

藻場吸収源デジタルツイン構築による 深海貯留量の推定



五十嵐弘道
海洋研究開発機構付加価値情報創生部門
地球情報科学技術センター

ブルーカーボンとは

- 沿岸・海洋生態系が光合成によりCO₂を取り込み、その後海底や深海に蓄積される炭素のこと
- ブルーカーボンの主要な吸収源としては、藻場（海草・海藻）や塩性湿地・干潟、マングローブ林があげられ、これらは「ブルーカーボン生態系」と呼ばれています。

環境省webページより

<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/blue-carbon-jp/about.html>



海草（うみくさ）

海中で花を咲かせ種子によって繁殖し、海中で一生を過ごすアマモなどの海産種子植物。比較的浅いところに多く、海底深くに生育することはない。アマモ、スガモ等。



海藻（うみも）

海で生活する藻類。胞子によって繁殖する。海藻の根は栄養吸収のためではなく、岩に固着するためのもので、葉色によって緑藻・褐藻・紅藻の3種類に分けられる。コンブ、ワカメ等。



塩性湿地・干潟

干潮時に干上がり、満潮時には海面下に没する潮間帯において砂質または砂泥質の浅場がひろがっている場所を干潟と呼び、河川や沿岸流によって運ばれてきた土砂が、海岸や河口部などに堆積し形成される。また干潟の陸に近い場所に発達する、ヨシ等が茂る湿地帯を塩性湿地と呼ぶ。



