

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ~ 2012

課題番号：22560193

研究課題名（和文）

多孔体内における燃焼現象の解明のための反応性流体力学に基づく数値解析法の開発

研究課題名（英文）

DEVELOPMENT OF NUMERICAL ANALYSIS METHOD BASED ON REACTIVE FLUID MECHANICS FOR INVESTIGATION OF COMBUSTION PHENOMENON IN POROUS MEDIUM

研究代表者

山下 博史 (YAMASHITA HIROSHI)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40111835

研究成果の概要（和文）：

複雑な微細構造を有する多孔体内における燃焼現象を解明するための反応性流体力学に基づく数値解析手法を開発し、様々な燃焼現象に適用した数値計算結果を実験結果と比較検討することにより、その妥当性を検証した。特に、基本的な多孔体の利用形態である燃料供給インジェクターの場合について計算を行い、多孔体による燃料供給の一様化の効果、火炎の保持機構、熱循環による供給燃料の予熱の効果について検討した。また、多孔体流入部における表面反応によるラジカルクエンチングの影響について解明した。

研究成果の概要（英文）：

The numerical analysis method based on reactive fluid mechanics has been developed in order to investigate combustion phenomenon in porous medium, and verified the validity in this method by comparing the numerical results obtained applying to various combustion phenomena with the experiments. Especially, the effects of the porous medium on fuel supply uniformization, flame holding mechanism, and preheat of feed fuel due to heat circulation have been investigated. Moreover, the effects of the surface reaction in porous medium injector on radical quenching have been investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	400,000	120,000	520,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：数値解析法・多孔体・燃焼反応・表面反応・反応性流体力学

## 1. 研究開始当初の背景

現在、地球環境問題に関連し、省資源・省

エネルギーおよび大気汚染物質低減の両面から、燃焼現象の科学的解明は緊急の課題となっている。このため、各種の多孔体を用い

た燃焼機器が提案されている。たとえば、多孔体に担持された触媒による低温での燃焼促進を行う触媒燃焼がある。従来の多くの実用燃焼器では気相中での燃焼を利用するため、火炎温度は2200Kを超え、火炎中では大量の窒素酸化物が生成されている。これに対し、触媒反応を利用する場合には極めて低い温度で燃焼反応を進行させることができ、窒素酸化物の生成を格段に低減することができる。また、多孔体を燃料供給用インジェクターとして用いた燃焼器があり、これにより一様な燃料の供給、火炎の保持、熱循環の促進が可能となっている。さらに、燃焼排ガス中のすすや窒素酸化物等の有害生成物の後処理のために多孔体を用いられている。このような多孔体を用いた燃焼機器における燃焼現象を解明するための数値解析手法の開発が重要な課題となっている。

多孔体はその複雑な微細構造のために、通常の反応性流体力学の保存方程式である偏微分方程式に基づく数値解析は困難であることが指摘され、微分方程式に依らない格子ボルツマン法による解析がなされてきており、最近いくつかの研究成果を発表してきた。しかしながら、これらの格子ボルツマン法による研究成果により、実際には格子ボルツマン法による解析においてもその空間分解能は用いた格子間隔によって決まっており、決して高い空間分解能が得られるわけではないことがわかっている。したがって、多孔体の複雑な微細構造を合理的に表現することができれば、通常の反応性流体力学に基づく数値解析が可能ではないかという着想に至った。これが可能であれば、現象論的な反応モデルを使わずに得ない格子ボルツマン法による解析でなく、精密科学として確立した詳細素反応機構と、さらに固気界面における確立された境界条件を適用できる反応性流体力学に基づく数値解析を適用することができる。

さらに、このような厳密な数値解析では、燃焼現象を気相と固相の連成問題として扱う必要があり、この点については最近いくつかの研究成果を発表してきた。しかしながら、これらの研究では固体側はやむを得ず平滑な平面として扱っており、固体側を多孔体として扱うには至っていない。

## 2. 研究の目的

複雑な微細構造を有する多孔体内における燃焼現象を解明するための反応性流体力学に基づく数値解析手法を開発し、様々な燃焼現象に適用した数値計算結果を実験結果と比較検討することにより、その妥当性を検証する。

