

3.1.2 海域の流動・水質・底質モデル

3.1.2.1 流動モデル

瀬戸内海における気候変動の影響評価・将来予測のための海域モデルには、数十年スケールの長期間予測が可能であること、影響プロセスが陽に解析できること、きめ細かな海域の影響評価に耐えられる空間解像度(水平方向 1 km 程度)を有すること、適応策検討のための施策効果評価が可能であることが求められている。具体的には、(a) 陸域からの淡水・汚濁負荷流出、(b) 海面の運動・熱フラックス、(c) 外洋との海水交換の3つのプロセスの気候変動影響が瀬戸内海の流動・水質・底質や生物・生態系に伝播するようなモデル化(図B-4、図B-5、図B-6)を進めるとともに、長期計算の実施に向けたプログラムの最適化を図る必要がある。

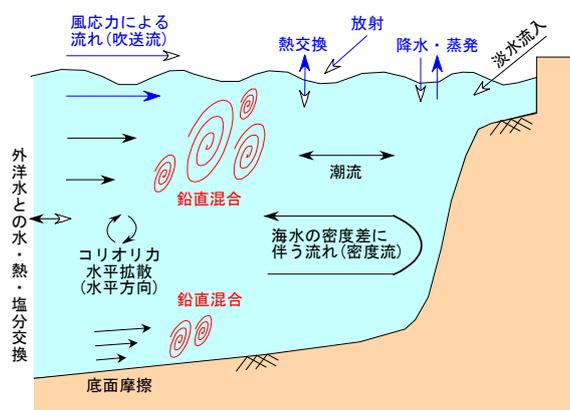


図 B-4 流動モデルが解析する現象

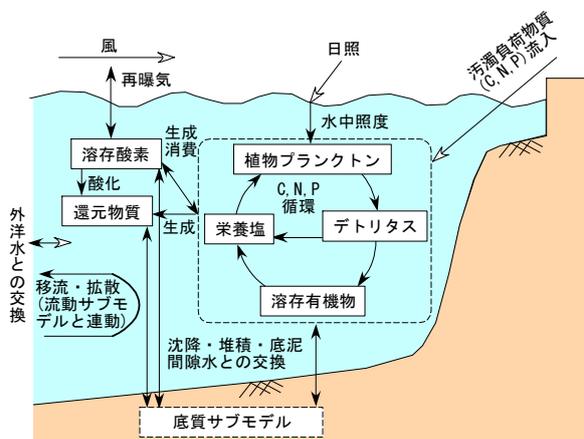


図 B-5 水質モデルが解析する現象

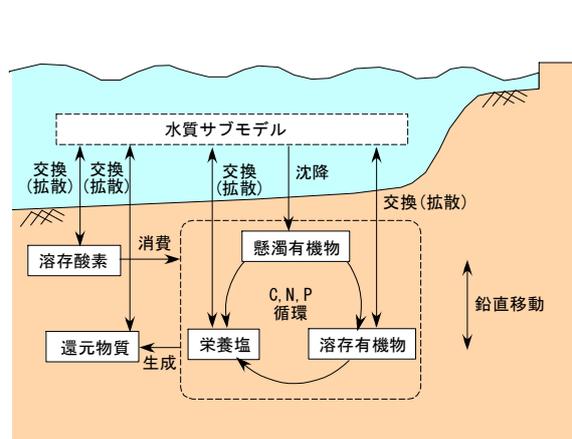


図 B-6 底質モデルが解析する現象

本業務に用いた海域モデルは、国立環境研究所がこれまで東京湾・伊勢湾・東シナ海等を対象に検証・改良を進め、長期シミュレーションの使用実績がある、3次元モデルである(東ら, 2009; 東ら, 2011; 東ら, 2013; Higashi et al., 2015)。

【基礎方程式】

流動モデルは、水量(水深・海面水位)、流速、水温(ポテンシャル水温)、塩分、および密度・圧力を予測変数とし、静水圧・ブシネスク近似を適用した基礎方程式(B-27)～(B-32)で構成されている。数値解法

には、コロケート格子・レベル座標系の有限差分法を用い、自由水面の追跡には VOF 法(Hirt and Nichols, 1981)を採用している。

$$\text{[連続式]} \quad \frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial (u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial (v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial (w\phi)}{\partial z} = S_\phi \quad (\text{B-27})$$

$$\text{[運動方程式]} \quad \frac{\partial \phi u}{\partial t} + \frac{\partial u\phi u}{\partial x} + \frac{\partial v\phi u}{\partial y} + \frac{\partial w\phi u}{\partial z} = -\frac{\phi}{\rho_0} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F'_u + \phi f v \quad (\text{B-28})$$

$$\frac{\partial \phi v}{\partial t} + \frac{\partial u\phi v}{\partial x} + \frac{\partial v\phi v}{\partial y} + \frac{\partial w\phi v}{\partial z} = -\frac{\phi}{\rho_0} \left(\frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F'_v - \phi f u \quad (\text{B-29})$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (\text{B-30})$$

$$\text{[熱輸送方程式]} \quad \frac{\partial (\phi\theta)}{\partial t} + \frac{\partial (u\phi\theta)}{\partial x} + \frac{\partial (v\phi\theta)}{\partial y} + \frac{\partial (w\phi\theta)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + F_\theta + \phi S_\theta \quad (\text{B-31})$$

$$\text{[塩分輸送方程式]} \quad \frac{\partial (\phi s)}{\partial t} + \frac{\partial (u\phi s)}{\partial x} + \frac{\partial (v\phi s)}{\partial y} + \frac{\partial (w\phi s)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi K_H \frac{\partial s}{\partial z} \right) + F_s + \phi S_s \quad (\text{B-32})$$

ここに、 ϕ : 格子中の水深(m)、 u, v, w : それぞれ x, y, z 方向の流速 (m s^{-1})、 θ, C : それぞれ温位 ($^{\circ}\text{C}$)、塩分 (無次元)、 f : コリオリ係数 (s^{-1})、 ρ, ρ_0 : それぞれ海水の現場密度 (kg m^{-3})と平均密度 ($= 1025 \text{ kg m}^{-3}$)、 P : 圧力 ($\text{kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$)、 K_M : 鉛直渦動粘性係数($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)、 K_H : 鉛直渦拡散係数($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)、 g : 重力加速度($= 9.8 \text{ m s}^{-2}$)、 S_ϕ, S_θ, S_s : それぞれ水・熱・塩分の生成(外部からの流入)量($\text{s}^{-1}, ^{\circ}\text{C s}^{-1}, \text{s}^{-1}$)である。

【水平渦粘性・渦拡散】

水平渦粘性項 F'_u, F'_v ($\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$)は Smagorinsky (1963)のパラメタリゼーションを用いて算定する。

$$F'_u = \frac{\partial}{\partial x} \left(2\phi A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \phi A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \quad (\text{B-33})$$

$$F'_v = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \phi A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left(2\phi A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (\text{B-34})$$

ここに、 A_M : 水平渦動粘性係数($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)であり、次式で表される。

$$A_M = \max \left[C_M \Delta_{grid} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 0.5 \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2}, \nu_{\min} \right] \quad (\text{B-35})$$

ここに、 C_M : 定数($=0.10 \sim 0.20$)、 Δ_{grid} : 水平方向の格子面積(m^2)、 ν_{\min} : 水平渦動粘性係数の最小値(バックグラウンド値)である。

熱、塩分の水平渦拡散項 F_θ ($^{\circ}\text{C s}^{-1}$)、 F_s (s^{-1})はそれぞれ以下の式で表わされる。

$$F_\theta = \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi A_H \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi A_H \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (\text{B-36})$$

$$F_s = \frac{\partial}{\partial x} \left(\phi A_H \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\phi A_H \frac{\partial s}{\partial y} \right) \quad (\text{B-37})$$

ここに、 A_H : 水平渦拡散係数($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)であり、次式で表される。

$$A_H = \max [C_H A_M, D_{\min}] \quad (\text{B-38})$$

ここに、 C_H : 定数(=0.2 程度)、 D_{\min} : 水平渦拡散係数の最小値(バックグラウンド値)である。

【鉛直渦動粘性・渦拡散】

鉛直渦動粘性係数 K_M および鉛直渦拡散係数 K_H の算定については Furuichi et al.(2012) のパラメタリゼーションを採用する。Furuichi et al.(2012) では乱流エネルギーを次式によって求める。

$$\frac{\partial(\phi k)}{\partial t} + \frac{\partial(u\phi k)}{\partial x} + \frac{\partial(v\phi k)}{\partial y} + \frac{\partial(w\phi k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi K_k \frac{\partial k}{\partial z} \right) + F_k + \phi S_k \quad (\text{B-39})$$

$$S_k = K_M \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} + \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \rho_B}{\partial z} - \varepsilon \quad (\text{B-40})$$

ここに、 k : 乱流エネルギー(= $q^2/2$, $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)、 K_k : 乱流の鉛直渦拡散係数($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)、 ρ_B : ポテンシャル密度(kg m^{-3}) である。 ε は乱流エネルギー散逸率($\text{m}^2 \text{s}^{-3}$)であり、次式で表される。

$$\varepsilon = \alpha q^3 / l \quad (\text{B-41})$$

ここに、 α : 定数(=0.060)である。 l は乱流の長さスケール(m)であり、診断方程式(Furuichi et al., 2012; 東ら, 2017)を用いて算定される。 K_M , K_H , K_k は、Mellor(2001)と同様、 k と l を用いて求められる安定度関数より導かれる。

【圧力・密度】

圧力 P 及び海水の密度 ρ については、水深、水温、塩分を用いて UNESCO(1981)の状態方程式で算定される。

【海底の境界条件】

海底における境界条件には海底摩擦を与え、水・熱・塩分の出入はないものとする。

$$K_M \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} = C_D u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (\text{B-42})$$

$$K_M \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{by}}{\rho_0} = C_D v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (\text{B-43})$$

$$w = 0 \quad (\text{B-44})$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0 \quad (\text{B-45})$$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad (\text{B-46})$$

ここに、 u_b , v_b : それぞれ最下層における u , v 、 C_D : 流速の対数分布則より求められる摩擦係数(無次元)である。

【海面の境界条件】

海面の境界条件に与える運動量・熱・水蒸気フラックスは Kondo(1975)のモデルを用いて算定される。流速の境界条件は以下の式で表わされる。

$$K_M \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{ax}}{\rho_0} = \frac{\rho_a}{\rho_0} C_M U_a \sqrt{U_a^2 + V_a^2} \quad (\text{B-47})$$

$$K_M \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_{ay}}{\rho_0} = \frac{\rho_a}{\rho_0} C_M V_a \sqrt{U_a^2 + V_a^2} \quad (\text{B-48})$$

ここに、 ρ_a : 大気の密度(kg m^{-3})、 U_a , V_a : それぞれ x , y 方向の海面より高さ 10m の風速(m s^{-1})、 C_M : 運動量のバルク輸送係数(無次元)である。海面における熱収支は次式で表わされる。

$$Q_n = S_d - S_u + L_d - L_u - H - l_w E \quad (\text{B-49})$$

ここに、 Q_n : 正味の熱流入フラックス($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、 S_d , S_u : それぞれ下向き、上向きの短波放射フラックス($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、 L_d , L_u : それぞれ下向き、上向きの長波放射フラックス($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、 H : 顕熱フラックス($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、 $l_w E$: 潜熱フラックス($\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)である。これらのうち S_d と L_d は再解析データや気候変動予測実験など大気モデルの出力値が入力条件として与えられる。 S_u は海面に入射した S_d が海面で反射したものであり、次式で求められる。

$$S_u = (1 - \text{ref}) S_d \quad (\text{B-50})$$

ここに、 ref : アルベード(無次元)である。残りの短波放射は、海水に吸収されつつ下層に透過するが、本モデルではそれを表現するために海面からの深さ z_s における短波放射量 Q_s を次式で算定する。

$$Q_s = (S_d - S_u) \exp(-\alpha_s z_s) \quad (\text{B-51})$$

ここに、 α_s : 光の消散係数(m^{-1})であり、一般に海水の水質によって変化することが知られている。本モデルでは、東シナ海の観測値より求めた Koshikawa et al. (2015) の経験式を参考にして、次式で α_s を算定する

$$\alpha_s = -0.41s + 0.021\text{Chl.}a + 110\text{SS} + 1.423 \quad (\text{B-52})$$