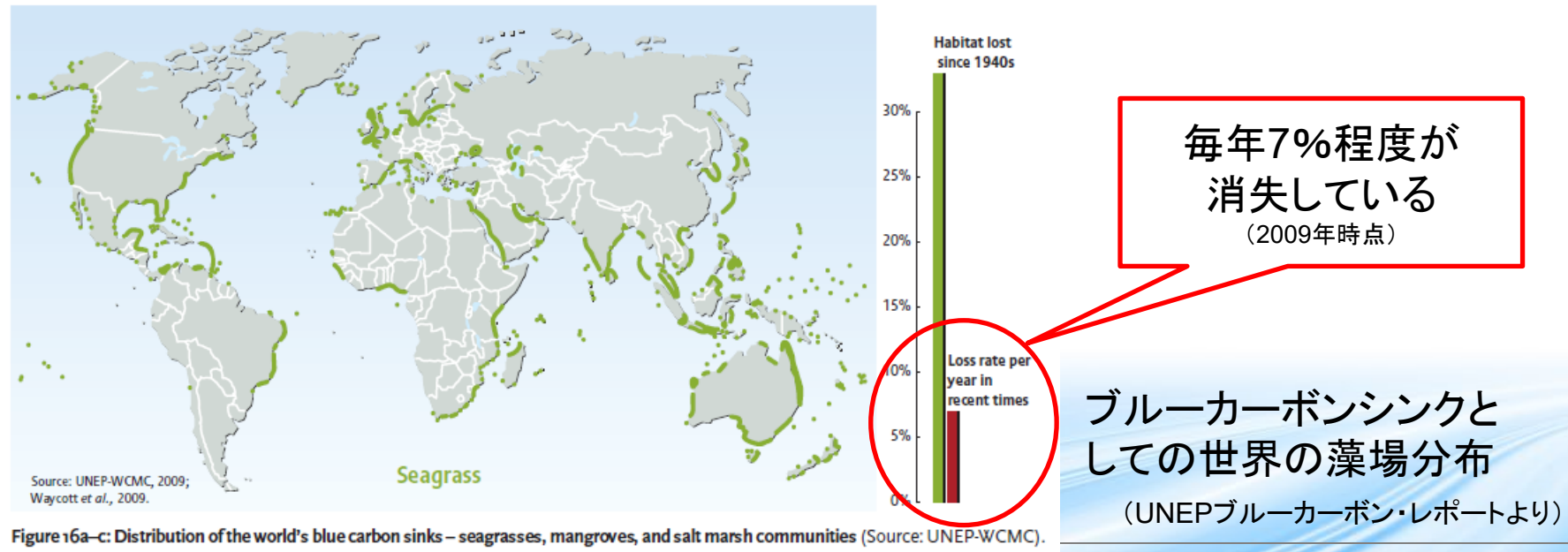
マングローブ林

熱帯や亜熱帯の河口付近など、河川水と海水が混じりあう汽水域に生息する樹木。国内では鹿児島県以南の海岸に分布。

浅海生態系別のCO₂吸収量は、面積が広いことなどから海草・海藻藻場が大半(60%以上)を占める。

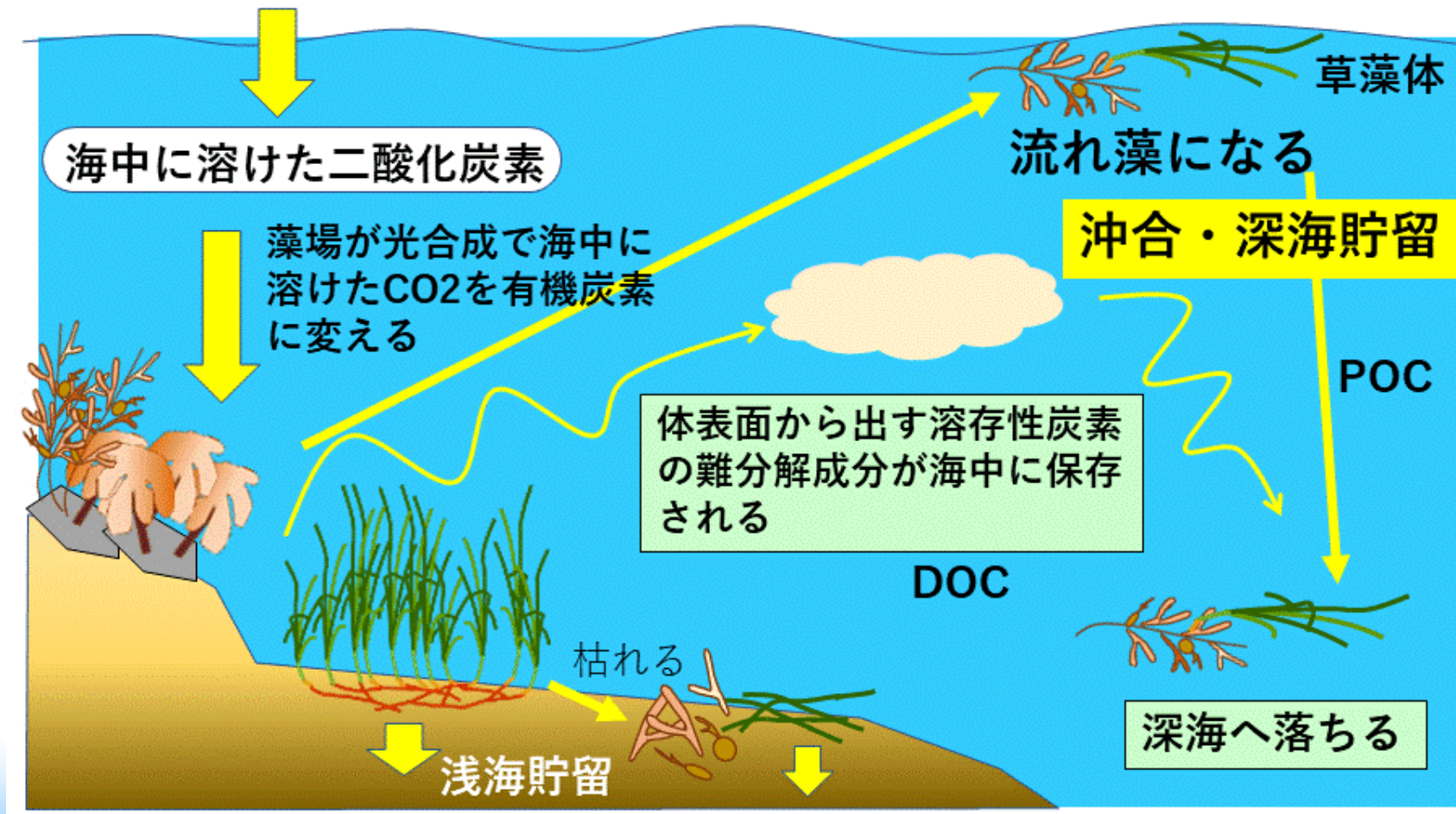
背景:ブルーカーボン吸収源としての沿岸藻場

- 沿岸浅海域の藻場は有機炭素を海底に貯留するブルーカーボンの最大の吸収源の一つ
- 藻場は温暖化の影響を受けやすく地球上で最も消失率の高い生態系
広域の沿岸浅海域を持つ日本においては特に深刻 (UNEPブルーカーボンレポート)
→炭素貯留機能維持という観点から消失を食い止めるための施策が急務
- 藻場の分布状態や外洋への流出から深海への輸送・貯留プロセスは未解明
温暖化の進行に伴う藻場の現況把握と将来予測の情報創生も急務



背景:ブルーカーボン吸収源としての沿岸藻場

現状と課題:藻場生産物の沖合・深海での貯留



「藻場生産物の沖合・深海貯留」概念図

浅海域における貯留については多くの既存知見が得られているのに対して、沖合から深海への貯留プロセスについては未解明な部分が多い。

貯留の計算

- インベントリ: 国レベルでの温室効果ガス吸排出量
- 2024年4月に国連へ報告した我が国の温室効果ガスインベントリでは、世界で初めて、海草藻場・海藻藻場による吸収量を合わせて算定・報告しました。(環境省HPより)
- 「我が国のインベントリにおける藻場(海草・海藻)の算定方法について」

https://www.env.go.jp/earth/ondanka/blue-carbon-jp/pdf/initiatives/02_inventory.pdf

海草・海藻藻場による炭素貯留として、**堆積貯留・難分解貯留・深海貯留・RDOC貯留**の4プロセスを考慮している

$$\begin{aligned} \text{藻場タイプ}j\text{の吸収係数 (gCO}_2\text{/m}^2\text{/year)} &= \frac{\text{CO}_2\text{隔離量} \times \text{残存率の総和}}{\text{現存量をCO}_2\text{量に換算する項}} \times C_{\text{cont}j} \times (44/12) \times E_j \\ &= \frac{\begin{aligned} &(P/B_{\text{max}})_j \times B_{\text{max}} \times r_{2j} && \text{: 堆積貯留} \\ &+ (P/B_{\text{max}})_j \times B_{\text{max}} \times r_{3j} && \text{: 深海貯留} \\ &+ (P/B_{\text{max}})_j \times B_{\text{max}} \times r_{1j} \times (1-r_{2j}-r_{3j}) && \text{: 難分解貯留} \\ &+ B_{\text{max}} \times r_{4j} && \text{: RDOC貯留} \end{aligned}}{\begin{aligned} &B_{\text{max}} \times \left[(P/B_{\text{max}})_j \times \{r_{1j} + (r_{2j} + r_{3j})(1-r_{1j})\} + r_{4j} \right] \\ &\text{最大現存量 (乾燥重量)} \quad \text{CO}_2\text{隔離量} \times \text{残存率の総和のうち、現存量以外の項} \end{aligned}} \times C_{\text{cont}j} \times (44/12) \times E_j \\ &= \text{吸収係数} = \text{吸収ポテンシャル} \times B_{\text{max}} \times E_j \end{aligned}$$

「海草・海藻藻場のCO2貯留量算定に向けたガイドブック」(国立研究開発法人 水産研究・教育機構)より

背景:ブルーカーボン吸収源としての沿岸藻場

現状と課題

海洋域へのブルーカーボン(BC)隔離量に関する現状の見積

BC生態系からの移出形態		大型藻類	海草藻場	単位
ハビタット内堆積物への貯留		6	80	Tg C/yr
溶存有機炭素としての移出				
混合層以深への移送	117		11	
粒状有機炭素としての移出				
陸棚域堆積物への貯留	14		13	
深層への沈降隔離	35			
出典		Krause-Jensen & Duarte (2016) Duarte & Krause-Jensen (2017)		

浅海域におけるブルーカーボン隔離量が多い海草藻場(アマモなど)に対して、沖合・深海での貯留量が多いとされる大型藻類(コンブなど)については不明な部分が多い。

【温暖化緩和施策に向けた海洋におけるCO₂吸収・貯留プロセスの理解が急務】

沖合・深海貯留プロセスが未解明で定量化ができていないことから、管理施策につながる情報創生ができていない

→藻場の生産・流出から輸送・貯留に至るプロセスを表現できるモデルを構築して炭素貯留量の現況を定量的に評価し、さらに将来予測情報を創出する必要がある。

CREST 海洋とCO2の関係性解明から拓く海のポテンシャル: 「海洋貯留による藻場吸収源デジタルツインの構築」

CREST

日本沿岸における海草・海藻藻場を対象として、藻場の生産及び流出観測、船舶からの採水・採泥調査や分解実験を通じた実測と海洋モデルシミュレーションを統合化して**藻場生産物の流出、深海への輸送、貯留までのプロセスを定量的に推定する「藻場吸収源デジタルツイン」を開発**し、日本国内における藻場から外洋の貯留庫への炭素移行量の定量的把握や気候変動に伴う将来予測情報を創出することにより、環境施策の推進に資するイノベーションを創発する。

