



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



建設機械を用途とした耐摩耗性多合金鋳鉄の開発

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2014-06-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 原, 宏哉 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00005114

建設機械を用途とした耐摩耗性
多合金鋳鉄の開発

原 宏哉

目次

第一章 緒論

1. 1	本研究の背景	2
1. 2	これまでの研究	3
1. 3	本研究の目的	3
1. 4	本論文の構成	4
	参考文献	5

第二章 スガ式摩耗試験機, 実験方法および供試材の製作

2. 1	目的	9
2. 2	スガ摩耗試験機による予備試験	9
2. 3	実験方法および実験条件	
2. 3. 1	供試材	9
2. 3. 2	実験方法	10
2. 4	実験条件の確立	
2. 4. 1	荷重による再現性実験	10
2. 4. 2	表面粗さによる再現性実験	11
2. 5	供試材の製作	
2. 5. 1	球状バナジウム炭化物鋳鉄の製造	12
2. 5. 2	多合金鋳鉄の製造	12
2. 4	結言	13
	参考文献	14

第三章 種々の炭化物を有する鋳鉄のすべり摩耗特性

3. 1	目的	27
3. 2	実験方法および実験条件	27
3. 2. 1	供試材	27
3. 2. 2	実験方法	28
3. 3	実験結果および考察	
3. 3. 1	SEM 観察	29
3. 3. 2	マイクロスコープによる観察	29
3. 3. 3	EPMA 面分析	30
3. 3. 4	炭化物の面積率及び硬さ測定結果	30
3. 3. 5	摩耗試験前後の硬さ測定	31

3. 4 結言	31
参考文献	34

第四章 実機による破砕試験（ガラス粉砕機）

4. 1 目的	48
4. 2 実験方法および実験条件	
4. 2. 1 供試材	50
4. 2. 2 ガラス破砕機による摩耗試験方法	50
4. 3 実験結果および考察	
4. 3. 1 実験結果	51
4. 3. 2 VCが耐摩耗性に及ぼす影響	53
4. 3. 3 基地組織の硬さの変化が耐摩耗性に及ぼす影響	54
4. 3. 4 摩耗表面性状が耐摩耗性に及ぼす影響	55
4. 4 結言	55
参考文献	57

第五章 実機による破砕試験（ギロチン切断機）

5. 1 目的	72
5. 2 実験方法および実験条件	
5. 2. 1 供試材	73
5. 2. 2 ギロチン切断試験	74
5. 3 実験結果および考察	
5. 3. 1 切断荷重の推移	77
5. 3. 2 切断荷重・ひずみ線図	77
5. 3. 3 切断刃の損傷	78
5. 4 結言	78

第六章 総論

6. 1 本研究で得られた成果	101
6. 2 今後の課題と展望	104

謝辞	106
本研究に関する著者の公開論文	108
Figure captions	110
List of tables	112

第一章

緒 論

1. 1 本研究の背景

摩耗特性におよぼす支配因子としては、機械的性質、材料的因子および環境的因子などが挙げられる。機械的因子については接触荷重、すべり速度および表面粗さ、材料的因子については炭素量、組織と硬さ、環境的因子については雰囲気、湿度、潤滑の程度などが重要になる。また、摩耗形態によって、すべり摩耗、ころがり摩耗などがある。特に、すべり摩耗の中でもアブレシブ摩耗は他の形態の摩耗に比べて摩耗量が著しく大きい。アブレシブ摩耗は固体粒子によって生じる摩耗であり、すべり合う固体面間において硬い異物が介在する場合や一方の面が硬くて粗い場合、あるいは固体表面と粒子が高速で衝突する場合などに主として削り取りにより材料の固体表面が摩耗する現象である^{1)~4)}。

近年、循環型社会形成推進基本法の公布および、各種リサイクル法が制定され、資源有効利用や都市鉱山の観点から各種廃棄物のリサイクルに関係する仕組みが整備されてきている。廃棄物の各種選別工程において、各種破碎機や重機、選別機、輸送機等多種に亘る機器が用いられている。図 1-1 に各廃棄物のリサイクル工程一連の模式図を示す。自動車、家電および建築解体物から出る廃棄物の多くは、金属類、プラスチック類をはじめとする多種複合材料から形成されている。これらをリサイクルする工程で選別効率を向上させるため、複合材料の単体分離や粒度、粒径および形状を揃えることを目的としてシュレッダーによる、破碎が行われている。この破碎工程は、粒度を一定にすることが非常に重要となり、後工程である選別工程の効率に大きく影響を与える。粒度を一定にすることにより、自動選別機および手選別において、

材料別に分けられる。その後、選別された廃棄物は、それぞれ材料別にリサイクルされる。

このようなリサイクル工程において、特に廃棄物を粉砕する際、破砕刃に廃棄物との激しいアブレイブ摩耗が生じる。破砕工程で、破砕刃に著しいアブレイブ摩耗が生じると刃のクリアランスが大きくなることで、粒径を揃えることが困難となることや、破砕効率の低下により、後工程である選別工程において廃棄物の分離が困難になる。現状では破砕刃の交換を定期的に行っているが、特に摩耗の激しい部材については交換期間が短く、それによるメンテナンス性の悪化、ランニングコストの増加、工場稼働率の低下などが問題となっている。そのような観点から、ことから耐アブレイブ摩耗性に優れた材料の開発が求められている。

1. 2 これまでの研究

従来、耐摩耗材料の共通点としては、基地組織中に硬質な炭化物を有している。これまでの研究では、硬質な炭化物を有した鋳鋼に着目し、耐摩耗材料として用いられている高クロム鋳鉄 (Hi-Cr)^{5) ~ 7)} や、高マンガン系球状バナジウム炭化物鋳鉄について、優れた耐エロージョン摩耗性を有することが知られている^{8) ~ 17)}。

1. 3 本研究の目的

従来、耐摩耗材料の共通点としては、基地組織中に硬質な炭化物を有している。そこで本研究では、硬質な炭化物を有した鋳鋼に着目した。そこで、従来耐摩耗材料として用いられている高ク

ロム鋳鉄，また，優れた耐エロージョン摩耗性を有することが知られている球状バナジウム炭化物鋳鉄について，スガ式摩耗試験機を用いてアブレシブ摩耗特性評価を行った．また，実用化を目指すにあたり，各種材料による実機試験を行ない，実用化に耐えるか評価を行なった．

1. 4 本論文の構成

本論文は，全六章で構成され，下記に各章の概要について述べる．

第一章では，研究背景やについて述べるとともに，本研究の意義及び目的を述べた．

第二章では，評価を行うためのスガ式摩耗試験について延べ，試験の再現性を確認するとともに実験条件の確立を行なった．また，今後使用する供試材の製造を行った．

第三章では，第二章において確立した実験条件を用い，各種鋳鉄のスガ式摩耗試験を進め，耐アブレシブ摩耗特性評価を行う．

第四章では，第三章で報告された開発した鋳鉄のスガ式摩耗試験機による耐アブレシブ摩耗特性評価を元に，材料の実用化を目指して実機試験を行なった．実機試験には，蛍光管ガラスリサイクルプラントにて用いられるガラス粉碎機を対象として，従来から使用されている破碎刃との摩耗損傷の比較検討を行なった．

第五章では，さらに実機調査としてギロチン切断試験機を用いて，種々の材料の摩耗評価試験を行ない，実用化へ向けての材料特性について明らかにした．

第六章は総括であり，本研究の成果を要約する．

参考文献

- 1) 中野 行夫, 福井工業大学研究紀要, 鉄鋼のアブレイブ摩耗に対する Crめっき層の効果(第一報), 15巻 85-95号(1985)
- 2) 渋谷 佳男, 今沢好明, 桑名 一利, 鐵と鋼 : 日本鐵鋼協會々誌 ほう化处理した鋼のすべり摩耗特性について p75-84
66(5)巻 532-538号 (1980)
- 3) 渋谷 佳男, 今沢好明, 桑名 一利, 鐵と鋼 : 日本鐵鋼協會々誌, ほう化处理鋼すべり摩耗痕の觀察について p.84-90, 66(5)巻 532-538号(1980)
- 4) 砂田 久吉, 泉 久司, 田村 今男, 鐵と鋼 : 日本鐵鋼協會々誌, 超高炭素クロム鋼のすべり摩耗特性, 70(6)巻 580-587,(1984)
- 5) Yukio Nakano, "The effect of Cr plating layer on the abrasive wear of steel (First Report)", Fukui University of Technology Research Bulletin, Vol 15, pp. 85-95 , (1985)
- 6) Hisayoshi Sunada, Hisashi Izumi, Tamura Imaotoko "Sliding wear properties of ultra-high carbon chromium steel", Iron and Steel, Journal of Iron and Steel Institute of Japan, Vol 70 (6), pp. 580-587, (1984)
- 7) Akira Sawamoto, Keisaku Oshiro, Kimio Matsuda, "Work hardening characteristics of high manganese steel containing vanadium", Casting, Volume 54, Issue 4 ,(1982)
- 8) Naoji Yoneta, Kazumichi Shimizu, Hiroya Hara, Masahiro Tnaka, Yoshihiro Nawa, " Wear Characteristics of Spheroidal Carbides Cast Irons " , Key Engineering Materials in Uniaxial Rotary Glass Shredder Vol 457, pp249-254,(2011)

-
- 9) Kazumichi Shimizu, Toru Noguchi, "erosion characteristics of ductile iron with various matrix structures", transactions of the japan foundrymens society, vol.13, (1994)
 - 10) Kazumichi Shimizu, "Erosion Wear Properties of Steel". PhD thesis, (2001)
 - 11) Kazumichi Shimizu, Toru Noguchi, IMONO Vol.66,(1994)
 - 12) Kazumichi Shimizu, Toru Noguchi, Trans.Jpn.Soc.Mech.Eng.65, 632A,(1999)
 - 13) Kazumichi Shimizu, Toru Noguchi, Setsuo Asoh, J.JFS, Vol 76, 3, (2004)
 - 14) Kazumichi Shimizu, Toru Noguchi, Shigeru.Doi, Trans. of AFS, Vol.101, pp. 78-93, pp. 225-229, (1993)
 - 15) Kazumichi Shimizu, Toru Noguchi, Wear 176, pp. 255-260, (1994)
 - 16) Kazumichi Shimizu, Toru Noguchi, Takafumi Kamada, Hidehito Takasaki, Wear Vol.198, pp. 150-155, (1995)
 - 17) Kazumichi Shimizu, Toru Noguchi, "Erosion Characteristics of Ductile Iron with Various Matrix Structures", Trans. of the Japan foundrymen's society, VOL. 13, (1994)

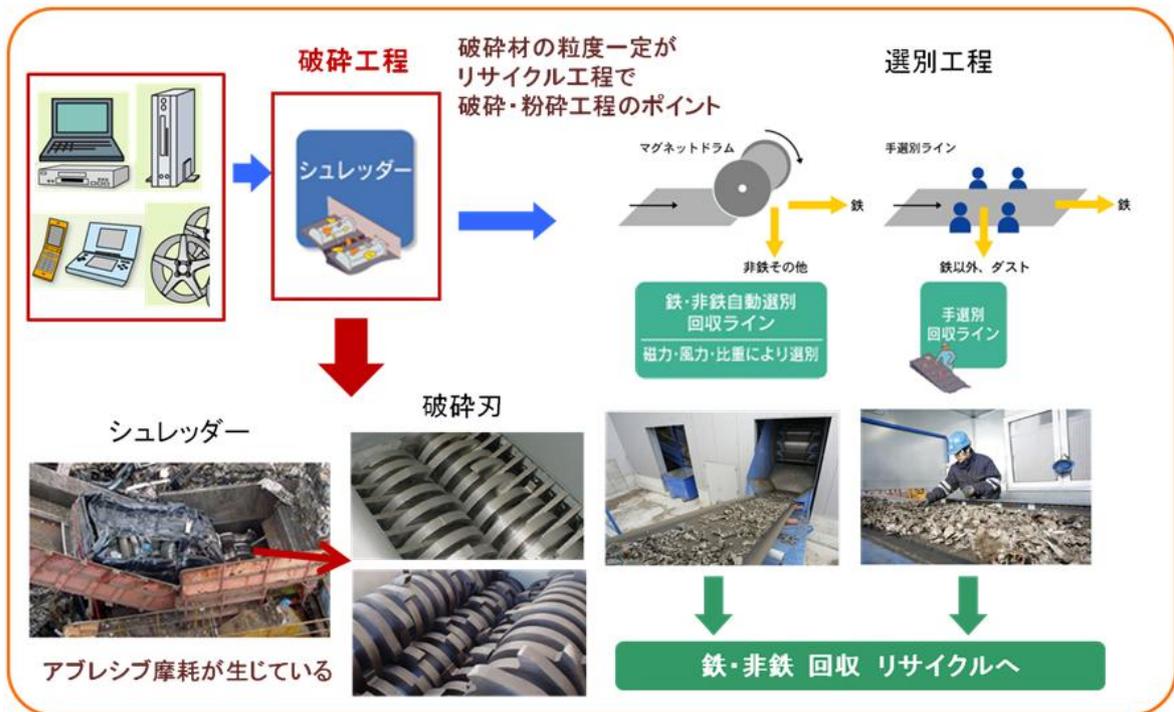


Fig. 1-1 Recycling process of waste materials.

第二章

スガ式摩耗試験機，実験方法
および供試材の製作

2. 1 目的

本章では、予備実験としてスガ式摩耗試験機を用い滑り摩耗試験を行ない、基準の設定および再現性を確認し、また試験に使用した炭化物晶出型鋳造材料の製作を行った。

2. 2 スガ摩耗試験機による予備試験

スガ摩耗試験機は、静止した回転輪（研磨紙を外周に取り付けてある）に規定の荷重を付加し、その回転輪に対し、塗装した試験片を規程回数だけ往復運動させることにより、試験片の摩耗減量を測定する。研磨紙の未使用部分が逐次送り出されて接触する機構になっている。研磨作用は、静止中の回転輪に対して試験片を30mmのストロークで往復運動させて摩擦することによって生じる。JIS K 5600-5-10に規定された平面磨耗試験方法である。本実験に用いたスガ式摩耗試験機（NVS-ISO3）の全体図をFig. 2-1に、可動部模式図をFig. 2-2を示す。

2. 3 実験方法および実験条件

2. 3. 1 供試材

予備試験に用いた供試材は、S45C、SUS304とした。試験に用いた摩耗試験片の寸法は50mm×50mm×4mmの平板状に機械加工した。それらの化学成分及び機械的性質をTable 2-1及び各供試材の組織写真をFig. 2-4に示す。

2. 3. 2 実験方法

実験条件は，試験片に対しての摩耗面積は約 30 mm × 12 mm となっており，摩耗輪にかけることができる荷重は約 0.98 N ~ 29.4 N と変化できる．摩耗輪は試験台が 1 往復するごとに 0.9 度回転する．摩耗輪に装着したエメリー紙は # 180 とした．

2. 4 実験条件の確立

本研究においてスガ式摩耗試験機を導入するにあたり，スガ式摩耗試験機が正当に評価できる試験機であり，正確なデータを得られるのかを確認する必要がある．そこで、試験荷重，試験片表面の粗さの統一を行い，実験条件を確立するために予備実験を行った¹⁾．

2. 4. 1 荷重による再現性実験

供試材には S45C を用いて，試験荷重を 9.8 N，19.6 N，29.4 N の 3 水準として摩耗試験を各 2 回行った．実験結果を Fig. 2-5 に示した．S45C は 9.8 N では 1 回目 0.136 g，2 回目 0.139 g となり，19.6 N では 1 回目 0.250 g，2 回目 0.261 g で，29.4 N では 1 回目 0.319 g，2 回目 0.324 g となった．各荷重で摩耗量の大きな差は見られず，再現性が得られた．荷重 9.8 N の摩耗量と荷重 19.6 N の摩耗量を比較すると，約 2 倍の摩耗量となった．一方荷重 9.8 N の摩耗量と荷重 29.4 N の摩耗量を比較すると，2.3 倍程度であり，荷重が 2 倍，3 倍となっても摩耗量は 2 倍，3 倍と増加はしなかった．各荷重での摩耗量はそれぞれ直線的

に増加する傾向が確認でき，高い再現性を得られた．このことから，摩耗量を定量的に評価することができる．

2. 4. 2 表面粗さによる再現性実験

供試材には，表面粗さの値の差が大きかった試験片である SUS304 を用いた．試験面をエメリー紙 # 400 にて研磨したもので， $Ra=0.7\ \mu\text{m}$ の試験片と，試験表面に平面研削盤による研削加工を施したもので， $Ra=0.12\ \mu\text{m}$ の 2 種類を用いた．荷重は 9.8N にて試験を行い，表面粗さの違いによる摩耗量の変化を調べた．表面粗さの違いによる再現性実験結果を Fig. 2-6 に示した．試験表面をエメリー紙で研磨した試料は摩耗量が 0.075g となり，試験表面に研削加工を施した試料では摩耗量が 0.074g となり，表面粗さの違いによる摩耗量の増減は見られなかった．

2. 5 供試材の製作

本研究では，炭化物形成元素である Cr, Mo, V, Nb, W を添加させ炭素と結合させることにより，多合金鋳鉄などの炭化物晶出型の鋳造材料の開発を進めており，供試材として球状バナジウム炭化物鋳鉄および多合金鋳鉄を用いた．製造方法としては，以下に示す各炭化物晶出型他合金鋳鉄の目標とした化学組成を用い，この炭化物構成元素を加えた材料を高周波炉で溶解し，Fig.2-6 に示す，Y ブロック鋳型に鋳造する．得られた Y ブロックから各々試験片を切出し加工後，滑り摩耗評価を行った．すべり摩耗評価による結果から，同様に供試材を鋳造し実

機試験用の試作刃を製造後，実機試験に用いた．製造方法の流れを Fig.2-7 に示す．

2. 5. 1 球状バナジウム炭化物鋳鉄の製造

供試材として，基地中に球状炭化物を有する三種類の球状炭化物鋳鉄（Spheroidal Carbides cast Iron：以降 SCI と略す）を用いた．それらは，耐摩耗性が期待される，種々基地組織を持つ，ステンレス系の高 VCrNi 球状炭化物鋳鉄（以降 SCI-VCrNi と呼ぶ），高マンガン系の高マンガン球状炭化物鋳鉄（以降 SCI-VMn と呼ぶ）および白鋳鉄系の白鋳鉄系球状炭化物鋳鉄（以降 SCI-W と呼ぶ）の 3 種類の球状炭化物鋳鉄である．SCI-VCrNi，SCI-VMn は，ステンレス系と高マンガン系であるが，互いにオーステナイト基地となっており，VC が球状化している．SCI-W のほうが白鋳鉄系であり，基地組織に高硬度のベイナイト組織が含まれている．それぞれの化学成分を Table 2-2 に示す．

2. 5. 2 多合金鋳鉄の製造

供試材として，基地組織中に炭化物を晶出させ，また熱処理による二次炭化物の析出により，耐アブレシブ摩耗性向上と耐熱性を期待して多合金鋳鉄を用いた．炭化物促進元素であるバナジウム (V) を，高温における二次炭化物の析出硬化を起させるための Mo，W 及び Cr，さらに高温強度を向上させるとともに焼戻し抵抗を増大して焼戻し硬さを高める Co を含有する多合金系の Fe-M(Cr，

Me, W, V, Co) -C 材料を設計し，基本合金組成として，Cr, Mo, W, V 量をそれぞれ 5%一定とし，C 量を約 2.0% Co 量を 10%に調整した多合金鋳鉄（10%-Co）の製造を行った．化学成分を Table 2-3 に示す．

2. 6 結言

本研究では，S45C の各試験荷重における摩耗試験結果より，各荷重 9.8N, 19.6N, 29.4N で大きなずれは見られず，各試験荷重において再現性が得られた．また，予備実験での表面粗さの違いによっては摩耗量に大きな差は見られなかった．

ここで，各荷重で再現性が得られたが，荷重 29.4N はスガ式摩耗試験機において最大試験荷重であるため，試験機に負担が大きくなる．荷重 9.8N では試験表面の摩耗痕に明瞭な凹凸が見られない．したがって試験荷重は 19.6N とした．表面粗さによる摩耗量の違いが見られなかったことから試験片の表面は研削加工を施し 0.2 a で統一した．

予備実験結果から以下の実験条件に決定した．

- ・ 荷重：19.6N
- ・ 試験片サイズ：50mm × 50mm × 4mm
- ・ 表面粗さ：0.2 a
- ・ 摩耗輪のエメリー紙：#180

また，炭化物晶出型鋳造材料として，球状バナジウム炭

化物 鋳鉄 および 多合金 鋳鉄 を 製作 し、 試験 片 への 加工 行
い 滑り 摩耗 の 評価、 実機 試験 へ 用いた。

参 考 文 献

- 1) 星山 康洋， 白石 吉和， プラズマ 浸炭 処理 した バナジウ
ム 炭化物 ステンレス 鋳鉄 の 摩耗 と 疲労， J.JFS, Vol.79,
No. 4, pp167-173 (2007)

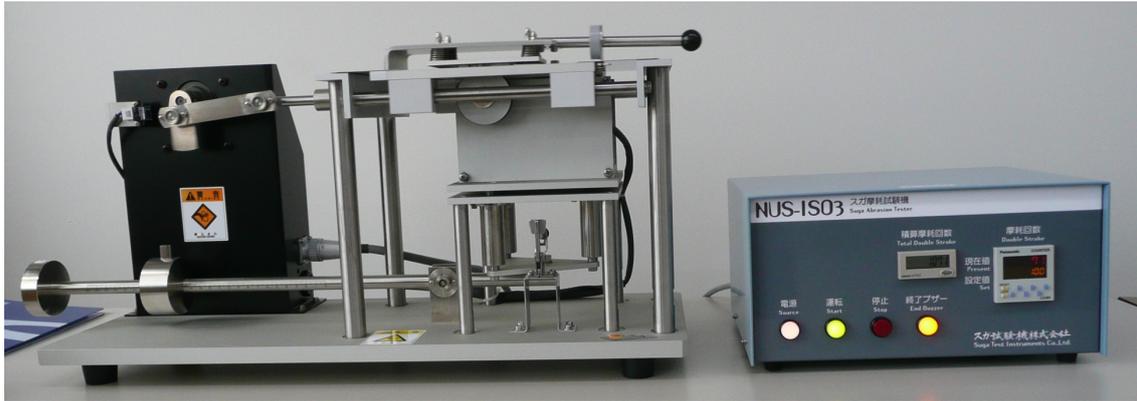


Fig. 2-1 Overall view of Suga wear testing machine.

