

〈特集〉

水環境計測に向けたリモートセンシング・UAVの活用

作野 裕 司

広島大学 大学院工学研究科
 (〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1 E-mail: sakuno@hiroshima-u.ac.jp)

概 要

近年、発展が目覚ましい衛星・UAV（無人機）によるリモートセンシング技術を使った応用事例を、主に沿岸の水環境に焦点をあてて紹介する。ここでは、主に海洋の表面水温（SST）、クロロフィルa（Chla）を推定できる衛星MODIS、1時間に1回Chlaを観測できる静止海衛星GOCI、高解像度で湖沼などを観測できる衛星LANDSAT-8、そしてUAVという代表的な4種類のプラットフォームを対象とした。最終的に瀬戸内海の栄養状態、濁水の流出過程、湖の水温、藻場の拡大などの解析にこれらのデータが極めて有効であることを示した。

キーワード：環境、衛星、UAV、水質、藻場
 原稿受付 2018.4.17

EICA: 23(1) 27-30

1. はじめに

近年、リモートセンシング技術の発展は目覚ましい。ここでいう「リモートセンシング」とは、英語で「Remote Sensing (RS)」と書き、文字通り、「非接触で計測する」という意味である。最近では人工衛星（以降、単に衛星と呼ぶ）データの画像解析によって得られた情報というイメージが強い。一方「ドローン」（ここでは、無人機の意味である「UAV (Unmanned aerial vehicle)」という言葉を使う）といえ、近年の最先端技術を象徴するような用語となっている。実際、水環境計測分野でも Fig. 1 に示すように、外洋や沿岸域において衛星やUAVが当たり前のように使われる時代となっている。本特集では、筆者がこれまでに実績のある「水環境計測におけるRS・UAVの活用」について、最新の情報を踏まえて、紹介する。

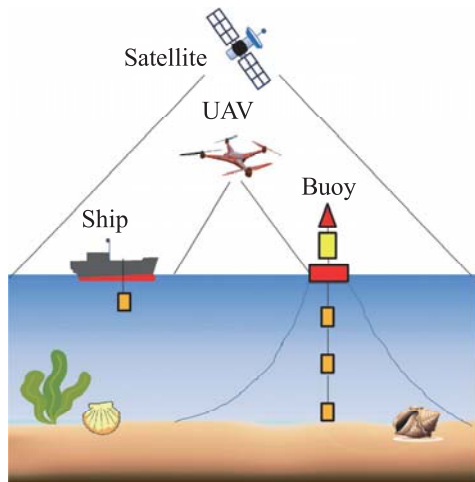


Fig. 1 Schematic diagram of water environment measurement by satellite/UAV etc.

2. 水環境計測に使われるプラットフォーム

2.1 概要

プラットフォームと聞くと「駅舎」を想像する人も多いと思うが、RS分野でいうプラットフォームとは、カメラやセンサを載せる飛行体のことをいい、衛星やUAVは代表的なRSプラットフォームである。Fig. 2 は水環境計測分野における最近の衛星プラットフォームの時空間スケールを示している。これによると、すでに500 m 解像度、1日周期の観測体制はほぼ実現しており、今後は矢印の方向に技術開発が進むと考えられる。現状ではこのような衛星観測を補うための観測手段としてのUAV観測が注目されている。

