

バグフィルターの圧力損失特性の解析と
最適設計に関する研究

2004年

池野 栄 宣

目 次

第 1 章 緒 論	1
1.1 はじめに	1
1.2 粒子分離の基本形態と集塵装置の分類	3
1.3 バグフィルターに関する既往の研究	9
1.3.1 圧力損失に関する既往の研究	9
1.3.2 捕集性能に関する既往の研究	13
1.4 バグフィルターの計画設計における課題	14
1.5 本研究の目的	15
Nomenclature	18
Literature Cited	20
第 2 章 一様払落としモデルに基づく連続運転型 バグフィルターの圧力損失特性の解析	25
2.1 緒 言	25
2.2 一様払落としモデルと基礎式	26
2.3 圧力損失理論式	30
2.3.1 初期圧損 ΔP_{IN}	31
2.3.2 最終圧損 ΔP_{FIN}	31
2.4 圧力損失理論式と数値シミュレーション結果との比較	32
2.4.1 初期圧損 ΔP_{IN}	34
2.4.2 最終圧損 ΔP_{FIN}	35
2.4.3 $m (= \overline{u_N} / u_{av})$ および σ^2 / u_{av}^2 の相関	37
2.5 圧力損失相関式からの圧損パラメーターおよび平均濾過 速度の推算	41
2.5.1 圧損パラメーター ζ_d および α の推算	41
2.5.2 平均濾過速度 u_{av} の推算	44
2.6 圧力損失相関式の活用法	45
2.7 簡易圧力損失相関式	46
2.7.1 初期圧損 ΔP_{IN}	46
2.7.2 最終圧損 ΔP_{FIN}	47

2.8	実測値との比較	49
2.8.1	実験装置図および実験方法	49
2.8.2	結果および考察	51
2.9	結 言	53
	Nomenclature	54
	Literature Cited	56
第 3 章	バグフィルターの圧力損失パラメーターに及ぼす 濾過速度と含塵濃度の影響	57
3.1	緒 言	57
3.2	実験装置と測定方法	58
3.3	実験結果と考察	62
3.3.1	比抵抗 α の相関	62
3.3.2	比抵抗 α に関する次元解析	66
3.3.3	汚れ濾布抵抗 ζ_d	69
3.4	比抵抗の速度依存性を考慮した多室バグフィルターの 圧力損失の数値シミュレーション結果	70
3.5	結 言	72
	Nomenclature	74
	Literature Cited	76
第 4 章	斑落ちモデルに基づくバグフィルターの圧力損失 に関する実験的考察	79
4.1	緒 言	79
4.2	斑落ちモデルと基礎式	80
4.3	実験装置と測定方法	84
4.3.1	清浄濾布抵抗 ζ_c と機械圧損 $\Delta P''$ の測定	84
4.3.2	回分運転の実験方法	86
4.3.3	連続運転の実験方法	86
4.4	実験結果と考察	87
4.4.1	回分運転の実験結果と数値シミュレーション結果	87
4.4.2	連続運転の実験結果と数値シミュレーション結果	92
4.5	一様払落としモデルとの比較	97
4.6	結 言	99

Nomenclature	100
Literature Cited	103
第5章 斑落ちモデルに基づく連続運転型バグフィルターの の圧力損失特性の解析	105
5.1 緒言	105
5.2 斑落ちモデルと基礎式	106
5.3 圧力損失理論式	109
5.4 圧力損失理論式と数値シミュレーション結果との比較	112
5.4.1 任意の時間における圧力損失相関式	114
5.4.2 $m_D, m_C, \sigma_D^2/u_{D,av}^2$ および $\sigma_C^2/u_{C,av}^2$ の相関	117
5.4.3 本体圧力損失の推算	123
5.5 簡易圧力損失相関式	125
5.6 結言	135
Nomenclature	136
Literature Cited	141
第6章 総括	143
Appendix	147
A Eq.(2.11)の導出	147
B Eq.(2.23)の導出	149
C Eq.(3.14)の導出	151
D Eq.(4.11)と Eq.(4.12)の導出	152
E Eq.(5.11)の導出	154
F Eq.(5.22)の導出	156
G Eq.(5.26)と Eq.(5.27)の導出	158
H Eq.(5.32)の導出	160
著者発表の研究論文	163
謝辞	165

第 1 章

緒 論

1.1 はじめに

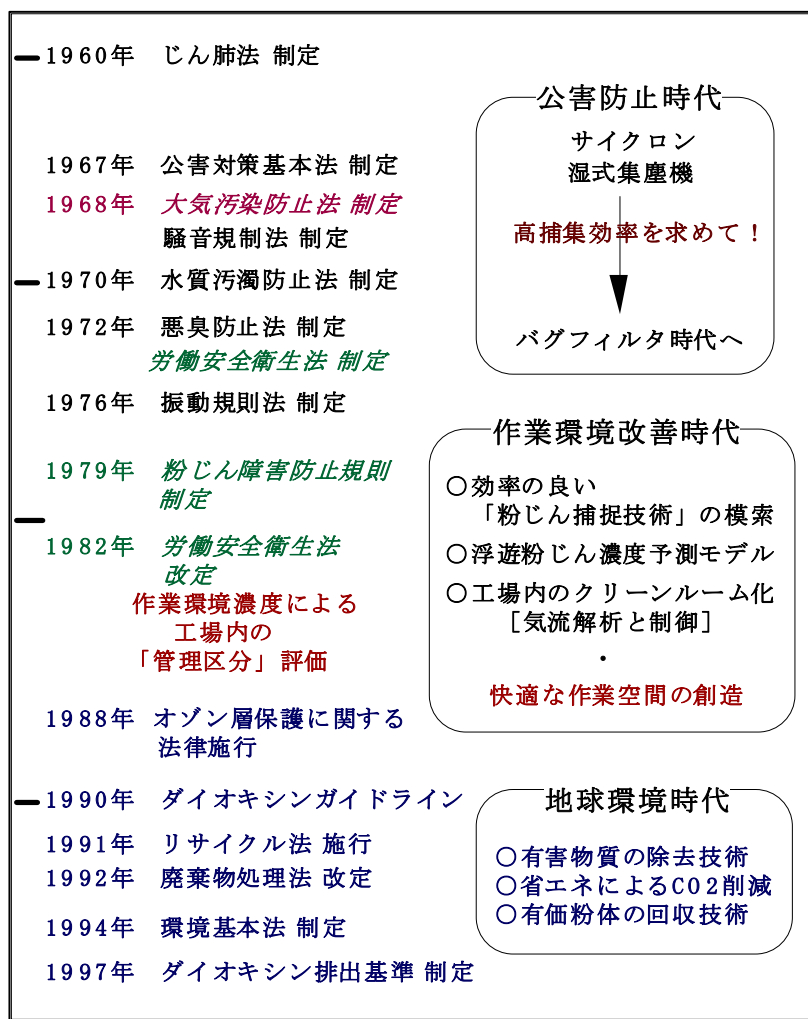
気相中から粒子を分離する固気分離技術は、各種プロセスで生産された有価物質の回収を目的にサイクロンを発端として研究開発されてきたが、1960年のじん肺法および1968年の大気汚染防止法の制定を境にして、公害防止技術あるいは集塵技術として位置付けられることになった。しかしながら、対象粉体の微細化および大気排出規制値の低濃度化がすすむに従って分離方式も変遷し、より高性能な分離技術が求められるようになった。それに伴い、集塵分野は捕集効率の高い電気集塵機およびバグフィルターの時代へと移行した。一方、1980年代後半から地球環境問題がクローズアップされ、集塵装置の省エネルギー化技術と捕集粉のリサイクルおよび処理技術が社会的に要求されてきた。また、1990年のダイオキシソガイドライン施行以降は、気相中に含まれるダイオキシソおよび塩化水素などの有害物質をバグフィルターの濾過面上で反応または粒子化させて分離除去する技術が広く採用されてきている。このように、集塵分野は社会ニーズと関連法令の流れとともに必要とすべき技術が大きく推移してきている(Table 1.1 参照)。

このような社会背景により、バグフィルターは集塵装置の主流となっているが、捕集物である粉塵および濾過材を構成する繊維が不均一な層をなすため数学的手法が複雑であり、その解析的研究はあ

まり進んでいない。さらに、実験的研究も粉の分散および粉塵の堆積現象の再現性を得るのが困難なため実験誤差が大きく、普遍化されているものは少ない。従って、バグフィルターの計画設計や性能の推算は、経験に頼らざるを得ないのが現状である。

本章では、固気分離の基礎的事項と代表的な固気分離装置である集塵装置における分離機構を記述するとともに、バグフィルターに関する既往の研究と計画設計をする上での問題点を述べ、本研究の目的を記述する。

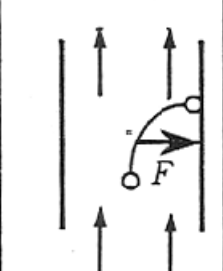
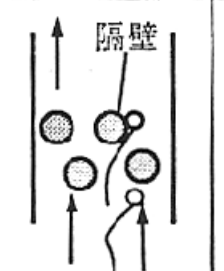
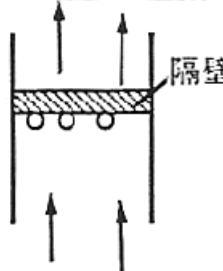
Table 1.1 関連法令と集塵分野の流れ



1.2 粒子分離の基本形態と集塵装置の分類

Emi and Otani (1994a)は、分散系である気相から粒子を分離する上で必要な場を、気体と粒子の間に速度差を生じさせる「エネルギー勾配場=力場」と、気体を通過させ粒子のみを捕集する「隔壁場」の2種類の形態に分類している(Table 1.2 参照)。

Table 1.2 分散系粒子分離の基本形態 (Emi and Otani, 1994a)

分離の要因	力場	力+隔壁場	隔壁場
分離形態			
分離性能	小	中	大
圧力損失	小	中	大
性能評価の指標	分離速度	衝突効率 圧力損失	圧力損失

その要素を列記すると、

力場 ----- 重力・遠心力・静電気力・磁気力・慣性力
濃度差・熱泳動力 など

隔壁場 ----- 繊維層・粒子層・流動層・織布・不織布
網・水滴・多孔質材 など

が挙げられる。力場のみを利用した装置は、チャンバー・サイクロン・電気集塵機が該当し、隔壁場のみを利用した装置の代表的なものにバグフィルターがある。また、力場と隔壁場を併用した装置としては、噴霧スクラバー・充填層・移動層が列記される。

分離性能面から見た場合、力場では「気体と粒子の速度差」が大きいほど性能は向上するが、分離対象粒子径によって利用すべき力の種類が変わってくる。Takahashi(1989)は、力の種類別に粒子の

移動速度と粒子径の関係を Fig.1.1 のようにまとめている。本図から分かるように、 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ を境にして「拡散力・静電気力利用エリア」と「慣性力・重力利用のエリア」に分かれる。

一方、隔壁場では「隔壁の材質・密度・厚さ・繊維径など」によって性能が大きく違ってくる。一般的には、力の場利用より隔壁場利用のほうが性能が良いと考えられており、高性能化が求められる昨今では、隔壁場を利用した装置すなわちバグフィルターが広く採用されてきている。

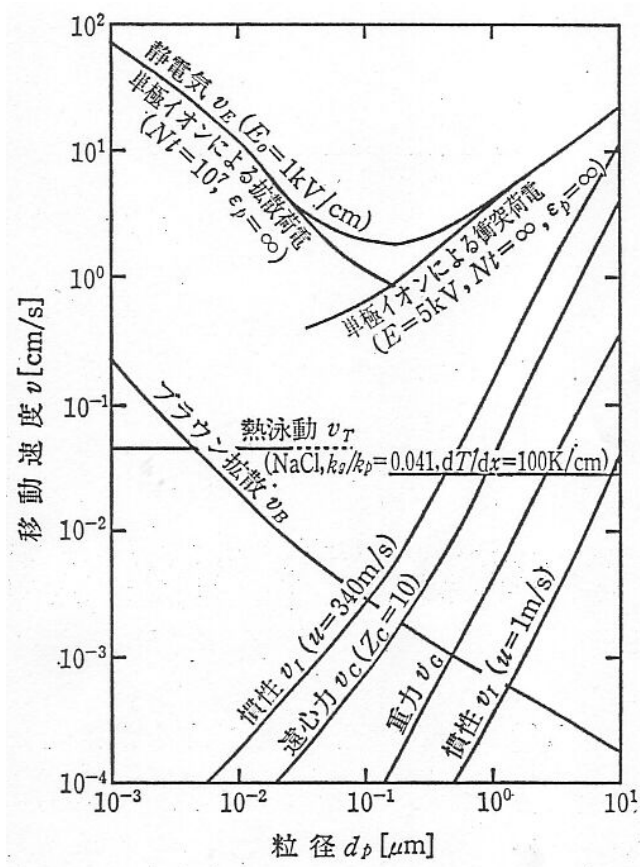


Fig.1.1 力の種類と粒子の移動速度 (Takahashi,1989)

固気分離操作は、集塵装置として広く用いられているが、その捕集原理と特性に応じて用途が違ってくる。Yoneda(1994a)は、各種の集塵方式と対象用途・圧力損失・分離粒子径などの特性を Table 1.3 のようにまとめ、Emi and Otani(1994b)は、各種集塵装置の部分捕集

効率曲線の傾向を Fig.1.2 のように表している。

Table 1.3 各種集塵方式の特性 (Yoneda,1994a)

	捕集原理	圧力損失 [mmAq]	分離限界径 [μm]	固定費	運転費	特 徴
① 慣性集塵機	慣性衝突	~50	20	最安	低	異物または特に粗いダストのブレダスタ
② サイクロン集塵機 (マルチクロン)	遠心力	~200	3	安	中	粗いダストのブレダスタ
③ 湿式集塵機 (スクラバ)	水滴衝突 など	~200~	1	中	高	排水処理を要し、メンテナ ンスが難
④ バグフィルタ (濾過集塵機)	乾式濾過	~200	0.1	高	中	排気が目視できない、集塵 率が確保できる
⑤ 電気集塵機 (EP)	静電気	~50	0.2	最高	低	設備費が大、電力用ボイラ など高温で大風量に適する
⑥ 移動層集塵機 (グラニユラーベッド)	乾式濾過	~500	0.2~0.5	最高	高	高温ガスなど特殊用途

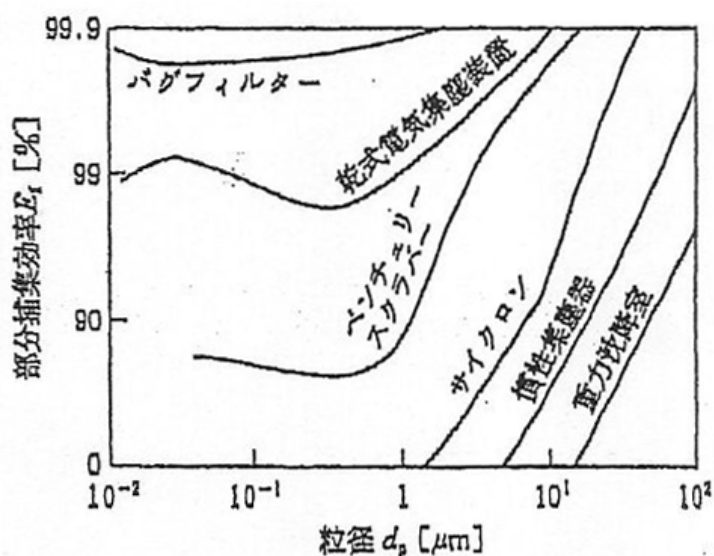


Fig.1.2 各種集塵装置の部分捕集効率曲線 (Emi and Otani, 1994b)

これらの図表から分かるように、重力・慣性集塵装置およびサイクロンはブレダスターあるいは粗粉体回収用として、バグフィルターと電気集塵装置は高性能集塵装置として利用されている。移動層

集塵は粒子充填層を移動させながら濾過する方式で、粒子の材質を考慮することで 500～800℃の高温ガス集塵に使用できるが、固定費および運転費が高いため実際に運用されている台数は少ない。近年、高温ガス用としてセラミックおよび金属焼結体を使用したフィルターが実用化され、Kanaoka *et al.*(1988,1998,1999)によって払落とし特性と圧力損失などについて研究されている。

これまで述べてきたように、高性能が求められる昨今においては、捕集効率の高いバグフィルターが集塵装置の主流となっている。バグフィルターは払落とし方式別に分類されることが多く、機械シェーキング方式、パルスジェット方式、逆洗または逆圧方式に大別されている。その概念図を Fig.1.3 (Ikeno,1999)に示す。また、Yoneda (1994b)がまとめた分類と特徴を Table 1.4 に示す。

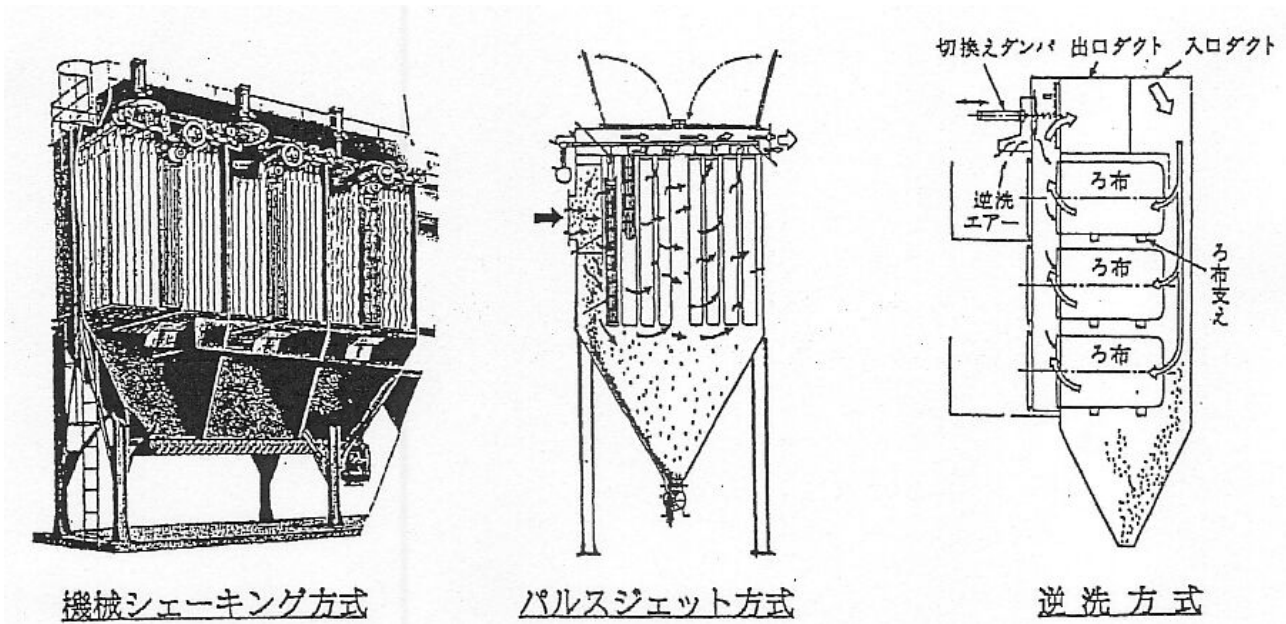


Fig.1.3 払落とし方式別バグフィルターの概念図 (Ikeno,1999)

Table 1.4 バグフィルターターの分類と特徴 (Yoneda, 1994b)

払い落とし方式	種類		形状		布		濾過面	適用濾過速度 [m/min]	適用ガス温度 [°C]	特徴および主な用途
	織	封	円	封	材	料				
機械駆動	織	封	円	筒	テトロンなどの合成繊維	テトロンなどの合成繊維	内面	0.6~1.6	~200 (耐熱ナイロン)	小風量から大風量まで、また一般環境集塵から高温排ガスまで幅広く使用されている 払い落としが確実で、ヒューム（電気炉排ガスなど）に適する
				筒			外面	1~2	~100	数十 m ³ /min までの小型簡易集塵機
	不織布	封	円 (封筒もあり)	筒	テトロンなどの合成繊維	テトロンなどの合成繊維	外面	1~4	~200 (耐熱ナイロン)	ガスを中斷することなく、払い落としが可能のため、小風量の連続タイプに適し、風量変動が少ない 外面濾過のため、空気輸送の固気分離などの高含塵、摩耗ダクトに適する 濾過速度が大きくとれるので、コンバクトで据付けスベースが小さい
							外面	0.5~1.5	~250 (ガラス繊維)	石灰燐きボイラなど高温含塵ガスに、最近、適用されている
不織布	封	円	カートリッジ (円筒ひだ折)	合成繊維または紙	合成繊維または紙	外面	0.3~1	~140 (テトロン)	濾過面積が大きくとれ、コンバクトとなる 低含塵で高集塵率の用途 (空気清浄およびパテリ工場の鉛粉捕集など) に適する	
						外面	0.5~1.5	~450 ~1200	高温集塵	
逆圧または逆流	織または不織布	封	円	筒	テトロンなどの合成繊維	テトロンなどの合成繊維	内面	0.6~1.2	~200 (耐熱ナイロン)	古くから、セメント、鉄鋼などで広く使用されている カーボンブラック、非鉄精錬など高温ヒュームに適する
							外面	0.3~1	~250	
	不織布	封	筒	筒	テトロンなどの合成繊維	テトロンなどの合成繊維	外面	1~2	~100 (テトロン)	封筒布のため、コンバクトに取付けでき据付けスペースが小さい 鈍物砂処理の集塵など払い落としやすい、ダストで大風量に適する

注) 1) バルスジェットの中には帆布1本ごとにバルス払い落としするのでなく、1室ごとにバルス払い落としをするコンバクトメントバルス方式がある。
2) 逆圧の中には払い落とし用を間欠的に止めるのでなく、連続的に開閉して脈動気流を与える脈動逆圧方式がある。

機械シェーキング方式のバグフィルターは、円筒濾布の内面を濾過面としており、含塵ガスは円筒濾布の下部から流入する。捕集堆積した粉塵は、濾布の上部または中央部を振動させて払落とし操作を行う。振動数および振幅を大きくすることで払落とし効果を増すことができるが、濾布に大きな剪断力がかかりすぎると損傷を招くことになる。また、本方式では払落とし操作は気流を止めて行う必要があることから、連続運転をするためには多室構成として各室を切換ながら払落とし操作を行うためのダンパーなどの機器が必要となる。バグフィルター本体の圧力損失は、濾過部の圧力損失と切換機器の圧力損失、含塵ガスが円筒濾布の下部から流入する時に生じる圧力損失およびバグフィルター出入口部での圧力損失の和となる。

パルスジェット方式のバグフィルターは、円筒または封筒状濾布の外面を濾過面とし、含塵ガスは集塵機の入口部に設けられた分散板に衝突したのち濾布外面で濾過される。払落とし操作は圧縮エアーを濾布の内側にパルスのように噴出(一般的には 0.1s~0.3s)させて行い、圧縮エアーの力と濾布の変形により堆積粉塵を剥離させる。圧縮エアーの圧力と量を大きくすることで払落とし効果が増すが、オーバークリーニングによる捕集効率の低下および濾布の損傷の観点から限界が生じる。本方式のバグフィルターは、払落とし力が他の方式に比べて強くパルスのように短時間で行われることから、多室に分割せずに気流を止めることなく一列ごとに払落とし操作を行うことができる(オンラインパルスと言われる)。この方式の場合の本体圧力損失は、濾過部の圧力損失と濾過後の清浄ガスが円筒または封筒状濾布の上部から流出する時に生じる圧力損失およびバグフィルター出入口部での圧力損失の和となる。しかしながら、払落とし時間が短く、その直後から濾過操作が始まるために、一旦は払落としされた粉塵の何割かが落下せずに再付着して圧力損失の上昇を招く傾向がある。特に、粒子径および比重の小さな粉塵の場合は再付着現象が顕著であることから、パルスジェット方式であっても多

室に分割して気流を止めて払落とし操作を行う(オフラインパルスと言われる)システムにする必要がある。

逆洗または逆圧方式のバグフィルターでは、円筒または封筒状濾布を使用して内面濾過と外面濾過の両方法が使用されている。払落とし機構は、大気と機内の差圧を利用して濾過方向と逆向きに大気を流入させる点にある。従って、多室構成として気流を切替えるダンパーなどの機器が必要となる。払落とし効果は他の方式に較べて低いため、剥離性の良い粉塵のみに用いられている。また、払落とし時に流入させる逆洗エアの量が多いため、集塵風量の変動が大きくなるという欠点もある。払落としに使用される動力が小さいという長所があるが、払落とし効果が低いことから実機として採用されている台数は少ない。

1.3 バグフィルターに関する既往の研究

バグフィルターを含めた集塵装置に関する成書の代表的なものに、Iinoya *et al.*による「集塵装置の性能(1976a)」と「集塵工学(1980)」がある。最近では、理論だけでなく実施例と課題を含めて Kanaoka *et al.*によってまとめられた「集塵の技術と装置(1997)」がある。これらの成書にも記述されているが、集塵装置の性能を論じる上で重要な点は、集塵装置全体の動力を左右する圧力損失と大気浄化に寄与する粉塵の捕集性能の2点にある。本節では、バグフィルターの性能の指標となる圧力損失と捕集性能に関する既往の研究内容を列記し、残された課題を記述する。

1.3.1 圧力損失に関する既往の研究

バグフィルターは隔壁である濾布上で粉塵を捕集することから Kimura and Iinoya(1965)は、集塵時の濾布圧損を清浄濾布の圧力損

失と粉塵層の圧力損失の和として次式で表現している。

$$\begin{aligned}\Delta P' &= \Delta P'_c + \Delta P'_d \\ &= (\zeta_c + m_p \alpha) \mu u\end{aligned}\quad (1.1)$$

しかしながら、バグフィルターの濾布圧損は、清浄濾布設置時には小さいが運転時間とともに徐々に上昇した後、払落とし周期内に捕集堆積する粉塵層の圧力損失を変動範囲として定常化する。これは、払落とし操作で落ちない残留粉塵が濾布内部または表面に徐々に堆積したのち、払落とし力と粉塵と濾布との付着力が均衡状態に達して定常化するためと考えられる。定常に達した時点における払落とし直後の圧力損失は、清浄濾布の圧力損失よりも大きく粉塵の物性によっては数十倍になる。これを表現するため、Noll *et al.*(1973)は単位面積当たり残留する粉塵量を $W[\text{kg}/\text{m}^2]$ として次式で表している。

$$\Delta P' = B(W + M)u \quad (1.2)$$

ここで、 M は払落とし操作ののち新たに捕集堆積する単位面積当たりの粉塵量としている。Eq.(1.2)には清浄濾布の圧力損失特性が含まれていないことから、Iinoya and Makino(1976)は払落とし時に残留する粉塵と清浄濾布の圧力損失を合わせて係数 A を用いた次式を提案している。

$$\Delta P' = (A + B M^\delta)u \quad (1.3)$$

ここで、 δ は近似的に1として扱えるとしている(Iinoya *et al.*,1978)。圧力損失の正確な表現式は未だ確立されてはいないが、現在ではEq.(1.3)の形で表現されることが多く、係数 A と B を圧損パラメータと称して研究が進められている。一方、Eq.(1.3)中の係数 A と B の経時変化について、Mori(1979)が機械シェーキング方式のバグフィルターで鋳物砂を集塵した場合について報告している。それによれば、係数 B は運転当初からほぼ一定であるが、係数 A は定常化するまで80~120日を要している。

さて、上記のいずれの式の係数も実験あるいは実機のデータから算出せざるを得ず、必然的に実測データの解析方法が重要となって

くる。回分運転(単室運転または間欠運転とも言われる)で使用されているバグフィルターの圧力損失の時間変化挙動は、単位面積当たりに堆積する粉塵量 M のみによって支配されることから、Eq.(1.3)に基づいてデータの解析が行われている。しかしながら、実用的に運用されているバグフィルターの殆どは連続運転型で多室または多列構成になっており、運転中に一室または一列ずつ払落とし操作を行うことで、途中停止することなく一定範囲内の圧力損失で運転される。この場合、各室の堆積粉塵量 M が異なるため、各室の濾過速度も異なり時間とともに変化する。Tanaka *et al.*(1973)は、各室の流量と圧力損失を電気回路の電流と電圧に置き換えて並列回路として圧力損失を求めている。同様な考え方により Iinoya *et al.*(1976b)は、多室バグフィルターの圧力損失値から Eq.(1.3)の係数 A, B を求める方法を示している。また、Cooper and Hampl (1976)は、圧力損失と堆積粉塵量との関係を実験的にまとめ、Eq.(1.3)の変形式を用いて各室の任意時間での濾過速度を求めている。いずれの方法もバグフィルター本体の圧力損失を、濾布の圧力損失と粉塵層の圧力損失の和として解析している。

しかしながら、装置化するときには装置固有の圧力損失(機械圧損)が必ず発生する。特に、連続運転をするには各室または各列を切替える機器が必要不可欠となり、その抵抗は濾布圧損の挙動に大きく影響する。また、前節でも記述したように、含塵ガスが円筒濾布の下部から流入する時に生じる圧力損失あるいは濾過後の清浄ガスが円筒または封筒状濾布の上部から流出する時に生じる圧力損失も濾布圧損の挙動に影響する。これを考慮したモデルとして Ikeno and Yoneda(1983)は、濾布圧損に切替機器などの機械圧損を加えた本体圧力損失モデルを示し、数値シミュレーション結果から最終圧損の近似式を提示した。しかしながら、その近似式は誤差が大きく、最終圧損のみに対する近似式であったため、実機の測定データから圧損パラメーターを正確に算出することができなかった。

一方、粉塵層の圧力損失に関する研究も古くからすすめられている。Carman(1937)は、Kozeny の導いた理論式に検討を加えて粒子充填層の圧力損失を空隙率 ε と粒子の比表面積 S_v を用いて表している(Kozeny-Carman 式)が、空隙率 ε と粉体物性および濾過速度との関係を表現するまでには至っていない。粉塵層の圧力損失の指標(圧損パラメーター)は比抵抗 α として表現されており、それに関しては、Borgwardt *et al.*(1968), Dennis *et al.*(1978), Mori(1979)によって濾過速度への依存性が報告されている。しかしながら、その依存度は濾過速度の 0.2 乗～1.5 乗と幅があり普遍化されていない。Yamada *et al.*(1987)は、粉塵層の圧力損失が濾過速度の 0.4 乗～1.0 乗に比例するデータとともに空隙率に対する影響を示し、圧密特性の測定方法を提唱しているが、空隙率が粉体物性と濾過速度によってどのように変わるかまでは言及していない。比抵抗に対する空隙率の影響に関しては Kimura and Iinoya(1965)が、Kozeny-Carman 式を用いて考察し、Suzuki *et al.* (1991)は、粒子層空隙率推定モデルを提唱して粒度分布から圧力損失を推定できることを示しているが、充填速度(=濾過速度×含塵濃度)の影響を数値化するまでには至っていない。このように、比抵抗は定量的に十分評価されているとは言えず、バグフィルターを設計する場合には実機のデータおよび実験に頼らざるを得ないのが現状である。

残留粉塵を含んだ払落とし後の濾布圧損を示す指標(圧損パラメーター)は汚れ濾布抵抗 ζ_a として表現されており、粉塵の物性および濾布の種類によって様々な値を示す。また、払落とし方式あるいは払落とし力によっても変わってくる。この汚れ濾布抵抗 ζ_a に関する解析的な研究は、定常化までの時間が長いことおよび濾材と粉体との組み合わせの多さ故にほとんど成されていない。これを解明する手段として、払落とし機構に関する研究が Kanaoka *et al.*(1994)によってすすめられている。

1.3.2 捕集性能に関する既往の研究

バグフィルターは、繊維層である濾布で粉塵を捕集する機構であることから、エアフィルターとの粉塵捕集機構と同じと考えられる。エアフィルターの捕集効率については、Emi *et al.*(1973)が慣性力と重力および拡散力と繊維によるさえぎり効果を用いて解析し、捕集効率を推算する図表を表している。また、Inagaki *et al.*(2001)は繊維断面形状が捕集効率に影響するとして研究報告している。また、Mori *et al.*(1995)は、繊維のさえぎり効果による捕集効率が繊維層の充填密度によって変わると報告している。

一方、粉塵負荷を伴う場合の捕集効率については、Kimura and Shirato(1970)が粉塵の粒度と濾過速度などの運転条件をパラメーターとして実験式を提示している。Mori(1979)は、粉塵負荷量によって捕集効率が大きく変わることを実験データで示し、実験で得られた積算透過率から瞬間透過率を算出している。また、Ikemori and Kosakai(1978)は、粉塵負荷量と圧力損失の関係を実験的に求めて捕集効率と圧力損失との相関を実験式で示している。これらの研究によれば、粉塵負荷量が多くなる(圧力損失が高い)ほど捕集効率は良くなり、濾過速度が遅いほど捕集効率が良くなることを示している。Emi *et al.*(1987)も同様な報告をしているが、いずれの研究も実験室での回分実験で得られた結果であり、実用されているバグフィルターの運転データとの比較は行われていない。一般的には、バグフィルターの出口粉塵濃度は払落とし直後に増大し、その後急激に減少する。Hakamata *et al.*(1993)は、パルスジェット型バグフィルターの出口粉塵の個数を経時的に測定して報告している。その図を Fig.1.4 に示す。実用されているバグフィルターの殆どを占める多室あるいは多列構成の連続運転型バグフィルターの粉塵捕集効率については、Fig.1.4 に類似した実測例は報告されてはいるが解析的な研究は殆ど報告されていない。

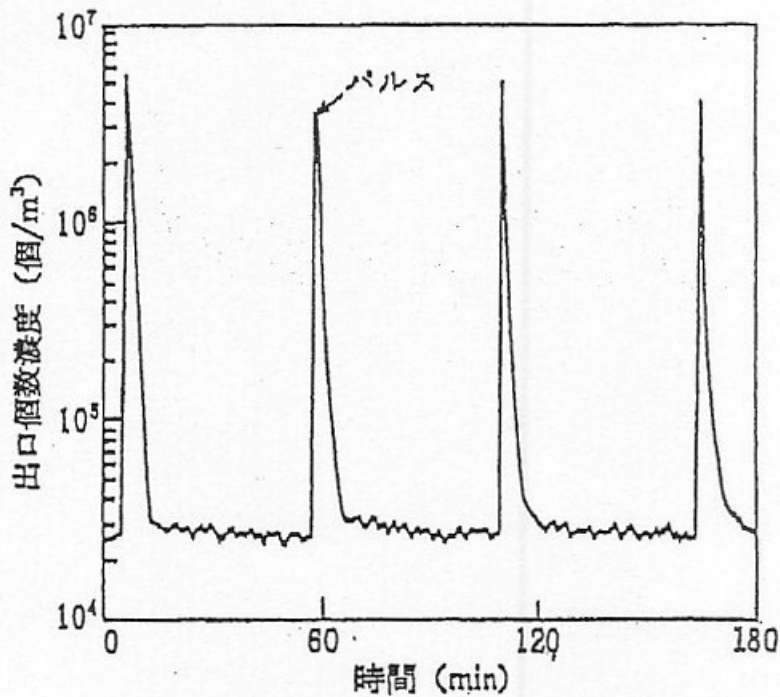


Fig.1.4 パルスジェット前後の出口個数濃度の推移
(Hakamata *et al.*,1993)

これまで述べてきたように、バグフィルターの性能の指標である圧力損失と粉塵捕集性能は、濾過面に堆積する粉塵量(粉塵負荷量)と密接な関係がある。

1.4 バグフィルターの計画設計における課題

バグフィルターを計画設計する場合、以下のような手順で計画される。

- 第1ステップ 集塵対象に応じた必要集塵風量を算出する。
- 第2ステップ バグフィルターに与える許容圧力損失(1.5kPa ~ 2kPa とされる場合が多い)以下で運転できる最大濾過速度を推算して必要濾過面積を算出する。この場合、出口粉塵濃度を増加させない

ように払落としサイクルを極端に短くしないことに留意する。

第3ステップ 集塵系統(吸引部～ダクト～バグフィルター～ダクト～ブロアー～排気)全体の圧力損失を算出してブロアーの必要静圧と駆動モーターの仕様を決定する。この場合、バグフィルターの圧力損失は、第2ステップで与えた許容圧力損失としている。

最も重要なのが機器の大小を決定する第2ステップの作業となる。しかしながら、粒子径を含めた対象粉塵の物性値が様々であるため濾過速度と圧力損失の関係も画一的には表せない。必然的に、集塵実績から類似する粉塵の運転データを検索して濾過速度と圧力損失の関係を推定せざるを得ない。類似する集塵実績がある場合においても、濾過速度および払落としサイクルなどの運転条件を変えたときに、圧力損失がどのように変化するかも実際に運転してみなければ正確な値を把握できない。一方、実績のない粉塵の集塵計画に至っては、現場にテスト機を持ち込んで1～2ヶ月の時間をかけて圧力損失特性を測定して、濾過速度および払落としサイクルなどの最適設計点を把握するしか手段がないのが現状である。これは、圧損パラメーターである汚れ濾布抵抗 ζ_d と比抵抗 α が経験的にしか得られないことと、圧力損失の正確な表現式が確立されていないことに起因している。

1.5 本研究の目的

バグフィルターの性能の優劣は、動力の指標である圧力損失と大気浄化の指標である粉塵捕集効率で示される。計画設計をする際にも、この2点を重視して最適設計点の検討をする必要がある。一方、

既往の研究でも述べられているように、バグフィルターの粉塵捕集効率は粉塵負荷量の増減に伴う圧力損失の挙動と密接な関係がある。しかしながら、バグフィルターの圧力損失に関する研究は濾過部の圧力損失のみに対して検討されており、装置化するときには必ず発生する装置固有の圧力損失(機械圧損)の影響を加えて検討されたものは殆ど報告されていない。特に、実用的に運転されているバグフィルターの殆どを占める連続運転型バグフィルターは多室または多列構成になっており、運転中に一室または一列ずつ払落とし操作をして連続的に運転をしている。そのためには、各室または各列を切替える機器が必要不可欠となり、その抵抗(機械圧損)は濾布の圧力損失の挙動に大きく影響する。

本研究の目的は、この機械圧損の影響を考慮して、多室あるいは多列で構成される連続運転型バグフィルターの圧力損失の挙動を数値的に表し、濾過速度および払落としサイクルなどの運転条件の最適設計を可能とすることにある。また、圧損パラメーターである汚れ濾布抵抗 ζ_d および比抵抗 α と粉体物性および運転条件との相関を求め、経験則に依存した計画設計からの脱却を図る。

第2章では、連続運転型バグフィルターに不可欠な機械圧損を加えた Ikeno and Yoneda (1983) が提示した本体圧力損失に対する表現式を用いて、新たに払落とし直前の第 N 室(または N 列)の平均濾過速度 \bar{u}_N と全室に対する平均濾過速度 u_{av} との比 m ($= \bar{u}_N/u_{av}$) と、 u_{av} に対する各室の平均濾過速度 \bar{u}_i の分散値 σ^2 の考えを加えて本体初期圧損 ΔP_{IN} と本体最終圧損 ΔP_{FIN} に対する圧力損失理論式を導出し、機械圧損の大小による本体圧力損失への影響を評価する。この理論式に補正項を加えた ΔP_{IN} と ΔP_{FIN} に対する精度の高い相関式を提示し、これらの相関式の装置設計への活用法および実験あるいは実機の運転データから圧力損失の指標である圧損パラメーター(ζ_d, α)が算出できることを示す。また、数値シミュレーション結果と圧力損失理論式との比較から m および σ^2 を用いない簡便化した場合の ΔP_{IN} と ΔP_{FIN} の相関式を提示する。

第3章では、粒度分布および流動性の異なる3種類の粉体による実験結果から、汚れ濾布抵抗 ζ_d と比抵抗 α に対する濾過速度および含塵濃度の影響を示す。また、Kozeny-Carman 式と実験結果を用いて粉塵層の空隙率を数値化し、比抵抗 α を粉体物性および運転条件から推算できる実験式を求める。

第4章では、第2章で表現できなかつた圧力損失の時間変化挙動を実験的に考察し、圧力損失の時間変化挙動を表現できる新たなモデルを提示する。第2章で用いた既往の払落としモデルは、払落とし操作後の濾過面に残留する粉塵量は均一に分布しているとした「一様払落としモデル」であったが、払落とし操作後の濾過面を観察すると残留する粉塵量が場所によって差異があった。本章では、濾過面が粉塵の残留した汚れ濾布抵抗 ζ_D を有する濾過面と清浄濾布状態まで払落とされた清浄濾布抵抗 ζ_C を有する濾過面の2面で構成されているとする「斑落ちモデル」を提示する。その面積比率を ε_D 対 ε_C とした斑落ちモデルに基づく数値シミュレーション結果が、回分運転および連続運転における本体圧力損失の時間変化挙動の実測値を全時間領域で良好に表現できることを示す。

第5章では、第2章で提示した払落とし直前の第 N 室(または第 N 列)の時間平均の濾過速度 \bar{u}_N と室平均の濾過速度 u_{av} との比 m ($=\bar{u}_N/u_{av}$) および u_{av} に対する各室の平均濾過速度 \bar{u}_i の分散値 σ^2 の考えを第4章で提示した「斑落ちモデル」に適用して理論解析を行い、本体圧力損失の数値シミュレーション結果と理論解析結果を比較する。その比較から、様々な運転条件に適用でき、さらに最終圧損だけでなく全時間域に適用可能な本体圧力損失の精度の高い相関式を導出する。

第6章では、本論文を総括する。

Nomenclature

A	= pressure drop parameter defined by Eq.(1.3)	[Pa · s/m]
B	= pressure drop parameter defined by Eq.(1.3)	[Pa · s/m]
M	= dust loading on filter cloth	[kg/m ²]
m	= ratio of average filtering velocity of the N-th compartment just before cleaning operation to that of all compartments	[—]
m_p	= dust loading on filter cloth	[kg/m ²]
N	= number of compartments	[—]
S_v	= specific surface area	[m ² /m ³]
u	= filtering velocity for filtering operation	[m/s]
u_{av}	= average filtering velocity for continuous filtering operation	[m/s]
\bar{u}_i	= filtering velocity in the i -th compartment averaged over filtering operation	[m/s]
\bar{u}_N	= filtering velocity in the N-th compartment just before cleaning averaged over filtering operation	[m/s]
W	= residual dust on filter cloth	[kg/m ²]
α	= specific resistance of dust cake	[m/kg]
$\Delta P'$	= filter cloth pressure drop with dust loading	[Pa]
$\Delta P'_c$	= pressure drop of virginal filter cloth	[Pa]
$\Delta P'_d$	= pressure drop of dust layer	[Pa]
ΔP_{FIN}	= total pressure drop for bag filter just before cleaning	[Pa]
ΔP_{IN}	= total pressure drop for bag filter just after cleaning	[Pa]
ε	= void fraction	[—]
ε_c	= fraction of virginal filter cloth area to the total area	[—]

ε_D	= fraction of filter cloth area with residual dust to the total area	[-]
ζ_d	= specific resistance of filter cloth with residual dust by uniformed cleaning model	[m ⁻¹]
ζ_C	= specific resistance of virginial filter cloth by patched cleaning model	[m ⁻¹]
ζ_D	= specific resistance of filter cloth with residual dust by patched cleaning model	[m ⁻¹]
μ	= gas viscosity	[Pa · s]
σ^2	= variance of the filtering velocity in i-th compartment averaged over filtering operation \bar{u}_i to u_{av}	[m ² /s ²]

Literature Cited

Borgwardt, R. H., R .E. Harrington and P. W. Spaite ;

”Filtration Characteristics of Fly Ash from a Pulverized Coal-Fired Power Plant,” *Journal of the Air Pollution Control Association*, **18**, 387-390(1968)

Carman, P. C. ;

“Fluid Flow through Granular Bed,” *Transactions of the Institution of Chemical Engineers (London)*, **15**, 150-166 (1937)

Cooper, D. W. and V. Hampl ;

”Conference on Particulate Collection Problems in Converting to Low Sulfur Coals,” Paper No.9 Fabric Filtration Performance Model, EPA-600/7-76-016, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C. (1976)

Dennis, R., R .W. Cass and R. R. Hall ;

”Dust Dislodgement from Woven Fabrics Versus Filter Performance,” *Journal of the Air Pollution Control Association*, **28**, 47-51 (1978)

Emi, H., K. Okuyama and N. Yoshioka ;

“Prediction of Collection Efficiency of Aerosols by High-Porosity Fibrous Filter,” *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **6**, 349-354 (1973)

Emi, H., C. Kanaoka, Y. Otani and M. Higashi;

“Further Upgrading of Advanced Air Filter,” Proceeding of the 52th Annual Meeting of the Society of Chemical Engineers, Japan, p.213 (1987)

Emi, H. and Y. Otani ;

“Gas-Ryushi-Kei Bunri no Kiso,” *Kagaku Kogaku no Shinpo*, 28,
Ryutai-Ryushi-Kei Bunri, Kagakukogakukai ed., 18-21 (1994a)

Emi, H. and Y. Otani ;

“Gas-Ryushi-Kei Bunri no Kiso,” *Kagaku Kogaku no Shinpo*, 28,
Ryutai-Ryushi-Kei Bunri, Kagakukogakukai ed., p.25 (1994b)

Hakamata, T., K. Ushiroebisu and A. Suzuki ;

“ Performance of Pulse Jet Type Bag Filter,” *Sinto Gihou*, **13**,
37-41 (1993)

Iinoya, K., N. Kimura, K. Makino, M. Lin, N. Morishima, T. Yoshida,
H. Emi and I. Tamori ;

“Shujin Souchi no Seinou,” Iinoya, K. ed., Sangyo Gijutsu Center,
Tokyo, Japan (1976a)

Iinoya, K. and K. Makino ;

“Bag Filter no Seinousuitei,” *Shujin Souchi no Seinou*, Iinoya, K. ed.,
51-59, Sangyo Gijutsu Center, Tokyo, Japan (1976)

Iinoya, K., K. Makino , K. Ueshima , M. H .Lin and Y. Mori ;

“A Method for Measuring Pressure Drop Parameters of Multi-Compar
-tment Bag Filter,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 517-521 (1976b)

Iinoya, K., K. Makino, N. Izumi and Y. Mori ;

“The Analytical Optimal Design of Fabric Filter System,” *Journal of
Chemical Engineering of Japan*, **11**, 136-142 (1978)

Iinoya, K. ;

“Shujin Kogaku,” *Nikkan Kougyo Shinbunsha*, Tokyo, Japan (1980)

Ikemori, K. and Y. Kosakai ;

“Collection Efficiency, Flow Resistance and Their Correlation in a Needle-Punched Felt Used for Bag Filter,” *Kuuki Seijyo*, **16(3)**, 1-19 (1978)

Ikeno, H. and T. Yoneda ;

“Pressure Drop in Multi-Compartment Bag Filter,” *Journal of the Society of Powder Technology* , Japan, **20**, 142-146 (1983)

Ikeno, H. ;

“Koki Bunri Gijutsu no Shinten,” *Saikin no Kagaku Kogaku* **51**, Ryutai-Ryushi-Kei Bunri Kogaku no Tenkai, Kagakukogakukai ed., p.101(1999)

Inagaki, M., K. Sakai, N. Namiki, H. Emi and Y. Otani ;

“Influence of Fiber Cross-sectional Shape on Filter Collection Performance,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **27**, 113-120 (2001)

Kanaoka, C. and I. Tamori ;

“Recent Trends of Ceramic Filter Techniques for Dust-Laden Hot Gases,” *The Association of Powder Process Industry and Engineering Japan*, **20**, No.2, 1-8 (1988)

Kanaoka, C., M. Furuuchi and J. Murai ;

“The Dust Cleaning Mechanism of a Pulse Jet Type Bag Filter,” *Journal of the Society of Powder Technology* , Japan, **31**, 424-429 (1994)

Kanaoka, C., I. Tamori, T. Yoneda and H. Makino ;

“Shujin no Gijutsu to Souchi,” *Nikkan Kougyo Shinbun*, Tokyo, Japan (1997)

Kanaoka, C. and T. Kishima ;

“Releasing Mechanism of Dust accumulated on Ceramic Filter Surface,” *Journal of the Society of Powder Technology* , Japan, **35**, 250-255 (1998)

Kanaoka, C., T. Kishima and M. Amormkitbanamrung ;

“Cleaning Mechanism of Dust from Ceramic Filter Element,” High Temperature Gas Cleaning, Ed. A.Ditter, G.Hammer and G.Kasper, MVM, Karlsruhe, 142-152 (1999)

Kimura, N. and K. Iinoya ;

“Pressure Drop Characteristics of Filter Cloth for Dust Collection,” *Kagaku Kogaku*, **29**, 166-174 (1965)

Kimura, N. and M. Shirato ;

“Collection Efficiency of Dry Cloth-Filters with Dust Loading,” *Kagaku Kogaku*, **34**, 984-990 (1970)