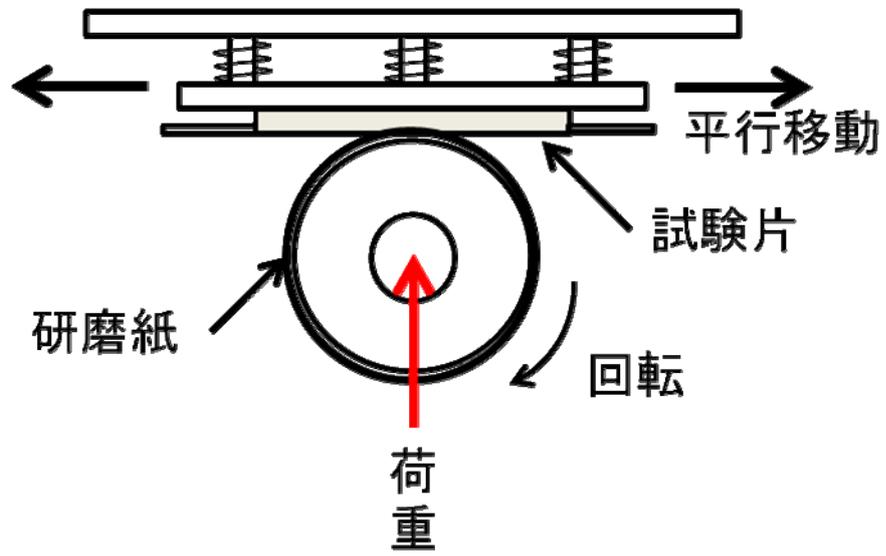
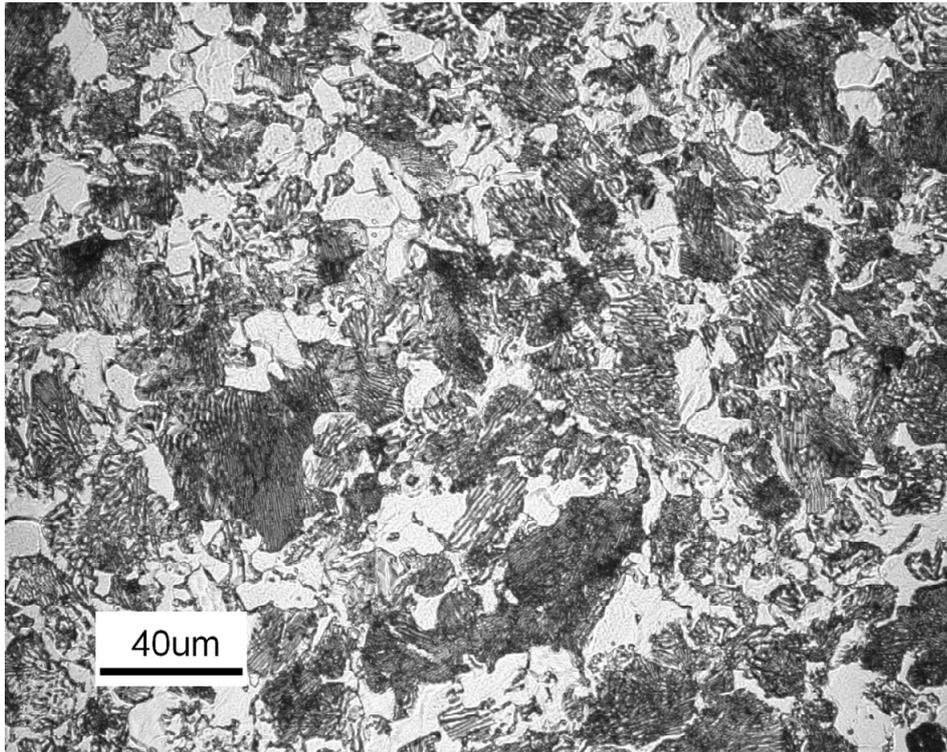


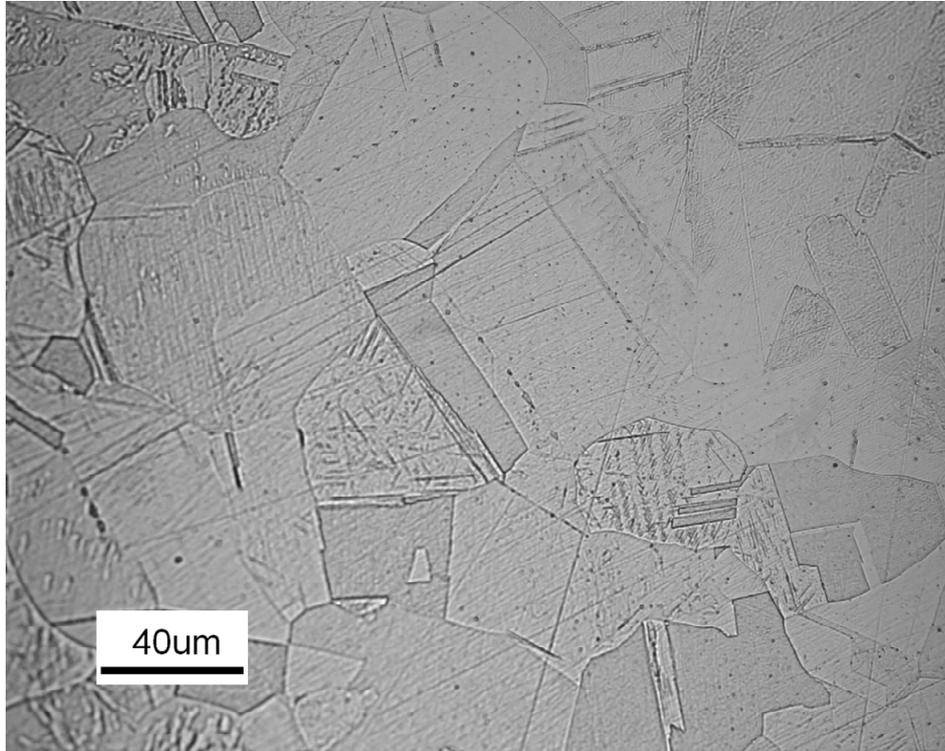
Fig. 2-2 Moving parts schematic view of Suga wear testing machine.

Table 2-1 Chemical composition of each test material.

	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S
S45C	0.46	0.25	0.79	0.19	0.70	0.027	0.017
SUS304	0.04	0.64	0.92	8.08	18.11	0.045	0.030



(a) Microstructure of S45C



(b) Microstructure of SUS304

Fig. 2-3 Photo of plane bending fatigue test machine

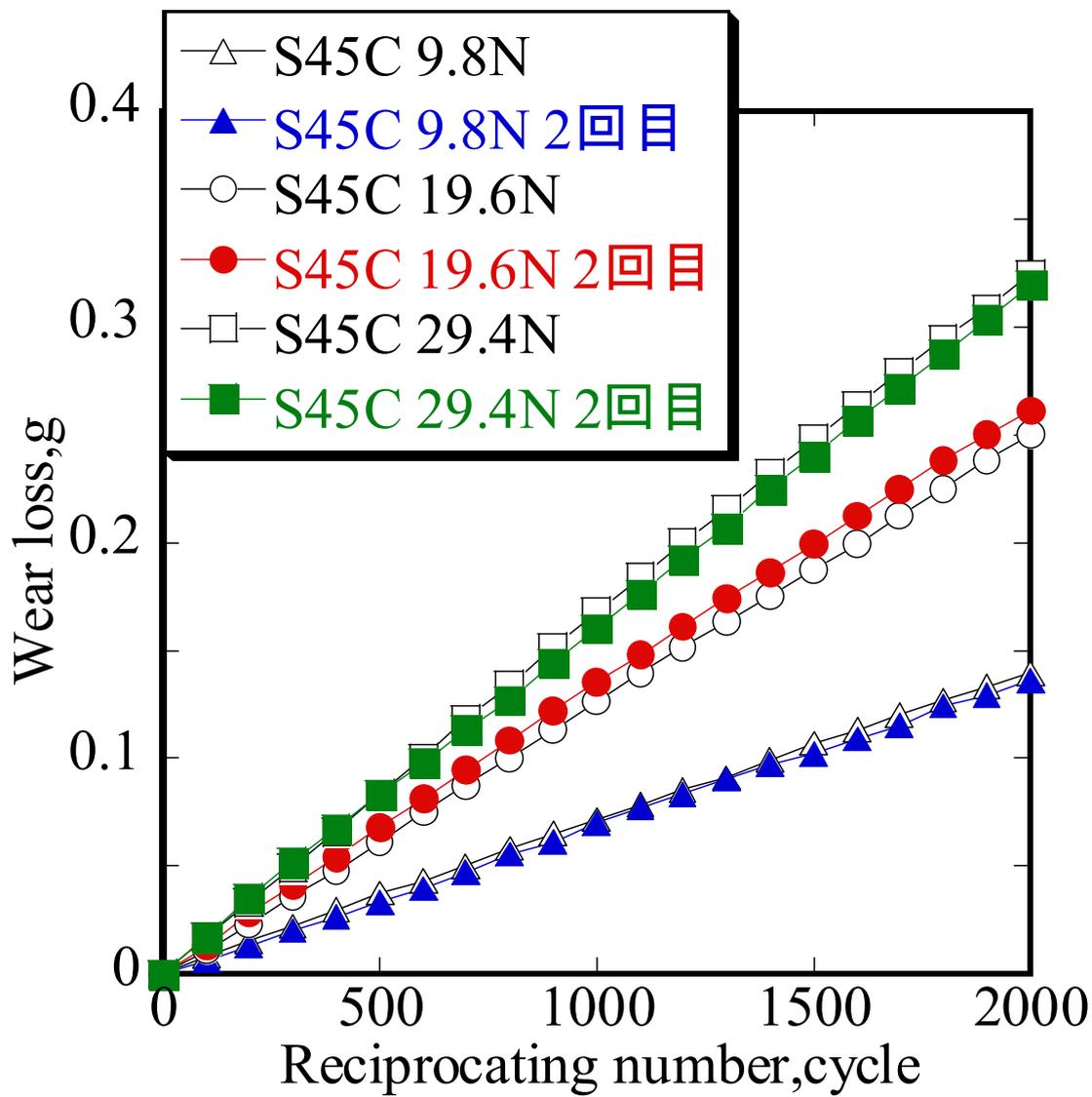


Fig. 2-4 Reproducibility of the experimental results with a load change in the S45C.

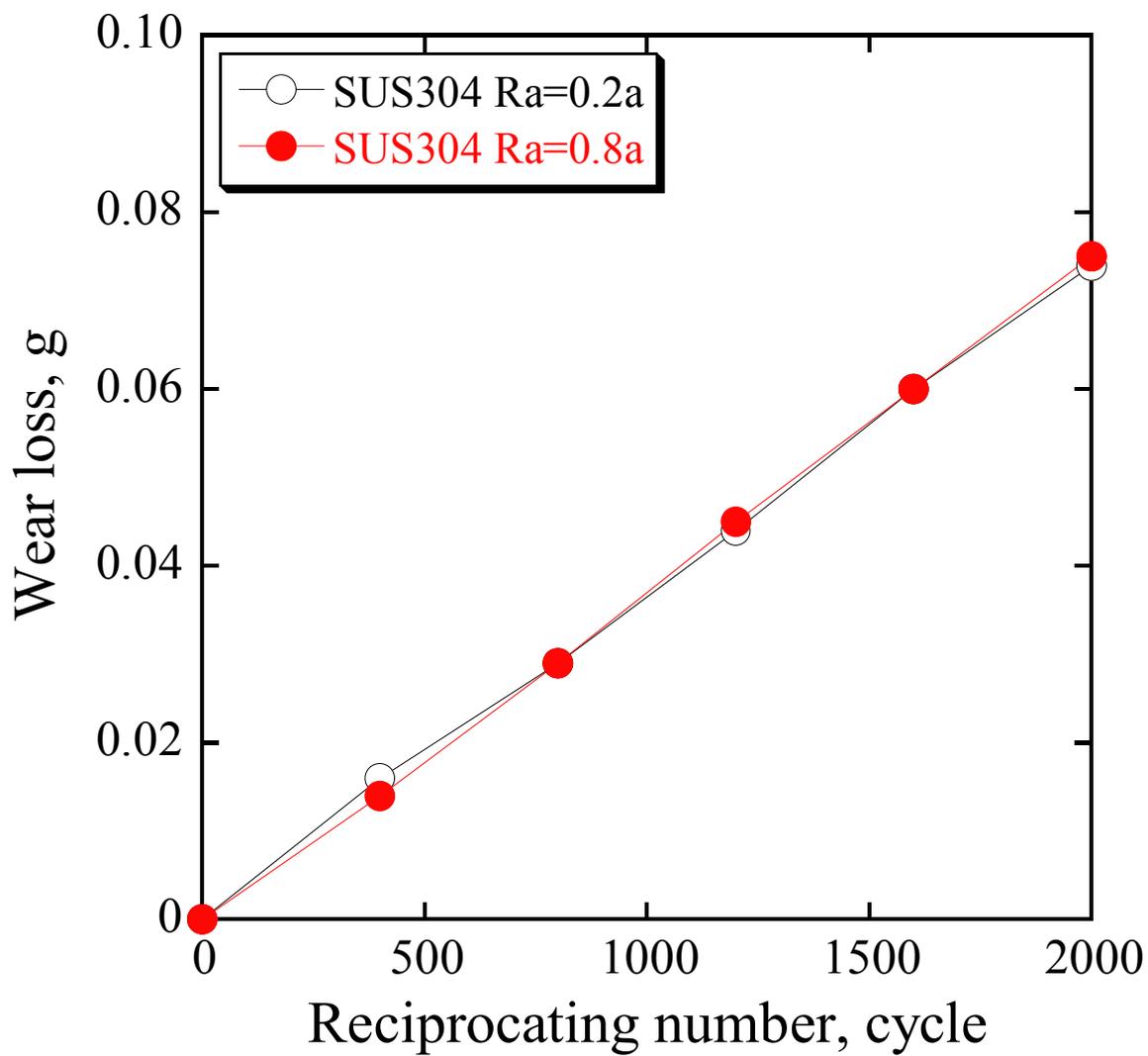


Fig. 2-5 Reproducibility of the experimental results in the changes of surface roughness in SUS304.

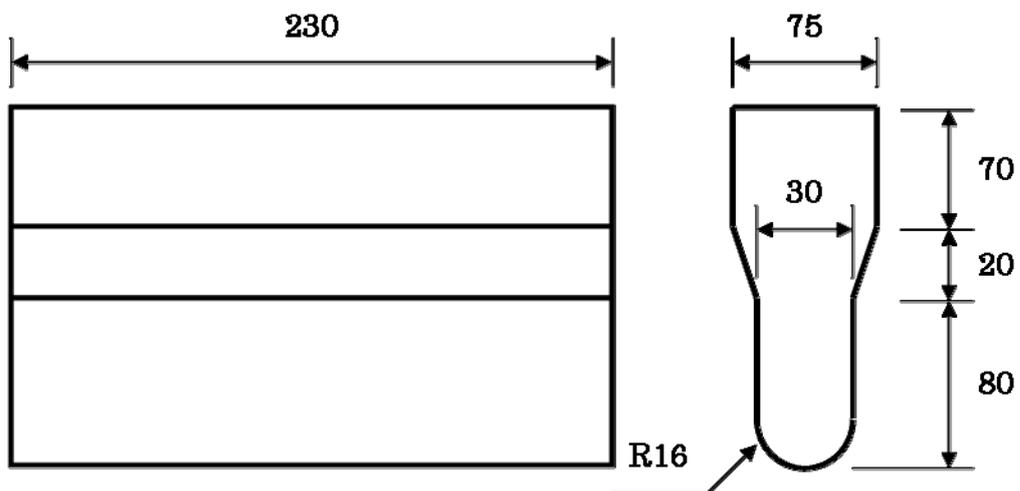


Fig. 2-6 Schematic diagram of Y-block (JIS G0307).

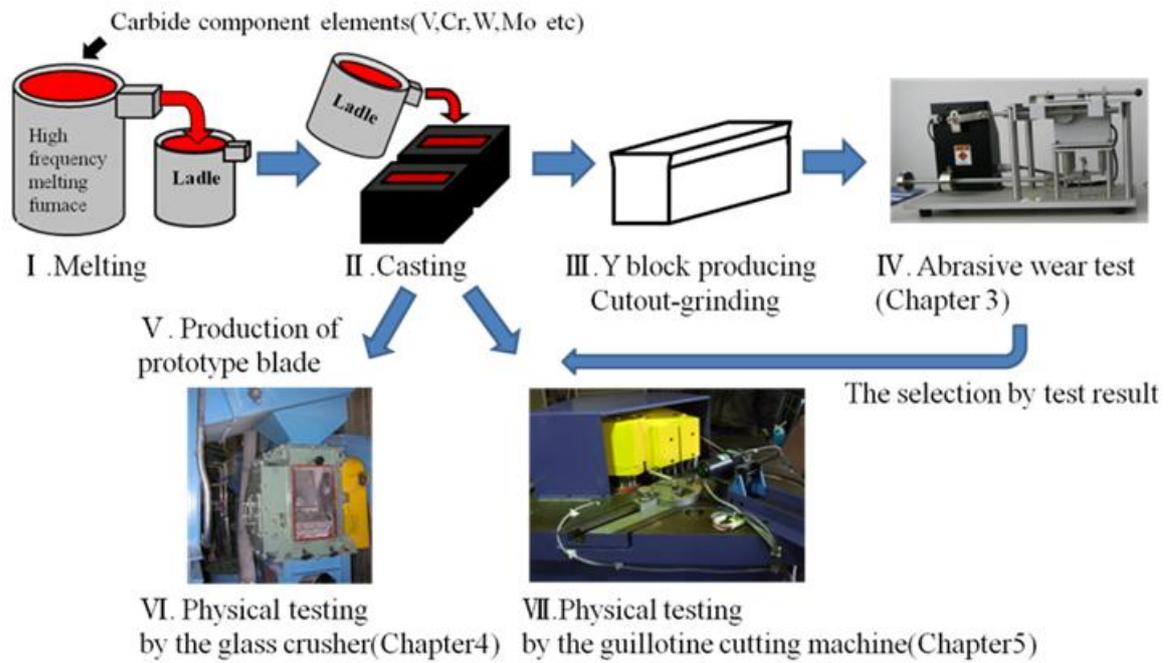


Fig. 2-7 Manufacturing process of the test material

Table 2-2 Chemical composition of each spheroidal vanadium carbide cast iron. (mass%)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Fe
SCI-VCrNi	3.00	1.00	0.60	8.0	18.0	-	≥10	Bal.
SCI-VMn	3.00	0.50	≥10	-	0.50	-	≥10	Bal.
SCI-W	3.00	1.00	0.40	-	-	0.50	≥10	Bal.

Table 2-3 Chemical composition of multi-alloy cast iron.

(mass%)

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Co	Fe
10%Co	2.00	0.50	0.50	5.00	5.00	5.00	5.00	10.00	Bal.

第三章

種々の炭化物を有する鑄鉄の
すべり摩耗特性

3. 1 目的

本章では，新たな耐摩耗材料として期待されている炭化物晶出型鑄造材料に着目し，種々の高硬度な炭化物を有する鑄鉄のアブレシブ摩耗特性を調査した．

3. 2 実験方法および実験条件

3. 2. 1 供試材

本研究に用いた供試材は，比較材として 12mass% Cr, 17mass% Cr 添加させた 2 種類の高クロム鑄鉄，第 2 章で製造を行った球状バナジウム炭化物鑄鉄から SCI-VCrNi, SCI-VMn, SCI-W および多合金鑄鉄 10%Co の 7 種類とした．各供試材は，第 2 章において各成分を目標値として設定し調整を行ったが，調整後の実際の成分を Table 3-1 に示す．一般的な耐摩耗材料として知られる高クロム鑄鉄からクロム添加量を 12% と目標とした 12Cr, 17% を目標とした 17Cr と調整を行ない，実際のクロムの添加量は 11.5% , 16.4% となった．球状バナジウム炭化物鑄鉄では，第 2 章で述べた目標値として製造を行ない，実際の値は SCI-VCrNi において，バナジウムが 12.2% , クロムが 17.7% , ニッケルが 7.96% となった．SCI-VMn ではバナジウムが，13.4% , マンガンが 12.2% , SCI-W では，バナジウムが 12.7% となった．多合金鑄鉄である 10%Co においても，第 2 章で述べた目標値を設定し製造したが，実際にはクロムが 4.73% , モリブデン 4.73% , バナジウム 5.37% , タングステン 4.71% , コバルト 10.91% となった．コバルトにおいては，二次硬化を目的とした熱処

理を行ない，焼きなまし 950℃で 5 時間，焼入れ 1050℃で 1 時間，やきもどし 525℃で 3 時間という処理条件を行っている．その熱処理条件を，Fig.3-1 に示す．また Fig. 3-2 に供試材の基地組織写真と初期硬さを示す．

EDS による分析を行った．Fig.3-3 に結果を示す．12Cr は M3C 炭化物，17Cr では M3C 炭化物と，M7C3 炭化物の晶出が確認できた．また球状バナジウム炭化物鋳鉄 SCI-VCrNi ではバナジウム炭化物である球状の MC 炭化物が分散していることが確認され，一部 M7C3 炭化物の晶出が確認された．SCI-VMn および SCI-W でも同様に球状のバナジウム炭化物が確認できた．多合金鋳鉄 10%Co においては，MC 炭化物，M2C 炭化物の晶出が確認でき，また熱処理による微細な二次炭化物の析出も確認できた．

3. 2. 2 実験方法

実験条件は，試験片に対しての摩耗面積は約 30mm × 12mm となっており，摩耗輪にかけることができる荷重は 19.6N 設定した．摩耗輪は試験台が 1 往復するごとに 0.9 度回転する．摩耗輪に装着したエメリー紙は #180 とした．試験片サイズ：50mm × 50mm × 4mm とし，表面は研削加工を施し 0.2a とした．

3. 3 実験結果および考察

各供試材の摩耗試験結果を Fig. 3-4 に示す．Fig. 3-4 より各供試材の摩耗量は往復回数の増加によって直線的に増加した．

12Cr, 17Crは同程度の摩耗量となり, SCI-VCrNi, SCI-VMnでは12Cr, 17Crと比べ, 約1/2に摩耗量が減少した。また, SCI-Wでは12Cr, 17Crと比べ, 約1/3に摩耗量が減少した。10%Co材は, SCI-Wと同等の摩耗量であった。

硬さ600Hv程度の高クロム鋳鉄よりも硬さ360Hv程度の球状バナジウム炭化物鋳鉄が耐摩耗性に優れた結果となった要因を明らかにするため, 各供試材に対し, SEMによる摩耗表面観察, マイクロスコープによる摩耗痕の観察, EPMAによる炭化物の形状, 面積率の解析, マイクロビッカース硬度計による摩耗試験後の硬さ測定を行った。

3. 3. 1 SEM 観察

各供試材のSEM画像をFig. 3-5に示す。全ての供試材で引っ掻き摩耗のアブレシブ摩耗形態を示していたが, 明瞭な違いは見られなかった。摩耗量の多い12Cr, 17Crの摩耗表面は, 一方向に深く粗いのに対し, 摩耗量の少ないSCIや10%Co材においては, 一部剥離脱落した箇所やくぼみが見られるものの, 12Crや17Crに比べて平坦である。

3. 3. 2 マイクロスコープによる観察

12mass%CrとSCI-VMnの三次元モデルと断面高さプロフィールの画像をFig. 3-6に示す。試験表面の摩耗痕を三次元化して観察を行った。摩耗試験結果から, 摩耗量が多かった12mass%Crと摩耗量が少なかったSCI-VMnを用いて, 高クロム鋳鉄と球状バナジウム炭化物鋳鉄の

三次元モデル，断面高さプロファイルから表面の凹凸を測定した．その結果 SCI-VMn の凹凸が小さく，摩耗量が少なかったことと一致した．

3. 3. 3 EPMA 面分析

炭化物面積率を EPMA 面分析によって解析した．各供試材の EPMA 画像を Fig. 3-7 に示した．高クロム鑄鉄の面積率は 12mass%Cr が 27.90%，17mass%Cr は 29.26% で共に約 30% 程度で，炭化物が基地組織を分断するように大きなデンドライト状に確認された．一方，球状バナジウム炭化物鑄鉄の面積率は SCI-VCrNi が 14.62%，SCI-VMn は 12.10% であった．

3. 3. 4 炭化物の面積率及び硬さ測定結果

各供試材の炭化物の面積率を測定し，材料の初期硬さを示した．炭化物の面積率は，200 倍で組織写真を各 5 視野撮影し，画像処理により二値化し算出した．測定した画像を Fig. 3-8 に示す．また，得られた炭化物の面積率及び硬さ測定結果を Table3-2 に示す．

多合金鑄鉄 10%Co は熱処理による二次炭化物の析出による基地組織の硬化のため，硬度が 783HV と最も高く，優れた耐摩耗性を示した要因となる．摩耗量の多い 12Cr, 17Cr では炭化物の面積率が，27.90%，29.30% であり，初期硬さも 584HV, 603HV と摩耗量が多いにも関わらず，高い値を示している．対して摩耗量が少ない球状バナジウム炭化物鑄鉄は，12Cr, 17Cr と比較して炭化物の面積

率，初期硬さ共に低い値を示した．従来，硬さが高い材料ほど，耐摩耗性に優れていると知られている．高クロム鑄鉄と球状バナジウム炭化物鑄鉄の結果は矛盾する．

球状バナジウム炭化物鑄鉄は，摩耗量の多い 12Cr, 17Cr と比較して，炭化物の面積や初期硬さが低いにもかかわらず，耐摩耗性が高かった理由を試験後の硬さで考察した．

3. 3. 5 摩耗試験前後の硬さ測定

Fig.3-9 に試験前後の表面硬さ測定結果を示す．赤軸が試験後の硬さを示す．12Cr, 17Cr では試験後の硬さが約 100HV 程度の増加であったのに対し，球状バナジウム炭化物鑄鉄では，約 30～50% の硬さの上昇が見られた．硬さが上昇した理由は，残留オーステナイトが摩耗試験により加工誘起変態し，マルテンサイトに変態したためであり，摩耗後の硬さの上昇率が高いことが耐摩耗性に優れる要因の 1 つであると，推察した．

3. 4 結言

摩耗試験の結果から，球状炭化物鑄鉄 (SCI) は，高クロム鑄鉄と比較して摩耗量が 1/2～1/3 と少なく，非常に良好な耐アブレシブ摩耗特性を示した．また多合金鑄鉄である 10%Co は熱処理により，二次炭化物が析出し，基地組織の硬度が上昇し，良好な耐アブレシブ摩耗特性を示した．これは耐摩耗性において，硬質炭化物の有無が関係していると考えられる．これらの炭化物の影響を SEM

観察および、マイクロスコープによる観察結果より考察したところ、高クロム鋳鉄と球状バナジウム炭化物鋳鉄では高クロム鋳鉄の摩耗痕が明瞭に観察できた。これは球状バナジウム炭化物鋳鉄の摩耗量が少ない結果と一致した。しかしながら表面および断面観察からは炭化物の直接的な影響は確認できないため、摩耗量に大きな違いが生じた要因を炭化物の種類、形状、面積率を考察した。EPMA 面分析の結果から高クロム鋳鉄の炭化物の面積率は 12 mass% Cr が 27.90%、17 mass% Cr は 29.26% で共に約 30% 程度で基地組織を分断するようにデンドライト状になっていた。一方、球状バナジウム炭化物鋳鉄の炭化物の面積率は SCI-VCrNi が 14.62%、SCI-VMn は 12.10% であり、基地組織中に球状に昌出していた。XRD 回折から、12 mass% Cr と 17 mass% Cr はクロム炭化物である、 $(Fe,Cr)_7C_3$ 、 $(Fe,Cr)_{23}C_6$ を有しており、SCI-VCrNi、SCI-VMn からはバナジウム炭化物である VC がそれぞれ確認された。しかしながら、炭化物の面積率が多い高クロム鋳鉄よりも球状バナジウム炭化物鋳鉄の方が摩耗量を抑えており、高クロム鋳鉄と球状バナジウム炭化物鋳鉄の違いは、有している炭化物の種類および面積率の違いであることが推察される。炭化物は非常に硬度が高いものであるため、摩耗されにくいのではないかと考えられるために、基地組織の硬さから考察を行うため、ビッカース硬度計で試験前後の硬さを測定した。その結果、すべての供試材で硬さの増加が確認され、硬さの増加量は 12 mass% Cr が約 19%、17 mass% Cr が約 18%、SCI-VCrNi

が約 70% , SCI-VMn が約 80% で , 試験後の硬さは約 700Hv 前後となった . その結果から , 硬さの上昇率が高いものほど摩耗量を抑えており , 摩耗量との相関性が確認できた . これらの供試材の硬度の上昇は加工硬化によるものだと推察される . つまり , 加工硬化の要因は基地組織であるオーステナイトが加工誘起変態してマルテンサイト化したことが考えられる ¹⁾⁻²⁾ .

