

1. はじめに

水塊において、密度変化によって生成される成層状態は（以下、成層度とする）、力学的にその水環境に影響を与える。その物理的メカニズムを理解するためには、成層度を定量的に評価することが重要である。湖沼・沿岸海域（河口含む）の鉛直方向の成層度を定量的に評価するために、複数の直接・間接的に表現する指標が提案されてきた。簡易的に鉛直方向の2点間の密度差分を評価する方法（Knauss 1997）や単位面積をもつ水柱全体のポテンシャルエネルギーを算定する方法がある。後者について、例えば、以下の2つの成層度を評価する指標が挙げられる。有明海の貧酸素水塊の経年変化を明らかにするために定義された指標（柳・下村 2004）である。これは鉛直方向の密度変化の分布形を考慮した指標である。また、淡水流入量が顕著な河口域の成層度を表現する指標として、鉛直方向の密度変化と水深を重み付けした一次元ポテンシャルエネルギー（Simpson et al. 1978）が利用されてきた。この一次元ポテンシャルエネルギーは、内部波の振動特性を研究するために湖沼にも導入され（Antenucci et al. 2000）、その後、Rueda et al. (2003) によって成層度の定量化のために転用された。

歴史的に湖沼の成層度を定量化する場合には、多くの研究では水温の鉛直分布の変化 (ΔT) で評価してきた。例えば、表層混合領域 (epilimnion) は、鉛直方向の単位変化を Δz とすれば $\Delta T/\Delta z \leq 1.5$ [$^{\circ}\text{C}/\text{m}$] で評価される (e.g., Pernica 2014)。しかし、湖沼の全水塊における成層度は、密度変化の安定性を評価する Schmidt stability (e.g., Idso 1973) が利用されてきた (Kimura et al. 2017)。

本稿では、上記に挙げた成層度を評価する3つの指標について、海域、河口域、及び湖沼の季節的な密度変化を伴う成層度について、それぞれの特性と可用性を明らかにするものである。

2. 方法

柳・下村 (2004) が定義した水柱のポテンシャルエネルギーは、全水深の平均密度 ($\bar{\rho}$ [kg/m^3]) と水深 z [m] の密度 ($\rho(z)$ [kg/m^3]) との差分を鉛直方向に積分し、重力加速度 g [m/s^2] を掛けたものであり、次式で与えられる:

$$PE = g \int_{-H}^{\eta} (\rho(z) - \bar{\rho}) dz \quad (1)$$

一方、Simpson et al. (1978) 等が提案した水柱のポテンシャルエネルギーアノーマリーは、以下のように定義される。

$$PEA = \frac{g}{\eta + H} \int_{-H}^{\eta} (\rho(z) - \bar{\rho}) z dz \quad (2)$$

ここで H = 底面の深さ [m], η = 水位 [m] である。密度の鉛直分布の形状を直接表現した式(1)との比較では、深さによる鉛直方向の重み付けと全水深で規格化した部分が異なる。次に、湖沼などの閉鎖系水塊においては、鉛直混合の度合いを水平面積と水塊の体積中心からのズレを重み付けした Schmidt stability が用いられる。Idso (1973) により水塊の重心位置からのズレで修正し直した式は、以下のように与えられる。

$$S_t = \frac{g}{A_0} \int_0^{z_m} (z - z_E) A(z) [\bar{\rho} - \rho(z)] dz \quad (3)$$

ここで A_0 = 湖表面 [m^2], $A(z)$ = 水深 z での面積 [m^2], z_m = 最大水深 (湖表面~湖底面) [m]; z_E = 鉛直方向の平均密度となる水深 [m] (重心深さ) である。

データセットは、典型的な海域・河口域・湖沼の時空間の密度変化を示す過去の研究成果を利用した。

3. 結果と検討

沿岸海域の典型的な密度の鉛直分布を用い、各成層度について水深 z に対する成分の比較を図示した (図1)。但し、海水密度は $\sigma_t (= \rho - 1000)$ [kg/m^3] で与え、各指標は水柱における単位体積当たりのポテンシャルエネルギーで統一した。PE と S_t は平均密度となる z_E を起点に増加する。特に S_t は水柱重心からの水深と密度の差分の積によって2次曲線的に増加する。表層と底面付近では差分層が半減する為に成分量が減少した。