ここに、 s : 塩分(無次元)、 $\text{Chl.}a$: 植物プランクトンのクロロフィル a 濃度(mg/m^3)、 SS : 懸濁粒子濃度(kg m^{-3})であり、後者 2 つは後述の水質・底質・生態系モデルの予測変数になっている。なお、上式では塩分が説明変数となっているが、これは塩分と CDOM(蛍光性溶存有機物)に負の相関があるためであり、塩分が低いほど CDOM 濃度が高くなり、光が透過しにくいことを表している。一方、海面に入射する長波放射はそのほとんどが海水表層において吸収される。上向きの長波放射フラックスは次式を用いて算定される。

$$L_u = \varepsilon \sigma_s (273.15 + T_s)^4 \quad (\text{B-53})$$

ここに、 σ : 黒体度(無次元)、 σ_s : Stefan-Boltzmann 定数($=5.67 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$)、 T_s : 海面水温($^{\circ}\text{C}$)である。

顕熱・潜熱フラックスはそれぞれ以下の式を用いて算定される。

$$H = \rho_a c_{pa} C_H W_a (T_s - T_a) \quad (\text{B-54})$$

$$l_w E = l_w \rho_a C_E W_a (q_s - q_a) \quad (\text{B-55})$$

ここに、 c_{pa} : 空気の定圧比熱($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)、 l_w : 水の気化潜熱(J kg^{-1})、 W_a , q_a , T_a : それぞれ海面より高さ 10m の風速(m s^{-1})、比湿(g kg^{-1})、気温($^{\circ}\text{C}$)、 q_s : 海面直上の飽和比湿(g kg^{-1})、 C_E , C_H : それぞれ潜熱、顕熱のバルク輸送係数(無次元)である。

3.1.2.2 水質モデル

水質・底質モデルは、海水・海底における炭素(C)－窒素(N)－リン(P)－酸素(O)の生化学循環(図 B-5、図 B-6)を解析するものであり、図 B-7 の構造になっている。C、N、P についてはそれぞれ植物プランクトン態、懸濁(デトリタス)有機態、溶存有機態および溶存無機態(C を除く)の形態変化を考慮している。なお、本業務の計算においてケイ素(Si)は、広域総合水質調査(環境省)等の観測値を見る限り、珪藻類の一次生産を阻害するほどの濃度低下が確認されなかったため、計算の対象外とした。

水質モデルの予測変数を表 B-4 に示す。植物プランクトンは、平成 27～30 年度業務および今年度業務において培養実験を行った *Eucampia zodiacus* と *Skeletonema marinoi-dohrnii* complex (以降、それぞれ E 型珪藻、S 型珪藻と記す)、およびその他の種として過去に国立環境研究所(2016)が培養実験にて増殖パラメータ(未発表)を取得した渦鞭毛藻の計 3 種とした。懸濁態有機物および溶存態有機物は、分解速度の違いを考慮し、分解速度が比較的速い易分解性、遅い難分解性に分画している。溶存酸素は、海面における再曝気と植物プランクトンの光合成による供給と、有機物の好気分解、硝化および酸素消費物質(ODU: Oxygen Demand Unit)の酸化による消費を考慮している。なお、ODU は、有機物の嫌気分解に伴って生成される鉄、マンガン、硫化水素等の還元物質を一纏めにしたものに相当し、COD と同様、ODU の酸化に必要な酸素量で評価した濃度指標である(Sohma et al., 2008)。ODU の酸化速度は他のプロセスよりも速く、ODU は負の DO と読み替えることができるため、モデル上でもそのように取り扱っている(ODU を予測変数として設定せず、DO が正值のときは溶存酸素、負値のときは ODU と解釈する)。

各物質の海水中での輸送は、いずれも移流拡散方程式(図 B-56)を用いて解析される。

$$\frac{\partial(\phi C_M)}{\partial t} + \frac{\partial(u\phi C_M)}{\partial x} + \frac{\partial(v\phi C_M)}{\partial y} + \frac{\partial\{(w - w_{pM})\phi C_M\}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\phi K_H \frac{\partial C_M}{\partial z} \right) + F_M + \phi S_M \quad (\text{図 B-56})$$

ここに、 C_M : 物質 M の水中濃度(例えば mg L^{-1})、 w_{pM} : 物質 M の沈降速度(m s^{-1})である。 S_M は物質 M の生成項(例えば $\text{mg L}^{-1} \text{ s}^{-1}$)であり、図 B-7 に記された物質間の各パスが次のように定式化されており、それらに基づいて計算格子ごとに算定される。

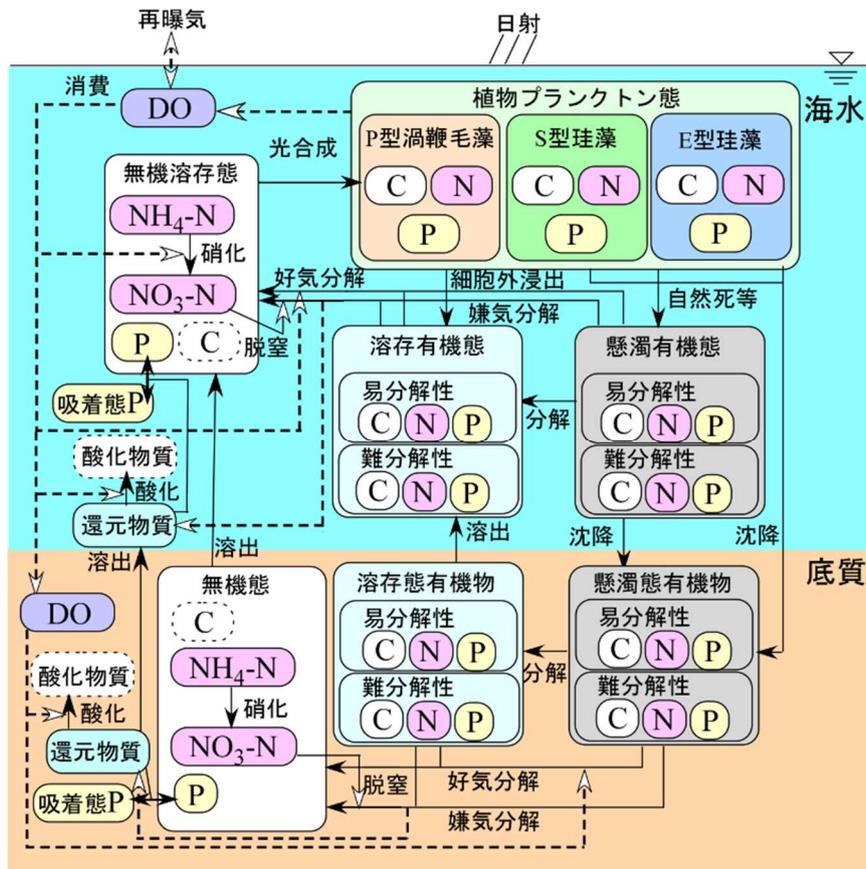


図 B-7 水質・底質モデルの構造

表 B-4 水質モデルの予測変数

名称	表記	単位	名称	表記	単位
植物プランクトン態	S型珪藻	C_{plw}	溶存有機態	易分解 DOC	C_{docf}
	E型珪藻	C_{plc}		難分解 DOC	C_{docs}
	P型渦鞭毛藻	C_{pls}		易分解 DON	C_{donf}
懸濁有機態	易分解 POC	C_{pocf}	難分解 DON	C_{dons}	
	難分解 POC	C_{pocs}	易分解 DOP	C_{dopf}	
	易分解 PON	C_{ponf}	難分解 DOP	C_{dops}	
	難分解 PON	C_{pons}	無機態 栄養塩	NO ₃ -N	C_{dino}
	易分解 POP	C_{popf}		NH ₄ -N	C_{dinh}
	難分解 POP	C_{pops}		DIP	C_{dip}
懸濁粒子(鉱物)	シルト・泥	C_{sps}	溶存酸素	吸着態 P	C_{adp}
	砂	C_{spl}		DO	C_{dox}

【植物プランクトン】

図 B-7 の植物プランクトンには C、N、P が記されているが、その構成比(C:N:P)は一定と仮定している。そのため、植物プランクトン態の予測変数は、表 B-4 に示してあるとおり、C のみとなっており、N と P は設定した C:N:P 比を用いて算定する仕組みになっている。植物プランクトンのモデル基礎式およびモデルパラメータを表 B-5～表 B-8 に示す。

表 B-5 植物プランクトンのモデル基礎式

	関数	単位	パラメータ
植物プランクトン ($pl = plw$: S 型珪藻, plc : E 型珪藻, pls : P 型渦鞭毛藻)			
純増加量	$S_{pl} = Gp_{pl} - Exc_{pl} - Mor_{pl}$	mg-C L ⁻¹ s ⁻¹	
純光合成量	$Gp_{pl} = \mu_{Tpl} f_{Npl} f_{Ipl} C_{pl}$	mg-C L ⁻¹ s ⁻¹	μ_{Tpl} , f_{Npl} , f_{Ipl}
細胞外浸出	$Exc_{pl} = \gamma_{pl} Gp_{pl}$	mg-C L ⁻¹ s ⁻¹	γ_{pl}
自然死・捕食	$Mor_{pl} = \beta_{pl} Gp_{pl}$	mg-C L ⁻¹ s ⁻¹	β_{pl}

表 B-6 植物プランクトンモデルの栄養塩影響関数(無次元)

	関数	パラメータ
植物プランクトン ($pl = plw$: S 型珪藻, plc : E 型珪藻, pls : P 型渦鞭毛藻)		
栄養塩影響関数	$f_{Npl} = \min(f_{DINpl}, f_{DIPpl})$	
DIN 影響関数	$f_{DINpl} = \min(1, f_{NHpl} + f_{NOpl})$	
NH ₄ -N 影響関数	$f_{NHpl} = \frac{C_{dinh}}{K_{NHpl} + C_{dinh}}$	K_{NHpl}
NO ₃ -N 影響関数	$f_{NOpl} = \frac{C_{dino}}{K_{NOpl} + C_{dino}}$	K_{NOpl}
DIP 影響関数	$f_{DIPpl} = \frac{C_{dip}}{K_{DIPpl} + C_{dip}}$	K_{DIPpl}

表 B-7 植物プランクトンモデルの光影響関数(無次元)

	関数	パラメータ
S 型珪藻の 光影響関数	$f_{Iplw} = \frac{I - I_{0plw}}{(K_{Iplw} - I_{0plw}) + (I - I_{0plw})}$	K_{Iplw}, I_{0plw}
E 型珪藻の 光影響関数	$f_{Iplc} = \frac{I - I_{0plc}}{(K_{Iplc} - I_{0plc}) + (I - I_{0plc})}$	K_{Iplc}, I_{0plc}
P 型珪藻の 光影響関数	$f_{Ipls} = \frac{0.5(I - I_{0pls})}{(K_{1pls} - I_{0pls}) + (I - I_{0pls})} + \frac{0.5 \max(0, I - I_{1pls})}{(K_{2pls} - I_{1pls}) + (I - I_{1pls})}$	$K_{1pls}, I_{0pls},$ K_{2pls}, I_{1pls}

I : 量子子密度($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)であり、モデルで使用する放射照度($\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$)との関係式には $1 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1} = 1.96 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Thimijan and Heins, 1983)を用いた。

表 B-8 植物プランクトンのモデルパラメータ(今年度モデル)

	表記	S 型珪藻 ($pl=plw$)	E 型珪藻 ($pl=plc$)	P 型渦鞭毛藻 ($pl=pls$)	単位
比増殖速度	μ_{Ipl}	図 5-3 ¹⁾	図 5-3 ¹⁾	2.4 ³⁾	day^{-1}
NH ₄ -N 半飽和定数	K_{NHpl}	0.090 ⁴⁾	0.133 ⁴⁾	0.063 ⁴⁾	$\mu\text{mol L}^{-1}$
NO ₃ -N 半飽和定数	K_{NOpl}	表 4-16 ²⁾	表 4-21 ²⁾	0.19 ⁵⁾	$\mu\text{mol L}^{-1}$
DIP 半飽和定数	K_{DIPpl}	0.10 ⁷⁾	0.15 ⁶⁾	0.070 ⁷⁾	$\mu\text{mol L}^{-1}$
光半飽和定数	K_{Ipl}	図 5-3 ¹⁾	図 5-3 ¹⁾	$K_{1pls} = 50$ ³⁾ $K_{2pls} = 525$ ³⁾	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
補償光量	I_{0pl}	図 5-3 ¹⁾	図 5-3 ¹⁾	$I_{0pls} = 0.0$ ³⁾ $I_{1pls} = 500$ ³⁾	$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
細胞外浸出係数	γ_{pl}	0.135 ⁸⁾	0.135 ⁸⁾	0.135 ⁸⁾	無次元
比減少速度	β_{pl}	0.45 ⁹⁾	0.34 ⁹⁾	0.24 ⁹⁾	day^{-1}
C:N:P モル比	Rdf_{NC} Rdf_{PC}	106:16:1 ¹⁰⁾	106:16:1 ¹⁰⁾	106:16:1 ¹⁰⁾	無次元

