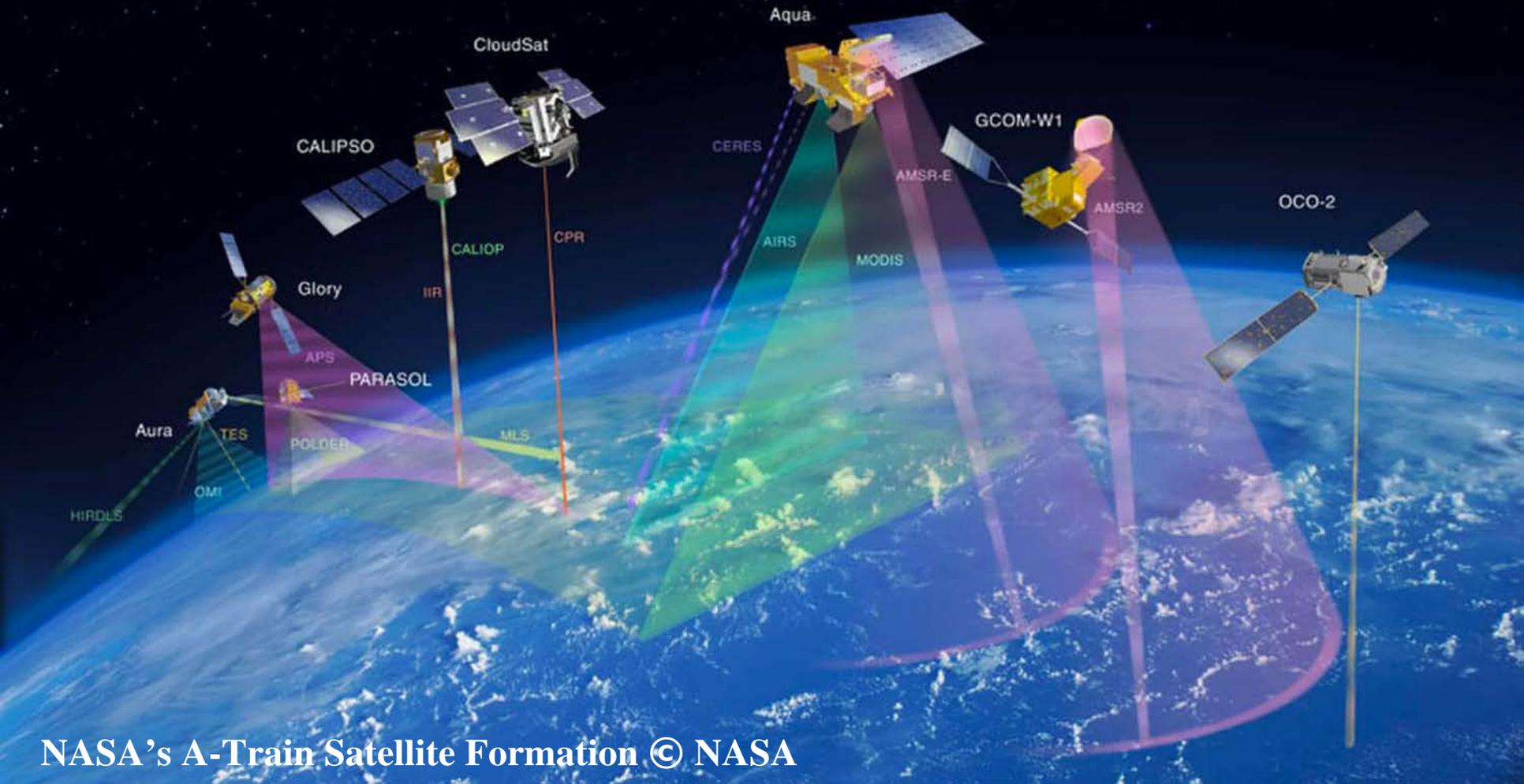


水色リモートセンシング技術 の沿岸環境への応用

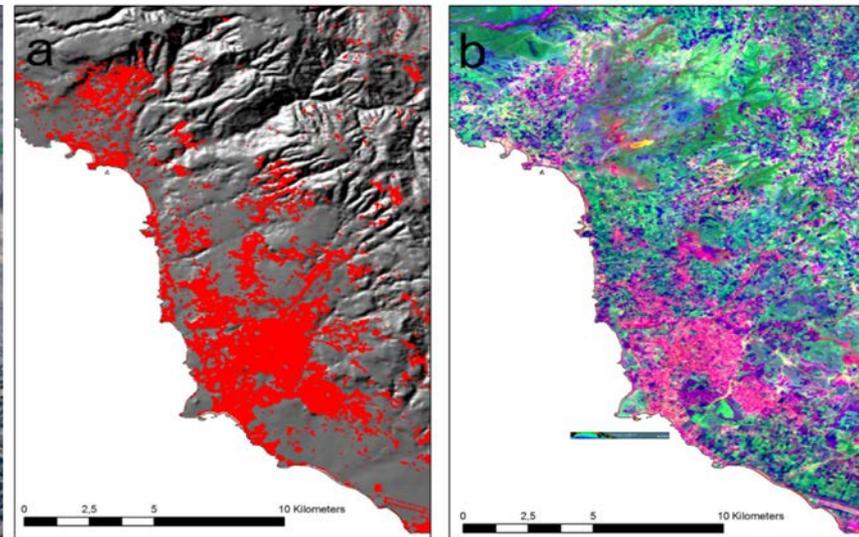
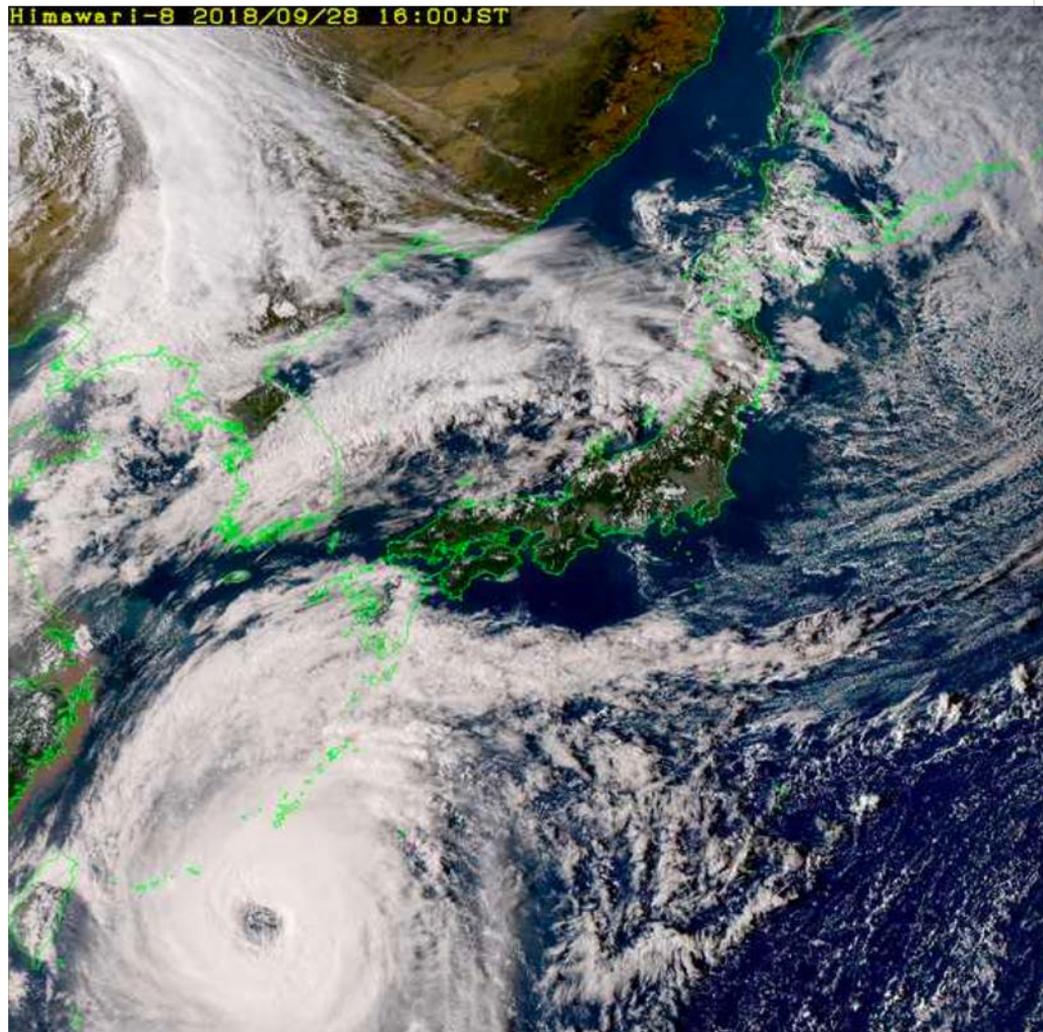
横浜国立大学大学院 都市イノベーション研究院
水環境研究室 助教 比嘉 紘士

人工衛星リモートセンシングとは？

対象物に触れることなく、物体が反射・放射する電磁波を遠隔(remote)から計測(sensing)し、物体の形状や性質などを識別する技術。



人工衛星リモートセンシングとは？



都市部面積の時系列変化

Agapiou, A., et al. (2015). Impact of urban sprawl to cultural heritage monuments: The case study of Paphos area in Cyprus. *Journal of Cultural Heritage*, 16(5), 671-680.



NDVIによる作物の成長モニタリング

•Copyright contains modified Copernicus Sentinel data (2016), processed by ESA

日々の天気予報

ひまわり 8号による観測画像

出典：気象衛星センターホームページ

URL: http://www.jma.go.jp/jma/kishou/photo/index.html#20181002_2

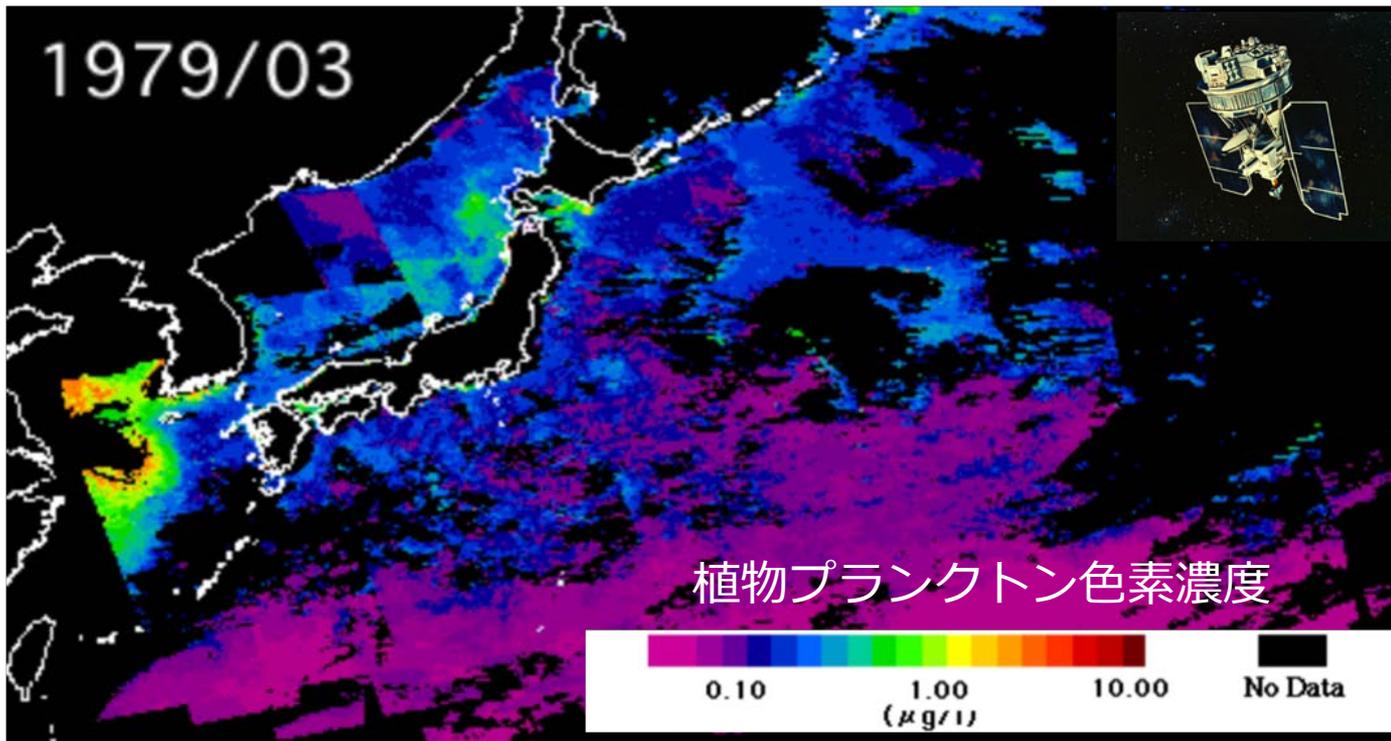
水色のリモートセンシング

海洋を対象とした**可視域**のリモートセンシング

- **1978年 – 1986年** (Hovis et al., 1980)

