形状記憶合金アクチュエータのマイクロメカニズムへの適用*

生田 幸士**

Application of Shape Memory Alloy Actuator for Micromechanism / Koji IKUTA

Key words : shape memory alloy, actuator, micro robot, micro mechanism, nitinol, thermoelastic martensitic transformation, electric resistance feedback, endoscope, manipulator, gripper

1. はじめに

今日のマイクロエレクトロニクスの発展に見られるように、トランジスタを始めとする電気素子の小型化、マイクロ化は、単に寸法が小さいという量的な進歩以上に、人類にとって情報化社会の実現といった質的な変革をもたらしつつある。同様にメカニズムの世界においても機械素子の小型化、マイクロ化は、コンパクトな機械の実現といった量的進歩にとどまらず、従来到底不可能であった作業を容易にし、工学、医学などの分野に革命的な質的進歩をもたらすと考えられる。

従来「マイクロ」という言葉は、広く「超小型」という意味であいまいに用いられてきたようである。そのため現在のマイクロメカニズムは2つの意味を持つ。それは従来の加工技術の超精密化によるアプローチと、近年急速に進歩を遂げた VLSI 等の集積回路製造技術を用いたマイクロ化技術である。前者は mm から cm オーダ、後者は 1 mm 以下のスケールである。両者は単にスケール、素材、用途等の差があるだけでなく、実用化に際しては各々異なった問題を持つ。そのため筆者らは混乱を避けるため、前者を「ミニチュアメカニズム」、後者を「マイクロメカニズム」と呼び区別している。また両者をまとめて「超小型メカニズム」と呼んでいるが、以後、

本稿でもこれに準じてゆくことにする。

現在、超小型メカニズムの重要な問題の一つはアクチュエータの開発である。図1は各種アクチュエータの出力/重量比 (W/kg) を、アクチュエータ全重量に対してプロットしたものである¹⁾。この図から、一般にアクチュエータの重量が小さくなるにつれ、高い出力/重量比が得にくくなることがわかる。100 g 以下

- DC モータ+減速ギア
- AC モータ+ハーモニックドライブ
- ◎ モータ (鉄道)
- 2 サイクルガソリンエンジン (自動車)
- 4 サイクルガソリンエンジン (自動車)
- ⊙ ロータリエンジン (自動車)
- + ピストンエンジン (航空機)
- ジーゼルエンジン (鉄道)
- ⊗ 4 サイクル高速ジーゼルエンジン (自動車)
- ⊗ 4 サイクル高速ジーゼルエンジン (船)
- ⊗ ガスタービン (航空機)
- ⊗ ガスタービン (船)
- ▲ 油圧モータ
- △ 空気圧モータ
- ⊗ SMA アクチュエータ

図1 各種アクチュエータの出力/重量比

* 原稿受付 昭和63年7月16日

** University of California, Santa Barbara
(Santa Barbara, CA 93106, U. S. A.)

の軽量小型領域では、DC モータでさえも 10 W/kg 程度の値でしかない。電磁式モータの場合、モータ部品の小型化が困難であるだけでなく、小さくなるにつれ磁束密度が減少するため、原理的に小型化には不利となってくる²⁾。特に重量 10 g 以下のミニチュア/マイクロ領域においては、利用可能な従来方式のアクチュエータは皆無と言ってよい。新しい駆動原理に基づく新アクチュエータの導入が期待されるフロンティア領域³⁾と言えよう。

一方、形状記憶合金（以後 SMA と略す）アクチュエータの場合、10 g 以下の超小型領域においても 10² W/kg 近い高出力重量比を達成できることが示され、またいくつかの試作例もある¹⁾³⁾。本稿では SMA の超小型アクチュエータへの可能性を議論し、ミニチュアアクチュエータへの応用研究のいくつかを紹介する。

2. 超小型 SMA アクチュエータの特性

SMA アクチュエータの基本特性については既に論じられているが¹⁾³⁾、本章では超小型アクチュエータへの適用という観点から再考察してみる。

2.1 小型化に適した基本特性

まず SMA アクチュエータには以下のような小型化に適した長所がある。

- (a) 高出力/重量比
- (b) 機構的単純性
- (c) 遠隔操作性：(独立性)¹⁾
- (d) センサ機能

SMA アクチュエータは、金属の相変態現象(熱弾性型マルテンサイト変態)を用いた一種の「ダイレクトドライブ・リニアアクチュエータ」であり、減速ギアなど付属機構が最小限に押さえられる。そのため機構が極めて単純化できる。この (b) の長所は小型化の必要条件であるだけでなく、製造コスト、信頼性の改善に大きく寄与する重要な因子である。

