伸縮密閉容器と形状記憶合金ばねから構成される
負の熱膨張をする装置の動作特性*山口 義 幸^{*1}Operating Characteristic of Negative Thermal Expansion Object Composed
of Telescopic Enclosure and Shape Memory Alloy SpringYoshiyuki YAMAGUCHI^{*2}^{*2} Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan University,
1-1 Minami-Osawa, Hachioji-shi, Tokyo, 192-0397 Japan

Driving device for heat transfer enhancement in a fluid layer heated from above was developed. The device was composed of a coil spring made of shape memory alloy and a closed vessel that is flexible in axial direction telescopically. It shrinks and sinks under water when it is hot, and it expands and floats on water when it is cold. Therefore, the device was named "Negative Thermal Expansion Capsular Object" shortly NTE capsule. Two types of the NTE capsule were proposed. One is the inner spring type and the other is outer spring type. Their performance was proved experimentally. Their operating characteristics were compared to each other and their potentialities in heat transfer enhancement were discussed. As a result, it was proven that the heat transfer enhancement effect could desire NTE capsule of the outside spring type.

Key Words: Natural Energy, Heat Transfer Enhancement, Free Convection, Negative Thermal Expansion, Top Heat Mode, Shape Memory Alloy, Telescopic Enclosure

1. まえがき

近年、夏季の都市部では大量の空調廃熱が外気を暖め、これによって外気と熱交換を行う空調機器の運転効率が低下して、ますます廃熱が増加する悪循環が生じることがあり問題となっている。この問題に対して、土壌の大きな熱容量を利用して、地下にヒートシンクを設ける方法が提案されている。地下熱交換器の使用による空調システムの省エネルギー効果の影響について、玄地ら^{(1), (2)}は数値解析に基づく詳細な議論を行い、地下熱交換システムを使用することによるエネルギー消費の縮小は、設備の構築コストを考慮しても深い地下に冷媒を送り込むことによるエネルギー消費の増加を上回ると結論した。

ところで、負の熱膨張を行う物質が存在するならば、トップヒートモードで作動する伝熱促進装置を作ることができる。しかしながら、加熱により可逆的に収縮するような物質で、工業的に利用可能な材料は見当たらない。そこで、そのような特性を持つ物体を作ることができれば、その物体を使用して、上部を加熱した流体層中で対流を起こし伝熱促進を行うことができると考えた。

本論文で議論する装置は、負の熱膨張を行うことを特徴とする。そこで、筆者はこの装置を Negative Thermal

Fig.1 Notional view of a thermal storage system using an underground heat exchanger

Expansion Capsular Object, 略して NTE カプセルと名づけた。本研究の NTE カプセルは、形状記憶合金(SMA)製のコイルばねおよび一方のみに伸縮する密閉容器から構成される。その重量を適切に調節して、水槽に投入すると、この装置は高温では収縮し沈み、低温では膨張して水面に浮かぶ。水槽の上部が熱せられ、低部が冷却されている場合、NTE カプセルは浮上と沈降を交互に繰り返し、伝熱を促進する。したがって、NTE カプセルを用いてトップヒートモードで伝熱促進を行う装置を構築することができる。図1は、NTE カプセルの適用例の概要である。

* 原稿受付 2001年6月7日。

^{*1} 東京都立大学大学院工学研究科(〒192-0397 八王子市南大沢1-1)。

E-mail: yoshi@ecomp.metro-u.ac.jp

なお、これまでに片岡ら⁽³⁾は、シリンダーピストンで密閉容器を構成して、シリンダ内の空気を SMA コイルばねで圧縮する仕組みの装置を複数個用いて、上部から加熱される流体層に対流を起こして、伝熱を促進することに成功している。本研究では、密閉容器を一方向のみに伸縮する機構を設けたベローズで構成し、装置内の空気圧と、容器の伸びの関係を調べたほか、装置単体での動作に注目して、その動作特性について実験を行っている点が、片岡らの研究と異なる。

