9B12 水素吸蔵合金を用いたウェアラブルアクチュエータの設計

Design of an Wearable Actuator Using Metal Hydride Alloys

○学 山田 貴史 (北大) 正 井野 秀一 (北大) 佐藤 満 (昭和大) 王 少遲 (コペル電子)

伊藤 秀明 (日本製鋼所) 泉 隆 (北海道東海大) 正 伊福部 達 (東大)

*Takafumi Yamada (Hokkaido University), Shuichi Ino (Hokkaido University), Mitsuru Sato (Showa University), Shao-Chi Wang (Coper Electronics Ltd.), Hideaki Ito (Japan Steel Works Ltd.), Takashi Izumi (Hokkaido Tohoku University) and Tohru Ifukube (University of Tokyo)

1. はじめに

現在、モータや空気圧・油圧アクチュエータといった様々なアクチュエータが日常生活において欠かせない動力源として活躍している。これらの産業用アクチュエータは、位置制御の正確さや耐久性に優れているが、出力を大きくすると容積が大きくなり、ハードウェア的な意味での柔軟性にも欠けるといった側面がある。

一方、人間の筋肉は単位面積当たり約 4 kgf (40N) の出力を出し、出力重量比が大きく、柔軟性に優れた高性能のアクチュエータと言える。このような出力重量比が大きく、柔軟性に富んだ新しいアクチュエータの開発は、ロボットや動力義肢などの分野を始めとして、社会的にもその要望が高まっている。特に、人体に装着させるようなリハビリ機器では、可搬性に加え、ヒトの筋・関節系とのインピーダンス整合を加味した柔軟性や静寂性に優れたアクチュエータを利用したシステム設計が求められている。

このような要求を満たすためのものとして、我々は水素吸蔵合金(MH 合金)を駆動源としたアクチュエータの開発に取り組んでいる^[1]。このアクチュエータは、水素ガスを媒体としているので、アクチュエータ自体に衝突時の負荷に対する緩衝作用があり、過負荷に対しても強い。また、MH 合金自体が大量の水素ガスを貯蔵し、放出する超小型ボンベと成り得るので、装置自体の小型化が可能である。そして、このアクチュエータのベローズ部を従来の金属材料から高分子複合材料に替え、軽量・小型・低廉かつウェアラブルなソフトアクチュエータを提案した^[2]。

本研究では、複合フィルム材をベローズに利用した MH ソフトアクチュエータの静的および動的な状態における基礎特性を調べ、新しいウェアラブルなアクチュエータとしてのリハビリ機器への応用について考察した。

2. 水素吸蔵合金アクチュエータ

2.1 MH 合金の特性

水素吸蔵合金とは、合金に対する加熱・冷却により、合金体積の千倍以上の水素ガスを可逆的に放出・吸収するといった特性を持った合金のことである。つまり、この特性により熱エネルギーを機械エネルギーに変換することが可能となる。この MH 合金は、現在まで様々な種類の合金

Fig.1 Equilibrium hydrogen pressure of MH Alloy as a function of temperature

が開発されている。

いま、水素吸蔵合金 (M) と水素ガス (H) との可逆反応により金属水化物 (MH_x) が形成される過程は (1) 式で表せる。

ここで、Q は反応熱であり、一定温度ならば、ギブスの法則より一定圧力で反応が進行する。また、(1) 式が平衡状態にあるとき、水素圧 P と温度 T との間には Van't Hoff の式が成り立ち、log P は 1/T の一次関数として表すことができる^[3]。

図 1 に今回の実験で使用した CaNiMnAl 系の水素吸蔵合金の平衡水素圧と温度の関係を示す。この図より、常温の範囲において平衡水素圧は 1 atm 程度であることが分かる。したがって、人体への装着を考慮したときに、MH の反応熱により火傷を負う危険性は少ないといえる。

