

京都工芸繊維大学

氏名	かわさき おさむ 川崎 修
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博乙第166号
学位授与の日付	平成20年9月25日
学位授与の要件	学位規則第3条第4項該当
学位論文題目	圧電デバイスと圧電デバイス技術に関する研究
審査委員	(主査)教授 吉本昌広 教授 尾江邦重 教授 播磨 弘

論文内容の要旨

本論文は、エレクトロニクス産業において、重要な電子部品・デバイスの一つである圧電デバイスと圧電デバイスを実現する際に必要となる技術(圧電デバイス化技術)に関する研究をまとめたものである。

第1章では、本研究の技術的背景、関連する技術の現状と課題を述べ、本研究の目的と意義、論文の構成を述べた。

第2章では、撓み振動の進行波を用いた超音波モータについて述べた。このモータは効率、制御精度、信頼性などに問題がある。ここでは、これらの問題点を解決し、さらに小型化の限界を明確にすることを目的とした。具体的には以下の研究を進めた。

- ①圧電振動解析による、駆動能力が高く機械振動損失が小さい振動体の開発。
- ②振動体の変位が移動体へ伝達される機構の理論的解析とその実験的検証。
- ③パルス計測による非線形性の迅速な評価法の考案と、同手法を活用した圧電セラミックの線形性の改善。
- ④圧電セラミックの非線形性によるモータのヒステリシス特性の発見と、それとモータの不安定動作の関係解明。
- ⑤不安定動作を回避するための駆動制御回路の考案。

これにより、進行波方式超音波モータの理論、設計、製作および使用で必須となる一連の技術を確立した。

以上の技術を用いて、①中空形状効果を活かしたリング型超音波モータ、②大出力化と精密制御を目的としたディスク型超音波モータ、③機器の小型を推進する小型超音波モータを開発した。本研究により、超音波モータの最高効率が50%程度にまで向上し、数ミリメートルの大きさまでの小型化が可能になった。これらの超音波モータは実用化された。

第3章では、圧電トランスの実用化を阻んできた破壊や特性劣化など、信頼性に関する問題の解決を目指した研究の結果を記した。①圧電トランスの理論解析に基づく圧電トランスの開発、②パルス駆動による圧電セラミック材料の非線形性の迅速な評価法の考案、および、この評価手法を活用した圧電セラミック材料の開発、③圧電トランスのヒステリシス特性と不安定動作の関係の解明、および、不安定動作領域での駆動がトランスの破壊の大きな原因であることの明確化、④自動周波数追尾機能と不安定動作領域回避機能を備えた駆動回路の実現を行った。これにより、本トランスを液晶ディスプレイのバックライト用のインバータ電源の昇圧トランスとして実用化した。

圧電デバイスでは、圧電セラミック材料の非線形性と有機系接着層の存在が、信頼性を含む特性に悪

影響を与えている。第4章では、圧電単結晶を原子レベルで接合できる直接接合技術を使用して、この課題の解決を行った。まず、Z-カット LiNbO₃を分極方向が反転するように直接接合して分極反転基板を作成し、2次の厚み振動モードを励振する高周波共振子を研究した。従来の共振子に比べ、2次高調波を利用した共振子は、厚さを2倍にできるので高周波化が容易である。圧電単結晶の種類と方位を選び直接接合することにより、圧電特性を制御できることを示した。また、直接接合は、接着層を用いた場合に比べて、高周波において機械的損失を小さくでき、圧電特性が安定することを実証した。

分極反転基板でバイモルフ型振動子を形成し、衝撃センサおよび圧電アクチュエータの片持ち梁構造を作製した。バイモルフ素子の固定も直接接合で行うことにより、接合による機械損失を低減し、超小型かつ高感度な加速度センサを実現するとともに、線形性と温度特性の優れた圧電アクチュエータを実現した。

これらのデバイス研究を通じて、直接接合は高周波帯でも機械損失が小さく、しかも大変位動作領域においても特性が優れ、耐熱性が高く、信頼性の高い接合が実現できることを実証した。

