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

宮武 誠¹・吉江祐人²・湊 賢一³・松村一弘⁴

Makoto MIYATAKE, Yuto YOSHIE, Ken-ichi MINATO and Kazuhiro MATSUMURA

¹ 正会員 博（工）函館工業高等専門学校 環境都市工学科（〒042-8501 函館市戸倉町14番1号）

² 学生員 函館工業高等専門学校 専攻科環境システム工学専攻（〒042-8501 函館市戸倉町14番1号）

³ 博（工）函館工業高等専門学校 電気電子工学科（〒042-8501 函館市戸倉町14番1号）

⁴ 博（水）北海道立工業技術センター 機械電子技術科（〒041-0801 函館市桔梗町379番）

The variation characteristics of tidal current and water quality in Hakodate port are investigated through field observation and numerical modeling. Measurements of nutrients, dissolved oxygen, chemical oxygen demand and turbidity are obtained from the whole area of the port. The results show that, during falling tide, the sediments suspension lead to increasing of chemical oxygen demand concentration. This phenomenon is made oxygen consumption speed to accelerate near the seabed. The phosphorus accumulated into the port is supplied from one of the rivers flowing out to Hakodate bay. The daily variation of water quality in the port is estimated using the multi-level model concerned with the ecological system. The results of prediction are in good qualitative agreement with those of observation.

Key Words: Hakodate port, field observation, sediment suspension, nutrients supply, multi-level model

1. はじめに

函館市では現在、「国際水産・海洋未来都市構想」に際し、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、マリーナ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利用する構想が計画されている¹⁾。しかし、これまでの港湾は、静穏度の確保や荷役作業の安全性に重点が置かれ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ことがある。函館港の港奥海域においても、長年に渡る造船業や水産業により水質の悪化が懸念されるが、過去に函館港を対象とした港内の流動や水質の変動特性を詳細に取り扱った研究は見当たらない。

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外力を特定するとともに、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及びトレーサ粒子による追跡解析に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、今後実施予定の自律駆動型水素吸蔵合金アキュエータによる海

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、港湾周辺海域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。

2. 函館港港奥海域の流動と水質の日変動特性

(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D0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（HACH社製DR/890 USEPA法準拠）によって6時間間隔で計測した。

(2) 港奥海域における流動外力の検討

図-2(a)及び(b)は，観測期間中の風速ベクトルならびに，定時毎に得た20分間の水圧データから算出した有義波高及び長周期波高の経時変化を示す。図中に示す長周期波高は周期が30秒から600秒に相当する波を対象として表示する。観測期間中，最も有義波高が高くなる9/27の12:00から20:00には，風速5m/s以上の風が時間経過とともに西北西から西方向へ向きを転じながら卓越する。しかし，20:00以降には風向を北東に転じ，風速が減速した結果，有義波高もそれに伴い減少する。有義波高は，その8割程度が長周期波高であることから，港奥海域の波浪は長周期波成分が卓越し，その消長は観測期間中に生じた風に支配的であると考えられる。

図-3(a)は毎定時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みられるものの，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。以上の結果，500秒程度で卓越する長周期波は風によって生じ，副振動により発達するものと考えられる。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，周期が500秒程度の長周期波に比較して，3オクタ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時間周期の波に支配されているものと推察される。

(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-4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時間周期の波を発生させる外力は他にも考えられるが，ここでは既往の流況調査報

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) 下層 (T.P.-6.0m)		計測器を所定水深に沈めて測定.	
水温					
CL			6時間		所定水深の海水を採水器により取得した後、吸光度計によって測定.
濁度					
COD					
TP

図-2 観測期間中の風と波浪の関係

図-3 観測期間中における水位のパワースペクトル

告書⁵⁾から主要4分潮のうち1日2回潮のS₂分潮及びM₂分潮の振幅流速を正弦波として，図中のAB及びBCの境界に与えた。図-5(a)及び(b)は，前述の1昼夜観測で得た港奥海域における水温及び塩素量の経時変化を示す。水温及び塩素量は微小な変動があるものの，全層にわたりほぼ均一な分布を保持しながら観測期間中，概ね一定で推移する傾向にある。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。また，計算領域の北側に位置する七重浜海岸には

