

機関番号：17102

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2010

課題番号：21686073

研究課題名（和文） 複雑多孔質構造への粒子堆積挙動を考慮した高温集塵システムの高性能化研究

研究課題名（英文） Study of particle separation system under high temperature condition by considering particle behavior on heterogeneous non-woven filter

研究代表者

井上 元（INOUE GEN）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：40336003

研究成果の概要（和文）：

石炭ガス化複合発電システムで用いられる金属不織布フィルタの高性能化のために、複雑構造内の粒子挙動を把握することは極めて重要である。本研究では、その複雑構造内の粒子輸送付着挙動を予測するために、不均一多孔質構造を考慮した新たな数値解析手法を開発した。そして構造の異なる模擬フィルタを対象に、種々の条件で計算を行い、内部付着量や回収率の比較を行い、集塵効率や逆洗性能をまとめたフィルタ特性マップを作成し、高性能フィルタの開発指針の提案が可能になった。

研究成果の概要（英文）：

In order to improve the performance of the non-woven filter used for IGCC process, it is very important to know the particle behavior in the non-woven filter. In this study, numerical simulation method considered the non-uniform structure is newly proposed in order to predict micro-particle behavior in complex structure. As a result, the particle behavior in the non-woven filter was able qualitatively to be figured out and it is found that the particle adhesion behavior and the internal distribution depend on the transfer parameter of structure. Furthermore, we made the filter characteristic map concerned the behavior of particle adhesion.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2010年度	3,000,000	900,000	3,900,000
総計	7,600,000	2,280,000	9,880,000

研究分野：化学工学，環境技術，シミュレーション工学，流体工学，移動現象

科研費の分科・細目：プロセス工学，化工物性・移動操作・単位操作

キーワード：

- ・石炭ガス化複合発電システム
- ・多孔質体

- ・集塵

- ・フィルタ
- ・不織布

- ・数値解析
- ・固気二相流

1. 研究開始当初の背景

近年の、石油価格の高騰、エネルギー需要の増大や地球環境問題を背景として、高効率でかつ環境負荷の小さいエネルギーシステムが有望視されている。その一つとして豊富な資源を有する石炭を用いた石炭ガス化複合発電システム(IGCC)の開発が進められ、早期実用化が期待されている。本システムは従来の石炭火力発電に比べ発電効率が高く、またCO₂排出量も低く、また利用可能炭種の増加により、エネルギー資源の選択範囲が広がる利点がある。現在国内外で様々な実証試験が進められ、商用化に向けて着実に前進しているものの、信頼性や安全性の向上、コストダウン、スケールアップ設計のノウハウなど、依然多くの技術課題が残されている。中でもIGCCでは、ガス化炉からの高温ガスの流れに付随し輸送される直径数 μm の粒子を、発電用ガスタービンの保護のために除去する集塵操作が必要となる(図1)。集塵方式にはサイクロンや電気集塵等があるが、高温高圧化ではセラミックフィルタやメタルフィルタを用いたろ過集塵方式が、回収効率の高さから有望とされている。フィルタには、高性能で安定した集塵性能と、熱的機械的応力に対する耐久性が求められており、フィルタ材料に関して、集塵性能や強度の観点で評価手法が提案されており、また最適形状の提案も行われている。しかしこれらの多くが、既存構造の評価や選定に留まっており、フィルタのマイクロ構造と粒子付着挙動の相関や、粒子性状と圧力損失の関係が未だ明確にされていない。特にフィルタは粒子の堆積に伴い、圧力損失が増加するため、ガス逆流等による払落し処理(逆洗)が行われる(図2)が、これに伴う熱的・機械的变化により劣化を助長することになる。したがって頻繁な逆洗処理を行わないために、一定のガス流通性を保持した状態で、透過面が付着粒子で完全に覆われず、さらに逆洗により円滑に粒子の剥離が可能な構造が求められている。しかしこのような粒子堆積層の形成を選択的に制御できるフィルタ構造の検討も皆無である。加えて今後高性能化に向けて高温化が進むことは不可避であり、その際液状粒子の付着も問題となる。フィルタ内部への浸入が顕著となり、より複雑な挙動となると予想される。高温高圧環境であるためフィルタ部での粒子挙動を直接評価することは難しく、そのため数値解析による予測が有効と考えられる。

