

最近における粉砕技術の進歩ならびに 石炭, コークス, 焼結鉱の破碎性

八 嶋 三 郎*・橋 本 等*²

Recent Advances in Grinding Technique and Crushing Behavior of Some Kinds of Coal, Coke and Sintered Ore

Saburo YASHIMA and Hitoshi HASHIMOTO

はじめに

従来の選鉱と製錬に関わる原料鉱石の材料力学的諸性質と破碎性等については、既にかなり研究が進められており、それらに基づく粉砕設計あるいは粉砕速度論に立脚した粉砕成績の評価も十分に行いうる段階に達している。本解説では、はじめに最近における粉砕技術の進歩を主として粉砕機の変遷に重点をおいて要約して述べ、あわせて、石炭, コークスならびに焼結鉱の強度と破碎性につき最近行つた幾つかの実験的研究結果を紹介した。石炭の粉砕は実技的には既に十分目的を達しているが、その基礎となる強度と破碎性については近年原田ら¹⁾によつて行われた研究があるのみで、ほかに系統的な研究は行われていない。ここに述べる結果は石炭の炭化度と材料力学的諸性質の関係に重点をおいて破碎性の研究を行つたものである。コークスと焼結鉱の強度と破碎性についても同様で系統的な研究はみられない。コークスと焼結鉱はともに組織がきわめて複雑で、焼結金属あるいはセラミックスのような均質な組織を持つ多孔体とは異なるが、材料という観点からすると一種の多孔体として取り扱うことができるので、材料力学的諸性質と気孔率の関係に重点をおいて検討を進め、またコークスについては気孔の構造と強度の関係も調べた。石炭の材料力学的諸性質と破碎性については現在研究を進めている段階で、その結果の一部を紹介した。また焼結鉱の強度と破碎性については現段階ではコークスほど数多くの測定を行つてはいない。石炭, コークスあるいは焼結鉱は不均質な組織を持つているがゆえにそれらの材料力学的諸性質を測定してもその意義は薄いという見方もあるかもしれないが、材料が固体としての形を保つている以

上強度やヤング率, ポアソン比は測定しうる値であり、またそれらの値がなければ粉砕の研究も進まないし、設計もできない。碎料単粒子につき、その材料力学的諸性質と破碎性という巨視的立場に立つた。しかもまた、その緒についた段階の研究であるが、従来えられた結果を要約して述べる。

1. 最近における粉砕技術の進歩²⁾

主として粉砕機に重点をおいて最近における技術的進歩を要約して述べる。

1.1 粉砕機の大型化

最近粉砕系統の合理化を図るために粉砕機が大型化する傾向がある。

1.1.1 破碎機³⁾

神戸製鋼所の最近 10 年間の実績をみると、ジャイレトリクラッシャーでは全製作台数のうち 42-65 型 (コンケーブ給鉱口の半径方向の長さが 42 inch, クラッシングヘッド下端付近の直径が 65 inch) 以上の大型機が 55%, そのうち 75% が輸出向けで 60-89 型, 60-109 型がその 1/2 を占めている。また大型ジャイレトリクラッシャーを搭載した移動式破碎設備により経済性改善を図る傾向にあり、シシェンノース鉱山 (南アフリカ) では西独クルップ製の 60-109 型, 7000 t/h, ジュバール銅鉱山 (米国アリゾナ州) ではアリスチャルマース製の 60-89 型, 3600 t/h の移動式破碎設備の例がある。わが国では破碎性能と操作性のよい油圧式コンクラッシャーが骨材生産, 鉱石の破碎に多用され、この分野では細粒産物を多く生産できるような破碎性が要求されることもあつて、従来の 2 倍の細粒生産能力を持つたオートファイニングクラッシャーが開発されている⁴⁾⁵⁾。

昭和 63 年 6 月 23 日受付 (Received June 23, 1988) (依頼解説)

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

*² 東北大学選鉱製錬研究所助手 (現: 東北大学工学部助手) 工博 (Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Now Faculty of Engineering, Tohoku University)

Key words: coal; coke; crushing; fracture; grinding; sintering; strength.

1.1.2 セメント用粉砕機⁶⁾

これには石灰石粉砕用の原料ミルと焼成クリンカー粉砕用の仕上ミルがある。原料ミルは従来のボールミルからローラーミルへと移行してきている。わが国の石灰石は欧米のそれに比べて硬質でローラーミルは不向きとされていたが、1台で閉回路粉砕・乾燥（あるいは冷却）・分級ができ、粉砕動力がボールミル方式に比べて20～30%少ないという利点が注目され近時盛んに用いられるようになった。セメント原料の乾燥粉砕方式には、①ローラーミル方式、②エアースエプトミル方式、③中央排出ミル方式があるが、①では1979年、日本セメント上磯工場に世界最大のMPS4850型がすえ付けられており、②では台湾のラッキーセメントで15×22型（回転円筒ミルの内側直径が15ft、内側長さが22ft）が用いられ、③では1981年にインドネシアスマトラ島のセメントプラントで中央排出式16×50 1/2型、5000kWのチューブミルが稼動を開始している。セメント工場の仕上ミルシステムは、2室チューブミルと空気分級機の組合せによる閉回路方式が主流であるが、設備投資節減、省力、省人員などの効率化の目的で大型ミルが用いられるようになり、国内では現在6000kWの規模のミルが用いられている。国外では1981年にヨルダンセメントで18×57 1/2型、8000kWのチューブミルが用いられるようになり、その効率は4000kW級と同等であるといわれている。なお大形ミルにおけるBOND理論の適用については田中、吉本の報告⁷⁾がある。一方セメント仕上ミルの電力原単位の改善が進められ、従来の50kWh/tから38～45kWh/tへと減少してきているが、この効率改善と安定した品質の製品を生産しうるようになったのは、分級ライナーと小径ボールの使用、粉砕助剤の効果とエアースエプト効果、捕集効率のよい空気分級機と最新の電子技術を活用した自動制御装置の採用に負うところが大きい。つぎに大型ミルの駆動装置についてみると、ミルの駆動には減速装置が密閉されたセンタードライブ方式が多用されている。歯車減速装置は1次ギヤと2次ピニオンを二つに分けたシンメトリー型が主体であるが、この方式は2次ギヤの製作限界から6500～7000kWが上限で、最近ではコンパクトに設計できる遊星減速機ができており、前述の8000kWミルにもこの方式が用いられている。ミル駆動面の新しい方式は1969年にフランスのセメント工場でミル胴体の外周に6400kW電動機のローターを取り付け、直接ミルを駆動するギヤレスドライブ方式が初めて採用されている。電源周波数を変えることにより経済速度で運転することが可能であり、すえ付け面積が少ないなどの利点がある。この方式は現在世界で38台採用されている。一方ローラーミルがセメント仕上ミルとして使用されたのは1980年西独ハノーバーのセメント工場が最初である。砕成物の粒度分布がシャープなためセメントの品質に影響

を及ぼす難点があつたが、小野田セメントと神戸製鋼所の共同開発でこれを解決し、1984年から小野田セメントで用いられるようになった。小野田セメント田原工場での成績によると、セメント仕上ミル室全系の動力原単位はセメントクリンカ粉砕で28～32kWh/tで、チューブミルの場合の38～45kWh/tに比べて約30%の省エネルギー効果があり、今後電力多消費産業であるセメント工場で粉砕消費電力節減の点からローラーミルの粉砕性が見直されてくるものと考えられている。

1.1.3 ローラーミル

以下にローラーミルの開発状況を述べる。このミルはローラーの回転運動に伴う遠心力や垂直荷重によつてタイヤ（ミル壁）あるいは回転テーブル上の砕料を圧縮・せん断破砕する粉砕機で、従来遠心リングローラーミルあるいはロッシェミルなどがあり、ローラーを回転テーブルに押し付ける作用はスプリングまたは油圧による。前述のほかにはすえ付け面積が少なく、騒音も低いなどの利点がある。ローラーとタイヤあるいは回転テーブルの接触状態で分類するとつぎのような種類がある。①固定破砕面（タイヤ）とローラーが垂直に接するミル：レイモンドミル（三菱重工業）、ローラーミル（栗本鉄工所）、日鉄鉦・ノイマンミル（日鉄鉦業）、イシイミル（石井粉砕機製作所）。②回転テーブルとローラーが水平に接触するミル：宇部ロッシェミル（宇部興産）、アトックスミル（F. L. SMIDTH）、アサノ型ミル（日本セメント）。③回転テーブルとローラーが斜めに接触するミル：レイモンドパウルミル（三菱重工業）、アサノサンドエース（日本セメント）。④回転テーブルとローラーが円弧状に接触するミル：IHI型ミル（石川島播磨重工業）、KVM型ミル（川崎重工業）、MPS-118ミル（バブコック日立）、OK、CM、FM各シリーズミル（神戸製鋼所）、Pfeiffer MPSミル（Pfeiffer）。⑤ローラーを用いないで大型鋼球を用いるミル：EL-70ミル（バブコック日立）、NEミル（太陽鉄工）。

1.1.4 鉦山用粉砕機⁸⁾⁹⁾

鉦山用粉砕機にも1970年ころから大型化の傾向がみられ、従来のロッドミルとボールミルの組合せによる2段階粉砕にかわつて操作性のよい大型ボールミルによる1段階粉砕が採用されるようになった。湿式粉砕で、1969～1972年にパプアニューギニアのブーゲンビル銅鉦山に1段階粉砕方式の内径5.5mの大型ボールミルが設備され、現在12台稼動している。閉回路粗粉砕にはボールミルに比べてロッドミルがすぐれているが、1982年にオーストラリアのワーズレ鉦山では神戸製鋼所製の14×20 1/2型ロッドミルが3台稼動を開始した。世界最大のロッドミルは北米鉄鉦山で用いられている15×20 1/2型であり、これがロッドミルの大きさの限界とされている。