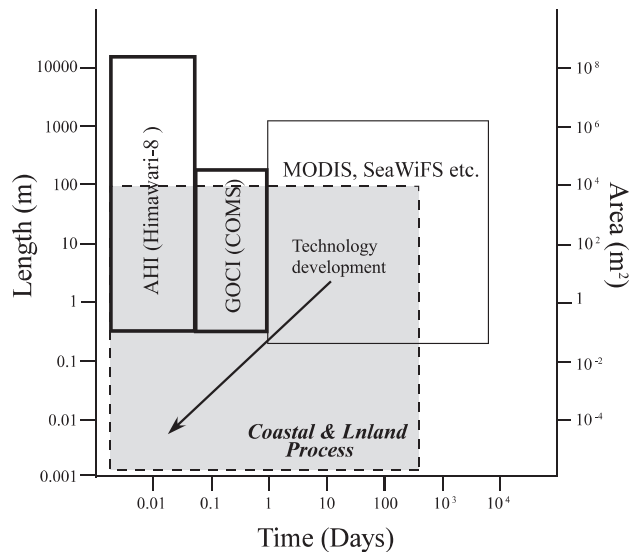


Fig. 2 Spatial-time scale of coastal and inland process in relation to polar orbiting and geostationary satellites. This original figure is from Mouw et al.¹⁾

2.2 衛星

ここでは、現在稼働中の水環境を計測する代表的な3種類の衛星プラットフォームについて紹介する。なお、いずれの衛星データも現在、インターネットから無料で入手することができる。

(1) 海洋観測衛星 AQUA MODIS

2000年から現在まで地球全体の海表面水温 (SST: Sea Surface Temperature) やクロロフィル a (Chla: Chlorophyll-a, 魚のえさ, 海洋の栄養状態や二酸化炭素吸収源の指標) を計測しているのが、米国の AQUA MODIS (アクア, モーディス) という海洋観測衛星である。この衛星により、約 1 km の空間解像度で、毎日、SST/Chla データが得られる。

(データ入手先: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)

(2) 静止海色衛星 COMS GOCI

2010年から現在まで韓国や日本を中心とした Chla を計測しているのが、COMS GOCI (コムス, ゴシ) という韓国の海洋観測衛星である。この衛星は、世界ではじめて静止軌道から 500 m の空間解像度で、毎時間の Chla データを観測することに成功している。

(データ入手先: <http://kosc.kiost.ac.kr/eng/>)

(3) 地球観測衛星 Landsat-8

地球観測衛星といえば、米国の「Landsat (ランドサット)」と言われるくらい有名なプラットフォームで、2013年から現在まで、「Landsat-8」と呼ばれる8号機が稼働している。前述した AQUA MODIS や COMS GOCI と異なり、最初から SST/Chla などの海洋の物理量を提供しているわけではなく、30 m という高解像度を生かして、湖沼や沿岸域の様々な現象をユーザー側が自由にアレンジして使う形式で提供されている。

(データ入手先: <https://earthexplorer.usgs.gov/>)

2.3 UAV

前述したように、UAV は最近ではドローンという愛称で親しまれている。以前は農薬散布などで使う高額なラジコンヘリ (数百万円~数千万円) が有名だったが、2011年3月に発生した東日本大震災以降から急速に安価 (数万円~数十万円) なツールとなっている。UAV が研究として飛躍的に使われるようになった物理的な理由のひとつが、リチウムイオンポリマー電池 (以降、リポ電池と呼ぶ) の登場だと言われている。この電池の登場により、UAV の飛行時間が数分から 20-30 分となったことが大きいと言われている。最近では、落下事故などが多く、法的な規制も多くなっているが、映像や物流などの分野で加速度的に利用が検討され始めている。UAV に搭載するカメラは、定番と言われる DJI 社の Phantom のような小型のドローンでは数 10~数 100 g 程度の重さ

のカメラが搭載されているが、近年では、数 kg~数 10 kg のカメラやセンサも搭載できるプロ仕様の UAV や、採水ドローン、潜水ドローンなどといった様々な用途の UAV も登場している。UAV の一例として、**Fig. 3** に当研究室が所有している、6 枚ローターの UAV を示す。この UAV では、操縦は 2.4 GHz 帯の電波を使った無線操縦システム (プロポ) を使って行う。撮影高度は最大 150 m であり、地上風速 5 m/s までの風速に耐えられる設計となっている。また、上空の暴風などで危険だと判断された場合は、自動帰還する機能もある。UAV の動力となっているのは、3300 mAh のリポ電池 2 個で、300 g 程度の物体を持ち上げる能力がある。飛行可能な時間は最大 15 分程度 (通常 10 分程度) である。撮影するカメラは高解像度の小型コンパクトデジカメ (通常は Canon Power Shot S100) を使用している。



