

© 1989 ISIJ

 ///////////////
 論 文
 ///////////////

鉄鉱石焼結ケーキ中の空隙の構造解析

葛西栄輝*・Roy R. LOVEL*²・William J. RANKIN*³・大森康男*⁴

Structural Analysis of the Void in Iron Ore Sinter Cake

Eiki KASAI, Roy R. LOVEL, William J. RANKIN and Yasuo OMORI

Synopsis :

Physical properties of sinter cake such as strength and permeability are strongly related to its structure. In this investigation, the three-dimensional structure of voids in sinter cake was quantified using an image analyzer. The physical properties were then compared with the measured structural parameters.

The results obtained are of a preliminary nature and the interpretations are tentative. However, a possible way to evaluate sinter strength was identified, which utilizes the measured values of void fraction and the size distribution and shape factor of the voids. The work also showed that when a sinter cake is considered to be a packed bed, the apparent diameters of the particles used for estimating heat exchange rates between gas and solid and pressure drop across the bed are different for the two purposes.

A theoretical analysis of the magnitudes of forces acting on granules was made to identify the causes of the rearrangement of a bed during sintering.

Key words : sinter ; iron ore ; structure ; permeability ; image analysis ; sinter cake ; void fraction ; heat exchange rate ; pore.

1. 緒 言

焼結層の空隙率、固体表面形状等の物理的構造は、層の通気性および成品焼結鉱の強度に直接影響を与える重要な因子であり、原料の性状を含め、各種操業条件により決定されるものと考えられる。しかし、層構造自体が主要操業因子の一つである層通過ガス流量を規定しているため、その変化過程の解析は極めて複雑なものとなる。これに関連して従来の数学的モデルでは、層の通気性定量化の必要性から ERGUN の式¹⁾を使用し、その中の通気抵抗係数をパラメーターフィッティング等により与えている²⁾³⁾。この係数には充填層の代表的な構造因子として平均粒子径、空隙率が含まれており、焼結に伴う層構造変化の概要を推定することはできるが、構造変化の駆動力や融液の性質・量との関連等、詳細な検討は行われていない。また、焼結鉱の強度に関しては多孔質体の強度理論を主体にした解析が行われてきたが、層構造との関係はいまだ不明確である。これには、層構造の直接観察の困難性が一つの原因となつている。最近、非破壊にて層構造の情報が得られる X 線断層撮影法を使用した

一連の解析結果が報告されており⁴⁾⁵⁾、現状では装置の解像度が十分であるとは言えないものの今後の進展が期待される。

画像解析装置は焼結鉱製造プロセスの分野において主に構成鉱物相の定量解析に用いられており、ハードおよびソフトウェアの進歩に伴い測定精度・スピードは飛躍的に向上している。しかし、測定対象は平滑な断面を持つ試料に限られ、焼結鉱の組織、構造の複雑さのため立体的な情報を得るのは極めて難しい。本研究では、層構造の 3 次元的な情報を得るため、異なるコークス配合量にて得られた焼結層 (ケーキ) のスライス試料について画像解析を行った。その結果、ケーキの構造の特徴および強度、圧損、固体とガス間の有効伝熱面積との関係に関する興味ある知見が得られた。さらに、層構造変化の駆動力についても考察を加えた。

2. 測 定 試 料

層構造の異なる焼結試料を得るため、本実験では原料中のコークス配合量を 4.0 から 5.0 mass% までの五つのレベル (それぞれ T-1~T-5 と呼ぶ) に変化させた。

昭和 63 年 11 月本会講演大会にて一部発表 昭和 63 年 4 月 12 日受付 (Received Apr. 12, 1988)

* 東北大学選鉱製錬研究所 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University, 2-1-1 Katahira Sendai 980)

*² Div. of Mineral and Process Engineering, CSIRO, Australia

*³ Div. of Mineral and Process Engineering, CSIRO, Australia, Ph. D.

*⁴ 東北大学選鉱製錬研究所 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University)

原料は豪州産ヘマタイト鉱石 A (T. Fe : 59.1, CaO : 0.04, SiO₂ : 7.35, Al₂O₃ : 2.84, Ig. Loss : 5.1 in mass%), 石灰石 (T. Fe : 0.22, CaO : 54.6, SiO₂ : 0.56, Al₂O₃ : 0.28, Ig. Loss : 43.2 in mass%), 蛇紋岩, や金用コークスを使用し, 返鉱は同一原料をあらかじめ焼結, 粉碎して調整した. 各成品焼結鉱の目標化学組成は CaO : 11.7, SiO₂ : 6.5, Al₂O₃ : 2.3, MgO : 1.7 (mass%), 塩基度は 1.8 である. 試験は BHP 中央研究所所有の円筒型焼結機 (有効断面積 0.08845 m²) で作製した. 焼結条件を Table 1 に示す.