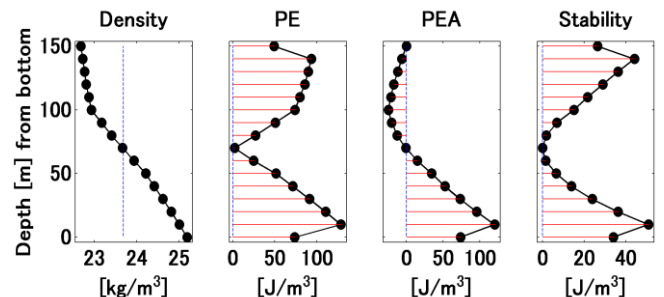


図1 密度分布に対応する各指標の層毎の成分 (注: Stability = S_t / z_m , 出典データ Knauss 1997)。

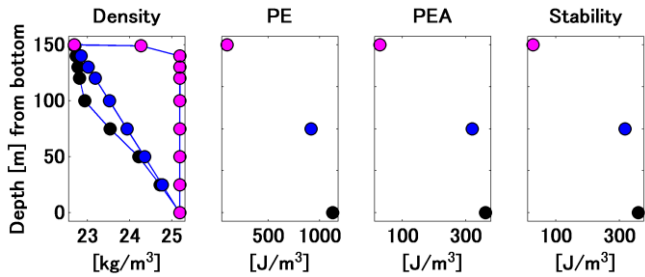


図2 密度の鉛直分布形による指標値の変化

各指標は、表層と底面の間で同じ差分密度であつても分布形が異なる場合には、その違いを定量的に評価することができる(図2)。図3は海域と河口域の典型的な密度変化の観測値を利用し、密度分布の季節変化とそれらの変化に対応する各指標値の比較図である。強い成層度が出現する河口域では、各指標と密度差との強い相関が確認できる。沿岸域ではPEの相関は多少バラツキが多くなるものの R^2 は高い値を示した。PEAと S_t は同じ値を示す。この理由は、2つの指標は単位面積をもつ水柱の場合には数学的に同じものとなる。例えばポテンシャルエネルギーの起点が異なっても、全水深で積分した場合には同じ値になるからである。次に、閉鎖系水域且つ、主に水温で密度分布が決定される湖沼について各指標の比較を行った(図4)。但し、閉鎖系水域の特性を生かし水深毎の面積で重み付けを行い、湖表面で規格化した指標を用いた。浅い湖で密度差が小さい成層度の場合には、各指標共に密度差との強い相関を示した。しかし、より大きな密度差が観測された深い湖では、全指標ともに密度差と強い相関

