

氏名	りゅう ごよう 劉 午陽
学位(専攻分野)	博士 (工学)
学位記番号	博甲第955号
学位授与の日付	令和2年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	The Investigation of Macroscopic Mechanical Characteristic and Formability of Material with Periodical Sub-macroscopic Structure (周期的なサブマクロ構造を有する素材の巨視的な力学特性および成形性の発現メカニズムの解明)
審査委員	(主査)准教授 飯塚高志 教授 森田辰郎 教授 森脇一郎

論文内容の要旨

低炭素社会や環境保全の観点から輸送機器等の部材の軽量化が強く求められている。エンボス加工は、曲げ剛性を向上させる方法として古くから用いられており、エンボス板を素材として使用することは、軽量化と曲げ剛性の向上を同時に可能にする方法と考えられる。一方で、エンボス板は遮熱性、防音性、放吸熱性、低表面感受性および意匠性といった機能性の観点からも現状で広く利用されており、近年ではエンボス板を素材とした成形も行われている。しかしながら、このようなエンボス板の成形に関する研究はこれまでほとんど行われておらず、また見かけの力学特性に関する研究も見られない。一方、薄板成形の分野では、素材の r 値、 n 値および極限伸び性がそれぞれ深絞り性、張出し性および穴広げ性と相関があることが実験的、理論的に示されている。

本研究では、エンボス板の形状等のマクロな構造をサブマクロな構造とみなし、ミクロな構造およびサブマクロな構造がマクロな板としての素材の見かけの力学特性と成形性にどのような影響を及ぼすか、またその関係性はどのようなものかの解明を行っている。

本論文は 11 章より構成され、まず、第 1 章と第 2 章では周期的構造を有する素材に関する研究の現状と本研究に用いた両面エンボス板に関するパラメータの定義についてそれぞれ述べている。

第 3 章～第 6 章ではサブマクロ構造を有したエンボス板の見かけの力学特性とその異方性の発現メカニズムについて明らかにしている。第 3 章では、周期的なエンボス加工を施すことによって、見かけの弾性特性がどのように変化するかを調査している。実験および解析を用いて、異なる予ひずみ量が与えられた両面エンボス板の弾性域における引張試験と曲げ試験を行い、予ひずみ量、エンボス方向およびエンボス高さによる引張剛性および曲げ剛性の変化とこれら二つの剛性間との関係性について明らかにしている[1]。

第 4 章では、周期的なエンボス構造の付与によって発現する新たな見かけの塑性異方性を明ら

かにしている。エンボス方向、圧延方向およびその組合せを変えて一軸引張試験を行い、エンボス板の見かけの r 値のこれらの方向に対する依存性がエンボス構造（高さ）によってどのように変化するかを実験および解析を用いて調査し、エンボス板の見かけの塑性異方性は二つの異方性の重ね合わせとして現れ、エンボス加工条件によって変化することを示している。さらに見かけの異方性の重ね合わせ効果を推測する簡単なモデルを提案し、エンボス高さと二つの基準方向の偏差による面内異方性（ Δr 値）の変化を予測している [2]。

第 5 章と第 6 章では、エンボス板の加工硬化特性（ n 値）について検討している。実際に平板にエンボス板加工を施すと、周期的な形状の他に周期的な板厚および加工硬化の分布が発生する。その影響を調査するために、第 5 章では加工硬化特性のエンボス高さによる影響を明らかにしている。また、第 6 章では、加工まま材と焼鈍し材の比較を行うことによって、エンボス加工による加工硬化量の分布がエンボス板の見かけの加工硬化指数に及ぼす影響とその異方性について明らかにしている [3]。

第 7 章～第 10 章では、エンボス板の成形性に関する調査をおこなっている。

第 7 章では、エンボス板の深絞り試験の実験・解析から、深絞り成形性を評価し、見かけの r 値との関係について検討している。また、エンボス板の独特な変形メカニズムについて検討し、エンボス板が SD（Strength Differential）効果を示す可能性が示唆されている [4]。

第 8 章では、解析を用いてエンボス板の面内圧縮試験方法を検討している。さらに一軸引張試験の結果と比較することで、エンボス構造による SD 効果の発現の程度を明らかにしている [6]。

第 9 章ではエンボス板の伸びフランジ成形性を評価するために、実験および解析によって穴広げ試験を行い、穴広げ性と破断の発生メカニズムについて検討している [5]。

第 10 章では、エンボス板のエリクセン試験によって張出し成形性の評価を行うとともに、 n 値との関係性について考察している。また、解析から張出し加工時の両面エンボス板の変形挙動について明らかにしている [7]。

