

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高靱性・耐摩耗性鋳鉄材を金型材料に適用するための  
切削加工技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成24年 3月

委託者 ; 四国経済産業局

委託先 ; 財団法人東予産業創造センター

## 目次

### 第1章 研究開発の概要

#### 1-1.

##### 1-1-1 研究開発の背景

##### 1-1-2 研究の目的

##### 1-1-3 研究の概要及び目標

#### 1-2. 研究体制

#### 1-3. 成果概要

#### 1-4. 当該研究開発の連絡窓口

### 第2章 本論

#### 2-1. 鋳鉄材に最適な熱処理技術の確立

##### 2-1-1 熱処理温度と金属組織との関係の理論付け

##### 2-1-2 最適な熱処理条件の検討

##### 2-1-3 耐摩耗性等の評価

#### 2-2. 難削材加工技術の確立

##### 2-2-1 使用工具と切削状況の関係把握

###### (1) 基礎研究

###### (2) 金型製作における加工技術研究

##### 2-2-2 切削加工条件の検討

##### 2-2-3 切削加工と放電加工の最適組合せの検討

#### 2-3. 耐摩耗性金型製造技術の構築

##### 2-3-1 金型の試作

##### 2-3-2 寸法精度、耐摩耗性の評価

##### 2-3-3 追加研究

##### 2-3-4 試作品評価と改良

### 第3章

#### 3-1 全体総括

#### 3-2 事業化

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1.

#### 1-1-1 研究開発の背景

近年、自動車産業では、環境負荷の低減、燃費の向上、衝突安全性の強化などの要求に応えるため、構成部品に小型化・軽量化・薄肉化を求めており、その部品は高強度材使用となってきた。高強度材を使用すると従来のダイキャスト金型では摩耗による消耗が早いことから、高強度材を鑄込むダイキャスト金型に対しても耐摩耗性のある新規材料による製造が求められている。この業界ニーズに応えるため、金型メーカー等の多くは、従来材へのレーザーや電子ビームなどによる表面改質で耐摩耗性に対処しようと研究開発を行っているが、切削加工の後、表面改質をするため歪み等が残り、要求する精度が確保できていない現状にある。

一方当社は、自動車部品の高強度化に伴い、それを製作するダイキャスト金型の耐摩耗性に応えるため高靱性・耐摩耗性のある鑄鉄材料(特許 3737803 号)の適用を試みているが、耐摩耗性鑄鉄材料は難削材であるため加工効率の悪さが課題になっている。尚、当鑄鉄材は切削加工を必要としない分野(スラリー用配管、ミキサー用プロペラ等)においては利用されている。また、耐摩耗性において、焼結炉緩衝板では、旧材質(高クロム鑄鉄)で寿命1年であったが、当材料使用において、3年の寿命を得ている。(球状炭化物材料 P194～P206:球相材料研究会編)

このように当鑄鉄材料の熱処理については一分野でその効果が明らかになっており、切削加工を必要としない部品等には使われるものの、精密加工が必要な金型分野では切削効率の悪さが課題となり利用されていない。

今回使用する上述の鑄鉄材料は、共同研究者である清水教授、(株)三共合金鑄造所らが開発し特許出願(特許:3737803号、発明の名称:球状バナジウム炭化物含有高マンガン鑄鉄材料及びその製造方法)しているもので、**自動車用ダイキャスト金型として当社が実施する許諾を得ており**、この鑄鉄材を使用した耐摩耗性ダイキャスト金型の開発により、業界から当分野への進出に大きな期待を受けている。

#### 1-1-2 研究の目的

自動車産業では鑄造部品の高強度化に伴い、それを製作する金型にも耐摩耗性を求めており、この要求に応えるため高靱性・耐摩耗性を有する新規鑄鉄材の適用を試みるが、熱処理を施した鑄鉄材は難削材であるため、切削加工が困難である。そこで、切削加工の高度化(切削加工と放電加工の最適な組合せ)による低コスト(3分の1以下)での難削材加工技術を確立し、従来金型の3倍以上の耐久性のあるダイキャスト金型を開発する。

#### 1-1-3 研究の概要及び目標

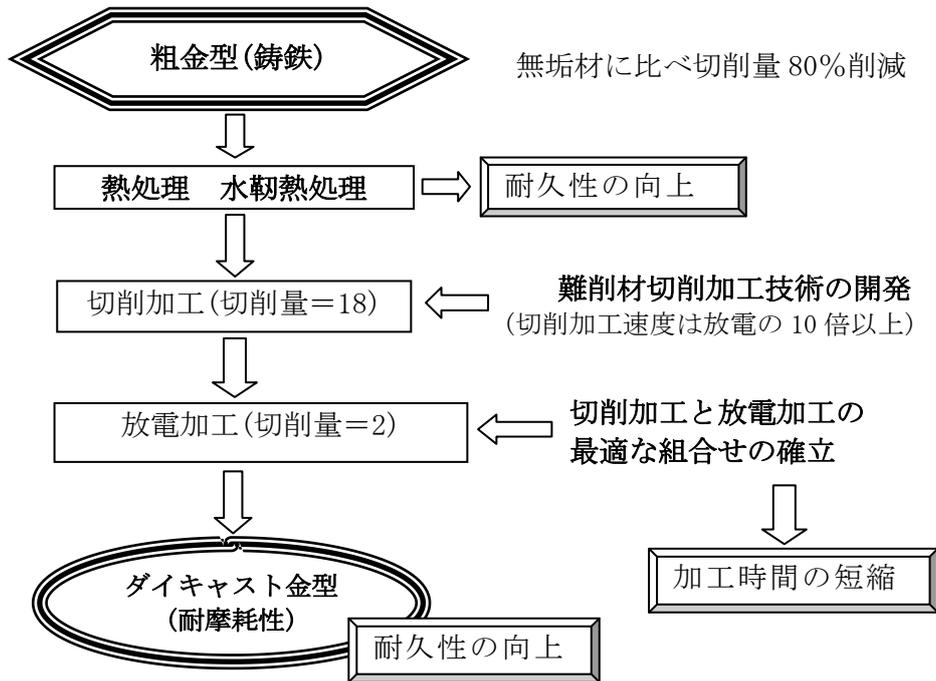
自動車産業では、

①切削加工に係る技術において達成すべき高度化目標は難削材加工対応であり、高靱性素材で難削材とよばれる鑄鉄材に適した工具と加工条件を確立し、最適な切削加工技術(切削加工と放電加工の最適な組合せ)を開発することで、従来の工具鋼並みの加工精度(公差0.003mm以内)の確保と加工時間の短縮(5分の1)を目指す。

②熱処理に係る技術において達成すべき高度化目標は新材料に対応した熱処理技術の向上であり、熱処理の技術開発により、耐摩耗性と熱処理後の切削加工性とのバランスの取れた、鑄鉄材に最適な熱処理条件を見出す。

③金型に係る技術において達成すべき高度化目標は金型の低コスト化や短期間製造等を可能とする新素材・新製造技術の構築であり、高靱性・耐摩耗性鑄鉄材(特許 3737803 号)をダイキャスト金型材料に適用可能にするために、切削加工技術、熱処理技術、鑄造技術(外注)を適切に組み合わせることで達成する。

