

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業  
(経済危機対応・地域活性化予備費事業)

耐摩耗性・高靱性・溶接性を備えた  
建設機械用アタッチメント材料の開発

研究開発成果等報告書

平成24年3月

委託者 経済産業省北海道経済産業局  
委託先 株式会社北海道二十一世紀総合研究所

# 目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
(1) 実施内容の細目	1
1-2 研究体制	5
(1) 研究組織及び管理体制	5
(2) 管理員及び研究員	5
(3) 研究支援体制	6
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	9
第2章 研究開発の内容	10
1. 開発材料の配合成分の検討	10
(1) 合金組成の選定および製造	10
2. 開発材料の耐摩耗性など機械的性質の評価	12
2.1 スガ式摩耗試験による耐摩耗性の評価	12
(1) スガ式摩耗試験機	12
(2) 試験方法及び供試材	14
(3) 試験結果	16
2.2 常温エロージョン摩耗試験機による耐摩耗性の評価	21
(1) 常温エロージョン摩耗試験機	21
(2) 実験方法及び供試材	21
(3) 試験結果	22
3. 試験用部品の試作および検証	23
3.1 装置開発	23
(1) 開発概要	23
(2) 一軸破砕試験機	24
(3) ギロチン切断試験機	26
3.2 切断試験	29
(1) 一軸破砕機試験	29
(2) ギロチン切断試験	36
3.3 実機試験	44
(1) ミニモジュール破砕機	44
第3章 総括	53

# 第 1 章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

### (1) 実施内容の細目

#### 1) 研究の目的

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、ラバンディ用破碎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、ラバンティ破碎刃、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。

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。

そこで、本試作開発では、これまでの耐摩耗材料にかわり、高硬度・高靱性・耐摩耗性を備えた材料の開発を行い、破碎刃の試作品製造を行う。開発する材料としては、各種成分を配合した鋳鉄を用いる。鋳鉄を破碎刃材料として用いる利点は、複雑な形状も一体成形でき、寸法精度も高く、熱処理、溶接も可能である。また、使用済みの破碎刃を再溶解

することによって、破碎刃の再生が可能な事から、環境にも配慮した製品作りが行える。

現在、リサイクルプラントなどの破碎機用破碎刃材料として工具鋼などが多く用いられてきたが、昨今のコスト減、生産性向上などの面から高硬度、高韌性に優れた材料の開発が課題となっている。そこで、高温溶解鑄造技術法を活用し、破碎刃の試験製作を行い、摩耗寿命の延命化させ、今後市場拡大が見込める、建設機器分野、廃棄物処理分野、リサイクル分野への販路開拓を目指す。

## 2) 研究の概要

摩耗が激しい建設機械アタッチメントには炭素鋼や高 Cr 鋳鉄が用いられている一方、それら素材は高硬度や耐摩耗性に課題があり、昨今のコスト減、生産性向上などの面から高硬度、高韌性に優れた耐摩耗材料の開発が急務となっている。本事業では、これまでの耐摩耗材料にかわり、従来の交換サイクルが稼働時間約 15 日間（1 ヶ月 2 回交換）であったのに対し、6 倍の 90 日間での交換サイクルとなるような高硬度・高韌性・耐摩耗性を備えたアタッチメント用耐摩耗材料の開発を行うとともに、破碎器用破碎刃の試作開発・実証を経て実用化を目指す。



### 3) 実施内容

#### ①開発材料の配合成分の検討

(株式会社アールアンドイー、国立大学法人室蘭工業大学)

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、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必要があり、コストが増加する傾向にあった。

そこで、バナジウム(V)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)などの金属元素を選定し、乾式アブレシブ摩耗に対応した白鋳鉄系球状炭化物鋳鋼（耐摩耗材料1）、衝撃摩耗に対応した高マンガン系球状炭化物鋳鋼（耐摩耗材料2）、乾式アブレシブ摩耗に対応した多合金系白鋳鉄（耐摩耗材料3）、乾式アブレシブ摩耗に対応した多合金系白鋳鉄（耐摩耗材料4）、計4種の耐摩耗材料を開発した。

#### ②開発材料の耐摩耗性など機械的性質の評価

(株式会社アールアンドイー、国立大学法人室蘭工業大学)

新材料を開発するにあたり、従来使用されている材料に対しての機械的性質を測定し、開発材料の指針を設定した。

実施内容①において作製された4種の材料、および、比較材としてS50C 焼入れ材を供して、褶動摩耗試験を行った結果、耐摩耗材料1（乾式アブレシブ摩耗に対応した白鋳鉄系球状炭化物鋳鋼）が比較材と比べて、8倍の耐摩耗性が向上することが判明した。

この結果から、実施内容③における破砕刃の選定を行った。

#### ③試験用部品の試作および検証

(株式会社アールアンドイー、国立大学法人室蘭工業大学)

開発材料の摩耗性や強度を把握するために、一軸破砕試験機およびギロチン切断試験機を導入し、制作された耐摩耗材料の破砕試験を行った。

さらに、実機試験として、(株)SRテクノのミニモジュール破砕機に破砕刃を搭載し、摩耗状態などを調査した。その結果、耐摩耗材料3（乾式アブレシブ摩耗に対応した多合金系白鋳鉄）が最も摩耗量が少なく、優れた耐摩耗性を有していることが判明した。

#### ④プロジェクトの管理運営

(株式会社北海道二十一世紀総合研究所)

プロジェクトの円滑なる運営のため、研究開発委員会など打合せ機会の日程調整、プロジェクト参加機関間の各調整、プロジェクトの進捗管理、プロジェクトの予算管理などを実施した。また、各実施項目にお

る評価・検証結果にかかる関連情報の収集整理を行うほか、対象とする市場等についてのデータ収集整理を行った。

(2) 委託期間

平成23年1月17日～平成24年3月30日

(3) 実施計画日程

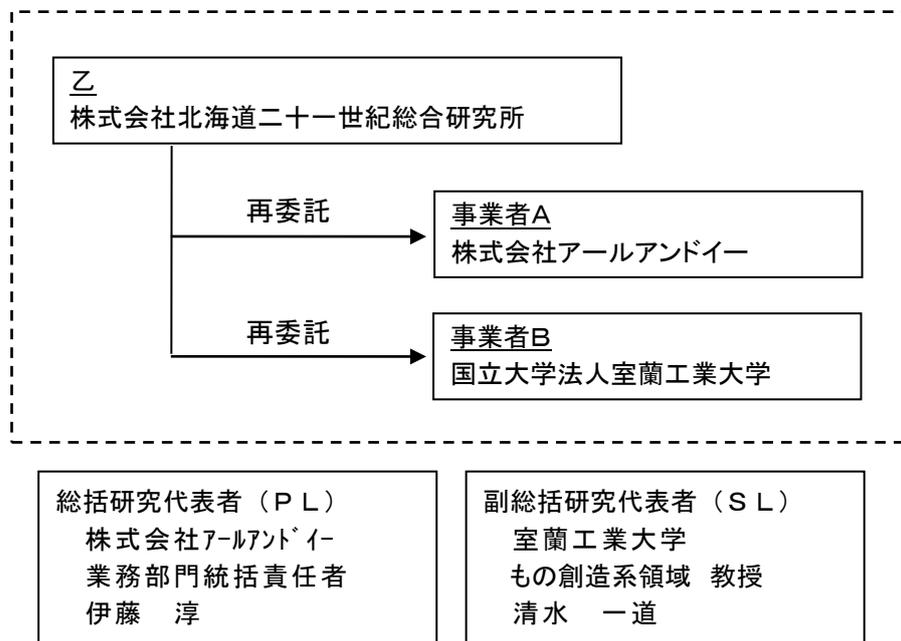
実施内容	平成22年度			平成23年度											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
①開発材料の配合成分の検討	合金設計			材料の製造											
②機械的性質の評価	従来材の機械的性質評価			開発材の機械的性質評価											
③試験用部品の試作および検証				試作品の製造および評価試験											
④プロジェクトの管理運営	プロジェクトの管理														
・研究開発委員会の開催							○						○		
・報告書作成													●→		

■委員会の開催

	開催日時・場所	主な検討内容
第1回委員会	平成23年5月13日(金) (ホテルポールスター札幌)	・本事業の目的と経緯等 ・実施計画書について ・スケジュールほか
第2回委員会	平成23年12月2日(金) (株)アールアンドイー 会議室)	・研究開発の進捗状況について ・今後のスケジュール
第3回委員会	平成24年3月1日(木) (ホテルポールスター札幌)	・研究開発の進行状況について ・意見交換

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 株式会社北海道二十一世紀総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
原田 実	取締役調査研究部長	④
浅野清隆	調査研究部部長	④
布川勝治	調査研究部主任研究員	④
小山秀子	調査研究部補助員	④

【再委託先】

株式会社アールアンドイー

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
伊藤 淳	業務部門 統括責任者	①②③
原 宏哉	業務部門 研究開発部 主任研究員	①②③
田原 貴史	管理部門 総務部長	①②③
高橋 唯男	業務部門 環境事業部 部長	①②③
伊藤 重宜	業務部門 環境事業部 次長	①②③
高橋 勝	業務部門 建材事業部 部長	①②③
藤江 仁志	業務部門 建材事業部	①②③

国立大学法人 室蘭工業大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
清水 一道	もの創造系領域 教授	①②③
新巴 雅尔	ものづくり基盤センター	①②③

(3) 研究支援体制

■検討委員会 参加者名簿

(委員)

木口 昭二 近畿大学理工学部機械工学科 教授

(プロジェクトメンバー)

北山 茂一 株式会社アールアンドイー 代表取締役社長

伊藤 淳 株式会社アールアンドイー 業務部門 統括責任者  
(総括研究代表者)

高橋 唯男 株式会社アールアンドイー 環境事業部 部長

田原 貴史 株式会社アールアンドイー 総務部 部長

原 宏哉 株式会社アールアンドイー 研究開発部 主任研究員

清水 一道 室蘭工業大学 もの創造系領域材料工学ユニット 教授  
(副総括研究代表者)

(事務局)

原田 実 株式会社北海道二十一世紀総合研究所 取締役調査研究部長

布川 勝治 同 主任研究員

## 1-3 成果概要

### (1) 開発材料の配合成分の検討

バナジウム(V)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)など各元素含有量の重量割合(%)において添加量が5~20%の範囲になるように調整し、合金設計を行い、実験室レベルでの硬質な炭化物を、微細にしかも粒状としてマトリックス状に分散した4種類の耐摩耗性材料を開発した。

耐摩耗材料1：白鑄鉄系球状炭化物鑄鋼

耐摩耗材料2：高マンガン系球状炭化物鑄鋼

耐摩耗材料3：コバルトを多量に含有した多合金系白鑄鉄

耐摩耗材料4：耐摩耗材料3からコバルトを除き、熱処理を行った多合金系白鑄鉄

### (2) 開発材料の耐摩耗性など機械的性質の評価

新材料を開発するにあたり、従来使用されている材料に対して、機械的性質を測定し、開発材料の指針を設定した。

#### ①スガ式摩耗試験

スガ式摩耗試験は、従来材である耐摩耗材料高クロム鑄鉄(Hi-Cr)、および、開発を行った耐摩耗材料1~4を用いた。比較材として、機械構造用炭素鋼S50Cの焼入れ材(Q)を用いた。試験の結果、耐摩耗材料1が最も耐摩耗性に優れており、比較材であるS50C(Q)の8倍の耐摩耗性を有した。次いで耐摩耗材料2、耐摩耗材料3、耐摩耗材料4の順で耐摩耗性を有していた。

#### ②常温エロージョン摩耗試験

常温エロージョン摩耗試験では、いずれの衝突角度においても、摩耗量の差は見られず、全ての試験片においてほぼ同等の損傷速度となった。耐摩耗材料4がエロージョン摩耗試験において最も耐摩耗性を有し、次いで耐摩耗材料1となった。耐摩耗材料2及び耐摩耗材料3試験片の損傷速度はほぼ同様の値となる結果となった。

### (3) 試験用部品の試作および検証

開発された材料を用い、建設機器用アタッチメントであるラバンティシャーなどでの使用を目的とした刃の試作およびその摩耗試験を行った。実験に当たっては、新たに専用の破砕試験機を開発し、実環境に合わせた耐摩耗材料の破砕試験を行い評価した。

#### ①試験装置の開発

一般に破砕機は大型の物が多く、試験を目的として大型機と同等の仕様(試験刃形状、トルク、プッシャー常備)の小型機が存在しない。そこで、

本事業において一軸破砕試験機の装置開発を行った。

また、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実験を行った。

## ②切断試験の結果

一軸破砕試験機を用いた実験の結果、土砂分の多い試験材料を用いた破砕試験においては、耐摩耗材料 3 を用いた破砕刃が最も耐摩耗性に優れ、同様に使用した耐摩耗材料 2 および耐摩耗材料 4 の 5 倍の耐摩耗性能を有することが判明した。

ギロチン切断機を用いた実験の結果、耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 3 は、耐摩耗材料 4 に近い耐久性がある。但し、耐摩耗材料 3 は本試験中に一部欠けが発生した。また、耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 2 については加工性を考慮して硬度を調整している。靱性が下がれば葉の欠けが発生する可能性はあるが、硬度を上げることでさらに耐久性を向上させられるかが今後の検討課題と思われる。

## ③実機試験

破砕機等を実際に使用している現場において、開発した材料による破砕刃を使用してもらい、第三者としてのアドバイスを目的で実機試験を行った。

耐摩耗材料 3 で作製した回転刃には、大きな欠けが発生した。これは、硬度が  $HRC=66$  と硬い材料であり、ハーネス投入時に最大負荷が掛かり、欠けが発生したものと推察される。

耐摩耗材料 4 は、耐摩耗材料 3 と比較して欠けの発生および摩耗の進展が見られなかった。耐摩耗材料 4 がミニモジュール破砕機に適していると言える。

これらの結果から、(1)褶動摩耗試験では、耐摩耗材料 1 が最も優れ、比較材の 8 倍の耐摩耗性を有する。(2)一軸破砕機による土砂状摩耗試験では、耐摩耗材料 3 が耐摩耗材料 2 および 4 の 5 倍の耐摩耗性を有する。(3)ギロチン切断試験では、耐摩耗材料 3 が最も耐摩耗性を有する。(4)実機試験においても、耐摩耗材料 4 が高い耐摩耗性を有していることが判明した。

