

改良型サンド・エロージョン試験機の試作*

小松芳成**・鎌田久雄**・伊藤信雄**・三浦敏秋**
マスカルド ガスパル リト***・後藤正治**・麻生節夫**

A Pilot Study on an Improved Sand-Erosion Testing Machine

Yoshinari KOMATSU**, Hisao KAMADA**, Nobuo ITO**, Toshiaki MIURA**
Gaspar Lito MASCARDO***, Shoji GOTO** and Setsuo Aso**

(Abstract)

A pilot run was done on an improved version of a sand erosion testing machine with the option of controlling slurry temperature and speed. With the use of this machine, the experiment was conducted on SS 400, SUS 430 F, SUS 304 and SUS 403 test specimens. The following results were obtained.

(1) The improved sand erosion testing machine has an operational temperature range from 293 K to 343 K with a temperature variation of ± 0.5 K. Also, it has an operational slurry speed range from 5.5 m/s to 10.5 m/s with a speed variation of about 0.2%. This is very favorable in the study of temperature dependence and slurry speed dependence in sand erosion behavior.

(2) The order of sand erosion resistance for SS 400, SUS 430 F, SUS 403 and SUS 304 does not vary whichever temperature and whichever slurry speed is used.

(3) The sand erosion behavior is highly dependent on slurry temperature and slurry speed.

(4) In the development of sand-erosion resistant materials, materials with high hardness and good corrosion resistance was deduced to be advantageous.

Key words : sand-erosion, slurry temperature, slurry speed, SS 400, SUS 430 F, SUS 304, SUS 403

(平成7年12月4日受付, 平成7年12月28日受理)

*平成7年7月20日, 秋田大学鉱山学部技術部技術発表会で一部発表.

**秋田大学鉱山学部物質工学科.

Department of Materials Engineering and Applied Chemistry, Mining College, Akita University.

***秋田大学大学院鉱山学研究科物質工学専攻.

Department of Materials Engineering and Applied Chemistry, Graduate School of Mining and Engineering, Akita University.

1. はじめに

各種の鉱山用機械や建設用機械では、鉱石、岩石あるいは土砂などの流水（スラリー）を扱うことが多い。このような場合には、機械部品がスラリーによって容易に摩滅されてしまうことが多く、その都度、新しい部品と交換しなければならない。このことは生産コストの点で大きな問題となっている。そこで、耐摩耗性にすぐれた材料を開発して寿命の長い部品を作ることが強く望まれている（総合鋳物センター ED 委員会編, 1980, P. 25）。

一般に耐摩耗金属材料の開発には、合金組成をいろいろ変えて経験的な手法にしたがって材料開発を行う方法の他に、各種材料の摩耗挙動を正しく把握して摩耗現象を解明することに基づいて材料開発を行うことも重要な1つの方法として挙げられている。ところでサンド・エロージョンは大変複雑な現象であるので、その解明には試験条件を精度よく制御して精度の高い実験を行うことが要求されている（腐食防食協会編, 1987, P. 186）。

これまで一般に使用されてきたサンド・エロージョン試験機では試験温度とスラリー速度の設定において正確さに劣り、任意の試験条件を設定することがきわめて困難な場合が多かった（宇佐美ら, 1977）。したがってデータの再現性を得ることが難しく、かつ装置の操作性も悪かった。そのため、得られたデータには一般性に乏しく、他研究者のデータとの比較検討する場合にも難しい場合がしばしばみられた。そこで、本研究では作業性が良く任意の試験条件を容易に設定することができ、しかも高精度のデータを得ることができる新しい試験機を試作することにした。

2. 改良型試験機の特徴

Fig. 1 (a) は本研究において試作した試験機の全体図である。この試験機は、下部から試験槽内の温度を外気の影響をできるだけ受けなくて一定に保持するための恒温槽、著者らの一部が従来から実験に使用している試験機（麻生、菅原ら, 1993）と同じ形状の試験槽および試験片取り付け用円盤、試験片

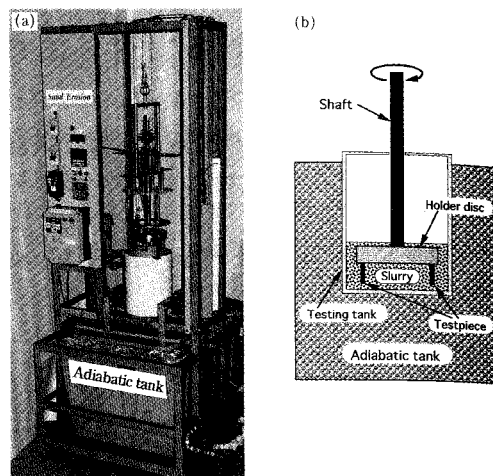


Fig. 1 An over-all view of the improved testing machine.

