

平成30年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「サーボプレスとCAEの高度利用により、中～小ロット生産に対応した  
ボンデフリーの分流冷間鍛造技術開発」

研究開発成果等報告書

平成31年3月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人横浜企業経営支援財団

## 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（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	3
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
第2章 本論	
2-1 サーボプレスによる分流鍛造工法の開発	
2-1-1 汎用サーボプレスで行う分流鍛造工法（油圧ユニット）の開発	7
2-1-2 サーボプレスのスライドモーションを活用した鍛造工法の開発	9
2-2 CAE を活用した適正な金型設計システム構築	
2-2-1 材料物性データベース構築	12
2-2-2 CAE による成形条件と金型設計条件適正化	15
2-3 ボンデフリー化への取り組み	
2-3-1 金型表面処理の選定	20
2-3-2 サーボプレスのスライドモーションによる潤滑条件改善	25
2-3-3 冷間鍛造用高機能潤滑油の開発	33
最終章 全体総括	

## 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

冷間鍛造はコスト面や性能面で従来工法と比較して大きなメリットを享受できる技術である。その反面短所として、イニシャルコストの増大や環境負荷の高い潤滑のための前処理（ボンデ処理）が必要となるなどの問題がある。本研究の目的は、サーボプレス・CAE・分流鍛造の高度利用、高機能潤滑油の開発によってこの問題を解決し、従来不可能であった中～小ロット生産に対応したボンデフリーの冷間鍛造技術を確立することである。

#### ○従来技術での課題

鍛造とは、「工具・金型などを用いて固体材料の一部または全体を圧縮または打撃することによって成形および鍛錬を行うこと」である。その中でも、積極的に材料を加熱することなく、室温または室温に近い温度で行う鍛造を「冷間鍛造」と呼ぶ。

その長所は以下の通りである。

- ◎金型によって製品精度（バラつき）を管理した状態で量産が可能
- ◎非常に高い寸法精度（IT7～11）と表面粗さが実現でき、後工程がまったく不要となるか（ネットシェイプ）、研削のみで済む場合が多い（ニアネットシェイプ）
- ◎連続した鍛流線により製品強度が向上し（歯車の疲労強度で25～30%増加）、部品の小型化や軽量化が図れる
- ◎加工硬化による加工物の降伏点の上昇、結晶の微細化による磨耗特性の向上（熱処理の省略）

従来工法からの転換で大きなメリットを享受できる工法であるが、反面短所として以下が挙げられる。

#### ◆イニシャルコストの増大

#### ◆環境負荷の高い潤滑のための前処理（ボンデ処理）が必要となる

イニシャルコストが増大する要因は、

- ・非常に大きな成形荷重を要するため、数百～数千トンクラス的大型プレス機が必要となる。
- ・金型についても、高剛性、高精度が必要となるため製造コストが高い。
- ・適正な製品設計や工程設計、金型設計を得るまでに数多くの試作（トライアンドエラー）を要し、開発期間が長期化する。
- ・金型の寿命予測については勘と経験に頼る部分が大きく、金型材質や構造に基づいた体系的な解析方法が確立されていないため、早期の金型破損を避けるためには過剰な金型設計とせざるを得ない。

などがあり、それを回収するための大量生産が前提となる。現状では中～小ロット生産に対応した冷間鍛造技術は確立されておらず、大量の生産数量が確保できない産業分野においては、そこがネックとな

り採用ができない。冷間鍛造品が幅広く普及しないのはそのためである。

また環境問題であるが、冷間鍛造においては、被加工材と金型間の潤滑が非常に重要であり、この効果が加工の成否を決定する。このため被加工材へ予め「ボンデ処理」を施すことが必須となっている。「ボンデ処理」は潤滑膜が被加工材に化学反応によって一体化しているため面積拡大や高い面圧領域にも追従できる優れた潤滑法である。しかし、「ボンデ処理」には多くの工程を要するため設備が大型化するとともにエネルギー消費も増大する。またボンデ処理工程から大量の産廃物や廃液が発生し環境負荷面でも問題視されている。さらに、ボンデ処理被膜は固体膜であり被加工材表面に残存することにより寸法精度を低下させる問題もある。このような背景から「ボンデ処理」に替わる、環境面に配慮し、かつ加工精度の向上と簡易に適用できる液状の潤滑油を適用する方法が求められている。

本開発の実現性が高まった大きな要因として、サーボプレスの登場と CAE 技術の進歩がある。サーボプレスは加工中にスライドを自在に上下動させたり、任意の場所で任意の加工スピードを設定したりすることが可能で（スライドモーション）、これによって鍛造時の材料流動の制御や、潤滑油の再潤滑効果が期待できる。

CAE については、3次元鍛造シミュレーションソフトが開発・市販され、性能や操作性の向上と低価格化が進んできた。それと平行してハードに関しても高性能なものが比較的安価に入手できるようになり、計算速度も飛躍的に向上した。

よって、これらを組み合わせて高度利用することで、従来不可能であった中～小ロット生産に対応したボンデフリーの冷間鍛造技術を確立することを目指す。（図 1-1）

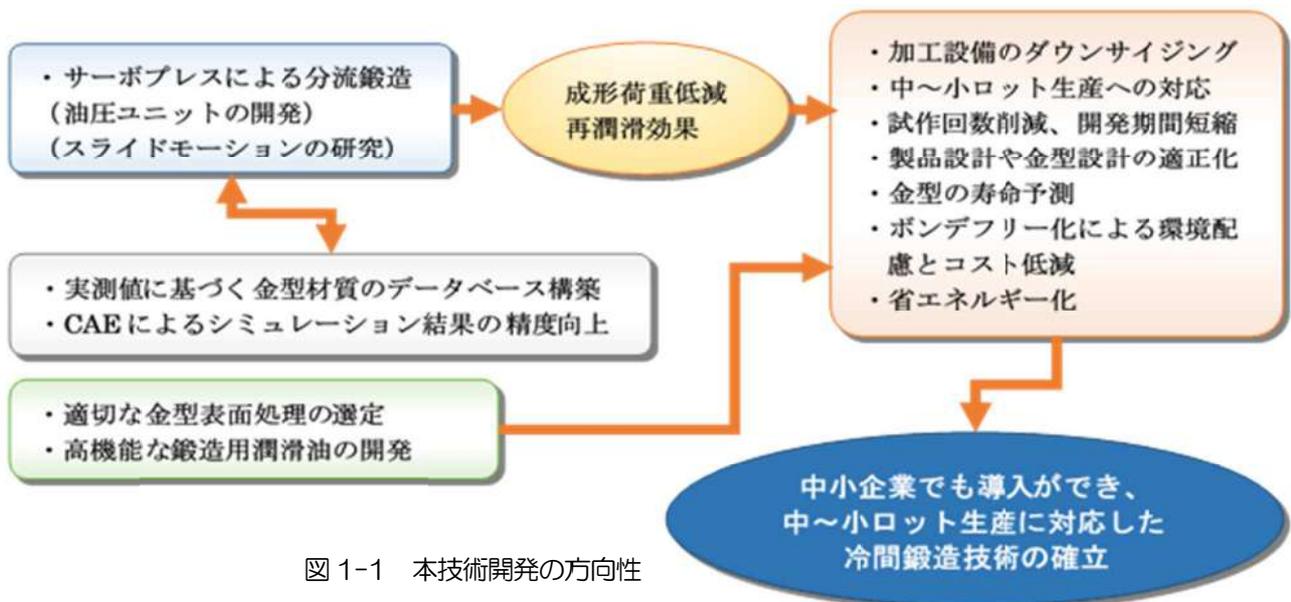


図 1-1 本技術開発の方向性

本事業によって製品化を目指す具体的な対象製品は、図 1-2 にあるような多段軸部品である。超高回転で使用されるため要求精度が非常に高く、従来技術では切削+研削加工で検討されているが高コストである。また、従来技術の冷間鍛造で製作する場合は、鍛造～焼鈍～ボンデ処理を複数回繰り返す必要があり、非常に多くの工程を要するため、これも高コストとなる。

今回の技術開発では、最小の工程数かつボンデフリー化の実現によって、現状抱えているこれら課題の解決を目的としている。

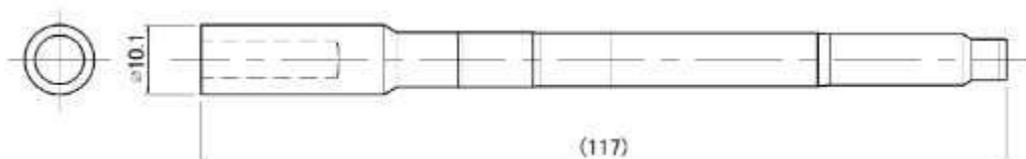


図 1-2 最終目標製品の概略図

○新技術を実現するために解決すべき研究課題

(三) 精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

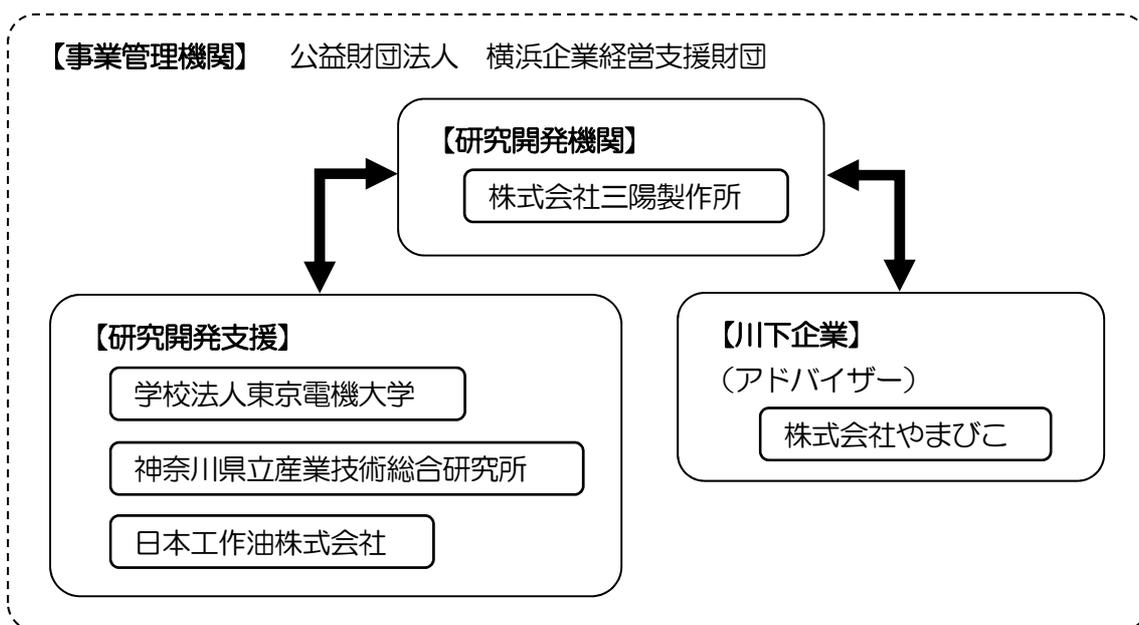
(3) 川下分野横断的な共通の事項

①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

力生産性・効率化の向上、低コスト化

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

1-2-1 研究組織・管理体制



**総括研究代表者 (PL)**

株式会社三陽製作所  
取締役 開発営業部長  
角道 将人

**副総括研究代表者 (SL)**

学校法人東京電機大学 工学部  
教授  
柳田 明

**1-2-2 研究者・協力者氏名**

株式会社三陽製作所

氏名	所属・役職	備考
角道 将人	取締役 開発営業部長	PL
水村 隆	取締役	
佐藤 剛	品質管理担当 係長	
白畑 武司	設計・生産技術 係長	
中能 慎二	設計・生産技術 主任	
伊藤 敬	設計・生産技術担当	

学校法人東京電機大学

氏名	所属・役職	備考
柳田 明	工学部機械工学科 教授	SL
王 梓印	工学研究科 機械工学専攻 修士	
松嶋 秀哲	工学研究科 機械工学専攻 修士	

神奈川県立産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	備考
高橋 和仁	情報・生産技術部 主任研究員	
薩田 寿隆	情報・生産技術部 総括グループリーダー	
高木 眞一	機械・材料技術部 総括グループリーダー	
堀内 崇弘	機械・材料技術部 主任研究員	
吉田 健太郎	機械・材料技術部 主任研究員	
中村 紀夫	機械・材料技術部 主任研究員	
星川 潔	機械・材料技術部 主任研究員	
百瀬 晶	機械・材料技術部 主任研究員	
本泉 佑	機械・材料技術部 主任研究員	
清水 貴司	機械・材料技術部	

日本工作油株式会社

氏名	所属・役職	備考
村本 兼一	技術部 係長	
高橋 章友	技術部	
木村 茂樹	技術部 顧問	

株式会社やまびこ

氏名	所属・役職	備考
藤澤 高司	生産本部生産技術部 部長	アドバイザー

### 1-3 成果概要

#### 1-3-1 汎用サーボプレスで行う分流鍛造工法（油圧ユニット）の開発

汎用のサーボプレスを用いて、分流鍛造、および金型内でワークを揺動させながら前方押出を行うことが可能な設備が完成した。同様の機能を持つ専用の油圧プレスと比較し、設備導入コストの 30～40%低減を実現した。

#### 1-3-2 サーボプレスのスライドモーションを活用した鍛造工法の開発

スライドモーションによる再潤滑効果は、金型と被加工材の縦弾性係数に影響されることを見出し、実際の分流鍛造へ適用した結果、その効果を確認できた。潤滑剤の動粘度にも影響されることを示した。アルミ合金-鉄系金型で効果が得られたことより、鉄系材料-超硬金型の組合せで、平歯車ではボンデフリー化が可能であると考えられる。また、制御分流鍛造を実験で検証する環境を整えることができたとともに、本事業の発展として連続前方押出法の開発も別途進めることが可能となった。

#### 1-3-3 材料物性データベース構築

YXR7 / YXR3 / SKH51 / HAP10 / DC53 / SKD61 / SWRM8 / S45C / S20C / SCM415 / C1100 / A5056 について、CAE シミュレーションで有効な S-S 線図が取得できた。

DC53 において、シャルピー衝撃値試験によって、熱処理メーカーと熱処理条件を変えた際の靱性値の違いを得た。

#### 1-3-4 CAE による成形条件と金型設計条件適正化への課題への対応

加工中の AE センサ波形、ひずみゲージ波形等のデータを自動的に蓄積できる「金型異常検知システム」を構築することができた。特に AE 波形については、焼付きと相関があるエネルギー値の変化や異常波形の取得に成功した。今後収集したデータの解析をさらに進めることにより、金型異常の定量的検知が期待される。

冷間鍛造シミュレーションにおいて、これまでの実験で得られた材料物性値や摩擦係数等のデータに基づいた最適なパラメータ設定を導き出すことができ、前方押出鍛造の成形荷重で96%以上という非常に高い比較精度を得た。

#### 1-3-5 金型表面処理の選定

ボール通し試験結果の詳細かつ定量的な検証結果をもとにして、コーティングメーカーの技術者も交えて評価を行い、冷間鍛造金型に適応できる剥離強度を有するもので摩擦係数0.2以下を達成できる表面処理を選定することができた。

#### 1-3-6 サーボプレスのスライドモーションによる潤滑条件改善

1段の前方押出実験において、アンダーカット部からの油の注入に成功した。また前方押出鍛造においては、金型内で材料の揺動を行うと荷重が逆に上がってしまうという現象が確認されたが、さらに新たな潤滑方式を考案し、その結果31%もの荷重低減効果を得ることができた。これによって、本事業の最終目的である多段軸部品「ローターシャフト」の冷間鍛造1工程での製作に向けての条件が整った。

#### 1-3-7 冷間鍛造用高機能潤滑油の開発

初年度から合計すると、添加剤の組み合わせで106パターンの油剤を作製し、評価試験を実施。極圧状態でも焼付き抑制効果の高い潤滑油の開発に成功した。後方押出加工試験においてサーボモーションを併用することで対ボンデ80%の目標を達成することができた。

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

[事業管理機関]

公益財団法人 横浜企業経営支援財団 経営支援部技術支援担当

〒231-0011 神奈川県横浜市中区太田町2-23 横浜メディア・ビジネスセンター7階

E-mail : sapoin@idec.or.jp

Tel : 045-225-3733

[研究開発機関]

