

水素吸蔵合金を応用した 災害救助用ソフトジャッキアップツールの設計

細野 美奈子^{*1} 榊 浩司^{*1} 近井 学^{*1} 島田 茂伸^{*2} 土井 幸輝^{*3}
中村 優美子^{*1} 井野 秀一^{*1}

Design of Soft Jack-Up Tool for a Disaster Rescue Operation using Hydrogen Storage Alloy

Minako Hosono^{*1}, Kouji Sakaki^{*1}, Manabu Chikai^{*1}, Shigenobu Shimada^{*2}, Kouki Doi^{*3},
Yumiko Nakamura^{*1} and Shuichi Ino^{*1}

Abstract – This study aims to design a jack-up tool, which is compact, light, and has a soft end-effector, for a disaster rescue operation. It is well said that self-help and mutual assistance in neighborhood community work effectively in a disaster situation, especially for a rescue operation. Since the survival rate of rescued person exponentially decreases as time goes by, the rescue operation often needs to be done by disaster victims themselves before the arriving of public rescue teams. However, commercially available jack-up tools are big, heavy, and need a repetitive task that it would be a physical burden for the victims. In order to solve the problems, we propose a jack-up tool applying hydrogen storage alloy as its power source. Hydrogen absorbing alloys have an ability to store a large amount of hydrogen gas, which is nearly 1000 times larger than the alloys in volume ratio. The hydrogen gas absorbed in the alloys is released by heating. In the study, we designed a jack-up tool using 16 g of LaNi₅-based hydrogen storage alloy as its power source and a fiber-reinforced rubber bag as its end effector, and the prototype tool jacked up 80 kg mass by heating the alloy at 80°C.

Keywords: Jack-up tool, Soft actuator, Hydrogen storage alloy, Bag type end effector and Rescue operation

1. はじめに

地震をはじめとする自然災害時において、生き埋めや閉じ込めからの生存救出率は時間の経過と共に指数関数的に減少することが報告されている^[1]。よって、転倒家具や倒壊家屋によって閉じ込められた場合の救出や救助空間の確保は迅速に行われなければならない。しかし、災害によって道路の倒壊などライフラインが寸断された場合、国・地方公共団体等の公的機関による救助や支援活動が開始されるまでには時間を要する。そのため、災害時においては被災者自身を含む個々の住民や自主防災組織、ボランティア等地域コミュニティによる「自助」や「共助」によって早急に救助活動が行われることが必要であるとされている^[2-5]。

救出や救助空間の確保作業に有効なツールとしてはジャッキやバールが挙げられており、電力確保が困難な状況下であっても使用可能であるよう手や足を使った人力の空圧-油圧変換型ジャッキアップツールも普及している。しかし、これらの道具や機器は金属製のため重く、

出力が大きいほどサイズも大きくなる上、使用時に操作者の力もしくは繰り返し作業を必要とするため身体的な負担がかかりやすい。そのため、高齢者や要援護者などの災害弱者となりやすい世帯でも身体的な負担が軽く扱える無電力駆動型のジャッキアップツールがあれば、「自助」や「共助」が必要とされる災害時の救助活動において有効に働くと考えられる。

このような背景から、我々は水素吸蔵合金（以下、MH合金）を圧力源としたジャッキアップツールの開発に取り組んできた。水素を吸蔵した状態のMH合金は加熱することで大量の水素ガスを放出する性質があることから、無電力下でもポットやお風呂の残り湯、生石灰と水の化学反応などの熱源で加熱することで圧力源として利用できる。これまでの研究で、我々は水素圧-油圧変換機構を含むジャッキアップツールを試作し、MH合金16gを用いて、80°Cのお湯で加熱することで100kgの重りを持ち上げられるシステムを開発した^[6]。本研究では図1に示すように、ゴム系の材料を用いて袋状のエンドエフェクタを試作し、油圧に変換することなく水素圧のみで駆動する災害救助用ソフトジャッキアップツールを提案する。これによって、ジャッキアップツールをよりコンパクトかつより薄く柔軟で、片手で持ち運べる程度に軽量なものとすることを目指す。

^{*1}: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

^{*2}: 地方独立行政法人 東京都立産業技術研究センター

^{*3}: 独立行政法人 国立特別支援教育総合研究所

^{*1}: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{*2}: Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute

^{*3}: National Institute of Special Needs Education

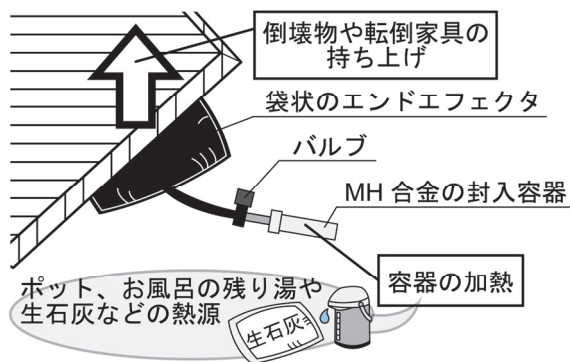


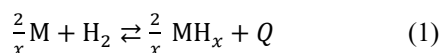
図1 MH合金を用いた災害救助用
ソフトジャッキアップツールの概要

Fig. 1 Soft Jack-Up Tool for a Disaster Rescue Operation
using Hydrogen Storage Alloy.

2. ジャッキアップツール用 MH アクチュエータ

2.1 MH合金の性質

MH合金は加熱・冷却により可逆的に水素を放出・吸蔵する性質をもつ。MH合金の水素の吸蔵・放出反応における化学反応式は(1)式ようになる。



ただし、Mは合金、Hは水素、Qは反応に伴う熱量を表すものとする。また、係数xは正の値をとり、最も簡単な場合はx=1となる。この化学反応は、温度が一定であれば一定の圧力、すなわち平衡水素圧のもとで進行する。

本研究で用いたMH合金 $LaNi_{4.45}Co_{0.5}Mn_{0.05}$ の写真を図2に、 $LaNi_{4.45}Co_{0.5}Mn_{0.05}$ の水素圧力、温度、合金内の水素濃度の相関を表す圧力組成等温線を図3に示す。図3に示す通り、 $LaNi_{4.45}Co_{0.5}Mn_{0.05}$ の常温25℃下における平衡水素圧は大気圧よりやや低い値となっている。この平衡水素圧の値は $LaNi_{4.45}Co_{0.5}Mn_{0.05}$ の温度を上げるとともに増加し、80℃における平衡水素圧の値は0.7 MPa程度となる。

2.2 アクチュエータの駆動原理

本研究では、以上のような性質を持つMH合金を圧力源としたアクチュエータ（以下、MHアクチュエータ）を用いて、災害救助用のジャッキアップツールを設計、試作する。MHアクチュエータの駆動原理を図4に示す。(1)式に示すMH合金の性質より、MH合金を密閉容器に封入し、加熱・冷却によってMH合金の温度を制御すれば、振動や騒音の発生しない圧力源を得ることができる。加えて、図4に示す通り、ペローズやシリンダ、袋状の伸縮可能な構造物をエンドエフェクタとして合金封入容器と接続すれば、温度制御によって生じた圧力差を機械



図2 本研究で用いた水素吸蔵合金



Fig. 2 Hydrogen Storage Alloy ($LaNi_{4.45}Co_{0.5}Mn_{0.05}$).

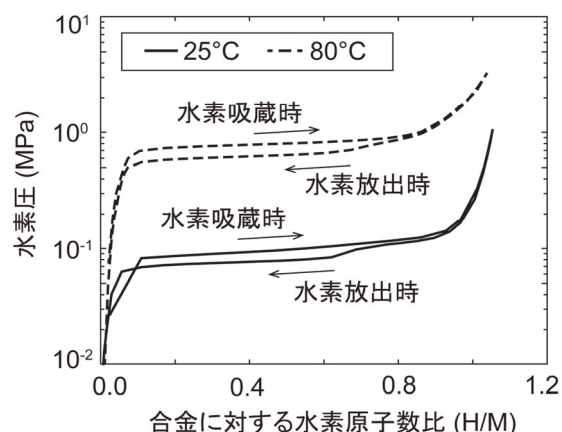


図3 $LaNi_{4.45}Co_{0.5}Mn_{0.05}$ の圧力組成等温線

Fig. 3 Pressure-Composition isotherms of
 $LaNi_{4.45}Co_{0.5}Mn_{0.05}$.

