

人工衛星画像を用いた諏訪湖における水草分布域のモニタリング手法の開発

長野県諏訪湖環境研究センター ○筒井 裕文, 谷野 宏樹, 宮坂 真司, 北野 聡

1. はじめに

諏訪湖では、1960年代に高度経済成長にともなう水質汚濁が進行し、富栄養化によるアオコの異常発生が見られるようになった¹⁾。その後、流域下水道の整備や諏訪湖に係る湖沼水質保全計画による取組みなどにより水質が改善し、アオコに代わって水草が繁茂するようになった。2000年頃から浮葉植物ヒシ *Trapa* spp.が大量繁茂しており、栄養塩の吸収による水質浄化の一方で、ヒシの大量繁茂により水の流動の阻害や沈水植物への影響、船の航行や親水活動の支障となることが懸念され¹⁾、適切な管理が課題となっている。

諏訪湖における水草の適切な管理のためには水草繁茂状況の適切なモニタリングが必要であり、長野県では夏季に水草の繁茂域に関する全周調査を実施してきた²⁾。一方でこれらの調査には少なくない時間や労力が必要となるため、ヒシ繁茂状況に応じた管理を行うための根拠などに必要な年度内の時系列的なモニタリングを行うことは困難であった。

近年、人工衛星から撮影された光学画像を用いた水草のモニタリングに関する検討がなされており、ヒシの繁茂状況の把握を行った例も報告されている^{3,4)}。そこで、本研究では人工衛星からの光学画像を活用した諏訪湖全域を対象とした網羅的な水草、特に浮葉植物の繁茂状況のモニタリング技術の開発を目的として、特に時系列的な繁茂状況を解析する手法について検討を行った。

2. 実験材料および方法

2.1 使用データおよび前処理

本研究では長野県の諏訪湖を対象とし、Sentinel-2の光学画像を利用した解析をGoogle colabratory上で実施した。諏訪湖では2-3日毎にSentinel-2によるマルチスペクトル光学画像が撮影されている。Sentinel-2におけるマルチスペクトル画像のバンド情報を表1に示す。衛星光学画像は事前にCopernicus browser (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>)にて諏訪湖全域が問題なく撮影されていることを確認したうえで、大気補正などが行われているLevel 2A画像をダウンロードして用いた。今回の検討ではマルチスペクトル画像のうち分解能が10-20mのバンドの反射率データを用い、符号あり小数型の32 bit形式に変換したうえで、欠測データ(NaN)を0に置換した。さらにバンド間の分解能および位置の差を解消するため分解能10mのバンドデータについて、band11を基準とした20mメッシュに分解能をダウンスケーリングする前処理を行った。

2.2 浮葉植物分類に用いた指標の計算

浮葉植物と開放水域の分類を行うため、本研究では既往研究にて植生の検出に広く用いられているNormalized Difference Vegetation Index (NDVI)⁵⁾、Floating algae index (FAI)⁶⁾、水域の検出に広く用いられているNormalized Difference Water Index (NDWI)⁷⁾、Augmented Normalized Difference Water Index (ANDWI)⁸⁾を以下の通り算出した。

$$NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}$$

$$FAI = B08 - B04 - (B11 - B04) \times \frac{\lambda_{B08} - \lambda_{B04}}{\lambda_{B11} - \lambda_{B04}}$$

$$NDWI = \frac{B08 - B03}{B08 + B03}$$

$$ANDWI = \frac{B08 + B11 + B12 - B02 - B03 - B04}{B08 + B11 + B12 + B02 + B03 + B04}$$

算出した各指標のラスターデータは Geotiff 形式で保存するとともに、ヒストグラムを 200 分割で算出し、水域と浮葉植物の分類の閾値の検討に用いた。

2.3 Sentinel-2 光学画像からの浮葉植物の抽出

浮葉植物の抽出には前述の指標を算出した後、QGIS (ver. 3.34.6)を用いて地図上に描画した。その後、各指標のヒストグラムを目安に閾値を変化させ、教師データとして長野県水産試験場諏訪支場が実施した水生植物分布域調査のヒシ分布域の結果と全体的に一致する閾値を目視で確認のうえ設定し、浮葉植物と開放水域を分画し、植生域の面積の推定を行った。衛星画像の撮影日は教師データである水生植物分布調査の実施日に近い晴天時を選択した。

