

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

難加工材の高温板鍛造プレス加工における高機能金型の開発

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 山野井精機株式会社

「この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成 11 年法律第 42 号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。」

# 目次

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
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 研究開発の成果	
2. 1 高温板鍛造プレス加工	8
2. 1-1 加熱・冷却制御方法の開発	8
2. 1-2 板鍛造加工	1 1
2. 2 プレス加工金型用表面処理技術の開発	1 4
2. 2-1 複合処理	1 4
2. 2-2 新規 PVD 炭素系被膜	1 8
第3章 全体総括	2 0

## 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

#### 研究開発の背景

#### ○軽量化への対応

自動車を始めるとする輸送関連の産業において、CO<sub>2</sub>排出量削減のため軽量化は必要不可欠となっている。そのような状況において、軽金属材料の適用は軽量化への対応として大きく期待されており、特に実用金属中で最軽量であるマグネシウムは、輸送関連への適用について様々な研究開発が行われ、ダイカスト製品を中心とし、除々に使用量が増えつつある。

#### ○展伸材成形の進展

軽量化および複雑形状化を解決すべくマグネシウム合金展伸材技術開発が進展している。輸送関連への適用のためには、広幅な板や室温での成形性向上、歩止まりの改善などの実現が必要不可欠となっている。

#### ○複雑形状化への対応

中国などとの低コスト化競争に勝ち抜くため、各製品の部品点数削減が強く求められている。その結果、各部品形状は益々複雑化している。特に自動車部品ではその傾向が強く、プレス製品では従来の2次元形状から3次元複雑形状を実現するニーズが増加している。

#### 研究開発の目的

軽量化、複雑形状への対応や従来に無い展伸材成形方法の開発のため、難加工材（マグネシウム合金）を150トン級のプレス機を使用し、450℃の高温で高耐久性を有する金型コーティング技術を確立し、高温板鍛造技術による自動車部品の製造を目的とする。

#### 研究開発の概要

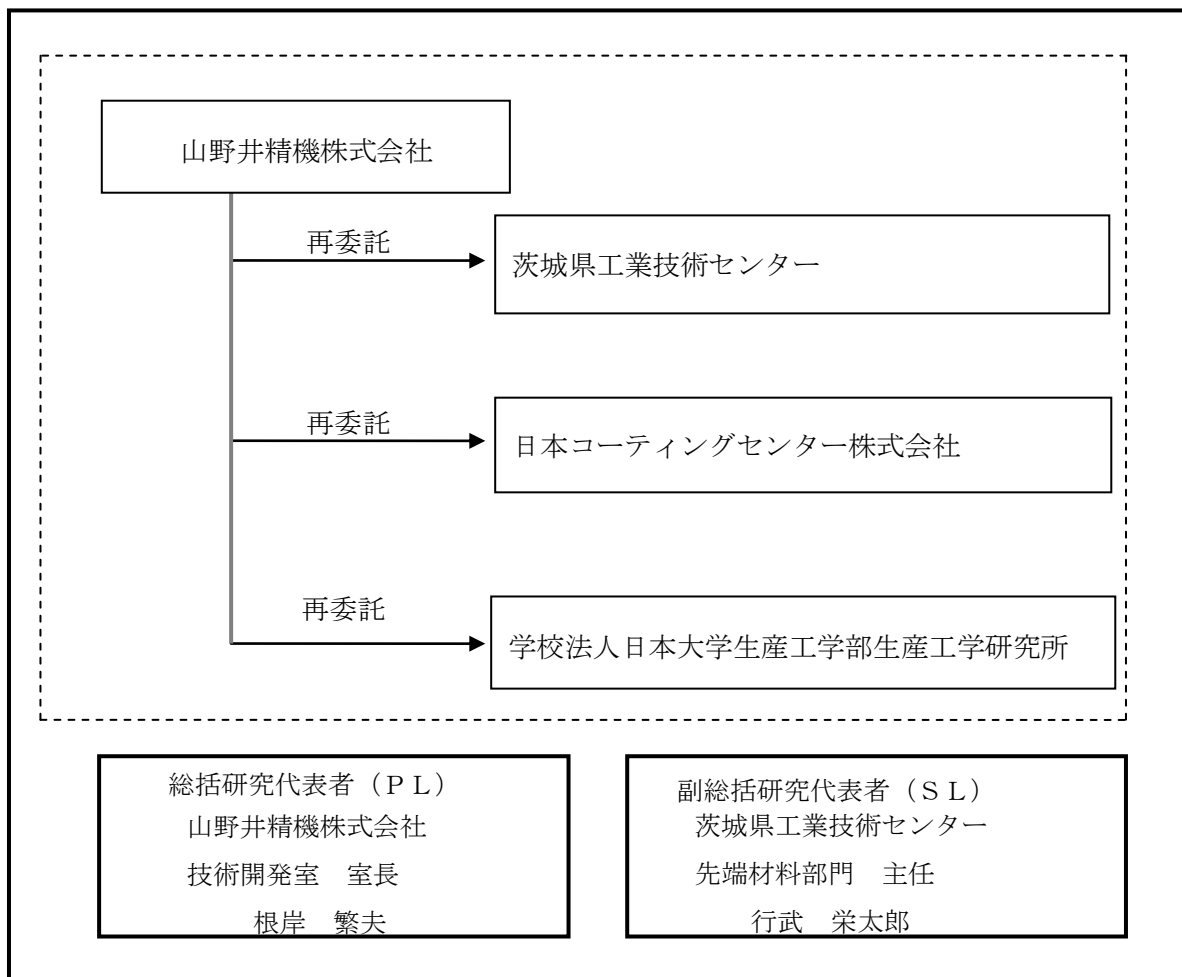
難加工材である「マグネシウム合金」を対象とした高温域における板鍛造プレス加工の技術を確立し製品化システムを構築する。

自動車の外装部品を製作することを目的として「マグネシウム合金展伸材での3次元形状のプレス加工技術の確立」、「熱源を使用した鍛造成形に耐えうる高剛性の金型の設計」、「小さなプレス能力で大きな鍛造プレス品を製造する技術の開発」を実施する。

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

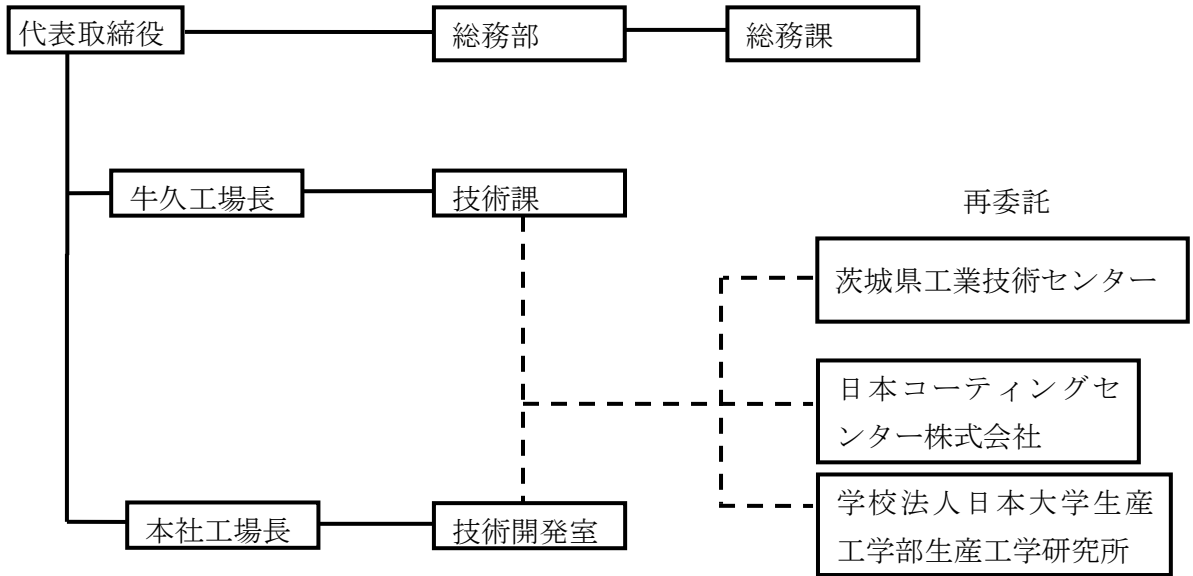
1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

