様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２８ 年　 ６ 月 ２１ 日現在

機関番号：１２６０１
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2013～2015
課題番号：２５４２０７９８

研究課題名（和文）流動層流動特性モデル化における基礎研究

研究課題名（英文）Modeling of Fluidized Bed Flow Behavior

研究代表者
石束　真典（Ishizuka, Masanori）

東京大学・生産技術研究所・研究員

研究者番号：１０３８６７１６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではエクセルギー再生型石炭ガス化発電システムのための大型三塔式流動層ガス化炉について、この流動層の流動特性をモデル化し、一般化するための基礎研究を行った。以下の４つの研究項目について検討した。
①流動層における流動特性の抽出、②電気回路特性と流動層流動特性の類似性検討、③流動層流動特性のモデル化と等価回路表記、④モデルのモジュール化と集積化の検討
流動層流動特性の等価回路モデルによるモデル化を実験結果との比較により達成し、等価回路モデルによる流動制御の可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：This report describes a new method to model flow behaviors in the triple bed circulating fluidized bed (TBCFB). The modeling is based on an analogy between the flow behavior of a fluidized bed and an electric circuit, which is correlation between pressure and voltage, solid mass flux and electric current and hydraulic resistance and electric resistance. The proposed modeling was verified considering the flow behavior of the riser in the TBCFD in a pilot-scale experimental setup. The results demonstrate that the model constructed applying the proposed methodology has captured the characteristics of the flow behavior in the TBCFB well. The proposed modeling method is thus promising for the control of a fluidized bed.

研究分野：流動層

キーワード：流動層　モデル化　等価回路モデル

１．研究開始当初の背景
省エネルギーへの関心の高まりを背景として発電システムの高効率化が強く求められている。申請者らは、石炭火力発電システムの発電効率を高効率化することを目指して次世代の石炭ガス化火力発電システムに関する研究を行ってきた。このシステムにおいて発電効率の高効率化はエクセルギー再生型の石炭ガス化炉がキーコンポーネントとなっている。そこで申請者らは、エクセルギー再生型の石炭ガス化炉として三塔式循環流動層型の反応器を提案し、その流動層の流動状態、流動特性を研究テーマとし、詳細に検討して報告してきた。この研究の中で、循環流動層の流動特性として、高速な粒子循環（Gs ≧ ５００ kg•$m^{-1}s^{-2}$）二おける、流動層内圧力分布や粒子ホールドアップなどを明らかにしてきたが、これら諸特性は研究で使用した三塔式循環流動層特有の特性として得られたものであった。一般に、装置を製作する際にはその装置の動作をモデル化することで設計並びに製作の指針とすることができるが、こと流動層においては、その流動特性が装置特有・固有の特性を示すことが知られ、一般化のためのモデル化を行うことが困難である。よって流動層においては、流動特性解析を行うために評価対象の実寸大模型となる流動層装置を製作しその特性を評価するといった、大規模な流動層システムが困難な手法を選択せざるを得ない。これらの問題を解決するために、マイクロ流体の流動解析に用いられる電気回路の等価回路モデル化を流動層に適応し、流動層のモデル化、一般化を行うことを考えた。そこで、本研究では、流動層において流動特性を電気回路の等価回路を用いてモデル化、一般化するための手法について研究を行い、その基盤技術を確立することを目的とする。

２．研究の目的
申請者らは、これまでにエクセルギー再生型石炭ガス化発電システムのための大型三塔式流動層ガス化炉について研究を行い、その流動特性について明らかにしてきた。本研究では、これら流動層の流動特性をモデル化し、一般化するための基礎研究を行う。計画している研究項目は、
①流動層における流動特性の抽出、②電気回路特性と流動層流動特性の類似性検討、③流動層流動特性のモデル化と等価回路表記、④モデルのモジュール化と集積化の検討、の４つである。

３．研究の方法
上記の背景とこれまでの研究成果をもとに、本研究では流動層流動特性のモデル化における基礎研究を行う。本研究では電気回路の等価回路にて流動層の流動特性をモデル化し、その設計手法を提案する。その手法を基に流動層を設計し、さらにはその運転手法を構築したいと考えている。具体的には、研究期間内において以下のことを明らかにする。

