

博士學位論文

内容の要旨
および
審査結果の要旨
第16号

令和4年度
広島工業大学

— は し が き —

本編は、学位規則(昭和28年4月1日文部省令第9号)第8条による公表を目的として、
本学において博士の学位を授与した者の『論文内容の要旨および論文審査結果の要旨』
を収録したものである。

目次

課程博士

【工学系研究科】

(学位記番号)	(学位の種類)	(氏名)	(論文題目)	(頁)
甲第19号	博士(工学)	乾 雅貴	ギターアンプシステム信号増幅回路における内蔵デ バイス非線形特性の解析と歪伝達特性のモデリング に関する研究	… 1

氏名	乾 雅貴
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第19号
学位授与年月日	令和5年3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	ギターアンプシステム信号増幅回路における内蔵デバイス非線形特性の解析と歪伝達特性のモデリングに関する研究
論文審査委員	【主査】教授 大谷 幸三 教授 久保川 淳司 教授 加藤 浩介

内容の要旨

半導体集積回路の発展と共に電子楽器のデジタル化が進んでいる。従来ディスクリート部品を使ったアナログ回路も、DSP(Digital Signal Processor) 信号処理集積回路により多彩な音色を表現することが可能になり、今日では CPU(Central Processing Unit) のさらなる進化によりソフトウェアエミュレータを用いた機器が多く開発されるようになってきている。その要因はデジタル化により機器が安価になり、かつポータビリティを高めることができるからだと考えられる。しかしながら、そのような現代においてもなお電子楽器回路の主流はアナログ回路であり、ギターアンプに至ってはなお真空管が用いられている。それは使用されているディスクリートデバイスの非線形特性によって音色(奇数次高調波歪と偶数次高調波歪の大きさとその混合比が影響していると言われていた)が決定されているからである。そういった電子楽器を用いてひとたび創造された音楽群の音色は演奏者のみならず音楽ファンの脳裏には焼き付けられている。その結果その演奏をデジタル演算によるエミュレーション楽器に置き換えることは容易ではない。従って音響心理学における認知能力の研究と再現性の高いエミュレータを開発することは最先端の技術的課題となっている。

本研究はこのような背景から、典型的なアナログ電子楽器であるギターアンプシステムにおける真空管ギターアンプとエフェクタペダルに対して、その奇数次高調波歪と偶数次高調波歪の特徴をデバイス物理及び電子回路の非線形性の観点から定量的に明らかにし、デジタル化に資する伝達特性のモデリングをしようとするものである。

第1章では研究背景として近年の電子楽器のデジタル化の動向と、一般的な電子楽器における歪音響特性とその歴史について述べている。続いて本研究の対象システムである真空管ギターアンプおよびギターペダルエフェクタの歪特性の進化の過程を詳しく述べたのち、その歪特性における最大の課題である偶関数・奇関数伝達特性に対する認知能力について、従来の研究を紹介するとともに本研究の目的を述べている。

第 2 章では三極真空管の従来のモデルについて述べたのち、従来のモデルを拡張した高精度モデルについて述べている。本研究者が所属する研究室では三極真空管の高精度物理モデルの開発を進めてきているが、本研究では未解決であった高グリッド電圧動作領域に対して改良モデル式とパラメータを導入し適用領域を拡大させ、全動作領域のフィッティング精度を向上させることに成功している。

第 3 章では、その三極真空管の高精度物理モデルのパラメータの抽出手法を提案している。一般的に電子デバイス及びそれを搭載したアナログ電子回路の特性は、そのバイアス動作条件および信号振幅に対して複雑に変化しそれらには明らかな個体差がある。その個体差はメーカー間の設計思想の違い、およびその製造手法に起因する。特に本質的に偶数次歪特性を内在しそのバラツキが大きいと言われる真空管ギターアンプにおいて、そのバラツキを統計的に解析する指標が必要である。その指標として、本研究では部品加工と組立の製造プロセスに依存したデバイス物理モデルパラメータ群を用いる手法を提案している。さらにその結果に基づき、半自動で行なっているパラメータ抽出に対して新たな特性解析アルゴリズムを考案し完全自動化させている。

