解 説

水素吸蔵合金のアクチュエータ技術への応用

Metal Hydride Materials for Actuator Applications

井 野 秀 一*

*独立行政法人 産業技術総合研究所 ヒューマンライフテクノロジー研究部門

Shuichi Ino* *Human Technology Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

1. は じ め に

持続的な地球環境を未来へ伝えるために、安全でクリーンなエネルギーの研究開発が世界各国で進められている。日本でも、風力や地熱に代表される自然エネルギーやITを応用したスマートグリッドなど、次世代のエネルギー・社会システムに向けた技術開発への関心は高い。特に、国民に甚大な被害をもたらした東日本大震災以降、暮らしとエネルギーの関係は、産業界のみならず、生活者の視点においても重大な問題となっている。これらのエネルギーの諸問題へのチャレンジの一つとして、水素とその貯蔵技術に着目した研究がある。水素は酸素と反応することで熱や電気エネルギーに変換され、生成物は人体や環境に無害な水のみであることから、水素は環境負荷の小さい優れたエネルギー媒体として注目されている。その水素を安全かつ大量に貯蔵・運搬するための材料開発として、水素吸蔵合金 (Metal Hydride, Hydrogen-Absorbing Alloy) の研究が材料科学の領域で進んでいる [1]。

一方で、日本は超高齢社会への道を真っ直ぐに突き進んでおり、2030年には3人にひとりが65歳以上となることが予想されている。このような急激な人口構造の変化は、国の社会保険や医療・介護制度等に深刻な問題を生んでいる。そこでは、高齢者の自立した日常生活の支援、介護者の負担軽減、在宅ケアなど、医療や福祉とともに、テクノロジーが取り組むべき課題も多い。特に、加齢による移動機能の衰えの影響は大きく、QOL (Quality of Life) の低下や介護者への身体的負担の増大に結びつく。そのため、高齢者の運動機能低下を予防し、介護者の負担軽減に資するリハビリ・福祉機器の開発に役立つ、軽量で柔軟な性質を備えたアクチュエータの早期実現が望まれている。

このような背景のなかで、私たちは、水素吸蔵合金に備わるユニークな化学反応のメカニズムに着目し、コンパクトでソフトなアクチュエータの技術開発を、リハビリの充

実や介護に伴う負担軽減を目標に、学際的な共同研究体制で推進している [2]。本稿では、水素吸蔵合金の基礎特性、アクチュエータの構造と機能的特徴、関節リハビリ・褥瘡予防・移乗介助をサポートするシステム等への応用例を述べ、これからの医療と福祉を支えるアクチュエータの機能性材料について考えたい。

2. 水素吸蔵合金

水素吸蔵合金 (以下, MH) とは、自己の体積の1,000倍以上の水素を吸蔵 (放出) 可能な合金である。これは、液化あるいは圧縮するよりも高体積密度である。

1968年に米国のBrookhaven国立研究所でマグネシウム系のMH (Mg_2Ni) が発見された。これが歴史的にはじめての実用的な水素吸蔵合金である。偶然にも同時期 (1970年) にオランダのPhilips社で希土類系のMH ($LaNi_5$) が発見されている。これらの相次ぐ発見がその後の多様な合金の開発の契機となり、現在までに100種類を超えるMHが生みだされている [3]。

MH (M) は、水素 (H_2) と可逆的な化学反応により、金属水素化物 (MH_x) を形成する。 Q は反応熱である。

この反応は、温度が一定ならば圧力も一定な平衡水素圧のもとで進行する。その様子をグラフで示したものが、PCT曲線 (P : 圧力, C : 水素濃度, T : 温度) である (図1)。水

図1 水素吸蔵合金のPCT特性 (模式図)

原稿受付 2013年3月26日

キーワード: Soft Actuator, Metal Hydride, Human-Machine Interface, Rehabilitation Engineering

*〒305-8566 つくば市東1-1-1

*Tsukuba-shi, Ibaraki

図2 水素吸蔵合金アクチュエータの基本構造と試験器

図3 ステップ荷重に対する伸縮挙動の比較

素吸蔵特性に優れる合金は、平坦な平衡水素圧の領域（プラト域）が大きい。また、この平衡水素圧は、温度上昇とともに高くなる性質を持つ。すなわち、MHを加熱すると平衡水素圧が上昇し、逆に冷却すると平衡水素圧は下降することから、MHは水素の媒介により化学エネルギーを熱や機械エネルギー（圧力）に自在に変換する機能性材料として活用できる。

