(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)特許出願公開番号
特開2008-19751
(P2008-19751A)
(43)公開日　平成20年1月31日(2008.1.31)

(51)Int.Cl.	F I	テーマコード（参考）
F03G 7/06 (2006.01)	F03G 7/06	D

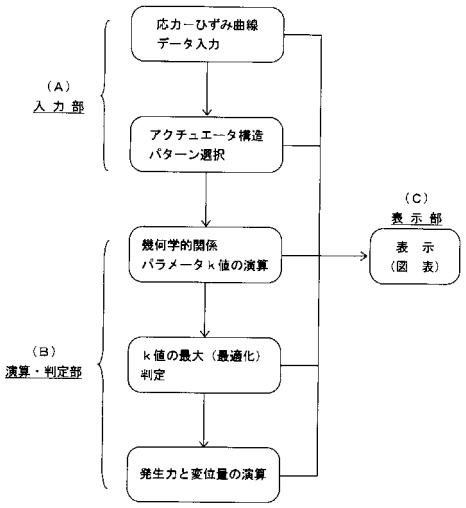
審査請求 未請求　請求項の数 5　ＯＬ　（全 13 頁）

(21)出願番号　特願2006-190986 (P2006-190986)
(22)出願日　平成18年7月11日 (2006.7.11)

(71)出願人　301023238
独立行政法人物質・材料研究機構
茨城県つくば市千現一丁目２番地１
(72)発明者　石田　章
茨城県つくば市千現一丁目２番１号　独立行政法人物質・材料研究機構内
(72)発明者　佐藤　守夫
茨城県つくば市千現一丁目２番１号　独立行政法人物質・材料研究機構内

(54)【発明の名称】形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計支援装置

(57)【要約】　（修正有）
【課題】形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計、製造を可能とすることのできる新しい技術手段を提供する。
【解決手段】設計支援装置であって、入力部においては、（ａ－１）形状記憶合金薄膜の材料特性：応力（σ）－ひずみ（ε）曲線を高温相（オーステナイト相）と低温相（マルテンサイト相）の各々についての入力、（ａ－２）アクチュエータ構造のパターンとして、単軸引っ張り変形モードまたはダイヤフラムモードのいずれかの選択、演算・判定部においては、（ｂ－１）幾何学的関係パラメータＫ値の、引っ張り変形モードまたはダイヤフラムモードにおいての演算、（ｂ－２）高温相および低温相のいずれにおいても、応力（σ）あるいはひずみ（ε）が薄膜の塑性変形が起きる値よりも小さいことを条件とするＫ値の最大化（最適化）の判定、（ｂ－３）Ｋ値の最大化（最適化）にともなうアクチュエータの発生力と変位量の演算、が行われる。
【選択図】図１



【特許請求の範囲】
【請求項１】
電子計算機システムとして、（Ａ）入力部、（Ｂ）演算・判定部、（Ｃ）表示部とを有する形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計支援装置であって、
（Ａ）入力部においては、
（ａ－１）形状記憶合金薄膜の材料特性：応力（σ）－ひずみ（ε）曲線を高温相（オーステナイト相）と低温相（マルテンサイト相）の各々についての入力、
（ａ－２）アクチュエータ構造のパターンとして、単軸引っ張り変形モードまたはダイヤフラムモードのいずれかの選択、
（Ｂ）演算・判定部においては、
（ｂ－１）幾何学的関係パラメータＫ値の、引っ張り変形モードにおいては次式
【数１】