- ・藻場生産物の流出・輸送・貯留プロセスの解明
- ・環境施策に資する藻場からのブルーカーボン貯留量の現況把握・将来予測情報の創出



仲岡グループ（北海道大学）
沿岸域のブルーカーボン貯留・変動プロセスの解明
実習船「みさご丸」「うみあいさ」 厚岸実験場でのchl a観測
海草・海藻藻場の物理・生物・水中カメラ観測

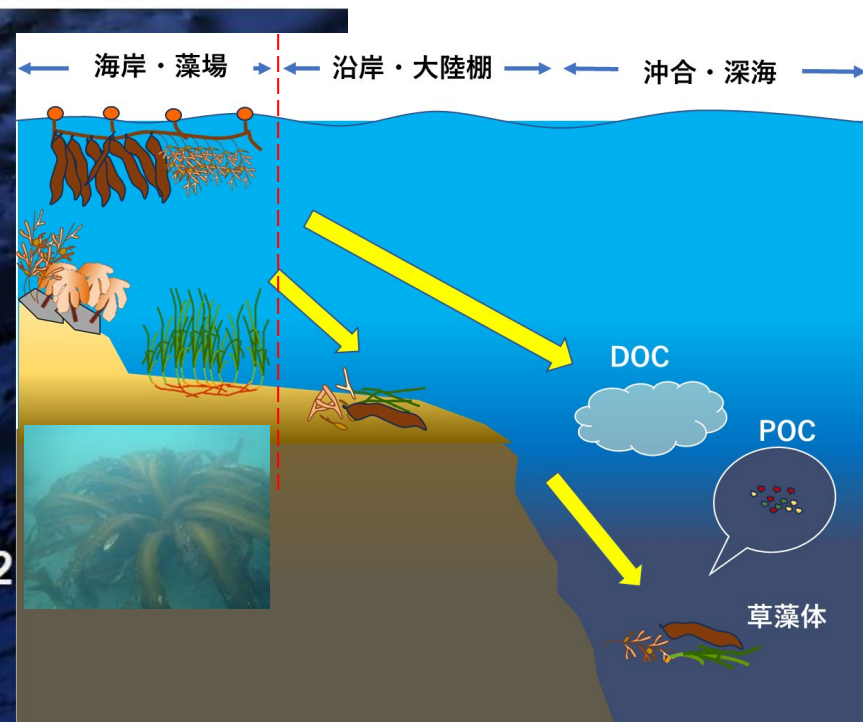
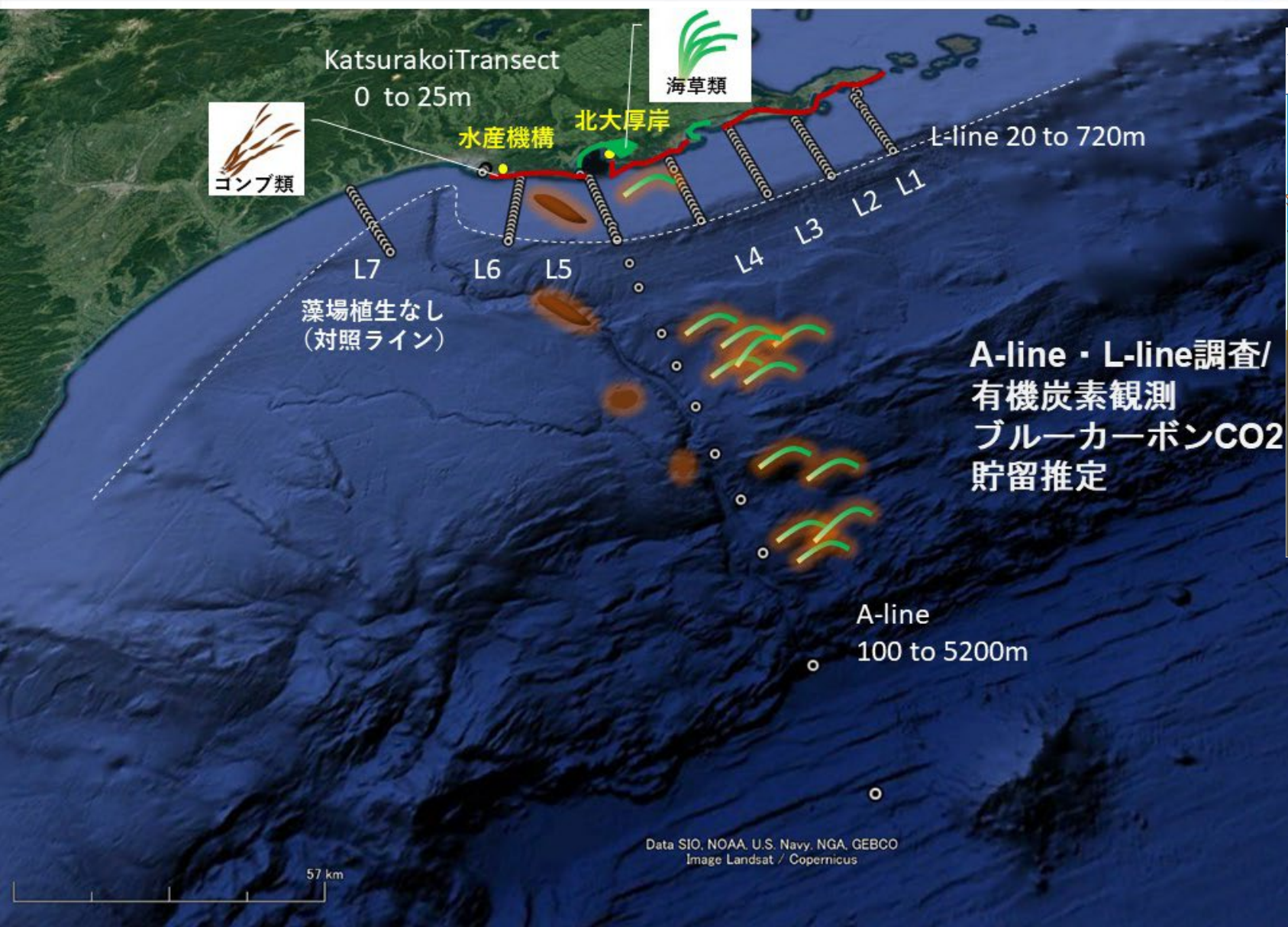
飯山グループ（滋賀大学）
AI解析による観測の高度化とデジタルツインへの統合
藻場映像観測のAI解析
粒子沈降速度推定
衛星データAI解析AI物体検出・追跡
ヒューマンインザループ機能開発