株式会社三陽製作所 取締役 開発営業部長 角道 将人

〒236-0044 神奈川県横浜市金沢区朝比奈町138番地

E-mail : m-kakudo@sanyoseisakusho.co.jp

Tel : 045-781-5873

## 第2章 本論

### 2-1 サーボプレスによる分流鍛造工法の開発

#### 2-1-1 汎用サーボプレスで行う分流鍛造工法の開発

多軸制御による複動成型を行えるよう、後付けが可能でプレス機のスライド動作と連動した制御が可能な油圧ユニット（複動成形用／背圧・ノックアウト用）を設計～製作し、プレス機への組み込み施工を行った。（図 2-1）

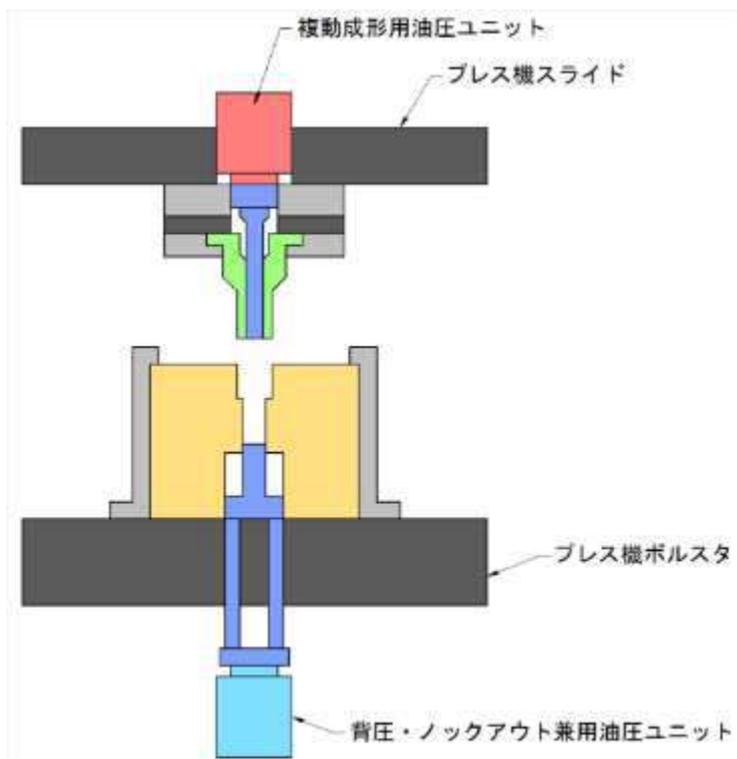


図 2-1 サーボプレスに組み込む油圧ユニットの概略図

#### 追加油圧ユニットスペック

上側：シリンダー内径φ140／ストローク 30mm／最大加圧能力 300kN

下側：シリンダー内径φ160／ストローク 120mm／最大加圧能力 280kN

スライド側は、大型の油圧シリンダーを埋め込むことによる強度低下が懸念されたため、CAE 解析による強度検証を実施。追加の補強プレートを取り付けることとした。（図 2-2～図 2-6）

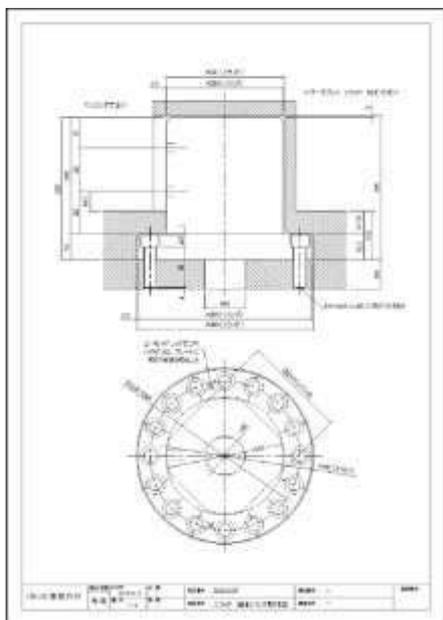


図 2-2 上部（スライド側）への油圧シリンダー埋め込み設計

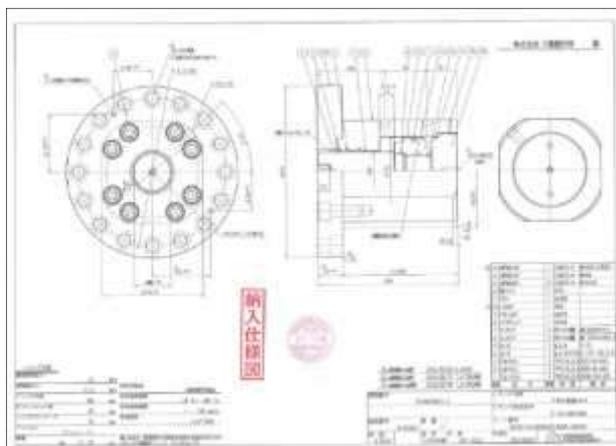


図 2-3 スライド側専用油圧シリンダー図面

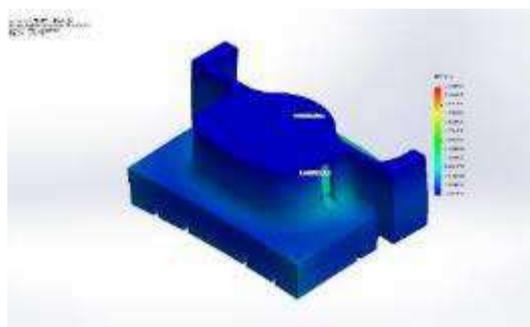


図 2-5 補強プレートの CAE 解析による強度検証

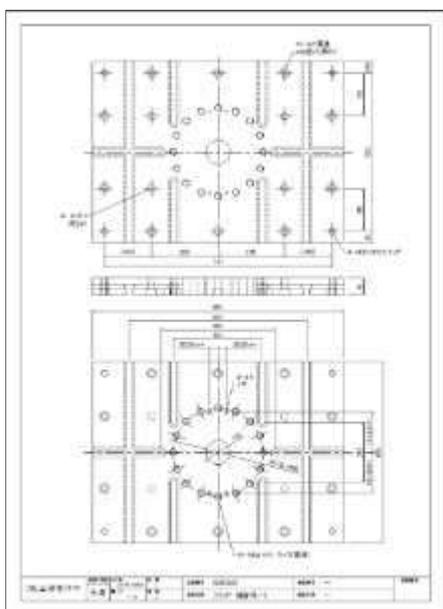


図 2-4 上部（スライド側）の追加補強プレート



図 2-6 サーボプレスへの組み込み施工

ボルスタ側は、吊り下げ式の油圧ダイクッションを新たに設計～製作した。（図2-7、図2-8）

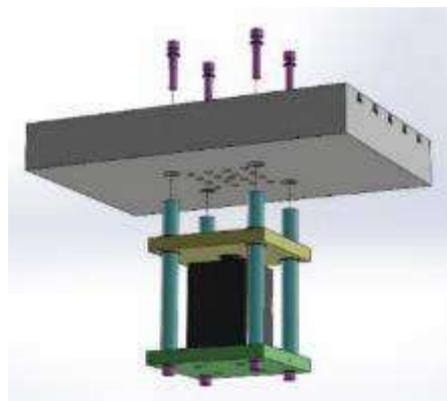
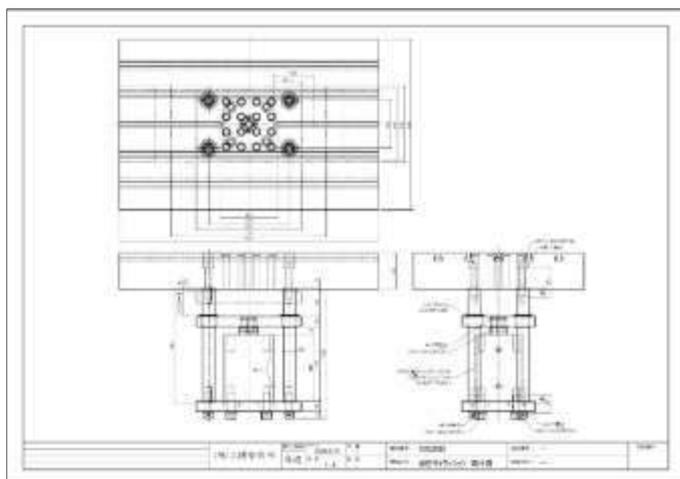


図2-7 ボルスタ側の油圧ダイクッション設計

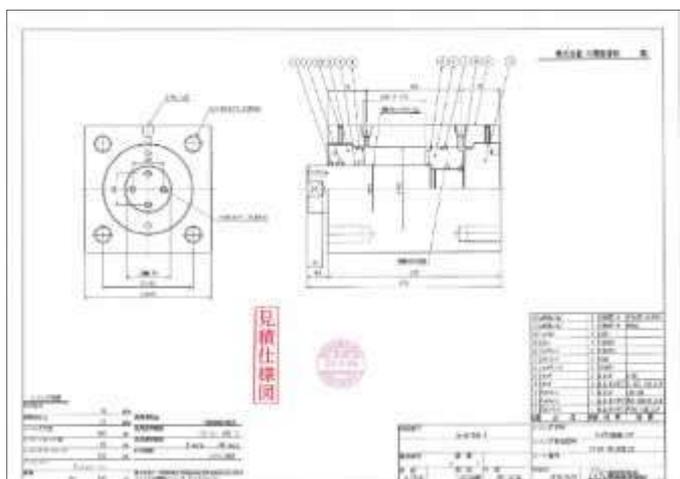


図2-8 ボルスタ側専用油圧シリンダー図面

### 2-1-2 サーボプレスのスライドモーションを活用した鍛造工法の開発

図2-9のような中実ギアでの場合では、左図において密閉に近い鍛造を行うとき、材料を外周方向にのみ流動させると、金型内の加工面圧が急上昇する。この問題点を改善するために逃がしパンチを調整して材料の軸方向に逃げ場を作る。材料を複数方向に逃がすことにより密閉に近い加工状態を回避し加工荷重を抑えながら歯形部分への充填率をあげ、欠肉の少ないモノを加工することができる加工法が分流鍛造である。④の逃がしパンチはくさび機構で移動させる。図1にくさび機構による分流鍛造が行える実験用金型の模式図を示す。第2工程において振動モーションを作用させることでの荷重の低減を調査した。

図2-10は当実験で鍛造された試験片である。分流なしの場合、歯形を充填させるのには2工程を要するが、分流を行うことで1工程でも近いところまで歯形を充填させることができた。

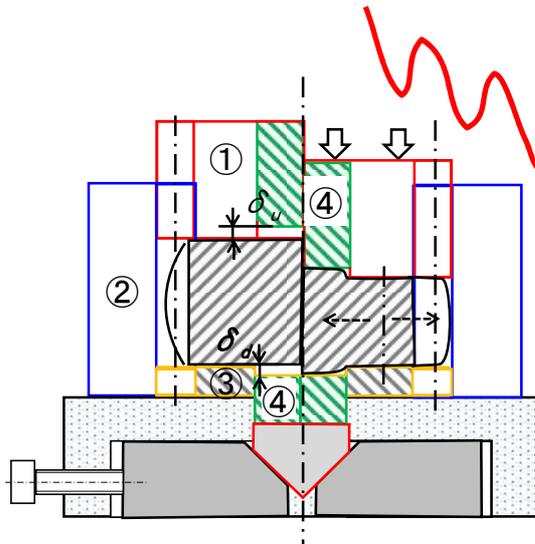
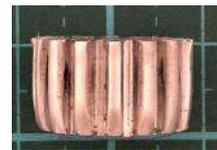
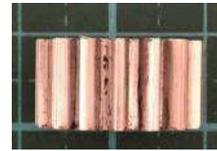


図2-9 くさび機構による分流鍛造の模式図

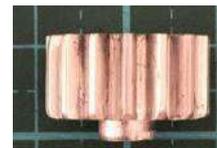
- ①歯形パンチ
- ②歯形ダイ
- ③歯形スペーサー
- ④逃がしパンチ



第1工程  
(分流なし)



第2工程  
(分流なし)



第2工程  
(分流1mm)

図2-10 分流あり・なしでの充満度比較

加工荷重60kNで加工を中断し、型内を再配置し、分流量をφ6、高さ1mmで設定し第2工程で振動モーションを与えた分流鍛造を行った。分流鍛造時の第2工程での荷重曲線の一例を図3に示す。図2-11より加工後の最大荷重を低減できたことがわかる。

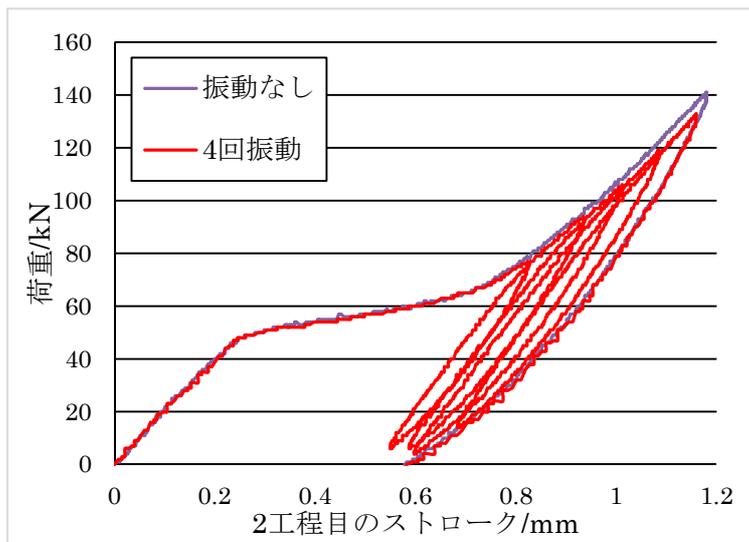


図2-11 第2工程での荷重曲線(A1070, 56cSt, 4回振動)

図2-12に各動粘度において第2工程の振動回数を変化させた時の最大荷重の変化を示す。図2-12より、A1070では潤滑油の粘度別に見ると56cStが安定してすべての振動回数において荷重を下げる事が出来た。28cStでは3回振動までは荷重を下げる事が出来たが、4回振動で荷重が上昇してしまった。100.4cStでは3、4回振動で荷重が上昇してしまった。A1070の場合は56cStの試験油が最も荷重低減に有効であることが分かった。A5056では分流鍛造のみで加工した場合に比べて2~4回除荷しても顕著的な荷重減少を見られなかった。これはA5056がA1070より硬く、加工時の最大荷重が高くなりバリが大きく出てしまったためである。バリ成形にかかる荷重上昇がモーション効果による荷重減少を上回り、モーション効果による荷重減少が結果として表れなかった。

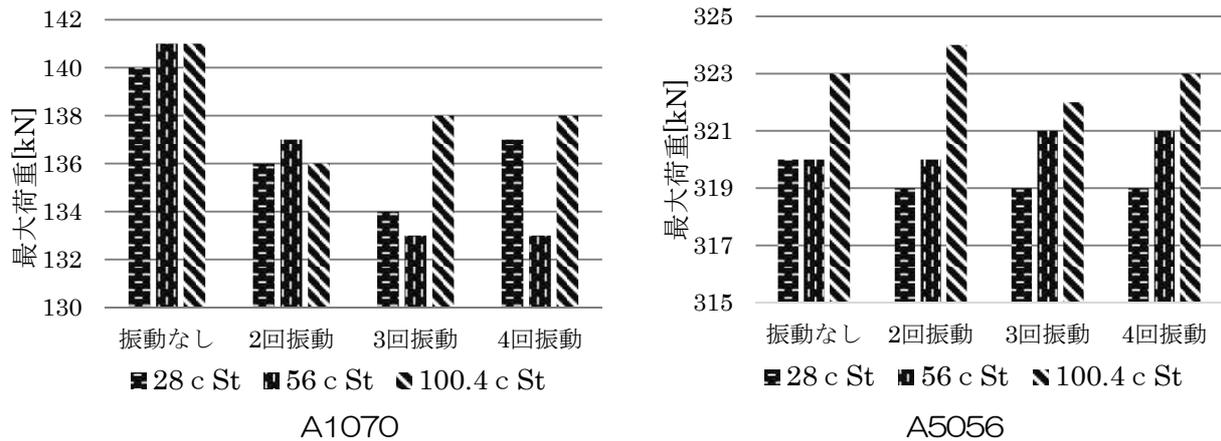


図2-12 振動回数と最大荷重の関係

次に、くさび機構の代わりに450kNサーボプレスに実装した背圧付与ユニット（図2-13）を用いて分流量を制御し、少ない分流量で歯車を充填させる工法について、解析ソフト「simufact.forming」による解析と鍛造実験を比較検証しながら研究を進めた。（図2-14）

