

開閉装置用水素吸蔵合金アクチュエータの開発

松村 一弘、吉田 晋*、小林 弘幸*、林 宏樹**、鈴木 慎一***、
須田 孝徳****、濱田 靖弘*****

Development of Metal Hydride Actuator for Autonomous Opening-Closing Device

Kazuhiro Matsumura, Susumu Yoshida*, Hiroyuki Kobayashi*,
Hiroki Hayashi**, Shinichi Suzuki***, Takanori Suda****,
Yasuhiro Hamada*****

要 旨

水素吸蔵合金は温度によって、水素を放出したり吸蔵したりすることが可能な金属である。この特徴を利用すれば、周囲温度に応じて得られる水素圧力を力に変換し機構の駆動源とすることで、無電源で温度変化のみで動作する機構となる。この応用として、換気口の開閉を自律駆動させるための水素吸蔵合金アクチュエータを試作し恒温槽実験を行った。動作の予測値と実験計測値は良く一致し、周囲温度で動作することを、負荷状態で実証した。

1. はじめに

水素吸蔵合金アクチュエータ (Metal Hydride Actuator, 以下:MH アクチュエータ) は流体アクチュエータに分類され、作動媒体となる水素ガスの増減に、冷却や加熱によって水素を可逆的に吸蔵・放出する水素吸蔵合金 (Metal Hydride, 以下:合金)を用いている。すなわち、熱エネルギーを物理的運動に変換する熱駆動型で、温度変化で駆動することから温度センサも兼ねており、これが電源に依存する電動モータや空気圧シリンダ等の既存アクチュエータとの決定的な差と言える^{1) 2)}。この特徴を生かすことで、周囲のわずかな温度変化が駆動力となるので、電源供給を受けられないあるいは受けたくない場所に応用できる。そのような応用として、空間温度が高いとき外気導入を必要とするハウス栽培や建屋の換気、寒冷大気を取り込む製氷や食料貯蔵での利用が考えられる^{3) 4)}。

従来の閉じられた空間の空気の入れ換えには、ファンを回す機械換気と窓などを開ける自然換気がある。自然換気に着目すると、手動開閉と動力開閉に分けられ、さらに、動力開閉は操作を必要としない自動開閉と、起動スイッチ等を操作する半自動開閉がある。手動と半自動では開閉の都度に作業者が足を運ぶ必要があり、人手不足の要因ともなる。また、既存のアクチュエータを使う動力開閉では、電源が必須で配線工事や開閉装置の設置場所によっては送電線工事も必要となる。そして、必ず電気料金が発生する。それに対して、MHアクチュエータは周囲の温度変化がエネルギーなので、エネルギーコスト零でパッシブ動作する。本開発では、空間の自然換気用の駆動力としてMHアクチュエータの可能性を検証するために、試作と恒温槽実験を行った。

