

# 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

APPLICATION OF AUTONOMOUS METAL HYDRIDE ACTUATOR FOR SEAWATER EXCHANGE IN HAKODATE PORT

宮武 誠<sup>1</sup>・湊 賢一<sup>2</sup>・本村真治<sup>3</sup>・松村一弘<sup>4</sup>・増田 亨<sup>5</sup>・吉江祐人<sup>6</sup>  
Makoto MIYATAKE, Ken-ichi MINATO, Shinji HONMURA, Kazuhiro MATSUMURA,  
Tohru MASUDA and Yuto YOSHIE

- <sup>1</sup>正員 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)  
<sup>2</sup>非会員 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)  
<sup>3</sup>非会員 函館工業高等専門学校 機械工学科(〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)  
<sup>4</sup>非会員 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)  
<sup>5</sup>非会員 国土交通省北海道開発局 函館開発建設部(〒040-8501 函館市大川町1番27号)  
<sup>6</sup>非会員 函館工業高等専門学校 専攻科(〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)

The autonomous metal hydride actuator (A-MHA), as adapted for water pumping equipment, is developed to seawater exchange in Hakodate port. The performance of LaNi metal hydride and double-acting piston pump are investigated through experiment and numerical simulation. Setting hydrogen pressure to about 2.0MPa, desorption-absorption process works most effectively and estimate of maximum pumping discharge due to A-MHA is about 200m<sup>3</sup>/hr. The efficiency of seawater exchange with A-MHA is analyzed by using the Lagrangian particle model. The present result indicates that the most appropriate location of A-MHA is nearly at the west apron of Hakodate port.

**Key Words:** Metal hydride actuator, thermal energy, double-acting piston pump, seawater exchange

## 1. はじめに

函館市では現在「国際水産・海洋都市未来構想」に際し、函館港の港奥海域を大型畜養施設として利用する構想が計画されている<sup>1)</sup>。しかし、港内の水質は長年に渡る造船業や水産業等により著しく劣化しており、利用するにあたっては水質浄化を図る必要がある。これに対し函館港内には2箇所<sup>2)</sup>の温泉源があり、温水と冷水を取得しやすい環境にあることから、本研究ではその温度差を利用した自律駆動型水素吸蔵合金アクチュエータ(Autonomous Metal Hydride Actuator:以後、A-MHAと略す。)を海水交換装置の動力として適用させることを計画している。ここで、A-MHAとは温度差によって水素を吸蔵・放出する水素吸蔵合金の特性を利用したアクチュエータであり、このA-MHAによる海水交換装置の検討は過去に数多く行われている。たとえば、先川ら<sup>2)</sup>は

A-MHAによって得られる動力を昇降するプランジャーに連結させることで海水を汲み上げるしくみを提案し、その実用化の可能性について検討している。また、長谷ら<sup>3)</sup>は、既設の海水交換型防波堤にも適用できるようにスパイラル型スクリューを採用したA-MHAによる海水交換システムを考案し、装置の動力性能の面で有用な知見を得ている。しかし、上記の研究はA-MHAを用いた海水送水方式を主眼として検討されたものであり、A-MHAの動力性能に関わる合金の水素吸放出性能について検討した研究は数少ない。また、本研究ではA-MHAを函館港に適用させるにあたり、送水方式はより高い動力伝達率を実現させるため、A-MHAから得られるピストン往復運動を直接、間欠型ピストンポンプに連結させる方法を採用する。しかし、そのポンプによる海水送水能力と合金の水素吸放出量の関係について検討した研究は見当たらない。

本研究は、合金の水素吸放出性能をA-MHA 模型装置による室内実験及び合金の熱伝導に関する数値解析により解明する。また、上記の解析を現地スケールで実施して求めた水素吸放出量及びA-MHA 模型装置に連結された間欠型ピストンポンプ模型による送水量との関係から、実海域でのA-MHA による送水可能な海水量を推定する。更に推定した海水送水量を反映させた準3次元多層流動モデルによる粒子追跡解析によって、両館港内の海水交換率に優れたA-MHA による外海水の最適導入位置を明らかにする。

