

技 術 論 文

耐摩耗複合ライナーの特性評価

Evaluation of the wear resistance characteristics of FUJICO's composite liners



技術開発センター
商品・生産技術開発室
主任 花田 喜嗣
Yoshitsugu Hanada

技術開発センター
商品・生産技術開発室
室長 博士(工学) 園田 晃大
Akio Sonoda

技術開発センター
商品・生産技術開発室
技術顧問 牟田 敏克
Toshikatsu Muta

技術開発センター
主任 博士(工学)
肖 陽
Yang Xiao

要 旨

当社の複合ライナー商品として、高炭素高クロム系の材質が広く使われており、厳しい環境下においても十分な耐摩耗効果を発揮し、長年高い評価をいただいている。さらなる安価化や多様化によるライナー拡販に向けて、新規の材質開発や製法に対する取組みを行っている。本稿では、耐摩耗ライナーの評価として、耐滑り摩耗性および耐衝突摩耗性に着目した特性調査を行った。この結果、炭化物の面積率や局所硬度の関係から、当社のライナー特性を明らかにすることができた。

Synopsis:

FUJICO has produced high-performance composite liners with high wear resistance by using high-Carbon and high-Chromium iron. For many years, it is received good feedback from its users, because of its ability to withstand harsh environment conditions. We have developed new materials and production methods for improving the quality of existing liners. This paper investigates and discusses the performance of the liners in terms of resistance toward abrasion and impact wear. The results indicated that FUJICO's liners were clarified by area ratio of carbides and local hardness as matrix and carbides in the performances.

1. 緒言

当社の高温耐摩耗用鑄造複合ライナー¹⁾は、高温環境下で耐摩耗性を要求される設備に広く適用されている。特に高炭素高クロム系のライナーは高硬度の炭化物を大量に含むため、耐摩耗性に優れており、各種耐アブレーション、耐エロージョン材料として、実に様々な設備に用途を拡大している。当社のライナーは製鉄所を中心に、例えば、シュートライナーやホッパーライナー、粉砕機ライナー、グリズリーやウィンドレグ内面など、特に原料の激しい衝撃や動きがある箇所に適応されている^{2,3)}。これまでの長年の使用において、当製品はコストや耐用面で非常に良好な実績を

収めている。

しかしながら、国内外に関わらず、現在、多くの種類のライナーが各メーカーから販売されており、ユーザーは使用環境とコストに合わせて見直し更新適用を逐次行っている。これらのライナーの摩耗の形態は使用環境、例えば、摩耗の原因となる材料の種類、大きさ、形状、接触の際の相手材の温度、角度、速度や量などの諸条件によって異なるため、耐摩耗性を普遍的に評価することは難しい。また耐摩耗性はメーカーによって様々な試験方法で評価しているものの、実際のところ、実機使用によってその効果が明らかになることが多い。耐摩耗性はライナーの金属組織に大きく

依存することから、基地や析出物の在り方が重要であり、それを整理することで耐用予測やコストダウンの指針が得られる。現在、ライナーのシェア競争が激化する中、常に確固たる品質とコストを提案することで、顧客からの信頼を得ることができ、販路維持拡大が期待できる。

このような背景から当社では、現在のシェアに加え、より幅広く展開するために、ライナー組織の確認および耐摩耗性への影響に対する特性調査に取り組んできた。本稿では一部ではあるが、材質と耐摩耗の特性にかかわる調査結果について紹介する。

2. 試料および実験方法

2.1 実験試料

評価用のサンプルの合金成分を Table 1 に示す。基本的な組成として高炭素高クロム系を選定した。特殊合金については開発中であるため、割愛させていただく。

Table 1 Chemical composition of sample liners

No	Chemical composition (mass%)					Product method
	C	Cr	Special Metals			
			X	Y	Z	
A	4.0-5.0	25-30				Welding
B	4.5-5.5	20-25			0.2-0.5	Welding
C	4.0-5.0	20-25		1.0-2.0	0.5-1.0	Welding
D	4.5-5.5	20-25		3.0-4.0		Welding
E	4.0-5.0	25-30			1.0-2.0	Casting
F	4.5-5.5	25-30	3.5-4.5		4.0-5.0	Casting
G	4.0-5.0	25-30			1.0-2.0	Casting
H	4.5-5.5	25-30	3.5-4.5		4.0-5.0	Casting
I	4.0-5.0	30-35	1.5-2.5	3.5-4.5	4.0-5.0	Casting
J*	Hi-Cr liner					Welding
K*	Hi-Cr liner					Welding
L**	Ceramics					Sintering