1.1.5 自生粉砕機

自生粉砕は粉砕媒体を用いず、原石相互の衝突による圧縮、転動などにより粉砕が進行する。乾式では碎成物を空気で排出する気流排出型と、これとミル周辺排出方式を併用した周辺排出型とあり、後者の方式の太陽鉄工製 21 ft 大型エロフォールミルが飯田建材工業（栃木県）で用いられており、碎成物中の細粒は気流により、粗粒は周辺のグレートから排出される。過粉砕が少なく、粉砕比が大きいのが特徴である。このほか太陽鉄工製の乾式のミルが約 20 個所で用いられている。一方 1976 年以来神戸製鋼所製の 30 × 10 型、3 300 kW の大型オートジナスミルが 5 台ソ連のダイヤモンド鉱山で稼働している。また、1980 年以来チリのディスピュタダ銅鉱山で神戸製鋼所製の 28 × 15 型、5 200 kW の湿式セミオートジナスミル（少量のボールを粉砕媒体として用いる）が用いられている¹⁰⁾。なおオートジナスミルのスケールアップについては内田、中島の報告¹¹⁾がある。

1.2 碎石用破碎機

現在わが国では大量の建設用骨材が碎石プラントにより生産されている。詳細は省略するが、松本¹²⁾によれば従来 1 次、2 次ジョークラッシャー、インパクトクラッシャーあるいは通常型のコンクラッシャーの組合せによる方式が大勢を占めてきたが、最近圧密層圧縮破碎方式の AF クラッシャーとこれに対する給鉱を破碎する小型 2 次ジャイレトリクラッシャー（11-36 型）ならびに固定、可動双方の破碎面を曲面とした DYNAJAW クラッシャーが開発され、破碎系統が著しく簡略化され、また工事費、工期、改造の不便さ、撤去後の跡処理問題の関係から全スキッド化されるようになってきている。一方太陽鉄工、栗本鉄工所では大型チューブミルと高性能大型空気分級機を組み合わせた乾式微粉砕装置を開発しており、岩石を砕いて多量の微粉を製造するのに適している。

1.3 鉄鉱業における鉄鉱石、ペレットなどの破碎

以上では破碎機、粉砕機について述べたが、本節では碎料の性質の一つとして製鉄関係の鉄鉱石あるいはペレットの処理に関わる破碎性の研究を行つた西原¹³⁾の報告を要約して紹介する。現在わが国に輸入されている鉄鉱石は 40~50 種類にのぼり、その性状はきわめて複雑である。鉱石を鉱床と成因別に分類すると Fig. 1 の

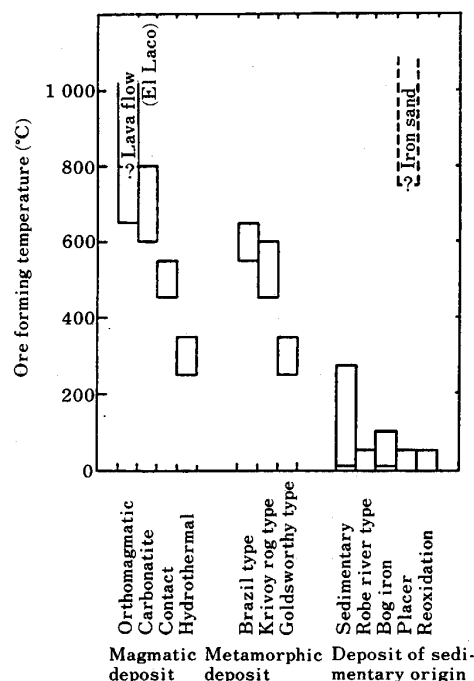


Fig. 1. Classification of iron ore deposits.

ようになる。鉱床は火成鉱床、変成鉱床、堆積鉱床に分けられる。火成鉱床は 300~800°C の高い温度で生成したもので、正岩漿、カーボナタイト、接触交代、熱水の各鉱床から成る。変成鉱床は 300~650°C の生成温度の鉱床で、動力変成、熱変成、熱水変成の作用によつてブラジル型、クリボイログ型、ゴールドワージ型に分類される。堆積鉱床は 280°C 以下の低い生成温度の鉱床で、ローブリバー型は 2 次的に生成した化学的沈殿堆積鉱床であり、砂鉄の起源は火成鉱床であるが、2 次的に堆積したもので、堆積鉱床に分類してある。鉱床の成因によつて分類した鉄鉱石のワークインデックス (W_i) は Table 1 のようで、火成鉱床では正岩漿および接触交代鉱床の鉱石の W_i はそれぞれ 19~24 kWh/t, 12~14 kWh/t (ふるい分けの目開き $P_1 = 74 \mu\text{m}$)、一次起源が火成鉱床の砂鉄の W_i は約 19 kWh/t で全般的に高い値を示す。変成鉱床ではブラジル型鉱石の W_i は 6~7 kWh/t ($P_1 = 74 \mu\text{m}$) と 19~24 kWh/t ($P_1 = 44 \mu\text{m}$) に

Table 1. Work index of iron ores and iron minerals.

Deposit	Type	W_i (kWh/t)	P_1 (μm)	Mineral	By Bond		
					Mineral	W_i (kWh/t) mean	P_1 (μm)
Magmatic	Orthomagmatic	19.6-24.1	74	Magnetite	Iron ore	12.7	74
	Contact	12.5-14.1	74	Magnetite	Magnetite	14.6	74
	Iron sand	18.7-19.1	74	Magnetite	Hematite	13.2	74
Metamorphic	Brazil	6.5-7.2	74	Hematite	Limonite	11.5	74
	do.	19.2-23.8	44	Hematite	Taconite	12.5	74
	Krivoy rog	15.0-19.0	74	Magnetite	—	—	—
	Goldsworthy	10.8-14.9	74	Hematite	—	—	—
	Sedimentary orgin	6.8-14.0	74	Hematite	—	—	—
	Robe river	10.9	74	Limonite	—	—	—

Table 2. Work index and reposed angle of agglomerates.

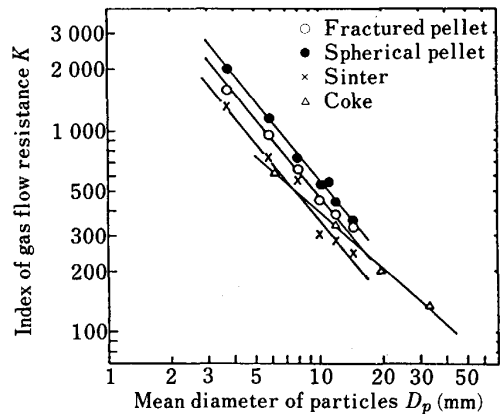
Material	W_i (kWh/t)	P_1 (μm)	Reposed angle (degree)	By Bond	
				W_i (kWh/t)	P_1 (μm)
Spherical pellet	11.4	149	25-28	8.7	149
Fractured pellet	13.7	149	28-35	10.7	74
Sinter	19.5	149	31-35	8.8	149
Coke	22.5	74	31-35	36.2	74
	40.0	74			

大別される。これはグレインサイズが 50~60 μm で、 $P_1 > 74 \mu\text{m}$ ではグレインのはく離が比較的容易に起こり、 $P_1 < 44 \mu\text{m}$ では粒子内の破断を必要とするためである。クリボイログ型、ゴールドワージ型鉱石の W_i は生成温度の低下とともに小となる。堆積鉱床では W_i は 6~14 kWh/t と比較的小さい、BOND によればマグネタイトの W_i は 14.6 kWh/t、ヘマタイトの W_i は 13.2 kWh/t、リモナイトの W_i は 11.5 kWh/t であり、鉱床の成因による鉄鉱石のワークインデックスの特徴をよく表している。

塊鉱石、焼結鉱あるいはコークスは、粒子の表面が破砕面で囲まれ、その形状も不規則であるが、ペレットは球形である。このためペレットは高炉内の中心部へと流れ込み、中央偏析を起こすと同時に、隣接する堆積層の境界面での巻込みを生ずる。Table 2¹³⁾ に示すように球形ペレットの安息角は小であるが、ペレットを破砕したいわゆる破砕ペレットの安息角は焼結鉱やコークスのそれに近い値を示す。充てん層での破砕ペレットの通気性 K と粒径 D_p との関係は Fig. 2¹³⁾ に示すように焼結鉱、コークスの圧損が低く球形ペレットの圧損は高く、破砕ペレットはその中間の値を示す。球形ペレットを破砕すると、①安息角の改善、②通気性の改善のほかに還元停滞の改善、堆積層としての安定性の改善などをもたらす。その効果は高炉操業成績からも実際に認められつつある。高炉に使用される塊鉱石、焼結鉱、ペレット、コークスなどはすべて破砕、粉碎と整粒操作を伴い、これらの技術の強化とともに製鉄技術が発展してきたともいえるので、将来ともこれらの技術は製鉄業の発展上欠かせないものである。

1.4 粉碎媒体とライナ

ボールミル粉碎用のボールとして、従来鑄造ボール(チルドボール)や鍛造ボール(スチールボール)が用いられてきた。チルドボールはスチールボールに比べて硬いながらも、スチールボールは靱性はあるが硬さが低く、摩耗量が多いという欠点があった。これを改善したボールやシルベップが開発され用いられている(日本燃料の S あるいは SS ボールおよびシルベップ)。これらは従来のチルドボール(主として白鉄)の硬さを生かし、中心部の孔をなくして強さを増したもので、化学成分は TC: 2.90~3.80, GC < 0.30, Si: 0.20~1.40, Mn < 0.70, P < 0.50, S < 0.30, Cr: 1.20~2.70 であり、

Fig. 2. Relation between K and D_p .

