

琵琶湖の水質環境・水産資源に影響を与える
底層混合層の発生と消滅過程の解明

Classification of Onset and Recovery from Bottom Mixed Layer in Lake Biwa

中山 恵 介
Keisuke Nakayama

1. はじめに

日本最大の淡水湖である琵琶湖を対象とする。琵琶湖北部では、春から夏にかけて表層の湖水が暖められることで、底層において混合層が発達する¹⁻³⁾。この混合層を底層混合層と呼ぶ。混合層の厚さは最大で 20m 程度であり、成層の効果により底層混合層とその上部の水塊の間のスカラー量のフラックスが抑制される。そのため、有機物を中心とした底質の存在により、底層付近における溶存酸素が消費され、底層混合層内に貧酸素水塊が発生する。夏季を中心として、底層混合層が発生するといわれているが、十分な日射が与えられても発生しない場合があり、底層混合層の発生と消滅機構は未解明である。なお、琵琶湖において用いられている呼称としては、表層混合層は“水表層”，底層混合層は“湖底境界層”であり、本報告においてそれぞれの両者は同じ現象を意味する。

そのような状況下，2020 年夏季において，過去に発生したことがない特異な空間分布を有する貧酸素水塊が発生し，エビの大量死が確認された。そこで本研究では，底層で発生する貧酸素水塊が，湖内でいかに発生・移動し消滅しているか解明することを目的とする。

2. 琵琶湖での現地観測

2. 1 観測の概要

本研究では琵琶湖を対象とした 2018 年 2 月から 2020 年 4 月まで約一ヶ月おき（表-1）に今津沖中央地点（図-1 の赤点）において水温，塩分，電気伝導度，密度，Chl-a，濁度，pH，Dissolved Oxygen(DO)，光量子の鉛直データについて，AAQ-176 を用いて滋賀県琵琶湖研究科学センターにて調査されたデータを使用した。観測日については表-1 に示す。また，サーミスタチェーンにより 2018 年 9 月 21 日 12:00 から 2019 年 7 月 20 日 1:30 まで 10 分おきの水温のデータを採取した。鉛直プロファイルの計測には，総合水質系 AAQ-176，サーミスタチェーンには TidbiT Water Temperature Logger を使用した。

表-1 AAQ-176 による観測日リスト

2018/2/8	2018/20/25	2019/8/22
2018/3/15	2018/11/21	2019/9/26
2018/3/22	2018/12/19	2019/10/24
2018/5/11	2019/1/10	2019/11/29
2018/5/31	2019/2/20	2019/12/18

2018/6/21	2019/3/14	2020/2/13
2018/7/10	2019/5/23	2020/3/18
2018/7/26	2019/6/20	2020/4/15
2018/9/27	2019/7/25	

