

# 進化的計算を用いたリニア超音波モータ振動子の形状設計\* (第1報, 定式化と基本形状の生成結果)

橋本 正夫<sup>\*1</sup>, 柴崎 豪, 前野 隆司<sup>\*2</sup>

## Method for Designing Geometry of Vibrator of Linear Ultrasonic Motor using Evolutionary Computation (1<sup>st</sup> report, Formulation and Results of Generating Basic Geometry)

Masao HASHIMOTO, Go SHIBASAKI and Takashi MAENO

Geometry design of vibrators for linear ultrasonic motors is not easy because the vibrators have many designing parameters and so the solution space has large non-linear characteristics. Usual designing methods due to try and error by designers are not optimized. So, it is difficult to design small-sized and high-performance linear ultrasonic motors. In this study, a method is proposed for designing the vibrator for the linear ultrasonic motors using genetic algorithms and finite element method. As a result, geometry of the vibrator for small-sized linear ultrasonic motors is generated. Size is within ten millimeters wide and twenty millimeters long. Obtained geometry of the vibrator satisfies all the settled designing conditions.

**Key Words:** Linear Ultrasonic Motor, Actuator, Shape optimization method, Genetic Algorithms, Finite element method

### 1. 緒 言

情報機器やロボットに用いられる運動機構の高度化に伴い、駆動源であるアクチュエータの小型・高精度化が望まれている。超音波モータは、単位体積あたりの出力パワーが大きいこと、非通電時に保持力を有すること等の要因により、新たな小型・高精度アクチュエータとして期待されている。

超音波モータは一般に振動子と移動子から構成される。振動子の設計過程は、任意形状の振動子における任意の固有振動数・固有振動モードを組み合わせることにより任意の回転または直進運動を生成するものであり、設計自由度が大きい。このため、様々な形状の超音波モータが提案されてきた<sup>(1)-(10)</sup>。しかし、これまでに設計された超音波モータ振動子の基本形状は、おもに矩形や円筒状といった単純な形状であった。これは、単純な形状ならば設計者が複数の振動モードと

固有振動数を同時に最適化することが容易であること、単純な形状は相対的に製造コストが小さいことなどに起因する。

超音波モータ振動子の移動子との接触部に楕円振動を生成するためには、用いる2つの振動の固有振動数を一致させる必要がある。回転型超音波モータの場合には、振動子は一般に軸対称形状であるため、用いる2つの固有振動モードは sine モードと cosine モードという相似な2つのモードである。このため、加工誤差のない理想的な形状の場合、2つの振動の固有振動数は一致する。一方、リニア超音波モータの場合には、モードシェープの異なる2つの振動を用いる。一般にモードシェープの異なる振動の固有振動数は一致しないため、リニア超音波モータの場合には、振動子形状を工夫して固有振動数を一致させなければならない。しかし、振動子形状が複雑化すると、同時に振動モードも複雑化し、所望の楕円運動を生成させることが容易でない。このため、従来のリニア超音波モータの設計は、単純な振動子形状を試行錯誤的に求めるに留まっていた。

一方、計算機シミュレーションによる構造物の最適

<sup>\*1</sup> 学生員, 慶応義塾大学大学院

<sup>\*2</sup> 正員, 慶応義塾大学理工学部(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)

