

海水密度を直接計測する話

金 成 誠 一*

キーワード：塩分、海水密度、海水の屈折率

1. はじめに

海洋の中には、様々なスケールの海水の運動が重なり合っており、そのことが結果的に、海水の動きを複雑怪奇なものにしている。もとを正せば、これは、海水自体に様々なスケールと大きさの力が働いていることに起因している。これらの力が海水に働くとき、海水は、働いた力に比例した加速度を得て運動する。その時の比例定数が海水の質量である。海水の質量といっても、海水や空気のような流体は大きさを持たないので、固体のような質量を考えるわけには行かない。そこで、流体の場合は、一定容積の流体が持つ質量でその流体の質量を代表させる。これを流体の密度という。したがって、密度 ρ の流体に力 F が働いたとき、その流体が加速度 a で運動するとすると、その加速度は $a = F/\rho = \alpha F$ で表されるということは、Newton の運動の法則が教えるところである。ここに、 α は密度 ρ の逆数で、海洋では水の比容と呼ばれる量である。このように、海水の運動を扱う場合、海水に働く力とともに、海水の密度を知ることがきわめて重要であるが、力と加速度の関係では、海水の密度を粗い値 1 と置いても運動の本質は損なわれない。しかしながら、海洋の大規模循環は、海面の凹凸と密接に結びついており、海面の凹凸から海流系を推定することができる。ところで、海面の凹凸はどうやって知ることができるだろうか。現在では、人工衛星によって直接海面の凹凸を観測することができるが、人工衛星がなかった昔、1800年代は海洋の観測から海面の凹凸を推定していた。と言っても、船で海洋に乗り出したところで、海面の凹凸が目視できるわけではない。実は、海水の密度の鉛直分布を精密に調べることにより、この海面の凹凸を知ることができるのである。実際、海洋物理学者は、海洋の水温、塩分の精密計測によって海洋中の密度分布を求め、これから海面の凹凸を計算し、海流系の推定計

算を行う。ここで、水の密度の定義を思い出そう。水の密度は、単位容積の水の質量であった。したがって、その逆数である比容の定義は、単位質量の水が占める容積ということになる。このことは、軽い水と重い水を同じ重さだけ取ったとき、軽い水の方が大きな容積となることを意味している。そこで、今、比容が α である海水を 1 グラムとり、これを底面積 1 平方センチメートルの枘に入れたとき、この海水の高さがちょうど α の値に等しいことは容易にわかる。静水圧下では、「単位質量の水の重さ」は「単位質量相当圧力」と読み替えることができるので、「単位底面積で単位質量相当圧力の海水の高さがその海水の比容 α となる」という言い方が可能になる。このことを更に敷衍すると、海洋の内部に任意の等圧面を仮定し、その等圧面が水平（ジオイドと平行）ならば、この等圧面上の海水の比容を海面まで積算した値は等圧面と海面の間の海水の高さと数値的に等しくなることを意味する。これが、海水密度、したがって海水比容から海面凹凸が推定できることの理由である。この他に、最近の海洋乱流の分野では、微細乱流混合パラメータと水の乱流による変位に起因する密度の微細鉛直分布を直接対応付けようとする試みがなされるようになった。こうした研究でも、微細な密度の鉛直構造の精密な計測が欠かせない。海洋中の海水の密度分布を正確に知ることの海洋物理学的重要性がここにある。そこで、この小文では、海水の密度はかつてはどのように測定されていたのか、現在はどのようにして密度をきめているか、今後はどのような方法に取って代われそうかについて話しをしてみたい。

