



ブルーカーボン生態系における植物プランクトン によるCO₂吸収量の評価

Keisuke Nakayama

Kobe University

Background and aims

- 2050年にカーボンニュートラルを達成するための方策の一つとして、港湾などの沿岸浅海域において水生生物の作用により CO_2 を吸収するブルーカーボンが世界的に推進されている。

Nellemann (2009) により、海草や海藻などのブルーカーボン生態系による CO_2 の正味吸収効果の有効性が報告されたのが始まりであり、植物プランクトンによる吸収も含まれている。しかし、植物プランクトンによる CO_2 の吸収と貯留効果を評価することが困難であることから、これまではアマモ場等を中心として進められてきた。植物プランクトンは、閉鎖性内湾スケールで発生するため、そのバイオマスはアマモ場に匹敵するポテンシャルを有している。そこで本研究では、閉鎖性水域における植物プランクトンによる CO_2 の吸収量の推定手法を開発し、ブルーカーボン生態系における植物プランクトンの貢献度を評価することを目的とする。

pCO₂の推定について

CO₂濃度の推定には全炭酸濃度（DIC）、全アルカリ度（TA）、水温、塩分が必要とされ、これらの値を基に化学平衡状態を仮定してCO₂濃度を計算する手法が用いられている²³⁾。特にアマモ場や植物プランクトンが多量に発生する水域では、光合成と呼吸がDIC変動に与える影響が顕著であり、これを正確に捉えることが重要である。

DICの変動は日中の光合成による吸収と夜間の呼吸による放出に大きく影響される。

- ① 光量子束密度（PAR）の日変化を詳細に測定し、光合成と呼吸の寄与を分離して評価することが必要である。
- ② 濁度や藻類異常増殖による光減衰が光合成を抑制し、DICの変動に影響を与えるため、これらの要因もモデルに組み込む必要である。
- ③ 水温も光合成や呼吸の速度に直接影響を及ぼし、アマモの成長やCO₂吸収能力を左右している。
- ④ 地形は光環境や水理条件を変化させ、DIC分布に影響を与えるため、DICモデルの精度を高めるためには、正確な地形データや栄養塩動態の統合も必要である。

閉鎖性水域の地域特性を考慮したCO₂濃度の正確な推定のためには、これらを統合したDICモデルを構築し、その妥当性を観測データで検証する必要がある。

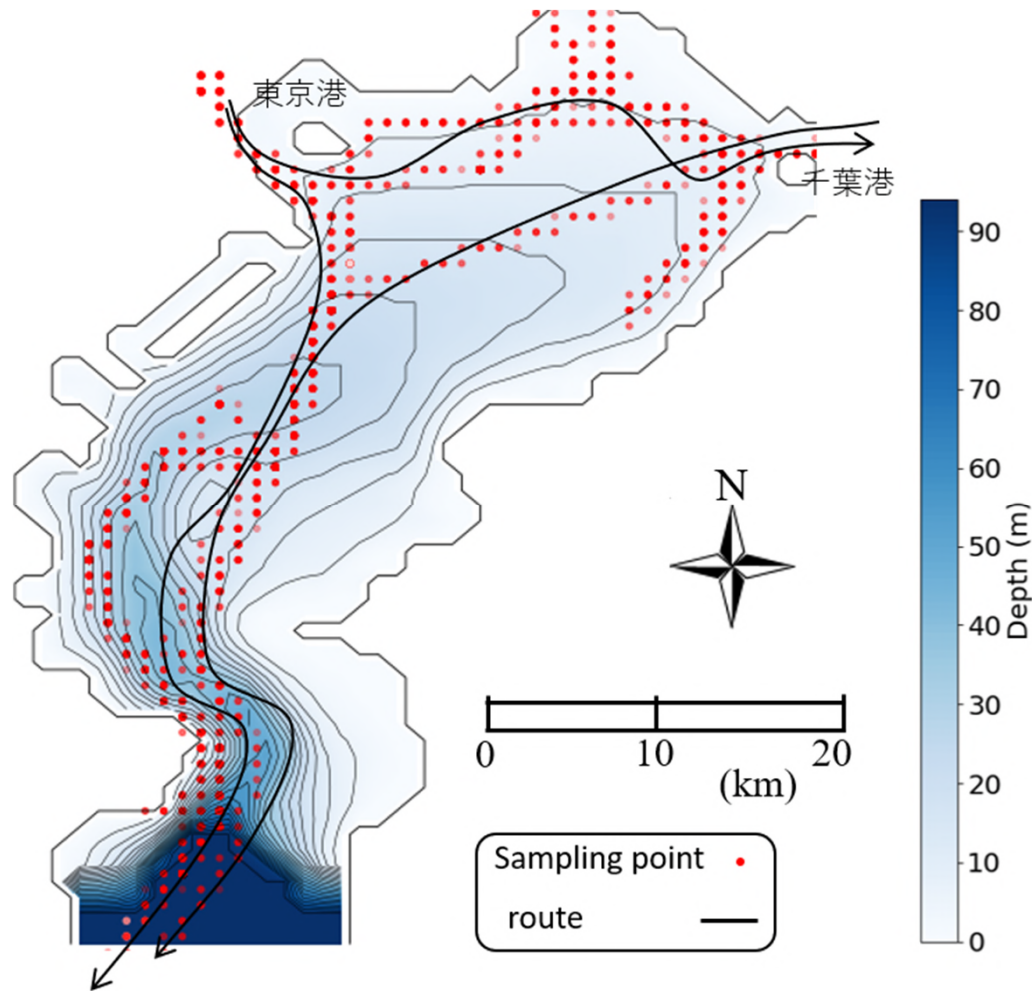
現地調査について

Kuboらによりフィールド観測が実施されており，その中から $p\text{CO}_2$ の計測値が多い2010年の東京湾の $p\text{CO}_2$ について再現計算を行う．

Kuboらは，2010年4月から12月までの期間において，1か月に1日間から3日間かけて水表面付近の， $p\text{CO}_2$ の観測を行った．観測地点は，湾口から湾奥にかけて東京湾全体が対象であった．