Nimbus-7に搭載された**CZCS**

(Coastal Zone Color Scanner) が世界初の水色センサー

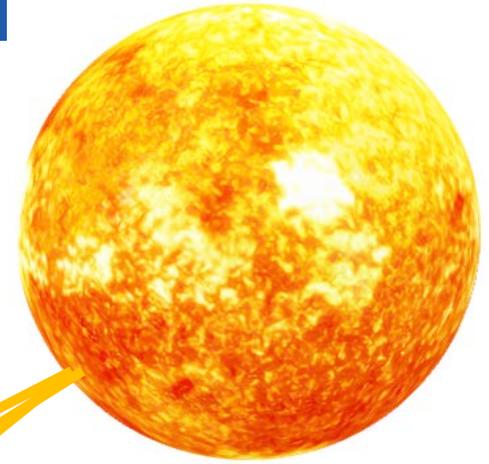
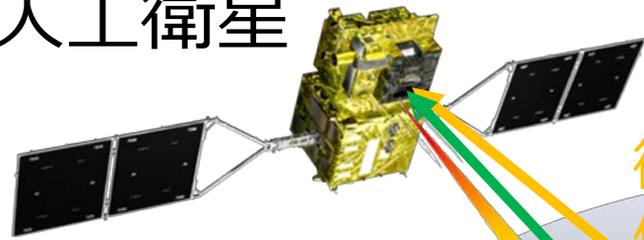


Nimbus7-CZCS月別複合画像による北西太平洋海域における植物プランクトン分布の衛星画像時系列データベース

編: 福島甫, 虎谷充浩,
松村皐月, 原島省

水色センサーとは？

人工衛星



微小な液体または
個体の粒子による反射

水中で反射されて
衛星方向に進む光
(海面放射輝度)

海面での反射



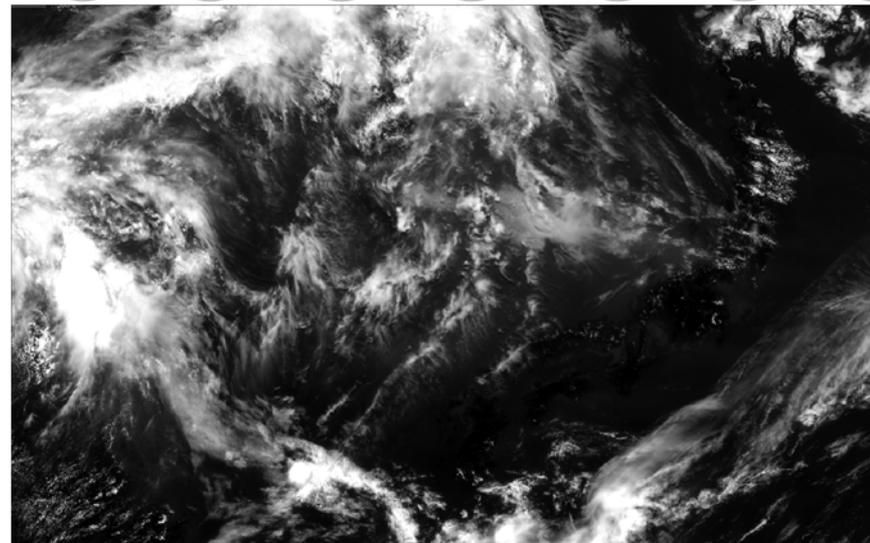
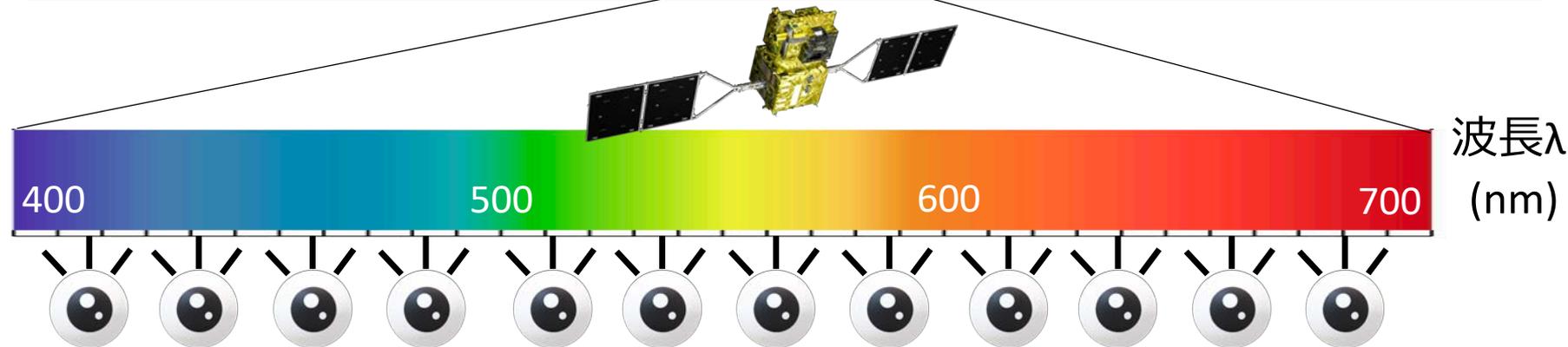
大気
海洋表層

大気中の散乱・吸収，海面での太陽の直接反射等を大気補正により除去し，**水中から進んでくる光の放射輝度**を得る。

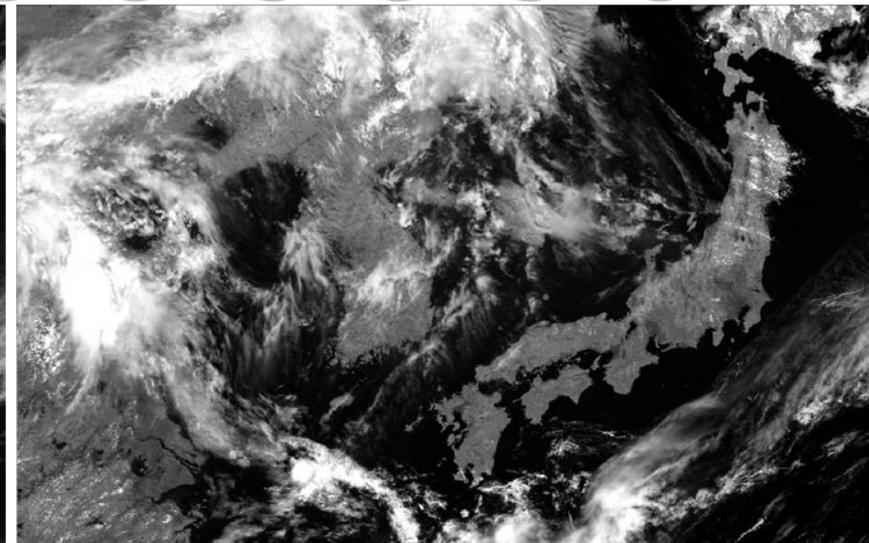
水色センサーとは？

- 人の目が感知できる可視光と，近赤外光を利用する。

ガンマ線	x線	紫外線	可視光線	赤外線	電波
------	----	-----	-------------	-----	----

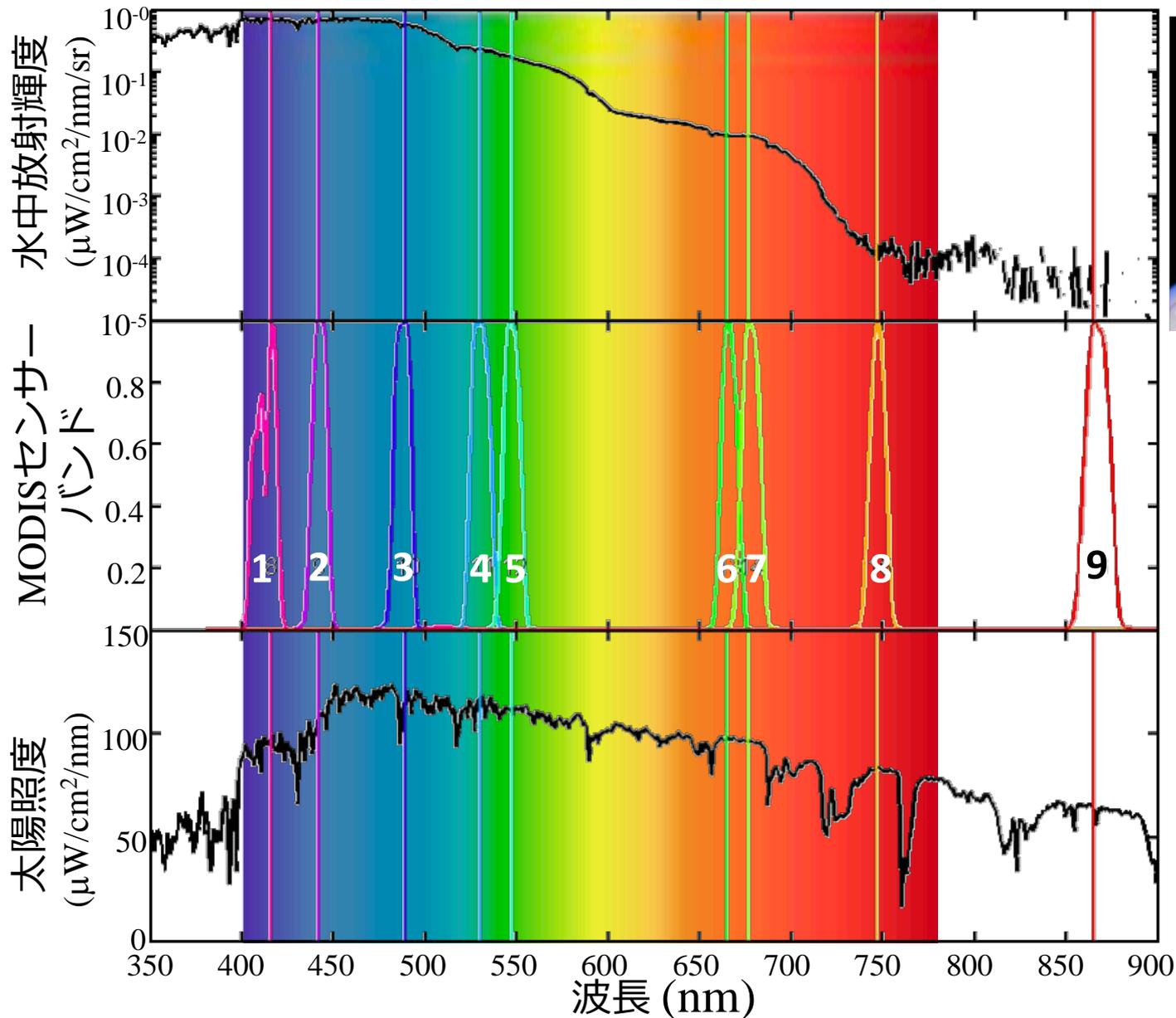


中央波長412 nmの衛星データ



中央波長865 nmの衛星データ

水色センサー-MODISが捉える波長



© NASA

水色センサー-MODISを
搭載したAqua衛星

可視域, 近赤外の
主に9つのバンド
を使用して**水の色**
を捉える.