Mori, H., N. Kimura, M. Kakizoe and S. Uesaka ;

“The Performance of Needle Punched Felt Filters,” *Journal of the Society of Powder Technology* , Japan, **32**, 856-865 (1995)

Mori, Y. ;

“Performance and Operation for Bag Filter,” Doctor Thesis, Kyoto Univ., Japan (1979)

Noll, K. E., W. T. Davies and S. P. Shelton ;

”Pressure Drop of Fabrics Filter for Dust Loading,” Paper No.73-30-1,66th Annual Meeting, APCA (Chicago,1973)

- Suzuki, M., T. Sakata, S. Nakamura, M. Hirota and T. Oshima ;
“Effect of Size Distribution on Pressure Drop in Particle Packed
Bed,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **17**, 417-422 (1991)
- Takahashi, K. ed. ;
“Ouyou Aerosol Gaku,” p.144, Youkendo, Tokyo, Japan (1989)
- Tanaka, N. , K. Makino and K. Iinoya ;
“Theoretical Analysis of Dust Cleaning Operation in Multi-Comart
-ment Bag Filter,” *Kagaku Kogaku*, **37**, 718-724 (1973)
- Yamada, M., K. Kuramitsu and K. Makino ;
“On Estimation of the Mechanical Strength of the Dust Layer
Collected on Bag Filter Cloths,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **13**,
13-19 (1987)
- Yoneda, T. ;
“Haigas Shori Gijutsu,”*Kagaku Kogaku no Shinpo*,28,Ryutai-Ryushi-
Kei Bunri, Kagakukogakukai ed., p.195 (1994a)
- Yoneda, T. ;
“Haigas Shori Gijutsu,”*Kagaku Kogaku no Shinpo*,28,Ryutai-Ryushi-
Kei Bunri, Kagaku kogakukai ed., p.196 (1994b)

第 2 章

一様払落としモデルに基づく連続運転型 バグフィルターの圧力損失特性の解析

2.1 緒 言

バグフィルターに使用している濾布は、濾布上に捕集された粉塵を定期的に払落とすことによって長期間使用される。その圧力損失は、清浄濾布設置時には小さいが運転時間とともに徐々に上昇した後、払落とし周期内に捕集堆積する粉塵層の圧力損失を変動範囲として定常化する。これは、払落とし操作で落ちない残留粉塵が濾布内部または表面に徐々に堆積したのち、払落とし力と粉塵と濾布との付着力が均衡状態に達して定常化すると考えられている。この定常圧力損失は、集塵装置全体の運転動力を決定するうえで重要な数値であり、上限設定値によって機器の大きさが変わってくる。従ってバグフィルターの設計において、濾過速度および含塵濃度などの運転条件に対する定常圧力損失を推算することが重要になってくる。圧力損失が定常に達した後は一定期間経過し、濾布の劣化とともに粉塵の濾布内部への浸透がすすみ、圧力損失の上昇と捕集効率の低下現象が起きる。これが濾布の寿命と考えられている。

一方、バグフィルターの圧損パラメーターである汚れ濾布抵抗と比抵抗は、定常化までの時間が長いことおよび粉の分散を含めたガス条件の再現性の問題から実験室では正確な数値が得られない。必

然的に実機の運転データから圧損パラメーターを算出せざるを得ないため、運転条件による圧力損失の挙動を理論的に把握することが重要となる。

連続運転型である多室バグフィルターの圧力損失に関しては、Tanaka *et al.*(1973) による理論的考察と Iinoya *et al.*(1976)による圧損パラメーター測定法が研究報告されているが、濾布圧損のみについて検討されており機械圧損の影響については言及されていない。しかしながら、連続運転型バグフィルターは、多室または多列構成になっており、運転中に一室または一列ずつ払落とし操作を行うことで、途中停止することなく一定範囲内の圧力損失で運転される。そのためには各室または各列を切替える機器が必要不可欠となり、その抵抗は濾布圧損の挙動に大きく影響する。これを考慮したモデルとして Ikeno and Yoneda(1983)は、濾布圧損に切替機器などの機械圧損を加えた本体圧力損失モデルを示し、数値シミュレーション結果から最終圧損の近似式を提示した。しかしながら、その近似式は誤差も大きく最終圧損のみに対する近似式であったため、実機の測定データから圧損パラメーターを正確に算出することができなかった。

本章では、数値シミュレーション結果と理論解析結果の比較から、本体圧力損失の初期圧損と最終圧損に対する精度の高い相関式を導出して機械圧損による本体圧力損失への影響を評価する。また、本相関式の装置設計への活用法を示す。

2.2 一様払落としモデルと基礎式

濾布圧損の表現式に関しては、数多くの研究者 (Mumfold, 1963; Kimura and Shirato, 1970; Iinoya and Makino, 1976; Mori, 1979) によって報告されているが、本章では Ikeno and Yoneda(1983)が提出した

Eq.(2.1)を用いる。本式では、濾過面に捕集された粉塵層が払落とし操作によって一様に払落とされるものとして、濾布圧損を払落とし操作後の残留粉塵を含んだ濾布の圧力損失と、そこに捕集堆積する粉塵層の圧力損失の和として表現している。この一様払落としモデルの模式図を Fig.2.1 に示す。

$$\Delta P' = (\zeta_d + \alpha c u t) \mu u \quad (2.1)$$

ここで、 ζ_d は払落とし操作で払落とされない残留粉塵と濾材による抵抗係数で汚れ濾布抵抗とよばれ、全濾過面で一定としている。また、 α は払落とし操作ののち、新たに捕集堆積した粉塵層による抵抗係数で比抵抗とよばれる。本章では、 ζ_d と α は濾過速度によって変動しないものと仮定する。 c は濾布に捕集された粉塵量に基づく含塵濃度、 u は濾過速度、 μ は空気の粘度である。

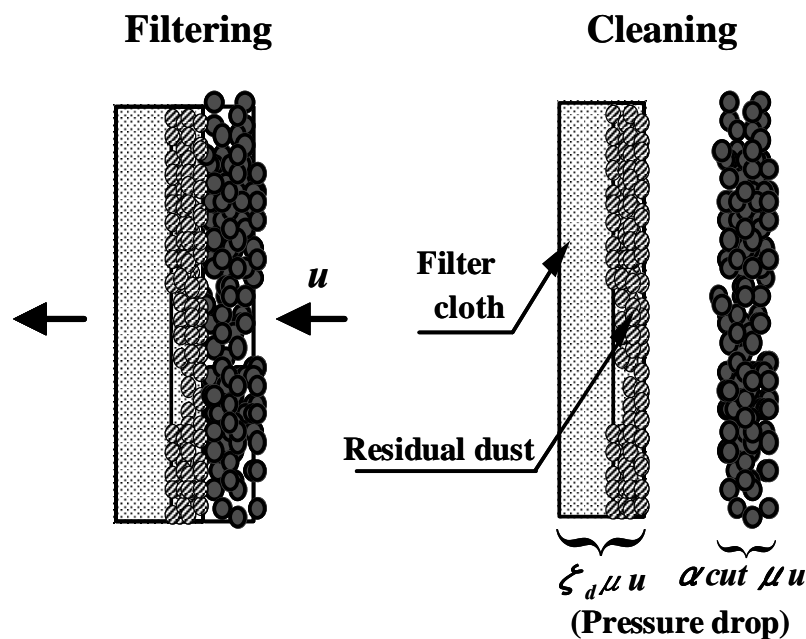


Fig.2.1 Schematic diagram of uniformed cleaning model

機械圧損は、流速と抵抗係数の異なる出入口部圧損と切換機器部圧損など複数項の和になるが、ここでは代表速度 v と機械抵抗係数 λ を用いて次式で表す。

$$\Delta P'' = \frac{1}{2} \lambda \gamma v^2 \quad (2.2)$$

機械抵抗係数 λ は、切換ダンパー、入口および出口部での平均抵抗係数で、通常は切換ダンパー部の通過流速を代表速度として決定される。機械特性である代表速度 v と濾過速度 u の間には $v = K u$ の関係がある。従って、バグフィルター本体の圧力損失 ΔP は次式で表現できる (Ikeno and Yoneda, 1983)。

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P' + \Delta P'' \\ &= (\zeta_d + \alpha c u t) \mu u + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

機械圧損を含めた多室(または多列)バグフィルターの本体圧力損失の模式図を Fig.2.2 に、本体圧力損失 ΔP および濾布圧損 $\Delta P'$ の時間変化図を Fig.2.3 に示す。

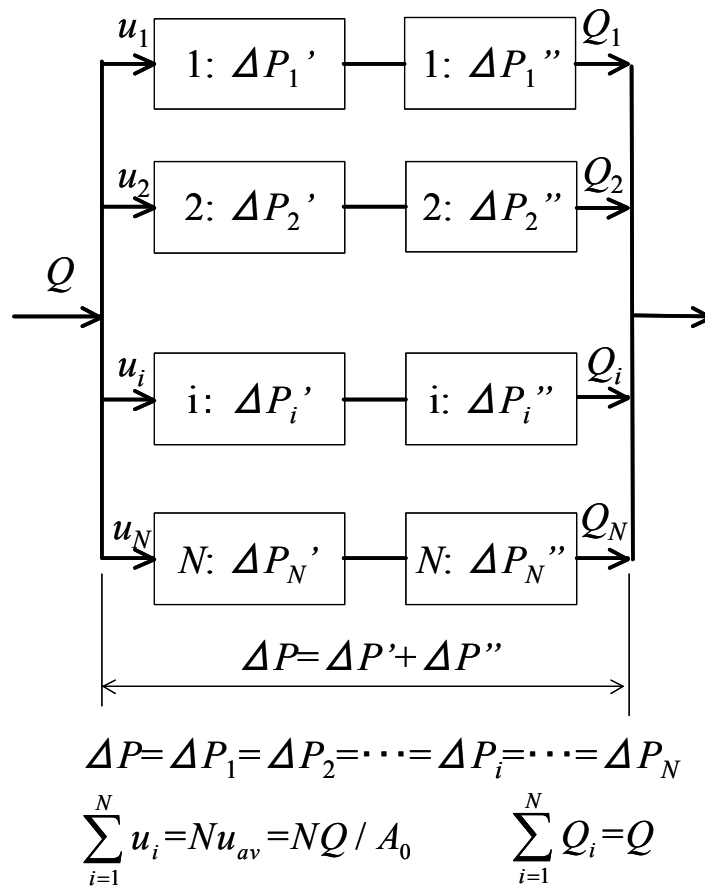


Fig.2.2 Schematic diagram of pressure drop for multi-compartment bag filter

いま、全室濾過時の第 i 室の濾過速度を u_i 、他の 1 室払落とし時の濾過速度を u'_i とし、第 1 室目を払落とししてから t 時間後における全室濾過時の本体圧力損失は

$$\Delta P_i = \left(\zeta_d + \alpha c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_1} u_j dt + \alpha c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_2} u'_j dt + \alpha c \int_0^{t_3} u_i dt \right) \mu u_i + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \quad (2.4)$$

と表せる。ここで t_1 は全室濾過時間、 t_2 は 1 室払落とし時間、 t_3 は $t_3 = t - (i-1)(t_1 + t_2) < t_1$ と表せる。従って、Eq. (2.4) の () 内の第 2 項から第 4 項は各々の時間中に捕集堆積する粉塵による圧力損失を表している。

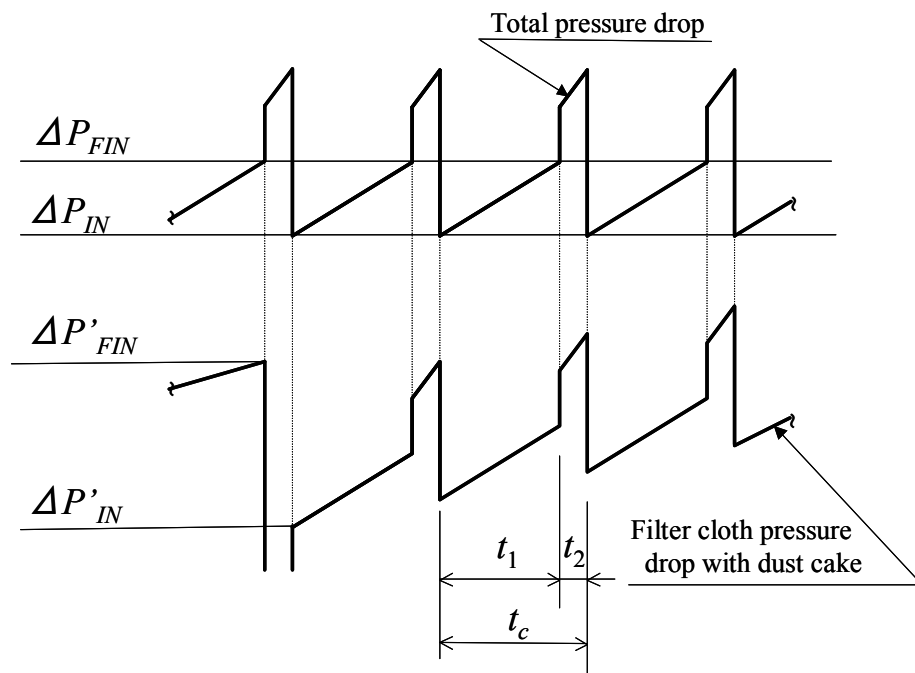


Fig.2.3 Conceptual diagram of pressure drop for operation cycle

ここで、 $0 \sim t_1$ 間の平均濾過速度を \bar{u}_i 、 $0 \sim t_2$ 間の平均濾過速度を \bar{u}'_i とすると次式を得る。

$$\Delta P_i = \left(\zeta_d + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j + \alpha c t_2 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}'_j + \alpha c \int_0^{t_3} u_i dt \right) \mu u_i + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \quad (2.5)$$

N 室構成の機械シェーキング式バグフィルターまたは N 列構成のパルスジェット式バグフィルターにおいては、各室または各列は並列配置であり全体の処理風量 Q は時間に関係なく一定であることから

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_1 = \Delta P_2 = \dots = \Delta P_i = \dots = \Delta P_N \\ Q &= \sum_{i=1}^N Q_i = \text{const.} \\ Nu_{av} &\equiv \sum_{i=1}^N \bar{u}_i = \sum_{i=1}^{N-1} \bar{u}'_i = (N-1) u'_{av} = \text{const.} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

の関係が成立つ。圧損パラメーター ζ_d 、 α 、 λ と平均濾過速度 u_{av} などの運転条件が既知であれば Eq.(2.4)を Eq.(2.6)の条件で数値シミュレーションを行うことで本体圧力損失 ΔP は算出できる。

2.3 圧力損失理論式

本節では、新たに払落とし直後の室を第1室、払落とし直前の室を第 N 室として、平均濾過速度 u_{av} と \bar{u}_N との関係および u_{av} に対する \bar{u}_i の分散 σ^2 を導入して圧力損失理論式を導出する。

まず u_{av} と \bar{u}_N との関係を $\bar{u}_N = m u_{av}$ とおくと次の関係式が成立つ。

$$Nu_{av} \equiv \sum_{i=1}^N \bar{u}_i = \sum_{i=1}^{N-1} \bar{u}_i + m u_{av}$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} \bar{u}_i = (N-m) u_{av} \quad (2.7)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} \bar{u}'_i = Nu_{av} \quad (2.8)$$

ここで、各室での速度比 \bar{u}'_i/\bar{u}_i が一定と仮定すると Eqs.(2.7),(2.8)より次式を得る。

$$\bar{u}_i = \frac{N}{N-m} \bar{u}_i \quad (2.9)$$

Eq.(2.5)において、 $t_3=0$ の時の ΔP は払落とし直後の初期圧損(最小圧損) ΔP_{IN} を示し、 $t_3=t_1$ の時の ΔP は払落とし直前の最終圧損(最大圧損) ΔP_{FIN} を示す(Fig.2.3 参照)。

2.3.1 初期圧損 ΔP_{IN}

Eq.(2.5)において、 $t_3=0$ とすると次式を得る。

$$\begin{aligned} (\Delta P_i)_{IN} &= \left(\zeta_d + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j + \alpha c t_2 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}'_j \right) \mu u_{iIN} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{iIN}^2 \\ &= \left(\zeta_d + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j + \alpha c t_2 \frac{N}{N-m} \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j \right) \mu u_{iIN} \\ &\quad + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{iIN}^2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

ここで、 $u_{iIN} = \bar{u}_i$ と近似し、上式を $i=1 \sim N$ まで辺々加え、平均濾過速度 u_{av} に対する \bar{u}_i の分散 σ^2 を考慮すると次式を得る(Appendix A 参照)。

$$\begin{aligned} \Delta P_{IN} &= \zeta_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{(Nt_c - mt_1)}{N-m} u_{av}^2 \left[N + \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right\} \right] \\ &\quad - \alpha c \mu \frac{(Nt_c - mt_1)}{N-m} u_{av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right\} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right\} \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.3.2 最終圧損 ΔP_{FIN}

同様に、 ΔP_{FIN} は Eq.(2.5)において $t_3=t_1$ とおくと次式を得る。

$$\begin{aligned} (\Delta P_i)_{FIN} &= \left(\zeta_d + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j + \alpha c t_2 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}'_j + \alpha c t_1 \bar{u}_i \right) \mu u_{iFIN} \\ &\quad + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{iFIN}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \left(\zeta_d + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^i \bar{u}_j + \alpha c t_2 \frac{N}{N-m} \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j \right) \mu u_{iFIN} \\
&\quad + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{iFIN}^2
\end{aligned} \tag{2.12}$$

ここでも、近似的に $u_{iFIN} = \bar{u}_i$ と置いて同様な式変形をすると次式を得る。

$$\begin{aligned}
\Delta P_{FIN} &= \zeta_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{(Nt_c - mt_1)}{N-m} u_{av}^2 \left[N + \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right\} \right] \\
&\quad - \alpha c \mu \frac{N}{N-m} t_2 u_{av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right\} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right\}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

2.4 圧力損失理論式と数値シミュレーション結果との比較

本節では、Eq.(2.4)に基づく数値シミュレーション結果と前節で示した ΔP_{IN} , ΔP_{FIN} に対する圧力損失理論式 Eqs.(2.11),(2.13)との比較をする。数値シミュレーションにおいて用いた圧損パラメータ ζ_d , α と機械圧損 $\Delta P''$ および平均濾過速度 u_{av} , 室数 N , 含塵濃度 c などの運転条件を Table 2.1 に示す。また、数値シミュレーションするときの Eq.(2.4)における差分時間は、

$$\text{全室濾過時 } \Delta t = t_1 / 5 \quad \text{他の1室払落とし時 } \Delta t = t_2 / 2$$

とし、収束条件は $(n-1)$ 巡目と n 巡目の ΔP_{FIN} の誤差が 0.5%以下となったときを定常運転に入ったものとした。差分時間を上記時間の $1/5$ ($t_1/25, t_2/10$) とした場合の数値シミュレーション結果と比較しても ΔP_{FIN} の差が 1%以下であったことから上記の分割数とした。数値シミュレーション結果で得られた ΔP_{IN} と ΔP_{FIN} の範囲は、

$$400 \text{ Pa} < \Delta P_{IN} < 1800 \text{ Pa} \quad 450 \text{ Pa} < \Delta P_{FIN} < 2200 \text{ Pa}$$

であり、実用バグフィルターの運転範囲にある。 m および σ^2/u_{av}^2 は

数値シミュレーションにより求められ、本数値シミュレーション条件においては下記の範囲であった。

$$0.59 < m < 0.9 \quad 0.005 < \sigma^2 / u_{av}^2 < 0.24$$

数値シミュレーション結果の一例を Fig.2.4 に示す。本図は、Fig.2.3 に示した圧力損失モデルにおける圧力損失の時間変化の特徴と良く一致している。

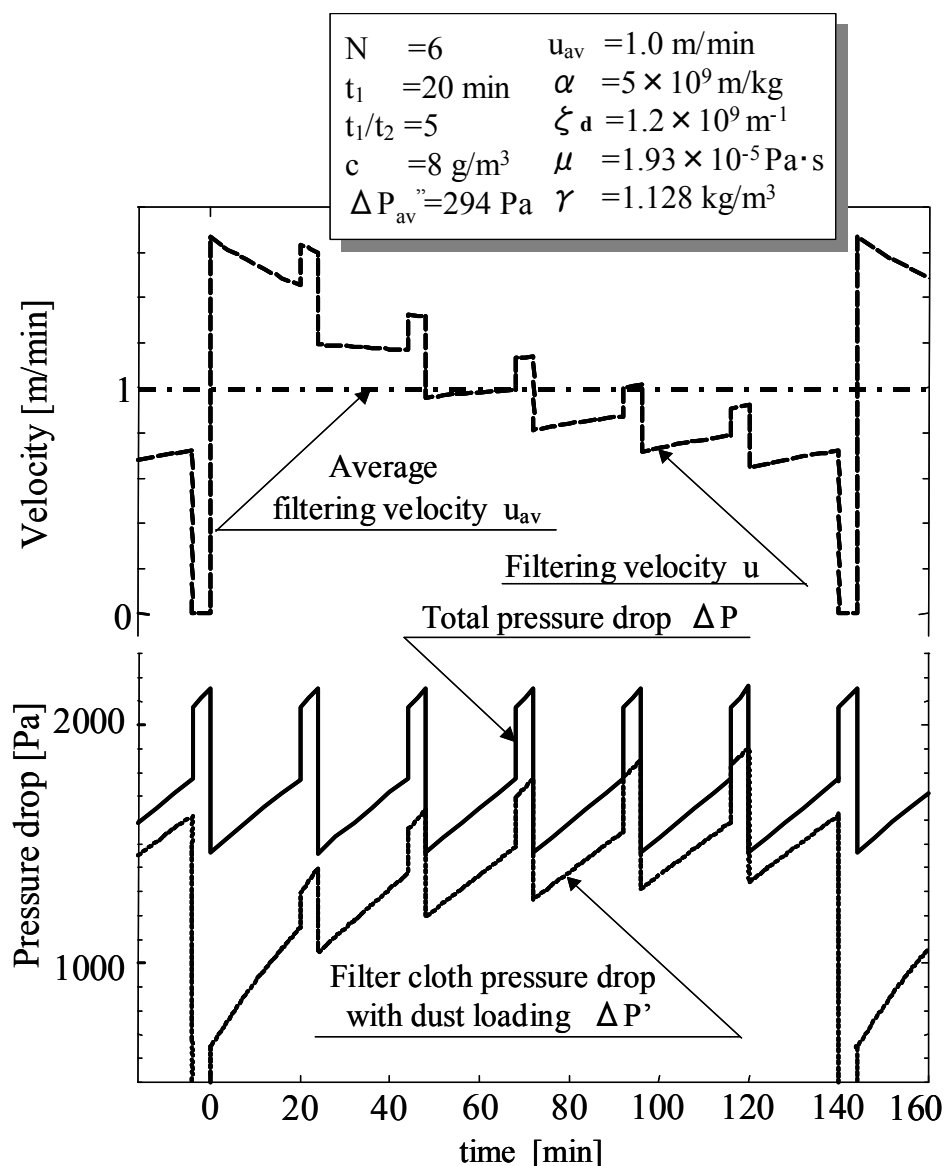


Fig.2.4 Numerical simulation results of ΔP , $\Delta P'$ and u for six-compartment bag filter

Table 2.1 Conditions of numerical calculation

ζ_d	[m ⁻¹]	1.2×10^9	t_1	[min]	10,20,30
α	[m/kg]	5.0×10^9	t_1/t_2	[-]	5,10,20
u_{av}	[m/min]	1.0	μ	[Pa·s]	1.93×10^{-5}
N	[-]	3,6,9	γ	[kg/m ³]	1.128
c	[g/m ³]	1.0~10	ΔP_{av}	[Pa]	0,147,294,588

2.4.1 初期圧損 ΔP_{IN}

Eq.(2.11)を平均濾過速度 u_{av} における汚れ濾布抵抗と機械抵抗の圧力損失の和 $\zeta_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \{1 + \sigma^2/u_{av}^2\}$ で無次元化すると次式を得る。

$$y_{IN} = 1 + \frac{1}{2} x \quad (2.14)$$

ここで、 y_{IN} と x は下記に示す無次元変数である。

$$y_{IN} = \frac{\Delta P_{IN} + \alpha c \mu \frac{N t_c - m t_1}{N - m} u_{av}^2 (1 + \sigma^2/u_{av}^2)}{\zeta_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 (1 + \sigma^2/u_{av}^2)} \quad (2.15)$$

$$x = \frac{\alpha c \mu \frac{N t_c - m t_1}{N - m} u_{av}^2 (N + 1 + \sigma^2/u_{av}^2)}{\zeta_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 (1 + \sigma^2/u_{av}^2)} \quad (2.16)$$

数値シミュレーション結果を Eqs.(2.14)~(2.16)に基づいて整理すると Fig.2.5 になる。 $x > 3$ における理論勾配 1/2 からのずれは、理論解析時に用いた $u_{iIN} = \bar{u}_i$ の近似と各室での速度比 \bar{u}_i/\bar{u}_i を一定と仮定した点にあると考えられる。

一方、機械圧損の無いバグフィルターはあり得ないことから機械

圧損 0 Pa 以外の数値シミュレーション結果の相関式を最小二乗法で求めると次式を得る。

$$y_{IN} = 1 + \frac{1}{2}x - 0.0038x^2 \quad (2.17)$$

本相関式と数値シミュレーション結果との平均誤差は、 $x=0\sim 5$ の範囲で $\pm 0.5\%$ である。

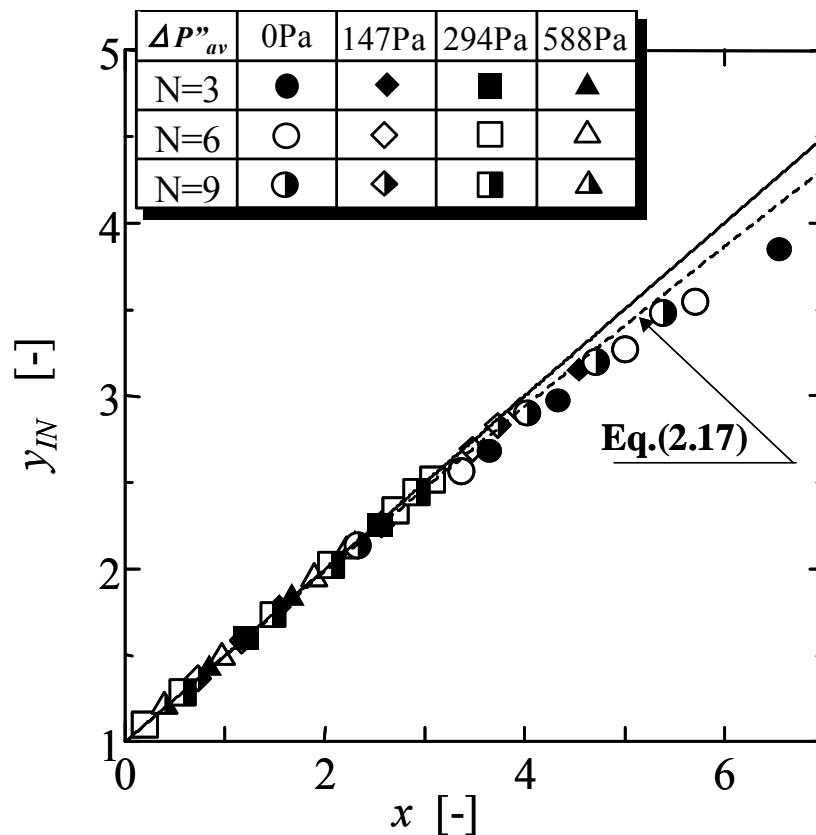


Fig.2.5 Correlation for ΔP_{IN}

2.4.2 最終圧損 ΔP_{FIN}

初期圧損 ΔP_{IN} の場合と同様に Eq.(2.13)を平均濾過速度 u_{av} における汚れ濾布抵抗と機械抵抗の圧力損失の和 $\xi_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \{1 + \sigma^2/u_{av}^2\}$ で無次元化し、Eq.(2.16)の x を用いて整理すると次式を得る。

$$y_{FIN} = 1 + \frac{1}{2} x \quad (2.18)$$

ここで、 y_{FIN} は次式に示す無次元変数で表す。

$$y_{FIN} = \frac{\Delta P_{FIN} + ac\mu \frac{Nt_2}{N-m} u_{av}^2 (1 + \sigma^2/u_{av}^2)}{\zeta_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 (1 + \sigma^2/u_{av}^2)} \quad (2.19)$$

Eqs.(2.16),(2.18),(2.19)に基づき数値シミュレーション結果を整理すると Fig.2.6 を得る。

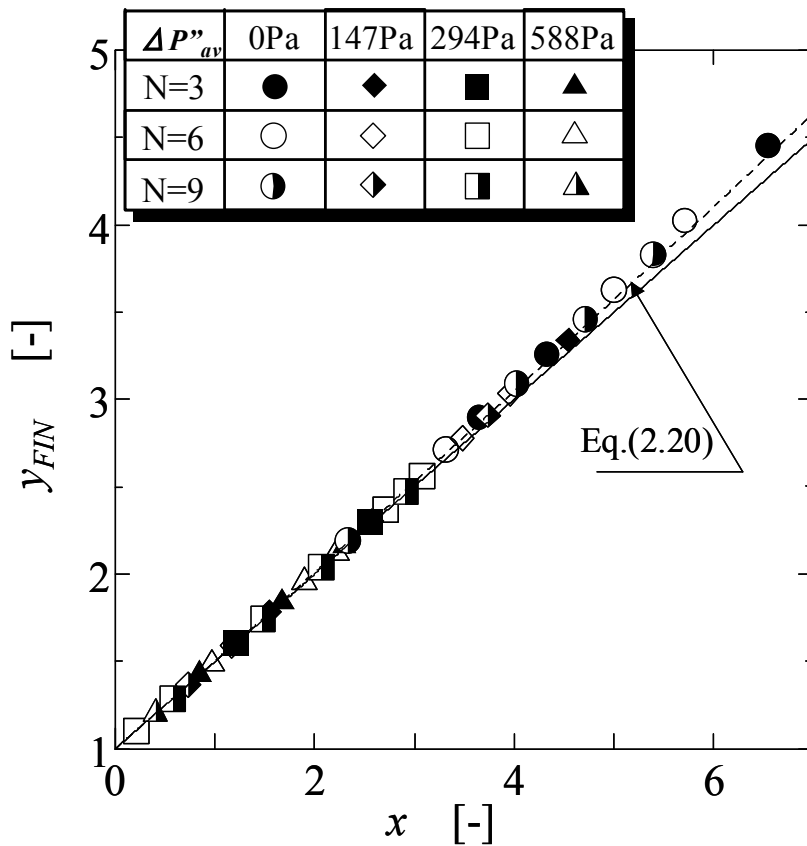


Fig.2.6 Correlation for ΔP_{FIN}

この場合も $x > 3$ において、理論解析時に用いた $u_{iFIN} = \bar{u}_i$ の近似と $\bar{u}'_i / \bar{u}_i =$ 一定の仮定による理論勾配 1/2 からのずれが生じている。ここでも機械圧損 0 Pa 以外の数値シミュレーション結果の相関を求めると次式を得る。

$$y_{\text{FIN}} = 1 + \frac{1}{2} x + 0.0029 x^2 \quad (2.20)$$

本相関式と数値シミュレーション結果との平均誤差は、 $x=0\sim 5$ の範囲で $\pm 0.7\%$ である。

2.4.3 $m(=\overline{u_N}/u_{\text{av}})$ および σ^2/u_{av}^2 の相関

前項で与えられた圧力損失相関式 Eq.(2.17)と Eq.(2.20)を用いて初期圧損 ΔP_{IN} および最終圧損 ΔP_{FIN} を推算しようとするとき、Table 2.1 で与えられる平均濾過速度 u_{av} と圧損パラメーター ζ_d 、 α 、 λ の値の他に、 m と σ^2/u_{av}^2 の値が必要となる。ここでは、Table 2.1 で示される条件から m と σ^2/u_{av}^2 を求める相関式の誘導を試みる。

第 N 室の最終圧損 $(\Delta P_{\text{FIN}})_N$ は、Eq.(2.12)より次式のように表せる。

$$\begin{aligned} (\Delta P_{\text{FIN}})_N = & \left(\zeta_d + \alpha c t_1 \sum_{i=1}^N \bar{u}_i + \alpha c t_2 \frac{N}{N-m} \sum_{i=1}^{N-1} \bar{u}_i \right) u_{\text{NFIN}} \mu \\ & + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{\text{NFIN}}^2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

ここでも理論解析時の近似と同様に $u_{\text{NFIN}} = \overline{u_N}$ と近似し、Eqs.(2.7), (2.8)の関係を用いて Eq.(2.21)を変形すると次式を得る。

$$(\Delta P_{\text{FIN}})_N = \left(\zeta_d + \alpha c N t_c u_{\text{av}} \right) m u_{\text{av}} \mu + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 (m u_{\text{av}})^2 \quad (2.22)$$

ここで、 $(\Delta P_{\text{FIN}})_N$ は ΔP_{FIN} に等しいので、Eq.(2.22)と Eq.(2.13)から、 m に対する次式の関係式を得る (**Appendix B**)。

$$\begin{aligned} m = 1 - \frac{1}{2} \frac{\alpha c (N t_c - t_1) u_{\text{av}} - \frac{\lambda \gamma K^2}{\mu} m (1-m) u_{\text{av}}}{\zeta_d + \alpha c (N t_c - t_1) u_{\text{av}} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{\text{av}}} \\ - \frac{1}{2} \frac{\alpha c u_{\text{av}} \left\{ N t_c - t_1 - \beta + \left(\frac{N t_c}{N-m} - \frac{2N-m}{N-m} t_1 - \frac{\lambda \gamma K^2}{\alpha c \mu} \right) \frac{\sigma^2}{u_{\text{av}}^2} \right\}}{\zeta_d + \alpha c (N t_c - t_1) u_{\text{av}} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{\text{av}}} \end{aligned} \quad (2.23)$$

ここで、 $\beta = [N(N-1)t_c + \{2(N+m^2) - m(3N+1)\}t_1] / (N-m)$ である。さらに、Eq.(2.23)の右辺第3項を無視小と仮定すると、次式のように簡略化される。

$$m = 1 - \frac{1}{2} P_\alpha^* + P_\lambda^* m(1-m) \quad (2.24)$$

ここで、無次元粉塵層圧損 P_α^* および無次元機械圧損 P_λ^* はそれぞれ次式で定義され、0~1の間の値をとる変数である。

$$P_\alpha^* = \frac{\alpha c(Nt_c - t_1)u_{av}}{\zeta_d + \alpha c(Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{av}} \quad (2.25)$$

$$P_\lambda^* = \frac{\frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{av}}{\zeta_d + \alpha c(Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{av}} \quad (2.26)$$

さらに、Eq.(2.24)の m の表現を右辺の m に再代入すると

$$\begin{aligned} m &= 1 - \frac{1}{2} P_\alpha^* + P_\lambda^* \left\{ 1 - \frac{1}{2} P_\alpha^* + P_\lambda^* m(1-m) \right\} \left\{ \frac{1}{2} P_\alpha^* - P_\lambda^* m(1-m) \right\} \\ &= 1 - \frac{1}{2} P_\alpha^* \left\{ 1 - P_\lambda^* \left(1 - \frac{1}{2} P_\alpha^* \right) \right\} + P_\lambda^{*2} m(1-m) \left\{ 1 - P_\lambda^* m(1-m) \right\} \end{aligned} \quad (2.27)$$

となる。 P_λ^* , m は1以下であることから高次の第3項を無視すると、次式のように簡略化される。

$$m = 1 - \frac{1}{2} P_\alpha^* \left\{ 1 - P_\lambda^* \left(1 - \frac{1}{2} P_\alpha^* \right) \right\} \quad (2.28)$$

Fig.2.7 には、数値シミュレーションから得られた m の値を Eq.(2.28)に従ってプロットした。これより m 値は Eq.(2.28)で精度よく相関出来ることが分かる。

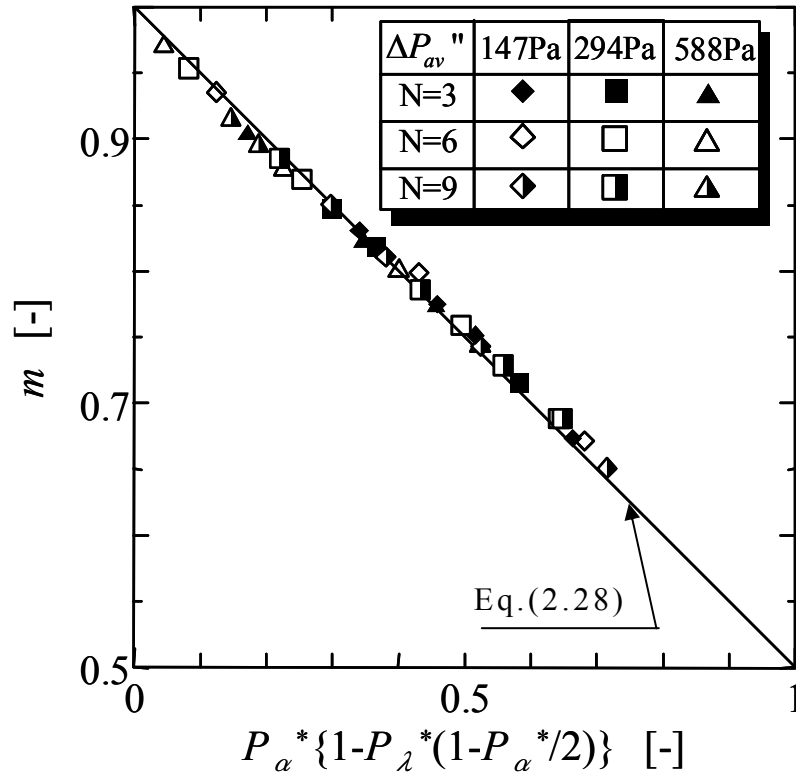


Fig.2.7 Correlation for m ($= \overline{u_N} / u_{av}$)

一方、数値シミュレーションから得られた σ^2 / u_{av}^2 も、 m 値の相関に用いた変数 $P_\alpha^* \{1 - P_\lambda^* (1 - P_\alpha^* / 2)\}$ を用いて相関した。その相関結果を Fig.2.8 に示す。これより σ^2 / u_{av}^2 値は次式で良好に相関できることが分かった。

$$\sigma^2 / u_{av}^2 = 0.34 [P_\alpha^* \{ 1 - P_\lambda^* (1 - \frac{1}{2} P_\alpha^*) \}]^3 \quad (2.29)$$

Table 2.1 で示される条件のもとで、Eq.(2.28)と Eq.(2.29)を用いて Eq.(2.17)および Eq.(2.20)から推算した初期圧損 $\Delta P_{IN,est}$ および最終圧損 $\Delta P_{FIN,est}$ を、数値シミュレーションで得られた初期圧損 $\Delta P_{IN,sim}$ および最終圧損 $\Delta P_{FIN,sim}$ と比較した結果を Fig.2.9.および Fig.2.10 に示す。圧力損失はよい精度（平均誤差 $\pm 0.51\%$ および $\pm 0.21\%$ ）で推算できることが分かる。

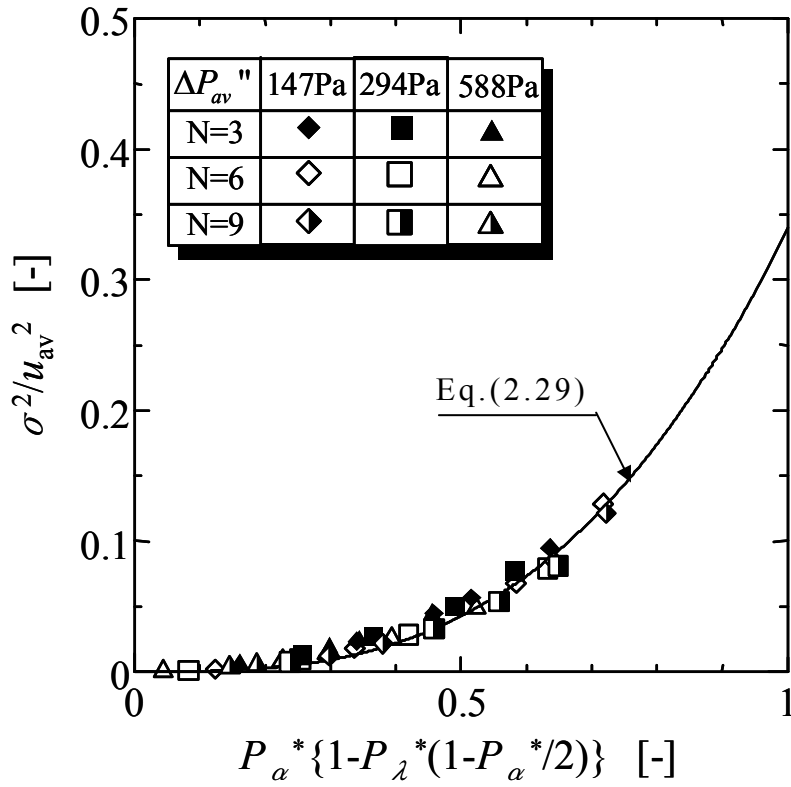


Fig.2.8 Correlation for σ^2/u_{av}^2

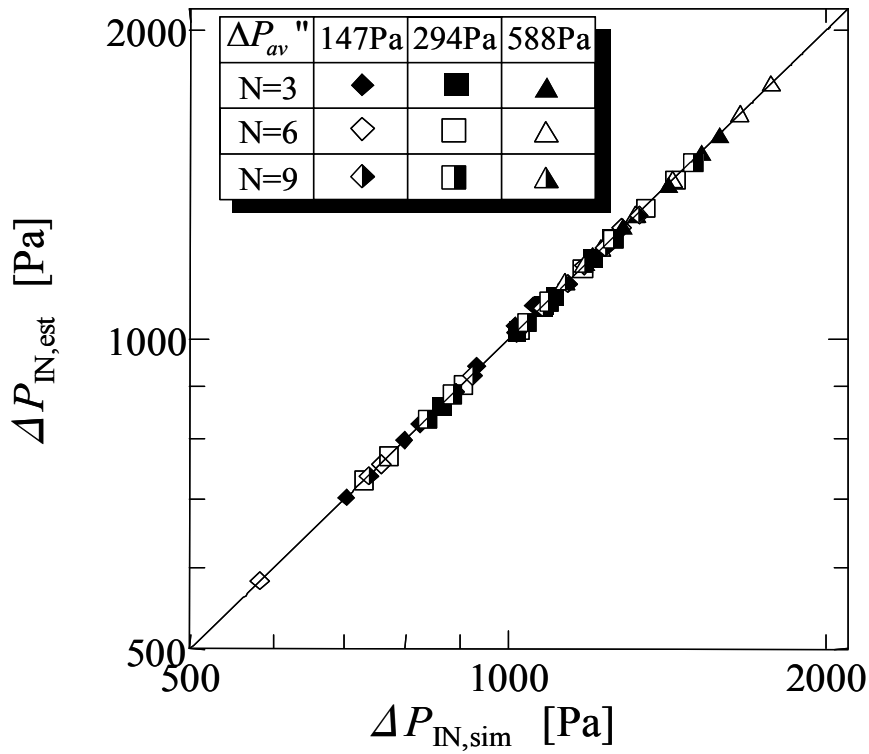


Fig.2.9 Comparison between simulated and estimated values for ΔP_{IN}

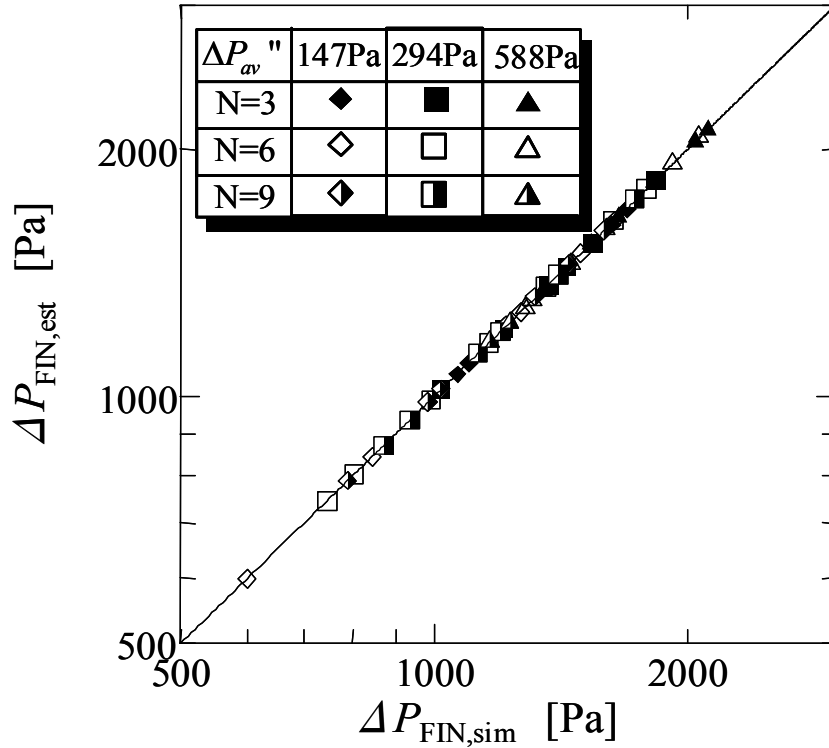


Fig.2.10 Comparison between simulated and estimated values for ΔP_{FIN}

2.5 圧力損失相関式からの圧損パラメーターおよび平均濾過速度の推算

2.5.1 圧損パラメーター ζ_d および α の推算

初期圧損 ΔP_{IN} 、最終圧損 ΔP_{FIN} および平均濾過速度 u_{av} と機械圧損パラメーター λK^2 を、圧力損失相関式 Eqs.(2.17),(2.20) および m と σ^2/u_{av}^2 の相関式 Eqs.(2.28),(2.29) に与えて、圧損パラメーターである汚れ濾布抵抗 ζ_d および比抵抗 α を推算したときの推算値の精度を検討する。この場合、収束計算は ζ_d と α の2変数を同時に求める必要があることから、その目的関数 ϕ には次式を用いた。

$$\phi = (\Delta P_{IN,sim} - \Delta P_{IN,est})^2 + (\Delta P_{FIN,sim} - \Delta P_{FIN,est})^2 \quad (2.30)$$

ここで、 $\Delta P_{IN,sim}$ と $\Delta P_{FIN,sim}$ は Table 2.1 の条件のもとで数値シミュレーションされた値であり、 $\Delta P_{IN,est}$ と $\Delta P_{FIN,est}$ はそれぞれ Eq.(2.17)と Eq.(2.20)から推算された値を表す。収束計算には Simplex 法を用い、目的関数 ϕ が 10^{-5} Pa^2 以下の値となるまで収束計算を繰り返した。

推算された汚れ濾布抵抗 $\zeta_{d,est}$ および比抵抗 α_{est} の値を、 m と σ^2/u_{av}^2 の相関に用いた変数 $P_\alpha^* \{1 - P_\lambda^* (1 - P_\alpha^*/2)\}$ に対してプロットした結果を Fig.2.11 と Fig.2.12 に示した。Table 2.1 に示す数値シミュレーションに用いた ζ_d および α の値はそれぞれ $0.12 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$ および $0.5 \times 10^{10} \text{ m/kg}$ であることから、推算された $\zeta_{d,est}$ および α_{est} の値はほぼ真値（数値シミュレーションに用いた値）の周りに分布している。特に、横軸の変数 $P_\alpha^* \{1 - P_\lambda^* (1 - P_\alpha^*/2)\}$ が 0.3 以下の条件では、 ζ_d および α は $\pm 5\%$ 以下の誤差で推算できることが分かった。

