

論文内容要旨 (和文)

平成 23 年度入学 博士後期課程

専攻名 電子情報工学

氏 名 稲田 禎一



論 文 題 目 プログラムドマテリアル開発のための計算論的近最適集合解析に関する研究

半導体産業はドックイヤーとも言われる速さで技術革新を続けている。半導体チップの固定に用いられる接着材料は、スマートフォンなどの小型で高速処理が必要な電子機器には欠かせない材料であり、種々の組立プロセスにおいて使用可能な特性（流動性、弾性率、タック等）を有し、最終的には高い耐熱性、信頼性を持つ必要がある。このような材料は、時系列で多様な特性を発現する必要があることから、プログラムドマテリアルと呼ばれる。その開発は、従来の経験と勘に基づく職人的な設計では極めて困難になってきており、新規な合理的な材料設計の手法が必要になっている。本論文はその基盤となる数理設計手法とソフトウェアを確立と、実際の開発への適用を目的とし、プログラムドマテリアル開発のための数理設計手法について、以下の各点について論じた。

まず、本数理設計手法の基盤として材料設計に適した近最適化手法の構築を試みた。従来の線形計画法は実ベクトル空間の凸集合を対象としているのに対して、材料の組合せに対応した 2^n 個の複素ベクトル空間の非凸集合を対象とすることで、材料使用数の制限、特許など制約、粘弾性などの複素物性値を取り扱いのいずれにも対応できるようにした。一方、目標関数の最適値を求めることは、材料開発の上では重要ではなく、目標値を満たす領域を求めることが必要であることから、解の拘束条件を弱くして、アルゴリズムを簡略化した。以上の数理設計手法は新規なものであるため、弱条件組合せ線形計画法と名付けた。

次に、弱条件組合せ線形計画法を実際に材料技術者が使いこなすためには、ユーザーフレンドリーなシステムが必要である。そこで、本研究で開発した5種類のソフトウェアそれぞれのアルゴリズム、インターフェイス、機能について概説した。これらは、単に解が天下り的に与えられるだけではなく、技術者が試行錯誤しながら材料を決めて行き、結果として、目標達成する材料を得るようなシステムも備えており、技術者の教育効果も有する。また、過去の実験データの再利用を考慮した新たな材料設計支援システムを提案した。データの記述方式を定義した二つのデータベースを使用することで、効果的に過去の実験データから必要な情報を検索することができる。

さらに、上記の弱条件組合せ線形計画ソフトウェアを用いた材料開発の実例を取り上げ、その効果について検証した。接着剤では、エポキシ樹脂、アクリルポリマー及び無機フィラーなどの配合比率を変更することで、フィルムの特性を大きく変えることができる。このフィルムの特性を最適化するために、配合比率とフィルム特性の相関を調査した。その結果、特に、短期間開発には極めて有効であることが分かった。また、線形近似のため実際の実験結果とずれがある場合があるとの課題について、部分的な非線形化によるずれの低減が可能であることを示した。さらに、粘接着剤では複素物性値を含めて最適設計する必要があることから、筆者が考案した複素物性値の予測式を用いて、複素物性値を含めた目標配合の計算を行い、本手法により目標を満たす配合の算出が可能であることを確認した。

また、高度に複合化された半導体産業では、製品供給に関するリスク管理が重要になっている。本手法で目標を満たす素材の組合せが多数得られた場合に、素材のいくつかが供給停止になった場合に製品供給がストップする確率（リスク）を算出する手法を考案した。単純な並列直列モデルだけでなく、一般的な形でリスクを算出することが可能であることを確認した。リスクを算出することで、ボトルネックになる素材を明らかに出来、リスク低減のためにどのような代替品を探索すべきかの指針が得られた。

最後に、本手法の今後の展開について論じた。本手法は、短期間の開発に特に有効であるため、今後の半導体関連材料の開発に有用であるだけでなく、消費者の嗜好の変化に追随する必要がある、スマートフォンなどの携帯機器、オーディオ製品などの部材開発に特に有用である。また、工業材料だけでなく食品、環境など様々な応用展開が可能である。そのためのさらなる理論的拡張についても論じた。特に線形写像が時間の関数の場合に関する拡張、演算結果をさらに時系列な数値として扱い、その積分などを算出すること、非線形最適化との融合などが可能であることを示した。

