

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610143

研究課題名(和文)ヘテロダインダブルパス干渉計を用いた海水の塩分測定に関する基礎的研究

研究課題名(英文)Basic study on measurement of seawater salinity using heterodyne doublepass interferometer

研究代表者

浅川 賢一 (Asakawa, Kenichi)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・シニアスタッフ

研究者番号：40344288

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、半導体レーザーと音響/光周波数変換器を組み合わせた光源とヘテロダイン・ダブルパス干渉計を用いて、高い測定分解能と安定性を持つ塩分センサが実現可能であることを実証することを目的とした。まず、HeNeレーザーを光源とするヘテロダイン・ダブルパス干渉計を用いて、基礎的な実験を行った結果、マイケルソン干渉計と比較して、温度安定性が1桁以上改善されることを確認した。さらに、半導体光源を用いて実験を行ったが、十分なS/Nを持つ干渉計出力を得ることができたものの、検波を行うロックインアンプに問題があることが明らかになった。今後、パソコンを利用したヘテロダイン検波を試みる予定である。

研究成果の概要(英文)：The object of this project is to show the possibility to realize an optical salinometer having high resolution and stability. First, we built a heterodyne double-pass interferometer with HeNe laser as a light source and evaluated its basic performance. As a result, it was confirmed that the temperature stability is improved by more than an order of magnitude, compared with the Michelson interferometer. Furthermore we incorporated a semiconductor laser as a light source. Although we could obtain interferometer output with sufficient signal to noise, it revealed that there is a problem with the lock-in amplifier for performing the heterodyne detection. We are going to try heterodyne detection using a computer without using the lock-in amplifier.

研究分野：海中工学

キーワード：ヘテロダイン干渉計 ダブルパス干渉計 HeNeレーザー 半導体レーザー 地球温暖化 海洋観測 塩分大洋循環

### 1. 研究開始当初の背景

海水は大気の約 1,000 倍の熱容量を持っており、大気温度の平滑化に重要な役割を果たしている。しかし、本来安定しているはずの深海においても、水温の上昇が観測されている。地球温暖化の本質を理解し、その将来変動の予測精度を高めるためには、大洋の状態とその変化を長期に渡って観測し、理解することが重要である。

海水は、極域周辺で冷却されて深海に沈み込み、約 4,000 年かけて大洋を循環すると言われている。海水が循環することにより、海水に吸収された熱も大洋中に拡散する。この海水の循環を支配するのは海水密度差である。海水密度は水温と水圧、塩分に依存するため、海洋の環境観測では、この 3 つの物理量が長期に渡って観測されている。

従来、塩分は電気電導度を測定して求めてきた。この電気電導度センサは、十分な精度と分解能が得られており、低消費電力化も進んでいるものの、長期的な安定性は不十分で、高精度な観測を行うためには、毎年の校正が必要である。そのため、海洋環境観測用のブイシステムでは、毎年メンテナンスのために大型観測船の航海が必要とされている。観測コストを下げ、観測箇所を拡大し、より高密度の観測網を実現するためには、より高い長期的安定度を持つ塩分センサを実現する必要がある。

一方、屈折率と塩分の間には、ローレンツ・ローレンツの式で表される直接的な関係があることが知られている。そのため、屈折率を用いた塩分測定が新しい測定方法として注目されてきた。これまで、屈折や回折などを用いた様々な光を用いた塩分センサが提案されて開発されてきたが、未だに広く使われている光塩分センサは存在しない。