## 2. A-MHA の原理

水素吸蔵合金は、安定した水素化物を形成しやすい発熱型金属A (Ti, Zr, La, Mm, Ca 等) 及び水素と親和力を持たない吸熱型金属B (Ni, Fe, Co, Mn 等) から構成される合金であり、 $AB_3$ ,  $AB_2$ ,  $AB$ ,  $A_2B$  系の組成がよく知られている<sup>4)</sup>。本研究は、実海域で想定される100℃未満の温度差域で一般的に用いられる $LaNi_5$ 合金を用いる。図-1には水素吸蔵合金の反応式を示す。この一連の反応を利用すると、様々なエネルギーを回収することが可能であり、特に金属水素化物は、燃料電池としての利用が最近注目されている<sup>5)</sup>。A-MHA は両館港内に点在する温泉源(温水)と海水(冷水)を図中右辺第2項の熱エネルギーとして外部から交差的に与えることで、合金から吸放出する水素の圧力を機械エネルギーに変換する仕組みになっている。

図-2は本研究で考案するA-MHA による海水交換装置の概念図を示す。合金を入れた2つの容器を温水槽と冷水槽で交互に交換することにより、合金に封入していた水素が加熱によって放出し、冷却により吸蔵される。この合金の水素吸放出によって、合金容器内は高温側で圧力が上昇し、低温側では圧力低下となり、この圧力差がピストンシリンダーに伝達され、ピストンは往復運動を繰り返す。ピストンは間欠型ピストンポンプに直接連結することで、外海水を送水する機構になっている。また、恒温槽における合金容器の交換は、この動力の一部を使用して駆動するため、自律的に連続稼働が可能である。

## 3. 合金の水素吸放出性能に関する検討

### (1) A-MHA 模型装置を用いた室内実験

A-MHA の動力源となる合金の水素吸放出性能は、初期に封入する平衡水素圧及び交差的に与える温度差によって支配される。ここでは写真-1(a)に示すA-MHA 模型装置を用いて、水素吸蔵合金の吸放出量を評価する。このA-MHA 模型装置は写真-1(b)に示す合金容器、恒温槽、ピストン駆動部から構成されている。合金容器は熱伝導に優れた銅製を採用し、2本1組としてピストン駆動部に接続される。恒温