* 東光電機工業株式会社

** 株式会社三徳

*** 北海道立総合研究機構工業試験場

**** 苫小牧工業高等専門学校

***** 北海道大学大学院工学研究院

責任著者連絡先 (Matsumura Kazuhiro) matsumura@techakodate.or.jp

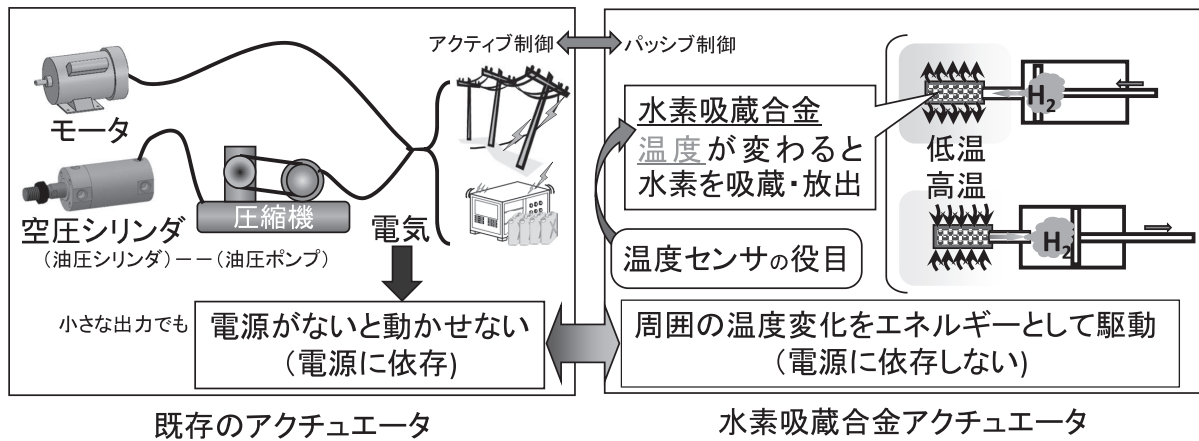


図1 既存アクチュエータと MH アクチュエータ対比

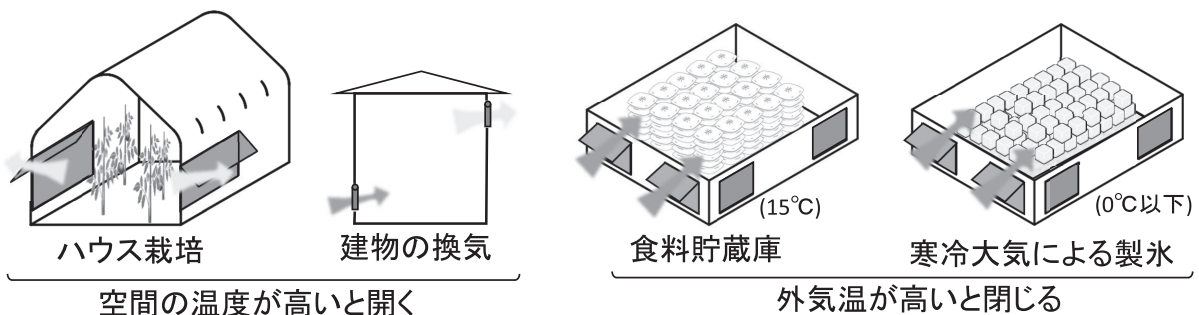
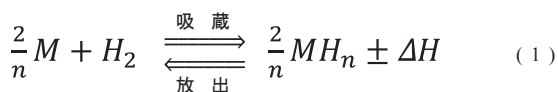


図2 MH アクチュエータによる開閉の応用例

2. 試作水素吸蔵合金の特性

合金が水素を吸蔵する過程を示したのが図3である。加圧された気体の水素は、合金の表面で吸着した後、原子状水素に瞬時に解離し、原子状水素が合金内に侵入する^{5) 6)}。侵入した水素原子は、その量が多くなると、それぞれ結晶格子内の安定した位置に落ち着き動きが鈍くなり、この状態になると合金内に蓄えられた内部エネルギーが外部に放出され熱を発生し、その後安定化して金属水素化物となる。この熱を奪うこと、つまり、合金を冷やせば水素を吸蔵させられ、逆に加熱すれば水素を放出する。また、図3に示す水素化反応を表したのが(1)式である。合金をM、水素化物をMH_n、反応熱をΔHで示す。



