

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：13101  
 研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23760844  
 研究課題名(和文) 革新的熱流体シミュレーションによるソーラー水素製造の高効率化に関する研究  
 研究課題名(英文) A study of heat transfer simulation for the development of high-efficiency fluidized bed solar reactor  
 研究代表者  
 櫻井 篤 (SAKURAI ATSUSHI)  
 新潟大学・自然科学系・准教授  
 研究者番号：20529614

## 研究成果の概要(和文)：

本研究では、内循環流動層式ソーラー水熱分解器内における熱流体シミュレーションモデル開発を行うと共に、ソーラー水熱分解器の高効率化・大型化設計技術の確立を図った。具体的な研究成果は以下の通りである。

1) 球面調和関数展開法による高速ふく射輸送解析モデルを応用した。この計算方法は、他の手法と比べて圧倒的に高速であり、太陽光が多重散乱を起こす流動層ソーラー水熱分解器に最適な手法であることを見出した。2) 体積分率法を採用することで高密度流へと展開することが可能となり、上記のふく射輸送モデルと連成することにより、内部の流動・温度場に関するシミュレーションモデルを開発した。3) ソーラー水熱分解器をモデルとした、可視化実験用流路を作製した。粒子の運動はハイスピードデジタルカメラによって撮影し、画像処理を行うことで内部循環状態の定量的な評価を行った。上記の計算結果と比較することにより、予測モデルにフィードバックすることが出来た。4) 以上の知見を基に新型ソーラー反応器である内循環流動層反応器を大幅に改良した。

## 研究成果の概要(英文)：

In the present study, a heat transfer simulation model for internal fluidized bed type solar reactor has been developed, and then we have shown the guidance for high-efficiency and scalable design of the solar reactor. The obtained results are as follows; 1) Radiative transfer equation can be solved by the spherical harmonics method. We found that this method is very efficient for solving the radiative transfer equation involving multiple light scattering. 2) A heat transfer model using volume fraction method has been developed by combining with the radiative heat transfer. The heat transfer model can simulate temperature and velocity profile inside the reactor. 3) An experimental visualization of solar reactor has been developed. By comparison with the simulation results, we could improve our simulation model. 4) We have re-designed new type solar reactor based on the above the findings.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・エネルギー学

キーワード：太陽エネルギー，水素製造，熱流体解析，可視化実験

## 1. 研究開始当初の背景

次世代の CO<sub>2</sub> フリー水素製造法として高温太陽集熱による二段階水熱分解サイクルが注目されている。太陽日射の豊富なサンベルト(米国南西部, 豪州, 地中海沿岸, 中東, インド, 中国内陸部等)における太陽熱発電では, 近年, スペイン・米で 1000~1500°C の高温太陽熱が得られる MWth 級タワー型集光システムが実用化された。~1500°C の太陽熱の大型利用が可能になったことから, 欧米では発電の次の次世代技術として「高温水熱分解サイクルによるソーラー水素製造システム」の開発が活性化しており, サイクル反応としては金属酸化物(反応性セラミック)を反応媒体とする二段階サイクルが最も有望視されている。実験室レベル(5kWth)で 4% 弱の太陽集熱→水素転換効率であるが, 理想的には MW 級への大型化により効率 30% 以上が期待される。そのため, 反応器の設計改良と大型化で熱損失を軽減させ, エネルギー効率を極限まで高める研究開発が必要である。本研究では, 内循環流動層式ソーラー水熱分解器内における熱流体现象を解明することを目的とし, 可視化実験の実施と熱流体シミュレーションモデルの開発を行う。これにより水熱分解器の高効率化・大型化設計の指針とする。

## 2. 研究の目的

本ソーラー水熱分解器における熱流体シミュレーションモデルを開発する。ビームダウン型集光シミュレータによる照射実験の解析をもとにシミュレーションモデルを開発し, 実験による比較・検証を経て高精度化を図り, ソーラー水熱分解器の高効率化・大型化設計の指針とする。具体的には, 球面調和関数展開法による高速ふく射輸送解析モデルと体積分率法に基づく流動層モデルを基軸として, 太陽集光が多重散乱を起こす流動層ソーラー反応器における熱流体シミュレーション解析モデルを開発する。これにより流動層ソーラー反応器における太陽光による粒子群及び気体の最適なふく射加熱条件・熱流動条件を明らかにできる。また, 内循環流動層ソーラー水熱分解器のモデル装置による可視化実験を行う。申請研究者は, 試験結果をフィードバックし水分解器内の熱流体モデルの最適化を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 熱流体シミュレーションモデル

まずふく射輸送方程式の解法として, 球面調和関数展開法による高速ふく射輸送解析モデルを応用した。この計算方法は, 他の手法と比べて圧倒的に高速であり, 太陽光が多重散乱を起こす流動層ソーラー水熱分解器に最適な手法である。本研究では多分散粒子