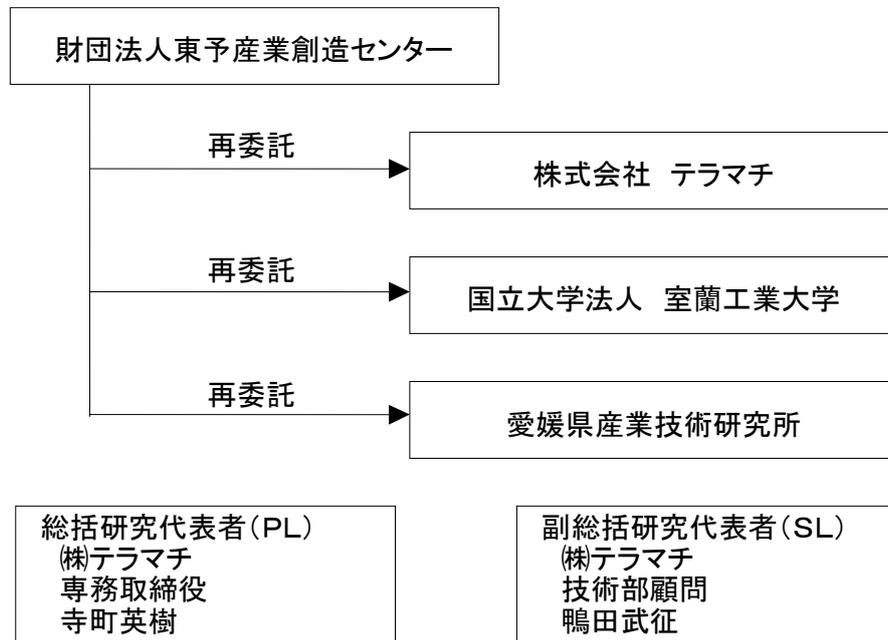
<イメージ図>



1-2. 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

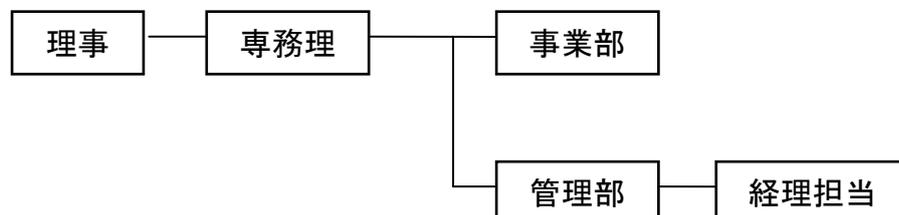
1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

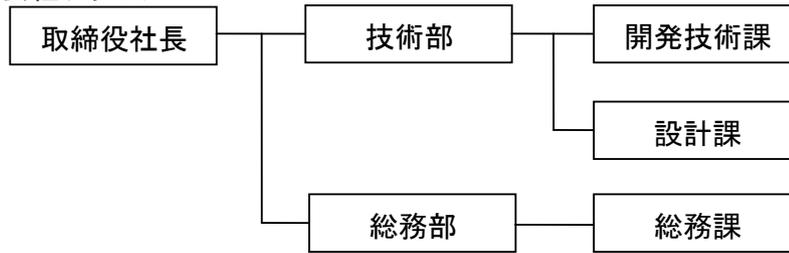
①事業管理者

財団法人東予産業創造センター

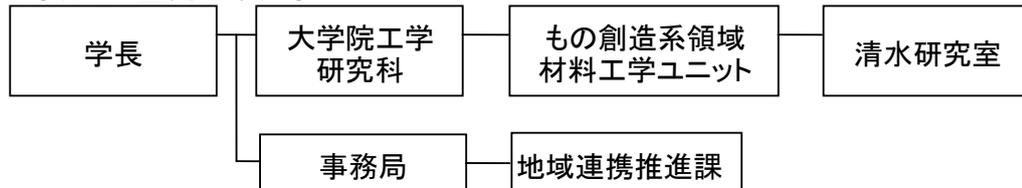


②(再委託先)

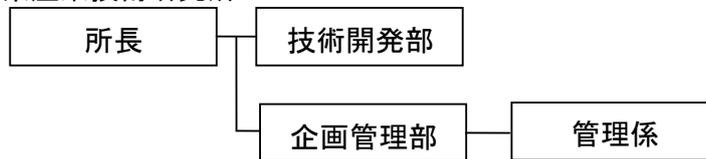
株式会社テラマチ



国立大学法人 室蘭工業大学



愛媛県産業技術研究所



総務・会計・施設管理事務等の総括管理

(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】財団法人東予産業創造センター

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
村上哲也	事業部長	④
越智 学	管理部長	④
寺町英樹	総括研究代表者 (P L) 株式会社テラマチ 専務取締役	④
鴨田武征	副総括研究代表者 (S L) 株式会社テラマチ 技術部顧問	④

【再委託先】

株式会社テラマチ

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
岩瀬昭雄	技術部 顧問	②、③
大久保就浩	技術部 開発技術課 課長代理	①、②、③
伊藤辰徳	技術部 開発技術課	①、②、③
長井万也	技術部 設計課	②、③
松浦啓太	技術部 設計課	①、②
宮下浩咲	金型製造部 製造 2 G	②、③

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	大学院工学研究科 もの創造系領域材料工学ユニット ものづくり基盤センター長 教授 博士(工学)	①-1、①-3、③

愛媛県産業技術研究所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
仙波浩雅	主任研究員	③
藤本俊二	主任研究員	③

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人東予産業創造センター

(経理担当者) 管理部長 越智学

(業務管理者) 事業部長 村上哲也

(再委託先)

株式会社テラマチ

(経理担当者) 総務部総務課 清水敬

(業務管理者) 代表取締役 寺町昌則

国立大学法人 室蘭工業大学

(経理担当者) 事務局 地域連携推進課 川岸斉

(業務管理者) 大学院工学研究科 もの創造系領域材料工学ユニット  
ものづくり基盤センター長  
教授 博士(工学) 清水一道

愛媛県産業技術研究所

(経理担当者) 管理係長 高市宏昭

(業務管理者) 技術開発部 鈴木貴明

(4) 他からの指導・協力者及び指導・協力事項

研究推進会議 委員

氏名	所属・役職	備考
寺町 英樹	株式会社テラマチ 専務取締役	P L
嶋田 武征	株式会社テラマチ 技術部顧問	S L
大久保 就浩	株式会社テラマチ 技術部 開発技術課 課長代理	委
清水 一道	国立大学法人 室蘭工業大学 教授	
鈴木 貴明	愛媛県産業技術研究所 技術開発部長	
藤本 俊二	愛媛県産業技術研究所 主任研究員	
仙波 浩雅	愛媛県産業技術研究所 主任研究員	
松元 秀人	株式会社三共合金鑄造所 専務取締役	アドバイザー

アドバイザー氏名	主な指導・協力事項
松元 秀人	使用する材料に関する指導

### 1-3. 成果概要

#### ① 鋳鉄鉄材に最適な熱処理技術の確立

##### ①-1 熱処理温度と金属組織との関係調査と理論付け

##### ①-2 最適な熱処理条件の検討・試験

高マンガン鋼は熱処理さえ充分であれば、非常に韌性の高いオーステナイト組織であるが、とくに肉厚物では熱伝導率がSKD61等の約1/2と小さいため、内部の冷却速度が遅く、カーバイトあるいはパーライトの析出するおそれがあること、また熱処理の昇温時での割れを発生させる可能性がある。他、金型材料に適用させるためには、結晶の微細化が必要であり、結晶粒界上の炭化物の析出を防ぐことが重要である。

