



Effects of thermal stratification and hydraulic retention on carbon flux in shallow subtropical lakes

林, 浩之

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2022-03-25

(Date of Publication)

2023-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8350号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008350>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 林 浩之

専 攻 市民工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Effects of thermal stratification and hydraulic retention on carbon flux in shallow subtropical lakes

亜熱帯地域の小面積湖沼における水温成層と滞留時間が炭 素フラックスに与える影響評価

指導教員 中山 恵介

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) は、海洋における炭素貯留量は世界全体における 50%から 60%に相当 ($2.3 \pm 0.7 \text{ Pg C yr}^{-1}$) し、森林生態系による貯留量の約 1.3 倍であることを報告している。いわゆる“Blue carbon”である。陸水域からは海洋に対して 0.9 Pg C yr^{-1} ほどの炭素が流れ込んでいると報告されている。しかし、陸水域の閉鎖性水域である湖沼がどの程度の炭素を貯留しているかは不明であり、特に 1 km^2 以下の小面積湖沼における研究成果はほとんど存在しない。

地球温暖化が進行しつつある現在、湖沼生態系において水理学的な炭素貯留への影響を理解する必要がある。例えば、亜熱帯地域では台風がしばしば発生・通過するため、流動場が影響を受け、炭素貯留が大きく変化する可能性が高い。実際に、幾つかの水深 5 m 以下の湖沼では、台風の通過により鉛直混合が卓越し、完全に湖内の水が混合されることが報告されている。つまり、水理学的に大きなインパクトを与えられることにより、炭素貯留量に変化することを意味する。水中二酸化炭素分圧を決定づけているのは、水温、塩分、dissolved inorganic carbon (DIC), total alkalinity (TA) であり、石灰化が生じない限り DIC が水中二酸化炭素分圧を決定づけていると言える。DIC は河川から流入し、湖沼内に滞留し、植物プランクトンの光合成や呼吸、および底層に堆積した有機物の分解による溶出などにより値が変化する。さらに、河川から dissolved organic carbon (DOC) が流入することで、無機化により DIC が増加する。つまり、平時時の成層が大きな影響を及ぼしているだけでなく、台風発生時における出水も重要なインパクトを DIC に与えていると予想される。しかし、亜熱帯地域の小面積湖沼における季節的な炭素吸収に関する研究成果は少なく、水理学的にどのように炭素吸収が支配されているかは未解明である。そこで本研究では、成層場に注目しつつ、季節変化も踏まえて DOC と DIC の変化を検討した。

Net ecosystem production (NEP) は、閉鎖性水域における gross primary production (GPP) から ecological respiration (ER) を差し引いた値であり、正味の炭素吸収量に匹敵する。約 10 年間分のデータから、研究対象である Yuan-Yang Lake (YYL) では GPP と ER が非常に小さく、結果として YYL から大気中へ炭素が放出されていることがわかった。表層水に注目すると、春と秋には GPP が ER より大きく NEP が正であり流入する河川水に比較して DIC の値が低く、炭素を吸収傾向であることが示された。下層水では DIC の値が高く、成層の効果により上下層間での DIC フラックスが抑制されていることがわかった。それらとは対象的に、秋には台風が通過するため、そして冬には放射冷却で鉛直混合が促進されるため、底層からの DIC 供給の影響により表層水における DIC が高くなることがわかった。それらの特徴を簡易的に再現するために、以下に示される conceptual equation model を提案した。

$$NEP = \frac{(DIC_R - DIC_L)}{t_r} - \frac{A_L}{V_{total}} F_{CO_2}$$

ここで、 DIC_R は河川から流入する DIC、 DIC_L は 湖内平均 DIC、 t_r は滞留時間、 A_L は水表面積、 V_{total} は湖沼体積、 F_{CO_2} は水面から大気への炭素フラックスである。