これらの結果から , 球状バナジウム炭化物鋳鉄は高クロム鋳鉄に比べ , 硬さの上昇率が 70~80% と非常に高くなっており , この硬さの上昇率の高さから , 基地組織が加工誘起変態する際に , エネルギーを吸収したために摩耗が抑えられたと推察できる . なお , 炭化物の面積率よりオーステナイト組織の面積が多い方がアブレシブ摩耗に有効である .

これら結果を以下に要約する .

(1) SCI-W 及び 10%Co が優れた耐アブレシブ摩耗特性を示した .

(2) 球状炭化物鋳鉄 (SCI) は , 高クロム鋳鉄と比較して摩耗量が 1/2~1/3 と少なく , 非常に良好な耐アブレシブ摩耗特性を示した . この要因として , 基地組織中に存在する残留オーステナイトが砥粒との接触により , 加工誘起変態しマルテンサイトに変態したことで著しく硬さが増加したためと考えられる .

(3) 球状バナジウム炭化物鋳鉄は高クロム鋳鉄よりも基地組織の割合が多いため , 基地組織が摩耗により加工誘起変態する際にエネルギーを吸収し摩耗量を抑えたと推

察できる。

(4) 10%Co は熱処理により，二次炭化物が析出した。基地組織の硬度が上昇し，良好な耐アブレシブ摩耗特性を示した。

(5) アブレシブ摩耗は，炭化物の面積率や初期硬さだけではなく，加工硬化による硬さの増加も重要である。加工誘起変態し，著しく硬さが増加する材料は優れた耐アブレシブ摩耗特性を示した。

参考文献

1) Akira Sawamoto, Keisaku Oshiro, Kimio Matsuda, "Work hardening characteristics of high manganese steel containing vanadium", Casting, Volume 54, Issue 4, (1982)

2) Naoji Yoneta, Kazumichi Shimizu, Hiroya Hara, Masahiro Tnaka, Yoshihiro Nawa, "Wear Characteristics of Spheroidal Carbides Cast Irons", Key Engineering Materials in Uniaxial Rotary Glass Shredder Vol 457, pp249-254, (2011)

Table3-1 Chemical composition.

	(mass%)											
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W	Co	Fe
12Cr	3.24	0.70	0.97	0.02	0.01	-	11.5	-	-	-	-	Bal.
17Cr	3.14	0.77	0.79	0.02	0.01	-	16.4	-	-	-	-	Bal.
SCI- VCrNi	2.99	0.73	0.60	0.02	0.02	7.96	17.7	-	12.2	-	-	Bal.
SCI-VMn	3.00	0.70	12.2	0.04	0.01	1.60	0.50	-	13.4	-	-	Bal.
SCI-W	3.40	0.90	0.40	0.01	0.03	2.90	-	0.50	12.7	-	-	Bal.
10%Co	2.04	0.45	0.61	0.036	0.016	-	4.73	4.73	5.37	4.71	10.91	Bal.

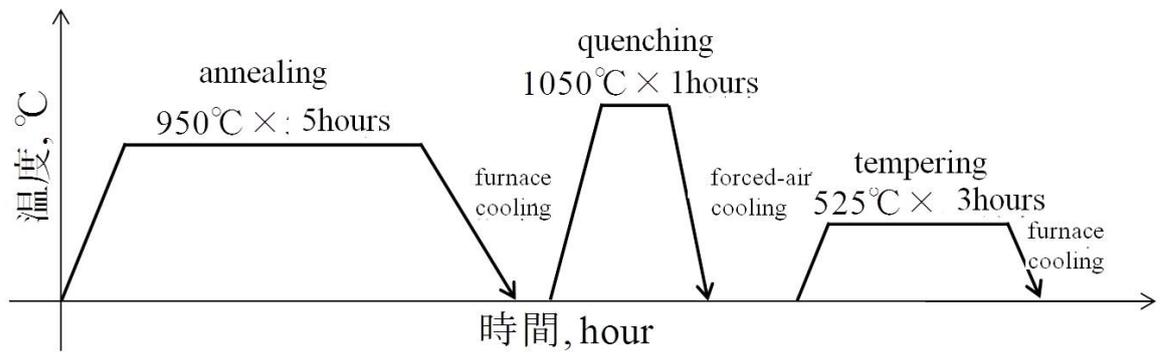
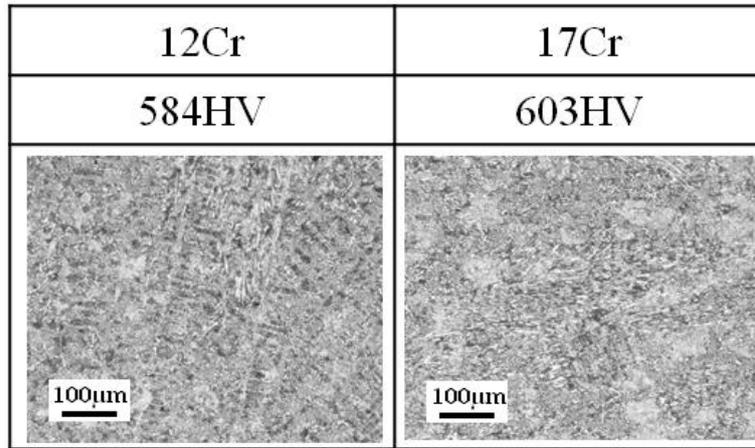
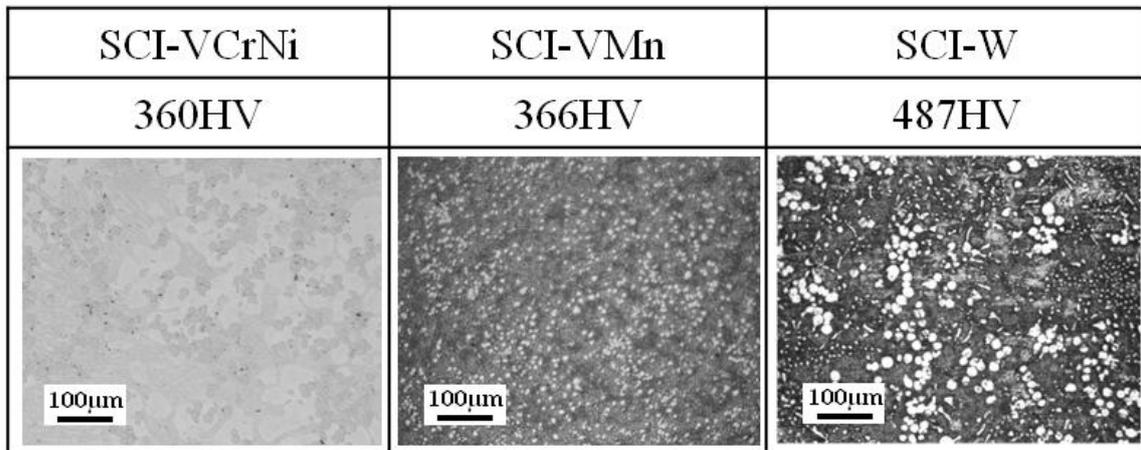


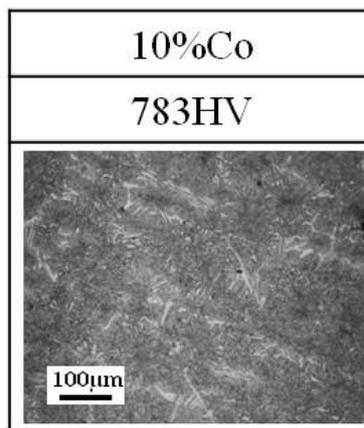
Fig.3-1 Heat treatment condition of multi-alloy cast iron.



(a) High chromium cast iron

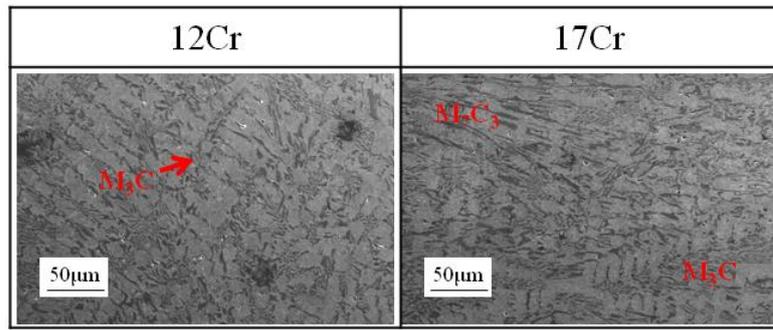


(b) Spheroidal vanadium carbide cast iron

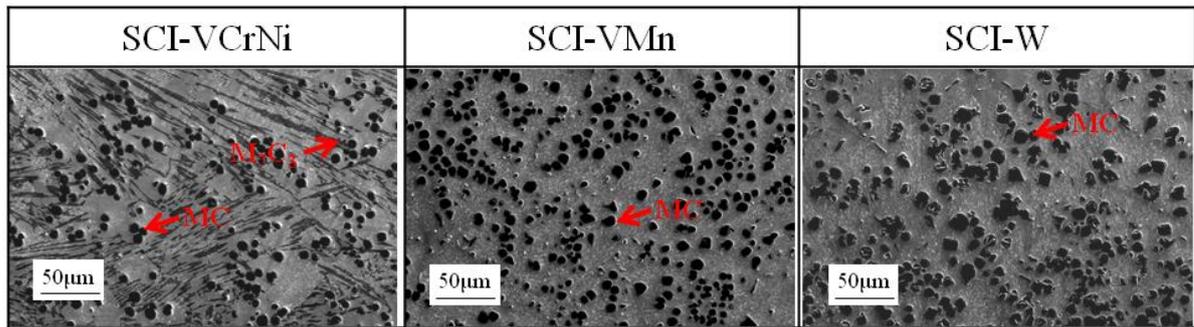


(c) Multi-alloy cast iron

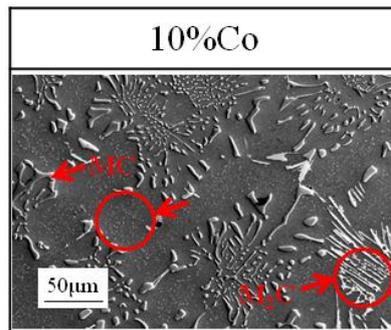
Fig. 3-2 Microstructure of specimens.



(a) High chromium cast iron



(b) Spheroidal vanadium carbide cast iron



(c) Multi-alloy cast iron

Fig. 3-3 EDS surface analysis of specimens.

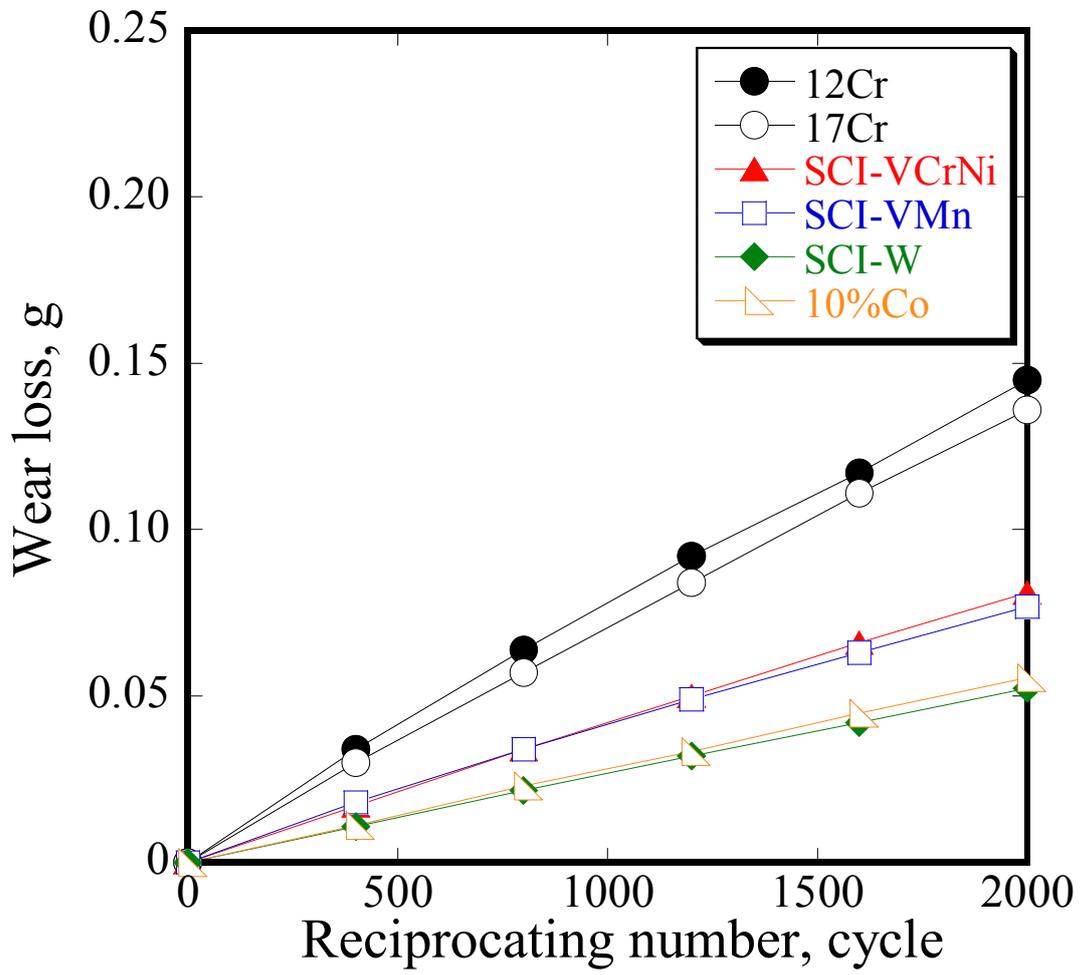
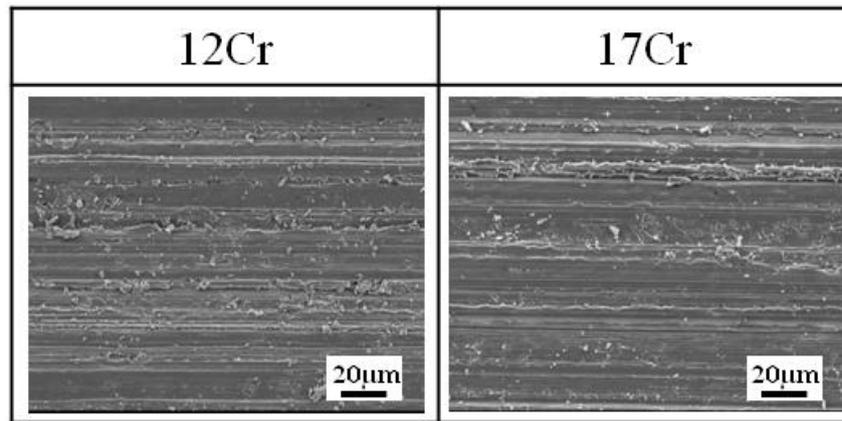
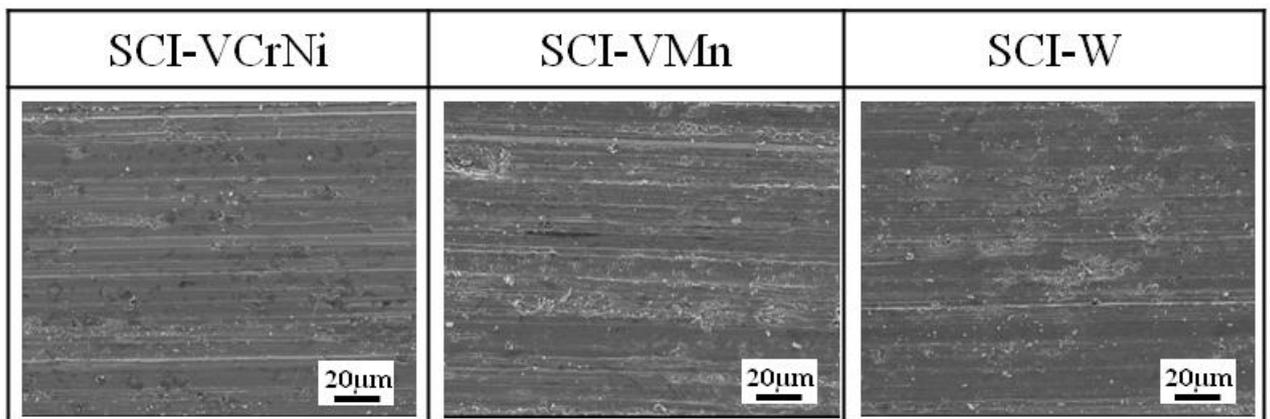


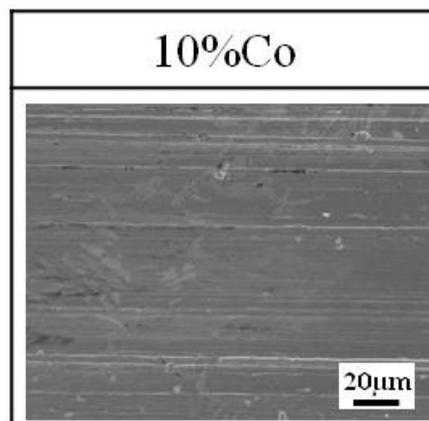
Fig. 3-4 Suga wear test results for each test material.



(a) High chromium cast iron

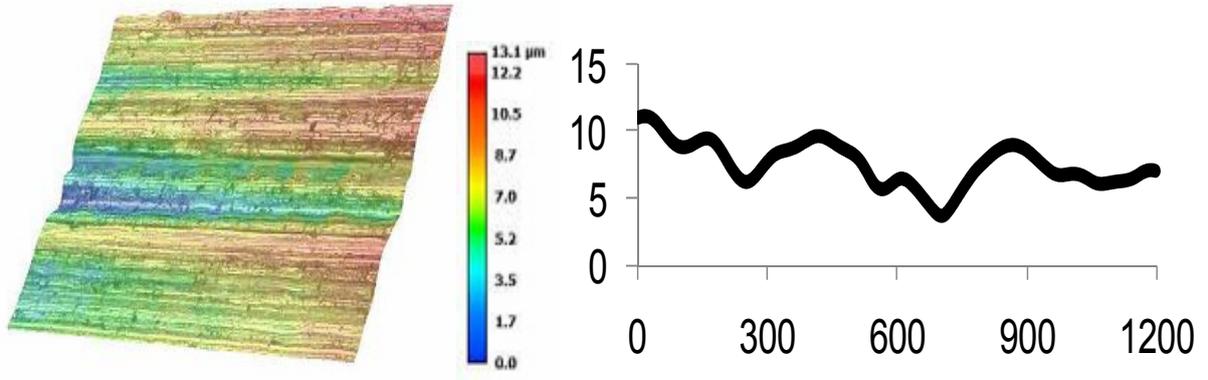


(b) Spheroidal vanadium carbide cast iron

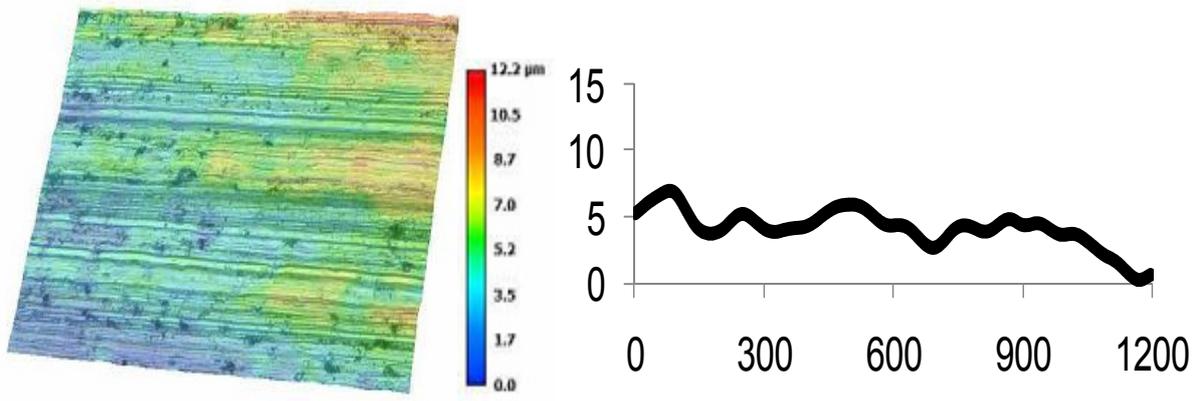


(c) Multi-alloy cast iron

Fig. 3-5 SEM photographs of abrasion surfaces

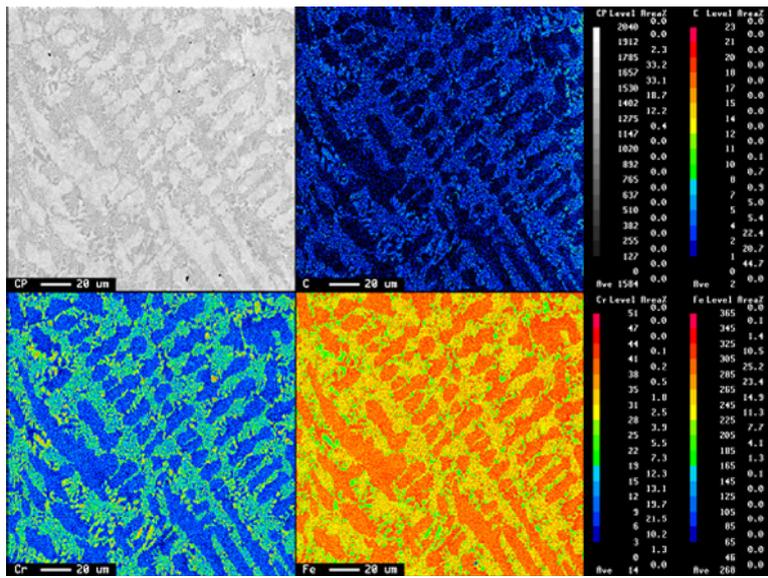


(a) Wear surface of 12mass%Cr

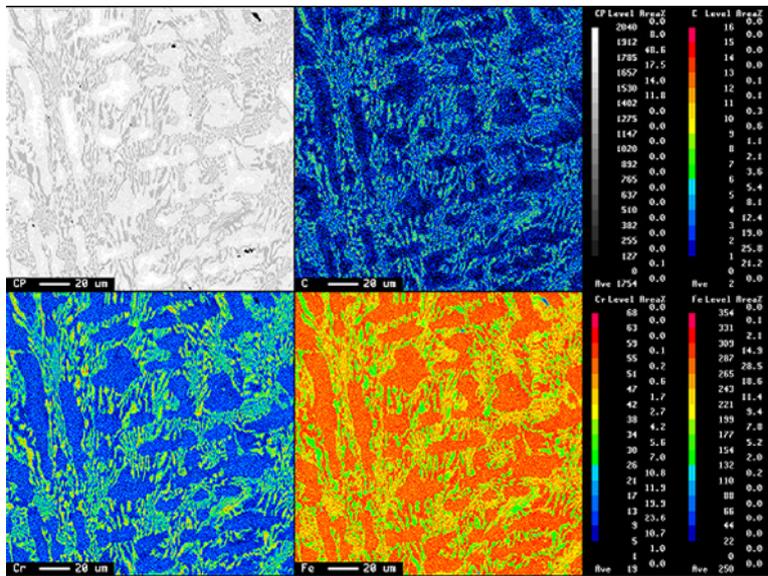


(b) Wear surface of SCI-VMn

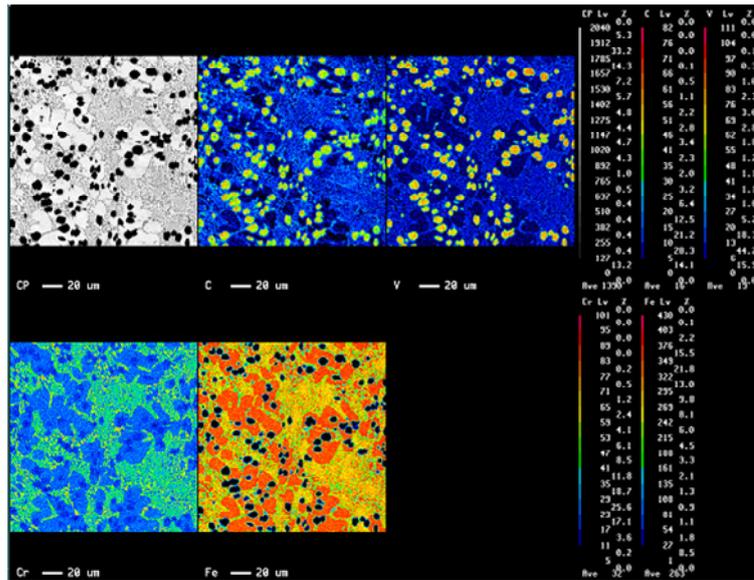
Fig. 3-6 Cross-sectional height and three-dimensional model of the wear surface.