3. 結果および考察

3.1 Sentinel-2 画像から算出した各指標の画像

代表として 2022 年度の Sentinel-2 画像をもとに作成した True color 画像、ヒシ分布域調査結果、各種指標の算出結果を図 1 の(A), (B), (C)–(F)にそれぞれ示す。なお、ヒシ分布域調査結果における L, M, H はそれぞれ植生密度の段階を示しており、L は株間距離が 2 m 以上の疎な状態、M は株間距離が 1-2 m の中間的な状態、H は株間距離が 1 m 未満の密な状態をそれぞれ示す。目視において、植生域の検出に用いられる NDVI および FAI ではヒシの繁茂域がシグナルとして検出され、H の範囲と概ね一致した。また、水域の検出に用いられる NDWI および ANDWI でも開放水面とヒシ繁茂域が分かれて検出された。NDVI および NDWI では北西部に大気由来と思われるノイズが比較的多く認められた。

3.2 各指標値の撮影日ごとのヒストグラム

各年度の衛星画像について NDVI および NDWI を算出した結果のヒストグラムを図 2 および図 3 にそれぞれ示す。いずれの年度でも水域に起因すると思われる低い指標値側の大きく比較的鋭いピークと、植生域に起因すると思われる大きな指標値側の低く比較的なだらかなピークが現れた。また各年度で同様の時期の画像を用いたにもかかわらずピーク位置が年度により異なり、水域側のピークの極値は NDVI が -0.12–0.00、NDWI が -0.18–0.08 の範囲に、浮葉植物側のピークの極値は NDVI が 0.33–0.53、NDWI が 0.23–0.40 の範囲にそれぞれ現れた。国内の既往研究においては、NDWI > 0.27 の値を用いることで浮葉植物を検出可能との報告³⁾や、NDVI > 0.50 として水草帯の検出を行っている報告⁴⁾など多くの研究で閾値に定数が用いられているが、同一地点かつ同一時期でもピーク位置に 0.2 程度

表 1. Sentinel-2 のマルチバンド情報

バンド番号	波長域	中心波長 (nm)	地上分解能 (m GSD)
B01	Indigo	443	60
B02	Blue	490	10
B03	Green	560	10
B04	Red	665	10
B05	VNIR1	705	20
B06	VNIR2	740	20
B07	VNIR3	783	20
B08	NIR1	842	10
B8A	NIR2	865	20
B09	NIR3	945	60
B10	SWIR1	1375	60
B11	SWIR2	1610	20
B12	SWIR3	2190	20

