

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「アルミ鍛造の生産工程削減を可能とする潤滑油の開発」

研究開発成果等報告書

平成23年9月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人埼玉県産業振興公社

<成果報告書目次>

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	
1-1-1	研究開発の背景	1
1-1-2	研究開発の目的	1
1-1-3	研究の目標	1
1-2	研究体制	
1-2-1	研究組織及び管理体制	6
1-2-2	管理員及び研究員	8
1-2-3	経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	8
1-2-4	他からの指導・協力者	9
1-3	研究成果概要	
1-3-1	研究開発概要	10
1-3-2	研究結果概要	11
1-4	当該研究開発の連絡窓口	11

第2章 本論

2-1	潤滑膜形成技術の研究	
2-1-1	研究の背景・課題・目的・研究の方向性及び研究項目	12
2-1-2	ミストの高温金型への付着挙動	13
2-1-3	溶媒の付着効率向上の研究	17
2-1-4	潤滑成分（添加剤）による付着効率向上の研究	19
2-1-5	塗布方法による付着効率向上の研究	23
2-2	冷却性低減技術の研究	
2-2-1	研究の背景・課題・目的・研究の方向性及び研究項目	29
2-2-2	溶媒のタイプによる冷却性の研究	30
2-2-3	少量塗布による冷却低減の研究	30
2-3	焼付き防止技術の研究	
2-3-1	研究の背景・課題・目的・研究の方向性	32
2-3-2	焼付き防止性能を評価する鍛造試験法の開発	32
2-3-3	高圧下で膜追従性のある添加剤の探索：鍛造の据込み工法で評価	35
2-3-4	高圧下で膜追従性のある添加剤の探索：押出し工法で評価	45
2-3-5	アルミ表面粗さと潤滑膜形成の関係	52
2-3-6	鍛造後の内部組織観察と製品強度	52
2-3-7	粉体添加剤の粒度と焼付き防止性の研究	54
2-4	潤滑剤の配合の選択	
2-4-1	実機用配合の試作	57
2-4-2	実機性能の評価と配合の見直し	60
2-5	最終配合の決定	
2-5-1	最終配合の品質と性能	61
2-5-2	目標達成度合いの検証	62

第3章 全体総括

3-1	研究開発成果	67
3-2	研究開発後の課題	67
3-3	事業化計画	68
	「参考文献」	69

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

1-1-1 研究開発の背景

自動車業界は、燃費規制・CO₂削減等の対応が急務であり、鉄鋼部品からアルミ部品へと軽量化を進めている。アルミ部品の中で鍛造部品は身近なアルミホイールが挙げられるが、軽量化を進める中で大型部品（サスペンション用のハイマウント・ナックルや将来はシャシー等）を生産するようになってきている。小型部品は、アルミ素材の加温・軟化後冷える前の一段階圧縮・変形で作られている。一方、大型部品の生産工程は、第一段目でアルミ素材が冷え硬化するので、二段階目の再加熱、その後二段階目の圧縮が必要となっている。

従来技術は、水溶性潤滑剤を使うため、金型温度を170℃に設定している。170℃以上では、潤滑剤が熱い金型で沸騰し潤滑剤成分が金型に付着し難く、付着した成分膜が薄くなり、金型とアルミ素材が焼き付くので金型を200℃以上にできない。また、金型を水で冷却するのでアルミ素材の冷却も起こり、高い圧縮圧力が必要となる。従って、水溶性潤滑剤によるハイサイクル化・ダウンサイジング化は困難であった。

これらの課題を解決するため、A社（大型鍛造部品・生産メーカー）はダイカスト分野で高温付着・少量塗布技術を有する青木科学に鍛造分野への応用を求めてきた。これが発端となり、高温で金型に潤滑成分が付着し易い、かつ冷却の少ない鍛造用「油性」潤滑剤の開発を開始した。更なる冷却性低減のため、第三回「ものづくり大賞・経済産業大臣賞」を受賞した静電塗布可能なダイカスト用配合技術（油は絶縁体で静電塗布できない）と静電塗布を鍛造分野に活用し、A社と共同研究を進め鍛造用油性潤滑油に係る二種類の特許を出願した。しかし、少量塗布条件下での高温時の潤滑性が不足しており、更なる改善が必要となっていた。

1-1-2 研究開発の目的

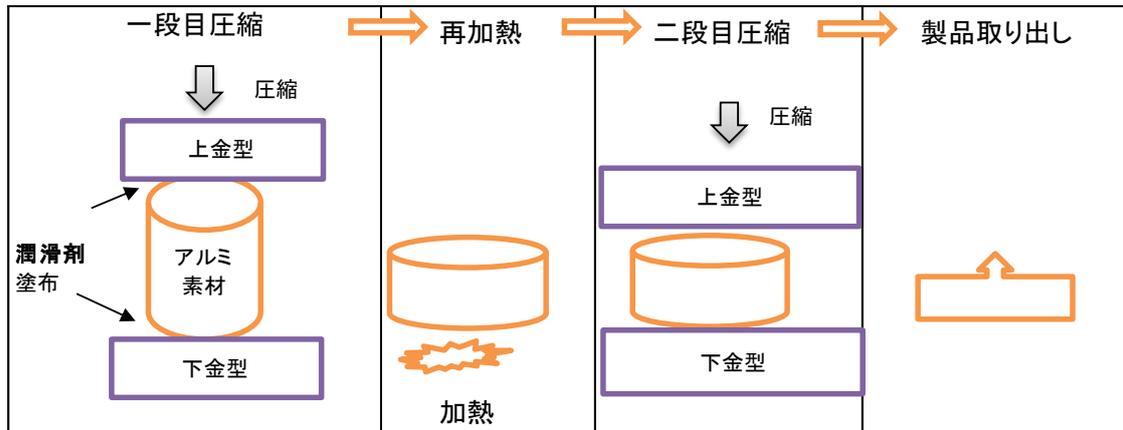
本研究開発の目的は、生産工程の20%ハイサイクル化及び30%のダウンサイジング化を実現するための新たな鍛造用潤滑剤の開発である。

1-1-3 研究の目標

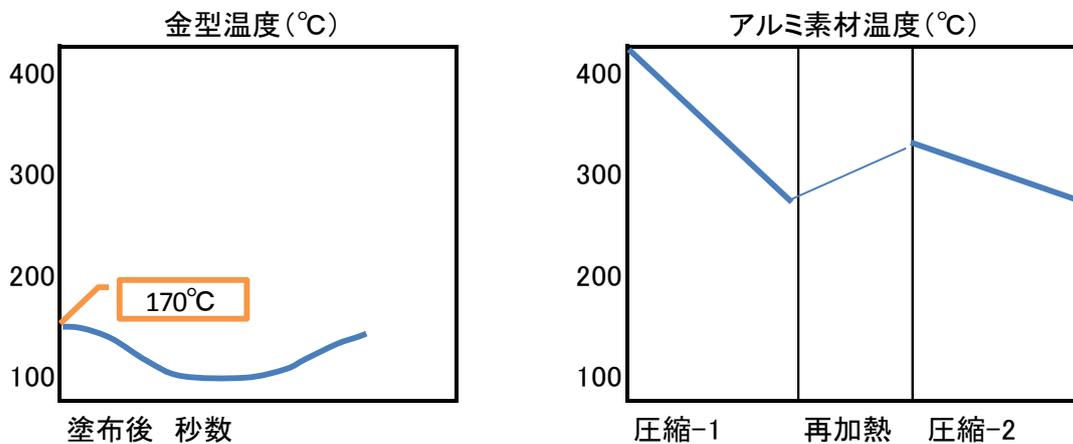
(1) 現在の生産工程

鍛造の生産工程は、小型部品用の一段階生産工程と、大型部品の二段階生産工程に大別される。図-1は大型部品用の二段階生産工程であり、図中の「再加熱」と「二段目圧縮」の工程を削除した工程が小型部品用の一段階生産工程である。潤滑剤から見て、大型及び小型部品で使える潤滑剤を開発することが効率的であるので、大型部品用の二段階生産工程を対象として、潤滑剤の開発目標を設定した。

図－1：鍛造工程概要



図－2：工程中の温度変化



(2) 生産工程上の課題

課題－1：水溶性潤滑剤を塗布するため、金型温度を 170°C に設定している。170°C 以上で潤滑剤を塗布すると、熱い金型で潤滑剤の主成分である水成分がライデンフロスト現象（以降、LF 現象と称す。詳細は 2 章を参照：専門用語の解説－1 P 1 3）と呼ばれる沸騰を起こし、金型面から跳びはねる。その結果、潤滑剤が金型に付着し難く、金型面上の油膜が薄くなり、油膜とアルミ素材が焼き付く。従って、金型設定温度を 170°C 以上の高温にできないとの問題がある。

課題－2：水溶性潤滑剤の塗布量は多量であり、金型を冷却するので金型温度が若干低下し（図－2）、初期金型温度の 170°C に回復するのに時間が掛かる。

課題－3：450°C のアルミ素材は 170°C の金型で圧縮されるので冷却される。また、金型に残った若干の水の気化によりアルミ素材は更に冷却される。その結果、一段目圧縮後、アルミ素材は約 300°C に冷え、一段目圧縮でも高压な圧縮が必要となる。即ち、水溶性潤滑剤によるダウンサイジング化は困難である。

課題－4：300°C に冷却されたアルミ素材は硬いので、再度アルミ素材を 350°C まで加熱するための再加熱工程が必要である。水溶性潤滑剤では、サイクルタイムの短縮が困難である。

(3) 対策

全体の対策の方向性は、圧縮終了時まで、アルミ素材温度を高く保つことである。その結果、①再加熱工程を省略でき、サイクルタイムの短縮が可能となる。また、②圧縮終了時でもアルミが柔らかく、圧縮圧力を低減できる。即ち、プレス機のダウンサイジング化を可能とする。

具体的対策－１：課題－１の金型設定温度（170℃）を高温化する。これを達成するためには、水溶性潤滑剤に代えて、LF現象を400℃まで起こさない「油性」潤滑剤を金型へ塗布する。その結果、高温でも油膜を厚く確保でき、金型を300℃以上まで加熱が可能となる。

具体的対策－２：課題－２の「水溶性潤滑剤の多量塗布による金型冷却」を低減するため、特に、300℃へ高めた金型の潤滑剤塗布による温度低下を極力低減するため、**金型への潤滑剤の塗布量**を低減する。鋳造用離型剤で蓄積した知見の「油性潤滑剤は付着効率が良い」を活用し、油性化により少量塗布を達成する。加えて、鋳造用離型剤で蓄積した「静電塗布型潤滑剤と静電塗布」技術を鍛造用潤滑剤にも活用し、金型への潤滑剤の付着効率を更に高め、その分、塗布量を削減し、最終的に潤滑剤による金型の冷却を低減する。

具体的対策－３：加えて、水に比べ油の気化熱は約1/6である。潤滑剤を油性化することで潤滑剤の気化熱の低減を通し金型及びアルミ素材の冷却を低減する。

具体的対策－４：課題－４の再加熱工程の削除は、上記の具体的対策－１、２、３の結果として達成する。

上記課題と潤滑剤側の具体的対策を表－１にまとめる。表－１の具体的対策を通し、本事業の目的を達成する。

表－１ 課題と具体的対策

課題	課題内容	具体的対策
1	水溶性潤滑剤のため金型温度が170℃	油性潤滑剤で、金型温度を300℃へ
2	水溶性潤滑剤の多量塗布による金型冷却	少量塗布の油性で、金型冷却の低減 付着の優れた静電塗布で冷却低減
3	水の気化による金型冷却	気化潜熱の少ない油性で冷却低減
4	アルミ素材の再加熱工程が必要	対策－１，２，３で対応

表－２ 対策と目的

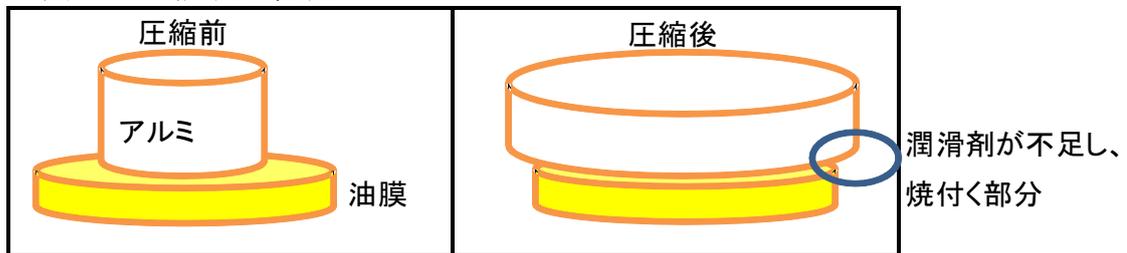
具体的対策	直接的効果	効果
油性化－１	金型高温化・再加熱工程の削減	ダウンサイジング化 ハイサイクル化
少量塗布	塗布時間の短縮	ハイサイクル化
静電塗布	少量塗布	ハイサイクル化
油性化－２	冷却性低減・再加熱工程の削減	ダウンサイジング化

新たな課題と対策

表－2の対策を講じると、少量塗布のため潤滑能力の低下により「圧縮時の焼付き」が懸念される。これが新たな課題である。図－3に示すように、アルミ素材の圧縮前の潤滑膜は十分幅広い。しかし、圧縮後は、アルミ素材が約50%伸びるので、潤滑膜が不足する部位ができる。その部分は、金型と接し、焼付きを起こす可能性がある。

新たな対策としては、少量塗布条件下でも、より優れた潤滑性を付与する必要がある。単に単位面積当たりの潤滑性が良い潤滑膜ではなく、アルミ素材の伸びに沿って潤滑膜が広がる性質（膜追従性）もあると好ましい。最悪、油膜を厚くすることで補うことも対策の一つである。

