

混合水深評価手法に関する現状と課題

水資源環境工学研究所 正会員 ○古里 栄一

1.はじめに

混合水深(z_m)は Sverdrup(1953)が海洋学においてプランクトン一次生産の限界水理条件である臨界水深(z_{cr})の定式化において、計 7 個設けた仮定条件の一つである。 z_m は水圏生態学、特に海洋学分野の概念であることから、水理学分野では研究対象となっておらず、その力学的議論や定義は十分ではない。一方で多様な面で近年ますます z_{cr} の重要性は高まっていることから、その基礎概念である z_m を適切に評価する必要がある。

z_{cr} と z_m は海水面でのガス交換や酸素生産、熱量貯留に強く影響することから、気候変動にかかる諸課題に関連して前世紀末からこれらの水深概念に対して海洋学では多様な手法による研究が極めて盛んである。一方で陸水域では湖沼物理の研究が特にわが国では近年活発ではないこともあり、混合水深に関する学術研究例は少ない傾向がある。一方で工学分野では貯水池水質保全対策としての気泡式循環対策の直接的効果の指標として、混合水深および臨界水深概念が古くから国内外で活用されている。

こうした z_m の重要性の一方で、水理学的に定量的な定義と評価手法が確立していないために国内外の学術・技術分野で混乱が生じているのが実態であると考えられる。

2.混合水深と水温成層・水温躍層・Mixed/Mixing depth

水温成層は、水温(密度)鉛直分布形態の一つである。線形以外の成層では、水温が急変する水深、つまり水温躍層が存在する。この上部の水温がほぼ均一とみなせる場合に混合層と呼ばれ、その下端位置水深が z_m となる。さらに、水面付近水温の時間変動で生じる日内躍層と、より深部の季節躍層に区分される。これらは、一次躍層と二次躍層と呼ばれることがあり、文献等によって一次と二次の位置が逆の場合もある。さらにダム貯水池では流出入および気泡式循環によって形成される躍層もある。

混合水深は英語では Mixed depth と表記されてきたが近年は Mixing depth が使用されることもある。これは、混合層が形成された乱流の発生が、数日以上過去の過去であるが、検討対象時であるかの時間に応じた違いである。この分類は時間に基づくものであるのに対して、古くから Mixed が使われてきた背景は、乱流現象の主体客体関係において、あくまで水は外部からの混合営力で「受動的に混合させられる」という意味だったと筆者は考える。

実務分野や物理分野以外の特に生物系学会では、水温成層形態の「見た目」で z_m が判断されることが多い。従前の気泡式循環対策の効果評価においてそれ

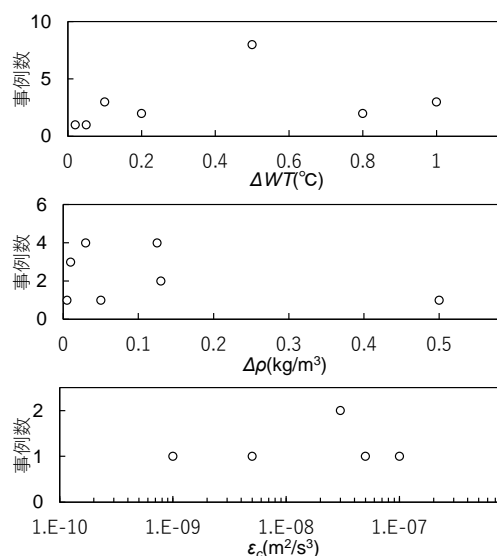


図-1 z_m 定義指標値の事例 (ΔDO は 0.5%、 L_T は約 1~0.1m が用いられている。)