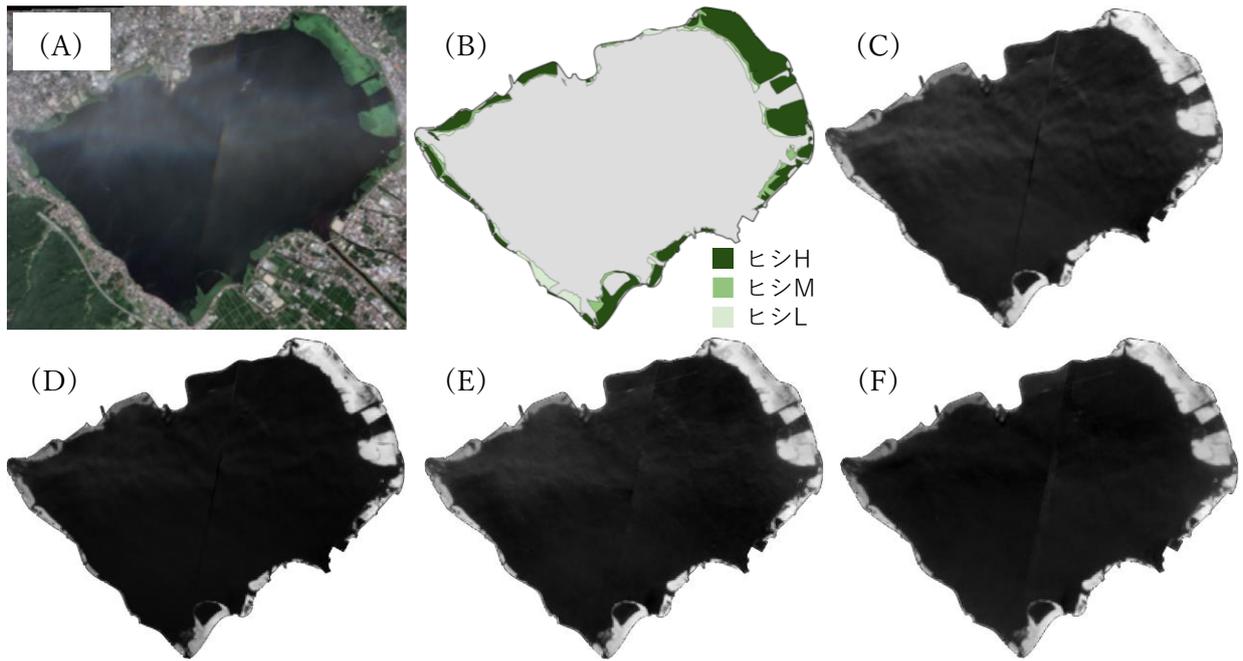


図 1 Sentinel-2 マルチバンド画像(2022 年 8 月 10 日)より作成した画像と長野県水産試験場諏訪支場によるヒシ繁茂域の調査結果(2022 年 8 月 9-10 日). (A) True color 画像, (B) 調査結果図, (C) NDVI, (D) FAI, (E) NDWI, (F) ANDWI

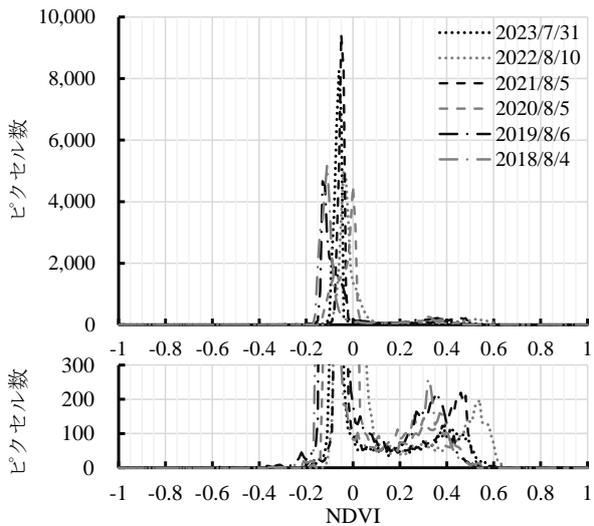


図 2 各年度の諏訪湖内 NDVI 値のヒストグラム

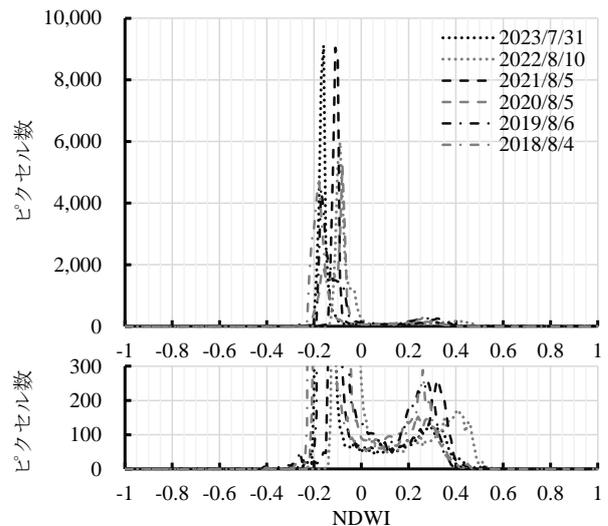


図 3 各年度の諏訪湖内 NDWI 値のヒストグラム

の差があることから、事前に閾値の妥当性を検討することが重要であることが示された。特に複数時期の画像を対象とした解析を行う際にはそれぞれの画像で適切な閾値を設定する必要があることが示された。また、2つのピークが完全に分離していないことから、精度向上のためには単一の指標だけでなく、複数の指標を用いた分類の検討も必要であると考えられた。

