

鑄ぐるみ接合法による鑄鉄複合材料の製造と諸特性評価

—高温での耐摩耗性を有する粉体輸送ベント管の開発—

高橋芳朗*・園田正樹*・清高稔勝*・北坂学*・片岸庄史**・清水一道***

*生産技術部・**(株)八幡ハイキャスト・***国立大分工業高等専門学校

Manufacture and Several Characteristic Evaluations of Cast Iron Matrix Composite Materials by Cast-In Insertion Process

-Development of High-Temperature Wear Resistance Bent Pipe for Powder Transportation-

Yoshiro TAKAHASHI*, Masaki SONODA*, Toshikatsu KIYOTAKA*, Manabu KITASAKA*,
Shoji KATAGISHI** and Kazumichi SHIMIZU***

*Production Engineering Division, **Yahata High Cast, LTD and ***Oita National College of Technology

要旨

硬質な炭化タングステン粉末を耐摩耗性が要求される部位にねずみ鑄鉄や高クロム鑄鉄で鑄ぐるんだ粉体輸送配管材料を作製した。また、得られた材料の組織、室温から高温における硬さ、高温酸化特性などを評価し、従来の鉄鋼材料と比較した。その結果、雰囲気によって使用可能温度範囲が制約されるものの、得られた材料は従来の鉄鋼材料に比べて高温環境下で優れた諸特性を示すことが分かった。

1. はじめに

製鉄プラントなどの粉体輸送配管ベント部では、500～800℃を超えるアッシュエロージョンによる摩耗が著しい。エロージョンとは、粉体の衝突により配管などの材料の表面が損傷、除去される摩耗現象の一つであるが、このような現象が起こって配管などに孔が開くと操業が停止するとともに、高熱なガスや粉体の噴出により大事故を招く危険性もある。したがって、定期的なメンテナンスやエロージョン寿命の予測とともに、プラントの長寿命化を可能とする耐エロージョン摩耗材料の開発が重要な課題となっている。

これまでに国立大分工業高等専門学校の清水研究室では、各種鉄鋼材料におけるエロージョン摩耗特性について、被衝突材料の機械的性質と粉体の形状、硬さ、流速、衝突角度などとの関係について系統的に調査を行ってきた¹⁾。その結果、被衝突材料のエロージョン摩耗特性は衝突角度依存性があり、脆性材料と延性材料では異なる傾向を示すことが分かっている。また、粉体の形状や硬さなどの違いによっても、エロージョン摩耗の形態が異なることが分かっている。しかし、これまでの研究は室温における試験評価が中心であり、摩耗メカニズムの解明、試験装置の開発などの難しさから、高温における試験評価はほとんどなされていないのが現状である。

一方、鑄ぐるみ接合法は、鑄造による成形性の利点

を応用して異種材料や部材を複合化する液相複合法の一つであり、鑄造部品の高機能化・高付加価値化をはかる上で非常に有効な工業的手法とされている²⁾。特に耐摩耗性が要求される鑄造部品では、機械装置の高速化・高出力化に対応するためにその材質の向上が求められており、単一の合金では限界があることから、近年では耐摩耗性が要求される部位に超硬やセラミックスなどの硬質粉末やブロックを鑄ぐるんだ複合材料の研究が精力的に行われている^{3)~8)}。しかし、これらの研究はいずれも複合材料の室温における組織評価が中心であり、高温エロージョン摩耗特性の指針となる高温環境下の諸特性はほとんど調査されていないのが現状である。

したがって本研究では、高温での耐エロージョン摩耗特性を向上させるため、硬質な炭化タングステン（以下、WCとする）粉末を耐摩耗性が要求される部位にねずみ鑄鉄（以下、FC200とする）や高クロム鑄鉄（以下、27Crとする）で鑄ぐるんだ粉体輸送配管材料を作製した。そして、得られた材料の組織、室温から高温における硬さ、高温酸化特性などを評価し、従来の鉄鋼材料と比較した。