本論文では、タイプの異なる 2 つの NTE カプセルについて述べ、それらの動作特性および伝熱促進効果を比較検討する。

おもな記号

A	密閉容器内部の最大断面積
A_b	密閉容器内部の有効断面積
dl	密閉容器の伸び
F_b	蓋に作用する全圧力
F_s	ばねの力
H	水槽の深さ
k	ばね定数
L	密閉容器の長さ
L_f	ばねが自由長となる密閉容器の長さ
m	密閉容器内の空気の質量
p_b	密閉容器内の圧力
Q	ヒータ発熱量
Q_L	水槽下部への伝熱量
T_b	密閉容器内の温度
z	位置 (深さ)
δ	連結棒の張出し長さ、または SMA ばねの変位
ρ_{w0}	流体の密度

2. NTE カプセルの概要

NTE カプセルの概要を図 2 に示す。実際に製作した装置では、ベローズ②は非常に多数の山と谷およびコントロールリング⑤を持っている。また、コントロールリングは、ほとんど互いに接触した状態で使用される。しかし、NTE カプセルの構造を理解し易くするために、図 2 は単純化して描かれている。図 2 (a) は、SMA ばねを密閉容器の内側に設置するタイプで、以下、Type I と呼ぶ。また、図 2 (b) は、SMA ばねを密閉容器の外側に設置するタイプで、以下、Type II と呼ぶ。Type I の NTE カプセルでは、ばねは引っ張りばねとして作用し、Type II では、圧縮ばねとして作用する。

Type II の NTE カプセルは、ばねと周囲流体が直接接触して熱交換を行うので、ばねの温度応答が速くなり、NTE カプセルが水面と底面の間を往復する周期が短縮さ

(a) NTE Capsule of which SMA spring is set Inside of the bellows (Type I)

(b) NTE Capsule of which SMA spring is set Inside of the bellows (Type II)

① SMA spring	⑥ Tying rods
② Rubber bellows	⑦ Guid flanges
③ Top lid	⑧ Tail flanges
④ Bottom lid	⑨ Valve
⑤ Control rings	

Fig.2 Schematic diagram of NTE capsules

れて、Type I の NTE カプセルよりも伝熱促進効果が向上することが期待される。

NTE カプセルの密閉容器の胴体部には、K-1773 型ベローズを使用した。市販品のベローズはネオプレンゴムで作られているが、ネオプレンゴムは僅かながらガスを透過するため、本研究では、ガスの透過係数が小さくタイヤチューブなどに用いられるブチルゴムをベローズの材料に用いた。K-1773 型ベローズの形状は、内径 35 mm、外径 48 mm、両端のグリッパーマージンを除いた蛇腹部の最小長さ 100 mm、ゴムの厚さ 0.8 mm で、山数は 49 である。

コイルばね①は Ti-Ni 形状記憶合金製で、ばねの形状は Type I と Type II で若干異なる。これは、同一のベローズを用いて必要な浮力と密度変化を得よう NTE カプセルを設計した結果である。Type I のばねは、素線径 4 mm、コイル径 24 mm、有効巻き数 6 巻きおよび自由長でのピッチ 5.5 mm で、Type II のばねは、素線径 3 mm、コイル径 16.5 mm、有効巻き数 10 巻きおよび自由長でのピッチ 7 mm である。SMA コイルばねは、形状記憶効果が現われる温度より低温では柔軟で変形が容易である一方、それより高温では非常に硬いばねである。

田中ら⁽⁴⁾は、SMA に関する解説書を著し、SMA ばねとバイアスばねから構成される伸張メカニズムの設計手法について述べている。この研究の NTE カプセルは、

バイアスばねとして空気ばねを使用した伸張メカニズムと見なすことができ、本研究の NTE カプセルは田中らの方法に基づいて設計された。

図 3 は Type I の NTE カプセルにおける密閉容器の長さ L と蓋に作用する全圧力 F_b の関係を示す。この図で、直線 ① および ①' は SMA コイルばねが容器を圧縮する力 F_s を、曲線 ② および ②' は容器中の空気が外部の水との圧力差によって蓋に及ぼす全圧力 F_b を示す。Type II では異なるばねを使用するので、 L および F_b 、 F_s の値は異なるが、設計の手順は同じである。

