

函館港内の水質改善に関する A-MHA の最適配置

The study on optimal arrangement of A-MHA in Hakodate port

函館工業高等専門学校 ○学生員 佐藤 侑亮 (Yusuke Sato)
函館工業高等専門学校 正 員 宮武 誠 (Makoto Miyatake)
函館工業高等専門学校 非会員 湊 賢一 (Kenichi Minato)

1. はじめに

函館市では現在、旧函館ドック跡地を国際水産・海洋総合研究センターとして再利用することを目的とした「函館国産水産・海洋都市未来構想」¹⁾が計画されている。本構想には、旧函館ドック跡地のドックヤード周辺海域をマリンレジャー施設として再利用する計画も含まれている。しかし、長年に渡り利用されてきたドックヤード海域及び港内の水質は著しく劣化しており、現状のままでマリンレジャー施設として利用するのは非常に困難である。そこで、当該水域の水質改善をするためには、大量の外海水を低コストで取水でき、港内の水質を改善しうる海水交換システムが必要となる。本研究では外海水の揚水に用いる動力として、函館港内に内存する温泉源と海水の温度差により駆動する自律型水素吸蔵合金アクチュエーター (Automatically - Metal Hydride Actuator : 以下 A-MHA) を適用させる研究を行っている。

本研究の目的は、A-MHA によって海水交換を促進させた際の港内水域の水質改善効果と港外に及ぼす水環境の影響を現地観測及び数値解析の両面から解明し、港湾周辺海域に与える水質環境負荷の影響を最小限にする A-MHA の最適配置位置を検討する。

2. 函館港内における水質と水位の現地観測

2.1 観測方法

図-1は、港内港奥海域で行った1昼夜連続観測と、港内全海域で行った長期観測の調査位置を示す。図中のSt-0は1日連続観測位置を示し、St-1～4は長期観測位置を示す。表-1は、1昼夜連続観測の観測項目を示す。観測項目は、水位・水温・DO(溶存酸素量)・COD(化学的酸素要求量)・濁度・TP(全りん量)・TN(全窒素量)の7項目である。水位は、TPを基準とし、TP-2.0mの水深にデータロガー付水圧計を設置し、正時毎に20分間、0.5秒のサンプリング間隔で測定した。DO及び水温は、鉛直方向の変化を把握するため、上層(TP-2.0m)、中層(TP-4.0m)、下層(TP-6.0m)とし、DO・水温計を用いて正時毎に1時間間隔で測定した。COD・濁度・TP・TNは6時間間隔とし、正時毎に採水器によって回収された海水を吸光光度計により分析した。

一方、長期観測は平成20年10月20日、11月28日及び12月10日の計3回行った。調査項目は、DO、濁度、TP、TNである。調査方法については、1昼夜連続観測と同様に、DO・水温計及び吸光光度計により測定し、水面から水深方向に上層(3.0m)、中層(6.0m)、下層(9.0m)の3層を対象とした。

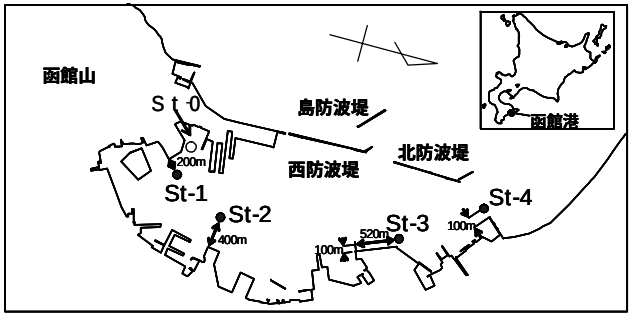


図-1 現地観測位置

表-1 1昼夜連続観測項目

	期間	層	間隔	時間	サンプリング
水位	25時間 (9/27 0:00 ~9/28 0:00)	TP-2.0m	1時間	20分	0.5秒
DO		DO 水温計によって計測			
水温					
COD		上層 (TP-2.0m) 中層 (TP-4.0m) 下層 (TP-6.0m)	6時間	各層の海水を採水器によって採水し、吸光光度計によって計測	
濁度					
TP					
TN					