2. 供試材の作製

粒径の異なる二種類のWC粉末（(株)高純度化学研究所製、純度99.0mass%、平均粒径5 μ mおよび150 μ m）

を準備し、表1に示す混合比で配合した。ただし、WC粉末を耐摩耗性が要求される部位に固定するためには、目的の部位となる鑄型表面にWC粉末を塗布し、成形する必要がある。したがって、WC粉末の鑄型表面への塗布・成形性を良くするため、約1mass%の水ガラスと約0.3mass%の水を加えてペースト状にしたものを実験に供した⁴⁾。

図1に示すように、ペースト状のWC粉末はあらかじめ目的の形状に塗布・成形した後、40℃で5時間以上放置してから90℃で2時間乾燥した。得られたWC粉末の乾燥成形体は、図2に示す炭酸ガス鑄型内に固定し、表2に示す鑄鉄溶湯で鑄ぐるんだ。ただし、鑄鉄溶湯の鑄込温度はFC200が約1380～1420℃、27Crが約1450～1490℃とした。また、鑄造時に水ガラス成分であるナトリウムなどが酸化してガスを発生し、その吹き上がりで鑄鉄溶湯が湯口より吹きこぼれることに注意して試験片を作製した。

表1 WC粉末の混合比 (mass%比)

試料名	150 μm : 5 μm
A	100 : 0
B	75 : 25
C	50 : 50
D	25 : 75
E	0 : 100

表2 鑄鉄溶湯の化学成分 (mass%)

試料名	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Fe
FC200	3.84	2.26	0.42	0.04	-	0.03	0.05	-	残部
27Cr	2.76	0.46	0.64	0.03	0.02	-	27.0	0.44	残部

3. 実験方法

3.1 組織観察

WC鑄ぐるみ層（以下、WC層とする）を含む供試材の先端部から約50×50×15mmの形状の板材を切出し、断面を切断後、研磨して金属顕微鏡によりWC層断面のマイクロ組織を観察した。さらに、WC層を詳細に観察するため、走査型電子顕微鏡およびそれに付随するX線マイクロアナライザを用いて分析した。

3.2 高温酸化試験

実際の使用環境を想定して、試験片を小型電気炉内で500、650、800℃に大気中でそれぞれ加熱し、2時間保持した後に炉冷する酸化試験を実施した。そして、試験片の酸化量を試験前後の質量変化から算出し、試験前後の組織および硬さについて従来の鉄鋼材料と比

