

衛星観測データを応用した 沿岸環境デジタルツイン構築に関する研究

横浜国立大学 大学院都市イノベーション研究院
准教授 比嘉 紘士(ひが ひろと)

■様々な分野でのデジタルツイン構築

- 第5回科学技術基本計画において目指すべき未来社会の姿としてSociety 5.0が提唱（内閣府, 2016）
→ **デジタルツインの開発が重視**

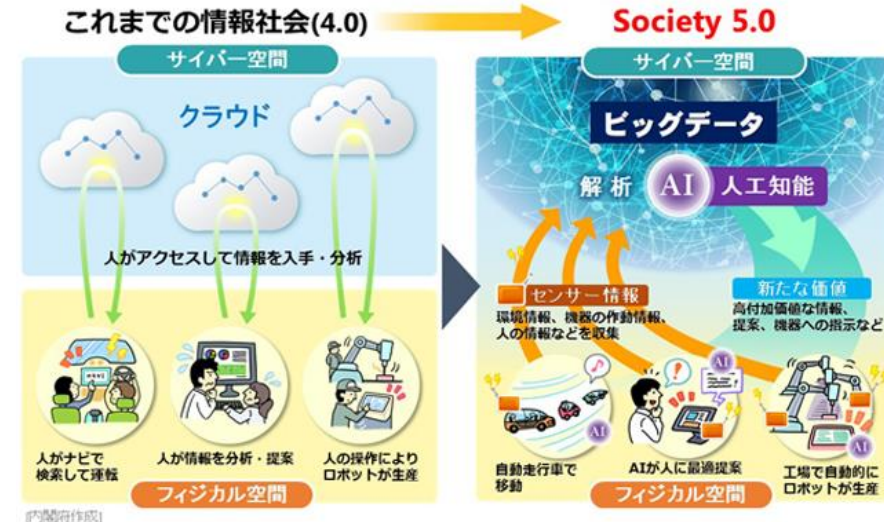
■デジタルツインとは？

- 実際に存在する物やシステムを仮想的に表現し、得られた結果やシナリオに基づき**意思決定プロセスを支援**するもの

■デジタルツインのフレームワーク

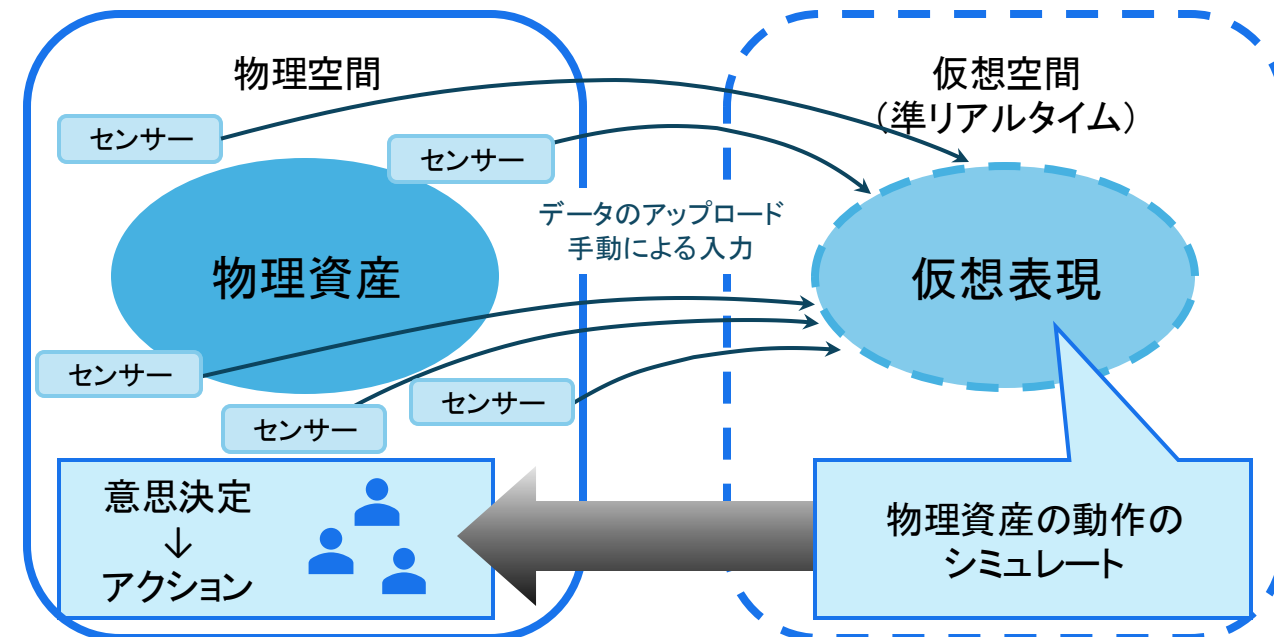
- デジタルツインのフレームワークを提示**
- デジタルツイン成熟度レベルの定義, その選択方法を提案 (Metcalf et al. 2023)

Metcalf, B., Boshuizen, H. C., Bulens, J., & Koehorst, J. J. (2023). Digital twin maturity levels: a theoretical framework for defining capabilities and goals in the life and environmental sciences. F1000Research, 12, 961.



Society 5.0
の仕組み

内閣府ホームページ Society 5.0 - 科学技術政策
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/



デジタルツインの概念図

■海洋デジタルツインのフレームワーク構築

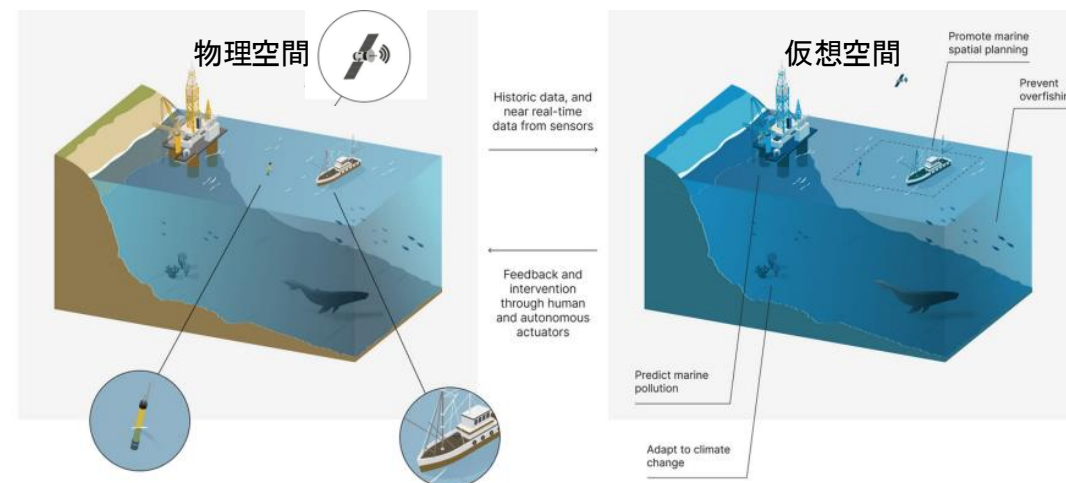
(Tzachor et al. 2023)

- 漁業の乱獲防止, 海洋汚染のモデリングと予測, 気候変動への適応, 海洋空間計画(MSP)などの適用事例を検討. データ取得やコスト等の課題を整理.

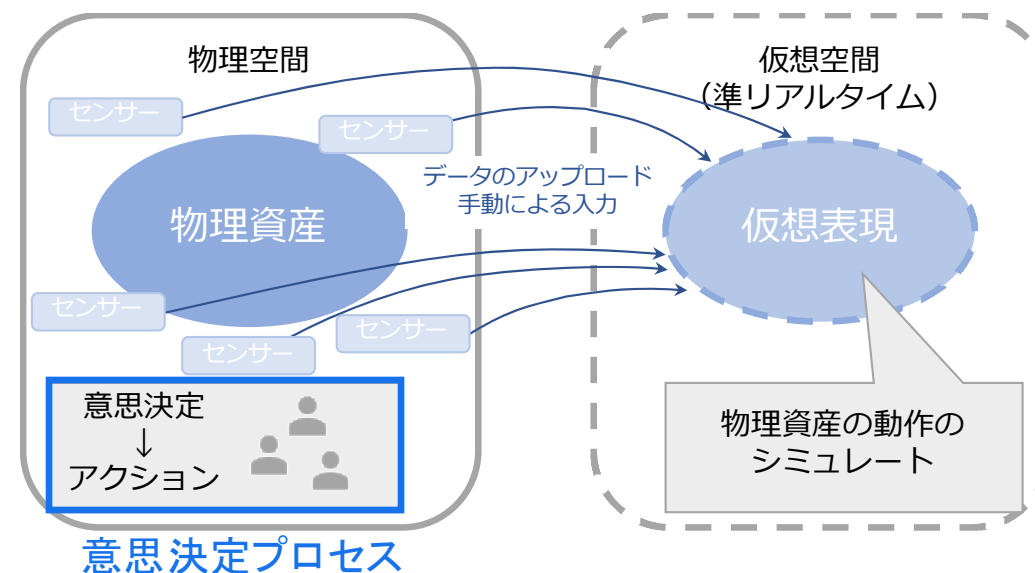
■沿岸環境におけるデジタルツインの障壁と対策

- コストの問題**. センサー類の導入にはある程度まとまった資金の投入が必要.
- 多様なステークホルダーの存在**. 海洋空間計画におけるステークホルダー間の意思決定プロセス支援の重要性を言及.
- 適切なデータの完全な入手の難しさ**. 例えば, 高時空間解像度の生態系モニタリング

Tzachor, A., Hendel, O. & Richards, C.E. Digital twins: a stepping stone to achieve ocean sustainability?. npj Ocean Sustain 2, 16 (2023).