図－3 油膜追従性

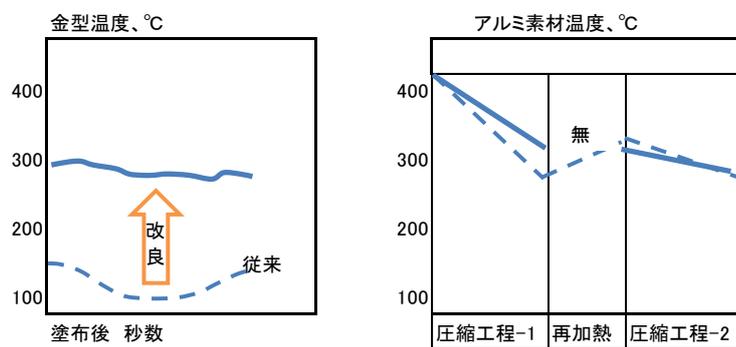


(4) 研究の具体的目標

表－3 具体的研究目標

項目	細目	従来	本研究
温度 (図－4)	金型初期設定	170℃	300℃
	1段圧縮後の素材	300℃	330℃
	再加熱後の素材	350℃	なし
	2段圧縮後の素材	300℃	300℃
潤滑剤	溶媒	水溶性	油性（炭化水素）
塗布量		基準	1/10
気化熱		539 cal/g	90 cal/g
塗布方法	潤滑剤組成 スプレー方法	非静電塗布型 通常スプレー	静電塗布型 静電ガン
潤滑膜	膜追従性	有	10倍に強化

図－４ 工程中の温度変化の目標値



(5) 研究項目

表－１～３の研究を実施するための潤滑剤に係る研究項目を表－４にまとめる。

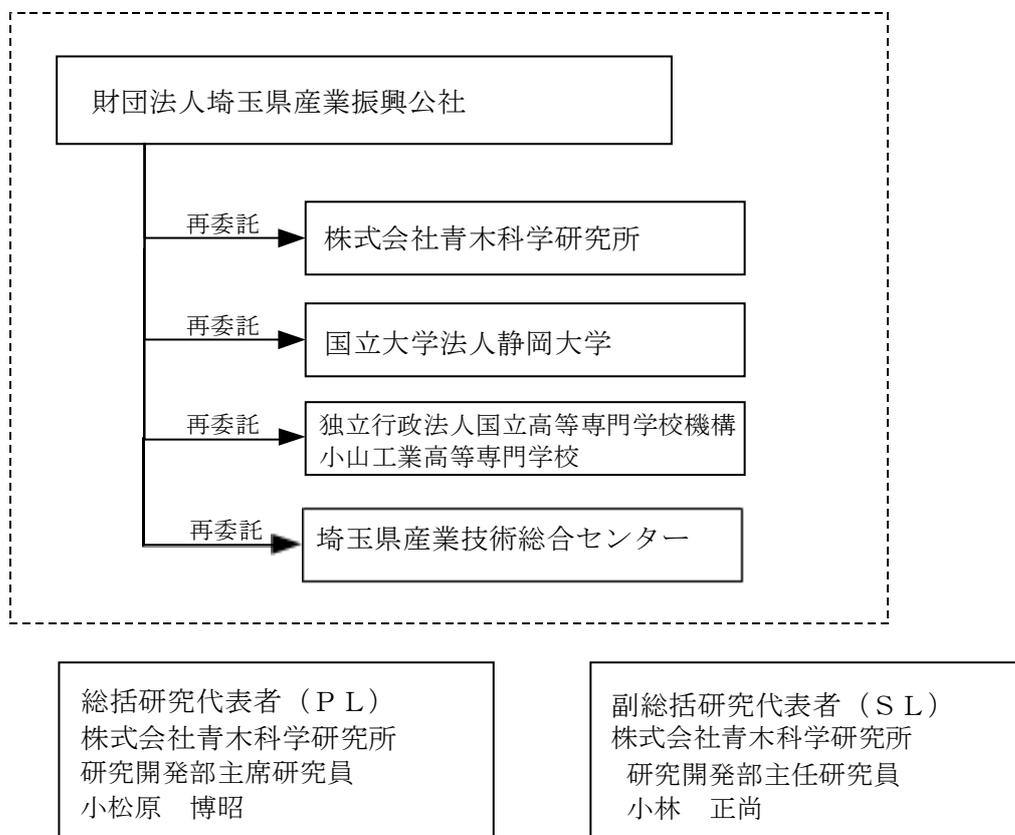
表－４：研究項目

項目の区分	研究内容
２－１	潤滑膜形成技術の研究
２－２	冷却性低減技術の研究
２－３	焼付き防止技術
２－４	潤滑剤の配合の選択
２－５	最終決定の配合

1-2 研究体制

1-2-1 研究組織及び管理体制

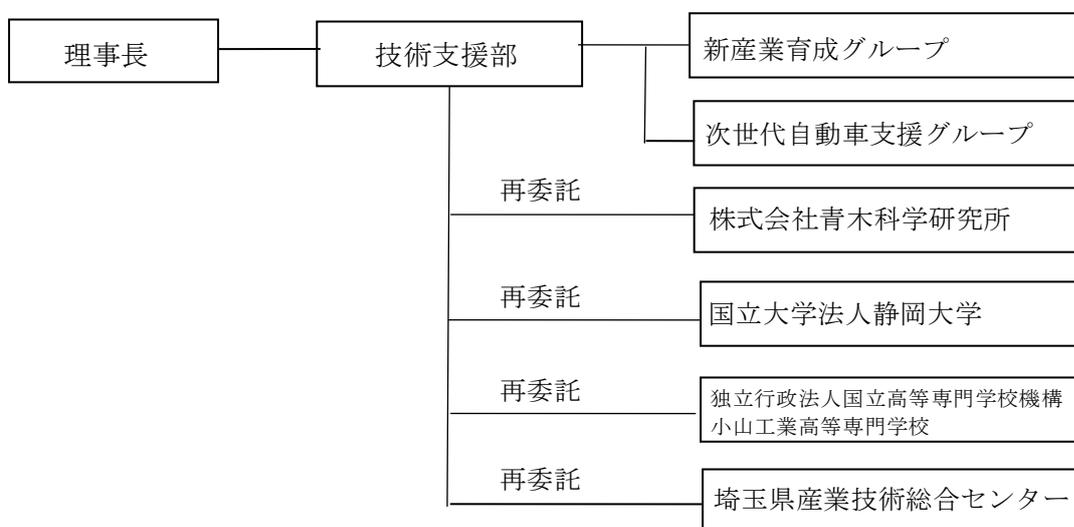
(1) 研究組織（全体）



(2) 管理体制

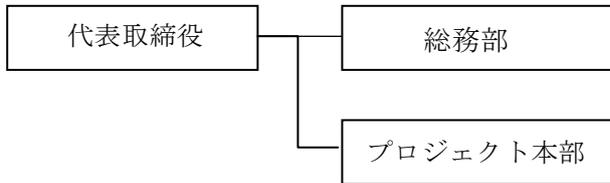
① 事業管理機関

[財団法人埼玉県産業振興公社]

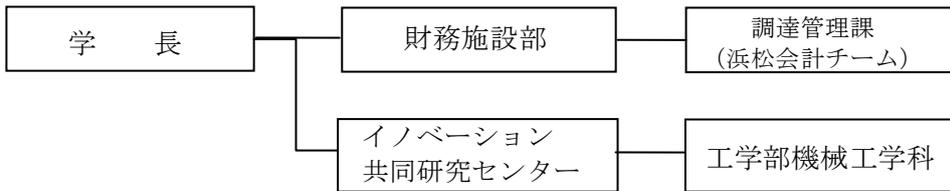


②再委託先

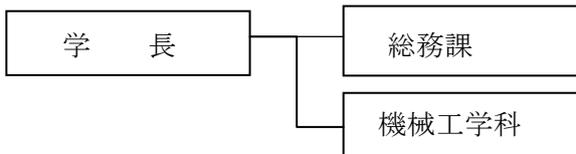
[株式会社青木科学研究所]



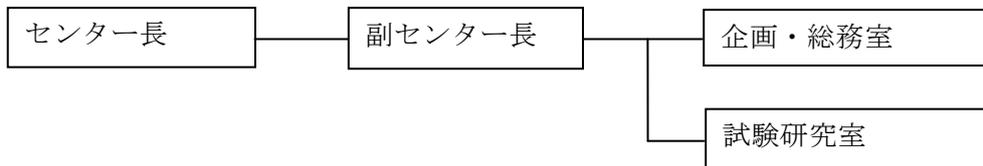
[国立大学法人静岡大学]



[独立行政法人国立高等専門学校機構小山工業高等専門学校]



[埼玉県産業技術総合センター]



1-2-2 管理員及び研究員

【事業管理者】 財団法人埼玉県産業振興公社

氏名	所属・役職	実施内容
井上 崇	技術支援部 次世代自動車支援グループ 主査	プロジェクトの管理・ 運営
中島 和広	技術支援部 新産業育成グループ 主査	プロジェクトの管理・ 運営

【再委託先】（研究員）

株式会社青木科学研究所

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
小松原 博昭	研究開発部 主席研究員	2-1、2-2、2-3、2-4、2-5
小林 正尚	研究開発部 主任研究員	2-2、2-3、2-4
保坂 秀雄	研究開発部 主席研究員	2-2、2-3、2-4
清水 俊明	研究開発部 主任研究員	2-1、2-2、2-3、2-4

国立大学法人静岡大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
中村 保	機械工学科 教授	2-3

独立行政法人国立高等専門学校機構小山工業高等専門学校

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
高島 武雄	機械工学科 教授	2-1

埼玉県産業技術総合センター

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
永野 正明	金属材料・評価担当 担当部長	2-3

1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

（事業管理者）

財団法人埼玉県産業振興公社

（経理担当者） 技術支援部新産業育成グループ 主査 中島 和弘

（業務管理者） 技術支援部 部長 中島 規之

（再委託先）

株式会社青木科学研究所

（経理担当者） 総務部 経理担当 田中 房

（業務管理者） プロジェクト本部 本部長付 大平 博文

国立大学法人静岡大学

(経理担当者) 財務施設部 調達管理課長 西川 正孝

(業務管理者) イノベーション共同研究センター 牧澤 久光

独立行政法人国立高等専門学校機構小山工業高等専門学校

(経理担当者) 総務課 財務係長 本多 亮介

(業務管理者) 総務課 評価・地域連携係長 宇津木 崇史

埼玉県産業技術総合センター

(経理担当者) 総務経理・管理運営担当 担当部長 山岸 善行

(業務管理者) 試験研究室長 北村 英三

1-2-4 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	備考
小松原 博昭	株式会社青木科学研究所 研究開発部 主席研究員	委 PL
小林 正尚	株式会社青木科学研究所 研究開発部 主任研究員	委 SL
保坂 秀雄	株式会社青木科学研究所 研究開発部 主席研究員	委
清水 俊明	株式会社青木科学研究所 研究開発部 主任研究員	委
中村 保	国立大学法人静岡大学 機械工学科 教授	
高島 武雄	独立行政法人国立高等専門学校機構 小山工業高等専門学校 機械工学科教授	
永野 正明	埼玉県産業技術総合センター 金属材料・評価担当部長	
A氏	A社	アドバイザー
B氏	B社	アドバイザー
石井 博之	財団法人埼玉県産業振興公社 産学連携コーディネータ	
井上 崇	財団法人埼玉県産業振興公社 技術支援部次世代自動車支援グループ 主査	

1-3 研究成果概要

1-3-1 研究開発概要

鍛造工程のサイクルタイム短縮、ダウンサイジングを目標に、従来の水溶性潤滑剤に代えて、鍛造工程中のアルミ素材の温度低下を最小限に抑えることが可能な潤滑剤を開発するため、以下のテーマについて研究した。

(1) 潤滑膜形成技術の研究

目的：アルミ素材が接触する金型を現行の 170℃から約 300℃へ高めても、潤滑膜を形成できる潤滑剤及び塗布条件・塗布方法による付着効率の向上を検討する。

成果：潤滑剤の主成分である溶媒の 300℃における「金型面上での LF 現象（突沸）」と添加剤を固定しながら溶媒を変えた場合（4 水準）の付着効率を検討した結果、石油系の溶剤—1を溶媒にすると良いことが分かった。また、溶媒を固定し各種添加剤（10 種類）を変えた場合、付着効率が変わることも分かった。（4）項で配合が選定されるまでの潤滑膜形成と冷却性を検討するための暫定的な添加剤を選定し、300℃でも付着・油膜形成することを確認した。付着効率を高める塗布条件は、塗布量が多い、塗布用エア一圧が低い、塗布距離が短いことであることも分かった。塗布方法としては静電塗布が約 30%付着効率を高めることも確認できた。

(2) 冷却性低減技術の研究

目的：潤滑剤による金型冷却を低減する手法の検討。

成果：溶媒を従来の水から溶剤—1に代えることで、気化による冷却性を 1/6 に抑えられることを見出した。加えて、上記（1）項の成果を活用し、付着効率を高めた分を少量塗布化（1/10 以上）し、合計で 1/60 以下の冷却性を達成できる可能性を見出した。

(3) 焼付き防止技術の研究

目的：上記（1）、（2）項の成果である少量塗布に向かうため、単位容量当たりの潤滑性の向上を研究する。

成果：通常の据込み加工と過酷な押出し加工における潤滑性を評価した。まずは、据込み加工条件下で、100 トンのプレス機で 60 種類の添加剤を評価した。その中から数種類の潤滑性の良い添加剤を見出し、溶剤—1と組み合わせで試作—5を作成した。次に、より過酷な潤滑条件の押出し加工に優れた試作—E（試作—5に極圧添加剤を追加）を作成した。

(4) 潤滑剤の配合の選択

目的：試験機を使った上記（3）項の成果である試作用添加剤が実機にも適応できることを確認する。

成果：据え込み加工条件の実際の鍛造機で、試作—5が優れた潤滑性能を有することを確認した。

(5) 最終配合の決定

目的：上記(4)項までに得られた成果から、本委託事業の目的に合致する配合を決定することと、その配合を実機において性能向上度合いを検証する。

成果：最終配合を3種類に決定した。①据込み加工用に試作—5、②その高性能版としての静電塗布用の試作—5 S、③押出し加工用の試作—Eである。静電塗布用の試作—5 S潤滑剤が、本委託事業の最終目的である実機での生産工程のハイサイクル化及びダウンサイジング化に貢献することを検証できた。

1-3-2 研究結果概要

従来は、水溶性潤滑剤の突沸を抑えるため金型温度は170℃に制限されている。新たに開発した油性潤滑剤は300℃の金型でも使用可能でありアルミ素材を高温で加工できる。(水溶性潤滑剤は300℃で焼付きを発生し使用できないことを確認した。)加えて、①潤滑剤の油性化と②静電塗布による少量塗布が相まって、金型冷却が低減され、最終的にはアルミ素材を従来よりも高温で加工できる。その結果、二段圧縮生産中のアルミ素材の再加熱工程が削減でき、最終的には本研究の目標である次の二点を達成できると判断した。

