

討6 高炉における粒状体の運動

住友金属工業(株)総合技術研究所

○田中 努 梶原 義雅

稲田 隆信

1. 緒言

高炉におけるコークス、鉱石などの粒状体の運動に関する検討はガス流れおよび液流れとともに高炉の制御性を向上し、安定操作を実現するために重要である。しかし、従来の理論的検討¹⁾²⁾は、連続体を前提とし、かつ運動と応力状態を分離した形で行われており、動力学現象が重要となる炉頂における装入物分布、不連続現象が重要となる荷下がりの異常現象などの解析には適用できない。

ここでは、粒子毎の運動方程式を構成方程式とする数式モデルを開発し、炉頂の装入物分布形成および炉下部の荷下がり現象の解析に適用した。

2. 粒状体の動力学モデル

2.1 粒子間相互作用

粒子毎の運動方程式を解くことにより粒子の集合体が示す巨視的挙動を研究する着想は分子動力学³⁾の分野で成功しており、類似の手法を粒状体に適用した。この場合、分子動力学と異なり粒子の衝突にともなうエネルギー損失を考慮するとともに静止状態における粒子配列の安定性を保証する必要がある。この条件を満足する粒子間相互作用としてFig. 1に示すVoigt-Kelvinモデルを導入した。

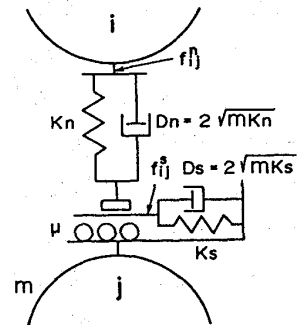


Fig. 1 Rheological model for the interaction between particles.

Fig. 2の2次元粒子の配列において微小時間における並進と回転に関する微小変位 $\Delta l_{ij}^n, \Delta l_{ij}^s$ は幾何学的関係から(1), (2)式で表わされ、

$$\Delta l_{ij}^n = (\dot{X}_i - \dot{X}_j) \cos \theta_{ij} \cdot \Delta t + (\dot{Y}_i - \dot{Y}_j) \sin \theta_{ij} \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\Delta l_{ij}^s = -(\dot{X}_i - \dot{X}_j) \sin \theta_{ij} \cdot \Delta t + (\dot{Y}_i - \dot{Y}_j) \cos \theta_{ij} \cdot \Delta t + d(\dot{\theta}_i + \dot{\theta}_j) \Delta t / 2 \quad (2)$$

粒子iの並進と回転に関する力と変位の関係は微小変位を用いて(3), (4)式で表わされる。

$$f_i^n = -\sum_j \left\{ K_n (\Delta l_{ij}^n + l_{ij}^n) + D_n \Delta l_{ij}^n \right\} \quad (3)$$

$$f_i^s = -\sum_j \left\{ K_s (\Delta l_{ij}^s + l_{ij}^s) + D_s \Delta l_{ij}^s \right\} \quad (4)$$

また、粒子のこり条件としてスプリングとダッシュボットの合力に対してCoulomb則を適用した。

$$|K_s (\Delta l_{ij}^s + l_{ij}^s) + D_s \Delta l_{ij}^s| \leq \mu \cdot |K_n (\Delta l_{ij}^n + l_{ij}^n) + D_n \Delta l_{ij}^n| \quad (5)$$

一方、運動方程式は(6)~(8)式で表わされ、

$$m \ddot{X}_i = m g_x - f_i^n \cos \theta_{ij} + f_i^s \sin \theta_{ij} + f_i^x \quad (6)$$

$$m \ddot{Y}_i = m g_y - f_i^n \sin \theta_{ij} + f_i^s \cos \theta_{ij} + f_i^y \quad (f_i^x, f_i^y: \text{外力}) \quad (7)$$

$$m d \ddot{\theta}_i = 4 f_i^s \quad (8)$$

(1)~(8)式を時間積分することにより粒子間力、速度などが得られる。

2.2 粒子とガスの相互作用

ガス流れは、ガスと粒子の相互作用力を付加したNavier-Stokes方程式、連続の式および状態方程式により記述され、差分化を行った後、SOLA法を用いて解いた。ここではガスと粒子の相互作用力として充填層におけるErgun式、 $\text{Func}(f_i, V_g - V_p, \epsilon, d, \eta) = 0$ を用いた。

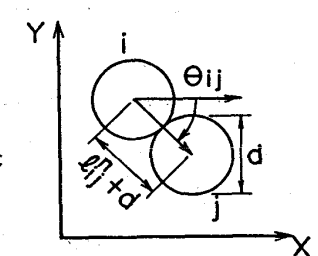


Fig. 2 Arrangement of particles.

