

論文

鉄鉱石焼結鉱の強度支配要因と 強度予測モデル

佐藤 駿*・川口尊三*・一伊達稔*²・吉永眞弓*³

Strength Controlling Factors and Their Model for Iron Ore Sinter

Shun SATO, Takazo KAWAGUCHI, Minoru ICHIDATE and Mayumi YOSHINAGA

Synopsis:

Strength is the basic characteristic of sinter manufactured by the agglomeration process. A fundamental study was carried out for the analysis of the controlling factors of sinter strength and a quantitative prediction model for sinter strength was developed. Sinter strength was described in terms of the porosity, the mineral composition and the melting ratio of sinter on the basis of the strength model of the porous materials. The calculated strength by the model was in relatively good agreement with the observed one on the various sinter.

Key words: agglomeration; sinter; iron ore; strength; modelling; quality.

1. 緒 言

焼結プロセスは元来微粉原料の塊成化処理法の一つとして発展してきたが現在でも他の物理性状に先立つて焼結鉱の強度指標は基本的な品質として位置づけられている。特に最近では省エネルギーを目的とした低温焼成技術¹⁾が普及するに伴って焼結鉱の強度および歩留りの向上は重要な技術的課題となっている。

著者らは複雑な要因の交絡する焼結プロセスを基礎的に解析し、諸要因間の定量的関係を段階ごとに再構成することで焼結過程のモデル化²⁾³⁾を進めてきたが、本研究では焼結鉱の基礎性状から焼結鉱強度を定量予測するモデルの開発について検討した。

2. 焼結鉱の強度とその考え方

焼結鉱の強度指標として一般に用いられている落下強度 (SI) や回転強度 (TI) は所定の機械的衝撃力のもとで試料焼結鉱の破壊粉化度を相対評価する簡便な指標と位置づけられる。従って焼結鉱の強度を支配する本質的な要因はその内部構造に由来する。焼結鉱成品は 5~50 mm 径に及ぶ広い粒度範囲をもちその算術平均径は 20 mm 前後となっている。焼結鉱の外形は大塊状の焼結ケーキが破碎整粒された結果得られた産物で表面の凹凸の多い不定形状を成す。焼結鉱粒子内部には多数の大

小ささまざまな気孔が存在し、その周囲は焼結反応で生成した鉱物相の集合体と未熔融残留元鉱によって不均一に満たされている。

焼結鉱強度のモデル化にあたりその内部構造因子の取扱いについては、焼結鉱組織構造が完全に均一か、完全に不均一かのどちらかの理想化されたモデルが第1近似として有効と考えられる。本論では前者の仮定により「多孔体強度理論」⁴⁾を応用して焼結鉱の強度を検討することとした。實際上、焼結鉱はおそらく上記二つの理想的状態の中間に位置しており、局所的な内部欠陥の性質に依存する脆性体と考えられるので、モデルの取扱いの厳密さと適用範囲は問題が多いが、この点は実用的な見地から実験結果との対応性を重視しつつ簡易モデルの構築を目標とした。

Fig. 1 には焼結鉱の構造と強度に関する概念を2次元で模式的に示した。すなわち、焼結鉱組織は気孔部と基地部とから成り、多孔体強度理論によれば供試構造体中に気孔等の欠陥がなければその強度は基地の強度で表現される。この基準強度から気孔等欠陥部分の体積存在率によって決定される強度減の程度に応じて多孔体としての焼結鉱強度が評価される。焼結鉱構造中の気孔は基地組織中の鉱物相群に比べて一般に大きなサイズを有するため気孔と基地を分離して考えることは適当と思われる。

昭和 57 年 9 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 5 月 29 日受付 (Received May 29, 1986)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasaki-cho Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

*² 住友金属工業(株)総合技術研究所 工博 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*³ 住友金属工業(株)総合技術研究所 理博 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

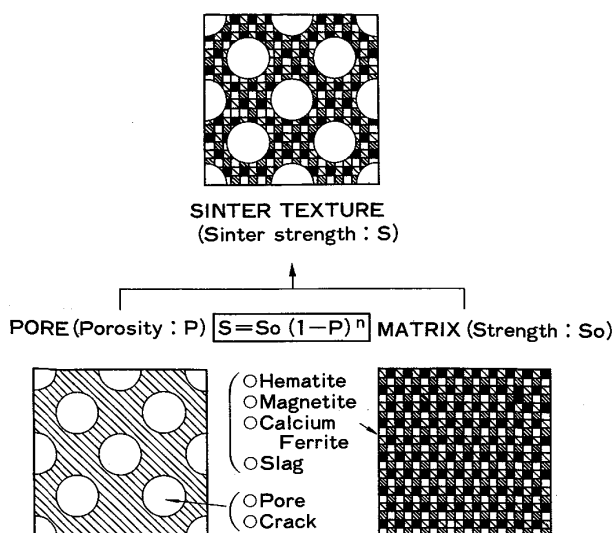


Fig. 1. General conception of sinter structure and strength.