１）流動層における流動特性の抽出
　流動特性をモデル化するに必要なパラメータの抽出を行う。

２）電気回路特性と流動層流動特性の類似性検討
　電気回路特性と流動層流動特性との物理モデル的見地からの相似性、類似性の導出を行う。

３）流動層流動特性のモデル化と等価回路表記
　流動層流動特性を電気回路の等価回路としてモデル化し、特性再現性評価を実施。

４）モデルのモジュール化と集積化の検討
　等価回路モデルのモジュール化ならびに複合化･集積化とその特性評価を実施。

４．研究成果
1. はじめに
　火力発電所の発電効率を電力需要及び化石燃料価格の増加に応じ向上させる必要がある。

石炭ガス化技術に基づいた火力発電所が世界で開発されている[1,2]。次世代型高効率石炭ガス化複合発電を想定し、熱分解炉であるダウナー、水蒸気ガス化炉である気泡流動層、チャー燃焼炉であるライザーから構成される三塔式循環流動層（TBCFB）石炭ガス化炉を提案され開発が行なわれている[3-5]。この循環流動層石炭ガス化炉は、ダウナー、気泡流動層、ライザー、

Table 1. Analogy between the flow behavior of a fluidized bed and electric circuit

Fluidizations	Electronics
Solid mass flux Fs ($kg \cdot s^{-1}$)	Current I (A)
Pressure drop P (Pa)	Voltage drop V (V)
Resistance Ra ($Pa \cdot s \cdot kg^{-1}$)	Resistance R ($\Omega = V \cdot A^{-1}$)
Capacitance Ca ($kg \cdot Pa^{-1}$)	Capacitance C ($F = A \cdot s \cdot V^{-1}$)
Inertia Ma ($Pa \cdot s^2 \cdot kg^{-1}$)	Inductance L ($H = V \cdot s \cdot A^{-1}$)

システムの安定した動作と制御のためには、循環流動層の流動特性をモデル化する必要があると考えている。

マイクロフルイディクスの研究分野では、マイクロデバイス内の流体特性を電気回路の等価モデルを用いてモデル化することが行われている[6-11]。流体デバイスの流動特性は電気回路等価モデルによってよくモデル化することができる。また、等価回路はインタフェースの一貫性があり、それゆえ複雑かつ大規模はデバイス機能を表すために等価回路モデルを統合あるいは複合化することは容易である。流体デバイスの等価回路モデル化によって、半導体集積回路およびプリント回路基板などの電気回路設計の技術と同様の手順を使用して設計および解析を行うことが可能となる。電気回路の設計では、回路シミュレータによって回路挙動の解析を実行することができる。

本研究では、電気回路の等価回路を用いて、循環流動層の流動特性をモデル化する新しい方法を提案し、この方法の有用性を、パイロットスケールの循環流動層について実験で得られたデータを用いて調べた。

2. 流動層の等価回路モデル

モデリングは、電気回路の電気的特性および流動層の流動特性との間の類似性に基づいて行った。電気的特性及び流動特性との間の基本的な類似性は、以下の式で定義される。

$$P = FsRa \qquad (1)$$

$$P = Ma\frac{dFs}{dt} \qquad (2)$$

$$Fs = Ca\frac{dP}{dt} \qquad (3)$$

式（1）は、オームの法則であり、流体抵抗のために発現される。式（2）は流動層のイナータンスであり、電気回路のインダクタンスの定義から得た。また、式（3）は流体コンプライアンスであり、

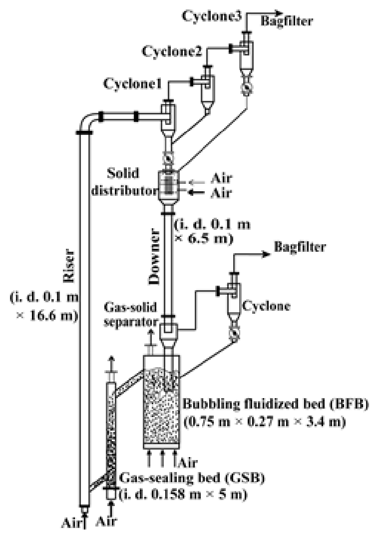

Figure 1. Equivalent circuit model of the riser

静電容量の定義から得た。電気回路の電気的特性および流動層の流動特性との間の類似性を表 1 に掲げる。電気回路を形成する際には、キルヒホッフの電流則および電圧則を満たす必要がある。流動層中の粒子の運動エネルギーは、電気回路内のコイルによるエネルギーの貯蔵として表され 、粒子濃度の変化へによるエネルギーの蓄積は、電気回路におけるコンデンサのエネルギー貯蔵としてあらわされている。

