

琵琶湖における高精度な流動場の解析手法の提案

神戸大学 市民工学専攻 学生会員 ○王 媛 神戸大学 市民工学専攻 正会員 中山 恵介
 神戸大学 市民工学専攻 学生会員 岩田 遼 首都大学東京 都市基盤環境学科 正会員 新谷 哲也
 佐賀大学 農学部 速水 祐一 京都大学 名誉教授 藤原建紀

1. はじめに

地球温暖化の影響により水温が上昇し、その結果、大水深の湖では秋季から冬季にかけて毎年発生するオーバーターンが抑制される可能性が指摘されている。実際に2019年において、「琵琶湖の深呼吸」と呼ばれる全層循環が発生せず、混合水深は水深80mまでのみであったことが報告されている。今後、同様な現象が発生する可能性が高く、生態系への深刻なダメージが懸念されている。湖の流動を再現する上で重要な外力である気象条件の将来予測結果について、その精度は徐々に向上している。よって、流動場を高精度に再現することができれば、今後の地球温暖化に対する対策を講じる上で重要な知見を得ることが可能となる。しかし、これまでに利用されている流動モデルは静水圧近似に基づいたものであり、高周波成分の内部波の砕波等によるエネルギーの損失を考慮することができていない。そのため、静水圧近似モデルでは成層場の再現性に限界があり、高精度な長期予測が困難となっている。そこで本研究では、高周波内部波の卓越成分である内部ソリトン波 (Internal Solitary Waves : ISWs) に注目し、ポテンシャルエネルギーに与える影響を検討することで、成層場の再現性の向上を目指した。

2. エネルギー散逸モデル

1993年9月4日から9月10日にかけて、浅水部では2m間隔、深水部では3m間隔で水温計が設置されたサーミスタチェーンにより10分間隔の水温計測が実施された(図-1)。1993年9月4日の前日、台風13号が琵琶湖の西側を通じたため、測点4(以下ST.4)における水温の鉛直分布の時系列から、9月4日から5日にかけて密度界面が大きく変化している様子が確認された(図-2)。

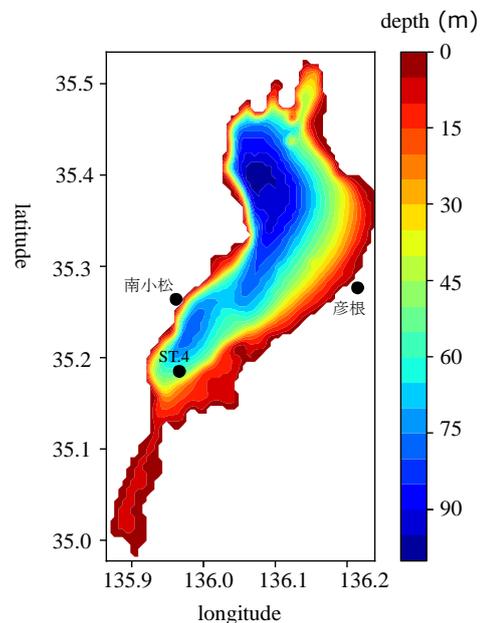


図-1 琵琶湖の水深と ST.4.

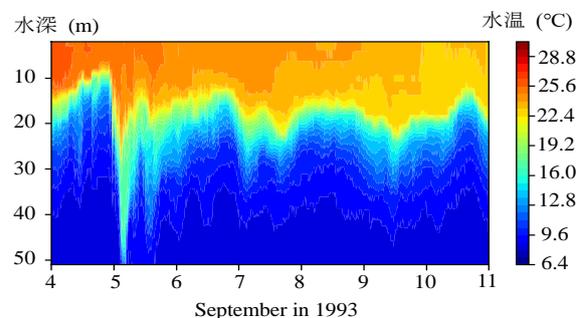


図-2 観測による ST.4 における水温の鉛直分布の時系列。

内部ソリトン波の発生により失われるエネルギーを評価するため、3次元数値計算モデル *Fantom* を用いて内部波等の挙動に関する再現計算を実施した。日射量と風速は彦根を用いたが、風向に関しては湖上での観測結果との比較から相関の高い南小松の値を用いた。水平メッシュサイズは500m、鉛直メッシュサイズは浅水部では1m間隔、深水部では5m間隔とした。計算時間間隔は15sである。ISWsの斜面上での砕波効果

キーワード 内部ソリトン波, 摩擦損失モデル, 静水圧モデル, オーバーターン, 全層循環
 連絡先 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学 市民工学専攻 TEL 0788036056

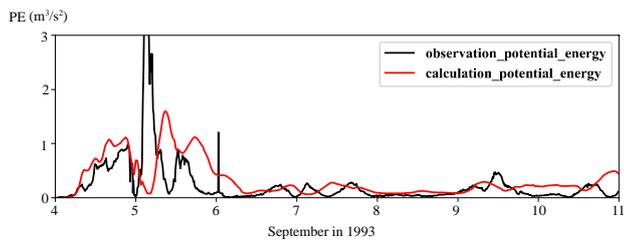


図-3 ST.4における観測値と計算値の E_p .

