

特集 ■アクチュエータ・テクノロジー ～ヒトとの親和性を目指して～

水素吸蔵合金アクチュエータの基礎と応用

～ヒトへの親和性に富んだ動力源としての福祉機器への応用～



佐藤 満

SATO MITSURU

昭和大学



井野秀一

INO SHUICHI

東京大学

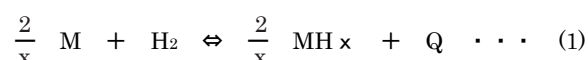
1. はじめに

少子高齢社会の到来により、生活を支援する機器、特に介護支援や自立支援といった目的の機器への要求が高まっている。身体接触を伴った生活空間での作業課題を果たす機器に用いるアクチュエータには、電源や周辺装置も含めて小型であること、サイズに比して大きな出力が得られること、身体に接触する作業課題では適切な柔軟性を実現できること、無音・無振動で作動することなど、従来の産業用・民生用機器とは異なる条件が求められる。しかし、これらを十分に満たすものは存在しないのが現状である。こうした用途のアクチュエータとして、筆者らは大量の水素を吸脱するという機能をもつ水素吸蔵合金を利用したアクチュエータの開発とその応用に取り組んでいる。本稿では、水素吸蔵合金の性質とアクチュエータとして利用する場合の動作原理と特徴、および介護支援機器や自立支援機器への応用事例を紹介する。最後に VR 分野への応用の展望を述べる。

2. 水素吸蔵合金の性質

金属には量の多寡を問わず水素を吸収する性質があることは昔から知られていたが、水素吸蔵合金 (metal hydride: 以下 MH) はこの性質を最適化して極めて多量の水素を吸収・貯蔵できるように開発された。1960 年代末に米国とオランダでそれぞれ MgNi 系と LaNi 系の MH が開発されたのを契機に、100 種類以上の MH が現在までに開発されている。MH はそれ自体の体積の 1000 倍以上の水素ガスを吸収でき、種類によっては液体水素よりも高密度で水素を貯蔵できる [1]。単に多くの水素を貯蔵できるだけでなく、合金周囲の水素圧の操

作、または合金の温度の操作によって、可逆的に水素の吸収・放出を行わせることが可能であり、その反応速度は非常に急速である。MH(M) と水素 (H₂) とは、次のような可逆反応によって金属水化物 (MH_x) を形成する。



ただし、Q は反応に伴う熱量で、一般に Q > 0 である [2]。x は反応式の係数で正の値をとり、最も簡単な場合、x = 1 となる。すなわち MH が水素を吸収する過程では、過剰となった内部エネルギーが熱として放出され、逆に MH が水素を放出する過程では、不足する内部エネルギーを補う熱の吸収が生じる。

この水素化反応式は温度を一定としたときの一定水素圧力下での式であり、水素化は合金周囲の水素圧力 (P)・合金内の水素濃度 (C)・合金温度 (T) の間である平衡状態を保つ。数々の条件下におけるこれらの平衡状態の様子を図にまとめて示したものが P-C-T 線図で、これが MH の水素吸蔵の基本的特性を表すものとされている。図 1 は P-C-T 線図の概念を示す。縦軸が合金周囲の水素圧力、横軸が合金内の水素濃度 (等温組成比) である。図からわかるように、水素圧が組成比の値によらずほぼ一定の領域が存在し、これを平衡水素解離圧と呼ぶ。この平衡水素解離圧は温度に依存しており、一般に温度の上昇に伴って指数関数的に増大する。図 2 は平衡水素解離圧 (lnP) と温度 (1/T) の関係を各種組成の MH に関してまとめて示したグラフである。どの組成の MH も温度と平衡水素解離圧の関係は、このグラフ (P-T 線図) 上では直線関係で示される。一つの種類の MH に限れば、

温度変化に伴う圧力変化はこの直線に沿った状態でのみ変化する。基本的に 2 種類の金属の組合せからなる MH に第 3, 第 4 の元素を添加することで, この直線の傾きや位置などの状態を, ある程度変化させることもできる。

3. MH アクチュエータの動作原理と特徴

このように MH は周囲の水素圧操作か熱的な操作を加えることで, 可逆的に水素の出し入れを行うことができる。LaNi 系や CaNi 系の MH では, 常温付近の温度のとき大気圧近傍に平衡水素解離圧があり, こうした MH は加熱操作により水素を閉じた空間へ放出させると, 大気圧より高い水素圧を得ることができる。MH アクチュエータはこの水素の圧力変化を動力として利用する。