$$\left(\frac{1}{\varepsilon+1}\right)^2+\left(\frac{K}{\sigma}\right)^2=1$$

に従って、
ダイヤフラムモードにおいては、次式
【数２】

$$\sigma=K\varepsilon^{-\frac{1}{2}}$$

に従っての演算、
（ｂ－２）高温相（オーステナイト相）および低温相（マルテンサイト相）のいずれにおいても、応力（σ）あるいはひずみ（ε）が薄膜の塑性変形が起きる値よりも小さいことを条件とするＫ値の最大化（最適化）の判定、
（ｂ－３）Ｋ値の最大化（最適化）にともなうアクチュエータの発生力と変位量の演算、が行われ、薄膜アクチュエータの性能（力と変位）を予測可能とすることを特徴とする形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計支援装置。
【請求項２】
（Ｃ）表示部においては、（Ａ）入力部、（Ｂ）演算・判定部での操作もしくは推移が数値、表および図の少くともいずれかにより表示されることを特徴とする請求項１に記載の設計支援装置。
【請求項３】
請求項１または２に記載の設計支援装置において、アクチュエータ実測値の入力・記憶部と共に、予測性能（力と変位）との対比からＫ値の補正を指示する補正指示部とを有していることを特徴とする形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計支援装置。
【請求項４】
請求項１から３のいずれかの装置において、薄膜アクチュエータの性能（力と変位）を予測可能とすることを特徴とする形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計支援プログラム。
【請求項５】
請求項４のプログラムを記録した電子計算機読み取り可能な記録媒体。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、形状記憶合金薄膜を用いるアクチュエータの性能予測を可能とする設計支援装置に関するものである。
【背景技術】

【０００２】
従来より、形状記憶合金薄膜アクチュエータを用いたデバイスの試作・開発が行われているが、その多くが、材料の特性を把握しないで試行錯誤的に作られており、デバイス開発に要するコストと労力が大きい割には成果が得られていない。また、形状記憶合金の材料特性を考慮した設計手法についても検討されてきているものの、形状記憶合金の応力－ひずみ曲線は通常の弾性変形とは異なって非線形の挙動をとり、また変形温度に対しても敏感なことから複数の物性パラメータを使った複雑な計算が必要であり、コストと労力を要する。また、形状を変えたデバイスに対しても新たに最初から再計算を行わないと設計変更の指針が得られないという欠点があった。
【０００３】
たとえば、ばねを用いた二方向形状記憶素子の動作原理を示す図として、高温状態と低温状態の形状記憶合金ばねの応力－ひずみ曲線上にバイアスばねの弾性変形をプロットし、交点から二方向形状記憶素子のストロークを予測する方法が提案されている（非特許文献１）。しかしながら、実際的な構造を有する薄膜アクチュエータの設計方法については、簡単な方法がなく、効率的なデバイス開発を行うことができなかった。
【０００４】
また、単軸引っ張り型アクチュエータについての材料力学的な解析や、ダイヤフラム型アクチュエータの材料力学的な解析が報告されている（非特許文献２、３）が、材料特性としての応力－ひずみ曲線から実際的なアクチュエータを設計し、製造するための指針は提示されていない。
【非特許文献１】「形状記憶合金」　舟久保熙康編　産業図書(1984) p.147
【非特許文献２】M.Kohl“Shape Memory Microactuators ”Springer(2004) p.110
【非特許文献３】D.D.Shin, K.P.Mohanchandra, G.P.Carman:“Development of hydraulic linear actuator using thin film SMA”, Sensors and Actuators A119(2005) 151-156
【発明の開示】
【発明が解決しようとする課題】
【０００５】
本発明は、上記のとおりの背景から、従来の問題点を解消し、形状記憶合金薄膜で作動するマイクロポンプやマイクロバルブ等のデバイスの設計と製造に有用な、形状記憶合金薄膜を単軸引っ張り変形モードあるいはダイヤフラムモードで使った場合のアクチュエータとしての性能（力と変位量）について、薄膜の物性値（応力－ひずみ曲線）に基づいて予測し、これによりアクチュエータの設計、そして製造を可能とすることのできる新しい技術手段を提供することを課題としている。
【課題を解決するための手段】
【０００６】
本発明は、上記の課題を解決するものとして、以下の特徴を有する形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計支援装置を提供する。
【０００７】
第１：電子計算機システムとして、（Ａ）入力部、（Ｂ）演算・判定部、（Ｃ）表示部とを有する形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計支援装置であって、
（Ａ）入力部においては、
（ａ－１）形状記憶合金薄膜の材料特性：応力（σ）－ひずみ（ε）曲線を高温相（オーステナイト相）と低温相（マルテンサイト相）の各々についての入力、
（ａ－２）アクチュエータ構造のパターンとして、単軸引っ張り変形モードまたはダイヤフラムモードのいずれかの選択、
（Ｂ）演算・判定部においては、
（ｂ－１）幾何学的関係パラメータＫ値の、引っ張り変形モードにおいては次式
【０００８】