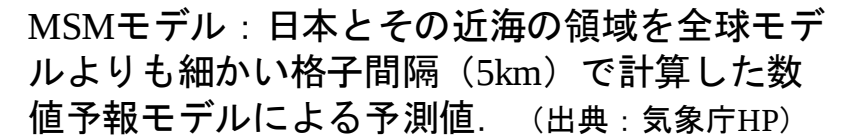
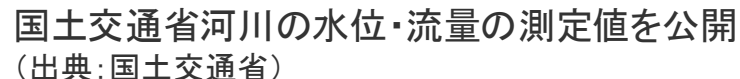


海洋の持続可能性向上のためのデジタルツインの利用



デジタルツインの概念図

■ 気象庁(過去の気象データ検索)



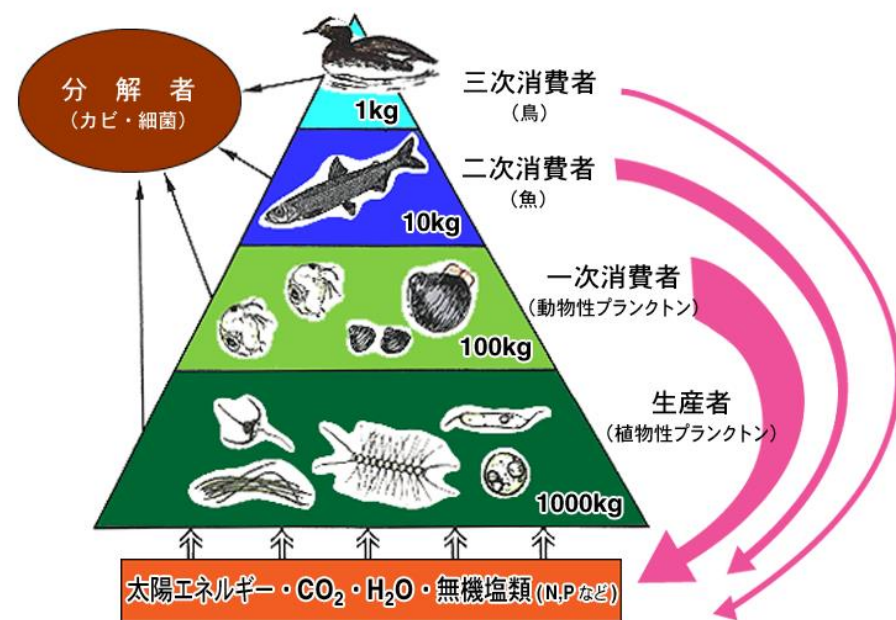
- PARI構築のデータベース
 - JAMSTECによるJCOPE計算値
 - 衛星データによる水質推定
 - 生態系, 水産等, 多様なデータがある.
- 観測による労力・コストの問題, データ自体の時空間解像度(スペック)の問題が存在.

■ 内湾環境における多様な問題意識

- 東京湾のような富栄養化によって毎年、赤潮・青潮の発生に悩まされる海域もあれば、過剰な総量規制により貧栄養化する水域も出現。海域によって生産性は著しく低下し、漁獲量も底をつき回復の兆しが見えていない。
 - 適切な物質循環のバランスの見出せていない
 - 軽減策等の実行に対する環境の応答を読み解きは至難の業。
- 内湾における二酸化炭素吸収ポテンシャル(ブルーカーボン)の評価も未解明な点が多い。
 - 干潟や浅海域による炭素固定と生物生息場の創出に期待。
 - 炭素固定にも寄与し、同時に多様な生態系を育むブルーインフラの適切な設計、配置が重要となり得る。

■ 必要な手法・施策の整理

- 従来の主たる取り組み: 栄養塩等負荷の削減。
- 干潟・浅場の修復・造成のように、高次の栄養段階の生物に栄養が行き渡る方策こそ必要。
- 今後必要な取り組み: 特に、浅い沿岸部(水辺)に重点を置いた施策が効果の面から必要であり、人々への関心を喚起する上でも重要。



沿岸海域の典型的な食物連鎖 (山室, 2001)

■ どの場所から手をつけるべきか

- 貧酸素水塊は、生物生息にとって重大な障害。しかし、湾規模の改善は短期的には非現実的。
- 現状の貧酸素の影響を受けにくい、沿岸部に着目し、その水質改善や生物生息場の拡大に取り組むべき。
- 生物作用等による沖合への浄化波及効果を期待。

■ 考え得る対応策

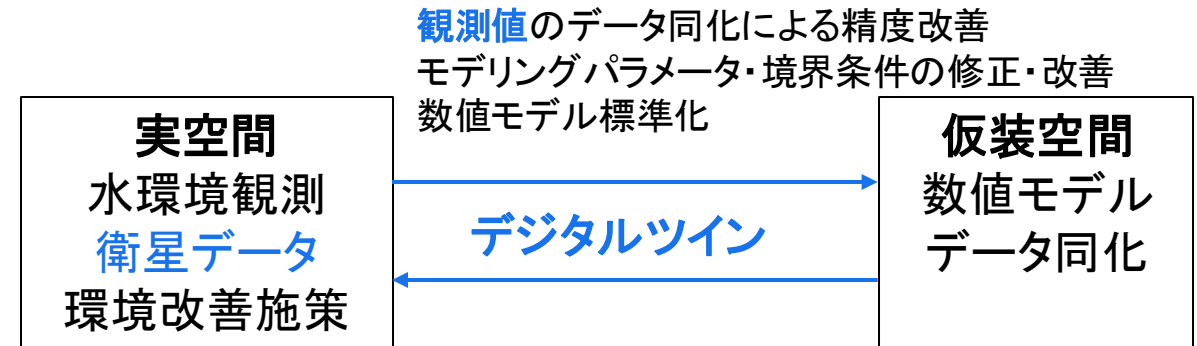
- 様々な護岸全面での干潟・藻場造成(従来法)
- 低利用・未利用の埋立地の干潟・浅場への転用
- 改修期の垂直護岸を自然共生護岸化
- 海底地形の改良による貧酸素・青潮対策

■ 人と海辺の生態系とのかかわりの欠如

- 中央集権国家の発達, 経済優先のガバナンスの拡大により, 海辺の人の営みと都市の人の営みが乖離.
- 身近な海は護岸や港によって管理され, 都市域では水質が悪化し, 人々が容易に海辺に近づけない事態.

新しい海域利用に向けて, 海辺の生態系機能と生物多様性の価値を再認識し, 自然資本と生態系サービスの現在の需要と供給, さらにそのバランスを見出すこと. 人と自然との関係を再生, あるいは再構築し, 海辺への関心・利用を回復させること.

■ 沿岸環境デジタルツインの可能性



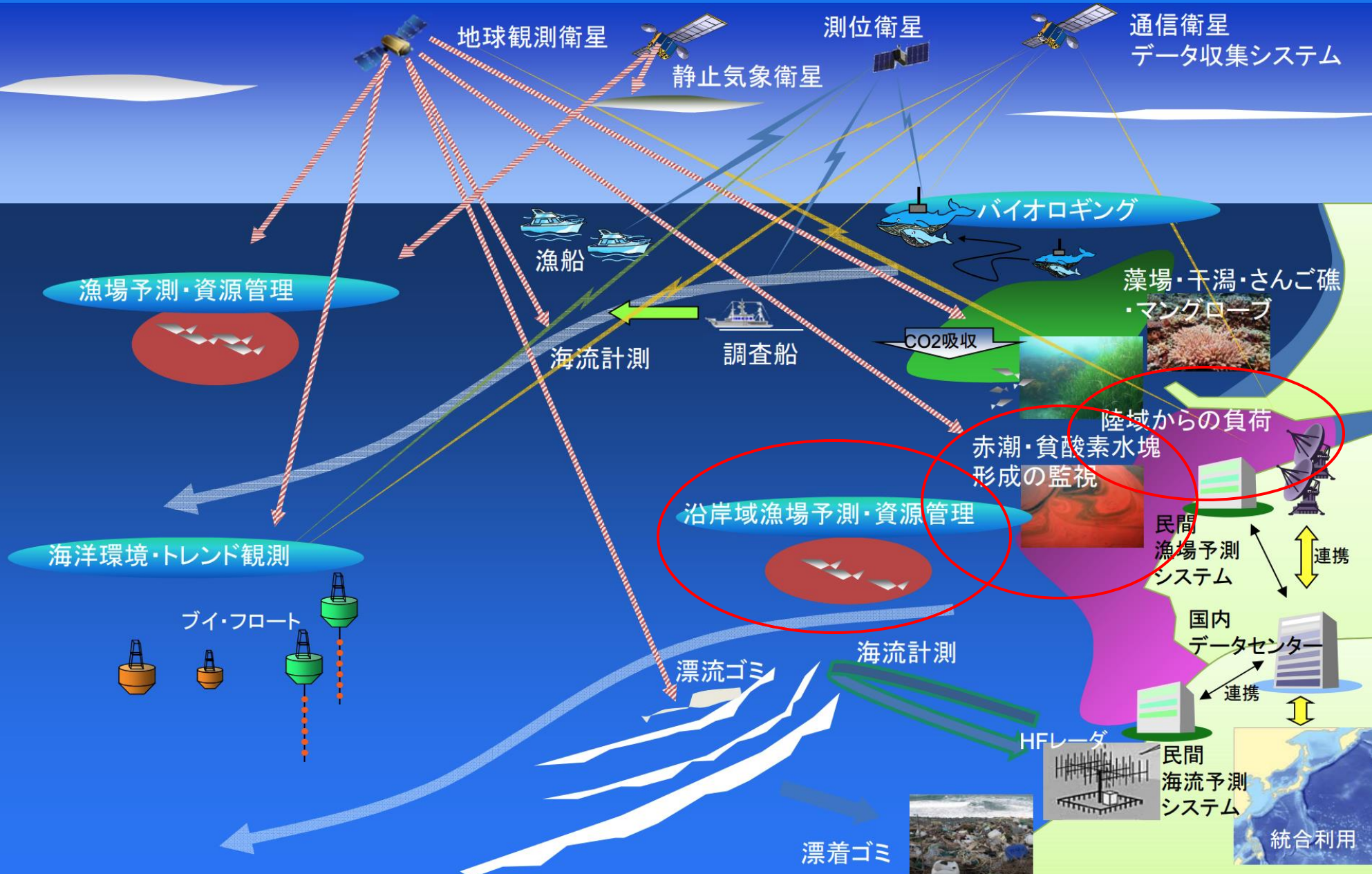
短期的・長期的な問題に対し, 行動に対する生態系へのレスポンスを仮想空間にて定量化.

アサリ, 海苔の生産, スマート漁業・養殖業への利用, 環境改善施策, 環境アセスメント, 水環境や油・軽石漂流等のリアルタイム予測, 適切な物質循環のバランスの明確化.