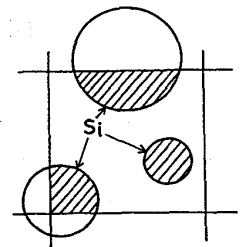


Fig. 3 Arrangement of particles in a cell of gas flow.

一般に粒子はFig. 3の如くガス流れの計算セルを横切って配列されるので空隙率 ϵ は各セルで評価した。また、セルにおける粒子の速度 v_p 及び粒径 d はセル内の粒子の面積 S_i で重み付けした平均操作により求めた。逆に粒子がガスから受ける力は、セルと重なる粒子面積の $1/2$ 乗の重みを付けて粒子側に配分した。これは、粒径の小さい程、ガスによる坑力の配分が大きいことを意味する。

3. モデルの妥当性の検証

3.1 ホッパーからの粒子の排出

観察面側に壁を持たない2次元ホッ

パーに充填した柱状粒子の排出を対象に、モデルと実験の比較を行なった。

モデル計算では摩擦係数 $\mu=0.72$ の場合、ホッパー出口で架橋現象が現われた。一方、表面の粗い粒子を使用した実験でも類似の現象が観察された(Fig. 4)。その他、排出粒子数の時間変化、堆積形状、排出順序などについてモデル計算結果と実験結果との対応を認めた³⁾。

3.2 送風条件下における荷下がり

アクリル製の2次元高炉平

板模型(巾30cm, 高さ60cm)にコルクを充填し、片方の羽口下方より切り出しつつ送風した場合を対象に実験との比較を行なった。送風により炉芯停滞域が発達し、実験結果と良い対応があった(Fig. 5)。

また、送風量が増加して $Fr=3.5 \times 10^{-2}$ の場合には炉芯の停滞域を除く領域にスラッシング現象が出現し、ほぼ実験と対応した。

4. 実炉への適用

4.1 原料装入過程における細粒の偏析

近年高炉で、細粒原料を

多使用するための装入法に関する検討⁵⁾が行なわれており、炉頂における細粒分布制御の重要性が増している。そこで、炉口径7mのベル式高炉を対象に細粒を含む焼結鉱(粒径比2.8:1)を、固定コークス層上に装入した場合の、細粒の偏析に及ぼす装入速度の影響について検討した。

原料の運動過程は 1) ベル出口からコークス層への落下・衝突、2) コークス斜面上の流れ、3) コークス斜面上での堆積に分類されるが、細粒の偏析に特に関係の深いのは 2) の過程である。装入速度6t/s および2.5t/s の場合の装入開始から3秒後におけるコークス斜面上での代表的な粒子の運動挙動および速度分布を Fig. 6 に示す。これより以下のことがわかる。

- 1) 運動の上流では、細粒は表層にも分布しているが下流では表層の細粒は少なく、粗粒間の間隙を通過して細粒が沈降する現象が認められる。
- 2) 粒子の運動速度は、固定コークス層の近傍(細粒径の2~3倍)を除いて、層厚方向および半径方向で顕著な変化は認められない。

以上の知見より、装入直後に粗粒と混合状態にある細粒は、沈降によりコークスと接触し、その結果運動量が減衰するので炉芯への到達量が減少すると考えられ、Fig. 7 に示す様に中心

Fig. 7 Arrangement of particles near the center of a furnace under charging rate of 2.5t/s and 3s after charging.

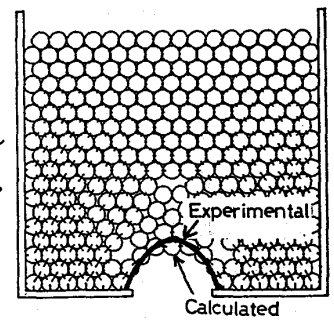


Fig. 4 Formation of a mechanical bridge just above the exit of a hopper.

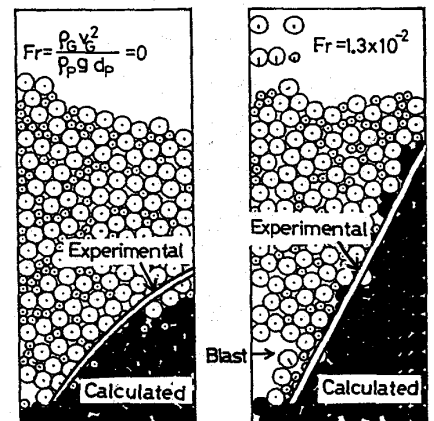


Fig. 5 Effect of Fr number on the profile of a deadman after one cycle discharge of the number of particles initially filled.

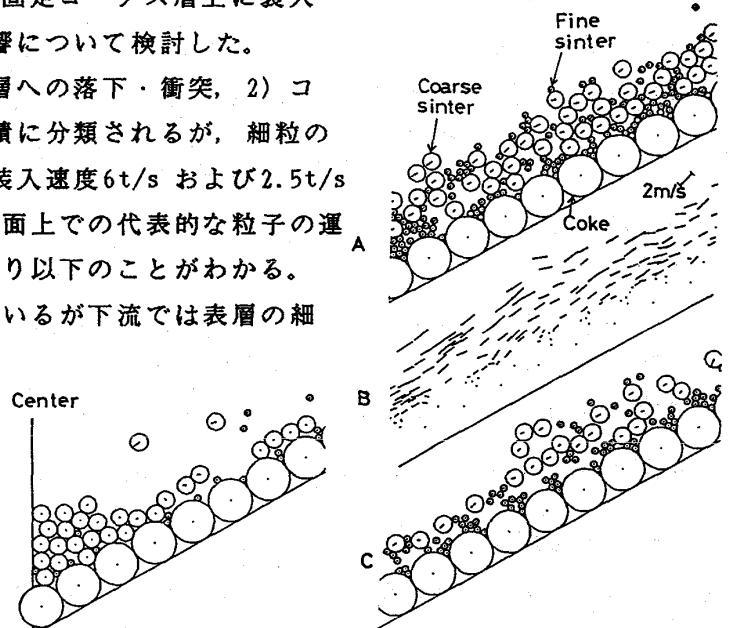


Fig. 6 Flow of particles on 30° inclined coke layer under charging rate of 6t/s for A and B, and 2.5t/s for C. B: Velocity distribution

部では細粒が少ない計算結果が得られる。堆積原料中の細粒分率の半径方向分布をFig.8に実線で示すが、細粒の偏析は装入速度の小さい方が顕著であり、従来の実験結果⁵⁾とも一致する。

上記のコークス斜面上での粒子の運動挙動より、斜面上の細粒分率に影響する因子としては1)空隙率 ϵ 、2)運動状態にある粒子群の層厚 h 、3)上流側の細粒分率 X 、および4)堆積プロファイルなどが考えられる。1)~3)までの因子と細粒分率の関係を(9)式で簡略表示する。

$$dX/dx = -\alpha X \epsilon / h \quad (\alpha: \text{パラメータ}) \quad (9)$$

斜面上の粒子の運動速度は半径方向でほぼ一定で、かつ装入速度にも依存しないので ϵ/h は装入速度に逆比例するものと考えられる。装入速度2.5t/sにおける(9)式のパラメータを、モデル計算との対比から $\alpha \epsilon / h = 0.77/\text{m}$ として積分した。その結果をFig.8に破線で示すが、(9)式の簡略式の方が細粒の偏析に及ぼす装入速度の影響が若干大きいものの、装入速度の減少により偏析が顕著になる傾向を簡単に表せることが分かる。

4.2 高炉下部における荷下がり

高炉下部では、コークスは炉壁と炉芯停滞域の間を、レースウェイに向かって降下し、かつ送風の影響も顕著となり、荷下がり機構は複雑である。荷下がり現象に関係するパラメータとしては、粒子に働く重力、ガスの坑力、摩擦力または粘着力などの粒子の性状および空隙率、炉形状などの幾何学的因子が考えられる。ここでは、送風ガスの影響の中でも特にスラッキングによる荷下がりの異常について検討した。この場合、羽口でのジェット運動量数、充填層でのRe数は重要ではなく充填層でのFr数および空隙率が重要となる。