MH アクチュエータの動作原理の概念図を図 3 に示す。鋳造された MH はいったん $10\mu\text{m}$ 程度に粉碎し, 熱伝導性を上げるために Cu メッキで薄いコーティングが施され, 板状に圧縮形成される。この両面に MH の温度を電気的に制御するペルチェ素子を配置して一体化したものが MH モジュールである。これを図 4 のようにアルミ製の容器に密閉したものが MH アクチュエータの駆

動源となる。容器内の水素圧変化は外部の作動部に取り出す。一般的なピストン・シリンダでは水素漏出を完全に防ぐことが困難なため, 作動部にはステンレス製で伸縮が可能な金属ベローズを使用する。図 4 に示す MH モジュールは 30mm 角で MH の厚さは 3mm で, MH の重量はおよそ 6g であり, 1000cc を超える水素吸脱量を得ることができる。半径 40mm の金属ベローズであれば, 50kg の重量を 50mm ほど昇降させることができる。

熱の授受による MH の水素吸脱反応は急速に生じるものの, ペルチェ素子の温度制御には時間遅れが生じる上に, 板状の MH の内部まで熱が伝導するにはさらに遅れが生じる。例えば LaNi 系の MH では 20°C 程度でほぼ定格容量の水素を吸蔵しており, 70°C 前後まで加熱すると有効移動量の水素すべてを放出できるが, この温度まで上昇させるためには 10 秒以上の時間を要する。したがって, MH アクチュエータは急峻な動作には不向きであるが, 介護支援・自立支援を目的とした機器では, むしろゆっくりとした動作が求められるケースが多いため, こうした目的の機器のアクチュエータとしては利用価値がある。さらに気体の圧力変化を駆動源としてい

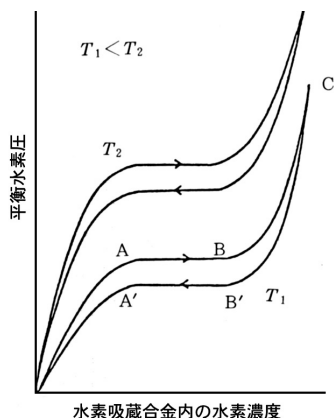


図 1 MH の水素吸蔵特性 (P-C-T 線図)

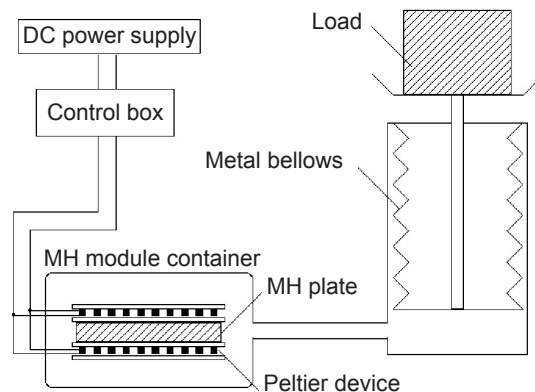


図 3 MH アクチュエータの基本構造

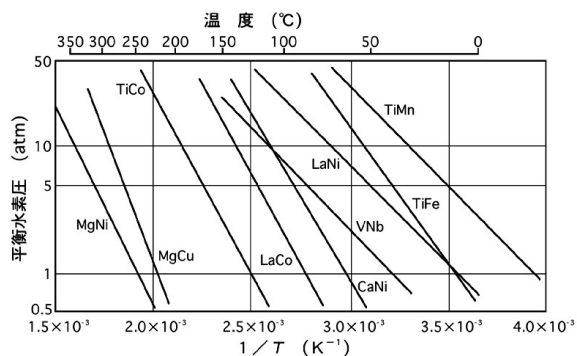


図 2 各種 MH での平衡水素圧 (lnP) と温度 (1/T) の関係

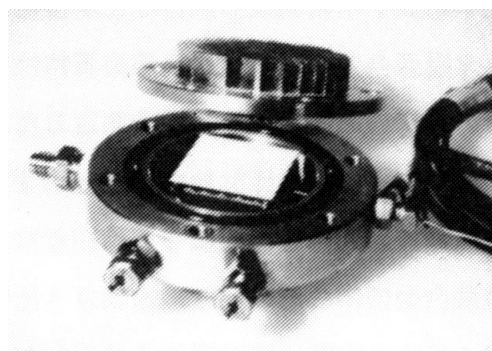


図 4 MH モジュールと封入容器

るので、位置決め精度が低い分、その緩衝性を有効に生かすという選択肢もある。特に介護支援・自立支援機器では、人の身体と接触しながら動作するため、柔らかなクッション性が極めて重要になるケースが多い。そのほかにも無騒音・無振動で動作するという特徴も、医療・福祉目的の機器には必須の条件である。近年の空気圧コンプレッサーにはかなり騒音を低減した製品も存在するが、この種の機器は病室や介護の居室という静寂な環境で作業する。明かりを消した寝室で時計の針の刻む音が気になったという経験は誰にでもあると思うが、この種の機器では無騒音であるメリットは思いのほか大きい。以上のように、MH アクチュエータは既存のアクチュエータにはないユニークな特徴があり、福祉機器への応用には適した面があると言える。

