

戦略的国際共同研究プログラム(SICORP)

日本-V4 共同研究

終了報告書 概要

1. 研究課題名：「難加工性マグネシウム合金管を対象としたレーザダイレス引抜きマルチスケールモデル」
2. 研究期間：2015年11月～2019年3月
3. 主な参加研究者名：
日本側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	古島 剛	准教授	東京大学 生産技術研究所	ダイレス実験 総括
研究参加者	増和 尚輝	博士前期課程 学生	首都大学東京理工学 研究科	実験装置開発
研究参加者	廣瀬 雄太郎	博士前期課程 学生	首都大学東京理工学 研究科	基礎実験
研究参加者	DU Peihua	博士学 生	東京大学工学研究科	組織観察
研究参加者	古澤 周作	学術支 援職員	東京大学 生産技術 研究所	薄肉細管実験
研究期間中の全参加研究者数			5名	

ポーランド側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Andrij Milenin	Professor	AGH University of Science and Technology	マルチスケール モデル総括
研究参加者	Piotr Kustra	Assistant Professor	AGH University of Science and Technology	マクロモデル の構築
研究参加者	Marek Paćko	Assistant Professor	AGH University of Science and Technology	マイクロモデル の構築
研究参加者	Dorota Byrska- Wójcik	Assistant	AGH University of Science and Technology	数値計算・最 適化計算
研究期間中の全参加研究者数			4名	

チェコ側チーム

	氏名	役職	所属	研究分担
研究代表者	Jiri Nemecek	Associate Professor	Czech Technical University in Prague	総括・マイク ロ特性評価
研究参加者	Matej Leps	Senior researcher	Czech Technical University in Prague	最適化計算
研究期間中の全参加研究者数			2名	

4. 国際共同研究の概要

本研究は、レーザダイレス引抜き熱変形結晶組織連成のマルチスケール解析モデルを開発することにより、難加工性マグネシウム合金薄肉細管を創製することを目的とする。日本側は難加工性マグネシウム合金管を用いたレーザダイレス引抜き実験を担当し、ポーランド側は加工中の熱と変形および結晶組織と表面あれ進展を考慮したマルチスケール解析を開発した。またチェコ側がナノインデンテーションや元素分析に基づくマイクロ特性評価を実施し、ポーランド側に解析のための材料特性を提供する。各国の連携した研究体制により、レーザダイレス引抜きにおけるミクロからマクロに渡る寸法横断的な各種加工因子の最適化を図った。最終的に難加工性マグネシウム合金の薄肉細管化プロセスを開発することに成功した。本共同研究成果は、自動車の軽量化部材や医療用生体吸収性材料への適用が期待される。

5. 国際共同研究の成果

5-1 国際共同研究の学術成果および実施内容

Mg合金は実用金属中最も軽く、最も高い比強度・比剛性を有する金属である。また中空構造体である管材形状としてMg合金を用いると、さらなる軽量化と高剛性化を実現することができ、自動車・鉄道等の構造部材の軽量化に貢献できることが注目されている。またMg合金は優れた生体吸収性材料としても知られており医療用ステント材として需要も期待できる。その一方でhcp結晶構造を持つことから非常に加工性を悪い金属材料であることが知られており、特に細管化の困難さやその二次加工の困難さが問題とされている。そこで本研究では、レーザダイレス引抜きのマルチスケール解析を開発することにより、優れた機械的特性を有するマグネシウム合金細管を創製することを目的としている。この目的を達成するために各国がこれまでの実績を踏まえた上で実験的・解析的な役割を担う。日本側がこれまでに実績のあるレーザダイレス引抜き実験を担当する。またポーランド側が加工中の熱と変形および内部組織と表面あれ進展を考慮したマルチスケール解析を開発する。またチェコ側がナノインデンテーションや元素分析に基づくマイクロ特性評価を実施し、ポーランド側に解析のための材料特性を提供する。各国の連携した研究体制により、レーザダイレス引抜きにおけるミクロからマクロに渡る寸法横断的な各種加工因子の最適化を図った。最終的に外径2mm、肉厚0.2mmの微小なマグネシウム合金薄肉細管の創製に成功した。

5-2 国際共同研究による相乗効果

本共同研究は、レーザダイレス引抜き加工に関する基本的な知見を持つ日本側と、塑性理論や最適化計算を基盤としたシミュレーション技術に長けたポーランド側、優れた微小な機械的特性や元素分析技術を持つチェコ側が、それぞれの長所を合わせることで共同研究を遂行することができた。各国の強みである①加工（日本）、②理論（ポーランド）、③評価（チェコ）の材料加工に関係する3本の矢を結集することで、従来にはない最適化加工条件を導き出すことによって難加工性マグネシウム合金を対象に、総断面減少率にして95%を達成することができた。

