

資料 3

令和 3 年度「森は海の恋人」水の循環研究会

「森は海の恋人」水の循環研究会

成果報告書 付録編

(海域モデルの構築と再現性検証)

令和 4 年 3 月

目次

1	海洋流動モデルの概要.....	1
2	海洋流動モデルの計算期間および手順	3
3	海洋流動モデルの入力条件等.....	3
4	海洋流動モデルの再現性検証.....	9
(ア)	再現性の検証項目	9
(イ)	潮位の再現性.....	10
(ウ)	流向・流速（潮流樁円）の再現性.....	11
(エ)	水温・塩分の再現性.....	15
(オ)	急潮の再現	38
(カ)	出水時の再現.....	43
(キ)	冬季と夏季の鉛直構造の再現	47
(ク)	海底湧水の影響の確認	51
5	低次生態系モデルの概要	54
6	低次生態系モデルの計算期間および手順	59
7	低次生態系モデルの入力条件等	60
(ア)	陸域モデルからの出力（2018年の例、栄養塩・SS、負荷量（河川・地下水）） .	61
(イ)	湾外から流入する栄養塩等の負荷量の設定	62
(ウ)	陸域から海域に流入する栄養塩物質等の分画比の設定等	64
8	低次生態系モデルの再現性検証	64
(ア)	栄養物質濃度の再現性の確認（T-N、T-P）	64
(イ)	水質濃度の再現性（Chl-a、栄養塩）	66
(ウ)	水質濃度の再現性（SS(衛星データ)）	67
(エ)	栄養物質濃度の再現性の確認（鉄、ケイ素）	68
(オ)	栄養物質濃度の再現性の確認（Chl-a）	68
(カ)	一次生産の再現（植物プランクトン発生種の再現）	69
(キ)	一次生産の再現（湾全体、沿岸域の一次生産量）	70

1 海洋流動モデルの概要

海洋流動モデルの概要を以下に示す。

【モデル概要】

- 3次元非静水圧モデル

- 基礎式

f面近似およびブシネスク近似を施した、Navier-Stokesの運動方程式、連続式、水温・塩分の保存式、状態方程式

- 計算格子

水平方向には可変格子、鉛直方向にはレベル座標で離散化

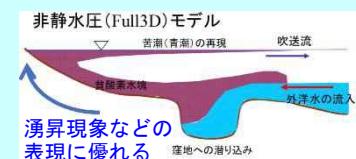
- 海面における熱収支

短波放射、長波放射、潜熱輸送、顯熱輸送を考慮し、バルク式で表現

- 乱流モデル→拡散係数の推定方法

水平方向はSmagorinskyモデルを採用
鉛直方向はMunk-Anderson型の成層化関数を採用

- 流れの3次元的な特徴を再現できるモデル
- 沿岸域のモデルでは近年利用されるようになってきている。



- 一般的であり、利用事例の多い解析手法を、それぞれ採用している。

また、3次元格子分割とするが、その課題とそれに対する具体的な対応（方策）は以下のとおりである。

- 深海部の計算は要する実時間が膨大であり、深海部を詳細な表現は業務の目的達成の障害になる可能性がある。
- 深海部をある程度簡略化し、ただし、一定の精度を担保し、陸域～外洋・深海を解析する方針とする。

【具体的な方策】

- 駿河湾湾口部の大水深部(1500m超)は一定水深とし、計算時間の短縮を図る。
- 直層分割は、表層は詳細な設定を行い、深層は層厚大きくする（深層の水質変化は緩やかであるため）。具体的には以下のとおり。
- 0m、1m、2m、3m、4m、5m、6m、7m、8m、10m、12m、15m、20m、25m、30m、40m、50m、75m、100m、150m、200m、300m、400m、500m、600m、800m、1000m、1200m、1500m

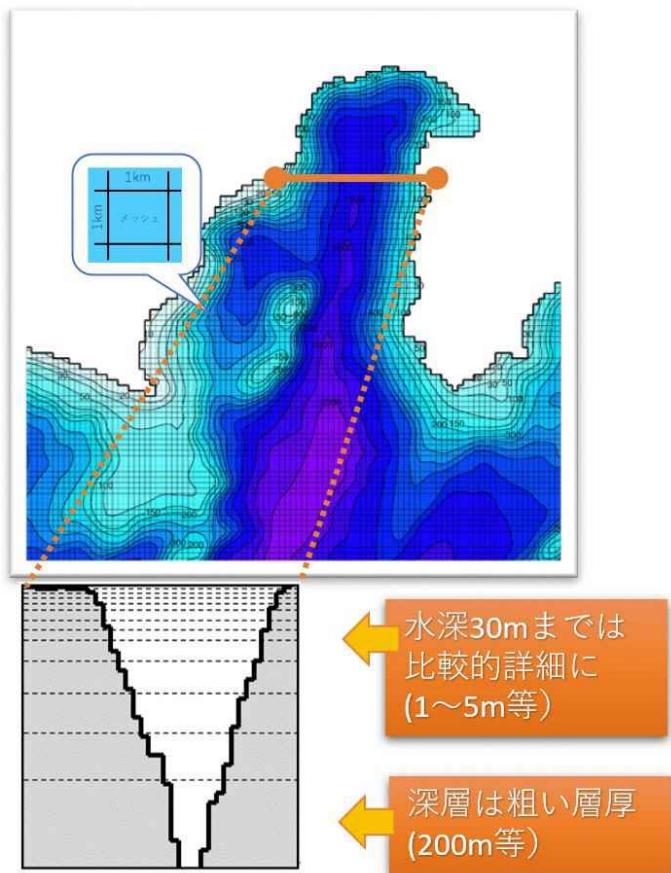


図 1 層厚の分割イメージ

鉛直的な拡散については、鉛直拡散係数 (K_z) の評価方法（中村ら(1989)）を採用して再現した。この評価方法は、リチャードソン数および風速の関数で定義されており、混合層厚に関する鉛直拡散係数の鉛直分布も風速およびパラメータで調整する形となっている。

$$K_z = \frac{\kappa w_s z}{S_c} \exp(-k_* z) \frac{1}{(1 + \alpha R_i^\gamma)^n}$$

$$k_* = A_0 \sin \phi / U, \quad A_0 = 0.51 \\ (\text{減衰係数})$$

$$R_i = \frac{-1 + [1 + 40 N^2 \kappa^2 z^2 / (w_s^2 \exp(-2k_* z))] }{20} \\ (\text{リチャードソン数})$$

κ : カルマン定数, w_s : 海面摩擦速度, U : 風速, z : 各層水深,
 S_c : 乱流シミュット数, N : ブラント・バイサラ振動数, ϕ : 緯度

2 海洋流動モデルの計算期間および手順

- 計算期間は平常時／黒潮の蛇行の変動、及びデータの測得・確定状況を踏まえて、近年2年間（【平常時】2015年（平均的な海況）、【参考値として計算】2018年（黒潮の蛇行期））とした。
- 計算タイムステップは30秒、計算条件のタイムステップは気象条件および潮位境界条件は1時間単位、外洋モデルから設定する側面境界条件は3時間単位とした。
- 計算出力間隔は計算項目により1時間または1日とした。

3 海洋流動モデルの入力条件等

海洋流動モデルの入力条件等のイメージは図2に示すとおりである。

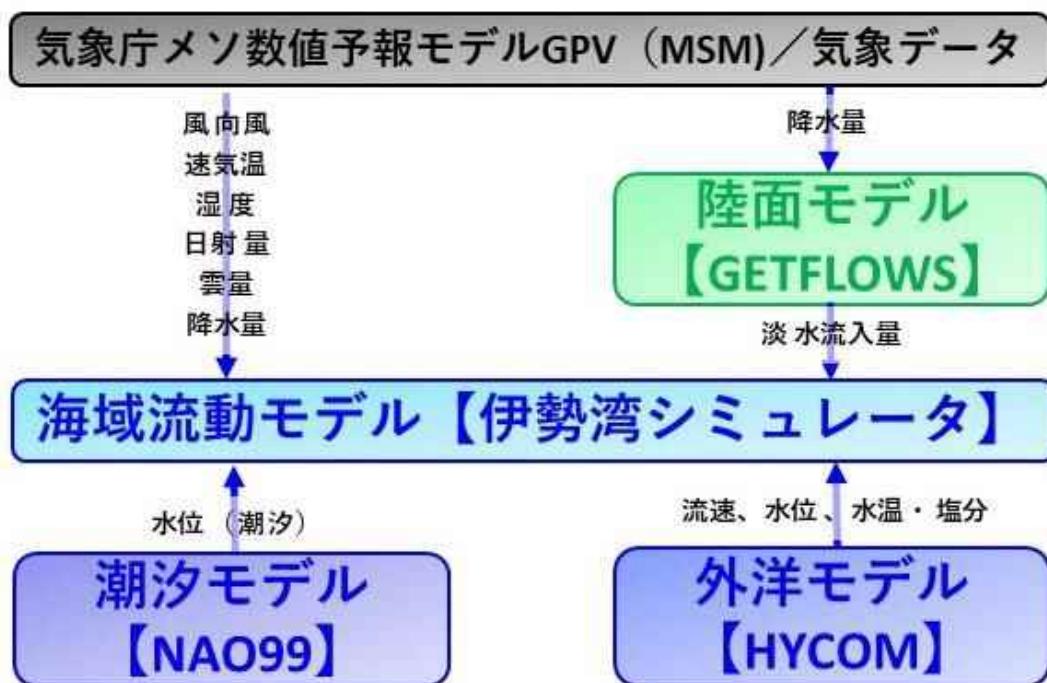


図2 海洋流動モデルの入力条件イメージ

● 気象条件

気象庁のメソ数値予報モデルGPV (MSM) を主に利用、日射量については気象官署（静岡）を利用した。

● 海域側面境界条件

外洋モデルHYCOMの出力を利用（3次元流速、水位、水温・塩分）した。詳細は次のとお

りである。

<HYCOM+NCODA Global 1/12° Analysis>

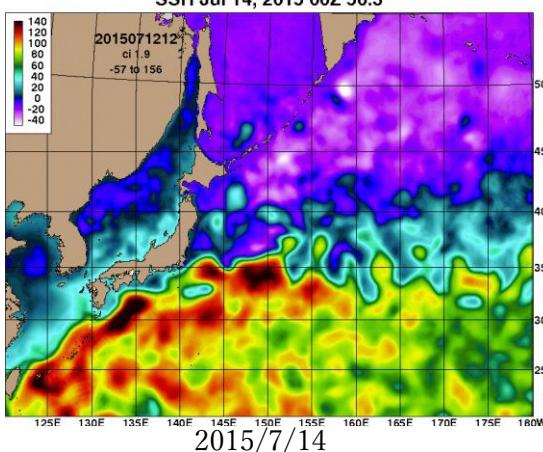
(Global Ocean Forecasting System [GOFS] 3.1)

- ❖ <https://www.hycom.org/>
- ❖ 水平解像度 1/12° 、3次元変分法によるデータ同化、3時間ごとの出力
- ❖ 3次元流速、水温・塩分、水位について利用
- ❖ 水平方向、時間方向に補間して設定

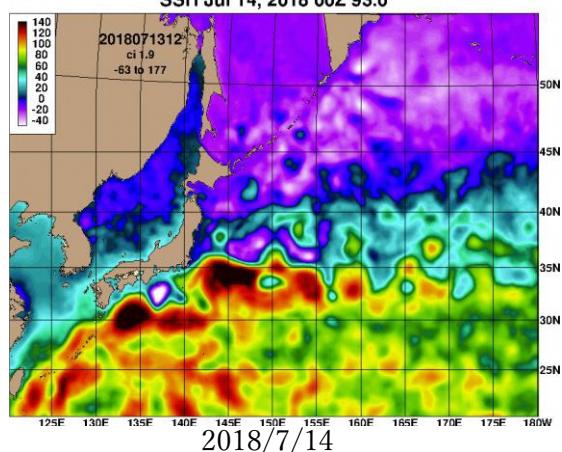
<https://www7320.nrlssc.navy.mil/GLBhycomcice1-12/kurosh.html>

HYCOM による計算例（海面高度）

SSH Jul 14, 2015 00Z 56.3



SSH Jul 14, 2018 00Z 93.0



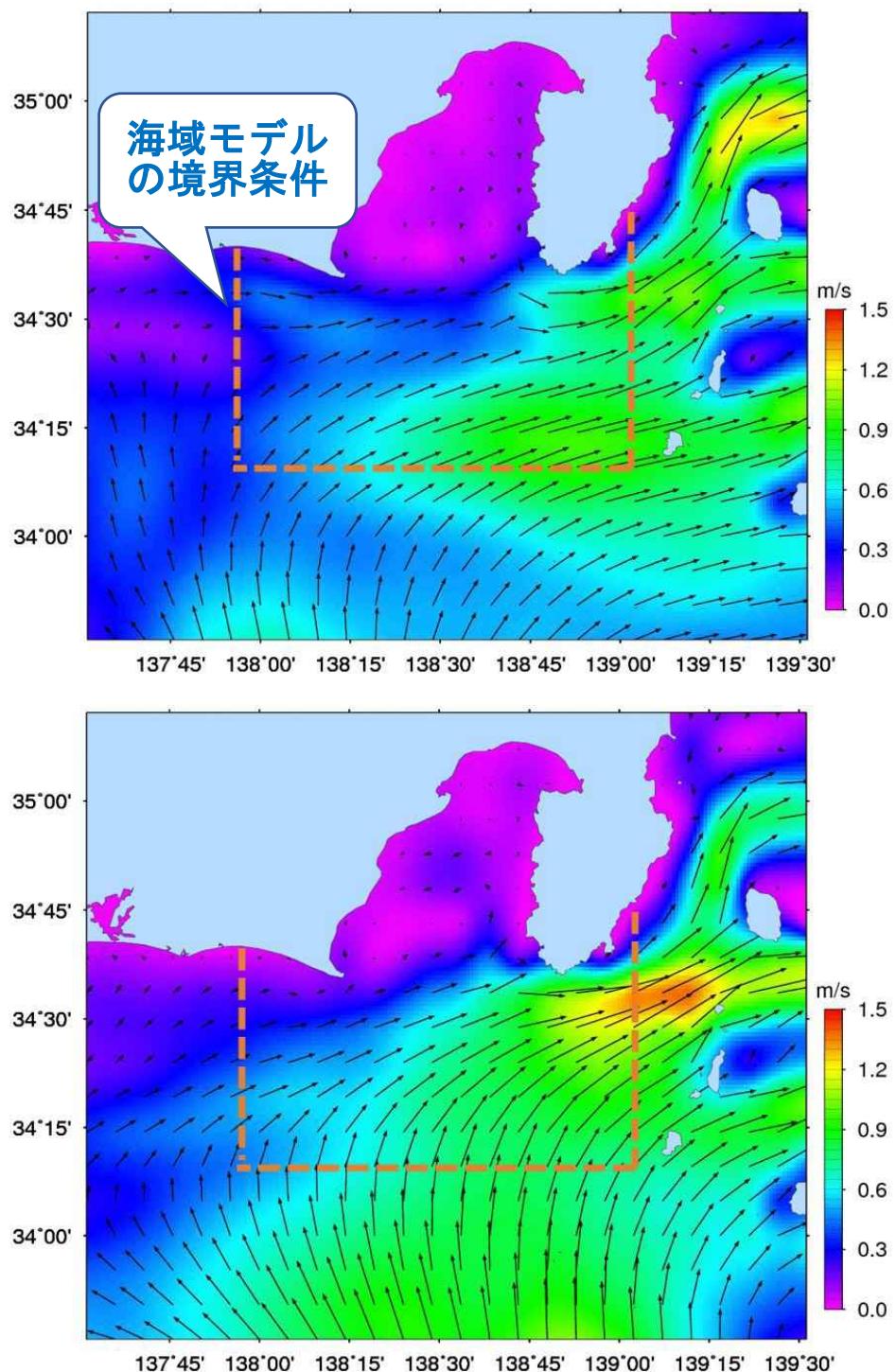


図 3 海域モデルの境界条件

- 潮汐成分

国立天文台潮汐予測モデル NA099 を採用した。

- 初期条件

外洋モデル HYCOM の出力を利用（水温・塩分）した、

- 陸域からの淡水流入条件

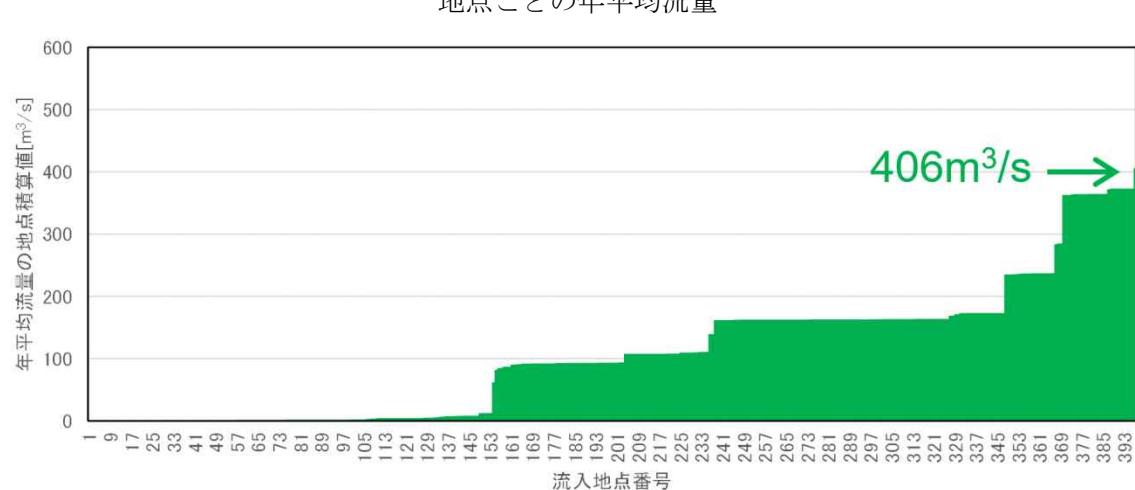
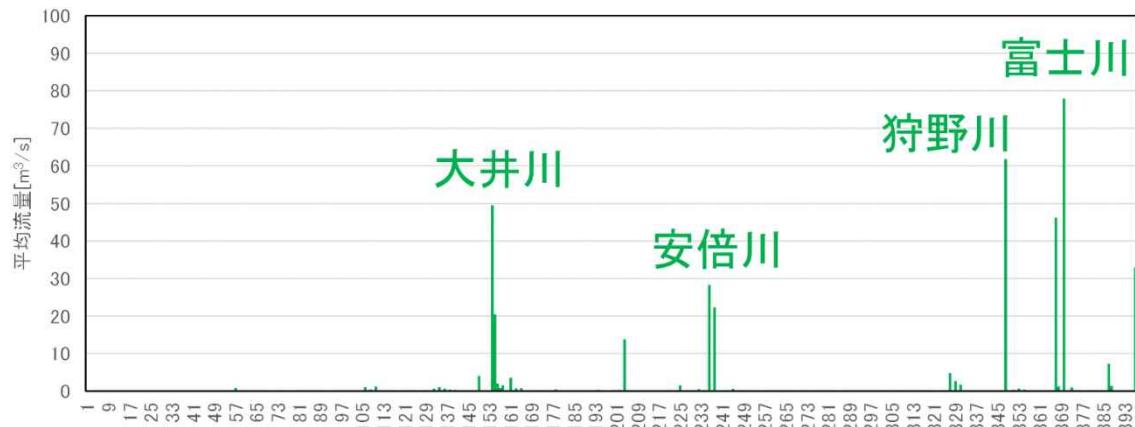
GETFLOWS の出力結果を利用した。主要河川、残留域（直接流入域）、地下湧水でそれぞれ設定した。

- 側面境界条件

外洋モデルの計算結果、陸域モデル (GETFLOWS) からの引き継ぎデータを活用した。
GETFLOWS 出力(日別値)の概要は以下のとおりである。

河川流入 (2015 年)

地点ごとの年平均流量



全地点の積算流量の年間変動

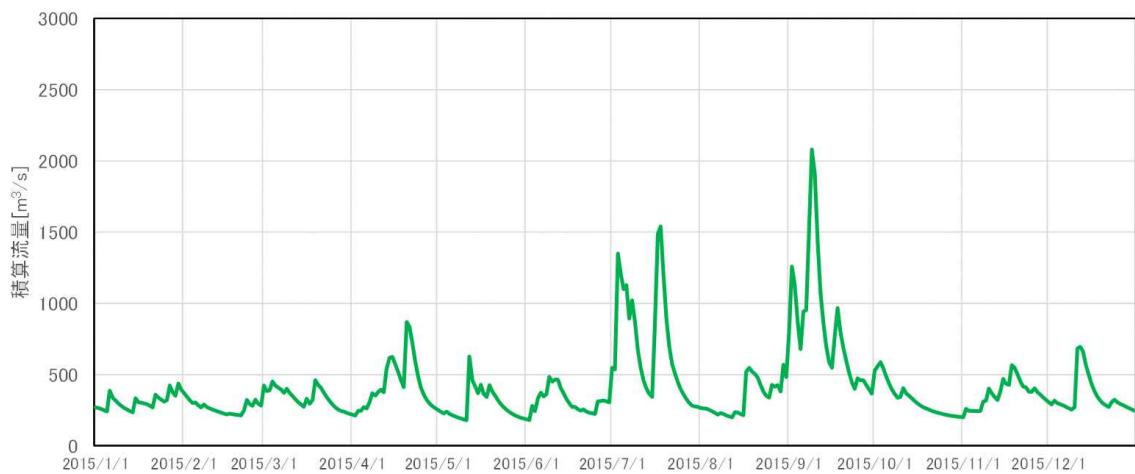
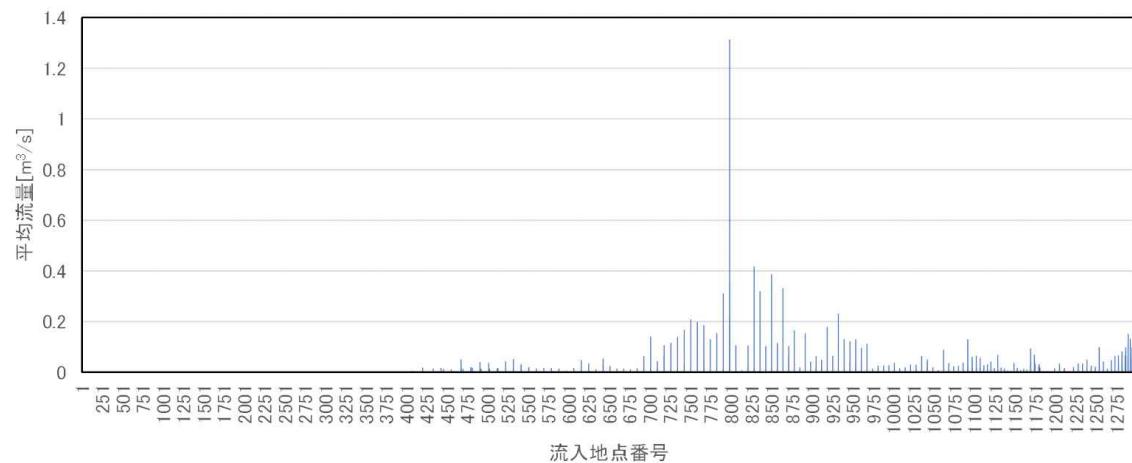


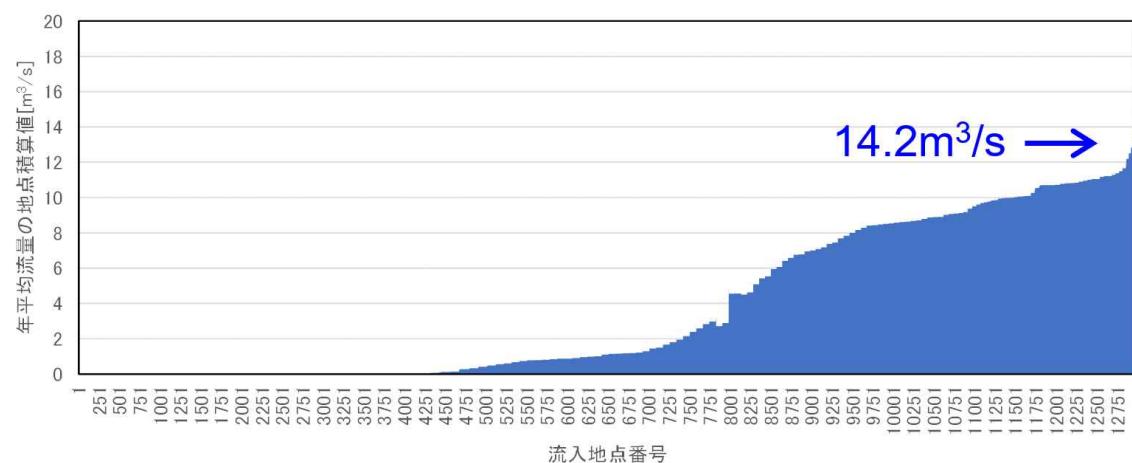
図 4 GETFLOWS 出力(日別値)： 河川流入 (2015 年)

海底湧水(2015年)

地点ごとの年平均流量



地点ごとの年平均流量の積算



全地点の積算流量の年間変動

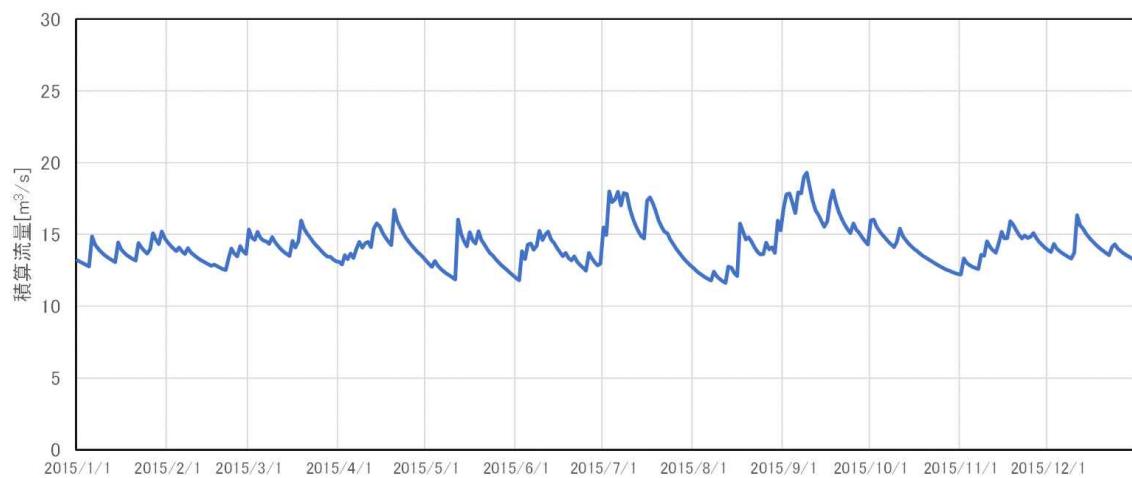


図 5 GETFLOWS 出力(日別値)： 海底湧水(2015年)

4 海洋流動モデルの再現性検証

(ア) 再現性の検証項目

海洋流動モデルの再現性を検証する項目と比較に用いるデータは表 1 に示すとおりである。

表 1 再現性検証項目とデータ

項目	比較に用いるデータ	課題など
潮位	・潮位の実測値（1時間値） ・潮汐調和定数（主要4分潮）	
流れ	・潮流権円 ・平均流	・平均流については長期間の係留観測が無く比較が難しい ・流速分布は曳航式観測のある日時の比較
水温・塩分	・駿河湾海洋生態系研究プロジェクト（SURUME） ・ブイ観測データ（水温のみ） ・地先定線観測データ ・衛星データ（MODIS） ・衛星データ（GCOM-C）	・連続塩分データが存在しない

※衛星データについて

「MODIS」：

NASA 地球観測衛星 TERRA/AQUA 搭載センサ。東海大学情報技術センター（TRIC）が受信・輝度/幾何変換処理（Level1B）処理を行い、さらに地球観測利用研究センター（EORC）が処理したプロダクトを利用。水温の解像度は（0.01°）1000m 程度。

「GCOM-C」：

気候変動観測衛星「しきさい」に搭載されている光学センサ「多波長光学放射計」（SGLI）のプロダクトを JAXA が開設している G-potal（地球観測衛星データ提供システム、<https://gportal.jaxa.jp/gpr/>）からダウンロードして利用（物理量プロダクト（Level-2））。水温および Chl-a 等の解像度：250m および 1000m 程度。2017 年末に打ち上げ。

(イ) 潮位の再現性

潮位の再現結果は図 6 に示すとおりである。計算値は観測値とほぼ一致している。

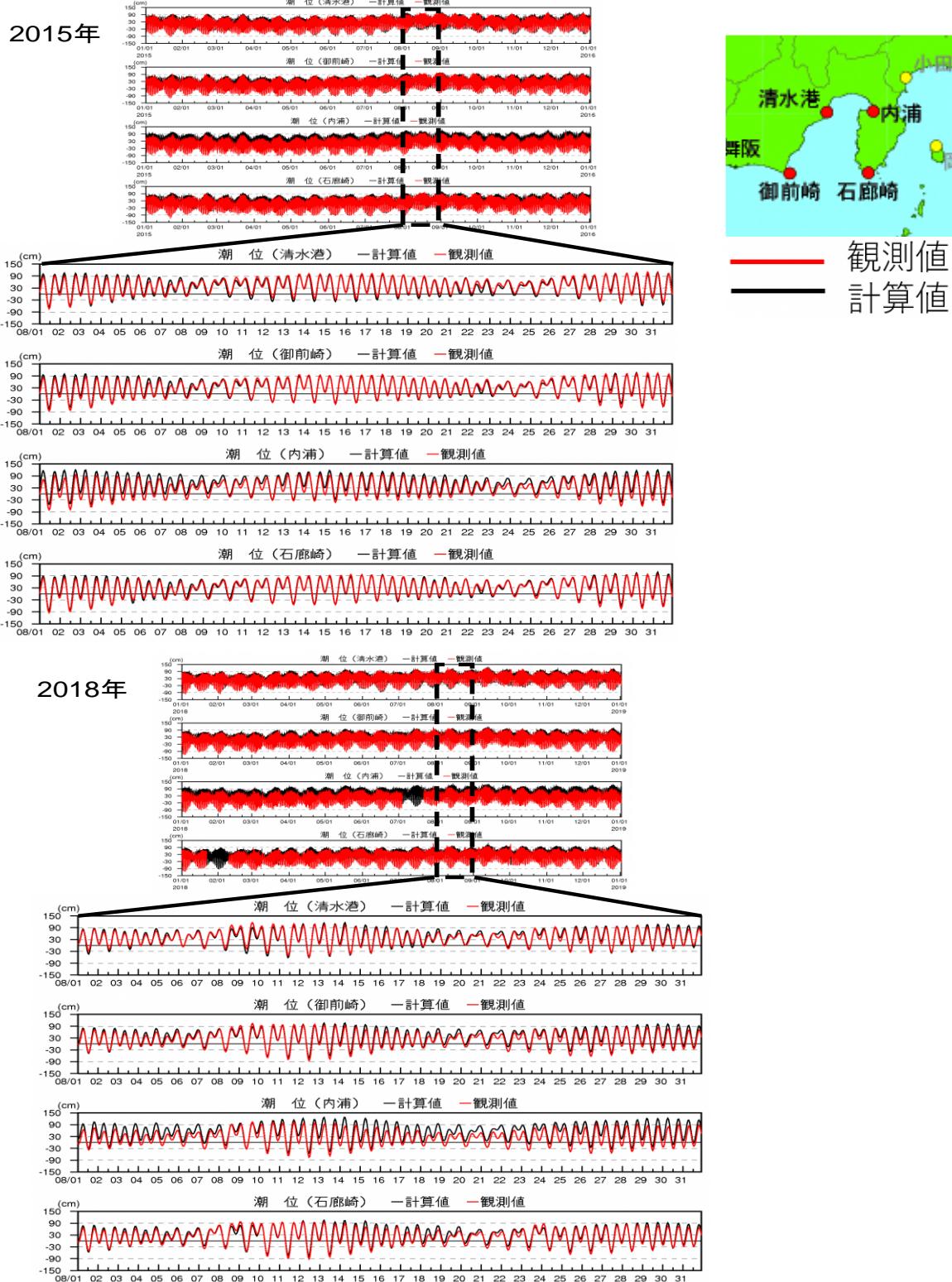


図 6 潮位の再現結果

調和定数：潮汐データから、周期の異なる分潮成分に分解して得られた定数（振幅、遅角）を比較した。計算値は観測値とほぼ一致している。

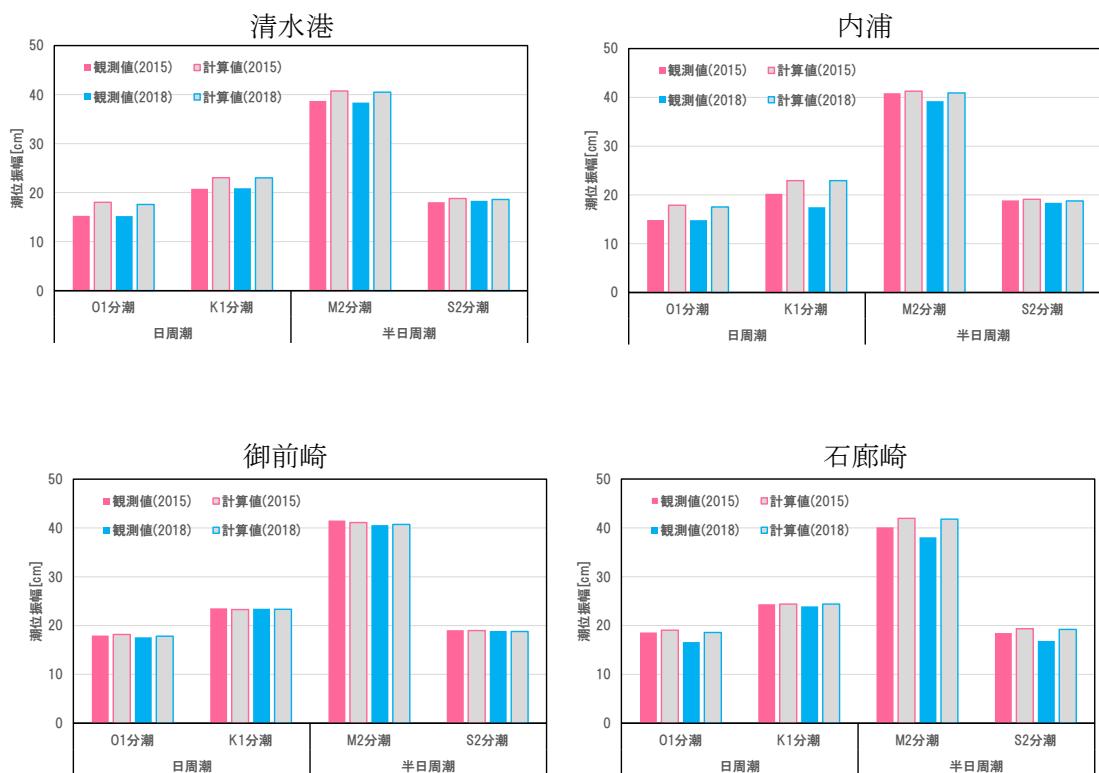


図 7 定数（振幅、遅角）の再現結果

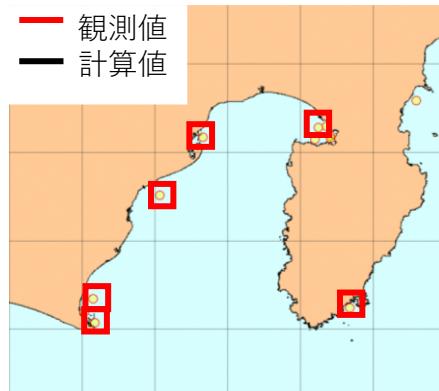
(ウ) 流向・流速（潮流権円）の再現性

JODC から収集した潮流データとの比較を図 8 に示す。

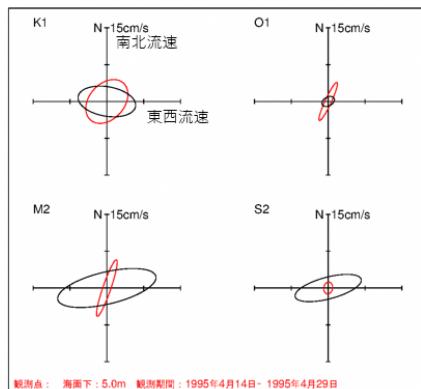
計算期間のデータは存在せず、比較的古いデータとなっている。計算年（2015 および 2018 年）の同一日で参考として比較している。2015 年と 2018 年の計算値で比べても異なった傾向を示す。