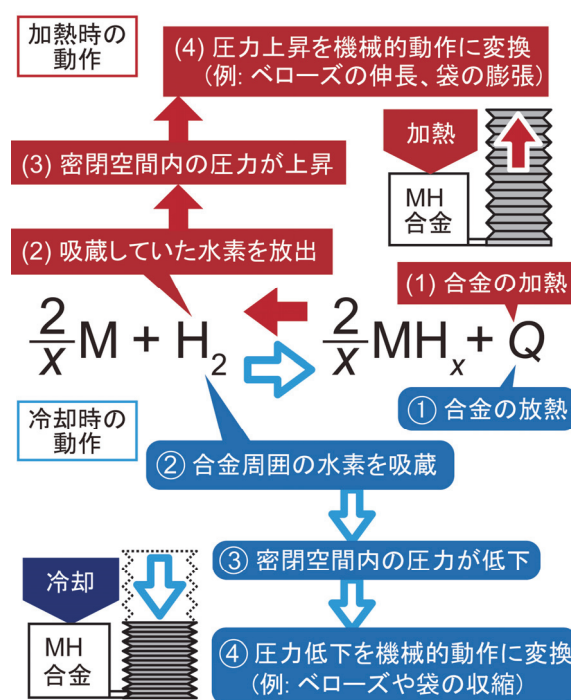


図4 MHアクチュエータの駆動原理

Fig. 4 Working Principle of MH Actuator.

的動作に変換することが可能となる。さらに、MH 合金が吸蔵可能な水素ガスの体積は 1 g あたり 100 cm³ から 150 cm³ 程度であり、体積比にしておよそ 1000 倍もの水素を貯えることができる⁷⁾ため、少量の MH 合金から大出力を得ることが可能となる。

3. 災害救助用ソフトジャッキアップツールの試作

3.1 エンドエフェクタの検討

本研究では、薄くて柔軟なソフトジャッキアップツールを実現するため、MH アクチュエータのエンドエフェクタとして、ハンディエアージャッキに使用されているプラスチックファイバークロス補強ゴム製の袋 (TA823WB、(株) イチネン TASC0、以下、水素バッグ) を用いることとした。水素バッグの寸法は 150×160 mm であり、2 mm 以上の隙間に挿入することができる。

水素バッグのガスバリア性を図 5(a)に示すような実験セットアップを用いて確認した。実験では、水素よりも分子径の小さいヘリウムを水素バッグに充てんして 40 kg の重りを 40 mm まで持ち上げた後、バルブを閉じて水素バッグを封止し、ジャッキアップ高さの経時変化を 3 日間にわたり計測した。高さの計測にはレーザー変位計 (CD22、オブテックス・エフエー (株)) を使用し、データは NI LabVIEW2016 で構築したプログラムを用いてデータロガー (NI9220、ナショナルインスツルメンツ (株)) によって収録した。サンプリング周波数は 100 Hz とした。実験結果を図 5(b)に示す。図 5(b)に示すように、時間と共にヘリウムガスがリークすることによってジャッキアップ高さが減少したが、72 時間で 28 mm まで高さを維持することができた。

以上の結果より、水素バッグをエンドエフェクタとして用いれば隙間を 40 mm まで広げられること、圧迫の除去や空間確保のための瓦礫の挿入が可能となる程度のジャッキアップ高さを長時間維持できることから、水素バッグは災害発生直後の救助活動でソフトジャッキアップツールのエンドエフェクタとして有効に働く可能性が示された。

3.2 ソフトジャッキアップツールの駆動実験

水素を吸蔵した LaNi_{4.45}Co_{0.5}Mn_{0.05} 16 g を SUS316 製の容器に封入し、水素バッグと接続してソフトジャッキアップツールを試作した。図 6(a)に示す水素バッグと図 6(b)に示す MH 合金容器を接続したときソフトジャッキアップツールは最小構成となり、このときツールの質量は約 540 g となった。続いて、試作したソフトジャッキアップツールの駆動実験を行った。実験セットアップを図 7(a)に示す。図 7(a)に示すように、本実験ではソフトジャッキアップツールの MH 合金容器を恒温水槽 (NCB-1200、東京理化器械 (株)) で 80℃まで加熱し、水素バッグの膨