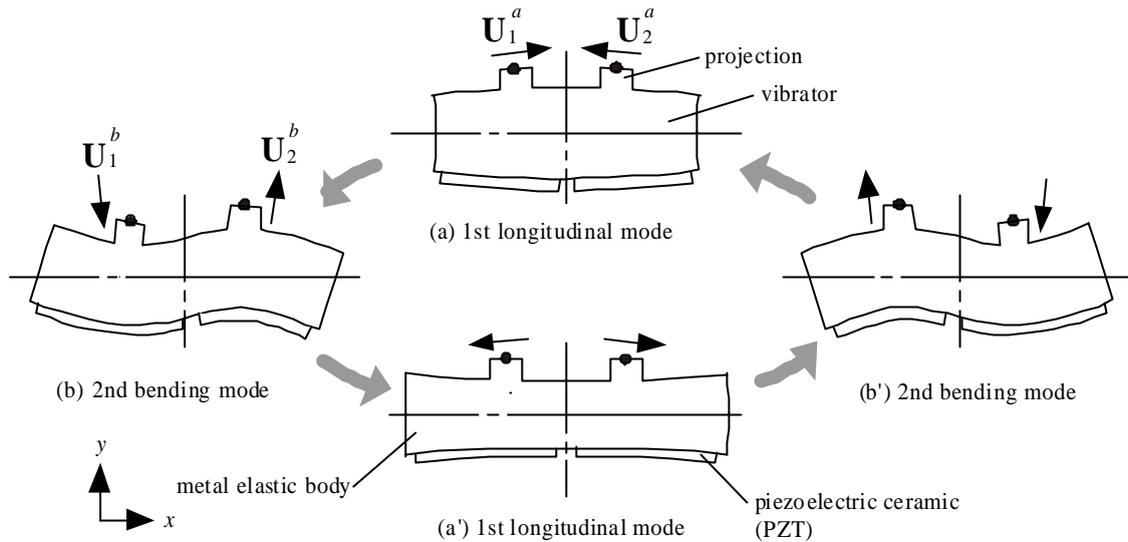


Fig. 1 Driving principle of former linear ultrasonic motor

設計に関する研究が近年進展している<sup>(11)(12)</sup>。すなわち、トラス、ラーメン、梁や板などの連続体構造の設計問題を対象に、感度解析による最適化の研究<sup>(13)(14)</sup>、自己組織化や遺伝的アルゴリズムなどの最適化手法を適用した研究<sup>(15)-(18)</sup>、均質化法の研究<sup>(19)</sup>などが行われている。しかし、超音波モータの振動子形状設計のような、振動子の動的設計問題への適用はこれまでに十分には行われていなかった。特に、複数の振動の固有振動数を一致させかつ振動子形状と振動モードを最適化するような研究は行われていなかった。

本研究では、まず、リニア超音波モータの駆動原理と設計条件を整理する。つぎに、有限要素解析と遺伝的アルゴリズムを用いたリニア超音波モータ振動子の基本形状設計法を提案する。最後に、提案した手法を用いて解析を行ない、本手法によれば設計条件を満たす超音波モータ振動子の基本形状を生成できることを示す。

## 2. 駆動原理と設計条件

2.1 駆動原理 従来のリニア超音波モータ<sup>(7)</sup>の駆動原理の模式図を図1に示す。図1の例では、長方形の金属製弾性振動子(vibrator)の下面に圧電素子が、上面に2つの突起が設けられている。奥行き方向の幅は任意であり、本振動子の場合には4mmである。2次元平面内の固有振動には一般に縦振動と曲げ振動があるが、本振動子は縦振動1次モード(a)(a')と曲げ振動2次モード(b)(b')を対象とし、これらの固有振動数がほぼ等しくなるように設計されている。振動子上面の2つの突起には、縦振動1次モード(a)によってベクトル  $U_i^a$  ( $i=1, 2$ )で示した左右方向の変位が、曲げ振動2次

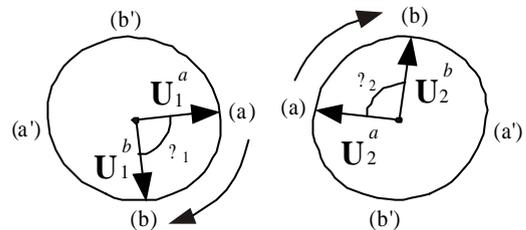


Fig. 2 Displacement vectors and elliptic motion at the contact points on vibrator

モード(b)によってベクトル  $U_i^b$  ( $i=1, 2$ )で示した上下方向の変位がそれぞれ生じる。ただし、ベクトル  $U_i^a$ 、 $U_i^b$  ( $i=1, 2$ )は最大変位時の突起の振幅と振動方向を表す。圧電素子に交流電圧を印加し、振動数の等しい縦振動(a)と曲げ振動(b)を1/4周期分だけ異なる時間位相で発生させると、変位ベクトル  $U_i^a$ と  $U_i^b$ が重畳される結果、2つの突起上の点は図2に示したような右回りの楕円軌跡((a)(b)(a')(b'))を描く。2つの突起の上面に直進子(slider)を接触させると、直進子は2つの突起に順に右に送り出されるように間欠的に接触し、右方向に移動する。また、位相差を変えることにより、楕円運動の回転方向を反転させ、直進子の移動方向を反転させることができる。

2.2 設計条件 特性の良いリニア超音波モータ用振動子を2次元平面内で設計することは、以下の5つの条件を満たす振動子形状と、その2つの固有振動モードを選択することである。

組み合わせる2つの振動の固有振動数が等しい。直進子との接触点(突起上の点)において、2つの固有振動モードにおける変位ベクトル  $U_i^a$ と  $U_i^b$  ( $i=1, 2$ )が直交する。

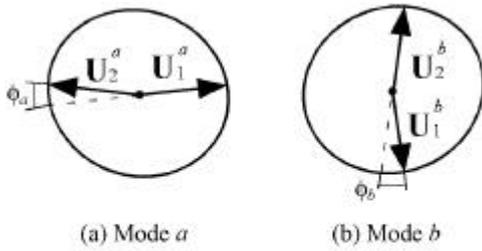


Fig. 3 Definition of angles  $\phi_a$  and  $\phi_b$

いずれの接触点においても、ベクトル和が示す楕円軌道が同一方向へ回転している。

ある固有振動モード $\xi$  ( $\xi = a, b$ ) において、2つの接触点での変位ベクトル  $U_1^{\xi}$ ,  $U_2^{\xi}$  のなす角が 180 度である。

接触点の振幅が相対的に大きい。

の条件は、固有振動数が異なっていると周期的な楕円運動が得られないことより自明である。は楕円を真円に近づけるための条件である。図 2 に示した例では、2つの固有振動モードにおける変位ベクトルのなす角が 90 度からやや離れている。このため、楕円はやや扁平しており、モータの駆動効率低下する。