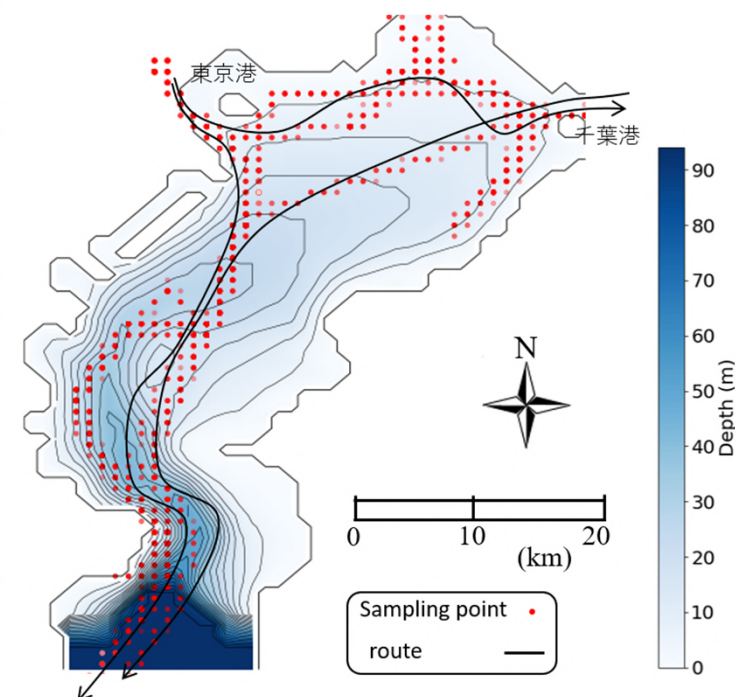
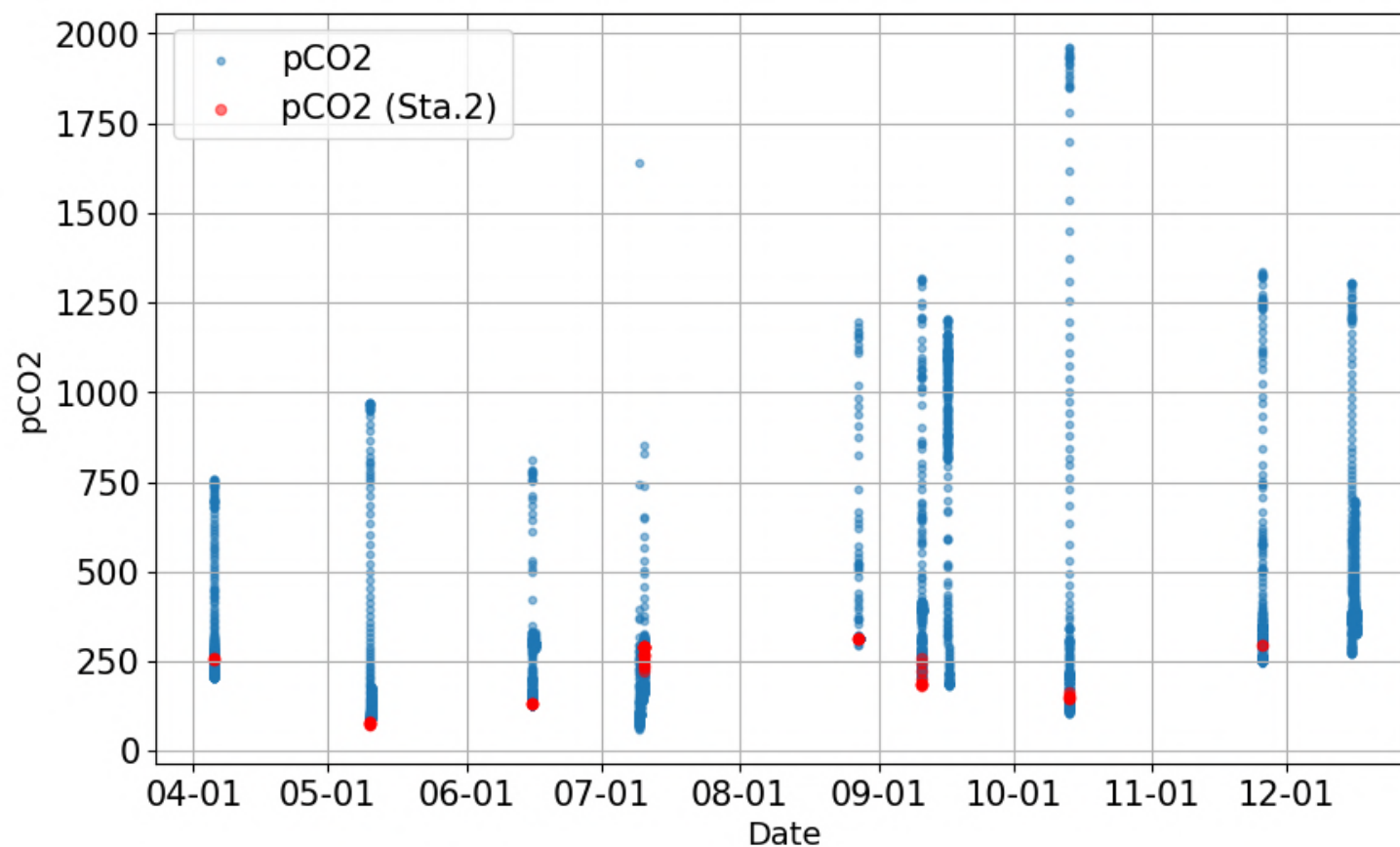
day	time	観測開始地点（緯度，経度）	観測終了地点（緯度，経度）	$p\text{CO}_2$ データ数
2010/4/5	9:00~15:22	35°37'33.6"N, 139°45'03.6"E	35°08'16.8"N, 139°37'01.2"E	322
2010/5/10	10:00~16:32	35°37'33.6"N, 139°45'07.2"E	35°07'28.7"N, 139°38'54.4"E	359
2010/6/15	10:00~15:27	35°37'30.0"N, 139°45'07.2"E	35°13'17.9"N, 139°43'50.3"E	327
2010/6/16	7:45~8:50	35°13'09.0"N, 139°44'22.1"E	35°11'20.8"N, 139°44'38.6"E	65
2010/7/9	11:00~15:37	35°38'04.0"N, 139°45'35.2"E	35°35'40.5"N, 140°06'21.7"E	239
2010/7/10	7:00~14:43	35°35'40.6"N, 140°06'21.6"E	35°13'21.1"N, 139°44'45.2"E	436
2010/8/27	9:30~14:46	35°37'30.7"N, 139°45'07.9"E	35°07'39.7"N, 139°40'58.8"E	251
2010/9/10	9:30~16:10	35°37'30.0"N, 139°45'07.2"E	35°13'26.4"N, 139°45'21.6"E	311
2010/9/16	7:00~11:53	35°35'50.4"N, 140°06'21.6"E	35°35'08.5"N, 139°54'53.8"E	287
2010/10/13	9:32~14:20	35°37'30.7"N, 139°45'07.9"E	35°12'46.8"N, 139°44'24.0"E	289
2010/11/25	9:30~14:54	35°18'46.8"N, 139°44'45.6"E	35°13'22.8"N, 139°43'08.4"E	325
2010/12/15	9:30~16:07	35°37'30.0"N, 139°45'07.2"E	35°35'59.0"N, 140°06'31.4"E	247
2010/12/16	7:09~13:38	35°35'58.1"N, 140°06'31.6"E	35°07'28.0"N, 139°39'34.7"E	619

東京湾の観測地点

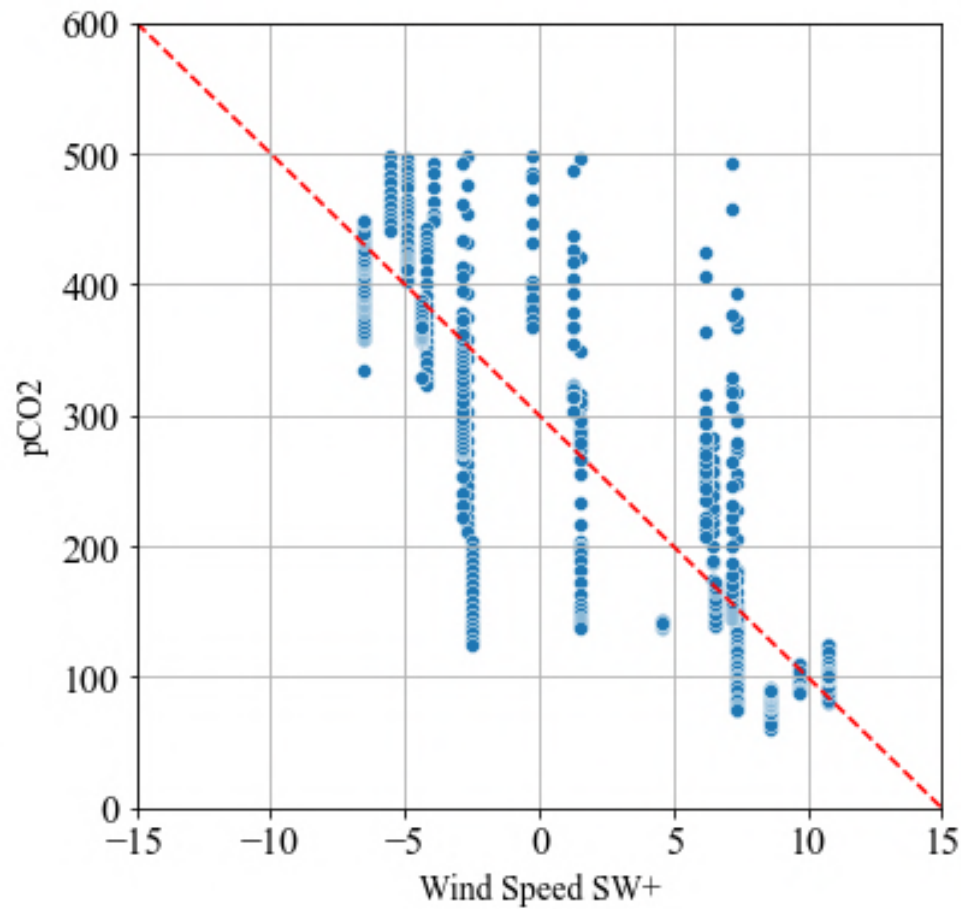


Kuboらは、2010年4月から12月までの期間において、1か月に1日間から3日間かけて水表面付近の、pCO₂の観測を行った。観測地点は、湾口から湾奥にかけて東京湾全体が対象であった。