本研究では、以下の条件の元で、NTE カプセルを設計した。

- (1) 水槽の深さは、 $H = 1 \text{ m}$ とする。
- (2) 水槽の上部 ($z = 0 \text{ m}$) は高温で、その温度は $T = 50^\circ\text{C}$ とする。
- (3) 水槽の底部 ($z = 1 \text{ m}$) は低温で、その温度は $T = 20^\circ\text{C}$ とする。

図 3 中の直線 ① は、低温 ($T = 20^\circ\text{C}$) での SMA コイルばねの張力を示し、直線 ①' は、高温 ($T = 50^\circ\text{C}$) での SMA コイルばねの張力を示す。また、図 3 中の曲線 ② は、水槽の上部 ($z = 0 \text{ m}$, $T = 50^\circ\text{C}$) における蓋に作用する全圧力を、曲線 ②' は、水槽の底部 ($z = 1 \text{ m}$, $T = 20^\circ\text{C}$) における蓋に作用する全圧力を示す。

直線 ① および ①' は次式で記述される。

$$F_s = k(L - L_f) \quad (1)$$

ここで、 L_f は密閉容器の自由長で、Type I の設計値は $L_f = 175 \text{ mm}$ (Type II では 160 mm) である。また、 k はばね定数である。文献(4)によると Ti-Ni 合金ばねの場合、直線 ① のばね定数は $k = k_h = 9.07 \text{ kN/m}$ 、直線 ①' のばね定数は $k = k_c = 2.89 \text{ kN/m}$ と見積もられる (Type II では $k_h = 5.40 \text{ kN/m}$, $k_c = 1.80 \text{ kN/m}$)。一方、曲線 ② および ②' は次式で記述される。

$$F_b = \left\{ \frac{mRT_b}{A_b L} - (\rho_w g z + p_a) \right\} A \quad (2)$$

ベローズ K-1773 の形状から、最大断面積は $A = 196.3 \text{ cm}^2$ で、有効断面積は $A_b = 145.1 \text{ cm}^2$ である。この状況で NTE カプセルが正常に作動するように密閉容器内の圧力を考慮して、密閉容器中の空気量は $m = 0.475 \text{ g}$ (Type II では 0.344 g) として計算を行った。また、曲線 ② に対する深さ z および温度 T は $z = 0 \text{ m}$ および $T = T_h = 323 \text{ K}$ で、曲線 ②' に対しては $z = H = 1 \text{ m}$ および $T = T_c = 293 \text{ K}$ である。

NTE カプセルの動作は、図 3 に従って次のように説明される。初めに、低温に維持された NTE カプセルは、水に浮かぶ。この状態は図 3 の B' 点に相当する。B' 点は直線 ① と曲線 ②' の交点である。しばらくして、コイルばねが高温になると、SMA コイルばねの張力は、直線 ①

Fig.3 Full pressure of the lid as a function of length of the vessel

から直線 ①' に推移する。このとき、NTE カプセルの状態は図 3 の A 点へ移動する。A 点における NTE カプセルの有効密度が周囲の水の密度より大きければ、NTE カプセルは水に沈み、NTE カプセルの状態は A' 点へ移動する。その後しばらくして、コイルばねが再び低温になると、NTE カプセルの状態は B へ移動する。B における NTE カプセルの有効密度が周囲の水の密度より小さければ、NTE カプセルは水面へ上昇し、NTE カプセルの状態は再び B' に戻る。このようにして、サイクル B'-A-A'-B-B'-... が繰り返され、NTE カプセルは浮上と沈下を繰り返す。