は、楕円運動方向が逆転していると駆動方向が定まらないことより、自明である。は、 $U_1^{\xi}$  と  $U_2^{\xi}$  のなす角を 180 度に近づけ、それぞれの接触点と直進子との接触時間間隔をなるべく等間隔に保つための条件である。例えば図 2 の場合、(b) の直後に左側の接触点が直進子に接触してから、(b) の直前に右側の接触点が直進子に接触するまでの時間間隔は 1/2 周期よりもやや小さく、逆の時間間隔は 1/2 周期よりもやや大きい。このように非接触時間がばらつくと、超音波モータの効率や、外乱に対するロバスト性が低下する。は、内部損失を低減し、効率を向上させるための条件である。なぜなら、直進子との接触点以外の不要な部分の振幅が大きいと、振動エネルギーが大きく、内部損失も大きくなるためである。

ところが、従来のリニア超音波モータにおいては、上記の多目的最適化が容易でないため、熟練した設計者でさえも、単純な固有振動モードを生成できる単純形状の振動子設計に留まっていた。このため、例えば図 1 に示したりニア超音波モータは必ずしも上記の条件に対して最適化はされていない。また、形状変更により小型化を行うことが極めて困難であった。

このため、本研究では、有限要素法によって求めた振動子の固有振動数・固有振動モードに対し、上記の

設計条件を満たすときに 0 へ収束する評価関数を用いて評価を行うことを考える。

ある形状の振動子の固有振動数・固有振動モードが求められている場合を想定する。まず、ある周波数範囲内に存在する  $n$  個の固有振動モードから任意に 2 つを選んだ組 (モード  $a$  およびモード  $b$ ) の振動特性を評価することとする。以下に、前述の設計条件を定式化した評価関数  $E_1 \sim E_4$  を示す。

固有振動数の差の評価関数  $E_1$

$$E_1 = 1 - \frac{f_a}{f_b} \quad (1)$$

ただし、 $f_a$  はモード  $a$  の固有振動数、 $f_b$  はモード  $b$  の固有振動数であり、 $f_a < f_b$  とする。

接触点の楕円軌道の評価関数  $E_2$

$$E_2 = 1 - \left| 1 - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (1 - \sin \theta_i) \right| \quad (2)$$

ただし、 $\theta_i$  ( $i=1, 2$ ) は  $U_i^a$  と  $U_i^b$  のなす角である (図 2)。  $E_2$  は、 $\theta_1 = \theta_2 = 90$  度または  $\theta_1 = \theta_2 = -90$  度のとき、すなわち、変位ベクトル  $U_i^a$  と  $U_i^b$  ( $i=1, 2$ ) が直交し、かつ、いずれの接触点においても楕円軌道が同一方向へ回転するときに 0 となる関数である。

各接触点の接触時間位相差の評価関数  $E_3$

$$E_3 = \frac{1}{2} - \frac{1}{4} (\cos f_a + \cos f_b) \quad (3)$$

ただし、 $\phi_a$  は  $U_1^a$  と  $U_2^a$  のなす角、 $\phi_b$  は  $U_1^b$  と  $U_2^b$  のなす角である (図 3)。  $E_3$  は、 $U_1^a$  と  $U_2^a$  のなす角および  $U_1^b$  と  $U_2^b$  のなす角が 180 度のときに 0 となる関数である。

接触点の振幅の評価関数  $E_4$

$$E_4 = 1 - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^2 \left( \frac{\|U_i^a\|}{\|U_{\max}^a\|} + \frac{\|U_i^b\|}{\|U_{\max}^b\|} \right) \quad (4)$$

ただし、 $U_{\max}^a$  は固有振動モード  $a$  において振幅が最大となっている点の振幅を表す。したがって、式(4)は、その振動モードの中での接触点の振幅の大きさを評価する指標であるといえる。

以上のような複数の評価関数  $E_1$  から  $E_4$  を有する問

題は多目的最適化問題と捉えることもできるが、本研究では簡単のため、単一の評価関数  $E$ 、

$$E = w_1 E_1 + w_2 E_2 + w_3 E_3 + w_4 E_4 \quad (5)$$

を用いることとする。ただし、 $w_1 \sim w_4$  はそれぞれの設計条件の重要度を表すおもみである。

有限要素法で求められた  $n$  個の固有振動モードから任意に 2 個を選んだ組に対して  $E$  が求められた。そこで、求められた  ${}_2C_n$  個の  $E$  の最小値  $E_{min}$  を、

$$E_{min} = \min \{ E \mid {}_2C_n \} \quad (6)$$

より求める。 $E_{min}$  は、ある形状の振動子を超音波モータとして機能させるために適した固有振動モードを 2 つ選ぶとともに、その振動子の形状そのものを評価する評価関数である。 $E_{min}$  が小さいほど、その振動子は設計条件に適合している。

### 3. 解形状の生成手法

3.1 解析の流れ 超音波モータ振動子の設計条件は 2 章で示したように多岐に渡るため、本研究の形状設計問題は多数の解候補が存在する問題、すなわち、解空間が多峰性を有する問題であると考えられる。このような場合には、均質化法などの一般的なトポロジー最適化手法の適用が困難である。一方、遺伝的アルゴリズム(GA)<sup>(20)</sup>などの進化的計算手法は、複数の探索点を有するために大域的探索能力に優れ、不連続解空間における探索能力を有するため、本問題に適している。このため、本研究では GA を用いた解形状の探索を行う。

