

ブリルアンライダーによる海水温鉛直分布モニタリング手法の検討

坂本 陸哉, 阿保 真

東京都立大学大学院システムデザイン研究科 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)

Feasibility study on monitoring method of vertical seawater temperature distributions using Brillouin lidar

Rikuya SAKAMOTO and Makoto ABO

Tokyo Metropolitan Univ., 6-6 Asahigaoka, Hino, Tokyo 191-0065

Abstract: The high-spectral-resolution lidar (HSRL) technique for Brillouin backscatter signal spectrum has been used to measure the vertical distribution of seawater temperature. Methods for measuring the vertical distribution of seawater temperature and salinity using airborne or satellite-borne Brillouin lidar have been evaluated and investigated through numerical simulations and laboratory experiments. However, continuous day-and-night lidar measurements from above the sea surface are difficult because of the effects of atmospheric conditions and reflected light from the sea surface, so continuous measurements are difficult regardless of day or night. In this study, we investigate monitoring method for vertical distribution of seawater temperature from the sea surface using a compact Brillouin lidar.

Key Words: HSRL, Brillouin scatter, seawater temperature

1. はじめに

海水中の環境や生態に関係する水質情報の3次元分布計測は、海水中の様々な事象のメカニズムの解明や海洋環境問題の改善に貢献できる。しかし、水質情報の最も基本となる海水温の鉛直分布でさえ未だ有効な計測手段が実用化されていないのが現状である。それに対しこれまで、航空機や衛星搭載型ブリルアンライダーによる海水温と塩分濃度鉛直分布の測定手法が提案され、数値シミュレーションや室内実験により評価・検討が行われてきた^{1,2)}。しかし、海面の上空から行うライダー計測では、大気の状態や海面での反射光の影響を受けるため、昼夜問わず連続的な測定は困難である。この課題は海面から海水温鉛直分布のモニタリング手法を構築することにより解消できると考えられる。

本研究では、海面から海水温の鉛直分布をモニタリングするために、現在提案・検討されているブリルアンライダーの原理を基に、小型化を前提にした測定手法の提案と、測定誤差の評価によるフィルタの仕様の選定、濁りのある海域におけるミー散乱光の漏れ込みに対する補正法についての検討を行う。

2. ブリルアンライダーを用いた海水温の測定原理

ブリルアンライダーは海水温、塩分濃度、水圧などの海洋パラメータとブリルアンスペクトルの周波数シフトと線幅に依存性があるという特徴を利用し、HSRL (High-Spectral-Resolution Lidar) 手法によりこれらパラメータを測定する。今回は海水温に対するブリルアン後方散乱スペクトルの変化を HSRL 手法でセンシングし海水温を測定する方法について検討する。

2.1 海水中におけるブリルアン散乱と海洋パラメータの依存性

海水中にレーザー光を照射すると、中心波長がシフトしないミー・レイリー散乱と中心波長から対称的に周波数シフトしたブリルアン散乱が生成される。気体と比べて液体のブリルアンシフトは非常に大きいのが特徴である。液体中のブリルアン散乱スペクトルはストークス光とアンチストークス光の両方を以下に示すローレンツ関数の形式で表すことができる²⁾。

$$I_B(\nu_B, \Gamma_B) = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\Gamma_B}{4(\nu - \nu_B)^2 + \Gamma_B^2} + \frac{\Gamma_B}{4(\nu + \nu_B)^2 + \Gamma_B^2} \right\} \quad (1)$$

ここで、 ν_B はブリルアン周波数シフト、 Γ_B はブリルアン線幅である。この2つのパラメータは主に海水温と塩分濃度に依存して大きさが変わる³⁾。Fig.1 に海水温に対するブリルアン散乱スペクトル (アンチストークス光) の変化を示す。海水温が上がるにつれて線幅が狭くなり周波数シフトが大きくなるのが分かる。

2.2 ブリルアンライダーによる海水温の測定手法

ブリルアンライダーを用いた海水温リモートセンシングの測定手法の1つにエタロンを用いたダブルエッジ手法がある。吸収フィルタでレイリー/ミー散乱光を除去したのち、Fig.2に示すようにブリルアンスペクトルの裾野付近の散乱光強度を透過させるように2つのエタロンフィルタを配置して、2つの透過光の強度比から海水温を推定することができる。

各エタロンフィルタ透過後の信号強度 I は以下の式で表される。

$$I_i = \int_{-\infty}^{+\infty} T_i(v - v_i, \Gamma_i) I_B(v_B, \Gamma_B) dv \quad (2)$$

$$T_i = [1 + \left(\frac{2FSR_i}{\pi\Gamma_i}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{FSR_i}v\right)] \quad (3)$$