(潮流樽円)

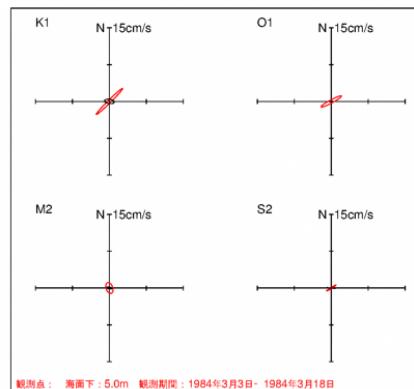
主要 4 分潮の流速のベクトル終点の時間変化を結んで描かれる樽円。縦軸は南北流速 (cm/s)、横軸は東西流速(cm/s) を示す。



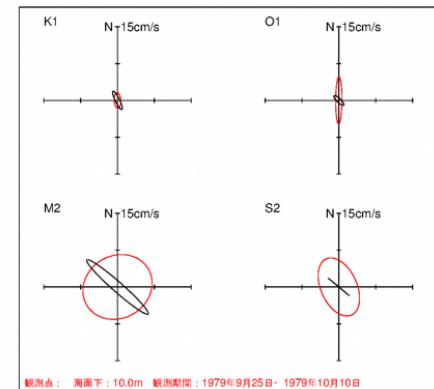
JODC (日本海洋データセンター)
https://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html
 に収録されている潮流データ地点



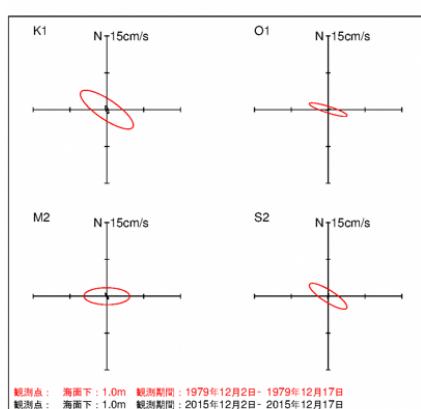
静岡 水深5m



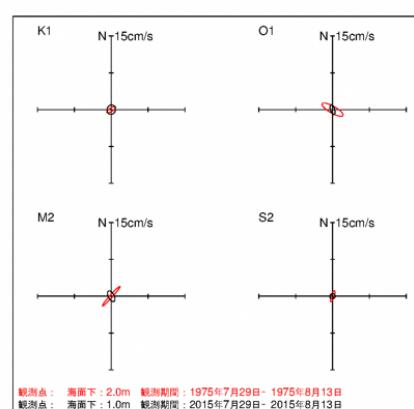
清水港 水深5m



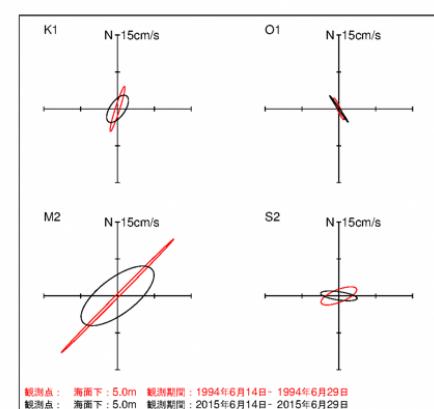
内浦 水深10m



御前崎 水深1m

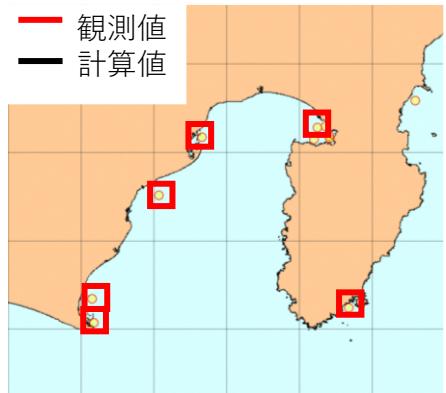


御前崎 水深2m



下田 水深5m

図 8 JODC から収集した潮流データとの比較(2015 年)



JODC (日本海洋データセンター)
https://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html
 に収録されている潮流データ地点

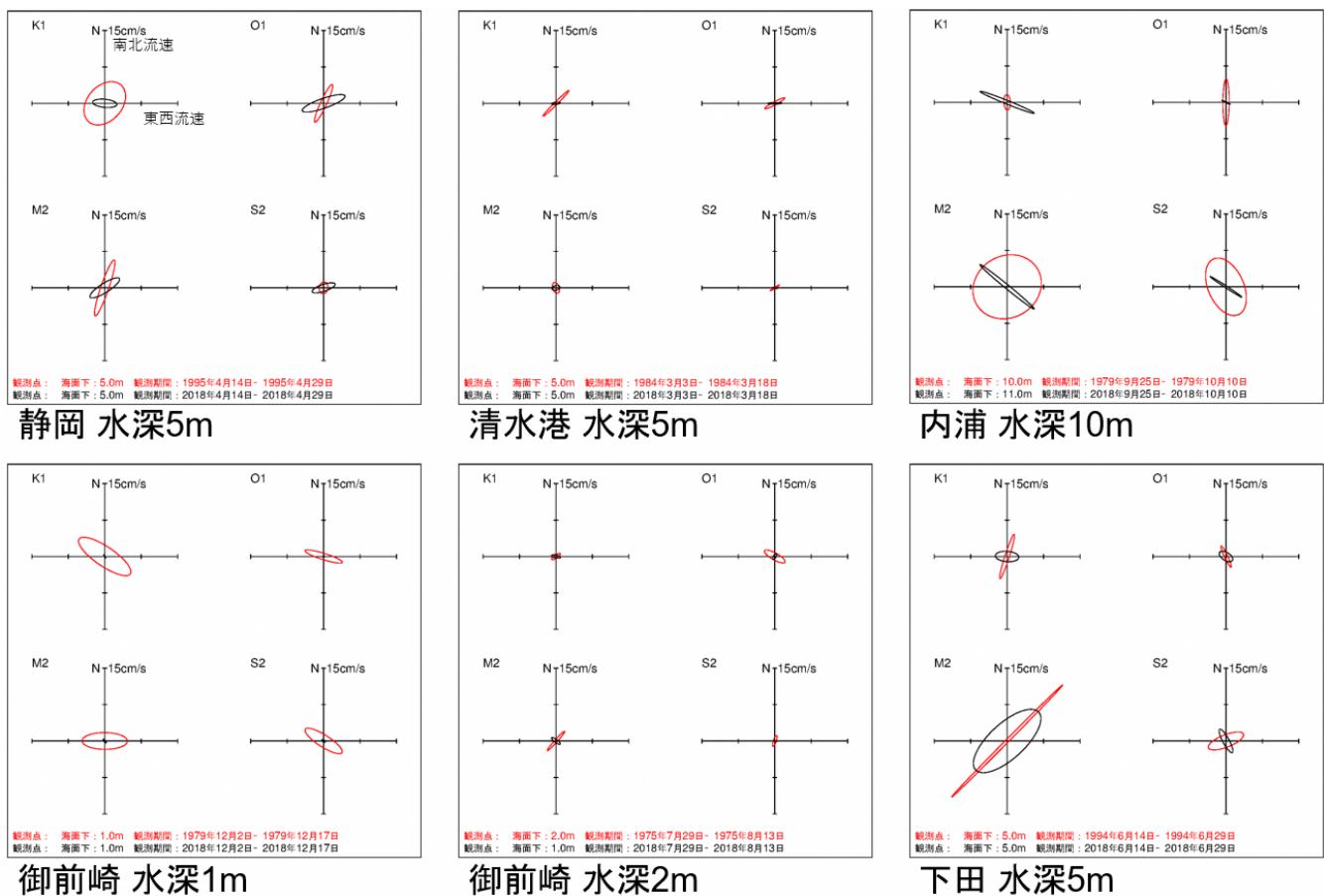


図 9 JODC から収集した潮流データとの比較(2018年)

JODC から収集した曳航式流速データとの比較(2015 年)を図 10 に示す。

観測流速からも、湾内の反時計回りの循環が認められる。また、伊豆半島沖は強い東向きの流れが確認され、モデルにおいても再現できる。

- 計算期間のうち、湾内の流速データが存在したのは、以下の 3 日間に限られた。
- 2015 年 7 月 21 日
- 2015 年 7 月 22 日
- 2015 年 8 月 25 日

← 観測値
← 計算値



JODC (日本海洋データセンター)
https://www.jodc.go.jp/jodcweb/index_j.html
に収録されている海流データ(2015)

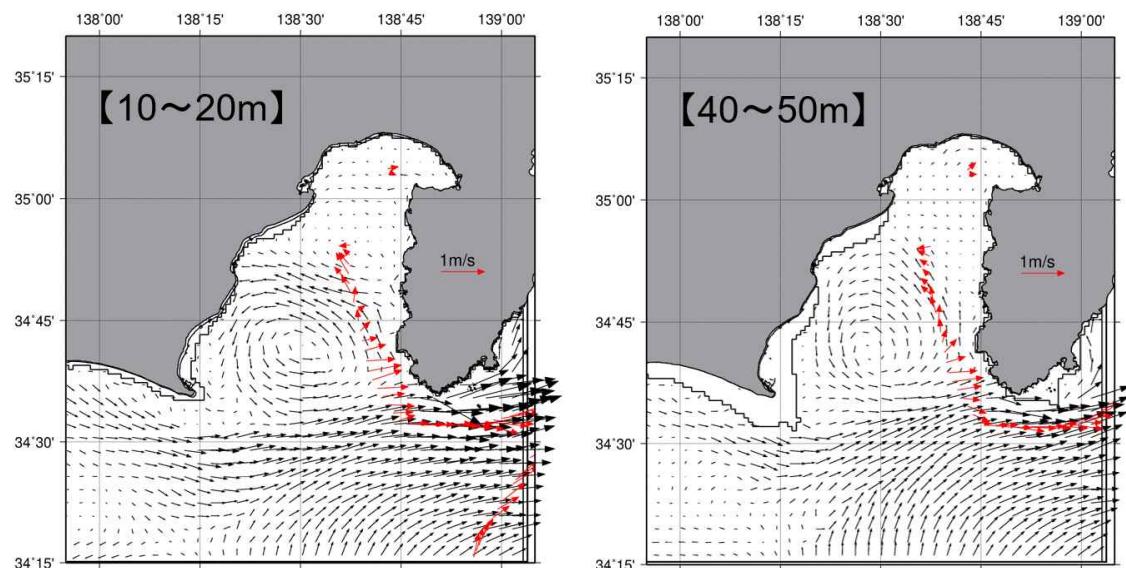
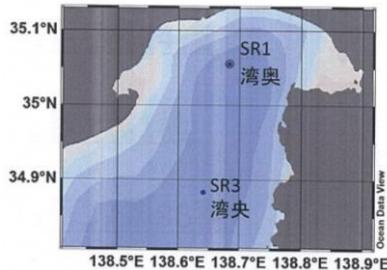


図 10 JODC から収集した曳航式流速データとの比較(2015 年)

(エ) 水温・塩分の再现性

再现性の検証に用いた観測値は以下に示す観測によるものである。

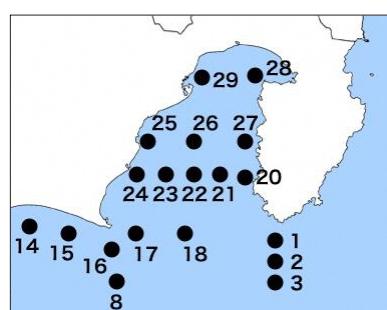
- 駿河湾海洋生態系研究プロジェクト (SURUME) による水温・塩分鉛直観測
 - ✧ 湾内 2 地点、2015~2017 年、月に 1 回程度



- ブイ観測データ (静岡県海洋観測データベース検索システム)
 - ✧ 水温のみ、指定層(1, 5, 10, 12, 15, 20, 30, 35m(地点により異なる))
 - ✧ 連続観測
 - ✧ 湾内 4 地点



- 地先定線観測データ (静岡県海洋観測データベース検索システム)
 - ✧ 水温・塩分、最大 10 層程度(0~700m(地点により異なる))
 - ✧ 月に 1 回
 - ✧ 湾内 12 地点、1983 年~



駿河湾海洋生態系研究プロジェクト (SURUME) による水温・塩分データとの比較を図 11 に示す。計算値は観測値とほぼ一致している。

イソプレットでの比較 (2015 年)

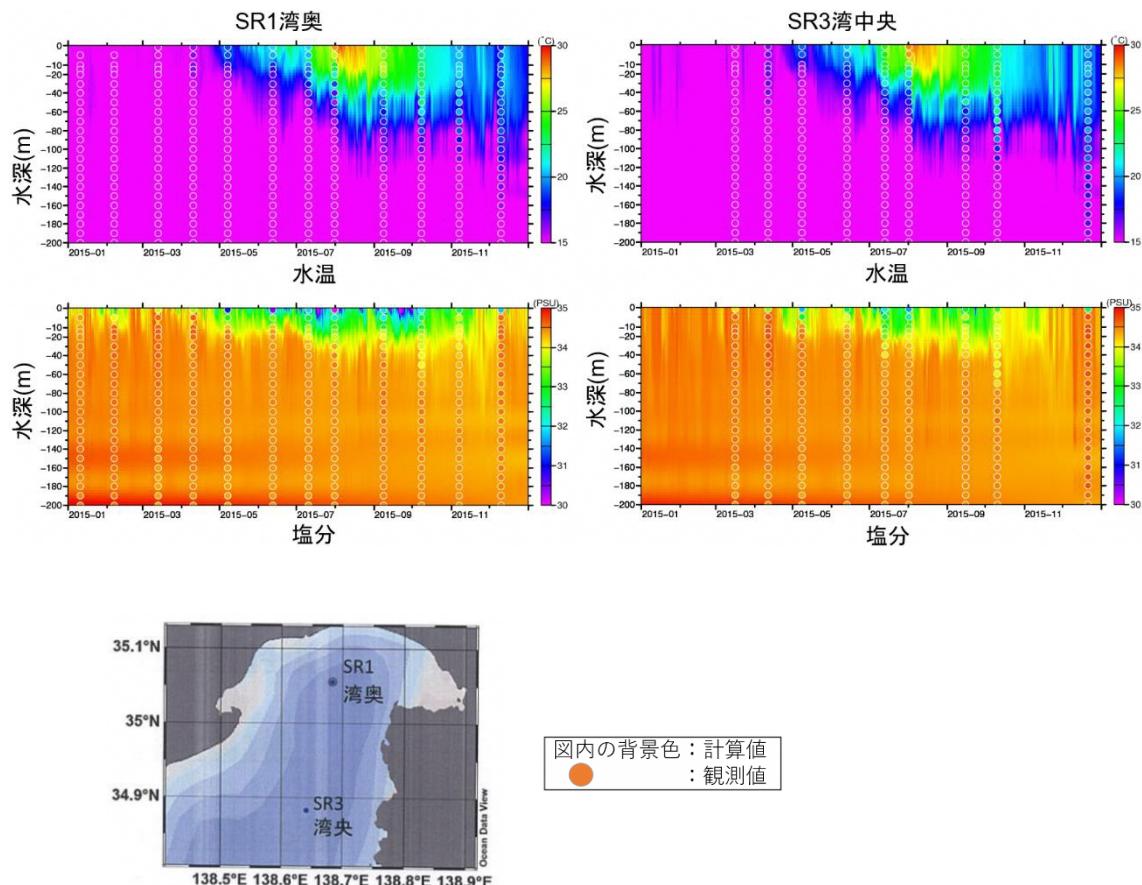


図 11 水温・塩分データとの比較：イソプレットでの比較 (2015 年)

駿河湾海洋生態系研究プロジェクト (SURUME) による水温・塩分データとの比較を以下に示す。水温の再現性にやや課題は残るもの、全体的な傾向は再現できている。

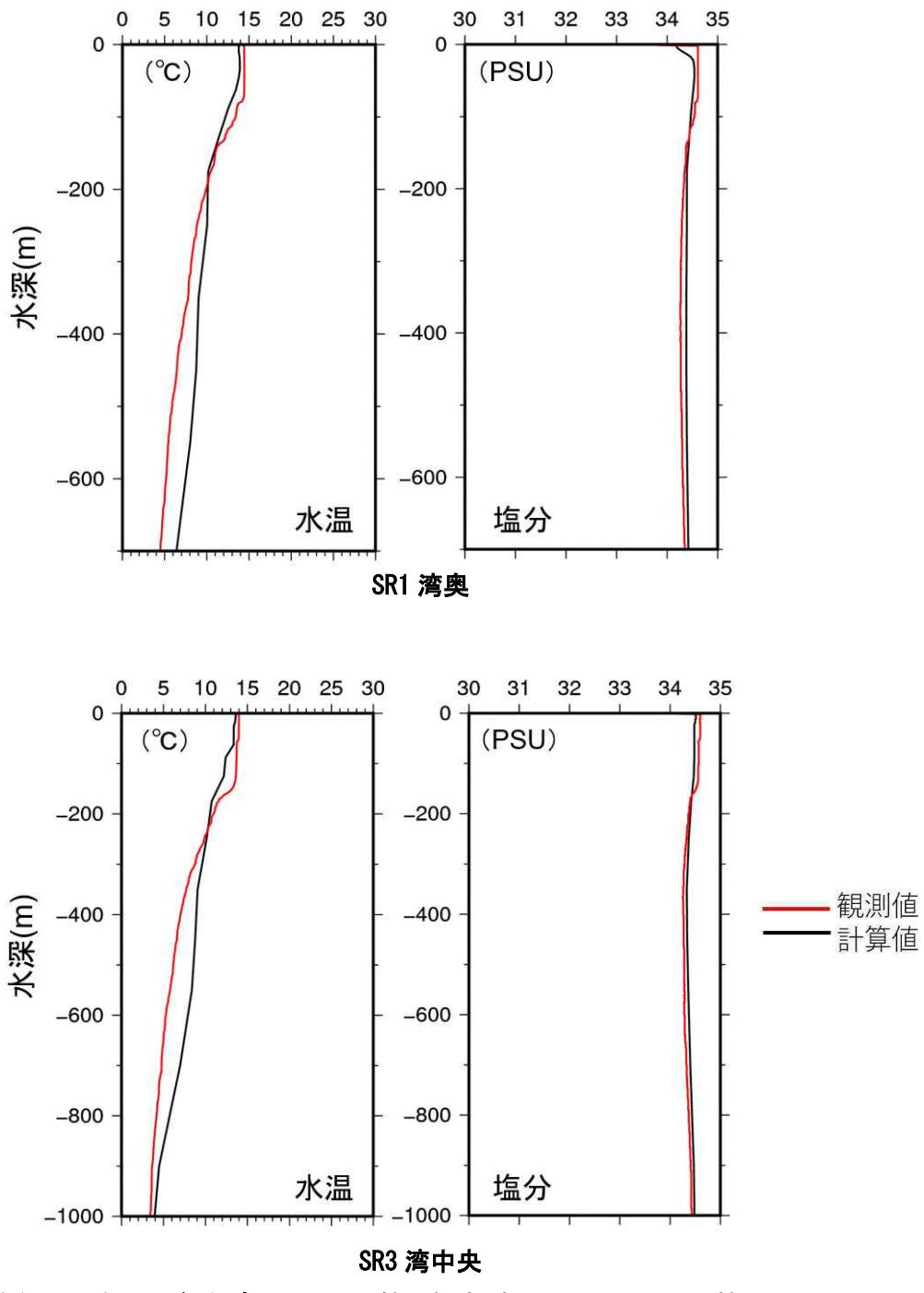


図 12 水温・塩分データとの比較：鉛直プロファイルでの比較
(2015 年冬季 観測日 3/13)

鉛直プロファイルでの比較（2015年夏季 観測日 9/15）

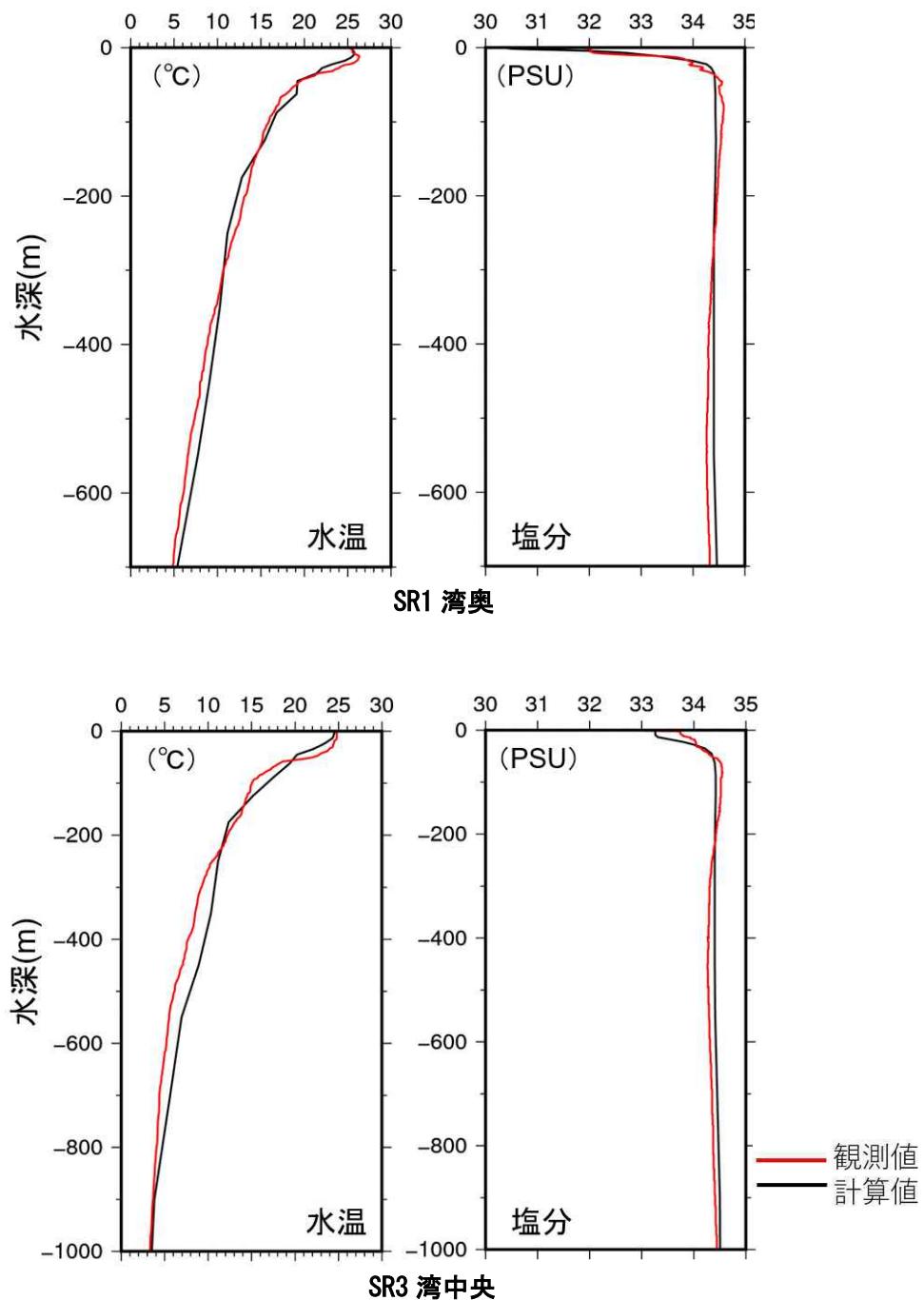


図 13 水温・塩分データとの比較：鉛直プロファイルでの比較
(2015年夏季 観測日 9/15)