そこで、熱処理条件を決定し、テストを実施した。

結果、結晶の微細化が確認され、硬度の軟化が確認された。

また、懸念事項であった結晶粒界上の炭化物の析出は観察されなかった。

他、水靱処理を施すことにより、微細炭化物の増加などの効果が確認できた。

##### ①-3 耐摩耗性等の評価

KSH-M材のアブレシブ摩耗特性を評価した。その結果を以下に要約する。

- (1) VM2.0C では水靱処理を行うことで耐摩耗性が向上したが、3.5C では顕著な差は見られなかった。
- (2) KSH-M の炭化物は硬さが約 2300HV と高く、摩耗では削り取られず剥離により基地組織から取り除かれるため、剥離を抑えることが重要である。
- (3) VM2.0C は基地組織内の粒上に晶出した VC が水靱処理により粗大化したため、基地組織の硬さが上昇し、摩耗を抑えたと考えられる。
- (4) 各供試材を比較すると、VM3.5C が最も耐摩耗性に優れており、VM2.0C と比較すると約 2/3 程度に摩耗量を抑えた。これは、VM3.5C の硬さ上昇率が著しく高いため、摩耗によるエネルギーを多く吸収したことが考えられる。

KSH-M材の高温エロージョン摩耗特性を評価した。その結果を以下に示す。

- (1) 水靱処理を施した供試材は鋳放し材に比べ、総じてビッカース硬さが増加し、高温環境下におけるエロージョン摩耗を抑えた結果となった。
- (2) 水靱処理を施すことで、より完全なオーステナイト組織を得ることができたと推察される。

#### ② 難削材加工技術の確立

##### ②-1 使用工具と切削状況の関係把握

##### ②-2 切削加工条件の検討

切削加工基礎試験により次のことが明らかとなった。

- (1) 工具を被削材に対して傾けて加工することにより工具寿命が延びる。
- (2) CBN 工具は、本被削材のエンドミル加工に有効である。
- (3) 被削材の C 含有量が高いほど加工は困難である。工具寿命が短い。
- (4) 加工面の加工硬化による硬さは Hv800 程度になる。その深さは1mm 以上に達する。
- (5) C 含有量が高いほど加工硬化が起こり易い。
- (6) 表面粗さは、仕上げ加工で理論あらさの7倍程度となる。

金型製作における加工技術研究により次のことが分かった。

- (1) CBN材の細径ボールエンドミルにおいては、メーカーの違いに差異は少ない。
- (2) CBN材の細径ボールエンドミルの切削では、傾斜角が加工硬化に与える影響は少ない。
- (3) 熱処理の有無で切削性の差異は発生しない。
- (4) 実用的な切削速度は、荒加工の場合、CBNで、50m/min、超硬で、20m/min、仕上げ加工は、CBNで80m/min 程度である。
- (5) 工具の傾斜方向の違いによる背分力の差はほとんどない。
- (6) 放電加工・各種切削加工条件が分かった。

##### ②-3 切削加工と放電加工の最適組合せの検討

上項切削加工基礎試験により、マシニングセンターによる切削加工条件等の把握により、CAMソフトに上記条件を反映し、アルミダイカスト金型を可能な限り、切削するようにシュミレーションし、放電加工時間の削減を検討した。その結果、全加工全てマシニングセンターによる切削加工には出来なかったが、当初想定していた程度より、切削加工時間を増やすことが出来、一定の成果を上げることが出来た。

### ③耐摩耗性金型製造技術の構築

#### ③-1 金型の試作

これまで積み重ねてきた加工技術を駆使し、アルミダイカスト金型の製作を実施した。

今回の金型製作の中では、約 1/3 の加工時間短縮は、ほぼ達成出来た。

但し、当初目的である加工時間短縮 1/5 は、未達成である。が、スケールアップを実施することにより、加工時間短縮 1/5 は、可能であることが分かった。

#### ③-2 寸法精度、耐摩耗性の評価

KSH-M材を使用した金型製作において、マシニング加工は、荒加工部分であるため、理論切削形状と実切削形状の誤差は10μ m程、生じた。が、最終、型彫放電にて仕上げを実施することもあり、最終製品に影響の及ぼさない精度ということで、形状評価を実施した。型彫放電後の寸法評価は、当初の目標通り±3μ mを満足している。

KSH-M材に対するアルミダイカスト試打ちでは初期段階での金型表面に亀甲割れが発生し、金型材料としては対策研究の必要がある。

そこで、材料等を見直す際、KSH-M材と同様の球状炭化物鋳鉄材料KSH-W材に着目しKSH-W材にて追加研究を実施することとした。

##### (1)KSH-W材料の焼戻し曲線・組織変態の実験

KSH-W材の硬度調整のための焼戻し曲線の理解及び材料の組織変態についての研究が必要である。

テラマチ社内にて、各種熱処理ヒートパターンを想定し、実験を実施。

焼戻し曲線及び組織変態のノウハウを得ることが出来た。

##### (2)KSH-W材料金型の製作

KSH-W材料金型を製作するにあたって、KSH-M材の研究結果の応用により可能であった。が、より最適な加工条件を見出すための研究が必要である。

##### (3)KSH-W材金型の耐摩耗性評価

耐摩耗性評価のため、アルミダイカストの実作業にて耐久性を評価した。

テスト結果として、2000ショット終了後、ダイカスト製品及び金型表面を観察。

- ・金型表面に亀甲割れは発生していない。
- ・欠け部を起点とした亀裂進展及び微小鋳巣部からの亀裂進展はなかった。
- ・SKD61と比較して、離型性がよい。

よって、KSH-Wはアルミダイカスト用金型として十分可能性が高いことが確認された。

今後、アルミダイカスト金型材料としてKSH-Wの技術的特性の把握と共に鋳巣が金型表面に出ない鋳込み方法の研究が必要となる。

#### 1-4. 当該研究開発の連絡窓口

会社名:(株)テラマチ

Tel:0898-68-7016

Fax:0898-68-7862

①氏名:寺町 英樹

所属役職:専務取締役

E-mail:h\_teramachi@teramachi.co.jp

②氏名:松浦 啓太

所属部署:開発設計部

E-mail:k\_matsuura@teramachi.co.jp

## 第2章 本論

### 2-1 鋳鉄材に最適な熱処理技術の調査・検討・試験

#### 2-1-1 熱処理温度と金属組織との関係調査と理論付け

#### 2-1-2 最適な熱処理条件の検討

高マンガン鋼は熱処理さえ充分であれば、非常に靱性の高いオーステナイト組織であるが、とくに肉厚物では熱伝導率がSKD61等の約1/2と小さいため、内部の冷却速度が遅く、カーバイトあるいはパーライトの析出するおそれがあり、また熱処理の昇温時での割れを発生させる可能性がある。他、金型材料に適用させるためには、結晶の微細化が必要であり、結晶粒界上の炭化物の析出を防ぐことが重要である。

そこで、過去の研究成果を軸に、熱処理条件を決定し、テストを実施した。

結果、結晶の微細化が確認され、硬度の軟化が確認された。

また、懸念事項であった結晶粒界上の炭化物の析出は観察されなかった。

他、水靱処理を施すことにより、微細炭化物の増加などの効果が確認できた。

現段階では、上記により、耐摩耗性が増すことの期待は出来た。が、その後の研究により、耐摩耗性は向上するものの熱処理費用と耐摩耗性向上の比較では、総合的に考慮した際、熱処理を実施することのメリットがあまり期待出来ないことより、耐摩耗性向上を考慮した本金型製作においては、熱処理なし(AS CAST 状態)にて、金型を製作することにした。

但し、当初の目的である金型の耐久性向上が少しでも必要である場合、引き続き、熱処理温度等の改良・材料組成の改良も考慮するものとする。

#### 2-1-3 耐摩耗性等の評価

KSH-M材のアブレシブ摩耗特性を評価するために、スガ式摩耗試験実験を実施した。

その結果を以下に要約する。

- (1) VM2.0C では水靱処理を行うことで耐摩耗性が向上したが、3.5C では顕著な差は見られなかった。
- (2) KSH-M の炭化物は硬さが約 2300HV と高く、摩耗では削り取られず剥離により基地組織から取り除かれるため、剥離を抑えることが重要である。
- (3) VM2.0C は基地組織内の粒上に晶出した VC が水靱処理により粗大化したため、基地組織の硬さが上昇し、摩耗を抑えたと考えられる。
- (4) 各供試材を比較すると、VM3.5C が最も耐摩耗性に優れており、VM2.0C と比較すると約 2/3 程度に摩耗量を抑えた。これは、VM3.5C の硬さ上昇率が著しく高いため、摩耗によるエネルギーを多く吸収したことが考えられる。