2.2 港内港奥海域における水質の日変動特性

1昼夜連続観測の結果、得られた水位と水質の経時変化を図-2に示す。図中(a)に示す水位は、正時毎に0.5秒間隔で得られた水圧データを算術平均したものである。これより、函館港内では1日2回潮成分が卓越していると言える。図中(b)は、濁度を示す。これより下層において、9/27の18:00と9/28の6:00に濁度のピークが見られる。図中(a)の潮位と比較すると、下層における濁度のピークは下げ潮最強時とほぼ一致することがわかる。これは、下げ潮最強時の流速により底質が巻き上げられたことに起因すると考えられる。図中(c)は、CODを示す。CODは上層が最も低く、下層になるにつれて上昇しているのがわかる。一方、全層において、9/27の18:00と9/28の6:00にCODのピークが見受けられる。これは下層における濁度のピークとほぼ一致する。よって下層では、下げ潮最強時に巻き上げられた底質に含まれる有機物及び海底生物が増加したため港奥海域の水質は一時的に劣化したと言える。図中(d)は、DOを示す。全層におけるDOの値は、観測開始時刻から終了時刻にかけて低下していることがわかる。また、下層のDOに着目すると、値が大きく変動しており、9/27の20:00及び9/28の3:00付近では、貧酸素水塊が形成されていることがわかる。これは、図中(c)で示したCODが時間経過とともに相対的に上昇し、酸素の内部消費が加速したためだと考えら

れる。一方、図中**(b)**の下層における濁度は上層及び中層と比較してオーダ単位の差があることがわかる。これより、下層で見られた貧酸素水塊は、巻き上げられた底質中に含まれる酸素消費物質濃度が全層で最も高くなった結果発生したものと考えられる。図中**(e)**及び**(f)**はTNとTPを示す。いずれも下層における値が上層及び中層の値と比較して全体的に高いことがわかる。特に、下層におけるTPに着目すると、9/27の12:00及び9/28の0:00と12:00に上昇していることがわかる。一方、図中**(d)**に示した下層の濁度と比較すると、両者の間には明確な相関関係が認められない。したがって下層のTPは底質に含まれる栄養塩が海水中に溶出した成分ではないものと推定され、濁度の消長と異なった要因により港内に供給されているともの考えられる。

2.3 港内に供給する栄養塩の流入源に関する長期観測

図-3は、12月に港内全海域で行われた長期観測の結果を示す。図中**(a)**は、12/6～12/10までの降水量と日照時間の変化を示す。これより、12/6から調査当日にかけて継続的な降雨が確認できる。また、日照時間も12/6から調査当日にかけて上昇傾向にある。図中**(b)**は、各観測地点におけるDO及びTPの変化を示す。DO及びTPの値は全層平均したものである。DOの値を見ると、1日連続観測の結果に比して全体的に上昇していることがわかる。これは、前出の降水量及び日照時間の変化から考察すると、継続的な降雨によって海水が淡水化したことによる飽和溶存酸素量の増加と、日照時間の増加に伴い海水中の植物プランクトンの光合成が活性化することに起因すると考えられる。一方、光合成に寄与するTPの分布を見ると、1日連続観測におけるTPの結果と比較して**St-3**を除き全体的に高く推移していることがわかる。加えて、港内港口側海域に設置した**St-4**の値が、港内港奥側海域の**St-1**とほぼ同等の値を示していることから、港内に内存するTPは、港外から栄養塩が潮流によって輸送された結果、港内海域に蓄積されたものと考えられる。

3. 港内を対象とした栄養塩の追跡シミュレーション

現地観測では具視化できない港湾周辺海域の栄養塩の挙動を定量的に捉えるため、オイラー・ラグランジュモデル²⁾による粒子を用いた潮流による栄養塩の輸送解析を行った。

3.1 港内周辺海域の流動に関する再現性

(1)式は、オイラー・ラグランジュモデルにおける粒子の移動距離の算定式を示す。粒子の移動距離は、粒子の移流及び乱れから算出される。本解析ではオイラー流速を用いることで粒子の移動距離を算定する。なお、オイラー流速には、マルチレベルモデル³⁾によって計算された多層流動を用いる。

$$X_{i+1} = X_i + u_E(X_i, t) \cdot \Delta t + u'_i \cdot \Delta t + [\nabla_i u_E(X_i, t) \cdot \{u_E(X_i, t) \cdot \Delta t\}] \cdot \Delta t \quad (1)$$