第 4 章では、統計解析の課題としてメーカーによる特性の違いについて、5 社の三極真空管(米国名 12AX7、欧州名 ECC83S、共に増幅率 100) を統計的手法によりクラスタリング分類し、その特性の違いがギターアンプ前段増幅器の歪伝達特性にどのように表れるか定量的に解析している。さらに、同一メーカーで増幅率の異なる 2 種類の三極真空管(ECC83S 増幅率 100、5751 増幅率 70) についても同様の解析を行っている。ここではモデルパラメータの相関性から製造バラツキの原因を推定し、それを基にそれぞれの代表デバイスを選定し、その代表デバイスを搭載したギターアンプの前段増幅器において、その特性の違いがどのように歪伝達特性に影響するのかその有意差を定量的に求めている。特にその差を、協和音、不協和音の二音による相互変調歪を用いることで音楽信号として偶数次および奇数次のそれぞれの特徴を分析し、多項式の近似モデルとして表すことに成功している。

第 5 章では、強い歪音を特徴とする典型的な“ディストーション”分類のギターペダルエフェクタに対して、新たな歪制御回路を提案しその試作器での実験解析結果を述べている。ここでは、内蔵している基幹部品である OPA(Operational Amplifier) 集積回路のトポロジーのリバースエンジニアリングを行い、基本的なディストーション機器で用いられる非反転 OPA 回路伝達特性の電源電圧依存性の起源を世界で初めて明らかにしている。その結果に基づき、従来の市販機器(奇数次高調波歪調整のみ) にはない特徴として、偶数次高調波歪成分を独立にコントロールすることができる機器を提案している。そして本機器を用い真空管アンプと同様な実験と解析を行ない、その伝達特性を多項式の近似モデルとして表している。さらにこうして得られた伝達特性のスペクトラムを聴覚の定量的スペクトル分析に対比させて議論している。

第 6 章では、最後に本研究の成果をギターアンプシステム信号増幅回路における内蔵デバイス非線形特性の解析と歪伝達特性としてまとめている。

審査結果の要旨

本論文は、ギターアンプシステムにおける真空管ギターアンプとエフェクタペダルに対して、その奇数次高調波歪と偶数次高調波歪の特徴をデバイス物理及び電子回路の非線形性の観点から明らかにしたものであり、その結果は歪スペクトル高調波成分の定量的変化に対する音響心理学研究を加速させるうえで高く評価できる。

本研究成果は、電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌）に筆頭著者としてまとめた主論文1と3、Journal of Audio Engineering Society に筆頭著者としてまとめた主論文2によって公表し、国際学会においても3回発表している。したがって、本論文が博士学位論文として十分な内容と価値を有することを審査員が一致して認めた。

博士学位論文の公聴会は、2023年2月16日（木）、広島工業大学 NX 507 教室に多数の教員の参加を得て開催された。約60分間の講演において、申請者は研究課題、提案手法及び成果の新規性と有用性を明確に主張した。講演後には、研究の独創性や今後の発展について活発な質疑応答が行われ、申請者が十分な学識を持つことが確認された。そして、その後開催された論文審査委員会において、本博士論文は高く評価され、審査委員全員が一致して、申請者は博士（工学）の学位を授与される資格を有すると判定した。

主論文

1：乾 雅貴，佐々木 玲生，濱崎 利彦

電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌），Vol.140，No.1，pp.1-8，2020
物理モデルパラメータによる小型三極真空管静特性の製造メーカー依存性の統計解析
[DOI] <https://doi.org/10.1541/ieejeiss.140.1>

2：Masaki Inui, Toshihiko Hamasaki, Menno van der Veen

Journal of Audio Engineering Society, Vol.69, No.1/2, pp.80-103, 2021
[DOI] <https://doi.org/10.17743/jaes.2020.0068>

3：乾 雅貴，溝淵 智哉，濱崎 利彦

電気学会論文誌C（電子・情報・システム部門誌），Vol.143，No.3，pp.318-331，2023
三極真空管物理モデルパラメータの最適抽出と統計解析
[DOI] <https://doi.org/10.1541/ieejeiss.143.318>

博士学位論文内容の要旨および審査結果の要旨第16号

令和5年4月1日発行

発行 広島工業大学

大学院 工学系研究科

編集 広島工業大学 教学支援部

〒731-5193 広島市佐伯区三宅2丁目1-1

TEL 082-921-3121