

超精密機械加工とその評価技術

— PZT 微小位置決めアクチュエータの設計と試作 —

菊池 誠* 小石川 勝男*

1. 緒言

本研究は、PZT 微小位置決めアクチュエータの一簡易的設計法(主に弾性体部分の簡易的設計法)を提案し、その方法に基づく試作、評価を行うことを目的としている。

PZT 素子は、素子内部の電界の変化を素子の体積の変化として変換する素子であり、巨視的観点から捉えれば、電圧-圧力変換素子とも言える。このため、従来から弾性体と組み合わせて微小位置決めアクチュエータに利用されている。PZT 微小位置決めアクチュエータは、既に津田¹⁾、岡崎²⁾、西村³⁾らによって詳しく設計製作検証されているが、その詳細部、特に弾性体部分で主要をなす円弧ヒンジの設計はParos と Wiesbord⁴⁾によって研究されたものを利用している。しかし、この方法では正規化が十分されていない為、線図を用いた簡便な設計が難しい。現在では、有限要素法を用いたシミュレーションによる数値的な設計もSmith⁵⁾ら、本西⁶⁾らによって試みられているが、設計の簡便さの点で設計者の負担は大きい。

そこで本研究では中小企業の現場における設計を考慮し、線図を利用した簡便な設計法を提案する。尚、本報告では弾性体の設計の基本となる単一ヒンジについて説明する。

2. 設計法

一般に、弾性体はリンクとヒンジの組み合わせから構成できる。設計を簡単にする為にリンクはヒンジに対して十分高い剛性が得られると都合が良い。しかし実際には難しい。そこで簡便な設計をするには、設計パラメータとしてリンクに対するヒンジの相対的な剛性を基とした設計法が必要となる。従来から円弧ヒンジの設計は Paros と Wiesbord によるものが利用されているが、本設計法とは形状パラメータの定義と正規化の対象が異なる。

2.1 単一ヒンジの設計

いま、ヒンジの形状を図1 に仮定する。任意のモーメントMを加えた時の曲がり θ により発生する変位量を y とおくと、はりの単純曲げ理論に基づいて方程式は式(1)になる。

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M \quad (1)$$

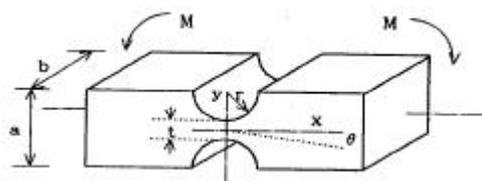


図1 単一ヒンジの形状

ここで, E は縦弾性係数, I は断面二次モーメントである。更に θ を積分方程式で表現すれば, 積分定数 C を定義して, 式(1)は式(2)となる。

$$\theta = \frac{dy}{dx} = \int \frac{rM}{EI} dx + C \quad (2)$$

図1 から I を式(3)とすれば, 式(2)はヒンジの形状から式(4)となる。

$$I = \frac{2}{3} b y^3 \quad (3)$$

$$\theta = \frac{3M}{2bE} \int_{-r}^r \frac{1}{\left\{ \left(r + \frac{t}{2} \right) - \sqrt{r^2 - x^2} \right\}^3} dx \quad (\text{但し } r \geq x) \quad (4)$$

ここで, x を式(5)で定義する z で置換すれば, 式(4)は式(6)となる。

$$z = \sqrt{\frac{x+r}{r-x}} \quad (\text{但し } r \geq x) \quad (5)$$

$$\theta = \frac{48Mr}{bE(2r+t)^3} \int_0^{\infty} \frac{z(z^2+1)}{\left\{ z^2 - 2\left(\frac{2r}{2r+t}\right)z + 1 \right\}^3} dz \quad (6)$$

次に, 新たに係数 β 及び K を式(7)で定義する。

$$\beta = \frac{2r}{2r+t} = \frac{2r}{a} \quad K = \frac{48rM}{bE(2r+t)^3} = \frac{4rM}{bEa^3} \quad (7)$$

