



人工衛星データを用いたアマモ場分布計測と汽水域での溶存無機炭素量を用いた検討

駒井, 克昭
早川, 博
佐藤, 辰哉
中山, 恵介

(Citation)

土木学会論文集B1 (水工学) , 75(2):I_397-I_402

(Issue Date)

2019

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90007845>



人工衛星データを用いたアマモ場分布計測と 汽水域での溶存無機炭素量を用いた検討

駒井克昭¹・早川 博²・佐藤辰哉³・中山恵介⁴

¹正会員 北見工業大学准教授 工学部地球環境工学科 (〒090-8507 北海道北見市公園町165)

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

²正会員 北見工業大学教授 工学部地域未来デザイン工学科 (同上)

E-mail: h-haya@mail.kitami-it.ac.jp

³学生会員 北見工業大学大学院工学研究科社会環境工学専攻 (同上)

E-mail: m1852200083@std.kitami-it.ac.jp

⁴正会員 神戸大学教授 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

オホーツク沿岸潟湖においてアマモ場の分布を人工衛星データを用いて推定し、現地観測によって得られたDIC (溶存無機炭素) とその変化量との比較により検証した。人工衛星Sentinel-2のNDVI値を平均化した値をアマモの分布密度に換算して分布データを作成した。アマモ繁茂域の内外の計17地点において2018年7~8月の約1か月間のDICの濃度変化をモデルにより計算した結果、観測値を良好に再現したことから、NDVI値によってアマモ場の分布が良く再現されたことが確認された。アマモの繁茂の有無による再現性の傾向の違いが見られたが、水面下での繁茂状況の推定が不十分であることやアマモの流水抵抗による水交換と水質に及ぼす影響が関係していることが示唆された。

Key Words : seagrass, remote sensing, satellite, NDVI, dissolved inorganic carbon, lagoon

1. はじめに

オホーツク海沿岸に位置する潟湖では潮汐の影響によって自然干潟が形成され、渡り鳥を含む多くの野鳥が年間を通して飛来する。湖内にはアマモが広く生息しており、水生生物の重要な生息場としての役割を果たしている。アマモは地球温暖化の緩和機能を持つ「ブルーカーボン」としても期待されている¹⁾。オホーツク海沿岸に位置するコムケ湖 (図-1) もそのような潟湖の一つであり、既往の研究により浅海域や汽水湖で沿岸生態系の光合成等が水中のCO₂分圧に大きく寄与していることが報告されている^{2,3)}。また、アマモ場を中心とした光合成等の生物活動によって主に溶存無機炭素(DIC)の変動がCO₂分圧の挙動を決定付けるのに重要であることが示されている²⁾。さらに、田多ら⁴⁾は生物過程を考慮して3次元流動解析を用いた大気-海面間のCO₂フラックスの推定に成功している。

一方で人工衛星やUAV (Unmanned Aerial Vehicles) を用いたリモートセンシングは赤色帯や近赤外帯の反射率に基づいたNDVI (Normalized Difference Vegetation Index : 正規化植生指数⁵⁾ 等の指標によって広範囲に陸上植物や水面上の植物体の分布を把握するのに有効であるが、水面

下の沈水植物の場合は水による光の減衰の影響により反射シグナルが非常に弱い⁶⁾ため、沈水植物の現存量を推定するには光の減衰や水面下の物体の反射に対する特殊な処理が必要となる。アマモの場合は水面に浮いた葉部分による反射シグナルが一定程度あると考えられるが、マルチスペクトルセンサーの情報を用いた分布の推定は容易ではない^{7,8)}。

一方、近年においてリモートセンシングに用いられている人工衛星の分解能は高く、例えば、Sentinel-2^{9,10)}のマルチスペクトルセンサーの分解能は10 mであることから水域の規模によってはアマモの光環境を制限する水深や濁度の分布、アマモによる光合成等の生物活動の影響を受けるDIC等の水質分布等の情報と組み合わせることで実用的なアマモの現存量を求めることは可能と考えられる。本研究では、オホーツク海沿岸の潟湖の一つであるコムケ湖を対象として、アマモが優占している夏期においてアマモの繁茂状況を人工衛星Sentinel-2のNDVIデータを用いて推定し、UAVによる空撮から得た結果と現地観測結果との比較を行った。また、湖水のアマモ繁茂域内外の多点におけるDICの変化量の実測値をモデルによる計算値と比較することで人工衛星データによって推定されたアマモの繁茂状況の推定結果の検証を試みた。