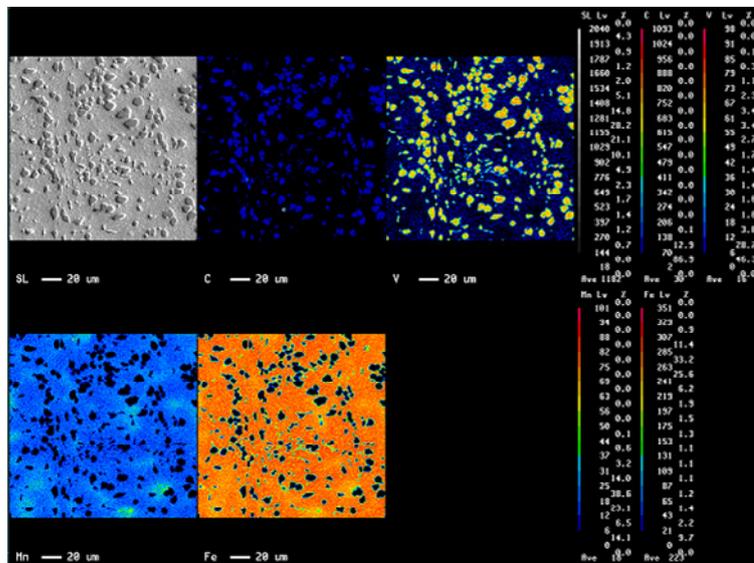
(a) 12mass%Cr



(b) 17mass%Cr

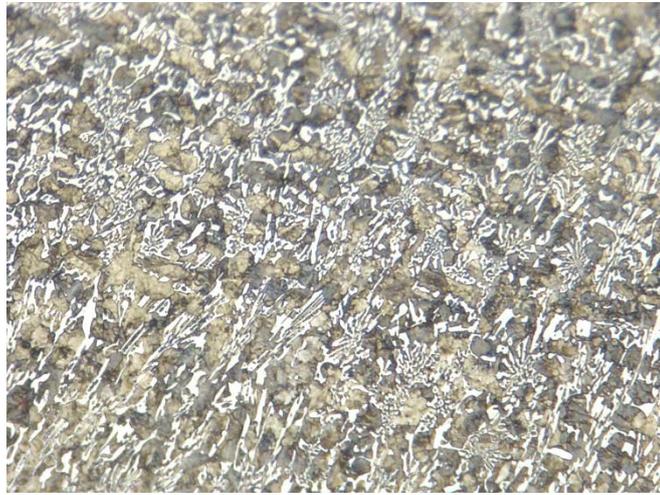


(c) SCI-VCrNi

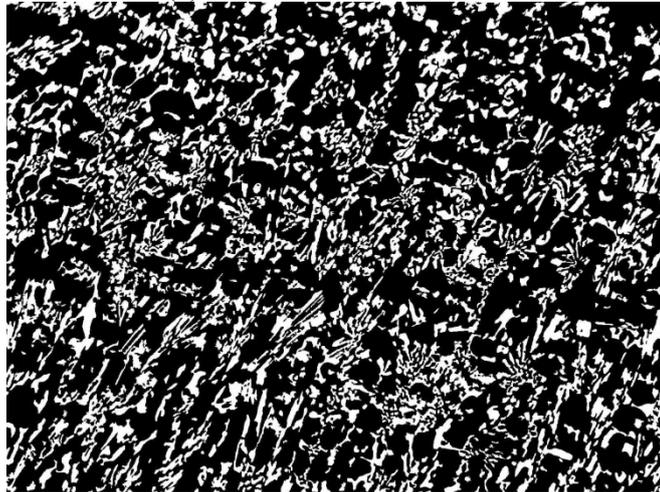


(d) EPMA analysis results of SCI-VMn

Fig. 3-7 EPMA analysis of the results of each test material.



(a) Microstructure of 12Cr



(b) Image processing photo of 12Cr

Fig. 3-8 Method for measuring the area ratio of the carbide

Table 3-2 Volume fractions of carbides and Vickers hardness of specimens. (mass%)

Specimens	12Cr	17Cr	SCI-VCrNi	SCI-VMn	SCI-W	10%Co
Volume fraction of carbides	27.90%	29.30%	22.6%	12.1%	16.5%	13.0%
Hardness	584HV	603HV	360HV	366HV	487HV	783HV

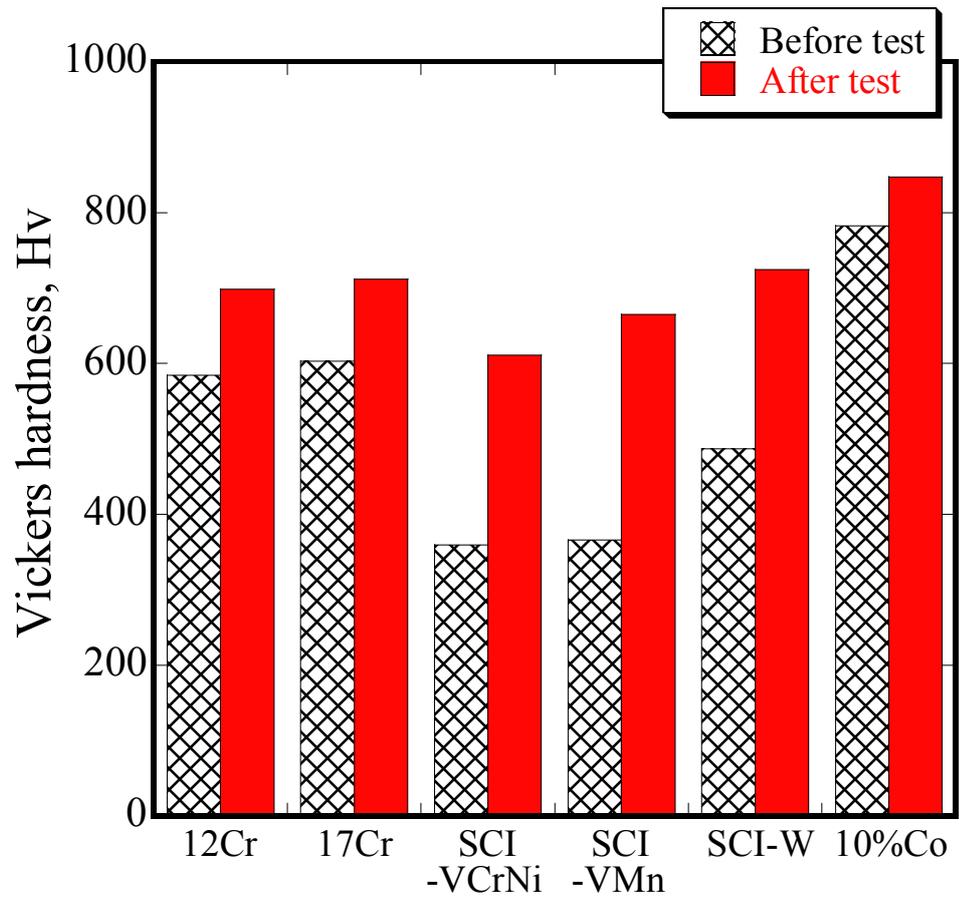


Fig.3-9 Vickers hardness changes before and after abrasive wear tests of specimens.

第四章

実機による破碎試験

(ガラス粉碎機)

4. 1 目的

近年，循環型社会形成推進基本法の公布及び，各種リサイクル法が制定され，資源有効利用や都市鉱山（urban mine）の観点から，各種廃棄物のリサイクルに関係する仕組みが整備されてきている^{1)~2)}．廃棄物の各種選別工程において各種破碎機や重機，選別機，輸送機等多種にわたる機器が用いられている．特に自動車，家電，建設解体物から出る廃棄物の多くは，金属類，プラスチック類をはじめとする多種複合材料から形成され，これらをリサイクルする工程において，選別効率を向上させるため，複合材料の単体分離及び，粒度，粒径，形状を揃えることを目的として³⁾，様々な機器が用いられている．これら各機器において，用途や廃棄物の種類により，装置各部に様々な形態の摩耗を生じておりメンテナンス性悪化，ランニングコスト増加，工場稼働率の低下といった問題を生じている．

本研究は，これら廃棄物の中でも，廃蛍光灯ガラスのリサイクル工場で使用されている，一軸回転式ガラス粉碎機の粉碎刃に着目した．廃蛍光灯ガラスは，電極近くに電気伝導性を抑制するための鉛ガラスが用いられていて，鉛ガラスを除去してリサイクルする．廃蛍光灯ガラスのリサイクル工場では，ガラスをリサイクルする選別工程として，1) 金属等の異物除去，2) 粒径を揃えるための破碎，3) 比重選別による鉛ガラスの除去，を行い選別されたソーダ石灰ガラスを建設用断熱材（グラスウール）の原料としてリサイクルしている．この選別工

程における，2) 粒径を揃えるための粉砕過程において，粉砕刃に激しいアブレッシブ摩耗を生じ問題となっている．

これまでの研究で清水らは，高炉などの輸送配管バンド部等で粉粒体などの固体粒子の衝突によって生じるエロージョン摩耗に着目して研究を行い，軟鋼，球状黒鉛鑄鉄，ステンレス鋼，高クロム鑄鉄および球状炭化物鑄鉄など様々な鉄鋼材料の摩耗特性を明らかにしてきた．エロージョン摩耗は固体粒子の衝突によって材料の表面が損傷，除去される現象であるが，その支配因子は複雑で，衝突材の衝突速度や衝突角度，被衝突材の硬さや組織，衝突材の硬さや粒径，形状が摩耗特性に影響するため，その定量的な評価を行ってきた^{4)~8)}．さらに，エロージョン摩耗の重要な支配因子として，粉粒体の衝突する角度によって，衝突角度依存性が存在することも知られている^{9)~11)}．清水ら¹²⁾が開発してきた各種球状炭化物鑄鉄は，組織内に球状化したバナジウムカーバイド（VC）を晶出させた鑄鉄で，このVCがビッカース硬さで約2400Hvと非常に硬い．またこのVCが基地組織との密着性も非常によいことで，耐摩耗材として多く用いられている高クロム鑄鉄に比べても摩耗量が小さく，衝突角度依存性もないことから，良好な耐摩耗特性を示している．そこで，このエロージョン摩耗特性に優れた，3種類の球状炭化物鑄鉄（Spheroidal Carbide cast Iron：SCI-VCrNi，SCI-VMn，SCI-W）を選定し，一軸回転式ガラス粉砕機の粉砕刃を試作して，実用機に取り付け実用化実験を行っ

た．これにより，ガラス粒子の衝突によるガラス粉碎刃の摩耗メカニズムについて考察した．

4. 2 実験方法および実験条件

4. 2. 1 供試材

3種類の球状炭化物鋳鉄を用いて試作した回転刃各々の材料組成を Table 4-1 に，組織写真を Fig.4-1 に示す．SCI-VCrNi はオーステナイト基地組織にクロム炭化物が晶出し，さらに VC を晶出させたステンレス系材料であり，SCI-VMn はオーステナイト基地組織に VC を晶出させた高マンガン系材料であり，また SCI-W は VC を晶出させ熱処理を施したマルテンサイト基地組織の白鋳鉄系材料である．

いずれの材料も VC を晶出させるため，10%程度のバナジウムが添加されている．材料硬さはビッカース硬さで，SCI-VCrNi が 320Hv，SCI-VMn が 380Hv，SCI-W は 800Hv であった．また VC の硬さをマイクロビッカース硬度計で測定した結果，どの球状炭化物鋳鉄も 2400Hv と硬い値を示した．

4. 2. 2 ガラス破碎機による摩耗試験方法

球状炭化物鋳鉄で試作した粉碎刃を，Fig. 4-2 に示す．これらを本実験に用いたガラス破碎機に取り付け，経過時間毎に摩耗状況を確認しながら実験を行い粉碎刃の重量損傷量を計測した．

試験機として使用した一軸回転式ガラス破碎機を Fig.

4-3 に示す．この粉砕機は回転刃 4 枚，固定刃 1 枚で，回転軸に回転刃を固定し，低速回転させて，回転刃と固定刃でガラスを挟み込むように粉砕する構造になっている．

粉砕前，粉砕後の廃蛍光灯ガラスを Fig. 4-4 に示す．廃蛍光灯ガラスの主な組成は，ソーダ石灰ガラスでビッカース硬さ 500～600Hv 程度と硬いこと，及び不定形であるために，粉砕刃に激しいアブレシブ摩耗を生じている．

実験終了後の粉砕刃において，VC 球状化率測定，VC 晶出面積測定，及び断面組織写真観察を行い VC が耐摩耗性に及ぼす効果を確認した．また粉砕刃表面からのビッカース硬さ分布測定及び SEM による摩耗表面観察を行い，ガラス粒子衝突により粉砕刃に生じるアブレシブ摩耗特性について考察した．

4. 3 実験結果および考察

4. 3. 1 実験結果

経過時間に伴う摩耗量変化のグラフを Fig. 4-5 に示す．試験開始後 $1.93 \times 10^5 \text{ sec}$ において SCI-W は SCI-VCrNi に比べて重量損傷量が 1/12 となり，また SCI-VMn は SCI-VCrNi より重量損傷量が少ない結果となった．

粉砕刃の摩耗状況結果のマクロ写真を Fig. 4-6 に示す．SCI-VCrNi は $1.93 \times 10^5 \text{ sec}$ 経過で摩耗が進展し，粉砕刃として使用不能となり，SCI-VMn は $2.56 \times 10^5 \text{ sec}$ 経過して，同様の状況になった．それに対し，SCI-W は $6.18 \times$

105secまで運転を試みたが、同図に示すとおり、摩耗の進展が非常に少なく、 6.18×10^5 secに及ぶ時間経過後においても、粉碎刃の原形を留めていた。次に経過時間毎の、摩耗状況マクロ写真をFig. 4-7に示す。(0.22 × 10⁵sec, 0.93 × 10⁵sec, 1.93 × 10⁵sec経過時間毎にそれぞれ観察した。)

経過時間 0.22 × 10⁵secでは、どの粉碎刃もさほど摩耗は進展しておらず、経過時間 0.93 × 10⁵secで、摩耗量に顕著な差がみられた。これら粉碎刃は、刃の先端部分からガラスの激しい衝突により徐々に丸みを帯び、刃の根元部分へ摩耗が進展している。さらに経過時間 1.93 × 10⁵secで、SCI-VCrNiは刃先の摩耗が、刃の根元まで進展し使用不能となった。

SCI-VMnにおいても同様に顕著な摩耗の進展が見られた。SCI-Wは、刃先に若干丸みを帯びた程度で摩耗はほとんど進展していない状況であった。粉碎刃の原形を長時間維持することは、粉碎刃の長寿命化によるメンテナンス性の向上を図ることばかりでなく、回転刃と固定刃のクリアランスを一定に保ち、破碎効率を長時間維持することとなり、ガラスの粒度・粒径に関わる粉碎効率及び選別効率向上にも影響すると考えられる。

従来の使用刃は、これまでの稼働実績において運転時間 0.72 × 10⁵secから 0.86 × 10⁵sec程度の寿命であること及び、SCI-Wの重量損傷量がSCI-VCrNiに比べ1/12であったことから考慮すると、SCI-Wの寿命は本実験で最終的な評価には至っていないが、従来使用刃のおおよそ25

倍と推察され，飛躍的に耐摩耗性を向上する結果となった

4. 3. 2 VCが耐摩耗性に及ぼす影響

試作した各々の球状炭化物鋳鉄粉砕刃の組織写真 Fig.4-1 において，バナジウム球状炭化物(VC)が球状に晶出している様子が観察された．耐摩耗性を考慮する上では，VCの球状化率及び晶出量が大きく影響を与えることからこれらを分析した．VCの球状化率測定結果を Fig. 4-8 に，また晶出面積測定結果を Fig. 4-9 に示す．球状化率は，SCI-Wが最もよく，次にSCI-VCrNi,SCI-VMnの順であった．どの組織においても，球状化割合が70%程度以上と安定して晶出していたため，摩耗量の差異への大きな影響はないと考えられる．

また，晶出面積においても，最小のSCI-VMnで18.4%，最も晶出面積が多かったSCI-Wで21.9%となっており，おおよそ20%程度と安定してVCが晶出しているため，VCの晶出面積の差が摩耗量の差に，大きく影響するとは考えにくい．

次に摩耗断面方向組織写真を Fig. 4-10 に示す．粉砕刃表面にガラス粒子が衝突する際，VCが耐摩耗性に及ぼす影響を観察した．これまでのエロージョン摩耗の研究においても，粉粒体が衝突する際，VCの硬さが硬いこと及び，基地組織との密着性がよいことで，VCは被衝突材料の塑性流動を抑え，耐摩耗性に非常に有効な効果を示すことが報告されている¹²⁾．ガラス粒子の衝突によるアブ

レッシブ摩耗に対して，Fig. 4-10 に示す通り，どの種類の粉砕刃においても材料表面の VC が塑性流動を抑え，摩耗の進展を抑制している様子がエロージョン摩耗の際の VC の効果と同様に見て取れる．

これらのことから，試作した粉砕刃の VC が及ぼす摩耗量の影響は，VC の球状化率及び面積率，硬さ，密着性に明確な違いは見られず，VC は耐摩耗性を向上させる上で，非常に有効であることを示しているため，3種類の球状炭化物鋳鉄における摩耗量の違いは，VC には起因しないことが推察される．

4. 3. 3 基地組織の硬さの変化が耐摩耗性に及ぼす影響

耐摩耗性を考慮する上で，基地組織の硬さの変化を考察することは，重要な要素である．Fig. 4-11 に各粉砕刃の摩耗表面からの硬さ分布を示す．SCI-VCrNi, SCI-VMn は，双方ともに基地組織がオーステナイト域の組織であるため，ガラス粒子が衝突することによって，マルテンサイト加工誘起変態し，硬度上昇することが期待される．SCI-VMn は粉砕刃表面が，約 700Hv まで硬くなっており，加工誘起変態により硬度上昇したことが顕著に伺える．しかしながら，SCI-VCrNi は，今回のガラス粒子衝突によるアブレシブ摩耗のような摩耗形態では，硬さに変化が見られない．このことによって，SCI-VMn は SCI-VCrNi よりガラス粒子のアブレシブ摩耗に対する，耐摩耗性に優れていたことは明確である．一方 SCI-W は，

基地組織が材料表面から内部まで非常に硬く，VCの晶出効果も伴って，ガラス粒子によるアブレシブ摩耗に対して，良好な耐摩耗性を示していると考えする。

4. 3. 4 摩耗表面性状が耐摩耗性に及ぼす影響

粉碎刃表面 SEM 写真を Fig. 4-12 に示す。SCI-VCrNi は激しい切削摩耗痕が見られ，材料表面が深く削り取られている。それに対し SCI-VMn は，同様に切削摩耗痕は見られるものの，SCI-VCrNi に比べて摩耗痕は浅く摩耗の進展が抑制されている。このことは，Fig. 4-11 に示す摩耗表面からの硬さ分布のグラフより，SCI-VMn の材料表面がガラス粒子の衝突により，加工誘起変態して硬くなったことが要因であると推察できる。それに対し SCI-W は，基地組織が材料表面から内部まで非常に硬いため，他の 2 種類同様にガラス粒子の激しい衝突を受けているにもかかわらず，材料表面に切削摩耗の痕はほとんど見られない。ガラスのアブレシブ摩耗に対しては，基地組織の硬さが耐摩耗性に大きく影響すると言える。

4. 4 結言

本研究では，激しいアブレシブ摩耗を生じているガラス粉碎機の粉碎刃において，3 種類の球状炭化物鋳鉄を用いて粉碎刃を試作し，実際の粉碎機でその摩耗特性を考察するための実用化実験を行った。その結果を下記に示す。

1) SCI-W の寿命は，従来使用刃の約 25 倍と，ガラスの

アブレシブ摩耗に対して最も優れていた。SCI-Wは基地組織が、粉砕刃表面から内部まで800Hvと非常に硬く、VCの晶出効果も伴って、他の2種類と比べてガラス粒子衝突による、切削摩耗が起きにくいことが要因となった。

2) 球状炭化物鋳鉄で晶出するVCは、ガラスを粉砕するアブレシブ摩耗に対し、摩耗の進展を抑制する効果が大きい。本研究で試作した球状炭化物鋳鉄3種類において、VCの球状化率は約70%、晶出面積は20%程度であったが、3種類の球状炭化物鋳鉄は共に、VCがガラス粒子の衝突による塑性流動を抑え、耐摩耗性に大きな効果を示していた。VCの効果を最大限得るためには、球状化率、面積率がこの数値以上であることが望ましいと言える。

3) SCI-VMnはマトリックスがオーステナイト基地であり、オーステナイト基地がガラス粒子の衝突により、加工誘起変態し硬度が上昇した。一方SCI-VCrNiは、SCI-VMn同様、加工誘起変態による硬度上昇を期待できる材料であったが、ガラス粒子のアブレシブ摩耗に対しては、材料表面硬さにほとんど変化がなかった。その結果SCI-VMnはSCI-VCrNiより、ガラス粒子のアブレシブ摩耗に対して、耐摩耗性が優れていた要因になったと考えられる。

参考文献

- 1) M. Ito and M. Tsunekawa: SHIGEN-TO-SOZAI Vol. 122, p. 142, (2006)
- 2) M. Tsunekawa: Waste management research Vol. 14, p. 279, (2003)
- 3) S. Owada, M. Ito, et al.: SHIGEN-TO-SOZAI Vol. 121, p.28, (2005)
- 4) K. Shimizu and T. Noguchi: IMONO Vol. 66, p. 7, (1994)
- 5) K. Shimizu and T. Noguchi: Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Vol. 65-632A, p. 940, (1999)
- 6) K. Shimizu, T. Noguchi and S. Doi: Trans. of AFS, Vol. 101, p. 225, (1993)
- 7) K. Shimizu and T. Noguchi: Wear Vol. 176, p. 255, (1994)
- 8) K. Shimizu, T. Noguchi, T. Kamada, H. Takasaki: Wear Vol. 198, p. 150, (1996)
- 9) I. Finnie: Wear Vol. 3, p. 87, (1960)
- 10) J. G. A. Bitter: Wear Vol. 6, p. 5, (1963)
- 11) I. M. Hutchings and R.E. Winter: Wear Vol. 27, p. 121, (1974)
- 12) X. Yaer, K. Shimizu, et al.: Wear Vol. 264, p. 947, (2008)

Table 4-1 Chemical compositions and Vickers hardness
of SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.