一方で、台風前の季節（4月から7月）、台風期（8月から11月）、台風後の季節（12月から3月）に分けて5年間分の気象および水質データを解析した。結果として、台風による鉛直混合は、栄養レベルが異なっているにもかかわらず、炭素フラックスを決定づける重要な要因であることが示された。滞留時間が短いYYLでは台風前の季節に比較して、台風期に107%ほどNEPが減少し、滞留時間が長いTsui-Fong Lake (TFL)では82%ほど低下することがわかった。台風期のYYLでの滞留時間は4.4日間であり、TFLの滞留時間は39日間であった。植物プランクトンの一生を約1週間であると考えれば、YYLでは台風期に十分な滞留時間が与えられないため、NEPが大きく減少したと考えられた。よって、台風の通過が炭素吸収量であるNEPに大きな影響を与えるだけでなく、滞留時間も大きな影響を与えることが示された。

亜熱帯地域の小面積湖沼における水表面から大気への炭素フラックスを対象とし、気象および水質項目がどのように影響を及ぼしているかを検討するため、structure equation model (SEM) と多変量解析を利用した。その結果、両解析において、炭素フラックスへ最も影響を及ぼしていたのは予想通りDICであった。一方で、多変量解析において、YYLおよびTFLにおいてDOCと炭素フラックスは常に強い正の相関を持つ結果とはならなかったが、SEM解析では強い相関が得られた。DOCが炭素フラックスに大きな影響を及ぼしていたのは、無機化によりDICを増加させ、その結果、炭素フラックスを増大させたためであった。多変量解析では個々の変数の相関を検討するのみであったことから、反応過程を考慮することができなかつたために異なる結果になったと考えられる。よって、複雑な反応過程を有する場合にはSEM解析が有効であることがわかった。

氏名	林 浩之		
論文 題目	Effects of thermal stratification and hydraulic retention on carbon flux in shallow subtropical lakes (亜熱帯地域の小面積湖沼における水温成層と滞留時間が炭素フラックスに与える影響評価)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	中山 憲介
	副査	教授	内山 雄介
	副査	准教授	小林 健一郎
	副査		
			印
要 旨			
<p>Intergovernmental Panel on Climate Change (2013) は、海洋における炭素貯留量は世界全体における50%から60%に相当 ($2.3 \pm 0.7 \text{ Pg C yr}^{-1}$) し、森林生態系による貯留量の約1.3倍であることを報告している。いわゆる“Blue carbon”である。陸水域からは海洋に対して 0.9 Pg C yr^{-1} ほどの炭素が流れ込んでいると報告されている。しかし、陸水域の閉鎖性水域である湖沼がどの程度の炭素を貯留しているかは不明であり、特に 1 km^2 以下の小面積湖沼における研究成果はほとんど存在しない。</p> <p>地球温暖化が進行しつつある現在、湖沼生態系において水理学的な炭素貯留への影響を理解する必要がある。例えば、亜熱帯地域では台風がしばしば発生・通過するため、流動場が影響を受け、炭素貯留が大きく変化する可能性が高い。実際に、幾つかの水深5m以下の湖沼では、台風の通過により鉛直混合が卓越し、完全に湖内の水が混合されることが報告されている。つまり、水理学的に大きなインパクトが与えられることにより、炭素貯留量に変化することを意味する。水中二酸化炭素分圧を決定づけているのは、水温、塩分、dissolved inorganic carbon (DIC)、total alkalinity (TA) であり、石灰化が生じない限りDICが水中二酸化炭素分圧を決定づけていると言える。DICは河川から流入し、湖沼内に滞留し、植物プランクトンの光合成や呼吸、および底層に堆積した有機物の分解による溶出などにより値が変化する。さらに、河川から dissolved organic carbon (DOC) が流入することで、無機化によりDICが増加する。つまり、平水時の成層が大きな影響を及ぼしているだけでなく、台風発生時における出水も重要なインパクトをDICに与えていると予想される。しかし、亜熱帯地域の小面積湖沼における季節的な炭素吸収に関する研究成果は少なく、水理学的にどのように炭素吸収が支配されているかは未解明である。そこで本研究では、成層場に注目しつつ、季節変化も踏まえてDOCとDICの変化を検討した。</p> <p>Net ecosystem production (NEP) は、閉鎖性水域における gross primary production (GPP) から ecological respiration (ER) を差し引いた値であり、正味の炭素吸収量に匹敵する。約10年間分のデータから、研究対象である Yuan-Yang Lake (YYL) ではGPPとERが非常に小さく、結果としてYYLから大気中へ炭素が放出されていることがわかった。表層水に注目すると、春と秋にはGPPがERより大きくNEPが正であり流入する河川水に比較してDICの値が低く、炭素を吸収傾向であることが示された。下層水ではDICの値が高く、成層の効果により上下層間でのDICフラックスが抑制されていることがわかった。それらとは対比的に、秋には台風が通過するため、そして冬には放射冷却で鉛直混合が促進されるため、底層から</p>			

