



# DIC方程式を用いた純一次生産速度の推定手法の開発

丸山, 桃茄  
中山, 恵介  
清水, 武俊  
駒井, 克昭

---

**(Citation)**

土木学会論文集, 79(18):23-18124

**(Issue Date)**

2023-10-04

**(Resource Type)**

journal article

**(Version)**

Version of Record

**(Rights)**

© 2023 土木学会  
© 2023 Japan Society of Civil Engineers

**(URL)**

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100492305>



# DIC方程式を用いた 純一次生産速度の推定手法の開発

丸山 桃茄<sup>1</sup>・中山 恵介<sup>2</sup>・清水 武俊<sup>3</sup>・駒井 克昭<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)  
E-mail: 230t129t@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)  
E-mail: nakayama@phoenix.kobe-u.ac.jp (Corresponding Author)

<sup>3</sup> 神戸市建設局下水道部計画課 (〒651-0084 神戸市中央区磯部通 3 丁目 1 番 7 号)

<sup>4</sup> 正会員 北見工業大学工学部社会環境系 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

海水域のみならず、淡水も含めた低塩分な領域における炭素貯留効果が注目されているが、現在確立しているのは海草・海藻藻場における年間の炭素隔離量の推定手法のみである。そこで、本論文ではすべての水域に用いることができる手法を開発し、検証することを目的とした。北海道・コムケ湖におけるアマモの DIC 方程式を用いて、光量子束密度や水温、アマモの現存量の変化を仮定し、1 年間の DIC の変化量を推定したところ、いくつかの改善点はあるものの、過去の研究でのリーフマーキング法による北海道・厚岸湖や全国平均の純一次生産速度の推定値と比較して良好な結果を得ることができた。提案手法は植生密度や長さを定量的に容易に把握できるという利点を有しており、新たな手法となる可能性が示された。

**Key Words :** *blue carbon, seagrass meadows, Zostera marina, net ecosystem production, net primary production*

## 1. 序論

近年、熱波や大雨、干ばつ、熱帯低気圧などのさまざまな自然・社会・経済的影響が問題となっており、地球温暖化が進むにつれて、これらの極端現象の頻度や強さが増すことが危惧されている。地球温暖化の原因は、人間活動による二酸化炭素などの温室効果ガスの増加であると考えられている<sup>1)</sup>。そのため、二酸化炭素の排出をできるだけ少なくするために国際的な取り組みが行われており、2015年には気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)にて「パリ協定」が合意され、国連持続可能な開発サミットでは持続可能な開発目標(SDGs)の目標13にて気候変動に関する行動目標が示された<sup>2)</sup>。このように、国際的に地球温暖化対策を進めている中で、二酸化炭素の吸収源として注目されているのがブルーカーボンである。ブルーカーボンとは、海洋生物による光合成などの作用によって隔離、あるいは貯留された炭素のことであり、地球上で生物が隔離するグリーンカーボンと呼ばれる炭素のうち55%に相当するとも言われる<sup>3)</sup>。日本においても、令和元年に「地球温暖化防止に貢献するブルーカーボンの役割に関する検討会」が設置されるなど、ブルーカーボン生態系の活用に向けた取り組みが行われている<sup>4)</sup>。

ジャパンエコノミー技術組合(JBE)では、海草・海藻藻場において「Jブルークレジット®」制度を創設しており、クレジットを発行することで気候変動緩和策の持続や拡大に向けた取り組みが行われている<sup>5)</sup>。一方で、淡水も含めた低塩分な領域における炭素貯留効果が注目されてきており<sup>6,7)</sup>、クレジット制度の創設を目指し検討する必要があると考えられる。現在導入されているクレジット制度では、海草・海藻藻場の活動量(面積)と吸収係数を乗じることで、藻場における年間の隔離量を推定する<sup>5,8)</sup>。吸収係数を推定する際、アマモでは葉鞘に穴をあけて生産量を算出するリーフマーキング法を用いて純一次生産速度を推定している<sup>3)</sup>。しかし、淡水を含む低塩分領域に生息するヨシ、ササバモ、エビモ、マツモ等においてはアマモに比べて穴を開ける部分が小さいことや、他の生物に食べられる可能性があるといった点からリーフマーキング法を用いることが難しい。

そこで本研究では、リーフマーキング法に代わり、呼吸によるDIC(溶存無機炭素)の放出量から光合成による吸収量を引いた、DICの変化量を表すDIC方程式を用いた水生植物の純一次生産速度の推定手法を開発し、検証を行った。