五十嵐グループ（JAMSTEC）
デジタルツイン構築
地球シミュレータ付加価値情報創生システム
高解像度海洋再解析データ
将来予測ダウンスケーリングデータ
藻場生産モデル
日本全国の藻場から流出・輸送実験
海草・海藻の生産・流出・輸送・分解・貯留モデル構築

堀グループ（水産研究・教育機構）
沿岸域からの有機炭素流出・輸送プロセスの解明
漁業調査船北光丸
A-line・L-line調査/有機炭素観測
ブルーカーボンCO2貯留推定

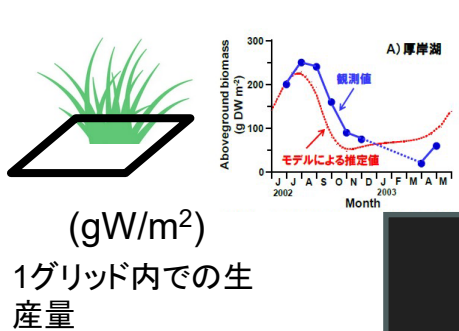
宮島グループ（東京大学）
先端的分析技術・実験技術の開発と応用
海草・海藻分解実験
同位体比質量分析計
採泥採水資料の化学分析・海藻分解実験

研究対象地域: 北海道東部海域



デジタルツインの全体像

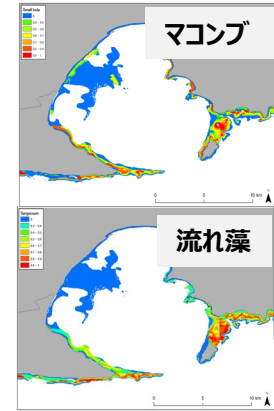
藻場生産モデル



【入力値】SDM入力値
【出力値】グリッドごとの藻場密度

生産モデルの出力値を掛け合わせることでグリッドごとの生産量を推定する

$$(gW/m^2) * m^2 * 密度 = gW$$



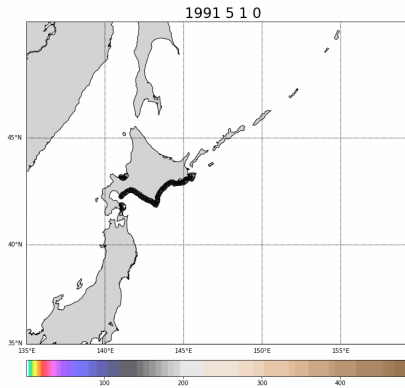
各グリッドで生産された海草・海藻の流出割合・タイミングを推定し、輸送モデルに渡す

$$gW * 流出率 = 流出量$$

藻場流出モデル

藻場輸送モデル

3次元粒子追跡モデルによりアマモ・コンブの輸送を表現する



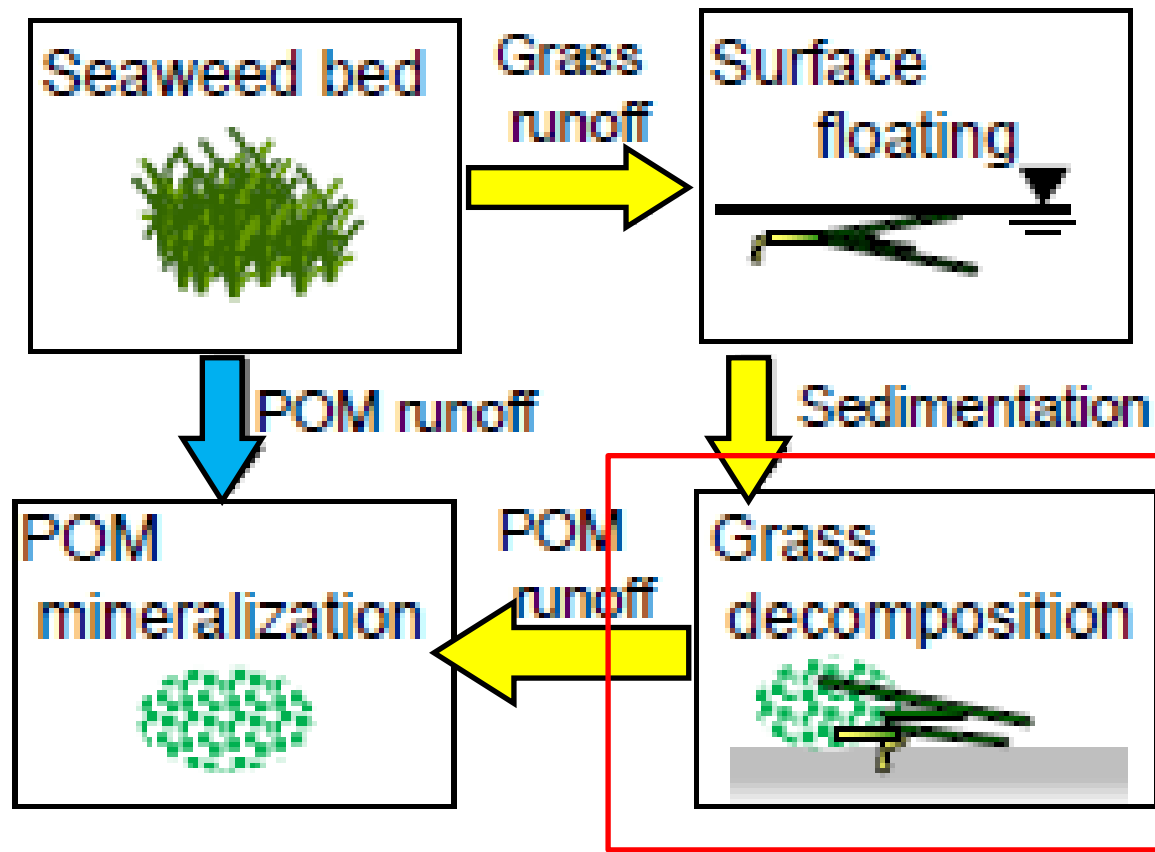
細粒化プロセス・分解プロセスを導入して、草体・POC・DIC別の3次元分布情報を創出
←分解実験を実施しその結果をモデルのパラメータとして使用