NTE カプセルの仕組みは単純であるが、この研究に類似した研究報告はほとんど見られない。この理由の一つに、軸の方角へのみ伸縮する密閉容器を構築することの困難さが挙げられる。密閉容器をシリンダおよびピストンから構成すると、摺動部からのガスの漏出を完全に抑えることが難しく、非常に長期間の使用を前提とする地下熱交換システムへの適用は難しいと思われる。一方、風船のように柔軟な容器を用いると、ガスの漏出を完全に抑えることは可能だが、座屈や半径方向への膨張が問題になる。本研究ではゴムベローズとコントロールリングおよび連結棒から密閉容器を構成することでこの問題を解決した。コントロールリングと連結棒は、ベローズの座屈および半径方向への膨張を抑える役目をする。コントロールリングの外径は 64 mm で、3 本の連結棒を使用した。装置の質量は Type I, Type II 共におよそ 500 g で、組み立てて密閉容器に空気を充填した後に、重りを加えて装置の見かけ密度を未調整した。

実験に先立って、形状記憶処理をした SMA コイルばねを 5°C の水中で塑性変形が生じるまで SMA コイルばねを引っ張り、その後温度を徐々に上昇させながらコイルばねの形状を観察した。観察の結果、Type I, Type II

のいずれのばねも 25 °C で形状を回復し始め、50 °C で完全にその形状を回復した。また、これらのばねを引っ張りばねとして、ばね定数を測定したところ、50 °C の高温および 25 °C の低温でそれぞれ設計値とほぼ等しい値を得た。ただし、Type II のばねでは低温時に変形量が 4 mm を超えると塑性変形が始まり、ばねの力は設計値より弱くなった。このことは、高温時と低温時で SMA ばねの力の差が大きくなることを示し、NTE カプセルの動作にとっては有利に働く。

3. 密閉容器内圧力の測定

3・1 実験装置および方法 密閉容器内の圧力測定に用いた実験装置の概要を図 4 に示す。NTE カプセルの上蓋には直径 1 mm の孔が 2 つ設けられた。一つの孔には直径 1 mm のステンレスチューブを挿入して圧力計へと導いた。また、もう一つの孔には C-C 熱電対を挿入し内部の温度を計測した。NTE カプセルは恒温水槽中で水平に保持し、水の深さは NTE カプセルがちょうど漬かる程度とした。初期擾乱の影響を排除するため、Type I の NTE カプセルでは、容器の温度を一旦 57 °C まで上げた後、水槽の温度コントローラを 32 °C に設定して 1 時間半放置してから測定を開始した。圧力の測定は、水槽の温度を 3 °C ずつ上げながら 56 °C まで行い、続いて 3 °C ずつ下げながら 32 °C に戻るまで行った。各測定の時間間隔は 30 分以上で、容器中の空気と水槽の水の温度は全ての測定で互いに一致していた。

Type II の NTE カプセルについても同様に圧力および密閉容器の長さの変化を測定したが、実験の最高温度を 65 °C、最低温度を 20 °C と、Type I の場合より広く取った。これは製作した NTE カプセルが浮上・沈降動作を行うために必要な密度変化を得る温度差が Type I よりも Type II の方が大きいためである。その理由については実験結果の項で説明する。

3・2 結果および考察 Type I の NTE カプセルにおける温度変化に対する密閉容器内の圧力 p および連結棒の張出し長さ δ の測定結果を図 5 に示す。中実の丸は圧力 p を、白抜き丸は連結棒の張出し長さ δ を表す。図 5 にはエラーバーを併せて示した。本実験における圧力 p の測定精度は ± 2 kPa で、連結棒の張出し長さ δ の測定精度は ± 0.5 mm である。図中の実線は温度上昇中の結果を、破線は温度降下中の結果を示す。本実験における δ の最大値は 27 mm であった。連結棒の張出し長さ δ は、図 2 に描かれたように、容器が圧縮されると大きくなり、容器が膨張すると小さくなる。すなわち、小さな δ は密閉容器の長さ L が大きいことを意味し、大きな δ は L が小さいことを意味する。

Fig.4 Experimental setup for pressure measurements of the vessel of the NTE capsule

Fig.5 Pressure in the vessel and overhang of tying rods for the NTE capsule of type I

Fig.6 Pressure in the vessel and overhang of tying rods for the NTE capsule of type II

図 5 では、温度を上げながら測定した値（実線）と温度を下げながら測定した値（破線）に差が見られる。特に δ - T ヒステリシスははっきりと見られる一方、 p - T ヒステリシスはそれほど明らかではない。