回路抵抗 R、リアクタンス L、キャパシタンス C は、流動
層の流動特性を表現するために使用した。この回路は、集中定数系としての R、L、及び C の組み合わせによって表現され、図 1 に示すように、循環流動層のライザーは、等価回路としてモデル化することができる。ここでは、キルヒホッフの電圧法則を満たすように、各素子の両端の電圧差を追加している。流動層のライザー全体にかかる圧力が、粒子循環の駆動力と考えている。このモデル化方法を採用する場合、複合化されたシステムは、電気回路素子間の一連の接続に

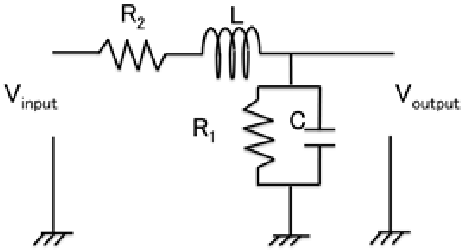

Figure 2. Experimental setup of the triple-bed circulating fluidized bed (TBCFB)

よって記述することができる。また、この回路は、

キルヒホッフの電流則を満足している。

3. 実験

図 2 は、大型 TBCFB コールドモデル[12]の概略図である。このモデルは、ライザー (0.1 m I.D. × 16.6 m 高さ)、ダウナー (0.1 m I.D. × 6.5 m 高さ)、気固分離装置、気泡流動層 (BFB, 0.75 m × 0.27 m × 3.4 m)、ガスシールベッド (GSB, 0.158 m I.D. × 5.0 m) からなる。コールドモデルで使用した珪砂粒子の密度及び平均粒径は 2600 kgm-3 と 83 μm (最小流動化速 (Umf) = 0.0058 ms-1)であった。GSB はライザーに BFB から多数の粒子を供給するのに十分な駆動力を提供するために、BFBとライザーとの間に設置した[5,13]。また、BFB とライザー間のガスシールとして機能する。ライザーと GSB の空塔ガス速度は、5～12 ms^{-1} と 0～0.094 ms^{-1} の範囲であった。BFB の空塔ガス速度は 0.0041 ms^{-1} に固定した。圧力は圧力センサ（キーエンス、AP48）を TBCFB システム全体に沿って設置した。センサの出力信号は、データ収集システム (CONTEC、AIO-163202FX) とラップトップコンピュータを介して 100Hz のサンプリング周波数で取得した。固体の質量流束 (G_s) は、バルブを使用して、粒子の一定量を蓄積するのに要する時間に基づいて測定した。

図 3 はライザーガス空塔速度 (U_{gr}) の関数としての固体質量流束 (G_s) を示している。 この時、GSB のガス速度
(U_{gg})は 0.094 ms^{-1} に設定した。$U_{gr} = 5\ ms^{-1}$ のときに、 G_s は 210 $kgm^{-2}{\cdot}s^{-1}$ であった。$U_{gr} = 12\ ms^{-1}$ においては大きく増加し 546 $kgm^{-2}{\cdot}s^{-1}$ に達した。U_{gr} を変え、ライザーの頂部と底部との間の圧力差を測定した。図 4 は、TBCFB 上の粒子の循環が安定したとき、つまり、システムが定常状態で循環運転している場合のライザーにおける固体質量流束に対する圧力差の結果を示している。黒色の点は実験データの時間平均を、点線はモデルの直線を示している。モデルが十分に実験データに適合していることがわかる。この条件では、定常状態であることから図 1 の等価回路の C 及び L の回路定数がゼロに等しく、等価回路のパラメータが決定される。それは直列に接続された抵抗 R1 と R2 との等価回路と仮定され、式 (4) で示されるオームの法則に従う。

$$E = (R1 + R2)\, I \qquad (4)$$

図 4 のグラフの傾きは、抵抗 R (= R1+ R2) に相当する。 その値は R = -50.6 であった。 R が負の値であることは、電気回路における電力の増幅を示している。この系でのライザーは、TBCFB の粒子循環を担う駆動力を提供している。負の値の抵抗値 (負性抵抗) をもつ電子デバイスとしては、トンネルダイオードがある[14]。ほかに負性抵抗を有する電気回路としては、負性イ