草体・POC・DICそれぞれのgW

貯留モデル

輸送モデル結果から炭素貯留量を推定するモデルを構築

$$gW \rightarrow gCW$$

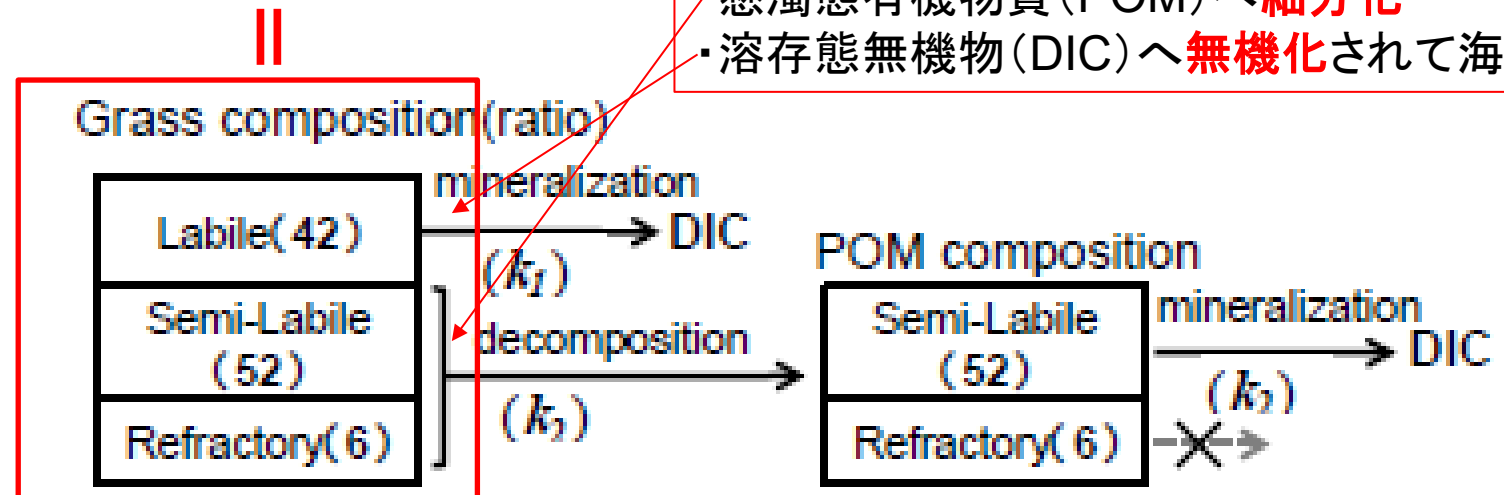


杉松他(2015) 瀬戸内海アマモ輸送モデル

- ・アマモは一定時間表層を漂流したのち沈降を開始。
- ・海底に着底後懸濁態有機物へ分解する
 - ← 浮遊期間・浮遊後の沈降速度は水槽実験
漂流期間は25.7日、沈降速度は21.1mm/s

