

4 参考資料

4.1 風の頻度分布と卓越風向

2016年から2018年の日平均風速の風向別の頻度分布を図4.1に示した。明確に2方向の風が卓越している傾向があるため、青色の直線で示した方向のデータを風データの代表とした。

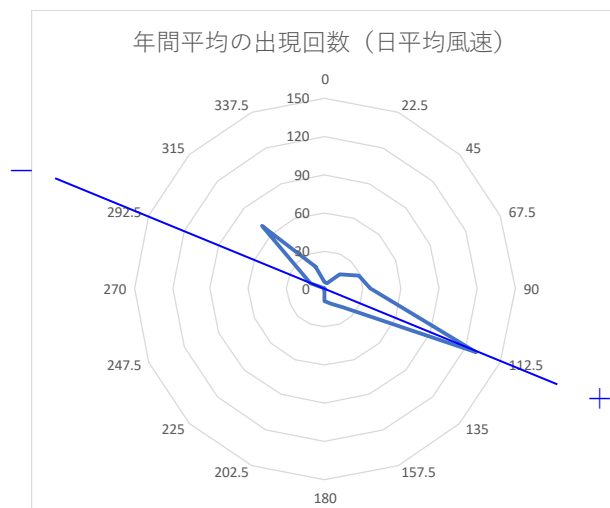
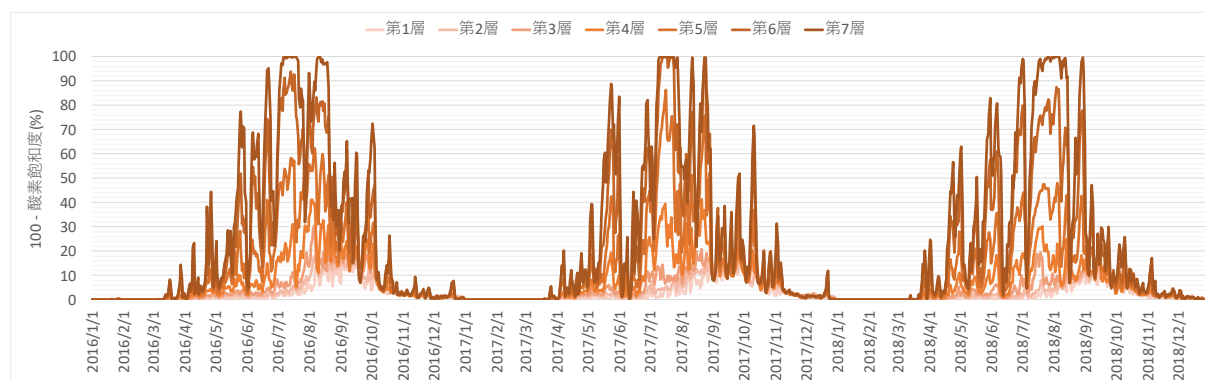


図 4.1 日平均風速の風向別の頻度分布 (2016~2018 年)

4.2 貧酸素水塊の 100-酸素飽和度の平均値

DO 濃度 (mg/L) は水温などでも変化するため、以降の解析では DO 飽和度 (%) を用いて評価することとした。貧酸素水塊の規模を可視化した例を図 4.2に示した。水温から推定される飽和 DO 濃度と実際の DO 濃度から DO 飽和度を推定し、これを 100%からの差値として算定した (水深帯別の平均値として可視化)。

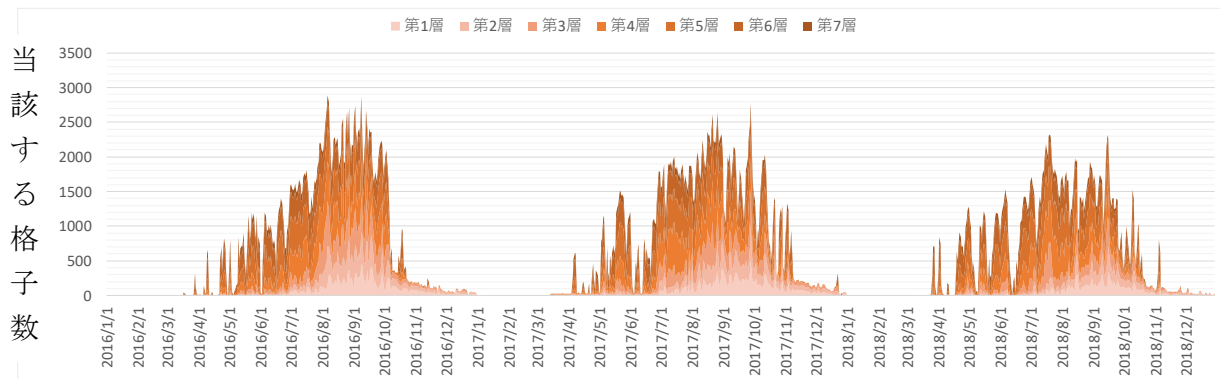


第 N 層は水深 N_m と同義

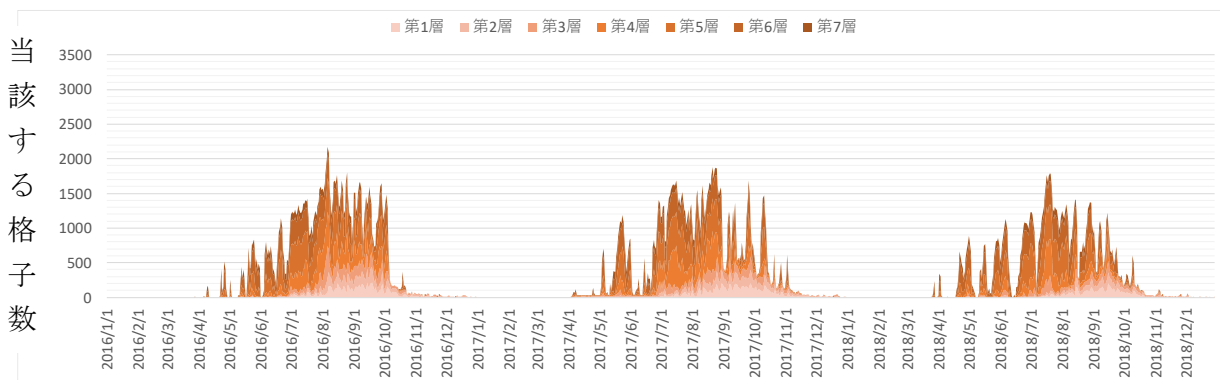
図 4.2 水深帯別の 100-酸素飽和度の平均値

貧酸素水塊容積の評価指標として、前述の「100-酸素飽和度（検討会において DO 不飽和度と呼んだ）」が閾値よりも大きくなる格子数を計数した結果を図 4.3に示した。

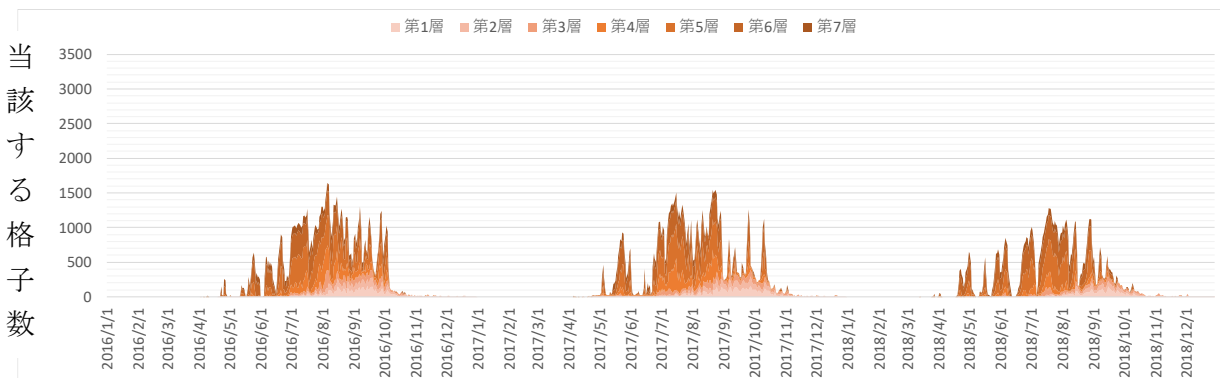
100-酸素飽和度が 10%以上の格子数



100-酸素飽和度が 20%以上の格子数



100-酸素飽和度が 30%以上の格子数



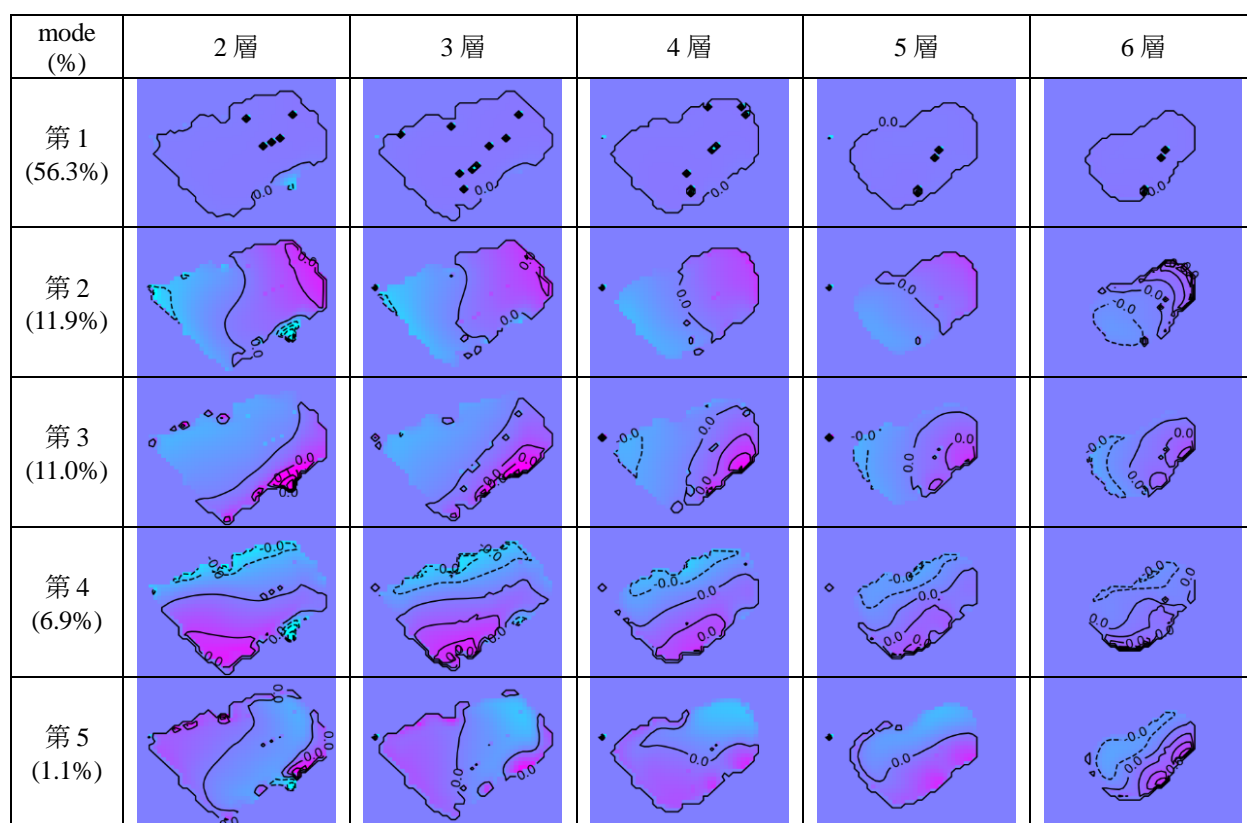
第 N 層は水深 N_m と同義

図 4.3 水深帯別の貧酸素水塊の規模(100-酸素飽和度が閾値以上の格子数)

4.3 水塊の流動の数値化

図 2.40では、水塊の「水平方向の動き」を数値化したものとして「mode3」という値を可視化した。これは、各時間について全格子（3907 個）の水温データの平均値からの偏差のデータ（全時間数(3*36X*24)×全格子数(3907)）に対して主成分分析を行った結果、第 1 モードは季節変動、第 2 モードは鉛直構造の変動が抽出され、第 3 モードに水温の水平的な変動が抽出された。この第 3 モード（mode3）を水平的な水塊の動きの変化と捉えたものである。

モードはあくまで基本情報であり、データの全体を要約し、季節変動の有無や代表的な空間分布等を俯瞰するために整理するものである。なお、単位はなく相対的な大小関係を把握するためのものである。



第 1 モードは全体の水温の大小の季節変動として抽出されました（年別のバイアス）。

第 2 モードは鉛直構造の季節変動として抽出されました。

第 3、4 モードは水温の水平的な変動をよく示しています。

第 5 モード以降は単体での寄与率が 1%程度となり小さくなります。

第 4 モードまでで帰属抽出できなかった細かい変動成分が抽出されているものと思われます。

数値は標準化されているため単位はない。図中の◆はコンター線である。

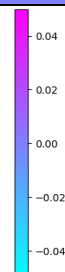


図 4.4 代表的な空間分布

4.4 貧酸素水塊に関するモード

貧酸素水塊についてもモードを基本情報として整理した。結果を要約すると表 4.1 主成分分析によって抽出されたモードのとおりである。モードの時間変動を図 4.5に、代表的な空間分布を図 4.6に示した。代表的な空間パターンがどのように時間的に出現するかを確認するためのものであり、値の絶対値が大きいほど、貧酸素水塊の値の変動が大きい。

例えば第1モードは、図 4.5(1)では明確な季節変動がみられる成分であることがわかる。空間パターン(図 4.6(1))は一様であり、単に季節による値の大小のバイアスが抽出されている。第2モードは、空間パターンとしては上層・下層の濃度差のパターンであり、これは夏から秋にかけて卓越して見られる(値の絶対値が大きい)。第3モード以降は、貧酸素水塊の場所ごとの偏りに関する空間パターンとその卓越時期が確認できる。

表 4.1 主成分分析によって抽出されたモード

	情報量 (累積)	モードの意味合い
第1モード	94.1% (94.1)	空間全体の濃度の高い・低い (全体の濃度が高いほど値が高い)
第2モード	2.2% (96.3)	上層・下層の濃度の差異の大きさ (上層が高く、下層が低いほど値が大きい)
第3モード	1.0% (97.3)	湖沼内の北側・南側の濃度の差異の大きさ (北岸側で高いほど値が高い)
第4モード	0.3% (97.6)	下層南側の濃度の高さ (下層南側で濃度が高いほど値が高い)
第5モード	0.3% (97.9)	下層北側の濃度の高さ (下層北側で濃度が高いほど値が高い)
その他	2.1% (100.0)	—

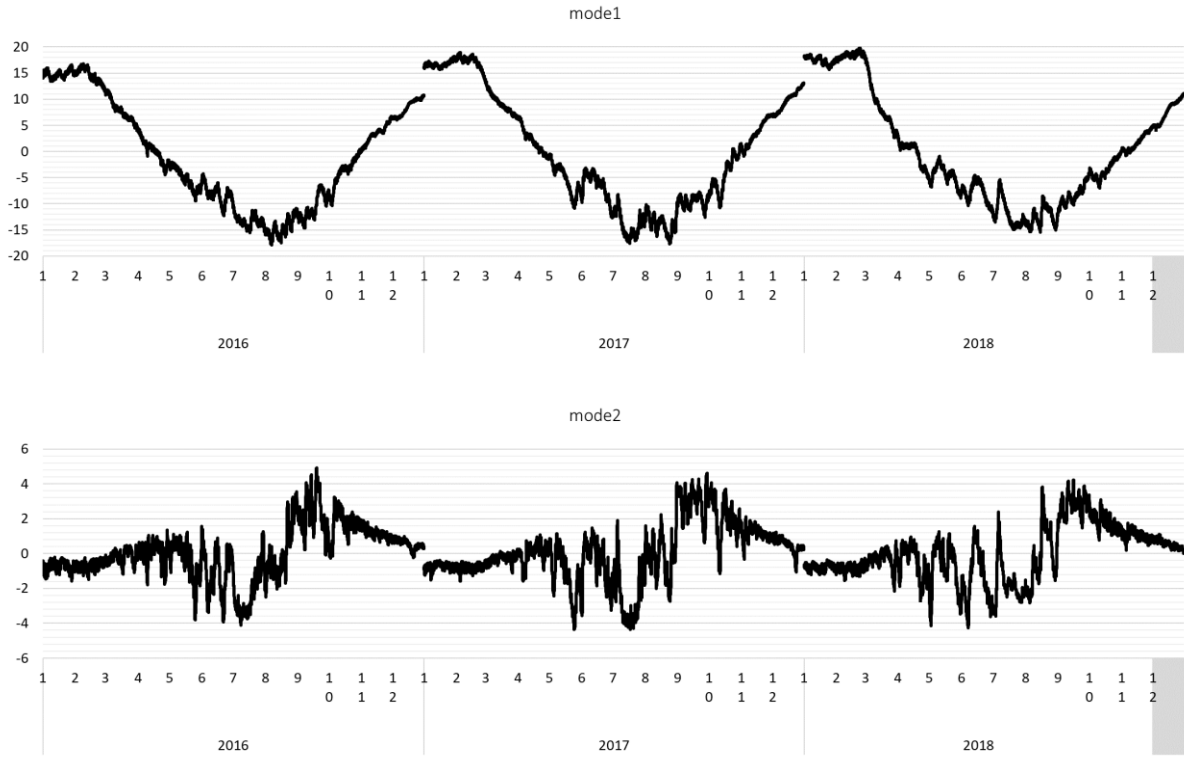


図 4.5 (1) 各モードの時間変動

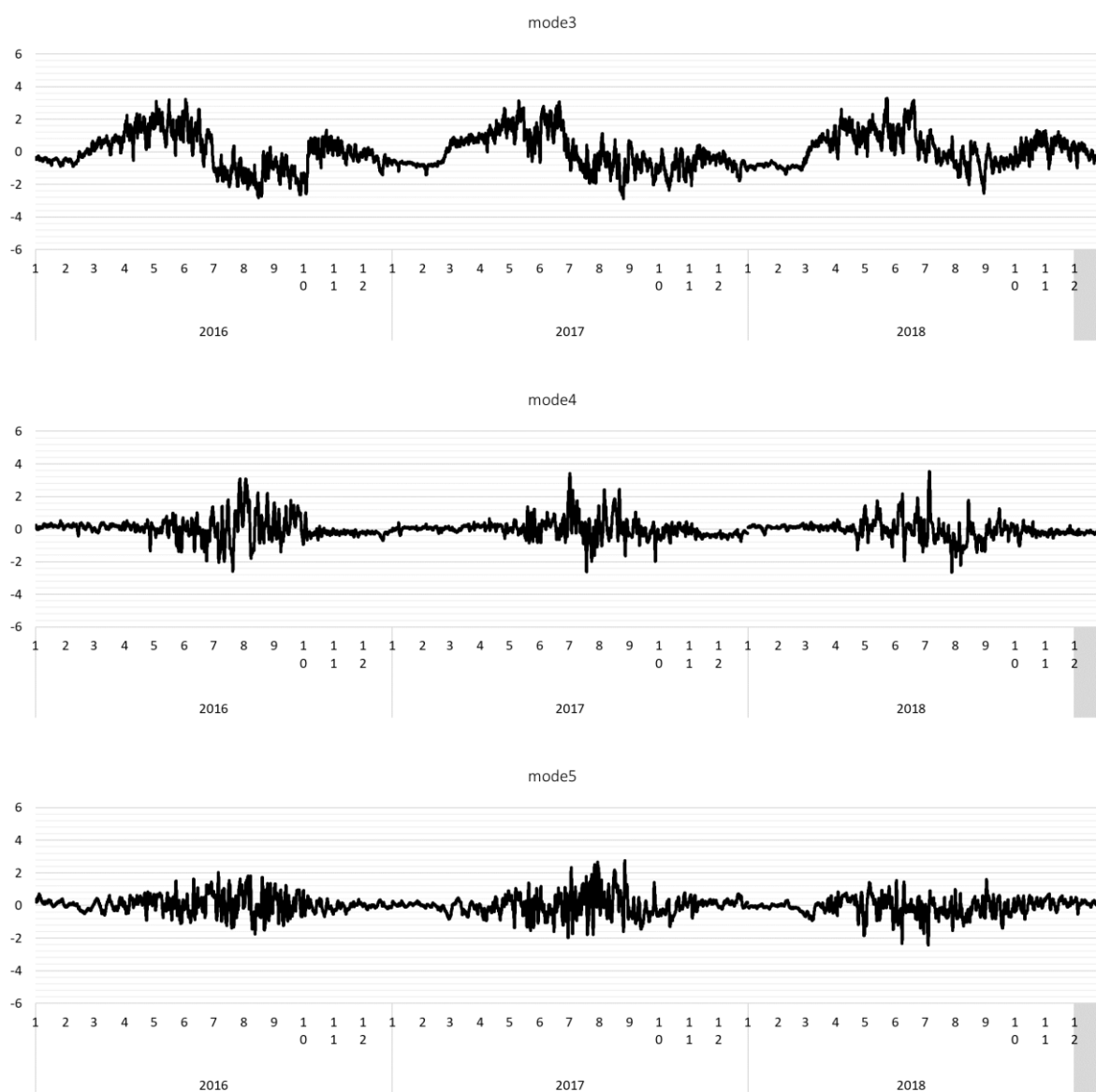


図 4.5 (2) 各モードの時間変動

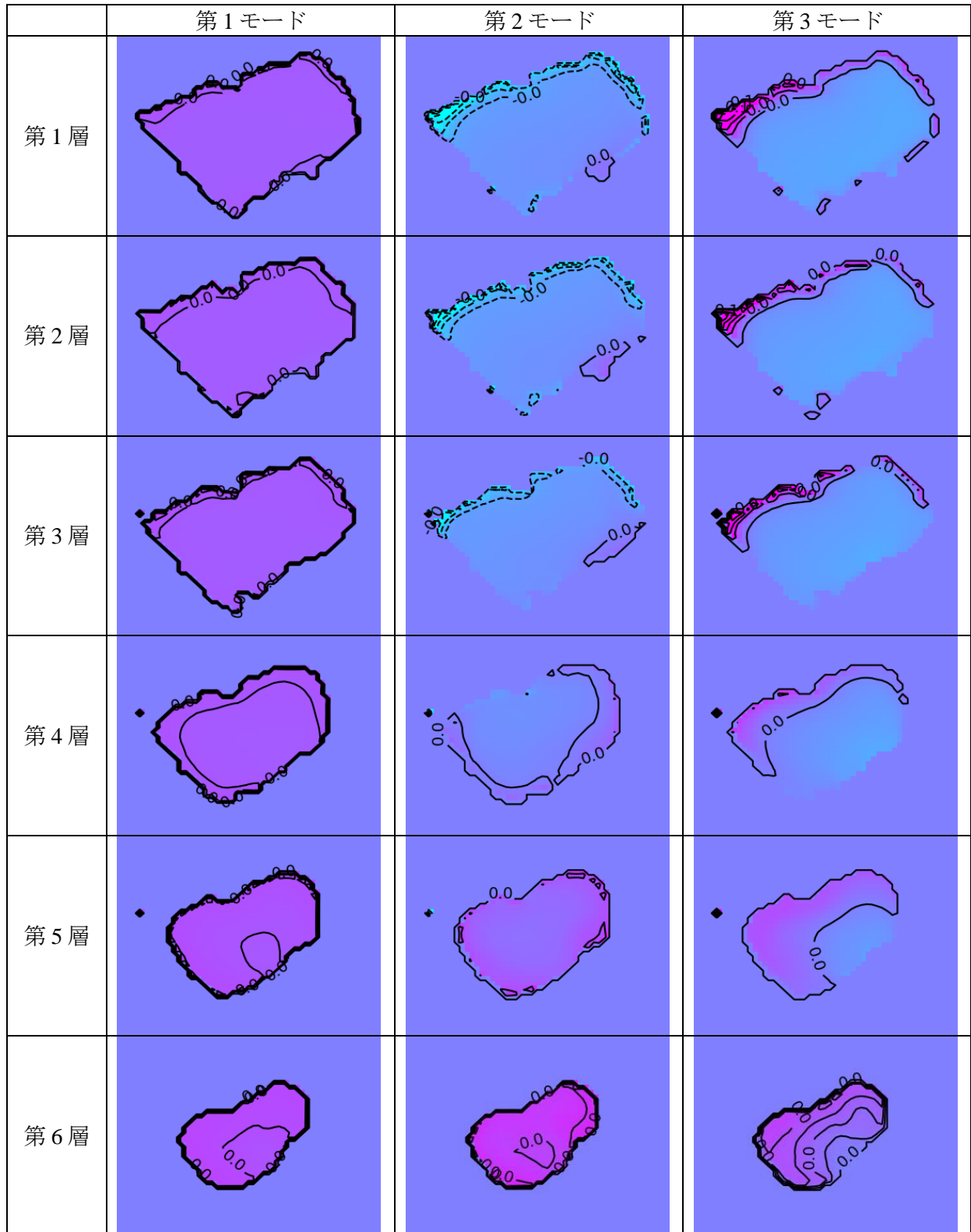


図 4.6 (1) 代表的な DO の立体構造 (凡例は図 4.4と同様、標準化のため単位はない)

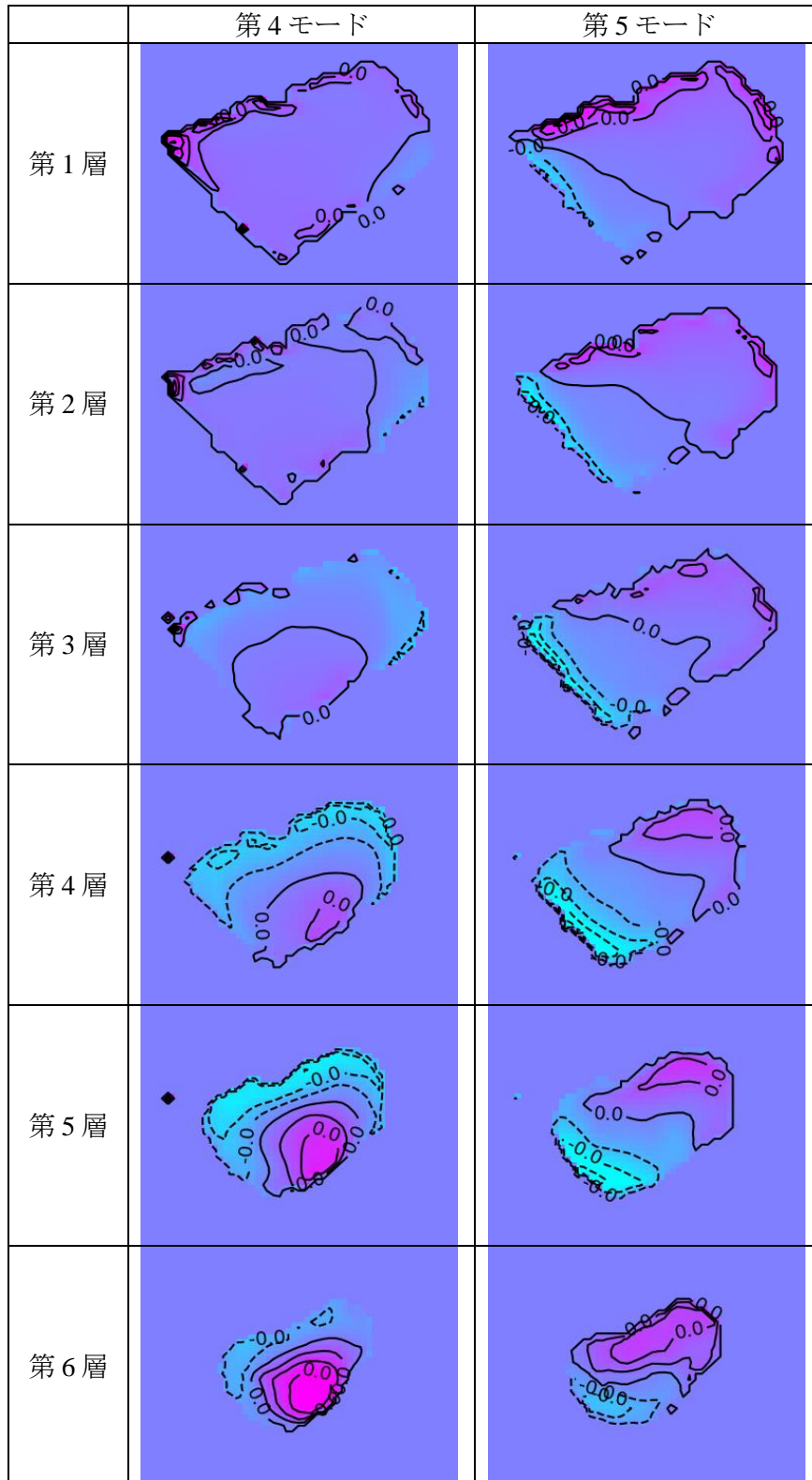


図 4.6 (2) 代表的な DO の立体構造 (凡例は図 4.4と同様、標準化のため単位はない)