ブイ観測データとの比較（2015、25時間移動平均）、地先観測データとの比較を以下に示す。なお、移動平均処理により内部波による変動を除去したものである。

平均的な水温の再現性は良好である。

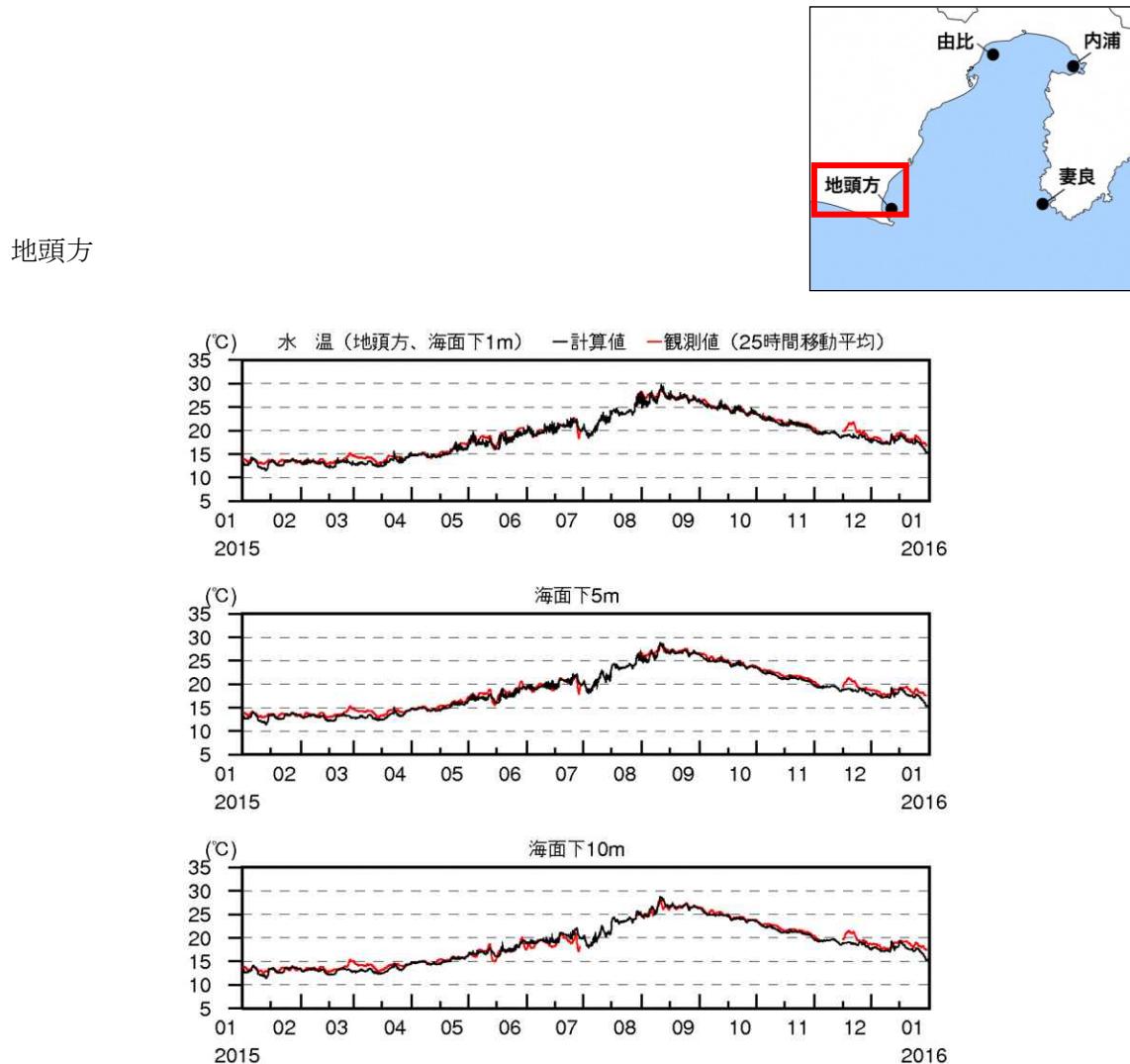


図 14 水温・塩分データとの比較：ブイ観測データとの比較（2015）

由比

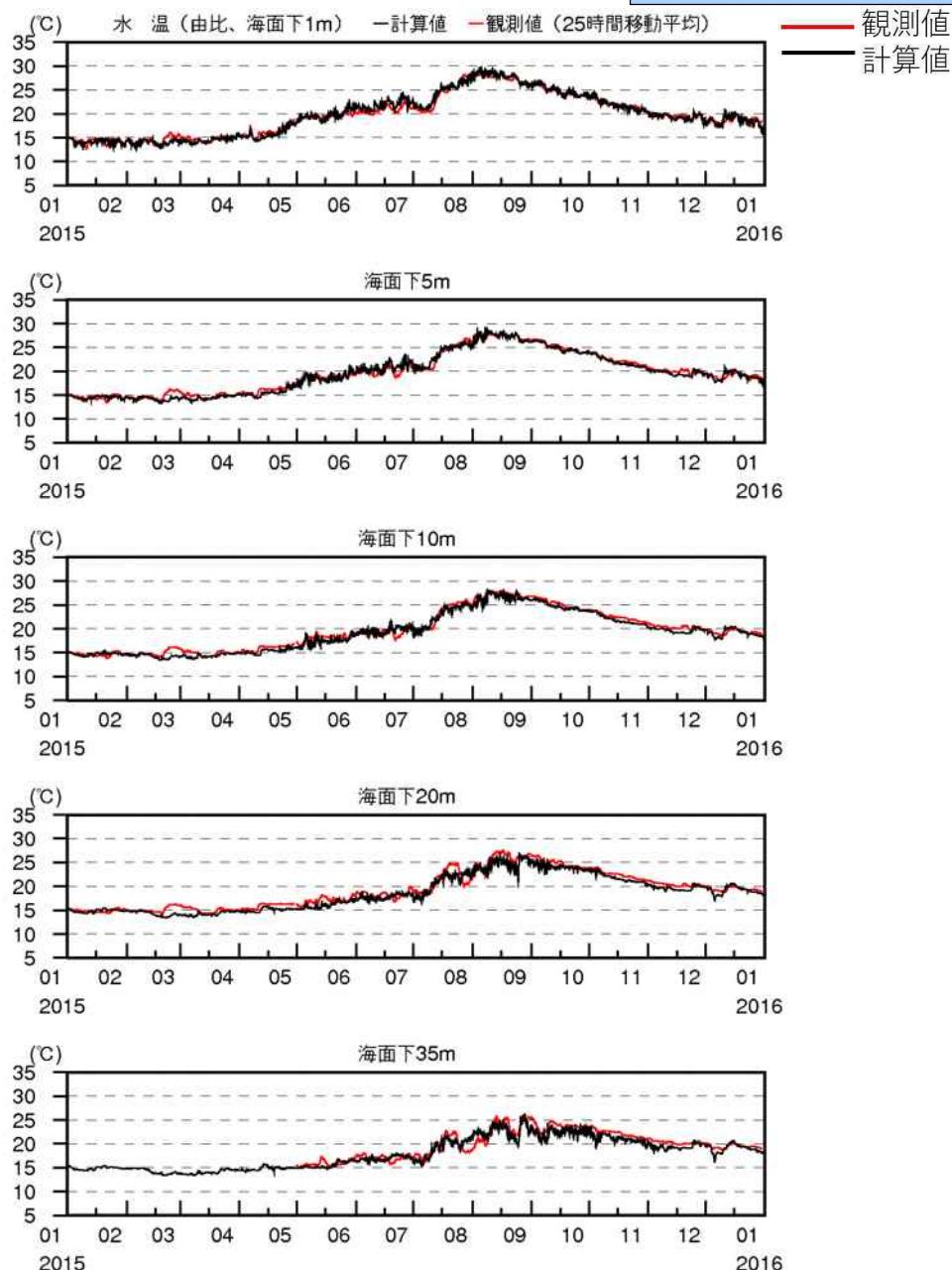


図 15 水温・塩分データとの比較：ブイ観測データとの比較（2015）

内浦

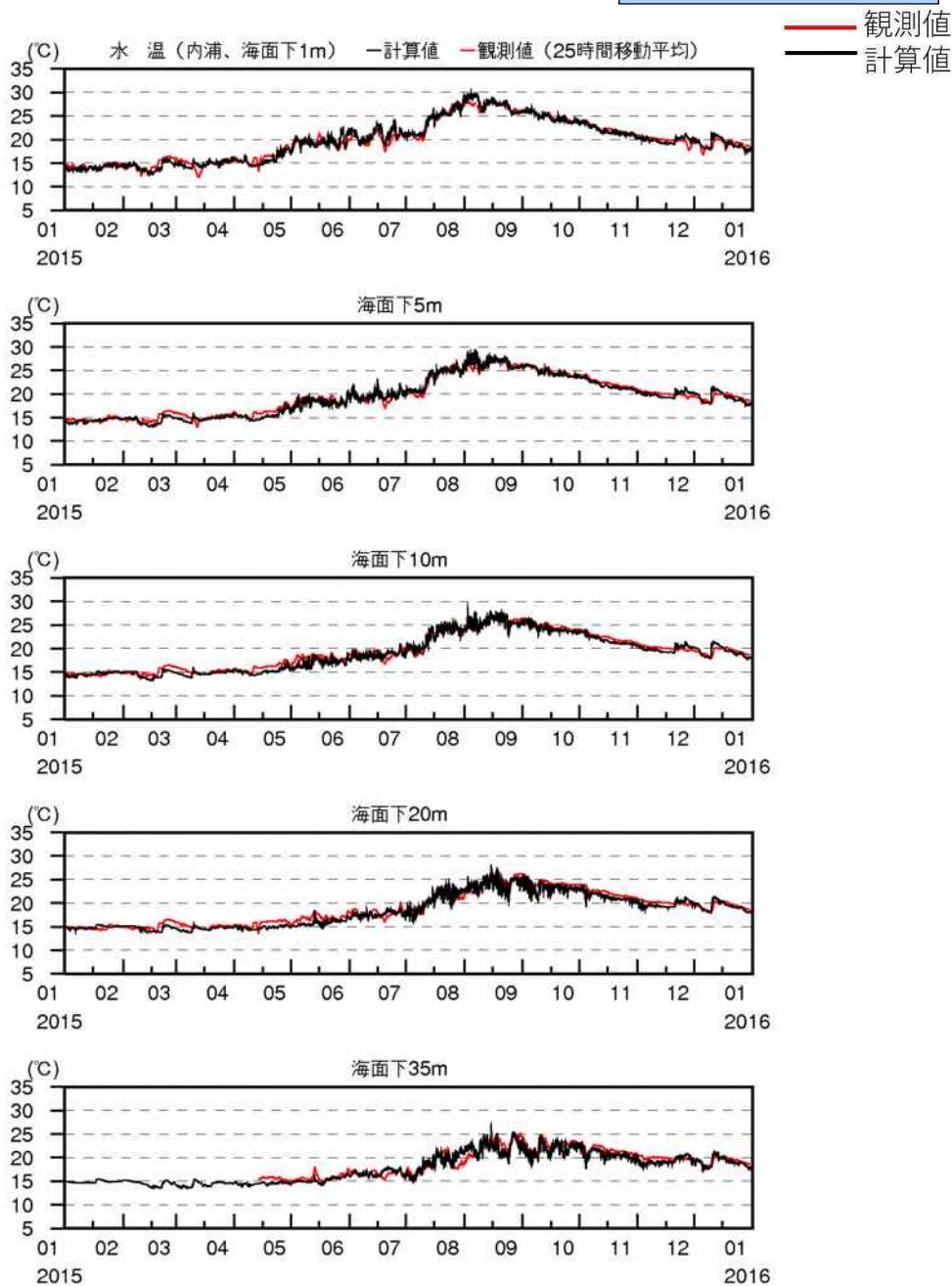


図 16 水温・塩分データとの比較：ブイ観測データとの比較（2015）

妻良



観測値
計算値

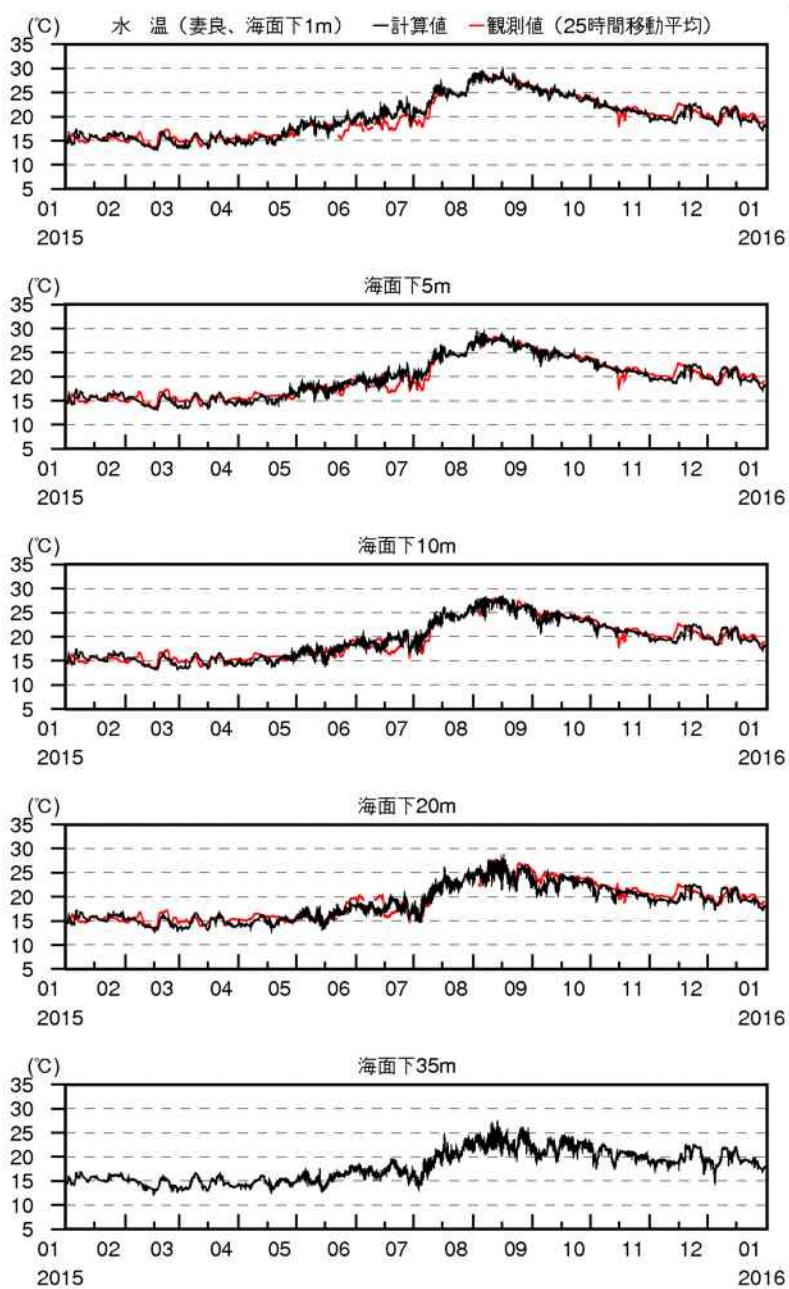


図 17 水温・塩分データとの比較：ブイ観測データとの比較（2015）

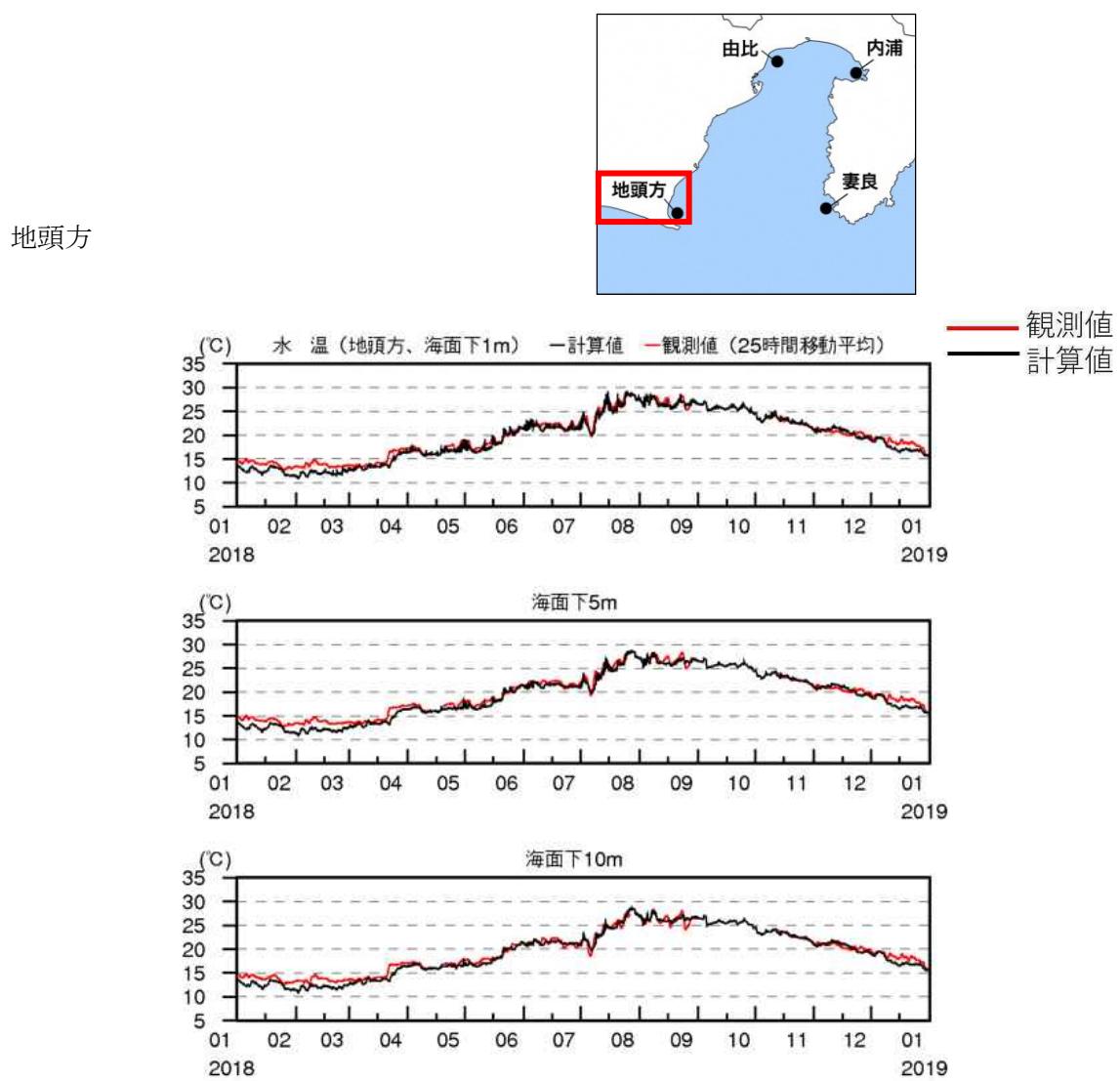


図 18 水温・塩分データとの比較：ブイ観測データとの比較（2018）

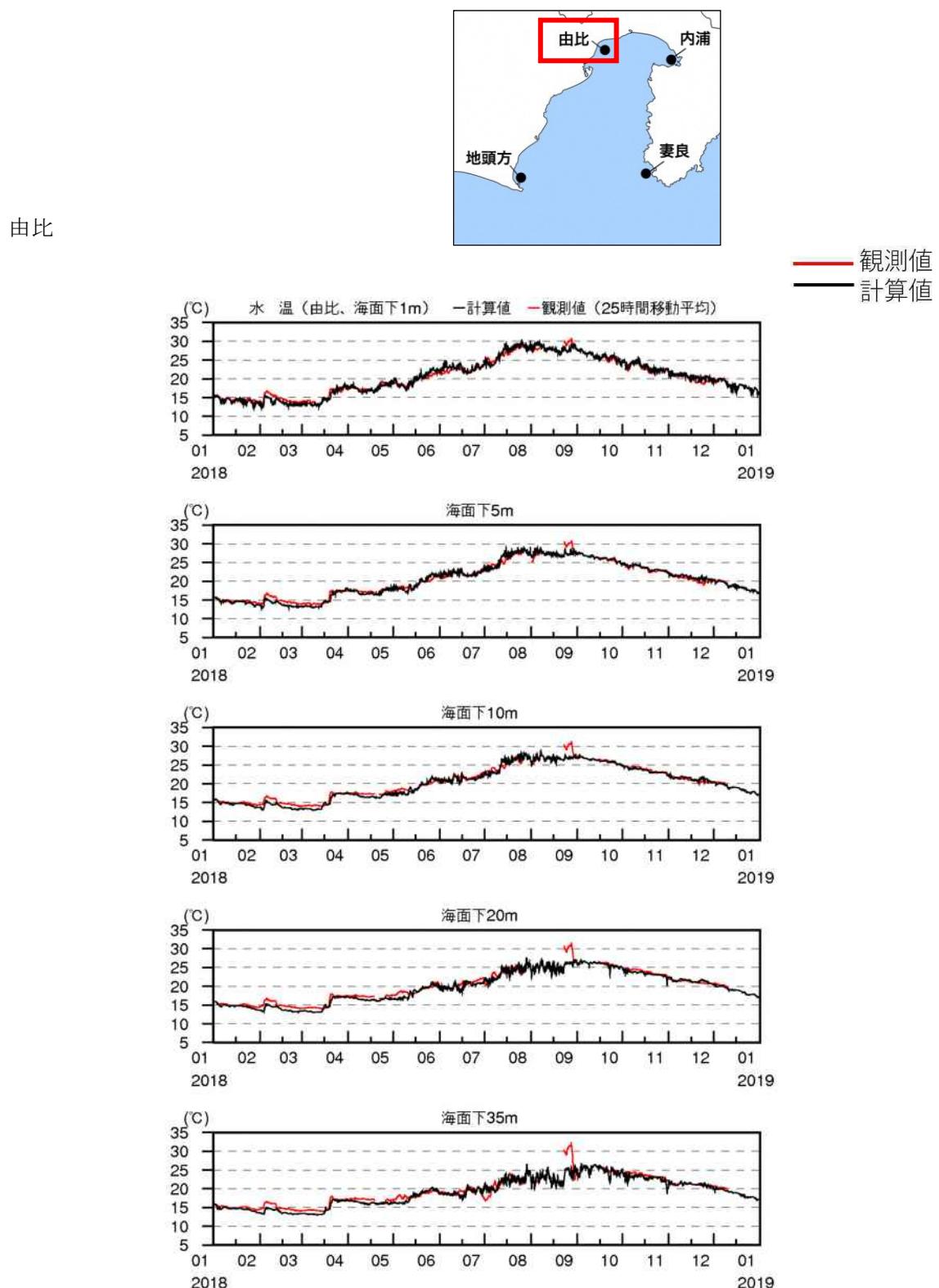


図 19 水温・塩分データとの比較：ブイ観測データとの比較（2018）

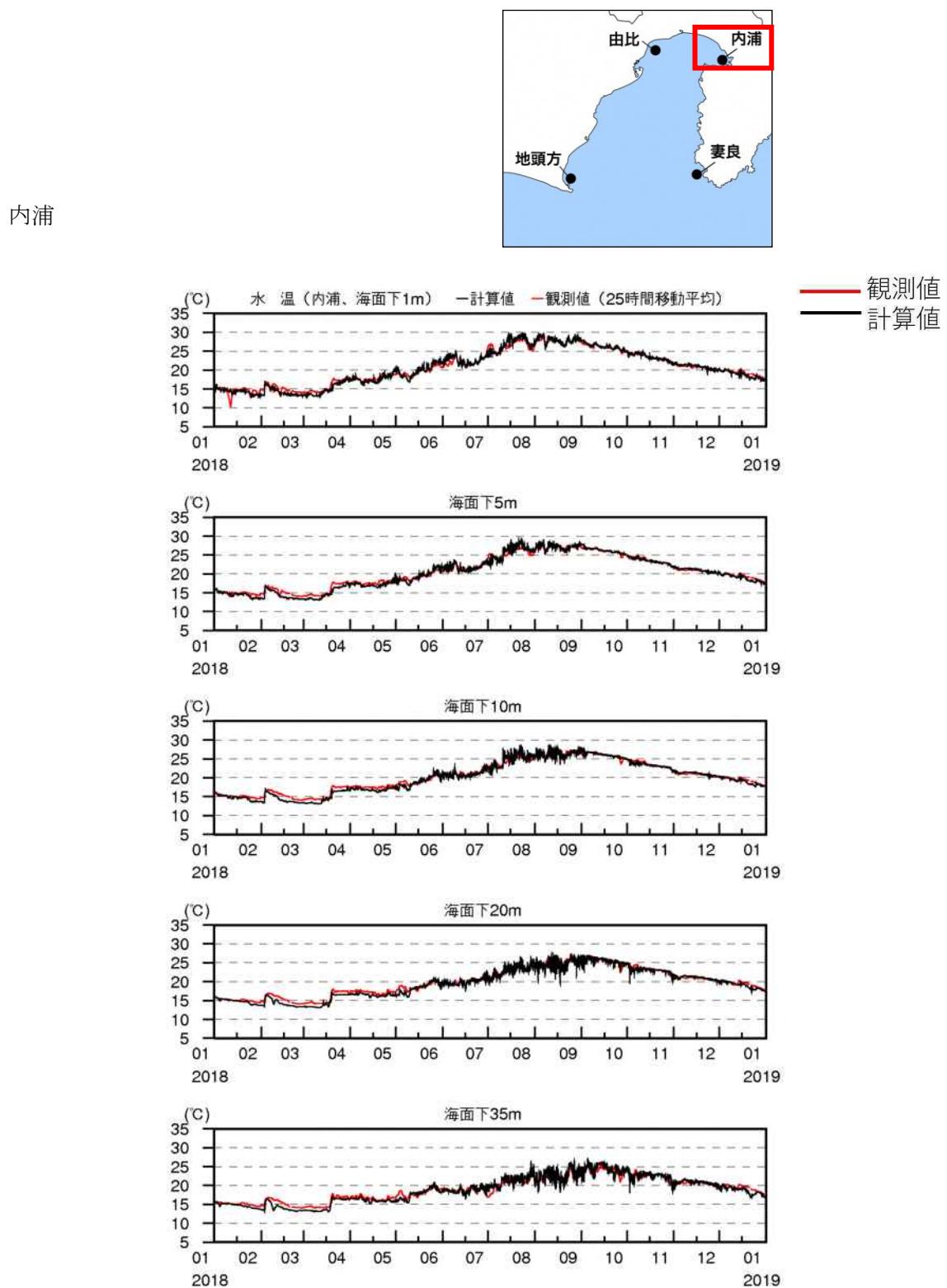


図 20 水温・塩分データとの比較：ブイ観測データとの比較（2018）

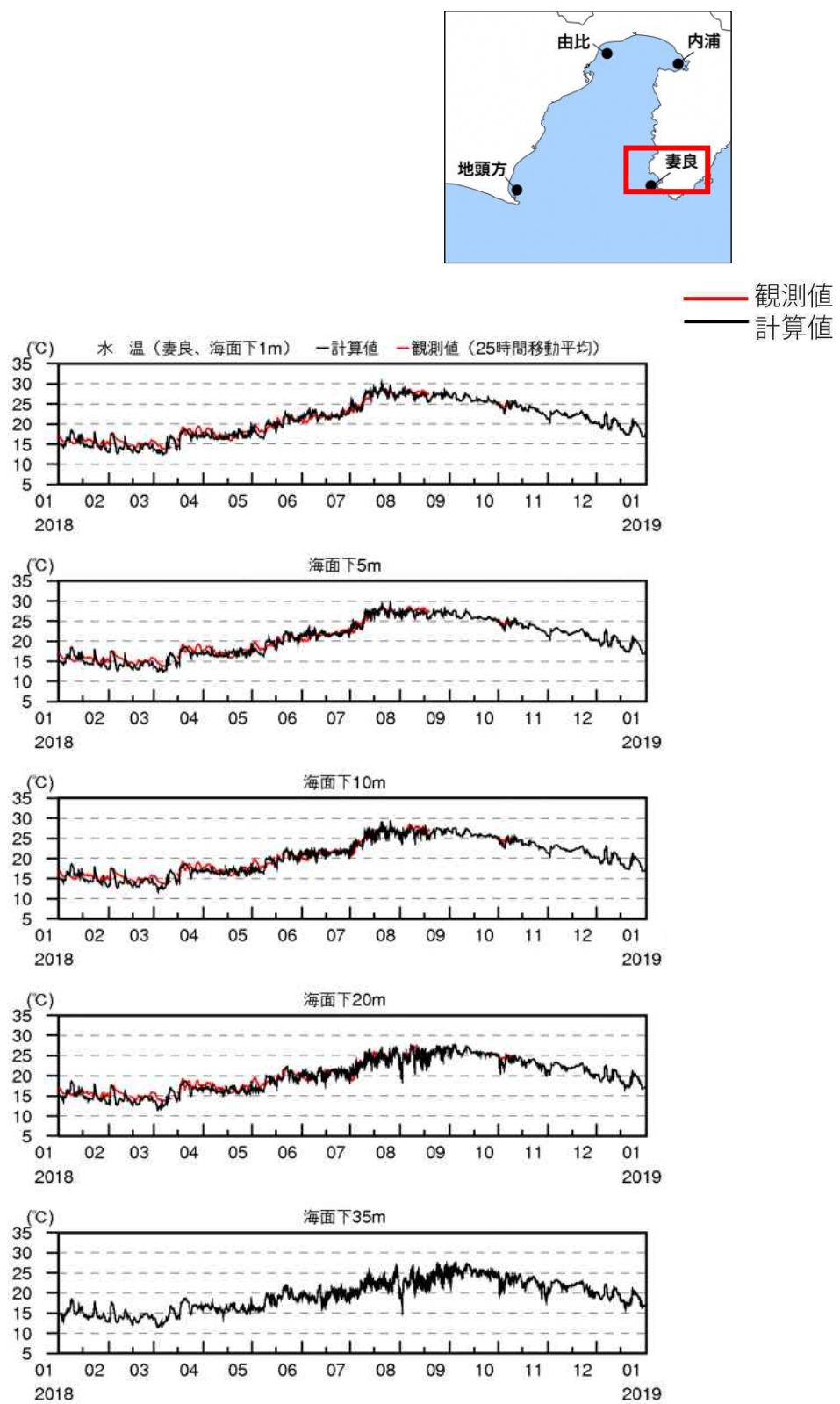
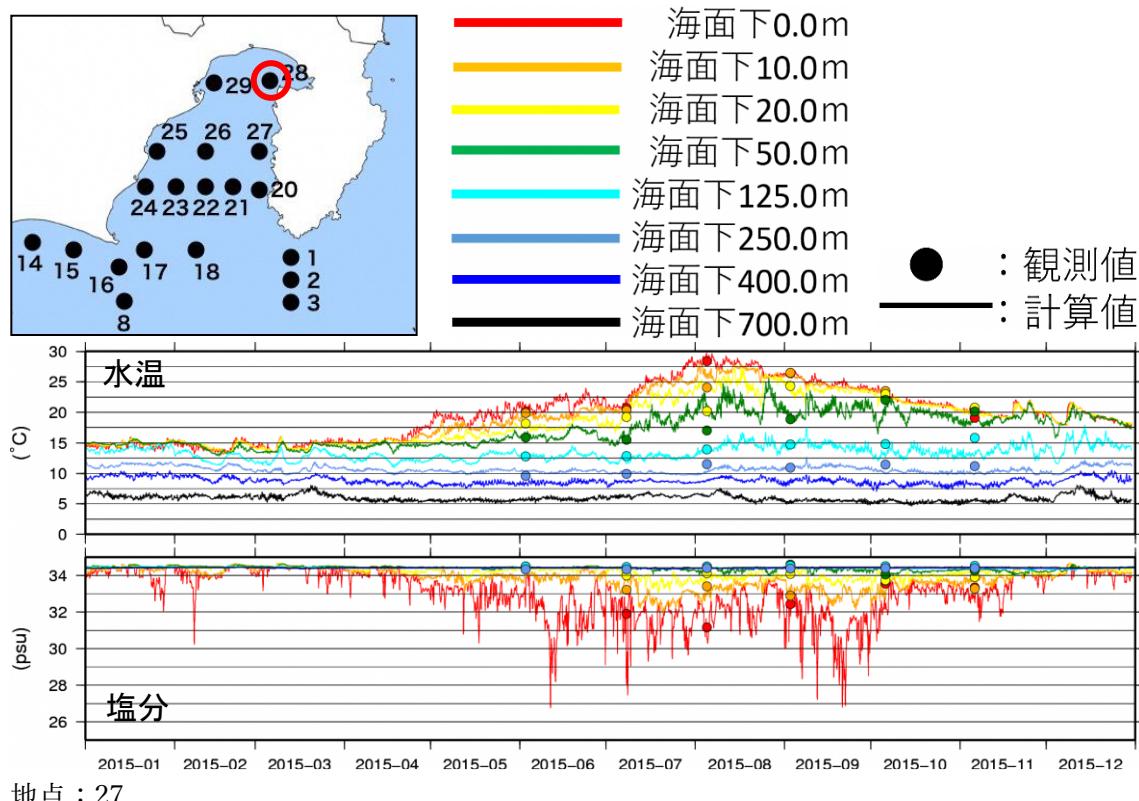


図 21 水温・塩分データとの比較：ブイ観測データとの比較（2018）

地点 : 28



地点 : 27

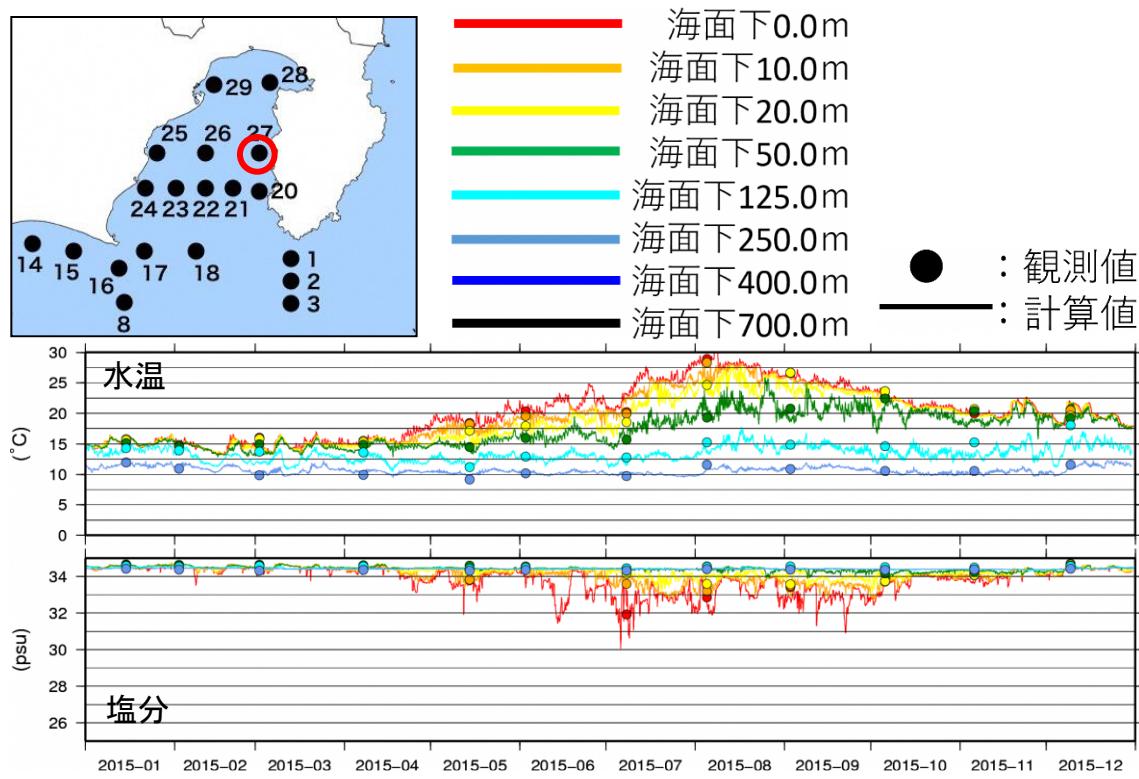
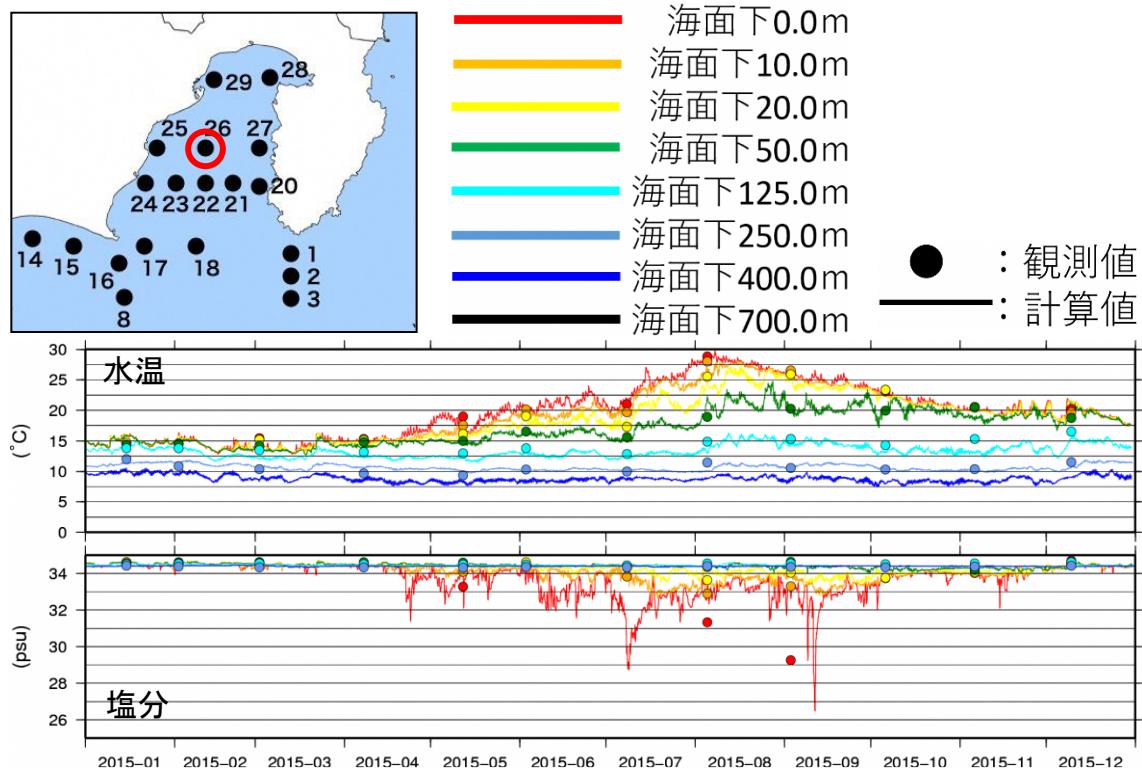


図 22 水温・塩分データとの比較：地先定線観測データとの比較 (2015)

地点 : 26



地点 : 25

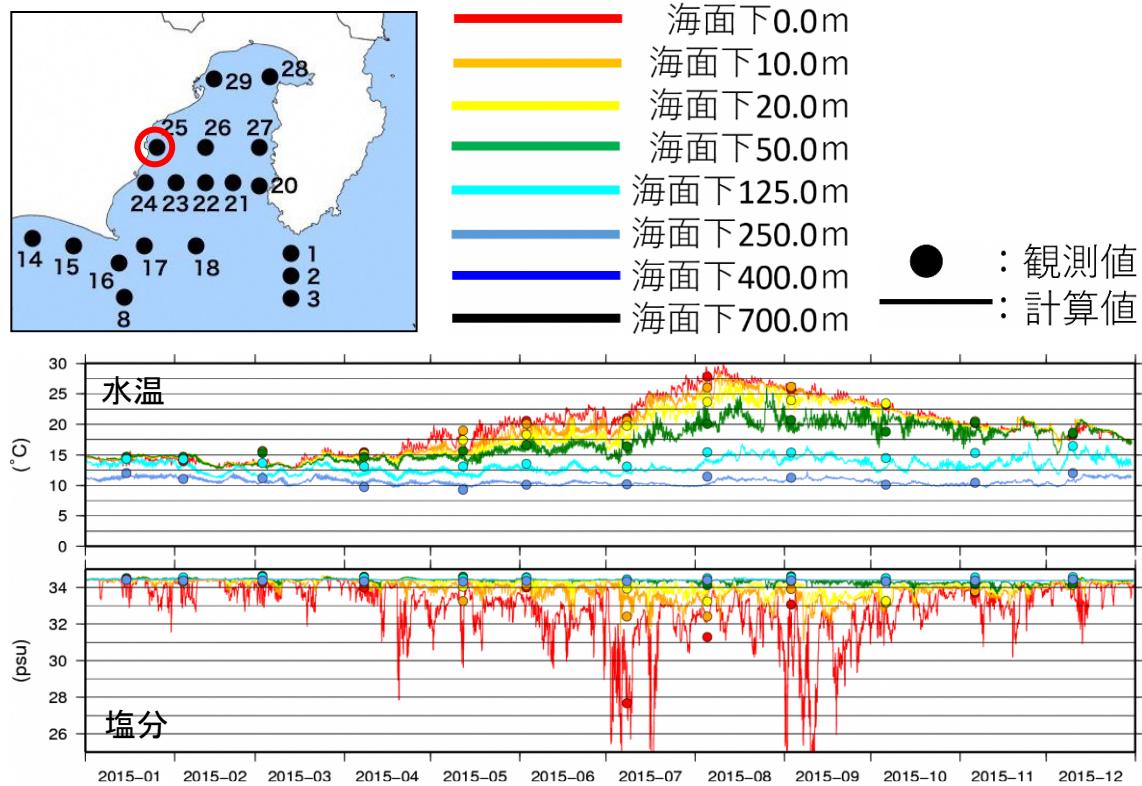
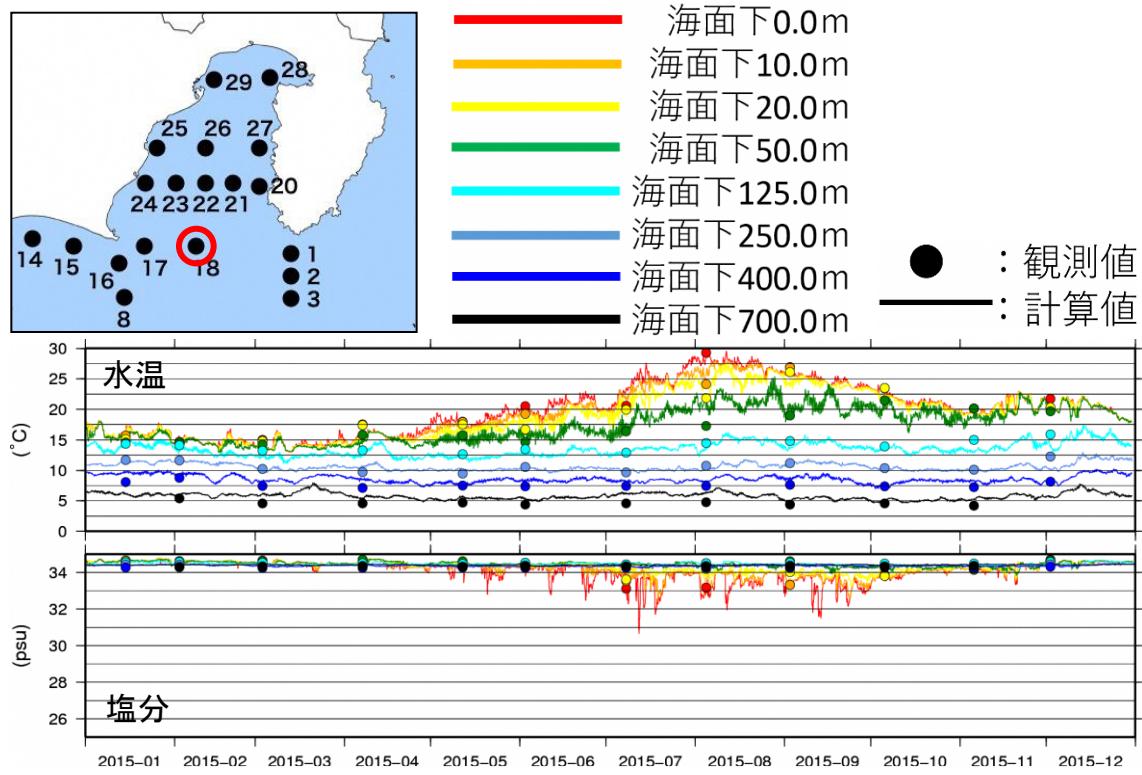