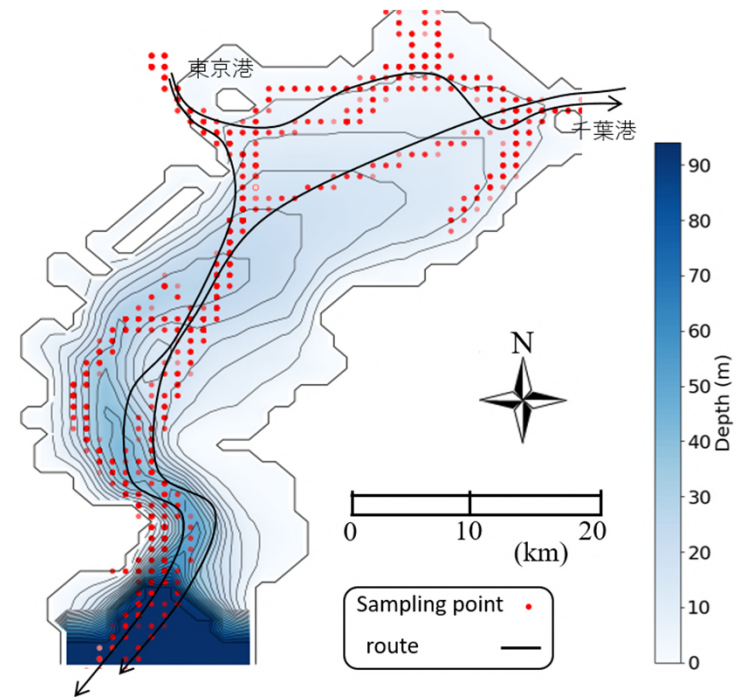
東京湾のpCO₂の観測値



観測結果の特徴



北東風による湾奥部の底層の貧酸素水塊が湧昇したことによるpCO₂の増加が原因だと考えられる。

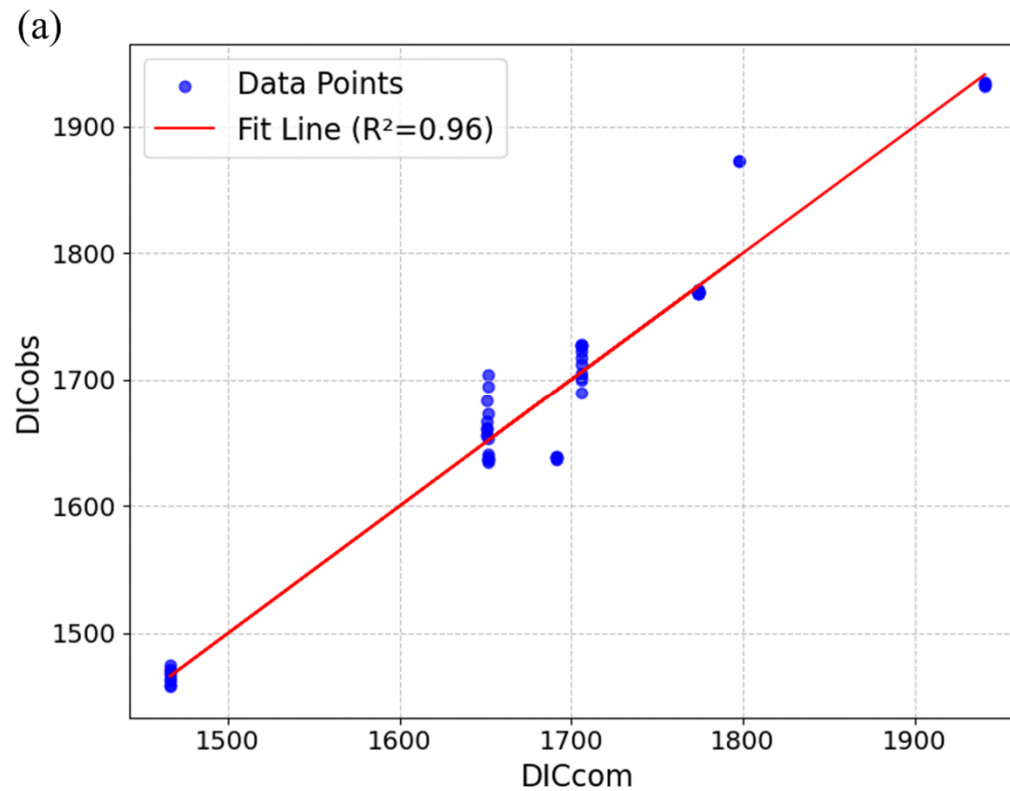


DICの推定

東京湾の $p\text{CO}_2$ を推定するためには，炭酸系の平衡方程式に基づき $p\text{H}$ ，全アルカリ度（TA）およびDICのうち2つのパラメータを与える必要がある．そのためには，DIC，TAを推定する必要がある．

$DIC \cdot (K_B^* + h) \cdot (K_1^* h^2 + 2K_1^* K_2^* h) = [TA(K_B^* + h)h - K_B^* B_T h - K_W^* (K_B^* + h) + (K_B^* + h)h^2] \cdot (h^2 + K_1^* h + K_1^* K_2^*)$	(22)
$\begin{aligned} \ln K_1^* \\ = 2.83655 - 2307.1266/T - 1.5529413 \ln T - (0.20768410 + 4.0484/T)\sqrt{S} + 0.0846834S - 0.00654208S^{2/3} \\ + \ln(1 - 0.001005S) \end{aligned}$	(23)
$\begin{aligned} \ln K_2^* \\ = -9.226508 - 3351.6106/T - 0.2005743 \ln T - (0.106901773 + 23.9722/T)\sqrt{S} + 0.1130822S - 0.008469S^{3/2} \\ + \ln(1 - 0.001005S) \end{aligned}$	(24)
$\begin{aligned} \ln K_B^* = & (-8966.90 - 2890.53S^{1/2} - 77.942S + 1.728S^{3/2} - 0.0996S^2)/T \\ & + 148.0248 + 137.1942S^{1/2} + 1.62142S - (24.4344 + 25.085S^{1/2} \\ & + 0.2174S)\ln T + 0.053105S^{1/2} \end{aligned}$	(25)
$B_T = 4.16 \cdot 10^{-4} \frac{S}{35}$	(26)
$\ln K_W^* = 148.96502 - 13847.26/T - 23.6521 \ln T + [118.67/T - 5.977 + 1.0495 \ln T]S^1 - 0.01615S$	(27)
$s = DIC / \left(1 + \frac{K_1^*}{h} + \frac{K_1^* K_2^*}{h^2} \right)$	(28)

DICの推定式

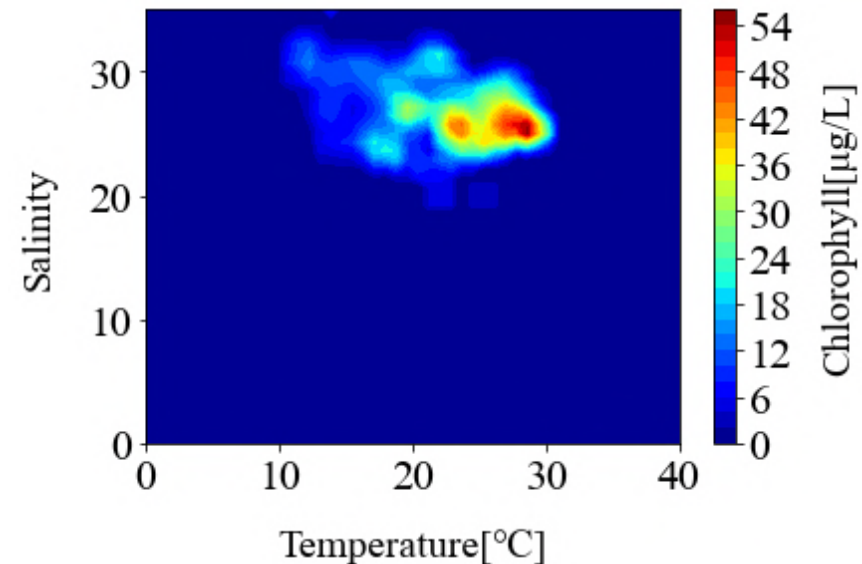
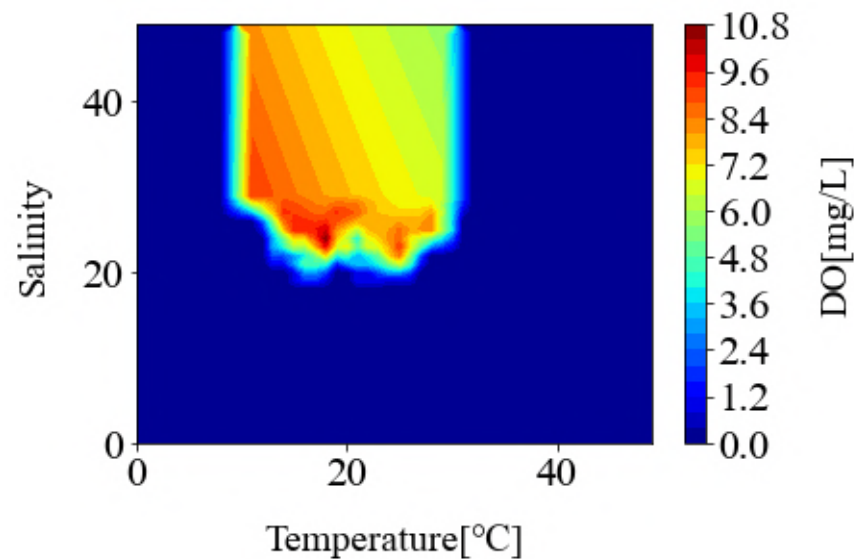


回帰式	R^2
$\begin{aligned} \text{DIC} &= 1795.6814932073691 + (-19.705160545399206T) + (26.649786770202034S) \\ &+ (-45.18739392149505DO) + (0.36438428031284825\text{Chl. a}) \end{aligned}$	0.96

数値計算結果の利用方法について

東京湾の $p\text{CO}_2$ を推定するためには、炭酸系の平衡方程式に基づきTA, DICが必要である. DICは、前のスライドに示される通り、水温、塩分、Chl.a, DOから推定可能である.

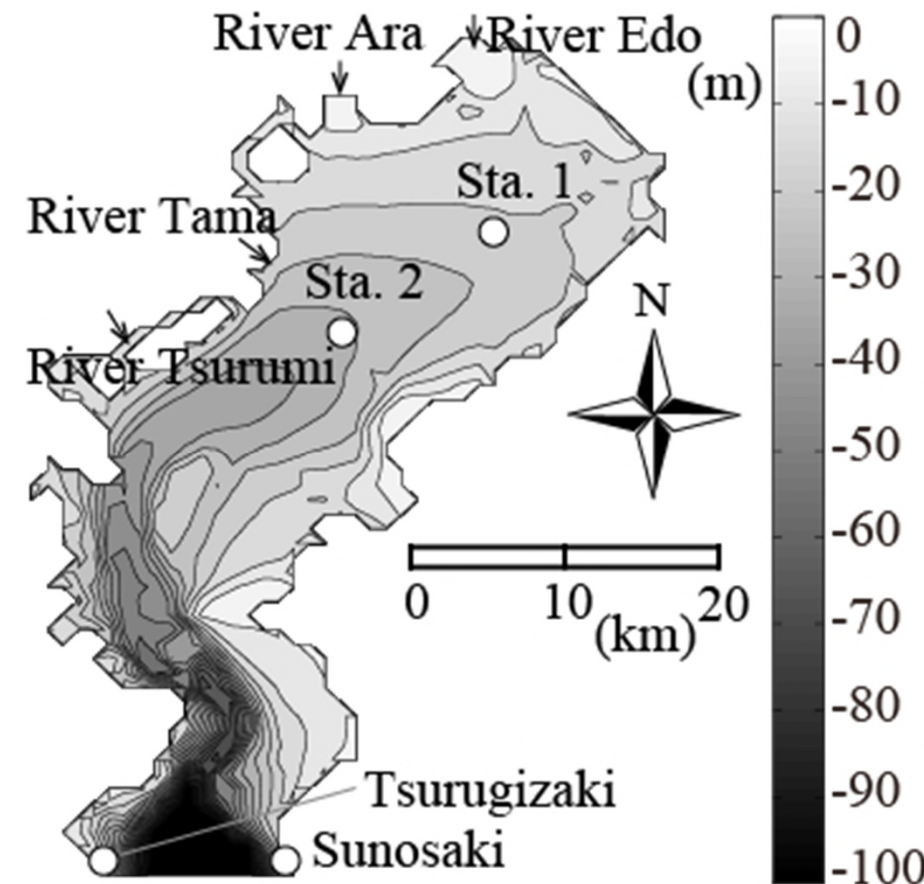
3次元シミュレーションにおいて、水温、塩分を推定するのは容易である. 一方で、Chl.aとDOについては、生態系モデルにより再現は可能であるが、その再現精度は非常に低く、オーダーで一致する可能性は低い. そのため、Chl.aとDOを推定するための手法を開発しなくてはならない.