(1) 生産工程のサイクルタイムを21%短縮(目標は20%短縮)

再加熱工程の削除、少量塗布によるスプレータイムの短縮、水を乾燥するための作業の時間等を短縮できる。

(2) 生産工程のダウンサイジングは39%(目標は30%低減)

金型によるアルミ素材の冷却を低減、及び、開発した潤滑剤の低摩擦性能により高温でのアルミ素材の圧縮が可能となり、高温の柔らかいアルミ素材の加工が可能となる。即ち、低い圧力で圧縮が可能となり、圧縮装置の小型化が可能となる。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

(管理法人)

財団法人埼玉県産業振興公社

技術支援部 主査 井上 崇

E-mail: takashi@saitama-j.or.jp

〒330-8669

埼玉県さいたま市大宮区桜木町1丁目7番地5

(統括研究代表者)

株式会社青木科学研究所

研究開発部 主席研究員 小松原 博昭

E-mail: h_komatsubara@lubrolene.co.jp

〒367-0117

埼玉県児玉郡美里町白石620

第2章 本論

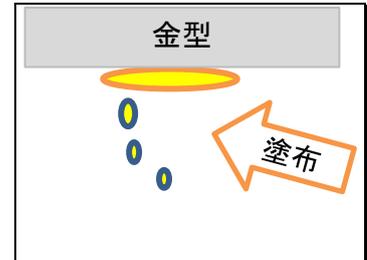
2-1 潤滑膜形成技術の研究

2-1-1 研究の背景・課題・目標・研究の方向性及び研究項目

(1) 背景

第一段目の圧縮工程に先立ち、図-1に示す様に塗布工程がある。この工程は、上下に設置された金型へ潤滑剤をスプレーで塗布する数秒間の工程である(図-5)。

図-5 塗布工程



(2) 課題

金型温度が高いと、LF現象を起し、潤滑剤ミストが金型に付着し難いため、焼付きの原因となる。潤滑剤で金型面を冷却し、金型温度を下げ、焼付きを防止することもある。また、焼付きを防止するため、過剰に潤滑剤を塗布し、焼付き部以外の部分の油膜を厚くし過ぎていることもある。

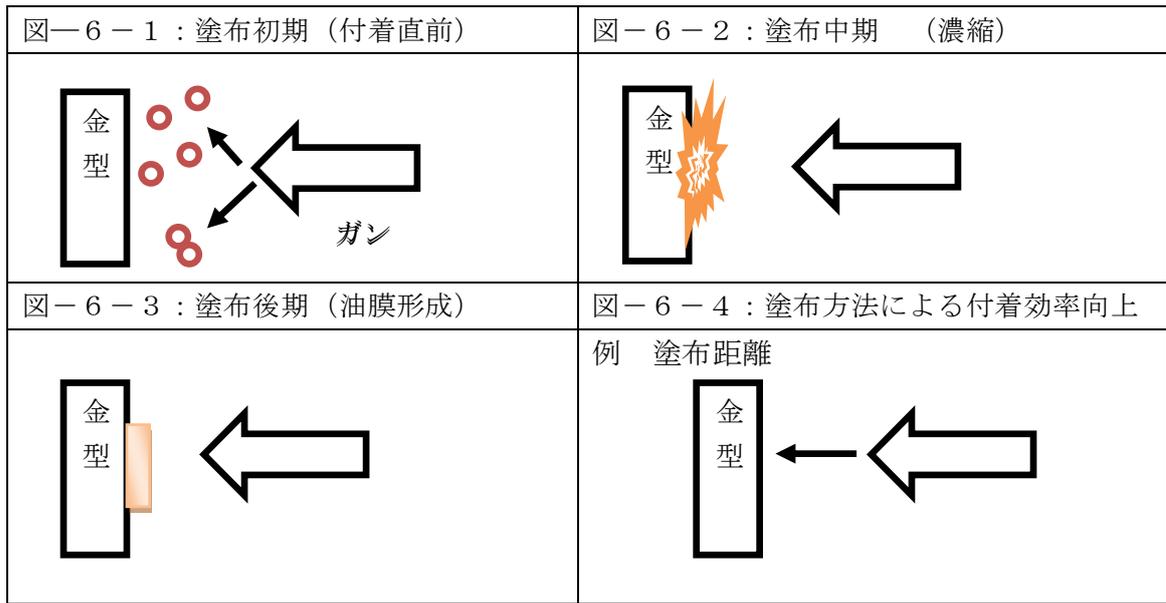
(3) 目標

鍛造工程時、潤滑剤の少量塗布を可能とする潤滑膜形成技術を研究する。

(4) 研究の方向性

少量塗布を可能とするためには、塗布工程中の解析が重要である。

- ①塗布された潤滑剤の個々のミストが高温の金型に接触する際、ミストが突沸する(図-6-1)。突沸すると、金型面から飛び出し、金型への付着効率が悪化する。潤滑剤を突沸し難くすることで、少量塗布を可能とする。
- ②金型に接触したミスト中の溶媒は気化し、残った潤滑成分が金型に濡れながら濃縮していく(図-6-2)。溶媒の気化速度を最適化し、付着効率を高め、少量塗布を達成する。また溶剤濃度を低めることで少量塗布に寄与する。
- ③金型に付着した潤滑膜が金型面上で「垂れ流れにくい半乾燥膜」を形成することで、垂れ流れによる油膜形成疎外を最少化できる(図-6-3)。即ち、潤滑成分の適正化で、垂れ流れを防止し最少塗布を促進する。
- ④塗布方法(塗布距離、塗布圧力、塗布ガンのタイプ等)を最適化し、付着効率を高め、最少塗布量を達成する(図-6-4)。



(5) 研究項目

上記の方向性を勘案し、具体的研究項目を表-5にまとめる。

表-5 2-1項の研究項目

番号	項目	研究の再委託先
2-1-2	ミストの高温金型への付着挙動	小山高専、高島工博
2-1-3	溶媒の付着効率向上の研究	青木科学研究所
2-1-4	潤滑成分 (添加剤) による付着率向上の研究	青木科学研究所
2-1-5	塗布方法による付着効率向上の研究	青木科学研究所

2-1-2 ミストの高温金型への付着挙動

(1) 目的

金型温度を 170℃から約 300~330℃へ高めるため、金型面上での潤滑剤の L F 現象 (突沸) の挙動を解析する。

専門用語の解説-1 L F (ライデンフロスト) 現象

フライパン上の水滴	金型面の水滴
<p>熱いフライパンの上に水滴を落とす。水滴が分裂し、踊りながら蒸発する= L F 現象。この時に水滴が外にこぼれる。</p> <p>原因 水滴の底部が瞬時に加熱され気化。 気化したガスが約 1700 倍に膨張し、水滴を押し上げる。</p>	<p>「下」金型で L F 現象を起こし潤滑剤が跳びはねても、多くの液滴は金型に付着する。しかし、「上」金型で L F 現象を起こすと殆どの液滴は跳びはね、金型に付着しない。</p> <p>L F 現象を起すと、付着する潤滑膜は薄くなり、焼付きの原因。</p> <p>対策は潤滑剤の L F 発生温度を高めること。水溶性より油性が好ましい。</p>

(2) 方法

水の LF 現象を解析した(文献-1) 専門家の小山高専・高島博士に依頼し、10 種類の試作試料を評価した。

図-7に示す LF 現象計測器と 35mm カメラ及び高速度カメラ (200 mm Macro Lenz) を使用し、加熱した金属 (黄銅) 面上に液滴 1 滴 (約 0.05 cc) を垂らす。金属板に接触した液滴の下部が急激に加熱され、ガス化し膨張する。この膨張力で液滴が押し上げられ、跳びはねる。液滴が跳びはねたら、金属板の温度を 5℃ 下げ、同じ観察をする。更に 5℃ 温度を下げ、液滴が跳びはねなくなる温度を見出し、LF 温度とする。

また、液滴の分裂や突沸状況を高速度カメラで、又は肉眼で観察する。更に、高速度カメラの映像から、液滴の蒸発時間を測定する。

図-7 : LF 現象測定器と高速度カメラ



(3) 評価試料

LF 現象は、液滴の揮発性に影響される (文献-1、文献-2)。従って、溶剤の揮発性を因子とした試料 8 種類と粉体 (CaCO_3 炭酸カルシウム) を混合した 2 種類の試料、合計 10 試料を観察した。鍛造用潤滑剤配合を決定する前であるため、基本的には鑄造用油性離型剤 (青木科学製 WFR-3R) の組成から、本研究用試料を作成する。各試料の具体的成分を「評価結果の表」に示す。

(4) 測定結果

試料-8 の「油性鍛造用試料と CaCO_3 粉体の混合物」を評価結果の一例として図-8に示す (液滴の横幅は 3.2mm、金属板温度は 324℃)。金属板へ接触直後に核沸騰状態であり、LF 温度を超えていることが高速度カメラから、観察できた。金属板の温度を下げ、この試料の LF 温度は 320℃ と判定した。

図-8 評価結果



10 試料の評価結果を表－6にまとめる。

表－6 : LF 温度の評価結果

番号	組成	LF温度℃	物性	観察のメモ
0	水	160		文献－1より
1	溶剤－1(高度精製飽和系)	320	引火点86℃	
2	溶剤－1 95% 高粘度石油系基油 5%	350		添加効果あり 突沸発生あり
3	溶剤－1 95% 菜種油5%	350		添加効果あり 突沸No-2より弱い
4	溶剤－2(高度精製飽和系)	340	引火点106℃	
5	PA0-2	400	引火点160℃	
6	PA0-6 (中粘度合成基油)	500以上	引火点240℃	
7	溶剤－1 97% CaCO ₃ 3%	320	粒径：5 μm	添加効果なし
8	溶剤－1 97% CaCO ₃ 3%	330	粒径：21 μm	添加効果なし
9	WFR-3R (青木科学製DC離型剤)	460	水0%	
10	WFR-3EC (青木科学製DC離型剤)	460	0.5%水含有	少量の水の影響なし

(5) 評価

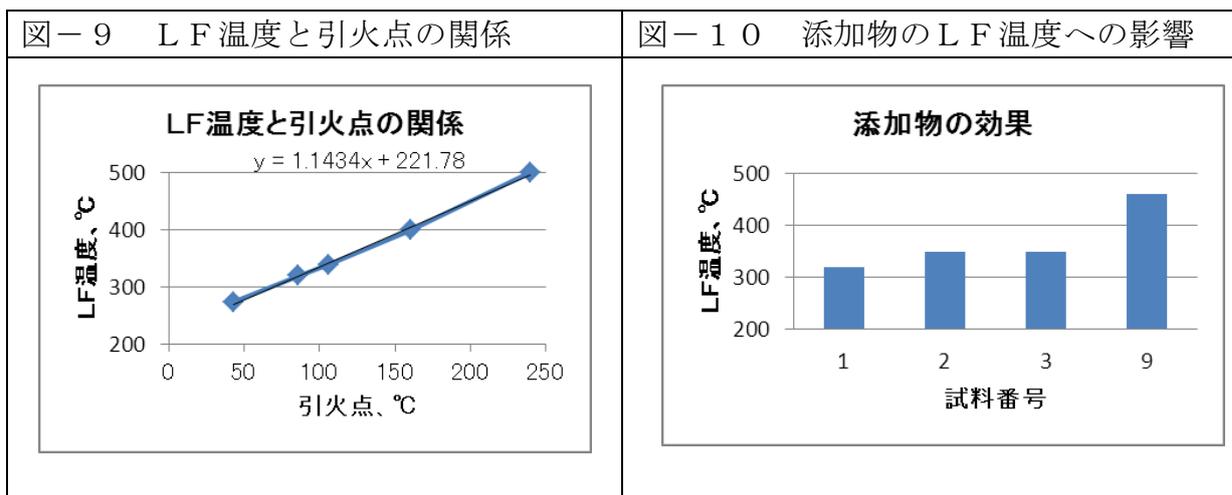
水溶性潤滑剤のLF温度は水以外の成分の濃度によって変わるが、約160℃から200℃程度であることが知られている(文献－2)。このため、潤滑剤塗布時の突沸を抑え付着効率を高めるため、金型温度は150℃から200℃に抑えられているのが現状である。この温度以上に金型温度を設定すると、潤滑剤・離型剤の金型への付着効率が急激に低下するので、塗布効率を無視してでも金型を冷却するため塗布量を増大させなければいけない。事実、A社(鍛造メーカー)のアルミ鍛造工程では金型温度は170℃、また、ダイカストでは金型温度の制御が困難であるので多量に水溶性離型剤を塗布して一時的に金型温度を200℃以下に抑え対策を取っている。ダイカスト(DC)業界では、離型剤の半量以上が冷却に使われ、付着効率が悪い。

表－6に示すように、試料番号－0の水を除き、試料番号－1～9は水を含まないため、LF温度は300℃以上である。即ち、金型温度を高めても、潤滑剤の付着効率の低下を起こさないことが分かった。

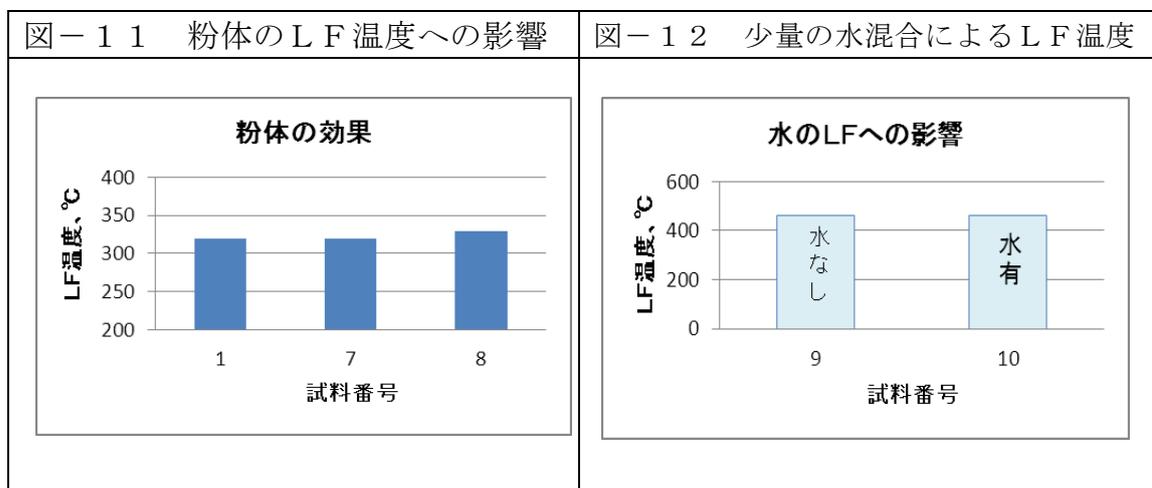
しかし、試料中の基材でLF温度は異なっていた。混合系ではない単一成分系の試料－1、4、5、6番でもLF温度は320～500℃と大幅に異なる。LF温度は揮発性(例えば沸点)の影響を受けるので、揮発性的一种である引火点で整理すると、図－9が得られる。石油基材の引火点を上げれば、LF温度が高められることが確認できた。単一系の基材(試料番号－1)に、5%程の少量の添加剤を加えた