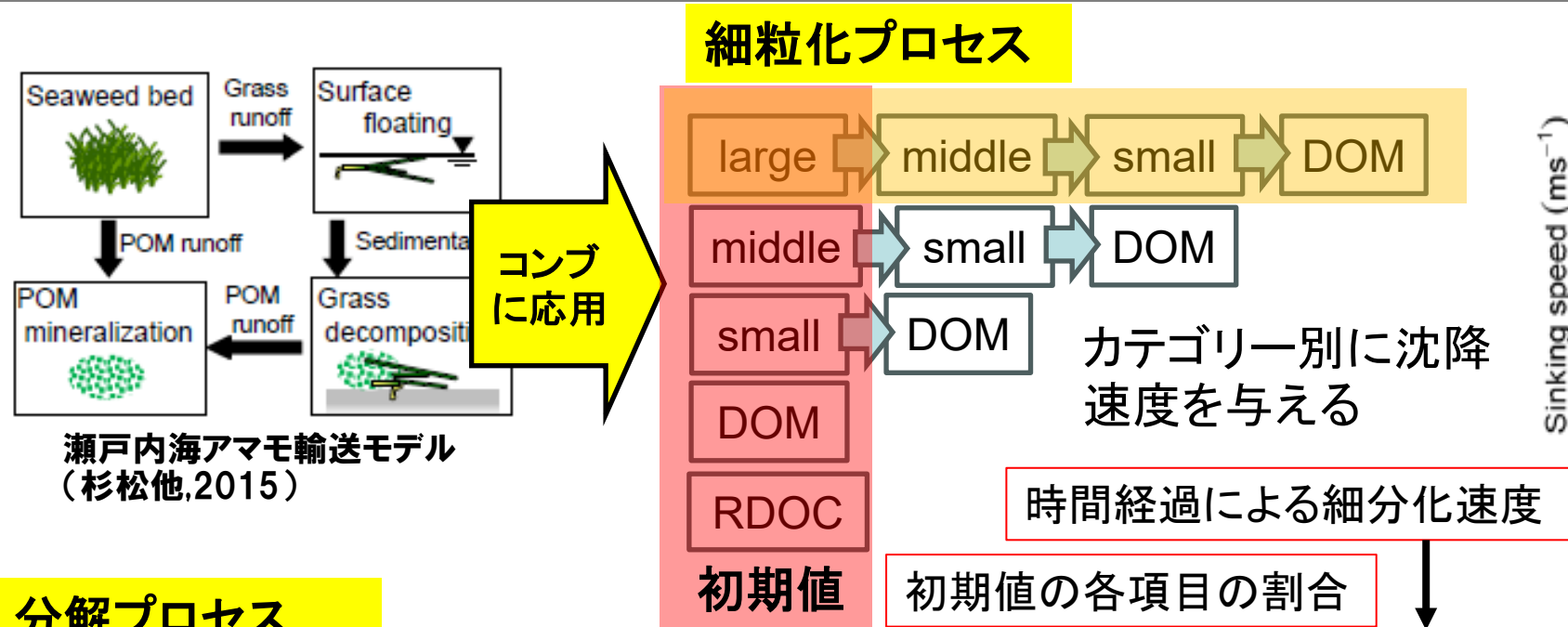
海底に着底したアマモ草体は

- ・懸濁態有機物質(POM)へ**細分化**
- ・溶存態無機物(DIC)へ**無機化**されて海中へ放出



コンブ輸送モデルの開発

- ・コンブはnegatively buoyant
- ・形態によって沈降速度が異なる
- ・細粒化も分解も速い！

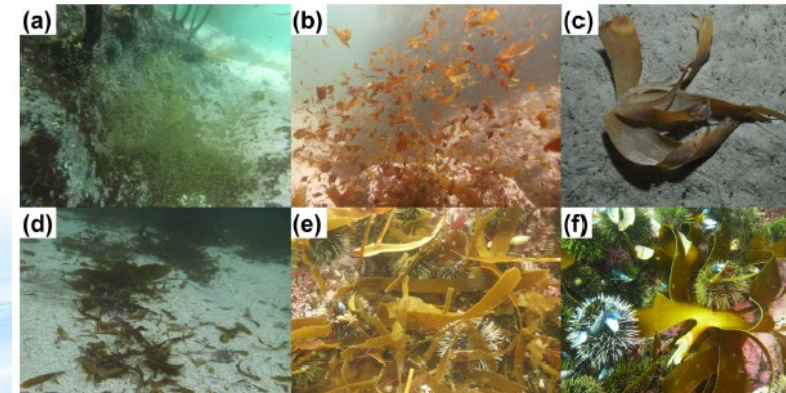
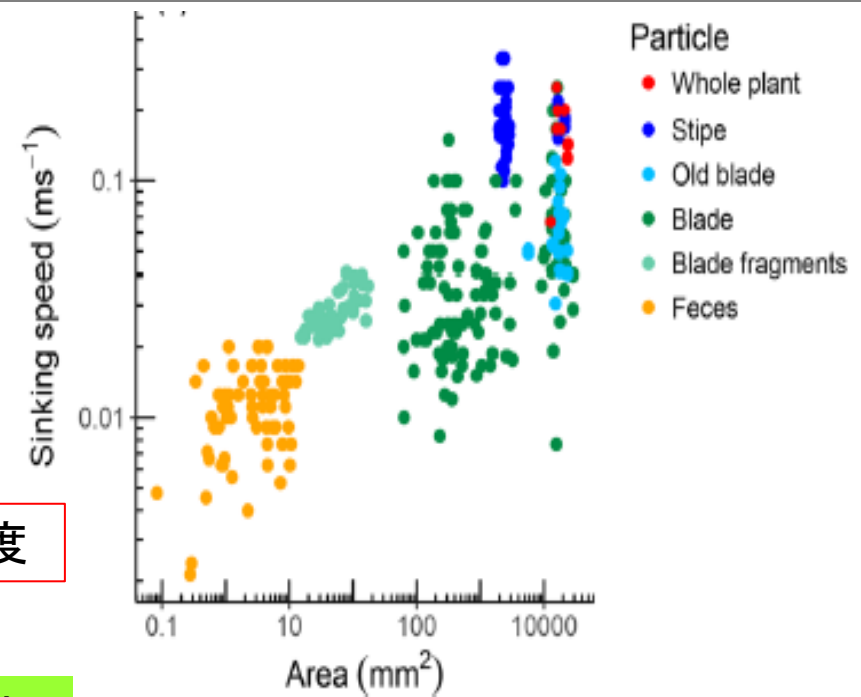
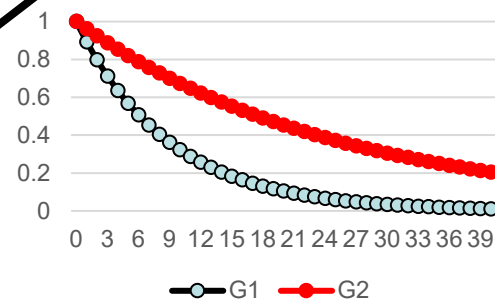


分解プロセス

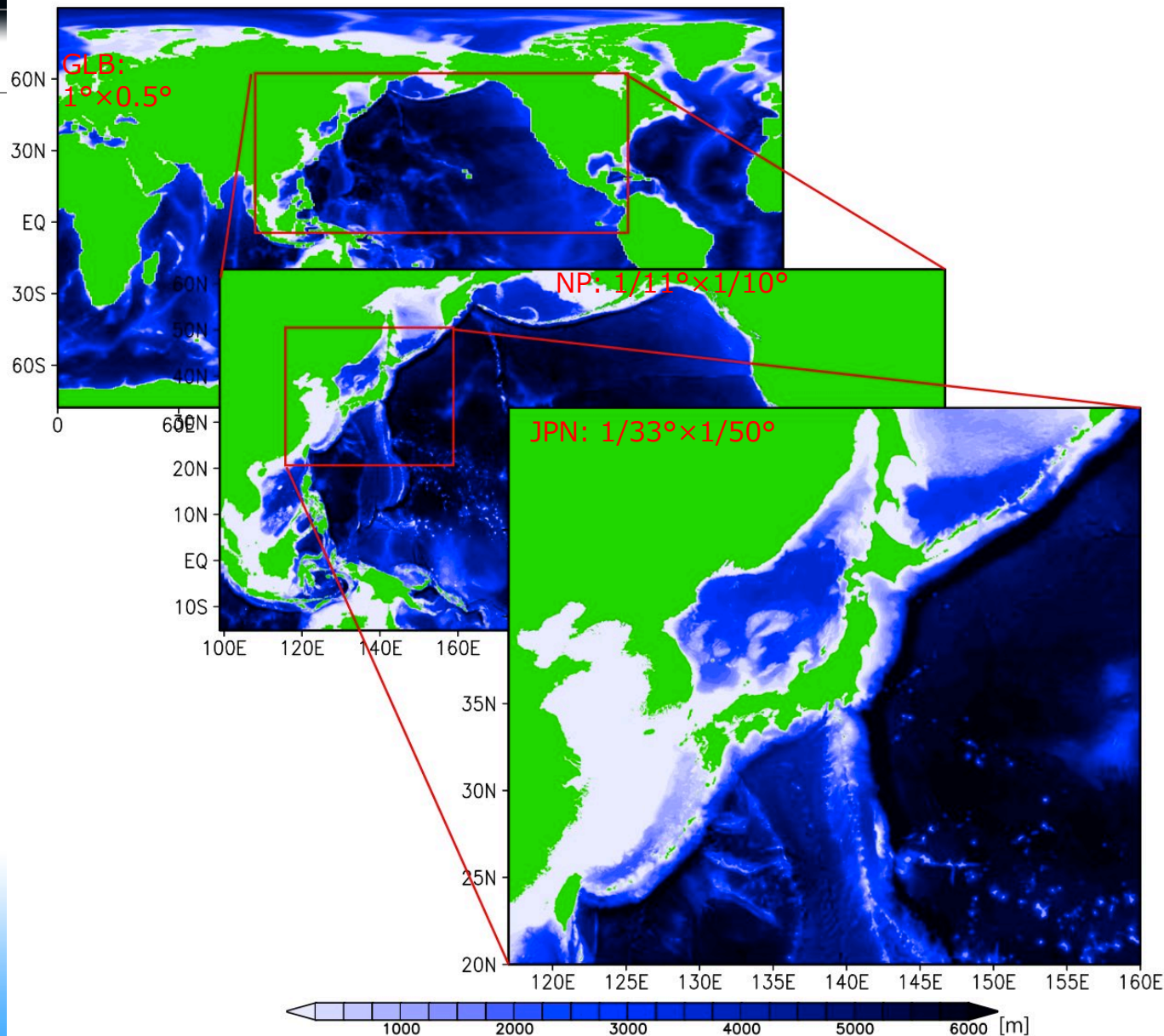
Gモデル(Westrich and Berner,1984)
有機物含量(炭素量)の時間変化を表現する。

$$G(t) = G_1[\exp(-k_1t)] + G_2[\exp(-k_2t)] + G_{NR}$$

分解速度係数(k_1, k_2)