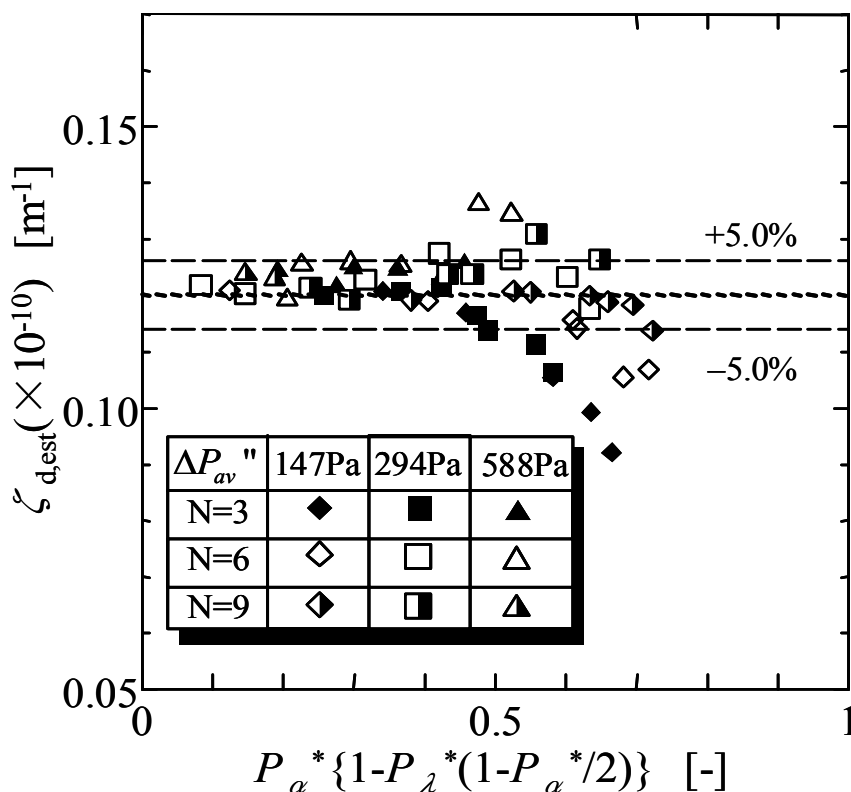


Fig.2.11 Estimation values of ζ_d

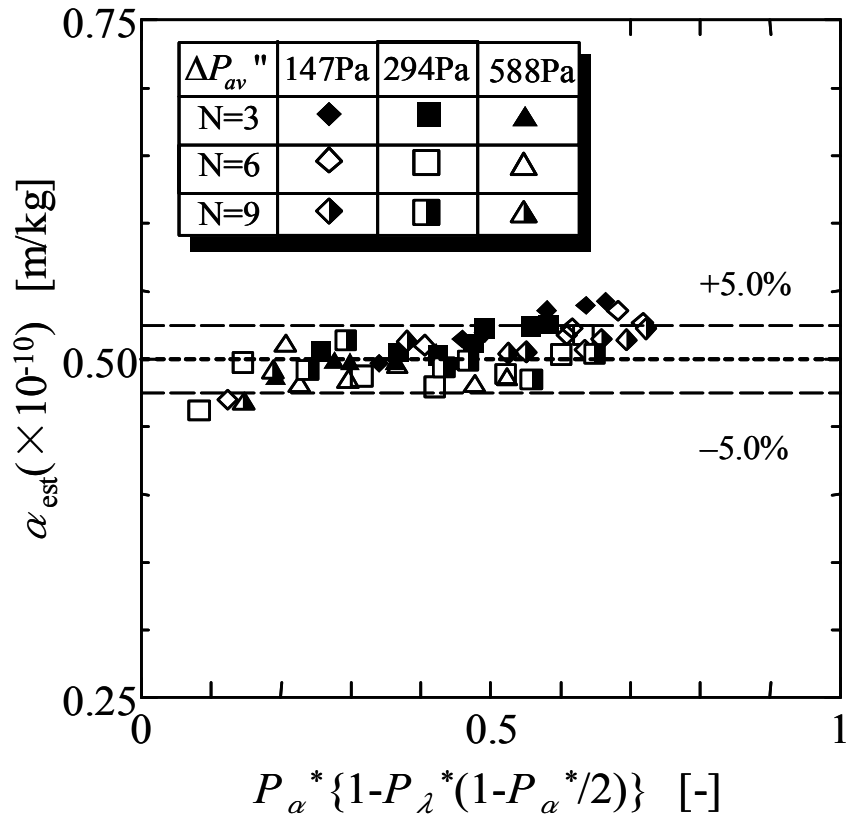


Fig.2.12 Estimation values of α

Fig.2.12 において横軸の値が極端に 0 に近い値で誤差の大きな推算値が見られるのは、 $\Delta P_{IN,sim}$ 値と $\Delta P_{FIN,sim}$ 値の差が極端に小さくなり、推算における有効数字の桁落ちが生じたものである。一方、全推算値の平均誤差は ζ_d に対して $\pm 4.7\%$ 、 α に対して $\pm 3.3\%$ であった。

ここで、横軸の変数 $P_\alpha^* \{1 - P_\lambda^* (1 - P_\alpha^* / 2)\}$ が小さい濾過操作とは、 P_α^* が小さいか P_λ^* が大きいことを意味しており、濾過操作としては、圧損パラメーター ζ_d と α の小さな粉塵を濾過する場合や頻繁な払落とし操作を行って捕集堆積する粉塵層の圧力損失が大きくなる場合あるいは機械圧損が大きな装置を用いて濾過操作を行う場合に相当する。一方、Fig.2.7 および Fig.2.8 から、横軸の変数 $P_\alpha^* \{1 - P_\lambda^* (1 - P_\alpha^* / 2)\}$ が小さくなるに従って m が 1 に、 σ^2 / u_w^2 が 0 に近づくとこの濾過操作を意味している。換言すれば、多室バグフィルターの前後における本体圧力損失の変動幅が小さく、

各室の濾過速度に大きな差異がない濾過操作の場合に相当することを意味している。

2.5.2 平均濾過速度 u_{av} の推算

前項と同様に、最終圧損 ΔP_{FIN} と圧損パラメーター $\zeta_d, \alpha, \lambda K^2$ を、圧力損失相関式 Eq.(2.20) および m と σ^2/u_{av}^2 の相関式 Eq.(2.28) と Eq.(2.29) に与えて、平均濾過速度 u_{av} を推算した場合の推算値の精度を検討する。この場合、収束計算の目的関数 ϕ は次式とした。

$$\phi = (\Delta P_{FIN, sim} - \Delta P_{FIN, est})^2 \quad (2.31)$$

ここで、 $\Delta P_{FIN, sim}$ は Table 2.1 の条件のもとで数値シミュレーションされた値であり、 $\Delta P_{FIN, est}$ は Eq.(2.20) から推算された値を表す。ここでも、収束計算は目的関数 ϕ が 10^{-5} Pa^2 以下の値となるまで繰り返した。推算された平均濾過速度 $u_{av, est}$ の値は、変数 $P_\alpha^* \{1 - P_\lambda^* (1 - P_\alpha^*/2)\}$ に対してプロットし、その結果を Fig.2.13 に示す。

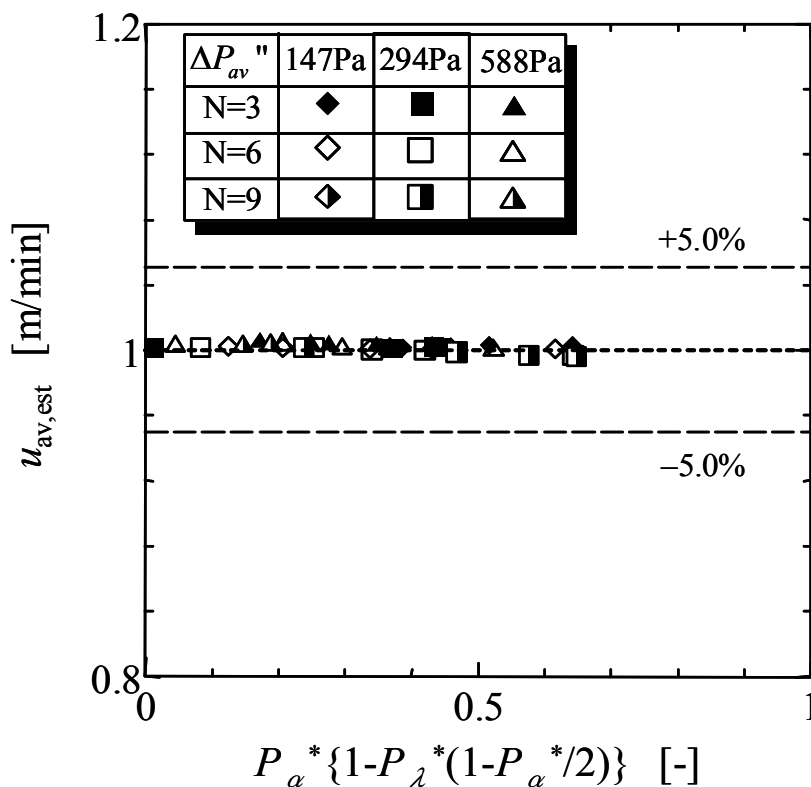


Fig.2.13 Estimation values of u_{av}

これより、Table 2.1 に示す濾過条件のもとで、Eqs.(2.28),(2.29)の補助のもと、Eq.(2.20)から推算された平均濾過速度の推算値 $u_{av,est}$ は、数値シミュレーションに用いた平均濾過速度 1.0m/min と全濾過条件においてよい精度（平均誤差±0.20%）で一致することが分かった。

2.6 圧力損失相関式の活用法

前節で導出した圧力損失相関式 Eq.(2.17)と Eq.(2.20)および m と σ^2/u_{av}^2 の相関式 Eqs.(2.28),(2.29)は、以下に示すような工業的活用法がある。

- ① 平均濾過速度などの運転条件を変える時に圧力損失が推算でき、必要な運転動力の設定ができる。
- ② 圧損パラメーターが既知の集塵対象において、許容圧損以下で運転できる濾過速度すなわち装置の大きさが決定できる。
- ③ 実験および実機の運転データから濾過物性である圧損パラメーター ζ_d と α が算出できる。

特に圧損パラメーターの算出は、粉体物性値および濾布物性値との関連を追求する意味で有用な活用法といえる。

Table 2.1 に示した数値シミュレーション条件値で、機械圧損のある場合における各々の変数を算出した場合の相関式による計算値と数値シミュレーション値との誤差は以下のものであった。

ΔP_{FIN} の算出：平均濾過速度など全ての運転条件を既知として Eqs.(2.20),(2.28),(2.29)で算出した ΔP_{FIN} と数値シミュレーションで求めた ΔP_{FIN} との平均誤差は±0.21%であった。

u_{av} の算出：平均濾過速度以外の運転条件と ΔP_{FIN} を既知として Eqs.(2.20),(2.28),(2.29)から算出した u_{av} と数値シミュレーション値との平均誤差は±0.20%であった。

ζ_d, α の算出： $\Delta P_{IN}, \Delta P_{FIN}$ と全ての運転条件を既知として Eqs.(2.17),(2.20)および Eqs.(2.28),(2.29)から算出した ζ_d, α と数値シミュレーション値との平均誤差は、 ζ_d で 4.7%, α に対しては±3.3%であった。

2.7 簡易圧力損失相関式

2.7.1 初期圧損 ΔP_{IN}

Eq.(2.17)で、 $m = 1$, $\sigma^2/u_{av}^2 = 0$ と簡単化した場合の相関を **Fig. 2.14** に示す。機械圧損 0 Pa の場合を除いた数値シミュレーション結果で相関式を求めると次式を得る。

$$Y_{IN} = 1 + \frac{1}{2} X - 0.0043 X^2 \quad (2.32)$$

ここで、 Y_{IN} と X は下記に示す無次元変数である。

$$Y_{IN} = \frac{\Delta P_{IN} + \alpha c \mu \frac{N t_c - t_1}{N - 1} u_{av}^2}{\zeta_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2} \quad (2.33)$$

$$X = \frac{\alpha c \mu \frac{N t_c - t_1}{N - 1} u_{av}^2 (N + 1)}{\zeta_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2} \quad (2.34)$$

機械圧損 0 Pa の場合を除いた数値シミュレーション結果と相関式の平均誤差は、 $X=0 \sim 5$ の範囲で±0.7%であり、Eq.(2.17)との差は殆どみられない。

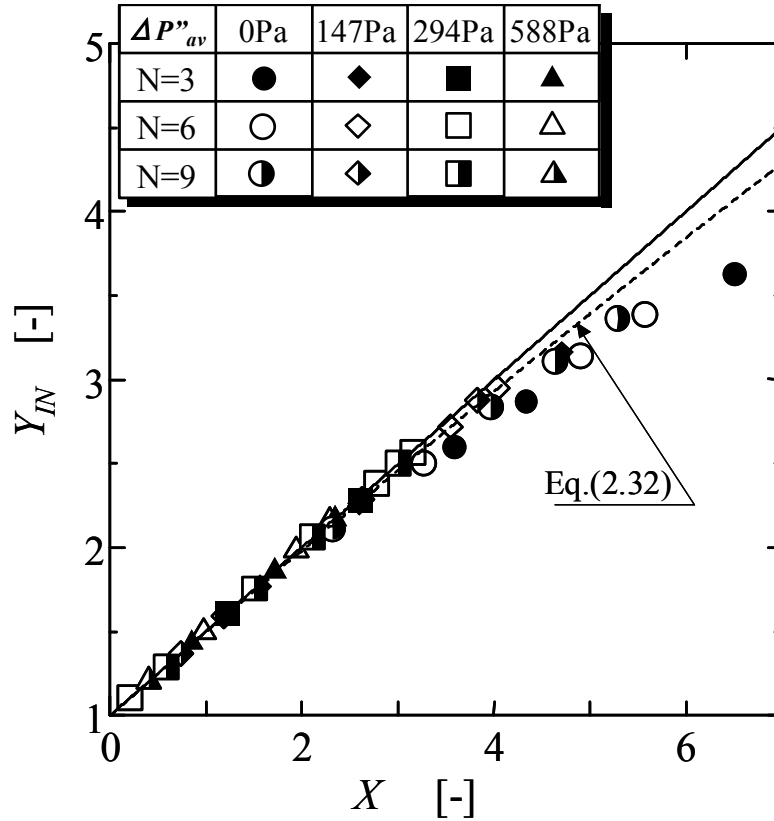


Fig.2.14 Simplified correlation for ΔP_{IN}
 $(m=1, \sigma^2 / u_{av}^2 = 0)$

2.7.2 最終圧損 ΔP_{FIN}

Eq.(2.20)を $m = 1$, $\sigma^2 / u_{av}^2 = 0$ と簡単化すると Fig.2.15 を得、機械圧損 0 Pa の場合を除いた相関式は次式となる。

$$Y_{FIN} = 1 + \frac{1}{2} X + 0.0060 X^2 \quad (2.35)$$

ここで、 Y_{FIN} は次に示す無次元変数で表す。

$$Y_{FIN} = \frac{\Delta P_{FIN} + \alpha \mu \frac{N t_2}{N-1} u_{av}^2}{\zeta_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2} \quad (2.36)$$

また、 X は Eq.(2.34)で表わされる。機械圧損 0 Pa の場合を除いた数値シミュレーション結果と相関式の平均誤差は、 $X=0 \sim 5$ の範囲

で Eq.(2.20)の場合の $\pm 0.21\%$ に対し、Eq.(2.35)の場合は $\pm 1.2\%$ と大きな差はない。また、前節で述べた u_{av} , ζ_d , α の算出に対しても各々 $\pm 0.3\%$, $\pm 5.5\%$, $\pm 3.5\%$ の平均誤差で算出できる。

m , σ^2/u_{av}^2 を含まない Eq.(2.32)と Eq.(2.35)は、本体圧損を推算するうえで有用といえる。他方、Eq.(2.32)と Eq.(2.35)の二次補正項のない相関式を用いた場合には、 ΔP_{FIN} と u_{av} に対しては平均誤差 $\pm 3\%$ で求められるが ζ_d と α に対しては平均誤差が各々 $\pm 18\%$, $\pm 15\%$ となり実用的とは言えない。

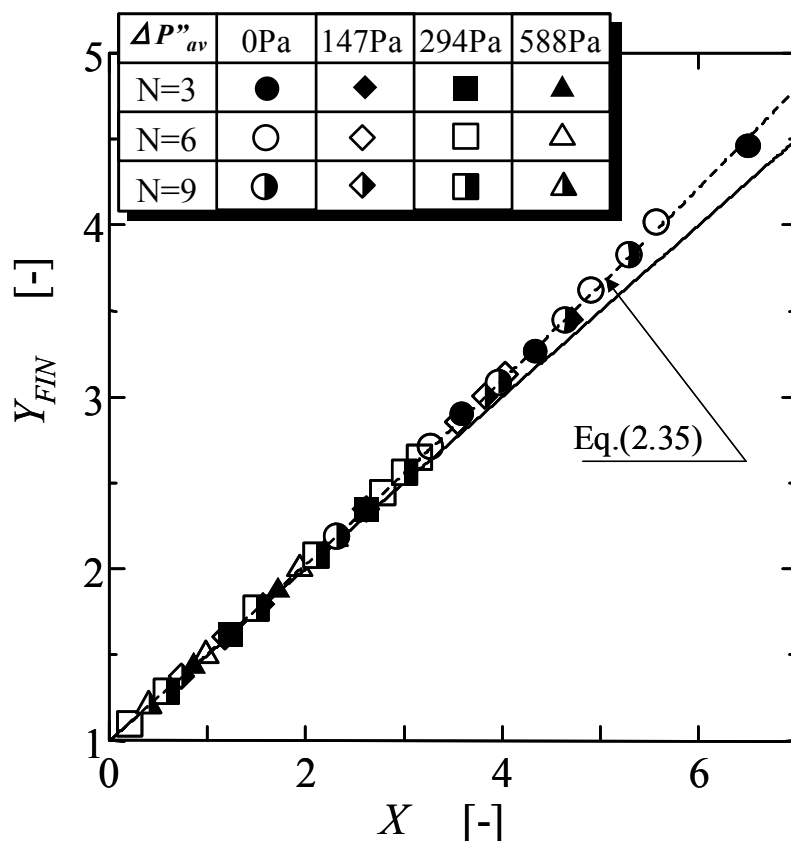


Fig.2.15 Simplified correlation for ΔP_{FIN}
 $(m=1, \sigma^2/u_{av}^2=0)$

2.8 実測値との比較

前節にて、圧損パラメーターが実用的な精度で算出できることを示したが、本節では連続運転における実機の圧力損失挙動に対し、求めた圧損パラメーターによる数値シミュレーション結果と実測値とを比較することで、「一様払落としモデル」を評価する。

2.8.1 実験装置および実験方法

実験装置図を Fig.2.16 に、実験条件の詳細を Table 2.2 に示す。集塵機にはパルスジェット式バグフィルターを用い、集塵機②内には目付重量 600 ± 20 g/m² のポリエステルフェルト濾布(径 165mm,長さ 500mm,濾過面積 0.259m²)が 2 本/列で 3 列設置されており、その総濾過面積は 1.554m² である。試験粉体は集塵機前に設けた配管にテーブルフィーダー①で定量供給され、集塵機にて捕集される。濾過操作中の気体流量を一定に保つため、出口配管途中に設けたオリフィス流量計③にて流量を常時測定し、インバーターにてブロワー④の回転数を制御する。また、集塵機の圧力損失は差圧変換器⑤を用いて電気信号(4~20mA)に変換し、パソコン⑥を用いてその時間変化を記録する。なお、図には示されていないが集塵機には粉塵払落としのためコンプレッサーとパルスジェット装置が設置されている。試験粉体には炭酸カルシウムを用いた。原粉および濾布に付着した粉の 50%粒子径、比表面積径および平均体積径を Table 2.3 に示す。粉体の粒度分布測定にはレーザー回析法(HORIBA LA-500)を用いた。

テーブルフィーダーで炭酸カルシウムを 2.6kg/h で定量的に切り出し、一定時間ごとにパルスジェットによる払落とし操作を行いながら本体圧力損失 ΔP の払落とし周期内での時間変化が十分に定常化するまで実験を継続し、その時間変化曲線を測定した。本実験で

使用した集塵機には濾布が2本／列で3列設置されていることから、連続運転におけるコンパートメント数は $N=3$ で固定されている。その濾過面積は1列あたり 0.518m^2 である。平均濾過速度 u_{av} は $1.5\text{m}/\text{min}$ で実験を行った。圧縮エアによるパルスジェットは、エア圧力を 0.65MPa 、払落とし時間を 0.1s 、全列濾過時間(払落とし操作の列送り時間)は 320s と固定した。濾布に捕集された粉塵量に基づく含塵濃度 c は、予め回分運転実験で測定した濾布への到達率 0.68 [= (濾布に捕集された粉塵量) / (供給した総粉塵量)] が連続運転でも変わらないと仮定して、含塵濃度 c を供給量基準の含塵濃度と回分運転で実測した濾布への到達率の積とした。

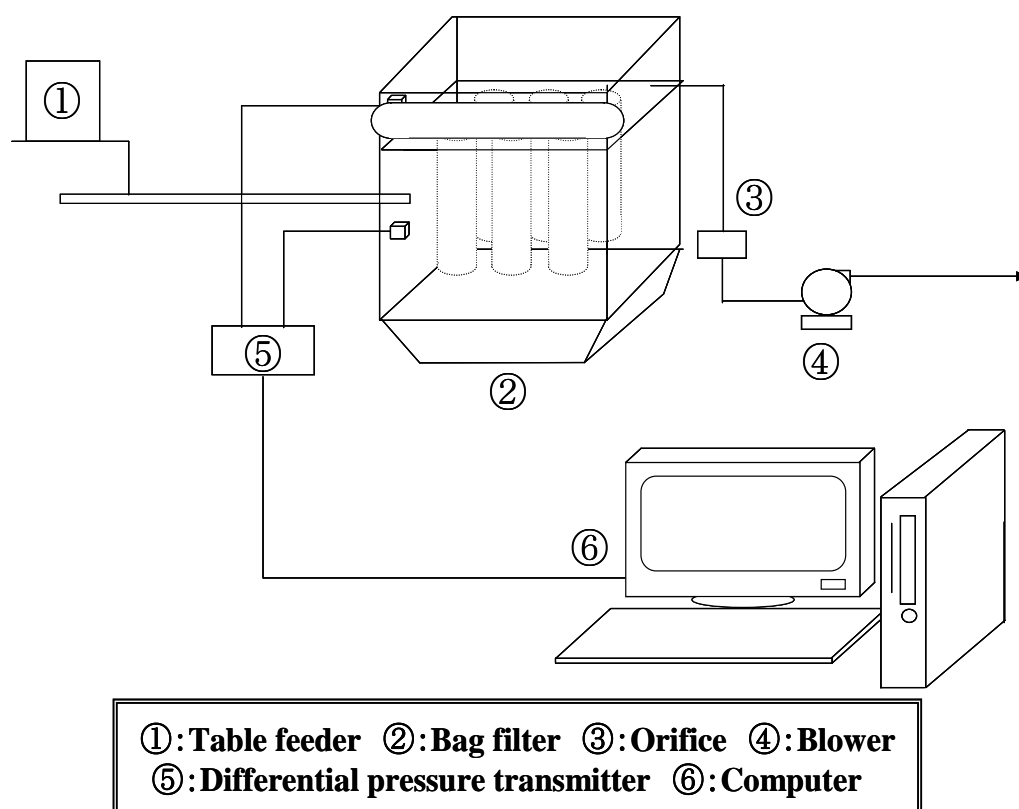


Fig.2.16 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 2.2 Experimental conditions

u_{av}	[m/min]	1.5	c	[g/m ³]	7.59
N	[-]	3	μ	[Pa·s]	1.87×10^{-5}
t_1	[s]	320	γ	[kg/m ³]	1.185
t_2	[s]	0.1	ΔP_{av}	[Pa]	2.39

Table 2.3 Characteristic diameters of CaCO₃ powder

	D_{50}	D_s	D_v
Original powder	9.85 μ m	2.64 μ m	0.69 μ m
Powder on filter cloth	5.72 μ m	1.86 μ m	0.60 μ m

2.8.2 結果および考察

Table 2.2 に示した実験条件で連続運転を行い、定常化した本体圧力損失の時間変化挙動を Fig.2.17 に実線で示す。実験から得られた初期圧損 ΔP_{IN} (266Pa)と最終圧損 ΔP_{FIN} (552Pa)を圧力損失相関式 Eqs.(2.17),(2.20)および m と σ^2/u_w^2 の相関式 Eqs.(2.28),(2.29)に与えて得られた圧損パラメーター ζ_d と α を下記に示す。

$$\zeta_d = 0.190 \times 10^9 \text{ m}^{-1} \quad \alpha = 7.35 \times 10^9 \text{ m/kg}$$

この圧損パラメーター ζ_d と α を用いた数値シミュレーションにより得られた本体圧力損失の時間変化挙動を同図に破線で示す。圧力損失の測定に使用した空圧機器には応答遅れが生じるため、数値シミュレーションには時定数 1.0s の一次応答遅れを考慮した。

最終圧損 ΔP_{FIN} は実測値 552Pa に対して計算値 551Pa と精度良く得られたが、初期圧損 ΔP_{IN} については実測値 266Pa と計算値 236Pa には 13%の誤差が生じた。また、本体圧力損失の時間変化挙動についても実験値と計算値は大きく異なった結果を得た。この原因は、濾布上に付着した粉塵層が一様に払落とされているという仮定にあると考えられる。この点については、第4章で述べる。

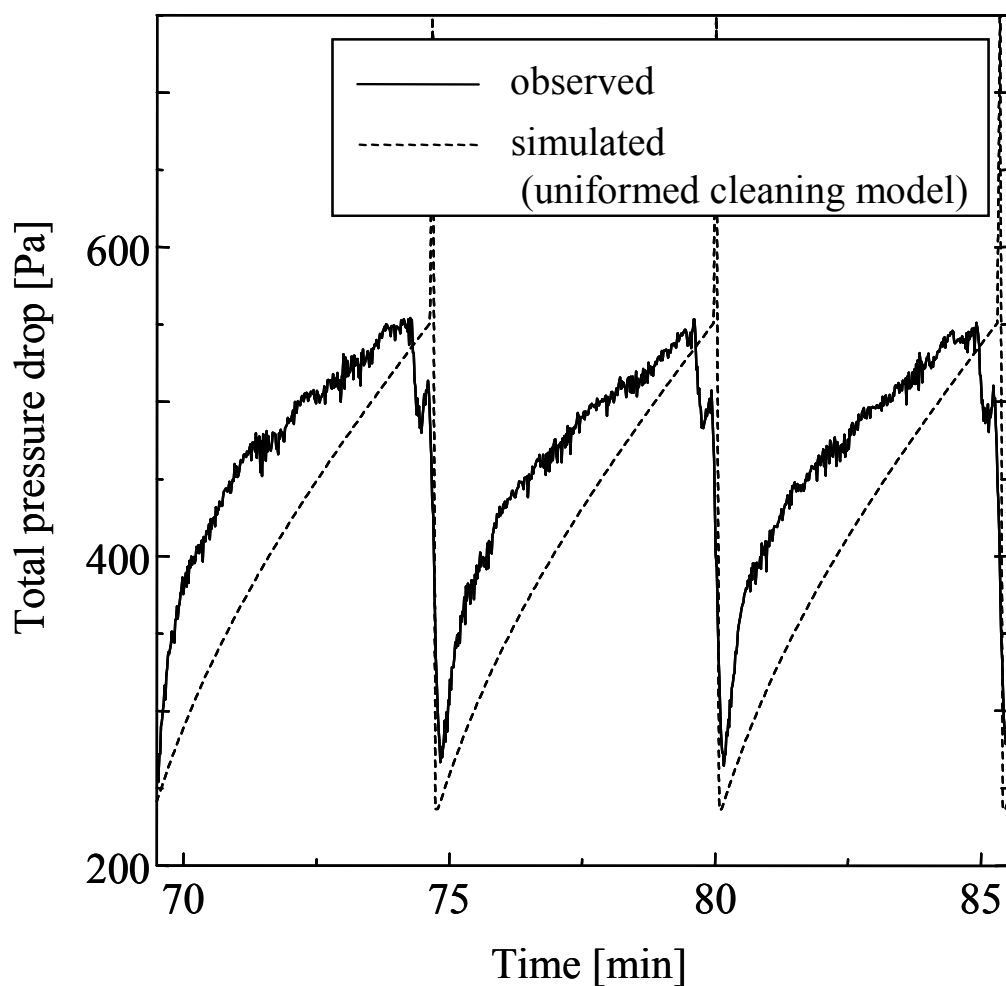


Fig.2.17 Behavior of total pressure drop for calcium carbonate by continuous filtering operation in 3-compartment bag filter and the simulation results

2.9 結 言

連続運転型バグフィルターに必要な不可欠な機械圧損を加えた本体圧力損失モデルを用いて、機械圧損による本体圧損および濾布圧損への影響を検討し、次のような結論を得た。

1. 機械圧損をとり入れた本体圧力損失の理論解析において、払落とし直前の第 N 室の時間平均の濾過速度 \bar{u}_N と室平均の濾過速度 u_{av} との比 $m(= \bar{u}_N/u_{av})$ および u_{av} に対する各室の時間平均の濾過速度 \bar{u}_i の分散値 σ^2/u_{av}^2 を用いて、本体初期圧損 ΔP_{IN} と本体最終圧損 ΔP_{FIN} に対する圧力損失理論式を導出した。
2. 圧力損失理論式と数値シミュレーション結果との比較により理論式からのずれを考慮した圧力損失相関式を導出するとともに、 $m(= \bar{u}_N/u_{av})$ および分散値 σ^2/u_{av}^2 の相関式を導出した。これにより、数値シミュレーションを行うことなく本体圧力損失、許容圧損値に対する最大濾過速度および圧損パラメーター ζ_d と α が算出できることを示した。
3. $m = 1$, $\sigma^2/u_{av}^2 = 0$ と単純化した場合の簡易圧力損失相関式においても本体圧力損失、許容圧損値に対する最大濾過速度および圧損パラメーター ζ_d と α が、実用上許容される精度で算出できることを示した。

Nomenclature

A_0	= total filter cloth area	[m ²]
c	= dust concentration at inlet of filter cloth	[kg/m ³]
D_{50}	= median diameter	[m]
D_s	= specific surface area diameter	[m]
D_v	= mean volume diameter	[m]
m	= ratio of average filtering velocity of the N-th compartment just before cleaning operation to that of all compartments	[—]
N	= number of compartments	[—]
Q	= total gas flow rate	[m ³ /s]
Q_i	= gas flow rate in the i -th compartment	[m ³ /s]
t	= time	[s]
t_1	= filtering time	[s]
t_2	= cleaning time	[s]
t_3	= filtering time [= $t - (i - 1) (t_1 + t_2)$]	[s]
t_c	= partial period time (= $t_1 + t_2$)	[s]
u	= filtering velocity for filtering operation	[m/s]
u'	= filtering velocity for cleaning operation	[m/s]
u_{av}	= average filtering velocity for filtering operation	[m/s]
u'_{av}	= average filtering velocity for cleaning operation	[m/s]
\overline{u}_i	= filtering velocity in the i -th compartment averaged over filtering operation	[m/s]
\overline{u}'_i	= filtering velocity in the i -th compartment averaged over cleaning operation	[m/s]
u_{iFIN}	= filtering velocity in the i -th compartment just before cleaning	[m/s]

u_{iIN}	= filtering velocity in the i -th compartment just after cleaning	[m/s]
\bar{u}_N	= filtering velocity in the N -th compartment just before cleaning averaged over filtering operation	[m/s]
v	= characteristic velocity for machine	[m/s]
X	= dimensionless variable defined by Eq.(2.34)	[—]
x	= dimensionless variable defined by Eq.(2.16)	[—]
Y_{FIN}	= dimensionless variable defined by Eq.(2.36)	[—]
Y_{IN}	= dimensionless variable defined by Eq.(2.33)	[—]
y_{FIN}	= dimensionless variable defined by Eq.(2.19)	[—]
y_{IN}	= dimensionless variable defined by Eq.(2.15)	[—]
α	= specific resistance of dust cake	[m/kg]
γ	= gas density	[kg/m ³]
ΔP	= total pressure drop for bag filter	[Pa]
$\Delta P'$	= filter cloth pressure drop with dust load	[Pa]
$\Delta P''$	= machine pressure drop	[Pa]
$\Delta P''_{av}$	= machine pressure drop for u_{av}	[Pa]
ΔP_i	= total pressure drop for the i -th compartment bag filter	[Pa]
ΔP_{FIN}	= total pressure drop for bag filter just before cleaning	[Pa]
ΔP_{IN}	= total pressure drop for bag filter just after cleaning	[Pa]
ζ_d	= specific resistance of filter cloth with residual dust	[m ⁻¹]
λ	= coefficient defined by Eq.(2.2)	[—]
μ	= gas viscosity	[Pa·s]
σ^2	= variance of the filtering velocity in i -th compartment averaged over filtering operation \bar{u}_i to u_{av}	[m ² /s ²]

Literature Cited

- Iinoya, K. , K. Makino , K. Ueshima , M. H. Lin and Y. Mori ;
“A Method for Measuring Pressure Drop Parameters of Multi-Compartment Bag Filter,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 517-521 (1976)
- Iinoya, K. and K. Makino ;
“Bag Filter no Seinousuitei,” *Shujin Souchi no Seinou*, Iinoya, K. ed., 51-59, Sangyo Gijutsu Center, Tokyo, Japan (1976)
- Ikeno, H. and T. Yoneda ;
“Pressure Drop in Multi-Compartment Bag Filter,” *Journal of the Society of Powder Technology* , Japan, **20**, 142-146 (1983)
- Kimura, N. and M. Shirato ;
“Collection Efficiency of Dry Cloth-Filters with Dust Loading,” *Kagaku Kogaku*, **34**, 984-990 (1970)
- Mori, Y. ;
“Performance and Operation for Bag Filter,” *Doctor Thesis*, Kyoto Univ., Japan (1979)
- Mumford, A. R. ; Plant and Process Ventilation, W.C.L.Hemeon ed., 113-117, The Industrial Press, New York , USA (1963)
- Tanaka, N. , K. Makino and K. Iinoya ;
“Theoretical Analysis of Dust Cleaning Operation in Multi-Compartment Bag Filter,” *Kagaku Kogaku*, **37**, 718-724 (1973)

第 3 章

バグフィルターの圧力損失パラメーターに 及ぼす濾過速度と含塵濃度の影響

3.1 緒 言

バグフィルターの圧力損失は、清浄濾布設置時には小さいが、運転時間とともに上昇した後、払落とし周期内に捕集堆積する粉塵層の圧力損失を変動範囲として定常化する。この定常圧力損失は、集塵装置全体の運転動力を決定するうえで重要な数値であり、上限設定値によって機器の大きさが変わってくる。したがって、バグフィルターの設計において濾過速度および含塵濃度などの運転条件に対する定常圧力損失を精度よく推算することが重要になってくる。この圧力損失を支配する要因として、濾過速度などの運転条件と濾材および粉体に寄与するパラメーターである汚れ濾布抵抗と比抵抗が知られている。しかしながら、汚れ濾布抵抗に関しては、定常化までの時間が長いことおよび濾材と粉体との組み合わせの多さ故にほとんど解明されておらず、現状では実験に頼らざるを得ない。一方、粉塵層の比抵抗に関しては、Borgwardt *et al.*(1968), Dennis *et al.*(1978), Mori(1979)によって濾過速度への依存性が報告されているが、その依存度は濾過速度の 0.2 乗～1.5 乗と幅があり普遍化されていない。Yamada *et al.*(1987)は、粉塵層の圧力損失が濾過速度の 0.4 乗～1.0 乗に比例するデータとともに空隙率に対する影響を示し、圧密特

性の測定方法を提唱しているが、空隙率が粉体物性と濾過速度によってどのように変わるかまでは言及していない。また、Kimura and Inoya (1965)が Kozeny-Carman 式を用いて比抵抗を考察し、Suzuki *et al.* (1991)は粒子層空隙率推定モデルを提唱して粒度分布から圧力損失を推定できることを示しているが、濾過速度および含塵濃度などの運転条件の比抵抗への依存性を求めるまでには至っていない。

このように、汚れ濾布抵抗と比抵抗は定量的に十分評価されているとは言えず、バグフィルターを設計する場合には実機のデータおよび実験に頼らざるを得ないのが現状である。

本章では、粒度分布および流動性の異なる3種類の粉体による実験結果から、汚れ濾布抵抗と比抵抗に対する濾過速度および含塵濃度の影響を示す。また、Kozeny-Carman 式と実験結果を用いて粉塵層の空隙率を数値化し、比抵抗と粉体物性および運転条件との相関を示す。

3.2 実験装置と測定方法

実験装置は、第2章の Fig.2.16 に示した装置を使用した。試験粉体には、炭酸カルシウムと珪砂および珪藻土を用いた。その比表面積、平均体積径および粒子密度を Table 3.1 に示す。粉体の粒度分布測定にはレーザー回析法(HORIBA LA-500)を用いた。なお、使用濾布は試験粉体ごとに新品に変えて実験を行った。

Table 3.1 Physical properties of test powders

Test Powder	D_s [μm]	D_v [μm]	ρ_s [kg/m^3]
Calcium carbonate	1.85	0.60	2710
Silica sand	11.50	4.18	2600
Diatomite	11.98	6.29	2300

圧損パラメーターの測定に当たっては、各濾布の粉塵負荷量が等しいと見なし得る回分実験による測定方法を用いた。まず、汚れ濾布抵抗が定常に達するまで集塵と払落とし操作を充分繰り返す。その後、粉体を供給しない状態で全濾布をパルスジェットにより払落とし操作を行い、各濾布の残留粉塵負荷量を一定とし、配管を含めた装置系内に付着および沈降している粉体を除去して実験準備を整えた。回分実験の手順は、まず、テーブルフィーダーで粉体を定量的に切り出し、払落とし操作を行わずに、圧力損失 ΔP の時間変化が十分に一定となるまで実験を継続し、圧力損失の時間変化曲線を測定した。濾布面に捕集堆積した粉塵量は、測定終了時点で装置系内に付着および沈降している粉体を回収して秤量し、測定時間中に供給した粉体量から回収量を差し引くことにより求めた。含塵濃度の影響を見るため、炭酸カルシウムと珪砂の供給量は 1 時間あたり 2.6kg と 1.3kg、かさ比重の小さな珪藻土のそれは 1.3kg と 0.65kg 切り出した。実験条件の詳細を Table 3.2 に示す。

炭酸カルシウムによる圧力損失 ΔP の時間変化の測定例を Fig.3.1 に示す。集塵開始直後は圧力損失の上昇勾配は大きいですが、時間経過とともに勾配は一定値に漸近する結果を与える。

本章でも濾布圧損 $\Delta P'$ の表現式には、第 2 章で示した Ikeno and Yoneda(1983)が提出した Eq.(2.1)を用いる。

$$\Delta P' = (\zeta_d + \alpha c u t) \mu u \quad (2.1)$$

Eq.(2.1)中の ζ_d および α が求める圧損パラメーターであり、前者は払落とし操作で払落とされない残留粉塵と濾材による抵抗係数で汚れ濾布抵抗、後者は払落とし操作ののち新たに捕集堆積した粉塵層による抵抗係数で比抵抗と呼ばれる。また、 c は濾布に捕集された粉塵量に基づく含塵濃度（以後、含塵濃度と略す）、 u は濾過速度、 μ は気体の粘度である。本実験で測定される圧力損失 ΔP は、Eq.(2.1)に示す濾布圧損 $\Delta P'$ と濾布の上部を気流が通過する時に生じる機械圧損

$\Delta P''$ とが加算された値であることから、予め機械圧損 $\Delta P''$ と濾過速度 u との関係性を求めておく必要がある。本実験装置の $\Delta P''$ の測定結果を Fig.3.2 に示すが、 ΔP に比してかなり小さな値であった。

Table 3.2 Experimental conditions

Filtering velocity	[m/min]	1.0 ~ 3.0
Filtering time	[min]	15 , 20, 30
Powder feed rate	[kg/h]	0.65 , 1.3 , 2.6
Pulse pressure	[MPa]	0.65

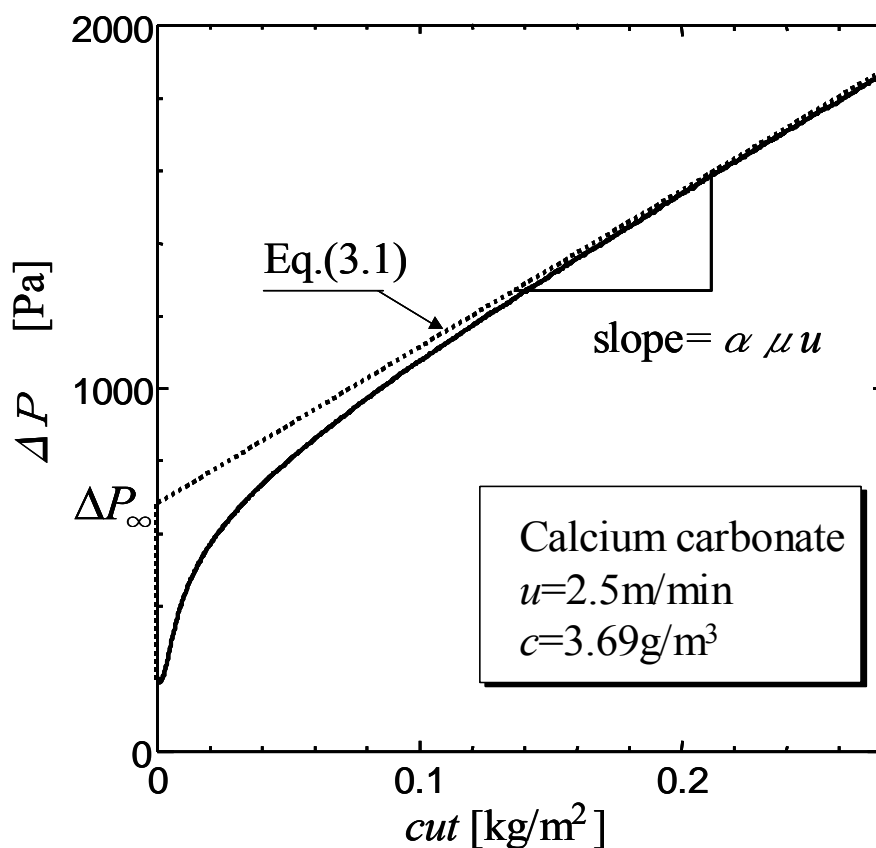


Fig.3.1 Measurement of pressure drop by batch operation

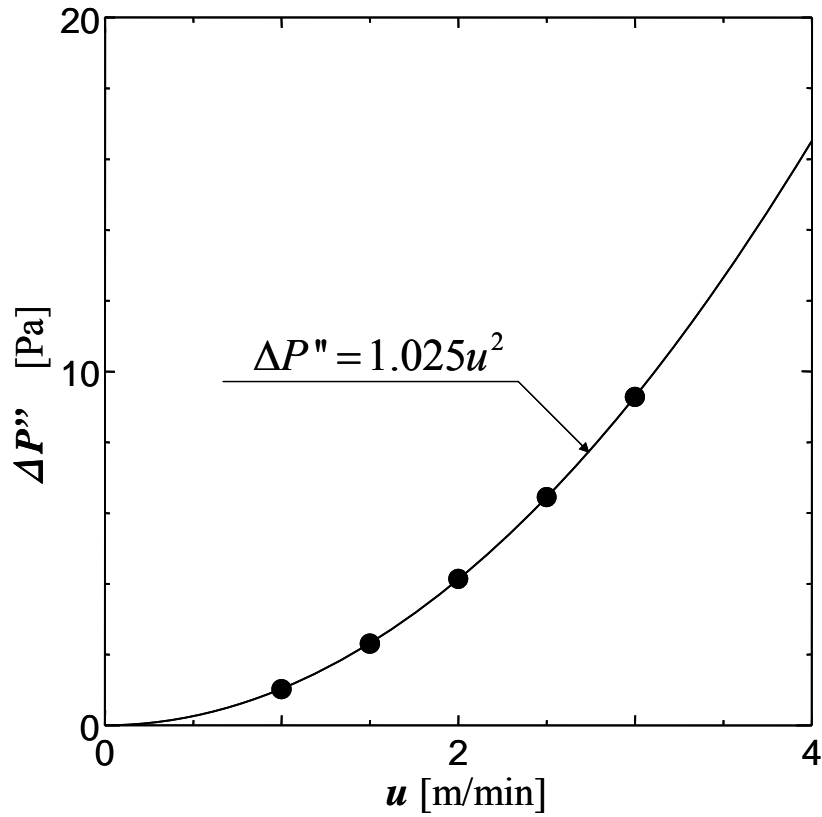


Fig.3.2 Effects of filtering velocity on mechanical pressure drop

Fig.3.1 の実験結果と Eq.(2.1)との比較に際し、圧力損失 ΔP が時間とともに直線的に変化する領域において漸近線 Eq.(3.1)を引き、その勾配 $\alpha \mu u$ と時間軸零での切片 ΔP_∞ から比抵抗 α と汚れ濾布抵抗 ζ_d を下式に従って求めた。

$$\Delta P = \Delta P_\infty + \alpha c u t \mu u \quad (3.1)$$

$$\Delta P_\infty = \zeta_d \mu u + \Delta P'' \quad (3.2)$$

ここで、含塵濃度 c の値は、測定時間中に供給した粉体量から濾布に到達せずに装置系内に付着および沈降した粉体量を差引いた量から換算した濾布単位面積当たりの捕集粉塵量 m_p より、 $c = m_p / (ut)$ として算出した。

3.3 実験結果と考察

3.3.1 比抵抗 α の相関

Figs.3.3, 3.4, 3.5 には、各粉体についての実測した比抵抗 α と含塵濃度 c の関係を濾過速度 u 別に示してある。炭酸カルシウムと珪砂では、濾過速度に関係なく含塵濃度のほぼ $-1/3$ 乗に比例していることが分かる。しかし、珪藻土では α は含塵濃度の増加に伴って小さくなるが規則性は認められなかった。

ここで、炭酸カルシウムと珪砂に対して、比抵抗 α に対する濾過速度 u の影響を調べるため、 $\alpha c^{1/3}$ と濾過速度 u の関係を Fig.3.6 にプロットした。本図には参考までに珪藻土のデータもプロットしてある。本図より、炭酸カルシウムと珪砂の比抵抗 α は次式の間係をほぼ満足することが分かった。

$$\alpha \propto u^{1/2} \times c^{-1/3} \quad (3.3)$$

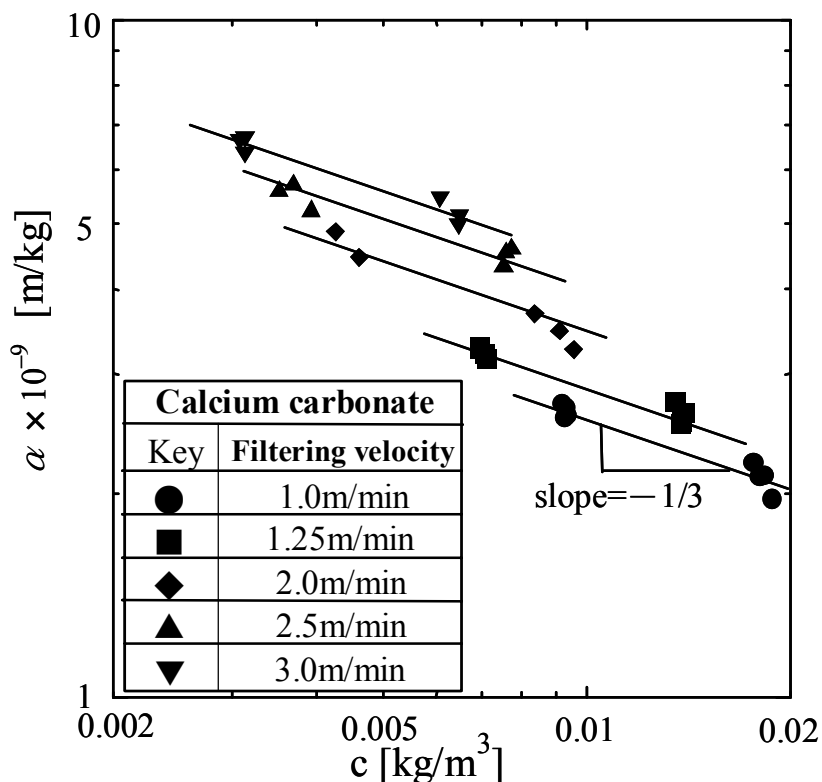


Fig.3.3 Effects of dust concentration on specific resistance of dust cake for calcium carbonate powder