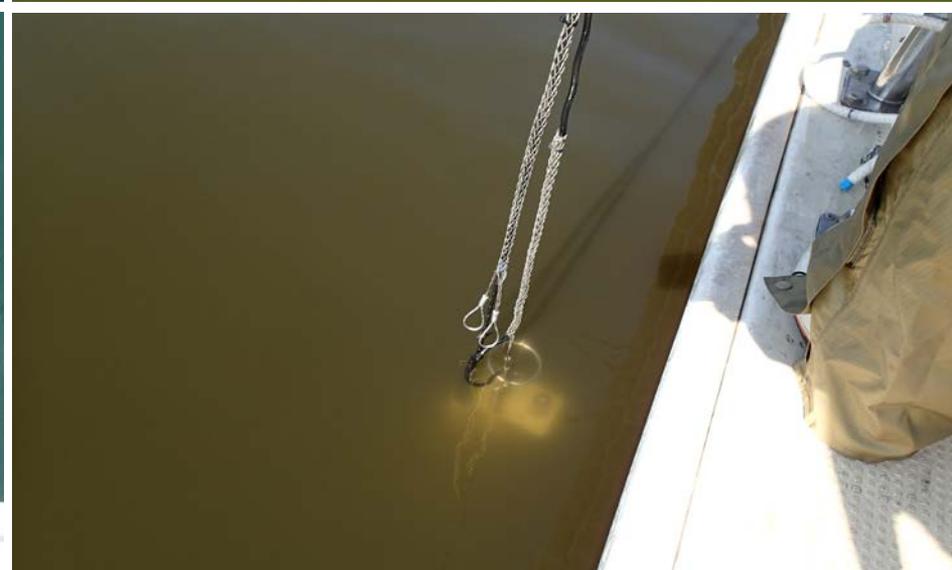
© NOAA STAR

URL:<https://www.star.nesdis.noaa.gov/>

水の色を利用し水質を推定する

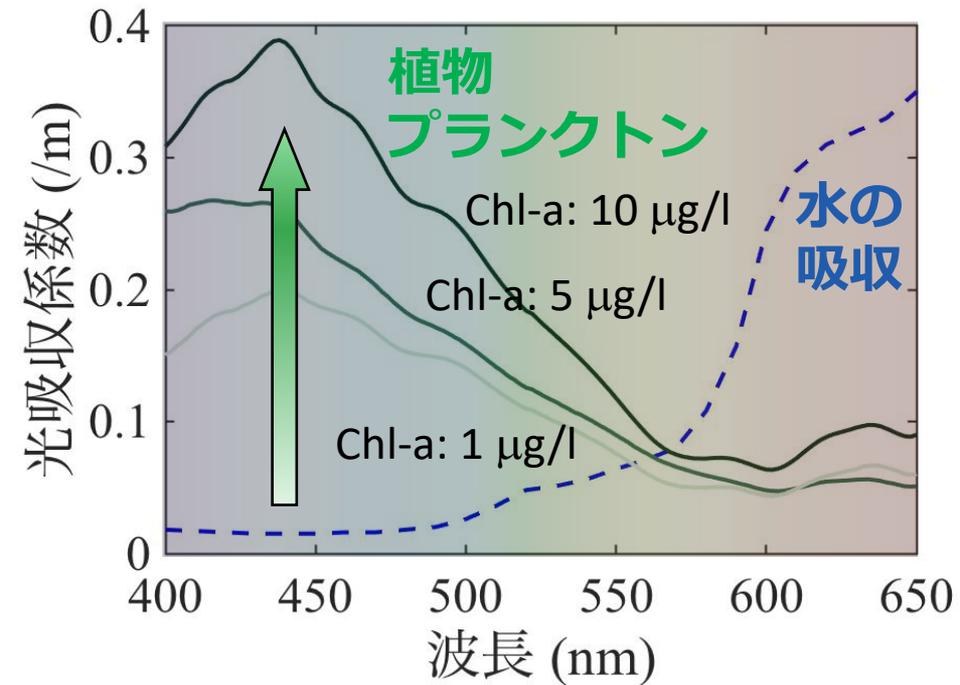
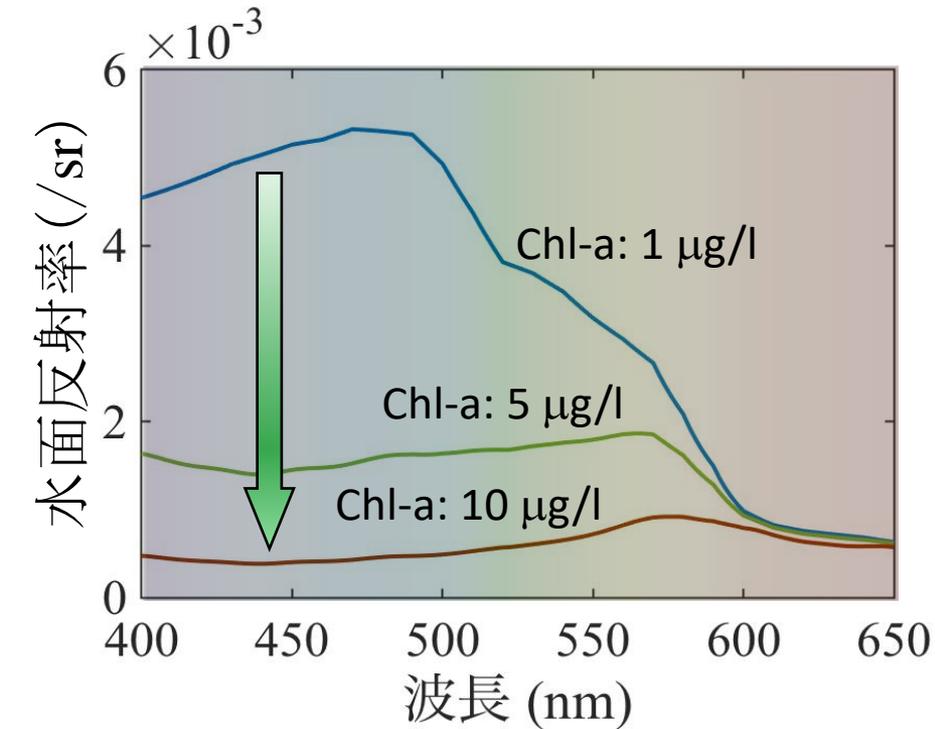
2018年5月 瀬戸内海安芸灘

2018年7月 霞ヶ浦

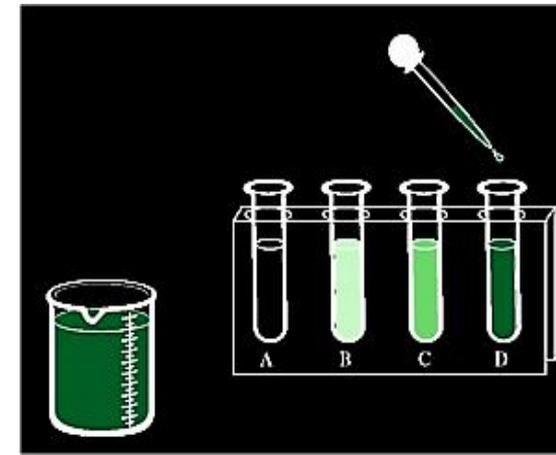


水質の推定方法

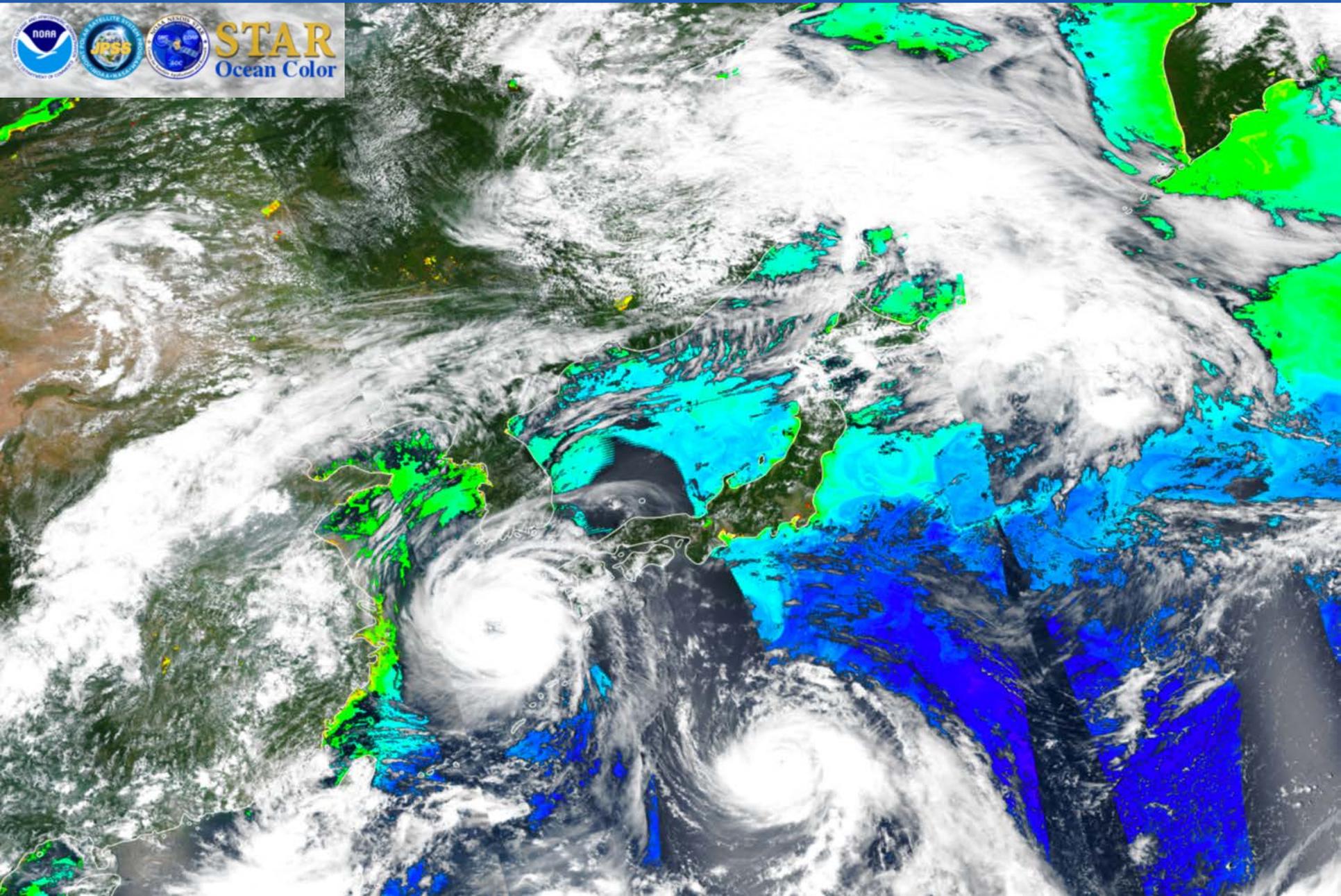
- 植物プランクトンの量の指標となるクロロフィルa濃度(Chl-a)の推定



- ✓ クロロフィルa濃度の増加と共に青色域の水面反射率が減少.
- ✓ 短波長における水面反射率の減少量をクロロフィルa濃度として定量化.