Fig. 3 UAV of 6 rotors owned by our laboratory

3. RS による水環境計測の活用事例

3.1 MODIS による Chla 計測

Fig. 4 は MODIS データから生成された、日本周辺海域における年平均 Chla の分布図である。これより、日本周辺では、瀬戸内海に代表されるような沿岸地域で Chla が高くなっており、これらの水域での非常に高い生産性を示している。一方では、きびしい栄養塩規制等により、瀬戸内海などでは逆に貧栄養化²⁾も懸念されており、Chla の変化は環境のみならず、漁業

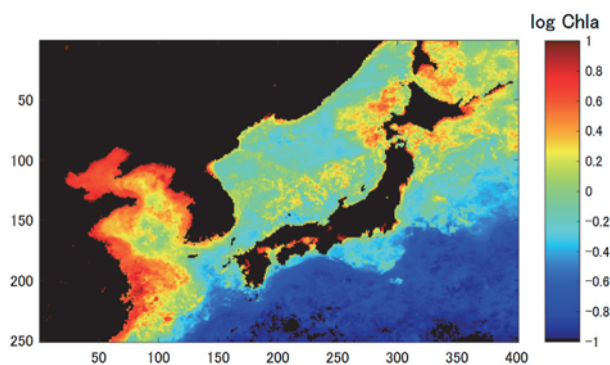


Fig. 4 Annual mean Chla distribution map surrounding Japan using MODIS data. The original data is MODIS Level 3 product of NASA's ocean color Web.

者も大きな関心を寄せている。また、東北から北海道の沿岸でも高い Chla が確認される。これらの水域では非常に良好な漁場となっており、衛星による Chla 監視を利用したハイテク漁業³⁾も実践されている。**Table 1** と **Table 2** に主な衛星データから得られる過去の Chla データの一覧と MODIS データから得られる海洋の物理量の一覧をそれぞれ示す。

Table 1 Chla data availability period by main satellite sensor

Sensor Name	Data availability period
CZCS	Oct. 1978-Jun. 1986
OCTS	Nov. 1996-Jun. 1997
SeaWiFS	Sep. 1997-Dec. 2010
MODIS (Terra)	Feb. 2000-ongoing
MODIS (AQUA)	Feb. 2002-ongoing

Table 2 Physical parameters obtained from MODIS

Physical parameters
Aerosol optical thickness
Angstrom coefficient
Chlorophyll concentration
Chromophonic Dissolved Organic Matter index
Diffuse attenuation coefficient
Fluorescence Line Height
Instantaneous Photosynthetically Available Radiation
Particulate Inorganic Carbon
Particulate Organic Carbon
Remote Sensing Reflectance
Sea Surface Temperature

3.2 GOCI による濁水の移動解析

短時間に、連続した2つ以上の画像が取得された場合、移動体の動きを追跡できる。このアイデアを使って、衛星画像から雲や海流の動き（方向ベクトル）を追跡する手法研究^{4,5)}がさかんに行われている。例えば、**Fig. 5** は台風通過直後に撮影された大阪湾周辺における2枚の GOCI 画像（午前9時と午前11時）の比較と、その差分画像である。差分画像から判断して、河川からの濁水が、沖に向かって進行している様子

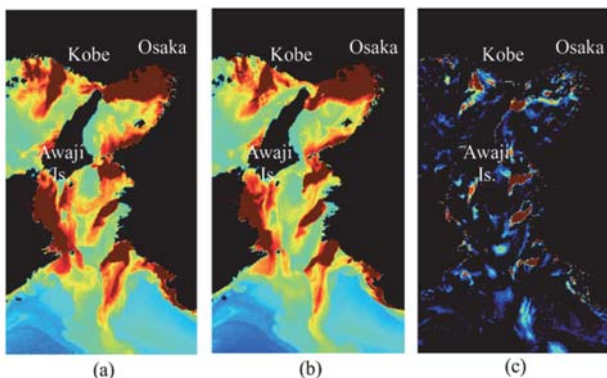


Fig. 5 GOCI images of 9 am (a) and 10 am (b), and differential images (c) in Osaka Bay immediately after typhoon passing, 13 Sep. 2013.