## 2. コムケ湖におけるアマモの純一次生産速度の推定

### (1) DIC 方程式について

DIC 方程式とは、水生植物の呼吸によって放出した DIC から光合成によって吸収した DIC を引いた、DIC の 1 時間あたりの変化量を表す式であり、Nakayama et al.<sup>9)</sup> により式(1)のように定義されている。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\text{DIC}) &= \Delta\text{DIC} \\ &= R_A \exp\left(-\frac{E_{aR}}{T_w R}\right) \\ &\quad - P_\Psi \tanh\left(\frac{\alpha_\Psi I}{P_\Psi}\right) R_P \exp\left(-\frac{E_{aP}}{T_w R}\right) \\ &= -\text{NEP} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、DIC：水深 1 m で葉長 1 m の水生植物が 1 m<sup>2</sup> あたり 100 シュートある場合の溶存無機炭素( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ )、 $R_A$ ：呼吸のパラメータ( $\mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ )、 $E_{aR}$ ：呼吸のための活性化エネルギー( $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ )、 $T_w$ ：水温(K)、 $R$ ：ボルツマン定数( $=1.380649 \times 10^{-23}$ )( $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1}$ )、 $P_\Psi$ ：光合成のパラメータ( $\mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ )、 $\alpha_\Psi$ ：光合成のパラメータ( $\text{m}^2 \text{s kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ )、 $I$ ：光量子束密度( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )、 $R_P$ ：光合成のパラメータ、 $E_{aP}$ ：光合成のための活性化エネルギー( $\text{m}^2 \text{kg s}^{-2}$ )、NEP(Net Ecosystem Production)：純生態系生産( $\mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ )である。

DIC 方程式のパラメータの値は生物や場所によって異なる。また、純一次生産速度とは 1 年間の光合成を通じて生産された有機物から呼吸量を差し引いたものであり、海藻・海藻を構成するのに用いられる有機物と海中に放出される有機物(DOM)の合計である<sup>3)</sup>。有機物の分解速度を十分に小さいと仮定すると、式(1)を用いて求められる NEP は、光合成によって吸収される無機炭素量から呼吸によって放出される無機炭素量を引いたものであると

表-1 コムケ湖のアマモのパラメータの値

parameters	Komuke Lagoon
leaves (shoot <sup>-1</sup> )	4
density (shoots m <sup>-2</sup> )	100
Leaf length (m)	1
$R_A$	$8.50 \times 10^5$
$E_{aR}$	$4.80 \times 10^{-20}$
$P_\Psi$	21.5
$R_P$	$1.64 \times 10^8$
$\alpha_\Psi$	21.5/200
$E_{aP}$	$7.70 \times 10^{-20}$

いう点で純一次生産速度(NPP)と一致する。したがって、NEP は NPP と考えることができ、DIC 方程式を用いて 1 年間の DIC の変化量を算出することで、純一次生産速度を推定することが可能となる。

### (2) DIC 方程式のパラメータ

コムケ湖におけるアマモのパラメータは表-1 のようになる。このパラメータは約 1 日間の室内実験の結果をもとに得られた値である。コムケ湖は、北海道北東部(北緯 44°15'30"、東経 143°30'20")に位置する汽水湖であり、オホーツク海沿いに 3 つの湖盆が連なる<sup>10)</sup>。室内実験で用いたアマモは東に位置する最も大きな第 1 湖から採取されたものである<sup>9)</sup>。

DIC 方程式は水深 1 m あたりの式であり、水草が水面まで達している場合に対応する。したがって、本研究では、水深は一様に 1 m であり水面まで水草が存在していると仮定し、光量子束密度と水温の 1 時間ごとの変化、さらにアマモの現存量の季節変化を仮定して 1 年間の DIC の変化量を推定する。

### (3) パラメータの設定

#### a) 光量子束密度の設定

光量子束密度はコムケ湖における長期的な観測値がないため、アメダス<sup>注1)</sup>による網走の日射量のデータを用いて 1 年の 1 時間ごとの変化を設定した。2019 年 10 月から 2022 年 9 月までのアメダスの観測値より、月ごとの一日合計全日射量の平均値は 5~7 月に最大値、12 月に最小値となる。そのため、3 年間の平均をもとに 6 月中旬を最大 20.5 MJ/m<sup>2</sup>、12 月中旬を最小 5.4 MJ/m<sup>2</sup>としてサインカーブを描く変化をすると仮定し、2021 年の観測値との比較を行った(図-1)。観測値が大きく変動しているのは、日射量が天候に影響されるためである。

また、1 日の合計全日射量を 1 としたときの 1 時間ごとの日射量の割合を設定し、仮定と観測値を比較した(図-2)。天気の変化が激しい日では、1 時間ごとの変化

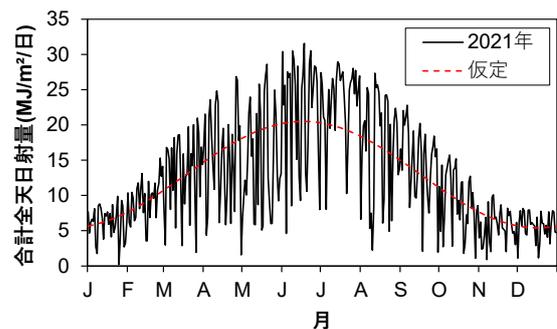


図-1 1 日の合計全日射量の 1 年の変化の観測値及び仮定の比較 (観測値は 2021 年 1 月 1 日から 12 月 31 日までの結果)