*made in other maker, **developing original ceramics liner

A~D は当社製の溶接法による肉盛ライナーである。E, F は当社製の鋳掛法による板状鋳造ライナーであり、G~I は同じく鋳掛法による複雑形状対応型ライナーである⁴⁾。J, K は比較用の他社製の溶接ライナーである。さらに、L は自社製セラミックライナー⁵⁾を用いて、傾向を確認した。L 以外は高クロム鋳鉄系の材質であり、炭素量およびクロム量は大きく差はないが、他の特殊金属の配合量や施工法などが異なっている。

2.2 特性評価

組織全体の硬度測定はロックウェル硬度計を用い、荷重 150kgf で負荷時間 10 秒の条件で行った。5 点の

ロックウェル硬度測定結果から平均を算出し、ショア硬度に換算した。また、基地および炭化物の特定箇所別の硬度測定にはマイクロビッカース硬度計を用いた。荷重は 0.05kgf とし、負荷時間 15 秒間の条件で行い、同様に 5 点平均とした。

続いて、Fig.1 に示したエンドレスエメリー試験機を用いたアブレッシブ摩耗試験により、耐滑り摩耗性の評価を行った。試験条件を Table 2 に示す。試験片サイズは 50mm×50mm の平面に対して、3.1kgf の荷重下、ベルト回転速度を 240m/min に設定した。連続 2 時間の摩耗試験を行った後、試験片の減重量を測定した。各試験片の減重量と比重から摩耗分の体積に換算して比較を行った。次に、Fig.2 に示すショットブラスト機を用いてブラストエロージョン摩耗試験を行い、耐衝突摩耗性の評価を行った。試験条件を Table 3 に示す。

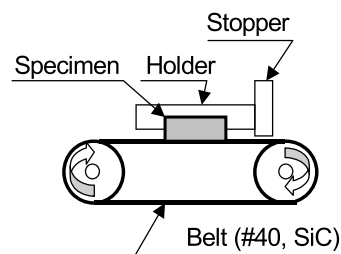


Fig.1 Schematic diagram of abrasive wear test

Table 2 Conditions of abrasive wear test

Load (kgf)	3.1
Speed (m/min)	240
Belt roughness	#40
Test time (hr)	2
Size of test piece (mm)	50×50×10

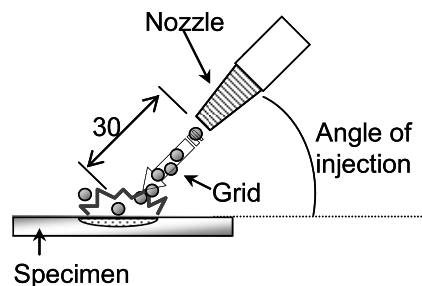


Fig.2 Schematic diagram of impact wear test

Table 3 Conditions of impact wear test

Abrasives	Alumina grid, #24
Angle of injection (°)	45
Air pressure (kgf/cm ²)	4.0
Quantity of projected materials (kg)	1.5
Injection time (s)	60