2. 1800年代の密度計測

世界の海洋が本格的に調べられ出したのは、英国の Challenger 号の世界周航観測航海以降であるが、海洋

* 立正大学地球環境科学部

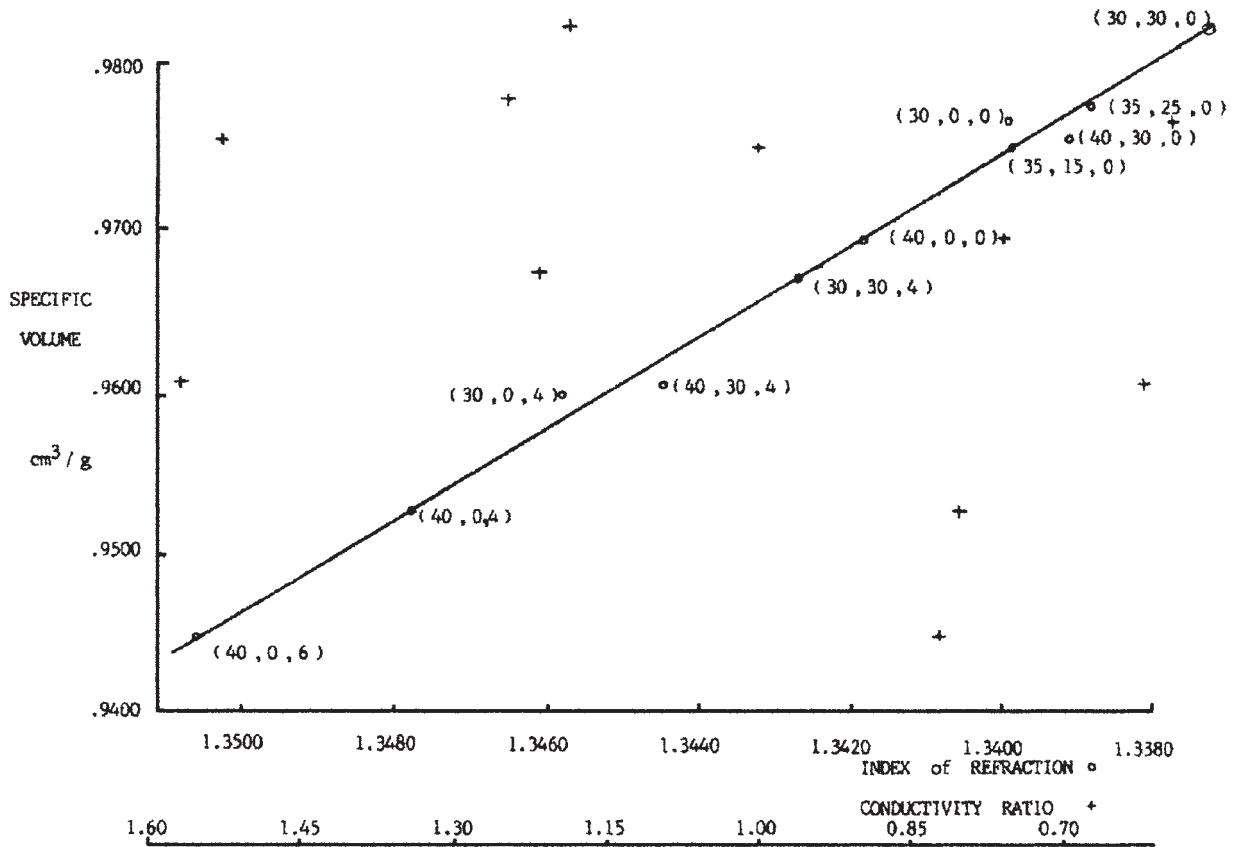


Fig.1. 海水比容 (Specific volume) の屈折率および比伝導度に対する依存性. 丸印は (S, T, p) で表した海水の屈折率と比容の関係を示す. +印は、通常の海洋における水温、塩分、圧力の適当な組み合わせに対する比伝導度と比容の関係を示したもので、比伝導度と比容の関係は、温度、塩分、圧力に大幅に依存することがわかる. (After G. Seaver, 1987).

の内部の種々の深度の海水標本が自由に採取できるようになったのは、Nansen によるナンセンボトル採水器の考案以降である。ナンセンによって行われた北大西洋探検航海 (1876 - 1878) では比重計によって海水密度が計測されていた。この比重法は実験室内で精密に計測する場合は比重で最高 5×10^{-5} の精度があるといわれていた。しかしながら、 $(10 \sim 20) \times 10^{-5}$ 程度の精度が普通で、特に揺れる船の上では、とてもこの精度は望めない。ノルウェイの海洋学者である Tornoe は Nansen の依頼で、北極探検航海用に、海水の塩分を海水の電気伝導度から求める方法を考案したといわれている (Seaver, 1987)。つまり、海水密度は水温と塩分の関数なので、水温と塩分を求めて密度を計算しようというわけである。Tornoe の方法は、白金電極とブリッジ回路を用い、海水の電気伝導比によって塩分を求めるやりかたで、これは、伝導度比を使う点は現在の電気伝導度法とほとんど同じやり方、というよりも、現在の方法のはしりと言って言いすぎではない。この方法で 0.03psu の精度を達成したといわれるが、何分再現性の悪さと、塩分換算のための式が複雑過ぎて計算に時間が掛かりすぎる (当時は

手計算するしか方法が無かった) という欠点があった。

一方、液体の光学的屈折率が液体の密度と密接な関係があること、さらに、密度 屈折率の関係を利用して液体の密度を計測するという方法が知られていた。この原理は、現在は果樹栽培の分野で糖度計として利用されているばかりではなく、米国では、水族館などの海水の塩分計測にも使われている。Tornoe はこの点に着目し、Hallwachs の考案になる屈折率計を海洋学における海水の塩分測定に応用する試みをし、海水屈折率と塩分の相互比較計測を広範に行った (Tornoe, 1900)。

海水の屈折率に関しては、1877年から1906年までに、米国、ドイツ、フランス、ノルウェイ、英国などの研究者が海洋物理学的立場で研究を進めており、塩分と海水屈折率の関係、比容と屈折率の関係などが少しずつ明らかになっていった。いったい、塩分を求めるのに、電気伝導度法と屈折率法とどちらが有利かといえば、電気伝導度は水温に大きく左右され、伝導度比と水温から塩分を計算する式は非常に複雑である。これに対し、屈折率と塩分、比容の関係は非常に単純で近似的に線形関係で表され、温度依存性もきわめて小さいという利点がある。