ここで $i(i=1, 2)$ は各エタロンフィルタを表しており、 T_i はエアリー関数形式で表されたエタロンフィルタの伝達関数、 v_i と Γ_i は各フィルタの中心周波数シフトと帯域幅である²⁾。透過光強度比 S を次式で定義する。

$$S = \frac{I_2}{I_1} \quad (4)$$

Fig.3に透過光強度比と水温の関係の一例を示す。今回の研究では、海上でライダーシステムを使用することを考慮し、システムの小型化を目指してヨウ素セルなどの吸収フィルタを使用しない。Fig.4にエタロンと干渉フィルタのみを用いた受光システムを示す。吸収フィルタを使用しないことにより、受信光に含まれるミー・レイリー散乱光の漏れ込みの影響を考慮する必要があるが、任意のレーザ波長選択が可能となるため、海水における減衰の小さい波長を用いて、従来より深い所までの海水温測定が期待できる。

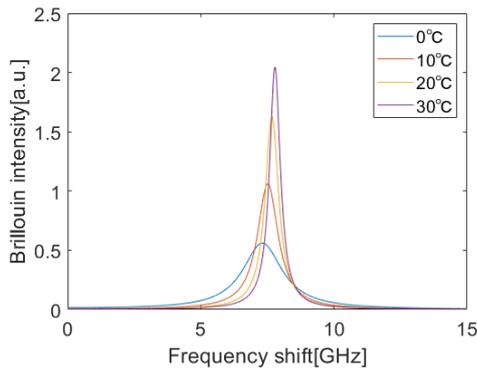


Fig.1 The Brillouin spectrums in different seawater temperatures.

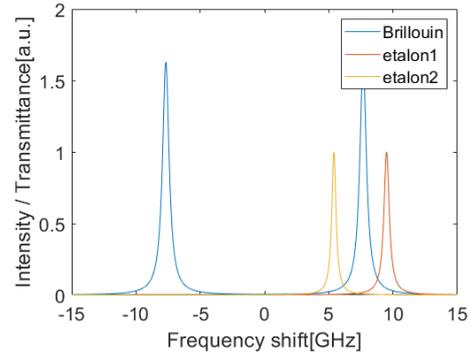


Fig.2 Principle of the double edge technique.

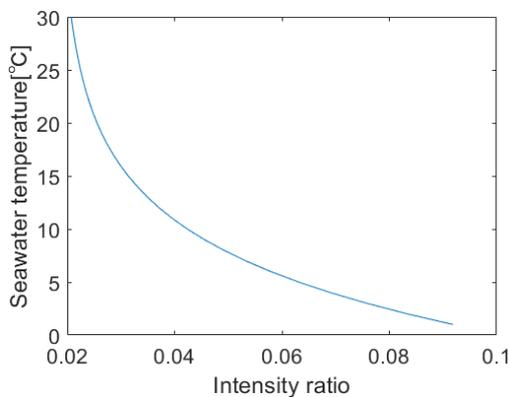


Fig.3 The intensity ratios in different seawater temperatures

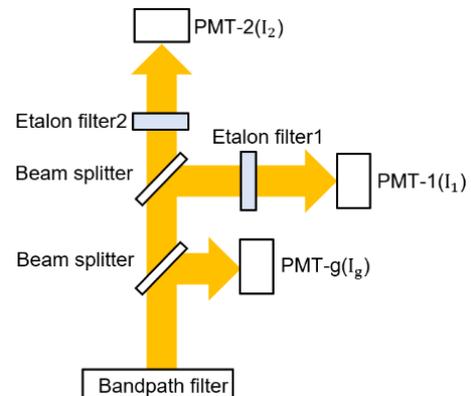


Fig.4 Schematic diagram of the receiving part of the Brillouin lidar.