## 3. 研究の方法

(1) 多孔体内における燃焼現象の解明のための反応性流体力学に基づく数値解析手法の開発

① 直角座標系に基づく計算格子での多孔体微細構造の乱数による生成手法について検討し、生成した多孔体の空隙率と濡れ面積の正確な算出方法を確立する。

② 直角座標系に基づく計算格子での多孔体表面の認識と固気界面境界条件の設定について検討し、スカラー量の界面での値と法線方向勾配を高精度で求める手法を確立する。

③ 多孔体構造とその界面境界条件の一般性のあるアルゴリズムについて検討し、気相に対する反応性流体力学に基づく数値計算コードに開発したコードを組み込む。

(2) 開発した数値解析手法の様々な多孔体における燃焼現象への適用と妥当性の検討

① 基本的な多孔体の利用形態である燃料供給インジェクターについて計算結果と実験結果を比較検討し、燃料供給の一様化の効果、火炎の保持機構、熱循環の促進効果を解明する。

② 多孔体を用いた触媒燃焼に本解析手法を適用し、数値計算を行い、検討する。

③ 多孔体を用いた排ガスの触媒処理に本解析手法を適用し、数値計算を行い検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 研究調査

配分予定の研究調査のための旅費を使用し、多孔体に関する数値解析手法、固気連成問題の取り扱い、多孔体を利用した燃焼器に関する実験的研究、触媒に関する素反応機構に関する国内外の最新の成果について調査し、本研究の実施に役立たせた。

### (2) 数値計算装置の整備

現有の「各種燃焼場の数値シミュレーション装置」と購入した数値解析用計算機により、本研究での使用のための整備を行った。

(3) 多孔体内における燃焼現象の解明のための反応性流体力学に基づく数値解析手法の開発

① 直角座標系に基づく計算格子での多孔体微細構造の乱数による生成手法の確立

固相部分として、種々の半径を有する球体を、適当な個数だけ、乱数を用い三次元空間計算格子に配置することにより、任意の空隙率と濡れ面積を有する多孔体の微細構造を生成することを考えた。また、球体がオーバーラップした部分は連結した固体部と考

えた。このような方法で生成された微細構造が現実の多孔体の構造を模擬しているかを検討した。特に、任意に構成した多孔体構造における空隙率と濡れ面積の算出方法を検討した。構築された多孔体構造の一例を図1に示す。

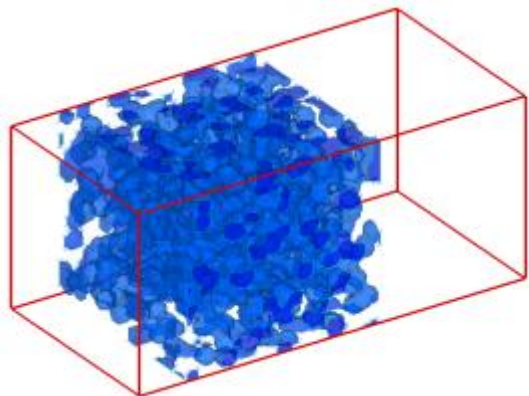


図1 構築された多孔体構造の一例

② 直角座標系に基づく計算格子での多孔体表面の認識と界面境界条件の設定

前項で生成された多孔体構造の表面の配置と方位が境界条件の設定で重要となるため、これを認識する方法を確立した。さらに、固気界面での境界条件ではスカラー量の表面での値と法線方向勾配が重要であるが、これらを高精度で求め、界面の境界条件の設定方法を確立した。

③ 多孔体構造とその界面境界条件の一般性のあるアルゴリズムの開発と計算コードへの組み込み

任意の多孔体構造に適用することができるように、以上の手法の一般性のあるアルゴリズムを開発し、既開発されている気相に対する反応性流体力学に基づく数値計算コードに組み込んだ。

④ 市販の素反応解析ソフトウェア CHEMKIN-PRO のライセンス取得

多孔体壁における触媒反応を含む表面反応や、高炭素燃料の燃焼反応の数値解析のために、市販の素反応解析ソフトウェア CHEMKIN-PRO のライセンスを2年間分契約し、その解析方法を修得した。触媒反応を含む表面反応や、高炭素燃料の燃焼反応の数値解析を独自開発プログラムに組み込んだ。