パーライトとクロームセメンタイトの組織から成り、クロームセメンタイトはロックウェル C スケール 65 以上の硬い相で、パーライト組織は特に靱性に富み、これが良好な結果をもたらしている。一方、鉄分等の混入を防ぐ高純度粉碎には従来天然産のけい石やめのうを用い、いわゆるストーンライニングとストーンボールが用いられてきたが、材料の入手困難などのため、これにかわるものとして高純度アルミナボール、ライナあるいはポットが製造され用いられている。ボールは大きいもので 60~80 mm ϕ 、比重は 3.6~3.8 (日本化学陶業、日本特殊陶業など)。また高純度、高靱性粉碎媒体としてジルコニア・セラミックボールも作られている(品川白煉瓦など)。

特殊形状のボールミルライナとして角形スパイラルライニングが開発されている¹⁴⁾。従来の円型ライニングではボールの運動がミルの回転軸方向に見て変化がない一定の軌跡を画くが、このライニングを用いると周期的に軌跡が変化してボールの運動の活性を高め、同時にボールの持上げ高さを大として粉碎がより有効に行われるようにしたものである(大同特殊鋼 ASL ミル、オーストリア WAAGNER-BIRO 社から導入)。

1.5 超微粉碎

振動ボールミル、ピンミル、ハンマーミル、スクリーンミル等のはん用粉碎機ならびに低温粉碎機等は紙幅の関係で割愛し、つぎに超微粉碎について述べる。粉碎の分野での明確な定義はないが、超微粉碎は数ミクロン

Table 3. Classification of ultra-fine grinding machines.

Grinding machine		Characteristic
High speed rotational impact and shearing mills	Pin mills	Fed particles are ground by pins on rotating discs.
	Hammer mills	Fed particles are ground by swing hammers rotating at high speed.
	Axial flow mills	Fed particles are conveyed by axial air stream and ground by rotating shaft having plates for impact.
Ball mills	Tumbling ball mills	Ball mills in a narrow sense including pot mills, tube mills, conical mills, rod mills, etc.
	Vibrating ball mills	Fed particles are ground by vibrating cylindrical mill with grinding media.
	Planetary ball mills	Ball mills with centrifugal force intensified by revolving and rotating mill pots.
Jet mills	Stream suction type	Fed particles are sucked in and ground in an ultra-sonic jet stream in a nozzle or in an ultra-sonic one circling virtually or horizontally.
	Collision type	Fed particles are accelerated by jet stream and ground by collision with plates or other particles accelerated by another stream. (Nozzles are faced each other.)
	Combination type	Combination of stream suction type and collision type.
Media agitating mills	Tower mills, mixing tank type of mills, flow tube type of mills annular tube type of mills.	

メートルからサブミクロンサイズの碎成物を作る操作で、乾式法と湿式法がある。Table 3は茂呂、坂本、岩田¹⁵⁾による超微粉砕機の種類で、在来の粉砕機によつても超微粉砕を行うことができるし、最近では摩砕により超微粉砕を行う各種の媒体攪拌型粉砕機が考案されている。この碎成物の粒径はいわゆる粉砕限界に達する領域でもあるので、乾式粉砕では効果的粉砕助剤を選択することが重要であり、湿式でも媒液あるいは分散剤の影響が大である。長時間粉砕を行うときにはミルの材質による碎成物の汚染にも留意せねばならない。超微粉砕に用いられる各種の粉砕機については既にまとめられた文献¹⁶⁾がある。また最近における超微粉砕研究例を参考文献 17)~22)に掲げた。

2. 石炭の材料力学的諸性質と破碎性²³⁾

石炭の破碎性は一般にハードグロブ粉砕能指数 *HGI* で表される。この指数はボールレースミルの一種であるハードグロブミルを用いて一定条件のもとに石炭試料を粉砕し、碎成物中の微粉の量から算出するもので、*HGI* にはハードグロブミルの構造的な要因と碎料粒子の物理的な要因の二つが含まれていると考えられる。*HGI* は石炭の石炭化度を表す諸物性と深く関連していることが知られている。Fig. 3は実験に用いた試料の *HGI* と揮発分 *VM* の関係を Fig. 4は *HGI* と水素炭素比 *H/C* の関係を示したものである。*VM* または *H/C* が大きくて、石炭化度の低い石炭ほど *HGI* が小さく破碎性が悪い傾向が見られる。相関係数を求めて検定するとこれらの物性と *HGI* の間には危険率 1% の水準で相関関係が認められる。以下に石炭単粒子の破碎特性

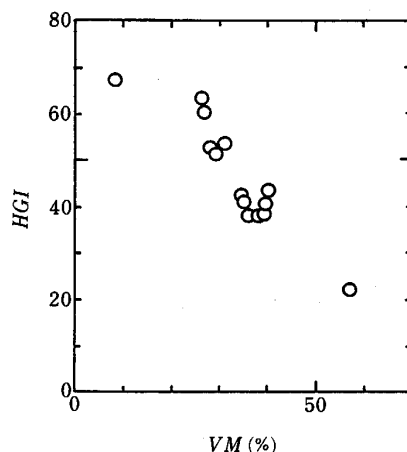


Fig. 3. Relation between Hardgrove grindability index, *HGI* and volatile matter content, *VM* of coal.

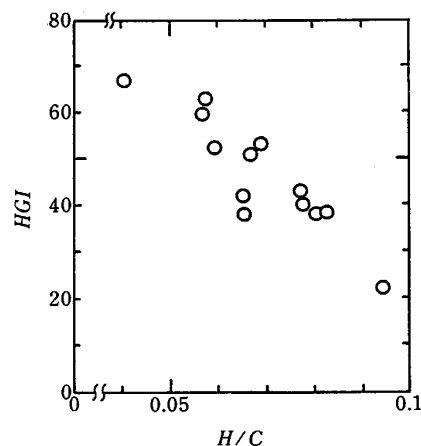


Fig. 4. Relation between Hardgrove grindability index, *HGI* and a ratio *H/C* of coal.

Table 4. Properties of coals.

Samples	<i>HGI</i>	<i>VW</i> (%)	<i>FC</i> (%)	<i>FR</i>	<i>H/C</i>
Miike	38	38.4	39.3	1.02	0.0828
Taiheiyo	40	40.1	49.8	1.24	0.0777
Bujun	22	57.2	39.7	0.69	0.0943
Daido	52	28.1	61.5	2.19	0.0592
Yarrabee	67	8.7	83.5	9.60	0.0405
Daiyon	38	36.1	57.9	1.60	0.0653
Bays water	42	34.8	59.4	1.71	0.0651
Ipswich	51	29.6	52.6	1.77	0.0670
A	53	31.1	52.6	1.69	0.0690
B	63	26.4	59.0	2.23	0.0573
C	60	26.8	62.3	2.32	0.0570
D	43	40.1	54.8	1.37	0.0773
E	38	39.5	47.0	1.19	0.0808
F	41	35.1	56.7	1.62	—

を調べ、*HGI* と石炭化度を表す諸物性の関係を検討してみる。

2.1 試料, 試験片ならびに実験方法

石炭化度の異なる 2 種類の国内炭と 12 種類の外国

炭, 合計 14 種類の試料を準備した. Table 4 に揮発分 *VM*, 固定炭素量 *FC*, 燃料比 *FR*, 水素炭素比 *H/C* と *HGI* の値を掲げた. オーストラリア産のヤラビー炭は, 試料の中では最も石炭化度の進んだ無煙炭で粉砕性が最もよい石炭である. 中国産の撫順炭は試料の中では石炭化度が最も低く, 層構造の発達していない, いわゆる目無炭で粉砕性が最も悪い石炭である. これらの試料から公称直径 2.0 cm の球形試験片と公称直径 1.5 cm, 長さ 3.0 cm の円柱形試験片を 1 試料当たり平均 21 個作製した. なお球形試験片は全試料につき作製したが, 円柱形試験片を作るには大塊を必要とするので, 大塊を準備できた 9 試料についてだけ作製した. 試験片の作製方法, 寸法精度等は既報²⁴⁾に詳述したので省略する.

球形試験片をインストロン型材料試験機を用いて常速荷重下で圧縮破砕し, 破壊荷重 L_f (N) の値から平松ら²⁵⁾ の式 (1) を用いて球圧壊強度 S_s (Pa) を求めた. この球圧壊強度は引張強度に相当する.

$$S_s = 2.8L_f / \pi d^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここに d (m) は上下着力点間の距離であるが, 近似的に試験片の直径とした. また円柱形試験片を用いて, 同じく常速荷重下で圧縮破砕し, 破壊荷重 L_f (N) から次式 (2) を用いて圧縮強度 S_c (Pa) を求めた.

$$S_c = 4L_f / \pi d_c^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここに d_c (m) は円柱の直径である. またひずみゲージをはり付けた円柱形試験片を用いて圧縮破砕実験を行い, 破壊荷重の 40% の荷重が作用した点の荷重 L (N) と縦ひずみ ϵ_1 の値からヤング率 Y (Pa) を, 縦ひずみと横ひずみ ϵ_2 の値からポアソン比 ν (-) をそれぞれ式 (3) と式 (4) を用いて求めた.

$$Y = L / \epsilon_1 \dots\dots\dots (3)$$

$$\nu = \epsilon_2 / \epsilon_1 \dots\dots\dots (4)$$

なお試料の加圧板には研磨したタングステンカーバイド板を用いた. そのヤング率とポアソン比はそれぞれ 5.93×10^{11} Pa, 0.21 である.

2.2 石炭単粒子の破壊特性と *HGI*

Table 5 に石炭単粒子の破壊特性として S_s , S_c , Y , ν と *HGI* の値を掲げた. Fig. 5 は S_s と *HGI*, Fig. 6

Table 5. Mechanical properties of coals.