2. 研究の目的

実験では測定が困難なフィルタへの粒子付着挙動の検討には数値解析が有効であるが、既存の解析モデルは以下の点を考慮しておらず、不十分であると考えられる。

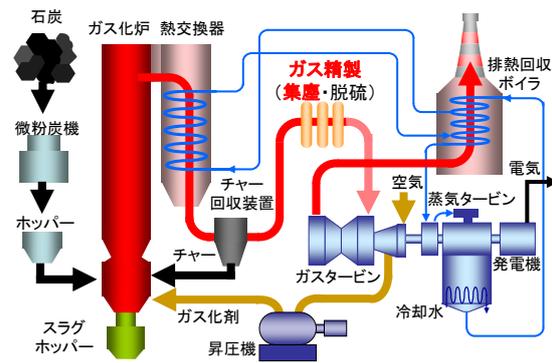


図1 石炭ガス化複合発電システムの概要

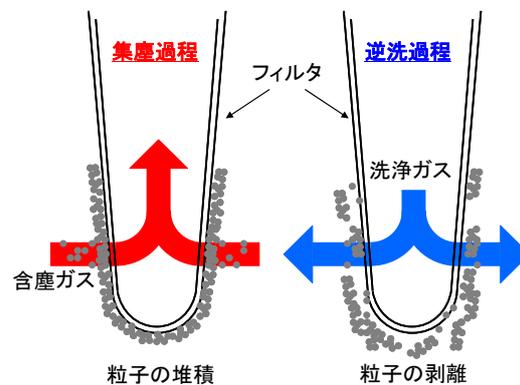


図2 フィルタへの粒子付着と再生の概要

・粒子付着力のモデル化 ・粒子堆積による流動特性の時間変化 ・各種幾何形状を有する材料による不均一空隙構造の影響 これらをすべて計算可能な手法は皆無であり、多孔質構造の特徴に合わせた解析手法の確立が必要である。そこで本研究では 1) フィルタ実構造の数値化と特性評価、実測値との比較、2) 粒子付着堆積挙動解析と特性評価、3) 模擬粒子付着フィルタの流動実験と解析結果との比較を行い、要求されている、低圧力損失、高集塵効率、逆洗サイクルの低減、逆洗処理性能の向上、高耐久性に繋がる最適フィルタ構造について検討した。

3. 研究の方法

複雑な内部構造を持つ不織布金属フィルタ内の解析を行うため、数値シミュレーションにより模擬フィルタを作成し構造を数値化した。解析により作成した不織布フィルタ構造図を図3に示す。1格子 $0.3\mu\text{m}$ の直交3次元空間に直線繊維を各方向にランダムに配向させ、層状に積層させる事により作成した。なお仮定として、繊維は互いに貫通を許すものとし、繊維径は一定とした。また、図4に実際の不織布金属フィルタを示す。実フィルタの繊維径 $df[\mu\text{m}]$ 、空隙率 $\varepsilon[-]$ を基準 ($df: 3.0\mu\text{m}$ $\varepsilon: 0.64$) とし、これらの値を変え複数の模擬不織布構造を作成した。次

に作成したフィルタ構造と実際のフィルタの各種構造特性を比較することで模擬構造の妥当性を評価した。実構造の平均細孔径が $7\mu\text{m}$ であったのに対し、模擬構造の細孔径は $8\mu\text{m}$ となり、同程度の値となった。また透過率もそれぞれ $4.612 \times 10^{-13}\text{m}^2$ 、 $4.358 \times 10^{-13}\text{m}^2$ と同程度となり、以上より本模擬構造の妥当性を確認した。

次に複雑不織布構造を対象に数値解析手法を開発した。模擬構造を繊維径相当の格子(10mesh)で疎視化(マルチブロック化)することで、不均一空隙構造の影響を考慮しつつ多孔体内流動計算を高速に行う手法の開発を試みた。ブロック化後、隣接ブロック間の局所輸送係数(細孔径・空隙率・透過率)を球充填法やランダムウォーク法により予め算出し、各ブロック間での複雑構造を考慮した輸送計算モデルを作成した。また本研究では粒子を連続体として扱い、粒子濃度輸送として解析を行った。解析には3次元スタッガードメッシュを用い、流動場計算には圧力ポアソン式の反復計算を行った。また、粒子の輸送は分子拡散の考慮はせず、対流輸送のみで移動するものとした。粒子付着は既存のエアゾール捕集機構の計算式に基づき、さえぎり効果として粒子付着項を設け計算を行った。周囲条件を壁面条件、空気流入量 $3.35 \times 10^{-9}\text{m}^3/\text{s}$ とし、粒子濃度 $0.261\text{g}/\text{m}^3$ を下部から一定流入させ計算を行った。また粒子付着による空隙率、表面積、透過率の変化を各時間ステップで再計算し、模擬的に粒子によるフィルタ細孔の閉塞を再現した。また一定時間経過した際に、付着した粒子を払い落とし、繰り返し集塵を行う計算も行った。