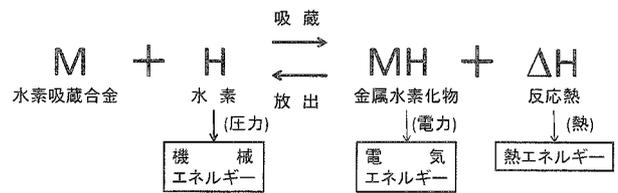


図-1 水素吸蔵合金の反応式

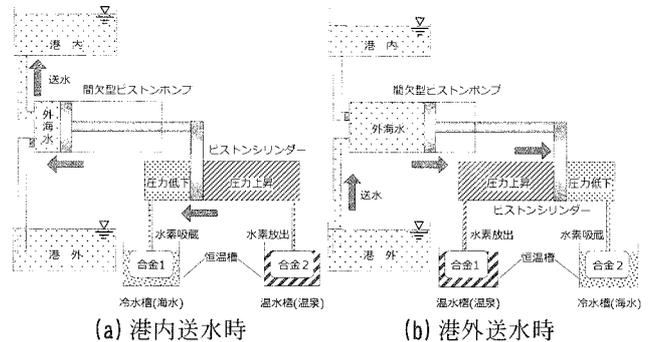


図-2 A-MHA を用いた海水交換装置の概念図

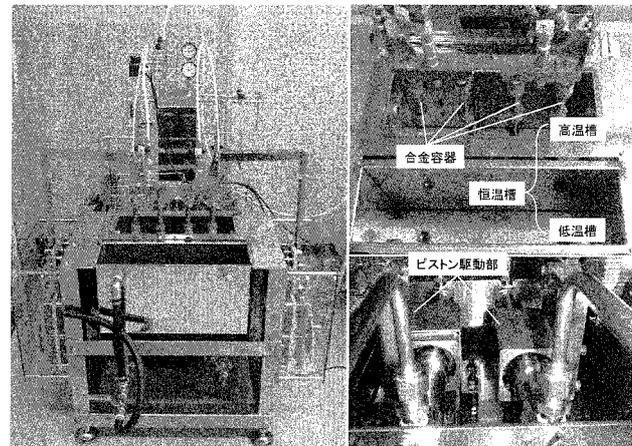


写真-1 A-MHA 模型装置

槽の水温は高温側の80℃と低温側の15℃を実験期間中、一定に保てるようになっている。ピストン駆動部のシリンダー総容積は39.94mlである。

実験は、はじめに合金表面の酸化皮膜や水素以外のガス体吸着を除去し、水素を吸蔵しやすい表面に整える活性化処理を行った後、合金を容器内に封入する。用いる合金は $LaNi_5$ 合金とし、40gの合金を4本の容器に均等配分する。次に真空引きにより脱水素作業を行った後、容器内の合金に水素を加圧する。この初期に加圧する平衡水素圧は実験期間中、常に一定値を維持して実験を行う。与える初期平衡水素圧は、本実験に用いる模型装置において加圧可能な0.3MPa, 0.5MPa, 0.6MPa, 0.7MPaの4ケースとする。合金の水素吸放出量は、2組の合金容器の温度を20℃で一定に保った後、一方の容器を高温槽、他方を低温槽に入れ、水素吸放出が完全に終了する3分間の総和量として測定する。

## (2) 合金の水素吸放出量に関する数値解析

前述の室内実験では検討できない平衡水素圧の高い領域での吸放出性能を数値解析によって検証する。容器内の合金は等方性均質多孔体とし、恒温槽の熱が容器周囲から合金へ均一に伝達されるものと仮定すれば、合金内の温度は以下に示す鉛直2次元熱伝導方程式に支配される。

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

ここに、 $r$ 及び $z$ は図-3において、それぞれ合金容器半径方向及び鉛直上向きにとった座標軸、 $T$ は合金温度(K)、 $\lambda$ は合金の熱伝導率(W/mK)、 $c$ は合金の比熱(J/gK)、 $\rho$ は合金密度(g/cm<sup>3</sup>)を示す。図中のABCDで示す計算領域において、境界AB,BC,CDには恒温槽における水温を与え、境界ADは境界と法線方向の熱量フラックスを零として、各時間における合金内部の温度分布を差分法により計算する。

合金の水素吸放出量の算定は、図-4に示す予め測定された各温度に対するLaNi<sub>5</sub>合金のPCT (Pressure Composition Temperature: 圧力-組成等温) 曲線を用いる。この曲線は水素と合金の原子比を表す水素濃度 $C$ と平衡水素圧 $P$ との関係を表し、図中には吸蔵・放出過程をそれぞれ表示する。本研究はこの測定値を数値計算に使用できるように、以下に示す曲線式において、

$$C = C_r + (C_s - C_r) \left\{ \frac{1}{1 + (\alpha|P|)^n} \right\}^{(1+1/n)} \quad (2)$$

残留水素濃度 $C_r$ 、飽和水素濃度 $C_s$ 、定数 $\alpha, n$ をPowellの共役勾配法<sup>6)</sup>により同定する。同定した各パラメータを温度の関数式で表した結果、得られた計算値を図中の実線で表示する。合金の水素吸放出量は、前述の室内実験で与えた初期平衡水圧及び(1)式より得られた合金内部の温度分布を用いて、(2)式から水素濃度を計算し、合金温度の経時変化に伴う水素濃度差 $\Delta C$ により下式を用いて算出する。

$$q = 11.2 \cdot \Delta C \cdot \frac{N(\text{LaNi}_5)}{M(\text{LaNi}_5)} \quad (3)$$

ここに、 $q$ は合金1gあたりの水素吸放出量( $\ell/g$ )、 $M(\text{LaNi}_5)$ は合金の原子量、 $N(\text{LaNi}_5)$ は合金の原子数である。時間経過に伴う合金全体からの水素吸放出量 $Q(\ell)$ は次式を用いて算出し、水素吸放出の終了する時間までの総和量を求める。