1) 本編第 5 章参照、2) 平成 30 年度報告書参照、3) 既存の培養実験の値(越川, 未発表データ)、4) 調整値(NO₃-N の半飽和定数の 0.7 倍程度)、5) 調整値(S 型珪藻の 0.7 倍程度)、6) 西川(2011)の DIP 半飽和定数に[本業務の NO₃-N 半飽和定数(平均値)]/[西川(2011)の NO₃-N 半飽和定数]を乗じた値、7) 6)で求めた E 型の DIP 半飽和定数に[S 型、P 型の NO₃-N 半飽和定数(平均値)]/[E 型の NO₃-N 半飽和定数(平均値)]を乗じた値、8) 標準的な値(例えば、Sohma et al., 2008)、9) 調整値、10) Redfield(1958)。

【懸濁有機態・溶存有機態】

懸濁有機態、溶存有機態のモデル基礎式をそれぞれ表 B-9、表 B-10 に示す。また、モデルパラメータを表 B-15 に示す。

表 B-9 懸濁有機態のモデル基礎式

	関数	単位	パラメータ
懸濁有機態 C: 易分解 POC および難分解 POC ($poci, i=f$: 易分解, s : 難分解)			
純増加量	$S_{poci} = \sum_{pl} Sbs_{pl \rightarrow poci} - Dpd_{poci} - Dpi_{poci}$	mg-C L ⁻¹ s ⁻¹	
植物プランクトン自然死・捕食による増加	$Sbs_{pl \rightarrow poci} = R_{pl \rightarrow i} Mor_{pl}$	mg-C L ⁻¹ s ⁻¹	$R_{pl \rightarrow i}$
溶存有機態 C への細粒化	$Dpd_{poci} = Vpd_{0i} \exp(k_D T) C_{poci}$	mg-C L ⁻¹ s ⁻¹	Vpd_{0i}, k_D
無機態 C への分解消滅	$Dpi_{poci} = Vpi_{Ti} C_{poci}$ (詳細は表 B-11)	mg-C L ⁻¹ s ⁻¹	
懸濁有機態 N: 易分解 PON および難分解 PON ($poni, i=f$: 易分解, s : 難分解)			
純増加量	$S_{poni} = \sum_{pl} Sbs_{pl \rightarrow poni} - Dpd_{poni} - Dpi_{poni}$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	
植物プランクトン自然死・捕食による増加	$Sbs_{pl \rightarrow poni} = R_{pl \rightarrow i} Rdf_{NC} Mor_{pl}$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	$R_{pl \rightarrow i}, Rdf_{NC}$
溶存有機態 N への細粒化	$Dpd_{poni} = Vpd_{0i} \exp(k_D T) C_{poni}$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	Vpd_{0i}, k_D
無機態 N (NH ₄ -N) への分解回帰	$Dpi_{poni} = Vpi_{Ti} C_{poni}$ (詳細は表 B-11)	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	
懸濁有機態 P: 易分解 POP および難分解 POP ($popi, i=f$: 易分解, s : 難分解)			
純増加量	$S_{popi} = \sum_{pl} Sbs_{pl \rightarrow popi} - Dpd_{popi} - Dpi_{popi}$	mg-P L ⁻¹ s ⁻¹	
植物プランクトン自然死・捕食による増加	$Sbs_{pl \rightarrow popi} = R_{pl \rightarrow i} Rdf_{PC} Mor_{pl}$	mg-P L ⁻¹ s ⁻¹	$R_{pl \rightarrow i}, Rdf_{PC}$
溶存有機態 P への細粒化	$Dpd_{popi} = Vpd_{0i} \exp(k_D T) C_{popi}$	mg-P L ⁻¹ s ⁻¹	Vpd_{0i}, k_D
無機態 P (DIP) への分解回帰	$Dpi_{popi} = Vpi_{Ti} C_{popi}$ (詳細は表 B-11)	mg-P L ⁻¹ s ⁻¹	

表 B-10 溶存有機態のモデル基礎式

	関数	単位	パラメータ
溶存有機態 C: 易分解 DOC および難分解 DOC ($doci, i=f$: 易分解, s : 難分解)			
純増加量	$S_{doci} = \sum_{pl} Sbs_{pl \rightarrow doci} + Dpd_{poci} - Ddi_{doci}$	mg-C $L^{-1} s^{-1}$	
植物プランクトン 細胞外浸出	$Sbs_{pl \rightarrow doci} = R_{pl \rightarrow i} Exc_{pl}$	mg-C $L^{-1} s^{-1}$	$R_{pl \rightarrow i}$
懸濁有機態 C の 分解	$Dpd_{poci} = Vpd_{oi} \exp(k_D T) C_{poci}$ (表 B-9 に既出)	mg-C $L^{-1} s^{-1}$	Vpd_{oi}, k_D
無機態 C への分 解消滅	$Ddi_{doci} = Vdi_{Ti} C_{doci}$ (詳細は表 B-12)	mg-C $L^{-1} s^{-1}$	
溶存有機態 N: 易分解 DON および難分解 DON ($doni, i=f$: 易分解, s : 難分解)			
純増加量	$S_{doni} = \sum_{pl} Sbs_{pl \rightarrow doni} + Dpd_{poni} - Ddi_{doni}$	mg-N $L^{-1} s^{-1}$	
植物プランクトン 細胞外浸出	$Sbs_{pl \rightarrow doni} = R_{pl \rightarrow i} Rdf_{NC} Exc_{pl}$	mg-N $L^{-1} s^{-1}$	$R_{pl \rightarrow i},$ Rdf_{NC}
懸濁有機態 N の 分解	$Dpd_{poni} = Vpd_{oi} \exp(k_D T) C_{poni}$ (表 B-9 に既出)	mg-N $L^{-1} s^{-1}$	Vpd_{oi}, k_D
無機態 N (NH_4-N)への分解 回帰	$Ddi_{doni} = Vdi_{Ti} C_{doni}$ (詳細は表 B-12)	mg-N $L^{-1} s^{-1}$	
溶存有機態 P: 易分解 DOP および難分解 DOP ($dopi, i=f$: 易分解, s : 難分解)			
純増加量	$S_{dopi} = \sum_{pl} Sbs_{pl \rightarrow dopi} + Dpd_{popi} - Ddi_{dopi}$	mg-P $L^{-1} s^{-1}$	
植物プランクトン 細胞外浸出	$Sbs_{pl \rightarrow dopi} = R_{pl \rightarrow i} Rdf_{PC} Exc_{pl}$	mg-P $L^{-1} s^{-1}$	$R_{pl \rightarrow i},$ Rdf_{PC}
懸濁有機態 P の 分解	$Dpd_{popi} = Vpd_{oi} \exp(k_D T) C_{popi}$ (表 B-9 に既出)	mg-P $L^{-1} s^{-1}$	Vpd_{oi}, k_D
無機態 P (DIP)へ の分解回帰	$Ddi_{dopi} = Vdi_{Ti} C_{dopi}$ (詳細は表 B-12)	mg-P $L^{-1} s^{-1}$	

表 B-9 および表 B-10 では、懸濁有機態から無機態、溶存有機態から無機態への分解がそれぞれ 1 つの式で表されているが、それには好気分解、準嫌気分解(脱窒)、嫌気分解が含まれている(表 B-11 および表 B-12)。好気分解では溶存酸素を、準嫌気分解では硝酸を有機態炭素の分解量に応じてそれぞれ消費する。

表 B-11 懸濁有機態から無機態への分解の構成

	関数	パラメータ
比分解速度	$Vpi_{Ti} = Vpi_{0i} \exp(k_D T) = Vpi_{oxi} + Vpi_{sbi} + Vpi_{ani}$	Vpi_{0i}, k_D
好気分解速度	$Vpi_{oxi} = Vpi_{Ti} \left\{ \frac{\max(C_{dox}, 0)}{K_{Dox} + C_{dox}} \right\}$	K_{Dox}
準嫌気分解(脱窒)速度	$Vpi_{sbi} = Vpi_{Ti} \left\{ 1 - \frac{\max(C_{dox}, 0)}{K_{Dox} + C_{dox}} \right\} \left(\frac{C_{dino}}{K_{Dsb} + C_{dino}} \right)$	K_{Dox}, K_{Dsb}
嫌気分解速度	$Vpi_{ani} = Vpi_{Ti} \left\{ 1 - \frac{\max(C_{dox}, 0)}{K_{Dox} + C_{dox}} \right\} \left(1 - \frac{C_{dino}}{K_{Dsb} + C_{dino}} \right)$	K_{Dox}, K_{Dsb}

T 水温(°C)(浅海域では温位 θ とほぼ同値)

表 B-12 溶存有機態から無機態への分解の構成

	関数	パラメータ
比分解速度	$Vdi_{Ti} = Vdi_{0i} \exp(k_D T) = Vdi_{oxi} + Vdi_{sbi} + Vdi_{ani}$	Vdi_{0i}, k_D
好気分解速度	$Vdi_{oxi} = Vdi_{Ti} \left\{ \frac{\max(C_{dox}, 0)}{K_{Dox} + C_{dox}} \right\}$	K_{Dox}
準嫌気分解(脱窒)速度	$Vdi_{sbi} = Vdi_{Ti} \left\{ 1 - \frac{\max(C_{dox}, 0)}{K_{Dox} + C_{dox}} \right\} \left(\frac{C_{dino}}{K_{Dsb} + C_{dino}} \right)$	K_{Dox}, K_{Dsb}
嫌気分解速度	$Vdi_{ani} = Vdi_{Ti} \left\{ 1 - \frac{\max(C_{dox}, 0)}{K_{Dox} + C_{dox}} \right\} \left(1 - \frac{C_{dino}}{K_{Dsb} + C_{dino}} \right)$	K_{Dox}, K_{Dsb}

T 水温(°C)(浅海域では温位 θ とほぼ同値)

【無機態栄養塩】

無機態栄養塩のモデル基礎式を表 B-13 に示す。また、モデルパラメータを表 B-15 に示す。本モデルでは、DIP と懸濁粒子の吸脱着が考慮されており、吸着は好気時、脱着は嫌気分解発生時に発生するようにしてある。なお、モデルの簡素化のため吸脱着は最細粒径の懸濁粒子とのみ生じるものとし、吸着量の上限(吸着能)を設けてある。

表 B-13 無機態栄養塩のモデル基礎式

	関数	単位	パラメータ
NH₄-N			
純増加量	$S_{dinh} = -\sum_{pl} Cns_{dinh \rightarrow pl} + \sum_{poni} Dpi_{poni} + \sum_{doni} Ddi_{doni} - Nit$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	
植物プランクトンによる吸収	$Cns_{dinh \rightarrow pl} = \frac{\min(f_{NHpl}, f_{DIPpl})}{f_{Npl}} Rdf_{NC} Gp_{pl}$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	Rdf_{NC}
懸濁有機態 N の分解回帰	$Dpi_{poni} = Vpi_{Ti} C_{poni} \quad (\text{表 B-9 に既出})$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	
溶存有機態 N の分解回帰	$Ddi_{doni} = Vdi_{Ti} C_{doni} \quad (\text{表 B-10 に既出})$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	
硝化	$Nit = Nit_0 \exp(k_{nit} T) \left\{ \frac{\max(C_{dox}, 0)}{K_{nit} + C_{dox}} \right\} C_{dinh}$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	Nit_0, k_{nit}, K_{nit}
NO₃-N			
純増加量	$S_{dino} = -\sum_{pl} Cns_{dino \rightarrow pl} - Denit + Nit$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	
植物プランクトンによる吸収	$Cns_{dino \rightarrow pl} = \frac{\min(f_{DINpl} - f_{NHpl}, f_{DIPpl})}{f_{Npl}} Rdf_{NC} Gp_{pl}$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	Rdf_{NC}
準嫌気分解に伴う消費(消滅)	$Denit = R_{NCan} \left(\sum_{poci} Vpi_{sbi} C_{poci} + \sum_{doci} Vdi_{sbi} C_{doci} \right)$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	R_{NCan}
硝化	$Nit = Nit_0 \exp(k_{nit} T) \left\{ \frac{\max(C_{dox}, 0)}{K_{nit} + C_{dox}} \right\} C_{dinh} \quad (\text{既出})$	mg-N L ⁻¹ s ⁻¹	Nit_0, k_{nit}, K_{nit}
DIP			
純増加量	$S_{dip} = -\sum_{pl} Cns_{dip \rightarrow pl} - Adsr + Dsr$	mg-P L ⁻¹ s ⁻¹	
植物プランクトンによる吸収	$Cns_{dip \rightarrow pl} = Rdf_{PC} Gp_{pl}$	mg-P L ⁻¹ s ⁻¹	Rdf_{PC}
SS への吸着 (好気時)	$Adsr = \min \left\{ V_{adp} C_{sps} \frac{\max(C_{dox}, 0)}{K_{adp} + C_{dox}} C_{dip}, \frac{Cap C_{sps} - C_{adp}}{\Delta t} \right\}$	mg-P L ⁻¹ s ⁻¹	V_{adp}, K_{adp}, Cap
SS からの脱着 (嫌気時)	$Dsr = \min \left\{ R_{PCdsr} \left(\sum_{poci} Vpi_{ani} C_{poci} + \sum_{doci} Vdi_{ani} C_{doci} \right), \frac{C_{adp}}{\Delta t} \right\}$	mg-P L ⁻¹ s ⁻¹	R_{PCdsr}