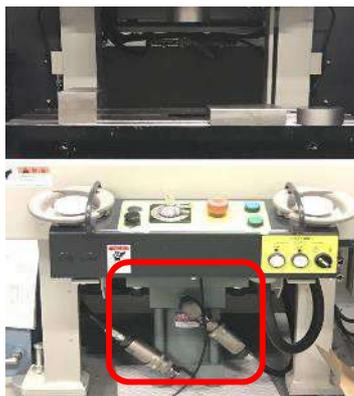


図2-13 背圧付与ユニット

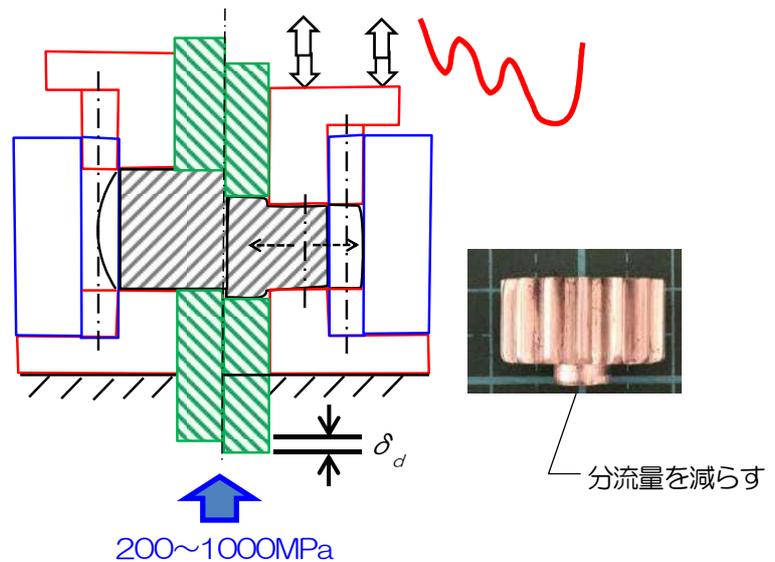


図2-14 背圧付与ユニットによる分流量鍛造の模式図

制御分流量鍛造の効果を推定するために、CAEソフト「simufact.forming」によるシミュレーションを行った。（図2-15）背圧付与はバネモデルを用いた。得られた荷重-ストローク曲線(A5056想定)を図2-16に示す。分流量鍛造の分流量は、制御鍛造で背圧440MPaでの加工終了時の分流量0.37mmとし、その結果最大荷重を減少させることに成功した。分流量鍛造のみとくらべ場合最大加工荷重は0.6kN(5%)減少した。図2-17にシミュレーションより求めた歯型充填率を示す。制御分流量鍛造では、通常分流量鍛造よりも高い充填率を得ることができている。

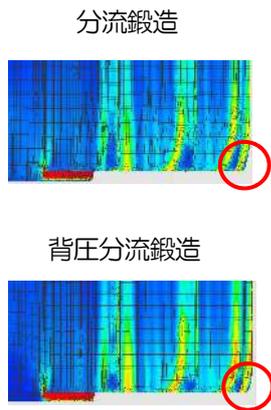


図2-15 CAEシミュレーション

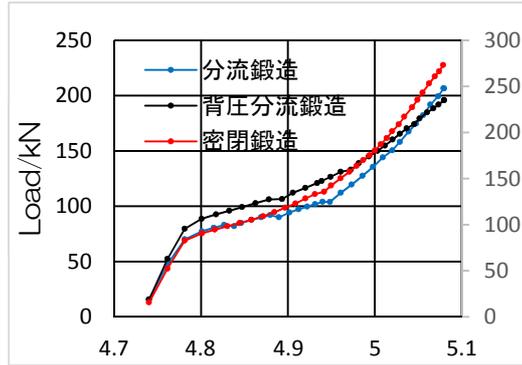


図2-16 ストローク荷重線図

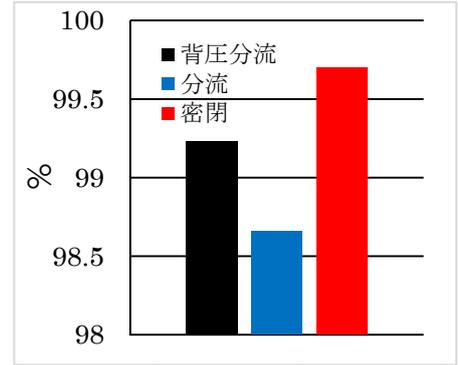


図2-17 充填率

## 2-2 CAE を活用した適正な金型設計システム構築

### 2-2-1 材料物性データベース構築

#### ① 試験方法の妥当性確認

試験方法の妥当性確認のため、未熱処理の汎用材料2種で引張試験と圧縮試験を実施。

(図 2-18~図 2-22)



図 2-18 サーメックマスターZⅢ型

(富士電波工業(株))

負荷形式：油圧方式

負荷荷重：最大 100kN (10ton)

試験速度： $10^{-3}$  ~500mm/sec



図 2-19 引張試験片 (φ8mm)



図 2-20 圧縮試験片  
(φ8mm、高さ10mm)

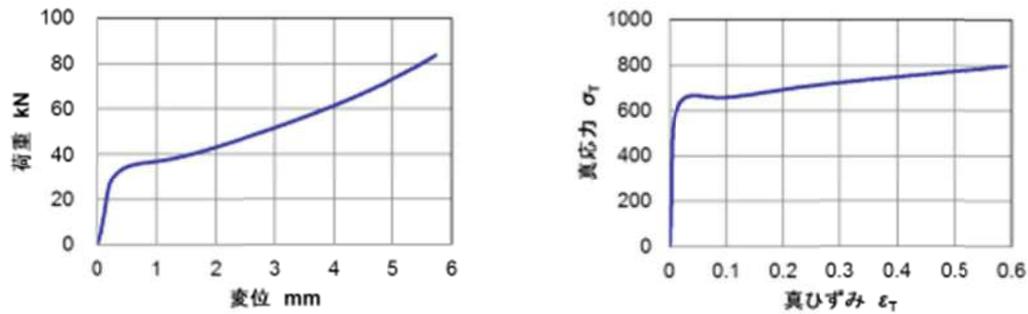


図 2-21 圧縮試験により求めた S-S 曲線 (材質: SK3)

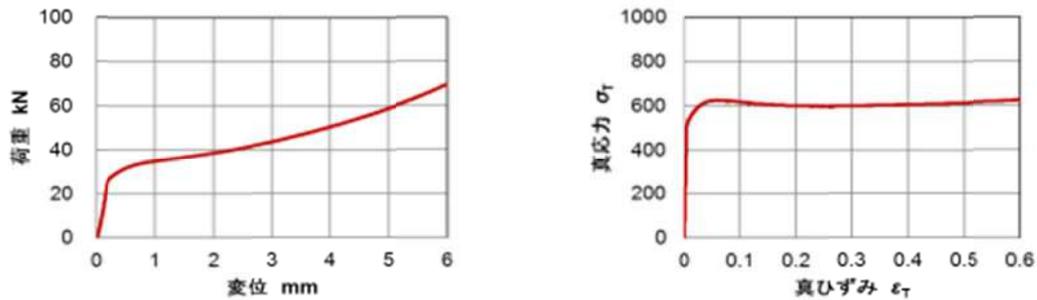


図 2-22 圧縮試験により求めた S-S 曲線 (材質: SS400)

圧縮試験については、本試験機での計測で問題のない結果が得られた。但し、熱処理材の場合は荷重が過大となるため、試験片の径を $\phi 8 \Rightarrow \phi 6$ mm とする必要がある。

引張試験については、熱処理材の場合本試験機の最大荷重内で適応可能な試験片の製作が困難であることが判明した。

結果として、材料物性試験については以下に決定した。

- CAE 解析には、圧縮試験によって得られたデータを適用することとする。
- 引張試験は、圧縮試験結果の妥当性確認のために以下に条件変更のうえ実施する。

試験機 : インストロン万能試験機 5582 型

試験片 : 図 2-23 の形状に変更

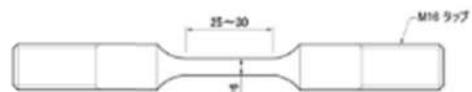


図 2-23 引張試験片寸法

## ② 圧縮試験、引張試験の実施 (図 2-24~図 2-27)

金型材 (推奨硬度で熱処理) : YXR7 / YXR3 / SKH51 / HAP10 / DC53 / DAC (SKD61)

被加工材 : SWRM8 / S45C / S20C / SCM415 / C1100 / A5056



図 2-24 圧縮試験片 試験前後



図 2-25 引張試験片

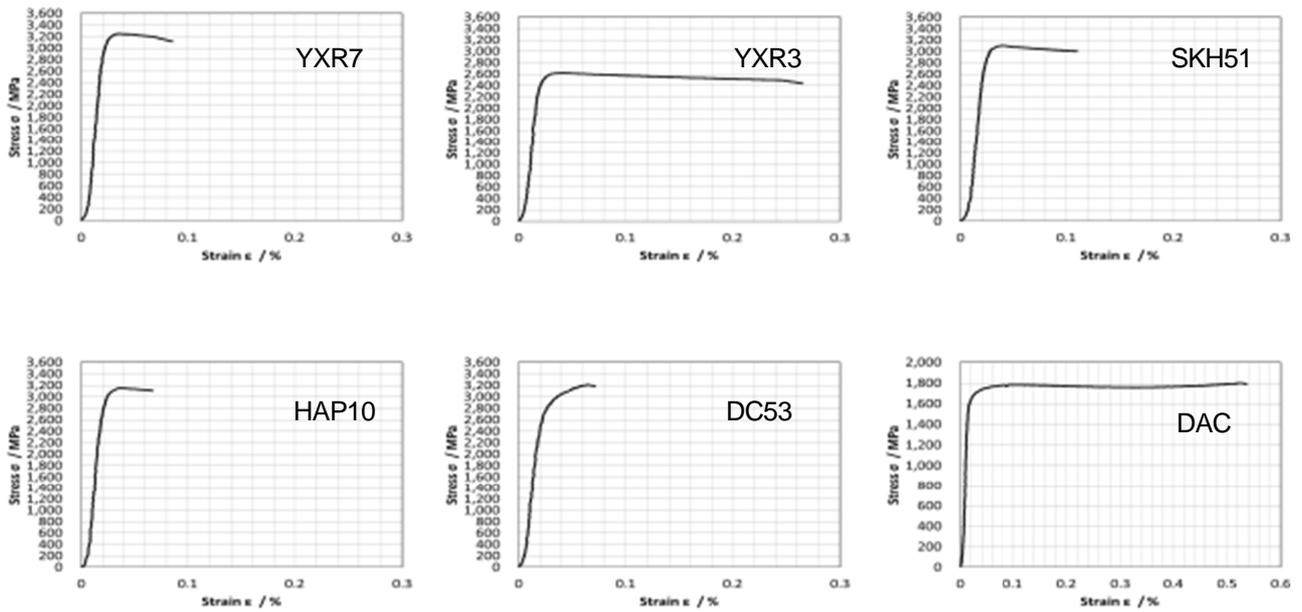


図 2-26 取得した金型材の S-S 線図

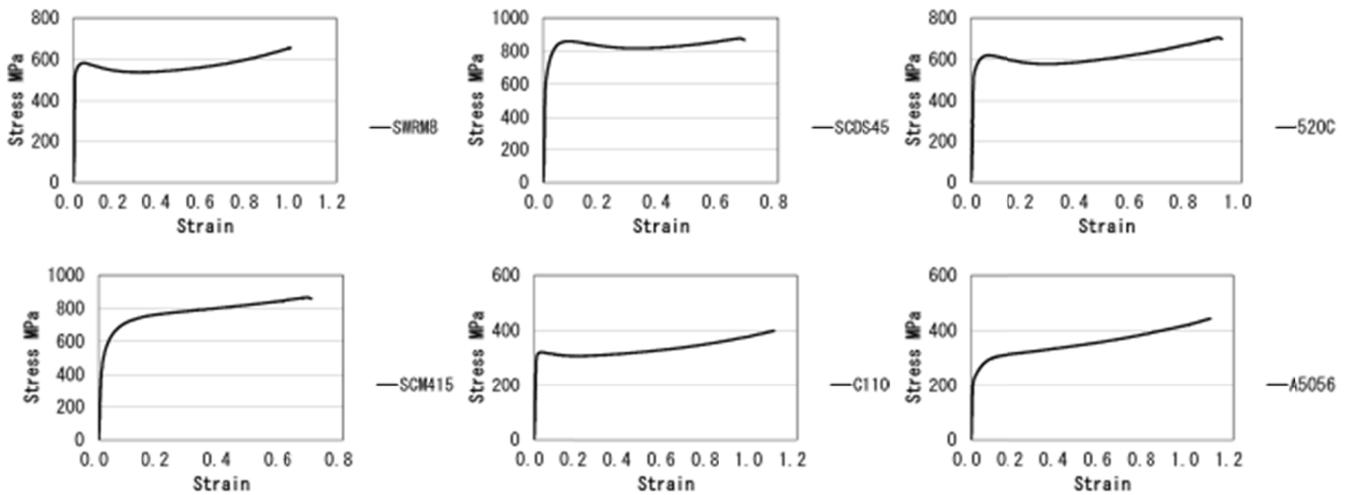


図 2-27 取得した被加工材の S-S 線図

③ 縦弾性係数とポアソン比の測定 (図 2-28、表 2-1)



図 2-28 測定風景

表 2-1 縦弾性係数とポアソン比の測定結

	SS400	S20C	SCM415	S45C	SKH51	DC53	HAP10	YXR3	YXR7	DAC
ヤング率 E / GPa	212.41	212.31	210.48	207.05	215.47	205.08	216.82	206.85	206.38	214.30
ポアソン比 $\delta$	0.30	0.30	0.29	0.28	0.29	0.29	0.30	0.29	0.29	0.28

#### ④ シャルピー衝撃値の測定（図 2-29、表 2-2）

材質： DC53

硬度： HRC62 と HRC58 の2種類

熱処理方法： 真空焼入れ と ソルト焼入れ の2種類

熱処理メーカー： K社 と N社 の2社



図 2-29 試験片

表 2-2 シャルピー衝撃値試験結果

材質	DC53							
	高温ダブルテンパー							
		吸収エネルギー(J)						
		試験片-1	試験片-2	試験片-3	試験片-4	試験片-5	試験片-6	試験片-7
硬度		HRC62 N社	HRC62 N社	HRC58 N社	HRC62 N社	HRC62 K社	HRC58 K社	HRC62 K社
試験数		真空 安定化有	真空	真空	ソルト	真空	真空	ソルト
1		3.350	3.180	3.180	3.020	2.210	3.180	3.180
2		2.530	3.180	3.180	3.180	3.020	2.530	6.360
3		2.700	3.180	3.020	2.530	2.370	2.860	3.510
4		3.180	3.180	3.180	2.370	3.020	3.020	3.020
5		3.020	3.180	3.180	3.020	2.530	2.370	3.020
AVE		2.956	3.180	3.148	2.824	2.630	2.792	3.183

### 2-2-2 CAE による成形条件と金型設計条件適正化

#### ① 金型異常検知システムの構築

実機テストの評価は、金型の焼付きや破損等の異常を検知することが重要となる。そのため検証用金型に各種センサを取り付け、異常検知を行うシステムを構築した。まず各種センサの有効性について評価（テスト）を実施し、効果的と思われる AE センサ・ひずみゲージ・変位センサを採用した。

（図 2-30～図 2-32）

- 加速度センサ（加工時の振動）×1CH  
⇒ボール通し試験にて計測テストを実施。分解能不足であることが判明。
- AE センサ（加工時の振動）×1CH  
⇒ボール通し試験にて計測テストを実施し、有効性が確認できた。
- ひずみゲージ（加工荷重）×2CH  
⇒ボール通し試験にて計測テストを実施。有効性が確認できた。
- ひずみゲージ（金型の変形）×2CH  
⇒前項に記載した前方押出鍛造において計測テストを実施。有効性が確認できた。
- 変位センサ（下死点での上型と下型の距離）×4CH  
⇒前項に記載した前方押出鍛造において計測実施。有効性が確認できた。
- 温度センサ（金型の温度）×1CH  
⇒実際に鍛造品と金型が接触している箇所の温度計測が可能な方法が存在せず、有効なデータ取得ができないため採用しないこととした。