2次元の平板高炉を対象とし、原料を羽口前の巾0.13D(D=炉床径)高さ0.09Dの領域から抜き取った。計算では空隙率の小さい2次元粒子を前提としているので、実炉では粒径の小さいコークスが炉下部に存在する場合に相当する。

4.2.1 粒子間力

粒子充填直後の粒子間力の分布をFig.9に示す。線の太さは粒子間力の大きさに比例しており、最大力の0.3倍以下の力は表示してない。粒子間力是不規則であるが、比較的強い力の線は複数の粒子に亘り伸びている。炉底に近い程、粒子間力は大であり、半径方向に顕著な差は認められない。Fig.10は、羽口前の粒子を除去してから0.07秒後の代表的な粒子間力の分布を表している。荷下がりにより粒子間力は複雑に変化するが、一般に炉壁近傍の粒子間力は減少する(A)。また、羽口上方では縮流によりアーチ状の粒子間力の大きな状態が出現することがある(B)。

4.2.2 粒状体の流れ

送風なしの条件で初期に充填した粒子が炉芯の停滞域を除いて、ほぼ置換された段階における層状に装入したトレーサの分布をFig.11に示す。層状に降下する粒子はやがて炉芯の停滞域と炉壁で囲まれる領域を羽口前の粒子の抜取り部に向けてロート状に流れる様子がわかる。Fig.12は、通常高炉並みの送風

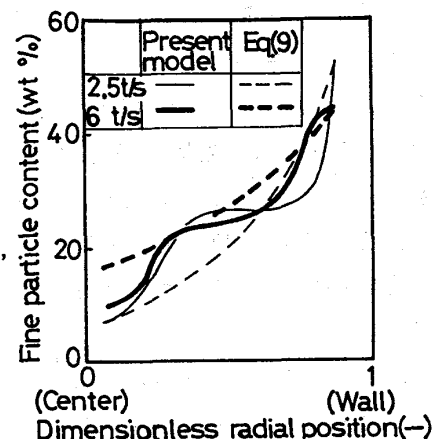


Fig.8 Radial distribution of fine particles.

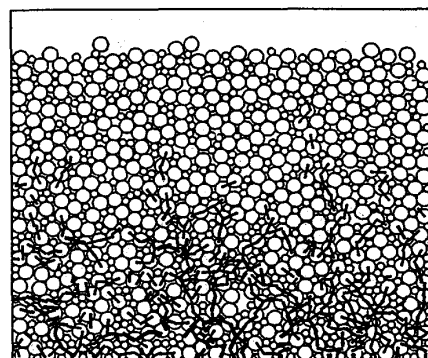


Fig.9 Force between particles after filling.

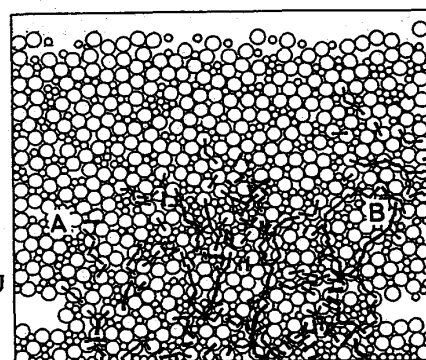


Fig.10 Force between particles just after the particles located in front of tuyere were removed.

($Fr=1.8 \times 10^{-2}$)におけるトレーサの分布である。羽口の上方では空隙は大きく、また、層状に充填した粒子の配列は、送風の影響により顕著に乱れる様子がわかる。左右の羽口から送風した場合は、炉芯停滞域の顕著な発達認められず、片側羽口から送風した場合 (Fig. 5) と荷下がり挙動が顕著に異なる。これは、炉芯停滞域の頂点付近に存在する粒子は、力学的に不安定な状態にあることを意味する。

送風により荷下がりが不安定になる挙動を詳細に解析するために、羽口～炉芯間の領域を対象に送風量がさらに増加した $Fr=3.5 \times 10^{-2}$ における粒子の運動を計算した。結果をFig. 13に示す。 $t=0s$ では、羽口前にレースウェイが形成され、羽口周囲の粒子は安定である。羽口近傍の粒子を除去してから0.04s後の $t=0.27s$ では、空隙を充填するために粒子が流れ込むとともに、粒子の流れ込みにより粒子とガスの相互作用力が増加し、羽口前のガス流れは若干上方に向きを変える。 $t=0.55s$ では、ガス流れの変化により羽口上部では空間が拡大し、 $t=1.12s$ では、羽口上方の広範な領域に空隙の大きい空間が拡大するとともに、粒子は雨滴の様に、充填層に落下する。

