

東京大学大学院新領域創成科学研究科
社会文化環境学専攻

2017 年度
修 士 論 文

水流発生装置を用いた港内および浅場の
貧酸素改善方策の検討

Numerical Study on Effective Measures for Reducing Hypoxia
and Anoxia Using a Water Circulation System in Ports and Shoal

2018 年 1 月 22 日提出
指導教員 佐々木 淳 教授

石崎 優芙
Ishizaki, Yu

目次

1. 序論	1
1. 1 背景	1
1. 2 目的	2
2. 船橋市漁業協同組合・船橋市・千葉県による事業の概要	3
2. 1 当該海域特性	3
2. 2 水流発生装置概要および稼働状況	4
3. 現地観測	7
4. 数値計算の方法	19
4. 1 数値モデル	19
4. 2 数値実験	30
4. 2. 1 現地観測結果の数値再現	30
4. 2. 2 水流発生装置の現地適用に関する数値実験	37
5. 数値計算の結果と考察	40
5. 1 現地観測結果の数値再現	40
5. 1. 1 結果	40
5. 1. 2 検証	55
5. 1. 3 考察	57
5. 2 水流発生装置の現地適用に関する数値実験	58
5. 2. 1 結果	58
5. 2. 2 検証	61
5. 2. 3 水流発生装置性能を向上させた場合の計算結果	63
5. 2. 4 考察	72
6. 結論および今後の課題	74
6. 1 結論	74
6. 2 今後の課題	74
参考文献	75

1. 序論

1. 1 背景

東京湾などの閉鎖性の内湾では、富栄養化・貧酸素化が湾内の水質環境や生態系に悪影響を及ぼしている。これは都市化・工業化に伴う陸域由来の汚濁負荷の増加や、海域の埋め立てによって浅瀬や干潟、藻場などの環境場が喪失し、自然の浄化作用が低下したことなどが原因に挙げられる。これに対し法による排水規制（環境省、2016）や下水の高度処理化（例えば東京都下水道局、2016）などの海域への流入負荷量削減が進められてきた。また人工干潟造成、浚渫溜地の埋め戻し、エアレーションなど様々な取り組みがなされ（例えば向井、東京湾再生推進会議）、水質汚濁のピーク時に比べて幾分か改善しつつあるが、未だ多くの問題を抱え、抜本的な改善には至っていない。これには、過去に海底に堆積した有機汚濁物質や、海面で生産された植物プランクトンなどの分解・無機化による汚濁物質としての再帰する物質循環が生じていること、その過程で酸素消費が貧酸素化を招いていることが一因にある。東京湾奥部においては特に青潮の発生が深刻であり、発生回数や発生規模に差はあるものの、今日においても毎年のように青潮が発生しており、影響が大きい時にはアサリの大量へい死を招くなどの漁業被害も報告されている（千葉県、2015）。前述した水質改善検討手法の一つとして、人為的な水流発生装置を用いた水塊の海水混合技術がある。

例えば遠藤ら（2010）は、太陽光を電源としてポンプ稼動による表層水を底層から放出する装置による現地実験を実施しているが、その影響範囲は放出口近傍に限定されていた。角屋ら（2007）は、空港施設の間に存在する閉鎖性の強い水路において表層水を海底に送り込むことにより発生する循環流を利用した外部電源供給を用いた水流発生装置を適用しており、一定の改善効果が報告された。野々村ら（2005）は富栄養化が顕著な貯水池において水流発生装置にて表層水を海底に送り込み水温破壊を加速させる実験を行っており、その破壊の影響範囲は池全体に様に及んでいた。しかしながら、底層に供給した表層水のDO濃度が低下していたことから、水温成層の破壊過程でDO濃度に変化は無かった。また、北・黒川（2012）は野々村ら（2005）と類似の装置を用いて貯水池において水質観測に加えて流速観測を行うことで、成層期における成層不安定化に必要な流速が検討されている。また上述した水流発生装置は日々技術改良が行われており、現在船橋港においては新たな水流発生装置（イービストレード社、マルチ・ストリーマー）が2016年と2017年に設置され、水質改善効果測定が行われている。

これらの水流を利用した水質改善を目的とする装置には、成層破壊に至るほどの装置の出力が求められていることに加え、外部電源供給を用いる場合はコストが大きくなり、費用対効果が低くなる可能性があることが課題にある。実用化に至るには、電力コスト削減を図り、対象領域に応じた効率的な装置の設計・配置・使用が必要である。そのための検討手法として、環境条件を限定した室内実験や数値計算がある。特に各地域また各地点によって大きく変化する現地環境条件に対して、様々な検討を行うことやその他の地域への適用拡大の検討が可能となる数値計算は有用である。

1. 2 目的

本研究では船橋市漁業協同組合・船橋市・千葉県の事業により、2017 年に船橋港内にて運転していた水流発生装置による現地 DO 環境への影響について、現地観測結果をもとに考察すると共に、水流発生装置の機能を数値計算モデルにて再現することで、現地観測結果のみでは評価が難しい部分について言及する。また、実証実験による検討条件は限定的となるため、拡大検討として、数値計算上で様々な環境条件を設定し、効果的となる設置方法について検討することを目的とする。本研究での水流発生装置導入による DO 環境改善目標としては、ある一定範囲において無酸素状態を回避し、生物の大量へい死を抑制することや、硫化物生成を抑制することで、青潮発生規模の縮小につなげることを念頭においている。

2. 船橋市漁業協同組合・船橋市・千葉県による事業の概要

2. 1 当該海域特性

調査対象地域となる三番瀬は、江戸川の河口付近の干潟及び浅海域を指し、船橋市、市川市、浦安市、習志野市の沿岸に接する。この海域は東京湾の再奥部の埋立地によって囲まれた位置にあり、岸から沖合3～4キロの範囲には浅瀬が広がり、その先は急に水深が深くなっている。三番瀬というと一般的には干潟が一面に広がっているイメージがあるが、実際には主な干潟は30haほどである。しかし東京湾奥部における数少ない干潟・浅海域であることも事実であり、魚類をはじめとする海の生物や鳥類の貴重な生息地でもある。また、三番瀬は潮干狩りや釣り、ウィンドサーフィンなどの場として利用されることも多く、レジャー面でも貴重な場所である。本研究の調査対象地域は船橋港を中心とした海域であり、市川航路と船橋航路が通っている。船橋三番瀬海浜公園が中心に位置し、南船橋、二俣新町、市川塩浜に接している。



写真-2.1 (左：三番瀬海浜公園での潮干狩り右：三番瀬漁場内での海苔養殖)

2. 2 水流発生装置概要および稼働状況

本研究対象とする水流発生装置（イービストレード社、マルチストリーマー、MST-200）の原理および本体全景を図-2.1、写真-2.2 に示す。水流発生装置の原理は、表層の酸素が豊富に含まれた水を水面の浮体から吸い込みポンプに貯め、ポンプから取水した水が駆動水となって整流筒後方から吐出され、それが整流筒を通過することで水流が増幅し、ポンプからの吐出水の約 30 倍の流量を動かすことができるものである。導水量は約 216000 m³/日である。流動によって酸素が豊富な表層水と酸素が少ない底層水が混合することで三番瀬内の底層溶存酸素量が向上し、青潮時の貧酸素水塊が減少することが期待される。貧酸素水塊の早期解消は魚介類の大量死を抑制できるため、昨今の問題解決に有効的であると考えることが出来る。船橋港内では、図-2.2 に示す 2 地点に設置されており、船橋港内側を地点 1、浅場となる仮航路側を地点 2 とした。また水流発生装置は、地点 1 には 2 台（M₁₁、M₁₂）が設置、地点 2 には 1 台（M₂）が設置されている。図-2.3、図-2.4 に水流発生装置の噴出方向を示し、図 2-5 に海底における設置状況を示す。地点 1 では 2 台とも対岸に向かって、M₁₁ は干潮時水深約 7m の位置から水平方向に、M₁₂ は干潮時水深約 4m の位置から水平から 5° 下向きに噴出されている。地点 2 の M₂ については、船橋航路方向に、干潮時水深 2m の位置から水平方向に噴出されている。

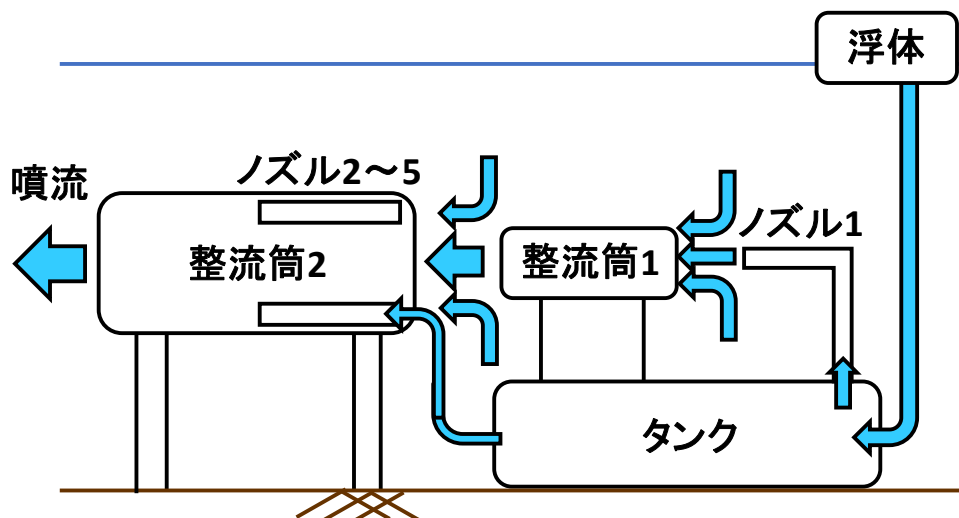
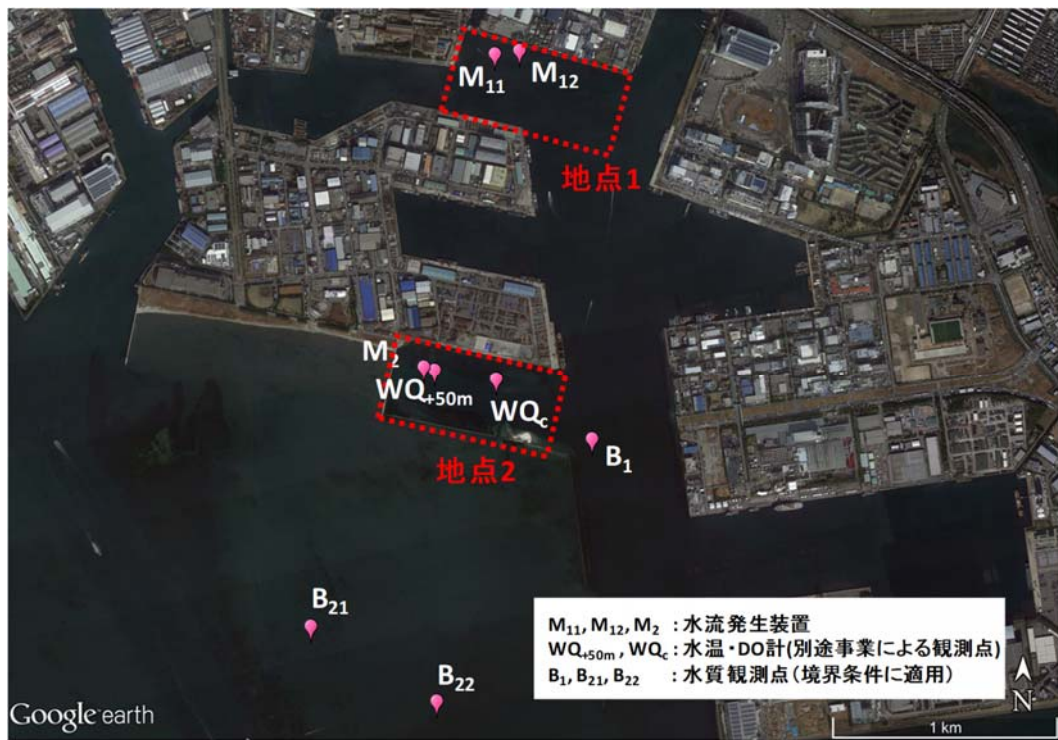


図-2.1 水流発生装置原理



写真-2.2 水流発生装置本体部（イービストレード社撮影）



出典：Google earth

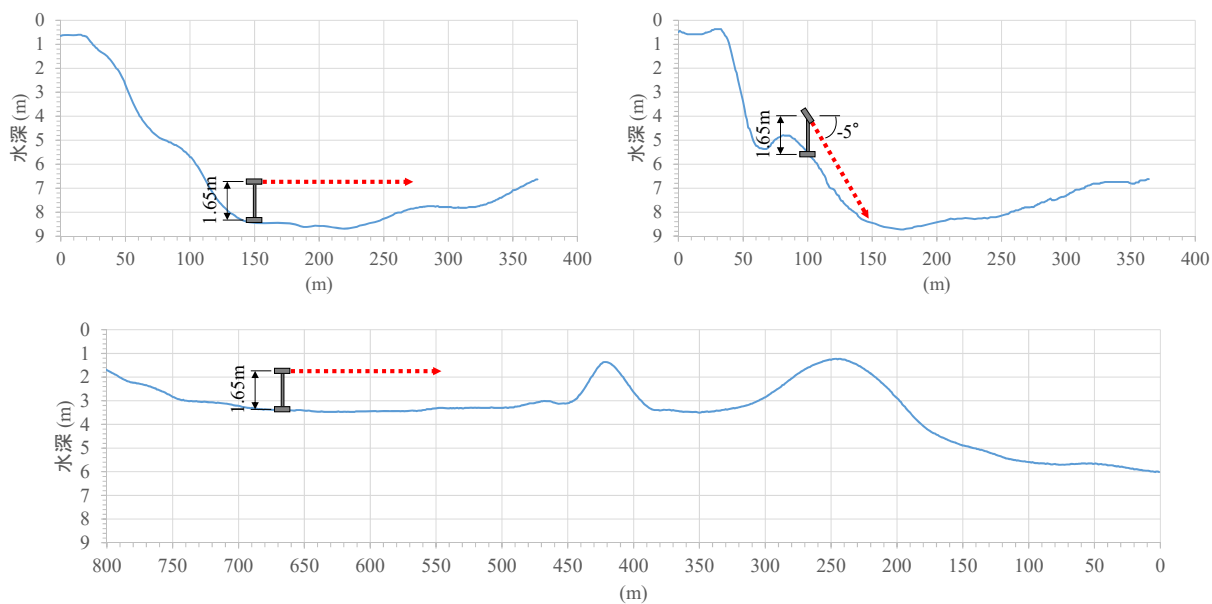
図-2.2 本研究対象



出典：Google earth
図-2.3 地点1における水流発生装置噴流方向



出典：Google earth
図-2.4 地点2における水流発生装置噴流方向



※水深は干潮時

出典：船橋市漁業協同組合（2017）を基に作成

図-2.5 水流発生装置の海中設置状況
(左上：地点 1_M₁₁，右上：地点 1_M₁₂，下：地点 2_M₂)

3. 現地観測

1) 現地観測項目および観測日

水流発生装置による水流や水質に与える影響を明らかにするため、装置周辺の多点において、船上から投げ込み式水質計を用いた水質観測を実施した。本研究とは別に同等の水質調査や底質調査、また装置前面および対照区では係留系による水質連続観測が実施されている。観測項目および観測日を表-2.1 に示し、観測結果を以下に示す。

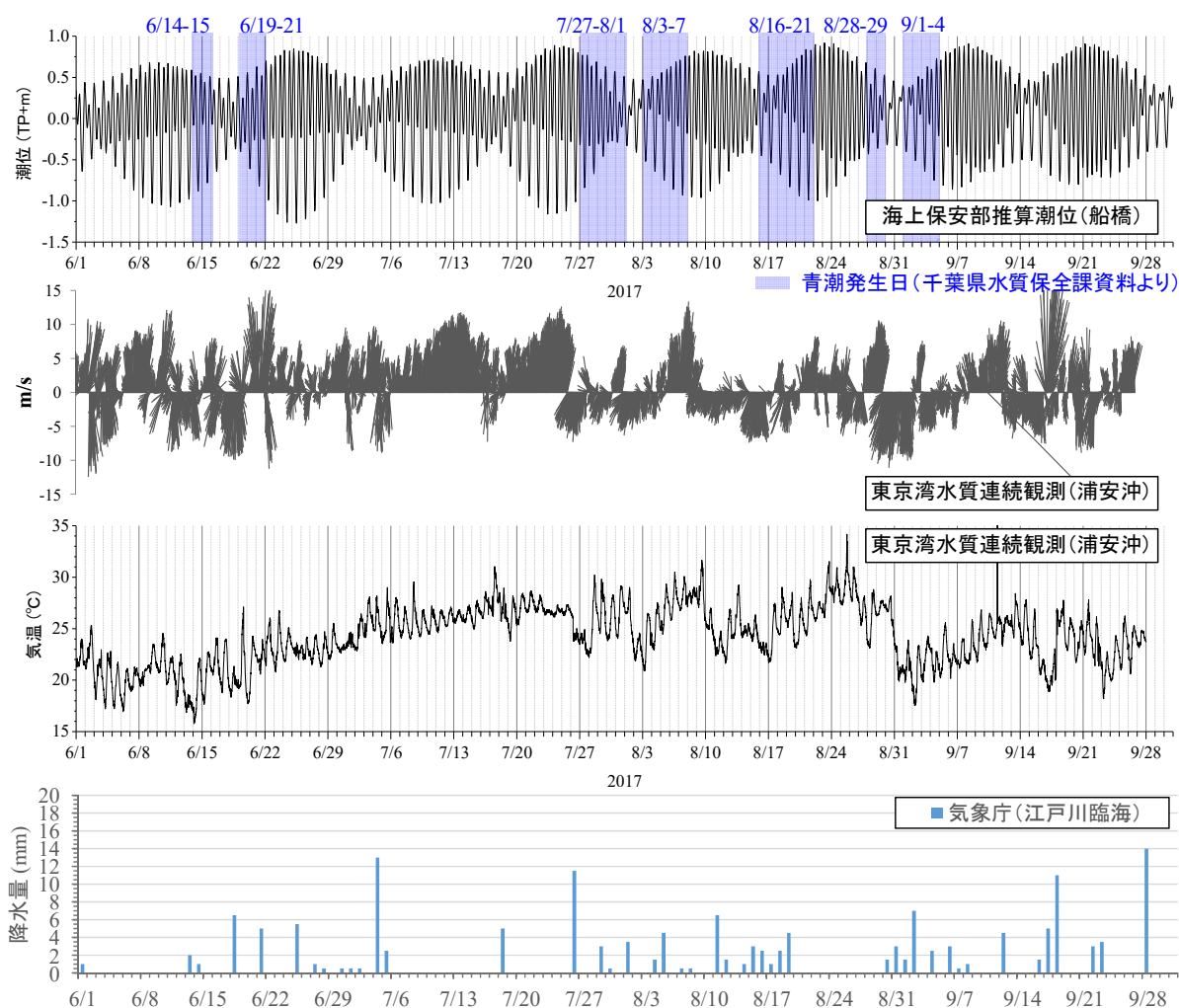
表-3.1 観測項目および観測日

項目			7月	8月	9月			
水質	定期観測	水温、塩分、DO	26	7	2	4	5	11 22

出典：船橋市漁業協同組合（2017）を基に作成

2) 気象観測結果および青潮発生状況

対象領域に近い観測結果等として、2017 年夏季の船橋における天文潮位、浦安沖の水質連続モニタリングポストにおける風速・風向、表層水温、気象庁江戸川臨海气象台における降水量、また、船橋港内のみの局所的なものも含む青潮の発生日を図-3.1 に示す。青潮発生日は 6 月 14 日～15 日、6 月 19 日～21 日、7 月 27 日～8 月 1 日、8 月 3 日～7 日、8 月 16 日～21 日、8 月 28～29 日、9 月 1 日～4 日であった。7 月下旬以降は北偏風が支配的となることが多く、またそれに伴い表層水温の低下も見られ、度々青潮が発生していた。



出典：海上保安庁，国土交通省，気象庁

図-3.1 対象期間における気象条件および青潮発生期間

3) 水質観測データ

本研究において、2017 年の夏季の青潮前となる 8 月 30 日と青潮時となる 9 月 2 日に、水流発生装置周辺の多点において、船上から投げ込み式水質計 (AAQ177, JFE ADVANTEC 社) による水質観測を実施した。図-3.3, 図-3.4, 図-3.5, 図-3.6 に各地点における観測地点を示す。また図-3.2 に水質測定時における潮位表を示す。

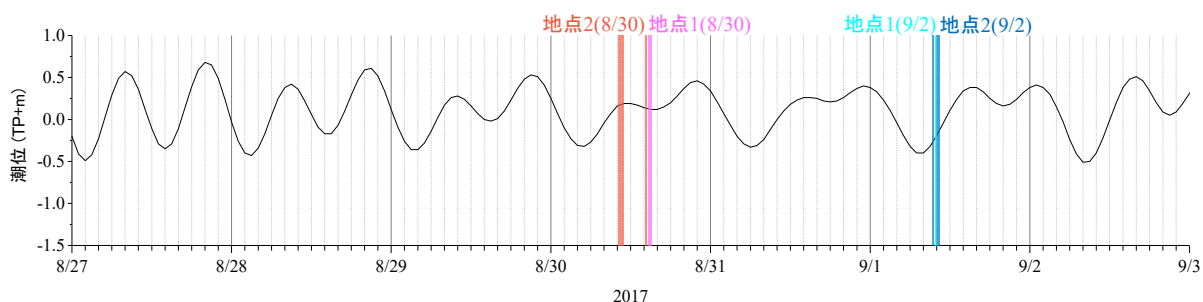
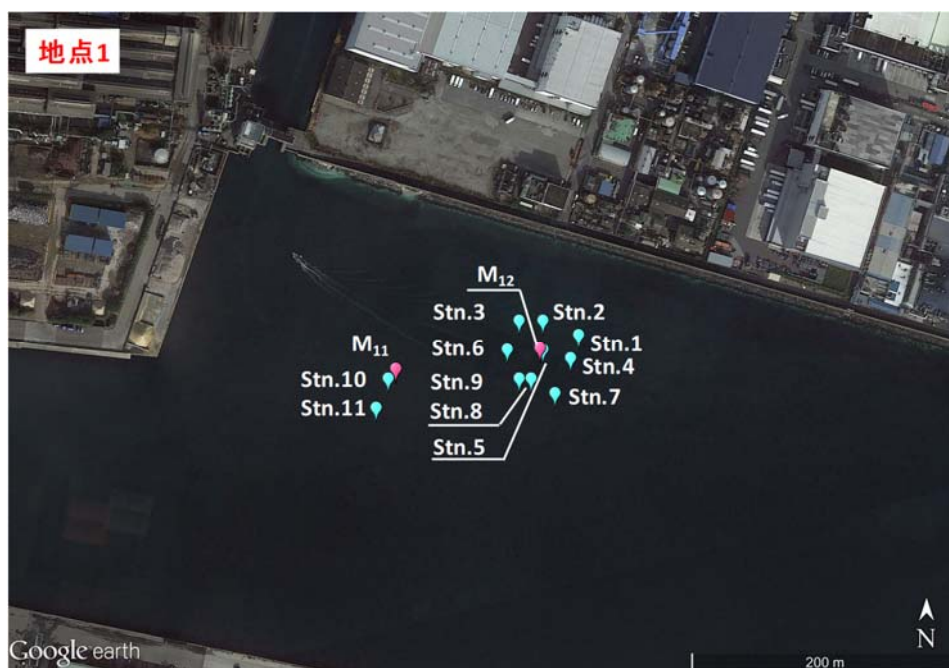
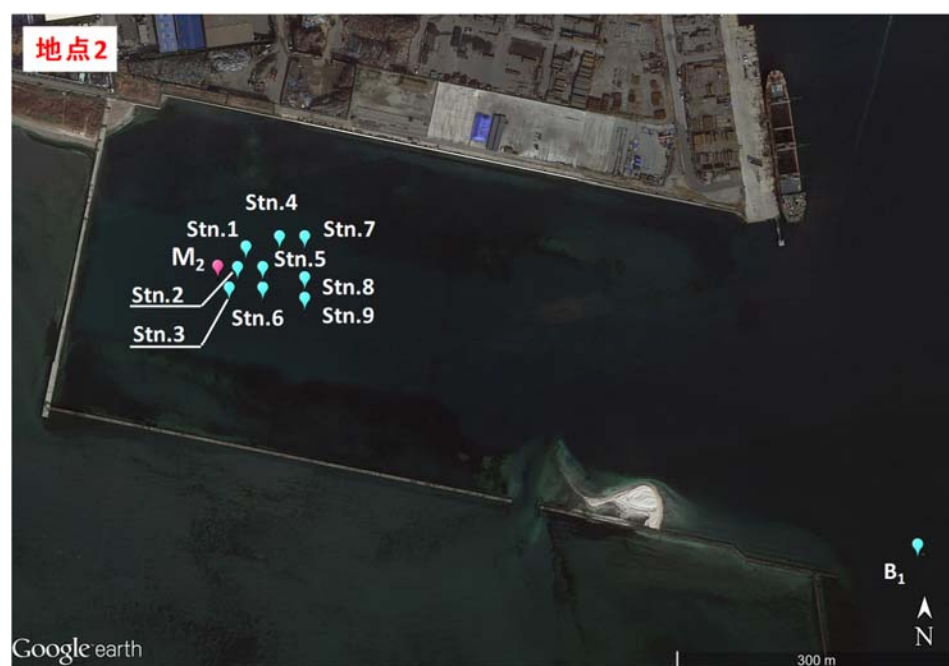


図-3.2 水質測定時における潮位



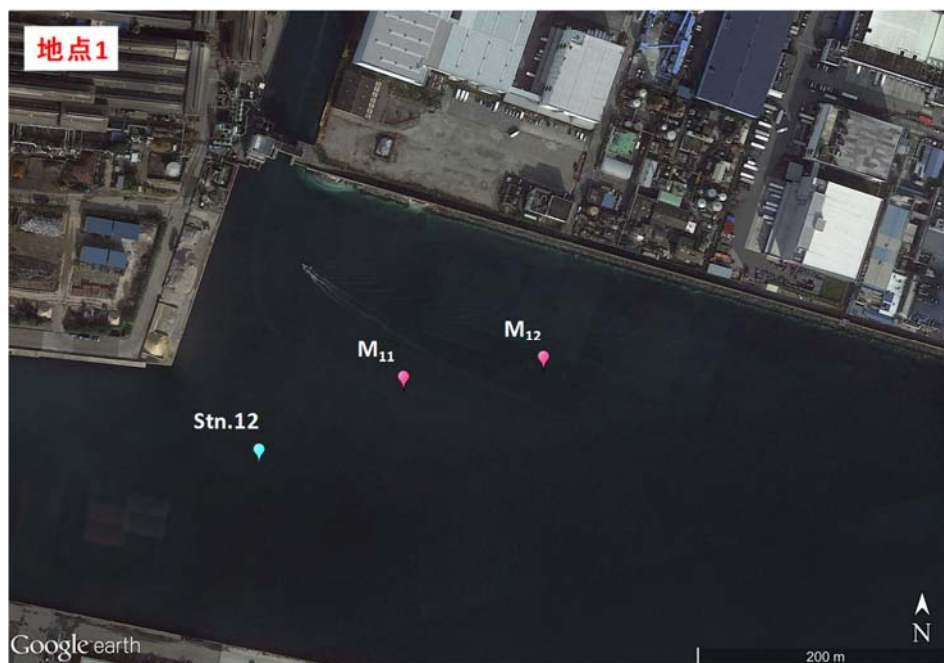
出展：Google earth

図-3.3 地点1における水質観測地点（平常時 2017年8月30日）



出展：Google earth

図-3.4 地点2における水質観測地点（平常時 2017年8月30日）



出展：Google earth

図-3.5 地点1における水質観測地点（青潮時 2017年9月2日）



出展：Google earth

図-3.6 地点2における水質観測地点（青潮時 2017年9月2日）

4) 定期観測結果

図-3.7, 図-3.8, 図-3.9, 図-3.10 に地点 2 の Stn.1~9 および B1 の各観測日における水温, 塩分, DO, 濁度の鉛直分布を示す。青潮前の平常時となる 8 月 30 日の水温について, 水流発生装置から, より北側に遠方となる Stn.4 と Stn.7 では, 他に比べて強い水温躍層が生じていたのに対し, 装置前面となる Stn.2 では, 表層から底層間の差が小さくなっており, 装置の影響と考えられる鉛直混合が見られた。また, Stn.1 と Stn.3 を比較すると南側となる Stn.3 の方が水温躍層位置浅くなっていた。装置に近いほど水流発生装置からの噴流の影響が大きくなることに加え, この観測時においては, 北側で影響が小さく, 南側で影響が大きくなっていた。同日の塩分については, 海水面の約 26PSU から海底面の約 27.5PSU の差が見られた。装置前面の Stn.2 では, 他地点よりも表層で高く, 底層で低くなっており, 装置の影響と推察される表底層間の海水交換が確認された。同日の DO については, Stn.2 を除く, 表層では 7.0mg/L 以上となり深くなるにつれて減少し, 3.0mg/L 強から海底面では 4.0mg/L 弱となった。一方 Stn.2 では, 表層では 5.0mg/L 程度となり海底面では 4.0mg/L 程度となった。装置前面においては海底面での DO は他の測点より若干高くなるのに比して, 表層での DO 低下幅は大きくなっていた。同日の濁度については, 装置正面方向において高い傾向にあり, 底層では Stn.5 が最大となり, 最も遠い Stn.8 においても比較的高く, 装置からの濁度の高い噴流や, 噴流に伴う底質の巻き上げ, また装置による気泡の影響などが考えられる。

青潮時となる 9 月 2 日については, どの水質項目も平常時に比べて表層から底層間の差が小さくなっており, 青潮水が地点 2 の領域全体に進入している様子が見られる。DO については, どの測点においても海底面ではほぼ無酸素状態であった。詳細には Stn.10, Stn.12, Stn.13, Stn.14 で 0.006mg/L から 0.016mg/L の範囲にあったのに対して, 水流発生装置前面となる Stn.11 では, 0.021mg/L と若干高い DO が存在していた。

