

函館港内の流動と水質の変動特性について

VARIATION CHARACTERISTICS OF TIDAL CURRENT AND WATER QUALITY IN HAKODATE PORT

函館工業高等専門学校 ○学生員 吉江祐人 (Yuto Yoshie)
 函館工業高等専門学校 正員 宮武 誠 (Makoto Miyatake)

1. はじめに

函館市では現在、「国産水産・海洋未来都市構想」に際し、旧函館ドック跡地に国産水産・海洋総合研究センターを建設することや、マリンレジャーの場及び大型蓄養施設として函館港の港奥海域を整備する構想が計画されている^[1]。しかし、一般的に港湾は、静穏度や荷役作業の安全性に重点を置いて整備されているため、特に港奥海域では閉鎖性が強く、水質の悪化が問題となる場合がある。また、函館港の港奥海域においても、閉鎖性が強いことから、水質の悪化が懸念されている。

本研究は、函館港港奥海域の水質と水位に関する1昼夜連続観測及び準3次元多層モデルによる流動計算から、港内の流動と港奥海域の水質変動メカニズムを解明する。更に港湾全域を対象とした水質の長期観測より港奥海域に蓄積する栄養塩の供給源について検討する。また、これらの結果に基づき、昨年実施した自律駆動型水素吸蔵合金アクチュエータによる海水交換装置^[2]の現地実験に際して、装置運用後の港内の水質改善効果や、港湾周辺の水質環境に及ぼす影響を定量的に予測・評価可能な函館港における準3次元水質環境モデルを構築し、その予測精度やモデルの妥当性を検証するものである。

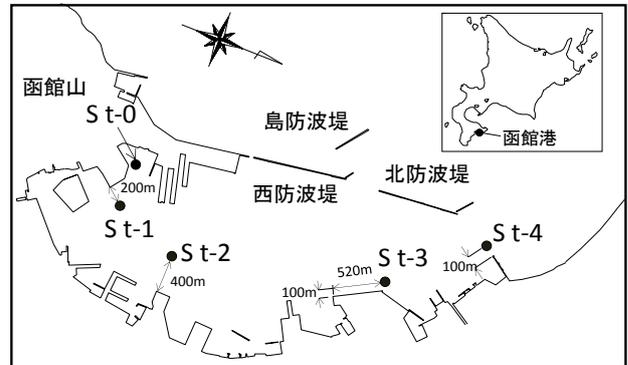


図-1 現地観測の調査位置

表-1 1昼夜観測の計測項目

	期間	層(水深)	間隔	時間	サンプリング
水位	25時間 (9/27 12:00 ~9/28 12:00)	T.P.-2.0m	1時間	20分	0.5秒
DO		上層 (T.P.-2.0m) 中層 (T.P.-4.0m)		計測器を所定水深に沈めて測定。	
水温				下層 (T.P.-6.0m)	6時間
CL					
濁度					
COD					
TP					

2. 函館港港奥海域の流動と水質の日変動特性

2.1 函館港西埠頭前面海域における1昼夜連続観測

港内港奥海域の水質と水位に関する日変動特性を把握するため、西埠頭-6.5m 岸壁前面海域において1昼夜連続観測を実施した。図-1は、現地観測の調査位置を示す。1昼夜連続観測は図中のSt-0地点において、2008年9月27日~28日に実施した。また、図中に示すSt-1~St-4は後述する港湾全域を対象とした水質の長期観測で使用する。1昼夜観測の計測項目を表-1に示す。水位は自記式圧力計により、毎正時20分間、0.5秒のサンプリング間隔で計測した。DO(溶存酸素量)及び水温、Cl(塩素量)は、水深方向に3層設け、それぞれT.P.から-2m(上層)、-4m(中層)、-6m(下層)地点の値を1時間間隔で正時毎に計測した。濁度、T-P(全リン量)、COD(化学的酸素要求量)は深さ方向にDOと同様の上層、中層、下層地点の海水を採水器により採取した後、吸光度計によって6時間間隔で計測した。

