

太陽追尾システム駆動用水素吸蔵合金アクチュエータ の動作特性

松村一弘、村田政隆、小林弘幸*、須田孝徳**

Operating Characteristics of Metal Hydride Actuator for Driving Solar Tracking Systems

Kazuhiro Matsumura, Masataka Murata, Hiroyuki Kobayashi*, Takanori Suda**

要 旨

太陽光発電では、太陽電池を常に太陽と正対する向きに制御することで発電効率が向上する。この制御の駆動に、太陽の輻射熱で動作する水素吸蔵合金アクチュエータを用いれば、無電源で自律駆動する太陽追尾システムが構成できる。本研究では、実用化に必要な日射量が水素吸蔵合金によって追尾駆動力に変換される特性について、一定環境下で実験を行った。その結果、遮光板を挟む左右の水素吸蔵合金を入れた容器の受熱量差によって、水素吸蔵合金アクチュエータが動作することが明らかとなった。日射量と動作特性の関係が得られたことで、実験温度と異なる温度での動作時間推定や、搭載する太陽電池サイズから、概算のシステムの設計が可能となる、基礎データが得られた。

1. はじめに

固定して太陽電池を設置するよりも、常に太陽と正対する位置に太陽電池の向きを制御することで発電量が増加することが広く知られており¹⁾、太陽を追いかけるように運用するので太陽追尾と呼称される。既存の太陽追尾装置は、追尾動作を予めプログラムするか日射センサで太陽位置を検出し、モータ駆動で太陽電池の向きを変えており、制御のために常に電力を消費する。これに対して、本研究が目指す自律駆動型太陽追尾システム²⁾は、わずかな温度差で放出水素圧力が変化する特徴を持つ水素吸蔵合金(以下、MH: Metal Hydride)^{3,4)}を、太陽光の輻射熱で温めることで駆動に必要な圧力を得られ、電力を必要とせず(エネルギーコストゼロ)、さらに特別な制御装置を

必要としないシンプルな構造で、既存装置と比較しローコストで太陽追尾を実現できる可能性がある。この可能性をフィールドで低温低日射量の冬季期間に実証した^{5,6)}。この実証での発電量の妥当性を NEDO 日射量データベース^{*1}で検証し、さらに年間の発電量推定を行った結果、試作したシステムでは最大 60%程度の増加が見込まれた。実用規模や異なる大きさの追尾システムの設計条件や、様々な設置場所での稼働量と発電増加量の推定には日射量と動作特性が必須である。しかし、このフィールド実験では風等の外乱の変化が大きいことで測定データがバラツキ、日射量に対する動作特性を明らかにすることが困難であった。刻々と変化する太陽位置や風等の気象条件下では、日射量と駆動力の関係の再現性が得にくい。

*東光電機工業株式会社

**苫小牧工業高等専門学校

*1 NEDO が公開する日本の 800 以上の地点における任意の角度、方位での月別、時間別の日射量を推計できる太陽光発電の発電量把握のためのデータベースで、MONSOLA-11 を使用
責任著者連絡先 (matsumura kazuhiro) :matsumura@techakodate.or.jp

このため、太陽追尾システムに用いた水素吸蔵合金アクチュエータ(以下、MHA : Metal Hydride Actuator)部を一定環境下とみなせる室内(一定温度で無風)に設置し、太陽光の代わりに人工白色光を照射し、動作実験を行った。

2. 水素吸蔵合金アクチュエータと追尾原理

流体アクチュエータに分類される MHA は、作動媒体となる水素ガスの増減に、図 1 に示す様に冷却や加熱によって水素を可逆的に吸蔵・放出する MH を用いている。すなわち、熱エネルギーを運動エネルギーに変換する熱駆動型で、温度変化によって駆動するので温度センサも兼ね、これが



図 1 水素吸蔵合金の水素化反応

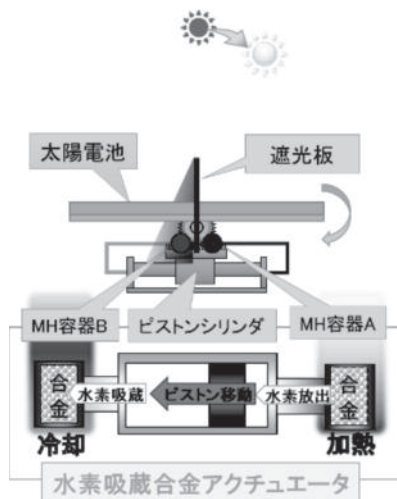


図 2 MHA 太陽追尾システム構成

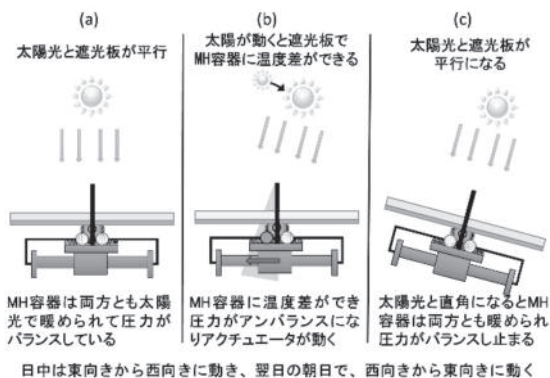


図 3 MHA 太陽追尾動作原理

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^{7,8)}。この熱エネルギーに太陽の輻射熱を利用すれば、図 2 に示す様に太陽追尾システムを MHA で駆動できる。この MHA は遮光板の左右に MH を入れた容器(以下、MH 容器)とピストンシリンダで構成される。その MHA の動作を図 3 に示す。太陽光の入射光と遮光板が平行な図 3(a)では、左右の MH 容器は同じように温められるため、温度差が生じず、左右の水素圧力は平衡を維持するためピストンは停止している。時間経過後の図 3(b)では、太陽が移動した位置と遮光板により、MH 容器は日向と日陰に分かれるため、MH 容器には温度差が生じて水素圧力差は発生し、ピストンは太陽電池が太陽と正対する方向に移動する。正対後の図 3(c)では、太陽光の入射方向と遮光板が再び平行な状態となるため、ピストンが停止する。このように、日差しのある日中の太陽追尾は、これらの動作を繰り返して実現する。