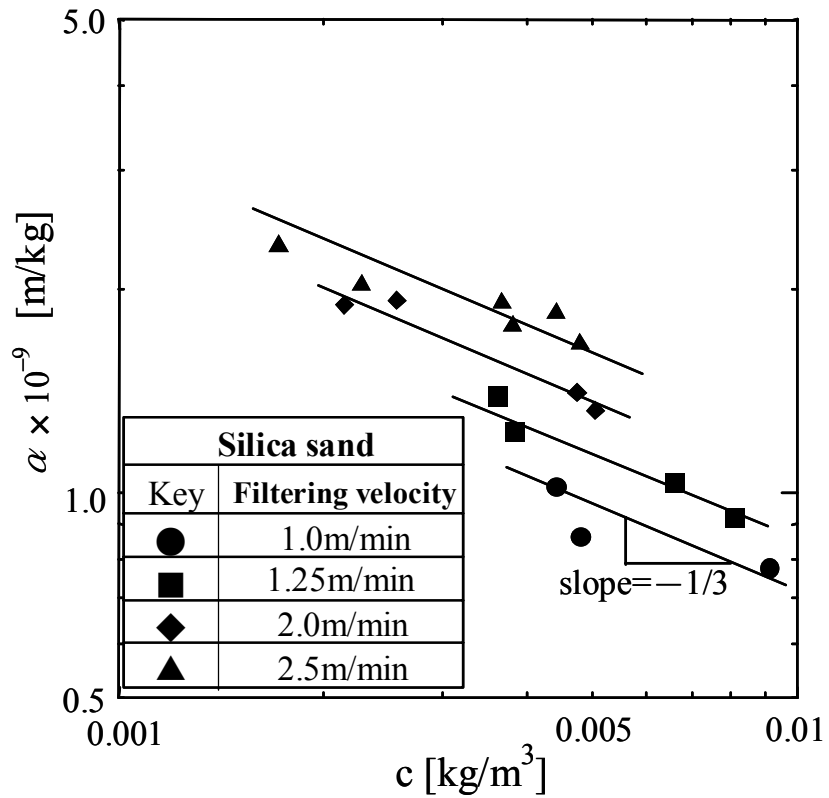


Fig.3.4 Effects of dust concentration on specific resistance of dust cake for silica sand powder

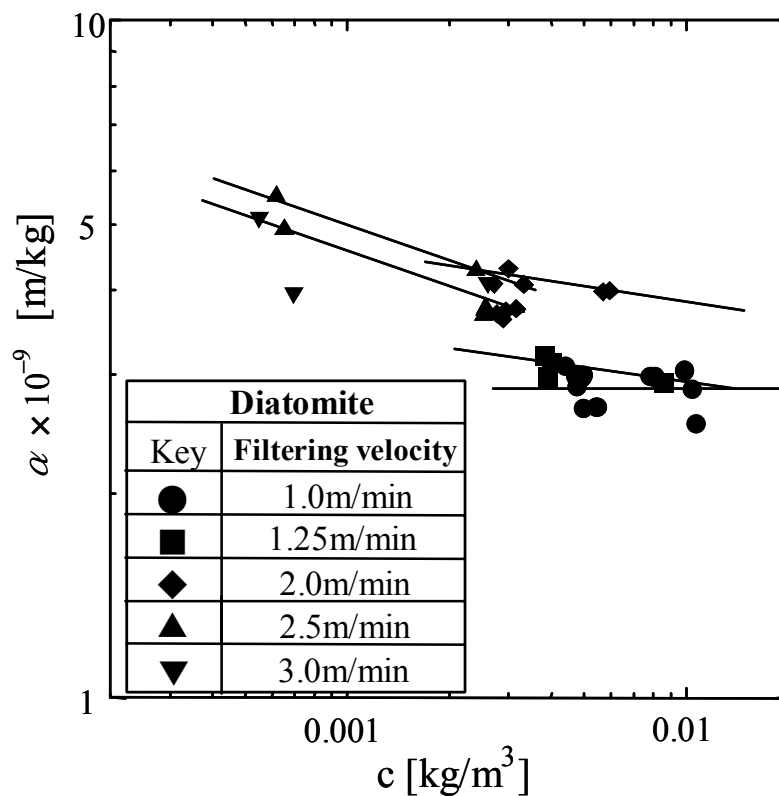


Fig.3.5 Effects of dust concentration on specific resistance of dust cake for diatomite powder

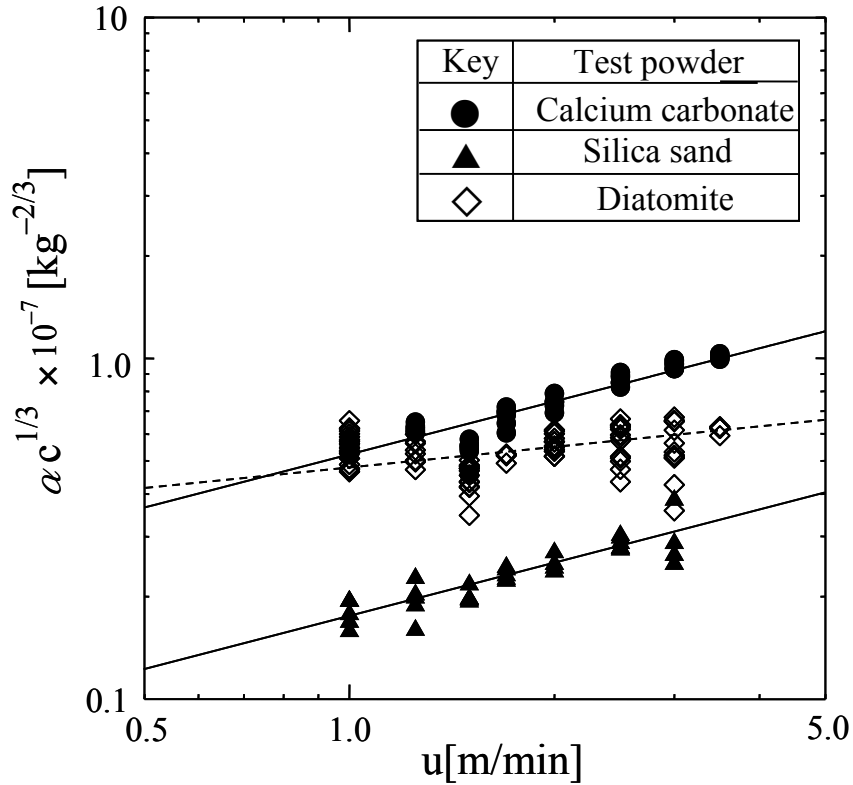


Fig.3.6 Correlation of specific resistance of dust cake with filtering velocity and dust concentration

一方、Kozeny と Carman は粒子充填層を、その内表面積と体積が粒子充填層の全表面積と空隙体積に等しい均一な形状の流路の集まりと考え、流体速度と粒子充填層の圧力損失 ΔP_{pow} の関係を以下のようにまとめている。

$$\Delta P_{pow} = \frac{5.0 S_v^2 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu L u \quad (3.4)$$

S_v は単位体積基準の比表面積、 ε は粒子充填層の空隙率、 L は粒子充填層の厚さである。ここで、粒子の比表面積径を D_s とすると、

$$S_v = 6 / D_s \quad (3.5)$$

また、Eq.(3.4)を濾布上に堆積した粉塵層に適用し、単位面積当たりの捕集粉塵量 m_p には、

$$m_p = cut = (1-\varepsilon) \rho_s L \quad (3.6)$$

の関係があることから Eq.(3.7)を得る。

$$\Delta P_{pow} = \frac{180 (1-\varepsilon)^2}{D_s^2 \varepsilon^3} \mu L u = \frac{180 (1-\varepsilon)}{\rho_s D_s^2 \varepsilon^3} c u \times \mu u \quad (3.7)$$

Eq.(3.7)と Eq.(2.1)の第2項との比較から次式を得る。

$$\alpha = \frac{180 (1-\varepsilon)}{\rho_s D_s^2 \varepsilon^3} \quad (3.8)$$

このことから Kozeny-Carman 式から導出した比抵抗に関する Eq.(3.8)の空隙率に関する $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ 項が、濾過速度 u と含塵濃度 c の影響を受けていることになる。実測した比抵抗 α と Table 3.1 に示される比表面積径 D_s および粒子密度 ρ_s を用いて Eq.(3.8)から算出した $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ を $u^{1/2}/c^{1/3}$ に対してプロットした結果を Fig.3.7 に示す。ここでも参考として珪藻土のデータも同時にプロットしたが、珪藻土の結果は空隙率の低い粉塵層を形成していることが分かる。

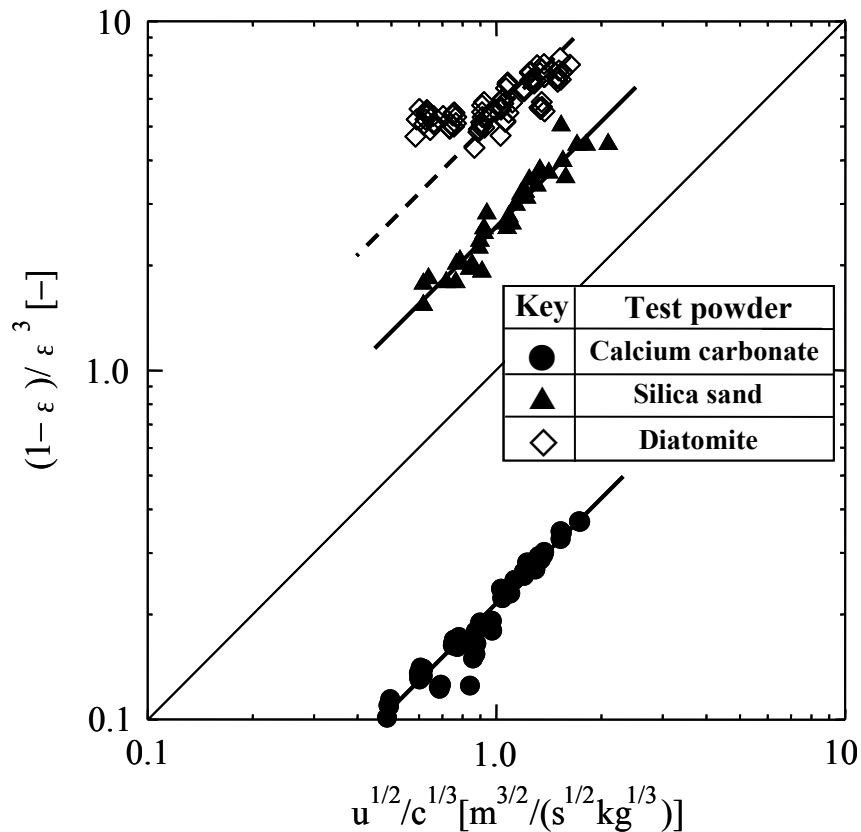


Fig.3.7 Correlation of measured value of $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ with filtering velocity and dust concentration

3.3.2 比抵抗 α に関する次元解析

ここで、多層の粒子層で構成されている粉塵層の単一粒子に対する力学バランスを考える。厚さ L の粉塵層前後の圧力差を ΔP_{pow} とすると、厚さ L' の単一粒子層前後の圧力差は $\Delta P_{pow} \times (L'/L)$ と表せる。粒子層全体が空隙率 ε で形成されていることから、厚さ L' の単一粒子層内の粒子占有面積は $(1-\varepsilon)$ と考えられ、単一粒子前後の粒子占有面積基準の圧力差 $\Delta P'_{pow}$ は次式で表せる。

$$\Delta P'_{pow} = \frac{L'}{L} \Delta P_{pow} \frac{1}{(1-\varepsilon)} \quad (3.9)$$

ここで、単一粒子層の厚さ L' は平均体積径 D_v で表せることから Eq.(3.6) と Eq.(3.9) から次式を得る。

$$\Delta P'_{pow} = \Delta P_{pow} \frac{D_v}{L(1-\varepsilon)} = \Delta P_{pow} \frac{\rho_s D_v}{cut} \quad (3.10)$$

この単一粒子に働いている圧力差に対応する物理量として法線応力 σ を考えることにより次の無次元数を得る。

$$\frac{\Delta P'_{pow}}{\sigma} = \frac{\Delta P_{pow} \rho_s D_v}{cut \sigma} \quad (3.11)$$

さらに、粉塵層の空隙率は気流中の粒子間距離に影響されると考えられ、平均粒子間距離 $\ell = (\rho_s \pi D_v^3 / 6c)^{1/3}$ から次の無次元数を得る。

$$\frac{\ell}{D_v} \propto \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^{1/3} \quad (3.12)$$

ここで、空隙率 ε が Eqs.(3.11),(3.12) の無次元数の影響を受けるとして $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ 項を次式で表現する。

$$\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} = K \left(\frac{\Delta P_{pow} \rho_s D_v}{cut \sigma} \right)^p \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^q \quad (3.13)$$

Eq.(3.7) と Eq.(3.13) から ΔP_{pow} を消去し、Fig.3.7 の結果を用いると次式を得る (Appendix C 参照)。

$$\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} = K' \left(\frac{D_v}{D_s} \right) \left(\frac{1}{D_v \sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^{1/3} (\mu u)^{1/2} \quad (3.14)$$

次元解析で導入された法線応力 σ が、どのようなパラメータと関連づけられるかは明確ではないが、単一粒子に働く物理量という観点から平均体積径 D_v がパラメータの一つであろうと考えられる。これより $\sigma \propto D_v^y$ なる関係を仮定すると、次の有次元式を得る。

$$\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} = K' \left(\frac{D_v}{D_s} \right) D_v^{-(y+1)/2} \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^{1/3} (\mu u)^{1/2} \quad (3.15)$$

実験結果から K', y を最小二乗法により求めると、

$$K' = 6.44 \times 10^8, \quad y = -7/2$$

を得る。即ち、実測した比抵抗 α と Eq.(3.8) から算出した $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ は Fig.3.8 のように相関され、下記に示す相関式を得る。

$$\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} = 6.44 \times 10^8 \left(\frac{D_v}{D_s} \right) D_v^{5/4} \rho_s^{1/3} c^{-1/3} u^{1/2} \mu^{1/2} \quad (3.16)$$

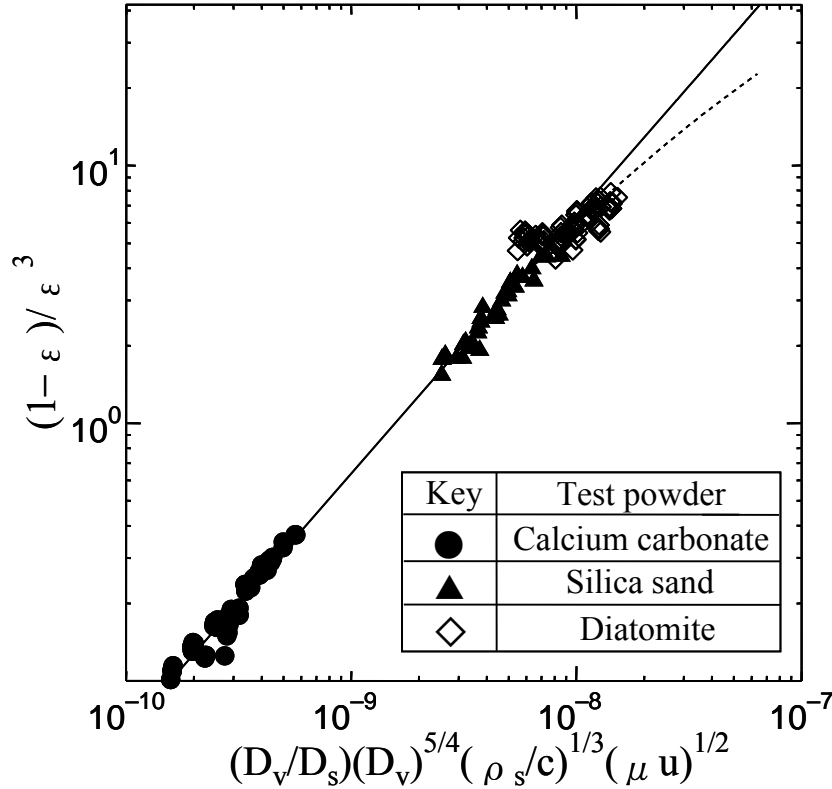


Fig.3.8 Comparison of measured value of $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ with calculated that from Eq.(3.16)

本図にプロットした珪藻土の実験データは、他の2つの粉体に対する相関線の外挿部で $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ 値の大きなところとあり、やや相関線の下方にはずれかけて存在している。本図において珪藻土のデータが相関線からはずれはじめる点を見ると、 $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ の値が4近傍にあり、空隙率 ε にして0.5近傍にある。これは、 $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ の値が次第に最密充填値に漸近していくことを意味するものと考えられる。充填率 $(1-\varepsilon)$ で整理した結果を Fig.3.9 に示す。

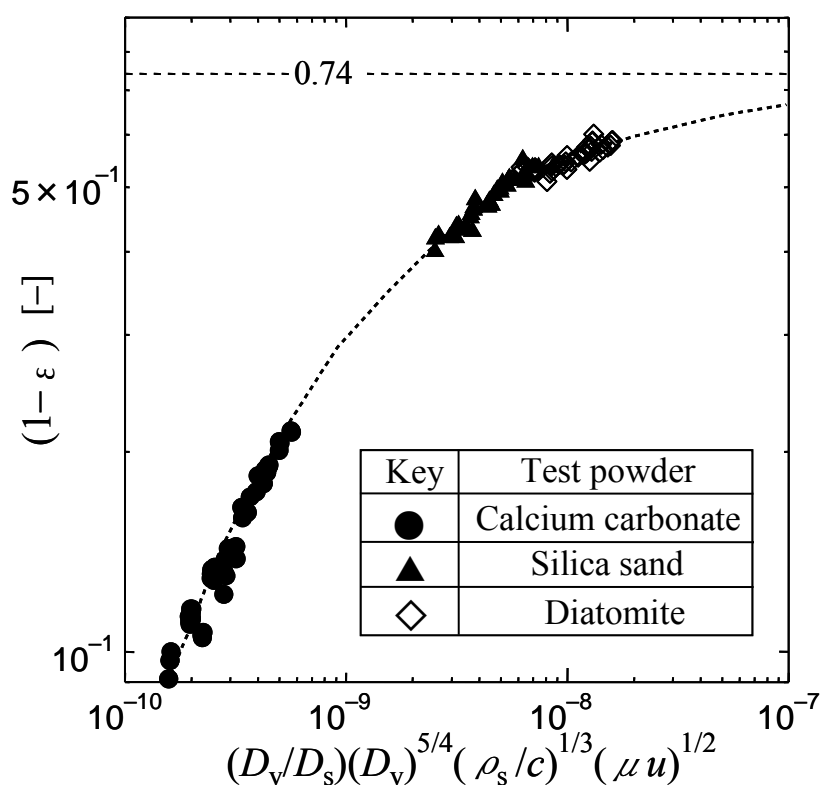


Fig.3.9 Comparison of measured value of packing fraction with calculated that from correlation

さらに、Eq.(3.8)と Eq.(3.16)から比抵抗 α は次式のような実験式で表わされる。

$$\alpha = 1.15 \times 10^{11} \left(\frac{D_v}{D_s} \right)^3 D_v^{-3/4} \rho_s^{-2/3} c^{-1/3} u^{1/2} \mu^{1/2} \quad (3.17)$$

本実験式は、常温での実験データによるものであり、空気の粘度 μ はほぼ一定値 ($\doteq 1.9 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) の場合である。Eq.(3.17)による比抵抗の推算値 α_{est} と実測値 α_{exp} との比較を Fig.3.10 に示す。本図から Eq.(3.17)による比抵抗 α の推算値は、珪藻土を含め3粉体とも実測値の $\pm 25\%$ の範囲にあることが分かる。

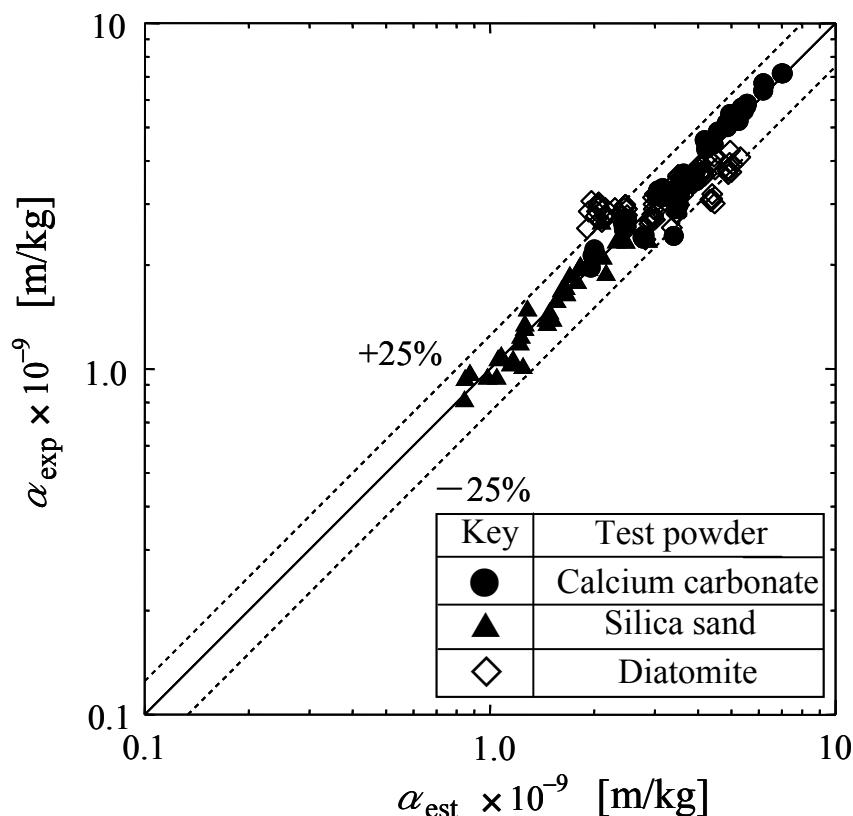


Fig.3.10 Comparison of measured specific resistance of dust cake α_{exp} with estimated that from Eq.(3.17) α_{est}

3.3.3 汚れ濾布抵抗 ζ_d

実測した汚れ濾布抵抗 ζ_d と濾過速度 u との関係を Fig.3.11 に示す。3粉体とも粉塵供給量による影響はなく、濾過速度に関しても実験誤差範囲内で一定とみなせる。これは、本実験ではパルスジェットによる払落とし条件を一定としているためと考えられる。数値的には、粒子径が細かく濾布内部に浸透しやすい炭酸カルシウムが最も

大きな値を示している。

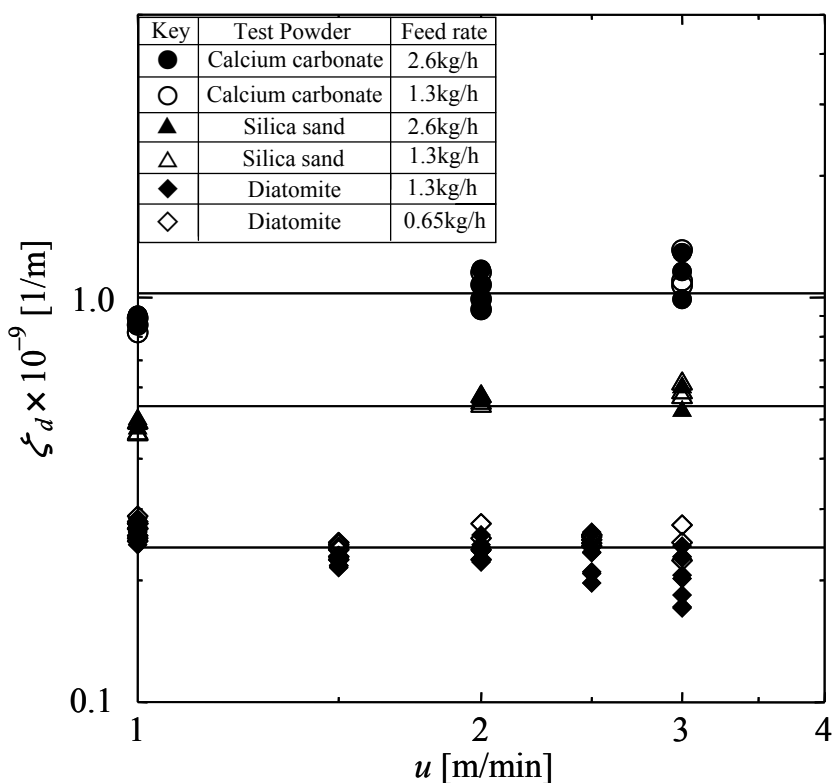


Fig.3.11 Effects of filtering velocity on specific resistance of filter cloth with residual dust

3.4 比抵抗の速度依存性を考慮した多室バグフィルターの圧力損失の数値シミュレーション結果

第2章において、多室バグフィルターの連続運転における第*i*室の圧力損失 ΔP_i の時間変化を、Eq.(3.18)で表されるモデル式で数値シミュレーションを行った。

$$\Delta P_i = \left(\zeta_d + c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_1} \alpha_j u_j dt + c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_2} \alpha'_j u'_j dt + c \int_0^{t_3} \alpha_i u_i dt \right) \mu u_i + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \quad (3.18)$$

Eq.(3.18)において t_1 は全室濾過時間、 t_2 は1室払落とし時間、 t_3 は

$t_3 = t - (i - 1)(t_1 + t_2) < t_1$ と表せる。第2章では、比抵抗 α_i は一定値として解析した。しかし、前節の実験結果から比抵抗は濾過速度 u の 0.5 乗に依存することが示された。ここでは、この速度依存性が多室バグフィルターの圧力損失の時間変化にどの程度影響するのかを検討する。計算に際して比抵抗 α_i は次式で表現する。

$$\alpha_i = \alpha_{av} (u_i / u_{av})^{0.5} \quad (3.19)$$

ここで、 α_i をすべて α_{av} で近似すると第2章の解析に一致する。Eq.(3.19)を Eq.(3.18)に代入し、第2章と同様の数値シミュレーションの手順で行った結果の一例を Fig.3.12 に示す。同図には比較のため $\alpha_i = \alpha_{av}$ として数値シミュレーションした結果も破線で示してある。

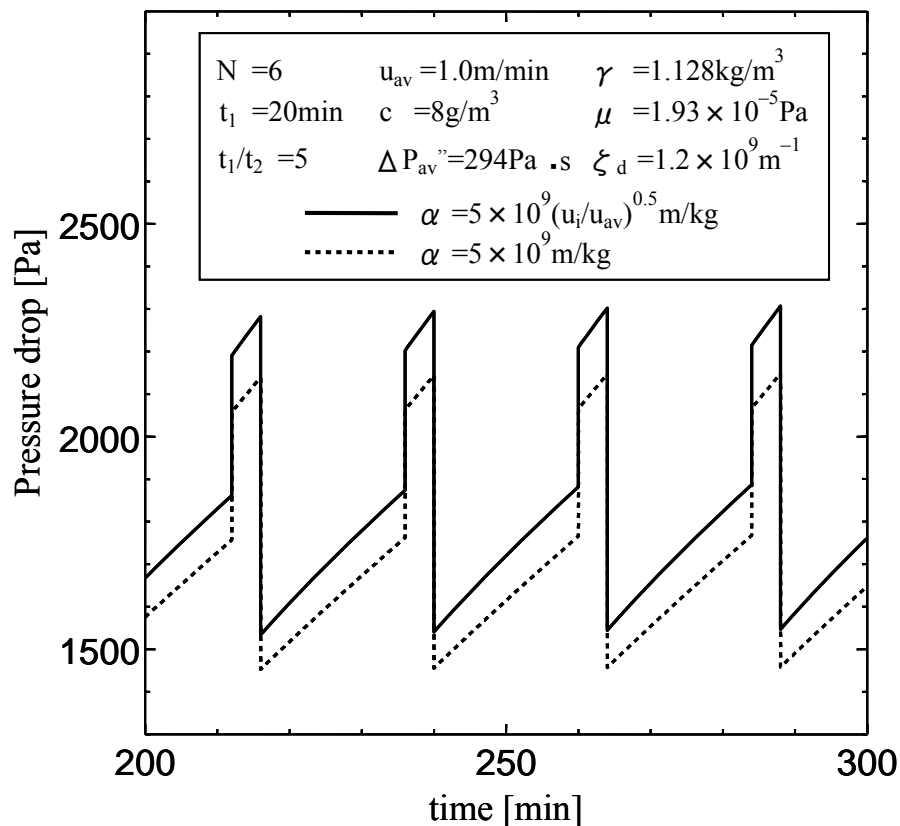


Fig.3.12 Effects of filtering velocity dependence of specific Resistance on behavior of pressure drop in a six-compartment bag filter

本図から、比抵抗の濾過速度変化に対する依存性を考慮した場合の圧力損失は、考慮しない場合に較べて数%大きくなるが全体的な圧力損失の挙動はほとんど変わらないことが分かる。一方、比抵抗 α の値を Fig.3.12 中に与えられた $5.0 \times 10^9 \text{ m/kg}$ の代わりに $5.6 \times 10^9 \text{ m/kg}$ なる一定値を用いて数値シミュレーションを行うと、圧力損失の挙動は Fig.3.12 中の速度依存性を考慮した場合の実線に殆ど一致することが分かった。

これより、実験式 Eq.(3.17)を用いて平均濾過速度 u_{av} に対する比抵抗 α_{av} を求め、この α_{av} 値より少し大きな値 (Fig.3.12 では 12%) を比抵抗として与えることにより、濾過操作中の比抵抗を一定として数値シミュレーションした圧力損失の挙動と Eq.(3.19)のように比抵抗が濾過速度の変化に依存するとして数値シミュレーションした圧力損失の挙動とを良好に一致させることが出来ることが分かった。ただし、Eq.(3.17)から求めた比抵抗に比してどの程度大きな値を設定すればよいのかについての定量的な検討は今後の課題である。

3.5 結 言

粉体物性の異なる炭酸カルシウムと珪砂および珪藻土による濾布圧損の回分実験結果から、バグフィルターの圧力損失パラメーターである比抵抗 α と汚れ濾布抵抗 ζ_d に対する濾過速度 u と含塵濃度 c の影響を求め、次のような結論を得た。

1. 粉塵層が空隙率 0.5 以上で形成される粉体の比抵抗 α は、ほぼ濾過速度の 1/2 乗に比例して増大し、含塵濃度の 1/3 乗に比例して減少した。
2. 濾布圧損モデル式と Kozeny-Carman 式に基づき、比抵抗 α の実験値から求めた $(1-\epsilon)/\epsilon^3$ を粉体物性と運転条件を用いて相関し、得られた相関式より比抵抗 α に対

する実験式を得た。

$$\alpha = 1.15 \times 10^{11} \left(\frac{D_v}{D_s} \right)^3 D_v^{-3/4} \rho_s^{-2/3} c^{-1/3} u^{1/2} \mu^{1/2}$$

本実験式を用いることで比抵抗 α は、 $\pm 25\%$ の誤差で推算できることを示した。

3. 汚れ濾布抵抗 ζ_d は、濾過速度と含塵濃度の影響をほとんど受けず、各粉体ごとにはほぼ一定値を示した。
4. 濾過操作中の比抵抗の濾過速度変化に対する依存性を考慮した場合、多室バグフィルターの圧力損失値は、依存性を考慮しなかった場合のそれより僅かに大きな値を与えた。しかし、両者の圧力損失の時間変化挙動にはあまり影響を与えないことが分かった。

Nomenclature

c	= dust concentration based on collected dust on filter cloth	[kg/m ³]
D_s	= specific surface area diameter	[m]
D_v	= mean volume diameter	[m]
L	= thickness of multi-layer dust cake	[m]
L'	= thickness of single-layer dust cake	[m]
ℓ	= average distance between particles	[m]
m_p	= dust loading on filter cloth	[kg/m ²]
N	= number of compartments	[—]
S_v	= specific surface area	[m ² /m ³]
t	= time	[s]
t_1	= filtering time	[s]
t_2	= cleaning time	[s]
t_3	= filtering time [= $t - (i - 1) (t_1 + t_2)$]	[s]
u	= filtering velocity for filtering operation	[m/s]
u'	= filtering velocity for cleaning operation	[m/s]
u_{av}	= average filtering velocity for filtering operation	
u_i	= filtering velocity in i -th compartment for filtering operation	[m/s]
u'_i	= filtering velocity in i -th compartment for cleaning operation	[m/s]
α	= specific resistance of dust cake	[m/kg]
α_{av}	= average specific resistance of dust cake for filtering operation	[m/kg]
α_i	= specific resistance of dust cake in i -th compartment for filtering operation	[m/kg]

α'_i	= specific resistance of dust cake in i -th compartment for cleaning operation	[m/kg]
γ	= gas density	[kg/m ³]
ΔP	= total pressure drop for bag filter	[Pa]
$\Delta P'$	= filter cloth pressure drop with dust loading	[Pa]
$\Delta P''$	= machine pressure drop	[Pa]
ΔP_∞	= pressure drop defined in Eq.(3.2)	[Pa]
ΔP_i	= total pressure drop in i -th compartment	[Pa]
ΔP_{pow}	= pressure drop for multi-layer dust cake	[Pa]
$\Delta P'_{pow}$	= pressure drop for single-layer dust cake	[Pa]
ε	= void fraction	[—]
ζ_d	= specific resistance of filter cloth with residual dust	[m ⁻¹]
λ	= machine resistance coefficient	[—]
μ	= gas viscosity	[Pa·s]
ρ_s	= particle density	[kg/m ³]
σ	= normal stress in dust layer	[Pa]

Literature Cited

Borgwardt, R. H., R. E. Harrington and P. W. Spaite ;

”Filtration Characteristics of Fly Ash from a Pulverized Coal-Fired Power Plant,” *Journal of the Air Pollution Control Association*, **18**, 387-390(1968)

Dennis, R., R. W. Cass and R. R. Hall ;

”Dust Dislodgement from Woven Fabrics Versus Filter Performance,” *Journal of the Air Pollution Control Association*, **28**, 47-51(1978)

Iinoya, K. and K. Makino ;

“Bag Filter no Seinouseitei,” *Shujin Souchi no Seinou*, Iinoya, K. ed., 51-59, Sangyo Gijutsu Center, Tokyo, Japan (1976)

Ikeno, H. and T. Yoneda ;

“Pressure Drop in Multi-Compartment Bag Filter,” *Journal of the Society of Powder Technology*, Japan, **20**, 142-146 (1983)

Kimura, N. and M. Shirato ;

“Collection Efficiency of Dry Cloth-Filters with Dust Loading,” *Kagaku Kogaku*, **34**, 984-990 (1970)

Mori, Y. ;

“Performance and Operation for Bag Filter,” Doctor Thesis, Kyoto Univ., Japan (1979)

Mumford, A. R. ; *Plant and Process Ventilation*, W.C.L.Hemeon ed., 113-117, The Industrial Press, New York , USA (1963)

Kimura, N and K. Iinoya ;

“Pressure Drop Characteristics of Filter Cloth for Dust Collection,”
Kagaku Kogaku, **29**, 166-174 (1965)

Suzuki, M., T. Sakata, S. Nakamura, M. Hirota and T. Oshima ;

“Effect of Size Distribution on Pressure Drop in Particle Packed Bed,”
Kagaku Kogaku Ronbunshu, **17**, 417-422 (1991)

Yamada, M., K. Kuramitsu and K. Makino ;

“On Estimation of the Mechanical Strength of the Dust Layer Collected
on Bag Filter Cloths,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **13**, 13-19 (1987)

第 4 章

斑落ちモデルに基づくバグフィルターの 圧力損失に関する実験的考察

4.1 緒 言

バグフィルターの濾布圧損に関する表現式は数多くの研究者 (Mumfold,1963;Kimura and Shirato,1970;Iinoya and Makino,1976;Mori, 1979;Ikeno and Yoneda,1983)によって報告されており、そのほとんどが濾布または残留粉塵を含んだ濾布の圧力損失とそこに捕集堆積する粉塵層の圧力損失の和として表現している。これらの表現式では、集塵開始時には濾布または残留粉塵を含んだ濾布の圧力損失を示し、それ以降は捕集堆積する粉塵量のほぼ 1 乗に比例して増加するとして表されている。しかしながら、回分運転において圧力損失の時間変化挙動を実測すると、集塵開始直後の圧力損失の上昇勾配は大きく、堆積粉塵量の増加とともに勾配は一定値に漸近する結果を与える (Fig.4.4 参照)。連続運転においても、圧力損失の上昇勾配は回分運転と同様な時間変化を示す。これは、集塵開始時には粉塵が濾布内部または濾過面に不均一に堆積し、時間経過とともに均一化していくことによるものと推察される。特に、連続運転では圧力損失の上昇勾配が一定値に漸近する前に払落とし操作がなされるため、従来の表現式では圧力損失の挙動を精度よく表すことができない。従って、払落とし直後からの圧力損失の時間変化挙動の解析が重要と

なる。

Dennis *et al.*(1978)は、払落とし操作後の濾過面を全く払落とされない部分とある程度まで払落とされる部分に分けたモデルを用いることで回分運転における圧力損失の時間変化挙動が表現できることを示している。しかしながら、このモデルでは全く払落とされない部分の抵抗値を圧力損失の上昇勾配が一定値に漸近した時点での値としていることから、集塵時間および含塵濃度などの運転条件ごとに、その抵抗値を設定あるいは測定する必要があった。そのため、圧力損失の上昇勾配が一定値に漸近する前に払落とし操作がされる連続運転型のバグフィルターにおける圧力損失の時間変化挙動を推算するまでには至っていない。

第2章では、粉塵層が一様に払落とされるとした「一様払落としモデル」を用いて、連続運転型バグフィルターにおける圧力損失の時間変化を数値シミュレーションした。しかしながら、このモデルでは最終圧損は許容範囲で算出できるが、圧力損失の時間変化を十分表現することができなかった。

本章では、払落とし後の濾過面を払落とし操作によってある程度まで払落とされる部分と清浄濾布状態まで払落とされる部分の2面に分けた「斑落ちモデル」を用いることで、前述した回分運転での圧力損失の集塵開始直後を含めた時間変化挙動を表現するとともに、このモデルで連続運転型バグフィルターにおける圧力損失の時間変化挙動も表現できることを示す。

4.2 斑落ちモデルと基礎式

本章でも濾布圧損 $\Delta P'$ の表現式は、第2章で示した Eq.(2.1)を用いる。

$$\Delta P' = (\zeta_d + \alpha c u t) \mu u \quad (2.1)$$

また、バグフィルターに不可欠な濾過部以外の機械圧損 $\Delta P''$ を加えた本体圧力損失 ΔP の表現式も第 2 章と同様に次式を用いる。

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P' + \Delta P'' \\ &= (\zeta_d + \alpha c u t) \mu u + \frac{1}{2} \lambda \gamma v^2 \\ &= (\zeta_d + \alpha c u t) \mu u + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで、 v は機械圧損を支配する代表速度で装置設計ごとに係数 K は違ってくるが濾過速度 u との間に $v=Ku$ なる関係がある。一様払落としモデルでは、払落とし操作後の残留粉塵を含んだ汚れ濾布抵抗 ζ_d は全濾過面で一定と表現している。

ここで、払落とし操作によって濾過面に残留する粉塵量が場所によって差異があるという実験観察結果から、簡易的に濾過面が粉塵の残留した汚れ濾布抵抗 ζ_D を有する濾過面 (以後、濾過面 D と略す) と清浄濾布状態まで払落とされた清浄濾布抵抗 ζ_C を有する濾過面 (以後、濾過面 C と略す) の 2 面で構成されているとする斑落ちモデルを考える。その模式図を **Fig.4.1** に示す。

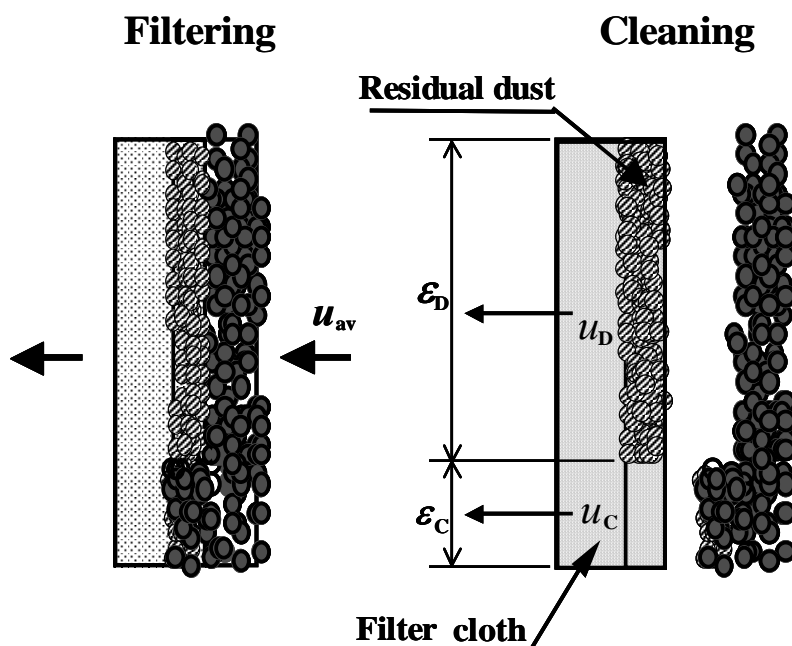


Fig.4.1 Schematic diagram of filtration model based on the patched cleaning model

回分運転において、払落とし操作後の集塵中の各濾過面での濾過速度を各々 u_D , u_C とすると、各濾過面に対応する本体圧力損失は Eq.(2.3)より次式で表せる。

$$\Delta P_D = (\zeta_D + \alpha c u_D t) \mu u_D + \Delta P_m'' \quad (\text{濾過面 D}) \quad (4.1)$$

$$\Delta P_C = (\zeta_C + \alpha c u_C t) \mu u_C + \Delta P_m'' \quad (\text{濾過面 C}) \quad (4.2)$$

ここで、 $\Delta P_m''$ は後述の Eq.(4.5)で定義される平均濾過速度 u_m における機械圧損である。また、ここでは比抵抗 α は濾過速度の変化に依存しないものと仮定して一定としている。

この2面は並列配置であることから $\Delta P = \Delta P_D = \Delta P_C$ となり次式が成り立つ。

$$(\zeta_D + \alpha c u_D t) \mu u_D = (\zeta_C + \alpha c u_C t) \mu u_C \quad (4.3)$$

従って、各濾過面の濾過速度 u_D と u_C の間には集塵開始時 $\zeta_D / \zeta_C = u_C / u_D$ の関係が成り立ち、両者には差が生じるが、時間経過とともに各濾過面の粉塵層を含んだ抵抗値の差が少なくなり u_D , u_C とも u_m に近づく。ここで全濾過面積を A_0 、残留粉塵のある濾過面の面積を A_D 、残留粉塵のない濾過面の面積を A_C とし、その比率を ε_D 対 ε_C とすると

$$A_D = \varepsilon_D A_0, \quad A_C = \varepsilon_C A_0, \quad \varepsilon_D + \varepsilon_C = 1 \quad (4.4)$$

と表せる。また、全体の処理風量を Q 各濾過面での風量を各々 Q_D , Q_C とすると、 $Q = Q_D + Q_C$ から u_m は次式で表せる。

$$\begin{aligned} u_m &= Q / A_0 = (Q_D + Q_C) / A_0 \\ &= Q_D / (A_D / \varepsilon_D) + Q_C / (A_C / \varepsilon_C) \\ &= \varepsilon_D u_D + \varepsilon_C u_C \end{aligned} \quad (4.5)$$

ζ_D , ζ_C , ε_C , α , λ と平均濾過速度 u_m などの運転条件が既知であれば、Eqs.(4.1),(4.2)を Eqs.(4.3),(4.4),(4.5)の条件で数値計算を行うことで回分運転における本体圧力損失 ΔP の時間変化が算出できる。

次に、 N 列で構成されるバグフィルターでの連続運転の場合を考える。その本体圧力損失の模式図を Fig.4.2 に示す。全列濾過時において第 i 列の各濾過面における濾過速度を $u_{D,i}$, $u_{C,i}$ 、他の1列を払

落とししている時の各濾過面における濾過速度を $u'_{D,i}$, $u'_{C,i}$ とし、第 1 列目を払落としてから t 時間後における全列濾過時の第 i 列の各濾過面に対応した本体圧力損失は Eqs. (4.6), (4.7) で表せる。但し、ここでも比抵抗 α は濾過速度の変化に依存しないものと仮定して一定としている。ここで t_1 は全列濾過時間、 t_2 は払落とし時間、 t_3 は $t_3 = t - (i-1)(t_1 + t_2) < t_1$ と表せる。従って、Eqs. (4.6), (4.7) の () 内の第 2 項から第 4 項は各々の時間中に捕集堆積する粉塵による圧力損失を表している。

$$\begin{aligned} \Delta P_{D,i} = & \left(\zeta_D + \alpha c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_1} u_{D,j} dt + \alpha c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_2} u'_{D,j} dt + \alpha c \int_0^{t_3} u_{D,i} dt \right) \mu u_{D,i} \\ & + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{C,i} = & \left(\zeta_C + \alpha c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_1} u_{C,j} dt + \alpha c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_2} u'_{C,j} dt + \alpha c \int_0^{t_3} u_{C,i} dt \right) \mu u_{C,i} \\ & + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

N 列構成のパルスジェット式バグフィルターにおいては、各列は並列配置であり、全体の処理風量 Q は時間に関係なく一定であることから次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{D,1} = \Delta P_{D,2} = \cdots = \Delta P_{D,i} = \cdots = \Delta P_{D,N} \\ &= \Delta P_{C,1} = \Delta P_{C,2} = \cdots = \Delta P_{C,i} = \cdots = \Delta P_{C,N} \\ Q_D &= \sum_{i=1}^N Q_{D,i} \quad , \quad Q_C = \sum_{i=1}^N Q_{C,i} \quad , \quad Q = Q_D + Q_C = \text{const.} \\ N u_{D,av} &= (N-1) u'_{D,av} \quad , \quad N u_{C,av} = (N-1) u'_{C,av} \\ u_i &= \varepsilon_D u_{D,i} + \varepsilon_C u_{C,i} \\ u_{av} &= \varepsilon_D u_{D,av} + \varepsilon_C u_{C,av} = \text{const.} \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

回分運転と同様に ζ_D , ζ_C , ε_C , α , λ と列平均の濾過速度 u_{av} などの運転条件が既知であれば、Eqs.(4.6),(4.7)を Eq.(4.8)の条件で数値計算することで本体圧力損失 ΔP の時間変化を算出できる。

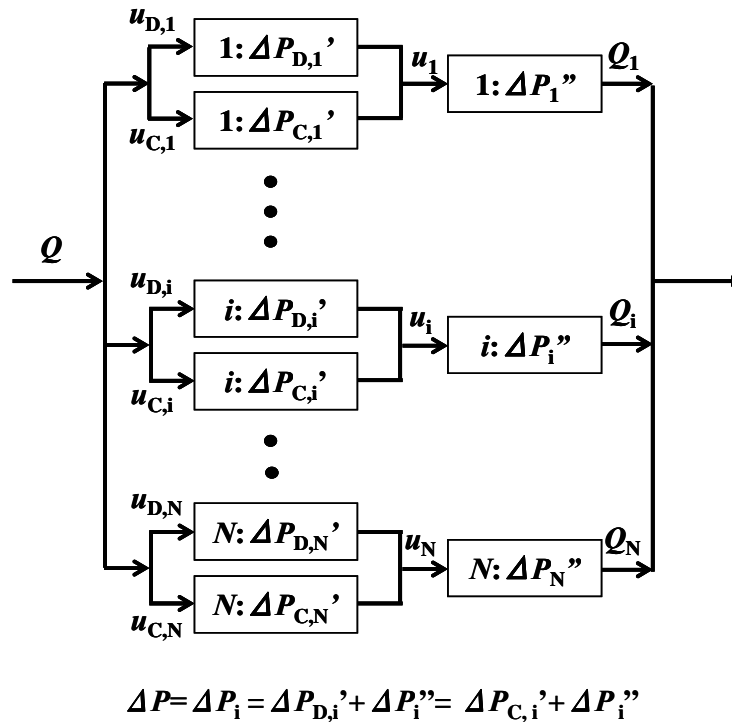


Fig.4.2 Schematic diagram of pressure drop for multi-compartment bag filter by patched cleaning model

4.3 実験装置と測定方法

実験装置は、第2章の Fig.2.16 に示した装置を使用した。試験粉体には、第3章で用いた炭酸カルシウムと珪砂および珪藻土(Table 3.1 参照)を使用した。

4.3.1 清浄濾布抵抗 ζ_c と機械圧損 $\Delta P''$ の測定

粉塵負荷実験を行う前に、本斑落ちモデルに必要な清浄濾布抵抗 ζ_c を求めておく必要がある。また、本実験で測定される本体圧力損失 ΔP は Eq.(2.3) に示すように、濾布圧損 $\Delta P'$ と濾過部以外の機械圧損 $\Delta P''$ とが加算された値であることから、予め機械圧損 $\Delta P''$ と濾過速度 u との関係性を求めておく必要がある。

清浄濾布を取り付け、粉体を供給せずに濾過速度 u_c を変えて本体圧力損失 $\Delta P_c (= \Delta P_c' + \Delta P'')$ を測定した結果を Fig.4.3 に示す。粉塵を含まない清浄濾布取り付け時の本体圧力損失 ΔP_c は Eq.(2.3) から次式で表せる。

$$\Delta P_c = \zeta_c \mu u_c + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_c^2 \quad (4.9)$$

Fig.4.3 および Eq.(4.9) から、清浄濾布抵抗 ζ_c および機械圧損 $\Delta P''$ と濾過速度 u_c との関係式を得る。

$$\zeta_c = 4.80 \times 10^7 \text{ m}^{-1} \quad \Delta P'' = 3600 u_c^2 \quad (4.10)$$

