

Breakup dynamics of liquid metal ligament with interfacial heat and mass transfer

任, 夢佳

<https://hdl.handle.net/2324/7396230>

出版情報 : Kyushu University, 2025, 博士 (工学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :



氏 名 : 任 夢佳

論 文 名 : Breakup dynamics of liquid metal ligament
with interfacial heat and mass transfer
(界面の熱物質拡散を伴う液体金属リガメントの分裂ダイナミクス)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

金属積層造形 (Metal Additive Manufacturing, 金属 AM) は, 材料の歩留まりの良さと成形能力の高さを生かして, 近年, 航空宇宙, 自動車, 医療分野をはじめ, 形状が複雑な高機能部品の製造に広く適用されている. 金属 AM で成形した部材の構造的強度ならびに機械的特性は, 素材である金属粉末の品質に依存するため, 高い球形度, 単一粒径, 優れた界面特性を有する高品質な金属粉末に対する要求が高まっている. 金属 AM 用の粉末製造では, 液体金属に高速のガスジェットを吹き付けて, 細い糸状の液体構造 (リガメント) へと変形したのち, 界面張力の作用で液滴へと分裂して, 最終的に凝固して固体粒子化する一連の過程をたどる. このとき, 高温状態のリガメントの気液界面を介して, 雰囲気との間で熱と物質の拡散的な輸送が進行する. その結果生じる表面の酸化や凝固といった界面現象は, 分裂後に出来る液滴および粒子の形状に対して必然的に影響を与えるため, 気液界面を通じた熱物質拡散を伴うリガメントのダイナミクスを明らかにすることは, 熱流体工学および材料工学の観点から重要である. しかし, 熱拡散と物質拡散の影響を切り分けて, 液体金属リガメントが分裂に至るまでの挙動に与える双方の影響を実験によって定量的に明らかにすることは難しく, それゆえ普遍性の高い数理モデルによって現象を記述した研究は過去に見当たらない. そこで本論文では, 金属粉末製造の共通プロセスである, 界面の熱物質拡散を伴う液体金属リガメントの分裂ダイナミクスに着目し, 実験と理論の両面から現象を明らかにすることを目的としている.

第 1 章の序論では, 研究の背景として, 金属 AM 工程における粉末品質の重要性を調査し, その品質向上の鍵となるリガメントの分裂が液体分裂の普遍的プロセスであるとして, 非粘性流体から非ニュートン流体まで先行研究をレビューする. 続いて, 酸化による非球形液滴の形成挙動に焦点を当て, 液体金属の流動において顕在化する界面化学反応の重要性を強調する. これらの背景を踏まえて, 熱物質拡散とともに大変形するリガメントのダイナミクスが未解明であることを明確にし, 本研究の目的および位置づけに繋げる.

第 2 章では, 単一リガメントの分裂挙動を観察するための装置と方法を述べる. 作動流体である熔融スズ (錫) を等温容器に保持し, 挿入した金属棒を等加速度で引き抜くことで, 単一の錫リガメントを高い再現性で形成可能な独自の機構を提案する. 高速度カメラおよび高速赤外線カメラを用いて, リガメントが大きく変形しながら分裂に至るプロセスを, 高い時空間分解能で撮影および温度計測する実験系を構築している. あわせて, 物質拡散の特性を管理するために, アルゴン雰囲気および油膜コーティングを用いた環境制御方法を示す.

第 3 章では, リガメントの分裂に関する結果を示す. 錫を含む各種流体におけるリガメントの収

縮と分裂のダイナミクスを時系列に撮影することで、収縮部（くびれ）の径の時間変化を定量的に計測する．その結果、大気中で伸長する錫リガメントは、はじめ界面張力の時定数に従ってくびれが細くなるものの、突如、界面張力と粘性の時定数に従って加速度的に細くなって分裂に至ることを示す．これにより、液体金属リガメントに現れる特異なクロスオーバー現象を、実験的に初めて明らかにしている．対比実験として、アルゴンや脱気油膜の低酸素濃度中の錫リガメントは、界面張力の時定数のみに従って細ることを確認し、表面酸化が与える影響を抽出して明らかにする．さらに、くびれ部の温度計測の結果から、クロスオーバー現象に与える凝固の影響が限定的であることを明らかにする．これら実験に対応して、界面張力と熱物質拡散を考慮した数理モデルを新たに構築し、クロスオーバーを有する特異なくびれの収縮挙動をスケーリングすることに成功している．

第4章では、液滴形状に関する結果を示す．分裂後に形成される錫液滴の形状を統計的に評価し、表面酸化を有する非球形な錫液滴を定量化している．初期温度を変化させると、温度上昇に伴って錫液滴が大きくなるものの、縦横比は約7と一定値になることを示している．そして、無次元化した等価体積径を、ガンマ分布で統一的に整理している．

第5章では、本論文の結論をまとめる．