考え得るステークホルダー

民間企業(ゼネコン, コンサル), 行政・地方自治体, 水産研究所等の研究機関, 漁業者, NPO, 市民…



海洋・宇宙の連携イメージ(環境・水産分科会)海洋環境/水産資源 by JAXA

海色リモートセンシングとは？

海色リモートセンシングとは？

- 可視域・近赤外域の光を利用して、水色から水質濃度を推定.
- クロロフィルa, 懸濁物質濃度, 有色溶存有機物等を推定.
→ 色が付いている物質の量を推定

しきさい衛星データ
2021年3月18日 RGB画像

海色リモートセンシングとは？

海色リモートセンシングとは？

- 可視域・近赤外域の光を利用して、水色から水質濃度を推定.
- クロロフィルa, 懸濁物質濃度, 有色溶存有機物等を推定.
→ 色が付いている物質の量を推定

しきさい衛星データ
2021年3月18日 クロロフィルa濃度

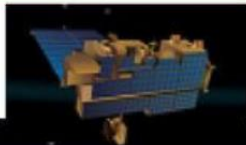


Remote Sensing – Ocean Color

EAS 42700/B5100 – Class 5

March 6, 2017, NY

Satellite sensor



Sun

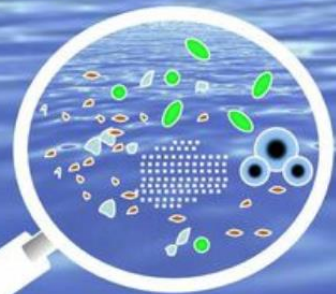


Atmospheric scattering & absorption

air molecules, greenhouse gasses
(CO₂, O₃, NO₂), water vapor,
aerosols, dust, smoke

In-water attenuation

- Water molecules
- Phytoplankton
- Colored Dissolved Organic Matter (CDOM)
- Non-algal particles (NAP)



L_A
 L_W
 L_R

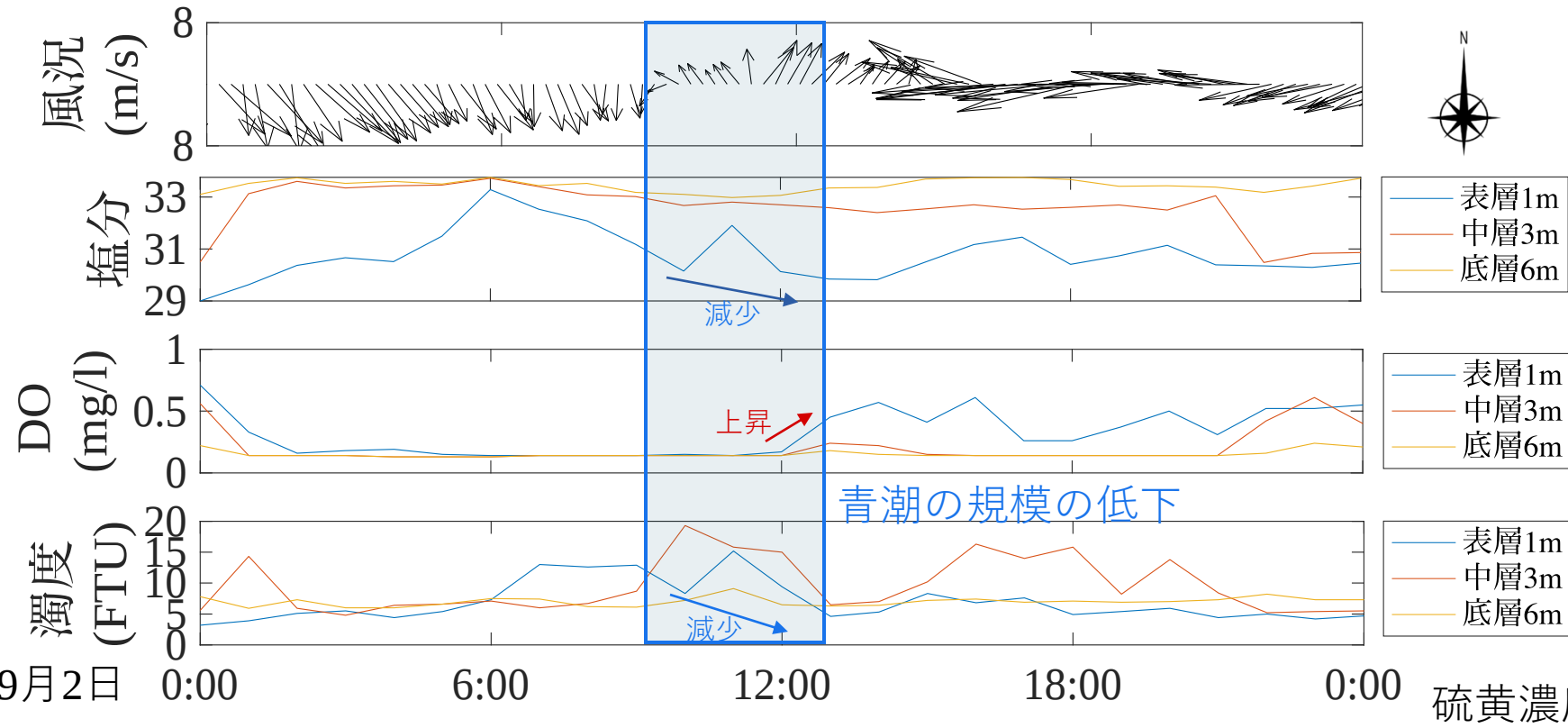
Reflection from water surface

Transmission through water-air
boundary

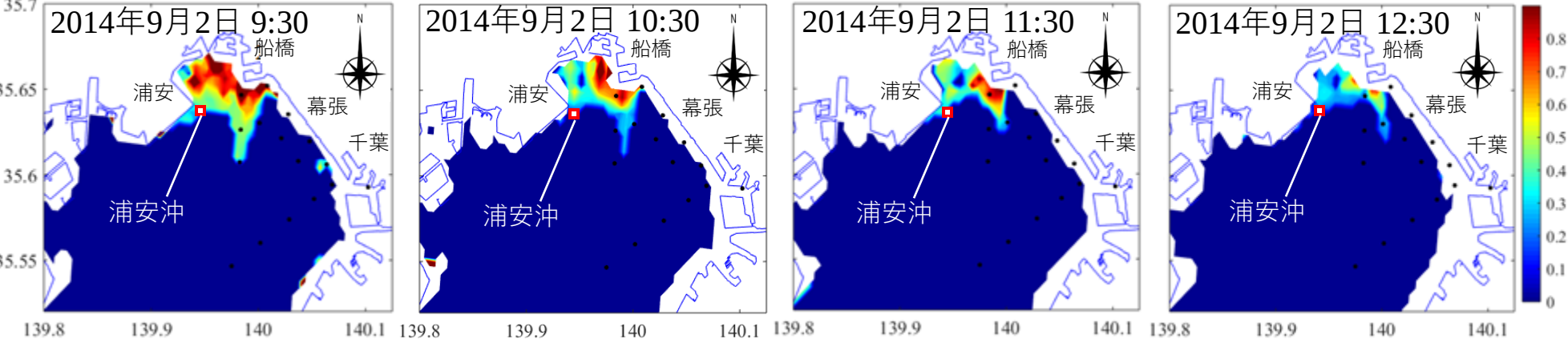
Bottom reflection

Remote Sensing of the Ocean and
Coastal Waters

Published by [Jocelyn Beasley](#)



衛星データ取得期間



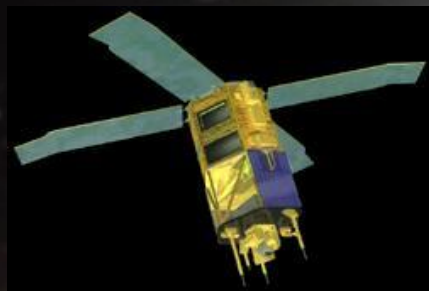
南風の連吹により、青潮分布が短時間で徐々に縮小する過程を観測。

Higa, H., Sugahara, S., Salem, S. I., Nakamura, Y., & Suzuki, T. (2020). An estimation method for blue tide distribution in Tokyo Bay based on sulfur concentrations using Geostationary Ocean Color Imager (GOCI). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 235, 106615.

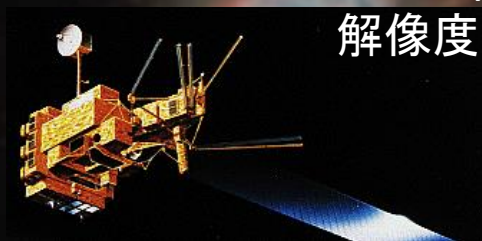
海色衛星の近年の動向とセンサーの違い



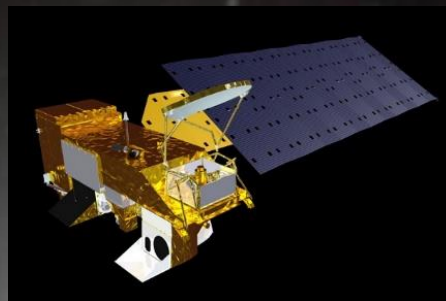
NIMBUS-7/CZCS
1978 – 1986
by NASA



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



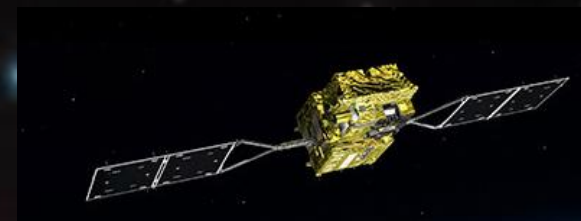
みどり(ADEOS)/OCTS
1996 - 1997 by JAXA
解像度: 700m × 700m
頻度: 3日1回



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



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



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



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



PACE
2024 by NASA
解像度: 1 km × 1 km
頻度: 2日



GOCI-II
2020 by KOSC
解像度: 250m × 250m
頻度: 1日8回

しきさい衛星の標準プロダクト

海洋 詳細 🔍	正規化海水射出放射輝度 [NWLR(L ^{***})] *** is wavelength.	定義：海面から射出する放射輝度(雲検知含む) 単位：W/m2/str/um あるいは1/sr
	大気補正パラメータ [NWLR(T ^{***})] *** is wavelength.	定義：大気散乱などの影響を推定するために用いるエアロゾル光学的厚さや波長特性などの情報 単位：無次元
	光合成有効放射 [NWLR(PAR_)]	定義：植物プランクトンが潜在的に光合成へ利用できる波長400－700nmの海面入射光量の海面における1日あたりの積算値 単位：Ein/m2/dayまたはmol photons/m2/day
	クロロフィルa 濃度 [IWPR(CHLA)]	定義：植物プランクトンの主要な光合成色素の水中表層における濃度 単位：mg/m3
	懸濁物質濃度 [IWPR(TSM_)]	定義：水中表層の懸濁物質量を単位水あたりの乾燥重量で表したもので、プランクトンなどの有機物と土壌などの無機物の合わせたもの 単位：g/m3
	有色溶存有機物吸光係数 [IWPR(CDOM)]	定義：波長412nmにおける水中表層に溶解している有機物による光吸収係数 単位：1/m
	海面水温 [SSTD/SSTN(SST_)]	定義：海面の(バルク)温度(雲検知含む) 単位：deg.C)

