形状記憶合金の基礎と応用*

西 田 稔¹ 山 内 清² 大 方 一 三³

Fundamental Aspects and Recent Applications of Shape Memory Alloy

by Minoru NISHIDA¹, Kiyoshi YAMAUCHI² and Ichizo OHKATA³

1. Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, Kurokami, Kumamoto 860-8555
2. Tokin Corporation, Kohriyama, Taihaku, Sendai 982-8510
3. Piolax Medical Device, Kariba, Hodogaya, Yokohama 240-0025

The shape memory alloys are fascinating materials with great potential for application as new functional materials. Fundamental aspects of the thermoelastic martensitic transformation, with which the shape memory effect and the superplasticity are associated, are briefly summarized. The mechanisms of the above two properties are also described. Among several tens of shape memory alloys, the Ti-Ni alloy is considered to be the best for practical applications because of its excellence in mechanical properties, corrosion resistance, etc. In the latter half of the present paper, recent applications of the Ti-Ni alloy in various fields are introduced.

KEY WORDS : Shape Memory Alloy, Thermoelastic Martensitic Transformation, Superelasticity

1. はじめに

変形後の加熱や負荷応力の除荷により瞬時に数%の塑性ひずみを回復する特性を持つ形状記憶合金は、1980年代初頭の新素材ブーム以来、機能性金属材料の代表として注目され、携帯電話機のアンテナ、眼鏡フレーム等の身近なものからエレクトロニクス、メカトロニクス、医療器具などの幅広い分野にわたり応用研究が進められている。また近年、材料自身が周辺環境を認識、判断し、自ら特性を変えることのできる材料と定義されているスマートマテリアルあるいはインテリジェントマテリアルの有力な候補ともなっている。本稿では、形状記憶合金に特有な構造相転移である熱弾性マルテンサイト変態の特徴と形状記憶効果、超弾性の機構を概観し、唯一の実用材料であるTi-Ni合金の最近の応用事例を機能および分野別に紹介する。マルテンサイト変態に関するさらに詳細な議論および後掲の表1に示す従来の応用事例については引用文献^{1)~3)}を参照されたい。

2. 形状記憶合金の特徴

2・1 熱弾性マルテンサイト変態

マルテンサイト変態は固体内で起こる無拡散型の構造相転移であり、温度を下げることにより高温(母)相から低温(マルテンサイト)相へ格子が擬せん断変形して結晶構造が変化する。熱力学的考察により、マルテンサイト変態は、形状記憶合金で起こる熱弾性型と炭素鋼や合金鋼の焼き入れ硬化に代表される非熱弾性型に分類される。一般に体積: V 、表面積: S のマルテンサイト

晶の核生成に伴う系の全自由エネルギー変化 ΔG は次式で近似される。

$$\Delta G = V\Delta G_c + S\sigma + V(A+B) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで ΔG_c : 単位体積当たりの化学的自由エネルギー変化, σ : 単位面積当たりの界面エネルギー, A : 単位体積当たりの弾性ひずみエネルギー, B : 単位体積当たりの塑性ひずみエネルギーである。 $V\Delta G_c$ は母相とマルテンサイト相が平衡する温度以下では負の値を取り、変態の駆動力に他ならない。一方、 $S\sigma$, $V(A+B)$ は変態を妨げる因子として働く。したがって、変態は自由エネルギーの定義より $|V\Delta G_c| > |S\sigma + V(A+B)|$, すなわち、 $\Delta G < 0$ となる温度まで過冷されたときに開始し、この温度が M_s (マルテンサイト変態開始)温度である。同様に加熱時にマルテンサイト相から母相への逆変態が開始する温度が A_s (逆変態開始)温度となる。

形状記憶合金ではマルテンサイト相と母相は可動性を保持した整合界面であり、変態に伴う形状変化が小さいため式(1)の σ および B は無視できるほど小さい。したがって、全自由エネルギー変化は

$$\Delta G = V\Delta G_c + VA \quad \dots\dots\dots (2)$$

で表され、熱的な項と弾性的な項だけで記述できる。このことが熱弾性型と呼ばれる山縁である。非熱弾性型変態では母相とは非整合界面であり、変態に伴う形状変化が大きいため、核生成はすべてのエネルギー項を含んだ式(1)で記述され、変態にはより大きな駆動力、すなわち、過冷度が必要になる。したがって、変態の温度ヒステリシス($A_s - M_s$)は合金鋼等では400℃以上にも達するが、形状記憶合金では20℃前後と小さい。

