

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01206

研究課題名（和文）液滴の流動・凝固と皮膜の変形・破壊のメカニクス

研究課題名（英文）Mechanics of flow/solidification of droplet and deformation/fracture of coating

研究代表者

阪口 基己（Sakaguchi, Motoki）

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：60452083

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：溶融パラフィンを再現性よく滴下できる装置を製作し、液滴の流動・凝固・密着過程での残留応力の発達挙動を実測するとともに、凝固後の皮膜に発生する破壊現象と残留応力との関連を明らかにした。液滴の材質、液滴の温度、液滴の衝突速度、基材の予熱温度を実験変数とし、それぞれの影響をモデル実験により個別に抽出した。また、液滴の流動・凝固を流体シミュレーションにより再現するとともに、凝固・密着過程での変形破壊機構を熱構造連成有限要素解析により定量化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、溶射プロセスをモデル化した溶融パラフィンの滴下実験により、さまざまな滴下条件が残留応力の発達過程に及ぼす影響を個別に抽出した。また、数値解析を援用して、それぞれの滴下条件が液滴の流動・凝固過程と皮膜の変形・破壊機構に与える影響を可視化しながら、優れた皮膜強度を生み出す最適滴下条件を模索した。本研究で考察した凝固皮膜の強度問題は、液滴の衝突と流動を扱う流体力学、凝固と熱移動を扱う熱力学、変形と破壊を扱う材料力学が絡んだ複雑な問題だったが、現象を可視化しやすいパラフィンの滴下実験と数値解析により、この熱/流体/構造連成メカニクスの体系的な理解が得られた。

研究成果の概要（英文）：A new experimental set-up was developed to examine residual stress evolution during the flow, solidification and adhesion processes of paraffin droplet impacting a solid substrate. The droplet material, droplet temperature, droplet impact velocity, and substrate preheating temperature were considered as experimental variables, and the effects of each were extracted separately by model experiments. The flow and solidification of the droplets were reproduced by fluid simulation, and the deformation and fracture mechanisms during the solidification and adhesion processes were quantified by coupled thermo-structural finite element analysis.

研究分野：材料力学，破壊力学

キーワード：液滴 流動 凝固 皮膜 変形 破壊 残留応力

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

溶射はジェットエンジン高温部材を保護する遮熱コーティングや自動車の摺動部品の耐摩耗コーティングの成膜に広く用いられている。溶射では、熔融させた材料粒子を基材表面に吹き付けて衝突、急速冷却、凝固、堆積させる。成膜された溶射皮膜には割れや剥離といった損傷が基本問題としてつきまとい、この損傷は溶射時に発達する皮膜の残留応力に大きく左右される。ただ、熔融した単一の粒子が基材に衝突して急冷凝固する過程は時間と寸法のスケールが小さく、その過程で発達する残留応力の実測は極めて難しい。これまで、溶射を模擬したいいくつかのモデル実験が行われてきたが、凝固した後の皮膜の強度については検討されているものの、単一粒子の凝固・密着過程での応力やひずみの測定には成功していない。

2. 研究の目的

本研究では、熔融パラフィンを再現性よく滴下できる装置を製作し、液滴の流動・凝固・密着過程での残留応力の発達挙動を実測するとともに、凝固後の皮膜に発生する破壊現象と残留応力との関連を明らかにすることを目的とした。液滴の材質、液滴の温度、液滴の衝突速度、基材の予熱温度を実験変数とし、それぞれの影響をモデル実験により個別に抽出するとともに、液滴の流動・凝固を数値シミュレーションによって再現しながら、凝固・密着過程での変形破壊機構を熱構造連成有限要素解析により定量化することを目指した。

3. 研究の方法

(1) 滴下実験装置の作製

これまでの試作装置を基に、新しい滴下装置を製作した(図1参照)。この装置では、銅製容器の外周をヒータで加熱し、熔融パラフィンの温度を制御した。パラフィンは銅製容器の下部の吐出口から基材の中央部に滴下した。基材裏面には2軸ひずみゲージと熱電対を貼付し、液滴の凝固・密着過程で生じるひずみと温度変化を測定した。液滴の流動・凝固挙動をハイスピードカメラで撮影し、液滴の表面温度を赤外線カメラで測定した。この装置では、マイクロメータを改良したバルブによって吐出口を開閉して滴下量を制御し、滴下高さを変えることで基材への衝突速度を制御した。基材は循環冷却機能を持つ恒温槽の中に設置することで予熱温度を制御した。