しきさい衛星の研究プロダクト

海洋	有光層深度 [EZD]	定義：植物の成長に十分な光のある層の深さで、PARが海面直下の1/100となる水深 単位：m
	海水固有の光学特性 [IOP]	定義：植物色素・懸濁物質・有色溶存有機物の光吸収係数および懸濁物質の光後方散乱係数等の海水が持つ光学的性質 単位：1/m
	海洋純基礎生産力 [ONPP]	定義：植物プランクトンによる（呼吸を引いた）炭素固定量である純光合成速度 単位：mgC/m2/day
	植物プランクトン機能別分類 [PHFT]	定義：窒素固定、珪素固定、二酸化炭素能出など、生物地球化学的あるいは生態学的機能に基づいた植物プランクトングループの分類 単位：無次元
	赤潮 [RTD]	定義：植物プランクトン等微小生物による海面の着色現象である赤潮の判別 単位：無次元
	多センサ複合海色 [MOC]	定義：他衛星のCHLAプロダクトと併せて時間解像度を上げたデータセット 単位：mg/m3
	多センサ複合海面水温 [MSST]	定義：他衛星のSSTプロダクトと併せて時間解像度を上げたデータセット 単位：℃
	硝酸塩ベース基礎生産量	定義：海面における硝酸塩濃度及び硝酸塩ベースの基礎生産量 単位：TBD
	流れ藻指数（FAI）	定義：近赤外の反射率を用いた海面の流れ藻の存在を表す指数 単位：無次元

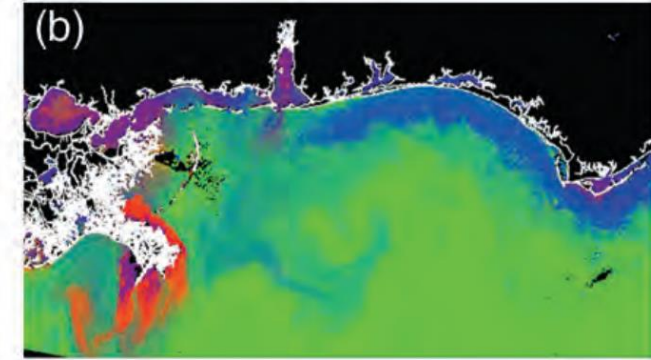
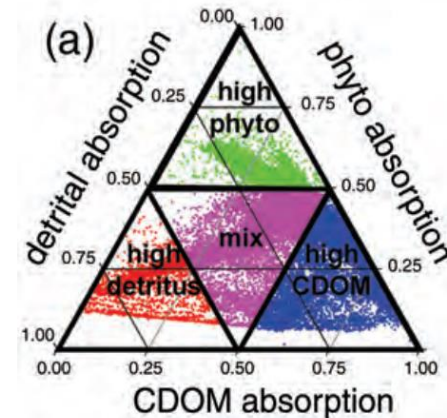
G-portal:
https://suzaku.eorc.jaxa.jp/GCOM_C/data/product_re_j.html

■ 固有光学特性 (Inherent Optical Properties: IOPs)

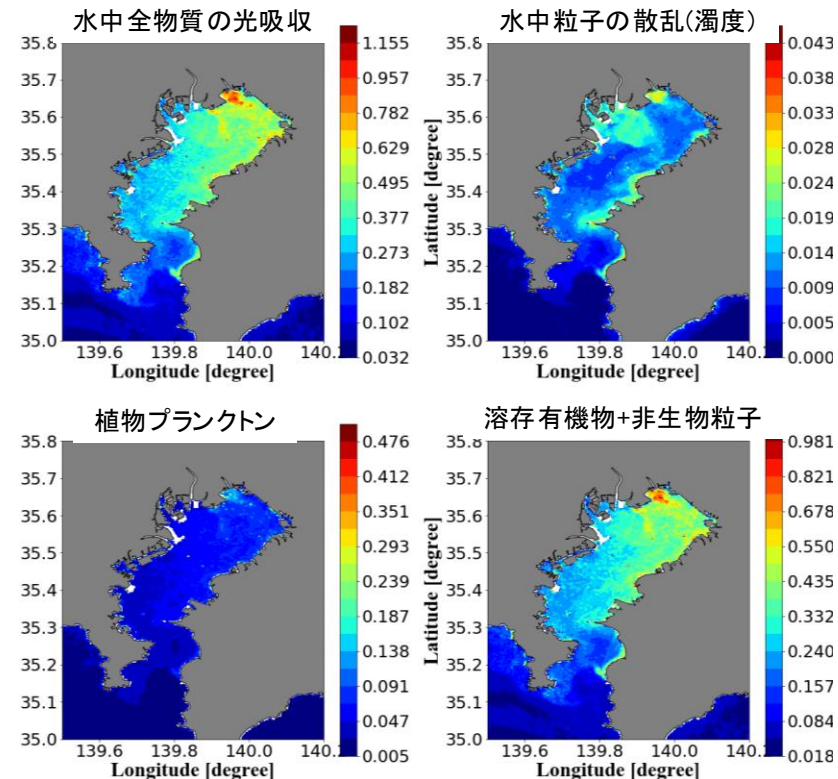
- IOPsは、入射光には関係ない性質を持ち、特定の物質が光をどのように吸収し、散乱するかを表す。
(例: 光吸収係数(a), 光散乱係数(b), その和である消散係数(c)等)

■ 沿岸域におけるIOPs推定 (インバージョン)

- IOPsのインバース推定は、水中固有の光学特性を分離して複数の情報を同時に抽出。
- 沿岸域特化型の大気補正モデルの高精度化により、IOPs推定が高精度化。
- IOPsの利用により、水塊分類、溶存有機物(塩分+内部生産)、非生物粒子、土砂等の濁度、土砂の粒径、青潮、赤潮を含む植物プランクトンの濃度や種の同定に期待。
→ IOPsを用いた生態系モデルとのデータ同化システム開発の研究を実施中。



IOPsによる水塊分類例 (IOCCG, 2006)



しきさい衛星による
IOPsの推定例

全光吸収係数, 植物
プランクトン, 溶
存有有機物+非生物
粒子の光吸収係数,
後方散乱係数。

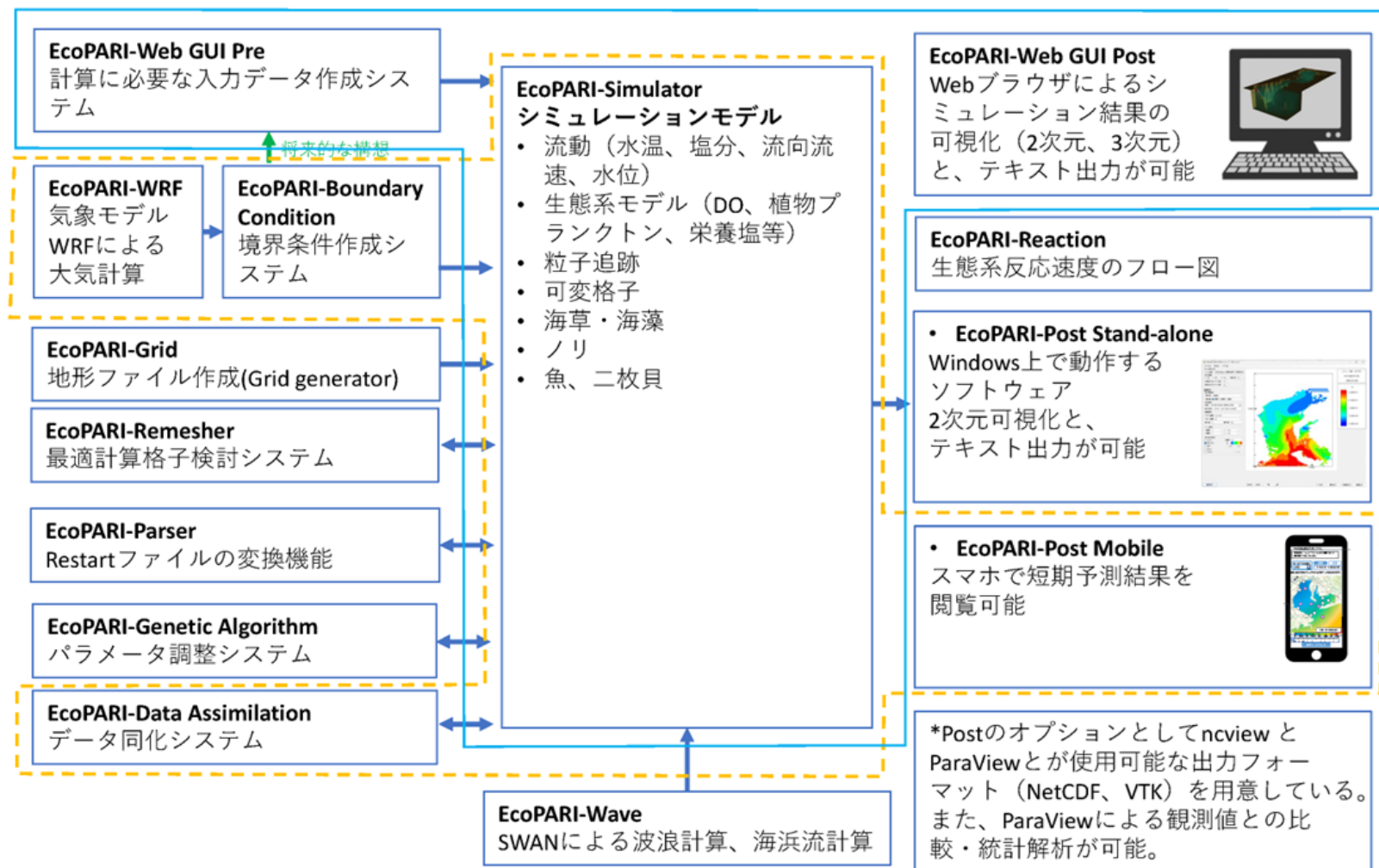
流動生態系シミュレーションシステム EcoPARI (エコパリ)

システム名称：流動生態系シミュレーションシステム

Ecological hydrodynamics simulation system of the Port and Airport Research Institute



- 港湾空港技術研究所が開発している流動生態系シミュレーションシステム「EcoPARI」.
- EcoPARIは、水温、塩分、栄養塩、赤潮などの再現や予測を行う.
- 浅場造成や湾口防波堤建設、下水処理場の管理運転の影響評価等の分析に役立つ.
- 伊勢湾、東京湾、大阪湾でも適用が進んでいる.