また、上述したようにマルテンサイト変態は、格子の擬せん断変形によって起こるため、 M_s 温度以上の特定の温度域で母相に外力を加えることによって誘起され、生成相は応力誘起マルテンサイトと呼ばれる。

* 1999年8月23日受付 9月17日受理

1. 熊本大学教授 大学院自然科学研究科

2. (株)トーキン第一技術開発部 部長

3. (株)バイオラックスメディカルデバイス 取締役社長
〔寄者連絡先〕 FAX 096-342-3720 (熊本大・知能生産)

キーワード: 形状記憶合金, 熱弾性マルテンサイト変態, 超弾性

2・2 形状記憶効果と超弾性

図1は代表的な形状記憶合金であるTi-Ni合金の変態温度近傍での応力-ひずみ-回復曲線を示す。変形温度が冷却時のマルテンサイト変態終了温度 M_f 以下ではマルテンサイト結晶の変形が起こり、除荷後の A_f 以上への加熱によって矢印で示すように残留ひずみが回復する。 M_f から M_s の範囲ではマルテンサイト結晶の変形と残留母相の応力誘起マルテンサイト変態が起こり、この場合も、除荷後の A_f 以上への加熱によって残留ひずみが回復する。 M_s から A_s の間では変形はすべて応力誘起マルテンサイト相の生成によって担われるが、マルテンサイト相は除荷後も安定であり、この場合もまた、除荷後の A_f 以上への加熱によって残留ひずみが回復する。結果として、 M_f 以下から A_s の範囲では上述の温度区分によって変形様式の違いはあるが、 A_f 以上への加熱に伴い形状が回復する。これが形状記憶効果である。 A_s 点から A_f 点の間では、応力誘起したマルテンサイト相の一部が熱力学的に不安定なため除荷により逆変態しそれに伴い形状を回復する超弾性を示す。残りは安定なマルテンサイト相として残留するので、加熱により形状記憶効果が現れる。 A_f 点以上では除荷のみで形状は回復し完全な超弾性を示す。母相の降伏応力がマルテンサイト相の誘起応力を下回る温度(図1では20℃)にまで変形温度を上昇させると、すべり変形によって母相に不可逆欠陥が導入され形状回復が起こらなくなる。したがって形状記憶効果と超弾性は兄弟の関係にあり、同一の試料ではどちらが発現するかは変形温度によって決まる。実用に際しては所望の温度で形状記憶効果あるいは超弾性のいずれかが現れるように合金組成の調整および熱処理によって変態点を制御する。

形状記憶効果と超弾性の発現機構は図2によって説明される。一般に形状記憶合金の母相は(a)に示すように規則構造を持ち、擬せん断変形して結晶構造が変化したマルテンサイト相もそれを

図1 変態点近傍の種々の温度におけるTi-50.8 at % Ni合金の応力-ひずみ-回復曲線

M_s : マルテンサイト変態開始温度 = -40℃
 M_f : マルテンサイト変態終了温度 = -60℃
 A_s : 逆変態開始温度 = -20℃
 A_f : 逆変態終了温度 = -10℃

引き継いだ周期積層構造(b)となる。(a)の母相は冷却されると(b)のマルテンサイト相へ熱弾性的に変態し、構造変化に伴うひずみを打ち消すために双晶が発生する。外力が加わると双晶変形が起こり(c)のような変形を生じる。さらに図2では省略したがこれらの双晶から成る晶界面兄弟晶の界面も外力によって移動(食い合い)を起こす。これを加熱すると逆変態により結晶構造が(a)に戻り、それに伴い形状も回復する。超弾性は(a), (c)間の点線で示す過程を経て起こる。応力誘起変態が起こり、かつ、マルテンサイトが安定に存在しない温度範囲で母相(a)を変形すると応力誘起マルテンサイト相(c)が生成し、除荷に伴い逆変態が起こり母相(a)へ戻ることで形状が回復する。超弾性は図1に見られるように非線形の弾性であり、厳密には変態擬弾性(Transformation Pseudoelasticity)と定義されている。ここで注目すべきことは母相およびマルテンサイト相とも規則構造を持つことから、変態・逆変態に伴う結晶学的な可逆性が自動的に保証されている。言い換えれば、個々の原子自身が移動しさらには帰るべき位置を憶えていることである。後述するTi-Ni合金では、母相はCsCl型規則構造、マルテンサイト相は単位胞を単斜晶とする2H周期積層構造となる。