を取り付けた円盤を回転させるための駆動ユニットおよびモーター、試験温度とスラリー速度（回転速度）を簡便に制御できる操作盤、実験作業の労力を緩和するためのバランス荷重の付加機構という構造になっている。すなわち本試験機はスラリー中で試験片を回転させる試験片回転型のものである。試験片取り付け部の模式図を Fig. 1 (b) に示した。その他各部については以下に詳述する。全体として試験温度とスラリー速度の制御の高精度化をはかり、かつ操作性を高めた点に本試験機の特徴がある。

2.1 スラリー温度の制御

恒温槽は樹脂製角型の容量 200 l と 300 l のタンクをそれぞれ内側と外側に用い、その間隙に断熱材を使用することで保温性を高めた。スラリー温度の制御系は Fig. 2 に示すような温度調節計と 3kW の投げ込み式パイプヒーターおよび恒温槽内の温度差を緩和するための循環ポンプ（流量：27 l/min）で構成されている。これまでに用いられてきた試験機（以下、従来の試験機という）との違いはスラリー温度 20~70°C の広い温度範囲で $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ の精度で試験温度の制御が可能となったことである。このことはデータの再現性を大きく向上させた。

2.2 スラリー速度の制御

従来の試験機（麻生、菅原ら, 1993）では、スラ

リー速度の制御をモーターの回転軸側のプーリーと試験片を取り付けた円盤を回転させるシャフト側のプーリーの径の組み合わせを変えることによる機械

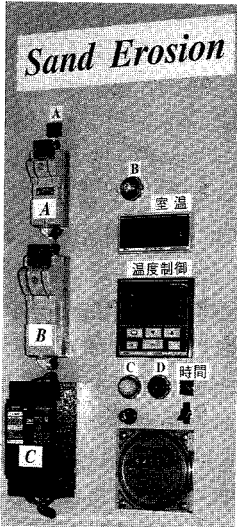


Fig. 2 Testing temperature control panel.



Fig. 3 Slurry speed control inverter.

的な方法で行ってきた。しかし、この方法では試験条件を変える度に各々のプーリーを交換する必要があり、また各プーリーの直径比をもとにして比例計算によってプーリーの径を決めても実際は試験槽内の水と砂の抵抗によって目的のスラリー速度に正確に設定することは難しかった。そこで本研究での改良型試験機では直径がそれぞれ2, 3, 4インチの3段プーリーをモーターの回転軸と試験片取り付け側の各々に用いて機械的に制御する方法と、Fig. 3に示したインバータを使用し周波数を変化させてモーターの回転数を制御する電気的な方法とを併用することによってこの問題を解決した。その結果、試験片を取り付けた円盤側の回転数を2 r.p.m. 単位で制御することが可能となり、水と砂の抵抗による回転数の低下にも瞬時に対応ができて目的のスラリー速度を正確に得ることができるようになった。ちなみに試験片取り付け円盤側の回転数を約700~1300 r.p.m. まで変えて実験を行った。

2. 3 バランス荷重の付加機構

本実験では実際に試験を行う場合、あらかじめ決められた時間毎に試験機を停止して試験槽内の円盤から試験片を取り外しその重量を測定した。また、その試験期間中に砂粒子の細粒化等によってスラリーの性状が変わることも懸念されるので一定時間毎に水と砂を新しいものに交換した。この際一定時間経過後の試験片の重量測定は、従来の試験機（麻生、菅原ほか、1993）では試験片を取り付けた円盤、シャフト、プーリーを一緒にシャフトの軸受けから抜くように持ち上げ、シャフトの軸受けと試験槽の上端の間のかぎられたスペースで円盤をシャフトから取り外し、それに取り付けられている試験片を取り出す方法がとられていた。この方法ではかなりの労力を要するとともに作業性も良くなかった。そこで、楽な姿勢で容易に実験ができるようにするために、先に駆動ユニットと記した、すなわち試験片を取り付けた円盤とシャフト、プーリーおよび軸受けを一緒に持ち上げる方式を採用した。これにはFig. 4に示すように、この駆動ユニットと同じ重量のバランス荷重をワイヤーを介して付加した。このことによって小さい力で一連の作業を行うことができるように

