

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13571

研究課題名(和文) 光周波数コムを利用した屈折式海水塩分センサの開発

研究課題名(英文) Salinity measurements by using a refractive-index sensor with an optical frequency comb

研究代表者

粥川 洋平 (KAYUKAWA, Yohei)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・工学計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：50371034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：海洋大循環と呼ばれる、地球規模の海水の運動を解明することは、地球温暖化メカニズムを把握するうえでも極めて重要である。本研究では、海中に沈めて直接塩分測定が可能な絶対塩分センサの実用化を目指し、その基礎技術となる高精度な海水屈折率測定装置の開発を目指した。測定原理としては、SLDなどを用いた分光干渉センサと同様の原理を用いた。純水および海水で満たされた2つの光学セルを通して反射したビーム同士の干渉スペクトルを解析することで、純水と海水の屈折率差を求めることができる。発振波長範囲420 nm～2 μmを持つ広帯域光周波数コムを光源として採用することで、海水の屈折率を高精度に測定可能なことを示した。

研究成果の概要(英文)：Measuring the absolute salinity of sea water is important to understand the mechanism of oceans. In order to develop a new absolute-salinity sensing device with refractive index measurement which can be used under water, a precise refractive index measurement technique was developed in this study. The measurement principle is based on spectral a method known as an interference displacement sensor. Interference fringes from the difference between the optical length of a pure water and a sea water cell was observed as a interference spectrum by a optical spectrum analyzer. In the present study, it was shown that the refractive index can be measured precisely by employing an optical frequency comb which has a broad range of optical frequency from 420 nm to 2 μm.

研究分野：流体熱物性、精密計測

キーワード：レーザー計測 海洋科学 センサ 超精密計測 光周波数コム 屈折率 海水 塩分

1. 研究開始当初の背景

深海における水圧は最大で約 100 MPa に達し、海水の透明度もせいぜい十数メートルであるため、それより深い海洋中の減少を観測することは様々な困難が伴う。一方で、海流の毎年の変化がその年の気候に影響を与えるなど、海水の運動は気象に大きな影響を与える。このように、海洋大循環と呼ばれる、深層海流を含む地球規模の海水の運動を解明することは、地球温暖化メカニズムを把握するうえでも極めて重要である。全球の気候シミュレーションにおいてはもっぱら数値シミュレーションが用いられており、その入力値となる様々な観測データが必要である。日夜、多くの海洋観測船が世界中の海洋で観測を行っている。

海洋観測量の中で海水のメカニズムを解明するために最も重要なパラメータは海水の密度である。しかしながらその精密測定は容易ではない。そこで、海水の塩分が密度に代わって重要な役割を果たしている。塩分の定義は、単位質量の海水中に溶け込んでいる溶質の総量であり、これを絶対塩分 S_A とも呼ぶ。その直接測定は困難であるため、「海水 1 kg 中に 32.4356g の塩化カリウムを含む溶液と 15 , 1 気圧において電気伝導度が等しい海水の塩分を 35」と定義する実用塩分 S_P が広く用いられるようになった。より正確な塩分の指標として、実用塩分には反映されない、ケイ酸塩や硝酸塩といった電気伝導度に寄与しない組成を考慮した Reference composition salinity, S_R が提案され、これらが海洋分野で塩分を議論する際の一般的な定義となっている。しかしながら、海域によっては絶対塩分との差が大きく、図 1 に示すように、例えば北太平洋では最大で $0.03 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ の誤差が生じることが知られている [1]。

このように、密度アノマリーが原因となり、電気伝導度センサ単体による計測では、絶対塩分を正しく評価することができない。分解能に関して、例えば太平洋の深度 5000 m における北緯 $20^\circ \sim 50^\circ$ の塩分勾配 (0.01 g/kg) に対して電気伝導度センサ ($0.2 \sim 0.3 \text{ mg/kg}$) では塩分プロファイルの空間分解能は 100 km 以上になってしまう。水温の分布と同等に議論するためには電気伝導度センサの 20 倍の精度が必要である。