4.5 多変量解析

既往の見解で指摘されているとおり、貧酸素水塊と気温・風との関係性について、DO 濃度の観測結果を再現できる諏訪湖貧酸素水塊モデルの結果との対応関係を分析してきた。一方で、貧酸素水塊発生及び拡大に関連する要因には、湖沼内の流れといった「物理的な要因」の他に、ブルームに伴う沈降フラックスの増加や底泥からの酸素消費など「生化学的な要因」など、非常に様々な要因が考えられる。

本検討で収集されたデータは多様であることから、全体を概観し、なおかつ有意義な特徴を抽出することは容易ではない。そこで、ここでは、「時系列図作成」、「散布図作成」などの基本的な可視化に加えて、「主成分分析」、「クラスター分析」、「次元圧縮」など一連の解析（表 4.2）を幅広く実施することで、全体のデータのありようを概観し、なおかつ着目すべき項目の洗い出しを行った。

なお、対象データとしては、水質調査結果である「水温」「透明度」「pH」「DO」「COD」「SS」「全窒素」「全リン」「測定水深」「測定地点の最大水深」、シミュレーションの条件として収集された「気温」「風（南北方向成分、東西方向成分）」「全天日射量」「雲量」「水位（代表して釜口水門の水位とした）」「河川流量（代表して上川の河川流量とした）」の合計 16 項目を対象とし、2016、2017 年の二か年における水質調査の観測日のデータとしてデータセットを構築した（データ数 156）。ただし、「アンモニア態窒素」「硝酸態窒素」は他の水質項目に比べて測定頻度が少ないため、データセットの項目からは除外した。

なお、今回の解析対象は日々の貧酸素水塊の規模の消長という時間スケールの分析であるため、データ頻度も少なく長期的な変動をすると考えられる藻場や底質に関する条件については分析の対象外とした。

表 4.2 データ解析の実施内容

	実施内容	解析対象		着眼点・解析のねらい
		要因データ	結果データ	
1	時系列図可視化*	●	●	基本的な可視化 (気象条件などもそのまま可視化)
2	散布図可視化*	●	●	基本的な可視化 (気象条件などもそのまま可視化) ※図を省略し相関係数の一覧として記載した
3	主成分分析	●	**	主要な成分（以降、モード）を抽出することで 大まかな状況を概観
4	クラスター分析	●***	****	各モードがどのような頻度で出現しているかを 概観
5	次元圧縮（t-SNE）	●	**	モードを抽出することで大まかな状況を概観 (主成分分析では見つけられない特徴が抽出できるかどうかを確認)

*：累積効果を勘案するため一部のデータは様々な時間幅で移動平均処理したデータも対象とする。

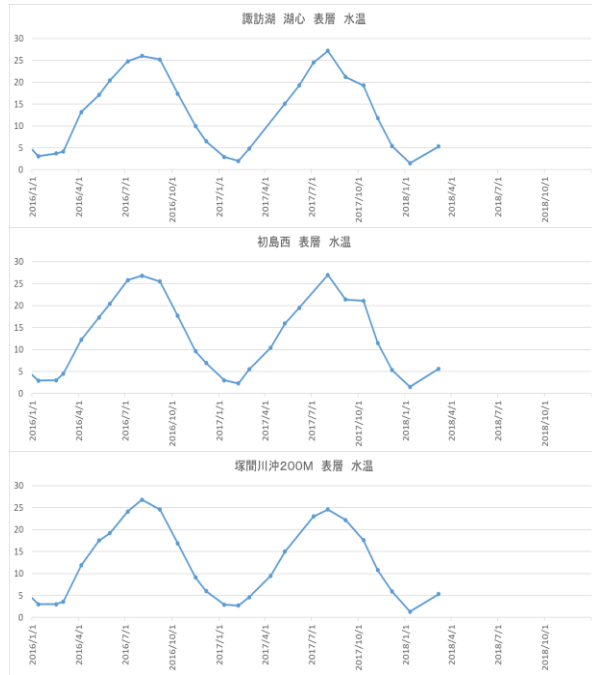
**：モードと結果データの時系列図の比較も実施する。

***：クラスター分析は、3「主成分分析」の結果に対して行うものとする。

****：各クラスターと貧酸素の状況の対応状況も確認する。

各項目の時系列図を図 4.7に可視化した。表層・底層は観測地点毎の定義による。

表層



底層

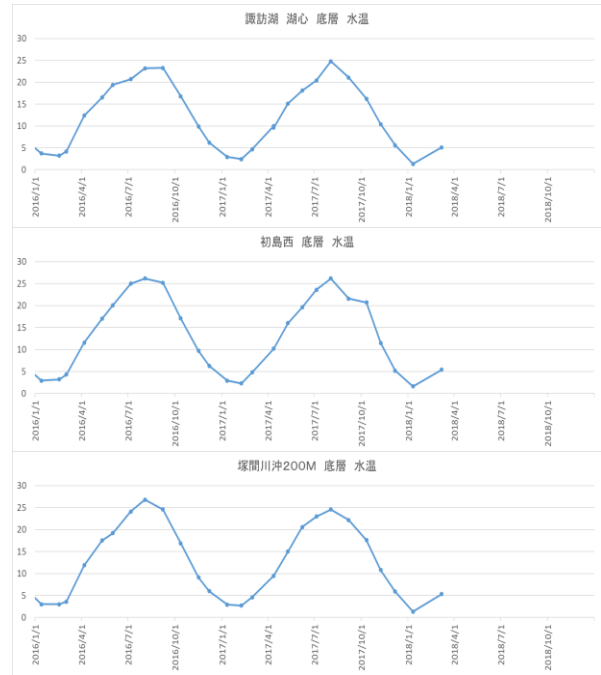
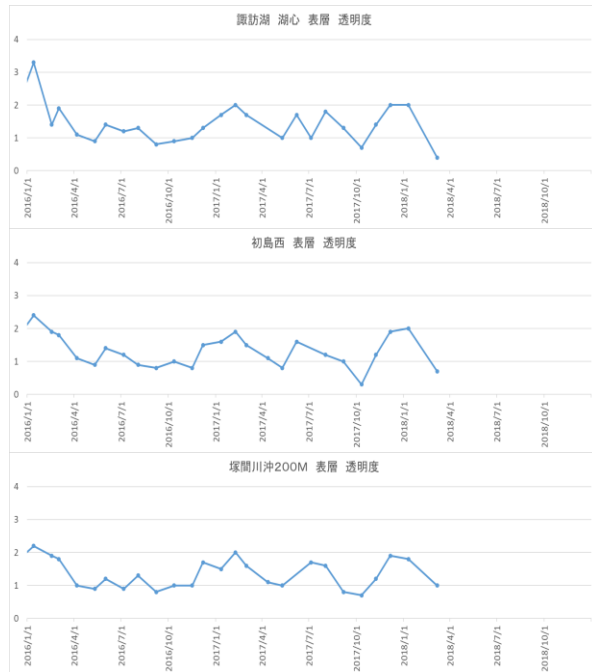


図 4.7 (1) 時系列変動 (水温)

表層



底層

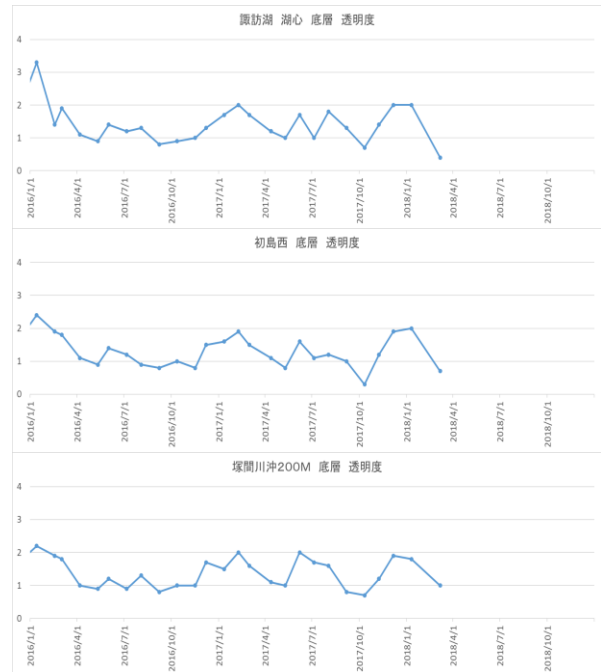
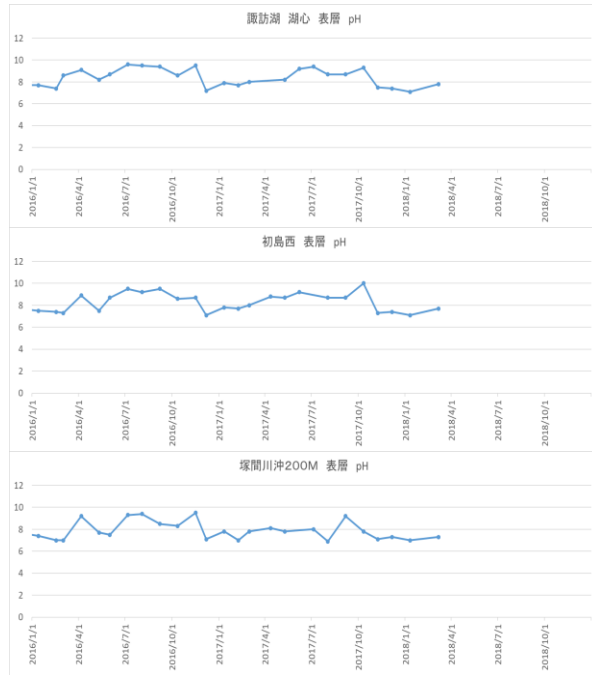


図 4.7 (2) 時系列変動 (透明度)

表層



底層

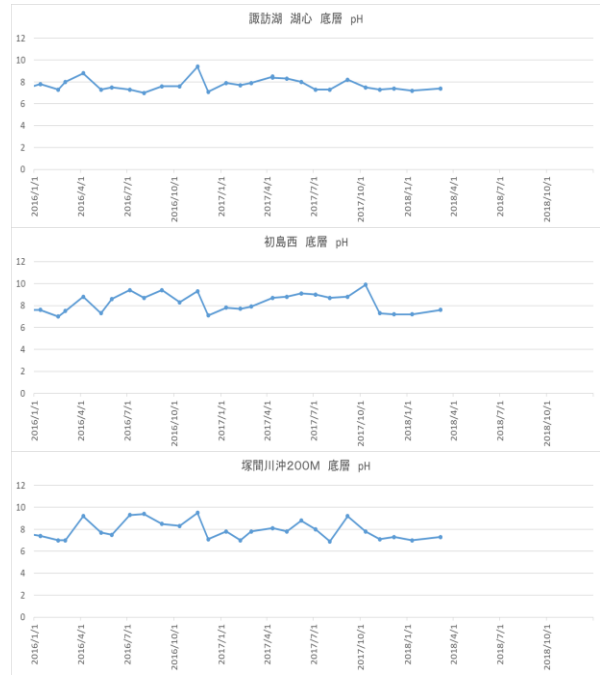
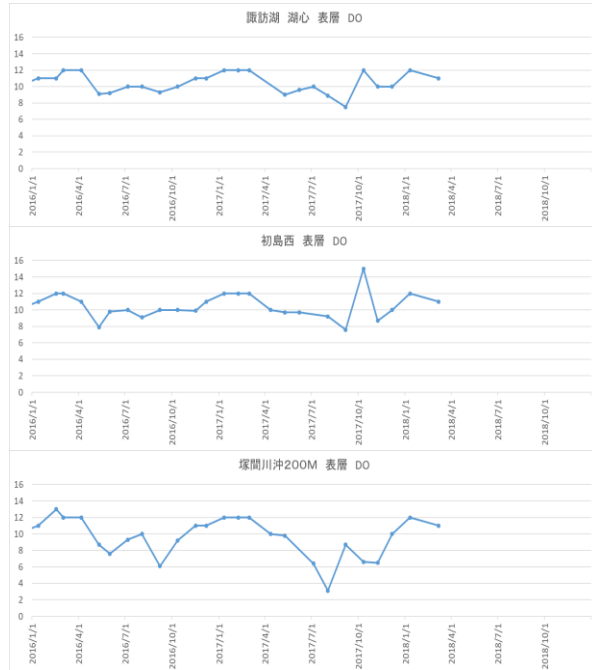


図 4.7 (3) 時系列変動 (pH)

表層



底層

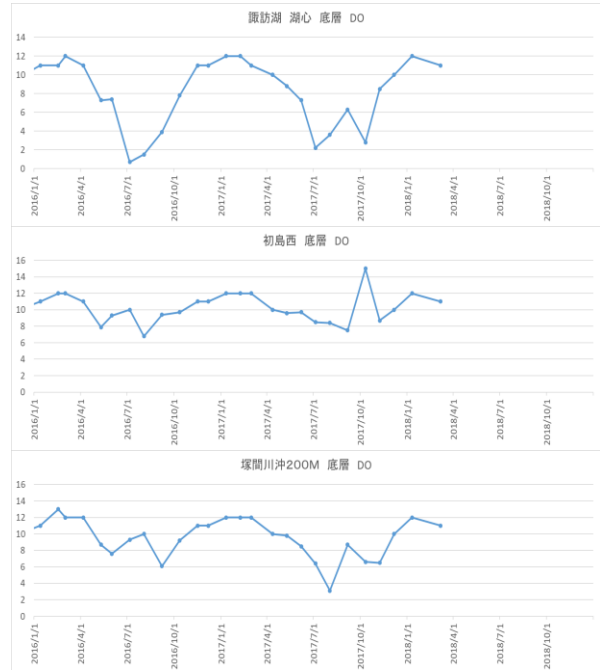
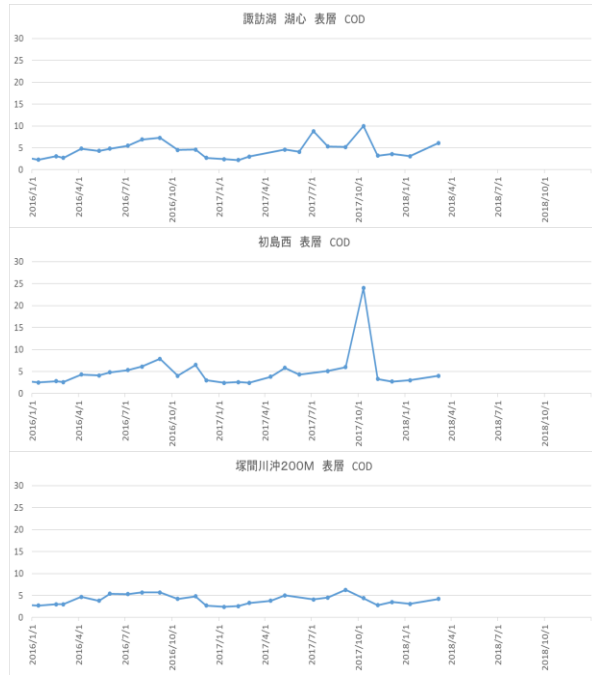


図 4.7 (4) 時系列変動 (DO)

表層



底層

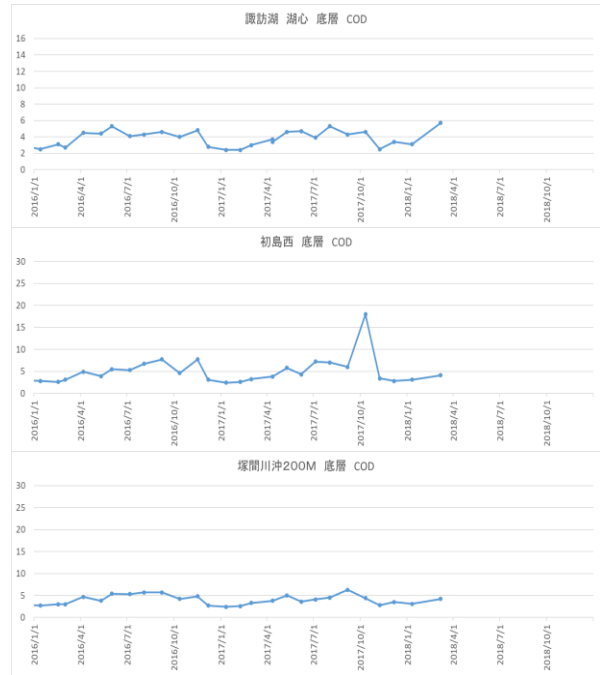
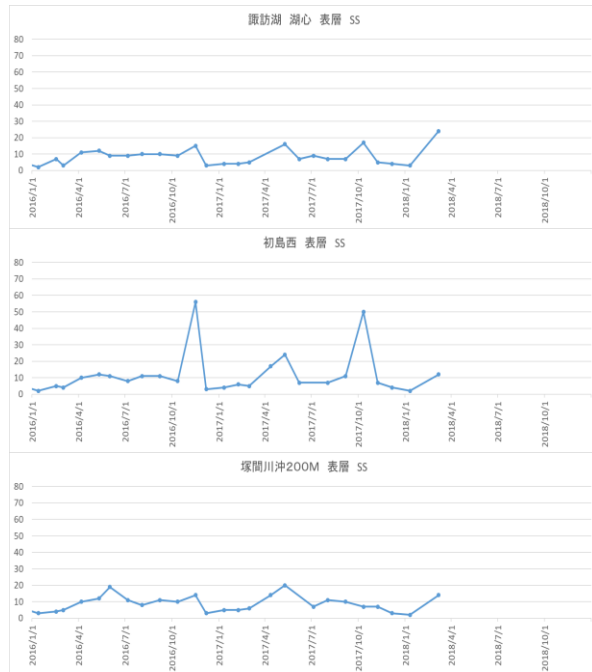


図 4.7 (5) 時系列変動 (COD)

表層



底層

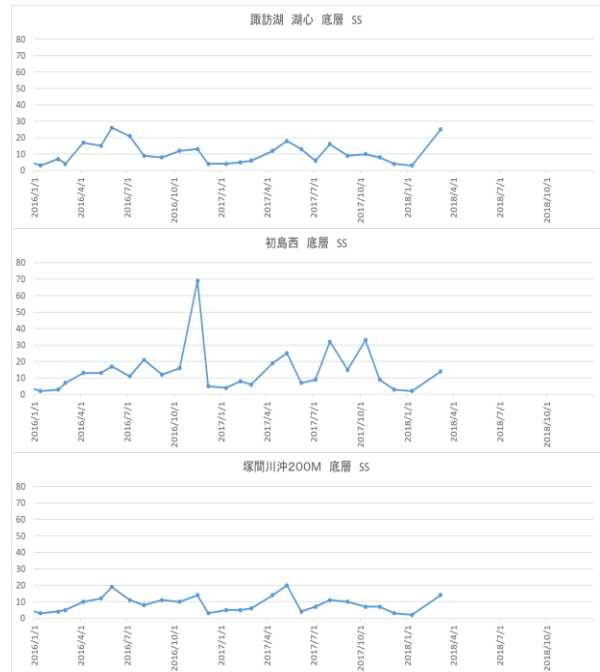
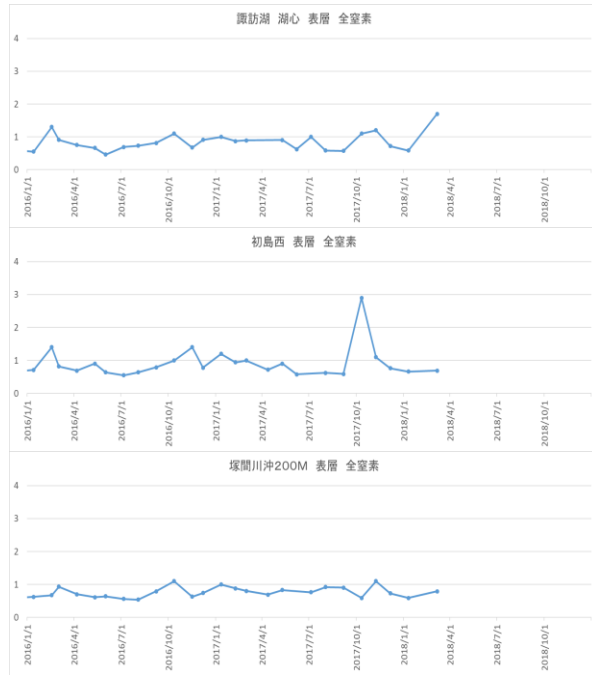


図 4.7 (6) 時系列変動 (SS)

表層



底層

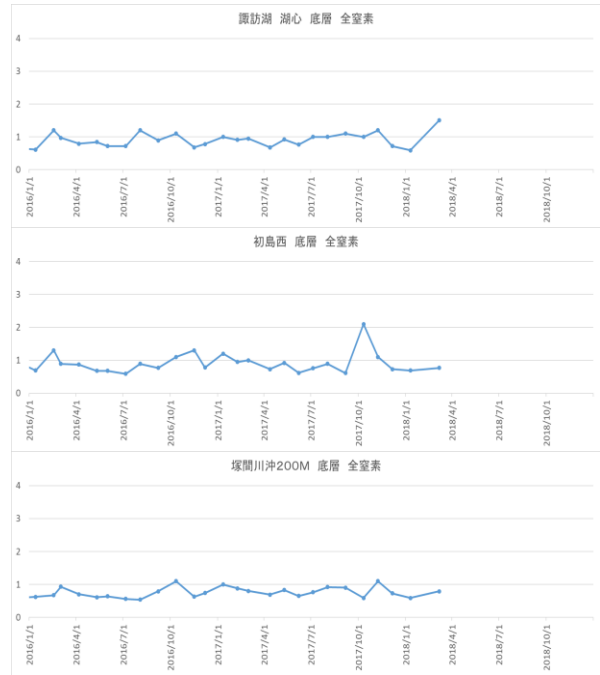
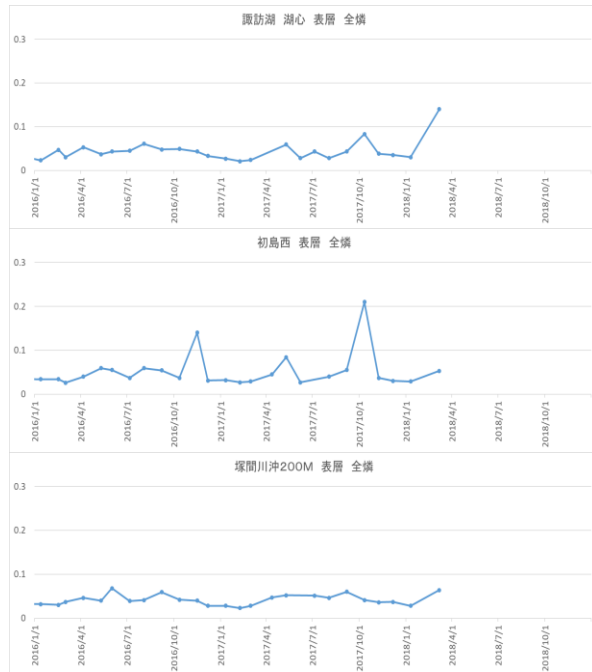


図 4.7 (7) 時系列変動 (全窒素)

表層



底層

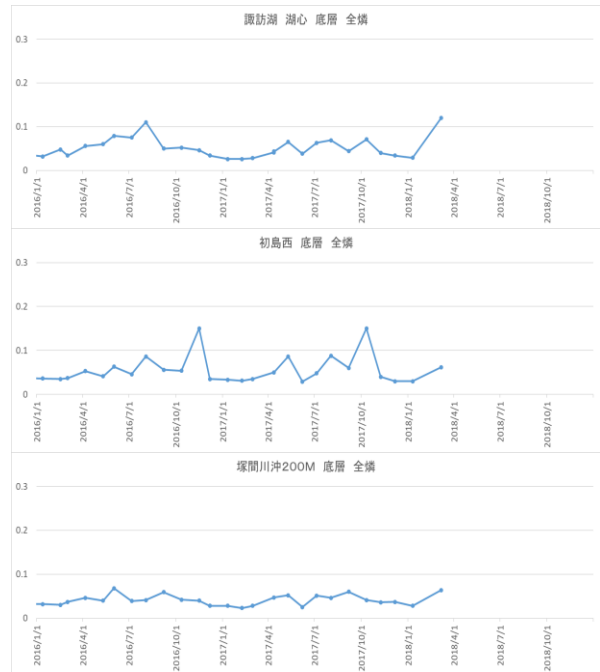
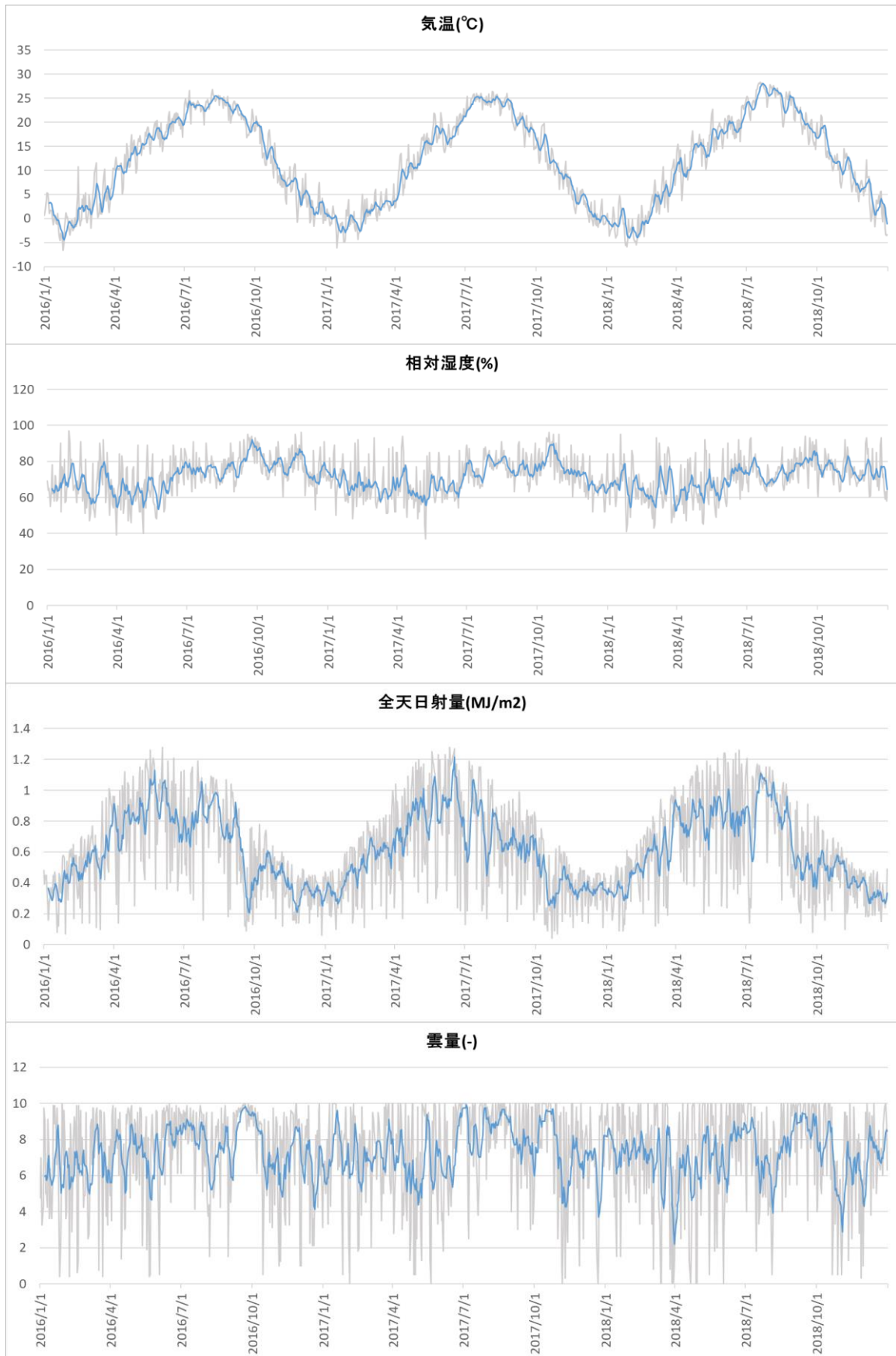
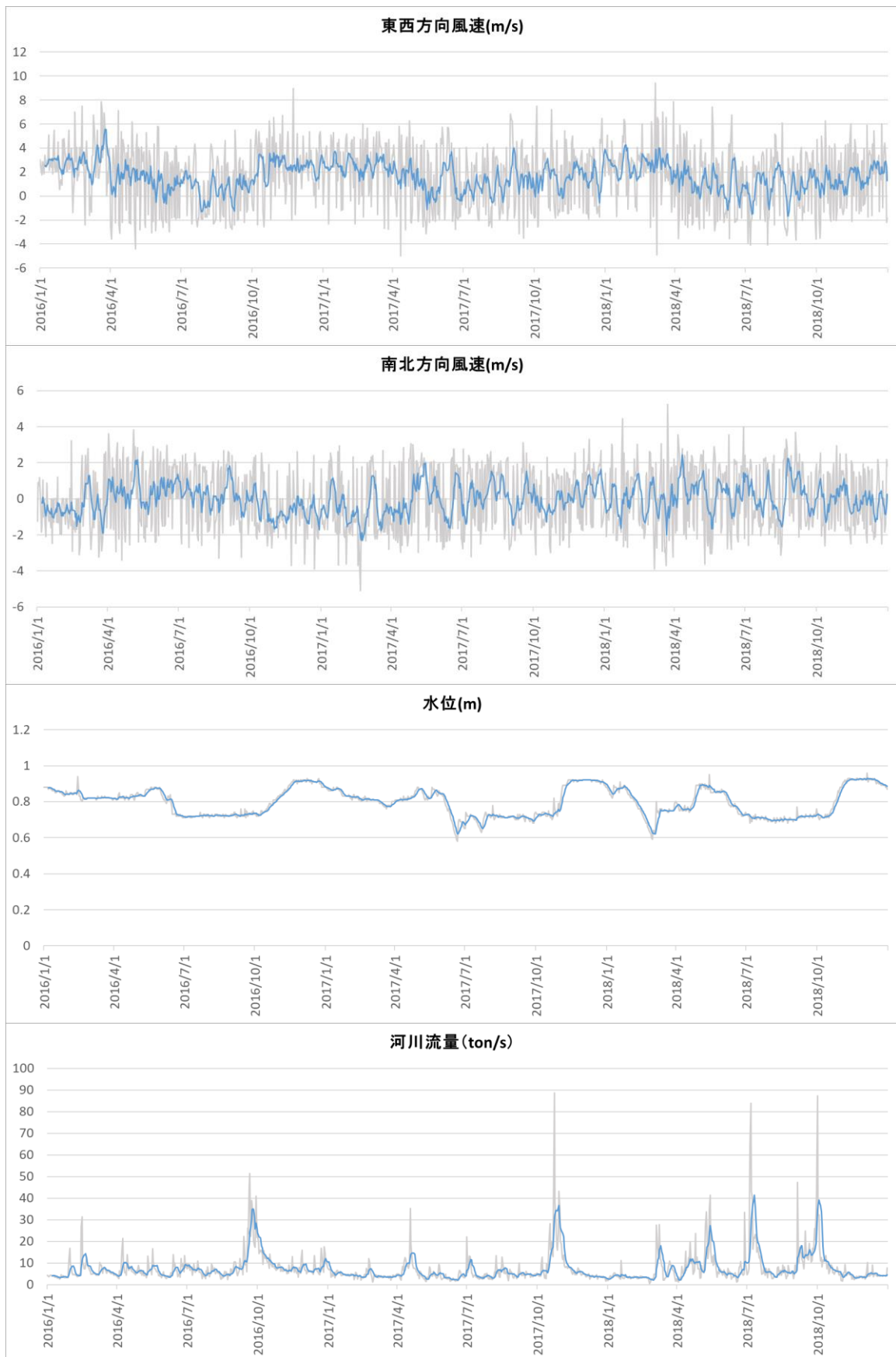