更に, 解析を続けると, 式(4)が式(8)と等価であることを導ける。

$$\theta = \frac{K}{4} \left[\frac{3\beta}{2(1-\beta^2)^{\frac{5}{2}}} \left\{ \pi + t a^{-1} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \right\} + \frac{2+\beta^2}{(1-\beta^2)^2} \right] \quad (8)$$

次は, 式(8)の正規化を試みる。いま, 図1 で示した立体で $r=0$ の場合の曲がり θ_0 を求めると, 式(9)になる。

$$\theta_0 = \frac{24r}{Eb a^3} M = \frac{K}{2} \quad (9)$$

ここで, θ を θ_0 で正規化すると式(10)となる。

$$k_n = \frac{1}{2} \left[\frac{3\beta}{2(1-\beta^2)^{\frac{5}{2}}} \left\{ \pi + t a^{-1} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \right\} + \frac{2+\beta^2}{(1-\beta^2)^2} \right] \quad (10)$$

ここで, 係数 β は切り欠きの形状を表現する係数である。図2 は式(10)を数値的にグラフ化したものである。図2 では, 横軸に β , 縦軸にヒンジに対するリンクの剛性 k_n を示している。

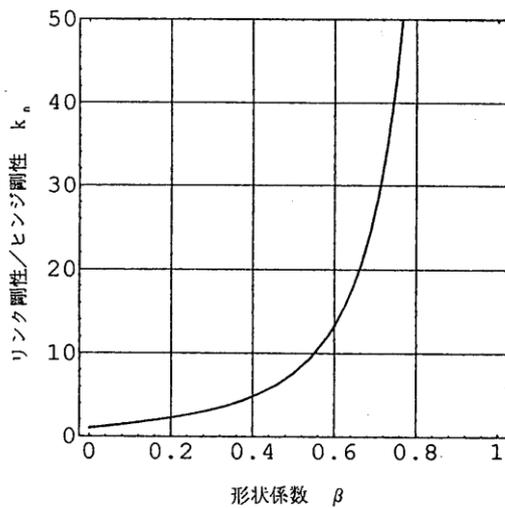


図2 β と k_n の関係

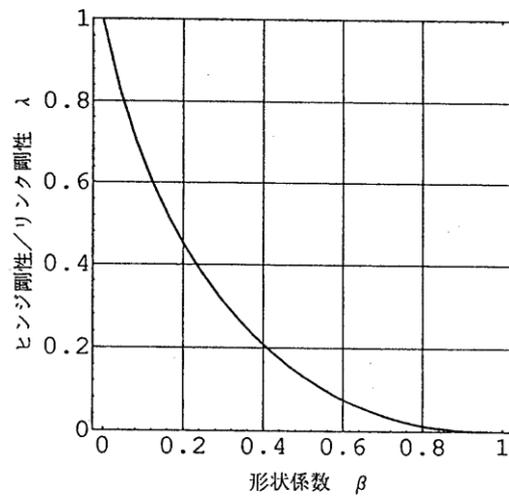


図3 β と λ の関係

実際の設計では k_n の逆数を使用する。即ち、リンクの剛性を1とした場合のヒンジの剛性である。この係数を λ とし、式(11)により定義する。

$$\lambda = 2 \left[\frac{3\beta}{2(1-\beta^2)^{\frac{5}{2}}} \left\{ \pi + t a n^{-1} \left(\frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) \right\} + \frac{2+\beta^2}{(1-\beta^2)^2} \right]^{-1} \quad (11)$$

図3は式(11)を数値的にグラフ化したものである。

単一ヒンジの設計は図3を幾何学的に利用すれば、複雑な計算も不必要であり、更に、式(11)は β だけの関数であるから、ヒンジ形状が図1で示されるものであれば、大きさに左右されることもなく容易に設計できる。