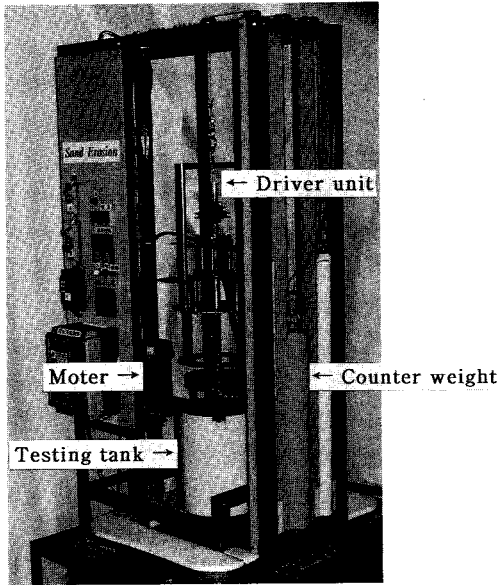


Fig. 4 Counter weight additional mechanism.

なった。また、試験槽も同様の考え方でバランス荷重を付加することによって水と砂の交換作業を容易にできるようにした。

3. 改良型サンド・エロージョン試験機による 2. 3の実験

本研究で作成した改良型サンド・エロージョン試験機は宇佐美ら（宇佐美ら，1977）によって作製され、今まで著者らの一部が実験に使用してきた試料回転型の試験装置〔従来の試験機〕（麻生，菅原ら，1993）と基本的な部分と同じ形式のものである。すなわち、試験槽および試験片取り付け用円盤は同一形状である。あえてこのようにした理由は、従来の試験機によって得られている実験結果と改良型試験機から得られる実験結果の比較検討を容易にして従来得られてきたデータも統一的に解析できるようにするためである。

これらの方法は、試験片を装着した円盤を水とフラタリーサンドを所定の割合で混合したスラリー中で所定時間回転させたときの試験片の質量減少量を測定するものであって、多種類の試料を同一の条件で同時に試験（1回につき7本の試験片が装着可能）

できる利点があることのほかに、スラリーの性状や温度、速度を任意に制御できる特徴を有している。

次に、本研究で作成した改良型サンド・エロージョン試験機を用いて実際に2. 3の実験を行ってその性能について検討した。この実験では、サンド・エロージョン挙動をスラリー温度とスラリー速度の依存性を調べることを目的とした。したがって、温度と速度以外の因子をすべて一定の条件とした。

すなわち、スラリーには従来用いられてきたもの（麻生，菅原ら，1993）と同様にフラタリーサンド（平均粒径 $200\ \mu\text{m}$ の球状天然珪砂）40 vol %と水道水60 vol %からなるものを用い、試験片を取り付けた円盤の回転速度は700 r.p.m.，1000 r.p.m.，1300 r.p.m.の3種類とした。この場合のスラリー速度は円盤の回転方向に対するスラリーの付きまといがあるのでその効果をのぞくため、円盤の回転速度からスラリー流速を差し引いた速度で表わした。なお、ここでできるだけ正確なスラリー流速を推定するために、外径85 mmで8枚羽根の小型水車をスラリーの液面に接触させ、この水車の回転速度をもとにして間接的にスラリー流速の補正を行った。なお、上述したように、試験中における円盤の回転速度の変動は設定値に対してわずか約2%程度であった。試験温度（スラリー温度）は293 K，318 K，343 Kの3種類とし、試験中の温度変動を $\pm 0.5\ \text{K}$ 以内とした。また試験時間は全体で90時間としたが、質量減少率の経時変化を調べるために約20時間ごとに試験片の質量減少量を測定した。

3. 1 試験に供した試験片

本試験に使用した試験片はFig. 5に示したような直径が9.9 mmで長さが75 mmの丸棒状のもので、材質は上から軟鋼（SS 400）、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS 304）、フェライト系ステンレス鋼（SUS 430 F）およびマルテンサイト系ステンレス鋼（SUS 403）である。

このような材質の試料を選んだ理由は従来からサンド・エロージョン現象はスラリー中の溶液による腐食と砂などの粒子の衝突による摩耗の協同現象によっておこるとされてきたからである（腐食防食協会編，1987，P. 131）（石井ら，1995）。すなわち、選

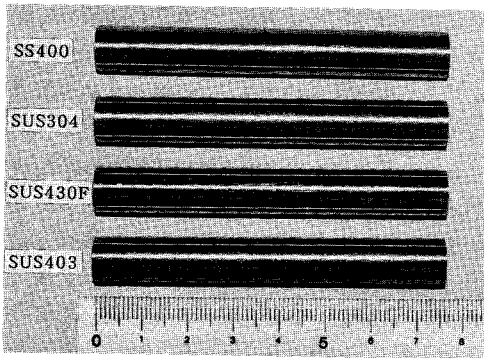


Fig. 5 Macrograph of testpieces.