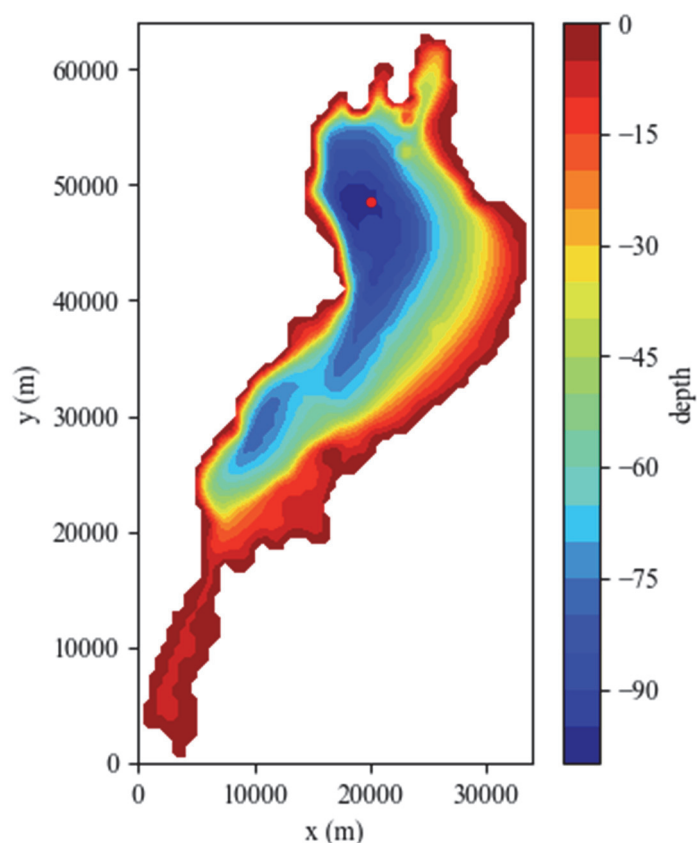


図-1 琵琶湖の湖底までの水深分布図（水面からの水深が負で示されている）。

2. 2 観測データから混合層厚の推定方法

サーミスタチェーンの観測結果から、水温の鉛直分布の時間変化コンター図を作成した。2018年10月から2019年1月ごろまでは水温 $5.0^{\circ}\text{C} \sim 7.5^{\circ}\text{C}$ の層が確認できたが、2019年1月以降は同様の水温の層が確認されていないことがわかった。AAQ-176 が観測を行った各観測日に対して、水温の鉛直変化と DO の鉛直変化を示したグラフを作成した。これらのグラフから表層混合層と底層混合層の厚さを決定し、解析に使用した。表層混合層は風の力で強制的に混ぜられる層のことで、底層混合層は内部波などの鉛直混合によって発生する層のことである（表-2、図-2）。混合層内では、密度や水温などの多くのパラメータが一様になっている様子が見られる。表層混合層と底層混合層の間には成層が存在しており、表層混合層と底層混合層で挟む形で存在している。

表-2 AAQ-176 観測日と表層および底層混合層厚さ

観測日	表層混合層	底層混合層	観測日	表層混合層	底層混合層
2018/2/8	60.123	27.06	2019/2/20	32.887	19.348
2018/3/15	1.473	10.635	2019/3/14	54.412	17.004
2018/3/22	26.041	7.785	2019/5/23	13.119	5.74
2018/5/11	8.795	14.823	2019/6/20	8.746	7.4577

2018/5/31	4.073	4.253	2019/7/25	8.596	3.293
2018/6/21	12.18	2.91	2019/8/22	9.204	3.644
2018/7/10	0.458	3.206	2019/9/26	15.106	2.289
2018/7/26	6.842	8.057	2019/10/24	17.439	4.141
2018/9/27	13.045	11.264	2019/11/29	22.543	7.69
2018/10/25	18.49	7.95	2019/12/18	36.877	3.6
2018/11/21	26.533	8.476	2020/2/13	74.282	10.194
2018/12/19	34.155	4.344	2020/3/18	1.335	15.17
2019/1/10	41.524	11.981	2020/4/15	44.88	13.341