この合金は組成によって、図4に示すように温度に対する吸蔵や放出する圧力を変えることがで

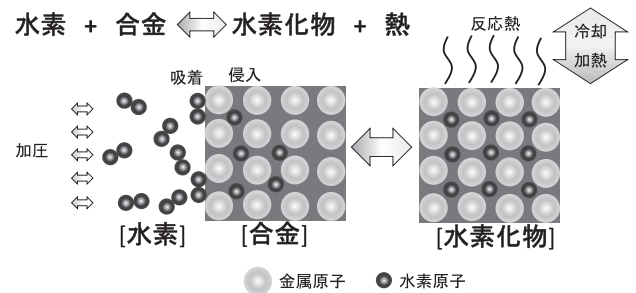


図3 合金の水素吸蔵・放出モデル

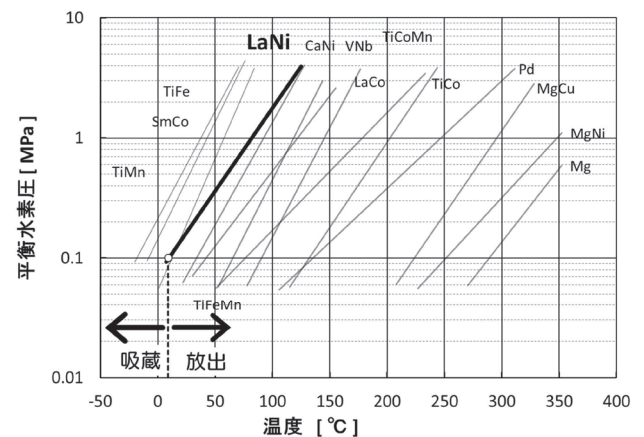


図4 組成の異なる合金の圧力 - 温度特性例

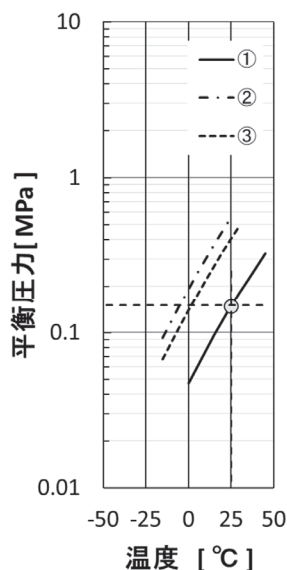


図5 試作合金の圧力 - 温度特性

きる⁷⁾。例えばLaNiでは、大気圧(図4では0.1MPa)で9℃以上になると水素を放出し、9℃以下で水素を吸蔵する。

試作MHアクチュエータ用として3種類の希土類-ニッケル系のAB5型合金をストリップキャスト法⁸⁾で試作した。試作合金の圧力-組成等温線(PCT線)の測定結果から求めた、温度に対する平衡圧力を図5に示す。

3. 水素吸蔵合金アクチュエータの試作

試作したMHアクチュエータのモデルを開閉機構の構想も合わせて図6に示す。この図の右側は空間温度が低い場合、左側は空間温度が高い場合である。開閉されるのは数枚の薄いブレードで、それぞれ連動している。ブレードの回転軸はブレードの重心と一致しており僅かな力で揺動(開閉動作)をする。このブレードには、柔軟で伸びないワイヤで錘 W_1 と錘 W_2 が接続され、錘 W_2 の重さはブレードを閉じる方向に作用し、 W_1 の重さはブレードを開く方向に作用させている。この重さの関係は $W_2 > W_1$ であり、空間温度が低い場合にブレードは図6の右に示す様に閉じた状態になる。空間温度が高くなりMHアクチュエータが W_2 を持ち上げると、持ち上げた高さに応じて W_1 は下がりブレードが揺動する。合金は容器に入っており、容器が周囲の空気によって冷えるとシリンダ内の水素が合金に吸蔵され(図6右)、圧力が

