

人工筋肉の製作を目的とした微細塑性加工技術の開発

国立鈴鹿工業高等専門学校 電子情報工学科

教授 齊藤正美

(平成6年度研究開発助成 AF-94021)

1. 研究の背景

ロボットに代表されるいわゆる知能機械の開発が近年盛んに進められているが、その機能や動作特性は生物に比べると多くの点でまだ遠く及ばない。例えば環境への適応性という点では、明らかに動作の柔らかさや環境変化に対する対応の柔軟性に欠けているといえる。その原因の一つに、コンプライアントな性質を機械に付与する手段として、これまでは制御理論、コンピュータ制御技術、人工知能理論等を基礎として過度にソフトウェア中心の考え方をしてきたことが挙げられる。これに対して生物では、ハードウェア自体にもいわば知的な性質があり、生体運動制御系の動力源（アクチュエータ）である骨格筋を例にとれば、軽量で高出力、柔軟性（粘弾性的性質）、機械的インピーダンスの可変性などのハード的特質が備わっており、これらが神経回路網の働きと融合し、あるいは相補い合って巧みな運動制御が行われる。このような特質を備えた人工の動力源＝人工筋肉ができれば、これまで以上に柔軟かつ環境適応性に優れた運動制御システムが実現できると思われる。

人工筋肉の開発に関しては、これまで静電力、電磁力、空気圧、形状記憶合金、高分子ゲルの膨潤作用を利用したもの等多数が報告されている [1]。総合的な機能はいずれも生体筋に及ばないが、その中において静電アクチュエータ

は（出力／断面積）比、エネルギー効率などの面で生体筋に匹敵する性能が得られる可能性が十分あり、また、アクチュエータに粘弾性的性質およびその可変性を与えることも原理的には可能である [2]。このような背景から本研究では、静電力によって駆動されるアクチュエータ＝人工筋肉を実現することを最終目的としている。そのためには、IC製造技術を基盤としたマイクロマシニング技術のほか、塑性加工を含む機械的加工法の新たな展開－微細化と精密化等－が必要である。本研究では、そのための製作技術＝微細加工技術を以下のように開発する。

2. 研究内容および方法

2.1 目的とする静電アクチュエータの構造と精度

従来のフィルム積層形（二次元）静電アクチュエータでは、ステータとスライダ間隙 δ を均一に維持することがむずかしいので、現状では微小ガラスビーズを挿入してすきまを確保している。そのため、実用的には δ を20-30 μm 程度にしか小さくできず、それが駆動力を増加できない一因となっている。また、摩耗によりスライダおよびステータの寿命が低下する。