3. 水素吸蔵合金アクチュエータの動作モデル

太陽追尾システムは図 4 に示す様に、回転軸心に固定ギアを設置し、ラックが噛み合わされている。直線運動をするピストンシリンダからラックに動きが伝わると MHA や太陽電池を搭載する架台ごと回る揺動運動となる。この揺動させるために必要な力は、システム内部抵抗 L_i [Nm]と風などの外部負荷 L_e [Nm]によって求めることができる。そして、この揺動運動はラック&ギアで MHA の直線運動から得ている。この直線運動をさせる力を生じさせる日向側と日陰側の圧力差があれば、太陽追尾システムは駆動する。

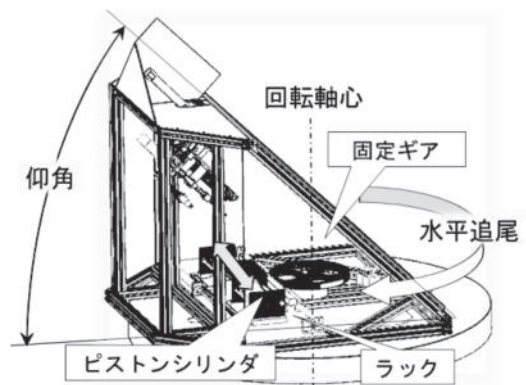


図 4 試作システム概要

その駆動力 F [N]はギア直径 D_g [m]とギア効率 η で(1)式で求められる。

$$F = \frac{(L_i + L_e)}{(D_g/2)} \eta \quad \text{----- (1)}$$

駆動力はピストン左右の圧力による力の差であるから、ピストンシリンダの有効断面積 S [m²]と日向側の圧力 P_a [Pa]、日陰側の圧力 P_b [Pa]から(2)式となる。

$$F = P_a \cdot S - P_b \cdot S \quad \text{----- (2)}$$

駆動力 F を得るための駆動熱量 Q [J]と太陽光からの受熱量 Q_i [J]の差が、MH 容器表面の反射や放熱の損失熱量 Q_L [J]であり(3)式に示す関係となる。

$$Q_t = Q + Q_L \quad \text{----- (3)}$$

そして、駆動熱量 Q は、MH の水素化反応に伴う反応熱量 Q_r [J]、MH 容器自体を加熱するために必要な温度変化したときの MH 容器熱容量 Q_c [J]、合金自体を加熱するために必要な温度変化したときの MH 熱容量 Q_m [J]から(4)式となる。

$$Q = Q_r + Q_c + Q_m \quad \text{----- (4)}$$

本研究に用いた MH は、前述したフィールド実験と同じく LaNi₅ に代表される AB₅ 型希土類系合金で、MmNi を主成分とし、ストリップキャスト法⁹⁾での試作品とした。その PCT (Hydrogen Pressure-Construction-constant Temperature) 特性を図 5 に示す。そして、本実験で予想された 20~60[°C]の温度域における、動作条件となる水素の吸蔵および放出のプラトー域の推定値を図 6 に示す。この図から MH の温度と圧力の関係を近似する Van't Hoff の(5)式で反応熱が求められる¹⁰⁾。

$$\ln P_{H_2} = \frac{2\Delta H}{nRT} - \frac{2\Delta S}{nR} \quad \text{----- (5)}$$

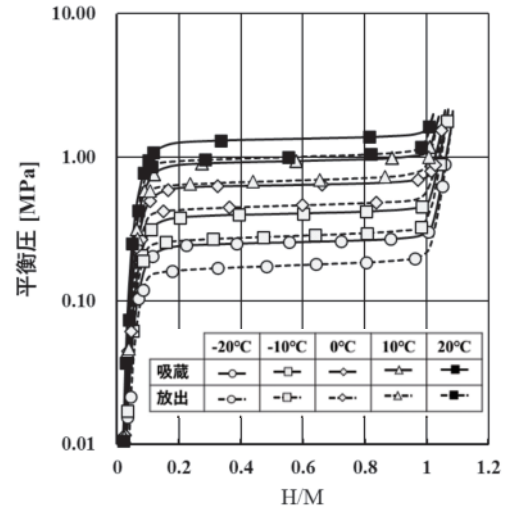


図 5 使用 MH の PCT 特性

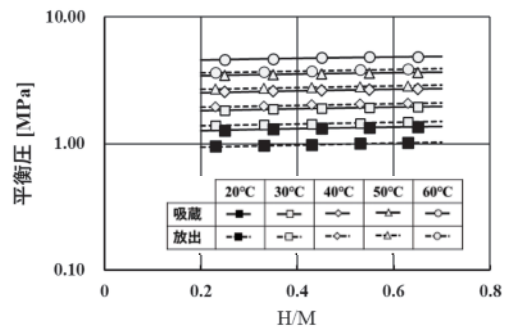


図 6 プラトー域推定結果

この式の R [kJ/(K·mol)]は気体定数、 T [K]は温度、 ΔS [kJ/mol]はエントロピー変化、 ΔH [kJ/mol]はエンタルピー変化でMHと水素の反応熱である。使用した MH の反応熱を求めると、例えば $H/M=0.5$ で水素吸蔵が -27.0 [kJ/mol(H₂)]、放出が -26.5 [kJ/mol(H₂)]であった。MH から n [mol]の水素が放出された場合、反応熱量 Q_r は ΔH を用いて(6)式となる。