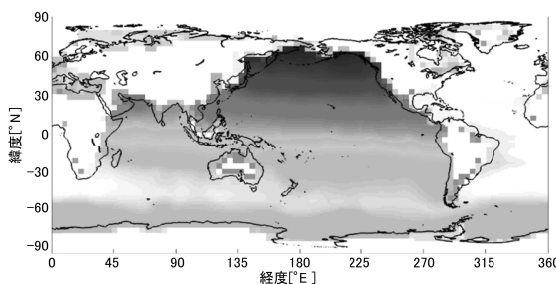


図 1: 絶対塩分と実用塩分の違いによる海水密度の差 (アノマリー) [1]

2. 研究の目的

このように、電気伝導度による海水の塩分測定はその分解能の高さ、ならびにセンサを海洋中に直接沈めることができるという利点から標準的な方法として長年利用されてきたが、絶対塩分を与えるものではない。このため、様々な深度から採水した海水サンプルを観測船内または陸上に持ち帰り密度を測定する取り組みも並行して行われている。この密度測定にはもっぱら振動密度計が用いられるが、求められる精度は相対不確かさで 1 ppm という水準であり、振動密度計の感度の限界に近い。このレベルでは、振動密度計の校正に用いられる純水と海水の密度差に起因する計器の非直線性の影響が無視できないと考えられる。

上記の現状を踏まえ、本研究では、海水の絶対塩分をより正確に直接計測する方法として、電気伝導度計 (CTD) に代わる屈折率センサの実用化を目指すことを目的とする。

屈折率と絶対塩分の関係は直線性が高く、アノマリーの懸念がない。報告者はこれまでに、マイケルソン干渉計や、光周波数コムを用いた測定技術を開発し、液体の屈折率測定の高精度化を進めてきた。分解能をさらに高め、電気伝導度センサにかわる高精度な屈折率センサを開発し、密度アノマリーの問題解決を図ると同時に測定精度の大幅向上を狙う。これにより、例えばこれまで観測できなかった微小な変化、例えば低層の塩分濃度の長期的低下といった現象を定量的に捉えることができれば、水循環の強化や極地の氷の融解といった地球温暖化メカニズムの解明に大きく貢献すると考えられる。

3. 研究の方法

本研究では、上記の目的達成のため、海中に沈めて直接塩分測定が可能な屈折式絶対塩分センサの実用化を目指し、その基礎技術となる高精度な海水屈折率測定装置の開発を目指した。

屈折率の測定方法には、いわゆる屈折角の計測に基づく最小偏角法やアッペ式屈折系 (臨界角法) が知られている。しかしながら、屈折角を極めて微小な分解能で計測することは容易ではなく、これらの幾何光学的手法の精度的限界は約 10 ppm であった。そこで本研究では、報告者がこれまでに開発したマイケルソン型分光干渉計 [2] による液体屈折率絶対測定装置のように、高い分解能を特長とする光波干渉法を用いることとした。

マイケルソン干渉計は、原理的にミラーの空間的な移動メカニズムを必要とするため、海水中に沈めた状態での測定には適さない。そこで、ミラーの走査ではなく、光周波数をスキャンする方式を用いることとした。

光周波数の走査により干渉測定 of 精度向上を実現する方法として、ヘテロダイン干渉計などが良く知られているが、その周波数可

変幅は数十～数百 MHz である。ミラーを走査しないフィクストパス型の干渉計では、本研究の目標である、電気伝導度センサを上回る分解能を実現することは難しい。そこで本研究では、可干渉なレーザーの縦モードを連続したスペクトルで出力可能な白色光源である、光周波数コムを利用することとした。これを光スเปアナで検出することで、光ヘテロダイン方式と比較して光周波数走査範囲を約 10^6 倍に拡張することが可能である[3]。