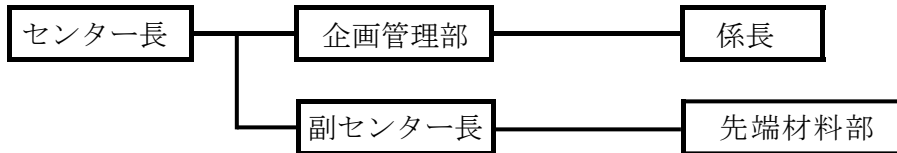
①事業管理機関

[山野井精機株式会社]

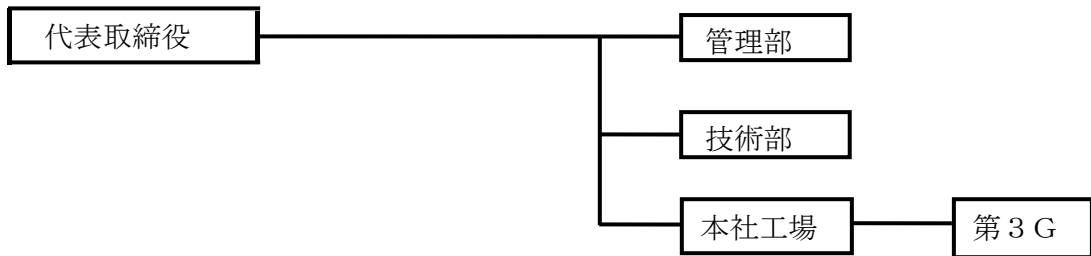


② 再委託先

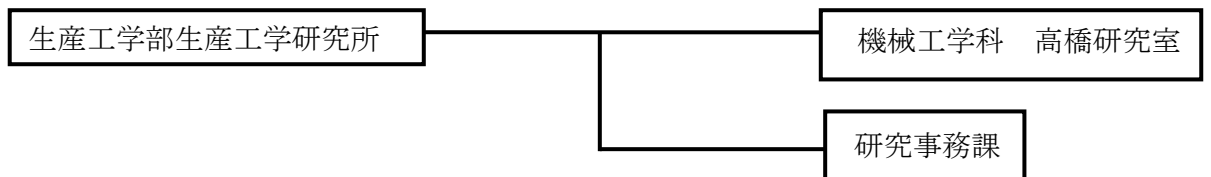
茨城県工業技術センター



日本コーティングセンター株式会社



学校法人日本大学



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 山野井精機株式会社

①管理員

氏名	所属・役職
北泉 正男	本社工場長
根岸 繁夫	技術開発室 室長

②研究員

氏名	所属・役職
根岸 繁夫(再)	技術開発室 室長
幸田 稔	技術開発室 主任研究員
秋谷 俊之	技術開発室 研究員
大山 智弘	技術課
笹本 陽平	技術課

【再委託先】

茨城県工業技術センター

氏名	所属・役職
斎藤 和哉	先端材料部門 部門長
行武 栄太郎	先端材料部門 主任
早乙女 秀丸	先端材料部門 技師
上田 聖	先端材料部門 技師
石川 裕理	先端材料部門 技師

日本コーティングセンター株式会社

氏名	所属・役職
川名 淳雄	取締役 技術部長
斉藤 邦夫	技術部 主任
岡田 英一	技術部

学校法人日本大学生産工学部生産工学研究所

氏名	所属・役職
高橋 進	機械工学科 教授

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

山野井精機株式会社

(経理担当者)	総務部長	坂本 良雄
(業務管理者)	本社工場長	北泉 正男

(再委託先)

茨城県工業技術センター

(経理担当者)	企画管理部 係長	岡見 八重子
(業務管理者)	副センター長	佐川 克雄

日本コーティングセンター株式会社

(経理担当者)	管理部 主任	伊東 大介
(業務管理者)	取締役技術部長	川名 淳雄

学校法人日本大学生産工学部生産工学研究所

(経理担当者)	研究事務課	鈴木 典紘
(業務管理者)	機械工学科教授	高橋 進

(4) 他からの指導・協力者

氏名	所属・役職	備考
小原 久	一般社団法人日本マグネシウム協会 専務理事	アドバイザー
加藤 数良	学校法人日本大学生産工学部生産工学研究所 機械工学科 教授	アドバイザー
佐藤 雅彦	日本金属株式会社 マグネ事業部販売グループ グループ長	アドバイザー
小泉 重人	三協マテリアル株式会社 マグネシウム統括部 課長	アドバイザー
井上 正士	不二ライトメタル株式会社 生産本部 西日本事業部 資材 生産部付 押出商品開発担当部長	アドバイザー
椋沢 均	株式会社日本テクノ 代表取締役	アドバイザー



### 1-3 成果概要

#### [高温板鍛造プレス加工]

##### 加熱・冷却方法の開発

- ・過熱蒸気で素材加熱すると、短時間（10秒以内）で300℃程度まで到達可能
- ・カードリッジヒーターをパンチを囲むように配置し、金型を断熱材で囲むことで、パンチ、ダイ表面温度の温度を設定温度の±10℃以内に制御可能

##### 板鍛造加工

- ・成形品のエッジを鋭利化するには350℃以上の加工温度が必要
- ・350℃以上で板鍛造しても結晶粒は粗大化しない（AZ31圧延材）
- ・400℃以上で位置決めピン成形を行うと目標値φ3.0mm以上のピン（6本）が150トンプレス機で成形可能

#### [プレス加工金型用表面処理技術の開発]

##### 複合処理

- ・室温では金型表面を複合ブラストすることで摩擦係数が低下したが、高温では低下
- ・複合ブラストを施した表面にDLCコーティングすることで摩擦係数が低下
- ・室温では金型表面を荒らすことで摩擦抵抗は低減するが、高温では材料剛性が低下するため、荒れた金型表面に材料が入りこみ摩擦抵抗が高くなる
- ・プレス加工時（高い面圧力）に近い状態での金型コーティングの耐磨耗、耐凝着性の新しい評価方法を開発

##### 新規PVD炭素系皮膜の検討

- ・カーボン系複合被膜をPVD硬質膜と組み合わせて、Mg合金加工用の表面処理コーティングを開発
- ・W（タングステン）系の皮膜はマグネシウム合金に対して高い耐凝着性を示す
- ・Cr系、Mo系の皮膜でも高温での耐凝着性が期待できる