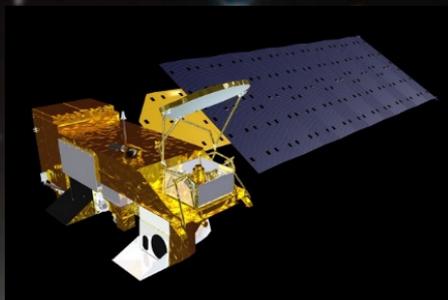
海洋観測のための人工衛星データの利用



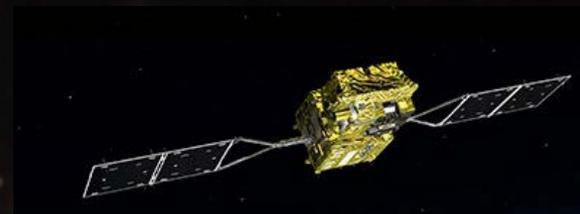
水色センサーを搭載した人工衛星の発展



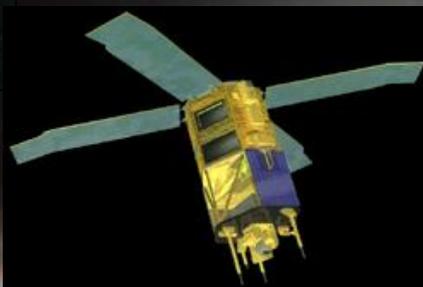
NIMBUS-7/CZCS
1978 - 1986
by NASA



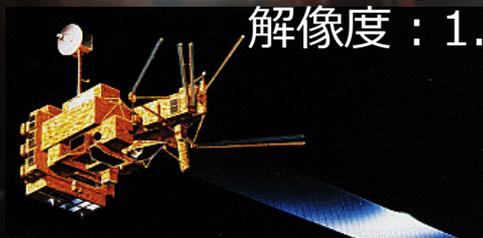
TERRA, AQUA/MODIS
2004 by NASA
解像度：1km×1km
頻度：1日1回