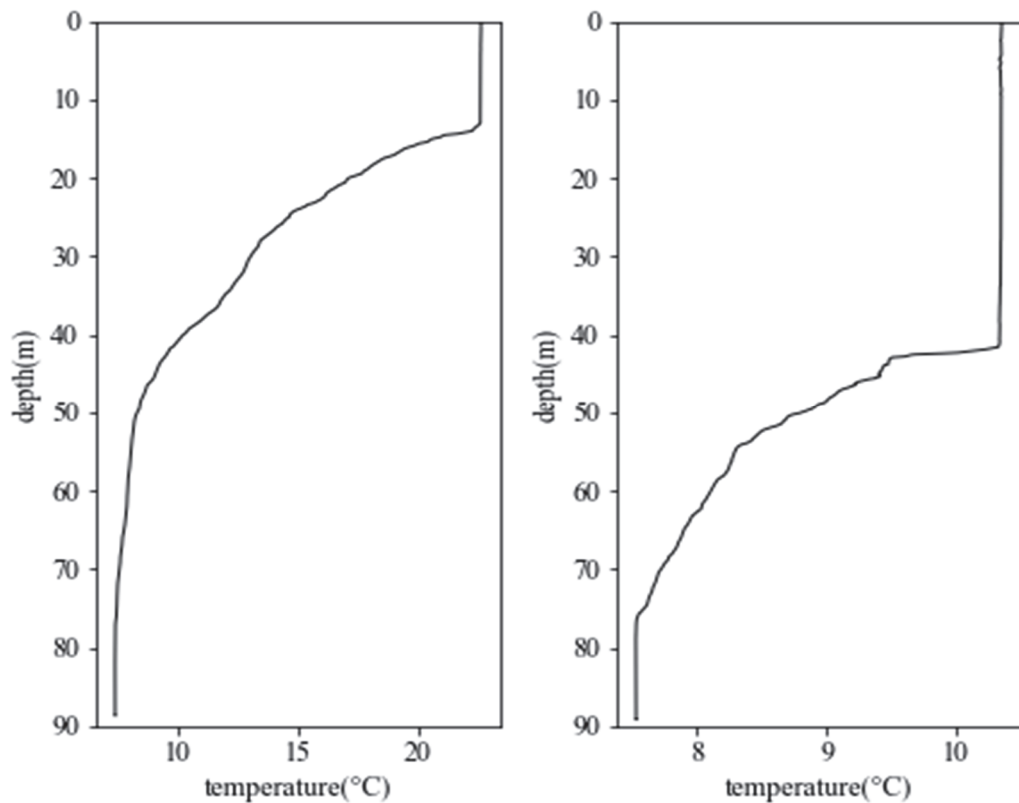


図-2 水温の鉛直分布図. 左図：2018年9月27日，右図：2019年1月10日．

サーミスタチェーンによる水温の観測データから，自動的に混合層厚を推定することを試みた．推定方法はAAQ-176の水温の鉛直分布を記述した観測データを参考に水表面の水温から1℃低下した水温の水深を表層混合層，湖底の水温から0.08℃上昇した水温の水深を底層混合層とした．冬季は全体の温度変化が小さく1℃，0.08℃という設定では全体を包括してしまうため，表層は水表面から0.08℃低下した水温の水深を表層混合層，底層は湖底から0.02℃上昇した水温の水深を底層混合層とパラメータを変えた．これらのパラメータは決定係数が最も高くなるように設定した（表-3）．決定係数の値として表層は0.906，底層は0.125であった．このことから表層の解析には有意性があるといえる．

表-3 AAQ-176による推定値とサーミスタチェーンの推定値の比較（左の2列が観測値，右の2列が推定値を示している）

観測日	表層混合層	底層混合層	表層混合層	底層混合層
2018/9/27	13.045	11.264	12.64	9.578

2018/10/25	18.49	7.95	21.047	9.538
2018/11/21	26.533	8.476	29.04	14.373
2018/12/19	34.155	4.344	34.713	15.282
2019/1/10	41.524	11.981	56.497	12.285
2019/2/20	32.887	19.348	47.285	10.894
2019/3/14	54.412	17.004	58.924	9.25
2019/5/23	13.119	5.74	10.393	14.216
2019/6/20	8.746	7.4577	8.351	6.4

風エネルギーが大きくなることで、表層および底層混合層厚が影響を受ける可能性がある（図-3）。風が強くなると混合層厚が大きくなる傾向にあることがわかった。また表-3にも示したように表層、底層ともに2~3月に最も発達し、春にリセットされ秋から冬にかけて発達している傾向があることがわかった。なお、このことから2~3月に全層循環が起きていることが確認された。