提案者等は本研究に先立って、HeNe レーザ光源を用いたヘテロダイン・マイケルソン干渉計による観測方法を提案し、検討を進めてきた。ヘテロダイン干渉計を用いることにより、屈折率変動を電気信号の位相変動として計測することができるため、高い測定精度を得ることが期待できる。これまでの研究で、厚さ 0.25mm のセルを挿入したヘテロダイン・マイケルソン干渉計により、0.09% の精度で塩分を測定できることを確認していた。しかし、ヘテロダイン・マイケルソン干渉計では、周辺の温度変動の影響を大きく受けることが、課題として残されていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、半導体レーザと音響/光周波数変換器を組み合わせた光源とヘテロダイン・ダブルパス干渉計を用いて、塩分の測定を行い、電気電導度センサ以上の高い測定分解能と短期的・長期的安定性が実現できることを実証することを目的とした。ヘテロダイン・ダブルパス干渉計を用いることにより、ヘテロダイン・マイケルソン干渉計の課題で

あった周辺温度変動の影響を低減することが期待できる。さらに、半導体光源を用いることにより、小型で取り扱いが容易で、より安定したヘテロダイン干渉計用光源を作り出すことが期待できる。

### 3. 研究の方法

本研究では、半導体レーザを光源とした干渉計を組み立てるのに先だって、まずゼーマン効果をj用いて周波数を安定化した HeNe レーザを光源としたヘテロダイン・ダブルパス干渉計を作成し、塩水と蒸留水の間の屈折率差の測定を行い、その安定性等を評価した。

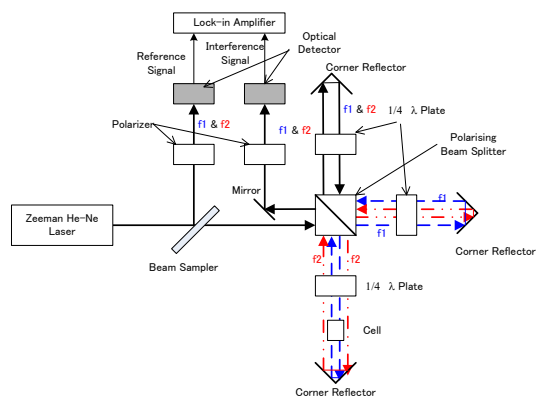


図1 ヘテロダイン・ダブルパス干渉計のブロック図

図1はヘテロダイン・ダブルパス干渉計の基本構造を示したブロック図である。ゼーマン HeNe レーザは僅かに周波数が異なる2つの直交した直線偏光を出力する。この2つの直交した直線偏光を図1では青と赤で示している。青と赤の光が重なる部分は、黒で示している。それぞれの発信周波数を  $f_1$  と  $f_2$  とすると、その差の周波数は約 1MHz となっている。レーザの出力光の一部はビームスプリッターにより取り出され、偏光子を通して光検知器によりその差周波数  $f_1 - f_2$  を持つ成分が参照信号として取り出される。残りの光は偏光ビームスプリッターに入射する。青の光は偏光ビームスプリッターを透過し、赤の光は反射され、各々別の腕に入射される。これらの光はコーナーリフレクタで反射され、偏光ビームスプリッターに戻ってくる。1/4波長板を2回通ることにより、偏光方向が90度回転する。そのため、今度は青の光は偏光ビームスプリッターで反射され、赤の光は透過し、第3の腕に入射する。このように、これらの光は3回コーナーリフレクタで反射され、干渉計から出力し、第2の光検知器で、差周波数  $f_1 - f_2$  を持つ成分が信号として取り出される。この信号と参照信号の位相差をロックインアンプで検知する。

青と赤の光はほとんど同じ光路を通過するが、青の光のみ、塩水または蒸留水が入っ

たセルを通過する。2つの光がほぼ同じ光路を通ることにより、温度変化等による干渉計の歪みが相殺される。

図2はセルの構造を示したものである。セルの厚さは0.25mmとした。幅6mmの空色で示された部分に塩水と蒸留水を交互に満たすことにより、その屈折率差を電気信号の位相差として検知する。HeNeレーザー光の波長を $\lambda$ 、純粋と塩水の屈折率差を $\Delta n$ 、セルの厚さを $L$ 、塩水と蒸留水に対する位相差を $\Delta\theta$ とすると、これらの間には次式の関係がある。