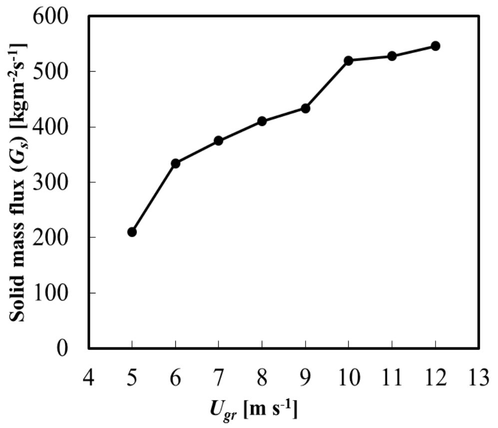

Figure 3. Effect of the gas velocity in the riser on the solid mass flux

ンピーダンス回路 (NIC) と呼ばれる、トランジスタやオペアンプを含む回路がある。 NIC は電力増幅の機能を有しているが、その単一入力単一出力のために電気機器などの電力増幅器の制御には適していない。この TBCFB システムは十分な数の自由度を持っていないため、G_s は、U_{gr} によって操作することが困難となる。そこで我々は、システム制御への自由度を追加するために、別のパラメータを必要とする。

4. モデルの検証

図 5 は、固体質量流束 (G_s) に対する GSB の空塔ガス速度(U_{gg})の効果を示す。線はモデルによる曲線を、ダイヤモンドマーカーは実験デー

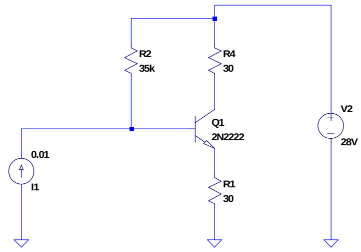

Figure 6. Equivalent circuit model of the riser and gas sealing bed

タを示している。ガスを GSB に供給しなかった場合には、G_s が 129 $kgm^{-2}{\cdot}s^{-1}$ であった。これは、この条件の下ではライザーへの GSB からの粒子輸送は十分ではなかったことを示している。 U_{gg} を、0.13 ms^{-1} に増加させたとき、G_s が急激に 490 $kgm^{-2}{\cdot}s^{-1}$ に増加している。これはライザーに固体を輸送する駆動力となる GSB 中の圧力差は、ガスの流れによって増加したことを示唆している。図 6 は、ライザーと GSB の合わせた流動特性を示す等価回路モデルである。U_{gr} を変化さえることなく G_s を制御するのに、適切な U_{gg} 値は 0.038 から 0.130 ms^{-1} であった。現在の実験条件下で可能性があります。図 5 に示すように、実験から得られた結果は、制御端子と入力と出力の 3 端子素子を有する等価回路モデル (図6) のシミュレーション結果と同様の傾向を示した。

5. おわりに

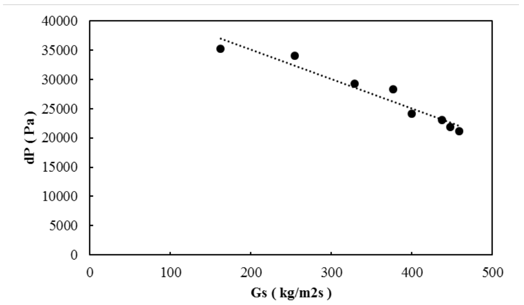

Figure 4. Pressure vs solid mass flux variation in the riser

等価回路を用いた循環流動層の流動挙動をモデル化する新しい方法を提案した。提案されたモデルを検証するために、我々は、大規模TBCFBコールドモデルを用いて実験的得たライザーのデータとモデルを用いて得られた結果を比較した。電流と固体質量流束、圧力差と電圧との対応関係を仮定することによって、我々は、等価回路を用いて、ライザーの流動特性をモデル化した。このモデルを使用して、流動層のライザーにおける流動特性は、増幅機能を示す負性抵抗を有することを示した。システムを制御するためにさらに別のパラメータを必要とした。提案したモデル化方法は、流動層における流動特性の分析のために有望であるといえる。

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１件）

1, Masanori Ishizuka, Hiroyuki Mizuno, Yui Koatni, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi, “Modelling of Flow Behaviour at Downer and Riser in Triple Bed Circulating Fluidized Bed Using Equivalent Circuit”, Chemical Engineering Transactions, 45, 889-894 (2015) DOI: 10.3303/CET1545149