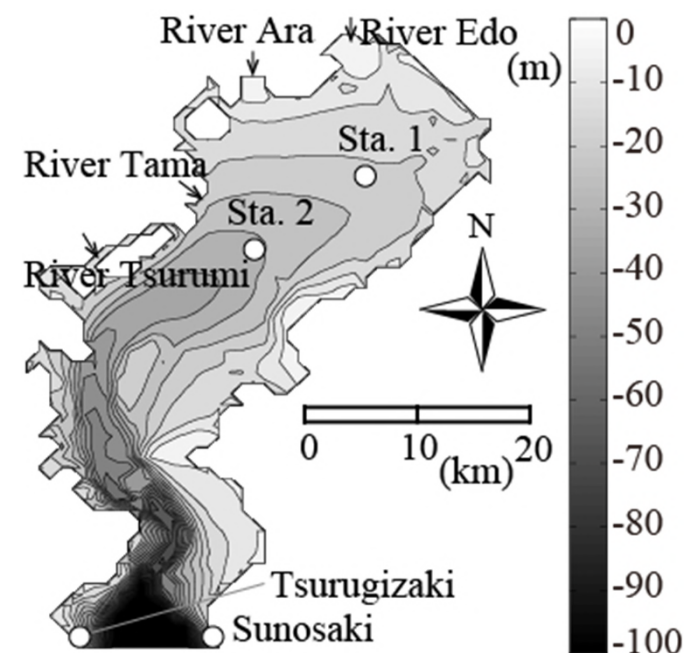
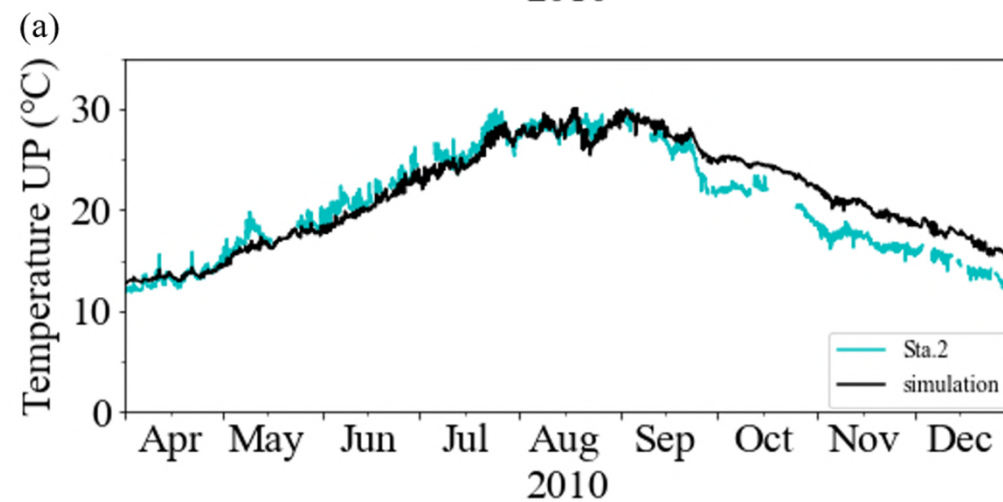
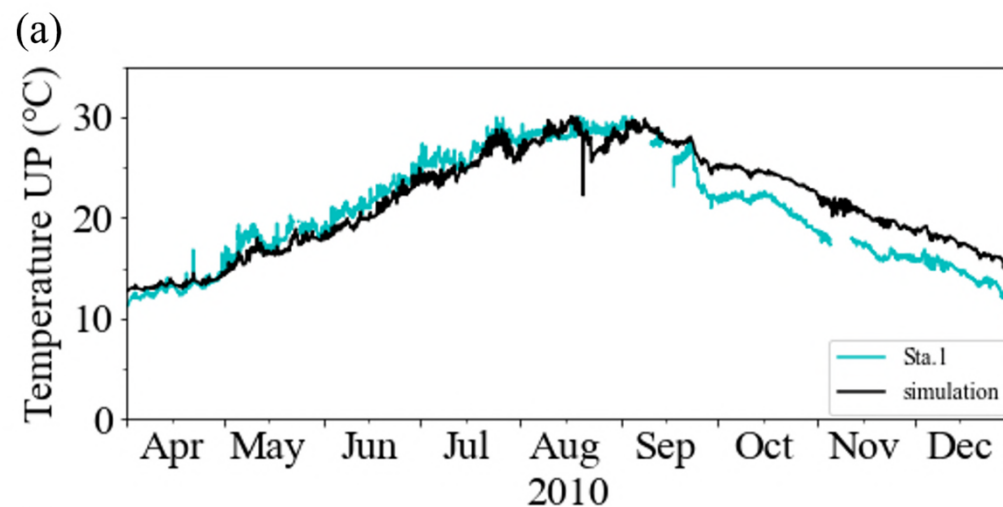
3次元シミュレーション

3次元数値計算モデルは3次元流動モデルFantomを用いた.

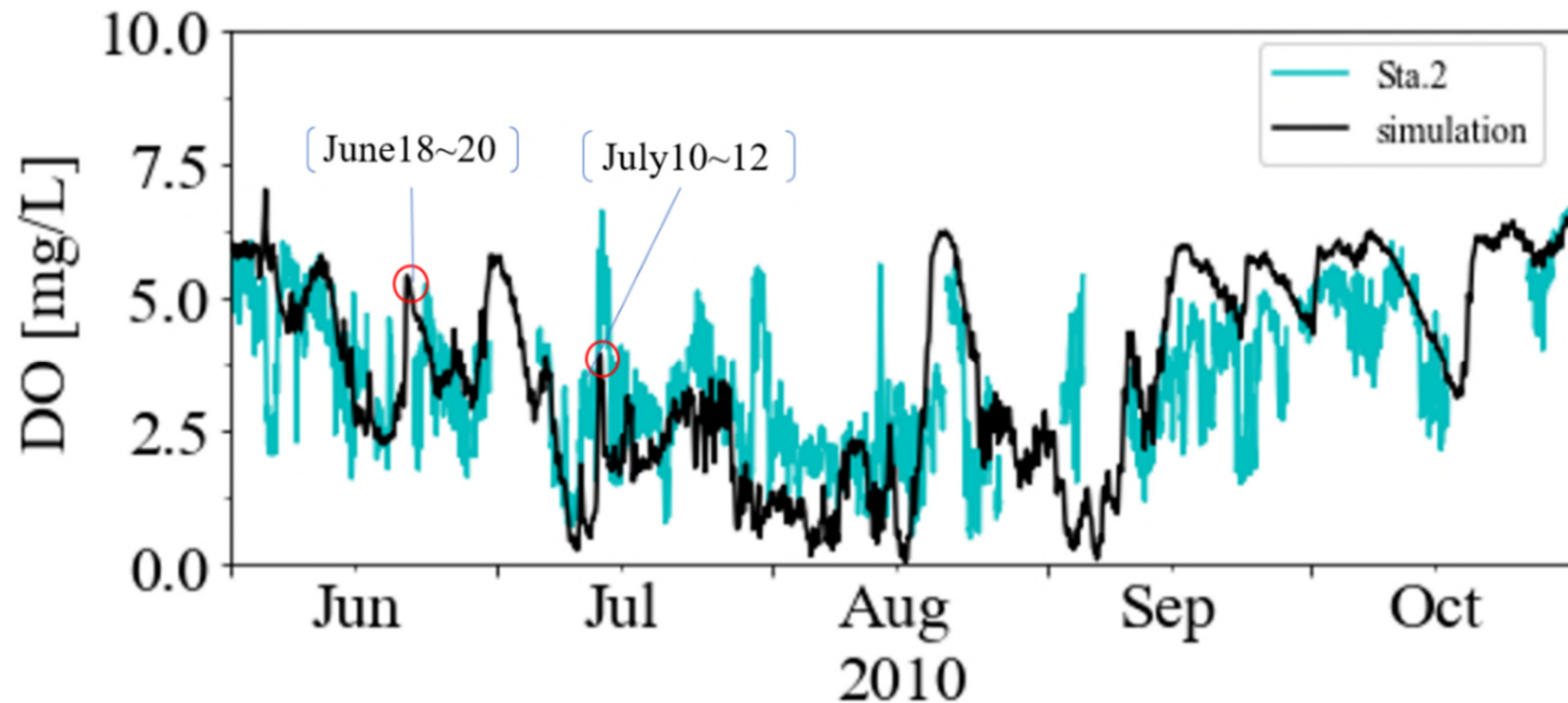
- ① 計算条件の設定と実行は, Luaにより制御可能である.
- ② 基礎方程式は, 非圧縮とブジネスク近似を施した3次元 Navier-Stokes式である.
- ③ Fantomはオブジェクト指向型プログラミングを利用して作成されており, 鉛直カラムを接続することで3次元空間を再現できる.
- ④ 運動量, 水温, 塩分の移流計算にはUltimate Quickest法を用い, 粘性 (拡散) 項は2次精度の中心差分で離散化した.
- ⑤ 水平拡散に対しては陽的に計算し, 鉛直拡散は陰的に計算することとした.
- ⑥ 鉛直方向の混合が水の質量・エネルギー輸送にどのような影響を及ぼすか評価するために, ジェネリック・レングス・スケール (GLS) 方程式モデルを採用した.