群による光吸収・散乱特性及び高温気体化学種による光吸収特性についても知見を蓄積している。また, 流動層内は, 固体と気体が共存する固気二相流である。この固気二相流モデルは, 体積分率法を採用することで高密度流へと展開することが可能となる。

### (2) 可視化実験装置の製作と実験

水熱分解反応を起こすためには 1400°C 以上の高温場が必要となるため, 可視化実験は困難である。しかし化学反応を伴わない場合でも, ふく射・熱流体现象モデルの最適化を行うにあたって粒子の速度分布, 温度分布を測定することは重要である。可視化実験装置は, 二塔型ソーラー水熱分解器をモデル化し, 内循環型の二次元的な流路を作製する。粒子の運動はハイスピードカメラによって撮影し, PIV(粒子画像流速測定法)のアルゴリズムを応用し, 運動速度分布を測定する。以上の結果を予測モデルにフィードバックする。

## 4. 研究成果

### (1) 熱流体シミュレーションモデル

図 1 に時間平均の速度ベクトルの分布を示す。各ベクトルは速度の大きさで色分けされ, 赤いものほど大きな速度を持っていることを表している。解析では, 図 1 にあるように塔の中央部から上昇した粒子が左回りに壁沿いに下降する流れと, 上の連結部から反応塔へと流れ込み, 反応塔を降下したのちに再生塔へと戻る流れの 2 種類の循環が確認された。図 2 では, 流動層の時間平均温度分布を示している。反応器上部の黒体放射壁からのふく射により流動層上部が加熱され, 加熱された粒子が循環することで流れに沿った温度分布が生じていることが分かる。また, 低温の作動流体により再生塔中央部付近の粒子が冷やされていることも見て取れる。

### (2) 可視化実験装置の製作と実験

実験に用いる内循環流動層型太陽熱反応器の可視化実験設備を図 3 に示す。この装置は, 実際に水素製造実証実験に用いられている形状をそのままに, 流路の厚さを気泡のサイズより小さくすることで, 流動層内部の様子を表現できるようになっている。また, 側面から流動層の撮影を行えるようにモデルを高精度の亚克力板で作成した。可視化用モデルの大きさは, 反応器上部の集光太陽光入射部の大きさを 135mm, 反応器全体の高さを 160mm, 再生塔および反応塔の幅をそれぞれ 60mm および 40mm とし, 厚さを 6mm としている。装置の下部の金属ノズルは作動流体の流入口で, 再生塔と反応塔でそれぞれ別の流入口となっている。再生塔および反応塔の底部はステンレスの分散板になっており, 直径 40 $\mu$ m の穴が均等に開けられている。装置上部

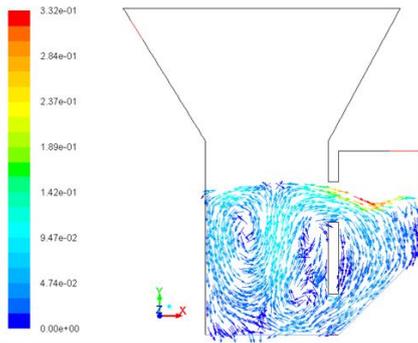


Fig. 1 Mean velocity vector of the solid phase



Fig. 2 Mean temperature of the solid phase

の金属ノズルは作動流体の流出口で、作動流体はサイクロン式の粒子回収器を通したのち大気解放されるようになっている。

本研究では、Particle Image Velocimetry (PIV) という手法を用いて、流動層の速度場の測定を行う。PIV とは、流れにトレーサと呼ばれるマーカーを挿入することで可視化を行い、撮影した画像にデジタル画像処理を加え、流れ場の速度分布の情報を抽出する方法である。流動層に用いる粒子はガラスビーズ、ポリスチレンビーズ、酸化セリウム粒子の三種類で、作動流体には窒素を用いる。撮影は高速度 CCD カメラ k-II (カトウ光研株式会社製) を用いて行った。

図 4 に粒子体積分率分布の瞬時場を示す。図のようにシミュレーションによる予測結果と可視化実験の結果は良く一致している。図 5 は反応器モデル高さの中間部において PIV による垂直方向平均ベクトルの分布と、シミュレーション結果を示す。シミュレーションでは粒子の摩擦特性が不明であったが、この結果から摩擦角度 45 度が最も実験に近い値を示し、予測モデルの向上に寄与していることがわかる。また、速度ベクトルの分布を二次元的に俯瞰することにより、気泡周囲において特に大きな速度分布が見られ、気泡により周囲の粒子が引きずられるエントレインメントと呼ばれる現象が起きていることが分かった。