これらのことから、摩耗条件にあった耐摩耗材料を選定し、供給することが事業化においての重要な点であることが得られた。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

##### ①事業管理者の連絡窓口

所属	株式会社北海道二十一世紀総合研究所
役職	取締役調査研究部長
氏名	原田 実
電話	011-231-3053
FAX	011-231-3143
E-mail	harada@htri.co.jp

##### ②開発実施者の連絡窓口

###### ■総括研究代表者

所属	株式会社アールアンドイー
役職	業務部門 統括責任者
氏名	伊藤 淳
電話	0143-80-2233
FAX	0143-80-2232
E-mail	junito.eng@rande.co.jp

###### ■副総括研究代表者

所属	室蘭工業大学
役職	もの創造系領域 教授
氏名	清水 一道
電話	0143-46-5651
FAX	0143-46-5651
E-mail	shimizu@mmm.muroran-it.ac.jp

## 第 2 章 研究開発の内容

### 1. 開発材料の配合成分の検討

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、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必要があり、コストが増加する傾向にあった。

そこで、バナジウム(V)、クロム(Cr)、ニッケル(Ni)などの金属元素を選定し、調整・配合(合金配合設計)を行う。具体的には、各元素含有量の重量割合(%)において添加量が5～20%の範囲になるように調整し、合金設計を行い、実験室レベルでの硬質な炭化物を微細にしかも粒状としてマトリックス状に分散した耐摩耗性材料の開発を行った。

従来品	新技術
<b>高マンガン鋳鋼</b> メリット：高靱性 デメリット：耐摩耗性 弱	<b>高マンガン鋳鋼＋高クロム鋳鋼＋α</b> 両材質の長所を持った、複合材料の開発 更に、溶接性の検討を行う。 →従来品の 6 倍を目指す。
<b>高クロム鋳鋼</b> メリット：高硬度 デメリット：割れやすい	

#### (1) 合金組成の選定および製造

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%～13%、Cr、Ni、Mo、W、V、Co量を各種配合した原材料を用いて4種の方法を電気炉中で溶解し、作製した。実験試料の化学組成をTable1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（耐摩耗材料1）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（耐摩耗材料2）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（耐摩耗材料3）および耐摩耗材料3からコバルトを除き、熱処理を行った多合金系白鋳鉄（耐摩耗材料4）を作製した。

これら作製した各種耐摩耗材料は、乾式アブレイブ摩耗（耐摩耗材料1、耐摩耗材料3、耐摩耗材料4）、衝撃摩耗（耐摩耗材料2）に対応する目的を持って作製された。

以下に、作製された耐摩耗材料の化学成分および、マイクロ組織を示す。  
 ミクロ組織観察には、光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡 (SEM) を使用した。

Table 1 耐摩耗材料の化学成分 (Mass%)

	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	others
耐摩耗材料 1	3.0	0.9	0.4	-	13	5	Mo,W
耐摩耗材料 2	3.0	0.6	12	-	10	-	W
耐摩耗材料 3	2.0	0.5	0.5	4.9	4.9	-	Mo,W,Co
耐摩耗材料 4	1.5	0.3	0.4	12	0.3	8	Mo,W

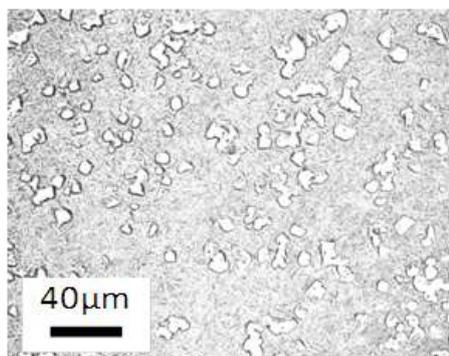


Fig.1 耐摩耗材料 1

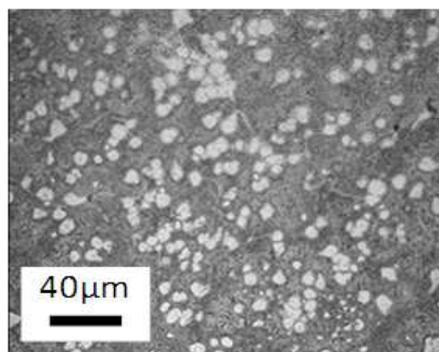


Fig. 2 耐摩耗材料 2

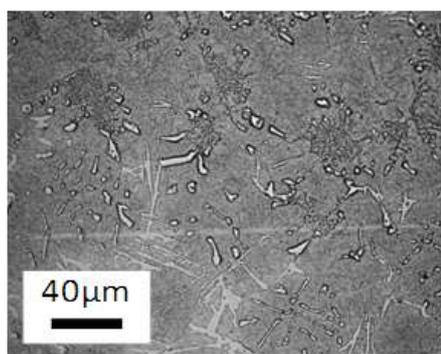


Fig. 3 耐摩耗材料 3

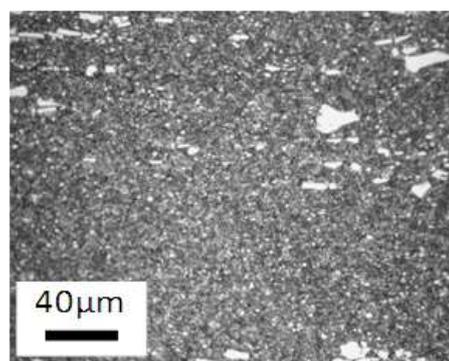


Fig. 4 耐摩耗材料 4

## 2. 開発材料の耐摩耗性など機械的性質の評価

エロージョン及びサンドエロージョン現象による摩耗によって、様々な生産システムで、多くの問題が引き起こされている。例えば鉄鋼プラント設備では、溶鋼二次製錬さらには熔融還元設備などで、溶銑、溶鋼への微粉炭、鉄鉱石などの粉粒体吹込みを行う際に、溶接配管を通り銑鉄に吹き込まれる。このとき配管バンド部でエロージョンによる損傷が引き起こされている。管路のエロージョンは、配管の内部が摩耗するため、外観からでは状況の把握が難しい。このような配管系が摩耗損傷によって孔があくようなことがあれば、ガス及び粉粒体の噴出などによって大きな事故をまねく恐れがある。

粉体によるエロージョン摩耗は、極めて複雑な機構によるものである。摩耗の支配要因としては、第一に摩耗を受ける材料の機械的性質、特に硬さが挙げられるのは当然である。しかしその他に固体粒子の硬さ、形状及び粒径、さらには粒子の衝突速度及び衝突角度なども摩耗量、摩耗特性に大きな影響を及ぼす。

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が上げられる。概略的にいえば、脆性的な材料では衝突角度が大きな範囲（摩耗面に対して垂直に近い角度での衝突）で摩耗が大きい、延性的な材料ではむしろ衝突角度が小さい範囲（摩耗面に対して平行に近い角度での衝突）で摩耗量が最大になると報告されている。

破砕機を用いた実機試験へ向けての材料選択が進められており、新材料を開発するにあたり、従来使用されている材料に対して、機械的性質を測定し、開発材料の指針を設定した。また、その影響について、スガ式摩耗試験機、常温エロージョン摩耗試験機を用いてアブレシブ摩耗特性評価を行った。

### 2. 1 スガ式摩耗試験による耐摩耗性の評価

#### (1) スガ式摩耗試験機

摩耗試験にはスガ式摩耗試験機（NUS-IS03）を用いた。Fig.5 にスガ式摩耗試験機の写真、Fig.6 にその概略図を示す。試験荷重は 0.98N～29.4N まで広範囲変化でき、摩耗輪に自由にエメリー紙を取り付け、試料が 1 往復するたびに摩耗輪が 0.9 度回転し、1 回転（試料が 400 往復）するごとにエメリー紙を取り替え、試験片が常に新しいエメリー紙で摩耗される仕組みとなっている。さらに、本試験機は、試料面に対し下方から摩耗輪が接触する構造で、摩耗粉が試験面に残らず摩耗すべりは発生しにくい。また、抜群の再現性と直線性がある。



Fig. 5 スガ式摩耗試験機

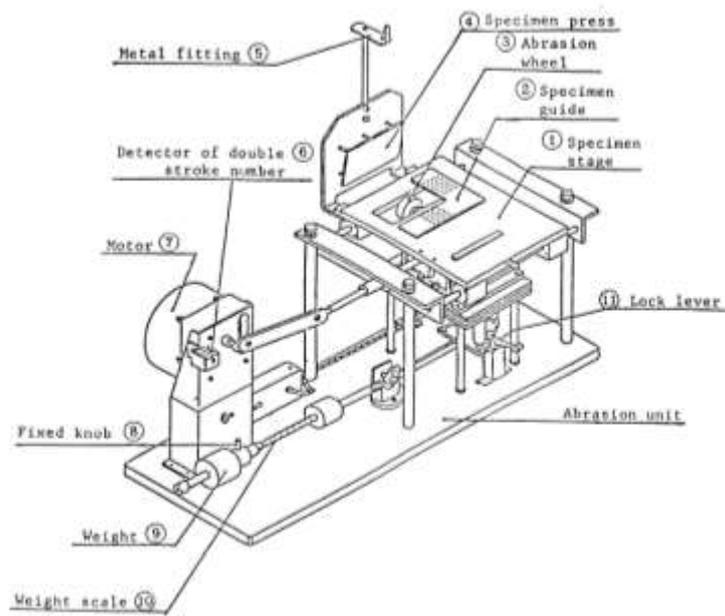


Fig. 6 スガ式摩耗試験機 概略図

## (2) 試験方法及び供試材

### ①試験方法

スガ式摩耗試験機の操作方法を以下に示す。(Fig. 7 参照)

- 1) 試験機本体にコネクタの電源プラグを AC100V コンセントに接続する。
- 2) 摩耗輪の周囲に裏面に接着剤を取り付けた研磨紙 (12mm×158mm) を張り付け、回転軸のキー溝に合わせ差し込んだ後、ローレットねじで固定する。
- 3) 試験面が摩耗輪に当たる位置になるよう試験片を試験片取り付け台の上にセットし、試験片抑え板及び止め金具で固定する。  
試験片のサイズは、幅 50~70mm、長さ 50~150mm、厚さ 1.0~4.0mm が適当である。
- 4) 試験片荷重を決めた後、荷重校正グラフを参照に、荷重おもり A、B 及び荷重調整おもり等を調整し、試験荷重に調整する。
- 5) 本体の電源スイッチを ON にし、摩耗回数設定機により往復回数を設定する。その後、荷重ロックを外し、荷重をかける。
- 6) 運転スイッチを押し、試験を開始する。設定回数になると運転を終了させ、試験片を外して、質量減少量を電子天秤にて測定する。この操作を繰り返す。なお、400 往復ごとに摩耗輪の研磨紙を交換する。



Fig. 7 スガ式摩耗試験機 操作説明図

供試材には、従来材である耐摩耗材料である高クロム鑄鉄(Hi-Cr)および開発を行った、耐摩耗材料 1~4 を用いた。Hi-Cr は、Cr 添加量を 12mass%(12Cr)および 27mass%(27Cr)添加させた焼入・焼戻し材(QT)を用いた。比較材には、機械構造用炭素鋼 S50C の焼入れ材(Q)を用いた。摩耗試験片の寸法は、50mm×50mm×4mm の平板状に研削加工した。

各供試材の化学成分を Table 2 に、組織写真を Fig 18 示す。熱処理を行った供試材は鑄放し材と同一の化学成分である。高クロム鑄鉄(Hi-Cr)の焼入・焼戻し条件は 1323K に 7.2ks 保持後空冷。その後、723K に 7.2ks 保持した。SCI-VMn の水靱処理条件は 1373K に 14.4ks 保持後水冷した。高クロム鑄鉄(Hi-Cr)では、焼戻し時に起きる 2 次硬化を狙い、この条件とした。

## ②試験前表面硬さ測定

各供試材の試験前表面の硬さを Table2 に示す。使用した装置はマイクロビッカース硬度計で測定荷重は 1kgf、試験片の一部をファインカッターにより切り出し、樹脂埋め後鏡面加工後測定した。高クロム鑄鉄(Hi-Cr)では、12Cr が 650HV、27Cr が 800HV であった。開発された耐摩耗材料では耐摩耗材料 1 が 900HV、耐摩耗材料 2 が 480HV、耐摩耗材料 3 が 980HV、耐摩耗材料 4 が 620HV であった。比較材 S50C(Q)の硬さは 700HV となった。

Table2 供試材化学成分

	C	Si	Mn	Cr	V	Ni	others	硬さ (HV)
従来材 12Cr(QT)	3.0	0.45	0.80	12.0	-	-	P,S	650
従来材 27Cr(QT)	3.1	0.45	0.77	26.5	-	-	P,S	800
耐摩耗材料 1	3.0	0.9	0.4	-	13	5	Mo,W	900
耐摩耗材料 2	3.0	0.6	12	-	10	-	W	480
耐摩耗材料 3	2.0	0.5	0.5	4.9	4.9	-	Mo,W,Co	980
耐摩耗材料 4	1.5	0.3	0.4	12	0.3	8	Mo,W	620
比較材 (S50C (Q))	0.4~ 0.5	0.2~ 0.4	0.6~ 0.9	-	-	-	-	700

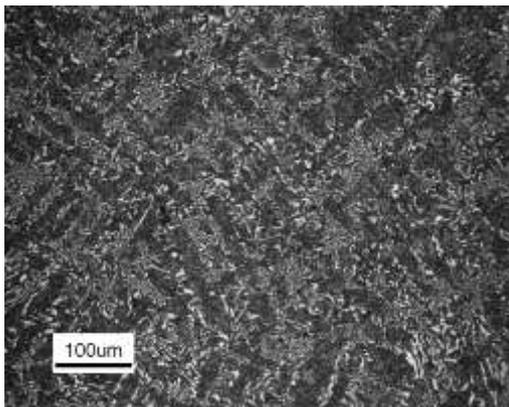


Fig. 8 12Cr(QT)