上述した形状記憶効果は非可逆的な現象で一方性と呼ばれる。すなわち、母相状態で記憶処理された素子は、 A_s 点以下での変形が A_f 点以上への加熱で元の形状に戻るのみで、再冷却しても自発的な形状変化は起こさない。この一方性はパイプ継手等の締結器具等には適している。しかし、感温デバイス部品等には温度サイクルに可逆的な形状変化する二方向性素子が必要となる。二方向性の付与は、合金自体を二方向性にする方法およびバイアスばね等と組み合わせる方法がある。前者は本来均一であるべき母相中に転位や析出物⁴⁾に由来する内部応力場を導入し、冷却時のマルテンサイト変態を制御することを原理としている。これにより図2の(a), (c)間の自発的な形状変化が一点鎖線で示す加熱・冷却のみで起こる。この合金は単独で使えるため素子の小型化、軽量化が可能であるが、冷却時の発生力が小さく、マルテンサイト相が外力によって容易に変形するなどの欠点があり、用途はビデオカメラ放熱孔の防塵カバーなど多くの仕事量を必要としない部品に限定されている。したがって、感温デバイスとして利用されている二方向素子は後述するようにバイアスばねとの組み合わせが主流となっている。

図2 形状記憶合金の変態および変形に伴う原子配列と機能を示す模式図

形状(一方性)記憶効果は実線で結んだ(a)→(b)→(c)→(a)、超弾性は応力負荷および除荷により点線で結んだ(a)→(c)で示される。試料内に内部応力の発生源がある場合、加熱・冷却のみで一点鎖線で結んだ(a)→(c)の二方向形状記憶効果が発現する。