図 4.7 (8) 時系列変動 (全燐)



灰色は時間データ、青色は日平均データである。

図 4.7 (9) 時系列変動 (気温・相对湿度・全天日射量・雲量)



灰色は時間データ、青色は日平均データである。

図 4.7 (10) 時系列変動 (風速・水位・河川流量)

※散布図も個別に確認しているが一覧として可視化することは現実的ではないため掲載を省略した。

	depth	wtemp	Lmax	tomei	pH	DO	COD	SS	TN	TP	atemp	humi	sun	cloud	u	v	wl	Q
depth	1.000	-0.062	0.505	0.035	-0.239	-0.318	-0.118	0.054	0.085	0.091	-0.023	-0.005	0.003	-0.006	0.028	-0.023	0.023	0.020
wtemp	-0.062	1.000	-0.054	-0.512	0.600	-0.605	0.539	0.281	-0.095	0.317	0.983	0.614	0.415	0.447	-0.281	-0.029	-0.727	0.126
Lmax	0.505	-0.054	1.000	0.084	-0.069	-0.155	-0.091	-0.057	0.076	0.014	-0.034	-0.025	-0.018	-0.018	0.015	-0.003	0.035	-0.009
tomei	0.035	-0.512	0.084	1.000	-0.470	0.232	-0.572	-0.578	-0.311	-0.610	-0.542	-0.502	-0.239	-0.519	-0.007	0.181	0.429	-0.461
pH	-0.239	0.600	-0.069	-0.470	1.000	0.083	0.601	0.390	-0.005	0.309	0.546	0.332	0.299	0.225	-0.175	0.097	-0.461	0.015
DO	-0.318	-0.605	-0.155	0.232	0.083	1.000	0.018	-0.073	0.168	-0.126	-0.650	-0.485	-0.164	-0.319	0.160	0.133	0.410	-0.157
COD	-0.118	0.539	-0.091	-0.572	0.601	0.018	1.000	0.633	0.517	0.774	0.530	0.365	0.234	0.339	-0.120	0.038	-0.449	0.051
SS	0.054	0.281	-0.057	-0.578	0.390	-0.073	0.633	1.000	0.463	0.864	0.269	0.273	0.152	0.240	0.062	-0.153	-0.155	0.152
TN	0.085	-0.095	0.076	-0.311	-0.005	0.168	0.517	0.463	1.000	0.648	-0.071	0.096	-0.120	0.138	0.039	-0.113	-0.053	0.114
TP	0.091	0.317	0.014	-0.610	0.309	-0.126	0.774	0.864	0.648	1.000	0.323	0.388	0.266	0.194	0.269	-0.008	-0.296	0.198
atemp	-0.023	0.983	-0.034	-0.542	0.546	-0.650	0.530	0.269	-0.071	0.323	1.000	0.633	0.388	0.482	-0.274	0.016	-0.703	0.145
humi	-0.005	0.614	-0.025	-0.502	0.332	-0.485	0.365	0.273	0.096	0.266	0.633	1.000	-0.213	0.715	-0.459	-0.097	-0.500	0.252
sun	0.003	0.415	-0.018	-0.239	0.299	-0.164	0.234	0.152	-0.120	0.194	0.388	-0.213	1.000	-0.146	0.138	-0.094	-0.465	0.075
cloud	-0.006	0.447	-0.018	-0.519	0.225	-0.319	0.339	0.240	0.138	0.269	0.482	0.715	-0.146	1.000	-0.249	-0.033	-0.449	0.325
u	0.028	-0.281	0.015	-0.007	-0.175	0.160	-0.120	0.062	0.039	-0.008	-0.274	-0.459	0.138	-0.249	1.000	-0.579	0.334	0.438
v	-0.023	-0.029	-0.003	0.181	0.097	0.133	0.038	-0.153	-0.113	-0.084	0.016	-0.097	-0.094	-0.033	-0.579	1.000	-0.069	-0.508
wl	0.023	-0.727	0.035	0.429	-0.461	0.410	-0.449	-0.155	-0.053	-0.296	-0.703	-0.500	-0.465	-0.449	0.334	-0.069	1.000	-0.207
Q	0.020	0.126	-0.009	-0.461	0.015	-0.157	0.051	0.152	0.114	0.198	0.145	0.252	0.075	0.325	0.438	-0.508	-0.207	1.000

暖色ほど相関高く、寒色ほど相関低い。色は全体的な状況を把握するために着けたものである。

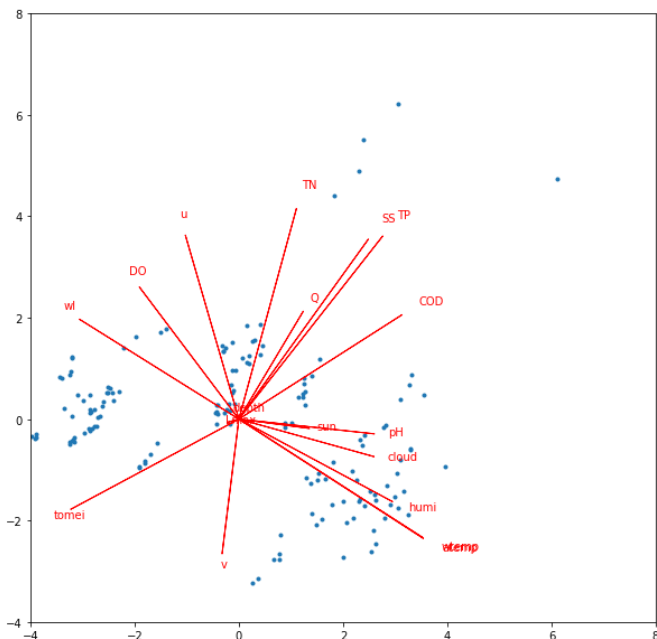
- depth:測定水深
- wtemp:水温
- Lmax:測定地点の水深
- tomei:透明度
- pH:pH
- DO:DO
- COD:COD
- SS:SS
- TN:全窒素
- TP:全磷
- atemp:気温
- humi:相対湿度
- sun:全日射量
- cloud:雲量
- u:南北方向風速
- v:東西方向風速
- wl:水位（釜口水門）
- Q:河川流量（上川）

図 4.8 すべての項目の散布図(省略)と相関係数一覧

主成分分析によりデータを要約した結果を図 4.9に示した。また、各モードの主成分得点の時系列変動の様子を図 4.10に示した。

【バイプロット】

横軸が第1モード、縦軸が第2モード
 どの項目がどの方向にどれくらいの大きさの軸となっているか（固有ベクトルと呼ばれるもの）を赤線で、実際のプロット（主成分得点と呼ばれる値）を●で示したもの。
 固有ベクトルは、各変数の角度を見比べて、同じ直線状に乗る角度の場合相関が高く、直角に近いほど相互に独立なのかを俯瞰できる。主成分得点のプロットは実際のデータがどのあたりにマッピングされているかを確認するためのものである。



上図の赤線（固有ベクトル）の値は以下の表のとおり。

	depth	wtemp	Lmax	tomei	pH	DO	COD	SS	TN	TP	atemp	humi	sun	cloud	u	v	wl	Q
mode1	-0.011	0.353	-0.023	-0.323	0.260	-0.191	0.313	0.248	0.111	0.276	0.354	0.295	0.135	0.259	-0.103	-0.032	-0.306	0.124
mode2	0.014	-0.234	-0.006	-0.178	-0.029	0.260	0.206	0.355	0.415	0.361	-0.235	-0.163	-0.018	-0.074	0.363	-0.266	0.197	0.213
mode3	-0.281	-0.054	-0.204	0.065	0.253	0.377	0.273	0.116	0.145	0.126	-0.074	-0.090	-0.053	-0.105	-0.339	0.454	0.019	-0.438
mode4	0.399	-0.143	0.344	0.032	-0.246	-0.143	-0.011	0.074	0.290	0.139	-0.098	0.266	-0.465	0.242	-0.314	0.181	0.102	-0.116
mode5	0.445	0.081	0.424	0.103	0.037	-0.138	0.077	0.094	0.021	0.156	0.079	-0.328	0.461	-0.352	0.036	0.139	-0.090	-0.255
mode6	-0.021	0.051	-0.586	0.099	-0.491	-0.446	-0.050	0.198	0.090	0.215	0.073	-0.032	0.068	-0.172	-0.075	-0.056	0.074	-0.229
mode7	0.007	0.158	0.101	0.042	0.332	-0.119	0.015	0.340	-0.356	-0.011	0.124	0.151	-0.301	-0.165	0.136	-0.250	0.510	-0.314
mode8	-0.310	0.157	0.236	0.379	-0.041	-0.025	0.206	-0.275	0.435	-0.073	0.093	0.127	-0.073	-0.173	-0.016	-0.481	-0.150	-0.225
mode9	-0.566	0.071	0.387	-0.116	-0.248	-0.267	0.034	-0.043	0.008	0.129	0.182	-0.212	-0.062	0.092	0.233	0.392	0.236	0.066
mode10	0.353	0.162	-0.274	0.178	0.028	0.038	0.371	-0.279	0.102	-0.124	0.233	-0.171	-0.227	0.246	0.497	0.206	0.071	-0.092
mode11	-0.081	-0.092	0.092	0.099	-0.156	0.107	-0.006	0.169	-0.156	-0.011	-0.122	-0.095	0.321	0.708	0.069	-0.229	-0.016	-0.438
mode12	-0.078	-0.013	0.037	0.703	0.036	-0.024	0.052	0.330	-0.260	0.241	-0.096	0.015	-0.155	0.037	0.099	0.128	-0.323	0.307
mode13	-0.070	-0.083	-0.042	-0.116	0.341	-0.266	-0.479	0.175	0.299	-0.129	-0.097	-0.127	-0.223	0.025	0.315	0.090	-0.405	-0.270
mode14	-0.020	-0.142	0.080	-0.343	-0.269	0.038	0.317	-0.120	-0.423	0.136	-0.167	0.076	-0.281	-0.215	0.187	-0.078	-0.449	-0.262
mode15	0.011	0.027	-0.053	-0.035	0.273	-0.251	0.040	-0.299	-0.110	0.352	-0.129	-0.589	-0.236	0.166	-0.329	-0.263	0.024	0.075
mode16	-0.047	-0.440	-0.056	0.086	0.316	-0.440	0.232	-0.279	-0.002	0.111	-0.293	0.369	0.281	0.022	0.140	0.111	0.151	-0.023
mode17	0.031	0.120	-0.029	0.053	0.024	0.291	-0.455	-0.352	-0.039	0.648	0.142	0.253	0.044	0.003	0.185	0.033	0.047	-0.141
mode18	-0.004	-0.680	-0.002	0.040	0.038	0.046	-0.016	0.035	-0.038	0.019	0.705	-0.086	-0.046	-0.009	-0.075	-0.109	-0.067	-0.003

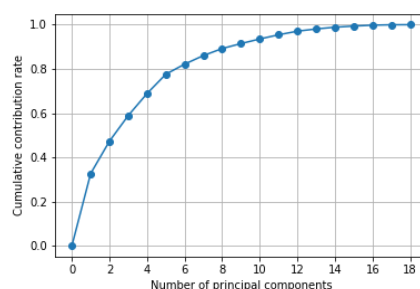
赤色ほどスコアが正に大きく、青色ほどスコアが負に大きい。ここでのスコアと図 4.8の相関係数は全く関係のない値であり、値の役割も大きく異なる。

【累積寄与率】

第1モード（寄与率が最も大きい）から第Nモードまでの寄与率を累積していった値（累積寄与率）を可視化したもの。

どのモードまで考慮すれば、どれくらいの情報量となるかを可視化でき、考慮すべきモード数などを検討するときに確認する。

寄与率は総分散（全情報量）に対する当該モードの固有値であり、全情報量のうちの当該モードの情報量の割合と捉えればよい。



寄与率は全体の情報量に対して、第1モードがどれくらいの情報量の大きさを占めているかを示すものである。

ここでの第1モードは、左図より、より水温の高い低いに連動している透明度、DO濃度などの関係が抽出されており、第2モードは有機物含有量の多い少ないに対応したDOなどの水質項目の対応が抽出されている。

図 4.9 主成分分析の結果

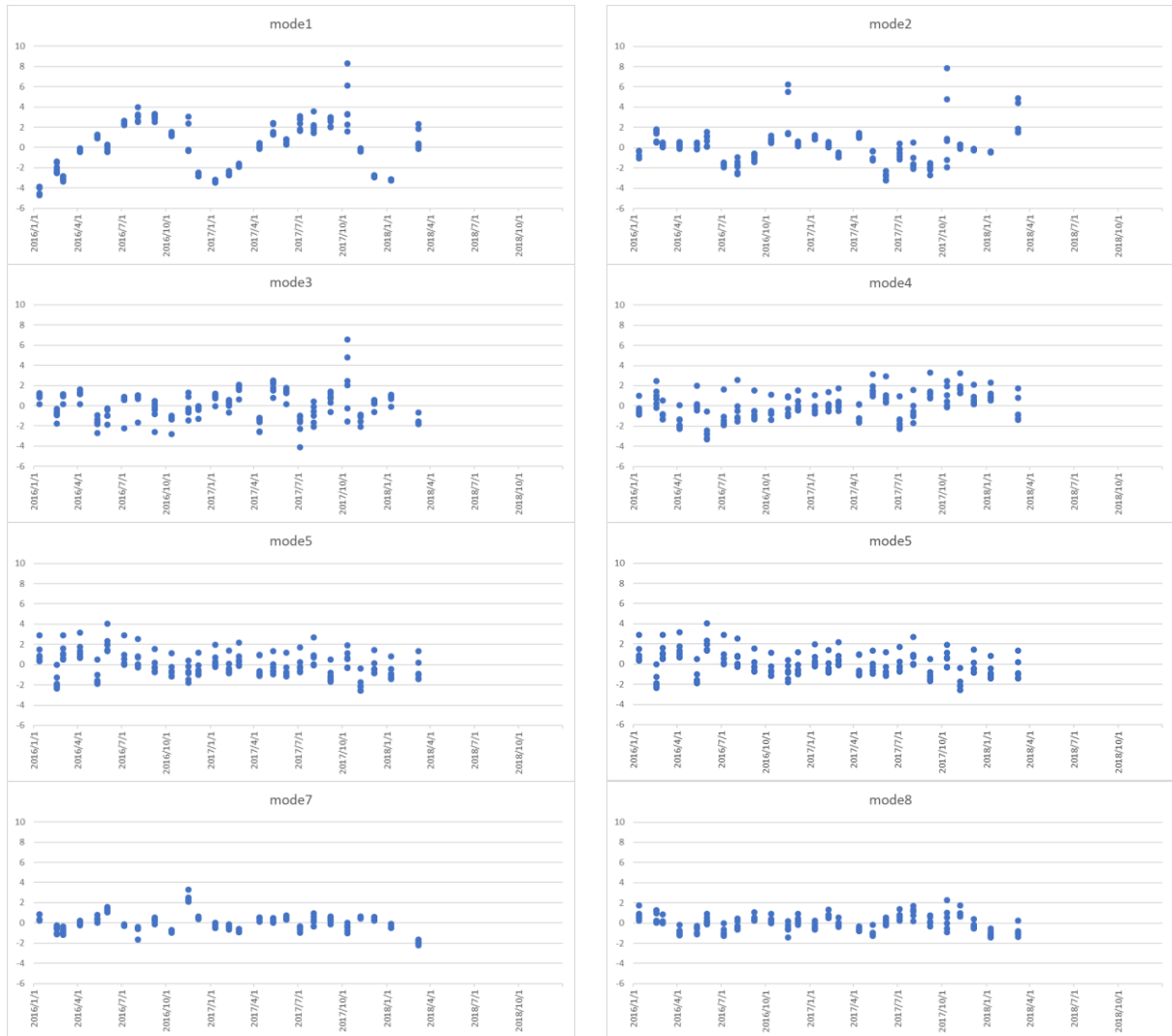
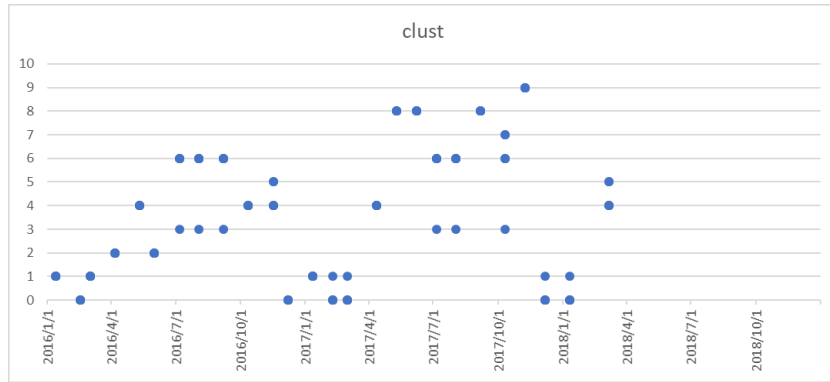


図 4.10 各モードの時間変動の様子

主成分分析の結果、第 1 モード、第 2 モードとしては、明確な季節変動成分が抽出された。水温・水位・DO の変動と様々な水質の変動は季節的な変動成分を有しており、例えば DO と pH は逆相関、COD・全窒素・全磷・SS と透明度は逆相関で、COD と透明度の逆相関はより明確な関係がみられる。水温と気温の相関関係や SS と全磷（磷の多くは懸濁物に吸着されている）の相関関係がより明確にでている。これらはすべて既存の知見としてよく知られている関係である。

主成分得点を用いて、クラスター分析を行うことで、データセットを類型化した。クラスター分析は、主成分得点のユークリッド距離を用いて類似度（非類似度）を測定し、ワード法による階層的クラスタリングを行った。デンドログラムより閾値を 50 としてデータを類型化し、10 個のグループを得た。このグループの時間方向の出現状況を図 4.11 に示した。

なお、クラスター分析とは、似ているデータのグループを作成していく解析手法であり、似たような状況のデータをひとくくりにすることで、それぞれどのような特徴の現象がどれくらい起きているかを俯瞰することができる。



縦軸はグループの ID 番号 (値の大小に意味はない)

図 4.11 各グループの時間方向の出現状況

参考として、「t-SNE¹⁰」を用いてデータを 2 次元に次元圧縮した散布図を図 4.12に示した。「t-SNE」は、データ間の距離関係 (類似しているデータはより近く、類似していないデータはより遠くの座標にプロットされる関係) になるべく保持されるように、もともと 16 次元の座標を 2 次元で表現させる方法である。同様の手法は、MDS (多次元尺度法) などでも実施できるが、「t-SNE」では「測地線距離」と呼ばれる距離関係が近いかどうかという指標で次元圧縮が可能である。

図 4.12は各項目がどのようにプロットされているかがわかりやすいように、●の大きさと当該項目の値の大小を表現しており、項目数分だけ図を作成した。

¹⁰ Laurens van der Maaten and Geoffrey Hinton: Visualizing Data using t-SNE, Journal of Machine Learning Research 9 (2008) 2579-2605

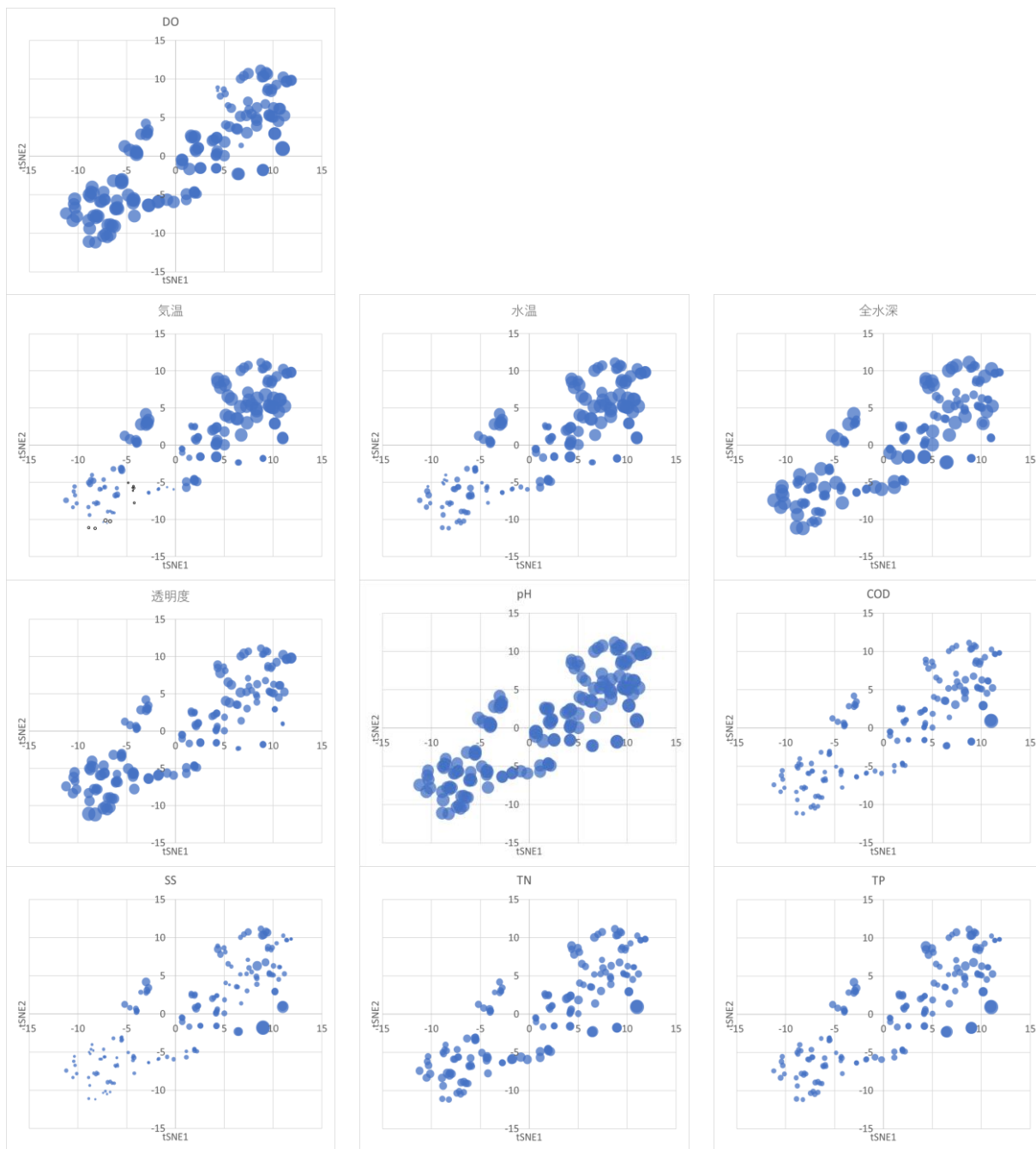


図 4.12 (1) t-SNE による次元圧縮の例

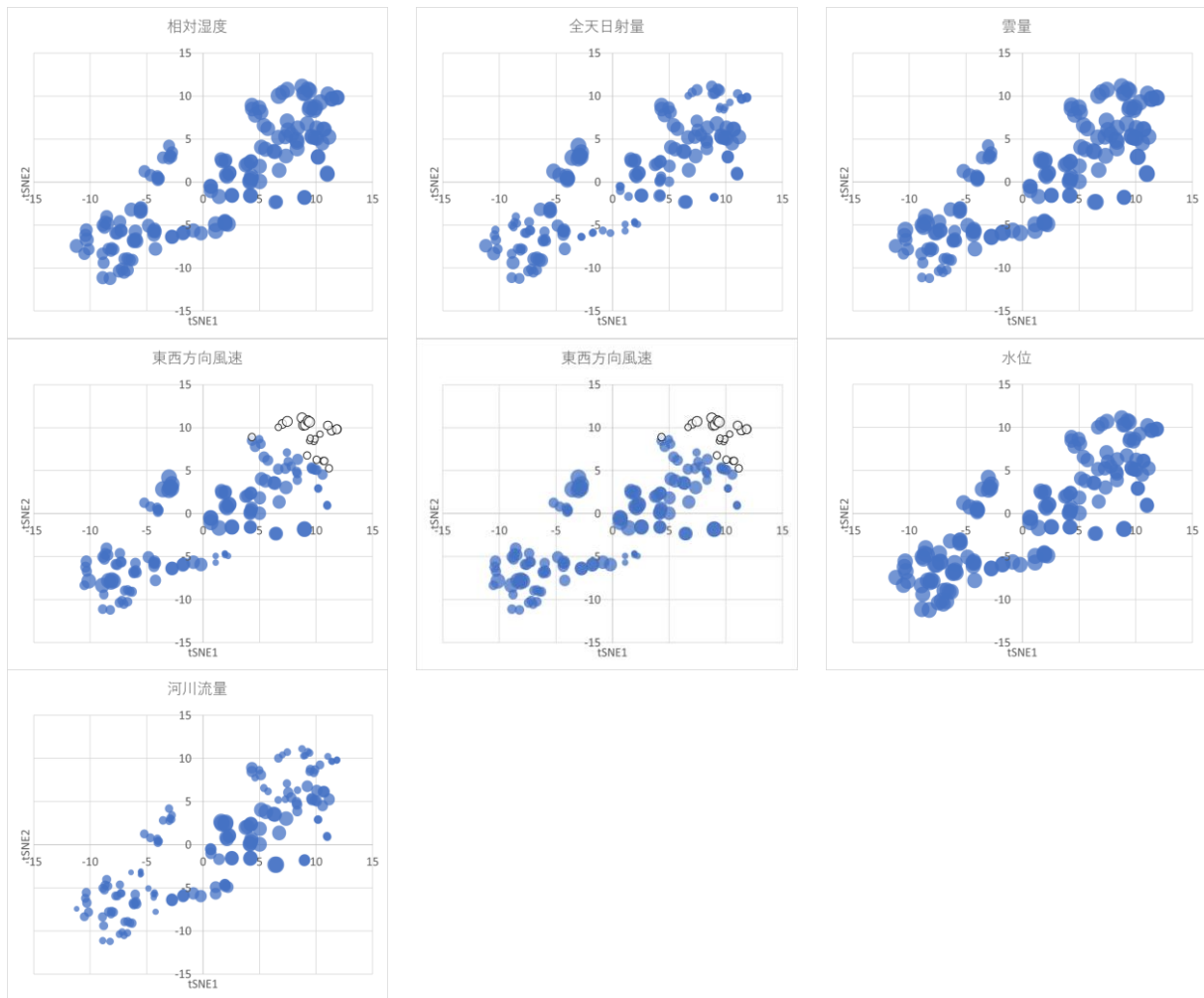


図 4.12 (2) t-SNE による次元圧縮の例

以上のような解析で、一通りのデータの俯瞰ができた。4.1 節から 4.5 節までを総合すると、水質項目は季節変動が明確に見えており、水温・透明度・DO は季節変動している特徴が一番顕著にみられた特徴である。また、水質に関しても一般的によく知られている SS と TP の相関が高いことなども特徴として見られる。DO 濃度は、水温などとの対応は明確にみられる一方、COD 等の水質項目との関係は水温などと比べると明確には見られなかった。