$$Q_r = n \cdot \Delta H \quad \text{----- (6)}$$

MH 容器熱量 Q_c は、容器自体が低温度 T_L [K]から高温 T_H [K] まで変化するための熱量で、MH 容器質量を M [g]、MH 容器の比熱を C_{pc} [J/K·g]として(7)式で表される。

$$Q_c = M \cdot C_{pc}(T_H - T_L) \quad \text{----- (7)}$$

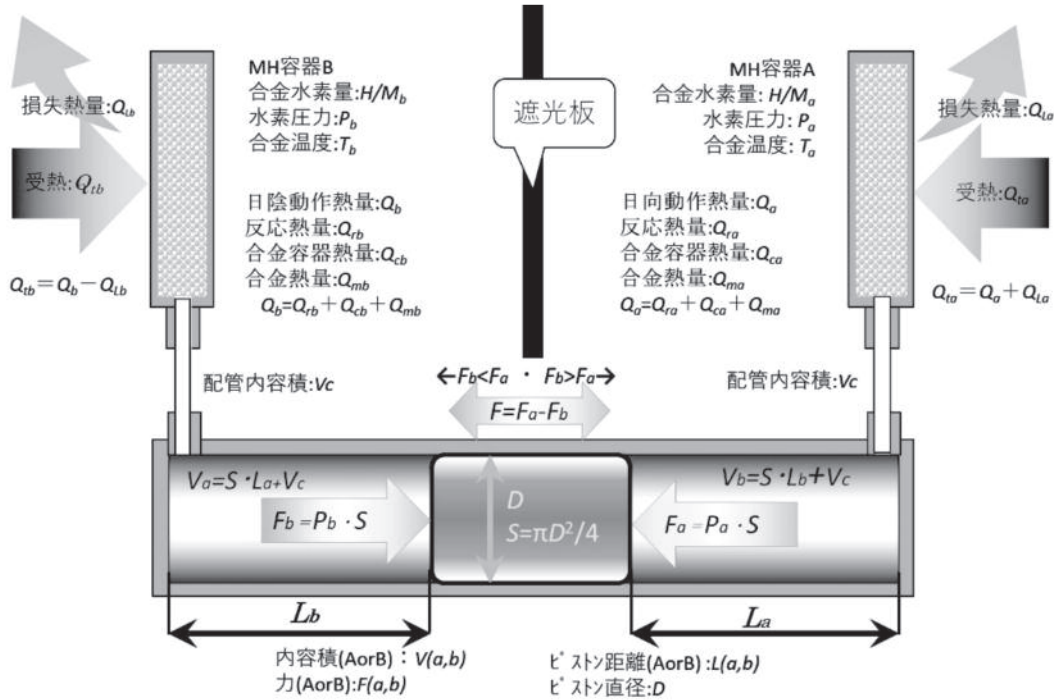


図7 動作モデル

MH 熱量 Q_m は、MH が低温度 T_L [K]から高温度 T_H [K]まで変化するための熱量で、MH 質量を m [g]、MH の比熱を C_p [J/K·g]として(8)式で表される。

$$Q_m = m \cdot C_p(T_H - T_L) \text{ ----- (8)}$$

MH の比熱については、Neumann-Kopp 則に従うことが示されている^{11,12)}。この法則で使用する MH と LaNi₅ の比熱の比率は 1.01 程度であることから、LaNi₅ の結果¹²⁾を基に実験で動作させるときの H/M 変化がプラトー域の 0.3~0.6 の範囲で、比熱の関係を(9)式とした。

$$C_p = 0.25 \frac{H}{M} + 0.65 \text{ ----- (9)}$$

上述の関係について、日向を A 側、日陰を B 側とすれば、A 側は日射によって温められることによる水素放出、B 側は温度低下による水素吸蔵となる。この状態における動作モデルを図7に示す。この図では A 側の記号には変数の末尾に「a」、B 側には「b」を付加している。

4. 実験装置と実験方法

実験は図8に示す様に人工白色光を太陽光の

代用とし、太陽追尾システムの MHA に関する部分を製作し、太陽の動きを再現する電動回転台に載せた。製作した MHA はフィールド実験と同仕様とし、MH が 175[g]封入できる MH 容器 2 個と内径 40[mm]・ストローク 300[mm]のピストンシリンダ、MH 容器とピストンシリンダ間のバルブ・配管類で構成した。フィールドで太陽追尾システムに作用する負荷は、自然の風圧荷重、積雪荷重、地震荷重が想定される。太陽電池

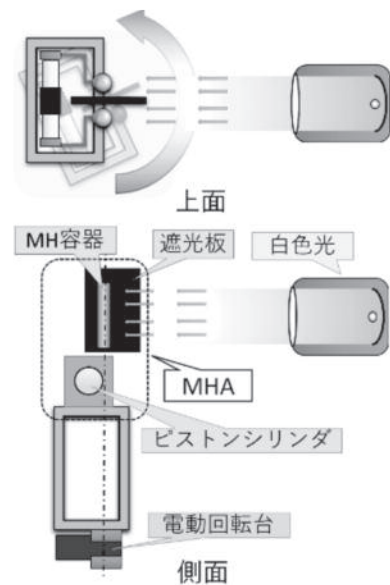


図8 実験構想

アレイ用支持物設計標準 (JIS-C 8955-2011) の解説によれば、自然の外力で支配的なのは風圧荷重とされている。この風圧荷重と内部抵抗を合わせて負荷条件とし、ランプ放射照度を変えた実験を行った。

4.1 実験装置

製作した実験装置主要部とセンサ配置を図 9 に、センサの一覧を表 1 に示す。電動回転台としてオリエンタルモータ製のロータリーアクチュエータ DGB130R36 を用い 0.25[度/分](360 度/日)の角速度で載せた実験装置を回転させた。

