

論文内容要旨 (和文)

2017年度入学 大学院博士後期課程(工学)

物質化学工学 専攻

氏 名 飯塚 洋行



論文題目 可燃性固体の燃え広がりに関する数値的検討

火災の安全性を考える上で、可燃性固体に沿った火炎の燃え広がり特性について議論することは重要である。特に、初期火災では炎を伴わない無炎燃焼である燻焼燃え広がり、もしくは、微小な火炎を形成しながら進行する有炎燃え広がりがしばしば生じる。燻焼燃え広がりや有炎燃え広がり現象の理論的研究もこれまでに成されてはいるが、特に、これらの燃焼形態における限界条件付近の燃焼性状についてはほとんど議論がなされていない。本研究では、数値計算(数値シミュレーション)を用いて、限界条件付近の燃え広がり現象を対象とした検討を行った。

本論文は全六章から構成され、各章の要旨は以下のとおりである。

第一章では、可燃性固体の燃え広がりの概要を記述する。近年の火災事故の状況などや可燃性固体の燃え広がり限界条件付近の燃焼特性や火災のリスクについて述べ、燃え広がり限界条件付近での燃焼挙動に関する研究動向や、本研究の目的について記述する。限界条件付近での燃え広がり形態は大きく二つに分けられ、火炎が生じない燻焼燃え広がりや微小火炎を伴う有炎燃え広がりである。また、燻焼燃え広がりが持続し規模が大きくなると火炎を伴う有炎燃え広がりに遷移することもある。これまで、可燃性固体の燻焼燃え広がりもしくは有炎燃え広がり特性については多くの研究がされてきたが、これらの燃焼形態における限界条件がどのように決まるのかについては十分な議論がなされていない。特に、燻焼から有炎燃え広がりへの遷移に関する研究例は少ない。したがって、限界条件付近の燃え広がり現象を対象として数値計算(数値シミュレーション)により燃焼挙動を明らかにすることを本研究の目的とする。

第二章では、可燃性固体の燻焼燃え広がりについて記述する。燻焼燃え広がり現象は、住宅火災等の初期段階において発生することが多く、火炎を伴わないことから燃え広がり箇所の発見が遅れて重大な火災事故につながるなどの危険性がある。また、燻焼燃え広がりの際に、燻焼時の不安定性や周囲環境への熱損失の影響によって、不安定な燃焼跡(フィンガリングパターン)を示すこともある。しかし、燻焼燃え広がりの理論的、数値的研究において、消炎限界に関する検討はあまりされておらず、燻焼燃え広がりの限界条件をシミュレータで再現できない状況にある。そこで、火災時の燻焼燃え広がり挙動に関する不安定性や熱損失などの諸要因を考慮した数値モデルを構築し、限界条件について検討した。これにより、酸素の供給速度や熱損失の程度が消炎限界条件に及ぼす影響を明らかにした。

第三章では、可燃性固体の有炎燃え広がりについて記述する。前章の燻焼燃え広がりが生じるような条件であっても、酸素供給状況が改善すれば、微小な火炎を形成しながら有炎燃え広がりが起こる可能性がある。また、燻焼燃え広がりや有炎燃え広がり現象は可燃性固体表面において発熱反応が生じるため熱的に薄い低次元系(2次元もしくは1次元)で表現できる現象であるが、有炎燃え広がりや有炎燃え広がり現象は気相中に火炎を形成するため高さ方向の熱や物質移動を無視できない現象である。そこで、高さ方向を考慮した2次元の数値シミュレーションとそれを無視した1次元シミュレーションの結果を比較することにより、限界条件付近における可燃性固体の有炎燃え広がり現象のメカニズムについて検討した。

第四章では、燻焼から有炎燃焼への遷移が生じる臨界条件について議論する。有炎燃焼への遷移のメカニズムは、可燃性固体近傍において燻焼による熱分解で生成された可燃性気体と気相の流れによって酸化剤(酸素)が流入して可燃性予混合気形成され、それが燻焼部(高温面)と接触することで火炎が生じて有炎燃え拡がりへと遷移することであると考えられる。したがって、遷移条件は燻焼面からその近傍に形成された可燃性予混合気への熱移動や、燻焼面近傍での流動挙動に依存する。これらの要因を考慮した単純な1次元モデルを構築し、燻焼から有炎燃焼への遷移条件に関する基礎的な知見を得た。


第五章では、モデルパラメータである反応速度の前指数因子の適切な選定方法について議論する。本研究での数値シミュレーションにおいて、適切な燃え拡がり速度を与える前指数因子を定める必要が生じた。そこで、このモデルパラメータを簡便に求められる無次元数値モデルを構築した。この無次元数値モデルは動座標系における定常解(進行波解)を数値的に求めるものであり、適切な前指数因子の値を決定することができる。前指数因子の値を一般的な燃焼条件を含む幅広い条件範囲で算出し、漸近解析による既存の近似式との比較や経験式の提案を行った。

第六章では、本論文の総括を記述する。

論文内容要旨 (英文)

2017年度入学 大学院博士後期課程

物質化学工学 専攻

氏 名 飯塚 洋行 

論 文 題 目 Numerical study on smoldering and flaming spread along combustible solids

In considering fire safety, it is important to discuss characteristics of flame spread along combustible solids. Especially in an early stage of fire, smoldering spread without flame or flaming spread with the formation of micro-flames often occurs. Although theoretical studies on smoldering and flaming spread phenomena have been conducted, there are few studies that focused on near-limit characteristics. In this study, numerical approach is adopted to investigate the smoldering and flaming spread phenomena in near-limit conditions. This thesis consists of six chapters, and the summary of each chapter is as follows.