くわかる。数時間の画像を連続してアニメーションにすればさらにその現象がわかりやすいが、500 m の解像度で、1時間ごとに撮影できる GOCI ならではの解析である。

3.3 Landsat-8 による湖沼の水温分布計測

Landsat-8 は、100 m 解像度の TIRS (Thermal Infrared Sensor) と呼ばれる放射温度を測定する熱赤外センサが搭載されている。このような比較的高解像度の熱赤外センサデータを使えば、海洋と比べスケールが非常に小さい、湖などの表面水温を知ることができる⁶⁾。**Fig. 6** は日本の代表的な湖沼（宍道湖・中海、琵琶湖、霞ヶ浦、小川原湖）において実測された湖表面水温 (Lake Surface Temperature: LST) と TIRS センサから推定された LST との関係⁷⁾を示している。このうち、(a) は単バンドモデルで推定した場合で、(b) は2バンドモデルで推定した場合である。単バンドモデルでは 1.6°C の RMS 誤差があるが2バンドモデルにすると 0.9°C の RMS 誤差となり、大幅に精度が向上した。2バンドを使った水温推定は古くから Split Window (SW) 法⁸⁾と呼ばれ、優れた水温推定法である。この結果も SW 法を支持するものとなっている。

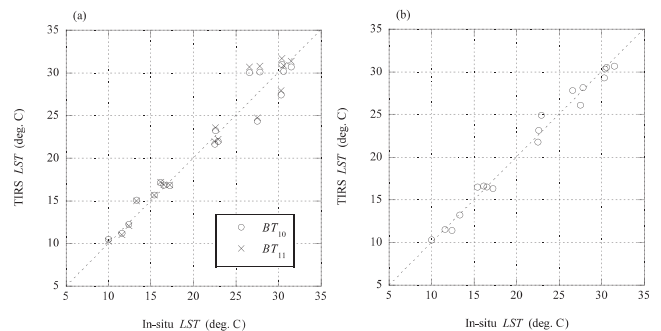


Fig. 6 Relationship between measured lake surface temperature (LST) in Japanese lakes and estimated LST using Landsat-8 TIRS data. (a) Single band model, (b) Two band model⁷⁾

3.4 UAV による藻の拡大計測

Fig. 7 は2010年から2012年の鳥根県の宍道湖南岸の湯町鼻付近において取得された UAV 画像（一部有人飛行機も使用）の経年変化⁹⁾である。画面の水域部に黒い斑点（2012年は白い斑点）状に分布する水草（オオササエビモとその上に覆うシオグサ）が急速に拡大している様子が写真からよくわかる。この画面は100 m～数100 m 四方の範囲であり、その中にある水草は水平的には数 cm～10 cm ほどの大きさしかないため、前述したような衛星からは判別できない。このように局所的な現象を繰り返し安価で撮影できる UAV は、水環境計測において非常に魅力的である。

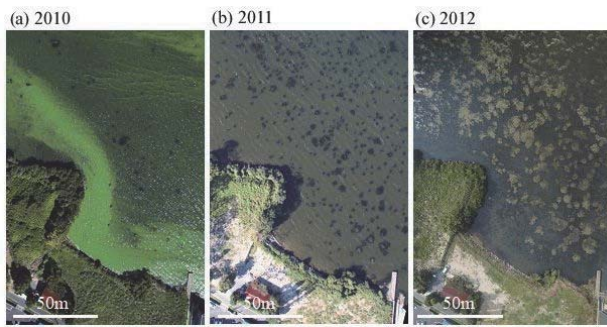


Fig. 7 An example of UAV images of macrophytes expand in the southern coast of Lake Shinji, Shimane Prefecture, Japan⁹⁾