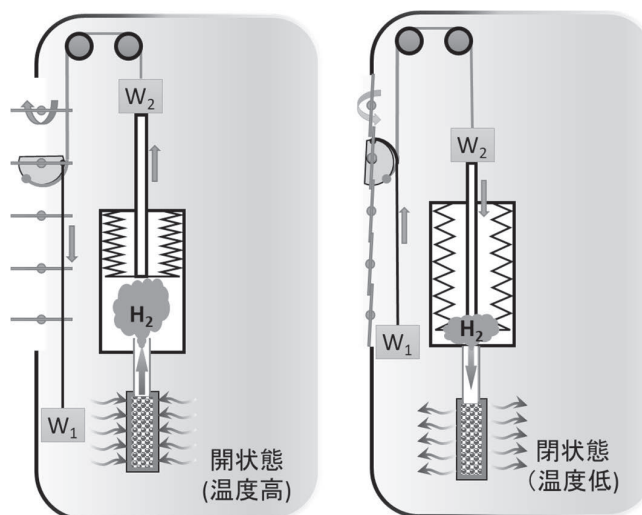


図6 試作 MH アクチュエータのモデル

低下しロッドが引き込まれる。逆に、周囲の空気によって容器が暖められるとシリンダ内に合金から水素が放出され(図6左)ロッドが押し出される。試作合金では図5から、例えば、ロッドが0.15MPaで押し出されるなら、そのときの温度は合金①が25℃、合金②が-5℃、合金③が3℃である。

MHアクチュエータの錘を持ち上げる力 F はブレードの揺動負荷を W_s とすれば、(2)式で示せる。

$$F \leq W_2 - W_1 + W_s \quad (2)$$

(2)式の右項が F より大きければブレードは閉じる動作をし、小さければ開く動作をする。そして、 F はシリンダ内圧力 P 、ピストン有効断面積 A 、シリンダの内部抵抗 F_r から、(3)式で示せる。

$$F = P \cdot A - F_r \quad (3)$$

上式の P (P_{H_2}) を生じさせる熱量(合金と水素の反応熱)は、MHアクチュエータがプラト域内で動作する条件で、温度と圧力の関係が van't Hoff (フォントホッフ) で近似されるとすれば、(4)式で示される⁹⁾。この式の R は気体定数、 T は温度(K)で、 ΔS はエントロピー変化、そして ΔH はエンタルピー変化で図3や(1)式に示す合金と水素の反応熱である。

$$\ln P_{H_2} = \frac{\Delta H}{RT} - \frac{\Delta S}{R} \quad (4)$$

図4や図5では横軸温度を℃としているが、横軸を $1/T$ とし縦軸に $\ln P_{H_2}$ をプロットすれば、その勾配から ΔH が、y切片から ΔS が求められる。

また、プラト域内で繰り返し水素の吸蔵・放出をさせることは、合金のサイクル特性¹⁰⁾に良好な条件で、仮に10回/日動作し水素移動量90%を寿命とするなら、7～10年利用可能と予測される¹¹⁾。ただし、水素移動量の減少量を見込んで合金量を増したり、合金組成を工夫して劣化を著しく減少させたりすれば、10年を超えた使用が可能となる。

試作したMHアクチュエータの主構成は金属ベローズシリンダ、合金容器、過度な温度上昇による圧力抑制用のレギュレータを含む配管で、図7に左が正面、右が背面の外観を示す。金属ベローズシリンダの有効断面積は $57.18 \times 10^3 \text{ mm}^2$ で、ロッド変位は100mmである。設計最大出力は使用する合金組成で異なるが合金温度変化が5～3℃で約450Nである。

4. 動作実験

動作実験には道総研工業試験場の恒温恒湿槽(エスベック製PL-4KP)を使用した。試作したMHアクチュエータを図8に示す様に、恒温槽内に実験負荷を加えられる架台とともに設置した。実験は所定の負荷を与えた後、実験対象合金の温度-圧力特性に合わせて恒温槽内の温度を0.5℃/分で変化させた。このときの合金温度変化や圧力、ロッド変位を各センサで計測した。表1に各合金の実験負荷と恒温槽設定温度を示す。ただし、合金②で負荷162.6Nは未実施である。