4. MH アクチュエータの介護支援機器への応用例

MH アクチュエータの小型ながら出力が大きいという特徴を生かして重量のある身体を持ち上げる機能で動作を支援する機器がいくつか試作されている。

4.1 座面昇降機能付き車いす

図 5 (a) は座ったままで高い場所に手が届くように、座面を昇降させる機能を付加した車いすである [3]。座面の下の空間に MH アクチュエータとバッテリーを配置して、体重 80kg の人を約 400mm 持ち上げることが可能である。CaNi 系の MH を 40g 使用し、油圧を併用した複動式のシリンダで水素圧を直動運動に変換しており、狭い配置スペースで大きなストロークを実現している。昇降速度はおおよそ 20mm/s である。

4.2 昇降式便座

図 5 (b) はトイレの便座からの立ち上がり動作を支援する便座昇降装置である [3]。トイレの便座は通常の椅子よりやや低い座面高に設定されているものが多い。そのため、便座から立ち上がる動作に苦勞する要介護者は多く、立ち上がる際に便座を上昇させると動作を容易にすることができる。便座は体重 100kg の人を最大 35cm まで上昇させることができ、昇降速度は 1.0cm/sec である。この機器においても、MH アクチュエータの水素圧 - 直動運動変換部には油圧を併用したピストン・シリンダを利用して、水素圧駆動のクッション性を抑制している。使用されている MH の総量は 300g である。この機器は先端福祉機器モデル住宅関連事業であるウェルフェアテクノハウス札幌に導入されて評価が行われた。

4.3 移乗介助装置

車いすへの乗降を移乗動作と呼ぶが、この動作に介助を必要とする要介護者は少なくない。図 6 は椅子や車いすからの移乗動作を支援するための介助機器である [4]。介護者が前方から抱きかかえる介護作業を機器に代行させる目的で開発された。最大リフト荷重は 100kg、持ち上げストロークは 535mm の出力があり、総重量はおおよそ 60kg、使用された MH 総量は 140g である。この動作介助機器では介助者の腕に代わる機器のアームレストが緩衝性を持った柔らかな動作をするように、MH アクチュエータの水素圧 - 直動運動変換部には金属ベローズのみが用いられて、水素圧そのものが動力に変換されている。この機器はある一般病院の病棟内で評価テストが繰り返され、その結果を反映させた改良機の開発が行われている。

4.4 車いす用座面昇降ユニット

車いすの低い座面からの立ち上がり動作を支援するために、座面を昇降させる機能を持った座面昇降ユニットの外観を図 7 に示す [5]。この装置は車いす利用者が一般的に使用する座面クッションと同じ形状をしており、既



(a) 座面昇降車いす

(b) 昇降便座

図 5 MH アクチュエータを利用した自立支援機器

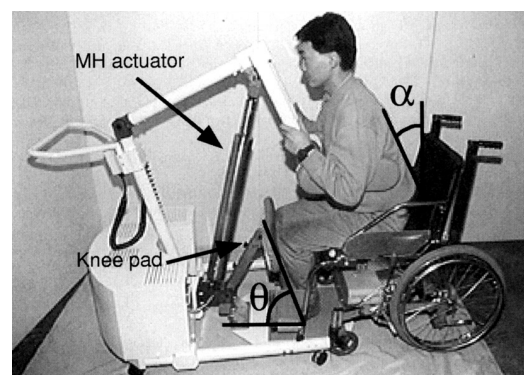


図 6 MH アクチュエータを用いた移乗介助装置

存の車いすに容易に設置が可能である。装置上面の昇降にエアバッグを用いることで動作前の厚さは 46mm とクッションと同程度に抑えている。エアバッグを水素で膨張させると漏出の恐れもあるため、この装置では MH アクチュエータの水素圧を空気圧に変換して、エアバッグにその空気を導入することで装置上面の昇降を行う方式を採用している。この機器は車いすからの起立動作を支援するので、両方の足は床に接した状態で使用される。座面が上昇するほど、足で支える体重が増加するので、体重の一部分を想定した最大 50kg の負荷を 80mm 昇降させる仕様となっている。急激な上昇は恐怖感を与えるため、座面上昇は 5 秒ほどかけて行う。