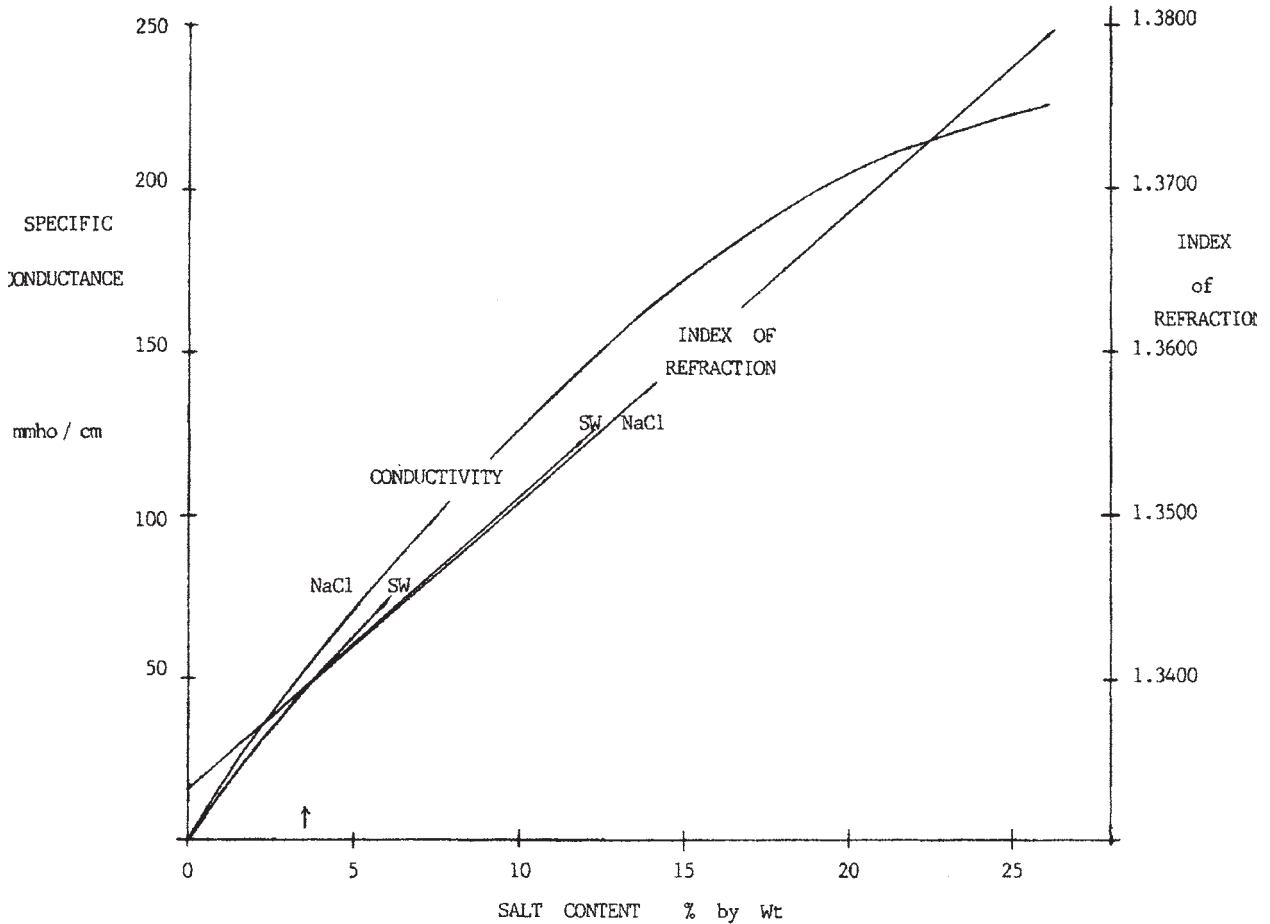


Fig.2. 比伝導度と塩分、および屈折率と塩分の関係。屈折率と塩分はほぼ線形関係にある。(After G. Seaver, 1987).