計測結果例を図9に示す。恒温槽の温度が変化すると、遅れは見られるが合金温度が追従して変

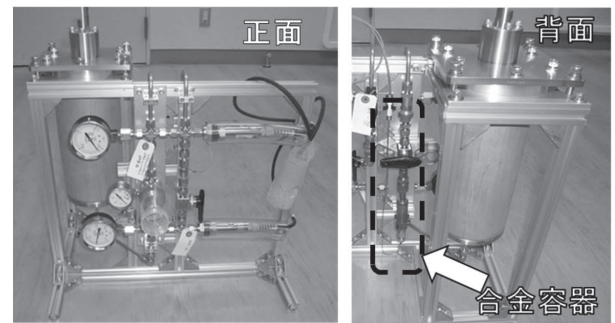


図7 試作 MH アクチュエータ

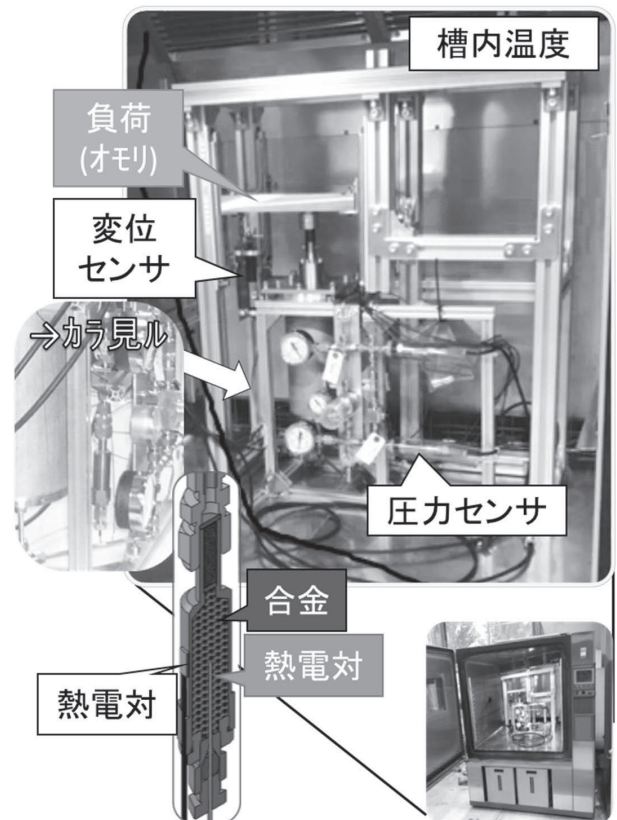


図8 恒温槽実験状況

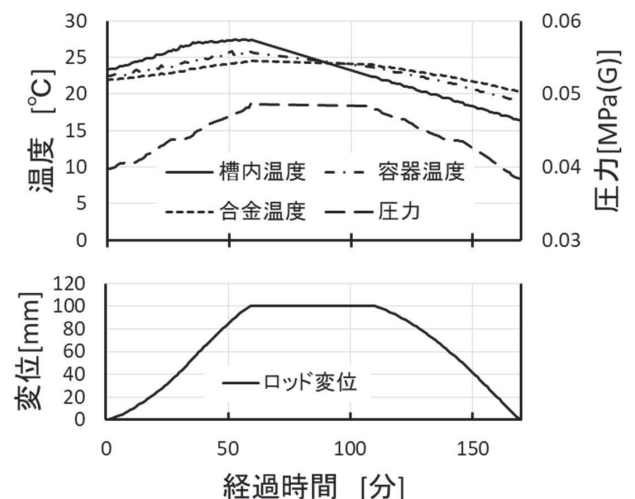


図9 合金①の計測結果 (負荷 162.6 N)

