

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 7 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24510015

研究課題名(和文) 光学的手法を用いた植物プランクトンによる一次生産速度の連続測定

研究課題名(英文) Continuous measurement of primary production by phytoplankton using the optical method

研究代表者

後藤 直成 (Goto, Naoshige)

滋賀県立大学・環境科学部・准教授

研究者番号：40336722

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、琵琶湖における植物プランクトンの一次生産速度を光学的手法により測定することを目的とした。一次生産速度は琵琶湖に係留した光学測器3機種の測定値から算出した。その結果、光学的手法による一次生産速度( $P_{opt}$ )は $1.3\sim 4.7\text{ g O}_2\text{ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ の範囲で変動し、酸素法による一次生産速度( $P_{O2}$ )とほぼ同様の季節変動を示した。この期間における $P_{opt}$ と $P_{O2}$ の間には高い正の相関関係が認められ、 $P_{opt}/P_{O2}$ 比は $0.91\sim 1.31$ (平均 $1.09$ )の範囲で変動した。これらの結果から、本研究の光学的手法は酸素法に近い精度で一次生産速度を測定できることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：In situ primary productivity in phytoplankton assemblages was determined with chlorophyll fluorescence (CF) technique at a central site in north basin of Lake Biwa, and compared with that determined with a traditional oxygen evolution ( $O_2$ ) technique to verify the availability of CF technique. Linear regression analysis in the primary productivities obtained by CF technique (PCF) and those by  $O_2$  technique ( $P_{O2}$ ) showed good fit to the equation of  $P_{O2} = 0.91\text{ PCF}$  ( $r^2 = 0.876$ ,  $p < 0.01$ ,  $n = 7$ ), and the slope was not significantly different from 1. PCF continuously estimated during the study period varied from  $0.28$  to  $6.59\text{ g O}_2\text{ m}^{-2}\text{ d}^{-1}$  ( $0.09\text{--}2.01\text{ g C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$ ), falling in the range of them from the previous literatures. High resolution of the daily productivity obtained in this study will allow them to precisely estimate the annual production in a lake.

研究分野：環境動態解析，陸水学，生物地球化学

キーワード：一次生産 植物プランクトン クロロフィル蛍光 琵琶湖

## 1. 研究開始当初の背景

植物プランクトンは水圏環境において最も主要な一次生産者であり、その正確な一次生産速度を測定・把握することは水圏生態系の保管理や漁業資源管理を行う上で欠かせないものとなっている。

一般に、植物プランクトンの一次生産速度は、ボトル培養法(酸素法、炭素法)で測定されている。この方法は、植物プランクトンの一次生産速度を精度良く測定することができるが、時間と労力がかかるため連続的な測定は不可能となっている。

そこで近年、上記のボトル培養法に代わって、光学的情報に基づく植物プランクトンの一次生産速度の測定が行われるようになってきた。最も代表的な手法の一つとして、パルス変調型クロロフィル励起蛍光法(PAM法)がある。この方法は植物プランクトンの光合成に関する重要な情報を容易かつ瞬時に測定することができる。しかしながら、国内におけるその利用・研究例は少なく、ほとんど普及していない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、琵琶湖における植物プランクトンの一次生産速度を光学的手法により連続的に測定・算出することである。一次生産速度の算出においてもっとも重要な情報である光合成-光曲線は、パルス変調型クロロフィル励起蛍光光度計を用いて光学的に測定する。また、水中放射照度ならびに植物プランクトン生物量と種組成も光学的測器を用いて連続的に測定する。これらの実測データに基づいて、琵琶湖における植物プランクトンの日間一次生産速度( $g C m^{-2} d^{-1}$ )を算出し、従来法(酸素法)の測定値と比較することによって、その光学的測定法の精度を評価する。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では、琵琶湖北湖の湖心部において、係留システムに3機種の光学的測器[水中放射照度計、クロロフィル蛍光計、多波長励起蛍光計]を設置することにより、およそ10分間隔で、水中放射強度、クロロフィルa濃度および植物プランクトンの種組成を測定した。また、月に1~2回の頻度で、係留システム設置水域における植物プランクトンの光合成-光曲線をパルス変調型クロロフィル励起蛍光光度計により作成した。これらの光学的測器から得られたデータに基づいて、植物プランクトンによる単位面積・一日あたりの一次生産速度( $g C m^{-2} d^{-1}$ )を算出した。

また同時に、同水域において、ボトル培養法(酸素法:現場法)により植物プランクトンの一次生産速度( $g C m^{-2} d^{-1}$ )を測定し、光学的測定法の値と比較した。

(2) 前述の光学的手法の精度をさらに高めるため、光合成-光曲線の連続測定法の開発を試みた。前述の方法では、光合成-光曲線をパルス変調型クロロフィル励起蛍光光度計で測定しているため、連続的に測定できない(2012年度は月に1~2回の測定頻度)。そこで、係留システムに設置されているクロロフィル蛍光計および水中光量子計の測定値から植物プランクトン一次生産速度の推定を試みた。この方法では、1日毎に光合成-光曲線を推定することができる。