次に、超小型アクチュエータの用途を考えると、(c) の遠隔操作性が良いことが重要となる。油圧、空気圧、ケーブル駆動方式では、エネルギー源とアクチュエータ間とが力学的に結合しているため、結合線の空間的、力学的拘束が無視できない。遠隔操作性の観点からは、結合線の影響が小さい電気エネルギー駆動の方が適している。SMA アクチュエータは電流のジュール熱によって直接駆動制御でき、また δ -array 結線法¹⁾などを用いて SMA 部のインピーダンスを大きくしておけば駆動電流値を大幅に下げられる。その結果、線径が小さく柔軟なリード線が使用可能で、遠隔操作性に富んだアクチュエータが構成できる。

また一般にアクチュエータが小さくなれば、付加するセンサも小型軽量の物が要求され、取付けも困難になってくる。(d) のセンサ機能は、相変態に伴って変化する SMA の電気抵抗値変化から、位置または力の情報を得ようとするものである。後でより詳しく解説するこの SMA アクチュエータ特有の機能は、サーボアクチュエータの小型化を容易にする。

2.2 アクチュエータ性能への小型化の影響

2.2.1 応答性の改善

SMA アクチュエータの基本原理は、熱エネルギーの流入によって駆動される相変態に基づくもので、一種の固体熱機関である。そのため応答速度は加熱冷却の速度によって決まる。加熱は通電加熱法により電源容量の許す限り高速に行える。しかし冷却速度は外部環境との熱移動速度で律速され、空冷などの簡便な方式で高い速度を得るには限界がある。

さて SMA を超小型アクチュエータに適用した場合を考察してみよう。小型化しても加熱は従来通り通電加熱法が利用できるため高速で行える。冷却に関してはどうか。SMA の代表長さを l とすると、体積は l^3 に、表面積は l^2 に比例する。その結果、熱伝導速度の目安となる単位体積当たりの表面積は $1/l$ に比例するため、SMA を小型化するにつれ冷却速度は相対的に大きくなり応答性は向上する。このことから応答性の観点からすれば、SMA アクチュエータにとって、小型化は有利に働くことがわかる。

2.2.2 出力/重量比の向上

次に、より一般的に出力/重量比に対する小型化の影響を考察してみよう。SMA の発生エネルギーはひずみエネルギーに比例するため、SMA の単位重量当たりの発生エネルギーは、質量やスケールによらず一定である。応答性は先の考察から、スケールが小さくなるに従い向上する。そのため SMA アクチュエータは、小型化に従い出力/重量比が大きくなるという興味深い結果が得られる。これはとりもなおさず、SMA の超小型アクチュエータへの適性を示すものである。

2.3 その他の特異性

前述のように、SMA アクチュエータが減速機構を必要としないことから、以下の特異な長所を持つ。

- (e) 清浄性 (クリーン性)
- (f) 静粛性 (サイレンス性)

クリーン度については、クラス 1 程度も可能であることが実験的に確かめられている⁴⁾。超小型アクチュエータにおいても、これらの特異性を生かした応用が期待される。具体的には、マイクロエレクトロニクスを始め、バイオテクノロジー、医療分野など高度なク

図2 SMA 特性の基本変数

リーン度が要求される環境での利用に適する。特に医療分野では静粛性も重要になる。

2.4 問題点

スケールには関係なく、SMA アクチュエータは一般に以下の問題点を有する。

- (g) エネルギー効率
- (h) 繰返し寿命

エネルギー効率はカルノー効率による限界があることが示されているが¹⁾、実際には1% 以下であることも珍しくはない。そのためエネルギー効率があまり重要でない分野への適用を心がけなければならない。また、繰返し寿命は、駆動ひずみ範囲に大きく依存することも忘れてはならない⁵⁾。

3. 超小型 SMA アクチュエータの制御

本章では、SMA アクチュエータの制御方式を概説した後、超小型化を実現する上で特に重要になってくる電気抵抗値フィードバック制御、およびその各種センシングへの応用法について述べる。

3.1 各種フィードバック方式の検討

図2に示すようにSMAの特性を記述する基本的変数は、温度、発生力（応力）、変位（ひずみ）、電気抵抗の4つである。SMA単独の伝達特性は、厳密には図3に示されるように、熱伝達による1次遅れと、相変態ヒステリシスに起因する非線形項とからなる⁶⁾。このブロック線図からも理解できるように、アクチュエータとしての観点からは、発生力と変位はアクチュエータの出力変数、温度と電気抵抗は内部状態変数とみなせる。特に電気抵抗の変化は、SMAの真の内部状態である相変態率と直接対応した関係にある。

