

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360101

研究課題名（和文） 弾性表面波モータの高出力限界に関する検討

研究課題名（英文） High power surface acoustic wave motor

研究代表者

黒澤 実（KUROSAWA MINORU）

東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授

研究者番号：70170090

## 研究成果の概要（和文）：

駆動周波数は9.61 MHzで、ステータ基板としては、長さ80 mm、幅13 mm、厚さ1 mmのニオブ酸リチウム128°回転Y板、X伝搬を用いた弾性表面波モータを試作した。スライダについては、ステータの波動伝搬幅より僅かに狭い9 mmとし、長さは4 mmの素子を用いた。モータ全体の高さを低く抑えるために、薄いステンレス板による平行板ばねとした。無負荷速度としては1.3 m/sが得られ、コンパクトなモータとして最大速度の記録となった。大型の評価装置と同じ無負荷速度が、各駆動電圧値で得られており、予圧機構の安定化により、高い速度を実現した。推力については、デバイス質量約5.4g、装置全体でも205gであるのに対し、推力11 Nを実現し、大推力アクチュエータであることを実証した。高い速度と高推力により、高出力なマイクロリニアモータの実現に成功した。

## 研究成果の概要（英文）：

A surface acoustic wave motor that utilizes 80 mm long, 13 mm wide and 1 mm thick 128-degree-rotated Y, X-propagation lithium niobate has been fabricated. A slider was 4 mm long and 9 mm wide that was slightly narrower than that of wave propagation width. For low-profile structure and stable operation, parallel leaf springs were used for preload. No-load speed of 1.3 m/s and the maximum thrust of 11 N were recorded. These values are top records as a compact linear motor. The device weight was only 5.4 g, and even total weight was 205 g, which are very light for 11 N thrust.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2012年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			0
年度			0
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：メカトロニクス、アクチュエータ、圧電デバイス、リニアモータ

## 1. 研究開始当初の背景

超音波領域の弾性波動もしくは振動を、摩擦力を介して回転もしくは直線運動へ変換する超音波モータの技術は、25年ほど前から我が国において中心的に研究・実用化が推し進められ、他国をリードする技術となっている。特に民生機用途に関しては独占状態である。応募者はこれらの研究開発に初期の頃から参画し、研究成果を上げるとともに実用化にも貢献してきた。最近、産業用大型リニアステージに用いられる高速超音波リニアモータの研究成果も実用化された。

従来の超音波モータの技術をさらに発展させるため、弾性表面波デバイス技術とMEMS技術との融合により生まれたのが弾性表面波モータの技術である。この新しいモータは我々が世界に先駆けて独自に研究開発を行ってきたものである。弾性表面波モータでは、弾性表面波デバイスに用いられる優れた圧電結晶材料とデバイス作製技術や、半導体およびMEMS分野で使われる高品質な材料および薄膜技術が活用できる。また、駆動周波数10~100MHzという従来の3桁程度高い周波数を用いており、素子のパワー密度を2桁程度高くすることができ、次世代超音波モータ技術・MEMSアクチュエータ技術として期待されている。

このモータは15年前に我々が研究を始め、学術研究において世界を牽引してきた。摩擦駆動面に特殊な設計を施すことで、これまで利用不可能であった駆動周波数10MHzという高い周波数で、モータの速度、推力、分解能などにおいて優れた性能を得られることを示した。例えば、厚さ1mmで僅か4gのステータ素子(60x14x1mm<sup>3</sup>)と4mm角の摩擦駆動面によるスライダで、無負荷速度1m/s、速度推力13Nが得られ、駆動電力18Wの弾性波動から2.5Wの機械出力が変換されることを示した。しかし、これらの実験データは、大型で高剛性な実験装置において取得できたデータであり、単体のコンパクトなモータとしての動作特性としては、未だ検証されていない。

また、一連の物理現象は弾性接触理論を用いて説明でき、高周波化に伴い振動振幅が10nm程度に小さくなった結果、一見固く見える摩擦駆動面の「柔らかさ」が摩擦駆動特性に大きな影響をもつという興味深い現象を見出した。すなわち、摩擦駆動面となるシリコン製スライダ表面に、例えば、直径20 $\mu$ m、高さ1 $\mu$ mの円形状突起を4mm角に10,000個形成することで、ひとつひとつの接触点ではコンプライアンスが高く、面全体としては剛性の高い、良好な摩擦駆動状態を実現していることを明らかにしている。高周波化の利点は、電気機械変換素子が150kW/kgもの高パワー密度で動作し、自重の200倍以上の推