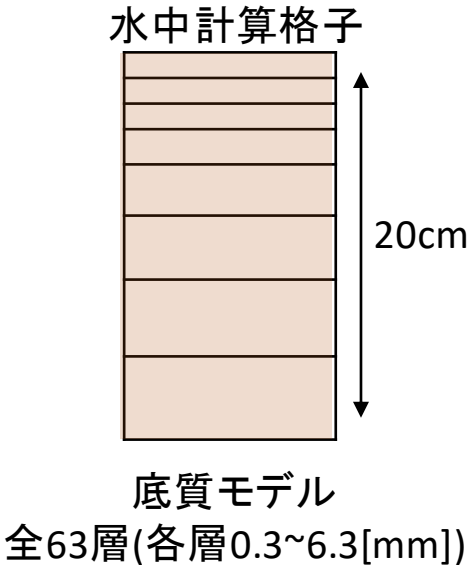
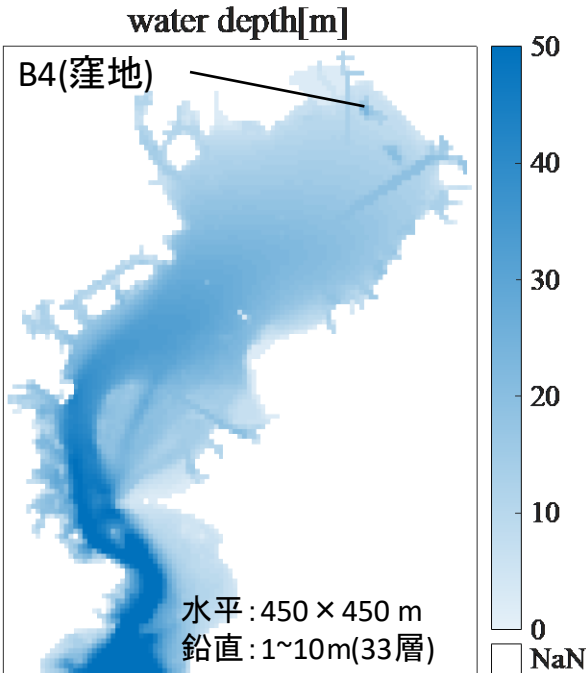


出典 PARI HP: <https://www.pari.go.jp/unit/mpmg/is/>

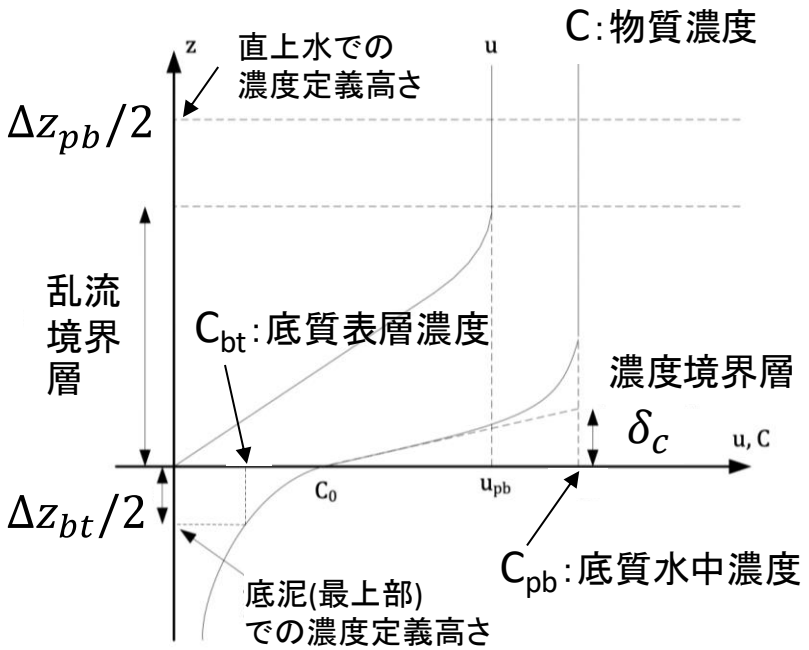
EcoPARI-Web GUI GUIシステム

EcoPARI-Forecast System 海域環境予測システム

使用モデル		非静水圧3次元流動モデルEcoPARI (港空研)
本計算期間		2021/1/1~2022/6/30
湾口	潮位	布良の潮位観測値
	水温・塩分	海洋予測モデルJCOPE T-DA 1時間あたりの計算値
	水質	劔崎沖の月1観測値を線形補完
河川	考慮した河川	荒川・多摩川・中川 隅田川・旧江戸川・鶴見川
	流量	鈴木(2013)を参考
	栄養塩	順流域LQ+生活・産業排水
	鉄・マンガン	出水時含めた荒川・多摩川の 観測結果からLQ式作成
気象	気温	検見川沖観測値
	気圧・日射量	東京気象台の観測値
	降水量	東京湾周辺8箇所の観測値
	風向・風速	東京湾周辺12箇所の観測値



水底間の物質移動



懸濁物質Cの沈降[molC m⁻² s⁻¹]

$$J_C^{sett} = \min(0, w_c) \cdot C$$

w_c : 物質Cの沈降速度[m/s]

溶存物質Cの拡散[molC m⁻² s⁻¹]

$$J_C^{diss} = -D \cdot \frac{C_{pb} - C_{bt}}{\delta_c + \frac{1}{2}\Delta z_{bt}}$$

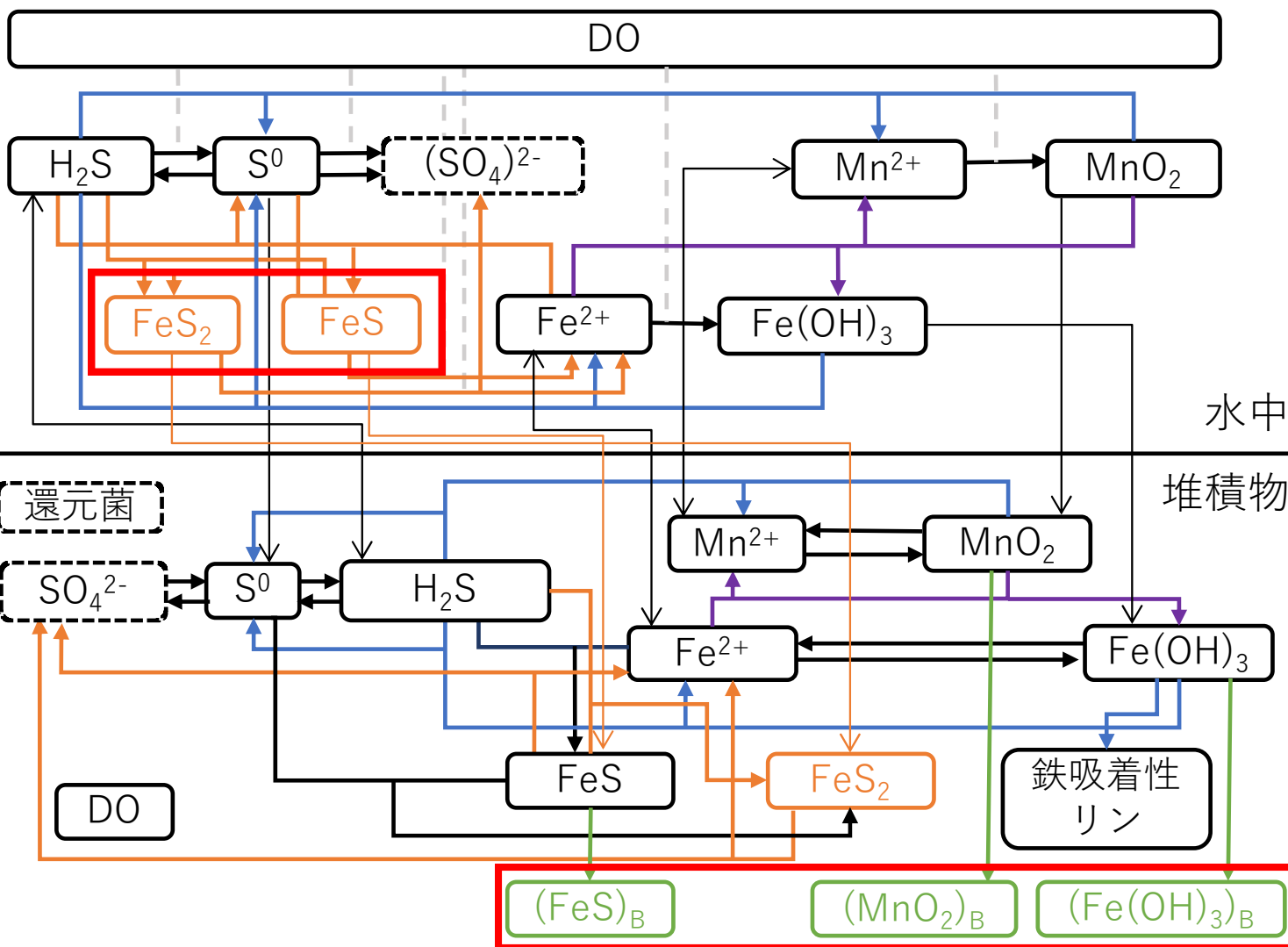
D: 実効拡散係数[m² s⁻¹]

C_{pb} : 底層水中の物質濃度[molC m⁻³]

C_{bt} : 底質表層の物質濃度[molC m⁻³]

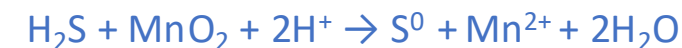
Δz_{bt} : 底質表層厚さ[m]

δ_c : 濃度境界層厚さ[m]



▷硫黄周りの酸化還元反応の詳細化

青潮要因である H_2S と $\text{Fe}\cdot\text{Mn}$ の酸化・還元反応を追加



▷新たに鉄・マンガン間の酸化還元反応を追加 酸素消費・ H_2S 溶出抑制に影響のある $\text{Fe}\cdot\text{Mn}$ 間の反応

消費・ H_2S 溶出抑制に影響のある $\text{Fe}\cdot\text{Mn}$ 間の反応



▷新たに $\text{FeS}\cdot\text{FeS}_2$ 周りの反応を追加

H_2S と FeS が反応し $\text{FeS}\cdot\text{FeS}_2$ が生成(H_2S 溶出抑制)



▷新たに結晶化反応を追加

反応性が低くなり、酸化剤として働かなくなる



参考文献

Fossing et al(2004) : A model set-up for an oxygen and nutrient flux model for Aarhus Bay Denmark, NERI Technical Report, No. 483

Mochida, F. et al(2023): Modeling of Sulfur and Iron Dynamics in Enclosed Bay Sediments and Evaluation of the Suppression Effect on Sulfide Release by Iron, Water 2023, 15, 2366.

Wang, K. et al(2022): An effective process-based modeling approach for predicting hypoxia and blue tide in Tokyo Bay, Coastal Engineering Journal, Vol. pp. 64(3), 458-476.

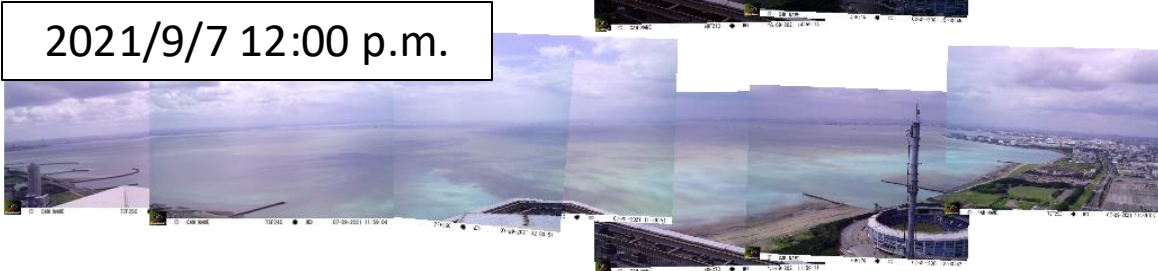
2021/9/5 3:00 p.m.