Table 2 に各試験についての装入密度, 焼結時間を示す. 焼結完了後のケーキはそのままの形で焼結機から取り出し, Fig. 1 に示すように上層から 200~300 mm のケーキ中央部を一辺が約 100 mm の立方体に切り出す. これを樹脂に埋め込み, 切断を容易にするため外形を整

Table 1. Sintering conditions.

Sinter pot Effective area Bed height	0.08845 m ² 0.5 m
Operation Ignition temperature Ignition time Ignition suction Sintering suction	1 250°C 90 s 8 kPa 14 kPa
Sinter mixes Basicity SiO ₂ Al ₂ O ₃ [Dry base] MgO Moisture	1.8 6.4 mass% 2.3 mass% 1.7 mass% 6.3 mass%

Table 2. Coke content, bed density, sintering time and tumble index of experimental runs.

Run	Coke [Dry base] (mass%)	Bed density (kg/m ³ -bed)	Sintering time (s)	ISO tumble index (%)
T-1	3.97	1910	1 068	51.8
T-2	4.24	1901	1 056	55.5
T-3	4.51	1913	1 122	60.2
T-4	4.77	1929	1 176	61.9
T-5	5.03	1929	1 230	62.5

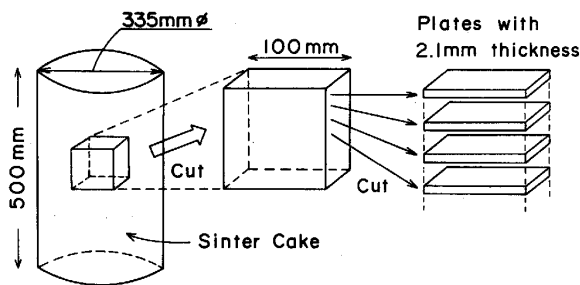


Fig. 1. Preparing of sinter plates from cake for image analysis.

えた後, ケーキ上部から下部に向かって 3 mm の幅で 20 回程度, 層水平方向にスライスした. 樹脂は後述する画像解析において気孔と焼結部の境界を明確にするため, 油性白色ペイントで着色した. スライス試料の平均厚さは 2.1 mm であり, 1 回の切断で 0.9 mm の厚さの部分が失われたことになる. 画像解析用試料を切り出した残りのケーキは 2 m の高さで 4 回の落下処理を行い, 冷間回転強度試験に供した.

3. 焼結層の構造解析

画像解析装置として KONTRON BILDANALYSE 社製の IBAS-2000 を使用し, スライス試料表面の画像はビデオカメラにより直接入力した. 測定は, 試料中心部の表・裏面の正方形領域について上層から下層へ向かって行つた. 入力画像はコントラストを高めるためのソフトウェア処理を行つた後, 空隙部分である樹脂と焼結鉱部に 2 値化処理される. この 2 値化画像について空隙率, 空隙の周辺長を測定し, さらに粗大気孔間をつないでいる幅 1 mm 以下の空隙のチャンネルの閉塞処理を行つた後, 得られた各気孔について円相当径, 形状係数を測定した.

4. 実験結果と考察

4.1 コークス配合量と焼結鉱の強度の関係

各焼結鉱の冷間回転強度は ISO 法に従つて求めた. 結果を Table 2 に併せて示す. また, Fig. 2 にはコークス配合量と回転強度, 焼結時間の関係を示す. 強度はコークス量増加に伴つて増加するが, その増加幅はだいに小さくなつていく. また, 焼結時間は最小値を示した後, コークス量増加に伴い延長される. これらの傾向は, 既報の結果⁶⁾と良く一致している.

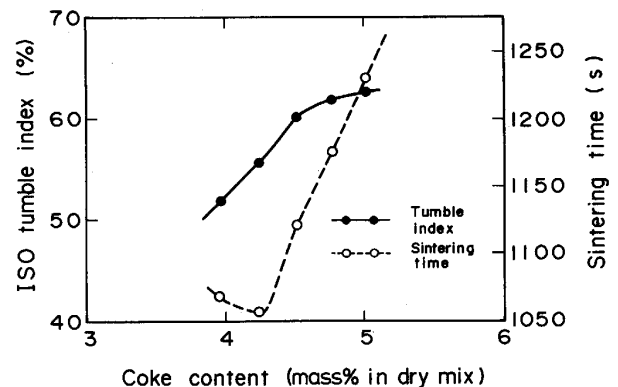


Fig. 2. Relationships between coke content of mixes and tumble index, and sintering time.