サーボプレスのスライド位置を0~10Vの電圧で出力し、その電圧が任意に設定した値になったところをトリガーとして、各センサが同期してデータを取得~グラフを自動作成するソフトウェアを独自に製作。



図 2-30 システム全景



図 2-31 実験風景

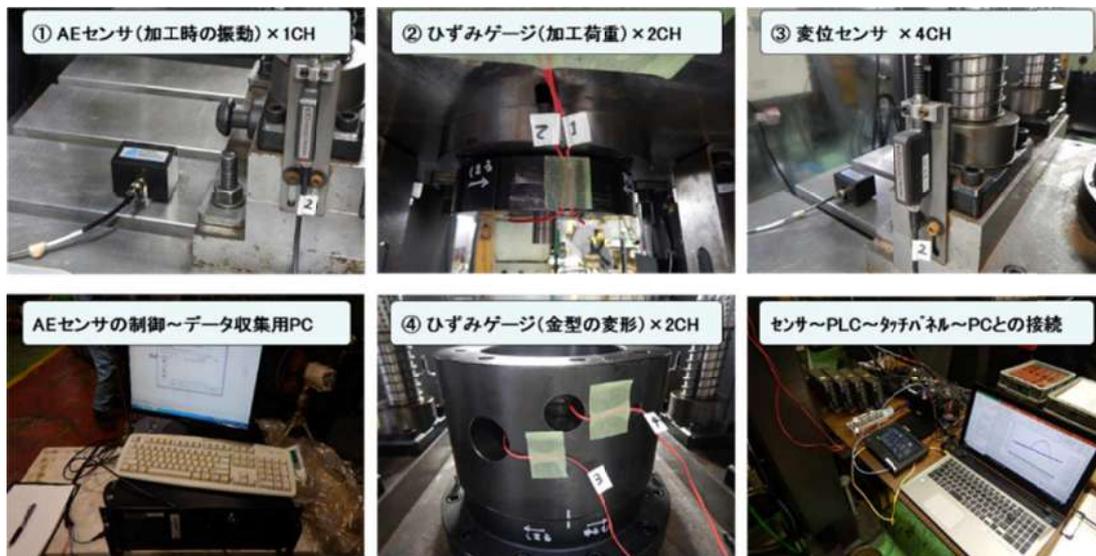


図 2-32 システム詳細

後述の2-3-2項で行った前方押出試験で取得したデータを図 2-33 に示す。

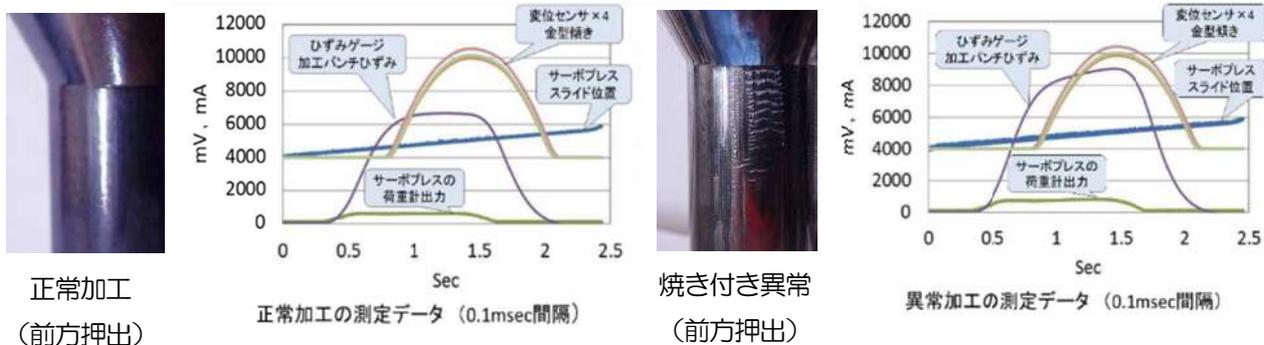


図 2-33 取得したひずみゲージと変位センサの波形

後述の2-3-1項で行ったボール通し試験で取得した AE 波形データを図 2-34 に示す。

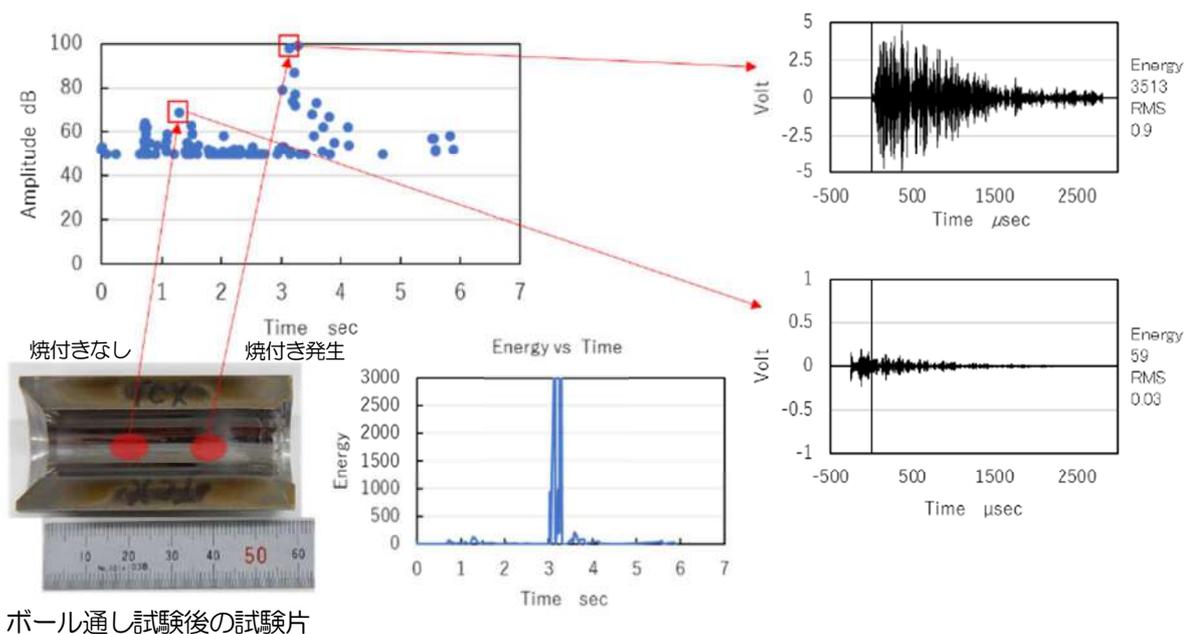


図 2-34 取得した AE センサ波形と焼付きとの相関

ひずみゲージの波形では、焼き付きと相関がある加工パンチのひずみ(成形荷重)のデータが得られ、AE 波形については、焼き付きと相関があるエネルギー値の変化や異常波形の取得に成功した。今後収集したデータの解析をさらに進めることによって、金型異常の定量的検知が期待される。

## ② 加工方法による金型表面性状の比較検証

金型の耐焼き付き性は金型の表面性状の影響を大きく受けるため、如何に表面性状を上げるかが要となる。今回導入した磨きを行うショットブラストを使用し、加工方法や加工条件ごとに仕上がりの粗さの比較評価を実施した。

仕上げ目標値は、日本塑性加工学会の有識者からの助言やこれまでの実績から、表面粗さ計の測定値でRa0.1 以下、Rz0.5 以下とした。

結果、WC の6th カットであれば、ショットブラストのみの手磨き工程なしで目標値を達成できた。(図 2-35、図 2-36、表 2-3)



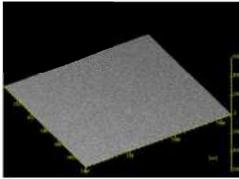
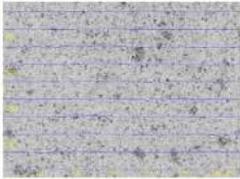
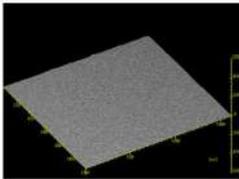
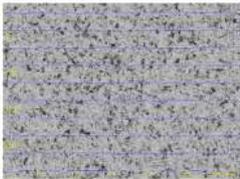
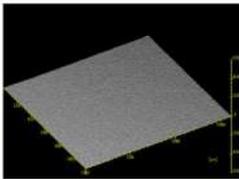
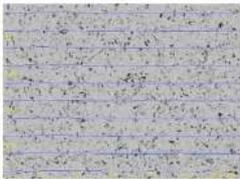
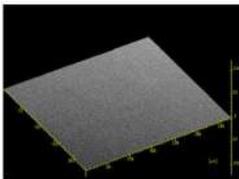
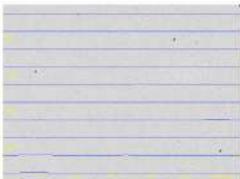
図 2-35 ショットブラストによる磨き工程



図 2-36 評価に使用した接触式の表面粗さ計と電子顕微鏡

表 2-3 加工条件ごとの粗さ測定結果

※赤文字=粗さ計 / 青文字=SEM

名称	材質	仕上げ	Ra	Rz	Rp	Rsk	Rku	拡大画像 (SEM) ×100 ×500	
			算術平均粗さ	最大高さ	最大山高さ	山と谷の対象性	とがり度		
WC6th	SLD	WC6th	0.28	2.276	1.174	-0.007	3.108		
			0.59	4.85	2.66				
		WC6th ユニフィニッシュ1	0.362	3.715	1.583	-0.296	5.844		
			0.68	8.7	2.37				
		WC6th ユニフィニッシュ1 ユニフィニッシュ2	0.225	1.734	0.761	-0.252	3.225		
			0.57	3.97	2.24				
		WC6th ユニフィニッシュ1 ユニフィニッシュ2 エアラップ	0.058	0.457	0.176	-0.57	4.366		
			0.2	1.57	0.87				

### ③ 前方押出鍛造のCAEシミュレーション実施

前項2-2-1で取得した金型材料と製品材料の各種物性値をシミュレーションソフトウェアに導入し、事項2-3-2に示すトライ用金型においてシミュレーションと実機トライの双方の比較検証を実施した。

最終製品（段付軸部品）の加工工法である前方押出試験において、絞り込み部形状の最適化検証を実施するにあたって3パターンの形状で金型を製作し（図2-37）、シミュレーションと実機テストの比較によって、最も精度の高いパラメータ設定を検証した。（図2-38、図2-39）

- ワークの材料物性データは、S20C 球状化焼鈍材の実測値を使用
- プレス条件は、200ton サーボプレス実機のデータを入力
- ワークおよび金型温度は20℃とした
- 摩擦係数は、ボールオンディスク試験の結果に基づき、クーロン摩擦=0.12 とし、せん断摩擦の値を変えて結果を比較検証した

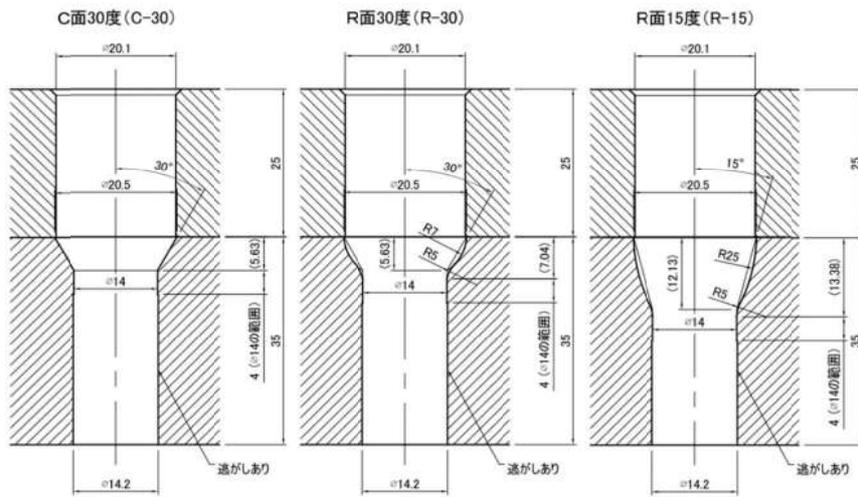


図 2-37 3パターンの絞り込み部形状

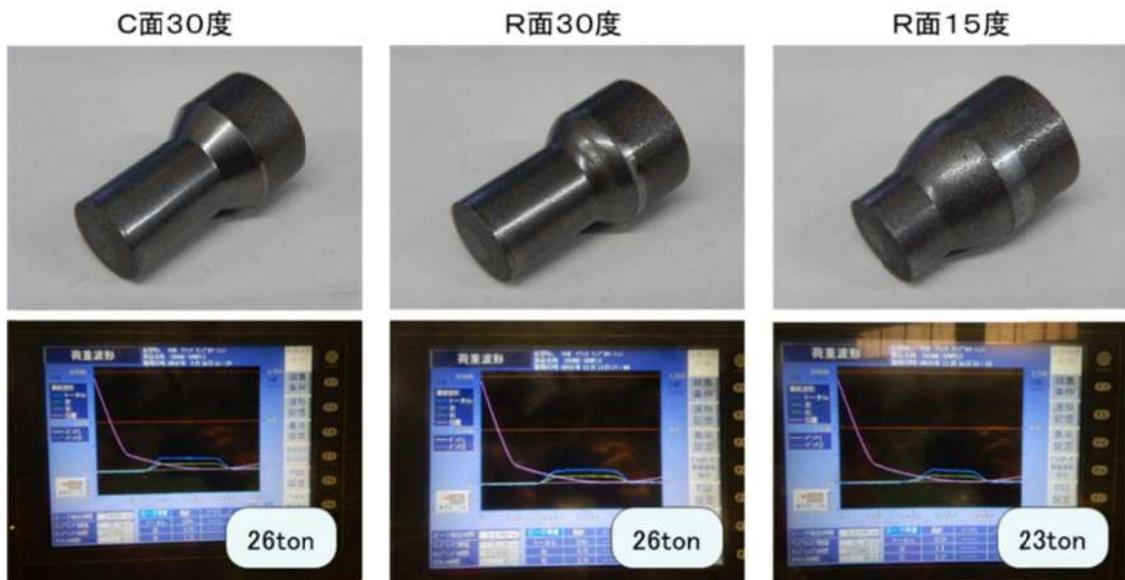


図 2-38 前方押出鍛造実機テストの結果

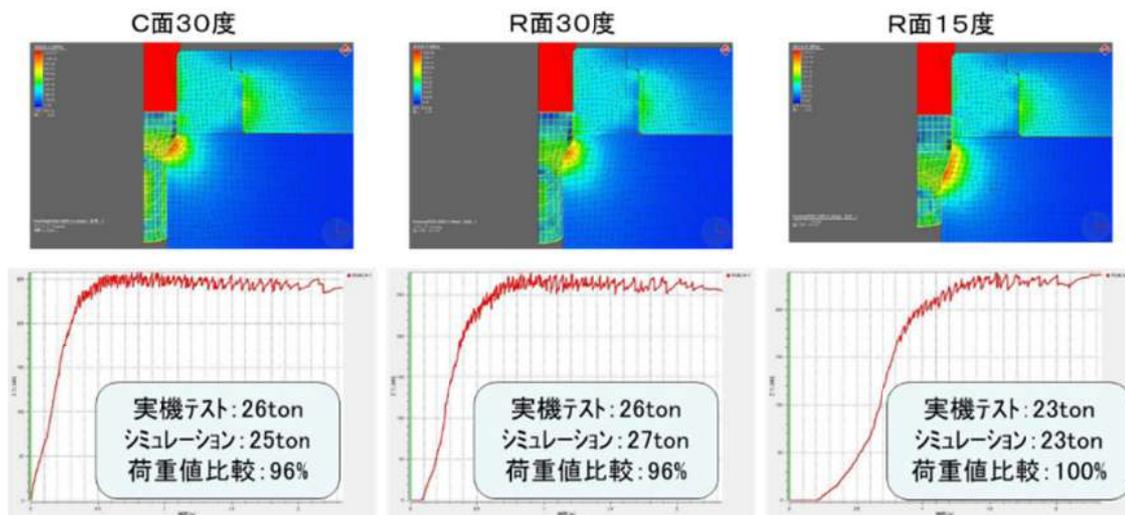


図 2-39 前方押出鍛造シミュレーションの結果

その結果、摩擦係数を クーロン摩擦=0.12、せん断摩擦=0.15 とした場合に実機テストとの比較で最も精度の高い荷重比較結果を得た（目標値=80%以上）

## 2-3 ボンデフリー化への取り組み

### 2-3-1 金型表面処理の課題への対応

コーティングメーカーとの協議を行ったうえで、試験の対象とする金型のコーティングを TiN / TiCN / TiAlN / AlCr / TiAlCr の5種類とした。（表 2-4）