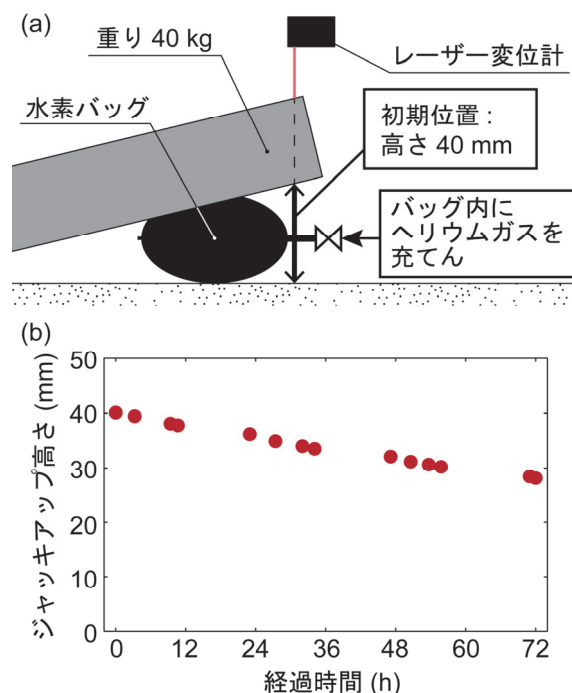


図 5 (a) ガスバリア性の計測実験セットアップ、
(b) 重りの高さの経時変化

Fig. 5 (a) Experimental Setup for Gas Barrier Property Measurement, (b) Change of Jack-Up Height with Time.

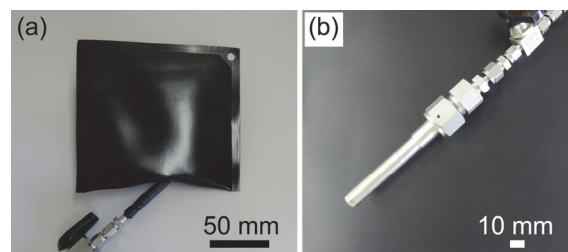


図 6 (a) 水素バッグ、(b) MH 合金の封入容器

Fig. 6 (a) Hydrogen-Gas Bag,
(b) Container of Hydrogen Storage Alloy.

張により持ち上げた重り 80 kg のジャッキアップ高さ、MH 合金容器の温度を計測した。本実験では、重りのジャッキアップ高さの到達目標を 40 mm とし、目標値を超えたら水素バッグのバルブを閉じて水素ガスの供給を停止した。変位の計測には先述したレーザー変位計を使用し、温度の計測には熱電対 (HTT0212、(株) 八光電機) を用いた。また、データは NI LabVIEW2016 で構築したプログラムを用いてデータロガー (NI9220、NI9213、ナショナルインスツルメンツ (株)) によって収録した。レーザー変位計のサンプリング周波数を 10 Hz、熱電対のサンプリング周波数を 1 Hz とした。

本実験の結果を図 7(b)と(c)に示す。図 7(b-i)は加熱前 (計測開始 0 秒時点)、図 7(b-ii)はバルブを閉じたとき (計測開始 30 秒時点) のジャッキアップの様子を示している。