5. MH アクチュエータを用いたウェアラブルな機器

小型で高出力という MH アクチュエータの特徴を生かすと、ウェアラブルな機器への応用が期待できる。ゆっくりした動作が要求されるタイプのウェアラブルな医療福祉用機器の動力源として MH アクチュエータを応用した事例を紹介する。

5.1 関節運動装置

手足の機能回復訓練を行うためのリハビリ機器に持続的他動運動 (CPM) 装置がある。これは手術した関節を動かさずにいると、関節が過度に固まってしまうため、術後早期の段階から、決められた範囲を愛護的に極めてゆっくりした速度で受動的に動かすための装置である。手術の後遺症を軽減するなど臨床的にもその効果は確かめられており、膝関節の術後では多用されている。腕の関節の場合、術後まもなく歩行ができるので、ウェアラブルな CPM 装置が理想である。図 8 は小型の MH アクチュエータを用いた肘関節用 CPM 装置で、重量は 1.7kg (バッテリーを除く) で従来の装置と比べて十分に軽量である。関節まわりのトルク出力は最大で約 7.0 Nm であり、この値は理学療法士の徒手による関節可動域訓練時の計測トルクと同程度である [6]。電磁モータを動力

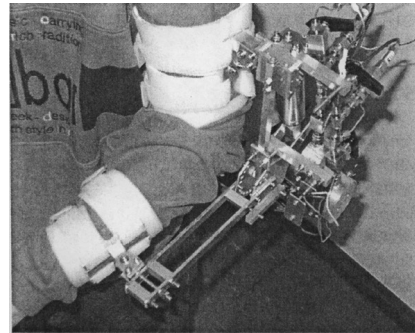


図 8 小型 MH アクチュエータを用いた肘用 CPM 装置

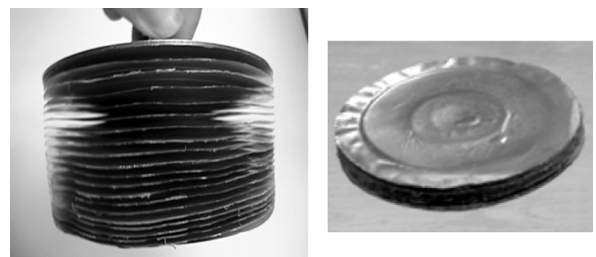


図 9 複層アルミラミネートを用いたソフトベローズ

として用いると、軸まわりの剛性が極めて高くなるが、MH アクチュエータを用いることで機械的インピーダンスを可変にすることができ、状況によっては柔らかさをもたせた関節可動域訓練が可能となる点が特徴である。

5.2 装置重量を軽減するソフトベローズ

MH アクチュエータは基本的に水素圧を動力に変換する機構上、動力変換部には水素気密性に優れた金属ベローズを利用する。金属ベローズは比較的重量が大きい上に、その全長は伸縮ストロークの 2 倍を超えるため、装置に実装する場合、配置に大きなスペースを必要とする。そのため、ウェアラブルな装置に MH アクチュエータを用いる場合、この点が障害となるケースが多い。そこで、金属ベローズに代わる動作部として、高分子複合フィルム材である複層アルミラミネートを用いたソフトベローズを開発した (図 9)。3500 回の連続伸縮試験で破損や劣化は確認されず、水素シール性は 10 日間の伸縮試験において、99.3% の水素を保持した。動作時の水素耐圧は 1.7atm と金属ベローズの数分の一であるが、気体の受圧面積を広く取れるため、出力は金属ベローズと遜色はない。重量は金属ベローズの 1/20、伸縮ストローク長に対する初期ベローズ長は 1/30 と飛躍的な改善が得られた [7]。さらに、金属ベローズは高価である点も欠点の一つだが、このソフトベローズは 1/10000 のコスト

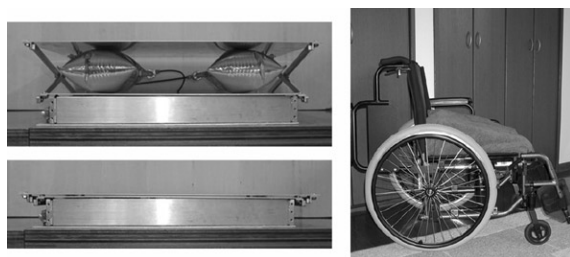


図 7 空気圧変換式 MH アクチュエータを用いた車いす用座面昇降ユニット

で製作でき、例えば医療材料ではよく見られる使い捨てのような使用法も可能である。また水素駆動による安全性が問題になる場合には、前述の水素圧を空気圧に変換する方式で空気を駆動源とすることもできる。