定した材料の中で SS 400 は最も軟らかく、かつ耐食性に劣るもの、SUS 403 は最も硬度が高く耐摩耗性に優れるもの、SUS 304 は最も耐食性に優れるもの、SUS 430 F はそれらの中間的な特性を有する材料である（日本規格協会，1995）。

3. 2 試験片の取り付け

Fig. 6 は、試験を開始する前、円盤に試験片を取り付けた状態である。試験片が取り付けられている円盤の下の部分にあるのが試験槽で、試験を行う場合は円盤を降下させてこの試験槽の中に挿入し、さらに試験槽を恒温槽に入れた後に試験温度を一定に制御した（Fig. 7 参照）。

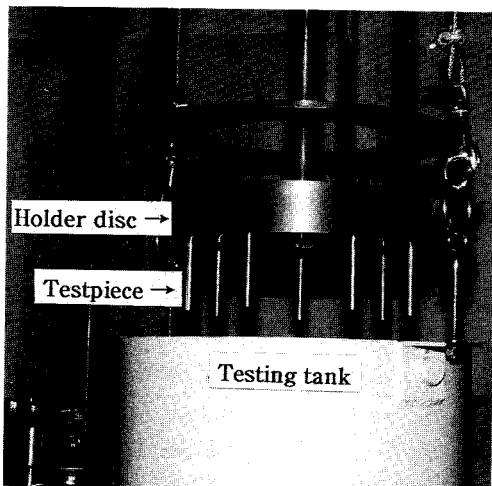


Fig. 6 Testpiece attachment area.

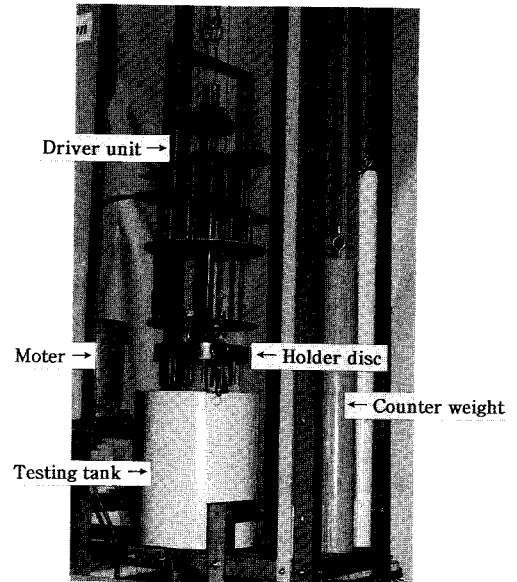


Fig. 7 The set-up of the driver unit and testing tank at the start of the experiment.

本実験の場合、上記の各種試験片を同時に円盤に取り付けて行った。したがって、それぞれ個々の試験片について試験する場合に比較すると試験条件の違いによるデータの誤差は全く無視できることになる。

3. 3 試験槽内の状態

前述した 4 種類の試験片を円盤に取り付けて、水とフラタリーサンドの体積割合を 6 : 4 とし、試験温度 293 K (20°C)、回転速度 700 r.p.m. の条件でサンド・エロージョン試験を行っているときの試験槽内の状態の 1 例を Fig. 8 に示す。図から、水と砂の混合液、すなわちスラリーが右廻りに渦を巻くようになっていることが確認できる。この状態から、円盤の回転数によって得られた一定のスラリー速度で試験片に摩耗現象が生じていることが容易に予想できる。なお不断は試験槽内の水の蒸発や砂の飛散を防止するために試験槽には蓋をしてスラリーの性状が変化しないように心がけている。この点も、従前の試験機（宇佐美ら，1977）に比較して改善した点である。

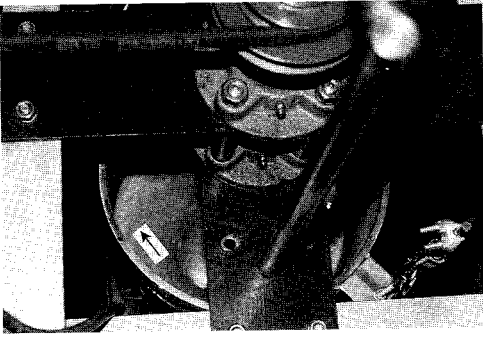


Fig. 8 The set-up inside the testing tank while the experiment is in progress.