但し、本実験は大気中および常温での実験であるため Eq.(4.10) は、気体の密度 γ が 1.2 kg/m^3 、粘度 μ が $1.9 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 近傍における関係式である。

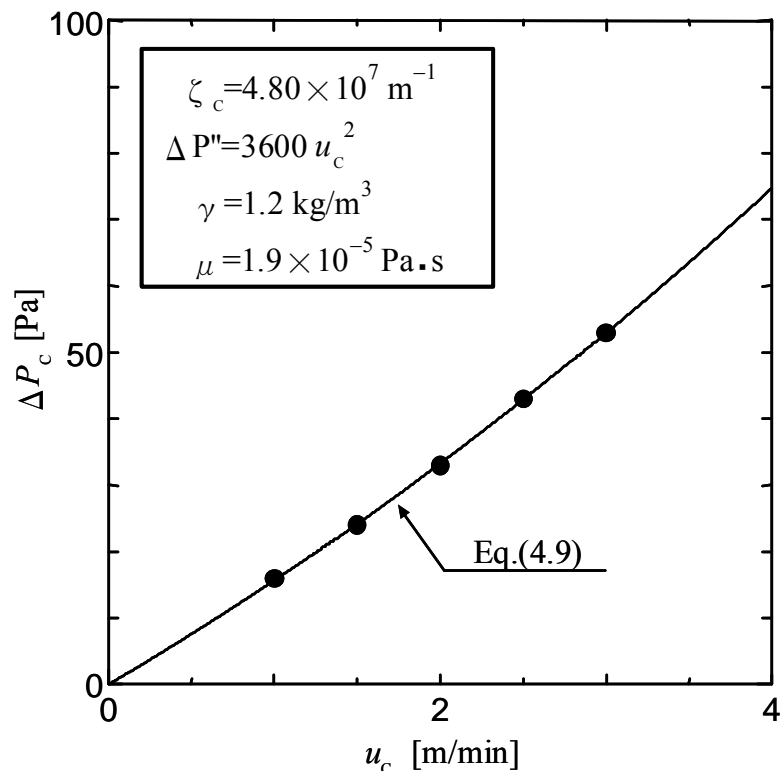


Fig.4.3 Effects of filtering velocity on total pressure drop of virgin bag filter

4.3.2 回分運転の実験方法

まず、汚れ濾布抵抗が定常に達するまで集塵と払落とし操作を充分繰り返す。その後、粉体を供給しない状態で全濾布に対しパルスジェットによる払落とし操作を行い、各濾布の残留粉塵負荷量を等しくし、配管を含めた装置系内に付着および沈降している粉体を除去して実験準備を整えた。実験の手順は、テーブルフィーダーで粉体を定量的に切り出し、払落とし操作を行わずに本体圧力損失 ΔP の時間変化が十分に一定になるまで実験を継続し、その時間変化曲線を測定した。濾布面に捕集堆積した粉塵量は、測定終了時点で装置系内に付着および沈降している粉体を回収して秤量し、測定時間中に供給した粉体量から回収量を差し引くことにより求めた。その他、実験手法の詳細は第3章の第2節と同様である。

4.3.3 連続運転の実験方法

テーブルフィーダーで粉体を定量的に切り出し、一定時間ごとにパルスジェットによる払落とし操作を行いながら本体圧力損失 ΔP の払落とし周期内の時間変化が十分に定常化するまで実験を継続し、その時間変化曲線を測定した。本実験で使用した集塵機には濾布が2本/列で3列設置されていることから、連続運転におけるコンパートメント数は $N=3$ で固定されている。その濾過面積は1列当たり 0.518m^2 である。圧縮エアによるパルスジェットは、エア圧力を 0.65MPa 、払落とし時間を 0.1s 、全列濾過時間(払落とし操作の列送り時間)は 320s と固定した。その他の実験条件は、Table 3.2 に示した回分運転の実験と同様とした。連続運転において濾布に捕集された粉塵量に基づく含塵濃度 c は、回分運転のような測定ができないため、回分運転実験で測定した濾布への到達率 [= (濾布に捕集された粉塵量) / (供給した総粉塵量)] が連続運転でも

変わらないと仮定して、含塵濃度 c を供給量基準の含塵濃度と回分運転で実測した濾布への到達率の積として推算した。

4.4 実験結果と考察

4.4.1 回分運転の実験結果と数値シミュレーション結果

試験した3粉体について、平均濾過速度 u_m を 2.0m/min とした時に実測した本体圧力損失の時間変化曲線を Figs.4.4(a),(b),(c)に実線で示す。また、Fig.4.4(a)の極初期段階部を拡大したものを Fig.4.5に示す。数値的には差があるが、3粉体とも集塵を開始した極初期段階では本体圧力損失の上昇勾配 $[d(\Delta P)/dt]$ は小さいが、すぐに大きくなって最大勾配を迎えた後、時間経過とともに勾配は減少して一定値に漸近する結果を与える。本現象については、Kanaoka and Yao (2003)がフライアッシュを用いた研究において報告している。

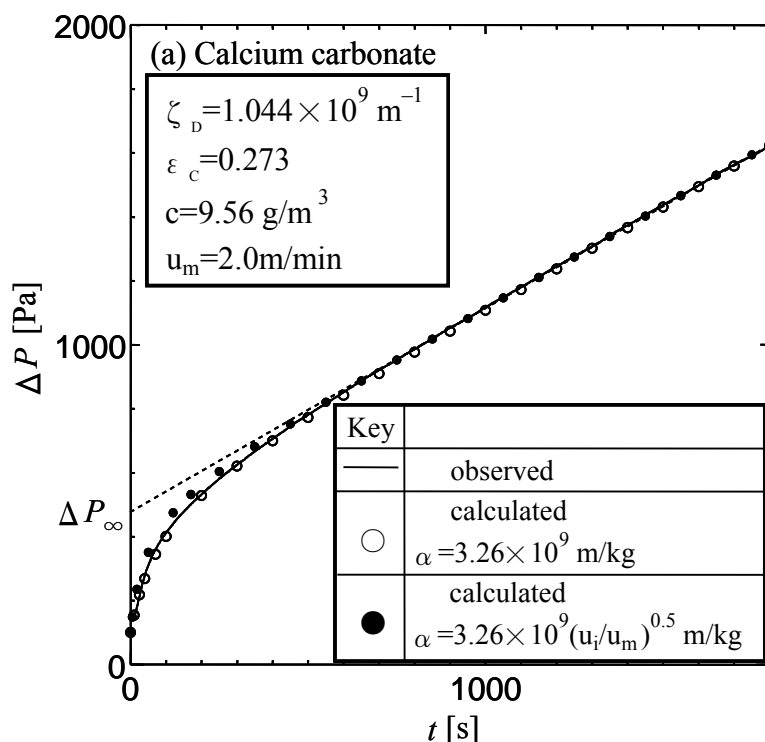


Fig.4.4(a) Behavior of total pressure drop for calcium carbonate by batch filtering operation and the simulation results

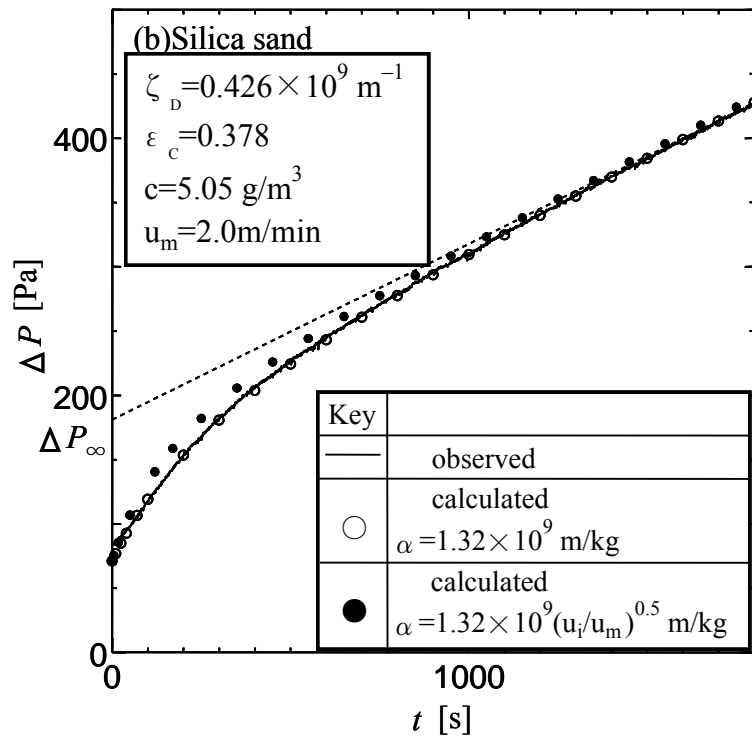


Fig.4.4(b) Behavior of total pressure drop for silica sand by batch filtering operation and the simulation results

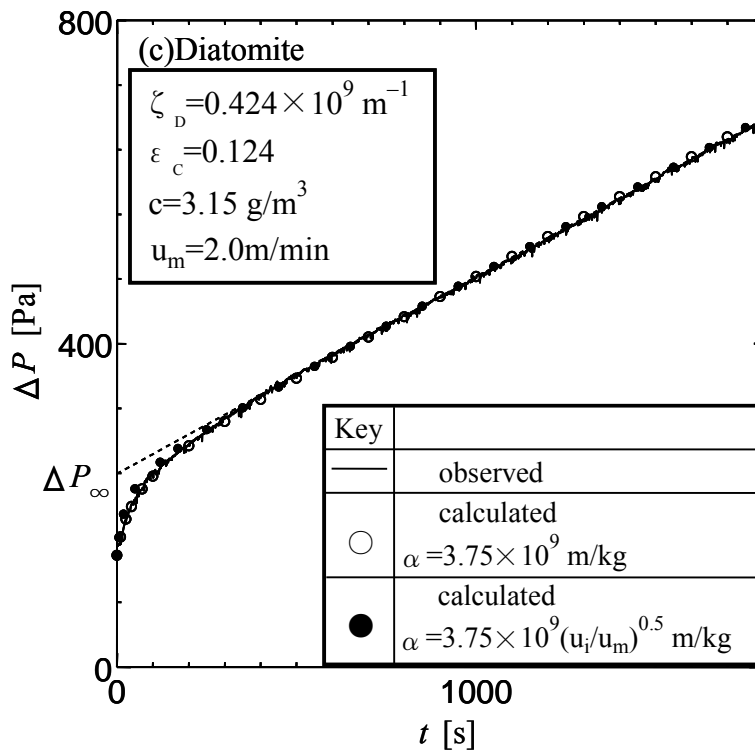


Fig.4.4(c) Behavior of total pressure drop for diatomite by batch filtering operation and the simulation results

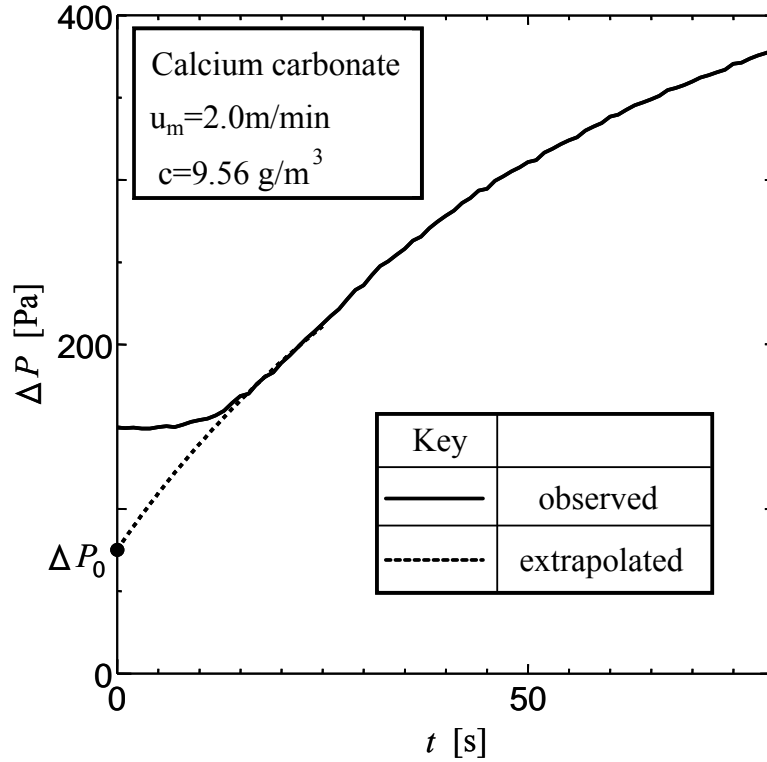


Fig.4.5 Behavior of total pressure drop for calcium carbonate in the early stage of filtration by batch filtering operation

Fig.4.5 および Figs.4.4(a),(b),(c)に示す時間軸「零」での切片 ΔP_0 と ΔP_∞ は、Eqs.(4.1)～(4.5)から各々 Eq.(4.11)と Eq.(4.12)で表せる (Appendix D 参照)。本斑落ちモデルでは、前述した極初期段階における本体圧力損失の挙動を表すことができないため切片 ΔP_0 は Fig.4.5 に示すように時間変化曲線から外挿した点と定義した。また、 ΔP_∞ も Figs.4.4(a),(b),(c)に示すように時間変化曲線に漸近線をひいて外挿した点とした。

$$\Delta P_0 = \frac{\zeta_D \zeta_C}{\varepsilon_D \zeta_C + \varepsilon_C \zeta_D} \mu u_m + \Delta P_m'' \quad (4.11)$$

$$\Delta P_\infty = (\varepsilon_D \zeta_D + \varepsilon_C \zeta_C) \mu u_m + \Delta P_m'' \quad (4.12)$$

機械圧損 $\Delta P_m''$ は Eq.(4.10)から求められ、比抵抗 α は

$$\Delta P = \Delta P_\infty + \alpha c u_m t \mu u_m \quad (4.13)$$

から求めることができる(第3章第2節参照)。ここで、含塵濃度 c

の値も第3章と同様に、測定時間中に供給した粉体量から濾布に到達せずに装置系内に付着および沈降した粉体量を差引いた量から換算した濾布単位面積当たりの捕集粉塵量 m_p より、 $c=m_p/(u_{mt})$ として算出した。

これにより回分運転での本体圧力損失の時間変化曲線から ΔP_0 と ΔP_{∞} を外挿して決定し、Eqs.(4.11),(4.12)を用いて濾過面 C の面積比率 $\varepsilon_c (=1 - \varepsilon_D)$ および汚れ濾布抵抗 ζ_D を求めることができる。試験した3粉体の圧力損失の時間変化曲線から求めた ε_c , ζ_D , α および予め測定した清浄濾布抵抗 ζ_c の値を用いて、本体圧力損失 ΔP の時間変化を数値シミュレーションした結果を Figs.4.4(a),(b),(c)に○印で示す。一方、第3章で、比抵抗 α は濾過速度 u の0.5乗に比例して変化する結論を得ている。本章で提示している斑落ちモデルでは2面の濾過速度に相違が生じることから、比抵抗 α に速度変化に対する依存性を考慮した場合の数値シミュレーション結果も Figs.4.4(a),(b),(c)に●印で示す。比抵抗 α に速度変化に対する依存性を考慮した場合には、依存性を考慮しない場合に較べて初期段階において本体圧力損失の上昇勾配に差が生じる。また、清浄濾布の面積比率 ε_c が大きくなるほどその差が広がるが、本体圧力損失の時間変化挙動および数値に大きな差異は見られない。これより、比抵抗 α に速度変化に対する依存性を考慮しなくても本体圧力損失の時間変化挙動を精度よく表すことができると言える。

平均濾過速度 u_m を変えた場合に、各粉体ごとに得られた濾過面 C の面積比率 ε_c と汚れ濾布抵抗 ζ_D を Fig.4.6 と Fig.4.7 に示す。粉体ごとに数値的な相違はあるが、炭酸カルシウムと珪砂の ε_c は平均濾過速度の増加にしたがって大きくなる傾向にある。それに対し珪藻土の ε_c は、ほぼ一定値を示している。この相違は、粉体の凝集性あるいは濾布との付着力によるものと推察される。一方、 ζ_D は平均濾過速度の影響をほとんど受けず、各粉体ごとにほぼ一定値を示した。この傾向および粉体ごとの数値の相違に対する定量的な検討

は今後の課題である。

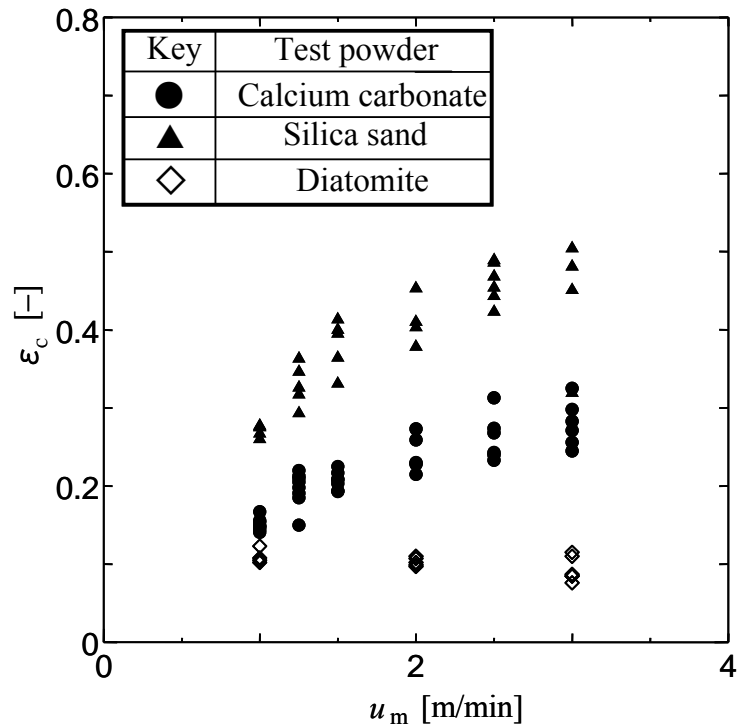


Fig.4.6 Effects of filtering velocity on the fraction of virgin area

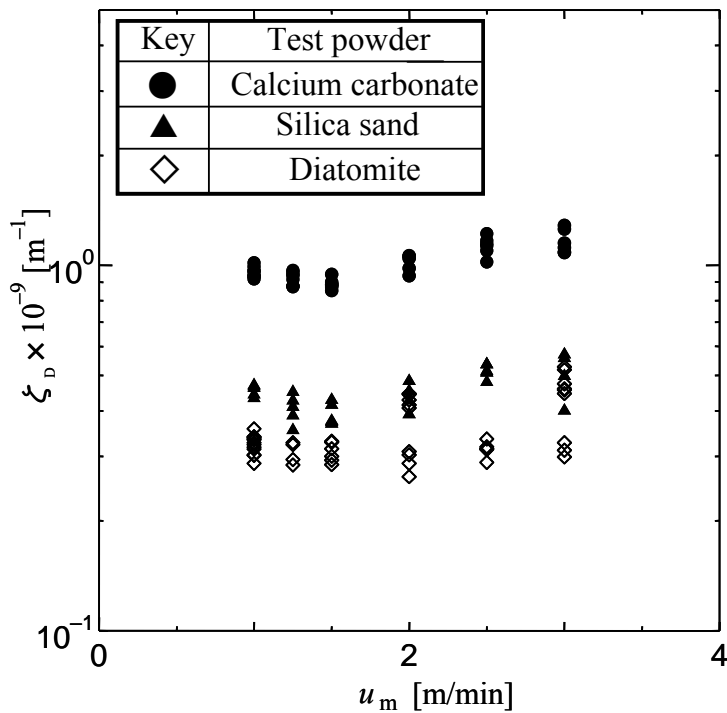


Fig.4.7 Effects of filtering velocity on the specific resistance of filter cloth with residual dust

4.4.2 連続運転の実験結果と数値シミュレーション結果

回分運転と同様に、試験した3粉体について、列平均の濾過速度 u_{av} を 2.0m/min とした時に実測した本体圧力損失の時間変化曲線を、Figs.4.8(a),(b),(c)に実線で示す。また、同図には回分運転で得られた ε_c , ζ_D , α , ζ_c の値を用いて Eqs.(4.6)~(4.8)により数値シミュレーションした本体圧力損失の時間変化を破線で示す。なお、数値シミュレーションで用いた含塵濃度 c は、供給量基準の含塵濃度と回分運転で実測した濾布への到達率の積とした。本図から、3粉体とも数値シミュレーション結果が実測値より小さな値を示していることが分かる。この相違は連続運転での全ての実験条件において共通している。その理由として、本実験装置での連続運転はパルスジェットによる払落とし時間が 0.1s と短く、その直後から濾過操作が始まるために、一旦は払落とされた粉塵量の何割かが瞬間的に濾布に再付着して汚れ濾布抵抗 ζ_D が回分運転で測定した値より大きくなっていることが推察される。この再付着現象は、凝集しにくく比重の小さな粉塵ほど顕著な傾向を示す。この場合、実用的に運転されている連続運転型バグフィルターでは、払落とし操作を行っても殆ど粉塵が系外に排出されず圧力損失が単調増加してしまうという現象で観察されているが、定量的には把握されていない。

ここで、 ε_c , α , ζ_c の値は変えずに、汚れ濾布抵抗 ζ_D を払落とし直後の圧力損失に合う値として数値シミュレーションした場合の結果を Figs.4.8(a),(b),(c)に○印で示す。本図から、本章で提出した斑落ちモデルを用いた数値シミュレーション結果は、全時間領域で本体圧力損失の時間変化挙動を良好に表すことができることが分かる。連続運転における汚れ濾布抵抗 ζ_D と回分運転で測定した汚れ濾布抵抗 ζ_D との差は、濾過面 C の面積比率 ε_c に比例して大きくなる傾向にあるが定量的な検討は今後の問題として残る。

Fig.4.9 では Fig.4.8(a)の炭酸カルシウムの実験結果について、連続運転における汚れ濾布抵抗 ζ_D の値を用いて、比抵抗 α に速度依存性を考慮した場合と速度依存性を考慮しない場合で、本体圧力損失の時間変化挙動にどの程度の差異が生じるかを示す。ここで、 ε_c と ζ_c は回分運転で測定した値とし、速度依存性を考慮した場合の比抵抗 α は、第3章でも検討したように Eqs.(4.6),(4.7)中の比抵抗 α を $\alpha = \alpha_{av}(u/u_{av})^{0.5}$ と置いて数値シミュレーションを行った。

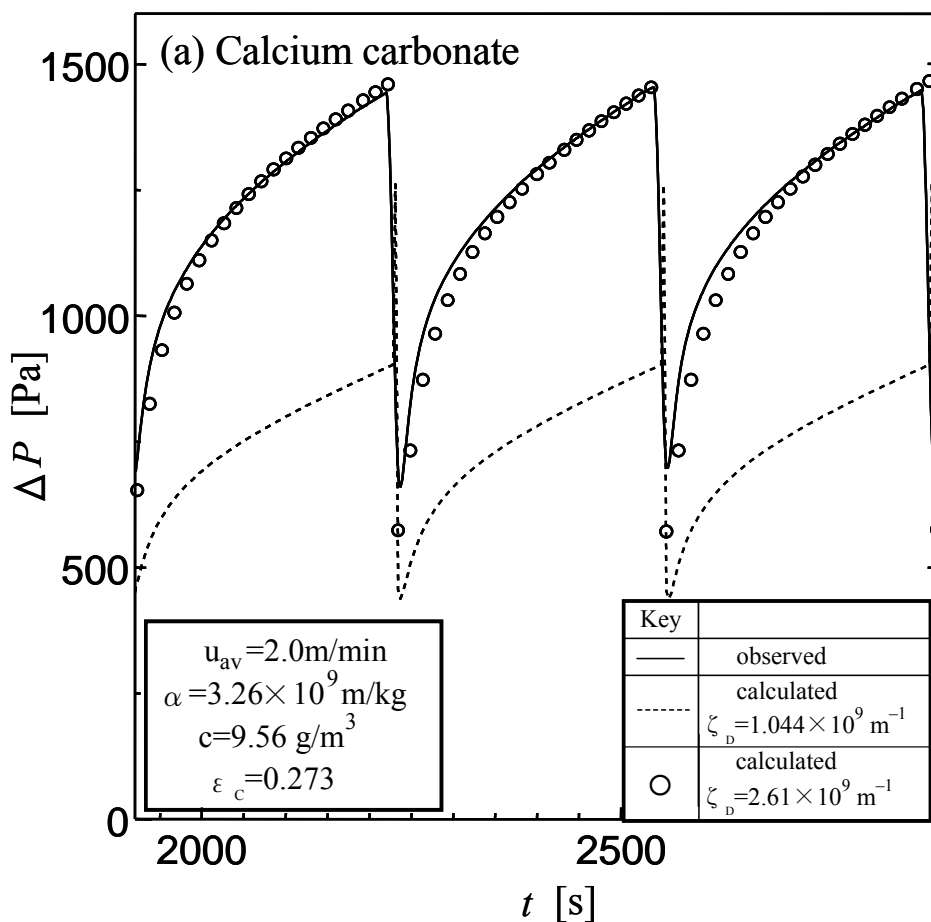


Fig.4.8 (a) Behavior of total pressure drop for calcium carbonate by continuous filtering operation in 3-compartment Bag filter and the simulation results

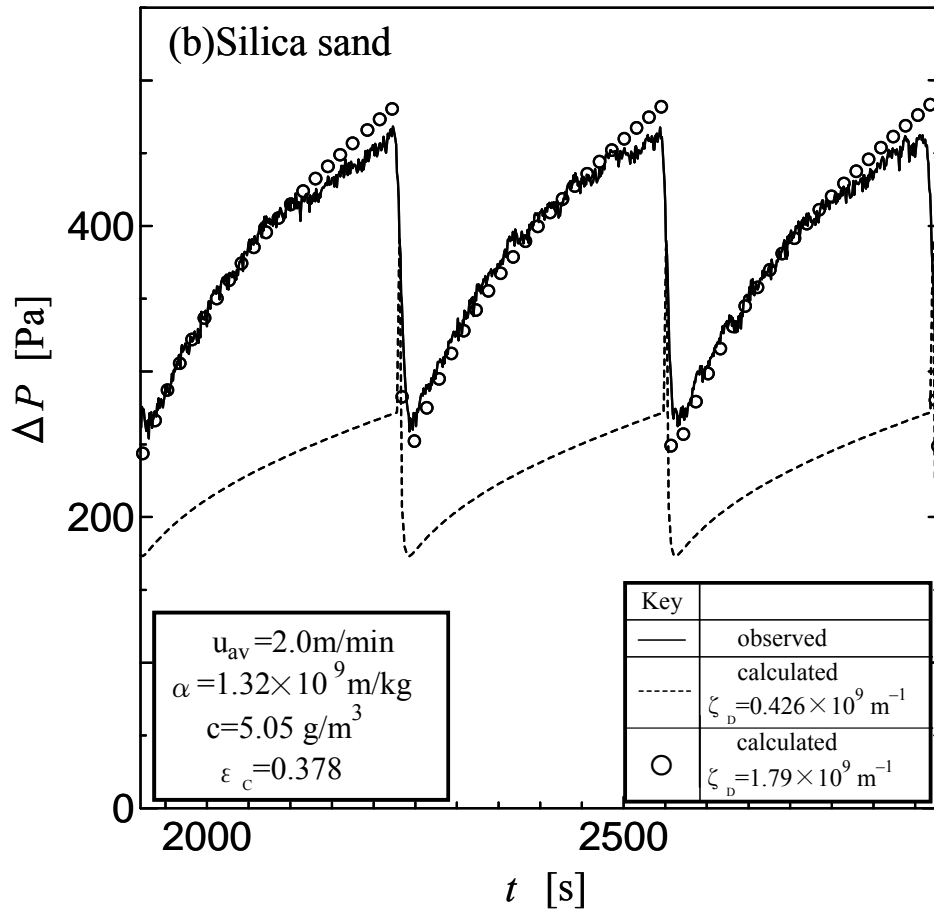


Fig.4.8 (b) Behavior of total pressure drop for silica sand by continuous filtering operation in 3-compartment bag filter and the simulation results

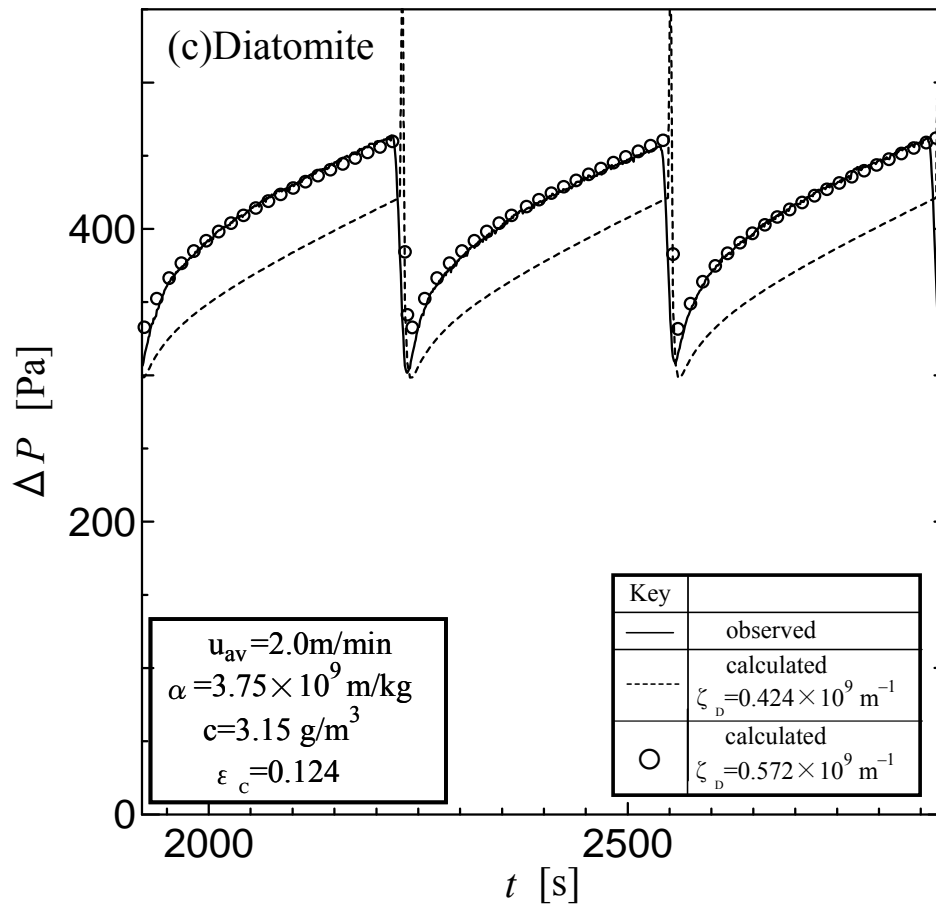


Fig.4.8 (c) Behavior of total pressure drop for diatomite by continuous filtering operation in 3-compartment bag filter and the simulation results

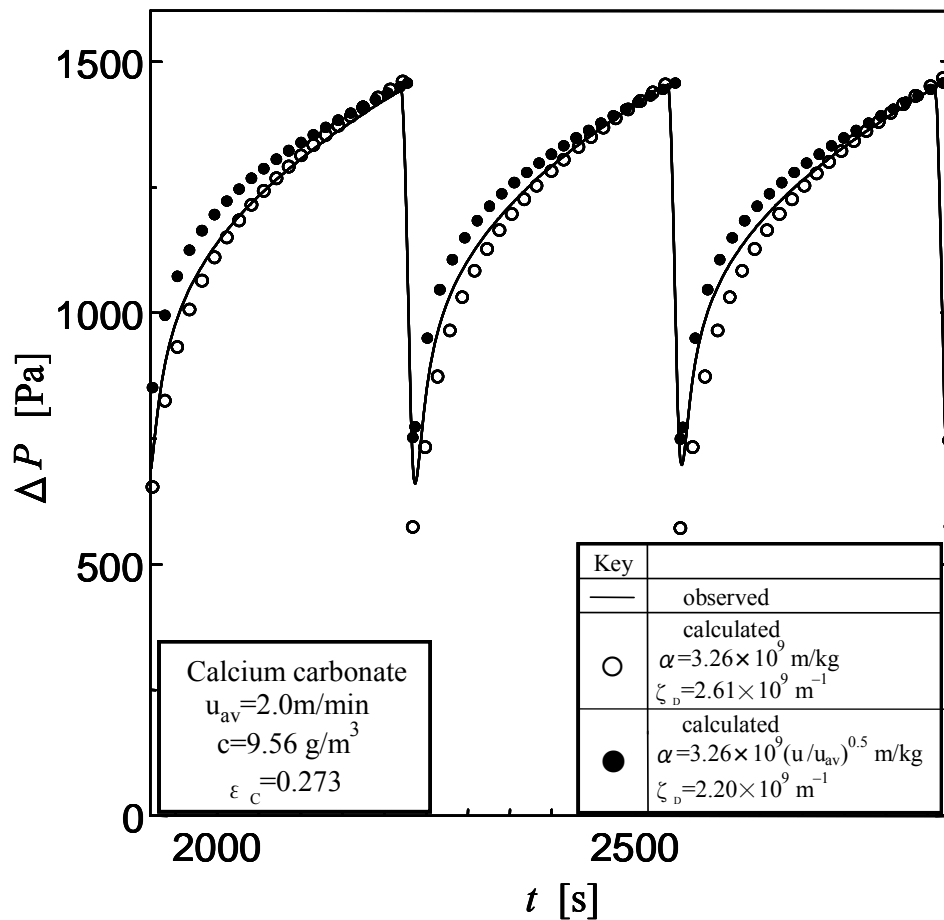


Fig.4.9 Behavior of total pressure drop for calcium carbonate by continuous filtering operation in 3-compartment bag filter and the simulation results

Fig.4.9 より、比抵抗 α に速度依存性を考慮した場合の実験結果を満足する汚れ濾布抵抗 $\zeta_D (=2.20 \times 10^9\text{ m}^{-1})$ は、考慮しない場合の汚れ濾布抵抗 $\zeta_D (=2.61 \times 10^9\text{ m}^{-1})$ に較べて小さくなるが、本体圧力損失の時間変化挙動は回分運転時の結果と同様に初期段階において上昇勾配に差が生じるものの、全体的な時間変化挙動には大きな差異は見られないことが分かった。

4.5 一様払落としモデルとの比較

第2章第8節では、炭酸カルシウムに対する本体圧力損失の時間変化挙動の実測値と一様払落としモデルによる数値シミュレーション結果との比較(Fig.2.17 参照)を示した。本節では、本章で提示した斑落ちモデルによる数値シミュレーション結果を示し、一様払落としモデルとの比較を行う。

斑落ちモデルによる数値シミュレーション条件は、Table 2.2 で示した運転条件と下記に示す ζ_C , ε_C , α , ζ_D を用いた。

$$\begin{aligned}\zeta_C &= 0.048 \times 10^9 \text{ m}^{-1} & \varepsilon_C &= 0.21 \\ \alpha &= 3.33 \times 10^9 \text{ m/kg} & \zeta_D &= 0.978 \times 10^9 \text{ m}^{-1}\end{aligned}$$

ここで、濾過面 C の面積比率 ε_C は炭酸カルシウムでの平均濾過速度 $u_{av} = 1.5 \text{ m/min}$ における回分実験で得られた値とし、比抵抗 α は第3章で得られた実験式 Eq.(3.17) から求めた。 ζ_D は、Eqs.(4.6)~(4.8) と実測された ΔP_{FIN} (552Pa) から算出した。なお、比抵抗 α には速度変化に対する依存性を考慮せず一定値とした。

数値シミュレーションにより得られた本体圧力損失の時間変化挙動を Fig.4.10 に○印で示す。ここでも圧力損失の測定に使用した空圧機器に応答遅れが生じるため、数値シミュレーションには時定数 1.0s の一次応答遅れを考慮した。なお、本図には比較のため一様払落としモデルによる数値シミュレーション結果も破線で示した。

斑落ちモデルを用いた場合、最終圧損 ΔP_{FIN} は実測値 552Pa に対して計算値 553Pa、初期圧損 ΔP_{IN} については、実測値 266Pa に対して計算値 268Pa と高い精度で算出できることが分かった。また、本体圧力損失の時間変化挙動についても実験値と計算値は殆ど一致した。これより、斑落ちモデルはバグフィルターの圧力損失の時間変化挙動を推算するうえで有用なモデルと言える。

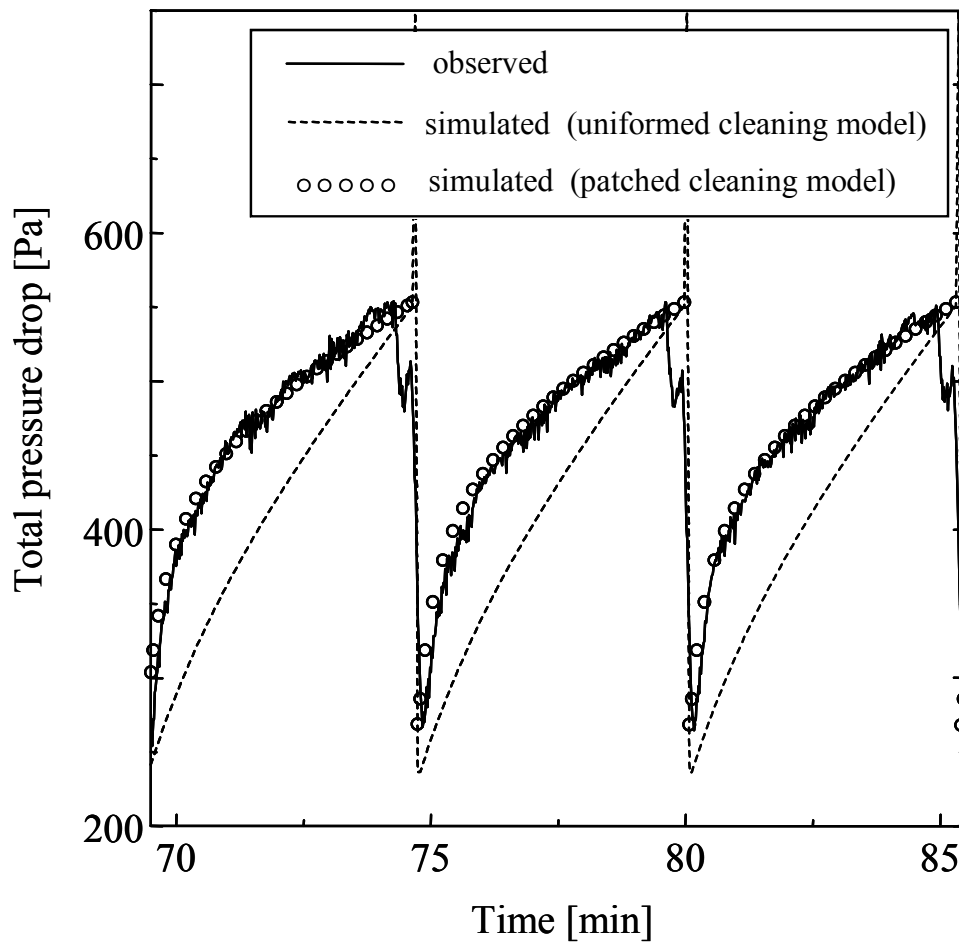


Fig.4.10 Behavior of total pressure drop for calcium carbonate by continuous filtering operation in 3-compartment bag filter and the simulation results

4.5 結 言

バグフィルターにおいて、払落とし操作後の濾過面に残留する粉塵量が場所によって差異があるという実験観察結果から、濾過面が粉塵の残留している濾過面と清浄濾布状態まで払落とされている濾過面の2面で構成されているとする斑落ちモデルを提示し、次のような結論を得た。

1. 汚れ濾布抵抗 ζ_D を有する濾過面と清浄濾布抵抗 ζ_C を有する濾過面の面積比率を、それぞれ ε_D と ε_C とした斑落ちモデルに基づく数値シミュレーション結果が、回分運転における本体圧力損失の全時間領域での実測された時間変化挙動と良好に一致することを示した。
2. 回分運転から得られた比抵抗 α 、汚れ濾布抵抗 ζ_D 、清浄濾布の面積比 ε_C 、清浄濾布抵抗 ζ_C を用いて連続運転における本体圧力損失の時間変化挙動を数値シミュレーションした結果、汚れ濾布抵抗 ζ_D を補正することで実測値を精度よく表すことができることを示した。
3. 濾過操作中の濾過速度変化に対応する比抵抗 α の速度依存性を考慮した場合、回分運転における本体圧力損失値は速度依存性を考慮しなかった場合のそれと殆ど変わらないことが分かった。また、連続運転型である3列構成バグフィルターの汚れ濾布抵抗 ζ_D は、速度依存性を考慮しなかった場合のそれより僅かに小さな値を与えた。しかし、本体圧力損失の時間変化挙動は比抵抗 α の速度依存性にあまり影響を受けないことが分かった。

Nomenclature

A_0	= total filter cloth area	[m ²]
A_C	= virginal filter cloth area	[m ²]
A_D	= filter cloth area with residual dust	[m ²]
c	= dust concentration based on collected dust on filter cloth	[kg/m ³]
m_p	= dust loading on filter cloth	[kg/m ²]
N	= number of compartments	[—]
Q	= total gas flow rate	[m ³ /s]
Q_C	= gas flow rate in virginal filter cloth area	[m ³ /s]
Q_D	= gas flow rate in filter cloth area with residual dust	[m ³ /s]
$Q_{C,i}$	= gas flow rate in virginal filter cloth area of i-th compartment	[m ³ /s]
$Q_{D,i}$	= gas flow rate in filter cloth area with residual dust of i-th compartment	[m ³ /s]
t	= time	[s]
t_1	= filtering time	[s]
t_2	= cleaning (pulse jet) time	[s]
t_3	= filtering time [= $t - (i - 1) (t_1 + t_2)$]	[s]
u	= filtering velocity for filtering operation	[m/s]
u'	= filtering velocity for cleaning operation	[m/s]
u_{av}	= average filtering velocity for continuous filtering operation	[m/s]
u_C	= filtering velocity in virginal filter cloth area	[m/s]
u_D	= filtering velocity in filter cloth area with residual dust	[m/s]
u_i	= filtering velocity in i-th compartment for filtering operation	[m/s]

u_m	= average filtering velocity for batch filtering operation	[m/s]
$u_{C,av}$	= average filtering velocity in virginal filter cloth area of i -th compartment for filtering operation	[m/s]
$u_{D,av}$	= average filtering velocity in filter cloth area with residual dust of i -th compartment for filtering operation	[m/s]
$u'_{C,av}$	= average filtering velocity in virginal filter cloth area of i -th compartment for cleaning operation	[m/s]
$u'_{D,av}$	= average filtering velocity in filter cloth area with residual dust of i -th compartment for cleaning operation	[m/s]
$u_{C,i}$	= filtering velocity in virginal filter cloth area of i -th compartment for filtering operation	[m/s]
$u_{D,i}$	= filtering velocity in filter cloth area with residual dust of i -th compartment for cleaning operation	[m/s]
$u'_{C,i}$	= filtering velocity in virginal filter cloth area of i -th compartment for cleaning operation	[m/s]
$u'_{D,i}$	= filtering velocity in filter cloth area with residual dust of i -th compartment for cleaning operation	[m/s]
α	= specific resistance of dust cake	[m/kg]
α_{av}	= specific resistance of dust cake for u_{av}	[m/kg]
γ	= gas density	[kg/m ³]
ΔP	= total pressure drop for bag filter	[Pa]
$\Delta P'$	= filter cloth pressure drop with dust loading	[Pa]
$\Delta P''$	= machine pressure drop	[Pa]
ΔP_0	= total pressure drop defined in Eq.(4.11)	[Pa]
ΔP_∞	= total pressure drop defined in Eq.(4.12)	[Pa]
$\Delta P''_{av}$	= machine pressure drop for u_{av}	[Pa]

ΔP_C	= total pressure drop in virginal filter cloth area	[Pa]
ΔP_D	= total pressure drop in filter cloth area with residual dust	[Pa]
$\Delta P''_m$	= machine pressure drop for u_m	[Pa]
$\Delta P_{C,i}$	= total pressure drop in virginal filter cloth area of i -th compartment	[Pa]
$\Delta P_{D,i}$	= total pressure drop in filter cloth area with residual dust of i -th compartment	[Pa]
ε_C	= fraction of virginal filter cloth area	[—]
ε_D	= fraction of filter cloth area with residual dust	[—]
ζ_d	= specific resistance of filter cloth with residual dust by uniformed cleaning model	$[m^{-1}]$
ζ_C	= specific resistance of virginal filter cloth	$[m^{-1}]$
ζ_D	= specific resistance of filter cloth with residual dust by patched cleaning model	$[m^{-1}]$
λ	= machine resistance coefficient	[—]
μ	= gas viscosity	$[Pa \cdot s]$

Literature Cited

Dennis, R., R. W. Cass and R. R. Hall ;

”Dust Dislodgement from Woven Fabrics Versus Filter Performance,”
Journal of the Air Pollution Control Association, **28**, 47-51(1978)

Iinoya, K. and K. Makino ;

“Bag Filter no Seinousuitei,” Shujin Souchi no Seinou, Iinoya, K. ed.,
pp.51-59, Sangyo Gijutsu Center, Tokyo, Japan (1976)

Ikeno, H. and T. Yoneda ;

“Pressure Drop in Multi-Compartment Bag Filter,” *Journal of the
Society of Powder Technology* , Japan, **20**,142-146 (1983)

Kanaoka, C and Y. Yao ;

“Time Dependency of the Pressure Drop in a Frat Type Pulse Jet
Fabric Filter,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **29**, 267-271 (2003)

Kimura, N. and M. Shirato ;

“Collection Efficiency of Dry Cloth-Filters with Dust Loading,”
Kagaku Kogaku, **34**, 984-990 (1970)

Mori, Y. ;

“Performance and Operation for Bag Filter,” Doctor Thesis, Kyoto
Univ., Japan (1979)

Mumford, A. R. ; Plant and Process Ventilation, W.C.L.Hemeon ed.,
113-117, The Industrial Press, New York , USA (1963)

第 5 章

斑落ちモデルに基づく連続運転型

バグフィルターの圧力損失特性の解析

5.1 緒 言

バグフィルターの払落とし操作後の濾過面が斑状態になっていることは、Dennis *et al.*(1978), Mori (1979)によって提示されている。しかしながら、第4章で記述したように Dennis *et al.*(1978)は払落とし操作後の濾過面を、全く払落とされない部分とある程度まで払落とされる部分に分けたモデルを用いることで回分運転の圧力損失を表現できることを示しているが、数値的に解析するまでには至っていない。また、Mori (1979)は払落とし操作後の濾過面を、濾布内部に堆積した部分と全く払落とされていない部分および一部が払落とされた部分に分け、その比率を変数として払落とし操作過程の任意の時点での圧力損失を算出できることを示しているが、集塵再開後の圧力損失の挙動への影響については言及していない。最近では、Kanaoka and Kishima(1998)がセラミックフィルターを用いた払落とし実験から、払落とし力によって斑落ちの程度が変わることを報告している。また、Ferrer and Smith(1998)は捕集堆積した粉塵層を格子状に分割して付着力の分布があると仮定し、斑落ち現象を力学的に検討している。このように、斑落ち現象についての実験的

および解析的研究がすすめられてはいるが、斑落ち現象が集塵時の圧力損失の挙動にどのような影響を及ぼすかについて言及しているものは殆ど報告されていない。

第4章では、払落とし後の濾過面を払落とし操作によってある程度まで払落とされる部分と清浄濾布状態まで払落とされる部分の2面に分けた「斑落ちモデル」を提示し、その数値シミュレーション結果が、回分運転および連続運転型バグフィルターにおける本体圧力損失の時間変化挙動を精度良く表現できることを示した。

本章では、第2章で提示した払落とし直前の第 N 室(または第 N 列)の時間平均の濾過速度 \bar{u}_N と室平均の濾過速度 u_{av} との比 m ($=\bar{u}_N/u_{av}$)と、 u_{av} に対する各室の時間平均の濾過速度 \bar{u}_i の分散値 σ^2 をパラメータとして導入する手法を、第4章で提示した「斑落ちモデル」に適用して理論解析を行い、数値シミュレーション結果との比較から幅広い運転条件に適用でき、さらに最終圧損だけでなく全運転時間域に適用可能な本体圧力損失に対する精度の高い相関式を導出する。また、本相関式が斑落ち程度 ε_c の大小に関わらず適用できることを示す。

5.2 斑落ちモデルと基礎式

第2章第2節で、濾布圧損 $\Delta P'$ にバグフィルターに不可欠な濾過部以外の機械圧損 $\Delta P''$ を加えた本体圧力損失 ΔP の表現式として次式を提示した。

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P' + \Delta P'' \\ &= (\zeta_d + \alpha c u t) \mu u + \frac{1}{2} \lambda \gamma v^2 \\ &= (\zeta_d + \alpha c u t) \mu u + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u^2\end{aligned}\quad (2.3)$$

