

令和7年12月16日

地球の慣性に従う“ゆっくりした揺らぎ”が湖内の乱流を生む ～温帯湖（猪苗代湖）の熱・物質循環を支える新たな駆動源～

概要

北見工業大学 工学部社会環境系の川口悠介准教授（前・東京大学大気海洋研究所）らの研究チームは、福島県環境創造センターおよび国立環境研究所と共同で、風が弱まった後も湖の内部でゆっくりと続く“揺らぎ”が、湖底付近の水を強く混ぜる役割を果たしていることを明らかにしました。福島県の猪苗代湖で行った観測では、周期が十数時間に及ぶゆっくりとした内部の振動が確認され、湖底近くに設置した乱流センサーのデータから、この揺らぎが実際に乱流混合を強めていることが分かりました。こうした「風後に残るゆっくりとした内部運動」が湖で明瞭に観測され、混合との関係まで直接示された例は国内外でも極めて少なく、湖の環境変動メカニズムを理解するうえで重要な知見となります。

研究の背景

春から夏にかけて、多くの湖では表層が温まり、上下の水温差によって「季節成層」と呼ばれる安定した状態が形成されます。この時期は上下の水が混ざりにくくなるため、湖の物質循環や酸素供給は、どのような仕組みが混合を引き起こすかに大きく左右されます。これまで湖で混合を生む主な要因としては、

- 風そのものによる攪乱
- 湖内で発生する内部波
- 地形に伴う沿岸流の変動

などが重視されてきました。なお海では、風が弱まった後にも“慣性振動（inertial oscillations）”と呼ばれるゆっくりした揺らぎが残り、これが水温・塩分の層構造（密度面）を揺らすことによって内部波が生じて海中の内部領域へと伝わることが知られています。こうした内部波は、波どうしの相互作用や不安定化によって砕け、結果として乱流混合を強める仕組みにつながります。しかし、湖でも同様のゆっくりとした内部の揺らぎが発達しうるのか、その混合への寄与がどの程度なのかは、これまで明確ではありませんでした。特に猪苗代湖は、湖の水平スケールが慣性振動の特性長（約10km）とほぼ同程度であり、地球の自転の影響を受けた揺らぎが湖全体にわたり持続しやすい条件が整っています。

本研究は、このような「風後に湖内に残る固有振動」が実際に存在するのか、そしてその揺らぎが湖底付近の乱流混合にどこまで影響を及ぼしているのかを、猪苗代湖での高頻度観測を通じて直接検証することを目的としました。