図-3.11, 図-3.12 に地点 1 の Stn.1~9 および Stn.12 における水温, 塩分, DO, 濁度の鉛直分布を示す。地点 2 よりも深いため, 水流発生装置も深い位置に設置されているが, 水質測定結果からは明瞭な水質差は確認できなかった。装置前面となる Stn.5 を含むいくつかの測点の底層で濁度の上昇が確認されるが, これは主として, 底質の浮泥が巻き上げによるものと考えられる。

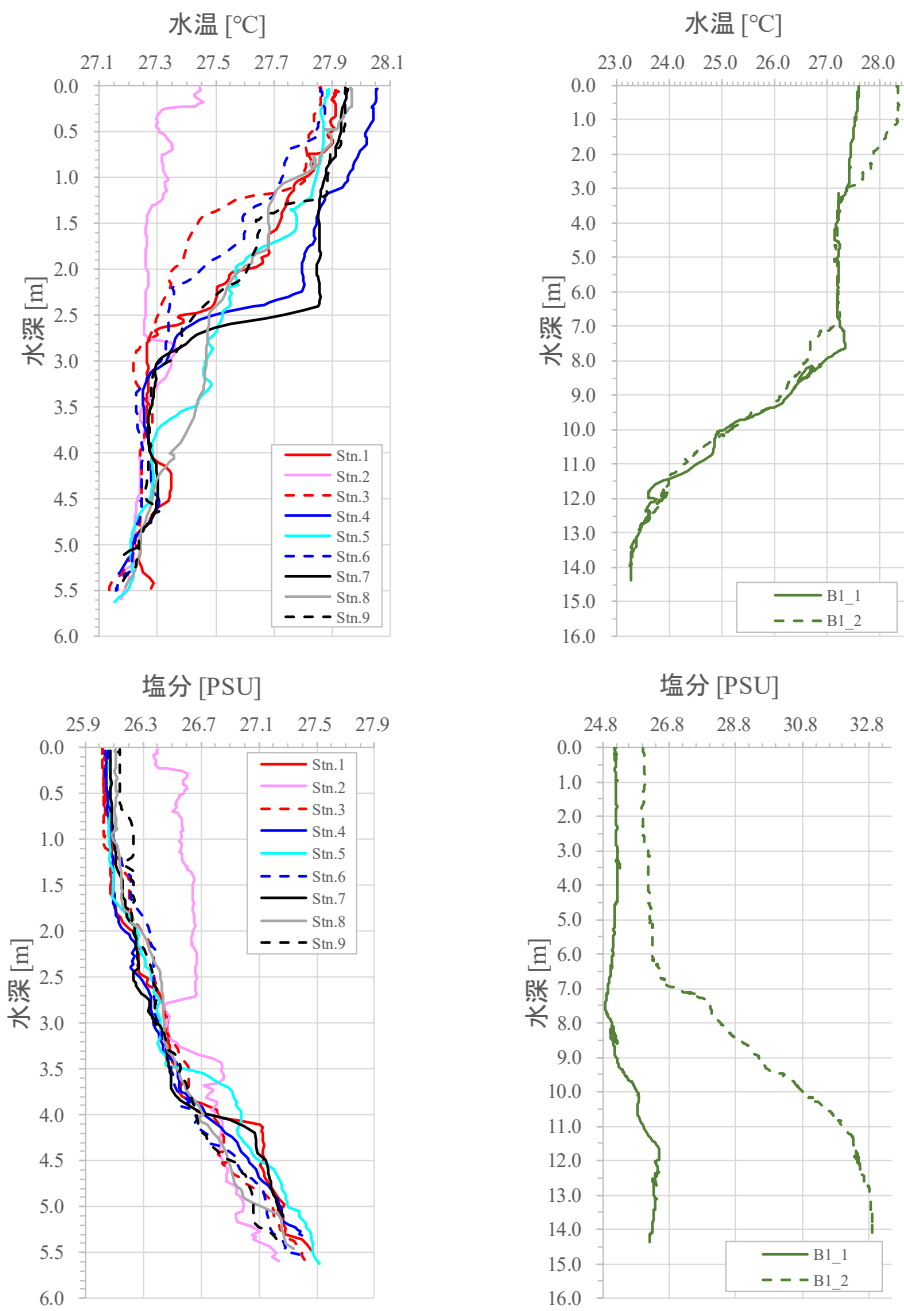


図-3.7 地点 2 の水流発生装置周辺と B1 における水温・塩分測定結果（2017 年 8 月 30 日）

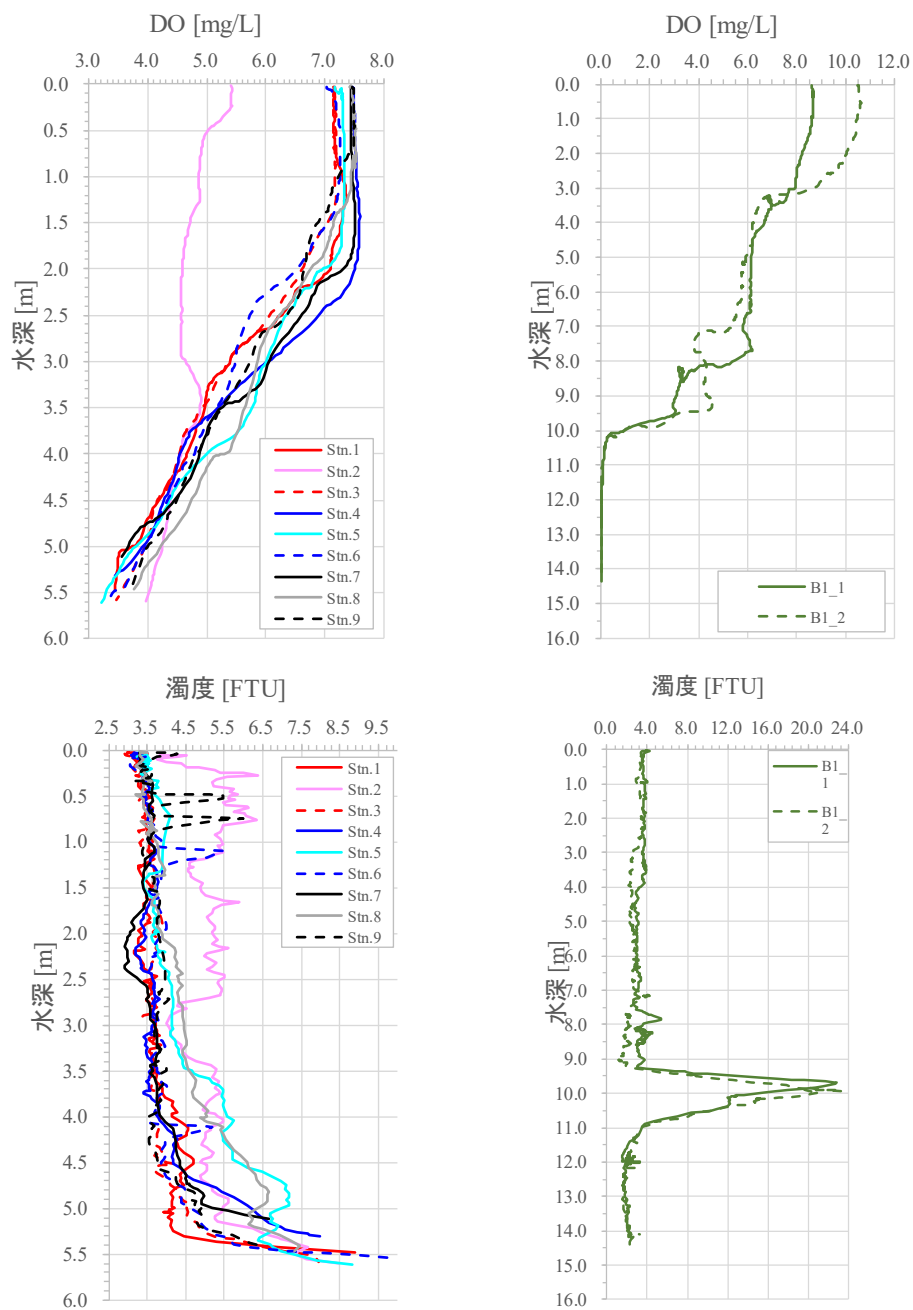


図-3.8 地点 2 の水流発生装置周辺と B1 における DO・濁度測定結果 (2017 年 8 月 30 日)

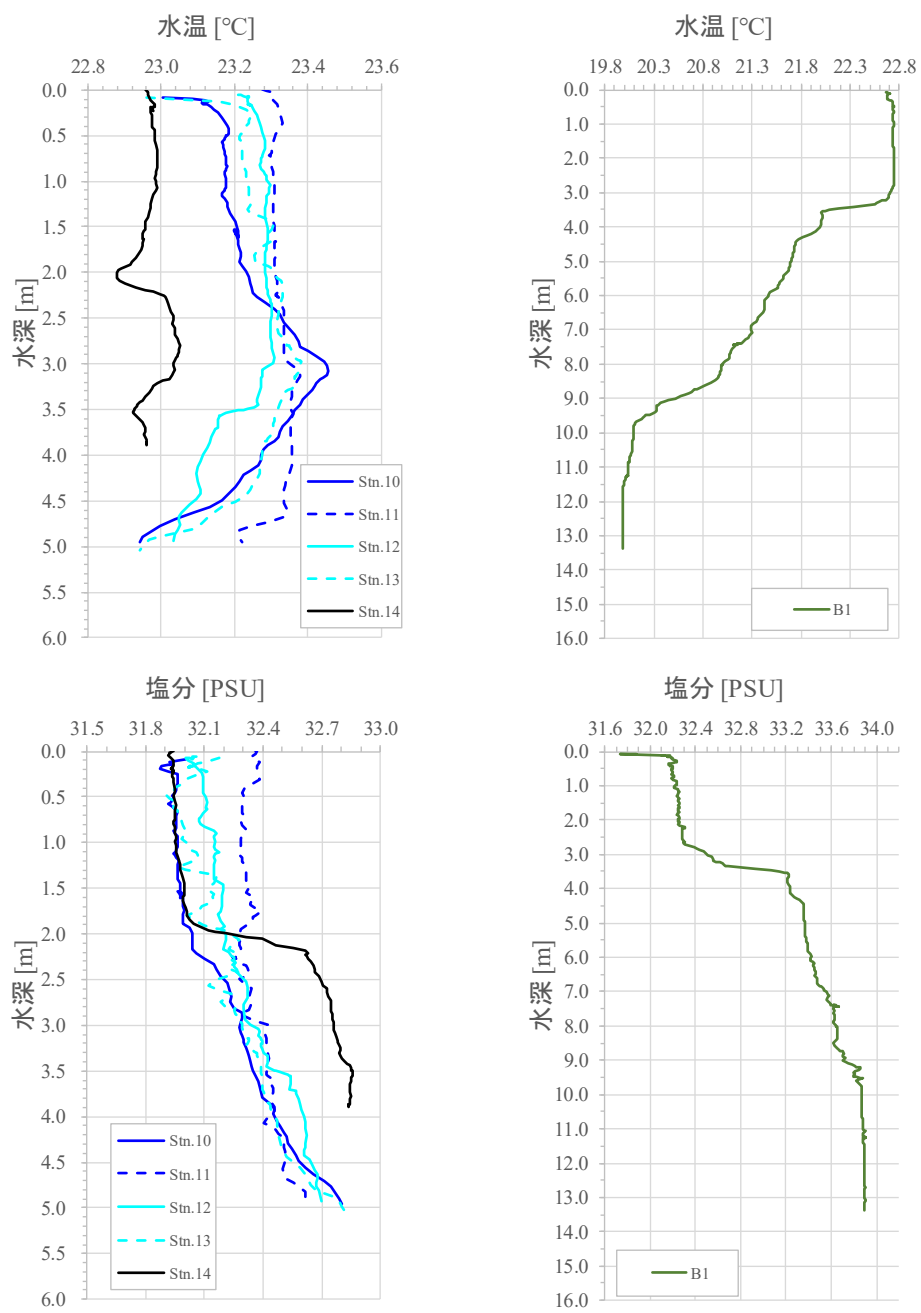


図-3.9 地点2の水流発生装置周辺とB1における水温・塩分測定結果（2017年9月2日）

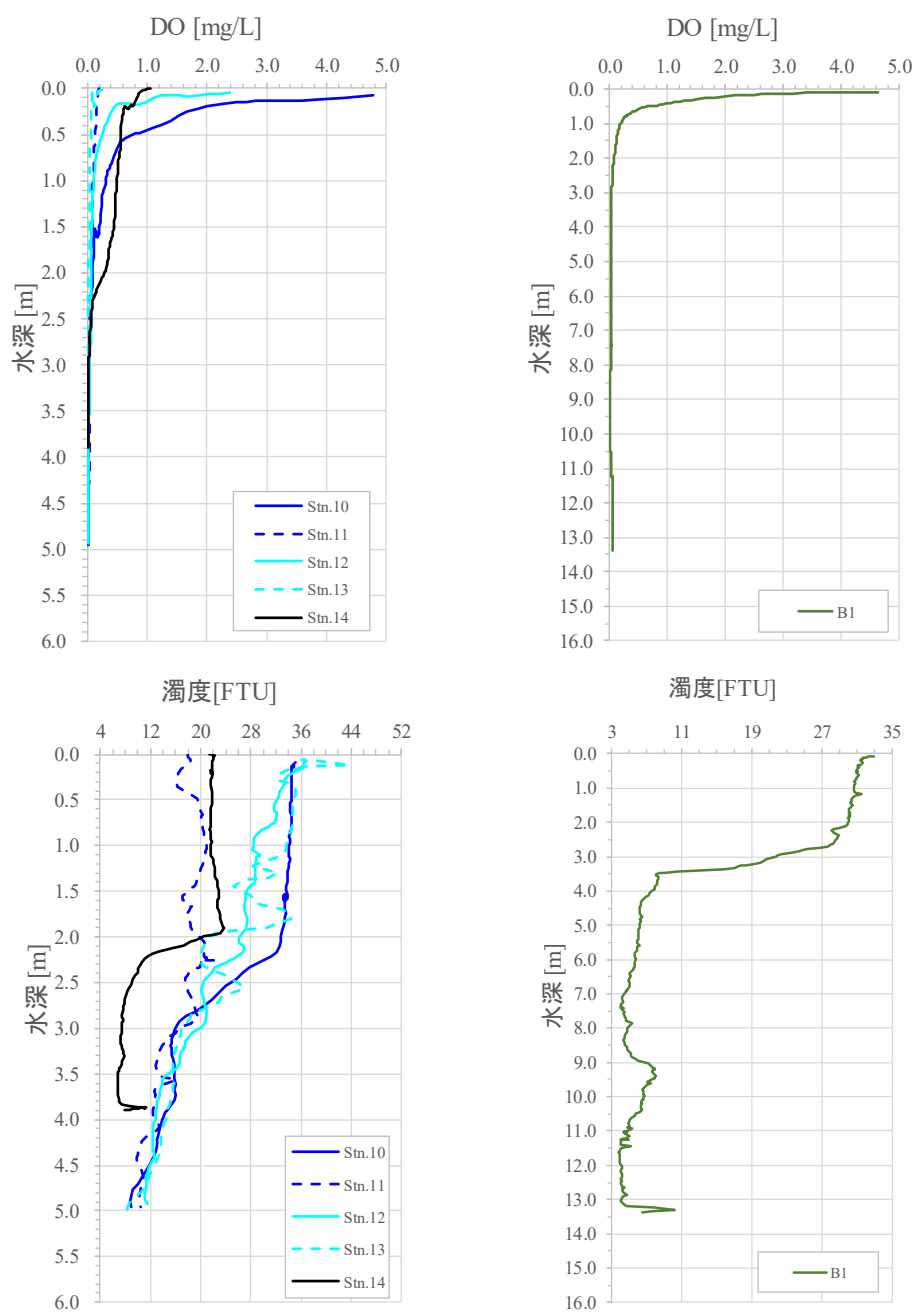


図-3.10 地点2の水流発生装置周辺とB1におけるDO・濁度測定結果（2017年9月2日）

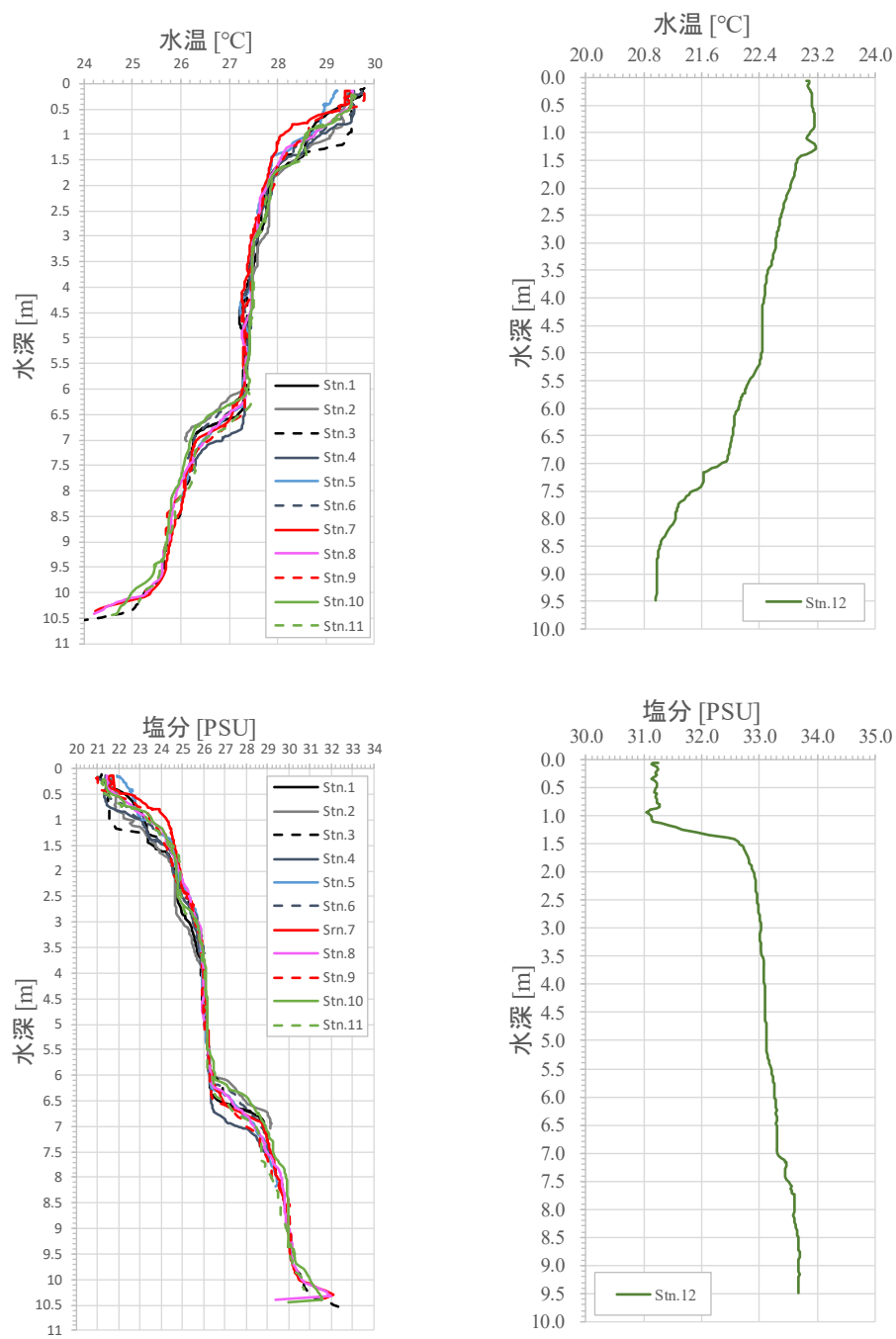


図-3.11 地点1の水流発生装置周辺における水温・塩分測定結果
(左列：2017年8月30日，右列：2017年9月2日)

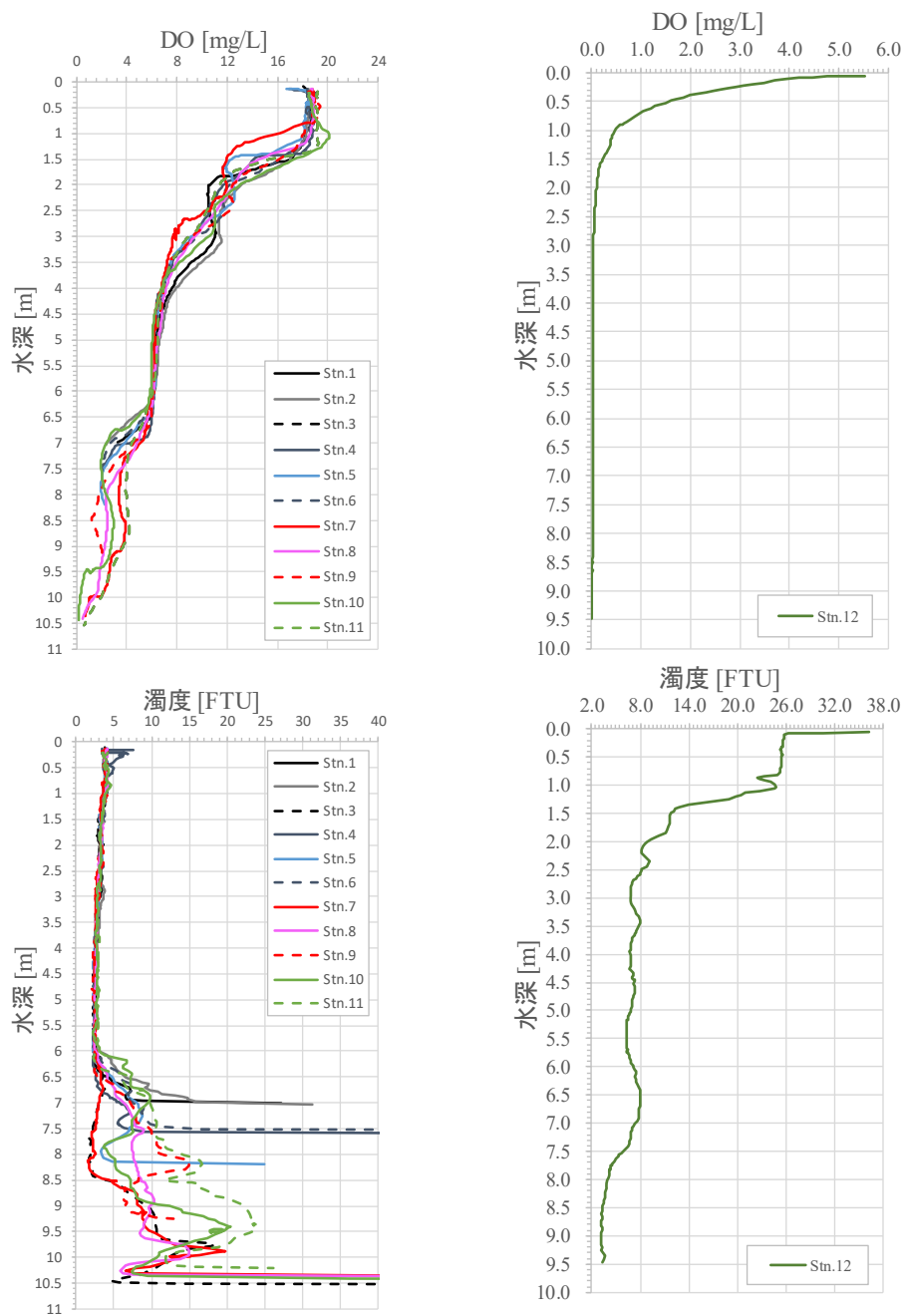


図-3.12 地点 1 の水流発生装置周辺における DO・濁度測定結果
(左列：2017 年 8 月 30 日，右列：2017 年 9 月 2 日)

4. 数値計算の方法

現地観測により、主に水流発生装置の噴出口近傍における噴流の影響や、取り込み口となる表層との海水循環などの現象を、周辺との各水質差から確認している。また、船橋市漁業協同組合・船橋市・千葉県による現地実証実験時に並行して実施された連続水質観測では、水流発生装置前面（+20m, +50）と対照区における DO の比較がなされている。その中で、装置が稼働停止した 9 月 18 日には各測点で DO 濃度差が見られなくなるのに対して、稼働中は水質差が見られ、装置前面では無酸素期間が対照区より少ないことや、青潮に起因する 8 月 27 日から 29 日の無酸素状態に至るまでと DO の回復に至る過程において時間差があることが報告されている。そのため、数値計算モデルにより現地状況をモデル化し、現地で生じた各現象について検討する。

4. 1 数値モデル

本研究では、MIKE モデル（DHI 社）を採用し、流動モデルとして MIKE3、生態系モデルとして EcoLab モジュールを使用した。EcoLab モジュールにおける各パラメータは、東京湾を対象に硫化物に着目した DO 環境に関する検討がなされた Thanh（2016）によるモデルパラメータを適用した。

MIKE3 の流体力学モデルの支配方程式は以下の 4 つである。

$$\frac{1}{\rho c_s^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = SS \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} + 2\Omega_{ij} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g_i + \left[V_T \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right\} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right] + u_i SS \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (S u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_s \frac{\partial S}{\partial x_j} \right] + SS \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (T u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[D_s \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + SS \quad (4.4)$$

ρ は密度、 c_s は海水中の音速、 u_i は x 方向における速度、 Ω はコリオリ係数、 P は圧力、 g は重力、 V_T は渦動粘性係数、 δ はクロネッカーのデルタ、 k は乱れの運動エネルギー、 S は塩分、 T は水温、 D_s は塩分の拡散係数、 D_t は水温の拡散係数、 t は時間、 SS はソース項を表す。式(3. 1)は質量保存の式、式(3.2)は運動量保存の式、式(3. 3)は塩分保存の式、式(3.4)は水温保存の式である

ECO Lab とは生態系モデルのことを指し、本研究において用いる溶存酸素モデルはモデル状態変数として溶存酸素、植物プランクトン、懸濁態有機物(デトリタス)、栄養塩(リン)、底質(有機物堆積物)、硫化物、コロイド状硫黄の 7 つを設定した。

生態系モデルはこれらの生化学的および力学的過程を含む異流拡散方程式により構成される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + S(C) \quad (4.5)$$

C は状態変数, u, v, w はそれぞれ x 方向, y 方向, z 方向の流速, K_x, K_y, K_z はそれぞれ x 方向, y 方向, z 方向の拡散係数, $S(C)$ は生成項である.

7つの状態変数の生化学的な関係を図-4.1に示す.

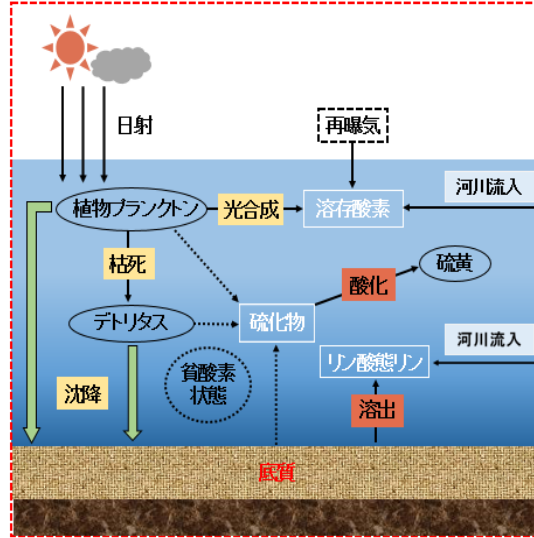


図-4.1 生態系モデルの概念図

上図から分かるように、日射や河川から流入した栄養塩を用いて植物プランクトンが増殖し、それらが枯死して溶存態有機物となる。さらにその溶存態有機物が沈降して底質となる。このように、各状態の変数が関わりあっていることが見て取れる。

以下、各物質の時間変化を方程式で表したものである。

植物プランクトン $C_{PPL}(\text{mg/l})$

$$\frac{\partial C_{PPL}}{\partial t} = (\text{光合成による増殖}) - (\text{枯死}) - (\text{呼吸}) - (\text{沈降}) \quad (4.6)$$

懸濁態有機物(デトリタス) $C_{DET}(\text{mg/l})$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{DET}}{\partial t} = & (\text{植物プランクトンの死骸}) - (\text{好気バクテリアによる分解}) \\ & - (\text{嫌気バクテリアによる分解}) - (\text{沈降}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

底質中有機物 $C_{sed}(\text{mg/m}^2)$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{sed}}{\partial t} = & (\text{植物プランクトンとデトリタスの沈降}) \\ & - (\text{好気バクテリアによる分解}) \end{aligned} \quad (4.8)$$

－（嫌気バクテリアによる分解）

溶存酸素 $C_{DO}(\text{mg/l})$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{DO}}{\partial t} = & \left(\text{光合成による生産} \right) - \left(\text{植物プランクトンの呼吸による消費} \right) \\ & - \left(\text{デトリタスの無機化による消費} \right) + \left(\text{水面での曝気} \right) - \left(\text{底泥出の酸素消費} \right) \\ & - \left(\text{硫化物の酸化による酸素消費} \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

リン酸態リン $C_{PO_4}(\text{mg/l})$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{PO_4}}{\partial t} = & - \left(\text{植物プランクトンによる摂取} \right) + \left(\text{デトリタスの好氣的無機化} \right) + \left(\text{底質の無機化} \right) \\ & + \left(\text{植物プランクトンの呼吸} \right) \\ & + \left(\text{底質からのリンの溶出} \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

硫化物イオン $C_{sul}(\text{mg/l})$

$$\frac{\partial C_{sul}}{\partial t} = \left(\text{有機物の嫌気分解} \right) + \left(\text{底質の嫌気分解} \right) - \left(\text{酸化による消費} \right) \quad (4.11)$$

硫黄 $C_{SO}(\text{mg/l})$

$$\frac{\partial C_{SO}}{\partial t} = \left(\text{硫化物の酸化による生成} \right) - \left(\text{コロイド状硫黄の酸化による消失} \right) \quad (4.12)$$

1) 植物プランクトン

先に示した物質の時間変化を表した方程式を一本の数式にまとめると以下ようになる。以下、それぞれの項の詳細を記述する。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{PPL}}{\partial t} = & \left\{ G_{max} \times \frac{I}{I_{opt}} \exp \left(1 - \frac{I}{I_{opt}} \right) \times \frac{C_{PO_4}}{K_{PO_4} + C_{PO_4}} \times C_{PPL} \right\} - \{ m_{PPL} \times \exp(a_1 T) \times C_{PPL} \} \\ & - \left\{ R_{PPL} \times \exp(a_2 T) \times C_{PPL} \times \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} \right\} - \left\{ w_{PPL} \times \frac{\partial C_{PPL}}{\partial z} \right\} \end{aligned} \quad (4.13)$$

・光合成による増殖（右辺第1項）

植物プランクトンの光合成による増殖は植物プランクトンの現存量 $C_{PPL}(\text{mg/l})$ と成長速度 $G(\text{day}^{-1})$ の積により以下のように表す。

$$\frac{\partial C_{PPL}}{\partial t} = G \times C_{PPL} \quad (4.14)$$

$$G_{max} = a \times \exp(\beta T) \quad (4.15)$$

ここで α は 0°C における最大可能成長速度, β は成長速度(day^{-1})の水温応答指数, $T(^{\circ}\text{C})$ は水温を表す.

$$G = G_{\max} \times \frac{I}{I_{\text{opt}}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{\text{opt}}}\right) \times \frac{C_{\text{PO}_4}}{K_{\text{PO}_4} + C_{\text{PO}_4}} \quad (4.16)$$

ここで, $I(\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day})$ は光の強さ, $I_{\text{opt}}(\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day})$ は光合成速度が最大となる時の光強度, $K_{\text{PO}_4}(\text{mg}/\text{l})$ はリンの半過飽和度 C_{PO_4} はリンの濃度を表す. 水中の光強度は濁りによって減衰するのだが, この機構は Lambert-Beer の法則に従って本モデルでも水深 $z(\text{m})$ での光を I_z として次のように与える.

$$I_z = I_o \exp(-kz) \quad (4.17)$$

ここで, $I_o(\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day})$ は水面での光の強さ, k は消散係数である. I_o は気象庁の過去の気象データ, あるいは日本気象協会 SDP データの東京の短波放射($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$)を入手し与えた.