4.2 焼結ケーキの構造

画像解析により得られた任意の相の面積率と実試料の体積率の関係は佐藤らの報告⁷⁾に詳しい。ここではさらに、測定された空隙の周辺長と層中の焼結鉱の表面積との関係についても検討した。

水平断面形状が高さ方向に対して一定である柱状の層を考え、その断面積を A 、高さを L 、層頂からの距離を z とし、微小距離 Δz で切断された層の任意断面を i と呼ぶ (i は層の上面で 0 、底面で $n (= L/\Delta z)$ となる)。この層中に存在する固体の表面積 S を、 z あるいは i の位置における断面中の空隙の周辺長 (それぞれ $L_p(z)$, $L_p(i)$) によつて表すと、(1)式となる。

$$S = \int_0^L L_p(z) dz = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (L_p(i) \Delta z)$$

$$= L \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (L_p(i) / n) = L \bar{L}_p \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 \bar{L}_p は試料の平均周辺長である。すなわち、任意の相の表面積はその周辺長に比例し、柱の高さ L を係数として持つ。したがつて、ベッド比表面積 A_s は、 $A_s = S / AL = \bar{L}_p / A \dots\dots\dots (2)$

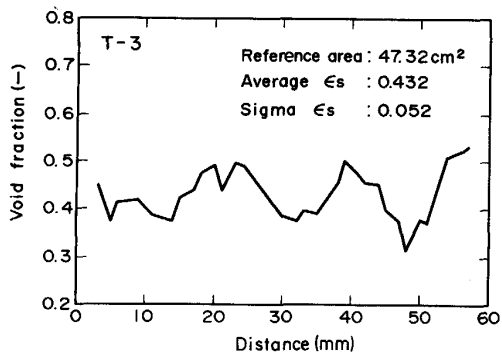


Fig. 3. Change of void fraction in vertical direction of cake.

となる。また、見掛けの粒子比表面積 A_p は

$$A_p = S / AL / (1 - S_p) = \bar{L}_p / A (1 - S_p) \dots (3)$$

となる。 S_p は空隙面積率の平均値であり、層の空隙率 ϵ に等しい⁷⁾。したがつて、代表性のある L_p , S_p を画像解析によつて求め、上記の各式に適用することにより、 A_s , A_p , ϵ 等の層構造の特性値が得られる。

Fig. 3 に T-3 の 69 mm × 69 mm 角の領域について得られた空隙率の層高方向分布を示す。測定値には大きな変動が認められ、この大きさの一断面に対する測定のみでは各因子の代表値を得ることは難しいことがわかる。各試料で測定された空隙率と比表面積を Table 3 に示す。これらはそれぞれ 40 個程度の断面 (0.2 m²) における測定値の平均である。表中には気孔の形状係数 (円相当径が 2.5†~20 mm の気孔についての平均値)、円相当径の算術平均値とその標準偏差、および D_s も示した。 D_s は各焼結ケーキと同一の粒子比表面積を持つ球の直径であり、ERGUN の式等、圧力損失式中の粒子代表径に相当する値と考えられる。

Fig. 3 に示した空隙の面積率は層高方向に大きく変動しているものの、その変化には不十分ながら約 15 mm を一周期 (ここでは便宜的に波長と呼ぶ) とする規則性が認められる。この傾向はコークス配合量の高い試料ほど明確であつた。ここで、充填層構造を理想化し、これを構成する球が最大径を持つ (最接近粒子が接触している) 空間格子、例えば単純、体心、面心の各立方格子を考える。それぞれの単位格子の任意の一辺に沿つて、これに直角に交わる面上の空隙の面積率分布を示すと Fig. 4 となる。本図から、空隙率は、単純格子では単位格子の一辺の長さ (d_p)、体心、面心格子では単位格子の一辺の 1/2 の長さ (それぞれ $d_p/\sqrt{3}$, $d_p/\sqrt{2}$) を波長として変動していることがわかる。さらに体心、面心立方格子では形状の異なる二つの波が一つの周期を構成している。このような理想的な格子配列において、計算対象面が各単位格子の断面より大きければ、これらの波長は対象面積にかかわらず一定である。しかしなが

Table 3. Characteristics of sinter cake structure obtained by an image analyzer.

