

高クロム鋳鉄のアブレイシブ摩耗試験用砂の選定

美野 和明*・斎藤 吉之*・杉田 雄二*²・伊藤 博之*²

Selection of Test Sands for Abrasive Wear of High-chromium Cast Irons

Kazuaki MINO, Yoshiyuki SAITOH, Yuji SUGITA and Hiroyuki ITOH

Synopsis : Dry sand/rubber wheel tests are used for low-stress abrasive wear. Test sands have to be selected to simulate an actual abrasive. But, hardness, roundness and size of sands have usually been a major concern. The present paper, restricting to abrasive wear in coal pulverizing mill, describes an experimental study on the selection of test sands based on similarity in abrasivity against white cast irons. Single-scratch tests were performed using a rubber wheel tester. The width to depth ratio of a groove, groove area and load on a single grain were measured or calculated for five kinds of martensitic white cast irons scratched by various sands. They were compared with those by hard particles extracted from coal. Two commercially available sands were selected, having similar abrasivity with larger and smaller sands extracted from coal. The characteristics of grooves such as the groove area were correlated with the wear rate in conventional sand/rubber wheel tests. Demonstrating strong dependence of the wear resistance on the size of sands, it was concluded that both two selected sands have to be used for rubber wheel wear tests as far as abrasive wear for coal pulverizing mill is concerned.

Key words : abrasive wear ; wear test ; abrasive wear test ; rubber wheel abrasion test ; cast iron ; high chromium cast iron ; pulverizing mill.

1. 緒言

石炭火力発電設備の1つとして、石炭を粉砕する微粉炭機があり、Fig. 1に示すような型が用いられている。回転テーブルの中心に投入した原料は遠心力でテーブル溝に入り、ローラーで粉砕される。これらの部材には、アブレイシブ摩耗に強い高クロム白鋳鉄が使われる。部品の長寿命化のために、新材料を開発したり、硬い材料を溶接盛金して、耐摩耗性の改善が試みられている。

このような材料開発には、実際の環境での摩耗を模擬した試験法が必要である。微粉炭機のように、低応力下でのアブレイシブ摩耗に対する実験室的評価法として、ラバー

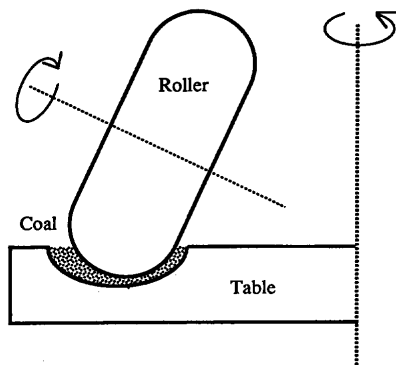


Fig. 1. Schematic of coal pulverizing mill.

ホイール摩耗試験が知られている。これはブチルゴムでライニングした鋼鉄製円盤を回転させ、短冊状の金属試験片を押し付けながら砂をその間に注入して、摩耗させる方法である。粉砕した石炭を摩耗粉体として用いるのが理想であるが、実炭では摩耗速度が小さく、現実的ではない。そこで問題になるのが、代用砂の選定である。摩耗性において実炭中の硬質粒子と類似したものが要求される。ところが、この類似性に関しては、砂の硬さおよび丸みや大きさなど外観を基にした検討^{1,2)}が報告されているに過ぎない。

本研究では、微粉炭機における摩耗に限定し、石炭粉から硬質粒子の抽出および粒子のアブレイシブ性に基づく摩耗試験用砂の選定に関する実験を行う。さらに、アブレイシブ性試験と通常のラバーホイール摩耗試験の比較、実機での摩耗との比較など、材料開発に必要な耐摩耗性評価について検討する。

2. 石炭中に含まれる硬質粒子

微粉炭機テーブルのローラー溝には、粉炭層が数cmの厚さで運転中に形成される。石炭自身はモース硬さで1-2(ビッカース硬さHv約30に相当)の軟質体であり、石炭中に含まれる硬質粒子が摩耗を引き起こす。Fig. 2は実機テーブル上の炭層において、板状に固まった粉砕炭の断面を示した

平成9年9月4日受付 平成10年1月6日受理 (Received on Sep. 4, 1997; Accepted on Jan. 6, 1998)

* 石川島播磨重工業(株)技術研究所 (Research Institute, Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., Ltd., 3-1-15 Toyosu Koto-ku Tokyo 135-8732)

* 2 中部電力(株)電力技術研究所 (Electric Power Research & Development Center, Chubu Electric Power Co., Inc.)