解析の流れを図 4 に示す。詳細については次節で述べるが、基本的な流れは以下の通りである。まず、遺伝子型 (genotype) で表された多数の振動子形状を、表現型 (phenotype)、すなわち 2 次元有限要素モデルに変換する。つぎに、それぞれの個体 (振動子) に対して有限要素法による固有振動数・固有振動モード解析を行い、その結果を 2 章で示した評価関数により評価する。さらに、適応度 (評価関数  $E_{min}$  の逆数) の判定を行い、適当な解が得られていなければ、選択、交叉、突然変異を行って新たな遺伝子型を生成する。これらの遺伝子型に対し、上述の手順を繰り返す。以上の繰り返し計算の結果、リニア超音波モータとして適した振動子の基本形状を求める。

3.2 詳細 以下に、本手法の詳細について述べる。  
a) 遺伝子型と表現型

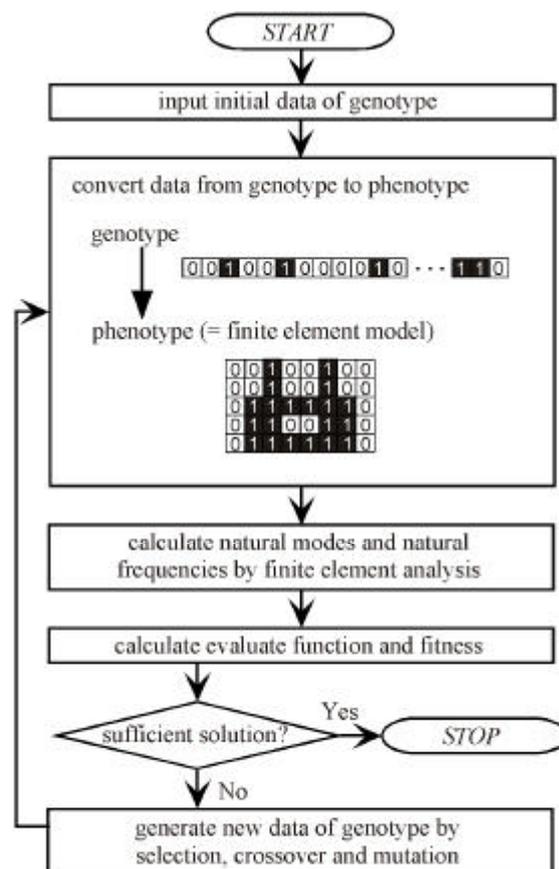


Fig. 4 Flow chart of analysis

振動子形状の表現型は、ある形状モデル定義領域内における要素の有無によって表現する。すなわち、図 4 の表現型の模式図に示したように、要素が存在する部分を 1、存在しない部分を 0 とすると、表現型は図中、黒い四角に白抜きで 1 と描かれた形状で表される。一方、遺伝子型は、マトリクス状の表現型を左から右へ、上から下へと一列に並べた、0 と 1 から成る 1 次元配列とする。

なお、リニア超音波モータの形状は左右対称であるので、実際には表現型の左半分のみを用いて表現型と遺伝子型を生成する。

個体 (振動子) 数は 50 とし、初期個体の遺伝子型はランダム関数により生成する。

#### b) 有限要素解析

それぞれの個体の表現型における、要素が存在する部分に四角形平面ひずみ要素を埋め込むことにより、2 次元有限要素モデルを構築する。形状モデル定義領域は、従来のリニア超音波モータ振動子よりも小さい縦 10mm 横 20mm の矩形領域とする。材料は黄銅とし、縦弾性係数  $10.4 \times 10^{10}$  Pa、ポアソン比 0.33、密度  $8.47 \times 10^3$  kg/mm<sup>3</sup> とする。境界条件は、いずれの節点も拘

束されない free-free 条件とする。また、振動子の上面に直進子との接触点 2 点を指定する。

本モデルに対し、有限要素法による固有振動数・固有振動モード解析を行い、固有振動数が低い方から  $n=10$  個の固有振動数と固有振動モードを求める。ただし剛体モードは除く。有限要素コードは MARC を用いる。

#### c) 選択・淘汰

求められた  $n$  個の固有振動数・固有振動モードから、式(6)により  $E_{min}$  を求め、各個体の形状を評価する。ただし、おもみは  $w_i=0.25$  ( $i=1\sim 4$ )とした。 $E_{min}$  の値が小さいほど超音波モータ振動子として適した基本形状である。評価関数値の逆数である適応度に基づき、ルーレット戦略およびエリート保存法によって、次世代の個体群を選択・淘汰する。

#### d) 交叉と突然変異

選択された 50 個の個体群に対して、遺伝的処理である交叉・突然変異を行う。交叉手法としては、1 次元配列化された遺伝子型に対して一点交叉を適用する。交叉率は 0.5、突然変異率は 0.1 とする。

