移動層集じん装置の最適運転*

和田 憲 造^{*1}, 糸 井 茂^{*1}
森 元 映 治^{*2}, 早 野 延 男^{*3}

Optimal Control of Moving Bed Dust Collector

Kenzo WADA, Shigeru ITOI
Eiji MORIMOTO and Nobuo HAYANO

In the present report, dust collection performance in a cross-current-type moving bed dust collector is experimentally investigated, and the optimal control of the dust collector is discussed. First, a model of the dust collector is discussed to simulate such aspects of dust collection performance as collection efficiency and pressure drop. The model of the dust collector is expressed as an aggregate of blocks with a unit volume, and simulations of collection performance are carried out using the model. Next, the optimal control of the moving bed dust collector is discussed. In the control of the dust collector, it is impossible to set the set-point of the pressure drop and the collection efficiency independently from the viewpoint of the characteristics of the dust collector. Hence we propose a fuzzy optimal control method as a control algorithm. By giving the value of weight in the performance function, a dust collector that meets the application can be constructed.

Key Words: Dust Collector, Moving Bed, Collection Efficiency Pressure Drop, Fuzzy Control, Optimal Control

1. 序 論

充てん層集じん装置は、固形粒子を充てんした層に含じんガスを通過させることによってダストを分離捕集する装置である。この装置は広範囲な条件下において使用可能であり、運転形態により固定層と移動層に大別される。

前報¹⁾では直交流式移動層の集じん効率について検討を行うため、層内における気流の流れを仮定し、固定層の集じん特性をもとに層の集じん効率をシミュレートし、ある程度移動層の集じん効率を予測することが可能となった。しかし、前報では移動層を層深さの異なる単位厚さの層の集合体と考えてモデル化しているため、層内の任意の位置における集じん状態を表すことは困難である。そこで本報では、層を単位堆積のブロックの集合体と考え、各ブロックの集じん特性を固定層の集じん特性をもとに算出し、これをもとに層全体の集じん特性（集じん効率および圧力損失）について検討を行った。さらに、移動層の最適運転につ

いて検討を行った。

集じん装置は一般に高集じん効率、低圧力損失で運転されるのが望ましい。しかし、高集じん効率と低圧力損失は互いに相反する関係にある。すなわち、集じん効率が高くなるにつれて圧力損失は上昇し、また、圧力損失を低く抑えようとする集じん効率が低下する傾向にある。通常、集じん装置を運転するときは圧力損失がある値になると、あるいは一定時間経過後にダストの払い落としやろ過媒体の交換を行っている。したがって、その間集じん装置を切り替えて運転する必要がある。一方、移動層集じん装置では媒体を連続的に排出できることから集じんを連続的に行うことが可能である。しかし、媒体の降下速度は集じん装置の使用目的、ダストおよび媒体の物性、あるいは周囲の環境条件等により試行錯誤的に決定されているのが現状である。この媒体降下速度を集じん装置の使用目的に合わせてうまくコントロールすることができれば最適な集じん装置を構成することができると思われる。

本報では、まず、移動層の圧力損失と集じん効率について検討を行い、次いで移動層集じん装置の最適運転について検討を行った。

* 原稿受付 平成4年5月18日。

^{*1} 正員、山口大学工学部（〒755 宇部市常盤台）。

^{*2} 正員、水産大学校（〒759-65 下関市永田本町2-7-1）。

^{*3} 東京理科大学山口短期大学（〒756 小野田市大学通り）。

2. 実験装置

図1に実験装置の概略を示す。この実験装置は前報で用いたものと同様である。含じんガスは高さ120 mm、幅100 mmの入口を通して層内に進入し、厚さ200 mmの層を通過後、入口と同形の出口から排出され、その間に集じんが行われる。

ダストはテーブルフィーダによって定量供給されている。また、ろ過媒体は層上部のホッパーより供給され、補集したダストと共に層下部のロータリバルブから連続的に排出される。充てん層を通過したダストの濃度は光散乱式デジタル粉じん計(D.D.I)により測定され、層の圧力損失は差圧変換器により測定される。また、流量はオリフィスにより測定され、一定流量となるようコントロールされている。なお、ダストとして平均粒径 $11.1\mu\text{m}$ のフライアッシュを、またろ過媒体として平均粒径4.5 mmのコークスを用いた。