3. 海水温測定における誤差要因

海水温は2つのエタロン透過光の強度比 S から推定するが、海水温変化によるブリルアンスペクトルの変化以外の要因で透過光強度に変化が生じた場合は海水温の誤差となる。誤差要因として以下が考えられる。

(1) ミー散乱漏れ込み誤差 ε_M [°C]

純海水と異なり濁りのある海水を測定するので、ミー散乱光の漏れ込みの影響がある。

(2) 統計誤差 ε_T [°C]

信号の統計的揺らぎによる誤差。レーザ出力や積算時間等で誤差の改善が図れる。

(3) 塩分濃度誤差 ε_S [°C]

ブリルアンスペクトルの周波数シフトや線幅は塩分濃度の変化にも依存している。海水温の推定にあたっては塩分濃度を仮定するが、実際の塩分濃度が仮定値と異なる場合には誤差になる。

(4) エタロンの揺らぎによる誤差 ε_E [°C]

ソリッドエタロンの場合、熱膨張に起因する基板厚さの変化によりフィルタの中心周波数シフトが起こり、透過率が変化し誤差になる。

4. 評価関数によるフィルタの仕様の選定

各誤差要因を考慮した評価関数を用いて、最適なエタロンフィルタの仕様の検討を行った。想定する測定環境は沿岸部で塩分濃度は 35% とした。また、各エタロンフィルタのパラメータの探索範囲は、 $0.1\text{GHz} \leq \nu_i \leq 10\text{GHz}$, $0.1\text{GHz} \leq \Gamma_i \leq 1.5\text{GHz}$ ($i=1, 2$) とし、①フィネス (f)=40 かつ $(\nu_i - FSR_i) < -15\text{GHz}$ と② $FSR_i = 2\nu_i$ かつ $(\nu_i + FSR_i) > 15\text{GHz}$ かつ $10 < f < 40$ の 2 つのパターンで探索を行った。ミー散乱漏れ込み誤差は、ミー散乱光強度が海水の濁り具合により異なるため、評価関数に組み込むと想定する測定環境ごとに最適フィルタの仕様が異なる可能性がある。またミー散乱漏れ込み誤差自体が大きいために、他の 3 つの誤差要因に関する評価関数で各エタロンフィルタの仕様を決定し、ミー散乱光の漏れ込みについては補正で対応することとした(詳細は 5 章)。評価関数 ε を以下に示す。

$$\varepsilon = \varepsilon_S + \sqrt{\varepsilon_t^2 + \varepsilon_e^2} \quad (5)$$

ここで ε_S は塩分濃度が設定した 35% に対して 30% であった場合の誤差、 ε_t は水深 10m における統計誤差、 ε_e は石英ガラスを $\pm 0.1^\circ\text{C}$ で温度制御し 2 つのエタロンの中心波長が反対方向にシフトしたときの誤差とする。各誤差の大きさは海水温 0~30°C での最大誤差とする。統計誤差は Table 1 に示すライダーパラメータとライダー方程式⁴⁾から求めた受信光強度から計算する。

式(5)による評価の結果、①のパターンの $\nu_1=7.6\text{GHz}$, $\Gamma_1=1.1\text{GHz}$, $\nu_2=4.7\text{GHz}$, $\Gamma_2=0.5\text{GHz}$ が最適なフィルタの仕様となった。これらのフィルタのスペクトルとブリルアンスペクトルの関係図を Fig. 5 に示す。

Table 1. Parameters of the Brillouin lidar

Lidar altitude	0m
Central wavelength	532nm
Single pulse energy	10 μJ
Attenuation coefficient	0.19 m^{-1}
Repetition frequency	10kHz
The refractive index of the seawater	1.33
Pulse width	6.671ns
The aperture of the telescope	0.2m
Brillouin backscattering coefficient at 180°	2.4 $\times 10^{-4}m^{-1}sr^{-1}$
Transmission of the optical receiving system	0.6
Efficiency of the photodetector	0.5
Integration time	1800s
Range resolution	1m

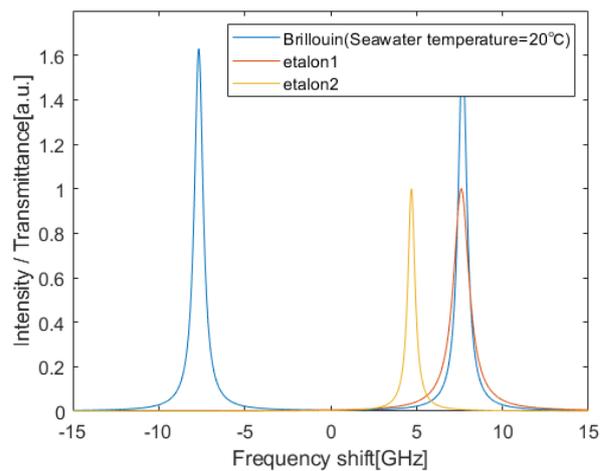


Fig.5 Brillouin spectrum and transmittance characteristics by optimum design of etalon filters.