2.2 港奥海域における流動外力の検討

図-2(a)は毎正時20分間に得られた0.5秒間隔の水圧データを用いて、FFTによるスペクトル解析を行った結果を示す。周期10秒以下で一部パワースペクトルにピークが見られるものの、そのほとんどは周期が30秒から600秒の間に集中する。すべてのケースにおいて、周期500秒付近で明確なパワースペクトルにピークが認め

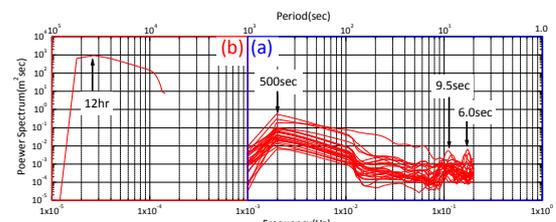


図-2 観測期間中における水位のパワースペクトル

られる。これは、港内を矩形とし、観測当時発生頻度の高かった風方向方向に長さを取り算出した港内の第1固有振動周期が510秒程度になることから、副振動成分によるものと推察される。同図(b)は、水圧データを正時毎に平均した値を用いて、再度FFT解析を行った結果を示す。12時間周期で卓越する波のパワースペクトルは、周期500秒程度の長周期波に比較して、3オーダー程度大きくなっている。1昼夜観測期間中の港奥海域の流動は、この12時間周期の波による流動に影響されていると推察される。

2.3 マルチレベルモデルによる港内の流動解析

前述の1昼夜連続観測期間中における港内の流動を準3次元多層モデルであるマルチレベルモデル^[3]によって計算する。このモデルは、静水面上にx軸及びy軸を取り、水深方向(z軸)に分割された各層における連続式及

び運動方程式、塩素量及び水温に関する移流拡散方程式から構成され、密度と塩素量及び水温の関係式には、Knudsen の状態方程式^[4]が用いられる。図-3 は計算対象領域を示す。計算メッシュは平成 10 年度の深浅測量結果に基づき、平面方向に 25m 間隔で分割し、鉛直方向には 1 昼夜観測と同様に、上層から順に静水面下-2m、-4m、-6m の 3 層で重層化させた。前出の FFT 解析の結果から 12 時間周期の波による流動の外力は他にも考えられるが、ここでは既往の流況調査報告書^[5]から主要 4 分潮のうち 1 日 2 回潮の S_2 分潮及び M_2 分潮の振幅流速を余弦波として、図中の AB 及び BC の境界に与えた。また、1 昼夜観測の結果、観測期間中の水温及び塩素量は、全層にわたりほぼ均一な分布を保持しながら、概ね一定で推移する傾向が見られた。また、既往の水質調査報告書^[6]から 1 昼夜観測とほぼ同期間に得た港外の塩素量及び水温の経年値と比較した結果、港内と港外での差は小さいことから、本解析では塩素量及び水温を計算領域で一定と仮定し、1 昼夜観測の値を与えた。計算領域の北側に位置する七重浜海岸には函館港に注ぐいくつかの流入河川が存在するが、平常時の河川流入量が小さく、詳細な観測が行われていないため、本計算は流入河川を考慮せず計算を行った。

図-4 は 1 昼夜観測と同位置の S_2 及び M_2 分潮の潮位を個別に計算した結果と観測潮位の比較を示す。 M_2 分潮の計算潮位は、 S_2 分潮と比較して潮位の変化が小さく、1 昼夜連続観測期間中における観測潮位は、 S_2 分潮の影響が大きいものと考えられる。