4.6 生態系モデルのモデル式とパラメータ

(1) モデル式

モデルの基本式は以下に示すとおりであり、水平・鉛直方向の移流項、拡散項とそれらを除く生成・消滅項から構成されている。

$$\frac{\partial}{\partial t}(h \cdot S) = \underbrace{-\left(u \frac{\partial}{\partial x}(h \cdot S) + v \frac{\partial}{\partial y}(h \cdot S) + w \frac{\partial}{\partial z}(h \cdot S)\right)}_{\text{移流項}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x \cdot h \cdot \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_y \cdot h \cdot \frac{\partial S}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_z \cdot h \cdot \frac{\partial S}{\partial z}\right)}_{\text{拡散項}} + \underbrace{\left(\frac{\partial}{\partial t}(h \cdot S)\right)^*}_{\text{生成・消滅項}}$$

ここで, S : 各構成要素の物質濃度(gm^{-3})

h : 層厚(m)

x, y, z : x, y は右手系の直交座標軸、 z は鉛直上向きを正

u, v, w : x, y, z 方向の流速成分(ms^{-1})

K_x, K_y, K_z : x, y, z 方向の渦拡散係数(m^2s^{-1})

$\left(\frac{\partial}{\partial t}(h \cdot S)\right)^*$: 生成・消滅項 (下記で構成要素毎に説明)

【水質サブモデル】

①. 植物プランクトン：PPHY

$$\frac{dPPHY}{dt} = \text{光合成} - \text{呼吸} - \text{細胞外分泌} - \text{枯死} - \text{沈降} - \text{被食} \quad (\text{動物プランクトン、懸濁物食者})$$

物質循環過程	主なモデル式
光合成	<p>光合成速度 (PP_1) は、水温 (T)、光量 (I)、栄養塩 (N, P) に依存するものとしてモデル化</p> $PP_1 = \mu \max_{pphy} \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot f(N, P)$ <p>$\mu \max_{pphy}$: 比光合成速度</p> <p>温度依存項</p> $f(T) = \exp(\theta_{pphy} (T - T_{opt})^2) \quad \text{or} \quad f(T) = \exp(\theta_{pphy} (T - T_{base}))$ <p>θ_{pphy} : 温度係数、T_{opt} : 最適水温、T_{base} : 基準水温</p> <p>光依存項</p> $f(I) = \frac{I_L}{I_{opt_{pphy}}} \cdot \exp\left(1.0 - \frac{I_L}{I_{opt_{pphy}}}\right)$ <p>$I_{opt_{pphy}}$: 最適光量、I_L : 第L層での平均光量</p> <p>ここで、第L層の光量は、以下のとおり、クロフィルa濃度に応じて、第L層の上端 (h_1) から下端 (h_2) にかけて減衰するものとして設定</p> $I_{h2} = I_{h1} \cdot \exp(-k \cdot (h_s - h_1))$ <p>k : 消散係数、h_s : 海表面光量</p> <p>栄養塩依存項</p> <p>$f(N, P)$ (栄養塩依存項) については、半飽和型の関数を活用</p> $f(NH4) = \left[\frac{PNH4}{Kpnh4_{pphy} + PNH4} \cdot \exp(-\Psi_{pphy} \cdot \frac{PNH4 \cdot 1000}{14}) \right]$ $f(NO3) = \left[\frac{PNO3}{Kpno3_{pphy} + PNO3} \cdot \exp(-\Psi_{pphy} \cdot \frac{PNO3 \cdot 1000}{14}) \right]$ $f(N) = [f(NH4) + f(NO3)], \quad f(P) = \left[\frac{PPO4}{Kppo4_{pphy} + PPO4} \right]$ $f(N, P) = \frac{2.0}{\left[\left(\frac{1.0}{f(N)} + \frac{1.0}{f(P)} \right) \right]}$
呼吸	<p>呼吸速度 (PP_3) は水温 (T) に依存するものとしてモデル化</p> $PP_3 = RESP_{pphy} \cdot \exp(Q10R_{pphy} \cdot (T - T_{base}))$ <p>$RESP_{pphy}$: 呼吸速度、$Q10R_{pphy}$: 温度係数、T_{base} : 基準温度</p>
細胞外分泌	<p>細胞外分泌速度 (PP_2) は、光合成量に対して一定の割合が細胞外分泌するものとして設定</p> $PP_2 = EXC_{pphy} \cdot PP_1$ <p>EXC_{pphy} : 細胞外分泌係数</p>

枯死	枯死速度 (PP_4) は水温 (T) に依存するものとしてモデル化 $PP_4 = MORTpphy \cdot \exp(Q10Mpphy \cdot (T - T_{base}))$ $MORTpphy$: 枯死速度、 $Q10Mpphy$: 温度係数、 T_{base} : 基準温度
沈降	沈降速度 (PP_5) は一定値 ($SINKpphy$) を設定
被食	被食については、動物プランクトンと懸濁物食者の摂餌を参照

②. 動物プランクトン : PZOO

$$\frac{dPZOO}{dt} = \text{摂餌} - \text{呼吸} \cdot \text{排泄} - \text{排糞} - \text{死亡}$$

物質循環過程	モデル式
摂餌	摂餌速度 (PZ_1) は、餌濃度 (P) と水温 (T) に依存するものとしてモデル化 $PZ_1 = Gpzoo \cdot f(P) \cdot f(T)$ $Gpzoo$: 摂餌速度 $f(P) = 1 - \exp(\lambda \cdot (P_{min} - PPHY))$ ($PPHY \geq P_{min}$) Ivlev(1945)の実験式を基に餌料濃度が閾値を下回ると摂餌ができなくなるものとしてモデル化 λ : Ivlev の係数、 P_{min} : 摂餌の閾値 $f(T) = \exp(\theta_{pzoo} (T - T_{opt})^2)$ or $f(T) = \exp(\theta_{pzoo} (T - T_{base}))$ θ_{pzoo} : 温度係数、 T_{opt} : 最適水温、 T_{base} : 基準水温
呼吸・排泄	呼吸・排泄速度 (PZ_3) は水温 (T) に依存するものとしてモデル化 $PZ_3 = RESPpzoo \cdot \exp(Q10Rpzoo(T - T_{base}))$ $RESPpzoo$: 呼吸速度、 $Q10Rpzoo$: 温度係数、 T_{base} : 基準水温
排糞	排糞速度 (PZ_2) は摂餌量のうち同化されずに排泄される割合としてモデル化 $PZ_2 = PZ_1(1 - ASSIpzoo)$ $ASSIpzoo$: 同化係数
死亡	死亡速度 (PZ_4) は水温 (T) に依存するものとしてモデル化 $PZ_4 = MORTpzoo \cdot \exp(Q10Mpzoo \cdot (T - T_{base}))$ $MORTpzoo$: 死亡速度、 $Q10Mpzoo$: 温度係数、 T_{base} : 基準水温

③. 懸濁態有機物：炭素：PPOC, 窒素：PPON, リン：PPOP

$$\frac{dPPOC}{dt} = \text{植物プランクトンの枯死} + \text{動物プランクトンの死亡} + \text{動物プランクトンの排糞} \\ - \text{分解} - \text{沈降} - \text{被食 (動物プランクトン、懸濁物食者)} + \text{流入負荷}$$

④. 溶存態有機物：炭素：PDOC, 窒素：PDON, リン：PDOP

$$\frac{dPDOC}{dt} = \text{植物プランクトンの細胞外分泌} + \text{懸濁態有機物の分解} - \text{無機化} + \text{流入負荷}$$

⑤. アンモニア態窒素 (NH₄-N)：PNH₄

$$\frac{dPNH_4}{dt} = -\text{光合成 (植物プランクトン、底生植物)} + \text{呼吸 (植物プランクトン、底生植物)} \\ + \text{排泄 (動物プランクトン、ベントス)} + \text{無機化} - \text{硝化} \pm \text{底生系との拡散} + \text{流入負荷}$$

⑥. 硝酸態窒素及び亜硝酸態窒素 (NO_x-N)：PNO_x

$$\frac{dPNO_x}{dt} = -\text{光合成 (植物プランクトン、底生植物)} + \text{硝化} \pm \text{底生系との拡散} + \text{流入負荷}$$

⑦. リン酸態リン (PO₄-P)：PPO₄

$$\frac{dPPO_4}{dt} = -\text{光合成 (植物プランクトン、底生植物)} + \text{呼吸 (植物プランクトン、底生植物)} \\ + \text{排泄 (動物プランクトン、ベントス)} \pm \text{底生系との拡散} + \text{流入負荷}$$

⑧. 溶存酸素 (DO)：PDO

$$\frac{dPDO}{dt} = \text{光合成 (植物プランクトン、底生植物)} - \text{呼吸 (生物)} - \text{分解・無機化に伴う酸素消費} \\ \pm \text{底生系との拡散} + \text{流入負荷} \pm \text{大気との交換}$$

【底質予測サブモデル】

⑨. 有機物：炭素：BTOC、窒素：BTON、リン：BTOP

$$\frac{dBTOC}{dt} = \text{排糞 (ベントス)} + \text{死亡 (ベントス)} + \text{枯死 (底生植物)} - \text{被食 (堆積物食者)} - \text{分解} \\ + \text{浮遊系からの沈降 (懸濁態有機物、植物プランクトン)} \pm \text{生物攪乱による移動}$$

$$\frac{dBDOC}{dt} = \text{付着珪藻の細胞外分泌} + \text{デトリタスの分解} - \text{無機化} \\ \pm \text{層間の拡散} \pm \text{生物攪乱による移動}$$

⑩. 間隙水中のアンモニア態窒素 (NH₄-N) : BNH₄

$$\frac{dBNH_4}{dt} = \text{呼吸・排泄 (ベントス)} - \text{光合成 (付着珪藻)} + \text{無機化} - \text{硝化} \pm \text{浮遊系との拡散} \\ \pm \text{層間の拡散} \pm \text{生物攪乱による移動}$$

⑪. 間隙水中の硝酸態窒素 (NO_x-N) : BNO_x

$$\frac{dBNO_x}{dt} = -\text{光合成 (付着珪藻)} + \text{硝化} - \text{脱窒} \pm \text{浮遊系との拡散} \pm \text{層間の拡散} \\ \pm \text{生物攪乱による移動}$$

⑫. 間隙水中のリン酸態リン (PO₄-P) : BPO₄

$$\frac{dBPO_4}{dt} = \text{呼吸・排泄 (ベントス)} - \text{光合成 (付着珪藻)} \\ + \text{無機化} \pm \text{吸脱着} \pm \text{浮遊系との拡散} \pm \text{層間の拡散} \pm \text{生物攪乱による移動}$$

⑬. 間隙水中の溶存酸素 (DO) : BDO

$$\frac{dBDO}{dt} = -\text{呼吸(ベントス)} - \text{分解・無機化に伴う酸素消費} + \text{光合成(付着珪藻)} \\ \pm \text{浮遊系との拡散} \pm \text{大気との交換} \pm \text{層間の拡散} \pm \text{生物攪乱による移動}$$

【底生生物予測サブモデル】

⑭. 付着珪藻：BDIA

付着珪藻に関する物質循環過程は、植物プランクトンに準じて定式化を行った。光合成については表層の有光層のみで行われることから付着珪藻の鉛直分布を仮定し、有光層の現存量を計算して光合成量を算出した。また、栄養塩は、直上水と底質間隙水の両方から摂取するものとし、その比率は再現性も考慮して設定した。

$$\frac{dBDIA}{dt} = \text{光合成} - \text{呼吸} - \text{細胞外分泌} - \text{枯死} - \text{被食 (堆積物食者)} \pm \text{生物攪乱による移動}$$

物質循環過程	主なモデル式
光合成	<p>光合成速度 (BD_1) は、泥温 (T)、光量 (I)、直上水と底質間隙水の栄養塩 (PN, PP, BN, BP) に依存するものとしてモデル化</p> $BD_1 = \mu \max bdia \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot [f(PN, PP)(1 - rB_{bdia}) + f(BN, BP) \cdot rB_{bdia}]$ <p>$\mu \max bdia$: 比最大光合成速度 rB_{bdia} : 浮遊系から摂取した栄養塩の割合 $f(T) = \exp(-0.004 \cdot (T - T_{opt\ bdia})^2)$ $T_{opt\ bdia}$: 最適温度 $f(I) = \frac{I}{K_{i\ bdia} + I}$ $K_{i\ bdia}$: 光量の半飽和定数 $f(PN, PP)$、$f(BN, BP)$ (栄養塩依存項) については、半飽和型の関数を用い、無機態窒素、無機態リンの相対的に濃度が不足する方に支配される現象を再現</p>
呼吸	<p>呼吸速度 (BD_3) は、光合成量に依存する部分と現存量と泥温 (T) に依存する部分 (静止呼吸) からなるものとしてモデル化</p> $BD_3 = ARESbdia \cdot BD_1 + RRESbdia \cdot \exp(Q_{10Rbdia} \cdot (T - T_{base}))$ <p>$ARESbdia$: 光合成に対応した呼吸の割合 $RRESbdia$: 相対的静止排泄速度 $Q_{10Rbdia}$: 温度係数</p>
細胞外分泌	<p>細胞外分泌速度 (BD_2) は、光合成量に対して一定の割合が細胞外分泌するものとして設定</p> $BD_2 = EXCbdia \cdot BD_1$ <p>$EXCbdia$: 細胞外分泌の割合</p>
枯死	<p>枯死速度 (BD_4) は、泥温 (T) に依存するものとしてモデル化</p> $BD_4 = MORTbdia \cdot \exp(Q_{10Mbdia} \cdot (T - T_{base}))$ <p>$MORTbdia$: 枯死速度 $Q_{10Mbdia}$: 温度係数</p>
被食	堆積物食者の摂餌を参照
生物攪乱	底生生物現存量に応じて各層間で物質の混合が生じるものとしてモデル化

⑮. 懸濁物食者：BSF

懸濁物食者については、湖沼における代表種としてヤマトシジミを想定しているが、現時点では主にアサリの室内実験値をもとに設定している。

$$\frac{dBSF}{dt} = \text{摂餌 (植物プランクトン、懸濁態有機物)} - \text{呼吸} \cdot \text{排泄} \\ - \text{排糞} - \text{死亡} - \text{漁獲} - \text{被食 (堆積物食者)}$$

物質循環過程	モデル式
摂餌	<p>室内試験結果に基づき、摂食速度 (BS_1) が餌濃度 ($CONC$)、温度 (T) 等に依存する現象をモデル化</p> $BS_1 = V_{bsf} \cdot f(T) \cdot f(CONC) \cdot f(BSF)$ <p>V_{bsf} (基準濾水速度) は、個体サイズと濾水速度の関係と観測個体の平均サイズを参考に設定</p> <p>温度依存項 ($f(T)$) は、アサリの温度と濾水速度の関係を基に 25°C を境に温度係数 ($Q10Gbsf$) は異なった値を設定</p> $f(T) = \exp(Q10Gbsf \cdot (T - 25))$ <p>$Q10Gbsf$: 温度係数 (0.09 ($T < 25^\circ\text{C} < T$) - 0.02)</p> <p>餌料濃度依存項 ($f(CONC)$) は、アサリの餌料濃度と濾水速度の関係を基に設定</p> $f(CONC) = \exp(Q10CONCbsf \cdot (CONC - 0.536))$ <p>$Q10CONCbsf$: 濃度係数 (-1.1 ($CONC < 0.536\text{mg L}^{-1} < CONC$) - 0.3)</p> <p>$f(BSF)$: 懸濁物食者の密度依存項</p> $f(BSF) = \frac{BSF}{BSF + Kbsf}, \quad Kbsf : \text{半飽和定数}(1 \sim 200 [\text{gC m}^{-2}])$
呼吸・排泄	<p>呼吸・排泄速度 (BS_3) は摂食量に依存する活動呼吸と現存量に依存する静止呼吸からなるものとしてモデル化</p> $BS_3 = ARESbsf \cdot BS_1 + RRESbsf \cdot f(T)$ $f(T) = \exp(Q10Rbsf \cdot (T - T_{base}))$ <p>$ARESbsf$: 摂餌量に対する活動呼吸の割合</p> <p>$RRESbsf$: 静止排泄 (呼吸) 速度</p> <p>$Q10Rbsf$: 温度係数 (0.15 ($T < T_{base} < T$) 0.08)</p>
排糞	<p>排糞速度 (BS_2) は摂餌量のうち同化されずに排泄される割合としてモデル化</p> $BS_2 = (1 - ASSlbsf) \cdot BS_1, \quad ASSlbsf : \text{同化係数}$
死亡	<p>死亡速度 (BS_4) は自然死亡と溶存酸素濃度の低下によるストレス死によるものとしてモデル化</p> $BS_4 = MORTbsf \cdot \exp(Q10Mbsf \cdot (T - T_{base})) + SMORTbsf \cdot (1 - f(DO))$ <p>$MORTbsf$: 自然死亡速度</p> <p>$Q10Mbsf$: 温度係数</p> <p>$SMORTbsf$: 低酸素化による死亡速度係数</p>
漁獲	漁獲実績から設定 (今回は 0)
被食	堆積物食者の摂餌を参照

⑩. 堆積物食者：BDF

堆積物食者に関する物質循環過程は、盤州干潟（環境省水環境部,2001）等の干潟生態系モデルで用いている考え方に基づいて定式化を行った。

$$\frac{dBDF}{dt} = \text{摂餌 (デトリタス、付着珪藻、堆積物食者、懸濁物食者)}$$

$$- \text{呼吸・排泄 - 排糞 - 死亡 - 被食 (堆積物食者、鳥類)}$$

物質循環過程	主なモデル式
摂餌	<p>摂餌速度 (BF_1) は、泥温 (T)、生息密度 (BDF)、餌料密度 ($FOODbdf$) に依存するものとしてモデル化</p> $BF_1 = G \max bdf \cdot CORWbdf \cdot f(T) \cdot f(BDF) \cdot f(FOODbdf)$ <p>$G \max bdf$: 摂餌速度</p> $f(T) = \exp(Q10Gbdf \cdot (T - T_{base}))$ <p>$Q10Gbdf$: 温度係数</p> $f(BDF) = \frac{BDF}{BDF + Kbdf}$ <p>$Kbdf$: 半飽和定数 (5.0~20.0[gC m⁻²])</p> <p>$f(FOODbdf)$ は、半飽和型の関数でモデル化</p>
呼吸・排泄	<p>呼吸・排泄速度 (BF_3) は摂食量に依存する活動呼吸と現存量に依存する静止呼吸からなるものとしてモデル化</p> $BF_3 = ARESbdf \cdot BF_1 + RRESbdf \cdot \exp(Q10Rbdf \cdot (T - T_{base}))$ <p>$ARESbdf$: 摂餌量に対する活動呼吸の割合</p> <p>$RRESbdf$: 静止排泄 (呼吸) 速度</p> <p>$Q10Rbdf$: 静止呼吸 (排泄) 速度の温度係数</p>
排糞	<p>排糞速度 (BF_2) は摂餌量のうち同化されずに排泄される割合としてモデル化</p> $BF_2 = (1 - ASSIbdf) \cdot BF_1$ <p>$ASSIbdf$: 同化係数</p>
死亡	<p>死亡速度 (BF_4) は、自然死亡速度と溶存酸素濃度(DO)の低下によるストレス死によるものとしてモデル化</p> $BF_4 = MORTbdf \cdot \exp(Q10Mbdf \cdot (T - T_{base})) + SMORTbdf \cdot (1 - f(DO))$ <p>$MORTbdf$: 自然死亡速度</p> <p>$Q10Mbdf$: 温度係数</p> <p>$SMORTbdf$: 低酸素化による死亡速度係数</p>
被食	被食については、堆積物食者の摂餌を考慮 (鳥類は0)

⑰. 水草：WEED

$$\frac{dWEED}{dt} = \text{光合成} - \text{呼吸} - \text{細胞外分泌} - \text{枯死} - \text{除去}$$

物質循環過程	主なモデル式
光合成	<p>光合成速度 (BD_1) は、泥温 (T)、光量 (I)、水中の栄養塩 (PN, PP) に依存するものとしてモデル化</p> $BD_1 = \mu_{max\ weed} \cdot f(T) \cdot f(I) \cdot [f(PN, PP)]$ <p>$\mu_{max\ weed}$: 比最大光合成速度</p> $f(T) = \exp(-0.01 \cdot (T - T_{opt_{weed}})^2)$ <p>$T_{opt_{weed}}$: 最適温度</p> $f(I) = \frac{I}{K_{iweed} + I}$ <p>K_{iweed} : 光量の半飽和定数</p> <p>$f(PN, PP)$ (栄養塩依存項) については、半飽和型の関数を用い、無機態窒素, 無機態リンの相対的に濃度が不足する方に支配される現象を再現</p>
呼吸	<p>呼吸速度 (BD_3) は、光合成量に依存する部分と現存量と水温 (T) に依存する部分 (静止呼吸) からなるものとしてモデル化</p> $BD_3 = ARES_{weed} \cdot BD_1 + RRES_{weed} \cdot \exp(Q_{10R_{weed}} \cdot (T - T_{weed}))$ <p>$ARES_{weed}$: 光合成に対応した呼吸の割合</p> <p>$RRES_{weed}$: 相対的静止排泄速度</p> <p>$Q_{10R_{weed}}$: 温度係数</p>
細胞外分泌	<p>細胞外分泌速度 (BD_2) は、光合成量に対して一定の割合が細胞外分泌するものとして設定</p> $BD_2 = EXC_{weed} \cdot BD_1$ <p>EXC_{weed} : 細胞外分泌の割合</p>
枯死	<p>枯死速度 (BD_4) は、水温 (T) に依存するものとしてモデル化</p> $BD_4 = MORT_{weed} \cdot \exp(Q_{10M_{weed}} \cdot (T - T_{weed}))$ <p>$MORT_{weed}$: 枯死速度</p> <p>$Q_{10M_{weed}}$: 温度係数</p>
除去	人為的除去を既存知見に基づいて設定

(2) パラメータ

①. 水質予測サブモデルパラメータ

計算に用いた水質予測サブモデルの生化学パラメータを表 4.3に示す。

表 4.3 (1) 植物プランクトンに関するパラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
■植物プランクトン			
比光合成速度(0°C)	1/day	4.2(22°C)	M
光合成に関する温度係数	-	-0.004	環
呼吸速度(0°C)	1/day	0.01	(10), 環
呼吸に関する温度係数	-	0.0524	(4), 環
枯死速度(0°C)	1/day	0.01	(10), 環
枯死に関する温度係数	-	0.0693	(4), 環
光合成に対するリン酸態リンの半飽和値	mg/L	0.001	環
光合成に対するアンモニア態窒素の半飽和値	mg/L	0.02	環
光合成に対する硝酸態窒素の半飽和値	mg/L	0.02	環
光合成量に対する分泌の割合	-	0.12	(3), 環
最適光量	MJ/m ² /day	8.56	(2), 環
消散係数	-	0.0275*Chla+0.4105	環
炭素/クロロフィル a 比	-	47.6	(2), 環
植物プランクトン中の易分解性有機物の割合	-	0.90	(10), 環
沈降速度	m/day	0.1	環

M はモデルチューニングを示す。

表 4.3(2) 動物プランクトンに関するパラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
■動物プランクトン			
最大摂餌速度(0°C)	1/day	0.10	M
摂餌に関する温度係数	-	0.0693	(2), 環
摂餌の閾値	mg/L	0.1	(6), 環
Ivlev 定数	L/mgC	5.0	(6), 環
同化係数	-	0.7	(2), 環
呼吸速度(0°C)	1/day	0.01	(10), 環
呼吸に関する温度係数	-	0.0524	(10), 環
死亡速度(0°C)	1/day	0.05	M
死亡に関する温度係数	-	0.0693	(2), 環

M はモデルチューニングを示す。

表 4.3(3) 懸濁態有機物に関するパラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
■懸濁態有機物			
POC _{fast} の分解速度(0°C)	1/day	0.040	(10), 環
POC _{slow} の分解速度(0°C)	1/day	0.003	(10), 環
POC _{refractory} の分解速度(0°C)	1/day	0.000	(10), 環
POC の分解に関する温度係数	-	0.07	(10), 環
PON _{fast} の分解速度(0°C)	1/day	0.040	(10), 環
PON _{slow} の分解速度(0°C)	1/day	0.003	(10), 環
PON _{refractory} の分解速度(0°C)	1/day	0.000	(10), 環
PON の分解に関する温度係数	-	0.07	(10), 環
POP _{fast} の分解速度(0°C)	1/day	0.040	(10), 環
POP _{slow} の分解速度(0°C)	1/day	0.003	(10), 環
POP _{refractory} の分解速度(0°C)	1/day	0.000	(10), 環
POP の分解に関する温度係数	-	0.07	(10), 環
POM の沈降速度	m/day	0.3	環

M はモデルチューニングを示す。

表 4.3(4) 溶存態有機物に関するパラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
■溶存態有機物			
DOC _{fast} の分解速度(0°C)	1/day	0.01	環
DOC _{slow} の分解速度(0°C)	1/day	0.001	環
DOC _{refractory} の分解速度(0°C)	1/day	0.000	(10), 環
DOC の分解に関する温度係数	-	0.0693	(4), 環
DON _{fast} の分解速度(0°C)	1/day	0.01	環
DON _{slow} の分解速度(0°C)	1/day	0.001	環
DON _{refractory} の分解速度(0°C)	1/day	0.000	(10), 環
DON の分解に関する温度係数	-	0.0693	(4), 環
DOP _{fast} の分解速度(0°C)	1/day	0.01	環
DOP _{slow} の分解速度(0°C)	1/day	0.001	環
DOP _{refractory} の分解速度(0°C)	1/day	0.000	(10), 環
DOP の分解に関する温度係数	-	0.0693	(4), 環
懸濁態有機炭素の分解・無機化量に対する溶存化の割合	-	0.1	M
懸濁態有機窒素の分解・無機化量に対する溶存化の割合	-	0.1	M
懸濁態有機リンの分解・無機化量に対する溶存化の割合	-	0.1	M

M はモデルチューニングを示す。

表 4.3(5) 溶存酸素に関するパラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
■溶存酸素			
植物プランクトンの OC 比(重量比)	-	3.51	M
動物プランクトンの OC 比(重量比)	-	3.51	(2), 環
懸濁態有機物の好氣的分解・無機化に対する溶存酸素の半飽和値	mg/L	0.099	(7), 環
溶存態有機物の好氣的分解・無機化に対する溶存酸素の半飽和値	mg/L	0.099	(7), 環
ODU の酸化速度	1/day	135.0	(8), 環
再ばっ気速度	m/day	1.0	M

M はモデルチューニングを示す。

表 4.3(6) その他のパラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
植物プランクトンの CN 比(重量)	-	6.1	(2), 環
動物プランクトンの CN 比(重量)	-	5.4	(2), 環
植物プランクトンの NP 比(重量)	-	6.6	(10), 環
動物プランクトンの NP 比(重量)	-	8.5	(2), 環
最大硝化速度(0°C)	1/day	0.003	環
硝化に関する温度係数	-	0.0693	環
硝化に対する溶存酸素の半飽和値	mg/L	0.5	環