力と500W/kgという優れた重量比をもつアクチュエータを実現可能となる。この利点を生かして大出力アクチュエータとしての可能性を検証する。

## 2. 研究の目的

これまでの研究成果による弾性摩擦駆動モデルに基づき、スライダ摩擦駆動面のコンプライアンス最適化と面積増大について検討を行い、モータとしての機械出力の限界を明らかにする。最終的に実現する単体モータとしては、例えば、重さ5gのステータ(基板寸法、長さ80mm、幅13mm、厚さ1mm)と、幅8mm長さ4mmのスライダにより実現される性能は、これまでの実験データと現状でのシミュレーション技術によれば、無負荷速度0.9 m/s、0速度推力13 Nが見込まれる。また、シミュレーションによれば上記の動作条件で、負荷推力10 Nのときには移動速度0.45 m/s、機械出力4.5 W、変換効率40%程度が得られる見込みである。これを実験により実証する。さらに、実験結果との比較により、シミュレーションの解析精度を向上して、駆動状況を把握するとともに、出力最大化、損出の低減、摩擦の低減等について検討を行い、限界出力と設計方法などを明確化する。

## 3. 研究の方法

駆動周波数10MHzの単層モータに関してスライダ摩擦駆動面の大きさと「柔らかさ」を駆動力に関し最適化をおこない、また機構の改良により無負荷速度特性を改善し、モータの機械出力を高くできるようにする。これまでに開発した弾性摩擦接触モデルに基づく摩擦駆動解析より、摩擦駆動時における駆動面のコンプライアンスの最適化を実現する。摩擦駆動面の耐久性向上のため、摩擦駆動面に与える負荷を下げた動作状況を検討する。また、考案・研究を進めてきた環流方式による励振電極の構成方法の最適化を行う。新たな対象構造の電極配置による高周波電力環流方式、および、高周波電力を一旦直流に変換して環流する新しく考案した環流方式による電極構成について検討を行う。

## 4. 研究成果

先ず、モータ全体の評価に先立って、ステータにおける波動励振とパワー回収効率に関しての評価実験を行った。ステータとして基板寸法90x13x1mm<sup>3</sup>のニオブ酸リチウム128°回転Y板、X伝搬を用いて、開口幅9mmのIDTを反射器付で作製した。この素子を用いて、レイリー波伝搬および回収効率と整合および進行波励振条件を実験により確認した。励振に関しては、反射器を付けたことにより反射器の無い場合に比べて1.7倍の電力

が波動として変換されている事が分かった。ここでの変換効率は 85%となった。また、整合抵抗 70Ωにおいて定在波比 1.2となる進行波が得られることを確認した。整合抵抗での電力回収率は 65%であり、素子での波動励振と受波において、35%のパワーロスの有ることを明らかにした。

弾性接触理論に基づいて開発した、弾性表面波モータの動作解析ツールに、スライダ突起が波動の進行方向に分布する効果を加えることで、摩擦駆動により波動が減衰する効果を取り込んだシミュレーション方法を検討した。改良した解析ツールでは、一つの突起を波動が通過する度に波動電力が減少する量の評価し、振幅値を更新して、次の突起に到達した波動が推力を発生するようにシミュレーションをしていくようにした。この方法により、動作解析が可能であることを明らかにした。

モータとしての動作を評価するため、5x5, 5x10, 10x10 mm<sup>2</sup>のスライダを用いて、予圧および駆動電圧を変化させて特性評価を行った。これまでの評価では、波動伝搬方向に 10mmのスライダでは、後方において波動振幅の減衰が大きくなるために、十分な推力を得られないために効率の低下が生ずることを明らかにした。そのため、スライダが大きい方が推力は大きくなるが、効率の観点から、スライダ長を長く取ることは好ましくなく、5mmとするのが適切であることを明らかにした。

ステータに用いる弾性表面波素子の波動励振および回収効率に関する検討と、弾性接触解析シミュレーションおよび試作・実験による動作条件の最適化検討した。ステータの電極に関しては、励振および回収効率はそれぞれ 80%程度であり、波動の回折効果による開口幅からの広がりを見ると、既に高い効率で動作した。導波路形成による漏れの低減も考えられるが、それほど効果が見込まれないと考えられる。

モータ特性の評価のために、駆動周波数約 10MHzで、ステータ基板としては、長さ 80mm、幅 13mm、厚さ 1mm のニオブ酸リチウム 128° 回転 Y 板、X 伝搬を用いた。スライダについては、ステータの波動伝搬幅より僅かに狭い 8 mm とし、長さは動作実験の結果をふまえて 4 mm の素子を用いた。シミュレーションに依れば、波動伝搬パワーからモータ機械出力への変換効率は、40%程度の効率が見込まれた。実験では、ミリメートルの全体寸法オーダーに対して、ナノメートルの平滑度を持って接触を実現することは困難であることが予想されたが、最大 32%という高い変換効率が実験により得られた。モータの動作特性としては例えば、予圧 40N のときに、無負荷速度 0.9m/s、推力 13N が得られ、機械出力