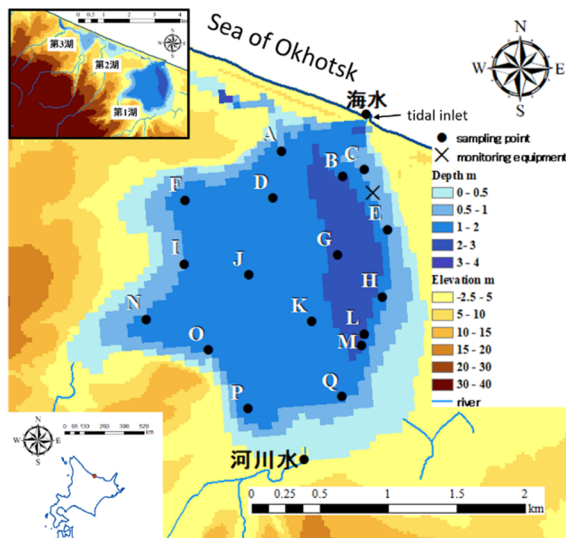


図-1 コムケ湖の位置，全体図，および第 1 湖の拡大図（調査地点，水深）

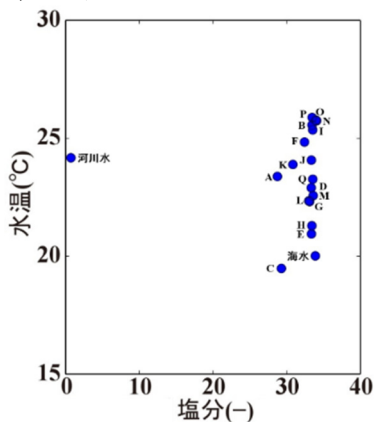
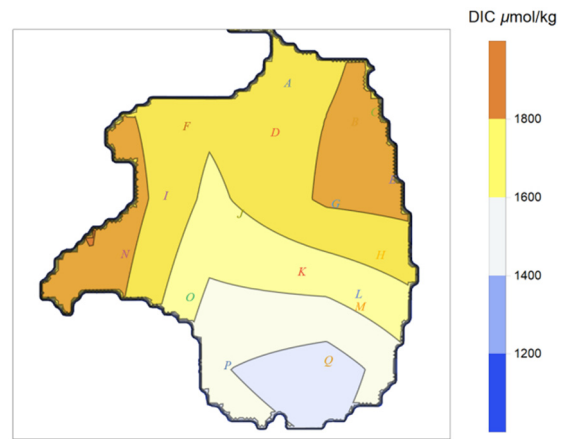


図-2 T-S ダイアグラム (2018 年 8 月 8 日)

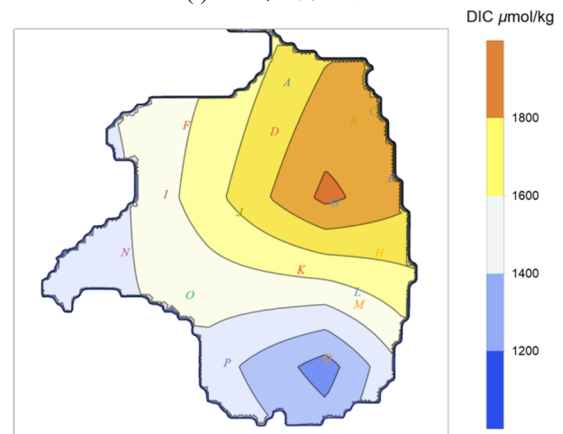
2. アマモ分布と水質に関する現地調査

(1) 水質調査手法

研究対象としたコムケ湖はオホーツク海と連結した第 1 湖と小さな第 2 湖，第 3 湖が連結した潟湖である。図-1 はコムケ湖の位置，全体図と調査対象とした第 1 湖の拡大図を示す。コムケ湖は植物プランクトンによるブルームの発生が少なく，また，水生植物としてはアマモが優占しており，アマモによる DIC への影響を検証するのに適していると考えられる。アマモの繁茂期である 2018 年 7 月 23 日と同年 8 月 8 日にコムケ湖にて，海水，河川水，および湖水の採水による水質調査を実施した。なお，調査はそれぞれ 10～17 時，11～17 時の間に実施しており，海水に関しては第 1 湖の湖口に流入する海水を採取している。DIC 測定用サンプルは各調査地点の表層にて 250 mL の Schott Duran 瓶で採水し，200 μ L の塩化第二水銀を添加して DIC を固定した²⁾。これらは全アルカリ度滴定装置(ATT-15，紀本電子社製)で測定した。7 月 23 日の調査では塩分をポータブル水質計 (Hach 製，HQ40d)，8 月 8 日の調査では水温，塩分，および濁度を多項目水