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

##### ①事業管理機関

山野井精機株式会社 本社（最寄り駅：つくばエクスプレス/守谷駅）

〒300-2347 茨城県つくばみらい市豊体 1670-3

##### ②研究実施場所（主たる研究実施場所については下線表記）

山野井精機株式会社牛久工場（最寄り駅：常磐線/牛久駅）

〒300-2347 茨城県牛久市奥原町 1650-10

TEL 029-875-2400 FAX 029-875-2123

技術開発室 室長 根岸繁夫

E-mail negishi-sg@yamanoiseiki.co.jp

茨城県工業技術センター（最寄り駅：水戸駅から関東鉄道バス/警察学校前）

〒311-3195 茨城県東茨城郡茨城町長岡 3781-1

TEL 029-293-7212 FAX 029-293-8029

先端材料部門 主任 行武栄太郎

E-mail yukutake@kougise.pref.ibaraki.jp

## 第2章 研究開発の成果

### 2.1 高温板鍛造プレス加工

#### 2.1-1 加熱・冷却制御方法の開発

##### ・流体方式による加熱・冷却方法

本研究開発では、金型の加熱方法を検討し、効率的かつ精度の高い温度制御をおこなう方法の開発を進めるため、過熱蒸気による加熱方法を検討した。

過熱蒸気とは大気圧下で100℃の飽和蒸気をさらに加熱した蒸気である。一般的に飽和蒸気は温度が少しでも低下すると凝縮して水になってしまうが、過熱蒸気は100℃以上に加熱できるため温度が低下しても気体であり続けるため、水による腐食の影響がなく、物を乾燥、焼成することが可能。また、無酸素状態で加熱できるため素材の表面酸化を防ぐことができる。特に、マグネシウム合金のような酸化しやすい素材の加熱には有効である。さらには、過熱蒸気は高温気体や排ガスと比べ熱容量が大きいため、少量・短時間で加熱が可能である。図2.1.1に装置概略を示す。



図 2.1.1 過熱蒸気発生装置概略

#### 過熱蒸気発生装置

本研究開発では新熱工業株式会社の過熱蒸気発生装置（アクアスチームヒーター）を用いて実験を行った。過熱蒸気は500℃まで加熱可能である。気体圧力は大気圧で約0.2MPaである。装置は、過熱蒸気発生装置と蒸気発生装置（ボイラー）の2つで構成されている。ボイラーにより飽和蒸気（100℃）を発生させ、その蒸気を用いて過熱蒸気発生装置により500℃まで数分で加熱する。加熱後は連続的に500℃の過熱蒸気を発生する。

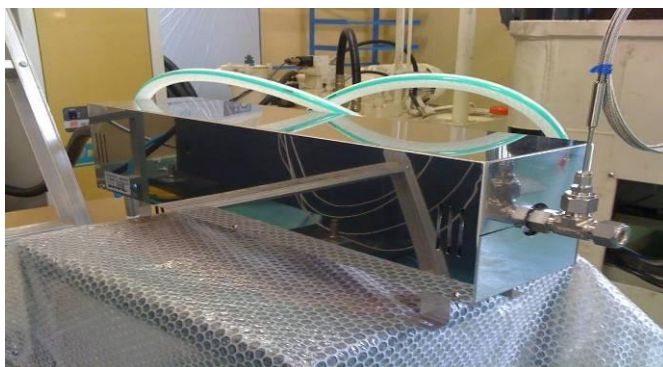


図 2.1.2 過熱蒸気発生装置

伝熱解析（シミュレーション）と実測で金型温度上昇を測定した結果を述べた。シミュレーション（結果：図 2.1.3）では 500℃の過熱蒸気（流速：0.1m/s）を流した結果、金型表面温度は最大約 200℃までしか上昇しない。これは、SKD（鉄）と過熱蒸気（水）との熱容量に大きな差があることが原因であることが考えられる。金型表面は入口付近で約 212℃を示し、出口付近では約 200℃を示す。このことから温度差は 10℃以上ある。マグネシウム合金をプレスするには金型温度分布±5℃以下にする必要があるため、10℃以上の温度差は問題である。また、500℃の過熱蒸気を利用して金型は 200℃程度しか上昇しない。

流速 0.1m/s では金型加熱が困難であるため、流速を上げ総流量を上げて金型を 30 分以上過熱したが金型温度は最高 320℃程度までしか上昇しなかった。これでは、400℃以上の板鍛造プレスは困難と判断し、素材の予備加熱に過熱蒸気を用いることにした。

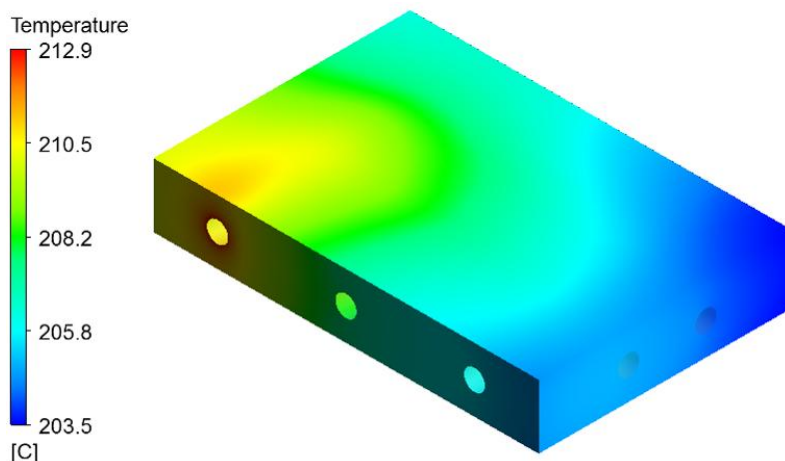


図 2.1.3 シミュレーション解析結果

過熱蒸気による素材プレ加熱では、金型と素材が接することなく加熱できるため、素材表面に傷が入りにくい。また、金型による加熱法より過熱蒸気を用いると短時間で素材加熱が可能となる。図 2.1.4 に金型加熱と加熱蒸気による加熱温度上昇速度の違いを示す。

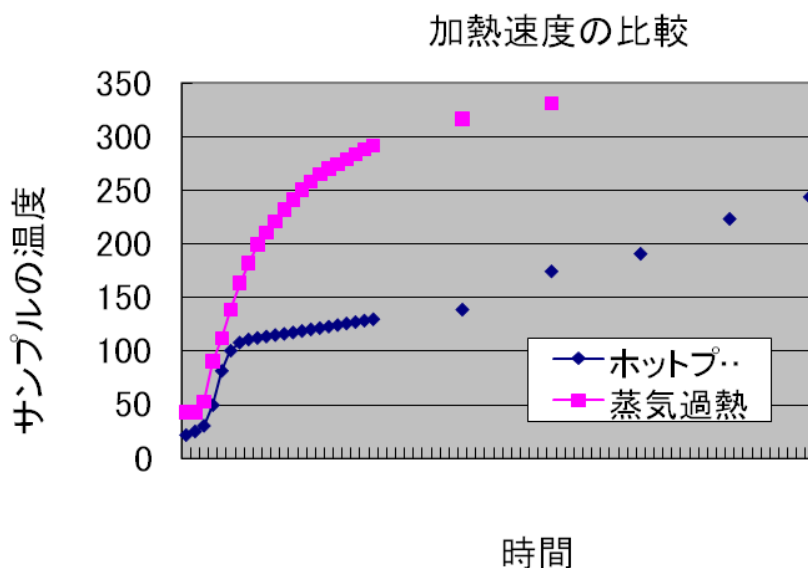


図 2.1.4 シミュレーション解析結果

過熱蒸気では素材（AZ31 マグネシウム合金：板厚 2.0mm）が 1 分以内で 250℃まで上昇したが、ホットプレートでは約 120℃までしか上昇しない。ホットプレートで 250℃まで上昇するには 5 分以上かかった。しかし、500℃の過熱蒸気を吹き付け最大 350℃まで上昇した。過熱蒸気での加熱は短時間で可能である。また、500℃の過熱蒸気を吹き付けてもマグネシウムの表面状態は健全であり、酸化した形跡は確認されなかった（目視）。