は最大で 3W となった。

モータとしての質量当たりの出力などを評価するため、予圧機構などを含めて、できるだけコンパクトで安定した動作が可能なモータ構造を検討して試作した。試作したモータについては、速度、推力、効率などの性能試験を行った。無負荷速度の低下が大きく、構造上の問題があることがわかった。また、推力についても実験装置ほどの値は得られていないが、質量約 10g のデバイスで、700 g の負荷を持ち上げられることを実験により示した。自重の 70 倍の負荷を持ち上げられる高出力なアクチュエータであることを実証した。

コンパクトな弾性表面波モータを試作し、モータ特性の評価を行った。駆動周波数は 9.61MHz で、ステータ基板としては、長さ 80mm、幅 13mm、厚さ 1mm のニオブ酸リチウム 128° 回転 Y 板、X 伝搬を用いた。スライダについては、ステータの波動伝搬幅より僅かに狭い 9 mm (摩擦駆動部は 8 mm 幅) とし、長さは大型装置による動作実験の結果をふまえて 4 mm の素子を用いた。モータ全体の高さを低く抑えるために、予圧を与えるばねとして、薄いステンレス板を用いた板ばねを用いた。また、予圧方向以外の剛性を高めて、大きな予圧印加を可能とするために、同じ板ばねを 2 枚用いた平行板ばねとした。このばねを用いることで、薄型で高い予圧を安定して印加できる構造とした。

モータの動作特性を、予圧と駆動電圧を変化させて測定した。無負荷速度としては 1.3m/s が得られ、コンパクトなモータとして最大速度の記録となった。このモータのスライダにはアルミナ膜を成膜したものと、していないものが用いられ、いずれの場合もこの最大速度を記録することができた。全体としてはだいたい大型の評価装置と同じ無負荷速度が、各駆動電圧値で得られており、予圧機構の安定化により、良い結果が得られることが明らかになった。推力に関しても同様に評価を行った。アルミナ膜のあるなしにより、多少推力の結果が異なり、摩擦係数の違いによるものと思われるが、膜がない方が大きめの値となった。例えば、駆動電圧 80 V においては、膜有りが 9.1 N であったのに対し、膜無しでは 11 N が得られた。大型装置では、13 N という記録があり、これに比べるとやや低下している。この原因は明らかではない。推力については、デバイス質量約 5.4g、装置全体でも 205 g であるのに対し、推力 11 N を実現した。デバイス重量の 200 倍以上の推力が得られる大推力アクチュエータであることを実証した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1. 黒澤実, “弾性表面波モータ,” 機械の研究, 62(5), 査読有, pp.496-502, 2010.  
<http://www.fujisan.co.jp/product/478/b/341203/>
2. 黒澤実, “小特集-最近の超音波モータの研究とその動向- 弾性表面波モータ,” 日本音響学会誌, 査読有, 66 巻 3 号, pp. 130-135, 2010.  
[http://www.asj.gr.jp/journal/04\\_contents/2010\\_03.html](http://www.asj.gr.jp/journal/04_contents/2010_03.html)
3. 黒澤実, “小特集「最近の超音波モータの研究とその動向」にあたって,” 査読有, 日本音響学会誌 66 巻 3 号, pp. 112-113, 2010.  
[http://www.asj.gr.jp/journal/04\\_contents/2010\\_03.html](http://www.asj.gr.jp/journal/04_contents/2010_03.html)
4. K. Sakano, M. K. Kurosawa, and T. Shigematsu, “Driving Characteristics of a Surface Acoustic Wave Motor using a Flat-Plane Slider,” *Advanced Robotics*, 査読有, vol. 24, no. 10, pp. 1407-1421, 2010.  
DOI: 10.1163/016918610X505549

[学会発表] (計 20 件)