M はモデルチューニングを示す。

②. 底質予測サブモデルパラメータ

計算に用いた底質予測サブモデルの生化学パラメータを表 4.4に示す。

表 4.4 (1) 底質予測に用いた生化学パラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
易分解性有機態炭素の分解速度定数 (i=1)(0°C)	1/h	0.000500	(15), 環
難分解性有機態炭素の分解速度定数 (i=2)(0°C)	1/h	0.00001710	(14), 環
不活性有機態炭素の分解速度定数 (i=3)(0°C)	1/h	0.00000007	(14), 環
易分解性有機態窒素の分解速度定数 (i=1)(0°C)	1/h	0.000500	(15), 環
難分解性有機態窒素の分解速度定数 (i=2)(0°C)	1/h	0.00001820	(14), 環
不活性有機態窒素の分解速度定数 (i=3)(0°C)	1/h	0.00000025	(14), 環
易分解性有機態リンの分解速度定数 (i=1)(0°C)	1/h	0.000500	(15), 環
難分解性有機態リンの分解速度定数 (i=2)(0°C)	1/h	0.00005000	(10), 環
不活性有機態リンの分解速度定数 (i=3)(0°C)	1/h	0.00000050	(10), 環
微生物の温度係数	-	0.0693	(15), 環
酸素還元に対する O ₂ の半飽和値	mgO/L	0.099	(12), 環
硝酸還元に対する NO ₃ の半飽和値	mgN/L	0.420	(12), 環
マンガン還元に対する MnO ₂ の半飽和値	mgMn/L	274.7	(12), 環
鉄還元に関する Fe(OH) ₃ の半飽和値	mgFe/L	698.1	(12), 環
硫酸還元に対する SO ₄ の半飽和値	mgS/L	51.9	(12), 環
酸素還元以外の無機化に対する O ₂ の半飽和値	mgO/L	0.320	M
硝酸還元以外の無機化に対する NO ₃ の半飽和値	mgN/L	0.140	(12), 環
マンガン還元以外の無機化に対する MnO ₂ の半飽和値	mgMn/L	274.7	(12), 環
鉄還元以外の無機化に対する Fe(OH) ₃ の半飽和値	mgFe/L	698.1	(12), 環
硫酸還元以外の無機化に対する SO ₄ の半飽和値	mgS/L	32.1	(12), 環
脱窒効率	-	0.75	M
硝化速度 (0°C)	1/h	0.003	(15), 環
硝化に対する O ₂ の半飽和値	mgO/L	0.032	(15), 環
Fe(OH) ₃ に吸着する PO ₄ のモル比	-	0.55	(16), 環

M はモデルチューニングを示す。

表 4.4(2) 底質予測に用いた生化学パラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
O ₂ による Mn ²⁺ の酸化速度	L/mgO/h	1.6875	(13), 環
O ₂ による Fe ²⁺ の酸化速度	L/mgO/h	56.2500	(13), 環
O ₂ による FeS の酸化速度	L/mgO/h	0.0675	(13), 環
O ₂ による FeS ₂ の酸化速度	L/mgO/h	0.0018	(13), 環
O ₂ による Σ H ₂ S の酸化速度	L/mgO/h	5.6250	(13), 環
O ₂ による CH ₄ の酸化速度	L/mgO/h	35.6771	(12), 環
MnO ₂ による Fe ²⁺ の酸化速度	L/mgMn/h	0.0011	(13), 環
MnO ₂ による Σ H ₂ S の酸化速度	L/mgMn/h	0.0002	(13), 環
Fe(OH) ₃ による Σ H ₂ S の酸化速度	L/mgS/h	0.0013	(13), 環
SO ₄ による CH ₄ の酸化速度	L/mgC/h	0.0001	(13), 環
FeS の沈殿速度	L/mgS/h	1.302	(10), 環
FeS の溶解速度	1/year	1.0	(12), 環
FeS の飽和濃度	μ M	6310	(12), 環
FeS と H ₂ S の反応速度(沈殿作用)	L/mgS/h	0.00001	(12), 環
FeS と S ⁰ の反応速度(沈殿作用)	L/mgS/h	0.3369	(12), 環
S ⁰ の水和速度	1/day	0.00003	(10), 環
S ⁰ の水和を抑制する H ₂ S 濃度	mgS/L	0.320	(13), 環

M はモデルチューニングを示す。

表 4.4(3) 底質予測に用いた溶存物質の拡散係数

パラメータ	単位	値	参考文献
NO ₃ の分子拡散係数 (0°C)	cm ² / day	0.845	(11), 環
NO ₃ の分子拡散係数に関する温度係数	cm ² / day/°C	0.0336	(11), 環
NH ₄ の分子拡散係数 (0°C)	cm ² / day	0.847	(11), 環
NH ₄ の分子拡散係数に関する温度係数	cm ² / day/°C	0.0336	(11), 環
O ₂ の分子拡散係数 (0°C)	cm ² / day	0.955	(11), 環
O ₂ の分子拡散係数に関する温度係数	cm ² / day/°C	0.0386	(11), 環
PO ₄ の分子拡散係数 (0°C)	cm ² / day	0.226	(17), 環
PO ₄ の分子拡散係数に関する温度係数	cm ² / day/°C	0.0124	(17), 環
SO ₄ の分子拡散係数 (0°C)	cm ² / day/°C	0.422	(12), 環
SO ₄ の分子拡散係数に関する温度係数	cm ² / day	0.0200	(12), 環
Mn ²⁺ の分子拡散係数 (0°C)	cm ² / day	0.296	(12), 環
Mn ²⁺ の分子拡散係数に関する温度係数	cm ² / day/°C	0.0124	(12), 環
Fe ²⁺ の分子拡散係数 (0°C)	cm ² / day	0.286	(12), 環
Fe ²⁺ の分子拡散係数に関する温度係数	cm ² / day/°C	0.0130	(12), 環
HS ⁻ の分子拡散係数 (0°C)	cm ² / day	0.899	(12), 環
HS ⁻ の分子拡散係数に関する温度係数	cm ² / day/°C	0.0236	(12), 環

M はモデルチューニングを示す。

③. 底生生物予測サブモデルパラメータ

計算に用いる底生生物予測サブモデルの生化学パラメータを表 4.5に示す。

表 4.5 (1) 付着藻類に関するパラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
最大成長速度	1/day	0.90	(18), 環
最適水温	°C	16.0	(18), 環
最適日射量	MJ/m ² /day	4.23	(18), 環
底泥内での日射の減数係数	1/cm	5.0	(10), 環
日射に対する自己遮蔽係数	mgC/g-dry	0.2	(10), 環
栄養塩のとりこみに対する窒素の半飽和定数	mg/L	0.042	(18), 環
栄養塩のとりこみに対するリンの半飽和定数	mg/L	0.004	(18), 環
光合成に占める呼吸の割合	-	0.10	(10), 環
相対静止排泄速度	1/day	0.01	(18), 環
相対静止呼吸に関する温度係数	-	0.0742	(18), 環
相対静止呼吸に対する基準温度	°C	20.0	(18), 環
光合成に占める細胞外分泌の割合	-	0.43	(21), 環
枯死速度	1/day	0.010	(21), 環
枯死に関する温度係数	-	0.0693	(18), 環
枯死に対する基準温度	°C	20.0	(18), 環
バイオマスの CN 比(重量比)	-	5.7	(18), 環
バイオマスの CP 比(重量比)	-	57.57	(18), 環
バイオマスの OC 比(重量比)	-	3.42	(18), 環
バイオマス中の易分解性有機物の割合	-	1.00	(10), 環

M はモデルチューニングを示す。

表 4.5(2) 懸濁物食者に関するパラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
濾水速度(20°C)	m ³ /ind/d	0.12	環
重量	gC/ind	0.683	環
生息密度に対する半飽和定数	gC/m ³	80.0	(10), 環
濾水に対する温度係数	-	0.0412(<25°C) -0.4269(>25°C)	環
濾水に対する基準温度	°C	25.0	環
最大濾水係数	1/day	0.03	(20), 環
同化効率	-	0.45	環
濾水に伴う呼吸の割合	-	0.214	(21), 環
相対静止排泄速度	1/day	0.008	環
相対静止呼吸に関する温度係数	-	0.1135(<26.2°C) -0.1570(>26.2°C)	(18), 環
相対静止呼吸に対する基準温度	°C	26.2	(18), 環
自然死亡速度	1/day	0.001	(18), 環
貧酸素による死亡速度	1/day	0.2	環
自然死亡に関する温度係数	-	0.0693	(18), 環
自然死亡に対する基準温度	°C	20.0	(18), 環
必須溶存酸素量	mg/L	2.0	(21), 環
バイオマスの CN 比(重量比)	-	4.38	(18), 環
バイオマスの CP 比(重量比)	-	31.536	(18), 環
バイオマスの OC 比(重量比)	-	3.00	環
バイオマス中の易分解性有機物の割合	-	0.90	環

M はモデルチューニングを示す。

表 4.5(3) 堆積物食者に関するパラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
最大摂食速度	1/day	0.14	環
摂餌に関する温度係数	-	0.0405	(18), 環
摂餌に対する基準温度	°C	20.0	(18), 環
生息密度に対する半飽和値	gC/m ²	5.0	環
共食いに対する嗜好係数	-	0.01	環
同化効率	-	0.55	(21), 環
摂食に伴う呼吸の割合	-	0.20	環
相対静止排泄速度	1/day	0.008	(18), 環
相対静止呼吸に関する温度係数	-	20.0	(18), 環
相対静止呼吸に対する基準温度	°C	0.0742	(18), 環
自然死亡速度	1/day	0.008	環
自然死亡に関する温度係数	-	0.0693	(18), 環
自然死亡に対する基準温度	°C	20.0	(18), 環
貧酸素による死亡速度	1/day	0.2	環
必須溶存酸素量	mg/L	2.0	(21), 環
バイオマスの CN 比(重量比)	-	4.53	(18), 環
バイオマスの CP 比(重量比)	-	32.616	(18), 環
バイオマスの OC 比(重量比)	-	3.00	環
バイオマス中の易分解性有機物の割合	-	0.90	環

M はモデルチューニングを示す。

表 4.5(4) 水草に関するパラメータ

パラメータ	単位	値	参考文献
最大成長速度	1/day	3.0	M
最適水温	°C	22.0	M
光合成に対する水温の温度係数	-	-0.01	環
最適日射量	MJ/m ² /day	2.4	M
栄養塩のとりこみに対する窒素の半飽和定数	mg/L	0.042	環
栄養塩のとりこみに対するリンの半飽和定数	mg/L	0.005	環
光合成に占める呼吸の割合	-	0.002	M
相対静止排泄速度	1/day	0.003	環
相対静止呼吸に関する温度係数	-	0.0693	環
相対静止呼吸に対する基準温度	°C	20.0	環
光合成に占める細胞外分泌の割合	-	0.14	M
枯死速度	1/day	0.02	M
枯死に関する温度係数	-	0.0693	環
枯死に対する基準温度	°C	20.0	環
バイオマスの CN 比(重量比)	-	9.3	環
バイオマスの CP 比(重量比)	-	121.27	環
バイオマスの OC 比(重量比)	-	3.5	M
バイオマス中の易分解性有機物の割合	-	0.95	M

M はモデルチューニングを示す。

(3) 参考文献

①. モデル構築に用いた文献

■水質予測モデルの構築に引用した文献

- Eppley R.W. (1972) Temperature and phytoplankton growth in the sea. *Fish. Bull.*, 70, 1063-1085.
- 堀口文男・中田喜三郎 (1995) 東京湾の水質のモデル解析. *Journal of Advanced Marine Science and Technology Society*, Vol.1, No.1, 71-92.
- Watt W.D. (1966) Release of dissolved organic material from the cells of phytoplankton populations. *Proc. Roy. Soc. Ser. B*, Vol.164, 521-551.
- 堀口文男・中田喜三郎 (1993) 沿岸生態系モデルの実海域への適用—山口県西部海域の場合—. *資源と環境*, Vo.2, No.1, 61-92.
- 横山長之 (1993) 海洋環境シミュレーション-水の流れと生物-, 白亜書房.
- 中部国策空港建設事業及び空港島地域開発用地埋立造成事業に関する環境影響評価書. 中部国際空港株式会社.
- 気象庁気象業務支援センター (1999) 海洋観測指針 (第1部) .

■底質予測モデル (非生物項) の構築に引用した文献

- Soetaert K., Herman P.M.J. and Middelburg J.J. (1996) A model of early diagenetic processes from the shelf to abyssal depths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.60, No.6, pp.1019-1040.
- Wijsman J.W.M., Herman P.M.J., Middelburg J.J. and Soetaert K. (2002) A model for early diagenetic processes in sediments of the continental shelf of the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.54, pp.403-421.
- NERI Technical Report (2004) A model set-up for an oxygen and nutrient flux model for Aarhus Bay (Denmark), No.483, pp.1-67.
- 永尾謙太郎・日比野忠史・松本英雄 (2005) 広島湾における有機物の変動解析と栄養塩生成形態の把握. *海岸工学論文集*, 第52巻, pp.916-920.
- Sohma A., Sekiguchi Y. and Nakata K. (2004) Modeling and evaluating the ecosystem of sea-grass beds, shallow waters without sea-grass, and an oxygen-depleted offshore area. *Journal of Marine Systems*, Vol.45, pp.105-142.
- 小林節子・西村肇 (1991) 鉄の酸化、水酸化、吸着過程からみた底質からのリンの溶出機構. *水質汚濁研究*, 第14巻, 第4号, pp.253-260.
- Boudreau B.P. (1997) *Diagenetic Models and Their Implementation: Modelling Transport and Reactions in Aquatic Sediments*. Springer.

■底質予測モデル (生物項) の構築に引用した文献

- 平成12年度 藻場・干潟等の環境保全機能定量評価基礎調査報告書, 環境省水環境部.
- 平成16年度 人工干潟・浅場の水質浄化機能定量化手法確立試験における干潟底生生態系モデルシミュレーション業務報告書, 国土環境株式会社.
- 安岡澄人・畑恭子・芳川忍・中野拓治・白谷栄作・中田喜三郎 (2005) 有明海の泥質干潟・浅海域での窒素循環の定量化-泥質干潟域の浮遊系-底生系結合生態系モデルの開発-. *海洋理工学会誌*, Vol.11, No.1, pp.21-33.

②. モデルパラメータに用いた文献

- (2) 堀口文男・中田喜三郎 (1995) 東京湾の水質のモデル解析. *Journal of Advanced Marine Science and Technology Society*, Vol.1, No.1, 71-92.
 - (3) Watt W.D. (1966) Release of dissolved organic material from the cells of phytoplankton populations. *Proc. Roy. Soc. Ser. B*, Vol.164, 521-551.
 - (4) 堀口文男・中田喜三郎 (1993) 沿岸生態系モデルの実海域への適用ー山口県西部海域の場合ー. *資源と環境*, Vo.2, No.1, 61-92.
 - (6) 国土交通省関東地方整備局・国土交通省東京航空局 (2005) 東京国際空港再拡張事業に係る環境影響評価準備書.
 - (7) Wijsman J.W.M., Herman P.M.J., Middelburg J.J. and Soetaert K. (2002) A model for early diagenetic Processes in sediments of the continental shelf of the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.54, pp.403-421.
 - (8) NERI Technical Report (2004) A model set-up for an oxygen and nutrient flux model for Aarhus Bay (Denmark), No.483, pp.1-67.
 - (10) いであ株式会社 (2014) 平成 25 年度 閉鎖性海域水環境状況総合解析業務報告書.
 - (11) Soetaert K., Herman P.M.J. and Middelburg J.J. (1996) A model of early diagenetic processes from the shelf to abyssal depths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol.60, No.6, pp.1019-1040.
 - (12) Wijsman J.W.M., Herman P.M.J., Middelburg J.J. and Soetaert K. (2002) A model for early diagenetic processes in sediments of the continental shelf of the Black Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol.54, pp.403-421.
 - (13) NERI Technical Report (2004) A model set-up for an oxygen and nutrient flux model for Aarhus Bay (Denmark). No.483, pp.1-67.
 - (14) 永尾謙太郎・日比野忠史・松本英雄 (2005) 広島湾における有機物の変動解析と栄養塩生成形態の把握. *海岸工学論文集*, 第 52 巻, pp.916-920.
 - (15) Sohma A., Sekiguchi Y. and Nakata K. (2004) Modeling and evaluating the ecosystem of sea-grass beds, shallow waters without sea-grass, and an oxygen-depleted offshore area. *Journal of Marine Systems*, Vol.45, pp.105-142.
 - (16) 小林節子・西村肇 (1991) 鉄の酸化、水酸化、吸着過程からみた底質からのリンの溶出機構. *水質汚濁研究*, 第 14 巻, 第 4 号, pp.253-260.
 - (17) Boudreau B.P. (1997) *Diagenetic Models and Their Implementation: Modelling Transport and Reactions in Aquatic Sediments*. Springer.
 - (18) 平成 12 年度 藻場・干潟等の環境保全機能定量評価基礎調査報告書, 環境省水環境部.
 - (20) J. バレッタ & P. ルアルディ／編, 中田喜三郎／訳 (1995) 干潟の生態系モデル (沿岸生態系の解析 2) .
 - (21) 平成 16 年度 人工干潟・浅場の水質浄化機能定量化手法確立試験における干潟底生生態系モデルシミュレーション業務報告書, 愛知県水産試験場.
- 環 平成 29 年度環境省請負業務報告書 平成 29 年度湖沼水質保全対策調査検討業務報告書, 平成 30 年 3 月, いであ株式会社.

4.7 平面分布および鉛直分布（数値を白字）

「2.4.3 平面分布および鉛直分布」で示した平面分布図および鉛直分布図の、数値の色を白色にしたものを図 4.14に示す。

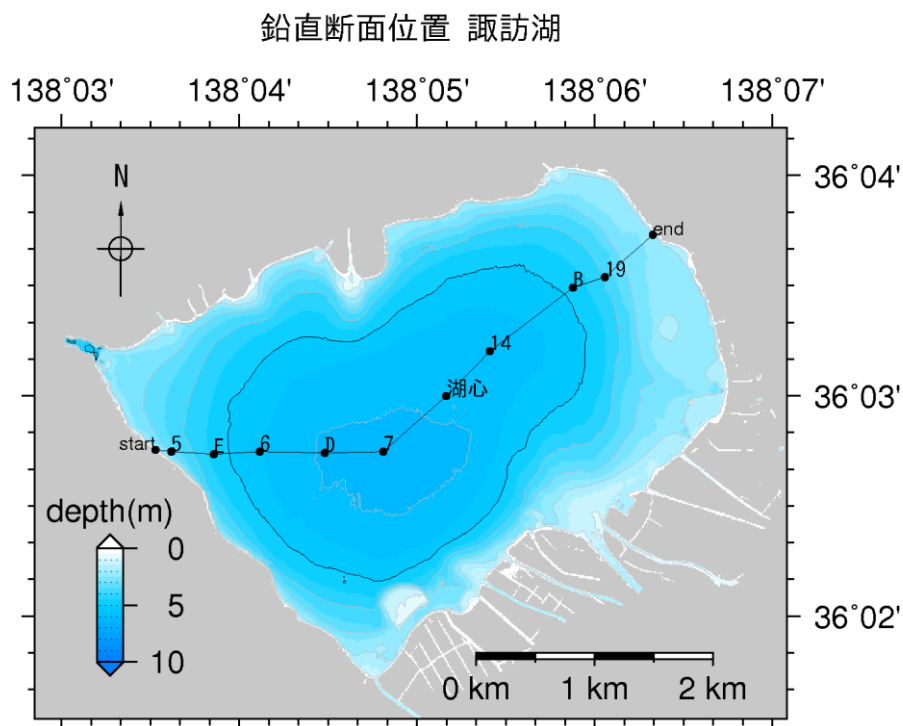


図 4.13 鉛直断面の位置【再掲】

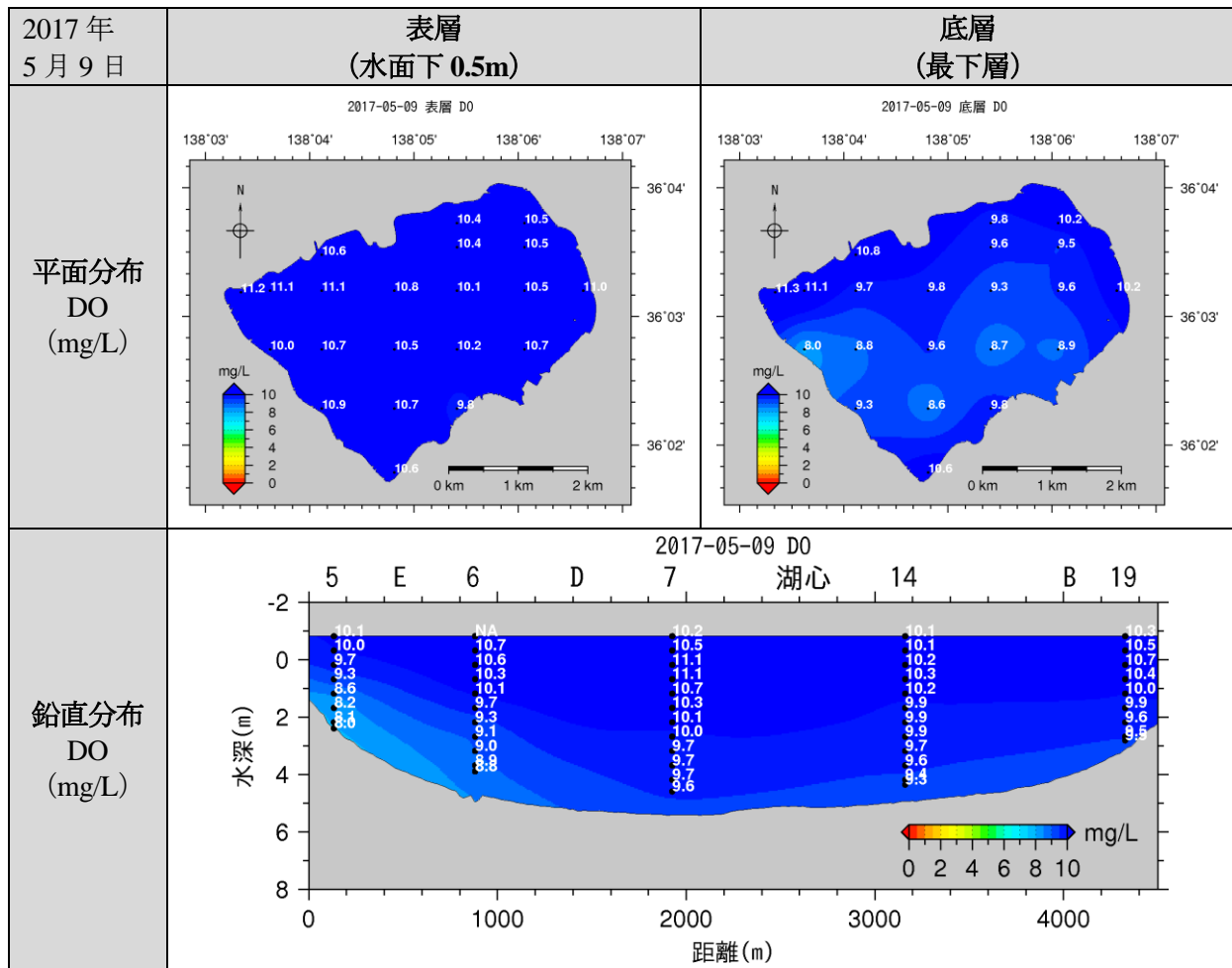
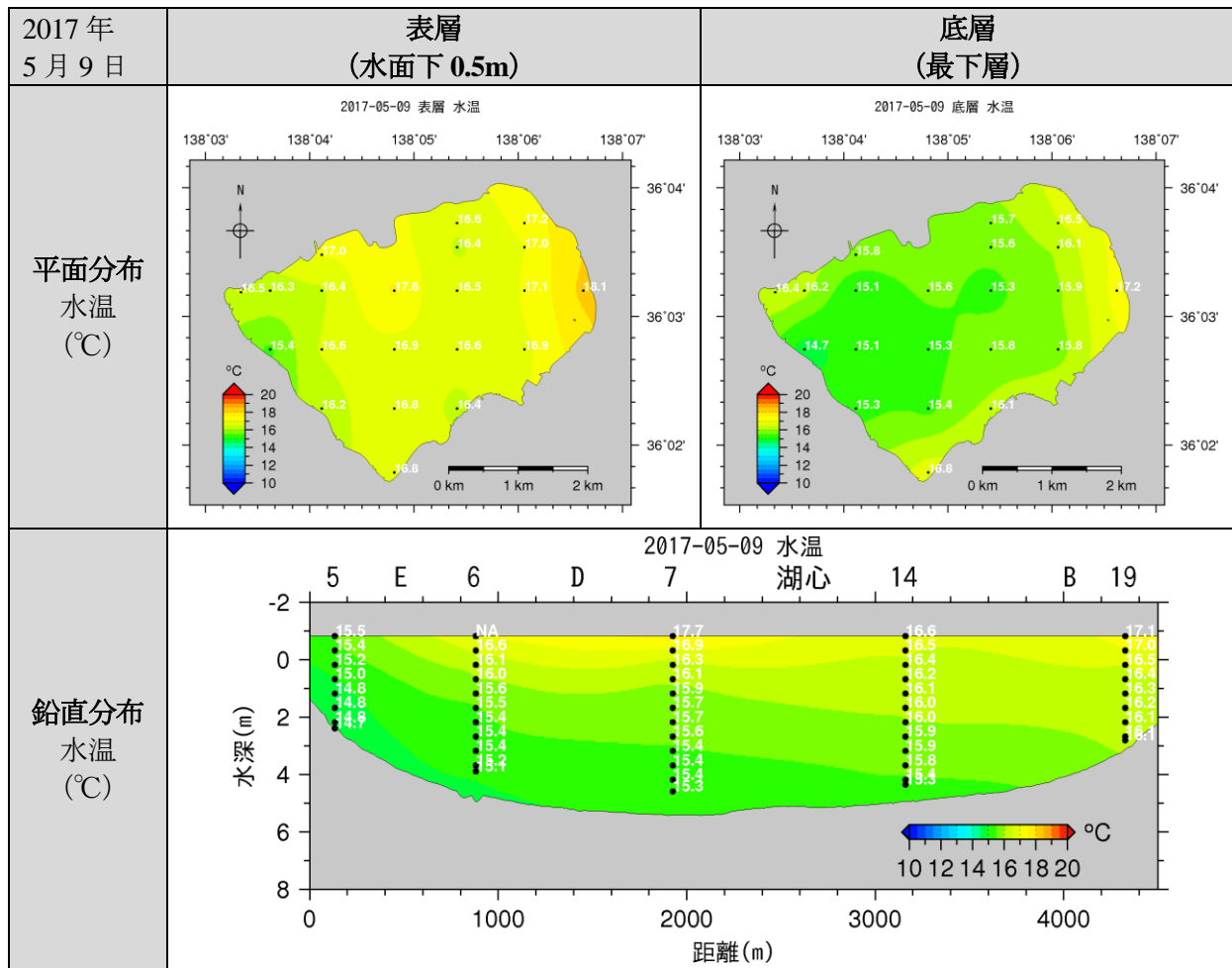


图 4.14(1) 平面・鉛直分布(2017年5月9日、DO)



※カラスケールに注意

図 4.14(2) 平面・鉛直分布(2017年5月9日、水温)