⑤ 三次元グラフィック可視化ソフトウェア micro-AVS による可視化

市販の数値解析結果の三次元グラフィック可視化ソフトウェア micro-AVS と可視化用

パソコンを購入し、可視化技術を改善した。

⑥ CPU コードのプログラムのGPU化を外部委託

数値計算速度のより一層の高速化を図るために、現有のオリジナルに開発したCPUコードのプログラムのGPU化を外部委託した。また、GPUコード用のパソコンを同時に購入し独自開発プログラムのGPU化を推進し、計算速度のさらなる高速化を達成した。

(4) 開発した数値解析手法の様々な多孔体における燃焼現象への適用と妥当性の検討

開発する数値解析手法を用いて、様々な多孔体における燃焼現象について数値解析を行い、研究調査によって取得した実験的研究の実験結果と比較検討し、本手法の妥当性について検討した。

① 燃料供給インジェクターによる燃料の一樣供給、火炎の保持、熱循環の促進

まず、基本的な多孔体の利用形態である燃料供給インジェクターの場合について計算結果と実験結果を比較検討した。また、多孔体による燃料供給の一樣化の効果、火炎の保持機構、熱循環による供給燃料の予熱の効果について検討した。計算結果の一例を図2に示す。

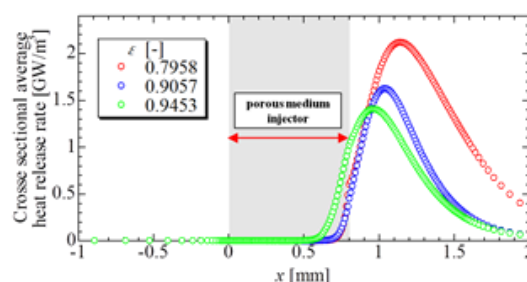


図2 繊維状多孔体の流入壁を有する超小型燃焼器における熱発生速度分布

図から分かるように、多孔体流入部背後で火炎が形成され、その位置と強度は空隙率 $\epsilon$ によって影響を受けており、最適な空隙率が存在することが示されている。

② 固体表面における表面反応によるラジカルクエンチングの影響

本数値解析手法により初めて、この固体側を実際の多孔体として扱うことが可能となった。これにより、実際的な多孔体流入部における表面反応によるラジカルクエンチングの影響を数値計算によって解明した。この研究の一例として超小型燃焼器に関する解析モデルと計算結果を図3および4に示す。

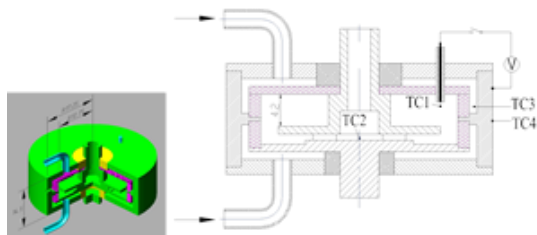
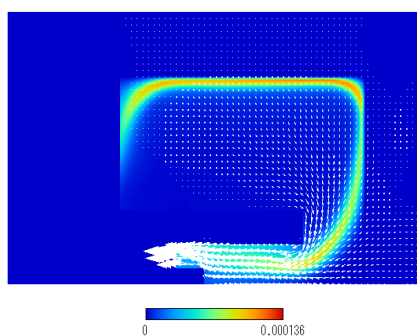
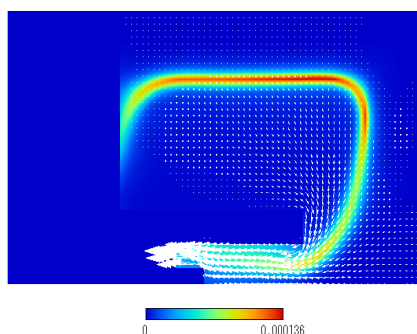


図3 超小型燃焼器の解析モデル



(a) Active wall



(b) Inert wall

図4 燃焼器内の  $\text{H}_2\text{O}_2$  の濃度分布

この計算の結果、ラジカルクエンチングの効果について、火炎形態の変化への影響はほとんどなかった。これは多孔体流入部へのラジカルの拡散が少ない条件であったことなどが考えられる。しかし、図4に示す  $\text{H}_2\text{O}_2$  や  $\text{H}$  ラジカルなどの主に未燃側に存在する化学種については、多孔体部へ拡散しやすく表面反応の影響を受けていることが分かった。予熱帯への拡散が大きい水素燃料を用いた場合にはより火炎へ与える影響は大きい可能性がある。