GCOM-C/SGLI
2017 by JAXA
解像度：250m×250m
頻度：2日おき



SEASTAR/SeaWiFS
1997 by NASA
解像度：1.1km×1.1km



みどり (ADEOS) /OCTS
1996 - 1997 by JAXA
解像度：700m×700m
頻度：3日1回

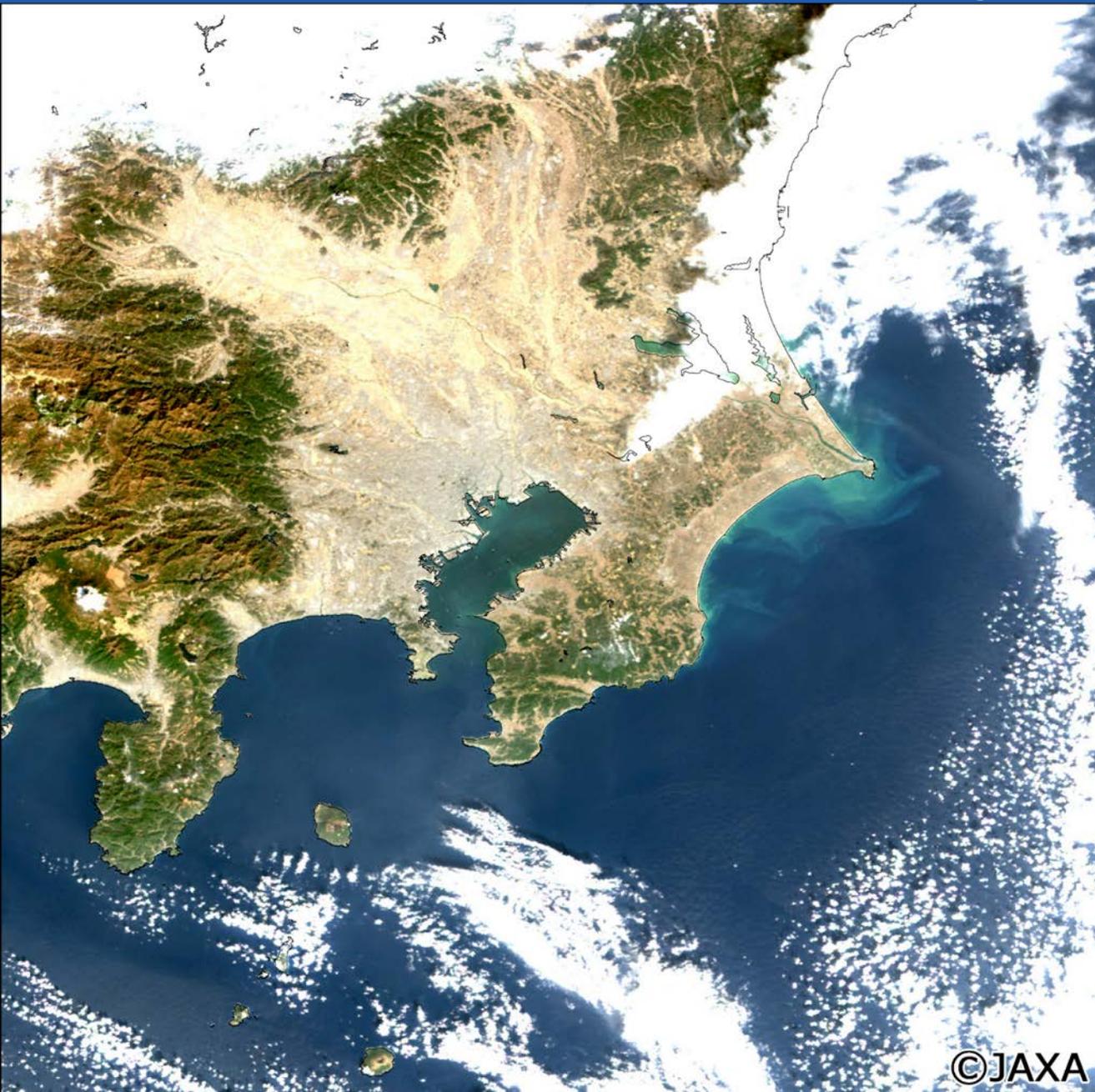


Sentinel-3/OLCI
2016 by ESA
解像度：300m×300m
頻度：2日



COMS/GOCI
2010 by KOSC
解像度：500m×500m
頻度：1日8回

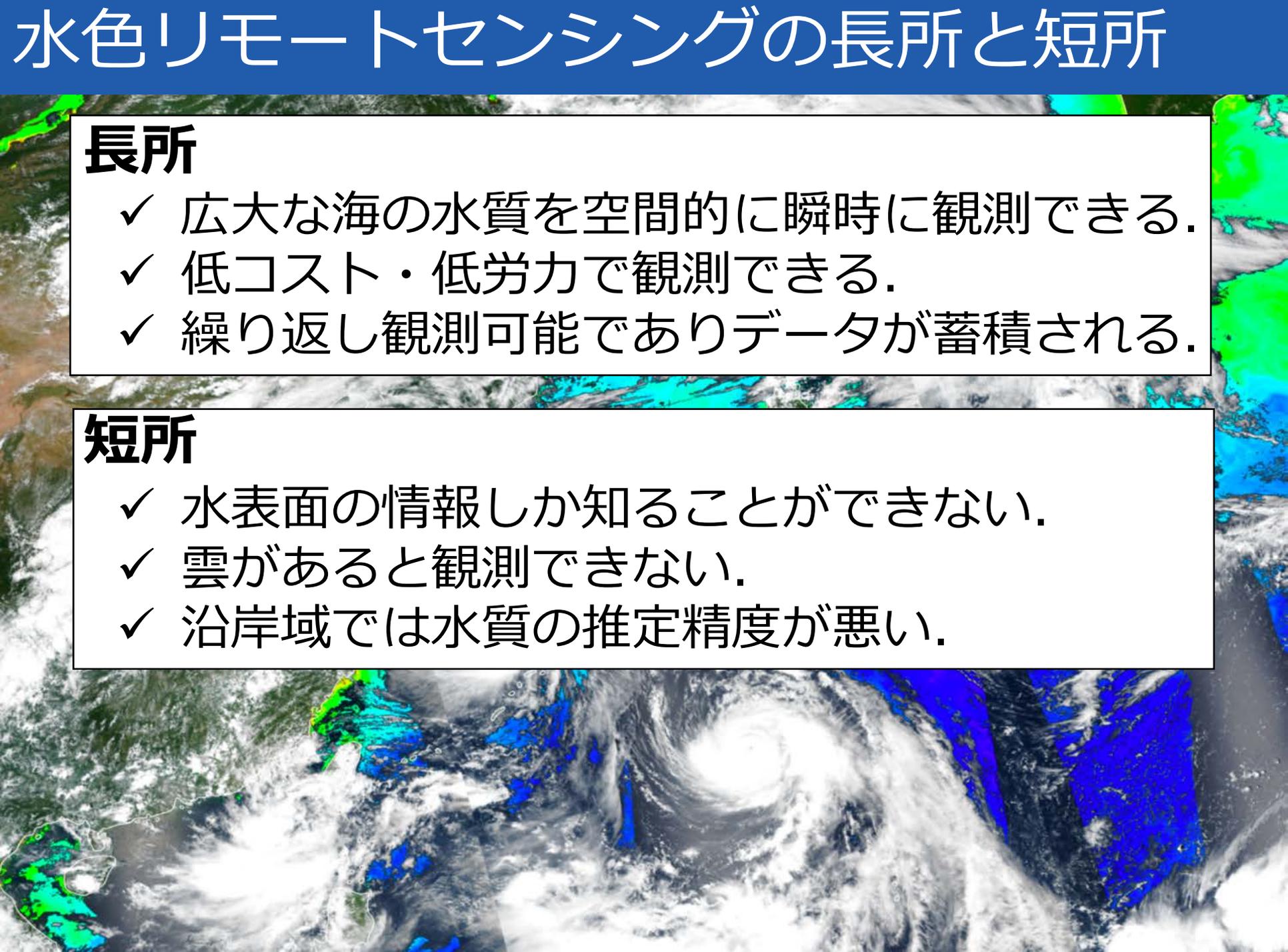
GCOM-C/SGLIのFirst Image



Aqua/MODIS
1km resolution

GCOM-C SGLI
250m resolution

水色リモートセンシングの長所と短所



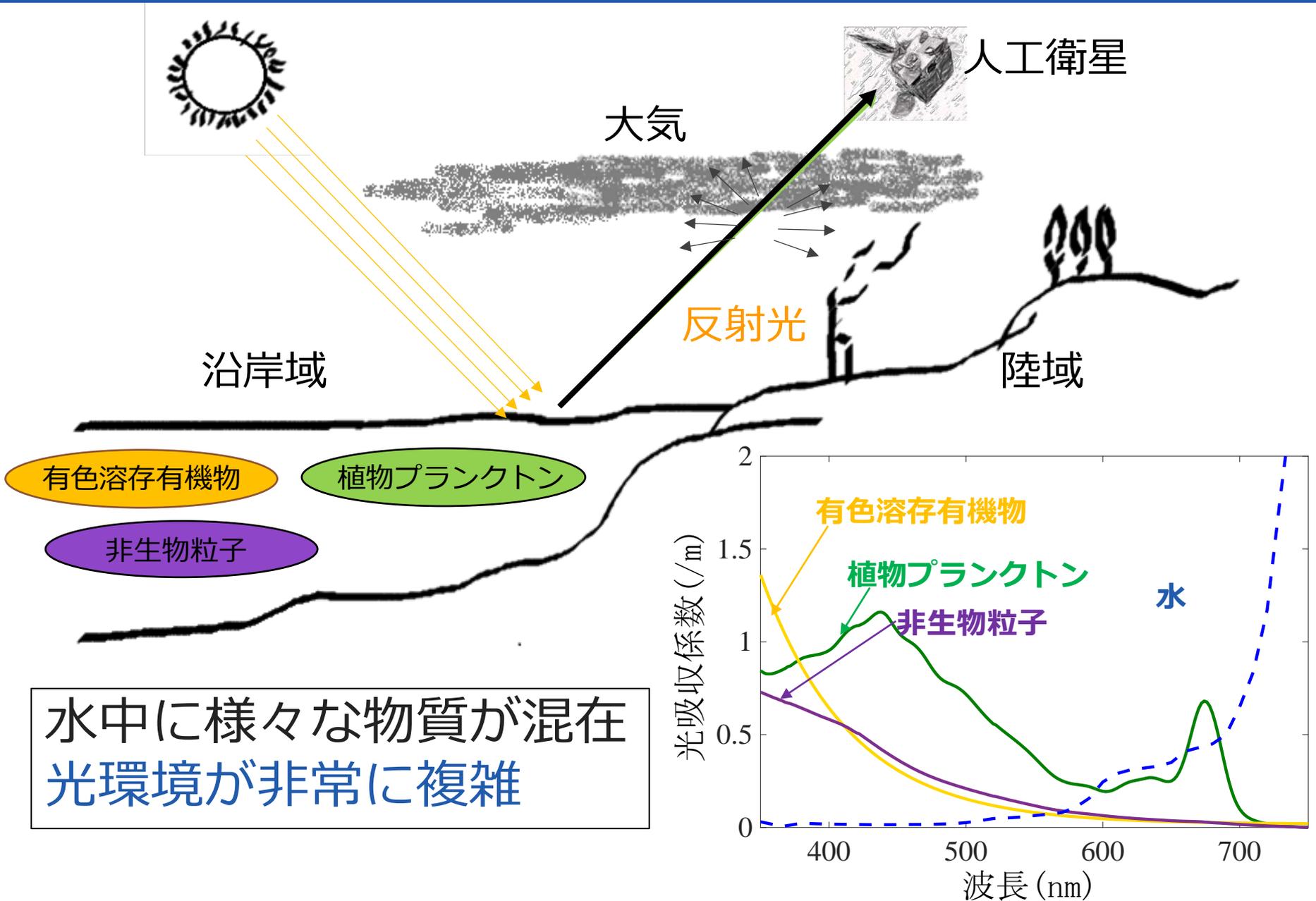
長所

- ✓ 広大な海の水質を空間的に瞬時に観測できる。
- ✓ 低コスト・低労力で観測できる。
- ✓ 繰り返し観測可能でありデータが蓄積される。

短所

- ✓ 水表面の情報しか知ることができない。
- ✓ 雲があると観測できない。
- ✓ 沿岸域では水質の推定精度が悪い。

なぜ沿岸域の水質推定が難しいのか？



JAXAによる地球観測ミッション(GCOM)

地球環境変動観測ミッション

(GCOM : Global Change Observation Mission)

2017年12月23日 種子島からGCOM-C打ち上げ



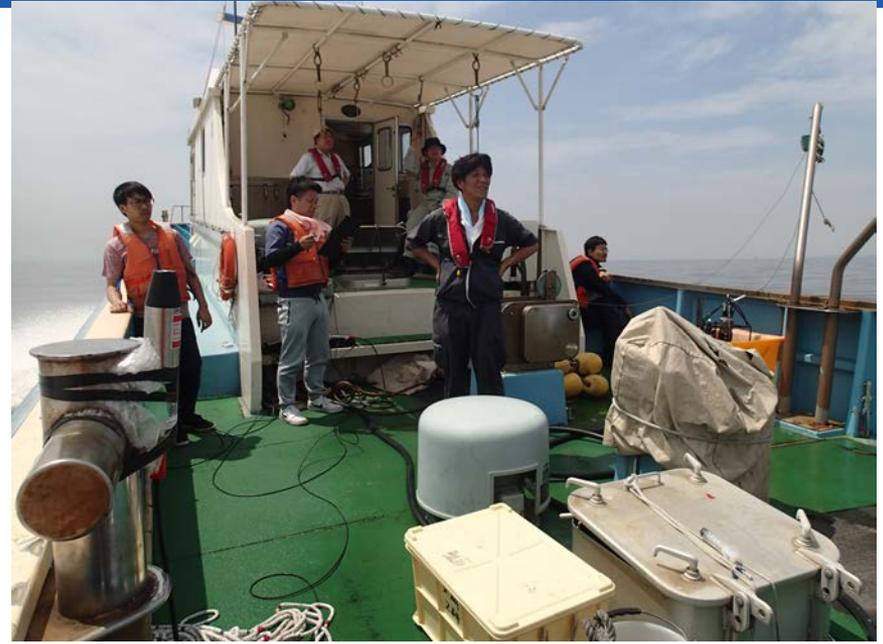
2016年 - 2018年

「沿岸域・湖沼の光学的性質特徴別分類に基づいた
大気-水中結合アルゴリズム構築に関する現地観測」

by 山梨大学, 広島大学, 東京大学, 東海大学, 横浜国立大学



東京湾の光学特性解明のための現地観測



2010年～2017年の間、
千葉県環境研究センターの
東京湾赤潮・青潮調査
に同行させて頂き、
多くの水質・光学データを
蓄積させて頂きました。

現地観測の概要

□ 観測日

2010年6月～2014年5月

2016年8月25日, 31日

9月15日, 23日

□ 水質観測項目

- 水温, 塩分, 溶存酸素, 濁度等
- クロロフィルa (Chl-a) ($\mu\text{g/l}$)
- 全浮遊懸濁物質 (TSS) (mg/l)
- 有機浮遊懸濁物質 (OSS) (mg/l)
- 無機浮遊懸濁物質 (ISS) (mg/l)

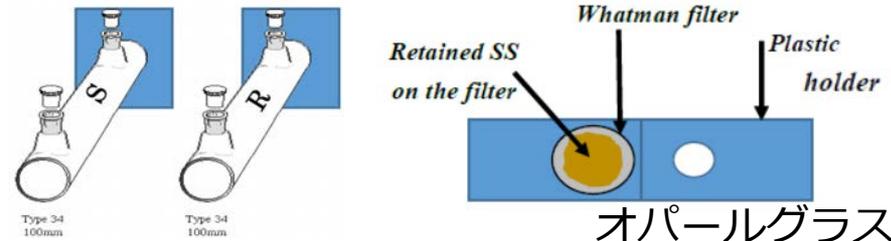
□ 光学観測項目

- 下向き放射照度 (E_d) ($\text{W/m}^2/\text{nm}$)
- 上向き放射輝度 (L_w) ($\text{W/m}^2/\text{str}/\text{nm}$)
- 光吸収係数 ($/\text{m}$)
- 後方散乱係数 ($/\text{m}$)

□ 光吸収係数 (a)の測定

Quantitative Filter Technique (QFT法)

(Sosik, (1999); Kishino et al., (1985))



測定項目

有色溶存有機物 ($a_{\text{CDOM}}(/\text{m})$)
植物プランクトン ($a_{\text{ph}}(/\text{m})$)
デトリタス ($a_d(/\text{m})$)

□ 後方散乱係数 (b_b)の測定

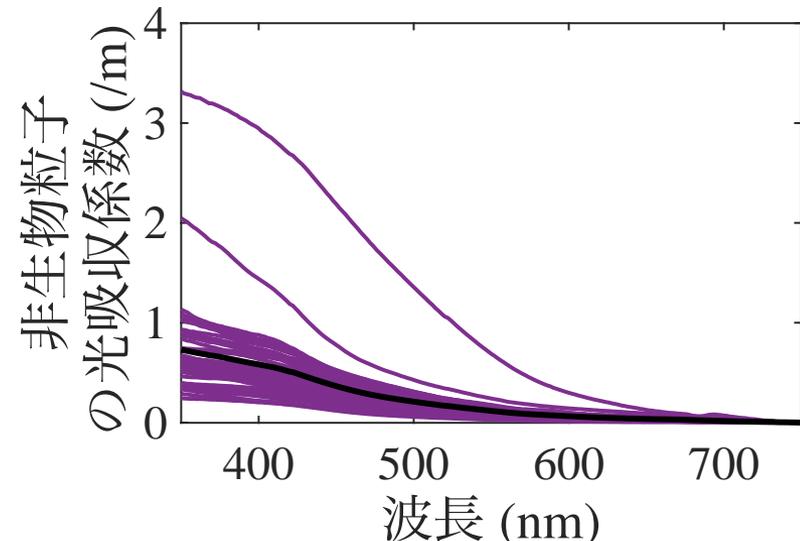
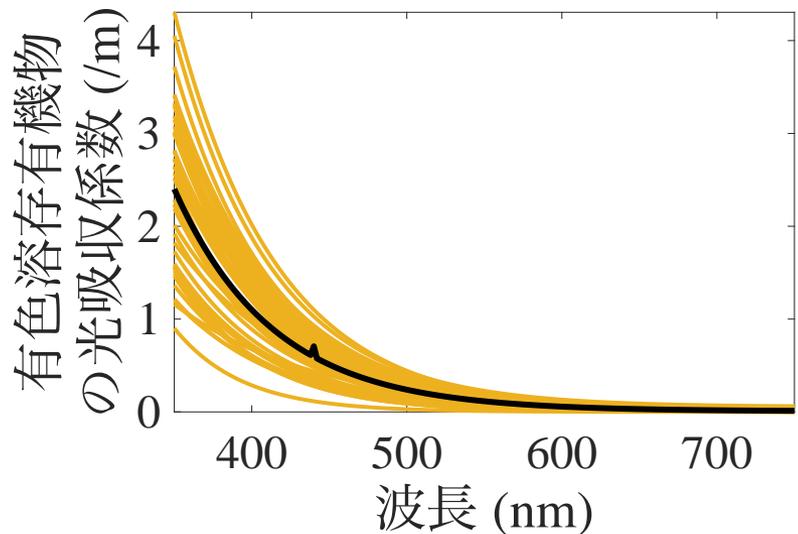
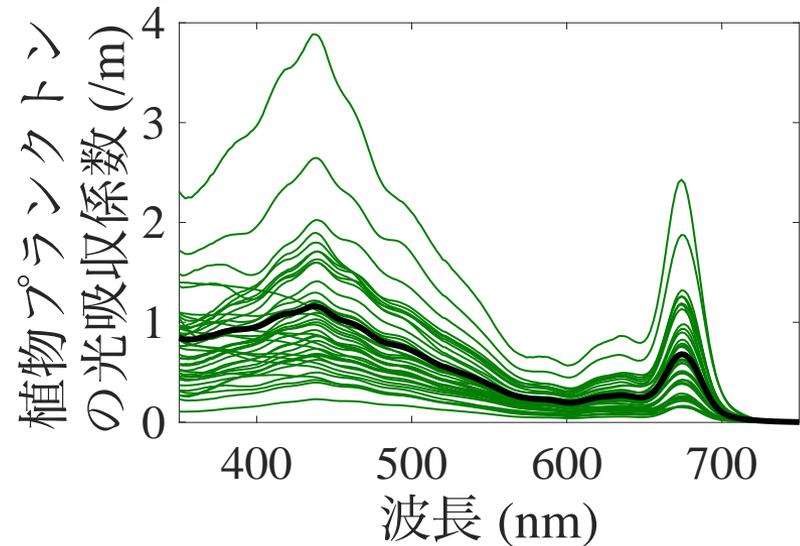
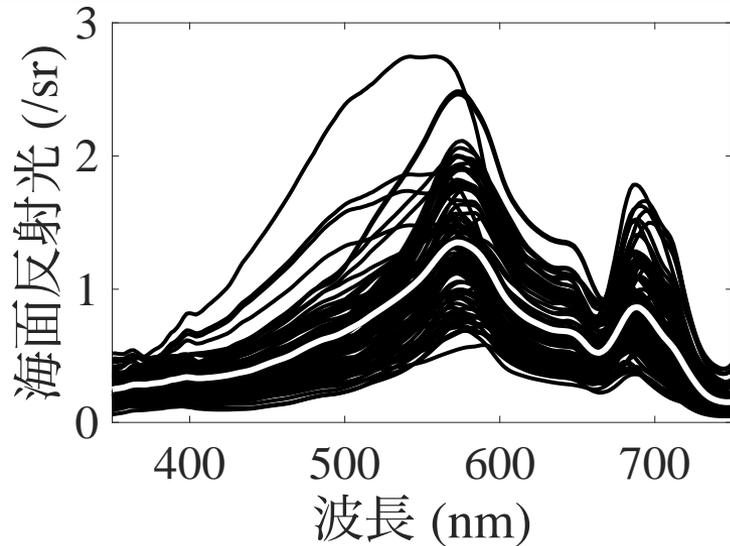