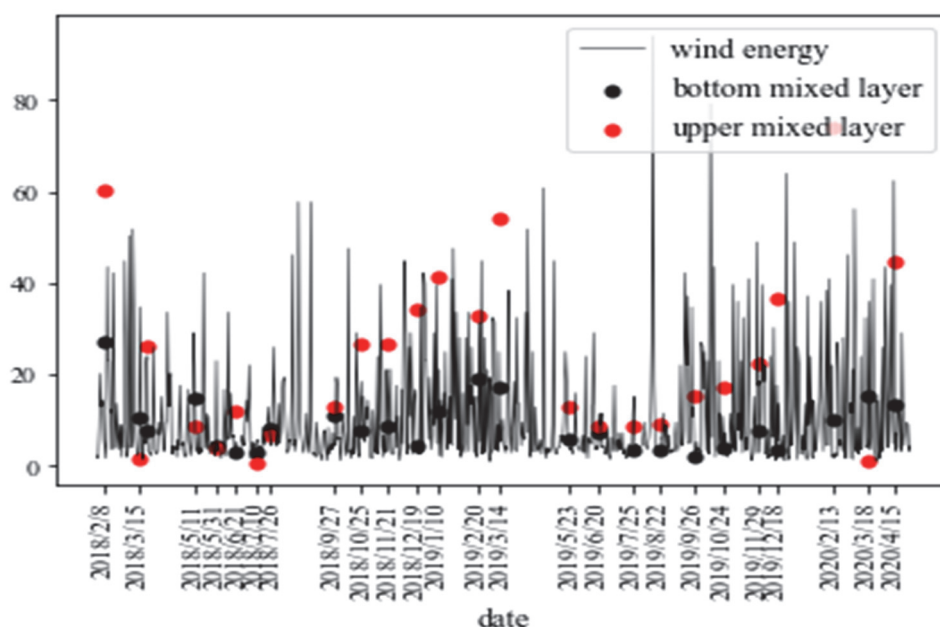


図-3 風エネルギーと表層および底層混合層厚の時系列（縦軸は風エネルギーについて m^2/s^2 、混合層厚は m である）。

3. 現地観測結果の解析

3. 1 混合層厚の変動について

例として、サーミスタチェーンデータの2018年9月末における水温の鉛直分布の時系列および風速データを示す（図-4）。風が強く吹いた後に水温が大きく変化していることが確認できる。水温の変化は底層よりも表層の方が大きいことがわかった。風が強く吹いた後に水温が大きく変化するという傾向は観測期間全体で確認された。

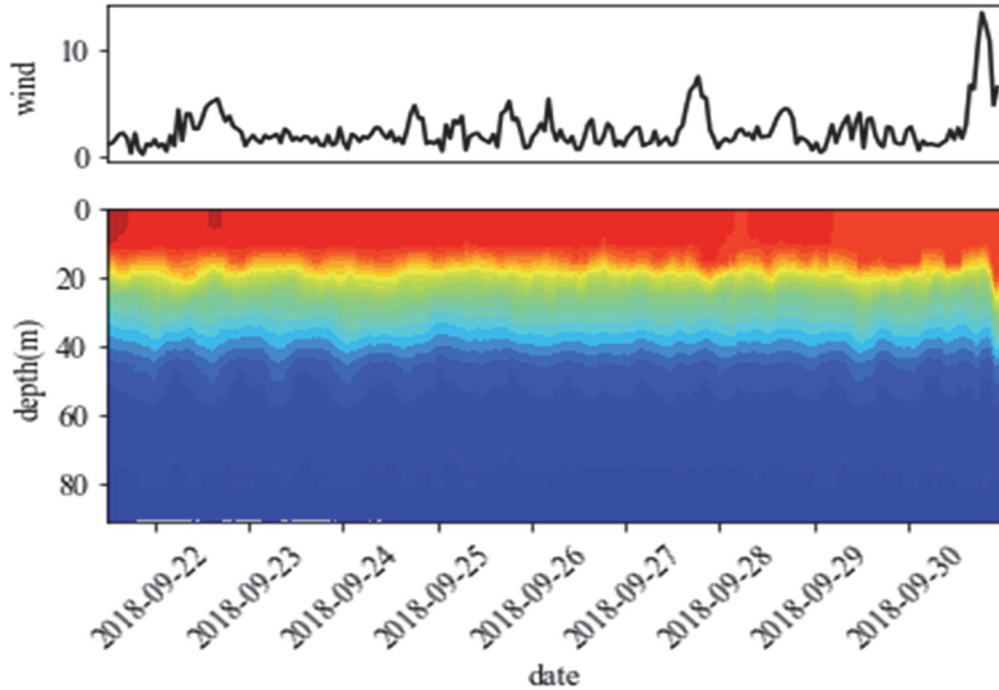
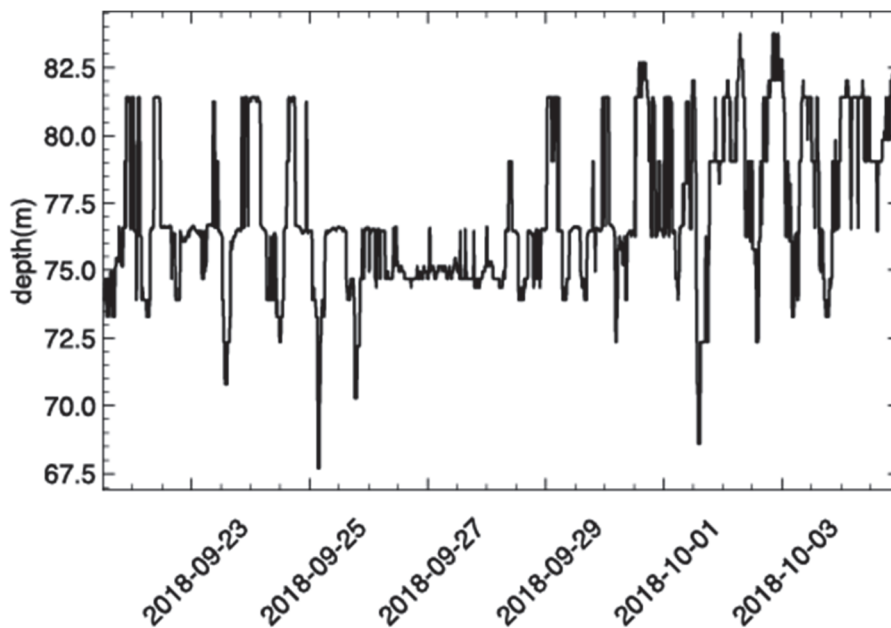