表 2-4 コーティングの種類と代表的な特性

コーティング種類	膜硬さ (HV)	膜厚 ( $\mu\text{m}$ )
TiN	1700~2000	1~4
TiCN	3000~3500	1~4
TiAlN	2400~2600	1~4
AlCr	1800~2000	2~4
TiAlCr	2800~3200	2~4

試験で使用する潤滑油は、事項2-3-3で製作した試験油「潤滑油A」と、現在三陽製作所において使用している既存の冷間鍛造用潤滑油「潤滑油B」の2種類とした。（表 2-5）

表 2-5 潤滑油の種類と主な添加物および粘性

潤滑油 A	EP 剤（極圧添加剤）、FM 剤（減摩剤） 油性剤、硫黄、リン化合物、亜鉛、カルシウム 他 粘性（40℃）：137.2 $\text{mm}^2/\text{s}$
潤滑油 B	EP 剤（極圧添加剤） 油性剤、硫黄、リン化合物 他 粘性（40℃）：252.3 $\text{mm}^2/\text{s}$

金型表面処理の摩擦係数測定と密着性の評価方法については、ボールオンディスク試験 / ピンオンディスク試験 / ブロックオンリング試験 / リング圧縮試験 / ボール通し試験 の各種試験方法を検討したが、本事業の研究者だけでの検討ではなく、本分野への知見が深い複数の専門家から幅広い見解、助言を得たうえで最終的に以下の方法に決定した。

① 摩擦係数の測定 …… ボールオンディスク試験(図 2-40)

- 既に試験設備を有しており、試験片の製作も容易である。
- 点接触であるため比較的高い面圧を得られ、潤滑油を使用した評価も可能である。
- 摩擦係数が測定できるだけでなく、試料とボールの摩擦痕をマイクروسコープを使って表面観察することで、摩耗特性の評価も可能である。

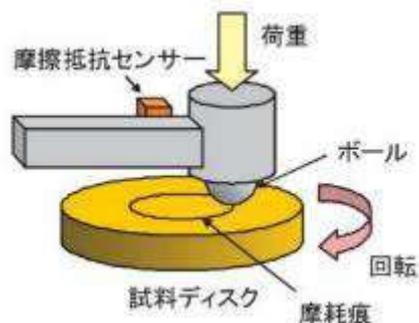


図 2-40 ボールオンディスク試験の概要

試験結果を表 2-6 に示す。

表 2-6 ボールオンディスク試験の結果(摩擦係数)

コーティング種類	潤滑油なし	潤滑油 A	潤滑油 B
TiN	0.634	0.128	0.116
TiCN	0.561	0.116	0.139
TiAlN	0.634	0.123	0.121
AlCr	0.602	0.117	0.099
TiAlCr	0.570	0.119	0.112
DLC (参考)	0.185	0.104	0.094

<相手材(静止サンプル)>

コーティング各種

基板：SUJ2

寸法：10.00 mm

<試験条件>

半径：5mm

速度：15mm/sec

荷重：5.00N

サンプリング周波数：20Hz

停止条件：287 回転

(約 10 分)

② 密着性の評価 …… ボール通し試験(図 2-41)

- 試験片の製作が容易で、試験の実施に関しても他の試験方法と比較して簡便である。
- 本研究で対象とするローターシャフトの鍛造に近い極圧条件が再現でき、潤滑油を使用した場合でも安定した試験結果が得られる。

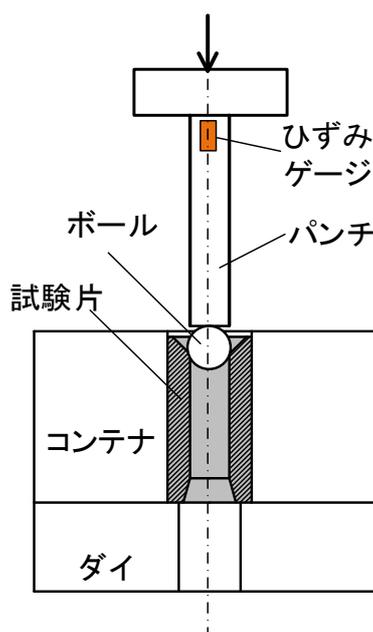
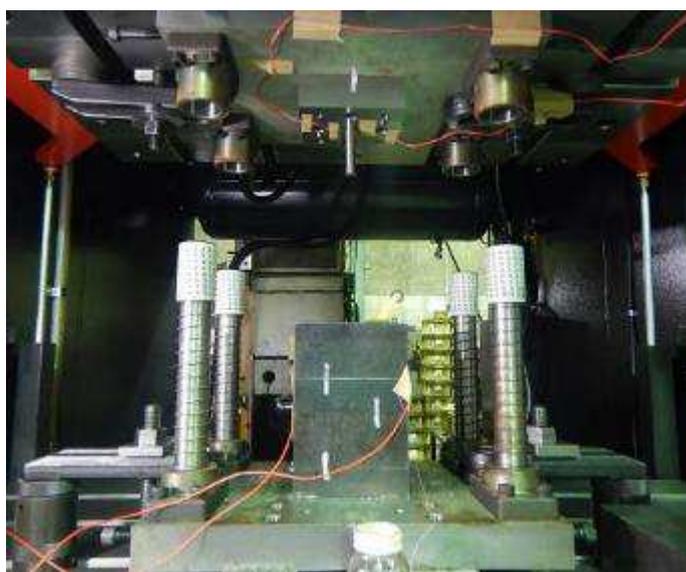
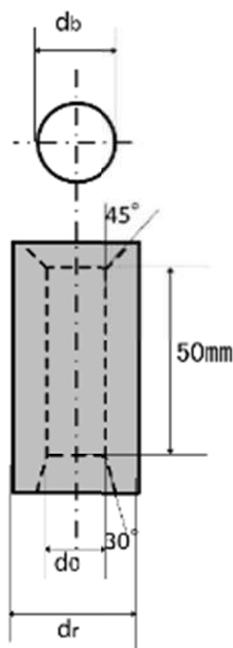


図 2-41 ボール通し試験の概要

ボール通し試験においても、コーティング 5 種類、潤滑油 2 種類で実施。耐焼付き性・剥離強度の比較評価を行った。試験条件を図 2-42 に、試験結果を図 2-43～図 2-46 に示す。



### ○ボール

ボール	
材質	SUJ 2
直径 $d_b$	15mm

### ○試験片

試験片	
材質	SS400
直径 $d_r$ / mm	30
内径 $d_0$ / mm	14.03(R=4%)、14.29(R=3%)

※内径：切削加工 表面粗さ  $Rz = 14\mu\text{m}$

### 断面減少率 $R$

$$R = \frac{d_b^2 - d_0^2}{d_r^2 - d_0^2}$$

押込み速度：等速15mm/s

図 2-42 ボール通し試験条件

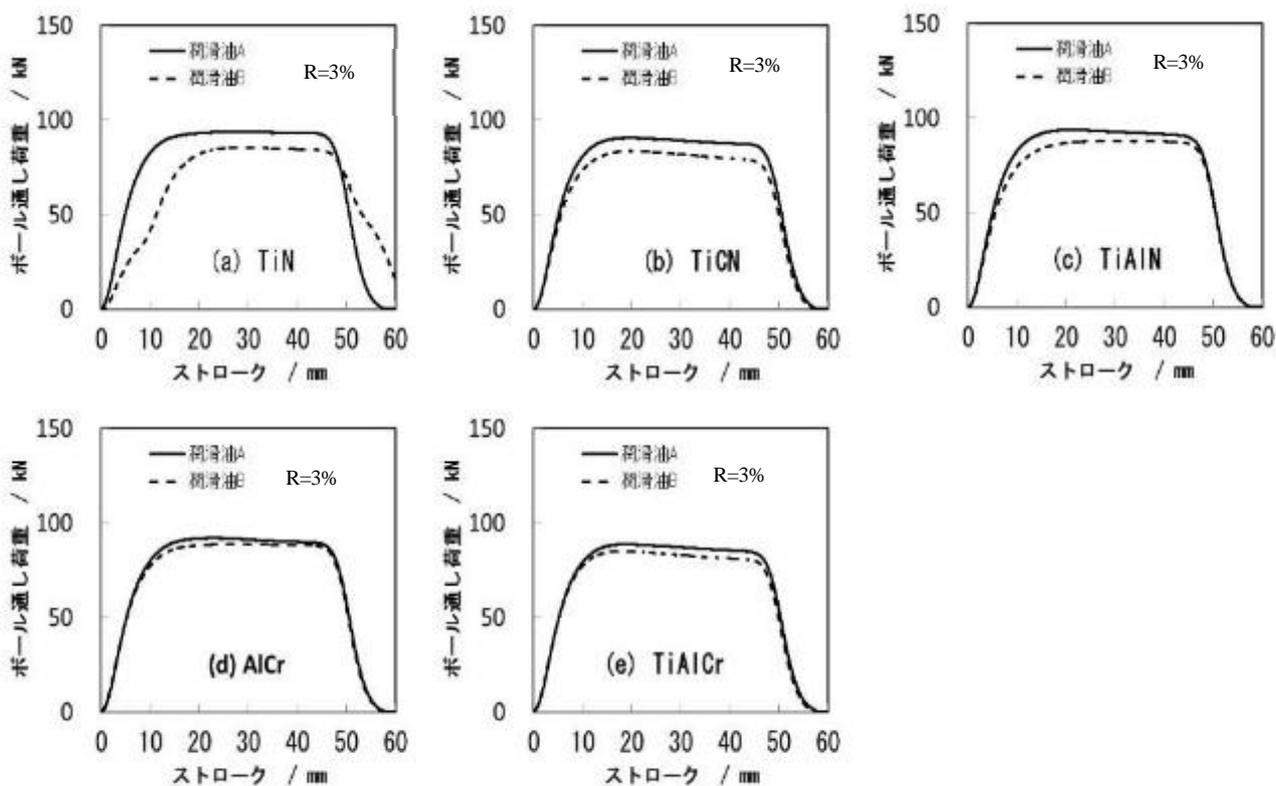


図 2-43 コーティングと潤滑油によるストロークと荷重の関係

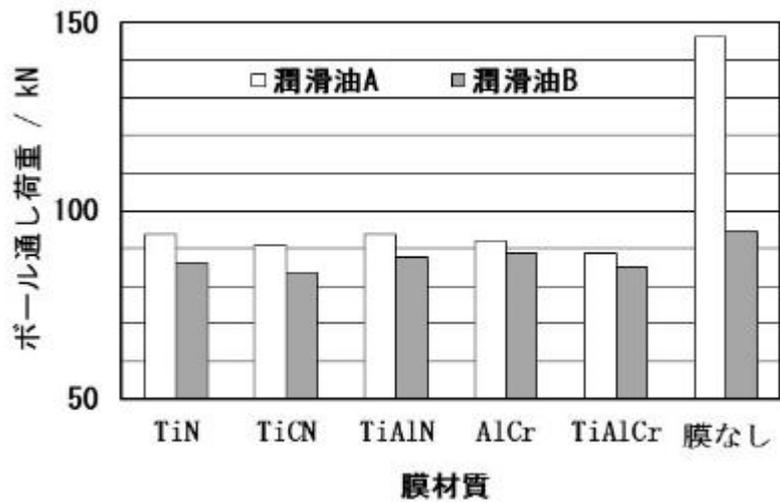


図2-44 R=3%の試験片内面

	TiN	TiCN	TiAlN	AlCr	TiAlCr	膜なし
試験油A	93.61	90.54	93.69	91.98	88.67	146.23
試験油B	85.93	83.54	87.63	88.61	85.01	94.53

図2-45 コーティングと潤滑油別の最大荷重

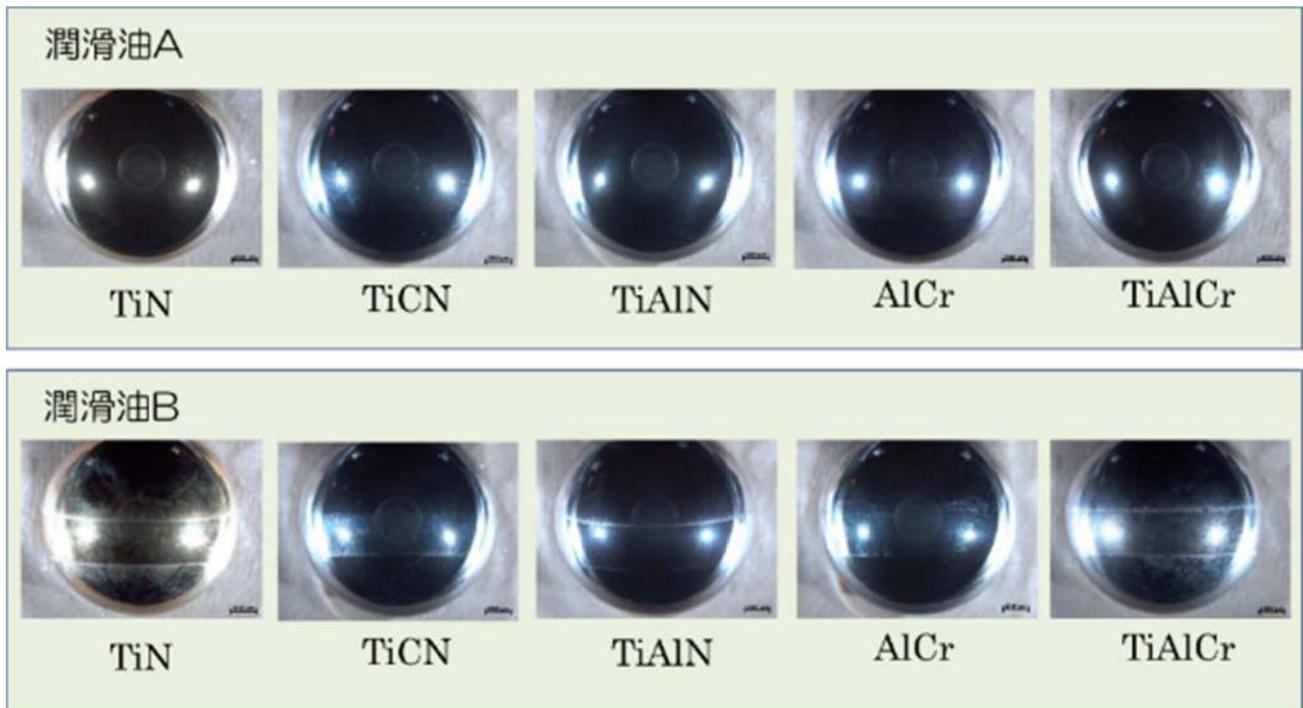


図2-46 試験後ボール表面

5つの中で低い荷重となった「TiCN」と「TiAlCr」について、SEM 観察および EPMA による凝着物の元素分析によって、目視だけではなく定量的な裏付けを進めた。(図 2-47、図 2-48)