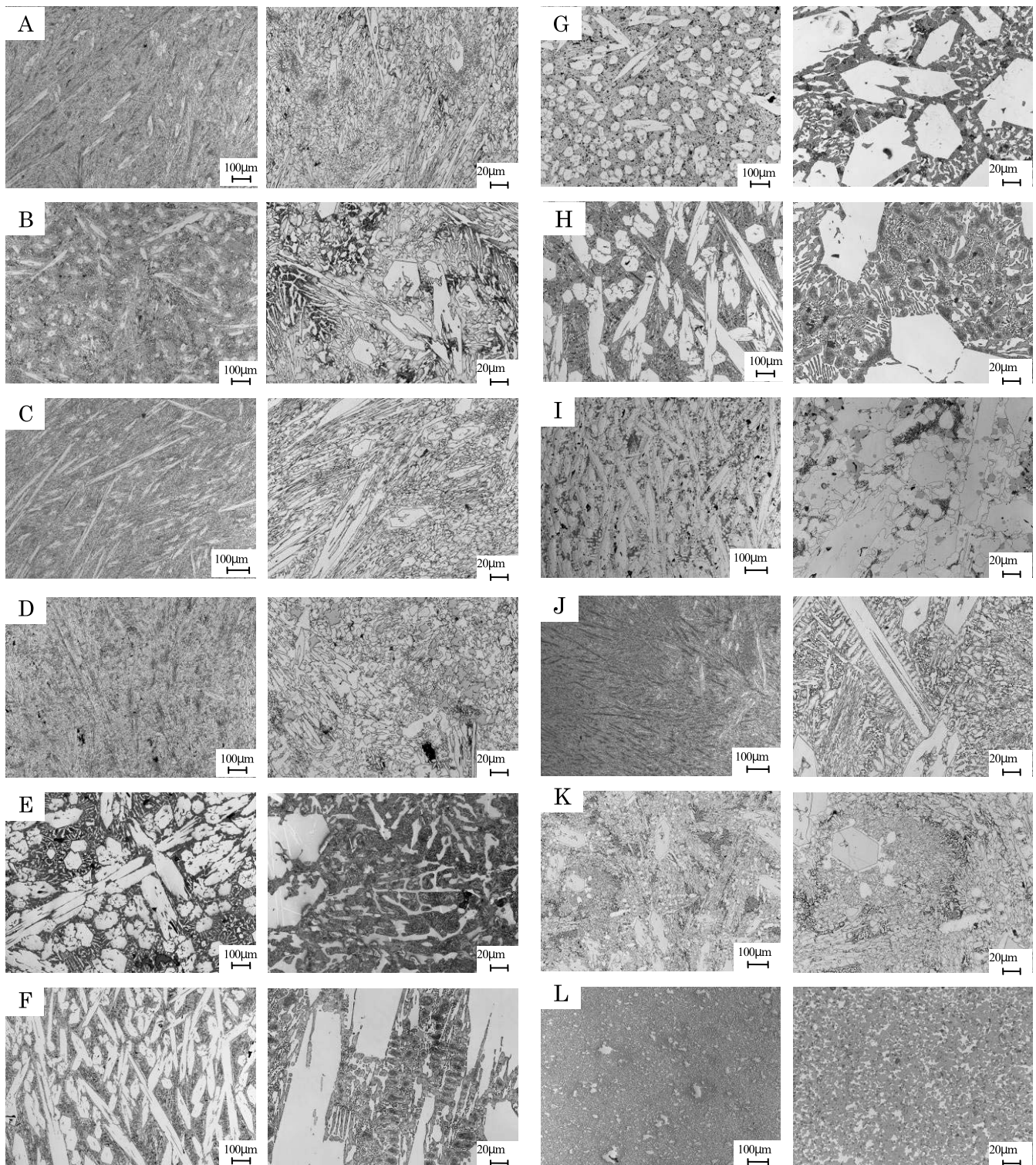


Fig.4 Microstructures of specimen for different compositions, product methods and liner maker; right photo shows high magnification

ブラスト材はアルミナグリッド#24を用い、1回の投射は1分間で1.5kgとした。連続5回繰り返しの投射を行った。投射角度は45°とした。試験後の減重量を測定し摩耗量を求め、5回の総摩耗量で評価した。滑り評価と同様に摩耗分の体積にて比較を行った。

3. 実験結果

3.1 ミクロ組織比較

Fig.4 にレーザー顕微鏡観察による各ライナーのミクロ写真を示す。左側に200倍、右側に1000倍視野とした。施工条件、観察箇所や方向によって得られる視的情報が大きく異なる。EやFに見られるような高ク