ここに、 X_i は、時刻 t_i における粒子の座標 $X(x, y, z)$ 、 $u_E(X_i, t)$ は、 (X_i, t) における場のオイラー流速、 u'_i は、 i 時間ステップの乱れ速度、 Δt は、計算時間間隔をそれぞれ示す。

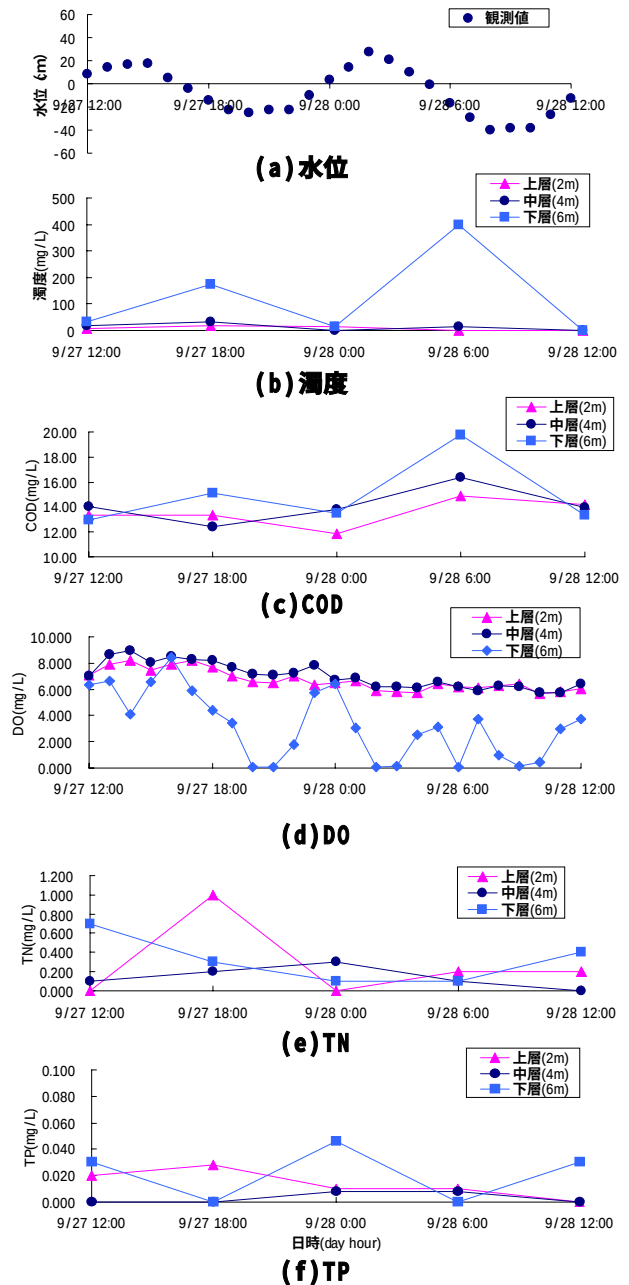
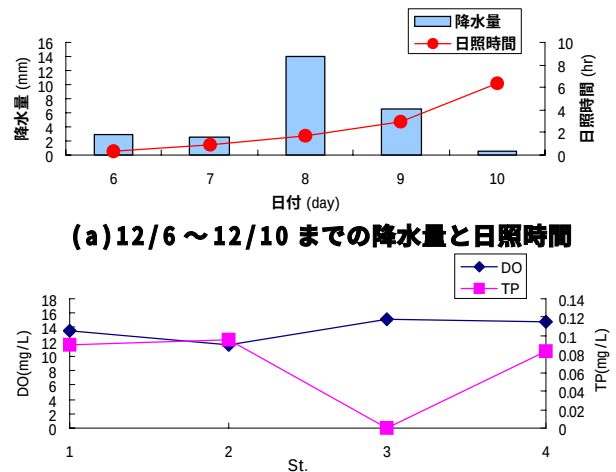