ものである。白い粒子が異物であり、この中で約10個の粒子がHv1000以上であった。表面に顔を出している硬質粒子がローラタイヤやテーブルと擦れてアブレイシブ摩耗を引き起こすと推察する。

テーブル上の炭層を深さ方向に対し上中下に分類して、それぞれの部位から採取した石炭粉をFig. 3に示す。石炭粉末は下方のものほど細かい。このサンプル中の分散粒子についても、下層にあった石炭粉末は0.2-0.4mmの粒子が多いのに対して、上層は1mm程度の粒子が多かった。EDXによる元素分析でSi-O, Al-O, Fe-S, Fe-S-O, Fe-Oなどが検出された。これら分散粒子はシリカ、アルミナ、鉄鉱石と考えられる。Si-O, Al-O系はMHv(2N)が1000-1500であるが、Fe-S-O系は100-700であった。全般的にはMHv1000-1200のシリカ粒子が多かった。このような石炭粉から次の手順で分散粒子を抽出した。

(a)大気中でバーナーによって石炭を燃やす。

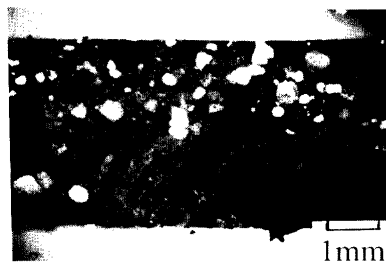


Fig. 2. Cross-section of a large coal flake densified on the grinding table of pulverizing mill. About ten particles in the photograph have the hardness larger than Hv1000.

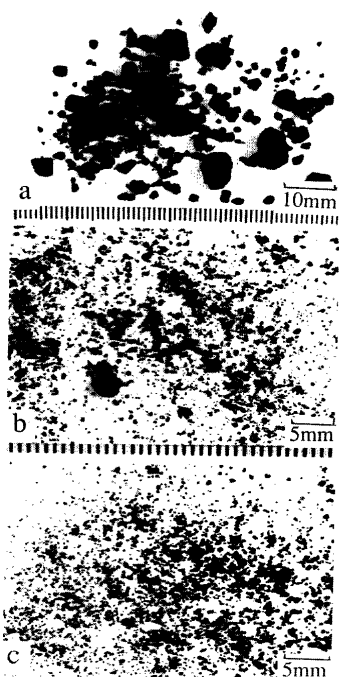


Fig. 3. Coal powders sampled from the grinding table. (a), (b) and (c) are sampled, respectively, from the upper, middle and lower layers of the coal bed on the table.

(b)強磁性異物を燃焼残渣から磁気分離する。

(c)250 μ mメッシュでふるい、灰と硬質粒子を分離する。

3. 実験方法

3.1 試験材料

Table 1に示す5種類の鋳鉄を用意した。#1から#4までの材料は1320Kまで2K/minの速度で凝固させて、直径70mmの円柱状インゴットを試作した。#5は溶湯を金型に鑄込み、50K/minを越える凝固速度で凝固させた。

#1は1040Kで2h加熱、炉冷の焼戻し、それ以外の材料は、不安定化熱処理として1320Kで6h加熱後に油冷し、さらに800Kで4hの焼戻し処理を行った。

熱処理を施した材料の組織をFig. 4に示す。写真で白く見える相はM₇C₃炭化物であり、硬さMHvは1300-1700である。黒っぽい基底はマルテンサイト相に炭化物が分散したものである。各材料のマクロ硬さとマトリックスの硬さはTable 1に示した。

Table 1. Chemical compositions and hardness of test materials. #1 to 4: slowly solidified, #5: fast solidified.