植物プランクトン単離培養種6種(珪藻2種、緑藻2種、シアノバクテリア2種)と琵琶湖北湖表層から採取した天然植物プランクトン群集を用いて以下の室内実験を行った。温度を一定(培養種:20℃,天然群集:現場水温)に保ったインキュベータ内にて、植物プランクトンに照射する放射照度を2時間ごとに変化(5段階:0~584  $\mu mol quanta m^{-2} s^{-1}$ )させながらクロロフィル蛍光強度を連続的(10分間隔)に測定した。同時に、インキュベータ内の放射照度を変化させるごとに植物プランクトンの光化学系における電子伝達速度(ETR:変換係数を用いることによりETRから一次生産速度を精度良く算出できる)およびクロロフィルa濃度を測定した。

上記の各放射照度(5段階)におけるクロロフィル蛍光強度とETRとの関係性を評価し、クロロフィル蛍光強度からETRの推定を試みた。

## 4. 研究成果

(1) 酸素法による一次生産速度( $P_{O_2}$ )は、1.27~4.45  $g O_2 m^{-2} d^{-1}$ の範囲で変動した。クロロフィル励起蛍光法による一次生産速度( $P_{CF}$ )は、 $P_{O_2}$ とほぼ同様の季節変動傾向を示し、1.28~4.66  $g O_2 m^{-2} d^{-1}$ の範囲にあった。この期間における $P_{O_2}$ と $P_{CF}$ との間には顕著な高い正の相関関係が認められ、 $P_{CF}/P_{O_2}$ 比は0.91~1.31(平均1.09)の範囲で変動した。また、 $P_{CF}$ と $P_{O_2}$ の間には $P_{O_2}=0.91P_{CF}$ の直線関係が認められ( $r^2=0.876, p<0.01, n=7$ )、その傾きと1との間に有意差はなかった(図1)。これらの結果から、クロロフィル励起蛍光法は酸素法とほぼ同様の精度で一次生産速度を測定できることが明らかとなった。

2012年4月17日~12月17日の期間に得られた各水深(5m, 10m, 15m)の水中放射照度とクロロフィルa濃度の連続データと光合成-光曲線を用いて、この期間における $P_{CF}$ を連続的に算出した。その結果、 $P_{CF}$ は0.28~6.59  $g O_2 m^{-2} d^{-1}$ の範囲で、日射量に依存して日々大きく変動した。その季節変動は、春期と夏期に高くなり、梅雨期と冬期に低くなる傾向を示した(図2)。

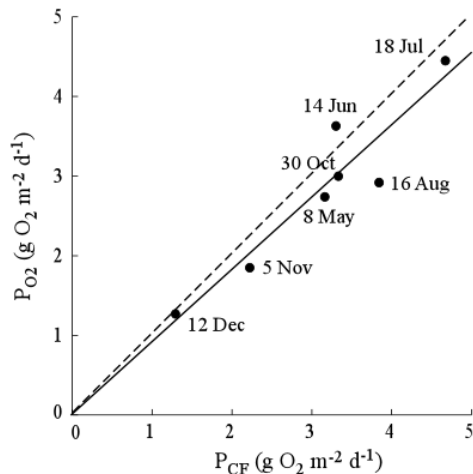


図 1. クロロフィル励起蛍光法 ( $P_{CF}$ ) と酸素法 ( $P_{O_2}$ ) で測定した一次生産速度の比較。直線は  $P_{O_2}$  と  $P_{CF}$  の回帰直線を、点線は 1:1 ラインを示す。

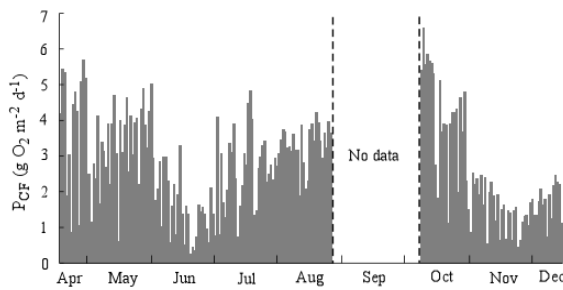


図 2. 琵琶湖北湖湖心部におけるクロロフィル励起蛍光法 ( $P_{CF}$ ) による植物プランクトンの一次生産速度 (2012 年 5 月 ~ 12 月)

(2) 単離培養種 (緑藻を除く) および天然群集のクロロフィル蛍光強度 (単位クロロフィル a 濃度で規格化) は放射照度の増加とともに低下する傾向を示した (単離培養種の緑藻は、放射照度の増加とともにクロロフィル蛍光強度が増加する傾向を示した) (図 3)。このような現象は、植物プランクトンの蛍光の量子収率が放射照度の増加に伴い低下 (キサントフィルサイクルやステート遷移による非光化学消光) したためであると推測される。