4. ま と め

筆者のこれまでの経験と最近の状況を踏まえて、水環境計測における衛星 RS・UAV の活用についてまとめた。この論文では、特に RS の優れた面を強調して書いたが、筆者の専門である衛星による沿岸の Chla 推定手法に限ると「高 Chla の精度精度が悪い」、「植物プランクトン種の判別が難しい」、「水に対して高感度、高解像度、高頻度の衛星がない」など、この分野の学問上では、いまだ様々な課題が山積しているのも事実である。しかし、Fig. 2 で示したように、衛星の観測技術は日進月歩で開発が進んでいる。実際、このような問題点を一気に克服するような衛星が最近次々と打ち上げられている。ヨーロッパの Sentinel-2 MSI (10 日周期, 10 m 解像度, 13 バンド), Sentinel-3 OLCI (2 日周期, 300 m 解像度, 21 バンド) をはじめとした Sentinel シリーズである。具体的には、これらの新しい衛星を使った場合、MODIS などの従来の衛星にはなかった沿岸の高 Chla 推定に不可欠である、700 nm 付近の反射率測定が可能となり、かつ解像度もよくなる。一方、先日のピョンチャンオリンピックではドローンの演出が世の中をにぎわせたように、その用途はますます広がりを見せている。このように衛星・UAV といったプラットフォーム性能の向

上、そして昨今の機械学習などのビッグデータ解析技術の発達により、衛星 RS・UAV のデータ利用は今後ますます広がり、便利になるだろう。現在は、利用する側が、衛星・UAV から取得されたビッグデータをさらにどのように活用するか、そのアイデアが問われる時代に突入したと言える。最後に本特集に執筆の機会を与えていただいた関係者に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) C. B. Mouw, S. Greb, D. Aurin, P. M. DiGiacomo, Z. Lee, M. Twardowski, C. Binding, C. Hu, R. Ma, and T. Moore: Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: Challenges and recommendations for future satellite missions, *Remote sensing of environment*, Vol. 60, pp. 15-30 (2015)
- 2) T. Yamamoto: The Seto Inland Sea—eutrophic or oligotrophic?." *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 47 (1-6), pp. 37-42 (2013)
- 3) 齊藤誠一: 衛星リモートセンシングで海洋空間を知る, 水産資源の持続可能な利用のためのアプローチ, *情報管理*, Vol. 60, No. 9, pp. 641-650 (2017)
- 4) 林昌宏, 下地和希: 大気追跡風算出アルゴリズム, *気象衛星センター技術報告*, Vol. 58, pp. 3-109, (2013)
- 5) I. J. Barton: Ocean currents from successive satellite images: The reciprocal filtering technique. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 19, No. 10, pp. 1677-1689 (2002)
- 6) Y. Huang, H. Liu, K. Hinkel, B. Yu, R. Beck, J. Wu: Analysis of Thermal Structure of Arctic Lakes at Local and Regional Scales Using in Situ and Multidate Landsat-8 Data, *Water Resources Research*, Vol. 53, No. 11, pp. 9642-9658 (2017)
- 7) 作野裕司, 横尾慶太: Landsat-8 TIRS データによる日本湖沼の表面水温推定の精度検証, *LAGUNA*, Vol. 24, pp. 39-48 (2018)
- 8) L. McMillin, and D. Crosby: Theory and validation of the multiple window sea surface temperature technique. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 89 C3), pp. 3655-3661 (1984)
- 9) 作野裕司, 國井秀伸, 渡辺豊: 低空からの空撮画像を利用した宍道湖の突発的な水草の分布拡大状況把握, *Research Abstracts on Spatial Information Science*, p. 16 (2010)