#### e) 形状修復処理

交叉、突然変異の処理を行った遺伝子列を表現型として配列すると、有限要素解析する形状モデルとしては適当でない場合が存在する。1 つは、振動子が 2 つ以上の部分に分かれてしまう場合である。この場合は、有限要素解析を行わず、この個体は適応度が極めて低いとみなす。2 つめは、図 3 の表現型に示したように中抜け要素が存在する場合である。このような形状は加工が困難であるので、本研究では形状修復処理を行う。すなわち、振動子内に中抜け要素があった場合には、その部分に要素を生成し、中抜けのない振動子形状に変更する。このことは、遺伝子型は異なるが表現型は同じというケースを許容することに相当する。

#### f) 収束条件

最良個体が 200 世代にわたって変化しなかった場合に、解は収束したとみなし、計算を終了するものとする。

### 4. 解形状の生成結果と考察

4.1 解析条件 まず、矩形解析領域を  $5 \times 10$  分割した場合の解析を 10 回行った。遺伝子長は 25 である。複数回解析を行ったのは、初期値をランダムに与えた際に異なる局所解に収束する可能性を確認するためである。接触点は、上面端部から 3 つめの節点とした。

つぎに、矩形解析領域を  $10 \times 20$  分割し、遺伝子長を 100 とした場合の解析を 5 回行った。接触点は、上

Table 1 Characteristics of generated vibrators

ID	area of elements	$E_{min}$	$f_a$	$\theta$ (k(deg))	$\phi$ (deg)
(i)	10x5	0.0527	165	79.60	22.58
(ii)	10x5	0.0519	172	89.23	2.95
(iii)	20x10	0.0046	164	88.99	4.17
(iv)	20x10	0.0057	168	89.57	2.36
(v)	20x10	0.0061	169	88.52	8.32
(vi)	20x10	0.0078	166	89.55	4.25
(vii)	20x10	0.0082	167	86.24	8.89

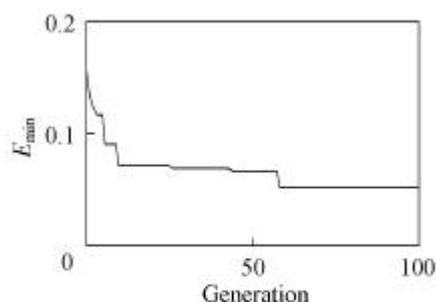


Fig. 5 Change in  $E_{min}$  for a model within 10x5 elements

面端部から 5 つめの節点とした。

4.2 結果と考察 それぞれの解析を行って得られた振動子解形状の特性を表 1 に示す。ただし、 $\theta$  は  $\theta_1$  と  $\theta_2$  の平均、 $\phi$  は  $\phi_a$  と  $\phi_b$  の平均である。

1 世代あたりの計算時間は、CPU PA8500 (440MHz) の UNIX ワークステーションを用いた場合、(i)、(ii) の解析では約 10 分、(iii) から (vii) の解析では約 30 分であった。

まず、矩形解析領域を  $5 \times 10$  分割して解析を行ったところ、10 回のうち 7 回は (i) の解が、3 回は (ii) の解が得られた。また、矩形解析領域を  $10 \times 20$  分割して 5 回解析を行ったところ、(iii) から (vii) の解が得られた。なお、(iii) から (vii) は評価関数  $E_{min}$  が小さい順に並べてある。

つぎに、それぞれの解の詳細について順に述べる。

まず、 $5 \times 10$  分割の解析において高い頻度で生成された (i) の解について述べる。図 5 には、各世代における最良個体の評価関数値  $E_{min}$  の履歴の一例を示す。図より、世代数の増加に伴い、 $E_{min}$  が減少していく様子がわかる。なお、58 世代以降は 200 世代に渡って最良個体の  $E_{min}$  は変化していなかった。したがって、本個体は最適解あるいは局所解であると考えられる。

図 6 に、求められた最良個体 (i) の解形状と、選択された 2 つの固有振動モードを示す。図より、黒丸で示した 2 つの接触点は、モード  $a$  では左右方向に、モード  $b$  では上下方向に振動していることがわかる。また、表 1 よりわかるように、 $\theta$  は 79.60 度であり、90 度よ

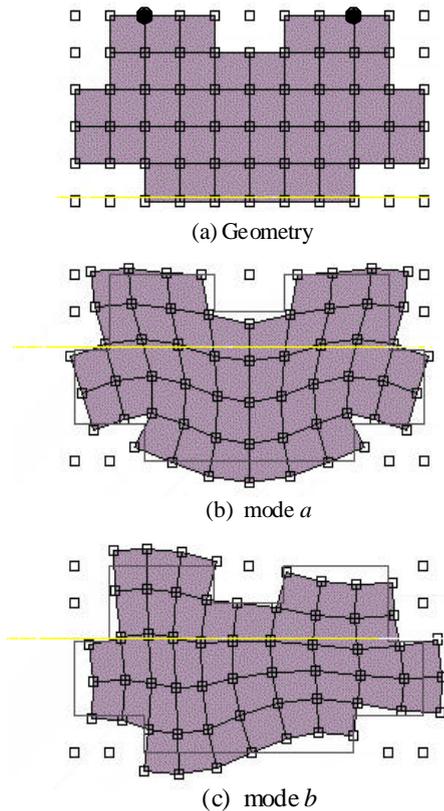


Fig. 6 Geometry and modes of generated vibrator (i)