次に、KSH-M材の高温エロージョン摩耗特性を評価するために、高温エロージョン摩耗試験を実施した。

その結果を以下に示す。

- (1) 水靱処理を施した供試材は鋳放し材に比べ、総じてビッカース硬さが増加し、高温環境下におけるエロージョン摩耗を抑えた結果となった。
- (2) 水靱処理を施すことで、より完全なオーステナイト組織を得ることができたと推察される。

以上のことより、高マンガン系球状バナジウム炭化物鋳鉄の高温環境下における耐エロージョン摩耗性向上の要因として、基地組織に晶出している十数  $\mu\text{m}$  のバナジウム炭化物と数  $\mu\text{m}$  の微細なバナジウム炭化物の制御が考えられる。本実験では炭素含有量を 3.5% C とし、水靱処理を施した供試材が、炭化物の形状、分布において最も良好な結果を示し、高温環境下におけるエロージョン摩耗を抑えることができたと言える。

### 2-2 難削材加工技術の確立

#### 2-2-1 使用工具と切削状況の関係把握

##### (1) 基礎研究

##### ① はじめに

難削材材料である高靱性・耐摩耗性鋳鉄材を金型に適用するための、適正な加工条件を把握する目的で、型彫り加工を念頭に置き基礎切削試験を行ったので、その結果について報告する。

## ② 試験方法

角形の被削材を切削動力計の上に取り付けられたチャックに取付け、ボールエンドミルで平面加工を行い、切削抵抗の大きさと工具の損傷状態で切削条件を評価した。

### ②-1 使用機械

三菱重工製 立形5軸マシニングセンタ  $\mu$  V1-5X

主電動機 7.5kw

最高回転数 40,000rpm

### ②-2 切削動力計

キスラー社製 3成分動力計 9257B

測定範囲  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$   $\pm 5$ kN

動力計を機械へ取り付けた状態を図1に示した。

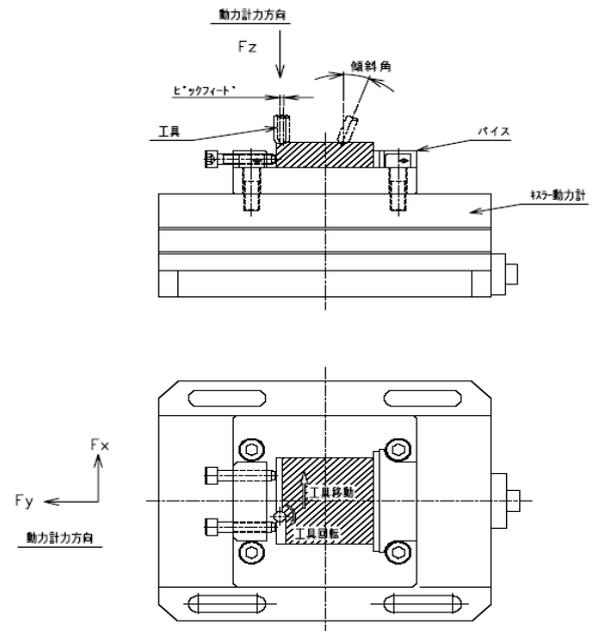


図1 切削動力計の取付け

### ②-3 被削材

球状バナジウム炭化物含有高マンガン鋳鉄

C含有量 2.0%、2.5%、3.0%、3.5% 4種類

大きさ 50mm(縦) × 50mm(横) × 15mm(厚さ)

(試験表面は条件を統一するため、ワイヤーカット又は平面加工実施)

### ②-4 使用工具

先端半径3mmの2枚刃ボールエンドミル

( $L/D=3$  工具突き出し長さ  $L=18$ mm)

使用工具は高硬度材料の加工に適した、超硬材質に表面コーティングを施したもの、及びCBN工具を使用した。

### ②-5 熱処理

今回の試験は熱処理(水靱処理)を実施しない状態で行った。

### ②-6 切削油

油性切削油(出光 マーグプラス ST-25)

### ②-7 工具寿命の判定

予備試験において、背分力は切削の進行に対して、主分力、送り分力よりもその増加が顕著であり、ある値以上で切削中の音や振動が大きくなることがわかった。また、今回の試験では、工具(摩耗)損傷の形態が多種であるため、背分力が基準値以上で工具寿命に達したと仮定した。

### ②-8 試験条件

以下荒加工と表現した加工条件は、

切込深さ 0.5mm、送り 0.04mm 以上/刃、チップフィード 1.0mm であり、仕上げは、

切込深さ 0.2mm、送り 0.02mm 以下/刃、チップフィード 0.5mm である。

また、切削速度は被削材と接触する最大周速で表した。

## ③ 試験結果

### ③-1 工具傾斜角と工具寿命

工具傾斜角と工具寿命(背分力の計測)の関係の実験を実施した。

少しのばらつきはあるものの、工具を傾斜さすことによって工具寿命が長くなることがわかる。ただし、超硬の仕上げ切削においては、工具損傷が、摩滅、チッピング摩耗の形態となってい

た。特に境界部のチッピングや欠けが顕著であったことより超硬工具で本材料を 60m/min 以上で加工するのは無理であると思われる。

CBN 工具の摩耗は大半が正常なすきとり摩耗であり、CBN 工具の硬さが、被削材に含有される非常に硬い炭化物に対抗できる硬さであるといえる。

### ③-2 切削速度と工具寿命

超硬での荒加工時の切削速度 20m/min と 60m/min の切削抵抗を被削材 C 含有量別に実験を実施した。

一般的に抵抗曲線は一律に増加するのではなく、山谷を繰り返す形で増加している。これは、摩耗が単純なすきとり摩耗でなく微小な欠けやチッピングが発生していると推測される。

超硬工具で仕上げ切削の実験を実施した。軽切削であるにもかかわらず、短時間で寿命と設定した閾値を超えた。加工後の工具損傷形態をみると、80m/min では境界部が大きく損傷し、100m/min ではさらに大きく損傷している。切削速度が速すぎるのであろう。超硬工具では切削速度 60m/min は閾値に達する加工時間が、荒、仕上げとも 10 分前後であり、実用的な上限速度を超えている。

CBN 工具の荒加工の摩耗は、傾斜角 0° の切削速度 160m/min を除いて、すべてが正常なすきとり摩耗である。本被削材硬度に十分適応できた工具であると思われる。しかし、切削速度 160m/min は速すぎ、工具寿命が短く工具価格が高価であることより経済的でない。実用的には 60m/min 前後であろう。

### ③-3 被削材 C 含有量と切削抵抗

超硬工具で加工したときの被削材 C 含有量の違いによる切削抵抗の実験を実施した。全体的に見ると、切削諸元にかかわらず、C 量の増加に比例して工具寿命は短くなるといえる。素材の硬さは C 含有量による違いがないことから、組織中に分散された球状炭化物が工具の損傷に大きく影響していると考えられる。