Samples	<i>HGI</i>	S_s (Pa)	S_c (Pa)	Y (Pa)	ν (-)
Miike	38	3.03×10^6	3.19×10^7	1.28×10^{10}	0.37
Taiheiyō	40	8.94×10^5	6.52×10^6	6.12×10^9	0.39
Bujun	22	6.41×10^6	6.99×10^7	5.73×10^9	0.39
Daido	52	7.20×10^5	7.68×10^6	2.38×10^9	0.29
Yarrabee	67	1.22×10^6	6.27×10^6	4.77×10^9	0.29
Daiyon	38	1.62×10^6	—	—	—
Bays water	42	2.39×10^6	—	—	—
Ipswich	51	8.72×10^5	—	—	—
A	53	1.43×10^6	—	—	—
B	63	1.25×10^6	2.28×10^7	4.80×10^9	0.29
C	60	1.47×10^6	2.29×10^7	3.63×10^9	0.31
D	43	1.44×10^6	—	—	—
E	38	1.70×10^6	3.90×10^7	4.27×10^9	0.37
F	41	1.83×10^6	3.95×10^7	3.94×10^9	0.33

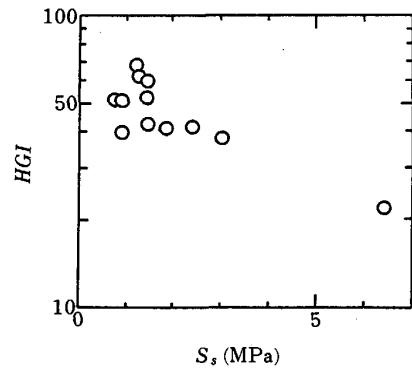


Fig. 5. Relation between Hardgrove grindability index, *HGI* and sphere compressive strength, S_s of spherical specimen.

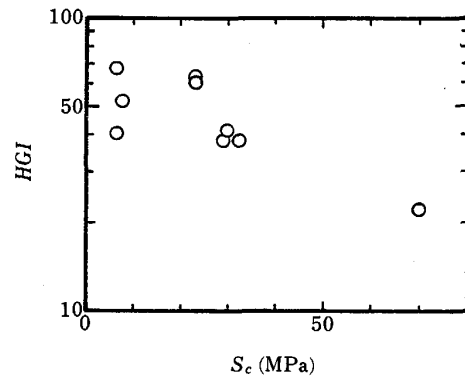


Fig. 6. Relation between Hardgrove grindability index, *HGI* and compressive strength, S_c of cylindrical specimen.

は S_c と *HGI* の関係を示したものである. ばらつきはあるが強度が大となるほど *HGI* は小で, 砕成物中の微粉の量が少なくなる傾向がみられる. 粒子の破壊荷重に比較して粒子に作用する力がかなり大きい場合には粒子の破壊確率はほぼ 1 となるから, 強度が大なるほど破壊までに蓄えられるひずみエネルギー, すなわち破砕エネルギーが大となり, 砕成物中の微粉の量が多くなる. 逆に粒子の破壊荷重に比較して粒子に作用する力が小さい場合には, 強度が大であるほど粒子の破壊確率が小さくなるから, 砕成物中の微粉の量が少なくなる. したがって石炭の強度が大であるほど *HGI* が小さく, 微粉の量が少ないということは, ミル内で力が作用した粒子の破壊確率が 1 より小さいことを意味している. ただし厳密には強度測定用の試験片と *HGI* 測定に用いる石炭粒子のサイズが異なるので, 強度の粒子径依存性を検討しなければならない.

Fig. 7 には ν と *HGI* の関係を示した. ν が大きい材料ほど塑性的と考えられ, 塑性が大きい石炭ほど粉砕性

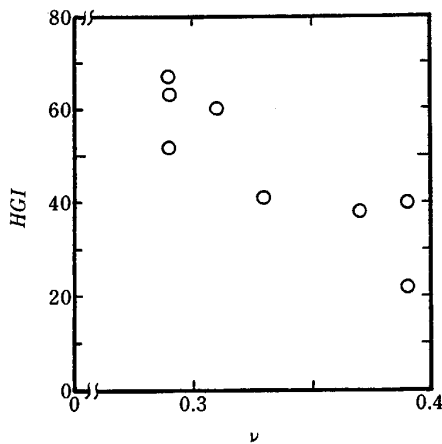


Fig. 7. Relation between Hardgrove grindability index, *HGI* and Poisson's ratio, ν of cylindrical specimen.

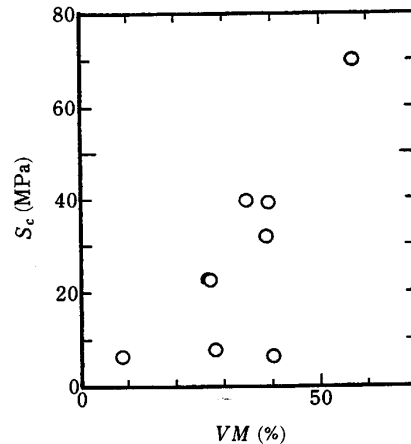


Fig. 9. Relation between compressive strength, S_c and volatile matter content, *VM* of coal.

Table 6. Correlation between *HGI* and mechanical properties of coals.

Properties	Number of data	Coefficient of correlation	Inspection level
$\log HGI-S_s$	14	-0.795	0.01
$\log HGI-S_c$	9	-0.798	0.02
$HGI-Y$	9	-0.345	—
$HGI-\nu$	9	-0.884	0.01

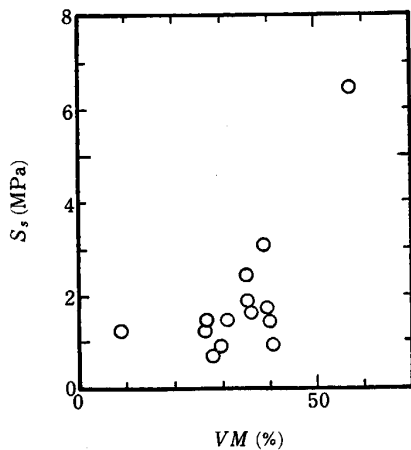


Fig. 8. Relation between sphere compressive strength, S_s and volatile matter content, *VM* of coal.

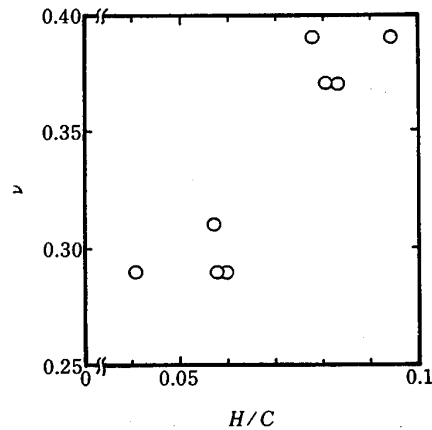


Fig. 10. Relation between Poisson's ratio, ν and a ratio H/C of coal.

Table 7. Correlation between mechanical properties and *VM*, H/C .

Properties	Number of data	Coefficient of correlation	Inspection level
S_s-VM	14	0.687	0.01
S_s-H/C	13	0.636	0.02
S_c-VM	9	0.762	0.05
S_c-H/C	8	0.738	0.10
$\log Y-VM$	9	0.317	—
$\log Y-H/C$	8	0.485	—
$\nu-VM$	9	0.840	0.01
$\nu-H/C$	8	0.914	0.01

が悪い。これは粒子に加えられたエネルギーが塑性変形に消費され、粉砕に有効に使われなくなるためであろう。Table 6 はこれらの値と *HGI* との相関係数を求めて検定した結果で、ヤング率を除いて相関関係が認められる。

2.3 石炭化度による単粒子の破碎性

Fig. 8 は S_s と *VM* の関係、Fig. 9 は S_c と *VM* の関係を示したもので、ばらつきはあるが揮発分が大きいほ

ど強度が大となる傾向がみられる。Fig. 10 は ν と H/C の関係を示したもので、 H/C が増大するとともに ν も大となり、石炭化度の低いものほど強度が大であり、またポアソン比が大きいことからより塑性的になると考えられる。Table 7 には石炭単粒子の破碎性と石炭の *VM*, H/C の相関関係を検定した結果を掲げた。

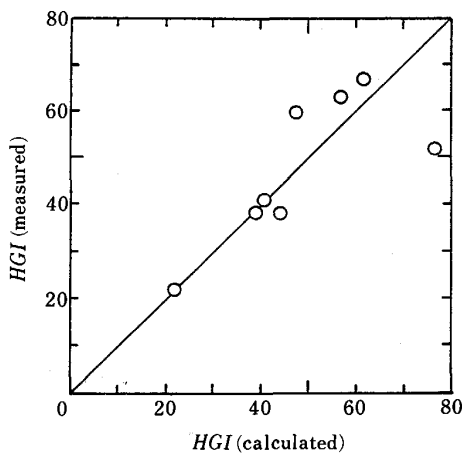


Fig. 11. Comparison of Hardgrove grindability index calculated by using Eq. (5) with measured one.

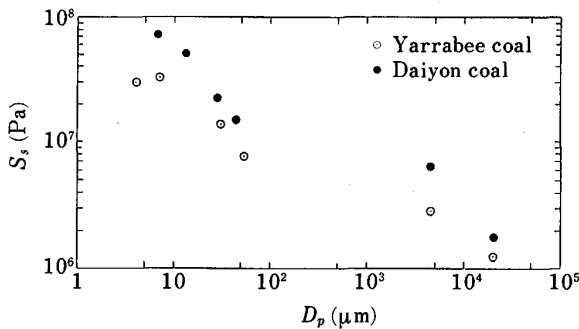


Fig. 12. Variation of sphere compressive strength, S_s with particle size, D_p of coals.