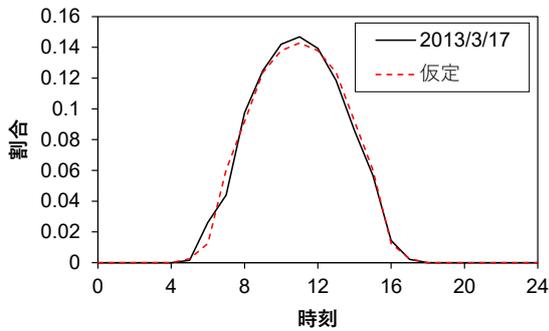


図-2 1日の日射量の変化の観測値及び仮定の比較 (観測値は2013年3月17日の結果)

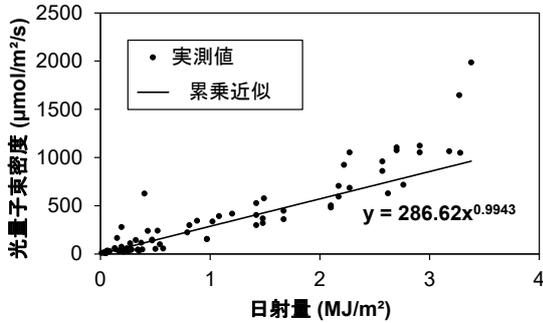


図-3 日射量と光量子束密度の関係

に大きな特徴が見られなかった。そこで、一年間の平均に近い春分の日付近で、1日中雲が少なく安定した天気であった2013年3月17日に注目し、仮定を行った。アメダスの観測値より、網走においては春分・秋分付近では全天日射量は5時から17時にかけて0より大きな値を示したため、5時から増加し、11時に最大値を示し、その後17時にかけて減少するという変化をすると仮定した。

DIC 方程式では光量子束密度を利用していることから、日射量を光量子束密度に変換する必要がある。そこで、2018年のコムケ湖におけるアマモを用いた実験<sup>9)</sup>、同様にして神戸で行われた2021年、2022年のササバモを用いた実験における光量子束密度の観測値と、アメダスの日射量のデータの相関関係から、日射量から光量子束密度への変換係数を決定した。相関関係は図-3のようになり、光量子束密度は日射量に286.62だけ乗じた値となると仮定した。この変換係数を用いて、現場の光量子束密度の年間変化および時間変化を推定した。

b) 水温の設定

水温については、2013年4月24日から6月18日(春季)、8月3日から10月23日(夏季)のコムケ湖における観測値<sup>10)</sup>をもとに1年の変化を設定した。1日の平均水温については、4月から6月にかけて上昇し、8月に最大値をとり、10月にかけて下降することが観測値より明らかになった。そのため、2月中旬に最低-2.5℃、8月中旬に最高21.5℃として、サインカーブを描く変化をする

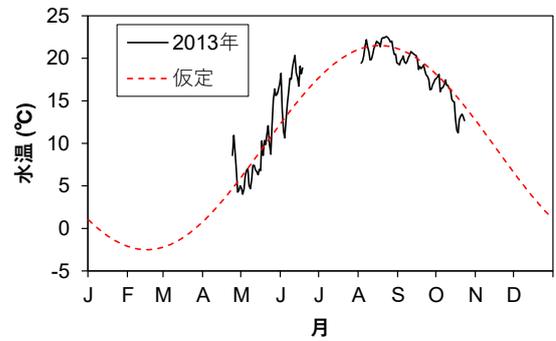


図-4 1日の平均水温の1年の変化の観測値及び仮定の比較 (観測値は2013年4月24日から6月18日、8月3日から10月23日の結果)

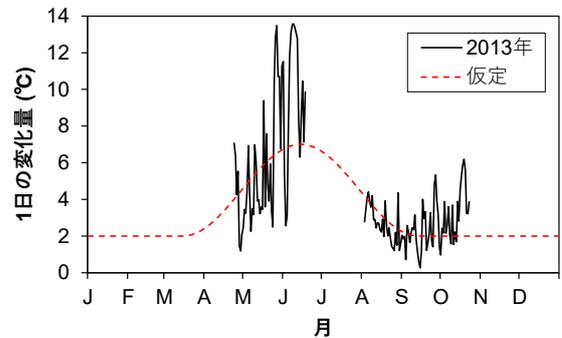


図-5 1日の水温の変化量の1年の変化の観測値及び仮定の比較 (観測値は2013年4月24日から6月18日、8月3日から10月23日の結果)