3. 移動層モデル

3.1 移動層のモデル 移動層集じん装置において、集じんが進むにつれて層内でダストがたい積し、またろ過媒体の降下につれてたい積ダストの分布状態(粉じん負荷分布)は変化する。しかし、媒体降下速度が一定のもとでは一定時間経過後に層内はある定常状態となり、集じん効率および圧力損失は一定の値を示す。

今、移動層を図2に示すような単位体積のブロックの集合体と考え、集じんは層内を流れる流線⁽¹⁾上のブロックで順次行われていくものとする。この各ブロックの集じん特性を固定層における集じん特性と同様に考えることにより、層内の粉じん負荷の分布を求めることができ、また、これら各ブロックの粉じん負荷から個々のブロックの集じん効率と圧力損失を求め、こ

図1 実験装置概略図

れらを合計することによって層全体の集じん効率と圧力損失を求めることができる。ブロックは一辺1 cmの立方体とし、また、層内の流線は12本とした。なお、充てん材の流れはマスフローとなっており各ブロックは一様に降下するものとした。

3.2 集じん効率⁽¹⁾ 図3に集じんのモデル図を示す。ある時間 t において層深さ x の層における集じん効率 $E(x, t)$ は層深さ x 地点のダスト濃度 $C(x, t)$ と入口側ダスト濃度 C_i とを用いて

$$E(x, t) = 1 - \frac{C(x, t)}{C_i} \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表される。また、充てん層内の集じん状態は次の偏微分方程式で表される⁽¹⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -\eta \cdot C(x, t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \eta \cdot C(x, t) \cdot u \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $C(x, t)$ はダスト濃度、 η は単位層効率、 x は層深さを表す。また、 u は層内のガス流速、 m は単位体積当たりの粉じん負荷を表している。また、単位層効率 η は次のように表せる。

図2 移動層のブロックモデル

図3 集じんのモデル図

$$\eta = \{a - b \cdot m(x, t)\} \left\{ m(x, t) + \frac{\eta_0}{a} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 a, b は粒子の捕集状態を表す定数である。式(4)を用いると式(2), (3)は次式のように表せる。

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \{a - b \cdot m(x, t)\} \left\{ m(x, t) + \frac{\eta_0}{a} \right\} C(x, t) \cdot u \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = -\{a - b \cdot m(x, t)\} \left\{ m(x, t) + \frac{\eta_0}{a} \right\} C(x, t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

なお、初期条件と境界条件は以下のとおりである。

初期条件： $t=0$ のとき $m=0$

境界条件： $x=0$ のとき $C=C_i$

この偏微分方程式を以下に示す差分方程式に変換し、逐次計算を行うことにより集じん効率を求めた。

$$m(X, T+1) = \{a - b \cdot m(X, T)\} \left\{ m(X, T) + \frac{\eta_0}{a} \right\} C(X, T) \cdot u + m(X, T) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$C(X+1, T) = -\{a - b \cdot m(X, T)\} \left\{ m(X, T) + \frac{\eta_0}{a} \right\} C(X, T) + C(X, T) \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

初期条件： $t=0$ のとき $m(X, 0)=0$

境界条件： $x=0$ のとき $C(0, T)=C_i$

3.3 圧力損失 粉じん負荷を有する層の圧力損失はろ過媒体のみ（清浄層）の圧力損失と粉じん負荷（集じんされたダスト）による圧力損失の和として次式のように表せる⁽²⁾。

$$dp = dp_0 + dp_m \quad \dots\dots\dots (9)$$

dp ：全圧力損失

dp_0 ：清浄層の圧力損失

dp_m ：粉じん負荷による圧力損失

固定層の実験より得られた集じん効率と圧力損失より層全体の粉じん負荷と圧力損失比 (dp/dp_0-1) の関係を両対数グラフに表したものを図4に示す。図から粉じん負荷による圧力損失 dp_m は積算粉じん負荷の関数として次式のように表せる。