$$\Delta\theta = 4\pi L / \lambda \Delta n$$

すなわち、位相差 $\Delta\theta$ を測定することにより、純水と塩水の屈折率差 $\Delta n$ を知ることができる。

実験は図3に示すように、防振台の上に干渉計を組み立てて行った。

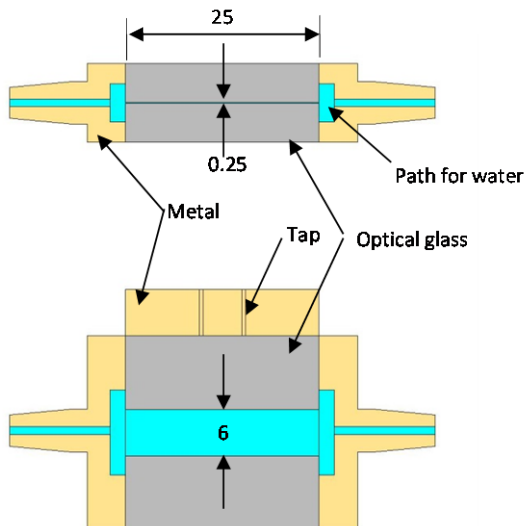


図2 セルの構造

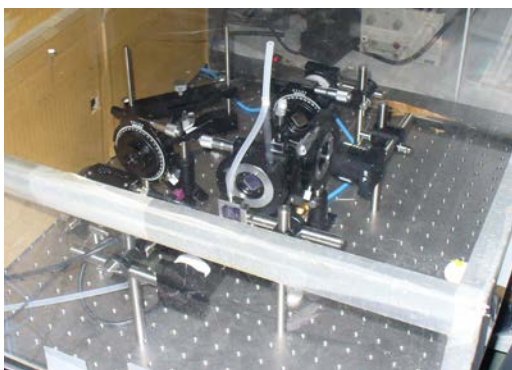


図3 実験装置

図4は参照信号と信号の波形をオシロスコープで観測した例である。2つの信号の差周波数は約1MHzであり、十分なS/Nがえられていることが確認できる。信号のジビリティは約0.69であった。

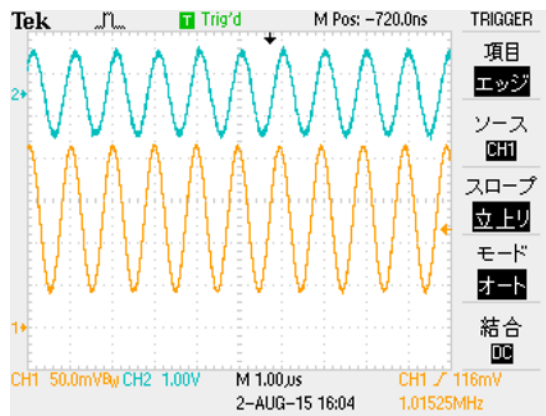


図4 参照信号と信号の波形

半導体光源を用いる場合には、出力光をビームスプリッターにより2つに分割し、一方の光を音響光周波数シフターにより周波数変換を行うことにより、数十MHz程度の周波数差を持つ2つのレーザー光を作成することができる。この光をゼーマンHeNeレーザー光の代わりに用いることができる。

#### 4. 研究成果

塩水と純粋の屈折率差の測定を行うのに先だて、ヘテロダイン・ダブルパス干渉計の安定性を評価するために、位相差の時間変動を約56時間に渡って連続的に測定し、その安定性を確認した。同時に周辺温度の観測を行った。その間の位相の変動は、図5に示すように約8度であり、温度変動は約2度であった。ヘテロダイン・マイケルソン干渉計の場合には、1度の温度変動に対し、約80度の位相変動が観測されていた。ダブルパス干渉計を導入することにより、マイケルソン干渉計に比較して、1桁以上温度変動の影響を低減できることが確認できた。