この時, 光合成の最適光強度 I_{opt} の単位が($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$)であるため, 単位統一のため以下の式を用いた.

$$1(\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}) \times 100 / 4.185 = 1(\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day})$$

消散係数 k は透明度 $Z_t(\text{m})$ の関数を用いて表した. 透明度 $Z_t(\text{m})$ は水面でのクロロフィル a 濃度 $C_{\text{chl-a}}(\mu\text{g}/\text{l})$ の関数として以下のように与えた.

$$k = \frac{K_2}{Z_T} \quad (4.18)$$

$$Z_T = -1.0085 \ln(C_{\text{chl-a}}) + 5.461 \quad (4.19)$$

$$C_{\text{chl-a}} = 0.021 \times C_{\text{PPL}} \times 1000 \quad (4.20)$$

・枯死 (右辺第2項)

$$\frac{\partial C_{\text{PPL}}}{\partial t} m_{\text{PPL}} \times \exp(a_1 T) \times C_{\text{PPL}} \quad (4.21)$$

ここで, a_1 は温度係数である.

・呼吸による自己分解 (右辺第3項)

$$\frac{\partial C_{\text{PPL}}}{\partial t} = R_{\text{PPL}} \times \exp(a_2 T) \times C_{\text{PPL}} \times \frac{C_{\text{DO}}}{K_{\text{DO}} + C_{\text{DO}}} \quad (4.22)$$

ここで R_{PPL} は 0°C における植物プランクトンの呼吸速度(day^{-1}). a_2 は温度係数, C_{DO} は溶存酸素濃度, K_{DO} は半飽和値, $\frac{C_{\text{DO}}}{K_{\text{DO}} + C_{\text{DO}}}$ は溶存酸素による制限式である.

・植物プランクトンの沈降 (右辺第4項)

$$\frac{\partial C_{\text{PPL}}}{\partial t} = w_{\text{PPL}} \frac{\partial C_{\text{PPL}}}{\partial z} \quad (4.23)$$

2) 懸濁態有機物 (デトリタス)

$$\frac{\partial C_{DET}}{\partial t} = \{m_{PPL} \times \exp(a_1 T) \times C_{PPL}\} - \left\{m_{om} \times b_1 \times \exp(a_1 T) \times \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}} \times C_{DET}\right\} - \left\{v_{poc}^{anb}(T, DO) \times C_{DET} \times 2.7\right\} - \left[w_{DET} \frac{\partial C_{DET}}{\partial z}\right] \quad (4.24)$$

・植物プランクトンの死骸 (右辺第1項)

水中の懸濁態有機物の供給は先に示した以下の式で表される.

$$\frac{\partial C_{DET}}{\partial T} = m_{PPL} \times \exp(a_1 T) \times C_{PPL} \quad (4.25)$$

・バクテリアによるデトリタスの分解 (右辺第2項)

$$\frac{\partial C_{DET}}{\partial T} = m_{om} \times b_1 \times \exp(a_1 T) \times \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}} \times C_{DET} \quad (4.26)$$

ここで, $m_{om}(day^{-1})$ は $0^\circ C$ における有機物分解速度, $K_{DO} (mg/l)$ は酸素半飽和値である.

・デトリタスの沈降 (右辺第3項)

$$\frac{\partial C_{DET}}{\partial t} = w_{DET} \frac{\partial C_{DET}}{\partial z} \quad (4.27)$$

・デトリタスの嫌氣的分解

$$\frac{\partial C_{DET}}{\partial t} = v_{poc}^{anb}(T, DO) \times C_{DET} \times 2.7 \quad (4.28)$$

$v_{poc}^{anb}(T, DO)$ は嫌氣的無機化速度(day^{-1})であり, 以下の式で表す.

$$v_{poc}^{anb} = \alpha_{poc}^{anb} \exp(\beta_{poc}^{anb} T) \left(1 - \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}}\right) \quad (4.29)$$

α_{poc}^{anb} は $0^\circ C$ における嫌氣状態での有機物の無機化速度(day^{-1}), β_{poc}^{anb} は温度定数を表す. $\left(1 - \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}}\right)$ は貧酸素状態が進めば嫌氣分解を促進することを表している.

3) 底質

$$\frac{\partial C_{sed}}{\partial t} = \left(w_{PPL} \frac{\partial C_{PPL}}{\partial z} + w_{DET} \frac{\partial C_{DET}}{\partial z}\right) - \left\{m_{omsed} \times b_1 \times \exp(\beta_{poc}^{anb} T) \times \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}} \times C_{sed}\right\} - \left\{\alpha_{poc}^{anb} \exp(\beta_{poc}^{anb} T) \left(1 - \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}}\right) \times C_{sed} \times \left(1 - \frac{C_{sul}}{K_{sul} + C_{sul}}\right)\right\} \quad (4.30)$$

・植物プランクトンの沈降とデトリタスの沈降 (右辺第1項)

$$\frac{\partial C_{sed}}{\partial t} = \left(w_{PPL} \frac{\partial C_{PPL}}{\partial z} + w_{DET} \frac{\partial C_{DET}}{\partial z} \right) \quad (4.31)$$

・好気バクテリアによる分解（右辺第2項）

底泥に堆積した有機物の好氣的無機化は以下の式で表す。

ここで、 $m_{omsed}(\text{day}^{-1})$ は底質での有機物無機化速度、 b_1 は分解される有機物の割合である。

$$\frac{\partial C_{sed}}{\partial t} = m_{omsed} \times b_1 \times \exp(\beta_{poc}^{anb} T) \times \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}} \times C_{sed} \quad (4.32)$$

・嫌気バクテリアによる分解（右辺第3項）

$$K_z \frac{\partial C_{sul}}{\partial z} \Big|_{bottom} = v_{poc}^{anb} (T, DO) \times C_{sed} \times \left(1 - \frac{C_{sul}}{K_{sul} + C_{sul}} \right) \quad (4.33)$$

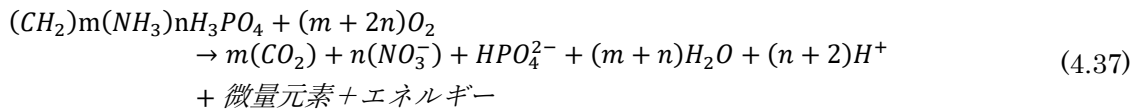
4) 溶存酸素

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{DO}}{\partial t} = & \{ R_1 \times G \times C_{PPL} \} - \{ R_1 \times R_{PPL} \times \exp(a_2 T) \times C_{PPL} \} \\ & - \left\{ R_1 \times m_{om} \times \exp(a_1 T) \times \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} \times C_{DET} \right\} + K_a (C_{sat} - C_{DO}) \\ & - \left\{ dR_1 \times m_{omsed} \times \exp(\beta_{poc}^{anb} T) \times \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} \times C_{sed} \right\} \\ & - \left\{ 2 \times \alpha_{H_2S}^{oxc} \times \exp(\beta_{H_2S}^{oxc} T) \times \frac{DO}{DO + K_{DO}^{oxc}} \times C_{sul} \right\} \end{aligned} \quad (4.34)$$

・光合成による酸素の生産（右辺第1項）

$$\frac{\partial C_{DO}}{\partial t} = R_1 \times G \times C_{PPL} \quad (4.36)$$

R_1 は全酸素要求量と炭素の重量比を表し、有機物の酸化還元反応は以下の式で表される。



従って

$$R_1 = \frac{O \text{ の重量}}{C \text{ の重量}} = \frac{32(m+2n)}{12m} \quad (4.38)$$

となる.

・植物プランクトンの呼吸による消費 (右辺第 2 項)

$$\frac{\partial C_{DO}}{\partial t} = R_1 \times R_{PPL} \times \exp(a_2 T) \times C_{DET} \quad (4.39)$$

・デトリタスの分解による酸素消費 (右辺第 3 項)

$$\frac{\partial C_{DO}}{\partial t} = R_1 \times b_1 \times m_{om} \times \exp(a_1 T) \times \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} \times C_{DET} \quad (4.40)$$

・水面での再曝気 (右辺第 4 項)

$$K_z \left. \frac{\partial C_{oxy}}{\partial z} \right]_{surface} = K_a (C_{sat} - C_{DO}) \quad (4.41)$$

ここで, 飽和酸素濃度 C_{sat} は水温 T と塩分 S から次のように表す.

$$\begin{aligned} C_{sat} = & 14.65 - 0.0841 \times S \\ & + T \left\{ 0.00256 \times S - 0.41022 + T(0.007991 - 0.0000374 \times S \right. \\ & \left. - 0.000077774 \times T) \right\} \end{aligned} \quad (4.42)$$

・底泥からの酸素消費 (右辺第 5 項)

$$K_z \left. \frac{\partial C_{DO}}{\partial z} \right]_{bottom} = dR_1 \times m_{omsed} \times \exp(\beta_{poc}^{anb} T) \times \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} \times C_{sed} \quad (4.43)$$

・硫化水素の酸化 (右辺第 6 項)

$$\frac{\partial C_{DO}}{\partial t} = 2v_{H_2S}^{oxc}(T, DO) \times C_{sul} \quad (4.44)$$

$$v_{H_2S}^{oxc} = \alpha_{H_2S}^{oxc} \times \exp(\beta_{H_2S}^{oxc} T) \times \frac{DO}{DO + K_{DO}^{oxc}} \quad (4.45)$$

5) リン酸態リン

$$\begin{aligned}
\frac{\partial C_{PO_4}}{\partial t} = & -\{R_2 \times G \times C_{PPL}\} + \left\{dR_2 \times m_{om} \times \exp(a_1 T) \times \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}} \times C_{DET}\right\} \\
& + \left\{R_2 \times m_{PPL} \times \exp(a_2 T) \times \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}} \times C_{PPL}\right\} \\
& + \left\{k_p \times \exp\left(pt \times T - 0.35 \times C_{DO}\right)\right\} \\
& + \left\{dR_1 \times m_{omsed} \times \exp(\beta_{poc}^{anb} T) \times \frac{C_{DO}}{K_{DO} + C_{DO}} \times b1 \times p1\right\}
\end{aligned} \tag{4.46}$$

・植物プランクトンによる摂取（右辺第1項）

$$\frac{\partial C_{PO_4}}{\partial t} = R_2 \times G \times C_{PPL} \tag{4.47}$$

$$R_2 : C = \frac{31}{12m} \tag{4.48}$$

・デトリタスの好氣的無機化による回帰，植物プランクトンの呼吸による回帰（右辺第2項）

$$\frac{\partial C_{PO_4}}{\partial t} = dR_2 \times m_{om} \times \exp(a_1 T) \times \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}} \times C_{DET} \tag{4.49}$$

$$\frac{\partial C_{PO_4}}{\partial t} = R_2 \times m_{PPL} \times \exp(a_2 T) \times \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}} \times C_{PPL} \tag{4.50}$$

・底泥からのリンの溶出（右辺第3項）

$$K_2 \left. \frac{\partial C_{PO_4}}{\partial z} \right|_{bottom} = k_p \times \exp\left(pt \times T - 0.35 \times C_{DO}\right) \tag{4.51}$$

6) 硫化物

$$\frac{\partial C_{sul}}{\partial t} = \left\{ v_{poc}^{anb}(T, DO) \times C_{sed} \times 2.7 \right\} + \left\{ v_{poc}^{anb}(T, DO) \times C_{DET} \times 2.7 \right\} - \left\{ \alpha_{H_2S}^{oxc} \times \exp(\beta_{H_2S}^{oxc} T) \times \frac{DO}{DO + K_{DO}^{oxc}} \times C_{H_2S} \right\} \quad (4.52)$$

図-4.2 に、嫌気分解によって生じる硫化水素の溶出、そして酸化に関わる基本過程についての概略を示す。

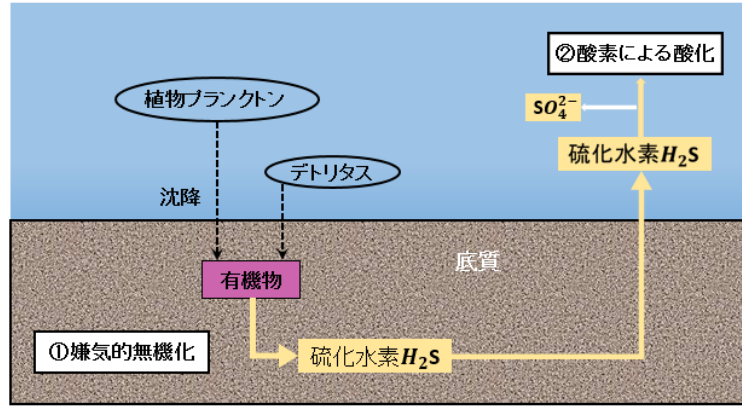
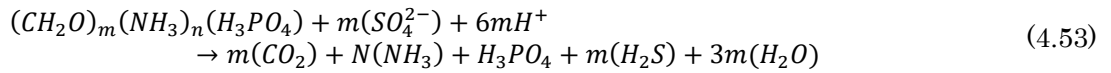
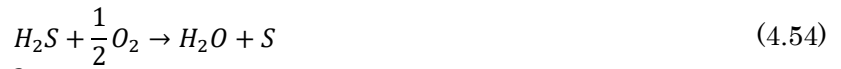


図-4.2 嫌気分解の概略

嫌気環境下の底泥中では、硫酸還元菌による有機物の嫌氣的無機化によって硫化水素 H_2S が生成される。化学量論的にみると、有機物の嫌氣的無機過程は以下のように表現される。



次に硫化水素の酸化に関しても同様に以下のように表現される。



・硫化水素の生成（右辺第1項）

$$K_z \left[\frac{\partial C_{sul}}{\partial z} \right]_{bottom} = v_{poc}^{anb}(T, DO) \times C_{sed} \times 2.7 \quad (4.56)$$

$$\frac{\partial C_{sul}}{\partial t} = v_{poc}^{anb}(T, DO) \times C_{DET} \times 2.7 \quad (4.57)$$

$v_{poc}^{anb}(T, DO)$ は嫌氣的無機化速度(day^{-1})であり、以下の式で表す。

$$v_{poc}^{anb} = \alpha_{poc}^{anb} \exp(\beta_{poc}^{anb} T) \left(1 - \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}}\right) \quad (4.58)$$

図に示すように α_{poc}^{anb} は 0°C における嫌気状態での有機物の無機化速度(day^{-1}), β_{poc}^{anb} は温度定数を表す.
 $\left(1 - \frac{C_{DO}}{C_{DO} + K_{DO}}\right)$ は貧酸素状態が進めば嫌気分解を促進することを表している.

・硫化水素の酸化過程および, それによる酸素の消費 (右辺第2項)

$$\frac{\partial C_{sul}}{\partial t} = v_{H_2S}^{oxc}(T, DO) \times C_{sul} \quad (4.59)$$

$v_{H_2S}^{oxc}$ は硫化水素の酸化速度(day^{-1})であり, 以下の式で表す.

$$v_{H_2S}^{oxc} = \alpha_{H_2S}^{oxc} \times \exp(\beta_{H_2S}^{oxc} T) \times \frac{DO}{DO + K_{DO}^{oxc}} \quad (4.60)$$

α_{poc}^{anb} は 0°C での H_2S の酸化速度(day^{-1}), $\beta_{H_2S}^{oxc}$ は温度定数を表す.

7) コロイド状硫黄

$$\frac{\partial C_{SO}}{\partial t} = 0.5 \times v_{H_2S}^{oxc}(T, DO) \times C_{sul} - w_{so} \times \frac{\partial C_{so}}{\partial z} \quad (4.61)$$

・コロイド状硫黄の生成 (右辺第1項)

$$\frac{\partial C_{SO}}{\partial t} = 0.5 \times v_{H_2S}^{oxc}(T, DO) \times C_{sul} \quad (4.62)$$

と表される. ここで C_{SO} は硫黄の濃度である.

・コロイド状硫黄の消失 (右辺第2項)

$$\frac{\partial C_{SO}}{\partial t} = w_{so} \times \frac{\partial C_{so}}{\partial z} \quad (4.63)$$

また, Ecolab における概要値を以下の表-4.1 に示す.

表-4.1 Ecolab における概要値

State Variables	7
Auxiliary Variables	16
Constants	32
Processes	31
Forcings	6

また, Ecolab の constants において与えたパラメータの値の一覧を表-4.2 に示す.

表-4.2 Ecolab パラメータ値一覧

項目	値	単位
gmax	0.693	1/day
optimal Light	50	dimensionless
Phytoplankton dead speed	0.05	1/day
ratio of Oxygen production by phytoplankton	3.47	dimensionless
ratio of Phosphorus production by phytoplankton	0.0243	dimensionless
ratio of Oxygen production by det	3.47	dimensionless
ratio of Phosphorus production by det	0.0243	dimensionless
0degree Phytoplankton breath speed	0.02	1/day
0degree mukika speed	0.14238	1/day
sediment mukika speed	0.14238	1/day
g-temp-coefficient	0.0693	dimensionless
1 temperature coefficient	0.0693	dimensionless
2 temperature coefficient	0.0523	dimensionless
bsed-temperature coefficient	0.0693	dimensionless
bunnkaisei yuukibutu wariai	0.6	dimensionless
Oxy half houwateisuu	0.3	mg/l
P half houwateisuu	0.0002	mg/l
Phytoplankton settling speed	0.032	m/day
det settling speed	2	m/day
sulfide dissolution oxygen limit	0.5	mg/l
constant number	1.93	dimensionless
asul	12	1/day
sul/c	2.7	dimensionless
ased	0.05	1/day
bsul	0.0693	dimensionless
sediment P coefficient	0.00015	dimensionless
sed-P-temp-coefficient	0.115	dimensionless
Phosphorus-coefficient	1	dimensionless
sul-half-houwateisuu	40	mg/l
background sediment concentration	1.2	g/m ²
Sulfur settling speed	0.5	m/day
Water surface air	0	mg/l

4. 2 数値実験

4. 2. 1 現地観測結果の数値再現

(1) 地形

検討対象領域周りは、岸壁や防泥柵により閉鎖的な空間であるが、本検討では閉鎖領域のみをモデル化し、図-4.3 のように、船橋航路との接続部と漁場への接続部となる防泥柵の切れ目を開境界として扱った。地形データは、三番瀬自然環境データベースに収録されている、2012 年の深浅測量成果（測線 10m 間隔）を使用した。基データは A. P. 表記であるが、T. P. 表記に換算した。計算格子は、水中発生装置の整流筒内径が約 1mであることを考慮し、噴流口およびその周辺で 1m の最小格子領域として設定した。また、計算の効率化を図るため、粗格子での計算結果を、同領域内に存在する細格子への境界条件として計算実行中に逐次的に与え、同時に細格子領域の計算が可能となるネスティングを採用し、噴流部から遠ざかるに従って格子領域を 3m, 9m となるように粗格子を設定した。そのため、上記の標高データについてスプラインによる内挿を実施し、各格子領域に対応した地形データに再整理した。また本計算モデルの計算格子は構造格子を採用しているが、境界設定方法の関係より、片側の側壁を船橋航路側に延伸し、図-4.4 のように領域を設定した。



出展：Google earth

図-4.3 検討領域

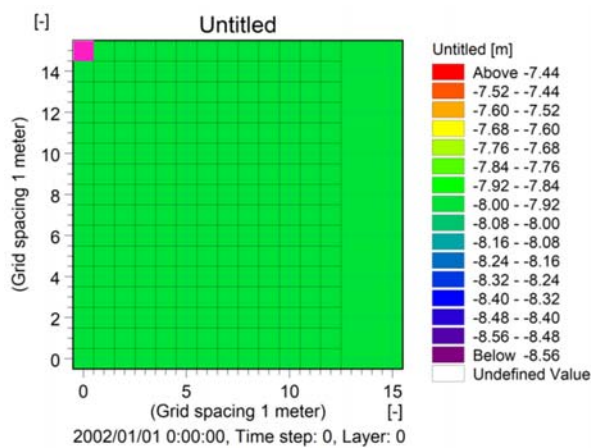
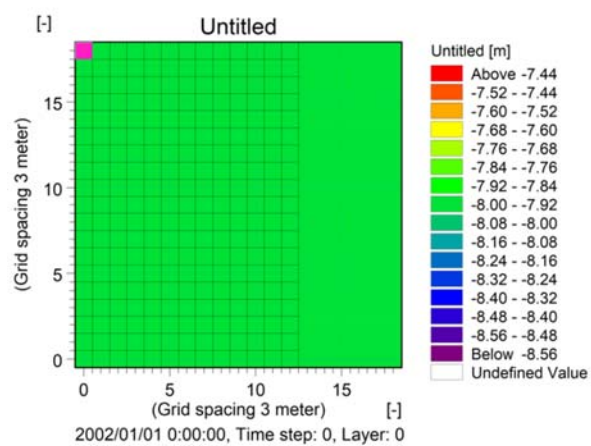
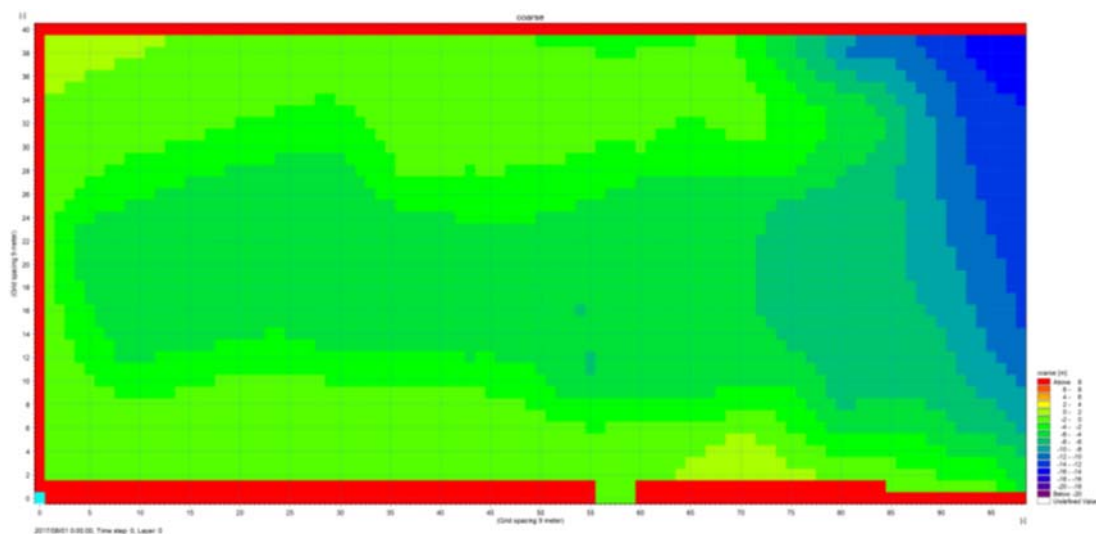


図-4.4 数値計算地形データ（上：9m 格子，中：3m 格子，下：1m 格子）

（２） 検討ケース

現地状況再現計算結果について正確な解釈を得るため、水流発生装置の有無、計算期間中の青潮水の流入の有無等の主要因を変更した検討ケースについても実施し、現地状況再現計算結果との比較により、現地再現計算結果について考察した。以下に検討ケースを示す。

Case1: 比較検討用計算（水流発生装置なし、青潮水の流入なし）

Case2: 比較検討用計算（水流発生装置なし、青潮水の流入あり）

Case3: 現地状況再現計算（水流発生装置あり、青潮水の流入あり）

（３） 境界条件

境界条件には、流況については、図-4.5 に示す海上保安部により推算された船橋における天文潮位を与えた。水質は水温、塩分、DO について、現地観測結果が存在する地点の中で、境界に最も近傍となる B1（船橋航路 11 ブイ）および B2（漁場平場）における、図-4.6、4.7 に示す青潮前の平常時（2017 年 8 月 30 日の B1、B21）と図-4.8、4.9 に示す青潮時（2017 年 9 月 2 日の B1、B22）の観測結果を採用した。各観測結果は、本計算モデルの層厚に対応するよう、鉛直方向 0.5m 間隔で平均化处理して与えた。計算期間は 8 月 30 日 10:00:00 から 9 月 3 日 08:00:00 までであり、9 月 1 日 15:00:00 から 9 月 3 日 00:00:00 の期間は青潮時の観測結果を、それ以外の期間は平常時の観測結果を与えた。

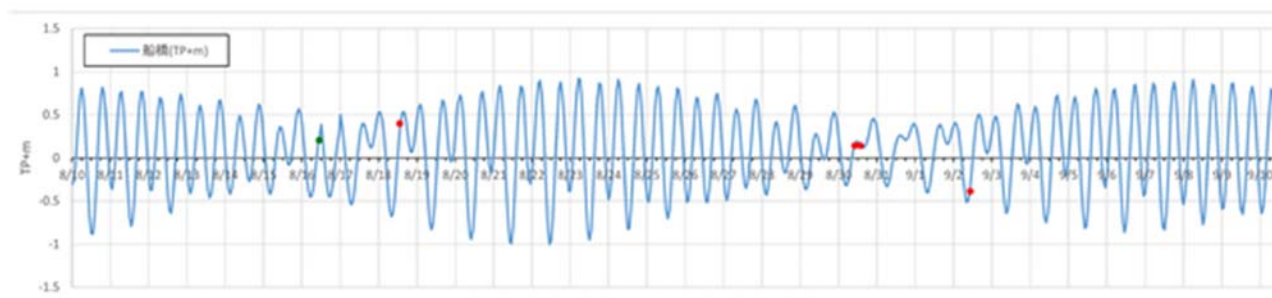


図-4.5 船橋における天文潮位

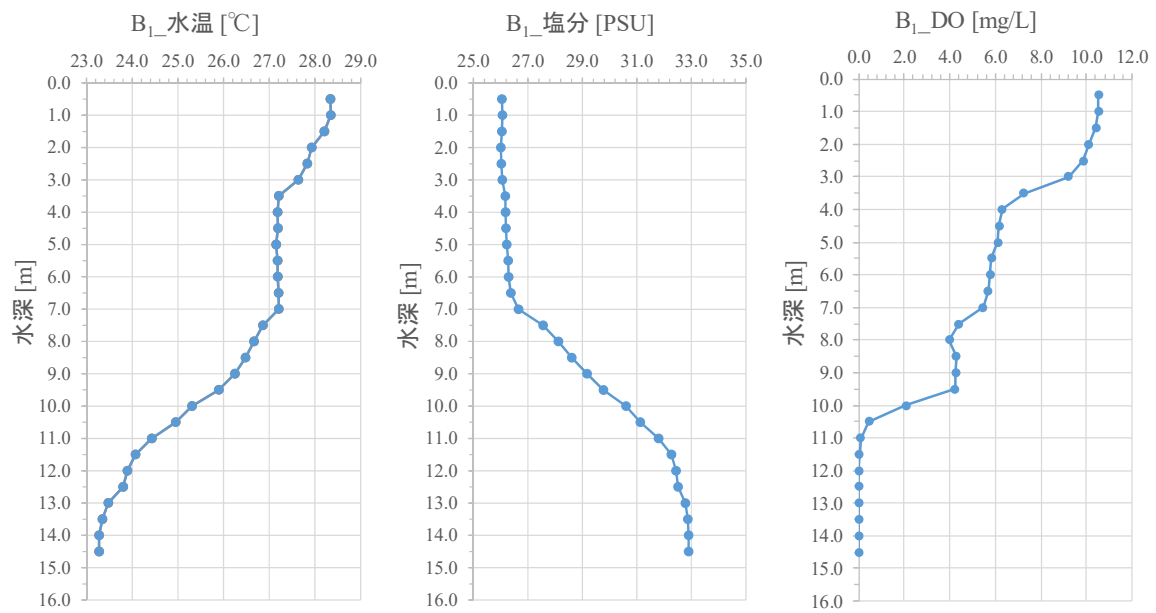


図-4.6 平常時 B₁境界条件 (2017 年 8 月 30 日観測結果時の各層における平均値)