2.4 港奥海域における水質の日変動特性

図-5 は港奥海域における各水質の経時変化を示す。同図 (b) に示す濁度は上・中層よりも下層で高く、9/27 の 18:00 及び 9/28 の 6:00 では他層に比して 2 オーダ程度高い値を示す。この濁度が高くなる時間帯は前出の図-4 において、下げ潮最強時にほぼ一致し、図-5 (a) に示す 1 昼夜観測と同位置で得た S_2 分潮における下層流速の計算値が最大となる。この結果、下げ潮最強時の潮流によって底質が巻き上げられたものと推察される。同図 (c) は COD の経時変化を示す。COD は濁度と同様に下層で常に高く推移しており、それに追従するように上・中層の COD が増加している。観測期間中、下層の COD が特に高くなる時間帯は、同図 (b) で示した下層の濁度が高くなる 9/27 の 18:00 及び 9/28 の 6:00 に一致する。これは、下げ潮最強時の潮流によって底質に含まれるヘドロや底生生物等が同時に巻き上げられたことに起因する。同図 (d) は DO の経時変化を示し、図中の実線は飽和溶存酸素量を示す。DO は全層において 9/27 の 12:00 から 16:00 まで高い値で推移しているが、その後、減少する傾向にある。特に下層では一時的に貧酸素水塊を形成している。これより、下げ潮最強時の底質の巻き上げにより海中に含まれる被酸化性物質の濃度が高まった結果、酸素の内部消費が一層加速しているものと考えられる。同図 (e) に示す T-P は、下層で 12 時間周期の波の流動の影響を受けるが、上述した DO の経時変化での相関性は見受けられなかった。