輸送モデルを駆動する海洋モデル



	JPN (日本近海)
目的	2km将来予測
基盤海洋モデルコード	MRI.COMv4.6 (Tsuji et al. 2017)
領域	117E-160E, 20N-52N
水平解像度	1/33 x 1/50
鉛直層	60層 (表層2m～最下層700m)
各種過程	潮汐、海水、河川流入
参考論文	Sakamoto et al. (2019)

気象研究所で開発された海洋モデル

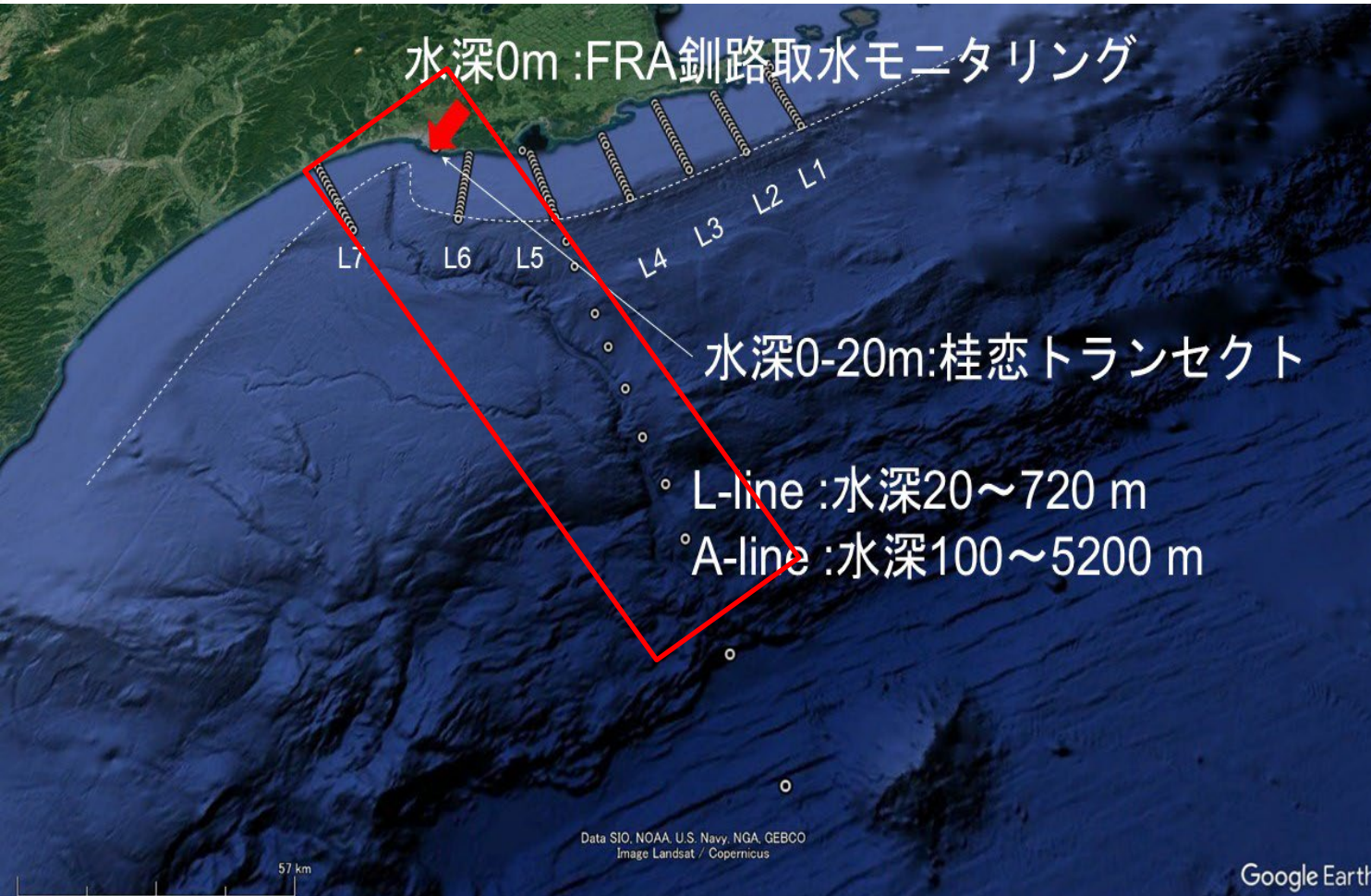
公開版データセット (FORP version4)

Nishikawa et al.(2023)

Forcing	Historical	RCP2.6	RCP8.5
MIROC5	1991-2005	2086-2100	2041-2055, 2086-2100
MRI-CGCM3	1991-2005	2086-2100	2041-2055, 2086-2100
JRA55-do	1991-2005, 2006-2018		