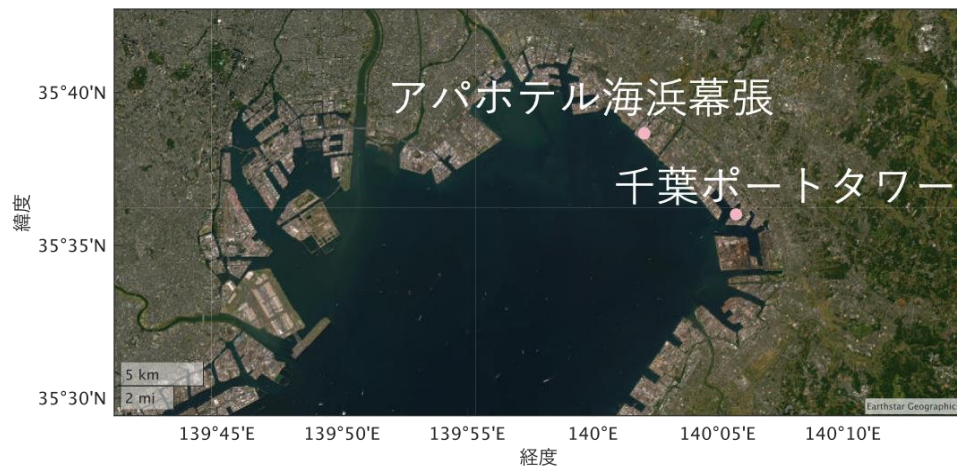
2021/9/6 3:00 p.m.



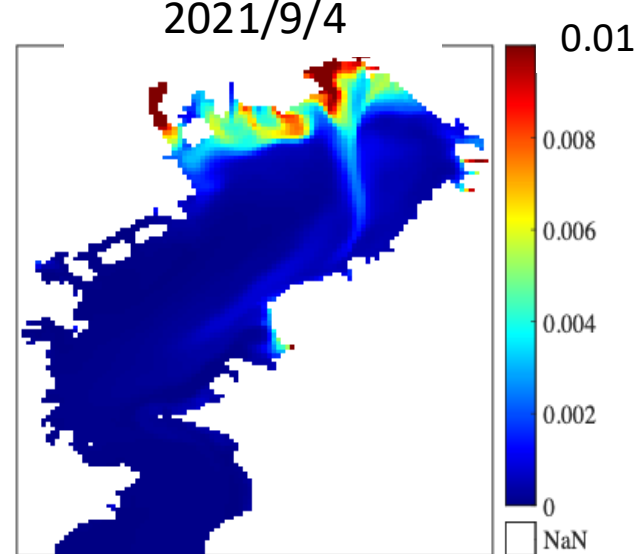
2021/9/7 12:00 p.m.



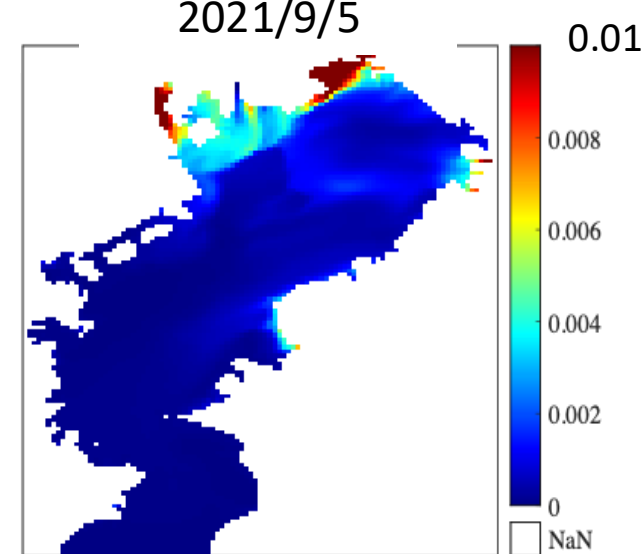
アパホテル海浜幕張からみた青潮発生時の様子



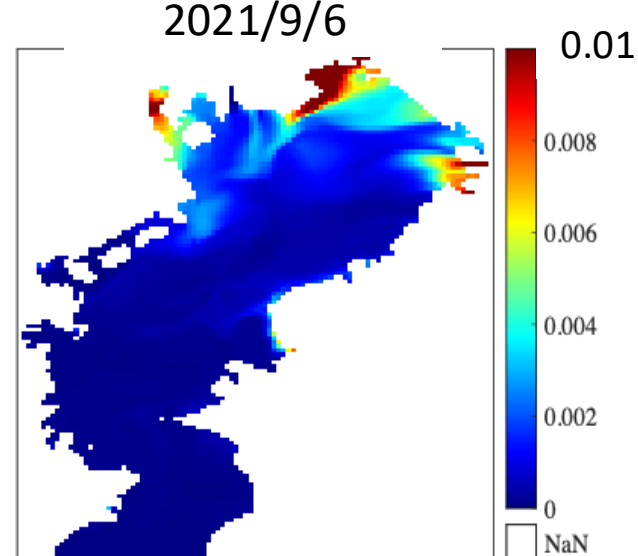
2021/9/4



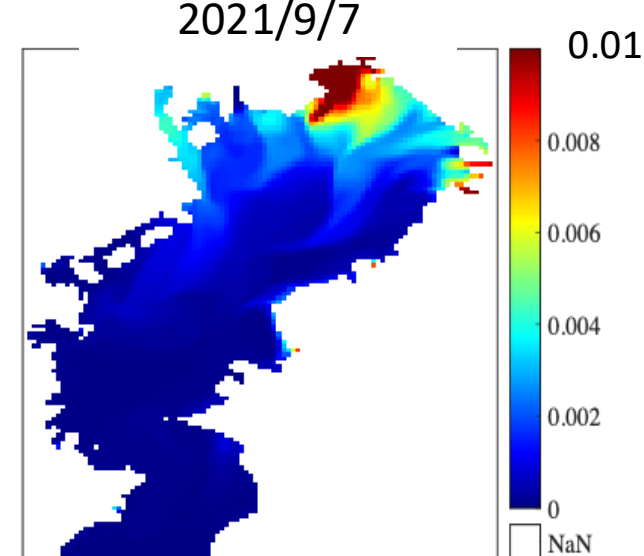
2021/9/5



2021/9/6



2021/9/7



単体硫黄濃度の計算結果. 濃度レベルの調整に課題あり.

■ 数値モデルに生じる不確実性

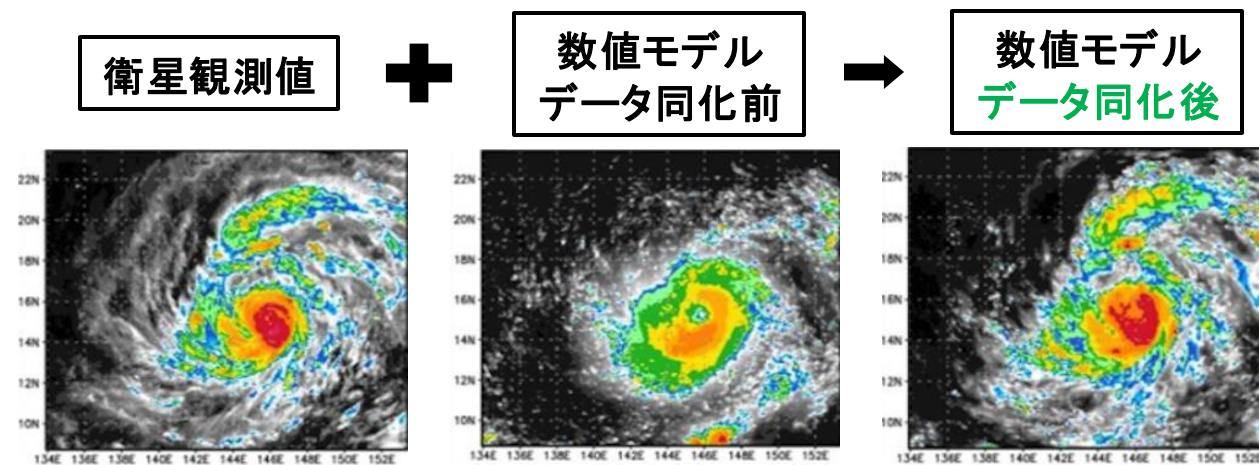
- 初期条件・境界条件・パラメーターに不確実性.
- 解決策として**データ同化**の利用が挙げられる.
(松崎ら(2020))

■ データ同化

- 観測データの情報を数値モデルに適切に取り込み,
数値モデルの精度向上を行う手法.
- 初期条件・境界条件・パラメータの**最適値の推定**が可能.

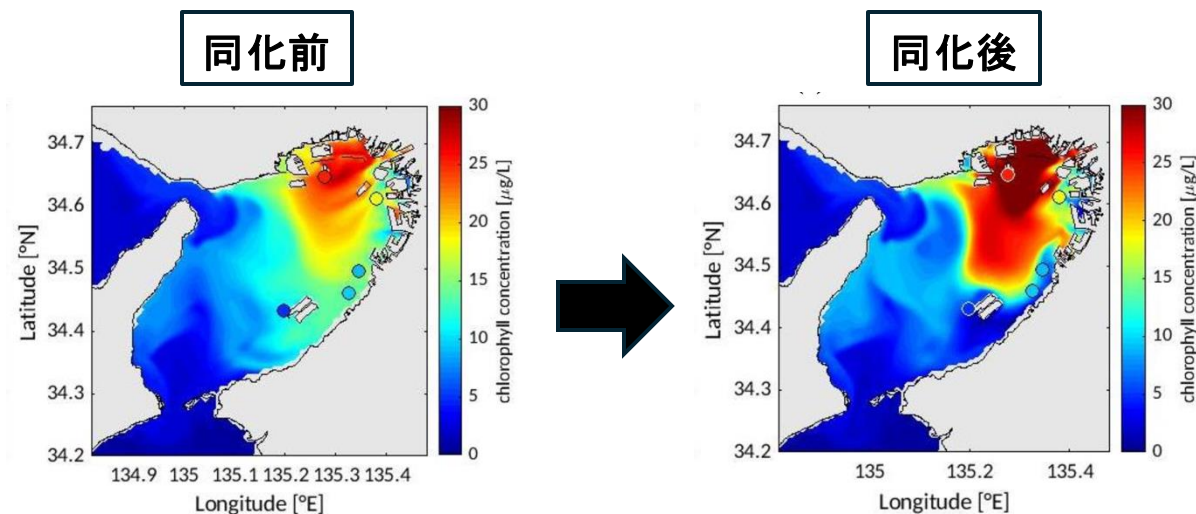
■ 沿岸域におけるデータ同化

- HFレーダーの流向流速観測値やブイの連続水質観測値を同化. (岡田ら(2023), 入江ら(2020))
- 衛星データ用いた同化事例はほとんどない.
- 衛星観測が高頻度化・高解像度化.
⇒ 沿岸域へのデータ同化に有効な可能性.