(a) 2018 年 7 月 23 日



(b) 2018 年 8 月 8 日

図-3 DIC の分布

質計(AAQ1183，JFE アドバンテック社製)を用いて測定した。さらに，St. 1 の水深 1 m においてメモリ式光子計 (DEFI2-L，JFE アドバンテック社製) とメモリ式水温・水位計 (Eijkelkamp 社製，SERA Diver) を用いて光子束密度，水温を連続モニタリングした。

(2) 塩分と水温，およびDICの分布特性

図-2 に 2018 年 8 月の水質調査から得られた T-S ダイアグラムを示す。塩分は河川水を除き，28.8～34.1 の範囲にある。水温は 19.5～25.9℃の範囲にあった。

図-3 は(a)2018 年 7 月と(b)同年 8 月における DIC の分布を示している。分布は，現地採水地点での観測データを空間的に距離の 2 乗の逆数で重み付き平均して補間して作成したものである。St. A～Q の DIC が 1401.0～2004.3 μ mol/kg の範囲であり，海水の DIC が 1986.1 μ mol/kg，河川水の DIC が 505.1 μ mol/kg であった。

(3) 濁度の分布特性

図-4 は濁度分布 (2018 年 8 月調査) を示している。濁度分布は先述の DIC と同様に補間して作成したものである。光強度の減衰曲線は SS と濁度の関係 (式(1)¹⁰⁾ と減衰係数と SS との関係 (式(2)；横山ら¹²⁾の式を修正) を用いて一般に良く知られる Lambert-Beer 則 (式(3)) から求めた。

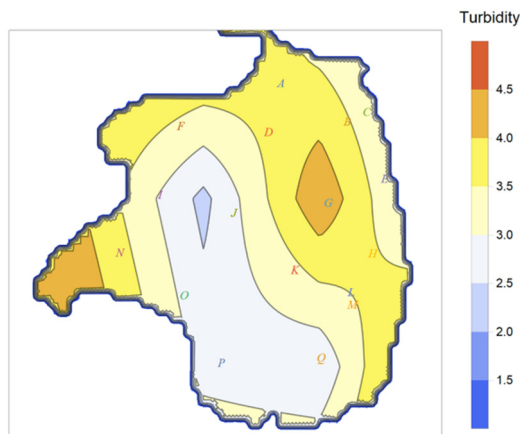


図-4 濁度分布 (2018年8月8日)

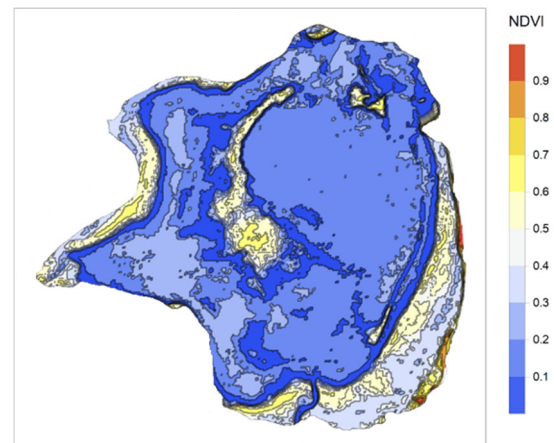
$$\begin{aligned} SS &= 0.8416turb & (1) \\ k_z &= 0.29SS^{0.8} + 0.28 & (2) \\ I &= I_0 e^{-k_z z} & (3) \end{aligned}$$

ここに、 SS : 懸濁物質濃度 (mg/L) , $turb$: 濁度, k_z : 光減衰係数, I : 光量子束密度, I_0 : 水面での光量子束密度 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) である。後述するモデル計算ではこの濁度による光減衰を考慮する。