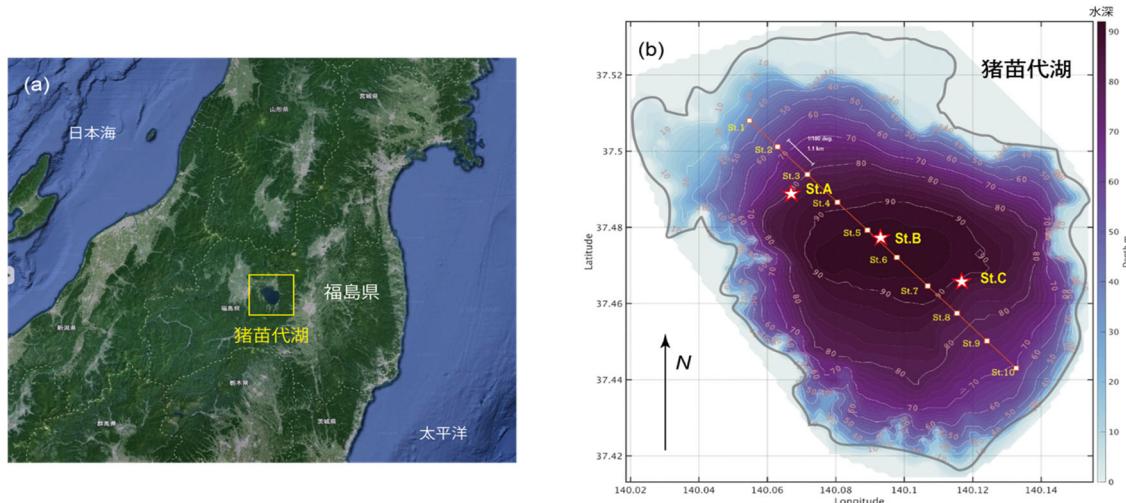


図1：調査対象湖（福島県・猪苗代湖）と観測地点の位置。Station A, B, C に流速プロファイラ（ADCP）を配置し、対角線上に乱流観測を実施した。

研究手法

本研究では、猪苗代湖の北湖中央付近において、流速構造と混合の実態を明らかにするため、以下の観測を組み合わせました（図1）。

① 流速プロファイラ（ADCP）による多点同時観測

湖底に複数台の流速計を設置し、同じ期間に複数地点で流速を同時記録しました。これにより、湖内で生じたゆっくりした内部の揺らぎが、どの方向へ、どのように広がっていくのかを立体的に把握することができました。