りもやや小さいものの超音波モータの振動子として十分に利用できる値である．また、 $\phi$ は 22.58 度であり、やはり超音波モータの振動子として十分利用できる値である．また、両モードの固有振動数の差は 1.3kHz であった．この差は要素分割数の粗さに起因するものであり、詳細設計時に十分修正しうる値である．実際に寸法の微調整を行ってみたところ、2 つの固有振動数の差を 0 にすることが可能であった．これらより、得られた解形状は設計条件をある程度満足する振動子の基本形状であるといえる．なお、本固有振動モードは縦振動と曲げ振動が連成した複雑なモードであり、これらを生成するための振動子形状も複雑である．よって、本振動子は、振動モードを縦振動または曲げ振動に限定した従来の試行錯誤的な設計では求めることが困難な新たな形状であるといえる．

初期値を変えて計算しても常に(i)の形状が得られるならば、本手法は超音波モータの最適形状探索手法であるといえる．ところが、10 回のうち 3 回は(ii)の形状に収束した．(ii)の形状を図 7 に示す．(ii)の形状の場合の固有振動モードは、(i)の場合と同様なモードであった．表 1 をみると、(ii)の場合の評価関数  $E_{min}$  は (i)の場合よりも小さい 0.0519 となっている．したがって、形状(ii)は形状(i)よりも設計条件を満たす結果であるといえる．しかし、実は、結果(ii)では、用いる 2 つ

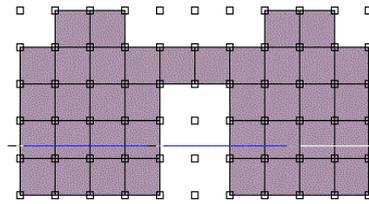


Fig. 7 Geometry of generated vibrator (ii)

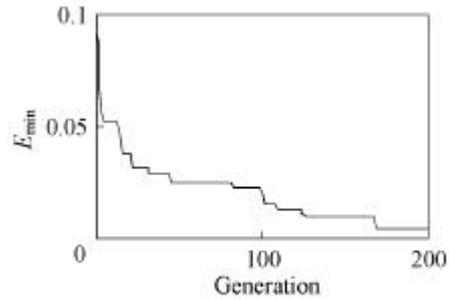


Fig. 8 Change in  $E_{min}$  for a model within 20x10 elements

の固有振動数の間に、別の固有振動数が存在している．経験的に、別の固有振動数が 10%から 20%程度離れていないと、その不要な振動が励振されてしまい超音波モータとしては機能しない．図 7 の場合に微調整等によって不要な固有振動数のみを大きく変化させることは困難である．また、中央部の幅が小さすぎて加工しにくい、解析精度が低いと考えられる、等の問題がある．これらの理由のため、(ii)の形状を超音波モータの振動子として用いることは難しい．

以上より、本手法は、初期値の選び方によって別の形状に収束する可能性がある手法であるといえる．つまり、最適解に到達せずに局所解に陥る可能性があるという GA の一般的な問題点を含有する．また、適応度が最も優れた個体であっても、本研究で設定した評価関数以外の要因によって、超音波モータの振動子として適当でない場合もある．これらの点は今後の課題である．ただし、前述したように、本研究によれば、設計者の試行錯誤では得ることが困難な(i)の形状に高い確率で収束することが明らかになった．このことは、本研究の有効性を示すものであるといえる．

GA において、遺伝子にコーディングされた変数が多すぎると局所解に陥りやすくなることが知られている．一方、本研究では、有限要素分割を細分化して要素数を増加させれば、解析精度が向上するとともに、より複雑な振動子形状を生成できると考えられる．これらを確認するために、矩形解析領域を  $10 \times 20$  分割した場合の解析を行った．以下にその結果を示す．