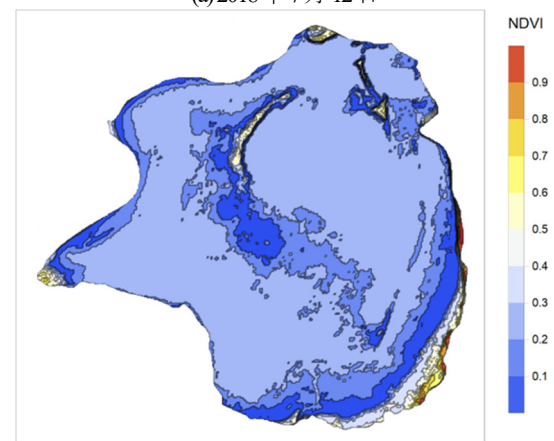
(4) アマモ繁茂域の調査

図-5は2018年7月12日 (01:26:56 UTC) と同年8月6日 (01:26:50 UTC) に人工衛星によって撮影されたコムケ湖周辺の NDVI データの分布を示している。画像データは European Space Agency (ESA) による地球観測ミッション Sentinel-2 L1C によって得られたものであり、マルチスペクトルセンサーの波長とバンド幅は Band 4 (橙) が 665 nm と 30 nm, Band 8 (近赤外) が 842 nm と 115 nm, $\text{NDVI} = (B8 - B4) / (B8 + B4)$ である⁹⁾。

同年8月8日にはマルチスペクトルカメラ (MicaSense 社製 RedEdge 3) を搭載した UAV (ドローン) によりコムケ湖面を上空から空撮し、NDVI 値の分布を算出し、人工衛星による NDVI の妥当性を確認した。マルチスペクトルカメラの波長とバンド幅は Band4 に相当する波長が 668 nm と 10 nm, Band8 に相当する波長が 840 nm と 40 nm であり、撮影時の高度は約 150 m, 地上分解能は約 10 cm/pixel である。現地においては船上から採水時にアマモが優占しているかどうかを目視で確認した。この際、アマモが船上から確認できない地点はアマモ無しとした。図-6は UAV による NDVI データと目視によるアマモの有無のデータに人工衛星による NDVI 画像 (a)7月12日, (b)8月6日の衛星画像) を重ね合わせたものである。人工衛星で得られた NDVI 値の分布が目視で確認されたアマモの分布とより高解像度な UAV で撮影された NDVI の分布と良く一致していることから、人工衛星データがアマモの分布を概ね捉えていることが分かる。図-2の T-S ダイアグラムと図-6を比較すると、アマモの繁茂域より湖奥側の St. I, J, N, O, P, Q で水温が高く湖口側



(a)2018年7月12日



(b)2018年8月6日

図-5 人工衛星による NDVI 画像

で海水温と同様に低い値となっていることがわかる。また、図-3の DIC 分布と図-6を比較すると St. F, I, N, O, P, Q の湖奥部において著しく低下しており、アマモの繁茂によって湖口から入った潮流が抵抗を受けることにより流速が低下して混合しにくくなり水塊の特性が湖口寄りと湖奥寄りで異なっていることが推察される。

3. アマモ場の分布の推定結果に関する考察

(1) 検証に用いるDIC変化量の推定方法

現地におけるアマモの現存量と人工衛星による推定結果を直接に比較することは難しいが、分布の推定結果を用いてアマモによる DIC の変化量を推定した結果が妥当かどうかで、間接的にアマモ場の推定結果を検証する事が可能と考えられる。基礎式には一般的な生態系モデル¹³⁾に準じて以下の式を用いた。

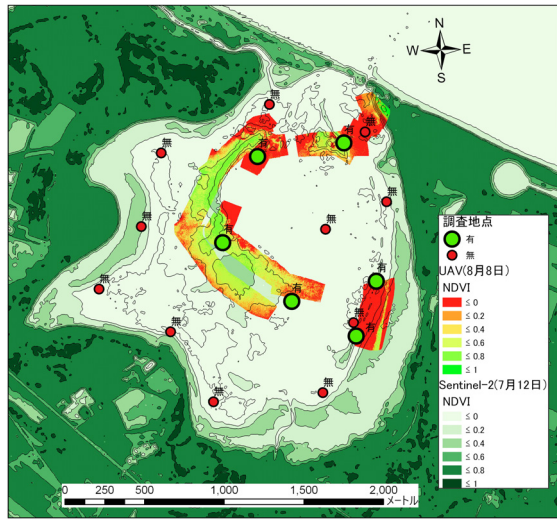
$$\frac{dC}{dt} = (G_m F_l F_{pt} + R_{20} F_{rt}) E \quad (4)$$