(Mass%)

Specimen	C	Si	Mn	Ni	Cr	V	Hv
SCI-VCrNi	3.0	1.0	0.7	8.0	18.0	10.0	320
SCI-VMn	3.0	0.5	13.0	—	—	12.8	380
SCI-W	3.0	1.0	0.4	<5.0	—	12.8	900

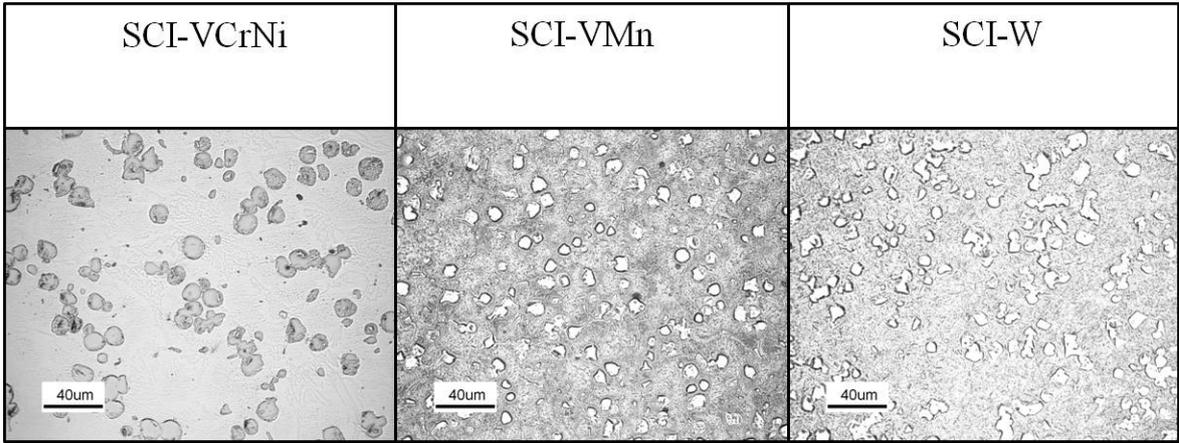


Fig. 4-1 Microstructure of SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.

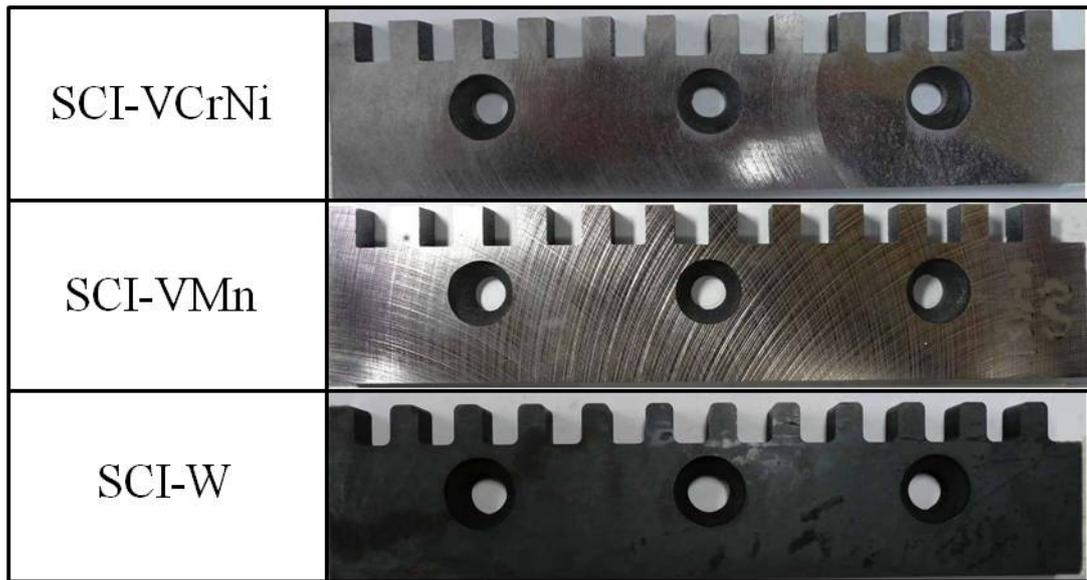


Fig. 4-2 Three sort of trial shredding blades made by Spheroidal carbides cast iron.



Fig. 4-3 Uniaxial rotational glass shredder.



Fig. 4-4 Crushed glass of waste fluorescent lamp.

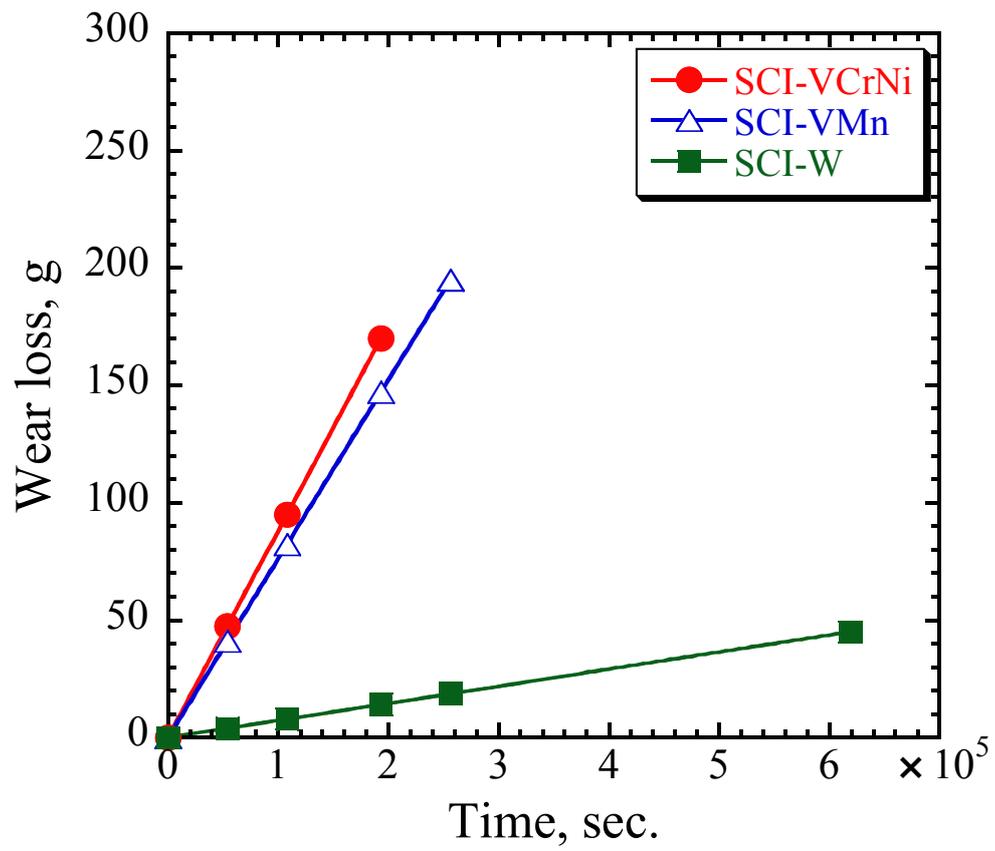


Fig. 4-5 Wear loss Vs. Operating time in SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.

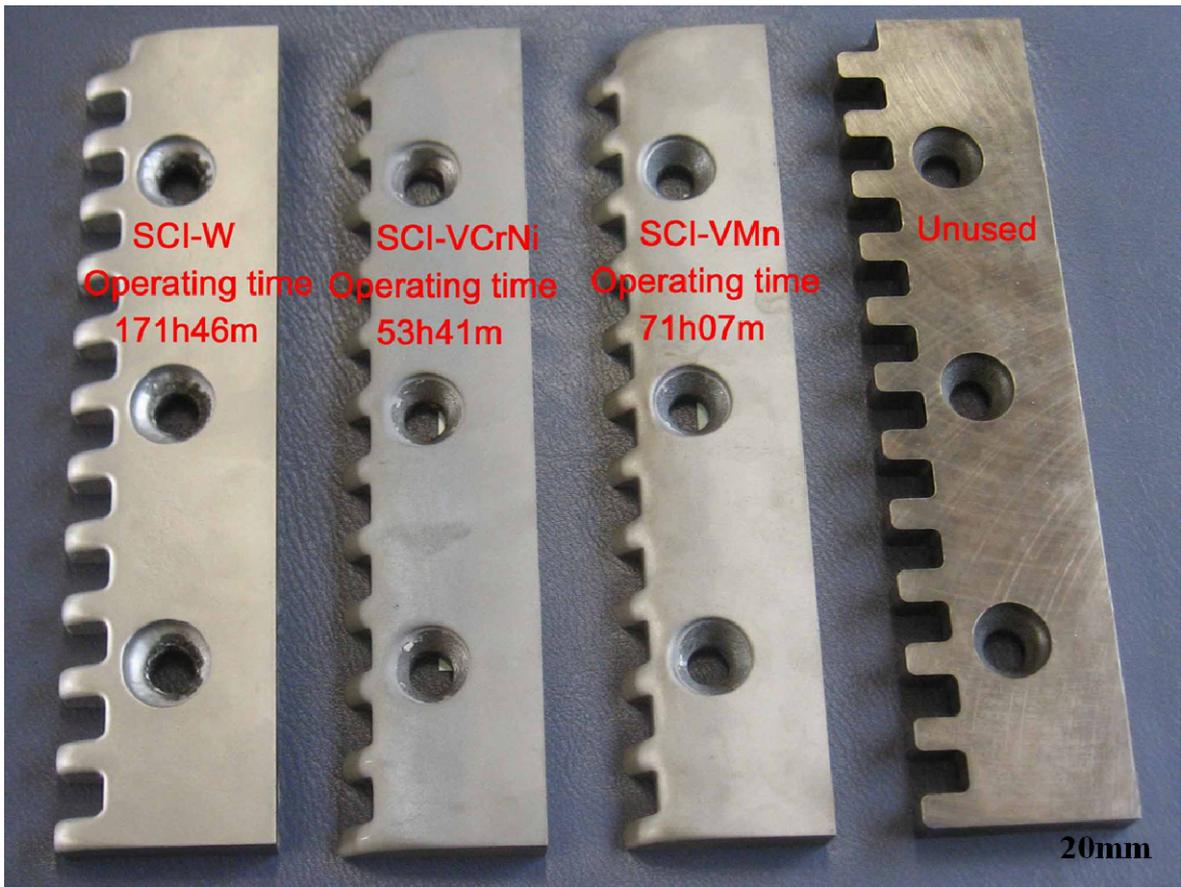


Fig. 4-6 Macro photographs of shredding blade after test.

	After 6hour 15min	After 25hour 55min	After 53hour 41min
SCI-VCrNi			
SCI-VMn			
SCI-W			

Fig. 4-7 Wear appearance of shredding blades as a function of operating time.

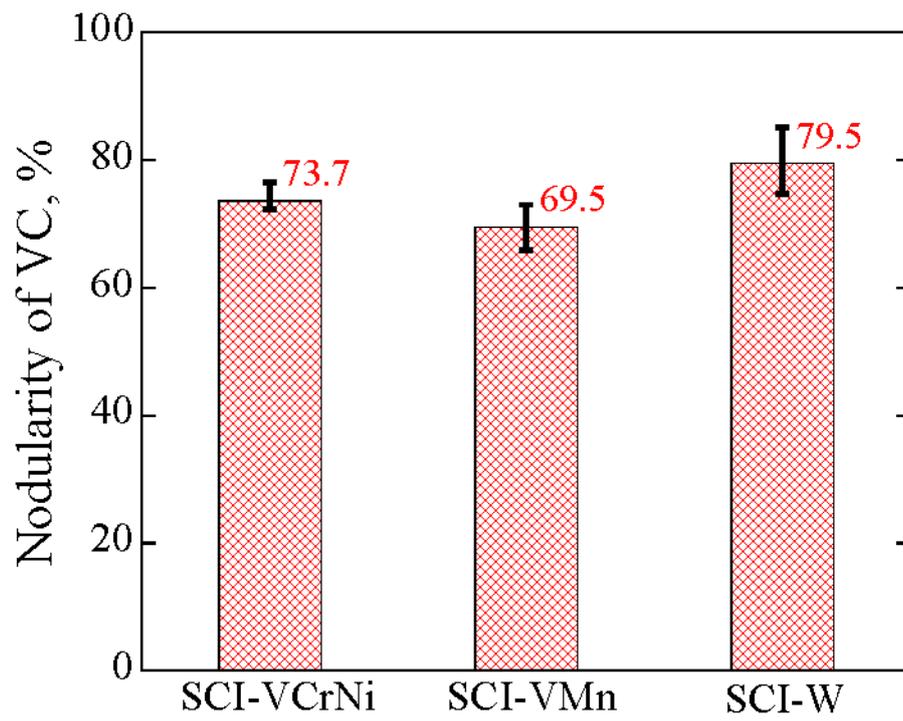


Fig. 4-8 Spheroidal ratios of VC(%) in SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.

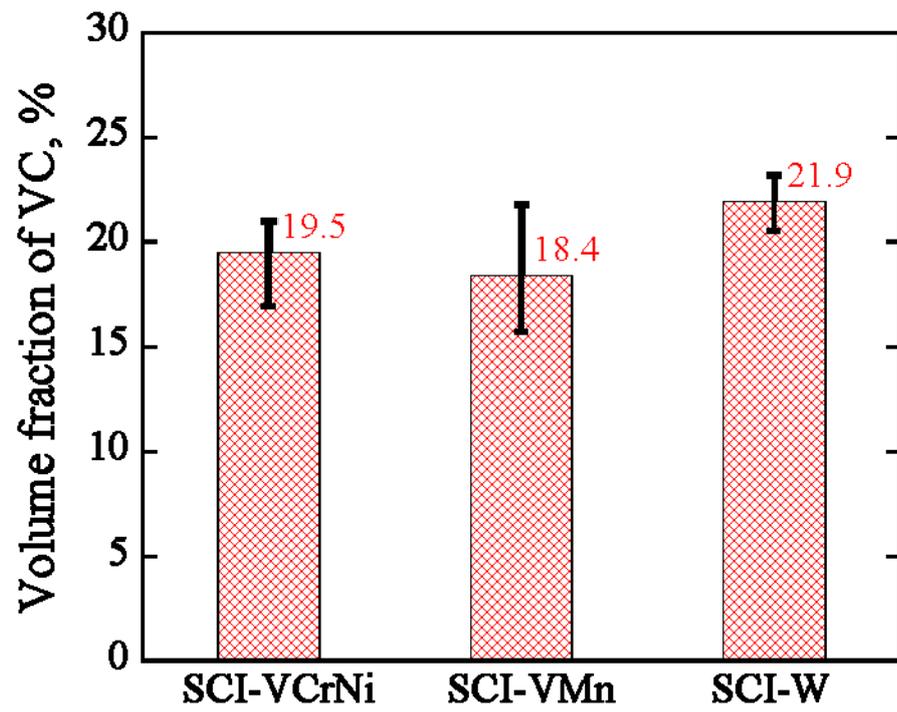


Fig. 4-9 Area percentage of VC(%) in SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.

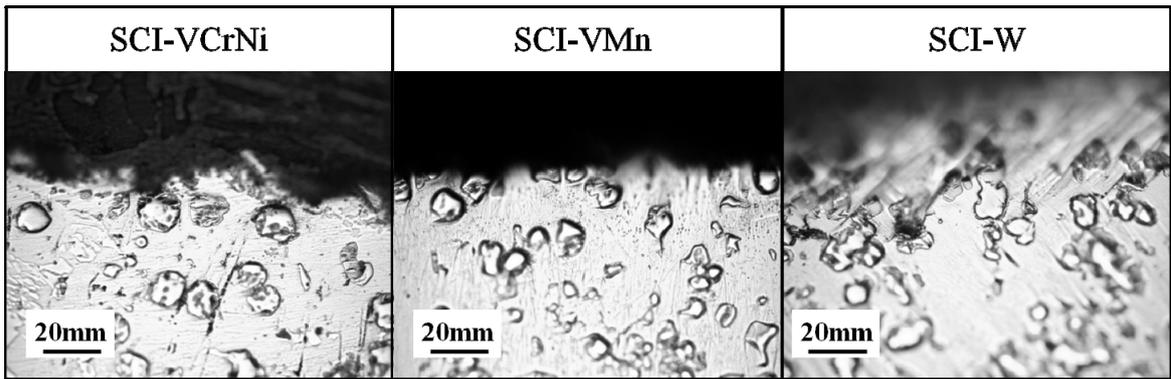


Fig. 4-10 Vertical section observation of SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.

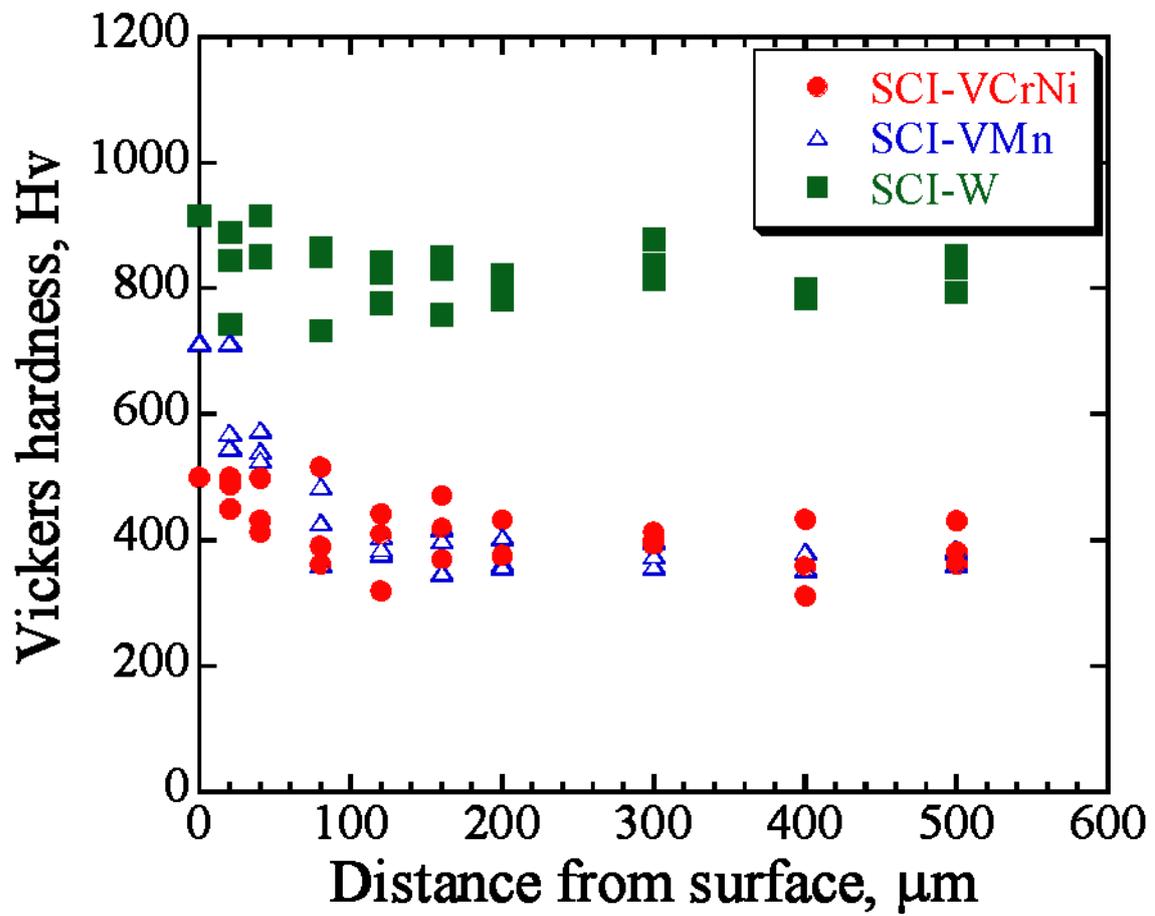


Fig. 4-11 Vickers hardness distribution from test surface of SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.

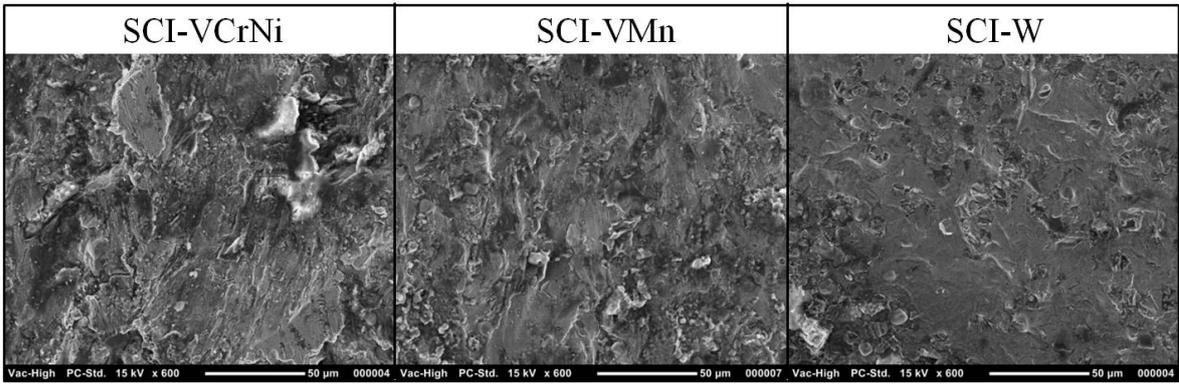


Fig. 4-12 Test surface morphology of SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.

第五章

実機による破碎試験 (ギロチン切断機)

5. 1 目的

これまで、鋳物産業の最大のユーザーは、自動車業界などの輸送機械であり、鋳物業界全体の6割を占めている。自動車の基本性能を支える重要な部位は鋳物製品であり、鋳物なしに自動車産業は成り立たないことがわかる。近年、世界的不況の中、自動車産業の業績は下降しており、それと同時に鋳造産業での出荷量も減少傾向にある。そこで、鋳造業界では、ユーザーのニーズを先取りして技術開発を進め、鋳造製品に高品質、高付加価値、コスト低減、生産効率の改善、環境配慮などの取組を進めている。

鋳物業界において、自動車産業に次ぐ主要ユーザーは建設機械などの産業機械の分野である。工作機械や射出成形機の主要構造材は鋳物であり、パワーシャベルおよびブルドーザーなどの建設機械でも鋳物が多用されている。公共事業費の削減から低迷した建設業界に替わり最近では、リサイクル分野での建設機械のニーズが高まっている。製造業界では、環境を配慮した製品生産を進めており、製造時に発生する廃棄物の削減・リサイクルなどが必要となっている。建設機械などの川下産業では、鋳物のグローバル調達化が進み、ショベルやショベル用ツール、ラバンディ用破砕刃などアタッチメントやパーツの生産は海外需要を中心にここ数年急増している。これらアタッチメントは、掘削作業・解体作業などで常に土砂・金属にさらされており、最も摩耗の激しい部品であり、ラバンティ破砕刃、ショベル用ツールなどアタッ

チメントに対する高硬度，耐摩耗性などのニーズが高まっている．

そこで，本研究では，これまでの従来材料にかわり，第三章から述べている SCI-VMn などの球状バナジウム炭化物鋳鉄を用い，建設機械用アタッチメントの中でも特に摩耗損傷量の多い，ラバンティシアを対象としたギロチン切断試験を行ない，その摩耗損傷などについて検討する．

5. 2 実験方法および実験条件

5. 2. 1 供試材

多成分系中間合金，合金鉄，純金属及び高純度銑鉄を用い，C量を約1.5%～3.0%，V量を0.3%～1.3%，Cr，Ni，Mo，W，V，Co量を各種配合した原材料を用いて4種の材料を電気炉中で溶解し，作製した．実験試料の化学組成をTable 5-1，組織写真をFig. 5-1に示す．

モリブデン，タングステンなどの合金元素を溶湯中で球状化処理し，基地組織中に高硬度の球状炭化物を晶出させ熱処理を行った白鋳鉄系球状炭化物鋳鋼（SCI-W）および，高靱性で延性に富み，耐衝撃性や耐摩耗性に優れている高マンガン系基地組織に高硬度の球状炭化物を晶出させ熱処理を行った高マンガン系球状炭化物鋳鋼（SCI-VMn）を作成した．また，高温強度を向上させるとともに焼戻し抵抗を増大して焼戻し硬さを高める目的でコバルト多量に含有した多合金系白鋳鉄（10mass%Co）およびW，Cr，Mo，Vなどを添加し，耐摩耗性，耐衝撃

性、不変形性、耐熱性などを付与した冷間金型工具鋼（SKD11）を作製し、供試材として用いた。

5. 2. 2 ギロチン切断試験

ギロチン切断は、シャーリングカットといい、板材を一定の幅（長さ）に切断する加工のことである。シャーリング加工の原理は基本的に日常でも使用するハサミと同じで、二つの刃の間に材料（板材）を挟むことによって切断するせん断加工である。ギロチン切断試験機とは、ハサミと同じ原理で Fig.5-2 のように、あるシャール角をもった上刃と下刃の二枚の刃の間に板材（板金材料）をセットし、上刃を下に押し付けることによって板材を直線状に切断加工（せん断加工）するための装置である。一般的に、精密板金・板金加工の加工工程としては、定尺板（原板）を一定の幅に切断したり、所定の幅・長さの切板（スケッチ材）に切り出したりするカット加工に利用される。また、解体現場において鋼材などを切断する際のラバンティシャーなどにも使用される。Fig. 5-2 にギロチン切断の模式図を示す。