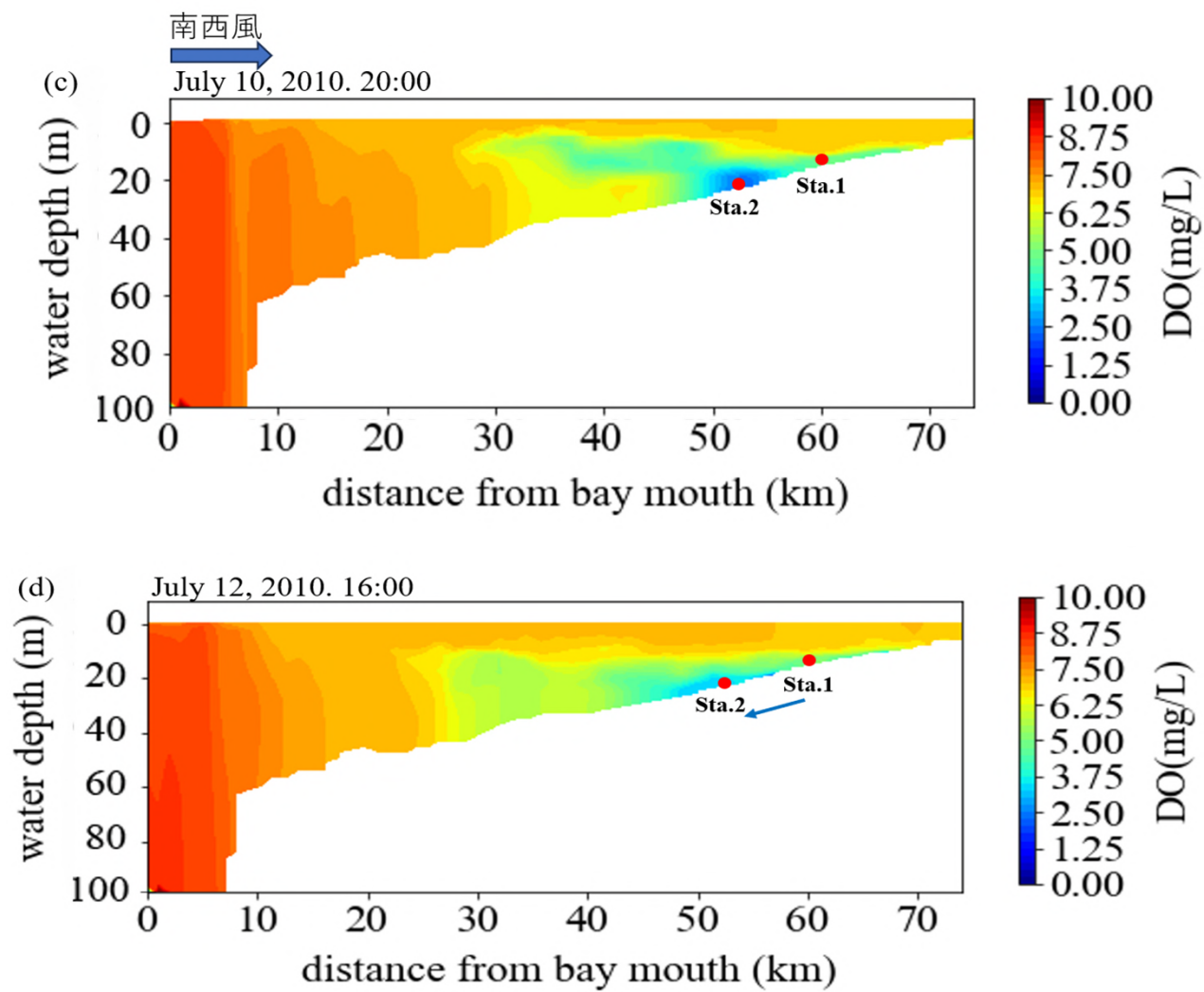
モデルの再現性について：水温



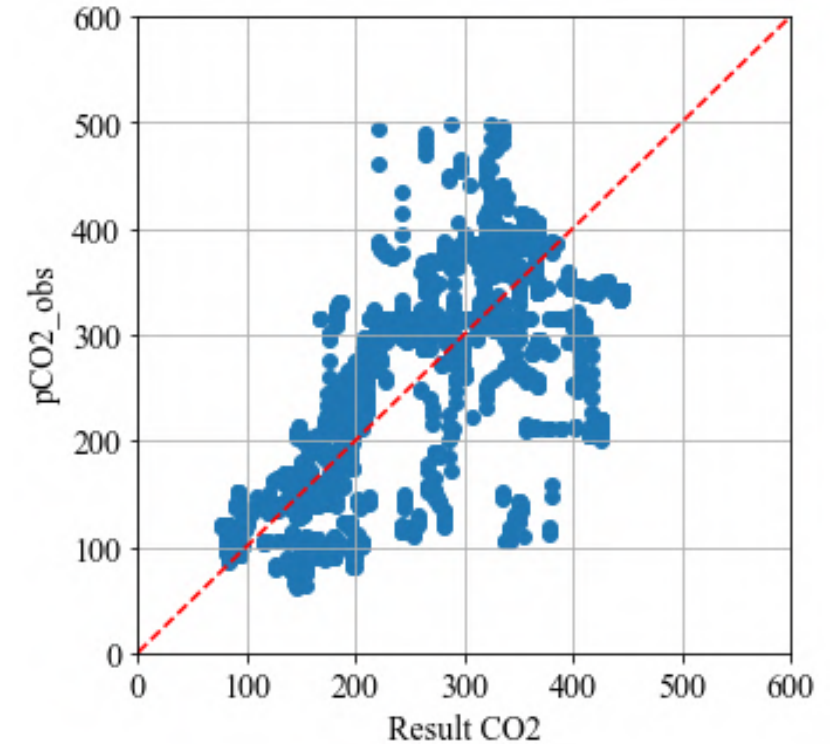
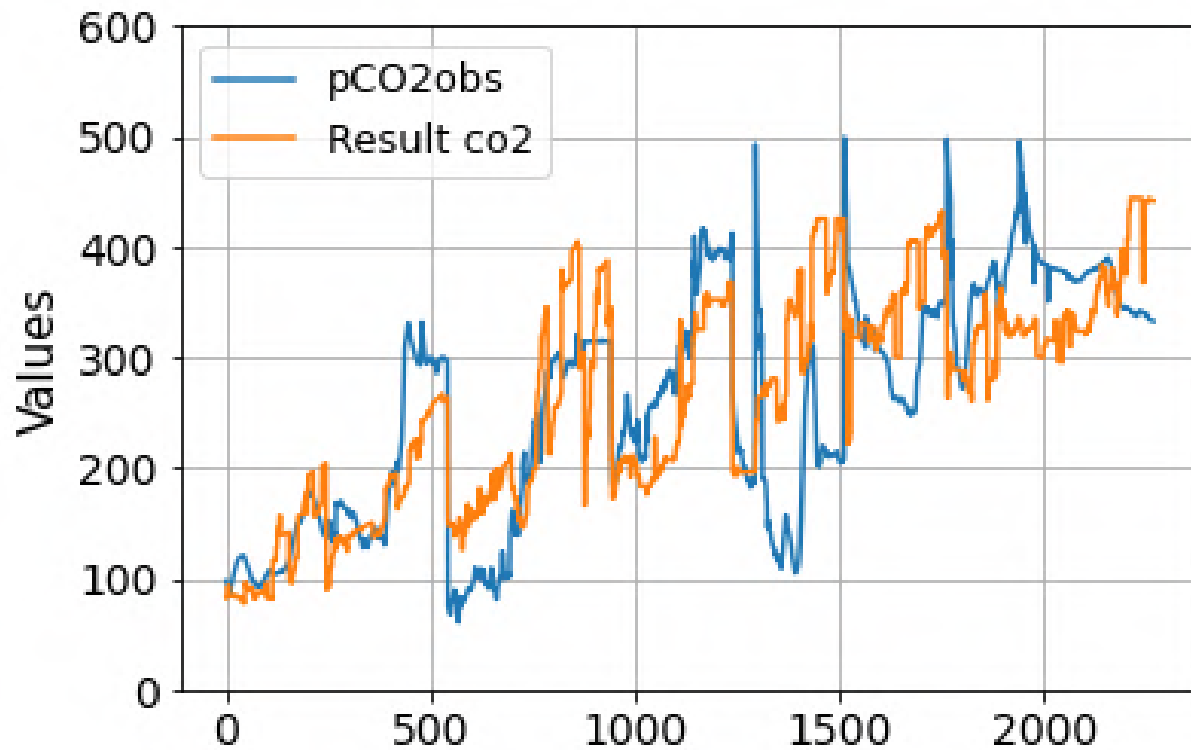
モデルの再現性について：DO