最後に第 11 章では、本研究による結論と展望を要約している。本研究では、エンボス板を周期的なサブマクロ構造を有する素材として捉え、塑性力学の観点から初めて体系的に検討している。これは、薄板に設計された周期的な形状、板厚分布などを付与することによって、設計通りの力学特性や成形性を付与できる可能性を示唆し、新たなテーラードマテリアルの概念を与えるものと考えている。一方、本研究における成形性試験の結果などからエンボス板の成形に関する重要な情報提供を提供しており、剛性と機能性の高い素材としてエンボス板の効果的な利用を促進できると考えている。長期的には、薄板の力学特性と変形、破壊などの理解の深化や、テーラードマテリアルの開発を通じて素材のさらなる有効利用、特に部材の軽量化や歩留まり向上に寄与することによって、環境的・経済的に人にやさしい社会づくりに役立つと考えている。

論文審査の結果の要旨

エンボス板は曲げ剛性の高さと様々な機能性のために産業界で幅広く利用されており、エンボス板を素材とした板材成形も実際に行われている。しかしながら、エンボス板の成形に関する工学的な検討はこれまでほとんどなされておらず、産業界においても単純に有限要素法（FEM）を用いた直接的なモデルを使った検討しかなされていない。板材成形の分野では、素材の力学特性

と成形性の相関について理論的および実験的に示されており、エンボス板を素材として見た場合に、平板と同様の相関が現れるのかについては大変興味深いことである。これは、平板の成形で成立した理屈をそのままエンボス板の成形に適用できるか、別の見方をすれば、適切な形状や板厚分布などを与えることによって素材に左右されず構造のみに依存した特性や成形性を与えられるかに関する検討である。

本論文は、周期的な構造を持ったエンボス板を擬一様な平板とみなすことによって、平板の成形に関する理論がどこまでエンボス板に適用可能かを検討した挑戦的なものである。このような試みはこれまで行われておらず、大変独創的で将来的な発展性のある創造的な研究である。エンボス板の r 値とその異方性と深絞り成形性の関係、加工硬化指数と張出し成形性の関係のように明確な課題設定をもっており、まず見かけの力学特性を明らかにして、後に成形性や成形メカニズムとの関連を検討することで、研究方法や論旨も一貫性を持っていて明確である。先行研究については、ほとんどないため主に板材成形の古典理論を参照しているのは適切であると考えられる。得られた結論も妥当であり、成形性に関してはまだ研究途上であるが、これまでにない新しい知見を与えている。

この研究から得られた成果は塑性力学の分野に新しいアイデアを与え、工業的には難成形性材料の成形性向上などを可能にする技術に発展する可能性があり、それぞれにおいて価値が高いといえる。研究発表能力も優秀であることも踏まえて、博士の学位を授与するに値する内容となっている。以下に学位論文の内容に関連している 7 編の公表論文を示す。

公表論文（査読付き国際会議プロシーディングを含む）

- [1] Liu, W.Y., Suzuki, Y., Iizuka, T., Shiratori, T., Komatsu, T.: “Variation of tensile and bending rigidities of a duplex embossed steel sheet by small uniaxial tensile deformation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 261 (2018), 123-139. (第 3 章)
- [2] Liu, W.Y., Iizuka, T.: “Fundamental apparent plastic anisotropy of duplex embossed aluminum sheet”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 163 (2019), 105125. (第 4 章)
- [3] Liu, W.Y., Iizuka, T.: “Variation of apparent mechanical anisotropy of cold-formed embossed sheet by annealing”, *AIP Conference Proceedings*, 1769 (2016), 200003. (第 6 章)
- [4] Liu, W.Y., Iizuka, T.: “Investigation on flange deformation behavior of duplex embossed sheet metal subjected to deep drawing”, *AIP Conference Proceedings*, 1896 (2017), 020011. (第 7 章)
- [5] Liu, W.Y., Iizuka, T.: “Trials to evaluate distribution of Lankford value using hole expansion test”, *Procedia Manufacturing*, 15 (2018), 1754-1761. (第 9 章)
- [6] Liu, W.Y., Iizuka, T.: “Examination of evaluation method of uniaxial compressive property of cold-formed duplex embossed sheet metal by FEM analysis”, *Journal of Physics: Conference series*, 1063 (2018), 012162. (第 8 章)
- [7] Liu, W.Y., Iizuka, T.: “Trials to evaluate bulging formability of duplex embossed A1050-O sheet using erichsen test”, *AIP conference Proceedings*, 2113 (2019), 160014. (第 10 章)