このような問題点を改善するため、本研究では図1に示すような三次元構造の静電アクチュエータを提案している。

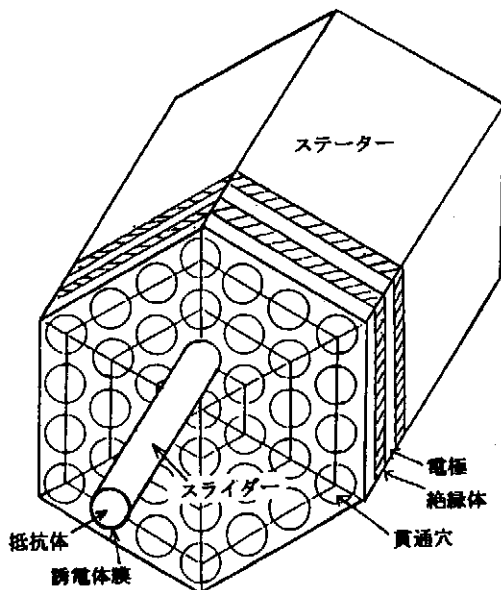


図1 目的とする静電アクチュエータの構造

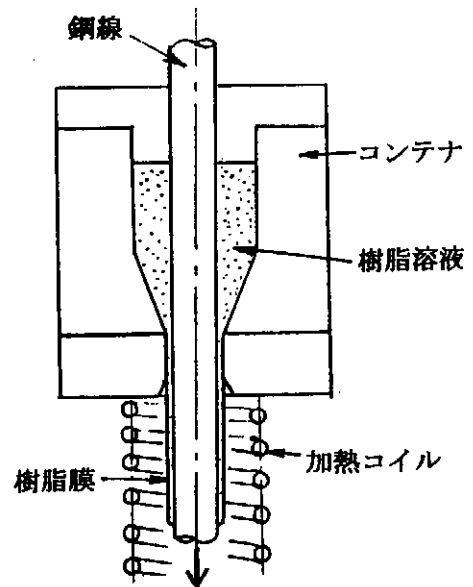


図2 スライダ誘電体膜形成装置

ステータは、厚さ120 μ m程度の金属板（電極）と樹脂薄板（絶縁体）を交互に積層・接着して円柱または多角柱をつくり、軸方向に多数の細径貫通穴を設けた構造とする。この貫通穴の中をワイヤー状のスライダーが移動する。スライダーの核は細長い抵抗体であり、その上に厚さ5 μ m程度の誘電体膜が形成されている。貫通穴の中で、このスライダーの表面と電極表面が向かい合い、二次元静電アクチュエータの場合と同様、静電誘導現象を利用して軸方向推進力を発生させる。貫通穴の直径が小さくなって密に配置できるほど、また貫通穴が深いほど（出力/断面積）比は増大する。ステータの貫通穴径およびスライダー径は0.3-0.5mm、真円度は1 μ m以下、表面あらさ $R_{max}=0.1\mu$ mを当面の目標としている。

2.2 スライダー製作方法

スライダーの断面は、図1中に示すように、芯となる抵抗体の外側に厚さ約5 μ mの誘電体膜（ポリイミド）がコーティングされた構造となっている。誘電体膜の形成手段として図2に示すような方法を採用した。芯材①を樹脂溶液②に漬漬した状態でゆっくり下方へ引き抜くと同時に、コンテナ③内で温度勾配を与えて樹脂を徐々に硬化させ、その過程でダイス④から引き抜くという方法である。装置一式を設計・製作して種々の条件下で実験を行った。

2.3 ステータ貫通穴加工法

貫通穴を形成するための方法としてつぎの2種類を試みる。

- ① 金属板と絶縁板を接着して厚さ10mm程度の積層材を作成し、その後細径ドリルで深い穴をあける。穴の真円度と曲がり、および加工可能アスペクト比が問題となる。
- ② 金属板と絶縁板を数枚接着した薄い積層板に細径ドリルで穴をあけた後、それを積層すると同時に貫通穴を形成する。その後それを下穴として仕上げ加工を行う。

3. 実験結果

3.1 ワイヤー状スライダーの製作実験

スライダーの芯は本来高い電気抵抗値をもつ材料でなければならないが、今回は膜形成実験だけを目的として鋼線（直径0.500mm、真円度1 μ m以下）を用いることにし、まづつぎのような基礎実験を行った。

エポキシ樹脂溶液に鋼線を漬けた状態で静かに引き上げて吊るし、30分間重力によって自然滴させた後、熱を加えて樹脂膜を硬化・定着させた。エポキシ樹脂溶液をメチルエチルケトンで薄めて粘度を2種類（それぞれ約20および300cSt（20℃））に調整し、それぞれについて実験を行

表1 樹脂膜形成後のスライダー径および膜厚の測定結果（自然滴下法）

	高粘度溶液の場合						低粘度溶液の場合					
	測定方向				真円度 μ m	平均膜厚 μ m	測定方向				真円度 μ m	平均膜厚 μ m
	a-a	b-b	c-c	d-d			a-a	b-b	c-c	d-d		
測定位置 1	584	588	588	587	4	43	535	533	531	534	4	17
測定位置 2	562	566	568	564	6	32	531	535	531	534	4	16
測定位置 3	549	545	545	550	5	24	532	530	528	526	6	15
測定位置 4	541	541	537	536	5	19	524	529	528	524	5	13