ロム鉄では、特徴的な初晶 M_7C_3 は六角柱となり⁷⁾、針状に存在していることが多く確認された。また、D や I にはクロム以外の元素からなる炭化物があり、それらは四面体や立方体状であり、エッチング濃淡差からも判別が付きやすく、いくつかの炭化物が混在していることが確認できた。

Fig.4 から見てとれるように A~D の溶接法のライナーよりも E~I の鑄掛ライナーの方が白色の炭化物がはっきりと大きく存在しており、占める割合が大きかった。また、鑄掛法の組織は成分にかかわらず、六角柱の炭化物が多くを占め、どれも似たような組織を示していた。溶接法のライナーは鑄掛法よりも炭化物が細く微細であった。基地部に関しては鑄掛と比較してあまりエッチングされず、合金成分が多く基地に取り残されている可能性が高いと考えられる。これはすなわち溶接法では鑄型を使わず、直接原板に溶接されることにより、施工直後から外気に晒され急冷されるため、炭化物の成長が抑制されやすいと推察できる。しかも、溶接の場所によっては熱量の掛かり方が異なり、マイクロ組織からバラツキが多い結果となった。A~D、J、K はあまり統一感がなく、それぞれ異なった組織を示していることがわかった。特に D は炭化物が針状とも塊状とも取れないような微細な形状を呈しており、さらにクロム以外の特殊元素の炭化物が確認できた。

次に Table 4 に各ライナーにおける炭化物が占める面積率、炭化物粒の大きさおよび間隔を示す。複数視野による平均値により算出した。統計対象は初晶 M_7C_3 をはじめ代表的な炭化物のみとした。

Table 4 Comparison of carbide distribution

	Area ratio (%)	Size (μm)			Carbides spacing (μm)
		Average	Maximum	Minimum	
A	27.7	19.9	34.6	11.0	118.8
B	35.2	28.2	28.0	12.8	53.2
C	32.3	18.8	23.7	8.3	80.0
D	52.2	8.3	16.6	2.3	18.5
E	64.5	58.4	107.9	13.8	34.1
F	60.6	76.4	113.2	18.7	27.2
G	50.3	36.4	59.4	9.9	35.0
H	60.6	76.4	113.2	18.7	28.4
I	62.4	56.4	102.3	24.9	46.9
J	36.5	11.8	47.0	8.4	56.4
K	33.3	37.1	77.4	26.3	79.8
L	65.0	10.0	15.0	5.0	3.0

溶接法によるライナーは鑄掛法よりも炭化物が占める割合が小さかった。また、炭化物の平均粒、最大

および最小径ともに鑄掛法よりも小さいことがわかった。粒小で面積率も小さい結果から、炭化物は疎らに存在し、特に A に関しては $100\mu\text{m}$ ほどの間隔であった。D は炭化物が非常に小さく、基地との区別が付きにくく間隔が測定しづらいほど、非常に微細化された組織となっていた。L は焼結法により作られたセラミックス組織あるため、粒が他と比べ非常に小さく $10\mu\text{m}$ で構成されていた。

3.2 硬度評価

次にそれぞれの材質にたいして硬度測定を行った結果を Fig.5 および Fig.6 に示す。Fig.5 にはマクロ的な硬度、Fig.6 には観察から判別される基地部と炭化物部の局所硬度をとともに示す。