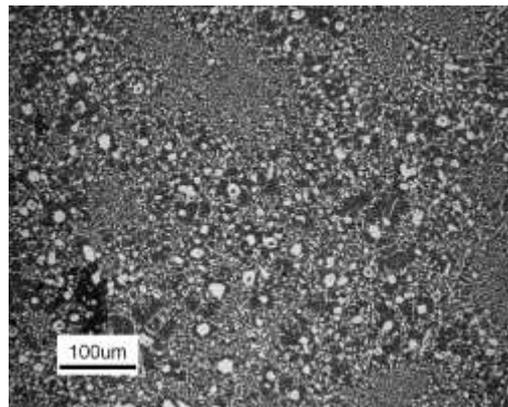


Fig. 9 27Cr(QT)

### (3) 試験結果

#### ①スガ式摩耗試験実験結果

スガ式摩耗試験結果を Fig. 10 に示す。摩耗量は往復回数の増加と共に直線的に増加した。各供試材の摩耗量は S50C(Q) の 1/2 以下に抑えられていることから炭素鋼よりも優れた耐摩耗性を有していることがわかる。本実験で用いた供試材の中では、耐摩耗材料 1 が最も耐摩耗性に優れており、比較材である S50C(Q) の 8 倍の耐摩耗性を有した。次いで耐摩耗材料 2、耐摩耗材料 3、耐摩耗材料 4 の順で耐摩耗性を有していた。従来材である 12Cr、27Cr は Cr 添加量が増加すると摩耗量が減少した。

耐摩耗材料 3 は 27Cr と、耐摩耗材料 4 は 12Cr と同等の摩耗量であった。

この要因を考察するため、各供試材に対し摩耗面 SEM 観察、EPMA 面分析、炭化物の面積率測定を行った。

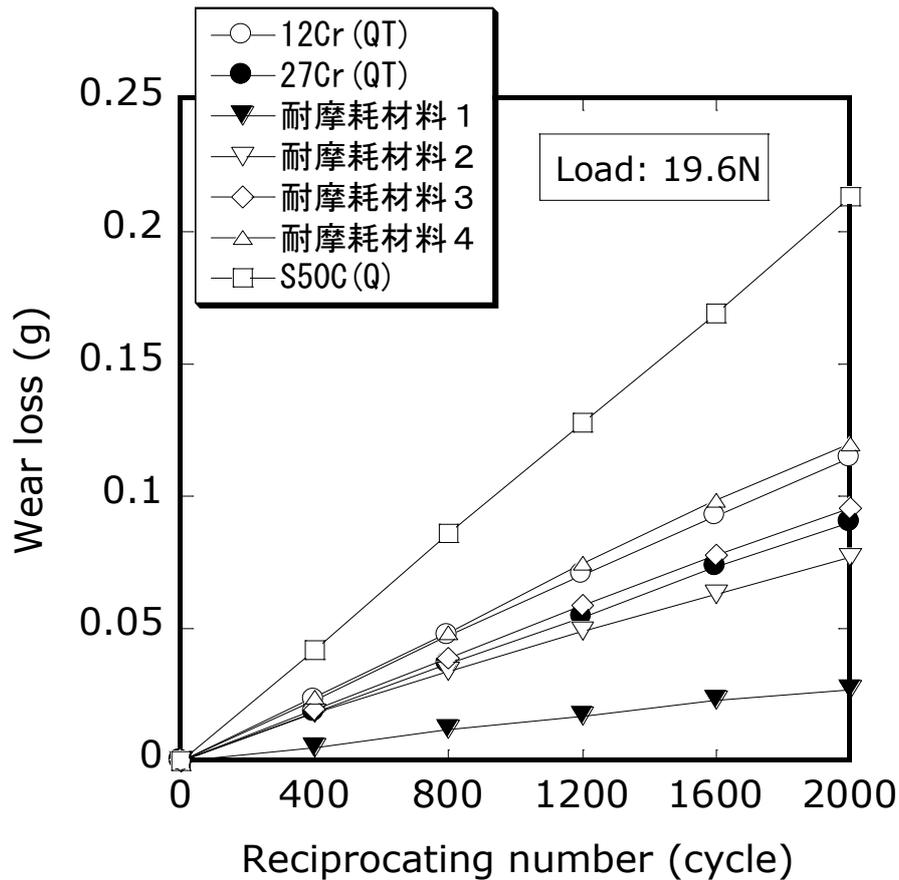


Fig.10 スガ式摩耗試験結果比較

## ②摩耗面 SEM 観察

従来材の摩耗面 SEM 写真を Fig. 11～13 に示す。各供試材で塑性変形による摩耗痕が見られた。12Cr の摩耗面は 27Cr 比べ著しく粗く、耐摩耗性に優れないことがわかる。耐摩耗材料 2 は Hi-Cr に比べ摩耗面に平坦な個所が多く見られ、耐摩耗性に優れることがわかる。

Hi-Cr では、組織写真や面分析結果の炭化物分布状態から、摩耗痕が基地組織だけでなく炭化物上にも生成されていると推察できる。耐摩耗材料 2 では摩耗面に黒い影が見られ、その上に脆性的破壊による凹凸が形成されていた。

## ③EPMA 面分析、EDS 面分析

炭化物の分布状態を EMPA 面分析により調査した。分析結果を Fig. 14、15 に示す。12Cr はデントライト状の炭化物が基地組織を分断するように晶出しているが、12Cr(QT)ではデントライト状から変化し、微細に分離した形状となった。27Cr および 27Cr(QT)の炭化物は共に基地組織中に分散して晶出した。

耐摩耗材料 2 に関して炭化物の分布状態を EDS 面分析により調査した。分析結果を Fig. 16 に示す。球状の VC が基地組織全体に分散していた。基地組織を拡大した組織写真を Fig. 17 に示す。基地組織中に粒上の炭化物が見られた。そこで、この炭化物に注目し EDS 面分析を行った。分析結果を Fig. 18 に示す。V の反応が見られたことから、V を固溶した粒状炭化物が基地組織中に晶出していることがわかった。

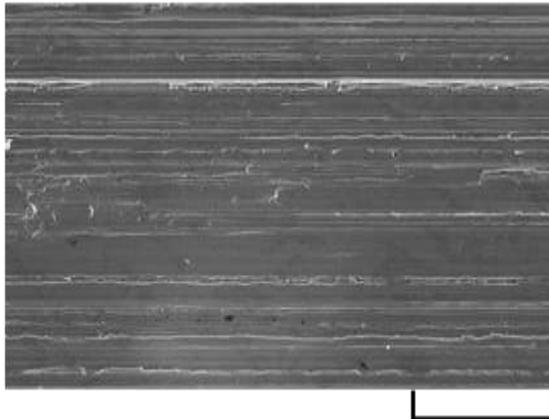


Fig. 11 12Cr(QT) 50μm

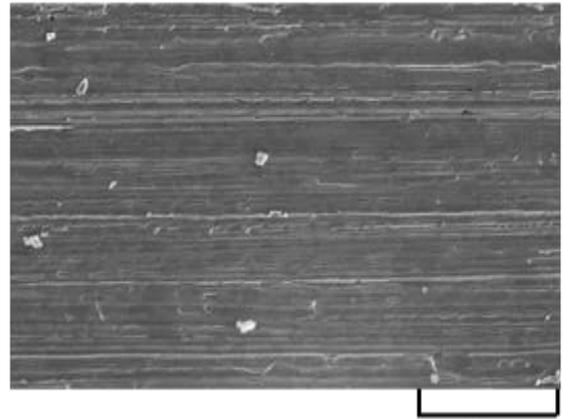


Fig. 12 27Cr(QT) 50μm

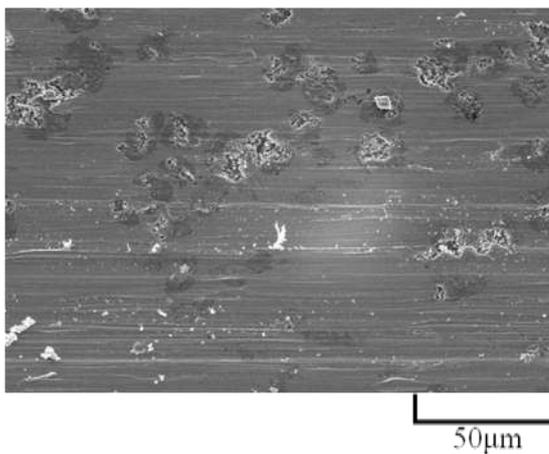


Fig. 13 耐摩耗材料 2

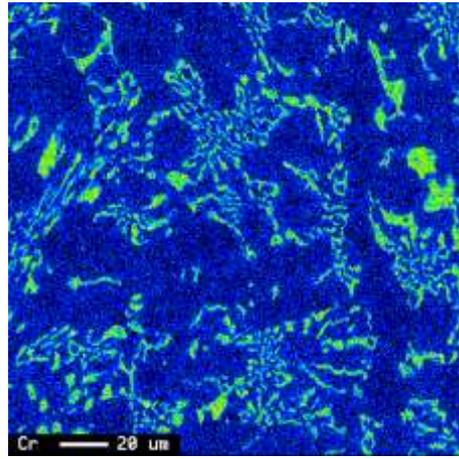
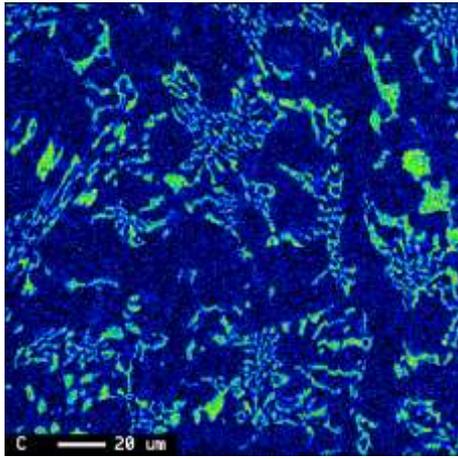


Fig. 14 12Cr(QT)

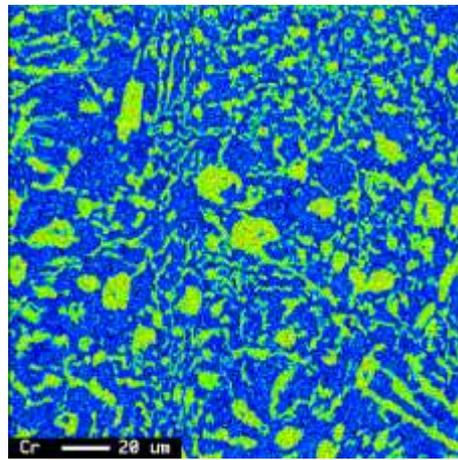
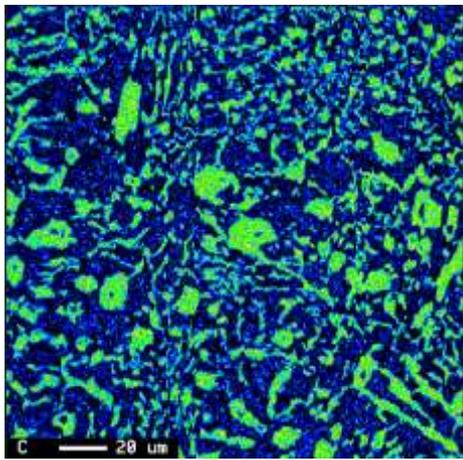


Fig. 15 27Cr(QT)