図 23 水温・塩分データとの比較：地先定線観測データとの比較 (2015)

地点 : 18



地点 : 28

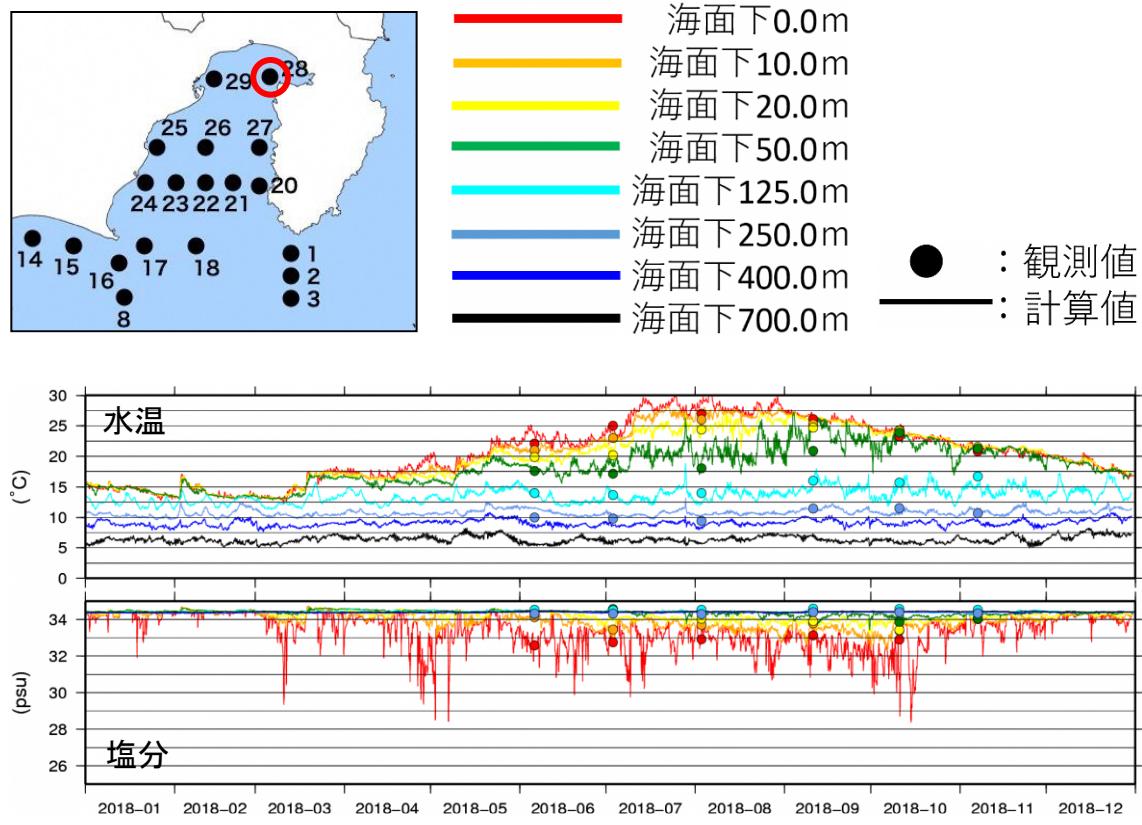
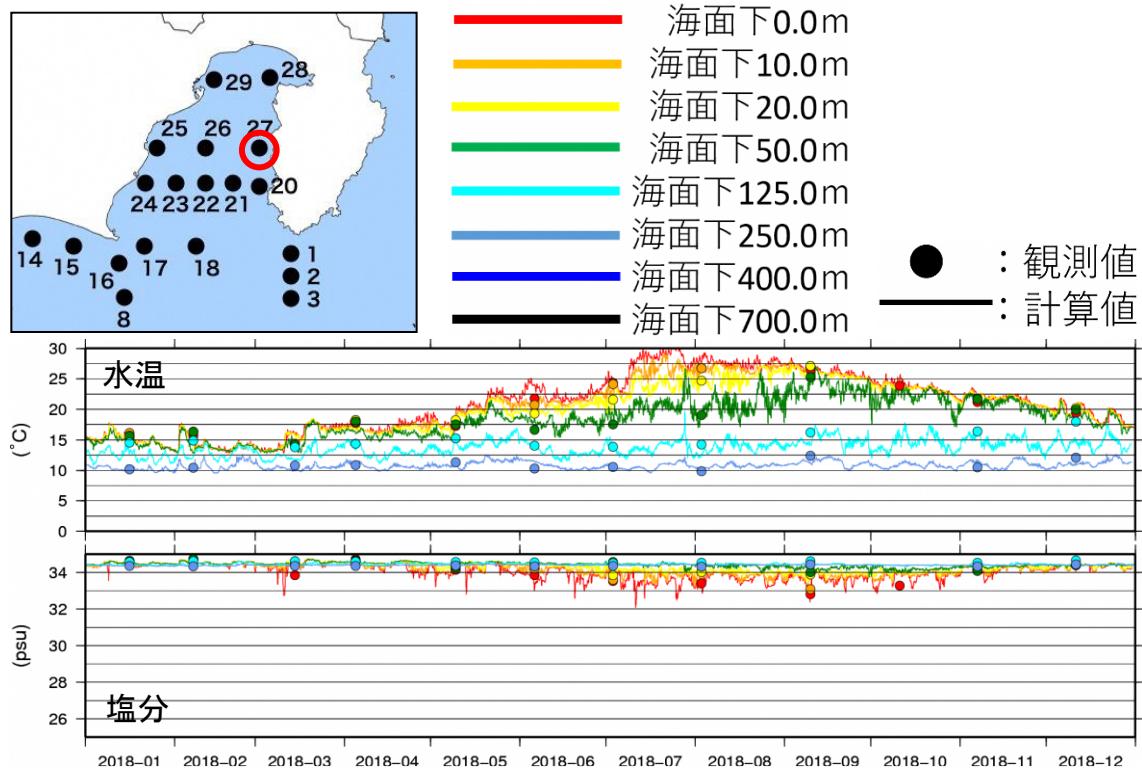


図 24 水温・塩分データとの比較：地先定線観測データとの比較 (2015)

地点 : 27



地点 : 26

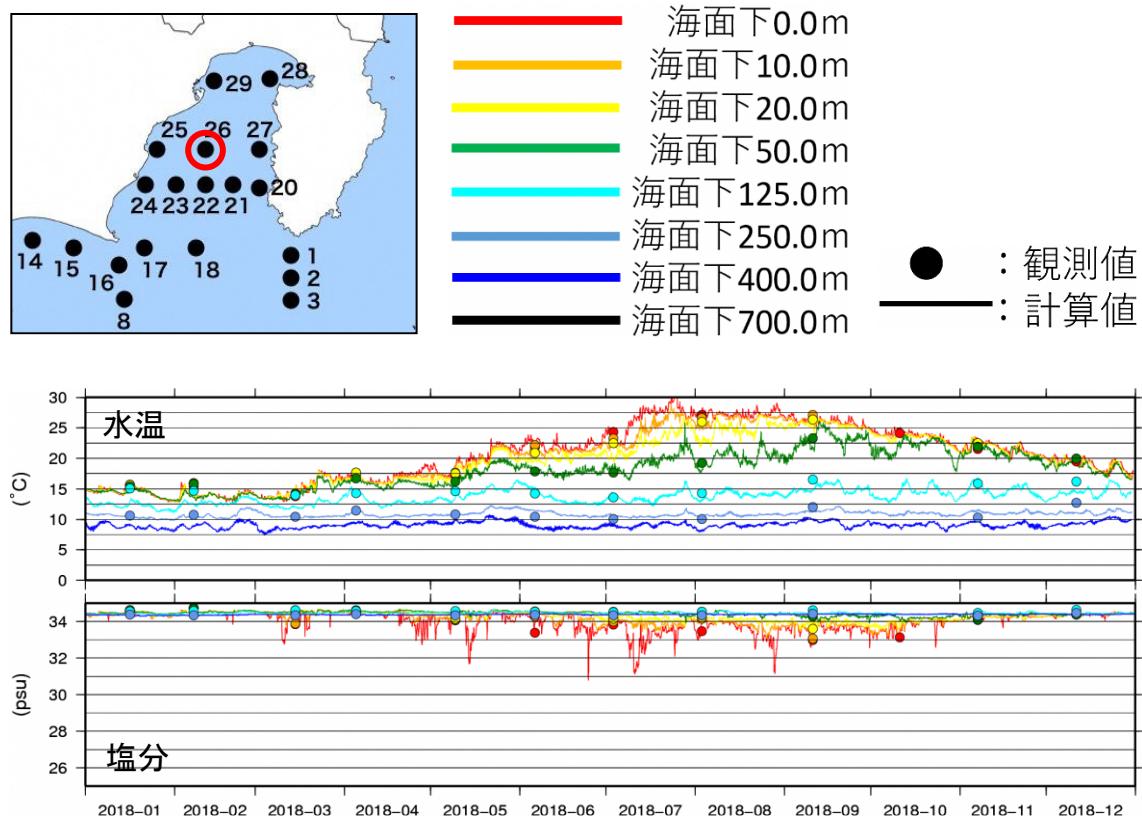
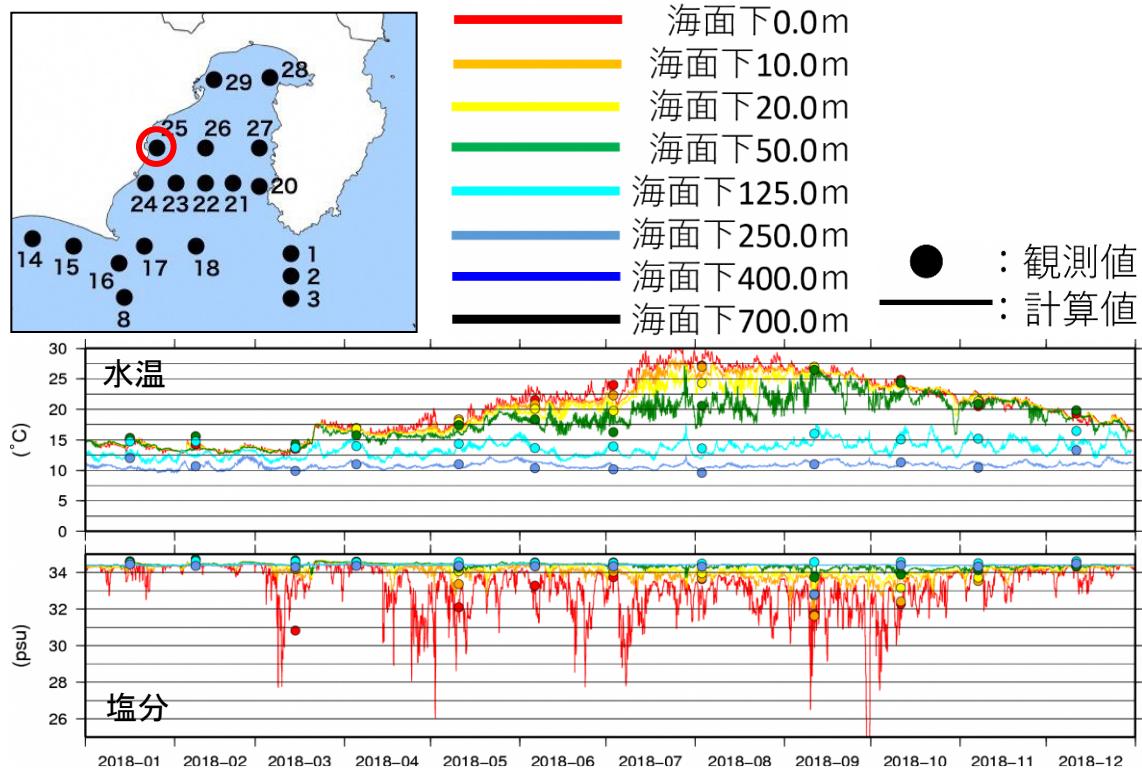


図 25 水温・塩分データとの比較：地先定線観測データとの比較（2018）

地点 : 25



地点 : 18

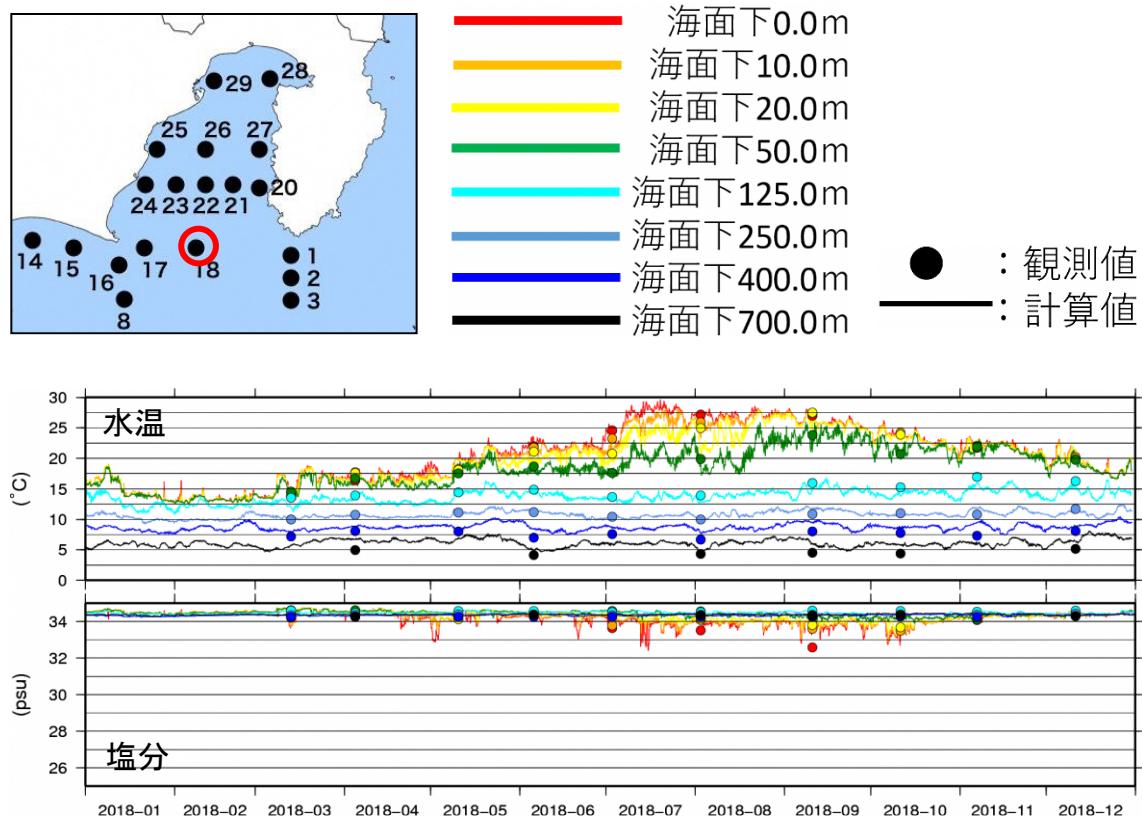
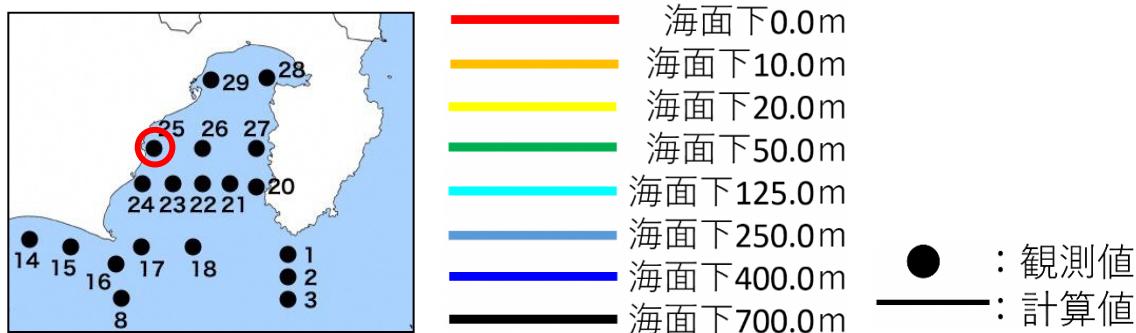
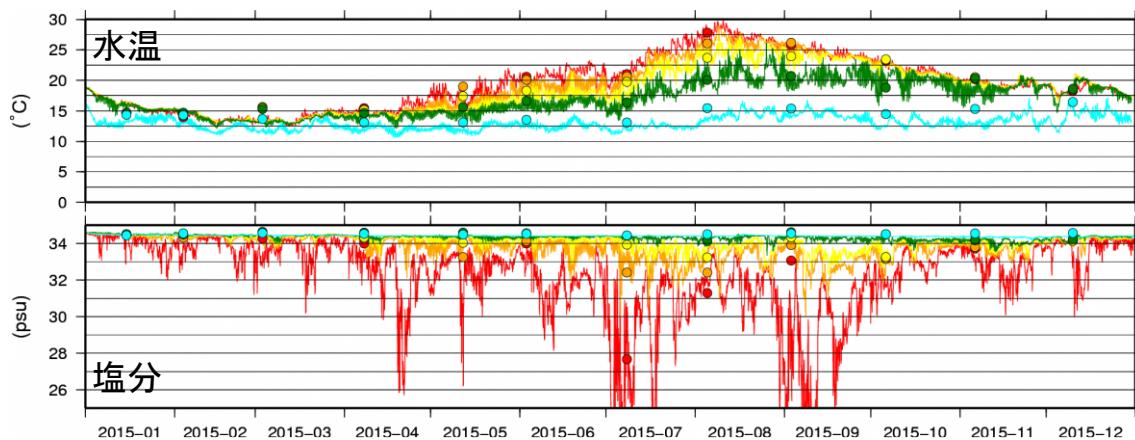


図 26 水温・塩分データとの比較：地先定線観測データとの比較 (2018)

なお、地先定線観測データとの比較については再現性が課題となつたが、助走計算を設定したことで、1月水温が低下、陸域モデル条件の変更により表層塩分が低下して、いずれも再現性が高まつた。



【第2回海域部会でのケース】



【修正ケース（陸域モデルの結果を更新）】

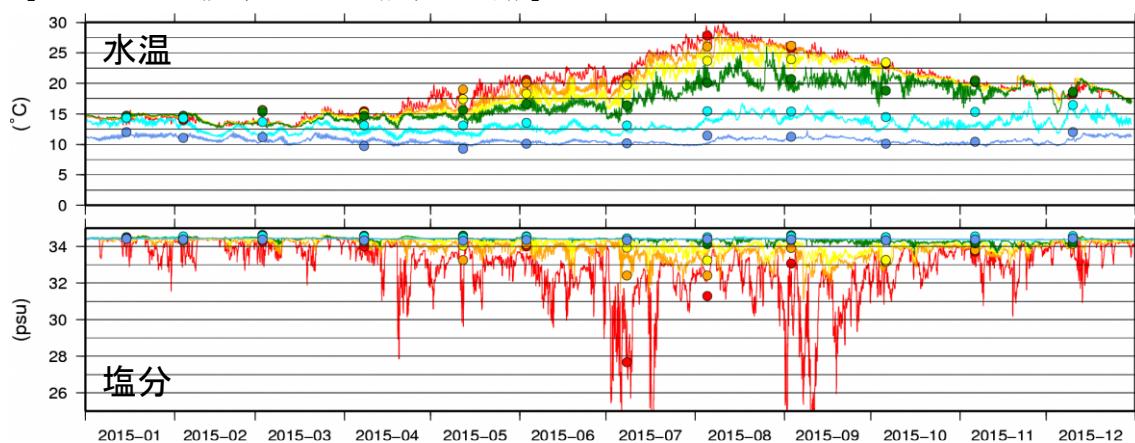
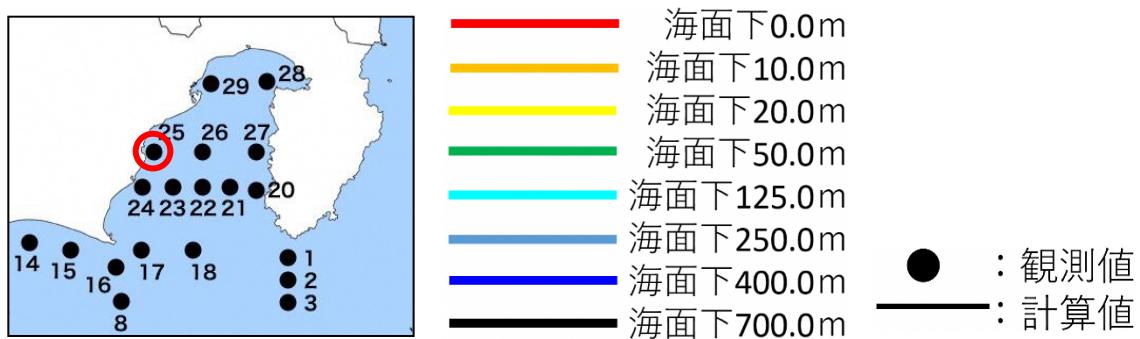
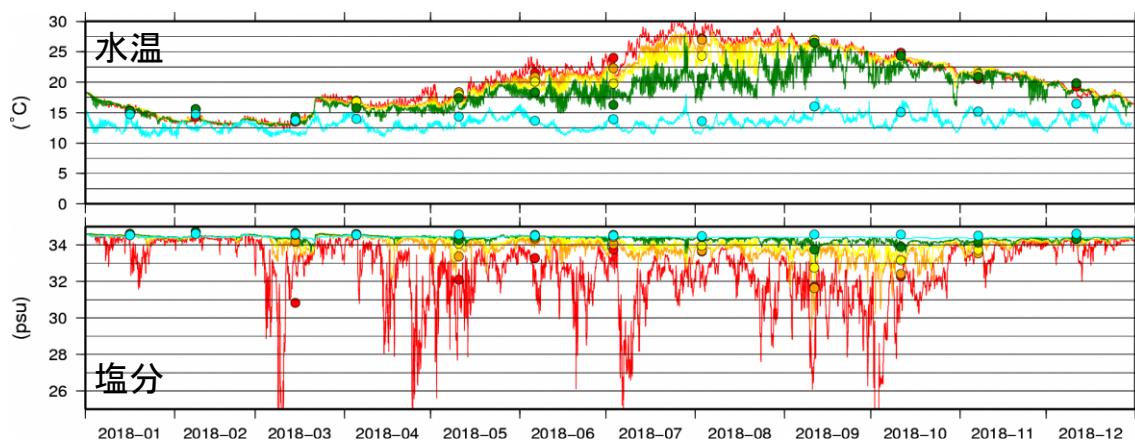


図 27 水温・塩分データとの比較：再現性の修正



【第2回海域部会でのケース】



【修正ケース（陸域モデルの結果を更新）】

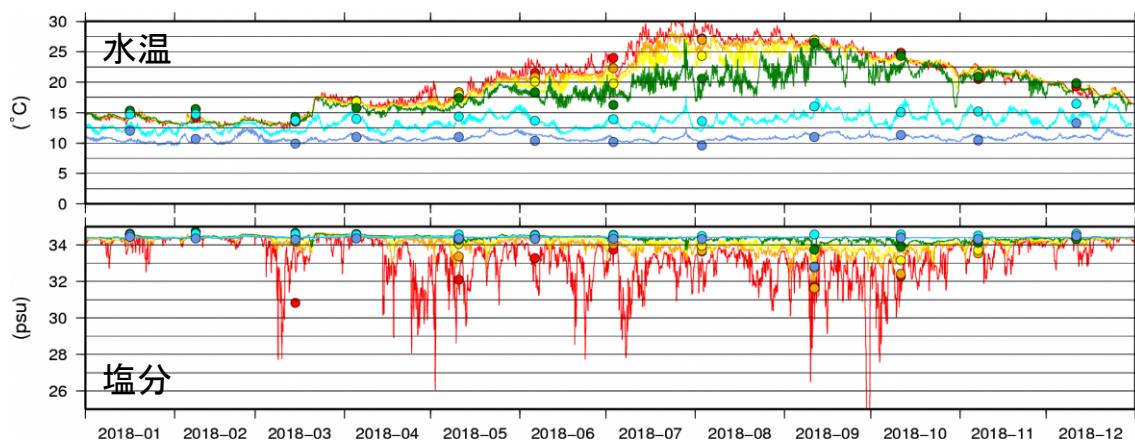


図 28 水温・塩分データとの比較：再現性の修正

地先定線観測による水温の鉛直分布確認では同様に混合層が浅い傾向がみられた。2018年の冬季（1月）で顕著であった。

鉛直拡散の状況について確認した結果、鉛直拡散係数は冬季に増加する傾向は再現された。なお、水深50～100mで鉛直拡散係数は急激に低下傾向にあった。

以上の課題を解決するために、以下の対応を行った。

- ① 水深 100m 以深では、鉛直解像度が粗くなる（50m 程度）。これは河口近くの水深帯の解像度を確保するため。⇒鉛直解像度の再調整
- ② 鉛直拡散係数のパラメタリゼーションの調整

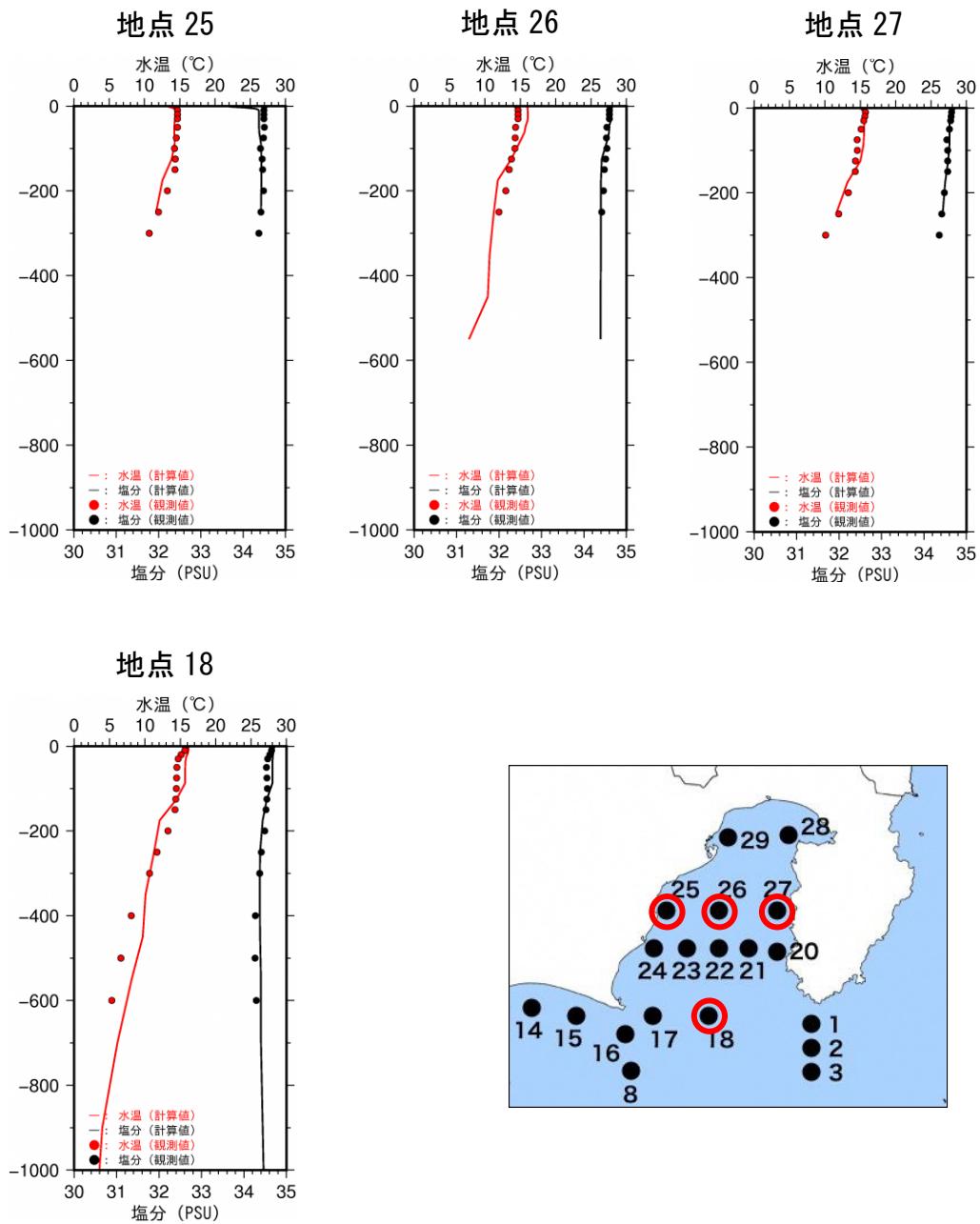


図 29 地先定線観測による水温の鉛直分布（2015年1月）

地先定線観測による水温の鉛直分布（2018年1月）

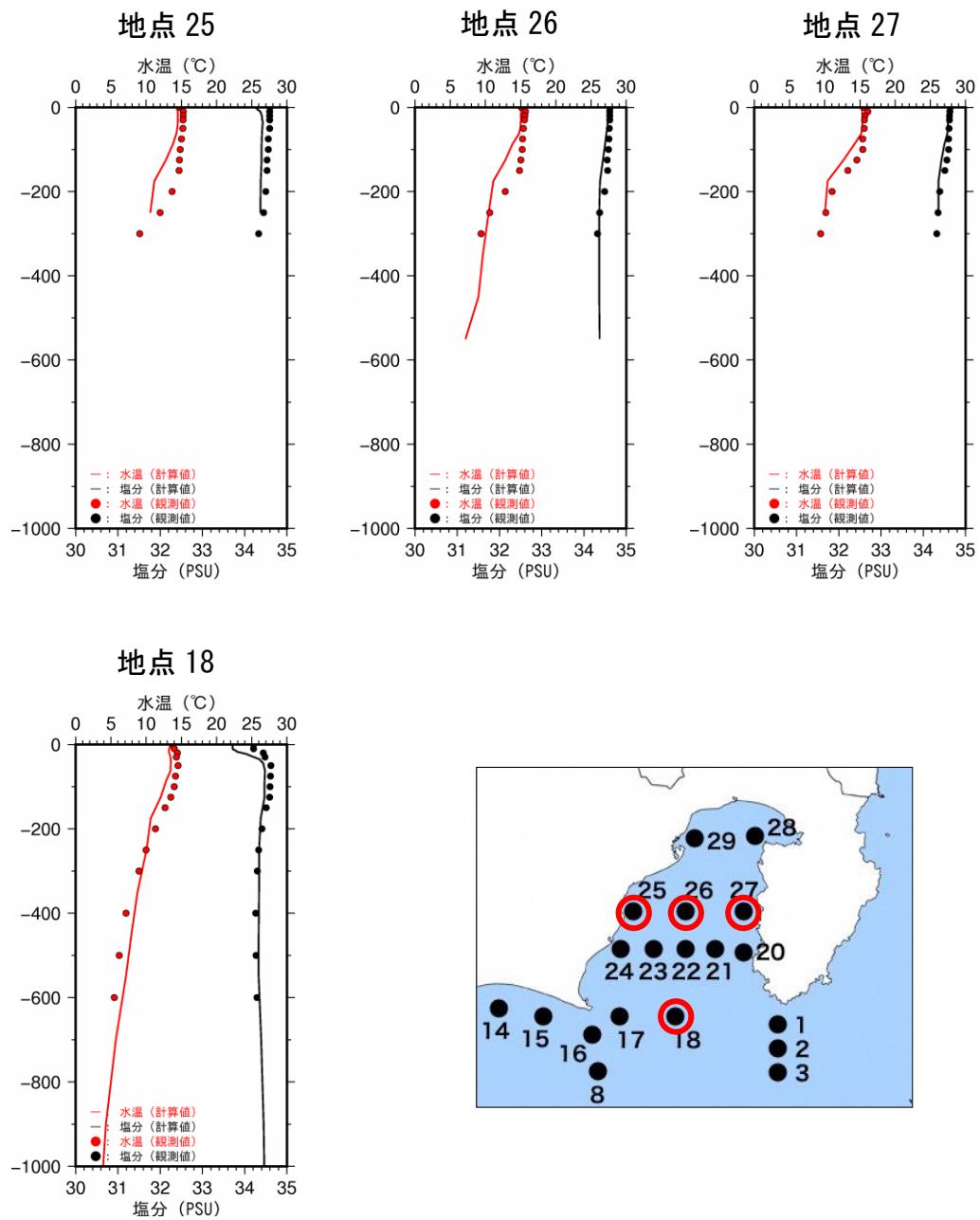
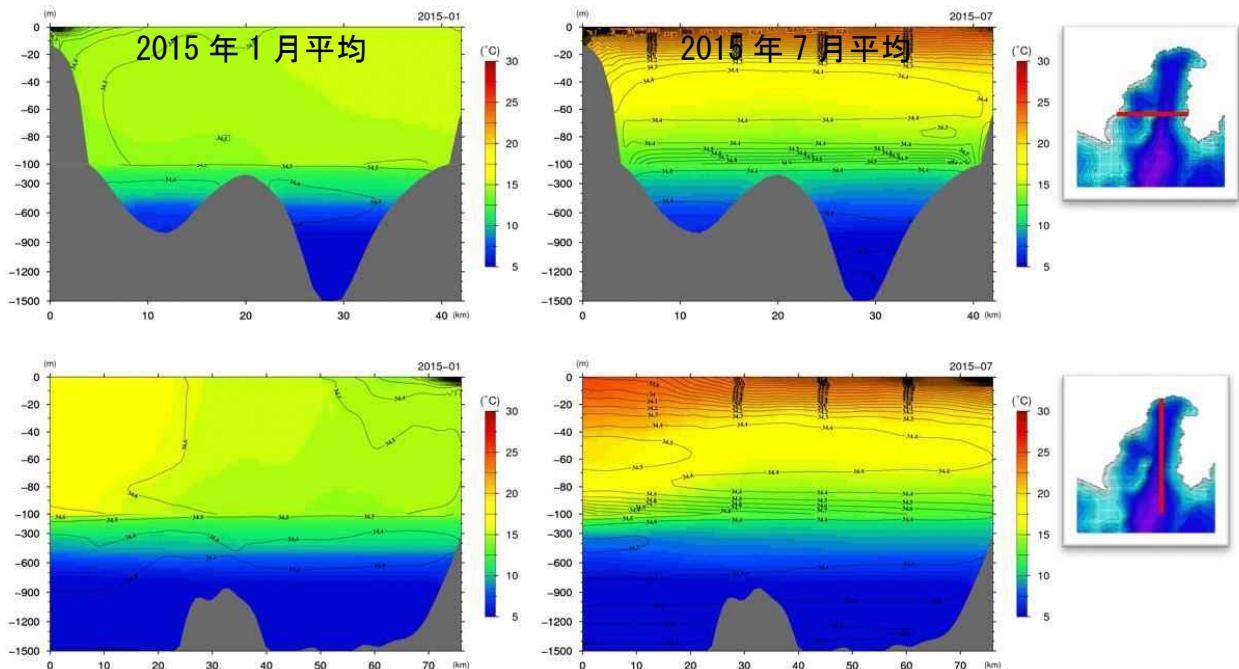