図-2 1日連続観測結果



(b) 12/10におけるDOとTPの層平均値の比較

図-3 経月観測結果

図-4は、マルチレベルモデル及びオイラー・ラグランジュモデルの計算対象領域を示す。対象領域は港外海域を含む函館湾全海域を対象とし、港内外の多層流動をマルチレベルにより把握した。図中の境界AB及びBCからは、現地観測の結果から約12時間周期の S_2 及び M_2 成分の多層潮流流速を与える。図-5は、St-0における1日連続観測の観測水位及びマルチレベルモデルの解析水位の比較を示す。これより、 S_2 成分は観測値と比較してほぼ妥当な精度を示していることから、 S_2 成分の解析値をオイラー・ラグランジュモデルの流動外力として用いた。図-6は、表層(-2.0m)における残差流ベクトルを示す。函館山側から北方へ流入する潮流は、岸に近づくにつれその流向を南東方向に転じ、港内に流入していることが確認できる。したがって栄養塩は、この南東方向の潮流流動により港外から港内へ輸送されるものと考えられる。以上の結果から、図-4の領域Dの表層(-2.0m)に400個の粒子を配置し、オイラー・ラグランジュモデルによる30日間(60回潮)の計算を行い、前出の12/10の現地観測における栄養塩の潮流輸送を解明した。

3.2 オイラー・ラグランジュ法による栄養塩の追跡

図-7は、計算開始から30日後の港内海域における粒子の分布を示す。前出の図-6において、港内に流入する潮流は港内で減速し、その一部は港外に流出するが、ほとんどの流れが港奥海域に向かっている。その流動に伴い、粒子は港奥海域に貯留していることがわかる。現地観測の結果と勘案すると、12/10における長期観測のTPの分布は、港口から流入する栄養塩によって港口と港奥海域のTP濃度が同等になったものと考えられる。図-4に示す領域Dの岸側には、流入河川が位置し、その河川上流側には農地や富栄養湖が存在している。以上の結果より、現地観測の結果を考慮すると、降雨により農地及び富栄養湖から河川に流入した栄養塩は、函館湾内に供給される。その後、供給された栄養塩は、潮流により港口から港内海域に輸送され、港内の流速減少に伴い貯留されるものと考えられる。

3.3 A-MHA を函館湾に適用した際の水質改善効果

ここでは、A-MHAを実際に港奥海域沿岸に設置し、流動は後述するA-MHAが取水可能な流量を与えたマルチレベルモデルにより計算する。その後、オイラー・ラグランジュモデルにより港内に配置した粒子によって海水交換効率を算出した。図-8は、A-MHAの想定配置図を示す。計算対象領域は、前出のオイラー・ラグランジュモデルによる河川流入の計算と同様とした。図中の表は各ケースの計算条件を示し、case.0はA-MHA適用前の現況を示す。case.1～7はA-MHA適用後を示し、流入位置は図中の●印とした。A-MHAから流入させる流量は、現状においてA-MHAが取水できる最大流量を単位面積当たりに変換したものをを用いる。以上の設定のもと、図中のEに示す港内領域の1メッシュ当たり1粒子を配置し、1週間計14回潮の計算を行い、現況とA-MHA適用後の港内の海水交換効率を比較した。図-9は、case.0とA-MHA適用後の各ケースのうち港奥海域の海水交換が最も顕著であったcase.3の粒子分布を示す。図中(a)は、現況を示す。これより、港内海域に配置した粒子は、