一方で、MH自体も、水素の吸蔵時に膨張し、放出時に収縮する。そのため、吸蔵・放出を繰り返すと微粉化が進行し、粒径が小さくなる。粉体の状態では有効熱伝導率が低く、迅速なMHの加熱・冷却が困難となる。そのため、アクチュエータに応用するMHには、無電解メッキにより、粉体表面に銅薄膜を形成し、熱伝導率と耐久性を高める工夫を施している。さらに、もう一工夫として、MH粉体を高圧プレス成形により、固形化させて利用している。

3. 水素吸蔵合金アクチュエータ

MHは高密度に水素を貯蔵する不思議な機能を備えている。上述の化学反応式が示すように、加熱・冷却により、可逆的に水素の放出・吸蔵が可能なることから、熱エネルギーを調節することで平衡圧をコントロールできる。この圧力変化を機械的エネルギーとして取り出して、ものを動かすシステムが、水素吸蔵合金アクチュエータである。

水素吸蔵合金アクチュエータの基本構造は、大きく分けて、MHと温度調整デバイスを組み込んだMHモジュールを内蔵した密閉容器系（圧力発生部）と水素圧を駆動力に変換する伸縮性の効果器系（作動部）から成る（図2）。

例えば、 LaNi_5 系のMHを6[g]、作動部に金属ベローズを利用し、合金温度を 80°C に設定した場合の出力は約600[N]である。これは使用した合金の約1万倍の重さの持ち上げに相当する出力である。単純な駆動システムでも、一般のアクチュエータに比べて、非常に高い出力重量比を得られることが大きな特徴である。

4. 日常生活環境との融合

4.1 柔らかさ

日常生活環境で使用するアクチュエータの場合、産業応

用等の機械システムとは異なり、ユーザとの接触時の安全性や快適性などの観点から、ソフトであることが求められる。すなわち、コンプライアンス制御などによる見かけの柔軟性ではなく、本質的な柔らかさを装置自体に備える受動的な柔軟性が大事である。

水素吸蔵合金アクチュエータは駆動媒体が気体であり、さしずめ、自らに柔らかさを備えたソフトアクチュエータといえる。例えば、突然の接触を模したステップ荷重に対する応答は、ヒト肘関節と類似した挙動を示す（図3）。また、アクチュエータの可動部（金属ベローズ、ばね定数 0.7 [N/mm] ）を拮抗的に配置した場合、それらの内圧の和を調整（ $0.1\sim 0.6\text{ [MPa]}$ ）することで、回転ジョイントのスティフネスは比例的に変化し（およそ $2\sim 5\text{ [Nm/rad]}$ ）、その範囲はヒト肘関節の随意運動時と同程度であった[4]。

さらに、金属ベローズよりも柔らかく、身体装着を重視したウェアラブルな駆動機構の実現に向けて、ガスバリア性の高いラミネートフィルムを利用したソフトベローズの開発に着手している[5]。ソフト化と同時に、軽量化と低コスト化などの実用化に向けての複数のメリットも生まれた。また、伝統的な抄紙技術を応用した水素吸蔵合金シートの試作にも成功しており、しなやかでウェアラブルな性状を満足する水素吸蔵合金アクチュエータのオールソフト化に向けた技術開発が異業種連携の輪で加速している。

4.2 高出力重量比

日常生活環境のなかで活躍するアクチュエータは、柔らかさだけでなく、作業内容に応じた出力も欠かせない。特に、介護やリハビリなどの人間支援のための技術には、ヒトの筋肉に比類するパワーが必要である。しかし、高分子や形状記憶合金などの材料を応用したソフトアクチュエータの多くは、実効的な出力が小さく、実用化に向けた出力機能の向上策が模索されている段階である。

一方で、水素吸蔵合金アクチュエータは、数グラムのMHで、関節リハビリや身体を持ち上げに必要な推力を容易に得ることが可能である。この高出力重量比（合金重量換算で $1,000\sim 10,000$ 倍）と発生力は、他のソフトアクチュエータと比べて大きく、実用化に向けた優位性は高い。それゆえに、等身大での作業支援のための機器応用（例えば、パワーアシストや福祉機器など）に対する期待も大きい。