【数１】

$$\left(\frac{1}{\varepsilon+1}\right)^2+\left(\frac{K}{\sigma}\right)^2=1$$

【０００９】
に従って、
ダイヤフラムモードにおいては、次式
【００１０】
【数２】

$$\sigma=K\varepsilon^{-\frac{1}{2}}$$

【００１１】
に従っての演算、
（ｂ－２）高温相（オーステナイト相）および低温相（マルテンサイト相）のいずれにおいても、応力（σ）あるいはひずみ（ε）が薄膜の塑性変形が起きる値よりも小さいことを条件とするＫ値の最大化（最適化）の判定、
（ｂ－３）Ｋ値の最大化（最適化）にともなうアクチュエータの発生力と変位量の演算が行われ、薄膜アクチュエータの性能（力と変位）を予測可能とする.
第２：（Ｃ）表示部においては、（Ａ）入力部、（Ｂ）演算・判定部での操作もしくは推移が数値、表および図の少くともいずれかにより表示される。
【００１２】
第３：上記の設計支援装置において、アクチュエータ実測値の入力・記憶部と共に、予測性能（力と変位）との対比からＫ値の補正を指示する補正指示部とを有している。
【００１３】
第４：上記１から第３のいずれかの装置において、薄膜アクチュエータの性能（力と変位）を予測可能とする形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計支援プログラム。
【００１４】
第５：上記のプログラムを記録した電子計算機読み取り可能な記録媒体。
【発明の効果】
【００１５】
上記のとおりの本発明によれば、これまでの試行錯誤的なデバイスの試作から、前もってアクチュエータ性能あるいはデバイス特性を予測し、設計することが可能になる。これによりデバイス応用の見通しも立てやすくなり、形状記憶合金薄膜のデバイスへの応用が促進される。
【００１６】
本発明はこれまでの試行錯誤的なデバイス開発のアプローチや観点を根底からくつがえすものであり、非常に簡単な方法であるにもかかわらず、ミクロンサイズからセンチメートルサイズまでの幅広いデバイスの設計にすぐ応用できる。特に形状記憶合金薄膜を用いたデバイス応用として注目されているマイクロバルブやポンプは、それぞれ引っ張り変形モードあるいはダイヤフラムモードのアクチュエータを基本としていることから実用的な価値は非常に高い。
【００１７】
本発明は、形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計のための基本的で欠くことのできない手段、手法になる。
【発明を実施するための最良の形態】
【００１８】

本発明においては、薄膜アクチュエータの構造に基づく幾何学的条件式を導き出してＫ値というパラメータを導入することにより、応力－ひずみ曲線とアクチュエータの構造を関連付け、さらに塑性変形の有無を判定条件に用いてＫ値を最適化するという手段により、薄膜アクチュエータの性能予想を可能としている。

【００１９】

アクチュエータとして使われた薄膜の応力とひずみはアクチュエータの構造に基づく幾何学的関係と材料の機械的特性の２つの条件を同時に満たす必要があり、これら２つの条件のうち、どちらかが欠けても薄膜の応力とひずみを予測することができない。さらに、形状記憶合金のような非線形の変形挙動（応力－ひずみ曲線）を記述する場合には、通常、複数の材料パラメータが必要であり、有限要素法等の手法を借りて、高温相（オーステナイト相）の状態と低温相（マルテンサイト相）の状態の薄膜の応力とひずみを求め、ひずみあるは応力がそれぞれの状態の薄膜で塑性変形が起きる値よりも小さいことを判定する必要がある。Ｋ値は、このような複雑な手続きを省いて、高温相と低温相の２つの応力－ひずみ曲線から同時に塑性変形が起きないための条件を判定し、薄膜の複雑な機械的特性をたった１個のパラメータとして集約するために導入される。

【００２０】

図１は本発明の実施の形態を例示した構成ブロック図である。この図１に例示したように、分散型、ネットワーク型、あるいは集中させた電子計算機システムとして、（Ａ）入力部、（Ｂ）演算・判定部、（Ｃ）表示部とを有する形状記憶合金薄膜アクチュエータの設計支援装置である。