$$Q = 2\pi\rho \int_0^a \int_0^h q \cdot r \cdot dr \cdot dz \quad (4)$$

## (3) LaNi<sub>5</sub>合金の水素吸放出性能

図-5は初期平衡水素圧と水素吸放出量の関係を示す。同図中のAは室内実験による測定値と数値解

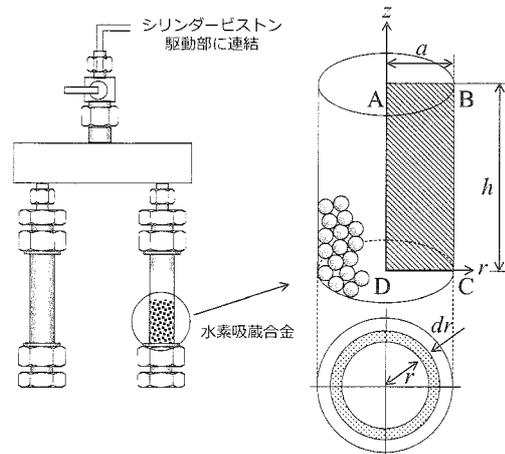


図-3 合金の熱伝導計算領域

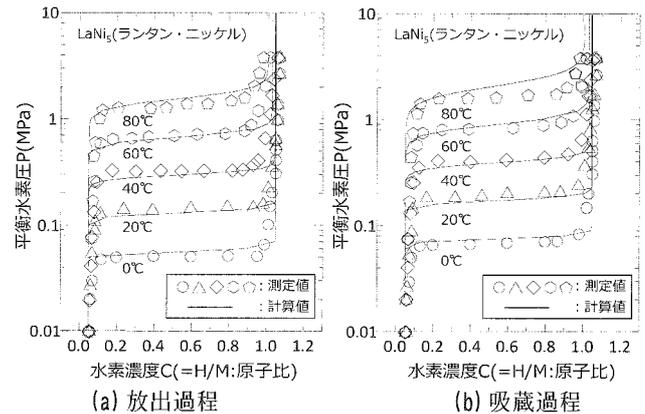


図-4 LaNi<sub>5</sub>合金のPCT曲線の定式化

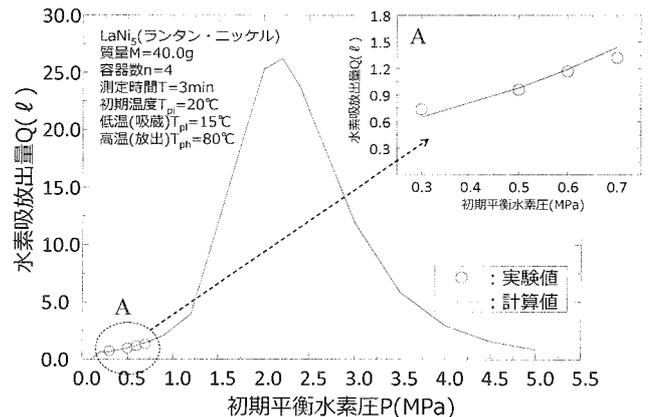


図-5 初期平衡水素圧と水素吸放出量の関係

析結果の比較を示す。両者ともに水素吸放出量は、初期平衡水素圧の増加に伴い線形的に増加し、計算値は測定値を妥当な精度で予測する。この解析を初期平衡水素圧の高い領域に適用させた結果、水素吸放出量は平衡水素圧が1.2MPa付近から急激に増加する。これは前出の図-4のPCT曲線において、平衡水素圧がほぼ一定にも関わらず、水素濃度が大きく変化するプラトー領域に合金の吸放出過程が入ったことにより、合金温度の経時変化に伴う水素濃度差が急激に増加したことに起因する。この水素吸放出

量は2.3MPa程度の平衡水圧を与えた時点で最大となり、この値以上の平衡水素圧を与えても、吸放性能は逆に低下する。以上の結果、100℃未満の低温度差条件下において、LaNi<sub>5</sub>合金の吸放性能を最大限に発揮させるためには、2.0MPa程度の初期平衡水素圧を与える必要があると考えられる。

#### 4. 実海域でのA-MHAによる送水量の推定

##### (1) A-MHA実機の水素吸放出量に関する数値解析

写真-2は実際に函館港に設置予定のA-MHA実機の外観を示す。ここでは前章の水素吸放出量に関する数値解析を現地スケールで実施し、A-MHA実機に対する水素吸放出量を予測する。このA-MHA実機には円盤状に6ブロックの合金容器が搭載されており、その中には計1.5kgのLaNi<sub>5</sub>合金を封入する。この円盤形合金容器は回転し、高温槽と低温槽を交互に潜り抜けることで水素吸放出を繰り返す、その上部にあるシリンダーピストンを往復運動させる。