切断面においては、少なからずバリ・ダレも発生し、手前の切断される側の材料の断面においては板材の下面側にバリ（上面側はダレ）が発生し、切断された板材の断面は板の上面側にバリ（下面側はダレ）が発生する。Fig. 5-3 にせん断面の模式図を示す。

ギロチン切断においては、このような切断面のバリ・ダレの発生や、切断材料の反り・たわみを極力抑え、縦・

横・対角の寸法を出し直角・平行度の保たれたきちっとした必要寸法を出すことが必要である。このような精度よい加工を実現するために、せん断加工において最も重要なのが、上刃と下刃の隙間（クリアランス）を適正にすることであり、クリアランスが適正であると、だれ、かえり（バリ）は比較的小さくなる。

クリアランスが小さ過ぎると、2次せん断が生じ、所要せん断力が大きくなり、刃の摩耗や損傷が生じ易くなる。

そこで、刃の摩耗損傷を適正に把握するために、切断時に発生するひずみ、圧力を測定することが可能なギロチン切断試験機を開発し、以下にその仕様を示す。またギロチン切断試験機の写真を Fig. 5-4 に示す。

1) 装置仕様

(a) ギロチンシヤ

- ・ 電源：三相 AC200/220V (50/60Hz)
- ・ メインモーター：2.2kw
- ・ 切断刃寸法：18mm × 250mm
- ・ 素材切断：冷延鋼板
- ・ 板厚：Max 3.2mm
- ・ 板幅：100～240mm
- ・ 板長さ：800～1600mm
- ・ 本体重量：1.1ton

(b) 材料送りテーブル

・ ローラーコンベアー

ローラー幅 100mm 全長 1000mm

・ 材料送り装置 制御盤

電源 : AC100V (50Hz)

電源容量 2KVA

・ 材料送り装置

送り速度 : Max 1.2m/min

供試材をギロチン切断試験機用の切断刃形状（上刃，下刃）に加工し，切断対象としては，市販SS400の厚さ4.5mm鋼板を幅100×1500mmの大きさに切断したものを使用した．Table 5-2に切断刃材質と硬さを，Fig. 5-5に切断刃形状を示す．

実験方法は，被切断材を短冊状に連続切断して（切断長さ約7mm），切断時の荷重，刃に作用する歪み，刃先形状の変化等を観察して評価した．切断荷重は油圧を計測して荷重に換算した．刃に作用する歪みは刃の中央付近に3軸歪みゲージを貼り付けて計測した．

また，切断刃上刃と下刃のスキマをスキマゲージを用いて0.23mmとなるよう調節した．

試験回数は，まず各刃とも5000ショットずつ行い，その後に追加で各刃5000ショット，それぞれ計10000ショットまで実施した．

5. 3 実験結果および考察

5. 3. 1 切断荷重の推移

切断荷重の推移を Fig.5-6 に示す。SCI-W, SCI-VMn, 10mass%Co, SKD11 とも、切断回数が増加するにつれ、切断荷重は徐々に上昇している。SCI-VMn が 5000 ショットを超えたあたりから切断荷重の上昇が大きくなり、10000 ショット時点で従来材 SKD11 の切断荷重と同程度となった。本試験の範囲内では SCI-W, 10mass%Co も若干の上昇傾向は見られるが、上記 2 種と比較すると上昇は小さい。これは、後述する切断刃先形状からも説明可能である。

通常の使用される切断刃として SKD11 が使用されており、それと比較すると SCI-VMn が同等の荷重を示す。SKD11 の荷重レベルを基準とすると、SCI-W, 10%Co は切断に用いる荷重が低く、切断材料として適していると判断される。

5. 3. 2 切断荷重・ひずみ線図

結果として、供試材のそれぞれのひずみ線図を Fig5-7, Fig. 5-8, Fig. 5-9, Fig. 5-10 に示す。切断時の荷重・ひずみを時間軸で表した。図において、主応力は、計測された 3 種のひずみから計算した値である。(縦弾性係数 = 2100 kg/mm^2 , ポアソン比 = 0.3 とした) 主応力の最大値が中心より送れて発生しているのは、ゲージ貼り付け位置が切断範囲の中心からずれているためである。

これらのデータから切断時の主応力が測定できた。主

応力は SCI-W は高めになるが，全体的に 170 前後の主応力を示すことが判明した．SKD11 と 10% Co は同等の値となった．従来材としての SKD11 と比較して，新規切断材料として開発した球状バナジウム炭化物鋳鉄，多合金鋳鉄とも，波形に大きな乱れがなく，SKD11 と同様に切断刃として使用可能なことが確認された．そこで，切断回数の寿命でどの程度摩耗したかを評価した．

5. 3. 3 切断刃の損傷

次に切断刃の損傷・摩耗量を確認するために刃先の試験開始前後の拡大写真を Fig. 5-11 示す．

試験前後で刃先の粗さの変化が見られるものの，摩耗損傷が確認できないため，次に形状測定装置を利用して比較した． Fig. 5-12, Fig. 5-13, は形状測定機の外観写真である．

刃先の形状測定結果を Fig. 5-14～ Fig. 5-17 に示す．形状測定結果からは，切断の進行により刃先が丸みをおびてくることがわかる．SKD11 と 10% Co には摩耗が見られず，SCI-VMn と SCI-W は摩耗が進行するのが観察された．その結果，10% Co の切断能力，耐摩耗性から，切断刃として非常によい結果値を示し，実用化が期待される．

5. 4 結言

耐摩耗性を向上させたギロチン切断刃の材料開発を目的とし，各種配合調整を行った材料のギロチン切断試験

を実施し，材料の評価を行った．

(1) 切断試験を行うために，自動化されたギロチン試験機を開発し，その結果 短時間において 10000 回以上の切断試験をすることが可能となった．

(2) 自動計測により主応力や歪みを求め，開発した球状バナジウム炭化物鋳鉄および多合金鋳鉄の両者においても，基準となる SKD11 の波形を遜色ない値を示した．

(3) 一般的な切断刃材料である SKD11 と比較して，10% Co は切断荷重が低く抑えられ，また摩耗損傷量も抑えられることから，切断に適した材料である．

Table 5-1 Chemical composition of each test material

(mass%)

	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	others
SCI-W	3.0	0.9	0.4	—	13	5	Mo, W
SCI-VMn	3.0	0.6	12	—	10	—	W
10%Co	2.0	0.5	0.5	4.9	4.9	—	Mo, W, Co
SKD11	1.5	0.3	0.4	12	0.3	—	Mo, W

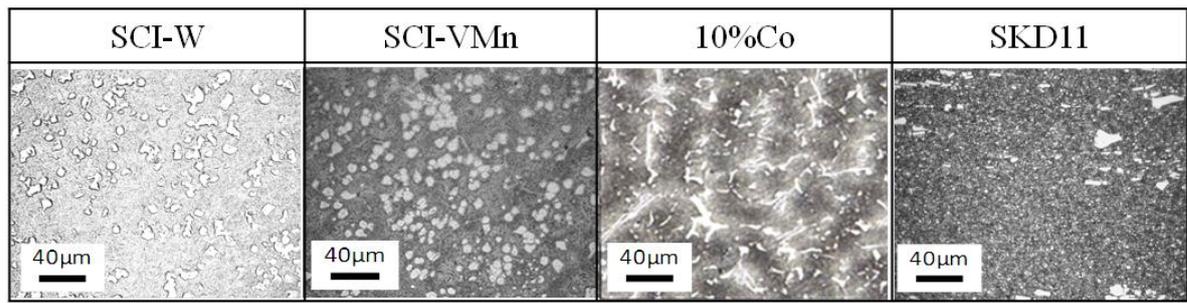


Fig. 5-1 Microstructure of specimens.

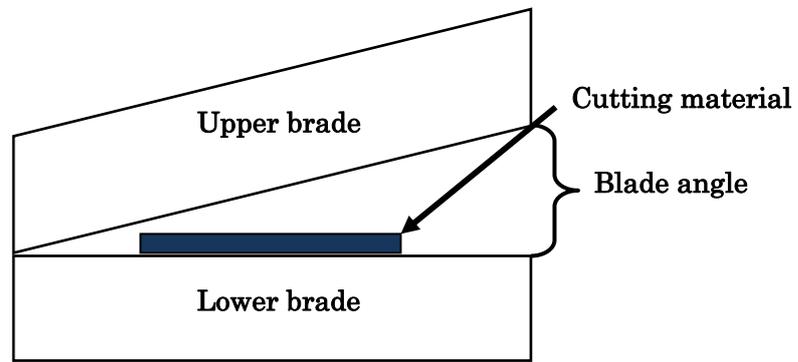


Fig. 5-2 Schematic diagram of a guillotine cutting.

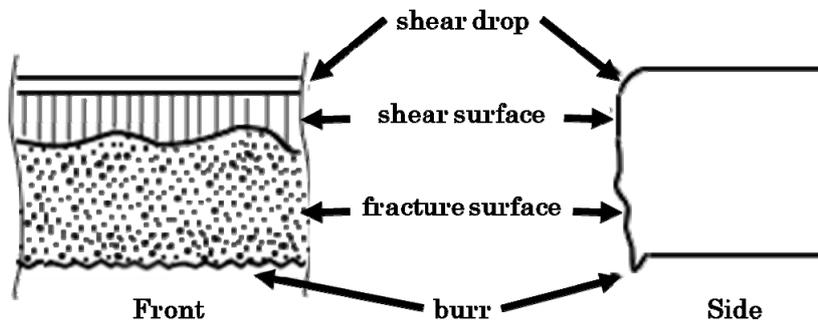


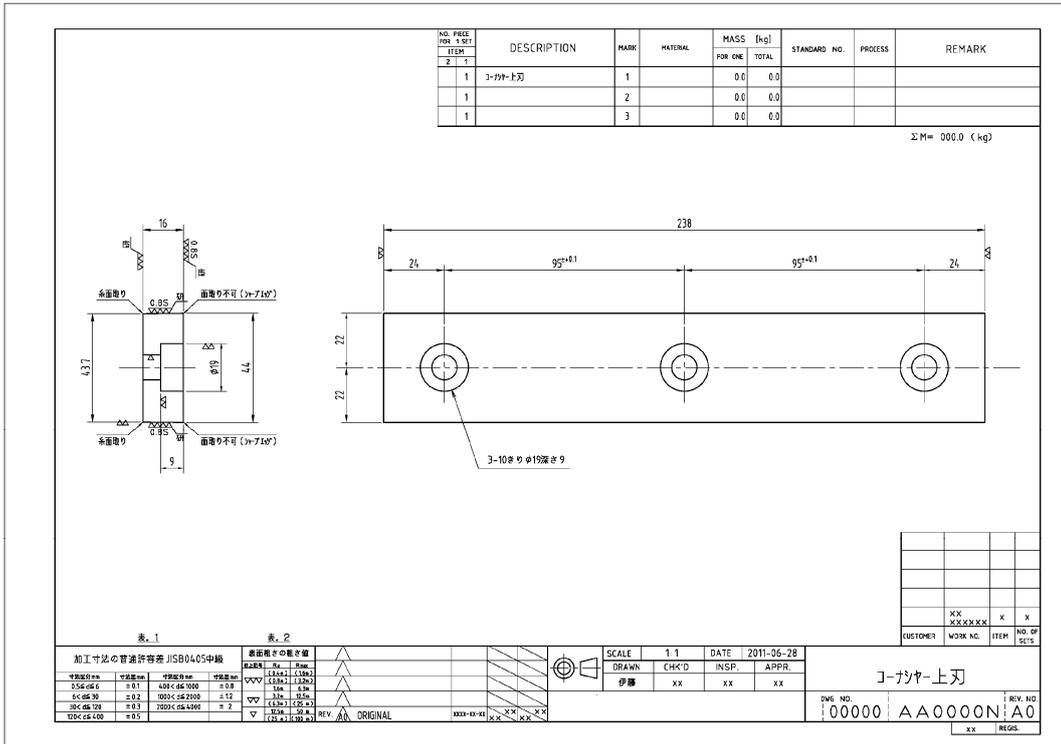
Fig. 5-3 Schematic view of a sheared surface.



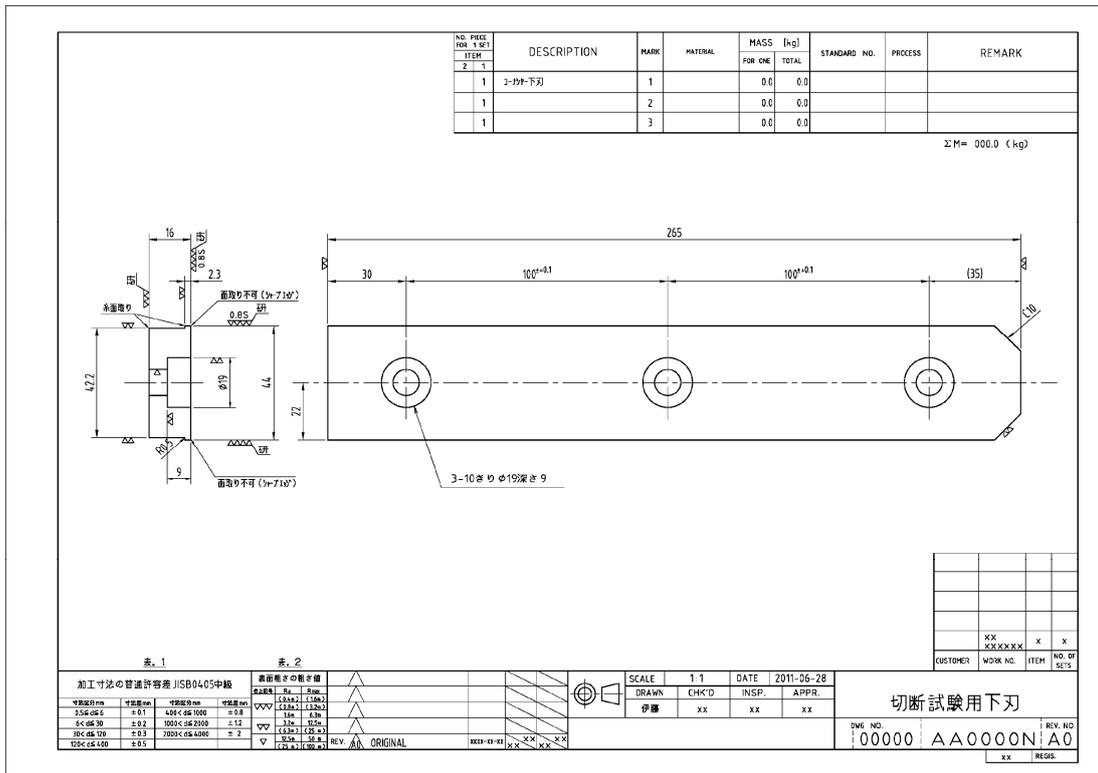
Fig. 5-4 Photos of guillotine cutting testing machine.

Table 5-2 Material and hardness of the cutting blade

	硬 さ	
SCI-W	HRc 58～60	鑄放し
SCI-VM n	HRc 35～40	焼入, 焼戻し
10mass%Co	HRc 65～66	焼入, 焼戻し
SKD11	HRc 55～60	熱処理



(a) Drawings of the cutting blade (upper blade)



(b) Drawings of the cutting blade (lower blade)

Fig. 5-5 Shape of the cutting blade of the guillotine cutting testing machine.

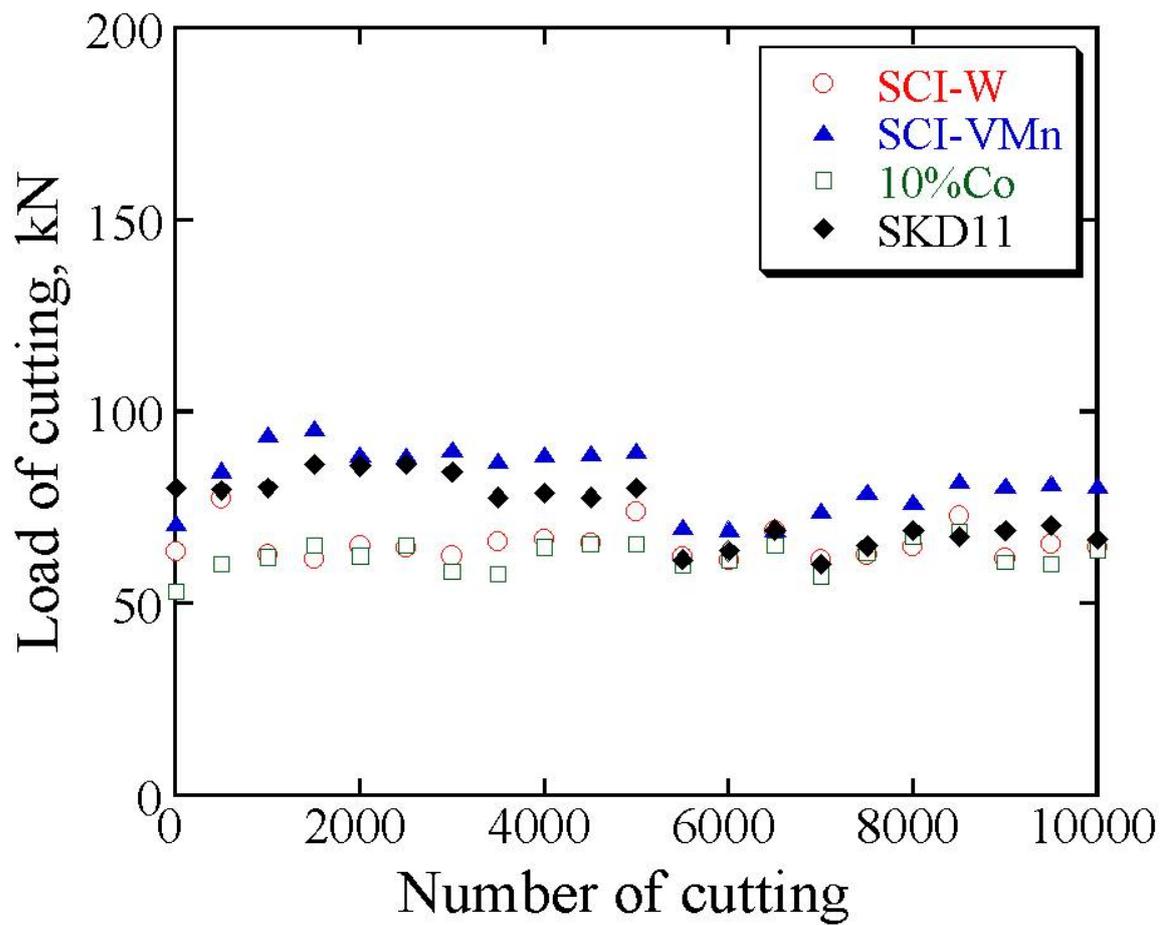


Fig. 5-6 Transition of Load of cutting.

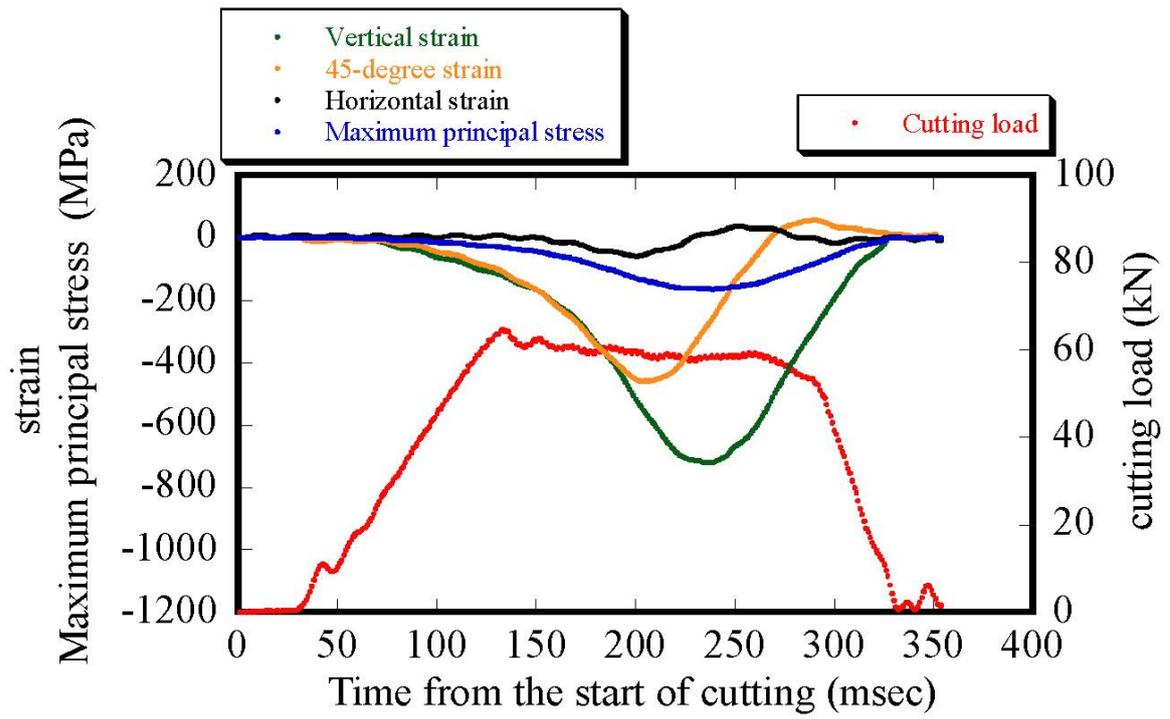


Fig. 5-7 Strain diagram of SCI-W.

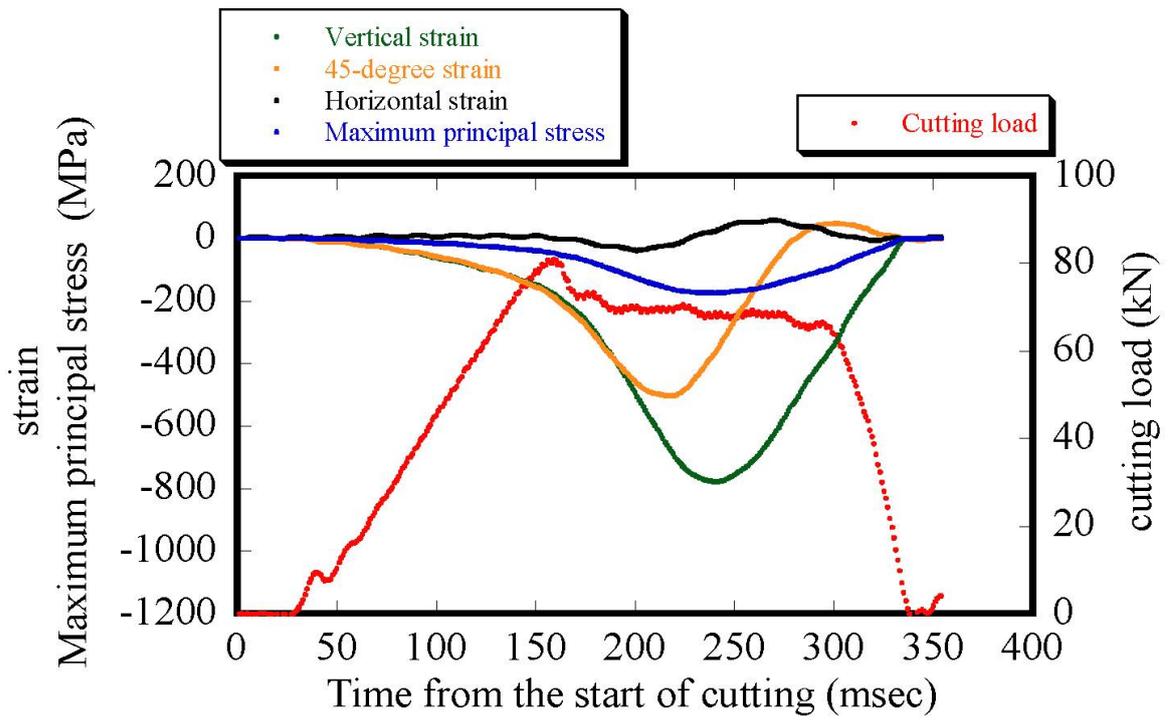


Fig. 5-8 Strain diagram of SCI-VMn.