実際にSMAをサーボアクチュエータとするためには、目的に応じてこれらの変数内のいくつかを計測し、フィードバック系を構成しなければならない。以下、どの変数をフィードバックするか注目してSMAの制御方式を分類し、その特徴を簡単に述べる。

a) 出力フィードバック方式

図3 SMA アクチュエータの伝達関数

出力変数である変位または発生力をフィードバック制御する方式である。ポテンショメータなどを用いて位置情報のみをフィードバック制御するサーボ方式は簡便なため、従来のSMAサーボアクチュエータの試作研究において最も良く用いられている^{7)~9)}。後者のひずみゲージを用いた発生力フィードバック方式についても、制御可能性が実験的に検討されている¹⁰⁾。しかし、図3からもわかるように、これらの方式ではアクチュエータの冷却条件の変化などによる温度外乱や、動作時の負荷変動により、SMAが容易にオーバーヒートしたり、それに伴う疲労の導入による特性劣下の危険性があった。前述のように、特に超小型アクチュエータの場合は相対的に冷却速度が向上するため、温度外乱の影響も大きくなり、実用上無視できない問題となる。

b) 内部状態フィードバック方式

SMAアクチュエータの内部状態変数である温度または電気抵抗をフィードバックする方式である。しかし、温度フィードバック方式¹⁰⁾¹¹⁾については、SMAとセンサ間のアイソレーションが必要であり、かつ微小なSMA材の正確な温度計測は極めて困難である。たとえそれが可能になっても温度と変位、発生力の間には相変態に由来するヒステリシスが存在し、厳密にはSMAの内部状態を計測していることにはならず実用的とは言い難い。特に超小型のSMAアクチュエータには適さない。

3.2 電気抵抗値フィードバック方式¹⁾³⁾

図4は良好な材料特性を持つSMA (Ti-Ni合金)の典型的な温度-電気抵抗値曲線である。これはR相(低温側)-母相(高温側)の変態特性で、温度に対して負の勾配を持ち、ヒステリシスも小さい。抵抗値は母相とR相の混在比率にはほぼ線形であると考えられるため、 R_{max} , R_{min} 間を0~1で正規化してフィードバック量(正規化抵抗値 λ)として用いられている¹⁾。図5のブロック線図のように、一組の拮抗するSMA (1), (2)の各正規化抵抗値 λ_1 , λ_2 を、常に $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ の拘束関

図4 良好な Ti-Ni 合金の温度-電気抵抗値曲線

係下で0~1間で変化させた場合、図6(a)のような位置についてのオープンループ特性が得られている。同図(b)は抵抗値フィードバック系を持たない拮抗型SMAアクチュエータを、PWMドライバの各Duty比 D_1 、 D_2 を $D_1 + D_2 = 1$ の拘束関係下で変化させた場合の位置のオープンループ特性である。駆動ひずみ範囲が微小な時は両者の差は少ないが、実用的な2%ひずみ範囲では、前者のヒステリシスが著しく小さいことがわかる。

図7は抵抗値フィードバック下で、冷却空気を突然遮断した時の、SMAアクチュエータの変位変動を調べた結果である。このような急激な温度外乱に対して

図5 拮抗型SMAアクチュエータの抵抗値フィードバック

(a) 抵抗値フィードバック系による位置制御特性

(b) デューティ比制御のみの位置制御特性

図6

図7 抵抗値フィードバックのロバストネス改善

も、抵抗値フィードバック系の働きにより変位変動がほとんど見られない。これらの結果から、抵抗値フィードバック方式は、(1) ヒステリシス特性の低減、(2) 温度外乱に対するロバストネスの改善、(3) オーバヒート防止、などの優れた特性があることがわかる。

3.3 センサ機能

出力フィードバックと抵抗値フィードバックを同時に用いると、SMAアクチュエータにセンサ機能を持たせることができる。具体的には、位置センサ+抵抗値から力情報を、力センサ+抵抗値から位置情報をセンシングできるものである。この原理は以下のように説明できる。SMAの抵抗値が相変態をモニタしていることになることは前にも述べたが、SMAの剛性が相変態と一対一に対応するため、抵抗値からSMAの剛性がモニタできる。系の力学特性が既知であれば、SMAの剛性と位置情報から力が算出でき、剛性と力情報とから位置が知れることになる⁶⁾。この機能は、超小型アクチュエータシステムを実現するためには特に有効と思われる。