$$F_l = \frac{I}{I_0} \exp \left[1 - \frac{I}{I_0} \right] \quad (5)$$

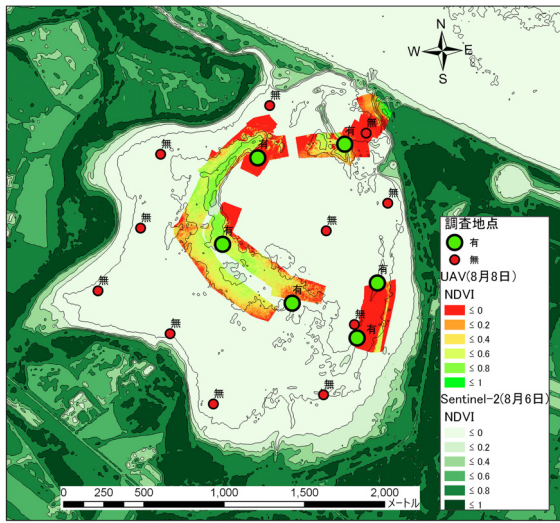
$$F_{pt} = \theta_p^{T-T_0} \quad (6)$$

$$F_{rt} = \theta_r^{T-T_0} \quad (7)$$

ここに、 G_m : 最大光合成速度 ($5.525 \times 10^{-3} \mu\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$) ,



(a) 2018年7月12日



(b) 2018年8月6日

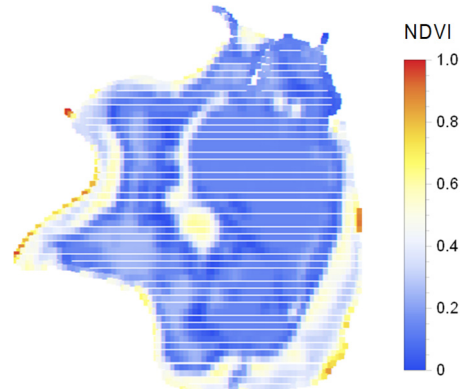
図-6 UAV (2018年8月8日) と人工衛星による NDVI 画像、および目視によるアマモの有無の比較。緑丸印：アマモあり、赤丸印：アマモなし

I_{qx} ：最適光量子束密度 ($505.779 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)， θ_s ， θ_p ：温度補正係数 (1.021, 1.014)， R_{20} ：基準温度 (20°C) における呼吸速度 ($0.834 \times 10^3 \mu\text{mol kg}^{-1} \text{s}^{-1}$)， F_i ：強光阻害の効果¹⁴⁾， F_p ， F_n ：温度の効果， E ：アマモの湿潤重量である。なお、アマモを用いた水槽実験で確認された本モデルの決定係数 R^2 は0.98である。これらのパラメータを単位湿潤重量あたりに換算した上で、次式を用いて DIC 変化量を推定した。

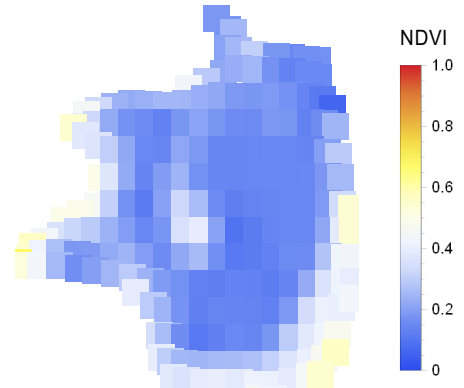
$$\widetilde{G}_1 = \frac{f_1}{f_e} G_e \quad (8)$$

