

シャフト炉におけるダストに起因する 棚吊り機構

山 岡 秀 行*

Mechanism of Hanging Caused by Dust in a Shaft Furnace

Hideyuki YAMAOKA

Synopsis:

The mechanism of hanging caused by the dust in reducing gas in the reduction shaft furnace was investigated. Through experimental studies using a rectangular model and theoretical studies using a two dimensional mathematical simulation model, it was clarified that the dust in reducing gas stucked on the packed particles to form a dust blockade zone in front of tuyered and when the dust concentration of reducing gas was high or the descending velocity of packed bed was low, the dust blockade zone was expanded and the gas pressure drop was increased to cause hanging.

Key words: shaft furnace; hanging; dust; two phase flow of gas and powders; mathematical model.

1. 諸 言

従来、高炉をはじめガスと原料が向流する移動層内におけるガス流れは、Ergun 式に代表されるように、清浄なガスの流れとして取り扱われてきた。しかし、荷下がり等の機械的な衝撃をうけて原料が粉化し、高温領域で蒸発した金属や金属酸化物が低温領域で再凝縮するため炉内では多種多様のダストが存在し、ガス流れに影響を及ぼしている可能性がある。このような観点から著者らは充填層内におけるダストを伴ったガス流れの挙動およびその高炉通気現象との関連性について論述した¹⁾²⁾。

一方、著者らはシャフト式還元炉とキューボラ式溶解炉で構成し、溶解炉で微粉炭の多量吹込みを併用して酸素送風を行うことにより高炉法と比較して生産性を倍増し、コークス消費を抜本的に削減すべき新しい製鉄法(SC 法)の開発を試みたが、その機能実証試験においてシャフト式還元炉でダストを含有する還元ガスを使用した場合、棚吊りが生起することを確認した³⁾⁴⁾。

高炉内における棚吊り現象に関しては炭素析出⁵⁾やフラッキング⁶⁾さらには亜鉛やアルカリ蒸気の凝縮⁷⁾との関連において研究された例がある。しかし、本問題はシャフト式還元炉における現象であり、還元ガス中のダストとの関係が深いことが確認されている。

ここでは、上記のシャフト式還元炉における棚吊り現象とダスト挙動との関連性について実験および理論的な視点から考察を加えた。

2. シャフト式還元炉における棚吊り現象

Fig. 1 に SC 法試験炉の構成を、Fig. 2 にシャフト式還元炉における還元ガス中のダスト濃度および原料の荷下がり速度と棚吊りの関係を示す³⁾⁴⁾。ダスト濃度が高い場合および荷下がり速度が遅い場合、棚吊りが発生する傾向にあった。

Table 1 に SC 法試験炉の操業で採取した還元ガスを

Table 1. Chemical analysis and size distribution of dust collected at the operation³⁾ of the SC pilot plant.

Chemical analysis (%)									
Sampling point	T. C	T. Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Alkali	T. S	
Dust catcher	62.4	8.2	11.8	5.9	1.5	5.5	0.46	1.0	
Hot cyclone	43.9	4.1	22.0	9.8	2.1	10.4	1.14	0.7	
Inlet of R. F.	12.6	2.9	35.3	15.4	5.9	19.4	8.9	0.5	
Size distribution (%)									
Sampling point	+60	60~100	100~150	150~200	200~325	-325			
Dust catcher	4.94	8.23	8.60	6.72	10.82	60.69			
Hot cyclone	0.17	0.02	0.07	0.18	1.13	99.43			
Inlet of R. F.	0.06	0.05	0.07	0.04	0.04	99.74			

平成 2 年 9 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 12 月 12 日受付 (Received Dec. 12, 1990)

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

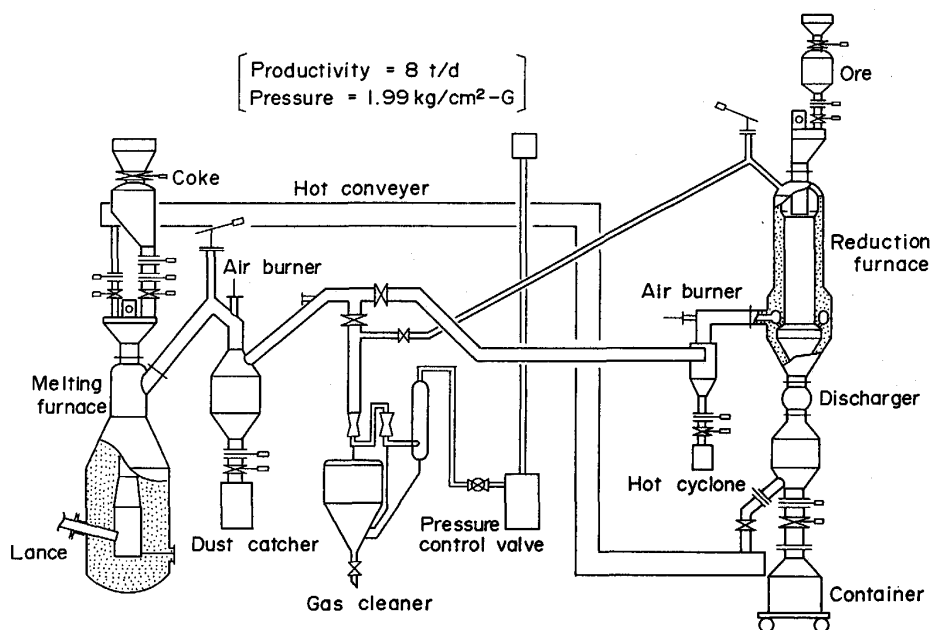
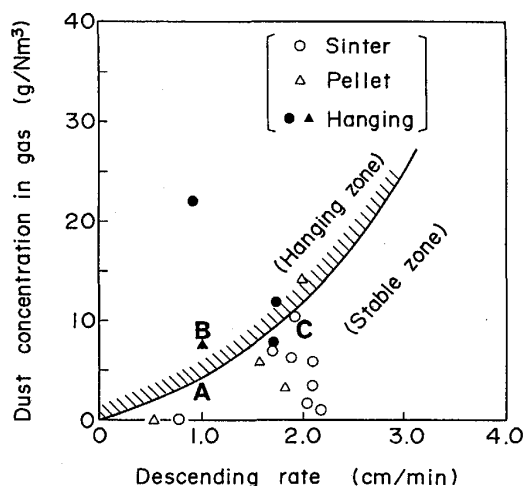