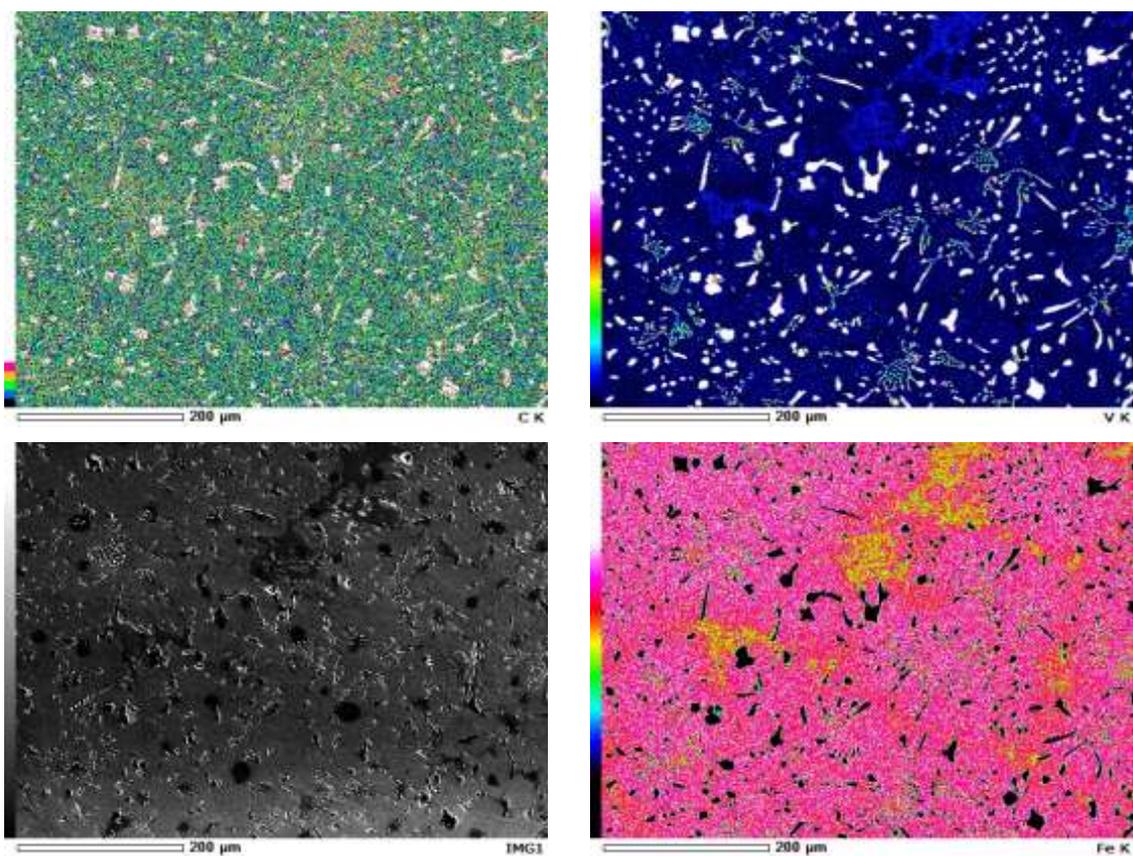


Fig.16 耐摩耗材料 2 の EDS 面分析結果

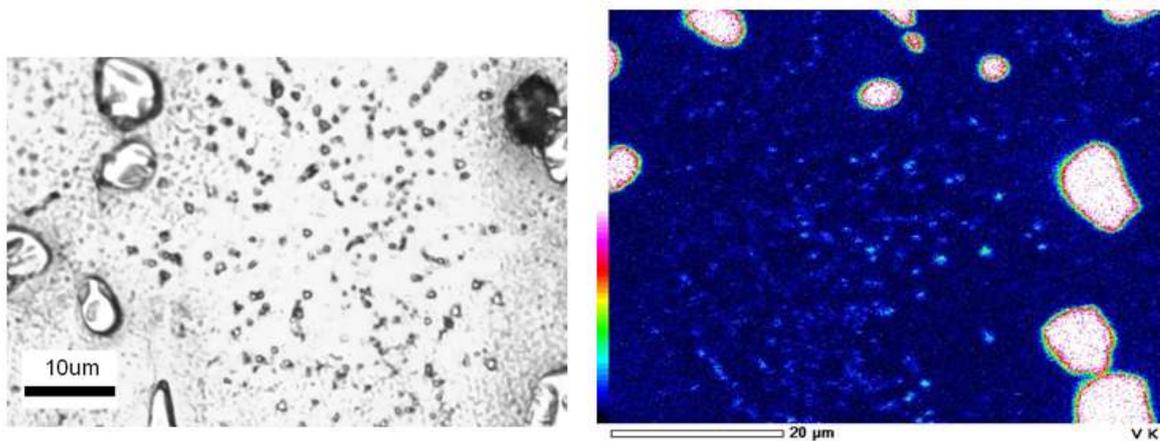


Fig.17 耐摩耗材料 2 の基地組織拡大写真      Fig.18 耐摩耗材料 2 の EDS 分析結果

## 2. 2 常温エロージョン摩耗試験機による耐摩耗性の評価

### (1) 常温エロージョン摩耗試験機

常温エロージョン試験機は、吸引式ブラストマシンを用いた。試験機の構造を Fig. 19 に示す。



Fig. 19 常温エロージョン摩耗試験機

### (2) 実験方法及び供試材

#### ① 試験方法

試験条件は、試験片の寸法は  $50 \times 50 \times 10$  mm、衝突粒子噴出ノズルから供試材表面までの距離を 50mm とした。衝突角度を変化させるため、角度を調整する治具を設置し、すべての供試片に対し、30deg.、6deg.及び 90deg. の 3 水準で試験した。空気流速は 100m/s、噴出量は  $30 \pm 1$ g/sec、総循環粒子量は 2kg とした。実験時間は 3600s、室温で実験を行った。

粉粒体はランドカットワイヤー (RCW) を使用した。RCW は円形加工したワイヤーを一定長さで切断した円柱形の粒子で、RCW の硬度はビッカース硬さで 800Hv、平均粒径は  $810 \mu\text{m}$  のものを使用した。粉粒体自体も、供試材への衝突によって摩耗、変形するため、試験毎に交換した。

供試材には、耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 2、耐摩耗材料 3、耐摩耗材料 4 を用いた。

### (3) 試験結果

各供試材の室温エロージョン摩耗試験結果を Fig. 20 に示す。横軸に衝突角度、縦軸に損傷速度を示す。いずれの衝突角度においても、摩耗量の差は見られず、全ての試験片においてほぼ同等の損傷速度となった。耐摩耗材料 4 がエロージョン摩耗試験において最も耐摩耗性を有し、次いで耐摩耗材料 1 となった。耐摩耗材料 2 及び耐摩耗材料 3 試験片の損傷速度はほぼ同様の値となる結果となった。

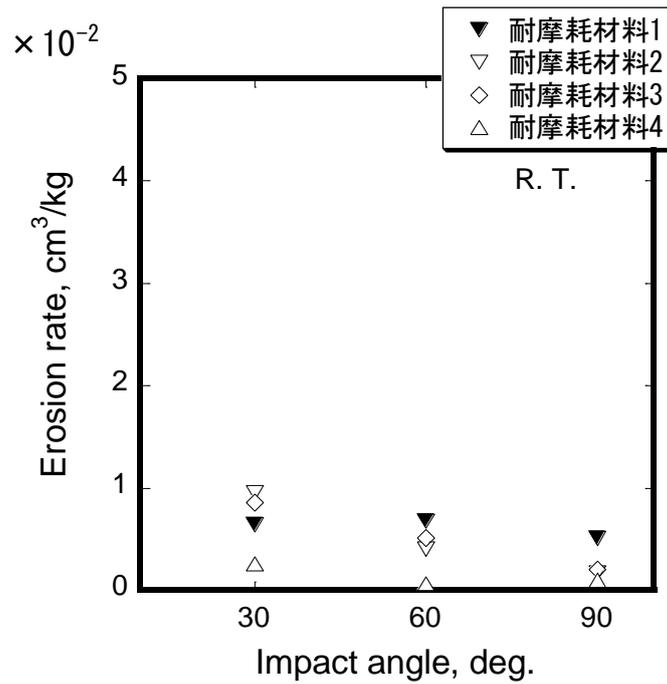


Fig. 20 各耐摩耗材料における常温エロージョン摩耗での損傷速度と衝突角度の関係

### 3. 試験用部品の試作および検証

#### 3. 1 装置開発

##### (1) 開発概要

廃棄物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、粒径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。粒径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、破碎工程で廃棄物を粉碎する際、破碎刃に廃棄物との激しいアブレシブ摩耗が生じる。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。破碎刃にアブレシブ摩耗が生じると刃のクリアランスが大きくなるため、粒径を揃えることが困難となることや、破碎効率が低下し、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。現状では破碎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。このことから耐アブレシブ摩耗性に優れた材料の開発が求められている。

開発された材料を用い、建設機器用アタッチメントであるラバンティシャーなどでの使用を目的とした刃の試作およびその摩耗試験を行う。実験室レベルでの材料の評価は前項にて述べたが、実際、耐摩耗材料を使用する状況において、実験室レベルでの評価だけでは難しく、そこで新たに専用の破碎試験機を開発し、実環境に合わせた耐摩耗材料の破碎試験を行い、評価する。

その後、実際の破碎現場で使用されている破碎機を用い、現場レベルでの耐摩耗材料の評価を行い、事業化を目指す。

## (2) 一軸破碎試験機

破碎機には、一軸方式、二軸方式、ハンマー方式などがあり、その最も大きな違いは処理後の対象物の大きさである。一般に一軸破碎機は細かく、二軸破碎機は大きめ、ハンマー方式はコンクリートなど固いものを砕く際に使用される。一軸破碎機の破碎方式は回転刃に対象物を押し付ける様にして少しずつ削り取っていく様なイメージであり、また、排出口に取り付けてあるスクリーン（網目）の穴サイズより小さくなるまで排出されず、何回も破碎を繰り返す。このスクリーンの穴サイズを変えることによって、ある程度希望の粉碎後のサイズを選ぶことができ、一般には 20～70mm 程度の粒度調整に適している。

一般に破碎機は大型の物が多く、試験を目的として大型機と同等の仕様（試験刃形状、トルク、プッシャー常備）の小型機が存在しない。そこで、本事業において一軸破碎試験機の装置開発を行い以下にその仕様を示す。

### ①装置仕様

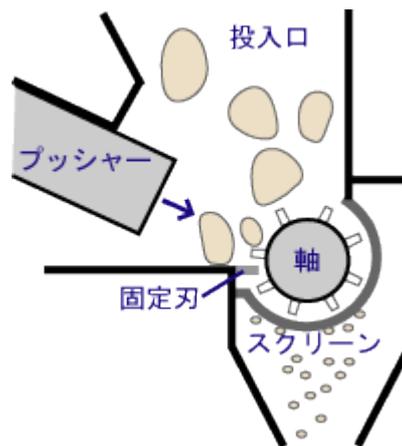


Fig. 21 一軸破碎機の模式図

- ・ローター径：φ290
- ・ローター長さ：380mm
- ・回転刃：25mm×45mm×45mm
- ・回転刃個数：15個（円周3個×5列）
- ・固定刃個数：1個
- ・動力：4P 200V 11Kw 同期モーター  
インバーター制御：固定トルク方式  
回転数可変（ローター回転数：50～100rpm）
- ・プッシャー：油圧シリンダー
- ・スクリーン：φ30mm 穴



Fig. 22 装置全景



Fig. 23 制御盤



Fig. 24 破砕機ローター部

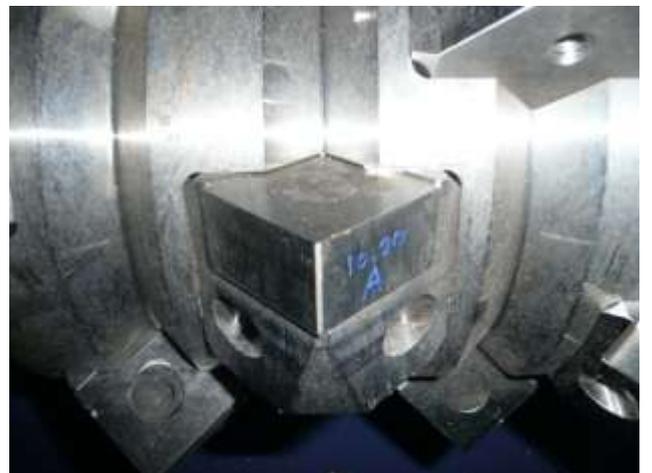


Fig. 25 回転刃ホルダーおよび回転刃



Fig. 26  $\phi 30\text{mm}$  メッシュ穴

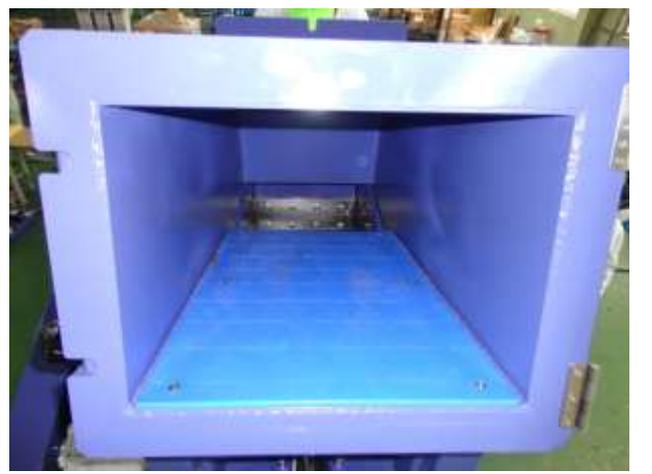


Fig. 27 原料投入部

### (3) ギロチン切断試験機

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.28 のように、あるシャー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。

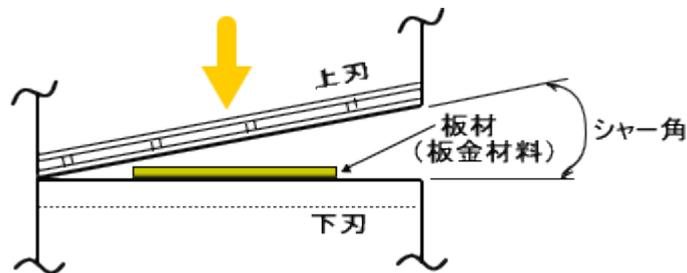


Fig. 28 ギロチン切断模式図

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。

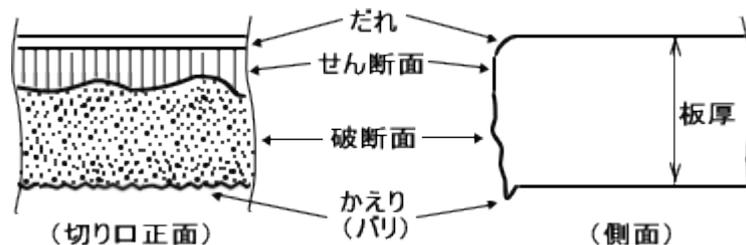


Fig. 29 せん断面模式図

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すぎると、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。

## 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



Fig. 30 ギロチン切断試験機装置全景

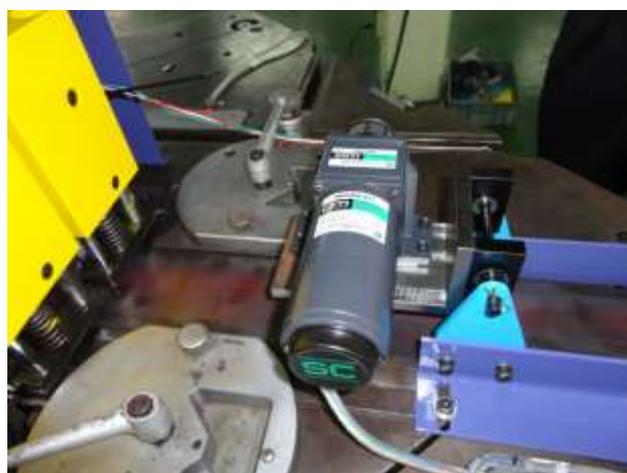


Fig. 31 切断材料送り装置



Fig. 32 切断機 操作部



Fig. 33 切断部



Fig. 34 切断装置操作盤

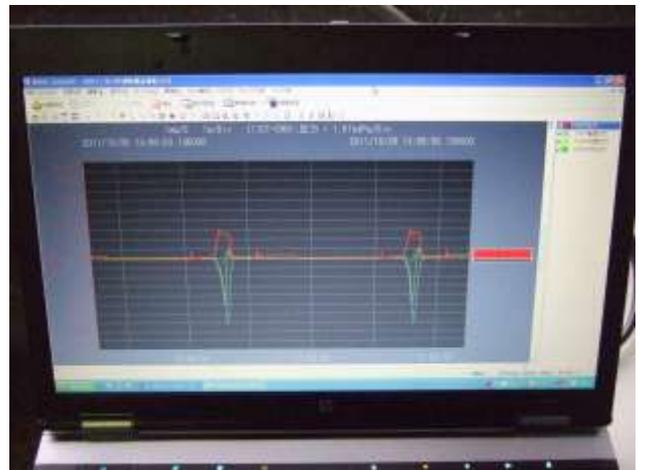


Fig. 35 ひずみゲージ解析装置

### 3. 2 切断試験

次に、開発を行った一軸破碎試験機及びギロチン切断試験機による切断試験を行った。

#### (1) 一軸破碎機試験

##### ①試験方法

##### (a)試験機

前項で開発を行った一軸破碎試験機を用いて試験を行った。



Fig. 36 一軸破碎試験機

##### (b) 試験刃

Table3 に試験を行った刃の材質を示した。

回転刃ローターには、15個の回転刃が取付可能であり、今回の試験においては、耐摩耗材料2を5個、耐摩耗材料3を5個、耐摩耗材料4を5個取付、試験を行った。また、固定刃には、耐摩耗材料4を用いた。回転刃ローターの模式図を Fig. 37 に示し、各耐摩耗材料回転刃の取付位置を Fig. 38 に示す。