### ③-4 加工硬化について

高マンガン鋳鉄が難削材である理由は、非常に硬い球状炭化物が分散されていることにあるが、加えて加工硬化を起こし易い特徴があるためと考えられる。

各種加工諸元における加工開始からの切削長さごとの断面のマイクロビッカース硬さを測定した。

高マンガン鋳鉄材の内部硬さは、Hv450 程度であった。

従って、それ以上の硬さを示した部分は、加工硬化したと考えられる。

結果より、硬化層の最大硬さは Hv800 程度となることがわかる。また、最大硬さ(加工表面硬さ)は加工条件が異なってもほとんど同じであった。

被削材の C 含有量と加工硬化の関係は、C%が高いものほど表面硬さが高く、硬化層深さも深くなることが分かった。

仕上げ切削における加工硬化の実験を実施した。CBN 工具では背分力が閾値に達したときの切削長が超硬工具の約 10 倍であったが、このときにほぼ同様の加工硬化程度を示している。

硬化層深さは、切削長さに比例して深くなることが分かった。(ここで示した硬化層深さとは、Hv500 以上の硬さとなった深さとした)言い換えれば、切削抵抗(背分力)の増加、すなわち切れ味の低下によって硬化層はより深くなると言える。その最大深さは 1mm 以上に達することが分かった。

図 2 に加工終了部(切削長さ約 2250mm)表面の断面組織の拡大写真を示した。写真でも明らかのように、表面は工具の押付けと回転により塑性流動が見られ、加工硬化を起こしていることがわかる。

本試験の高マンガン鋳鉄のエンドミル加工では、加工硬化のないワイヤーカット面の切削とエンドミル加工した面での切削で、ほぼ同じ工具寿命であったことより、工具寿命を支配しているのは、球状炭化物であり加工硬化の影響は少ないと思われる。

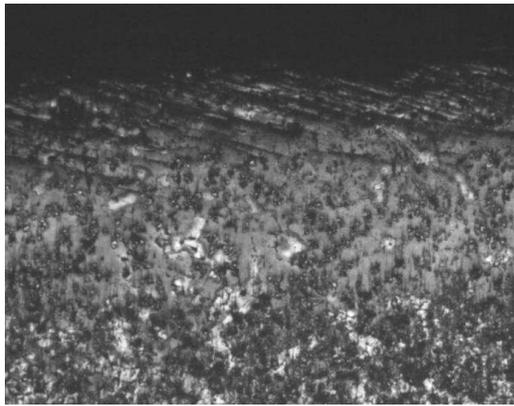


図2 加工硬化断面部の拡大写真(No.3-3) ×50

### ③-5 加工面あらしについて

今回の試験で加工した試料の表面あらしを測定した。

荒加工、仕上げ加工とも工具軌跡から計算される理論荒さより、悪い粗さとなっている。特に仕上げでは、理論あらしの7倍程度の荒さとなっている。原因として図2に示したような表面組織の塑性変形(加工硬化)の影響が大きいと思われる。

### ③-6 まとめ

代表的な難削材である高マンガン鑄鉄(KSH-M)のボールエンドミルでの切削加工試験により次のことが明らかとなった。

- 1) 工具を被削材に対して傾けて加工することにより工具寿命が延びる。
- 2) CBN 工具は、本被削材のエンドミル加工に有効である。
- 3) 被削材のC含有量が高いほど加工は困難である。工具寿命が短い。
- 4) 加工面の加工硬化による硬さはHv800程度になる。その深さは1mm以上に達する。
- 5) C含有量が高いほど加工硬化が起こり易い。
- 6) 表面粗さは、仕上げ加工で理論あらしの7倍程度となる。

## (2) 金型製作における加工技術研究

### ①概要

基礎研究は、一般に難削材といわれる高靱性・耐摩耗性鑄鉄材料(球状バナジウム炭化物含有高マンガン鑄鉄)の切削性能を、超硬合金にコーティング被覆した工具及び1種類のCBN工具のエンドミル加工で評価し、一定の成果が得られた。

よって、上記基礎研究結果を踏まえて、CBN工具を使用して、金型製作における型彫りに関する加工技術を中心に研究した。

### ② 細径ボールエンドミルの加工

型彫り加工においては、コーナRや微細彫刻部の加工が必須条件となるため、φ2のボールエンドミルでの切削試験を行った。

#### ②-1 工具メーカーの比較

工具メーカーによって、切削性能がどの程度異なるかの切削試験を実施した。

結果、工具メーカーによる差は、殆どなかった。

#### ②-2 工具傾斜角

φ6ボールエンドミル切削試験において、傾斜切削により若干の工具寿命の増加が期待できる結果を報告した。本報では、細径ボールエンドミルで試験し、その効果を確認した。

試験結果として、傾斜角を適切にセットすれば、寿命が長いことが分かった。

ここで、各傾斜角での加工力波形に着目した。きつい傾斜角は、プラス方向の背分力が大きいだけでなく、マイナス方向の背分力も大きくなっている。これは、傾斜をつけたことによって円周方向の加工力が、被削材を持ち上げる方向に働いたためと思われる。背分力の振幅が大きくなることも、ビビリ振動発生要因の一つと思われる。

CBN工具でのボールエンドミル加工を対象としたとき、加工硬化による硬さの増加は、均一に分散された球状炭化物の硬さから見れば、それほど問題とならない。最も、寿命に影響するのは球状炭化物である。

## ②-3 細径仕上げ切削のまとめ

難削材といわれる KSH-M の型彫り仕上げ加工(ボールエンドミルを使用した仕上げ切削)は、十分に可能であることが分かった。

## ③ 切削加工条件の検討

### ③-1 熱処理が加工条件に及ぼす影響

基礎研究で、KSH-M 材料を熱処理することにより、組織が微細化し、生地硬度が軟化する事が確認された。ここでは、熱処理の有無が被削性に及ぼす影響について実験した。

その結果、2.5% C では熱処理した方が被削性が良く、3.0% C では、熱処理しない方が良くなった。この結果のみで、熱処理が被削性に及ぼす影響を判断することは困難だが、加工時の振動、音等の様子及び、使用済み工具の摩耗状況から、熱処理前後の被削性はほとんど同等であると思われる。

### ③-2 V-T 線図

球状バナジウム炭化物含有高マンガン鋳鉄(KSH-M)をボールエンドミルによる切削加工の、V-T線図を得た。

よって、荒加工の場合、仕上げ加工の場合、それぞれの実用的な切削速度の理解が出来た。

### ③-3 工具の傾斜方向と背分力

工具を傾斜させる(被削材を傾斜)加工が、寿命延長に効果があることは、すでに述べた。現実的な型彫り加工においては、刃先は三次元の動きをするため、工具傾斜を同一に保つことは困難である。ここでは、工具傾斜の方向が寿命(背分力)に対して影響するかを確認した。

加工はダウンカットで、傾斜は工具中心が被削材に接触しない方向に傾けた。

結果、傾斜方向の違いによる背分力の差は、殆どなかった。

### ③-4 フィードバック制御による多軸加工

難削材の M/C 加工において、最も注意しなければならないのは、加工中の工具の破損である。工具の破損は、場合によっては、被加工物に重大な損傷を与えるだけでなく、M/C 本体を傷つけることもある。本研究開発では、これらを未然に防ぐ方法として、切削動力計の負荷信号を M/C に取り込み、それにより M/C の動きを制御する方法を試みた。

#### ③-4-1 フィードバック制御の概要

##### 1) フィードバック信号

M/C テーブルに固定したキスラー多成分動力計の 3 成分アナログ信号をフィードバック信号とする。

- ・キスラー多成分動力計 型式 9129AA
- ・測定範囲  $F_x, F_y, F_z$  共  $\pm 10\text{kN}$
- ・プレート大きさ  $90 \times 105(\text{mm})$