表1 形状記憶合金の応用商品化年表

年	'80	'85	'90	'95
分野				
家電	電子レンジ コーヒーメーカー エアコン VTRカバール オオシュレット	炊飯器	アヒス ゆで卵	ヘルマン
自動車		フォグランプ ラジエーターバルブ 蒸気トラップ ファンクラッチ エンジンコントロール		
生活関連	オシチ 乾燥庫	火災報知器	シャワーバルブ 眼鏡フレーム	混合水栓 カメラシャッター
建築	ハウス換気口		軒下換気口 床下換気口	岩盤亀裂センサー 岩石破砕器 弾性波検層プローブ
エネルギー	ヒートエンジン			
産業機器	パイプ継手 ファスナー	コネクター	ロボット	マイクロマシン
衣料品		ズボン ズボン	ズボン ズボン	ズボン ズボン
医療	歯列矯正アーチワイヤー 静脈フィルター		ガイドワイヤー マイクロシリコン ズボン 人工歯根	能動鉗子 ズボン スリット

~~~~~ 超弾性利用

3. 形状記憶合金の応用

形状記憶効果や超弾性を示す合金は20種類以上に及ぶが、実際に供されているのは等原子比組成近傍のTi-49~51原子%Ni合金およびそれらを基本にCu, Nbなどを添加した多元系合金のみである。Ti-Ni合金は1963年に米国の海軍兵器研究所で艦船用構造材料の開発中に偶然に発見され、NASAおよびグッドイヤー・エアロスペース社において人工衛星に搭載するパラボラアンテナが試作されたことはよく知られている。その後、レイケム社によって軍用機の油圧配管継手として商品化され、現在は民機にも採用され多くの需要がある。

国内での応用開発は、Ti-Ni基本特許「NICKEL-BASE ALLOYS」(US, Pat. 3, 174, 851)および応用基本特許「熱エネルギーを機械エネルギーへ変換する装置」(実公昭49-309)が相次いで期限切れを迎えた1981年以降に本格化した。当時は、実用化のための基礎的なデータが不足していたこともあり、まず玩具に使われた。続いて、乾燥庫のシャッター、電子レンジのダンパ、エアコンの風向制御等の感温アクチュエータに広く採用された。合金の機能性で見ると、形状記憶効果を利用したものが先行し、超弾性は、歯列矯正用アーチワイヤーにわずかに使われていたにすぎなかったが、ブラワイヤおよび血管造影用カテーテルチューブのガイドワイヤへの応用で一気に広まった。これまでの商品化の経緯を表1の年表に示す。

3・1 形状記憶効果の応用

形状記憶効果には4つの利用法が考えられる。上述した航空機の油圧配管継手に代表される一方向性素子は、小型・軽量かつ信頼性の高い拘束力を提供する。また、形状回復時に発生する力は圧力源として利用することができる。バイアスばねと組み合わせた二方向素子はサーマルアクチュエータとして多くの家電生活関連製品に利用されている。さらに熱エネルギーを機械的エネルギーに変換する、いわゆる、熱エンジンの開発が継続して行われている⁵⁾。ここでは最近の代表的な応用・開発事例のいくつかを紹介する。

3・1・1 サーマルバルブ⁶⁾ 形状記憶合金の温度に対するセンサーとアクチュエータの両方の機能を最も有効に活かしている応用例は二方向素子を用いたサーマルバルブである。通常は液体や気体等の流体温度を感知するセンサーと、その流路を開閉するモータあるいはソレノイド等のアクチュエータを組み合わせ、これらを働かせるための電気エネルギーおよび回路が必要となる。このためシステムは多くの部品を必要とし複雑になる。一方、二方向素子を利用すると図3、4に示すように極めてシンプルな構成になる。近年の快適な居住空間への指向の高まりに伴い、サーマル(温水)バルブの需要は多くなっている。

図3に二方向素子を使用した浄水器の熱水切換弁の構造を示す。水道水は、浄水器の活性炭と中空糸膜によって悪臭や雑菌を除去

図3 浄水器熱水切換弁の構造
(a) 温水が流れ、浄水器への弁が閉じられた状態
(b) 冷水が浄水器へ導かれる正常状態

図4 混合水栓バルブの構造

することで浄化される。しかし、温水を浄水器に流すと活性炭が捕獲した臭気菌を飲料水に放出したり、ポリエチレン等の樹脂製中空糸膜が軟化して、濾過機能が低下する。一般家庭の蛇口は温水と冷水の混合水栓が多いため、誤って浄水器に温水を流す可能性があり、それを防止する手段が必要である。図3(a)は温水(35℃以上)が流れ形状記憶合金(SMA)ばねが形状回復によって伸び、バイアスばねを押し縮めることでサーマルバルブが作動し浄水器への水路を塞いだ状態、(b)は冷水が流れ(a)とは逆にバイアスばねが形状記憶合金ばねを押し縮め浄水器に導かれる正常状態を示している。