2015年台風19号におけるデータ同化の事例: Miyoshi et al.(2018)

<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00458297>



大阪湾におけるブイの観測値のデータ同化による
クロロフィル濃度の修正: 入江ら(2020)

■ 沿岸域における人工衛星データの問題

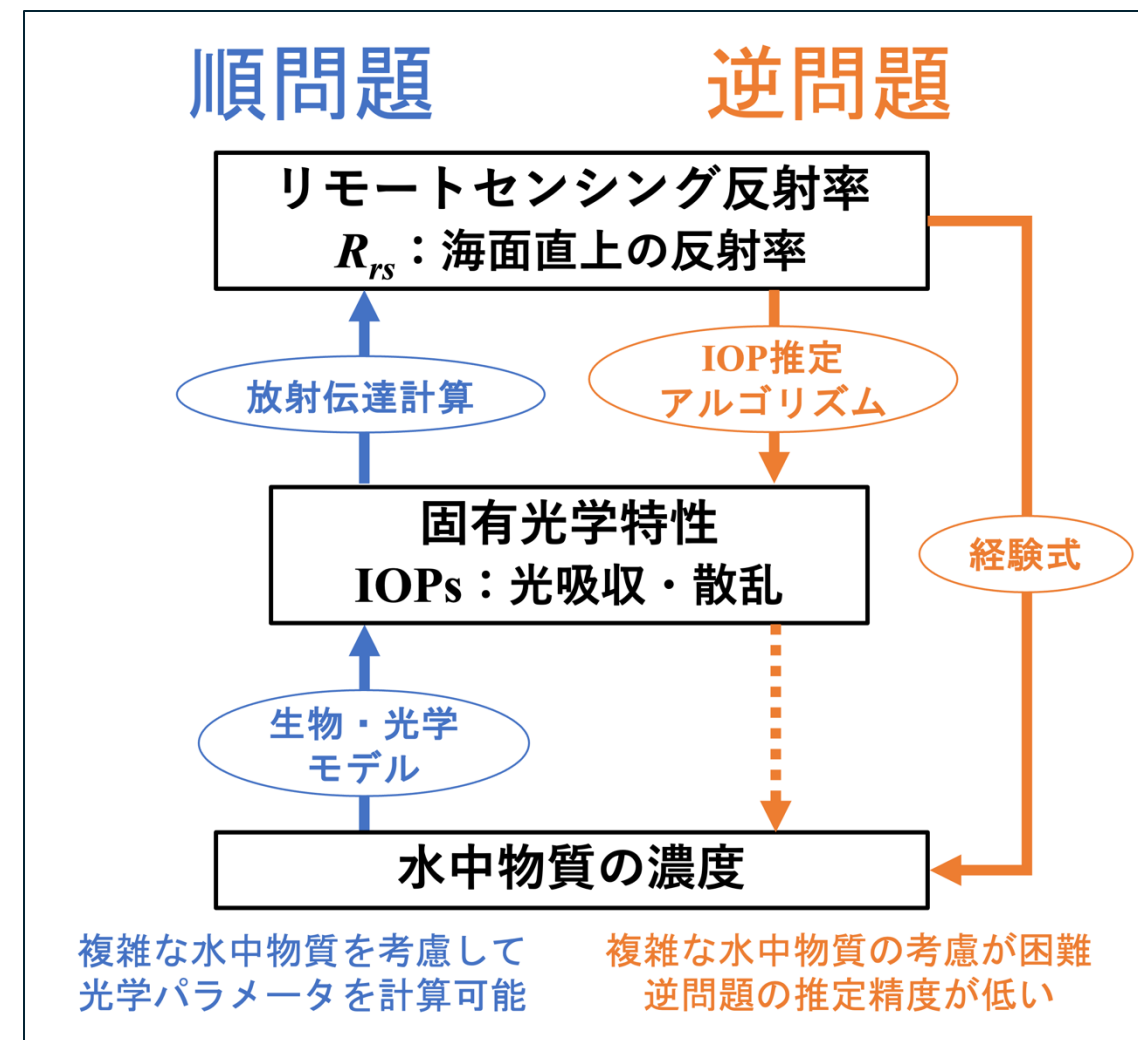
- 水中物質濃度 (CHLA, TSM...) は推定精度が低い.
 - 既往のアルゴリズムが、複雑な光環境である沿岸域に適していない.

河川水の流入や内部生産により
水中物質の構成が複雑に変化する.

海色衛星データによる経験式に基づいた水中物質濃度の推定値は不確実性が大きく、データ同化への利用は困難

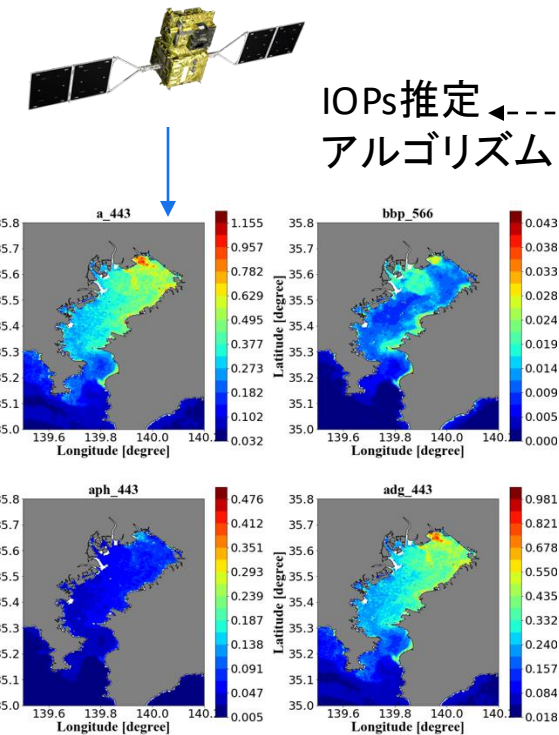
■ 光学パラメータを用いたデータ同化

- 生態系モデル計算結果の水中物質濃度から光学パラメータ (IOPs・ R_{rs}) を計算し、光学パラメータを対象として、数値モデルと海色衛星データとの親和性の高いデータ同化を実現する.



光学パラメータと水中物質濃度の関係

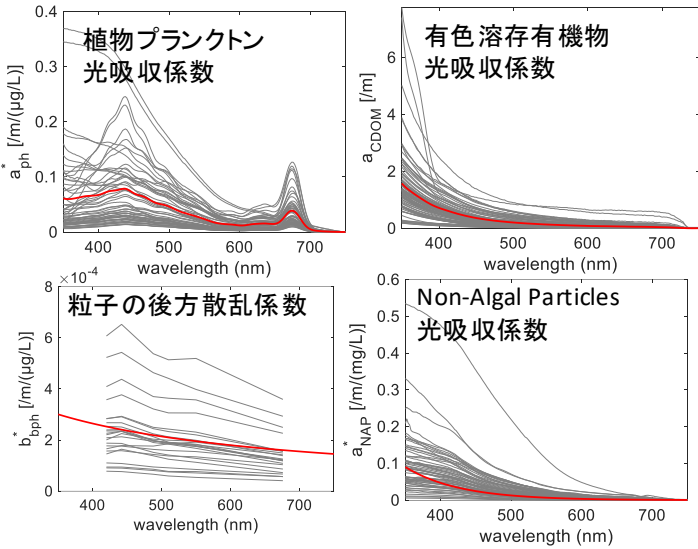
光学衛星データ



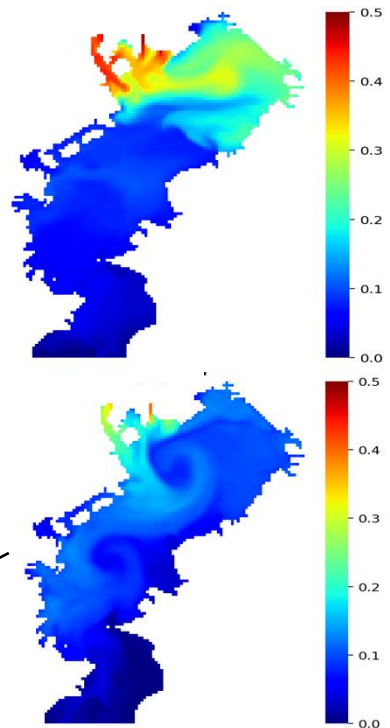
IOPs推定
アルゴリズム

入力条件
Specific IOPs
比光吸収係数,
比後方散乱係数
※物質の形状, 色, 組成等
により変化

数値モデルにより
IOPs, SIOPの適切な
選択と入力
IOPs推定の高精度化



3次元流動・生態系モデル
による計算結果



光学衛星データと生態系モデルと
の親和性の高いデータ同化手法

IOPs同士の同化

順問題 (生物光学モデル・放射伝達モデル)

逆問題 (インバージョン)

固有光学特性 (IOPs)

水質 (生態系パラメーター)

環境特性の研究・監視

有色溶存有機物の光吸収係数 (/m)	関係性の把握	DOC, NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , D-Fe, D-Mn, 塩分
Non-Algal Particleの光吸収係数 (/m)		非生物粒子
植物プランクトンの光吸収係数 (/m)		植物プランクトン濃度・種の同定
粒子の後方散乱係数 (/m)		無機懸濁物質, 懸濁態リン・鉄・マンガン

