T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

# 論文 / 著書情報
# Article / Book Information

| | |
|---|---|
| 題目(和文) | 純アルミニウム板ならびに純銅板の電磁成形挙動と高速変形組織 |
| Title(English) | |
| 著者(和文) | 神戸貴史 |
| Author(English) | Takashi Kambe |
| 出典(和文) | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第11445号,<br>授与年月日:2020年3月26日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:熊井 真次,村石 信二,中村 吉男,藤居 俊之,小林 郁夫 |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering),<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第11445号,<br>Conferred date:2020/3/26,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,, |
| 学位種別(和文) | 博士論文 |
| Category(English) | Doctoral Thesis |
| 種別(和文) | 審査の要旨 |
| Type(English) | Exam Summary |

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

（博士課程）

# 論文審査の要旨及び審査員

| 報告番号 | 甲第　　号 | | 学位申請者氏名 | | 神戸　貴史 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 論文審査<br>審 査 員 | | 氏　名 | 職　名 | | 氏　名 | 職　名 |
| | 主査 | 熊井　真次 | 教授 | 審査員 | 小林　郁夫 | 准教授 |
| | 審査員 | 村石　信二 | 准教授 | | | |
| | | 中村　吉男 | 教授 | | | |
| | | 藤居　俊之 | 教授 | | | |

論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文は，「純アルミニウム板ならびに純銅板の電磁成形挙動と高速変形組織」と題し，以下の 6 章で構成されている．

第 1 章「緒論」では，衝撃塑性加工法とこれを用いて変形させた金属に形成される高速変形組織について紹介し，衝撃加工法の一種である電磁成形法の特徴，電磁圧接法との共通点と相違点について述べるとともに，電磁成形に関する従来の研究について概観している．電磁成形後の組織変化と電磁成形挙動，すなわち電磁力によって引き起こされる金属の高速変形挙動とを直接対応させて検討した研究や，電磁成形において回避すべき金属板と金型の接合が，どのような条件下で起こるのかについて検討した研究が極めて少ないこと，そしてこれは電磁成形時の変形挙動を実験的手法によって直接観察することや測定することが極めて困難であることに起因していると指摘している．このような背景の下，本研究では，新たに考案した数値解析モデルを活用し，実験と数値解析の両手法を用いて，金属板の電磁成形挙動ならびに高速変形組織と電磁成形挙動の関係について明らかにすると述べている．

第 2 章「電磁成形挙動を再現する解析モデルの構築」では，まず，本研究の目的を達成するには，実験と数値解析を同じ条件で遂行することができるようにするため，被加工材や金型として用いる金属の選定ならびに成形条件の選択が重要であると述べている．そこで，被加工材には，研究室所有の電磁パルス発生機装置の能力で電磁成形が可能な，高い変形能と導電率を持つ厚さ 1mm 以下の純アルミニウムと純銅の薄板を，金型には工具鋼を選定した上で，金型の最適形状について実験と数値解析の両面から検討を行っている．その結果，幅 1mm、深さ 0.5mm の V 字型の溝を持つ金型を用いれば，同じ条件下で電磁成形実験と数値解析を実施することができ，両者の結果を直接比較することが可能となることを明らかにしている．

数値解析に関しては，まず電磁成形過程を，(I)電磁力を受けて変形した金属板が金型に衝突する過程，(II)金型の溝に金属板が流入する挙動と，(III)それに伴う温度上昇過程，(IV)溝流入後の金属板と金型の冷却過程に分類し，(I)を ANSYS Emag-Mechanical の有限要素法モデル(Model 1)を用いて，(I)で得られた情報を初期条件として，(II)と(III)を ANSYS AUTODYN の SPH 法モデル(Model 2)を用いて，さらに(II)と(III)で得られた情報を初期条件として，(IV)を OpenFOAM の有限体積法モデル(Model 3)を用いて統合的に数値解析し，一連の電磁成形過程を再現することに成功している．

実験結果は数値解析結果と定量的によく一致し，よって，実験で得られた電磁成形板の形状変化と高速変形によるミクロ組織変化を，本数値解析によって再現した電磁成形中に金属板が溝へ流入する挙動，溝流入中のひずみやひずみ速度の変化，温度上昇，その後の温度低下等と直接対応させることで，電磁成形後の組織変化と電磁成形挙動との関係を明らかにすることができると結論している．

第 3 章「純アルミニウム板の電磁成形挙動と高速変形組織の比較」では，厚さ 0.8mm の純アルミニウム板を V 字型の溝を有する鋼製金型を用い，充電エネルギー2，4，6kJ の各条件で電磁成形を実施し，得られた成形材について詳細な組織観察を行っている．2kJ では溝は被加工材により充填されなかったが，4，6kJ では充填されること，さらに 6kJ で成形した場合，充填部の先端の形状は一対の角状を呈していたと報告している．OM，SEM，TEM による組織観察の結果，溝内に流入した板の表面の結晶粒が溝斜面に沿って大きく引き延ばされていること，板最表面には，直径数～数十 nm の大きさの超微細粒からなる領域が観察されること，また溝入口の角部には比較的転位密度の少ない直径数百 nm の等軸粒が観察されることを明らかにしている．一方，板厚中央部の結晶粒に変化は見られないこ