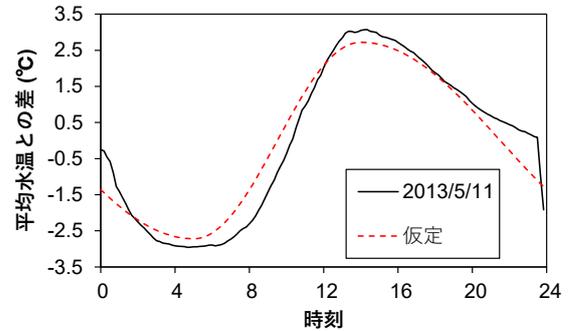


図-6 1日の水温の変化の観測値及び仮定の比較 (観測値は2013年5月11日の結果)

と仮定し、観測値との比較を行った(図-4)。また、1日の変化量に注目すると、春季の方が夏季よりも大きな変化がみられた。ここでは、1日の変化量を1日の最低水温と最高水温の差とする。1月から3月中旬までは一定、3月中旬から6月中旬にかけて変化量が大きくなり、6月中旬から9月中旬にかけては変化量が減少、9月中旬から12月までは一定といった変化をすると仮定し、観測値と比較した(図-5)。

さらに、水温の1時間ごとの変化を設定した。春季の方が夏季よりも変化が大きく、目立った特徴がみられたため春季のデータに注目し、5時に最低水温、14時に最高水温を示すような変化をすると仮定した。図-5で仮定した1日の変化量と1時間ごとの変化の仮定から得られた5月11日の水温の1日の変化を2013年5月11日の

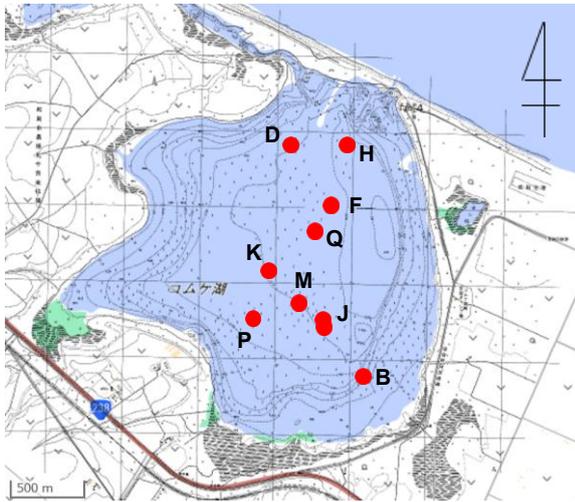


図-7 コムケ湖における観測地点 (国土地理院の湖沼図<sup>12)</sup>を加工して作成) (Nagatomo et al.<sup>13)</sup> より引用)

表-2 アマモの状態 (Nagatomo et al.<sup>13)</sup>, 松本ら<sup>14)</sup>より引用し一部改変)

観測年	地点	水深	アマモの長さ	アマモの密度
2018年	B地点	0.56 m	0.56 m	
2018年	D地点	1.02 m	1.02 m	
2018年	H地点	1.37 m	1.37 m	
2018年	J地点	1.32 m	1.32 m	
2018年	K地点	1.30 m	1.30 m	
2018年	M地点	1.20 m	1.20 m	
2019年	F地点	1.45 m	0.50 m	0.25 m 間隔
2019年	J地点	1.10 m	0.70 m	0.20 m 間隔
2019年	P地点	1.00 m	1.10 m	0.10 m 間隔
2019年	Q地点	1.25 m	0.30 m	0.30 m 間隔
平均			0.94 m	0.21 m 間隔

観測値と比較すると、図-6 のようになる。

### c) アマモの成長の設定

アマモの成長とは、シュート密度と長さの変化とする。DIC 方程式によって得られる値は密度が  $1\text{ m}^2$  あたり 100 シュート、葉長が  $1\text{ m}$  のときであるが、アマモの成長に伴って光合成による吸収量や呼吸による放出量は変化すると考えられる。そのため、アマモの成長についても仮定を行った。コムケ湖では、2018年8月8日と2019年7月22日に図-7のB, D, H, J, K, M地点とF, J, P, Q地点においてアマモの状態の観測が実施された<sup>13),14)</sup>

