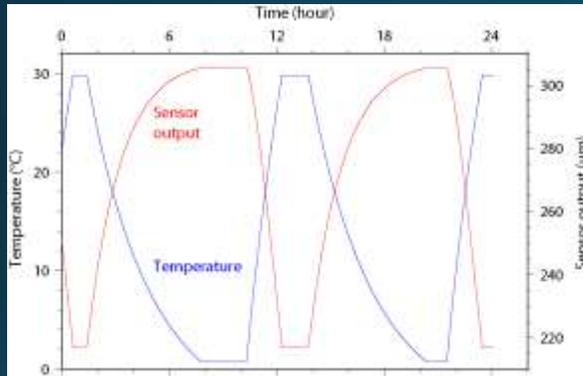
屈折率測定に基づく海水密度の超高感度測定

- 分光干渉レーザー変位計（厚み計）
 - 基準セル（純水やガラス）と海水の屈折率差

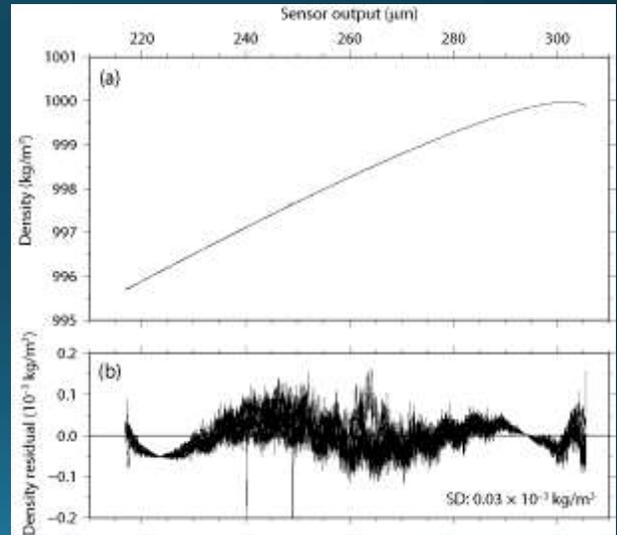


30

屈折率密度計による純水の測定結果

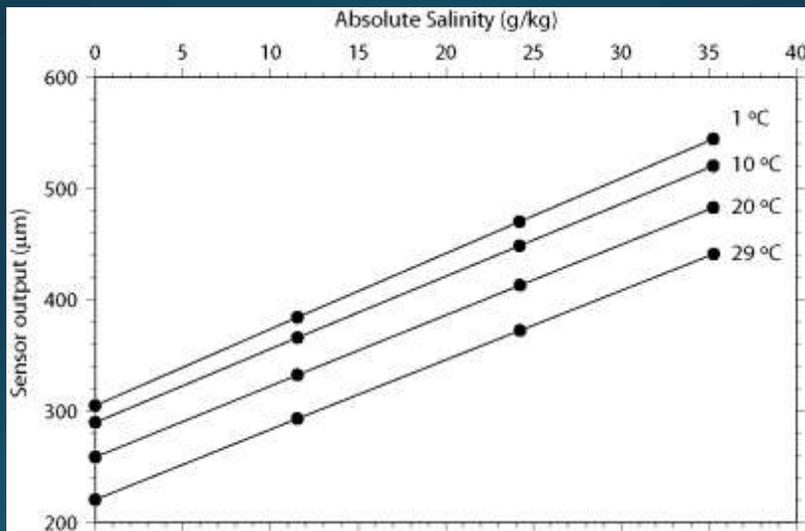


恒温水槽内で測定



31

屈折率密度計による海水の測定結果



32

屈折率密度センサーの仕様

サイズ	Φ210 mm x 500 mm
空中重量	14 kg
耐圧	10,500 m
温度範囲	~ 50°C
塩分範囲	0 - 120 g/kg
分解能	0.00006 kg/m ³ @ 35 g/kg 0.00012 kg/m ³ @ 1°C

電気伝導度塩分計AUTOSAL 8400Bの分解能: 0.00015 kg/m³
振動式密度計Anton-Paar社DMA 5000Mの分解能 : 0.001 kg/m³

センサーを高精度に校正するための密度標準海水が必要！



33

マルチパラメータ標準海水の開発

(株) KANSOテクノスと共同研究

- 駿河湾深層水 (400 m)
- 栄養塩標準海水と同じ製造技術 (生物活動の停止)
 - オートクレーブ (120°C、2時間を2回)
- 500 L ステンレス容器
- 500 mLアルミ缶+プラスチック中栓+ブチルゴム
 - ガス・水蒸気バリア性、1ロット330本程度



大容量オートクレーブ

クリーンルームで分注



液中秤量法による
海水密度絶対測定
→ 産総研 粥川さん

34

まとめと課題

- 分光干渉レーザー変位計を用いた屈折率密度センサー
 - 超高感度な海水密度の測定が可能 (0.1 ppm)
 - 海溝最深部 (10,000 m) までの測定 (4,9月の「かいめい」航海)
 - 広範な塩分レンジに対応 (0-120 g/kg)
- 屈折率密度センサーを高精度に校正するための標準海水
 - SIトレーサブルで高精度な密度絶対測定
- センサー出力値から密度への変換式
 - 出力値 (屈折率差)、温度、圧力の関数