函館湾に注ぐいくつかの流入河川が存在するが、平常時の河川流量が小さく、詳細な観測が行われていない。そのため、本計算は流入河川を考慮せず計算を行った。

図-6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 分潮に比較して潮位の変化が小さく、1昼夜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。

(4) 港奥海域における水質の日変動特性

図-7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オーダー程度高い値を示す。この濁度が高くなる時間帯は前出の図-5において、下げ潮最強時にほぼ一致し、図-7(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。一方、同図(e)に示すT-Pは、上層において9/27の12:00から18:00の間で高く推移する。これは中・下層のT-Pの値を考慮すると、下げ潮時の潮流によって輸送された成分と考えられる。この上層のT-Pは、9/28の18:00から3:00の潮流流速が減速する満潮時に向かって中層ならびに下層へ沈降することが認められる。

3. 函館港における栄養塩の供給源に関する検討

(1) 函館港全域を対象した水質観測

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ヶ月間であり、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-8及び9、10中の(a)、(b)、(c)、(d)は、10月

図-4 計算対象領域

図-5 水温及び塩素量の観測値

図-6 計算潮位と実測潮位の比較

図-7 観測期間中の各水質の日変動変化

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-8及び9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)に示す同期間の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、観測日より4日前に降水がある12月のT-Pを示す図-10(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、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と推察される。これに対し、図-10(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とは異なる原因によるものと考えられる。図-8及び9、10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月の場合に比較して、港湾全域で高い値を示す。これに対し、11月及び12月のCODはともに、同程度の値で港湾全域にほぼ均一に分布し、降水に伴う変化は見られない。図-8及び9、10中の(d)は10月及び11月、12月のDO分布を示す。降水量の少ない10月及び11月のDOはT-PならびにT-Nと同様に港奥海域で高い値になる。一方、4日前に降水がある12月のDOは、港湾全域で高い値となり、同時期におけるT-Pの港内分布の傾向に一致する。以上の結果、港内のDOの消長は、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。

(2) 粒子追跡解析

前出の図-4において、七重浜海岸には函館湾に注ぐ流入河川が幾つかある。その中でも図中のFに示す流入河川は、上流域に農地及び富栄養化で問題となっている湖沼を有していることから、降水時には大量の栄養塩の流入が想定される。しかし前述のように、この河川に関する流入流量や水質に関する詳細な観測は行われていない。そこで、本研究は図中の■で示す河川の前面海域にトレーサ粒子を400個配置し、オイラー・ラクランジュ法⁷⁾による追跡解析を行った。粒子を移動させる港湾周辺海域の流動は、降水後の河川増水に伴う淡水流入による影響が考えられるが、ここではS₂分潮の潮流流速のみを用いて計算を行った。

図-11は、30日間移動させたトレーサ粒子分布及びS₂分潮の潮汐残差流ベクトル分布を示す。河川前面海域に配置したトレーサ粒子は、函館山側から流入し、七重浜海岸で南東方向に流れを転じる潮汐残差流により、第3航路港口から港内に輸送され、流れの停滞する港奥海域に蓄積していることが認められる。T-Pは本解析で用いたトレーサ粒子とは違い、植物プランクトンによる生産・分解ならびに沈降作用等により非保存物質である。しかし、港奥側に輸送される過程は港湾全域における現地観測の傾向とよく一致することから、定性的ではあるが、港内のT-Pは函館湾に注ぐ流