3. 実験方法

3.1 供試焼結鉱

実験に用いられた焼結鉱は製鉄部会法⁵⁾に準拠した焼結鍋試験装置で製造された。焼結鉱製造法の詳細は前報²³⁾に記載した。

また鍋試験にて製造された焼結鉱の他に、住友金属工業(株)小倉製鉄所第3焼結機(有効面積 222 m²)で製造された実用焼結鉱についても比較検討を行った。これら試料焼結鉱の性状についてはまとめて後述する。

3.2 焼結鉱のマクロ強度試験法

鍋試験で製造された焼結鉱の常温強度は JIS M 8711 に準拠した落下強度試験法により測定された。また実焼結機製造の焼結鉱強度は住友金属工業(株)の場合すべて回転強度試験法を採用しているが、これは JIS M 8712 に準拠して実施されている。両常温強度指標の間の換算は以下の方法で実施し鍋焼結鉱との評価法統一をはかった。すなわち、供試焼結鉱 15~20 mm, 500 g を小型回転ドラム(内径 140 mmφ, 長さ 200 mm, 180° 対向 20 mm 高さリフター板 2 枚付)に装入し、回転速度 30 rpm, 900 回転後の 10 mm 篩上収率を指標として「小型ドラム強度」を定義した。Fig. 2 に示される鍋試験焼結鉱の小型ドラム強度(%)と落下強度(%)との対応関係を利用して実機焼結鉱の小型ドラム強度実測値から落下強度を推定した。

3.3 焼結鉱のミクロ強度試験法

焼結鉱のマクロ強度は前述のごとく実際に高炉で使用される焼結鉱サイズの有姿に基づいてその衝撃粉化抵抗

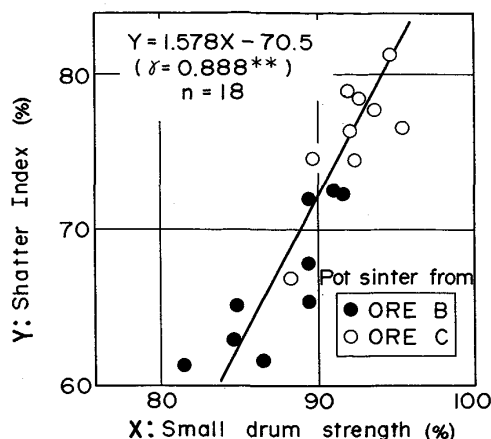


Fig. 2. Relationship between shatter index and small drum strength.

を評価する指標であり、強度に影響を及ぼすさまざまな要因を包含している。これに対して、焼結鉱のミクロ(マイクロ)強度は欠陥部である気孔を除いた基地組織の強度評価を意図している。従つて、供試料には理想的には欠陥部分のないことが望ましいが、実用上それが無視できるほど少なければ代用可能と考えられる。焼結鉱のような気孔を欠陥とする多孔質脆性体は衝撃力により応力集中を受け優先的に欠陥部から破壊されることを利用すれば、粒子径の小さな試料ほど気孔存在率も少なく気孔径も小さくなると考えられる。

そこで、粒度別に樹脂埋込みされた研磨試料について顕微鏡で拡大しながら、それぞれ粒子 120 個の気孔の存在をポイントカウント法で調査した。

Table 1 はこの結果を整理したもので、破碎焼結鉱の粒度別平均気孔率(Mean porosity)を以下の方法で計算した。まず実測された平均気孔径から球近似で気孔体積を計算し、これに平均気孔数を乗じた後球近似平均粒子体積で割つて気孔の存在する粒子 1 個当たりの平均気孔率を求める。さらに平均気孔率はこれに気孔存在粒子率を掛けて求めた。この結果、粒子径 0.3 mm 以下の試料の平均気孔率はごく小さな値となり、この試料粒径範囲の強度試験法は基地強度評価法として採用できる。

Fig. 3 にはコークスのマイクロ強度測定法の一つとして古くから提唱されている H. E. BLAYDEN 等の測定法⁶⁾とその装置を示した。本装置の鋼管製円筒内に試料 2 g を鋼球 12 個(7.66 mmφ)とともに装入し、一定の条件で回転させて試料の衝撃粉碎を行い、試験後の回収物の所定サイズの篩上残存率をマイクロ強度指数(Micro strength)として評価するものである。本研究における焼結鉱基地強度評価法として、試験方法および

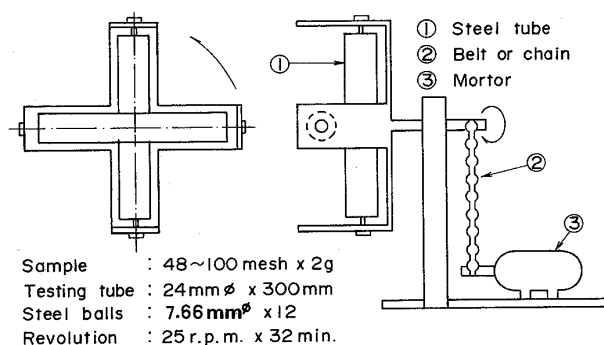
Table 1. Pore size analysis in sinter.