② 微細乱流計による乱流の直接観測

上下の水温差が大きくなる「季節躍層」付近を重点的に測定し、どの深度・どの時間帯で混合が強まるのかを詳しく捉えました。

③ 気象観測（風速・風向）

湖畔の観測装置のデータを用いて、風が弱まった後に湖内でどのような内部応答が起こるのかを、流速の変化と比較しました。

④ 周期解析による“ゆっくりした揺らぎ”の抽出

流速の時間変化を解析し、地球の自転と関係した“慣性周期”に近い成分がどの程度卓越していたかを評価しました。

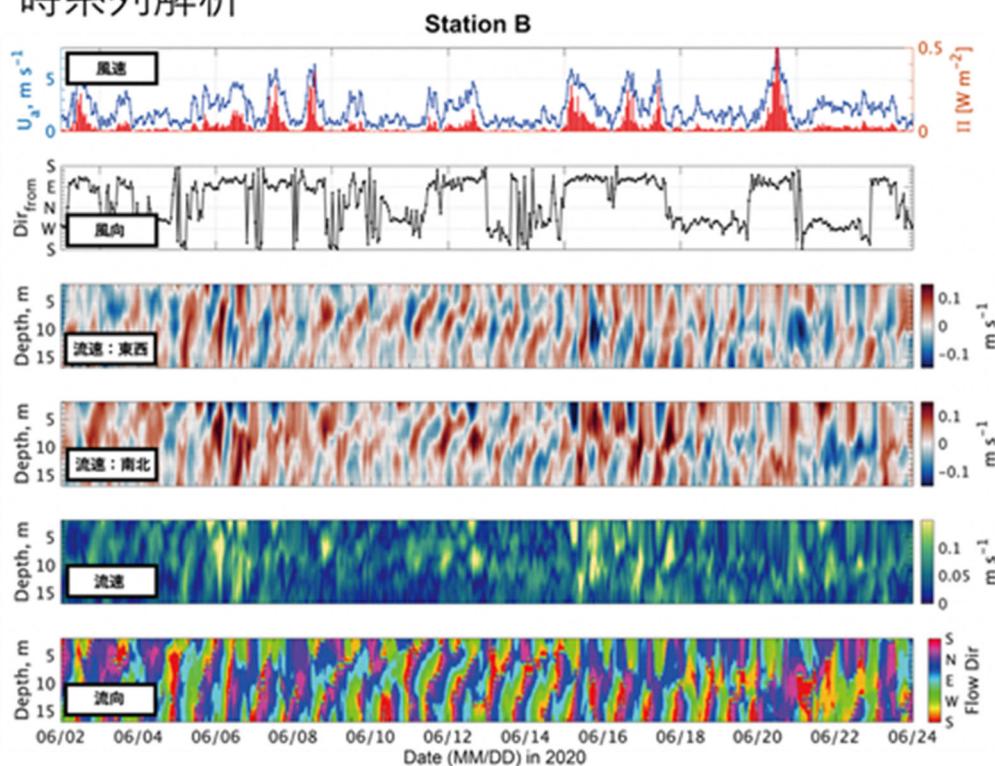
主な成果

① 湖で“慣性周期に近いゆっくりした内部の揺らぎ”を明瞭に観測

猪苗代湖の成層期に、周期十数時間のゆっくりした水平流速の変動が卓越していることを確認しました（図2）。これは、湖の大きさから理論的に予測される内部セイシュ（数時間程度）よりもはるかに長い周期であり、地球の自転が決める「慣性周期」に近い特徴を持つことが分かりました。

猪苗代湖では、季節風により水面が押し込まれた後、風が弱まても慣性振動が残り、湖内に収束帯が形成されます。この収束帯を起点に波動が伝搬し、底層付近を含む強い混合が生じます（図3）。湖沼でこのような“長周期の内部揺らぎ”が明瞭に観測される例は非常に少なく、湖でも海と同様の力学が働くことを示す重要な証拠となります。

時系列解析



スペクトル解析（回転流速）

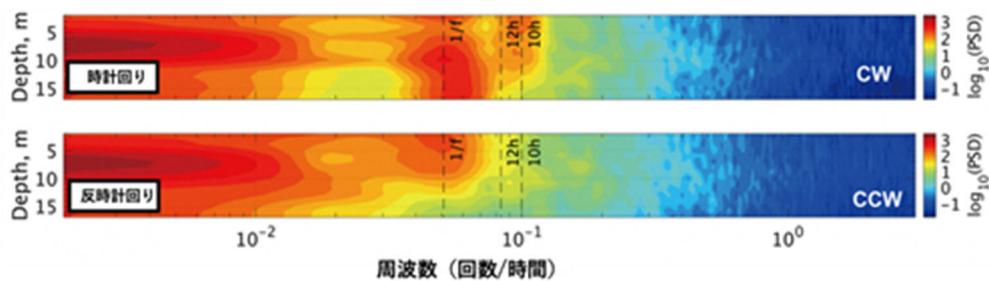


図 2：湖内で観測された“ゆっくりした内部の揺らぎ”的時系列変化（上図）とスペクトル解析（下図）の結果。 $1/f (=18$ 時間)の周期帯に顕著な回転エネルギーが見られる。