Cake	Void fraction [ε] (-)	Surface area in cake [A _s] (m ² /m ³ -cake)	Specific surface of cake [A _p] (m ² /m ³ -solid)	D _s *1 (mm)	Average diameter of pore (mm)	SD*2 (-)	Average shape factor*3 (-)
T-1	0.453	300	548	10.9	8.13	0.676	0.298
T-2	0.437	271	481	12.5	7.42	0.712	0.305
T-3	0.432	248	437	13.7	8.01	0.658	0.347
T-4	0.432	252	444	13.5	7.92	0.810	0.357
T-5	0.439	243	433	13.9	8.02	0.814	0.362

*1: Diameter of a sphere having same specific surface area as sinter cake
 *2: Standard deviation of diameters of pores
 *3: Average values of pores with sizes in the range from 2.5 to 20 mm in diameter

† チャネル閉塞処理過程で小気孔の形状係数が変化するため

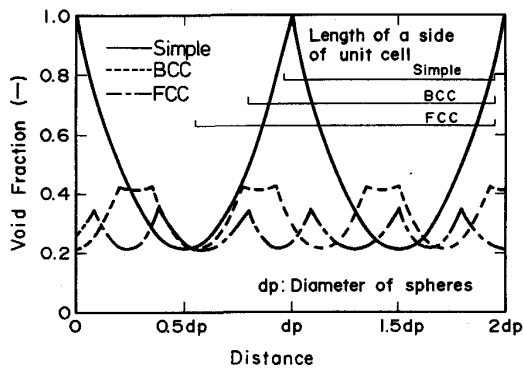


Fig. 4. Change of void fraction in closed packing beds of simple, BCC and FCC cells.

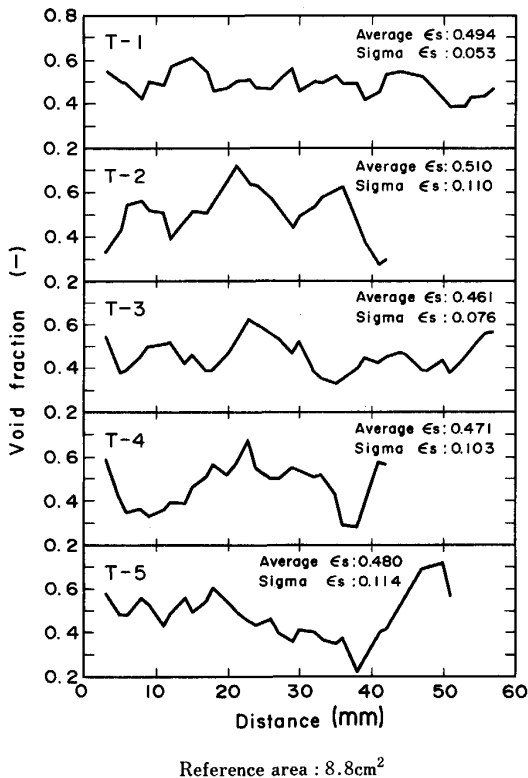


Fig. 5. Change of void fraction in vertical direction of cakes.

ら、焼結ケーキはもちろん一般的な多孔質体、粒子の充填層においては気孔や粒子の配列は不規則であるため、対象面積の増加に従って測定される空隙率はしだいにその平均値へ近づき、やがて一定値を示すものと推察される。したがって、空隙率の変動を調べるためには測定面積をでき得る限り、対応する単位格子の断面積に近いものとする必要がある。前述したように試料T-3の波長は約15mmであり、ケーキを構成する単位を単純、体心格子と仮定すると、各格子の断面はそれぞれ15, 30mmとなる。そこで測定領域を30mm×30mm角と

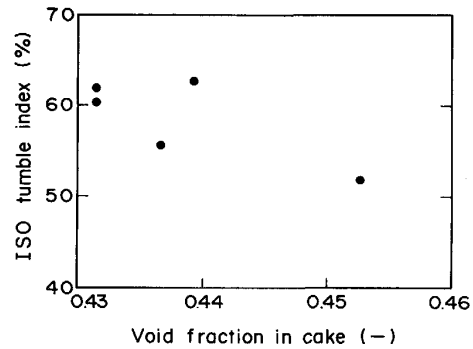


Fig. 6. Relationship between void fraction of sinter cakes and ISO tumble index.