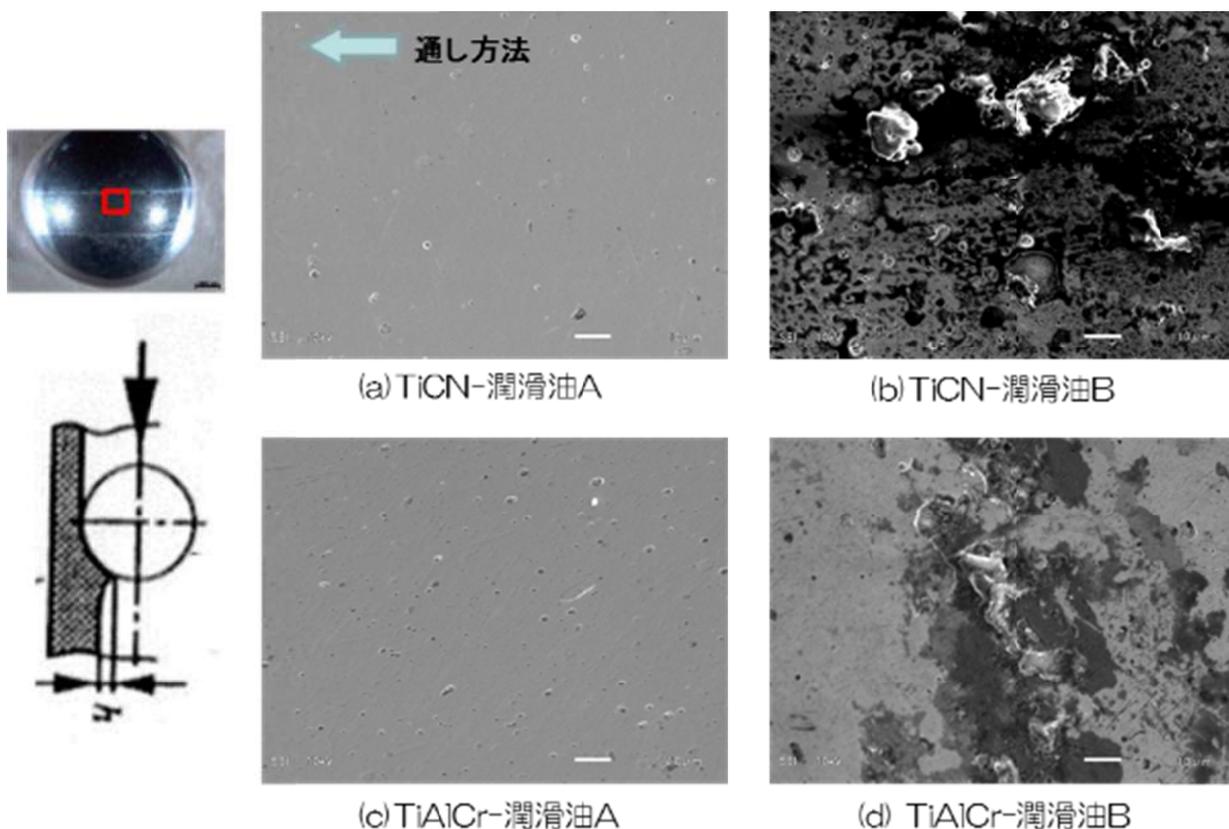


図 2-47 試験後のボール試験片接触表面の SEM 画像

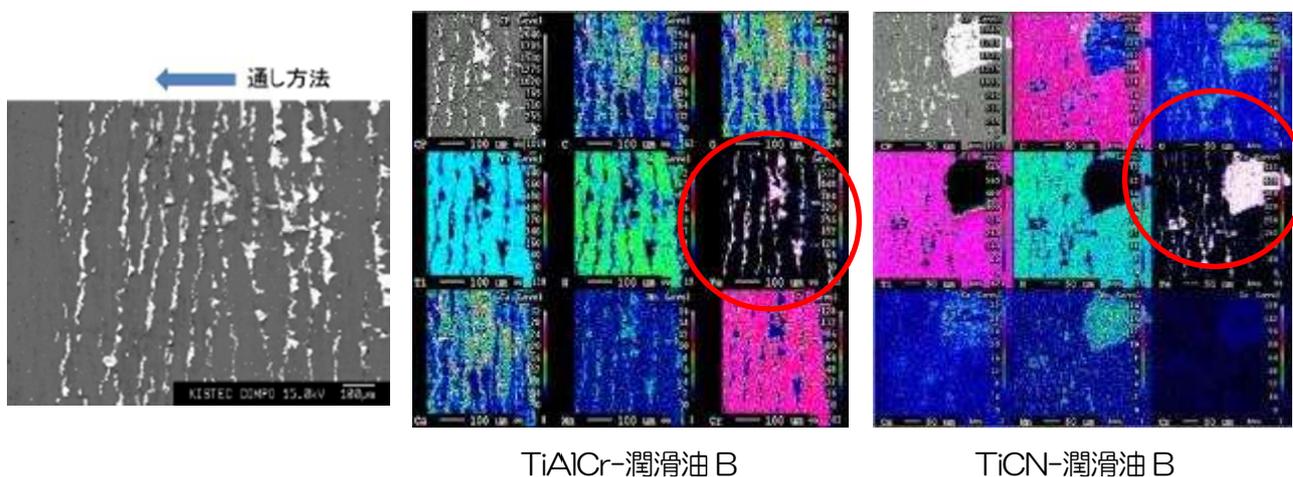


図 2-48 試験後のボール試験片接触表面 EPMA による元素分布

図 2-48 で赤丸印をしている箇所は、Fe (鉄) の成分が検出されていることを示している。すなわち、ボールと試験片で明らかに焼付き (凝着) が発生していることが確認された。

#### ◆潤滑油の評価

- 開発油（潤滑油A）の方が荷重の高い結果となったが、既存油（潤滑油B）に対して焼付き（凝着）の抑制効果は明らかに優れていることが確認された。
- 開発油の荷重が高くなった原因として、潤滑油の粘度の違いや、材料の破断よりも変形抵抗の方が大きくなったこと、などが推察される。

#### ◆金型表面処理（コーティング）の評価

- ボール通し試験では、TiCN および TiAlCr が良い結果を示した。
- コーティングにおいて、C（炭素）が入ると摩擦係数は下がるが、耐熱性が落ちる
- 極圧下にさらされる冷間鍛造金型へのコーティングでは、硬度とともに靱性を併せ持つ必要がある。

⇒TiAlCr は硬度が 2800~3200Hv、酸化温度も 1000℃と高く、かつ超多層膜で靱性も兼ね備えていることから、本事業における金型に最も適しているとの結論に至った。

### 2-3-2 サーボプレスのスライドモーションによる潤滑条件改善

#### ① 押し通し試験によるストップ&モーション効果の検証

試験では図 2-49 に示すように、同一平面上に T 字型に 3 台の JANOME 製サーボプレス：JPU-8004(最大荷重 80kN)を配置し、多軸サーボプレスとする。金型、パンチ、試験片は図 2-50 に示すように配置する。金型、パンチには SKD11 を用いた。金型の内径は $10^{+0.02}_0$ mm、パンチの外径は $9.97^{+0.01}_0$ mm とする。

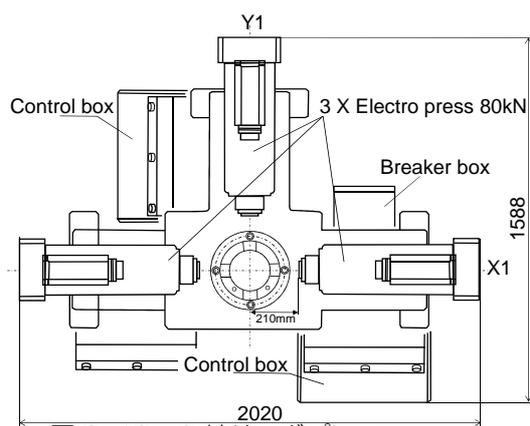


図 2-49 3軸サーボプレス



図 2-50 金型配置の概観

#### <試験方法>

摩擦の変動を一定背圧押し通し試験とストップ&モーション（以下 S&M）により明らかにする。図 2-51 に試験方法の概略図を示す。



図 2-52、2-53 より SS400 と A5056 とともに高い粘度である粘度 300 cSt の潤滑油を用いた方が全体的に摩擦係数は低くなった。これは今回の潤滑が流体のせん断抵抗となる液体潤滑ではなく、混合潤滑であったからと考えられる。よって高い粘度のものが適している。これにより S&M では粘度 300 cSt を用いることとした。

(b) ストップ&モーションによる摩擦係数の変化

S400 の S&M 有無による摩擦係数の比較結果を図 2-54 に示す。A5056 の S&M 有無による摩擦係数の比較結果を図 2-55 に示す。図 2-54 より停止中に摩擦係数が上昇している。これは除荷され弾性回復が起こる際、試験片が当たっていた金型部分には圧力がかかっていたがパンチ周りの金型にはパンチ径が細いため非常に低い圧力しかかかっている。このためパンチ周りの金型は弾性回復が起こらずパンチのみが弾性回復し金型とパンチの間隔が試験片と金型の間隔より広くなり、パンチ側に潤滑油が流れて油膜が薄くなっていると思われる。図 2-55 の A5056 では S&M を導入することにより全体を通して摩擦係数が低下した。これは除荷され弾性回復が起こる際に A5056 はヤング率が低いため金型より回復が多くなり金型と試験片の間隔が増加し再潤滑がおこり油膜が厚くなったと考えられる。

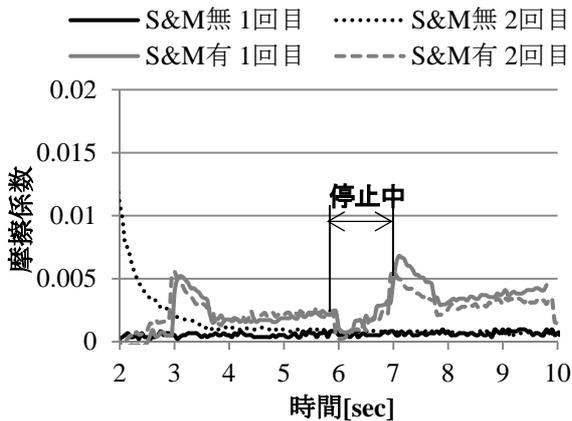


図 2-54 SS400 S&M の有無による摩擦係数の変化

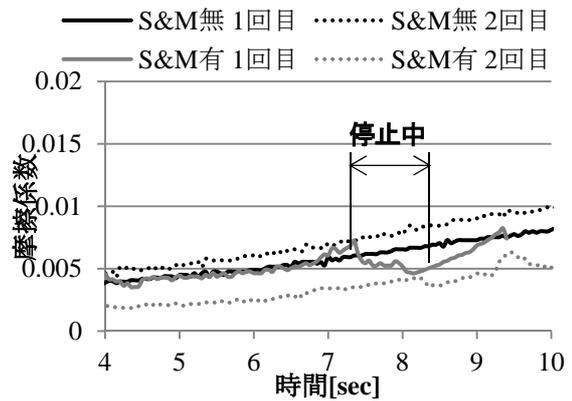


図 2-55 A5056 S&M の有無による摩擦係数の変化

② 前方押し鍛造におけるスライドモーション効果の検証

研究開発用の金型を新規に設計～製作。前方押し鍛造でモーションによる再潤滑効果を得るために、ワークを金型内で揺動させるというこれまでにない工法を確立する研究を進めた。(図 2-56) 試験片を実際の SWRM に変えて実験を実施。前方押しにおいて、金型分割面からの油注入を試みた。

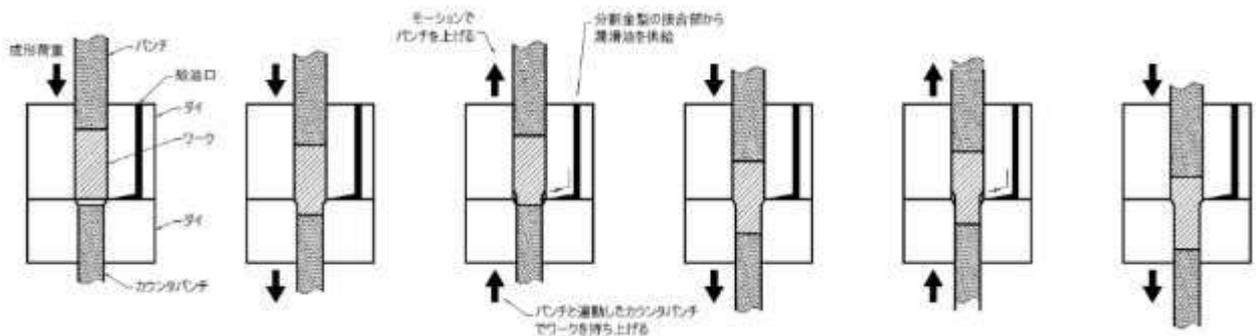


図 2-56 揺動鍛造概念図

実験の結果、2-2-2の③に記載の通り、C面 30度よりもR面 30度とR面 15度の方が荷重は若干下がったが、バリが発生は大きくなった。(図 2-57)

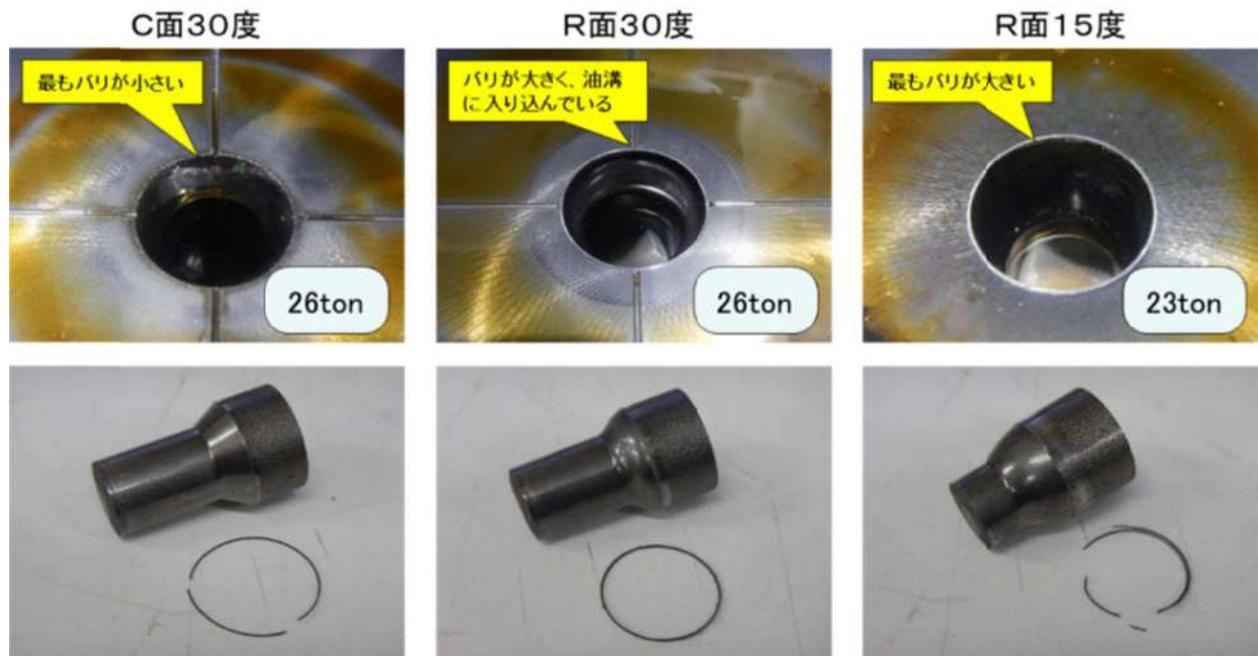


図 2-57 前方押出鍛造実機テスト（1段）の結果

油溝への材料の入り込みがなかったC面 30度の金型で、油に赤インクで着色し、実機テストを実施。ノックアウトした試験片の油溝部に油の付着が確認できた。(図 2-58、図 2-59)



図 2-58 前方押出用ダイインサート

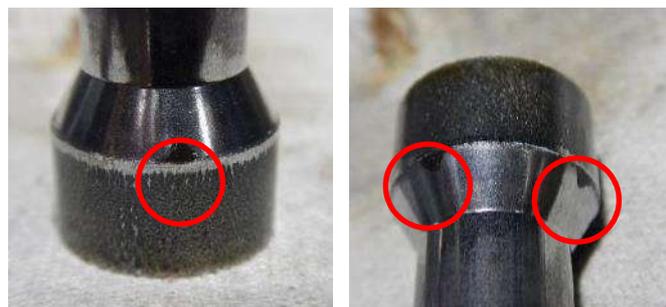


図 2-59 油が付着した試験片

続けて、モーションによる再潤滑効果を得るために、素材を金型内で揺動させる前方押出鍛造を行うと、荷重が逆に上がってしまうという現象が発生した。(図 2-60)

アンダーカット部に入り込んだバリが、揺動するにしたがって徐々に大きく成長し、逆に流動を妨げて焼付きを誘発した可能性がある。また、素材の加工硬化が進み、材料の流動を妨げたことも原因のひとつとして考えられる。