Fig. 1は、比容と海水の屈折率、および比伝導度の関係を種々の水温、塩分に対してプロットした結果を示すもの (Seaver, 1987) で、丸印は30ないし40psuの塩分の海水の屈折率と比容の関係を示し、(S, T, P) で示した範囲の変数に対しては、ばらつきの範囲は非常に狭いに反し、+印で表されている比伝導度の点は非常にばらつきが大きいことからそうした特性の違いがみてとれる。また、塩分に対する電気伝導度と屈折率の関係については、Fig. 2にみられるように、塩分と電気伝導度の非直線性が塩分と比容の直線関係に対して際立っていることがわかる。ただし、残念ながら、この当時までは、海水の屈折率に対する水温、塩分、圧力の精密な状態方程式が確立されていなかった。これに対して、1900年代のはじめに、Knudsenらが海水の物理特性を精密に調べ、海水の化学的塩素量同定によって塩分を精密に求める手法を確立した。この方法は、基本的には、ナンセンボトルで採水して、実験室で塩分値を決定するという方法である。このような方法は、Brown and Hamon (1961) が Knudsen Table を電気伝導度比と結びつけて、

現場の海水について完全に電氣的に、精密な塩分計測ができる手法が確立されるまで続いた。つまり、現在の標準的の海水密度決定は、現場の水温、圧力、電気伝導度を同時計測し、現場の塩分を算出し、しかる後に、求めた塩分と水温、圧力を用いて密度あるいは比容を計算するというものである。現在、海洋観測で使われている水温・塩分の鉛直分布計測装置 (CTD と呼ばれている) には、電極式と電磁誘導式の2種類があるが、最も高精度で、標準測器として世界的にも認められているのは Niel-Brown 社の電極式 CTD である。

3. 電気伝導度法の問題点

前項で述べた高精度 CTD が何の問題もなければ、あえてこれに取って代わる計測器を考える必要もないのであるが、現在の CTD は、電気伝導度、水温を別個のセンサーで計測するものである。したがって、密度算出には、少なくとも水温と塩分の二つの計測を必要とする。このことは、密度の変動を計測する場合、水温センサー

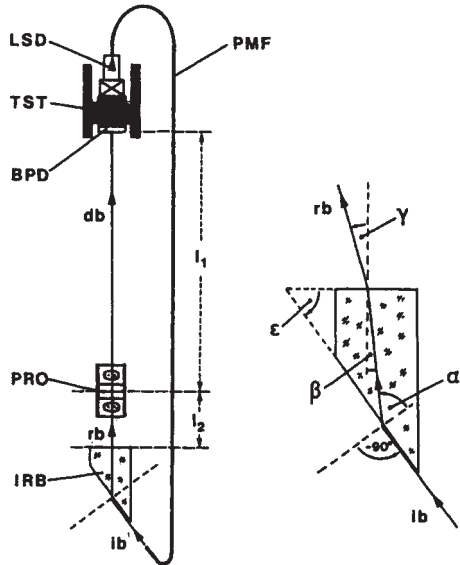


Fig.3. M&W による現場計測用小型屈折率センサーの模式図. ϵ 傾角のプリズム面に沿って光 i_b を臨界で入射する. プリズム面内に行進した光 r_b は、プリズム上部から空気中に出る. ガラスの屈折率 N は $N = \frac{\sin \gamma}{\sin \beta}$ で与えられる. ゆえに、海水の屈折率 n は、 $n = N \sin(\epsilon + \beta)$ から計算できる. (After Mahrt & Waldmann, 1988).

と塩分センサー (この場合は電気伝導度センサー) の時定数の一致が要求される。しかし、この両センサーの時定数を常に等しくすることは技術的に非常に難しい。時定数が異なる状態で計測した水温、塩分値を用いて密度を算出すると、水温、塩分の分布が深さで急激に変化するような場所の密度値にスパイク状の値の跳びが発生してしまうことが知られている。そのために、現在のCTDでは、この時定数の違いをフィルターで人工的に補償して両者を合わせるという方法がとられている。しかし、この方法は、どのような変動の早さにも追従できないというものではない。CTDの降下速度を大きくすると補償が不完全になる危険性が否定できない。これに対して、光の屈折率から直接密度を計測する方法では上記のような問題はまったく起こらない。その上、電気伝導度は温度に非常に敏感であるために、更正が大変厄介である。こうした点を考えると、海水の比容や密度計測に対する光学的計測の有利さが明らかである。

4. 海水屈折率計測方法の進展

海水の屈折率の計測は1900年台に盛んに行われ、Austin and Halikas (1976) によって SIO Report としてまとめられている。Seaver (1987) は、これらの

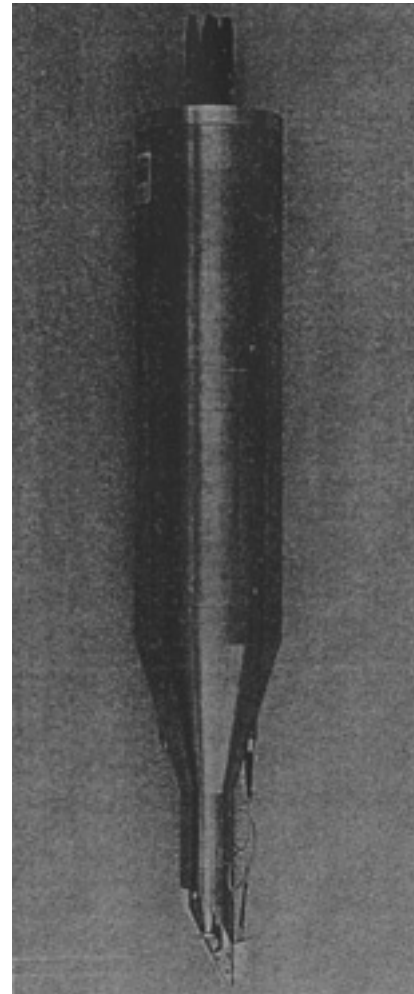


Fig.4. センサーおよび計測回路収納部の写真. (After Mahrt & Waldmann, 1988).