使用したランプは江東電気製 DIS-12H で、灯具は ARRI 製 Daylight_Compact1200 である。このランプは JIS-C8912-2011 や C8933-2011 の太陽電池測定用ソーラシミュレータ規格でのスペクトル合致度が 0.4~2.0 の範囲であるクラス C に相当する。このランプの放射照度を波長依存性が無いとされる表 1 に示すサーモパイルタイプの日射計で予め測定し、MH 容器への放射照度を求めた。

風の負荷に相当する風圧荷重を求めるために、試作太陽追尾システム⁵⁾の 1/10 スケールモデルを使った図 10 の風洞実験の結果^{*2}を用いた。測定は、風洞測定部上部に取り付けられた三分力計 (日章電機製 LMC-3531A) にモデルを取り付け、主流に対し図 11 に示す様に迎え角 α を変えて抗力 F_x [N]と揚力 F_y [N]を測定し、図 12 に示す抗力係数 C_D と揚力係数 C_L を得ている。その係数を使い、回転半径 r [m]、空気密度 ρ [kg/m³]、流速 v [m/s]、主流に対する投影面積 A_p [m²]とすれば、風圧によって生じる回転モーメント M_f [Nm]は(10)式で求められる。

$$M_f = r \sqrt{\left(C_D \frac{\rho v^2}{2} A_p\right)^2 + \left(C_L \frac{\rho v^2}{2} A_p\right)^2} \dots\dots(10)$$

この M_f は(1)式の L_e に相当し、このモーメントを MHA の直線運動に変換し、内部抵抗も合わせて負荷としたのが図 13 で、迎え角 60[度]のときが何れの風速でも最大負荷となる。迎え角 60[度]の負荷を精密レギュレータで圧力調整を

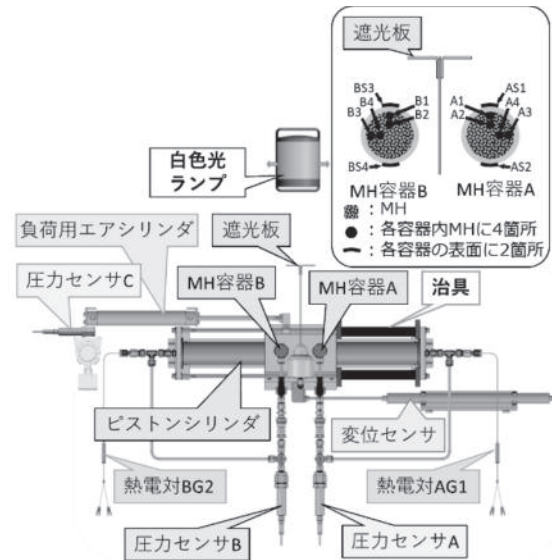


図 9 実験装置主要部と MH 容器水平断面図

表 1 測定項目とセンサの一覧

測定項目	センサ名	型式・仕様
システム角度	角度センサ	緑測器製 CP-2F 0~360度
放射照度	日射センサ	クリマテック製 CHF-SR05 0~1600W/m ²
ピストンシリンダ変位	変位センサ	緑測器製 LP-300FJ 0~300mm
A 側圧力	圧力センサ A	共和電業製 PVL-50KD 0~5MPa (G)
B 側圧力	圧力センサ B	共和電業製 PVL-20KD 0~2MPa (G)
負荷シリンダ圧力	圧力センサ C	共和電業製 PVL-20KD 0~2MPa (G)
容器 A-MH 温度	シース熱電対 A-1~4	計温製 TS-T10:T 種
容器 A 表面温度	表面熱電対 A-S1・S2	計温製 TF-T14:T 種
A 側水素ガス温度	シース熱電対 A-G1	計温製 TS-T10:T 種
容器 B-MH 温度	シース熱電対 B-5~8	計温製 TS-T10:T 種
容器 B 表面温度	表面熱電対 B-S3・S4	計温製 TF-T14:T 種
B 側水素ガス温度	シース熱電対 B-G2	計温製 TS-T10:T 種

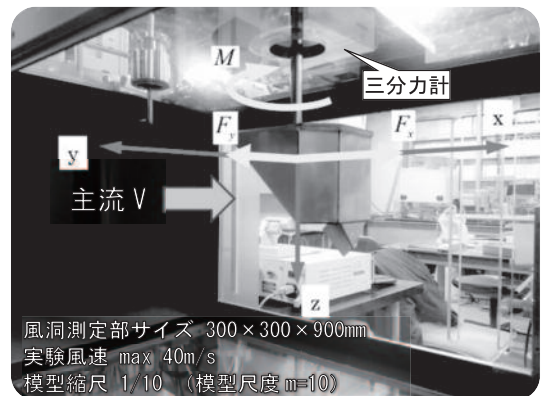


図 10 風洞実験状況

*2 函館工業高等専門学校生産システム工学科教授の本村真治先生による風洞実験結果

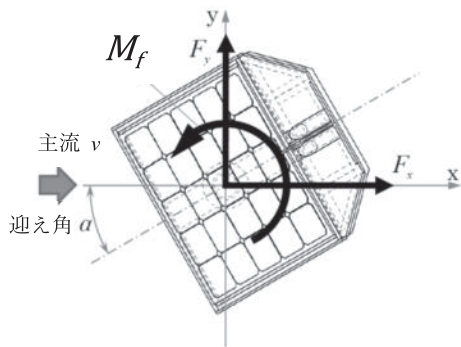


図 11 風洞実験モデル平面

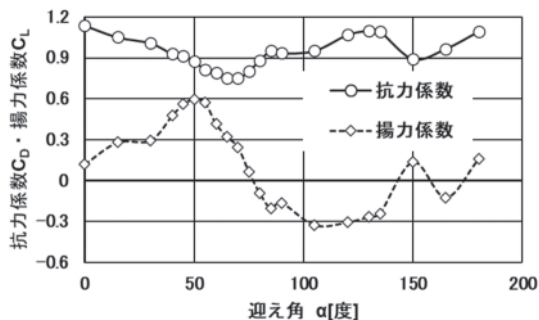


図 12 抗力係数と揚力係数

した図 9 に示す負荷用エアシリンダで、ピストンシリンダに直接作用させた。そして、負荷条件を変えてもピストンシリンダの動作開始を同じ位置にするために、図 9 に示す様に治具を取り付けた。