図-8 10月の観測結果

図-9 11月の観測結果

図-10 12月の観測結果

入河川から供給されるものと推察される。

4. 港湾周辺海域の水質環境モデルの構築

(1) 生態系モデルの構築

前述した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⁸⁾による物質循環に基づく生態系モデルを参考にして構築した。生態系モデルの概念図を図-12に示す。生態系は栄養塩-植物プランクトンの段階に留め、海中のDO及びCODは、港湾全域の現地観測において、T-PがDOの変化とよい相関を示したため、リンのみを栄養塩の制御因子として生産・分解するものとした。水深方向には前出の現地観測と同様に3層設け、上・中層を有光層、下層は無光層とし、生産は有光層のみで生じるものとする。有機態リン(OP)、無機態リン(IP)、COD、DOに関する物質収支式は以下のようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t}[OP_k \cdot h_k] = \begin{cases} G \cdot OP_k \cdot h_k & (k=1,2) \\ 0 & (k=3) \end{cases} - B_k^P \cdot OP_k \cdot h_k + \begin{cases} -S_k^P \cdot OP_k & (k=1) \\ -S_k^P \cdot OP_k + S_{k-1}^P \cdot OP_{k-1} & (k=2,3) \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[IP_k \cdot h_k] = \begin{cases} -G \cdot OP_k \cdot h_k & (k=1,2) \\ 0 & (k=3) \end{cases} + B_k^P \cdot OP_k \cdot h_k + \begin{cases} 0 & (k=1,2) \\ R_{IP} & (k=3) \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[COD_k \cdot h_k] = \begin{cases} \beta \cdot G \cdot OP_k \cdot h_k & (k=1,2) \\ 0 & (k=3) \end{cases} - B_k^C \cdot COD_k \cdot h_k + \begin{cases} -S_k^C \cdot COD_k & (k=1) \\ -S_k^C \cdot COD_k + S_{k-1}^C \cdot COD_{k-1} + R_{COD} & (k=2,3) \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[DO_k \cdot h_k] = \begin{cases} \alpha \cdot G \cdot OP_k \cdot h_k & (k=1,2) \\ 0 & (k=3) \end{cases} - B_k^D \cdot COD_k \cdot h_k + \begin{cases} m(HOWA - DO_1) \cdot h_1 & (k=1) \\ 0 & (k=2) \\ -D_B & (k=3) \end{cases} \quad (4)$$

ここに、 h_k は第 k 層の層厚、下添字 k は1を上層とする層番号、 OP_k 、 IP_k 、 COD_k 、 DO_k はそれぞれ第 k 層の有機態リン、無機態リン、化学的酸素要求量、溶存酸素量を示す。 G は生産速度、 B_k^P 、 B_k^C はそれぞれ第 k 層のOP及びCODの分解速度であり、 B_k^D は分解に伴う酸素消費速度を示す。 S_k^P 、 S_k^C は第 k 層のOP及びCODの沈降速度、 m は曝気係数、 $HOWA$ は飽和酸素量、 α 、 β はそれぞれDO及びCODの換算係数、 R_{IP} はリンの溶出速度である。これらの生態系モデルに含まれる

図-11 トレーサ粒子分布及び潮汐残差流ベクトル分布

図-12 生態系モデルの概念図

定数は、堀江ら⁸⁾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、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、現地観測及び解析結果に基づき定めた。以上の(1)式から(6)式は、前出のマルチレベルモデルによる港内の流動解析において、OP、IP、COD、DOに関する移流拡散方程式を新たに追加し、その生物反応項として組み込み計算を行った。流動解析に関する計算条件は前出と同様とし、港内・外に与える各水質に関する初期値及び境界条件は、観測結果に基づき決定した。

(2) 1昼夜連続観測の再現計算

図-13(a)、(b)、(c)はそれぞれCOD、DO、T-Pの計算値と1昼夜連続観測で得た観測値の比較を示し、T-Pの計算値は有機態リンOPと無機態リンIPの総和として表示する。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。また、同図 (c) に示す T-P は、下層において沈降・溶出を十分に再現できず、現地観測の傾向とは異なる結果となる。以上のように下層の再現精度にはやや課題が残るものの、上・中層における COD、DO、T-P 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。

6. 結 論

本研究で得られた結論を要約すると、下記のとおりである。

(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) 塩素量や水温の変化及び流入河川の影響を無視した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。

今後は、函館湾に注ぐ流入河川の流量及び港湾全域を対象とした水温及び塩素量を含めた水質の長期観測を実施し、より詳細な現象を把握するとともに、マルチレベルモデルならびに、水質環境モデルの予測計算精度を向上させる所存である。

謝辞：本研究を遂行するにあたっては、総務省「戦略的情報通信研究開発推進制度 (SCOPE)」の研究助成金による補助を受けたことをここに記し、謝意を表す。

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 priciples of

図-13 水質環境モデルによる計算値と観測値の比較

computation, The Rand Corporation, R-1417-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) 今里哲久：海水交換の概念と交換率，沿岸海洋研究ノート，30 周年記念特別号，pp. 111-123, 1993.
- 8) 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, No. 3, 1998.