Δt : 計算の時間ステップ(sec)

【溶存酸素】

溶存酸素のモデル基礎式を表 B-14 に示す。また、モデルパラメータを表 B-15 に示す。溶存酸素については海面における再曝気を考慮してあり、境界条件として与えられる。

表 B-14 溶存酸素のモデル基礎式

	関数	単位	パラメータ
DO			
純増加量	$S_{d_{ox}} = \sum_{pl} Spl_{pl \rightarrow d_{ox}} - Oxdec - Andec - Nit_{d_{ox}} (+Rrt_{d_{ox}})$	mg-O ₂ L ⁻¹ s ⁻¹	
植物プランクトン光合成による供給	$Spl_{pl \rightarrow d_{ox}} = R_{OC} Gp_{pl}$	mg-O ₂ L ⁻¹ s ⁻¹	R_{OC}
有機物の好気分解による DO 消費	$Oxdec = R_{OC} \left(\sum_{poci} Vpi_{oxi} C_{poci} + \sum_{doci} Vdi_{oxi} C_{doci} \right)$	mg-O ₂ L ⁻¹ s ⁻¹	R_{OC}
有機物の嫌気分解による ODU 生成	$Andec = R_{OC} \left(\sum_{poci} Vpi_{ani} C_{poci} + \sum_{doci} Vdi_{ani} C_{doci} \right)$	mg-O ₂ L ⁻¹ s ⁻¹	R_{OC}
硝化に伴う消費	$Nit_{d_{ox}} = R_{ON} Nit$	mg-O ₂ L ⁻¹ s ⁻¹	R_{ON}
再曝気量(大気からの供給、海面格子のみ)	$Rrt_{d_{ox}} = 0.31 V_{air}^2 (Sc / 660)^{-0.5} \frac{DO_{sat} - C_{d_{ox}}}{\Delta h_s} 1)$	mg-O ₂ L ⁻¹ s ⁻¹	

1) Wanninkhof (1992)。 V_{air} : 風速(m sec⁻¹)、 Sc : 溶存酸素の Schmit 数、 DO_{sat} : 海面における飽和溶存酸素量(mg-O₂ L⁻¹)、 Δh_s : 表層厚(m)。

表 B-15 水質モデルの懸濁有機態・溶存有機態・無機態栄養塩・溶存酸素に関するパラメータ

	表記	値	単位	備考
植物プランクトン態有機物の易分解性の割合	R_{pl-f}	0.95	無次元	1)
同 難分解性の割合	R_{pl-s}	0.05	無次元	1)
易分解性の懸濁→溶存有機態の細粒化速度	V_{pdof}	0.0050	day ⁻¹	2)
難分解性の懸濁→溶存有機態の細粒化速度	V_{pdos}	0.0001	day ⁻¹	2)
易分解性の懸濁有機態→無機態の比分解速度	V_{piof}	0.0450	day ⁻¹	2)
難分解性の懸濁有機態→無機態の比分解速度	V_{pios}	0.0000	day ⁻¹	2)
易分解性の溶存有機態→無機態の比分解速度	V_{diov}	0.0500	day ⁻¹	2)
難分解性の溶存有機態→無機態の比分解速度	V_{di0s}	0.0005	day ⁻¹	2)
有機物分解の温度係数	k_D	0.0693	°C ⁻¹	1) ($Q_{10} = 2.0$)
好気分解に関わる DO の半飽和定数	K_{Dox}	0.10	mg-O ₂ L ⁻¹	1)
準嫌気分解に関わる NO ₃ -N の半飽和定数	K_{Dsb}	0.16	mg-N L ⁻¹	1)
単位炭素量の好気分解に要する DO 量	R_{OC}	2.67	g-O ₂ g-C ⁻¹	理論値
単位炭素量の準嫌気分解に要する NO ₃ -N 量	R_{NC}	0.933	g-N g-C ⁻¹	理論値
硝化速度	Nit_0	0.024	day ⁻¹	1)
硝化の温度係数	K_{nit}	0.0693	°C ⁻¹	1) ($Q_{10} = 2.0$)
硝化に関わる DO の半飽和定数	k_{nit}	0.032	mg-O ₂ L ⁻¹	1)
単位窒素量の硝化に要する DO 量	R_{ON}	4.57	g-O ₂ g-N ⁻¹	理論値
DIP の吸着速度	V_{adp}	0.0010	m ³ kg ⁻¹ day ⁻¹	3)
DIP 吸着に関わる DO の半飽和定数	K_{adp}	0.10	mg-O ₂ L ⁻¹	調整値
SS の DIP 吸着能	Cap	0.52	g-P kg-SS ⁻¹	4)

1) Sohma et al. (2008)に基づいて調整した値、2) 東京湾で採取した海水を用いた分解実験の結果 (国立環境研究所, 2010)に基づいて調整した値、3) Shinohara et al. (2017)に基づいて調整した値、4) Suzumura et al. (2004)等に基づいて調整した値。

3.1.2.3 底質モデル

底質モデルは、Higashi et al. (2015)の放射性セシウム137動態モデルをベースとして、それをC-N-P-O循環に置き換えたものである。底質モデルの予測変数を表 B-16 に記す。

図 B-7 に記された物質間の各パスに与えるモデルの基礎式については、植物プランクトン態が存在しないことと、有機物分解や硝化の速度をシルト・泥分の含有率に応じて変化させていることを除けば、基本的には水質モデルと同じ表 B-9～表 B-14 を使用している。本業務で用いた底質モデルのモデルパラメータを表 B-17 に示す。

底質モデルにおける海底堆積物中の物質の移動は水平方向を無視した鉛直 1 次元の輸送方程式で解析され、海底表層は堆積・巻上げ(懸濁粒子・懸濁有機態)および拡散溶出(溶存有機態・無機態栄養塩・溶存酸素)を介して水質モデルの底層とオンラインで接続されている。その方法については 3.1.2.4 章にて記す。

表 B-16 底質モデルの予測変数

名称		表記	単位	名称		表記	単位
懸濁粒子 (鉱物)	シルト・泥	C_{sps}	g m^{-3}	溶存 有機態	易分解 DOC	C_{docf}	g-C m^{-3}
	砂	C_{spl}	g m^{-3}		難分解 DOC	C_{docs}	g-C m^{-3}
懸濁 有機態	易分解 POC	C_{pocf}	g-C m^{-3}		易分解 DON	C_{donf}	g-N m^{-3}
	難分解 POC	C_{pocs}	g-C m^{-3}		難分解 DON	C_{dons}	g-N m^{-3}
	易分解 PON	C_{ponf}	g-N m^{-3}		易分解 DOP	C_{dopf}	g-P m^{-3}
	難分解 PON	C_{pons}	g-N m^{-3}		難分解 DOP	C_{dops}	g-P m^{-3}
	易分解 POP	C_{popf}	g-P m^{-3}	無機態 栄養塩	$\text{NO}_3\text{-N}$	C_{dino}	g-N m^{-3}
難分解 POP	C_{pops}	g-P m^{-3}	$\text{NH}_4\text{-N}$		C_{dinh}	g-N m^{-3}	
溶存酸素	DO	C_{dox}	$\text{g-O}_2 \text{ m}^{-3}$		DIP	C_{dip}	g-P m^{-3}
					吸着態 P	C_{adp}	g-P m^{-3}

単位の m^{-3} はバルク(土粒子+空隙)の体積

表 B-17 底質モデルの懸濁有機態・溶存有機態・無機態栄養塩・溶存酸素に関するパラメータ

	表記	値	単位	備考
シルト・粘土				
易分解性の懸濁→溶存有機態の細粒化速度	Vpd_{of}	0.00167	day ⁻¹	1)
難分解性の懸濁→溶存有機態の細粒化速度	Vpd_{os}	0.00003	day ⁻¹	1)
易分解性の懸濁有機態→無機態の比分解速度	Vpi_{of}	0.01500	day ⁻¹	1)
難分解性の懸濁有機態→無機態の比分解速度	Vpi_{os}	0.00000	day ⁻¹	1)
易分解性の溶存有機態→無機態の比分解速度	Vdi_{of}	0.01667	day ⁻¹	1)
難分解性の溶存有機態→無機態の比分解速度	Vdi_{os}	0.00017	day ⁻¹	1)
有機物分解の温度係数	k_D	0.1335	°C ⁻¹	2) ($Q_{10} = 3.8$)
硝化速度	Nit_0	0.008	day ⁻¹	1)
硝化の温度係数	K_{nit}	0.1335	°C ⁻¹	2) ($Q_{10} = 3.8$)
DIP の吸着速度	V_{adp}	0.0010	m ³ kg ⁻¹ day ⁻¹	3)
DIP 吸着に関わる DO の半飽和定数	K_{adp}	0.10	mg-O ₂ L ⁻¹	3)
SS の DIP 吸着能	Cap	0.52	g-P kg-SS ⁻¹	3)
砂				
易分解性の懸濁→溶存有機態の細粒化速度	Vpd_{of}	0.00500	day ⁻¹	1)
難分解性の懸濁→溶存有機態の細粒化速度	Vpd_{os}	0.00010	day ⁻¹	1)
易分解性の懸濁有機態→無機態の比分解速度	Vpi_{of}	0.04500	day ⁻¹	1)
難分解性の懸濁有機態→無機態の比分解速度	Vpi_{os}	0.00000	day ⁻¹	1)
易分解性の溶存有機態→無機態の比分解速度	Vdi_{of}	0.05000	day ⁻¹	1)
難分解性の溶存有機態→無機態の比分解速度	Vdi_{os}	0.00050	day ⁻¹	1)
有機物分解の温度係数	k_D	0.0693	°C ⁻¹	2) ($Q_{10} = 2.0$)
硝化速度	Nit_0	0.024	day ⁻¹	1)
硝化の温度係数	K_{nit}	0.0693	°C ⁻¹	2) ($Q_{10} = 2.0$)
共通(シルト・粘土・砂)				
好気分解に関わる DO の半飽和定数	K_{Dox}	0.10	mg-O ₂ L ⁻¹	3)
準嫌気分解に関わる NO ₃ -N の半飽和定数	K_{Dsb}	0.16	mg-N L ⁻¹	3)
硝化に関わる DO の半飽和定数	k_{nit}	0.032	mg-O ₂ L ⁻¹	3)
単位炭素量の好気分解に要する DO 量	R_{OC}	2.67	g-O ₂ g-C ⁻¹	理論値
単位炭素量の準嫌気分解に要する NO ₃ -N 量	R_{NC}	0.933	g-N g-C ⁻¹	理論値
単位窒素量の硝化に要する DO 量	R_{ON}	4.57	g-O ₂ g-N ⁻¹	理論値

1) Sohma et al. (2008)および Fossing et al. (2004)に基づいて調整した値、2) Fossing et al. (2004)、3) 水質モデルと同じ値。

3.1.2.4 水質モデルと底質モデルの接続

【粒子状物質の沈降・堆積速度】

懸濁粒子、植物プランクトン、懸濁有機物などの粒子状物質は水中を沈降して海底に堆積する。また、強い底層流によって海底面が攪乱されると、粒子状物質は巻上げられ、海水の流れに従って輸送・拡散されつつ、再び海底に堆積する。

水中の沈降に関しては移流拡散方程式(B-56)の w_{pM} にて表され、底層水からの沈降量が海底への堆積量となる。本モデルでは表 B-18 のように沈降速度 w_{pM} を与えた。植物プランクトンの沈降速度に関しては、種による違いはもちろんのこと、栄養塩制限下で珪藻の沈降速度が増加するなど生理状態にも左右されることが報告されている(小野ら, 2006)ため、それを考慮した関数を作成して与えたものの、妥当性の検証は行っておらず、不確実性が残されている。

表 B-18 水質モデルに用いた植物プランクトン、懸濁粒子、懸濁態有機物の沈降速度

	関数・値 (m day ⁻¹)	備考
S 型珪藻	$w_{pplw} = \begin{cases} 0.54 & (f_{Nplw} \geq 0.5) \\ 0.54 + 4.0(1 - 2f_{Nplw}) & (f_{Nplw} < 0.5) \end{cases}$	1)
E 型珪藻	$w_{pplc} = \begin{cases} 0.12 & (f_{Nplc} \geq 0.5) \\ 0.12 + 5.0(1 - 2f_{Nplc}) & (f_{Nplc} < 0.5) \end{cases}$	1)
P 型渦鞭毛藻	$w_{ppls} = \begin{cases} -20.0 & (f_{Npls} \geq 0.5) \\ 20.0 & (f_{Npls} < 0.5) \end{cases}$	2)
懸濁粒子(シルト・泥)	$w_{psps} = 30$ (固定値)	3)
懸濁粒子(砂)	$w_{pspl} = 400$ (固定値)	3)
懸濁態有機物	$w_{pM} = 20$ (固定値)	調整値