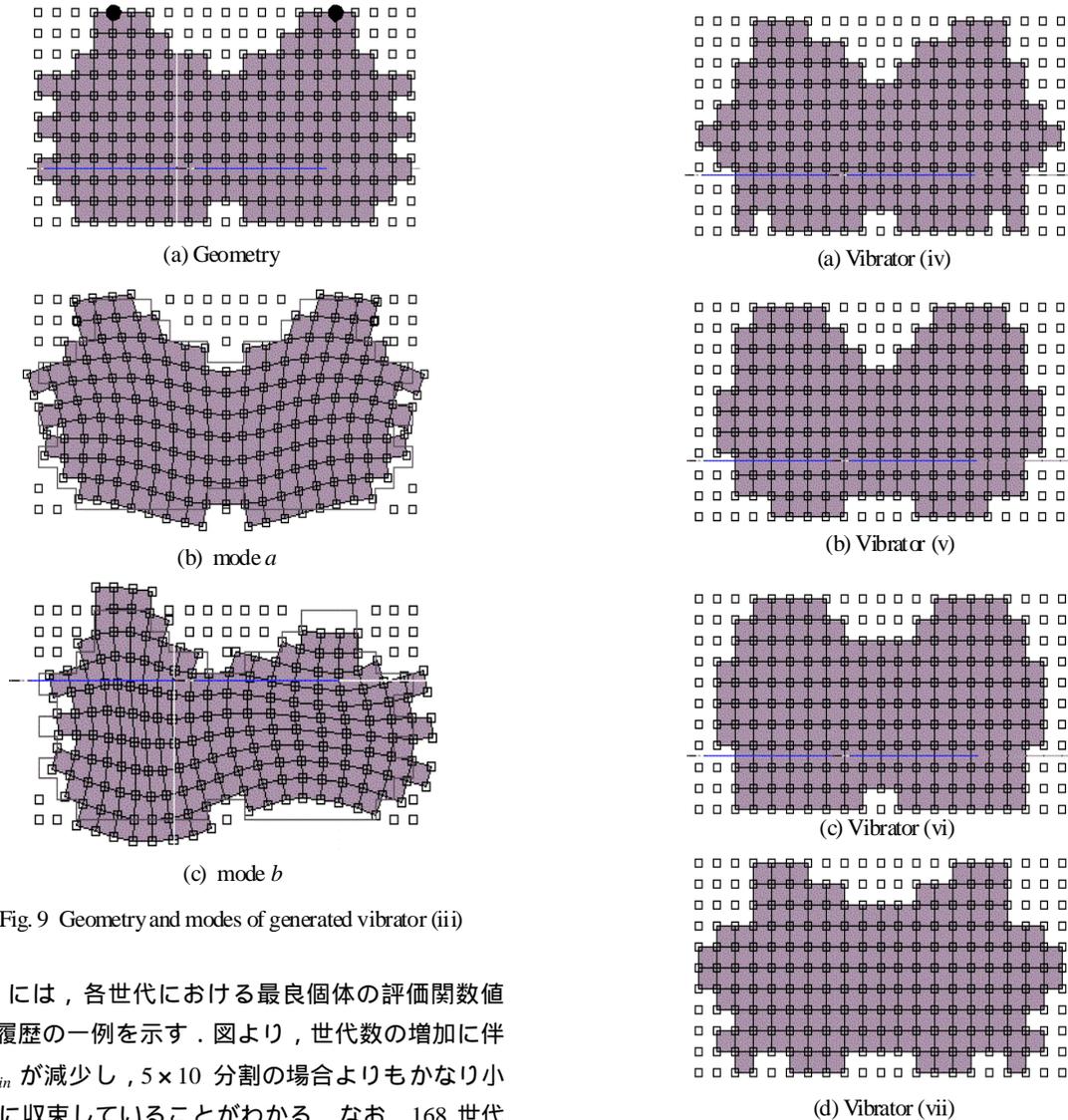


Fig. 9 Geometry and modes of generated vibrator (iii)

図 8 には、各世代における最良個体の評価関数値  $E_{min}$  の履歴の一例を示す。図より、世代数の増加に伴い、 $E_{min}$  が減少し、 $5 \times 10$  分割の場合よりもかなり小さい値に収束していることがわかる。なお、168 世代以降は 200 世代に渡って最良個体の  $E_{min}$  は変化していなかった。このときの最良個体(iii)の解形状と選択された 2 つの固有振動モードを図 9 に示す。図 9 と図 6 を比較すると、それぞれの固有振動モードはよく似たモードシェープの振動であることがわかる。また、基本形状も類似している。すなわち、中央部上下や四隅が削り取られた形状となっている。また、表 1 よりわかるように、振動子(iii)の  $E_{min}$  は 0.0046、 $\theta$  は 88.99 度、 $\phi$  は 4.17 度であり、(i)の形状よりもはるかに設計条件を満たした解であるといえる。また、両モードの固有振動数の差は 100Hz と十分小さかった。以上より、有限要素分割数を大きくすると、より設計条件を満たす解を得ることができるといえる。

しかし、同様な計算を 5 回行ったところ、他の 4 回の場合にはそれぞれ異なる解形状に収束した。これらの形状(iv)から(vii)を図 10 に示す。図より明らかなように、(iii)から(vii)の解形状は、ある程度類似した形状

Fig. 10 Geometry of generated vibrators (iv) to (vii)

であるといえる。すなわち、振動子(i)や(iii)と同様、中央部上下や四隅が削り取られた形状となっている。 $E_{min}$  の値も同程度のオーダーである(表 1)。これらより、本研究によれば、それぞれ超音波モータの振動子として用いることのできる形状を生成できたといえる。解析ごとに収束解形状は異なっており、いずれも局所解に陥っていると考えられるものの、いずれもある程度類似した形状である。以上より、本研究の有効性と課題が明らかになったといえる。つまり、本研究により、設計者が基本形状として採用できる様々な振動子形状を求めることができるものの、いずれの形状も最適解とは言い難く、局所解であると考えられる。

4.3 今後の展開 今後は、得られた解形状を基に、詳細設計を行い、リニア超音波モータを試作する予定である。また、試作したリニア超音波モータの振動特

性を評価することによって、提案した振動子設計法の有効性を検証する。

本研究で提案した手法のいくつかの課題を解決するために、以下のような今後の研究が必要である。

ひとつは、図 7 に示した(ii)の形状は、本研究の設計条件は満たしていたものの、実際には振動子としては適した形状ではない、という点である。これは、本研究の評価関数が現実の様々な設計条件を網羅していないことを示している。このため、他の設計因子を評価関数に追加するなどして、評価関数を改良する必要がある。