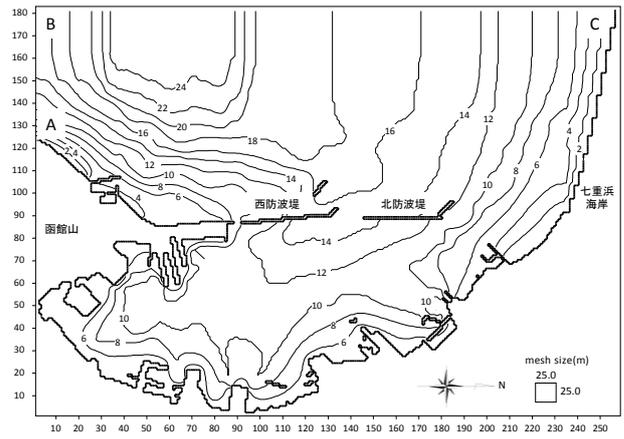


図-3 計算対象領域

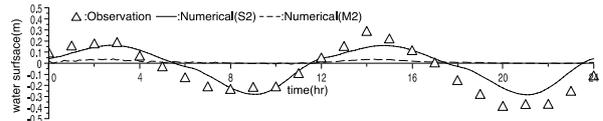


図-4 計算潮位と実測潮位の比較

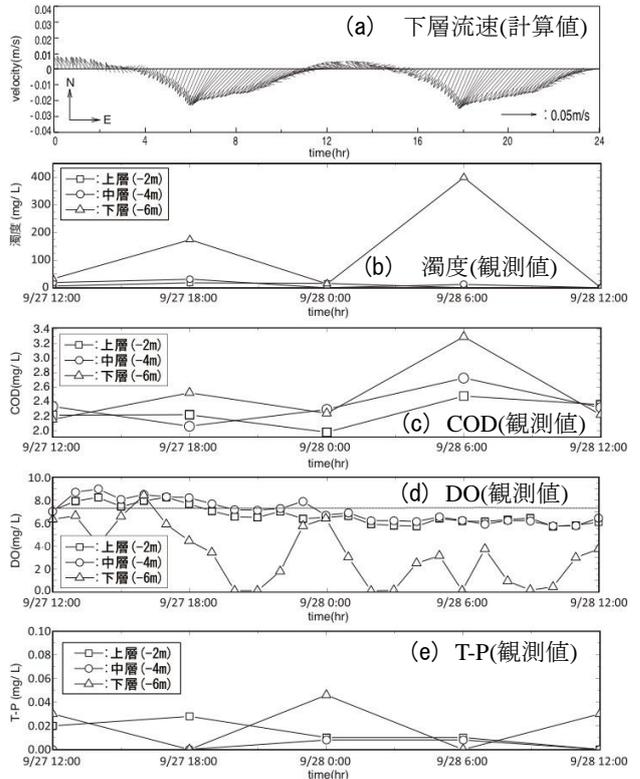


図-5 観測期間中の各水質の日変動

3. 函館港における栄養塩の供給源に関する検討

港内に蓄積する栄養塩の供給源を検討するため、前出の図-1 中の St-1~St-4 に示す港湾全域を対象とした現地観測を実施した。期間は 2008 年 10 月~12 月の 3 ヶ月であり、月 1 回の割合で各観測点における T-N、T-P、COD、DO を前述の 1 昼夜連続観測と同様な計測方法によって、それぞれ T-P から -2m(上層)、-4m(中層)、-6m(下層)地点で測定した。

図-6 及び 7、8 中の (a)、(b)、(c)、(d) は、10 月及び 11 月、12 月の各観測点で層平均した T-N、T-P、COD、DO の港内分布を示す。また、同図 (a) 中には観測日よ

り4日前の降水量を表示する．図-6及び図-7中の(a)に示す観測日より4日前に降水量が少ない10月及び11月のT-Nは，港口から港奥海域に向かって高く推移する．これは同図(b)に示す同時期のT-Pにおいても同様であり，栄養塩は閉鎖性の強い港奥海域に蓄積する傾向があると考えられる．これに対し，観測日から4日前に降水のある12月のT-Pを示す図-8(b)では，降水量の少ない10月及び11月に比して港湾全域で高い値となっている．この結果より，港奥海域に蓄積するT-Pは，降水に伴い港口から港奥へ輸送されるものであると推察できる．これに対し，図-8(a)に示す12月のT-Nは逆に，港湾全域で低下することから，その輸送過程はT-Pとは異なる原因であると考えられる．図-6～7中の(c)は10月及び11月，12月のCOD分布を示す．10月のCODは，11月及び12月の場合と比較すると，港内全域で高い値を示す．しかし，11月と12月のCODは，港内全域で一定に分布し，降水による変化は見られない．図-6～7中の(d)は10月及び11月，12月のDO分布を示す．観測日より4日前に降水量が少ない10月及び11月のDOは，T-P及びT-Nと同様に港奥海域で高い値となる．一方，観測日から4日前に降水のある12月のDOは，港内全域で高い値となっており，同時期のT-Pの港内分布の傾向と一致する．以上より，港内のDOの消長は，ほかにも要因が考えられるが，T-Nと比較すると，降水に伴い港口から港奥に輸送されるT-Pと高い相関があると考えられる．

4. 港湾周辺海域の水質環境モデルの構築

4.1 生態系モデルの構築

前出した1昼夜連続観測の水質を定量的に評価可能な

函館港における水質環境モデルを構築する．生態系モデルは堀江ら^[7]による物質循環に基づく生態系モデルを参考に構築した．生態系の物質収支は，OP(有機態リン)，IP(無機態リン)，DO，CODを構成因とする．上・中層は有光層，下層は無光層とし，光合成は有光層でのみ行われるものとする．生態系構成因はリンのみを栄養塩の制御因子とし，生産・分解・溶出に加え，海水流動による底質の巻き上げ作用を通じて変化するものとする．以上により生態系による物質収支の基礎式は以下のように得られる．