Table3 破碎刃の材質と硬度

	硬さ	
耐摩耗材料 2	HRc 35～40	焼入、焼戻し
耐摩耗材料 3	HRc 65～66	焼入、焼戻し
耐摩耗材料 4	HRc 55～60	熱処理

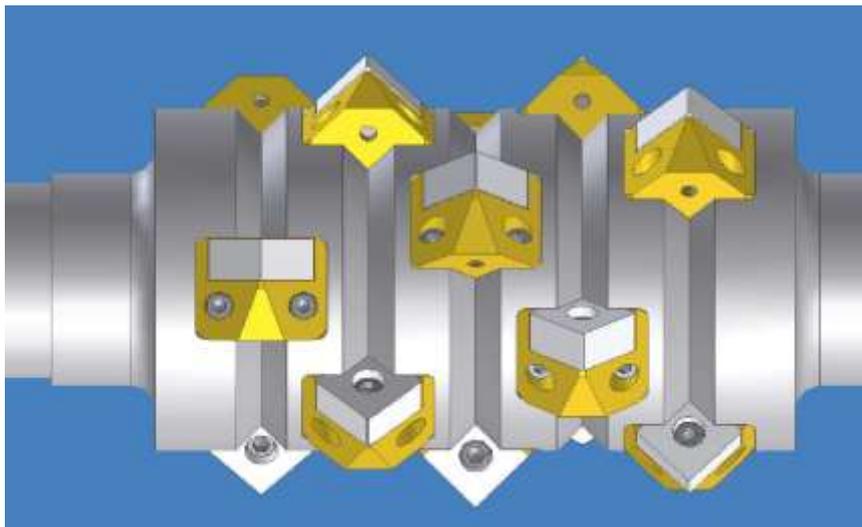


Fig. 37 回転刃ローター模式図

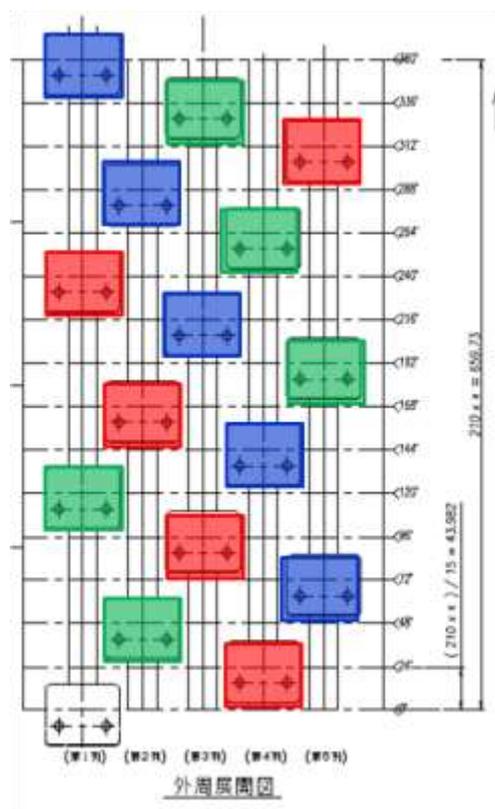


Fig. 38 各耐摩耗材料回転刃 取付位置



Fig. 39 一軸破碎機 固定刃 取付

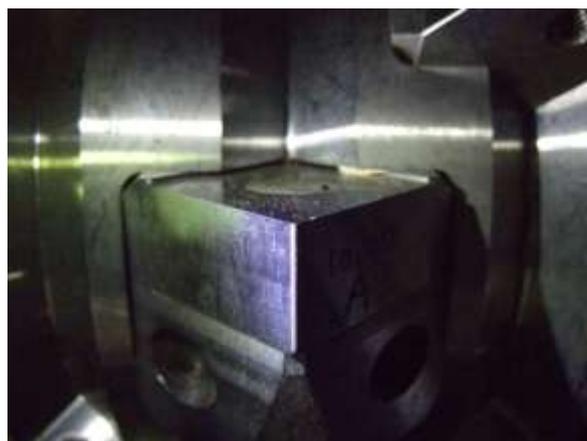


Fig.40 一軸破碎機 回転刃 取付

### (c)試験材料

自動車や家電製品などのシュレッダーダストといわれる廃棄物を専門的に扱い、シュレッダーダストの選別、リサイクルを行なっている株式会社 SR テクノ（北海道登別市）から、試験材料を購入して行った。

「SR 土砂ガラス」と称する試験材料は、シュレッダーダスト選別工程における旋回ふるい後の 10mm アンダーという材料を、磁気選別、リニア選別、風力比重選別後に有価物を除去した後の排出物である。その成分比を Table4 に示す。土砂分が多く、土砂摩耗に近い摩耗試験が可能となった。



Fig. 41 SR 土砂ガラス

Table4 SR 土砂ガラス成分比

MIX メタル山	7%	小石・プラスチック、鉄、真鍮、銅
ガラス銅混じり	3%	ガラス、銅、プラスチック
プラスチック	40%	プラスチック、土砂
ダスト	44%	土砂、ガラス、プラスチック
集塵機ダスト	6%	

(d)試験方法

一軸破碎試験機本体のスクリーンのメッシュ部（φ30mm）を塞ぎ、回転刃ローター外周部の空間に試験材料を充填し、破碎刃の摩耗加速試験を行った。ローター外周部の容積は約40リットル（0.04m<sup>3</sup>）となる。Fig. 42、Fig. 43にメッシュ部の加工を示し、Fig. 44にローター外周部の容積部分を示す。



Fig. 42 スクリーン加工前



Fig. 43 スクリーン加工後

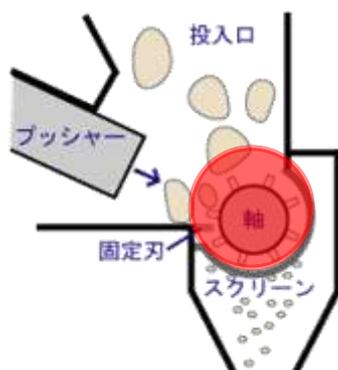


Fig. 44 ローター外周部の空間図



Fig. 45 回転刃－固定刃間のスキマ

試験材料は、ローター外周部の約 40 リットルの空間に、1 回につき約 30kg（容積 40 リットル分）投入し破碎を行い、2 時間毎に試験材料を排出し、再度新しい試験材料の投入・破碎という工程を繰り返して行った。8 時間毎に回転刃を取り外し、重量の測定および表面のマクロ観察を行った。回転刃のローターの回転数は、一軸破碎試験機の性能の最大である 80 回転/min と設定した。

また、回転刃と固定刃間のスキマを 1.00mm とするよう調節した。

## ②試験結果

耐摩耗材料の変化による回転刃の摩耗量の差のグラフを Fig. 46 に示す。

土砂分が多い試験材料を用い、摩耗劣化を加速的な環境を再現して試験を行った結果、耐摩耗材料 3 が最も摩耗量が少なく、耐摩耗材料 2 および 4 の約 5 倍の耐摩耗性を有することが判明した。また、各耐摩耗材料の摩耗量のエラーバーが大きいのは、ローター上の破碎刃の位置によって摩耗量が変わったためである。耐摩耗材料 3 は、取り付け位置による摩耗量のばらつきも少ないことが判明した。次に、一軸破碎試験機での摩耗状況を Fig. 47～Fig. 54 に示す。

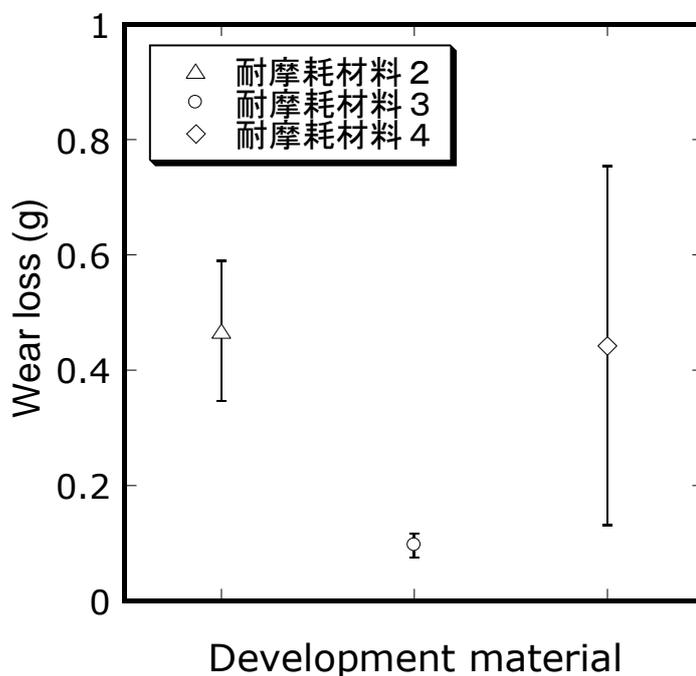


Fig. 46 各耐摩耗材料の摩耗量の差



Fig. 47 試験材料破碎中の回転刃およびローター



Fig. 48 試験終了後の回転刃およびローター

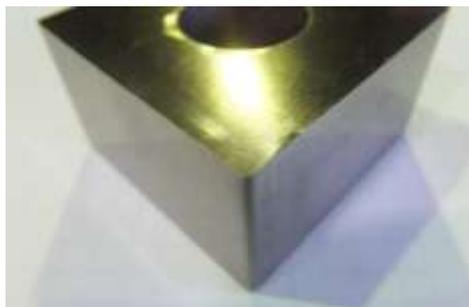


Fig. 49 耐摩耗材料 2 回転刃 試験前



Fig. 50 耐摩耗材料 2 回転刃 試験後

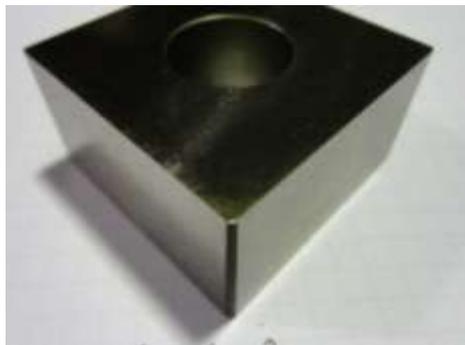


Fig. 51 耐摩耗材料 3 回転刃 試験前

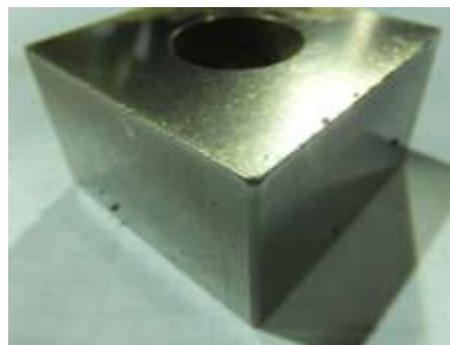


Fig. 52 耐摩耗材料 3 回転刃 試験後

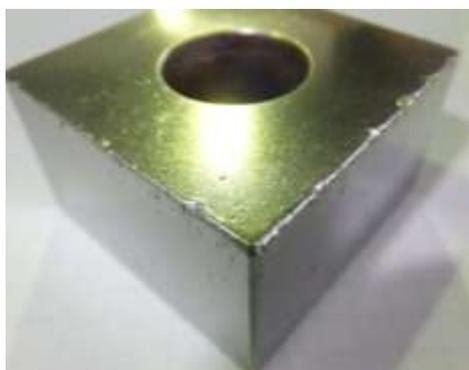


Fig. 53 耐摩耗材料 4 回転刃 試験前

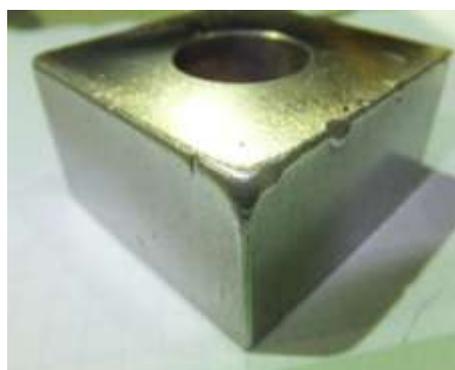


Fig. 54 耐摩耗材料 4 回転刃 試験後

一軸破碎試験機における加速的な摩耗試験において、80回転/minによる破碎を行った際、試験材料とローターの摩擦による発熱がみられ、回転刃への硬度などへの影響があるものと考えられ、今後検討する必要がある。また、破碎時のロータートルクは最大で  $30\text{N}\cdot\text{m}$  であり、平均トルクは  $18.5\text{N}\cdot\text{m}$  であった。

回転刃の表面観察からも、耐摩耗材料 2 および耐摩耗材料 4 は角が丸みを帯び、摩耗が進展していることが判明した。耐摩耗材料 3 については、試験後も試験前の形状と変化せず、耐摩耗性を有していることが判明した。