簡単な設計例として、拘束条件を $a=b=20\text{mm}$ 、リンク部剛性 100N/m 、ヒンジ部剛性はリンク部の0.2倍とした場合、ヒンジの切り欠き部の半径を求める。まず、図3から縦軸の値が0.2の横軸 β の値は約0.4である。従って、半径 $r=0.4 \times a/2=4\text{mm}$ となる。そしてヒンジ部の剛性は 20N/m と求められる。

2.2 検証

設計法を評価するために他の設計法との比較を試みた。いま、ヒンジ形状及び縦弾性係数が $r=5 \times 10^{-3}\text{m}$ 、 $b=42 \times 10^{-3}\text{m}$ 、 $t=3 \times 10^{-3}\text{m}$ 、 $E=2.1 \times 10^{11}\text{N/m}^2$ で与えられる場合についてヒンジの剛性を3つの方法で計算し結果を比較する。

方法1：数値計算による方法。式(6)の右辺をモーメント M で除して得られる式を採用し、オイラー法を用い、 $\epsilon \neq 0.01$ 、無限大 $\neq 1000$ とし、この間を10万分割した。

方法2：従来方法としては式(12)を採用した。

表1 比較例

$$k_a = \frac{2Eb t^{\frac{5}{2}}}{9\pi r^{\frac{1}{2}}} \quad (12)$$

方法	計算結果
数値計算, 式 (6)	4708.238
従来方法, 式 (12)	4349.353
本研究の方法, 式 (8)	4708.237

方法3：本研究で得られた知見式(8)利用した。

この結果を表1に示す。結果からは方法2(従来方法)が近似式であることが解る。更にこの近似式は正規化されていない為、誤差がヒンジの大きさに影響されることが本研究の知見からも解っている。これに対し、方法3(本研究の方法)の理論式は精密に行われた数値計算結果との誤差が十分小さく、簡便さと正確さを兼ね備えていると言える。

3.試作と評価

この計算方法に基づき試作したPZT微小位置決めアクチュエータを図3に示す。更に、図4に静特性、図5に動特性を示す。図4よりアクチュエータ静特性はPZTの持つヒステリシスが認められるが、振幅約1μmの範囲で線形性を示し