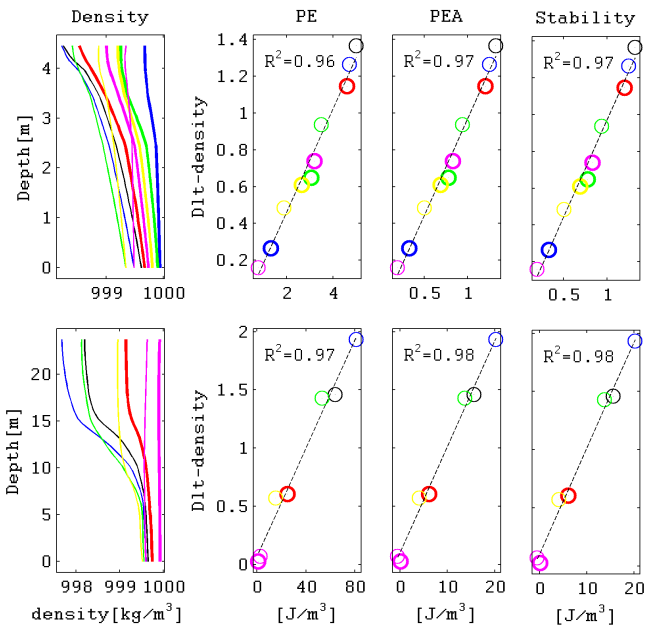


図4 湖沼の密度差と各指標の季節変化(上段:浅い湖 冬季除く月毎観測値,下段:深い湖 月毎観測値)。

を持ち、値はそれぞれの回帰線に乗る。図3と同様にPEAと S_t は同じ値を示す。これは、全体積の積分では、ポテンシャルエネルギーは一致するからである。

4. まとめ

沿岸・河口・陸水域の密度分布の変化に伴う成層度を示す指標の特性と可用性を調査した。水深方向の重み付けを持つPEAと S_t は、同じ指標で且つ可用性が高いことを明確にした。 S_t とほぼ同様の傾向を示したPEも簡便な数式の観点から、指標としての利用を推奨できる。湖沼の成層/混合状態の指標であるLake Numberが提案された背景に、深い湖に対する S_t の可用性の制限があった。その制限を量的に明確にする必要がある。

参考文献

- Antenucci JP, Imberger J, and Saggio A (2000) Seasonal evolution of the basin-scale internal wave field in a large stratified lake. *Limnol. Oceanogr.*, 45(7), 1621-1638.
- Idso SB, 1973. On the concept of lake stability. *Limnol. Oceanogr.* 18:681-683.
- Kimura N, Liu W-C, Tsai J-W, Chiu C-Y, Kratz TK, and Tai A (2017) Contribution of extreme meteorological forcing to vertical mixing in a small, shallow subtropical lake. *J. Limnol.* 76(1): 116-128
- Knauss JA (1997) Introduction to physical oceanography 2nd Ed., Prentice-Hall.
- Pernica PM (2014) Implications of Periodic Weak Thermal Stratification in the Epilimnion of Lake Opeongo. Ph.D. dissertation, Univ. of Toronto, Toronto, Canada.
- Rueda FJ, Schladow SG, Monismith SG and Stacey MT (2003) Dynamics of Large Polymictic Lake. I: Field Observations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2): 82-91.
- Simpson JH, Allen CM, and Morris NCG (1978) Fronts on the continental shelf. *Journal of Geophysical Research* 83 (C9): 4607-4614.
- 柳・下村 (2004) 有明海における成層度の経年変動. *海の研究 (Oceanography in Japan)*,13(6):575-581.

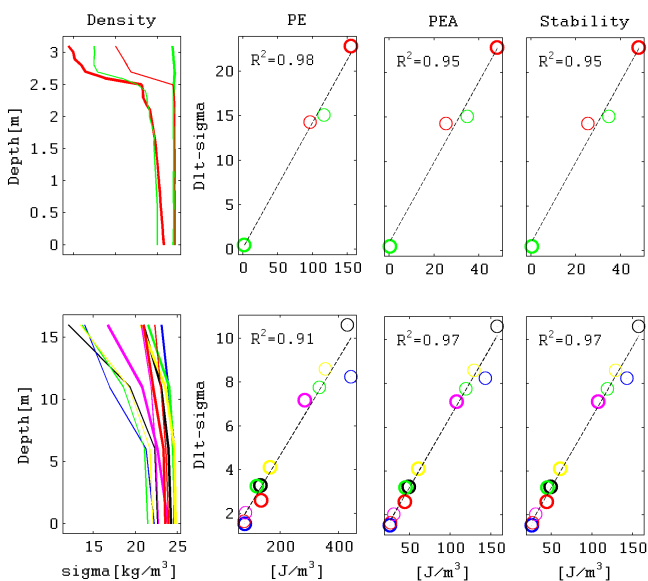


図3 密度差と各成層度の季節変化(上段:河口域 4シーズン観測値,下段:沿岸域 月毎観測値,点線=回帰線, R^2 =決定係数)。