して再度、空隙率の層高方向分布を測定した。

Fig. 5に各試料の空隙率分布を示す。各試料の空隙率のマクロ的変動に対する波長の平均値は本図より、T-1で約9mm、T-2で約11mm、T-3で約13mm、T-4で約19mm、T-5で30~40mm以上と推定される。各ケーキを構成する固体構造の特性が基本的には同様と見なせると仮定すると、これは見掛けの充填粒子の単位格子がコークス配合量の増加に伴って大きくなる、すなわち、焼結ケーキを構成する見掛けの粒子径が増大することを示唆する。コークス配合量を増加すると、通常、最高温度が高く、高温保持時間の長い層内温度パターンが得られる。よって、これは焼結過程の生成融液量が増加し、擬似粒子の合体现象が促進された結果と考えられる。

多孔質体の強度は一般にマトリックス強度と気孔率から評価することができ、焼結鉄の強度を気孔率と組織の基地強度から推定するモデル⁸⁾も報告されている。また、焼結鉄粒子の比表面積はその被還元性と密接な関連がある。したがって、気孔率、気孔形状は焼結鉄の品質を評価する上での重要な因子と考えることができる。本実験で得られた各焼結ケーキの空隙率と回転強度との関係にはFig. 6に示すように負の相関が認められる。しかしながら、成品焼結鉄は焼結ケーキを破碎、整粒した粒子であるため、ケーキの構造から焼結鉄粒子中の気孔率を推定する場合、あるいはケーキ空隙構造の制御によって成品焼結鉄の品質コントロールを指向する場合には破碎後にケーキ中の各空隙が焼結鉄粒子中に残存するか否かを定量する必要がある。簡便な方法としてはまず、気孔径の大小による方法⁹⁾があるが、Table 3で比較した気孔の円相当径の算術平均からは明確な関連性は得られなかつた。この理由としては、測定した気孔がケーキ断面から得られたもので立体としての気孔径とは異なることと、スライス試料は約100mm×100mm角のため直

径 35 mm 程度以上のほとんどの粗大気孔は試料から一部はみ出し、測定が不可能であったことが挙げられる。しかしながら、気孔径の標準偏差はコークス配合量の増加により増大し、ケーキはより不均一な構造を呈することがわかった。

Table 3 の気孔形状係数はコークス配合量増加に伴い大きくなっている。これは、焼成熱量の増加、すなわち融液量の増加や粘性の低下によつて複雑な固体形状が消滅し、より滑らかな表面が現れることを示唆する。固体比表面積についても同様の結果が得られた。これらの固体形状はケーキ破碎後には焼結鉄粒子の表面形状の一部として保存される。この時、Table 3 に示した D_s が 11 ~ 14 mm であることから、高炉装入物として、あるいは各種や金物物理性状試験用に整粒される焼結鉄粒度においては、破碎により新たに生じる表面に比較してケーキに既存する表面は大きな割合を占めるものと推測される。これは、表面の凹みを気孔の一部として考慮した焼結鉄粒子の気孔率とケーキの空隙率が正の相関を与える⁴⁾、粒子外部表面にケーキの空隙が大部分保存されている⁸⁾等の報告と関連して、ケーキ構造から成品焼結鉄の構造を推定するための一つの指針となると考えられる。

4.3 焼結ケーキの比表面積と有効伝熱面積、通気性の関係

焼結プロセスの数学的モデルにおいて層の通気性、比表面積は、それぞれ層通過ガス流量、気・固間の熱伝達速度を決定する重要な因子である。従来、これらの因子は種々の仮定の下、実験結果などを基にパラメーターフィッティング等により推定して使用されることが多いが、その信頼性についての検討は十分とは言えない。

熱伝達速度の計算には通常ベッド比表面積が使用される。本実験における測定対象の空隙には閉塞気孔も若干含まれているが、その割合は極めて小さく無視できる範囲と考えられる。各試料のベッド比表面積 A_s は 430 ~ 550 m²/m³-solid で、対応する見掛けの粒子径は 11 ~ 14 mm と測定された。この値は焼結層内の温度変化から計算された焼結完了帯の見掛けの粒子径¹⁰⁾と良く一致している。

従来、焼結層に適用される通気式として、主に係数を推定した ERGUN の式¹⁾が用いられてきた。いま、ERGUN の式を次のように変形する。

$$\Delta P/L = k_1 \mu u_0 + k_2 \rho_g u_0^2 \dots \dots \dots (4)$$

ここで、通気抵抗係数 k_1 , k_2 はそれぞれ、

$$k_1 = 150(1 - \epsilon)^2 / (\epsilon^3 d_p^2) \dots \dots \dots (5)$$

$$k_2 = 1.75(1 - \epsilon) / (\epsilon^3 d_p) \dots \dots \dots (6)$$

Table 4. Values of k_1 and k_2 calculated for various sinter cakes.