### ③まとめ

- (1) 一軸破碎試験機を開発し、開発を行った各種耐摩耗材料破碎刃の耐摩耗試験を行うことが可能となった。また、改造を施すことで、破碎刃を加速度的に摩耗させることが可能となった。
- (2) 土砂分の多い試験材料を用いた破碎試験においては、耐摩耗材料 3 を用いた破碎刃が最も耐摩耗性に優れ、同様に使用した耐摩耗材料 2 および耐摩耗材料 4 の 5 倍の耐摩耗性能を有することが判明した。

## (2) ギロチン切断試験

### ①試験方法

#### (a)試験機

前項で開発を行ったギロチン切断試験機を用いて試験を行った。



Fig. 55 試験機写真



Fig. 56 切断部写真

#### (b)試験刃

Table5 に試験を行った刃の材質を示した。

Table5 切断刃の材質と硬度

	硬さ	
耐摩耗材料 1	HRc 58~60	鑄放し
耐摩耗材料 2	HRc 35~40	焼入、焼戻し
耐摩耗材料 3	HRc 65~66	焼入、焼戻し
耐摩耗材料 4	HRc 55~60	熱処理
S50C(Q)	HRc 35	焼入、焼戻し

#### (c)被切断材

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。

#### (d)試験方法

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。

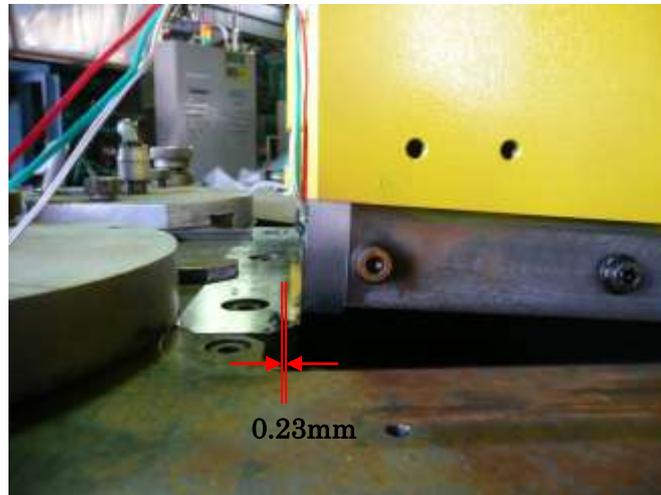


Fig. 57 切断刃上刃-下刃間スキマ

## ②試験結果

### ②-1 切断荷重

切断荷重の推移を Fig.58、59 に示す。

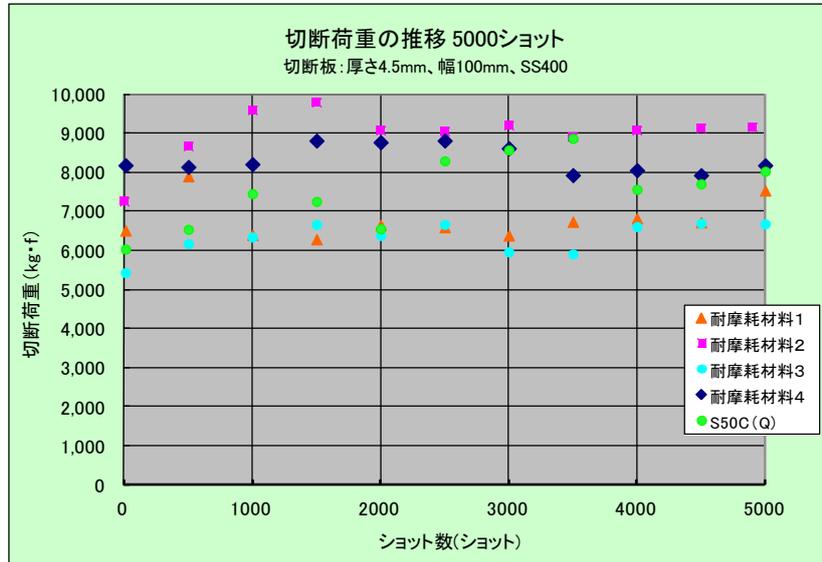


Fig.58 切断荷重推移 1～5000 ショット

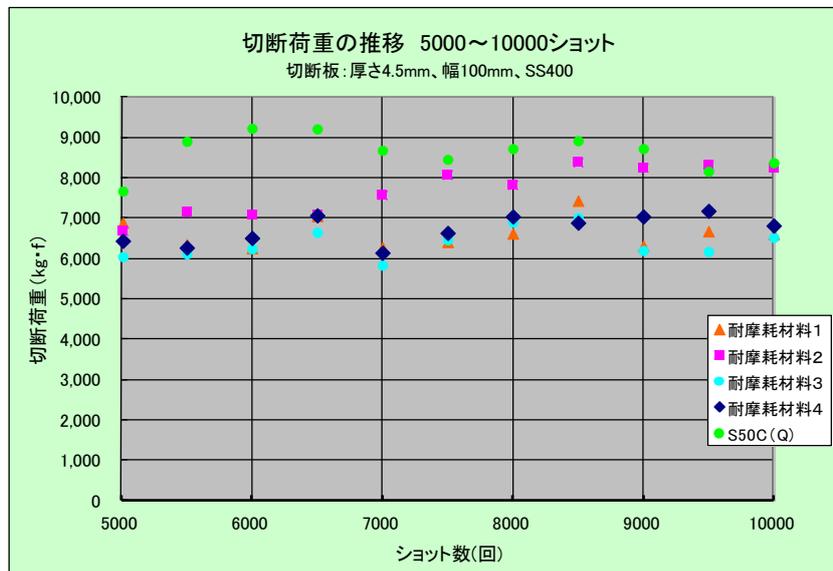


Fig.59 切断荷重推移 5000～10000 ショット

耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 2、耐摩耗材料 3、耐摩耗材料 4、比較材 S50C(Q)とも、切断荷重は徐々に上昇している。比較材 S50C(Q)の上昇が最も早く、5000 ショット以降はほぼ同程度の値で推移している。次いで耐摩耗材料 2 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 ショット時点で比較材 S50C(Q)の切断荷重と同程度となった。本試験の範囲内では耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 3、耐摩耗材料 4 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。

Fig.58 のショット回数 5000 までの範囲において耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 3、比較材 S50C(Q)の 3 種と比較して耐摩耗材料 2、耐摩耗材料 4 の切断荷重が開始時点から大きく推移している。後述する荷重・ひずみ線図も異なる。この原因は上下切断刃のクリアランスが他の 3 つより狭かったのではないかと推定される。クリアランスが異なった原因は、取付時の問題と思われる。Fig.59 のショット数 5000 以降では各刃共通でクリアランス 0.23mm と設定しており、耐摩耗材料 2、耐摩耗材料 4 と耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 3 の開始時切断荷重が同程度となった。比較材 S50C(Q)については 5000 ショット時点で刃の摩耗が大きく、測定荷重も大きい。

## ②-2 切断荷重・ひずみ線図

Fig.60～Fig.69 に切断時の荷重・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=2100kg/mm<sup>2</sup>、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。

荷重波形は、ワークの破断が起こるまで直線で上昇、その後の平坦部分は素材幅全部を切断している部分と思われる。本試験により SS400 (板厚 4.5mm) 簡易的な被切断抵抗は、15～20kg/mm<sup>2</sup> であった。

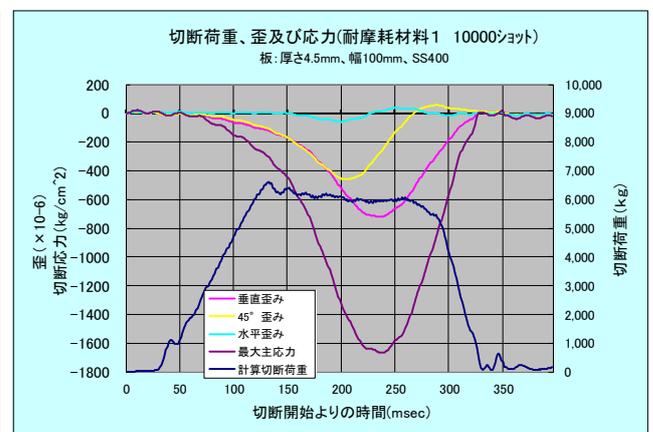
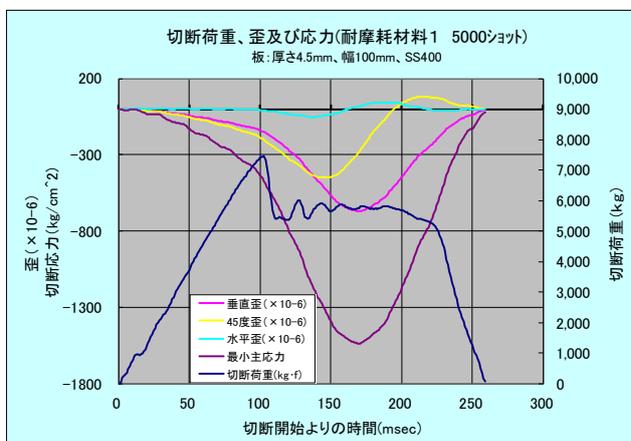