1) 小野ら(2006)のデータを参考に定式化、2) マイクロコズム実験の結果(国立環境研究所, 2016)を参考に定式化、3) 内山(2017)を参考に調整した値。

【海底堆積物の巻上】

海底に堆積した懸濁粒子の巻上は底層流による底面せん断応力が粒子の限界せん断応力を超えたときに発生するものとしてモデル化した。

$$sus_M = \max \left[0, E_M \frac{C_{bM}}{\sum_j C_{bj}} (\tau_b / \tau_{crM} - 1) \right] \quad (B-57)$$

ここに、 sus_M : 懸濁粒子 M の巻上フラックス ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 E_M : 巻上げ係数($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 τ_{crM} : 限界せん断

応力(N m⁻²)、 τ_b : 底面せん断応力(N m⁻²)、 C_{bM} : 海底表層グリッドにおける懸濁粒子 M の濃度(kg m⁻³)である。表 B-19 に解析に用いた懸濁粒子の巻上げ係数および限界せん断応力を示す。

表 B-19 解析に用いた懸濁粒子の巻上げ係数および限界せん断応力

	巻上げ係数(kg m ⁻² s ⁻¹)	限界せん断応力(N m ⁻²)	備考
懸濁粒子(シルト・泥)	2.0×10 ⁻⁴	0.36	1)
懸濁粒子(砂)	1.0×10 ⁻³	0.50	1)

1) 内山(2017)を参考に調整した値。

懸濁態有機物の巻上については、モデル化に関する知見が乏しいため、ここでは懸濁粒子と巻上率(海底表層グリッドにおける現存量に対する巻上量)が同じと仮定して算定した。なお、植物プランクトンについては、海底堆積時に直ちに死亡し、懸濁有機物に変わるものとした。

【海底堆積物中における物質の鉛直移動】

実際には懸濁粒子の堆積・巻上げに伴って海底面の位置が変動するが、その位置を逐次追跡する移動境界を考慮したモデル化を行うと計算量が著しく膨大になる。それを避けるため、海底堆積物中における物質の鉛直移動モデルには鉛直座標の原点を海底面に常に固定した相対空間の輸送方程式(B-58)を採用している(Higashi et al., 2015)。

$$\frac{\partial C_M}{\partial t} + w_s \frac{\partial C_M}{\partial z'} = D_{bM} \frac{\partial^2 C_M}{\partial z'^2} + S_M \quad (\text{B-58})$$

ここに、 C_M : 物質 M の海底中のバルク濃度(例えば g m⁻³)、 D_{bM} : 物質 M の拡散係数(m² s⁻¹)、 S_M : 物質 M の生成項(例えば g m⁻³ s⁻¹)、 z' : 海底面を 0 とした鉛直座標(上向きを正)である。 w_s は海底面の下降速度(m s⁻¹)、すなわち巻上速度であり、式(B-57)で求めた懸濁粒子の巻上量(kg m⁻² s⁻¹)を堆積物のバルク密度(kg m⁻³)で除すことにより算定される。なお、本モデルではバルク密度をモデルパラメータとして取り扱い、シルト・泥には 0.83×10³ (真比重 2.76、間隙率 0.70)、砂には 1.66×10³ kg m⁻² s⁻¹ (真比重 2.76、間隙率 0.40)を与えた。

堆積物中の拡散係数 D_{bM} については、粒子状物質(懸濁粒子、懸濁有機態および無機態栄養塩の吸着態 P)には 0 を、他の溶存物質については 3.5×10⁻¹⁰ m² s⁻¹ を与えた。後者の溶存物質については、この拡散係数に従って、水質モデルの底層水と底質モデルの表層における物質交換が行われる。

3.2 海域流動・水質・底質モデルの再現性(環境省広域総合水質調査 2007～2014 年
1、5、7、10月の観測値と計算値の月平均値の比較)