ここに、 \widetilde{G}_1 ：現場での光合成による DIC 吸収速度 (推定値)， G_e ：実験で求められた光合成速度， f_1 ：現場でのアマモの湿潤重量 (kg/m^2)， f_e ：実験でのアマモの湿潤重量 (kg/m^2) である。 f_1 と f_e については、

$$f_1 = \frac{w_0 S_1}{V_1} \quad (9)$$



(a) $\Delta x = 1.44''$



(b) $\Delta x = 5.76''$

図-7 平均化した NDVI 画像 (2018年7月12日)

$$f_e = \frac{w_0 S_e}{V_e} \quad (10)$$

ここに、 S_1 ：現場でのアマモのシュート数 (shoot)， V_1 ：現場での水量 (m^3) (= 面積 \times 水深)， w_0 ：1シュート当たりの湿潤重量 (kg/shoot)， S_e ：実験でのアマモのシュート数 (shoot)， V_e ：実験での水量 (m^3) (= 面積 \times 水深) である。

$$S_1 = \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 A_1 d_0 \quad (11)$$

ここに、 N ：人工衛星で計測された NDVI 値， N_0 ：基準の NDVI 値 (0.3)， A_1 ：現場での面積 (m^2)， d_0 ：基準植生密度 (200 shoot/m^2)，とした。

(2) 人工衛星データの平均化

流動によって水塊が移動することが水質に影響することや、冒頭に述べたように水面下に存在しているアマモからの反射シグナルが弱いことから、アマモの分布を推定するにはある程度の人工衛星データの補正が必要と考えられる。Sentinel-2 の解像度は 10 m であり、潮汐に伴う水塊の移動規模に比べると十分小さいと考えられることから、本研究では試行錯誤的に緯度・経度方向の平均領域幅を $\Delta x = 0.72''$ ， $1.44''$ ， $2.88''$ ， $5.76''$ ， $11.52''$ と設定し、決定係数が最小となる平均領域 ($\Delta x = 5.76''$) を最終的に使用した。図-7 は平均化した領域を変化させた結果を示している。

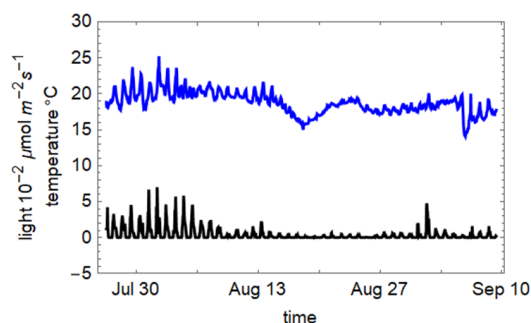
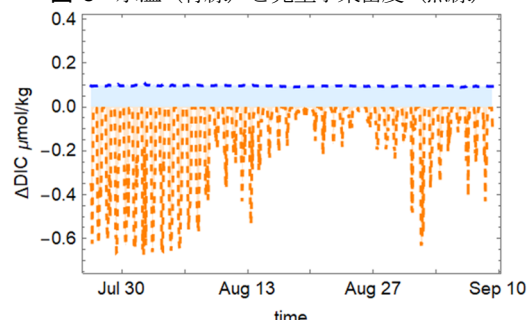
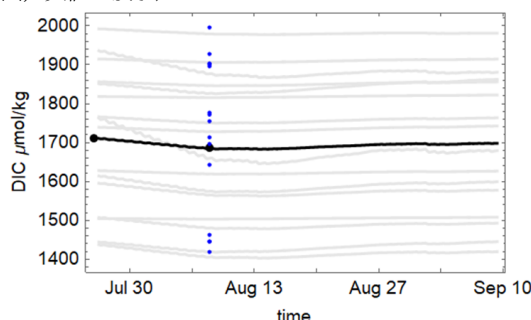


図-8 水温（青線）と光量子束密度（黒線）



(a) 光合成（薄橙）と呼吸（水色）による Δ DIC（正値は放出，負値は吸収）

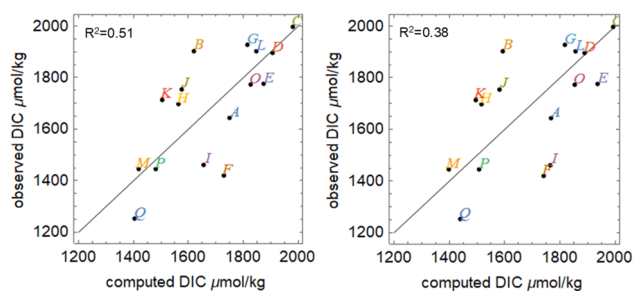


(b) DIC の計算値と観測値（青点：各地点での観測値，グレー線：各地点での計算値，黒点・黒実線：平均値）
図-9 計算結果（アマモ場分布に2018年7月12日の人工衛星データを使用， $\Delta x=5.76''$ ）