4.2 実験方法

実験を室温が約 20℃に保たれている北海道立工業技術センター精密測定室で行った。実験状況を図 14 に示す。装置設置場所での MH 容器周囲を風速計(Kestrel4000)で測定を試みたが風速が観察されなかったため、無風状態と判断した。

実験は、MH 容器表面や MH の温度が室温であることを確認し、ピストンシリンダを所定位置に治具で合わせ、負荷用エアシリンダで負荷を与えた。そして、アルミ板で MH 容器を図 15 に示す様に遮光して、ランプを点灯し約 10 分間放置した。その後、遮光用アルミ板を外すと同時に電動回転台を動作させ、ピストンシリンダ変位が中間位置の 150[mm]から 140[mm]になるまで測定を行った。測定データは、データロガー(グラフテック製 GL840)に収録した。この手順で、実際のシステム内部抵抗 53[N]に風圧荷重

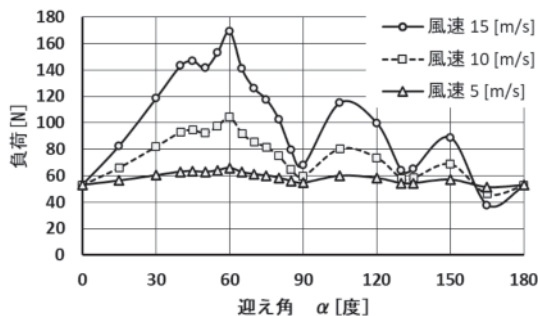


図 13 迎え角に対する風と内部抵抗の総負荷

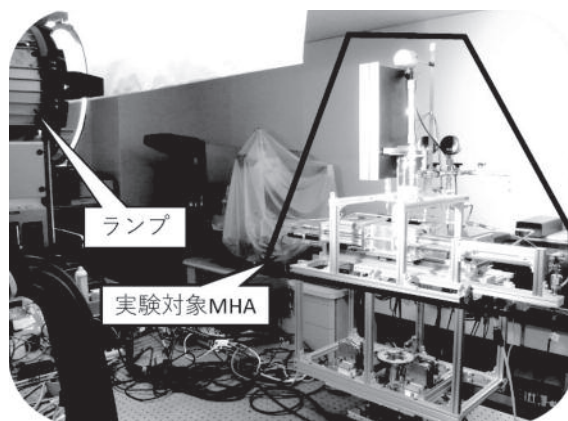


図 14 実験状況

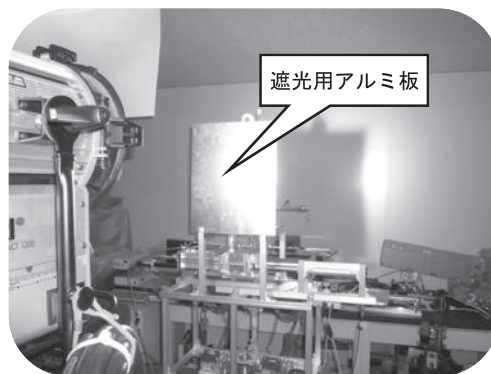


図 15 ランプ照射開始状況

表 2 実験パターン

風速[m/s] 迎え角 α =60°	負荷 ^{※1} [N]	MH 容器受光面の平均放射照度[W/m ²]				
		224	515	667	820	1,022
0	53 ^{※1}	●	●	●	●	●
5	67	●		●		
10	105		●	●	●	●
15	168 ^{※2}			●		●

※1 負荷 53N は実機の内部抵抗 (始動抵抗)

※2 負荷 168N は、迎え角 α=30 度では風速 20m/s、α=15 度では風速 28m/s に相当

※3 実験での負荷はエアシリンダ加圧力から算出したので ±3N の範囲

を加えた 4 段階の負荷と、MH 容器への放射照度を 224~1,022[W/m²]の 5 段階の条件を組み合わせ合わせた表 2 に●で示す 13 パターンの実験を行った。

5. 実験結果

各測定値は、図 9 に示す様に遮光板を挟み日方向に位置する方を容器 A や A 側と表記し、日陰に位置する方を容器 B や B 側と表記し整理をした。その結果の一例として放射照度 667[W/m²]における、遮光用アルミ板を外してからのランプ照射の経過時間に対する変位を図 16、積算受熱量を図 17、MH 温度を図 18、圧力変化を図 19

に示す。なお、温度測定結果で MH 内部の 4 箇所、MH 容器表面の 2 箇所の熱電対測定値を比較したところ、差が±0.1℃以内であり、熱電対精度を考慮すると同じと見なせるので、図 18 の MH 温度は MH 内部 4 カ所の平均とした。ランプが照射されてからピストンシリンダが動き出した点は図 16 に凡例の□で示した。この図から負荷が増えるほど動作開始するまでに時間を要したことが分かる。積算受熱量の図 17 から、A 側では同じ放射照度を受光し続けるので経過時間とともに積算受熱量は増加するが、B 側では徐々に遮光板によって日陰となるので受光量が