とを明らかにしている．

さらに数値解析により，各充電エネルギー条件における純アルミニウム板の電磁成形挙動を再現している．まず Model 2 によって，6kJ の条件においては，純アルミニウム板表面が溝の両斜面に沿って，溝内に先行して流入し，それらが合体することで溝が充填されることを明らかにしている．また，溝流入中の板表面のひずみ速度は $10^7$ $s^{-1}$ を超え，ひずみも 5～6 程度と非常に大きいが，板厚中央部では，ひずみ速度は $10^5$ $s^{-1}$ 程度であるものの，ひずみがほとんど上昇しないことを明らかにしている．さらに板表面ではアルミニウムの融点を超える大きな温度上昇が起き，局所融解する可能性があること，そしてその後板表面は $10^8$～$10^9$ K/s オーダーで急速に温度低下することを見出している．実験結果と数値解析結果を対応させることにより，板表面に観察された数～数十 nm の大きさの微細粒は，急冷凝固により形成された可能性があると結論している．また，溝角部の板表面に観察された等軸粒については、マイクロ秒のオーダーでも動的再結晶粒の形成が可能であるとする RDRX（rotational dynamic recrystallization）モデルを用いて説明できると述べている．

第 4 章「純銅板の電磁成形挙動と高速変形組織の比較」では， 厚さ 0.75mm の純銅板を 4，6，8kJ の充電エネルギーの条件で V 字型の溝を有する鋼製金型を用いて電磁成形し，得られた成形材について詳細な組織観察を行っている．8kJ で溝は充填され，純アルミニウム板と同様，純銅板表面が溝の両斜面に沿って，溝内に先行して流入し，それらが合体することで溝が充填されることを明らかにしている．組織観察の結果，溝内に流入した板の表面の結晶粒が溝斜面に沿って大きく引き延ばされていること，斜面部表面には直径が数百 nm の伸長した等軸粒，転位セル組織およびサブグレインの他，変形双晶も観察されたと述べている．なお，純アルミニウム板で観察されたような板最表面の直径数～数十 nm の大きさの超微細粒からなる領域は観察されないと報告している，一方，純アルミニウム板と同様，板厚中央部の結晶粒に変化は見られないことを明らかにしている．

数値解析により，各充電エネルギー条件における純銅板の電磁成形挙動を再現している．Model 2 によって，8kJ の条件においては，純銅板表面が溝の両斜面に沿って溝内に先行して流入し，それらが合体することで溝が充填されることを明らかにしている．また，溝流入中の板表面のひずみ速度は $10^7$ $s^{-1}$ を超え，ひずみも 6 程度と非常に大きいが，板厚中央部のひずみ速度は $10^5$ $s^{-1}$ 程度で，ひずみもほとんど上昇しないことを明らかにしている．さらに板表面の温度は 1200K まで上昇することを明らかにしている．Model 3 によって，溝流入後の冷却過程を再現し，純銅板表面は $10^8$～$10^9$ K/s オーダーの冷却速度で急冷されていることを明らかにしている．実験結果と数値解析結果を対応させることにより，斜面部の純銅板表面に観察された直径が数百 nm の伸長した等軸粒の形成についても RDRX（rotational dynamic recrystallization）モデルを用いて説明できると述べている．

第 5 章「純アルミニウム板ならびに純銅板の電磁成形時に金型との接合が発生する条件とその原因」では，電磁成形において防止すべき被加工材と金型との接合が起こる衝突条件ならびにその原因について検討している。Model 1 による解析結果に基づき，実際に衝突速度が 300m/s を超えるような条件となる充電エネルギーで電磁成形すると，純アルミニウム板，純銅板の両者において溝最深部，すなわち板の頭頂部において接合が起こり，接合界面にはボイドやポアを含む中間層が観察されることを見出している．Model 2 により金属板が溝に流入する過程を解析したところ，衝突速度が増加すると流入速度が大幅に増加し，溝の両斜面に沿う領域で金属板が大きく突出して溝内に流入するようになって，溝最深部で衝突・合体し，被加工金属と金型の SPH 粒子が混合することを再現している．また，このような領域は 2000K を超える高温に達し、局所融解が生じる可能性があることを明らかにしている。さらに Model 3 による解析により，局所融解領域は $10^8$～$10^9$ K/s の高い冷却速度で冷却されて急冷凝固され，中間層を形成する可能性があることを明らかにしている．Model 2 ならびに Model 3 による解析結果から予測される中間層の位置や大きさならびに組成は，実験によって得られた中間層のそれらとほぼ一致することを見出している．このように一連の数値解析によって，電磁成形において防止すべき被加工材と金型との接合が起こる衝突条件ならびにその原因について明らかにすることに成功している．

第 6 章「結論」では，各章で得られた成果を統括し，結論を述べている．

以上を要するに本研究は，新たに考案した数値解析手法を用い，電磁成形中の被加工材内の局所的なひずみ，ひずみ速度，温度等の変化を再現し，これを実験で得られた高速変形組織の解析結果と比較することで，電磁成形挙動ならびに高速変形組織の形成メカニズムを理解する上で重要な多くの知見を提供している．これらの知見は今後の電磁成形のみならず電磁圧接の発展に有効利用されることが期待でき，本研究は工学上ならびに工業上貢献するところが大きい. よって本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値があるものと認められる．

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ（T2R2）にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。