

## 論文の内容の要旨

論文題目 非線形伝達マトリックス法による圧電材料のハイパワー特性解析

氏 名 三宅 奏

圧電材料は変位入力を電荷出力に変換する正圧電効果、電界入力を変位出力に変換する逆圧電効果を用いて、超音波モータやエナジーハーベスティング技術、MEMSアクチュエータ・センサなど様々な用途に応用されている。これらの中でも、強力超音波デバイスなどの高トルク・高音圧が求められる用途においては、圧電振動子に高電圧を印加して共振振動を用いている。しかし、このようなハイパワー駆動条件においては、圧電振動子の振動速度の飽和や共振周波数変化、電流跳躍現象、駆動周波数に対する振動速度のヒステリシス等の現象が生じる。これらは圧電材料の非線形振動が原因とされており、振幅が大きくなることにより、高次弾性の影響が無視できなくなることによって、このような非線形現象が引き起こされている。また、圧電振動子が大振幅で振動した場合、非線形振動に加えて、歪みに応じた発熱が生じる。このような発熱は圧電材料の振動損失を増加させ、損失の増加によってさらに発熱量が増加していき、急激な発熱につながる。これにより、発熱は非線形振動と同様に、振動効率の低下および振動速度の飽和、あるいは圧電材料の脱分極を引き起こす。しかし、ハイパワー駆動時の非線形振動、発熱のいずれのメカニズムについても、これまで明らかにされていない。

圧電材料の特性評価指標として一般的に用いられている圧電定数や電気機械結合係数、Q値は非線形振動の影響を考慮していないため、現状では強力超音波デバイスにはハイパワー駆動には適していない材料が用いられている可能性がある。また、圧電材料開発の面でもこれらを経験指標として進められているため、ハイパワー駆動に適した圧電材料の開発は遅れている。また、圧電デバイスの設計には有限要素法が一般的に用いられているが、高次弾性の影響を考慮していないため、非線形振動の影響を抑えるために最適なデバイス設計もなされていない。

そこで本論文では、非線形振動と自己発熱が影響を与える圧電材料のハイパワー駆動時の圧電振動をモデル化し、これを用いて、ハイパワー特性の定量的評価方法を確立することを目的とした。また、提案手法を用いて異なる組成、添加物を有する複数種類の圧電材料のハイパワー特

性を比較することで、ハイパワー向け圧電材料開発の指針を得た。さらに、この測定を通じてハイパワー特性に優れる非鉛圧電材料を選定し、これを用いた小型超音波モータを試作し、その特性を評価した。

圧電材料のハイパワー特性のモデル化を行う上で、非線形振動と自己発熱の2つの影響要因があることは問題を複雑にする。そこで、まず温度一定条件を仮定した上で、非線形振動のモデル化を行った。高次弾性定数を圧電方程式に導入し、分布定数系の非線形振動モデルとして、非線形伝達マトリックスを導出した。非線形振動解析を分布定数系で行うことができれば、温度分布が発生した場合でも計算が可能になるためである。従来の圧電非線形振動の測定・解析手法として、非線形圧電等価回路がある。本手法は圧電体のLCR等価回路において、機械端子側の回路定数 $R$ 、 $C$ を振動速度に依って変化するパラメータとして扱うことで、非線形現象をモデル化している。機械的な振動の非線形性のみに着目し、圧電的性質・誘電的性質の非線形性はこれに比べて影響が小さいということを示した点で非常に有益であり、本研究でもこれを根拠として高次弾性のみに着目したモデル化を行っている。ただし、非線形圧電等価回路は集中定数系のモデルであるため、境界条件が限定される、発熱の計算が困難である、分極方向に対して圧電縦効果への応用が困難であるという問題点があった。本研究で提案する非線形伝達マトリックスは以上の問題点を解決する手法となっている。