(3) 各地点でのDIC変化量による検証

DIC変化量の計算には初期条件として2018年7月（図-3(a)）のDIC値を用い，2018年8月（図-3(b)）に観測されたDIC値を用いて検証した．図-8は計算に用いた水温と光量子束密度データを示している．図-9は(a)光合成と呼吸によるDICの放出量（負の値は吸収量），(b)各地点でのDICの変化量の計算値と観測値の比較を示している．7月後半は光合成による吸収が多く，DICが減少する結果となっており，変化量が概ね妥当な値となっている．

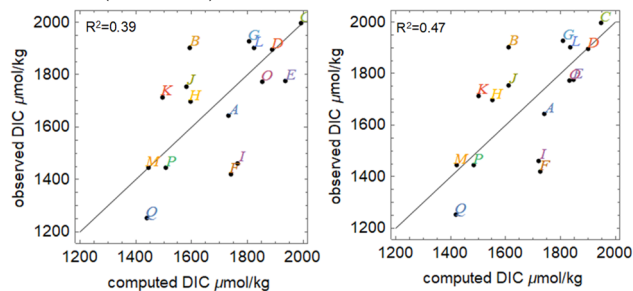
図-10は(a)2018年7月12日の人工衛星データから推定したアマモ分布を用いた計算値および(b)目視によるアマモの有無を用いた計算値と観測値の比較を示している．目視でアマモ有りの地点では200 shoot/m²とした．この結果から人工衛星データを用いた場合の方が再現性が良い（ $R^2=0.51$ ）ことが分かる．すなわち，人工衛星のデータでは植生密度の違いを捉えられたことで計算精度が向上したと判断できる．比較のため，一定水深（1.0～2.0



(a) 人工衛星(2018/7/12)

(b) 目視

図-10 (a)人工衛星データ（2018年7月）を使用した場合と(b)目視の記録を使用した場合のDICの計算値と観測値の比較（ $\Delta x=5.76''$ ）



(a) 水深 1.5 m

(b) 人工衛星(2018/8/6)

図-11 (a)水深をしきい値（1.5 m）として使用した場合および(b)人工衛星データ（2018年8月）を使用した場合のDICの計算値と観測値の比較

m) 以上で同様（200 shoot/m²）にアマモが分布していると仮定し，0.1 m間隔にしきい値を変化させて検討を行った．図-11(a)は目視によってアマモが確認された水域に近い水面下1.5 mをしきい値とした場合の計算値と観測値の比較を示している．その結果は $R^2=0.39$ となり，図-10(a)の結果に比べて精度が悪くなった．これらのことから，アマモ場の植生密度や分布域がDICの分布に影響を及ぼしている可能性が示唆される．

図-10(a)の結果を地点別に詳細に見ると，計算値が観測値よりも低い地点（St. B, H, J, K）はアマモの繁茂が確認されており，その逆の傾向を示している地点（St. A, F, I, Q）はアマモの繁茂が確認されていない．これは，アマモによる流水抵抗が少ない場合には水交換が活発になるため，実際にはアマモの光合成・呼吸が水質に及ぼす影響がより現れにくいことが影響していると考えられる．また，水面から目視で確認できないアマモが存在している場合，NDVIでは水による反射シグナルの減衰によって水面下のアマモの存在がより少なく見積もられている．このため晴天が続いた7月下旬から8月上旬にかけてDICの吸収量が実際よりも小さく計算され，8月のDICの計算値が観測値に比べて高めになった可能性もある．さらに，全地点の平均値が合うようにパラメータを調整していることも一因である．アマモの繁茂状況と計算結果の傾向の違いは以上のことが関係していると考えられる．

図-11(b)は2018年8月6日の人工衛星データから求めたアマモ分布を用いた計算値 ($\Delta x=5.76''$) を示している。図-10(a)7月のデータの方がわずかに R^2 が良好であるが大差がない結果となった。これは調査地点別には多少の違いはあるものの、大局的にはどちらの人工衛星データもアマモの分布の特徴を捉えられていることを示唆している。

