

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), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第11445号, 授与年月日:2020年3月26日, 学位の種別:課程博士, 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), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11445号, Conferred date:2020/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	要約
Type(English)	Outline

論文要約

電磁成形法は、電磁力を用いて、金属板を金型に高速衝突させ成形する手法である。金属板は高ひずみ速度で変形し、数～数十 μs オーダーという短時間で成形が完了する。電磁成形は静的な変形に比べスプリングバックが減少することや、高い転写性を持ち、複雑で微細な形状を瞬時に精度よく成形することができるといった特徴を持つが、これらを可能にする高速変形メカニズムについてはよくわかっていない。電磁成形による金属の高速変形メカニズムを明らかにするためには、電磁成形後の金属の組織変化と、金属板の電磁成形挙動を関連付けて検討する必要がある。

本研究では、高い変形能と導電率を持ち、電磁成形に適した金属である純アルミニウムと純銅板を、V字型の溝を持つ鋼製の金型を用いて電磁成形し、電磁成形中に起こる、電磁力を受けて変形した金属板が金型に衝突する過程(I)、金型の溝に流入する金属板の挙動(II)とそれに伴う温度上昇過程(III)、溝流入後の金属板と金型の冷却過程(IV)について実験と数値解析の両面から比較検討を行い、純アルミニウム板と純銅板の電磁成形挙動および、高速変形組織と電磁成形挙動の関係について明らかにした。

第1章「緒論」では、衝撃塑性加工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、電磁成形法の特徴、研究に関する現状および電磁圧接法との関係について述べ、電磁成形における高速変形メカニズムを明らかにするためには電磁成形挙動を実験と数値解析の両手法を用いて検討する必要があること、また、電磁成形において回避しなければならない接合が起こるような条件に関して検討する必要があることを指摘し、本研究の目的と独創性を述べた。

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、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、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 1 mm 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た。その結果、幅 1 mm、深さ 0.5 mm の V 字型の溝を持つ金型を用いれば、実験と数値解析の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た。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た。

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 0.8 mm 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, 6 kJ の各条件で電磁成形した。4, 6 kJ で溝が充填され、さらに 6 kJ における充填部の先端の形状は一对の角状を呈していた。組織観察の結果、板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た。

さらに数値解析により、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することを明らかにし、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、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た。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、 $10^8 \sim 10^9 \text{ K/s}$ オーダーで急速に温度低下することを見出した。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超微細粒は、急冷凝固により形成された可能性があり、角部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た。

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 0.75 mm の純銅板を 4, 6, 8 kJ 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た。8 kJ で溝は充填され、頭頂部の形状が峰状を呈していた。組織観察の結果、板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。

数値解析により、8 kJ 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す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、板厚中央部のひずみ速度は 10^5 s^{-1} 程度であるものの、ひずみは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 1200 K まで上昇し、その後、 $10^8 \sim 10^9 \text{ K/s}$ 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た。実験結果と数値解析結果を対応させることにより、純銅板表面の伸長した等軸粒の形成についても RDRX モデルを用いて説明できると述べた。

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た。衝突速度が 300 m/s を超えるような条件で電磁成形すると、両金属板の頭頂部と金型の溝最深部において接合が起こり、接合界面に中間層が観察された。数値解析により、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り、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た。また、このような領域は 2000 K を超え、局所融解し、 $10^8 \sim 10^9 \text{ K/s}$ の高い冷却速度で急冷凝固され、中間層を形成する可能性があることを明らかにした。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、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た。

第 6 章「結論」では、各章で得られた成果を統括し、結論を述べた。

本研究では純アルミニウムと純銅板を、V 字型の溝を持つ鋼製金型を用いて電磁成形し、電磁成形中に金属板や金型に起こる現象について実験と数値解析の両面から検討を行い、両金属板の電磁成形挙動

および、高速変形組織と電磁成形挙動の関係について明らかにした。

金属板が溝に流入する際、溝の斜面側の板表面が中央部よりも先行して溝に流入する様子が明らかとなり、最終形状は実験と数値解析とでよく一致した。板表面の結晶粒は引き延ばされていたのに対し、板厚中央部の結晶粒に変化は見られず、これは溝流入中、板表面のひずみ速度は 10^7 s^{-1} を超えており、ひずみも 5～6 程度と非常に大きかった一方で、板厚中央部のひずみ速度は 10^5 s^{-1} 程度であり、ひずみもほとんど上昇していなかったこととよく対応していた。板表面は主に塑性変形による仕事に起因する大きな温度上昇が起き、その後 $10^8 \sim 10^9 \text{ K/s}$ オーダーで温度低下しており、板表面に観察された数百 nm の大きさの等軸粒は温度低下する前に動的再結晶が起きたことで形成されたことが示唆された。融点を超える領域が存在した純アルミニウム板斜面部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と考えられる。このように、電磁成形後の組織変化と電磁成形挙動はよく対応しており、高速変形組織と電磁成形挙動の関係を明らかにすることができた。

また、金属板が金型に接合してしまう条件とその原因に関しても検討し、金属板の衝突速度が増加すると、溝に沿って流入する金属板の流入速度が増加し、斜面部の突出が大きくなり、溝最深部付近で両斜面部から流入してきた金属板が合体した後、溝最深部に衝突することで、金属前線と金型間で混ざり合いが起こると局所的に融解が起こり、急冷されることで接合が起こることが明らかとなった。