非線形圧電等価回路では回路定数を非線形パラメータとして扱っており、その非線形性の大きさを示す非線形係数を指標とすることで、圧電体の非線形特性を評価する手法が提案されている。しかし、非線形係数は振動子形状や材料の物性値に依存する値であるため、定量的測定としては最適ではない。本研究で着目する高次弾性定数は形状などに依存しない物性値であり、これを評価指標とすることで定量的な測定が行える。高次弾性定数は等価回路の非線形係数から求めることができ、分極方向に対して垂直な方向の振動に着目した圧電横効果の振動については、圧電振動子のアドミタンス特性を温度上昇を抑えるため高速スイープで測定し、非線形圧電等価回路を用いてフィッティングを行うことで高次弾性定数を測定することができる。この手法を用いて、異なる組成・添加物の非鉛圧電材料を高次弾性定数という評価指標から比較した。この結果、結晶粒界がなく単一ドメインである圧電単結晶は、圧電セラミックスに比べて非常に小さな高次弾性定数絶対値を持つこと、材料の圧電定数の減少、1次弾性定数の増加が高次弾性定数絶対値の減少につながる事が明らかになった。これにより、ハイパワー特性の向上のために必要な材料開発指針として、ドメイン壁や結晶粒界などの内部の構造欠陥を減らすこと、アクセプタ添加物の添加によるドメイン壁のピン止め、圧電性を高めるための手法としてよく用いられる、複数の結晶構造が共存するMPB(モルフォトロピック相境界)から組成比を離すこと等が有効となることを明らかにした。

以上の測定は電圧印加が容易であり、測定が簡便な圧電横効果で行ったが、一般的には分極方向と同方向の振動を用いる圧電縦効果の方がより圧電効果が大きく、圧電デバイスに応用されることが多い。しかし、圧電縦効果の場合には振動子の歪み分布に応じて電界分布が生じ、電界が一定とならないことから圧電等価回路を用いる場合機械端子側のLCRを複数考慮する必要がある。

り、非線形振動を考える場合横効果と同じように非線形圧電等価回路を用いることができない。そこで、圧電縦効果の場合には非線形伝達マトリックスを用いて高次弾性定数を求めた。横効果の場合と同様にアドミッタンス特性を測定し、非線形伝達マトリックスによるフィッティングを行って高次弾性定数を求めた。ただし、本モデルでは高次弾性定数の導入によって、見かけのステイフネスが材料の歪みに応じて変化し、歪み分布が変化したことによってその都度ステイフネスが変化するため、繰り返し計算によって歪み分布が収束するまで計算を行うアルゴリズムを構築し、計算を行った。

ハイパワー駆動時に避けられない圧電振動子の自己発熱についても、非線形伝達マトリックスを用いてモデル化を行った。まず、高次弾性定数を含めた物性値の温度依存性測定を行った。測定はアドミッタンス測定を用いて、恒温槽の内部に振動子を設置し、環境温度を変化させることで、各温度での物性値を求め、温度に対する物性値変化を測定した。自己発熱による温度上昇は、振動によるエネルギー損失を発熱源として熱伝導方程式を解くことで計算が行える。この際、温度によって圧電材料の物性値は変化するが、既に測定した物性値の温度依存性を参照し、物性値を変更し繰り返し計算を行うことで、非線形振動と自己発熱の相互影響をモデル化した。本手法を用いて圧電振動子の飽和振動速度を計算した結果、実測とよく一致し、モデルの妥当性を示すことができた。

以上のように、本論文では、高次弾性定数を圧電方程式に導入することにより、圧電材料のハイパワー特性の定量的評価手法の確立、実用上避けられない発熱を含めた評価、ハイパワー特性向上に適した材料開発手法の発見など、多岐にわたる応用が可能であることを示した。これまで、圧電材料のハイパワー特性については定量的評価法が無かったため、材料開発が遅れていたが、本論文による提案手法を元に評価と材料開発を行っていくことで、特に非鉛圧電材料については、既存の材料の新たな長所の発見や、新規材料の開拓につながり、環境負荷が小さく、十分な実用性を持った強力超音波デバイスの実現が期待できる。