5-3 国際共同研究成果の波及効果と今後の展望

本共同研究で達成したレーザダイレス引抜きによるマグネシウム合金細管の創製に関する成果は、マグネシウム合金製の生体吸収性ステントの開発に繋がる足掛かりになると考えられる。特にマグネシウム合金製生体吸収性ステントは、血管内狭窄をステントによるバルーン拡張で治癒し、かつ治癒後にステントを取り除く再手術をすることなく、自然に生体内で吸収され、分解・消失させることができれば、患者のクオリティオブライフを大幅に向上させることができると考えられる。特にダイレス引抜きと冷間でのダイス引抜きの組み合わせを繰り返すことで、より効率的に高品質なステント用のマグネシウム薄肉細管を作製できると考えられる。これらの実用化には、民間企業との協創が必要不可欠であり、産学連携によるいち早い社会実装を目指していく予定である。

Strategic International Collaborative Research Program (SICORP)
 Japan – V4 Joint Research Program
 Executive Summary of Final Report

1. Project title : 「Multi Scale Model of the Laser Dieless Drawing Process of Tubes from Hardly Deformable Magnesium Alloys」
2. Research period : November 2015 ~ March 2019
3. Main participants :
 Japan-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Tsuyoshi Furushima	Associate Prof.	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo	Leader of dieless drawing experiment
Collaborator	Naoki Mashiwa	Ms. Student	Tokyo Metropolitan University	Development of experimental apparatus
Collaborator	Yutaro Hirose	Ms. Student	Tokyo Metropolitan University	Fundamental experiment
Collaborator	Peifua Du	Ph. D student	The University of Tokyo	Microstructure observation
Collaborator	Shusaku Furusawa	Technical Staff	Institute of Industrial Science, The University of Tokyo	Fabrication of thinner tube
Total number of participants throughout the research period:				5

Poland-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Andrij Milenin	Professor	AGH University of Science and Technology	Leader of multi-scale simulation
Collaborator	Piotr Kustra	Assistant Professor	AGH University of Science and Technology	Macro model
Collaborator	Marek Paćko	Assistant Professor	AGH University of Science and Technology	Micro model
Collaborator	Dorota Byrska-Wójcik	Assistant	AGH University of Science and Technology	Numerical simulation & optimization
Total number of participants throughout the research period:				4

Czech-side

	Name	Title	Affiliation	Role in the research project
PI	Jiri Nemecek	Associate Professor	Czech Technical University in Prague	Leader of micro evaluation

Collaborator	Matej Leps	Senior researcher	Czech Technical University in Prague	Optimization
Total number of participants throughout the research period:				2

4. Summary of the international joint research

The aim of this study is to manufacturing the magnesium alloy thin and small-tubes with difficult formability by development of multi-scale model with deformation, heat and microstructure of laser dieless drawing process. Japan side conducted the experiment of the laser dieless drawing. The Poland developed the multi-scale model of laser dieless drawing. Czech evaluated the microscopic material characterization for input material properties for micro model developed by Poland team. Through the collaborative research works, various processing factors across dimensions from micro to macro in laser dieless drawing can be optimized. Based on these results, the magnesium alloy thin and small-tubes with difficult formability can be manufactured successfully by the optimized laser dieless drawing process. The results of this research are expected to be applied to lightweight part for automobiles and biodegradable materials for medical use.

5. Outcomes of the international joint research

5-1 Scientific outputs and implemented activities of the joint research

Magnesium alloys has the highest specific strength and rigidity due to the lightest metal in practical metals. In addition, the use of magnesium alloy hollow structure can realize further weight reduction and high rigidity of structure part for automobiles and railways. The magnesium alloy is known as excellent biodegradable metal and is expected as a mother tube for medical stents. However, the problem of the use of magnesium alloy is their poor deformability due to hcp crystal structure. Therefore, it is difficult to manufacture thin and small magnesium alloy tubes with good mechanical properties. The aim of this study is to develop the multi-scale model with coupled heat, deformation and microstructure of laser dieless drawing process for manufacturing thin and small magnesium alloy tubes. Japan team conducted the series of experiments of the laser dieless drawing. The Poland team developed the multi-scale model of laser dieless drawing. Czech team evaluated the microscopic material characterization using nano-indentation and component analysis for input material properties for the micro model developed by Poland team. Through the collaborative research works, various processing factors across dimensions from micro to macro in laser dieless drawing can be optimized. Based on these results, the magnesium alloy thin and small-tubes with outer diameter of 2mm and thickness of 0.2mm can be manufactured successfully by the optimized laser dieless drawing process.

5-2 Synergistic effects of the joint research

This joint research is based on the Japan team with basic knowledge on laser dieless drawing, the Poland team with excellent simulation technique based on plasticity theory and optimization, Czech team with excellent micro mechanical characteristics. By bringing three important factors of material forming of (1) processing (Japan), (2) theory (Poland) and (3) evaluation (Czech), which are strong point of each country, the the magnesium alloy thin and small-tubes can be manufactured successfully.