図 30 地先定線観測による水温の鉛直分布（2018年1月）

- 冬季の混合層は 100m 程度まで形成され、実測値よりやや浅い傾向
- 湾奥、湾西部で塩分成層が顕著



- 冬季の混合層は 100m 程度まで形成。→ 実測値よりやや浅い傾向
- 湾奥、湾西部で塩分成層が顕著

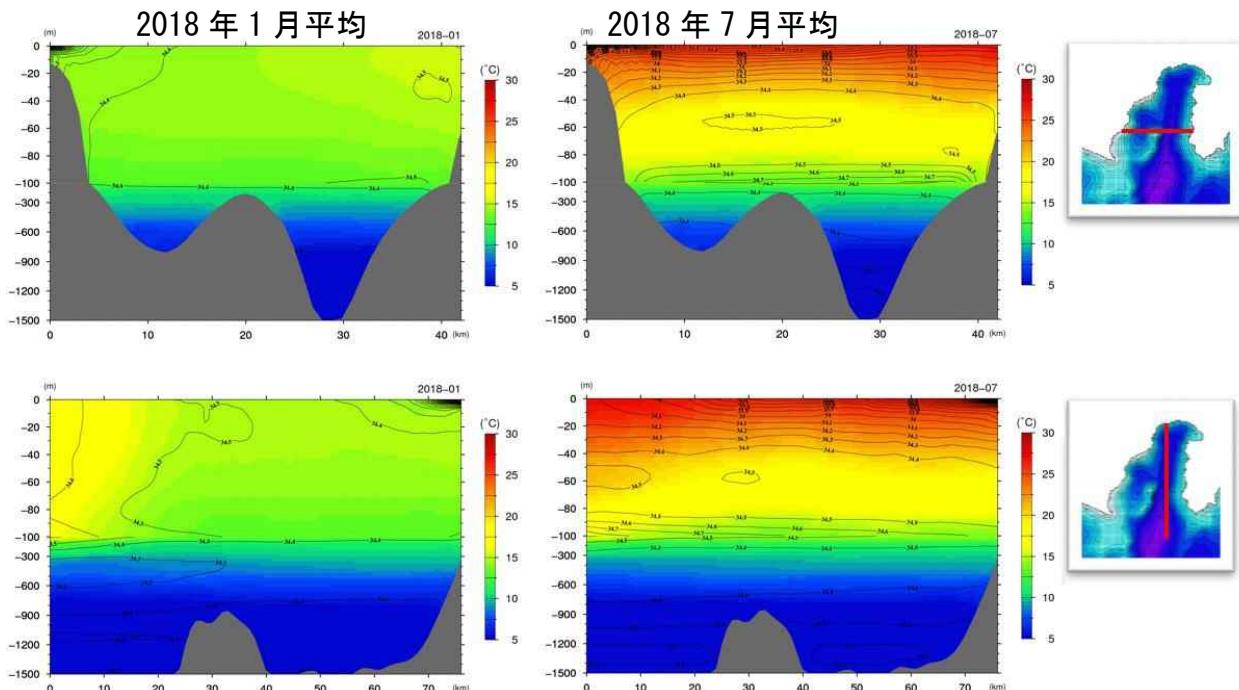


図 31 水温・塩分の分布（水温：カラー、塩分：実線）

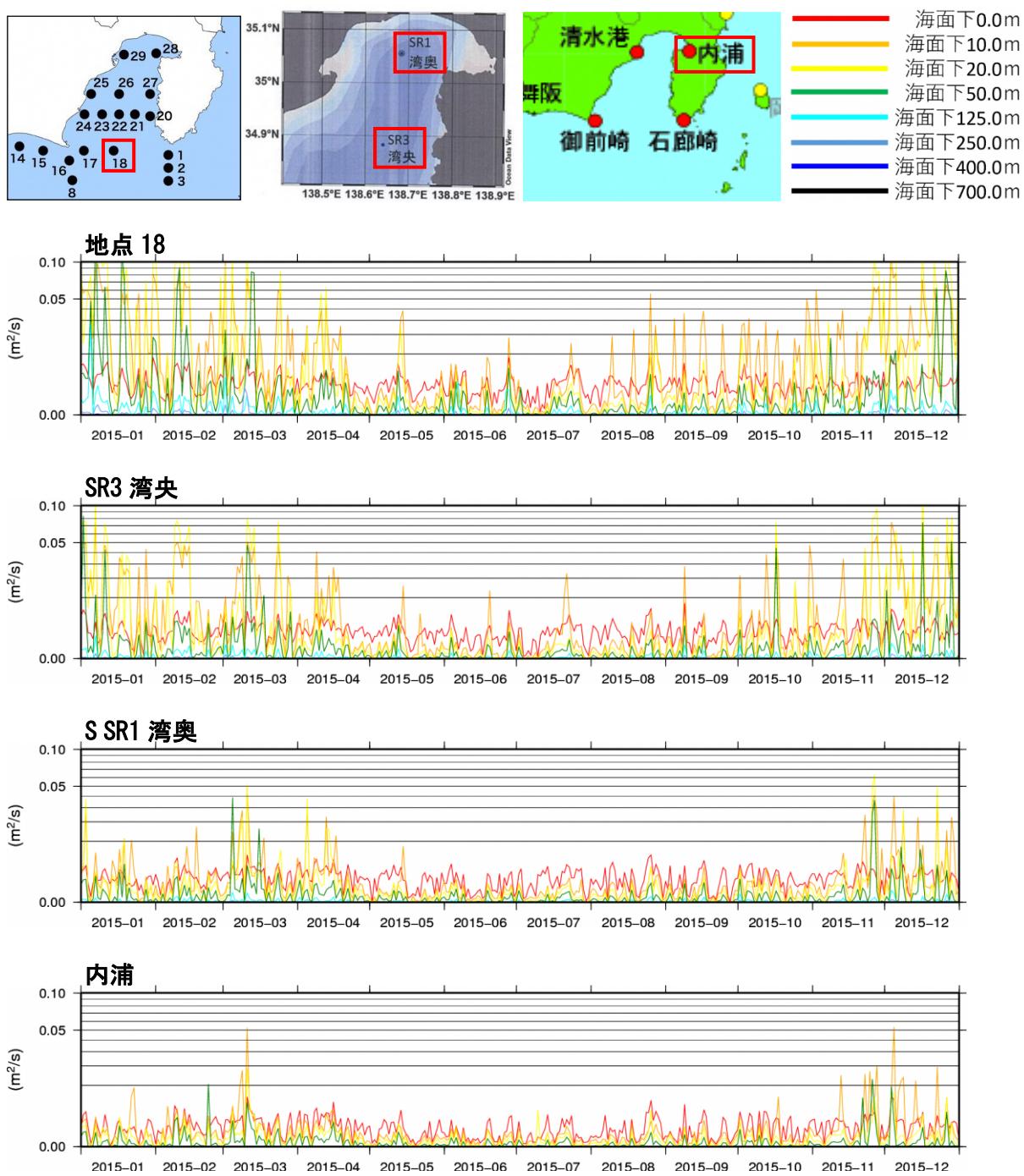


図 32 鉛直拡散の状況

- 冬季の鉛直混合は大きく、80~100mで活発。
- 夏季は鉛直混合は小さい。

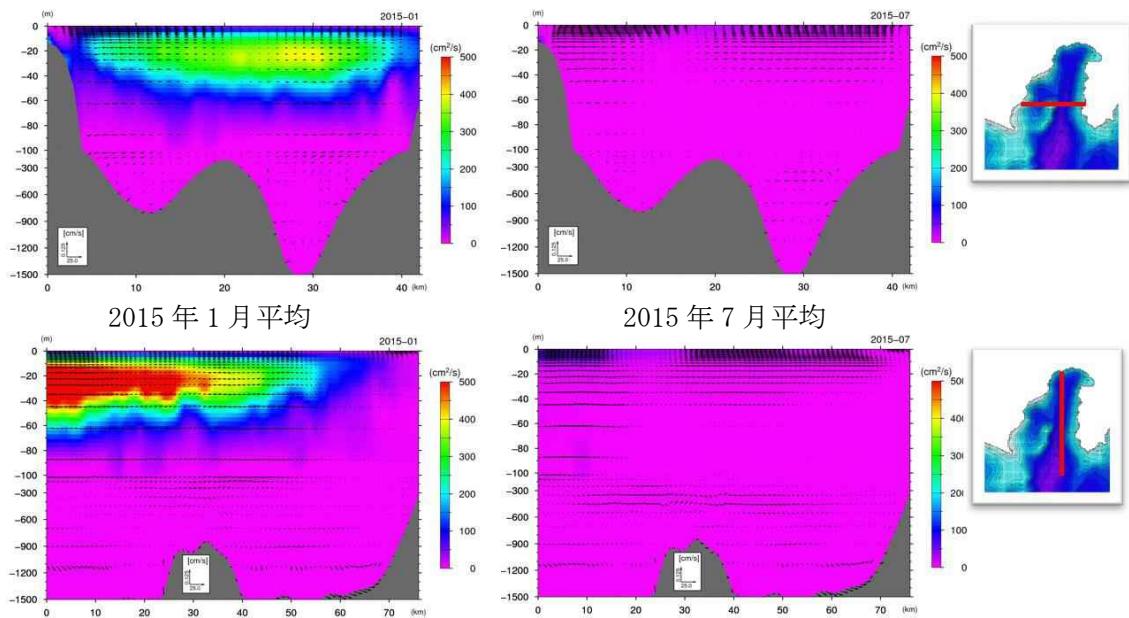
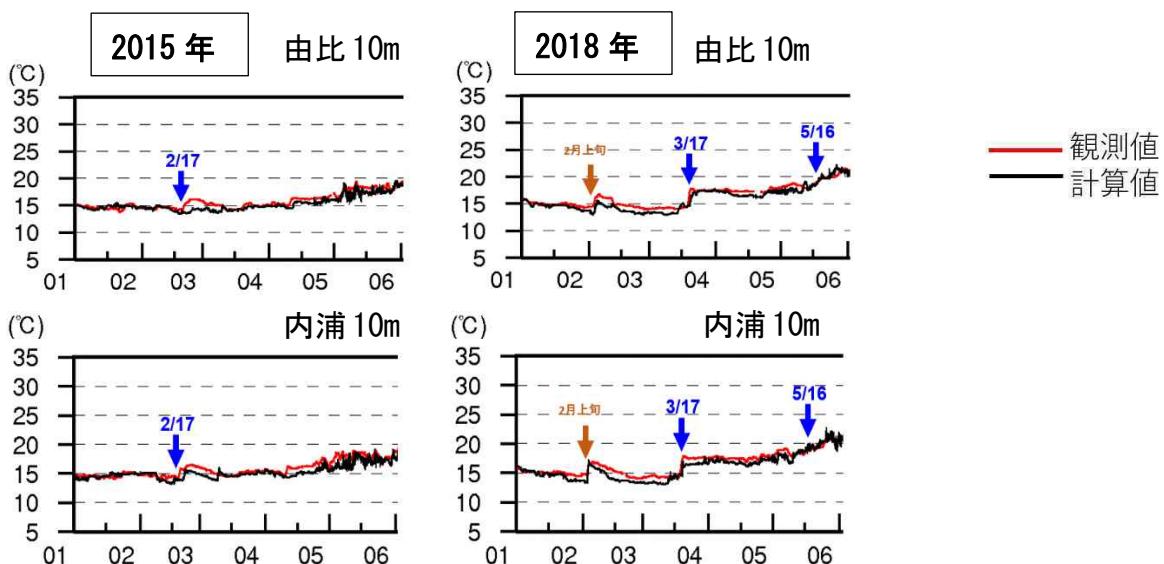


図 33 鉛直拡散の状況（鉛直拡散係数の分布）

(才) 急潮の再現

2015年2月17日、2018年3月17日に急潮と考えられる水温の急上昇が計算・観測とともに明瞭に確認された。このような駿河湾での特徴的な現象も再現できていることを確認できた。



※青矢印は静岡県水産・海洋技術研究所がHPで発表した急潮情報のうち水温上昇が示されていた日

https://fish-exp.pref.shizuoka.jp/01ocean/rapid_tide_list.html

図 34 急潮現象とその再現

2018年3月17日～3月20日（10m）の計算値と関東・東海海況速報による実測値を図35に示す。伊豆半島に沿って駿河湾内に侵入する暖水（急潮）についてタイミングや水温なども再現されていた。

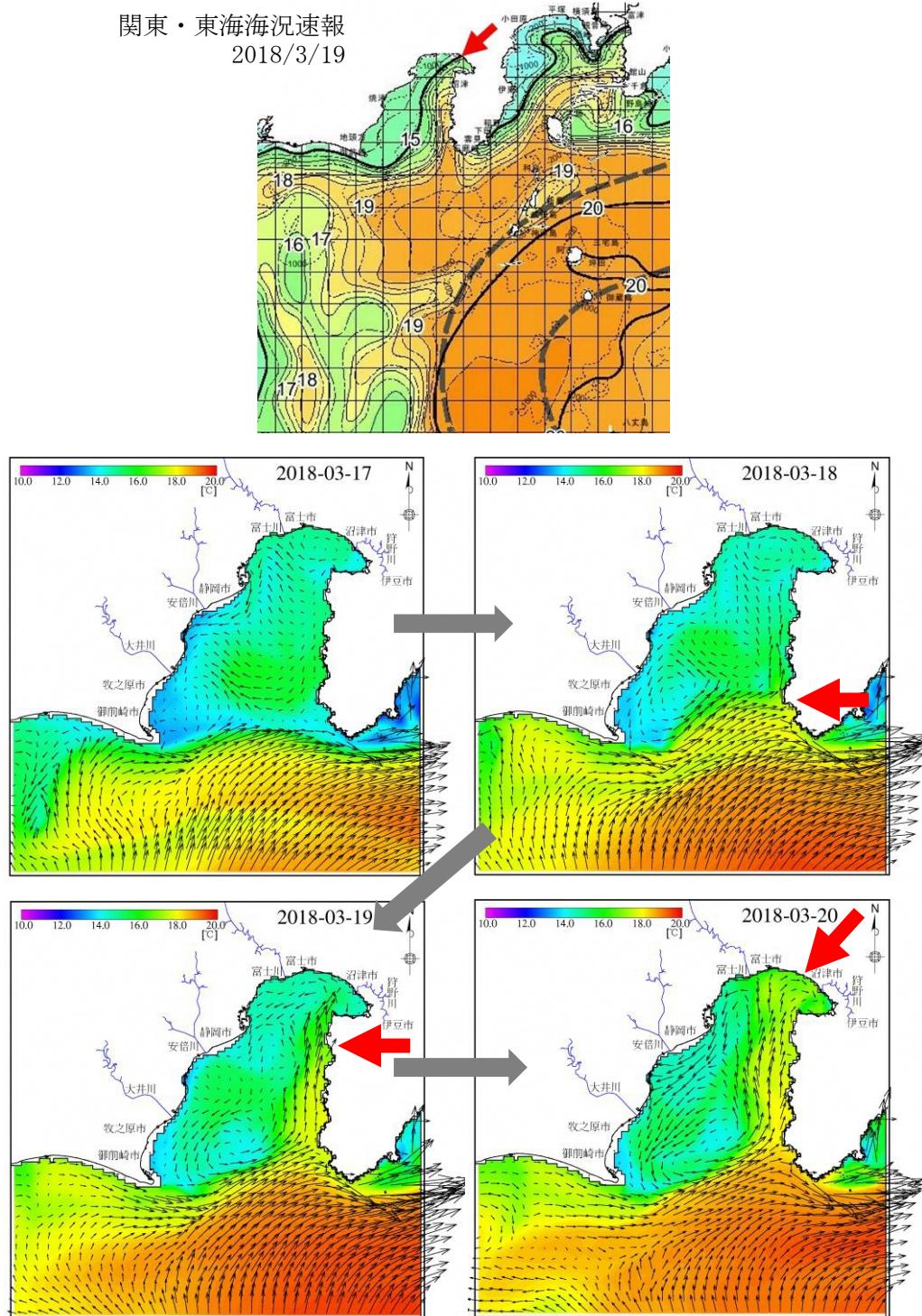
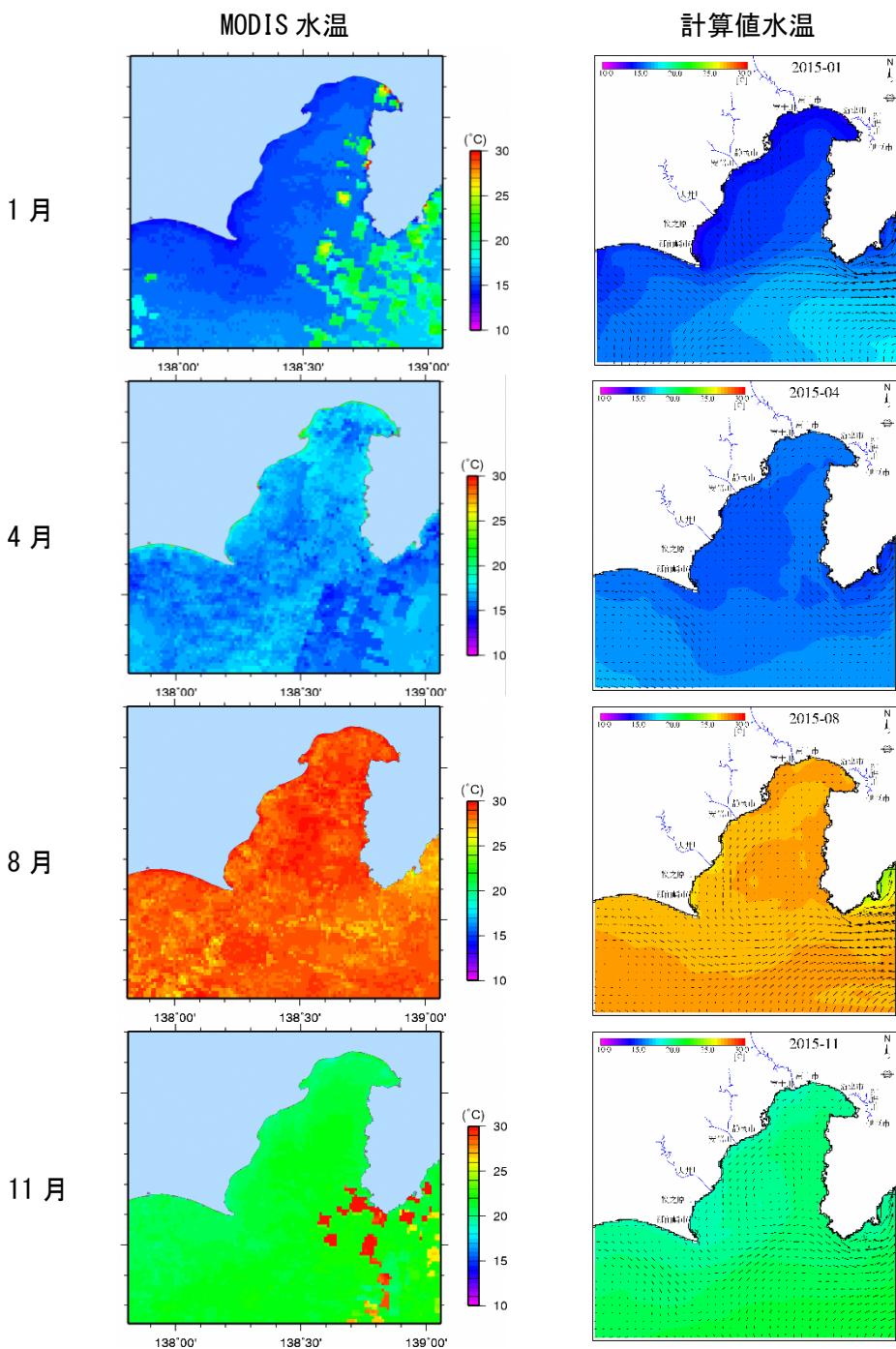
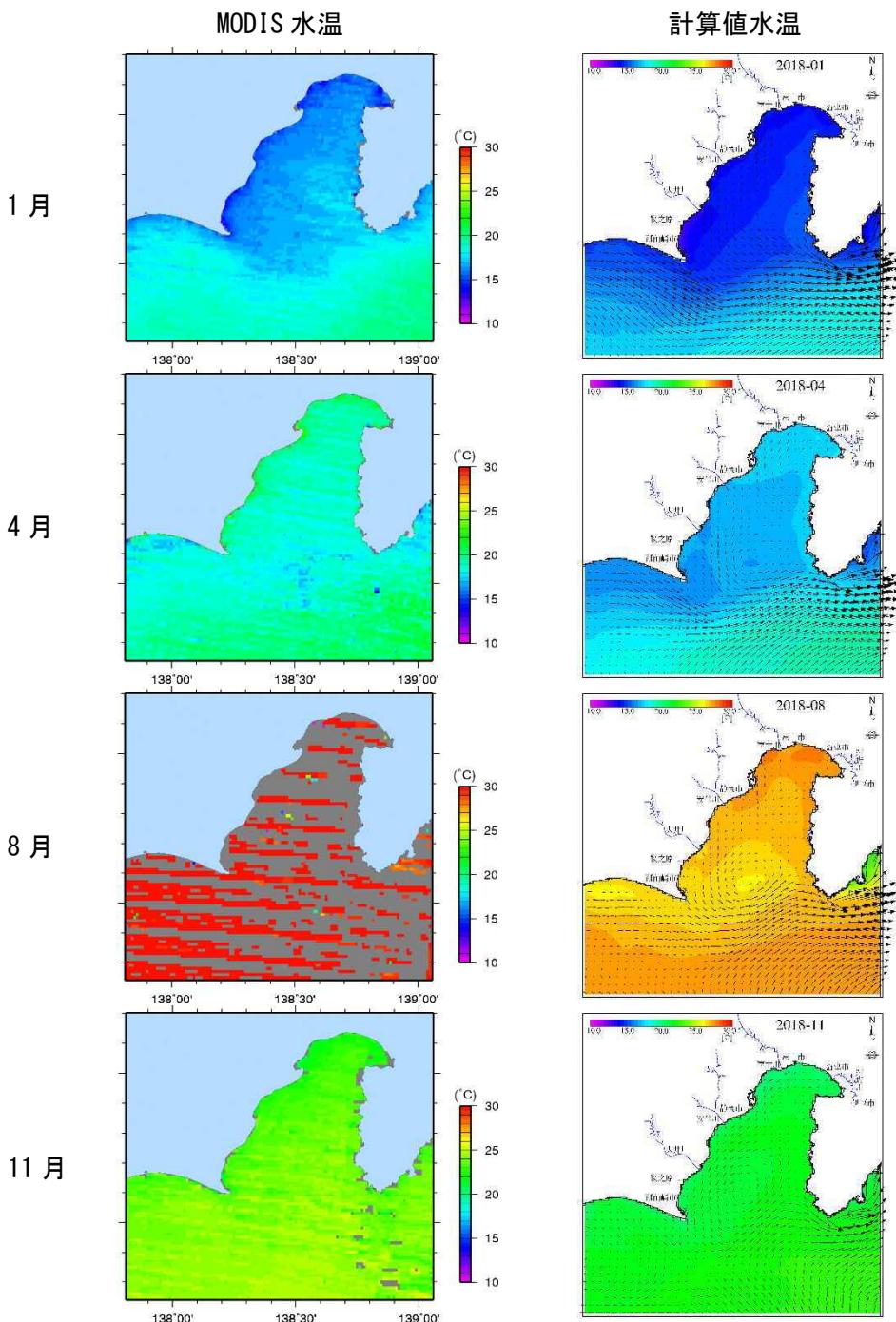


図 35 2018年3月17日～3月20日（10m）の計算値と実測値



※計算値の流速ベクトルは3格子ごとに間引いて表示

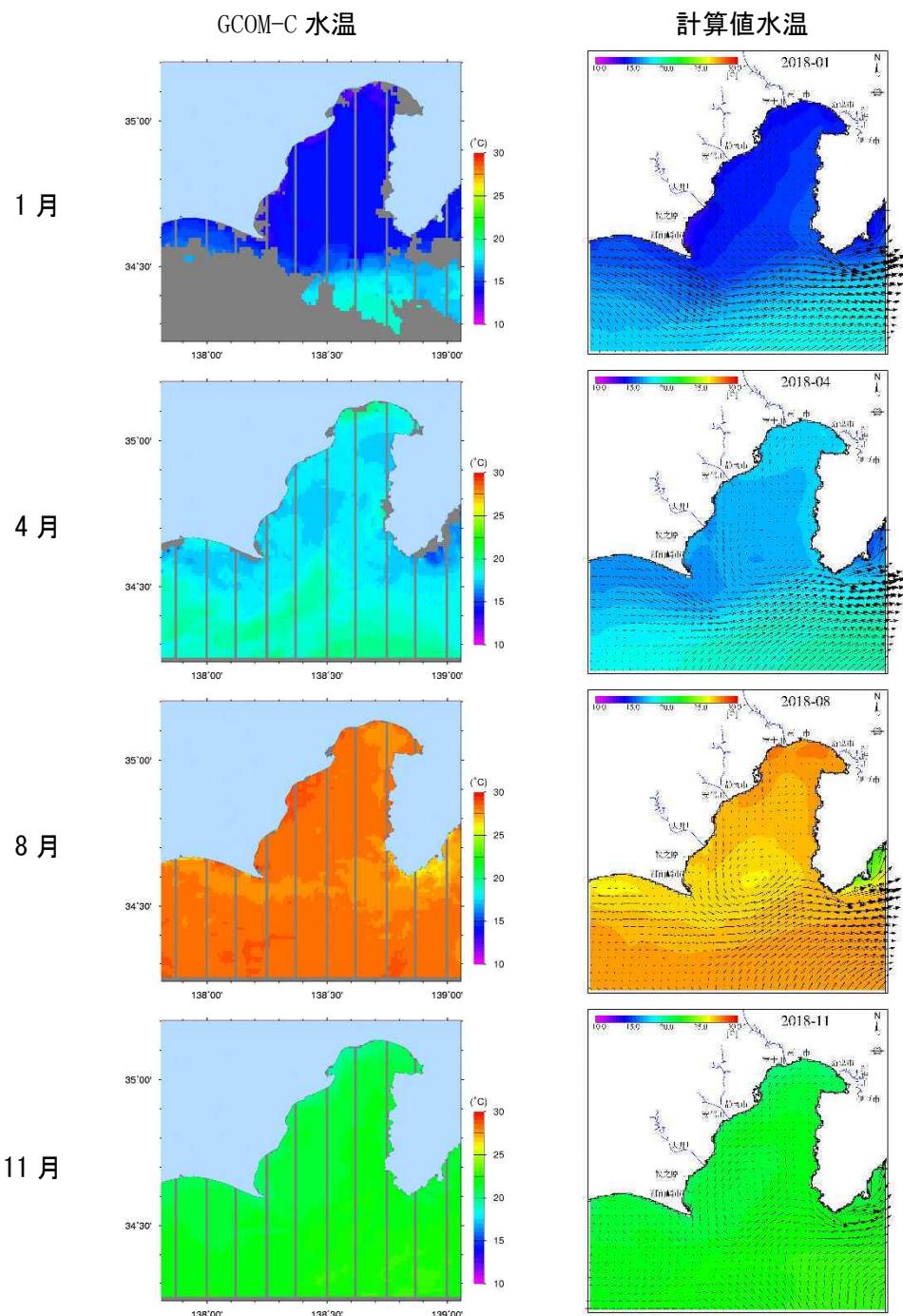
図 36 海面水温の再現状況（衛星データ（MODIS、GCOM-C）との比較（2015年）



※計算値の流速ベクトルは3格子ごとに間引いて表示

図 37 海面水温の再現状況（衛星データ（MODIS、GCOM-C）との比較（2018年）

衛星データ（MODIS、GCOM-C）との比較（2018年）



※計算値の流速ベクトルは3格子ごとに間引いて表示、GCOM-Cデータは雲などの影響があるデータを欠測とした。

図 38 海面水温の再現状況（衛星データ（MODIS、GCOM-C）との比較（2018年）

(力) 出水時の再現

出水時の状況（濁度・塩分）の比較として、衛星データ（GCOM-C）による濁度と塩分・流れ場の比較を図39に示した。

河川水（濁度と塩分の比較）の挙動（時期・分布傾向）を再現していた。

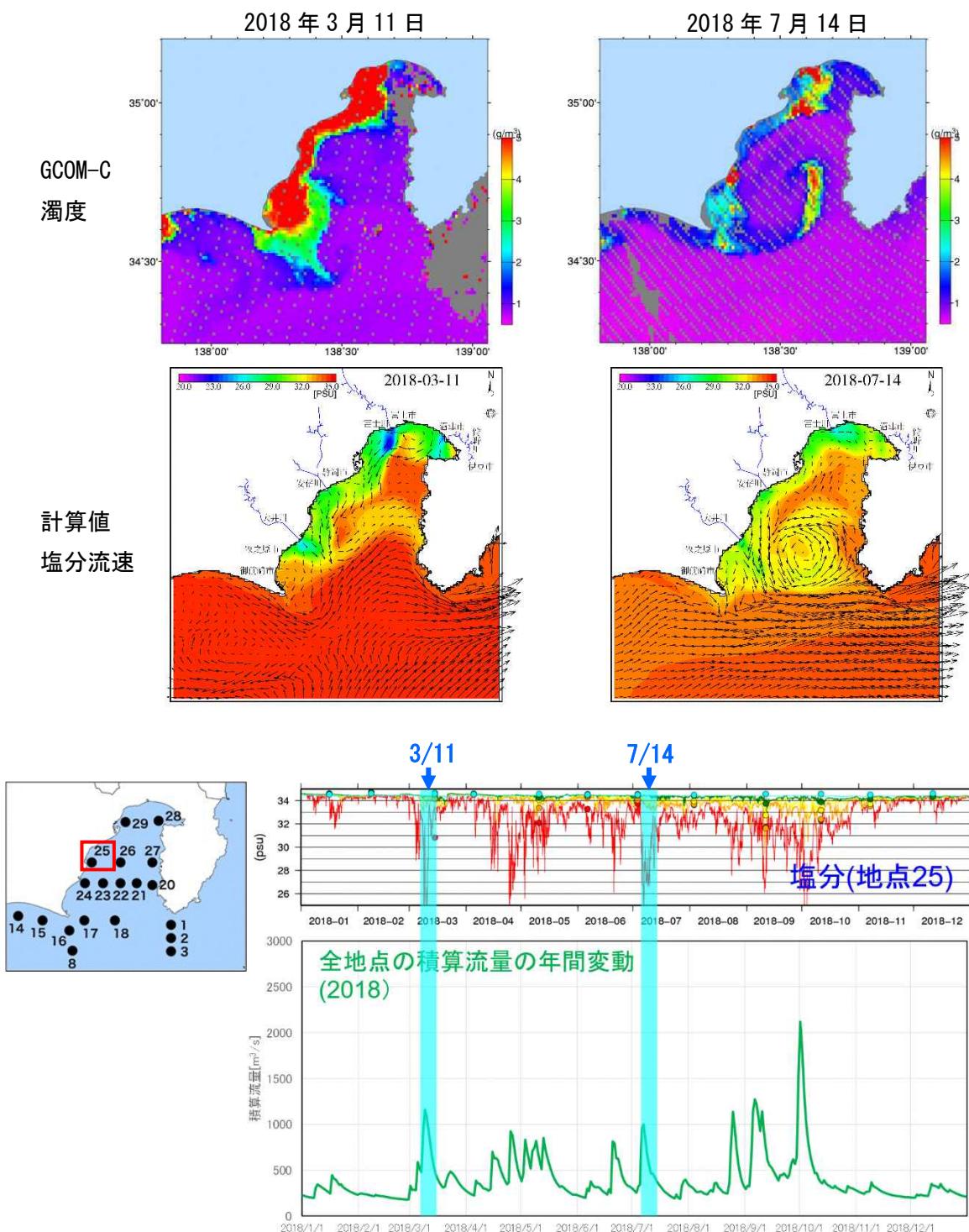
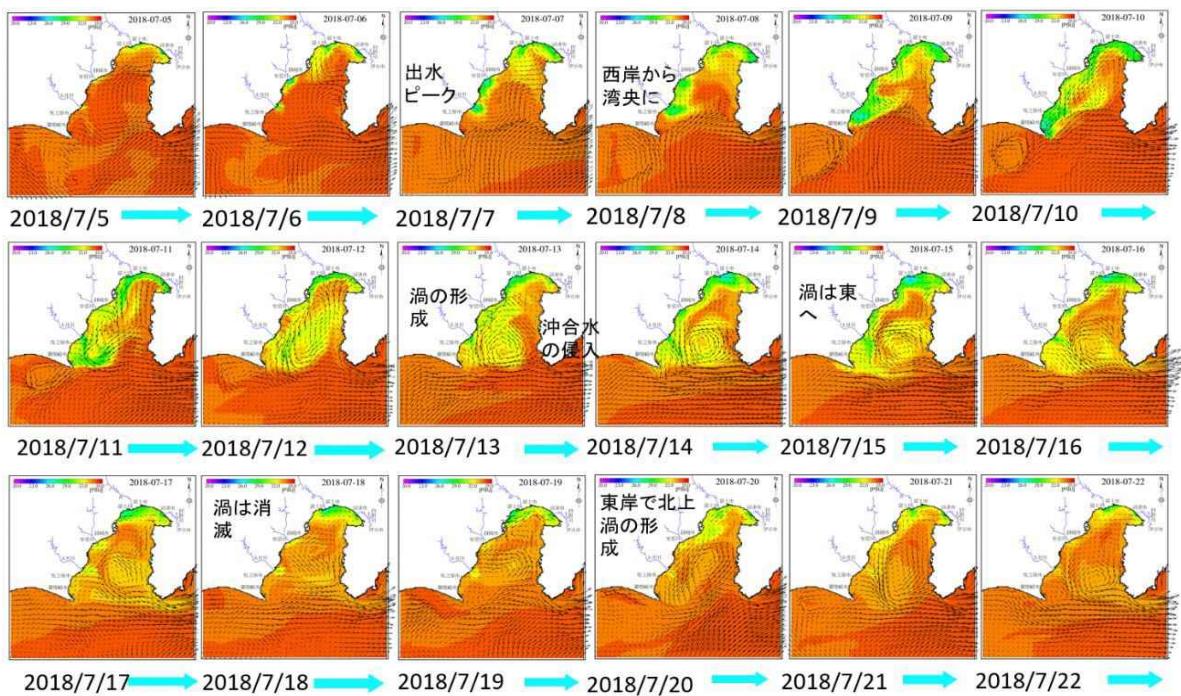