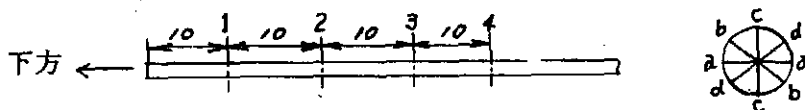


表2 樹脂膜形成後のスライダー径および膜厚の測定結果（引き抜き法）

	高粘度溶液の場合						低粘度溶液の場合					
	測定方向				真円度 μ m	平均膜厚 μ m	測定方向				真円度 μ m	平均膜厚 μ m
	a-a	b-b	c-c	d-d			a-a	b-b	c-c	d-d		
測定位置 1	514	513	512	513	2	6.5	513	513	510	511	3	5.8
測定位置 2	511	513	512	513	2	6.1	515	510	510	515	5	6.2
測定位置 3	512	512	512	513	1	6.1	511	511	517	516	6	6.8
測定位置 4	512	514	512	514	2	6.5	515	511	512	511	4	6.1

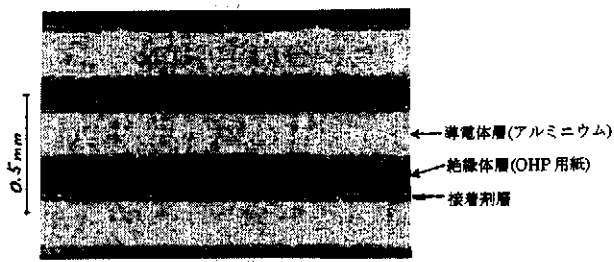


図3 導電体薄板と絶縁体薄板の積層状態

った。樹脂膜形成後のスライダ径の測定結果を表1に示す。高粘度と低粘度の樹脂溶液の場合ともに真円度はあまり良くないこと、樹脂溶液の粘度が高いほど樹脂膜が厚く、また軸方向に均一に形成されにくいことがわかる。外部から何らかの強制操作を加えない限り、均一な膜形成は困難であることを示唆される。

つぎに、同じ2種類の樹脂溶液を用いて図2に示す方法で樹脂膜形成実験を行った。鋼線を引き抜く速度は0.02mm/sおよび0.1mm/sの2種類とし、ダイス出口の加熱用コイル中心部の温度を約100℃に設定した。膜形成後のスライダ径と膜厚精度の測定結果を表2に例示する。表から看取されるように、高粘度、低粘度溶液いずれの場合も膜厚は約6μmで同程度となり、軸方向にかなり均一に膜が形成されるという結果が得られた。また、高粘度の樹脂溶液を用いた方が膜形成後のスライダ断面の真円度が良好

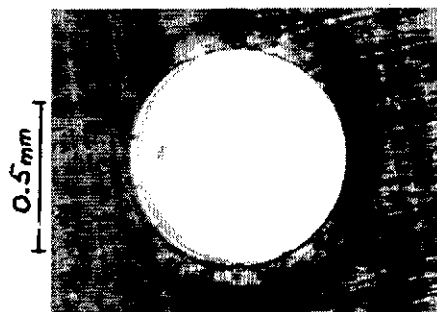
であり、また膜厚は軸方向に均一になることがわかった。それらの理由、膜形成機構の解明および膜厚精度の向上策等については引き続き今後の課題としたい。とくに後者に関しては、振動の少ない引き抜き装置の開発、樹脂硬化特性の正確な把握、真円度の高い引き抜きダイスの使用、膜形成後の矯正加工法などを検討する予定である。

3・2 ステータ貫通穴加工実験

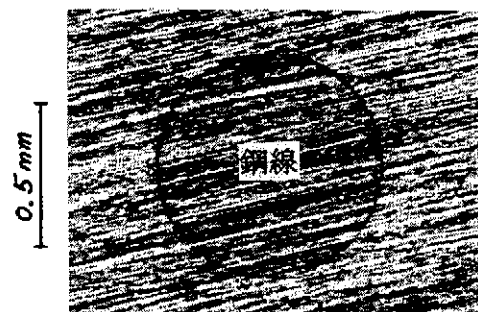
(1) ドリルによる貫通穴加工実験

電極材料としてのアルミニウム薄板(厚さ0.12mm)と絶縁薄板(厚さ0.10mm)を交互に積層・接着して穴あけ実験用試料を作成した。試料寸法は、長さ30mm、幅13mm、高さ(厚さ)10mmであり、専用の積層圧下装置を製作して実験に供した。図3に積層の状態を示す。アルミニウム層(白色)、接着剤層(アロンアルファ、灰色)、および絶縁体層(黒色)の3層から成っている。接着剤層の厚さは12~26μmの間でばらついているものの、接着状態は良好と判断された。