2.2 MH モジュール

MH 合金に対する加熱・冷却はペルチェ素子を用いて行った。これにより、電氣的に水素の放出・吸収を促し、圧力の制御ができるといった利点が生じる。そして、MH 合金とペルチェ素子を密閉容器内に設置しモジュール化することで、コンプレッサとしての機能を持つことができる。この MH モジュールを駆動源とすることにより軽量、小型、そしてウェアラブルなアクチュエータを設計することができる。

密閉容器は φ82mm、幅 20mm の円柱形で、内部には 6

Fig.2 Soft-bellows made of a laminate film

Table1 Comparison soft-bellows with metal-bellows

	soft-bellows	metal-bellows
weight (g)	35	140
number of folds	20	120
length (mm)	8	160
stroke (mm)	130	80
pressure proof (kgf/cm ²)	1.74	10
max output (kgf)	28	17
pressure area (cm ²)	50	1.6

gのMH合金が封入されている。容器には圧力を導くステンレスチューブと温度観測のための熱電対、そして、ペルチェ素子に電流を流すための端子がついている。全体の重量は電極を含め約250gとなっている。

2.3 複合フィルム材を用いたソフトベローズ

アクチュエータの装置を構成するパーツのほとんどは金属材料である。我々は人体に装着することを考慮し、より軽く、柔軟性があり、そして、水素を透過しない非金属材料でアクチュエータのベローズ部の作成を試みてきた。しかし、水素バリア性、柔軟性の両方を備えたベローズを作ることは、単一素材では難しい。そこで、高分子複合材料に着目した。

今回、ベローズ部を作成するにあたり、アルミ箔ラミネートフィルム（三菱ガス化学社製）を使用した。この素材は、ポリエチレン（PE）、アルミニウム（Al）、ポリエチレンテレフタレート（PET）の三層構造のフィルムである。水素透過性はアルミ箔の厚さに依存するが、我々はアルミ箔厚さが12μmのものを使用した。

このような材料を用い、直径100mm、段数20段のベローズを作成した。その外観を図2に示す。作成の際には、アルミ箔ラミネートフィルムのPEの層が140℃程で融解する特性を活かし、熱圧着で形成した。

試作ベローズの重量やストローク、耐圧、最大出力と従来の金属ベローズとの比較を表1にまとめた。この表からも分かりますとおり、試作ベローズ重量は金属ベローズと比べると約4分の1の35gとなり、一層軽量となった。また、ストローク/ベローズ全長も30倍以上となり、ウェアラブル性が向上した。

3. アクチュエータの評価実験装置

本研究で試作したMHアクチュエータを図3に示す。また、実験装置の概略を図4に示す。実験装置は主に、これまで紹介してきたMHモジュールとソフトベローズ、そ

Fig.3 Photograph of a metal hydride actuator with soft-bellows

Fig.4 Experimental setup for the MH actuator

れに測定部を加えた三つの部分から構成されている。

MHモジュール内部の温度が過度に上昇するのを防ぐために熱電対を設置し、観測を行った。また、MHモジュールに対する電流は、PCに接続したDAボード（DATEL社製、PC-412LV）より発生させた電圧信号を電流アンプ（KEPCO社製、BOP20-20M）で電流信号に変換、増幅して供給した。MHモジュールから発生した水素解離圧の測定には圧力センサ（共和電業社製、PGM-5K）を用いた。さらに、解離圧より発生する鉛直方向の出力は材料試験機（A&D社製、STA-1225）により測定した。

4. MHソフトアクチュエータの静的特性

4.1 ソフトベローズの耐久性

試作したベローズの実用性を調べるために、水素透過性と耐屈曲特性について検証した。

まず、水素透過性を調べるために変位を30mmに固定し、7kgほどの荷重を加えた。変位はベローズを最も圧縮した状態を0mmとする。測定は約250時間連続で行った。その結果を図5に示す。この結果より、水素圧の減少量を算出すると、0.7%程度であった。