試料番号－２、３の場合、LFは30℃程高まった（図－１０）。この３試料の引火点は2－3℃しか変わらないので、この点では引火点で整理できない。水へ少量の塩を溶かした時の沸点上昇と類似した挙動である。

潤滑剤には各種の他の成分を混合するので、更にLF温度は上昇可能である。事実、試料番号－９（青木科学製DC用離型剤）は油性成分を約15%含有し、LF温度は460℃とかなり高い。



他の添加成分として、1) 粉体と2) 若干の水混合系を検討した。粉体の場合、化学実験において清浄なガラス容器で液体を煮詰める時、突沸防止策として沸騰石を入れている。沸騰石が発泡核となり液体の過熱・突沸を防ぐ。この効果を調べてみた。試料番号－７、８に見られるように、粉体を加えてもLF上昇効果は見られなかった（図－１１）。粉体混合直後に効果が見られたデータもあるが、粉体を長期に液体に漬けると、粉体内部に残量する空気が液体に置き換ることや、本現象が高温固体面との接触時に生じる瞬時の非定常相変化（蒸発）現象であるため、LF温度の上昇効果が認められなかったと推測する。



一方、鍛造潤滑剤の塗布方法で付着効率の良い「静電塗布」を見込んでおり、「少量の水」を混合する可能性がある。水の混合効果を調べるため、試料番号－10（試料番号－9に0.5%の水と可溶化剤を混合）のLF温度も調べた。この程度の水の混合ではLF温度に影響しないことが判明した（図－12）。

この研究で得られた知見をまとめる。

1	溶剤・基油の引火点を上げるとLF温度を高められる。 本事業の目標の「金型温度 300℃」でも突沸しない潤滑剤の配合は組める。
2	少量の他成分を混合すると、更にLF温度を高められる。
3	粉体混合はLF温度を殆ど高めない。
4	若干の水を加えてもLF温度は低下しないので静電塗布用配合に有利である。

上記1と2の知見から、潤滑剤のLF温度を高める手法を見出せた。水溶性潤滑剤の様に、「金型温度が高いので冷却のために潤滑剤を使う」ことをしなくてよい。少量塗布へ向かえる。しかし、LF温度を過剰に高めると、後述するように（図－24）、「金型から油分が垂れ流れ」を起こし付着効率の悪化を招く。最適化が必要である。

2-1-3 溶媒の付着効率向上の研究

(1) 目的

2-1-2項の油性液体の「LF温度」とその溶媒を配合した潤滑剤の「付着効率」の相関を検証する。LF温度で4水準を評価する。

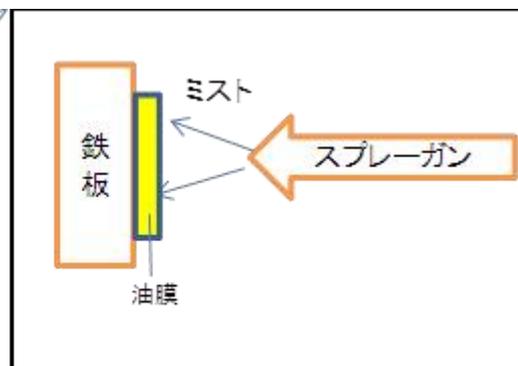
(2) 方法

図－13の付着試験機を使用し、加熱した鉄板に潤滑剤を塗布する（図－14）。鉄板の塗布前後の重量変化を0.1mgまで計測し、付着量として読み取る。塗布条件を表－7に示す。

図－13 付着試験機



図－14 塗布部分のイラスト



金型温度	250℃と 300℃
潤滑剤塗布量	油性 0.3cc
塗布	2 流体スプレー方式
塗布圧、エア	0.3MPa
塗布圧、液体	0.05MPa
塗布距離	200mm
鉄板	100mm 角

番号	添加剤	溶媒
12	15%	灯油
13	15%	溶剤-1
14	15%	溶剤-2
15	15%	PAO-2

(3) 評価試料

表一8に試料を示す。溶剤の評価が目的であり添加剤を固定した。青木科学製DC用製品WFRの添加剤を活用した。溶剤の物性は表一6参照。

(4) 測定結果

表一9 溶媒のタイプによる付着への影響

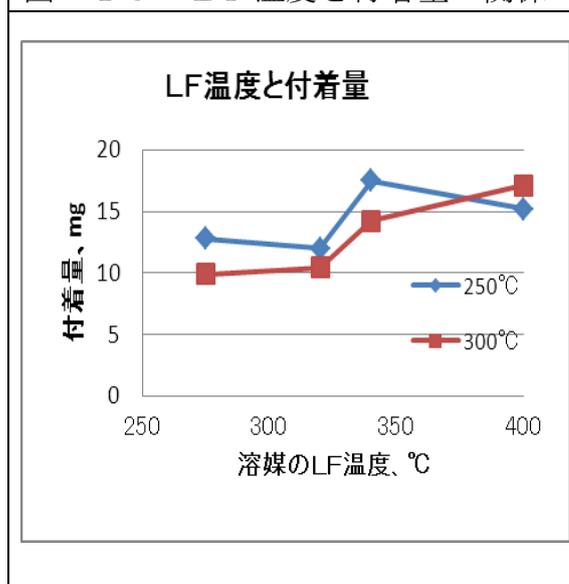
番号	LF温度、℃	付着量、mg 鉄板250℃	付着量、mg 鉄板300℃	引火点、℃
12	275	13	10	42
13	320	12	10	90
14	340	18	14	130
15	400	15	17	161

(5) 評価

図一15に示すように溶剤のLF温度を高めると、付着量は増加する傾向にある。付着量測定用鉄板温度が250℃の場合、LF温度が400℃の点が若干低めに出てきている。これ以上LF温度の高い溶剤を使うと、乾燥性が低下し、その結果、「厚く生成した油膜が垂れ流れる」との経験がある。そのため試料15のPAO-2を溶剤として使うには乾燥性の懸念が起こる。

本事業での目標温度である鉄板300℃で、LF温度と付着量に良い相関があるので、250℃での乾燥性については追求をしない。試料番号12の灯油を溶剤とした場合、300℃での付着量が低い。灯油のLF温度が275℃と低いので、若干突沸を起こしていると考ええる。溶剤として灯油を選定しない。

図一15 LF温度と付着量の関係



この項で得られた知見をまとめる。

1	潤滑剤のLF温度を高めると、金型への付着量は増加する。 少量塗布に向かい、潤滑剤のLF温度を高めると良いことが分かった。
2	金型温度が300℃付近の場合、溶剤として試料13又は試料14が好ましい。 但し、潤滑剤の実生産時の溶剤の入手性を考慮すると、試料13（溶剤-1、引火点が86℃）が好ましい。

2-1-4 潤滑成分（添加剤）による付着率向上の研究

(1) 目的

2-1-2項、2-1-3項で得られた知見を活用し、溶剤を「溶剤-1」に固定し、付着量を高めるための添加剤を研究する。この段階では、プレス機による潤滑性に優れた添加剤はまだ見出せていないので、単に付着量を増やすための添加剤の探索である。

(2) 方法（3種類）

- ① 図-13に示した付着試験機で付着効率を計測する。
- ② 図-16のレーザー顕微鏡を使用し、室温で塗布面の油膜厚さを計測する。
- ③ 高温の金型面上に形成した油膜の油膜厚さを蛍光線量計（図-17-1）で計測する。

これら試験法の長短を表-10に示す。

表-10 油膜厚み計測に係る試験法の長短

	付着試験機	顕微鏡	蛍光線量計測器
外観	図-13	図-16	図-17-1
測定温度	高温	室温	高温から室温（実機計測可能）
金型上の油膜計測	推測	推測	可能
測定時間	2日	3日	数分
測定場所	油膜全体	極狭いポイント	ポイントを変えて幅広く
測定値	重量	厚さ	顕微鏡方式で検量する
蛍光剤（潤滑剤中に）	不要	不要	必要

図-16：レーザー顕微鏡

	<p>メーカー：キーエンス社 型式：VK-9710 方法：付着試験で得た鉄板状の油膜を顕微鏡で観察する</p>
---	---

図-17-1：蛍光線量計測器

	<p>メーカー：Flex Service 社 型式：0L251 方法：蛍光の強度と「顕微鏡で測定した膜厚の関係」を事前に確認する（図-17-2）。金型上の油膜の蛍光線の強度を計測。検量線から油膜厚さを算出する。左図は鉄板の例であるが、付属品を付け実際の金型で計測した。</p>
---	--

図-17-2 蛍光線量の検量線

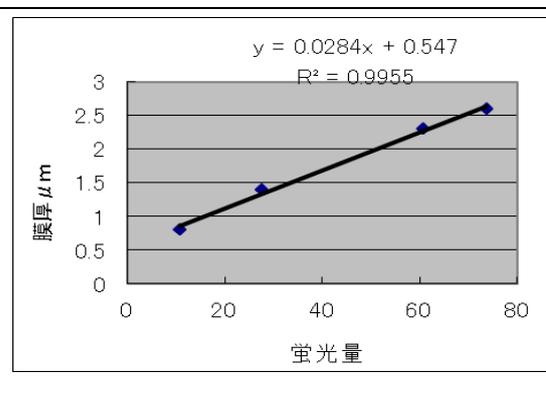
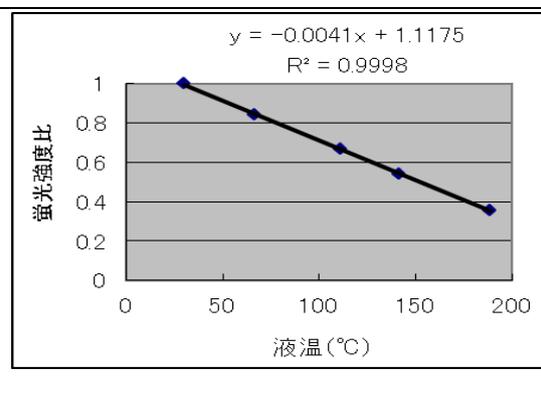


図-17-3 温度補正の検量線



(3) 評価試料

- ① 2成分系：表-11に示す番号-1の「溶剤-1」に番号-2～5及び8の添加剤を個々に5wt%加えた試料
- ② 離型剤製品の追加混合系：製品-1に番号-7を追加、及び製品-2に番号-6を追加した試料

表-11 潤滑剤成分の付着量への影響

番号	添加剤	注記	付着量 mg
1	溶剤-1	ブランクに相当	0
2	高粘度鉱油	100°C粘度が約30cSt	2.6
3	中粘度鉱油	100°C粘度が約10cSt	1.7
4	シリコーン油-1	ジメチル系、1万cSt@25°C	3.1
5	シリコーン油-2	アルキル変性型、約1000cSt@25°C	2.5
6	濡れ性向上剤	アルキルホリマー1%を製品-2に追加	2.4から3.2へ増量
7	粉体	CaCO ₃ 3%を製品-1に追加	8.1から12.3へ増量
8	硫化鉱油		1.5

製品-1：青木科学製離型剤 WFR-3R

添加剤は文献-4を参照した

製品-2：青木科学製離型剤 WFR-33

(4) 評価

①付着試験機法による付着量

評価条件：鉄板温度 250℃、鉄板 10cm 角、塗布量 0.3 cc

評価結果：表—1 1 中の「付着量」に示す。

考察：溶剤に単品の添加剤を 1～5 % 添加した時の付着量を測定した。単位重量当たりでの付着量を考えると、濡れ性向上剤と粉体の効率はよい。しかし、付着量が増え、油膜が厚くなったからと言って、潤滑性が良くなるとは限らない。しかも、試料 4 のジメチル型シリコーンは金型に堆積をする傾向にあり副作用もある。潤滑剤には、「油膜が厚く付く」添加剤で、2－3 項で研究する「耐焼付き性が優れ」、かつ、「副作用の少ない」成分が必要となる。なお、付着量と付着効率の関係は、直線的な関係があり、付着量が増えると付着効率も高まる。付着量増加は付着効率増加と同じ意味である。下に付着効率の計算例を示す。

○塗布側

塗布量：0.3 cc x 0.81 (g/cc) ≒ 240 mg

添加剤量 (5wt% 添加の場合)：240 mg x 5/100 = 12 mg.