4. 超小型SMAアクチュエータの応用研究

従来のSMAアクチュエータの応用研究の中で、特に超小型アクチュエータとしての試作研究は以下のよう分類される。

- 1) 超小型ロボット機構
 - a. 骨格型マイクロマニピュレータ³⁾
 - b. 軟体型マイクロハンド (図8)¹³⁾

図8 軟体型マイクロハンド

図11 マイクロ空気弁

図9 ねじり変形型マイクログリッパ

図10 クリーンルーム用ミニグリッパ

- c. 植物組織培養操作用リスト・ハンド¹⁴⁾
- d. ねじり変形型マイクログリッパ (図9)¹⁵⁾
- e. ベルチェ効果マイクログリッパ¹¹⁾
- f. クリーンルーム用ミニグリッパ (図10)¹⁶⁾
- 2) 超小型メカトロデバイス
- g. マイクロ空気弁 (図11)¹⁷⁾
- 3) 医療工学
- h. 人工腎臓用マイクロポンプ¹⁸⁾
- i. 能動内視鏡 (図12)¹⁹⁾²⁰⁾

以上の応用例は、すべて従来のアクチュエータでは不可能であったものである。特にb, d, g, hは数mm以下の超小型化を実現している点が興味深い。

駆動制御方式については、上記a~d, g, hはSMAへの通電量を制御するだけのオープンループ位置制御で、位置、力のセンシングは行われていない。

eの特徴は、通電加熱法を用いず、ベルチェ効果に基づく熱電素子を用いている点である。SMAが小さいため、約0.1 Hzの応答速度を得ている。また熱電対による温度フィードバック系と、ひずみゲージを用いた力フィードバック系を持つ。

fのミニグリッパは、クリーンルーム内でのICチップのハンドリングや、バイオテクノロジー、マイクロサージェリーなどの目的に設計されたものである。この場合、アクチュエータは小型軽量であること以外に、高度なクリーン度が要求される。SMAのクリーン度を最大限生かすため、発塵の恐れがあるメカニズムは一切使用されておらず、弾性カンチレバーをフィンガに用いている。また制御系については、抵抗値系とともに非接触型の超小型光センサによる位置フィードバック系を持ち、グリッパ把握力を力センサなしでセンシングしている。

iの場合、コイルばね状の拮抗型SMAアクチュエータは図5と同様の抵抗値フィードバック系を持つため、オーバヒートの危険性無く屈曲角のオープンループ制御を可能にしている。そのため腸壁など外部からの力によって屈曲角は変化してしまうが、能動内視鏡

図12 能動内視鏡の内部構造 (1節分)

自身がコンプライアンスを持つため実用上問題はない。むしろ温度センサや屈曲角センサが不要になるため、能動内視鏡の小型化が容易になっている。医師はファイバからの腸管内部の画像を見ながら、ジョイスティックで先端節の屈曲角をマスタスレーブ的に制御するだけでよい。後は、能動内視鏡の挿入と同期して、屈曲角が順次後部節にシフトしてゆくようにコンピュータ制御される。

5. まとめと今後への展望

幸いなことに現状では、日本はSMAアクチュエータの応用研究において世界をリードしている観がある。しかし、試作研究を越え実用化の域に達しているSMAアクチュエータは非常に少ない。この背景には適用分野の選定についての考察が不足していたことと、材料特性の理解や、基礎データが欠如していたことがあげられよう。前者の問題については、数多くの試作研究から少しずつ方向が見えてきたようにも思える。本稿で議論した超小型アクチュエータへの適用も、大きな可能性を秘めた応用分野であると筆者は信ずる。後者の問題についても、現在までに何冊かのSMAの啓蒙書^{21)~23)}が著され、筆者らが研究を始めた80年代初頭とは格段の差がある。しかし、アクチュエータの観点からみた材料特性の知見はまだ十分とは言えない。

現在、大阪科学技術センターを中心に産官学協同でSMAのJIS規格の制定が進められているが、複雑なSMAの特性をだれでも簡単に理解し利用できるよう、相変態特性、疲労を含む機械的性質や、抵抗値変化などの電気的性質¹⁹⁾のデータベースの確立が望まれる。またSMA特性の数学モデルの研究^{24)~26)}や、それとデータベースを結合したインテリジェントなSMA-CADなどの設計支援システムの開発が期待される。なお本稿では触れることができなかったが、1mm以下の「マイクロメカニズム」へのSMAの応用も、今後推進されるべき興味深い研究分野である。