第2章で用いた「一様払落としモデル」では、払落とし操作後の残留粉塵を含んだ汚れ濾布抵抗 ζ_d は全濾過面で一様と表現し

た。第4章では、払落とし操作によって濾過面に残留する粉塵量が場所によって差異があるという実験観察結果から、簡易的に濾過面が粉塵の残留した汚れ濾布抵抗 ζ_D を有する濾過面Dと、清浄濾布状態まで払落とされた清浄濾布抵抗 ζ_C を有する濾過面Cの2面で構成されているとする「斑落ちモデル」を考え、その模式図を Fig.4.1 に示した。

さらに、 N 室(または N 列)で構成されるバグフィルターでの連続運転の場合を考え(Fig.4.2 参照)、第1室目を払落とししてから t 時間後における全室濾過時の第 i 室の各濾過面に対応した本体圧力損失を下記に再記する Eqs.(4.6),(4.7)で表せることを示した。但し、比抵抗 α は濾過速度の変化に依存しないものと仮定して一定としている。ここで、 t_1 は全室濾過時間、 t_2 は払落とし時間、 t_3 は $t_3 = t - (i-1)(t_1+t_2) < t_1$ と表せる。従って、Eqs. (4.6), (4.7) の () 内の第2項から第4項は各々の時間中に捕集堆積する粉塵による圧力損失を表している。

$$\Delta P_{D,i} = \left(\zeta_D + \alpha c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_1} u_{D,j} dt + \alpha c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_2} u'_{D,j} dt + \alpha c \int_0^{t_3} u_{D,i} dt \right) \mu u_{D,i} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \quad (4.6)$$

$$\Delta P_{C,i} = \left(\zeta_C + \alpha c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_1} u_{C,j} dt + \alpha c \sum_{j=1}^{i-1} \int_0^{t_2} u'_{C,j} dt + \alpha c \int_0^{t_3} u_{C,i} dt \right) \mu u_{C,i} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \quad (4.7)$$

ここで、各濾過面での $0 \sim t_1$ 間の時間平均の濾過速度を $\overline{u_{D,i}}$ と $\overline{u_{C,i}}$ 、 $0 \sim t_2$ 間の時間平均の濾過速度を $\overline{u'_{D,i}}$ と $\overline{u'_{C,i}}$ とすると次式を得る。

$$\Delta P_{D,i} = \left(\zeta_D + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u_{D,j}} + \alpha c t_2 \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u'_{D,j}} + \alpha c \int_0^{t_3} u_{D,i} dt \right) \mu u_{D,i} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \quad (5.1)$$

$$\Delta P_{C,i} = \left(\zeta_C + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u_{C,j}} + \alpha c t_2 \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u'_{C,j}} + \alpha c \int_0^{t_3} u_{C,i} dt \right) \mu u_{C,i} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \quad (5.2)$$

N 室(または N 列)構成の連続運転型バグフィルターにおいては、各室は並列配置であり、全体の処理風量 Q は時間に関係なく一定であることから次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{D,1} = \Delta P_{D,2} = \cdots = \Delta P_{D,i} = \cdots = \Delta P_{D,N} \\ &= \Delta P_{C,1} = \Delta P_{C,2} = \cdots = \Delta P_{C,i} = \cdots = \Delta P_{C,N} \\ Q_D &= \sum_{i=1}^N Q_{D,i} \quad Q_C = \sum_{i=1}^N Q_{C,i} \quad Q = Q_D + Q_C = \text{const.} \\ N u_{D,av} &= (N-1) u'_{D,av} \quad , \quad N u_{C,av} = (N-1) u'_{C,av} \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

ここで、 $u_{D,av}$ 、 $u'_{D,av}$ 、 $u_{C,av}$ 、 $u'_{C,av}$ は濾過面 D および濾過面 C に対する室平均の濾過速度である。また、第 i 室の全濾過面積を A_i 、残留粉塵のある濾過面の面積を $A_{D,i}$ 、残留粉塵のない濾過面の面積を $A_{C,i}$ とし、その面積比率を ε_D 対 ε_C とすると

$$A_{D,i} = \varepsilon_D A_i \quad , \quad A_{C,i} = \varepsilon_C A_i \quad , \quad \varepsilon_D + \varepsilon_C = 1 \quad (5.4)$$

と表せる。また、第 i 室の処理風量を Q_i 、各濾過面での風量を各々 $Q_{D,i}$ 、 $Q_{C,i}$ とすると、 $Q_i = Q_{D,i} + Q_{C,i}$ から u_i は次式で表せる。

$$\begin{aligned} u_i &= Q_i / A_i = (Q_{D,i} + Q_{C,i}) / A_i \\ &= Q_{D,i} / (A_{D,i} / \varepsilon_D) + Q_{C,i} / (A_{C,i} / \varepsilon_C) \\ &= \varepsilon_D u_{D,i} + \varepsilon_C u_{C,i} \end{aligned} \quad (5.5)$$

従って、室平均の濾過速度 u_{av} は次式で表せる。

$$u_{av} = \varepsilon_D u_{D,av} + \varepsilon_C u_{C,av} = \text{const.} \quad (5.6)$$

ζ_D 、 ζ_C 、 ε_C 、 α 、 λ と室平均の濾過速度 u_{av} などの運転条件が既知であれば Eqs.(4.6),(4.7)を Eqs.(5.3),(5.5),(5.6)の条件で数値計算することで本体圧力損失 ΔP の時間変化を算出できる。

5.3 圧力損失理論式

本節でも第2章と同様に、払落とし直後の室を第1室、払落とし直前の室を第N室として、各濾過面の室平均の濾過速度 $u_{D,av}$ 、 $u_{C,av}$ と $\overline{u_{D,N}}$ 、 $\overline{u_{C,N}}$ との関係と、 $u_{D,av}$ 、 $u_{C,av}$ に対する $\overline{u_{D,i}}$ 、 $\overline{u_{C,i}}$ の分散 σ_D^2 、 σ_C^2 を導入して圧力損失理論式を導出する。

はじめに、濾過面Dに対し $u_{D,av}$ と $\overline{u_{D,N}}$ の関係を $\overline{u_{D,N}} = m_D u_{D,av}$ とおくと、

$$\begin{aligned} N u_{D,av} &= \sum_{i=1}^N \overline{u_{D,i}} = \sum_{i=1}^{N-1} \overline{u_{D,i}} + m_D u_{D,av} \\ \sum_{i=1}^{N-1} \overline{u_{D,i}} &= (N - m_D) u_{D,av} \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} \overline{u'_{D,i}} = N u_{D,av} \quad (5.8)$$

を得、各室での速度比 $\overline{u'_{D,i}}/\overline{u_{D,i}}$ が一定と仮定すると、Eqs.(5.7),(5.8) より次式を得る。

$$\overline{u'_{D,i}} = \frac{N}{N - m_D} \overline{u_{D,i}} \quad (5.9)$$

Eq.(5.9)を Eq.(5.1)に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \Delta P_{D,i} &= \left(\zeta_D + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u_{D,j}} + \alpha c t_2 \frac{N}{N - m_D} \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u_{D,j}} \right. \\ &\quad \left. + \alpha c \int_0^{t_3} u_{D,i} dt \right) \mu u_{D,i} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \end{aligned} \quad (5.10)$$

ここで、 $u_{D,i} = \overline{u_{D,i}}$ と近似し、上式を $i=1 \sim N$ まで辺々加え、濾過面Dの平均濾過速度 $u_{D,av}$ に対する $\overline{u_{D,i}}$ の分散 σ_D^2 を考慮すると濾過面Dに対応した本体圧力損失 ΔP_D は次式で表せる(Appendix E 参照)。

$$\begin{aligned} \Delta P_D &= \zeta_D \mu u_{D,av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{(N t_c - m_D t_1)}{N - m_D} u_{D,av}^2 \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \right\} \\ &\quad - \alpha c \mu \left\{ \frac{N}{N - m_D} t_2 - (t_3 - t_1) \right\} u_{D,av}^2 \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right) \end{aligned} \quad (5.11)$$

なお、機械圧損の項にある σ^2 は、室平均の平均濾過速度 u_{av} に対する各室の平均濾過速度 \bar{u}_i の分散値として表している。

同様に濾過面 C に対して、 $u_{C,av}$ と $\bar{u}_{C,N}$ の関係を $\bar{u}_{C,N} = m_C u_{C,av}$ とおくと、

$$N u_{C,av} = \sum_{i=1}^N \bar{u}_{C,i} = \sum_{i=1}^{N-1} \bar{u}_{C,i} + m_C u_{C,av}$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} \bar{u}_{C,i} = (N - m_C) u_{C,av} \quad (5.12)$$

$$\sum_{i=1}^{N-1} u'_{C,i} = N u_{C,av} \quad (5.13)$$

を得、ここでも各室での速度比 $\bar{u}'_{C,i} / \bar{u}_{C,i}$ が一定と仮定すると、Eqs.(5.12),(5.13)より次式を得る。

$$\bar{u}'_{C,i} = \frac{N}{N - m_C} \bar{u}_{C,i} \quad (5.14)$$

濾過面 D の場合と同様に、Eq.(5.14)を Eq.(5.2)に代入し、

$$\Delta P_{C,i} = \left(\zeta_C + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_{C,j} + \alpha c t_2 \frac{N}{N - m_C} \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_{C,j} + \alpha c \int_0^{t_3} u_{C,i} dt \right) \mu u_{C,i} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_i^2 \quad (5.15)$$

を得、 $u_{C,i} = \bar{u}_{C,i}$ と近似して濾過面 C の平均濾過速度 $u_{C,av}$ に対する $\bar{u}_{C,i}$ の分散 σ_C^2 を考慮すると濾過面 C に対応した本体圧力損失 ΔP_C は次式で表せる。

$$\Delta P_C = \zeta_C \mu u_{C,av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{(N t_c - m_C t_1)}{N - m_C} u_{C,av}^2 \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_C^2}{u_{C,av}^2} \right) \right\}$$

$$- \alpha c \mu \left\{ \frac{N}{N - m_C} t_2 - (t_3 - t_1) \right\} u_{C,av}^2 \left(1 + \frac{\sigma_C^2}{u_{C,av}^2} \right)$$

$$+ \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right) \quad (5.16)$$

ここで、

$$B_D = \frac{1}{2} \alpha c \frac{(N t_c - m_D t_1)}{N - m_D} \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \right\}$$

$$- \alpha c \left\{ \frac{N}{N - m_D} t_2 - (t_3 - t_1) \right\} \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \quad (5.17)$$

$$B_C = \frac{1}{2} \alpha c \frac{(Nt_c - m_C t_1)}{N - m_C} \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_C^2}{u_{C,av}^2} \right) \right\} \\ - \alpha c \left\{ \frac{N}{N - m_C} t_2 - (t_3 - t_1) \right\} \left(1 + \frac{\sigma_C^2}{u_{C,av}^2} \right) \quad (5.18)$$

$$D = \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right) \quad (5.19)$$

とおき、Eq.(5.11) $\times \varepsilon_D / \zeta_D$ と Eq.(5.16) $\times \varepsilon_C / \zeta_C$ を加算し Eq.(5.3) と Eq.(5.6) の関係を用いると次式を得る。

$$\varepsilon_D \frac{\Delta P_D}{\zeta_D} + \varepsilon_C \frac{\Delta P_C}{\zeta_C} = \left(\frac{\varepsilon_D}{\zeta_D} + \frac{\varepsilon_C}{\zeta_C} \right) \Delta P \\ = \mu u_{av} + \mu \left(\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} u_{D,av}^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} u_{C,av}^2 \right) + D \left(\frac{\varepsilon_D}{\zeta_D} + \frac{\varepsilon_C}{\zeta_C} \right) u_{av}^2 \quad (5.20)$$

$$\Delta P = \mu u_{av} \left/ \left(\frac{\varepsilon_D}{\zeta_D} + \frac{\varepsilon_C}{\zeta_C} \right) \right. + \mu \left(\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} u_{D,av}^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} u_{C,av}^2 \right) \left/ \left(\frac{\varepsilon_D}{\zeta_D} + \frac{\varepsilon_C}{\zeta_C} \right) \right. + D u_{av}^2 \quad (5.21)$$

ここで、 $u_{D,av} = k_D u_{av}$ 、 $u_{C,av} = k_C u_{av}$ とおき無次元化をおこなうと次式を得る (Appendix F 参照)。

$$y = 1 + \frac{1}{2} x \quad (5.22)$$

y と x は、下記に示す無次元数である。

$$y = \frac{G\Delta P + \alpha c \mu \left\{ \frac{N}{N - m_D} t_2 - (t_3 - t_1) \right\} u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right)}{\frac{B_D}{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2} \mu u_{av} + G D u_{av}^2} \quad (5.23)$$

$$x = \frac{\alpha c \mu \frac{N t_C - m_D t_1}{N - m_D} u_{av}^2 \left[N + \left\{ 1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right\} \right]}{\frac{B_D}{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2} \mu u_{av} + G D u_{av}^2} \quad (5.24)$$

Eqs.(5.23),(5.24)中の G は次式で表す。

$$G = \frac{\frac{\varepsilon_D + \varepsilon_C}{\zeta_D \zeta_C} B_D}{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2} B_D \quad (5.25)$$

また、 k_D と k_C は次式で表すことができる (Appendix G 参照)。

$$k_D = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5.26)$$

$$k_C = \frac{1 - \varepsilon_D k_D}{\varepsilon_C} \quad (5.27)$$

ここで、 a, b, c は以下に示す変数である。

$$a = \left(B_D \frac{\varepsilon_D^2}{\varepsilon_C^2} - B_D \right) u_{av} \quad b = \zeta_D + \frac{\varepsilon_D \zeta_C}{\varepsilon_C} + \frac{2\varepsilon_D B_C u_{av}}{\varepsilon_C^2} \quad c = \frac{\zeta_C}{\varepsilon_C} + \frac{B_C u_{av}}{\varepsilon_C^2}$$

5.4 圧力損失理論式と数値シミュレーション結果との比較

本節では、基礎式 Eqs.(4.6),(4.7)による数値シミュレーション結果と第3節に示した ΔP に対する圧力損失理論式 Eq.(5.22)との比較をする。数値シミュレーションにおいて用いた圧損パラメータ ζ_D, ζ_C, a と機械圧損 $\Delta P''$ および平均濾過速度 u_{av} , 室数 N , 含塵濃度 c などの運転条件を **Table 5.1** に示す。

また、数値シミュレーションを行うときの Eqs.(4.6),(4.7)における差分時間は、

$$\text{全室濾過時 } \Delta t = t_1 / 108 \quad \text{1列払落とし時 } \Delta t = t_2 / 20$$

とし、収束条件は $(n-1)$ 巡目と n 巡目の ΔP の全時間域での平均誤差が 0.5% 以下となったときを定常運転に入ったものとした。数値シミュレーション結果で得られた ΔP の全時間域での範囲は、

$$400 \text{ Pa} < \Delta P < 2200 \text{ Pa}$$

であり、実用バグフィルターの運転範囲にある。 $m_D, m_C, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2$ お

よび $\sigma_c^2/u_{c,av}^2$ は数値シミュレーションにより求められ、本数値シミュレーション条件においては下記の範囲であった。

$$0.68 < m_D < 1.26 \qquad 0.55 < m_C < 0.71$$

$$0.0012 < \sigma_D^2/u_{D,av}^2 < 0.0078 \qquad 0.16 < \sigma_C^2/u_{C,av}^2 < 0.65$$

斑落ちモデルを用いた数値シミュレーション結果の一例を Fig.5.1 に示す。

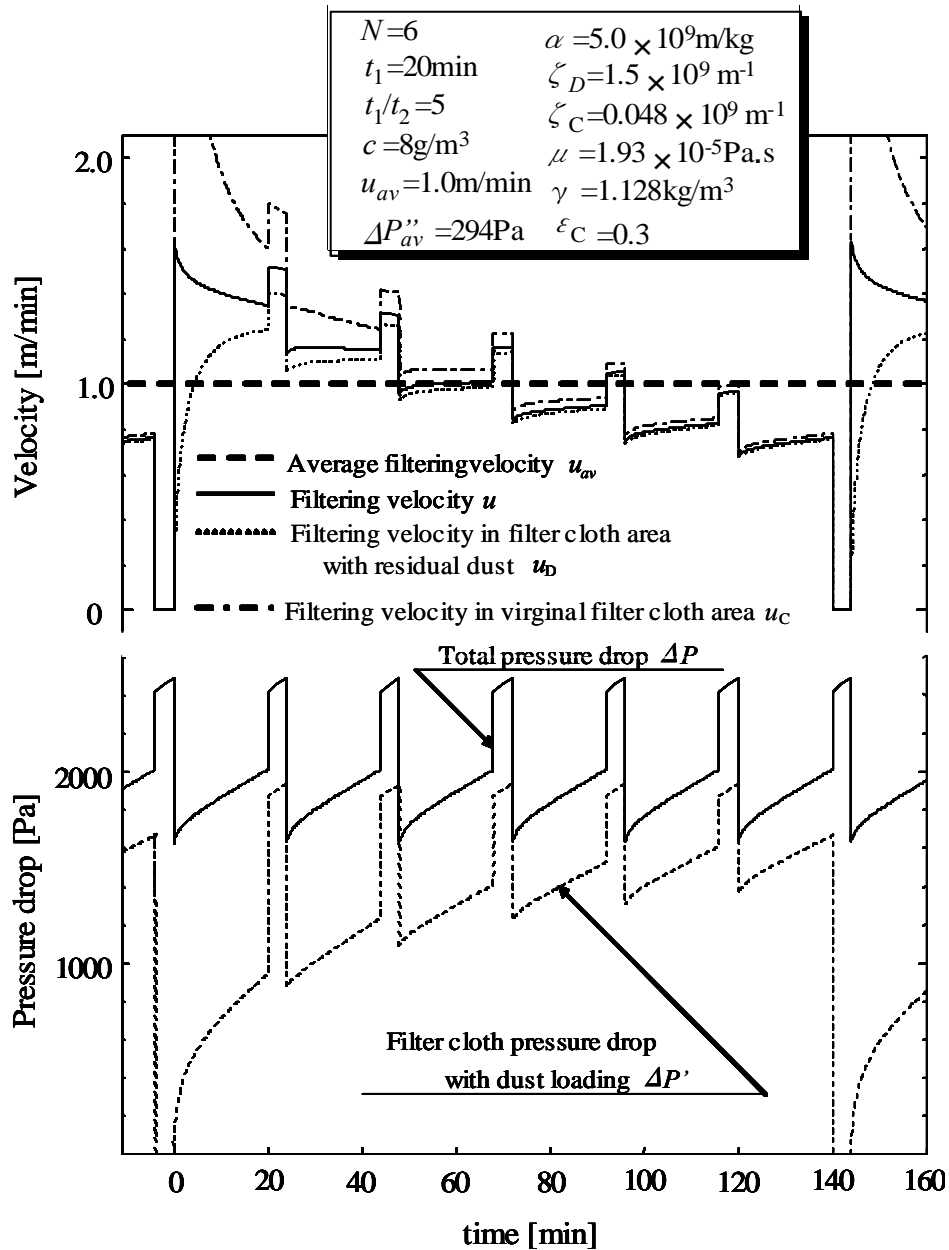


Fig.5.1 Numerical simulation results of total pressure drop, filter cloth pressure drop with dust loading and filtering velocity for six-compartment bag filter

Table 5.1 Conditions of numerical simulation

ζ_D	[m ⁻¹]	1.5×10^9	ε_D	[-]	0.7
ζ_C	[m ⁻¹]	0.048×10^9	ε_C	[-]	0.3
α	[m/kg]	5.0×10^9	t_1	[min]	10,20,30
u_{av}	[m/min]	1.0	t_1/t_2	[-]	5,10,20
N	[-]	3,6,9	μ	[Pa·s]	1.93×10^{-5}
c	[kg/m ³]	1.0~10	γ	[kg/m ³]	1.128
ΔP_{av}	[Pa]	147,294,588			

5.4.1 任意の時間における圧力損失相関式

Table 5.1 の運転条件に対して、運転時間 $t_3=0$, $t_3=t_1/2$, $t_3=t_1$ における本体圧力損失 ΔP_{IN} , $\Delta P_{1/2}$ および ΔP_{FIN} の数値シミュレーション結果を Eqs.(5.22)~(5.27)に基づいて整理すると、Figs. 5.2,5.3,5.4 となる。ここで、 m_D , m_C , $\sigma_D^2/u_{D,av}^2$ および $\sigma_C^2/u_{C,av}^2$ は数値シミュレーションで得られた値を代入した。Eq.(5.22)の理論勾配 1/2 からのずれは、理論解析時に用いた $u_{D,i} = \overline{u_{D,i}}$ および $u_{C,i} = \overline{u_{C,i}}$ の近似と各室での速度比 $\overline{u'_{D,i}}/\overline{u_{D,i}}$ および $\overline{u'_{C,i}}/\overline{u_{C,i}}$ をそれぞれ一定と仮定した点にあると考えられる。この理論勾配 1/2 からのずれを補正するため、第 2 章と同手法を用いて二次補正項を加えた相関式 Eq.(5.28)を導出した。

$$y = 1 + \frac{1}{2}x + K_t x^2 \quad (5.28)$$

Figs.5.2,5.3,5.4 には、Eq.(5.28)の結果を破線で示してある。ここで、 t_3/t_1 を変数とした数値シミュレーション結果を最小二乗法で整理し、求められた補正係数 K_t を t_3/t_1 で相関すると Fig.5.5 となり、相関式 Eq.(5.29)を得る。

$$K_t = 6.54 \times 10^{-3} (t_3/t_1)^{0.14} - 5.66 \times 10^{-3} \quad (5.29)$$

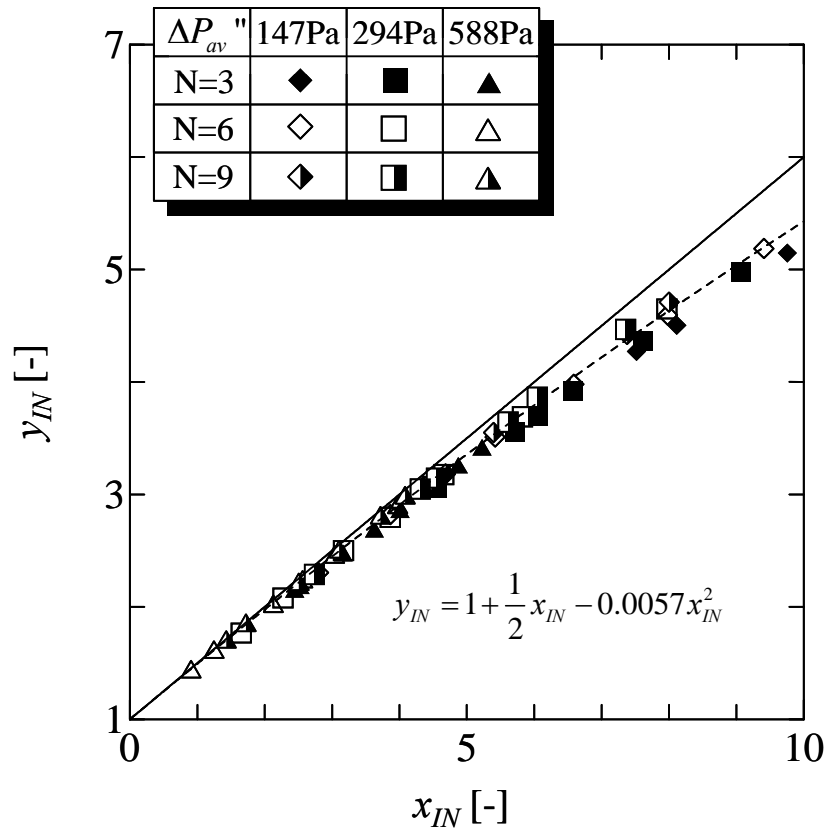


Fig.5.2 Correlation for total pressure drop at $t_3=0$

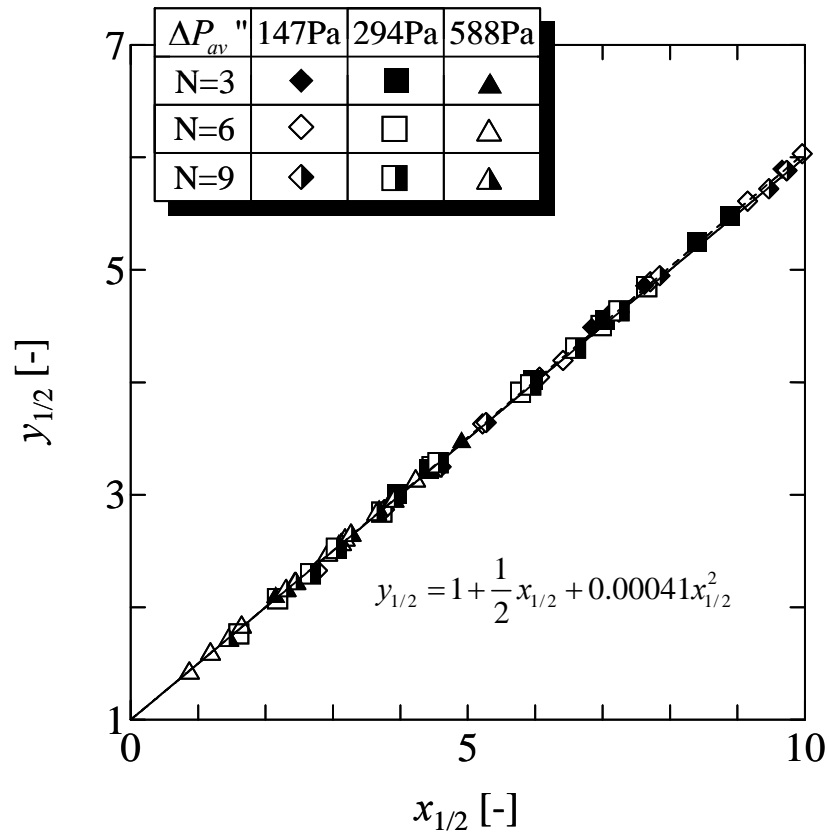


Fig.5.3 Correlation for total pressure drop at $t_3= t_{1/2}$

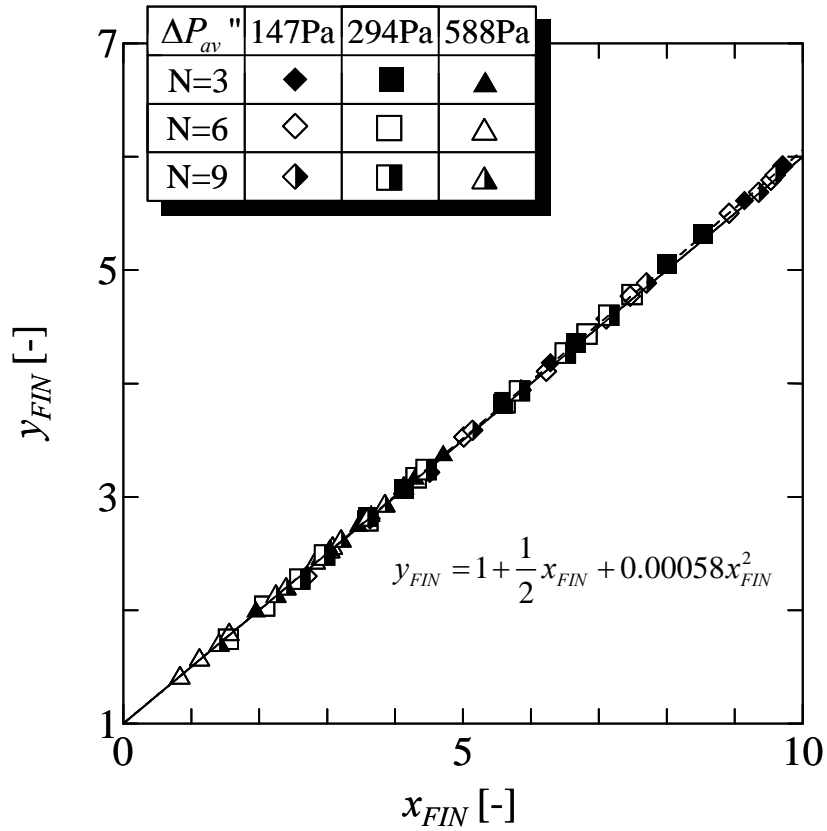


Fig.5.4 Correlation for total pressure drop at $t_3 = t_1$

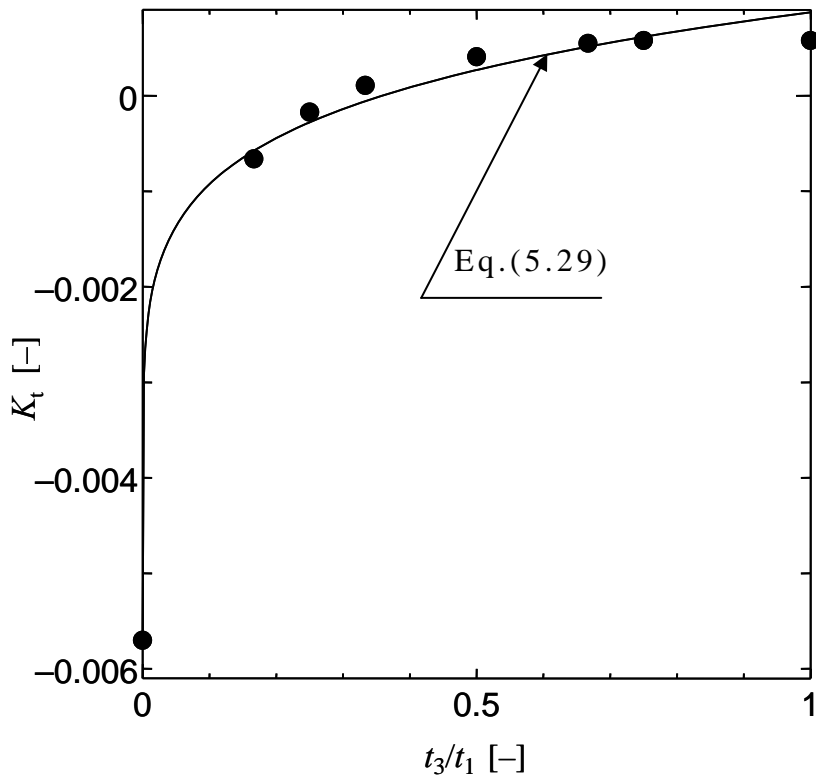


Fig.5.5 Relation of correction value K_t and t_3/t_1

5.4.2 m_D , m_C , $\sigma_D^2/u_{D,av}^2$ および $\sigma_C^2/u_{C,av}^2$ の相関

払落し直前の室(第 N 室)の濾過面 D の $\Delta P_{D,FIN}$ は、Eq.(5.10)より

$$\Delta P_{D,N,FIN} = \left(\zeta_D + \alpha c t_1 \sum_{i=1}^N \overline{u_{D,i}} + \alpha c t_2 \frac{N}{N-m_D} \sum_{i=1}^{N-1} \overline{u_{D,i}} \right) \mu u_{D,N,FIN} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{N,FIN}^2$$

を得、ここで、 $u_{D,N,FIN} = \overline{u_{D,N}}$, $u_{N,FIN} = \overline{u_N}$ と近似して、 $\overline{u_{D,N}} = m_D u_{D,av}$, $\overline{u_N} = m u_{av}$ であることを考慮し、 $u_{D,av} = k_D u_{av}$ と置くと次式を得る。

$$\Delta P_{D,N,FIN} = (\zeta_D + \alpha c N t_c k_D u_{av}) \mu m_D k_D u_{av} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 (m u_{av})^2 \quad (5.30)$$

一方、Eq.(5.11)において $t_3=t_1$ として $\Delta P_{D,FIN}$ を表すと次式を得る。

$$\begin{aligned} \Delta P_{D,FIN} = & \zeta_D \mu k_D u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \right\} k_D^2 u_{av}^2 \\ & - \alpha c \mu \frac{N}{N - m_D} t_2 k_D^2 u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right) \end{aligned} \quad (5.31)$$

$\Delta P_{D,N,FIN}$ は $\Delta P_{D,FIN}$ に等しいので、Eqs.(5.30),(5.31)から m_D に対する次の関係式を得る(Appendix H 参照)。

$$\begin{aligned} m_D = & 1 - \frac{1}{2} \frac{\alpha c (N t_c - t_1) k_D u_{av} - \frac{\lambda \gamma K^2}{\mu k_D} u_{av} (m_D - m^2)}{\zeta_D + \alpha c (N t_c - t_1) k_D u_{av} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2 \mu k_D} u_{av}} \\ & - \frac{1}{2} \frac{\alpha c k_D u_{av} \beta - \frac{1}{\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \left(\frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right)}{\zeta_D + \alpha c (N t_c - t_1) k_D u_{av} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2 \mu k_D} u_{av}} \end{aligned} \quad (5.32)$$

ここで、

$$\beta = N(t_c - t_1) \left(\frac{1 - m_D}{N - m_D} \right) - 2t_1(N - 2m_D) + N t_c \left(\frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} - 2t_1(N - m_D) \right) \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2}$$

Eq.(5.32)中の k_D は、Eq.(5.26)で算出することになり複雑であることから $k_D=1$ と単純化し、さらに Eq.(5.32)の右辺第3項を無視小と仮定すると、次式のように簡略化される。

$$m_D = 1 - \frac{1}{2} \frac{\alpha c (N t_c - t_1) u_{av} - \frac{\lambda \gamma K^2}{\mu} u_{av} (m_D - m^2)}{\zeta_D + \alpha c (N t_c - t_1) u_{av} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2 \mu} u_{av}} \quad (5.33)$$

ここで、無次元粉塵層圧損 $P_{D\alpha}^*$ および無次元機械圧損 $P_{D\lambda}^*$ をそれぞれ次のように定義すると、0～1の間の値をとる変数となる。

$$P_{D\alpha}^* = \frac{\alpha c(Nt_c - t_1)u_{av}}{\zeta_D + \alpha c(Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{\lambda\gamma K^2}{2\mu}u_{av}} \quad (5.34)$$

$$P_{D\lambda}^* = \frac{\frac{\lambda\gamma K^2}{2\mu}u_{av}}{\zeta_D + \alpha c(Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{\lambda\gamma K^2}{2\mu}u_{av}} \quad (5.35)$$

この $P_{D\alpha}^*$ と $P_{D\lambda}^*$ を Eq.(5.33)に代入すると次式を得る。

$$m_D = 1 - \frac{1}{2}P_{D\alpha}^* + P_{D\lambda}^*(m_D - m^2) \quad (5.36)$$

さらに、Eq.(5.36)の右辺の m_D の表現を右辺の m_D に再代入すると

$$\begin{aligned} m_D &= 1 - \frac{1}{2}P_{D\alpha}^* + P_{D\lambda}^* \left(1 - \frac{1}{2}P_{D\alpha}^* + P_{D\lambda}^*(m_D - m^2) - m^2 \right) \\ &= 1 - \frac{1}{2}P_{D\alpha}^* + P_{D\lambda}^* \left(1 - \frac{1}{2}P_{D\alpha}^* - m^2 \right) + P_{D\lambda}^{*2}(m_D - m^2) \end{aligned} \quad (5.37)$$

となる。 $P_{D\lambda}^*$ は、1以下であることから高次の第4項を無視すると、次式のように簡略化される。

$$\begin{aligned} m_D &= 1 - \frac{1}{2}P_{D\alpha}^* + P_{D\lambda}^* \left(1 - \frac{1}{2}P_{D\alpha}^* - m^2 \right) \\ &= 1 - \frac{1}{2} \left\{ P_{D\alpha}^* - 2P_{D\lambda}^* \left(1 - \frac{1}{2}P_{D\alpha}^* - m^2 \right) \right\} \end{aligned} \quad (5.38)$$

ここで m は、第2章第4節で求めた相関式 Eq.(2.28)で求められる。

$$m = 1 - \frac{1}{2}P_\alpha^* \left\{ 1 - P_\lambda^* \left(1 - \frac{1}{2}P_\alpha^* \right) \right\} \quad (2.28)$$

Eq.(2.28)中の P_α^* と P_λ^* に含まれる ζ_d は、一様払落としモデルの基礎式 Eq.(2.3)と第4章第4節の Eqs.(4.12),(4.13)との関係から次式で表せる。

$$\zeta_d = \varepsilon_D \zeta_D + \varepsilon_C \zeta_C \quad (5.39)$$

同様の操作を濾過面 C にも用いると次式を得る。

$$m_c = 1 - \frac{1}{2} \left\{ P_{c\alpha}^* - 2P_{c\lambda}^* \left(1 - \frac{1}{2} P_{c\alpha}^* - m^2 \right) \right\} \quad (5.40)$$

ここで、 $P_{c\alpha}^*$ と $P_{c\lambda}^*$ は次式で表す。

$$P_{c\alpha}^* = \frac{\alpha c (Nt_c - t_1) u_{av}}{\zeta_c + \alpha c (Nt_c - t_1) u_{av} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{av}} \quad (5.41)$$

$$P_{c\lambda}^* = \frac{\frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{av}}{\zeta_c + \alpha c (Nt_c - t_1) u_{av} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{av}} \quad (5.42)$$

Fig.5.6 は m_D に対する数値シミュレーション結果を Eq.(5.38) に基づいて整理したものであり、Fig.5.7 は m_c に対する数値シミュレーション結果を Eq.(5.40) に基づいて整理したものである。ここで、 z_D と z_C は下記のように定義した。

$$z_D = P_{D\alpha}^* - 2P_{D\lambda}^* \left(1 - \frac{1}{2} P_{D\alpha}^* - m^2 \right) \quad (5.43)$$

$$z_C = P_{c\alpha}^* - 2P_{c\lambda}^* \left(1 - \frac{1}{2} P_{c\alpha}^* - m^2 \right) \quad (5.44)$$

両図とも、横軸の変数 z_D, z_C が小さくなると理論勾配 (= -1/2) からのずれが生じている。これは、 z_D, z_C が小さくなると Eq.(5.32) において $k_D=1$ と見なせないことと Eq.(5.32) の右辺第 3 項および Eq.(5.37) の右辺第 4 項を無視小と見なせないためと考えられる。

横軸の変数 z_D, z_C が小さい濾過操作とは、 $P_{D\alpha}^*$ および $P_{c\alpha}^*$ が小さいか $P_{D\lambda}^*$ および $P_{c\lambda}^*$ が大きいことを意味しており、濾過操作としては、圧損パラメーター ζ_D, ζ_C と α の小さな粉塵を濾過する場合や頻繁な払落とし操作を行って捕集堆積する粉塵層の圧力損失が大きくなる場合あるいは機械圧損が大きな装置を用いて濾過操作を行う場合に相当する。

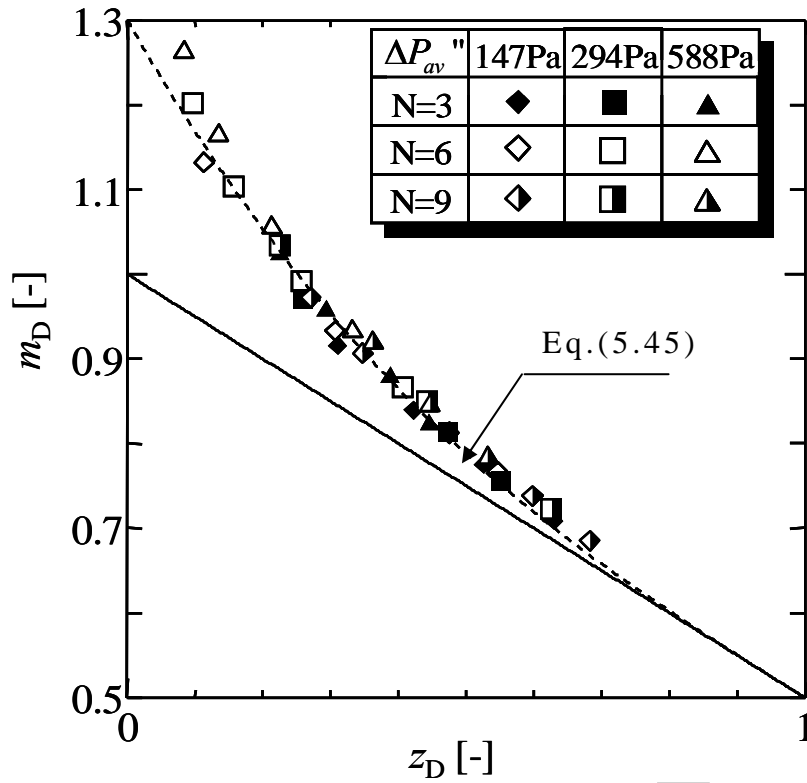


Fig.5.6 Correlation of m_D ($= \overline{u_{D,N}} / u_{D,av}$)

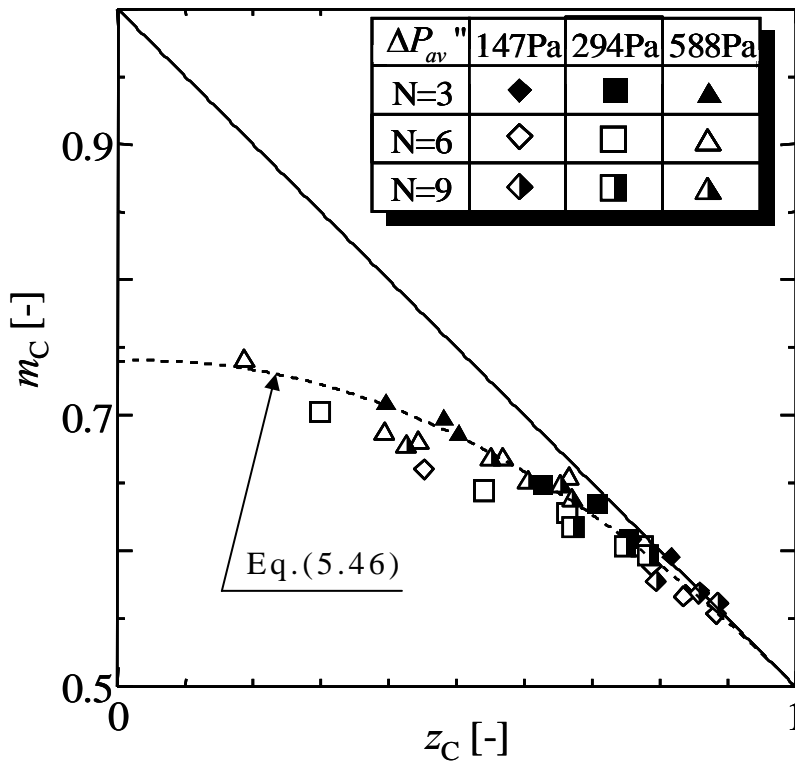


Fig.5.7 Correlation of m_C ($= \overline{u_{C,N}} / u_{C,av}$)

最小二乗法で理論勾配からのずれを補正項を用いて整理すると、 m_D と m_C に対する相関式 Eq.(5.45)と Eq.(5.46)を得る。

$$m_D = 1 - \frac{1}{2}z_D + 0.3(1 - z_C)^3 \quad (5.45)$$

$$m_C = 1 - \frac{1}{2}z_C - 0.26(1 - z_C)^2 \quad (5.46)$$

次に、濾過面Dの $\sigma_D^2/u_{D,av}^2$ に対する数値シミュレーション結果を Eq.(5.43)で定義した項 z_D を用いてまとめると Fig.5.8 となり、最小二乗法で指数と係数を求めると相関式 Eq.(5.47)を得る。

$$\frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} = 0.3z_D^4 \quad (5.47)$$

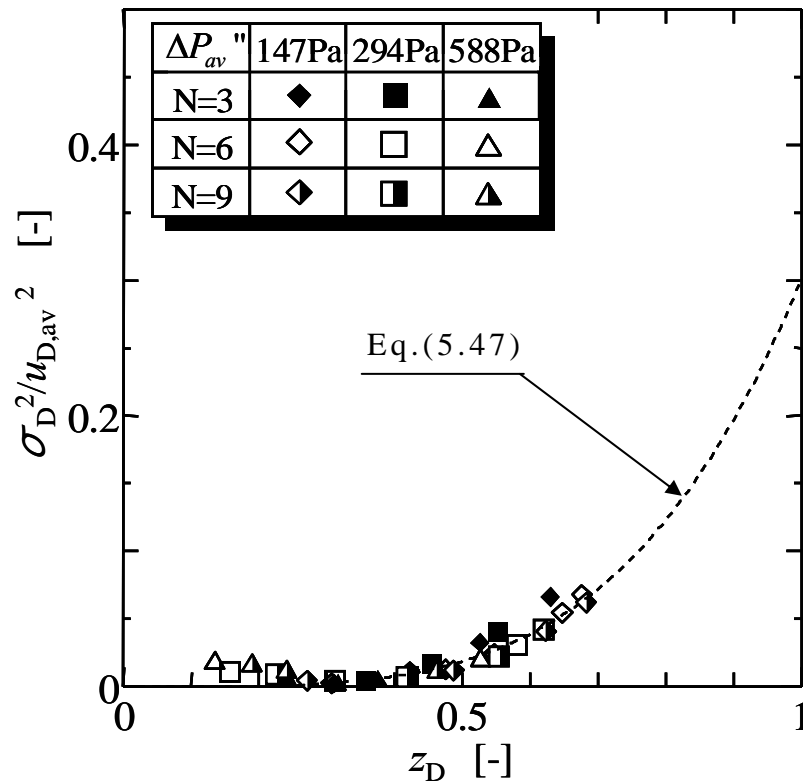


Fig.5.8 Correlation of $\sigma_D^2/u_{D,av}^2$

Fig.5.8 において、原点近くで Eq.(5.47)と数値シミュレーション結果とのずれが見られるが、 $\sigma_D^2/u_{D,av}^2$ の値が非常に小さいため無次元変数 y と x への影響は小さく問題はない。

一方、濾過面 C の分散 $\sigma_C^2/u_{C,av}^2$ については Eq.(5.44)の z_C では整理できなかつたため、下記に示す Eq.(5.48)で数値シミュレーション結果をまとめた図を Fig.5.9 に示す。Eq.(5.48)中の指数と係数は最小二乗法で決定した。

$$\frac{\sigma_C^2}{u_{av}^2} = 1.26 \left[N^{0.5} (P_{C\zeta}^*)^{0.75} (P_{C\alpha}^*)^{-0.25} (P_{C\lambda}^*)^{-0.5} \right] \quad (5.48)$$

ここで $P_{C\zeta}^*$ は次式で表す。

$$P_{C\zeta}^* = \frac{\zeta_C}{\zeta_C + \alpha c (Nt_c - t_1) u_{av} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{av}} \quad (5.49)$$

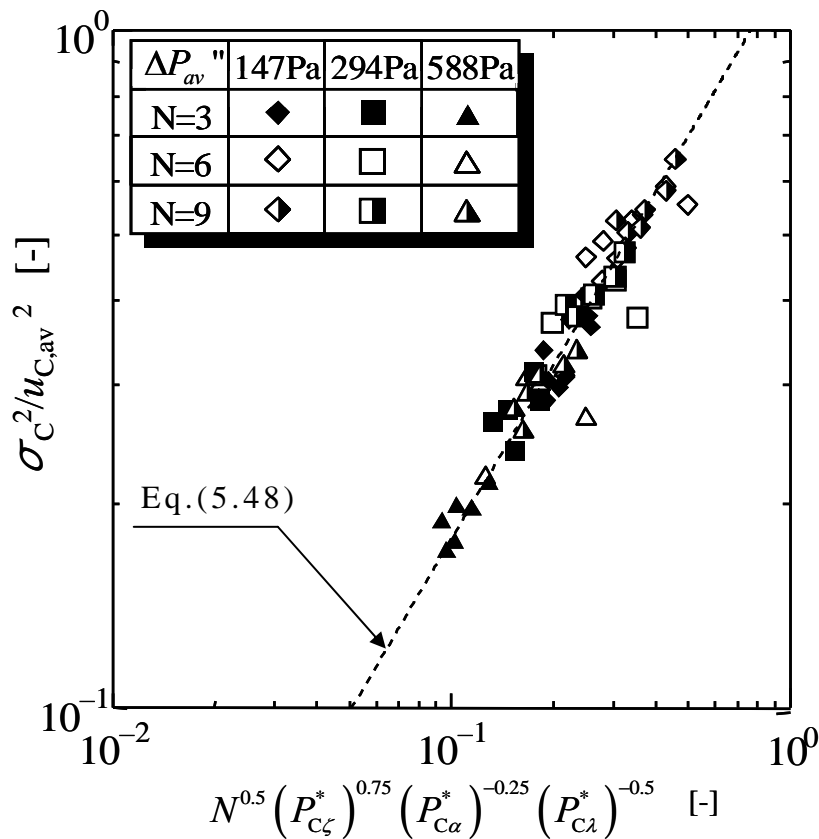


Fig.5.9 Correlation of $\sigma_C^2/u_{C,av}^2$

数値シミュレーション値と相関式 Eq.(5.48)から算出した値との平均誤差は 7.75%であるが、 $(1 + \sigma_C^2/u_{C,av}^2)$ 項の平均誤差で考えると約 2.4%となり無次元変数 y と x への影響は小さい。