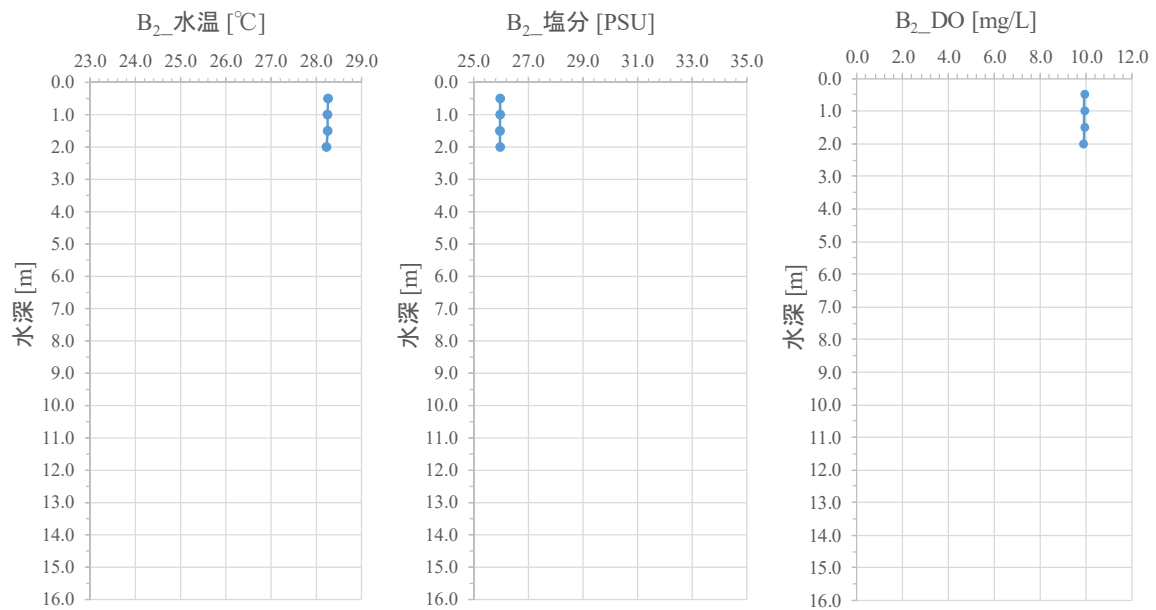


図-4.7 平常時 B₂境界条件 (2017 年 8 月 30 日観測結果時の各層における平均値)

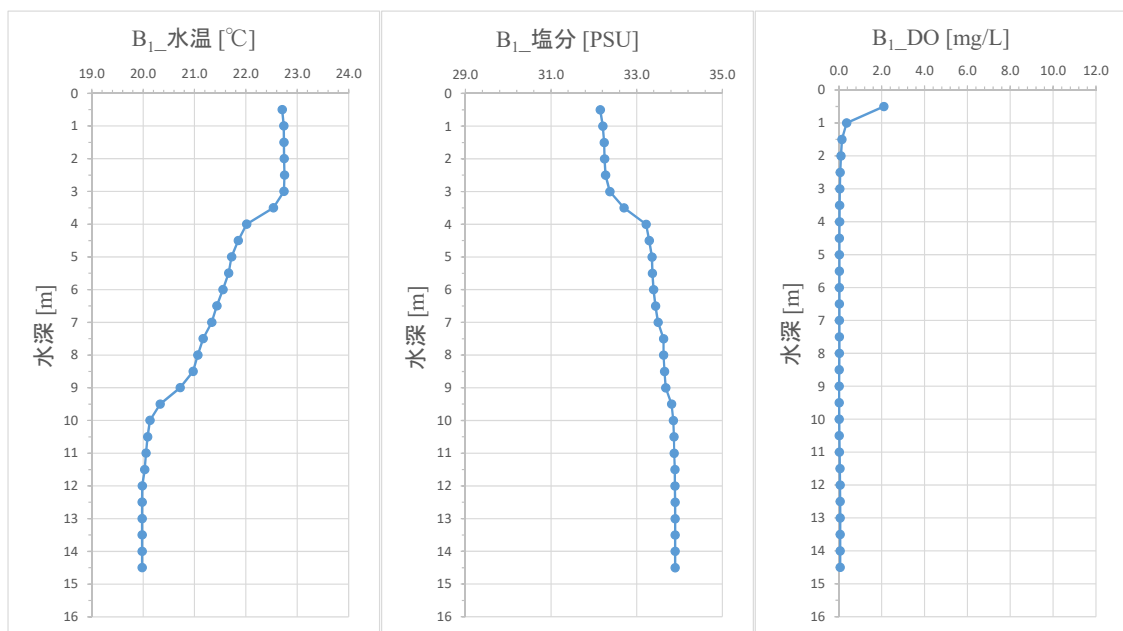


図-4.8 青潮時 B₁ 境界条件 (2017 年 9 月 2 日観測結果時の各層における平均値)

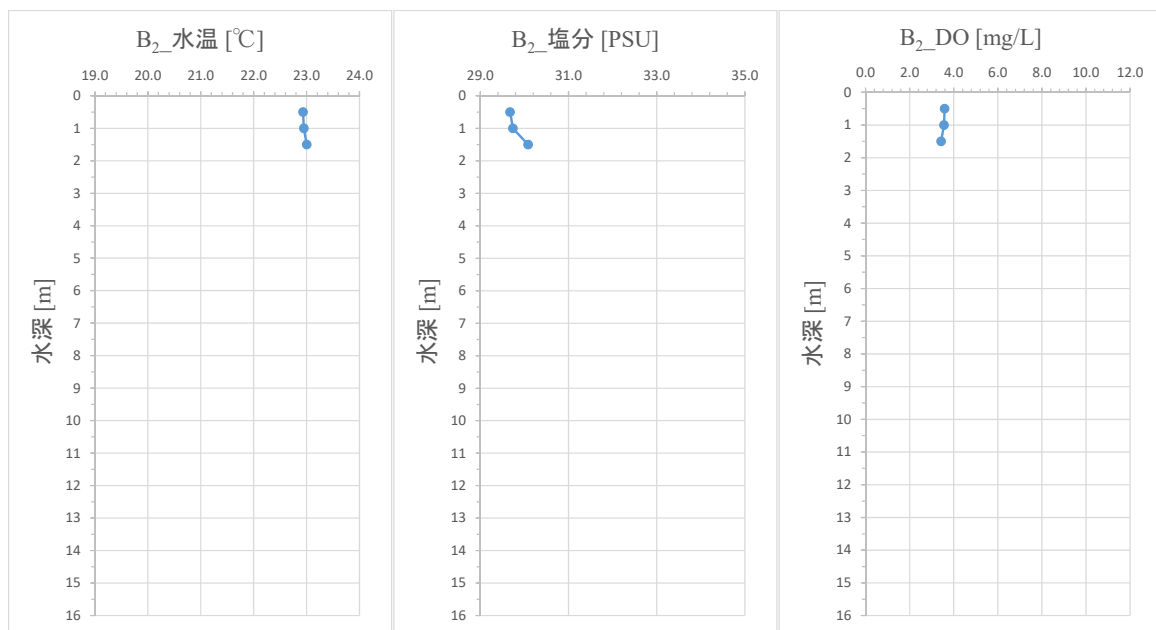


図-4.9 青潮時 B₂ 境界条件 (2017 年 9 月 2 日観測結果時の各層における平均値)

(4) 初期条件

初期条件には、青潮前の平常時（2017 年 8 月 30 日）に水流発生装置周辺で観測した結果（水流発生装置の影響の大きな装置前面を除く）を用いて、本計算モデルの層厚に対応するよう、鉛直方向 0.5m 間隔で平均化处理し、また全測点で平均化处理した値を、対象領域全面に一様に与えた。図-4.10 に青潮時に与えた初期条件を示す。

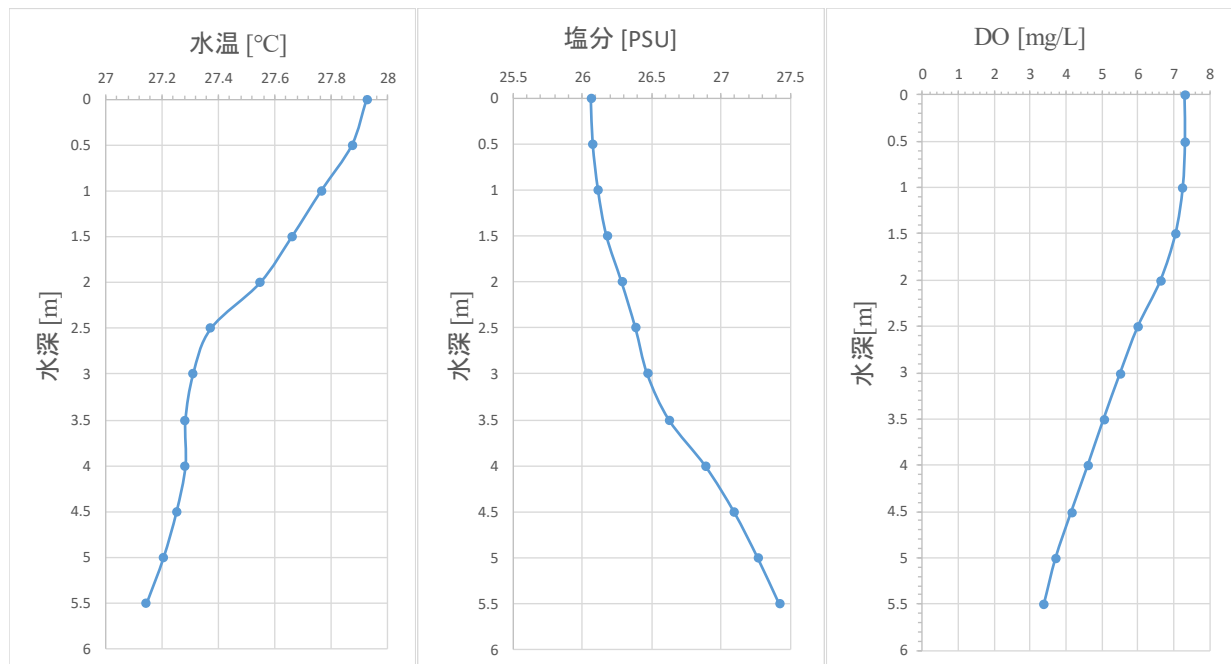
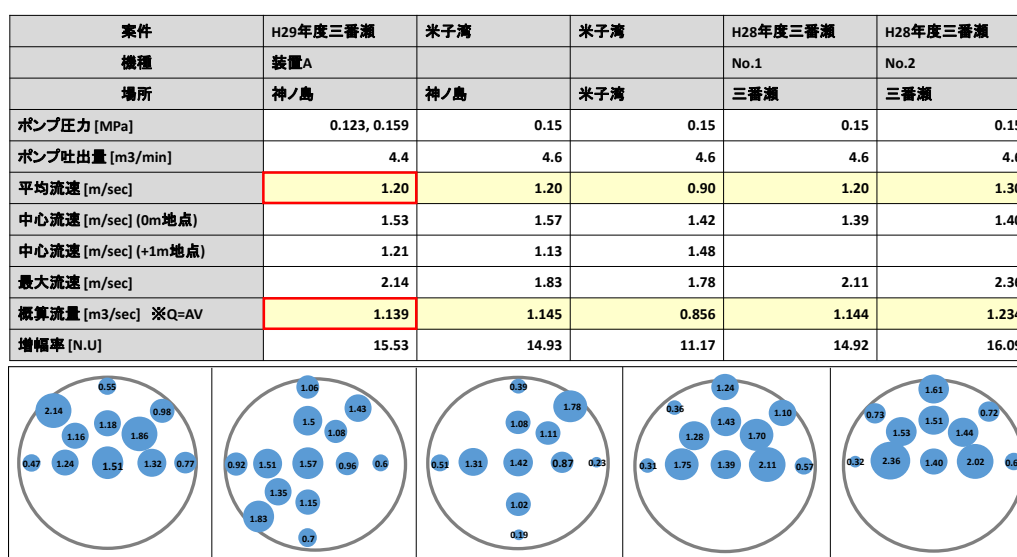


図-4.10 青潮時初期条件

（５）水流発生装置出力

図-4.11 に水流発生装置噴出口における流速測定結果を示すが、平均流速は 1.2m/s で、このときの流量は 1.139m³/s となった。このとき、流速 v1 は 1.2m/s、流量 Q1 は 1.139m³/s、流速 v2 は v1 の 1/30 となる 0.04m/s、流量 Q2 は 0.038m³/s とした。

対象期間中における水流発生装置の稼働状況としてポンプ圧力を確認したところ、定期メンテナンスや流速測定時における一時的な稼働停止、6 月上旬のスズキ稚魚による目詰まりと 9 月中旬の台風に伴うごみの目詰まりによる数日間の稼働停止を除き、100%近い状態を維持していた。そのため、本検討でモデル化する水流発生装置の出力については、常時 100%として扱った。



出典：船橋市漁業協同組合（2017）を基に作成

図-4.11 水流発生装置噴流口の流速測定結果

4. 2. 2 水流発生装置の現地適用に関する数値実験

(1) 計算条件

適用計算プログラムは、現地観測結果の数値再現と同様のものを用いた。水流発生装置の現地適用に関する数値実験として、現地の空間スケールと潮流との関係を踏まえつつ、主要な因子に着目して簡略化し、水流発生装置の基本性能模擬を実施した。モデル概要を図-4.12 に示す。船橋港内の地点1周辺を想定し、横断方向に約300m、延長方向に約900mの領域をとり、水深は7.5mで一様とした。側方2面は壁面とし、領域の両端となる横断方向の2面を開境界とした。境界条件は、流況には潮汐流を想定した正弦関数を最大流速が0.1m/sとなるように、図-4.13のとおりに与えた。水質は塩分と水温について、成層状態をシグモイド関数にて模擬し、一定値を図-4.14のとおりに与えた。初期条件についても境界条件と同値を平面一様に与えた。先述した図-4.11に水流発生装置噴出口における流速測定結果を示したが、平均流速は1.2m/sで、このときの流量は1.139m³/sとなった。そのため、本モデルにおける水流発生装置による噴流の模擬については、装置直上の表層水を底層へ送水し、海底面から2層目（水深6.5m-7.0m）より水平噴流を与えた（v₂, Q₂）。また、噴流層周辺の海水取込みの再現として、後方より水平噴流を与えた（v₁, Q₁）。このとき、流速v₁は1.2m/s、流量Q₁は1.139m³/s、流速v₂はv₁の1/30となる0.04m/s、流量Q₂は0.038m³/sとした。計算格子は、整流筒内径が約1mであることを考慮し、噴流口およびその周辺で1mの最小格子領域とし、噴流部から遠ざかるに従って粗格子（3m, 9m）となるネスティングを採用し、計算の効率化を図った。図-4.15にネスティング設定状況を示す。

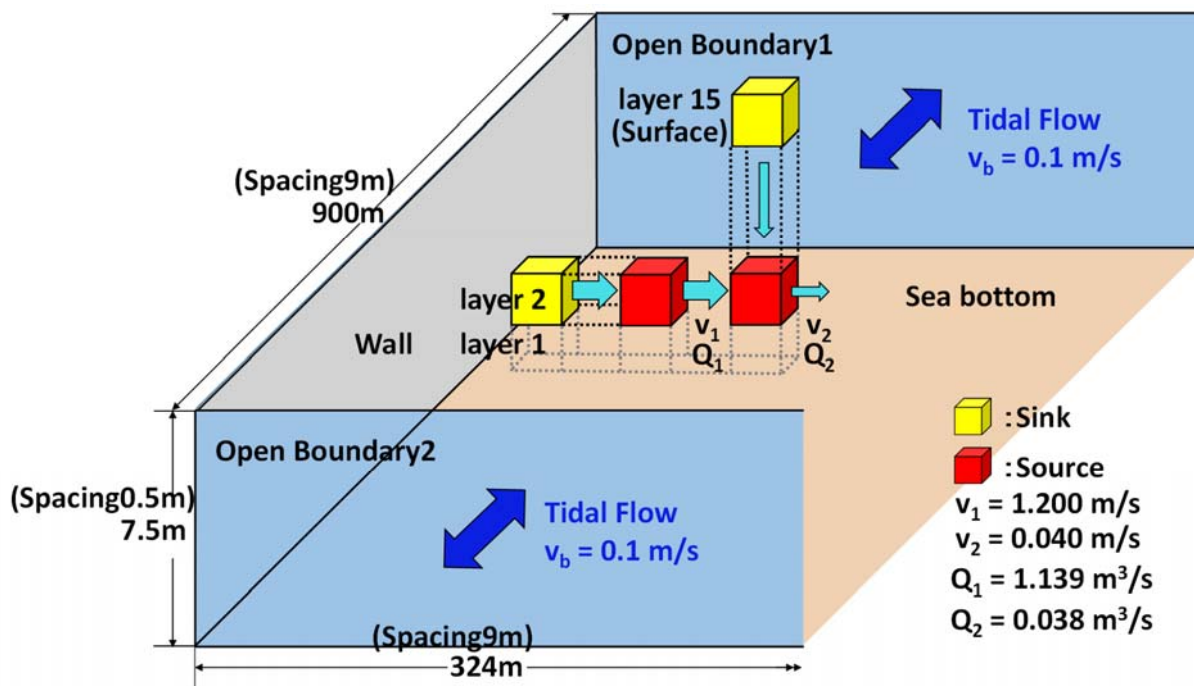


図-4.12 モデル概要図

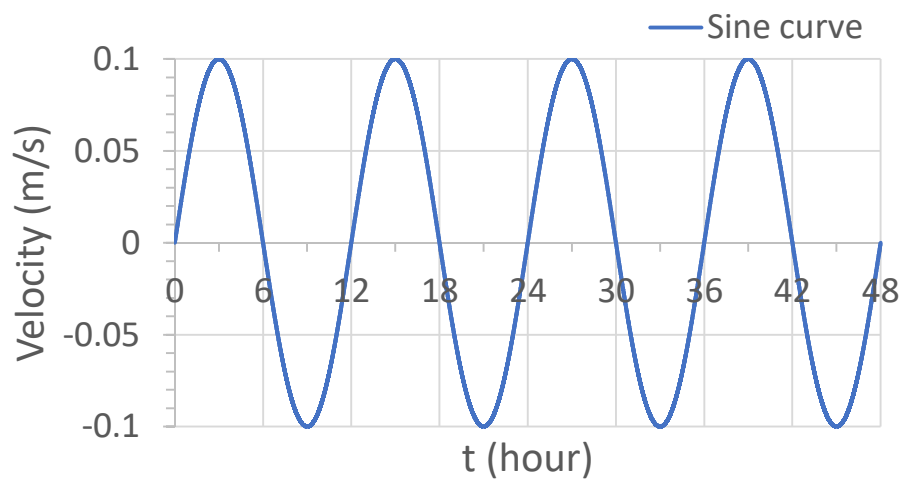


図-4.13 境界条件（流況）

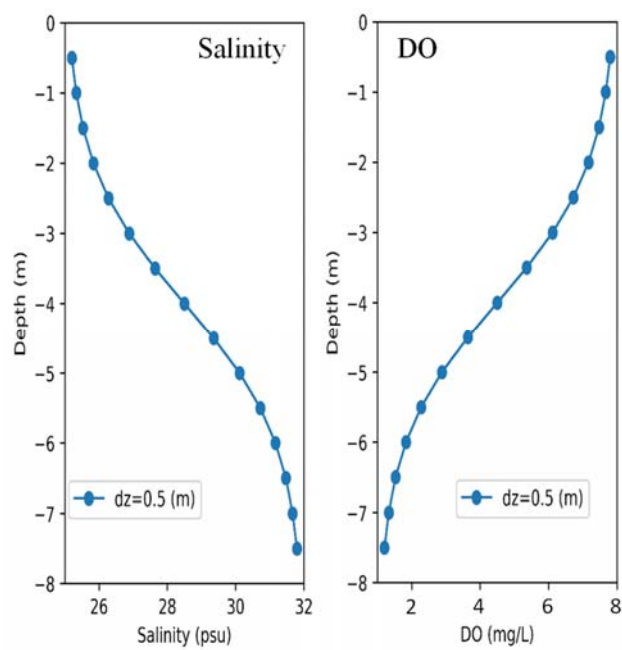


図-4.14 境界条件および初期条件の鉛直プロファイル

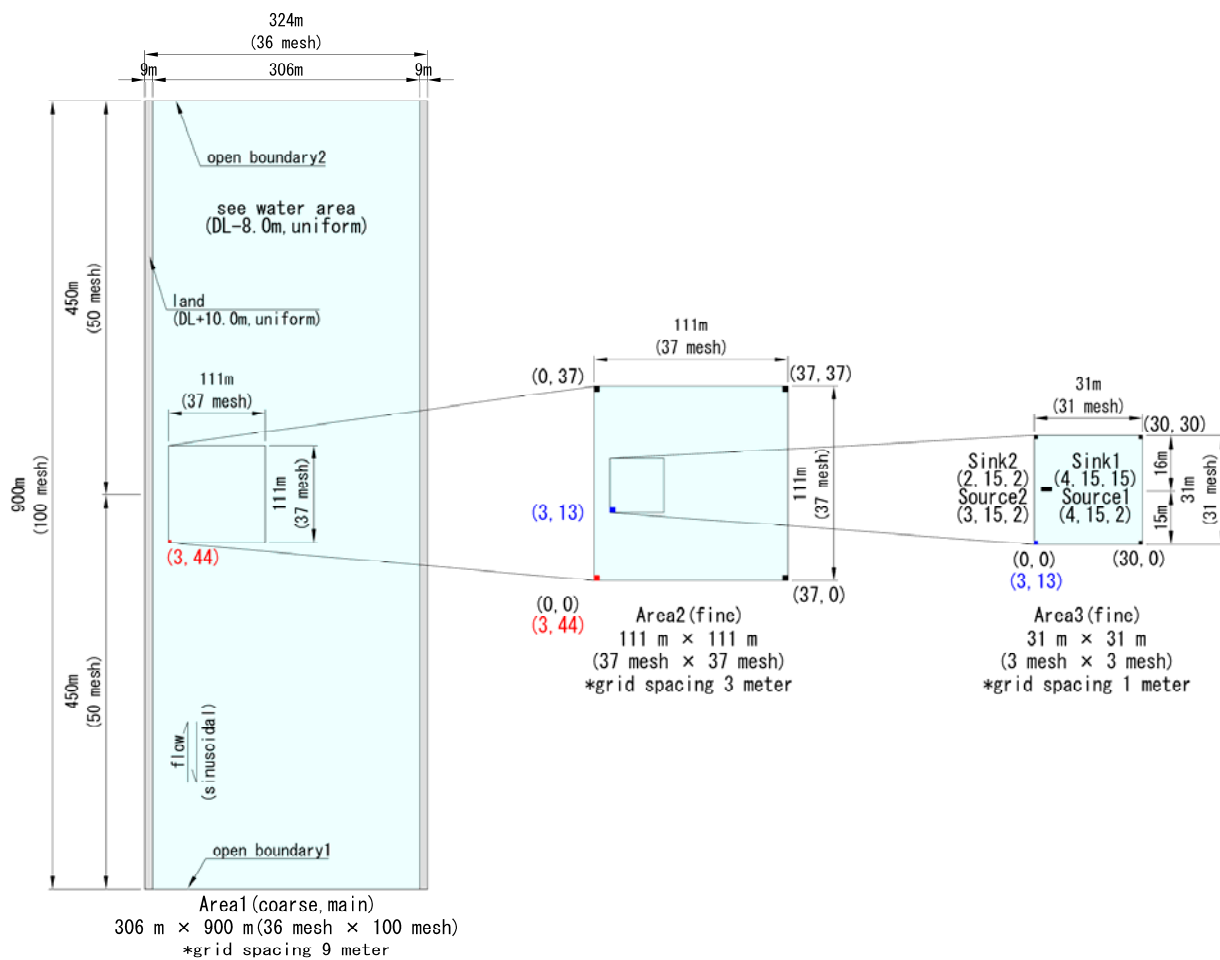


図-4.15 ネスティング設定状況

5. 数値計算の結果と考察

5. 1 現地観測結果の数値再現

5. 1. 1 結果

以下に Case1, Case2, Case3 における計算結果の流速, DO の平面図および断面図を示す. 平面図および断面図は 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00 のものである. いずれも水流発生装置を設置したと仮定した箇所で切り取った結果である.

Case1: 比較検討用計算 (水流発生装置なし, 青潮水の流入なし) の数値計算結果を以下に示す.

図-5.1, 図-5.2 の流速の平面図, 断面図と図-4.5 の天文潮位を照らし合わせて見ると, 上げ潮時には正の方向に流速を持ち, 下げ潮時には負の方向に流速を持っていることが分かる. しかしその動きは一様ではなく, 表層と底層では流向が異なっている. また平面図で見た場合流速は領域奥部まで及んでいる. 9 月 1 日 18:00 の結果に如実に表れているように領域中心部において周りと流速の様子が異なるのは漁場側の開境界において海水の流入・流出が起きていることが原因と考えられる.

また, 図-5.3, 図-5.4 の DO の平面図, 断面図と図-4.5 の天文潮位を照らし合わせてみると, 上げ潮時には DO が高くなり, 下げ潮時には DO が低くなっていることが分かる. これは上げ潮時には DO を豊富に含んだ海水が流入してくることが原因と考えられる.

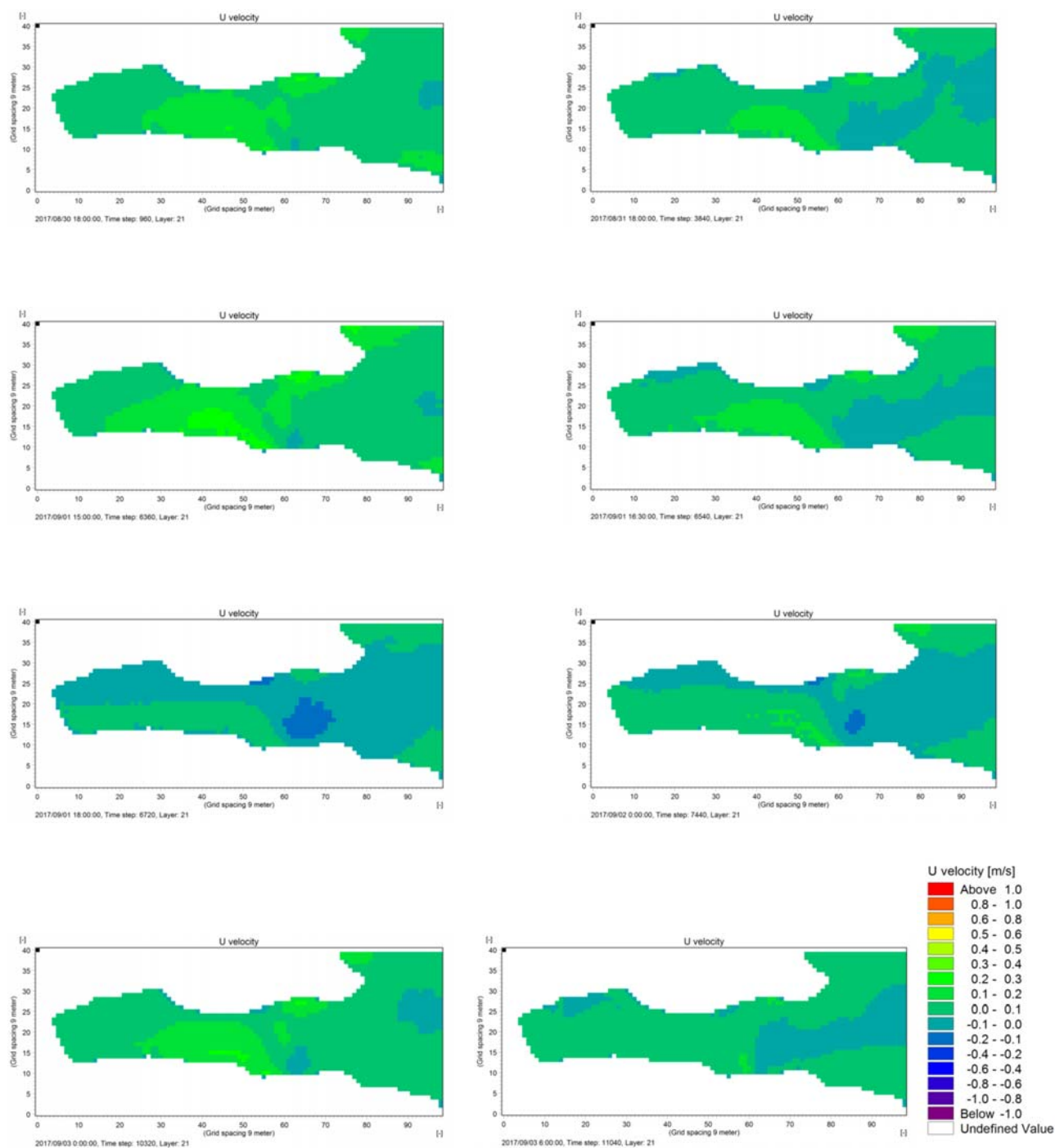


図-5.1 流速平面図

(鉛直第 21 層 (深度 3.5-4.0m) における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの流速平面分布の計算値、左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00)