1. 河瀬達也, 黒澤実, “弾性表面波モータの薄型化の実現とその評価,” 日音講論集, pp. 1329-1330, 東京・東京工科大学 (2013.3.13)
2. 黒澤実, “進行波型超音波リニアモータの効率とその可能性 (招待講演),” 日音講論集, pp. 1321-1324 東京・東京工科大学 (2013.3.13).
3. M. K. Kurosawa and H. Sakano, "Estimation of surface acoustic wave motor efficiency," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., p. 5C-4, International Congress Center, Dresden, Germany Oct. 8, 2012.
4. 黒澤実, 上原弘嵩, “高温環境での利用を考慮したクリップ型両面駆動 SAW モータの試作,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, pp. 2P1-G05(1)-(2), 静岡・アクトシティ浜松 (2012.5.29).
5. H. Tanaka, and M. K. Kurosawa, “Design of A Plunger Type Surface Acoustic Wave Motor,” in Abst. of 9th International Workshop Piezoelectric Materials and Applications in Actuators, IWPMA2012, p. 57, Hirosaki, Aomori, Japan, Apr. 23-25, 2012.
6. T. Kawase, and M. K. Kurosawa, “Design of the Thin Surface Acoustic Motor,” in Abst. of 9th International Workshop Piezoelectric Materials and Applications in Actuators, IWPMA2012, p. 14, Hirosaki, Aomori, Japan, Apr. 23-25, 2012.
7. 上原弘嵩, 黒澤実, “積層型弾性表面波モータにむけた両面駆動化に関する研究,” “日音講論集, pp. 1353-1354, 神奈川・神奈川大学 (2012.3.14).
8. 河瀬達也, 黒澤実, “非線形板ばねを用いた弾性表面波モータの小型化とアクチュエータとしての評価,” “日音講論集, pp. 1351-1352, 神奈川・神奈川大学 (2012.3.14).
9. 田中宏樹, 黒澤実, “プランジャ型弾性表面波モータの研究,” 日音講論集, pp. 1289-1290, 神奈川・神奈川大学 (2012.3.13).
10. M. K. Kurosawa, “Ultrasonic Motors: vibration generation, friction drive and energy harvesting, (invited)” to be published in Proc. IEEE Ultrason. Symp., Caribe Royale, Orlando, FL, USA., Oct. 18-21, 2011.
11. 黒澤実, 上原弘嵩, “高温環境での利用を考慮したリニアガイドレス SAW モータの試作,” 第 29 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, pp. RSJ2011AC3K1-5, 東京・芝浦工業大学 (2011.9.9).
12. 黒澤実, “弾性表面波モータの高温環境における動作の可能性,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 講演論文集, pp.1A2-F06(1)-1A2-F06(2), 岡山・岡山コンベンションセンター (2011.5.27).
13. 黒澤実, 坂野広樹, “弾性表面波モータの変換効率の検討,” 第 23 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 339-342, 愛知・愛知県産業労働センター (2011.5.19).
14. 河瀬達也, 黒澤実, “弾性表面波リニアモータの小型化・薄型化に関する研究,” 日音講論集, pp. 1405-1406, 東京・早稲田大学 (2011.3.11).
15. 上原弘嵩, 黒澤実, “両面駆動型弾性表面波モータによる高推力化に関する研究,” 日音講論集, pp. 1403-1404, 東京・早稲田大学 (2011.3.11).
16. 黒澤実, “超音波モータのパワー密度と発生力 (招待講演),” 日音講論集, pp. 1703-1706, 東京・早稲田大学 (2011.3.9)
17. 黒澤実, 坂野広樹, “弾性表面波モータの効率の評価,” 圧電材料・デバイスシンポジウム 2011 講演論文集, pp. 41-46, 宮城・東北大学 (2011.1.31)
18. 黒澤実, “弾性表面波モータの真空中動作における諸問題,” 第 28 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, RSJ2010AC1N2-2 愛知・名古屋工業大学 (2010.9.22).
19. 黒澤実, “超音波モータ,” 日本機械学会機素潤滑設計部門 No.10-39 「ブレークスルーを生み出す次世代アクチュエータ」講習会 pp. 7-14, 愛知・名古屋大学

(2010.6.22).

20. 黒澤実, “超音波モータ,” 日本機械学会機素潤滑設計部門 No.10-38 「ブレークスルーを生み出す次世代アクチュエータ」講習会, pp. 23-30, 愛知・名古屋大学 (2010.6.21).

[図書] (計 3 件)

1. 黒澤実, Woodhead Publishing, Ultrasonic transducers (分担), pp. 117-153 (2012. 9)
2. 黒澤実, Springer, Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs (分担), pp. 7-18 (2010.1)
3. 黒澤実, 株式会社エヌ・ティー・エス, アクチュエータ研究開発の最前線 (分担), pp. 78-150 (2011.8.8)

[その他]

ホームページ等

<http://www.kurosawa.ip.titech.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

黒澤 実 (KUROSAWA MINORU)  
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・  
准教授  
研究者番号 : 70170090

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし