

令和 2 年 7 月 5 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02051

研究課題名（和文）溶融・流動を伴うプラスチック燃焼ダイナミクスモデルの高次元化とその検証

研究課題名（英文）Modeling of Combustion over Melting/dripping Molten Polymer

研究代表者

中村 祐二（Nakamura, Yuji）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：50303657

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：溶融相の形状変化に応じて変化する燃焼特性に対して汎用モデル化することを目的として実験および数値シミュレーションを実施した。得られた主な成果を列記する。（1）バックライトCT法の原理を利用した時系列3次元形状変化計測システムの改良を行い、高精度での形状変化履歴を得ることができた。（2）異なる板厚材料を限界酸素濃度付近で燃焼させた際に得られる燃焼限界モードに関する検討を行い、従来の燃焼モード判定の妥当性を評価した。（3）低圧場を活用して一次元燃焼場を再現することを試み、溶融の影響を最小化した際の燃焼特性を数値化する手法を開発した。（4）溶融とガス化を同時に実現する数値解析手法の開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

溶融状態にある物質の正確な燃焼特性は、現象そのものを高精度で再現することが困難であり、現状はランダム誤差として考えているにも関わらず、ISOで規定される難燃性試験においても溶融物の落下が重要な判断基準として使われている。材料開発の段階でその可能性を判断できることが期待されている（社会的意義）。本現象は学術的には移動反応界面の問題であり、数値的に解こうとすると数値不安定性が高いため、安定化を促すための簡略化が不可欠である。その簡略化を支援するため、本研究を通じて溶融状態にある燃焼特性の数値化・可視化を可能とする手法を開発に成功し、高度モデル化に貢献した、（工学分野での学術的意義）。

研究成果の概要（英文）：Deformation of molten layer upon the combustion of thermoplastic materials are often observed and does affect the combustion characters quite much. Even though such fact has been already pointed out, no productive attempt was made to model it. The present research project aims to touch this issue seriously through various fundamental approaches and the schemes to proceed the modeling work are developed and validated. In the recent three funded years, 4 major achievements are made as follows: (1) backlight-CT measurement system to visualize time-dependent 3-D deformation process is developed. (2) investigate the validity of the existing combustion mode classification of various thickness of polymeric materials at near extinction condition. (3) unique scheme to obtain pure 1-D combustion feature without deformation effect using low-pressure technique is proposed. (4) Complete numerical simulation with deformation and gasification processes followed by Arrhenius law are developed.

研究分野：燃焼学，火災物理科学

キーワード：火災 燃焼 熱可塑性樹脂 溶融相 ガス化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

熱可塑性プラスチックの燃焼特性の評価においては溶融物の挙動が左右する一方で、それを予測する手法はなく、可燃物が時間的に変化することが燃焼現象に与える効果について明確にされていない。そのような事実にも関わらず、それを直接扱うことは著しく難しいため、真正面から考慮されていなかった。この状況を打破するためには、溶融状態を正しく計測し、それによる燃焼特性の変化を把握し、直接シミュレーション技術からモデル化ができるような段階的発展が不可欠である。直接数値シミュレーション技法としては世界で成功した例は限られており、実験と同時にできるチームはいない。

2. 研究の目的

我々は独自に開発した加熱による溶融現象が可能なシミュレーション技術をベースとして、溶融現象の可視化、燃焼特性の把握、数値シミュレーションの高度化を実施することで、変形する燃焼物の変形度合いが燃焼特性に与える影響について高度モデル化するために必要な基礎基盤を盤石にすることを旨とする。この目的を満すためには、上記独立した研究課題を平行して実施することが必要になるが、それに見合った研究環境を構築することで本目的を達成しようとするものである。

3. 研究の方法

溶融相の形状変化に応じて変化する燃焼特性に対して汎用モデル化することを目的として実験および数値シミュレーションを実施した。その実現のための方法を以下に列記する。(1) バックライト CT 法の原理を利用した時系列 3 次元形状変化計測システムの改良を行う。(2) 異なる板厚材料を限界酸素濃度付近で燃焼させた際に得られる燃焼限界モードに関する検討を行い、従来の燃焼モード判定の妥当性を評価する。(3) 低圧場を活用して一次元燃焼場を再現することを試み、溶融の影響を最小化した際の燃焼特性が得られるかを検討する。(4) 溶融とガス化を同時に実現する数値解析手法の開発を行う。

4. 研究成果

(1) まず、バックライト CT 法の原理を利用した時系列 3 次元形状変化計測システムの改良を行った。バックライト CT 法とは、溶融してゆく様子の「外形」をバックライトにより検出し、それを CT の原理を用いて三次元状態を再構成するものである。それを時系列で実施することで時々刻々変化する三次元変化を得ることができる。これまでは、バックライトで 360 度回転させる時間(遅れ時間)が 1 秒程度であったため、時間分解能が不十分であった。そのため解像度の向上には限界があった。今回、この改良を行うため、複数台のカメラとバックライトとして構成し、複数台まで拡張可能な画像処理アルゴリズムを構築した。また赤外線カメラを追加することで溶融部の形状変化ならびに温度計測を同時に実施するシステムを構築することを可能とした。結果の一例を以下に示す(2018 燃焼シンポジウム講演論文集より抜粋)。今後はここで開発された手法を活用して溶融面のうちガス化面積を明確に求め、局所のガス化情報を 3 次元で再構成することを目指す。

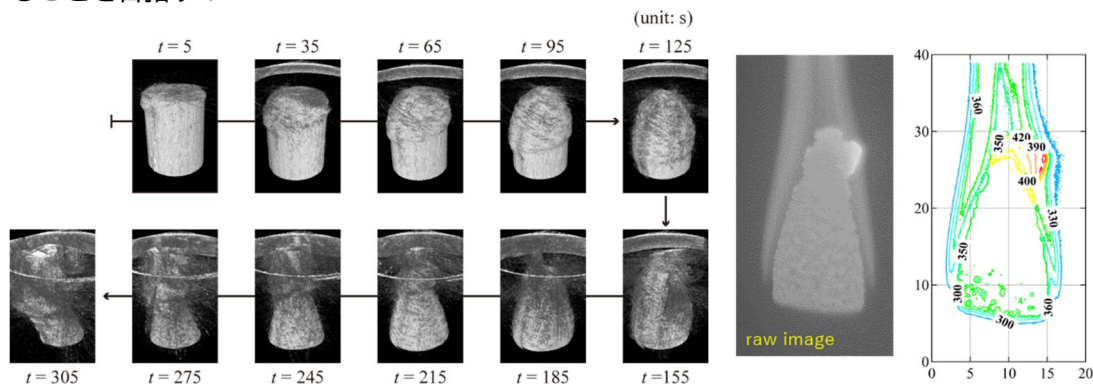


図1 バックライト CT を用いた三次元時系列形状変化(左)および赤外線カメラによる温度計測(右)

(2) 溶融を伴う燃焼を考える際、溶融の効果を抜き出し、そのモデル化を行うことが必須となる。すなわち、溶融が無視できる(あるいは著しく少ない)状態での燃焼特性について整理することが必要である。この目的を達成するため、異なる板厚材料を限界酸素濃度付近で燃焼させた

際に得られる燃焼限界モードに関する検討を行った。燃焼限界付近をターゲットとするため周囲酸素濃度を減じる方法を採用した。これにより溶融が緩慢となり、できるだけ溶融の効果が最小限となるように工夫した。ここで確認するのは、厚みによって切り替わる燃焼モードの違いをどのような観測量を用いて予測が可能であるかを特定することにある。

代表的な結果を以下に示す。燃焼限界付近での詳細な形状(図2左)を確認すると、「上に凸」となるとともに、火炎が試料を囲うようになり燃焼特性が変わる。燃焼特性の変化は、燃焼モード(厚みに依存してこの違いが発現)の違いとして現れるため、燃焼モードの切り替わりが予測できるということは燃焼特性の判定が正しくできることを意味する。従来理論によれば、燃え拡がり速度から判断すると1mm以下ならば「熱的に薄い」と考えればよいと判断されるものの、燃焼限界時の限界質量流束(Critical Mass Flux: CMF)では厚みが0.5mmでモード切替が起こることがわかる(図2右)。このように火炎の動きだけでは限界状態を正しく判断できないことが明確となり、「どこからガス化をどの程度しているか」を把握することが不可欠であることを暗示する。ガス化部は表面温度を特定すれば明確にできるため、ここでの結果は(1)で開発している(表面温度も同時計測可能な)バックライトCT観察法がモード切替などの詳細な燃焼状態を判定するのに有効であることを支持するものである。

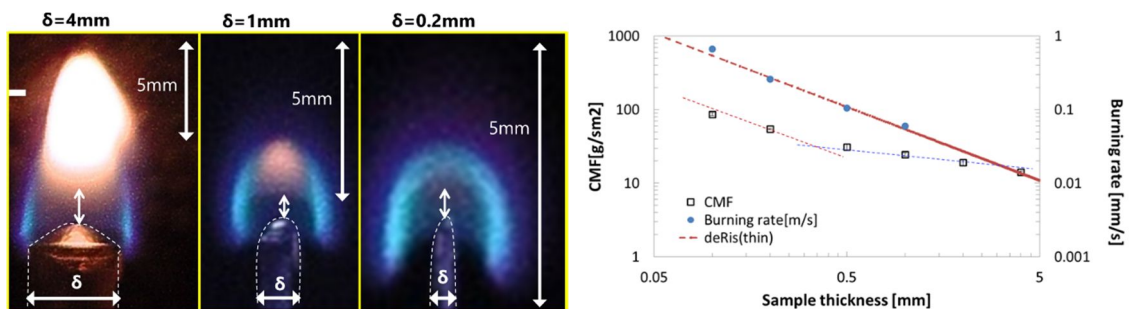


図2 異なる厚みを持つ熱可塑性樹脂の燃焼限界付近での燃焼挙動(左)および燃焼限界付近での燃焼特性値(右)(2018 燃焼シンポジウム講演論文集より抜粋)

(3)(2)で検討したように、溶融の効果を検討するために「溶融の効果がない場合の基礎燃焼特性」を知る必要がある。しかしながら、質量減少速度を3次元で計測すると誤差も増えるとの懸念もあるため、何等かの方法で溶融の影響を排除できる燃焼特性のデータベースを構築できる手法提案を行うことが望ましい。これまでの(1)(2)のような下方燃焼法ではそれを実現することができないため、新しい方法論を検討することが必須である。そこで溶融球体を用い、溶融変形を抑えた場における燃焼特性を得る手法構築を行った。具体的には低圧場を活用して一次元燃焼場を再現することを試みた。低圧場を活用することにより、浮力を相対的に抑えることが可能となるため、微小重力場と類似した点対称一次元燃焼場を再現することができる。しかも低圧場を導入することで煤の生成を抑えることができるため、煤からの輻射熱輸送が燃焼特性に与える影響をも排除することができる。溶融球を安定に形成するための工夫を講じる必要があるが、それに対する改善を繰り返すことで、以下のような代表的な結果を得ることに成功した。具体的には、球径を保ちつつ燃焼する状態を維持し、その間の燃焼速度から可燃物の燃焼特性値として知られる輸送数(B定数)を持ちメル手法を提案した。今後、この手法を活用・拡張して溶融挙動に依存しない基本燃焼特性データベースを作成することで、溶融の効果を明らかにするためのベースラインを提供できる。

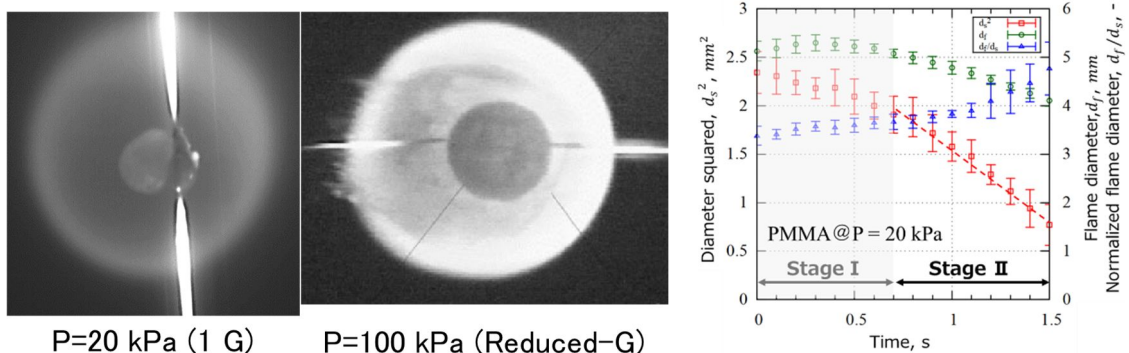


図3 低圧場による球状火炎の形成(左:比較例として航空機を用いた微小重力下での燃焼場を示す)および低圧場を用いた場合の燃焼速度(d_2 則)の導出例(右)(2019 燃焼シンポジウム講演論文集より抜粋)

(4)溶融とガス化を同時に実現する数値解析手法の開発を行った。従来開発してきた直接数値シミュレーションモデルでの対象物はPCM(Phase change material)であり、相変化のみを考慮していた。ここでは、溶融物の物理科学特性を独立して与えるようにコード内のサブルーチン

を一新 + 適宜追加開発して、溶融物の膨張およびガス化を数値化することを試みた。ガス化速度については様々なモデルを試すこととなったものの、最終的にはアレニウス型の温度依存性を持たせることとした。このモデルを導入することで実際のガス化現象に近づくものの、いわゆるガス化温度に近づくとは非線形的に増加し、その際に計算が発散することが多発する。また、相界面は著しく薄く、そこからのガス湧き出しを与えることになるため、発散度合がさらに強くなる（時間的にも急激であり、空間的にも急激である）。一般的に表面が空間に固定されている場合は、界面境界条件としてガス化速度を数学的に与えればよいが、ここでベースにしている手法はVOF等の体積ベースのものであり、界面そのものの位置を追跡するものではない。そのためガス化部は常に空間のどこかのグリッド数点にあり、それが時々刻々と変化するため、そのガス湧き出し位置が時々刻々変化することで圧力場解析が不安定になり発散をもたらしがちである。それを回避するため、様々な手法を検討したものの、最終的にはガス化が予測される個所のグリッドを小さくして時間刻みを適宜調整しながら発散を避けるという方法で対応することになった。