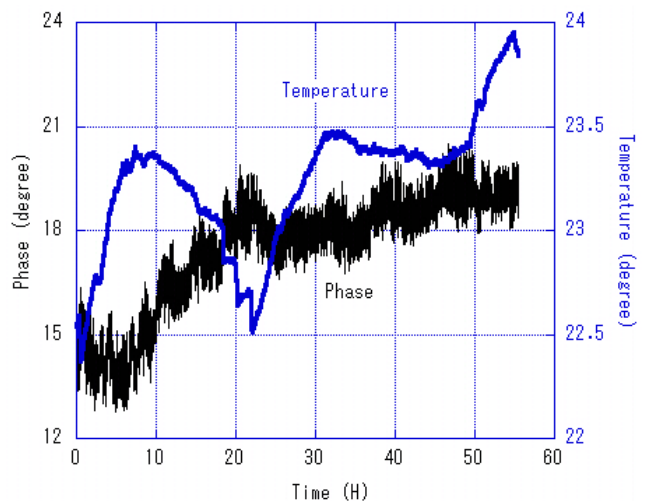


図5 ヘテロダイン・ダブルパス干渉計の安定性の評価



次に、干渉計の腕の中にセルを挿入し、純粋と塩水を交互に挿入したときの位相変動を測定した。図6は3.5%の塩水と純水を交互に挿入したときの測定例である。セルのなかの純粋と塩水が完全に置換するように、置換に先立ってセルの内部の水を抜き取っている。位相は4分間のデータを平均化して求め、隣り合う測定結果の位相差を求めた。位相差の平均値と標準偏差はそれぞれ182.0度と3.0度であった。ナトリウムD線(589nm)に対する塩分と屈折率の関係がHeNeレーザー光(633nm)に適応できると仮定すると、理論的な位相変動量は176.0度になる。これは、測定結果である182度より少し低い値であった。

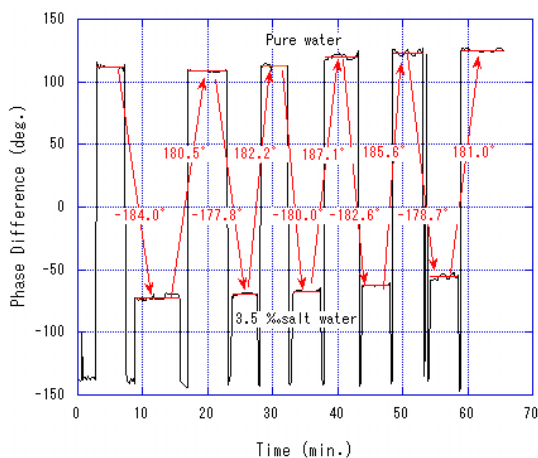


図6 3.5%塩水と純水を交互にセル内に挿入したときの位相差測定結果

図6を観察すると、位相が次第に増加していることが確認できる。この増加の原因を確認するために、位相差の測定と同時に参照信号の周波数変動を測定し、比較してみた。図7は図6に参照信号の周波数変動を重ねて表示したもので、位相変動と参照信号の周波数変動の間に相関があることが分かる。

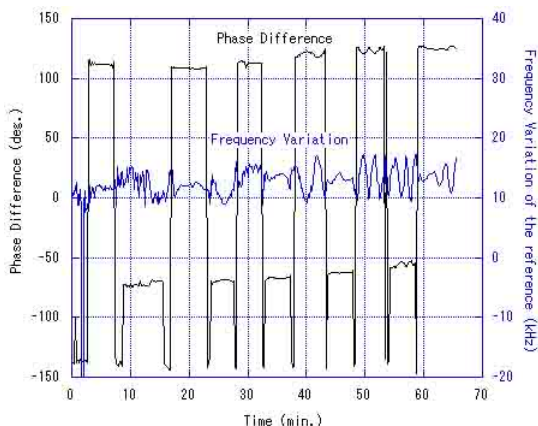


図7 位相変動と参照信号の周波数変動の関係

図8は参照信号の周波数変動と位相変動の相関を示したものである。参照信号の周波数変動量は2MHz程度であったが、その変動量と位相変動の間に明らかな相関があることが確認できる。この実験ではセルは挿入していない。