Cake	$k_1 \times 10^{-6}$ (m ⁻²)	$k_2 \times 10^{-2}$ (m ⁻²)
T-1	4.60	9.45
T-2	3.65	9.44
T-3	3.20	9.00
T-4	3.29	9.13
T-5	2.89	8.35
YOSHINAGA <i>et al.</i> ²⁾ *	1.06 ~ 12.7	1.76 ~ 24.7
SHIBATA <i>et al.</i> ³⁾ *	320	126

* : Void fraction of the cakes was supposed to be 0.45

である。(5), (6)式中の ϵ と d_p に各試料で測定された空隙率と D_s をそれぞれ代入して得られた k_1 , k_2 を Table 4 に示す。 k_1 , k_2 はコークス配合量の増加と共に減少しており、通気抵抗が低下することを示唆している。Fig. 2 では、コークス配合量の増加に伴つて焼結時間が延長する領域が認められたが、供給熱量の増加による高温帯幅の拡大、最高温度上昇に起因する現象と考えられる。したがつて、本実験条件においては、焼結完了帯の通気性改善が焼結ベッド全体の通気性に与える効果は相対的に小さいものと考えられた。

また、Table 4 には、焼結完了帯に対して、数学的モデルを用いたパラメーターフィッティングにより得られた吉永ら²⁾の値および焼結ケーキの圧損を実測することにより得られた柴田ら³⁾の値も同時に示した。吉永らの値は本研究のものとはほぼ一致しているが、実測値であることより比較的信頼性の高いと考えられる柴田らの値は他に比べて極めて大きい。これを本研究で求められた値と比較すると、 k_1 で約 100 倍、 k_2 で約 15 倍を示している。焼結完了帯の空隙率を本試料とほぼ同程度の 0.45 と仮定すると、(5), (6)式から見掛けの粒子径 d_p を推算することができ、約 1 mm に相当する。この値は、本実験で得られた各試料の D_s のほぼ 1/10 であり、焼結条件の相違のみが原因とは考えにくい。空隙周辺長の測定に関する主な誤差要因としてガス流れには直接関与しない閉塞気孔が考えられるが、その割合は少なく、しかも閉塞気孔を除去した場合、空隙の周辺長は減少し D_s はさらに大きな値をとる。したがつて、この相違は通気式に起因するものと考えることが妥当である。焼結ケーキ中の空隙の形状は不規則で、多くのチャンネル構造を有しており、いわゆる充填層構造とはかなり異なると推測される。この場合、チャンネルの部分における圧損が支配的となるため、層構造を均一と仮定した通気式(4)~(6)より求められた d_p は必然的に実際の値より小さくなる。よつて、ERGUN の式を用いる場合、圧損と気・固間熱伝達速度の推定に使用すべき見掛けの粒子径

がそれぞれ異なることも考えられる。

5. 焼結層の構造変化の駆動力

焼結過程における層構造変化は、層の収縮、空隙率や見掛けの粒子径増加等の現象として観察される。これらは水分の乾燥、コークスの燃焼等による物質の消失や融液生成による粒子の再配列が原因である。本研究では、この層構造変化を引き起こす駆動力についても検討した。

焼結層内では次の力が粒子に作用すると考えられる。

- 1) 層自重による圧縮力: F_b (N/m²)
- 2) 融液や固・液混合相に覆われた粒子間に働くキャピラリー結合力: F_p (N/m²)
- 3) 層通過ガスとの摩擦力 (圧損): F_f (N/m²)

以下、上記の (単位断面積あたりに換算した) 力についてそれぞれ考察する。

層頂から z の位置での圧縮力 F_b は (7) 式で表せる。

$$F_b = \rho_b z g_c \dots \dots \dots (7)$$

Fig. 7 に示したペンデュラー (Pendular) 領域における粒子間のキャピラリー結合力 H_p は

$$H_p = \gamma d_p \pi \sin \beta [\sin(\beta + \theta) + (d_p/4) \cdot (1/R_1 - 1/R_2) \sin \beta] \dots \dots \dots (8)$$