図-4 2018 年 9 月 21 日から 2018 年 9 月 30 日における風速（上図）および水温鉛直分布の時系列（下図）。

例として示された期間において、ウェーブレット解析を実施し、どの周期の変動がどの期間に卓越していたかを検討した（図-5）。本研究で対象としている底層混合層厚に関する結果のみ示す。卓越していたのは、約 12 時間、18 時間、45 時間、100 時間であった。Shimizu ら⁴⁾によると、夏から秋にかけての成層場では、43 時間、25 時間、20 時間、16 時間、12 時間、11 時間、10 時間、9 時間の内部波が卓越して発生することが示されている。最初と 2 番目の内部波はサイクロニック（CG）な内部ケルビン波であり、それ以降は全て内部ポアンカレ波である。サイクロニックかアンチサイクロニック（AG）であるかは、地形の影響を受けてそれほど重要でないことも知られている。



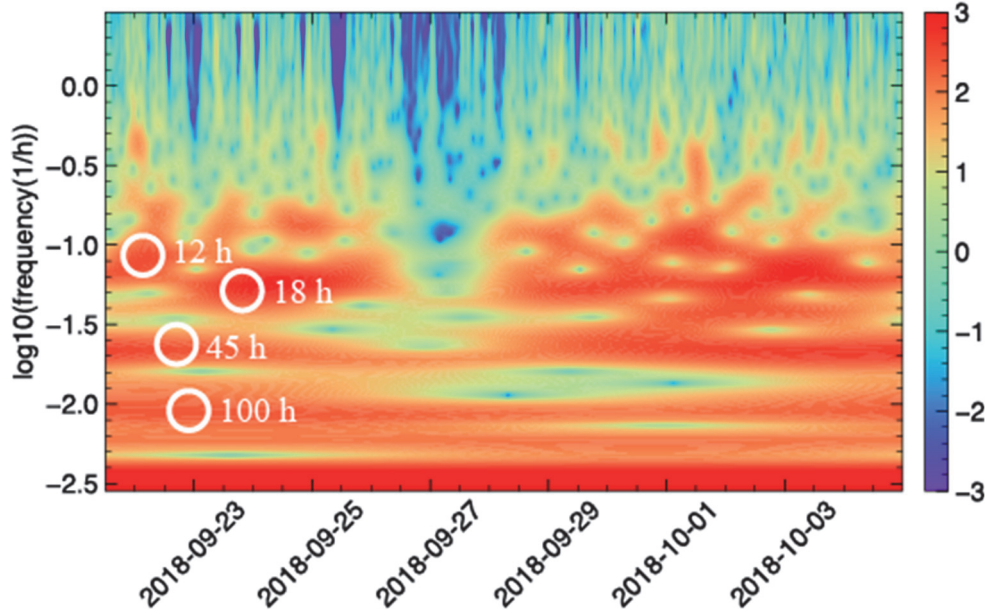


図-5 2018 年 9 月末から 10 月初旬における wavelet 解析結果. 上図：底層混合層の水面からの距離. 下図：底層混合層の水面からの距離の wavelet 解析結果.