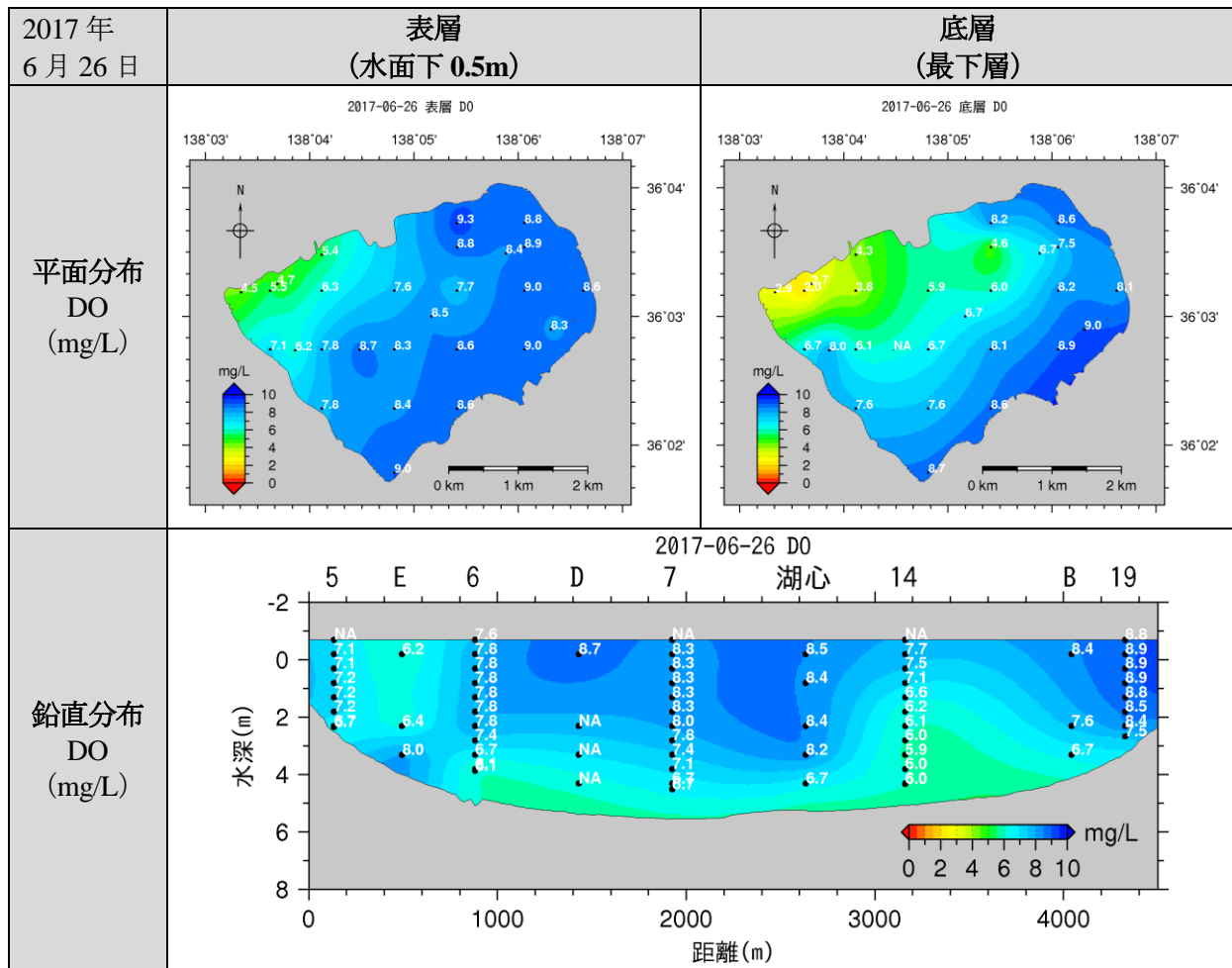


图 4.14(3) 平面·鉛直分布(2017年6月26日、DO)

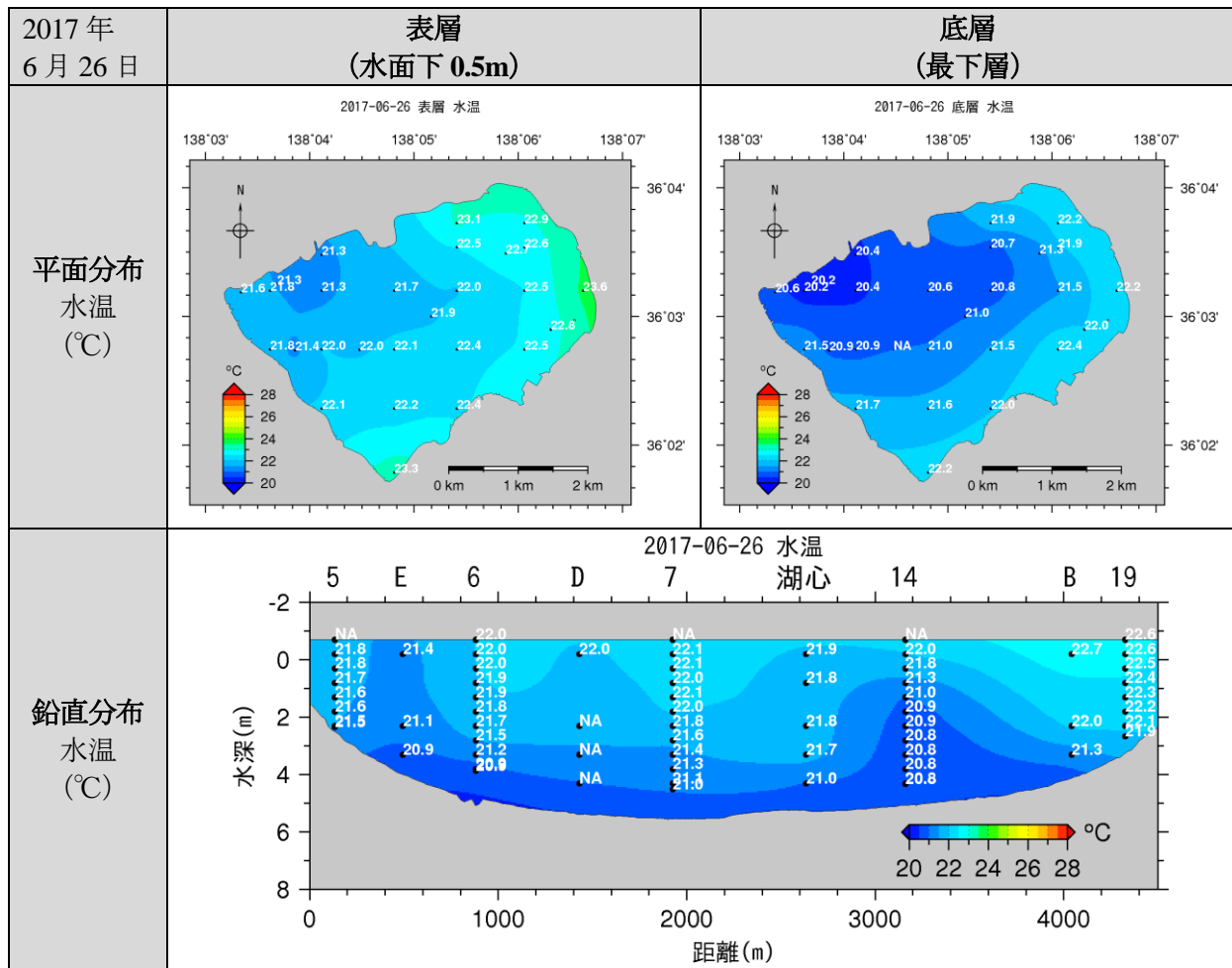


图 4.14(4) 平面・鉛直分布(2017年6月26日、水温)

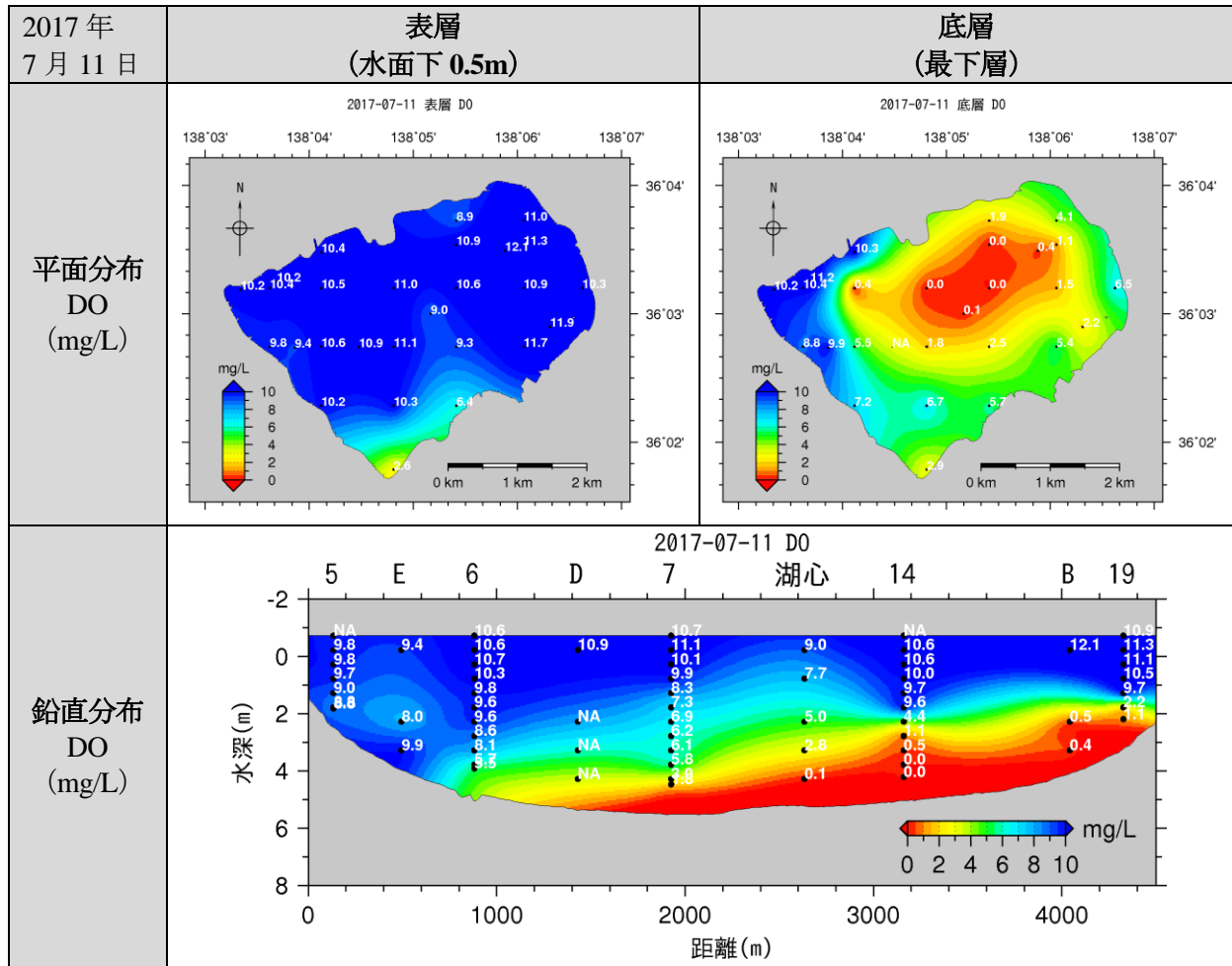


圖 4.14(5) 平面・鉛直分布(2017年7月11日、DO)

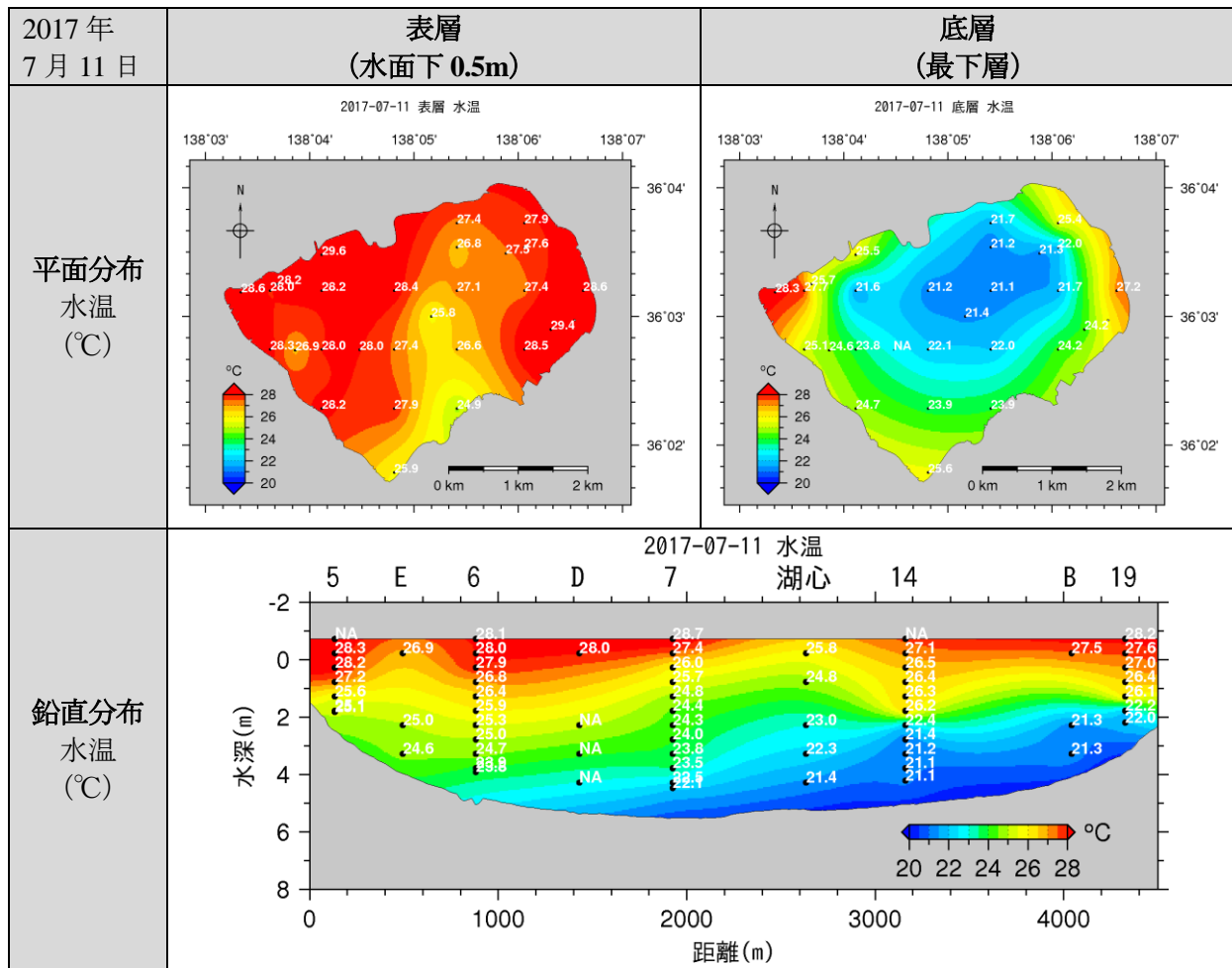


图 4.14(6) 平面・鉛直分布(2017年7月11日、水温)

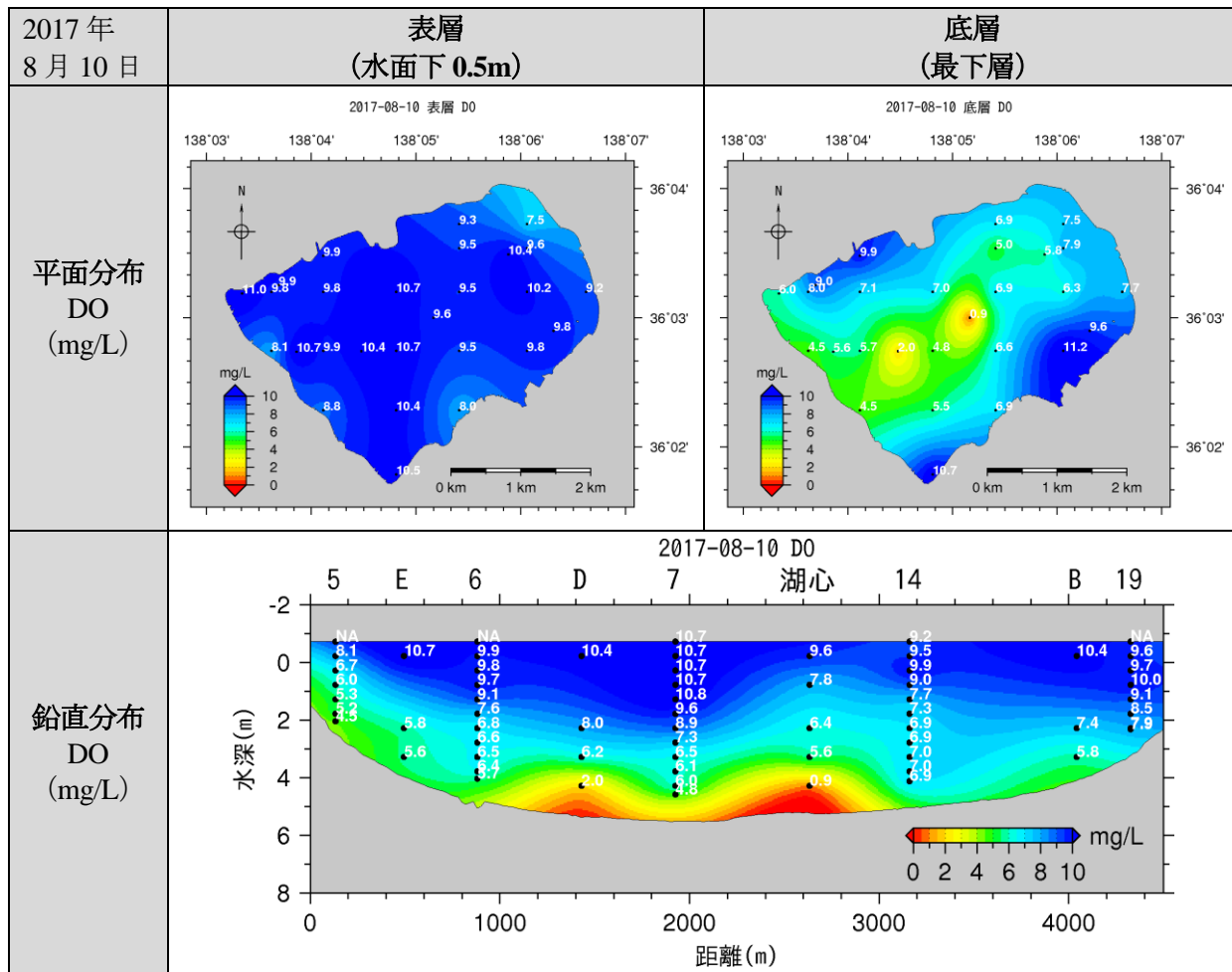


图 4.14(7) 平面・鉛直分布(2017年8月10日、DO)

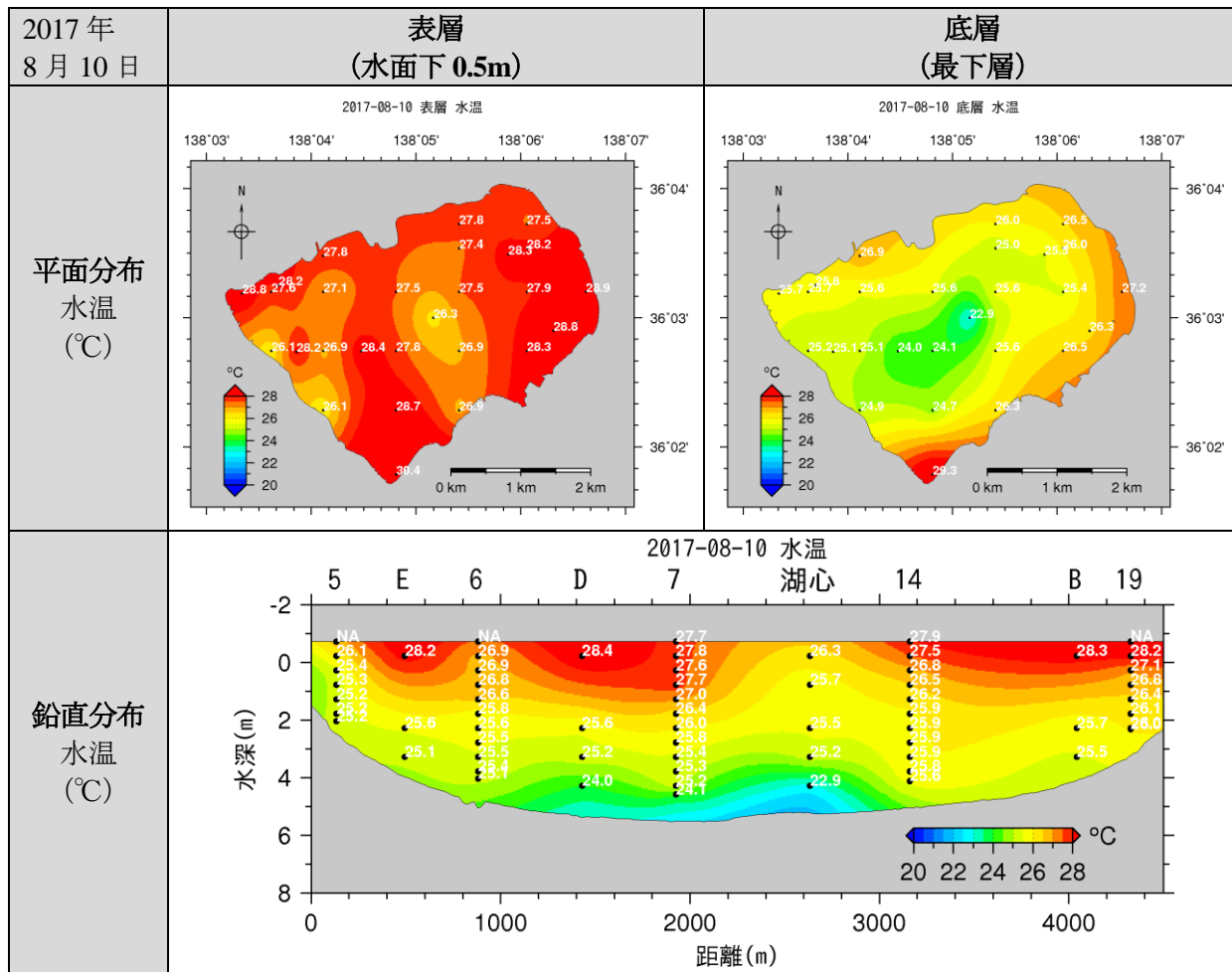


图 4.14(8) 平面・鉛直分布(2017年8月10日、水温)

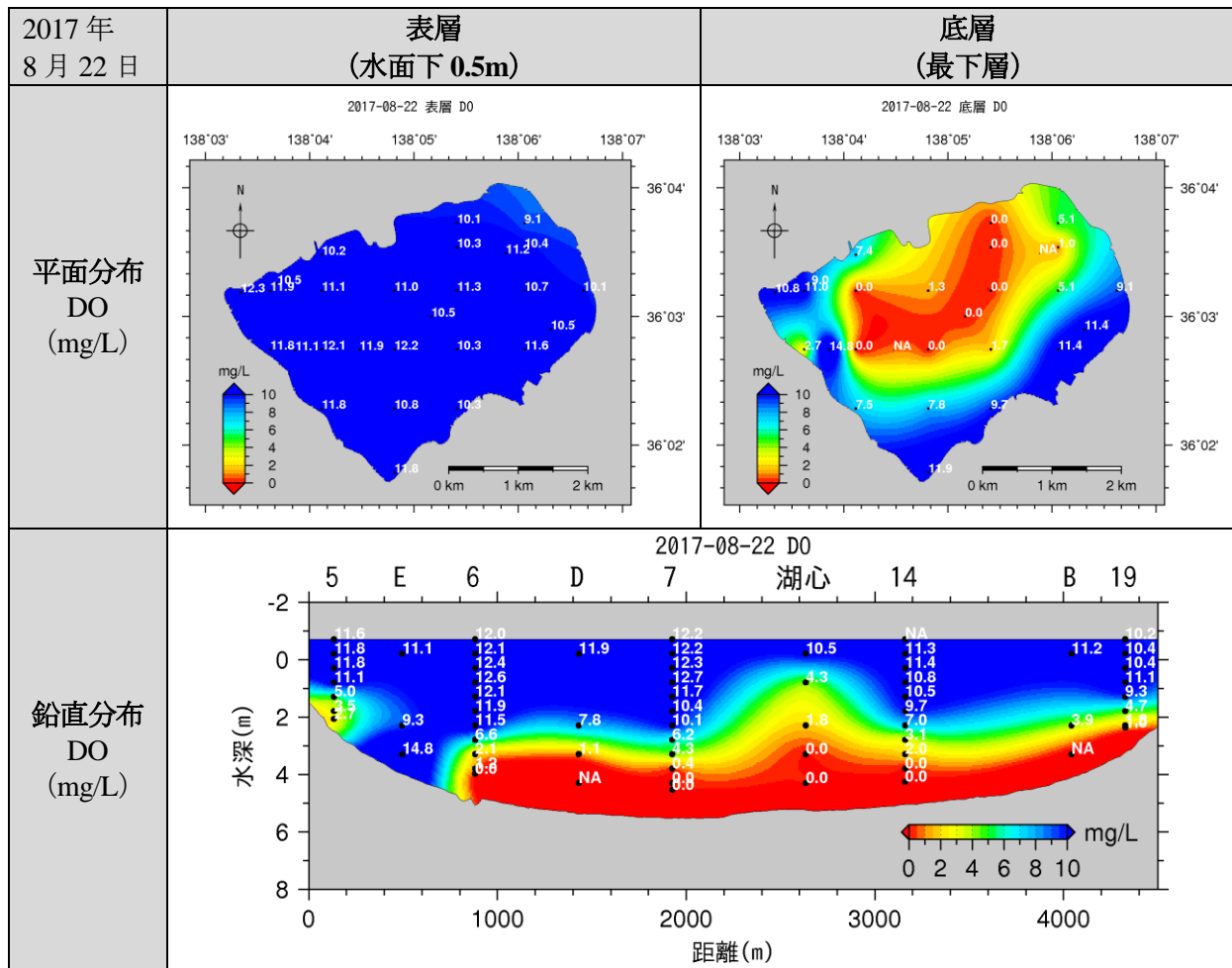


圖 4.14(9) 平面・鉛直分布(2017年8月22日、DO)

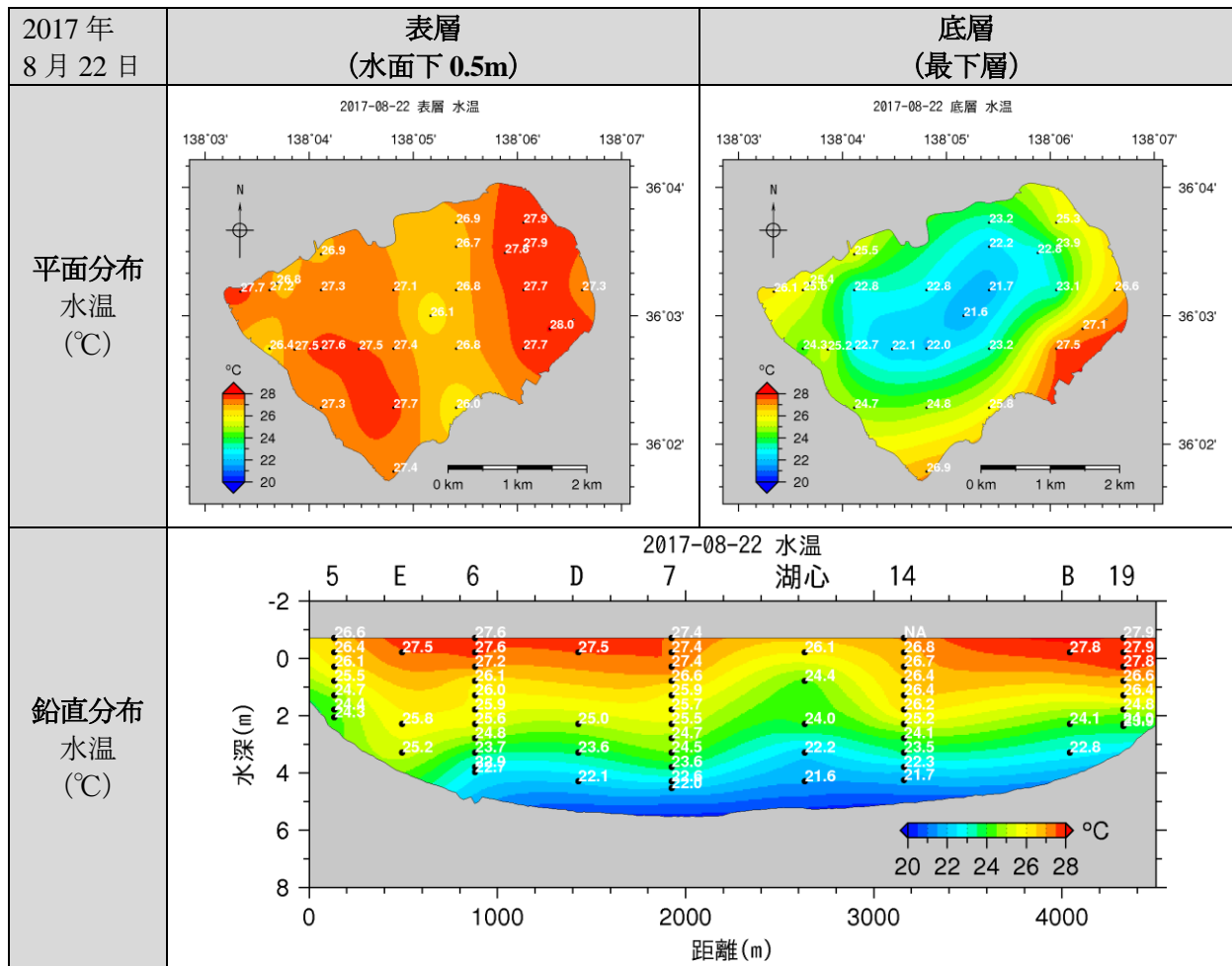


圖 4.14(10) 平面・鉛直分布(2017年8月22日、水温)