4. 結果および考察

Fig. 9 は各試料について、スラリー速度 5.5 m/s 一定のもとで、それぞれ 293 K 、 318 K および 343 K においてサンド・エロージョン試験を行ったときの質量減少率の経時変化を示したものである。なお線の重なりをわかりやすくするために詳細図を挿入した。いずれの場合も質量減少率 (M) は時間 (t) に対してほぼ直線的に増加する傾向にあることがわかる。この傾向は、従来いろいろな金属材料において得られているもの (麻生, 志田ら, 1993) (麻生, 村上ら, 1993) と同じものであり、このことは本実験で得られた結果が一般性がある妥当なものである

ことを裏付けるものである。これらの直線の勾配が大きいほど、試験片が短時間で摩滅してしまう傾向が強いことを示すものであって、耐サンド・エロージョン性には劣ることを意味するものである。すなわち、Fig. 9 においてはいずれの試料とも高温の場合ほど直線の勾配が大きくなり、摩滅しやすいことがわかる。また同一温度の場合 (たとえば Fig. 9 (c)) には試料の種類によって異なり、耐食性に劣る軟鋼材 (SS 400) では直線の勾配が大きくなってのに対し、硬度の高いマルテンサイト系ステンレス材 (SUS 403) ではその勾配は小さく耐サンド・エロージョン性に優れることが明確にあらわれている。

Fig. 10 はスラリー速度を 8.0 m/s と高速にした場合の結果である。これらの結果は Fig. 9 の場合と同様の傾向を示すことがわかるが、全体として Fig. 9 の場合より直線の勾配が大きくなっており、スラリー速度の増加とともにサンド・エロージョンが促進することを示すものである。

一方、Fig. 11 はスラリー速度を 10.5 m/s まで増加させた場合の結果である。この場合もサンド・エロージョン挙動は Fig. 9, 10 の場合とほぼ類似の傾向を示しているが Fig. 9, 10 の場合に比べると一段と直線の勾配が大きくなっている。すなわち、サンド・エロージョン挙動がスラリー速度によって強く影響

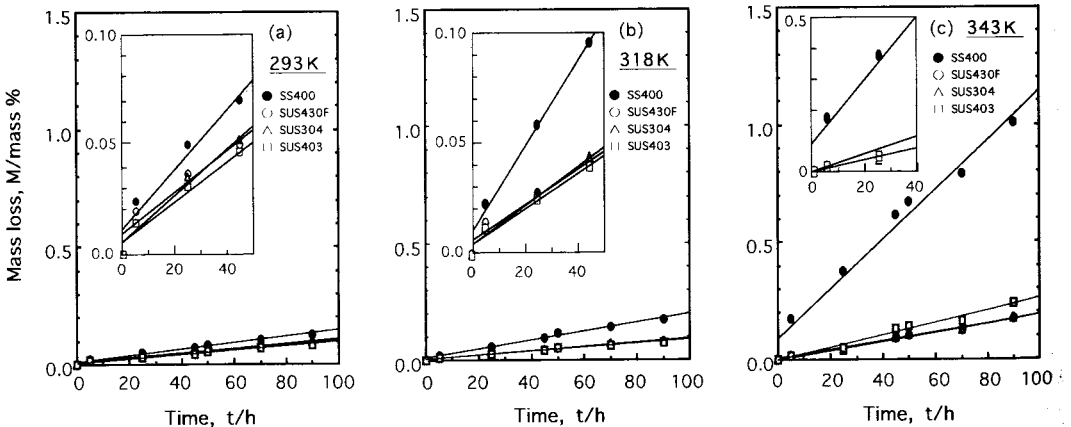


Fig. 9 Relation between mass loss (M) and testing time (t) at $V=5.5\text{ m/s}$; (a) 293 K , (b) 318 K , (c) 343 K .