図39 衛星データ（GCOM-C）による濁度と塩分・流れ場の比較（2018年）

出水時の状況（塩分・流れ）の比較（表層）



出水時の状況（塩分・流れ）の比較（40m 層）

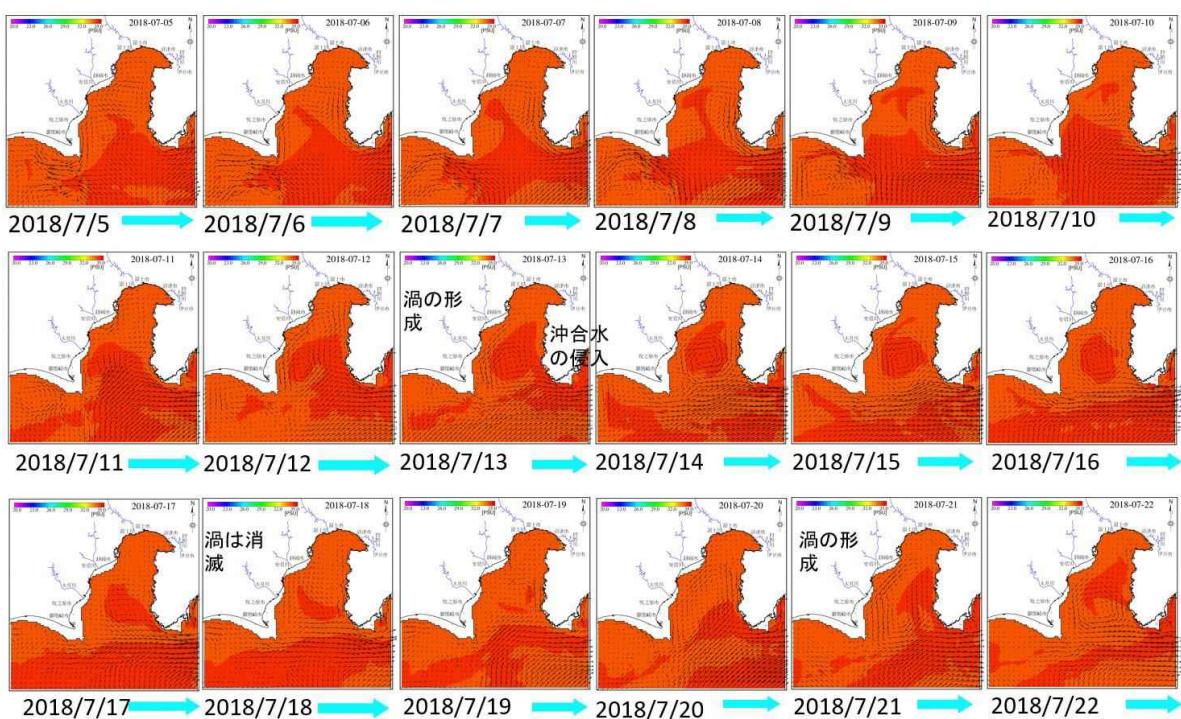


図 40 出水時の状況（塩分・流れ）の比較

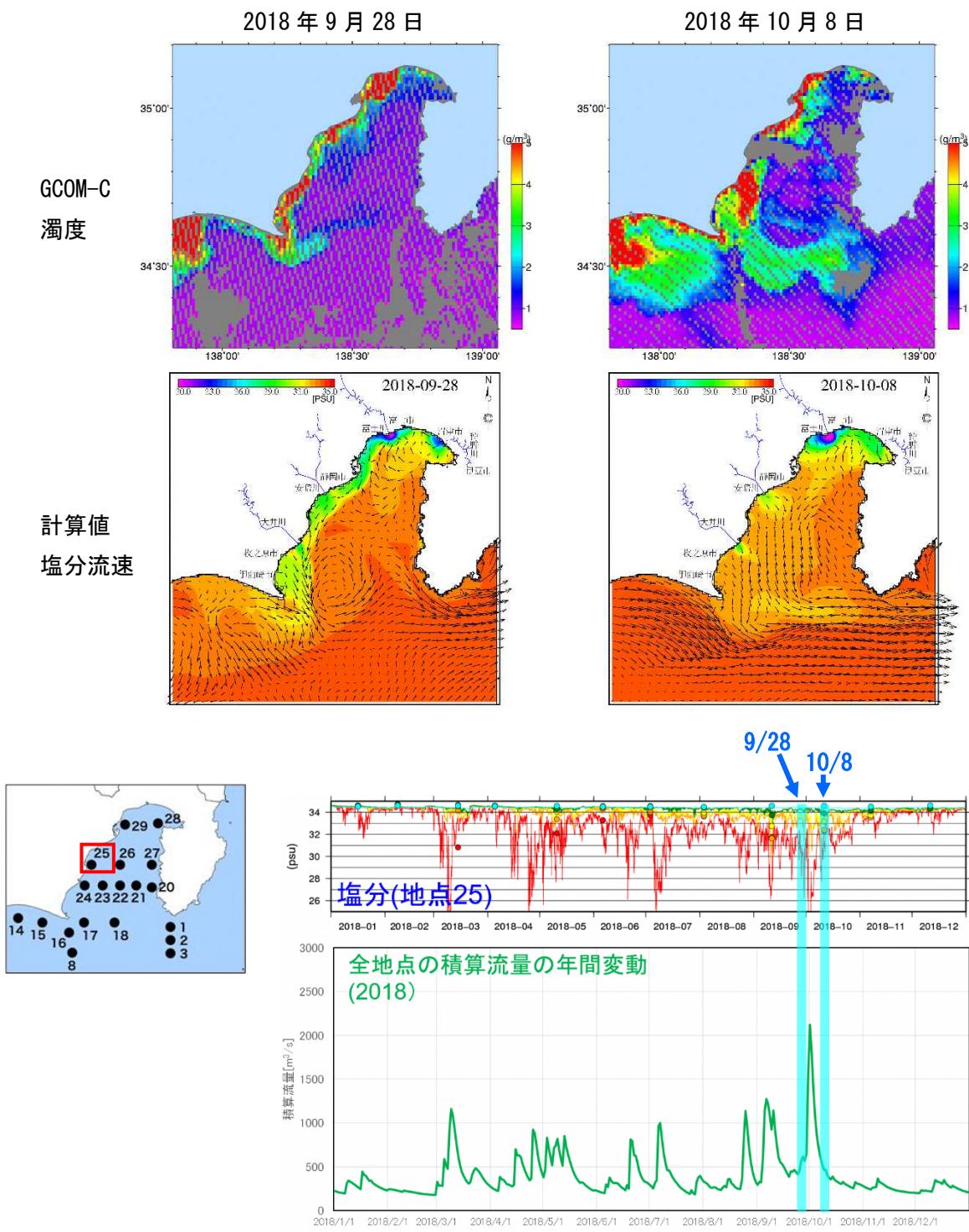


図 41 衛星データ (GCOM-C) による濁度と塩分・流れ場の比較

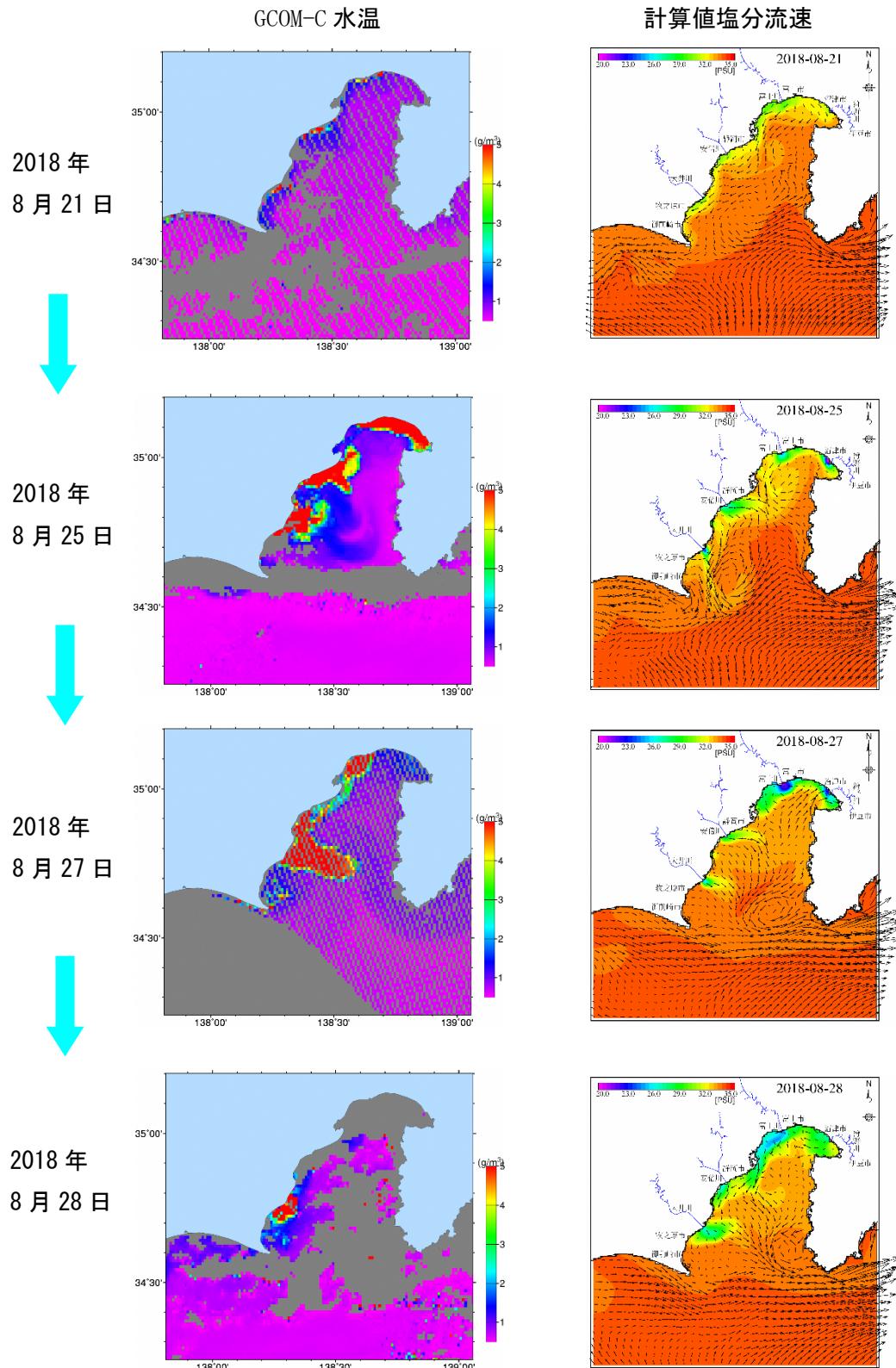
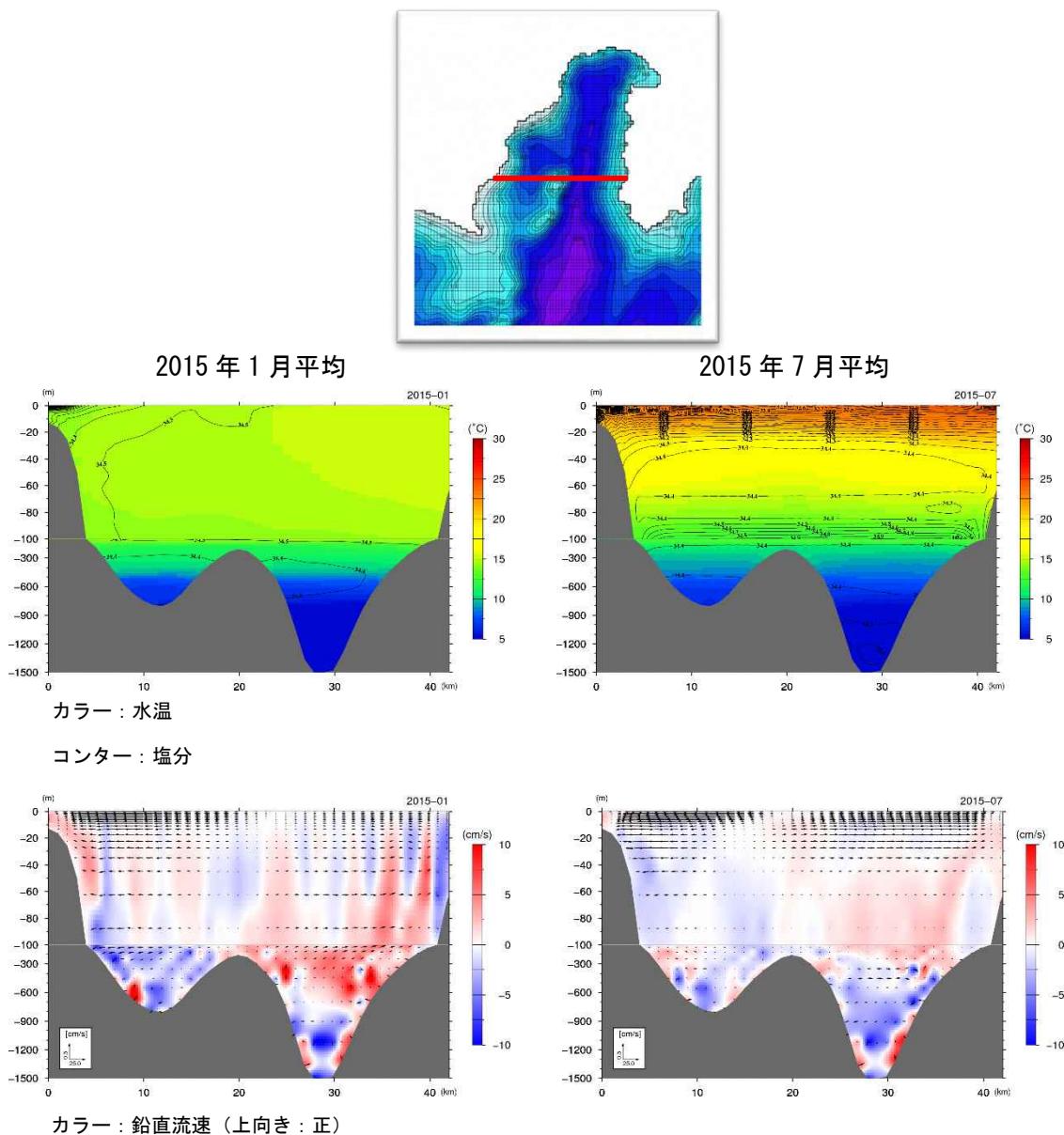
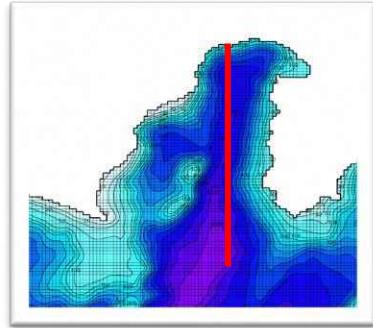


図 42 衛星データ (GCOM-C) による濁度と塩分・流れ場の比較

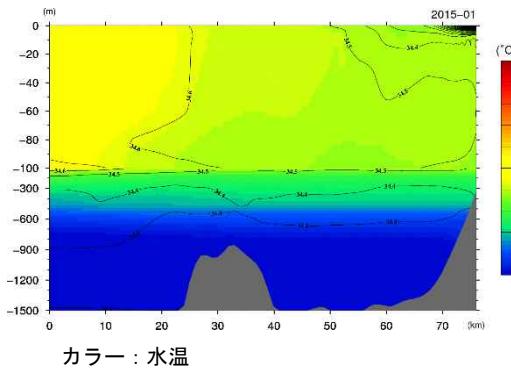
(キ) 冬季と夏季の鉛直構造の再現

- 表層の混合層は観測に比べるとやや浅い傾向であるが、一般的な季節変化の特徴を再現していた。
 - 冬季で 100m 程度の混合層（水温で顕著）
 - 湾奥および湾西側のごく表層に塩分成層が顕著
- 平均的な流動場をみると、冬季の方が、鉛直流速は大きい傾向（湧昇も沈降も）で、鉛直混合が盛んな傾向がみられる。このことは、鉛直拡散係数の分布でも見られる。
- 2018年冬季で顕著にみられるが、岸に近い水域で沈降が卓越し、湾中央の深い水域で湧昇が卓越する傾向であった。



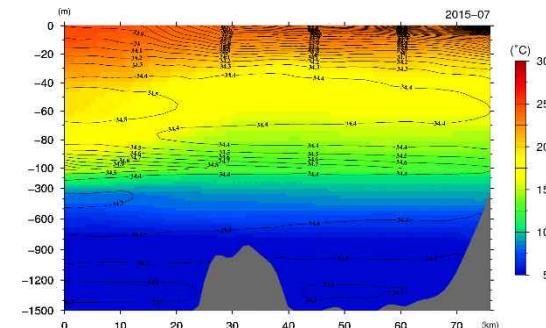


2015年1月平均

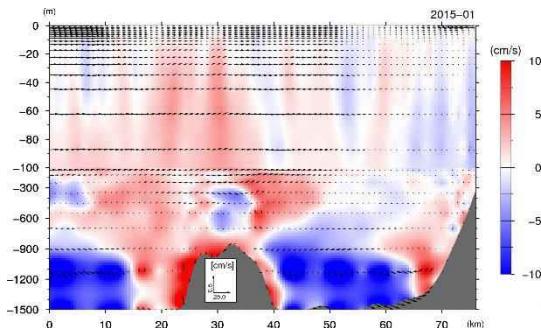


カラー：水温

2015年7月平均



コンター：塩分



カラー：鉛直流速（上向き：正）

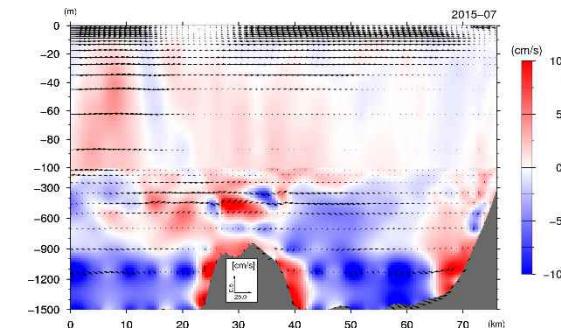


図 44 季節ごとの流動・水温場の鉛直構造（2015年）

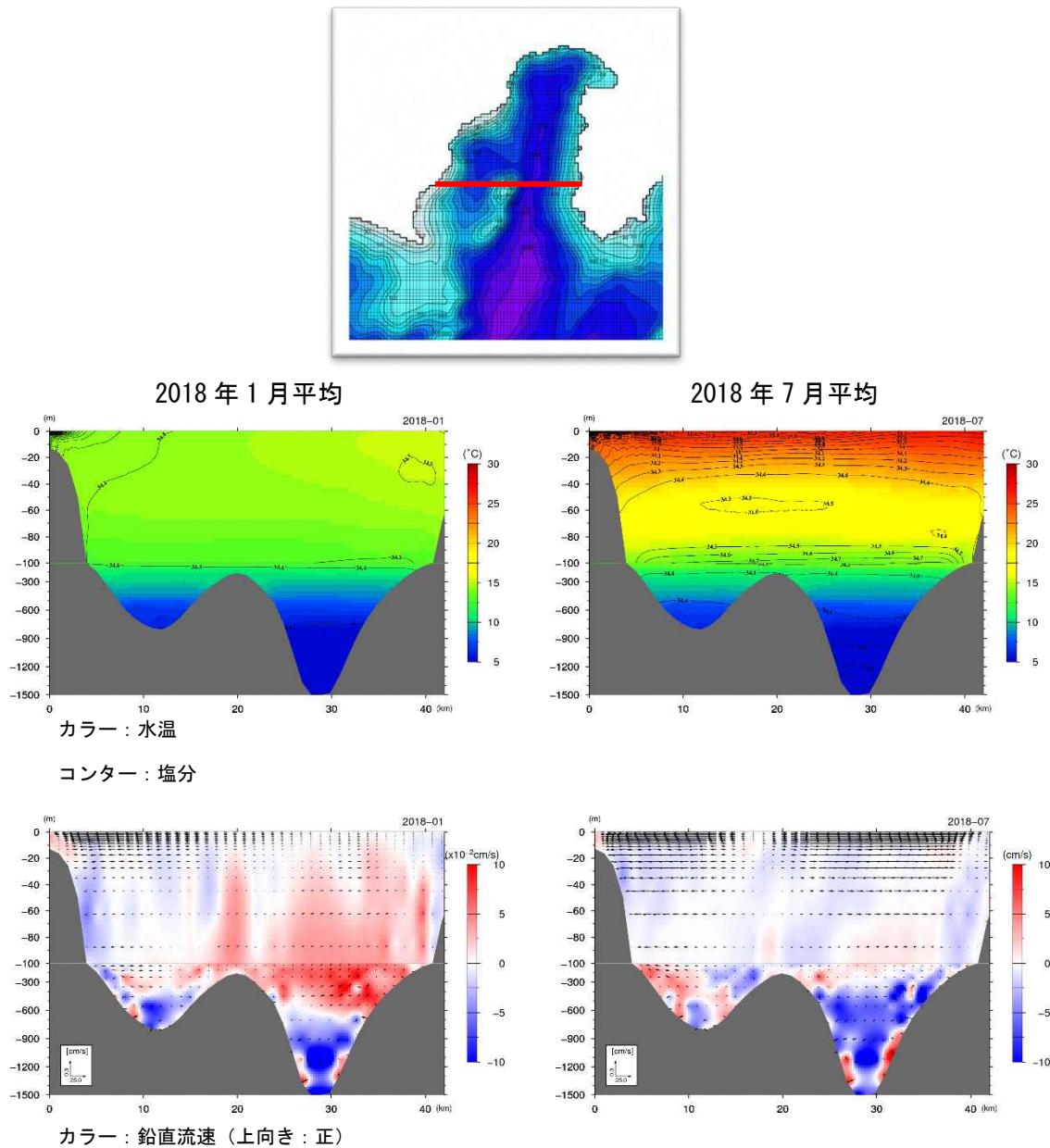
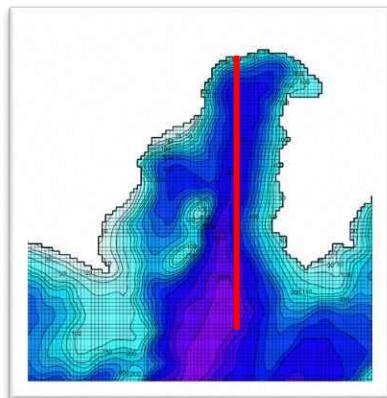
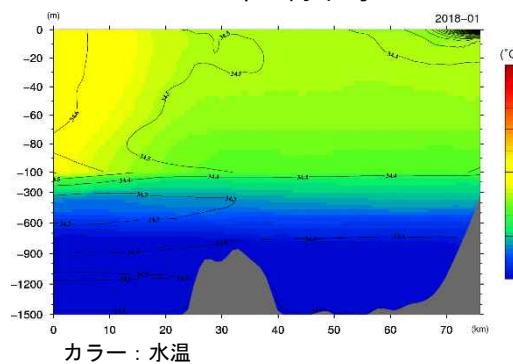


図 45 季節ごとの流動・水温場の鉛直構造（2018 年）



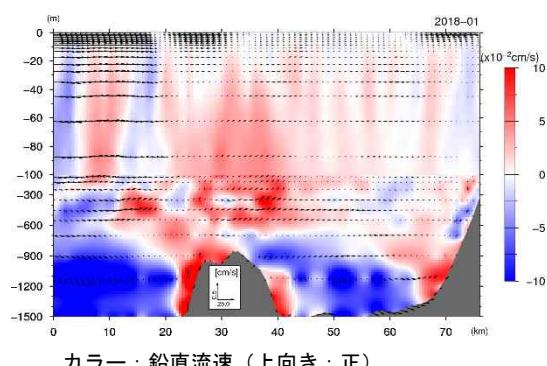
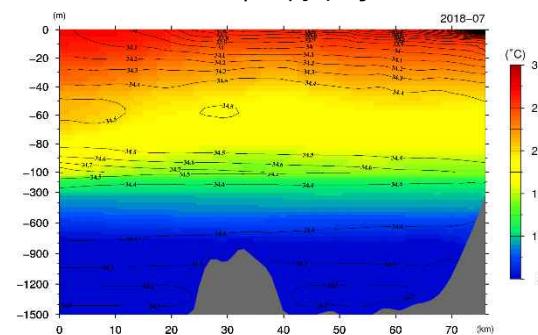
2018年1月平均



カラー：水温

コンター：塩分

2018年7月平均



カラー：鉛直流速（上向き：正）

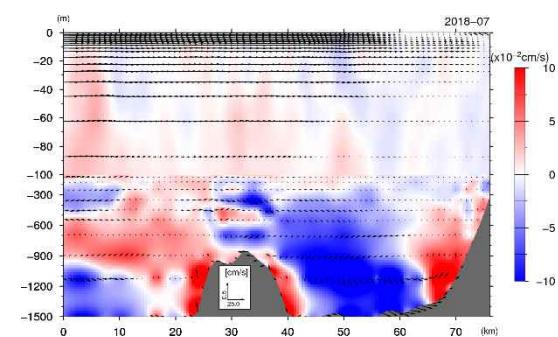


図 46 季節ごとの流動・水温場の鉛直構造（2018年）

(ク) 海底湧水の影響の確認

モデル計算結果による塩分の分布から、海底湧水の影響について確認した。

- 海底直上では、沿岸にごく近い海域で、わずかに変化。
- 海面では、塩分の水平分布が変わることで、塩分が増加する海域もみられる。

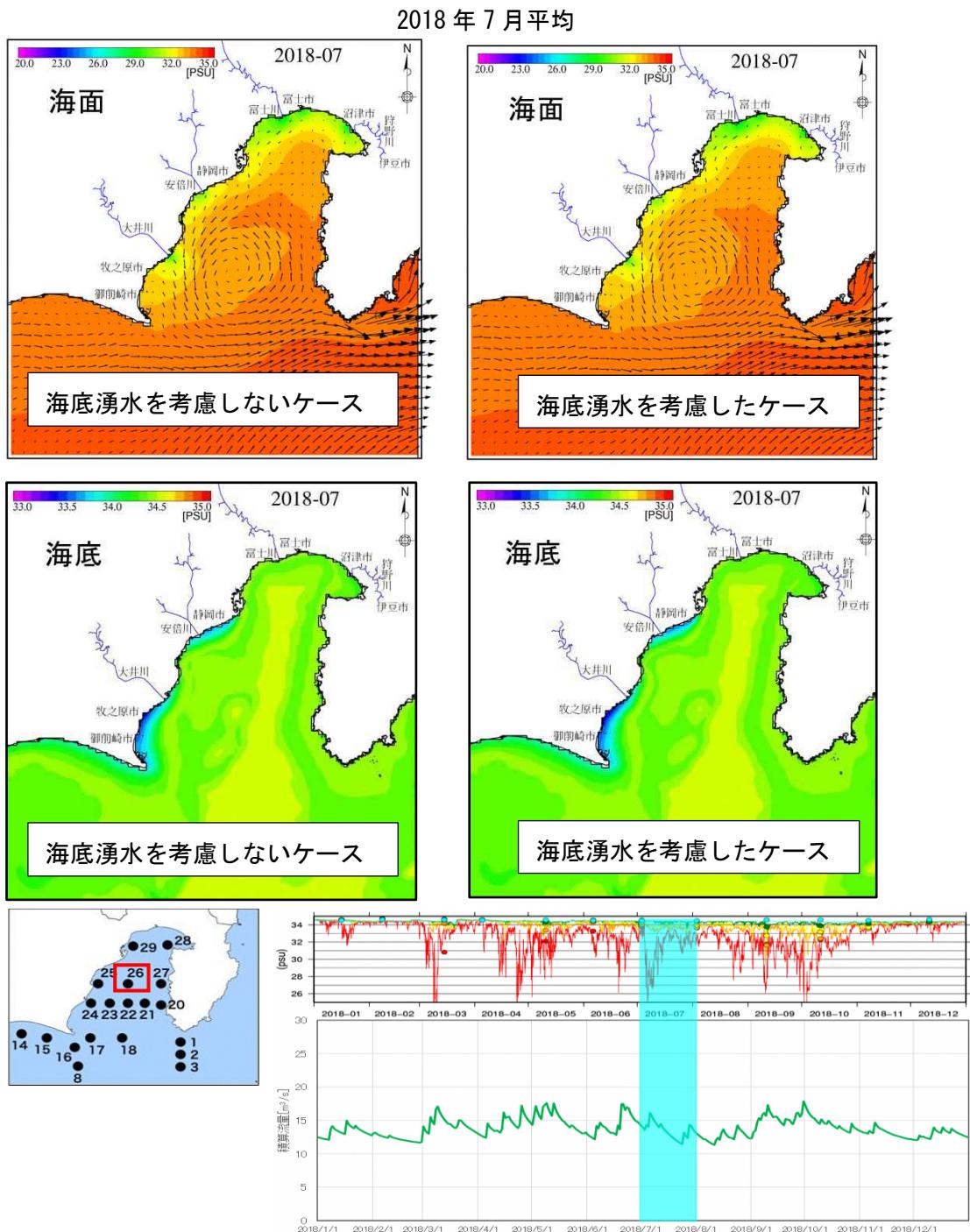


図 47 海底湧水を考慮した場合としない場合の比較

- 海底直上では、沿岸にごく近い海域で、海底湧水を考慮したケースで低塩分となる。
- 大井川河口でやや大きい傾向で、0.1PSU程度であった。
- 海面では、塩分の水平分布が変わることで、塩分が増加する海域もみられ、大きい海域で0.1~0.2PSU程度であった。

海底湧水を考慮したケースと考慮しないケースの差

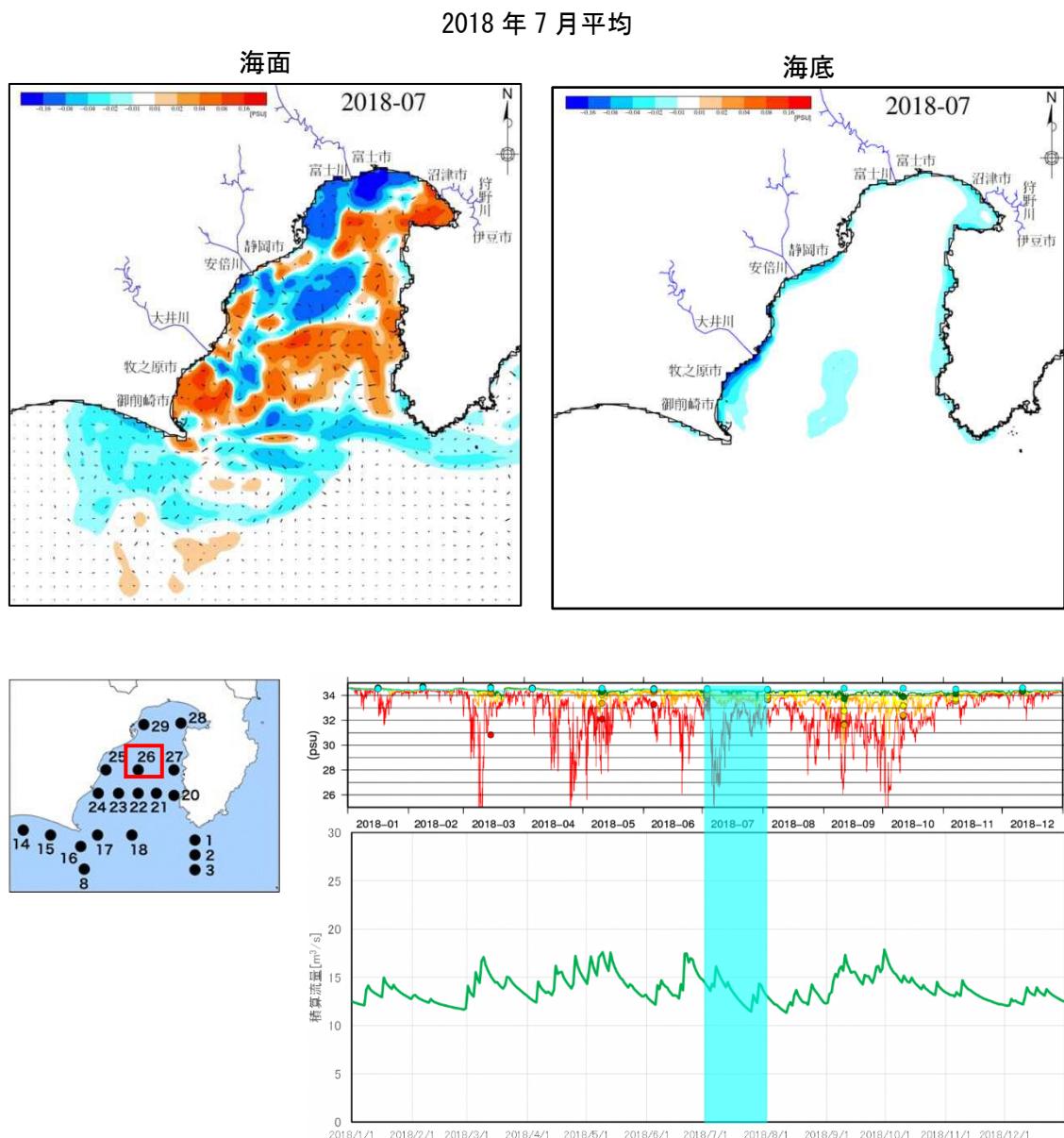
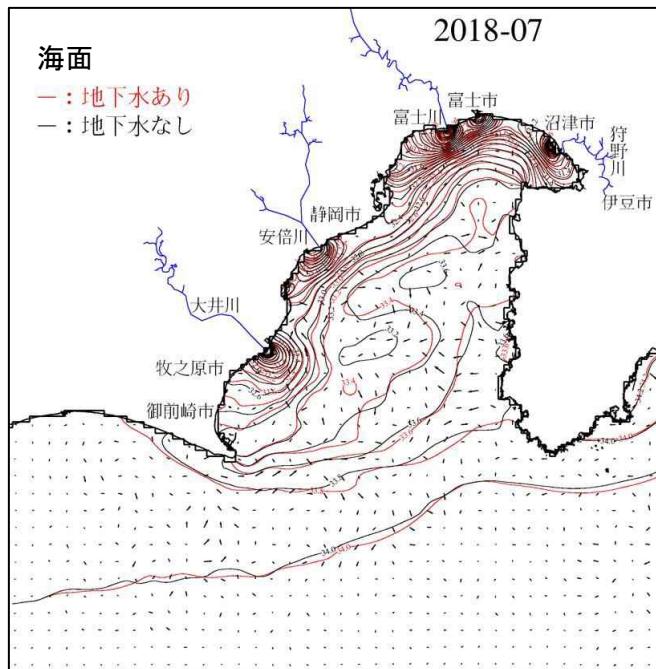