#### ・カードリッジヒーターによる金型温度分布の均一化（300℃～450℃）

##### 金型加熱カードリッジ配置

金型加熱方法としてカードリッジヒータによる均一加熱方法の検討を行った。図 2.1.5 に金型ヒータ配置を示す。

金型全体を断熱材に囲むことで、さらなる温度分布の均一化を狙った。さらには、保温機能を高めることで電力消費量及びプレス加工時の金型温度変化を小さくすることに成功した。

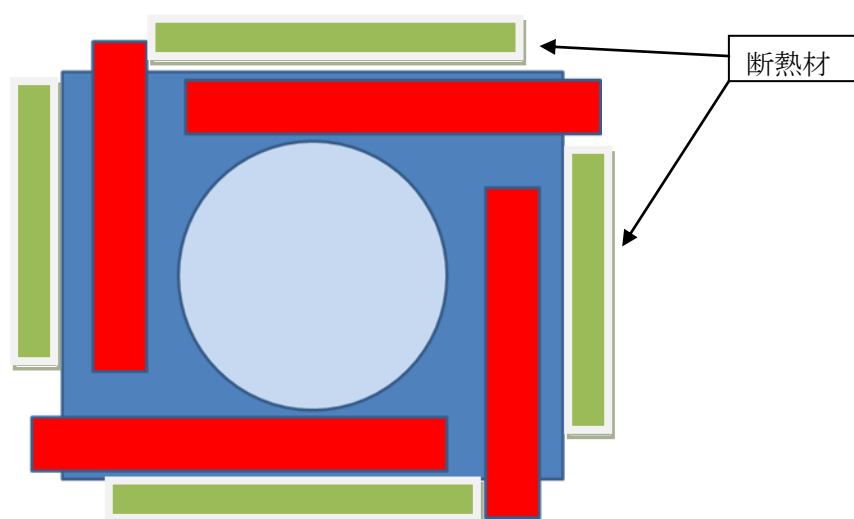
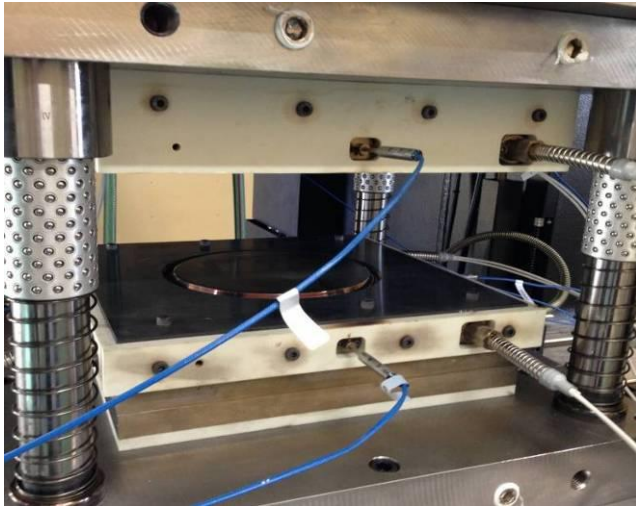


図 2.1.5 ヒーター、断熱材配置図

設定温度 300℃では、断熱材が無いとプレート温度は設定値に対して±10℃以内に収まっているが、パンチ表面温度は 30℃程度低い。しかし、断熱材で囲むことでパンチ、ダイ共に設定温度と金型表面温度が±10℃以内となる。

設定温度 400℃では、断熱材が無くてもプレート温度は設定温度とほぼ同等（±5℃以内）である。しかし、パンチは 30℃以上の温度差が発生する。しかし、断熱材で囲むことでその温度分布のむらは小さくなった。

金型温度を上昇させると、温度むらが小さくなり安定する傾向にある。しかし、プレートとパンチとでは温度差が 10℃以上あり、更なる加熱方法の更なる検討が必要。また、ヒーター出力、金型の熱膨張率を考慮すると、精度よくプレス加工するには 450℃が限界と考えられる。



- ・金型を断熱材で囲むことで、カードリッジヒーターを用いても 400℃において、金型内温度±5℃以内を達成
- ・消費電力量の減少 (省エネ)

## 2.1-2 板鍛造

- ・プレス曲げ・絞り加工の融合

### 金型設計

図 2.1.7 新たに検討した金型構成を示す。増押しを一つの金型で実現するためにパンチを可動式にすることで二段式パンチ金型の可能性を検討した。

パンチ稼働にはスプリングを用い、ストロークにより稼働するようにした。また、サーボプレス機械を用いることで速度変化及び停止することで材料特性を最大限に利用できるようにモーションプログラムを検討した。

## プレス曲げ・絞り融合金型概略

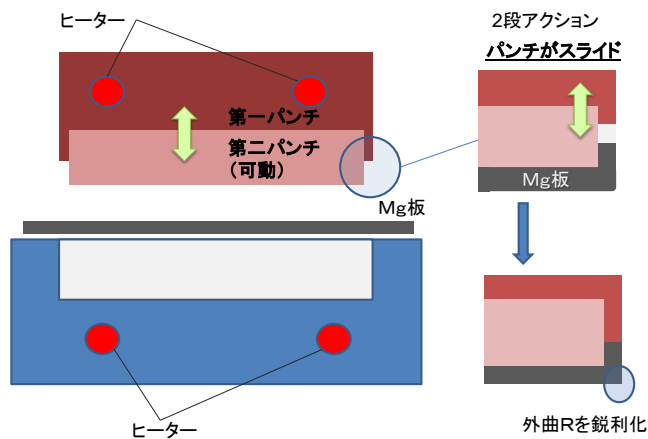


図 2. 1.6 可動式パンチ金型

新しく開発した金型により各温度でプレス加工試験を行い、ピン角成形を行った。図 2.1.7 に各条件でのコーナー部断面を示す。350℃ではまだ不十分であり、R2 以上の曲率が確認できる。400℃で加工した結果、ピン角に成功した。450℃では潤滑材のテフロンシートの

耐熱温度以上のため、テフロンシートが溶けてしまいプレス加工が不可能であった。また、400℃以上ではバリの発生が著しい。

## コーナー断面

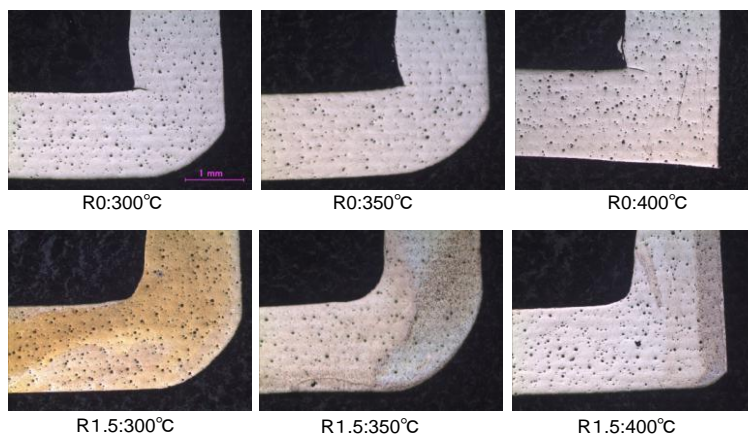


図 2. 1.7 ピン角成形

### ・製品試作（自動車部品）

本研究開発の最終ターゲットは、自動車用部品の製作である。そこで、本研究開発技術を用いて自動車部品用金型（絞り型，決め型）を試作し，プレス加工製品を試作した。

絞り型，決め型共に温間金型であり，絞り加工は350℃～400℃で加工した。決め型では250℃程度で加工することで，400℃で加工するより寸法精度が向上した。

図 2.1.8 に実製品との比較写真を示す。実製品は射出成型品（樹脂）であり，今回は更なる軽量化と高剛性を実現するため，難加工材であるマグネシウム合金で試作を行っ。

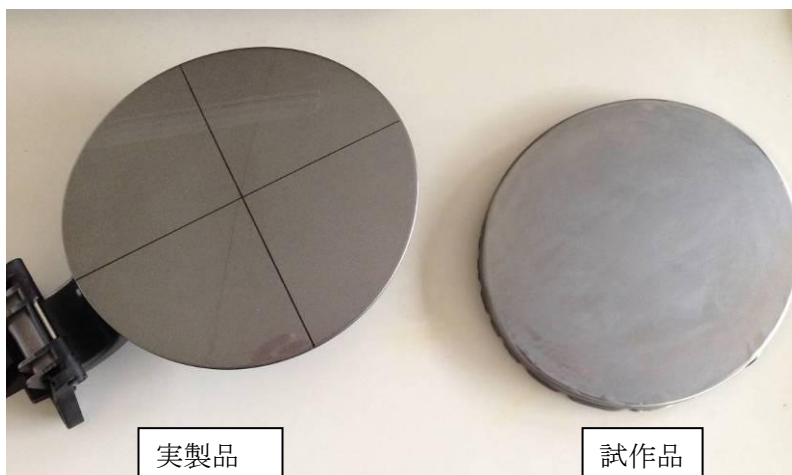


図 2. 1.8 実製品と試作の比較

### ・成形後の製品搬出システムの設計・製作

図 2.1.9 のようにプレス加工によって部品同士を締結する際の位置決め用のピンを成形することが可能であれば、取り付け易さを向上し、加工コスト等を抑えることが期待できる。さらには、成形後の搬出（抜き工程）でもピンによる位置決めは重要である。また、順送型では、トランスファー用のアームのリセット位置としてもピンは必要である。

そこで、部品を締結する際の位置決めピンの成形方法を確立するため、FEM シミュレーションを用いて、ピン成形のメカニズム解明および成形方法を検討した。

図 2.1.10 に材料の機械的性質の温度依存性を実験により求め、解析した結果を示す。この結果より、400℃でプレス加工することで、目標とする高さ 3mm、 $\phi 2\text{mm}$  の突起を 6 個、150 トンプレス機で成形できることがわかった。材料の拘束条件<sup>1</sup>を検討することで、最適な搬出（抜き行程）条件を見出だした。

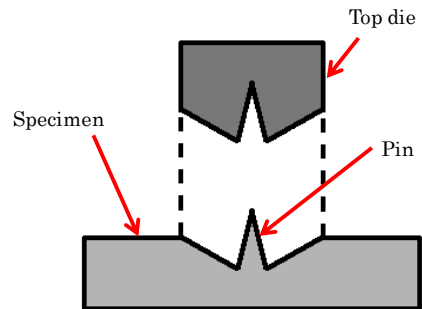


図 2.1.9 位置決めピン

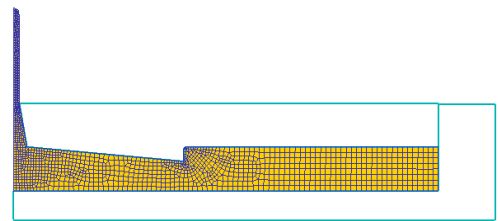


図 2.1.10 ピン成形のシミュレーション



## 2. 2 プレス加工金型用表面処理技術の開発

表面処理等のプレス後 2 次加工（洗浄，脱脂等）をスムーズに行うための新しい金型コーティングを開発する。具体的には、複合処理（窒化処理+被膜）、表面形状（ショット等によるくぼみ成形での油だまり形成、接触面積の減少）及び新規 PVD・炭素系被膜（PTFE に迫る低摩擦係数を示す被膜）の開発を行い、これら技術を融合することで潤滑油レスもしくは微量の潤滑油でも高温板鍛造が可能な新金型コーティング膜開発を行う。また、カーボン系新規被膜と PVD 法によるセラミックス硬質膜を組み合わせた潤滑性、耐摩耗性、耐熱性をもつ複合被膜を金型表面に被覆することにより、無潤滑でのプレス成型性に優れた金型コーティング技術を検討した。

### 2. 2-1 複合処理

1) 表面テクスチュア（JWBSA）と被膜を複合させると BOD 試験で低摩擦係数を示す。表面テクスチュア（JWBSA）は、図 2.2.1 に示す各種エアーツールを用いて、鏡面状態の SKD11 テストピースの表面形状を変化させた。各種エアーツールの内訳を表 2.2.1 に示す。これらを図 2.2.2 のように組み合わせて、計 16 通りの処理を行った。



図 2.2.1 各種エアーツール

表 2.2.1 エアーツールの内訳

J	治具ブラスト
W	ショットブラスト(鉄球)
B	ショットブラスト(ガラスビーズ)
S	研磨機(乾式)
A	研磨機(湿式)

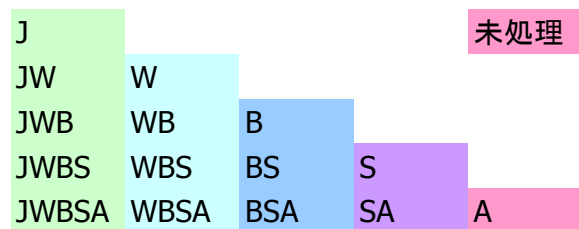


図 2.2.2 エアーツールの組み合わせ

処理後のテストピースに DLC（Diamond Like Carbon）を成膜し、Mg 合金（AZ31）との摩擦摩耗特性をボールオンディスク試験機（以下、BOD と記す）で評価した。その結果、表面テクスチュア（JWBSA）と被膜を複合させると BOD 試験で低摩擦係数を示した。

### ・高温特性評価、耐熱温度の検討

350°C近い成形温度で Mg を試打ちしたところ、全ての表面処理で Mg が凝着した。表面テクスチャ (JWBSA) に DLC コーティングをしたダイスで 350°Cでの試験を行ったところ、凝着した。図に示すように高温でのボールオンディスク摩耗試験では低摩擦係数を示したが、試作金型では凝着を発生していた。