蓄積されたデータを検討し、塩分、水温、圧力、光の波長に対する海水屈折率特性を詳細に調べ、塩分を決定するには、電気伝導度法よりも光学的計測の方が優れていることを示した。Kiel 大学の Mahrt and Waldmann (1988) は、屈折率の現場計測のみならず、海水の屈折率に基づく微細海水密度計測を可能ならしむる小型センサーを試作した。このセンサーを、Niel-Brown の CTD センサーと同時計測による比較観測を実行し、屈折率が 10^{-6} の精度で高速計測でき、かつ海水密度の精度も CTD から求めた密度と遜色がないことを実証した。

Fig. 3は Mahrt and Waldmann (以下 M&W と略記) らが開発した屈折率センサーで、レーザーダイオード (LSD) からの光をファイバーを通してガラスプリズム (IRB) の先端に導き、プリズムと海水境界面に沿って光を入射させる。この光の一部がプリズム内に入射角 β で入射し、屈折角 γ でプリズムから出る。これを上部の BPD で受光し、屈折角 γ を計測する。空気中のガラスの屈折率を N とすると、入射角 β 、射出角 γ の間には

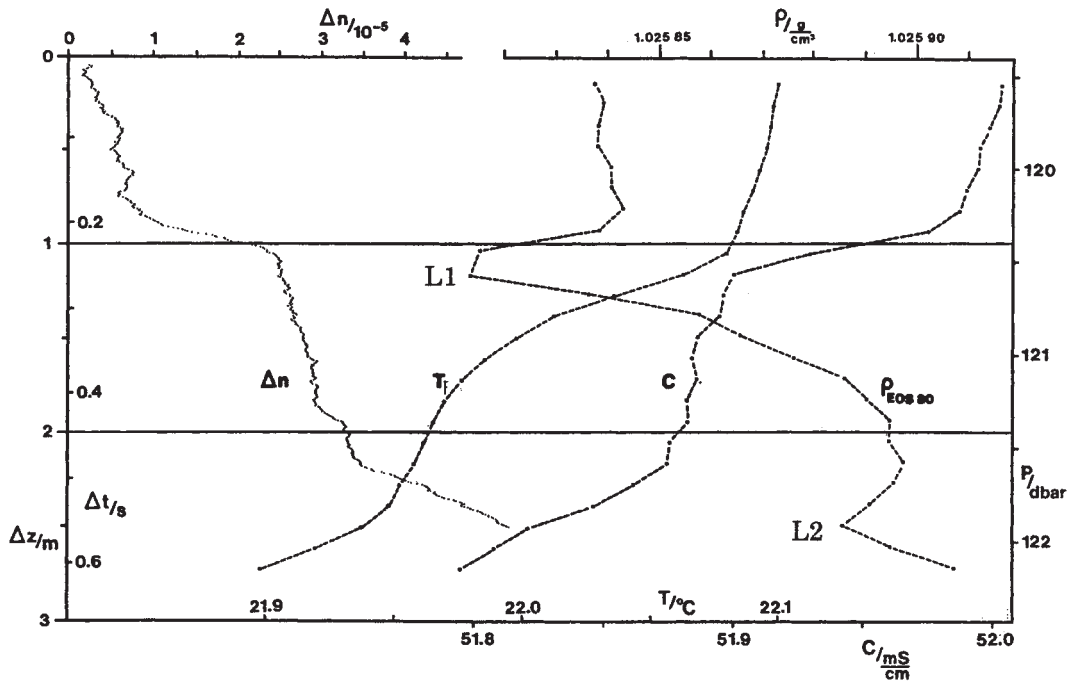


Fig.6. 屈折率とCTDデータとの比較. (After Mahrt & Waldmann, 1988).