（Ａ）入力部においては、

（ａ－１）形状記憶合金薄膜の材料特性：応力（σ）－ひずみ（ε）曲線を高温相（オーステナイト相）と低温相（マルテンサイト相）の各々についての入力と、

（ａ－２）アクチュエータ構造のパターンとして、単軸引っ張り変形モードまたはダイヤフラムモードのいずれかの選択が
行われる。

（Ｂ）演算・判定部においては、まず、

（ｂ－１）幾何学的関係パラメータＫ値の、引っ張り変形モードにおいては前記の次式

【００２１】

【数３】

$$\left(\frac{1}{\varepsilon+1}\right)^2+\left(\frac{K}{\sigma}\right)^2=1$$

【００２２】

に従って、

ダイヤフラムモードにおいては、前記の次式

【００２３】

【数４】

$$\sigma=K\varepsilon^{-\frac{1}{2}}$$

【００２４】

に従っての演算が行われる。

【００２５】

ついで

（ｂ－２）高温相（オーステナイト相）および低温相（マルテンサイト相）のいずれにおいても、応力（σ）あるいはひずみ（ε）が薄膜の塑性変形が起きる値よりも小さいことを条件とするＫ値の最大（最適化）の判定、

（ｂ－３）Ｋ値の最大（最適化）にともなうアクチュエータの発生力と変位量の演算が行われ、薄膜アクチュエータの性能（力と変位）を予測可能とする。

【００２６】

ここで、（Ｃ）表示部については、数値表、図等によって上記の操作や演算、判定の推移が表示されるようにすることができる。そして、さらに、アクチュエータ特性の実測値の入力・記憶部とともに、上記により予測された性能（力と変位）との対比から、Ｋ値の補正を指示する補正指示部を備えていてもよい。

【００２７】

本発明では、図１の装置を機能させるプログラムとして、またこれを記録した記録媒体をも提供する。

【００２８】

そこで以下に、さらに詳しく本発明の特徴について説明する。

【００２９】

まず図２は、本発明で対象とする形状記憶合金薄膜アクチュエータの概観図を示す。（ａ）では、膜面に垂直に働く力で形状記憶合金薄膜が引き上げられており、単軸引っ張り応力を受けるので、単軸引っ張りタイプのアクチュエータ：引っ張り変形モードと称することにする。一方、（ｂ）は下からの内圧によって薄膜がドーム型に膨らむ場合で、このタイプのアクチュエータをダイヤフラムタイプ：ダイヤフラムモードのアクチュエータと称することにする。応用について限定するものではないが、（ａ）単軸引っ張りタイプは、マイクロバルブ、ダイヤフラムタイプはマイクロポンプに多用されている。図３は、引っ張り変形タイプのアクチュエータを横から見た図である。この場合、形状記憶合金薄膜の両端は基板等に固定されており、中央部の基板が上下に動く。薄膜の受けるひずみεは式（１．１）で表され、応力σは力の釣り合いから式（１．２）で表される。

【００３０】

【数５】

$$\varepsilon = (L/\cos\theta - L)/L = 1/\cos\theta - 1 \qquad (1.1)$$

（Lは形状記憶合金薄膜の長さ、θは変位角）

【００３１】

【数６】

$$\sigma bt = F/\sin\theta \qquad (1.2)$$

（bは形状記憶合金薄膜の幅、tは形状記憶合金薄膜の厚さ、

Fは中央部の基板にかかる力）

【００３２】

本発明における独創性は、これらの式を組み合わせることにより薄膜のひずみと応力の幾何学的関係を前記のとおりの式（１．３）の形で表現し、同時に式（１．４）で示されるＫパラメータを導入することである。