3. 2 理論解を利用した考察

Antenucci ら⁵⁾によると、楕円の筒状の領域における内部長波の卓越周期の理論解は、以下の式を解くことで得られる。

$$\sigma_i^2 = \frac{Ce_1(\xi_0, q_i)Se_1(\xi_0, q_i)}{Ce_1'(\xi_0, q_i)Se_1'(\xi_0, q_i)}$$

$$q_i = \frac{1 - \phi^2 / \phi^2 \left(\frac{\sigma_i^2 - 1}{S_i^2} \right)}{4}$$

$$S_i = \frac{c_l}{\phi f_c}$$

ここで、 Ce は修正余弦楕円のマシュー関数、 Se は修正正弦楕円のマシュー関数、 ξ は半径座標、 ϕ は長軸半径、 φ は短軸半径、 $\sigma_i = \omega_i / f_c$ は無次元振動数である。

琵琶湖における最大の周期を持つ内部ケルビン波を対象として、長径を 52km、短径を 16km、上層厚さ 18m、下層厚さ 25m、密度差比 0.0025 すると、水表面積は 653km² (実際の水表面積とほぼ一致する)、コリオリ係数は 8.36E-5 (1/s) なので慣性周期が 20.9 時間、バーガー数が 0.233 となる。その結果、CG の内部ケルビン波は約 46 時間、AC のポアンカレ波は約 13 時間、CG の内部ポアンカレ波は約 7 時間、AC の内部ポアンカレ波は約 6 時間と続く。Shimizu らの値は、地形の効果で楕円のサイズを変更しなくては得られない値であることから、琵琶湖全体としては、46 時間と 13 時間が特に卓越するものと考えられる。Wavelet 解析で得られた値では、18 時間もあり、琵琶湖が急激に曲がっている地形の影響で発生するものであることが Shimizu ら⁴⁾により示されている。

外的要因である気象条件が与える影響を検討するため、ほぼ同期間における風速に対して wavelet 解析を実施した。その結果、日周期に対応する 24 時間、およびその関連の 36 時間や 126 時間を除き、63 時間が卓越していた (図-6)。内部ケルビン波に比して少し長い周期ではあるが、内部ケルビン波の発生と継続を促す可能性があると考えられる。特に底層混合層厚が発達していた 9 月下旬において、内部ケルビン波も発生していることが示されており、底層混合層の発達に重要な影響を及ぼしている可能性が示された。