○付着側

付着効率 (試料 4 の場合)：3.1mg/12mg = 26%

個々の添加剤を組み合わせると、その濃度ばかりでなく、添加剤同士の優先吸着も影響し、混合物の付着量は各成分の付着量を合算した値にはならない。

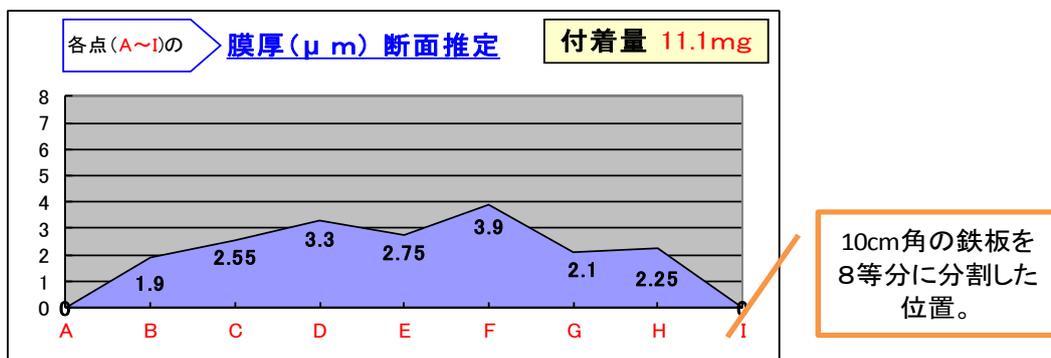
②顕微鏡法による油膜厚みの計測

<評価方法>

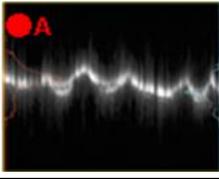
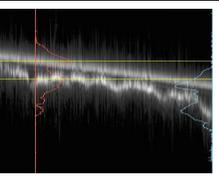
付着試験で鉄板上に形成した油膜の厚みを、レーザー顕微鏡を用いて計測した。試料は DC 用の青木科学製離型剤である WFR-3EC であり、蛍光剤を含有している。

評価結果：付着試験 (300℃) した場合の形成油膜の形状は凸型であった。なお、図—1 8—1 の油膜み計測結果の例として、図—1 8—2 に A 点と F 点での膜厚を示す。

図—1 8—1 顕微鏡による油膜厚みの計測



図－18－2 個々の点での顕微鏡観察の一例

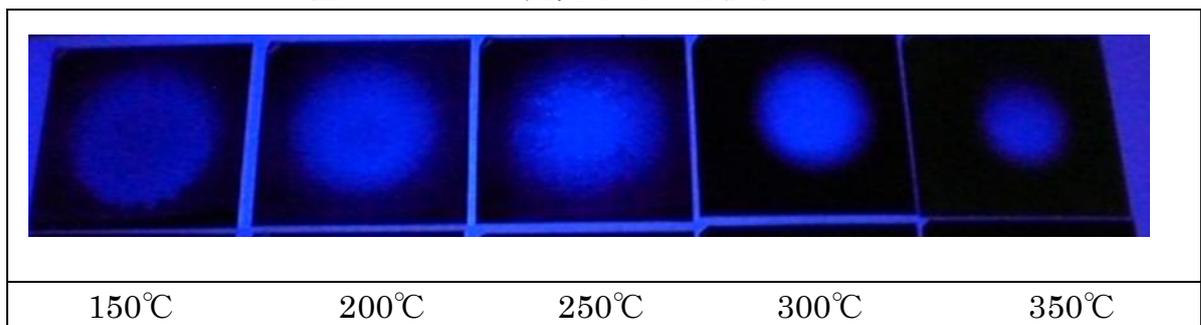
	<p>A点での油膜 鉄板の地金のうねりと油膜の上部に差がない＝油膜ゼロ</p>
	<p>F点での油膜 地金のギザギザ線に対し、油膜の上の線は滑らかで、平均 $3.9\mu\text{m}$ の厚みであった。</p>

③ 蛍光線量法による金型上の油膜厚み

③－1) 目視による油膜形状

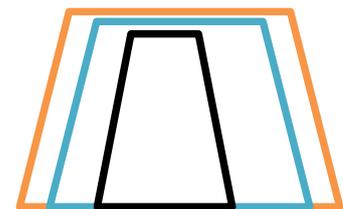
試料：②)項で使った離型剤を使い、付着させる温度を $150\sim 350^{\circ}\text{C}$ へ変えた。

図－19－1 発光している油膜



温度が上がると付着量は低下することが目視でも観察できた。高温になると部分的な LF 現象が増えてくるためと推測している。なお、図－18－1の膜厚計測を温度毎に実施し、図－19－1の写真と組み合わせると、温度毎の膜形状は図－19－2にイラストする形状となった。150°Cが外側、350°Cが内側の膜形状であり、膜厚は殆ど変わらないが、膜の直径が異なっていた。

図－19－2 油膜形状の推定



③－2) 蛍光量の数値化

図－19－1の蛍光を発している油膜の厚みを数値化したのが蛍光線量の測定である。油膜の中央部（最も厚い油膜を示す点）での油膜厚みと蛍光線量の関係を調べ、また、蛍光線量と温度の関係も調べ、図－17－3の検量線を作成した。200°Cに加温された実機の金型面上の各部位に形成した油膜厚みを蛍光線量法で計測した結果を表－12に示す。

表－１２ 実機 DC 用金型上の離型剤油膜厚さの計測結果

測定部位	静電 OFF 条件		静電 ON 条件		測定条件
	蛍光線量	換算油膜 (μm)	蛍光線量	換算油膜 (μm)	
可動－１	13.3	1.8	17.3	2.2	装置：800t ダクタマシン 離型剤塗布量：3.3cc 金型温度：200℃
可動－２	15.0	2.0	19.1	2.3	
可動－３	3.0	0.8	6.4	1.1	
中子－１	10.2	1.5	15.0	2.0	
中子－２	0.3	0.6	3.0	0.8	
固定－１	3.0	0.8	14.8	1.9	
固定－２	1.5	0.7	6.4	1.1	
固定－３	10.6	1.5	13.8	1.8	

これまで不可能であった、実生産中の金型（型温度 200℃）に形成した潤滑剤油膜のミクロンオーダーでの膜厚の測定が可能となった。画期的な手法である。静電塗布の有無での検証では、全ての測定部位において静電を印加した場合の膜厚の方が厚く、静電塗布の有効性も確認できた。図－２３－１の試験室的測定結果と良く一致している。

これまでの知見をまとめる。

1	添加剤によって付着量の増加傾向は大きく異なる。油膜を厚くするためには、最適な添加剤の探索が必要である。潤滑性を考慮しながら油膜を厚くするため、2-3 項の焼付き防止技術の検討が不可欠であり、この段階では特定の添加剤は選定できていない。
2	鉄板に付着した油膜は水平ではなく、凸型の形状をしている。中央で厚みを計測するのが良い。
3	実機の高温度金型上で、塗布直後の油膜厚み計測は可能である。方法は、潤滑剤に蛍光剤を配合し、蛍光線量を測定することである。

2－１－５ 塗布方法による付着効率向上の研究

(1) 目的

再加熱工程の削減（サイクルタイムの短縮）と圧縮圧力の低減（ダウンサイジング化）に向かい、アルミ素材の冷却性を低減するための塗布方法を検討する。

(2) 方法

図－１３の付着試験機を活用し、各種塗布方法と付着量の関係を研究する。

- ①通常塗布ガン（家庭用霧吹き機に類似）を使った検討因子としては、塗布距離、塗布量、塗布圧力を選定し、付着量を計測した。
- ②付着効率の優れた静電塗布方法の効果を検討した。

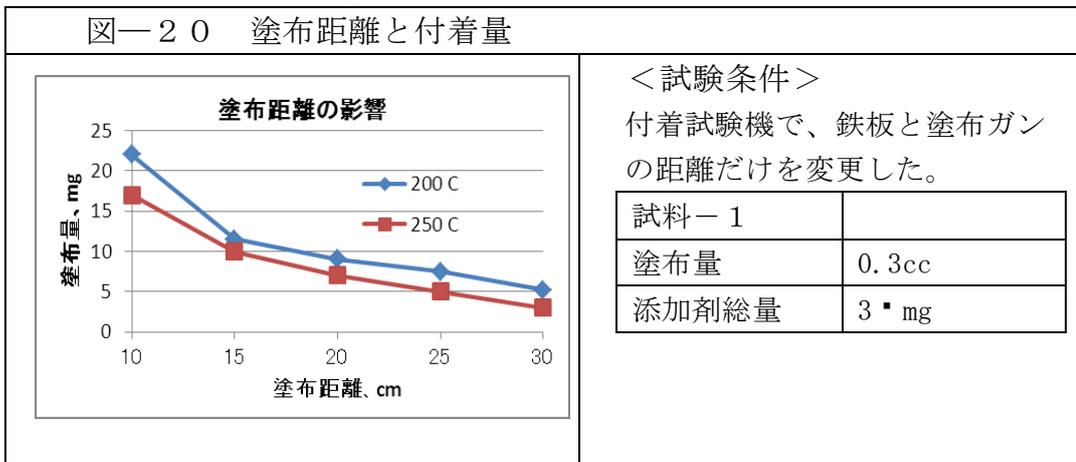
(3) 評価試料

鍛造用潤滑剤の配合は、この時点でまだ決定していないので、DC用油性離型剤で塗布方法による付着効率を検討する。

番号	塗布ガン	試料	添加剤
1	通常ガン	WFR-3R (青木科学製DC用油性離型剤)	12.5 wt%
2	静電ガン	WFR-3EC (青木科学製DC用静電型油性離型剤)	14.5 wt%

(4) 評価

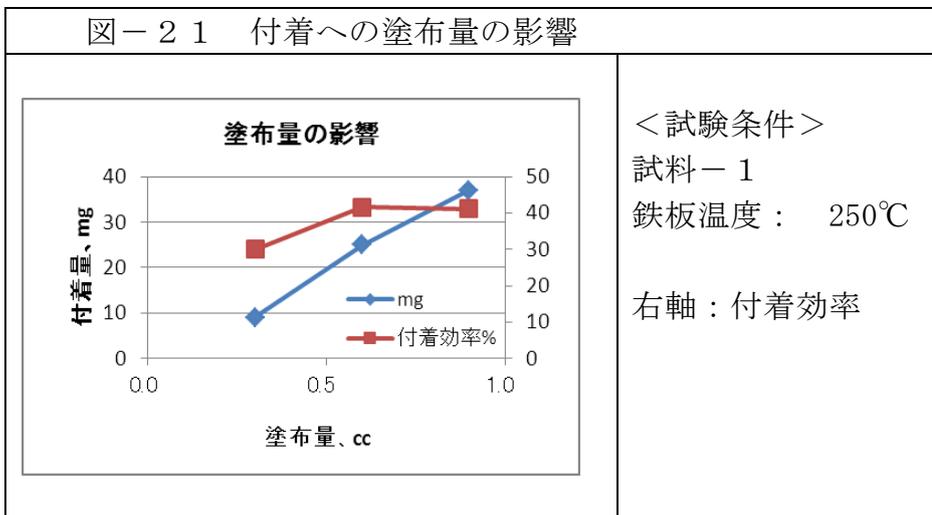
①-1) 塗布距離の影響



知見-1

塗布距離を近づけると、付着量は増加する(図-20)。しかし、直線関係ではなく、距離が遠くなると付着量の低下は少なくなる。実際の金型では広い範囲で油膜を形成する必要があり、塗布距離を離れた方が実用的である。DCでは約20cmが標準的距離であるが、鍛造装置内で取れる距離は装置サイズで変わるので、可能な限り塗布距離を短くすることが要点となる。なお、塗布距離20cm・200℃の付着効率は30%であった。

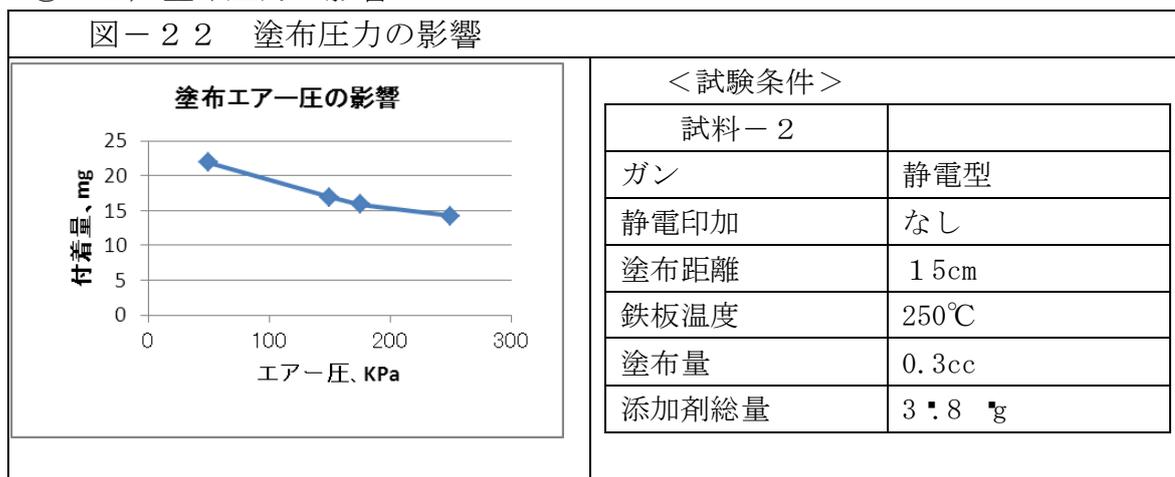
①-2) 塗布量の影響



知見－２

塗布量を増やすと付着量は増加する（図－２１）。この結果は文献－３と一致している。塗布効率（右軸）は塗布量が増えると30%から42%へ増加するが、その後、頭打ち。塗布量が増えると、鉄板からはみ出すミストも増加し、頭打ちとなるものと推定する。

①－３）塗布圧力の影響



知見－３

塗布圧力を下げると付着量は増加する（図－２２）。圧力が低いと細かなミストが生成するので、狙った対象物（鉄板）へミストが進みやすいため、低圧霧化が良いと考える。

②静電塗布方法による付着効率の向上

静電塗布を可能にするため、次の条件に合うよう工夫した。

- ・ 静電印加が可能なスプレー・ガンの使用
車塗装のリーダーである旭サナック社の協力を得て、DC用離型剤の専用静電ガンを作成してもらった。既に同社はこのガンを市販している。同ガンを本鍛造研究にも活用した。
- ・ 静電で潤滑剤ミストが印加するよう潤滑剤に「0.5%の水」と「水が油中に安定的に溶けるよう約2%の可溶化剤」を混合した。その結果、電気伝導性が付与でき、静電塗布が可能となった。
- ・ 評価結果

付着試験機で静電印加すると、鉄板への付着量は増加することを確認した（図－２３－１）。この結果は、実機を使い静電印加条件で油膜を形成し、膜厚さを計測した結果（図－２３－２）と良く一致した。図－２３－１で得られた油膜は蛍光剤を配合してある。その油膜にブラックライトを当てて発色させた写真を図－２４に示す。