3.2.1 表層水温

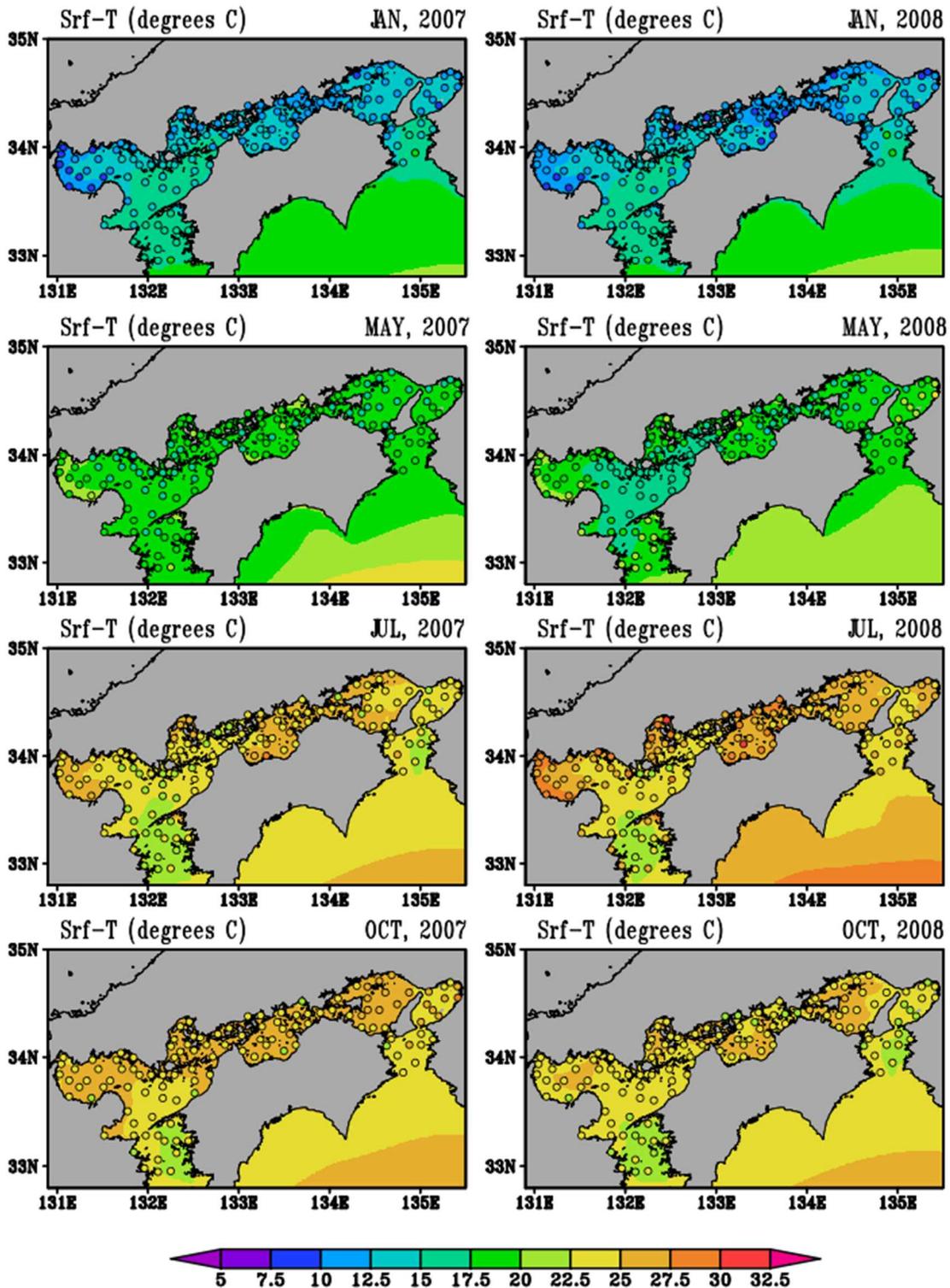


図 B-8 表層水温の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

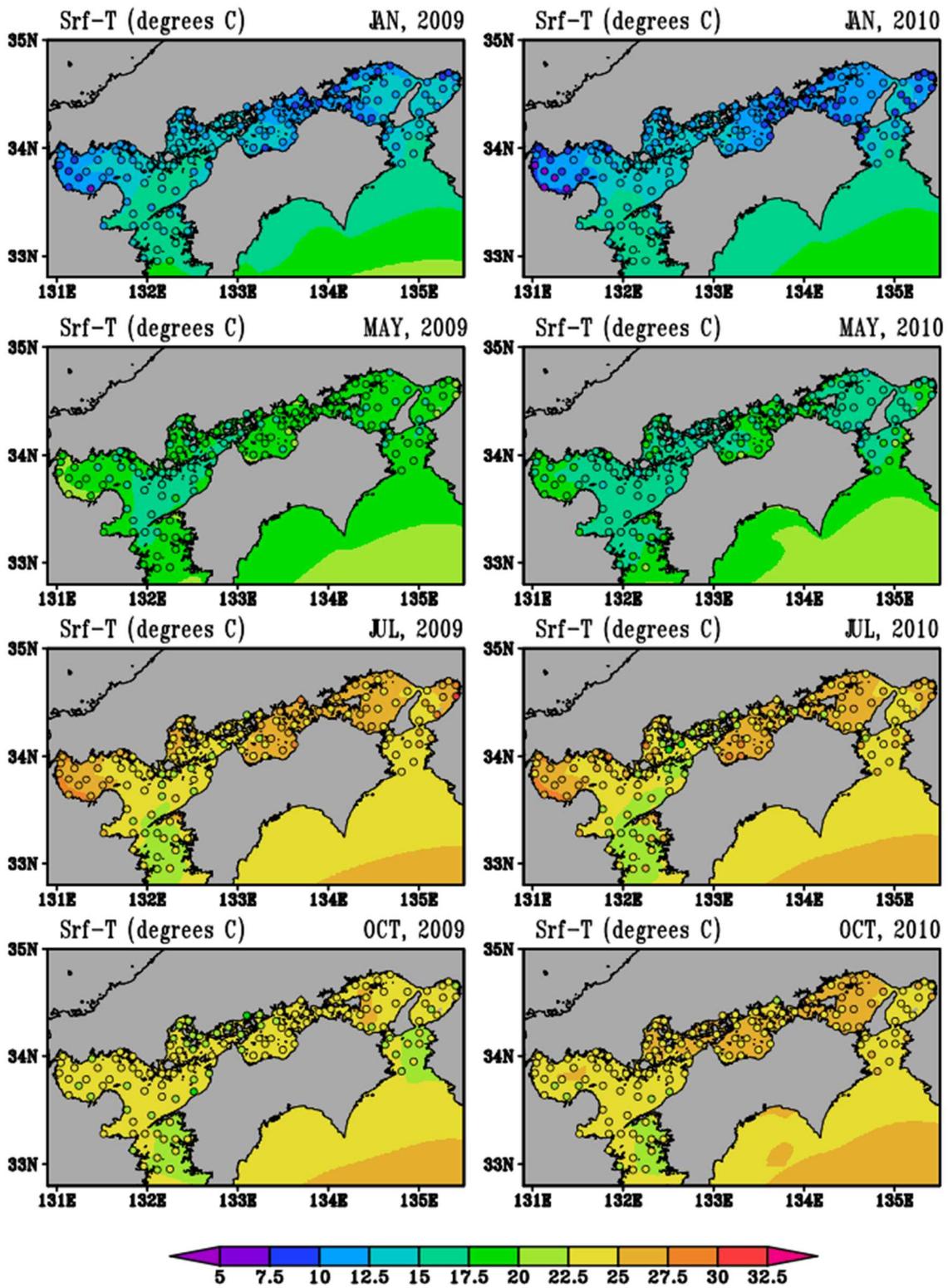


図 B-8 (続き) 表層水温の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

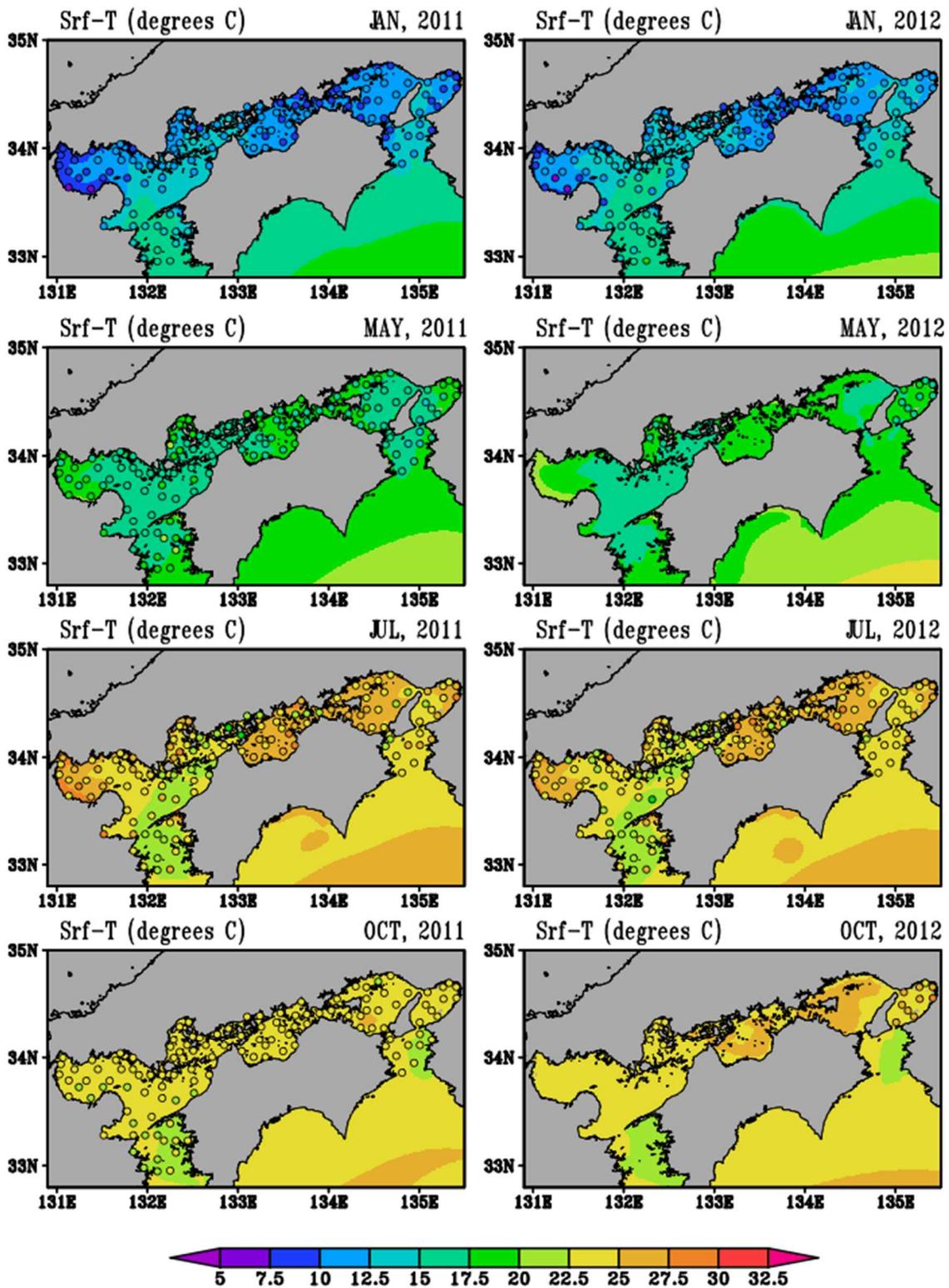


図 B-8 (続き) 表層水温の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

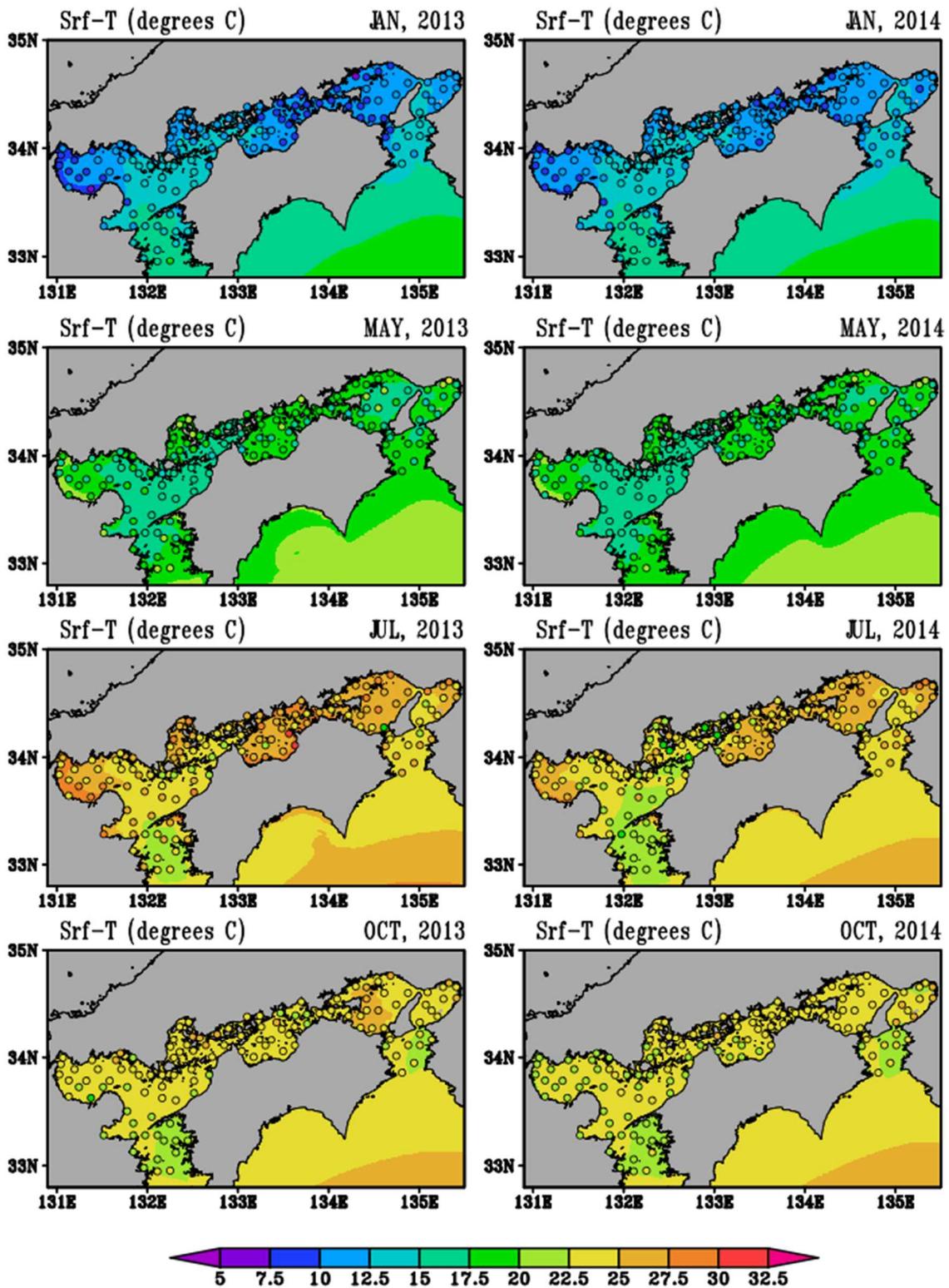


図 B-8 (続き) 表層水温の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