試作したベローズの素材であるアルミ箔ラミネートにおいて最も懸念される弱点は、屈曲・伸展の繰り返しによるピンホールの発生である。耐屈曲特性を調べるために、まず、二つのソフトベローズを拮抗させて接続し、反復試験中に常に内圧が一定になるようにした。そして、一方のベローズに重りを載せ、もう一方のベローズを材料試験機で繰り返し伸縮させた。その結果を図7に示す。なお、伸縮動作はストローク30mm、変位速度30mm/min、繰り返し数3500回で行った。図6から分かりますとおり、急激な変位の減少はない。従って、3500回の伸縮動作によってもピンホールが発生していないことがわかった。

Fig.5 Time course of pressure in soft-bellows

Fig.6 The relationship between number of strokes of soft-bellows and output displacement

Fig.7 The relationship between internal pressure of MH module and output of MH actuator

Fig.8 The relationship between current to MH module and output of MH actuator

Fig.9 The time pattern of pressure of a MH actuator by step input current

Fig.10 Bending structure of the MH actuator

以上より、複合フィルム材を利用したベローズは10日間という使用条件の下では、十分に連続して利用できることが確認できた。

4.2 出力に対する圧力の関係

次に、試作したベローズに関し、圧力-出力の関係を調べた。変位を10mm、50mm、90mmの位置でベローズを固定したときの水素圧と出力の関係を図7に示す。この図より、水素圧を高めるとそれに比例して出力も増加することがわかった。また、受圧面を大きくすることが容易なため、少ない圧力の変化で大きな出力が引き出せる。従って、ソフトベローズ型は金属ベローズに比べて、MHモジュールへ対する入力電流も少なく、省電力であることもわかった。

5. MH ソフトアクチュエータの動的特性

5.1 制御システム

試作したソフトベローズの動特性を調べるために、入力電流と発生圧力の関係を調べた(図8)。この関係は水素解離圧を一定に保ち、MHモジュールに印加した電流を測定したものである。実用性を考慮して、比例・積分動作を加えたPI制御を用いた。ここで、PI動作を行う際には、ソフトウェア(National Instrument社製、LabVIEW6.02)を用いて、プログラムを作成した。また、入力電流Iと圧力Pの関係は図8より(2)式で近似できる。

$$P = aI^2 + bI + c \quad (2)$$

PI制御による各パラメータの決定には、目標圧力値よりのオーバーシュートが1%未満になるように設定した。これは、人体に装着する場合の安全性を考慮し、装着時に過

負荷がヒトの関節に掛からないようにするためである。今回は、変位を10mmに固定し、目標圧力を1.10kgf/cm²に設定した。この圧力は出力に換算すると4kgf程度である。

5.2 ステップ応答

MHモジュールにソフトベローズを接続しない時と接続した時の二つの条件でステップ入力に対する応答性を調べる実験を行った。その結果を図9に示す。この図からも分かるとおり、ベローズを付けないときは、直線的に圧力が上昇し、目標圧に達している。そして、120秒後にはすでに出力が一定で安定していることが確認できる。これから、本実験で使用したPI制御は適切に作動していることがわかった。

次に、ソフトベローズをMHモジュールに接続して設置してステップ応答を調べた。この際に、オーバーシュートが1%未満になるように設定した。ベローズを接続しないときと比べると立ち上がりが少し遅れているのが確認できる。これは、ソフトベローズの柔軟性のため、僅かながらベローズの外形が変形したためと考えられる。しかしながら、ソフトベローズを接続したときには、接続しないときと同様に120秒後には安定している。このことからソフトベローズを出力部に利用してもMHモジュール内で生じる出力特性を損なうことなく出力端に力を伝達できることが分かった。

