

わたしたちの研究 (5) 生産システム工学研究室

泉井一浩 (H8/1996卒)



1. 本研究室の歴史と教員紹介

機械理工学専攻生産システム工学研究室は、教授・西脇眞二、准教授・泉井一浩、講師・林聖勳と、研究員4名、博士課程学生10名（内、社会人ドクター9名）、大学院生11名、学部生7名、事務補佐員2名が所属し、構造物やデバイス、生産システム等の設計・最適化手法に関する研究を行っています。また、マイクロエンジニアリング専攻デジタル設計生産学寄附講座の古田幸三特定助教も、前号の松原先生の記事で紹介されていましたが、当研究室と研究活動で強く連携していますので、今回もあわせて紹介させていただきます。

まずは、私、准教授の泉井一浩の自己紹介から始めたいと思います。私は、本学精密工学科に入学したのは1992年で、4回生時に最適システム設計工学研究室に配属され、吉村允孝先生のもとで研究をはじめました。1996年、1998年に学部、修士課程を修了し、そのまま同研究室にて博士後期課程に進学しました。吉村允孝先生には、その後助手として採用していただき、また学位取得など、引退されるまで長きに渡ってご指導をいただきました。研究内容は、いまでいう人工知能的・機械学習的な手法に基づく最適化や、設計・生産のコンカレント最適化、構造最適化、俯瞰的な視点に基づくシステムの最適化アプローチなどで、多岐にわたる数々を手法・考え方を学ばせていただきました。

その研究室に、西脇眞二現教授(図1)が当時助教授として着任されたのが2002年です。西脇教授は1982年に本学精密工学科に入学され、人見勝人先生の研究室(当時の研究室名も生産システム工学研究室です。なお「生産システム工学」という言葉を日本で最初にお造りになられたのが人見先生です。)にて1988年に同修士課程を修了されています。その後、(株)豊田中央研究所に入社され、その研究所時代には、米国のミシガン大学機械工学・応用力学学科の博士課程でPh.D.を取得されています。後半にお示しする構造最適化に関する一連の成果は、この博士課程でのご研究が出发点となっています。



図1 西脇眞二教授



図2 2004年米国ノートルダム大学を訪問
John Renaud教授および現地の学生さんとともに



図3 西脇教授の博士課程時代のアドバイザー
である菊池昇教授と Panos Papalambros 教授

当時の写真を1枚、[図2](#)として掲載します。吉村先生は米国の最適設計の研究者とのコネクションを数多くお持ちでした。西脇教授が留学先としてミシガン大学を選ばれたのも、その縁があったため、とのことでした（[図3](#)）。私も吉村先生のご紹介により、1年間、米国ノートルダム大学にて研究活動を行う機会をいただくことができました。

その後、学内の組織変更により航空宇宙工学専攻への所属を経て、2009年には西脇教授が独立され、機械理工学専攻に、現研究室である生産システム工学研究室を立ち上げられました。2011年には私、泉井も、准教授として本研究室の一員となりました。

次に、林聖勳（Sunghoon Lim）講師（[図4](#)）ですが、2009年に韓国Hanyang大学機械工学科を卒業後、2011年に同大学自動車工学科修士課程を、2016年には博士課程を修了されています。その在学中に、日本学術振興会（JSPS）の支援に基づいて京都大学とHanyang大学間で行われた磁気アクチュエータやモーターの最適設計に関する国際共同研究に参画されてきた縁もあり、2017年に来日するとともに本学の特定研究員に着任していただきました。そして、2018年に同特定助教、2020年には同講師となりました。これまで、構造最適化手法のモーター等の電磁機械システムへの応用や、ミクロ・マクロのマルチスケール最適化に関して、多くの成果をあげられています。

古田幸三特定助教（[図5](#)）は、本研究室に2012年に入ってから、修士課程では一旦同じ機械理工学専攻の中性子物理工学研究室に移られた後、博士後期課程で

本研究室に戻ってこられ、2018年に学位を取得されました。在学中はデザイン学連携プログラム (<http://www.design.kyoto-u.ac.jp/>) の1期生としても活躍され、在学中にはJSPSの特別研究員にも採用されるなど、アクティブに研究活動を進められています。その後、2019年には本研究室の特定研究員に、2020年からは現職のマイクロエンジニアリング専攻特定助教に採用されています。研究内容としては、熱電変換デバイスの最適設計で多大な成果をあげられていますし、複数材料の同時最適化理論の構築にも大きな貢献をしてくださっています。