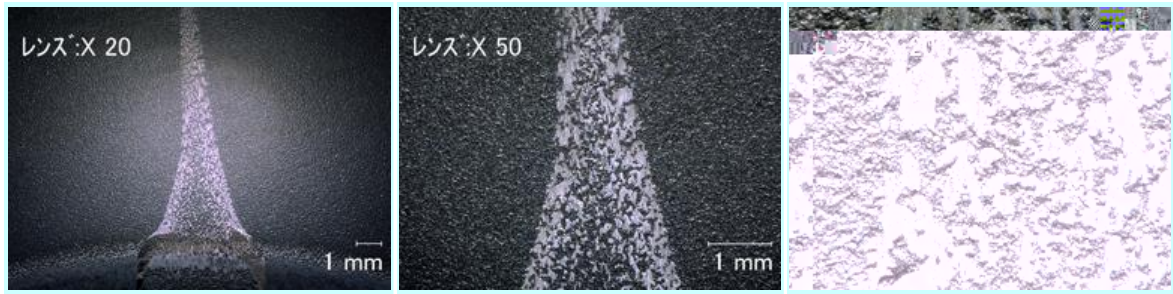


図 2.2.3 350°C加工後のダイス表面

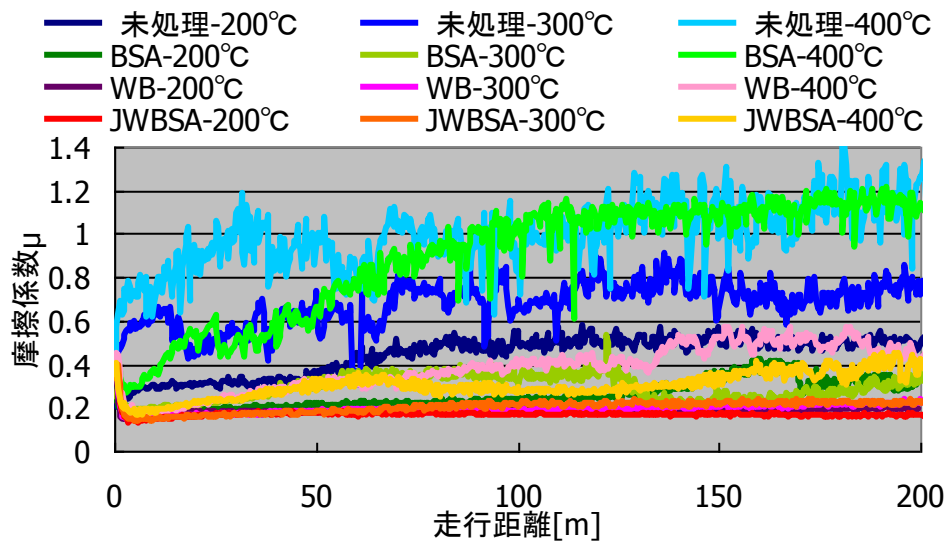


図 2.2.4 高温時における摩擦摩耗特性

① DLC（スリックコート）の耐凝着性評価

・金属含有 DLC、スリックコート F の結果を以下に示す。鏡面ではかなり Mg が凝着しており、JWBSA の表面粗さに Mg が押し付けられて埋まっている。

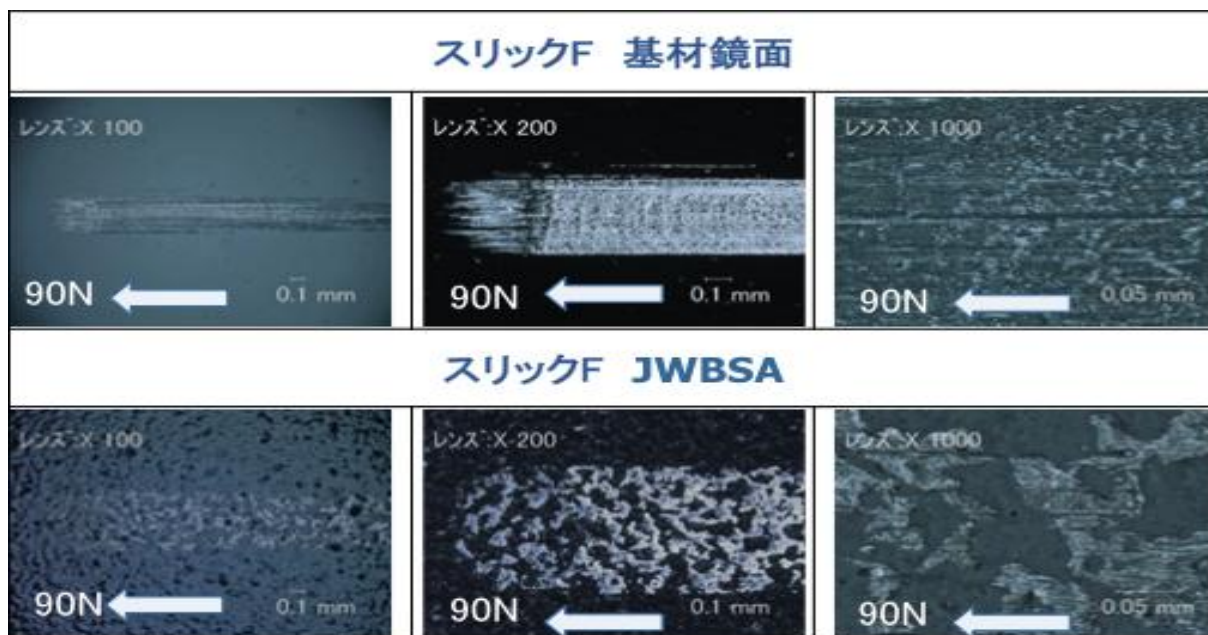


図 2.2.5 スリック F のスクラッチ試験結果

・スリックコート H の結果を以下に示す。鏡面ではかなり Mg が僅かに凝着している。JWBSA の表面粗さに Mg が押し付けられて埋まっている。スリック F ほど凝着は濃くない。