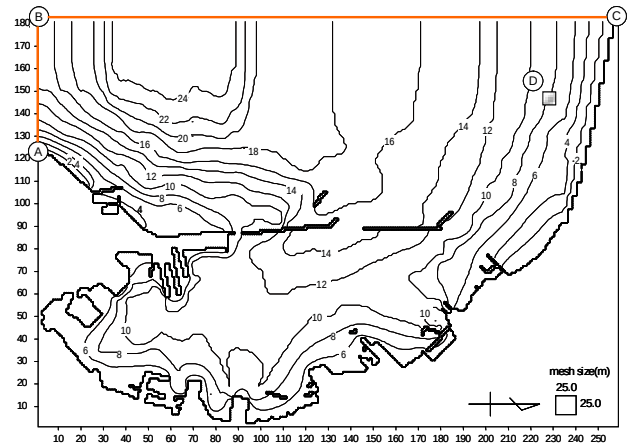


図-4 計算対象範囲

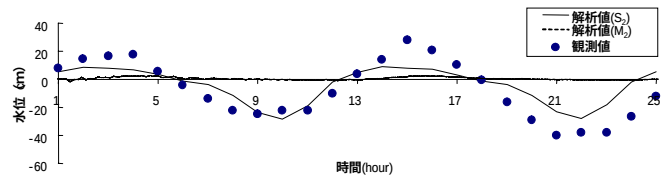


図-5 計算精度の検討

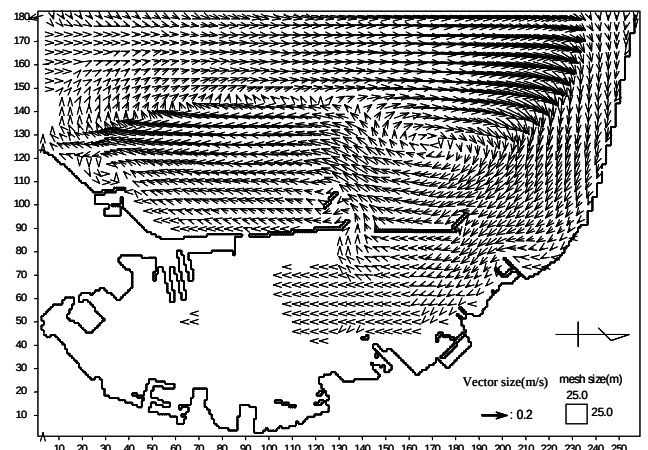


図-6 残差流ベクトル

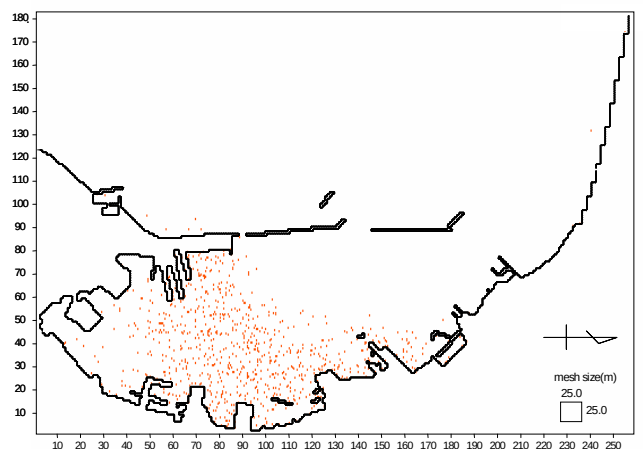


図-7 30日後(60回潮)の粒子分布

潮流により港内港奥海域へ押し込まれ港奥海域では粒子密度が高くなっている。一方、港内の粒子の一部は、西防波堤南側港口から港外に流出し、図-8に示す領域Fに分布する傾向がわかる。図中(b)はA-MHA適用後の粒子分布を示す。これより、case.0と比較して、港奥海域の粒子密度が低くなっていることがわかる。これは、A-MHAによって港奥海域に潮流とは相反する流動が加わったことによって、潮流の影響が小さくなったことに起因すると考えられる。一方、港中央海域に着目すると、粒子密度が現況に比して高く分布することが確認できる。この要因として、A-MHAによる流動が港内海域に加わったことで、港外からの流入を港中央でせき止めたものと考えられる。図-10は計算開始から14回潮後の各ケースにおける図-8の領域Fに流出した粒子の総数を港内に配置した粒子の総数で割った海水交換効率を示す。図中の直線は現況における海水交換効率を示す。これより、case.0を除くすべてのケースにおいて、現況と比較して海水交換効率は向上したと考えられる。海水交換効率で考えると、case.5が最良であるが、港外に流出する粒子も最も多くなることから、港外の水環境に与える影響は大きいと推察される。したがって港外の水質環境負荷及び港内の海水交換効率を勘案すれば、case.3が最良であるものと考えられる。

4. おわりに

本研究で得られた知見を以下に要約する。

- (1) 港内港奥海域の水質は、12時間周潮の下げ潮最強時の流速により底質が巻き上げられた結果、海水中のCOD濃度が増加することで一時的に劣化する。
- (2) 港内の栄養塩は、流入河川から港内海域に流入し、港内海域の流速減少に伴い港奥海域に貯留する。
- (3) 将来計算の結果、港外の水質に与える環境負荷の影響を考慮すると、西ふ頭港奥海域が最もA-MHAの配置に適している。