同様の応用例として浴室のシャワー等に取り付けられている混合水栓用温調バルブがある。現在市販されている多くの温調バルブにはワックスの熱膨張を利用した素子を取り付けられている。しかし、この素子は応答性が低く、作動するまでに熱水や冷水を一時的に流す欠点があった。一旦シャワーを止めた後、再びバルブを捻って身震いすることを少なからず経験するのはこのためである。最近開発された二方向素子を利用したバルブでは、形状記憶合金コイルばねが混合水の温度を絶えず検知して左右に動き、温度調節ノブで設定した温度を保つように、温水、冷水の流量をコントロールしている(図4)。

3・1・2 医療への応用 医療分野では、当初、脊椎湾曲症の矯正棒や接骨用のボーンプレート、ステーブル等、生体に埋め込んで体温あるいは外部加熱によって形状記憶効果を発現させる種々のインプラントが提案され、動物実験によってその有効性が検証されてきた。しかし、Niの生体への適合性・毒性等の問題が十分に解決されず、人体への適用は先送りとなっている。現在、インプラントとして採用されているのは、顎骨埋め込み型の人工歯根⁷⁾と後述する超弾性を利用した血管および胆管拡張用ステントのみである。

一方、診断・治療に用いられるディスプレイ医療器具は、一時的な生体との接触で済むために、前述の問題を考慮しなくてよい。さらに、高齢化・高福祉化時代の今日、患者の精神的・肉体的苦痛を和らげる低侵襲性医療技術の発達はめざましく、そのための診断および治療に必要な種々の新しい器具が続々と開発されている。その一つにTi-Ni合金パイプを用いた能動鉗子⁸⁾がある。

図5に示す腹腔鏡手術では、まず腹壁に約10mmの穴を開け、トラカール(套管針)を刺し、鉗子、腹腔鏡(内視鏡)などの手術器具を腹腔内に入れた後、腹腔鏡を見ながら遠隔操作で患部を処置する。この手術は開腹を必要とせず、患者の負担を小さくできるため大腸ガン、ヘルニア、虫垂炎、腎ガン、十二指腸潰瘍などにも適用されつつある。臓器(悪性腫瘍)の摘出は、鉗子先端部に取り付けたハサミを操作して行われる。狭い腹腔内での作業では、鉗子は、トラカール通過時は真っ直ぐで、摘出作業時は曲がった形状でその角度を自在にできることが望ましい。この要求に対し変態温度の異なる形状記憶合金パイプを用いた能動鉗子の開発が試みられている。室温以上で超弾性を示す内管と、形

図5 腹腔鏡手術の概念図

状回復温度が50℃の外管でできた二重構造管のシャフトは、冷水を循環させたときに直線形状、温水を循環させたときに曲がった形状となり、角度は水温で任意に調整することができることが報告されている⁸⁾。

3・1・3 形状回復力の応用 これまで述べてきたように形状記憶効果を利用した製品には形状変化を主体としたものが多く、形状回復時に発生する1GPaにも及ぶ回復力を有効に活用した応用例は少ない。これに着目した金子ら⁹⁾はTi-Ni合金を圧力源に利用した静的岩石破砕器を開発し本誌に報告した。この破砕器の特徴として、従来の静的破砕工法に比べ施工時間が極めて短時間であり、加熱用電源以外の周辺設備を必要としないため限られた作業空間でも使用可能であること等が挙げられる。性能の詳細、施工例については金子らの報告^{9)~11)}を参照して頂きたい。ここでは、最近提案されたTi-Ni合金を駆動圧力源とする物性測定用高圧発生装置¹²⁾を紹介する。

物性測定用の高圧装置は油圧プレスを用いる大型のものと、手動もしくは電動モータでネジを締め込むことで荷重を掛ける小型のものに分類される。前者の特徴は荷重の精密制御が簡便に行える点にあり、後者では省スペースが実現できる。I・海らは両者の特徴を兼ね備えた高圧装置の開発を目的として、図6に示すブリッジマン型アンビル装置を試作した。圧力源となるTi-Ni合金は直径15mm、長さ30mmの円柱形状であり、室温で15tの圧縮荷重を加え29mmに圧縮されている。これをヒータで加熱することにより回復力を発生させ、タングステンカーバイド製のアンビルの中央にセットしたガスケット中の試料に静水圧を負荷する仕組みである。図7はこの装置を用いて測定したBiの電気抵抗変化をアンビルの変位すなわちTi-Ni合金の形状回復に伴う長さ変化に対してプロットしたものである。変位量約0.4mmで抵抗はBi-I相からII相への圧力転移(2.55GPa)によって急激に減少し、引き続き抵抗が増加(II相→III相)した後、約0.9mmでIII相からV相への圧力転移(7.7GPa)に伴う抵抗減少が見られる。これらのことから、本装置を用いて10GPa程度の圧力が容易に発生可能であることが示唆され、高圧物性の分野で大きな反響を呼んでいる¹³⁾。

3・2 超弾性の応用

Ti-Ni超弾性合金は、最大7~8%にも及ぶひずみを荷重の解放と同時に完全に回復する特徴を持っている。超弾性では3つの

図6 形状記憶合金を圧力源とした高圧発生装置