図-23-1 試験室的測定結果（静電塗布による付着量）

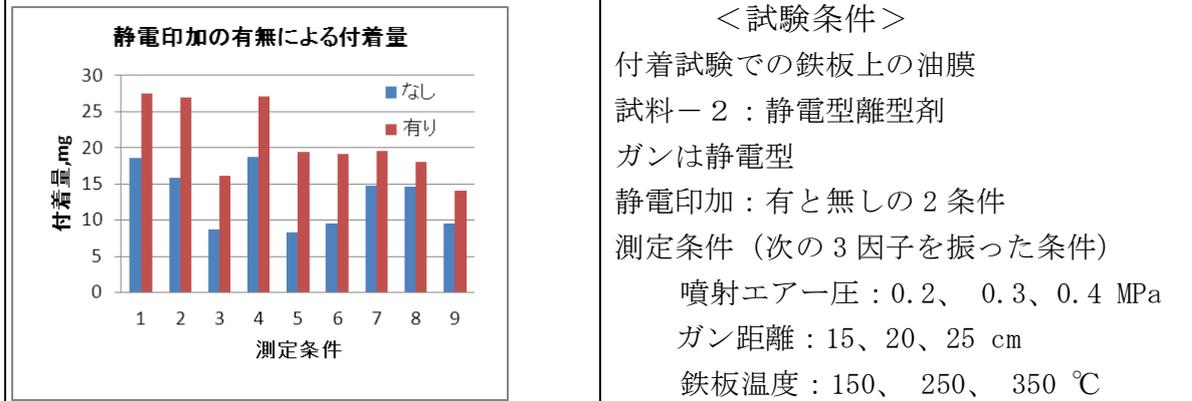


図-23-2 実機での油膜厚さ（表-12を図示化したデータ）

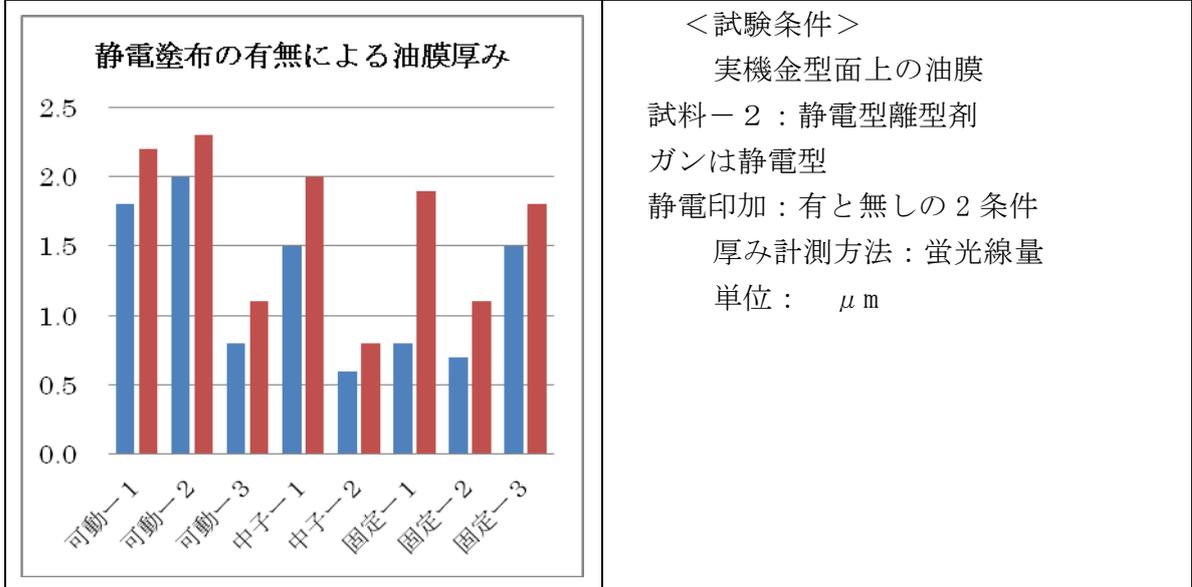


図-24 付着測定後の付着物の観察

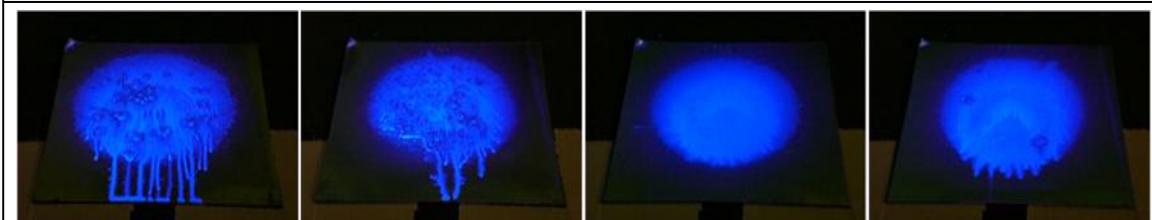


図 23-1 中の測定条件 1 測定条件 2 測定条件 3 測定条件 8

知見-4

静電印加すると、付着量は3割ほど増加する（図-23-1）。エア圧、ガンの距離、鉄板温度を各3水準振った計9試料の全てで付着量は増加した。な

お、この増加傾向を実機での油膜厚みで確認できた（図－２３－２）。しかし、蛍光による目視から 垂れ流れ（測定条件１、２）が起こっていることも分かった（図－２４）。明らかに過剰に付着している。その分、塗布量を低減できるとも言える。即ち、少量塗布に、静電塗布方法は適している。

これは静電有無だけを比較したものであり、「通常ガンで非静電型の鍛造用潤滑剤」と「静電ガンで静電型潤滑剤」の比較ではない。弊社の経験によると、約２～３倍の付着効率の差がある。この点は、鍛造用潤滑剤の配合を組んだ後で確認する。

知見 ２－１－５項での知見１～４のまとめ

付着量を増す手法は各種あり。これらを組み合わせ、欠点を勘案しながら少量塗布を達成する。その結果、アルミ素材の温度低下の削減に貢献する。

手 法	各手法の欠点
金型と塗布ガン先端を近づける	塗布面積が狭まる
塗布量を増やす	冷却性が増加
噴射時のエア圧を低める	外部空気の流れてミストのかく乱あり
静電印加	静電装置が必要でコストアップ

知見の総括：２－１項（油膜形成技術）の研究から得られた知見

2-1-2 ミストの高温金型への付着挙動	
1	引火点の高い溶剤・基油を選定すると、潤滑剤のLF温度を高めることができる。
2	本事業の目標の「金型温度 300℃」でも突沸しない潤滑剤の配合は組める。少量の他成分を混合すると、更にLF温度を高められる。
3	粉体混合はLF温度を殆ど高めない。
4	若干の水を加えてもLF温度は低下しないので静電塗布用配合に有利である。

2-1-3 溶媒の付着効率向上	
1	潤滑剤のLF温度を高めると、金型への付着量は増加する。
2	付着効率が向上した分、少量塗布に向かえる。
3	金型温度が 300℃付近であり、かつ、溶剤の入手性を勘案し、溶剤－１（引火点が 86℃、高度精製・炭化水素）が好ましいと判断した。

2-1-4 潤滑成分（添加剤）による付着効率の向上	
1	添加剤のタイプによって付着量の増加傾向は大きく異なる。濡れ性向上剤と呼ばれる添加剤は他の添加剤の付着を増強する。
2	鉄板に付着した油膜は水平ではなく、凸型の形状をしている。中央で厚みを計測するのが良い。
3	実機の高温金型上で、塗布直後の油膜厚み計測は可能である。方法は、潤滑剤に蛍光剤を配合し、蛍光線量を測定することである。

2-1-5 塗布方法による付着効率向上

1	<p>付着量を増やせる手法は各種あり、次の手法を組み合わせると良い。 この組み合わせで、アルミ素材の温度低下を削減し、サイクルタイムの短縮、ダウンサイジングに活用する。</p>	
	手 法	各手法の欠点
	金型と塗布ガン先端を近づける	塗布面積が狭まる
	塗布量を増やす	冷却性が増加
	噴射時のエア圧を低める	外部空気の流れてかく乱あり
	静電印加	静電装置が必要でコストアップ

2-2 冷却性低減技術の研究

2-2-1 研究の背景・課題・目標・研究の方向性及び研究項目

(1) 研究の背景

圧縮工程中で450℃のアルミ素材は温度低下を起こし、つぶすための必要な圧力が大きくなる。その為、二段圧縮方式では、アルミ素材を加温する工程がある。

(2) 課題

圧縮されれば圧縮圧・加工熱で温度は上がるはずだが、アルミ素材は次の理由で温度低下を示す。

- ①170℃の金型に接触する
- ②塗布された水溶性潤滑剤の溶媒（水）が気化するため、金型を冷却する
- ③空気への放熱

(3) 対策と目標

表-13 本項での対策と目標

研究内容	目標値（表-3参照）
溶媒のタイプによる冷却性の研究	539cal/g から 90cal/g へ
少量塗布による冷却低減の研究	水溶性潤滑剤の 1/10
空気への放熱	サイクルタイムの短縮

一般に、単位面積単位時間当たり、高温の被加工材（アルミ素材）から工具（金型）に流れる熱 q は、次の式で近似される（文献-5）。

$$q = (\lambda / \delta) (T_w - T_t)$$

工具面温度： T_t

被加工材表面温度： T_w

潤滑膜の熱伝導率： λ

潤滑膜の厚さ： δ

本研究の場合の対策の効果は上の式から見て妥当である。

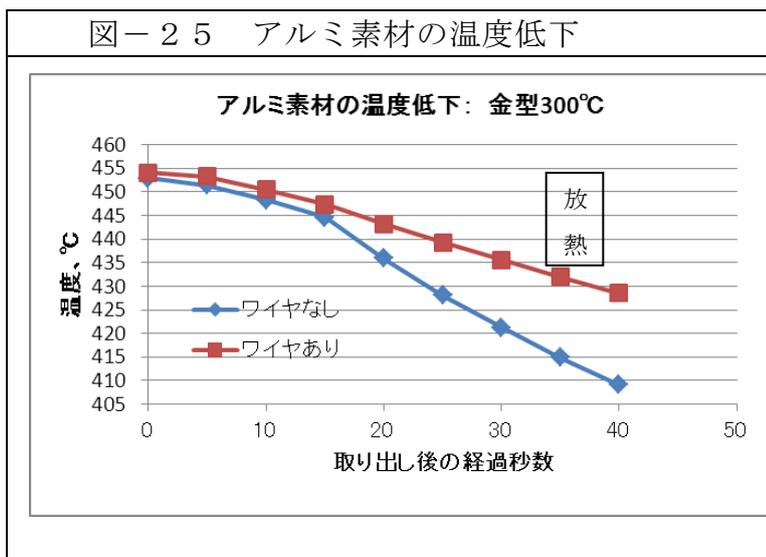
①金型温度 (T_t) を 170℃から 300℃へ高める。

期待できる効果： $(450 - 300) / (450 - 170) = 0.54$ （熱損失が半減する）

②170℃の金型へ潤滑剤を塗布した直後は、潤滑剤で金型が冷却され、約 150℃付近まで温度が低下する（図-4参照）。従って、溶媒の気化潜熱の低減と少量塗布は、塗布後の金型冷却の度合いを低減できる。特に、金型が 300℃になるとこの効果は大きくなる。

③上の式には、アルミ素材から空気への放熱は含まれていない。2-3項の「据込

「み試験機での焼付き性検討」で、試験条件を一定にするため、アルミ素材 ($T_w = 450^\circ\text{C}$) を電気炉から取り出した時の温度低下を調べた。「空気への放熱」と「接触したプレス機の金型への伝熱」を区別するため、0.1mm 径のワイヤ2本を置き、ワイヤに浮かしたアルミ素材の温度変化も測定した。図-25に示すように「ワイヤあり」の場合、アルミ素材と金型の直接接触がないため温度低下は小さいが、それでも温度低下はある。明らかに、空気放熱は大きい (図-25)。従って、サイクルタイム短縮は空気への放熱量低減を通しアルミ素材の温度低下の低減に効果があると言える。



2-2-2 溶媒のタイプによる冷却性の研究

単位重量当たりの冷却性を低減するため、溶媒を「水」から炭化水素の「溶剤-1」に置き換える事を検討した。文献-6にヘキサンは「338 J/g = 80 cal/g」とあり、他の文献ではブタンで84 cal/gである。今回の溶剤-1は直鎖炭化水素のC-13とC-14の混合物であり、ヘキサンと類似の気化熱と推定する。トルエンも気化熱は低いが、作業環境上で問題がある。この点で、石油系基材を高度に精製した溶剤-1は問題が少ない。単位重量当たりの水溶性潤滑剤の気化熱に比べ、溶剤-1を使う潤滑剤の気化熱は1/6と遥かに低く、アルミ素材の冷却低減に貢献できる。

表-14 気化熱

物質	気化熱、cal/g
水	539
ブタン	84
ヘキサン	80

2-2-3 少量塗布による冷却低減の研究

(1) 背景

鍛造用潤滑剤の配合が決定した後、塗布量が決定するので、現時点では塗布量低減による効果は確定できない。2-5項に具体的な塗布量を示す。しかし、2-1項に示す様に「付着効率向上」は可能であり、「塗布量の低減」に繋がると考えた。

鑄造用潤滑剤で積み重ねた経験から、予測される塗布量低減効果を表-15に示す。なお、基準はA社(大手鍛造メーカー)で使われている水溶性鍛造潤滑剤であり、0.5m x 0.2m x 2個=0.2 m²の金型面積(170℃操業)に60ccの塗布である。

2-2-2項の油性化と2-2-3項の少量塗布の組み合わせ効果として、塗布量と気化熱を組み合わせた冷却性を調べた。油性の試料として、鑄造用離型剤を用いた。

表-15 塗布量低減の期待値

方法	塗布量低減の期待値、cc/m ²
基準	300 = 60 / 0.2
溶剤-1を活用し、LF温度を上げる	1/3
添加剤の付着効率向上	1/3
静電塗布	30%減
その他(塗布エア一圧調整等)	20%減
合計	1/16 即ち 18.5 cc/m ² *

*DC用離型剤では、8cc/m²が平均。上記推定値18.5cc/m²は十分達成可能。

(2) 方法と結果

図-26 潤滑剤の冷却性																						
方法	結果：油性は冷却性が殆どなし																					
付着試験機の鉄板を250℃に加熱。 潤滑剤を塗布。 * 水溶性潤滑剤 10cc * 油性潤滑剤は約1/15の0.6cc 10cm角の鉄板温度を計測。	<table border="1"> <caption>潤滑剤の冷却性データ</caption> <thead> <tr> <th>塗布後の秒数</th> <th>水溶性10cc (°C)</th> <th>油性 0.6cc (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>180</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>140</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>145</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>155</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>180</td> <td>250</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>210</td> <td>250</td> </tr> </tbody> </table>	塗布後の秒数	水溶性10cc (°C)	油性 0.6cc (°C)	2	180	250	5	140	250	10	145	250	20	155	250	30	180	250	40	210	250
塗布後の秒数	水溶性10cc (°C)	油性 0.6cc (°C)																				
2	180	250																				
5	140	250																				
10	145	250																				
20	155	250																				
30	180	250																				
40	210	250																				