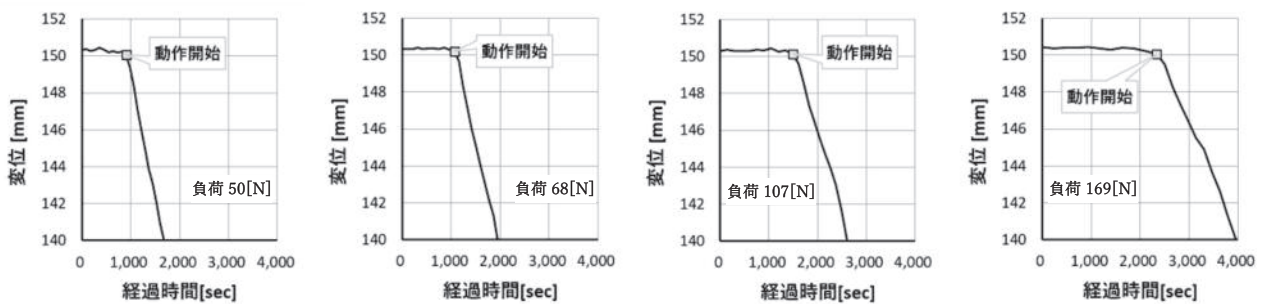


図 16 ピストンシリンダ変位

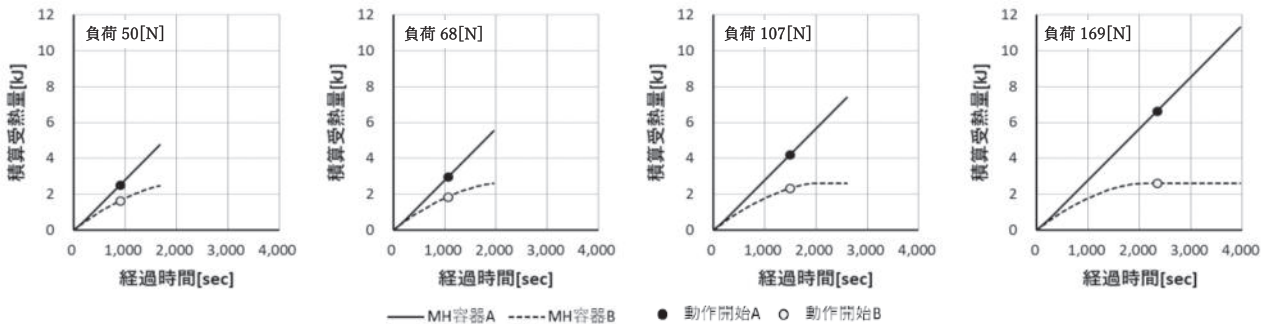


図 17 MH 容器の積算受熱量

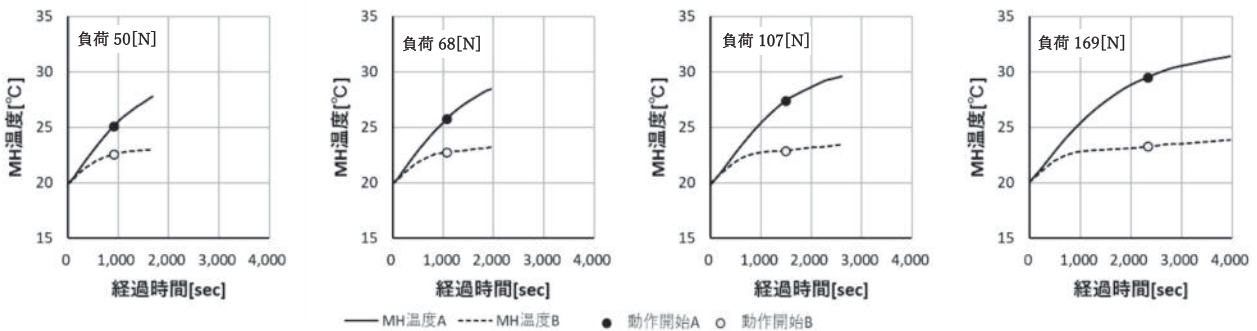


図 18 MH 温度

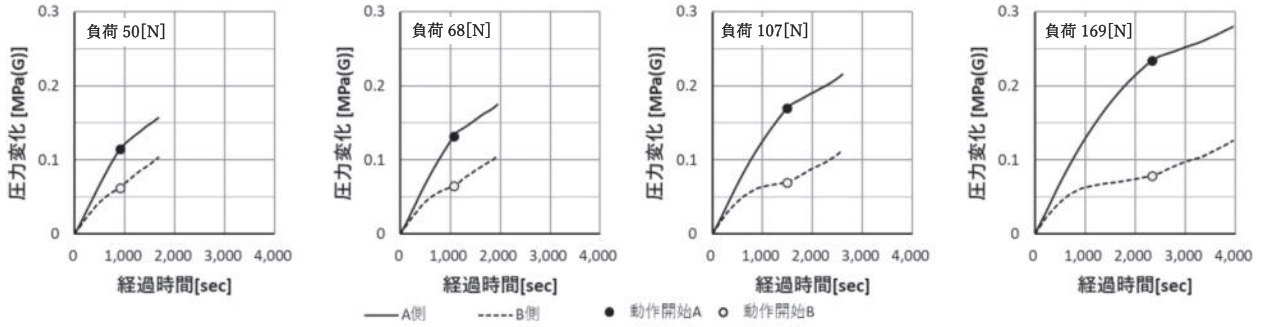


図 19 圧力変化

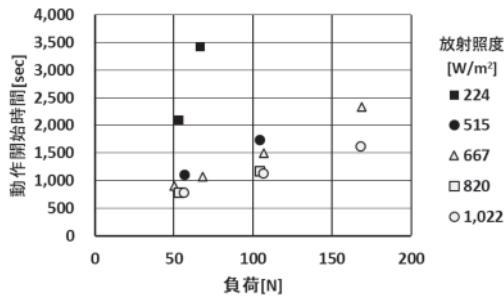


図 20 各放射照度における負荷と動作開始時間

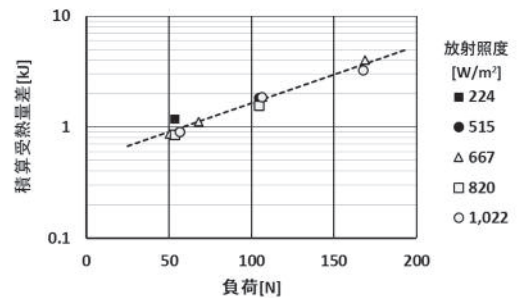


図 21 各放射照度における負荷と積算受熱量差

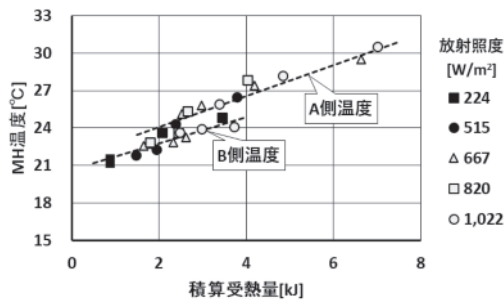


図 22 各放射照度における積算受熱量と MH 温度

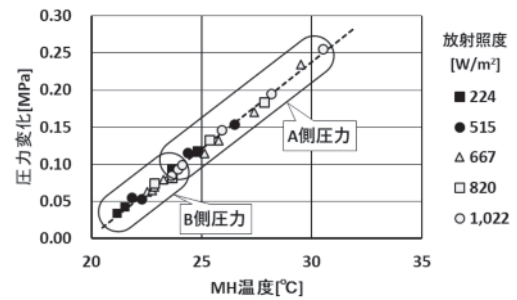


図 23 各放射照度における MH 温度と圧力変化

減少し、約 1,994 秒後には受光が無くなるので積算受熱量は増加しない。この積算受熱量は放射照度と MH 容器の受光面積と受光経過時間の積である。ここで、図 17～図 19 には共通して動作開始点は A 側を●B 側を○で示した。図 17 では●と○の縦軸方向の差が積算受熱量差、図 18 では MH 温度差、図 19 では圧力差となるが、どの図でも負荷が増えると、差が大きくなるのが分かる。他の放射照度の実験結果も図 16 から図 19 と同様な傾向を示した。

機械的運動は駆動抵抗より始動抵抗が大きいことから、図 16 から図 19 で示した動き出したときで表 2 に示した全実験の測定値を、MHA 原理の図 1 で示した様に、熱⇄MH 温度変化⇄圧力

変化⇄動作、の関係に基づいて整理した。負荷に対する動作時間を図 20 に積算受熱量差を図 21 に示す。そして、積算受熱量に対する MH 温度を図 22 に示し、MH 温度に対する圧力変化を図 23 に示す。これらの図 20 から図 23 をたどることで、得たい駆動力から圧力が求められ、圧力から MH 温度、そして必要な放射照度（熱量）が求められる。

6. 考察