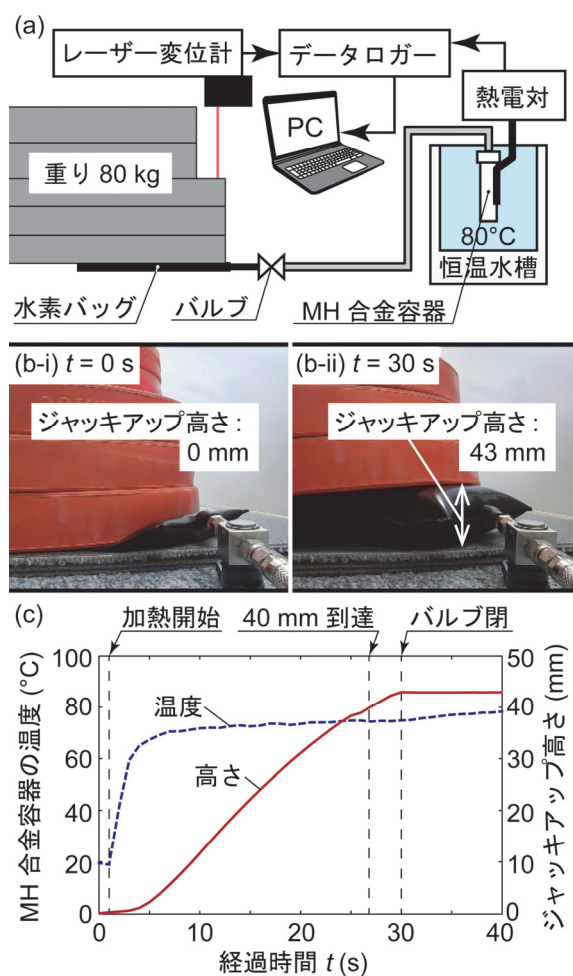


図 7 (a) 実験セットアップ、(b) ジャッキアップ時の様子、(c) 高さや温度の計測結果

Fig. 7 (a) Experimental Setup, (b) Jack-Up Operation by the Tool, (c) Measurement Results of Temperature and Jack-Up Height.

図 7(c)に示す結果より、MH 合金容器を 80°Cの恒温水槽に投入して約 2 秒後に MH 合金の水素放出による内部圧力の上昇によって水素バッグが膨張しはじめ、加熱開始から約 25 秒後には目標とした 40 mm のジャッキアップ高さに達した。よって、エンドエフェクタをゴム材料製の袋とし、水素圧力の変化を油圧に変換することなく直接利用することで、従来研究のオイルシリンダーおよびオイルコンバータを利用したジャッキアップツールと比較してよりコンパクトかつより軽量で薄く柔軟なソフトジャッキアップツールを構築することができた。

4. おわりに

本研究では、高齢者や要援護者などの災害弱者となり

やすい世帯でも身体的な負担が軽く扱えることを設計指針として、コンパクトで軽量の無電力駆動型ソフトジャッキアップツールを試作した。ソフトジャッキアップツールの圧力源には MH 合金 $\text{LaNi}_{4.45}\text{Co}_{0.5}\text{Mn}_{0.05}$ 16 g を用いることで、ポットやお湯の残り湯、生石灰と水の化学反応などの熱源によって無電力下でもツールを駆動可能とした。加えて、約 2 mm 厚のプラスチックファイバークロス補強ゴム製の袋をツールのエンドエフェクタとして採用することで、ツールの質量を約 540 g まで抑えた。また、試作したツールを 80°Cのお湯で加熱することで、約 25 秒で 80 kg の重りを 40 mm の高さまで滑らかに持ち上げられることを確認した。

今後は、MH 合金使用量や加熱温度の調整による応答速度の変化や、ツールの繰り返し使用時の挙動変化の有無を検討していく予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP 25242057 の助成を受けた。

参考文献

- [1] 国土交通省近畿日本整備局: 阪神・淡路大震災の経験に学ぶ,
<http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/daishinsai/>
- [2] Bartal, C., Zeller, L., Miskin, I., Sebbag, G., Karp, E., : Crush syndrome: Saving more lives in disasters: lessons learned from the early-response phase in Haiti, Archives of Internal Medicine, Vol. 171, No. 7, pp. 694-696 (2011).
- [3] Statheropoulos, M., Agapiou, A., Pallis, G. C., Mikedi, K., Karma, S., et al., : Factors that affect rescue time in urban search and rescue (USAR) operations, Natural Hazards, Vol. 75, No. 1, pp. 57-69 (2015).
- [4] 原岡, 仲井, 尾島, 野田, 村田, 早坂: 平常時における防災への知識・意識・行動の関連, 保健医療科学, Vol. 58, No. 3, pp. 277-282 (2009).
- [5] 平田, 石川: 地震に対する家庭の備えと防災拠点設置に関する住民の基礎意識調査—大地震発生時の住民の共助体制構築に関する研究—, 日本女子大学紀要, Vol. 59, pp. 79-87 (2012).
- [6] 細野, 島田, 土井, 榎, 近井, 井野: 水素吸蔵合金アキュエータを用いた家庭用防災支援ツールの提案, 第 3 回日本金属学会水素化合物に関わる次世代学術・応用展開研究会抄録集, 10 月 27-28 日, 室蘭, pp. 42 (2016).
- [7] 大角: 新版水素吸蔵合金—その物性と応用—, アグネ技術センター, 第 1 章 (2008).