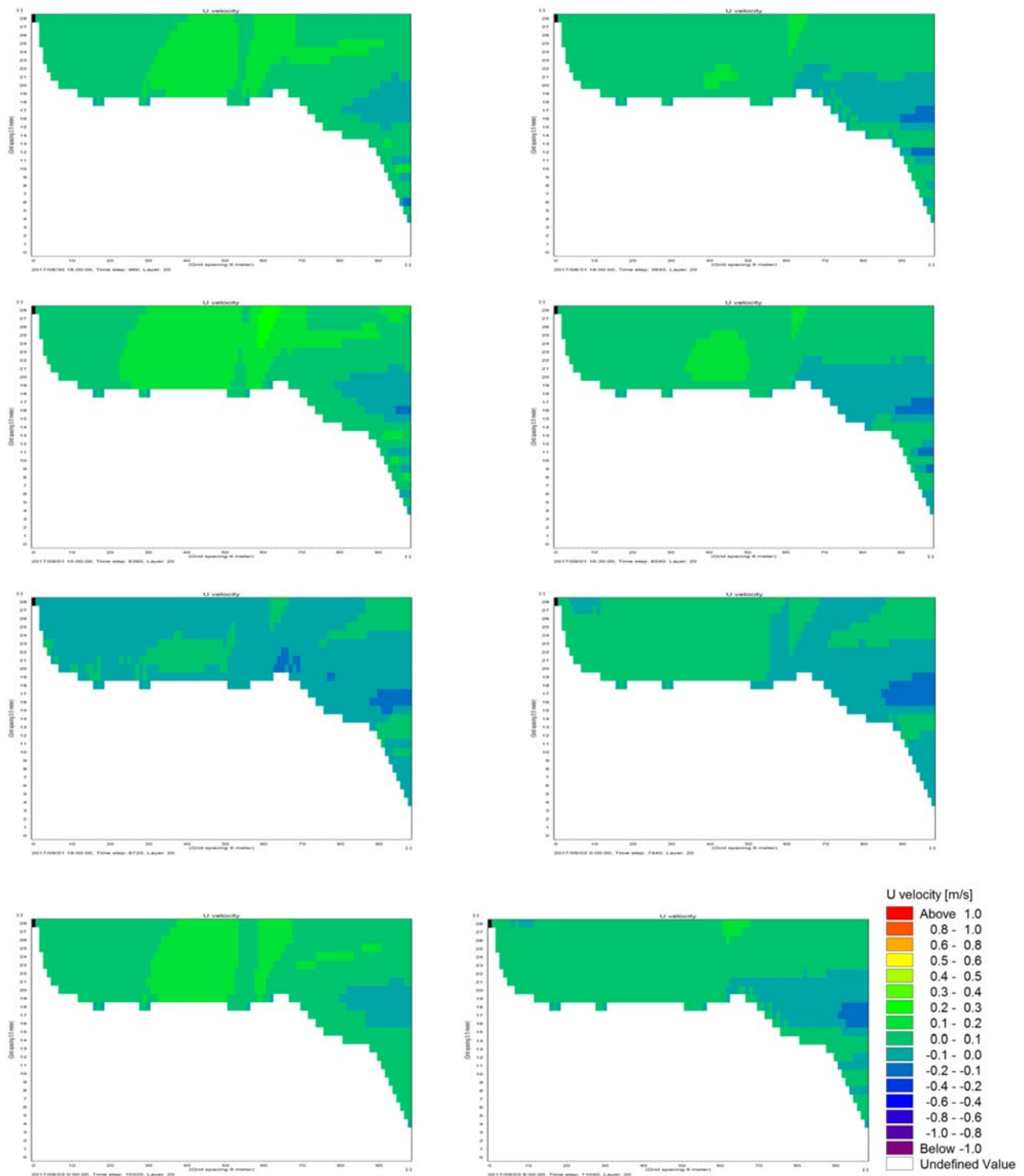


図-5.2 流速断面図

(横断方向第 21 層における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの流速分布の計算値, 左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00)

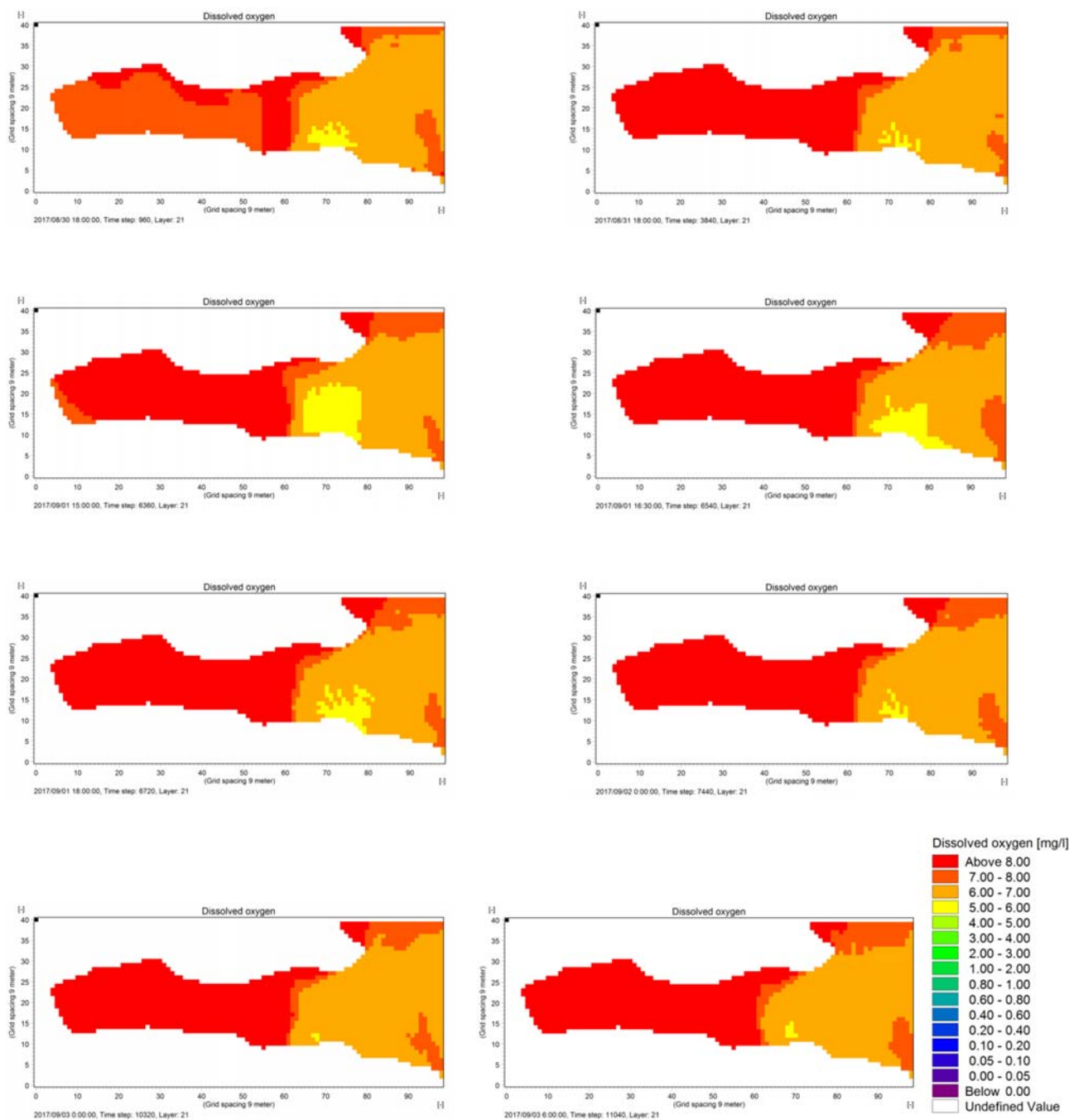


図-5.3 DO 平面図

(鉛直第 21 層 (深度 3.5-4.0m) における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの DO 分布の計算値, 左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00)

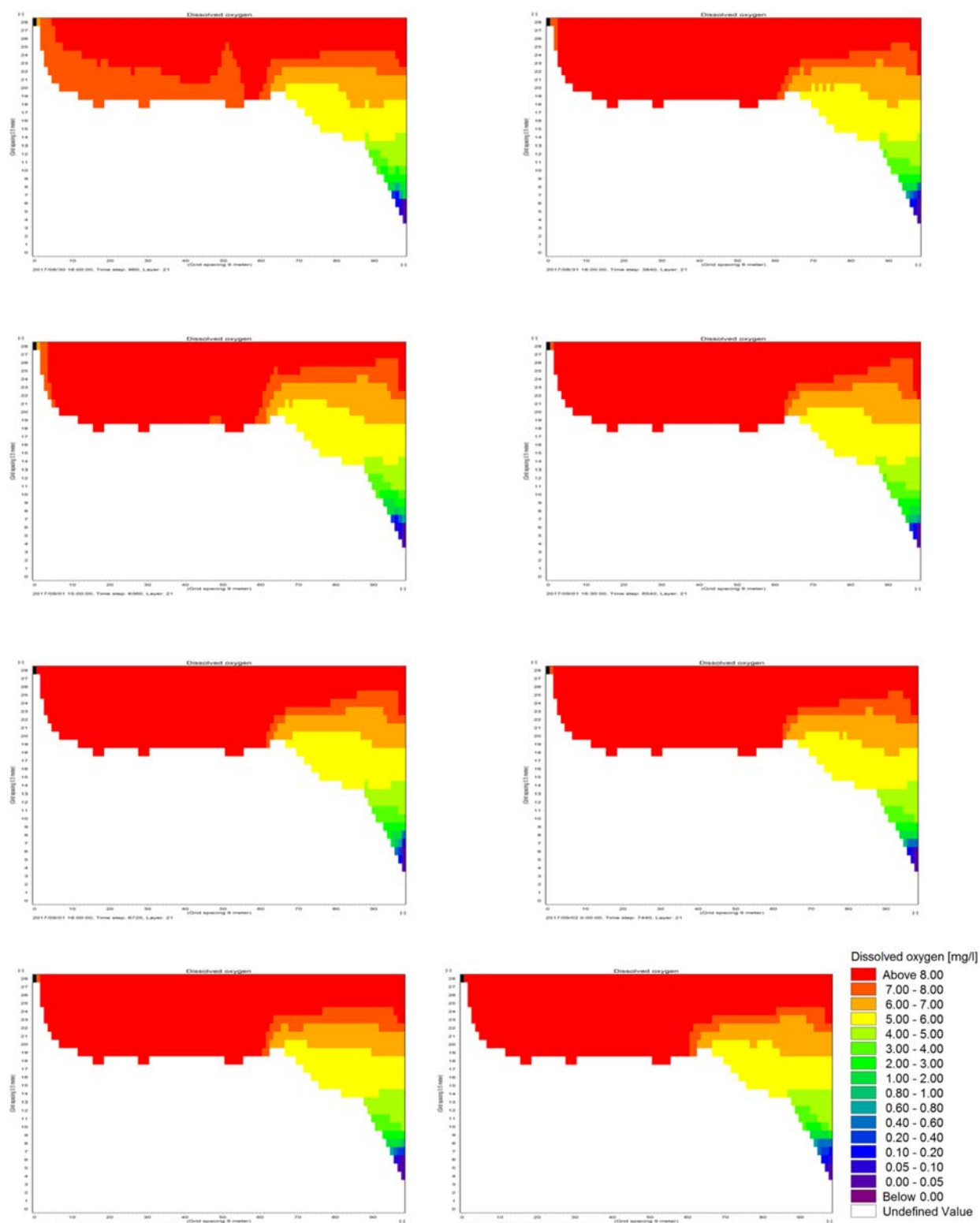


図-5.4 DO断面図

(横断方向第21層における2017年8月30日から9月3日までのDO分布の計算値、左上から右下に向かう順に8月30日18:00、8月31日18:00、9月1日15:00、16:30、18:00、9月2日0:00、9月3日0:00、6:00)

Case2: 比較検討用計算（水流発生装置なし，青潮水の流入あり）

図-5.5 の 9 月 1 日 15:00, 16:30, の結果から, 15:00 に青潮が発生し, 16:30 には領域奥部まで青潮が広く進入したことが分かる. それと比べて 9 月 3 日 0:00 の結果からは青潮発生後平常時の水質の海水が流入していることが流速の動きから見て取れる. 図-5.6 の同時刻の結果からも同じことが確認でき, 青潮の発生を模擬出来ていることが分かる.

また, 図-5.7 の 9 月 1 日 15:00 の結果からも DO の低い青潮が流入してくる様子を見ることが出来る. 9 月 1 日 16:30 の結果からは, 領域のほぼ全域において貧酸素状態となっていることが分かる. 図-5.8 の 9 月 1 日 16:30, 18:00, の結果から, 青潮発生一時間半後には全域の底層が貧酸素状態となっており, 三時間後の 18:00 には表層を除く領域全体が貧酸素状態となっている. しかし図-5.8 の 9 月 2 日 0:00 の結果では前日 18:00 の結果と比べ貧酸素になっていない表層が厚くなっており, これは上げ潮により多少なりとも DO を含んだ海水が流入したためと考えられる. また 9 月 3 日 0:00 には平常時の水質の流入により DO は回復を始め, 6 時間後には領域の全域において平常時の状態に戻ったことが分かる. 青潮発生時の結果を Case1 の結果と比較した際, 通常時であれば貧酸素状態にはならなかった領域であっても, ひとたび青潮が発生してしまうと一日も経たず貧酸素状態となることが分かる. また, この領域が浅場であり, 青潮の影響が行き届きやすいことも原因と考えられる.

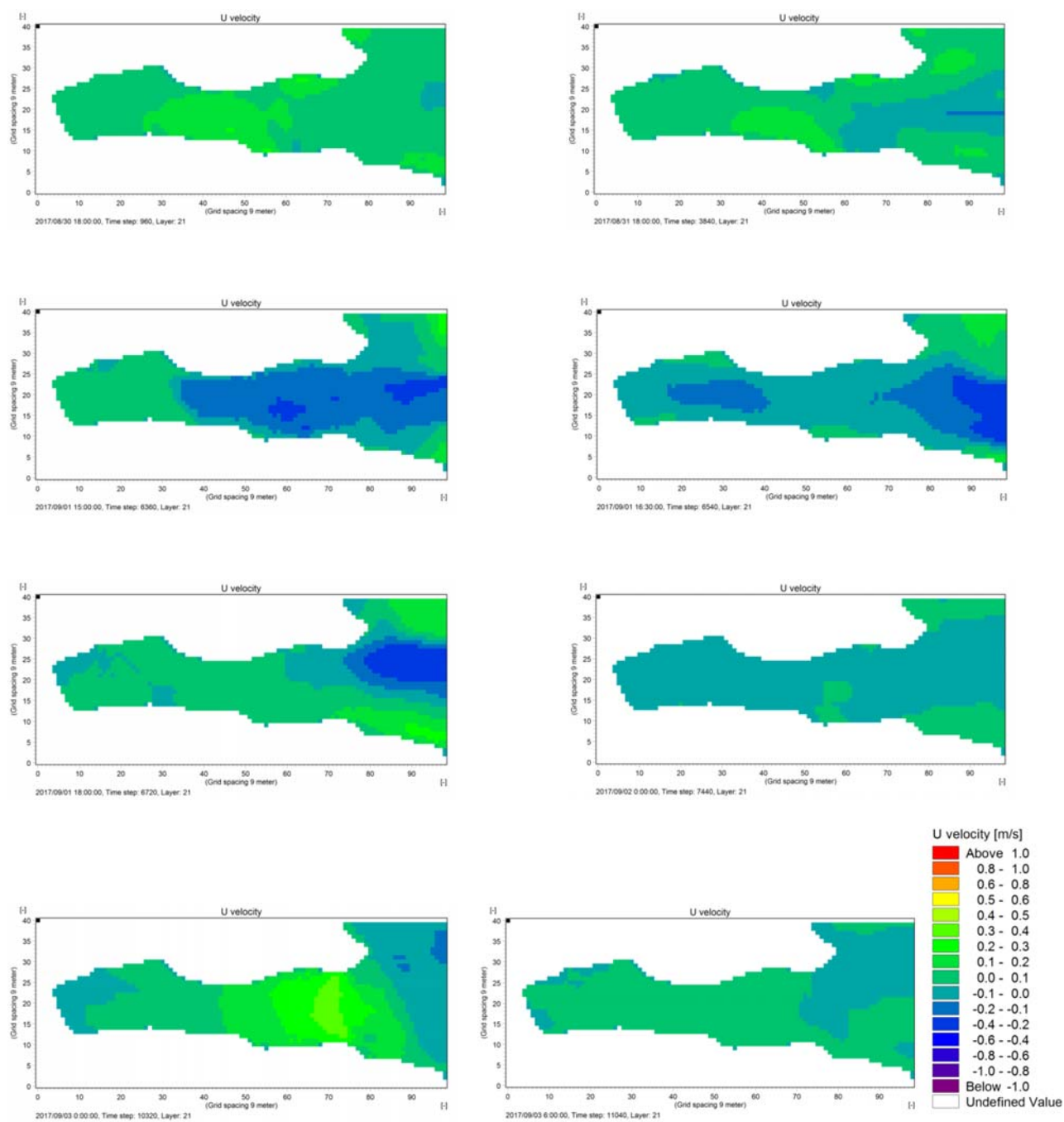


図-5.5 流速平面図

(鉛直第 21 層 (深度 3.5-4.0m) における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの流速平面分布の計算値、左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00、8 月 31 日 18:00、9 月 1 日 15:00、16:30、18:00、9 月 2 日 0:00、9 月 3 日 0:00、6:00)

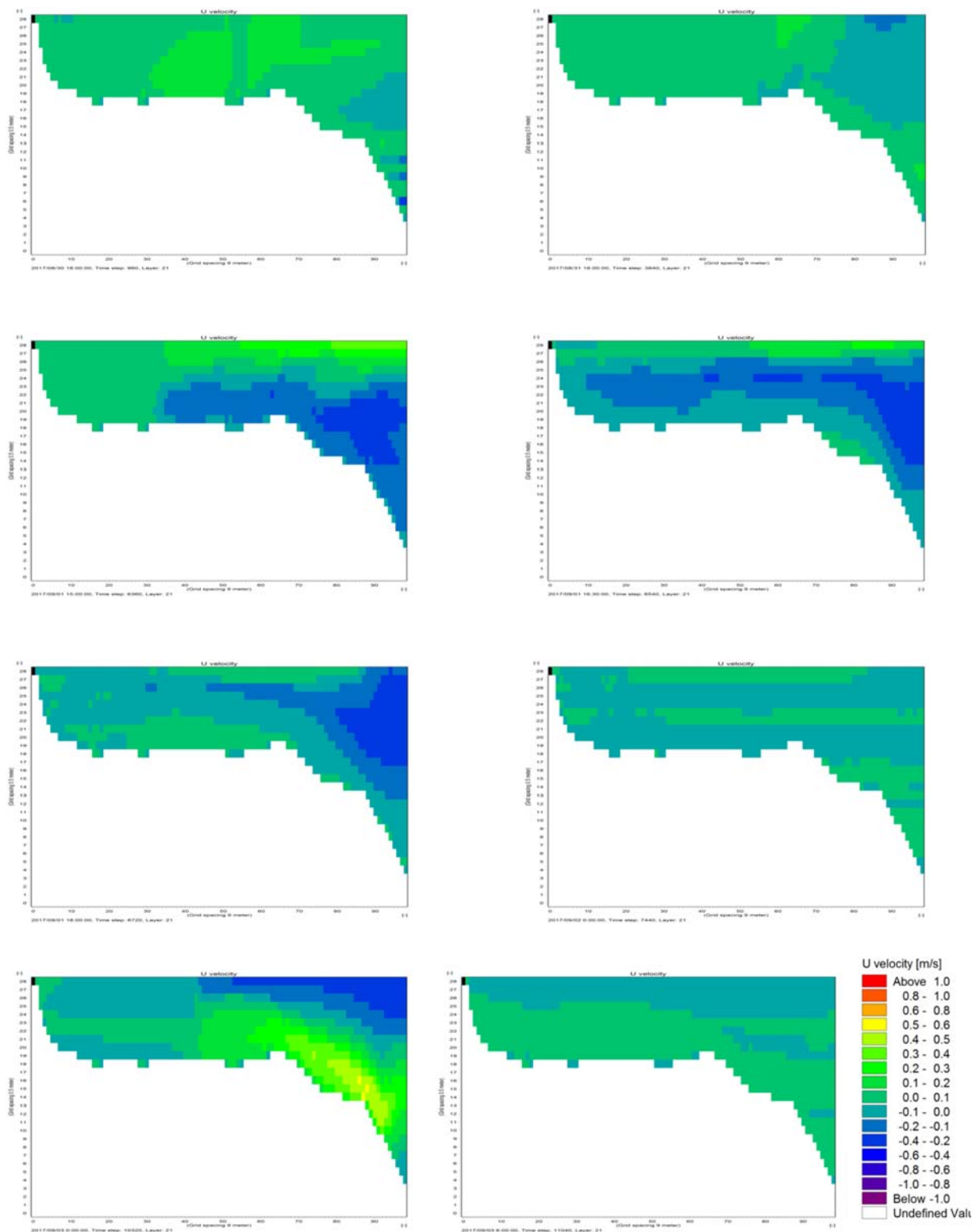


図-5.6 流速断面図

(横断方向第 21 層における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの流速分布の計算値, 左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00)

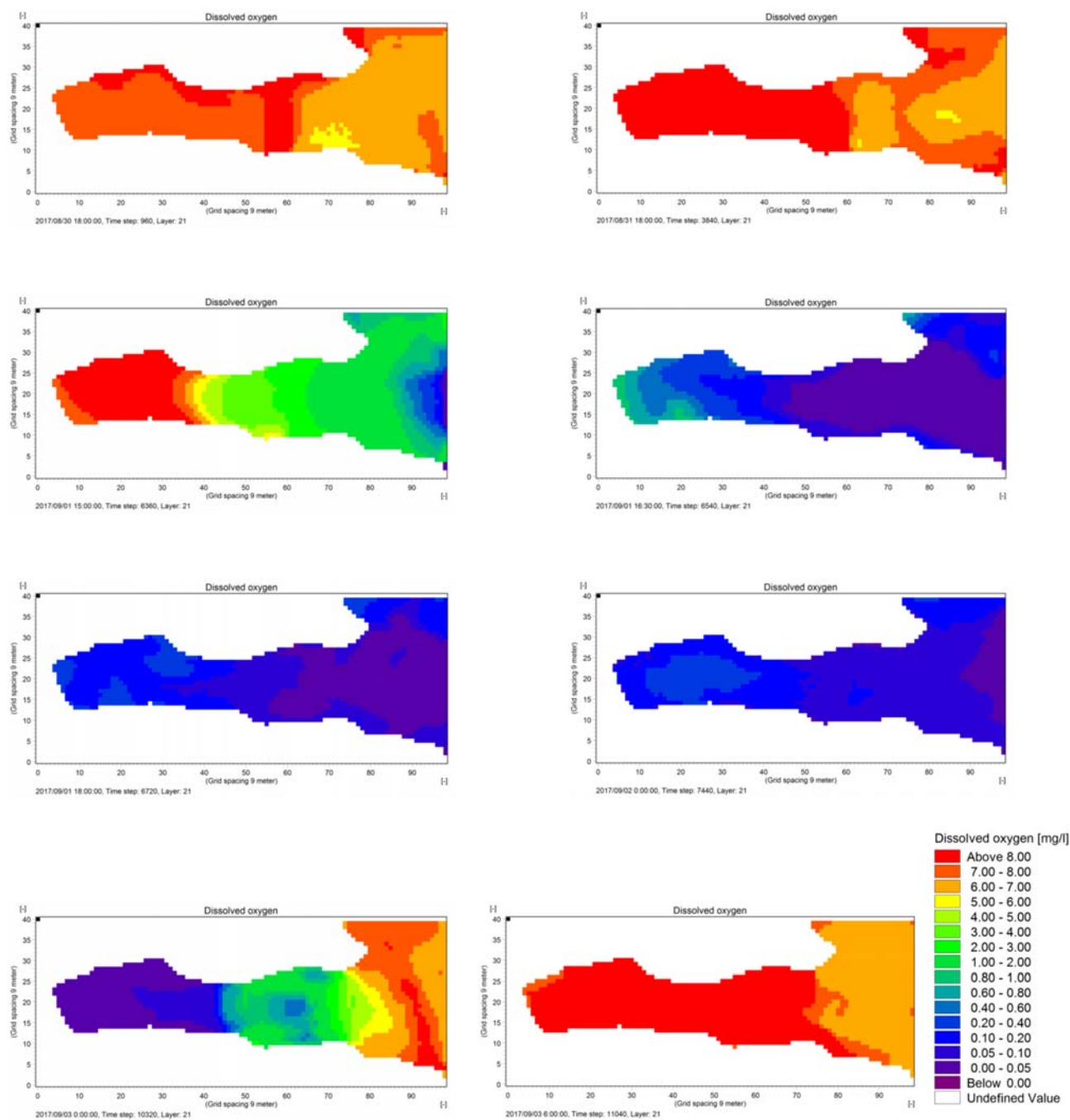


図-5.7 DO 平面図

(鉛直第 21 層 (深度 3.5-4.0m) における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの DO 分布の計算値, 左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00)

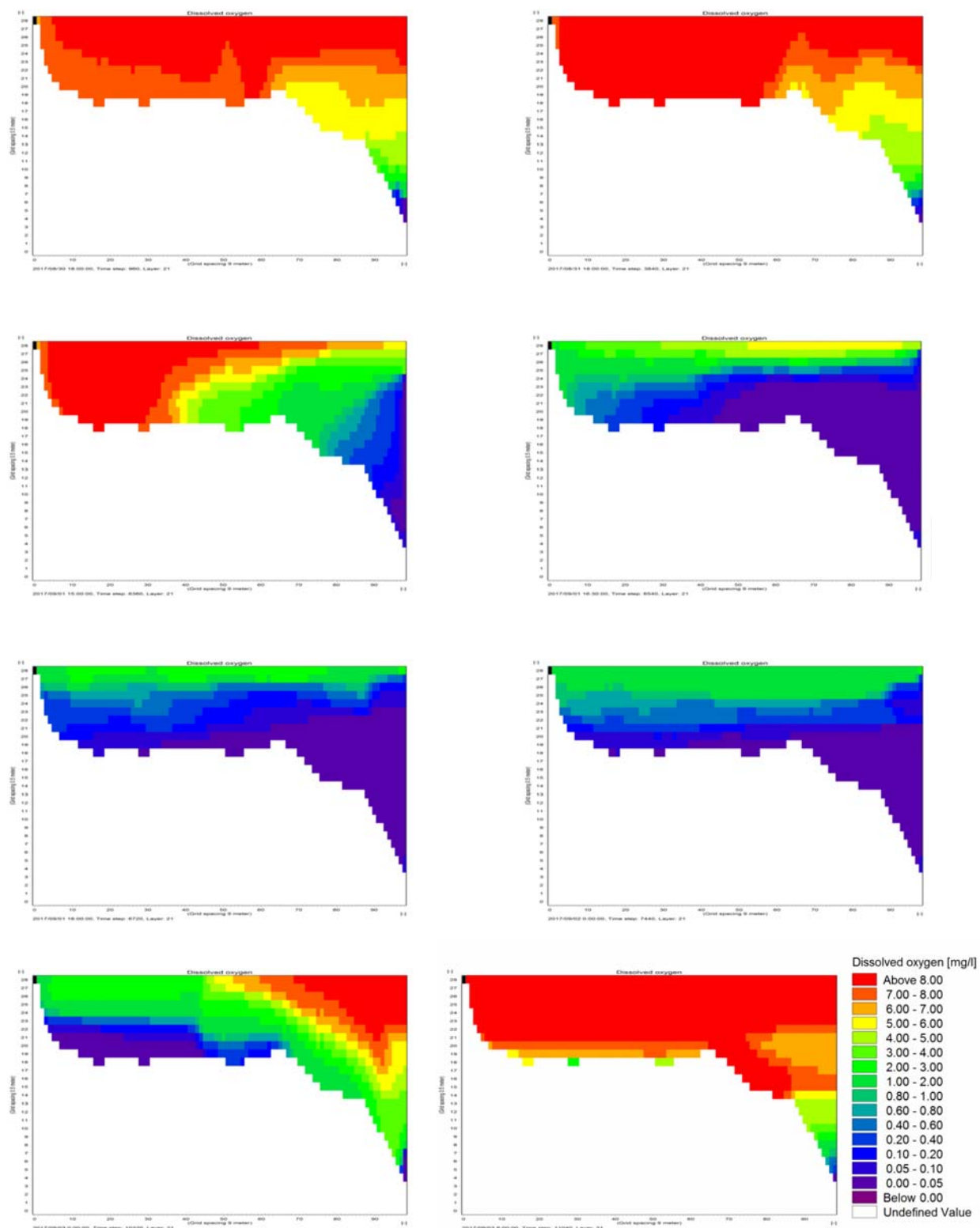


図-5.8 DO断面図

(横断方向第 21 層における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの DO 分布の計算値, 左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00)

Case3: 現地状況再現計算（水流発生装置あり，青潮水の流入あり）

水平方向 17 メッシュ目に水流発生装置を導入した場合の結果である。

図-5.9 の全ての平面図において，水流発生装置による正の方向の流速を確認することができ，青潮発生前，青潮発生後はその範囲が広く，青潮発生中は青潮の影響によりその範囲が狭いことが見て取れる。また図-5.10 の 8 月 31 日 18:00 の結果を Case1,Case2 の同時刻の結果と比較して見ると，水流発生装置による影響範囲が広範囲に及んでいることが分かる。全ての断面図において水流発生装置周辺は常に正の方向に流速を持っていることから，水流発生装置の水流を噴出する働きを模擬出来たと言える。

図-5.11，図-5.12 から，青潮発生前はもともとの DO が高いため水流発生装置による効果は見られないが，9 月 1 日 16:30 の結果を見ると，Case2 の同時刻の結果の底層全域が貧酸素状態となっていたことに比べ，水流発生装置周辺において貧酸素状態となっていないことから，水流発生装置は領域全体の底層が貧酸素状態になることを遅らせる働きを持っていることが分かる。また 9 月 1 日 18:00 の結果から，水流発生装置周辺はかろうじて酸素がゼロになることを免れている。9 月 3 日 0:00，6:00 の結果からは水流発生装置を導入することによって領域全体の DO の回復が早くなっていることが見て取れる。