第5章では、通信機器の小型化や薄型化を阻害しているラダーフィルタの小型化および薄型化の研究について述べた。長さ振動モードの矩形棒共振子において、新電極構造の考案により、通過帯域幅が広く、帯域外減衰量が大きいという優れた特性を持つ薄型で小型のラダーフィルタが可能になった。矩形棒状共振子は振動エネルギーが小さいので、保持の影響を受けやすい。ニッケル・クロム・アルミ溶射膜を共振子の振動の節に形成し、この溶射膜を介した支持構造により、共振特性が良好で、特性ばらつきが小さく、耐衝撃性が優れ、他素子からの振動漏洩を低減した保持構造を実現した。加えて、レーザー・シェービング加工による素子の共振周波数の微調整方法を考案し確立した。これらのデバイス化技術の確立により高性能の薄型で小型のラダーフィルタを実現した。

第6章は本研究の総括である。

論文審査の結果の要旨

本論文では、重要な圧電アクチュエータである超音波モータについて、①圧電振動の解析、②電気から振動へのエネルギー変換の解析、③振動から回転運動への変換の解析を体系的に進め、効率が50%を超える撓み振動式の超音波モータを実現した。本研究において2つのブレークスルーが認められる。そのうちの1つが超音波モータを安定に駆動する方法を考案したことであり、それは次の3点により実現している。

(1)圧電セラミックの非線形性に起因したヒステリシスが、超音波モータの周波数特性に存在することを明らかにした。そのヒステリシスがモータの不安定動作の原因であることを解明した。

(2)安定動作のためには、ヒステリシス領域より少し高い共振周波数付近での駆動が必須であることを解明した。

(3)ヒステリシスを示す周波数領域は、温度、駆動電圧および、負荷の状況により変化する。その変化をリアルタイムで検知し、駆動周波数を制御し、常に共振周波数付近で安定動作させる駆動回路を考案し、実現した。

以上の知見をもとに、超音波モータの最高効率を50%程度に向上し、また、5mm程度にまで小型化して、超音波モータの品質を製品レベルにまで向上させた。

超音波モータの研究で得られた知見をもとに、圧電トランス、衝撃センサおよびラダーフィルタの研究開発を展開している。圧電トランスの実用化を阻んできた破壊や特性劣化の問題を、超音波モータと同じ方法(前記(3))により解決し、その方法の有効性を確証している。

さらに、圧電単結晶の直接接合という新しい概念を提案し、圧電特性を制御できることを示したことが、本論文における、もうひとつの大きなブレークスルーである。これは、圧電単結晶の種類と方位を選び、接着層を介さずに直接接合することで、圧電特性を制御するもので、接着層を介する場合より、高周波帯域で機械損失が小さく、大変位動作でも特性の優れた接合になる。この成果は圧電デバイスの製作法に関して、これまで無い新しい道を切り開いたものといえる。本成果は衝撃センサやカーナビゲーションの方位センサとして実用化されている。

このように、本論文は、圧電材料の特性評価からデバイス構造の最適化、さらには、安定動作のための駆動回路の考案まで、圧電デバイスの実用化に必要な技術に関する研究を一貫して行なっている。超音波モータの研究開発において、一時代を画した研究であり、圧電材料およびデバイスに関する学術的な貢献はもとより、その工学的な応用上の価値は特筆に値する。

本研究は、申請者が 1984 年に立ち上げた研究グループにおいて、16 年間にわたり一貫して、研究リーダーとして直接行ってきた圧電デバイスに関する研究を集大成したものである。基礎となる内容は、以下の 8 編の国際誌に公表されている。参考までに、本論文の内容は 14 編の参考論文と共に著書 1 編に記載されている。また、本研究の成果は国内 107 件、米国 32 件の登録特許(うち国内 54 件、米国 8 件は本申請者が筆頭発明者)となり、強固な知的財産権が構築されている。