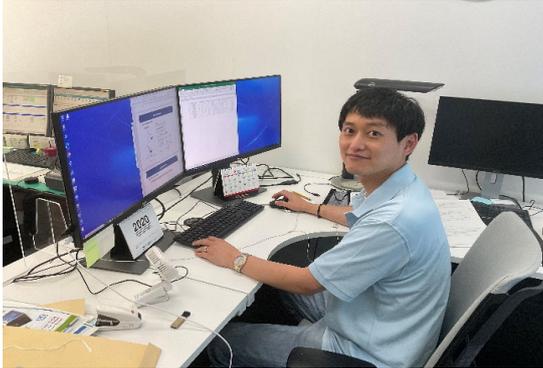


図4 林聖勳講師

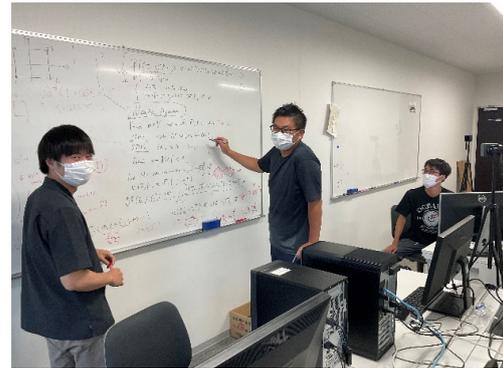


図5 大学院生と議論中の古田特定助教 院生室の壁にホワイトボードを設置し、そのときどきに思いついた内容について、いつでも気軽に議論できる環境にしています。

また、2012年から2020年まで、本研究室で助教として大変大きな研究成果を残された山田崇恭先生は、現在、東京大学工学系研究科総合研究機構戦略研究部門にて准教授としてご活躍されています。

2. 構造最適化・トポロジー最適化

では、本研究室の研究内容を紹介していきます。まず、構造最適化から。

構造最適化は、数理的、力学的根拠に基づいて、定められた性能を最大にするような形状を数値計算により求める手法です。構造最適化の中でも、特にトポロジー最適化は、外形形状とともに構造物中の穴の数やその位置まで同時に最適化することができるため、構造最適化の中でも極めて自由度が高く、抜本的に構造物の性能を向上させる方法として注目されています。図6にそのトポロジー最適化の実施例を示しておりますように、最初に設定した形状を創成する範囲を規定する設計領域のなかで、定められた制約条件のもとで目的関数を最善にする形状を導き出すことができます。この例では、体積制約のもとで剛性を最大化することで、軽くて剛性の高い形状を導出しています。

このトポロジー最適化の考え方は、剛性最大化や振動問題の他にも、実に多様



図6 トポロジー最適化実施例

な対象に展開することができます。図7では、熱流体の解析にもとづいて、圧力損失を最小にしながら冷却性能を最大化する水冷デバイスの流路をトポロジー最適化により導出した例を示しています。図8は、ハイブリッド車のインバーターケースの熱問題に対応するために、熱伝導の解析に基づいて、表面に最適な熱伝導縞構造を設計した例です。

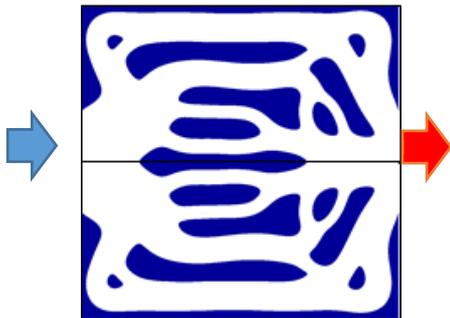


図7 水冷デバイスの流路設計



図8 ハイブリッド車のインバーターケース
表面に最適な熱伝導縞構造を設計

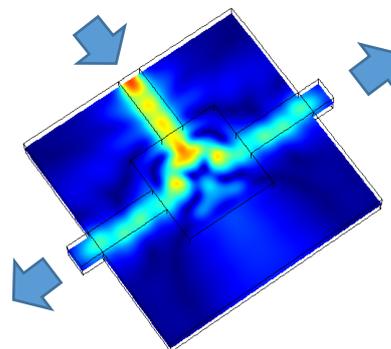
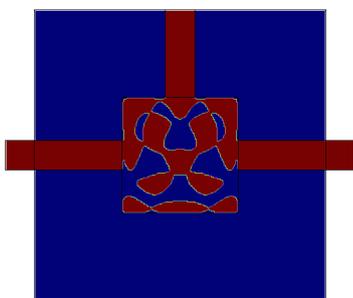