3.2.2 表層 TN

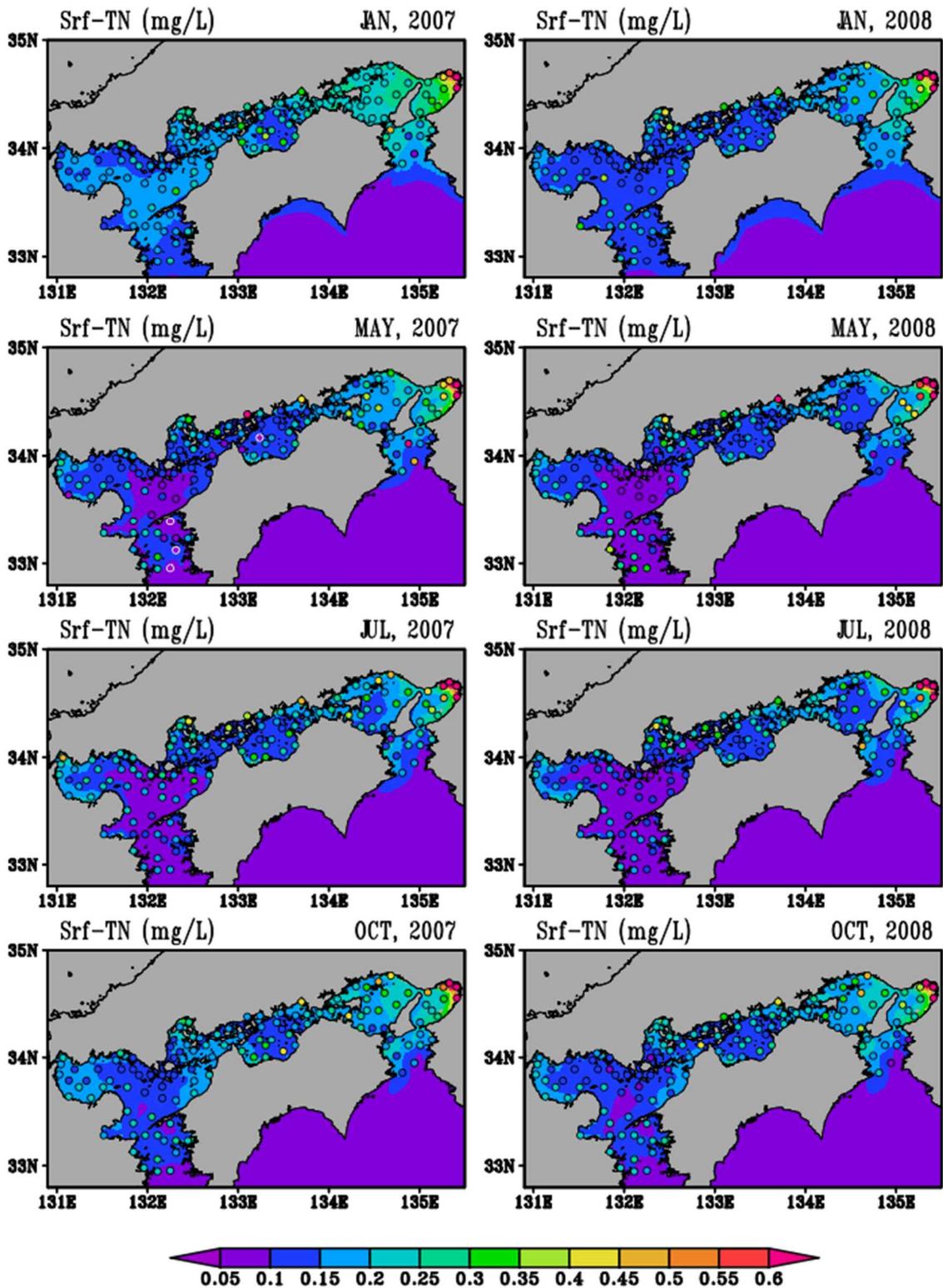


図 B-9 表層 TN の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

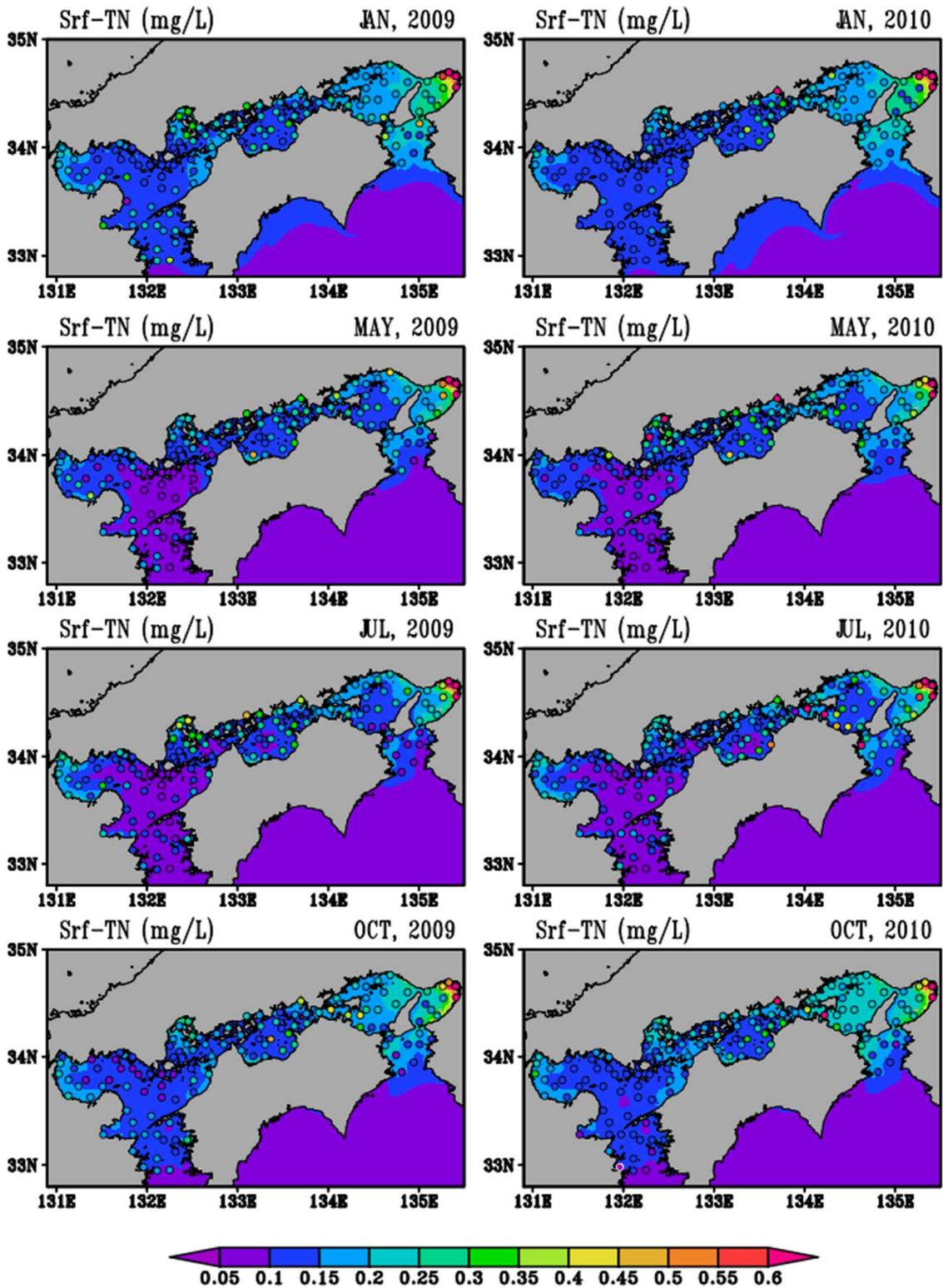


図 B-9 (続き) 表層 TN の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

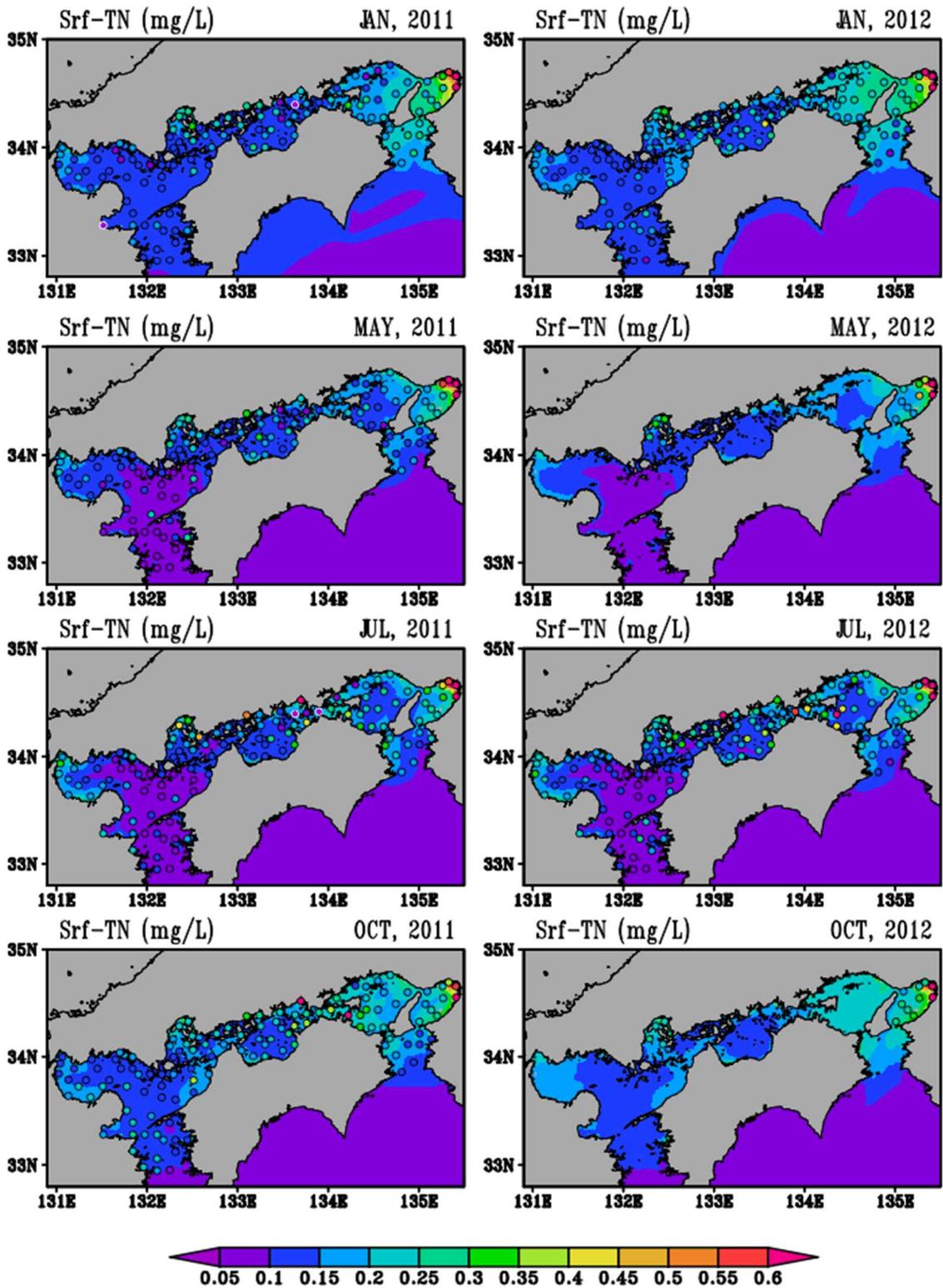


図 B-9 (続き) 表層 TN の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

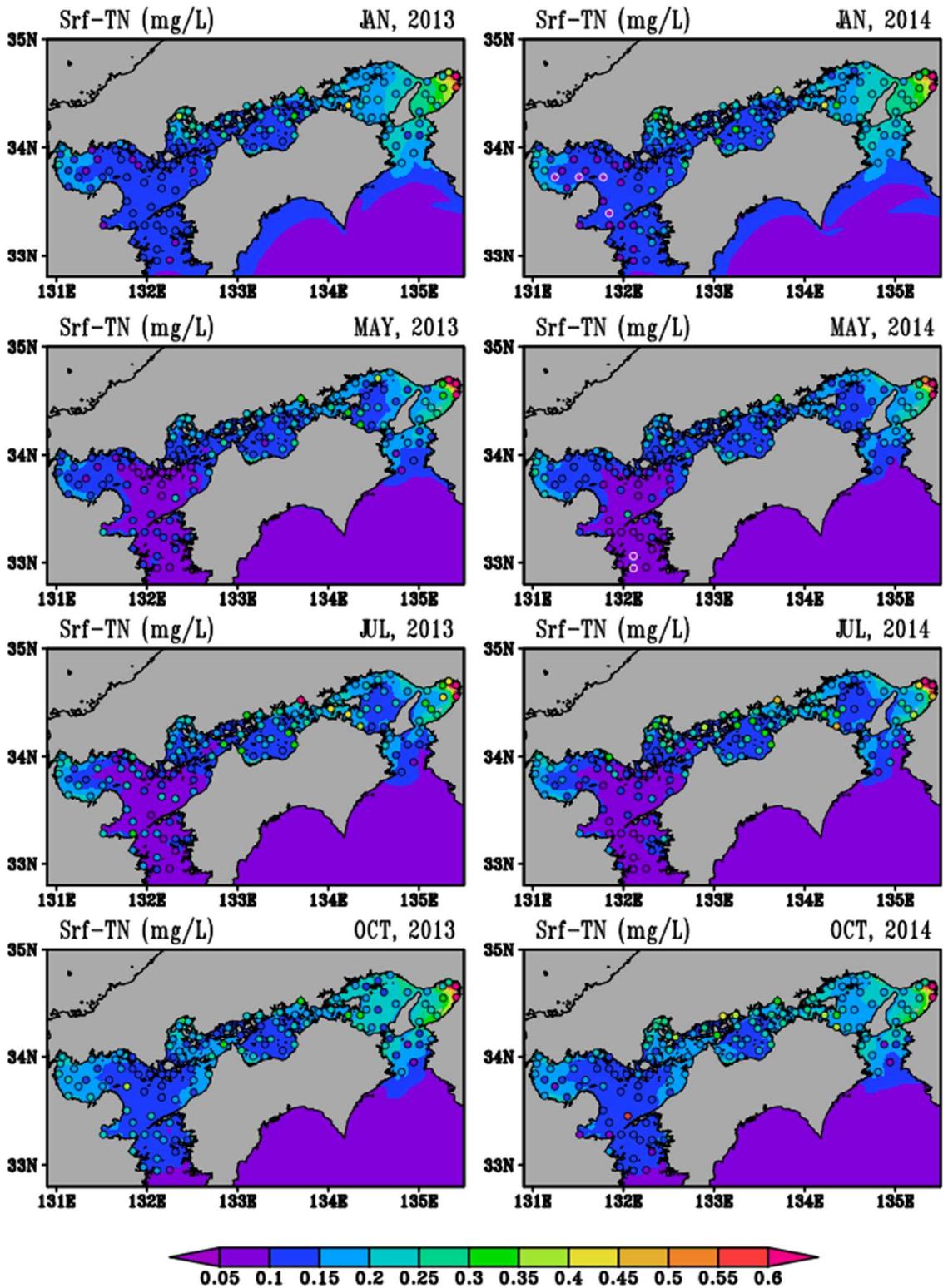


図 B-9 (続き) 表層 TN の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