5-3 Scientific, industrial or societal impacts/effects of the outputs

The achievement of this joint research on the manufacturing magnesium alloy thin and small tube by the laser dieless drawing is considered to be a foothold leading to the development of a magnesium alloy biodegradable stent. In particular, if a magnesium stent can be naturally absorbed, and eliminated in vivo without re-operation after healing, the quality of life of patients can be greatly improved. The magnesium thin and small tubes for high-quality stents can be produced more efficiently by the combination of dieless drawing and conventional cold die drawing. Corroborated work with company is indispensable for practical application of these, and we plan to aim for quick social implementation.

国際共同研究における主要な研究成果リスト

1. 論文発表等

*原著論文（相手側研究チームとの共著論文）

・査読有り：発表件数：計 4 件

1. P. Kustra, A. Milenin, B. Płonka, T. Furushima: Production Process of Biocompatible Magnesium Alloy Tubes Using Extrusion and Dieless Drawing Processes, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 25 (2016) pp. 2528-2535, DOI: 10.1007/s11665-016-2090-8
2. A. Milenin, P. Kustra, B. Płonka, T. Furushima: Physical and Numerical Modelling of Laser Dieless Drawing Process of Tubes from Magnesium Alloy, *Procedia Engineering*, Vol. 207, pp. 2352-2357 (2017)., doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1007
3. A. Milenin, P. Kustra, P. Du, S. Furusawa, T. Furushima: Computer aided design of the laser dieless drawing process of tubes from magnesium alloy with take into account ductility of the material, *Procedia Manufacturing*, Vol. 15 (2018), pp. 302-310., doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.223
4. A. Milenin, P. Kustra, T. Furushima, P. Du, J. Němeček: Design of the laser dieless drawing process of tubes from magnesium alloy using FEM model, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 262 (2018) pp. 65-74., doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.06.018

・査読無し：発表件数：計 0 件

*原著論文（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの論文）：発表件数：計 1 件

・査読有り：発表件数：計 1 件

1. T. Furushima, K. Manabe: Large reduction die-less mandrel drawing of magnesium alloy micro-tubes, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 67 (2018) pp. 309-312.

・査読無し：発表件数：計 0 件

*その他の著作物（相手側研究チームとの共著総説、書籍など）：発表件数：計 0 件
該当なし

*その他の著作物（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの総説、書籍など）：発表件数：計 2 件

1. 吉原 正一郎, 古島 剛, マグネシウム合金微細管の開発動向とその応用－生体吸収性材料の開発に向けた取り組み－, *塑性と加工*, Vol. 57, No. 670 (2016) pp.1028-1033
2. 古島剛, 吉原正一郎, 清水徹英: 生体吸収性マグネシウム合金微細管の開発とその応用, *素形材*, Vol. 59, No.4 (2018), pp. 27-33.

2. 学会発表

*口頭発表（相手側研究チームとの連名発表）

発表件数：計 3 件（うち招待講演：1 件）

*口頭発表（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表）

発表件数：計 6 件（うち招待講演：3 件）

*ポスター発表（相手側研究チームとの連名発表）

発表件数：計 0 件

*ポスター発表（相手側研究チームを含まない日本側研究チームの発表）

発表件数：計 0 件

3. 主催したワークショップ・セミナー・シンポジウム等の開催

該当なし

4. 研究交流の実績（主要な実績）

【研究打ち合わせ】

- ・2016年1月22日～28日：研究打ち合わせ 首都大学東京，東京，日本
- ・2016年9月18日～23日：研究打ち合わせ，AGH 科学技術大学，クラクフ，ポーランド
- ・2017年9月18日～20日：研究打ち合わせ，ケンブリッジ大学，ケンブリッジ，UK
- ・2018年9月16日～18日：研究打ち合わせ，ロワジュールホテル，豊橋，日本
- ・両国のチームメンバーを交えて Web ミーティングを2カ月に1回程度開催した。
- ・日本側のレーザダイレス引抜き実験の様子をライブ配信により参加機関と共有

【研究者の派遣、受入】

- ・2016年1月22日～28日：相手国側研究員2名を日本側研究機関に受け入れた。
- ・2018年9月14日～15日：相手国側研究員1名を日本側研究機関に受け入れた。

5. 特許出願

研究期間累積出願件数：0 件

6. 受賞・新聞報道等

該当なし

7. その他

【市民向けアウトリーチ活動】

- ・東京大学駒場リサーチキャンパス公開（2017年6月2日～3日）にて研究成果の一部のパネル展示
- ・東京大学駒場リサーチキャンパス公開（2018年6月8日～9日）にて研究成果の一部のパネル展示