Cast Iron Ingot No.	Element, mass %					Hardness Hv(196N)	Micro Hardness of Matrix, MHv, (0.5N)
	C	Cr	Mo	Co	Ni		
# 1	3.25	9.38	0.38		6.03	610-670	450-500
# 2	3.02	21.0	1.85			840-910	650-680
# 3	2.99	18.4	13.9			980	775
# 4	3.13	18.1	1.60	13.1		960-985	820-840
# 5	3.54	18.3	1.61	11.9		980-1010	880-910

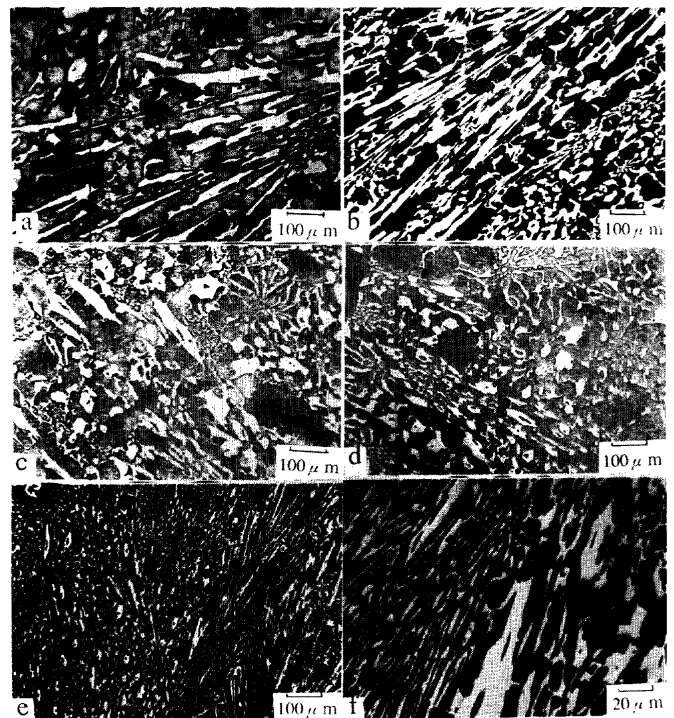


Fig. 4. Microstructures of various white cast irons used in the present study: (a) #1; (b) #2; (c) #3; (d) #4, (e, f) #5.

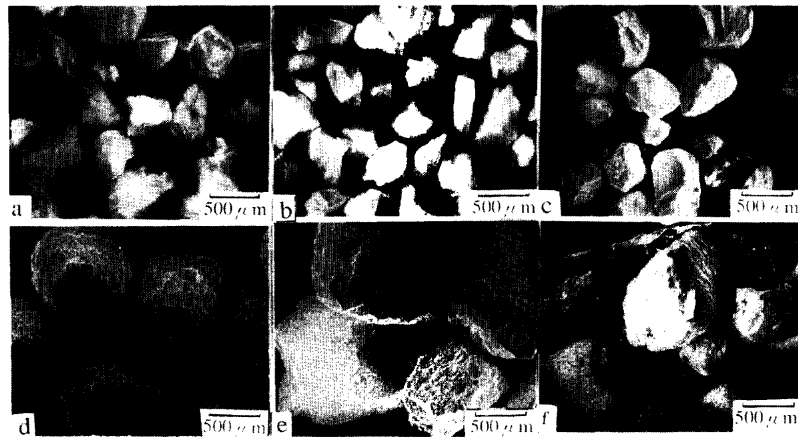


Fig. 5. SEM micrographs of wear test sands: (a) KF sands ; (b) SK sands ; (c) particles extracted from the lower layer of coal bed ; (d) mullite balls ; (e) conical sands ; (f) particles in the upper coal bed.