5.3 関節リハビリ装置

ソフトペローズを用いた MH アクチュエータによって、より小型で扱いやすい機器が実現できる。例えば、介護を要する寝たきりの高齢者は身体運動の少なさから、さらなる筋力低下や四肢の血流低下などの症状を招く。こうした動かないことによる一層の身体機能低下を廃用症候群と呼ぶが、関節運動を行う装置により、この状態はある程度防ぐことができる。たとえベッドで寝たままであっても、足の指のみをゆっくりと受動的に動かすだけで、足首よりも上の身体部分の血流までもが促進されることが確かめられている [8]。こうした運動生理学的知見を基にして、ベッド上で装着するだけで持続的な足指の他動運動を提供できる小型な装置を MH アクチュエータとソフトペローズの組合せで現在試作中である。

6. VR 機器への応用の可能性

MH アクチュエータは急峻な動作をする機器への応用は難しいが、比較的ゆっくりとした動きを提示するための機器であれば、上述のようにウェアラブルな機器への応用が可能である。その一方で、MH アクチュエータがもたらす動作は一般的な電磁モータやエアコンプレッサーを付帯させた空気圧アクチュエータで置き換え可能である。現状ではコスト面や技術的蓄積の共有度の高さなどで、MH アクチュエータは既存のアクチュエータに対抗するには不利な点も多い。しかし、MH アクチュエータは熱駆動である点が大きな特徴の一つであり、実はこれが既存のアクチュエータとの決定的な差異であるとも言える。この特徴を生かすと、例えば熱的な状態変化をそのまま動力として利用して表現する機構に応用できる可能性がある。さらに利用環境の熱エネルギーのみで駆動するならば、電力供給を要しないアクチュエータとして稼働させることもできる。他のアクチュエータでは実現不可能な、MH アクチュエータならではの応用事例はこのような利用方法ではないかと我々は考えている。

参考文献

- [1] 大西敬三 (監): 水素吸蔵合金の応用技術, シーエムシー出版 (2002)
- [2] 佐々木忠之, 川嶋稔夫, 青山英樹, 伊福部達, 小川孝寿:

水素吸蔵合金を利用したアクチュエータの開発, 日本ロボット学会誌, 4 (2) pp.45-48 (1986)

- [3] Y. Wakisaka, M. Muro, T. Kabutomori, H. Takeda, T. Izumi, S. Ino, T. Ifukube: Application of hydrogen absorbing alloys to medical and rehabilitation equipment, IEEE Trans Rehabil Eng, 5 (2) pp.148-157 (1997)
- [4] T. Tsuruga, S. Ino, T. Ifukube, M. Sato, T. Tanaka, T. Izumi, M. Muro: A basic study for a robotic transfer aid system based on human motion analysis, Adv. Robot, 14(7) pp.579-595 (2000)
- [5] M. Sato, S. Ino, N. Yoshida, T. Izumi and T. Ifukube: Portable pneumatic actuator system using MH alloys employed as assistive devices, J Robot Mechatr, 19 (6), pp.612-618 (2007)
- [6] 奥村, 敦賀, 井野, 伊福部, 田中, 泉, 河野, 室: 肘関節リハビリテーションシステムのための小型 MH アクチュエータの開発, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, 1 (5), pp.53-58 (1999)
- [7] 山田, 井野, 佐藤, 王, 伊藤, 泉, 伊福部: 関節リハビリ機器のための水素吸蔵合金ソフトアクチュエータの設計, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2002 論文集, pp.471-474 (2002)
- [8] 細野, 井野, 佐藤, 山下, 泉, 伊福部: 足趾の他動運動による血流測定に基づく関節リハビリ機器設計の基礎的検討, 第 28 回バイオメカニズム学術講演会予稿集, pp.247-248 (2007)

【略歴】

佐藤 満 (SATO Mitsuru)

昭和大学 保健医療学部 准教授

1987 年北海道大学医療技術短期大学部卒業 (理学療法士), 1993 年東京都立大学工学部卒業, 2006 年東京大学工学系研究科先端学際工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。1997 年昭和大学医療短期大学講師, 2005 年より現職。専門は福祉工学。

井野秀一 (INO Shuichi)

東京大学 先端科学技術研究センター 准教授

1988 年北海道大学工学部卒業, 1993 年北海道大学工学研究科生体工学専攻博士後期課程修了。工学博士。1993 年北海道大学電子科学研究所助手, 1995 年同大学講師, 2003 年より現職。専門は生体情報システム論に基づく福祉工学やバーチャルリアリティおよび触覚インタフェースに関する研究。