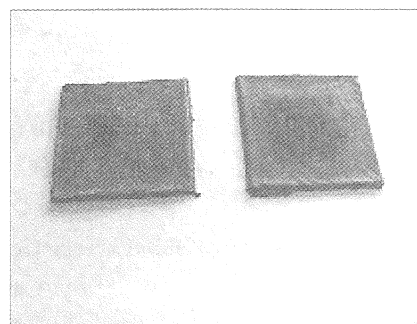


図1 WC粉末の乾燥成形体

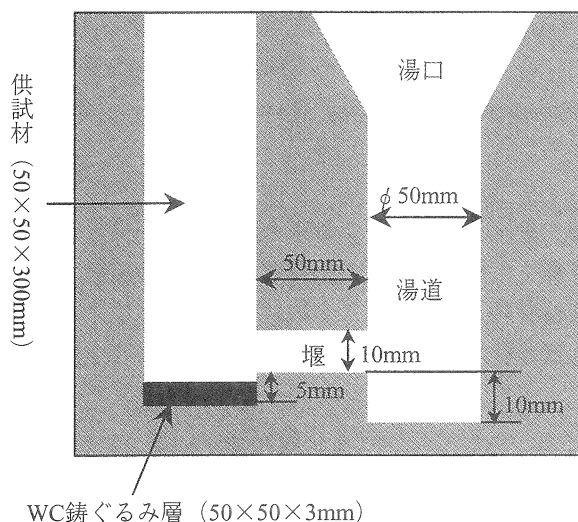


図2 炭酸ガス鑄型形状

較した。ただし、試験片形状は約10×10×10mmとし、昇温速度は300℃/hとする。

3.3 室温および高温硬さ試験

エロージョン摩耗に影響を及ぼす試験片の室温および高温硬さを調べるため、20、300、500、600、650、700、800℃における硬さを純度99.9999mass%の高純度アルゴンガス中で測定し、従来の鉄鋼材料と比較した。

4. 実験結果および考察

4.1 組織観察

図3にA-FC200複合材およびE-FC200複合材のWC層断面のマイクロ組織を示す。その結果、WC層表層部にいずれもガス欠陥が存在し、特にA-FC200複合材では水ガラスが大きく凝集した形跡も確認された。このような現象は、A-FC200複合材が150 μmのWC粉末のみを使用しており、WC粉末が粗くその間隙も大きいことから、間隙に結合材である水ガラスが鑄鉄溶湯の熱で溶けて大きく凝集したことによる。さらにそれに起因して、水ガラスの大きな凝集が鑄鉄溶湯のWC粉末間隙への浸透を阻害し、表層部にガス欠陥を発生させたと考えられる。また、E-FC200複合材では5 μmの微細なWC粉末

のみを使用していることからWC粉末の間隙も緻密であり、鑄鉄溶湯が十分に浸透できず表層部にガス欠陥を発生させたと考えられる。

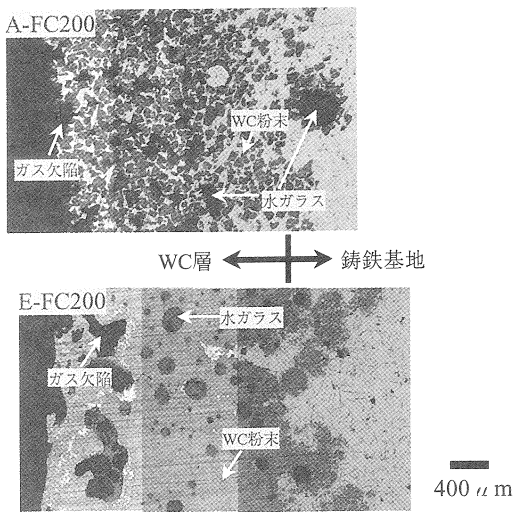


図3 A-FC200複合材およびE-FC200複合材のWC層断面のマイクロ組織

一方、図4にB-FC200複合材のWC層断面のマイクロ組織を示すが、WC層は粗いWC粉末と微細なWC粉末が均一に分散しており、水ガラスの凝集もA-FC200複合材およびE-FC200複合材に比べて細かく均一に分散している。また、鑄鉄溶湯はWC粉末の間隙に十分に浸透し、鑄鉄基地はWC粉末で強化された組織を呈している。このような結果は、C-FC200複合材およびD-FC200複合材でも同様に得られた。さらに、走査型電子顕微鏡に付随するX線マイクロアナライザを用いてWC層の鑄鉄基地を分析したところ、Wが基地中に固溶しており、図5に示すように鑄鉄との界面近傍では W_6C と思われる炭化物も析出していた⁴⁾。したがって、このように粗いWC粉末と微細なWC粉末を混合して鑄鉄溶湯で鑄ぐるんだWC層は、ガス欠陥や水ガラスの大きな凝集も少ないことから、鑄鉄の部分強化に有効であると考えられる。