Fig. 1. Outline of the SC pilot plant.

Fig. 2. The hanging zone distinguished by the dust concentration and the descending rate obtained through the connected operation³⁾ of the SC pilot plant³⁾.

インの各部位におけるダストの性状を示す。重力沈降式の除塵装置とサイクロン式の除塵装置を通り抜けて還元炉に入る直前での還元ガス中のダストは微細であることともにアルカリが濃化していることが示された。還元炉に流入して棚吊りを誘発するダストは溶解炉の高温部で蒸発したアルカリなどが再凝縮して生成した微細なダストであると見なすことができる。

3. 平板模型実験による棚吊り原因の調査

Fig. 3 に示す平板模型を使用してダストに起因する棚吊り原因について調査した。

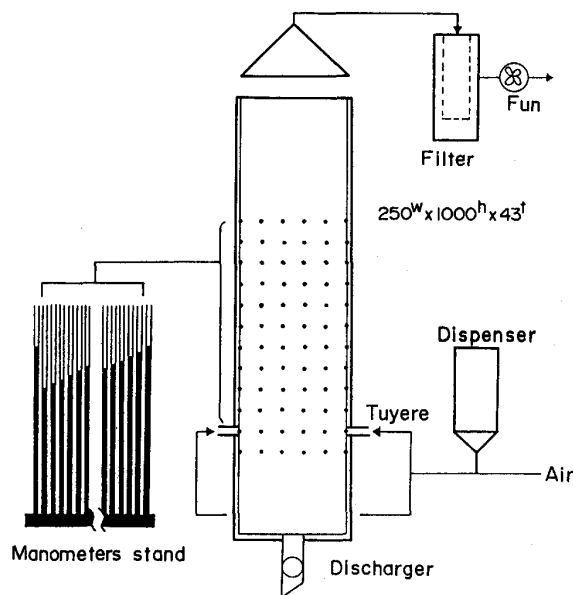


Fig. 3. Cold model for the investigation of the mechanism of hanging caused by dust.

3.1 ダストおよび原料種の影響

ダストとしてガラス粉、微粉炭、消石灰および SC 法機能実証試験で得られたダスト（以下、MF ダストと略称する）を使用し、原料としては焼結鉱またはガラス球を使用して棚吊りの有無を調査した。実験結果を Fig. 4 に示す。ガラス粉および微粉炭では棚吊りは発生しなかったが、消石灰では全ケース、MF ダストでは焼結を使用したケースで棚吊りが発生した。空気流速が低い方が棚吊りが発生しやすい、棚吊りが発生したケー

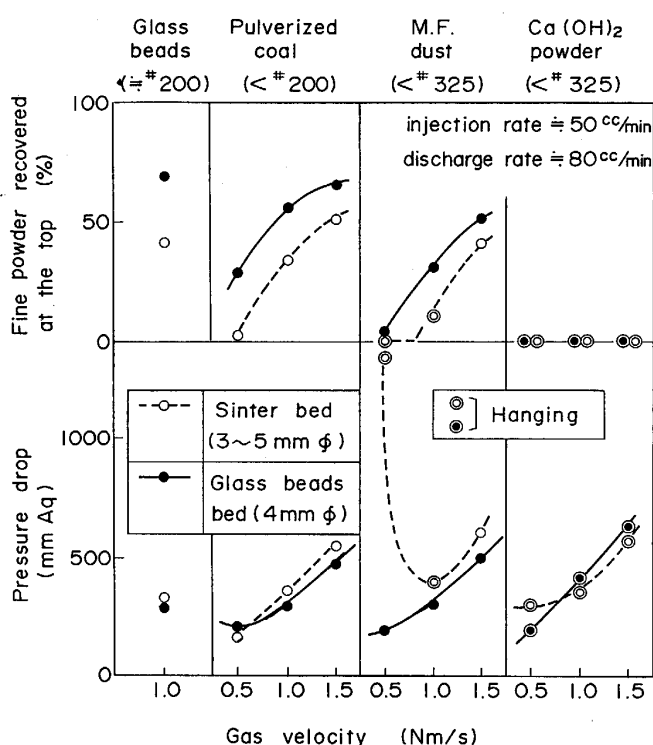


Fig. 4. Effect of the kind of powders and packed particles on the occurrence of hanging.