4.3 無騒音

音環境は日常生活にとって大事な要素である。産業用アクチュエータが高速に動き、振動や音を発生させながら活躍する工場等の環境と違って、一般住宅や病院施設などでは、常に静かさに配慮した環境づくりが求められる。そのため、生活支援機器に利用するアクチュエータは、努めて静音性に優れていなければならない。

水素吸蔵合金アクチュエータは、PCT 特性に代表される化学反応により生じる圧力の変化から動きを得る仕組みのため、基本的に騒音や振動は一切生じない。これは、高速回転を伴う電気モータやコンプレッサーを必要とする空気圧アクチュエータと根本的に異なる強みである。

4.4 自然エネルギー・廃熱利用

生活環境への配慮と同時に、自然環境や省エネルギーへの目配りも、持続可能な社会システムを構築していく上で重要な項目である。

水素吸蔵合金アクチュエータは、加熱・冷却により推力を直接的に得ることができ、太陽光などの自然エネルギーや廃熱を利用した駆動も MH の PCT 特性（温度と平衡圧の関係）次第で可能である。その検証の一例として、太陽光をレンズで集光して駆動する無電源システムのアクチュエータを試作し、その有効性を実験的に確認している [6]。

5. 福祉・防災を支える技術への応用

5.1 移動・移乗

下肢機能の低下により、自力での立ち上がりが難しい場合、移乗介助や住環境のバリアフリー化などの対応が必要になる。これまでに、水素吸蔵合金アクチュエータを利用して、車椅子に座面升降機能を付加した装置を、数種類開発している。一つは、座面を垂直に上下できるタイプであり、車椅子を利用した状態で、高い棚にあるものを扱うことを可能とする。ここで設計した水素吸蔵合金アクチュエータは、大きなストロークと出力を効率的に得られるように水素圧-油圧コンバータを連結したハイブリット機構のものである。もう一つは、折りたたみ車椅子の座面シートに軽量のエアバックを組み入れ、座面からの立ち上がりや着座を容易にするための傾斜を自在に与えるタイプである。この水素吸蔵合金アクチュエータには、水素圧-空気圧コンバータを利用して、水素系統を遮断したエア操作による座面傾斜を実現している [7]。

車椅子と同様に、移乗動作が欠かせないのはトイレである。一般的にトイレは、空間的な余裕が少なく、介護者にとって移乗介助が難しい場所でもある。そこで、前述の座面升降式車椅子に用いた油圧ハイブリット型出力機構の水素吸蔵合金アクチュエータを、洋式トイレの便座のリフト装置に応用したシステムを試作した（図 4）。この装置は、150 [g] の MH で、最大出力は 100 [kgf]、昇降量は 35 [cm]、

図 4 便座リフト装置と油圧ハイブリット型出力機構

図 5 手指関節リハビリ装置とプッシュプル型出力機構

速度は 10 [mm/s] で操作が可能である。また、トイレの水回りを利用した水冷システムにより、便座の下降時の省エネルギーに配慮する仕組みとなっている。

5.2 リハビリテーション・褥瘡予防

脳卒中や事故によるケガの回復期における関節リハビリテーションは、日常生活動作（ADL）の維持・向上に不可欠である。また、何らかの理由で、身体を自由に動かすことができない場合には、褥瘡（床ずれ）に対する配慮も重要になる。これらは、病院や施設などでは理学療法士や看護師らが徒手によって行うことが一般的であるが、その効果を回復期から慢性期に向けて継続するためには、人的および時間的な課題が常に伴う。また、退院後の在宅ケアや地域リハビリテーションでは、より一層の困難が横たわっている。

それらの対策の一つとして、必要なエクササイズを機械が他動的に行う CPM（Continuous Passive Motion）装置がある。臨床での効果は先行研究で確かめられている。しかし、従来装置は、電動モータを利用しているために、ヒトの関節が備えている柔軟性や機械インピーダンス可変性に対する機能は十分でない。また、モータからの機械音もあり、静かな居住空間での連続利用には向いていない。

そこで、課題解決の一歩として、ソフトで静かな性質の水素吸蔵合金アクチュエータを組み込んだコンパクトな手指用関節リハビリ装置を試作した（図 5）。小型の Push-Pull 型金属ベローズを使用し、MH は 3 [g]、最大出力は 100 [N]、伸縮速度は 20 [mm]、総重量は 250 [g] である。関節可動域訓練に向けた緩やかな動きを実現している。