3・2 摩耗試験用砂

市販のKF, SK, コニカル砂およびムライトボール(人工物)さらに石炭抽出粒子を摩耗試験に用いた。SEM写真をFig. 5に示す。市販砂はすべてHv1150-1250の範囲であり、平均粒径が0.3-0.5mmと0.8-1.0mmに分類される。KFはSKやコニカルと比べ、角が取れている。

3・3 アブレーション摩耗試験

3・3・1 1回転スクラッチ試験

巾10mm, 長さ50mm, 厚さ20mmの鑄鉄試験片をエメリー紙およびアルミナ粉で鏡面仕上げした。細かめの砂は数十粒, 粗い砂は十数粒を両面接着性の紙テープで直径140mmのラバーホイールに張り付け, ホイールをゆっくり手動で1回転させて, 試験片に引っ掻き傷をつけた。ホイールへの押し付け荷重は187Nとした。溝巾と深さの組み合わせ12点をレーザー顕微鏡で測定した。

3・3・2 ラバーホイール摩耗試験

連続して砂を供給しながら長時間摩耗させて, 重量変化を求める摩耗試験をASTM G65に準じて行った。直径200mm, 巾10mmのホイールを用い, 周速0.52m/s, 押し付け荷重196N, 砂供給量14-16kg/hの条件で行った。連続1hの試験後, 重量変化を計測した。

4. 実験結果および考察

4・1 ラバーホイールによる1回転スクラッチ試験

4・1・1 スクラッチ傷の概観

SK砂を用いた#2, #5鑄鉄の例について, 深さ方向の溝形状プロファイルを図6に示す。縦の点線および横実線はそれぞれ溝巾, 深さ分布の測定位置を示す。研磨により炭化物はマトリックス面から0.3-0.5 μ m浮き上がっている。溝の横に盛り上がりが見られることがある。盛り上がりを検討した摩耗速度の議論がある¹⁻³⁾。本材料系では盛り上がりは小さく, この影響は無視できる。

マトリックスには溝が形成されるが, M_7C_3 型の粗大炭化

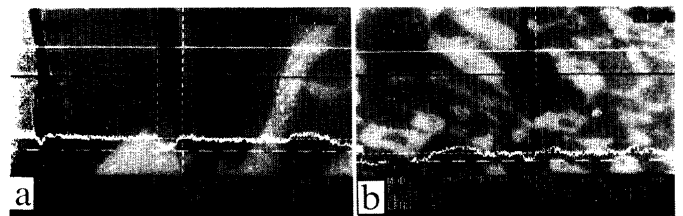


Fig. 6. Groove depth profiles produced by SK sands for (a) #2 and (b) #5 cast irons, measured by a laser scanning microscope.

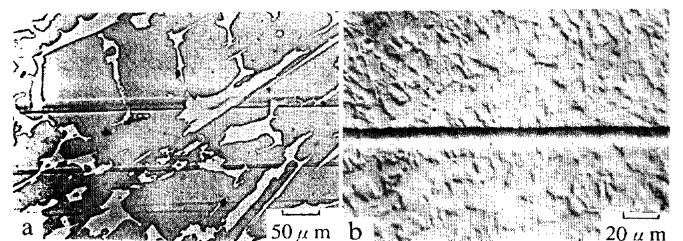


Fig. 7. Grooves formed by conical sands on (a) #2 and (b) #5 cast irons.

物には, Fig. 7 (a)で示すように, コニカルのような粗い砂でも傷はつかない。しかし, 炭化物に細かいクラックが入ることが希にあった。炭化物が細かく析出した#5の材料ではFig. 7 (b)に示すように, 大きな砂によって小さな炭化物が押し込まれた様子を呈する。なお, KFやSK砂では, 炭化物が押し込まれる様子は顕著でない。

4・1・2 溝の断面積 A_g および相当直径 D^*

さて, 直径 D の球を平板に押し付け, 塑性変形によって生じる圧痕を考える。圧痕の深さ方向の最大断面積は, 圧痕の最大径 d の大きさだけを測定すれば幾何学的関係式から計算できる。しかし, ラバーホイール摩耗試験で用いるような砂は理想的な球ではない。このような試験でのスクラッチ溝の断面積 A_g は溝のプロファイルに基づく実測が必要である。本研究では圧痕の深さ h と巾 d を計測し, h は d と比べて非常に小さいので, 次の近似式から A_g を求めた。なお, Fig. 8に A_g などの溝形状特性値を図示した。

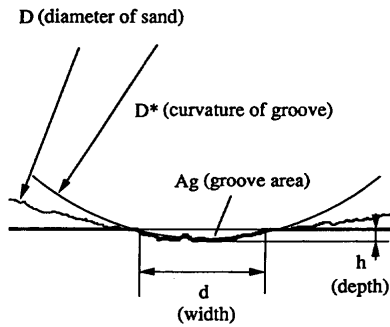


Fig. 8. Definition of groove characteristics.