(Particle : $n=120$)

Particle size (m/m)	Mean pore number (1/Particle)	Mean size of pore (m/m)	Particle containing pores (%)	Mean porosity in a particle (%)	Mean porosity (%)
2 ~1	1.83	0.141	76.3	0.152	0.116
1 ~0.5	1.35	0.121	64.9	0.568	0.369
0.5 ~0.3	0.58	0.074	39.3	0.369	0.145
0.3 ~0.15	0.08	0.065	8.3	0.187	0.016
0.15~0.074	0.01	0.026	1.2	0.014	0.0002

Table 2. Sinter characteristics from sinter pot test.

Ore blend	Mineral composition (%)				Micro-strength (%)	Melting ratio (%)	Porosity (%)	Shatter strength (%)
	Hematite	Magnetite	Calcium ferrite	Slag				
B	24.2	7.3	29.6	38.9	70.6	81.2	25.5	65.3
C	25.4	15.2	17.3	42.1	54.5	79.2	12.9	77.8
A	13.0	10.2	37.0	39.8	58.1	93.2	15.8	77.1
E	14.7	22.8	25.4	37.1	65.5	97.0	10.0	81.6
F	11.0	33.7	15.9	39.7	67.2	86.1	11.8	73.1
G	34.3	10.9	24.8	30.0	—	86.5	35.8	76.6
D	43.6	16.6	18.4	21.4	—	80.0	31.0	73.6
B+C	32.6	9.5	26.1	31.8	57.2	84.1	10.8	67.3
B+A	23.4	8.7	31.5	36.4	57.6	89.0	12.1	73.4
B+E	29.5	11.3	24.8	34.4	66.4	89.3	12.9	79.8

Fig. 3. Outline of test apparatus for evaluation of micro-strength of sinter⁶⁾.

装置は BLAYDEN 等の方法をそのまま準用するが、試料粒度については前述の知見から供試初期粒度を 0.3~0.15 mm (48~100 mesh) に整粒した焼結鉱粒子とし、試験後の 0.15 mm 篩上残存率をもつて焼結鉱のマイクロ強度と定義し利用することとした。

3.4 その他の基礎性状測定法

焼結鉱強度に影響を及ぼす主要因として焼結鉱鉱物構成と気孔率および溶融率が挙げられる。焼結鉱の主要鉱物相はヘマタイト (Hematite, Fe_2O_3)、マグネタイト (Magnetite, Fe_3O_4)、カルシウムフェライト (Calcium ferrite) およびシリケートスラグ (Silicate slag) の 4 種類に大別され、それぞれの構成比率は粉末 X 線回折法により試薬純ヘマタイトを外部標準物質としてあらかじめ定められた検量線を用いて定量した。定量法の詳細は松野ら⁷⁾による方法に準じた。

一方、焼結鉱の気孔率は JIS M 8716 に準じた見掛け

密度測定と JIS M 8717 による真密度測定結果から計算された。溶融率は樹脂埋込焼結鉱の切断断面のうち気孔および樹脂部を除く焼結鉱実体部分の面積に対して、焼結鉱中に介在する未溶融鉱石部の面積を差し引いた溶融部分の面積比率を定量して求められ、詳細は前報³⁾に記載した。

4. 実験結果および考察

4.1 焼結鉱の強度と性状

Table 2 には粉コークス配合率 4.5% 一定で焼成した鉱石銘柄別単味配合鋼試験による焼結鉱の強度とこれに関係する基礎性状をまとめて示した。落下強度の高い鉱石 E 配合の焼結鉱は溶融率が高く欠陥としての気孔率が低くなっている。溶融率の強度に及ぼす影響は気孔率の大小に関与する部分が大いだが、それ以外にも焼結鉱鉱物組織を界面で相互に接着させているバインダーとしての役割も重要と考えられる。マイクロ強度は焼結鉱マイクロ組織の平均化された基地強度を評価するもので、焼結鉱鉱物構成に依存すると考えられるが、落下強度への影響力は気孔等に比べて弱いように見受けられる。

Table 3 には小倉第 3 焼結機で製造された日別採取焼結鉱の強度に関連する性状をまとめて示した。この時期の焼結機操業条件は、鉱石 A と鉱石 B を主体とする原料配合構成のもと、生産量 200~240 t/h、粉コークス原単位 40~48 kg/ST、層厚 460~490 mm、成品塩基度 1.65~1.70 の範囲で生産された。前掲の鋼試験焼結鉱性状と異なり強度指標は製造所で試験された回転強度で示しているが、強度およびこれに関連する基礎性状 (マイク

Table 3. Sinter characteristics from Kokura No. 3 DL.