この δ - T ヒステリシスの原因は、コントロールリングと連結棒の間の摩擦にあると考えられる。なぜなら、圧力測定は恒温水槽の温度設定を変更してから 30 分以

上経過した後に密閉容器中の空気と水槽の水の温度が一致した状態でっており、各測定は平衡状態に近い条件で行われたとみなしてよい。従って、形状記憶合金の機械的性質、すなわち SMA ばねのばね定数が昇温時と降温時で大きく異なるとは考えられない。一方、密閉容器を構成するベローズはブチルゴム製で柔らかく、密閉容器の変形に大きな抵抗を示すとは考えられない。

Type II の NTE カプセルにおける温度変化に対する密閉容器内の圧力 p および、SMA ばねの変形量 δ の測定結果を図 6 に示す。ばねの変形量は NTE カプセルの初期状態（低温で水面に浮かぶ）を $\delta = 0$ として、ばねの伸びを表した。すなわち δ は、Type I の実験と同様に、容器が圧縮されると大きくなり、容器が膨張すると小さくなる。

図 6 と図 5 を比較すると、どちらも高温時と低温時の δ の差がおよそ 7 mm、 p の差がおよそ 35 kPa とほぼ等しい。このことは、Type I と Type II では、SMA ばねが異なり、ばね定数の設計値が異なるのに変位と圧力変動の関係が等しくなるのは、Type II のばねは低温時に塑性変形を起こして高温時と低温時でばねの力の差が大きくなったことが原因と考えられる。

一方、同じ変位量を得るのに必要な温度差が Type I と Type II で異なるのは、それぞれのばねの特性と考えている。Ti-Ni 合金の形状記憶効果はオーステナイト変態によって生じるが、このオーステナイト化の開始および終了温度は SMA の形状記憶処理時の熱処理によって変化する⁽⁶⁾。Type I と Type II では素線径、コイル径およびピッチが異なるので、形状記憶処理時の加熱および冷却速度が異なる。また、使用した材料も未熱処理時のオーステナイト化終了温度が Type I と Type II では若干異なっており、全く同一ではない。

4. NTE カプセルの動作観察

4・1 実験装置および方法 トップヒートモードの水槽を用いた NTE カプセルの実験の装置概要を図 7 に示す。防水されたカートリッジヒーター 3 本を使用して水を加熱した。水温の測定には C-C 熱電対を使用した。熱電対を 10 cm 間隔でガイド棒に取り付けて水槽に差し込み、水槽中の温度分布を測定した。水槽の内径は 150 mm で、水槽の高さは 1 m である。ただし、実験はすべて水層の深さを 95 cm として行った。実験開始前に水槽は 2 時間以上放置され、実験開始直前の 30 分間に温度変化はほとんど見られなかった。また、水槽の水はヒーターによって一定の発熱量で加熱されている他には特別な温度制御はしていない。

トップヒートモードの水槽を用いた NTE カプセルの動作観察実験の写真を図 8 に示す。写真は Type I の

Fig.7 Experimental setup for travel of the NTE capsule in a top heated water tank

The NTE capsule repeated broaching and sinking alternately.

Fig.8 Photos of the experiment for the NTE capsule in the top heated water tank

NTE カプセルを用い、ヒーターの深さを 30 cm とした場合の結果で、上部および底部の水温はそれぞれ、65 °C および 28 °C である。NTE カプセルは、浮上と沈降を繰り返す、その周期は 20~30 分であった。

4・2 動作観察 (Type I の場合) 観察された NTE カプセルの鉛直方向への移動の例を図 9 に示す。図には、実験を録画したビデオからベローズの中心の位置を 15 秒ごとに読み取った値が示されている。図 9 はヒーターの深さが 55 cm 場合の結果で、上部および底部の水温はそれぞれ、58 °C および 37 °C である。図 9 に見られるように、NTE カプセルは水面から落下して、水槽の途中でしばらくの間止まって、その後水槽の底までゆっくり降下する。この水槽の途中で一旦止まる動作は、NTE カプセルが浮上する時にも観察される。浮上および