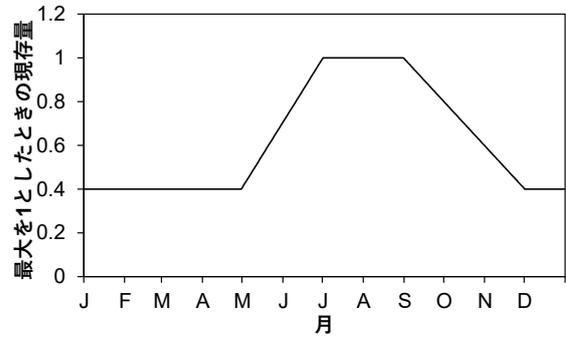


図-8 アマモの現存量の1年の変化の仮定

(表-2)。2018年の調査では各地点の水深とアマモの長さ、2019年の調査では各地点の水深とアマモの長さに加えてアマモの密度を観測した。

表-2より、7月のコムケ湖のシュート密度は  $1\text{ m}^2$  あたり 25 シュートと仮定した。しかし、 $1\text{ m}^2$  あたり 25 シュートという値は北海道内の他のアマモ場と比較してかなり低い。水島<sup>15)</sup>によって1985年に北海道・野付湾において行われた調査では、7月に  $1\text{ m}^2$  あたり平均 300 シュートとなることが示されている。また、2002年から2004年にかけて北海道・厚岸湖の3地点で行われた調査では、 $1\text{ m}^2$  あたり 1000 シュート以上を記録した観測地点もあった<sup>16)</sup>。そこで、7月において  $1\text{ m}^2$  あたり 25 シュートの場合とコムケ湖の観測で最も密度が高いP地点の観測値である  $1\text{ m}^2$  あたり 100 シュートの場合でも計算を行う。また、表-2より葉の長さは水深とほぼ同じ長さのことが多いことから、7・8月における葉の長さは  $1.0\text{ m}$  とした。

シュート密度と葉の長さは現存量と大きな関わりがあることから、現存量の変化をアマモの成長とした。水島<sup>15)</sup>によって現存量の月変化が明らかになっている野付湾とコムケ湖は1年の水温の変化に近いことから、アマモの1年サイクルは同様であると考えられる。したがって、野付湾におけるアマモの現存量の月変化を参考に、繁茂期である7月と8月を最大値1としてコムケ湖におけるアマモの1年の成長を設定した(図-8)。

### (4) 計算結果と比較

光量子束密度、水温をDIC方程式に代入して純一次生産速度の推定を行った。ただし、水温に関してはオホーツク海の海水の凝固点が  $-1.7\text{ }^\circ\text{C}$  である<sup>17)</sup>ことから、汽水であるコムケ湖では凝固点を  $-1.5\text{ }^\circ\text{C}$  とし、 $-1.5\text{ }^\circ\text{C}$  以下になる場合は  $-1.5\text{ }^\circ\text{C}$  として計算した。また、DIC方程式によって求められるDICの変化量は、湖水  $1\text{ kg}$  中の無機炭素量であるため、湖水の密度を用いて単位を変換する必要がある。密度は塩分、水温、圧力によって定まる<sup>18)</sup>。塩分については、2013年の5月と8月に行われた調査で

表-3 純一次生産速度に関する本研究による計算結果とリーフマーキング法に基づく文献値の比較

アマモの密度	アマモの長さ	NEP=NPP
25 shoots/m <sup>2</sup> で固定	1.0 m で固定	0.12 トン CO <sub>2</sub> /ha/年
100 shoots/m <sup>2</sup> で固定	1.0 m で固定	0.49 トン CO <sub>2</sub> /ha/年
最大 25 shoots/m <sup>2</sup> で年変化を考慮	最大 1.0 m で年変化を考慮	0.36 トン CO <sub>2</sub> /ha/年
最大 100 shoots/m <sup>2</sup> で年変化を考慮	最大 1.0 m で年変化を考慮	1.44 トン CO <sub>2</sub> /ha/年
コムケ湖における観測値からの推定値		4.21 トン CO <sub>2</sub> /ha/年
厚岸湖におけるリーフマーキング法による推定結果 (2010~2011年) (堀ら <sup>3)</sup> )		3.98 トン CO <sub>2</sub> /ha/年
リーフマーキング法による全国平均の推定結果 (2010~2011年) (堀ら <sup>3)</sup> )		12.6 トン CO <sub>2</sub> /ha/年
厚岸湖におけるリーフマーキング法による推定結果 (2002~2003年、12~3月を除く) (Hasegawa et al. <sup>16)</sup> )		9.46 トン CO <sub>2</sub> /ha/年