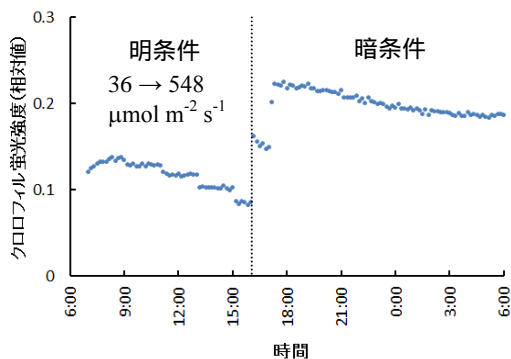


図 3. 明・暗条件下における珪藻 *Fragilaria capucina* のクロロフィル蛍光強度。

また、単離培養種、天然群集ともに、暗条件下におけるクロロフィル蛍光強度は明条件下における蛍光強度よりも高くなる傾向を示した (図 3)。

各単離培養種の暗条件下と明条件下におけるクロロフィル蛍光強度の比 (明暗比) と ETR との間には顕著な高い正 (あるいは負) の相関関係が認められた (図 4: 珪藻 *Fragilaria capucina* の場合)。ただし、この関係性は、植物プランクトングループ (珪藻、緑藻、シアノバクテリア) によって異なっていた。

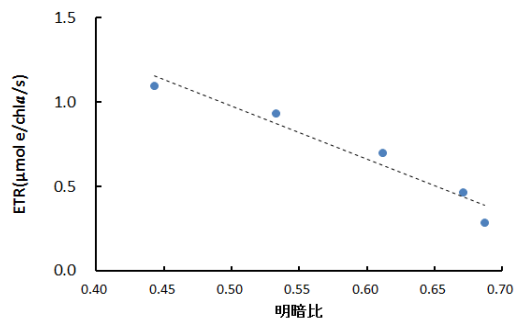


図 4. 珪藻 *Fragilaria capucina* における各放射照度の明暗比と ETR との関係。

これらの結果から、植物プランクトンの光合成 - 光曲線を現場において連続的に測定するためには、植物プランクトン種組成を多波長励起蛍光計などによって連続測定する必要があることが明らかとなった。

今後、多波長励起蛍光計などによる植物プランクトン種組成の推定精度が向上すれば、光合成 - 光曲線の連続測定が可能となり、植物プランクトンの一次生産速度の推定精度はさらに高まると期待される。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

Goto, N., Y. Tanaka and O. Mitamura (2014) Relationships between carbon flow through freshwater phytoplankton and environmental factors in Lake Biwa, Japan. *Fundamental and Applied of Limnology*, 184: 261-275. 査読有り。

太田洋平, 後藤直成, 伴修平 (2013) クロロフィル蛍光を用いた現場植物プランクトン一次生産力測定法の検討. *陸水学雑誌*, 74: 173-181. 査読有り。

〔学会発表〕(計4件)

後藤直成, 田中由佳, 三田村緒佐武 (2014) 琵琶湖における植物プランクトンを介した炭素フロー. 日本陸水学会第79回大会, 9月11日~13日(つくば国際会議場, つくば市).

Ban, S., Y. Ohta and N. Goto (2013) High-frequency and continuous monitoring of in situ primary production using optical sensors in Lake Biwa, Japan. SIL XXXII Congress, 4-9 August (Budapest, Hungary).

太田洋平, 後藤直成, 伴修平 (2013) クロロフィル蛍光を用いた現場植物プランクトン一次生産の測定. 日本陸水学会第78回大会, 9月11日~12日(龍谷大学, 大津).

太田洋平, 後藤直成, 伴修平 (2012) 琵琶湖北湖沖帯における気象イベントに対する一次生産の応答. 日本陸水学会第77回大会, 9月14日~17日(名古屋大学, 名古屋).

〔図書〕(計1件)

永田俊, 熊谷道夫, 吉山編 (2012) 温暖化の湖沼学. 後藤直成, 3.1 一次生産 (p. 124~132), 3.4 (2) 温暖化と植物プランクトンの群集構造 (p. 164~167). 京都大学出版会, 京都.

〔その他〕

後藤直成研究室ホームページ  
<http://www.ses.usp.ac.jp/ses/seitai/kyouin/goto.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

後藤直成 (GOTO, Naoshige)  
滋賀県立大学・環境科学部・准教授  
研究者番号: 40336722

(2) 研究分担者

伴修平 (BAN, Shuhei)  
滋賀県立大学・環境科学部・教授  
研究者番号: 50238234

石田典子 (ISHIDA, Noriko)  
名古屋女子大学・文学部・教授  
研究者番号: 90191874