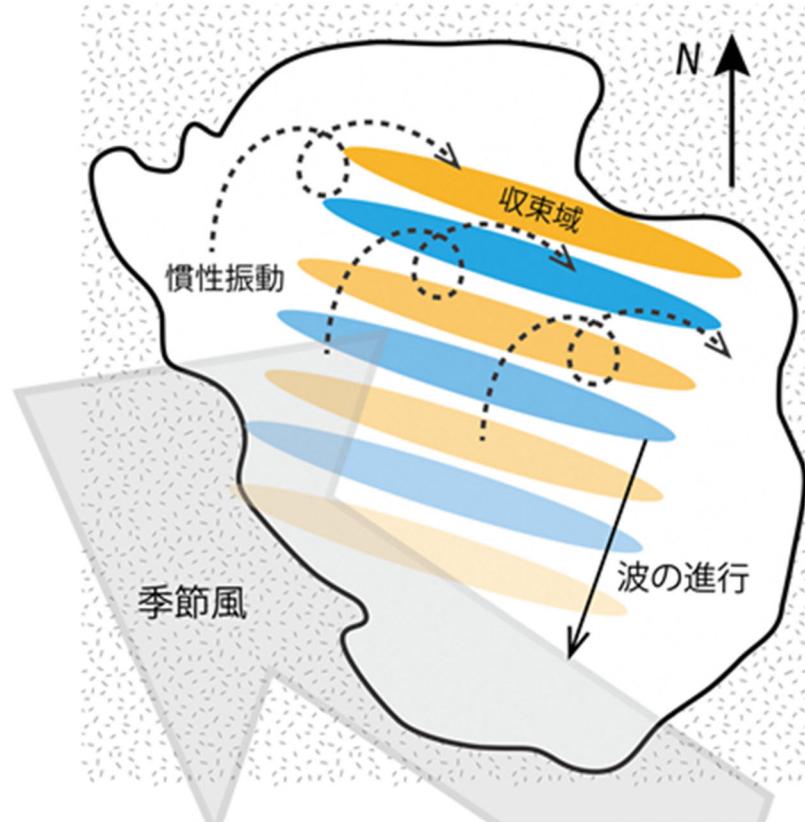


図 3：湖内で起きる“ゆっくりした揺らぎ”と混合強化の仕組み。初夏に卓越する南東からの季節風に対して水面が地球の自転を感じて慣性周期に時計回りの回転運動を行う。その結果、湖の北岸域に湖水の収束域が発生し、水圧の変異が内部波として湖内を伝搬する。

②内部の揺らぎが湖底付近の混合（乱流）を強めることを直接確認

微細乱流計による観測では、湖底付近の乱流強度が、ゆっくりとした内部の揺らぎが強まる時期と対応して増加する様子が確認されました（図4）。特に、風が弱まつた後に季節躍層がゆっくりと大きく振動し、その振動が湖底付近にまで影響していると考えられる状況で、乱流が強まる傾向が見られました。これらの観測結果は、湖において“風後の内部応答が底層混合を促す可能性”を示唆するものです。