3.2.3 表層 Chl. a

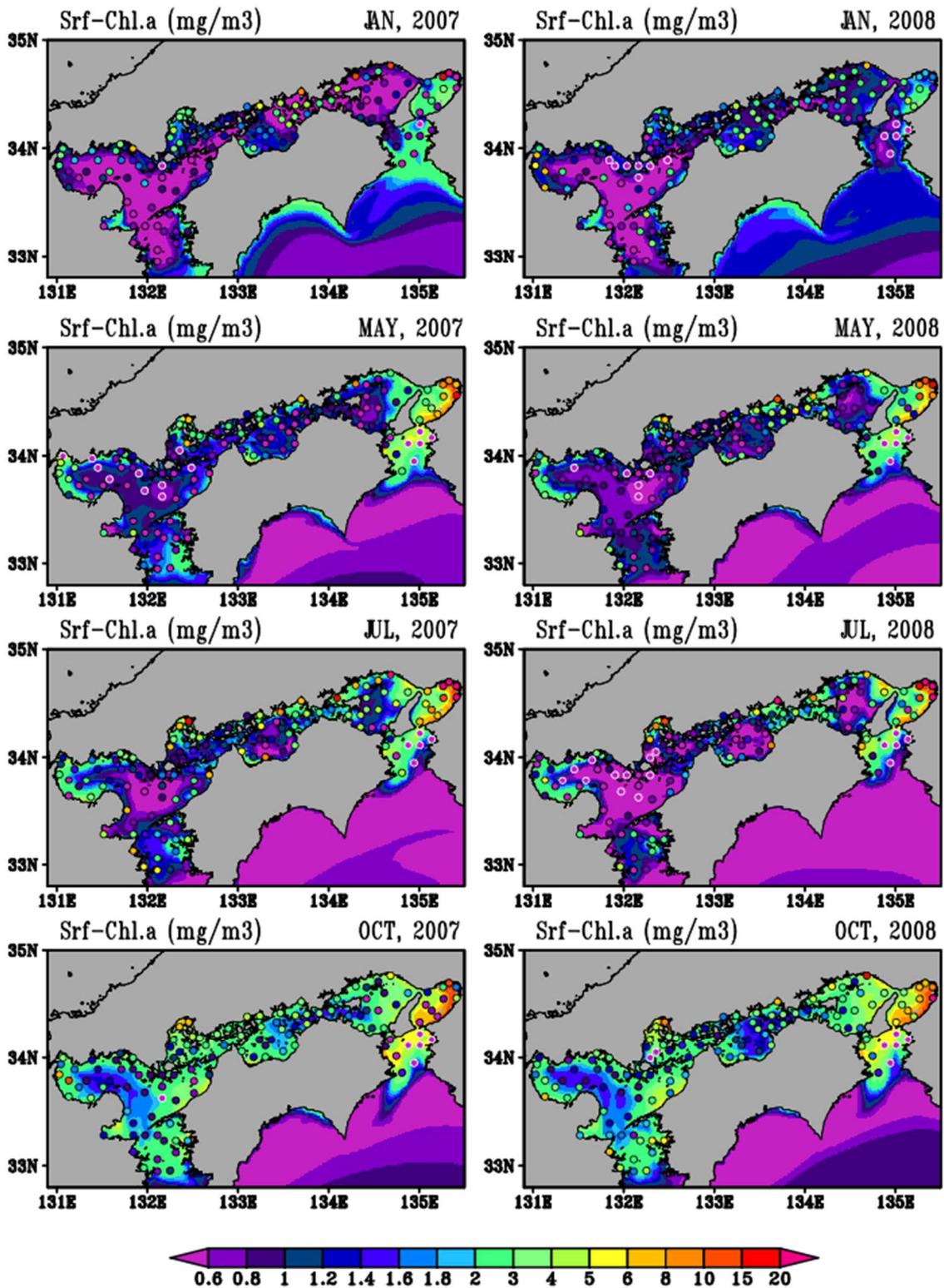


図 B-10 表層 Chl. a の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

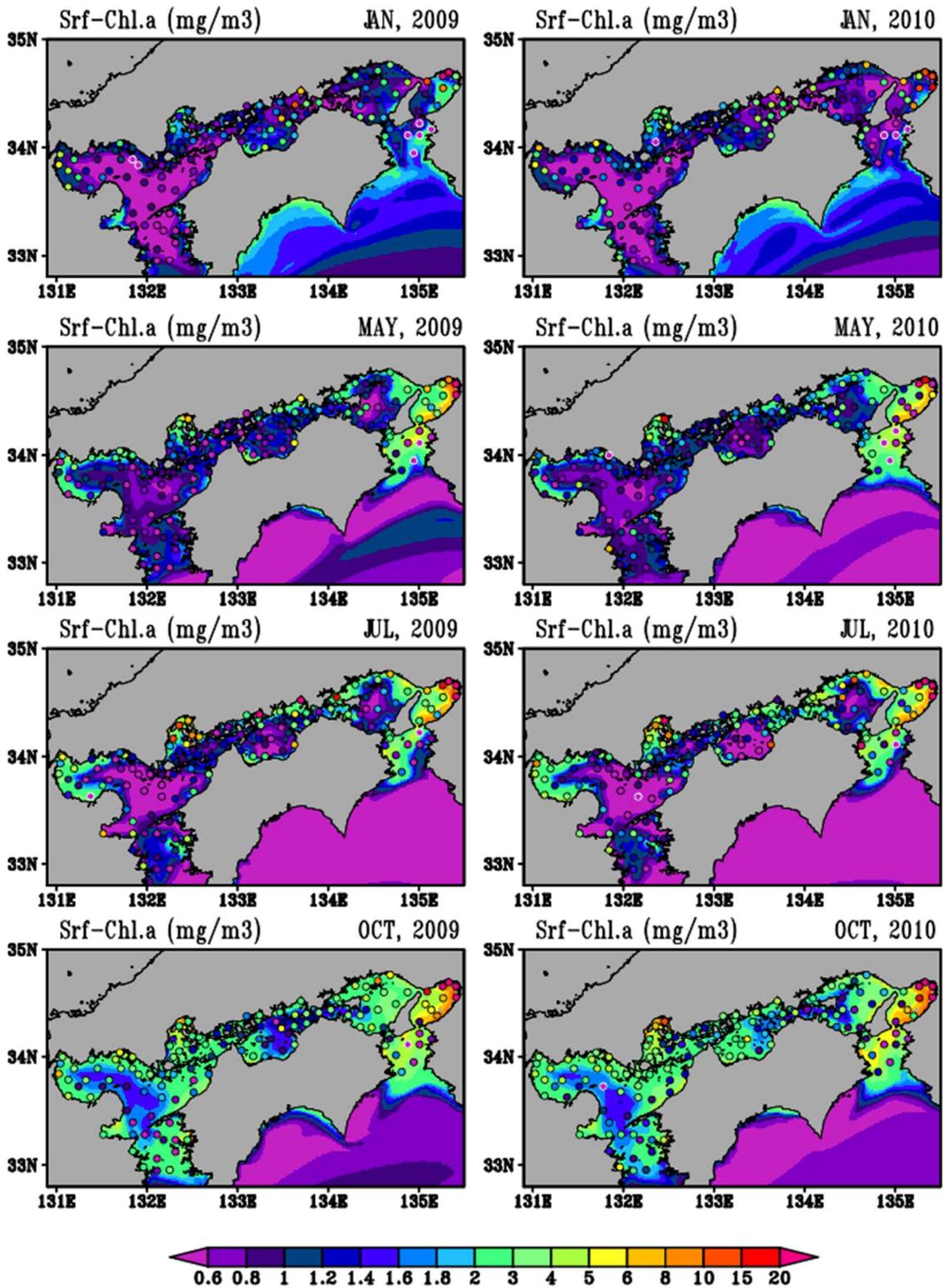


図 B-10 (続き) 表層 Chl. *a* の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

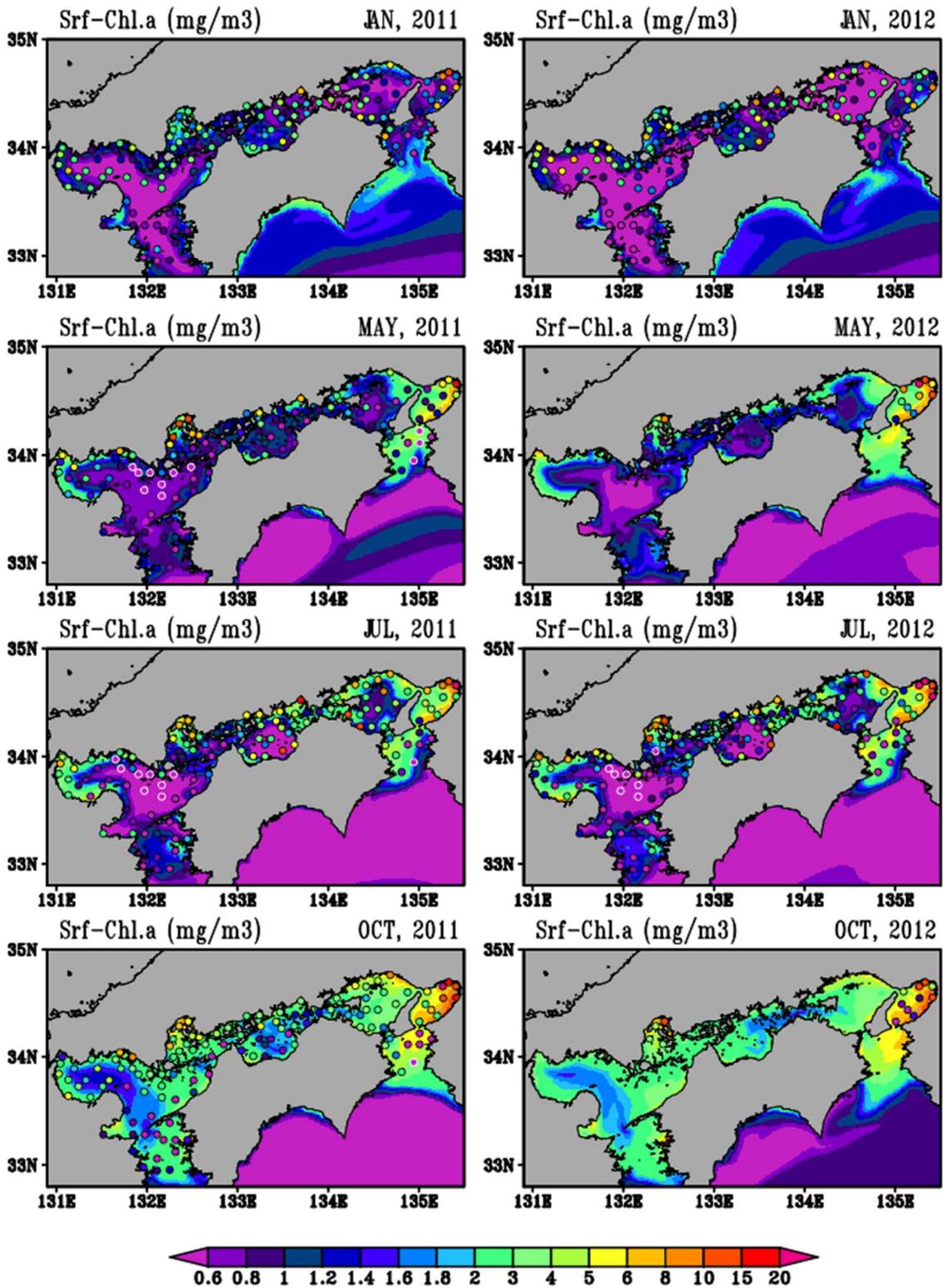


図 B-10 (続き) 表層 Chl. a の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較

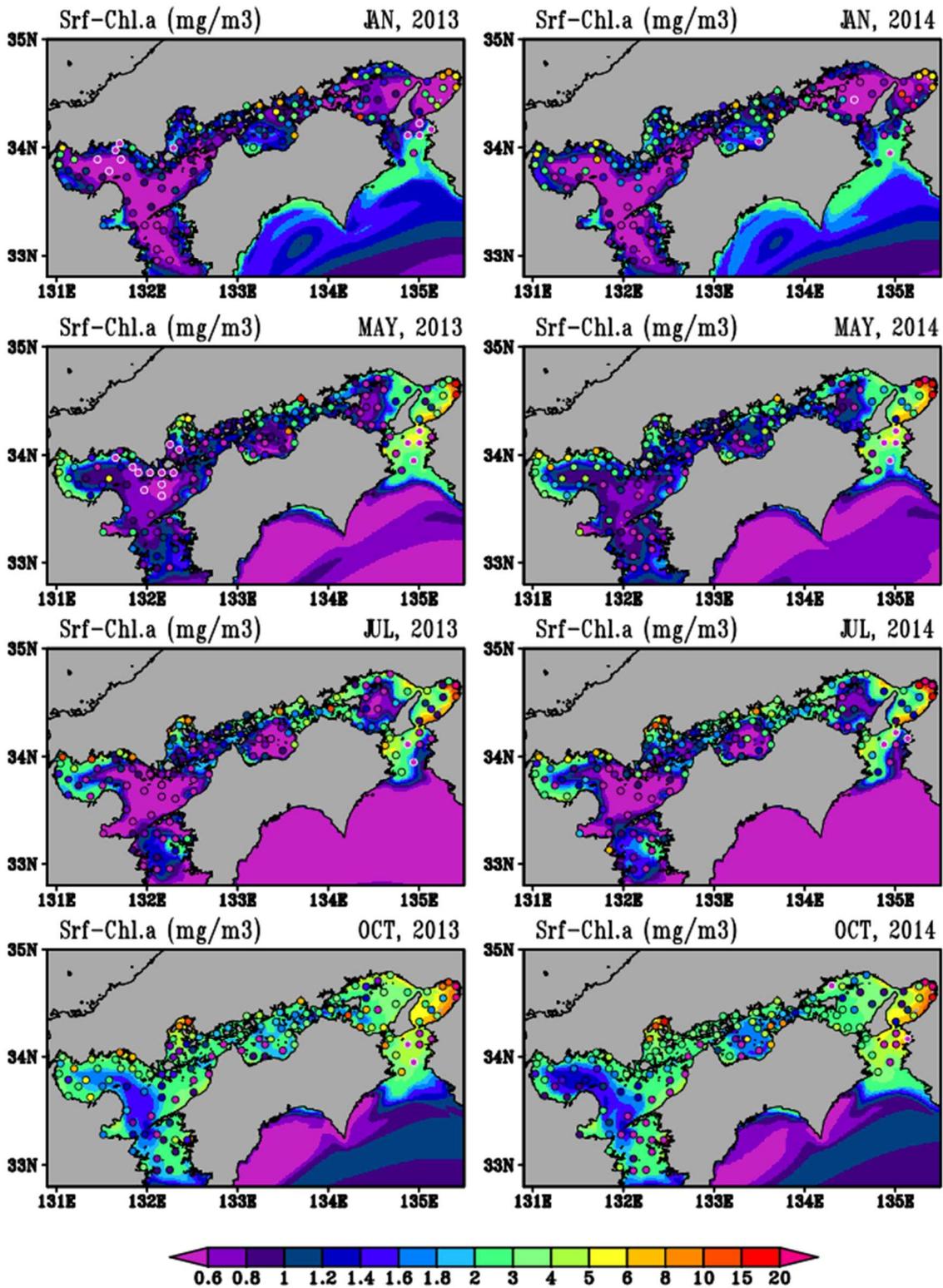


図 B-10 (続き) 表層 Chl. a の計算値(月平均値)と観測値(環境省広域総合水質調査)の比較