(1979)

Sample No.	Mineral composition (%)				Micro-strength (%)	Porosity (%)	Small drum strength (%)	Tumbler* strength (%)
	Hematite	Magnetite	Calcium ferrite	Slag				
1	18.8	23.6	45.0	12.6	63.1	20.7	95.3	67.0
2	22.2	18.8	28.0	31.0	64.1	16.9	94.5	67.1
3	26.2	23.7	31.9	18.2	66.1	19.5	95.1	67.2
4	17.8	24.6	30.8	26.8	66.2	21.4	94.0	66.9
5	18.9	27.3	30.5	23.3	66.3	21.3	91.8	66.1
6	23.3	21.1	36.4	19.2	65.1	21.6	91.8	68.2
7	16.0	23.6	34.1	26.3	67.4	21.7	94.1	66.2
8	20.4	25.8	39.1	14.7	65.8	19.2	93.0	66.2
9	27.4	29.9	33.1	11.1	67.5	19.9	94.0	67.8
10	22.4	21.7	37.8	18.1	66.4	25.9	96.1	68.8
11	26.7	18.8	26.7	27.8	57.1	21.9	94.6	69.4
12	25.9	15.2	34.2	24.7	58.1	19.8	94.1	68.0
13	31.7	29.2	25.4	13.7	58.8	19.5	94.6	68.5
14	32.8	17.2	36.7	13.3	62.7	18.3	94.6	68.8
15	29.6	20.6	30.5	19.3	65.1	20.7	92.7	68.3
16	15.7	26.4	33.6	24.3	65.1	19.5	94.8	68.4
17	19.2	21.5	36.3	23.0	65.8	20.0	93.0	68.6
18	20.7	18.8	23.6	36.9	67.8	19.5	95.2	68.2
19	27.2	23.5	30.0	19.3	67.2	20.1	96.1	67.5

* Measured by Kokura

Table 4. Characteristics of minerals by KISSIN's data⁸⁾.

Minerals	Chemical composition (%)				Reducibility (%)	Crushing strength (kg/mm ²)
	T. Fe	FeO	CaO	SiO ₂		
Hematite	—	—	—	—	49.9	26.7
Magnetite	62.45	22.3	1.07	3.06	26.7	36.9
Mono calcium ferrite	51.95	0.93	25.84	—	40.1	37.0
Di calcium ferrite	41.26	1.23	41.20	—	28.5	14.2
Fayalite	54.90	68.95	—	28.91	1.0	20.0
Olivine slag	cry.*	29.69	35.12	29.67	6.6	23.3
	gl.	29.76	31.91	29.54	3.1	4.6

* cry.: crystalline gl.: glassy

口強度、気孔率等)も極めて安定している。

4.2 焼結鉱のマイクロ強度とその推定方法

焼結鉱のマイクロ強度はその鉱物構成に依存するとの前提に立てば、各種鉱物の単体強度を鉱物の構成で集合化させることで推定が可能と考えられる。Table 4 には天然および合成された一辺 5~10 mm の立方体試料の圧潰強度を測定した D. A. KISSIN ら⁸⁾ の鉱物単体強度を示す。この結果はモノカルシウムフェライト (CaO・Fe₂O₃) とマグネタイトの強度がほぼ同程度に高く、ヘマタイトがこれに次ぐ。オリビン系のシリケートスラグは総じて強度が低く、特にガラス質のものは著しい。本研究では彼等の結果に基づいて鉱物単体強度を設定するが、ヘマタイトとマグネタイトの強度は天然鉄石でも焼結鉱中の 2 次生成物でも大差はないと予想されるので彼等の測定結果をそのまま利用した。焼結鉱中のカルシウムフェライトは SiO₂ や Al₂O₃ をも固溶した 4 成分系と一般に認知されており⁹⁾、また 2 成分系で近似しても酸化鉄の多いヘミカルシウムフェライト (CaO・2Fe₂O₃) に近い

とされている¹⁰⁾。KISSIN らのデータにはこの組成の強度値が欠けているが、Table 4 の中からモノタイプの値を流用する。最後にシリケートスラグの強度については結晶質とガラス質とで強度に大きな差がある上、実際焼結鉱では CaO に富むオリビン (Olivine) とされるが、他にこの種の定量的知見が乏しい現状ではやむを得ず KISSIN らのオリビン系スラグの結晶質と非晶質の強度の算術平均値を用いることとした。まとめると焼結鉱中の主要 4 種鉱物の単体強度はヘマタイト 26.7、マグネタイト 36.9、カルシウムフェライト 37.0、スラグ 14.0 (kg/mm²) の値を採用した。