Table 2. Average values of groove shape characteristics, d, h, D* for #2 cast iron.

Size	Group a			Group b		
	KF	SK	coal/small	mullite	conical	coal/large
D(mm)	0.4-0.6	0.2-0.5	0.3-0.5	0.6-1.1	0.8-1.2	0.8-1.3
d(μm)	5.6/6.0	9.2/9.7	6.4	16	11	12
h(μm)	0.30/0.33	0.49/0.50	0.35	0.66	0.74	0.49
D*(μm)	28/29	45/50	32	99	46	89

$$Ag = dh / 2 \dots\dots\dots (1)$$

測定したdおよびhに相当する仮想球の直径D*は次の幾何学的関係式で計算できる。

$$D^* = d^2 / 4h \dots\dots\dots (2)$$

さて、引っ掻き摩耗実験では、dおよびhの組み合わせ12点を計測したが、各組み合わせについて計算したAgとD*の値が平均値の3倍以上あるいは1/4以下のデータ素点は削除した。#2 鋳鉄の例についてd, h, D*の平均値をTable 2に示す。砂の直径の小さい(a)と直径の大きい(b)のグループを比べると、砂の大きさが2倍になると、d, hはともに概略2倍になっている。

相当曲率D*は砂の大きさの1/10-1/20である。(a)のグループでは、すべて30μm前後であり大差はない。外観写真ではSK砂は先が尖っているように思われるが、ミクロ的な曲率D*で比較すると、KFや石炭抽出粒子と変わらない。(b)のグループでは、コンカル砂のD*が他と比べ1/2の大きさであり、石炭抽出粒子と異なる。

4.1.3 溝の形状係数f

金属材料の硬さH

$$H = w / Ap \dots\dots\dots (3)$$

を用い、溝の断面積Agを式(4)のように表現する。ApはBrinell硬さのような球状の圧子を用いた場合の接触面積あるいは接触面の投影面積(両者はd≪Dのときには近似的に等しい)である。

$$Ag = (Ag / Ap) (w / H) = fw / H \dots\dots\dots (4)$$

ここで、形状係数fは文献2)と同様、次式で定義される溝の

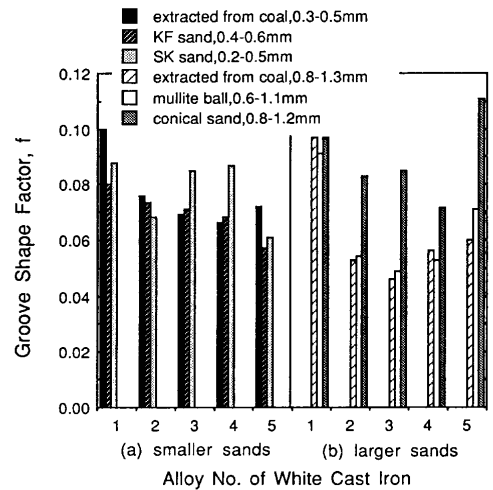


Fig. 9. Comparison of groove shape factor, cross-sectional area of grooves divided by projected contact area, among various abrasive sands.

特性値である。

$$f = Ag / Ap \dots\dots\dots (5)$$

スクラッチ試験中の粒子は溝を形成しながら進む。溝に入っている砂の部分で進行方向側は試験片と接触するが、反対側は浮いている。実際の接触面積は全体の半分とすると、

$$Ap = \pi d^2 / 8 \dots\dots\dots (6)$$

これとAgの式(1)と合わせると、次式が得られる。

$$f = (4 / \pi) h / d \dots\dots\dots (7)$$

さて、各種鋳鉄と砂の組み合わせによるスクラッチ試験について、式(7)を用いてfを求めた結果をFig. 9に示す。砂の直径が0.2-0.6mmの(a)グループについては、すべての鋳鉄で砂の種類によるf値の変化は小さい。砂の直径が大きい(b)グループでは#1, #4を除く鋳鉄で、コンカル砂が石炭抽出粒子やムライトボールと比べて、大きなf値したがって同じ巾でも深い溝が形成される。