【００３３】

【数７】

$$\{1/(\varepsilon+1)\}^2 + (K/\sigma)^2 = 1 \qquad (1.3)$$

$$K = F/bt \qquad (1.4)$$

【００３４】

Ｋパラメータは、上記の式（１．１）（１．２）より
【００３５】
【数８】

$$\cos\theta = 1/(\varepsilon + 1)$$

$$\sin\theta = F/\sigma bt$$

【００３６】
であるから、次式
【００３７】
【数９】

$$\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$$

【００３８】
に従い、また式（１．４）のパラメータを導入することで上記の式（１．３）が導かれる。
【００３９】
式（１．４）の右辺は、アクチュエータ設計のパラメータとして、アクチュエータのサイズと力のみで表現されている。すなわち、形状記憶合金の複雑な機械的特性をＫ値に集約することによってアクチュエータの設計が可能となる。
【００４０】
Ｋ値は、材料とデバイス（装置）を橋渡しする重要なパラメータとして本発明において導入されている。
【００４１】
この１個のパラメータＫによって、アクチュエータの構造と薄膜の複雑な機械的特性を関連付けることが可能になる。図４は形状記憶合金薄膜について実験的に測定した応力－ひずみ曲線（この図はＴｉ－５０原子％Ｎｉ合金薄膜）である。応力－ひずみ曲線は１５０℃と室温、即ち高温相（オーステナイト相）と低温相（マルテンサイト相）の状態で測定した。点線は式（１．３）で記述される曲線である。薄膜はアクチュエータの構造からくる幾何学的条件を満たす必要があるために点線で示した曲線上にないといけない。一方、材料特性から実線で示した応力－ひずみ曲線の関係も満たさないといけない。結局、単軸引っ張り型のアクチュエータとして用いた薄膜は２つの曲線の交点で示される応力とひずみを示す。式（１．４）から明らかなように大きい力を得るためにはＫ値は大きいほうが良い。ところがＫ値が大きすぎると、オーステナイト相では応力が降伏応力を超えることになり、一方、マルテンサイト相ではひずみが回復可能な変態ひずみを超えることになり、いずれの場合においても塑性変形が生じて形状記憶効果が得られない。そのためＫには最大値が存在する。この材料の場合、Ｋの最適値は４５である。この値を（１．４）式に代入することによってＦ＝３２ｄｔ（力＝３２×薄膜の幅×薄膜の厚さ）という簡単な予測式が得られる。また、変位量は図中の２つの交点におけるひずみを式（１．１）に代入してθを得れば、式（１．５）によって求められる。
【００４２】
【数１０】

$$d = L\tan\theta \qquad (1.5)$$

【００４３】
実際に報告されているマイクロバルブ（A.Ishida and V.Martynov:“Sputter Deposited Shape/Memory Alloy Thin Films:Properties and Applications”, MRS Bullctin 27(2002)111)について、材料組成のデータからＫ＝４５を仮定して求めた発生力とストロー

クは３１５ｍＮと３１０μｍであり、報告されている５００ｍＮと１００μｍ（このデバイスではアクチュエータとして可能なストロークの一部しか使用しないので予測値よりもちいさくなっているものと思われる。）と比較的良い一致を示した。

【００４４】

図５は、ダイヤフラムタイプのアクチュエータの断面図である。単軸引っ張りタイプと同様にひずみεの式（２．１）と応力σの式（２．２）を組み合わせ、さらに式（２．４）で示すＫパラメータを導入することによって式（２．３）の表現を得た。

【００４５】

【数１１】

$$\varepsilon = \frac{2}{3}(d/a)^2 \qquad (2.1)$$

（d はメンブレンの高さ、a はメンブレンの半径）

【００４６】

【数１２】

$$\sigma = Pa^2/4td \qquad (2.2)$$

（P はメンブレンの内圧、t は薄膜の厚さ）

【００４７】

【数１３】

$$\sigma = K\varepsilon^{-1/2} \qquad (2.3)$$

$$K = \frac{\sqrt{2}}{4\sqrt{3}}\frac{Pa}{t} = 0.204\frac{Pa}{t} \qquad (2.4)$$

【００４８】

すなわち、式（２．１）より

【００４９】

【数１４】

$$d = a\sqrt{(3/2)\varepsilon}$$

【００５０】

となり、これを式（２．２）を代入し、式（２．４）によって、式（２．３）が導かれる。

【００５１】

式（２．４）の右辺は、上記の式（１．４）と同様にアクチュエータ設計のパラメータのみ（アクチュエータのサイズと力）で表現されている。すなわち、形状記憶合金の複雑な機械的特性をＫ値に集約することによってアクチュエータの設計が可能となる。