Fig.9 Experimental travel along the vertical direction of the NTE capsule of type I

Fig.10 Temperature profiles of the water tank of the experiment for the NTE capsule of type I

沈降の時間はそれぞれ約 3 分で、浮上および沈降の間隔は約 20 分である。このような NTE カプセルの複雑な動きはヒータの位置や加熱量を変えて行った他の実験でも観察された。

図 10 は、図 9 の動作観察中に測定した水槽の温度分布である。実験開始時($t = 0$ min)には水の自然対流のために、水槽中の温度はヒータより上部では高温に、ヒータより下部では低温に保たれている。図 10 の $t = 0$ min と $t = 30$ min の比較から、 $z = 0.5$ m の温度に変化が見られる。これは NTE カプセルによる攪拌効果を示している。しかしながら、温度分布は全体としてそれほど変わらない。

図 9 と図 10 の比較から、NTE カプセルのバウンドは水温が急速に変わる場所で現われることが分かる。NTE カプセルはその周囲の水の密度とそれ自身の有効密度のわずかな違いから推進力を得る。したがって、NTE カプセルが液面から降下して低温層に突入すると水の密度が大きいので、上向きの力を受けてバウンドする動きが見られる。

Fig.11 Experimental travel along the vertical direction of the NTE capsule of type II

Fig.12 Temperature profiles of the water tank of the experiment for the NTE capsule of type II

4・3 動作観察 (Type II の場合) 観察された NTE カプセルの鉛直方向への移動の例を図 11 に示す。図には、実験を録画したビデオからペローズの中心の位置を 1/4 秒ごとに読み取った値が示されている。図 11 はヒータの深さが 55 cm 場合の結果で、実験開始直後の上部および底部の水温はそれぞれ、58.6 °C および 14.0 °C であった。図 11 に見られるように、NTE カプセルは水面から水槽の底までゆっくり降下し、底面到達後すぐさま浮上を開始して、水面までゆっくり上昇する。実験開始直後に NTE カプセルが一旦緩やかに浮上しているのは、室温 (約 15 °C) で投入された密閉容器内の空気が水槽上部の高温の水で温められて膨張して浮力が増したためである。ただし、5 秒後には SMA ばねも充分暖まって密閉容器を圧縮する力が増し、NTE カプセルは沈降を開始している。浮上および沈降の時間はそれぞれ約 10 秒程度である。図 11 の $t = 33$ sec 付近で NTE カプセルの位置が最も高くなっているが、ここでは上昇の際の慣性で NTE カプセルの頭部が水面から大きく飛び出している。NTE カプセルはその後、15 秒程度素面に留まり、ゆっくりと沈降を開始する。以後同様にして、

NTE カプセルは水面と水槽の底の間で沈降と浮上を繰り返した。

図 12 は、図 11 の動作観察中に測定した水槽の温度分布である。実験開始時($t = 0$ min)には水の自然対流のために、水槽中の温度はヒーターより上部では高温に、ヒーターより下部では低温に保たれている。図 12 の $t = 0$ min と $t = 4$ min では、温度分布に大きな変化が見られる。一方、 $t = 4$ min と $t = 8$ min の温度分布に大きな変化は見られない。このように実験開始直後に温度分布が大きく変化したことは Type II の NTE カプセルによる攪拌効果があることを示している。

5. 伝熱促進効果の検討

5・1 熱輸送量の計算 測定した温度分布の変化から伝熱促進効果を見積もる。ヒータで発生した熱 Q は水槽内の自然対流により、(1)水槽上部の保有エンタルピを増加させ、(2)水槽上部側壁から空気へ放熱および、(3)上部水面から空気へ放熱され、残りは水槽下部へ伝わり、空気および冷却水へ放熱される。そこで、図 10 および図 12 に破線で示した $z = 0.55$ m より上側の水と下側の水がそれぞれ保有するエンタルピを H 、ヒータ加熱量を Q 、水槽側壁の熱通過率を K_s 、水面から上方の空気への熱通過率を K_T とすると、水槽下部伝わる熱量 Q_L は熱バランスより、

$$Q_L = Q - \frac{dH}{dt} - \int_{\text{Upper Layer}} K_s (T - T_\infty) ds - K_T (T - T_\infty) A_T \quad (3)$$