4.1.4 1粒当たりの相当荷重w

摩耗試験中における1粒の砂当たりの荷重wは式(3)と(6)を組み合わせ、

$$w = \pi d^2 H / 8 \dots\dots\dots (8)$$

によって推定できる。上式にdおよびH(ここでは、マトリックス硬さMHv0.5Nをブリネル硬さに換算した値を使った)を代入して、wを計算した結果をFig.10に示す。同種の砂で、材料によってwが異なるという異常な結果が見られる。砂の影響について見ると、SKのwは他の砂の約2倍である。この要因についても明らかではないが、w値においてKFの方が石炭中粒子に近い。

4.2 模擬試験砂の選定

ミルテーブルの粉碎粉は上層で1mm程度の硬質粒子、下

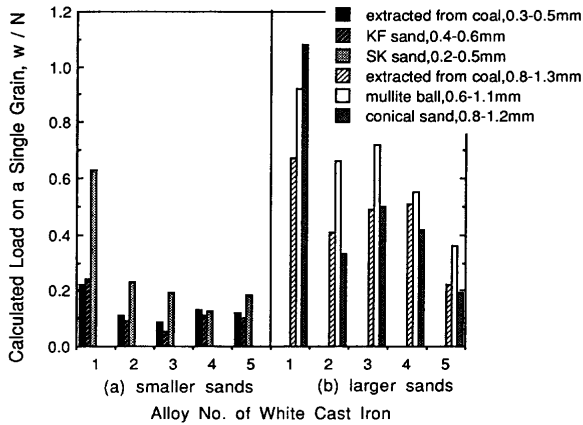


Fig. 10. Estimated load applied on a single grain of various abrasive sands during scratch test.

層はそれより細かい0.2-0.4mmの粒子が多く分散している。したがって、上述の(a)および(b)グループから石炭抽出粒子に近い2種類の大きさの砂を選びたい。

形状係数fについては、コンカル砂は石炭抽出粒子やムライトボールと比べて大きい。すなわち、同じ巾でも深い溝が形成され、模擬試験砂として適切ではない。したがって、(b)グループでは、ムライトボールを選定する。

(a)グループでは、SK砂は大きさが同じ程度の石炭抽出粒子と比べ、大きな溝巾が形成される。その結果、SKはあたかも大きな荷重が加わるような計算結果になる。この点で、SKは石炭抽出粒子と挙動が異なり、KFの方が模擬試験砂に適している。

4・3 スクラッチ試験とラバーホイール摩耗試験の相関

試験片とホイールの接触部で単位面積当たりN個の粒子が摩耗に関与しているとし、単位面積当たりの体積減少Vを式(4)により下式で表す。Lは摩耗溝の長さである。

$$V = NAgL = LNwf/H \dots\dots\dots (9)$$

ラバーホイール摩耗試験の摩耗速度とスクラッチ試験の溝断面積の関係をFig.11に示す。両者間に大略、比例関係がある。しかし、式(9)のAgはスクラッチ試験での値である。これをラバーホイール試験でのスクラッチ溝に当てはめるには、そのときの砂に加えられた荷重とラバーホイール試験における荷重を比較する必要がある。

スクラッチ試験で砂1粒当たりの推定荷重はFig.10に示したように、(a)グループの細かい砂では0.1-0.2N、(b)の粗い砂では0.2-1Nである。全砂で受ける荷重は、これらに粒数を乗じた値4-15Nである。これは試験片全体に加えた荷重187Nの数%から10%である。大半はラバーで荷重を受けていることになる。

一方、ラバーホイール摩耗試験については、全荷重を砂で受けると仮定し、1粒当たりの荷重を接触面に存在する砂の個数で割っている。本実験条件について計算すると、(a)グループでは0.05-3N、(b)グループでは0.4-1.4Nであ