【００５２】

Ｋ値は、材料とデバイス（装置）を橋渡しする重要なパラメータとして本発明において導入されている。

【００５３】

図６は、図４と同じ応力－ひずみ曲線に式（２．３）で表現される曲線をプロットしたものである。この場合のＫの最適値は３２であることがわかった。この値を式（２．４）に代入することによってＰ＝１５６．９ｔ／ａ（発生圧力＝１５６．９×薄膜の厚さ／ダ

イヤフラムの半径）という予測式が得られた。また、ダイヤフラムの下の体積Ｖは式（２．５）で表わされることから、図６の交点から読み取ったひずみを代入することによって、アクチュエータの１回の動作で得られる体積変化を求めることができる。

【００５４】

【数１５】

$$V = \frac{\sqrt{6\pi}}{12}(3+1.5\varepsilon)\sqrt{\varepsilon}a^3 \qquad (2.5)$$

【００５５】

実際に報告されているマイクロポンプ（D.D.Shin,K.P.Mohanchandra,G.P.Carman:“Development of hydraulic linear actuator using thin film SMA ”,Sensors and Actuators A119(2005)151-156）について、論文中の応力－ひずみ曲線からＫ＝３０を求めて発生圧力と体積変化を予測すると、０．１６８ＭＰａ及び０．０６０ｃｃが得られた。これらの値は報告されている０．１７２ＭＰａ及び０．０５１ｃｃと比較的良い一致を示した。