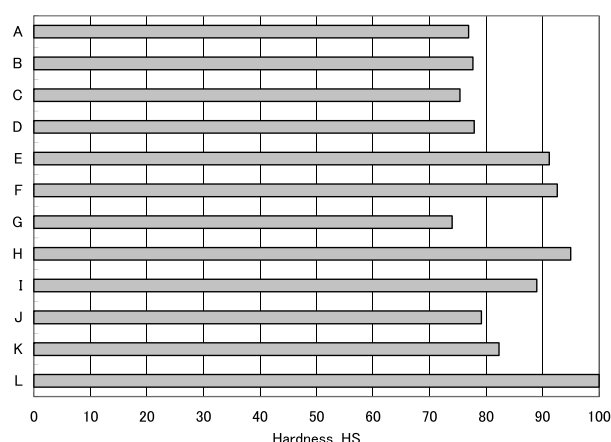


Fig.5 Comparison of macro-hardness on liners for wear resistic

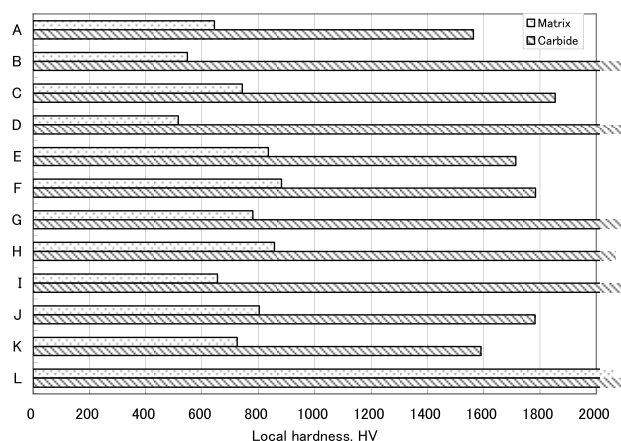


Fig.6 Comparison of matrix hardness and carbide hardness on liners for wear resistic

全体マクロ硬度は、A~D および J、K の溶接ライナーはいずれも HS 78 前後となり大きな差は見られなかった。鑄掛ライナーは HS 90 前後であり、溶接ライナーよりも高硬度であった。

炭化物はいずれも M_7C_3 の同一形態と考えられ、HV

1500 以上であった。ただし、L はセラミックス系材質が異なるため、他よりも高硬度であった。基底に関しては、ライナーに対して特殊合金にも相関が認められなかった。Table 4 に示されるように、マクロ硬度は炭化物量に依存しており、炭化物の占める割合が多いほど、高くなることが確認できた。

3.3 摩耗評価

試験に用いた相手材の形態と試験後のサンプル表面状態について、耐滑りおよび耐衝突試験後の写真を代表例としてサンプル C 材についてそれぞれ Fig.7 および Fig.8 に示す。

Fig.7 に示した滑り摩耗用のベルトの表面は SiC の砥粒が隙間無く付着されており、その砥粒の大きさは 0.2~1mm である。このベルトが一方方向に動き、試験片の表面を滑り削る機構である。したがって、試験片の砥粒の凸部と接触する部分から優先して摩耗される。摩耗方向に対してのみ動きが制約されているため、摩耗の形がほぼ固定され、基地部や炭化物部に関わらず、試験片の深さ方向に一樣に摩耗される。

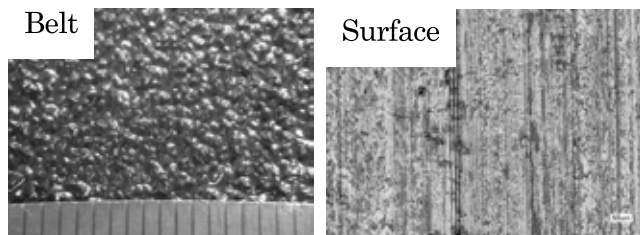


Fig.7 Appearances of SiC belt for abrasive wear test and the surface of specimen after the test

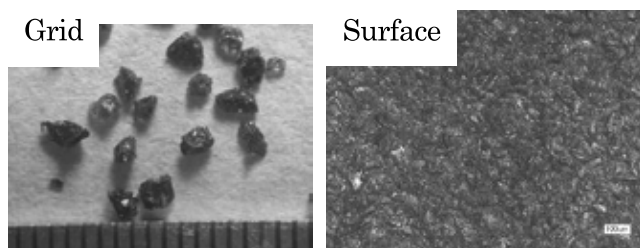


Fig.8 Appearances of Alumina grid for impact wear test and the surface of specimen after the test