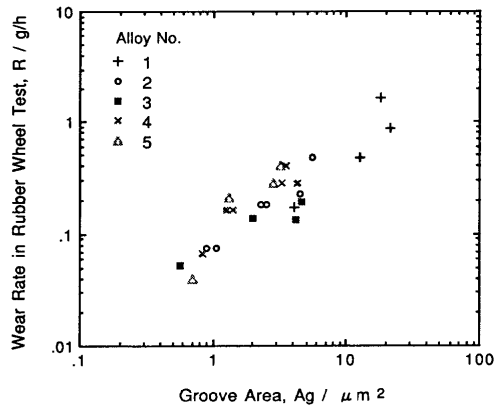


Fig. 11. Relationship between the wear rate in rubber-wheel wear tests and the groove area, Ag, for various cast irons and sands.

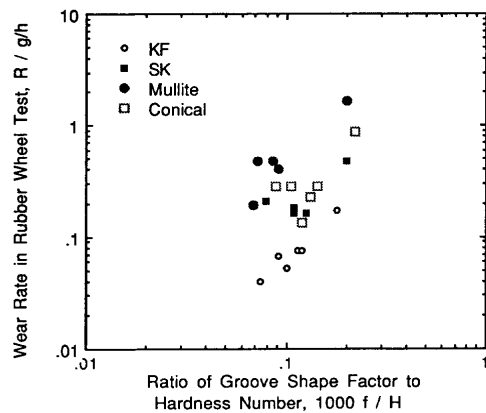


Fig. 12. Wear rate in rubber-wheel wear tests vs 1000 f/H_B in scratch tests.

り、スクラッチ試験から計算した値に近い。

さて、アブレーション試験ではマトリックスの減量だけを考慮しているが、マトリックスがまず掘られ、炭化物が欠落すると考えれば、結果としてラバーホイール試験との間に概略、Fig.10の比例関係が見られるのであろう。

Fig.12は式(9)で最後の展開式を検討するために、スクラッチ溝の形状係数f値とマトリックスの硬さの比に対して、ラバーホイール試験での摩耗速度をプロットしたものである。文献4)のラバーホイール摩耗試験の解析では、Nとwの積は砂の大きさに依存せず、試験片に加える全荷重(一定)に等しいと仮定している。もし仮定が正しければ、Fig.12の直線は砂の種類によらず、一本の線になるはずであるが、そのようにはなっていない。

さらに、Fig.12においてコンカルとSK砂に対する折れ線が目される。この2種類の砂を使ったラバーホイール摩耗試験では、後述のFig.13(a)で示すように、硬さの異なる#2と#4、#5で耐摩耗性評価がほとんど同じである。これはFig.12でf/hに対して摩耗量に変化せず、折れ線を示すという異常さの点で共通している。

4・4 ラバーホイール摩耗試験の実用的評価

ラバーホイール摩耗試験から各種材料の摩耗速度の逆数

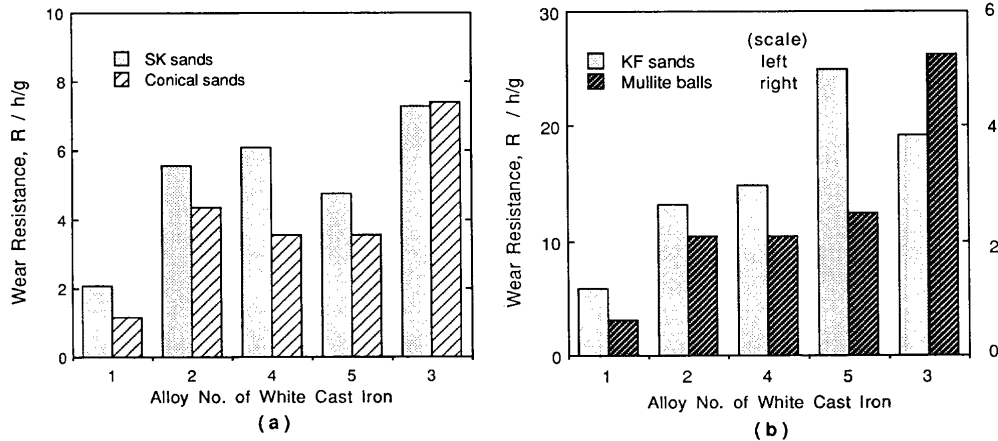


Fig. 13. Summary of rubber-wheel wear tests by (a) inappropriate sands and (b) suitable sands for coal pulverizing mill.