5.4.3 本体圧力損失の推算

Table 5.1 の運転条件に対して数値シミュレーションで得られた $\Delta P_{IN,sim}(t_3=0)$, $\Delta P_{1/2,sim}(t_3=t_1/2)$ および $\Delta P_{FIN,sim}(t_3=t_1)$ と、前節で求めた $m_D, m_C, \sigma_D^2/u_{D,av}^2, \sigma_C^2/u_{C,av}^2$ の相関式 Eqs.(5.45)~(5.48)を用いて本体圧力損失相関式 Eq.(5.28)で推算した $\Delta P_{IN,est}, \Delta P_{1/2,est}$ および $\Delta P_{FIN,est}$ と比較した結果を Figs.5.10~5.12 に示す。また、推算誤差を Table 5.2 の上段に示す。初期圧損 ΔP_{IN} の誤差が他に較べてやや大きいですが、Eq.(5.28)により本体圧力損失を精度よく表せている。

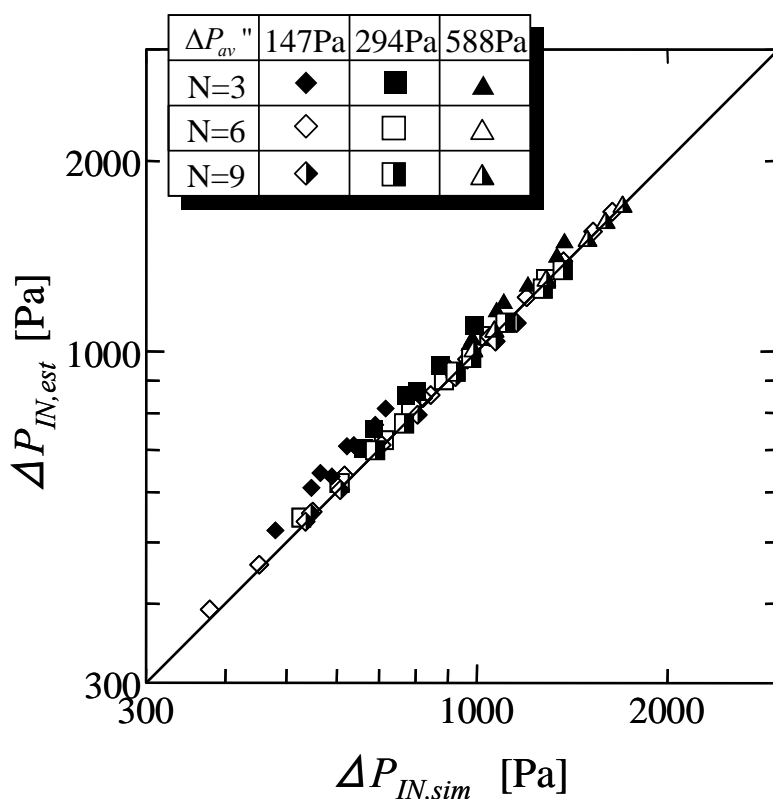


Fig.5.10 Comparison between simulated and estimated values for $\Delta P_{IN}(t_3=0)$

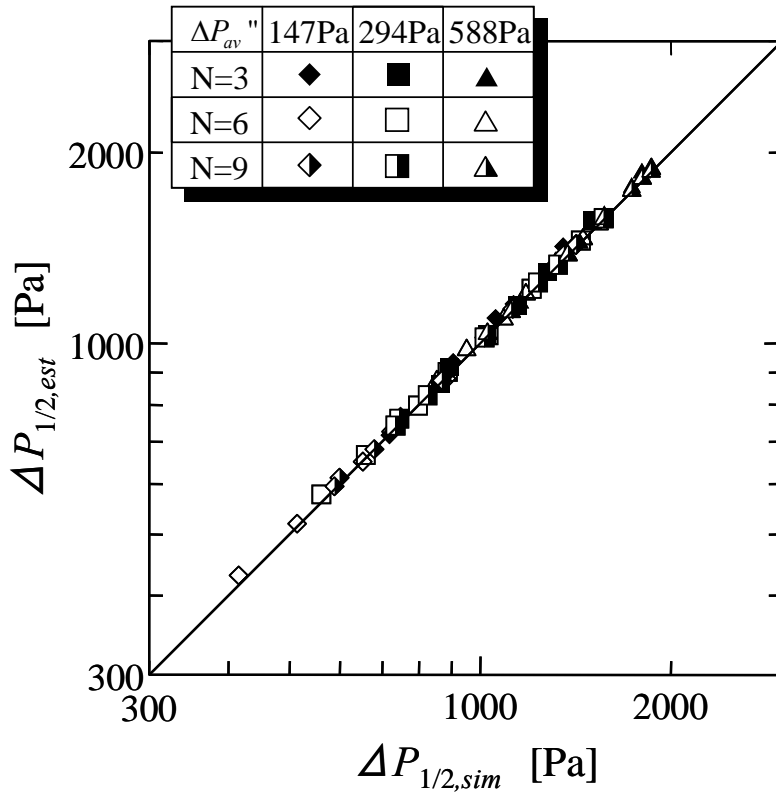


Fig.5.11 Comparison between simulated and estimated values for $\Delta P_{1/2}$ ($t_3=t_1/2$)

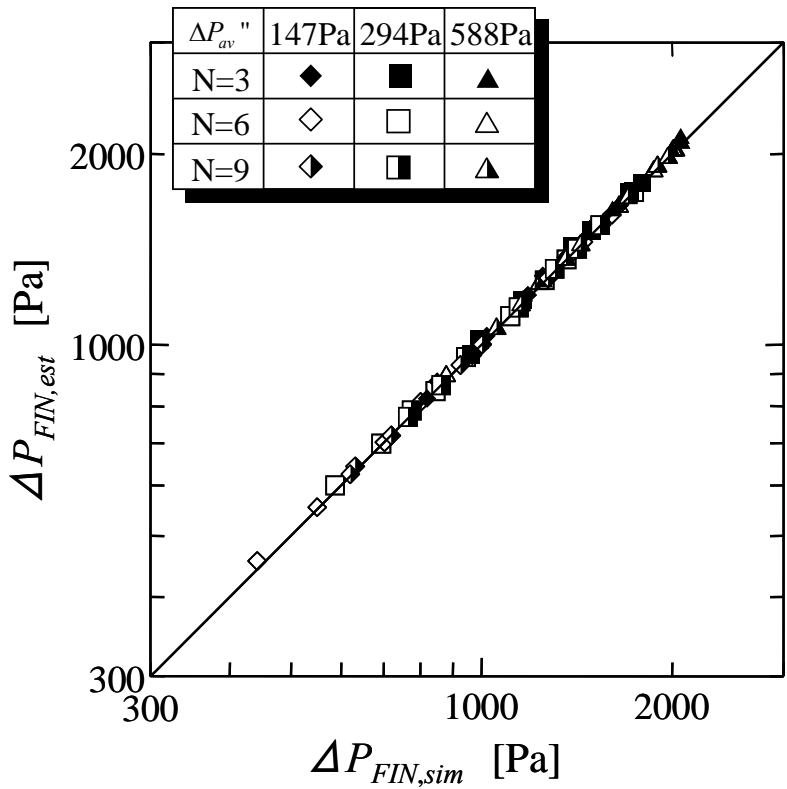


Fig.5.12 Comparison between simulated and estimated values for ΔP_{FIN} ($t_3 = t_1$)

Table 5.2 Comparison of simulated and estimated error

	ΔP_{IN}	$\Delta P_{1/2}$	ΔP_{FIN}
correlated			
$m_D, m_C, \sigma_D^2/u_{D,av}^2, \sigma_C^2/u_{C,av}^2$	3.62%	1.34%	0.91%
simplified $m_D = m_C = 1$			
$\sigma_D^2/u_{D,av}^2 = \sigma_C^2/u_{C,av}^2 = 0$	4.58%	1.13%	0.97%

5.5 簡易圧力損失相関式

前節では、 $m_D, m_C, m, \sigma_D^2/u_{D,av}^2$ と $\sigma_C^2/u_{C,av}^2$ の項を含む圧力損失相関式 Eq.(5.28)を導出したが、非常に複雑であるためパラメーターの少ない簡単な相関式が望ましい。

本節では、第3節で求めた本体圧力損失の理論式 Eq.(5.22)において $m_D = m_C = m = 1$, $\sigma_D^2/u_{D,av}^2 = 0$, $\sigma_C^2/u_{C,av}^2 = 0$ と近似し、簡易圧力損失相関式を導出する。

Eqs.(5.23),(5.24)において $m_1 = m_2 = m = 1$, $\sigma_D^2/u_{D,av}^2 = 0$, $\sigma_C^2/u_{C,av}^2 = 0$ と近似した時の y と x をそれぞれ Y と X とすると次式を得る。

$$Y = \frac{G' \Delta P + \alpha c \mu \left[\frac{N}{N-1} t_2 + (t_1 - t_3) \right] u_{av}^2}{\left[\frac{\varepsilon_D}{\zeta_D} (k_D')^2 + \frac{\varepsilon_C}{\zeta_C} (k_C')^2 \right] \mu u_{av} + \frac{1}{2} G' \lambda \gamma K^2 u_{av}^2} \quad (5.50)$$

$$X = \frac{\alpha c \mu \frac{N t_c - t_1}{N-1} (N+1) u_{av}^2}{\left[\frac{\varepsilon_D}{\zeta_D} (k_D')^2 + \frac{\varepsilon_C}{\zeta_C} (k_C')^2 \right] \mu u_{av} + \frac{1}{2} G' \lambda \gamma K^2 u_{av}^2} \quad (5.51)$$

ここで、 G', k_D', k_C' は Appendix F と Appendix G に示す G, k_D, k_C にお

いて $\sigma_D^2/u_{D,av}^2 = \sigma_C^2/u_{C,av}^2 = 0$, $m_D = m_C = m = 1$ とした変数とする。

Table 5.1 の運転条件に対して ΔP_{IN} , $\Delta P_{1/2}$ および ΔP_{FIN} について数値シミュレーションした結果を Eqs.(5.50),(5.51)に基づいて整理した図を Figs.5.13~5.15 に示す。

前節と同様に、二次補正項の係数を t_3/t_1 で整理した結果を Fig.5.16 に示す。同図から、任意の時間に対する圧力損失相関式を最小二乗法で求めると次式を得る。

$$Y = 1 + \frac{1}{2} X + K'_t X^2 \quad (5.52)$$

$$K'_t = 7.24 \times 10^{-3} (t_3/t_1)^{\frac{1}{4}} - 5.52 \times 10^{-3} \quad (5.53)$$

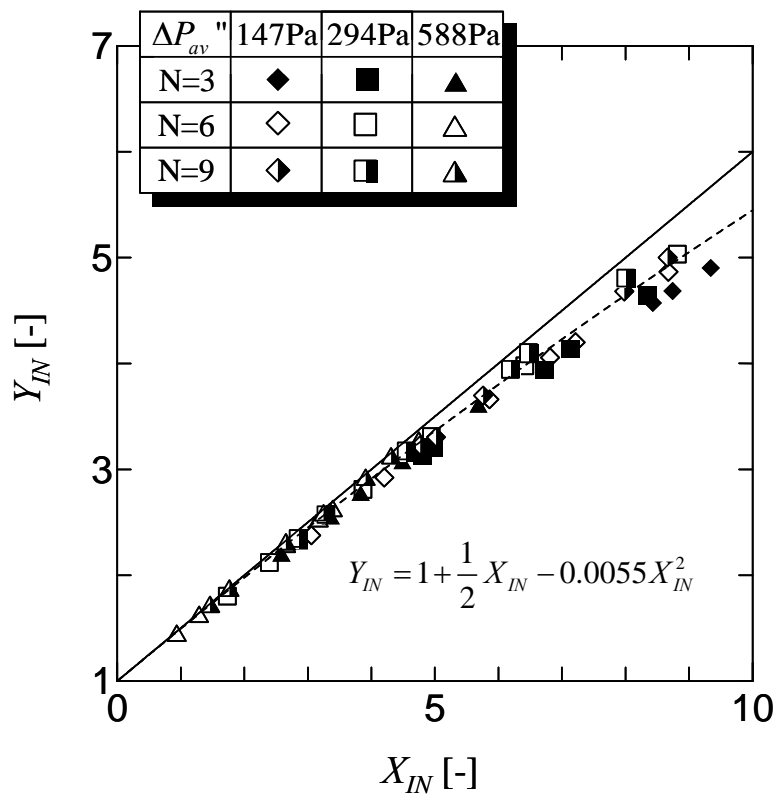


Fig.5.13 Simplified correlation for ΔP_{IN} ($t_3=0$)

$$[m_D = m_C = m = 1, \sigma_D^2/u_{D,av}^2 = \sigma_C^2/u_{C,av}^2 = 0]$$

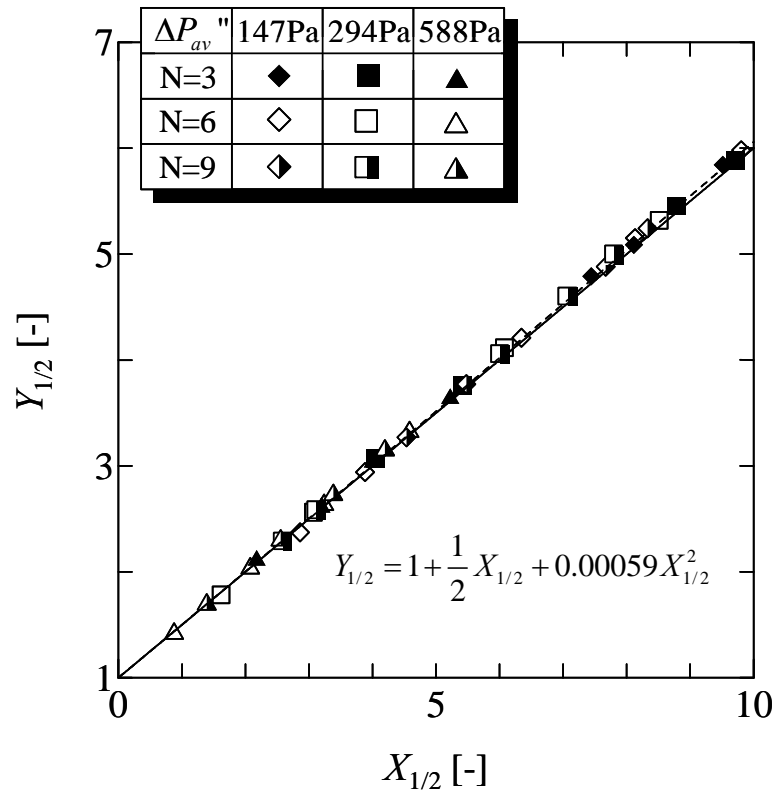


Fig.5.14 Simplified correlation for $\Delta P_{1/2}$ ($t_3=t_1/2$)

$$[m_D = m_C = m = 1, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2 = \sigma_C^2 / u_{C,av}^2 = 0]$$

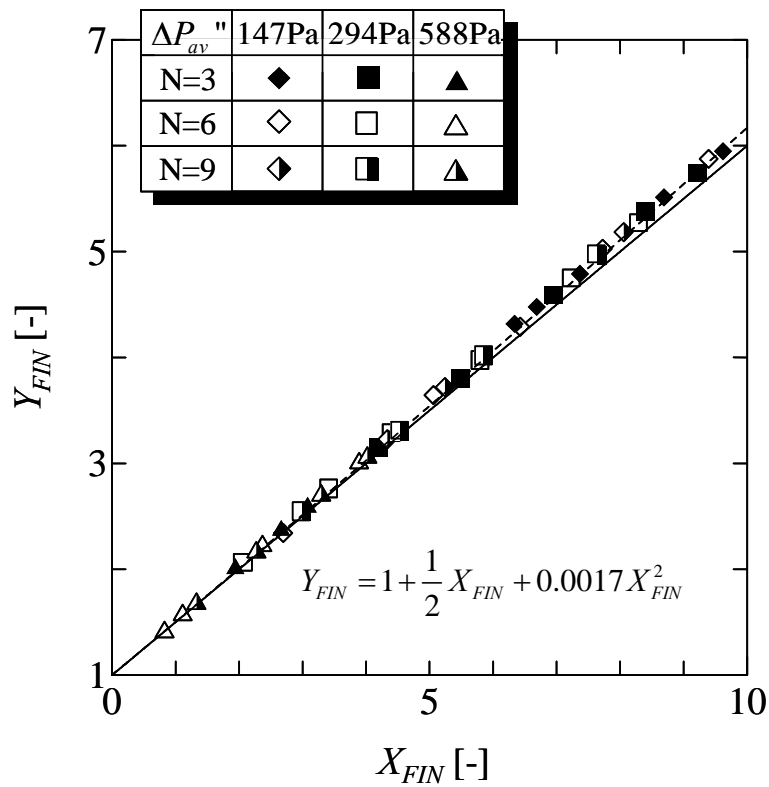


Fig.5.15 Simplified correlation for ΔP_{FIN} ($t_3= t_1$)

$$[m_D = m_C = m = 1, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2 = \sigma_C^2 / u_{C,av}^2 = 0]$$

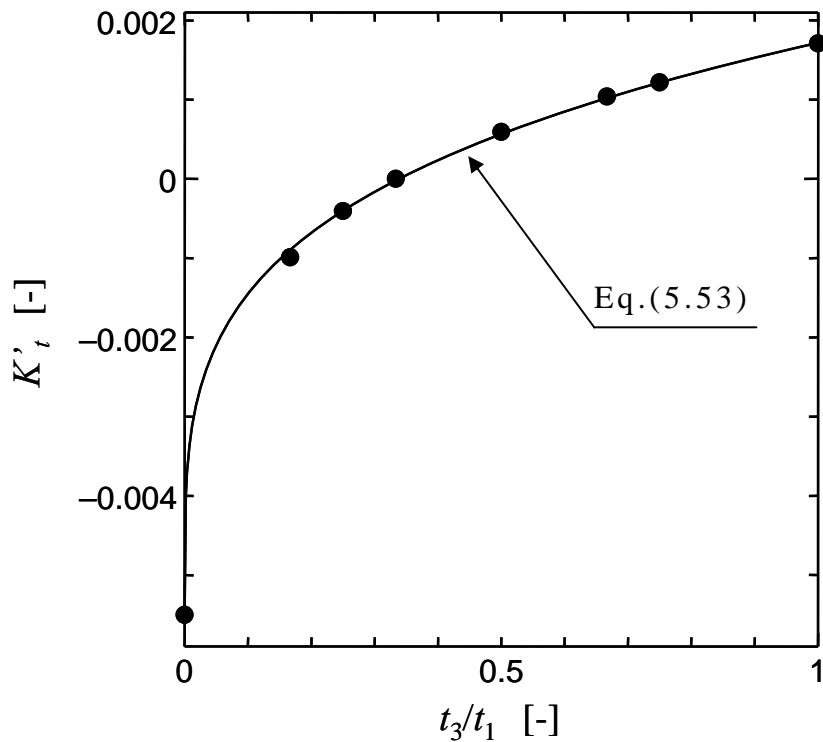


Fig.5.16 Relation of correction value K'_t and t_3/t_1

$$[m_D = m_C = m = 1, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2 = \sigma_C^2 / u_{C,av}^2 = 0]$$

Table 5.1 の運転条件に対して数値シミュレーションで得られた $\Delta P_{IN,sim}$, $\Delta P_{1/2,sim}$ および $\Delta P_{FIN,sim}$ と簡易圧力損失相関式 Eq.(5.52)で推算した値 $\Delta P_{IN,est}$, $\Delta P_{1/2,est}$, $\Delta P_{FIN,est}$ とを比較した結果を Figs.5.17~5.19 に示す。各々の平均誤差を、前述の Table 5.2 の下段に示す。圧力損失相関式 Eq.(5.28)で算出した場合の平均誤差と比較すると、両相関式による数値シミュレーション値との差はほとんど見られない。これより、 $m_D, m_C, m, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2, \sigma_C^2 / u_{C,av}^2$ を含まない簡易圧力損失相関式 Eq.(5.52)は、実用的な推算式といえる。

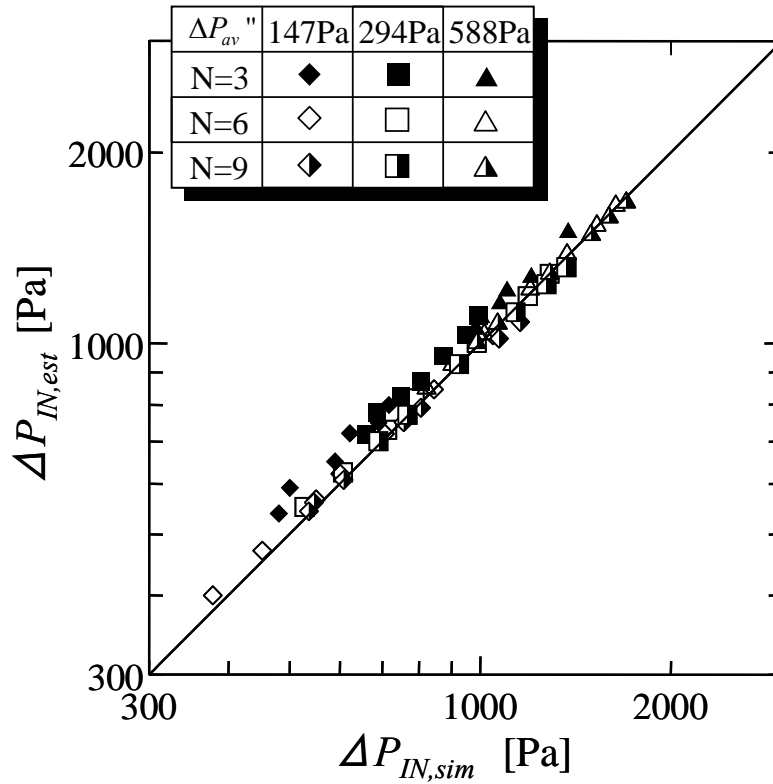


Fig.5.17 Comparison between simulated and estimated values by simplified correlation Eq.(5.52) for ΔP_{IN} ($t_3=0$)

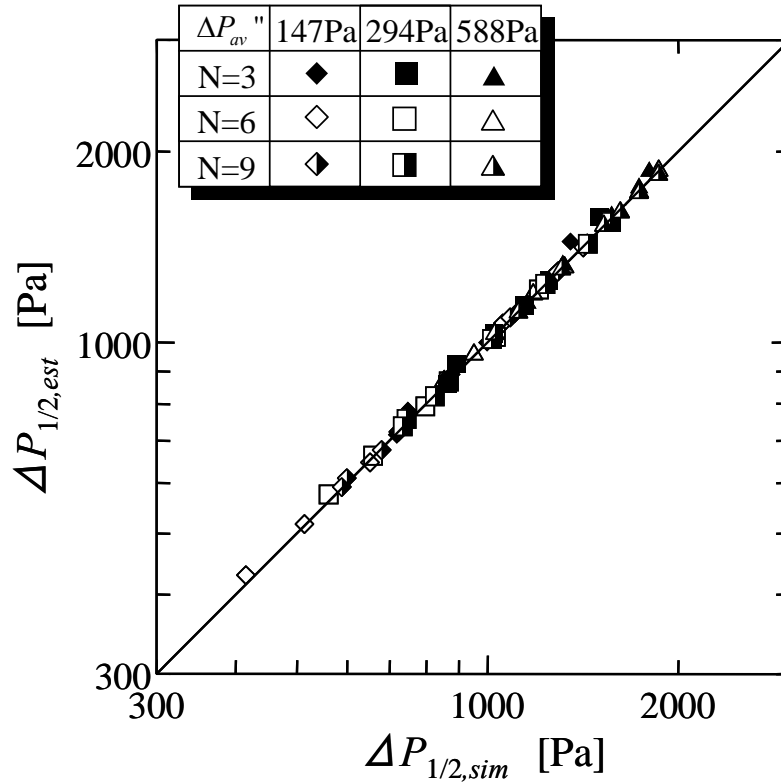


Fig.5.18 Comparison between simulated and estimated values by simplified correlation Eq.(5.52) for $\Delta P_{1/2}$ ($t_3=t_1/2$)

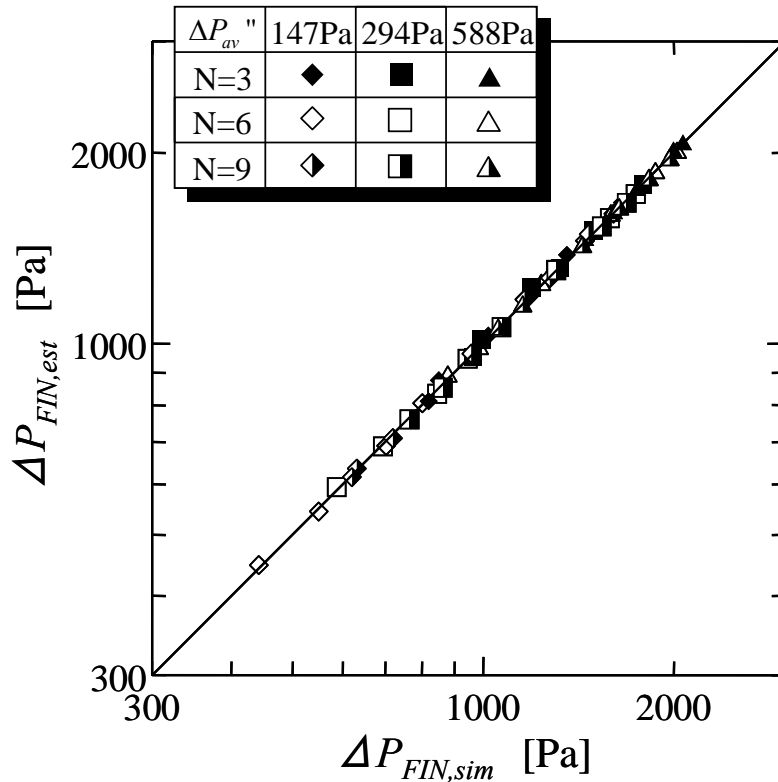


Fig.5.19 Comparison between simulated and estimated values by simplified correlation Eq.(5.52) for ΔP_{FIN} ($t_3 = t_1$)

簡易圧力損失相関式 Eq.(5.52)は、Table 5.1 の条件に示すように濾過面Cの面積比率 ε_c を 0.3 と固定して導出したものである。しかしながら、第4章で示した回分運転で得られた ε_c は 0.1~0.5 の範囲にあり一定値ではない。ここで、 ε_c を 0.15 および 0.45 とした場合の ΔP_{IN} , $\Delta P_{1/2}$ および ΔP_{FIN} に対する簡易圧力損失相関式を $\varepsilon_c=0.3$ の場合と同様な手法で求め、 ε_c の差異による相関式への影響を検討する。 ε_c を 0.15 および 0.45 とした場合での数値シミュレーション結果と本体圧力損失の理論式 Eq.(5.22)との比較を Figs.5.20(a),(b)~5.22(a),(b)に示す。

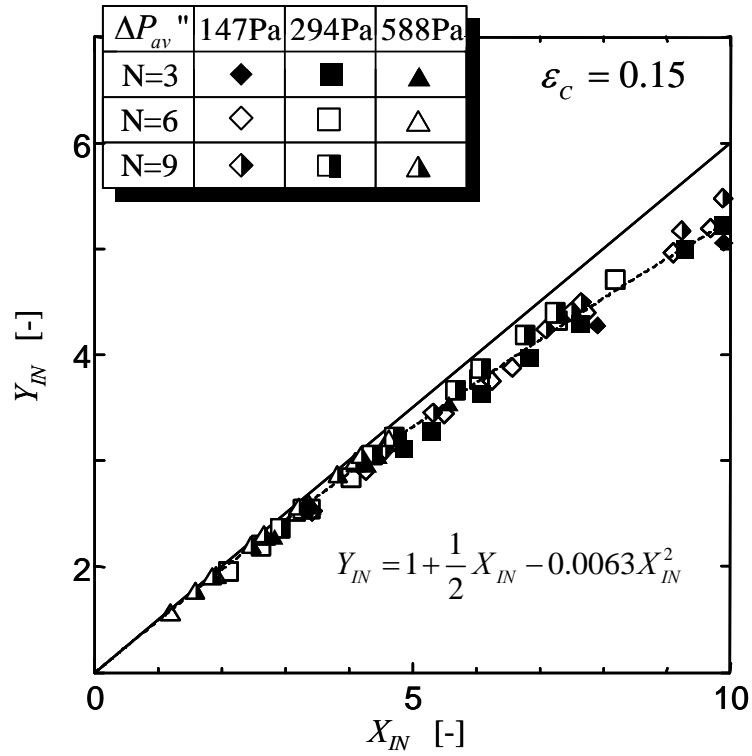


Fig.5.20(a) Simplified correlation for ΔP_{IN} ($t_3=0$)

$$[m_D = m_C = m = 1, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2 = \sigma_C^2 / u_{C,av}^2 = 0]$$

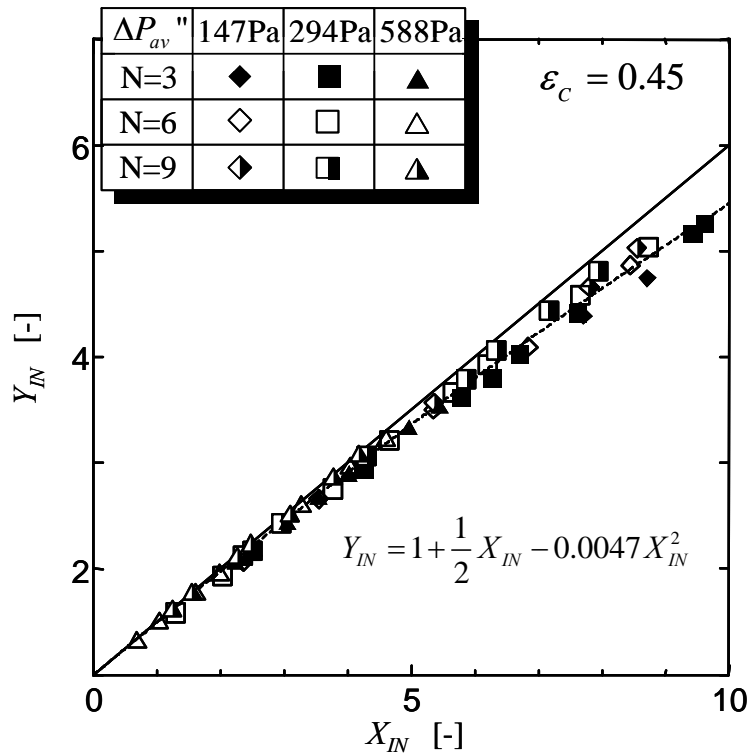


Fig.5.20(b) Simplified correlation for ΔP_{IN} ($t_3=0$)

$$[m_D = m_C = m = 1, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2 = \sigma_C^2 / u_{C,av}^2 = 0]$$

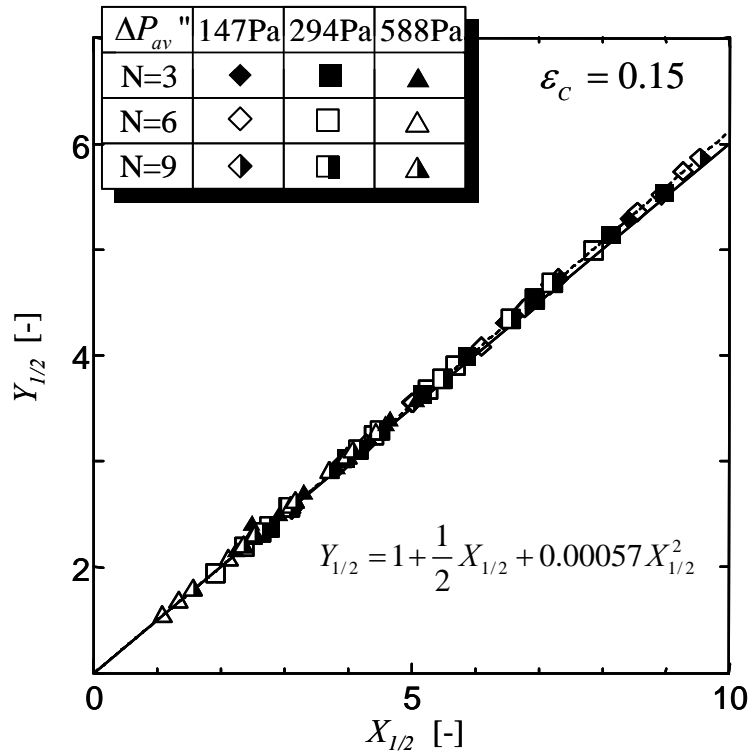


Fig.5.21(a) Simplified correlation for $\Delta P_{1/2}$ ($t_3=t_1/2$)

$$[m_D = m_C = m = 1, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2 = \sigma_C^2 / u_{C,av}^2 = 0]$$

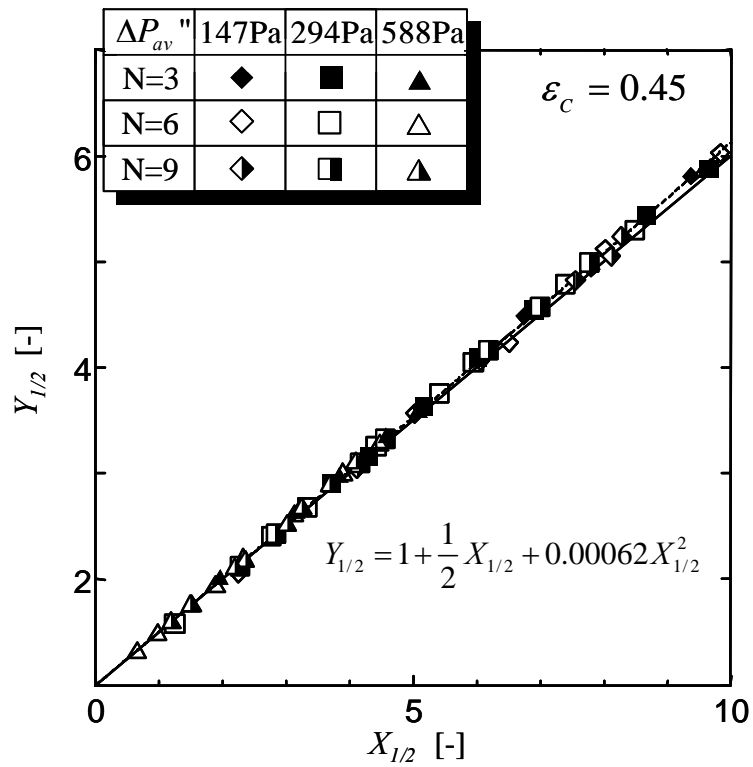


Fig.5.21(b) Simplified correlation for $\Delta P_{1/2}$ ($t_3=t_1/2$)

$$[m_D = m_C = m = 1, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2 = \sigma_C^2 / u_{C,av}^2 = 0]$$

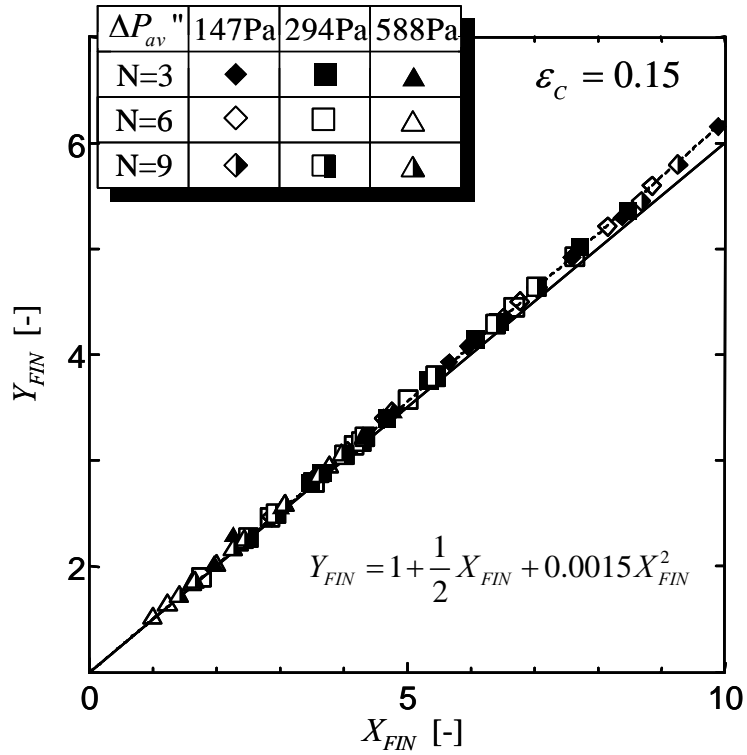


Fig.5.22(a) Simplified correlation for ΔP_{FIN} ($t_3 = t_1$)

$$[m_D = m_C = m = 1, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2 = \sigma_C^2 / u_{C,av}^2 = 0]$$

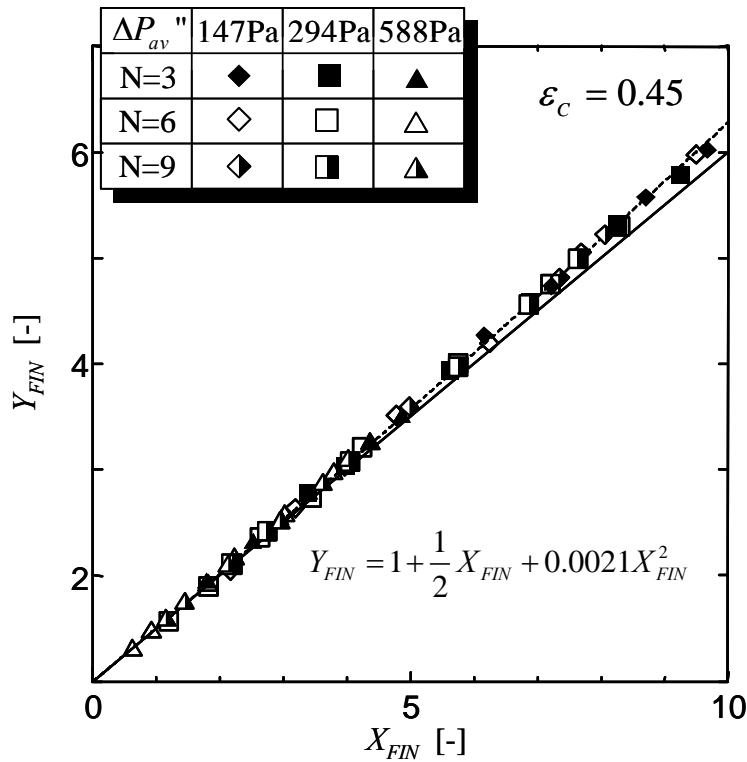


Fig.5.22(b) Simplified correlation for ΔP_{FIN} ($t_3 = t_1$)

$$[m_D = m_C = m = 1, \sigma_D^2 / u_{D,av}^2 = \sigma_C^2 / u_{C,av}^2 = 0]$$

圧力損失相関式 Eq.(5.52)の右辺の第2項までは理論式であり、 ε_c の影響は無次元変数 Y と X で評価されている。さらに、 ε_c は二次補正項の係数 K'_t に影響を及ぼしていると考えられる。そこで、その影響を K'_t の数値の比較により評価する。数値シミュレーションによって求めた各 ε_c に対する二次補正項の係数 K'_t の値を **Table 5.3** に示す。また、Eq.(5.52)中の X を 10 と置いた場合に、 ΔP に影響する Y の値が **Table 5.3** に示した K'_t によってどの程度変わるかを **Table 5.4** に示す。

Table 5.3 Comparison of correction coefficient in quadratic term of Eq.(5.52) , K'_t

ε_c	K'_t		
	ΔP_{IN}	$\Delta P_{1/2}$	ΔP_{FIN}
0.15	-0.0063	0.00057	0.0015
0.3	-0.0055	0.00059	0.0017
0.45	-0.0047	0.00062	0.0021

Table 5.4 Comparison of calculated values Y by Eq.(5.52) with $X=10$

ε_c	Y_{IN}	$Y_{1/2}$	Y_{FIN}
0.15	5.37	6.057	6.15
0.3	5.45	6.059	6.17
0.45	5.53	6.062	6.21

本表から分かるように、 ε_c が 0.15 から 0.45 の範囲で変わっても Y の値は Y_{IN} で 3%、 $Y_{1/2}$ で 0.1%、 Y_{FIN} で 1% 変わる程度である。従って、中間的な $\varepsilon_c=0.3$ と固定して導出した Eq.(5.52) を任意の ε_c に対して適用しても誤差は少なく、本相関式は有効な相関式と言える。

5.6 結 言

第 2 章で提示した、払落とし直前の第 N 室(または第 N 列)の時間平均の濾過速度 \bar{u}_N と室平均の濾過速度 u_{av} との比 m ($=\bar{u}_N/u_{av}$) および u_{av} に対する各室の平均濾過速度 \bar{u}_i の分散値 σ^2 をパラメーターとして導入する手法を、第 4 章で提示した「斑落ちモデル」に適用して理論解析を行い、数値シミュレーション結果との比較から次のような結論を得た。

1. 任意の時間における圧力損失理論式を導出し、数値シミュレーション結果との比較から、二次補正項を加えた圧力損失相関式を導出した。さらに、本相関式に含まれるパラメーター $m_D, m_C, \sigma_D^2/u_{D,av}^2, \sigma_C^2/u_{C,av}^2$ の相関式を導出して、数値シミュレーションを行うことなく本体圧力損失が精度よく算出できることを示した。
2. $m_D=m_C=m=1, \sigma_D^2/u_{D,av}^2=\sigma_C^2/u_{C,av}^2=0$ と簡単化した簡易圧力損失相関式を数値シミュレーション結果との比較から導出し、本相関式でも本体圧力損失が精度よく算出できることを示した。さらに、払落とし程度の指標である ε_c を変えた場合においても、 $\varepsilon_c=0.3$ と固定して導出した本相関式で本体圧力損失を良好に算出できることを示した。

Nomenclature

$A_{C,i}$	= virginal filter cloth area of i-th compartment	[m ²]
$A_{D,i}$	= filter cloth area with residual dust of i-th compartment	[m ²]
A_i	= total filter cloth area of i-th compartment	[m ²]
c	= dust concentration based on collected dust on filter cloth	[kg/m ³]
m	= ratio of average filtering velocity of the N-th compartment just before cleaning operation to that of all compartments	[-]
m_C	= ratio of average filtering velocity of the N-th compartment just before cleaning operation to that of all compartments for virginal filter cloth area	[-]
m_D	= ratio of average filtering velocity of the N-th compartment just before cleaning operation to that of all compartments for filter cloth area with residual dust	[-]
N	= number of compartments	[-]
$P_{C\alpha}^*$	= dimensionless variable defined by Eq.(5.41)	[-]
$P_{C\zeta}^*$	= dimensionless variable defined by Eq.(5.49)	[-]
$P_{C\lambda}^*$	= dimensionless variable defined by Eq.(5.42)	[-]
$P_{D\alpha}^*$	= dimensionless variable defined by Eq.(5.34)	[-]
$P_{D\lambda}^*$	= dimensionless variable defined by Eq.(5.35)	[-]
P_α^*	= dimensionless variable defined by Eq.(2.25)	[-]
P_λ^*	= dimensionless variable defined by Eq.(2.26)	[-]
Q	= total gas flow rate	[m ³ /s]
Q_i	= total gas flow rate in i-th compartment	[m ³ /s]

Q_C	= gas flow rate in virginal filter cloth area	[m ³ /s]
Q_D	= gas flow rate in filter cloth area with residual dust	[m ³ /s]
$Q_{C,i}$	= gas flow rate in virginal filter cloth area of i-th compartment	[m ³ /s]
$Q_{D,i}$	= gas flow rate in filter cloth area with residual dust of i-th compartment	[m ³ /s]
t	= time	[s]
t_1	= filtering time	[s]
t_2	= cleaning time	[s]
t_3	= filtering time [= $t - (i - 1) (t_1 + t_2)$]	[s]
t_c	= partial period time (= $t_1 + t_2$)	[s]
u	= filtering velocity for filtering operation	[m/s]
u'	= filtering velocity for cleaning operation	[m/s]
u_{av}	= average filtering velocity for continuous filtering operation	[m/s]
u_C	= filtering velocity in virginal filter cloth area	[m/s]
u_D	= filtering velocity in filter cloth area with residual dust	[m/s]
u_i	= filtering velocity in <i>i</i> -th compartment for filtering operation	[m/s]
$u_{C,av}$	= average filtering velocity in virginal filter cloth area of <i>i</i> -th compartment for filtering operation	[m/s]
$u_{D,av}$	= average filtering velocity in filter cloth area with residual dust of <i>i</i> -th compartment for filtering operation	[m/s]
$u_{C,i}$	= filtering velocity in virginal filter cloth area of <i>i</i> -th compartment for filtering operation	[m/s]
$u_{D,i}$	= filtering velocity in filter cloth area with residual dust of <i>i</i> -th compartment for cleaning operation	[m/s]

$\overline{u_{C,i}}$	= filtering velocity in virginal filter cloth area of i -th compartment averaged over filtering operation	[m/s]
$\overline{u_{D,i}}$	= filtering velocity in filter cloth area with residual dust of i -th compartment averaged over filtering operation	[m/s]
$u'_{C,av}$	= average filtering velocity in virginal filter cloth area of i -th compartment for cleaning operation	[m/s]
$u'_{D,av}$	= average filtering velocity in filter cloth area with residual dust of i -th compartment for cleaning operation	[m/s]
$u'_{C,i}$	= filtering velocity in virginal filter cloth area of i -th compartment for cleaning operation	[m/s]
$u'_{D,i}$	= filtering velocity in filter cloth area with residual dust of i -th compartment for cleaning operation	[m/s]
$\overline{u'_{C,i}}$	= filtering velocity in virginal filter cloth area of i -th compartment averaged over cleaning operation	[m/s]
$\overline{u'_{D,i}}$	= filtering velocity in filter cloth area with residual dust of i -th compartment averaged over cleaning operation	[m/s]
v	= characteristic velocity for machine	[m/s]
X	= dimensionless variable defined by Eq.(5.51)	[—]
X_{FIN}	= dimensionless variable defined by Eq.(5.51) with $t_3=t_1$	[—]
X_{IN}	= dimensionless variable defined by Eq.(5.51) with $t_3=0$	[—]
$X_{1/2}$	= dimensionless variable defined by Eq.(5.51) with $t_3=t_1/2$	[—]
x	= dimensionless variable defined by Eq.(5.24)	[—]

x_{FIN}	= dimensionless variable defined by Eq.(5.24) with $t_3=t_1$	[-]
x_{IN}	= dimensionless variable defined by Eq.(5.24) with $t_3=0$	[-]
$x_{1/2}$	= dimensionless variable defined by Eq.(5.24) with $t_3=t_1/2$	[-]
Y	= dimensionless variable defined by Eq.(5.50)	[-]
Y_{FIN}	= dimensionless variable defined by Eq.(5.50) with $t_3=t_1$	[-]
Y_{IN}	= dimensionless variable defined by Eq.(5.50) with $t_3=0$	[-]
$Y_{1/2}$	= dimensionless variable defined by Eq.(5.50) with $t_3=t_1/2$	[-]
y	= dimensionless variable defined by Eq.(5.23)	[-]
y_{FIN}	= dimensionless variable defined by Eq.(5.23) with $t_3=t_1$	[-]
y_{IN}	= dimensionless variable defined by Eq.(5.23) with $t_3=0$	[-]
$y_{1/2}$	= dimensionless variable defined by Eq.(5.23) with $t_3=t_1/2$	[-]
z_C	= dimensionless variable defined by Eq.(5.44)	[-]
z_D	= dimensionless variable defined by Eq.(5.43)	[-]
α	= specific resistance of dust cake	[m/kg]
γ	= gas density	[kg/m ³]
ΔP	= total pressure drop for bag filter	[Pa]
$\Delta P'$	= filter cloth pressure drop with dust loading	[Pa]
$\Delta P''$	= machine pressure drop	[Pa]
$\Delta P''_{av}$	= machine pressure drop for u_{av}	[Pa]
ΔP_C	= total pressure drop in virginal filter cloth area	[Pa]