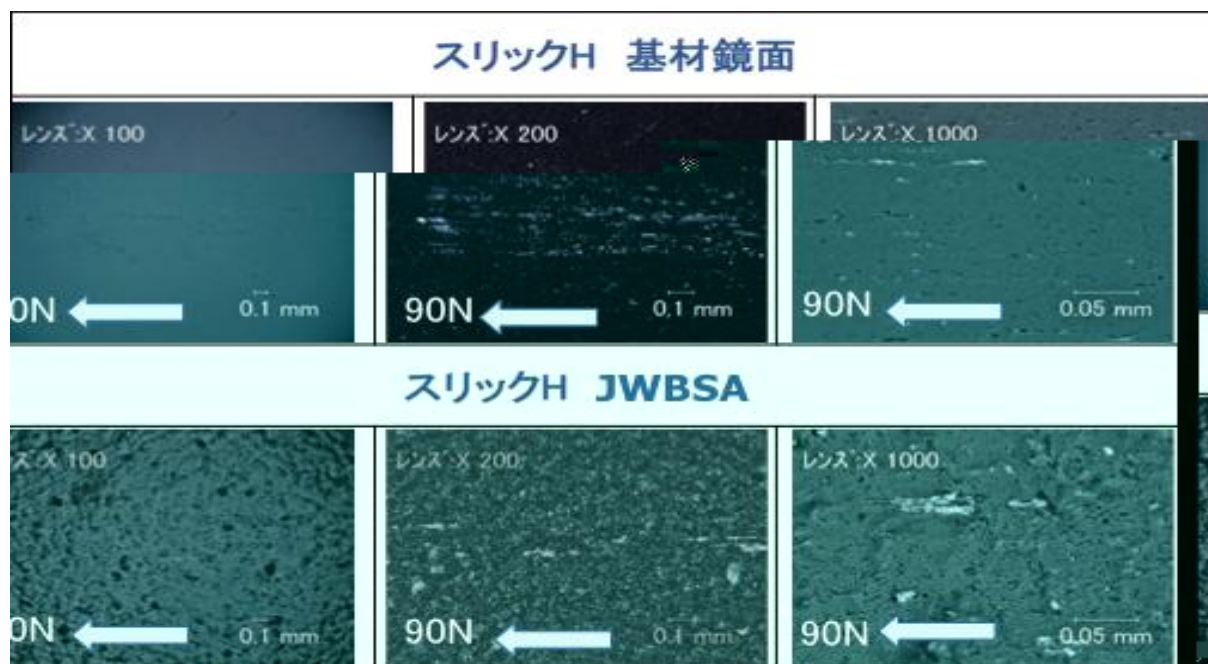


図 2.2.6 スリック H のスクラッチ試験結果

・スリックコート S の結果を以下に示す。鏡面、JWBSA とともに Mg の凝着は軽微であった。スリック H よりも凝着は改善していた。

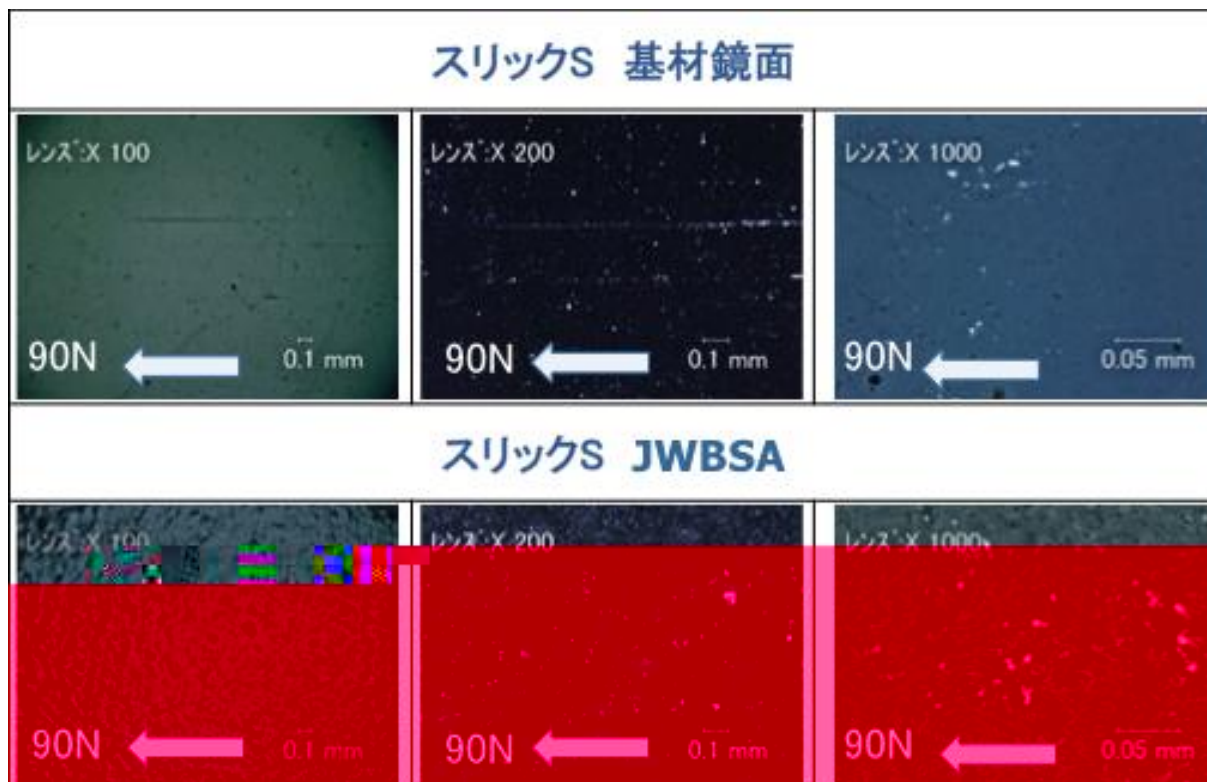


図 2.2.7 スリック S のスクラッチ試験結果

・W-DLC、スリックコート F の結果を以下に示す。Mg の凝着は全く確認されない。



図 2.2.8 W-DLC のスクラッチ試験結果

- ・ 既存スリック S、F、H と比較して、W-DLC は最も優れた耐凝着性を示した。
- ・ JWBSA を施してしまうと Mg が押し付けられて凹凸に埋まるため、鏡面状態が Mg 成形には好ましい。
- ・ Mg 合金に対してもっとも耐凝着性に優れていたのは W-DLC である。