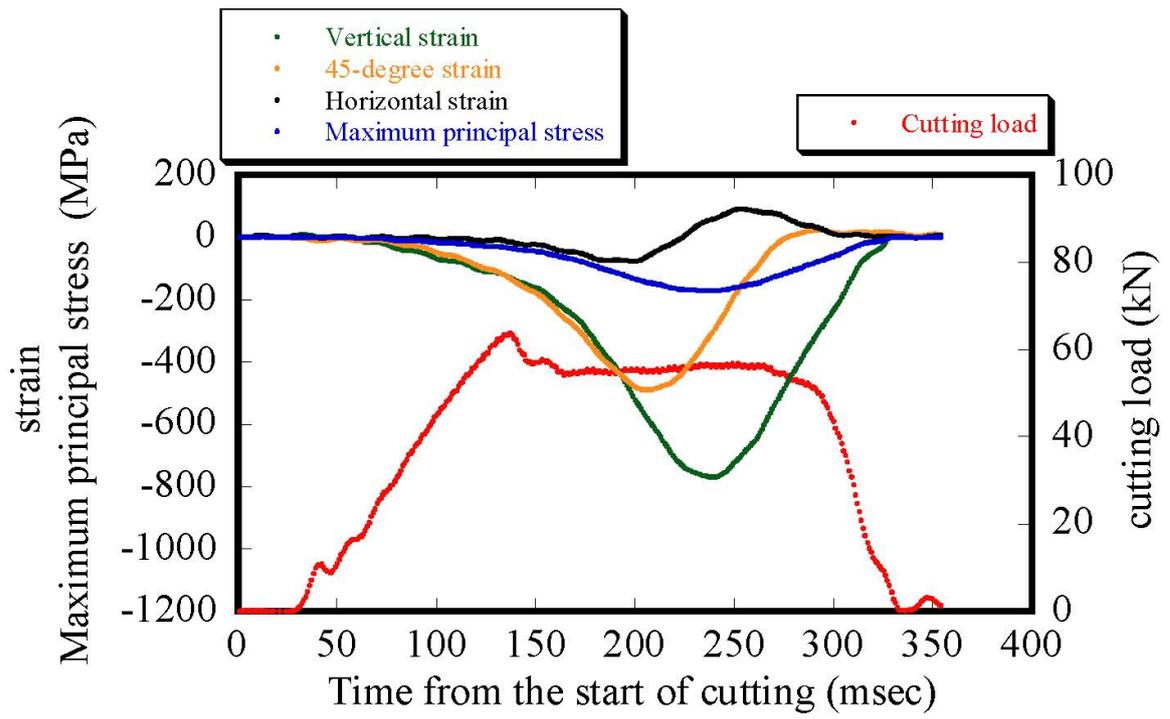


Fig. 5-9 Strain diagram of 10%Co.

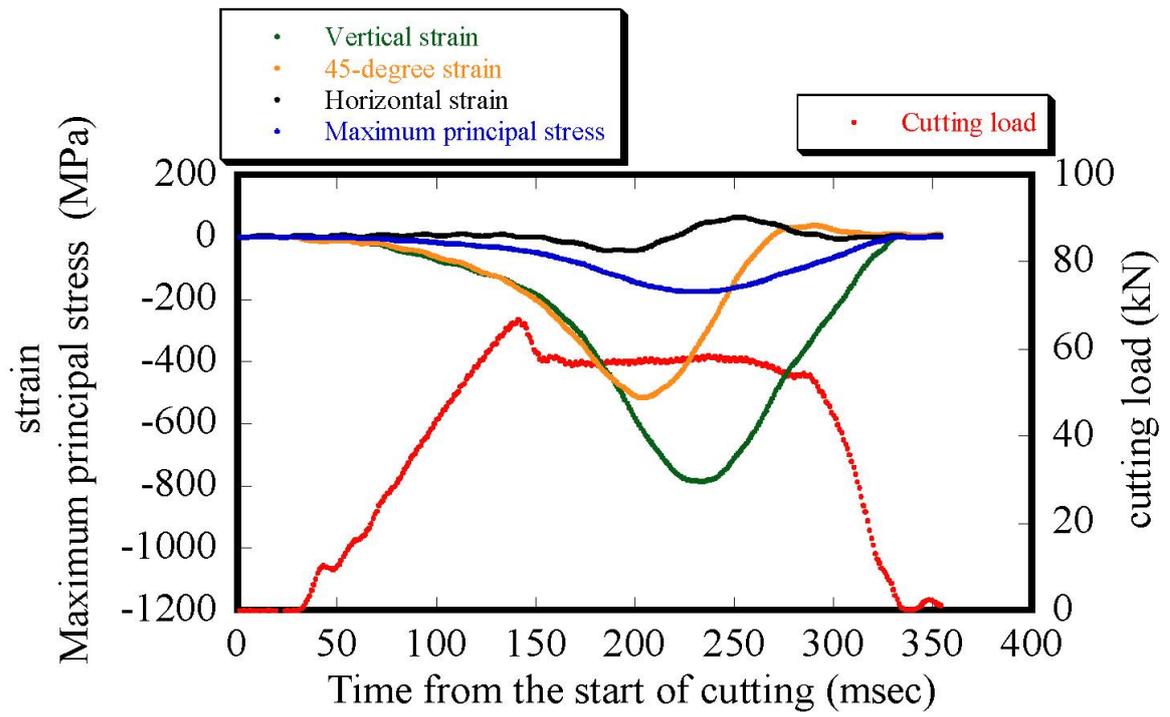


Fig. 5-10 Strain diagram of SKD11.

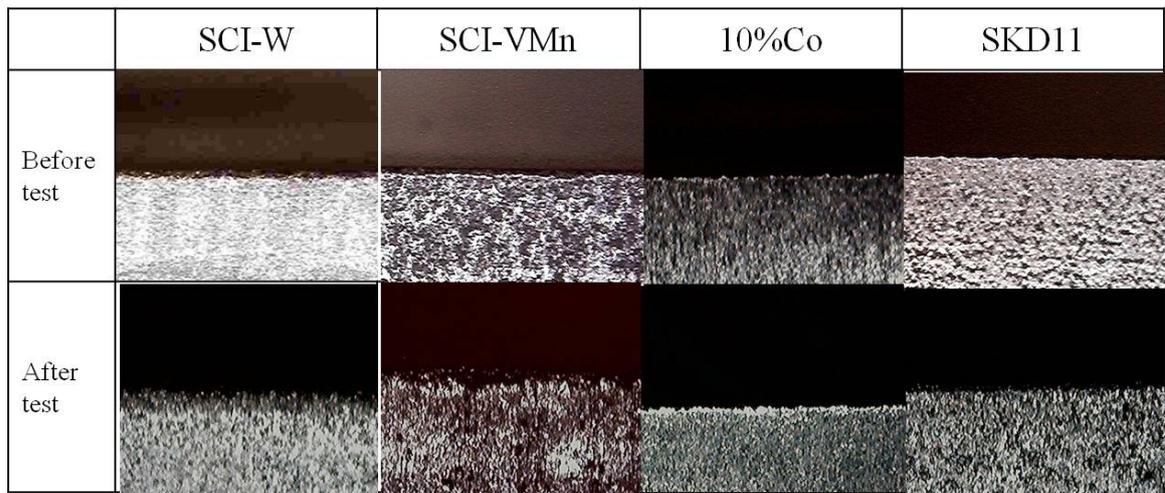


Fig. 5-11 Macro photograph of the cutting blade.



Fig. 5-12 Photo of shape measuring device.

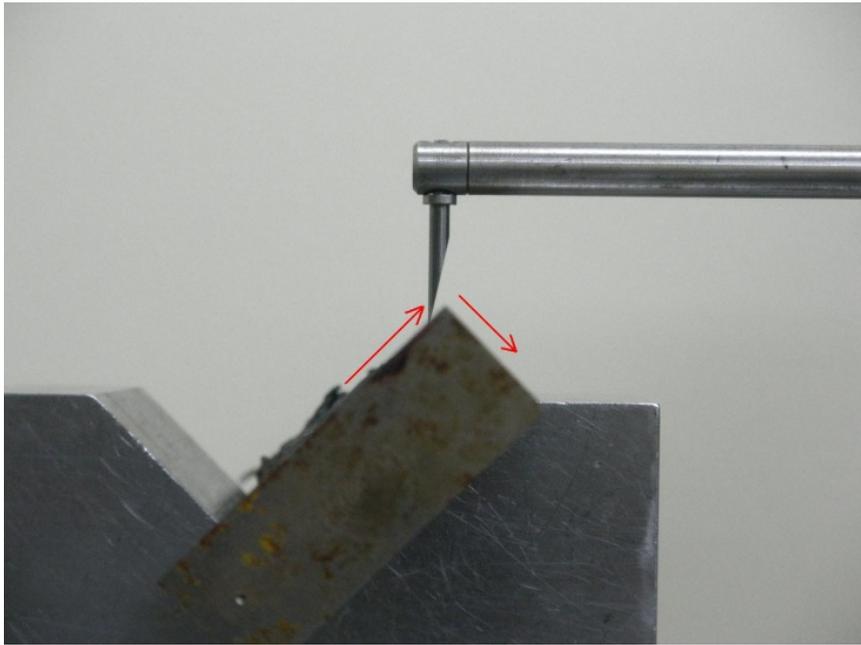
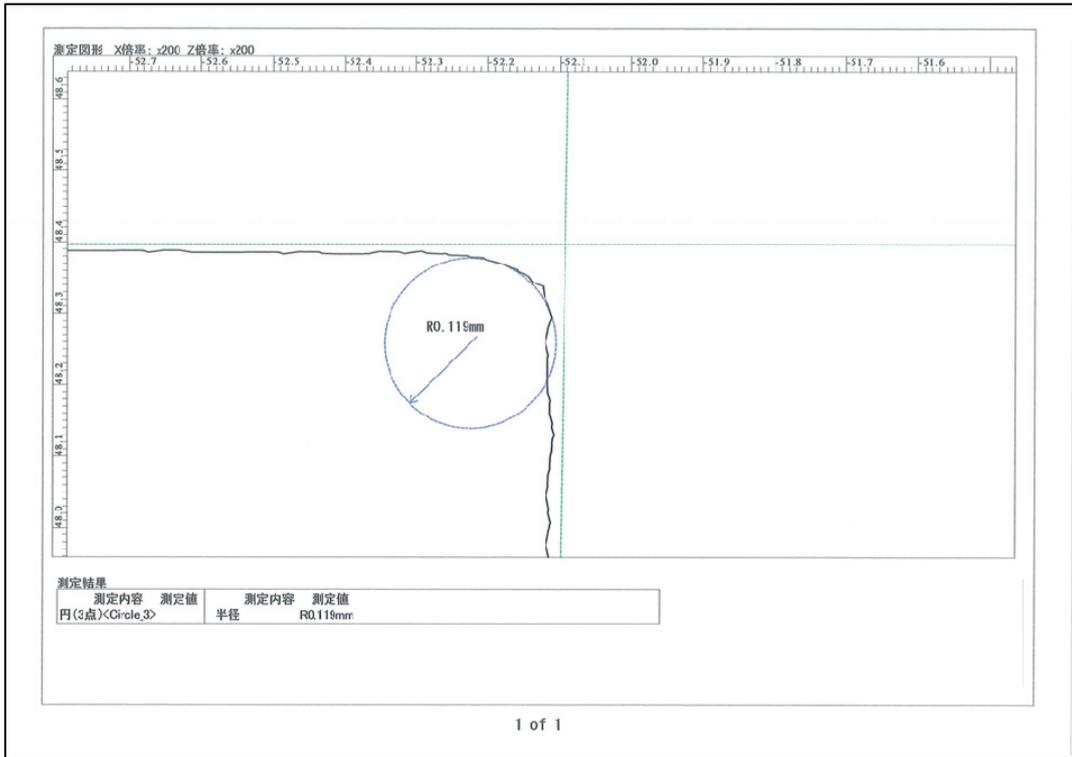
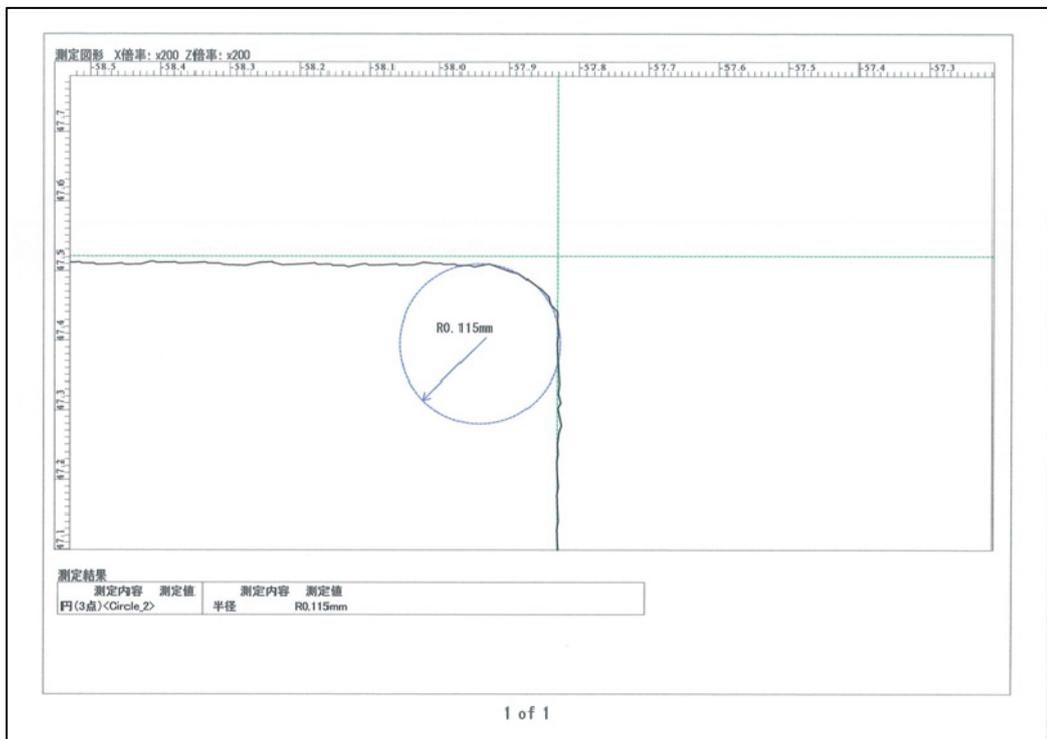


Fig. 5-13 Moving direction of the probe.

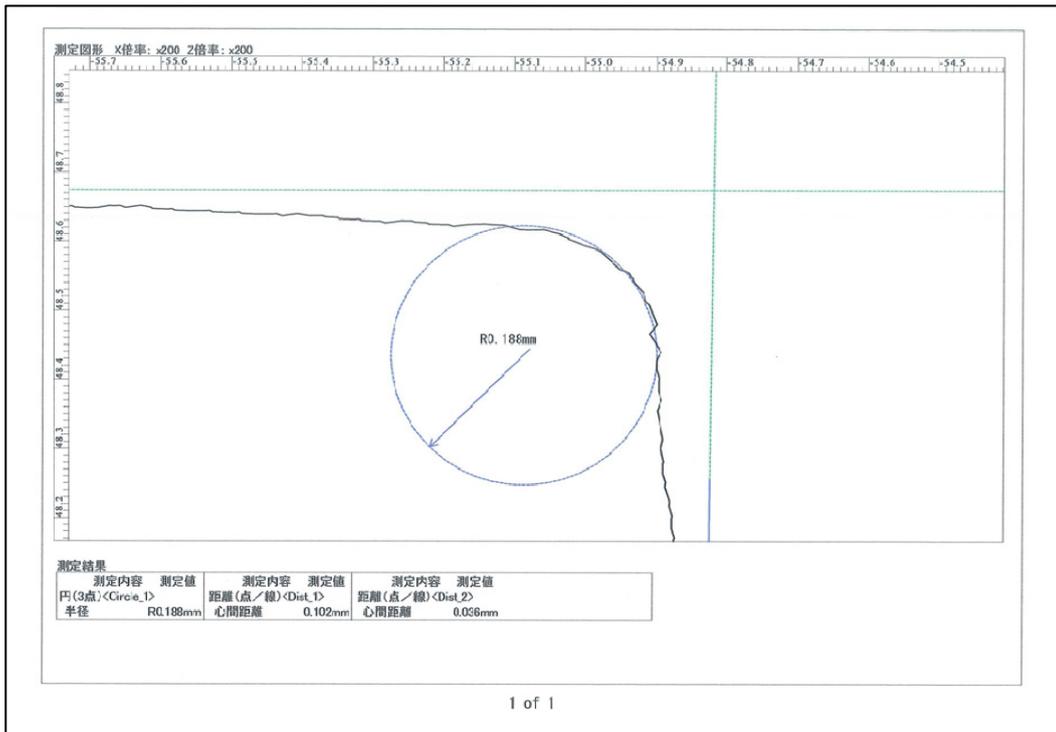


(a) Upper blade of SCI-W (Number of cutting 10000)

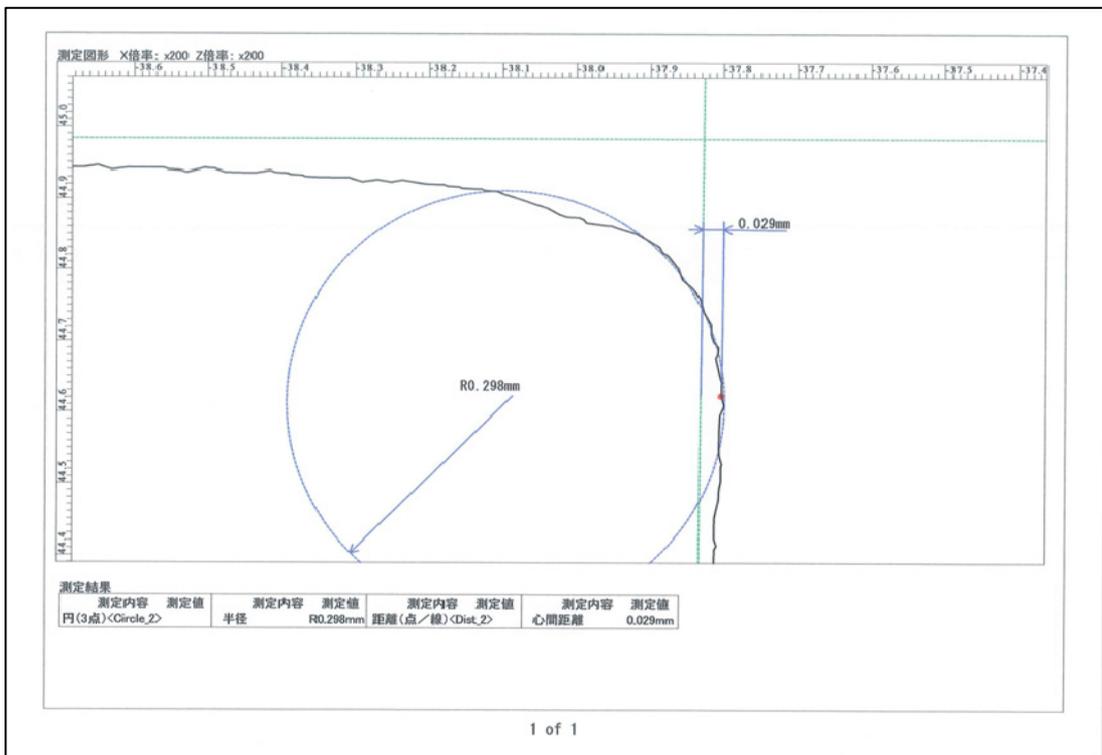


(b) Lower blade of SCI-W (Number of cutting 10000)

Fig. 5-14 Shape of the crushing blade of SCI-W.

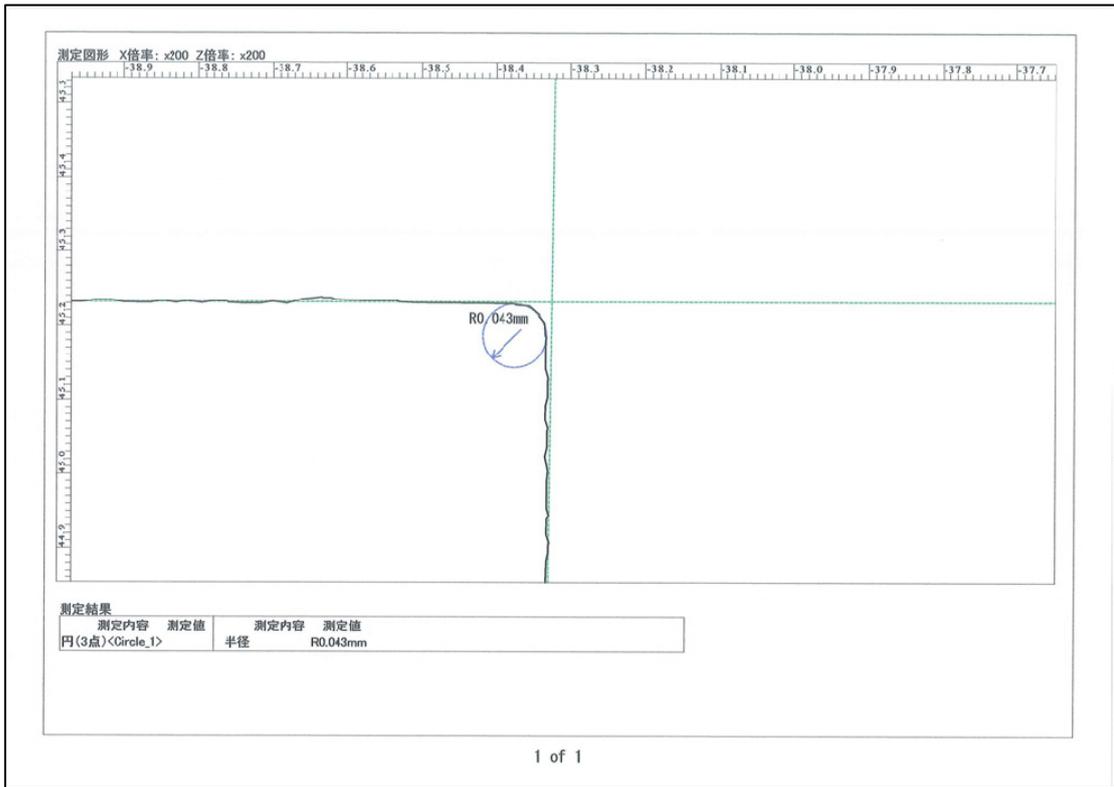


(a) Upper blade of SCI-VMn (Number of cutting 10000)

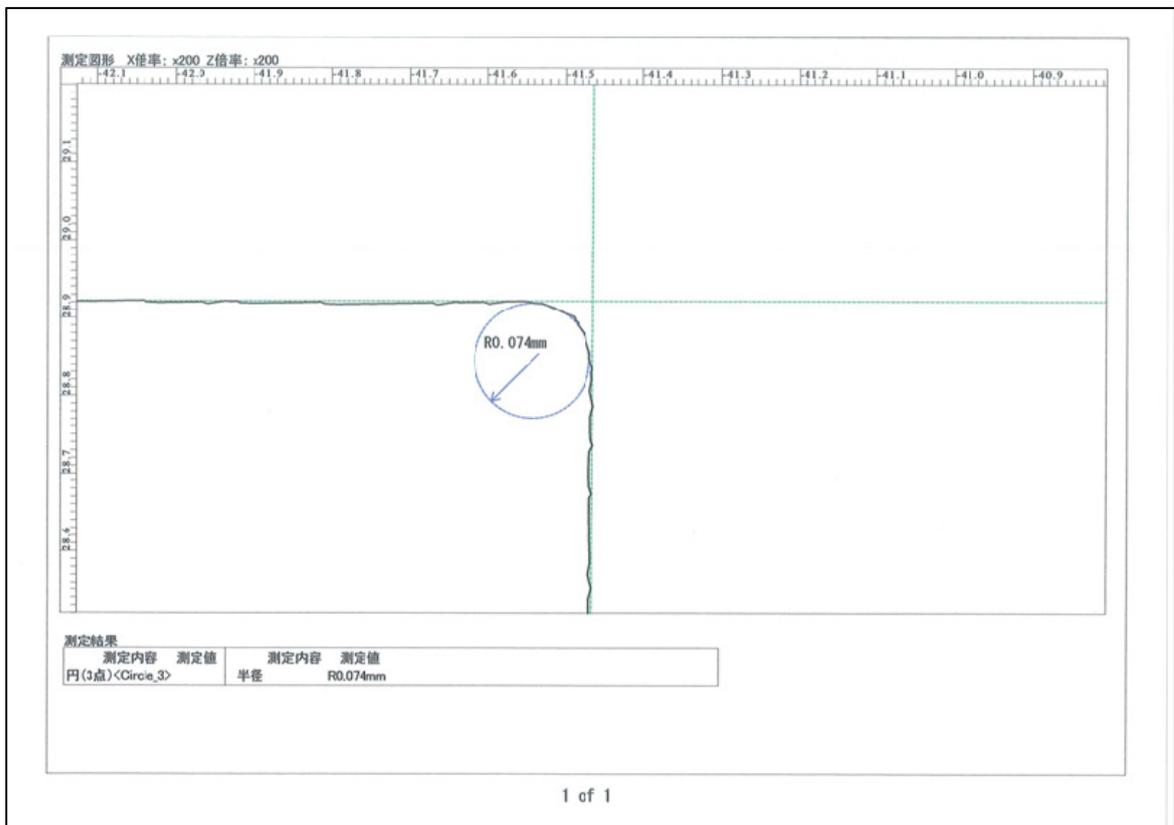


(b) Lower blade of SCI-VMn (Number of cutting 10000)

Fig. 5-15 Shape of the crushing blade of SCI-VMn.