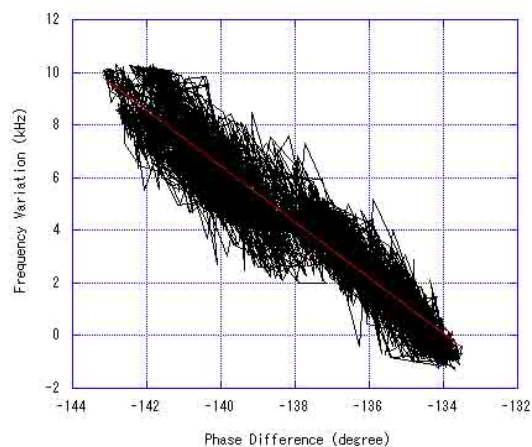


図8 参照信号の周波数変動と位相変動

この現象の原因を調べるために、ロックインアンプの参照信号入力と信号入力に同じ信号を入力し、周波数を変化させて位相差との関係を測定してみた。図9はその測定結果を示したものである。参照信号入力と信号入力に同じ信号を入力しているため、本来その位相差は一定の値になるはずであるが、図9をみると、一定の周期で位相差が変動していることがわかる。これは、ロックインアンプ内部の信号処理方法に起因するものであると考えられる。この周波数と位相差の関係が、図6の位相変動に影響を及ぼしているものと考えられる。

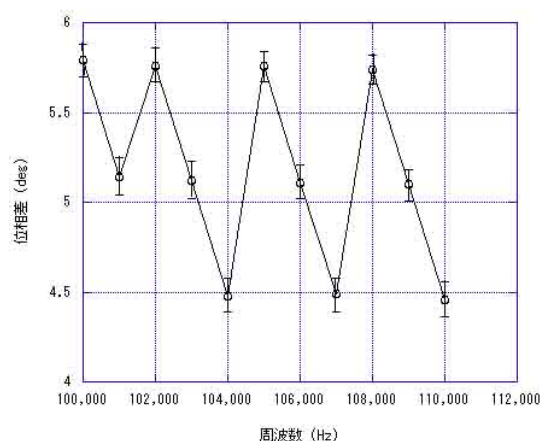


図9 ロックインアンプの周波数特性

この問題の対策として、(1) 半導体レーザーを光源として利用すること、(2) ロックインアンプを改善すること、が考えられる。本研究では、まず、(1)の方法を試みた。半導体レーザーを光源とするヘテロダイン光

源では、2つの光の周波数差は音響光周波数シフターの駆動信号周波数に一致するので、参照信号の周波数が安定する。これまでのところ、十分な S/N を持つ干渉計出力（信号）を得ることができているが、ロックインアンプでの位相を検知することができない。この原因を分析するために、参照信号と信号を A/D 変換器でデジタル信号に変換し、位相の検知が行えない原因を分析する予定である。(2)の方法として、同じようにデジタル信号に変換した信号と参照信号を用いて、パソコンにより同期検波を行い、その位相差を求める準備を進めている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

- ① Kenichi Asakawa, Yasuhisa Ishihara and Akito Araya, Basic Experiments on Measurement of Salinity using a Heterodyne Double-pass Interferometer, OCEANS ' 15 MTS/IEEE Washington, 2015 年 10 月 22 日、Washington DC, USA.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

浅川 賢一 (ASAKAWA, Kenichi)  
国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋工学センター・シニアスタッフ  
研究者番号：40344288

### (2) 連携研究者

植木 巖 (UEKI, Iwao)  
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  
研究者番号：60371712