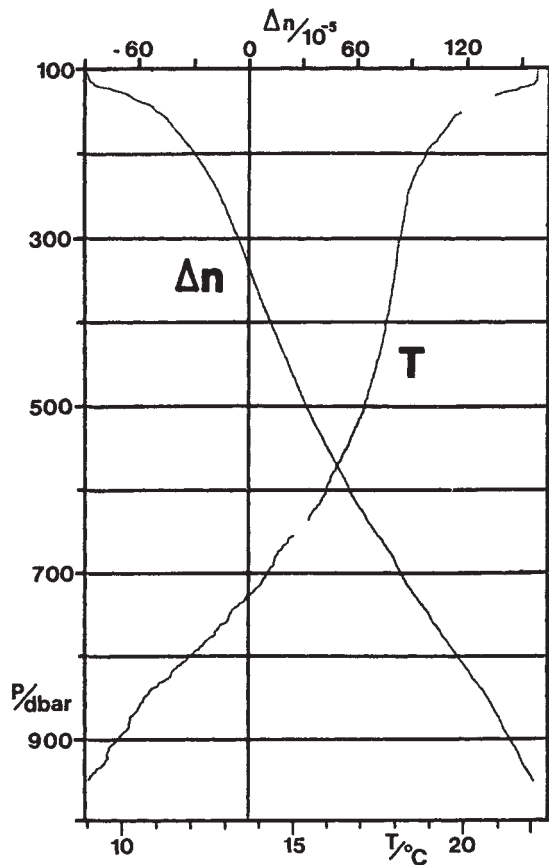


Fig.5. 計測された海水屈折率と水温の鉛直分布の一例. 屈折率偏差 Δn は1.33000を基準とした偏差で表してある. (After Mahrt & Waldmann, 1988).

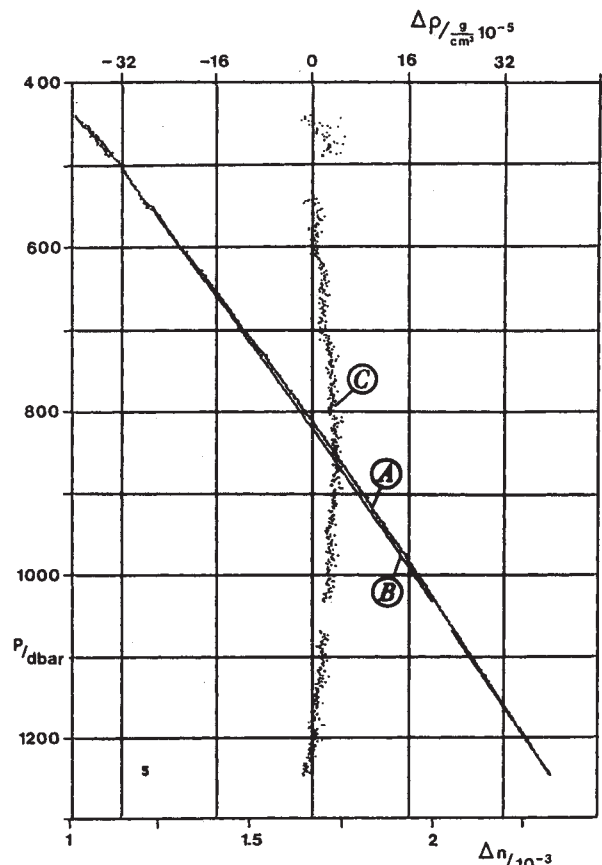


Fig.7. 屈折率にもとづく密度アノマリーとCTDによる密度アノマリーの比較. ①はCTD、②は屈折率によるアノマリー、③はその差を表す. (After Mahrt & Waldmann, 1988).

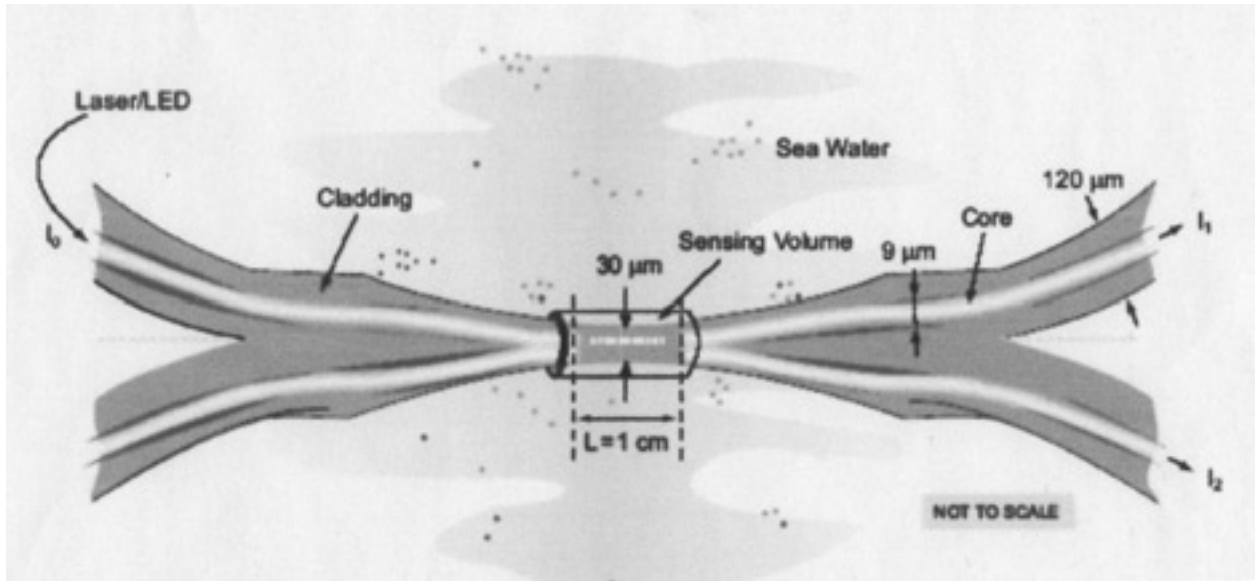


Fig.8. 海水屈折率計測用に溶融接合された光ファイバーの模式図.
(After Alford et al. 2004).