このように、炉下部の空隙が小さい場合には、例えば、羽口前に不連続に降下するコークスによる小さな荷下がりの不安定が、ガス流れとの相互作用により増幅され、羽口上方の広範な領域に拡大されて大きな荷下がりの不安定を起こす可能性が考えられる。

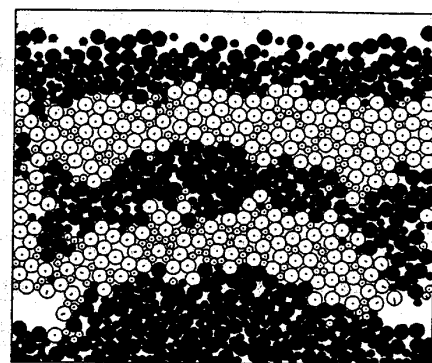


Fig.11 Tracers of particles without blasting after one cycle discharge of the number of particles initially filled.

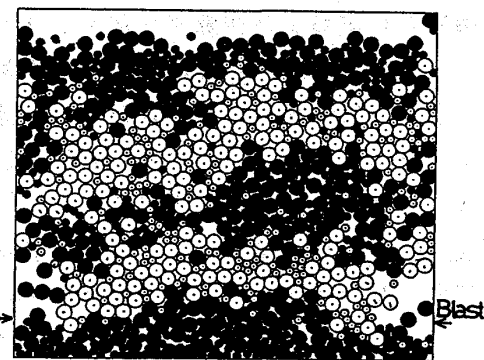


Fig.12 Tracers of particles under the same condition as Fig.11 except for blasting with $Fr=1.8 \times 10^{-2}$.

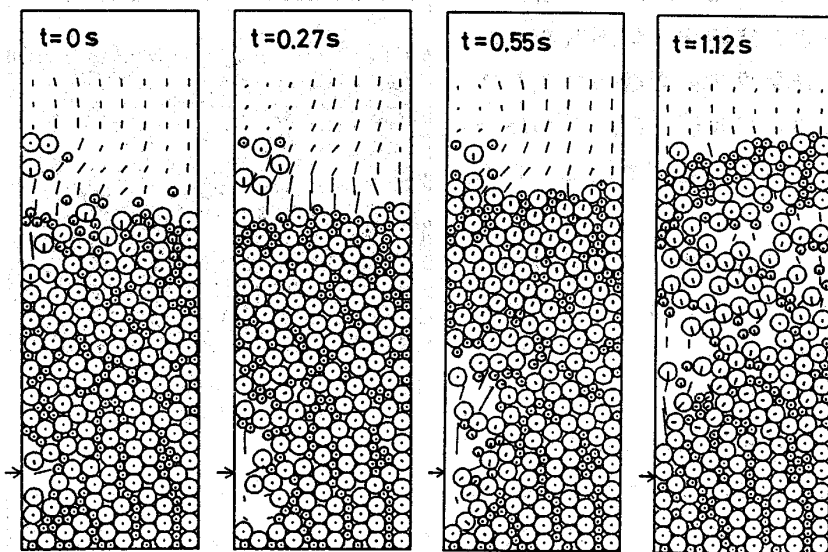


Fig.13 Transient movement of particles under high gas flow rate.

5. 結言

粒子毎の運動方程式を解くことにより、粒子集合体が見る巨視的運動を解析する数式モデルを開発した。本モデルを装入物の分布及び炉下部における荷下がり現象の解析に適用し、細粒の偏析及び送風による下がりの異常について有益な知見を得た。

粒子の形状及び性状の変化を考慮するとともに3次元への拡張が今後の課題である。

文献

- 1) 桑原ら: 鉄と鋼, 65 (1979), s565,
- 2) 奥野ら: 鉄と鋼, 72 (1986), p. 783
- 3) B. J. Alder et al.: J. Chem. Phys. 27 (1957), p. 1208
- 4) 田中ら: 鉄と鋼, 72 (1986), s914
- 5) 稲垣ら: 鉄と鋼, 69 (1983), s56