と表される。ここに右辺第 3 項は水槽上部の側壁での積分を表し、 T_∞ は実験室の室温を、 A_T は水槽の断面積を表す。保有エンタルピおよび放熱量の計算は、同一水平面上の温度は一樣と仮定し、各温度測定点の間の温度を

線形補完して求める。

水槽に NTE カプセルを投入せずに一定加熱した場合の温度分布の時間変化を測定し、水槽下部の熱移動は伝導のみによると仮定して解析した結果、 $K_s = 4.0$ W/m²K、 $K_T = 66$ W/m²K が得られた。なお、図 9、図 10 の実験でのヒータ加熱量は $Q = 132$ W、図 11、図 12 の実験では $Q = 268$ W であった。

5・2 結果および考察 図 13 は図 9 に示した Type I の NTE カプセルの動作観察中に測定した温度分布から計算した水槽下方への伝熱量 Q_L である。横軸には経過時間とあわせて、NTE カプセルの沈降・浮上サイクル数を示した。図 13 で $t = 0$ min の点のみ中実の丸で示されている。 $t = 0$ min の測定値は NTE カプセルを投入する直前の値であり、NTE カプセル投入後の値はこれと区別するため白抜き丸で示した。NTE カプセルは間欠的に動作し、温度測定の間隔も 15 分と粗いため、NTE カプセルの動作と温度測定のタイミングによって、得られる Q_L の値にはばらつきが見られるが、一定時間の平均値には意味があると考えられる。NTE カプセル投入以後 120 分までの Q_L の平均値は 12 W と計算された。ただし、 Q_L は、ばらつきが大きく、標準偏差は $\sigma_n(Q_L) = 21$ W である。

装置を構成する部品の質量と材質から見積もった NTE カプセルの熱容量は 548 J/K で、NTE カプセルの動作周期 24 分、水槽上下の温度差 20.2 °C から装置の顕熱が輸送する熱量は 7.7 W と見積もられる。 $t = 0$ min の伝熱量に装置の顕熱による熱輸送を加えた値はおよそ 25 W で、この値は上で求めた Q_L の誤差の範囲に入るが、伝熱量としては極めて小さい。ちなみに、NTE カプセルの動作サイクルは図 3 に示したように冷凍サイクルになるが、密閉容器内の空気が高温で吸熱し、低温で放熱する熱量はいずれも 1 サイクル当たり 10 J 未満と小さく、NTE カ

Fig.13 Heat transfer quantity to the lower part of the water tank using the inner spring type NTE capsule

Fig.14 Heat transfer quantity to the lower part of the water tank using the outer spring type NTE capsule

プセルの顕熱による伝熱に比べ無視できる。

以上から、SMA ばねを密閉容器の内側に配置した Type I の NTE カプセルでは、伝熱促進効果が得られないことが分かる。このタイプの NTE カプセルは、上部が加熱される水槽中で沈降・浮上を繰り返すものの、その運動の周期が長く、100 分経過時点でも NTE カプセルの往復回数は僅か 4 回である。これは、周囲流体と SMA ばねの間に熱伝導率の低い空気層が存在することが原因と考えられる。

図 14 は図 13 と同様にして求めた Type II の NTE カプセルの動作観察中に測定した温度分布から計算した水槽下方への伝熱量 Q_L である。NTE カプセル投入以後 4～8 分の Q_L の平均値は 342 W と計算された。 $t = 2$ min の Q_L は 0～2 分の間で温度分布が急激に変化したため、非常に大きな値を示しているが、NTE カプセルが数回往復すれば水槽内の温度分布の変動は小さくなって行くと考えられる。このため、 $t = 2$ min の値は Q_L の平均値の計算から除外した。なお、4～8 分の Q_L の標準偏差は $\sigma_n(Q_L) = 65$ W である。