- (1) R. Inaba, A. Tokushima, O. Kawasaki, Y. Ise, H. Yoneno, *Piezoelectric ultrasonic motor*, 1987 IEEE Ultrasonic Symposium, pp.747-756(1987)
- (2) O. Kawasaki, T. Nishikura, M. Sumihara, T. Ohtsuchi, K. Takeda, T. Nojima, K. Imada, *A small size ultrasonic motor*, 1993 IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp.435-440(1993)
- (3) K. Eda, Y. Tomita, M. Sugimoto, A. Nanba, T. Ogura, Y. Taguchi, O. Kawasaki, *Novel composite piezoelectric materials using direct bonding techniques*, 1995 IEEE Ultrasonics Symposium, pp.921-924(1995)
- (4) O. Kawasaki, M. Sugimoto, K. Takeda, Y. Tomita, K. Eda, *Variable property crystal resonators by direct bonding techniques*, 1996 IEEE Ultrasonics Symposium, pp.897-900(1996)
- (5) T. Ohtsuchi, M. Sugimoto, T. Ogura, Y. Tomita, O. Kawasaki, K. Eda, *Shock sensor using direct bonding of LiNbO₃ crystals*, 1996 IEEE Ultrasonics Symposium, pp.331-334(1996)
- (6) T. Ishizaki, Y. Asakawa, T. Furihata, J. Kato, O. Kawasaki, *A low-profile ladder filter for portable telephones employing length expander mode*, Jpn. J. Appl. Phys., **35**, 290-298(1996)
- (7) K. Imada, K. Miki, M. Sugimoto, T. Ohtsuchi, Y. Tomita, O. Kawasaki, K. Eda, *New piezoelectric bimorph structure actuator with high performance*, 1997 IFAC-IFIP-IMACS Conference, pp.397-402(1997)
- (8) M. Sugimoto, K. Takeda, T. Ohtsuchi, Y. Tomita, O. Kawasaki, *Even-order thickness-shear mode resonators using X-cut LiNbO₃ plates realized by a direct bonding technique*, 1998 IEEE Ultrasonics Symposium, pp.919-923(1998)

[参考論文]

- (1) 川崎修, 西倉孝弘, 武田克, 分散型電極構造の円板型超音波モータ, 電子情報通信学会, 信学技

報US87-58, pp.31-35(1987)

- (2) O. Kawasaki, T. Nishikura, Y. Imasaka, M. Sumihara, K. Takeda, H. Yoneno, *Ultra-Sonic Motor*, Denshi Tokyo No.26, pp.158-161(1987)
- (3) 稲葉律夫, 德島晃, 川崎修, 今吸喜信, 住原正則, 武出克, 米野寛, 伊勢悠紀彦, 超音波モータ, 電子情報通信学会, 信学技報US86-64, pp.25-30(1987)
- (4) 武田克, 住原正則, 西倉孝弘, 川崎修, 円板型超音波モータの振動体設計, 電子情報通信学会, 信学技報US88-54, pp.43-49(1988)
- (5) 川崎修, 4.1 アクチュエータへの応用における圧電セラミックの評価法, 材料開発における新しい評価法(3), 東京, 社団法人日本工業連合会, pp.131-147 (1991)
- (6) 川崎修, 超音波モータ, 機能材料, 東京, (株)シーエムシー、1991年1月号, Vol.11, pp.17-23 (1991)
- (7) 川崎修, 超音波モータ, 日本機械学会, メカトロニクス・ロボティクスにおける駆動・伝達機構の基礎と応用, pp.9-15(1991)
- (8) 川崎修, 圧電アクチュエータ, 金沢工業会誌, pp.23-29 (1992)
- (9) 川崎修, 江田和生, 福島寛, 岩田比呂志, 圧電トランス式インバータの開発, 電子情報通信学会, 信学技報US96-25, pp.31-37(1996)
- (10) 川崎修, マイクロ超音波モータ, 日本応用磁気学会, 応用磁気研究会資料, MSJ96-3, pp.17-24 (1996)
- (11) 川崎修, マイクロ圧電アクチュエータ, 電気学会, マグネティックス研究会資料, MAG-97-16, p.15-20(1997)
- (12) 大土哲朗, 川崎修, 直接接合型衝撃センサ, 日本機械学会, 講習会No. 97-57, 振動制御におけるアクチュエータ・センサ技術, pp.23-27(1997)
- (13) 川崎修, 圧電デバイスの加工, 砥粒学会誌, Vol.42, No.11, pp.479-483(1998)
- (14) 川崎修, 大上哲郎, 今田勝巳, 杉本雅人, 富田佳宏, 直接接合圧電デバイス, 電子情報通信学会, 信学技報US97-212, pp.31-35(1998)[招待論文]

[著書]

- (1) 川崎修(分担執筆), 精密制御用ニューアクチュエータ便覧, 富士テクノシステム (1994)
[分担箇所] 第1章圧電アクチュエータ 第22節リングバイモルフによるVTRオートトラッキングデバイス(pp.730-738); 第28節 オートフォーカス用アクチュエータ (pp.780-786), 第2章超音波モータ 第1節序論(pp.825-838); 第2節 拡大機構を有するディスク型超音波モータ(pp.839-848)