スでは、炉頂から排出されるダストはごく微量であり、大半が羽口前で原料（充填粒子）に付着していることが観察された。また、送風を停止すると棚吊りは崩壊した。

ここで、消石灰と MF ダストに共通な点は粒度が微細であるとともに原料に付着しやすい点にある。また、焼結鉱はガラス球より比表面積が大きいので、ダストが付着しやすい。

本実験は冷間実験であり、必ずしも SC 法のシャフト式還元炉を再現したものではないが、SC 法のシャフト式還元炉での棚吊りもダストの原料への付着に起因している可能性が強い。

3.2 ダスト濃度および荷下がり速度の影響

ダストとして消石灰、充填原料として焼結鉱を使用し、ダスト濃度および荷下がり速度を変更して棚吊りの有無を調査した。実験結果を Fig. 5 に示す。Fig. 2 に示したシャフト式還元炉における関係と同様、ダスト濃度が高い場合および荷下がり速度が低い場合、棚吊りが生じることが確認された。

3.3 棚吊り発生状況の観察

消石灰と焼結鉱を使用し、炉内におけるダストの挙動と棚吊りの関係を調査した。

Photo. 1 は Fig. 5 B の棚吊りが発生した条件に対応する。ダストが原料に付着した領域が中央にまで拡大し、棚吊りが発生している。この場合、原料は完全に上下に

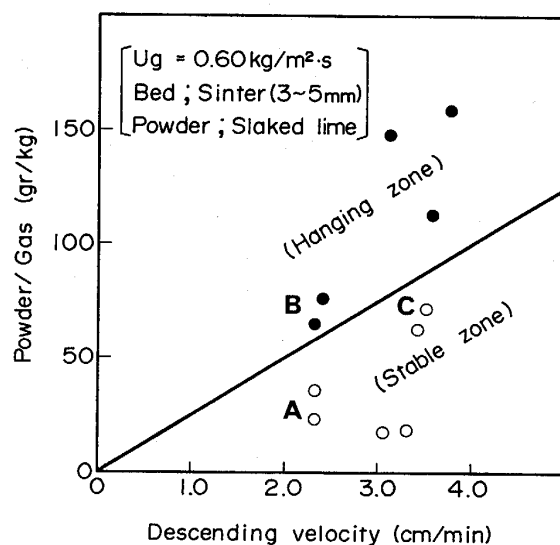
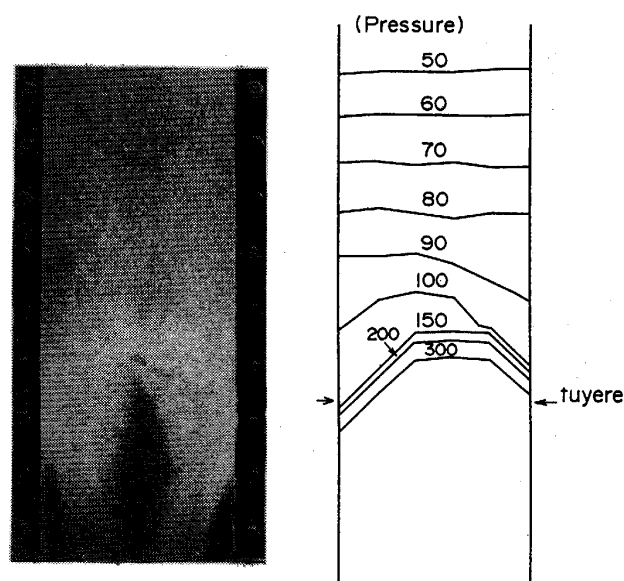


Fig. 5. The hanging zone distinguished by the dust concentration and the descending rate obtained through the cold model experiment.

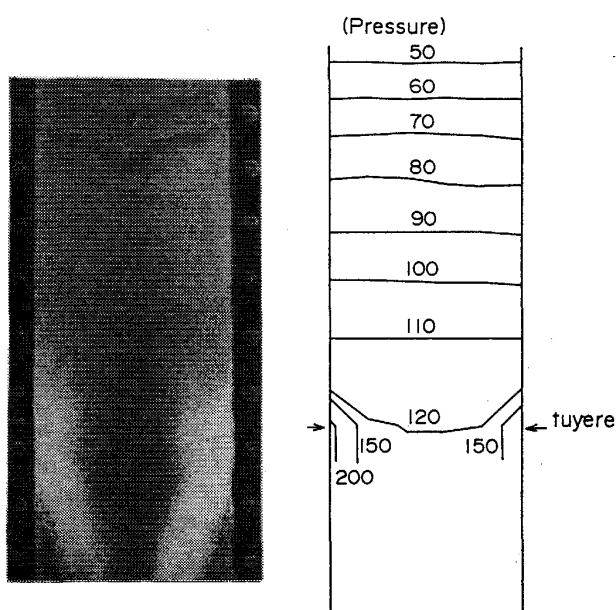


6 min after starting powder injection
Powder/Air : 84 g/Nm³
Velocity of air : 1 Nm/s
Velocity of packed bed : 23 mm/s

Photo. 1. General view and pressure drop (mmAq) when hanging occurred at the cold model.