【図面の簡単な説明】

【００５６】

【図１】本発明の構成の概要を例示したブロック図である。

【図２】薄膜アクチュエータパターンを示した斜視図である。

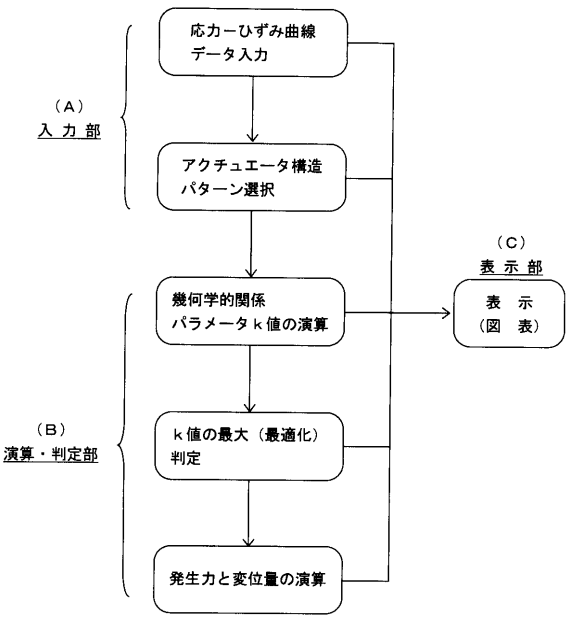
【図３】単軸引っ張り型アクチュエータの設計モデル図である。

【図４】単軸引っ張り型アクチュエータのＫ値の求め方を示した図である。

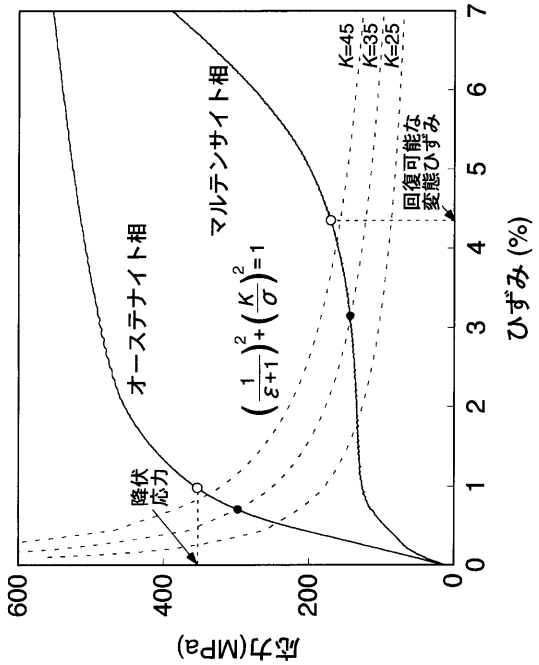
【図５】ダイヤフラム型アクチュエータの設計モデル図である。

【図６】ダイヤフラム型アクチュエータのＫ値の求め方を示した図である。