図9 誘電体導波路（NRDガイド）の設計

図9はNRDガイド（Non-Radiative Dielectric Waveguide）とよばれる電磁波の誘電体導波路であり、誘電体を適切に配置することで、電磁波を左右に曲げるように設計した構造例です。このようにトポロジー最適化の適用範囲は、機械工学

の範疇を超えています。

また、異なる特性をもつ複数の材料を適材適所に配置することができれば、単一の材料のみで最適化された形状をさらに凌駕する性能をもつ構造が得られることが期待されます。図10は、3種類の材料を利用した場合の、マルチマテリアルトポロジー最適化の例を示しています。比較的剛性の高い材料と軽量な材料の3種類の材料を最適配置した例です。

これらの例でご覧いただいたように、トポロジー最適化により得られた最適な構造形状は、その性能を最大限に発揮させるために複雑な形となっている場合が多いです。したがって、従来の成形法を用いると、得られた構造形状を実際に製造することは困難であることもありました。一方で、近年注目を集めている3次元造形は、成形する形状の自由度が極めて高く、トポロジー最適化との相性が極めて高いと言われています（図11）。このような観点から、3次元造形機の利用を含めた新しい設計・製造のかたちについても日々議論をしています。

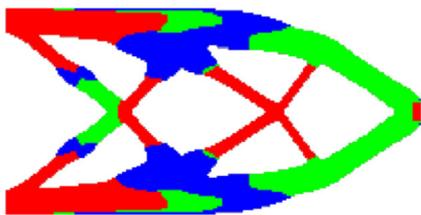


図10 複数材料のトポロジー最適化。剛性の高い材料と軽量な材料を適材適所に配置している。

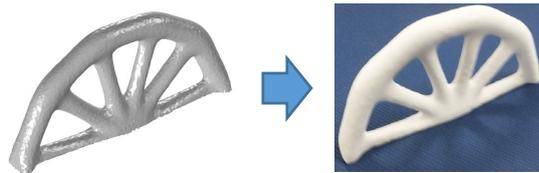


図11 トポロジー最適化による最適構造と3次元造形モデル。

3. 材料設計

さらにトポロジー最適化の考え方は、構造物のマクロ的な形状を求めるだけでなく、ミクロ構造に着目した材料設計にも応用が可能です。材料のミクロ構造の形状の設計に最適化を導入することで、メタマテリアルと呼ばれる自然界にはないような特性をもつ材料を創成することができます。

図12には、周期的に配置されるミクロ構造を最適化により求めた例を示しています。ここではマクロ的にみた構造物が負のポアソン比をもつようにミクロの周期構造を設計しています。他にも、負の体積弾性率をもつ音響メタマテリアルや負の屈折率をもつ電磁メタマテリアル等など、材料のミクロ構造の設計により、これまでにない特徴を持った機械デバイスの創成に取り組んでいます。