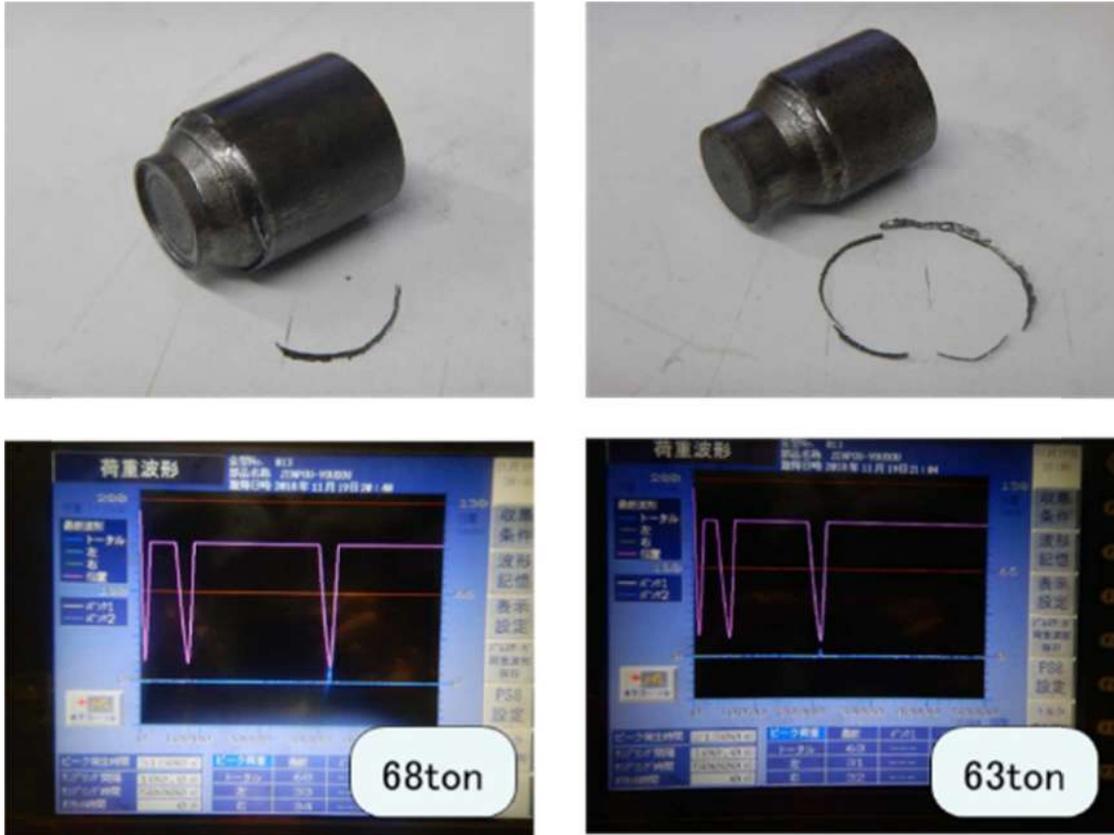


図 2-60 前方押出揺動鍛造テストの結果

断面減少率をローターシャフトに合わせ、絞り込み部の形状をシミュレーションによって最適化してバリの発生を最小限に抑えた２段階の前方押出実験金型を新規に設計～製作し、前方押出鍛造で再潤滑効果を得られる工法開発のために再度実験することとした。

設計に当たり、絞り込み部の最適形状をシミュレーションで検証、１段目＝15 度／２段目＝10 度が最も荷重の下がる結果となったため、この値を採用した。（図 2-61）

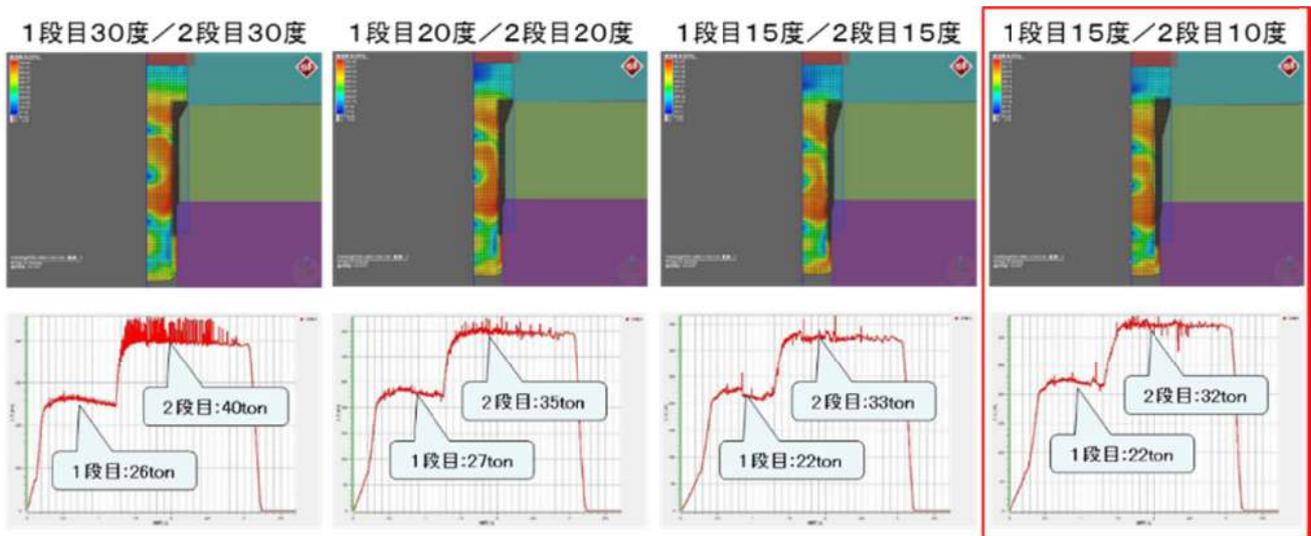


図 2-61 シミュレーションによる絞り込み形状の最適化検証

シミュレーションによって導き出された最適形状で実際の前方押出実験用金型を製作し、鍛造実機テストを行った結果が図 2-62 と図 2-63 である。2段階の前方押出実験においても、揺動を行うと逆に成形荷重が上がってしまうという現象が発生した。

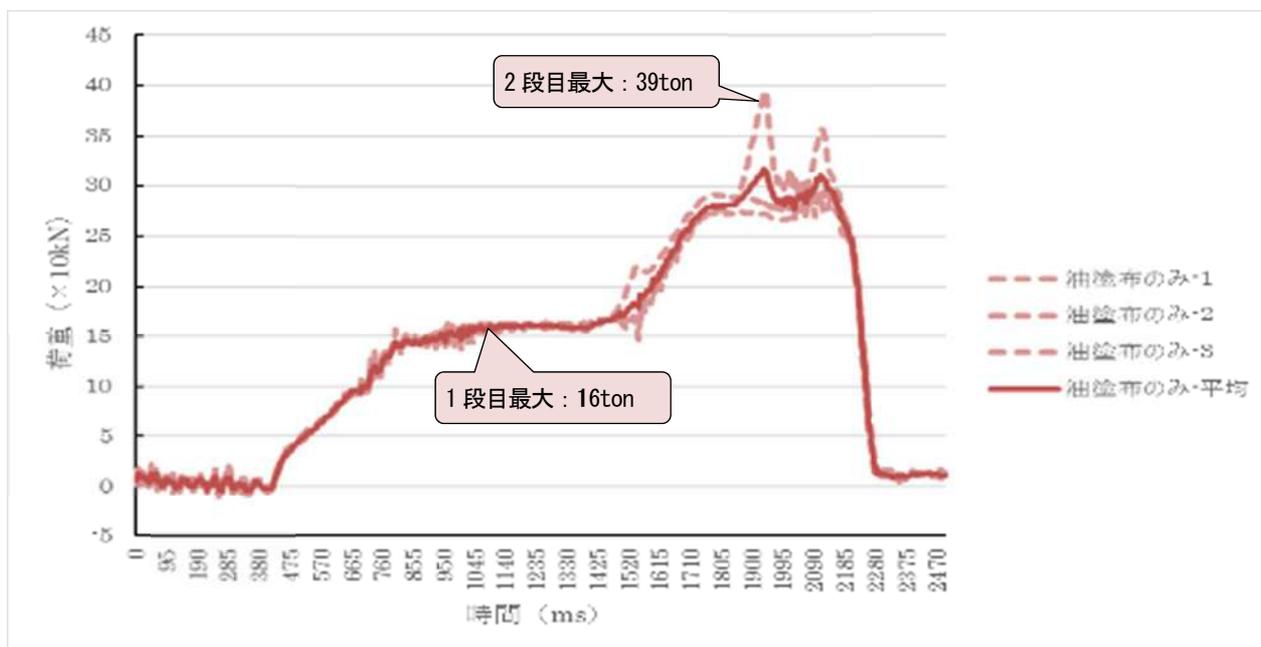


図 2-62 前方押出鍛造（2段）実機テストの結果



図 2-63 前方押出鍛造（2段）実機テストの結果

### ③ 新たな潤滑工法の検証

上述の結果をうけ、本事業の最終目的である多段軸部品の冷間鍛造1工程での製作に向けて、さらに新たな潤滑方式を考案。金型に改造を施し、実験を継続した。(図 2-64、図 2-65)

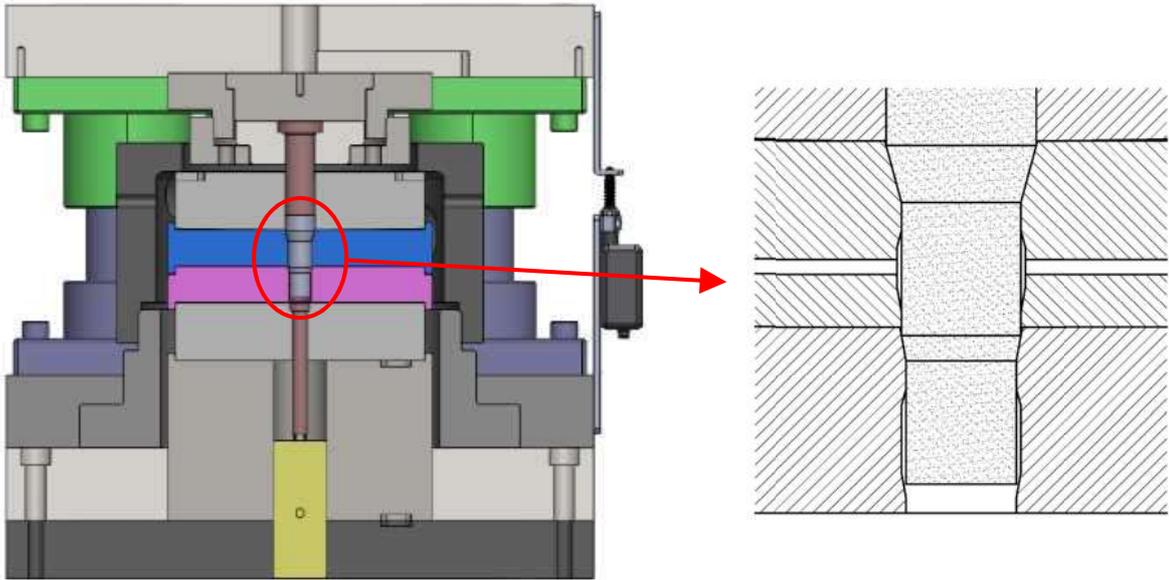


図 2-64 新たな潤滑方式の概要



図 2-65 新たな潤滑方式を採用した実験用金型

試験片および金型にあらかじめ潤滑油を塗布しただけの場合と、側面から注入した場合で各3回ずつ実験を行い、その際の荷重を比較したグラフを図 2-66 に示す。

試験片材質は S20C 球状化焼鈍材、加工速度は 15 mm/s、金型コーティングは TiAlCr、油は 2-3-3 項で開発した潤滑油（40℃粘度 101.3 mm<sup>2</sup>/s）である。

あらかじめ潤滑油を塗布しただけでは、油膜切れによって発生した凝着と思われる急激な荷重の上昇がみられた。潤滑油を側面から注入した場合にはそのような急激な荷重の上昇は発生せず、ピーク値で比較すると、1 段目で 16 → 14 トン〈約 12%ダウン〉、2 段目では 39 → 27 トン〈約 31%〉の荷重低減効果が確認できた。

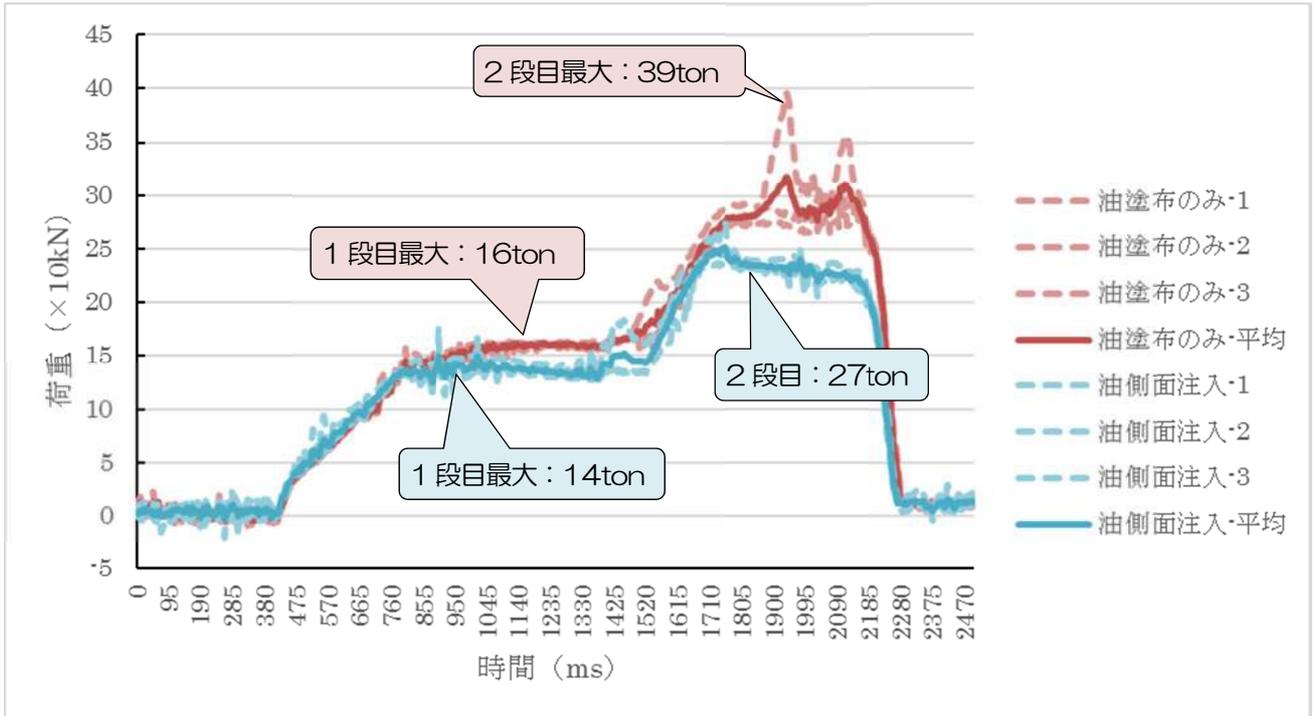


図 2-66 油塗布のみと油側面注入方式での成形荷重比較

また、加工後の試験片を観察すると、1段目絞り込み部の表面性状に明らかな違いがみられた。油塗布のみのものは絞り込み部が鏡面となっており、上部にはバリが発生してノックアウト時に削ぎ落とされた痕がある。これに対して油を側面から注入したものは、絞り込み部の面性状は加工前の状態に近く、上部にバリの発生がまったくない。これは、絞り込み部に十分な油膜が保持できており、流体潤滑状態が維持されていることを示している。(図 2-67)



図 2-67 油塗布のみと油側面注入方式での試験片比較

### 2-3-3 冷間鍛造用高性能潤滑油の開発

今回の潤滑油開発にあたって、評価については、図 2-68 に示す帯板引抜試験、および図 2-69 に示す後方押出加工試験を用いた。

帯板引抜試験は板状の試験片に潤滑油を表裏に均一に塗布し、任意の荷重で試験球を試験板に対して垂直方向に加圧し、そのままの状態では水平方向へ試験板を引っ張ることで試験板と試験球並びに試験プレートとの間で生じる摩擦面の変化を観察し焼付きが生じない荷重を求める。

後方押出加工試験は円柱状の試験片に潤滑油を塗油し、金型に設置後試験片の中央に向かい上型に取り付けたパンチを押し込むことで焼付きが生じる。焼付きが生じるまでの加工深さを求める。