参 考 文 献

- 1) 広瀬茂男, 生田幸士, 梅谷陽二: 形状記憶合金アクチュエータの開発(性能評価とその新構成法), 日本ロボット学会誌, 4, 2 (1986) 15.
- 2) W. Trimmer はか: ミクロの機械システム, 日経エレクトロニクス, 436 (1987.12.14) 209.
- 3) 本間 大, 三輪敬之, 井口信洋: 形状記憶効果を利用したデジタルアクチュエータ, 日本機械学会誌, 49, 448 (1983) 2163.
- 4) K. Ikuta: Application of Shape Memory Alloy Actuator for Clean Gripper, Proc. 7th RO. MAN. SY. Symp., Italy, (1988), (in printing).
- 5) 宮崎修一, 坂本英和: 形状記憶合金の繰返し特性, 日本金属学会会報, 24, 1 (1985) 33.
- 6) 生田幸士, 東京工業大学大学院 61 年度博士論文.
- 7) 野中 渉, 井口信洋, 本間 大: 形状記憶合金を利用したマニピュレータの開発, 第1回ロボット学会学術講演会予稿集, 1 (1983) 211.
- 8) 広瀬茂男, 生田幸士, 佐藤光一: 形状記憶合金アクチュエータの開発(σ 機構の導入による出力特性の改善), 日本ロボット学会誌, 4, 6 (1986) 28.
- 9) 橋本 稔ほか: 形状記憶アクチュエータとその2足歩行ロボットへの応用, 第1回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1 (1983) 207.
- 10) 栗林勝利: 形状記憶合金を用いた位置制御, システムと制御, 27, 9 (1983) 589.
- 11) 松島皓三, 薄井直樹: 形状記憶合金を用いたマイクロハンドの制御, 第5回バイオメカニズム学術講演会 (1984) 1307.
- 12) 栗林勝利: 温度フィードバックを用いた形状記憶合金アクチュエータの応答性の改善, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 5 (1987) 431.
- 13) 本間 大, 三輪敬之, 井口信洋: 形状記憶効果によるマイクロマニピュレータ, 精密機械, 50, 2 (1984) 37.
- 14) 三輪敬之, 山本敏郎, 柳橋康博, 児玉啓司: 植物組織培養の自動化に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, 54, 6 (1988) 1107.
- 15) J. A. Walker: A Small Rotary Actuator based on Torsionally Strained SMA, Proc. IEEE Micro Robot and Teleoperations Workshop, (1987).
- 16) 生田幸士: 形状記憶合金を用いたサーボアクチュエータの研究 (第11報)——クリーンルーム用ミニチュアグリッパへの応用, 1988年第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集 (発表予定).
- 17) 伊藤泰則, 本間 大, 井口信洋: 形状記憶合金を使用したアナログ電気駆動空気弁, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 5 (1987) 425.
- 18) 手塚耕一, 関口行雄, 舟久保照康, 土肥健純, 磯村 恒: 精機学会医用工学シンポジウム論文集 (1982) 67.
- 19) 広瀬茂男, 生田幸士, 塚本雅弘: 形状記憶合金アクチュエータの開発(材料特性の計測と能動内視鏡の開発), 日本ロボット学会誌, 5, 2 (1987) 3.
- 20) K. Ikuta, M. Tsukamoto & S. Hirose: Shape Memory Alloy Servo Actuator System with Electric Resistance Feedback and Application for Active Endoscope, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Philadelphia, USA, (1988) 427.
- 21) 舟久保照康編: 形状記憶合金, 産業図書 (1984).
- 22) 大阪科学技術センター形状記憶合金用途開発調査研究委員会編: 形状記憶合金とその使い方, 日刊工業新聞社 (1987).
- 23) 鈴木雄一: 実用形状記憶合金, 工業調査会 (1987).
- 24) 広瀬茂男, 生田幸士, 梅谷陽二: 形状記憶合金を用いたサーボアクチュエータの研究 (第2報)——形状記憶合金のモデル化, 計測自動制御学会学術講演会予稿集, 22 (1983) 545.
- 25) 広瀬茂男, 生田幸士, 梅谷陽二: 形状記憶合金を用いたサーボアクチュエータの研究 (第4報)——材料特性のモデル化とその実験, 第1回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1 (1983) 205.
- 26) S. Hirose, K. Ikuta & Y. Umetani: A New Design Method of Servo-Actuators Based on the Shape Memory Effect, Proc. 5th RO. MAN. SY. Symp., Udine, Italy, (1984) 339.