$$dp_m = dp_0 \cdot K \cdot m^q \quad \dots\dots\dots (10)$$

したがって、全圧力損失は式(9), (10)より次式のように表すことができる。

$$dp = dp_0(1 + K \cdot m^q) \quad \dots\dots\dots (11)$$

集じん状態のシミュレーションを行う際に、気流の流れが問題となる。移動層内の気流の流れは粉じん負

図4 粉じん負荷と圧力損失比の関係

(a) 媒体の降下速度 $v=0$ m/s

(b) 媒体の降下速度 $v=1.2$ m/s

図5 ダストのたい積状態

図 6 シミュレーションによるダストのたい積状態

荷に伴って変化するため一様でない。そこで、気流の流れを前報と同様に正弦波状の流線で表し、粉じん負荷の増加につれて流線が広がっていくものとした⁽¹⁾。

3・4 シミュレーションおよび実験結果 実験による移動層集じん装置の集じん状態を図5(a), (b)に示す。また、図6(a), (b)にブロックモデルを用いて同一条件で計算したときの結果を示す。(a), (b)はそれぞれ媒体降下速度を0 m/s, 1.2 m/sとしたときの運転開始120分後における層内の粉じん負荷分布を示したものである。シミュレーションにおいて粉じんは流線上のブロックで集じんされると仮定しており、さらに流線の本数を12本と限定しているため、媒体降下速度0 m/sの場合に層の出口側で粉じん負荷が帯状に分布しているようになっている。が、全体的にシミュレーションによる粉じんのたい積分布は実験による粉じん負荷の分布を良く表しているといえる。

図7に集じん効率と圧力損失についてのシミュレーションおよび実験結果を示す。丸印が実験、実線はシミュレーション結果を表している。集じん効率のシミュレーション結果は実験結果と比べ集じん初期は若干低くなっているが、その後はよく一致している。集じん初期に低くなる原因としては、シミュレーションでは粉じん負荷のないときは流線の広がり⁽¹⁾もないとした。しかし、実際はろ過媒体によって気流はさえぎられるため層上下に気流が広がりダストが集じんされる。このため集じん初期ではシミュレーションの方が低くなっているものと考えられる。圧力損失のシミュレーション結果は実験結果と比べ少し低めにでている

図 7 集じん効率および圧力損失

が良く一致しているといえる。

4. 移動層集じん装置の最適運動

4・1 制御方式 移動層の定常状態における圧力損失と集じん効率の値は媒体降下速度により決定される。したがって、媒体降下速度を操作することにより目的に応じた定常状態を作り出すことが可能となる。しかし、定常状態における圧力損失および集じん効率の値は媒体の降下速度によって一意的には定まらず、そのときのダストや媒体の物性、運転条件および周囲の環境条件等により変化する。さらに圧力損失と集じん効率は相反する関係にある。したがって、最適運転を行うに当たってこれらに個別に目標値を設定し、制御を行うことは不可能である。そこでこのような目標

値が明確に定まらないプロセスに対して、評価関数を用いたファジィ最適制御を提案し、これをもとに制御を行うことを考える。すなわち、ファジィ制御において、ある評価関数を定め、評価関数中の重みを適当に決めることにより、目的に応じた最適な状態での運転を目指す。この最適制御は通常の最適制御がある設定値を与えられて、その設定値に達するまでの応答のパターンを評価関数で定めるものと異なり、設定値が存在せず、両者のバランスによりある定常状態に持つて

いこうというものである。

評価関数として次式で示される評価関数を定義する。

$$J(t) = \{100 - E(t)\} + K_p \{dp(t) - dp_0\} \quad \cdots \cdots (12)$$

dp_0 : 清浄層の圧力損失

K_p : $J(t)$ に対する圧力損失の重み

上式右辺第1項は集じん効率 100% に対する偏差であり、第2項は粉じん負荷による圧力損失を表している。また、 K_p は圧力損失にかかる重みであり、この値を変えることにより目的に応じた制御が可能となる。