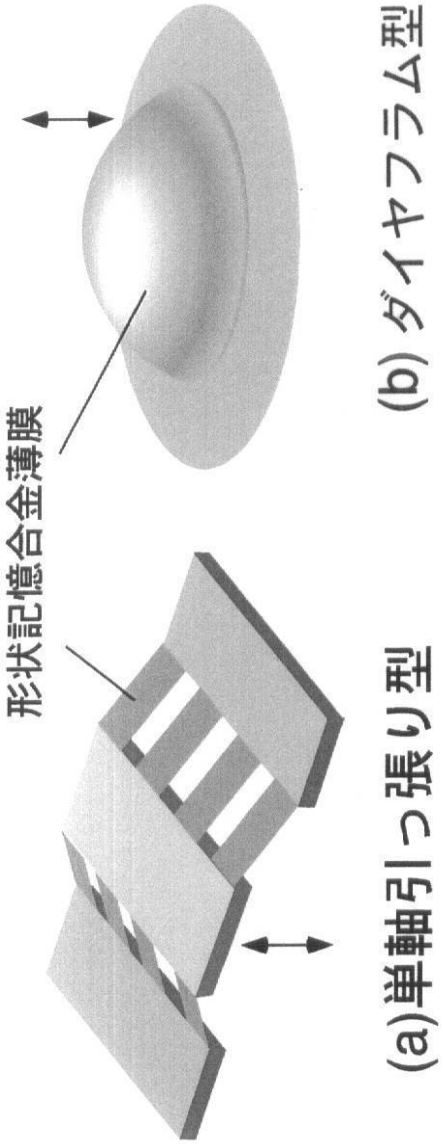
【図１】



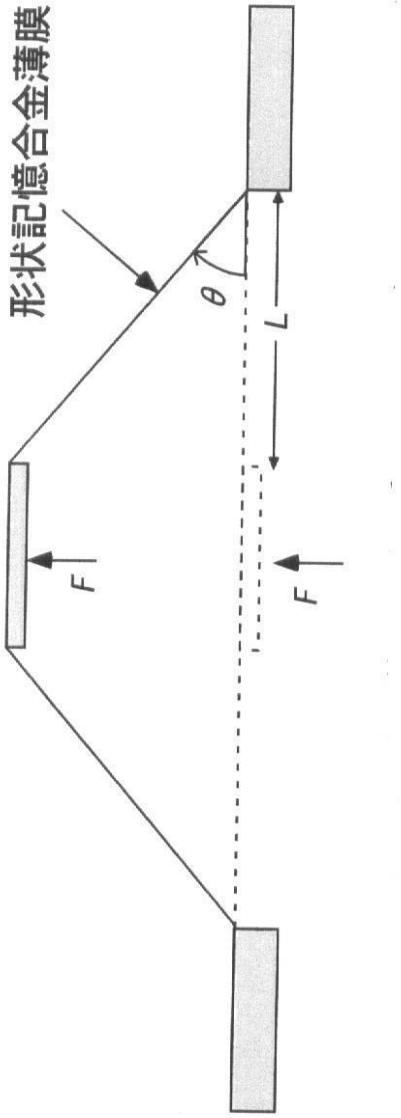
【図４】



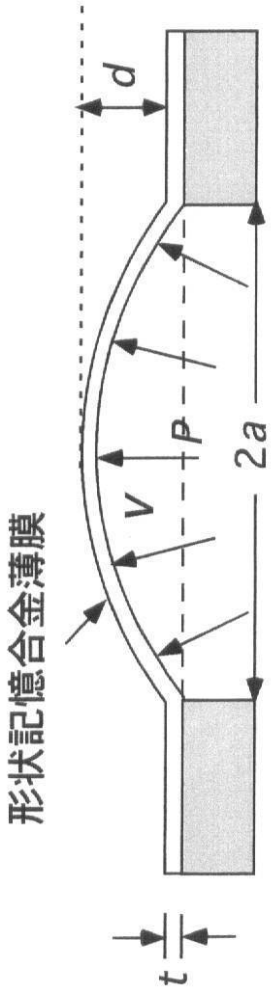
【図２】



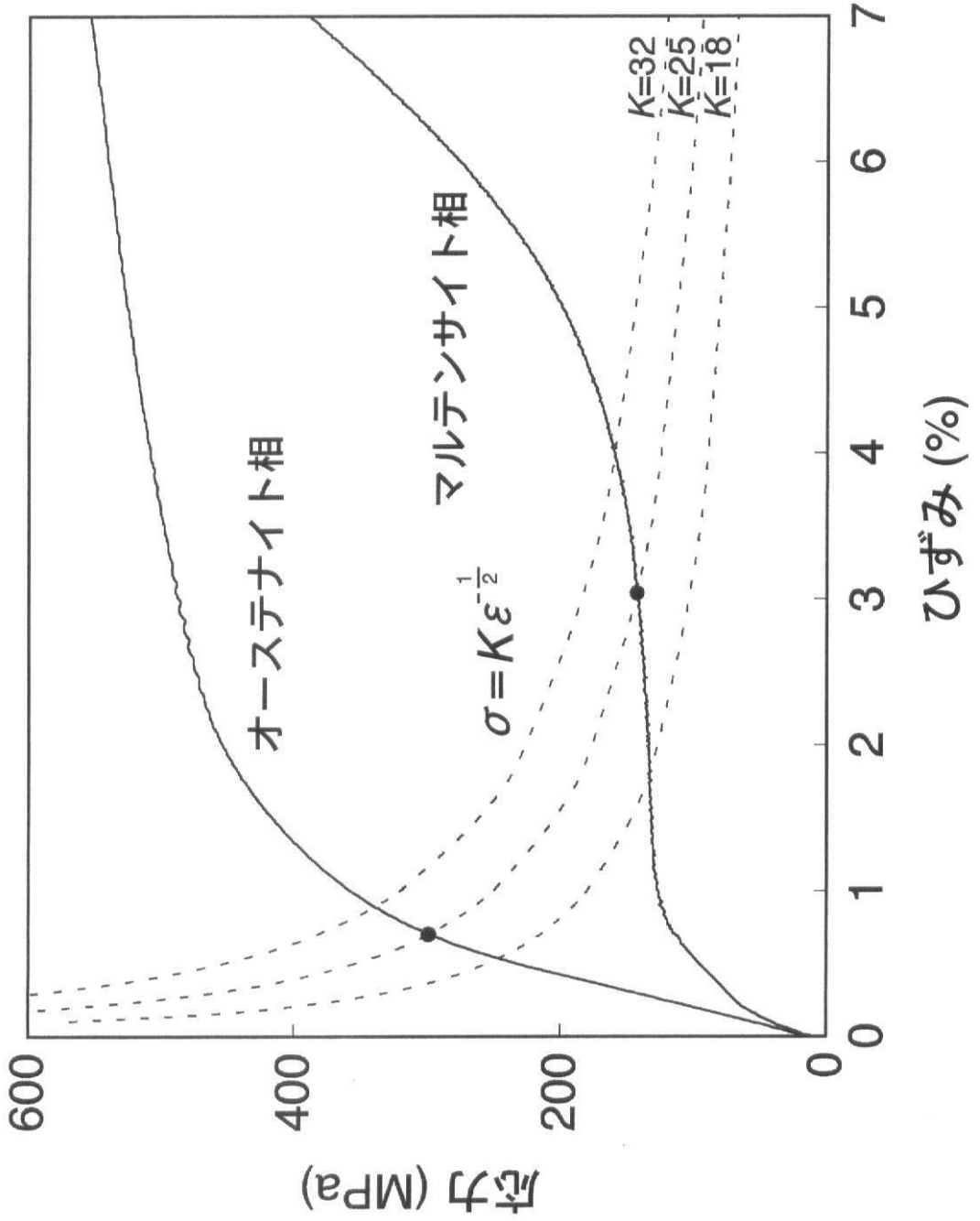
【図３】



【図５】



【図６】


応力 (MPa)
600
400
200
0
0
1
2
3
4
5
6
7
ひずみ (%)
オーステナイト相
マルテンサイト相
$\sigma = K\varepsilon^{-\frac{1}{2}}$
K=32
K=25
K=18