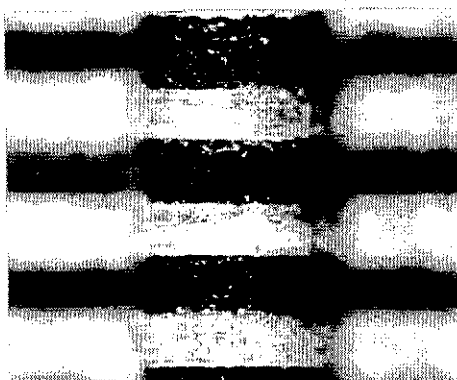
実験に用いたドリルは、細長い超硬合金製芯金の外側面に人工ダイヤモンド砥粒(平均対角長50μm)をスパイラル状にニッケル電着したものであり、外径は0.500mmに仕上げられてある。精密高速穴あけ装置により加工実験を行った。ドリルの突出量は12mm、ドリル回転数は約20000rpmとし、ドリルを上方に揺動させて切粉を排出しながら、5mm



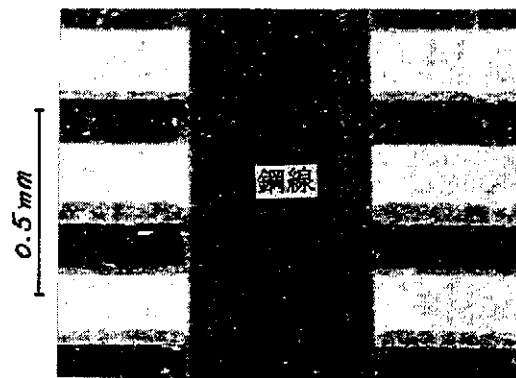
(a) 貫通穴の外観



(b) 貫通穴の形状精度(挿入された鋼線の外径0.500mm、真円度1μm以下)



(d) 貫通穴内面の性状



(c) 貫通穴加工状態

図4 積層材への貫通穴加工実験の結果

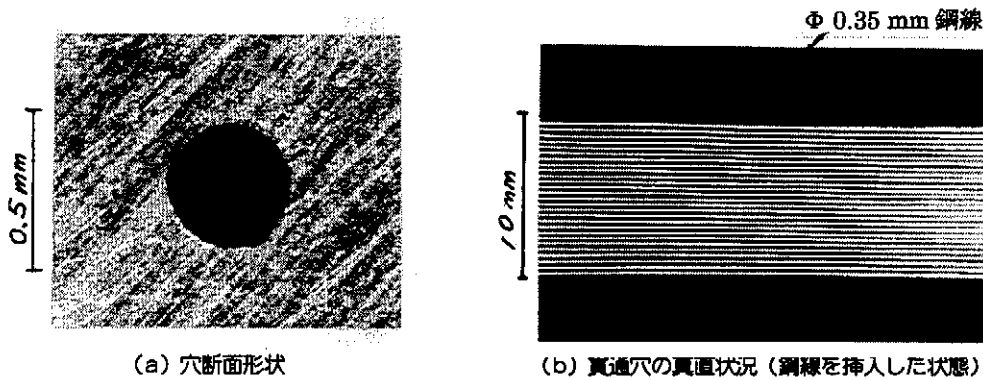


図5 積層法による貫通穴の形成実験結果

／minの送り速度で深さ10mm（アスペクト比20）の貫通穴を加工した。

図4 (a) は貫通穴仕上がり状態の観察写真である。工具顕微鏡上で下方から穴を通して光を透過させて積層材の上表面を撮影した。目視観察ではあるが、比較的良好な形状精度が得られている。このことを定量的に確認するため、外径と真円度が正確にわかっている鋼線（ $\Phi 0.500\text{mm}$ 、真円度 $1\mu\text{m}$ 以下）を穴に挿入し、その状態で断面研磨を行って拡大写真観察を行った（同図 (b)）。鋼線は穴に対して多少偏心しているが、すきまの分布状態から、穴の真円度は鋼線の真円度にかなり近い、つまり $1\mu\text{m}$ 以下であろうと判断される。また、穴の仕上がり径は $0.505\sim 0.507\text{mm}$ とドリル径よりもやや大きくなった。少なくとも真円度については実用可能範囲にあると判断できる。