##### M/C 制御対象

制御対象は送り速度のオーバーライドとする。このオーバーライドは送り方向に関係なく移動速度に適用される。制御は、入力された信号を常時監視し、2種類の設定値を設け、これを超えた場合に M/C を制御する。一つは、送り速度の減速指示(オーバーライド値の変更)で、もう一つは、異常停止指示(加工中断)とした。制御対象として送り速度のほか回転速度も考慮するのが望ましいが、開発に使用する M/C( $\mu V1-5X$ )には回転速度のオーバーライド機能が標準装備されていないため今回は断念した。

##### 2) M/C の改造

###### (ア) システム構成

図4にシステム構成を示した。

###### (イ) フィードバック制御計画と工事

制御の計画は、M/C 製造メーカーの三菱重工殿と(株)テラマチにより共同で行い、既設 NC システムの変更と新規追加モジュール追加等は三菱重工殿が実施した。

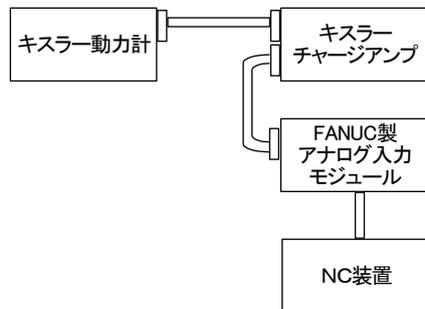


図 3 フィードバック制御システム構成



図 4 モジュール追加部

### ③-4-2 加工実験

図 5 に加工実験中の外観を示した。



図 5 加工試験外観

#### 1) 端部よりの一方向繰り返し加工

N/C制御の設定をフィードバック制御とし、他の切削試験と同様に、端部より切削加工を実施したときの動力計波形例を図6に示した。

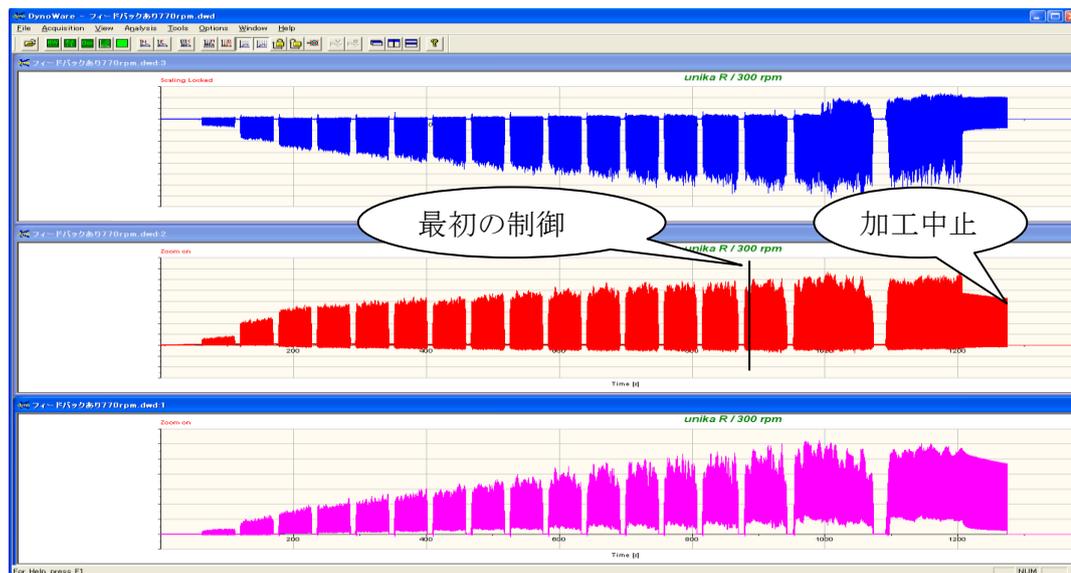


図 6. フィードバック制御した波形例

本実験は、工具寿命の短い超硬工具で行った。図において加工開始からの3パスは非定常状態であり無視するが、その後の加工も1パスごとに抵抗が増加し、設定閾値を超えた時間が設定時間に達したとき、最初の制御(オーバーライドの変更)が実施される。制御はその後も継続され、設定した回数(本実験は10回)のオーバーライドの変更が行われると加工は中止される。従って制御によって停止される直前の1パス時間はかなり長くなる、これは図からも読み取れる。③-3項で述べたように、送りのオーバーライド変更による、切削抵抗の減少は僅かであるため、制御が実施されても、大幅な寿命時間(切削抵抗が設定時間に到達するまでの時間)の増加は望めない。

## 2) 端部よりの連続回転加工

矩形の被削材を一定の傾斜角で、外周より連続回転加工したときの波形例を図7に示した。この加工では各辺の加工ごとに主分力と背分力 ( $F_x$ と $F_y$ ) が入れ替わる。また、傾斜角方向も各辺によって異なる。

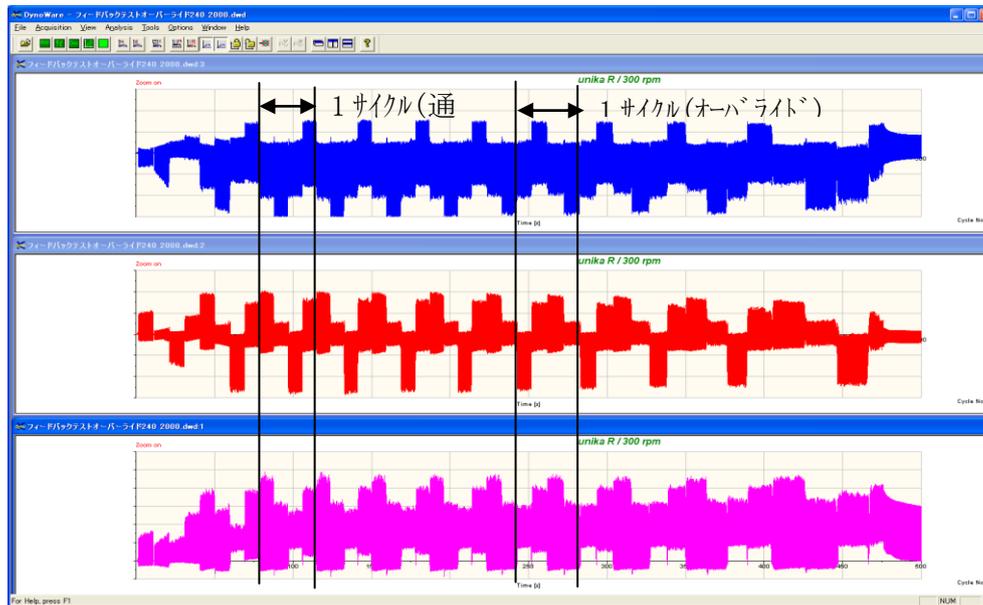


図7 フィードバック制御した波形例

### ③-4-3 フィードバック制御加工の考察

フィードバック制御加工をすることにより、工具摩耗による過負荷を確実に防止できることが分かった。これを有効に活用するには、的確な閾値の入力が必要である。

また、この開発により、実用化に向けての今後の課題として、以下の考慮が重要であることが分かった。

- 1) 高速回転のため、波形周期が 10ms 以下となり、通常のNC装置のAD変換では、ほぼ波形周期と同じ変換時間が必要となり、現象を適確に捕らえることが出来ないため、高速AD変換に対応できる制御器が必要となる。
- 2) 送り速度のオーバーライド変更は、機械、工具の保護には有効であるが、加工能率を下げることになる。このため、主軸回転のオーバーライドを検討する必要がある。
- 3) さらに、型彫り加工などで、図7のような複雑な波形に対応して、オーバーライドを上げ下げ出来るようにして、加工能率を向上させることが望ましい。