次に、Fig.8 に示した衝突摩耗試験用のグリッドは塊状で角々しく、その大きさは 1~2mm である。このグリッドを 45° の角度を付けて試験片表面に吹き付ける。試験片の表面を見ると、まさに抉り取られたような状態となっていることがわかる。このようなグリッドの形状であるため、表面肌荒れは凹凸が激しく、滑り摩耗とは異なり強度的に弱い所から摩耗、欠損が進行することがわかる。

続いて、耐滑り摩耗および耐衝撃摩耗の試験結果を

それぞれ Fig.9 および Fig.10 に示す。滑り摩耗の評価では、溶接法に関しては材質 A から D と順に評価が良くなった。J, K においては同じ溶接法でも A, B と同等の性能であった。溶接法の中では合金量の多い D が最もよい結果であった。鋳掛法の E, F に関しては材質 C, D と同等の性能であった。さらに、材質 L では D に比べ、約 10 倍の性能を示した。

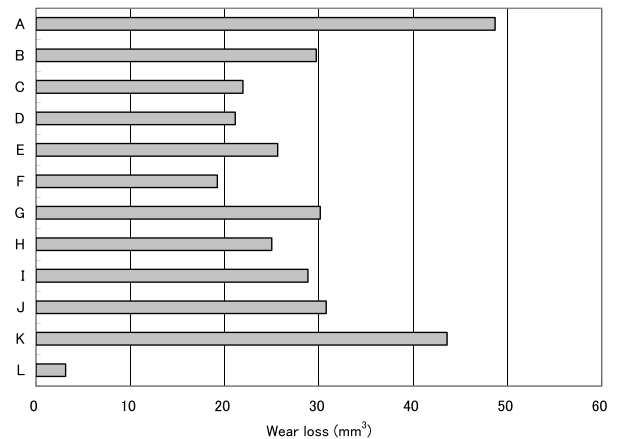


Fig.9 Comparison of abrasive wear loss on the liners

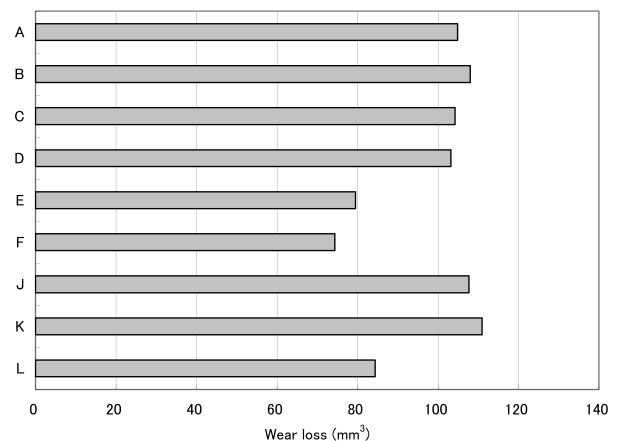


Fig.10 Comparison of impact wear loss on the liners

次に耐衝撃摩耗については、溶接法においては材質によらず摩耗量 100mm³ 前後であり、あまり性能差を認められなかった。鋳掛法については E, F では溶接法に比べ、2 割程度良い性能を示した。また、材質 L については滑り摩耗では非常に良好な性能を示したものの、衝撃摩耗では E, F と同等であった。全体的に劇的な摩耗の差が見られなかった。

3.4 特性評価の考察

これまでの炭化物量、硬度、および摩耗量の測定結果を整理し、硬度および組織に対する相関性を調査した。まず、Fig.11, 12, 13 にそれぞれマクロ硬度、基地部硬度、炭化物部硬度が耐滑りおよび耐衝撃性に及ぼす影響を示す。