4. おわりに

人工衛星 Sentinel-2 の NDVI 値よりアマモ分布を推定し、オホーツク海沿岸に位置する潟湖であるコムケ湖第1湖の水質分布を利用してその分布の推定結果を検証した。その結果、ある程度の DIC の変化量の再現性が確認できたことから NDVI 値で推定されたアマモ場の分布を用いて概ね良好なアマモ分布を推定できていることが確認された。アマモの繁茂の有無の違いによる再現性の傾向の違いが見られたが、水面下でのアマモの繁茂状況の推定が不十分であることやアマモの流水抵抗による影響が考えられた。

謝辞：本研究はJSPS科研費(課題番号：18H01545)の助成を受けている。北見工業大学技術部の信山直紀技術員にはDICの分析に協力頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Nellesmann, C., Corcoran, E., Duarte, C. M., Valdes, L., De Young, C., Fonseca, L., Grimsditch, G. (Eds) : *Blue carbon. A rapid response assessment.*, 80p, United Nations Environmental Programme, GRID-Arendal, Norway, 2009.
- 2) 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CO₂フラックスの空間分布特性と要因解析, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.1188-1193, 2014.
- 3) 田多一史, 所立樹, 渡辺謙太, 桑江朝比呂 : 北海道風連湖における大気-海水間CO₂フラックスに影響を及ぼす要因, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.69, No.2, pp.1252-1257, 2013.
- 4) 田多一史, 中山恵介, 所立樹, 渡辺謙太, 桑江朝比呂 : 春季出水期におけるコムケ湖の水質変動解析と大気-海洋間CO₂フラックスの推定, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol.72, No.2, I_982-I_987, 2016.
- 5) Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell and D.W. Deering: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third NASA ERTS Symposium*, NASA SP-351 1:309-317, 1973.
- 6) Best R.G., Wehde M.E., Linder R.L.: Spectral reflectance of hydrophytes, *Remote sensing of Environment*, Vol. 11, 27-35, 1981.
- 7) ルイソチエー, 作野裕司 : 衛星Terra/ASTERデータを使った吉名干潟における藻場モニタリング. 水工学論文集, Vol.52, pp.1381-1386, 2008.
- 8) 京田潤一, 桑江朝比呂 : 現地観測データと衛星画像の統合による海草藻場の分布域と密度の測定, 港湾空港技術研究所資料, No.1273, 2013.
- 9) Sinergise Ltd., Sentinel Hub, URL: <https://sentinel-hub.com/> (Retrieved: 13/08/2018)
- 10) Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch B., Isola, C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., Bargellini, P.: Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, Vol., 120, pp. 25-36, 2012
- 11) Komai, K., Nagao, A., Nunokawa, M., Watanabe, N., Maruya, Y. and Nakayama, K.: Influence of nutrient and fine sediment control to primary productivity by benthic attached algae in forest watershed, *Proceedings of IWA World Water Congress and Exhibition*, 2016
- 12) 横山勝英, 児玉真史, 岡村和磨, 山本浩一, 池ノ谷直樹 : 筑後川の高濁度感潮域における光強度と植物プランクトンの変動, 土木学会論文集B1 (水工学), Vol. 68, I_1585-I_1590, 2012
- 13) Kremer, J., Nixon, S. W.: A Coastal Marine Ecosystem, Simulation and Analysis, *Ecological Studies*, Vol. 24, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1978
- 14) Steele, J. H.: Environmental control of photpsynthesis in sea. *Limnology and Oceanography*, Vol.7, pp.137-150, 1962

(Received May 31, 2019)

(Accepted August 7, 2019)

MEASUREMENT OF SEAGRASS DISTRIBUTION BY SATELLITE DATA AND VARIDATION USING DISSOLVED INORGANIC CARBON IN LAGOON

Katsuaki KOMAI, Hiroshi HAYAKAWA, Tatsuya SATO, and Keisuke NAKAYAMA

Seagrass distribution in a lagoon located near the Sea of Okhotsk was estimated from satellite data, and varidated using DIC and its variation obtained by field observation data. Seagrass distribution was made by converted data from averaged NDVI of satellite Sentinel-2 to seagrass vegetation density. As a result of calculation of DIC model, since field observation data at 17 points in/out of seagrass vegetation area for a period of from July to August in 2018 were successfully represented, seagrass distribution using satellite NDVI was well verified. Bias of calculation results were appeared due to seagrass existence, however, the estimation insufficiency of vegetation under the water and the influence of hydraulic resistance of seagrass to tidal current and water quality were likely associated.