In Chapter 1, the nature of smoldering and flaming spread is summarized. Research trends are examined with a focus on near-limit characteristics, and the purpose of this study is defined.

In Chapter 2, near-limit characteristics of smoldering spread is discussed. Smoldering spread often occurs in an early stage of house fire, and there is a risk of delayed fire detection because of its flameless nature, leading to serious fire damage. A numerical model of smoldering spread along combustible solids is developed, and its solutions are presented to discuss near-extinction characteristics of smoldering spread. The critical condition of extinction is clearly defined as a turning point of solution.

In Chapter 3, near-limit flaming spread along combustible solids is discussed. Smoldering spread may experience a transition to flaming spread when burning situation such as the rate of oxygen supply is improved. Then, flaming spread with the formation of a small flame often occurs. A numerical model that considers flaming spread in a narrow channel is developed, and its solutions are presented to discuss characteristics of small-flame spread. Predicted spread rates agree reasonably well with previous experimental data. Model reduction to a 1-D system is also attempted.

In Chapter 4, the critical condition for transition from smoldering to flaming combustion is discussed. The critical condition depends on heat transfer from the smoldering surface to a combustible mixture formed in its vicinity and the near-surface convection. A simple one-dimensional model considering these factors is constructed, and basic insights into the transition to flaming combustion are obtained.

In Chapter 5, methods to compute a model parameter that corresponds to the pre-exponential factor of reaction rate constant are discussed. The parameter value must be chosen such that it yields the correct spread rate. A dimensionless numerical model that can easily find the correct value is constructed. The parameter values are determined under various conditions, and an empirical formula is proposed for simple estimation.

Finally, Chapter 6 summarizes findings of this study.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和 2年 2月 6日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 桑 名 一 徳



副査 會 田 忠 弘



副査 宋 戸 昌 広



副査 松 田 圭 悟



副査



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	専攻名 物質化学工学専攻	氏名 飯塚洋行
論文題目	可燃性固体の燃え拡がりに関する数値的検討	
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日 令和 2年 1月 27日～ 令和 2年 2月 6日
論文公聴会	令和 2年 2月 6日	場 所 工学部 4号館 117 教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日 令和 2年 2月 6日

学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

本論文は、セルロース系可燃性固体の燻焼燃え拡がりおよび有炎燃え拡がり現象を数値的に解析した結果をまとめたものである。

第 1 章では研究背景および研究目的が述べられている。火災時の燃焼形態に関する議論から、燃焼限界に近い条件での燃え拡がり現象に関する知見が火災安全上重要であることが述べられ、燻焼や微小火炎を伴う有炎燃焼を数値的に検討するという目的が設定されている。さらに、燻焼から有炎燃焼への遷移現象も検討の対象であることが述べられている。第 2 章では、燻焼燃え拡がり現象が数値解析の結果をもとに議論されている。まずモデルが構築され、既往の実験結果との比較から妥当性が検証されている。そして、解の存在性から消炎限界について議論され、限界条件のパラメータ依存性が検討されている。第 3 章では、微小火炎を伴う有炎燃え拡がり現象が数値解析の結果をもとに議論されている。第 2 章とは異なるモデルが構築され、モデルの妥当性や燻焼現象との差異について検討されている。第 4 章では、燻焼から有炎燃焼への遷移現象が数値的に検討されている。この遷移現象が発熱面による予混合気体の着火現象として捉えられ、数値モデルが提案されている。数値計算により着火すなわち遷移の臨界条件が求められているのみならず、漸近解析による近似解も提示されている。第 5 章では、モデルパラメータである反応速度定数の定め方について議論されている。このモデルパラメータと結果として得られる燃え拡がり速度の関係を数値的に検討することにより、パラメータ値の決定指針が提案されている。

燻焼燃え拡がりの消炎や有炎燃え拡がりへの遷移に関する既往の研究では、定性的な議論がほとんどであった。本論文ではこれらの限界条件を数値的に予測する方法論が詳細に検討されており、新規性および独自性のあるテーマだといえる。第 1 章でこれまでの研究状況をもとに研究目的が定義されていて、第 2 章から第 5 章での検討では設定した研究目的に沿った結論がそれぞれ述べられている。また、本論文の成果は論文 3 報にまとめられているとともに、国際学会でも発表されている。以上のことから、本論文は審査基準を満たしており合格と判定した。

本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。

最終試験の結果の要旨

学位論文のテーマ(燻焼および有炎燃え拡がり現象に関する数値解析)を中心とし、関連する事項について口頭により最終試験を実施した。申請者のこれまでの研究や文献調査で得られた知識に基づいた回答が得られたため、博士の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断した。以上のことから、最終試験の結果を合格と判定した。