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [OP_1 \cdot h_1] &= G \cdot OP_1 \cdot h_1 - B_1^P \cdot OP_1 \cdot h_1 - S_1^P \cdot OP_1 \\ \frac{\partial}{\partial t} [OP_2 \cdot h_2] &= G \cdot OP_2 \cdot h_2 - B_2^P \cdot OP_2 \cdot h_2 - S_2^P \cdot OP_2 + S_1^P \cdot OP_1 \quad (1) \\ \frac{\partial}{\partial t} [OP_3 \cdot h_3] &= -B_3^P \cdot OP_3 \cdot h_3 - S_3^P \cdot OP_3 + S_2^P \cdot OP_2 \\ \frac{\partial}{\partial t} [IP_1 \cdot h_1] &= -G \cdot OP_1 \cdot h_1 + B_1^P \cdot OP_1 \cdot h_1 \\ \frac{\partial}{\partial t} [IP_2 \cdot h_2] &= -G \cdot OP_2 \cdot h_2 + B_2^P \cdot OP_2 \cdot h_2 \quad (2) \\ \frac{\partial}{\partial t} [IP_3 \cdot h_3] &= B_3^P \cdot OP_3 \cdot h_3 + R_P \\ \frac{\partial}{\partial t} [COD_1 \cdot h_1] &= \beta \cdot G \cdot OP_1 \cdot h_1 - B_1^{COD} \cdot COD_1 \cdot h_1 \\ &\quad - S_1^{COD} \cdot COD_1 \\ \frac{\partial}{\partial t} [COD_2 \cdot h_2] &= \beta \cdot G \cdot OP_2 \cdot h_2 - B_2^{COD} \cdot COD_2 \cdot h_2 \\ &\quad - S_2^{COD} \cdot COD_2 + S_1^{COD} \cdot COD_1 \quad (3) \\ \frac{\partial}{\partial t} [COD_3 \cdot h_3] &= -B_3^{COD} \cdot COD_3 \cdot h_3 - S_3^{COD} \cdot COD_3 \\ &\quad + S_2^{COD} \cdot COD_2 + R_{COD} \end{aligned}$$