次に、27Crのマイクロ組織を図6に、B-27Cr複合材のWC層断面のマイクロ組織を図7に示す。図6に示すように、27Crは亜共晶組織であり、大きく樹枝状に晶出した初晶 γ と硬質な $\gamma-M_7C_3$ ($M=Fe, Cr$) 共晶の混合組織となっている。しかし、図7に示すように、WC粉末を分散させることでWC層の基地組織は微細となり、27Crの結晶成長を抑制することが確認できる。したがって、このような金属結晶の微細化は材料特性を向上させる上で重要であるが、鑄ぐるまれたWC粉末の特性と相俟って27Crの耐摩耗性を向上させることが期待できる。

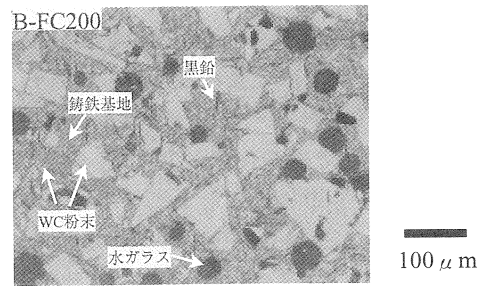


図4 B-FC200複合材のWC層断面のマイクロ組織

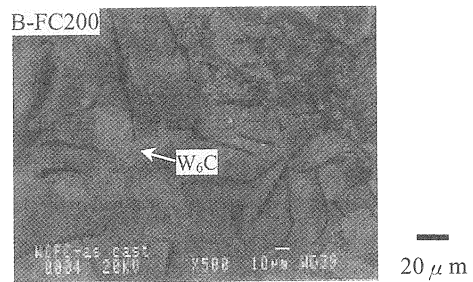


図5 WC層/FC200界面のSEM写真

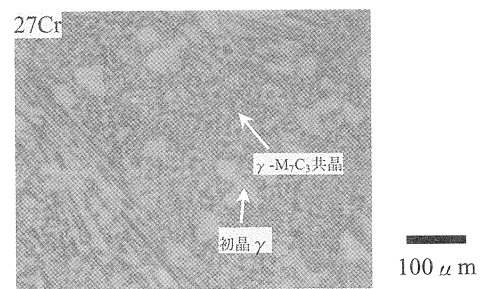


図6 27Crのマイクロ組織

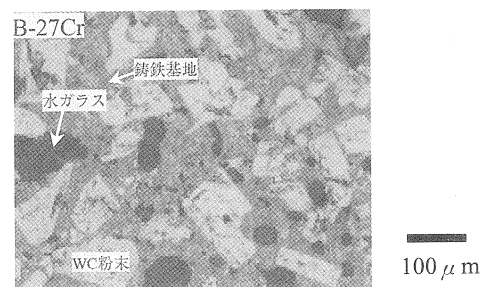


図7 B-27Cr複合材のWC層断面のマイクロ組織

4.2 高温酸化試験

従来の鉄鋼材料における高温酸化特性を図8に示す。ただし、酸化量は試験前の試験片の質量を100とし、試験前後の試験片の質量変化から算出している。また、一般構造用圧延鋼をSS400、機械構造用炭素鋼をS45C、機械構造用炭素鋼（焼入れ）をS45CQ、オーステナイト系ステンレス鋼をSUS304、ねずみ鑄鉄をFC200、球状黒鉛鑄鉄をFCD450、高クロム鑄鉄を27Crとした。その結果、500℃まではいずれの試験片もほとんど酸化し

ないことが確認された。しかし、加熱温度が上昇するにしたがって、Cr含有量の少ないSS400, S45C, S45C Q, FC200, FCD450で酸化量が増し、特に800℃ではその傾向が顕著に現れた。一方、Cr含有量の多いSUS304および27Crは800℃でも酸化量が少なく、耐高温酸化特性に優れていることが分かった。

また、WC層の高温酸化特性を確認するため、B-FC200複合材とFC200の高温酸化特性を図9に比較した。その結果、B-FC200複合材は650℃までは基地となるFC200と同程度の酸化特性を示すものの、800℃でWC層が激しく酸化し、耐高温酸化特性を逆に低下させることが分かった。したがって、WC粉末を鑄ぐるんだ複合材料は、不活性ガス雰囲気中で使用した場合には高温酸化が問題にならないものの、650℃以上の大気中で使用した場合には基地の高温酸化特性がいくら優れていても、WC層が激しく酸化するために使用できないと考えられる。