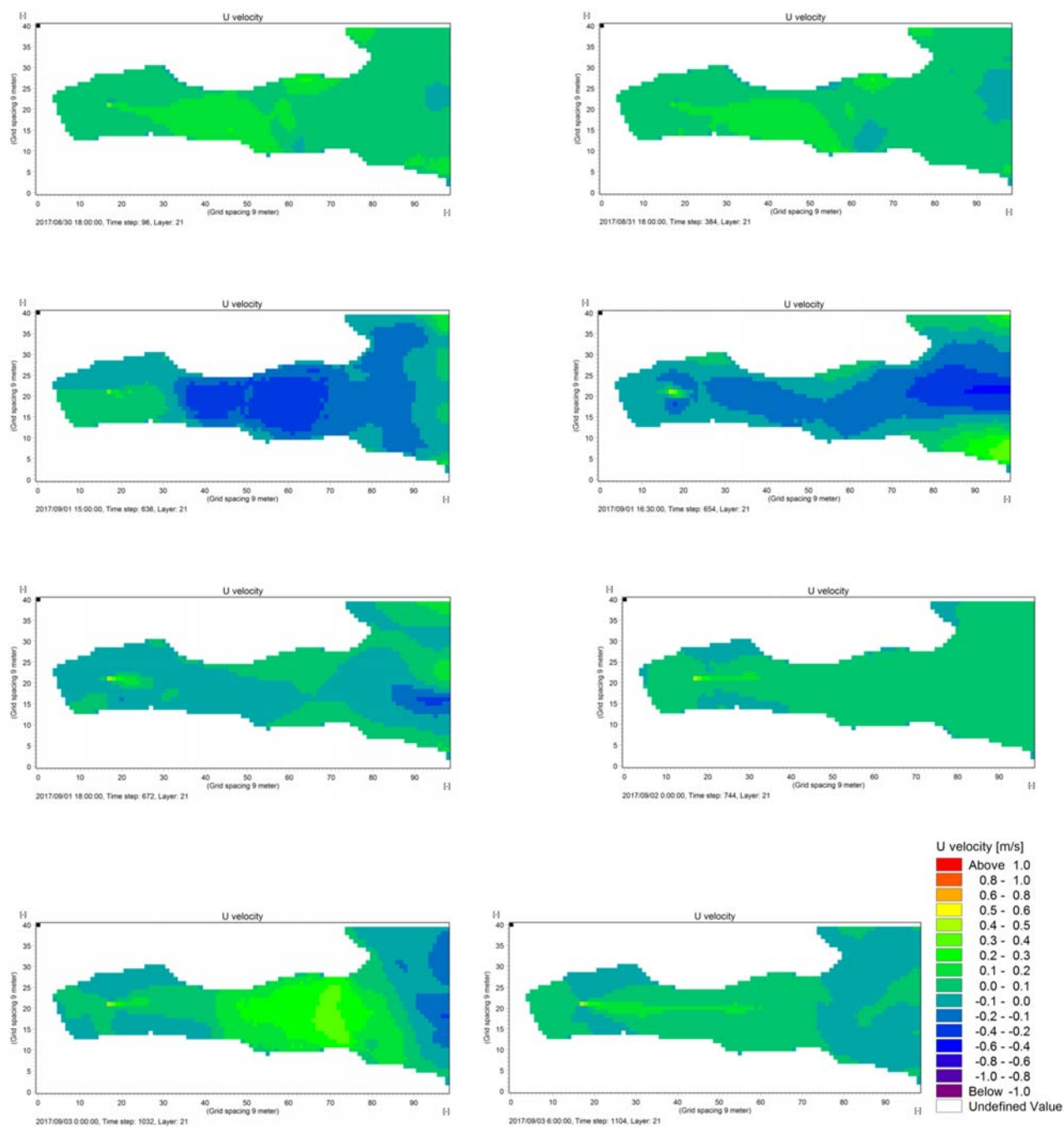


図-5.9 流速平面図

(鉛直第 21 層 (深度 3.5-4.0m) における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの流速平面分布の計算値, 左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00)

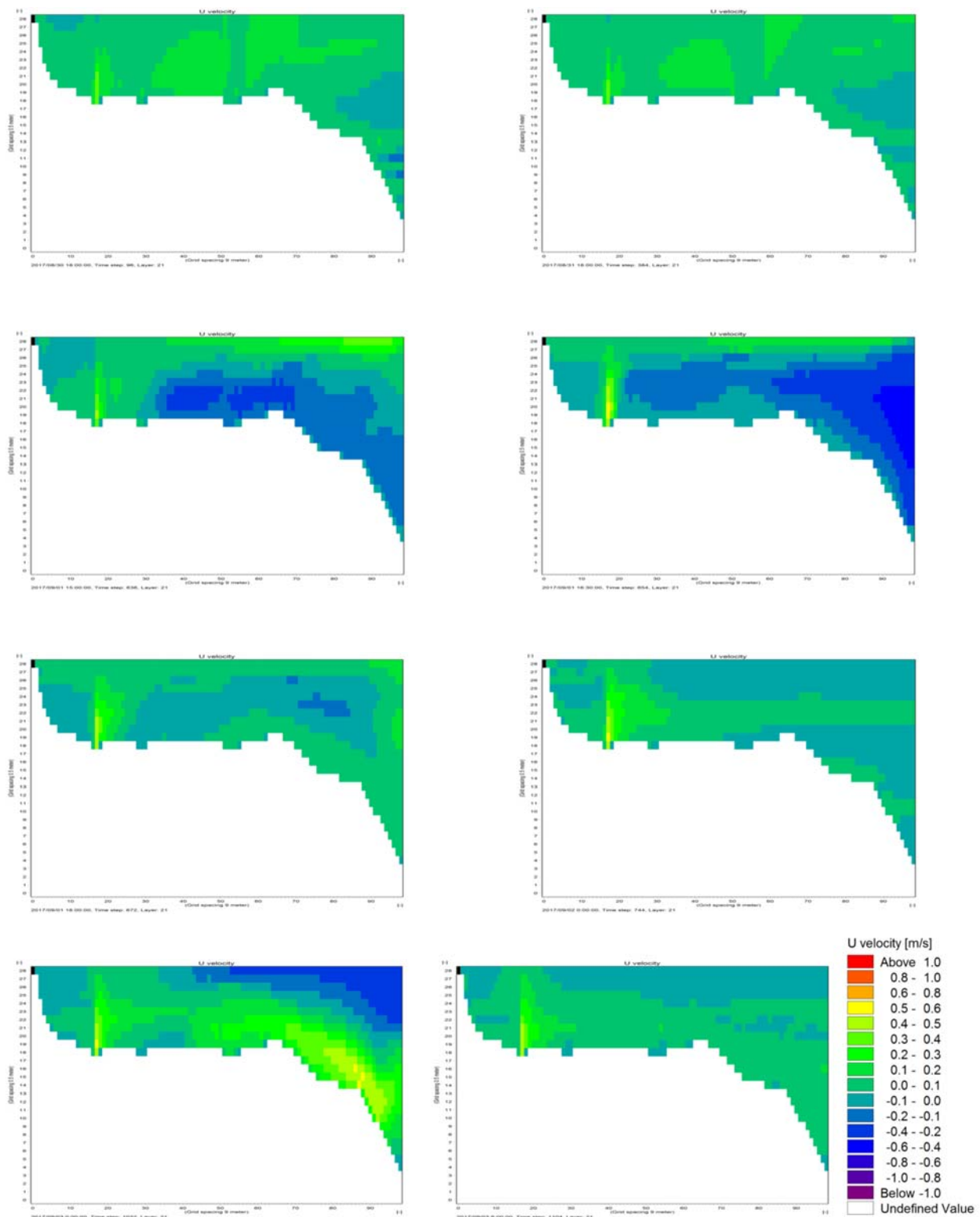


図-5.10 流速断面図

(横断方向第 21 層における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの流速分布の計算値, 左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00)

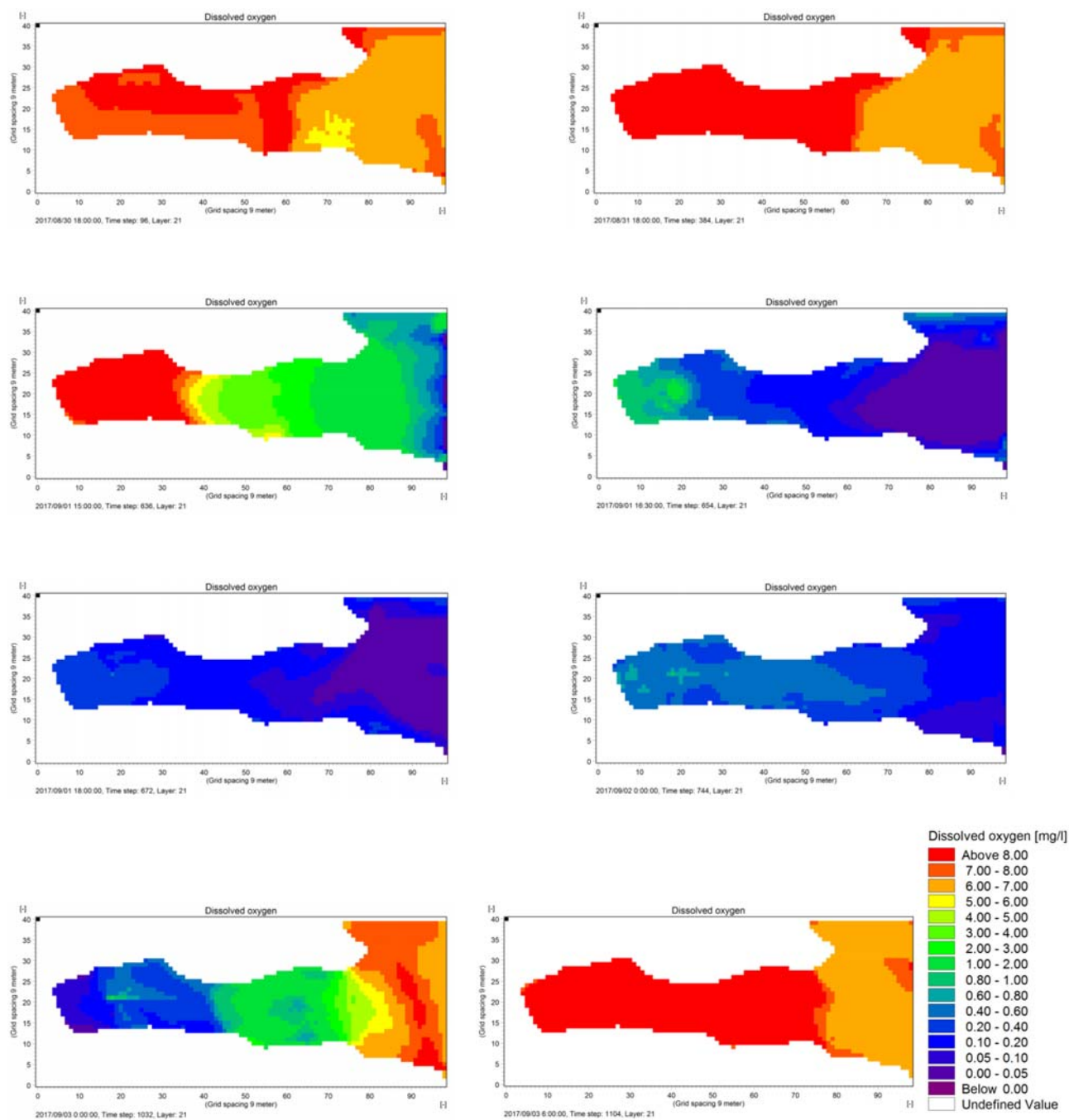


図-5.11 DO 平面図

(鉛直第 21 層 (深度 3.5-4.0m) における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの DO 平面分布の計算値, 左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00)

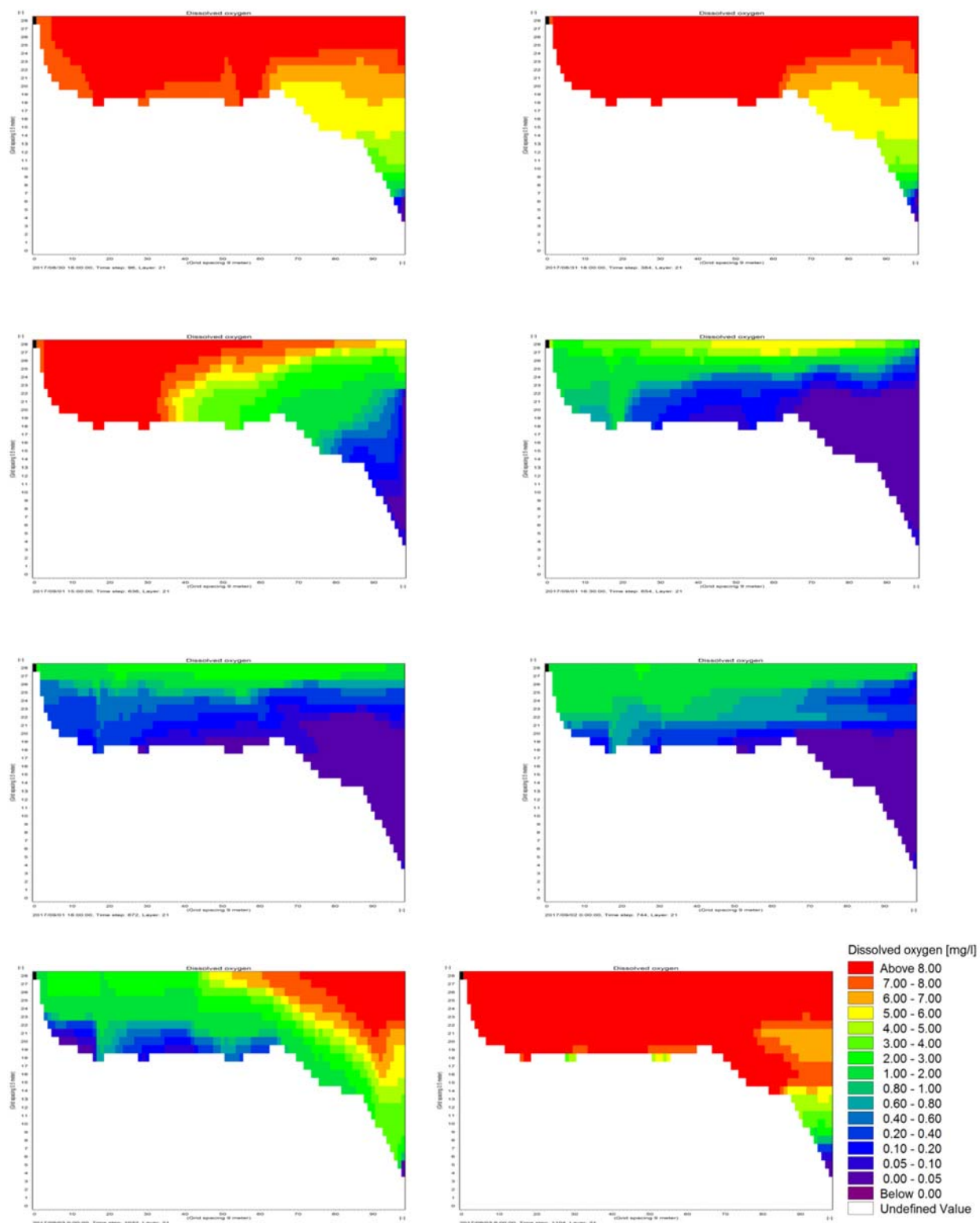


図-5.12 DO 断面図

(横断方向第 21 層における 2017 年 8 月 30 日から 9 月 3 日までの DO 分布の計算値, 左上から右下に向かう順に 8 月 30 日 18:00, 8 月 31 日 18:00, 9 月 1 日 15:00, 16:30, 18:00, 9 月 2 日 0:00, 9 月 3 日 0:00, 6:00)

5. 1. 2 検証

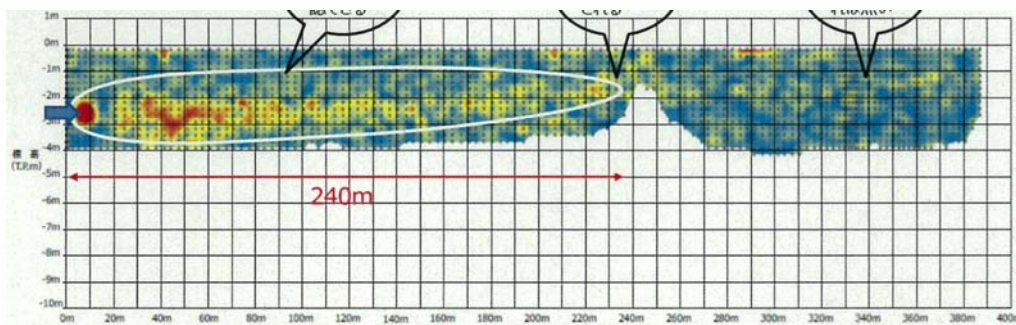
以下図-5.13 に地点 2 の流速断面位置，図-5.14 に流速測定による水流発生装置の影響範囲の確認を示す。図-5.10 の 8 月 31 日 18:00 の結果から数値計算による水流発生装置の影響範囲を見ることが出来るが，それによると湾奥から水平方向約 450m 直前まで影響は及んでいる。水流発生装置設置箇所は 17 メッシュ目(湾奥から約 153m)であるため，数値計算による水流発生装置前面からの影響範囲は約 290m であり，概ね再現出来ている。

また，図-5.15 に濁度の観測値と硫黄の計算値の時系列グラフを示す。濁度は青潮流入時に上昇し，下げ潮時に減少している。硫黄の計算値も青潮流入時に上昇し，下げ潮時に減少しているため概ね同じ推移をしていると言える。硫黄の計算値が 9 月 3 日 0:00 においてほぼゼロになっているが，本計算において 9 月 3 日 0:00 を青潮発生後に平常時の水質の海水が流入した時刻と仮定したためであり，実際の青潮発生期間と同等の期間を計算条件として与えた場合には 9 月 3 日 0:00 以降も濁度の観測値と概ね同じ動きをすると推定される。



出典：Google earth

図-5. 13 地点 2 の流速断面位置



出典：船橋市漁業協同組合（2017）

図-5. 14 流速測定による水流発生装置の影響範囲の確認

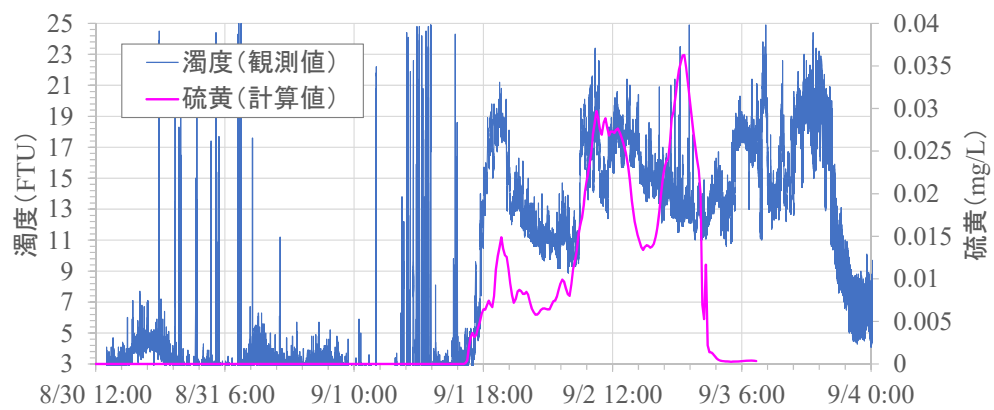


図-5.15 濁度(観測値)と硫黄(計算値)の時系列

5. 1. 3 考察

以上の結果より、通常時の流速変動や DO 変動は一定の周期で起こっており、潮位による影響が大きいことが分かった。青潮時にも大きな影響が見られたことから、開境界における潮の流入によって水質環境が大きく変わってしまうと推定される。

また、図-5.11、図-5.12 の数値計算結果からは青潮発生時であっても水流発生装置を導入することによって底層において少なくとも 0.2mg/L 以上の DO が確認出来るが、図-3.10 の青潮発生時の水流発生装置周辺の底層における DO はほぼゼロとなっている。このことから、水流発生装置導入時の DO の動きや値は再現出来ていないと言える。その原因として、青潮発生時に与えた境界条件の表層の DO が実際の値よりも高いこと、平常時、青潮発生時といった場合分けのみで境界条件は常に一定値を与えていたこと、また硫化物等の値は観測値ではなく基準値を組み込んだため底泥での酸素消費プロセスが正確ではないこと、気象条件を考慮していないことなどが考えられ、今後検討すべき課題である。

今回現地再現計算の対象としたのが浅場であるため、流入してくる海水の影響を受けやすい領域であり、さらには貧酸素水塊や塩分濃度の高い海水が窪地に滞りやすいといった要因からも青潮発生時には生物が存在出来ない環境となってしまう、また回復も遅い。しかし、水流発生装置を導入することで浅場全域への影響は望めないが、装置周辺の無酸素状態の回避、青潮発生後の水質回復の促進へは効果があることが分かった。また、水流発生装置は設置場所の状況によって効果が限定されるが、今回の対象領域である浅場や、閉鎖領域、限られた狭い領域において効果があると考えられる。

その他様々な検討ケースにおいては後の現地適用に関する数値実験にて述べる。

5. 2 水流発生装置の現地適用に関する数値実験

5. 2. 1 結果

以下に計算結果を示す。平面図は流速，DO 共に水流発生装置が設置されている海底面から 2 層目（水深 7.0m-7.5m）のものであり，断面図は 50 メッシュ目のものである。平面図，断面図共に 3 時間おきの結果を載せている。

図-5.16 から，正の方向に流速があることが分かる。また，図-5.17 から 6 時間おきに水平方向性の無機の流速が最大となっていることが分かり，これは境界条件で与えた潮汐の周期に依存していると考えられる。

また，図-5.18 の DO の平面図から，潮汐が最小となる際は水流発生装置周辺の DO 値が高くなり，潮汐が最大となる際は水流発生装置から離れた領域の DO が高くなっており，広範囲に及んでいることが分かる。DO においても境界条件で与えられた潮汐の周期に依存していると言える。断面図からは水流発生装置周辺においては僅かながら海水の底層の混合が見られるが，あくまで装置周辺に限られたものであり，領域全体に与える影響はほとんど見られない。

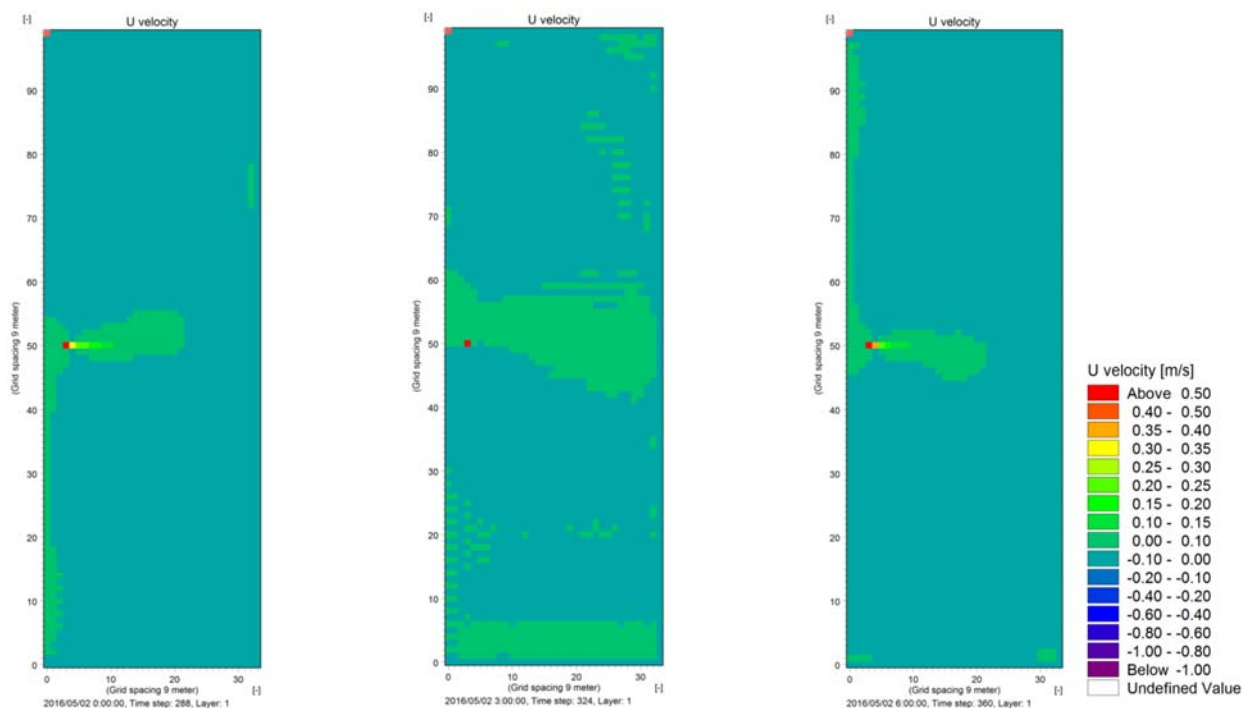


図-5.16 流速平面図

（鉛直第 1 層（深度 7.0-7.5m）における流速平面分布の計算値，計算時間は左から 24 時間，27 時間，30 時間）

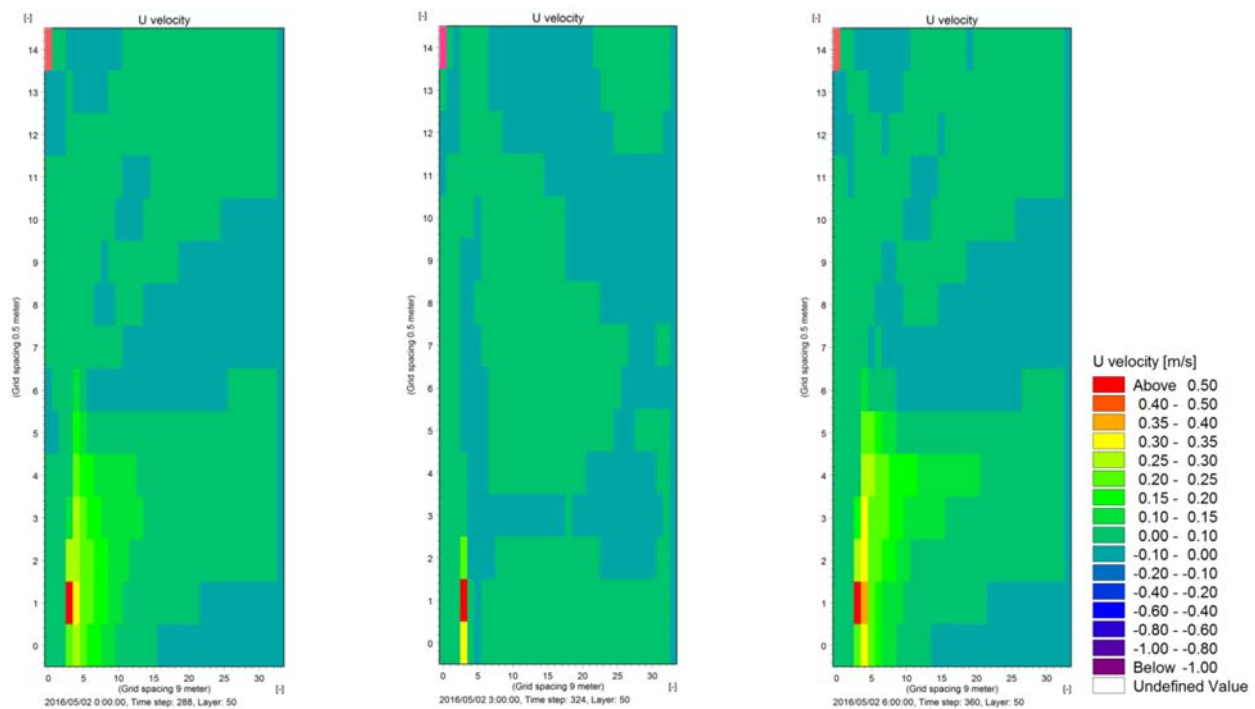


図-5.17 流速断面図

(横断方向第 50 層における流速分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

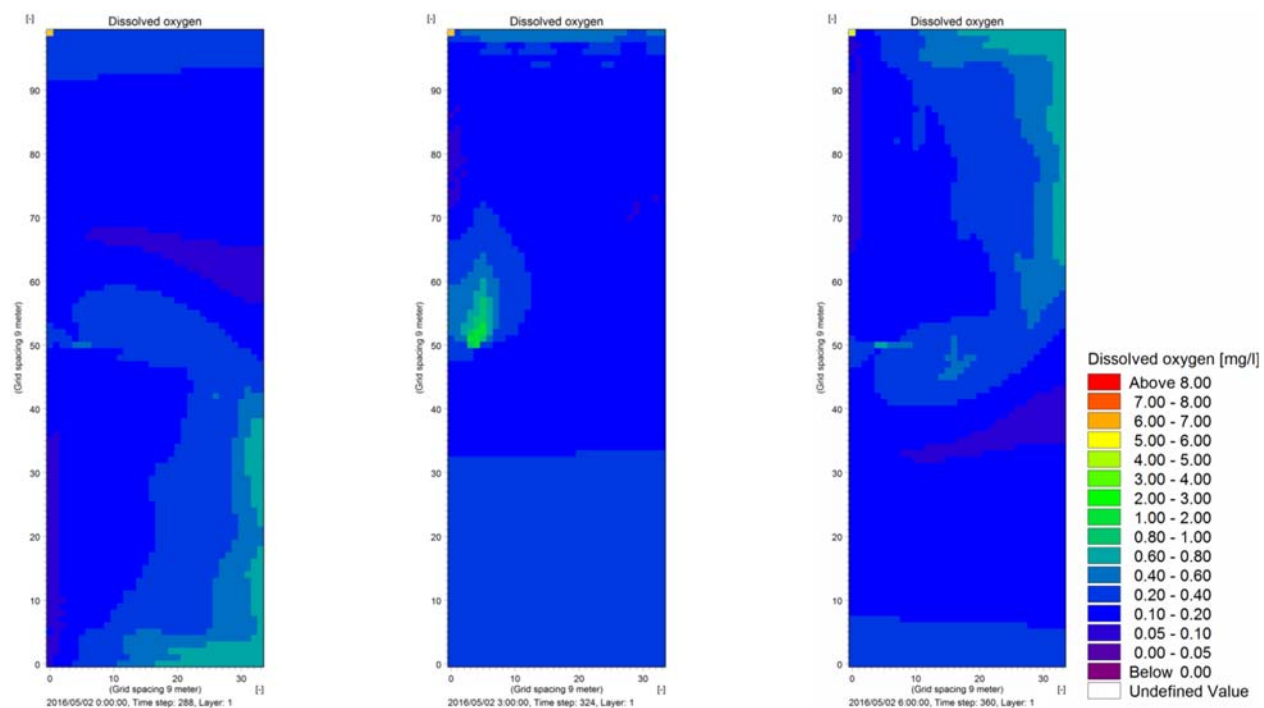


図-5.18 DO 平面図

(鉛直第 1 層 (深度 7.0-7.5m) における DO 平面分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