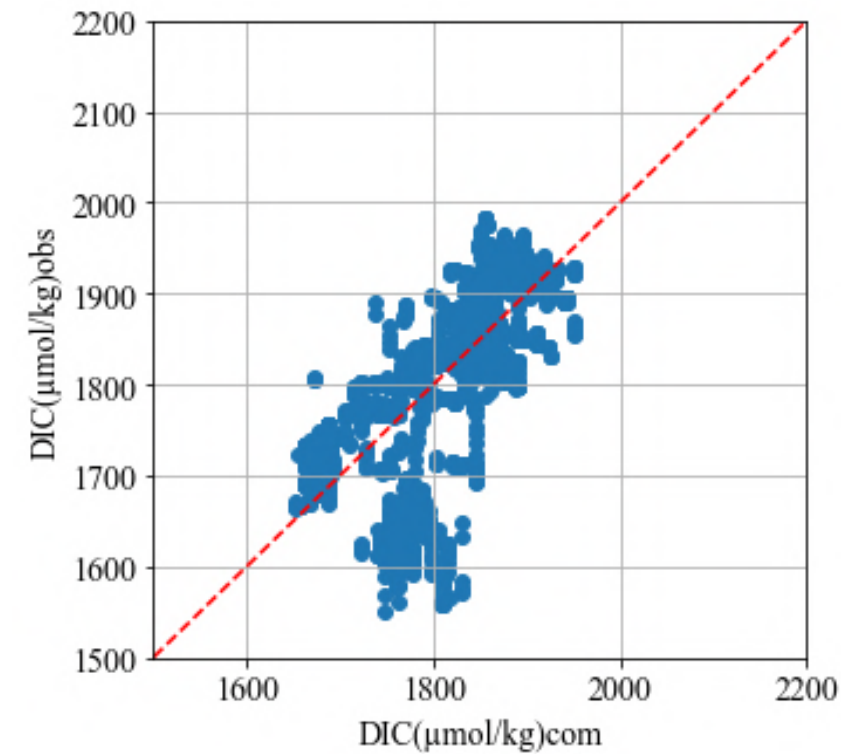
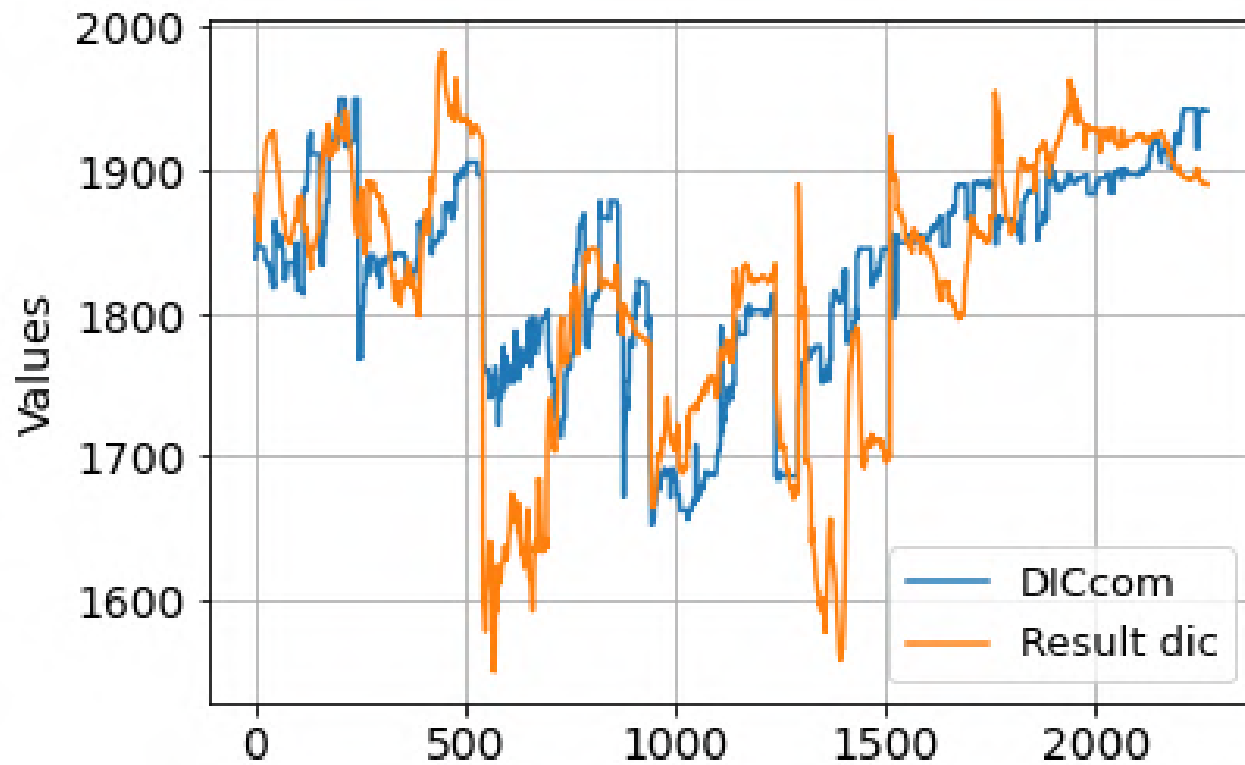
突発的なDOの回復



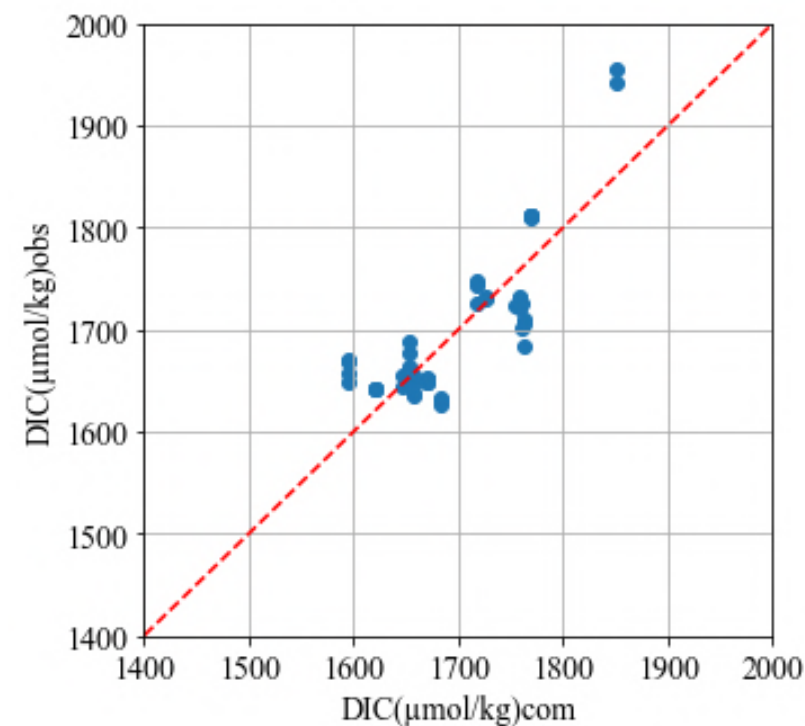
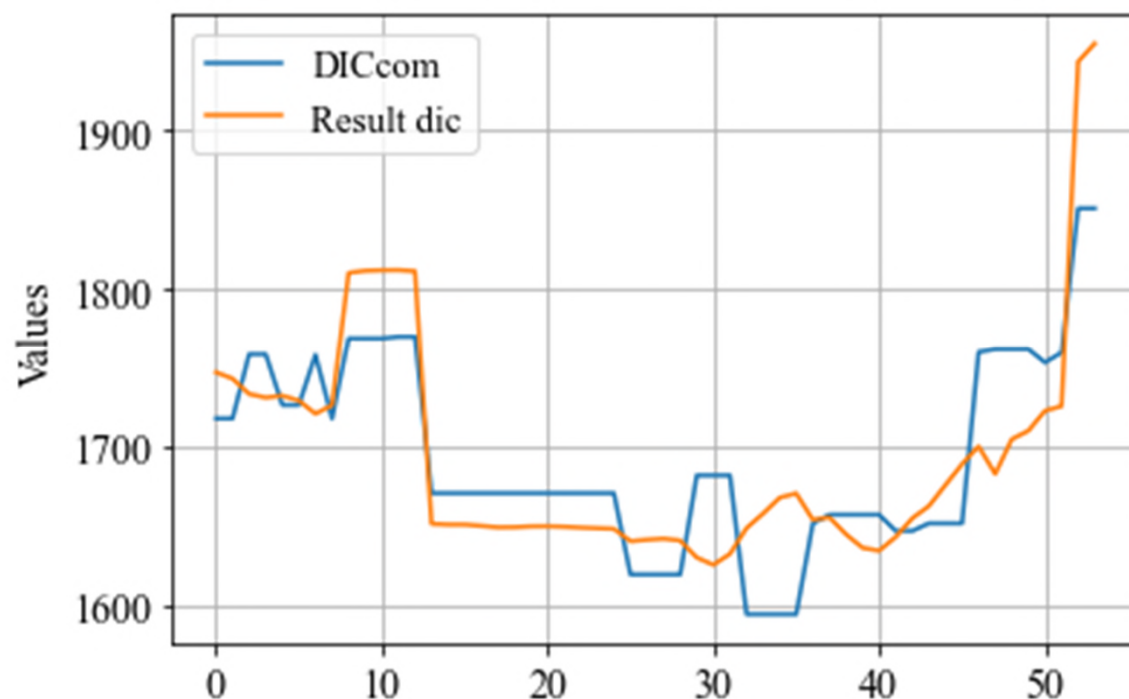
pCO₂の再現結果の検証