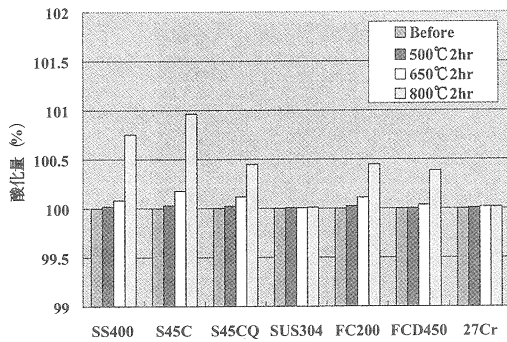


図8 従来の鉄鋼材料における高温酸化特性

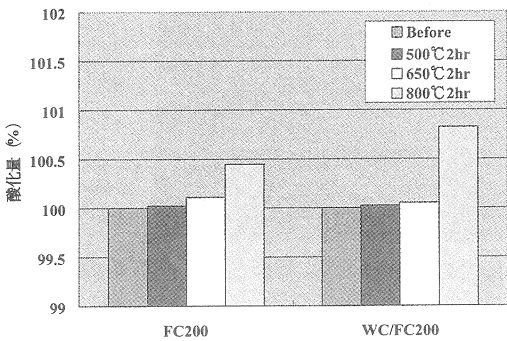


図9 B-FC200複合材とFC200の高温酸化特性

一方、高温環境下で材料を使用する場合、上述した高温酸化特性とは別に、材料の機械的性質に影響を及ぼす組織が重要な課題となる。そこで、高温酸化試験に用いた試験片を切断・研磨し、各試験片の試験前後における組織を観察した。図10に従来の鉄鋼材料における高温酸化試験前後のミクロ組織を示す。その結果、フェライトとパーライトからなるSS400の組織は、650