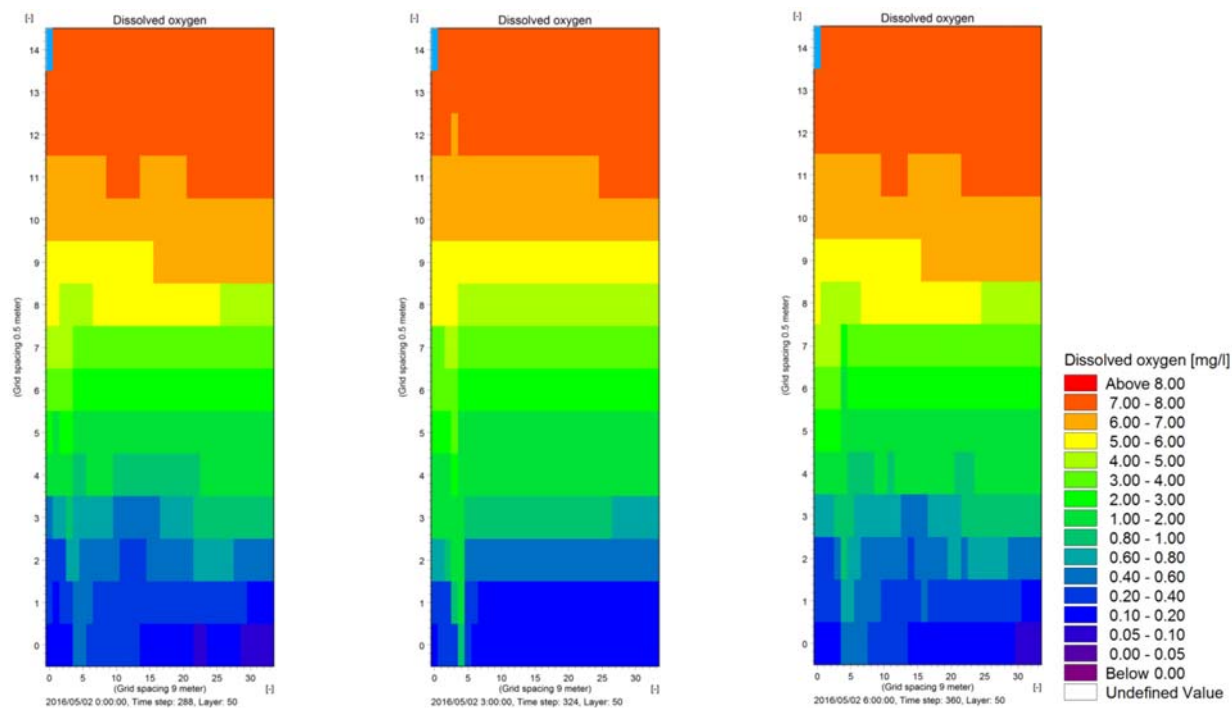


図-5.19 DO 断面図

(横断方向第 50 層における DO 分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

5. 2. 2 検証

船橋港における水流発生装置周辺（図-5.20）の流速測定結果より，水流発生装置の影響範囲は地点 1 では約 150m，地点 2 では約 240m と報告がなされている．その報告された結果は図-5.21 に示す．図-5.22 より，水流発生装置後方においては，装置は流速に影響を及ぼしていないと分かる．表層では速い流速が生じていたり，各水深において様々な方向の流速が生じていたり，流速は小さいが，乱流が生じていることがわかる．それによって流れ場が複雑になっている．一方，計算結果である図-5.17 より，水流発生装置によって 200m 以上先まで影響があることが見られるが，この計算結果は完全に流速が止まっている最大到達点のみを見たものであるため，現地における複雑な流れ場とは異なっていると考えられる．



出展：Google earth

図-5.20 地点 1 の流速断面位置

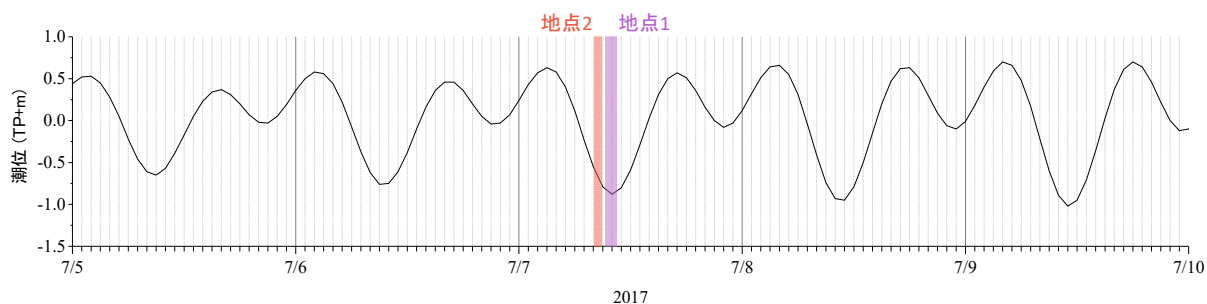
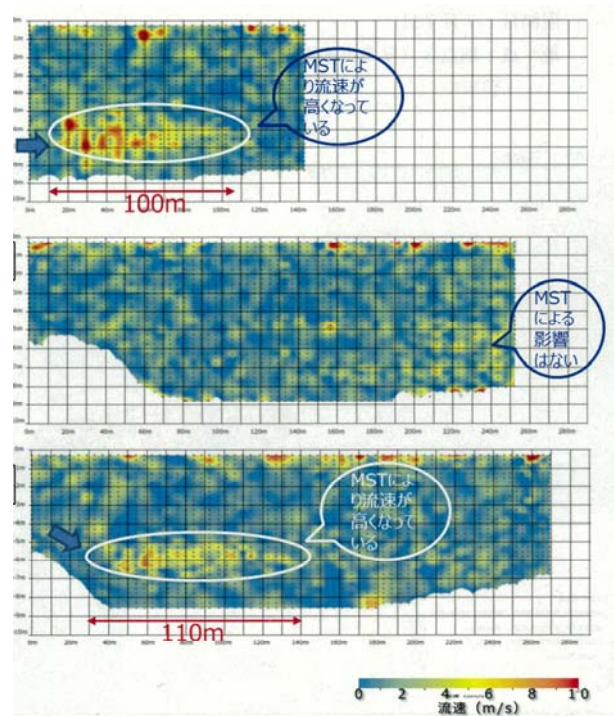


図-5.21 流況測定時における潮位表



出典：船橋市漁業協同組合（2017）

図-5.22 流速測定による水流発生装置の影響範囲の確認

5. 2. 3 水流発生装置性能を向上させた場合の計算結果

装置現況能力より性能を向上させたものを用いて、より水質環境の改善を目的に、以下の各検討を実施した。

(1) DO 添加

水流発生装置から出る噴流に DO を溶け込ませた場合を想定し、表層からの水を底層に持ってくる際に、飽和 DO 濃度程度に至るように表層の DO 値とは別に DO を一定濃度で添加した。現地実験中の海水面の平均水温は約 25℃であり、1 気圧 25℃での飽和 DO 濃度は 8.11mg/L となる。基本検討における海水面の DO 濃度変化は約 7.3~7.7mg/L であったため、飽和 DO 濃度に至る程度となる 0.5mg/L を添加した。図-5.23、図-5.24 は流速の平面図、断面図、図-5.25、図-5.26 は DO の平面図、断面図を示す。

いずれの平面図、断面図においてもはっきりとした変化は見られない。図-5.26 においては底層における混合範囲が少し広がったことが見て取れるが、DO 回復に対してより効果的であると断言は出来ない。

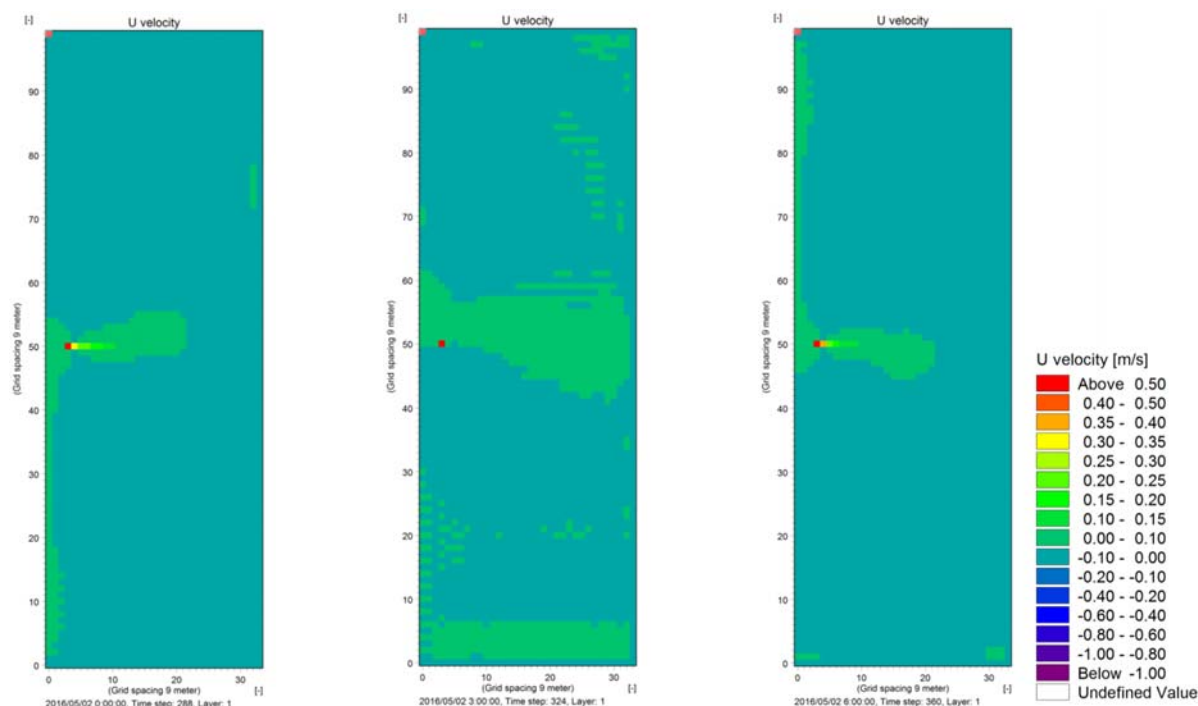


図-5.23 流速平面図

(鉛直第 1 層 (深度 7.0~7.5m) における流速平面分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

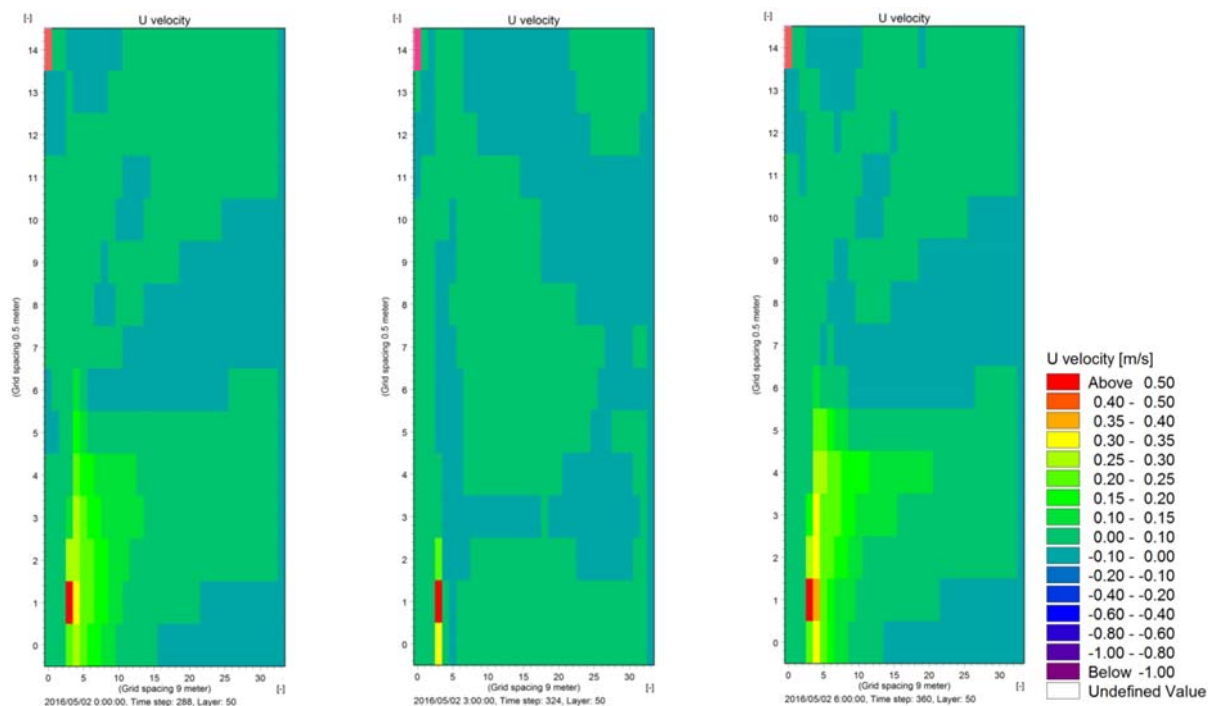


図-5.24 流速断面図

(横断方向第 50 層における流速分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

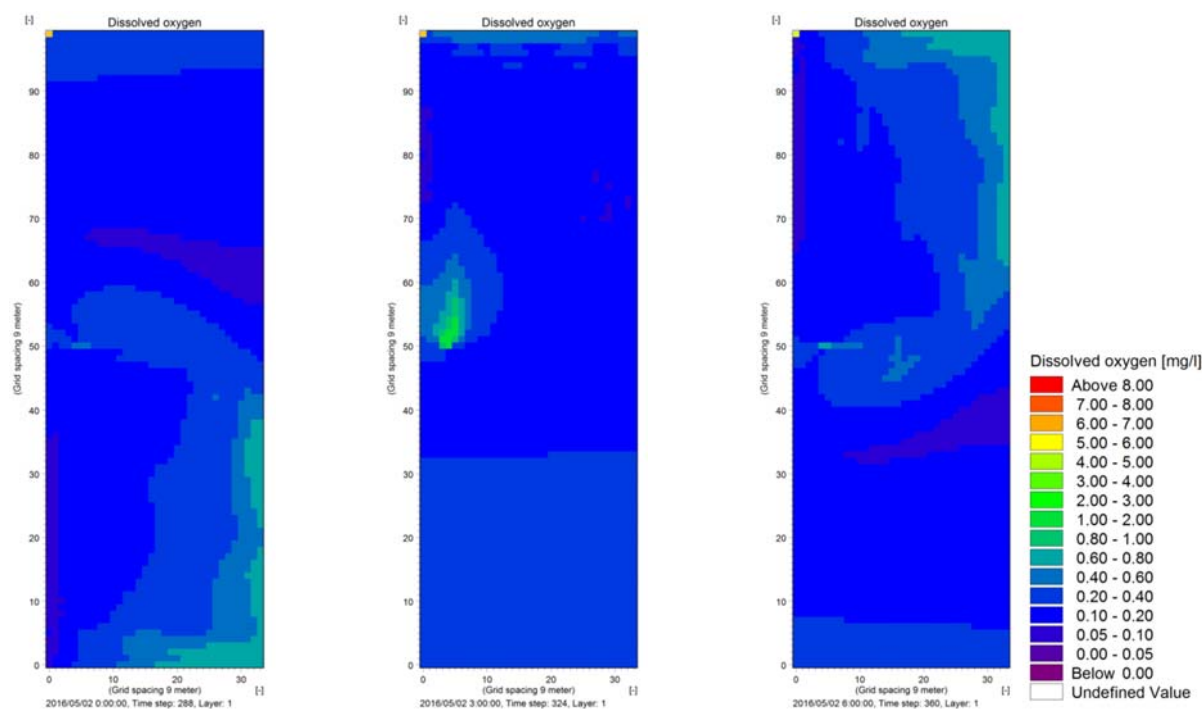


図-5.25 DO 平面図

(鉛直第 1 層 (深度 7.0-7.5m) における DO 平面分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

時間)

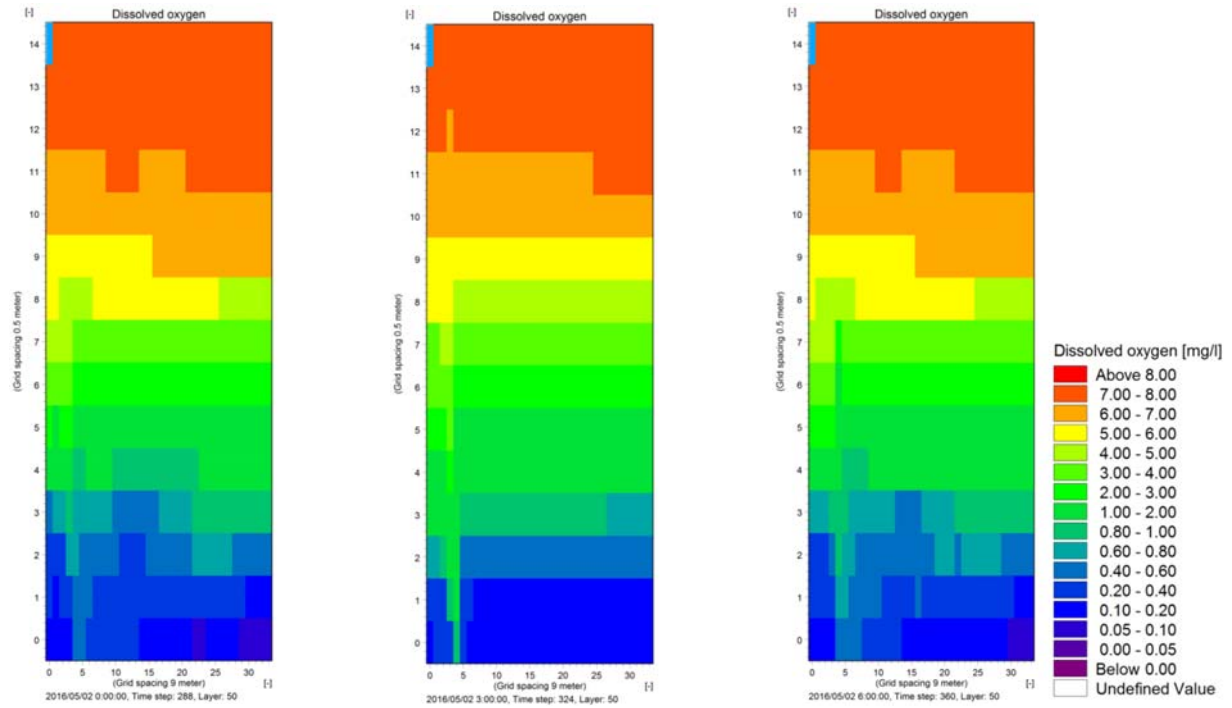


図-5.26 DO 断面図

(横断方向第 50 層における DO 分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

(2) 水流発生装置の増設

水流発生装置を増設した場合の検討を行った。設置台数は現地での稼働台数と同じ 2 台設置した場合と 3 台設置した場合にて検討した。水流発生装置は各々100m 離れた箇所に設置して計算を行った。

a) 2 台設置した場合

図-5.27, 図-5.28 は流速の平面図, 断面図, 図-5.29, 図-5.30 は DO の平面図, 断面図を示す。図-5.27, 図-5.28 からは 2 台の水流発生装置が正の方向に流速を持っている様子が見られる。6 時間後の結果がほぼ同じ動きをしていることから、境界条件で与えた潮汐の影響を受けていることが分かる。また、図-5.28 の断面図は 50 メッシュ目で切り取ったものであり、1 台設置の場合の水流発生装置の設置箇所が 50 メッシュ目であったことに比べ、2 台設置の場合の水流発生装置の設置箇所はそれぞれ 50 メッシュ目を中心に互いに 100m 離れた箇所であったため、図-5.17 よりも流速が見えていないと考えられる。

図-5.29 からは、まず 2 台設置した水流発生装置周辺の DO が高くなっていることがはっきりと見てとれるが、領域全体の DO にさしたる変化は見られない。図-5.30 においても 1 台設置の場合に比べ底層の海水の混合の範囲が広がっていることが分かる。また、水流発生装置周辺に限らず 20 m 以上先の地点において DO の回復が見られる。

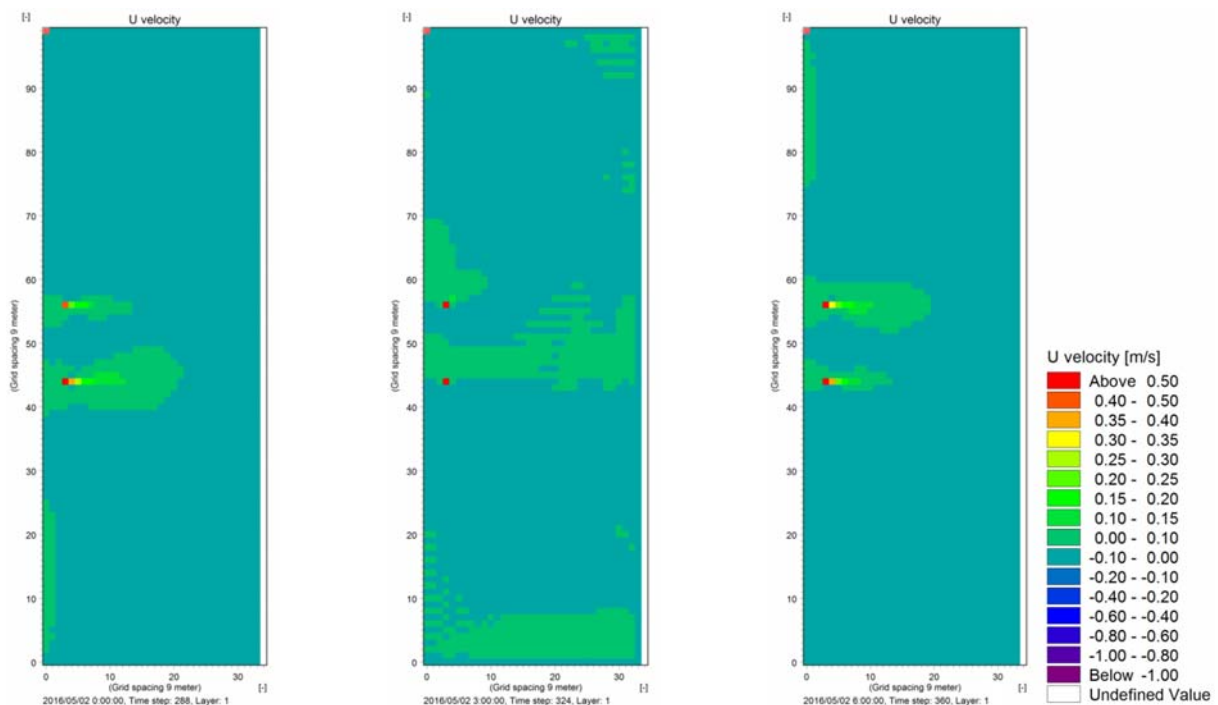


図-5.27 流速平面図

(鉛直第 1 層 (深度 7.0-7.5m) における流速平面分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

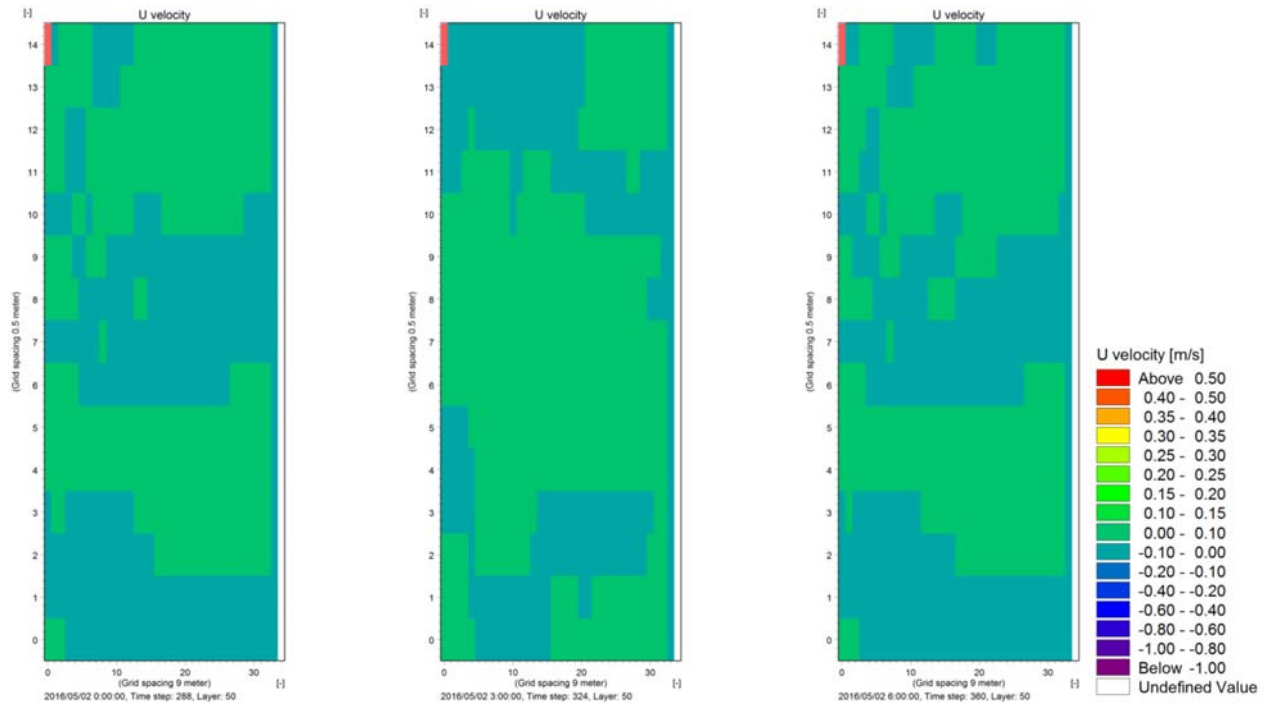


図-5.28 流速断面図

(横断方向第 50 層における流速分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

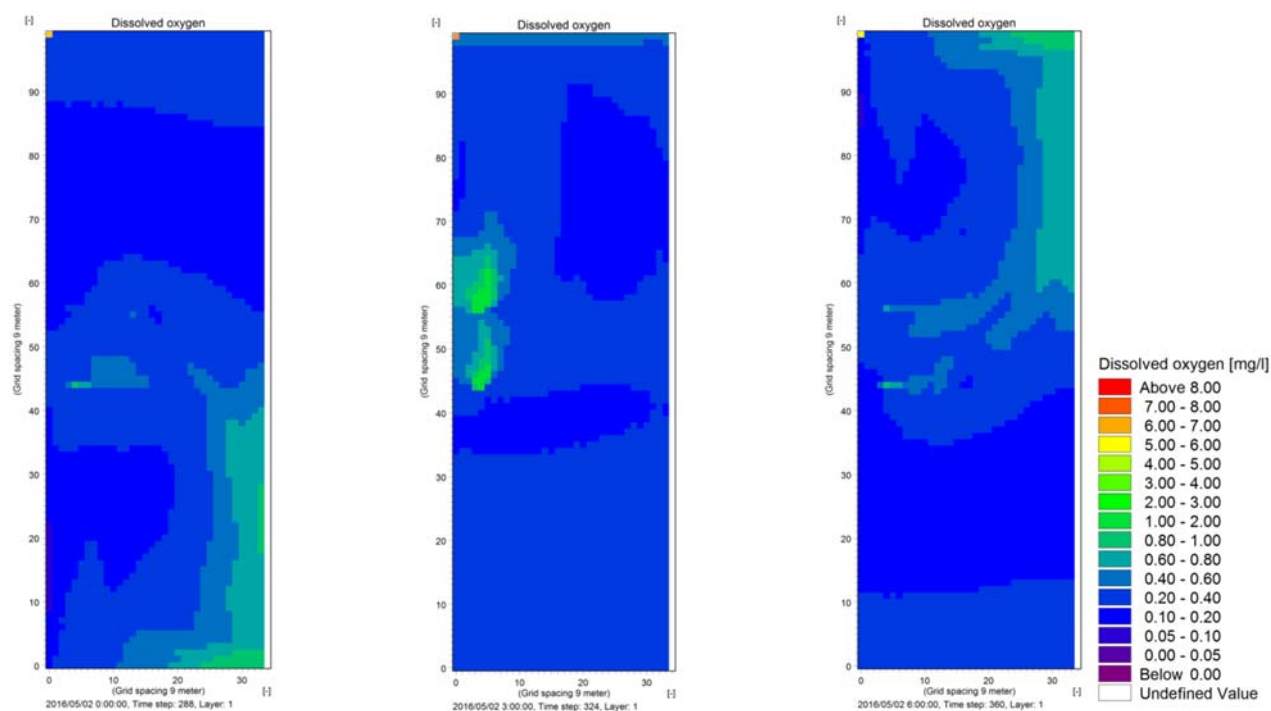


図-5.29 DO 平面図

(鉛直第 1 層 (深度 7.0-7.5m) における DO 平面分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