## 2. 2-2 新規 PVD 炭素系皮膜

・積層型：アーク+スパッタ複合装置による PVD と炭素系皮膜の積層

### 1) W-DLC 膜のラマン分光分析結果

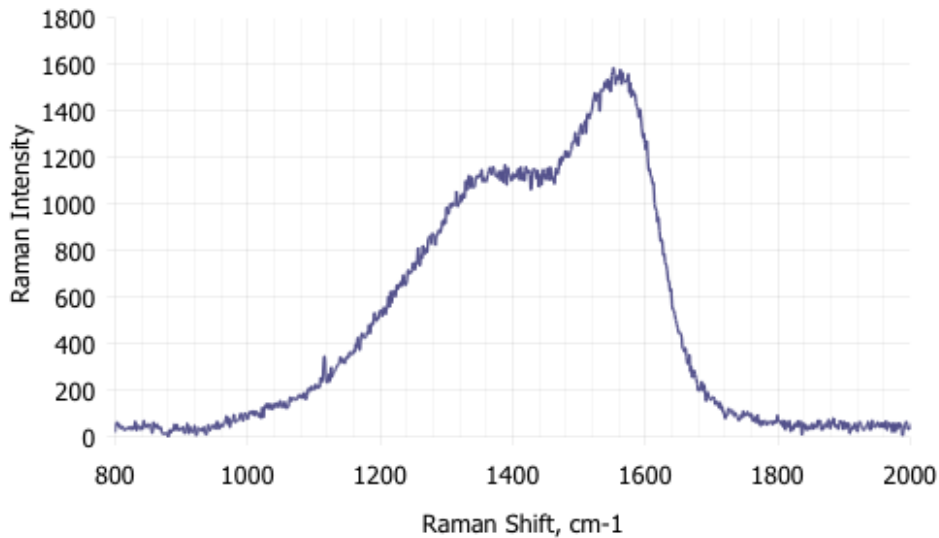


図 2.2.9 W-DLC のラマン分光分析結果

膜の構造を調べるためにラマン分光測定を実施した。そのスペクトルから典型的な DLC 構造であることを確認した。

### 2) W-DLC の高温ボールオンディスク摩耗試験

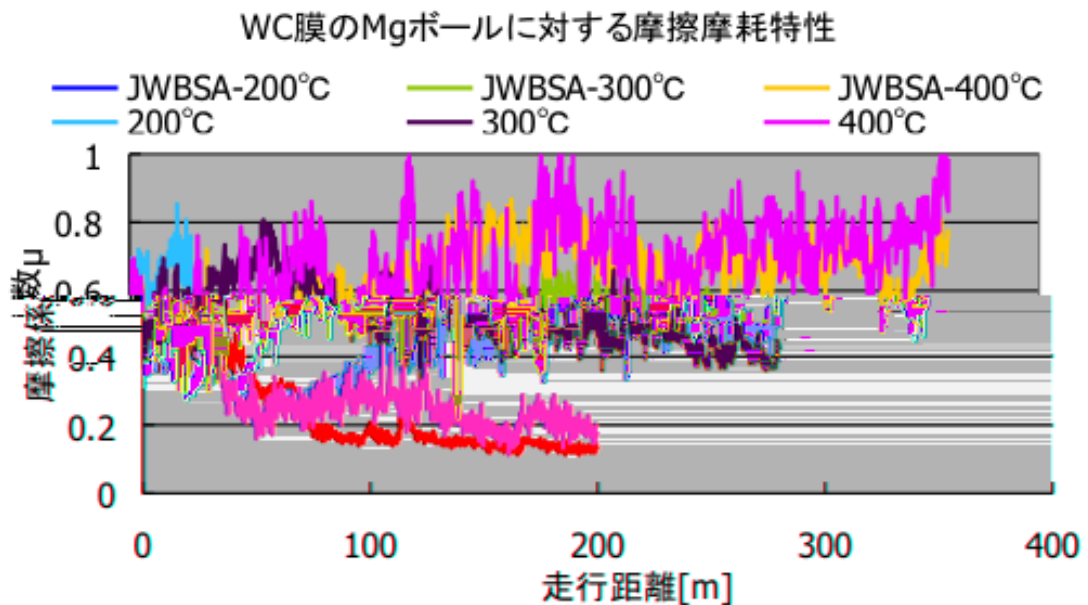


図 2.2.10 W-DLC の高温ボールオンディスク摩耗試験結果

400°Cまでの各温度において Mg 合金に対するボールオンディスク摩耗試験では、JWBSA を施すと低摩擦係数を示した。200°Cにおける JWBSA+WC は JWBSA+DLC に劣らない低摩擦係数を示した。温度が高くなるに従って摩擦係数が著しく上昇する。

### 3) 高温ボールオンディスク摩耗試験後の W-DLC の構造確認

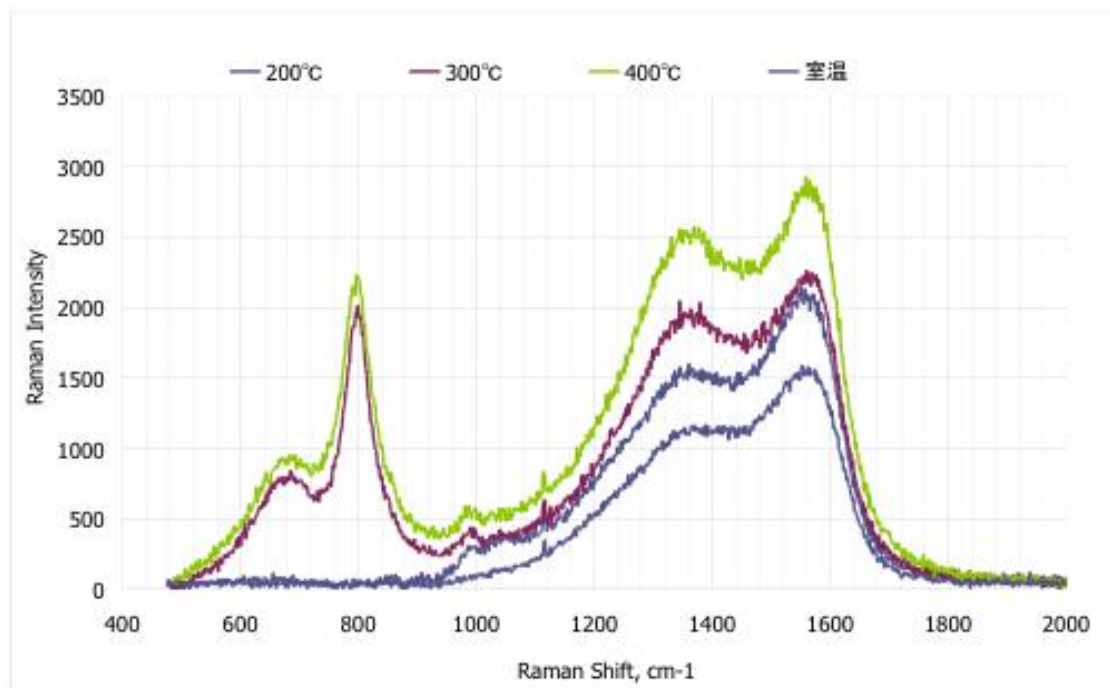


図 2.2.11 W-DLC の構造確認結果

摩擦係数上場の原因を調べるために、試験後の試料のラマン分光測定を実施した。温度が上昇するのに従って DLC 構造に変化は見られないが、低周波数側のピークが際立つことが確認された。しかし、このピークの原因不明である。

### 4) W-DLC の EPMA 分析

試料	分析点	W	C	O	Total
W-DLC 膜	n1	28.2	70.5	1.3	100
	n2	28.3	70.4	1.2	100
	n3	28.1	70.7	1.2	100
	平均	28.2	70.5	1.2	100

図 2.2.12 W-DLC の EPMA 分析結果

被膜の組成を確認するために EPMA による元素分析を行った。その結果、被膜の組成は W と C が 1 : 1 ではなく、W リッチな被膜であることが判明した。

### 第3章 全体総括

#### [高温板鍛造プレス加工]

##### 加熱・冷却方法の開発

- ・過熱蒸気で素材加熱すると、短時間（10秒以内）で300℃程度まで到達可能
- ・カードリッジヒーターをパンチを囲むように配置し、金型を断熱材で囲むことで、パンチ、ダイ表面温度を温度の設定温度の±10℃以内に制御する。
- ・過熱蒸気で素材（マグネシウム合金）をプレヒートすると耐食性皮膜（水酸基）が形成され、素材の耐食性が向上する。

##### 板鍛造加工

- ・成形品のエッジを鋭利化するには350℃以上の加工温度が必要。
- ・350℃以上で板鍛造しても結晶粒は粗大化しない。
- ・400℃以上で位置決めピン成形を行うと目標値3.0mm以上のピンが150トンプレス機で成形可能となる。
- ・高温でテフロンシートを用いると、400℃以上では溶けてしまい潤滑しない。また、400℃以上ではバリの発生が著しい。
- ・シミュレーション技術によりピン形状および加工温度の検討が可能。

#### [プレス加工金型用表面処理技術の開発]

##### 複合処理

- ・室温では金型表面を複合ブラストすることで摩擦係数が低下したが、高温では低下する。
- ・複合ブラストを施した表面にDLCコーティングすることで摩擦係数が低下する。
- ・室温では金型表面を荒らすことで摩擦抵抗は低減するが、高温では材料剛性が低下すると、荒れた金型表面に材料が入りこみ摩擦抵抗が高くなる。
- ・プレス加工時（高い面圧力）に近い状態での金型コーティングの耐磨耗、耐凝着性の新しい評価方法を開発。

##### 新規PVD炭素系皮膜の検討

- ・カーボン系複合被膜をPVD硬質膜と組み合わせて、Mg合金加工用の表面処理コーティングを開発した。
- ・複合型のコーティングは良い高温特性が得られない。
- ・積層型では、W（タングステン）系の皮膜はマグネシウム合金に対して高い耐凝着性を示した。
- ・Cr系、Mo系の皮膜も高温での耐凝着性が期待できる。