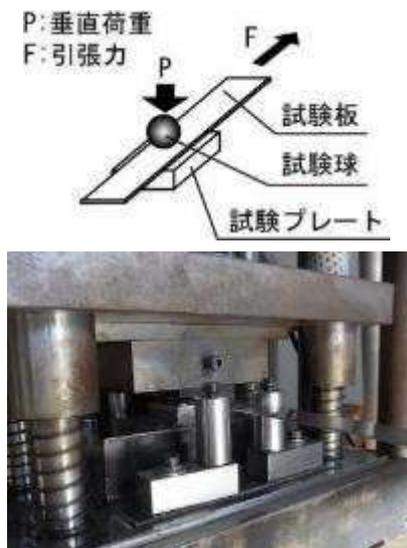


図 2-68 帯板引抜試験概略

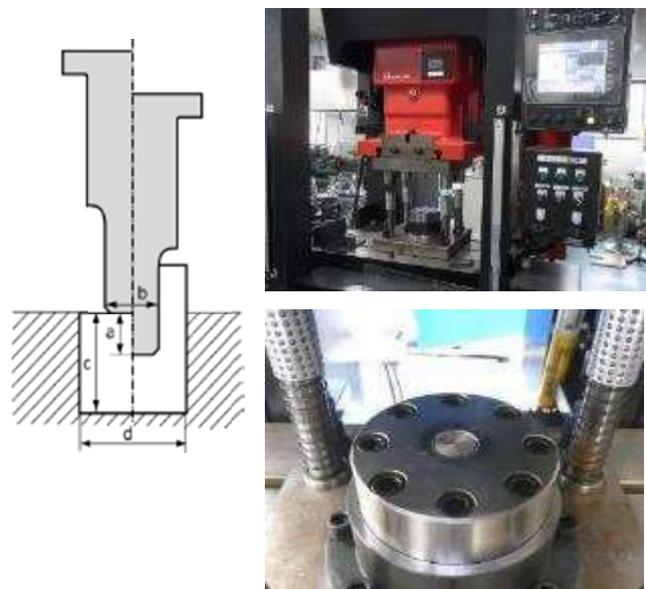


図 2-69 後方押出加工試験概略

#### ①ボンデ処理試験片と既存冷間鍛造用潤滑油との潤滑性能比較

##### <帯板引抜試験条件>

試験油：試験油 A（既存冷間鍛造潤滑油）  
 試験片：SPCC ダル材（ボンデ処理あり・なし）、L=500mm、t=1.0  
 試験プレート：超硬材  
 試験速度：170mm/s  
 総摩擦距離：450mm  
 試験荷重：190~260kgf

##### <後方押出加工試験条件>

試験油：試験油 A（既存冷間鍛造潤滑油、性状は表 2-8）  
 試験片：SDG3（ボンデ処理あり・なし）、 $\phi 32 \times h 32$   
 パンチ：超硬、 $\phi 15$   
 試験速度：40spm

表 2-8 試験油 A の性状

外観：目視	褐色透明液体
密度： $g/cm^3(15^\circ C)$	1.0395
粘度： $mm^2/s(40^\circ C)$	121.8
引火点： $^\circ C(COC)$	174
色相：ASTM	L 7.0

<帯板引抜試験結果>

表 2-9 各荷重における焼付き発生状況

	荷重 (kgf)							
	190	200	210	220	230	240	250	260
ボンデ処理試験片 +無潤滑	○							×
非ボンデ処理試験片 +試験油 A	○	×						

○ : 焼付き無し    × : 焼付き有り

表 2-10 (a) 焼付き直前・直後の荷重における摩擦表面変化 (ボンデ処理試験片)

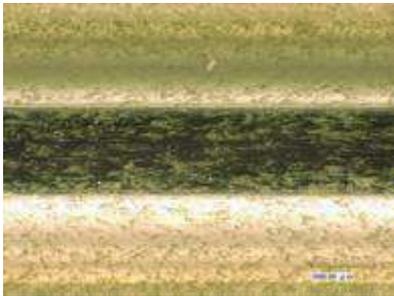
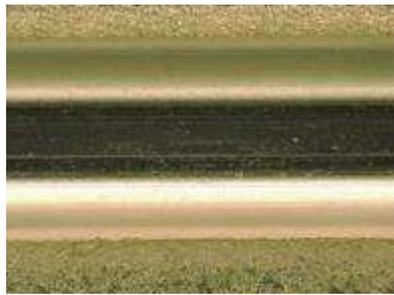
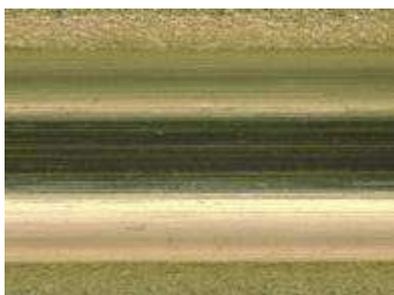
	荷重 : 250kgf	荷重 : 260kgf
ボンデ処理試験片 +無潤滑		

表 2-10 (b) 焼付き直前・直後の荷重における摩擦表面変化 (既存冷間鍛造用潤滑油)

	荷重 : 190kgf	荷重 : 200kgf
非ボンデ処理試験片 +試験油 A		

ボンデ処理試験片の焼付きが生じない荷重は 250kgf であるのに対し、非ボンデ処理試験片に試験油 A を塗油した状態では 190kgf と約 1.3 倍の荷重差がみられた。

<後方押出加工試験結果>

表 2-11 焼付き時の試験片内壁面及びパンチ先端

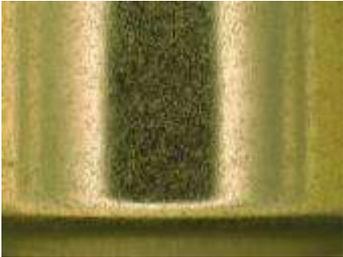
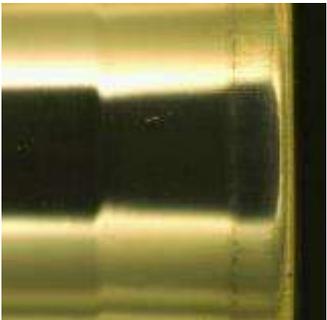
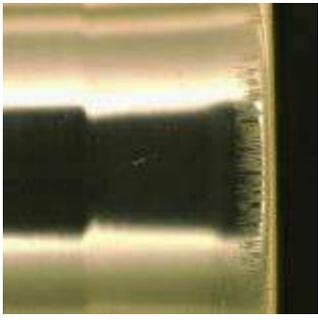
	ボンデ処理試験片 + 無潤滑	非ボンデ処理試験片 + 試験油 A
試験片内壁面 (50 倍)		
パンチ先端 (100 倍)		
焼付までの加工深さ	20mm	5mm

表 2-11 より、ボンデ処理試験片の焼付きまでの加工深さは、試験油 A の 4 倍程度であることがわかった。

また、ボンデ処理試験片の内壁面やパンチ先端の焼付きは試験油 A の方が激しいことがわかった。これは材料の変形に対する潤滑膜の追従性が影響していると考えられる。ボンデ被膜は材料表面に密着している物理的な膜であるのに対し、油潤滑は金属表面との化学反応で生成する反応膜が潤滑膜を担っている。化学的な反応膜は物理的な膜に比べ弱く脆いため大きな力がかかるとするに壊れ焼付いてしまう。表 2-9 の試験結果はその傾向が表れていると考えられる。

② 既存添加剤の最適組み合わせ試験調査

潤滑油に添加する添加剤は主に、硫黄化合物 (S-1、S-2、S-3)、有機金属塩 (Zn-1、Zn-2、Zn-3)、カルシウムスルホネート (Ca-1、Ca-2、Ca-3)、リン化合物 (P-1、P-2) がある。

油潤滑での耐焼付き性向上を目的とし、これら添加剤の最適な組み合わせについて調査を行った。

### <帯板引抜試験>

試験片：SPCC ダル材 (t=1.0)

試験プレート：超硬材

試験速度：170mm/s

総摩擦距離：450mm

試験荷重：100～210kgf

試験油：鉱物油に下記添加剤を 10%配合し粘度を 100mm<sup>2</sup>/s に調整した油剤を使用

(添加剤を併用する場合は各添加剤を 10%配合し粘度を 100mm<sup>2</sup>/s に調整)

(a) 硫黄化合物 S-1、S-2、S-3、

(b) 有機金属塩 Zn-1、Zn-2、Zn-3

(c) カルシウムスルホネート HB-1、HB-2、HB-3

(d) リン化合物 P-1、P-2

### <後方押出試験>

試験片：SDG3 (φ32×h32)

パンチ：超硬、φ15

試験速度：10spm

### <調査内容>

- 基油・添加剤の組み合わせで 60 種類の油剤を製作し、試験～評価を実施
- 結果が良好な 17 種を選抜し、後方押出試験のパンチを新たなものに交換して再試験
- 結果が良好な 2 種をもとに、極圧添加剤の配合量を変更して 17 種の油剤を製作して再試験
- 結果が最も良好な 1 種をもとに、より実加工に適した処方構成とするための調整を実施

この時点で、帯板引抜試験、後方押出試験共に対ボンドの 70%の性能を実現できた。

図 2-70 の試験後の試験片写真より、内壁面は大体上半分から焼付きが発生していることがわかった。これはパンチが下死点に到達するまでは問題なく、パンチが下死点から戻る際の油膜切れによる焼付きであることを示している。更なる改良点としては、パンチが戻る際に如何に油膜を切らすことなく潤滑性を保持できるかにあることがわかった。

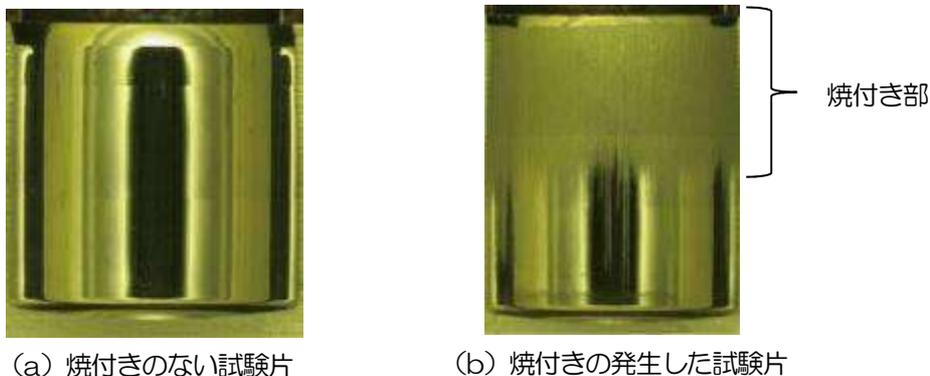
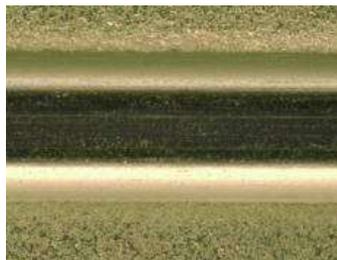


図 2-70 後方押出試験片の内壁面 (試験後)

上記の調査で最も良好な結果であった油剤（SP-12-3）をさらに調整した 12 種類の油剤で試験を実施した結果、後方押出加工試験において、サーボモーションを併用することで対ボンデ 80%の目標を達成することができた。（表 2-12、図 2-71、表 2-13、図 2-72）

表 2-12 帯板引抜試験結果

	帯板引き抜き試験 荷重 (kgf)												
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	250	260
ボンデ												○	X
SP-12-3								○	X				
FSP1								○	X				
FSP2							○	X					
FSP3							○	X					
FSP4					○	X							
FSP5							○	X					
FSP6								○	X				
FSP7								○	X				
FSP8						○	X						
FSP9					○	X							
FSP10								○	X				
FSP11								○	X				



摩擦痕拡大  
(焼付きなし：○)



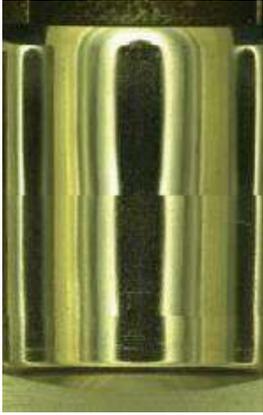
摩擦痕拡大  
(焼付きあり：×)

帯板引抜試験では、サーボモーションの再現ができないため、モーションなしで改良油剤の評価のみ実施  
⇒対ボンデ 70%の結果であった

図 2-71 帯板引抜試験片表面

表 2-13 後方押出加工試験結果

	後方押し出し試験 押し込み深さ (mm)												
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
ボンデ											○	X	
SP-12-3					○	X							
SP-12-3									○	X			
FSP1								○	X				
FSP2			○		○	X							
FSP3								○	X				
FSP4					○	X							
FSP5									○	X			
FSP6								○	X				
FSP7							○	X					
FSP8							○	X					
FSP9					○	X		X					
FSP10								○	X				
FSP11							○	X					



SP-12-3 焼き付きなし  
(押し込み深さ：18mm)



SP-12-3 焼き付きあり  
(押し込み深さ：19mm)

後方押出加工試験において、サーボモーションを併用することで対ボンデ 80%の目標を達成。

図 2-72 後方押出加工試験片表面

## 最終章 全体総括

グローバル競争にさらされている日本の製造業において、安い労働力を基盤とした海外からの低コスト品の流入により従来工法での競争力維持はもはや限界を迎えており、工法転換によるコストダウンの模索がなされている。

「MADE IN JAPAN」ブランドの品質を維持しつつ、国際社会での価格競争に勝ち抜くためには、大胆な発想で製法技術を革新的に進化させ、工程数の省略や性能の向上などの研究開発を推し進める必要がある。

そのような背景を受け、本プロジェクトは、「サーボプレス・CAE・分流鍛造の高度利用、高機能潤滑油の開発によって従来不可能であった中～小ロット生産に対応したボンデフリーの冷間鍛造技術を確立すること」を目的にスタートした。技術開発の方向性は以下の通りである。

①冷間鍛造において成形荷重を大幅に低減することが可能となる分流鍛造を複動式の専用機ではなく汎用のサーボプレスで実現するため、サーボプレスと連動した追従性の高いサーボバルブ制御の油圧ユニット（背圧、ロックアウト機構）を独自開発する。

→加工設備のダウンサイジング、汎用性の高い設備での中～小ロット生産

②一般的な金属材料データを用いるのではなく、金型材質の機械的性質を実際に測定し、そのデータをCAEに導入することでシミュレーション精度の向上を図る。

→試作回数削減による開発期間の短縮、製品設計や金型設計の最適化、金型の寿命予測

③鍛造におけるサーボプレスのスライドモーションによる再潤滑効果の研究、分割金型方式による金型内部への適切な表面処理（コーティング）の選定、ボンデ処理に匹敵する高い焼付き防止性と油膜追従性を有する液状の潤滑油の開発を行う。

→ボンデフリー化による環境配慮とコスト低減、省エネルギー化

これら項目に対して具体的な目標値を設定して研究開発を進めた結果、全ての目標値を達成することができた。

①目標値：加工トルク30%低減、加工エネルギー50%低減

→分流鍛造による加工トルクの低減効果が約31%得られ、スライドモーションによる加工トルクの低減効果が約6%得られた。

②目標値：シミュレーション結果と実機トライとの比較精度は、成形荷重で80%以上。

→前方押出鍛造において、シミュレーション結果と実機トライとの比較精度は、成形荷重で96%であった。

③目標値：モーション+潤滑油で、対ボンデ80%の性能実現

→添加剤の組み合わせで60パターンの油剤を作製し、評価試験を実施。後方押出加工試験において、サーボモーションを併用することで対ボンデ80%の目標を達成した。

本プロジェクトでは、参画機関全体での委員会を3年間通して毎年2回実施し、個別のミーティング、共同実験を以下のペースで定期的に行って綿密な連携を図りながら研究開発を推進した。

- (株)三陽製作所⇄東京電機大学は毎月の定例勉強会と年1回の個別ミーティングを実施。
- (株)三陽製作所⇄神奈川県立産業技術総合研究所は月平均2回の個別ミーティングと共同実験を実施。
- (株)三陽製作所⇄日本工作油(株)は年1回の個別ミーティングを実施。

特に CAE シミュレーションにおいて、(株)三陽製作所・東京電機大学・神奈川県立産業技術総合研究所の3者で共通の塑性加工シミュレーションソフトを導入することで、相互の連携を深めるとともに相乗的な解析技術の向上が図れたことは、産学連携による研究開発への支援事業であるサポーターティングイノベーションの大きな成果であった。

また、本プロジェクトの成果として得られた、CAE によるシミュレーションの精度向上、冷間鍛造金型に適した金型表面処理、冷間鍛造用高機能潤滑油については、環境配慮型の冷間鍛造工法の普及、事業化の展開に幅広く貢献するものと考える。