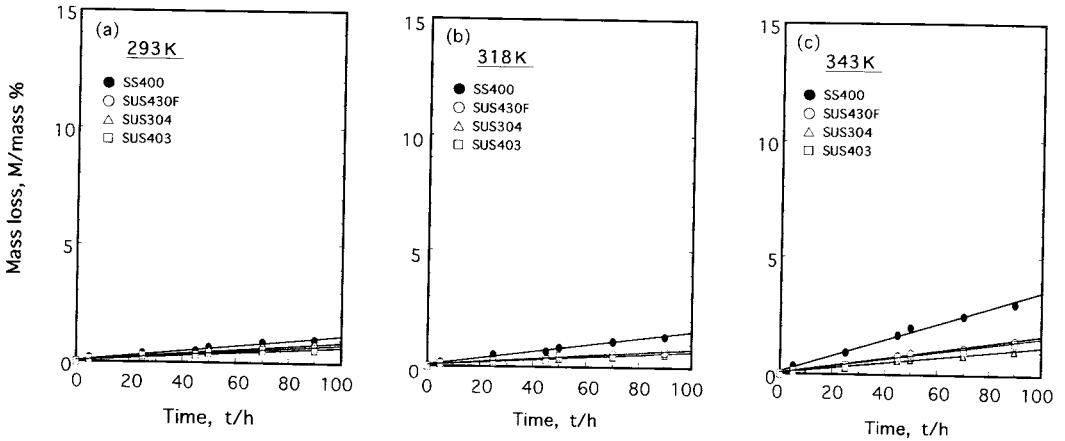


Fig. 10 Relation between mass loss (M) and testing time (t) at $V=8.0$ m/s ;
(a) 293 K, (b) 318 K, (c) 343 K.

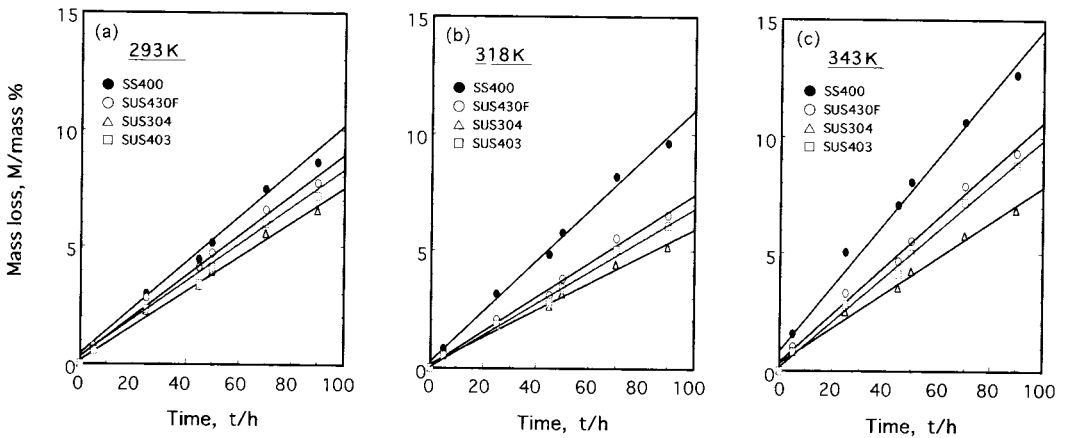


Fig. 11 Relation between mass loss (M) and testing time (t) at $V=10.5$ m/s ;
(a) 293 K, (b) 318 K, (c) 343 K.

を受けるものであることがわかる。つまり同一種類の試料であってもスラリーの温度と速度によってそのサンド・エロージョン挙動は大きく異なることになる。金属材料のサンド・エロージョンにおいてこのような傾向を示すことは、これまでも著者らの一部がすでに報告 (麻生, 菅原ら, 1993) (麻生, 田上ら, 1993) (麻生, 石井ら, 1995) しており, 本実験の結果もこれらの報告と一致するものである。

Fig. 11 (c) は本実験の中で最も高温かつ高速で最も苛酷な条件の場合に相当する。この図から明ら

かなように, 耐食性に劣りかつ最も軟らかい SS 400 材では直線の勾配は最も大きくなっており, 顕著なサンド・エロージョン挙動を呈している。これに対して耐食性に優れる SUS 304 材は, 本実験で用いた試料の中では最も耐サンド・エロージョン性に優れている。硬度の高い SUS 403 材も良い耐サンド・エロージョン性を示すようである。