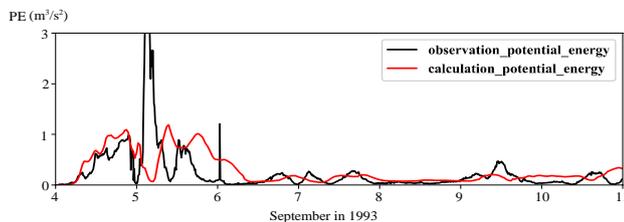


図-4 ISWsの砕波による運動量減衰モデルを用いたST.4における観測値と計算値の E_p .

を定量的に評価するため、観測・計算結果を利用してポテンシャルエネルギー E_p を計算した(図-3)。

$$E_p = \int \left\{ \frac{g}{2\rho_0} (z(\rho) - \bar{z}(\rho_t))^2 \right\} d\rho \quad (1)$$

ここで、 g ：重力加速度(9.8m/s²)、 ρ_0 ：基準密度、 ρ_t ：初期密度、 z ：ある密度 ρ における水深、 \bar{z} ：ある密度 ρ_t に対応する z である。

密度界面が大きく変化している9月4日から6日にかけて、計算による E_p が過少になっている箇所が存在するが、その他については概ね再現できていることが分かる(図-3)。一方で、9月9日から10日にかけて数値計算結果が過大になっていた。台風の通過に伴い密度界面が大きく変化し、長周期の内部波を発生させ、その後、高周波の内部ソリトン波群へと移行し、斜面上で砕波することでエネルギーを失ったため、密度界面の混合が抑制され、その結果、観測による E_p は小さな値で推移したと考えられる。つまり、静水圧近似の仮定では考慮できないISWsによる砕波の効果を、数値計算モデルに組み込む必要があると言える。内部ソリトン波群は、流速が大きくなる箇所が発生することが多いことを利用し、以下のような運動量の減衰 F をFantomに組み込むこととした。

$$F = -\alpha f \frac{|u|}{2} u \frac{1}{H} \quad (2)$$

ここで、 H ：水深、 u ：水平流速、 f ：0.0026、 α ：内部ソリトン波砕波係数である。

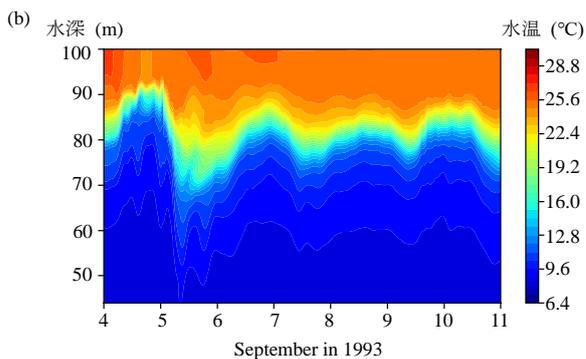
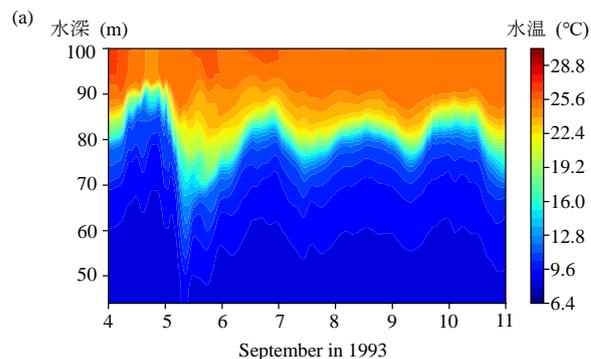


図-5 計算によるST.4における水温の鉛直分布の時間系列。(a)運動量減衰モデルなし。(b)運動量減衰モデルあり。

完璧にはないが、 $\alpha = 10$ を用いることで、静水圧条件でもISWsによるエネルギー減衰を再現できることを分かった(図-4)。ISWsが砕波することで失われるエネルギーを摩擦損失型のエネルギー損失を考慮することで、静水圧条件下での解析にて再現が可能となった(図-5)。

3. おわりに

ISWsの砕波によるエネルギー減衰を考慮するために、PEによる現地観測と静水圧モデルの比較を行った結果、静水圧モデルでは過度なPEが維持されていることが分かった。摩擦損失モデルを適用することで、静水圧モデルの再現性を向上することができた。

<参考文献>

- 1) L. Boegman, J. Imberger, G.N. Ivey, J.P. Antenucci: High-frequency internal waves in large stratified lakes, *Limnology and Oceanography*, pp.895-919, 48, 2003.
- 2) 藤原建紀, 速水祐一: 琵琶湖の中の巨人波と急潮, *日本水産資源保護協会月報*, pp.3-6, 497, 2006.
- 3) K. Nakayama, T. Sato, K. Shimizu, L. Boegman: Classification of internal solitary wave breaking over a slope, *Physical Review Fluids*, pp.014801, 4, 2019.