表1 各合金の実験負荷と恒温槽設定温度

	負荷162.6N	負荷278.7N
合金①	15～27℃	20～32℃
合金②	未実施	-7～2℃
合金③	-4～7℃	-1～10℃

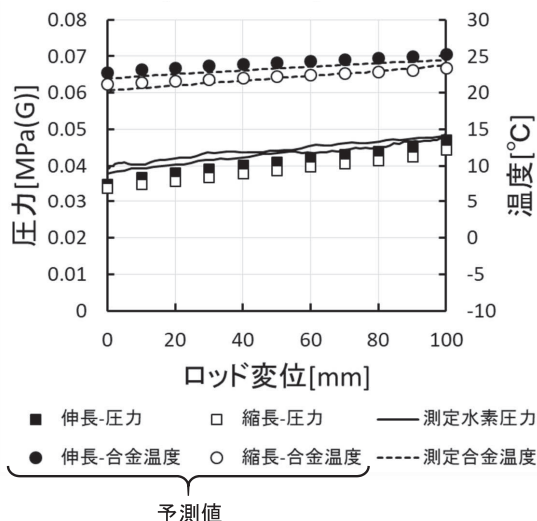


図10 合金①の結果 (負荷 162.6N)

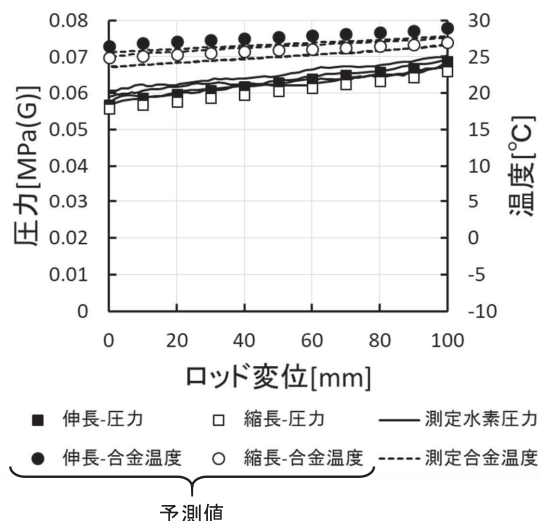


図11 合金①の結果 (負荷 278.7N)

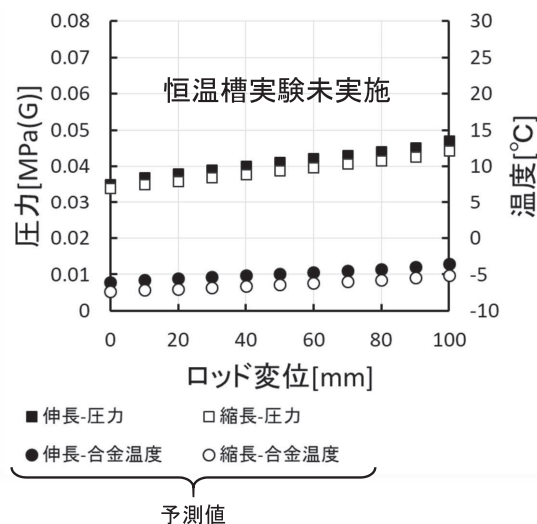


図12 合金②の結果 (負荷 162.6N)

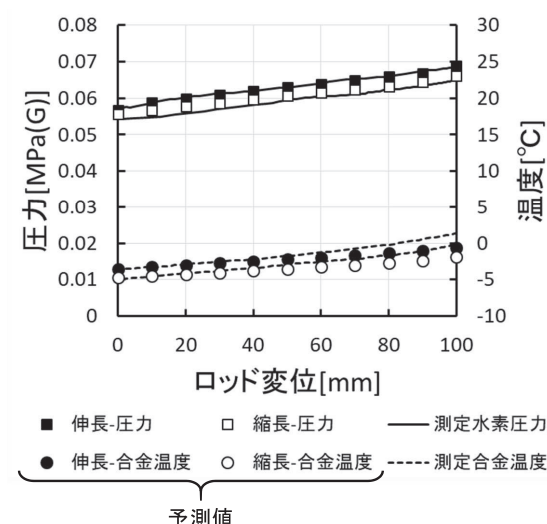


図13 合金②の結果 (負荷 278.7N)