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) 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.
- 3) JAN J.LEENDERTSE,RICHARD C.ALEXANDER,SHIAO-KUNG LIU:A THREE-DIMENSIONAL MODEL FOR ESTUARIES AND COASTAL SEAS,VOLUME 1,PRINCIPLES OF COMPUTATION,OFFICE OF WATER RESOURCES RESEARCH,1973.

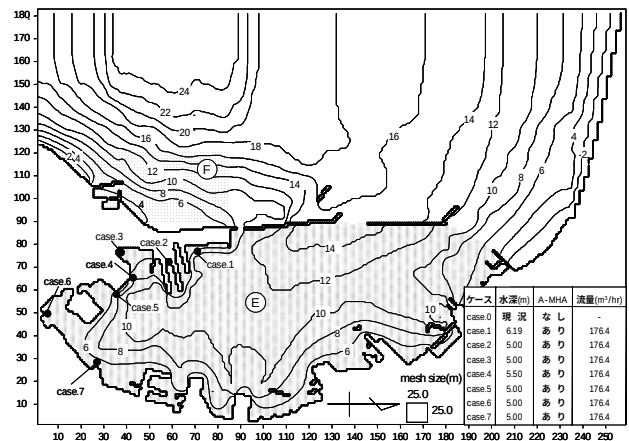
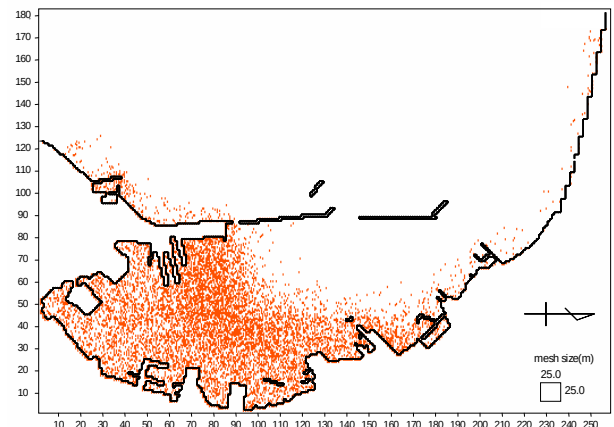
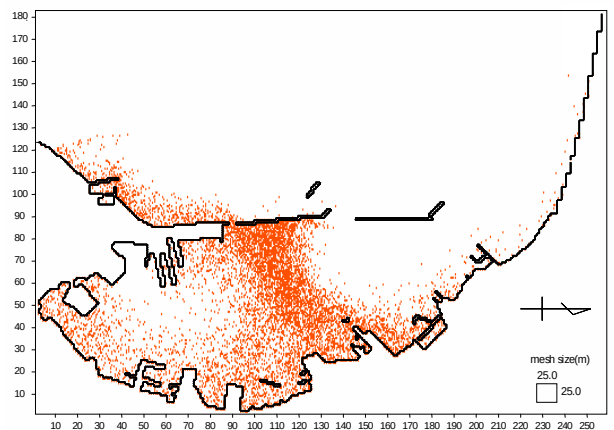


図-8 将来予測計算における計算対象領域



(a) 1週間後のcase.0の粒子分布



(b) 1週間後のcase.3の粒子分布

図-9 現況再現と将来計算の比較

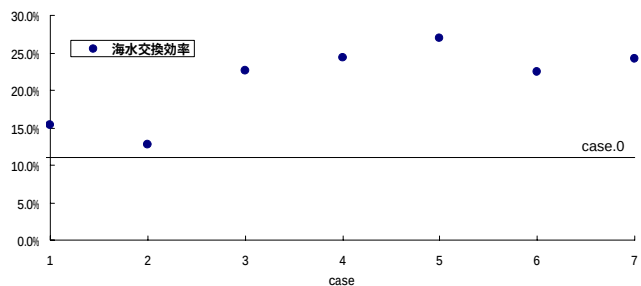


図-10 海水交換効率の比較