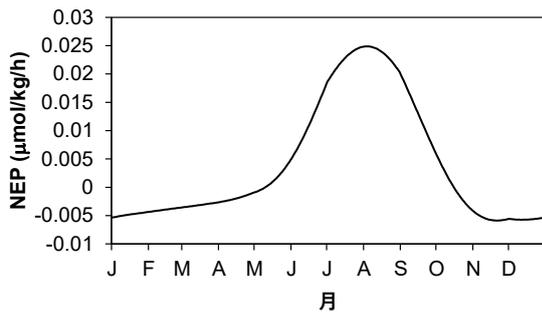


図-9 1年間のNEPの変化

コムケ湖においては春季に  $16.4 \pm 5.0$ 、夏季に  $27.0 \pm 4.6$  となることが報告されている<sup>10)</sup>。そのため、年間の平均を 21.7 として密度計算を行った。また、アマモの成長に関しては、成長を考慮しない場合と考慮した場合、両方の場合において計算を行う。一日のNEPの合計値に図-8で仮定した最大を1としたときの現存量の値を乗じることによって、アマモに成長についても考慮できると考えた。これらの仮定をもとに純一次生産速度を推定し、過去の研究等と比較したところ表-3のようになった。ここで、コムケ湖における観測値からの推定値とは、アマモの炭素含有量の測定値である  $80.3 \text{ g-C m}^{-2}$  から推定した値である。Wada et al.<sup>19)</sup>によると、カジメなどの大型藻類はDOCの放出がNPPの約30%を占める。アマモに関してもDOCの放出をNPPの30%とし、残りの70%が体組織を形成すると考えると、コムケ湖のアマモのNPPは4.21 トンCO<sub>2</sub>/ha/年と推定される。しかし、アマモは多年生であり、ある1年の最大の現存量には前年に体組織を形成した分も含まれているため、この推定値は過大評価である可能性がある。

同じ場所でも年によって純一次生産速度の値には差が生じているのは、アマモの密度が年によって異なることが原因と考えられる。三重県松名瀬沿岸で2000年6月か

ら2002年8月にかけて行われた調査では、2001年3月には1m<sup>2</sup>あたり972シュートだったが、2002年3月には1m<sup>2</sup>あたり612シュートであったという観測結果が報告されており<sup>20)</sup>、同じ季節でも年によってシュート密度が異なることが明らかになっている。また、密生アマモ場は疎生アマモ場と比較して生産量が大きいことが報告されている<sup>3)</sup>。したがって、アマモの密度は純一次生産速度に影響し、正確な推定には複数の地点で長期的な観測が必要であると考えられる。

表-3より、アマモの成長を考慮した場合と考慮しなかった場合を比較すると、考慮した場合の方がリーフマーキング法による推定値と近い値となった。したがって、正確な推定にはアマモの成長は考慮すべきであると考えられる。しかし、DIC方程式を用いて推定した純一次生産速度の値はコムケ湖における観測値からの推定値や過去の研究におけるリーフマーキング法による推定値と比較して小さい。これは、アマモの密度、シュートあたりの本数、長さ、光量子束密度の設定が実際よりも小さいことが原因だと考えられる。アマモの長さは水深ほどの長さになると仮定したが、表-2より水深1.0mで1.1mの長さのアマモが確認されたように1.0m以上の長さになる可能性も高い。また、野付湾では8月に密度が300 shoots m<sup>2</sup>、葉の長さが0.8~1.2mとなることが示されている<sup>15)</sup>。このような点から、アマモの密度、シュートあたりの本数、長さについては改善の余地があると考えられる。光量子束密度については、2018年のコムケ湖のアマモの実験において2000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>近い値が確認されている他に、札幌においても夏至近傍の晴天の日に2000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以上となることが報告されている<sup>21)</sup>。しかし、図-3より今回用いた変換係数では1000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>以上の光量子束密度を表すことは難しく、特に夏季のNEPが過小評価となっている可能性がある。これらの設定を改

善すると、より誤差が小さい値を得ることができると考えられる。

また、リーフマーキング法による推定値が過大評価となっているのも誤差が大きくなっている原因と考えられる。厚岸湖では4月から11月、野付湾では5月から12月までの観測が行われているように、北海道では冬季に流水の影響などで水面が氷で覆われて観測を行うことが難しい。コムケ湖についてDIC方程式を用いた推定値は、アマモの成長を考慮した場合、一年間では1.44トンCO<sub>2</sub>/ha/年であるが、4月から11月までに限定すると1.97トンCO<sub>2</sub>/ha/年となり、冬季を含めない方が含めた場合と比較して推定値が大きくなる。したがって、リーフマーキング法によって貯留される炭素量を推定する際に用いている衰退期の値が実際よりも高くなっている可能性があると考えられる。

1時間ごとのNEPの1日の合計値の一年の変化は図-9のようになる。繁茂期である7月や8月に最大となっていることから、アマモの成長の季節変化を表すことができたと考えられる。今後は精度の向上や他の水域へ適用のために、光量子束密度や水温を細かく変化させた場合のNEPの変化について検討を行う予定である。

### 3. 結論

本研究で得られた結果を要約すると以下の通りである。

- 1) コムケ湖に生息するアマモの年間のNEP、つまり純一次生産速度を推定したところ、改善点はあるものの、炭素含有量からの推定値や過去の研究における推定値と比較して良好な結果が得られた。
- 2) 改善点としては、アマモの密度、シュートあたりの本数、長さ、光量子束密度が挙げられる。より正確な推定を行うためには、アマモの密度を複数の地点で長期的に観測する必要があると考えられる。
- 3) 1日のNEPの合計値の1年間の変化は、アマモの成長と同様の変化が確認された。