以上、本研究では、新規な数理設計手法の確立とそのシステム構築を果たし、その有用性を明らかにした。これらは、日本が特に競争力を有する半導体用材料をはじめとする工業全般に大きな波及効果を及ぼすと考えられる。また、複素数を含む近最適化を行った例はなく、新規で有用な手法であると考えられる。複素物性値は粘接着剤だけでなく、免震部材、静音、電波吸収材などの多様な用途で重要な物性値であり、それらの設計にも今後応用が期待される。

- (注) ① タイプ、ワープロ等を用いてください。10pt 2,000字程度（2頁以内）とします。
② 論文題目が英文の場合は、題目の下に和訳を（ ）を付して併記してください。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 24 年 7 月 30 日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 松尾徳朗

副査 香田智則

副査 上原拓也

副査 ⑩

副査 ⑩

副査 ⑩



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

1. 論文申請者

専攻名 電子情報工学

氏名 稲田禎一

2. 論文題目 (外国語の場合は, その和訳を併記する。)

プログラムドマテリアル開発のための計算論的最適集合解析に関する研究

3. 審査年月日

論文審査 平成 24 年 7 月 24 日 ~ 平成 24 年 7 月 30 日

論文公聴会 平成 24 年 7 月 30 日

場所 工学部百周年記念会館

最終試験 平成 24 年 7 月 30 日

4. 学位論文の審査及び最終試験の結果 (「合格」・「不合格」で記入する。)

(1) 学位論文審査 合格

(2) 最終試験 合格

5. 学位論文の審査結果の要旨 (1,200 字程度)

別紙のとおり

6. 最終試験の結果の要旨

別紙のとおり

別紙

専攻名	電子情報工学	氏名	稲田 禎一
学位論文の審査結果の要旨			
<p>稲田氏は第1章において、常に技術革新を続ける半導体材料の開発にあつては、材料はプロセス特性、耐熱性、信頼性など多数の目標を満たすことが必要であり、その開発には、従来の経験と勘に基づく職人的な設計ではなく、新規な合理的な材料設計の手法が必要になっていることを言明された。このようなニーズを背景に、本論文の目的を、「材料設計の基盤となる数理設計手法とソフトウェア確立、さらには実際の開発への適用」としている。これは、学術的、産業的に重要であると判断される。</p> <p>続いて、氏は第2、3章において、本数理設計手法の基盤として材料設計に適した近最適化手法（弱条件組合せ線形計画法）の構築について論じている。従来の線形計画法は実ベクトル空間の凸集合を対象としているのに対して、材料の組合せに対応した$2n$個の複素ベクトル空間の非凸集合を対象とすることで、材料使用数の制限、特許など制約、粘弾性などの複素物性値を取り扱いのいずれにも対応できるようにしている。数学的な内容について、過不足なくまとめられており、妥当な内容である。</p> <p>第4章では、弱条件組合せ線形計画法を実際に材料技術者が使いこなすために必要となるユーザーフレンドリーなシステム、すなわち、開発した5種類のソフトウェアそれぞれのアルゴリズム、インターフェイス、機能について概説されており、重要な成果であると判断される。</p> <p>第5章では、目標を満たす素材の組合せ解が多数得られた場合に、素材のいくつかが供給停止になった場合に製品供給がストップする確率（リスク）を算出する手法について説明している。単純な並列直列モデルだけでなく、一般的な形でリスクを算出することが可能であること、リスクを算出することで、ボトルネックになる素材を明らかに出来、リスク低減のためにどのような代替品を探索すべきかの指針が得られることなど、新規で有用な知見である。</p> <p>第6章では、さらに、上記の弱条件組合せ線形計画ソフトウェアを用いた材料開発の実例を取り上げ、その効果について検証している。その結果、本手法により目標を満たす配合の算出が可能であることが確認された。</p> <p>第7章では、本手法の今後の展開について論じている。本手法は、半導体関連材料の開発に有用であるだけでなく、工業材料だけでなく食品、環境など様々な応用展開が可能である。そのためのさらなる理論的拡張についても論じられており、発展性があると判断される。以上、本研究は、新規な数理設計手法の確立とそのシステム構築を果たし、その有用性を明らかにしている。これらの研究成果については、4報の査読付き論文、多数の学会発表、4件の特許に印刷公表されており、学位授与に不足はないと判断される。以上の点から、合格と判定した。</p>			
最終試験の結果の要旨			
<p>公聴会において、論文内容について口頭で関連質問を行った結果、リスク算出の根拠、数理設計手法の基礎について、妥当な説明をされた。また、稲田氏は情報科学関連で2つの賞を受賞した他、本年5月に高分子学会賞を受賞しているなど、業績が国内、国外の学会で高く評価されている。以上の内容、結果を総合的に判断し、合格と判定した。</p>			