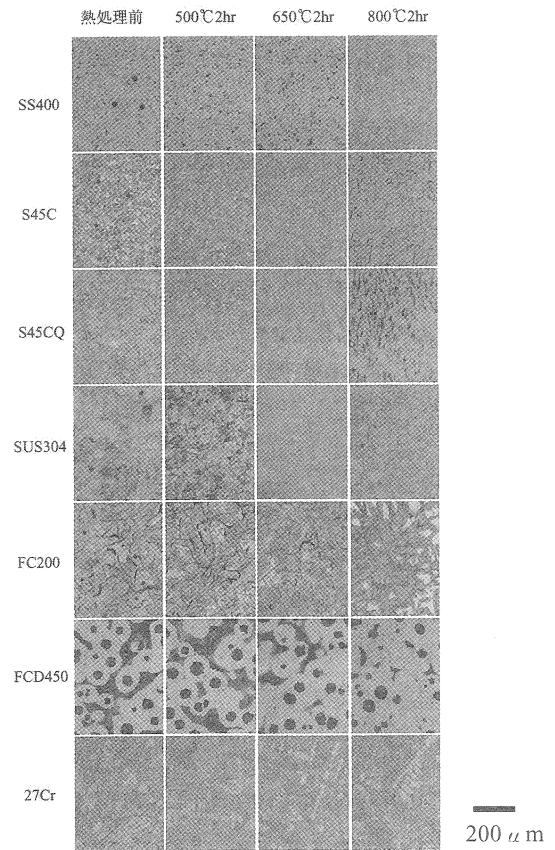


図10 従来の鉄鋼材料における高温酸化試験前後のミクロ組織

℃まであまり変化が見られないものの、800℃で組織がフェライト化し、結晶粒も粗大化している。また、フェライトとパーライトからなるS45Cの組織は、500℃および650℃で焼なまされて再結晶化しており、800℃でフェライト化が進み、結晶粒も粗大化している。一方、焼入れによりマルテンサイト化したS45CQの組織は、500℃および650℃で焼戻されて基地中に炭化物が析出しており、800℃でフェライト化が進み、結晶粒も粗大化している。オーステナイト単相のSUS304の組織は、500℃および650℃で焼なまされて粒界にわずかに炭化物が析出しており、800℃で結晶粒がわずかに粗大化している。黒鉛とパーライトからなるFC200の組織は、500℃および650℃で黒鉛周辺部からフェライト化が進み、800℃で黒鉛がなくなってその周辺部に酸化物が生成している。また、黒鉛とフェライト、パーライトからなるFCD450の組織は、650℃以上で黒鉛周辺部からフェライト化が進んでいる。一方、初晶 γ と γ -M₇C₃共晶の亜共晶からなる27Crの組織は、いずれの温度においてもあまり差が見られないことが確認できる。上述したように、Cr含有量の少ないSS400, S45C, S45

CQ, FC200, FCD450は800℃で酸化量が増し、耐高温酸化特性を著しく低下させた。これは加熱温度がフェライトとパーライトの二相からオーステナイト単相へ変態するA₁点（約723℃）を超えたために炭素がオーステナイト中に固溶し、大気加熱による脱炭と酸化が同時に進行したことに起因する。したがって、試験後の組織のフェライト化も脱炭による影響であり、硬さもフェライト化したものについては著しく低下していたことから、800℃の高温環境下では耐エロージョン摩耗特性もあまり期待できない。一方、SUS304および27Crは高温環境下でも比較的組織が安定しており、酸化や硬さの低下も少ないことから耐高温エロージョン摩耗材料として期待できると考えられる。

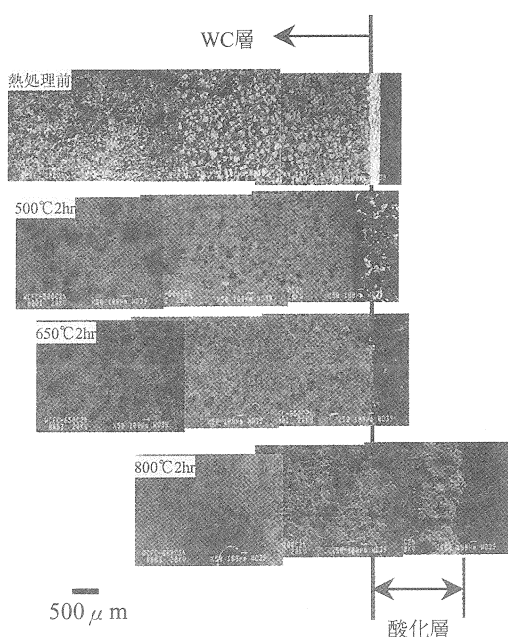


図11 B-FC200複合材の高温酸化試験前後の断面マイクロ組織

次に、図11に示すように、WC層の高温酸化試験前後のマイクロ組織を比較するため、B-FC200複合材の高温酸化試験前後の断面マイクロ組織を走査型電子顕微鏡およびそれに付随するX線マイクロアナライザを用いて分析した。その結果、熱処理前に比べて500℃ではWC粉末の組織が緻密化しており、WC層の基地中に酸素がわずかに拡散していた。また、650℃ではWC粉末が虫食い状態となり、WC粉末中に酸素がわずかに存在していた。さらに、WC層の基地中の酸素量が500℃の時より増えていることが分かった。一方、800℃ではWC層からFeとWの酸化物が隆起しており、WC層も同様に多くの酸化物を生成していた。また、酸素は鑄鉄基地中へ深く拡散しており、上述したように黒鉛のあった周