### 2-2-2 切削加工条件の検討

切削基礎研究及び金型製作における加工技術研究において、下記項目の加工条件が把握出来た。

- 1) 放電切断(ワイヤーカット)
- 2) 放電加工(型彫)
- 3) 加工(ドリル)
- 4) タップ加工
- 5) 平面フライス加工
- 6) 研削加工

### 2-2-3 切削加工と放電加工の最適組合せの検討

切削加工基礎試験等により、マシニングセンターによる切削加工条件の概略把握が出来た。そのことにより、CAMソフトに上記条件を反映し、アルミダイカスト金型を可能な限り、切削するようにシミュレーションし、ミニコンロッド金型、及びコンロッド金型の放電加工時間の削減を検討した。その結果、以下のような組合せにて、アルミダイカスト金型の製作が実施出来た。

表 1 ミニコンロッド加工時間実績

	SKD61		KSH-M	
	MC 荒加工	10.27H	超硬	
MC 仕上加工	1.5H	超硬	1.83H	CBN
放電加工	2.5H		3H	
磨き加工	4H		4H	
トータル時間	18.27H		8.83H	
加工時間比率	100%		48.33%	
削減率	-		51.67%	



図 8

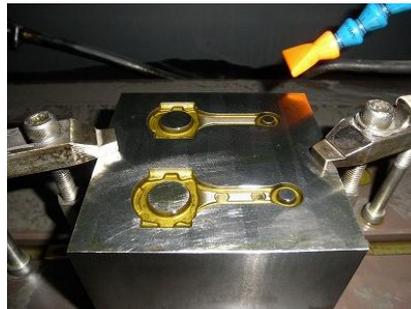


図 9

表 2 コンロッド加工時間実績

	SKD61		KSH-M	
	MC 荒加工	32.5H	超硬	
MC 仕上加工	4.5H	超硬	5.5H	CBN
放電加工	4.42H		5.25H	
磨き加工	8H		8H	
トータル時間	48.42H		18.75H	
加工時間比率	100%		37.94%	
削減率	-		62.06%	

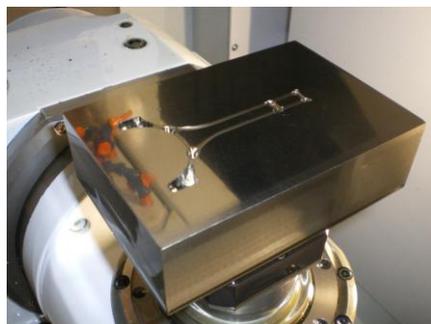


図 10 コンロッド金型

今回の金型製作の中では、約 1/3 の加工時間短縮は、ほぼ達成出来た。但し、当初目的である加工時間短縮 1/5 は、未達成である。が、スケールアップを実施することにより、加工時間短縮 1/5 は、可能であることが分かった。

## 2-3. 耐摩耗性金型製造技術の構築

### 2-3-1 金型の試作

#### ダイカスト金型の製作

ここまで積み重ねてきた加工技術を駆使し、アルミダイカスト金型の製作を実施した。  
室蘭工業大学の研究結果及び共同研究機関と協議の上、C=3.0%を採用した。

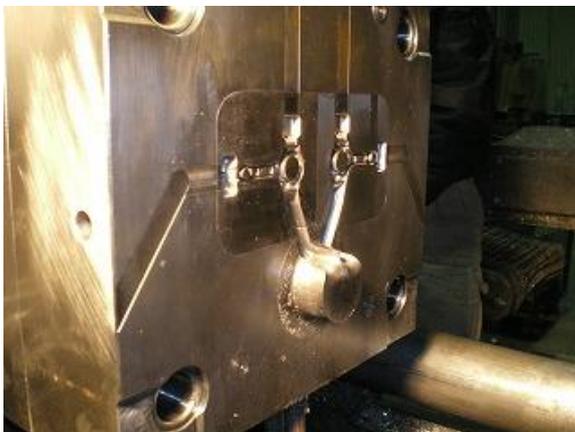


図 11



図 12

### 2-3-2 寸法精度、耐摩耗性の評価

#### (1) 金型の加工精度評価

KSH-M材を使用した金型製作において、荒加工部分であるため、理論切削形状と実切削形状の誤差は $10\mu\text{m}$ 程生じたが、最終、型彫放電にて仕上げを実施することもあり、最終製品に影響を及ぼさない精度ということで、満足できる形状であった。

#### (2) 金型の耐摩耗性評価

耐摩耗性評価のため、アルミダイカストの実作業にて耐久性を評価した。

テスト材料 ; ADC12

溶湯温度 ;  $680^{\circ}\text{C}$

成形機能力 ; 125t

試験方法 ; SKD61 と、KSH-M 2ヶ取りの同時射出方式

冷却 ; SKD61 KSH-M 同じ冷却方式

離型剤 ; SKD61 KSH-M 同じ

テスト結果 ; 20ショット目から、KSH-M金型の表面に亀裂が発生。

引き続き、テストを実施すると、下記写真のような亀甲割れがアルミ溶湯の接する部分に全て発生している。

SKD61金型は、全く問題なし。



図 13. KSH-M用金型 耐久テスト後①



図 14. KSH-M製品 50ショット後

### 2-3-3 追加研究

前項の報告にあるように、KSH-M材に対するアルミダイカスト試打ちでは初期段階での金型表面に亀甲割れが発生し、金型材料としては対策研究の必要がある。

そこで、材料等を見直す際、KSH-M材と同様の球状炭化物鑄鉄材料KSH-W材に着目した。以下に基本化学成分・硬度・機械的性質・マイクロ組織を記載する。

下記表から分かるように、KSH-M材と同様の材料で、抗張力及び衝撃値が高く、熱処理にて任意に硬度の調整が出来ることにより、KSH-M材より、良い結果が出るのではないかとの見解に達し、急遽、KSH-W材にて追加研究を実施することとした。

	基本化学成分						
	C	Si	Mn	Ni	Cr	V	他
KSH-M	3	0.5	13	-	-	12.8	-
KSH-W	3	1	0.4	<5	-	12.8	Mo

	硬度			機械的性質			マイクロ組織	
	ショア (HS)	ロックウェル (HRc)	ブリネル (HB)	抗張力 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	衝撃値 (J/cm <sup>2</sup> )	基地組織	炭化物
KSH-M	40→80	30→60	260→650	450≦	5≦	5≦	オーステナイト	球状V炭化物
KSH-W	54~85	40~62	370~700	マルテンサイト 1000~1300 ベイナイト+マルテンサイト 700~800	-	10~20	マルテンサイト もしくは ベイナイト+マルテンサイト	球状V炭化物

#### (1) KSH-W材料の焼戻し曲線・組織変態の実験

KSH-W材の硬度調整のための焼戻し曲線の理解及び材料の組織変態についての研究が必要である。テラマチ社内にて、各種熱処理ヒートパターンを想定し、実験を実施。焼戻し曲線及び組織変態のノウハウを得ることが出来た。

#### (2) KSH-W材料金型の製作

KSH-W材料金型を製作するにあたって、KSH-M材の加工条件の応用により製作したが、より最適な加工条件を見出すための研究が必要である。

#### (3) KSH-W材金型の耐摩耗性評価

耐摩耗性評価のため、アルミダイカストの実作業にて耐久性を評価した。

テスト材料 ; ADC12

溶湯温度 ; 680°C

成形機能力 ; 125t

試験方法 ; SKD61 と、KSH-W 2ヶ取りの同時射出方式

冷却 ; SKD61 KSH-W 同じ冷却方式

離型剤 ; SKD61 KSH-W 同じ

#### (4) KSH-W テスト結果

##### ① 2000ショット終了後、ダイカスト製品及び金型表面を観察

- ・金型表面に亀甲割れは発生していない。
- ・欠け部を起点とした亀裂進展及び微小鑄巣部からの亀裂進展はなかった。
- ・SKD61と比較して、離型性がよい。

KSH-Wの表面硬度をHRc53と高くしたことが効いているのであろう。

SKD61はHRc50の硬さとした場合、耐久性が著しくおちることが経験則で把握している。

##### ② 実験打ち切り

2000ショットから先の耐久性はKSH-Mのような短時間での亀裂発生がないこと、また、実験初期からの変化がないことから、経験的に、SKD61とほぼ同等ではないかと判断し、2000ショットで実験の打ち切りをした。