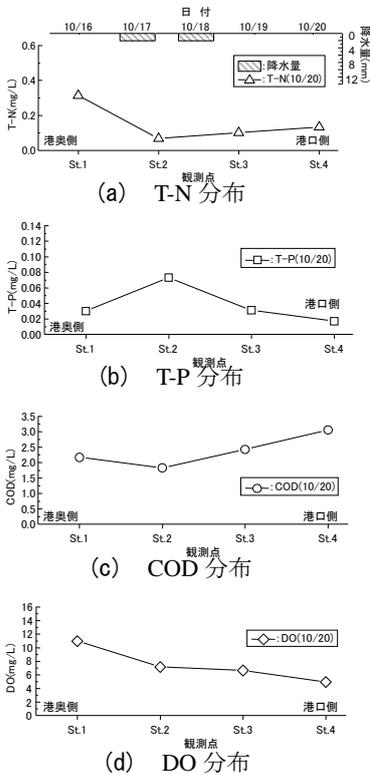


図-6 10月の観測結果

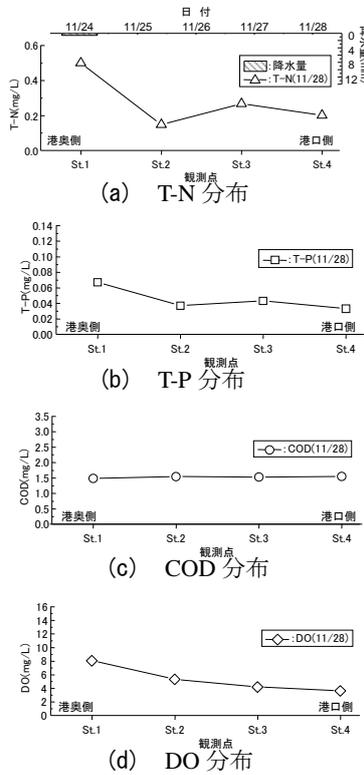


図-7 11月の観測結果

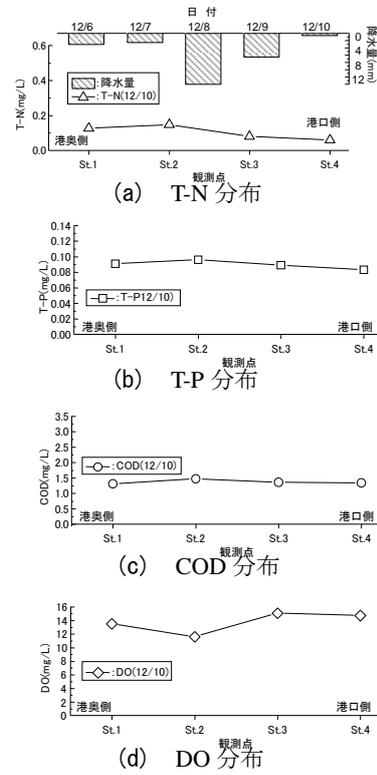


図-8 12月の観測結果

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}[DO_1 \cdot h_1] &= \alpha \cdot G \cdot OP_1 \cdot h_1 - B_1^{DO} \cdot COD_1 \cdot h_1 + m(HOWA - DO_1) \cdot h_1 \\ \frac{\partial}{\partial t}[DO_2 \cdot h_2] &= \alpha \cdot G \cdot OP_2 \cdot h_2 - B_2^{DO} \cdot COD_2 \cdot h_2 \\ \frac{\partial}{\partial t}[DO_3 \cdot h_3] &= -B_3^{DO} \cdot COD_3 \cdot h_3 - D_B \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、下添え字 k は上層を $k=1$ とする層番号を示し、 G は生産速度、 α 及び β は DO 及び COD 換算係数である。 B_k^P , B_k^{COD} はそれぞれ第 k 層の OP 及び COD の分解速度であり、 B_k^{DO} は分解に伴う酸素消費速度を示す。 S_k^P , S_k^{COD} は第 k 層の OP 及び COD の沈降速度、 $HOWA$ 及び m は飽和溶存酸素量と再曝気係数を表わす。また、 R_{IP} はリンの溶出速度である。これらの生態系に含まれる定数は堀江ら^[7]が提示した基準値を準用した。また、 R_{COD} 及び D_B はそれぞれ、底質の巻き上げによる COD の溶出速度ならびに酸素消費速度であり、以下の手順で計算を行った。はじめに予め求めたマルチレベルモデルによる下層の潮流合成流速 q と濁度 P_s の観測値の関係から、以下の曲線式を用いて、

$$P_s = M(q/q_{cr} - 1)^n \quad (5)$$

濁度を計算した後、次に COD の溶出速度及び酸素消費速度は、過去の現地観測の結果より、以下の直線式より算出した。

$$R_{COD} = -D_B = G_p \cdot P_s \quad (6)$$

ここに、 M, n, G_p は定数、 q_{cr} は巻き上げ限界流速であり、現地観測に基づき定めた。以上の式(1)~(6)式は、マルチレベルモデルにおける各物質の移流拡散方程式の生物反応項として組み込み計算を行った。

4.2 1 昼夜連続観測の再現計算

図-9(a)及び(b)はそれぞれ COD, DO の計算値と 1 昼夜観測で得た観測値の比較を示す。同図(a)に示す COD の計算値は、下層において下げ潮最強時の底質の巻き上げ作用により増加し、その生起時間はやや遅延するものの、1 昼夜観測と同様な傾向が得られる。これに対し、同図(b)に示す下層における DO の計算値は、現地と同様に下げ潮最強時の COD の増加に伴い低下するが、現地で生じた貧酸素水塊を十分に再現できていない。以上のように下層の再現精度にやや課題が残るものの、上・中層における COD, DO の計算値は、観測値とほぼ同様な傾向で推移しており、定性的ではあるが、概ね良好な結果を予測することができる。