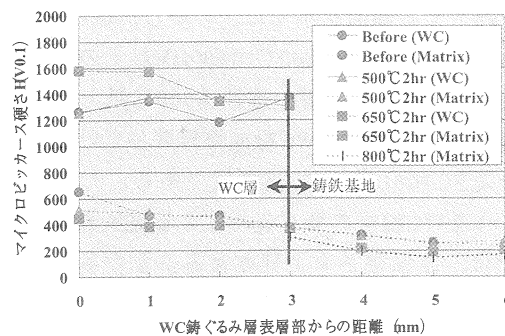


図12 B-FC200複合材の高温酸化試験前後の断面硬さ

辺部にFeの酸化物も生成していることが分かった。図12はこのようなB-FC200複合材の高温酸化試験前後の硬さを比較したものであるが、上述したように、粗いWC粉末は組織が500℃以上で緻密化することから硬さがわずかに上昇している。しかし、800℃では酸化が激しいため、硬さを測定することができなかった。一方、微細なWC粉末を含むWC層の基地は、鑄鉄基地のフェライト化により硬さがわずかに低下することが分かった。したがって、B-FC200複合材の高温酸化は、WC層の基地中に酸素が固溶・拡散し、温度が上昇するにしたがって内部へ酸素が移動する。また、650℃以上でWC粉末を酸化させて組織が変化し、耐高温酸化特性とともに硬さを低下させると考えられる。仮に、鑄鉄基地をFC200から27Crに変えて酸素の拡散を抑えたとしても、WC粉末の現れた表層部は650℃以上で酸化するため、大気中で使用する場合は効果が低い。ただし、不活性ガス雰囲気中では酸化や脱炭が起こらないため、後述する材料の高温硬さと相俟った耐高温エロージョン摩耗特性の向上が期待できる。

4.3 室温および高温硬さ試験

図13に従来の鉄鋼材料における高温硬さを示す。その結果、いずれの試験片も温度の上昇とともに硬さが低下する傾向を示した。特に、SS400, S45C, S45CQ, FC200, FCD450は500℃以上で硬さの差がほとんどなくなり、600℃以上で80HV以下に軟化する。一方、SUS304は500℃以上で硬さの低下が少なく、700℃まで150HV以上の硬さを維持している。また、27Crは600℃まで570HV以上の高硬度を示し、700℃でも200HV以上の硬さを示している。したがって、Cr含有量の多いSUS304および27Crは高温硬さに優れており、特に27Crは他の鉄鋼材料と比べて高温硬さとともに高温酸化特性も優れていることから、耐高温エロージョン摩耗材料として有望であると考えられる。

次に、図14にB-FC200複合材およびFC200の高温硬さを示す。その結果、いずれの試験片も温度の上昇と

もに硬さが低下する傾向を示した。しかし、粗いWC粉末は硬さの低下が少なく、800℃で600HV以上の高硬度を示している。一方、WC層の基地は500℃以上で硬さの低下が著しいが、微細なWC粉末が分散していることで基地となるFC200に比べて高硬度である。したがって、このようなWC粉末の鑄ぐるみによる鑄鉄表層部の部分複合化は、高温硬さを上昇させることから耐高温エロージョン摩耗特性の改善に効果が期待できる。しかし、さらに高温での耐高温エロージョン摩耗特性を向上させるためには、基地の強化が重要な課題となる。そこで、基地を27Crとし、同様に高温硬さ試験をした結果を図15に示す。その結果、WC層の基地の硬さが上昇し、600℃以上で硬さの低下が少なく、400HV以上の高硬度を示した。また、基地となる27Crと比較して600℃以上で硬さが高く、かつ硬さの低下も少ないことが分かった。

5. まとめ

耐高温エロージョン摩耗特性を向上させるため、硬質なWC粉末を耐摩耗性が要求される部位にFC200や27Crで鑄ぐるんだ粉体輸送配管材料を作製した。そして、得られた材料の組織、室温から高温における硬さ、高温酸化特性などを評価し、従来の鉄鋼材料と比較したところ、以下の結果が得られた。