前章の結果より初期平衡水素圧として2.0MPaを与えたA-MHA実機内の合金を、函館港内の温泉水温70℃<sup>①</sup>(高温槽)及び海水温18℃<sup>②</sup>(低温槽)に480秒サイクルで浸すものとすれば、A-MHA実機の合金容器1ブロックから吸放出される水素流量は、標準状態(0℃, 101.3KPa換算)で0.0036Nℓ/sとなる。

##### (2) 間欠型ピストンポンプによる海水送水量

前述したA-MHA実機の水素吸放出流量ならびにA-MHA模型装置に連結された間欠型ピストンポンプ模型の送水能力との関係から、A-MHA実機が送水可能な海水量を推定する。本研究に用いる間欠型ピストンポンプ模型は、摩擦抵抗の低減を図るため、シリンダー径50mmに対し、0.2mmの隙間をピストンとシリンダーの間に設けている。図-6(a)は室内実験で得たピストン移動速度と送水流量及び体積効率の関係を示す。隙間がない場合に対する隙間がある場合の送水流量比を示す体積効率は、隙間からの漏れ流量があるにも関わらず、ピストン移動速度の遅い段階から高い値で推移する。図中の実線及び点線で示す理論解析に基づく計算値と実験値を比較すると、両者はともに一致する。シリンダー径を更に大きくし、理論解析を再度行った結果を図-6(b)に示す。これよりシリンダー径を大きくすると体積効率は低下するが、送水流量は増加する。本研究ではピストン移動速度が50mm/sの段階で体積効率が80%程度確保でき、最も高い送水流量を示すシリンダー径300mmのピストンポンプを用いて、A-MHA実機における送水可能な海水量を推定する。

図-7は水素吸放出量によるA-MHAの出力から、シリンダー径300mmのピストンポンプによって送水可能な海水量を試算した結果を示す。同図は揚程及び配管系で生じる全ての水頭損失、動力伝達系の機械