つぎに、本実験に用いたドリルの加工特性を探るため、鋼線を挿入した状態で試料を研磨し、貫通穴の縦断面（貫通穴軸心を通る平面）を露出させて加工状態を観察した（図4 (c)）。図中に見られるように、アルミニウム薄板の下方（ドリル進行方向）に高さ $10\sim 15\mu\text{m}$ の材料のだれ、ないしはバリが発生していることが観察される。図 (c) の状態から鋼線だけを取り外して穴内面を観察した写真が同図 (d) である。高圧空気を噴射して貫通穴の内表面を清浄にした後であるが、表面あれ、微小バリあるいは残留切り屑によって内面性状は必ずしも良好とは言えない。貫通穴内面の性状という観点からみると、今回用いたドリルは適切でなかったと思われる。改善策として、たとえば先端に単結晶ダイヤモンド刃を装着したドリルを用いる切削方式の加工等が考えられる。

(2) 薄板の積層による貫通穴の形成

前項は多数の薄板をすべて積層した後で貫通穴をあけるという方法であったが、ここでは個々の薄板にあらかじめ穴をあけておき、それを積層すると同時に貫通穴を形成するという方法を試みる。そのため、 $\Phi 0.35\text{mm}$ のワイヤー

状ピンをガイドとして正確に薄板を積層できる装置を製作した。図5 (a) (b) に示すように、市販の切削ドリルで穴加工を行ったため真円度はあまり良くないが、細長い貫通穴を比較的高い真直度で形成することができる。これを下穴として仕上げ加工を行うという方法をとれば、密に隣り合った貫通穴を多数形成するのに有利と思われる。

4. 研究成果およびまとめ

静電力駆動による人工筋肉の開発を最終目的として、三次元構造の静電アクチュエータを提案し、その製作方法＝微細加工技術の検討を行った。第一は、断面が円の細長い心金の外側面に厚さ $5\mu\text{m}$ 程度の誘電体膜を均一に形成する技術（スライダ製作技術）、第二は、導電材料および絶縁材料の薄板を交互に積層したバルク材にアスペクト比の大きい細径貫通穴を形成する技術である（ステータ製作技術）。

スライダ製作技術については、樹脂溶液の熱硬化特性を利用した引き抜き方式の膜形成技術を考案して実験を行い、軸方向への平均膜厚誤差 $0.5\mu\text{m}$ 、真円度 $2\mu\text{m}$ 程度の精度で誘電体膜が形成できることを確認した。これらはまだ目標値には達していないが、同方法の改善策が見出せたので、今後検討を進めたい。

細径貫通穴加工技術に関しては、人工ダイヤモンド砥粒をスパイラル状に電着させた加工ドリルを用いて高速穴あけを行うことにより、アスペクト比20程度の深い貫通穴（ $\Phi 0.5\text{mm}$ ）を真円度 $1\mu\text{m}$ 以下の精度で加工できることを確認した。穴の内面性状についてはまだ不十分であるが、その改善策として単結晶ダイヤモンドドリルによる加工等が考えられる。また、薄板の積層過程で貫通下穴を形成する方法についても検討し、比較的真直度のよい貫通穴が形成できることを確認した。

以上、三次元構造の静電アクチュエータ用スライダおよびステータ製作技術を提案して実験的検討を行った。本

研究の遂行によって、それら技術の実現可能性が確認できたとともに、問題点の抽出とその改善策を見出すことができた。

5. 参考文献

- (1) Ronald E. Pelrine, Joseph S. Eckerle and Seiki Chiba : Review of Artificial Muscle Approach, Proc. on Micro Machine and Human Science, (1992, Nagoya), 1 - 19.
- (2) Youjiro Tamura, Masami Saito and Junji Furusho : A Motion Control System Modeled on Skeletal Muscle, Proc. Japan - USA Sympo. on Flexible Automation, (1996, Boston), 251 - 254.