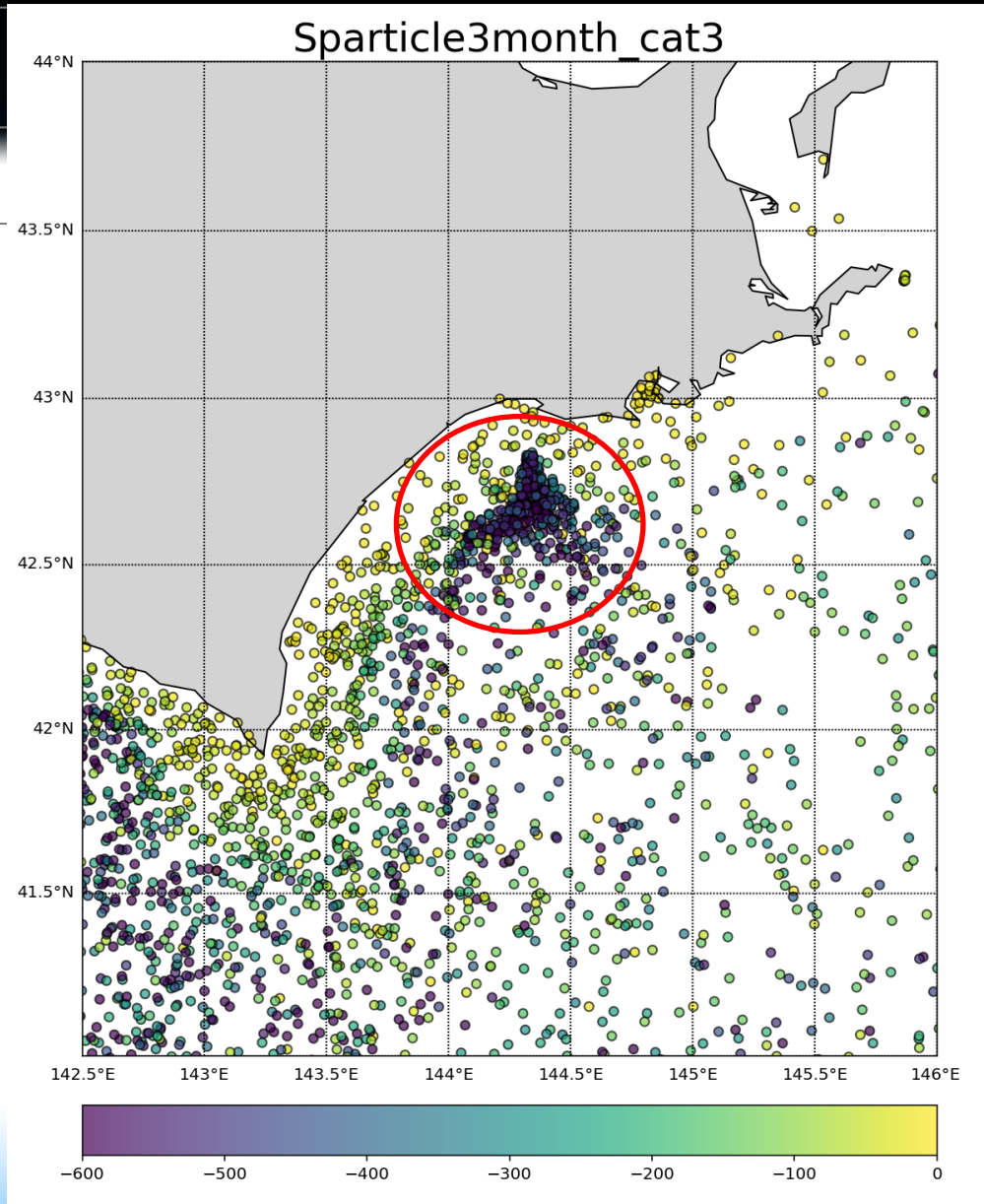
実験対象領域と実験設定

対象領域：北海道東部海域

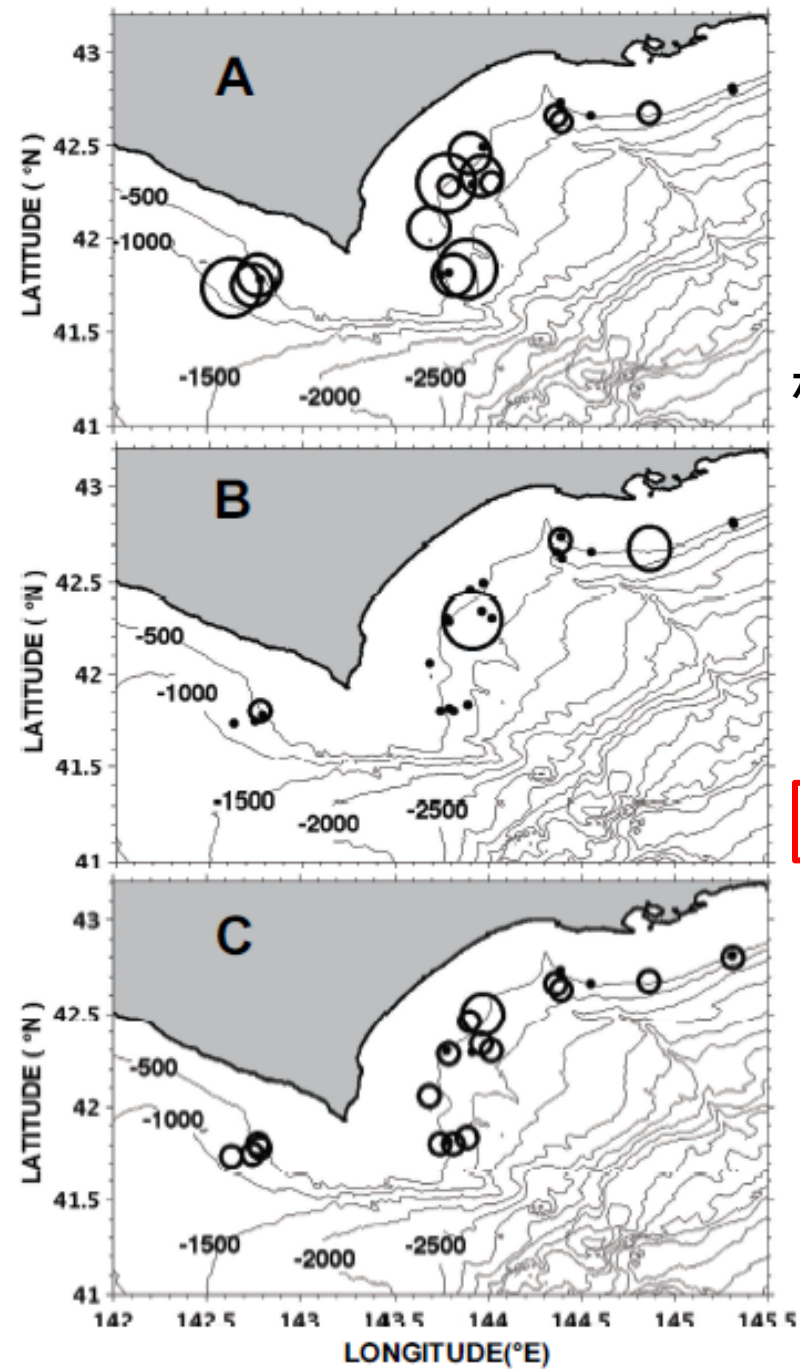


- 非静力学海洋モデルKinaco (Matsumura and Hasumi, 2008) の粒子追跡パッケージを使用
- FORP ver.4 historical runの1991年daily dataをforcing dataとして使用した。
- 1991年3-9月を対象とした実験を実施して粒子の移動を追跡した。

釧路沖の海底谷に注目



流出3か月後の粒子位置(拡大図)



海産大型植物の堆積密度分布

ホンダワラ類

コンブ類

海草

國分・小松(2015)

まとめ

- 日本国内における藻場から外洋の貯留庫への炭素移行量を定量的に把握するための藻場デジタルツインを開発している。
- 3次元粒子追跡モデルを日本周辺将来予測データFORPに適用してコンブの輸送を表現する。
- コンブの細粒化・分解の進行に伴い、海洋上層で早期に拡散するものと海底谷等に速やかにトラップされるものとに二分化することを示唆する結果を得た。
- 分解実験等により得られたパラメータや境界条件を整備して、実験数を増やし炭素移動の定量化を目指すとともに海草類へ適用するためのモデル改良を行う。



ありがとうございました。