このような鉱物単体強度は焼結原料配合や操業条件によらずそれぞれ一定と仮定し、焼結鉱のマイクロ強度がこれら鉱物の平均集合強度で得られるものとすれば、マイクロ強度 (MSI) は次式で表現される。

$$MSI = k(x_H \cdot s_H + x_M \cdot s_M + x_F \cdot s_F + x_S \cdot s_S) \quad \cdots (1)$$

ここで、 x と s はそれぞれ焼結鉱中主要 4 鉱物の含有率 (—) と単体強度 (%) を意味し、サブスクリプトの記号 H, M, F, S は順にヘマタイト、マグネタイト、カルシウムフェライト、スラグを意味する。 k は定数 (—) である。

Fig. 4 には鉄石 B 単体配合鍋試験焼結鉱による焼結操業条件変更時のマイクロ強度実測値の変化を示す。強度測定は 2 回繰り返し実施し、そのばらつきの範囲を図中に縦線で示した。

Fig. 5 にはこのマイクロ強度実測値 (Y) に対して、鉱物単体強度と粉末 X 線回折による鉱物定量値を (1) 式に代入して求められたマイクロ強度計算値 (X) の関係を示した。図中左側に偏った 2 点は Fig. 4 でばらつきの極端に大きな 2 点で精度的に難があるので、これらを除いた時の両者の対応関係は最小自乗法により次式で与

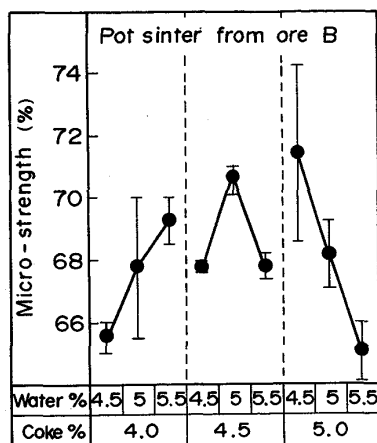


Fig. 4. Influence of sintering conditions on micro-strength.

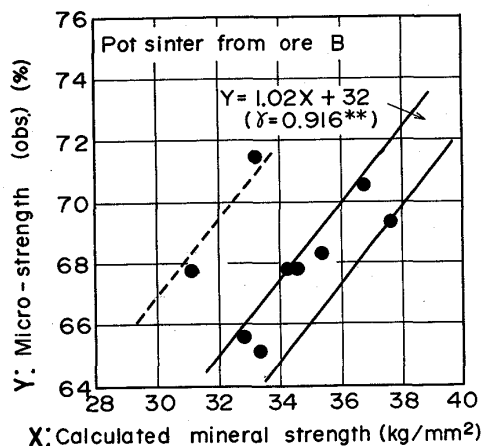


Fig. 5. Comparison between micro-strength (obs.) and calculated mineral strength.

えられる。

$$Y = 1.02X + 32 \quad (\gamma = 0.916^{**}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

同様に、Fig. 6 には各種焼結鉱のマイクロ強度実測値と計算強度との対応関係を示した。データのばらつきはかなりのものの全体として正の相関が認められ、回帰式と相関係数は以下に得られた。

$$Y = 0.948X + 35.07 \quad (\gamma = 0.511^{**}, n = 37) \quad \dots\dots\dots (3)$$

この結果から、焼結鉱の基地強度はマイクロ強度で評価が可能であり、それは焼結鉱中の主要 4 種鉱物の単体強度をその存在比率で平均集合化することによって予測推定ができる。

焼結鉱の鉱物単体強度に関して、本研究では KISSIN ら⁸⁾の測定結果を利用したがその信頼性を別の観点から検証した。前出(1)式に関して、マイクロ強度 (MSI)

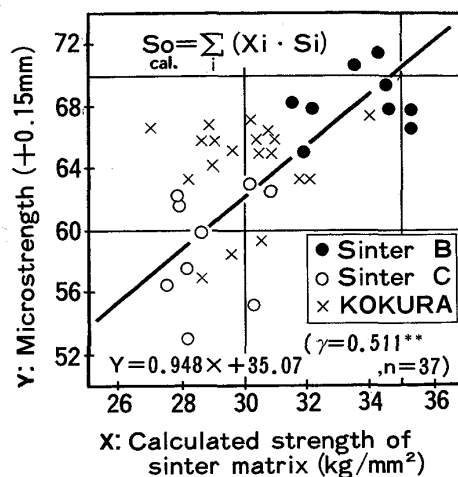


Fig. 6. Comparison between micro-strength (obs.) and calculated mineral strength of sinter matrix.

Table 5. Estimation and comparison of mineral strength.