**謝辞:** 本研究は、科学研究基盤B(22H01601)、科学研究学術変革領域研究A(公募研究)(22H05726)を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

### NOTES

注1) 気象庁：過去の気象データ・ダウンロード、  
<https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> ,  
(閲覧日：2023年1月25日)

### REFERENCES

- 1) IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of*

- Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.
- 2) 亀山康子: パリ協定—2020年以降の国際制度の概要と残された課題—, 廃棄物資源循環会誌, Vol. 27, No. 2, pp. 109-116, 2016. [Kameyama, Y.: The Paris Agreement: Summary of the Post-2020 International Framework and Challenges for the Future, *Japan Society of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 27, No.2, pp. 109-116, 2016.]
  - 3) 堀正和, 桑江朝比呂: ブルーカーボン—浅海におけるCO<sub>2</sub>隔離・貯留とその活用—, pp. 1-144, 地人書館, 2017. [Hori, M. and Kuwae, T.: *Blue carbon – Carbon dioxide sequestration and storage in shallow waters and its utilization*, pp. 1-144, Chijinshokan, 2017.]
  - 4) 国土交通省: ブルーカーボンとは, [https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan\\_tk6\\_000069.html](https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk6_000069.html) , (閲覧日: 2023年1月25日)
  - 5) Japan Blue Economy Association: Jブルークレジット, <https://www.blueeconomy.jp/credit/> (閲覧日: 2023年1月25日)
  - 6) Lin, H.C., Chiu, C.Y., Tsai, J.W., Liu, W.C., Tada, K. and Nakayama, K.: Influence of thermal stratification on seasonal net ecosystem production and dissolved inorganic carbon in a shallow subtropical lake, *Journal of Geophysical Research*, e2020JG005907, 2021.
  - 7) Lin, H.C., Tsai, J.W., Tada, K., Matsumoto, H., Chiu, C.Y. and Nakayama, K.: The impacts of the hydraulic retention effect and typhoon disturbance on the carbon flux in shallow subtropical mountain lakes, *Science of The Total Environment*, vol.803, 2022, 150044.
  - 8) 桑江朝比呂, 吉田吾郎, 堀正和, 渡辺謙太, 棚谷灯子, 岡田知也, 梅澤有, 佐々木淳: 浅海生態系における年間二酸化炭素吸収量の全国統計, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 75, No. 1, pp. 10-20, 2019. [Kuwae, T., Yoshida, G., Hori, M., Watanabe, K., Tanaya, T., Okada, T., Umezawa, Y. and Sasaki, J.: Nationwide estimate of the annual uptake of atmospheric carbon dioxide by shallow coastal ecosystems in Japan, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers B2 (coastal engineering)*, Vol. 75, No. 1, pp. 10-20, 2019.]
  - 9) Nakayama, K., Komai, K., Tada, K., Lin, H.C., Yajima, K., Yano, S., Watanabe, K., Hipsey, M.R., & Tsai, J.W.: Modeling dissolved inorganic carbon considering submerged aquatic vegetation. *Ecological Modelling*, 431, 2020, 109188.
  - 10) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 茂木博匡, 桑江朝比呂: 北海道コムケ湖における大気—海水間CO<sub>2</sub>フラックスの空間分布特性と要因分析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp. I\_1188-I\_1193, 2014. [Tada, K., Tokoro, T., Watanabe, K., Moki, H. and Kuwae, T.: Spatial distribution of air-sea CO<sub>2</sub> flux and its influencing factors at the Lake Komuke, Hokkaido, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers B3 (ocean engineering)*, Vol. 70, No. 2, pp. I\_1188-I\_1193, 2014.]
  - 11) 吉江祐人, 丸谷靖幸, 中山恵介, 駒井克昭, 新家哲也, 渡辺謙太, 一見和彦, 桑江朝比呂: コムケ湖における水質及び流動特性の解明, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 70, No. 2, pp. I\_1176-I\_1181, 2014. [Yoshie,