Fig.60 耐摩耗材料 1 5000 ショット

Fig.61 耐摩耗材料 1 10000 ショット

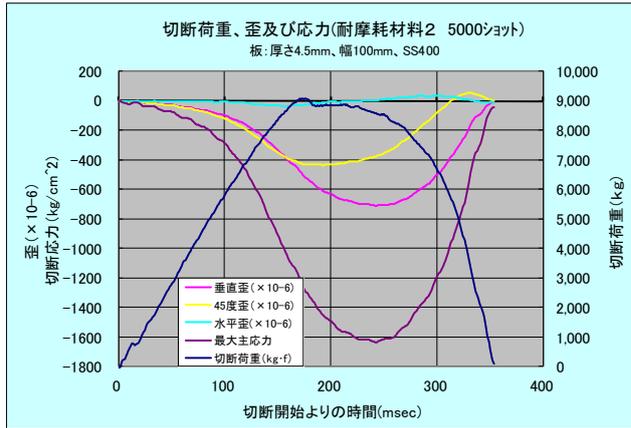


Fig.62 耐摩耗材料2 5000ショット

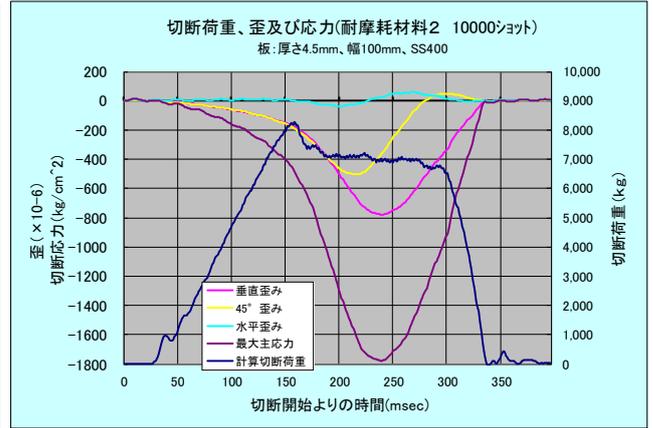


Fig.63 耐摩耗材料2 10000ショット

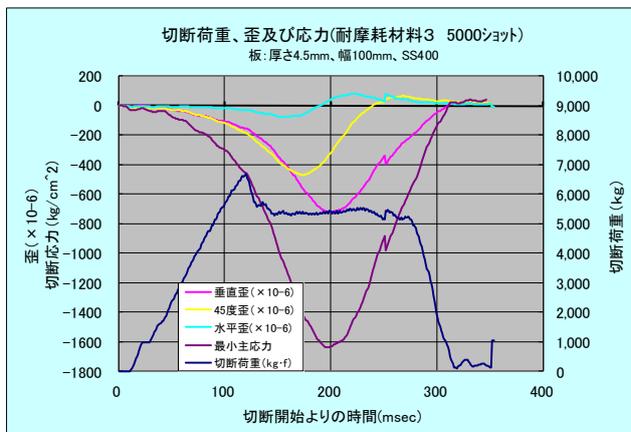


Fig.64 耐摩耗材料3 5000ショット

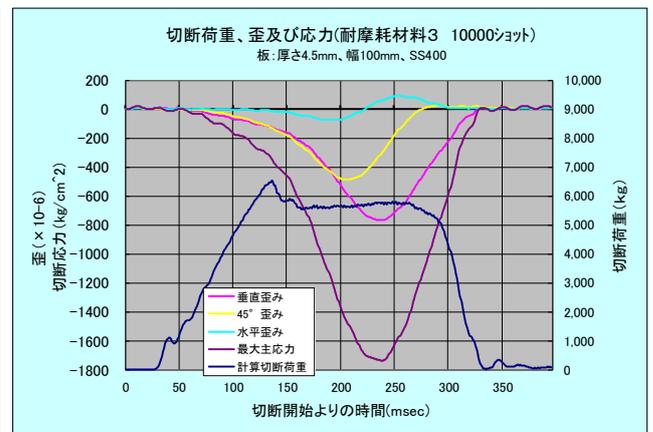


Fig.65 耐摩耗材料3 10000ショット

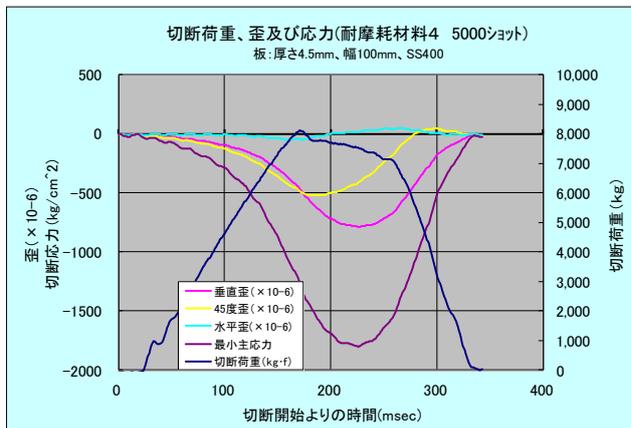


Fig.66 耐摩耗材料4 5000ショット

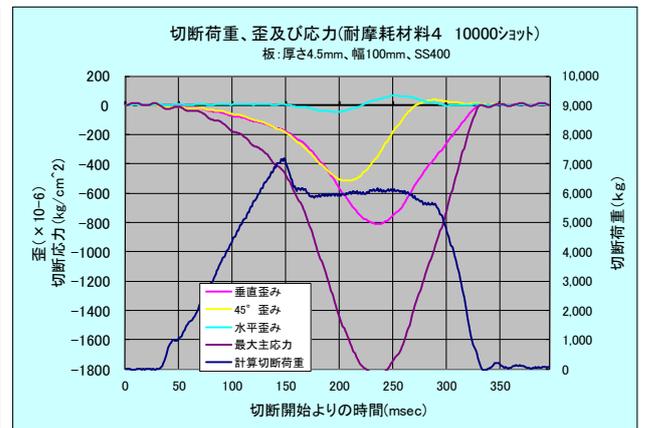


Fig.67 耐摩耗材料4 10000ショット

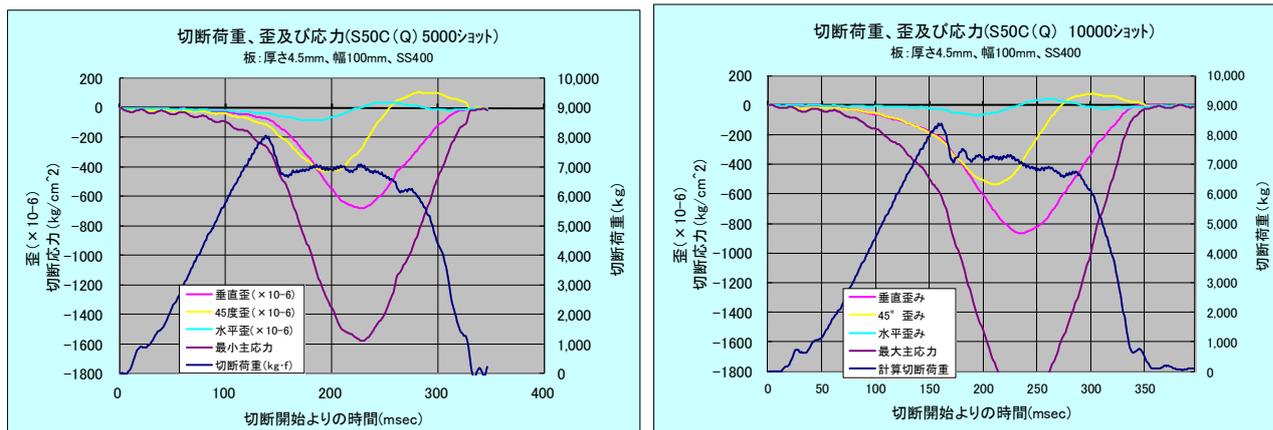


Fig.68 比較材 S50C(Q) 5000 ショット Fig.69 比較材 S50C(Q) 10000 ショット

### ②-3 切断刃の損傷

切断刃の先端を拡大写真で見ると、各材質とも、切断により刃先の凹凸が大きくなっていることがわかる。その荒れ方の程度は、比較材 S50C(Q)、耐摩耗材料 2、耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 3、耐摩耗材料 4 の順である。

刃先の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。その程度は、比較材 S50C(Q)が最も大きく、ついで耐摩耗材料 2、耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 3、耐摩耗材料 4 と続く。この結果は切断荷重の増加順とも一致する。

耐摩耗材料 2 と比較材 S50C(Q)は切断が進むにつれて荷重方向に潰されたような凹みが見られる。この 2 種は他 3 種の刃と比較して硬度が低く、刃先の損耗により切断荷重が増加し、圧縮により凹みが発生したと思われる。一般に材料の硬度が高いほど圧縮には強く、耐摩耗材料 1 および耐摩耗材料 2 は、基地組織中に高硬度の球状炭化物を晶出させた材料であるが、炭化物が均一に分散していない場合、全体の硬度が不足し、刃先の荒れ及び圧縮による変形が発生すると推定される。

圧縮変形の無い耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 3、耐摩耗材料 4 の 3 種の比較では、耐摩耗材料 1 の丸みが若干大きい。

今回の試験範囲では耐摩耗材料 3 と耐摩耗材料 4 はほぼ同程度の損耗であった。但し、後述に述べるが、両者とも刃の一部に欠けが生じた。

### ②-4 切断刃の欠け

耐摩耗材料 3 上刃は被切断材切り終わり付近の位置、また耐摩耗材料 4 は下刃の中央付近、ワーク接触面の反対側に欠けが発生していた。欠けの発生時期は刃の外観写真から判断して耐摩耗材料 4 が 3000 ショットまでの間、耐摩耗材料 3 が 5000 ショット以降である。耐摩耗材料 4 の場合は 5000 ショットまで実施時の上下刃クリアランスが狭く、刃に荷重がかかった可能性がある。

本試験結果においての欠け発生による荷重、ひずみ測定値への影響については、耐摩耗材料 3 は切断終了間際の位置であること、耐摩耗材料 4 は発生箇所が下刃で、さらにワークと直接触れる部分ではないことから、測定値への影響は無いと思われる。

## ②-5 刃先の応力

代表的な、歪み及び切断荷重測定データから簡易モデルを仮定して有限要素法により刃先応力を推定した。

解析は、上刃の底面（切断材幅×仮定奥行き）と刃の裏側（取付面）の荷重作用方向以外を変位拘束して、切断荷重を刃の上端部全体に作用させ、ゲージ貼付け位置において実験結果と計算結果が一致する仮定奥行きを求め、そのときの刃先応力を求めた。その結果、切断時の刃先に作用する応力は **2000MPa** 以上に達する結果となった。

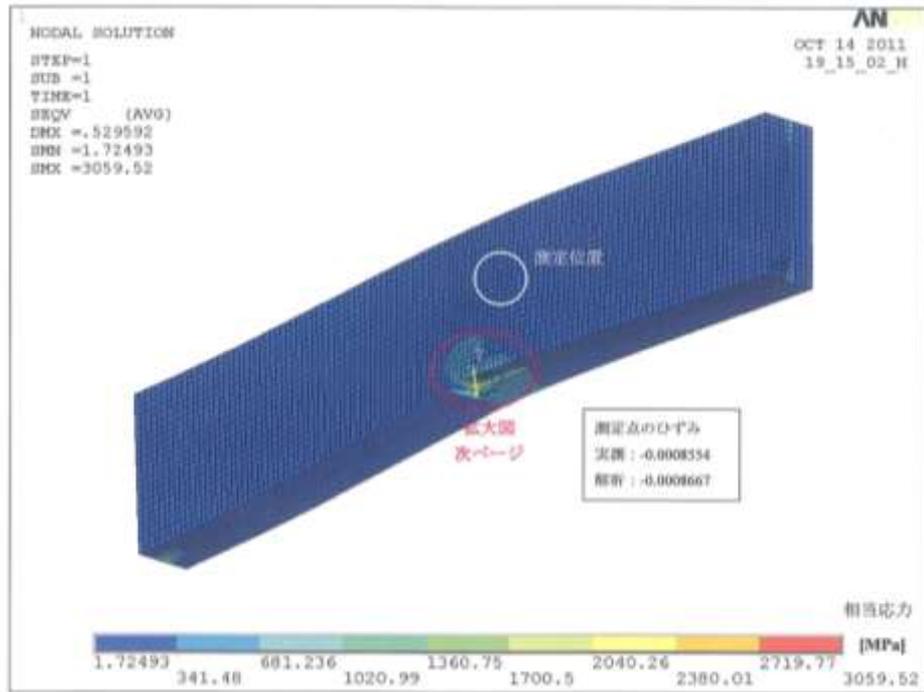


Fig.70 切断刃先の応力解析(1)

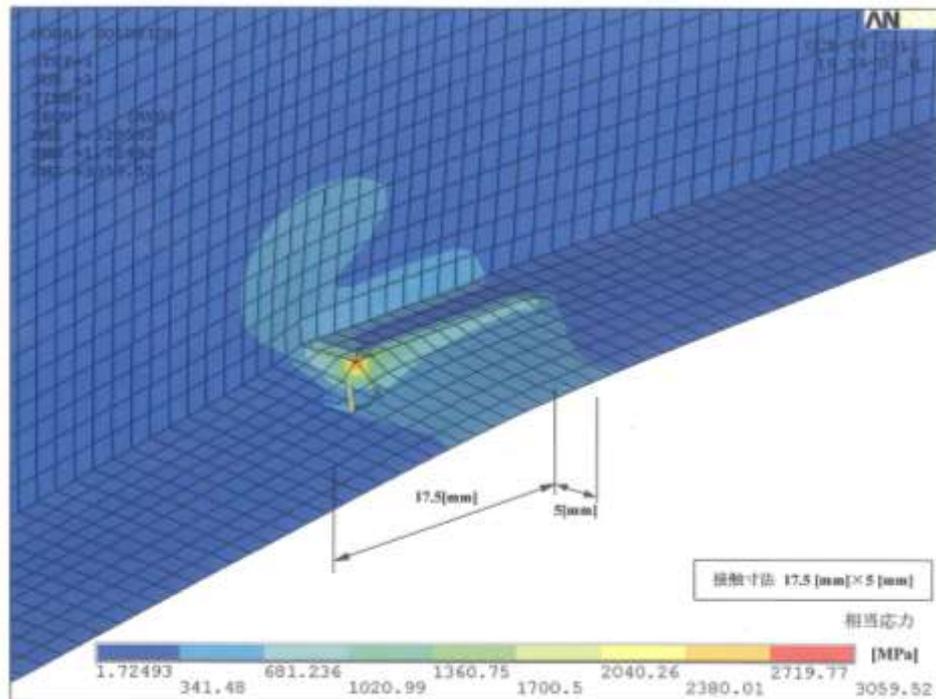


Fig.71 切断刃先の応力解析(2)

### ③まとめ

切断試験の結果、次のことがわかった。

- (1) 本試験ショット数 10000 回時点で刃の耐久性が良いのは、耐摩耗材料 3 と耐摩耗材料 4 でほぼ同等、次いで耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 2、比較材 S50C(Q)の順であった。
- (2) 耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 2、比較材 S50C(Q)とも、切断数が増すと、刃先の凹凸が大きくなる。
- (3) 硬度が高いと切断による刃先の丸み進展が小さい。
- (4) 耐摩耗材料 2、比較材 S50C(Q)は、切断数が増すと刃先の損耗により切断荷重が増加し、圧縮により潰されたように変形する。圧縮強度を高めるためには硬さの向上が有効であり、硬度の高い耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 3、耐摩耗材料 4 では圧縮による変形はほぼ無かった。
- (5) 本試験において刃の先端部には、2000MPa を超える高い応力状態となっていると推定される。切断刃は鋭利な刃先を必要とするため、炭化物の分散により硬くした耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 2 は炭化物の存在しない部分との差が大きく、高い圧縮応力によりミクロ的な損傷が一様にならないと思われる。このことが耐久性を悪くしていると考えられる。
- (6) 今回の試験範囲において、耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 3 は、耐摩耗材料 4 に近い耐久性がある。  
但し、耐摩耗材料 3 は本試験中に一部欠けが発生した。  
また、耐摩耗材料 1、耐摩耗材料 2 については加工性を考慮して硬度を表 1 の値に調整している。靱性が下がれば葉の欠けが発生する可能性はあるが、硬度を上げることでさらに耐久性を向上させられるかが今後の検討課題と思われる。

### 3. 3 実機試験

これまで開発された材料を用い、研究室におけるスガ式摩耗試験機および常温エロージョン摩耗試験機によるラボ試験を行った。その結果を用い、一段階スケールアップさせた試験を、一軸破碎試験機およびギロチン切断試験機により行った。各種試験機による破碎試験は、実環境に近い状態で行われているが、破碎機等を実際に使用している現場において開発した材料による破碎刃を使用してもらい、第三者としてのアドバイスを目的で実機試験を行った。

#### (1) ミニモジュール破碎機

一軸破碎試験機用の試験材料を購入した、株式会社SRテクノ（北海道登別市）の工場に設置されている「ミニモジュール破碎機」を用いて試験を行うこととなった。

通常、ミニモジュール破碎機は自動車等のハーネス部品から銅とプラスチック等の廃棄物を選別するために使用され、ハーネスを破碎する破碎機部分と、選別を行うエアテーブル選別機からの構成となっている。次に、ミニモジュール破碎機による選別工程を示す。

- (1) 自動車用のハーネスは、手作業により、カップラーなどの部品を外され、ベルトコンベアにより破碎機に供給される。
- (2) ミニモジュール破碎機は、回転刃 6 枚、固定刃 2 枚からなり、また破碎機下部にはφ5mm のスクリーンメッシュが設置され、ハーネスは 5mm 以下に破碎される。
- (3) 破碎されたハーネスは、次にエアテーブル選別機 1 に移動する。破碎機により粒径が均一となったハーネス（銅・プラスチック類）は、エアテーブルにより比重選別され、銅およびプラスチックに選別される。選別が不十分な部分に関しては、再度ミニモジュール破碎機に投入され破碎される。
- (4) エアテーブル選別機 1 により選別されたプラスチックは、エアテーブル選別機 2 に移動し、再度エアテーブル選別機 1 にて選別しきれない銅およびプラスチックに選別される。