Measuring and calculating method for mineral strength	Mineral strength (comparative values)			
	Hematite	Magnetite	Calcium ferrite	Slag
1. Canonical correlation	0.587	0.709	0.711	0.550
2. Micro-vickers hardness (kg/mm ²)	76.3	87.6	71.4	54.6
3. KISSIN's crushing strength (kg/mm ²)	26.7	36.9	37.0	14.0
Mineral strength (based on strength of hematite)	1	1.000	1.214	1.217
	2	1.000	1.148	0.936
	3	1.000	1.382	1.386
				0.524

と鉱物含有率 (x_i) は実測値でありそれらの組合せの測定値は延べ 55 個の焼結鉱試料から得ることができる。この多数の実測値を用いて正準方程式を立て、統計計算から逆に 4 種鉱物の単体強度の最確値を推定することが可能である。またさらにはマイクロ鉱物相ごとのマイクロビッカース硬度測定値を鉱物単体強度の参考値として評価比較することも可能と考えられる。Table 5 にはこのような観点から本研究で採用した KISSIN らの文献値に基づく鉱物単体強度を他の手法による値と比較した結果をまとめて示した。この結果によるといずれの評価法においてもシリケートスラグの単体強度が他鉱物に比較して低いことは共通しているが、正準分析法ではヘマタイトやシリケートスラグの強度が相対的に高目であつたり、マイクロビッカース硬度ではカルシウムフェライトの硬度が比較的小さい。しかしながら、全般的に見ると三つの方法の相対的な傾向は類似しており、KISSIN ら⁸⁾の測定値の採用はほぼ妥当なものと評価することができ

る。

4.3 焼結鉱の強度とその推定方法

焼結鉱のような多孔質脆性材料の破壊強度の気孔率依存性については古くから多数の研究が行われており、強度と気孔率との関係を表す実験式として種々の提案がなされている。本研究ではそのうちの代表的で簡単な実験式¹¹⁾が焼結鉱でも適用し得るものと考え、以下の表現を用いた。

$$SI = K \cdot m \cdot s_0 (100 - P)^n \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 SI : 焼結鉱の常温強度 (落下強度) (%) m : 基地鉱物相の結合性係数 (溶融率) (%) s_0 : 基地平均強度 ($P=0$ の時の焼結組織基地強度, マイクロ強度) (%) P : 焼結鉱気孔率 (%) K, n : 定数 (—)

いま結合性係数 m は焼結鉱鉱物相を界面で相互に接合させているバインダーとしての役割を想定し生成融液量に比例するものと考えたと溶融率で表現できる。モデルの簡素化のため m は原料鉱石種にのみ依存する係数と仮定して原料配合ごとに定まる定数として取り扱い、(4)式で $K \cdot m = 1/K'$ とおいて両辺の対数をとれば、

$$\log(SI/s_0) + \log K' = n \cdot \log(100 - P) \quad \dots\dots\dots (5)$$

となり、 $\log(SI/s_0)$ と $\log(100 - P)$ との関係は勾配 n の直線で表される。

ここで、 SI, s_0 および P に実測結果を用いて $\log(SI/s_0)$ と $\log(100 - P)$ を計算しそれぞれ縦軸 (Y)、横軸 (X) にプロットすると Fig. 7 が得られる。この結果によればデータのばらつきは認められるものの各種の性状の異なる焼結鉱の落下強度を統一された関係で整理が可能であることを示している。

Fig. 8 には焼結鉱種別の三つの回帰式を付け加えて示した。この結果(5)式の n の値は実験的に回帰式の X の係数で与えられるが、焼結鉱種別に異なっている。本来モデルが完全に実測値を説明できると仮定すれば、

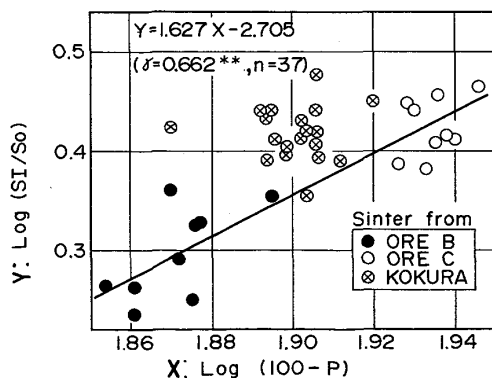


Fig. 7. Relationship between $\log(SI/s_0)$ and $\log(100-P)$.

強度に及ぼす気孔率の影響は焼結鉱の種類にかかわらず一定と考えられる。そこで図中焼結鉱種別に斜線で示したように同一の勾配を想定した場合でも大部分の実験値が説明できることから、焼結鉱種別の三つの回帰式の平均勾配もしくは全焼結鉱に関する回帰式の勾配に最も近い整数値 2 を本モデルの n 値に採用した。