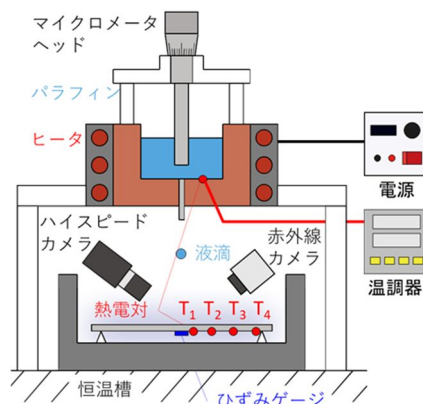


図1 滴下実験装置の模式図

(2) パラフィンの熱的機械的特性の評価

5種類のパラフィンの物性を測定した。融点や熱伝導率、比熱、潜熱などの熱物性、動粘性係数や表面張力係数、接触角などの流体物性を測定した。また、パラフィン試験片に対して、-20から融点直下まで試験温度を5刻みに設定して引張試験とクリープ試験を行い、それぞれの温度での応力ひずみ曲線、クリープ曲線、引張強度を取得した。

(3) 滴下実験による流動・凝固挙動の観察と残留応力の測定

作製した滴下装置を用い、4つの実験変数を個別に変化させた滴下実験を行った。液滴のリコイル挙動や凝固速度、凝固後の形状など、流動・凝固の素過程に実験変数が与える影響を検討しながら、基材裏面に発生するひずみの時間変化を計測した。

(4) パラフィン皮膜の割れ・剥離挙動の観察と皮膜の密着強度試験

滴下実験では、液滴が凝固する過程でのパラフィン皮膜の割れや剥離挙動を観察し、これらの破壊現象に与える4つの実験変数の影響を評価した。また、割れや剥離が生じない条件を対象にして、剥離試験により皮膜/基材界面での密着強度を測定し、界面の剥離強度に与える残留応力の影響を検討した。

(5) VOF法による衝突・流動・凝固プロセスの解析

汎用ソフトウェア FLOW-3D を用いて液滴の衝突・流動・凝固挙動を再現し、界面近傍の凝固が流動に与える影響を定量的に考察した。

(6) 熱構造連成有限要素解析による変形破壊機構の定量化

凝固後の皮膜形状を再現した有限要素モデルによる熱構造連成解析を行った。実験で測定した温度やひずみと照合しながら、皮膜中の残留応力の発達挙動を計算し、パラフィンの融点や線膨張係数、凝固直後のクリープ変形の影響を定量化した。

4. 研究成果

一連の滴下実験により、基材温度が低く、滴下高さが低く、液滴温度が低いほど基材裏面で計測される引張残留ひずみが大きくなり、市販のろうの場合は凝固皮膜に割れが生じ、工業用パラフィンの場合は基材/皮膜界面が剥離することを示した。また、基材温度、液滴の滴下高さ、温

度が密着強度に与える影響を評価し、基材温度が高く、滴下高さが高く、液滴温度が高いほど密着強度は大きくなり、この傾向は凝固・密着過程での剥離のしにくさと定性的に一致することを示した。続いて、クリープ変形を利用して皮膜中の引張残留応力を意図的に解放させた皮膜に対する剥離試験を行い、引張残留応力には基材/皮膜界面の密着強度を低下させる効果があることを明らかにした。

実測したパラフィン皮膜の形状を 2 次元軸対称モデルで再現し、測定した機械的特性を考慮した有限要素モデルを構築した。続いて、基材裏面のひずみを基に弾性解析を行い、凝固皮膜には 2~4MPa 程度の面内引張応力が発生すること、この面内引張応力とパラフィンの引張強度を比較すると凝固密着過程で生じる皮膜の割れを定量的に説明できることを明らかにした。また、基材/皮膜界面に働く垂直応力とせん断応力は、基材温度が低く、滴下高さが低いほど大きくなること、この傾向は滴下実験での剥離のしにくさや剥離試験での密着強度の大きさと定性的に一致することも明らかにした。

実測した熱物性を加味した熱構造連成有限要素解析を行い、滴下実験で計測したひずみの数値シミュレーションによる再現を試みた。その結果、凝固皮膜のクリープ変形を考慮しても、基材裏面のひずみの計算結果は実験結果より 2 倍程度大きくなるが、これは有限要素モデルが基材/皮膜界面の微小な空隙や局所的な剥離を反映できていないためであることを明らかにした。また、実験結果と計算結果の乖離が小さい滴下条件では凝固・密着過程での割れや剥離が生じにくく、剥離強度も高くなる傾向があることを明らかにした。