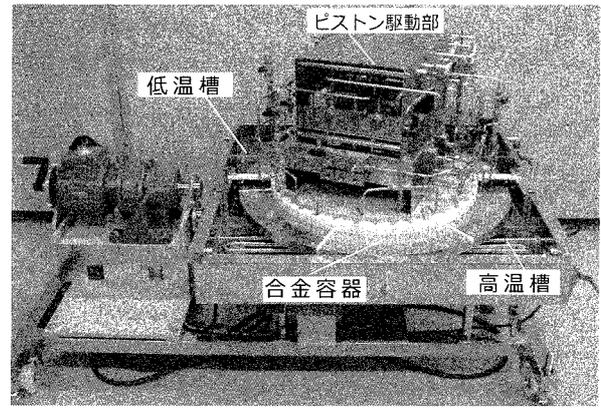


写真-2 函館港に設置するA-MHA実機の外観

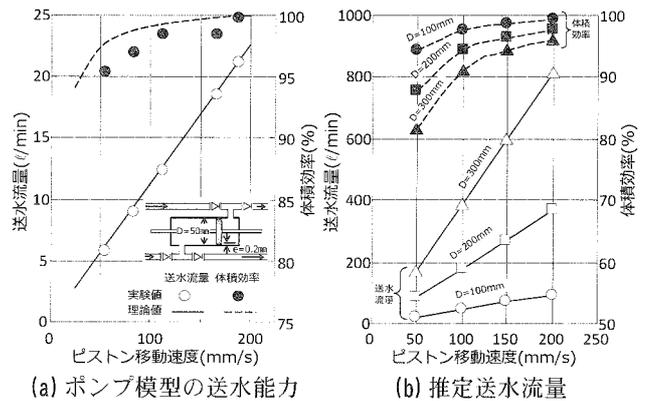


図-6 間欠型ピストンポンプの移動速度と送水流量の関係

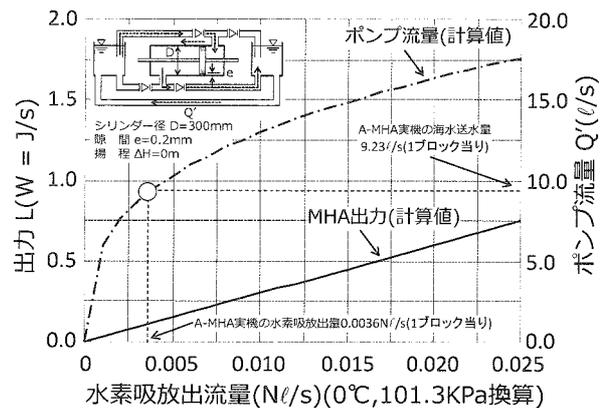


図-7 間欠型ピストンポンプによる海水送水量の推定値

損失等を考慮していない。前節で推定したA-MHA実機の水素吸放出流量を全て送水による海水の運動エネルギーに変換した場合、送水可能な海水量は図中から、合金容器1ブロックあたり9.23ℓ/sとなる。6ブロックを有するA-MHA実機システム全体では最大199m<sup>3</sup>/hr程度の送水が可能となる。

#### 5. A-MHAによる外海水導入位置の検討

##### (1) 準3次元多層流動モデルによる粒子追跡解析

前章で得られたA-MHAによる送水可能な海水量を用いて、函館港内の海水交換率に優れた外海水の最

適導入位置を数値解析により検討する。図-8 は計算対象領域を示す。図中の case5 の位置で過去に実施した現地観測結果<sup>8)</sup> から、港内の流動では 1 日 2 回潮成分の潮流が支配的であることが明らかにされている。本研究は、この港内の潮流流動を準 3 次元多層流動モデルであるマルチレベルモデル<sup>9)</sup> により計算する。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 25 m 間隔で分割し、鉛直方向には上層から順に静水面下 -2m, -4m, -6m, -9m, -30m の 5 層で重層化させる。図中の AB 及び BC の境界には、既往の調査報告書<sup>10)</sup> から主要 4 分潮の潮流流速のうち 1 日 2 回潮の  $S_2$  成分及び  $M_2$  成分を与える。また、港内の海水交換率を定量的に評価するため、マルチレベルモデルによって得た多層流速を用いて、図中の領域 D の全層にトレーサ粒子を計 11567 個配置し、オイラー・ラグランジュ法<sup>11)</sup> による粒子追跡解析を行う。計算は A-MHA による海水導入前の現況を case1 とし、図中の case2 から case8 に示す港奥海域の所定位置に前章で求めた A-MHA による海水送水量を導入した計 8 ケースについて行う。なお、計算時間は 7 日間とする。