本項で得られた知見・推定をまとめる。

1	溶媒を溶剤-1に代えることで、単位重量当たりの「気化潜熱を1/6」へ低減可能。
2	油性(溶剤-1)にすることで「塗布量を目標の1/10」にすることは十分可能。
3	1項と2項を組み合わせた実験結果で、鉄板の温度低下は殆ど無いことを確認。

2-3 焼付き防止技術の研究

2-3-1 研究の背景・課題・目的・研究の方向性

背景：アルミ鍛造用の潤滑剤開発において、アルミと金型が潤滑剤を介さずに接触することで、アルミ-金型間の境界摩擦が増大し、アルミが金型に溶着、焼付きを起こすことがある。

課題：特に本研究は、金型温度を現在の 170~200℃のレベルから 300℃へと上昇させることを特徴としているため、①添加剤にかかる熱的ストレスの増大及び②少量塗布に起因しており、潤滑能力の不足する可能性がある。

目的：高温高压下で溶着・焼付きを起こさない潤滑剤を研究するため、実際の鍛造を想定した試験法を確立し、その方法を使い潤滑剤の選定を検討する。

方向性：本研究では二種類の工法を検討する。①比較的マイルドな「据込み工法」と②過酷な「押し出し工法」であり、①は青木科学が実施、②は静岡大学が実施する。

2-3-2 焼付き防止性能を評価する鍛造試験法の開発

(1) 試験方法の選択

本件研究は世の中に多数ある潤滑添加剤の中から、高温高压条件下で金型とアルミの溶着、焼付きを起こさず加工性の優れる添加剤の探索および配合を検討することである。塑性加工における摩擦評価用の試験方法は各種提案されている（文献7、8）。本研究においては無数の添加剤の中から、効果のある添加剤の探索と、さらにはその組み合わせを考慮すると膨大な試験数となる可能性があるため、なるべく簡便な作業で評価を行える試験方法が好ましい。以下に好ましい装置の仕様を示す。

- ・潤滑剤皮膜が簡便かつ再現性良く形成出来ること
- ・評価金型温度を容易にかつ正確にコントロール出来ること
- ・試験後の金型表面に残留する皮膜の除去が容易なこと
- ・アルミ試験片の凝着、張り付きなどの場合の取り出しが容易であること
- ・評価の目安となる指標が数値化出来ること
- ・圧縮制御に関し、ピーク荷重設定、変位量設定の両方が可能なこと

共同研究者である静岡大学・中村教授、アドバイザー等との討議の結果、上記仕様を満たす試験方法として油圧プレスの圧縮による『アルミ円柱の据込み工法』での試験機（図-27、28）を使用し研究を進めることとした。データとして圧縮時の荷重を測定するための 1000kN ロードセルと、変位を計測するための分解能 20 μ m のリニアスケールを装備することとした。また、データ採取のための高サンプリング数が確保できるデータロガーも具備することとした。さらに、金型は潤滑剤皮膜の形成、除去が容易な円盤状の平面を基本とした。

図-27 上昇ラム式 100t 油圧熱プレス

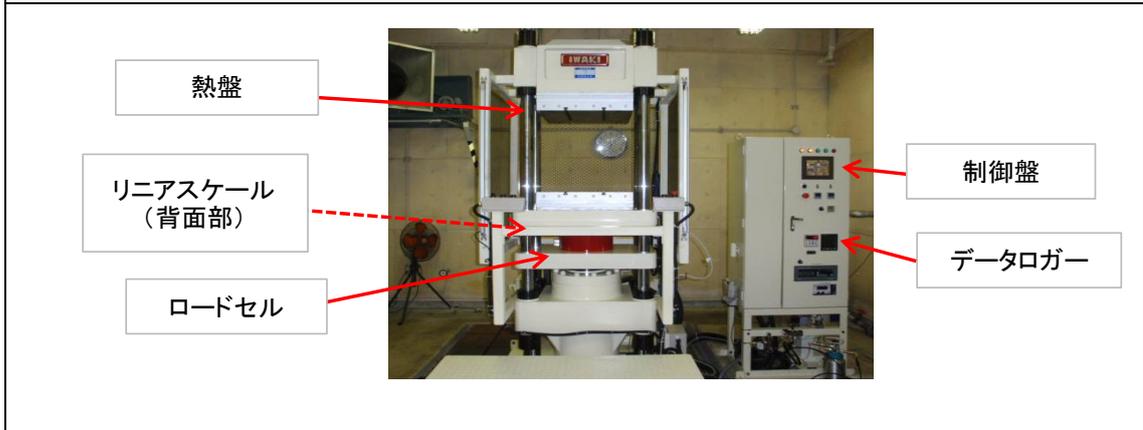
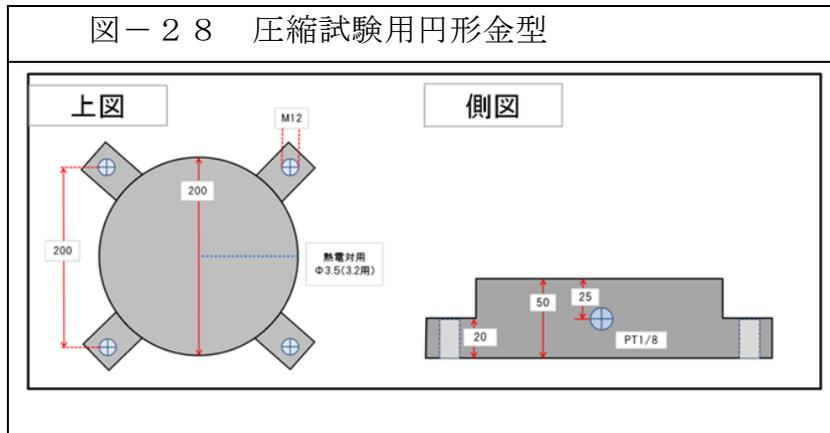


図-28 圧縮試験用円形金型



(2) 試験片サイズ

青木科学設置のプレス試験機での本格的試験に先立ち、埼玉県産業技術総合センター (SAITEC) 北部研究所にある油圧 100t プレスにて、大きさの異なるアルミ円柱を圧縮し、試験片サイズを決定した。(このプレスでは圧力バルブでの圧力設定のみ可能であり、本格的試験で目的とする荷重や変位量のデータ採取が出来ない) 表-16 に試験結果と図-29 に 100t 油圧プレスの外観を示す。

表-16 試験結果

設定圧力 (ton)	試験片 φ (mm)	初期厚さ (mm)	圧縮後厚さ (mm)	圧縮率 (%)
30	20	30.45	7.35	75.9
30	30	30.25	12.30	59.3
30	40	30.10	17.25	42.7
100	40	30.25	10.55	65.1
100	50	39.65	14.65	63.1
100	60	39.80	19.25	51.6

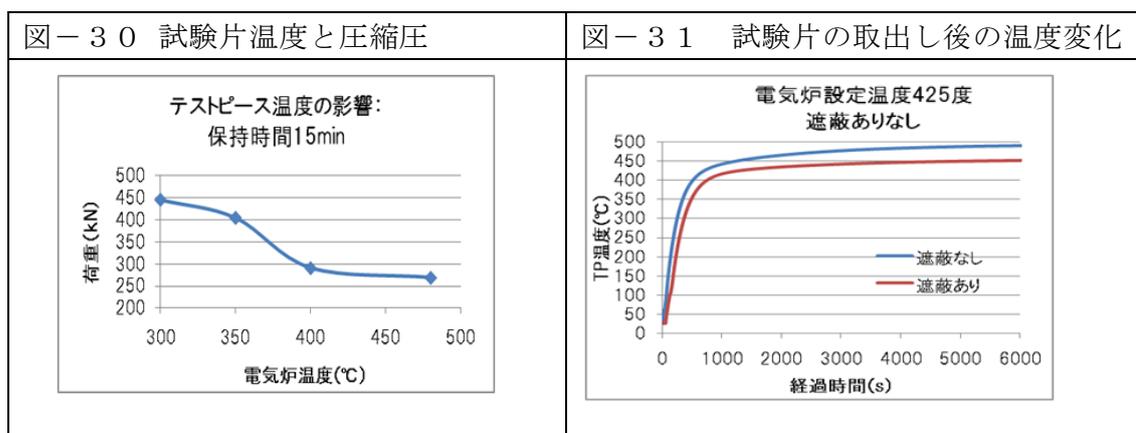
図-29 SAITEC の試験機



試験片のサイズは、温度因子を考慮すると容積の大きい物の方が良い。すなわち恒温槽で加熱した試験片を金型にセットし圧縮が開始されるまでの時間内の試験片の温度低下を軽減できる。一方、圧縮率を高めた方が表面の拡大が大きくなるため過酷な試験となる。その観点からは試験片サイズは小さい方が良いが、上記の試験片温度との兼ね合いからで 100 t 荷重時の圧縮率が 63~65%となる直径 40~50mm を選んだ (表一 1 6)。その後、引き抜き加工された A2011 材の丸棒を加工し『Φ43×L40』の試験片サイズとした。

(3) 試験片の温度

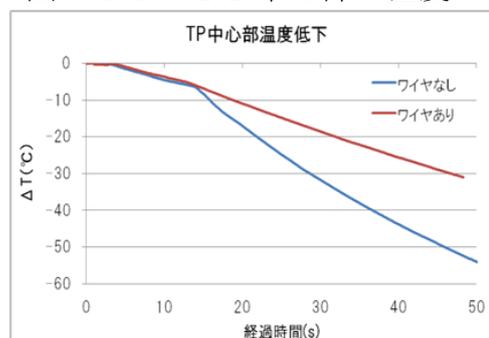
本研究では、実機のアルミ素材温度に合わせ試験片初期温度を 450℃とした。金型温度 300℃、圧縮率で約 60%が狙い目であるが、図-30 に示す様に試験片の温度が圧縮荷重へ与える影響は大きい。従って、電気炉で試験片温度を均一かつ一定にすることが重要であるため、試験片に熱電対をセットし電気炉内での加熱状況を測定した (図-31)。電気炉の特性上コイルの輻射熱により試験片の温度が上昇し続けることを防ぐため遮蔽板を設置し安定化を図ることとした。これらを考慮し、アルミ素材を 1.5 時間以上炉の中で加熱することにした。



(4) 試験片の冷却防止

試験片 (TP) を電気炉から取り出した後の温度低下も重要である。取り出し直後から試験片温度が降下する (図-32)。さらに金型にセットすることで試験片の金型による冷却が始まるため、急激に温度が降下する。温度低下を防ぐため、さらには皮膜の保護のためにアルミ試験片と金型の間に 0.1mm のワイヤを二本セットし、試験片と金型の直接接触を防ぎながら試験した。

図-32 TP 中心部の温度



(5) 試験手順の決定

研究開発委員会で討議の結果、圧縮試験の制御方法は目標の圧縮率を決めたうえで、変位位置による位置制御とした。圧縮率の基準はプレス機の荷重圧力限界である1000 kN 時における“無潤滑状態”での圧縮率とした。無潤滑での試験を行った結果、設定圧縮率を77%（圧縮ストローク 30.8mm）と決定した。ちなみに無潤滑の試験では圧縮後の試験片が金型に強固に張り付き、取り除くのが容易ではなかった。

(6) 試験手順の決定

- ①加熱炉の電源を入れる。
- ②炉の温度が450℃に達したら、アルミ試験片を炉に投入する。
- ③1.5時間加熱する。
- ④所定量の潤滑剤を金型に塗布する。
- ⑤金型上に0.1mm径のワイヤを2本置く。交差させるのが良い。
- ⑥アルミ試験片を取り出し、10秒後にワイヤ上に置く。
- ⑦2秒後にプレス機を起動させ、上下金型間を狭める（取り出し12秒後）。
- ⑧8秒後に圧縮を開始する（取り出し後20秒の開始を厳守する）。
- ⑨所定の圧縮率で、2-3秒で圧縮する
- ⑩圧縮後、試験片温度を計測する。

2-3-2項の試験法の開発で得られた知見をまとめる。

1	試験方法の選択：プレス機による据込み工法が適している。
2	試験片サイズ：丸棒のΦ43×L40を選定した。
3	試験片の温度：450℃の炉から取り出すと温度が急激に低下する。
4	試験片冷却の防止：0.1mm径のワイヤ2本で金型と試験片の接触を避けると冷却が低下した。炉からアルミ素材を取りだし後、20秒で圧縮を開始すると温度条件を一定にできる。
5	圧縮率の設定：無潤滑で圧縮できる最大の点である「77%圧縮」とする。

2-3-3 高圧下で膜追従性のある添加剤の探索：鍛造の据込み工法での評価

(1) 添加剤および評価用試料の準備

研究に先立ち添加剤メーカーに協力を要請し様々なタイプの添加剤（約60種）を準備した。例えば、エステル、各種ポリマー類、極圧添加剤、シリコンオイル、粉体などである（文献-4）。本研究の特徴は、①付着性能の高い油性タイプとすること、②スプレー方式で塗布することである。そのために添加剤は使用する溶剤-1と相溶性が高いことが好ましい。そうすることでスプレー時に安定した良好な皮膜形成が可能となる。

本研究では溶剤に相溶性のある添加剤を混合し、2成分系混合物を試験用試料とした。基本的に溶剤-1を80wt%、添加剤を20wt%の混合であった。塗布後、溶剤は蒸発するので、添加剤だけの潤滑性評価となる。

(2) 据込み工法での評価

(A) 添加剤単体での評価

60 種類の添加剤の試験結果を表-18にまとめる。圧縮荷重が低く、かつ、圧縮率の高い優れた添加剤は少なく、多くの添加剤は 圧縮荷重が高いにも関わらず低い圧縮率を示していた。表-17に良い添加剤(②、④、⑤)と悪い添加剤(①、③、⑥、⑦)の試験結果例を示す。