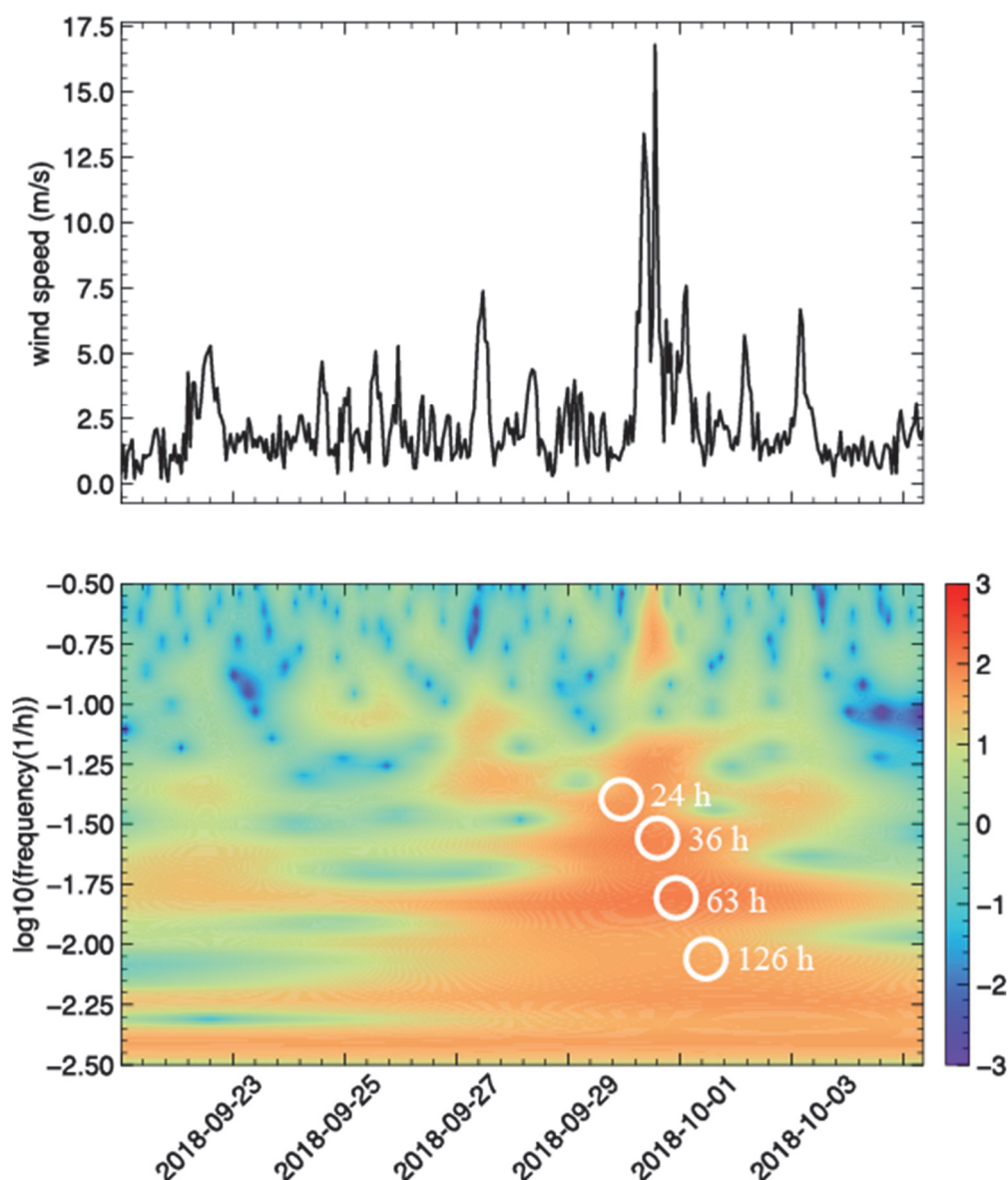


図-6 2018 年 9 月末から 10 月初旬における風速の wavelet 解析結果. 上図: 風速. 下図: 風速の wavelet 解析結果.

4. おわりに

本研究では琵琶湖の表層と底層の混合層厚を現地観測結果から検討した. AAQ-176 とサーミスタチェーンの観測結果から混合層厚を推定することができた. しかし, 冬季は全体としての水温変動が小さく一定のパラメータで推定することができず, 観測値との誤差が現れていた. また, 風が強く吹けば, 混合層にも影響を与えていることが分かった. 底層混合層の発達に寄与している要因を注するするために, wavelet 解析を実施し, 卓越周期に関する検討を行い, 内部ケルビン波が最も大きな影響を与えている可能性が示された. 特に, 外的要因である風がその発生及び継続に重要な役割を果たしている可能性を示すことができた. 今後, 内部ケルビン波に関する詳細な検討を行っていく必要がある.

参 考 文 献

- 1) 速水祐一, and 藤原建紀. "琵琶湖深層水の温暖化." 海の研究 8.3 (1999): 197-202.
- 2) 速水祐一, 藤原建紀, and 坂本亘. "琵琶湖北湖における水温鉛直分布の長期連続観測." 陸水学雑誌 58.3 (1997): 305-316.
- 3) 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター: 琵琶湖の全層循環, <https://www.lberi.jp/setting/learn/jikken/junkan> (Access 2022 年

1 月 25 日)

- 4) Shimizu, K., Imberger, J., Kumagai, M.: Horizontal structure and excitation of primary motions in a strongly stratified lake, *Limnology and Oceanography*, 52(6), 2641-2655, 2007.
- 5) Antenucci, J. P., Imberger, J.: Energetics of long internal gravity waves in large lakes, *Limnology and Oceanography*, 46(7), 1760-1773, 2001.

著 者

中山 恵介 所員，博士（工学），水工学