〔学会発表〕（計 15 件）

1, Masanori Ishizuka, Yuji Yoshie, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi, “An Analysis Method for Fluidized Bed Flow Behavior using Electric Circuit Analogy” Fluidization XIV, May 26-31, Noordwijkerhout, The Netherlands (2013)

2, Masanori Ishizuka, Yuping Liu, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi “Modeling of triple bed circulating fluidized bed coal gasifier flow behavior based on equivalent circuit model”,International Conference on Green Energy and Technology, Aug. 24-26, Kitakyushu (2013)

3, Masanori Ishizuka, Yuping Liu, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi “Modeling of Triple Bed Circulating Fluidized Bed Coal Gasifier Flow Behavior Based on Equivalent Circuit Model” International Conference of Coal Science & Technology 2013 (ICCS&T 2013), 29 Sept.-3 Oct., Pennsylvania (2013)

4, **石東 真典, 甘蔗 寂樹, 堤 敦司, ”循環流動層の等価回路モデル化”,化学工学会第 79 年会, 2014 年 3 月 18-20 日　岐阜大学**

5, Masanori Ishizuka, Hiroyuki Mizuno, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi “Modeling of Fluidized Bed Flow Behavior Using Electric Equivalent Circuit” The 7th World Congress on Particle Technology (WCPT7), May 19-22, 2014, Beijing, China, Abs. No. 436, May 20, (2014)

6, Hiroyuki Mizuno, Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka,Atsushi Tsutsumi “Thermal seawater desalination process using fluidized bed evaporator” The 7th World Congress on Particle Technology (WCPT7), May 19-22, 2014, Beijing, China, Abs. No. 372, May 20, (2014)

7, **水野 寛之, 甘蔗 寂樹, 石東 真典, 堤 敦司‘流動層型蒸発器を海水淡水化プロセスに適用した際の非流動化に関する検討” 化学工学会第 46 回, 秋季大会 9 月 17 日, 福岡 (2014)**

8, **石東 真典, 甘蔗 寂樹, 堤 敦司“三塔式循環流動層における流動特性解析のための等価回路モデル化”化学工学会第 46 回, 秋季大会 9 月 17 日,福岡 (2014)**

9, Masanori Ishizuka, Hiroyuki Mizuno, Yui Kotani, Yasuki Kansha, Atsushi Tsutsumi “Modeling of Triple bed Circulating Fluidized Bed Flow Behavior Using Equivalent Electrical Circuit” 4th Asian Conference on Innovative Energy and Environmental Chemical Engineering (ASCON-IEEChE 2014), November 9－12, Yeosu, Korea, 2014

10,**石東 真典, 水野 寛之 ,小谷唯 甘蔗 寂樹, 堤 敦司“大型三塔式循環流動層の粒子循環量制御のためのモデル化”第 20 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 12 月 11 日, 岡山理科大(2014)**

11,**水野 寛之,甘蔗 寂樹,石東 真典, 堤 敦司 “流動層型海水淡水化プロセスにおける非流動化に関する検討”第 20 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 12 月 11 日, 岡山理科大(2014)**

12,**石東 真典, 水野 寛之 ,小谷唯 甘蔗 寂樹, 堤 敦司“パルス状ガス供給による循環流動層の粒子循環量制御”第２１回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 12 月 11 日, 九州工業大学(2015)**

12,**石東 真典, 水野 寛之 ,小谷唯 甘蔗 寂**

樹，堤 敦司“パルス状ガス供給による循環流動層の粒子循環量制御”第２１回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム，12月11日，九州工業大学(2015)

13，Masanori Ishizuka，Hiroyuki Misuno，Yui Kotani，Yasuki Kansha，Atsushi Tsutsumi，”Modeling of Flow Behavior at Downer and Riser in Triple bed Circulating Fludized Bed Using Equivalent Circuit”18th Conference Process Integration，Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction,2015 Aug 23-27，Kuching，Sarawak，Malaysia

６．研究組織

(1)研究代表者

石東　真典　（ISHIZUKA，Masanori）
東京大学・生産技術研究所・特任研究員
研究者番号：１０３８６７１６

(2)研究分担者

甘蔗　寂樹　（KANSHA，Yasuki）
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：　１０５４４０８３