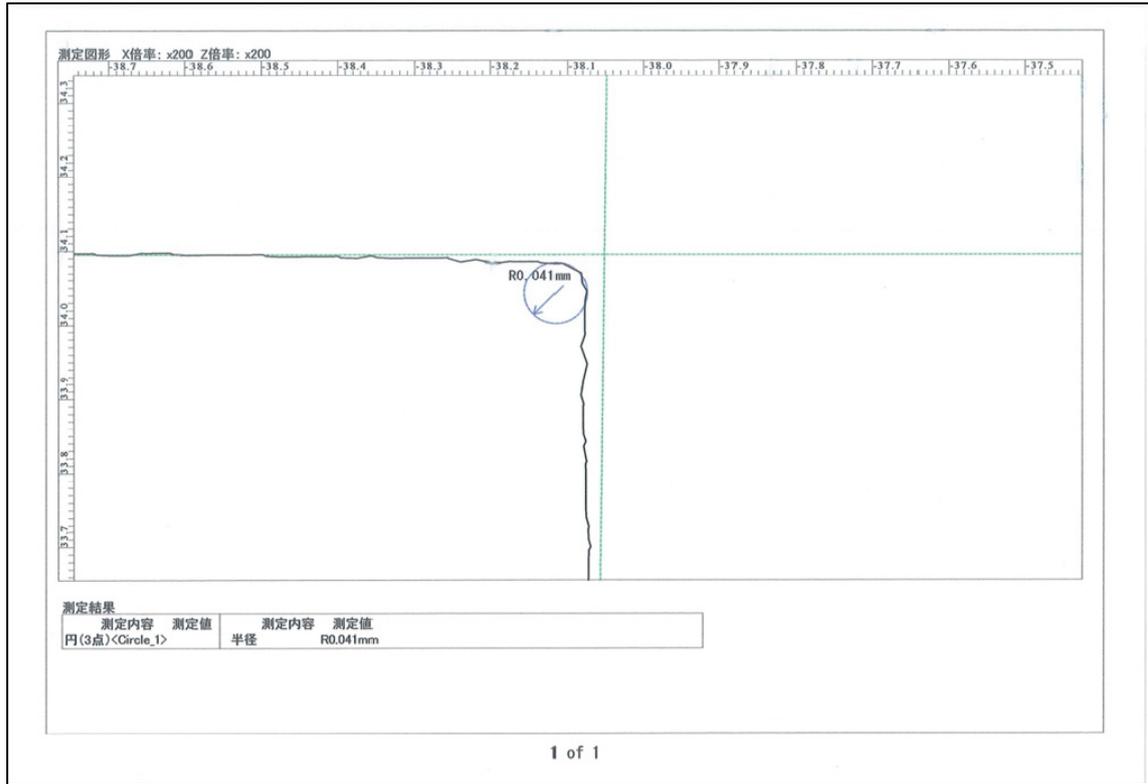


(a) Upper blade of 10%Co (Number of cutting 10000)

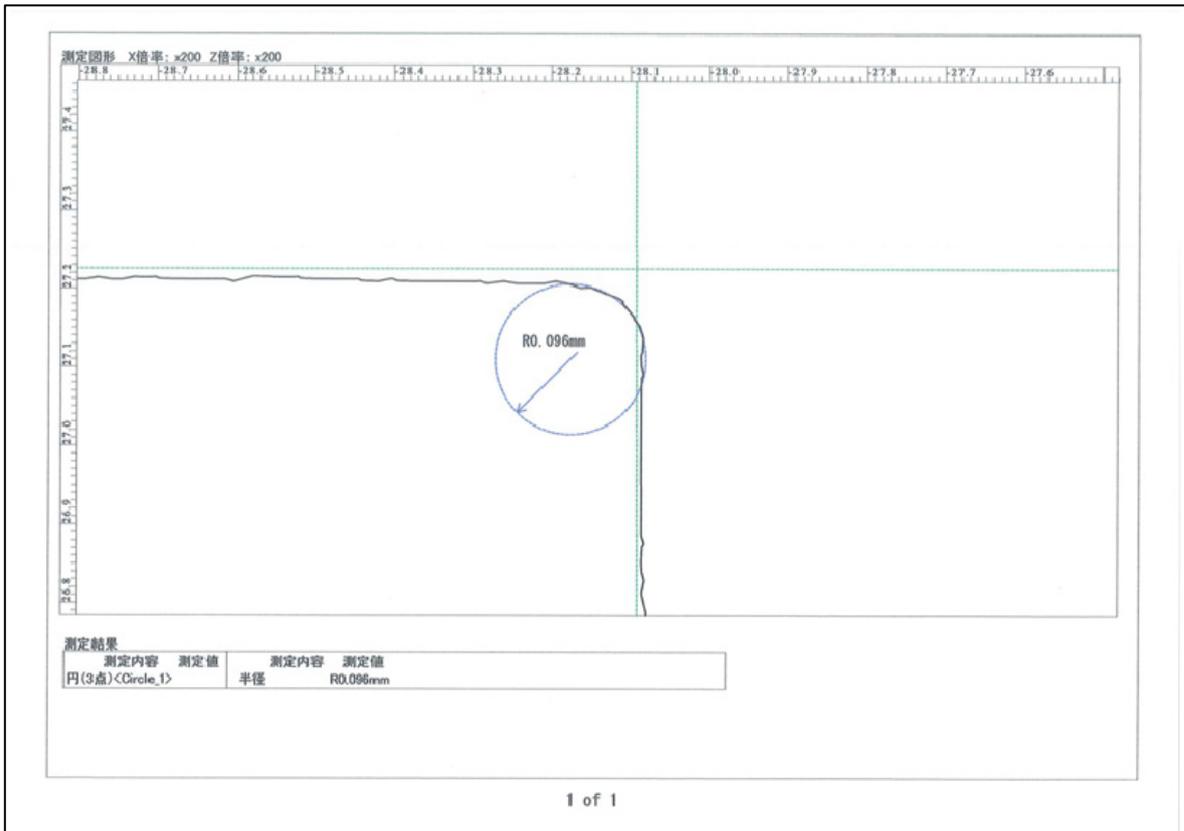


(b) Lower blade of 10%Co (Number of cutting 10000)

Fig. 5-16 Shape of the crushing blade of 10%Co.



(a) Upper blade of SKD11 (Number of cutting 10000)



(b) Lower blade of SKD11 (Number of cutting 10000)

Fig. 5-17 Shape of the crushing blade of SKD11.

第六章

総論

6. 1 本研究で得られた成果

これまでの建設機械アタッチメントは、主な素材に炭素鋼（圧延）や高Cr鋳鉄などが利用されていた。炭素鋼などは加工が容易であるが、耐摩耗性には乏しく、高硬度および耐摩耗性を得るために、熱処理、溶射などの表面処理を行う。また使用劣化により、稼動数十時間で交換作業などが必要であるため、生産性の低下、交換コストの増加などが懸念される。

本研究では、リサイクル施設や、解体現場なので使用される破砕機などの切断刃材料としての球状バナジウム炭化物鋳鉄の実用性について検討した。

リサイクル工程において、破砕工程で廃棄物を粉砕する際、破砕刃に廃棄物との激しいアブレシブ摩耗が生じる。

これまでの研究で、耐エロージョン摩耗性を有していることが判明している球状バナジウム炭化物鋳鉄材料に着目し、スガ式摩耗試験を行ない、耐エロージョン摩耗性と同様に耐アブレシブ摩耗特性を有していることが判明した。また、これら球状バナジウム炭化物鋳鉄の実用化を目指して各種切断・粉砕刃を製造し実機試験を行なった。硬質ガラスの破砕に用いられる一軸回転式粉砕機による試験では、白鋳鉄系の球状バナジウム炭化物が従来の破砕刃の25倍以上の摩耗寿命を有することが判明し、金属を切断するギロチン切断機を用いた試験においても、他の金属と比較して耐摩耗性が向上していることが判明した。

得られた結果は，各章ごとに示したが，ここで改めてそれらを要約すると以下のとおりである．

第一章では，アブレシブ摩耗や耐アブレシブ摩耗性を有した材料の必要性などの背景について述べるとともに，本研究の目的を述べた．第二章では，アブレシブ摩耗性を評価するための前段階として，スガ式摩耗試験機を用い，S45CやSUS304を供試材として実験条件を得るための試験を行ない，荷重条件の設定や，供試材試験片の表面粗さなどを決定づけ，今後のアブレシブ摩耗評価の基準とした．また，球状バナジウム炭化物鋳鉄および多合金鋳鉄を供試材として製造し，アブレシブ摩耗評価および実機試験へ用いる準備をおこなった．第三章では，種々の炭化物を含む鋳鋼のすべり摩耗特性として，前章で得られた実験基準を元に，一般的に耐摩耗性を有する材料として知られる高クロム鋳鉄（12Cr,17Cr）と，球状バナジウム炭化物鋳鉄を比較しスガ式摩耗試験機を用いアブレシブ摩耗試験を行った．その結果，球状バナジウム炭化物鋳鉄は優れた耐摩耗性を示し，高クロム鋳鉄と比べ約1/2程度摩耗を抑えた．球状バナジウム炭化物鋳鉄は高クロム鋳鉄よりも基地組織の割合が多いため，基地組織が摩耗により加工誘起変態する際にエネルギーを吸収し摩耗量を抑えたと推察できた．

第四章では，前章で得られた結果を元に，球状バナジウム炭化物鋳鉄が耐摩耗性材料として実用可能か実体試験を行った．一軸回転式ガラス粉碎機の粉碎刃を試作して，実用機に取り付け実用化実験を行った．その結果，激しいアブ

レシブ摩耗を生じているガラス粉碎機の粉碎刃において、球状バナジウム炭化物鋳鉄の中でも SCI-W が、比較した従来材料の 25 倍の耐摩耗性を有し、SCI-W は基地組織が、粉碎刃表面から内部まで 800Hv と非常に硬く、VC の晶出効果も伴って、他の 2 種類と比べてガラス粒子衝突による、切削摩耗が起きにくいことが要因となった。第五章では、ギロチン切断試験を行ない、切断時の摩耗変形への耐性について評価を行った。その結果、開発を行った球状バナジウム炭化物鋳鉄から SCI-W、多合金鋳鉄 10%Co が従来材と同等の性能を有し、切断刃としての能力に優れた。また耐久性を比較すると、SKD11 よりも 10%Co が優れる材料であった。第六章は、総括であり、本研究の成果を要約した。

以下に、これまでの結論を要約する。

1. リサイクルプラントや、建設機械などで使用可能性を有する炭化物晶出型鋳造材料である多合金鋳鉄（10%Co）を開発し、目的を達成した。

2. 開発材のアブレシブ摩耗評価として 10%Co が従来の耐摩耗材である高クロム鋳鉄と比較して 3 倍の耐アブレシブ摩耗特性を有した。また 10%Co は、熱処理による二次炭化物の析出により、初期硬度が上昇し、優れた耐摩耗性を示した。

3. 実機試験による性能評価として、ガラス粉碎機およびギロチン切断試験を行った。ガラス粉碎機による試験では、

SCI-W の寿命は従来材と比較して，40 倍以上の優れた耐摩耗性を示した．ギロチン切断機による試験では，各試験材料は，主応力や，歪みの波形から従来材と同様に切断刃として使用可能であり，中でも，10%Co は切断能力，耐摩耗性から，切断刃として非常によい結果値を示し，実用化が期待されることが判明した．

6. 2 今後の課題と展望

本研究で用いた球状バナジウム炭化物鋳鉄は，これまでに報告されている良好なエロージョン耐摩耗性に加え，本研究の成果として，その高いアブレシブ摩耗特性が明らかとなった．さらに，新規の耐摩耗性材料の開発として，コバルトを配合した多合金鋳鉄の製造を行なった．その結果球状バナジウム炭化物鋳鉄と同等の耐摩耗性を有している材料としてギロチン切断試験による結果が得られた．しかし，リサイクルプラントでの破砕機や，建設機械用アタッチメントとしての切断機などへ向けて実用する際には，その作業環境，対象物などによって摩耗条件が変化する．球状バナジウム炭化物鋳鉄は，エロージョン摩耗およびアブレシブ摩耗に耐摩耗性を有していることが判明し，多合金鋳鉄はギロチン切断への耐久性を有していることから，摩耗形態により得手不得手の材料があることが判明した．

そのような観点から，今後の展望として，材料を使用する条件に合わせ，摩耗状況を把握することで，最適な耐摩耗材料を供給できるよう，開発を行った材料の種々の摩耗

試験を進め，基礎データの構築を行うことで，材料の信頼性を向上させ，耐摩耗材料の実用化を目指す．

謝 辞

本研究を遂行し学位論文をまとめるに当たり，多くのご指導とご支援を賜りました，指導教官である清水一道教授に深く感謝しております．時に応じて，厳しくご指導いただいたこと，私自身の至らなさを実感することが出来たことは，今後の努力への糧になるものであります．

また博士課程への進学および研究活動全般にわたる多大な支援，ご指導をいただきました株式会社アールアンドイ一の皆様に心から感謝致します．特に，進学の機会を与えて頂き多大なご支援いただきました代表取締役 北山茂一様，業務部門統括責任者 伊藤淳様には，深く感謝致します．業務部門環境事業部部長 高橋唯男様，同事業部次長 伊藤重宜様，管理部門総務部長 田原貴史様，管理部門総務部課長 古川千秋様には，業務中ならびに大学出向中にもかかわらず，様々な面で御尽力いただきましたことを感謝いたします．

株式会社三共合金鑄造所 専務取締役 松元秀人様をはじめ会社の皆様には，研究の遂行のため材料の調整や，方向性について多くのご助言を頂き，試験片制作などご協力いただきましたこと深く感謝致します．

株式会社テラマチ 専務取締役 寺町英樹様，技術部設計課 長井万也様をはじめ，会社の皆様には，熱処理や材料加工，またギロチン切断試験などの開発に携わって頂き深く感謝致します．

この論文をまとめるにあたり，室蘭工業大学 博士後期

課程 楠本賢太様，船曳崇史様には，実験面で多くの支援をいただき深く感謝します．また，清水研究室の事務員の方々，研究生，学生の方々をはじめ，研究室の方々には，多くの支援を受けました．深く感謝致します．

最後に，本研究遂行時のみならず，常に暖かく支えてくれた家族に心から感謝します．

本研究に関する著者の公表論文

投稿論文(査読あり)

1. **Hiroya Hara**, Kazumichi Shimizu, “Abrasive wear resistance characteristics of spheroidal vanadium carbide cast iron”, Materials Science, Metal & Manufacturing , DOI: 10.5176/2251-1857_M312.30 ,(2012)
2. Naoji Yoneda, Kazumichi Shimizu, **Hiroya Hara**, Masahito Tanaka, Yoshihiro Nawa
Wear Characteristics of Spheroidal Carbides Cast Irons in Uniaxial Rotary Glass Shredder, Key Engineering Materials (Volume 457), pp,249-254, (2010)
3. 原宏哉, 清水一道, 楠本賢太, 伊藤淳, 球状バナジウム炭化物鋳鉄のアブレイブ摩耗特性, 鋳造工学, (2013) (掲載予定)

Proceedings

1. **Hiroya Hara**, Kazumichi Shimizu, Kenta Kusumoto, Jun Ito, Vasily Iefremenko, “Inf Influence of cobalt and niobium to the abrasive wear characteristics of multi-component cast iron.” World Tribology Congress, 2013
2. T.Funabiki, K.Shimizu, Xinba Yaer, **H.Hara**, K.Kusumoto, M.Tanaka, “Effect of erosive wear behavior of high chromium cast irons by erodent particles”, China Foundry, 2012
3. Xinba Yaer, K.Shimizu, **H.Hara**, M.Tanaka, H.Teramachi, “Abrasive wear of high manganese spheroidal vanadium carbides cast iron”, China Foundry, 2012

Presentation on conferences in Japan

1. 原宏哉, 清水一道, 楠本賢太, 伊藤淳, Nb を添加した他合金鋳鉄のアブレイブ摩耗特性, 社団法人日本鋳造工学会, 第 163 回全国講演大会, (2013-10-26, 富山県高岡市)
2. 原宏哉, 清水一道, 伊藤淳, 新巴雅尔, 炭素量の変化による高マンガン系球状バナジウム炭化物鋳鉄のアブレイブ摩耗特性評価, 社団法人日本鋳造工学会, 第 160 回全国講演大会, (2012-5-29, 愛知県名古屋市)
3. 楠本賢太, 清水一道, 大友辰哉, 原宏哉, エロージョン摩耗における球状炭化物鋳鉄の衝突角度依存性 FEM 解析, 社団法人日本鋳造工学会, 第 162 回全国講演大会, (2013-5-25, 山梨県甲府市)
4. 大友辰哉, 清水一道, 船曳崇史, 原宏哉, エロージョン摩耗における球状黒鉛鋳鉄の衝突角度依存性 FEM 解析, 社団法人日本鋳造工学会, 第 161 回全国講演大会, (2012-10-13, 岩手県盛岡市)
5. 楠本賢太, 清水一道, 原宏哉, 田中真人, 熱処理を施した高クロム鋳鉄のエロージョン摩耗に及ぼす衝突粒子の諸因子の影響, 社団法人日本鋳造工学会, 第 161 回全国講演大会, (2012-10-13, 岩手県盛岡市)
6. 船曳崇史, 清水一道, 寺町英樹, 原宏哉, 高マンガン系球状バナジウム炭化物鋳鉄の切削加工性, 社団法人日本鋳造工学会, 第 160 回全国講演大会, (2012-5-29, 愛知県名古屋市)
7. 寺町英樹, 清水一道, 原宏哉, 新巴雅尔, 球状バナジウム炭化物含有高マンガン鋳鉄の切削

における加工硬化の影響，日本機械学会北海道支部第50回講演会講演概要集，(2011-10-1 北海道旭川市)

8. 楠本賢太，清水一道，新巴雅尔，**原宏哉**，寺町 英樹，27Cr 鑄鉄のエロージョン摩耗に及ぼす衝突粒子の諸因子の影響，鑄造工学会北海道支部講演大会概要集，(2011-4-22 北海道函館市)

9. 楠本賢太，清水一道，**原宏哉**，米田直司，エロージョン摩耗に及ぼす衝突粒子の諸因子の影響，日本機械学会北海道支部第49回講演会講演概要集，(2010-11-7 北海道札幌市)

10. 楠本賢太，清水一道，新巴雅尔，米田直司，**原宏哉**，高クロム鑄鉄のエロージョン摩耗に及ぼす衝突粒子の諸因子の影響，鑄造工学会第157回全国講演大会講演概要集，(2010-10-1 北海道札幌市)

Presentation on international conferences

1. **Hiroya Hara**, Kazumichi Shimizu, Kenta Kusumoto, Jun Ito, Vasily Iefremenko, "Influence of cobalt and niobium to the abrasive wear characteristics of multi-component cast iron." The 5th Japan-Korea Workshop for Young Foundry Engineers, (2013-9-7, Muroran, Hokkaido, Japan)

2. Kenta Kusumoto, Kazumichi Shimizu, Shoji Kiguchi, Xinba Yaer, **Hiroya Hara**, Hideki Teramachi, "Effect of erodent properties on erosive wear behaviour of some heat treated high chromium cast irons" 70th World Foundry Congress, (2012-4-25, Monterrey, Mexico)

3. Kazumichi Shimizu, Xinba Yaer, **Hiroya Hara**, Masahito Tanaka
"Erosion characteristics of high chromium cast iron at high temperature of 1173K." , Abrasion2011 (2011-8-21 Liege Belgium)

4. Kenta Kusumoto, Kazumichi Shimizu, Xinba Yaer, **Hiroya Hara**, Masahito Tanaka
Effect of erodent properties on erosive wear behaviour of high chromium cast irons, Abrasion2011 (2011-8-21 Liege Belgium)

Figure captions

第一章 緒論

Number of Figure	Title of Figure	Page
Fig. 1-1	Recycling process of waste materials.	7

第二章 スガ式摩耗試験機，実験方法および供試材の製作

Number of Figure	Title of Figure	Page
Fig. 2-1	Overall view of Suga wear testing machine.	15
Fig. 2-2	Moving parts schematic view of Suga wear testing machine.	16
Fig. 2-3	Photo of plane bending fatigue test machine. (a) Microstructure of S45C	18
	Photo of plane bending fatigue test machine. (b) Microstructure of SUS304	19
Fig. 2-4	Reproducibility of the experimental results with a load change in the S45C.	20
Fig. 2-5	Reproducibility of the experimental results in the changes of surface roughness in SUS304.	21
Fig. 2-6	Schematic diagram of Y-block (JIS G0307).	22
Fig. 2-7	Manufacturing process of the test material.	23

第三章 種々の炭化物を有する鋳鉄のすべり摩耗特性

Number of Figure	Title of Figure	Page
Fig. 3-1	Heat treatment condition of multi-alloy cast iron.	36
Fig. 3-2	Microstructure of specimens.	37
Fig. 3-3	EDS surface analysis of specimens.	38
Fig. 3-4	Suga wear test results for each test material.	39
Fig. 3-5	SEM photographs of abrasion surfaces.	40
Fig. 3-6	Cross-sectional height and three-dimensional model of the wear surface.	41
Fig. 3-7	EPMA analysis of the results of each test material. (a) 12mass%Cr (b) 17mass%Cr	42
	EPMA analysis of the results of each test material. (c) SCI-VCrNi (d) SCI-VMn	43
Fig. 3-8	Method for measuring the area ratio of the carbide.	44
Fig. 3-9	Vickers hardness changes before and after abrasive wear tests of specimens.	46

第四章 実機による破砕試験（ガラス粉砕機）

Number of Figure	Title of Figure	Page
Fig. 4-1	Microstructure of SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.	59
Fig. 4-2	Three sort of trial shredding blades made by spheroidal carbides cast iron.	60
Fig. 4-3	Uniaxial rotational glass shredder.	61
Fig. 4-4	Crushed glass of waste fluorescent lamp.	62
Fig. 4-5	Wear loss Vs. Operating time in SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.	63
Fig. 4-6	Macro photographs of shredding blade after test.	64

Fig. 4-7	Wear appearance of shredding blades as a function of operating time.	65
Fig. 4-8	Spheroidal ratios of VC(%) in SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.	66
Fig. 4-9	Area percentage of VC(%) in SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.	67
Fig. 4-10	Vertical section observation of SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.	68
Fig. 4-11	Vickers hardness distribution from test surface of SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.	69
Fig. 4-12	Test surface morphology of SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.	70

第五章 実機による破砕試験（ギロチン切断機）

Number of Figure	Title of Figure	Page
Fig. 5-1	Microstructure of specimens.	81
Fig. 5-2	Schematic diagram of a guillotine cutting.	82
Fig. 5-3	Schematic view of a sheared surface.	83
Fig. 5-4	Photos of guillotine cutting testing machine.	84
Fig. 5-5	Shape of the cutting blade of the guillotine cutting testing machine. (a) Drawings of the cutting blade (upper blade)	86
	Shape of the cutting blade of the guillotine cutting testing machine. (b) Drawings of the cutting blade (lower blade)	87
Fig. 5-6	Transition of Load of cutting.	88
Fig. 5-7	Strain diagram of SCI-W.	89
Fig. 5-8	Strain diagram of SCI-VMn.	90
Fig. 5-9	Strain diagram of 10%Co.	91
Fig. 5-10	Strain diagram of SKD11.	92
Fig. 5-11	Macrophotograph of the cutting blade.	93
Fig. 5-12	Photo of shape measuring device.	94
Fig. 5-13	Moving direction of the probe.	95
Fig. 5-14	Shape of the crushing blade of SCI-W.	96
Fig. 5-15	Shape of the crushing blade of SCI-VMn.	97
Fig. 5-16	Shape of the crushing blade of 10%Co.	98
Fig. 5-17	Shape of the crushing blade of SKD11.	99

List of tables

Number of Tables	Title of Tables	Page
Table 2-1	Chemical composition of each test material.	17
Table 2-2	Chemical composition of each spheroidal vanadium carbide cast iron.	24
Table 2-3	Chemical composition of multi-alloy cast iron.	25
Table 3-1	Chemical composition of each test material.	35
Table 3-2	Volume fractions of carbides and Vickers hardness of specimens.	45
Table 4-1	Chemical compositions and Vickers hardness of SCI-VCrNi, SCI-VMn and SCI-W.	58
Table 5-1	Chemical composition of each test material	80
Table 5-2	Material and hardness of the cutting blade	85