Fig. 9 には $n=2$ とおいて鉱石 B 単味配合鍋試験焼結鉱に関する気孔率に関する項 (X) と強度に関する項 (Y) を定数項も含めて示した。両者の間には次式で示される良好な対応が認められた。

$$Y = 2.00X - 1.871 \quad (r = 0.63**, n = 9) \quad \dots\dots\dots (6)$$

この式より逆算して $K' = 76.03$ が得られた。

この結果から多孔体強度理論を応用して、焼結鉱の強度を気孔率と基地強度で表現できる見通しを得た。

次に、Fig. 8 に示した各焼結鉱に関する三つの回帰式の勾配を 2.0 と修正して再計算し、気孔率 P' (小数

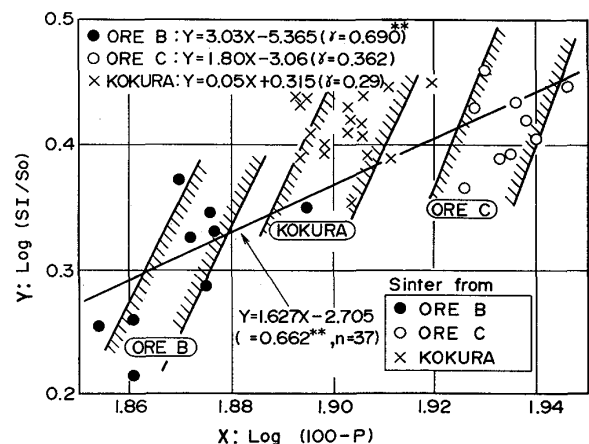


Fig. 8. Relationships between strength and porosity of various sinters (based on calculated values).

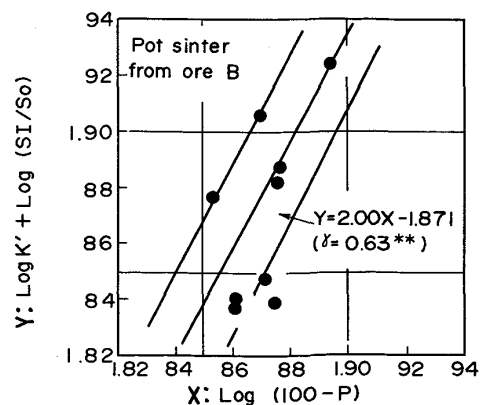


Fig. 9. Relationship between strength and porosity of pot sinter from ore B.

表示) で(4)式の形に表せば, 次式が得られる.

$$\left. \begin{aligned} \text{鉱石B単味配合焼結鉄: } SI &= 3.65s_0(1-P')^2 \\ \text{鉱石C単味配合焼結鉄: } SI &= 3.52s_0(1-P')^2 \\ \text{小倉第3焼結機焼結鉄: } SI &= 4.13s_0(1-P')^2 \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

焼結鉄ごとの(7)式の右辺の係数は鉱物相間の結合性の指標となる原料の溶解性に対応し, 鉱石BがCより溶解性良好な事実と良く一致する. 実機配合原料はさらに溶解性の良い鉱石Aや各種の雑原料を含むため鍋試験単味焼結鉄よりも高い係数を示すことは妥当な結果である.

Fig. 10 には落下強度実測値と焼結鉄基礎性状(鉱物構成および気孔率)から求められた落下強度計算値との対応を示した. 一部データのばらつきは認められるものの実用的範囲内ではほぼ満足すべき対応が得られた.

このように, 焼結鉄の常温強度は焼結鉄の基礎性状から多孔体強度理論を応用して定量予測が可能となった.

5. 強度推定総合モデルと実機への適用例

本研究は焼結鉄の基礎性状からその常温強度を定量的

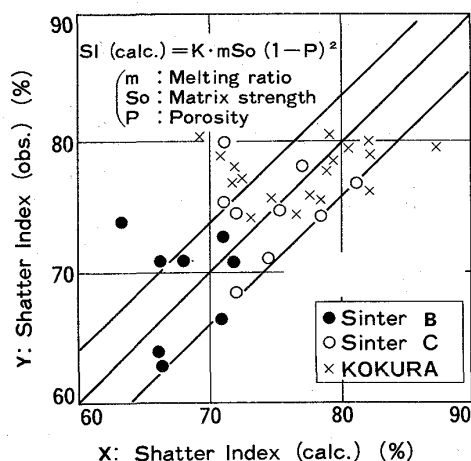


Fig. 10. Comparison between observed SI and calculated one.

に予測する方法について検討してきたが, 基礎性状自身を支配する要因は原料鉱石の特性と焼結操作条件によって定められる. 従って製造される焼結鉄の品質を定量的に予測する自己完結型のモデルを開発するにあたっては焼結プロセスの全過程にわたって定量的な知見と情報の統合が必要となる. Fig. 11 にはこれまでに報告した部分モデル²⁾³⁾も含めて常温強度を予測するためのモデルの総合的な関連性を示した.