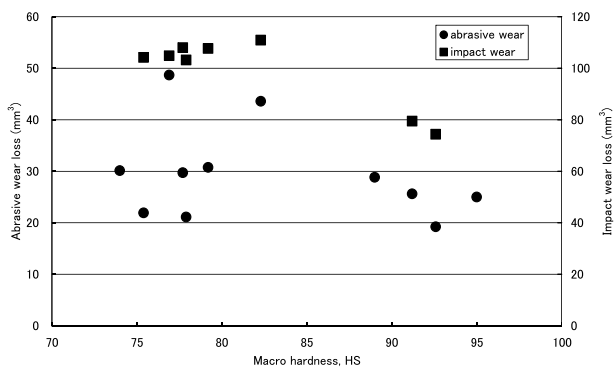


Fig.11 Effect of abrasive and impact wear loss on macro hardness

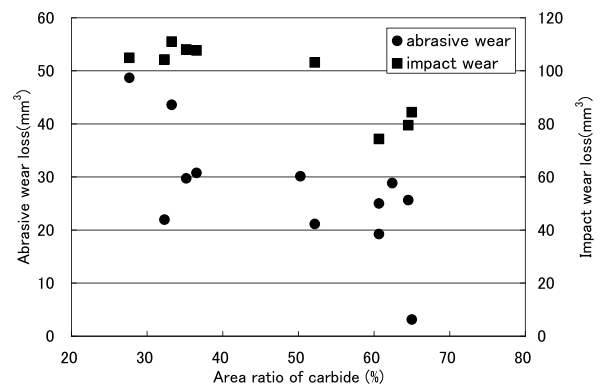


Fig.14 Effects of abrasive and impact wear loss on area ratio of carbide in the structure

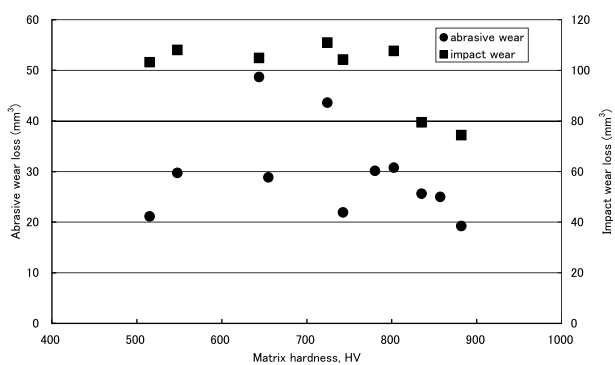


Fig.12 Effect of abrasive and impact wear loss on matrix hardness

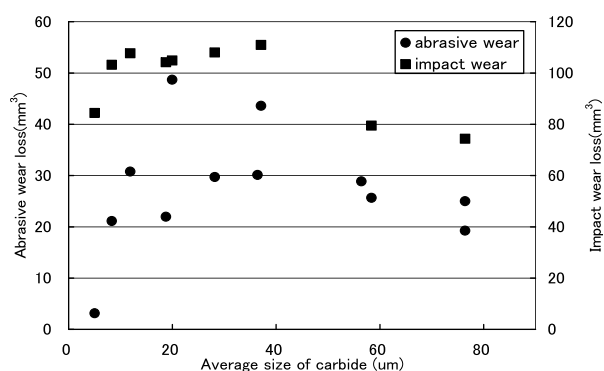


Fig.15 Effects of abrasive and impact wear loss on grain size of carbide

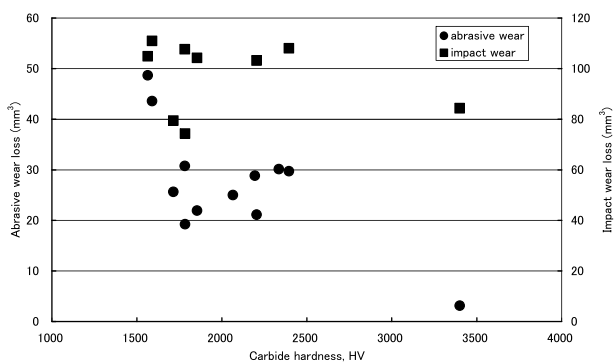


Fig.13 Effects of abrasive and impact wear loss on carbide hardness

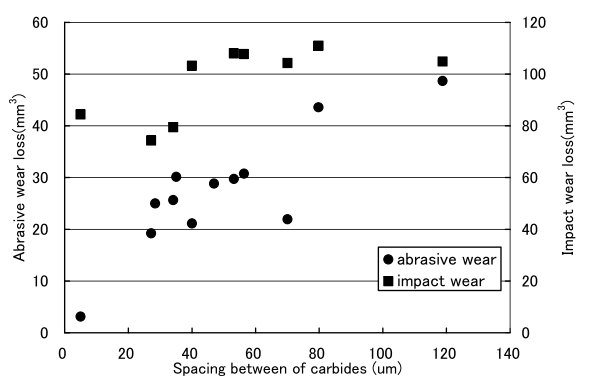


Fig.16 Effects of abrasive and impact wear loss on spacing between of carbides in the structure

