

■在外研究に至った経緯・研究目的

幾何学的コア構造は、電磁波や音の伝播を制御する電磁波メタマテリアル、音響メタマテリアルのようにナノ・マイクロスケールのものから、衝突時に圧潰してエネルギーを吸収する部材のようにマクロスケールのもので、幅広い科学技術分野で研究され、多様な用途で実用化が進んでいる。私の研究対象は後者のマクロスケールの幾何学的コア構造であり、コア形状と機械的特性(剛性や強度)の関係を明らかにし、乗客や荷物を守るエネルギー吸収材や緩衝材、軽量高剛性な建材等、硬さと柔らかさを兼ね備えた機能性構造の研究を行っている。理工学部機械工学科の私の研究室(機能デザイン研究室)では幾何学的コア構造の製作手法として、薄い平板を曲げて(折紙のように折って)製作する手法と 3D プリンタを用いて材料を積層して製作する手法を用いてきたが、前者の手法では材料の伸縮が必要なコア形状には適用できないためデザイン上の制約があり、後者の手法では大量生産に向かないため産業移転を視野に入れた設計提案ができないという問題があった。このため、コア構造デザインの可能性を広げ産業的に適用できる手法として、金属板をプレス加工する手法を取り入れたいと考えていた。

2019 年に沖縄で開催された折紙ワークショップと米国機械学会 ASME IDETC2019 で Swinburne University of Technology (オーストラリア・メルボルン)の Guoxing Lu 教授に連続してお会いしたことがきっかけで研究の話がはずみ、その後コロナ禍が明けて、Lu 教授の研究室に Visiting Associate Professor として滞在(2023 年 4 月 1 日~2024 年 3 月 25 日)し、双方の得意分野を融合させた本研究課題「等方的な機械特性を有するコア構造の設計と製造」が実現することとなった。Lu 教授のご専門は衝撃工学であり、衝撃を与える対象物としてのコア構造や折紙構造にも造詣が深い。本研究では、私が折紙の数理に基づいてコア構造を設計し、Lu 教授にはプレス加工によるコア構造の製作に関する知見を提供していただき、コア構造の機械特性を実験により明らかにすることを目的とした。本研究課題で取り組んだ内容は以下の 3 点である。

- ① コア構造の設計
- ② コア構造の製作
- ③ コア構造の機械特性の解明

■研究成果

①本研究では、切頂八面体を空間充填して得られるメタマテリアル(Kelvin cell lattices)の疑似構造を対象とした。本コア構造は切頂八面体をユニットコアとし、ユニットコアを規則的に並べたパネルをプレス加工で製作し、これを積層させてコア構造を製作できるように設計した。パネル製作時に切頂八面体のある面が削除されるため、厳密には切頂八面体の空間充填構造ではないものの、疑似的に対称構造であり、プレス加工で大量生産ができ、研究段階から産業移転を視野に入れたコア構造である。本設計手法と、ここから予測される本コア構造の機械的特性のシミュレーション結果について国際会議[4]にて発表した。

②コア構造の材料となるアルミ薄板の焼鈍を行った。焼鈍は材料の展延性を向上させる

ためプレス加工しやすくなるが、同時に材料の剛性を低下させるため、焼鈍温度・時間を調整して材料特性と焼鈍条件の関係を求め、コア形状の適切な成形条件を得た。コア構造の成形では、コア形状の型にアルミ薄板を挟み加圧して一度にコア形状に成形すると、アルミ薄板の中央で材料が不足し局所的に割れが生じることから、徐々にコア形状に加工する多段階プレスを採用した。複数の多段階プレスの型を作成し、理論上、アルミ薄板の中央と境界で材料が一樣に変形する型の形状を求めた。設計した多段階プレス型で加工したアルミパネルを接着し、コア構造を製作した。

③コア構造を面外方向に準静的に圧潰し、圧潰変位と反力の関係から圧潰特性を求めた。プラトー荷重は比較的一定となり良好な応答が得られた。特徴的な座屈モードが確認できたため、座屈モードとプラトー荷重の関係について引き続き検討を行っている。本成果は国際会議[2]にて発表予定である。

本研究課題を実施中、Lu 教授には私のデスクスペースのご提供、コア構造を製作する材料のご提供、Lu 教授の研究室の利用許可、各種実験装置の利用許可をいただき、何不自由なく研究に没頭することができた。また、Xinyi Zhang 博士には実験装置の操作やデータ取得に協力していただき、スムーズに実験を進めることができた。1 年間にわたり Swinburne University of Technology の Visiting Associate Professor として受け入れてくださり、本研究課題に最後までご協力いただけたこと、研究に関する相談から日頃のたわいもない世間話までつきあってくださったことに心から感謝している。

■学術交流

キャンパス内は多国籍で、英語だけでなく多様な言語が飛び交う研究環境であった。School of Science, Computing and Engineering Technologies と School of Engineering では、専門の異なる研究者が順番に登壇し、分野の垣根を超えた研究の融合と活性化を目的としたセミナー STEM Britz を定期的で開催しており、私は 9 月の回に招待していただき、折紙の数理設計と工学応用について講演する機会[5]をいただいた。講演後には Saulius Juodkazis 教授とナノスケール折紙構造について意見交換する時間があり、大変充実した 1 日となった。