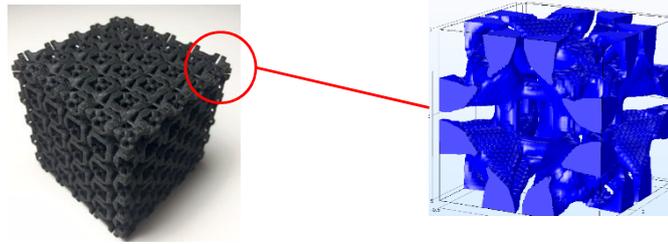


図12 周期的なマイクロ構造をもつ材料による負のポアソン比をもつ構造。

4. 最適解の解釈支援

近年では最適化手法やAIの技術が進み、多様な方面で活用されるようになりました。もちろんその成果は目覚ましいのですが、そのようにツールが便利になればなるほど、複雑な問題が解けるようになればなるほど、ツールはブラックボックス化して利用されるようになっていく傾向があります。しかしながら、一方で、得られた最適解がなぜそのような形になっているのか、その理屈は何か、ということまでは最適化のツールは直接は教えてくれません。よって、利用する技術者が最適解の意味を理解し、物理的な説明ができるようにしておくことがとても重要です。しかし、実はそれは容易なプロセスではありません。そこで、本研究室ではデータ科学の手法を用いて最適解の意味理解を支援するシステムについての研究にも取り組んでいます。図13はトポロジー最適化の結果について、最適解を得る途中に得られた多量のデータを利用することで、最適解の意味解釈の支援を行っている例を示しています。

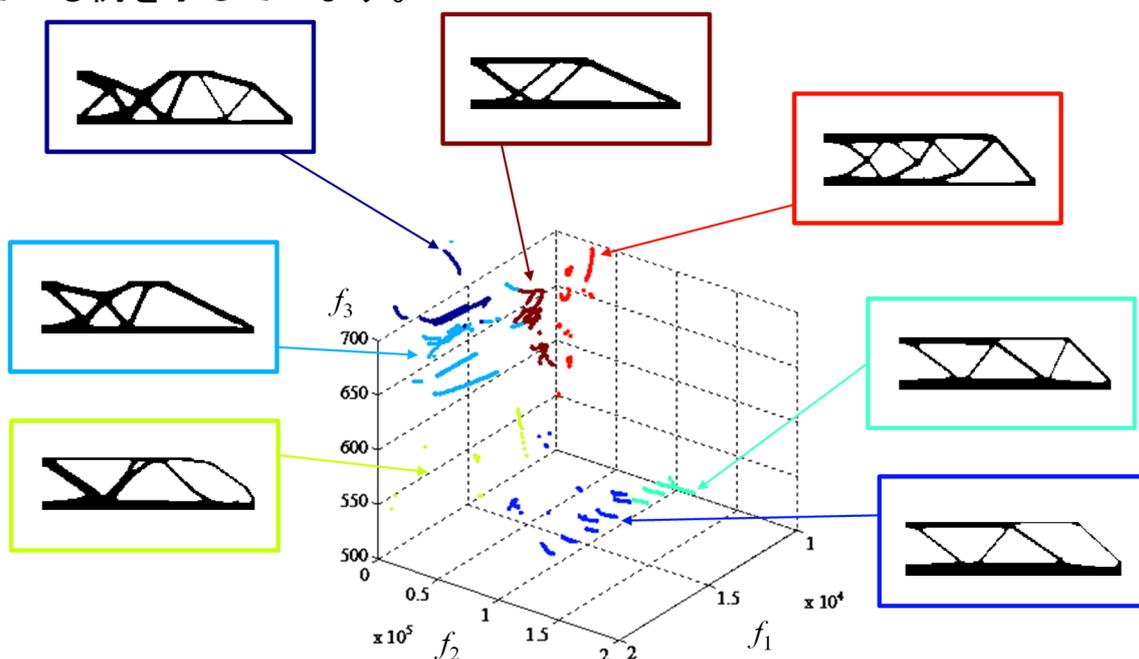


図13 最適解の物理的解釈支援

5. 生産システムの最適化

また、生産システムの最適化にも取り組んでいます。図14はロボットセル生産システムでの機器の配置を最適化している結果例です。生産システムでは多数の要件を満足することが求められていることが多く、多目的最適化手法を開発しています。この例では、作業効率、設置面積、ロボットによる作業可能性の3指標に基づいた評価を行っています。レイアウト問題だけでなく、スケジューリング問題や、不確定性を考慮した最適化の研究の他、製品性能とサプライチェーンのトレードオフの評価など、設計と製造の統合的な観点からの最適設計にも取り組んでいます。