分断されているが、その境界と等ガス圧力線は一致していたこと、また、送風を停止すると棚が崩壊したことから、棚吊りの直接原因はガス圧が原料の垂直荷重を上回ったためと推定される。Photo. 2 はダスト濃度が低く、棚吊りが発生しなかった Fig. 5 A に対応する。羽口から排出口へとダスト付着領域が形成されているが、全域には至っていない。

以上、棚吊りはダストが原料に付着して形成された通



15 min after starting powder injection
Powder/Air : 30 g/Nm³
Velocity of air : 1 Nm/s
Velocity of packed bed : 23 mm/s

Photo. 2. General view and pressure drop (mmAq) when no hanging occurred at the cold model.

気性の悪い領域が断面全域に拡大し、ガス圧が原料の垂直荷重を上回ることにより発生すると推定された。

4. 数学モデルによる理論的考察

上記の実験結果を踏まえ、充填層内におけるガス流れ、ダストの運動と原料への付着および荷下がり considering 棚吊り発生の有無を判定すべき2次元数学モデルを作成し、実験結果との対応関係について考察した。

4.1 ダスト-ガス2相流2次元数学モデル

4.1.1 状態変数

本数学モデルで採用した状態変数を Table 2 に示す。ガス、ダスト、充填粒子それぞれの存在量は充填層の空隙率および充填層空隙内におけるダストの空隙率を使用して表現することとした。

4.1.2 基礎方程式

(1) ガスおよびダストの状態の記述

Table 2. State variables in the two dimensional mathematical simulation model.

	Gas	Powder (Dust)	Packed bed
Velocity	u_g (m/s)	u_k (m/s)	u_s (m/s)
Void ratio		ε_k (m ³ /m ³ void)	ε_p (m ³ void/m ³ bed)
Pressure	P_g (kg/ms ²)		

ガスおよびダストの運動記述には著者の充填層内における固気2相流モデル¹⁾²⁾にダストの付着と剥離を付加し、以下の方程式を使用して記述した。

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_k + \text{div}(\varepsilon_k u_g) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_k u_g) + \frac{1}{\varepsilon_p \rho_g} (\text{grad } P_g + F_{p,g} + F_{k,g}) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (1 - \varepsilon_k) + \text{div}((1 - \varepsilon_k) u_k) = \frac{(R_s - R_d)}{\varepsilon_p \rho_k} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} ((1 - \varepsilon_k) u_k) + \frac{1}{\varepsilon_p \rho_k} (F_{p,k} + F_{g,k}) = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 ρ_g はガスの密度、 ρ_k はダストの見かけ密度を示す。 $F_{p,g}$ 、 $F_{k,g}$ 、 $F_{p,k}$ は充填粒子の相互作用力であるが、それぞれ以下のように記述した。

$$F_{k,g} = \left\{ 150 \mu_g \left(\frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k d_k \phi_k} \right)^2 + 1.75 \rho_g \frac{1 - \varepsilon_k}{\varepsilon_k d_k \phi_k} |u_g - u_k| \right\} (u_g - u_k) \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$F_{k,p} = \frac{3}{2} \frac{1 + e_{k,p}}{1 - e_{k,p}} \frac{(1 - \varepsilon_p) \rho_p (1 - \varepsilon_k) \rho_k (d_p + d_k)^2}{\rho_p d_p^3 + \rho_k d_k^3} |u_k| u_k \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$F_{g,p} = \left\{ 150 \mu_g \left(\frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p d_p \phi_p} \right)^2 + 1.75 \rho_g \frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p d_p \phi_p} |u_g| \right\} u_g \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 μ_g はガスの粘性係数、 d_k 、 ϕ_k はダストの粒子径と形状係数、 ρ_p 、 d_p は充填粒子の見かけ密度と粒径を示す。 $e_{k,p}$ は衝突における反発係数である。

次に、ダストの充填粒子への付着速度 R_s と充填粒子からの剥離速度 R_d の定式化が必要である。ダストの充填粒子への付着速度 R_s は、ダストが充填粒子と衝突した場合、一定の確率で充填粒子に付着すると仮定し、次式を使用した。

$$R_s = (1 - \varepsilon_k) \rho_k |u_k| (1 - (1 - x)^f) \quad \dots\dots\dots (8)$$