と与えられる¹¹⁾。(8)式中の R_1 と R_2 は幾何学的に、

$$R_1 = [d_p(1 - \cos \beta) + l] / [2 \cos(\beta + \theta)]$$

$$R_2 = (d_p/2) \sin \beta + R_1 [\sin(\beta + \theta) - 1]$$

と求められる。ここで便宜的に、 $d_p = 0.002$, $\gamma = 0.61$ (1250°C における CaO (20%)-Fe₂O₃ 系の値)¹²⁾, $\beta = 60^\circ$ とし、また、 θ と l は共に 0 とする。後者の仮定は融液が比較的少ない場合、 H_p がその体積に顕著に依存しない¹³⁾ことから妥当と考えられる。これにより、 H_p は 2.35×10^{-3} N と計算される。これを単位ベッド断面積あたりに換算すると、

$$F_p = 9/8 [(1 - \epsilon) / \pi d_p^2] k H_p^{14)} \doteq 660 [(1 - \epsilon) / \pi] k \dots \dots \dots (9)$$

となる。 k は配位数 (Coordination number) と呼ばれ、

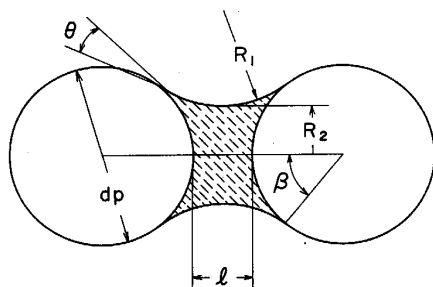
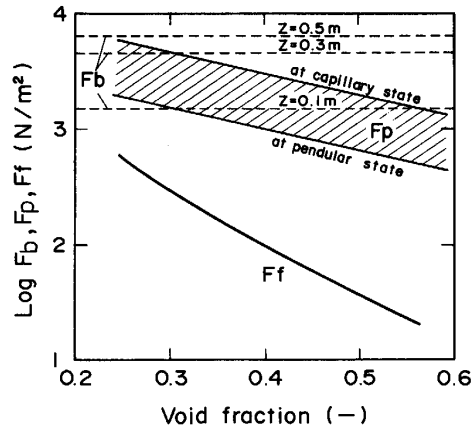


Fig. 7. Pendular bond between two spheres.

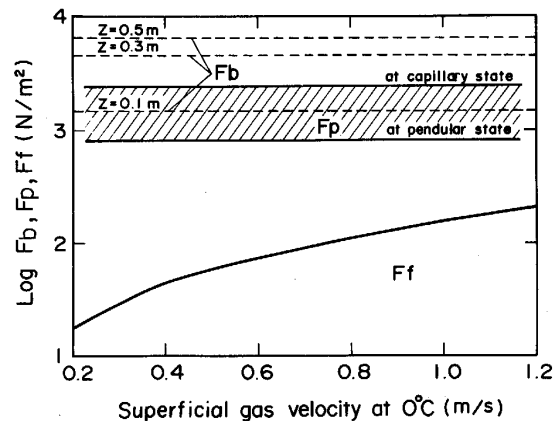
理想的には $k = \pi/\epsilon$ として与えられる¹⁵⁾。また、粒子がキャピラリー領域にある場合は (9) 式の約 3 倍の結合力を有する¹³⁾。

一方、一様な流れ下にある充填層内の F_f は層の圧力損失に等しく、ここでは粒子を剛体と仮定することで粒子の直径に相当する層高での ΔP を ERGUN の式を適用して推算した。

Fig. 8 には得られた各駆動力を ϵ に対して、Fig. 9 には 0°C に換算した u_0 に対して示した。いずれも層内温度 (T_b) = 1250°C, $d_p = 0.002$ m を仮定して得られた結果である。各図より、 F_f は他の力に比較して小さいことがわかる。したがって、チャンネルの近傍など極端に流速が高い領域以外では F_b と F_p が支配的であると考えられる。また、 F_b は層頂からの位置に依存し、層下



$\rho_b = 1600 \text{ kg/m}^3$ -bed $u_0 = 0.5 \text{ m/s}$ at 0°C $T_b = 1250^\circ\text{C}$
 $d_p = 0.002 \text{ m}$ ΔP was calculated ERGUN's eq. for $\Delta z = 0.002 \text{ m}$
 Fig. 8. Comparison of F_b , F_p and F_f as a function of void fraction of bed.



$\rho_b = 1600 \text{ kg/m}^3$ -bed $\epsilon = 0.45$ $T_b = 1250^\circ\text{C}$ $d_p = 0.002 \text{ m}$
 ΔP was calculated ERGUN's eq. for $\Delta z = 0.002 \text{ m}$
 Fig. 9. Comparison of F_b , F_p and F_f as function of superficial gas velocity (u_0).