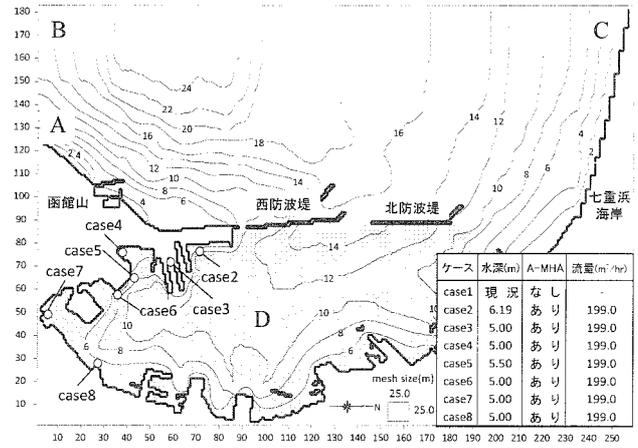


図-8 函館港の計算対象領域

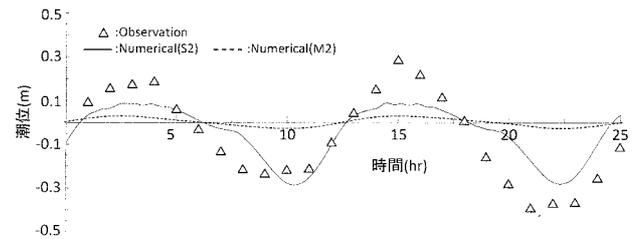


図-9 潮位の観測値と計算値の比較

### (2) 函館港における現況の海水交換

図-9 は前出の図-8 中 case5 の位置で過去に観測した実測潮位と同位置で得られた  $S_2$  成分及び  $M_2$  成分の計算潮位を比較したものである。 $S_2$  成分の計算潮位は、 $M_2$  成分に比して観測潮位をより妥当な精度で予測する。よって、過去に実施した観測期間における函館港奥海域の流動は、1 日 2 回潮の  $S_2$  成分に支配的であると考えられる。図-10 は  $S_2$  成分における第 1 層目の潮汐残差流ベクトル分布を示す。函館山側から北方向に流れる  $S_2$  成分の潮汐残差流は七重浜海岸からその流向を南東方向に転じ、第 3 航路港口から港内に流入する。流入した潮汐残差流の一部は第 1 航路港口から港外に流出し、北防波堤前面海域では大規模な循環流が形成される。一方、港内に流入した潮汐残差流は港中央海域付近ではほぼ消失し、港奥海域では海水交換が十分に及ばない停滞水域となっている。図-11 は、マルチレベルモデルで得た  $S_2$  成分の潮流流動によりトレーサ粒子を 7 日間移動させた結果を示す。図中には全層のトレーサ粒子を表示する。港中央海域に配置したトレーサ粒子は一部港外に流出するが、そのほとんどが港奥へ移動し、港奥海域の粒子密度がより密になっていることがわかる。この結果、現況の潮流流動による海水交換のみでは、港内に配置したトレーサ粒子が停滞水域となる港奥側に蓄積され、港奥海域の水質劣化はより進行するものと推察される。

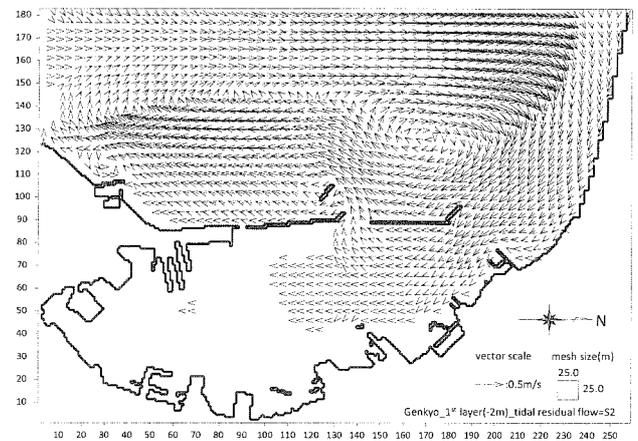


図-10  $S_2$  成分の潮汐残差流ベクトル分布 (第 1 層目)

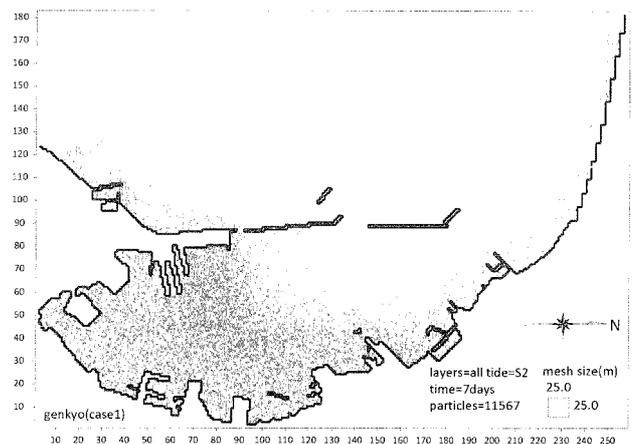


図-11  $S_2$  成分による 7 日後のトレーサ粒子分布 (case1)

### (3) A-MHA による海水交換促進効果

図-12 は  $S_2$  成分の潮流に加え、case4 の位置に A-MHA を配置し、海水導入を 7 日間行った場合のト

レーサ粒子分布を示す。図-11に示した現況の場合に比較して、A-MHAによる外海水導入により粒子密度は港中央海域で密になるものの、港奥側では低下し、港奥海域の水質改善効果が認められる。一方、港外に流出するトレーサ粒子は現況の場合に比して増加していることから、A-MHA適用後の港湾周辺海域に与える水質環境負荷の影響は少なからずあるものの、港外海域に拡散する領域は現況とほぼ同程度になるものと推定される。A-MHAによる海水交換促進効果を定量的に把握するため、港内に配置したトレーサ粒子の総数に対する港内に残留したトレーサ粒子の総数の割合を示す港内粒子残留率によって海水交換率を比較する。図-13は全ケースの港内粒子残留率を示す。現況(図中の実線)の潮流流動のみではトレーサ粒子の港内残留率は83%程度となるのに対し、A-MHAを適用した場合、全てのケースで港内粒子残留率が低下し、海水交換率の向上が認められる。この港内粒子残留率を勘案すると、A-MHAによる海水導入位置はcase6の函館港西埠頭前面海域付近が最適であるものと推察される。