### ①試験方法

初めに、ミニモジュール破砕機用の破砕刃(回転刃、固定刃)の製作を行った。Table6に試験を行った刃の材質を示す。

Table6 切断刃の材質と硬度

	硬さ	
耐摩耗材料 3	HRc 65～66	焼入、焼戻し
耐摩耗材料 4	HRc 55～60	熱処理



Fig. 72 ミニモジュール 回転刃 加工前



Fig. 73 ミニモジュール 固定刃 加工前

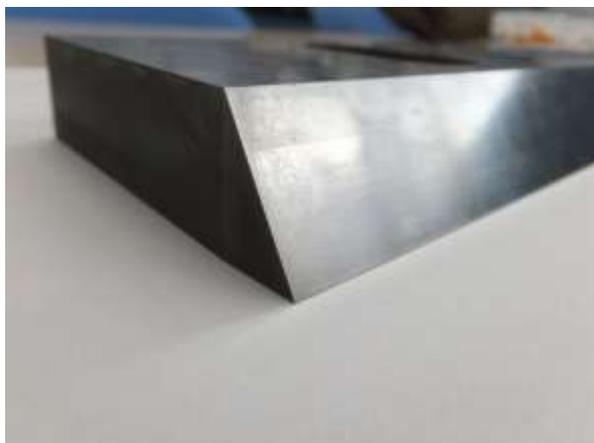


Fig. 74 ミニモジュール 回転刃 加工後

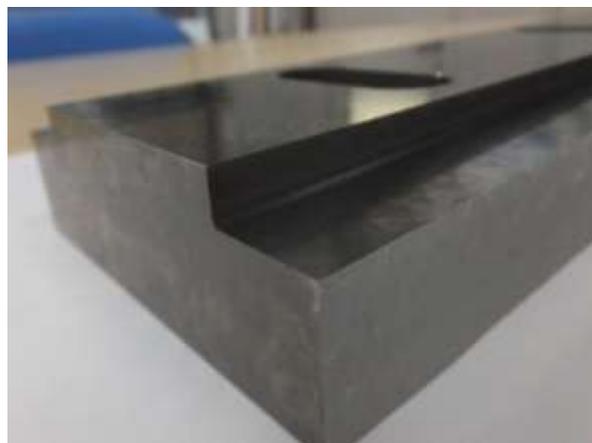


Fig. 75 ミニモジュール 固定刃 加工後

製作された破砕刃(回転刃・固定刃)を持って、破砕試験を行った。

ミニモジュール破砕機の回転刃 6枚のうち、2枚を耐摩耗材料 3 および耐摩耗材料 4 とした、また、固定刃 2枚のうち 1枚を耐摩耗材料 3 とした。残りの回転刃および固定刃は従来から使用しているものとした。破砕機内部の容量は約 0.1m<sup>3</sup> とし、回転刃ー固定刃間のスキマをすきまゲージにより 0.3mm と調整した。



Fig. 76 破碎部外観

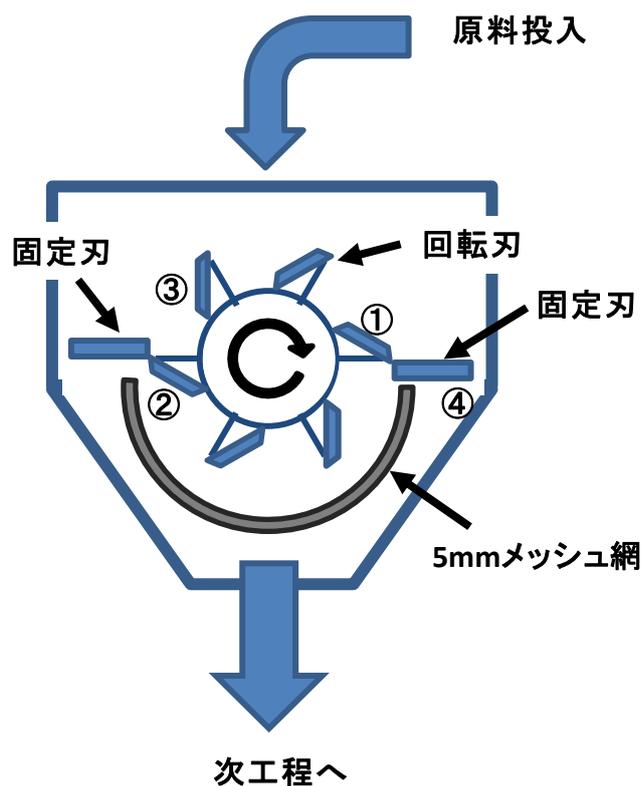


Fig. 77 破碎工程模式図

### 試験内容

回転刃：①耐摩耗材料3

②耐摩耗材料4

③測定対象従来刃

固定刃：④耐摩耗材料3

その他回転刃・固定刃＝：従来材

### 作業工程

・前処理後のハーネスを投入し、5mmアンダーに破碎後、エアテーブル選別機により、製品・その他へ選別を行う。

Fig. 78 破碎試験設定内容

## ②試験結果

次に試験結果を示す。投入量と選別後の製品および稼働時間について Table 7 に示す。

Table 7 稼働時間および投入量の関係

	1 日目	2 日目	3 日目	合計
作業時間	316min	431min	274min	1021min
製品（銅）	41kg	114kg	78.5kg	233.5kg
廃棄（プラ）	71kg	51kg	43kg	165kg
投入量	112kg	165kg	121.5kg	398.5kg

試験開始前後の回転刃および固定刃の重量を測定したが、秤量計の測定範囲外であり、変化を捉えることが出来なかった。

次に、回転刃の表面観察を行った。従来の材料を用いた回転刃についての試験前、試験後の写真を Fig. 79～84 に示す。試験前後においてもさほど摩耗の進展は見られなかった。

次に、耐摩耗材料 3 で製作した回転刃についての試験前、試験後の写真を、Fig. 85～90 に示す。

ミニモジュール破砕機は、定期的にベルトコンベアにてハーネスを供給し破砕を行う。ハーネス投入時に裁断するため最大負荷となり、通常時は所定の粒径とするため低負荷にて回転・破砕を行う。

耐摩耗材料 3 で作製した回転刃には、大きな欠けが発生した。これは、硬度が HRC=66 と硬い材料であり、ハーネス投入時に最大負荷か掛かり、欠けが発生したものと推察される。

次に、耐摩耗材料 4 で製作した回転刃についての試験前、試験後の写真を、Fig. 91～96 に示す。耐摩耗材料 4 は、一部小さな欠けが見られるものの、大きな摩耗進展は観察されなかった。

次に、耐摩耗材料 3 で製作した固定刃についての試験前、試験後の写真を、Fig. 97～102 に示す。回転刃で見られた欠けは、固定刃では観察されなかった。これは回転刃の刃先が薄いため欠けやすく、固定刃においては肉厚であるため欠けなかったものと推察される。



Fig. 79 従来材 回転刃 試験前(1)



Fig. 80 従来材 回転刃 試験後(1)



Fig. 81 従来材 回転刃 試験前(2)



Fig. 82 従来材 回転刃 試験後(2)



Fig. 83 従来材 回転刃 試験前(3)



Fig. 84 従来材 回転刃 試験後(3)



Fig. 85 耐摩耗材料 3 回轉刃試驗前(1)



Fig. 86 耐摩耗材料 3 回轉刃試驗後(1)



Fig. 87 耐摩耗材料 3 回轉刃試驗前(2)



Fig. 88 耐摩耗材料 3 回轉刃試驗後(2)

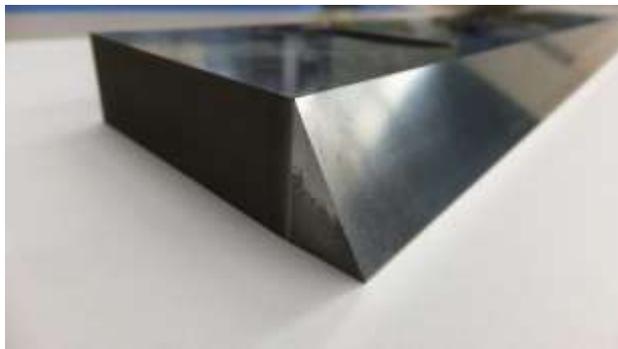


Fig. 89 耐摩耗材料 3 回轉刃試驗前(3)



Fig. 90 耐摩耗材料 3 回轉刃試驗後(3)



Fig. 91 耐摩耗材料 4 回轉刃試驗前(1)



Fig. 92 耐摩耗材料 4 回轉刃試驗後(1)



Fig. 93 耐摩耗材料 4 回轉刃試驗前(2)



Fig. 94 耐摩耗材料 4 回轉刃試驗後(2)

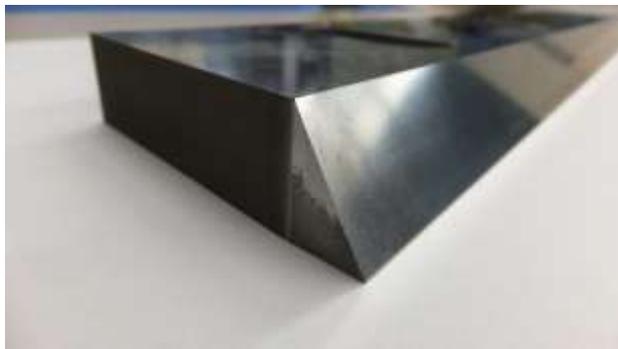


Fig. 95 耐摩耗材料 4 回轉刃試驗前(3)



Fig. 96 耐摩耗材料 4 回轉刃試驗後(3)



Fig. 97 耐摩耗材料 3 固定刃試驗前(1)



Fig. 98 耐摩耗材料 3 固定刃試驗後(1)



Fig. 99 耐摩耗材料 3 固定刃試驗前(2)



Fig. 100 耐摩耗材料 3 固定刃試驗後(2)

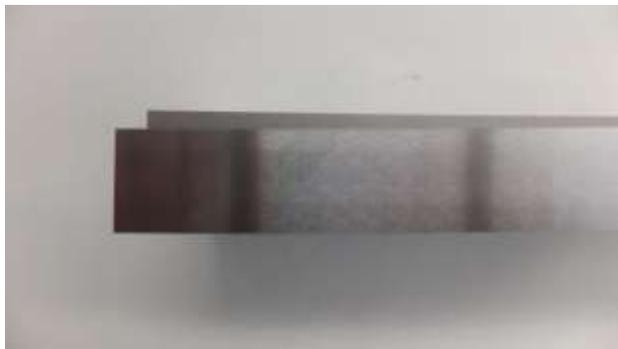


Fig. 101 耐摩耗材料 3 固定刃試驗前(3)



Fig. 102 耐摩耗材料 3 固定刃試驗後(3)

ミニモジュール破砕機における自動車用ハーネスの破砕において、従来材の回転刃および固定刃の最大に摩耗した際の写真を Fig. 103～106 に示す。回転刃の刃先の欠け、および固定刃の刃先が丸くなっていることが観察される。



Fig. 103 従来材の回転刃摩耗状態(1)



Fig. 104 従来材の回転刃摩耗状態(2)



Fig. 105 従来材の固定刃摩耗状態(1)



Fig. 106 従来材の固定刃摩耗状態(2)

### ③まとめ

- (1) 耐摩耗材料 3 で作製した回転刃には、大きな欠けが発生した。これは、硬度が  $HRc=66$  と硬い材料であり、ハーネス投入時に最大負荷か掛かり、欠けが発生したものと推察される。
- (2) 耐摩耗材料 4 は、耐摩耗材料 3 と比較して欠けの発生および摩耗の進展が見られなかった。耐摩耗材料 4 がミニモジュール破砕機に適していると言える。

これらのことより、ミニモジュール破砕機における破砕工程においては、ハーネス投入時の最大負荷時に発生する衝撃に耐えうる耐摩耗材料の選定が必要であり、破砕形態や破砕対称によって、耐摩耗材料の選定が必要不可欠であることが判明した。実機試験の結果は、耐摩耗材料の事業化向けの体制作りに大いに役立つものであった。

## 第3章 総括

### ■実施内容①開発材料の配合成分の検討

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%～13%、Cr、Ni、Mo、W、V、Co量を各種配合した原材料を用いて、乾式アブレシブ摩耗に対応した白鑄鉄系球状炭化物鑄鋼（耐摩耗材料1）、衝撃摩耗に対応した高マンガン系球状炭化物鑄鋼（耐摩耗材料2）、乾式アブレシブ摩耗に対応した多合金系白鑄鉄（耐摩耗材料3）、乾式アブレシブ摩耗に対応した多合金系白鑄鉄（耐摩耗材料4）4種の耐摩耗材料を開発した。開発された材料の溶解を行い、試験片および試作刃を製作した。試験片は、実施内容②における機械的性質の評価に用い、また試作刃は実施内容③における一軸破砕試験機、ギロチン切断試験機および実機試験として外部調査を依頼したミニモジュール破砕機用として開発材料の評価に使用した。

### ■実施内容②開発材料の耐摩耗性など機械的性質の評価

実施内容①において作製された4種材料および比較材としてS50C焼入れ材を供して、褶動摩耗試験を行い、試験の結果から耐摩耗材料1が比較材と比べて、8倍の耐摩耗性が向上することが、判明した。この結果を下に、実施内容③における破砕刃の選定を行い、実施内容①にて制作を行った。

### ■実施内容③試験用部品の試作および検証

一軸破砕試験機およびギロチン切断試験機を導入し、制作された耐摩耗材料の破砕試験を行った。破砕対象物として土砂等含まれた混合材料を用いた一軸破砕試験の結果から、耐摩耗材料3が最も摩耗量が少なく、耐摩耗材料2および4の約5倍の耐摩耗性が得られた。また、ギロチン切断試験では、歪みゲージを用い切断時の応力解析を行い、切断時の刃先に作用する応力は2000MPa以上達することが判明し、耐摩耗材料3が最も耐摩耗性が高い結果となった。

実機試験として、外部企業で所有する破砕機形状に合わせた試作刃を製作し、試験調査を依頼した。試験結果から耐摩耗材料3が最も摩耗量が少なく、優れた耐摩耗性を有していることが判明した。

これらの結果から、(1)褶動摩耗試験では、耐摩耗材料1が最も優れ、比較材の8倍の耐摩耗性を有する。(2)一軸破砕機による土砂状摩耗試験では、耐摩耗材料3が耐摩耗材料2および4の5倍の耐摩耗性を有する。(3)ギロチン切断試験では、耐摩耗材料3が最も耐摩耗性を有する。(4)実機試験においても、耐摩耗材料4が高い耐摩耗性を有していることが判明し、これらのことから、摩耗条件にあった耐摩耗材料を選定し、供給することが事業化における重要な点であることが得られた。