3.3 衛星を活用した浮葉植物植生域のモニタリングの妥当性

それぞれの年度の衛星画像について閾値をもとに算出した植生面積と、ヒシ分布域調査結果から算出された面積の比較結果を表 2 に示す。2018 年度以外で、植生指標である

表 2 水生植物調査結果と本研究にて衛星画像より推定したヒシ繁茂面積の比較

年度	水生植物調査結果 (ha)					衛星画像からの推定値 (ha)			
	L	M	H	M+H	Total	NDVI	FAI	NDWI	ANDWI
2023	83	10	90	100	183	103	104	94	99
2022	24	33	128	161	185	150	140	135	131
2019	22	8	135	143	165	144	143	134	137
2018	85	1	77	78	163	102	106	106	102

NDVI と FAI は実地調査の M と H の合計値と比較的近い値に合わせることができ、水域指標である NDWI と ANDWI は H の値と比較的近い値に合わせることができた。既往研究でも NDWI は植生密度 50%以上で繁茂している浮葉植物の検出に用いられており⁹⁾、その報告と一致した。一方で水生植物を広く検出する目的では NDVI の利用が適していると考えられ、モニタリングの目的に応じた指標の使い分けが必要であると示された。2018 年度の結果は衛星画像からの推定値はすべての指標において過大評価となった。この原因として他の年度で H となることの多い諏訪湖東側で 2018 年度は L の部分が多く、その領域でシグナルが検出されたため、クロモなどの沈水植物の影響を受けた可能性が考えられた。

4. まとめ

人工衛星 Sentinel-2 を活用した諏訪湖の浮葉植物帯のモニタリング手法について主に条件設定に関する検討を行った結果、植生指標である NDVI や水域指標である NDWI を用いて浮葉植物の検出が可能であること、一方で同一の季節であっても各指標の最適な閾値が異なることが明らかとなった。今後の展望として、教師データの集積による定量的な評価、複数の指標を活用した機械学習の活用による分類精度の向上と解析の省力化が考えられる。

参考文献

1. 長野県諏訪地域振興局: (2023) 諏訪湖創生ビジョン. 22–23.
2. 長野県: (2022) 令和 4 年度諏訪湖創生ビジョン事業調査結果報告書. 56–61.
3. 尾山 洋一, 松下 文経, 福島 武彦: (2017) 衛星画像から観測した国内 6 湖沼におけるヒシ属 *Trapa* L. の長期分布変化. *Jpn. J. Conserv. Ecol.*, **22**(1), 171–185.
4. 安井 一人, 松村 勇育, 浅見 正人, 蔡 吉, 酒井 陽一郎, 石川 可奈子: (2023) ドローンと衛星観測による伊庭内湖における水草繁茂面積の簡易推定. *陸水学雑誌*, **84**(1), 65–74.
5. Kriegler F.J., Malila W.A., Nalepka R.F., Richardson W.: (1969) Preprocessing transformations and their effect on multispectral recognition. *Remote Sens. Environ.*, **6**, 97–132.
6. Hu C.: (2009) A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sens. Environ.*, **113**(10), 2118–2129.
7. Mcfeeters S.K.: (1996) The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Remote Sens. Lett.*, **17**(7), 1425–1432.
8. Rad A.M., Kreitler J., Sadegh M.: (2021) Augmented Normalized Difference Water Index for improved surface water monitoring. *Environ. Model. Softw.*, **140**, 105030.

謝辞

本研究において使用した水生植物の繁茂状況の結果は長野県水産試験場諏訪支場の調査によって得られたものである。ここに謝意を表します。