初めに、Fig.11 に示すようにマクロ硬度が耐摩耗性に及ぼす影響として、滑り摩耗に関してはほとんど依存しないが、耐衝突性に関しては硬度が高くなるほど、若干ではあるが性能が向上した。Fig.12 に示す基地部の硬度が耐摩耗性に及ぼす影響は、あまり影響が見られなかった。Fig.13 に示す炭化物の硬度の影響については、硬度が高いほど耐摩耗性の向上が顕著に認められた。衝突よりも滑り摩耗の方が炭化物硬度の影響が強く現れた。

これらの硬度と耐摩耗性の相関性から、耐滑り摩耗

性は炭化物の硬度、耐衝突摩耗性は基地部の硬度に強く影響されることがわかった。滑り摩耗の特徴として、摩耗材と基材との接点が線状で一定の摺動であるため、基地よりも高硬度である炭化物の摩耗が基材全体の摩耗と見なされる。また衝突摩耗にたいしては、摩耗材の接触が点で衝突されるため、炭化物より低硬度である基地から摩耗しやすく基地硬度の影響が出やすいと考えられる。

次に Fig.14, 15, 16 にそれぞれ炭化物の面積率、サイズ、粒間隔が耐滑りおよび耐衝突摩耗性に及ぼす影

響を示す。Fig.14 に示すように炭化物面積率に関しては、面積率が大きいほどいずれの摩耗に対して性能が向上した。Fig.15 に示す炭化物粒の大きさに関しては、滑り摩耗に影響を及ぼさず、衝突摩耗に対しては大きい方がやや効果があった。続いて、Fig.16 に示す粒間の間隔に関しては、間隔が小さくなるほどいずれも性能が向上した。

これらの炭化物の存在状態と耐摩耗性の相関性から、滑り摩耗と衝突摩耗ともほぼ同等の傾向を示しており、いずれも炭化物量が多くまた緻密であるほど、性能が向上することが確認できた。今回の摩耗相手材はいずれも1mm 前後と炭化物組織に比べ非常に大きく、結果として炭化物の性能に依存することがわかった。

4. 結論

本稿では当社の複合ライナーを中心に特性評価を行った。今回の得られた調査結果を要約すると、次の通りである。

- 1) 今回の試験条件では、溶接法よりも鋳掛法のライナーの方が、耐摩耗性が良好であった。これは硬度や炭化物量においては溶接法よりも鋳掛法が高いためである。
- 2) 総合的に耐摩耗性は炭化物の状態に支配的であることがわかり、高硬度な炭化物を多く存在させるほど、性能の向上に繋がることわかった。
- 3) 一概にマクロ硬度が高ければ耐摩耗が良いわけではなく、炭化物の制御の方が効果的であることがわかった。

参考文献

- 1) 宮崎 裕之：フジコー技報, 8 (2000), 43-51
- 2) 大野 京一郎, 吉永 宏, 嵩 純孝：フジコー技報, 15(2007), 47-52
- 3) 大野 京一郎, 野村 大志郎：フジコー技報, 13 (2005), 60-64
- 4) 花田 喜嗣, 古田 博昭, 牟田 敏克, 姜 孝京, 永吉 英昭：フジコー技報, 18 (2010), 28-36
- 5) 花田 喜嗣：フジコー技報, 17 (2009), 43-48
- 6) 鋳型の生産技術教本編集部会：鋳型の生産技術, (2002), 194-218
- 7) 佐藤 知雄：鉄鋼の顕微鏡写真と解説, 丸善 (1968), 108
- 8) 山口 薫, 松原安宏：鋳物, 62 (1990), 43-49