- (1) 27Crは耐高温酸化特性に優れ、他の鉄鋼材料に比べて高温硬さも高く、かつ熱影響による組織および硬さの変化も少ないことから、耐高温エロージョン摩耗材料として有望である。
- (2) 粗いWC粉末と微細なWC粉末の混合粉末を27Crで鑄ぐるんで鑄鉄基地表層部を部分複合化することにより、表層部の高温硬さがさらに増すことから、耐高温エロージョン摩耗特性をより一層改善することが期待できる。
- (3) WCは650℃以上で激しく酸化するため、650℃以上の大気中でWC鑄ぐるみ材を使用しても耐高温エロージョン摩耗特性の向上は期待できない。したがって、650℃以上の使用では不活性ガス雰囲気中に限定するなど、適材適所の材料選択が重要である。

最後に、本研究の推進にあたり、貴重な御助言を賜りました秋田大学工学資源学部材料工学科の麻生節夫助教授に心より感謝の意を表します。また、本研究は、(財)大分県産業創造機構の新事業創出研究開発事業の委託を受けて実施したことを付記します。

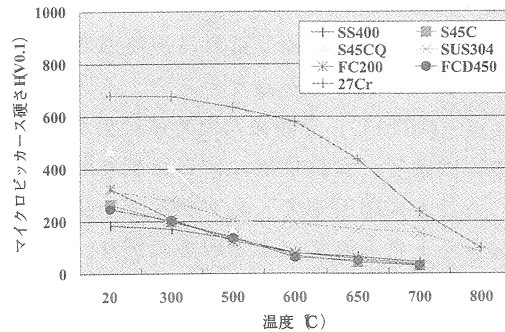


図13 従来の鉄鋼材料における高温硬さ

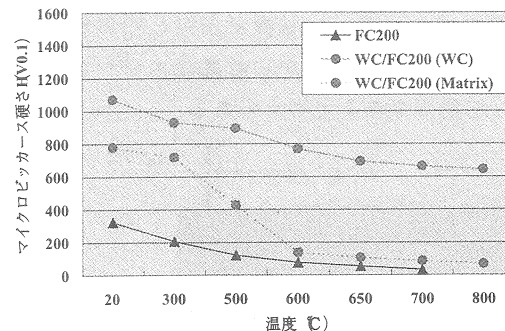


図14 B-FC200複合材およびFC200の高温硬さ

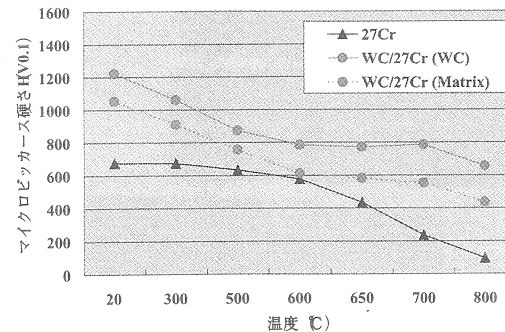


図15 B-27Cr複合材および27Crの高温硬さ

参考文献

- 1) 清水一道：鉄鋼材料のエロージョン摩耗特性，北海道大学大学院工学研究科博士論文，(2001)
- 2) 高橋芳朗：鉄道ブレーキ用鑄造複合材料の開発，九州大学大学院工学研究科博士論文，(2002)
- 3) 麻生節夫ほか：鑄造工学，70(1998)，878
- 4) 麻生節夫ほか：鑄造工学，73(2001)，155
- 5) 岡田和彦ほか：鑄造工学，73(2001)，493
- 6) 堺邦益ほか：鑄造工学，68(1996)，387
- 7) 堺邦益ほか：鑄造工学，68(1996)，392
- 8) 例えば，富田義弘ほか：鑄造工学，74(2002)，143