5. ミー散乱光の漏れ込み補正について

海水中において、濁度が大きくなるにつれてミー散乱強度も大きくなる。本研究で想定している受信部の設計上、エタロンフィルタ透過後の信号についてミー散乱光漏れ込みの影響を無視することはできないので、取得した信号からミー散乱光強度(透過強度)を推定して補正を行う方法を検討した。今回考案した補正法のフローを以下に示す。

- ① 水深 z における海水の減衰係数 $K(z)$ をエタロン透過光強度 $I_1(z)$ の水深方向に対する減衰から推定する.
- ② 減衰係数 $K(z)$ とバンドパスフィルタ透過光強度 $I_g(z)$ から海水の後方散乱係数 $\beta(z)$ を導出する.
- ③ ブリルアン後方散乱係数 β_b とレイリー後方散乱係数 β_r を文献値⁵⁾ から仮定し, $\beta(z)$ からミー後方散乱係数 $\beta_m(z)$ を導出する.
- ④ $\beta(z)$ と $\beta_m(z)$ の後方散乱係数比と $I_g(z)$ から, ミー散乱後方散乱信号強度 $P_m(z)$ を推定し, 各エタロンフィルタ透過信号強度を補正する.

・①について

海水温変化による透過光強度変化の影響を無視すると, 透過光強度 $I_1(z)$ の水深方向の信号から減衰係数 $K(z)$ は次式で表すことができる.

$$K(z) = \frac{d}{dz} \left\{ -\frac{1}{2} \log \frac{z^2 I_1(z)}{C \beta_b(z)} \right\} \quad (C: \text{装置定数}) \quad (6)$$

式(6)を単純な差分で表すと,

$$K(z) = -\frac{1}{2(z_2 - z_1)} \log \frac{z_2^2 I_1(z_2)}{z_1^2 I_1(z_1)} \quad (z_1 < z_2) \quad (7)$$

となり, 実測した透過光強度 $I_1(z)$ から, 減衰係数 $K(z)$ が推定できる.

・②について

バンドパスフィルタ透過光強度 $I_g(z)$, 推定した $K(z)$ と次式から海水の後方散乱係数 $\beta(z)$ を導出する.

$$\beta(z) = I_g(z) \frac{z^2}{c} \{ \exp[-2 \int_0^z K(z') dz'] \}^{-1} \quad (8)$$

・③, ④について

$\beta_m(z) = \beta(z) - (\beta_b + \beta_r)$ なので, 式(8)の結果より $\beta_m(z)$ を導出し, 後方散乱係数比 $\frac{\beta_m(z)}{\beta(z)}$ と透過光強度 $I_g(z)$ からミー散乱光強度 $P_m(z)$ を求める. ミー散乱光強度に関する各エタロンフィルタ透過後の信号強度 $I_m(z)$ を次式で求める.

$$I_m(z) = P_m(z) T_i(v=0) \quad (9)$$

この補正法において, 統計誤差等により減衰係数の推定に誤差が生じるため, 完全な補正はできない. 4章で求めたエタロンフィルタの仕様と Table 1 のライダーパラメータにおける補正後のミー散乱漏れ込み誤差 $\varepsilon_M(z=10\text{m})$ を含む全誤差要因の誤差を Table 2 に示す.

Table 2. Each measurement error by optimum design of etalon filters.

ε_M	$1.5 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ ($z=10\text{m}$)
ε_T	$2.6 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$ ($z=10\text{m}$)
ε_S	$3.3 \times 10^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}$
ε_E	$2.4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}$

6. まとめ

本研究では, 従来のブリルアンライダーの受信部とは異なり吸収フィルタがない設計で, エタロンフィルタの仕様の選定と設計上の課題とされるミー散乱の漏れ込みに関する補正法についての考察を行った. 今回のシミュレーションではミー散乱漏れ込み誤差を, 提案した補正法により十分に抑えられる可能性が示された. 今後の課題として, 塩分濃度誤差の前提条件が限定的であり, 誤差の大きさも他の誤差要因と比較して大きいので, 補正方法や受信部の設計変更, 受信信号からの推定方法の見直しを検討する必要がある.

参考文献

- 1) D. Yuan et al.: Optics Express 29(26) (2021) 43049.
- 2) K. Liang et al.: Applied Physics B 126(10) (2020) 1.
- 3) K. Liang et al.: Optical Engineering 51(6) (2012) 066002.
- 4) J. H. Churnside: Optical Engineering 53(5) (2014) 051405.
- 5) C. D. Mobley: Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters, Academic Press, San Diego (1994).