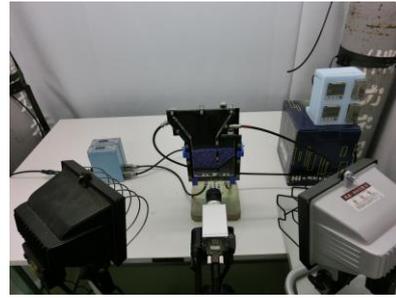
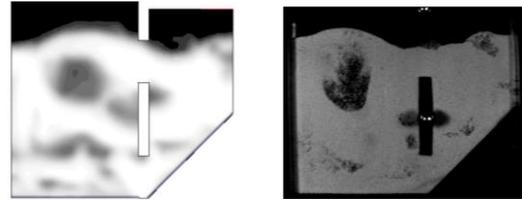


Fig. 3 Experimental setup



Simulation Experiment  
Fig. 4 Instantaneous field of the solid phase

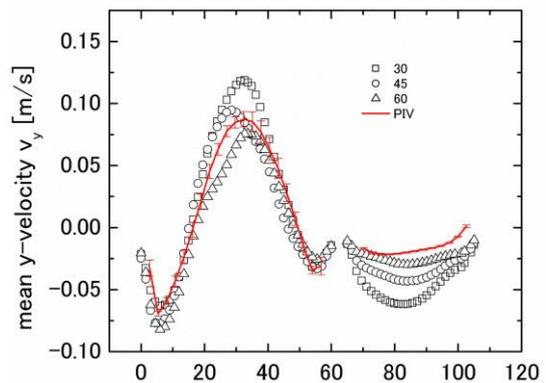


Fig. 5 Mean vertical velocity profile at the middle of the reactor model

また流動層底部の気泡発生時に生じるエントレインメント現象により、装置右側の反応塔から再生塔へと粒子が引きずられ循環が生じることが確認され、気泡が粒子の循環に大きな影響を与えていることが分かった。

以上まとめると、太陽集熱水分解反応器内における粒子流動シミュレーションの妥当性が実験的に示された。また、流動層粒子の最小流動化現象の再現が可能であり、実験値や理論値との比較から妥当性が得られた。粒子流動時に現れる気泡に関して高い予測精度が示され、シミュレーションによる予測の信頼性をより高める結果が得られた。

## 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 2 件）

- (1) Sakurai, A., Sakuma, S., Gokon, N., Matsubara, K, and Kodama, T., Heat Transfer Characteristics of Internally Circulating Fluidized Bed Solar Reactor, Proceedings of Solar PACES-2012, 2012. 査読有
- (2) Sakurai, A., Sakuma, S., Gokon, N., Matsubara, K, and Kodama, T., Fundamental Study of Radiative Transfer Analysis of Internally Circulating Fluidized Bed Solar Reactor, Proceedings of Solar PACES-2011, CD-ROM(23796), 2011. 査読有

〔学会発表〕（計 5 件）

- (1) Sakuma, S., Sakurai, A., Suzuki, S., Lee, S.J., Matsubara, K., Gokon, N., and Kodama, T., Experimental and Numerical Investigation for Development of High-efficiency Fluidized Bed Solar Reactor, The Third International Forum on Heat Transfer, Nagasaki, 2012 年 11 月 14 日.
- (2) Sakurai, A., Sakuma, S., Gokon, N., Matsubara, K, and Kodama, T., Heat Transfer Characteristics of Internally Circulating Fluidized Bed Solar Reactor, Solar PACES-2012, Morocco, 2012 年 9 月 14 日.
- (3) Sakuma, S., Sakurai, A., Ogino, K., Lee, S.J., Matsubara, K., Gokon, N., and Kodama, T., A Study of Thermal Design for the Development of High-efficiency Fluidized Bed Solar Reactor, 8th International Conference on Flow Dynamics, Sendai, 2011 年 11 月 11 日.
- (4) Sakurai, A., Sakuma, S., Gokon, N., Matsubara, K, and Kodama, T., Fundamental Study of Radiative Transfer Analysis of Internally Circulating Fluidized Bed Solar Reactor, Solar PACES-2011, Spain, 2011 年 9 月 22 日.
- (5) Sakuma, S., Sakurai, A., Matsubara, K., Gokon, N., and Kodama, T., Numerical Visualization of Radiative Heat Flux of Dispersed Particles Irradiated by Solar Light, The 11th Asian Symposium on Visualization, Niigata, 2011 年 6 月 7 日.

〔産業財産権〕

○取得状況（計 1 件）

名称：内循環流動層を用いた水熱分解装置及び水熱分解法

発明者：児玉竜也，郷右近展之，櫻井篤，松原幸治

権利者：新潟大学

種類：特許

番号：特願 2012-018199 号

取得年月日：2012 年 01 月 31 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

櫻井 篤 (SAKURAI ATSUSHI)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：20529614