は顕著であった。混合層を含む水温成層形態を植物プランクトンのハビタットと考えた概念整理も必要である。

3.混合水深評価方法の現状

z_m の評価手法は、先述した「見た目」以外では、様々な定量的方法が主に海洋分野で提案、利用されている。これらは以下に大別できる。1. 経験式として湖沼の特性量(透明度, フェッチ)を用いて、湖沼の代表的な値を評価する, 2. 水温, 密度, DO の鉛直分布から、表層値とある水深の値とが一定値に収まる水深を用いる, 3. 粘性消散率(ϵ)および Thorpe 長さ(L_T)が一定値以上の表層を十分な乱流が発生している混合層とする, 4. DYRESM 等の一次元ラグランジェモデルで直接表層混合層を解析する、である。これらのうち、方法2, 3に関して、文献から得られた指標値の事例を図-1に示す(参考文献には資料性の観点から、これらの出典を示した)。いずれの指標も文献によって幅が大きいことがわかる。なお水温および密度を用いた場合、それは過去の混合結果の痕跡、すなわち Mixed depth である可能性が排除できない問題がある。Active mixing 評価のためには方法3が好ましい。ただし、 ϵ 評価は流速データが必要でありダム管理には適正が低い。 L_T は水温鉛直分布から評価可能であり ϵ と一定の関係があること、DO は混合外力が十分でなければ水温が均一でも生化学反応によって深部では低下することからこれらは Mixing の指標として有用性がある。しかしながら DO を使用した唯一の事例は南極海を対象としたものであることから、淡水域での検討が必要である。また、混合に関する名称や概念整理とその普及も課題である。

【参考文献(zm定義指標に関して用いた論文)】

< ΔWT >

- 1) Foltz, G.R., Grodsky, S.A., Carton, J.A. and McPhaden, M.J.: Seasonal mixed layer heat budget of the tropical Atlantic Ocean, *J. Geophys. Res.*, 108(C5), 3146, DOI: 10.1029/2002JC001584, 2003.
- 2) Kara, A. B., Rochford, P.A. and Hurlburt, H.E.: An optimal definition for ocean mixed layer depth, *J. Geophys. Res.*, 105, pp. 16803–16821, 2000.
- 3) Kara, A.B., Rochford, P.A. and Hurlburt, H.E.: Mixed Layer depth variability over the global ocean. *J. Geophys. Res.*, 108, NO. C3, 3079, doi:10.1029/2000JC000736, 2003.
- 4) Kelly, K. A., and Qiu, B.: Heat flux estimates for the western North Atlantic, I, Assimilation of satellite data into a mixed layer model, *J. Phys. Oceanogr.*, 25, pp. 2344-2360, 1995.
- 5) Lamb, P.J.: On the mixed layer climatology of the north and tropical Atlantic, *Tellus, Ser. A*, 36, pp. 292-305, 1984.
- 6) Levitus, S.: Climatological atlas of the world ocean, NOAA Prof. Pap. 13, 173 pp., U.S. Govt. Print. Off. Washington. D. C., 1982.
- 7) Martin, P. J.: Simulation of the mixed layer at OWS November and Papa with several models, *J. Geophys. Res.*, 90, pp. 903-916, 1985.
- 8) Monterey, G.I. and Levitus, S.: Seasonal variability of mixed layer depth for the world ocean, in: NOAA Atlas NESDIS 14, U.S. Government Printing Office, Washington D.C., 96, pp. 1997.
- 9) Obata, A., Ishizaka, J. and Endoh, M.: Global verification of critical depth theory for phytoplankton bloom with climatological in situ temperature and satellite ocean color data. *J. Geophys. Res.*, 101 (C9), pp. 20657–20667, 1996.
- 10) Price, J. F., Weller, R. A. and Pinkel, R.: Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response diurnal heating, cooling, and wind mixing, *J. Geophys. Res.*, 91, pp. 8411-8427, 1986.
- 11) Rao, R.R., Molinari, R.L. and Festa, J.F.: Evolution of the climatological near-surface thermal structure of the tropical Indian Ocean: Description of mean monthly mixed layer depth, and sea surface temperature, surface current, and surface meteorological fields, *J. Geophys. Res.*, 94, pp. 10801–10815, 1989.
- 12) Siegel D.A., Doney S.C. and Yoder JA.: The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis. *Science*, 296, pp. 730-733, 2002.
- 13) Spall, M.A., Weller, R.A. and Furey, P.W.: Modeling the three-dimensional upper ocean heat budget and subduction rate during the Subduction Experiment, *J. Geophys. Res.*, 105, pp. 26151–26166, 2000.
- 14) Sprintall, J. and Roemmich, D.: Characterizing the structure of the surface layer in the Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 104, pp. 23297-23311, 1999.
- 15) Stramska, M., Dickey, T.D., Plueddemann, A., Weller, R., Langdon, C. and Marra, J.: Bio-optical variability associated with phytoplankton dynamics in the North Atlantic Ocean during spring and summer of 1991, *J. Geophys. Res.*, 100, pp. 6621-6632, 1995.
- 16) Tedford, E.W., MacIntyre, S., Miller, S.D. and Czikowsky, M.J.: Similarity Scaling of turbulence in a temperate lake during fall cooling, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, pp. 4689-4713, 2014.
- 17) Thompson, R.: Climatological numerical models of the surface mixed layer of the ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 6, pp. 496-503, 1976.
- 18) Wagner, R. G.: Decadal scale trends in mechanisms controlling meridional sea surface temperature gradients in the tropical Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 101, pp. 16683-16694, 1996.