#### ③ 触媒による低温での燃焼促進（触媒燃焼）

最近、触媒燃焼の研究において、気相と固相の連成問題として定式化し、いくつかの研

究成果を発表してきたが、固体側はやむを得ず平滑な平面として扱っていた。本研究で開発する数値解析手法により初めて、この固体側を実際的な多孔体として扱うことが可能となる。これにより、実際的な触媒燃焼の数値計算を行うことを検討した。

#### ④ 燃焼排ガス処理（DPF，三元触媒等）

最近、触媒による燃焼排ガスの処理の研究も前項と同様の考え方で数値解析を行ってきた。これについても、実際的な燃焼排ガス処理の数値計算を行うことを検討した。

#### (5) 研究の総括と成果の発表

得られた研究成果について総括し、配分予定の研究成果発表のための旅費を使用し、結果を学会等で発表した。さらに、配分予定の研究成果投稿料を使用し、内外の学会論文集に投稿し、社会・国民に発信した。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計5件）

① 山下博史，多孔体流入壁を有する超小型燃焼器の燃焼特性に関する数値解析，流体熱工学研究，査読無，48巻1号，2012，21-34.

② 白明蕊，山下博史，趙黛青，多孔体流入壁を有する超小型燃焼器の燃焼特性に関する数値解析 -ラジカルクエンチングの影響の考慮-，第50回燃焼シンポジウム講演論文集，査読無，50巻，2012，576-577.

③ 白崎洋平，山下博史，林直樹，趙黛青，超小型燃焼器の多孔体流入壁における燃焼特性に関する数値解析-水素燃料の場合-，第50回燃焼シンポジウム講演論文集，査読無，50巻，2012，346-347.

④ 白明蕊，山下博史，趙黛青，多孔体流入壁を有する超小型燃焼器の燃焼特性に関する数値解析，日本機械学会東海支部第61期総会・講演会講演論文集，査読無，No. 123-1，2012，CO-ROM.

⑤ 加藤雄大，山下博史，林直樹，趙黛青，超小型燃焼器の多孔体流入壁における燃焼特性に関する数値解析，第49回燃焼シンポジウム講演論文集，査読無，49巻，2011，506-507.

〔学会発表〕（計6件）

① 白明蕊，山下博史，趙黛青，多孔体流入壁を有する超小型燃焼器の燃焼特性に関する数値解析 -ラジカルクエンチングの影響の考慮-，第50回燃焼シンポジウム，2012.12.7，産業労働センター ウィンクあいち（愛知県）.

② 白崎洋平，山下博史，林直樹，趙黛青，超小型燃焼器の多孔体流入壁における燃焼特

性に関する数値解析-水素燃料の場合-, 第 50 回燃焼シンポジウム, 2012. 12. 6, 産業労働センター ウィンクあいち (愛知県).

③ 山下博史, 多孔体流入壁を有する超小型燃焼器の燃焼特性に関する数値解析, 東海流体熱工学研究会第 48 期総会・講演会, 2012. 8. 7, 名古屋大学 (愛知県).

④ 白明蕊, 山下博史, 趙黛青, 多孔体流入壁を有する超小型燃焼器の燃焼特性に関する数値解析, 日本機械学会東海支部第 61 期総会・講演会, 2012. 3. 15, 名古屋工業大学 (愛知県).

⑤ 加藤雄大, 山下博史, 林直樹, 趙黛青, 超小型燃焼器の多孔体流入壁における燃焼特性に関する数値解析, 第 49 回燃焼シンポジウム, 2011. 12. 7, 慶應義塾大学 (神奈川県).

⑥ Hiroshi Yamashita, Examination of porous medium injector in ultra-micro combustor, 2010 Japan-China Workshop on Combustion in Micro Power System, 2010. 9. 28, Nagoya University (Aichi).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]  
○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.eess.mech.nagoya-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山下 博史 (YAMASHITA HIROSHI)  
名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 40111835

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究

なし