ファジィ制御に用いる前件部変数として、集じん効率および圧力損失からなる評価関数 $J(t)$ 、集じん効率の変化量 $\Delta E(t)$ および圧力損失の変化量 $\Delta dp(t)$ をとり、後件部変数として媒体降下速度の変化量 $\Delta V(t)$

(a) メンバシップ関数

IF $\Delta E=N$ and $\Delta P=Z$ and $J=Z$ then $\Delta V=N$
 IF $\Delta E=Z$ and $\Delta P=Z$ and $J=P$ then $\Delta V=P$
 IF $\Delta E=Z$ and $\Delta P=P$ and $J=Z$ then $\Delta V=P$
 IF $\Delta E=Z$ and $\Delta P=Z$ and $J=Z$ then $\Delta V=Z$
 IF $\Delta E=Z$ and $\Delta P=Z$ and $J=N$ then $\Delta V=N$
 IF $\Delta E=Z$ and $\Delta P=N$ and $J=Z$ then $\Delta V=N$
 IF $\Delta E=P$ and $\Delta P=Z$ and $J=Z$ then $\Delta V=P$

(b) 制御規則

図 8 制御規則及びメンバシップ関数

(a) $K_p=0.06$ の場合

(b) $K_p=0.12$ の場合

(c) $K_p=0.18$ の場合

図 9 シミュレーション結果

図 10 ファジィ制御による実験結果

を取った。ただし $\Delta E(t)$, $\Delta dp(t)$ は以下のとおりである。

$$\Delta E(t) = E(t) - E(t-1) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$\Delta dp(t) = dp(t) - dp(t-1) \quad \dots\dots\dots (14)$$

メンバシップ関数は図 8 (a) で示される三角型のメンバシップ関数を用いた。また、ファジィ変数として P (Positive), Z (Zero), N (Negative) の 3 個のファジィ変数を使用した。なお、操作量の推定には Max-Min 合成法を用いた。(b) に本実験で用いた制御規則を示す。

4.2 シミュレーションおよび実験結果 集じん効率と圧力損失を検出し、媒体降下速度を操作することによって集じん状態の制御を行った。検出端としてデジタル粉じん計 (D. D. I.) および差圧変換器を、また操作端としてロータリバルブを用いた。

図 9 に評価関数中の重み K_p を 0.06, 0.12, 0.18 と変化させた場合のシミュレーション結果を示す。 K_p が大きくなるにつれ定常状態における圧力損失は低くなっている。しかし、集じん効率は K_p が 0.06 のほう

が 0.12 より若干低くなっている。これは圧力損失がある程度高くなることは層内の粉じん負荷も多くなることを意味しており、このためダストの吹き抜け、再飛散が多くなり、結果的に集じん効率が下がったものと思われる。

図 10 に実験による応答波形を示す。評価関数中の重みは $K_p = 0.12$ とした。シミュレーションでは 250 分後に操作量は安定し、高集じん効率、低圧力損失を実現しているが、実験では集じん効率および圧力損失とも多少変動している。また集じん効率が若干下がっているため、シミュレーションに比べて速く定常状態に達している。なお、この定常状態における集じん効率と圧力損失の値は評価関数中の重み K_p の値を調整することにより変えることができる。

5. 結 論

直交流式移動層集じん装置の集じん特性並びに最適運転について検討を行った。層を単位堆積のブロックの集合体と考え、各ブロックの集じん特性をもとに層全体の集じん効率および圧力損失について検討を行った。シミュレーションおよび実験結果より、ブロックモデルを用いることにより、集じん性能の予測がある程度可能になった。

次に移動層集じん装置の最適運転について検討を行った。最適運転を行うに当たって、圧力損失と集じん効率に個別に目標値を設定し、制御を行うことは集じん装置の特性上不可能である。そこでこのような目標値が明確に定まらないプロセスに対して、評価関数を用いたファジィ最適制御を提案し、評価関数中の重みを適当に定めて制御を行うことにより、用途に応じた運転を行うことが可能となった。

文 献

- (1) 和田・住吉・早野・片山, 機論, 56-522, B(1990), 523.
- (2) 狩野・伊東, 粉体工学会誌, 18(1981), 476.