- 河川の流入
- 沿岸湧昇
- 成層化, 貧酸素化
- 赤潮, 生物種

■ 光後方散乱係数を用いたデータ同化の実行

- 同化により評価関数が減少し、各パラメータに変化を得た。

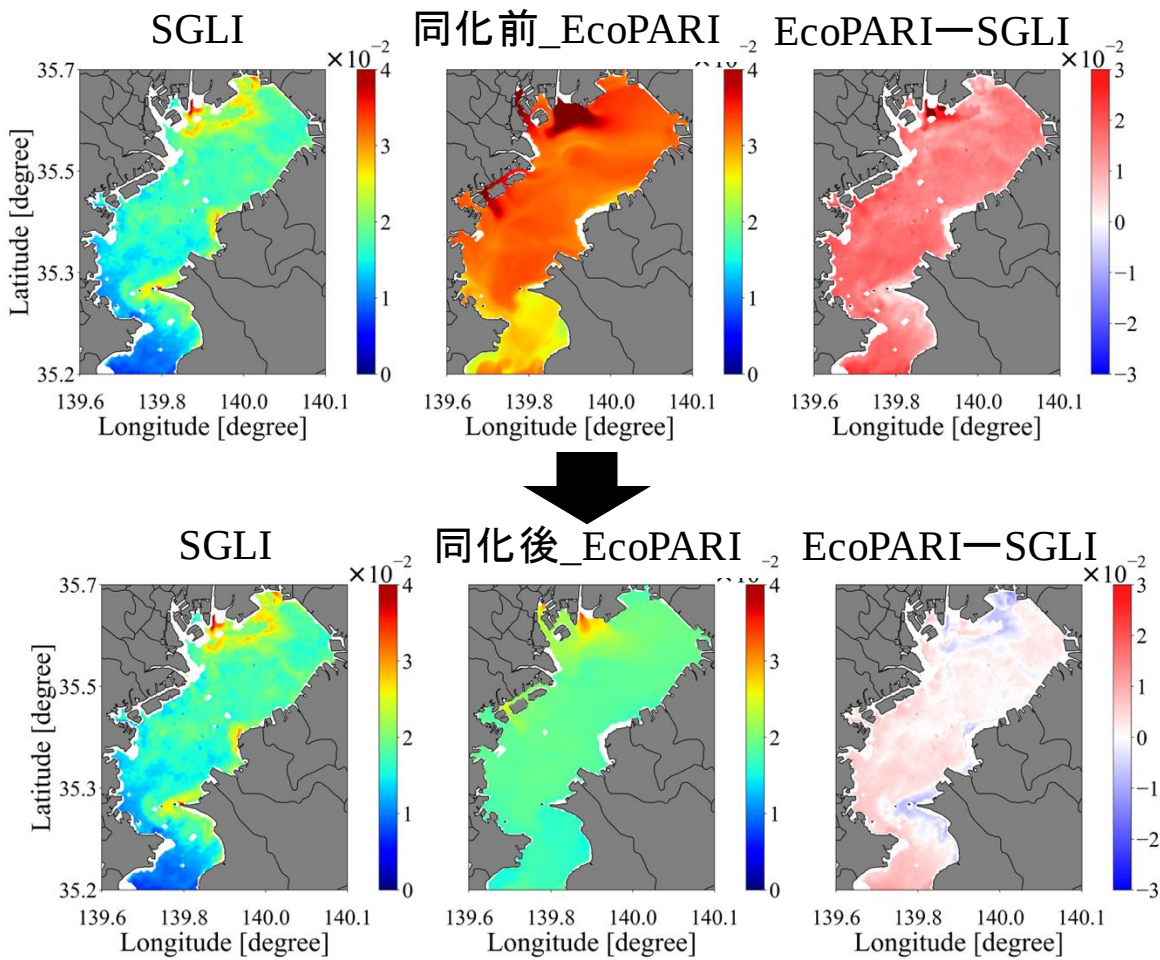
■ 同化前後の空間分布の変化

- 全体的にモデル計算値の $b_{bp}(565)$ が減少。
- 衛星データとの差が減少。

*検証に用いる現場観測値の不足により、精度評価が不十分

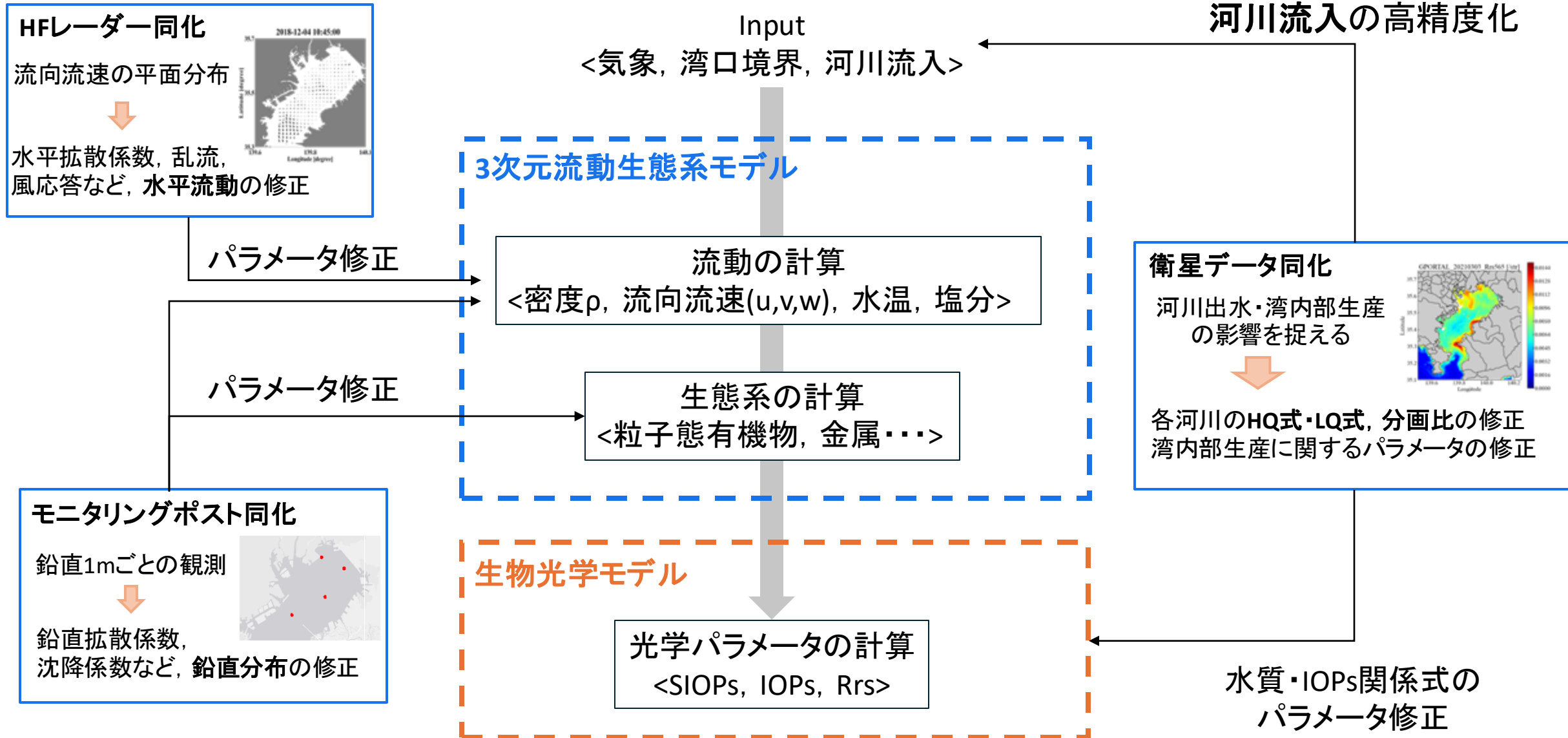
得られた各パラメータの変化

	データ同化前	グリーン関数適用後
評価関数	6773	980
LQ式係数	0.1742	0.1704
沈降係数	-1.160E-06	-2.996E-06
$b_{bp_{tss}}^*$ 計算式係数	7.070E-03	6.834E-03
$b_{bp_{tss}}^*$ 計算式乗数	-0.4078	-0.6047
植プラ最大光合成速度	1.300E-05	1.699E-05



2021年9月23日 後方散乱係数の同化結果

Comparison of the spatial distribution of $b_{bp}(565)$ of the difference between satellite observations and model calculated values before and after assimilation



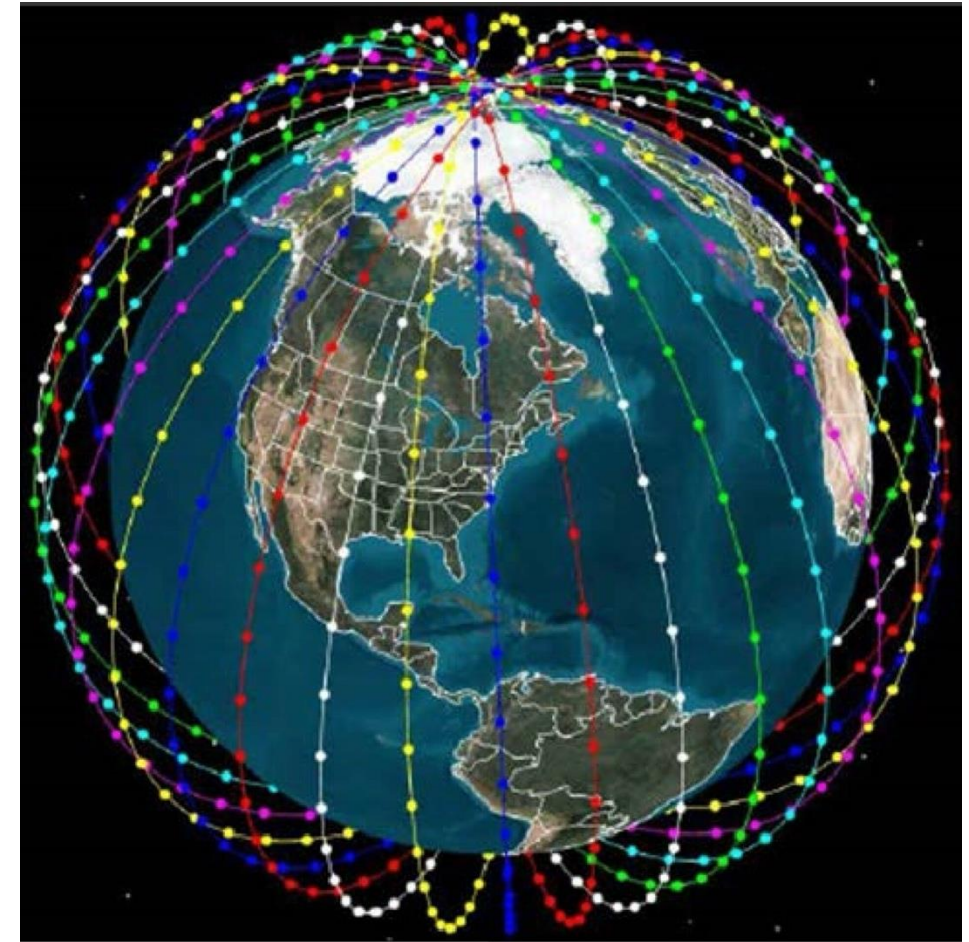
⇒赤潮・青潮の再現性の向上, 金属循環の詳細把握, SIOPsの空間分布把握

■ 沿岸環境におけるデジタルツインフレームワーク

- デジタルツイン開発における成熟度レベルの把握.
- 現状の技術的な課題の整理. ツイン構築に必要な適切な環境モニタリング技術の把握とコストとのバランス.
- 沿岸環境における**各種実測データの付加価値の向上**.
- 人間とツインとのインタラクションの方法の検討と多様なステークホルダーの考慮.

■ 海色衛星データのデジタルツイン構築への貢献

- IOPをはじめとした研究プロダクト開発の進展.
- 複数の人工衛星を用いた統合利用. **コンステレーションによる時空間分解能向上, 可視化技術向上**.
- 過去・現在・将来に渡る海洋・沿岸環境変化の解析. 力学・生物・化学モデルとのデータ同化や機械学習アプローチ, **幅広い分野横断を通じた社会とのインタラクション**を可能とするモデル開発.



人工衛星コンステレーションのイメージ図