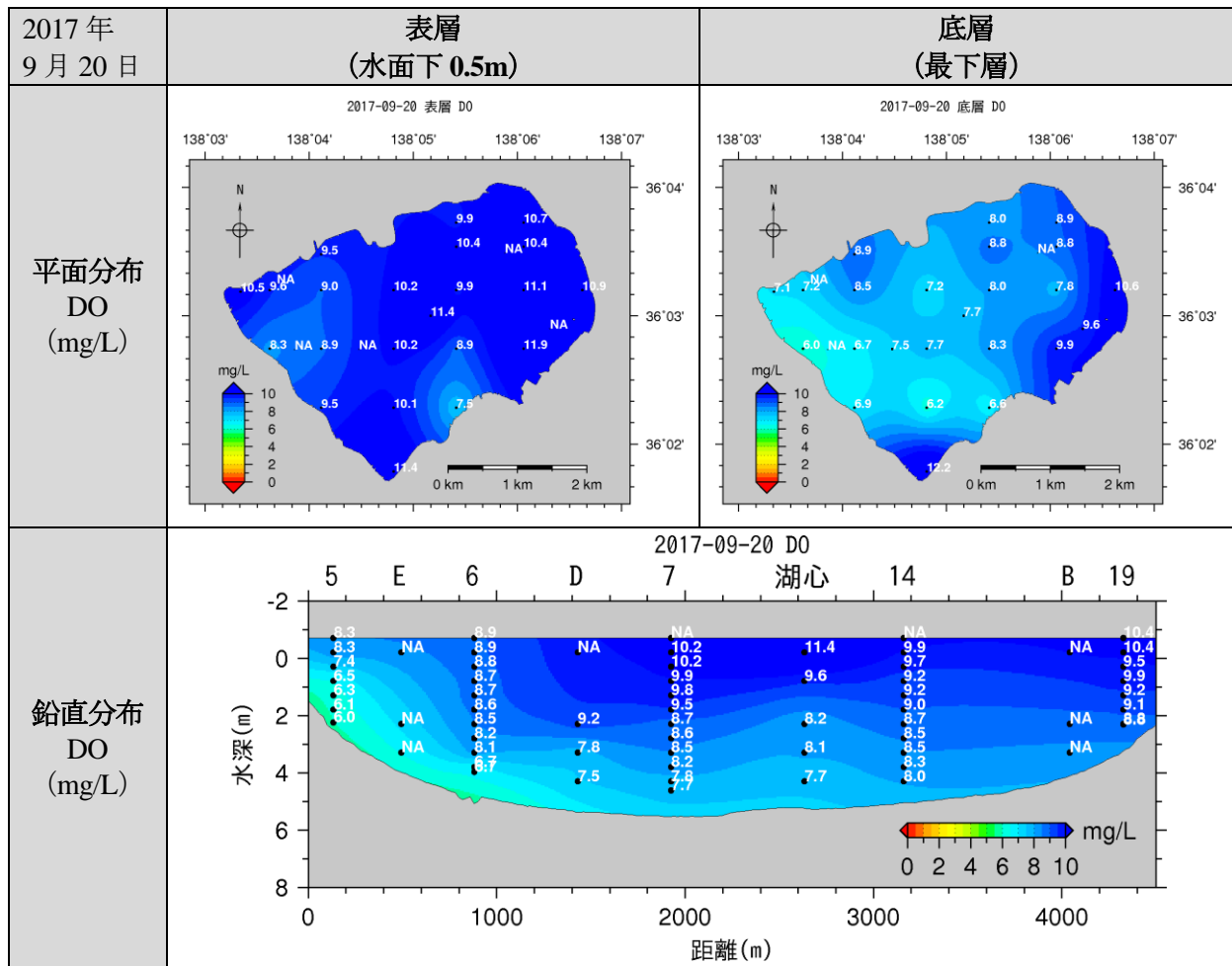


图 4.14(11) 平面・鉛直分布(2017年9月20日、DO)

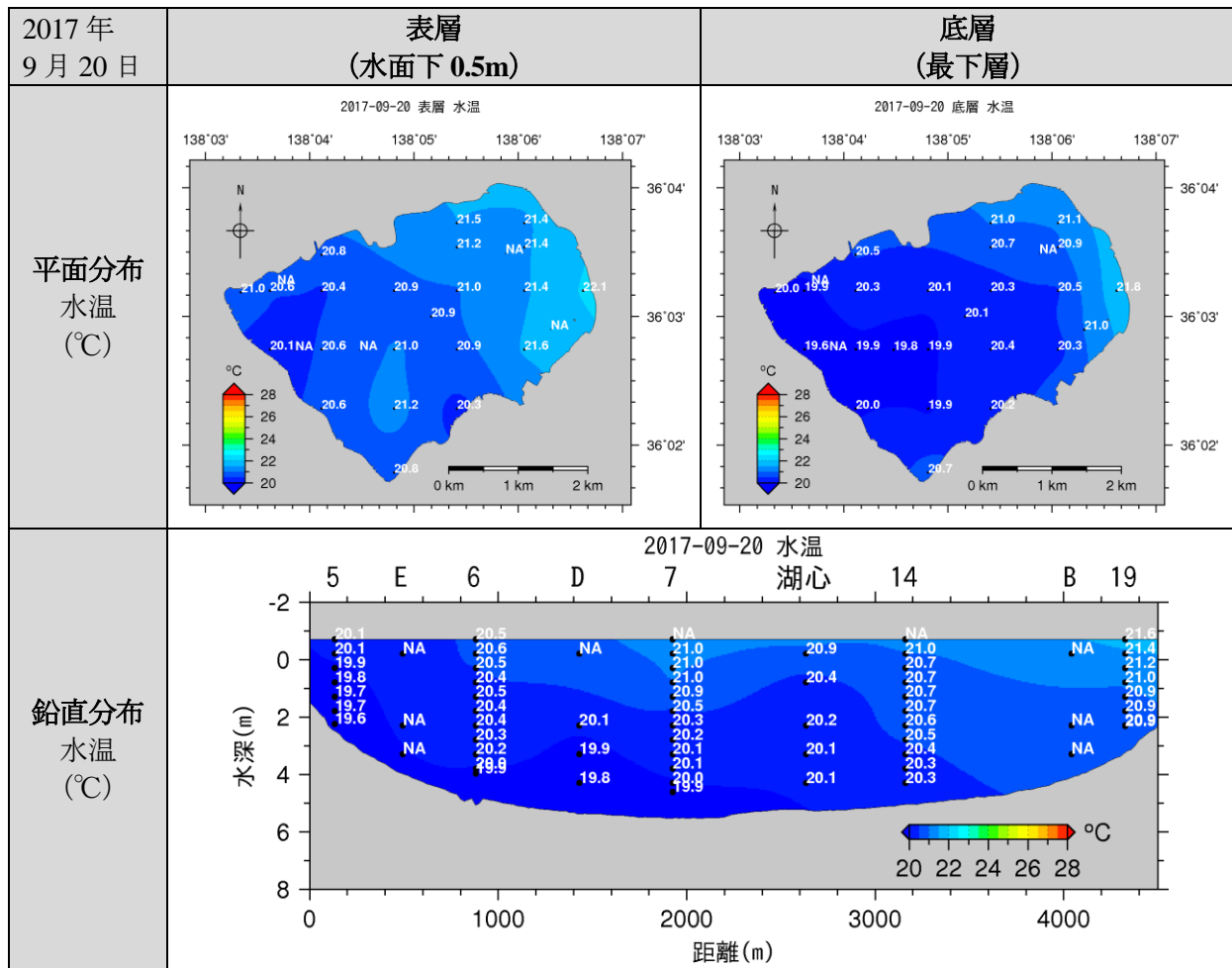


圖 4.14(12) 平面・鉛直分布(2017年9月20日、水温)

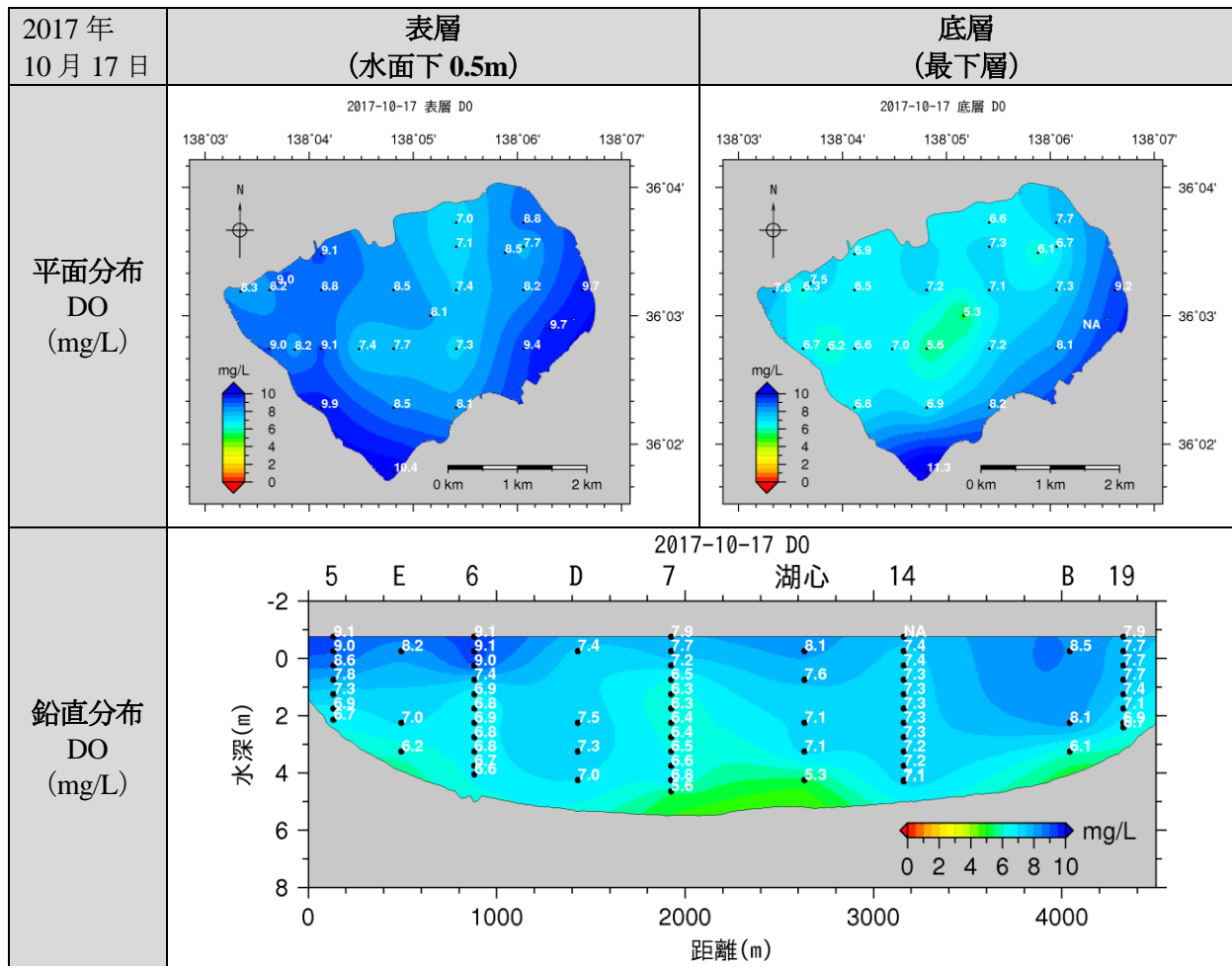
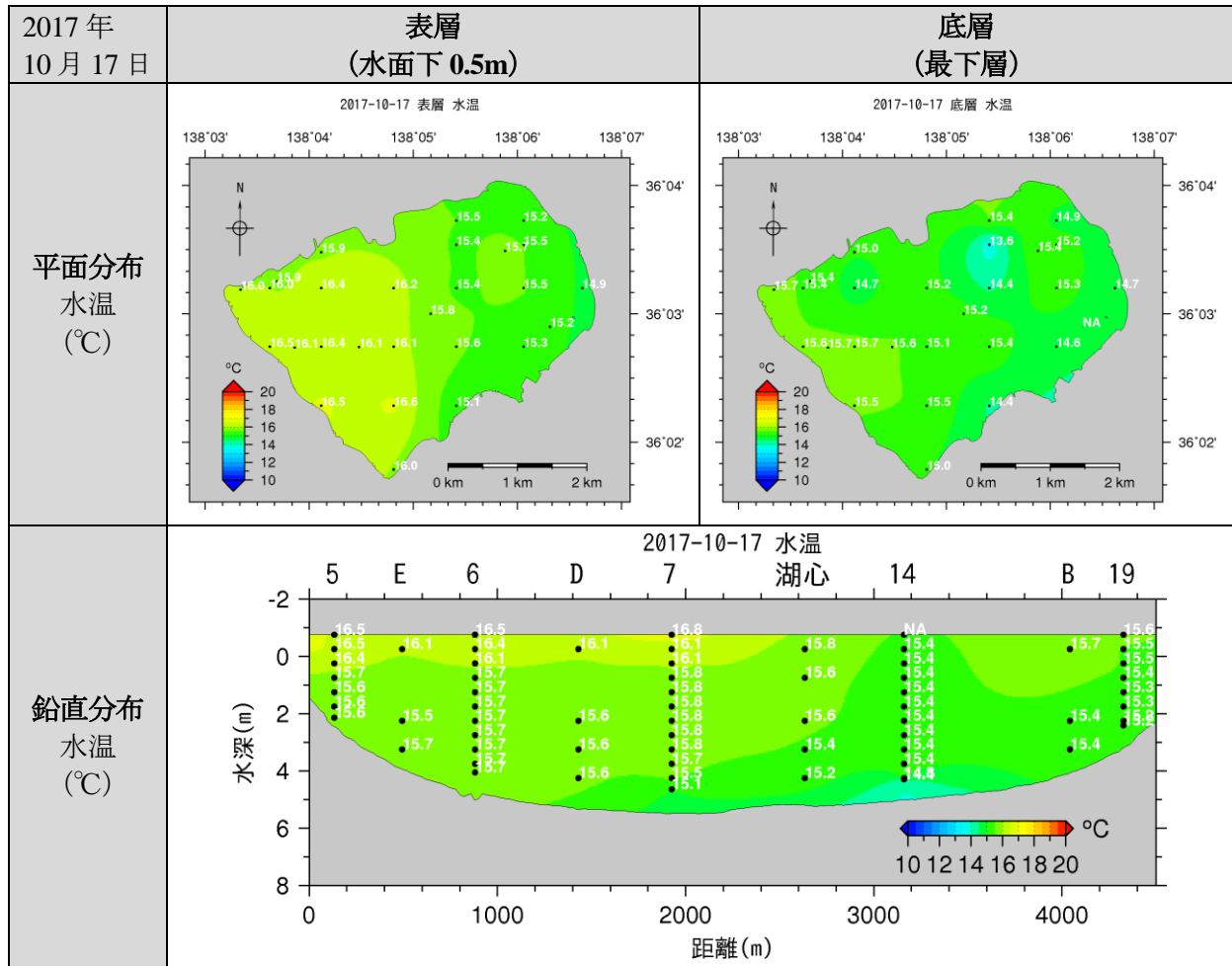


圖 4.14(13) 平面・鉛直分布(2017年10月17日、DO)



※カラスケールに注意

図 4.14(14) 平面・鉛直分布(2017年10月17日、水温)

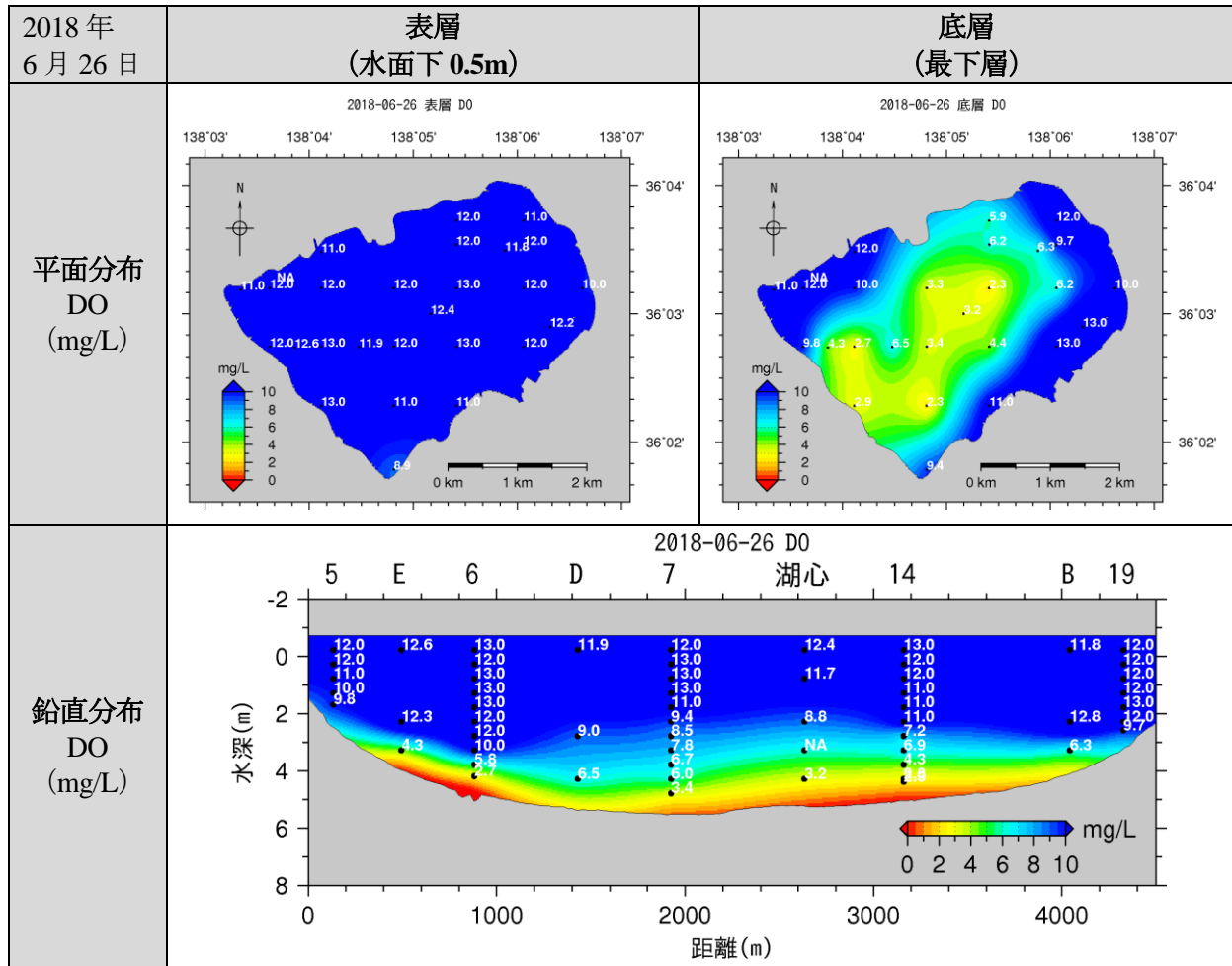


图 4.14(15) 平面·鉛直分布(2018年6月26日、DO)

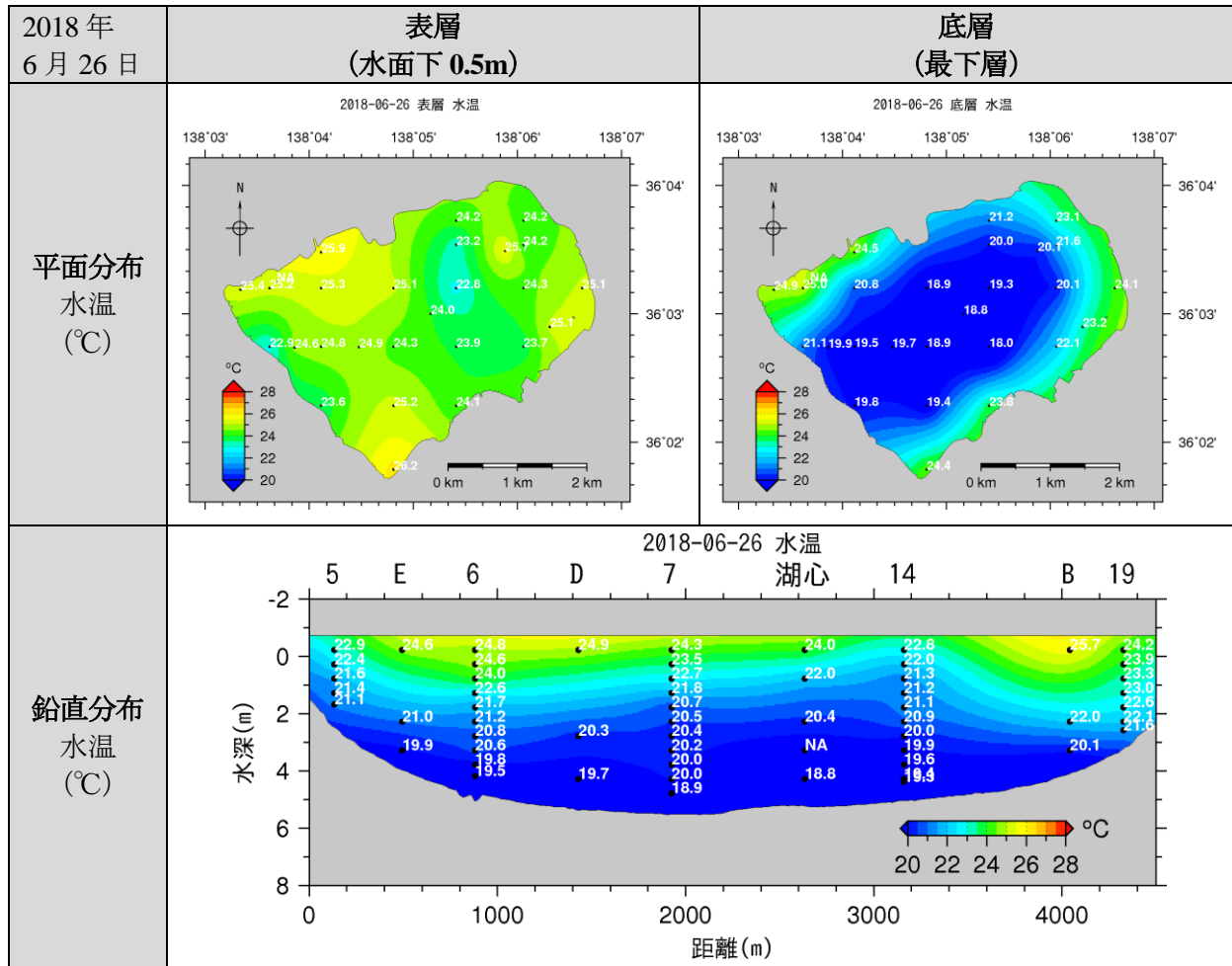


圖 4.14(16) 平面・鉛直分布(2018年6月26日、水温)

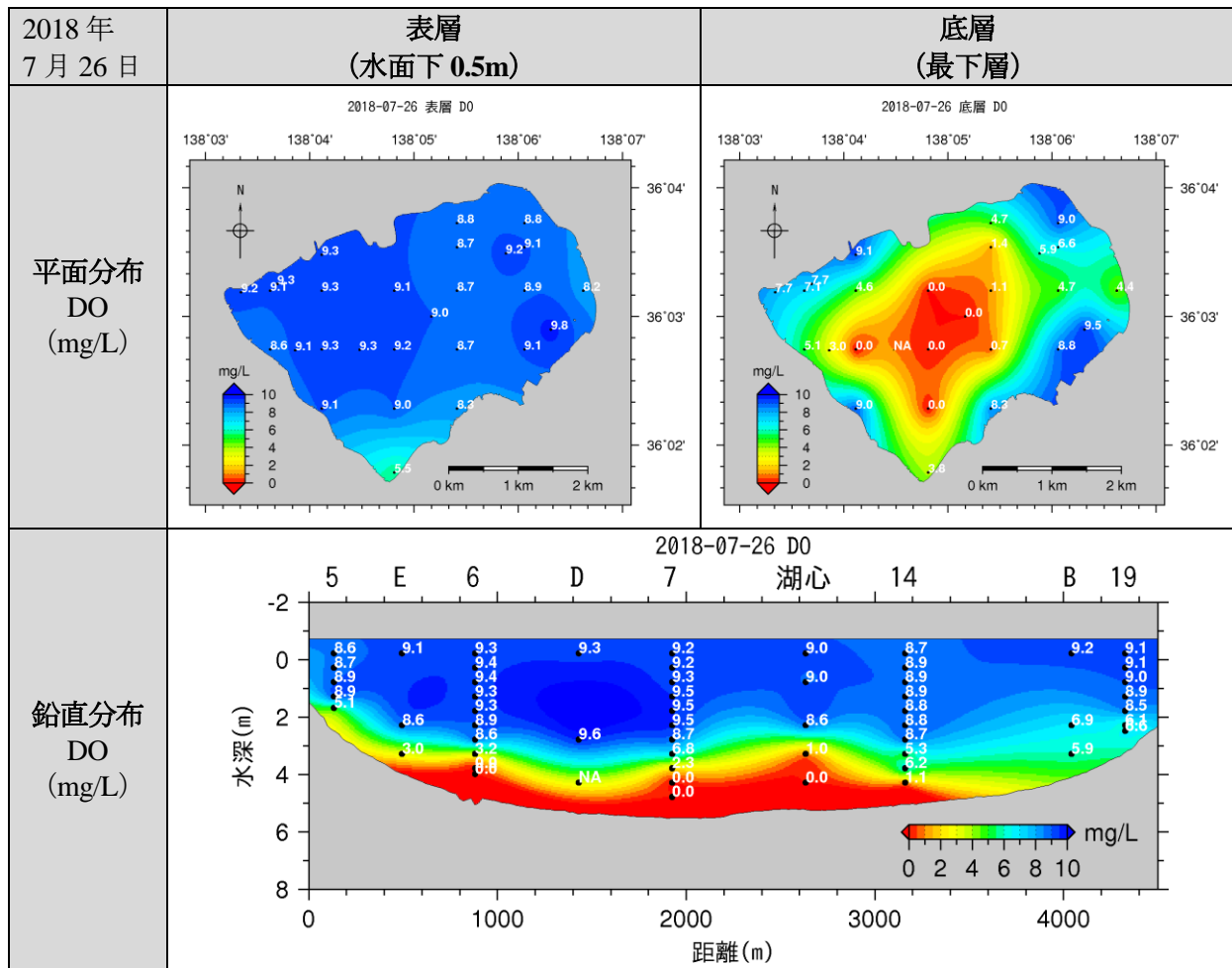


图 4.14(17) 平面·鉛直分布(2018年7月26日、DO)