溶融させたパラフィン液滴を 3 種類の透明基材上に滴下し、液滴の形状変化と液滴/基材界面の凝固挙動をハイスピードカメラで撮影した。その結果、液滴が流動しながら凝固する場合は、基材の熱伝導率が高いほど液滴の冷却速度が大きくなるため液滴の直径が小さくなること、液滴温度が高くなると粘性係数と表面張力が小さくなるだけでなく、凝固の進行が遅くなるため、液滴の直径は大きくなることを明らかにした。また、液滴/基材界面の凝固について、衝突条件に依存して液滴の外周部から中心にかけて緩やかに凝固する場合と液滴の流動と同時に凝固が進行する場合の 2 種類のパターンがあることを明らかにした。凝固後の液滴の最終形状について、基材の熱伝導率が高いほど、液滴温度が低いほど、直径が小さく厚い皮膜が形成されることを明らかにした。滴下高さが高くなると、直径が大きく薄い皮膜が形成され、基材からの伝熱の影響が大きいほど、滴下高さの影響を受けやすいことも明らかにした。

熱流体シミュレーションでは、物性値の温度依存性や固体分率に応じた抵抗力をモデルに組み込むことで、基材材質と液滴温度が液滴の流動挙動に与える影響を再現することに成功した。しかし、滴下高さが高い条件では実験と解析で乖離がみられた。また、液滴/基材界面の凝固挙動を定量的に評価するため、流動中に液滴に含まれる固層の厚さを計算した。その結果、衝突条件が凝固に与える影響は実験で得られた傾向と一致すること、凝固パターンの違いは液滴の流動挙動と大きく関連すること、液滴全体の体積に対して僅かな領域の固層が接触線を停止させることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kang Chao, Sakaguchi Motoki, Saito Akito, Inoue Hirotsugu	4. 巻 34
2. 論文標題 Adhesion strength of paraffin droplet impacted and solidified on metal substrate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Results in Physics	6. 最初と最後の頁 105310 ~ 105310
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.rinp.2022.105310	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kang Chao, Ikeda Ikki, Sakaguchi Motoki	4. 巻 118
2. 論文標題 Recoil and solidification of a paraffin droplet impacted on a metal substrate: Numerical study and experimental verification	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluids and Structures	6. 最初と最後の頁 103839 ~ 103839
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jfluidstructs.2023.103839	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kang Chao, Ikeda Ikki, Sakaguchi Motoki	4. 巻 228
2. 論文標題 Spreading dynamics associated with transient solidification of a paraffin droplet impacting a solid surface	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 125672 ~ 125672
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125672	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 2件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Chao Kang, Motoki Sakaguchi, Hirotsugu Inoue
2. 発表標題 A numerical study on creep deformation of a paraffin droplet impacted and solidified on a metal substrate
3. 学会等名 8th International Conference on Creep, Fatigue & Creep-Fatigue Interaction (CF8) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪口基己
2. 発表標題 液滴の衝突・流動・凝固と皮膜の変形・破壊の力学
3. 学会等名 日本材料学会 第173回破壊力学部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 血矢光太, Chao KANG, 阪口基己
2. 発表標題 パラフィン液滴の衝突・凝固挙動と皮膜の密着強度
3. 学会等名 日本材料学会 第71期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kang Chao, 阪口基己
2. 発表標題 金属基材に衝突・凝固したパラフィン液滴の変形と破壊
3. 学会等名 日本材料学会第71期第1回高温強度部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田一輝, Kang Chao, 阪口基己
2. 発表標題 パラフィン液滴の衝突・流動・凝固挙動の熱流体シミュレーション
3. 学会等名 日本材料学会 第60回記念高温強度シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田一輝, 血矢光太, Kang Chao, 阪口基己
2. 発表標題 固体表面に衝突したパラフィン液滴の流動・凝固のその場観察と熱流体シミュレーション
3. 学会等名 日本材料学会 第72期学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chao Kang, Motoki Sakaguchi, Hirotsugu Inoue
2. 発表標題 Adhesion Strength and Debonding Behaviours of Paraffin Droplets, Impacted and Solidified on Metal Substrate
3. 学会等名 Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength and the 13th Conference on Structural Integrity and Failure 2022 (APCFS 2022)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------