6. ヒトの関節への装着を考慮した曲げ機構

これまで試作したベローズが従来の金属ベローズと比

べ軽量・小型化され、人体に装着できる可能性を確認した。ここで、実際にどんな機構で装着させたら良いかを考察する。

関節リハビリ機器などに適用する場合、一軸の運動では関節の複雑な動きをサポートすることは難しく、多くの機構を要するため出力の損失が大きい。今回試作したペローズはその柔軟性から自在に曲げることが可能であり、複雑な機構なしで直接的に関節運動をサポートできると考えられる。そこで、関節の動きに沿うようにペローズを曲げるために、弾性材料（例えば、ゴムひも）を用いて拘束を加えることを提案する。ペローズが伸縮する際に、一部分のみ拘束されるため、その方向に曲げることができる。ここで拘束に弾性材料を提案したのは、関節の複雑な動きに柔軟に対応できるストロークを持たせるためである。実際にペローズに拘束を加えて伸張させたものを図 10 に示す。このように拘束を加えて直接曲げることにより、より関節の動きにマッチした機構を作ることができる。また、拘束部の弾性係数を変えることにより、曲率の調整も可能である。

7. 肘関節リハビリ機器への応用

このような曲げ機構を含めたウェアラブルアクチュエータの応用として CPM(Continuous Passive Motion)機器が挙げられる^[4]。これは肘関節などの手術後に、リハビリ方法として広く用いられている機器である。手術後に、そのまま放置しておくとう関節硬縮などの症状が起き、関節を動かす際に疼痛を感じたり、十分な関節可動域が得られないことがある。これを防ぐために、術後早期に理学療法士が絶えず関節をゆっくりと動かすことが効果的である。しかし、理学療法士が長時間ゆっくりとした繰り返しの動作のリハビリを行うことは難しく、負担も大きい。そのため、CPM 機器と呼ばれる関節リハビリ機器が開発され、臨床的にも高い効果が報告されている。

これまでの CPM 機器は電磁モータを使用しているためにコンプライアンスが少なく、装置自体が施設向けの大きなものとなっている。しかしながら、MH アクチュエータを用いることにより、 H_2 ガスの緩衝作用を生かした柔軟なアクチュエータを設計が可能であり、図 11 のように人体に装着できるほど軽量かつ小型な CPM 機器の設計が可能である^{[5][6]}。

8. まとめ

本研究の範囲内で以下のことが明らかになった。

- (1) アルミ箔ラミネートを用いて作成したペローズの水素透過性や耐屈曲特性は一週間程度であれば連続稼動に十分に耐え得る性能を持ち、金属ペローズに比べ、ウェアラブル性が向上した。
- (2) 圧力-出力特性より、僅かな圧力で大きな出力が取り出すことができる。また、入力電流も少なく、省電力である。

- (3) ソフトペローズを用いることにより、MH 合金自体の出力特性とほぼ同じ特性が得られることが分かった。
- (4) 人体に装着させるために曲げ機構を提案した。ペローズの一部に拘束を加えることにより、試作ペローズの柔軟性を生かした曲げ機構が考えられる。

今後の展望として、提案した曲げ機構について様々な拘束方法を検証し、ウェアラブルな関節リハビリ機器を設計し、実際に設計した関節リハビリ機器の臨床評価を行っていききたい。

Fig.11 An elbow joint rehabilitation system using an MH actuator

謝辞

本研究の一部は NEDO 平成 14 年産業技術研究助成事業の補助を受けた。記して感謝する。

参考文献

- [1] 佐々木, 川嶋, 青山, 伊福部, 小川: 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, vol.7, No.5, pp.469-500(1986)
- [2] 緒方, 井野, 山田, 泉, 吉永, 河野, 伊福部: 複合フィルム材料を用いた柔らかい水素吸蔵合金アクチュエータの開発, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.439(2002)
- [3] 大西敬三: 水素吸蔵合金の応用技術, シーエムシー出版, pp.203(1994)
- [4] R.B.Salter et al.: Clinical application of basic research on continuous passive motion for disorders and injuries of synovial joints: a preliminary report of a feasibility study, Journal of Orthopaedic Research, vol.1, pp.325-342 (1984)
- [5] S.Ino, T.Izumi, M.Takahashi and T.Ifukube: Design of an Actuator for Tele-existence Display of Position and Force to Human Hand and Elbow; Journal of Robotics and Mechatronics, vol.4, No.1, pp.43-48 (1992)
- [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, ヒューマンインターフェース学会研究報告集, vol.1, No.5, pp.53-58(1999)