- Y., Maruya, Y., Nakayama, K., Komai, K., Shintani, T., Watanabe, K., Ichimi, K. and Kuwae, T.: Investigation of water quality and flow characteristic in Lake Komuke, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineering B3 (ocean engineering)*, Vol. 70, No. 2, pp. I\_1176-I\_1181, 2014.]
- 12) 国土交通省国土地理院：調査実施湖沼一覧，<https://www.gsi.go.jp/kankyochiri/koshouchousa-list.html>，（閲覧日：2023年1月30日）
- 13) Nagatomo, K., Nakayama, K., Komai, K., Matsumoto, H., Watababe, K., Kubo, A., Tada, K., Maruya, Y., Yano, S., Tasi, J. W., Lin, H. C., Vilas, M., and Hipsey, M. R. (in press): A spatially integrated dissolved inorganic carbon (SDIC) model for aquatic ecosystems considering submerged vegetation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, e2022JG007032, 2023.
- 14) 松本大輝，中山恵介，駒井克昭，田多一史，佐々木大輔，渡辺謙太，久保篤史，丸谷靖幸：成層を考慮したアマモ場における溶存無機炭素鉛直分布の推定モデルの開発，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol. 76, No. 2, pp. I\_869-I\_874, 2020. [Matsumoto, H., Nakayama, K., Komai, K., Tada, K., Sasaki, D., Watanabe, K., Kubo, A. and Maruya, Y.: Development of a model for estimating of vertical distribution of dissolved inorganic carbon due to eelgrass in a stratified fluid, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers B3 (ocean engineering)*, Vol. 76, No. 2, pp. I\_869-I\_874, 2020.]
- 15) 水島敏博：野付湾のアマモ現存量と生産量の季節変化，北水報，第27号，pp. 111-118, 1985. [Mizushima, T.: Seasonal changes in standing crop and production of eelgrass (*Zostera marina* LINNE) in Notsuke Bay, eastern Hokkaido, *Hokkaiho*, Vol. 27, pp. 111-118, 1985.]
- 16) Hasegawa, N., Hori, M. and Mukai, H.: Seasonal shifts in seagrass bed primary producers in a cold-temperate estuary: Dynamics of eelgrass *Zostera marina* and associated epiphytic algae, *Aquatic Botany*, vol. 86, pp. 337-345, 2007.
- 17) 青木昌秋：オホーツク海の海氷，第四紀研究，Vol. 12, No. 4, pp. 235-240, 1974. [Aota, M.: On the ice of the sea of Okhotsk, *Japan Association for Quaternary Research*, Vol. 12, No. 4, pp. 235-240, 1974.]
- 18) 石川一郎，辻野博之，平原幹俊，中野英之，安田珠幾，石崎廣：気象研究所共用海洋モデル（MRI.COM）解説，気象研究技術報告，vol. 47, 2005. [Ishikawa, I., Tsujino, H., Hirahara, M., Nakano, H., Yasuda, T. and Ishizaki, H.: Commentary of Meteorological Research Institute shared ocean model (MRI.COM), *Technical reports of the Meteorological Research Institute*, Vol. 47, 2005.]
- 19) Wada, S., Aoki, M, N., Tsuchiya, Y., Sato, T., Shinagawa, H. and Hama, T.: Quantitative and qualitative analyses of dissolved organic matter released from *Ecklonia cava* Kjellman in Oura Bay, Shimoda, Izu Peninsula, Japan, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 394, pp. 344-358, 2007.
- 20) 阿部真比古，橋本奈央子，倉島彰，前川行幸：三重県松名瀬沿岸におけるアマモ群落の構造と季節変化，日本水産学会誌，Vol. 70, No. 4, pp. 523-529, 2004. [Abe, M., Hashimoto, N., Kurashima, A. and Maegawa, M.: Structure and seasonal change of the *Zostera marina* population on the coast of Matsunase, Mie Prefecture, central, Japan, *Nippon Suisan Gakkaishi*, Vol. 70, No. 4, pp. 523-529, 2004.]
- 21) 石井征亜，山崎敬亮，大場和彦，長谷川利弘，比屋根真一，田中逸夫：札幌，岐阜および那覇における昼光の分光量子束の季節変化特性，生物環境調節，Vol. 42, No. 2, pp. 147-154, 2004. [Ishii, S., Yamazaki, K., Oba, K., Hasegawa, T., Hiyane, S. and Tanaka, I.: Seasonal changes in spectral photon flux measured at Sapporo, Gifu and Naha, *Environ. Control in Biol.*, Vol. 42, No. 2, pp. 147-154, 2004.]

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 11, 2023)

## ESTIMATING ANNUAL CARBON DIOXIDE SEQUESTRATION USING THE EQUATION OF DIC METABOLISM

Momoka MARUYAMA, Keisuke NAKAYAMA, Taketoshi SHIMIZU and Katsuaki KOMAI

Recently, it has been revealed that coastal areas and lakes and marshes play a role in absorbing carbon dioxide, suggesting the necessity of establishing a carbon credit approach for the freshwater carbon system. We proposed and verified a new method for estimating carbon dioxide sequestration and reduction using the equation of DIC metabolism (DIC equation). The proposed method has the advantage of considering only vegetation density and length, indicating its potential for use as a new method. The estimated annual sequestration of carbon dioxide by eelgrass in Komuke Lagoon, located in Hokkaido, Japan, using the DIC equation was 1.41 tonnes CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>, which is close to the value estimated value obtained from the carbon content of eelgrass in Komuke Lagoon and also the estimated value obtained by leaf marking methods in Lake Akkeshi, located in Hokkaido, Japan.