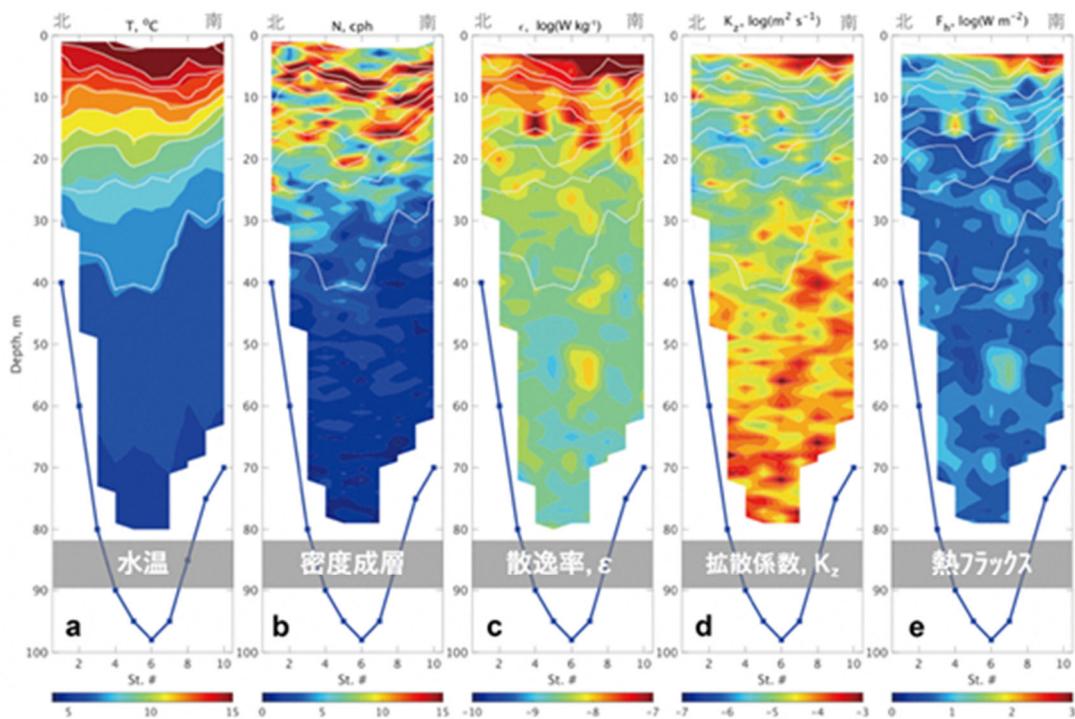


図4：観測された(a) 水温、(b) 密度成層、(c) 亂流散逸率、(d) 拡散係数、(e) 热フラックスの鉛直断面。

③湖沼の物質循環モデルに新しい視点を提供

従来の湖沼研究では、混合の源として

- 風そのものの搅乱
- 数時間周期の内部セイシュ
- 地形に伴う沿岸流

などが主に想定されてきました。本研究はそれに加えて、「風が止んだ後に残る、十数時間周期のゆっくりした揺らぎ」も湖底混合の重要な要素になりうることを世界で初めて明瞭に示しました。この知見は、

- 湖底の栄養塩輸送
- 有機物分解
- 低酸素水塊の形成
- 水質変動の将来予測

など、湖沼の環境管理に関わる多くの分野に影響を与える可能性があります。

今後の展望

本研究により、湖でも海と同じように風が止んだ後に長く続く“ゆっくりした内部の揺らぎ”が、湖底の混合を強めることが明らかになりました。しかし、その発生条件や影響範囲については、まだ全てが解明されたわけではありません。

今後の研究では、以下の点を中心に調査を進める予定です。

① どのような湖でこの“ゆっくりした揺らぎ”が発達するのかを解明する

湖の大きさ・深さ・形状、季節成層の強さなど、どの条件が揺らぎを生みやすくするのかを、日本国内外における他の湖でも観測を拡げて検証します。

② 混合が湖の物質循環に与える影響を定量化する

湖底からの栄養塩の湧き上がりや、酸素供給、プランクトンの増減など、湖の生態系や水質への影響を長期的に評価します。

③ 気候変動との関係を探る

近年の温暖化によって成層が強まり、混合の起き方が変化すると予測されています。今回明らかになった“ゆっくりした揺らぎ”が、将来の湖の水温構造や生態系機能にどのような影響を与えるのかを調べます。

④ 数値モデルへの組み込み

湖沼の水質モデルでは、これまで考慮されてこなかったこの揺らぎを取り入れ、より正確な予測モデルの構築を目指します。

まとめ

今回の成果は、湖沼の混合メカニズムに新たな視点をもたらすだけでなく、水質管理や気候変動適応策に直接つながる重要な一步です。今後は、観測・解析・モデル開発を統合し、湖沼環境の理解と保全に役立てていきます。

論文情報

掲載誌：*Limnology and Oceanography* (Wiley)

論文タイトル：*Wind-induced near-inertial motions and enhanced turbulent mixing in Lake Inawashiro*

著者：Yusuke Kawaguchi, Maki Shinozaki, Eun Yae Son, Satoshi Nakada, Takayuki Satou, Xialoan Lin

DOI：<https://doi.org/10.1002/lno.70283>

公開日：2025年12月10日

研究サポート

本研究は、東京大学大気海洋研究所「学際共同利用研究プログラム（Interdisciplinary Research Program）」の支援（課題番号：JURCAOSIRS25-07）を受けて実施されました。

本研究は、東京大学大気海洋研究所、北見工業大学、福島県環境創造センター、国立環境研究所を中心に、北海道大学、茨城大学、いであ株式会社の協力を得て実施されました。

お問い合わせ先

■ 研究内容について

北見工業大学 工学部 社会環境系

准教授 川口 悠介（かわぐち ゆうすけ）

E-mail : ykawaguchi@mail.kitami-it.ac.jp

■ 報道について

北見工業大学 企画総務課 広報戦略係

E-mail: : soumu05@desk.kitami-it.ac.jp

TEL : 0157-26-9116 FAX : 0157-26-9122