## 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) 100℃未満の低温度差条件下において、LaNi<sub>5</sub>合金の吸放出性能を最大限に発揮させるためには、2.0MPa程度の初期平衡水素圧を与える必要がある。
- (2) A-MHA実機にピストンとシリンダー間に隙間を設けた間欠型ピストンポンプを直接連結させた場合、A-MHA実機による実海域での海水送水量は最大で199m<sup>3</sup>/hr程度となる。
- (3) トレーサ粒子による港内粒子残留率によって、A-MHA実機による海水導入位置を検討した結果、港内の海水交換率に優れた函館港西埠頭前面海域に設置するのが最適である。

今後はA-MHA実機を函館港に設置し、現地実証実験により海水送水能力を検証するとともに、港奥海域の海水交換促進効果や水質改善効果を明らかにする所存である。

**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) 先川光弘，森昌也，梅沢信敏，松村一弘，岡田昌樹，遠藤強，吉田静男：温度差エネルギーと水素吸蔵合金を利用した海水交換装置の開発，海岸工学論文集，第49巻，pp. 1406-

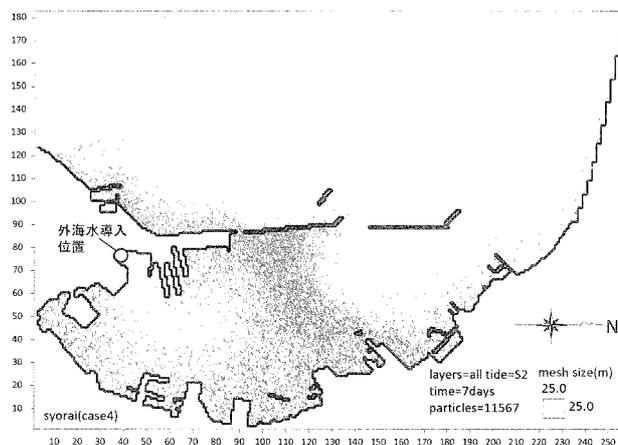


図-12 A-MHA適用後のトレーサ粒子分布(case4)

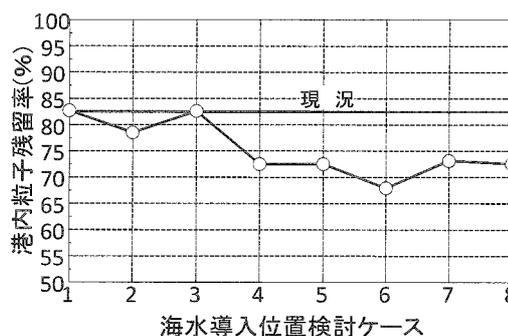


図-13 港内粒子残留率の比較

1410, 2002.

- 3) 長谷一矢，渥美洋一，井元忠博，先川光弘，松村一弘，吉田静男：温度差エネルギーを利用した水素吸蔵合金アクチュエータ活用型海水交換装置の開発，海洋開発論文集，第20巻，pp. 359-364, 2004.
- 4) 田中英雄：水素吸蔵合金-基礎から最先端技術まで-，株式会社エヌ・ティー・エス，pp. 54-63, 1998
- 5) 大角泰章：水素吸蔵合金-その物性と応用-，株式会社アグネ技術センター，pp. 397-404, 2008.
- 6) R.Fletcher,M.J.T.Powell:A rapidly convergent descent method for minimization,The Computer Journal,vol.6,pp.163-168,1963.
- 7) 柴田智郎，高橋徹哉，岡崎紀俊，大津直，鈴木隆広，秋田藤夫：函館平野の熱水流動系，北海道立地質研究所報告，第80号，pp. 27-37, 2009
- 8) 宮武誠，佐藤侑亮，増田亨，湊賢一，松村一弘：函館港内における流動と水質の日変動特性，土木学会北海道支部論文報告集，第65号，B-21, 2009.
- 9) 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,R-1417-OWPR,1973.
- 10) 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.
- 11) 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.