測定項目 後方散乱係数 (b_b) ($/\text{m}$)

測定波長 420, 442, 488, 510,
550, 676 (nm)

20.0 km

東京湾の光学特性の解明

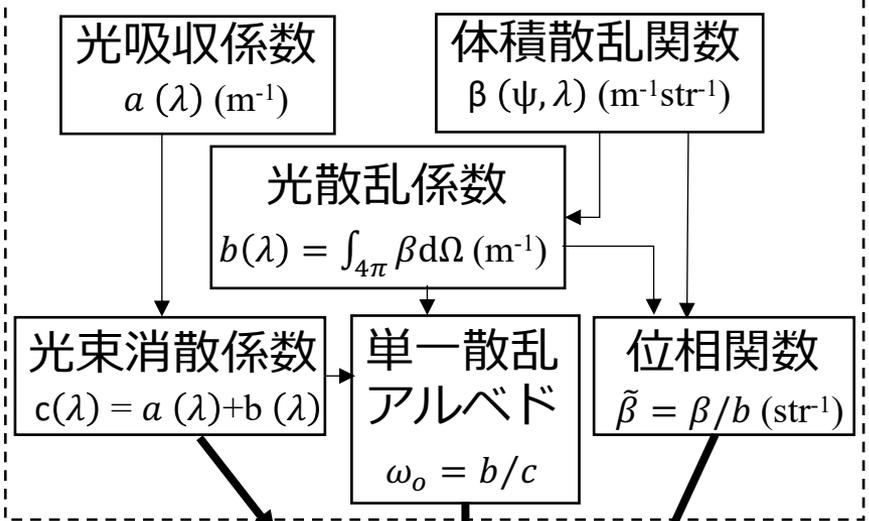


- ✓ 海面反射光(N=92), 固有光学特性(N=78)のデータを蓄積.
- ✓ 東京湾は植物プランクトン, CDOMが多量にある水域.

東京湾の光学特性の解明

Hydrolight (Mobley et al, 2000) 固有光学特性に基づき輝度分布を計算

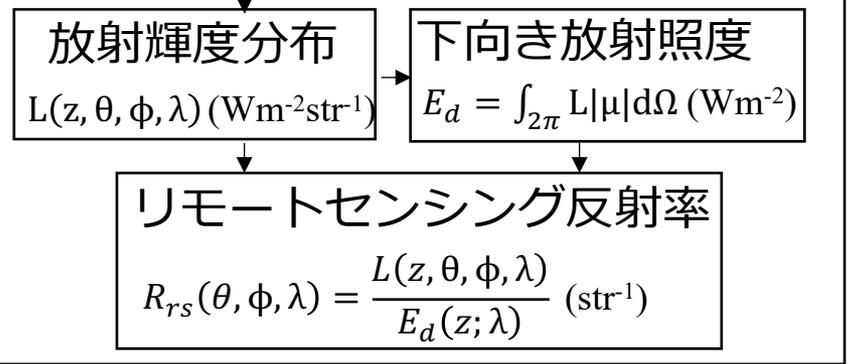
固有光学特性



放射伝達方程式

$$\cos \theta \frac{dL}{cdz} = -L + \omega_0 \int_{4\pi} \tilde{\beta} L d\Omega$$

放射量

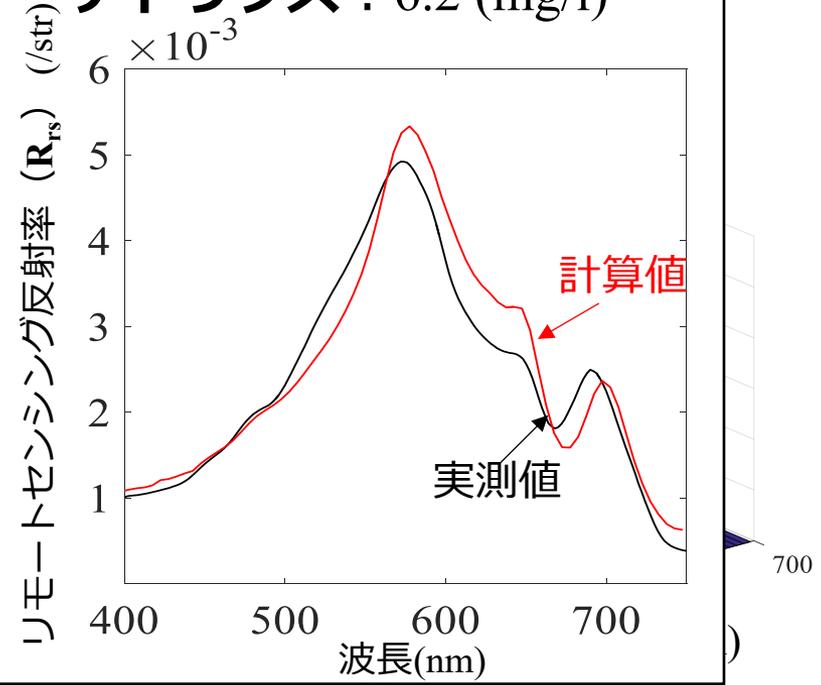


放射輝度の概念図



観測日: 2012年5月1日
 Chl-a: 44.8(μg/l)
 CDOM: 0.26 (/m)
 デトリタス: 6.2 (mg/l)

L: 輝度 (Wm⁻²sr⁻¹)



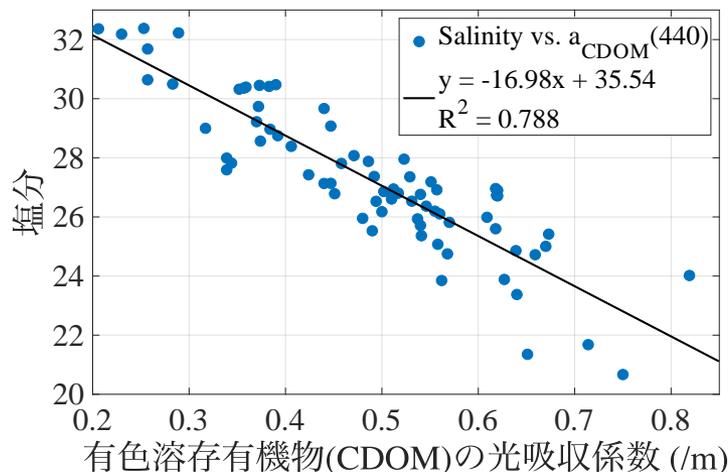
静止海色衛星による塩分の推定

1. 有色溶存有機物(CDOM)の特性把握のための現地観測



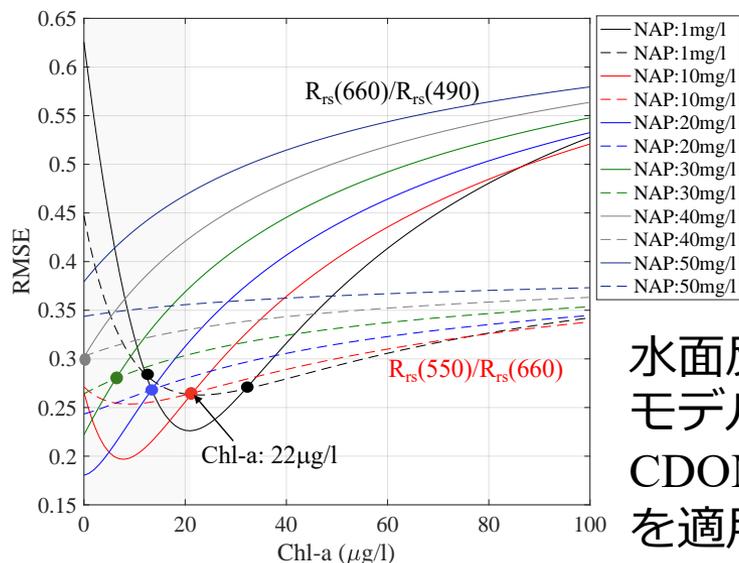
© 2018 Regents of the University of Minnesota.

2. aCDOMと塩分との関係



比嘉紘士, 福田智弘, 宮下寿哉, 中村由行, 鈴木崇之, 有色溶存有機物の光学特性を利用した静止海色衛星による東京湾の塩分分布推定に関する検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), 73(2), 2017.