2.4 HGIの次元解析

石炭の材料力学的諸性質が HGI にどのように寄与しているかを調べるために、 π 理論に基づき次元解析を行って次式(5)の関係をえた。

$$HGI = 5.24 \times 10^4 S_s^{-0.99} \cdot S_c^{-0.06} \cdot Y^{0.35} \cdot (1 - \nu^2)^{-0.39} + 13 \pm 3.94 \dots \dots \dots (5)$$

単位は SI ユニットである。上式から HGI に最も寄与しているのは球圧壊強度 S_s であり、ハードグロブミル内の破碎機構はおもに比較的球形な粒子の引張破壊であると推定される。Fig. 11 は HGI の実測値と式(5)による計算値の関係を示したもので、大部分は良好に一致しているが、一部一致していないものもみられる。この原因の一つとして強度の粒子径依存性が考えられる。粒子径による強度の変化が顕著な場合式(5)の導出に用いた試験片と HGI 測定用粒子の強度がかなり異なるため、特にマクロクラックの多い石炭では、強度測定に用いた試験片(15 および 20 mm)には低い応力レベルで破壊の根源となりうるマクロクラックが含まれやすく、強度が小さいのに対して、HGI 測定用試料の粒子(0.59

~1.19 mm)にはマクロクラックがほとんど含まれず別な欠陥が破壊の根源となり、強度が大きくなるためと考えられる。石炭粒子の球圧壊強度の粒子径依存性に関する測定結果の数列を Fig. 12 に示す。ヤラビー炭とダイヨン炭の場合で、まだ測定は完結していないが粒子径の減少に伴って球圧壊強度が変化する様子を知ることができる。1 測点当たり 50~100 個の粒子についての測定結果の平均値をプロットしたものである。著者の一人が既に報告²⁶⁾したように数種類のガラス質ならびに天然産鉱物試料の粒子径 40 μm ~10 cm の試験片の球圧壊強度と粒子体積の関係はガラス質試料では両対数紙上で1本の直線で表されるが、天然産鉱物試料では数本の折れ線で表される。これは粒子径の範囲によつて破壊の根源となる欠陥が異なるためと考えられる。石炭試料の場合も類似の傾向があるものと考えられるが、微粒域の粒子径による球圧壊強度の変化はより複雑である。Fig. 12 で粒子径 5 mm 以上はインストロン型材料試験機により、また粒子径 100 μm 以下の微小試験片は超微小ピッカース硬度計を改造した荷重試験機により常速荷重下で測定を行ったもので、現在中間の粒子径 5 mm~100 μm の試験片の球圧壊強度を精度よく測定できる装置がないので将来機会をえてこの中間領域の測定を行いたいと考えている。ここには省略したが、石炭以外の数種類の天然産鉱物粒子についても同様の測定を行った。粒子の圧縮破壊が粒子径の減少に伴って弾性的破壊から塑性的破壊へと移行するが、その遷移粒子径が数ミクロンであることも確かめている。

3. コークスの強度と破碎性

コークスの性質はその原料炭の性質に強く依存しており、強度を制御する目的で性質の異なる多種類の原料炭を配合して用いているので、高強度コークスを製造するためには、配合された原料炭の物性と生成コークスの性質、特に強度との関係を明らかにすることが必要である。コークスを一種の多孔体として捕えると、強度は気孔の構造と基質の強度の2要因に依存しており、またコークスの場合原料炭物性としては揮発分含有率あるいは反射率および軟化溶解性がこの両者に影響を及ぼすものと考えられる。以下に単粒子破碎の立場からこれらの関係を実験的に検討した結果を要約して述べ、合わせてコークスの強度と気孔の構造の関係、コークス製造時における装入炭の充てん密度などがコークスの性質に及ぼす影響、コークスの強度の実用的指標であるドラムインデックスの内容を検討した結果を紹介する²⁷⁾²⁸⁾。

3.1 試料

コークスの強度と原料炭の揮発分含有率ならびに反射率の関係を調べるために、揮発分含有率と反射率の異なる4種類の配合原料炭から製造されたコークスにつき実験を行った。つぎに原料炭の軟化溶解性指数の異なる4

Table 8. Properties of samples and raw coals.

Kinds of samples	Specific gravity λ (-)	BOND's work index W_{ic} (kWh/t)	Hardgrove index GI_c (-)	Young's modulus Y_1 (Pa)	Poisson's ratio ν (-)	Drum index DI_{15}^{30} (%)	Volatile matter $(VM)_{d.a.f.}$ (%)	Reflectance R_0 (%)
Coke A	1.78	6.27	171	4.73×10^9	0.177	93.9	30.0	1.07
Coke B	1.76	6.35	169	5.47×10^9	0.185	93.4	18.8	1.57
Coke C	1.81	5.23	203	3.15×10^9	0.181	92.2*	28.1	1.12
Coke D	1.85	3.06	333	2.71×10^9	0.205	83.6	39.8	0.80

* Calculated value from DI_{15}^{30}

Table 9. Properties of samples.

Kinds of samples	Coke					Raw coal		
	Specific gravity (-)	Hardgrove index GI (-)	Young's modulus Y (Pa)	Poisson's ratio ν (-)	Drum index DI_{15}^{30} (%)	MF (ddpm)	Volatile matter $(VM)_{d.a.f.}$ (%)	Reflectance R_0 (%)
Coke No. 1	1.86	69.5	7.35×10^4	0.195	87.9	87	27.9	1.15
Coke No. 2	1.84	68.4	6.79×10^9	0.196	93.4	403	29.2	1.15
Coke No. 3	1.83	66.7	6.62×10^9	0.211	94.1	710	29.7	1.15
Coke No. 4	1.88	66.7	6.50×10^9	0.198	93.6	1151	30.1	1.15

Table 10. Contents of samples.

Case No.	1	2	3	4
Water contents of charged coal (%)	7	11	7	11
Bulk density (t/m^3)	0.85	0.77	0.85	0.77
Coking temperature ($^{\circ}C$)	950	1050	950	1050
Blending ratio (%)				
Peak down	20	20	—	—
Coal cliff	15	15	5	5
Goonyella	15	15	10	10
KJ-14	10	10	—	—
Kairan	10	10	5	5
Natsume-shyo	5	5	10	10
Work worth	—	—	30	30
Liddel	15	15	30	30
Miike	10	10	10	10
Content of volatile matter (%)	28	28	35	35
Reflectance (%)	1.12	1.12	0.87	0.87
Maximum fluidity (ddpm)	500	500	550	550

種類の配合原料炭から製造したコークスにつき実験を行った。実験に供した8種類のコークス試料の物理的、材料力学的性質と原料炭の物性値を Table 8, 9 に掲げた。Coke A~D は揮発分含有率と反射率の影響検討のための試料で、Coke No. 1~No. 4 は軟化溶解性の影響検討用の試料である。Coke A~D については水銀圧入法により気孔容積分布も測定した。コークス炉内位置と原料炭かさ密度、揮発分含有率の影響を検討するために用いた4種類のコークス、Case 1~4 の原料炭の配合状態、かさ密度、揮発分含有率などの値を Table 10 に掲げた。コークス試料はコークス炉内位置によつて、炉壁近傍(頭, Head), 炉中央(足, Foot), とその中間部(胴, Body)に分けた。画像解析処理装置による気孔構造のコークス強度に及ぼす影響には原料炭の揮発分含有率と反射率が同じで軟化溶解性指数が大きく異なる Coke

No. 1 と No. 4 を用い、また原料炭のかさ密度と揮発分含有率の異なる Case 1~4 についても同様の検討を行った。ドラムインデックスの検討には Coke A~D と Coke No. 1~No. 4 の8種類の試料を用いた。

3.2 試験片

前項の石炭の場合と同様球形試験片により球圧壊強度を、また円柱形試験片により圧縮強度を求めた。原料炭の揮発分含有率あるいは反射率および軟化溶解性とコークスの性質との関係を検討するためには、強度の試験片体積依存性を調べるために6種類の寸法の球形試験片と同じく6種類の寸法の円柱形試験片を準備した。詳細は省略するが球形試験片は Coke A~D については公称直径 0.6~3.0 cm の試験片合計 1143 個、Coke No. 1~No. 4 については合計 960 個、円柱形試験片は直径×長さを 1×2 とし、Coke A~D については公称寸法 $0.5 \times 1.0 \sim 3.0 \times 6.0$ cm 合計 1056 個、Coke No. 1~No. 4 については合計 939 個準備した。原料炭のかさ密度、揮発分含有率ならびにコークス炉内位置とコークスの性質の関係の検討には公称寸法 1.0×2.0 cm の円柱形試験片を 443 個用いた。試験片の総数は 4541 個であり、1 測点当たり平均 42 個の試験片を用いて平均値を求めた。ヤング率、ポアソン比の測定には公称寸法 2.0×4.0 cm あるいは 1.5×3.0 cm の円柱形試験片を用いた。原コークス塊からの試験片切出しの方向はランダムとした。

3.3 実験方法

実験に用いた試験片は全部 JIS 少量法 (JIS K 2151-1972) に従つて見かけ密度を測定して次式から気孔率を求めた。コークスの真密度は試料の一部を 400 メッシュ ($37 \mu m$) 以下に粉砕してピクノメーター法で求めた。

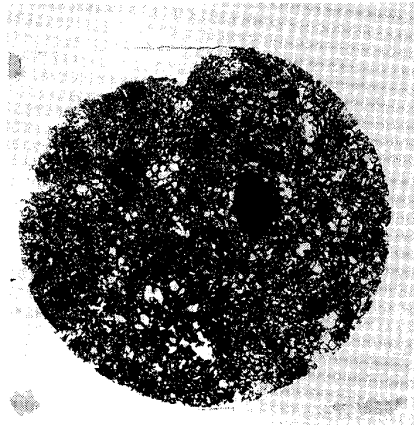


Photo 1. Sliced sample of Cylindrical Specimen possessing higher strength.