氏名	林 浩之
<p>のDIC供給の影響により表層水におけるDICが高くなることがわかった。それらの特徴を簡易的に再現するために、以下に示される conceptual equation model を提案した。</p> $NEP = \frac{(DIC_R - DIC_L)}{\tau_r} - \frac{A_L}{V_{total}} F_{CO_2}$ <p>ここで、DIC_Rは河川から流入するDIC、DIC_Lは湖内平均DIC、τ_rは滞留時間、A_Lは水表面積、V_{total}は湖沼体積、F_{CO_2}は水面から大気への炭素フラックスである。</p> <p>一方で、台風前の季節(4月から7月)、台風期(8月から11月)、台風後の季節(12月から3月)に分けて5年間分の気象および水質データを解析した。結果として、台風による鉛直混合は、栄養レベルが異なっても、炭素フラックスを決定づける重要な要因であることが示された。滞留時間が短いYYLでは台風前の季節に比較して、台風期に107%ほどNEPが減少し、滞留時間が長いTsui-Fong Lake (TFL)では82%ほど低下することがわかった。台風期のYYLでの滞留時間は4.4日間であり、TFLの滞留時間は39日間であった。植物プランクトンの一生を約1週間であると考えれば、YYLでは台風期に十分な滞留時間が与えられないため、NEPが大きく減少したと考えられた。よって、台風の通過が炭素吸収量であるNEPに大きな影響を与えるだけでなく、滞留時間も大きな影響を与えることが示された。</p> <p>亜熱帯地域の小面積湖沼における水表面から大気への炭素フラックスを対象とし、気象および水質項目がどのように影響を及ぼしているかを検討するため、structure equation model (SEM) と多変量解析を利用した。その結果、両解析において、炭素フラックスへ最も影響を及ぼしていたのは予想通りDICであった。一方で、多変量解析において、YYLおよびTFLにおいてDOCと炭素フラックスは常に強い正の相関を持つ結果とはならなかったが、SEM解析では強い相関が得られた。DOCが炭素フラックスに大きな影響を及ぼしていたのは、無機化によりDICを増加させ、その結果、炭素フラックスを増大させたためであった。多変量解析では個々の変数の相関を検討するのみであったことから、反応過程を考慮することができなかったために異なる結果になったと考えられる。よって、複雑な反応過程を有する場合にはSEM解析が有効であることがわかった。</p> <p>台風および成層の効果を検討し、小面積湖沼における正味の炭素吸収量を解析した結果、流動場と水質環境が大きく関係していることがわかった。これまで小面積湖沼は炭素吸収源として考慮されておらず、カーボンニュートラルに向けた淡水ブルーカーボン研究の動機付けになると考えられる。</p> <p>本研究は大小面積湖沼におけるCO₂吸収・放出機構の解明について、現地観測、統計解析、数値解析を用いて検討を行い、水中CO₂分圧の動態に及ぼす主要因について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。以上の点から、提出された論文は工学研究科学学位論文評価基準を満たしており、学位申請者の林浩之は、博士(学術)の学位を得る資格があると認める。</p>	