を求め、Fig.13にまとめた。Fig.13(a)は本研究で不適切と判断した砂を用いた結果であり、Fig.13(b)は適切な砂によるものである。砂の選定によって、耐摩耗性評価が大きく異なる。実際にコニカル砂を選定することは少ないかもしれないが、SK砂は外観では不適切と判定しにくい。これらの砂を用いると優れた材料を排除することになる。

さらに、実用的に重要な事柄がFig.13(b)で2点ある。第1は、現在使われている#1と#2の鋳鉄について、実際の装置での摩耗速度との比較である。実機での摩耗速度比は約2である。これに対して、KF、ムライトを用いたラバーホイール摩耗試験ではそれぞれ2.2および3.3であり、比較的よく対応している。実際の部品に近い大型インゴットから試験片を採取して摩耗試験を行うと、実機により近い結果が得られる⁹⁾。

もう1つは、模擬試験用砂に適する2種類の砂で互いの耐摩耗性評価が材料系によっては、大きく異なる点である。#4と#5は組成が似ているが、凝固速度が異なる。Fig.13に示すように、小径の砂で評価すると、#5は#2に対して耐摩耗性の改善が大きいが、大粒の砂では効果が小さい。#5は凝固速度が大きいため、炭化物の析出組織が細かい。この組織についてはFig.7ですでに述べた。なお、凝固速度の小さい#4は#2と比べ硬度は高いが、両方の砂に対して耐摩耗性がほとんど向上しない。

Silence⁶⁾は3C-18Cr, 3C-18Cr-16Mo-6Co-2V(質量%)などの鋳鉄で砂鋳型と黒鉛鋳型を使って、凝固速度が異なる2種類材料を用意し、粗い砂でラバーホイール摩耗試験を行っている。凝固速度の大きい黒鉛型で鋳造した材料の摩耗速度は砂型より約1桁大きいという結果を報告している。本研究ではこのような大差は認められないが、凝固速度の

大きい材料は粗い砂に対する耐摩耗性を改善するのは困難であるという点で文献5)と一致する。高硬度溶接棒の開発では5%C-(25-35)%Cr鋳鉄にNb, V, Tiなどを添加したり、高価な元素を使わない溶接棒⁷⁾の開発が国内外で試みられている。溶接盛金は凝固速度の大きい組織に近く、砂の大きさの影響を考慮して耐摩耗性を評価すべきであろう。#3は両砂に対して改善効果を示すが、組織と耐摩耗性については別途、報告したい。

5. 結言

特殊な試験で与えた引っ掻き傷の溝形状を検討することにより、粒子のアブレイシブ性において、粉碎炭から抽出した2種類の大きさの硬質粒子と類似する市販砂を選定した。砂の大きさによって、材料間の耐摩耗性優劣が異なる点などを示し、実用的な耐摩耗性評価のためには、2種類の選定砂を用いてラバーホイール摩耗試験を行う必要があることを示した。

文 献

- 1) J.H.Tylczak: ASM Handbook 18, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM, Ohio, (1992), 184.
- 2) M.A.Moore and P.A.Swanson: Wear of Materials 1983, ed. by K.C.Ludema, ASME, New York, (1983), 1.
- 3) K.H.Gahr: Wear, **124** (1988), 87.
- 4) H.S.Avery: Wear of Materials 1981, ed. by S.K.Rhee *et al.*, ASME, New York, (1981), 367.
- 5) 美野和明, 安武寛晴, 古賀 誠, 杉田雄二, 伊藤博之, 風間公一: 石川島播磨技報, **38** (1998), No 3 (掲載予定)
- 6) W.L.Silence: J.Lubrication Tech., **100** (1978), 428.
- 7) H.Berns and A.Fisher: Wear of Materials 1985, ed. by K.C.Ludema, ASME, New York, (1985), 625.