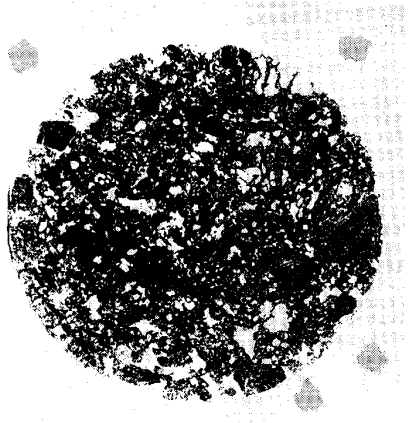


Photo 2. Sliced sample of Cylindrical Specimen possessing lower strength.



Photo 3. Sliced sample of spherical Specimen possessing higher strength.



Photo 4. Sliced sample of spherical Specimen possessing lower strength.

$$\phi = 1 - (\rho_a / \rho) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 ϕ は気孔率、 ρ_a は見かけ密度、 ρ は真密度である。その他の測定は前項の石炭の場合と同じである。球形試験片圧縮破壊時までに蓄えられる試験片単位質量当たりのひずみエネルギー、すなわち比破碎エネルギー (E/M)。ならびに円柱形試験片のそれ (E/M)。は、試験片圧縮時の荷重-変位曲線を図積分して求めたひずみエネルギー E と試験片の質量 M とから算出した。コークスの強度に及ぼす気孔の寸法とその分布ならびに形状の影響はつぎの方法で調べた。まず基質の強度が大きく異なると考えられる Coke No. 1 と No. 4 の円柱形試験片 (公称寸法 2.5×5.0 cm) と球形試験片 (公称直径 3.0 cm) の中で強度の大きなものと小さなものを選び出し、载荷方向に垂直な断面 (球形試験片の場合は破断面に垂直な断面とした) の厚み数+ミクロンの薄片試料を作り、つぎの四つのパラメーターを画像解析処理装置 (LUZEX 500) を用いて測定した。画像解析処理時の画面分解能は $40 \mu\text{m}$ であった。1) 試料断面における気孔の占める面積の割合、2) 気孔断面の面積 A 、3) 気

孔断面の周囲長 PM 、4) 気孔断面の形状係数 SF 。ここで気孔断面の複雑さを表す形状係数としてはつぎの式 (7) で表される円形度を用いた。

$$SF = (PM)^2 / (4 \pi A) \dots\dots\dots (7)$$

これは円の場合に最小値の 1 となり、周辺が複雑になるほど大きな値をとる。Photo. 1, 2 は円柱形試験片から作った薄片試料の拡大写真、Photo. 3, 4 は球形試験片から作った薄片試料の拡大写真で、黒い部分はコークスの基質、白い部分は気孔である。つぎに Case 1~Case 4 の 4 試料をそれぞれコークス炉の炉内位置によつて

頭, 胴, 脚に分けた合計 12 種類の試料から, それぞれについて強度の大きい試験片と小さい試験片を選び出し, 前同様に画像解析処理して各パラメーターを求めた. なお形状係数については気孔が小さい場合には測定精度が低下することを考慮して 120 μm 以下の気孔を除外した場合についても測定を行った.

3.4 原料炭の揮発分含有率ならびに反射率の影響

多孔体の破壊強度の気孔率依存性について現在までに提案されている実験式の中で多くの種類の多孔体について適用可能であり, かつ気孔率の適用範囲が最も広いといわれるのは RYSHKEWITH の提案した次式²⁹⁾である.

$$S = S_0 \exp(-b\phi) \dots\dots\dots (8)$$

ここに, S_0 は $\phi = 0$ における強度, b は正の定数である. 一方, 材料の強度の試験片体積依存性はつぎの WEIBULL³⁰⁾ の式(9)で表される.

$$S_0 = KV^{-1/m} \dots\dots\dots (9)$$

ここに, V は試験片体積, m は WEIBULL の均一性係数で, 材料の構造上の均一さを表す値であり, K は定数である. 以上の両式を組み合わせると多孔体の強度の気孔率依存性ならびに試験片体積依存性を表す式(10)がえられる.

$$S = KV^{-1/m} \exp(-b\phi) \dots\dots\dots (10)$$

実験の結果球圧壊強度 S_s , 圧縮強度 S_c と気孔率の関係についてよく式(10)が成立し, K, m, b の値を原料炭の揮発分含有率 $(VM)_{d.a.f.}$ ならびに反射率 $\overline{R_0}$ の関数として表すことができた. それらを次式(11), (12)に示す.

$$\left. \begin{aligned} S_s &= KV^{-1/m} \exp(-b\phi) \quad (\text{Pa}) \\ K &= -2.05 \times 10^6 (VM)_{d.a.f.} + 9.32 \\ &\quad \times 10^7 \pm 2.63 \times 10^6 \\ m &= -0.155 (VM)_{d.a.f.} + 8.85 \pm 0.1 \\ b &= -0.151 (VM)_{d.a.f.} + 8.86 \pm 0.1 \\ \\ K &= 5.08 \times 10^7 \overline{R_0} - 2.47 \times 10^7 \end{aligned} \right\} \dots\dots (11)$$

$$\left. \begin{aligned} &\pm 3.56 \times 10^6 \\ m &= 4.23 \overline{R_0} - 0.49 \pm 0.074 \\ b &= 3.86 \overline{R_0} - 0.128 \pm 0.170 \\ 0.238 &\leq \phi(-) \leq 0.748, \\ 0.113 &\leq V(\text{cm}^3) \leq 14.1 \\ 18.8 &\leq (VM)_{d.a.f.}(\%) \leq 39.8, \\ 0.80 &\leq \overline{R_0}(\%) \leq 1.57 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} S_c &= KV^{-1/m} \exp(-b\phi) \quad (\text{Pa}) \\ K &= -3.74 \times 10^7 (VM)_{d.a.f.} + 1.76 \\ &\quad \times 10^9 \pm 2.73 \times 10^7 \\ m &= -0.691 (VM)_{d.a.f.} + 32.1 \pm 0.64 \\ b &= -0.146 (VM)_{d.a.f.} \pm 12.4 \pm 0.04 \end{aligned} \right\} \dots\dots (12)$$

$$\left. \begin{aligned} K &= 9.56 \times 10^8 \overline{R_0} - 4.20 \times 10^8 \\ &\quad \pm 4.46 \times 10^7 \\ m &= 19.3 \overline{R_0} - 10.1 \pm 0.32 \\ b &= 3.86 \overline{R_0} + 3.71 \pm 0.10 \\ 0.238 &\leq \phi(-) \leq 0.748, \\ 0.125 &\leq V(\text{cm}^3) \leq 39.5 \\ 18.8 &\leq (VM)_{d.a.f.}(\%) \leq 39.8, \\ 0.80 &\leq \overline{R_0}(\%) \leq 1.57 \end{aligned} \right\}$$

$(E/M)_s, (E/M)_c$ も式(10)の実験式で表すことができ, K, m, b の値も同様に原料炭の $(VM)_{d.a.f.}$ あるいは $\overline{R_0}$ の関数として表すことができたが, これらは省略する.

3.5 原料炭の軟化溶解性の影響

原料炭の軟化溶解性のコークスの強度に及ぼす影響については, 式(10)の係数の中で基質の強度に関連した係数 K に対する影響のみを検討した. それは第1に原料炭の軟化溶解性は基質の強度に強く影響すると考えられ, 第2に試料の気孔率の範囲が狭いので式(10)の係数 b の値を精度よく求めることができないためである. そ

Table 11. Properties of sample and parameters of pore measured by image-analyzer.

Sample	Cylinder		Sphere	
	No. 1-1	No. 1-2	No. 1-3	No. 1-4
Strength S (Pa)	7.55×10^6	2.89×10^7	8.72×10^5	5.76×10^6
Strength calculated by empirical formula S' (Pa)	1.04×10^7	2.05×10^7	2.11×10^6	2.76×10^6
Porosity $\phi(-)$	0.490	0.407	0.452	0.392
Fraction of cross sectional area of pore at cross section of specimen (%)	22.7	18.3	14.2	10.7
Cross sectional area of pore (mm ²)	Average s. d. 3.69×10^{-2} 1.65×10^{-1}	2.07×10^{-2} 0.98×10^{-1}	2.59×10^{-2} 0.88×10^{-1}	1.45×10^{-2} 0.32×10^{-1}
Perimeter of cross section of pore (mm)	Average s. d. 6.07×10^{-1} 1.21	5.20×10^{-1} 1.00	5.12×10^{-1} 0.75	4.46×10^{-1} 0.60
Shape factor of cross section of pore (-)	Average s. d. 1.52 0.84	1.54 0.95	1.47 0.61	1.51 0.82

Table 12. Properties of sample and parameters of pore measured by image-analyzer.

Sample	No. 1-1	No. 1-2	No. 4-1	No. 4-2
Compressive strength S_c (Pa)	7.55×10^6	2.89×10^7	7.74×10^6	3.09×10^7
Compressive strength calculated by empirical formula S_c' (Pa)	1.14×10^7	2.05×10^7	1.24×10^7	1.78×10^7
Porosity ϕ (-)	0.490	0.407	0.509	0.464
Fraction of cross sectional area of pore at cross section of specimen (%)	26.7	22.7	37.9	33.1
Cross sectional area of pore (mm ²) Average s. d.	2.57×10^{-2} 1.19×10^{-1}	1.56×10^{-2} 1.01×10^{-1}	2.51×10^{-2} 3.10×10^{-1}	2.27×10^{-2} 1.32×10^{-1}
Perimeter of cross section of pore (mm) Average s. d.	4.81×10^{-1} 8.59×10^{-1}	3.81×10^{-1} 2.20×10^{-1}	4.86×10^{-1} 9.64×10^{-1}	4.60×10^{-1} 7.09×10^{-1}
Shape factor of cross section of pore (-) Average s. d.	1.42 0.58	1.40 0.59	1.41 0.59	1.42 0.63

Table 13. Young's modulus, Poisson's ratio, compressive strength and porosity of samples.

Sample	Porosity ϕ (-)	Young's modulus Y (Pa)	Poisson's ratio ν (-)	Compressive strength S_c (Pa)
1	Head	1.53×10^{10}	0.205	$2.20 \times 10^7 \pm 7.44 \times 10^6$
	Body	1.79×10^{10}	0.216	$1.97 \times 10^7 \pm 7.15 \times 10^6$
	Foot	7.19×10^9	0.218	$1.60 \times 10^7 \pm 5.27 \times 10^6$
2	Head	1.11×10^{10}	0.310	$1.67 \times 10^7 \pm 6.89 \times 10^6$
	Body	8.08×10^9	0.211	$1.88 \times 10^7 \pm 6.26 \times 10^6$
	Foot	4.94×10^9	0.274	$1.23 \times 10^7 \pm 5.52 \times 10^6$
3	Head	5.81×10^9	0.219	$1.76 \times 10^7 \pm 7.50 \times 10^6$
	Body	8.10×10^9	0.273	$1.67 \times 10^7 \pm 5.40 \times 10^6$
	Foot	5.62×10^9	0.209	$1.49 \times 10^7 \pm 5.66 \times 10^6$
4	Head	4.72×10^9	0.216	$1.70 \times 10^7 \pm 4.77 \times 10^6$
	Body	5.33×10^9	0.181	$2.09 \times 10^7 \pm 7.16 \times 10^6$
	Foot	3.36×10^9	0.202	$1.32 \times 10^7 \pm 4.96 \times 10^6$

ここで係数 b , m の値は前項で求めた実験式を適用しうるものとして原料炭の $(VM)_{d.a.f.}$ あるいは \bar{R}_0 から計算によつて求めた. S_s , S_c , $(E/M)_s$, $(E/M)_c$ と軟化溶解性指数 (MF) の関係も式(10)の実験式で整理することができたので, 一例として S_s の場合を述べると次式(13)のようである.

$$\begin{aligned}
 S_s &= KV^{-1/m} \exp(-b\phi) \quad (\text{Pa}) \\
 K &= 6.86 \times 10^3 (MF) + 2.84 \times 10^7 \\
 &\quad \pm 9.60 \times 10^5 \\
 m &= -0.155 (VM)_{d.a.f.} + 8.85 \pm 0.10 \\
 b &= -0.151 (VM)_{d.a.f.} + 8.68 \pm 0.10 \\
 m &= 4.23 \bar{R}_0 - 0.49 \pm 0.074 \\
 b &= 3.86 \bar{R}_0 - 0.128 \pm 0.170 \\
 0.238 &\leq \phi(-) \leq 0.748, \\
 0.113 &\leq V(\text{cm}^3) \leq 14.1 \\
 18.8 &\leq (VM)_{d.a.f.}(\%) \leq 39.8, \\
 0.80 &\leq \bar{R}_0(\%) \leq 1.57 \\
 87 &\leq (MF)(\text{ddpm}) \leq 1151
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

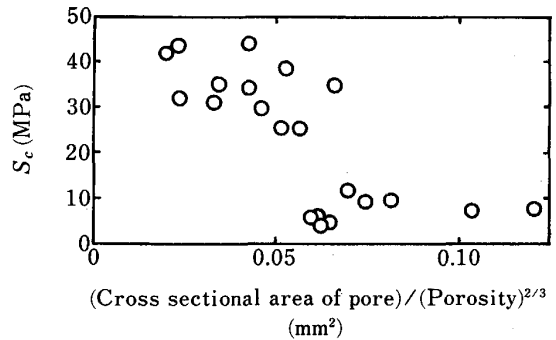


Fig. 13. Relation between compressive strength, and (cross sectional area of pore)/(porosity)^{2/3}.

3.6 コークスの破碎性と気孔の構造

コークス試験片の薄片試料につき気孔の寸法と分布, 形状に関する前述の四つのパラメーターを画像解析処理した結果を Table 11, 12 に掲げた. パラメーターの分布を示す図は省略したが, Table 中の *s. d.* はその標準偏差である. Table 11 から円柱形試験片, 球形試験片ともに気孔断面の面積と強度の相関関係が認められ, 気孔の断面積が大となるほど, また気孔サイズの分布が広く, 大きい気孔を含むコークスほど強度が低下する傾向

が認められる。Table 12 は基質の強度の差が大きい Coke No. 1 と No. 4 の円柱形試験片についての測定結果であるが Table 11 と同様の傾向が認められる。しかし気孔の形状係数、すなわち気孔断面の形状に関しては測定範囲では強度による顕著な差は認められない。

3.7 炉内位置によるコークスの性質の変化

Table 13 には 12 種類の試料の試験片について測定した S_c , ϕ , Y , ν の値を掲げた。炉内位置によるコークスの性質の変化には Case 1, 3 のように S_c が頭, 胴, 足の順に低下する場合と, Case 2, 4 のように S_c が頭, 頭, 足の順で低下する二つの場合がみられる。前者は含水率 7% で, かさ密度 0.85 t/m^3 の原料炭から, 後者は含水率 11% でかさ密度 0.77 t/m^3 の原料炭からそれぞれ製造されたコークスである。 ϕ , Y , ν についても同様に炉内位置による変化には二つの傾向がみられ, 炉内位置によるコークスの性質の変化の傾向は原料炭のかさ密度の影響を受けることがわかる。本実験に用いた試験片についても画像解析処理装置によつて, 気孔の構造に関するパラメーターの測定を行つたが, 前項と同様の結果がえられた。気孔の存在密度が一定であれば気孔断面積は気孔率の $2/3$ 乗に比例するから S_c に対する気孔断面積単独の影響を調べるために, S_c を (気孔断面積)/(気孔率) $^{2/3}$ に対してプロットすると Fig. 13 のようになり, 気孔断面積が S_c に対して影響を及ぼしている様子を知ることができる。

3.8 ドラムインデックスの検討

以上にえられた結果に基づき, コークスの強度の実用的指標で, コークスの集合粉砕特性を表すドラムインデックス (DI) とコークスの単粒子を用いて測定した材料力学的諸性質ならびに物理的性質の関係を π 理論に基づき次元解析によつて求めつぎの関係性をえた。

$$D_{15}^{30} = 100(1 - 5.80 \times 10^{-20} Y^{0.954} \cdot S_c^{-1.72} \cdot S_s^{-0.402} \cdot \rho^{7.02} \cdot \phi^{-2.77}) \dots\dots\dots(14)$$

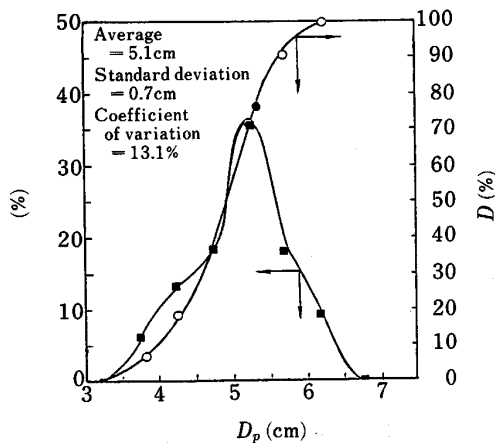


Fig. 14. Size distribution of average diameter of the three dimensions of specimen.

ただし, 上式において ρ の単位は (kg/m^3) である。一方, ドラム試験は一種の粉砕試験であり, DI は粉砕能の一種と考えることもできる。したがつて, 他の粉砕能を表す指数と明確な関係を持つものと考えられる。粉砕能として最も広く使われている BOND の仕事指数 $W_i^{31)}$ と石炭の粉砕能として使われているハードグローブ粉砕能指数 HGI と DI の関係を検討してつぎの結果をえた。

$$D_{15}^{30} = 7.60 \times 10^1 W_i^{0.113} \pm 0.554 \dots\dots\dots(15)$$

$$D_{15}^{30} = 1.75 \times 10^2 (HGI)^{-0.122} \pm 0.555 \dots\dots\dots(16)$$

4. 焼結鉄の強度と破碎性³²⁾

焼結鉄もまた一種の多孔体と考えることができる。焼結鉄粉砕・整粒過程における細粉の生成機構を調べる目的で焼結鉄球形試験片の圧縮破碎実験を試みた結果³²⁾を紹介する。Fig. 14 は NKK 福山製鉄所において準備された, ほぼ球形に整形した焼結鉄の 3 軸平均径の分布を示したものである。JIS R-2205 の手順に従つて全部の試験片につき重量 W_1 , 見かけ密度 ρ_a , かさ密度 ρ_b , 気孔率 ϕ_1 , 見かけ気孔率 ϕ_2 などを測定した。これらはそれぞれつぎに述べる定義の値であり, 計算に必要な真密度 ρ は試料の一部を 170 メッシュ (88 μm) 以下に粉砕してピクノメーター法によつて求めた。

$$\text{見かけ密度 } \rho_a = (\text{重量}) / (\text{閉気孔体積} + \text{基質体積})$$

$$\text{かさ密度 } \rho_b = (\text{重量}) / (\text{閉気孔体積} + \text{開気孔体積} + \text{基質体積})$$

$$\text{真密度 } \rho = (\text{重量}) / (\text{基質体積})$$

$$\text{気孔率 } \phi_1 = 1 - (\rho_a / \rho) = (\text{閉気孔体積}) / (\text{閉気孔体積} + \text{基質体積})$$

$$\text{見かけ気孔率 } \phi_2 = (\text{開気孔体積}) / (\text{閉気孔体積} + \text{開気孔体積} + \text{基質体積})$$