$\sin \gamma = \sin \beta$ の関係が成り立つ。また、海水の屈折率を n とするとき、プリズム面の水平軸からの傾き角を ε とすれば、 $n = N \sin(\varepsilon + \beta)$ が成り立つので、角 γ の計測により、海水屈折率 n が求まる。

Fig. 4は、センサーと光学計測回路収納部の実物写真である。Fig. 5は、Oceanus Cruise - 195 (Oct. 27-Nov. 15, 1987) で得た水温 T と屈折率偏差 $\Delta n = n - 1.33$ の鉛直分布を示したものであるが、横軸の Δn は、よく知られた Lorenz-Lorenz の方程式により、 $\Delta n \propto \rho$ として海水密度と関係付けられる。Fig. 6は、表層120m 付近のプロファイルを拡大して CTD のデータ (T_F, C, ρ_{EOS80}) と比較したものであるが、CTD の密度プロファイルには L_1, L_2 で示した密度逆転が現れているが、屈折率による密度 (Δn) には、それに対応した逆転はみられない。CTD の密度逆転は、明らかに、 C と T の時定数のミスマッチによるスパイク (密度のエラー) と考えられる。Fig. 7は深部のプロファイルのうち、450m と1250m の CTD による密度と、屈折率偏差 Δn が一致するようにプロットし、途中の変化をみたものであるが、④は CTD、③は屈折率による密度の相対プロファイルで、⑤は両者の差である。両者は $4 \times 10^{-5} (g/cm^3)$ 以内で一致していることがわかる。

5. 屈折率による密度計測の今後の課題

以上にみてきたように、海水屈折率による海水密度の直接測定方法は、現在、実用寸前のところまで開発が進んでいる。また、海水屈折率と海水密度を関係付ける密

度の状態方程式が Millard and Seaver (1990) によって与えられている。それによると、波長500 - 700nm の光について、塩分 0 - 40psu、温度 0 - 30、圧力 0 - 1100db のレンジに対して $0.049 (kg/m^3)$ の精度で密度の換算が可能な式として

$$\sigma = 12.2571 + 3089.4201(n - 1.33) + 0.062370T + 0.2891 \times 10^{-8}P^2 - 0.3624 \times 10^{-5}pS + 0.19347S \quad (1)$$

を提案している。ここに、 $\sigma = (\rho - 1) \times 1000$ で、 ρ は海水密度、 n は海水の屈折率、 p は圧力、 S は塩分、 T は水温である。(1)式には、右辺第5、第6項の、 S に関する線形項が含まれているが、塩分と屈折率が線形関係であることを考慮すると、塩分 - 屈折率の線形形式によって、この二つの項は屈折率の項で置き換えることができ、結果的に、密度 ρ のマリーは温度と圧力のみ関数として表現することができる。海洋学で要請される密度の精度、即ち $0.001 kg/m^3$ を達成するには、屈折率を $0.3 ppm$ 、水温を 0.01 、圧力を $1 db$ の精度で計測する必要があると Millard らは指摘している。現在、屈折率計測精度は $0.5 ppm$ 程度にまで達している (Waldmann and Thiele, 1996) ので、 $0.3 ppm$ の達成は時間の問題と思われる。この他に、Alford et al (2004) は、溶融結合した2本の光ファイバーを用いた屈折センサーを使用して、さらに高精度の屈折率計測を実現し、これを密度のマクロストラクチャー計測に応用し、従来の電気伝導度センサーに基づく従来の CTD 計測器に比べ、1桁精度が高い計測が可能であるとの結論を導いている。Fig. 8は、2本の光ファイバーを中央