< $\Delta \rho$ >

- 19) Anis, A. and Moum, J.N.: Prescriptions for heat flux and entrainment rates in upper ocean during convection, *Journal of Physical Oceanography*, 24, pp. 2143-, 2155, 1994.
- 20) de Boyer Montégut, C., Madec, G., Fischer, A.S., Lazar, A. and Iudicone, D.: Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile based climatology, *J. Geophys. Res.*, 109, C12003, doi:10.1029/2004JC002378.
- 21) Gardner, W.D., Gundersen, J.S., Richardson, M.J. and Walsh, I.D.: The role of seasonal and diel changes in mixed-layer depth on carbon and chlorophyll distributions in the Arabian Sea, *Deep-Sea Research II*, 46, pp. 1833-1858, 1999.
- 22) Huang, R. X., and S. Russell: Ventilation of the subtropical North Pacific, *J. Phys. Oceanogr.*, 24, pp. 2589-2605, 1994.
- 23) Lewis, M.R., Cart, M., Feldman, G., Esaias, W. and McClain, C.: Influence of penetrating solar radiation on the heat budget of the equatorial Pacific Ocean, *Nature*, 347, pp. 543-544, 1990.
- 24) Ohlmann, J. C., Siegel, D. A. and Gautier, C.: Ocean mixed layer radiative heating and solar penetration: A global analysis, *Y. Climate*, 9,

pp. 2265-2280, 1996.

- 25) Schneider, N., and Mu'ller, P.: The meridional and seasonal structures of the mixed layer depth and its diurnal amplitude observed during the Hawaii-to-Tahiti shuttle experiment, *J. Phys. Oceanogr.*, 20, pp. 1395–1404, 1990.
- 26) Smith, W.O. and Jones, R.M.: Vertical mixing, critical depths and phytoplankton growth in the Ross sea, *ICES J. Mar. Sci.*, 72(6), pp. 1952-1960, 2015.
- 27) Spall, M. A.: A diagnostic study of the wind and buoyancy driven North Atlantic circulation, *J. Geophys. Res.*, 96, pp. 18509-18518, 1991.
- 28) Suga, T., Motoki, K., Aoki, Y. and Macdonald, A.M.: The North Pacific climatology of winter mixed layer and mode waters. *J. Phys. Oceanogr.*, 34, pp. 3-22, 2004.
- 29) Thomson, R.E. and Fine, I.V.: Estimating mixed layer depth from oceanic profile data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 20(2), pp. 319-329, 2003.
- 30) Townsend, D.W., Keller, M.D., Sieracki, M.E. and Askelson, S.G.: Spring phytoplankton blooms in the absence of vertical water column stratification. *Nature*, 360, pp. 59-62, 1992.
- 31) Weller, R. A., and Plueddemann, A. J.: Observations of the vertical structure of the oceanic boundary layer, *J. Geophys. Res.*, 101, pp. 8789–8806, 1996.