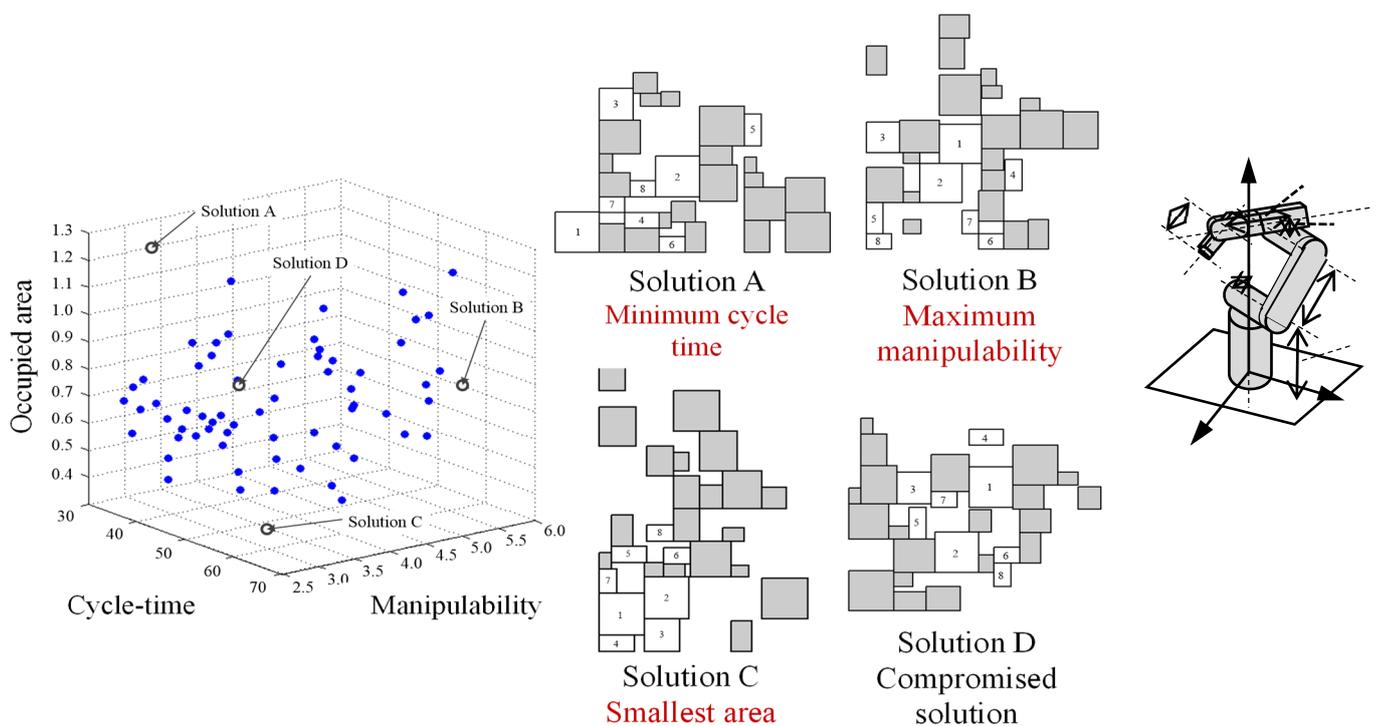


図14 ロボットセル生産システムのレイアウト最適化

6. おわりに

最適化の研究の面白いところに、他の多くの分野の方々とのコラボレーションを比較的行きやすいというものがあります。これまでもそれぞれの分野の専門家の方々との協業をさせていただくことにより、斬新な最適化結果を多く生み出せることができましたし、また、そういった方々の深い知識の一端に触れさせてもらえることが、最適化の研究を行っていく際の大きなモチベーションになっております。

現在でも、様々なの方々との協業を続けさせていただいており、1対1の共同研究

として実施するような形態の他にも、複数の大学、企業の方々が同時に参加されるコンソーシアムという場も貴重な情報交換の場となっております。本研究室では、トポロジー最適化応用コンソーシアム（<http://www.osdel.me.kyoto-u.ac.jp/SIP/>）、熱流体を対象としたトポロジー最適化研究コンソーシアム（<http://www.osdel.me.kyoto-u.ac.jp/TOF/>）、の2つの研究コンソーシアムを運営するなどの活動を行っています。

今回紹介させていただいた事例の中にも、コラボレーションの結果として得られたものが多く含まれております。この場をお借りして、これまで一緒に研究をしてくださった方々と、そして、研究の実務を担当した研究室スタッフや学生の皆さんに、感謝の意を表したいと思います。また、わたしどもの研究に興味を持っていただいた方は、ぜひお気軽にお声がけくださいますと幸いです。