図 48 海底湧水を考慮した場合としない場合の比較

塩分差は、塩分分布の相違を示しており、塩分勾配の大きい海面近くで、その相違が大きかった。

ベクトル：海底湧水を考慮したケースと考慮しないケースの差

2018年7月平均



7月

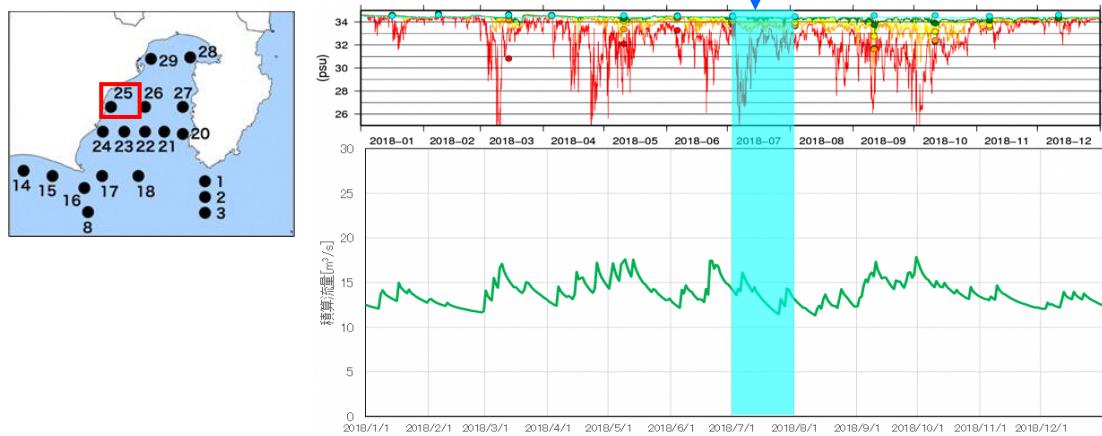


図 49 海底湧水を考慮した場合としない場合の比較

5 低次生態系モデルの概要

海水中の動・植物プランクトンや栄養塩などの海域での変動は移流拡散方程式にて再現している。具体的には以下のとおりである。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial uC}{\partial x} - \frac{\partial vC}{\partial y} - \frac{\partial wC}{\partial z} - \frac{\partial J_{C,x}}{\partial x} - \frac{\partial J_{C,y}}{\partial y} - \frac{\partial J_{C,z}}{\partial z} + S_C + q_C \quad \left. \begin{array}{l} \text{拡散フラックス} \\ J_{C,x} = -D_{C,h} \frac{\partial C}{\partial x} \\ J_{C,y} = -D_{C,h} \frac{\partial C}{\partial y} \\ J_{C,z} = -D_{C,v} \frac{\partial C}{\partial z} \end{array} \right\}$$

C	: 物質濃度(mol/m^3)
t	: 時間(s)
u, v, w	: x, y, z 方向の流速(m/s)
J_C	: 拡散フラックス
S_C	: 物質Cの生物・化学反応速度($\text{mol}/\text{m}^3/\text{s}$)
q_C	: 河川・地下水からの流入($\text{mol}/\text{m}^3/\text{s}$)
$D_{C,h}$: 水平方向の拡散係数(m^2/s)
$D_{C,v}$: 鉛直方向の拡散係数(m^2/s)

計算する物質濃度、モデルで計算される物質循環図は以下のとおりである。

表 2 計算する物質濃度一覧

分類	記号	単位	種類数	分類	記号	単位	種類数
植物プランクトン	PHY_i	molC m^{-3}	N_{PHY}	溶存態有機窒素	DON_l	molN m^{-3}	N_{DEC}
植物プランクトンの余剰窒素量	SQN_i	molN m^{-3}	N_{PHY}	溶存態有機リン	DOP_l	molP m^{-3}	N_{DEC}
植物プランクトンの余剰リン量	SQP_i	molP m^{-3}	N_{PHY}	好気性細菌	BAC_m	molC m^{-3}	N_{BAC}
動物プランクトン	ZOO_j	molC m^{-3}	N_{ZOO}	原生動物	PZ_n	molC m^{-3}	N_{PZ}
懸濁態有機炭素	POC_k	molC m^{-3}	N_{DEC}	リン酸 : PO_4^{3-}	PO_4	molP m^{-3}	1
懸濁態有機窒素	PON_k	molN m^{-3}	N_{DEC}	アンモニア : NH_4^+	NH_4	molN m^{-3}	1
懸濁態有機リン	POP_k	molP m^{-3}	N_{DEC}	亜硝酸 : NO_2^-	NO_2	molN m^{-3}	1
利用可能溶存態有機炭素	$ADOC$	molC m^{-3}	1	硝酸 : NO_3^-	NO_3	molN m^{-3}	1
溶存態有機炭素	DOC_l	molC m^{-3}	N_{DEC}	ケイ酸 : SiO_2	SiO_2	molSi m^{-3}	1
				硫化水素 : H_2S	H_2S	molS m^{-3}	1
				溶存酸素 : O_2	DO	$\text{molO}_2 \text{m}^{-3}$	1

追加項目 : 鉄 (Fe^{2+} 、 Fe(OH)_3)

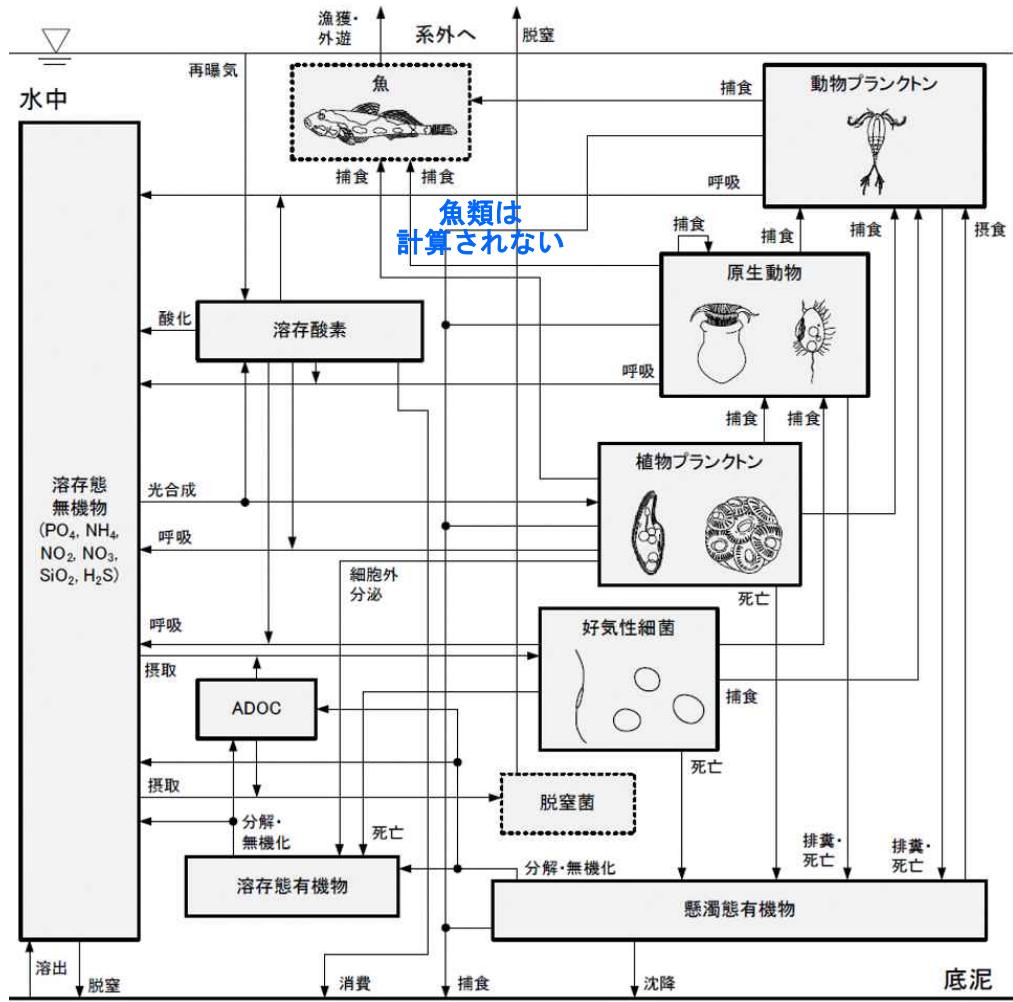
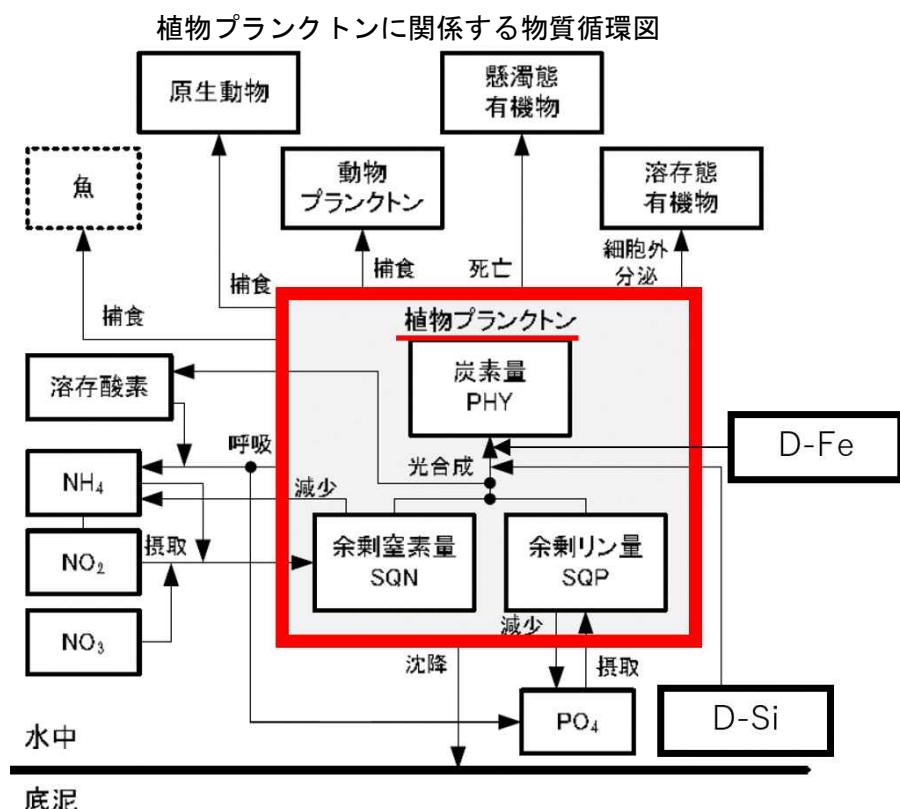


図 50 モデルで計算される物質循環図

また、物質濃度炭素の生物・化学反応式は以下のとおりである。植物プランクトンを例に示す。



植物プランクトンの増減速度 $S_c =$

- + [光合成による増殖] — (細胞外分泌)
- (呼吸)
- (枯死)
- (動物プランクトンによる被食)
- (原生動物による被食)
- (沈降)

1つ1つの反応項にモデル式が作成されている

例：光合成による増殖
=最適水温での増殖速度 (1/s)
× 光適正 (0-1)
× 栄養塩適正 (0-1)
× 水温適正 (0-1)
× 植物プランクトン量 (molC/m3)

図 51 物質濃度炭素の生物・化学反応式

なお、一次生産の再現にあたっては、植物プランクトンの種組成にケイ素の影響に関する知見(Nhan Van Dinh et al. (2020))を参考にした。知見の概要は以下のとおりである。

- 駿河湾で2018年4月・11月に採水した試料で微生物の培養試験を実施した。
- 11月に比べて4月の試料はSi、Pが高かった。
- 培養結果として、4月の試料でより多くの大型珪藻が増殖した。
- このことが鞭毛虫などの微生物ループにも影響を与えている。

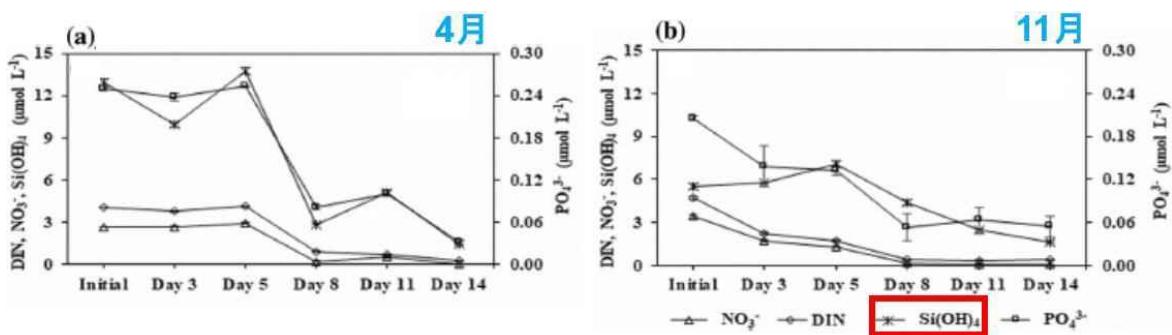
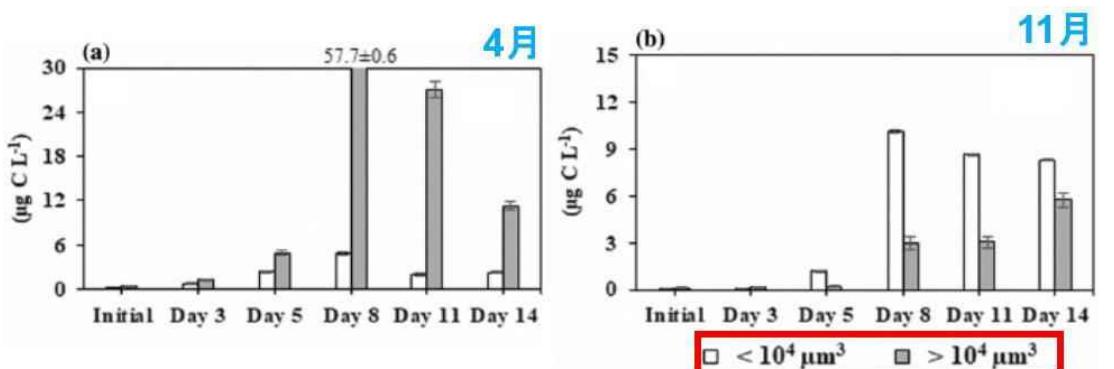


Fig. 1 Variation in nutrient concentration during the incubation (mean \pm SD, $n=3$). (a) April 2018; (b) November 2018



7 Biomass of small size (biovolume $< 10^4 \mu\text{m}^3$) and large size volume $> 10^4 \mu\text{m}^3$) diatoms during the incubation (mean \pm SD, 3)

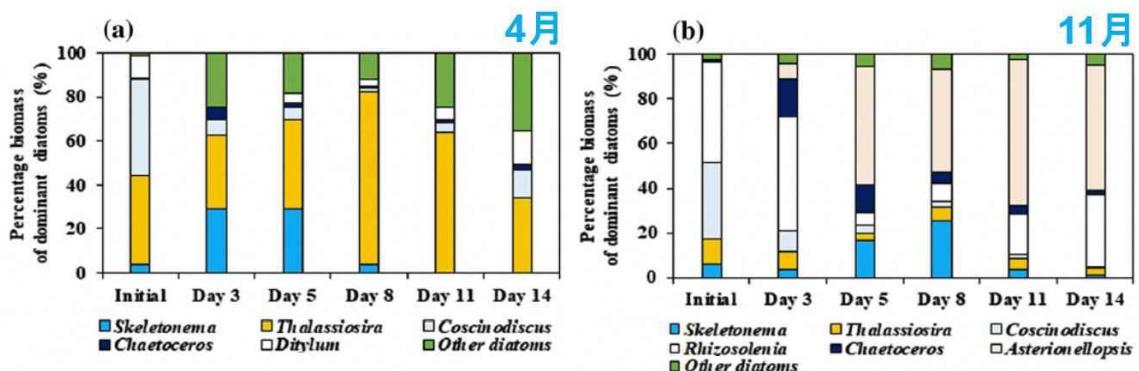


Fig. 4 Percentage biomass (%) of dominant diatoms (a) April 2018 and (b) November 2018

Nhan Van Dinh, Neatriz E. Casareto ... (2020) : Effect of diatom abundance and biogenic silica availability on the population growth of tintinnid ciliates at Suruga Bay, Journal of Oceanography

図 52 植物プランクトンの種組成にケイ素の影響に関する知見

また、その他の知見として、以下を参考に設定した。

- 植物プランクトンの体組成比(レッドフィールド比)は N:P:Si : Fe は、16 : 1 : 15 : 0.001 である (Redfield, 1934)
- 植物プランクトンの N:P:Si の要求量がおよそ、16:1:16 である (原島ら, 2018)

※モル比

Redfield, AC (1934). "On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton". James Johnstone Memorial Volume:

原島省(2008)：海洋生態系におけるケイ藻とシリカの役割、Journal of Environmental Biotechnology, Vol. 8, No. 1, 9–16

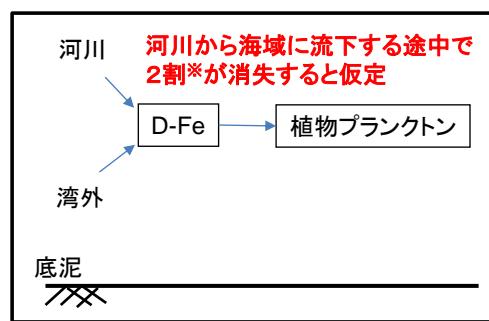
植物プランクトン生産過程のモデル設定については、元来、伊勢湾シミュレータにはケイ素・鉄が制限となる機能がなく、以下の考え方からケイ素・鉄と植物プランクトンの関係のモデル化を実施した。

- ① D-Si は河川上流から海域に至る過程で沈降しないものとした。
海域に到達する際に 3 割が消失するものとして入力値を設定した。
- ② D-Fe は海域で酸化される過程は省略し、河川で観測された濃度は
海域に到達する際に 2 割が消失するものとして入力値を設定した。

ケイ素と植物プランクトンとの関係



鉄と植物プランクトンとの関係



※吉村委員からご提供いただいた資料を参考に海域での再現性を踏まえて設定

図 53 ケイ素・鉄に関するモデル設定

また、プランクトン生産過程のモデル化については、伊勢湾シミュレータで駿河湾の微生物ループの再現を試みた。なお、カサレト委員からご提供を頂いた論文等を参考にモデル化

を行った。なお、動物プランクトンまでを解析の対象とし、魚類等の高次生物は扱っていない。プランクトン生産過程のモデル構造は図 54 に示すとおりである。

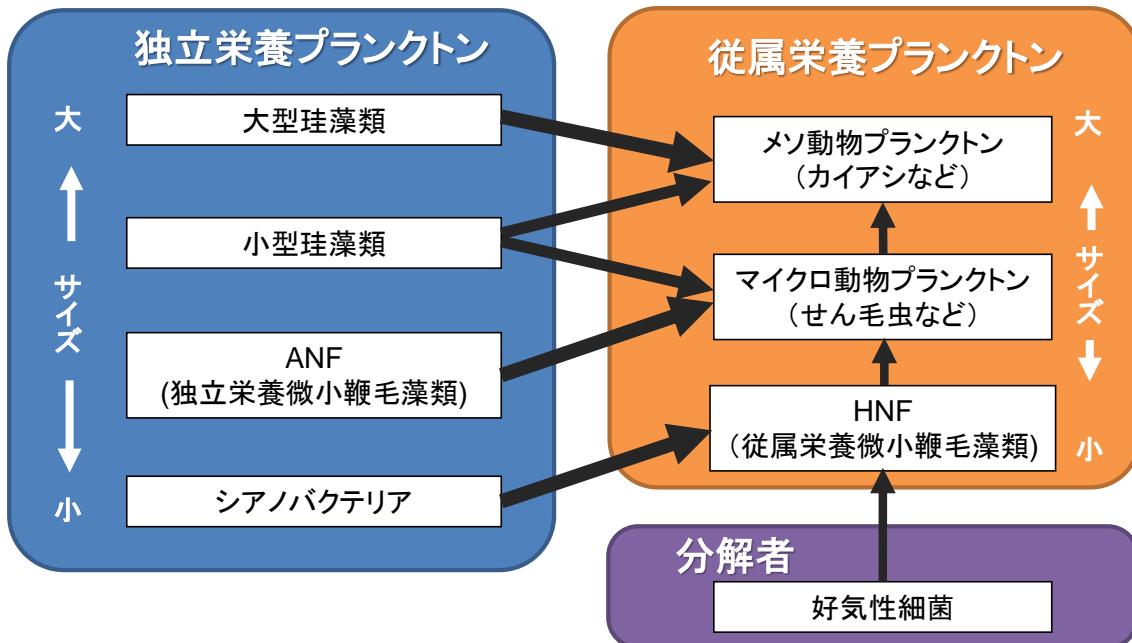


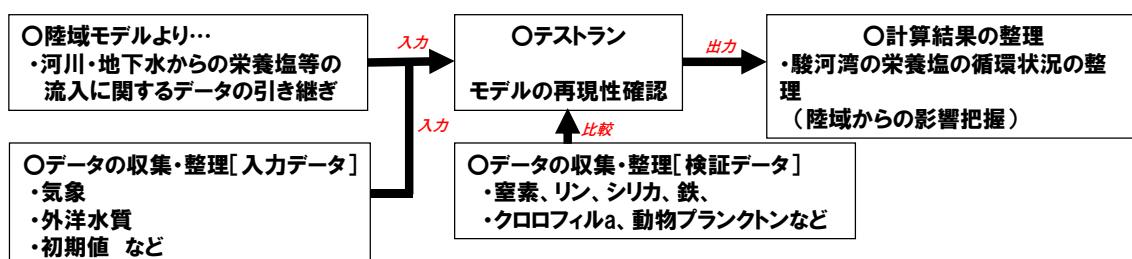
図 54 プランクトン生産過程のモデル構造

6 低次生態系モデルの計算期間および手順

計算期間に関する設定、計算手順は以下のとおりとした。

項目	設定
計算期間	海域流動モデルに準ずる ・2015年（平常時）・2018年（蛇行期）
タイプステップ	30(s)程度
計算結果の出力間隔	1日間隔（全メッシュの結果を出力）

計算手順



7 低次生態系モデルの入力条件等

低次生態系モデルの入力データは下表のとおりである。

表 3 低次生態系モデルの入力データ一覧

入力項目	設定方法
<ul style="list-style-type: none"> ・ 気象条件 ・ 陸域からの栄養塩・SS、ケイ素、その他金属等の負荷量（河川・地下水） 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海域流動モデルと同一 ・ 硝素・リン・SS は陸域モデルの出力を引き継ぐ。ただし、SS 濃度に依存して、栄養塩の分画比が動的に変動するよう設定した。 ・ ケイ素・鉄は観測結果を利用
・ 湾外からの栄養塩等の負荷量	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海洋気象観測船による定期海洋観測結果（気象庁）および既往の研究論文での観測値より推定 ・ 中央水産研究所による本州南方の東経 138 度線（御前崎沖定線：0-line）での水質調査結果を利用し、水温の閾数として、栄養塩濃度の境界条件を設定した。

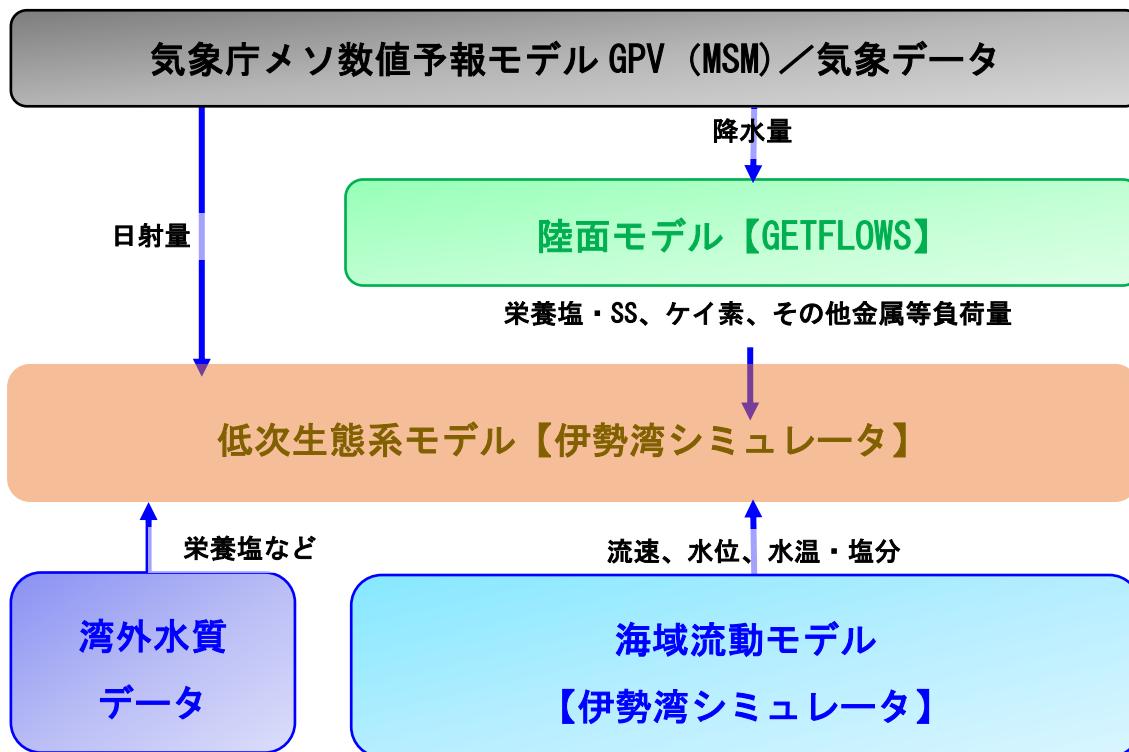
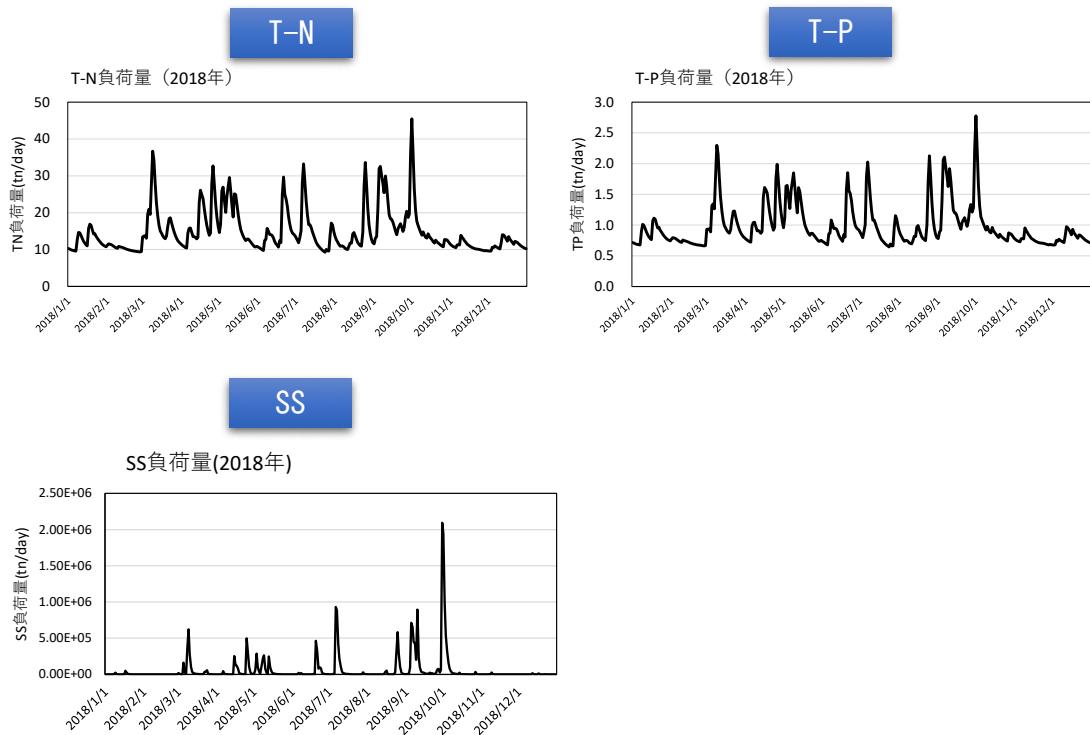


図 55 入力データのイメージ

(ア) 陸域モデルからの出力 (2018 年の例、栄養塩・SS、負荷量 (河川・地下水))

陸域モデル(GETFLOWS®) の出力結果を低次生態系モデルに入力している。出力結果は以下に示すとおりである。

全河川からの全窒素・全リン (2018 年)



全河川からの全窒素・全リン (2018 年)

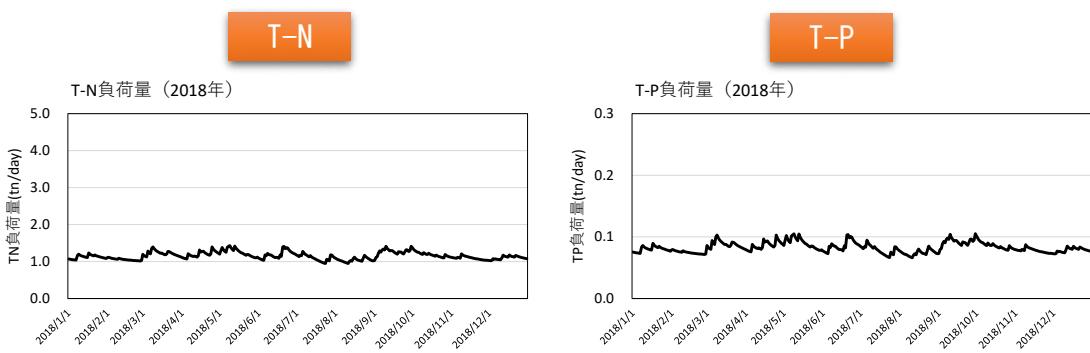
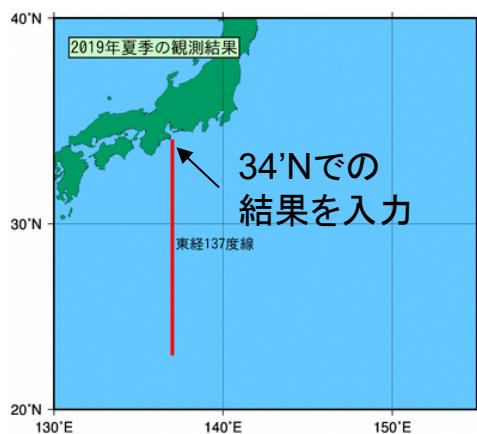


図 56 陸域モデル(GETFLOWS®) の出力結果

(イ) 湾外から流入する栄養塩等の負荷量の設定

駿河湾外水からの栄養塩等の負荷量は、気象庁による 2014 年から 2018 年（年 2 回）の調査結果を平均した結果を用いた。以下に示すとおりである。駿河湾外水の水質濃度は本データと次ページに示す O-Line 調査結果を用いた。駿河湾外水の栄養塩濃度の設定方法を次ページに示す。



観測データがない D-Fe は、武田(2007)や夏池ら(2016)の研究論文を参考に、水深方向に一様に 20nM を与えた。

武田重信(2007)：鉄による海洋一次生産の制御機構、Nippon Suisan Gakkaishi 73(1) 429-432

夏池真史(2016)：自然水中における鉄の化学種と生物利用性-鉄と有機物の動態からみる森・川・海のつながり-、水環境学会誌 Vol. 39, No. 6, pp. 197-210