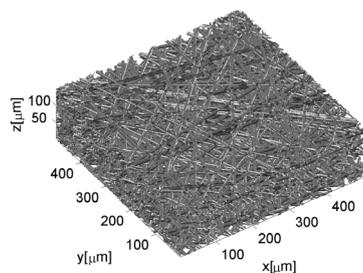


図3 作成した模擬金属不織布フィルタ構造

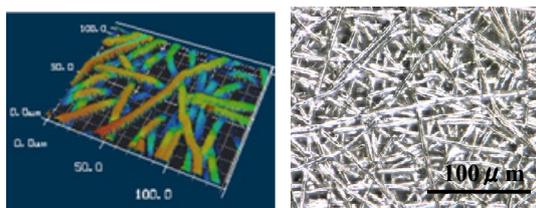


図4 実際の金属不織布フィルタ構造

4. 研究成果

図5に集塵解析の一例を示す。時間の経過とともに粒子の付着量が増加し、フィルタ内部へと侵入していく様子が確認できる。またフィルタ底部での粒子層(ケーキ層)の形成も確認できた。同様の計算をフィルタ空隙率や繊維径を変えて行い、粒子付着量分布を求めた。図6にフィルタ厚み方向の分布を示す。図より空隙率の減少や繊維径の減少に伴い、フィルタ内部への粒子付着量が減少することが分かる。平均細孔径が小さくなることにより、内部への粒子侵入が少なく逆洗後の回復に優位であるが、フィルタ表面への粒子堆積が増大し、ケーキ層が発達するため、圧力損失の増加や逆洗サイクルの観点から、一概に細孔径の減少および均一化が有効とは言えない。図7は集塵過程および逆洗操作におけるフィルタ部の圧力損失変化である。ここで、細孔径が様な均一構造(厚み方向に千鳥格子状に均一に繊維を配置した構造)との比較を行った。不均一構造は小細孔部を粒子が閉塞しやすく圧力損失は増大するが、ガス透過経路が逐一変化するためその上昇傾向は緩やかであることがわかった。一方均一構造では、一様に粒子が付着・堆積し低圧力損失であるが、全ての細孔が同じ時間で閉塞するため圧力損失が急激に上昇する傾向が確認できた。また図中時刻 t においてフィルタ外表面の堆積層を払い落として再度集塵解析を行ったところ、図のようにフィルタ透過面の繊維構造により付着粒子の内部侵入分布が異なり、そのため逆洗サイクルに伴う圧力変動に差異が生じることがわかった。この結果を踏まえ細孔径分布の異なる傾斜構造を模擬し、その有効性を検証した。また堆積層の空隙構造の影響を考慮するために、炭素粒子を含むペーストを作成し、模擬粒子堆積層作成用塗布装置を用いて、表面塗布後、圧縮・乾燥させ、粒子堆積層を再現し、断面観察と画像分析により構造特性(細孔径分布、透過率)を算出した。同塗布条件でも粒子種により空間構造に差異が見られ、粒子種毎の付着モデルの必要性を確認した。

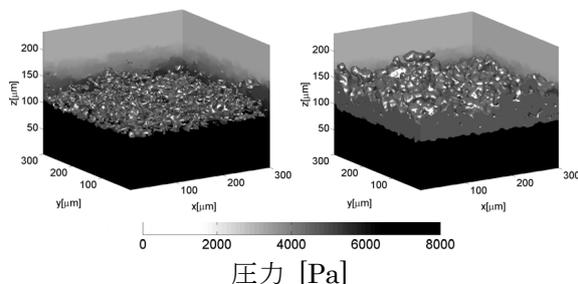
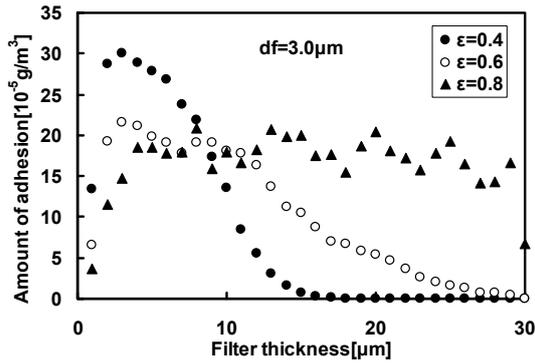