また、足趾の他動的な屈伸運動により下肢の褥瘡好発部位の血流量を促進する簡便な褥瘡予防運動装置の開発にも

図 6 ソフトベローズを用いた足部の褥瘡予防運動装置

着手している [8]。本装置には、足趾との親和性を考慮し、高分子フィルム材を用いたインタフェース（ソフトベローズ）を採用し、足趾形状の個人差や他動運動時に生じる拘束力の低減（安全性）に対する工夫を施してある（図 6）。

5.3 救助支援

救助活動の迅速化と安全性の向上を図るための資機材の高度化が、消防や防災の現場で切望されている。そこでは、外部電力を必要としない、可搬性に優れる、倒壊物等のジャッキアップに十分な高出力を備える、操作が簡単であるなどの諸機能が求められる。

このような背景のもと、スーパーレスキュー隊を擁する消防局等で意見交換しながら、水素吸蔵合金アクチュエータの大出力化（数 100 [kgf]）および伸縮性と頑丈性を満たす多段ラム型シリンダの試験開発を進めている。また、無給電による動作を可能にするために、生石灰を利用したシンプルな加熱機構も併せて開発している [9]。

6. お わ り に

本解説では、水素吸蔵合金の基礎特性、それを利用したアクチュエータの基本構造と特徴、および福祉機器や防災機器への応用について述べた。これらの技術は、実用化に向けた発展途上にあり、研究開発の「死の谷」(Valley of Death)を乗り越えてゆくためには、先進の「材料研究」と福祉・防災などの「生活支援技術開発」の有機的・共創的な異分野連携が今後ますます重要になると考えている。

最後に、本稿で紹介した研究内容は、当該研究課題の共

同研究者および大学院生諸氏との協力によるものである。ここに記して、感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] B. Sakintuna, F. Lamari-Darkrimb and M. Hirscherc: "Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol.32, pp.1121–1140, 2007.
- [2] S. Ino and M. Sato: 'Human-centered metal hydride actuator systems for rehabilitation and assistive technology,' in: *Handbook of Research on Personal Autonomy Technologies and Disability Informatics*. J. Pereira (ed.), pp.154–170, IGI Global, 2011.
- [3] 大西敬三：水素吸蔵合金のおはなし。日本規格協会, 2003.
- [4] 佐藤, 井野, 清水 ほか: "介助支援アームのためのコンプライアンス可変型水素吸蔵合金アクチュエータシステムの開発", 日本機械学会論文集 C 編, vol.62, no.597, pp.1912–1919, 1996.
- [5] S. Ino, M. Sato, M. Hosono and T. Izumi: "Development of a soft metal hydride actuator using a laminate bellows for rehabilitation systems," *Sensors and Actuators*, vol.B-136, no.1, pp.86–91, 2009.
- [6] M. Sato, M. Hosono, K. Yamashita, S. Nakajima and S. Ino: "Solar or surplus heat-driven actuators using metal hydride alloys," *Sensors and Actuators*, vol.B-156, no.1, pp.108–113, 2011.
- [7] M. Sato, S. Ino, N. Yoshida, T. Izumi and T. Ifukube: "Portable pneumatic actuator system using MH alloys, employed as an assistive device," *J. Robotics and Mechatronics*, vol.19, no.6, pp.612–618, 2007.
- [8] M. Hosono, S. Ino, M. Sato, K. Yamashita and T. Izumi: "A system utilizing metal hydride actuators to achieve passive motion of toe joints for prevention of pressure ulcers: a pilot study," *Rehabilitation Research and Practice*, vol.2012, article ID 541383, pp.1–7, 2012.
- [9] T. Hayashi, S. Ino, K. Sakaki, Y. Nakamura, M. Sato and S. Yoshimura: "A preliminary study of a metal hydride actuator to support rescue operations," *Int. Symp. on Metal-Hydrogen Systems 2012*, 2012.

井野秀一 (Shuichi Ino)

1993 年北海道大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。日本学術振興会特別研究員 (DC)、北海道大学講師、東京大学准教授等を経て、2010 年 (独) 産業技術総合研究所研究グループ長。健康・福祉工学や情報バリアフリーに関する学際的研究に従事。IEEE、電子情報通信学会、日本機械学会、日本生体医工学会、ヒューマンインタフェース学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)