すなわち、一個のダストが1回の衝突で充填粒子へ付着する確率を x とし、単位距離を流れる間に充填粒子と衝突する頻度を f とすれば、一個のダストが単位距離を流れる間に充填粒子に付着確率は $(1 - (1 - x)^f)$ で示すことができる。また、単位時間当たり、単位体積内に流れ込むダストの流量は $(1 - \varepsilon_k) \rho_k |u_k|$ と記述できるので、上式を得る。また、衝突の頻度 f は気体論の平均自由行程にならない、次式⁸⁾で算定した。

$$f = \frac{3}{2} (1 - \varepsilon_p) \frac{(d_p + d_k)^2}{d_p^3} \quad \dots\dots\dots (9)$$

充填粒子に付着したダストの剥離速度はダスト付着量

に比例し、かつ、周囲を流れるガスの運動エネルギーの増加とともに増大すると考え、次式を仮定した。

$$R_d = (\varepsilon_p^0 - \varepsilon_p) \rho_k^0 \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{1}{2} \frac{\rho_g |u_g|^2}{Ed} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

Ed は定数、 ρ_k^0 は充填粒子に付着したダストの高密度、 ε_p^0 はダストが付着していない状態での充填層の空隙率である。

(2) 充填原料の状態の記述

ダストの付着と剝離を考慮し、充填層空隙率を次式により記述した。

$$\frac{\partial}{\partial t} (1 - \varepsilon_p) + \text{div} ((1 - \varepsilon_p) u_s) = \frac{(R_d - R_s)}{\rho_k^0} \quad \dots\dots (11)$$

荷下がりにはガスやダストの運動には支配されないとし、Kinematic モデル⁹⁾を採用した。 B は Kinematic モデル定数である。

$$u_s(r) = -B \frac{\partial}{\partial r} u_s(z) \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{div} u_s = 0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

4.1.3 計算方法

Fig. 6 に計算手順を示す。微分方程式の計算を荷下がり速度分布の計算、ガスおよびダストの流速分布の計

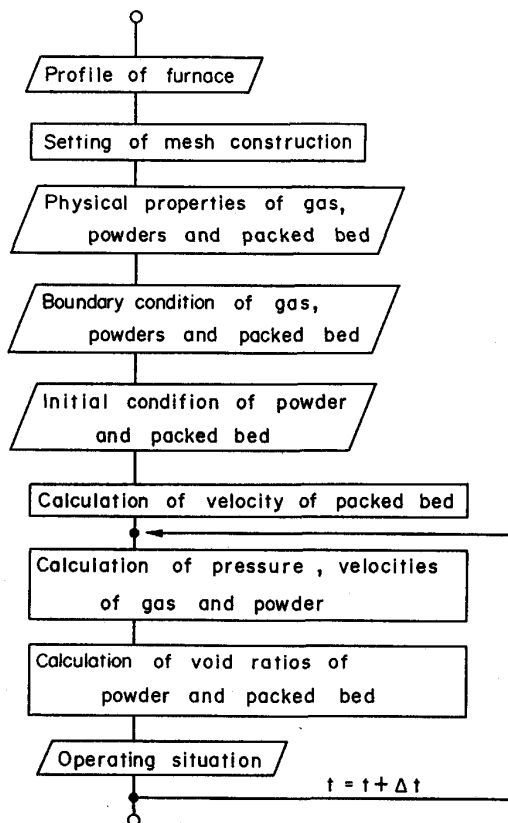


Fig. 6. Calculating procedure of the two dimensional mathematical simulation model.

算およびダストと充填層の空隙率分布の計算に分離した。

まず、(12)および(13)式を計算して荷下がり速度を求める。繰返し計算では初期条件として入力した充填層空隙率とダスト空隙率の分布を使用し、(1)、(2)、(4)式を計算してガスとダストの流速分布と圧力分布を求める。ここでは、(1)、(2)、(4)式における時間微分項を省略し、定常状態を仮定する。次に、上記の計算で得られたダスト流速と先に求められている荷下がり速度を使用して(3)および(11)式を計算し、新しい充填層空隙率とダスト空隙率の分布を求める。次の繰返しでは、新しく求められた充填層空隙率とダスト空隙率の分布を使用する。以上の繰返し計算を継続することにより、設定された条件に対応する定常状態を求めることができる。

具体的な微分方程式の計算には、Fig. 7 に示すメッシュ構成を採用し、ガスおよびダストの流速分布計算に

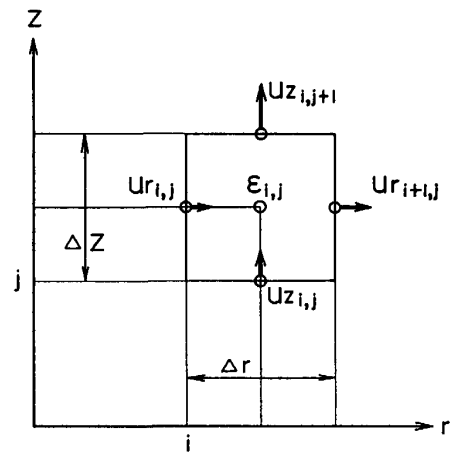


Fig. 7. Mesh construction of the two dimensional mathematical simulation model.

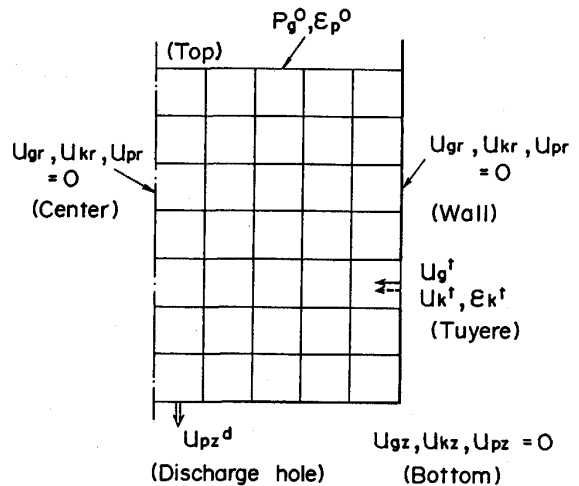


Fig. 8. Boundary condition of the two dimensional mathematical simulation model.

は SOLA 法¹⁰⁾ に準じた陰陽混成差分法、充填層とダストの空隙率分布の計算には陽差分法を適用した。境界条件の設定方法を Fig. 8 に示す。ガスに関して羽口におけるガス流速と炉頂の圧力、粉に関して羽口における流速と空隙率、充填原料に関して切出し口における流速と炉頂での空隙率を特定境界条件とした。一般境界条件は、中心、側壁および炉底におけるそれぞれに直角な方向の流速を 0 として与えた。

4.1.4 棚吊り判定指標

平板模型実験により棚吊りの発生にはガス圧が関与していることが確認された。そこで、棚吊りの指標として次式で定義する圧損レベル (PL) を導入した。

$$PL = \frac{w_p}{\Delta P} \dots\dots\dots (14)$$

ΔP は着目する部位と炉頂の圧力差 (kg/ms^2)、 w_p は原料荷重 (kg/ms^2) であり、圧力差が原料の垂直荷重を上回るとき、すなわち圧損レベルが 1 を上回るとき、棚吊りが発生すると考えられる。

圧力差 ΔP は数学モデルにより計算される。原料荷重の計算には次式に示す JANSSEN の式¹¹⁾ を採用した。

$$w_p = \left\{ 1 - \frac{D\gamma_p g}{4\mu_w k_p} \exp\left(-\frac{4\mu_w k_p}{D} h\right) \right\} \dots\dots\dots (15)$$

D は有効直径 (m)、 γ_p は原料の嵩密度 ($\text{kg/m}^2 \text{ bed}$)、 h は層頂から着目する部位までの深さ (m) を示す。 k は内部摩擦係数 (—)、 μ_w は壁面摩擦係数 (—) であるが、それぞれ 0.5, 0.8 とした。

4.1.5 Kinematic モデル定数の設定

円筒模型実験を行い Kinematic モデルの妥当性を検

討するとともに定数 B を決定した。

実験では粒度が 3~5 mm の着色および無着色焼結鉾を所定の時間間隔で交互に装入しつつ下部の切出し口から荷下がり速度が 1 cm/min になるように原料を切り出し、約 1 h 継続させた後、上部から順次着色原料の存在位置を調査した。一方、(12)、(13) 式より荷下がり速度分布を求め、層頂から装入された着色原料の所定時間後の存在位置を計算することができるが、計算結果が実験と一致する条件で定数 B を決定した。Fig. 9 に実験および計算結果を示す。定数 B を 0.6 cm にすれば Kinematic モデルによる計算と実験には図に示す一致性が得られた。

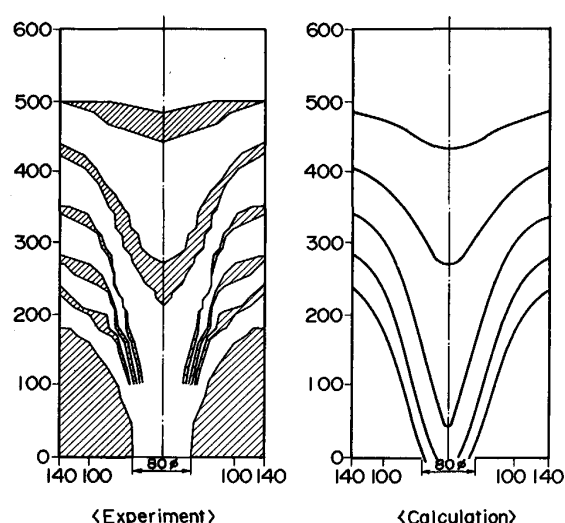


Fig. 9. Time lines obtained through the cold model experiment of the descend of burden and through the calculation using kinematic model.

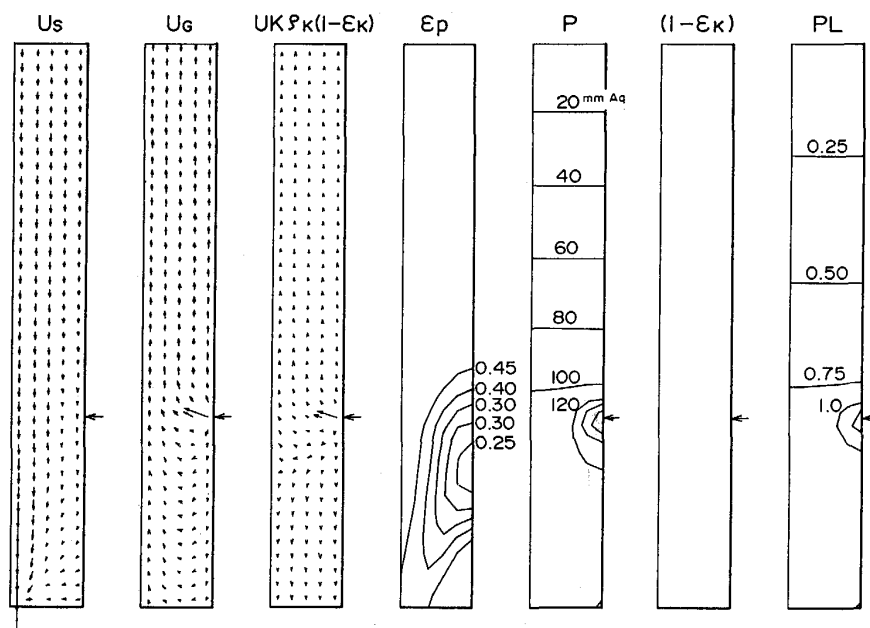


Fig. 10. Movements of packed bed, gas and powders for case A in Fig. 6 calculated by the two dimensional mathematical simulation model.

4.2 平板模型実験への適用

平板模型実験と対応させたシミュレーションを実施した。充填粒子へのダスト付着確率 x とダストの剝離速度記述式中の定数 Ed の設定が重要な問題となるが、ここでは計算結果が実験結果と以下のごとく対応するように調整し、それぞれ、 0.05 および 2000 kgm/s^2 に設定した。

Fig. 10 には Fig. 5 の A および Photo. 2 に示した棚吊りの発生しなかった実験条件に対応する計算結果を示す。ダスト付着領域 (ϵ_p の小さい領域) の形状および圧力分布は Photo. 2 に示した観察結果とおおむね一致し

ている。また、羽口近傍で圧損レベルは局所的に 1 を上回るが、中心側では 1 以下であり、全面には達していない。すなわち、棚吊りは羽口近傍で生起するが、中心部の荷下がり確保されることを示しており、棚吊りが発生しなかった実験事実と一致する。

Fig. 11 は棚吊りが発生した Fig. 5 の B および Photo. 1 に対応する計算結果である。ダスト付着領域が中心まで拡大し、圧損レベルは断面全域で 1 を上回っているが、これは、全面的な棚吊りが発生することを示す。

Fig. 12 には棚吊りが発生しなかった Fig. 5 の C に

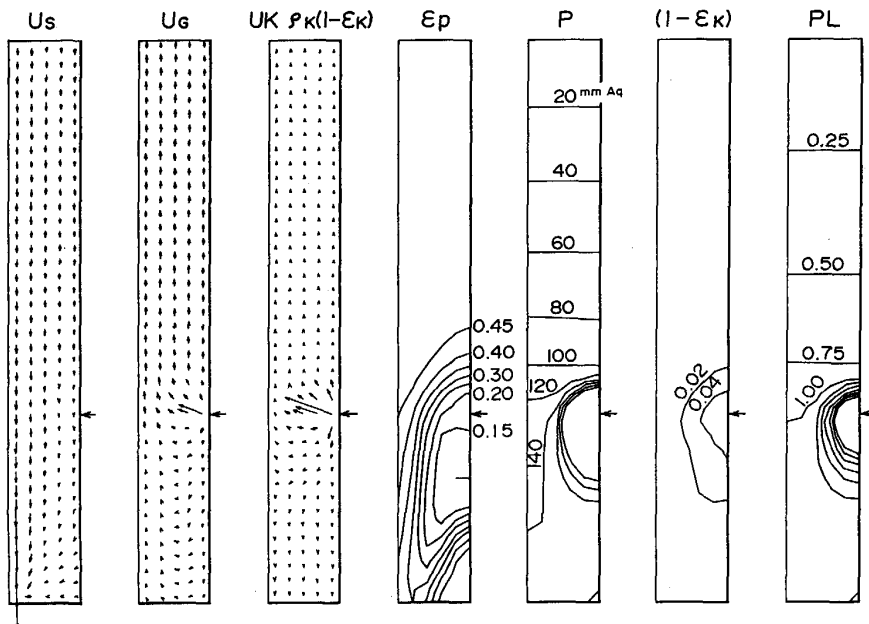


Fig. 11. Movements of packed bed, gas and powders for case B in Fig. 6 calculated by the two dimensional mathematical simulation model.

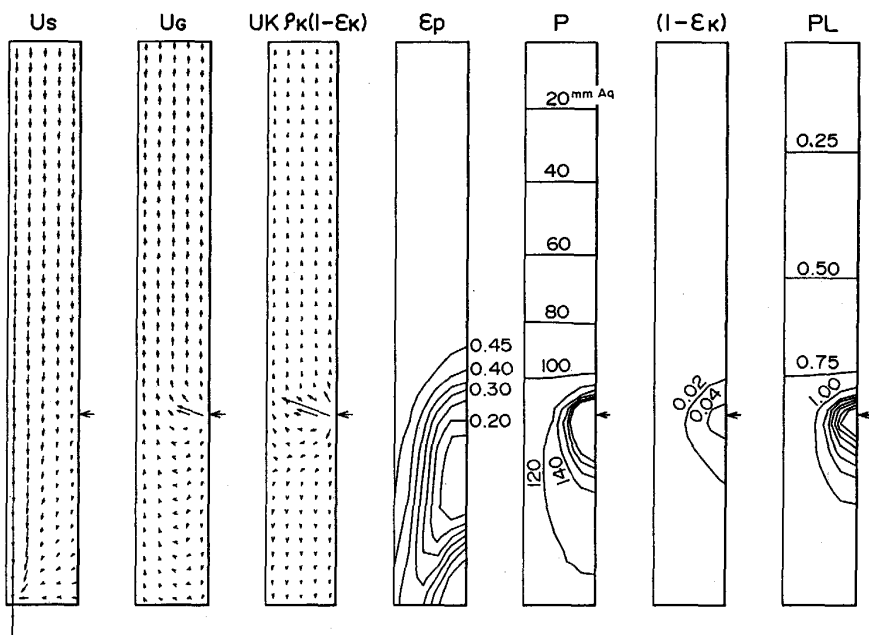


Fig. 12. Movements of packed bed, gas and powders for case C in Fig. 6 calculated by the two dimensional mathematical simulation model.



Fig. 13. Void ratio of packed bed and pressure level of the SC pilot plant during the connection operation³⁾ calculated by the two dimensional mathematical simulation model.

対応する計算結果を示す。荷下がり速度の増加により圧損レベルが1を上回る領域は羽口近傍へと縮退し、中心側では1を下回るため、棚吊りは発生しないことになる。

以上、充填粒子へのダスト付着確率 α とダストの剝離速度記述式中の定数 Ed を 0.05 および 2000 kgm/s² に設定することにより、本数学モデルは平板模型実験における棚吊りの有無をおおむね説明し得ることが示された。

4.3 還元炉パイロットプラント実績との対応

数学モデルを還元炉パイロットプラント実績と対比させた。ここで、充填粒子へのダストの付着確率 α とダストの剝離速度記述式中の定数 Ed としては平板模型実験との対応をもとに設定した値を使用した。Kinematicモデル定数 B は原料粒度に比例すると見なし、パイロットプラントでの原料粒度は約 12 mm であり円筒模型の約 3 倍であることから、パイロットプラントでの定数 B も円筒模型の 3 倍とし、1.8 cm とした。計算条件は Fig. 2 に示した記号 A~C の操業と対応している。

計算結果を Fig. 13 に示す。A および C の条件に対応する計算では、炉内全域で圧損レベルは 0.7 以下となり、棚吊りが発生しなかった事実と一致する。しかし、棚吊りが発生した B の条件でも圧損レベルが 1 を上回る領域は認められないため、この場合、計算は実験事実と対応していない。ただし、相対的に見れば A および C と比較して圧損レベルが増大し、棚吊りが発生しやすい方向に移行していることから、定性的には、還元炉パイロットプラントにおける棚吊りの有無に対応していると見なすことができる。

5. 結 言

ダストに起因するシャフト式還元炉の棚吊り機構について実験および理論的検討を加えた。結果は以下のように要約される。

(1) 平板模型実験を実施し、原料に付着しやすいダストが吹き込まれた場合、ダストが原料に付着して羽口前に通気性の悪い領域を形成させるが、ダスト濃度が高い場合や荷下がり速度が遅い場合、その領域が拡大して炉断面全域でガス圧が原料荷重を上回ると棚吊りが発生することを確認した。

(2) 上記の実験結果を踏まえ、充填層内におけるダストとガスの流れ、ダストの原料への付着とはく離および原料の荷下がり速度を考慮した 2 次元数学モデルを作成し、ダスト付着に起因する棚吊りの有無を判定する上で有効であることを示した。

文 献

- 1) 山岡秀行: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 403
- 2) 山岡秀行: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 2194
- 3) 宮崎富夫, 山岡秀行, 亀井康夫, 中村文夫: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 2122
- 4) T. MIYAZAKI, H. YAMAOKA, Y. KAMEI and F. NAKAMURA: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., 27 (1987), p. 618
- 5) 児玉惟孝, 重美彰利, 緒方年満, 堀尾竹弘, 高橋良輔: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 10
- 6) 児玉惟孝, 重美彰利, 斧 勝也, 緒方年満, 彼島秀雄: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 883
- 7) 児玉惟孝, 重美彰利, 斧勝也, 堀尾竹弘, 高橋良輔: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1739
- 8) 森川敬信: 流体-固体 2 相流 (1979), p. 67 [日刊工業新聞社]
- 9) R. M. NEDDERMANN and U. TUGUN: Powder Technology, 22 (1979), p. 243
- 10) 高橋亮一: コンピューターによる流体力学<演習> ((株)構造計画研究所編) (1982), p. 214
- 11) 化学工学便覧 (1957), p. 995 [丸善]