結果 ; KSH-Wはアルミダイカスト用金型として十分可能性が高いことが確認された。

#### (5) KSH-W材金型製作

KSH-W材は熱処理により硬度をコントロールすることが出来る材料であり、KSH-Mより被

削性が優れていることは、切削実験にて確認した。

但し、今回の熱処理実験でも確認されたが、ある一定以上の急加熱を与えることにより、割れを発生させる可能性があるため、薄肉部など急加熱につながらない様な粗切削形状にする必要がある。

#### (6) 今後の課題

今回の追加実験の為、急遽、鑄込みを実施したとはいえ、KSH-W材に鑄巣が発生した。一方、繰り返し熱衝撃が加わる使用環境にも関わらず、その鑄巣を起点とした割れ進展がなかったことより、アルミダイカスト金型材料として十分に強い材料であることが分かった。今後、アルミダイカスト金型材料としてKSH-Wの技術的特性の把握と共に鑄巣が金型表面に出ない鑄込み方法の研究が必要となる。

#### 2-3-4 試作品評価と改良

KSH-M材にて、小型金型を製作し実際にアルミダイカスト鑄込み試験を実施したが、金型表面にヒートチェック(毛割れ)が発生し耐摩耗性確認をするところまでは至らなかった。

原因としては、

- 1) KSH-M 金型にき裂が発生した主要因は、SKD61 金型と比較して、硬さ、引張強さ及び衝撃値が低いことが挙げられる。
- 2) アルミ溶湯の射出及び表面温度変化に伴って、発生する圧縮、引張の内部応力の繰り返しにより、マトリックス中の VC の密集から、 $\Delta K_{th}$  下限界応力拡大係数範囲が大きくなり、疲労き裂の発生、伝播が主な原因ではないかと考えられる。

対策としては、高温で溶解温度の制御を行い、VC の密集や鑄造欠陥を回避することが重要である。

上記、対策を実施するために、鑄造方案の見直し及び金型形状の見直しを実施する。

### 第3章

#### 3-1 全体総括

自動車産業ではアルミ鑄造品の高強度化要求に伴い、それを製作する鑄造用金型には耐摩耗性が求められている。又、産業用の機械部品類(インペラー、粉流体移送部品、破碎機刃物、ショベル刃等々)にも耐摩耗性の高い材料とその機械加工部品が期待されている。

国内の大学・研究機関と素材メーカーの努力で従来使われてきた「工具鋼」を越える耐摩耗性鑄鉄&鑄鋼材料が開発されてきたが機械部品として経済的に切削加工することが出来ず鑄放状態で使用できる範囲での使用に限られて来た。

この特殊耐摩耗鑄鉄・鑄鋼品を経済的に切削できる技術を開発できれば産業界の要求する産業機械向け高耐摩耗機械部品、高耐摩耗金型を新たなビジネスに出来る。

特に、切削除去量の大きい金型に適用できれば価格・技術で大きな差別化が期待できる。

そこで、切削加工の高度化、即ち「耐摩耗性の高い材料の難削材加工技術」を確立し新たなビジネス領域として企業発展に寄与すべく開発挑戦した。

開発は、基礎的な切削試験からスタートし、切削刃物材料、切削速度等々の基礎データを得た。さらに、刃先の加工部全てで切削速度がゼロとまらない傾斜切削を採用し、尚且つ、刃物に発生する背分力を切削機械にフィードバックして加工諸元を制御する加工法を提案・採用することで安全に、経済的に切削可能な施工法を開発できた。

これにより、従来、切削加工を諦めていた難削材である耐摩耗性機械部品も、切削加工を取り入れた部品製作が可能となった。

既に現在、難削材といわれる各種特殊材を使った「破碎機用回転刃+固定刃」、「切断刃」などを、開発した加工技術で製作し試験稼動中である。その耐摩耗性能の確立が待たれるところである。

一方、特殊耐摩耗性鑄鉄材料の自動車向けアルミ鑄造品用金型への適用のための、経済的金型製作技術を確立することに挑戦した。従来の工具鋼ブロックからの削り出しによる製作では切削除去量が大きく、非経済的である。かといって、特殊耐摩耗性鑄鉄材料では切削加工が困難であるところから敬遠されている。ここでは、この難題を解決するため、開発した切削加工法と放電加工の組み合わせにより小型金型を製作し、アルミダイキャストのテスト生産を試み評価した。

その結果、切削除去量が激減する効果と放電切削を最小化することにより小型金型の加工

時間を従来比1/3にすることが出来、中型以上になると従来比1/5も可能である見通しが得られた。

今回製作したKSH-M材小型金型のテスト生産では、金型表面にヒートチェック(毛割れ)が発生し耐摩耗性確認するところまでは至らなかった。本研究に使用した金型素材は、高韌性耐摩耗性鑄鉄・球状バナジウム炭化物含有高マンガン鑄鉄材料(特許3737803号)であり高温耐摩耗性試験も良い結果が出ていることから、この原因は明らかでない。原因究明と、材料改良が今後の課題である。

尚、同様種類の耐摩耗難削材KSH-Wで同様の小型金型を製作しアルミダイカスト鑄込み試験を追加的に実施した。結果として、耐久性の実証は出来た。

よって、今後は、KSH-M材に関する改良も視野に入れ、同様種類の耐摩耗難削材KSH-Wで同様の小型金型を製作しアルミダイカスト金型への適用を実施する。

### 3-2 事業化

事業化環境はこの2~3年で大きく変化している。中でも激しい円高により「日本のものづくり」の空洞化が懸念されている。加えて「東日本大震災」、「タイ・大洪水」による「ものづくり拠点」の大打撃と国内ものづくりには大きな逆風が吹いている。

日本の強みであった「金型」もこのような環境の中、積極的な海外移転が進み、特に小型金型は地域政策で積極的な海外移転が進み、本研究で意図した領域も厳しさが増している。しかし、今回、鑄鉄材料を金型材料に適用出来る見込みがついたことより、更なる改良を加え、事業化を目指すものとする。

また、上記のような市場環境の中で、元来、経済的に加工できないと考えられてきた国内開発の耐摩耗性特殊鑄鉄を本開発で加工可能とすることが出来たことにより、新たな耐摩耗機械部品が組み込み可能となる。

このことにより機械メーカーも製品の高付加価値化が図れ、当社も供給部品の高付加価値化が図れることにより相互にメリットを享受できる関係での事業化が期待できる。

共同研究企業である(株)三共合金鑄造所殿から各種「切断刃」、「ポンプ用インペラー・ケーシング」「スクリュー」、「食品用刃物」等の難削材加工相談を受けており又、破碎機用刃物材を研究している企業からは「特殊Co系」、「特殊Cr系」、等々耐摩耗性は確認できているが加工が出来ず、諦めていた機械部品の検討依頼等が来ている。

上記、現実的な対応及び一部開発的対応を進めつつ、四国経済産業局様のご支援のもと各方面へPRしつつ事業形態の確立、販路開拓活動を実施する。