図7 形状記憶合金を用いた高圧装置によるBiの圧力相転移に伴う電気抵抗変化

使い方が考えられる。第一は可逆的な回復機能であり、携帯電話機のアンテナ、眼鏡フレームなどが知られている。携帯電話の契約加入台数は1999年8月時点でPHSを含め5,000万台を突破し、超弾性合金に大きな市場を提供している。医療分野では前述したディスプレイ器具であるカテーテルチューブおよびガイドワイヤに利用されている。第二は形状保持と拘束を目的とした使い方であり、歯列矯正ワイヤ、ブラワイヤ、眼鏡フレーム等が代表的である。また、本誌の読者が興味を持たれるものとして平田らによって開発されている小型弾性波検層システム¹⁴⁾がある。これは発破による岩盤の損傷領域を簡便に測定することを目的として、穿孔したボアホールへ挿入するプローブにスリット加工によって4分割されたTi-Ni超弾性合金パイプを採用し、孔壁へ一定の押しつけ圧力で振動センサーを固定するところに最大の特徴がある。これによって孔荒れ、孔曲がりを有する孔壁に対しても十分な押しつけ力を作用させ得るため、精度のよい波形測定が可能であることが報告されている。第三は、図1に示したように超弾性が非線形の弾性であることから、エネルギー貯蔵材料への応用が有望視されている¹⁵⁾。

Ti-Ni合金は形状や寸法にもよるが1kg当たり数万～数十万円ですテンレス鋼の50～100倍と非常に高価であり、これが実用化を阻む大きな要因となっている。しかしディスプレイ医療器具の場合、使用重量が少なく高価格で付加価値が高いため、今後の発展が期待されている。ここでは超弾性合金の応用によって飛躍的な進歩を遂げている血管内手術用デバイスを紹介する。

3・2・1 血管内手術用デバイス 血管内手術は、先に述べた低侵襲性医療技術の一つである。コレステロールやカルシウムの堆積によって引き起こされる心臓冠動脈の血管狭窄は心筋梗塞の原因となる。これに対する医療は、従来の外科的開胸手術から、血管内に挿入されたガイドワイヤ、カテーテルチューブを介した、造影剤注入による血管造影診断およびバルーン、ステントによる血管拡張治療に変わってきている。図8はこれらのデバイスを用いた血管内手術の概念図¹⁶⁾である。

(1) **ガイドワイヤ**：ガイドワイヤは0.5～1.0mmφ程度の大きさで図8(a)～(c)、(e)に示すように、あらかじめ血管内に挿入して1～3mmφのカテーテルチューブの導入、回収を助けるものである。ガイドワイヤに要求される特性は、手首や大腿部動脈に設けた導入口から患部に容易に到達できることであり、そのためにはトルク伝達性（手元のねじりで先端部の方向制御が容易なこと）、耐キンク性（折れ曲がり難いこと）が求められる。超

図8 血管内手術の概念図

弾性合金ガイドワイヤはステンレス鋼コイルを用いた従来品に比べ上記の特性が格段に優れており、現在では70%以上のシェアを確保し主流となっている。実際の構造は超弾性ワイヤを芯線として線材の周囲にはX線の造影性を上げるためにW粉末などを含んだウレタン樹脂が被覆され、さらにその外側に血管内での滑りを良くするため親水性ポリマーがコートされている¹⁶⁾¹⁷⁾。

(2) **カテーテル**：カテーテルチューブは血管造影剤の注入や図8(c)、(d)に示すように後述するバルーンやステント等のメデイカルデバイスを患部へ導入する役割を果たす。そのため薄肉で耐圧性に優れ、さらにガイドワイヤと同様に良好なトルク伝達性、対キンク性が要求される。従来、ステンレス鋼メッシュをポリマーで被覆したチューブが用いられてきたが、1995年に上述の要求を満たすものとしてTi-Ni超弾性合金チューブを使用したカテーテルが、国内メーカーによって開発され用途を拡大している¹⁸⁾。

(3) **ステント**：血管内手術では図8(d)に見られるように、血管狭窄部はカテーテルによって導入されたバルーンを膨らませることによって拡張される。その後バルーンは減圧されカテーテル内に回収される（図8(e)）。しかし、バルーンによる拡張のみでは数か月後に再狭窄を起こす恐れがある場合、金属製のステントを留置する。これまでステンレス製のステントが主流であったが、近年、超弾性合金細線をメッシュ状に編んだものや、超弾性合金チューブをレーザー加工したものが開発されている。超弾性合金ステントの特徴は自己拡張により一定の張力で血管の拡張を維持し、かつ、血管の屈曲にも適応できる柔軟性を備えている点

図9 胆管拡張用超弾性合金ステント¹⁹⁾

(a) ステントの外観

(b) デリバリシステム（カテーテル）抜去後のステントの自己拡張