図2に、本研究において開発した、光周波数コムを光源とした分光干渉計による海水屈折率測定システムの概要を示す。

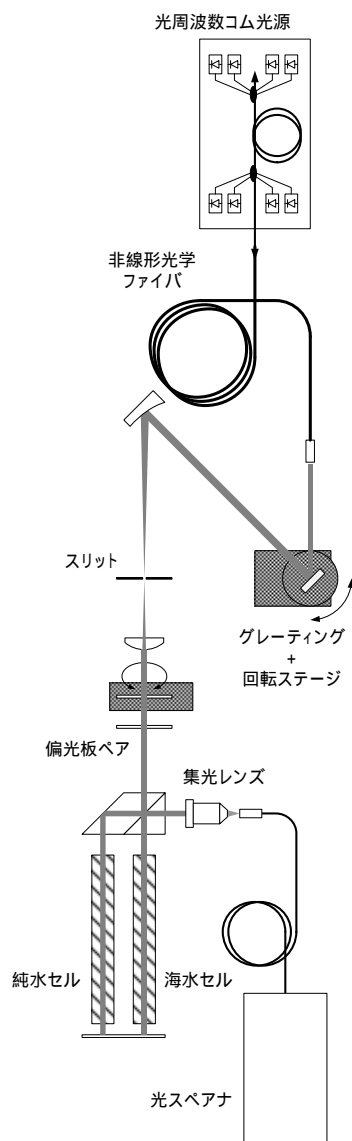


図2：本研究で開発した、光周波数コムを光源とした分光干渉計による海水屈折率測定システム

光周波数コム (Fianium, SC450-2W-U) は、モードロック・ファイバーレーザーによって発生するフェムト秒光パルス为非線形光学ファイバおよびファイバアンプを用いて増幅し、約 420 nm ~ 2 μm の範囲で連続的な

20 MHz 間隔の光コムを出力する。これをグレーティングを用いて周波数軸上に一定幅の波長を取り出し、図示されるように広帯域ビームスプリッタで分割することで純水および海水で満たされた2つの光学セルを通して反射したビームが合成され、光スペアナに入る。純水セルと海水セルの光路長差がその波長の偶数倍の時には強め合い、奇数倍の時には弱めあうため、光スペアナで観測される干渉パターン(スペクトル)を解析することで、純水と海水の屈折率差を求めることができる。

4. 研究成果

本研究では、高精度に温度制御した状態において屈折率計測を可能にすべく、新たに光路長 50 mm の密閉型円筒セル2つを導入した。一つを参照物質である純水で満たし、他方に海水を重点することで屈折率差を測定可能な干渉計を構成した。さらに、これまでに用いていたレーザー分光干渉変位センサに代わり、発振波長範囲 420 nm ~ 2 μm を持つ広帯域光周波数コムを光源として採用し、同波長帯域における干渉スペクトルを光スペアナにより測定することで、純水を基準とし海水の屈折率を高精度に測定可能なことを示した。

引用文献

- [1] IOC, SCOR and IAPSO, The International Thermodynamic Equation of Seawater-2010: Calculation and Use of Thermodynamic Properties, Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides No. 56, UNESCO, Paris, 196 pp. (2010).
- [2] 粥川 洋平, 藤井 賢一, "ダブルパス・マイケルソン干渉計による液体屈折率標準", 第30回日本熱物性シンポジウム 講演論文集 (pp. 389-391), 米沢, (2009).
- [3] Kayukawa, Y. "Measurement of the optical properties in the visible range by using a broad band optical frequency comb", Proceedings of the 18th Symposium on Thermophysical Properties (Paper ID: 1555). Boulder, CO., (2012).

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計2件)

粥川 洋平, 藤田 佳孝, 内田 裕 (海洋研究機構), 海洋モニタリングのための海水密度・屈折率計測技術 (招待講演), 化学工学会 秋季大会, 札幌, 2015.

Y. Kayukawa, H. Uchida, "Absolute salinity and density using a hydrostatic weighing apparatus", Annual Meeting of the International

Association for the Properties of Water
and Steam (IAPWS) , Dresden , 2016.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

粥川 洋平 (KAYUKAWA, Yohei)

産業技術総合研究所

工学計測標準研究部門・主任研究員

研究者番号：5 0 3 7 1 0 3 4