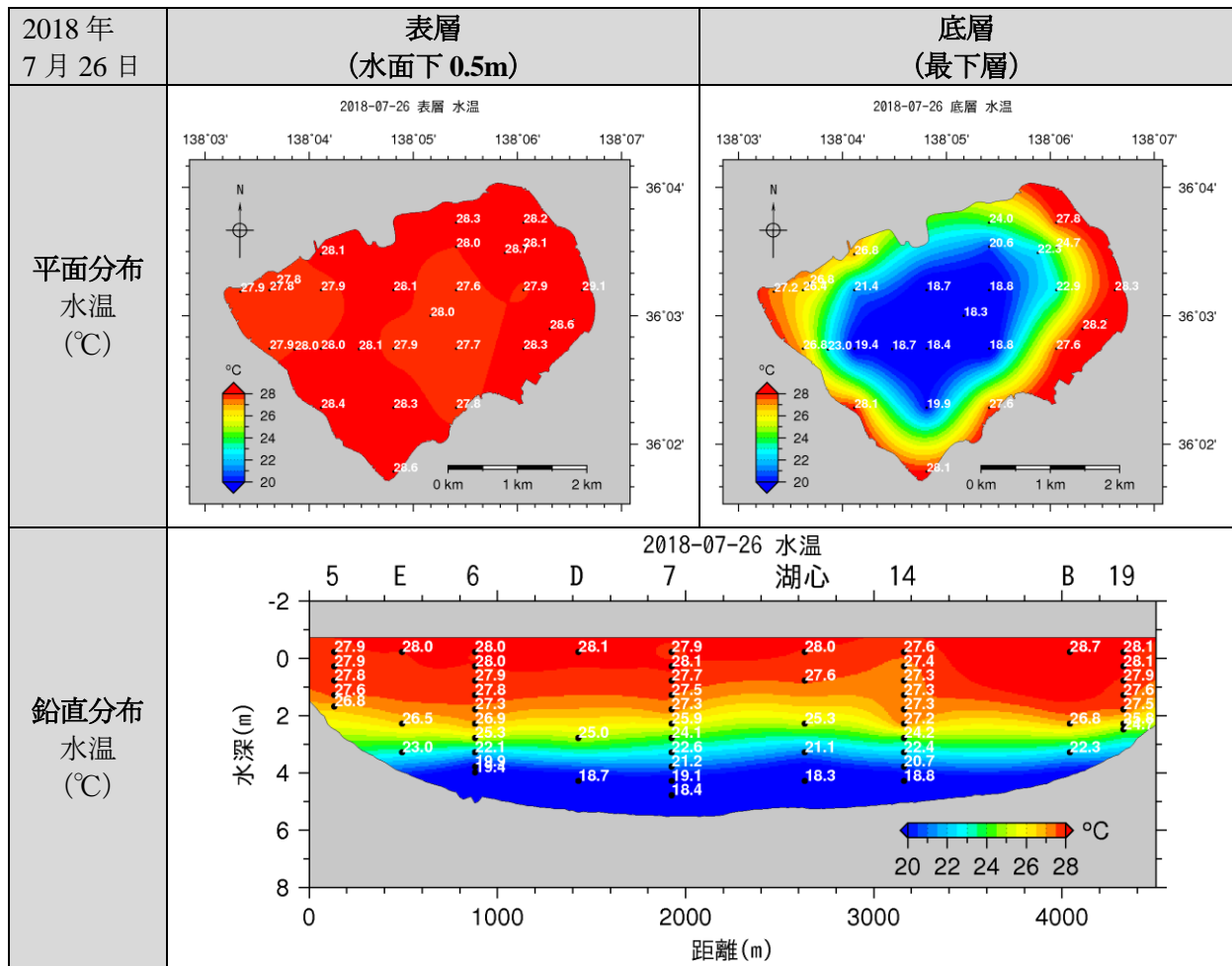


圖 4.14(18) 平面・鉛直分布(2018年7月26日、水温)

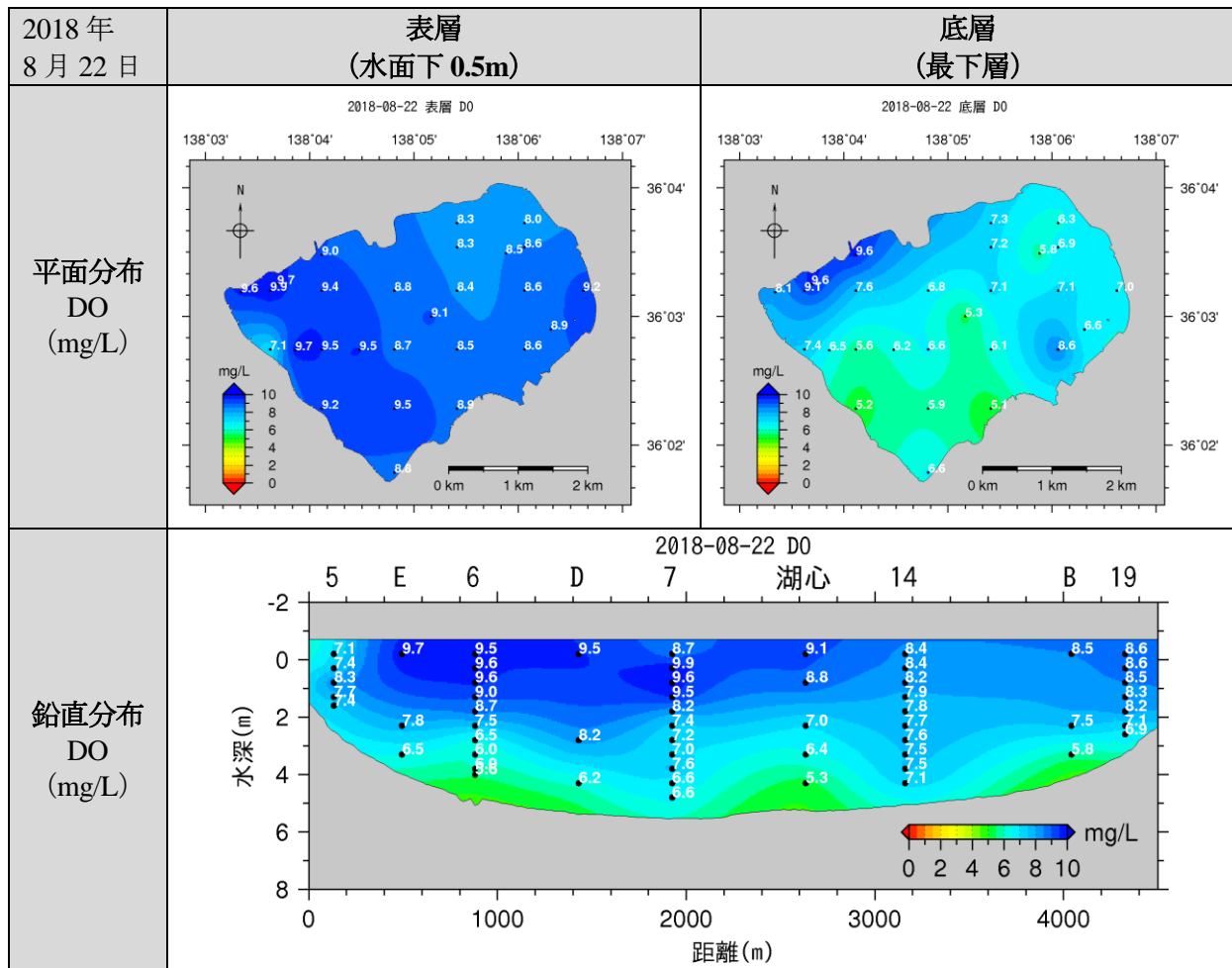


图 4.14(19) 平面・鉛直分布(2018年8月22日、DO)

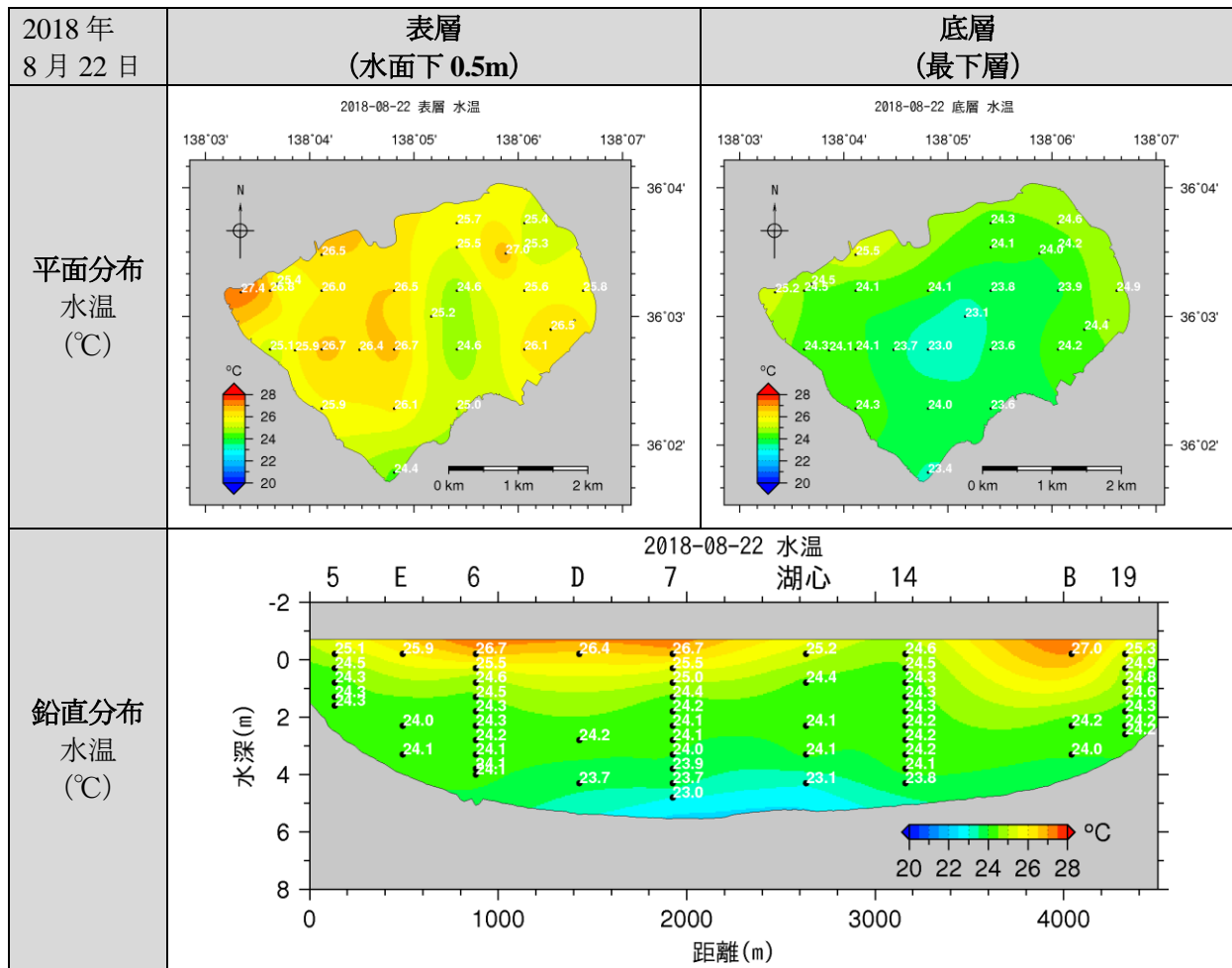


圖 4.14(20) 平面・鉛直分布(2018年8月22日、水温)

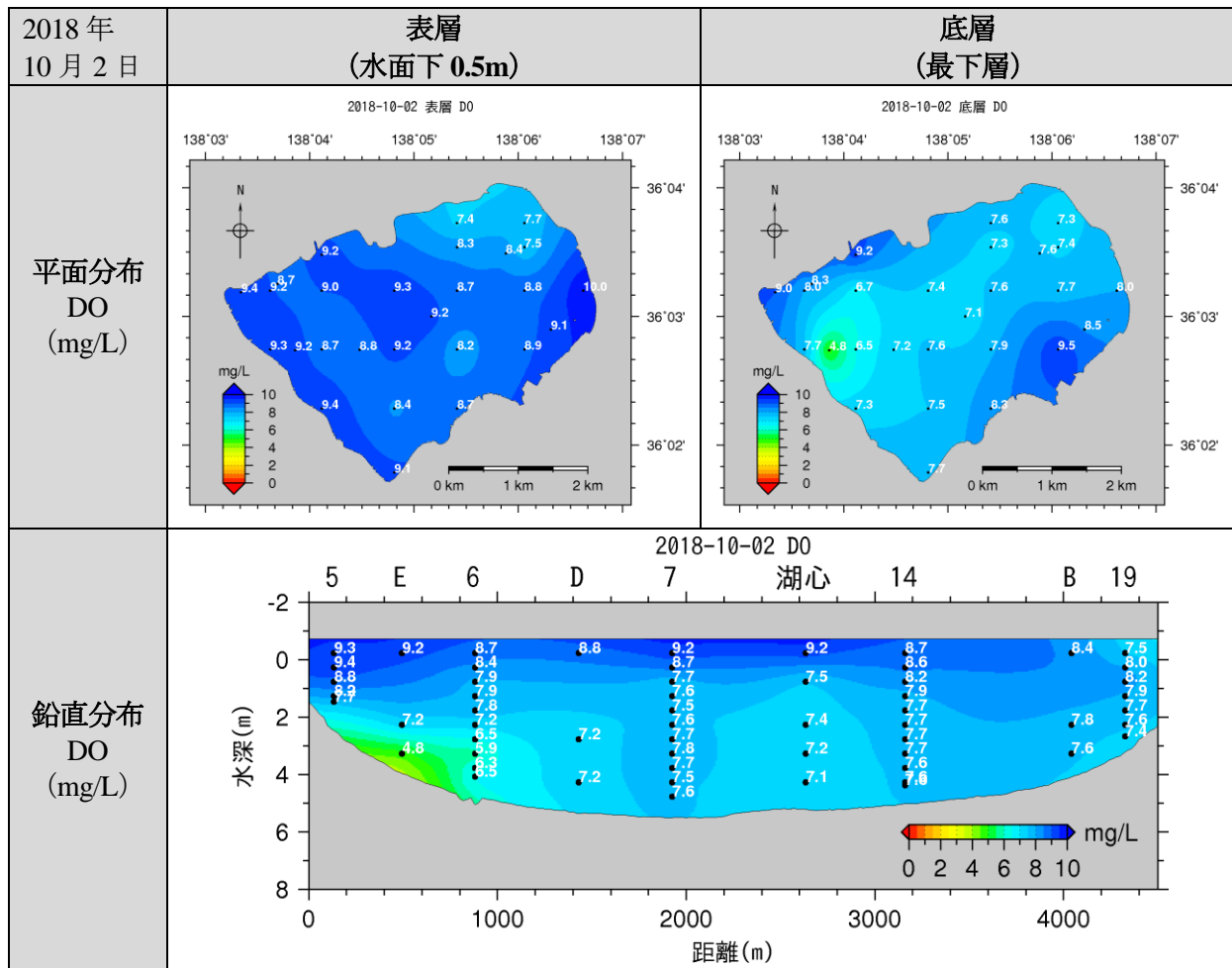


图 4.14(19) 平面・鉛直分布(2018年10月2日、DO)

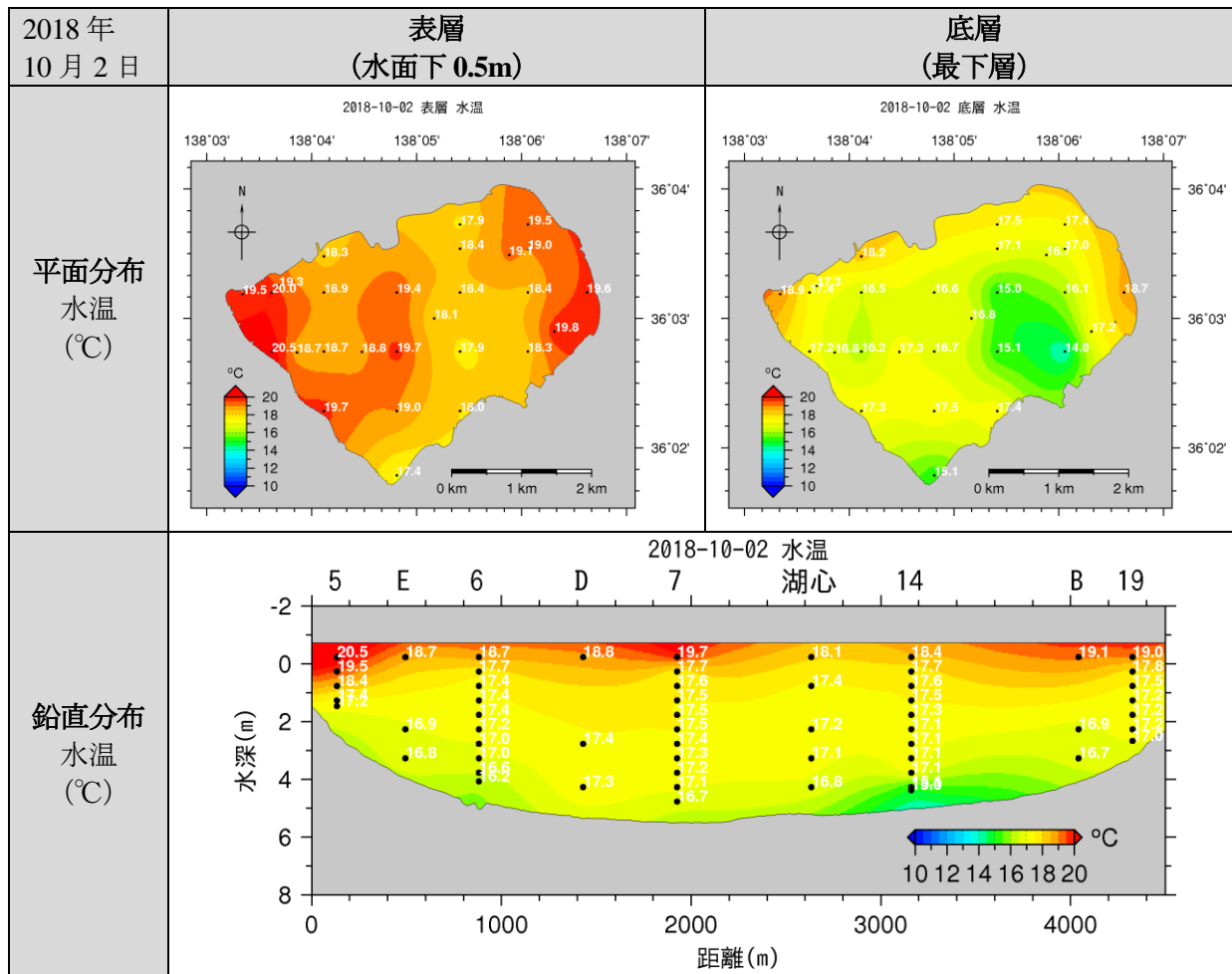


图 4.14(20) 平面·鉛直分布(2018年10月2日、水温)

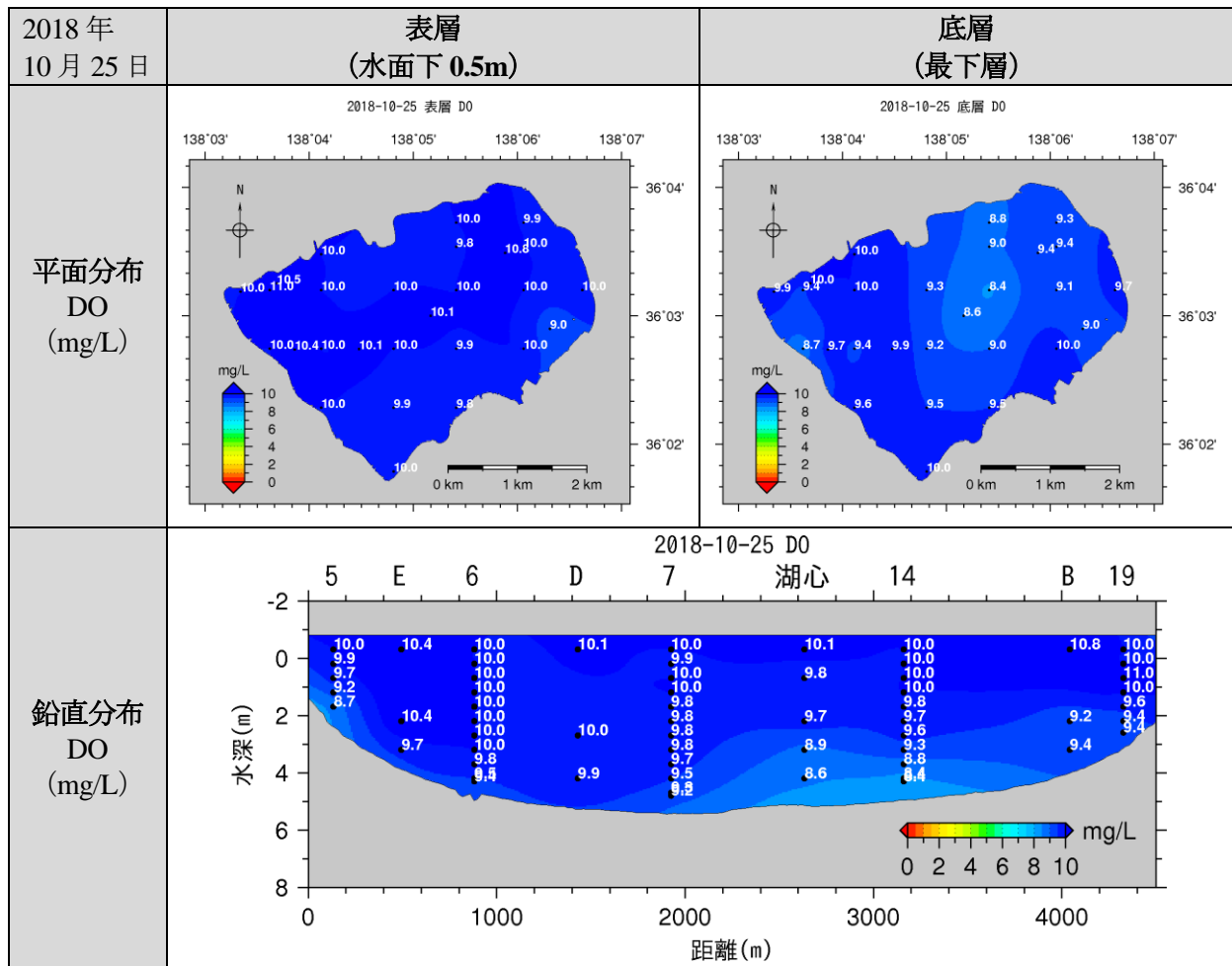


圖 4.14(21) 平面・鉛直分布(2018年10月25日、DO)

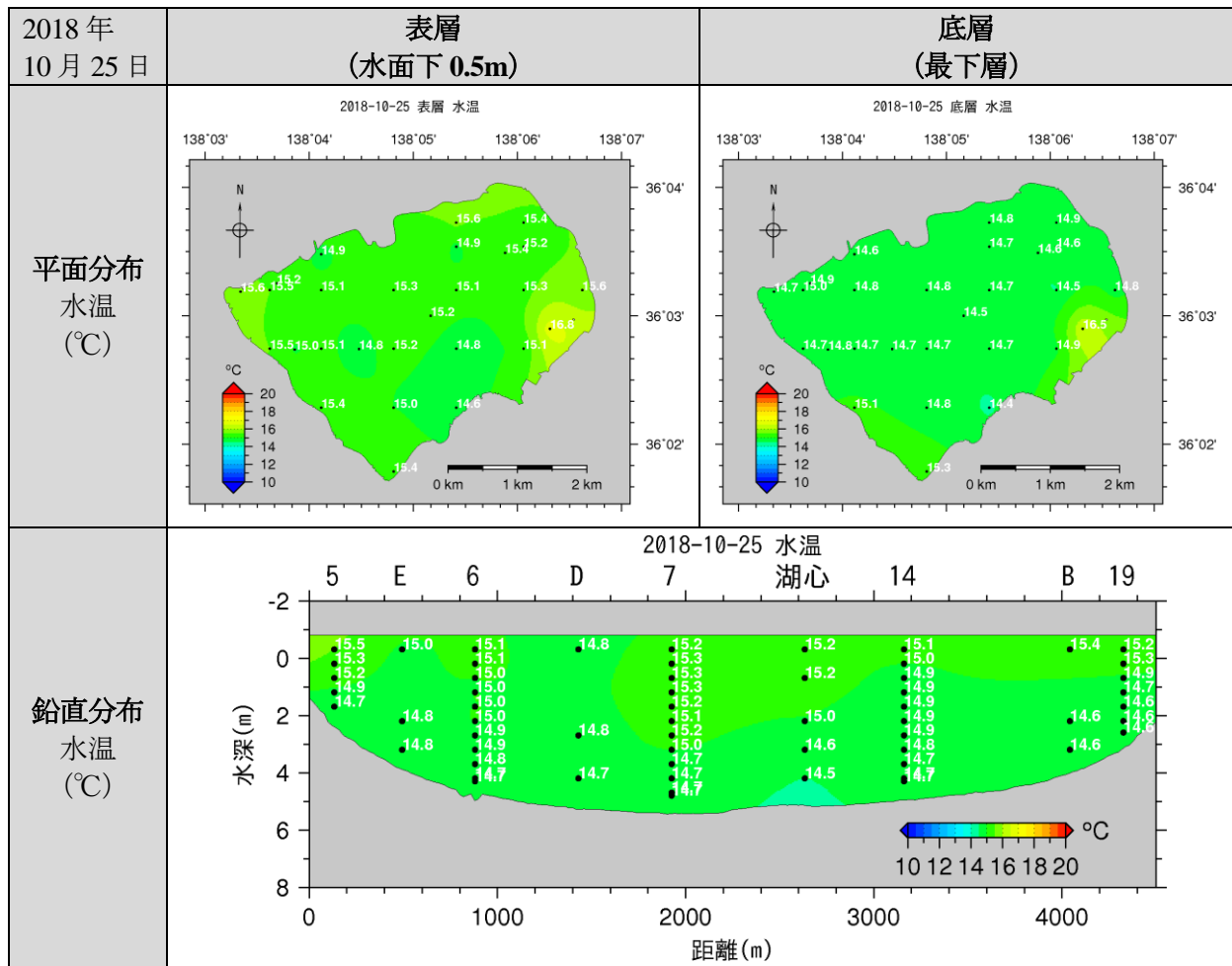


図 4.14(22) 平面・鉛直分布(2018年10月25日、水温)

4.8 収集整理したデータの調査期間等

調査名	地点数等	測定期間	測定頻度	項目
1. 諏訪湖内の水質等				
(1)水質常時監視結果	3地点×2水深	H29, H30	1回/月	生活環境項目(COD等8項目) 健康項目(カドミウム等26項目)など
(2)溶存酸素量等連続測定	5地点×2~4水深(H29) 5地点×2~3水深(H30)	H29, H30	10分毎(5~11月)	DO、水温
(信州大学測定)	湖心1地点	H29, H30	10分毎(5~11月)	DO、水温
(3)溶存酸素量等全面測定	21地点 (表層から50cm毎)	H29, H30	1回/月(5~10月)	DO、水温等
2. プランクトン調査				
(1)動物プランクトン調査	1地点(全層)	H29, H30	1回/月(5~10月は2回)	種類別のプランクトン数
(2)植物プランクトン調査	1地点×2水深	H29, H30	1回/月(5~10月は2回)	属別の細胞数
3. ヒシ刈り場所のモニタリング				
水質調査	6地点×3水深	H30	1回/月	DO等16項目
4. ヒシ種子除去場所のモニタリング				
(1)埋土ヒシ種子量調査	1地点	H29	3回/年	ヒシ種子の計数
(2)溶存酸素量等連続測定結果	2地点×1水深	H29	10分毎(5~10月)	DO、水温
(3)底生生物定性調査	7地点	H29	1回/年	底生生物種別の個体数
(4)水生植物調査	1地点	H29	1回/月(5月~11月)	ヒシその他の水生生物の分布
5. 覆砂場所のモニタリング				
(1)水質調査結果	6地点×1水深	H29, H30	4回/年	COD,T-N,T-P等23項目
(2)底質調査結果	6地点×1水深	H29, H30	4回/年	全硫化物、T-N,T-P、強熱減量
(3)生簀シジミ調査	6地点	H29, H30	4回/年	シジミの生育
(4)淡水シジミ調査	6地点	H29, H30	3回/年	シジミの生育
(5)底生生物定性調査	6地点	H29, H30	3回/年	底生生物種別の個体数
6. 動植物に関する調査				
(1)水生植物分布調査(ヒシ繁茂状況等)	諏訪湖内全域	H29, H30	1回/年	ヒシその他の水生生物の分布
(2)衛星画像データによる湖畔植生の把握	諏訪湖内全域	H30	1回/年	湖畔植生の概況把握
(3)ワカサギ資源量調査	諏訪湖内全域	H29, H30	6回/年	ワカサギ資源尾数推定値
7. 流入河川に関する調査				
(1)水質常時監視結果※1(1)に含む	4河川6地点	H29, H30	1回/月	生活環境項目(COD等8項目) 健康項目(カドミウム等26項目) など
(2)流入河川水量調査	3地点	H30	30分毎(連続測定)	流量、水温
(3)宮川に係る流域汚濁負荷実態調査	H29:23地点 H30:18地点	H29, H30	H29:年6回、H30:年8回	COD,T-N,T-P等10項目
8. 流出河川(天竜川)に関する調査				
水質常時監視結果※1(1)に含む	1地点(釜口水門)	H29, H30	1回/月	生活環境項目(COD等8項目) 健康項目(カドミウム等26項目)など
9. その他				
諏訪湖の湖底調査結果	諏訪湖内全域	H30	1回	湖底面の地形データの取得など
釜口水門放流量	1地点	H29, H30	1時間値	放流量
下水道放流量・水質データ	1地点	H29, H30	1時間値	処理水量・水質