5. 結論

本研究で得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 1 昼夜観測において、港奥海域の下層における DO の低下は、下げ潮時に生じる底質の巻き上げによって、海中の被酸化性物質の濃度が高まり、酸素の内部消費が一層加速したことに起因するものと考えられる。
- (2) 港湾全域を対象とした水質観測の結果、港内における DO の変化は、他にも要因が考えられるが、T-N に比較すると、降水に伴い港口から港奥に輸送される T-P と高い相関があると考えられる。
- (3) 塩素量と水温の変化及び流入河川の影響を無視した

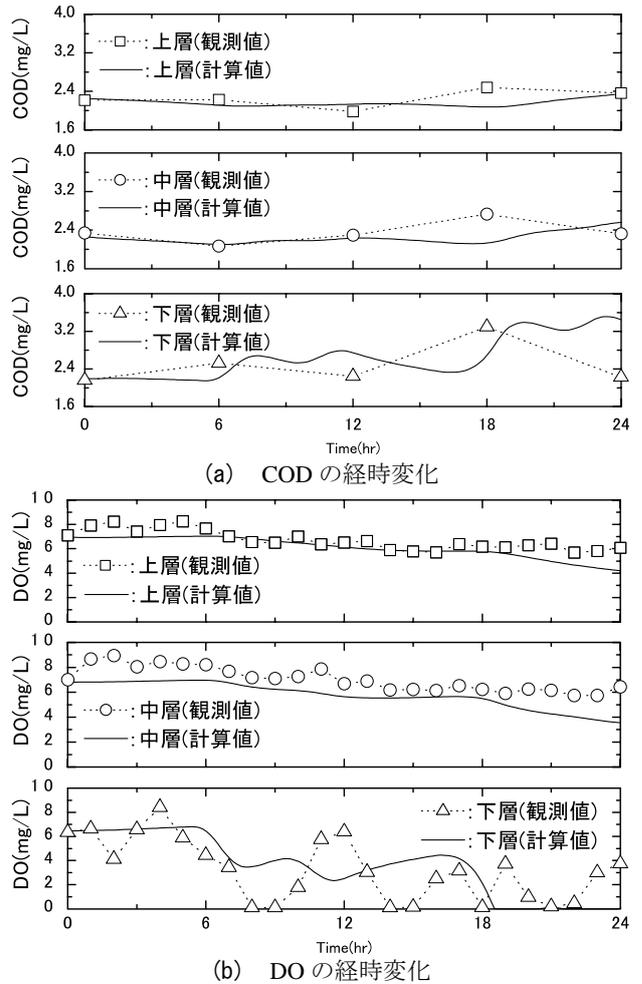


図-9 水質環境モデルによる計算値と観測値の比較

条件で取り扱ったマルチレベルモデルに、物質循環に基づく生態系モデルを組み込んだ水質環境モデルは、港内の流動や下層での水質の再現精度に課題が残っており、今後計算精度を高める必要がある。

参考文献

- [1] 函館市：国産水産・海洋総合研究センターの整備に向けた提案書Ⅱ，pp.10-17,2006.
- [2] 宮武 誠，湊 賢一，本村真治，松村一弘，増田 亨，吉江祐人：自律駆動型水素吸蔵合金アクチュエータを利用した函館港の海水交換装置の検討，海洋開発論文集，第26巻，pp.81-86,2010.
- [3] J.J.Leendertse,R.C.Alexander and S.K.Liu:A three dimensional model for estuary and coastal seas vol.1 principle of computation,The Rand Corporation,R1417-OWPR,1973.
- [4] 松梨順三郎，池田有光，海老瀬潜一，吉田喜三郎：環境流体汚染，森北出版株式会社，pp.170-171,1996.
- [5] 北海道開発局 函館開発建設部：平成9年度 函館港流況調査報告書，pp.50-59,1997.
- [6] 北海道開発局 函館開発建設部：平成10年度 函館港水質調査業務報告書，pp.57-99,1998.
- [7] 堀江 毅，細川恭史：海域における物質循環数値モデルの水質支配要因について，港湾技術研究所報告，運輸省港湾技術研究所，vol.22,No3,1998.