ΔP_D	= total pressure drop in filter cloth area with residual dust	[Pa]
$\Delta P_{C,i}$	= total pressure drop in virginal filter cloth area of i -th compartment	[Pa]
$\Delta P_{D,i}$	= total pressure drop in filter cloth area with residual dust of i -th compartment	[Pa]
ΔP_{FIN}	= total pressure drop for bag filter just before cleaning	[Pa]
ΔP_{IN}	= total pressure drop for bag filter just after cleaning	[Pa]
$\Delta P_{1/2}$	= total pressure drop for bag filter at $t_3=t_1/2$	[Pa]
\mathcal{E}_C	= fraction of virginal filter cloth area	[—]
\mathcal{E}_D	= fraction of filter cloth area with residual dust	[—]
ζ_d	= specific resistance of filter cloth with residual dust by uniformed cleaning model	$[\text{m}^{-1}]$
ζ_C	= specific resistance of virginal filter cloth	$[\text{m}^{-1}]$
ζ_D	= specific resistance of filter cloth with residual dust by patched cleaning model	$[\text{m}^{-1}]$
σ^2	= variance of the filtering velocity in i -th compartment averaged over filtering operation \bar{u}_i to u_{av}	$[\text{m}^2/\text{s}^2]$
σ_C^2	= variance of the filtering velocity in i -th compartment averaged over filtering operation $\bar{u}_{C,i}$ to $u_{C,av}$	$[\text{m}^2/\text{s}^2]$
σ_D^2	= variance of the filtering velocity in i -th compartment averaged over filtering operation $\bar{u}_{D,i}$ to $u_{D,av}$	$[\text{m}^2/\text{s}^2]$
λ	= machine resistance coefficient	[—]
μ	= gas viscosity	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$

Literature Cited

Dennis, R., R. W. Cass and R .R. Hall ;

”Dust Dislodgement from Woven Fabrics Versus Filter Performance,”
Journal of the Air Pollution Control Association, **28**, 47-51 (1978)

Ferer, M. and D. H. Smith ;

”Transition from Continuous to Discontinuous Material Failure in a
Simple Model of an Adhesive Layer,” *Physical Review*, **E58**,
7071-7078 (1998)

Kanaoka, C and T. Kishima ;

“The Observation of the Process of Accumulation of Dust on a Rigid
Ceramic Filter Surface and the Cleaning Mechanism of Dust From
the Filter Surface,” *Journal of the Society of Powder Technology ,
Japan*, **35**,250-255 (1998)

Mori, Y. ;

“Performance and Operation for Bag Filter,” Doctor Thesis,
Kyoto Univ., Japan (1979)

第 6 章

総 括

集塵装置の主流となっているバグフィルターの性能を表す指標は、集塵装置全体の動力を左右する圧力損失と、大気浄化に寄与する粉塵の捕集性能の2点に集約される。計画設計をする際にも、この2点を重視して最適設計点を検討する必要がある。既往の研究によれば、粉塵の捕集性能は粉塵負荷量の増減に伴う濾布圧損の挙動と密接な関係がある。しかしながら、バグフィルターの圧力損失の正確な表現式は未だ確立しておらず、計画設計をする際には経験則に頼らざるを得ないのが現状である。また、バグフィルターの圧力損失に関する研究も濾過部の圧力損失のみに対して検討されており、装置化するときには必ず発生する装置固有の圧力損失(機械圧損)の影響を加えて検討されたものは殆ど報告されていない。特に、実用的に運転されているバグフィルターの殆どを占める連続運転型バグフィルターは多室または多列構成になっており、運転中に一室または一列ずつ払落とし操作をして連続的に運転をしている。そのためには、各室または各列を切替える機器が必要不可欠となり、その抵抗(機械圧損)は濾布の圧力損失の挙動に大きく影響する。

本研究は、バグフィルターの最適設計をするために必要な本体圧力損失の挙動を機械圧損の影響を考慮して数値的に表すとともに、圧損パラメータである汚れ濾布抵抗 ζ_d および比抵抗 α が粉体物性および運転条件とどのような相関にあるかを求めることにより、現状の経験則に依存した計画設計からの脱却を図ることを目的として行った。

第1章では、はじめに社会的に必要とされる集塵技術が、環境関連法令の影響を受けながら時代とともに推移している背景を述べた。次に、バグフィルターを論ずる上で基本となる固気分離の基本的事項と分離機構の相違点からみた集塵装置の分類と特徴を記述した。さらに、高性能な固気分離装置であるバグフィルターに関する既往の研究と工業界で行われている計画設計段階での問題点を列記し、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、バグフィルターを装置化するときには必ず発生する装置固有の圧力損失(機械圧損)および連続運転型バグフィルターに必要な不可欠な切換機器の圧力損失(機械圧損)を加えた本体圧力損失モデルを用いて、機械圧損による本体圧力損失および濾布圧損への影響を理論解析によって検討した。その結果、既往の研究成果に払落とし直前の第 N 室の平均濾過速度 \bar{u}_N と平均濾過速度 u_{av} との比 $m(=\bar{u}_N/u_{av})$ と u_{av} に対する各室の平均濾過速度 \bar{u}_i の分散値 σ^2/u_{av}^2 を用いることにより、新たに本体初期圧損 ΔP_{IN} と本体最終圧損 ΔP_{FIN} に対する圧力損失理論式を導出した。さらに、圧力損失理論式と数値シミュレーション結果との比較により、理論式からのずれを考慮した圧力損失相関式を導出するとともに、 $m(=\bar{u}_N/u_{av})$ および分散値 σ^2/u_{av}^2 の相関式を導出して、数値シミュレーションを行うことなく本体圧力損失、許容圧損値に対する最大濾過速度および圧損パラメーター ζ_d と α が算出できることを示した。また、 $m=1$ 、 $\sigma^2/u_{av}^2=0$ と単純化した場合の簡易圧力損失相関式においても、本体圧力損失、許容圧損値に対する最大濾過速度および圧損パラメーター ζ_d と α が、実用上許容される精度で算出できることを示した。

第3章では、粉体物性の異なる炭酸カルシウムと珪砂および珪藻土による濾布圧損の回分実験結果から、バグフィルターの圧力損失パラメーターである比抵抗 α と汚れ濾布抵抗 ζ_d に対する濾過速度 u と含塵濃度 c の影響を求めた。その結果、粉塵層が空隙率0.5以上で形成される粉体の比抵抗 α は、ほぼ濾過速度の1/2乗に比例して増大し、含塵濃度の1/3乗に比例して減少することを示した。また、濾布

圧損のモデル式と Kozeny-Carman 式に基づき、実測した比抵抗 α の値から算出した $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3$ を粉体物性と運転条件を用いて相関し、得られた相関式より比抵抗 α に対する次の実験式を得た。

$$\alpha = 1.15 \times 10^{11} \left(\frac{D_v}{D_s} \right)^3 D_v^{-3/4} \rho_s^{-2/3} c^{-1/3} u^{1/2} \mu^{1/2}$$

本実験式を用いることで、比抵抗 α は $\pm 25\%$ の誤差で推算できることを示した。一方、汚れ濾布抵抗 ζ_d は、濾過速度と含塵濃度の影響は殆ど受けず、各粉体ごとにほぼ一定値を示した。

さらに、濾過操作中の比抵抗の濾過速度依存性を考慮した場合の圧力損失を検討した結果、多室バグフィルターの圧力損失値は、依存性を考慮しなかった場合のそれより僅かに大きな値となるが、両者の時間変化挙動にはあまり影響を与えないことを示した。

第4章では、第2章で表現できなかった圧力損失の時間変化挙動を実験的に考察した。本章では、払落とし操作後の濾過面に残留する粉塵量が場所によって差異があるという実験観察結果から、濾過面が粉塵の残留している濾過面と清浄濾布状態まで払落とされている濾過面の2面で構成されているとする斑落ちモデルを提示した。その面積比率を ε_D 対 ε_c とした斑落ちモデルに基づく数値シミュレーション結果が、回分運転および連続運転型バグフィルターにおける本体圧力損失の時間変化挙動の実測値と全時間領域で良好に一致することを示した。さらに、濾過操作中の濾過速度変化に対応する比抵抗 α の速度依存性を考慮した場合、回分運転における本体圧力損失値は速度依存性を考慮しなかった場合のそれと殆ど変わらないことを示した。また、連続運転型である3列構成バグフィルターの汚れ濾布抵抗 ζ_D は、速度依存性を考慮しなかった場合のそれより僅かに小さな値となるが、本体圧力損失の時間変化挙動は比抵抗 α の速度依存性にあまり影響を受けないことも示した。

第5章では、第2章で提示した払落とし直前の第 N 室(または N 列)の時間平均の濾過速度 \bar{u}_N と室平均の濾過速度 u_{av} との比 m ($= \bar{u}_N/u_{av}$) および u_{av} に対する各室の平均濾過速度 \bar{u}_i の分散値 σ^2 をパラ

メーターとして導入する手法を、第4章で提示した「斑落ちモデル」に適用して理論解析を行い、任意の時間に適用できる圧力損失理論式を導出した。また、本体圧力損失の数値シミュレーション結果と理論解析結果の比較により、理論式からのずれを考慮した圧力損失相関式を導出した。さらに、本相関式に含まれる m_D , m_C と $\sigma_D^2/u_{D,av}^2$, $\sigma_C^2/u_{C,av}^2$ の相関式を導出して、数値シミュレーションを行うことなく本体圧力損失が精度よく算出できることを示した。また、 $m_D = m_C = m = 1$, $\sigma_D^2/u_{D,av}^2 = \sigma_C^2/u_{C,av}^2 = 0$ と簡単化した簡易圧力損失相関式を数値シミュレーション結果との比較から導出し、本相関式でも本体圧力損失が精度よく算出できることを示した。さらに、払落とし程度の指標である ε_c が変わった場合においても、 $\varepsilon_c = 0.3$ と固定して導出した本相関式で、任意の時間に対して本体圧力損失が算出できることを示した。

本研究の最終目的は、粉塵の捕集性能を含めたバグフィルターの最適設計を行うことができる工学的な指針を求めることにある。そのための第一の課題にバグフィルターの圧力損失特性の把握があった。本研究で行った圧力損失特性に対する理論および実験的解析により、第3章で得られた比抵抗 α を推算できる実験式と、第5章で示した斑落ちモデルに基づいた任意の時間に対して適用できる圧力損失相関式が得られたことは、最終目的の実現に向けた一つの成果と言える。この段階において、粉塵の捕集性能に関する既往の研究成果と本研究で得られた圧力損失特性に関する成果を組み合わせることによりバグフィルターの最適設計が概ね可能になった。しかしながら、第4章でも述べたように再付着現象および濾材物性による汚れ濾布抵抗の定量化が大きな課題として残されている。また、本研究の成果である「斑落ちモデル」で示した斑落ち程度 ε_c と捕集性能との数値的な関連を解析することも今後の課題である。

バグフィルターの最適設計をする上で、本研究の成果が一助になることは確信しているが、前述のように残された課題も多く筆者を含め固気分離に携わる研究者は、様々な工業的知識の助けを受けて工学的に解決していかなければならない。

Appendix A

Eq.(2.11)の導出

(2.10)式を再記する。

$$\begin{aligned}
 (\Delta P_i)_{IN} &= \left(\zeta_d + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j + \alpha c t_2 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}'_j \right) \mu u_{iIN} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{iIN}^2 \\
 &= \left(\zeta_d + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j + \alpha c t_2 \frac{N}{N-m} \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j \right) \mu u_{iIN} \\
 &\quad + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{iIN}^2 \tag{A.1}
 \end{aligned}$$

ここで、近似的に $u_{iIN} = \bar{u}_i$ と置くと

$$(\Delta P_i)_{IN} = \left\{ \zeta_d + \alpha c \left(t_1 + \frac{N}{N-m} t_2 \right) \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j \right\} \mu \bar{u}_i + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 \bar{u}_i^2 \tag{A.2}$$

を得、Eq.(A.2)を $i=1 \sim N$ まで辺々加えると次式を得る。

$$\begin{aligned}
 N \Delta P_{IN} &= \zeta_d \mu \sum_{i=1}^N \bar{u}_i + \alpha c \mu \left(t_1 + \frac{N}{N-m} t_2 \right) \sum_{i=2}^N \left(\bar{u}_i \sum_{j=1}^{i-1} \bar{u}_j \right) + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 \sum_{i=1}^N \bar{u}_i^2 \\
 &= \zeta_d \mu \sum_{i=1}^N \bar{u}_i + \alpha c \mu \left(t_1 + \frac{N}{N-m} t_2 \right) \sum_{i=1}^N \left(\bar{u}_i \sum_{j=1}^i \bar{u}_j \right) \\
 &\quad - \alpha c \mu \left(t_1 + \frac{N}{N-m} t_2 \right) \sum_{i=1}^N \bar{u}_i^2 + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 \sum_{i=1}^N \bar{u}_i^2 \tag{A.3}
 \end{aligned}$$

ここで、平均濾過速度 u_{av} に対する \bar{u}_i の分散値を σ^2 とすると、

$$\begin{aligned}
 \sigma^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{u}_i - u_{av})^2 \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{u}_i^2 - \frac{2}{N} u_{av} \sum_{i=1}^N \bar{u}_i + \frac{1}{N} N u_{av}^2 \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{u}_i^2 - u_{av}^2 \tag{A.4}
 \end{aligned}$$

と表せる。ここで、マトリックスを考えると次式を得る。

$$\begin{aligned}
 2 \sum_{i=1}^N \left(\bar{u}_i \sum_{j=1}^i \bar{u}_j \right) &= \sum_{i=1}^N \bar{u}_i \sum_{j=1}^N \bar{u}_j + \sum_{i=1}^N \bar{u}_i^2 \\
 &= (N u_{av})^2 + \{ N u_{av}^2 + N \sigma^2 \} \tag{A.5}
 \end{aligned}$$

Eq.(A.3)で $t_c = t_1 + t_2$ と置き、Eq.(A.5)を代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned}
N \Delta P_{IN} &= \zeta_d \mu N u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{(N t_c - m t_1)}{N - m} [(N u_{av})^2 + N u_{av}^2 + N \sigma^2] \\
&\quad - \alpha c \mu \frac{(N t_c - m t_1)}{N - m} \{ N u_{av}^2 + N \sigma^2 \} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 \{ N u_{av}^2 + N \sigma^2 \}
\end{aligned} \tag{A.6}$$

よって、本文中の Eq.(2.11)を得る。

$$\begin{aligned}
\Delta P_{IN} &= \zeta_d \mu u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{(N t_c - m t_1)}{N - m} u_{av}^2 \left[N + \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right\} \right] \\
&\quad - \alpha c \mu \frac{(N t_c - m t_1)}{N - m} u_{av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right\} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right\}
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Appendix B

Eq.(2.23)の導出

$(\Delta P_{\text{FIN}})_N$ は ΔP_{FIN} に等しいことから、本文中の Eq.(2.22)と Eq.(2.13) を等値すると次式となる。

$$\begin{aligned}
 & (\zeta_d + \alpha c N t_c u_{\text{av}}) \mu u_{\text{av}} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 (m u_{\text{av}})^2 \\
 &= \zeta_d \mu u_{\text{av}} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{(N t_c - m t_1)}{N - m} u_{\text{av}}^2 \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{\text{av}}^2} \right) \right\} \\
 &\quad - \alpha c \mu \frac{N}{N - m} t_2 u_{\text{av}}^2 \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{\text{av}}^2} \right) + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{\text{av}}^2 \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{\text{av}}^2} \right) \quad (\text{B.1})
 \end{aligned}$$

Eq.(B.1)の両辺を μu_{av} で割ると次式を得る。

$$\begin{aligned}
 & (\zeta_d + \alpha c N t_c u_{\text{av}}) m + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 m^2 u_{\text{av}} \\
 &= \zeta_d + \frac{1}{2} \alpha c \frac{(N t_c - m t_1)}{N - m} u_{\text{av}} \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{\text{av}}^2} \right) \right\} \\
 &\quad - \alpha c \frac{N}{N - m} t_2 u_{\text{av}} \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{\text{av}}^2} \right) + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{\text{av}} \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{\text{av}}^2} \right) \quad (\text{B.2})
 \end{aligned}$$

次に、両辺に $\left(\frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 m u_{\text{av}} - \alpha c t_1 m u_{\text{av}} \right)$ を加えると次式となる。

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \zeta_d + \alpha c (N t_c - t_1) u_{\text{av}} + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{\text{av}} \right\} m \\
 &= \zeta_d + \frac{1}{2} \alpha c \frac{(N t_c - m t_1)}{N - m} u_{\text{av}} \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{\text{av}}^2} \right) \right\} \\
 &\quad - \alpha c \frac{N}{N - m} t_2 u_{\text{av}} \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{\text{av}}^2} \right) + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{\text{av}} \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{\text{av}}^2} - m^2 \right) \\
 &\quad - \alpha c t_1 m u_{\text{av}} + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 m u_{\text{av}} \quad (\text{B.3})
 \end{aligned}$$

さらに、Eq.(B.3)の右辺の変形を進める。

$$\begin{aligned}
& \{ \zeta_d + \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{av} \} m \\
&= \zeta_d + \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{av} \\
&\quad - \frac{1}{2} \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{av} m(1-m) \\
&\quad - \frac{1}{2} \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \frac{(Nt_c - mt_1)}{N-m} u_{av} \{ N + (1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2}) \} \\
&\quad - \alpha c \frac{N}{N-m} (t_c - t_1)u_{av} (1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2}) + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{av} \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} - \alpha c t_1 m u_{av} \\
&= \zeta_d + \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{av} \\
&\quad - \frac{1}{2} \{ \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} - \frac{1}{\mu} \lambda \gamma K^2 u_{av} m(1-m) \} \\
&\quad - \frac{1}{2} \alpha c u_{av} [(Nt_c - t_1) - \frac{(Nt_c - mt_1)}{N-m} \{ N + (1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2}) \} \\
&\quad + \frac{2N}{N-m} (t_c - t_1)(1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2}) + 2m t_1] + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{av} \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \\
&= \zeta_d + \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{av} \\
&\quad - \frac{1}{2} \{ \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} - \frac{1}{\mu} \lambda \gamma K^2 u_{av} m(1-m) \} \\
&\quad - \frac{1}{2} \alpha c u_{av} [(Nt_c - t_1) - \frac{1}{N-m} [N(N-1)t_c + \{ 2(N+m^2) \\
&\quad - m(3N+1) \} t_1] + (\frac{Nt_c}{N-m} - \frac{2N-m}{N-m} t_1 - \frac{\lambda \gamma K^2}{\alpha \mu}) \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \quad (B.4)
\end{aligned}$$

ここで、 $\beta = \frac{1}{N-m} [N(N-1)t_c + \{ 2(N+m^2) - m(3N+1) \} t_1]$ と置き、Eq.(B.4) を $\{ \zeta_d + \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{1}{2\mu} \lambda \gamma K^2 u_{av} \}$ で割ると本文中の Eq.(2.23)を得る。

$$\begin{aligned}
m &= 1 - \frac{1}{2} \frac{\alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} - \frac{\lambda \gamma K^2}{\mu} m(1-m)u_{av}}{\zeta_d + \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{av}} \\
&\quad - \frac{1}{2} \frac{\alpha c u_{av} \{ Nt_c - t_1 - \beta + (\frac{Nt_c}{N-m} - \frac{2N-m}{N-m} t_1 - \frac{\lambda \gamma K^2}{\alpha \mu}) \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \}}{\zeta_d + \alpha c (Nt_c - t_1)u_{av} + \frac{\lambda \gamma K^2}{2\mu} u_{av}} \quad (2.23)
\end{aligned}$$

Appendix C

Eq.(3.14)の導出

Eq.(3.7)と Eq.(3.13)から次式を得る。

$$\frac{\Delta P_{pow} \rho_s}{cut} = \frac{180 K}{D_s^2} \left(\frac{\Delta P_{pow} \rho_s D_v}{cut \sigma} \right)^p \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^q \mu u \quad (C.1)$$

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta P_{pow} \rho_s}{cut} \right)^{1-p} &= \frac{180 K}{D_s^2} \left(\frac{D_v}{\sigma} \right)^p \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^q \mu u \\ \frac{\Delta P_{pow} \rho_s}{cut} &= \left(\frac{180 K}{D_s^2} \right)^{\frac{1}{1-p}} \left(\frac{D_v}{\sigma} \right)^{\frac{p}{1-p}} \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^{\frac{q}{1-p}} (\mu u)^{\frac{1}{1-p}} \\ &= \frac{180}{D_s^2} \left\{ K \left(\frac{180 K}{D_s^2} \right)^{\frac{p}{1-p}} \left(\frac{D_v}{\sigma} \right)^{\frac{p}{1-p}} \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^{\frac{q}{1-p}} (\mu u)^{\frac{p}{1-p}} \right\} \mu u \end{aligned} \quad (C.2)$$

本文中の Eq.(3.7)との比較から次の関係式を得る。

$$\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} = K \left(\frac{180 K}{D_s^2} \right)^{\frac{p}{1-p}} \left(\frac{D_v}{\sigma} \right)^{\frac{p}{1-p}} \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^{\frac{q}{1-p}} (\mu u)^{\frac{p}{1-p}} \quad (C.3)$$

一方、Fig.3.7 より $(1-\varepsilon)/\varepsilon^3 \propto u^{1/2} c^{-1/3}$ の関係を得ていることから

$$\frac{p}{1-p} = \frac{1}{2}, \quad \frac{q}{1-p} = \frac{1}{3}$$

が成立する。従って、 $p=1/3, q=1/2$ が求められ本文中の Eq.(3.14)を得る。

$$\begin{aligned} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} &= K \left(\frac{180 K}{D_s^2} \right)^{1/2} \left(\frac{D_v}{\sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^{1/3} (\mu u)^{1/2} \\ &= K \left(\frac{D_v}{D_s} \right) \left(\frac{1}{D_v \sigma} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_s}{c} \right)^{1/3} (\mu u)^{1/2} \end{aligned} \quad (3.14)$$

Appendix D

Eq.(4.11)と Eq.(4.12)の導出

Eqs.(4.1),(4.2)において濾布圧損部のみについて考えると $\Delta P'_D, \Delta P'_C$ は、

$$\Delta P'_D = (\zeta_D + \alpha c u_D t) \mu u_D \quad \text{より} \quad \Delta P'_D / (\zeta_D + \alpha c u_D t) = \mu u_D \quad (\text{D.1})$$

$$\Delta P'_C = (\zeta_C + \alpha c u_C t) \mu u_C \quad \text{より} \quad \Delta P'_C / (\zeta_C + \alpha c u_C t) = \mu u_C \quad (\text{D.2})$$

と表せる。ここで $\Delta P'_D = \Delta P'_C = \Delta P'$ とおき、Eq.(4.5)の関係から次式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_D \Delta P'_D}{(\zeta_D + \alpha c u_D t)} + \frac{\varepsilon_C \Delta P'_C}{(\zeta_C + \alpha c u_C t)} &= \mu \varepsilon_D u_D + \mu \varepsilon_C u_C \\ \Delta P' \left\{ \frac{\varepsilon_D}{(\zeta_D + \alpha c u_D t)} + \frac{\varepsilon_C}{(\zeta_C + \alpha c u_C t)} \right\} &= \mu u_m \\ \Delta P' &= \frac{(\zeta_D + \alpha c u_D t)(\zeta_C + \alpha c u_C t)}{\varepsilon_D \zeta_C + \varepsilon_C \zeta_D + (\varepsilon_D u_C + \varepsilon_C u_D) \alpha c t} \mu u_m \end{aligned} \quad (\text{D.3})$$

ここで、

$$\begin{aligned} \varepsilon_D u_C + \varepsilon_C u_D &= (1 - \varepsilon_C) u_C + (1 - \varepsilon_D) u_D \\ &= u_C + u_D - (\varepsilon_C u_C + \varepsilon_D u_D) \\ &= u_C + u_D - u_m \end{aligned} \quad (\text{D.4})$$

と式変形できることから、Eq.(D.3)は次式で表せる。

$$\Delta P' = \frac{\zeta_D \zeta_C + (\zeta_D u_C + \zeta_C u_D + \alpha c t u_D u_C) \alpha c t}{\varepsilon_D \zeta_C + \varepsilon_C \zeta_D + (u_C + u_D - u_m) \alpha c t} \mu u_m \quad (\text{D.5})$$

従って、本体圧力損失 ΔP は次式となる。

$$\Delta P = \frac{\zeta_D \zeta_C + (\zeta_D u_C + \zeta_C u_D + \alpha c t u_D u_C) \alpha c t}{\varepsilon_D \zeta_C + \varepsilon_C \zeta_D + (u_C + u_D - u_m) \alpha c t} \mu u_m + \Delta P''_m \quad (\text{D.6})$$

ここで、 $t=0$ とすると、Eq.(D.6)から本文中の Eq.(4.11)を得る。

$$\Delta P_0 = \frac{\zeta_D \zeta_C}{\varepsilon_D \zeta_C + \varepsilon_C \zeta_D} \mu u_m + \Delta P''_m \quad (4.11)$$

一方、 $t=\infty$ の時には $u_C = u_D = u_m$ と考えてよいことから Eq.(D.6)は次のように式変形できる。

$$\begin{aligned}
\Delta P &= \frac{\zeta_D \zeta_C + (\zeta_D + \zeta_C + \alpha c u_m t) \alpha c u_m t}{\varepsilon_D \zeta_C + \varepsilon_C \zeta_D + \alpha c u_m t} \mu u_m + \Delta P_m'' \\
&= \frac{\zeta_D \zeta_C + (\varepsilon_D \zeta_D + \varepsilon_C \zeta_D + \varepsilon_D \zeta_C + \varepsilon_C \zeta_C + \alpha c u_m t) \alpha c u_m t}{\varepsilon_D \zeta_C + \varepsilon_C \zeta_D + \alpha c u_m t} \mu u_m + \Delta P_m'' \\
&= \frac{\zeta_D \zeta_C + (\varepsilon_D \zeta_D + \varepsilon_C \zeta_C) \alpha c u_m t + (\varepsilon_C \zeta_D + \varepsilon_D \zeta_C + \alpha c u_m t) \alpha c u_m t}{\varepsilon_D \zeta_C + \varepsilon_C \zeta_D + \alpha c u_m t} \mu u_m + \Delta P_m'' \\
&= \left\{ \frac{\zeta_D \zeta_C + (\varepsilon_D \zeta_D + \varepsilon_C \zeta_C) \alpha c u_m t}{\varepsilon_D \zeta_C + \varepsilon_C \zeta_D + \alpha c u_m t} + \alpha c u_m t \right\} \mu u_m + \Delta P_m'' \tag{D.7}
\end{aligned}$$

$t = \infty$ より、時間 t を含まない項 $\zeta_D \zeta_C$, $\varepsilon_D \zeta_C$, $\varepsilon_C \zeta_D$ を無視小と考えると Eq.(D.7)は次式となる。

$$\begin{aligned}
\Delta P &= \left\{ \frac{(\varepsilon_D \zeta_D + \varepsilon_C \zeta_C) \alpha c u_m t}{\alpha c u_m t} + \alpha c u_m t \right\} \mu u_m + \Delta P_m'' \\
&= \{(\varepsilon_D \zeta_D + \varepsilon_C \zeta_C) + \alpha c u_m t\} \mu u_m + \Delta P_m'' \tag{D.8}
\end{aligned}$$

Eq.(D.8)から時間軸「零」での切片 ΔP_∞ は、

$$\Delta P_\infty = (\varepsilon_D \zeta_D + \varepsilon_C \zeta_C) \mu u_m + \Delta P_m'' \tag{4.12}$$

と表せる。

Appendix E

Eq.(5.11)の導出

本文中の Eq.(5.10)を再記する。

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{D,i} &= \left(\zeta_D + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u_{D,j}} + \alpha c t_2 \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u'_{D,j}} + \alpha c \int_0^{t_3} \overline{u_{D,i}} dt \right) \mu \overline{u_{D,i}} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 \overline{u_i^2} \\
 &= \left(\zeta_D + \alpha c t_1 \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u_{D,j}} + \alpha c t_2 \frac{N}{N-m_D} \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u_{D,j}} + \alpha c t_3 \overline{u_{D,i}} \right) \mu \overline{u_{D,i}} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 \overline{u_i^2}
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

近似的に $u_i = \overline{u_i}$, $u_{D,i} = \overline{u_{D,i}}$ とし、 $i=1 \sim N$ まで辺々加えると次式を得る。

$$\begin{aligned}
 N \Delta P_D &= \zeta_D \mu \sum_{i=1}^N \overline{u_{D,i}} + \alpha c \mu \left(t_1 + \frac{N}{N-m_D} t_2 \right) \sum_{i=2}^N \left(\overline{u_{D,i}} \sum_{j=1}^{i-1} \overline{u_{D,j}} \right) \\
 &\quad + \alpha c \mu t_3 \sum_{i=1}^N \overline{u_{D,i}^2} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 \sum_{i=1}^N \overline{u_i^2} \\
 N \Delta P_D &= \zeta_D \mu N u_{D,av} + \alpha c \mu \left(t_1 + \frac{N}{N-m_D} t_2 \right) \sum_{i=1}^N \left(\overline{u_{D,i}} \sum_{j=1}^i \overline{u_{D,j}} \right) \\
 &\quad - \alpha c \mu \left(t_1 + \frac{N}{N-m_D} t_2 \right) \sum_{i=1}^N \overline{u_{D,i}^2} + \alpha c \mu t_3 \sum_{i=1}^N \overline{u_{D,i}^2} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 \sum_{i=1}^N \overline{u_i^2}
 \end{aligned} \tag{E.1}$$

ここで、濾過面Dの平均濾過速度 $u_{D,av}$ に対する $\overline{u_{D,i}}$ の分散を σ_D^2 とすると、

$$\begin{aligned}
 \sigma_D^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \overline{u_{D,i}^2} - u_{D,av}^2 \\
 \sum_{i=1}^N \overline{u_{D,i}^2} &= N u_{D,av}^2 + N \sigma_D^2
 \end{aligned} \tag{E.2}$$

と表せる。

ここで、 $\sum_{i=1}^N \left(\overline{u_{D,i}} \sum_{j=1}^i \overline{u_{D,j}} \right)$ を展開するために、マトリックスを考慮すると、

$$\begin{aligned}
 2 \sum_{i=1}^N \left(\overline{u_{D,i}} \sum_{j=1}^i \overline{u_{D,j}} \right) &= \sum_{i=1}^N \overline{u_{D,i}} \sum_{j=1}^N \overline{u_{D,j}} + \sum_{i=1}^N \overline{u_{D,i}^2} \\
 &= (N u_{D,av})^2 + (N u_{D,av}^2 + N \sigma_D^2)
 \end{aligned} \tag{E.3}$$

ここで、 $t_c = t_1 + t_2$ と置き、Eqs.(A.4),(E.2),(E.3)を(E.1)に代入すると本文中の Eq.(5.11)を得る。

$$\begin{aligned}
N\Delta P_D &= \zeta_D \mu N u_{D,av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} \left[(N u_{D,av})^2 + N u_{D,av}^2 + N \sigma_D^2 \right] \\
&\quad - \alpha c \mu \left[\frac{N}{N - m_D} t_2 - (t_3 - t_1) \right] \left\{ N u_{D,av}^2 + N \sigma_D^2 \right\} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 \left\{ N u_{av}^2 + N \sigma^2 \right\} \\
\Delta P_D &= \zeta_D \mu u_{D,av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} u_{D,av}^2 \left[N + \left\{ 1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right\} \right] \\
&\quad - \alpha c \mu \left[\frac{N}{N - m_D} t_2 - (t_3 - t_1) \right] u_{D,av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right\} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right\} \quad (5.11)
\end{aligned}$$

Appendix F

Eq.(5.22)の導出

本文中の Eq.(5.21)において、 $u_{D,av} = k_D u_{av}$, $u_{C,av} = k_C u_{av}$ とおくと次式を得る。

$$\Delta P = \frac{\mu u_{av}}{\frac{\varepsilon_D}{\zeta_D} + \frac{\varepsilon_C}{\zeta_C}} + \mu \frac{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2}{\frac{\varepsilon_D}{\zeta_D} + \frac{\varepsilon_C}{\zeta_C}} u_{av}^2 + D u_{av}^2 \quad (\text{F.1})$$

ここで、

$$G = \frac{\frac{\varepsilon_D}{\zeta_D} + \frac{\varepsilon_C}{\zeta_C}}{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2} \times B_D$$

と置いて、Eq.(F.1)の両辺にかけると次式となる。

$$G \Delta P = \frac{B_D}{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2} \mu u_{av} + B_D \mu u_{av}^2 + G D u_{av}^2 \quad (\text{F.2})$$

ここで、右辺の第3項の B_D に本文中の Eq.(5.17)を代入すると

$$G \Delta P = \frac{B_D}{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2} \mu u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} u_{av}^2 \left[N + \left\{ 1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right\} \right] - \alpha c \mu \left[\frac{N}{N - m_D} t_2 - (t_3 - t_1) \right] u_{av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right\} + G D u_{av}^2 \quad (\text{F.3})$$

を得、さらに変形すると Eq.(F.4)を得る。

$$\begin{aligned} G \Delta P + \alpha c \mu \left[\frac{N}{N - m_D} t_2 - (t_3 - t_1) \right] u_{av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right\} \\ = \frac{B_D}{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2} \mu u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} u_{av}^2 \left[N + \left\{ 1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right\} \right] + G D u_{av}^2 \end{aligned} \quad (\text{F.4})$$

ここで、

$$\frac{B_D}{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2} \mu u_{av} + G D u_{av}^2$$

で無次元化をおこなうと本文中の Eqs.(5.22)～(5.24)を得る。

$$y = 1 + \frac{1}{2} x \quad (5.22)$$

$$y = \frac{G \Delta P + \alpha c \mu \left[\frac{N}{N - m_D} t_2 - (t_3 - t_1) \right] u_{av}^2 \left\{ 1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right\}}{\frac{B_D}{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2} \mu u_{av} + G D u_{av}^2} \quad (5.23)$$

$$x = \frac{\alpha c \mu \frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} u_{av}^2 \left[N + \left\{ 1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right\} \right]}{\frac{B_D}{\frac{\varepsilon_D B_D}{\zeta_D} k_D^2 + \frac{\varepsilon_C B_C}{\zeta_C} k_C^2} \mu u_{av} + G D u_{av}^2} \quad (5.24)$$

Appendix G

Eq.(5.26)と Eq.(5.27)の導出

Eq.(5.11)と Eq.(5.16)において $u_{D,av} = k_D u_{av}$, $u_{C,av} = k_C u_{av}$ とおくと次式を得る。

$$\begin{aligned} \Delta P_D = & \zeta_D \mu k_D u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} k_D^2 u_{av}^2 \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \right\} \\ & - \alpha c \mu \left[\frac{N}{N - m_D} t_2 - (t_3 - t_1) \right] k_D^2 u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right) \end{aligned} \quad (G.1)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_C = & \zeta_C \mu k_C u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{N t_c - m_C t_1}{N - m_C} k_C^2 u_{av}^2 \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_C^2}{u_{C,av}^2} \right) \right\} \\ & - \alpha c \mu \left[\frac{N}{N - m_D} t_2 - (t_3 - t_1) \right] k_C^2 u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma_C^2}{u_{C,av}^2} \right) + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right) \end{aligned} \quad (G.2)$$

ここで、本文中の Eqs.(5.17)～(5.19)で表した B_D, B_C, D を用いると、Eqs.(G.1),(G.2)は次式で表せる。

$$\Delta P_D = \zeta_D k_D \mu u_{av} + B_D k_D^2 \mu u_{av}^2 + D u_{av}^2 \quad (G.3)$$

$$\Delta P_C = \zeta_C k_C \mu u_{av} + B_C k_C^2 \mu u_{av}^2 + D u_{av}^2 \quad (G.4)$$

濾過面Dと濾過面Cは並列配置であることから $\Delta P_D = \Delta P_C$ であるので

$$\begin{aligned} \zeta_D k_D \mu u_{av} + B_D k_D^2 \mu u_{av}^2 &= \zeta_C k_C \mu u_{av} + B_C k_C^2 \mu u_{av}^2 \\ \zeta_D k_D + B_D u_{av} k_D^2 &= \zeta_C k_C + B_C u_{av} k_C^2 \end{aligned} \quad (G.5)$$

が成立つ。また、Eq.(5.6)の関係から本文中の Eq.(5.27)を得る。

$$\begin{aligned} u_{av} &= \varepsilon_D u_{D,av} + \varepsilon_C u_{C,av} = \varepsilon_D k_D u_{av} + \varepsilon_C k_C u_{av} \\ 1 &= \varepsilon_D k_D + \varepsilon_C k_C \\ k_C &= \frac{1 - \varepsilon_D k_D}{\varepsilon_C} \end{aligned} \quad (5.27)$$

Eqs.(G.5),(5.27)より、 k_D に関する二次方程式 Eq.(G.6)を得る。

$$\zeta_D k_D + B_D u_{av} k_D^2 = \zeta_C \left(\frac{1 - \varepsilon_D k_D}{\varepsilon_C} \right) + \left(\frac{1 - 2\varepsilon_D k_D + \varepsilon_D^2 k_D^2}{\varepsilon_C^2} \right) B_C u_{av}$$

$$\left(B_C \frac{\varepsilon_D^2}{\varepsilon_C^2} - B_D \right) u_{av} k_D^2 - \left(\zeta_D + \frac{\varepsilon_D \zeta_C}{\varepsilon_C} + \frac{2\varepsilon_D B_C u_{av}}{\varepsilon_C^2} \right) k_D + \left(\frac{\zeta_C}{\varepsilon_C} + \frac{B_C u_{av}}{\varepsilon_C^2} \right) = 0 \quad (\text{G.6})$$

ここで、

$$a = \left(B_C \frac{\varepsilon_D^2}{\varepsilon_C^2} - B_D \right) u_{av} \quad b = \zeta_D + \frac{\varepsilon_D \zeta_C}{\varepsilon_C} + \frac{2\varepsilon_D B_C u_{av}}{\varepsilon_C^2} \quad c = \frac{\zeta_C}{\varepsilon_C} + \frac{B_C u_{av}}{\varepsilon_C^2}$$

と置いて、Eq.(G.6)から k_D の根を求めると本文中の Eq.(5.26)を得る。

$$k_D = \frac{b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5.26)$$

$\sqrt{\quad}$ 前の根を+にすると $k_D > k_C$ すなわち $u_{D,av} > u_{C,av}$ となってしまう、斑落ちモデルの考え方に反するため、-の根のみとした。 k_C は、Eq.(5.26)をEq.(5.27)に代入して算出する。

Appendix H

Eq.(5.32)の導出

本文中の Eqs.(5.30),(5.31)に示した $\Delta P_{D,N,FIN}$ と $\Delta P_{D,FIN}$ は同値であることから

$$\begin{aligned}
 & (\zeta_D + \alpha c N t_c k_D u_{av}) \mu m_D k_D u_{av} + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 m^2 u_{av}^2 \\
 &= \zeta_D \mu k_D u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \mu \frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \right\} k_D^2 u_{av}^2 \\
 & \quad - \alpha c \mu \frac{N}{N - m_D} t_2 k_D^2 u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + \frac{1}{2} \lambda \gamma K^2 u_{av}^2 \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right) \tag{H.1}
 \end{aligned}$$

が成立つ。両辺を $\mu k_D u_{av}$ で割ると、

$$\begin{aligned}
 & (\zeta_D + \alpha c N t_c k_D u_{av}) m_D + \frac{1}{2 \mu k_D} \lambda \gamma K^2 m^2 u_{av} \\
 &= \zeta_D + \frac{1}{2} \alpha c \frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \right\} k_D u_{av} \\
 & \quad - \alpha c \frac{N}{N - m_D} t_2 k_D u_{av} \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + \frac{1}{2 \mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right)
 \end{aligned}$$

となり、両辺に $\left[\frac{1}{2 \mu k_D} \lambda \gamma K^2 m_D u_{av} - \alpha c t_1 m_D k_D u_{av} \right]$ を加えると次式を得る。

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \zeta_D + \alpha c (N t_c - t_1) k_D u_{av} + \frac{1}{2 \mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \right\} m_D \\
 &= \zeta_D + \frac{1}{2} \alpha c \frac{N t_c - m_D t_1}{N - m_D} k_D u_{av} \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \right\} - \alpha c \frac{N}{N - m_D} t_2 k_D u_{av} \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \\
 & \quad + \frac{1}{2 \mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \left(1 + \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} - m^2 \right) - \alpha c t_1 m_D k_D u_{av} + \frac{1}{2 \mu k_D} \lambda \gamma K^2 m_D u_{av}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \zeta_D + \alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} + \frac{1}{2\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \\
&\quad - \frac{1}{2} \alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} + \frac{1}{2\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} (m_D - m^2) \\
&\quad - \frac{1}{2} \alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} + \frac{1}{2} \alpha c \frac{Nt_c - m_D t_1}{N - m_D} k_D u_{av} \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \right\} \\
&\quad - \alpha c \frac{N}{N - m_D} (t_c - t_1) k_D u_{av} \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + \frac{1}{2\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} - \alpha c t_1 m_D k_D u_{av} \\
&= \zeta_D + \alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} + \frac{1}{2\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \\
&\quad - \frac{1}{2} \left\{ \alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} - \frac{1}{\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} (m_D - m^2) \right\} \\
&\quad - \frac{1}{2} \alpha c k_D u_{av} \left[(Nt_c - t_1) - \frac{Nt_c - m_D t_1}{N - m_D} \left\{ N + \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \right\} \right] \\
&\quad + \frac{2N}{N - m_D} (t_c - t_1) \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + 2m_D t_1 \left] + \frac{1}{2\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \\
&= \zeta_D + \alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} + \frac{1}{2\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \\
&\quad - \frac{1}{2} \left\{ \alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} - \frac{1}{\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} (m_D - m^2) \right\} \\
&\quad - \frac{1}{2} \alpha c k_D u_{av} \beta + \frac{1}{2\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \tag{H.2}
\end{aligned}$$

Eq.(H.2)の両辺を $\left\{ \zeta_D + \alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} + \frac{1}{2\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \right\}$ で割ると本文中の

Eq.(5.32)を得る。

$$\begin{aligned}
m_D = 1 - \frac{1}{2} \frac{\alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} - \frac{1}{\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} (m_D - m^2)}{\zeta_D + \alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} + \frac{1}{2\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av}} \\
- \frac{1}{2} \frac{\alpha c k_D u_{av} \beta - \frac{1}{\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av} \left(\frac{\sigma^2}{u_{av}^2} \right)}{\zeta_D + \alpha c(Nt_c - t_1)k_D u_{av} + \frac{1}{2\mu k_D} \lambda \gamma K^2 u_{av}} \tag{5.32}
\end{aligned}$$

ここで β は、次のように表せる。

$$\begin{aligned}
\beta &= (Nt_c - t_1) - (Nt_c - m_D t_1) \frac{N}{N - m_D} - (Nt_c - m_D t_1) \frac{1}{N - m_D} \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \\
&\quad + \frac{2N}{N - m_D} (t_c - t_1) \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + 2m_D t_1 \\
&= (Nt_c - t_1) - (Nt_c - m_D t_1) \frac{N}{N - m_D} - (Nt_c - m_D t_1) \frac{2}{N - m_D} \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \\
&\quad + (Nt_c - m_D t_1) \frac{1}{N - m_D} \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + \frac{2N}{N - m_D} (t_c - t_1) \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + 2m_D t_1 \\
&= (Nt_c - t_1) - (Nt_c - m_D t_1) \frac{N}{N - m_D} + (Nt_c - m_D t_1) \frac{1}{N - m_D} \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \\
&\quad + \left\{ \frac{2N}{N - m_D} (t_c - t_1) - \frac{2Nt_c - 2m_D t_1}{N - m_D} \right\} \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + 2m_D t_1 \\
&= (Nt_c - t_1) - (Nt_c - m_D t_1) \frac{N}{N - m_D} + (Nt_c - m_D t_1) \frac{1}{N - m_D} \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) \\
&\quad - 2t_1 (N - m_D) \left(1 + \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \right) + 2m_D t_1 \\
&= Nt_c - t_1 - Nt_c \frac{N}{N - m_D} + m_D t_1 \frac{N}{N - m_D} + (Nt_c - m_D t_1) \frac{1}{N - m_D} \\
&\quad + (Nt_c - m_D t_1) \frac{1}{N - m_D} \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} - 2t_1 (N - 2m_D) - 2t_1 (N - m_D) \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \\
&= Nt_c \left(1 - \frac{N}{N - m_D} + \frac{1}{N - m_D} \right) - t_1 \left(1 - \frac{Nm_D}{N - m_D} + \frac{m_D}{N - m_D} \right) - 2t_1 (N - 2m_D) \\
&\quad + Nt_c \left(\frac{Nt_c - m_D t_1}{N - m_D} - 2t_1 (N - m_D) \right) \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \\
&= N(t_c - t_1) \left(\frac{1 - m_D}{N - m_D} \right) - 2t_1 (N - 2m_D) + Nt_c \left(\frac{Nt_c - m_D t_1}{N - m_D} - 2t_1 (N - m_D) \right) \frac{\sigma_D^2}{u_{D,av}^2} \quad (\text{H.3})
\end{aligned}$$

著者発表の研究論文

本論文中の所在

1. 多室バグフィルターにおける圧力損失特性の解析
池野栄宣、多田 豊、平岡節郎、周戸祐介：化学工学論文集，
28, 3, 241～247 (2002)

第 2 章

2. 多室バグフィルターの本体圧力損失からの濾過速度および
圧損パラメーターの推算
池野栄宣、多田 豊、平岡節郎、周戸祐介：化学工学論文集，
29, 5, 701～706 (2003)

第 2 章

3. バグフィルターの圧力損失パラメーターに及ぼす濾過速度と
含塵濃度の影響
池野栄宣、多田 豊、平岡節郎、池井正輝、周戸祐介：
化学工学論文集，30, 1, (2004) [印刷中]

第 3 章

4. 斑落ちモデルに基づくバグフィルターの圧力損失の考察
池野栄宣、多田 豊、平岡節郎、池井正輝、周戸祐介：
化学工学論文集に掲載決定

第 4 章

5. 斑落ちモデルに基づく多室バグフィルターの圧力損失特性
の解析
池野栄宣、多田 豊、平岡節郎、周戸祐介、池井正輝：
化学工学論文集に投稿中

第 5 章

謝 辞

何よりも先に、私の本学への入学に際しての多大な御尽力と、本研究を進めるにあたって懇切かつ細微にわたる御指導を賜った、学生時代からの恩師でもある名古屋工業大学大学院物質工学専攻の平岡節郎教授に心より感謝の意を表します。そして、本研究を進めるにあたって、壁につきあたったときも研究内容を親身になって検討して戴き多大な御助言を賜った名古屋工業大学大学院物質工学専攻の多田 豊教授に深く感謝いたします。さらに、濾過理論の何たるかを身を惜しまず御教授して戴いた名古屋工業大学大学院物質工学専攻の新垣 勉教授には感謝の念が絶えません。

一方、企業人でありながら本研究を行う機会を与えていただきました新東工業株式会社の永井 譲会長をはじめ、役員の方々の工学に対する多大な御理解に深く感謝いたします。特に、私の入学の際に後見人にもなって戴き、物心両面で常に暖かい御支援をして戴いた安保米生(前)新東エコテックカンパニー社長には言葉に尽くせぬ思いです。ここに深く感謝いたします。また、会社の仕事を進めながらの研究生活のため、私が所属した新東エコテックカンパニーの技術部および環境開発部のメンバーには言い知れぬ御苦勞をかけたことと思います。ここに陳謝し感謝の意を表します。そして、会社の仕事と研究を両立させるにあたって、公私ともに常に応援して戴いた同僚の西村育夫氏と三浦八朗氏に感謝いたします。

本研究を遂行するにあたっては、名古屋工業大学・化学工学研究室の皆様のお支援なくしては成し遂げられませんでした。実験の遂行および本論文を作成するにあたって、常に暖かく御支援して戴いた森 秀樹助教授、加藤禎人助教授、岩田修一助手に感謝いたします。また、大西明子技官と高橋典子事務官は研究生活におけるオアシス的な存在であり大きな活力となりました。ここに感謝の意を表します。

特に、本研究に直接協力して戴き、払落としモデルに基づく数値解析を共に行ってくれた周戸祐介君の馬力と強靱な精神力には頭の下がる思いです。また、根気を要する実験と圧損パラメーターの推算に携わってくれた池井正輝君の地道な努力に感謝いたします。そして、本論文の図式の作成に協力し、本研究の最終目的の達成に向けて現在も邁進している三好達也君には、感謝の意とともに今後の躍進を期待しています。

大同工業大学の中村 肇教授、松浦章裕教授そして社会人ドクターの先輩である松田充夫氏と亀井 登氏には、学会参加・論文作成など様々な面で御支援を戴き深く感謝いたしております。

最後に、名古屋工業大学・化学工学研究室の卒業生および在研生の方々と、ここに御名前を挙げることのできなかつた多くの方々に感謝いたします。

2003年12月

池野 栄 宣