これらの結果から次の結論をひきだすことができる。すなわち, 耐サンド・エロージョン性に優れる材料を開発するには耐食性に優れかつ高硬度の材質

の材料を基準とすべきである。

一般にサンド・エロージョンは複雑な現象(石井, 麻生ら, 1995)であるために, 試料の耐食性と硬度などの力学的性質との関係を直接的に結び付けることは不可能とされ, 従来の研究によれば, 硬度が高かったり耐食性に優れているものが必ずしも耐サンド・エロージョン性に優れているものとはかぎらないとの報告(田上ら, 1991)もされているが, 本研究の結果はこの点に対して明確な知見が得られたものとする。この際重要なことは, 本研究で試作した改良型試験機がスラリーの温度と速度の制御に優れており, その結果測定点のバラツキが少なく再現性のあるデータが得られたということである。

以上の結果より, 本実験で用いたいずれの試料においても, スラリーの温度と速度がサンド・エロージョン挙動に対して影響をおよぼす大きな因子であることが明らかとなった。この点についてはこれまでも他の金属材料において同様のことが報告されている(麻生, 菅原ら, 1993)(麻生, 石井ら, 1995)(石井, 麻生ら, 1995)。

そこで, これらの挙動をさらに詳細に解析するため Fig. 9~11の結果をもとにして, それぞれ100 hr 試験後の質量減少率の値を基準として, 各試料に対するスラリーの速度と温度の効果について検討をくわえることとした。以下にその結果について述べる。

Fig.12はサンド・エロージョンに対して最も劣る SS 400材と, 最も優れる SUS 304材について, 100 hr 経過後の質量減少率の温度依存性を示したものである。いずれの試料においてもスラリー速度の上昇とともに質量減少率が増加しているのは当然のことであるが, その温度依存性は両試料では異なっている。すなわち, 耐食性に劣る SS 400ではスラリー速度が高速になるほど大きな温度依存性を示すのに対し, 耐食性に優れる SUS 304ではいずれのスラリー速度の場合でもそれほど顕著な温度依存性はみられないようである。SS 400材と SUS 304材とは硬度の点では大差がないことが知られている(日本規格協会, 1995)のでこの現象はスラリー速度が増大するほど, いわゆる腐食摩耗現象が粒子の衝突によって加速されることを示唆するものと考えられる(石井, 麻生ら, 1995)。

一方 Fig. 13はこれら2種類の試料に対して, 各温度におけるスラリー速度依存性を比較したものである。いずれの温度においてもスラリー速度依存性は大きく, 質量減少率は高速の場合ほど著しく増加する傾向にあることが明瞭にあらわれている。さらにその傾向は耐食性に劣る SS 400材の方が顕著である。すなわち, サンド・エロージョン現象を解析する上では, スラリー速度は温度とならんで無視できない重要な因子である(石井, 麻生ら, 1995)こ

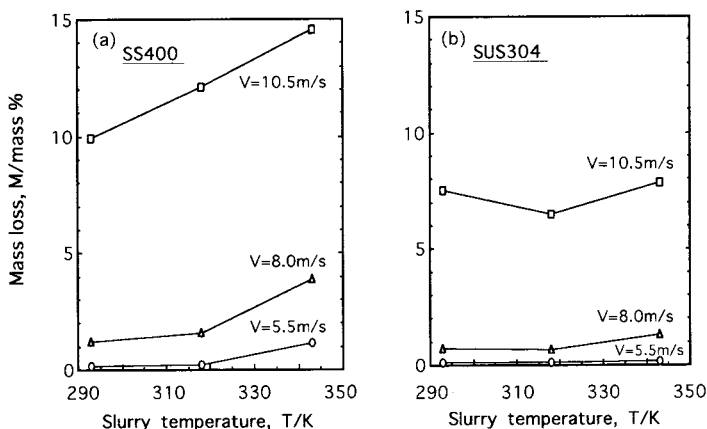


Fig. 12 Temperature dependence of mass loss % at 100 hr on (a) SS 400 and (b) SUS 304.