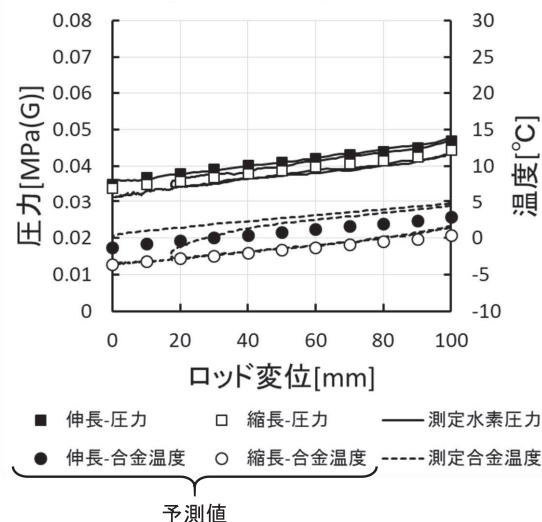


図14 合金③の結果 (負荷 162.6N)

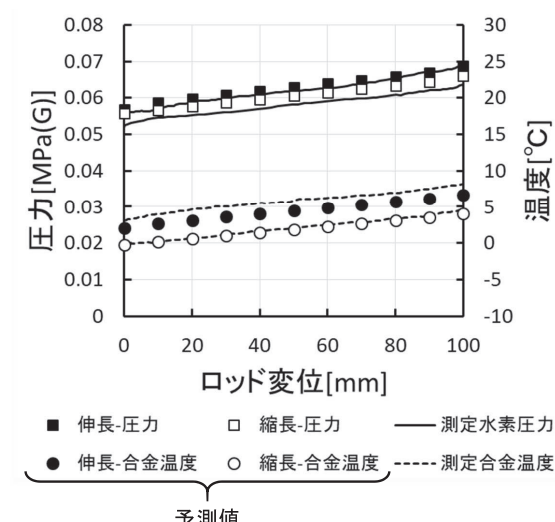


図15 合金③の結果 (負荷 278.7N)

化し、圧力も変化した。そして圧力変化に合わせてロッドが変位したことが計測された。他の実験も同様であった。図9の計測値と動作予測値をロッド変位に対する合金温度と圧力の相関関係で整理したのが図10である。合金温度と圧力は、計測値と予測値で概ね合致した。他の実験結果も同様に整理したのが図11～15である。これらの結果も合金温度と圧力は、計測値と予測値で概ね一致していることから、図5の合金特性からのアクチュエータ出力推定も適切であったと考えられる。なお、動作予測値は、金属ペローズシリンダの内容積変化によって生じる合金中の水素濃度変に温度と圧力をPCT線から求めた。

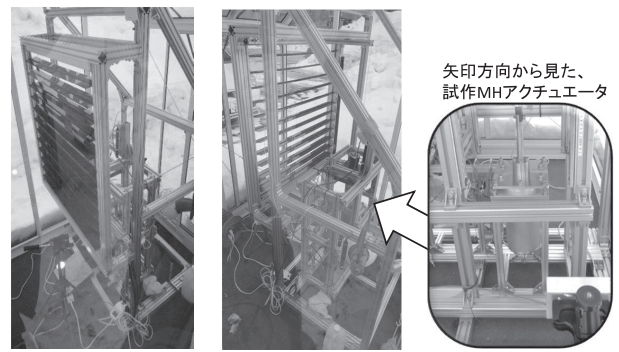
試作したMHアクチュエータを図16に示す開閉装置に取り付けてフィールドでの動作実験も行った。実験期間は2016/12/28～2017/1/20の冬季のため合金③を用いている。その結果を図17に示す。周囲温度の変化に追従してロッドが変位し、そのロッド変位によって開口部が開閉することが観察された。