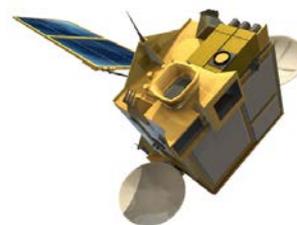
3. 有色溶存有機物推定法



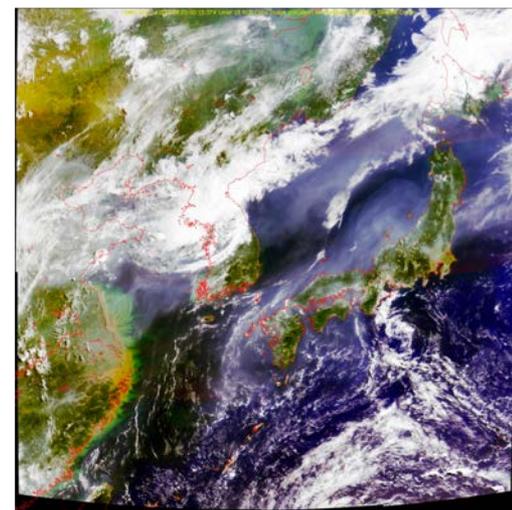
水面反射光計算モデルにより, CDOM推定モデルを適用性検証

4. 静止海色衛星画像へ適用

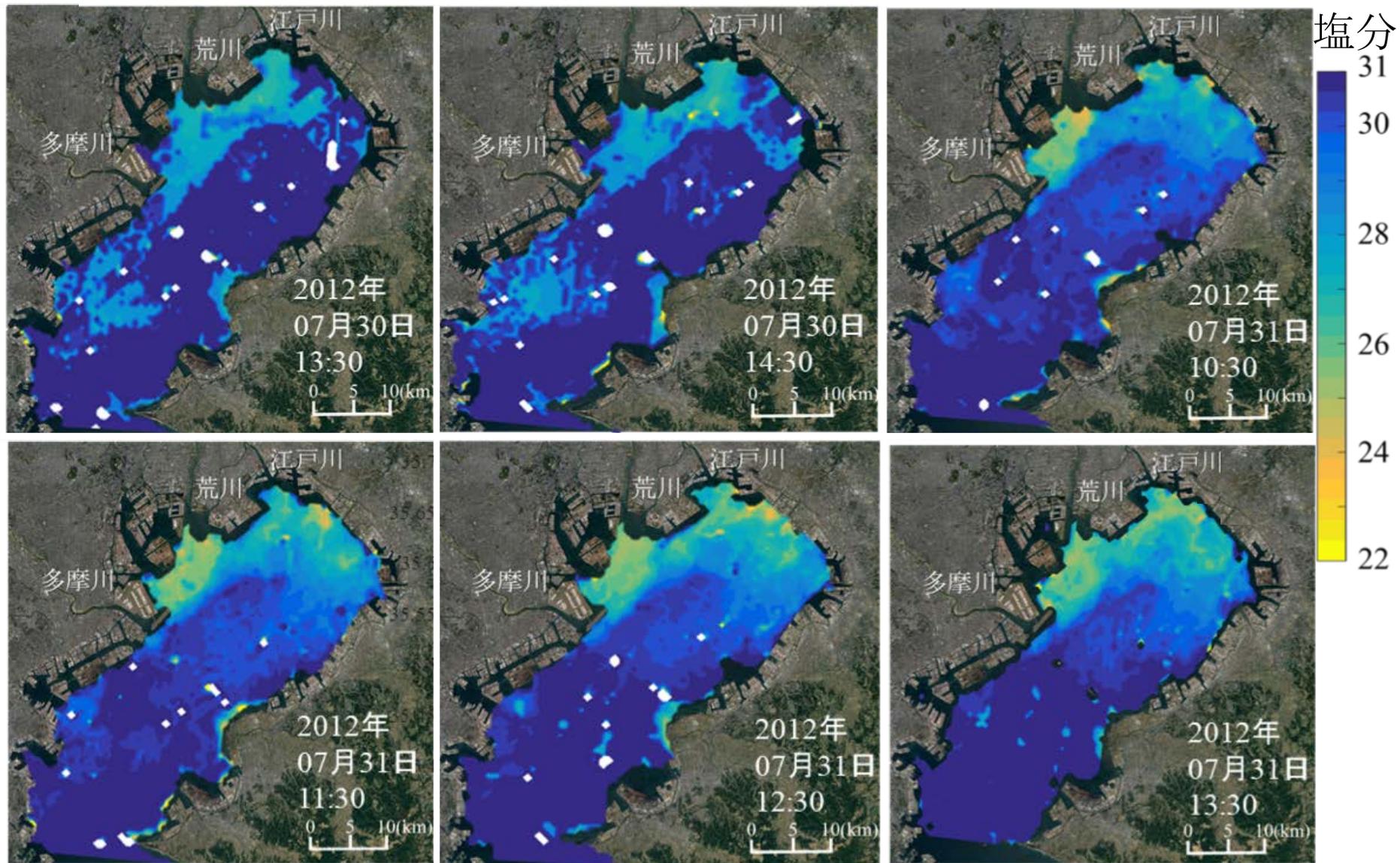
静止海色衛星 (GOCI)



湾内塩分の短期スケールにおける空間変動を解明



静止海色衛星による塩分の推定



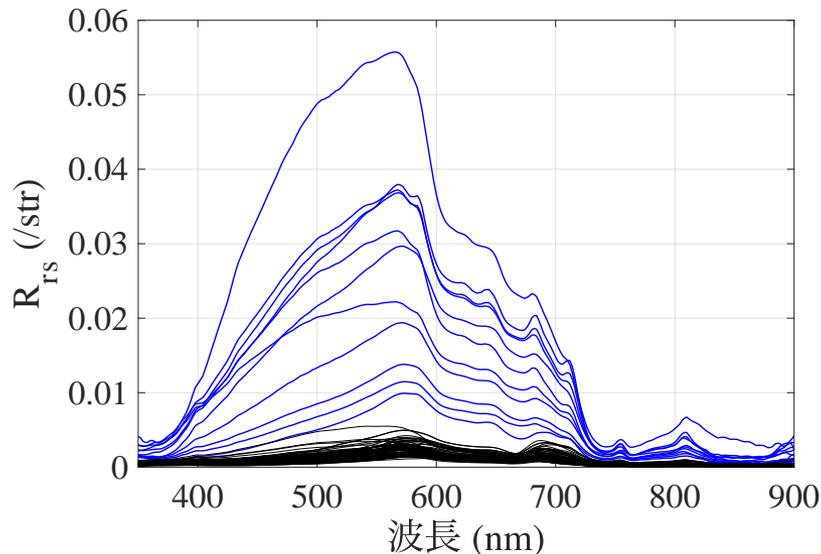
短期スケールの**低塩分水塊の空間的変動**を捉えることに成功.

青潮のための硫黄濃度の推定

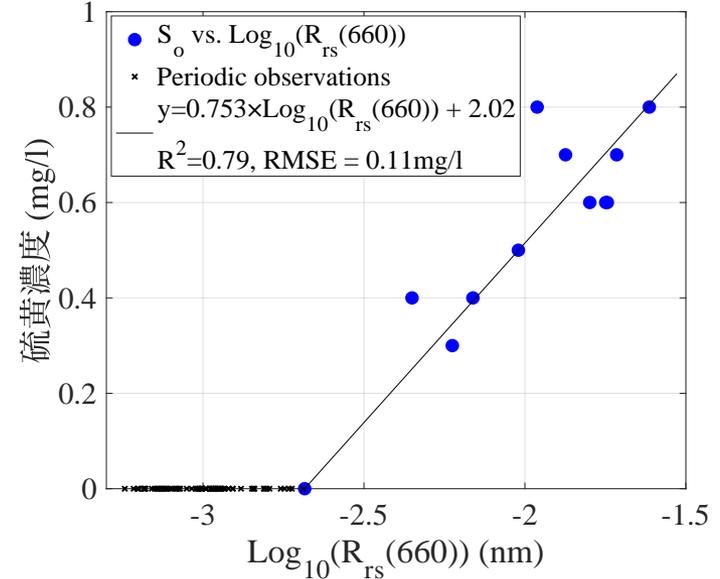
1. 青潮発生時に現地観測を実施



2. 青潮の光学特性を把握



3. 硫黄推定モデルを作成

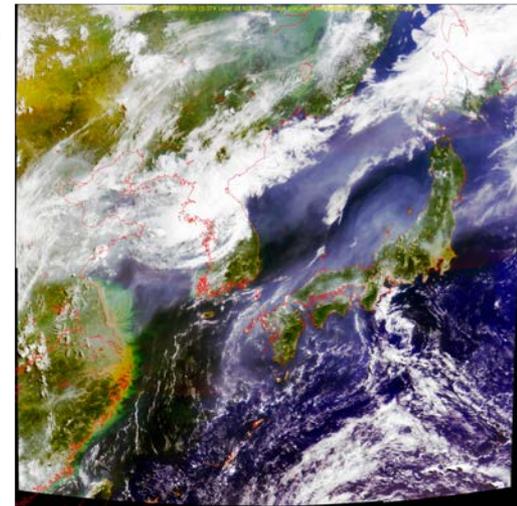


4. 静止海色衛星画像へ適用

静止海色衛星 (GOCI)

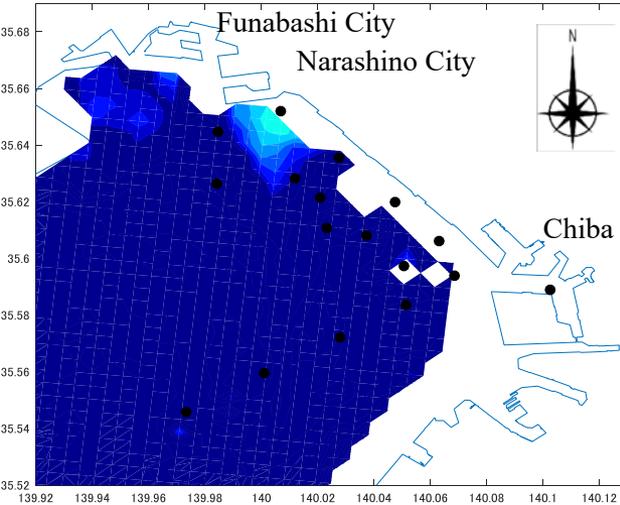


GOCI衛星の優れた
時空間分解能により
青潮の分布を捉える
ことが可能になった

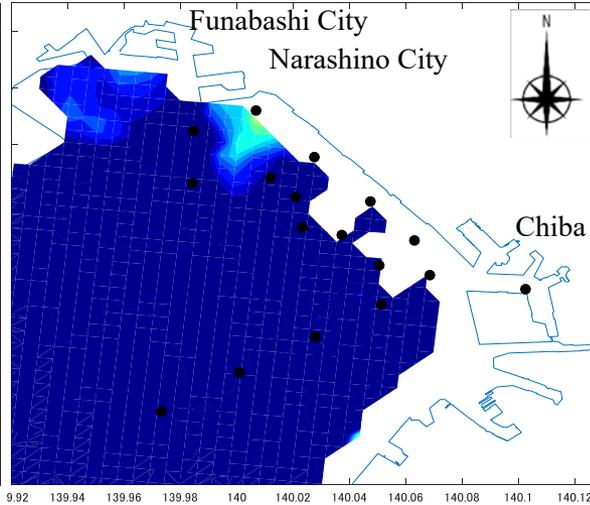


青潮のための硫黄濃度の推定

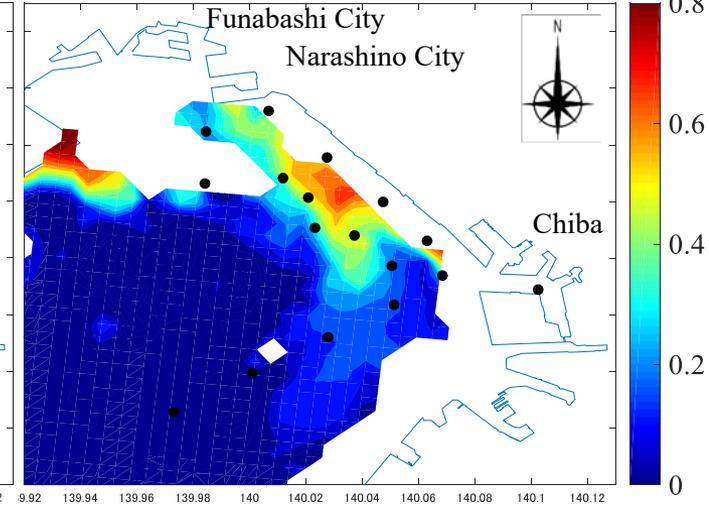
10:30 23th May, 2012



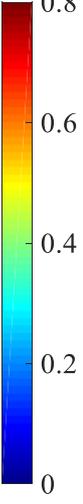
11:30 23th May, 2012



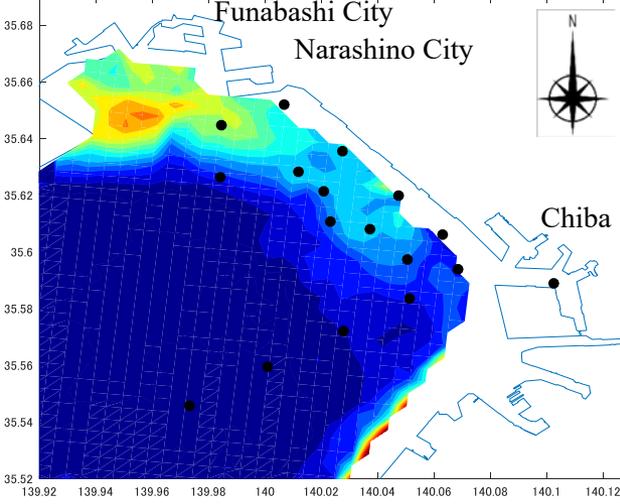
9:30 24th Sep, 2012



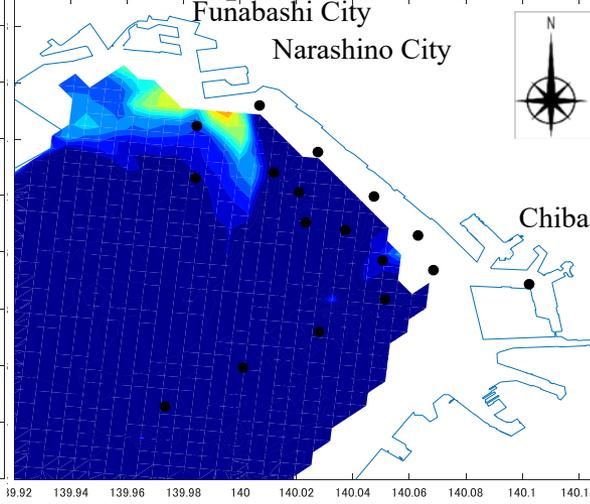
Sulfur (mg/l)



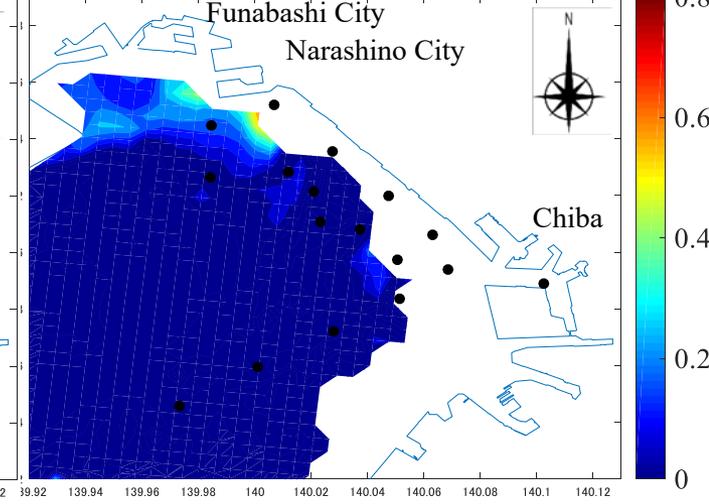
11:30 24th Sep, 2012



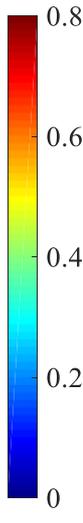
13:30 2nd Sep, 2014



14:30 2nd Sep, 2014



Sulfur (mg/l)



青潮の空間分布を**硫黄濃度**として推定することに成功.