最後に Fig. 12 には住友金属工業(株)小倉製鉄所第3焼結機における1か月間の日平均回転強度実測値の推移

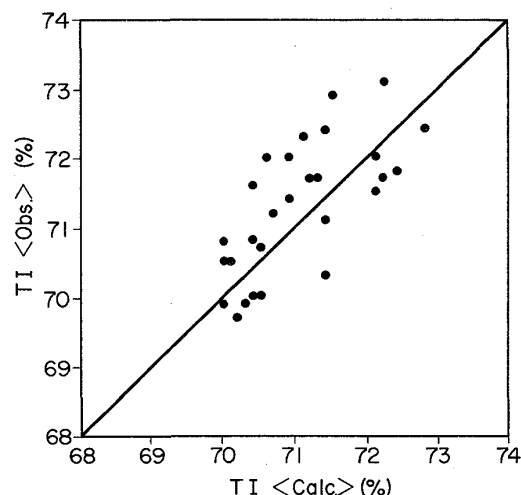
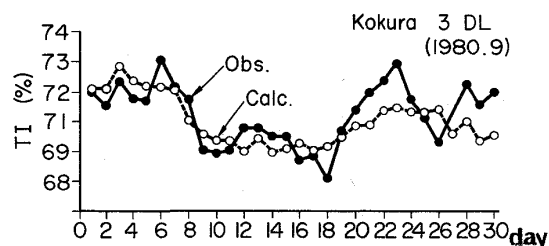


Fig. 12. Comparison between calculated value and observed one for TI.

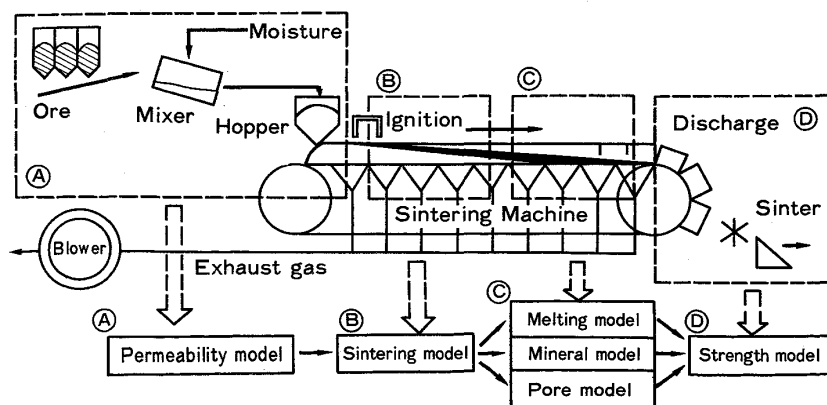


Fig. 11. Sintering process and sinter quality model.

に対し、Fig. 11 に示した総合モデルを用いて計算された予測値の対応状況を示しているが、極めて良好な精度で強度予測が可能となっている。9月中旬時期における強度低下傾向はモデルによる操業要因の解析によつて、鉱石Bの配合増に伴う原料の粗粒化が充填層の通気性を改善し焼結速度が高められた結果として、定量的に把握されている。同月下旬には再び原料配合構成が切り替わつて強度の回復をみた。この対応例は事後解析結果であるが、本モデルを計算機システムに組み込むならば、焼結作業の遂行に先立つてこのような焼結鉱強度の定量的予測が迅速に可能となる。

6. 結 言

焼結鉱の重要な品質の一つである常温強度に影響を及ぼす要因について考察し基礎的な実験で検証を進めた結果、多孔体強度理論に基づいて焼結鉱の基礎性状から常温強度を定量的に予測するモデルを開発できた。本モデルによる予測計算結果と各種の焼結鉱について実測された強度は良い一致を示した。

今後は他の焼結鉱品質の予測評価も可能としつつ、焼結プロセスの総合モデル化を目ざし操業最適化の確立を

はかりたい。

最後に本研究も含めて一連の焼結モデルの発表に関し御快諾いただいた住友金属工業株式会社中央技術研究所所長西岡邦夫博士と同研究所波崎研究センタ所長行俊照夫博士に厚く謝意を表する。

文 献

- 1) 佐々木稔, 肥田行博: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 563
- 2) 佐藤 駿, 吉永眞弓, 一伊達稔, 川口尊三: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 2174
- 3) 佐藤 駿, 川口尊三, 一伊達稔, 吉永眞弓: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 657
- 4) 堀 素夫: 多孔材料—性質と応用—(近藤連一編) (1975), p. 165 [技報堂]
- 5) 日本鉄鋼協会共同研究会製鉄部会: 鉄と鋼, **49** (1963), p. 1228
- 6) H. E. BLAYDEN, W. NOBLE and H. L. RILEY: J. Iron Steel Inst., **86** (1937), p. 47
- 7) F. MATSUNO, S. NISHIKIDA and H. IKESAKI: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **24** (1984), p. 275
- 8) D. A. KISSIN and T. I. LITVINOVA: STAL', **5** (1960), p. 318
- 9) 井上勝彦, 池田 孜: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 2190
- 10) 佐々木稔, 中沢孝夫: 鉄と鋼, **54** (1968), p. 1217
- 11) M. Yu. BAL'SHIN: Dokl. Akad. Nauk. SSSR, **154** (1964), p. 80