太陽追尾駆動用の MHA の仕様では、搭載太陽電池やシステムの自重と環境から受ける荷重を想定した負荷に対する動作可否を検討する必要がある。図 21 の負荷に対しての積算受熱量差か

ら、負荷が同じ程度であるなら A 側と B 側の積算受熱量差が、一定程度になると動作を開始することが分かる。そして、放射照度に対する動作開始時間の関係を求めたのが図 24 になる。この図から放射照度が大きいほど動作開始が早いことが見て取れる。次に、放射照度に対する動作開始時の A 側と B 側の積算受熱量差を図 25 に示す。この図から負荷が大きいほど A 側と B 側の積算受熱量差を必要とし、放射照度が大きいほど積算受熱量差が少ないこともわかる。図 24 や図 25 から放射照度が低くても動くことを読み取れるが、室内実験でありフィールドでは、低日射量が 1 時間以上続くことは希である。雲の多い晴れの日射量は $500\text{[W/m}^2\text{]}$ との例がある^{*3}。実験条件である $224\text{[W/m}^2\text{]}$ が得られるときは快晴時の早朝や夕刻の短時間であり、長時間生じない。実用的には $500\sim 1,000\text{[W/m}^2\text{]}$ が範囲と想定される。なお、本実験での MH 容器の受熱量は放射照度と MH 容器受光面積を使って求めると $1.02\sim 4.62\text{[W]}$ であり僅かな熱によって動いていると言える。

実験で得られた図 23 の動作開始時の MH 温度と圧力変化、図 6 から求めた MH の圧力温度特性を合わせて示したのが図 26 である。MH の放出や吸蔵の圧力-温度 (PT) 線の範囲に動作開始時の圧力と MH 温度が位置している。これは MH の PT 特性に従った実験結果であったことを示す。この関係を用い実験環境と異なる温度での動作開始時間推定した結果を図 27 に示す。この図には放射照度 $667\text{[W/m}^2\text{]}$ と $1,022\text{[W/m}^2\text{]}$ を合わせて示してあり、放射照度が高い方が、何れの初期温度でも早く動作を開始することが分かる。MH は組成や製法によって PCT 特性を変えられるので、初期温度の異なる環境向けの MHA も製作することができる。例えば、平均気温を初期温度として、運転可能範囲は最高気温と最低気温を想定し、それに適した PCT 特性の MH を使えば良い。