である。また、同様の超弾性合金ステントは胆汁の分泌障害によって引き起こされる閉塞性黄疸の治療法として、胆管の拡張にも利用されている(図9¹⁹⁾)。バルーンとステントを利用した治療は様々な医療分野において一般的なものとなりつつあり、米国では超弾性合金ステントの市場規模は近い将来30億ドルに達すると予想されている。

4. お わ り に

形状記憶合金の実用化研究が開始されて25年が経過し、様々な分野の商品に応用されてきたが、それらの中で市場が維持されているのは超弾性を利用したものに多く、その傾向は今後も続くと考えられる。それは、超弾性が他の材料にない特徴を持っているからである。形状記憶効果を利用したものはサーマルバルブのような用途に限定されつつある。さらに、マイクロマシン用アクチュエータを想定したスパッタ薄膜²⁰⁾の開発も精力的に進められている。高温形状記憶合金の開発、超弾性発現域の低温化、繰返し寿命等、解決すべき課題は多いが、目新しさではなく、必然性を持たせた用途開発が重要と考えられる。また、ここで紹介した多くの応用が材料研究者以外の発想から生み出されていることを付記し、拙稿が本誌の読者の方々に静的岩石破砕器や弾性波検層システムに続く応用をお考え頂く一助となれば幸いである。

引 用 文 献

- 1) 舟久保照康編：形状記憶合金，(1984)，産業図書
- 2) Otsuka, K. and Wayman, C. M. : Shape Memory Material, (1998), Cambridge University Press (United Kingdom)
- 3) 西田 稔・山内 清：固体物理, Vol. 33, p. 143-149, (1998)
- 4) Nishida, M. and Honma, T. : Scripta METALL., Vol. 18, p. 1293-1298, (1984)
- 5) 佐久間俊雄・岩田宇一：第35回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. II, p. 591-592, (1998)
- 6) Fukuyo, S. Suzuki, Y. and Sairenji, E. : Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann Ltd., p. 470-475, (1990)
- 7) Ohkata, I. and Tamura, H. : MRS Symp. Proc. Vol. 495, p. 345-355, (1997)
- 8) 中村仁彦・大沼顕介：日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'96講演論文集, Vol. B, p. 973, (1996)
- 9) 金子勝北古・西田 稔・稲葉 力・山内 清：資源と素材, Vol. 107, p. 959-964, (1991)
- 10) Inaba, T., Nishida, M., Kaneko, K. and Yamauchi, K. : Proc. 7th Int. Cong. on Rock Mechanics, Vol. 2, p. 1005-1008, (1991)
- 11) Yamauchi, K., Izumida, M., Inaba, T., Nishida, M. and Kaneko, K. : Trans. Mat. Res. Soc. Japan, Vol. 18 B, p. 1159-1162, (1994)
- 12) 吾妻志保・小阪 功・酒井 健・加賀山朋子・西田 稔：巨海玄道：第39回高圧討論会講演要旨集, p. 96, (1998)
- 13) 巨海玄道・吾妻志保・小阪 功・加賀山朋子・西田 稔：日本物理学会講演概要集, Vol. 54, Issue 1, Part 3, p. 478, (1999)
- 14) 平田篤夫・堀場夏峰・石黒幸文・吉永 徹・尾原祐三・金子勝北古：資源・素材学会平成11年度春季大会講演要旨集(1)資源編, p. 58-59, (1999)
- 15) 大塚和弘・宮崎修一：新素材―先端材料のすすめ―(F), 堂山昌男・山本良一共編, p. 59-63, (1984), 培風館(東京)
- 16) 大方一三：形状記憶合金に関する講習会予稿集，形状記憶合金協会(横浜)，p. 54-61, (1999)
- 17) 山内 清：日本金属学会会報, Vol. 32, p. 495-499, (1993)
- 18) テルモ(株)カタログ，ステノフォーカスNT
- 19) ジョンソン・エンド・ジョンソン メディカル(株)カタログ，スマートステント
- 20) 宮崎修一・石田 章：まてりあ(日本金属学会報)，Vol. 38, p. 279-280, (1999)