5. まとめ

周囲のわずかな温度変化を駆動力に変えられるMHアクチュエータを試作し、恒温槽内での動作実験から出力推定の妥当性も見出せ基本設計方法を確認できた。さらに、フィールド実験によっても周囲温度変化によってMHアクチュエータで自律的に開閉機構が駆動した。

謝 辞

本開発の遂行にあたり、合金の試作やPCT線測定で(株)三徳の渡邊正昭氏、金属ペローズシリンダ試作で日本バルカー工業(株)の齊藤雅則氏と伊奈正文氏、合金容器試作でケーアイシー(株)の熊井俊一氏、フィールド実験で当時の北大院工修士課程の齊藤大治氏・大前裕紀氏と北大工学士課程の金内遥一郎氏のご協力を得た。各位に深く感謝します。なお、本開発は北海道の平成28年度先進的エネルギー関連技術開発支援事業の一部で実施した。



フィールド実験中の開閉機構

図16 MH アクチュエータを駆動源とした開閉機構

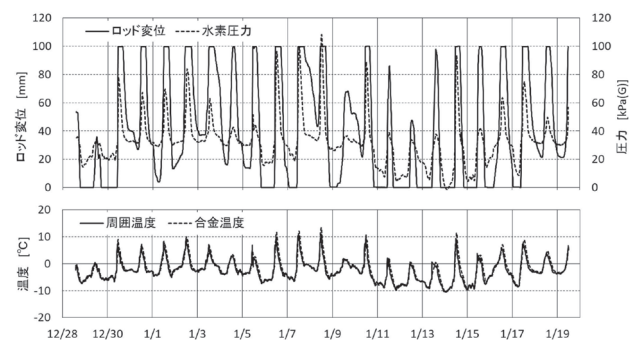


図17 フィールド実験結果
(2016/12/28 -2017/1/19)

参考文献

- 1) 吉田静男,松村一弘: 水素吸蔵合金を利用した自律駆動型アクチュエータの開発,水素利用技術集成,Vol.3,p695-703,(2007).
- 2) 吉田静男,松村一弘: 特許4951737,自律駆動型水素吸蔵合金アクチュエータ,(2003).
- 3) 濱田靖弘,佐久間大輝,須田孝徳,柿山純一朗,武者亮佑,松村一弘: 準寒冷地域における室温制御用自律駆動型開口部自動開閉装置の研究,NPO 法人 環境・エネルギー技術開発協会論文報告集,No.3,p4-9(2013).
- 4) 武者亮佑,須田孝徳,濱田靖弘,松村一弘: 準寒冷地域における室温制御用自律駆動型開口部自動開閉装置の研究第2報二種類の温度帯における長期運転実績とその評価, 空気調和・衛生工学会平成25年度大会学術講演論文集 Vol.2013,No.10,p185-188,(2013).
- 5) 大西敬三: 水素吸蔵合金のおはなし改訂版,日本規格協会, p29-31, (2003).
- 6) 古城則道: 水素の金属表面への吸着と溶解,NPO

- 法人 環境・エネルギー技術開発協会論文報告集, No.1,p3-8(2010).
- 7) 大西敬三：水素吸蔵合金のおはなし改訂版, 日本規格協会, p46, (2003).
- 8) 例えば、特許3201944, 希土類金属含有合金の製造システム, (2015).
- 9) 大角康章：新版水素吸蔵合金-その物性と応用-, アグネ研究センター, p38-42,(1993).
- 10) 大角康章：新版水素吸蔵合金-その物性と応用-, アグネ研究センター, p110,(1993).
- 11) 松村一弘, 下野 功, 須田孝徳, 林宏樹, 陣内賢治：水素吸蔵合金の水素吸蔵・放出サイクル試験. NPO 法人 環境・エネルギー技術開発協会 論文報告集, No.1,p39-41(2010).