得られた結果のうち代表的なものを以下に示す。右の境界条件のみ open としているためガスはそちらに向かって逃げる。そのためあたかも右向きの流れがあるような物理量分布となる。解析事例は2つを比較しているが、左が重力加速度をゼロとしたもの、右が重力加速度を通常重力加速度を与えたものである。この結果から、重力加速度がもたらす自然対流により溶融物の形成状態および発生ガスの濃度分布が大きく影響を受けることがわかった。現在、これらの解析の拡張版をとりまとめ、溶融挙動が混合気形成ならびに着火可能性に対してどのような影響を与えるかを詳細に検討した結果をジャーナル投稿する準備をしている。

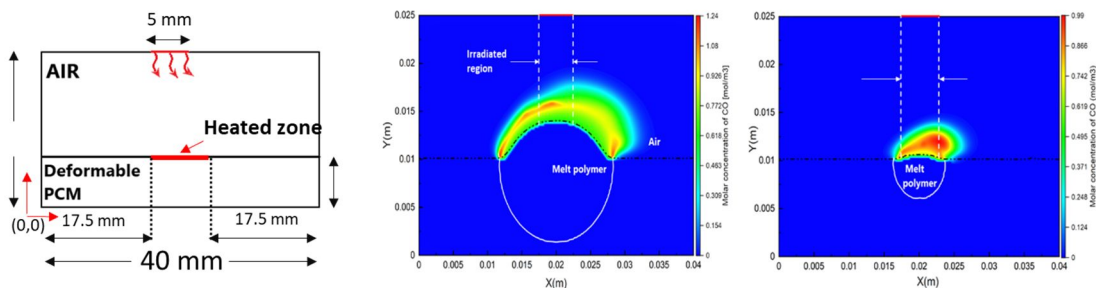


図4 溶融およびガス化を伴う数値シミュレーションの一例。左：無重力場，右：通常重力場を想定

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Migita, T., Yamahata, T., Strempl, P., Matsuoka, T., and Nakamura, Y.	4. 巻 56
2. 論文標題 Methodology to Achieve Pseudo 1-D Combustion System of Polymeric Materials using Low-pressured Technique	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fire Technology	6. 最初と最後の頁 229-245
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10694-019-00877-x	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 該当する

1. 著者名 松岡常吉, 小池悠太, 中村祐二	4. 巻 17(3)
2. 論文標題 燃烧により変形する固体の外形状のその場抽出方法	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 実験力学	6. 最初と最後の頁 191-197
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 松岡常吉, 小池悠太, 寺田啓人, 中村祐二
2. 発表標題 バックライト再構成法による燃烧中樹脂形状の可視化
3. 学会等名 平成30年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱上和成, 松岡常吉, 中村祐二
2. 発表標題 厚みのある試料の燃烧限界近傍での予熱域への伝熱経路
3. 学会等名 平成30年度日本火災学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上條 将, 竹内 誉, 右田龍弥, 中村祐二, 松岡常吉
2. 発表標題 臨界質量流束による高分子材料の燃焼限界の整理
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松岡常吉, 京極友宏, 小池悠太, 寺田啓人, 中村祐二
2. 発表標題 変形しながら燃焼する熱可塑性樹脂形状の時系列三次元計測
3. 学会等名 第56回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 濱上 和成, 上條 将, 松木 大輝, 右田 龍弥, 松岡 常吉, 中村祐二
2. 発表標題 高分子材料の下方燃え拡がりにおける予熱過程に及ぼす試料厚みの影響
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小池 悠太, 松岡 常吉, 中村 祐二
2. 発表標題 3次元画像再構成による熱可塑性固体の燃焼時変形過程の時系列計測
3. 学会等名 第55回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 右田龍弥, 山畑拓海, 松岡常吉, 中村祐二
2. 発表標題 低圧力場を活用した高分子材料の1次元燃焼
3. 学会等名 第57回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Migita, T., Yamahata, T., Stempfll, P., Matsuoka, T., and Nakamura, Y.
2. 発表標題 Feasibility Study on Simulating the Microgravity Combustion of Polymeric Material using Low-pressure
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (32nd ISTS) (国際学会)
4. 発表年 2019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
研究 分 担 者	松岡 常吉 (Matsuoka Tsuneyoshi) (90633040)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教 (13904)	