DICの再現結果の検証

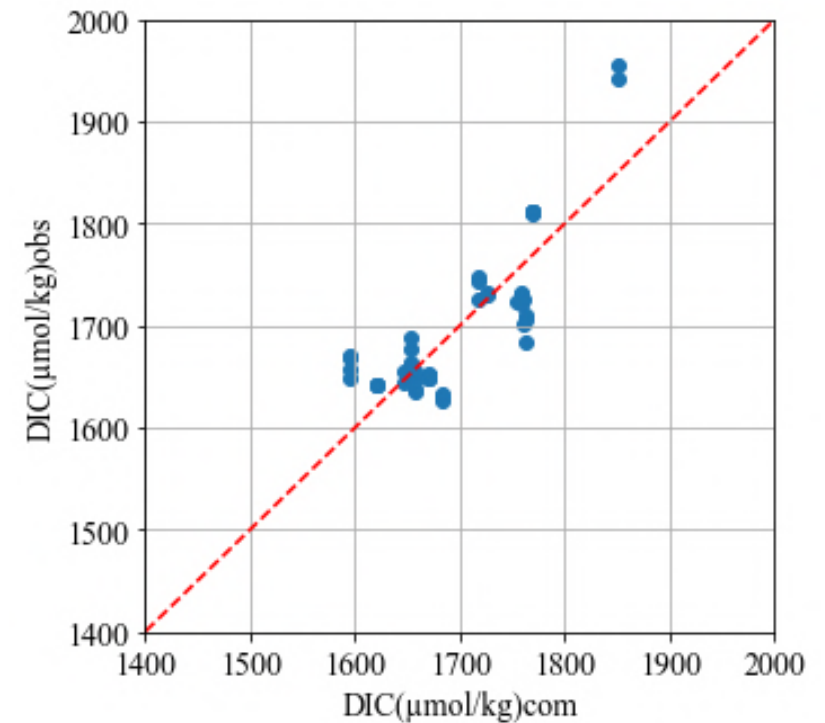
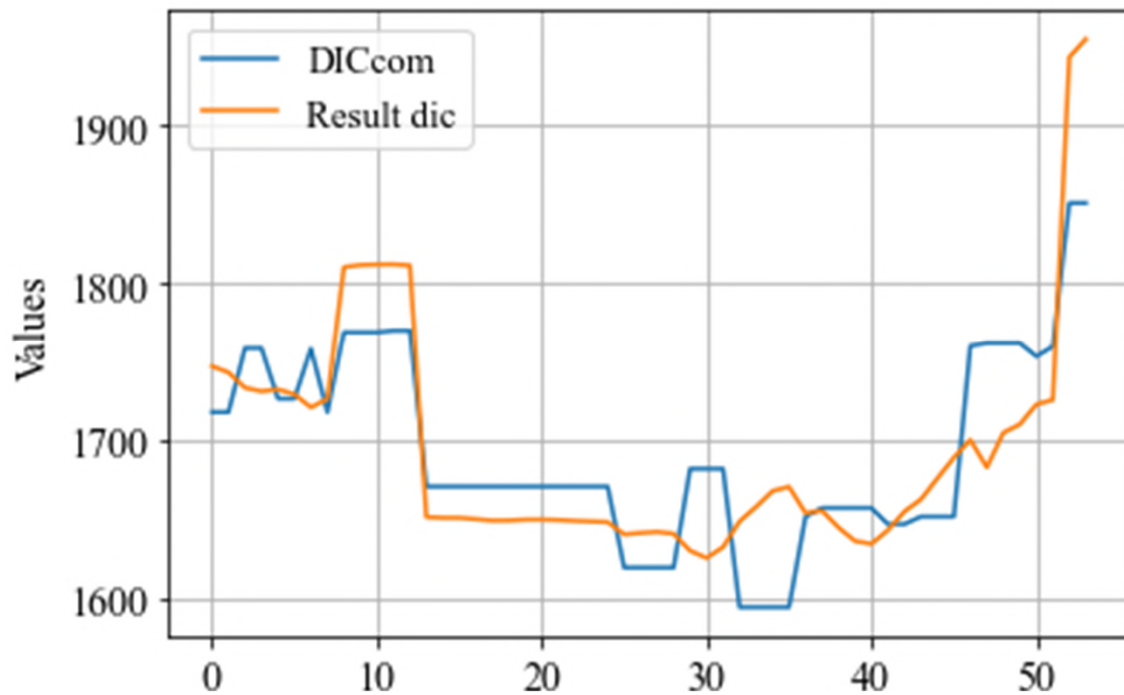