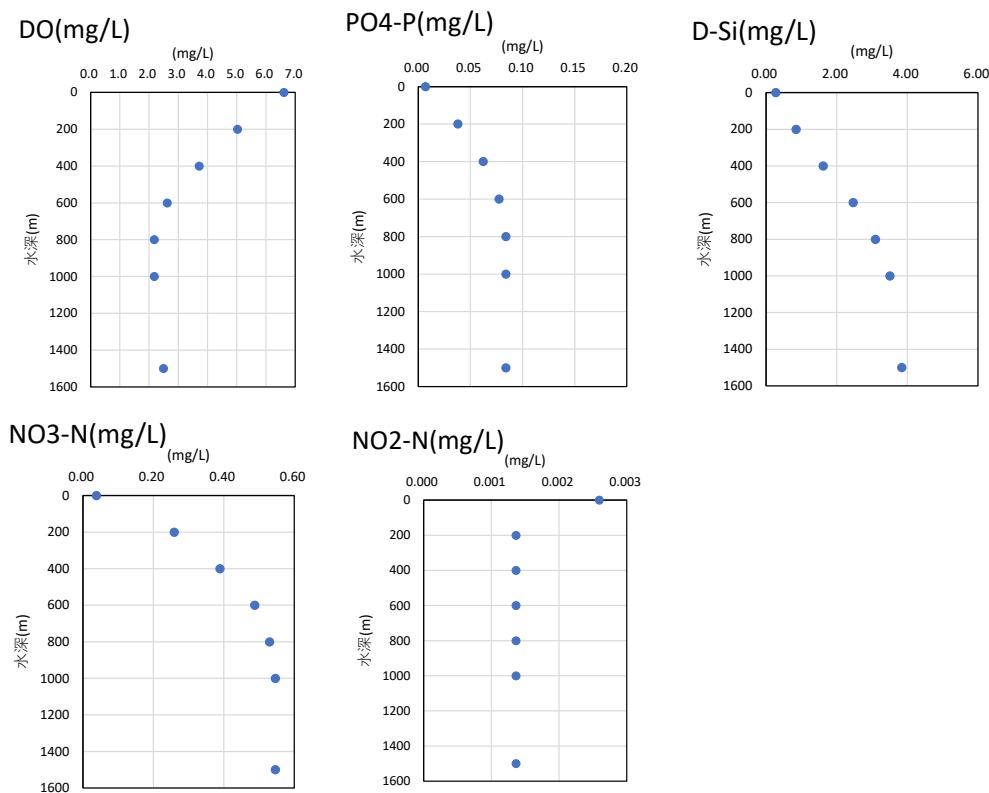


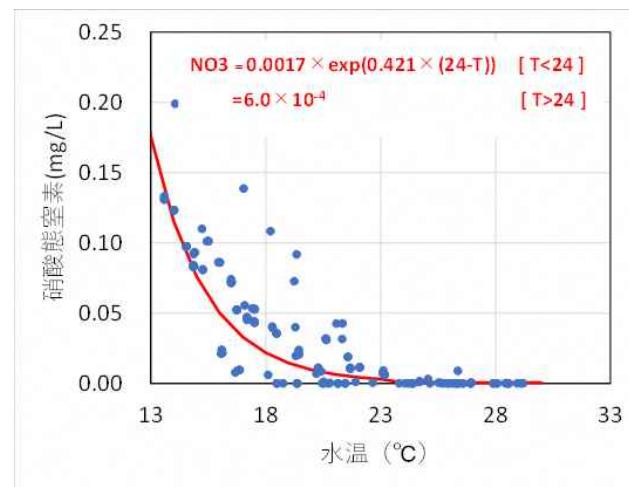
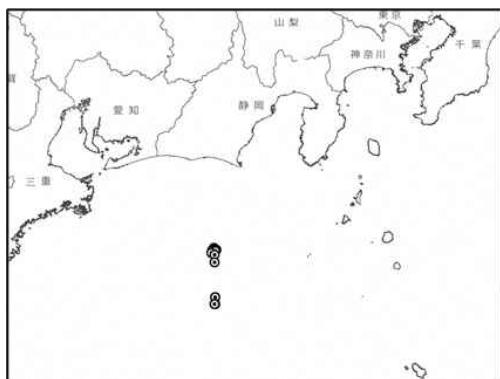
図 57 駿河湾外水の水質濃度

駿河湾外水の硝酸態窒素濃度の設定

黒潮の流路変動などによる駿河湾外水の水塊特性の変動を表現するために、水温に応じて硝酸態窒素が変動するように設定した（水温が高い（黒潮系水の寄与が大きい）場合は、硝酸態窒素濃度が低く、水温が低い（黒潮系水の寄与が小さい）場合は、硝酸態窒素濃度が高くなる）。

<修正方法>

既往の 0-Line 調査（左図）を基に水温と硝酸態窒素の関係が明瞭に得られたため（右図）、その関係式を用いて、駿河湾外水の硝酸態窒素の濃度を別途日別で設定している水温の関数として設定できるようにモデルを修正した。なお、亜硝酸態窒素、リン酸態リンと溶存ケイ素については、実測値データを用いて硝酸態窒素濃度とそれぞれの濃度比を求め、硝酸態窒素濃度の日別値にこの比を乗じて濃度を算定した。



※0-Line 調査：本州南方の東経 138 度線（御前崎沖定線：0-line）上で、水産研究・教育機構中央水産研究所が主体となって四季を通じておこなっている観測。

図 58 水温と硝酸態窒素の関係

(ウ) 陸域から海域に流入する栄養塩物質等の分画比の設定等

出水時の実態を表現するために、流量に応じて流入負荷量の分画比が変動するように設定した（出水時は、溶存態よりも懸濁態が多く流出する）。既往知見を参考に、河川のSS濃度に応じて、無機態栄養塩の比率を変化させるようにモデル設定した。

また、鉄・ケイ素濃度は、現地調査の観測値をもとに、河川内から海域に流出する際の消失割合を考慮して設定した。

<ケイ素・鉄の設定濃度 (mg/L) (消失割合を考慮)>

	D-Si	D-Fe
河川水濃度	4.42	0.184
地下水濃度	10.43	0.017

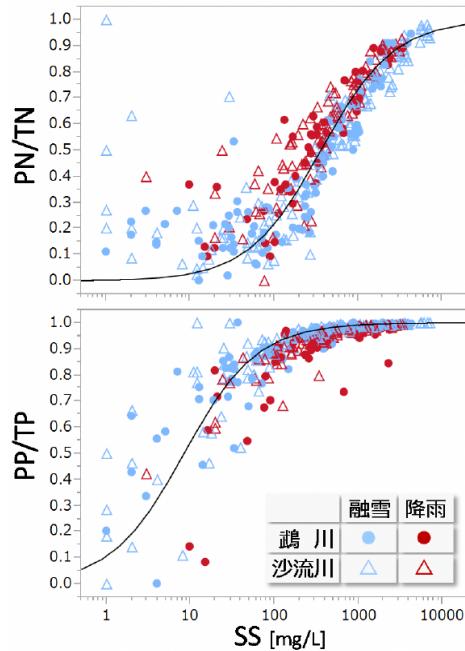


図-3 N及びP懸濁態存在比の関数近似

出典：水垣ら、出水時の存在形態別栄養塩濃度の推定方法、土木研究所寒地土木研究所

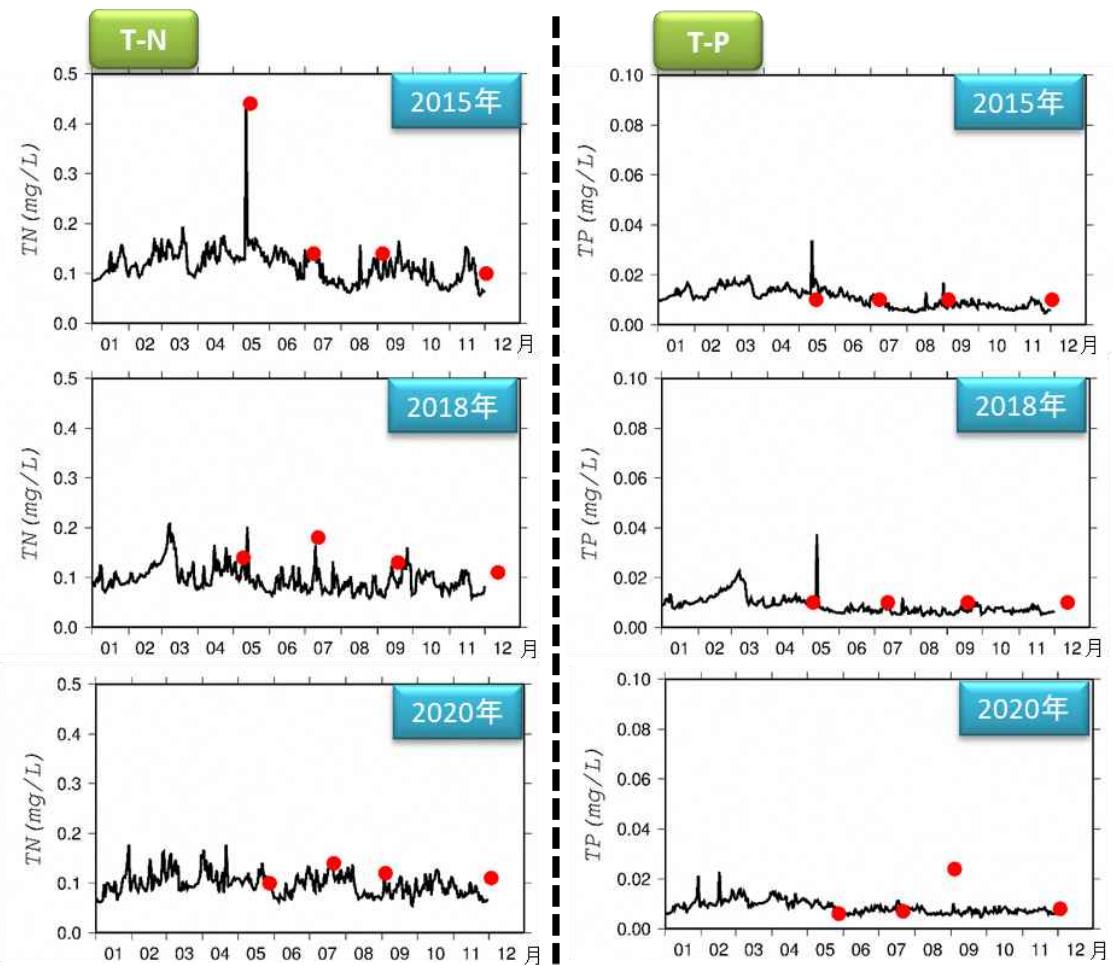
図 59 栄養塩物質等の設定

8 低次生態系モデルの再現性検証

(ア) 栄養物質濃度の再現性の確認 (T-N, T-P)

陸域から供給される窒素、リンについて、公共用水域水質調査結果とシミュレーションモデルによる計算結果を比較した。

計算値と観測値が概ね一致する傾向となり、ほぼ再現できており、流入負荷量・湾外からの負荷量の設定が概ね正しいことを示している。



— : 計算結果
● : 観測結果



図 60 栄養物質濃度の再現性の確認 (T-N、T-P)

(イ) 水質濃度の再現性 (Chl-a、栄養塩)

R. Sohrin(2019)※の観測結果との比較を行った。栄養塩の濃度レベルや夏季表層で窒素制限になるという水質特性を計算値は概ね再現している。

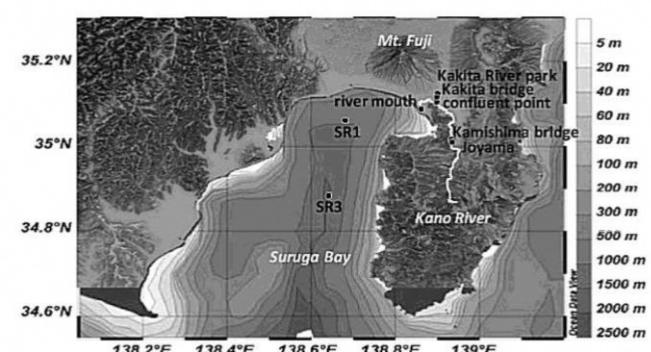
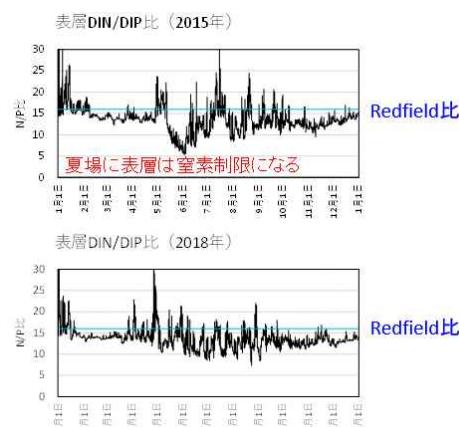
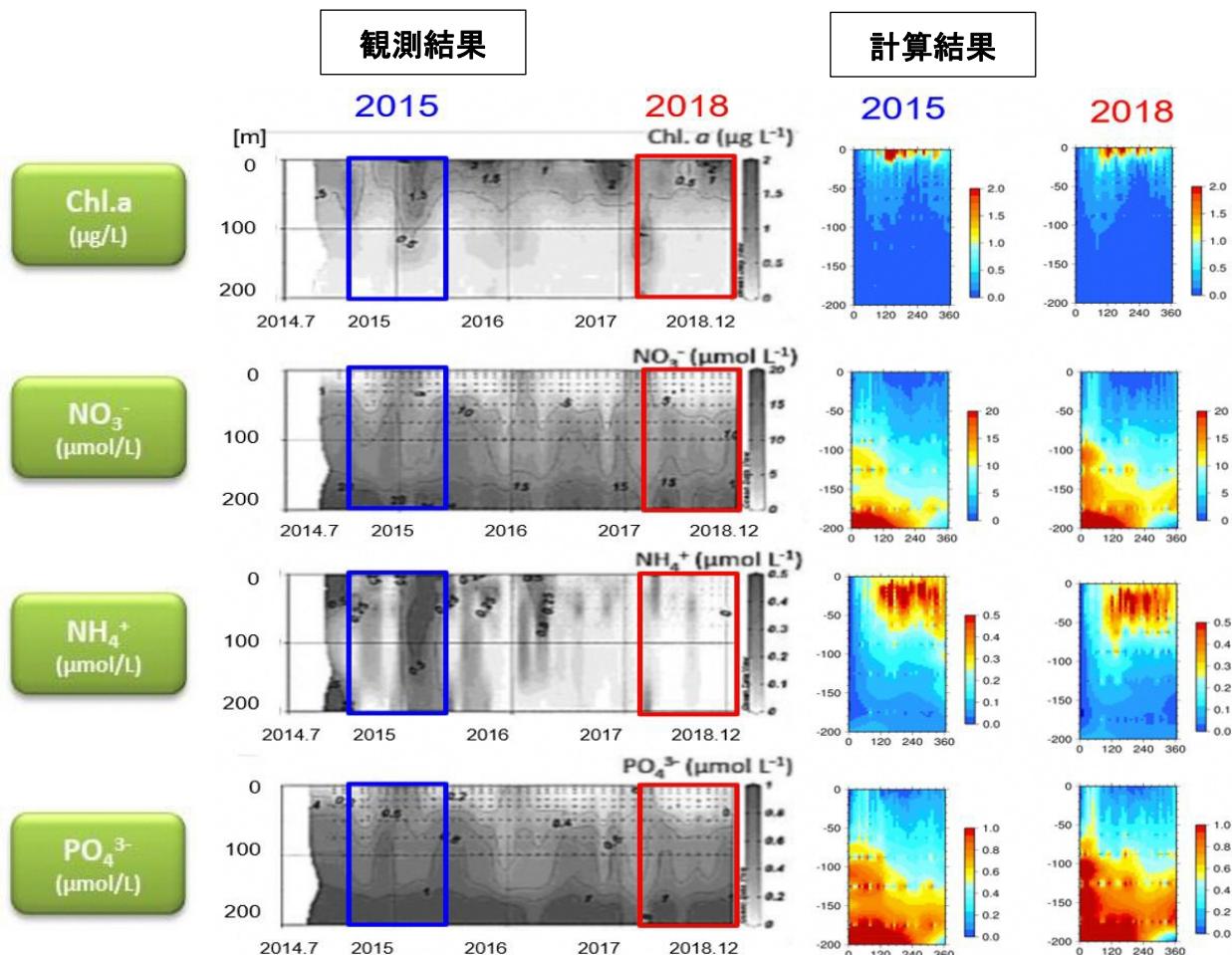
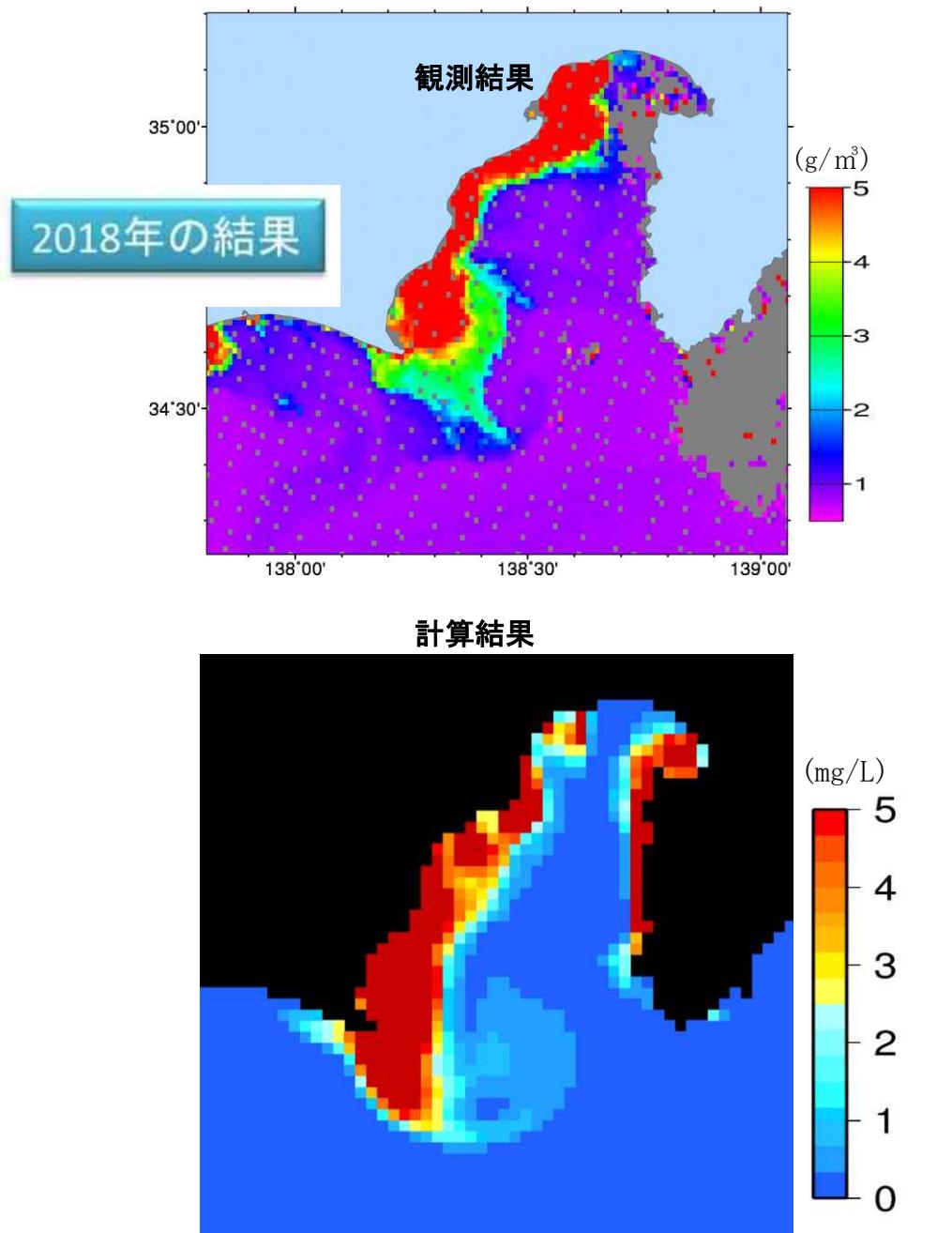


Fig. 7.1: Location of the study sites of Kakita River, Kano River and the Suruga Bay. Land and ocean images were obtained from the Red Relief Image Map by Asia Air Survey Co., Ltd., and R. Schlitzer, Ocean Data View, <https://odv.awi.de>, 2019, respectively. Bar shows water depth.

図 61 .Sohrin(2019)の観測結果との比較

(ウ) 水質濃度の再現性 (SS(衛星データ))

衛星データとの比較（濁り）を行った。観測結果における濁りの分布傾向をモデル計算でおおよそ再現できた。なお、沈降速度は 7m/day(一定値)、SS による光の減衰（消散係数 k）の変化については $k(1/m)=0.05256 \cdot SS(mg/L)$ とした。

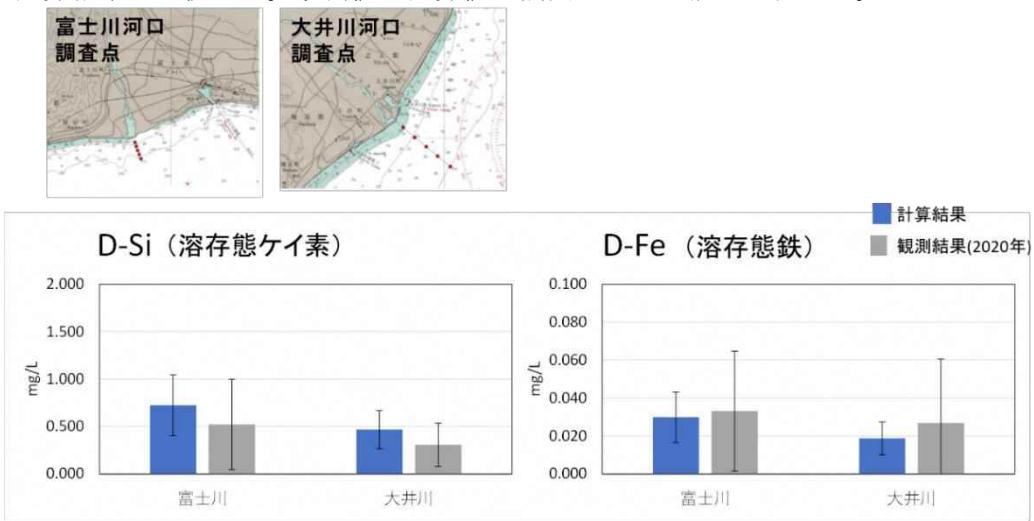


出典：三森ら (2014) : 沿岸域の基礎生産に着目した光環境に関する研究、土木研究所

図 62 SS の再現性検証

(エ) 栄養物質濃度の再現性の確認（鉄、ケイ素）

陸域から供給される鉄、ケイ素について、2020年に実施した現地調査結果とモデルによる計算結果を比較した。観測値と計算値の濃度レベルが概ね一致した。



※観測結果は、地点・時期（2020年9月・2020年11月）の平均で、エラーバーは標準偏差の幅（変動幅）を示す。鉄・ケイ素の観測は、2020年のみ実施

図 63 鉄・ケイ素の再現性検証

(オ) 栄養物質濃度の再現性の確認 (Chl-a)

クロロフィルaについて、2018年7月14日を例に、衛星データとシミュレーションモデルによる計算結果を比較した。観測結果におけるクロロフィルaの分布傾向を概ね再現できた。

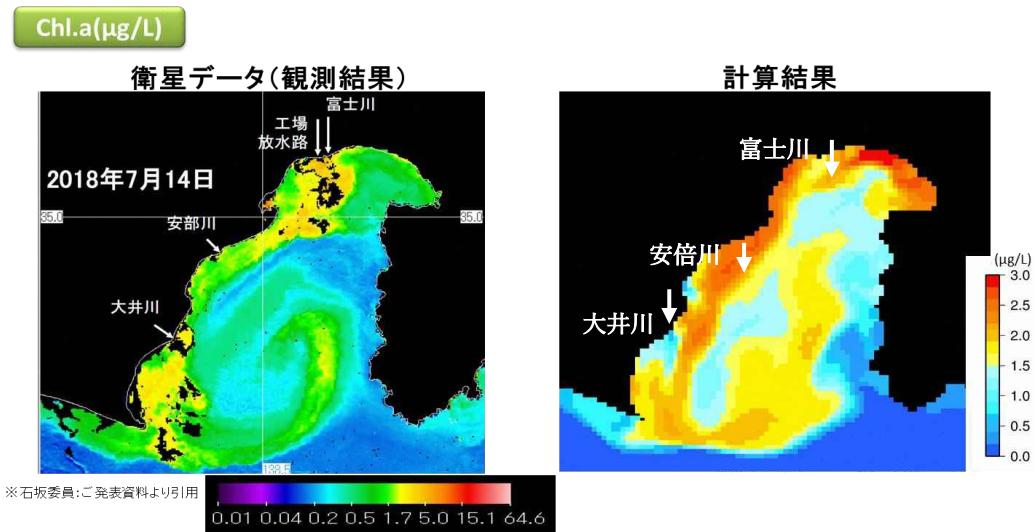
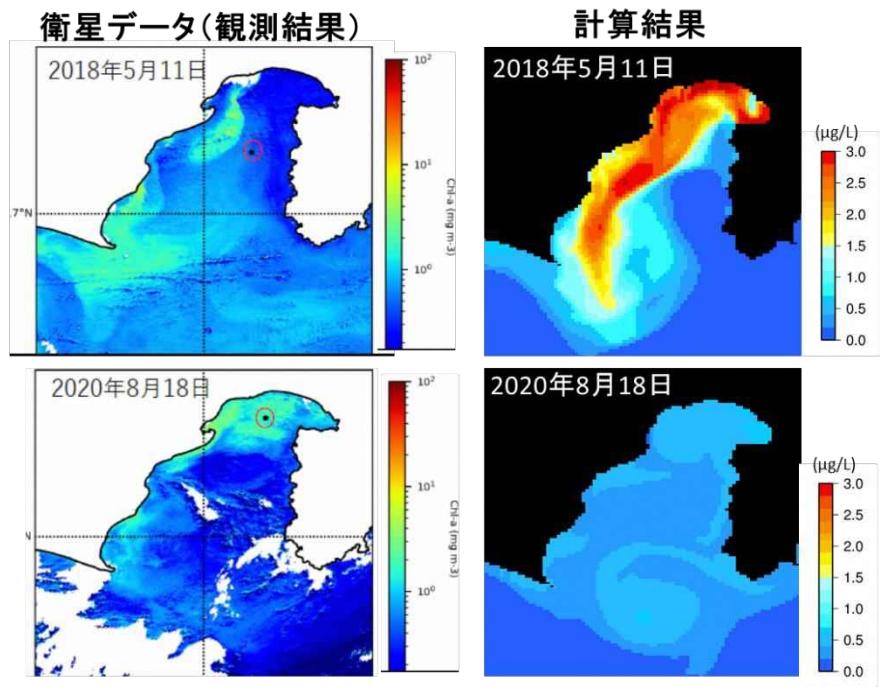


図 64 クロロフィルaの再現性検証

2018年7月14日以外にも、2018年5月11日、2020年8月18日において、衛星データと計算結果を比較した。クロロフィルaの分布範囲などは再現されているが、濃度の整合

性には課題がある。



※観測値は石坂委員ご提供資料

図 65 クロロフィル a の再現性検証

(力) 一次生産の再現（植物プランクトン発生種の再現）

既往知見により、駿河湾の特徴として、春のブルームにより大型珪藻が優占し、秋のブルームにより小型の植物プランクトンが優占することが知られている。現在も続く黒潮大蛇行の状況を表現した2018年を例に、プランクトンの発生種の移り変わりを、シミュレーション結果による発生量の割合で確認した。季節に応じてプランクトンの発生種の移り変わりを再現できた。

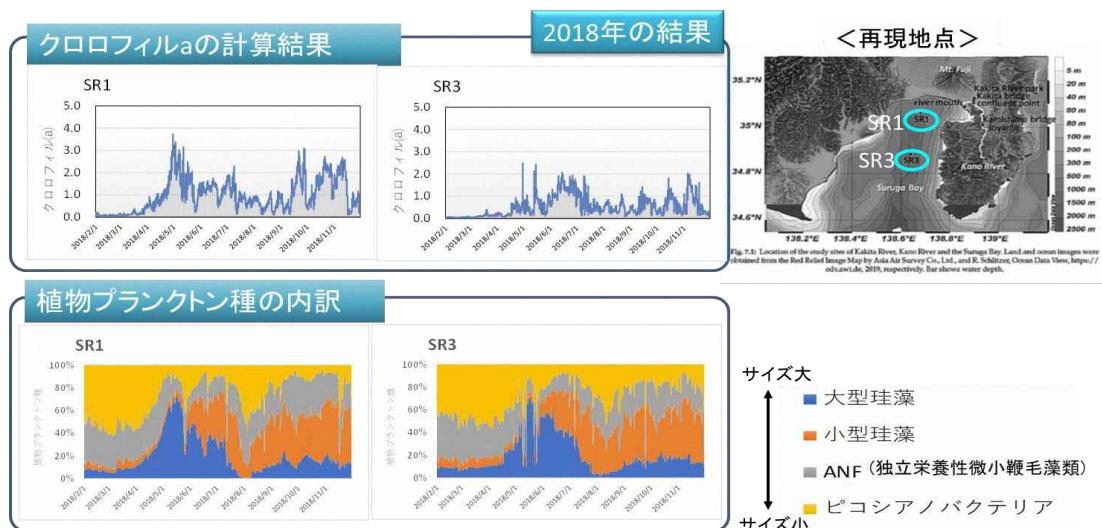


図 66 植物プランクトン発生種の再現性検証

(キ) 一次生産の再現（湾全体、沿岸域の一次生産量）

2015年、2018年、2020年の一次生産量は、いずれの年も春季は大型珪藻の生産量が多いが、秋季には小型珪藻の生産量が多い。黒潮非蛇行期（2015年）が大蛇行期（2018年、2020年）に比べて一次生産量は高い傾向であった。（黒潮の大蛇行期に春のブルームが低下する傾向が顕著）。湾平均でみた場合、一次生産量は約0.02～0.50(gC/m²/day)であった。

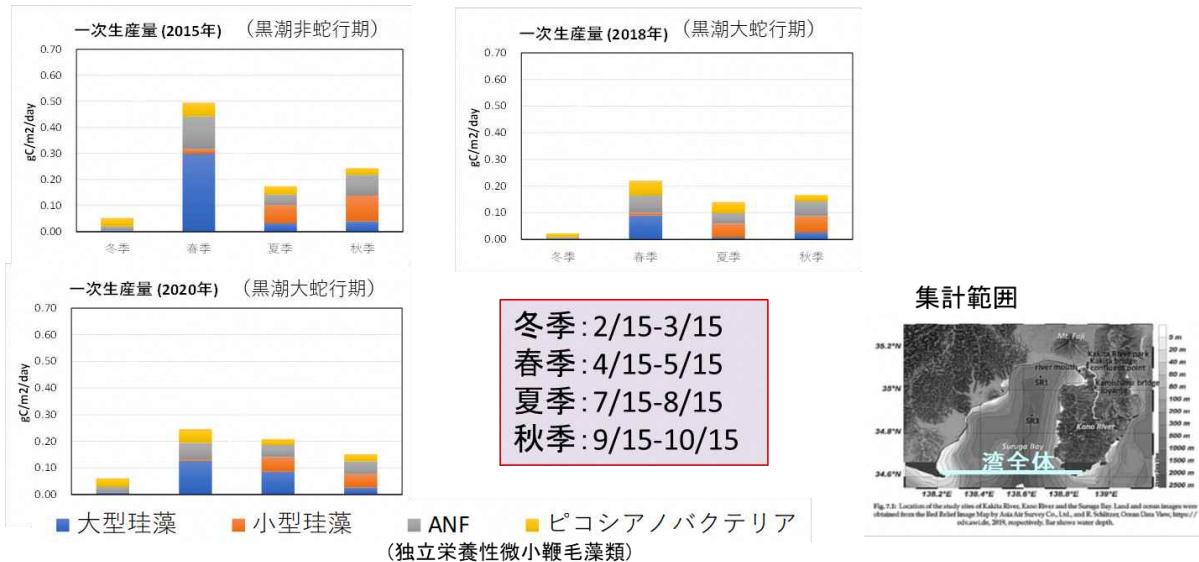


図 67 一次生産量の再現性検証（湾全体）

沿岸域で集計した一次生産量は、湾全体で集計した結果よりも高かった（河口域で高い一次生産が生じている）。一次生産量は、湾全体の集計結果と同様に、黒潮非蛇行期（2015年）が大蛇行期（2018年、2020年）に比べて高い傾向であった。

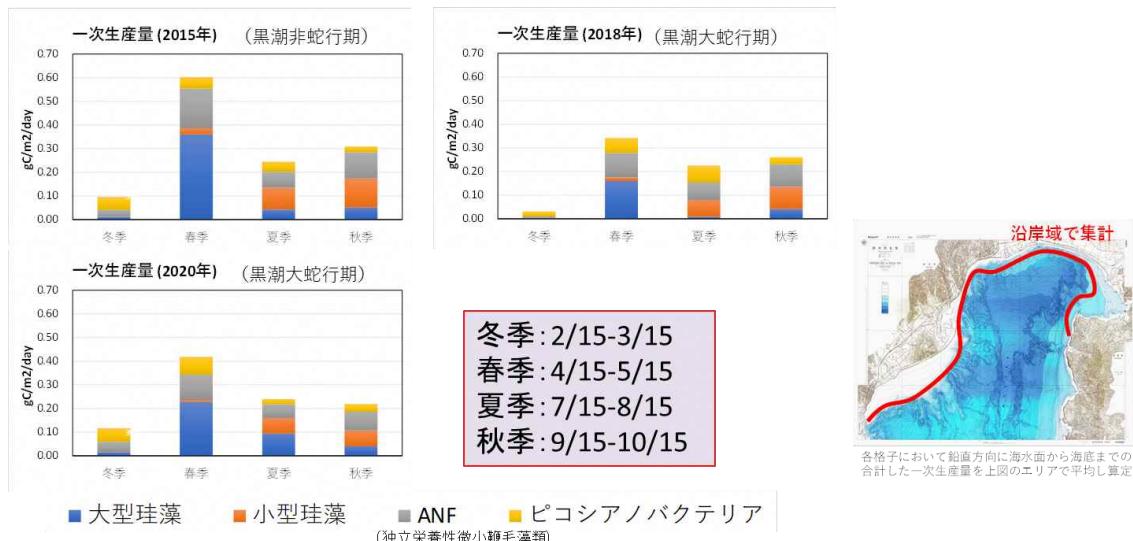


図 68 一次生産量の再現性検証（沿岸部）

駿河湾の食物連鎖の特徴に合わせて、植物プランクトン 4 種、それらを捕食する動物プランクトン・原生動物 3 種を考慮した駿河湾内の生態系モデルを作成した。(※伊勢湾シミュレータで解析可能な項目の範囲で、全体会員の意見も踏まえて、可能な限り駿河湾の特徴に合わせて選定) その結果、既往知見における「Si、P 濃度が比較的高い春季のブルームでは大型珪藻が優占する」については、その傾向をおおよそ再現することができた。また、駿河湾の水質特性と考えられる濁りやクロロフィル a 濃度の湾内の分布傾向を再現することができた。モデル計算結果から、駿河湾全域で平均した一次生産量は約 0.02~0.50gC/m²/day と推測した。なお、他海域の調査結果例は以下のとおりである。なお、湾全体に比べて一次生産量は河口を含む沿岸の浅い海域で高い傾向にあった。

<過去の調査事例>

伊勢湾・三河湾 : 0.4~3.5gC/m²/day (運輸省第五港湾建設局、1997)

瀬戸内海の年平均値として、

大阪湾奥部 : 1.3、広島湾北部 : 1.0、備讃瀬戸・安芸灘 : 0.3 gC/m²/day (松田ら(1997))

※ 駿河湾での算定結果とオーダーが一致する