動作後のピストンシリンダ速度は図 16 の変位から動作開始後の経過時間と変位量から推定でき、この速度を太陽追尾システムの揺動運動

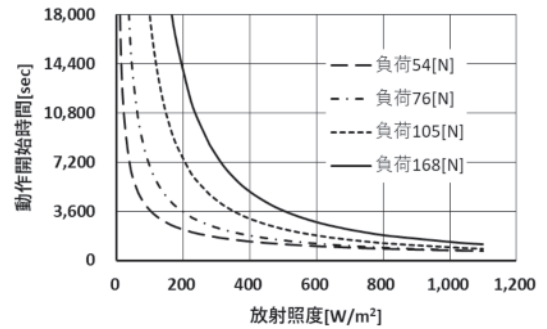


図 24 放射照度と動作開始時間

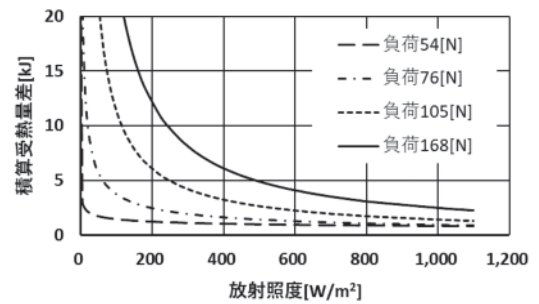


図 25 放射照度と積算受熱量差

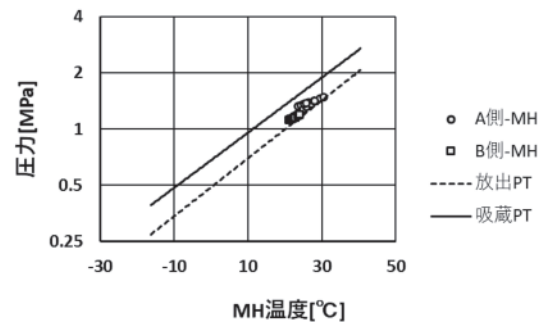


図 26 MH の PT と動作開始時の温度と圧力

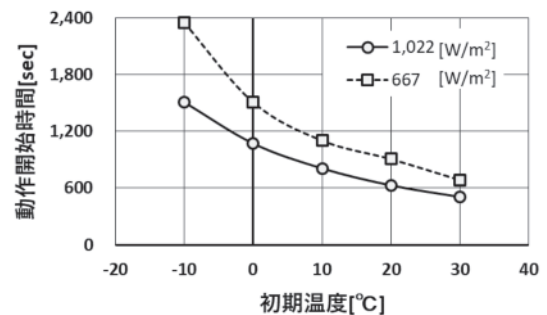


図 27 初期温度と動作開始時間の推定

*3 九州電力公開の日射量目安、http://www.kyuden.co.jp/effort_renewable-irradiation

に変換すると、例えば放射照度 $667[\text{W}/\text{m}^2]$ で負荷 $169[\text{N}]$ のときには $11[\text{度}/\text{分}]$ であり、約 40 分で太陽を捉えられる。このときの理論太陽発電効率の低下は $1.6[\%]$ 程度に留まる。

7. まとめ

負荷や放射照度を変えた室内での動作実験から、日向側と日陰側の MH 容器の受ける積算受熱量差が、一定量に達すると動作することが明らかとなった。そして、放射照度と動作を開始する時間の関係も求めることができた。さらに、周囲温度が異なる場合の動作開始時間の推定や、搭載する太陽電池サイズから、概算のシステム設計に必要な基礎データが得られた。

謝辞

MH 試作や分析では株式会社三徳の大月孝之様、アクチュエータ試作では株式会社東和製作所部長の清水智様、風力特性解析では函館工業高等専門学校教授の本村真治先生、実験条件や解析方法の有益なご助言で北海道大学大学院工学研究院教授の濱田靖弘先生、製品化データに関する有益なご助言で東光電機工業株式会社の吉田晋様、実験装置部品の設計や製作で有限会社梅津製作所社長の梅津訓様のご協力やご支援を頂いた。各位に深く感謝します。

なお、本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構から受託した令和 2 年度 A-STEP トライアウトで実施した。

参考文献

- 1) 例えば、トランジスタ技術 SPECIAL 編集部/編、太陽光発電のしくみと実例、グリーン・エレクトロニクス、No.5(CQ 出版) (2011)、pp.37-38
- 2) 濱田靖弘、松村一弘、須田孝徳、小林弘幸：特開 2015-171281、太陽追尾装置及び太陽光利用システム(2014)
- 3) 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(2013)、pp.185-188
- 4) 大西敬三、水素吸蔵合金のおはなし改訂版(日本規格協会)、(2003)、p.46
- 5) 松村一弘、小林弘幸、濱田靖弘、須田孝徳：水素吸蔵合金を利用する太陽追尾システムの基礎技術開発、北海道立工業技術センター研究報告、No.14(2016)、pp.18-24
- 6) Shin'ya Obara, Kazuhiro Matsumura, Shun Aizawa, Hiroyuki Kobayashi, Yasuhiro Hamada, Takanori Suda: Development of a solar tracking system of a nonelectric power source by using a metal hydride actuator, Solar Energy, Vol.158(2017), pp.1016-1025
- 7) 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(2007)、pp.695-703
- 8) 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：開閉装置用水素吸蔵合金アクチュエータの開発、北海道立工業技術センター研究報告、No.15(2018)、pp.38-44
- 9) 例えば、特許 3201944：希土類金属含有合金の製造システム(2015)
- 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(1993)、pp.38-42
- 11) 小野修一郎：金属の水素化反応を利用した熱機関およびヒートポンプの熱効率に関する考察、電気化学および工業物理化学、Vol.46-7(1978)、pp.388-394
- 12) 吉田篤正、仲恭宏、大北勤：水素吸蔵合金 LaNi_5 -水素系の熱物性および反応特性、機械学会論文集、Vol.55-515B(1990)、pp.278-282