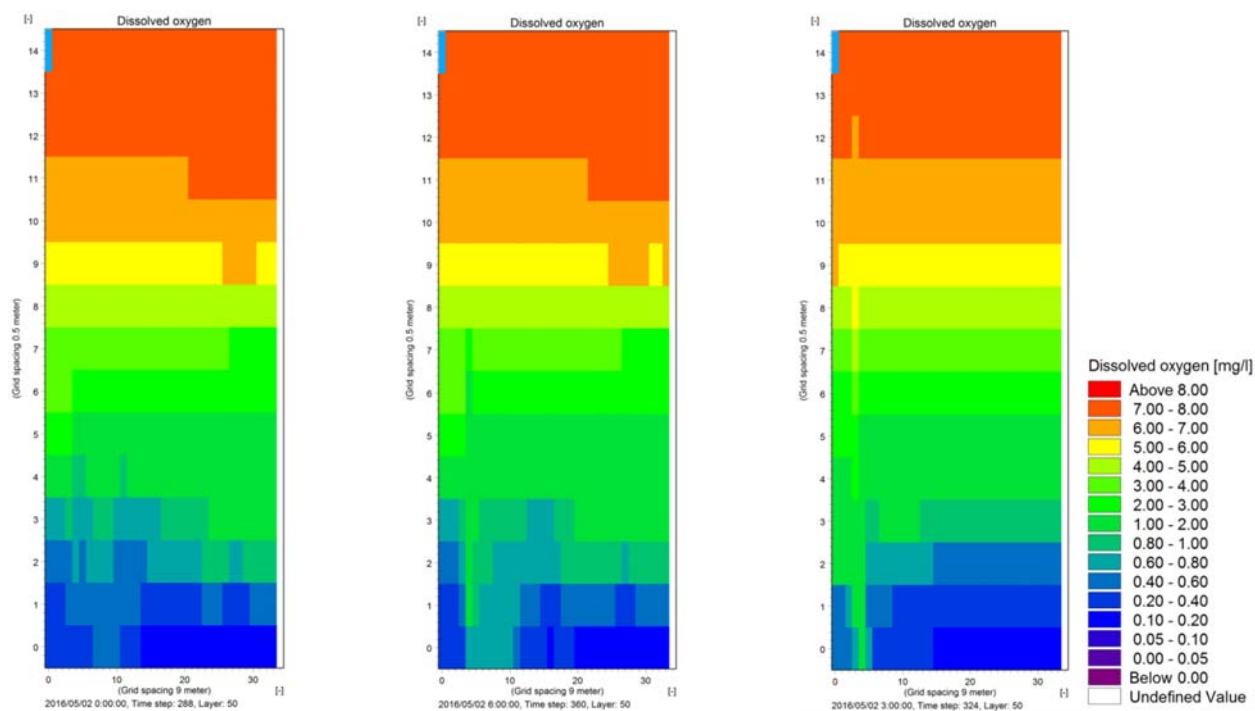


図-5.30 DO 断面図

(横断方向第 50 層における DO 分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

b) 3 台設置した場合

図-5.31, 図-5.32 は流速の平面図, 断面図, 図-5.33, 図-5.34 は DO の平面図, 断面図を示す。図-5.31 から, 3 台の水流発生装置が正の方向に流速を持っている様子が確認出来る。また, 図-5.32 と図-5.17 に大きな変化は無く, 隣り合った水流発生装置は 50 メッシュ目の断面においてほとんど影響を及ぼしていないように見えるが, 正の方向の流速がより表層においても確認出来るため, 隣り合った水流発生装置の持つ流速が関係していると考えられる。

図-5.33 からは 1 台設置, 2 台設置の場合に比べ水流発生装置による影響範囲が広がっていることが分かる。今回領域の幅が 324m のみのため全ての影響範囲を確認することは出来ないが, 広域に及ぶと考えられる。また, 図-5.34 より, 1 台設置, 2 台設置の場合に比べ混合が起きている層がより表層に近づいている。

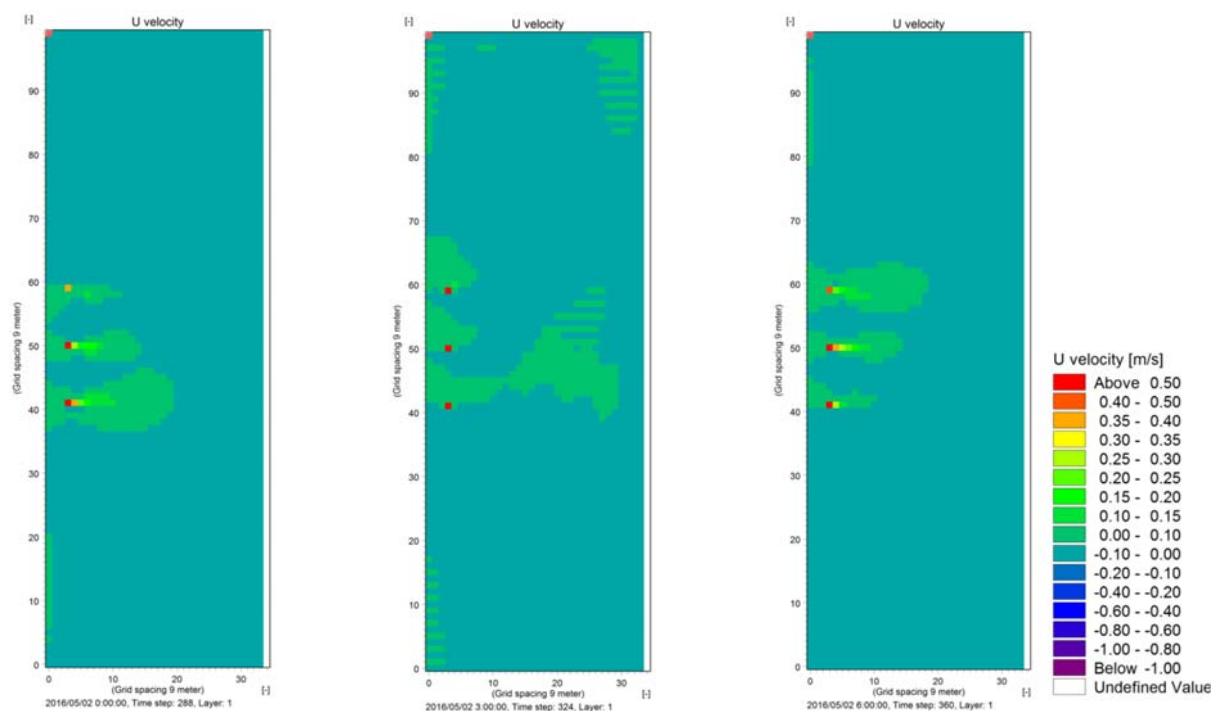


図-5.31 流速平面図

(鉛直第 1 層 (深度 7.0-7.5m) における流速平面分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

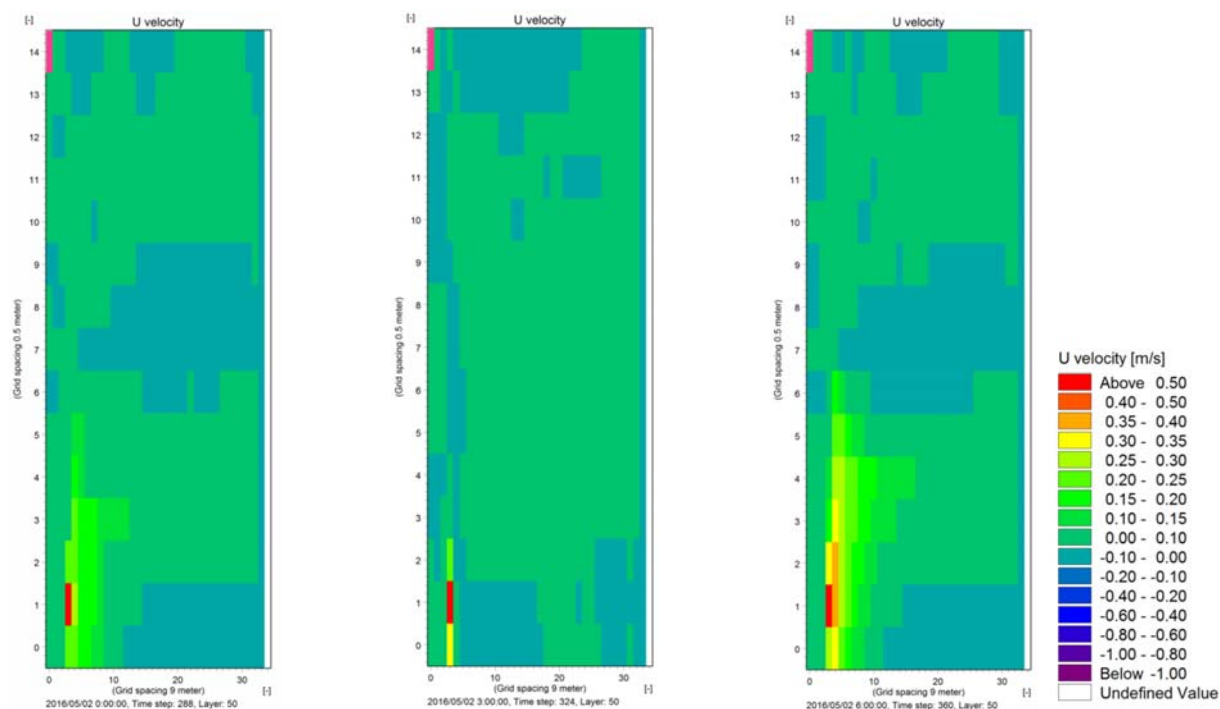


図-5.32 流速断面図

(横断方向第 50 層における流速分布の計算値，計算時間は左から 24 時間，27 時間，30 時間)

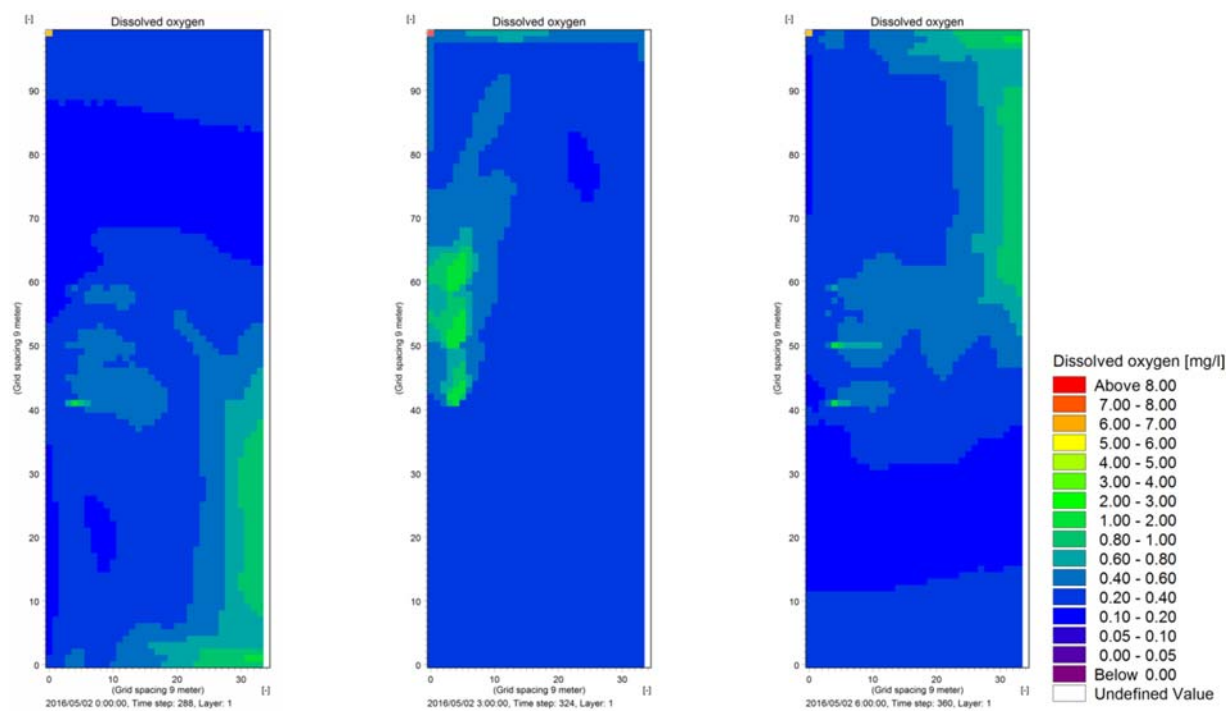


図-5.33 DO 平面図

(鉛直第 1 層 (深度 7.0-7.5m) における DO 平面分布の計算値，計算時間は左から 24 時間，27 時間，30 時間)

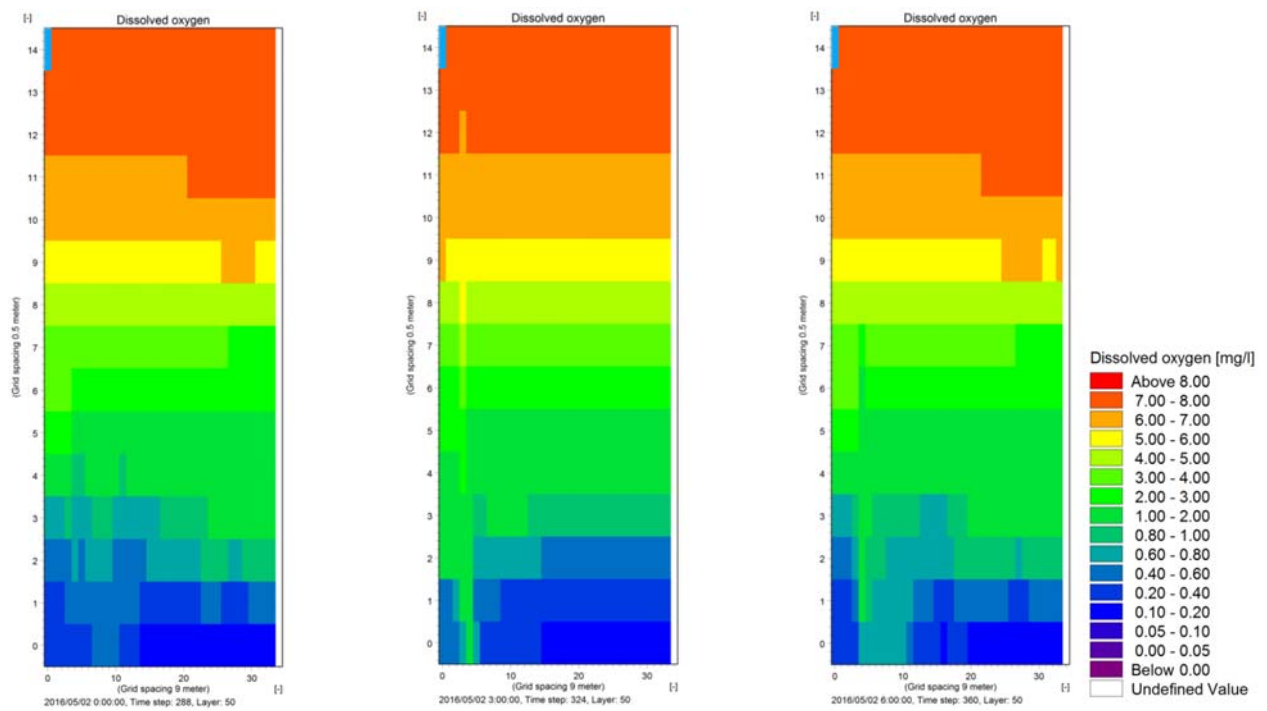


図-5.34 DO 断面図

(横断方向第 50 層における DO 分布の計算値, 計算時間は左から 24 時間, 27 時間, 30 時間)

5. 2. 4 考察

計算領域に対して DO が 0.5mg/L 以上となる割合を図-5.35, その根拠となる DO 平面図を図-5.36 に示す. 図-5.35 は水流発生装置を 1 台設置, 2 台設置, 3 台設置した場合と DO を添加した場合の計算結果から, 計算領域に対して DO が 0.5mg/L 以上となる領域の面積比をグラフにしたものであり, 横軸の出力ステップは数値計算上のタイムステップを表す. 図-5.36 は水流発生装置を 3 台設置した場合の DO 平面図であり, 左から 505, 510, 520 タイムステップ目の結果である. 図-5.35 と照らし合わせて根拠を判別しやすくするため, DO が 0.5mg/L 以上の値が黄色として見える色分けにしている. 図-5.35 によると 1 台設置の場合と DO を添加した場合の結果に変化は見られず, これは元々の表層の DO が飽和値に近く, 添加した DO の値が 0.5mg/L と小さかったことが原因であると考えられる. 例えば青潮発生時においてより高い濃度の DO を添加した場合には効果的な結果が期待できると推定される. また, 2 台設置, 3 台設置をした場合の DO が 0.5mg/L 以上となる面積比は 1 台設置のおよそ 2 倍, 3 倍となっており, 水流発生装置増設によって DO 回復を見込める面積は設置台数に比例すると考えられる.

また, 以上の計算結果と図-5.35 から, 水流発生装置の性能向上を図ったところ, DO 向上に関して最も効果が見られたのは水流発生装置を 3 台設置した場合であったが, 3 台設置することは膨大なコストがかかり, 相対費用効果を吟味した際に現実的ではないと考えられる. 今回の数値計算においては限られたパターンのみであったが, DO 添加と設置装置増設を組み合わせたり, 噴流の噴出方向の角度を変えてみたりと様々な検討を行うことができる. また, 設置箇所によっても効果に差は出ると考えられるため, より高い効果が考えられる様々なパターンの数値計算を行い, 提案していくことがこれからの課題である.

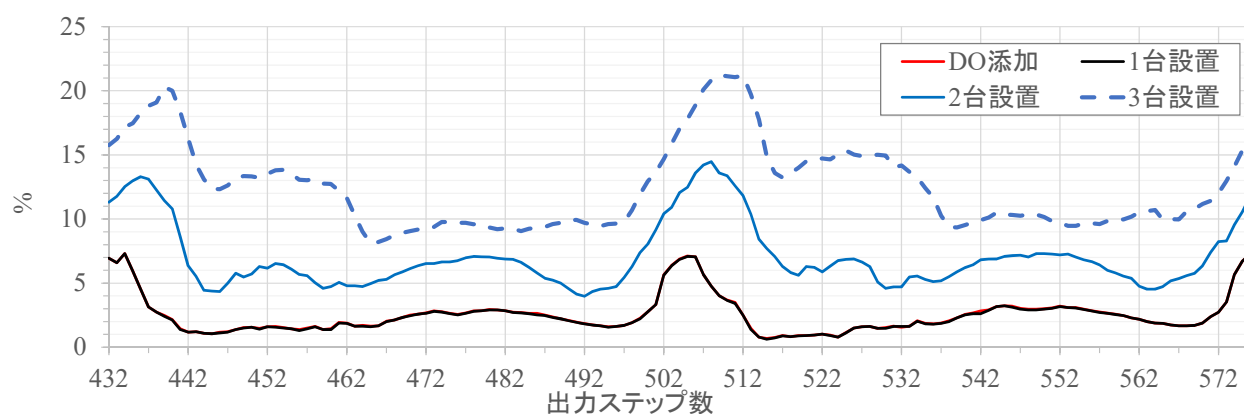


図-5.35 計算領域に対して DO が 0.5mg/L 以上となる割合
(出力ステップ: 1 ステップ 5 分)

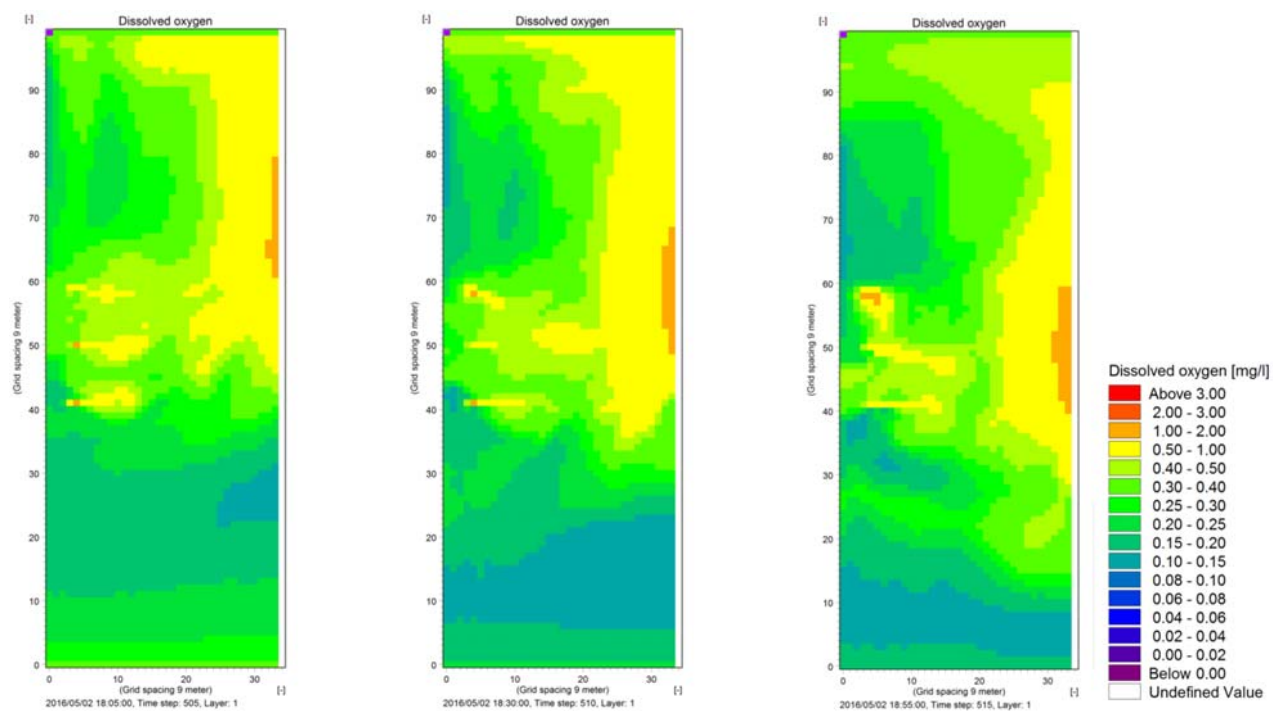


図-5.36 DO 平面図 (左 : 505 ステップ 中:510 ステップ 右:520 ステップ)

6. 結論および今後の課題

6. 1 結論

近年青潮発生に起因するアサリの大量へい死が問題となっている三番瀬において、2016年、2017年に船橋市漁業協同組合、千葉県、船橋市による、水流発生装置による効果の検討が行われた。水質保全を目的とした、貧酸素水塊の抑制工夫と考えられる水流発生装置について、現地観測を基に、MIKE3,Eco Lab などといった数値計算モデルにより現地現象に対して再現検討を実施し、数値再現システムの構築を行った。また、構築した数値再現システムを応用し、主要因子のみに簡略化し、各検討ケース(水流発生装置増設、DO 能力向上)による数値実験を実施し、水流発生装置の効果的な適用方法について検討を行った。得られた成果は以下のとおりである。

- 1) 現地観測結果に対して検討したところ、青潮が流入する様子などの水質環境場の再現とともに、水流発生装置の性能模擬についても概ね妥当な再現結果が得られた。しかしながら、青潮発生時の現地観測結果による水流発生装置周辺の底層における DO はほぼゼロであったのに対し、数値計算結果による水流発生装置周辺の底層における DO は少なくとも 0.2mg/L 以上確認され、再現が不十分であり再度検討すべき問題点も見えた。
- 2) 水流発生装置の適用条件を変更した、各検討ケースによる数値実験結果より水流発生装置を用いた貧酸素改善について検討したところ、基本となる 1 台設置に対し、2 台、3 台設置と設置台数を増やすことが DO 供給を行う上で効果的であることを示した。また設置台数を増やすことで領域内の DO が 0.5mg/L 以上の面積の割合がほぼ 2 倍、3 倍となっており、設置台数増設が DO 回復の見られる面積比に比例していた。DO 能力向上については、本検討においては追加できる DO が少なかったため、ほぼ変化は見られなかった。

6. 2 今後の課題

- 1) DO における再現が不十分であった原因として、青潮発生時に与えた境界条件の表層の DO が実際の値よりも高いこと、平常時、青潮発生時といった場合分けのみで境界条件は常に一定値を与えていたこと、また硫化物等の値は観測値ではなく基準値を組み込んだため底泥での酸素消費プロセスが正確ではないこと、気象条件を考慮していないことなど様々なことが考えられる。一つ一つの要素に着目して計算を行い、どの要素が最も結果に影響を与える原因であるかを追究し、より精度の高い数値計算を行うことが今後の目標であり課題である。
- 2) 今回の計算における検討ケースのパターンは充分であるとは言えないため、今後より様々な検討ケースの数値計算を行い、より効果的な水流発生装置の設置方法、能力向上方法を検討・提案することが今後の目標であり課題である。例えば現地適用計算において青潮が発生した場合の計算を行うことで、個別な事例に比べより汎用的な地形においた検討を行うことが出来ると推定されるため、最優先に計算を行い今後に繋げる必要がある。

参考文献

- [1] 青木伸一・福本直樹・岡本光雄(2001), 猪鼻湖における底層貧酸素水のエアレーション効果の検討, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 1066-1070.
- [2] 石川宗考・村上定瞭・中西弘・岩井重久(1990), 富栄養化したお濠, 池等の浄化システムの検討, 環境技術, Vol. 19, No. 2.
- [3] 遠藤徹・水田圭亮・白居諒・田中宏史・重松考昌(2010), 表層水供給装置による港湾海域底層の環境改善に関する現地実験, 海洋開発論文集, 第 26 巻, pp. 117-122.
- [4] 角屋浩二・石川健二・金山進・中瀬浩太・小谷拓(2007), 流水発生装置による閉鎖性水域の密度成層の緩和について, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 1021-1025.
- [5] 金山進・佐々木洋之・佐々木淳・岡田知也・春谷芳明・城野清治・廣海十朗・中瀬浩太(2004), 密度流を利用した底層貧酸素対策装置の効果とその再現計算, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1166-1170.
- [6] 金山進・春谷芳明・城野清治・佐々木淳・廣海十郎・岡田知也(2004), 流水発生装置による閉鎖性海域の水質浄化について, 海洋開発論文集, 第 20 巻.
- [7] 北真人・黒川岳司(2012), 噴流型流動促進装置導入による貯水池内の流況と水質の変化, 土木学会論文集 B1(水工学)Vol. 68, No. 4, pp. 1663-1668.
- [8] 木津竜一郎(2013), 太陽光発電による表層水供給装置を用いた夢洲沈殿池の環境改善に関する研究, 大阪市立大学大学院修士論文.
- [9] 熊倉祐人(2011), 東京湾の規模の違う浚渫窪地における観測と硫化物動態の数値シミュレーション, 横浜国立大学卒業論文.
- [10] 小松利光・岡田知也・中村由行・中島信一・長谷部崇・藤田和夫・井芹寧(1999), 閉鎖性水域底層への表層水供給による水質改善効果, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1111-1115.
- [11] 佐伯信哉・中村考幸・岡田修平(2009), 密度成層場における鉛直混合促進型護岸の効果と混合特性について, 土木学会論文集 B2, Vol. B2-65, No. 1, pp. 796-800.
- [12] 佐々木淳・小出摩耶子・長田正行・柴山知也・磯部雅彦(2003), 東京湾三番瀬における微細気泡発生装置を用いた青潮水改善効果の数値的検討, 海岸工学論文集, 第 50 巻.
- [13] 佐々木洋之・佐々木淳・武田真典・岡野崇裕・足立有平(2006), 閉鎖性領域におけるマイクロバブル発生装置を用いた溶存酸素供給効果の把握, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp. 1171-1175.
- [14] 佐藤文也(2015), 東京湾における貧酸素水塊の字空間分布特性, 東京大学卒業論文.
- [15] 田中真史・佐々木淳・柴山知也・磯部雅彦(2004), 窪地海域を対象とした微細気泡エアレーションによる貧酸素水改善効果の解析, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 1161-1165.
- [16] 株式会社中電シーティーアイ, (2016), 青潮被害軽減シミュレーションシステムの開発業務報告書.
- [17] 中町和雄・藤原拓・川口幸男・津野洋(2012), 縦軸水流発生装置を用いた実規模散気式オキシデーションディッチの流動特性と DO 分布に関する考察, 土木学会論文集 G(環境), Vol. 68, No. 1, pp. 13-20.
- [18] 野々村敦子・森本茂昭・河原能久・野間京二(2005), 流動発生装置による富栄養化した貯水池の水温躍層の破壊実験, 水工学論文集, 第 49 巻.
- [19] 船橋市漁業協同組合(2017), 三番瀬貧酸素水塊及び青潮の軽減対策報告書(受託者:イービストレード株式会社)

- [20] 道奥康治・神田徹・大成博文・西川考晴・松尾克美・木戸崇博(2000), マイクロバブル・エアレータによる貯水池の水質浄化実験, 水工学論文集, 第 44 巻.
- [21] 道奥康治・神田徹・大成博文・森口真仁・松尾昌和・白澤静敏・松尾和美(2001), マイクロバブルによる富栄養貯水池の水質改善工と浄化効率, 水工学論文集, 第 45 巻.
- [22] 山田哲史・天野誉之・南川久人(2005), 日本機械学会論文集(B 編), 第 71 巻, 705 号.
- [23] 矢持進・岡本庄市・山下貴幸・久保佳洋・小田一紀(1999), 噴流式水流発生装置による港湾域での生物生息の改善, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 1086-1090.
- [24] 吉本侑矢(2009), 内湾浚渫地における硫化物動態の把握と数値再現, 横浜国立大学大学院修士論文.
- [a] Sasaki, J., Kanayama, S., Nakase, K., and Kino, S. (2009), Effective application of mechanical circulator for reducing hypoxia in an estuarine trench. Coastal Eng. J., 51(4), pp. 309-339.
- [b] Vu Tien Thanh, (2016), Study on spatial and temporal variation of anoxic water and sulfide in Tokyo Bay, 東京大学大学院修士論文

謝辞

本研究を進めるにあたり，優しく丁寧なご指導を頂きました修士論文指導教員の佐々木淳教授に深謝致します．三年間，私がテーマに悩んだ時や方法が分からなくなってしまった時にいつも正しく導いて下さり，ありがとうございました．副指導教員の佐藤弘泰准教授には的確なアドバイスを頂きました．ここに感謝致します．現地観測についてご協力頂き，またデータも提供いただきました，船橋市漁業協同組合，船橋市，千葉県水産総合研究センター，イービストレード株式会社，パシフィックコンサルタンツ株式会社の皆様には，感謝申し上げます．そして編集作業を行うに当たり，専用ソフトウェアの操作に不慣れな私に，作図方法など教えて下さり，時には人生のあり方にまでご指導いただいた本研究室博士課程三年の遠藤雅実氏には感謝の念が絶えません．本研究室修士一年の古畑亜佑美さん・藤崎実玲さんは忙しい中修士論文の印刷，製本を手伝ってくださいました．ありがとうございました．最後になりましたが，いつも私の身を案じ心配してくれた友人，地元から応援し続けてくれた父や祖父，佐々木研究室の皆様に感謝の意を表します．

DHI-Mike3 および ECO Lab は DHI より東京大学に対し使用を承諾して頂いた．船橋の天文潮位データは，海上保安庁千葉海上保安部にご提供頂いた．モニタリングポストの風速・風向，表層水温データは国土交通省関東地方整備局にご提供頂いた．江戸川臨海における降水量は気象庁にご提供頂いた．