装置を構成する部品の質量と材質から見積もった NTE カプセルの熱容量は 566 J/K で、NTE カプセルの動作周期 45 秒、水槽上下の温度差 37.7 °C から装置の顕熱が輸送する熱量は 474 W と見積もられる。上で求めた Q_L の平均値と $t = 0$ min の Q_L との差をとると、熱輸送の増加は、188 W と計算される。以上から SMA ばねを密閉容器の外側に配置した Type II の NTE カプセルには伝熱促進効果があることが示された。

ただし、この熱輸送の増加は誤差を考慮しても、装置の顕熱から期待される熱輸送量に及ばない。これは、Type II の NTE カプセルでは SMA ばねが直接周囲流体に接していて、SMA ばねの温度が所定の条件を満たすと直ちに NTE カプセルが浮上・沈降を開始するため、装置の熱容量の大部分を占めるコントロールリングやガイドフランジの温度の追従が不十分なまま動作を行うためと考えられる。

また、SMA ばねの温度応答が速すぎると、NTE カプセルの移動中にも、ばねの温度が直ちに周囲流体と等しくなり、動時に NTE カプセルの見かけの密度も変化するので、水槽の中間で、装置の見かけの密度と周囲流体の密度が等しくなる位置で NTE カプセルが停止してしまうことが予想される。事実、Type II の NTE カプセルでは、水槽の温度設定の微妙な違いによって、NTE カプセルが水槽の底に到達せずに途中で沈降を停止して浮上してしまう動作や、沈降・浮上の振幅が次第に減衰して水槽の途中で静止してしまう動作が観察されている。

本報告で提案する NTE カプセルを用いて、タンク内の液体の攪拌や配管内の熱媒体の輸送を行うためには、直径が数 mm 程度の小型の装置を多数流体に投入するこ

とが考えられる。これまでに、赤木ら⁽⁶⁾は負の熱膨張をする微小粒子を用いた逆自然対流の創製について検討を行っている。また、片岡ら⁽³⁾は既に数 cm サイズの本研究と同様の機能を持つ装置の開発に成功している。装置を小型化すると温度応答が速くなるので、小型化の際には、本研究では伝熱促進効果を確認できなかった Type I の NTE カプセルも検討の価値があると考えている。

6. まとめ

負の熱膨張をする装置(NTE カプセル)を考案し、実験によりその動作を確認した。NTE カプセルは、形状記憶合金(SMA)コイルばねおよび軸方向にのみ伸縮する密閉容器から構成され、この密閉容器は山数の多いゴムベローズにコントロールリングと連結棒を組み合わせで構成された。本研究では、SMA ばねを密閉容器の内側に設置するタイプと外側に設置するタイプの 2 種類の NTE カプセル (直径 64 mm, 全長およそ 300 mm, 質量約 500 g) について検討し、以下の結論を得た。

- (1) NTE カプセルは、トップヒートモードの水中で交互に浮上・沈降を繰り返した。
- (2) しかしながら NTE カプセルは周囲流体との密度差で移動するので、その動作は水槽の温度 (密度) 分布に影響される。
- (3) 水槽の温度分布から下方への熱輸送を求めた結果、SMA ばねを密閉容器の内側に設置するタイプの NTE カプセルでは、伝熱促進効果は見られなかった。一方、ばねを外側に設置するタイプの NTE カプセルでは伝熱促進が示された。

謝 辞

本研究を遂行するに当たって、(株)古河テクノマテリアルから SMA 素材を提供頂いた。また、関東特殊製鋼(株)には SMA 素線の加工に協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) 玄地・他 4 名, エネルギー・資源, 18-5 (1997), 491-497.
- (2) 玄地・他 3 名, エネルギー・資源, 20-6 (1999), 562-569.
- (3) 片岡・他 5 名, 機講論, No.00-1 (2000), 717-718.
- (4) 田中・他 2 名, 形状記憶合金の機械的性質, (1993), 195-199, 養賢堂.
- (5) 田中・他 2 名, 形状記憶合金の機械的性質, (1993), 44-56, 養賢堂.
- (6) 赤木・他 1 名, 第 38 回日本伝熱シンポジウム, (2001), 521-522.