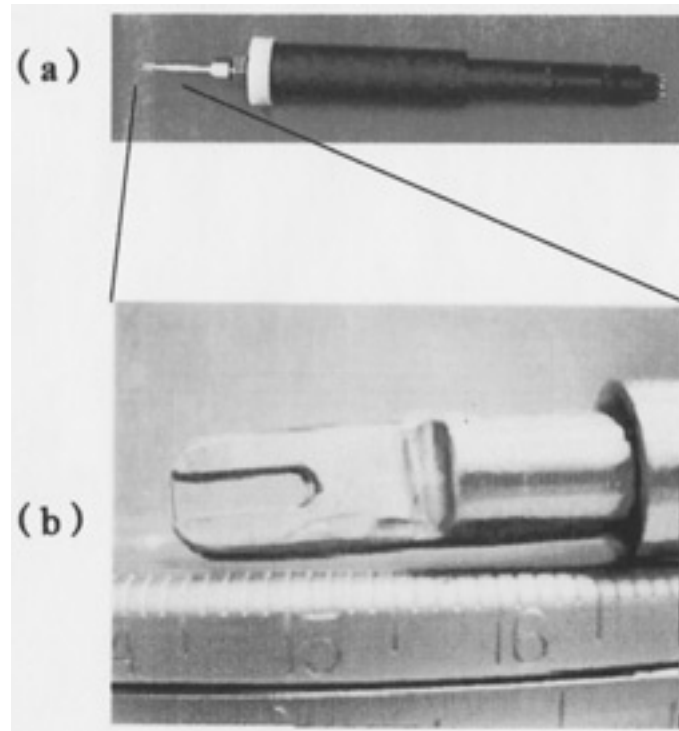


Fig.9. 溶融接合光ファイバーを用いた密度計測装置概観 (a)、およびセンサー取り付け部の拡大図 (b). (After Alford et al. 2004).

で溶融接合したもので、接合部分が海水に接している。一端のファイバーから I_0 の光を入れると、一部は海水の屈折率に応じて海水中に光が抜け、残りの光が他端の2本のファイバー I_1, I_2 に配分されて出力される。この配分は、中央の接合部周辺の海水の屈折率で決定されるので、この出力比（じっさいには、 I_1 と I_2 のカップリング係数の値）を計測することにより、逆に屈折率を知ることが出来るというのがこの計測方法の原理である。この原理にのっとり製作されたセンサーおよび計測回路収納部を Fig. 9 (a) に、また、ファイバーのセンサー先端部の拡大したものを Fig. 9 (b) に示してある。U字型のセンサー取り付け金具の先端に細く見えているのが溶融接合されたファイバーである。このセンサーによって、現在のCTDよりも1桁高い分解能で、かつ、mmオーダーのスケールの密度計測が可能であるという。このように、海洋の密度計測に関しては、光学的計測手段の見直しと、より精度の高い計測手法の開発が現在進捗しつつある。一方、屈折率による塩分計が、将来、現在の標準測器であるCTDに取って代わるには、塩分を電気伝導度と結びつけている状態方程式に相当する、屈折率と塩分、水温、圧力、光波長の精密な関係式が確定され、その関係式が国際的にも認知される必要がある。

以上に述べたような研究は、ヨーロッパ、カナダ、ア

メリカで主になされた研究であるが、わが国では、この種の研究がなされた形跡は残念ながらまったくない。いずれ、現在主流となっている電気伝導度法に取って代わる時代がくることは間違いないので、そのときになって慌てふためくことのないよう、今からでも、こうした計測手法の検討を開始すべきであろう。

6. むすびと謝辞

定年退職にあたり、随想かなにかの文章を書けという田村編集長からのご依頼がありました。文章下手で、人を感じさせるような面白い話などもできそうもなく、随想といった文学的な才能もないので、困ったことになったと悩みましたが、思い切って、本当は自分もやりたかったが出来なかったことを、後進への期待を込めて拙文を書いてみることにいたしました。わずか3年という短い期間ではありましたが、環境の良い熊谷キャンパスでの仕事はとても楽しいものでした。短期勤務の人間でも快く受け入れてくださった地球環境科学部の皆様、また、在職中のわかりにくい講義、や話を熱心に聴講してくれた院生、学部学生諸君にこころから感謝いたします。

参考文献

- Austin, R., and G. Halikas, 1976: The index of refraction of seawater, SIO report 76-1.
- Alford, M. H., D. W. Gerdt and C. M. Atkins, 2004: An ocean refractometer: Resolving millimeter-scale turbulent salinity fluctuations via the refractive index, Joun. Atmos. and Ocean. Technol. (in Press.).
- Brown, N. and B. Hamon, 1961: An inductive salinometer, Deep Sea Res., 8, 65-75.
- Mahrt, K. -H., and H. -C. Waldmann, 1988: Field proven highspeed micro optical density profiler sampling 1000 times per second with 10^{-6} precision, IEEE OCEANS'88, 497-504.
- Millard, R. C. and G. Seaver, 1990: An index of refractive algorithm for sea-water over temperature, pressure, salinity and wavelength, Deep Sea Res., 37, 12, 1909-1926.
- Seaver, G., 1987: The optical determination of temperature, pressure, salinity and density in physical oceanography, Marine Technol., Soc., Jour., 21, 69-79.
- Tornoe, H., 1900: On the determination of the salinity of seawater by its powers of refraction, Report on Norwegian Fish and Marine investigations, 1, 6, 1-13.
- Waldmann, H. -C., and S. Thiele, 1996: Results of the dynamical tests of a special designed optical microstructure density probe based on the measurement of the refractive index, IEEE OCEANS'96, 1131-1134.

A Note on Direct Measurement of the Density of Seawater

KANARI Seiichi*

*Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

Keywords: salinity, density, reflectivity of sea water