

## 審 査 の 結 果 の 要 旨

氏 名 三宅 奏

本論文は圧電材料のハイパワー特性の定量的評価方法について研究した成果であり、以下の六章から構成されている。第一章は研究背景並びに目的について、第二章は従来の非線形振動解析手法と、本論文で提案する非線形伝達マトリックスの導出について、第三章は圧電横効果振動子の非線形振動特性の定量的評価について、第四章は圧電縦効果振動子の非線形振動解析手法について、第五章は発熱を考慮したハイパワー特性解析手法について、第六章は本論文の結論について述べている。以下に各章の概要を示す。

第一章では研究背景として、従来の圧電材料のハイパワー特性評価手法の問題点について述べている。圧電振動子を大振幅で共振駆動するハイパワー駆動条件下では、共振周波数変化、電流跳躍現象、急激な発熱が生じ、強力超音波デバイスの出力パワー飽和や制御の困難さが問題となっている。これらの現象は発熱と非線形振動が相互に影響を及ぼしており、その特性評価方法が確立されていない。そのため、小振幅特性に着目した材料の選定が行われ、圧電定数や電気機械結合係数の大きい鉛系圧電材料が現在の主流の圧電材料となっている。その一方で、環境負荷の小さい非鉛圧電材料では、圧電定数は比較的小さいものの、ハイパワー駆動時の共振周波数変化や発熱が抑えられるものも存在する。そこで本研究では、環境負荷が小さく、従来よりも高性能な超音波デバイス実現のため、ハイパワー特性の定量的評価方法の考案を目的としている。

第二章では、先行研究での圧電非線形振動の測定・解析手法として、電氣的過渡応答測定法と非線形 *LCR* 等価回路について紹介している。これらは圧電材料の非線形振動のみに着目して測定・解析を行うため、発熱が生じない範囲での測定が前提となっている。しかし、実用上発熱は避けられないため、本研究では発熱が生じた場合にも解析が可能になるよう、圧電方程式に歪みの高次項を導入し、振動モードを解析可能な非線形伝達マトリックスを導出した。これを繰り返し計算のアルゴリズムで計算することにより、アドミッタンス曲線に現れる非線形現象を再現することを実証している。

第三章では、圧電横効果振動子の非線形振動特性の定量的評価手法として、歪みの高次項の係数である高次弾性定数を評価指標とすることを考案し、その測定手法として、アドミッタンス測定と非線形 *LCR* 等価回路を用いたフィッティングによる手法を提案している。さらに、異なる組成・添加物の圧電材料を高次弾性定数という評価指標を用いて比較した。その結果、ハイパワー特性に優れた材料の開発指針として、ドメイン壁や結晶粒界などの構造欠陥を減らすこと、添加物によるドメイン壁のピン止め、組成比の調整等が有効となることを明らかにしている。

第四章では、圧電縦効果振動の非線形振動の測定手法として、非線形伝達マトリックスを用いてアドミッタンスのフィッティングを行う方法を提案した。本手法によって得られたチタン

酸ジルコン酸鉛(PZT)の3次弾性定数には、電界依存性が見られた。そこで、5次弾性定数を考慮したモデルを用いて再度フィッティングを行い、内部応力の増加に従って5次以上の高次弾性の影響が大きくなることを明らかにしている。

第五章では、圧電振動子の発熱を考慮した解析手法を提案している。まず、高次弾性定数を含めた物性値の温度依存性を測定した。この結果を用いて、熱伝導方程式で計算した温度分布に従って物性値を変化させながら、非線形伝達マトリックスの計算を行うことにより、発熱と非線形振動が相互に影響するハイパワー駆動時の圧電振動特性を高い精度で計算可能であることを実証している。

第六章では本研究の結論を述べている。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等、多岐にわたる応用が可能であることが示された。これまで、圧電材料のハイパワー特性については定量評価の困難さから、飽和振動速度や共振周波数の変化率、温度の実測によって評価が行われてきたが、材料間の比較が困難であった。このためハイパワー特性に優れた圧電材料の開発は遅れていたが、本論文の提案手法を元に評価と材料開発を行っていくことで、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。

なお、本論文第三章は永田肇、沖村康之、笠島崇、山崎正人、岸本純明、原田智宏、清水寛之、保坂寛、第五章は尾崎亮平、保坂寛との共同研究であるが、論文提出者が主体となって測定や解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士（環境学）の学位請求論文として合格と認められる。

以上 1999 字