pCO₂の再現結果の検証 定式化に用いたデータのみ抽出

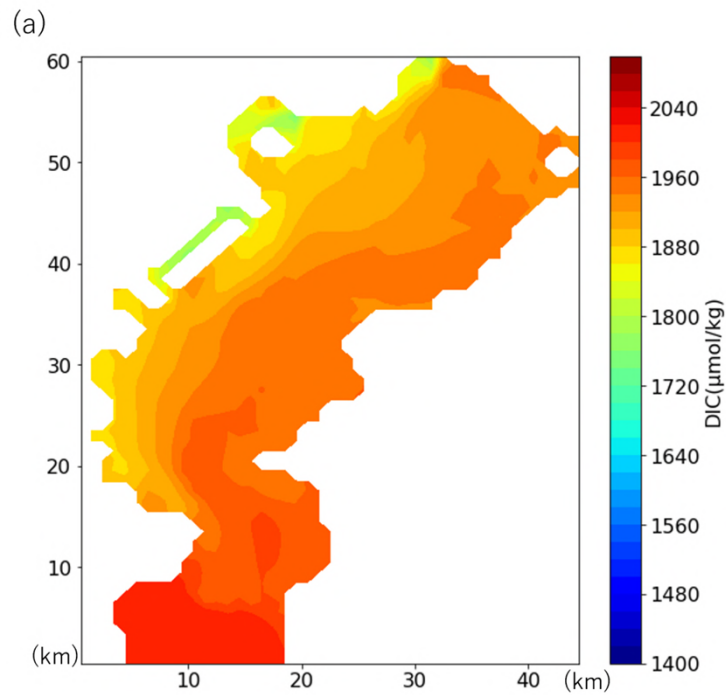


DICの再現結果の検証

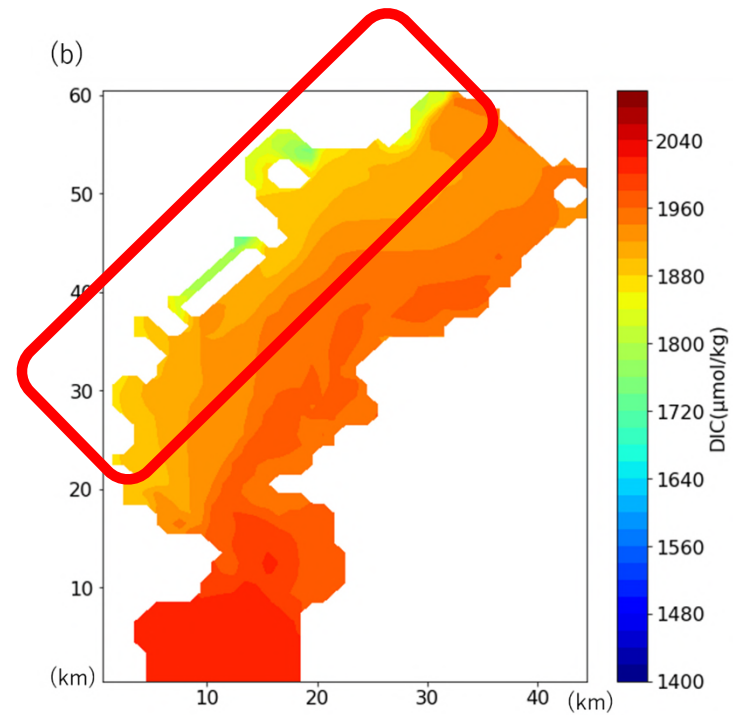
定式化に用いたデータのみ抽出



DICの日変化 (1) 5月15日

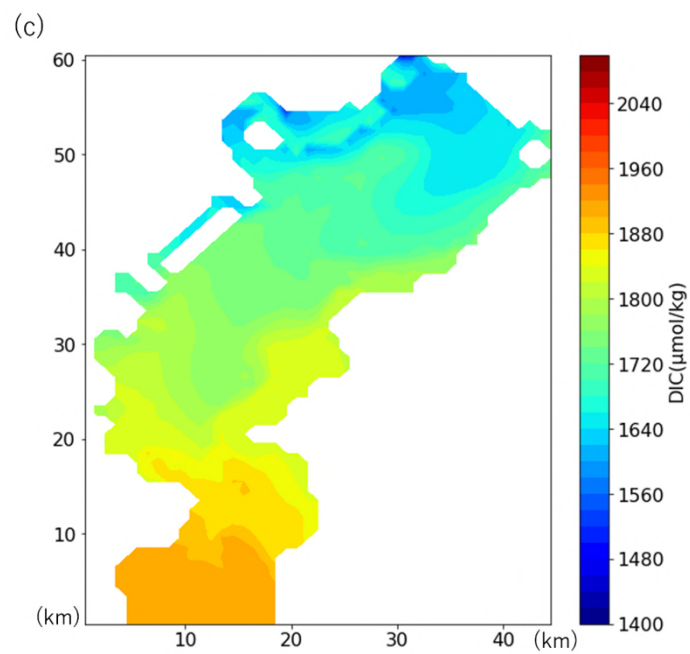


12:00

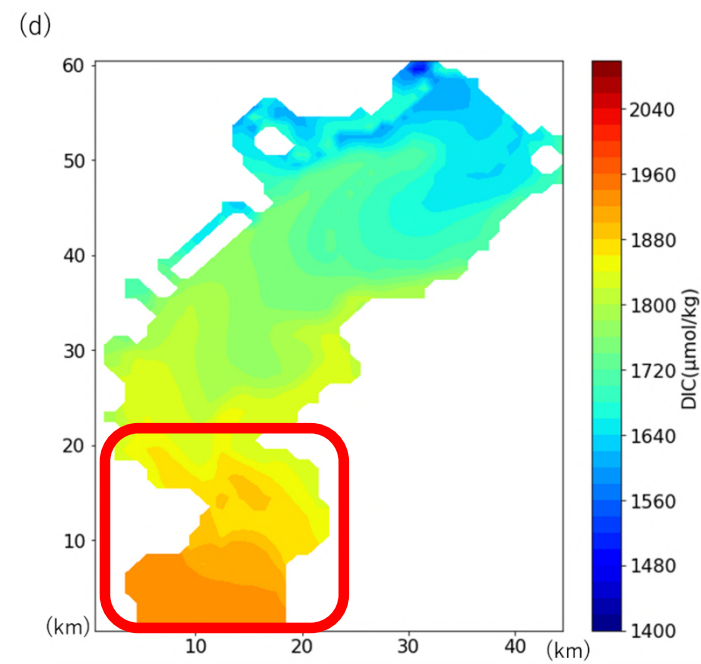


23:00

DICの日変化 (2) 8月15日

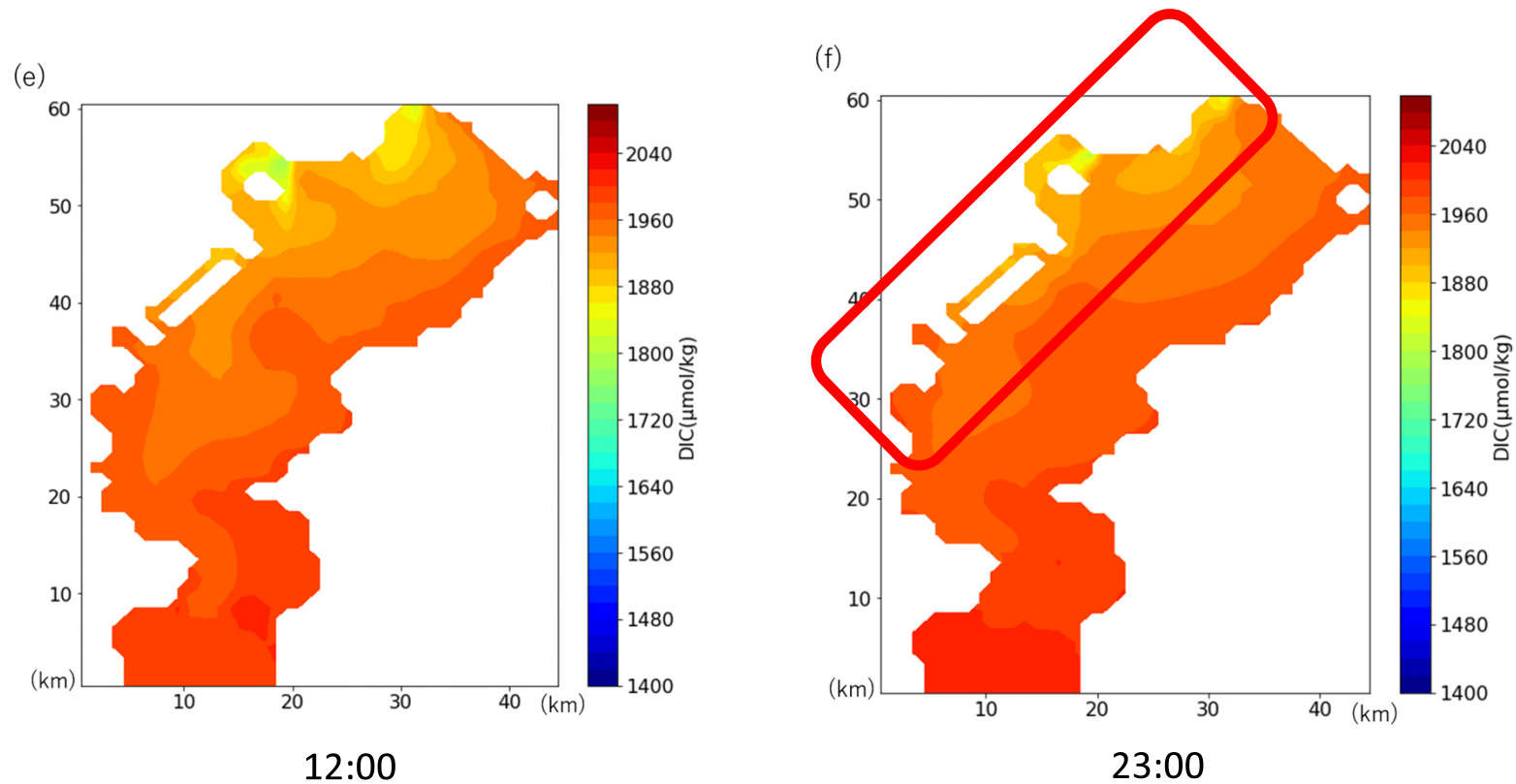


12:00

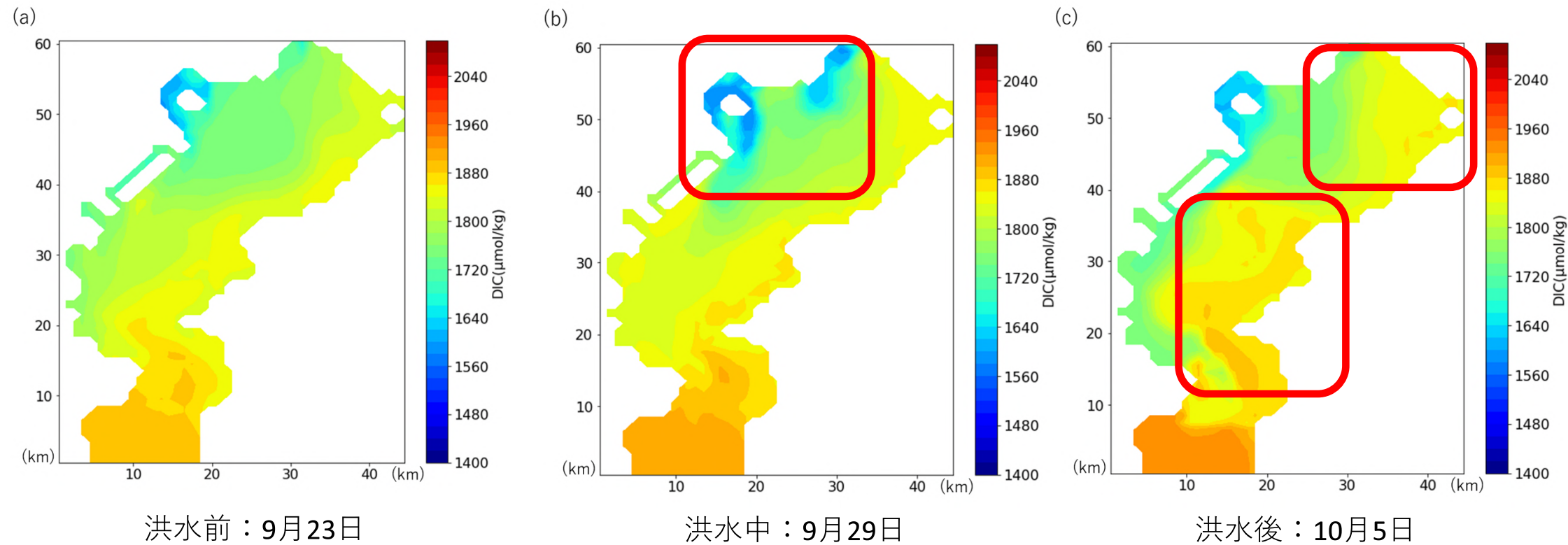


23:00

DICの日変化 (3) 12月15日



洪水のDICへの影響



Summary

- 東京湾における水中二酸化炭素分圧の日変動は大きく，ブルーカーボンにおける二酸化炭素の吸収量を推定するうえで考慮しなくてはならない最重要項目であることが示された.
- 季節的な変動だけでなく，洪水などのイベントで二酸化炭素の吸収量は大きく変化することが示された.



- 本研究で提案する3次元数値シミュレーションモデルを用いた解析が，今後のブルーカーボンによる二酸化炭素の吸収量の評価には必須であることが示された.



Thank you for your attention