本研究の設計問題は  $E_1$  から  $E_4$  という多数の評価関数を考慮する多目的最適化問題と考えることもできる。評価項目が増大すると、多目的性は増大し、さらに局所解に陥りやすくなるなどの問題点が考えられる。このため、パレート最適化などの多目的最適化手法を適用することが必要であると考えられる。

また、本研究の解形状探索結果は局所探索に陥っている。特に、要素数が大きい場合にその傾向が大きい。たとえば、図 10 に示したように、トポロジーが類似した形状がそれぞれ局所解として得られるということは、遺伝子のコーディング法に改良の余地があることを示していると考えられる。このため、生物の発生を模倣した遺伝的プログラミングや L システムなどの考え方を導入することにより、類似した形状は遺伝子のパターンも類似するようにコーディング法を改良し、類似した局所解形状への収束を回避する必要がある。

本研究は、以上のように発展の余地はあるものの、従来の方法では生成することが困難であった振動子形状を進化的計算により創発的に求める新たな手法の基本的な枠組みを提案したものである。

## 5. 結 言

本研究により以下の知見を得た。

- (1) 有限要素法による固有振動数・固有振動モード解析と遺伝的アルゴリズムによる解形状の探索に基づくリニア超音波モータ振動子の基本形状の設計法を提案した。
- (2) 提案した形状設計法により、設計条件を満足する新たなリニア超音波モータの振動子形状を得た。求められた解形状および組み合わせる 2 つの固有振動モードは、従来の設計者による試行錯誤的な設計では求めることが困難な解であった。
- (3) 本手法は、要素数や初期値の選び方に依存して局所解に陥るという問題点を有する。これらの点の解決は今後の課題である。

## 参 考 文 献

- (1) 指田年生, 超音波モータ, 応用物理, 54-6 (1985), 589-599.
- (2) 細江三弥, 超音波モータの自動焦点レンズへの応用, 東北大通研シンポジウム資料, (1987), 117-118.
- (3) 黒沢実, 上羽貞行, 振動子と積層圧電アクチュエータを用いた超音波モータ, 信学技報, 87-176, US87-31, (1987), 27-32.
- (4) Takano, T. and Tomikawa, Y., Linear Moving Ultrasonic Motor Using a Multi-Mode Vibrator, *Japan. J. Appl. Phys., Suppl.*, 28-1, 28 (1989), 164-166.
- (5) 大西一正, 内藤浩一, 中澤徹, 縦-曲げ結合振動を用いた超音波リニアアクチュエータ, 日本音響学会誌, 47-1 (1991), 27-34.
- (6) 木村篤史, 前野隆司, 関裕之, トラック形超音波モータの固有振動モードに関する研究, 機論, 59-562, C (1993), 1644-1649.
- (7) Funakubo, T. Tsubata, T. Taniguchi, Y. Kumei, K. Fujiwara, T. and Abe, C., Ultrasonic Linear Motor Using Multilayer Piezoelectric Actuators, *Japan. J. Appl. Phys.*, 34 Part1, No5B, (1995), 2756-2759.
- (8) 権田常躬, 松本豪, リニア型超音波アクチュエータ, フォトリ-オ-トメ-ション, 14-11, (1996), 16-20.
- (9) 前野隆司, 竹村研治郎, 小島信行, 縦振動と横振動の縮退に基づく多自由度超音波モータの開発, 日本ロボット学会誌, 16-8 (1998), 1115-1122.
- (10) 古川達也, 新行内充, 加川幸雄, 同型縮退モードを利用した自走型矩形超音波アクチュエータの有限要素モデル援助による検討, 日本音響学会誌, 55-8 (1999), 554-559.
- (11) 構造・材料の最適設計, 9, 日本機械学会編, (1989), 技報堂出版.
- (12) 尾田十八, 構造最適化手法の最近の動向, 機論, 57-541, A(1991), 1952-1957.
- (13) 大河内禎一, 宮田茂: 機械構造の形状の最適設計(第 1 報, 離散化された形状変換), 機論, 49-448, A(1983), 1532-1539.
- (14) 大河内禎一, 福富康志, 鳥居稔, 坂井浩: 機械構造の形状最適化計画, 機論, 52-476, A(1986), 1119-1125.
- (15) 伊能教夫, 上杉武文: 力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン(さまざまな位相構造の生成とその形態比較), 機論, 61-585, A(1995), 1109-1114.
- (16) 伊能教夫, 下平真子, 小林弘樹: 力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン(ローカルルールによって生じるシステム全体の挙動), 機論, 61-586, A(1995), 1416-1422.
- (17) 長谷川浩志, 川面恵司, GA 利用による機械構造物の位相最適化の一方法(有限要素の除去および付加パラメータを染色体とする位相最適化法), 機論, 61-581, A (1995), 183-190.
- (18) 稲川智一, 荒川雅生, 山川宏, 遺伝的アルゴリズムを用いた 2 次元構造物の最適トポロジーに関する研究, 機論, 61-587, C (1995), 2901-2907.
- (19) 菊地昇, 均質化法による最適設計理論, 応用物理, 3-1, (1993), 2-26.
- (20) 北野宏明編, 遺伝的アルゴリズム, (1994), 産業図書.