総個数 105 個の試験片を見かけ密度の分布がほぼ同じ 3 グループに分け, うち 2 グループを用いてインストロン型材料試験機により常速荷重破碎実験を行い, 残り 1 グループを用いて衝撃式落重試験機により衝撃荷重破碎実験を行つた。球圧壊強度 S_s は式 (1) によつて求め, またひずみエネルギー E と M から比破碎エネルギー E/M を求めた。常速荷重下における実験結果からつぎの関係性がえられた。

$$S_s = -1.28 \times 10^6 - 1.55 \times 10^6 \ln(\phi_2) \pm 3.89 \times 10^4 \text{ (Pa)} \dots\dots\dots(17)$$

$$0.132 \leq \phi_2(-) \leq 0.289$$

$$E/M = -8.13 - 8.21 \ln(\phi_2) \pm 0.26 \text{ (J/kg)} \dots\dots\dots(18)$$

$$0.132 \leq \phi_2(-) \leq 0.289$$

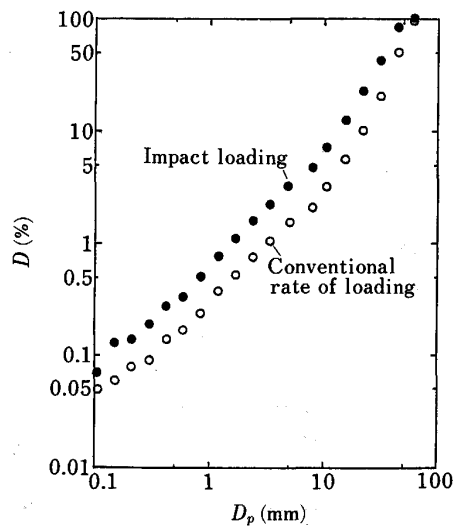


Fig. 15. Particle size distribution of fractured products under conventional rate of loading and under impact loading.

Table 14. Comparison of the experimental results under impact loading with those under conventional rate of loading.

		Under impact loading A	Under conventional rate of loading B	Ratio A/B
Loading rate	(N/S)	7.09×10^7	1.64×10^1	4.33×10^6
S_s	(Pa)	3.18×10^6	1.03×10^6	3.10
E/M	(J/kg)	7.73	4.08	1.89
ρ_a	(g/cc)	3.98	3.99	0.997
ρ_b	(g/cc)	3.04	3.08	0.987
ϕ_1	(%)	9.90	9.73	1.02
ϕ_2	(%)	23.58	22.73	1.04
d	(cm)	5.08	5.27	0.964

$$E/M = 1.03 \times 10^{-6} S_s^{1.09} \pm 0.30 \quad \text{(J/kg)} \quad \dots(19)$$

$$2.55 \times 10^5 \leq S_s(\text{Pa}) \leq 2.41 \times 10^6$$

$$\rho_a = 2.40 + 5.16 \times 10^{-1} \rho_b \pm 1.41 \times 10^{-2} \quad \text{(g/cc)} \quad \dots(20)$$

$$2.51 \leq \rho_b(\text{g/cc}) \leq 3.64$$

$$\rho_b = 3.43 - 3.66 \phi_1 \pm 1.78 \times 10^{-2} \quad \text{(g/cc)} \quad \dots(21)$$

$$0.0447 \leq \phi_1(-) \leq 0.264$$

$$\rho_b = 4.03 - 4.20 \phi_2 \pm 1.45 \times 10^{-2} \quad \text{(g/cc)} \quad \dots(22)$$

$$0.132 \leq \phi_2(-) \leq 0.289$$

$$\rho_b = 4.30 - 3.75(\phi_1 + \phi_2) \pm 1.88 \times 10^{-3} \quad \text{(g/cc)} \quad \dots(23)$$

$$0.182 \leq (\phi_1 + \phi_2)(-) \leq 0.493$$

つぎに衝撃荷重破碎実験結果からはつぎの関係がえら

れた。

$$S_s = -2.40 \times 10^6 - 3.84 \times 10^6 \ln(\phi_2) \pm 2.42 \times 10^5 \quad \text{(Pa)} \quad \dots(24)$$

$$0.192 \leq \phi_2(-) \leq 0.283$$

$$E/M = -2.84 - 7.29 \ln(\phi_2) \pm 0.95 \times 10^{-3} \quad \text{(J/kg)} \quad \dots(25)$$

$$0.192 \leq \phi_2(-) \leq 0.283$$

$$E/M = 1.72 \times 10^{-7} S_s^{1.17} \pm 0.60 \times 10^{-3} \quad \text{(J/kg)} \quad \dots(26)$$

$$1.02 \times 10^6 \leq S_s(\text{Pa}) \leq 7.76 \times 10^6$$

Fig. 15 に常速荷重破碎実験と衝撃荷重破碎実験産物の粒度分布を GAUDIN-SCHUHMANN プロットで示した。多数の粒子が共存する集合粉碎の場合には粒子相互の影響を考慮しなければならないが、単粒子破碎産物の粒度分布は碎料が一定であれば荷重状態によつて一義的に決まると考えてさしつかえない。Table 14 は衝撃荷重破碎実験と常速荷重破碎実験の結果を比較したもので、 S_s と E/M の値を比較しても衝撃荷重破碎実験産物の粒度分布が細粒側へと移行することがわかるが、Fig. 15 の常速荷重破碎実験産物の粒度分布は焼結鉄破碎・整粒過程における粗粒回収率の改善を図る場合の到達目標となりうる粒度分布と考えられる。前項に述べたコークスの場合には気孔率の範囲がかなり広いので式(8)の RYSHKEWITH の式を基にして実験式を求めたが、焼結鉄の場合にはコークスの場合に比べて気孔率の範囲が狭いので、多孔体の強度と気孔率の関係を表す多くの実験式についてあらかじめ適合性の検討を行い式(17)を導いた。なお焼結鉄の熱間における破碎性についても若干の検討を加えている。

む す び

以上、粉碎技術の進歩に関しては数多くのメーカーから資料をいただいたが、ここには記載しきれなかつたものもある。また石炭、コークスならびに焼結鉄の強度と破碎性については、従来私共の研究室で行つてきた実験的研究結果に重点をおき、これらを要約して述べた。単位はできるだけ SI ユニットとしたが、補助単位も数多く用いた。また BOND のワークインデックス W_i のように本来 (kWh/t) で表されて用いられているものについてはそれを踏襲した。

終わりに、投稿の機会を与えられた日本鉄鋼協会ならびに資料をいただいたメーカー各位に深く謝意を表します。

文 献

- 1) 原田種臣, 大和田秀二, 山下 亨: 日本鉄業会誌, 103 (1987), p. 748
- 2) 粉粒体工学 (化学工学協会編) (1985) [槇書店]
- 3) 愛甲秀夫: 神戸製鋼所技報 R & D, 35 (1985) 1, p. 1

- 4) 菅原勝彦, 才田善之, 村田博之: 文献3), p. 4
- 5) 田中 毅: 文献3), p. 22
- 6) 文献3)
- 7) 田中俊行, 吉本勝彦: 文献3), p. 34
- 8) 文献3)
- 9) 愛甲秀夫, 鳥羽克彦: 浮選 (資源処理技術), 31 (1984), p. 192
- 10) 文献3)
- 11) 内田陽三, 中島雄治: 文献3), p. 38
- 12) 松本勝己: 文献3), p. 14
- 13) 西原 守: 水曜会誌, 20 (1984), p. 197
- 14) 電気製鋼 (大同特殊鋼(株)機械事業部編), 57 (1986), p. 258
- 15) 新しい超微粉碎技術及びその鉄産物処理プロセスへの利用に関する調査研究報告書 (通商産業省公害資源研究所編) (1983)
- 16) 文献2), 15)
- 17) Y. KANDA, S. SANO and S. YASHIMA: Powder Technol., 48 (1986), p. 263
- 18) 八嶋三郎: 昭和 61 年度全国地下資源関係学協会合同秋季大会分科研究会資料[P] (1986), p. 9
- 19) 鈴木和夫, 桑原好孝, 水野正雄: 粉体工学会誌, 20 (1983), p. 82
- 20) K. SUZUKI and Y. KUWAHARA: J. Chem. Eng. Jpn., 19 (1986), p. 191
- 21) 神保元二: セラミック原料の超微粉碎機構の解析 (研究成果報告書) (1988)
- 22) 橋本 等, L. SIKONG, 折笠 聡, 丹野浩一: 日本鉄業会昭和 63 年度春季大会研究・業績発表講演会講演要旨集 (1988), p. 207
- 23) 橋本 等, L. SIKONG, 八嶋三郎: 化学工学協会第 53 年会研究発表講演要旨集 (1988), p. 125
- 24) 八嶋三郎, 諸橋昭一, 粟野 修, 神田良照: 化学工学, 34 (1970), p. 210
- 25) 平松良雄, 岡 行俊, 木山英郎: 日本鉄業会誌, 81 (1959), p. 1024
- 26) 八嶋三郎, 神田良照, 泉多恵子, 篠崎龍夫: 化学工学, 36 (1972), p. 1017
- 27) 石炭のコークス化特性部会報告書 (日本鉄鋼協会編) (1985), p. 154
- 28) S. YASHIMA, H. HASHIMOTO and K. SEINO: Proc. 4 th International Symposium on Agglomeration (1985), p. 827
- 29) 近藤連一編: 多孔材料—性質と利用—, 165 (1975) [技報堂]
- 30) W. WEIBULL: Ing. Vetenskaps Akad. Handl, No. 151 (1939)
- 31) F. C. BOND: British Chem. Eng., 6 (1961), p. 293
- 32) 八嶋三郎, 橋本 等: 未発表