赤潮を含むクロロフィルaの推定

クロロフィル蛍光強度

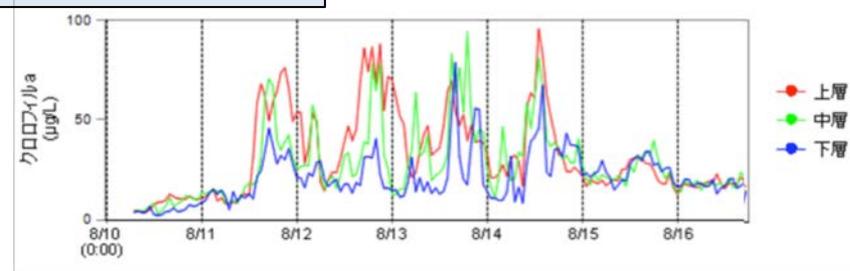
Fluorescence Line Height (FLH)モデル

適用

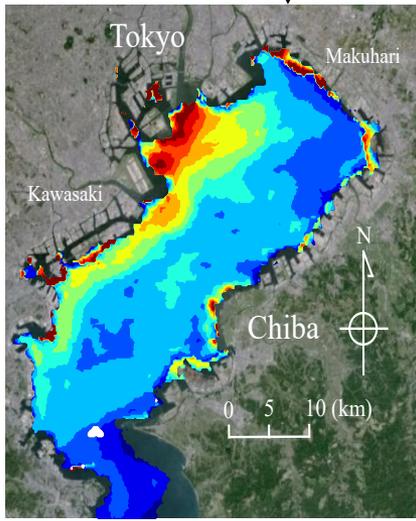
MODIS衛星データ

連続測定Chl-a
をデータ同化

出力



2011年1月26日



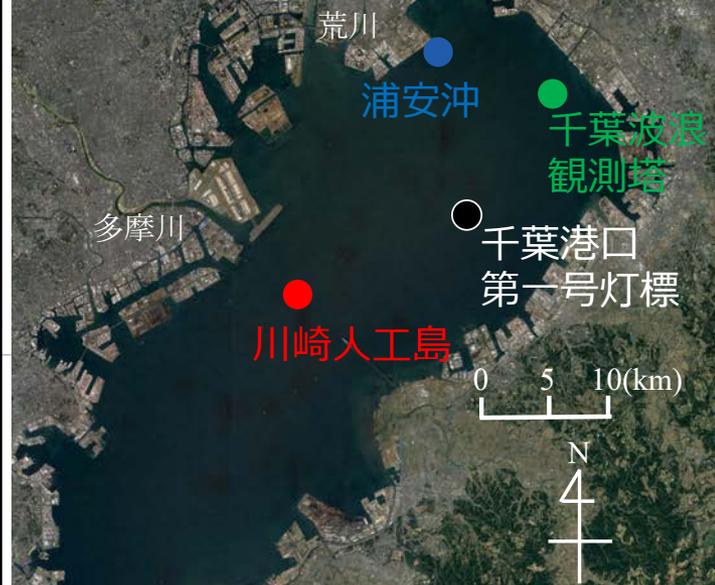
データ同化によりChl-a
を推定可能。



しかし不完全. 何故
Chl-aの推定は困難か？

比嘉紘士, 鯉淵幸生, 小林拓, 虎谷充浩, 作野裕司: 東京湾における海色リモートセンシングを用いた水環境モニタリング手法の提案, 土木学会論文集B2 (海岸工学), vol.71(2), I_1735-I_1740, 2015.

東京湾水質連続観測



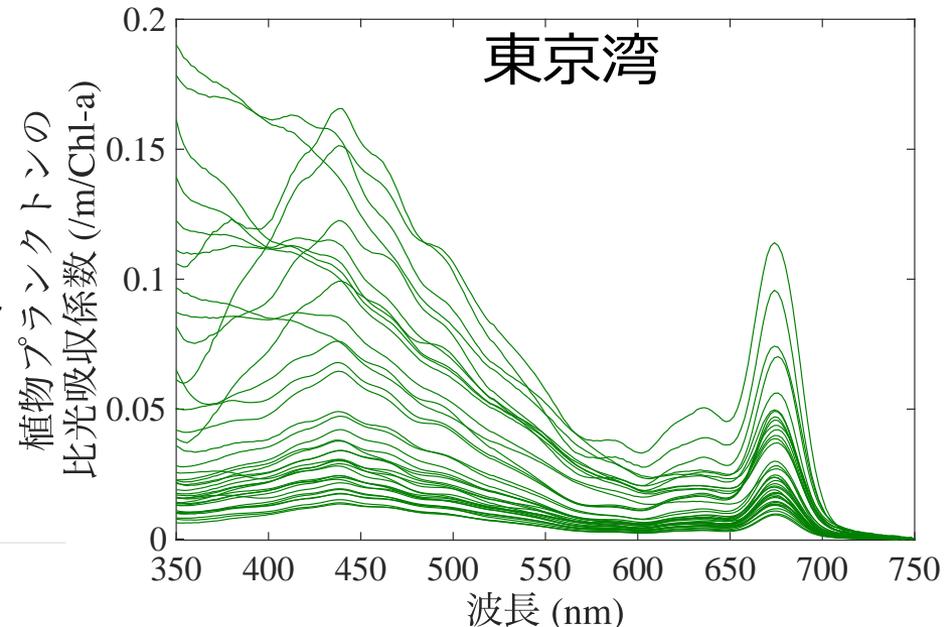
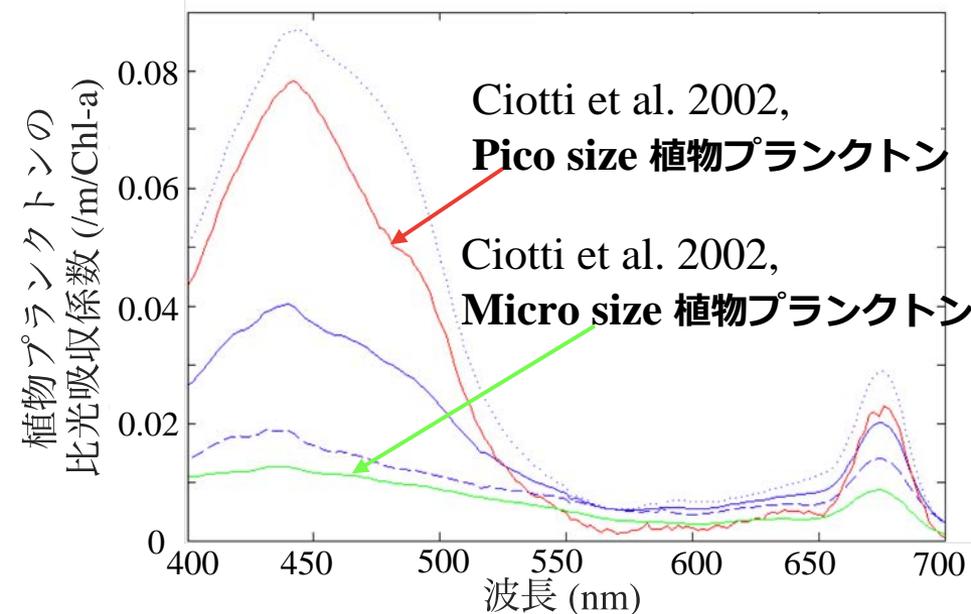
千葉港波浪観測塔 自動昇降装置

国土交通省関東地方整備局

URL: <http://www.tbeic.go.jp/MonitoringPost/Top>

クロロフィルa濃度推定の不確実性

クロロフィルa濃度あたりの植物プランクトンの光吸収係数



固有光学特性 (Inherent Optical Properties : IOPs) である植物プランクトンの光吸収係数を推定する必要がある。

現状では、

Lee et al.(2002)によるQuasi-Analytical Algorithm(QAA)

Smyth et al.(2006) による半理論的アルゴリズム等

沿岸域・湖沼に適する形へ改良する。

Lee, Z., Carder, K. L., & Arnone, R. A. (2002). Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied optics*, 41(27), 5755-5772.

衛星データの無償化

Korea Ocean Satellite Center, COMS/GOCI

URL: <http://kosc.kiost.ac.kr/eng/>

NASA, Aqua/MODIS

URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>

ESA, Sentinel-online

URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/>

JAXA, GCOM-C/SGLI

URL: <https://gportal.jaxa.jp/gpr/?lang=ja>

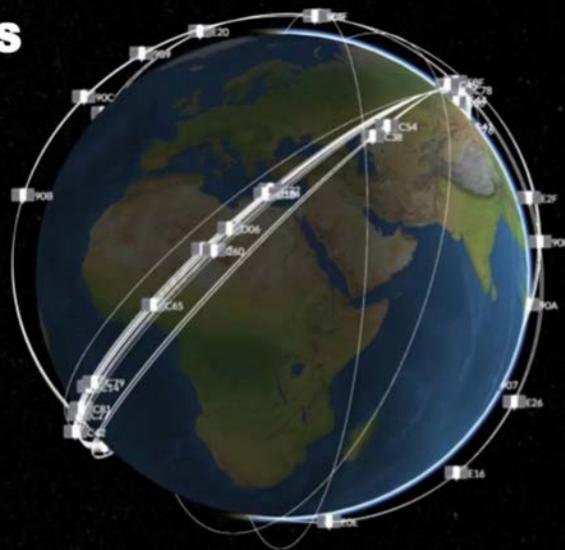
固定カメラによるリアルタイム観測



Internet of Things (IoT)による沿岸モニタリング 

小型衛星の可能性 (planet.)

+
190 SATS



打ち上げ前のDove衛星群

衛星名	Dove (ダヴ : 鳩)
衛星数	現時点190機
地上分解能	約3m
観測頻度	約毎日
観測波長帯	R/G/B/Near-IR
Upload時間	約4~12時間後



© planet. 10cm x 10cm x 30cm, 5kg

まとめ

- ✓ 人工衛星のハードウェアと水質推定手法は著しく発展しており、光環境特性が複雑である東京湾においても水色リモートセンシングが徐々に適用可能になっている。
- ✓ 現状、東京湾ではデータ同化によるクロロフィルa推定、塩分、青潮の推定が可能になってきているが、今後、データ同化を必要としない固有光学特性の推定法を検討予定。
- ✓ 無償で利用できる多くの人工衛星データ、また、高頻度高解像度で観測可能な小型衛星は、うまく活用できれば、今後、様々な用途で東京湾の環境モニタリングに有効になると考えられる。