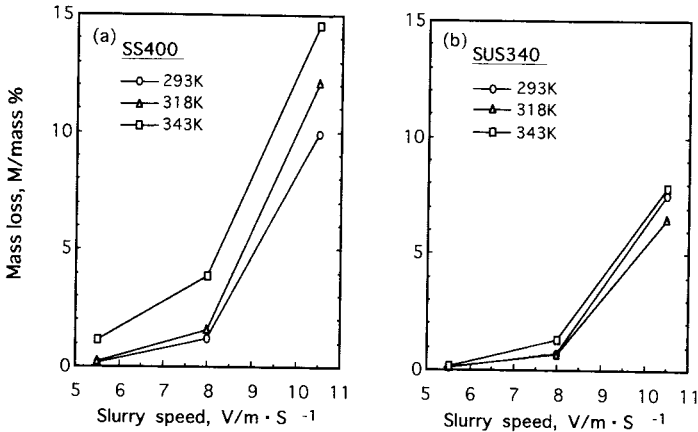


Fig. 13 Slurry-speed dependence of mass loss % at 100 hr on (a) SS 400 and (b) SUS 304.

とがあらためて再確認される。

5. 結論

スラリーの速度および温度を任意に制御することができる改良型サンド・エロージョン試験機を試作した。この試験機を用いて SS 400, SUS 430 F, SUS 304 および SUS 403 の材料についてサンド・エロージョン試験を行った。その結果次の結論が得られた。

- (1) 改良型試験機は試験中の温度変動が 293～343 K の設定温度に対して ± 0.5 K 以下、またスラリー速度の変動は 5.5 m/s ～ 10.5 m/s の設定速度に対して約 0.2% 以下の優れた性能を有していた。したがって、サンド・エロージョン挙動の温度依存性とスラリー速度依存性を調べるのには非常に有効なものである。
- (2) いずれの温度、いずれのスラリー速度においても SS 400, SUS 430 F, SUS 403, SUS 304 の順に耐サンド・エロージョン抵抗は増加した。
- (3) サンド・エロージョン現象はスラリーの温度と速度に強く依存するものであることが再確認された。
- (4) 耐サンド・エロージョン性に優れる材料を開発するには、硬度が高くかつ耐食性に優れる材質のものが有利であると推察された。

謝 辞

終りに臨み、本研究に協力された物質工学科材料工学コースの平成 7 年度卒論学生、山口寛君に深く感謝する。

文 献

- 麻生節夫・菅原勉・田上道弘・後藤正治 (1993) : 高クロム白鑄鉄のサンド・エロージョン速度の温度依存性. 日本金属学会誌, **57**, 96–102.
- 麻生節夫・志田達美・田上道弘・後藤正治 (1993) : Al-CuAl₂ ラメラ共晶合金のサンド・エロージョン挙動. 日本金属学会誌, **57**, 88–95.
- 麻生節夫・村上仁・田上道弘・後藤正治・武藤侃 (1994) : Fe-15% Cr-C-B 四元系共晶合金のサンド・エロージョン挙動. 鑄物, **66**, 345–350.
- 麻生節夫・菅原勉・田上道弘・後藤正治 (1993) : 高クロム白鑄鉄のサンド・エロージョン速度のスラリー速度依存性. 日本金属学会誌, **57**, 312–319.
- 麻生節夫・田上道弘・後藤正治 (1993) : 5 mass % Cr を含有する白鑄鉄のサンド・エロージョン. 日本金属学会誌, **57**, 1251–1257.
- 麻生節夫・石井雄三・後藤正治・田上道弘・武藤侃 (1995) : 含ボロン 25% Cr 白鑄鉄のサンド・エロージョンの温度依存性. 日本金属学会誌, **59**, 990–996.

- 石井雄三・麻生節夫・後藤正治・小松芳成 (1995) : 含ボロン高クロム白鑄鉄のサンド・エロージョンにおけるエロージョン・コロージョン速度の評価. 日本鑄造工学会第127回全国講演大会概要集, 41.
- 宇佐美正・芹田陽 (1977) : 白鑄鉄の凝固組織とサンド・エロージョンとの関係. 鑄物, **49**, 731-736.
- 総合鑄物センターED委員会編 (1980) : 鑄物のアブレーション摩耗. 総合鑄物センター, 25.
- 田上道弘・成田正明・麻生節夫・後藤正治・永田明彦 (1992) : 高クロム白鑄鉄の耐食性と耐サンド・エロージョン性の関係. 鑄物, **64**, 89-93.
- 日本規格協会 (1995) : JIS ハンドブック (鉄鋼).
- 腐食防食協会編 (1987) : エロージョンとコロージョン. 裳華房, 186.
- 腐食防食協会編 (1987) : エロージョンとコロージョン. 裳華房, 131.