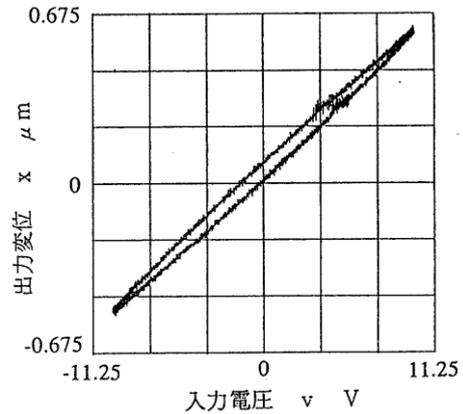


図4 アクチュエータの静特性

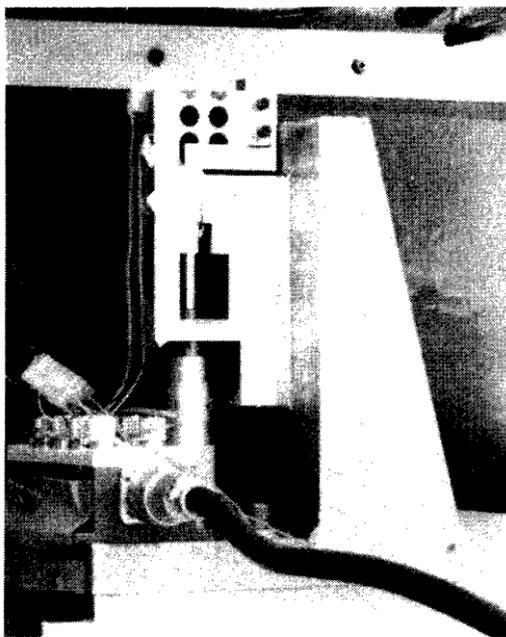


図3 試作したアクチュエータの外観写真

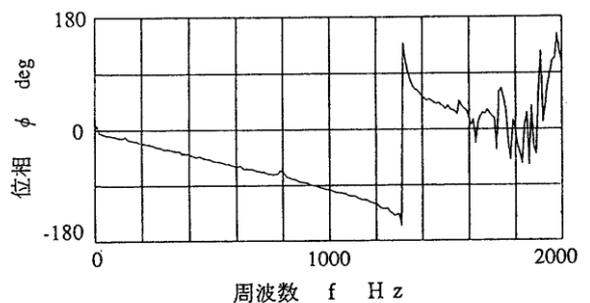
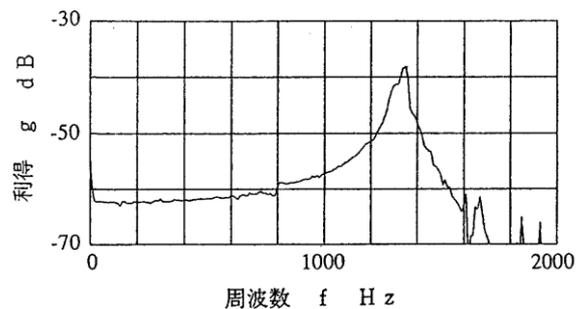


図5 アクチュエータの動特性

ている。図5 よりアクチュエータの動特性は 1.3Hz付近に共振点があり,位相遅れは認められるが利得は約800Hz 付近までは平坦な特性を維持している。従って,本研究で試作したアクチュエータは最大800Hz まで振幅 $1\mu\text{m}$ の変位を作り出すことができる。

図6 はアクチュエータによる微小位置決め の例である。入力信号として, 階段状の信号を 10 段階与え,最後に原点に戻すものを与えた。出力値は雑音に埋もれている為デジタルフ ィルタ処理を行っている。図6 において階段の 一段分は約 2nm ($0.002\mu\text{m}$)である。

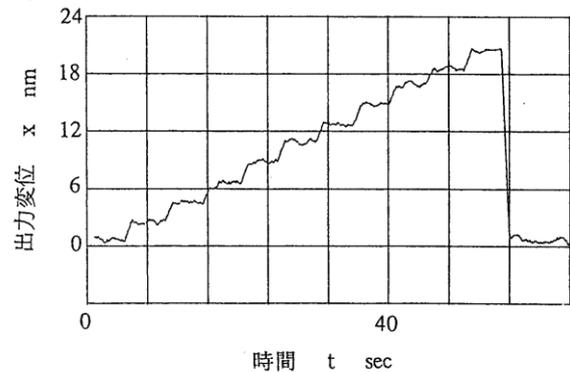


図6 階段状に10段入力を与えたときの アクチュエータの応答

4.結 言

本研究は微小位置決めアクチュエータに使用される単一ヒンジの一設計法の提案と, この方法を利用したアクチュエータの試作と評価を試みた。その結果, 本設計法が従来のものに比べ簡易的,汎用性があることが理解できた。しかし,この方法は中小企業にCAE 等が普及するまでのつなぎ的な方法であり,理想的には中小企業へのCAE の普及が望まれる。

尚,今回試作したアクチュエータは超精密加工実験⁷⁾に使用した。

参考文献

- 1) 津田: 一体構造の二次元検出器,精密,52,2(1986)143
- 2) 岡崎: 圧電素子を用いた微小変位工具台,精密,54,7(1988)163
- 3) 西村: ばれ支持された小形微動台の開発,精密,54,7(1988)157
- 4) J. M. Paros and L. Weisbord : How to design Flexure Hinges ,Machine Design , 37,11(1965)151
- 5) S.T.Smith, G.C.Ghetwyndand D.K.Bowen : Design and Assessment of Monolithic High Precision Translation Mechanisms, Sci. Instrum. , 20(1987)9977
- 6) 本西ら: 微小切込み装置の開発,精密, 57, 12 (1991) 59
- 7) 小石川ら: 50A クラストダイヤモンドによる砥粒加工に関する研究,精密春季講演論文集, (1992)215