部では F_p の数倍の値を示す。 F_b は常に層下方に向かって働き、 F_p は方向依存性がないと考えられることから、層構造変化は基本的には二つの力のバランスで進行すると考えられる。言い換えれば、 F_b は層を均一に圧縮し、 F_p は F_b に抗しながら粒子の合体と大気孔の生成を促進させ、また、 F_f はチャンネル部分を広げるため補助的に作用すると推定できる。

6. 結 言

焼結ケーキの構造の特徴を把握するため、コークス配合量を変化させた焼結実験によつて得られた焼結ケーキのスライス試料の空隙について画像解析を行った。測定された空隙率、比表面積等に基づき層構造と焼結強度あるいは熱伝達速度、圧損の推定に用いられる見掛けの粒子径との関係について検討した。その結果、焼結強度に関しては、ケーキの空隙率、気孔径分布、形状係数等で関連づけることができる可能性を示した。また、焼結ケーキの構造は理想的な充填層と極めて異なっているため、充填層として熱伝達速度と圧損を推算する場合、両者に使用すべき見掛けの粒子径が大きく異なることも考えられた。条件の異なる実験と比較したための不正確さは免れないが、この粒子径の相違は 10 倍程度に達することがあると推定される。

さらに、焼結過程における層構造変化の駆動力を、層の自重による圧縮力、粒子間のキャピラリー結合力、層通過ガスの摩擦力の三つに分類した。また、それぞれの力の大きさを比較し、構造変化は主に圧縮力とキャピラリー結合力とのバランスによつて進行するものと結論された。

終わりに、本実験の試料作製に御協力いただいたオーストラリア、BHP 中央研究所 Dr. G. R. BELTON ならびに Dr. C. E. Loo に深く感謝の意を表す。また、本研究の一部は著者の一人(葛西)が日本学術振興会、昭和

60 年度海外特別研究員としてオーストラリアに派遣中に行われたものであり、記して謝意を表す。

記 号

- D_s : 焼結ケーキと同一の粒子表面積を持つ球の直径 (m)
 d_p : 球の直径あるいは見掛けの粒子径 (m)
 g_c : 重力加速度 [9.807] (m/s²)
 L : 充填層の高さ (m)
 H_p : 粒子間のキャピラリー結合力 (N)
 ΔP : 層の圧力損失 (Pa)
 u, u_0 : ガス流速, ガス空塔流速 (m/s)
 γ : 融液の表面張力 (N/m)
 ε : 層の空隙率 (—)
 μ : ガスの粘度 (kg/ms)
 ρ_b, ρ_g : 層かさ密度, ガスの密度 (kg/m³-bed, kg/m³)

文 献

- 1) S. ERGUN: Chem. Eng. Progress, 48 (1952), p. 89
- 2) 吉永眞弓, 久保敏彦: 住友金属, 29 (1977), p. 383
- 3) 柴田充蔵, 和島正巳, 相馬英明, 松岡 宏: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 178
- 4) 佐々木三千夫, 小西 勝, 原藤正一, 田口 勇, 稲角忠弘: 鉄と鋼, 72 (1986), S 92
- 5) 川上茂樹, 佐々木望, 稲角忠弘, 佐々木勝彦, 佐々木三千夫: 鉄と鋼, 72 (1986), S 805
- 6) 城本義光, 萩原友郎, 吉川雅三: 富士製鉄技報, 16(1968), p. 1
- 7) 佐藤 駿, 川口尊三, 一伊達稔, 吉永眞弓: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 657
- 8) 佐藤 駿, 川口尊三, 一伊達稔, 吉永眞弓: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 964
- 9) 佐藤 駿, 川口尊三, 一伊達稔, 吉永眞弓: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 804
- 10) 堀尾正毅, 鞭 巖: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 425
- 11) W. PIETSH and H. RUMPF: Chem. Ing. Tech., 39 (1967), p. 885
- 12) 角田成夫, 森永健次, 柳ヶ瀬勉: 日本金属学会誌, 46 (1982), p. 369
- 13) P. C. KAPUR: Advances in Chemical Engineering, Vol. 10, ed. by T. B. DREW (1978), p. 69, p. 71 [Academic Press]
- 14) H. RUMPF: Agglomeration, ed. by W. A. KNEPPER (1962), p. 379 [Wiley]
- 15) S. DEBBAS and H. RUMPF: Chem. Ing. Sci., 21 (1966), p. 583