私が日本で活動している日本応用数理学会はオーストラリア数学会の応用数理部門 ANZIAM との学術交流を積極的に推進していることから、年次大会にあたる ANZIAM2024 に参加し、当研究室が近年取り組んでいる特殊形状ハニカムコアの機械特性に関して研究発表[3]を行った。毎年 2 月に開催される本大会は明治大学入試日程と重なっているため、在外研究中の今回が最初で最後の参加となるであろう。大変貴重な機会であった。参加者の女性比率が高く、宗教や文化の違いを配慮した食事の提供、会期中に性的マイノリティのための取り組みが設けられる等、ダイバーシティ&インクルージョンを推進し、誰もが安心して研究発表できる場を提供していると感じた。

■教育への効果

生田キャンパスの機械工学専攻大学院生とは、授業期間中の毎週金曜日にオンライン面談を行い、研究を指導し、研究協力を依頼した。日本とメルボルンの時差は1〜2時間しかなく、コロナ禍を経てオンライン対応が日常化していることから、学生も非常に柔軟に対応してくれた。日本での私は学生の報告を聞く立場であったが、2023年度は1研究者として研究を行う立場であったことから、学生から「先生も発表してほしい」という声が挙がり、プレゼンテーションを作成して学生に混ざってオーストラリアでの在外研究の進捗を共有したのが良い思い出である。在外研究課題に関係するコア構造の圧潰に関して、博士前期課程大学院生が筆頭著者として論文[1]を執筆し、査読付き学術誌に採択された。他に、博士前期課程大学院生2名が渡米し、米国機械学会 ASME IMECE2023 にて英語での口頭発表にチャレンジした。私の海外での経験を通して、研究の手法やデータのまとめ方といった目先のテクニックだけでなく、研究そのものの意義や上手くいかない時のモチベーションの保ち方、海外で研究に取り組むチャレンジ精神も含めて研究の面白さが学生に伝わったと願っている。

8月に応用数理国際会議 ICIAM2023 での研究発表のために一時帰国した際には、ホストの Lu 教授も来日してくださり、学会の空き時間を利用して生田キャンパスの私の研究室を訪問していただいた。夏季休暇中だったことから機械工学科教員や学生との直接交流はかなわなかったものの、当研究室の研究テーマを紹介し、研究発表[6]に関して塑性変形時に生じるスプリングバックの理論的アプローチについてアドバイスをいただいた。

■今後の展望

在外研究の研究成果は、2024年7月にメルボルンにて開催される折紙の国際会議 8OSME にて口頭発表[2]する予定である。さらに成果をとりまとめて学術論文として発表する。8OSME は Lu 教授が実行委員長を務めており、Swinburne University of Technology はオーストラリアの折紙研究の拠点として重要な位置づけである。私も実行委員の1人として微力ながら協力している。Swinburne University of Technology を始め、オーストラリアの研究者との交流を今後も強化していく。

Lu 教授が8月に当研究室を訪問された際には、研究室や生田キャンパスの実験設備をご覧になり、長期的な学術交流、共同研究の可能性について前向きなお返事をいただいた。今後、Lu 教授には客員教員として再来日していただき、大学院生を対象とした講演をお願いしたいと考えている。

■本研究課題に関する業績リスト

[論文]

[1] Ben Yue, 石田祥子, 斉藤一哉, 大久保洋志, 生物を模倣した角筒を有するハニカムコアの面外圧潰特性, 設計工学, Vol. 59, 2024年. DOI:

[口頭発表]

- [2] Sachiko Ishida, Xinyi Zhang, Guoxing Lu and Kohei Okayasu, Design and Fabrication of Quasi-isotropic Origami Metamaterials, The 8th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education, No. 135, 16–18 July, 2024, Melbourne, Australia [to be presented]
- [3] Sachiko Ishida, Geometrical Design and Mechanical Properties of Origami-inspired Cylindrical Honeycomb Cores, Australia and New Zealand Industrial and Applied Mathematics (ANZIAM2024), 11–15 Feb., 2024, Adelaide, Australia
- [4] Sachiko Ishida, Xinyi Zhang, Guoxing Lu, and Kohei Okayasu, Mechanical Properties of Truncated-octahedron-based Metamaterials, The 11th International Symposium on Impact Engineering (ISIE2023), 3–5 Dec., 2023, Perth, Australia
- [5] Sachiko Ishida, Origami Engineering: From Mathematics to Engineering, STEM Blitz seminar, Swinburne University of Technology, 26 Sep., 2023, Melbourne, Australia [Invited]
- [6] Sachiko Ishida, Enhanced designability of honeycomb cores, The 10th International Congress on Industrial and Applied Mathematics, 20–25 Aug., 2023, Tokyo, Japan [一時帰国]