< ΔDO >

- 32) Morales, K.C. and Kaiser, J.: Using dissolved oxygen concentrations to determine mixed layer depths in Bellingshausen sea, *Ocean Sci.*, 8, pp. 1-10, 2012.

< ϵ >

- 33) Dewey, R.K., and Moum, J.N.: Enhancement of fronts by vertical mixing. *Journal of Geophysical Research*, 95(C6), pp. 9433–9445, 1990.
- 34) Fer, I., and Sundfjord, A.: Observations of upper ocean boundary layer dynamics in the marginal ice zone. *J. Geophysical Research*, 112, C04012, doi:10.1029/2005JC003428, 2007.
- 35) Giunta, V., and Ward, B.: Ocean mixed layer depth from dissipation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2021JC017904. <https://doi.org/10.1029/2021JC017904>, 2022.
- 36) Lozovatsky, I. D., Roget, E., Fernando, H. J. S., Figueroa, M., and Shapovalov, S.: Sheared turbulence in a weakly stratified upper ocean. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research*, 53(2), pp. 387–407, 2006.

< L_T >

- 37) Brainerd, K.E. and Gregg, M.C.: Surface mixed and mixing layer depths, *Deep Sea Research*, 42(9), pp. 1521-1543, 1995.
- 38) Chalamalla, V.K. and Sarkar, S.: Mixing, dissipation rate, and overturn-based estimates in a near-bottom turbulent flow driven by internal tides, *Journal of Physical Oceanography*, 45, pp. 1969-1987, 2015.
- 39) Cisewski, B., Strass, V. H., Losch, M. and Prandke, H.: Mixed layer analysis of a mesoscale eddy in the Antarctic Polar Front Zone, I, *J. Geophys. Res.*, 113, C05017, doi:10.1029/2007JC004372, 2008.
- 40) Dillon, T.M.: Vertical Overturns: A comparison of Thorpe and Ozmidov Length Scales, *J. Geophysical Res.*, Vol. 87, pp. 9601-9613, 1982.
- 41) Etemad-Shahidi, A. and Imberger, J.: Anatomy of turbulence in thermally stratified lakes, *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 46, pp. 1158-1170, 2011.
- 42) Jalali, M., Chalamalla, V.K. and Sarkar, S.: On the accuracy of overturn-based estimates of turbulent dissipation at rough topography, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 47, pp. 513-532, 2017.
- 43) Kumar, B.P., D'Asaro, E., Rao, N.S., Rama, E. P. and Ravichandran, M.: Thorpe turbulence scaling in night time convective surface layers in the North Indian Ocean, *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 10.1175/JPO-D-21-0017.1, 2021.
- 44) Mater, B.D., Venayagomorthy, S.K., St Laurent, L and Moum, J.N.: Biases in Thorpe-scal estimates of turbulence dissipation. Part I: Assenments from large-scale overturns in oceanographic data, *Journal of Physical Oceanography*, Vol.45, pp. 2497-2521, 2015.
- 45) Thorpe, S.A.: Turbulence and mixing in a scottish loch, *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, Vol. 286, pp. 125-181, 1977.
- 46) 和方吉信, 水江謙二郎: Thorpe 変位を用いた鉛直渦拡散係数の推定, *沿岸海洋研究*, Vol. 57, pp. 15-19, 2019.
- 47) Wesson, J.C. and Gregg, M.C.: Mixing at Camarinal sill in the strait of Gibraltar, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, pp. 9847-9878, 1994.
- 48) Yang, P., Fong, D.A., Lo, E.Y. and Monismith, S.G.: Vertical mixing in a shallow tropical reservoir, *Limnology*, Vol. 20, pp. 279-296, 2019.