図5 不均一不織布フィルタの集塵解析例
左: 集塵開始直後、右: 一定時間経過後

(a) 空隙率変化



(b) 繊維径変化

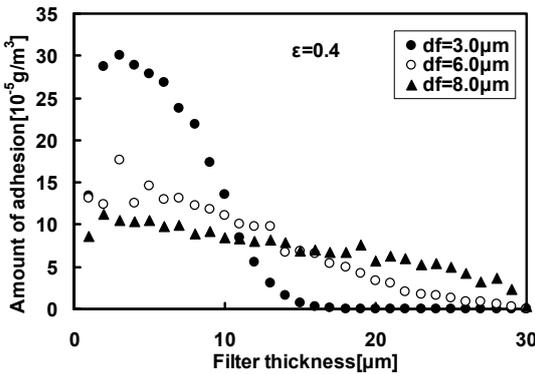


図6 フィルタ内厚み方向の粒子付着分布
(a)空隙率変化、(b) 繊維径変化

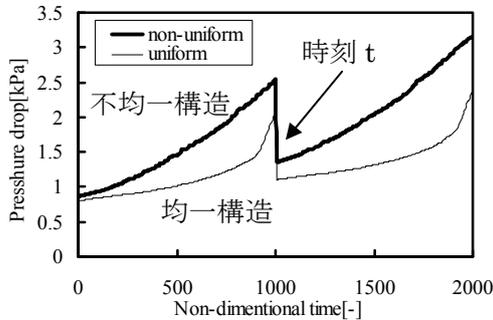


図7 集塵過程および逆洗操作における
フィルタ部の圧力損失変化
(横軸：時間、縦軸：圧力損失)

以上、本研究で開発した粒子付着を考慮した複雑多孔質体内の粒子流動計算モデルにより、種々のフィルタ構造を対象に粒子堆積による非定常の空隙構造変化および圧力損失変化を計算することが可能となった。そして付着粒子の払い落としと圧力損失増加を指標として構造特性をマップとして整理し、最適構造に関する指針を得ることができた。繊維構造スケールでのこのような評価は皆無であり、フィルタ特性を総合的に評価し、設計支援に応用できるものになったと考える。

今後は解析の妥当性の検討として、実機内部現象に近いデータとの比較を行い、高温による灰粒子の溶融化を考慮した数値解析を行っていく必要がある。またフィルタのみならず他の繊維状多孔質体の内部現象解明および構造設計支援に応用可能であり、今後は本解析をベースに更に複雑な現象（多相多成分流れ、相変化、粘弾性流体等）と組み合わせることにより、適用範囲の拡大を目指す。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ①S. Abe, G. Inoue, Y. Matsukuma, M. Minemoto, “Numerical Analysis of Particle Separation and Flow Characteristic in Non-woven Filter”, Journal of Novel Carbon Resources Sciences, 査読有, 3巻, 2010, 17-20

[学会発表] (計2件)

- ①安部信也, 井上元, 松隈洋介, 峯元雅樹, ”数値解析による集塵フィルタの粒子分離および流動特性の解明”, 化学工学会第75年会, 2010年3月18日, 鹿児島大学

- ②S. Abe, G. Inoue, Y. Matsukuma, M. Minemoto, “Numerical Analysis of Particle Separation and Flow Characteristic in Non-woven Filter”, The 6th International Symposium on Novel Carbon Resources Sciences, 2010年11月12日, 九州大学

[その他]

<http://mac2.chem-eng.kyushu-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

井上元 (INOUE GEN)

九州大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：40336003

(2) 研究協力者

峯元雅樹 (MINEMOTO MASAKI)

九州大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10315103

松隈洋介 (MATSUKUMA YOSUKE)

九州大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70282241