表-17 据込み試験結果(数例) 金型温度: 300°C、塗布量: 2cc

添加剤 番号	タイプ	荷重 (kN)	圧縮率 (%)	写真
①	シリコーンA	903	74.88	
②	シリコーンB	689	77.82	
③	高粘度エステル	838	77.03	
④	高粘度含酸素ポリマー	759	77.31	
⑤	炭化水素ポリマー	790	77.18	
⑥	ワックス	896	75.48	
⑦	粉体 (球状シリカ)	881	75.56	

表－18 据込み試験結果の一覧

サンプル名	荷重 kN	圧縮率%
シリコーン B	689	77.82
清浄分散剤	744	77.64
シリコーン C	745	77.55
高粘度含酸素ポリマー A	759	77.31
シリコーン D	763	77.73
炭化水素ポリマー A	790	77.18
シリコーン E	792	77.66
高粘度エステル A	814	77.26
シリコーン F	819	77.02
高粘度エステル B	838	77.03
高粘度ケタポリマー	856	77.39
高粘度含酸素ポリマー B	857	76.82
高粘度含酸素ポリマー C	857	76.97
炭化水素ポリマー B	864	76.53
高粘度エステル B	867	76.98
合成エステル A	870	76.99
高粘度含酸素ポリマー D	870	76.93
合成基油 A	875	76.93
高粘度含酸素ポリマー E	875	76.54
合成エステル B	883	76.95
シリコーン G	884	75.34
高粘度含酸素ポリマー F	888	74.95
シリコーン H	889	74.77
粉体 A	889	74.35
シリコーン I	892	75.97
シリコーン J	894	75.98
シリコーン K	896	75.48
高粘度含酸素ポリマー G	896	76.28
合成エステル C	898	75.12
熱可塑剤 A	901	75.19
シリコーン L	902	74.88

サンプル名	荷重 kN	圧縮率%
合成油 A	902	75.13
粉体 B	902	75.20
シリコーン A	903	75.24
シリコーン M	903	75.09
高粘度エステル C	903	75.35
シリコーン N	904	74.18
シリコーン O	905	75.75
合成エステル D	905	76.03
粉体 C	905	75.57
ワックス A	906	76.98
シリコーン P	907	75.73
合成エステル E	907	75.28
高粘度エステル D	907	75.38
合成エステル F	909	75.52
シリコーン Q	910	74.99
合成油 B	911	75.46
合成エステル G	912	74.30
合成油 C	912	75.57
合成油 D	913	75.29
合成油 E	913	75.18
高粘度エステル E	916	76.23
極圧剤 A	920	76.41
アクリルポリマー A	925	75.36
合成油 F	928	74.96
合成油 G	930	75.75
粉体 D	931	76.09
粉体 E	934	75.48
シリコーン R	936	74.73
合成油 H	938	75.11
合成エステル H	971	75.88

高さ 40mm の試験片を 77%圧縮すると、高さが 9.2mm となる。即ち加工ストローク 30.8mm (40.0-9.2=30.8) となるように位置制御をしている。従って設定された位置に達するまでの最大荷重が低くなれば潤滑特性が優れているといえる(良い例

として②シリコンBの 689kN で 77.8%の圧縮率)。潤滑特性が優れる添加剤では圧縮荷重が低下し、圧縮率も設定値の 77%を超える。位置制御でありながら潤滑性が良いと、短時間圧縮のためオーバーシュート気味となり 77%圧縮を超えるケースもあったと考える。逆に潤滑特性の悪い添加剤では荷重が高いことに加え、圧縮率が低くなり無潤滑時の 1000 kN 荷重で 77%より低い圧縮率となるものも多かった。さらに金型と強固に溶着を起こす添加剤も散見された（悪い例として、①シリコンAの 903 kN で 74.88%圧縮率で焼付きあり）。

また、荷重だけでなく加工時のアルミ素材の表面の拡大も鍛造においては重要であるため金型接触面のアルミ素材の表面の拡大についても注視し評価を行った。表面の拡大について詳細は後述するが、鍛造中の膜追従性（図—3参照）が必要と言われており、摩擦せん断係数を導出する上で重要である。

据込み試験での添加剤の評価の結果、表—20に示す添加剤番号②（シリコンB）、④（含酸素ポリマー）、⑤（炭化水素ポリマー）を最終配合の検討用に選定した。これらはいずれも圧縮率が設定値を超えており、圧縮荷重が低くさらに表面の拡大性が期待できる添加剤である。これらの添加剤に共通する特徴は、いずれも「ポリマー」と「高粘度」であるが、この特徴だけでは他の添加剤で悪い例に入ったものを説明できない。今後、添加剤のどのような品質が高圧鍛造に優れているかを検討していきたい。

(B) 添加剤の混合による検討

選定した添加剤で結果が一番良いのは表—17に示す②(シリコンB)である。市販の油性黒鉛タイプと水溶性タイプ潤滑剤の試験結果（表—19）と比べても、②シリコンは優れているが、本研究の最終目標を達成するには、更なる高性能の配合が必要となると考えた。

表—19 市販鍛造用潤滑剤の据込み試験結果

	金型温度	塗布量	方法	荷重 (kN)	圧縮率 (%)
油性黒鉛タイプ	300℃	2 cc	はけ塗り	728	77.75
水溶性タイプ	170℃	20 cc	スプレー	706	77.29

そこで、選定した添加剤を複数混合することで、相乗効果によりさらなる性能アップを図れるのかを検討した。その検討結果を表—20に示すように、選定した3種類のうちの2種類を混合する組み合わせでは、すべての組み合わせにおいて添加剤単体での荷重より優れる結果となり、混合することの相乗効果が確認できた。特に単体で荷重 759 kN と 790 kN の含酸素ポリマーと炭化水素ポリマーとの組み合わせでは荷重が 598kN へ劇的に低下すること、さらには表面の拡大性も向上したことは特筆すべき点である。

表-20 添加剤混合試験結果 溶剤-1に混合 (wt%)

試料		混合-1	混合-2	混合-3
配合	シリコーンB	10	10	
	高粘度含酸素ポリマー		10	10
	炭化水素ポリマー	10		10
結果	荷重 (kN)	661	675	598
	圧縮率 (%)	77.8	77.85	78.04
	表面拡大性	△	○	◎

その後、試験の繰り返しによる荷重、圧縮率、表面拡大性を確認した結果下記の表-21 (試作-5) を本研究の最終配合とした。また図-33に試験結果を示す。

表-21 最終配合 (wt%) 試作-5 S

溶剤-1	78
シリコーンB	4
高粘度含酸素ポリマー	4
炭化水素ポリマー	12
水+可溶化剤	2

図-33 最終配合 (試作-5 S : 静電型) の試験結果 (300℃)



添加剤混合による検討の結果、無潤滑での設定圧縮率 (77%) に圧縮するための荷重を約 1/2 に低減することが可能な潤滑剤の配合が得られた。市販の優れている油性潤滑剤の「圧縮率 77.75%, 荷重 728 kN」(表-19) と比べても 23% も低い荷重で圧縮でき、最終配合は優れていると言える。

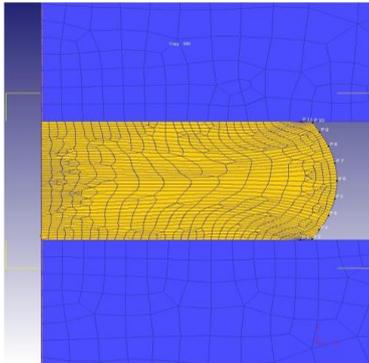
(C) 試験後試験片による摩擦せん断係数の導出

静岡大学が実施した形状・材料流動に関するシミュレーション結果を図-34に示す。このシミュレーションから、円柱を押し潰すと樽型への変形が予測できる。摩擦係数が 0.1 ($m=0.1$) の場合 (左図)、中心部での変形が大きく、かつ、右端面へ向かって変形しているのが分かる。一方、摩擦係数が 1.0 ($m=1$) の場合、金型面とアルミ素材間の滑りがないためフォールディングが起こり、接触近傍では塑性変形が少なく、単に右側へ押し出されて樽型変形が大きいと予測される。このシミュレーションは後述の写真の試験結果 (図-38) と良く一致していた。

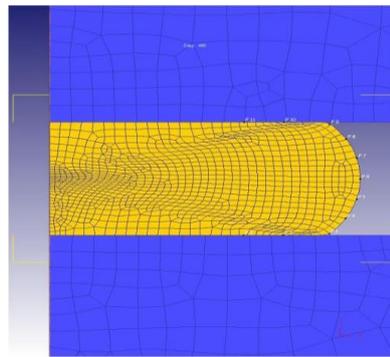
図一 3 4 円柱試験片据込み工法での形状・材料流動シミュレーション

・金型温度150度・工具速度10mm/s

m=0.1(圧縮率約60%)

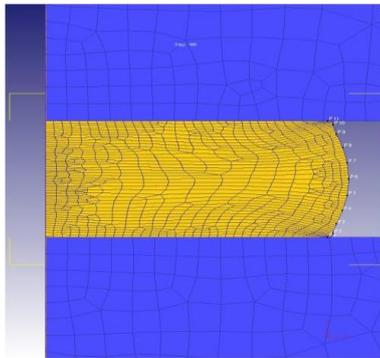


m=1(圧縮率約60%)

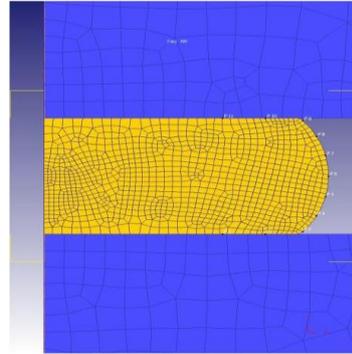


・金型温度300度・工具速度10mm/s

m=0.1(圧縮率約60%)



m=1(圧縮率約60%)



鍛造の加工においては圧縮時の荷重だけではなく、金型との接触面でのアルミの表面拡大が重要である。表面を拡大させるためには潤滑剤皮膜を境界面に保持させ摩擦せん断係数を下げることが必要となる。一般的には潤滑剤皮膜の『膜追従性』といわれている性能である。摩擦せん断係数を導出する手段として、静岡大学にて算出された図一 3 5 の校正図に、アルミ試験片の圧縮前後の測定値をプロットすることで求めることができる。

図一 3 5 円柱試験片の摩擦せん断係数校正図

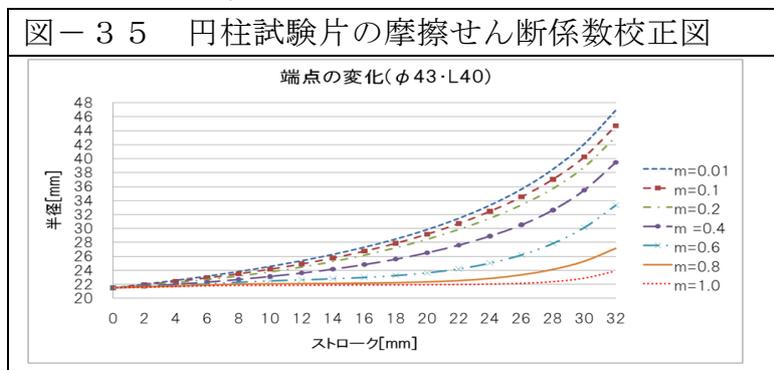


図-35を使って、摩擦係数は次のように算出した。

- ①本試験片の場合、圧縮前の半径は21.5mm、ストローク(潰し量)はゼロである。
- ②図-36に示す端部Aの圧縮後の位置を計測し、半径の拡大量を求める。
図-35のX軸の「半径」とする。
- ③高さ40mmからの潰し量を図-35の「ストローク」とする。
- ④②と③の交点のレベルから摩擦係数を算出する。

この図を使い、各種試料の摩擦係数を算出した。

表-21-2 摩擦せん断係数

	金型温度	荷重	圧縮率	ストローク	拡大面半径	摩擦せん断係数
	℃	kN	%	mm	mm	
水溶性(現行品)	170	759	77.29	31	37	0.4
油性黒鉛(市販品)	300	728	77.75	31	27	0.75
シリコーンA	300	903	74.88	30	25	0.8
シリコーンB	300	689	77.82	31	33	0.55
高粘度含酸素ポリマー	300	759	77.31	31	28	0.7
炭化水素ポリマー	300	790	77.18	31	28	0.7
ワックス	300	896	75.48	30	24	0.85
開発品、試作-5	300	528	77.38	31	37	0.4

表-21-2に示す様に、現行水溶性潤滑剤は金型温度170℃時に摩擦せん断係数 $m=0.4$ と低い。しかし300℃の金型では突沸で潤滑膜が薄くなり、使えない。一方、300℃で評価した他の添加剤・単体では、摩擦係数が高く、0.55~0.85の範囲であった。市販の油性黒鉛タイプでも0.75であった。表中のシリコーンB ($m=0.55$)、高粘度含酸素ポリマー ($m=0.7$)、炭化水素ポリマー ($m=0.7$) を混合して得られた試作-5の摩擦係数は $m=0.4$ 低くなった。170℃で優れた摩擦係数を示す現行の水溶性潤滑剤と比べ、試作-5の300℃の摩擦せん断係数は同等であるが、加工時の必要圧縮荷重は低いとの長所がある。

端部の移動がない場合は図-37に示すようにアルミ円柱の側面部が圧縮面にアルミが供給され『フォールディング』と呼ばれる現象を起し、樽型変形となる。図-38に表面拡大の違う試験片の写真を示す。

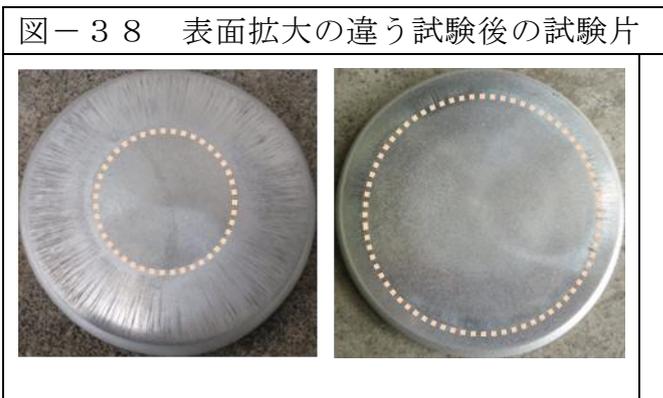
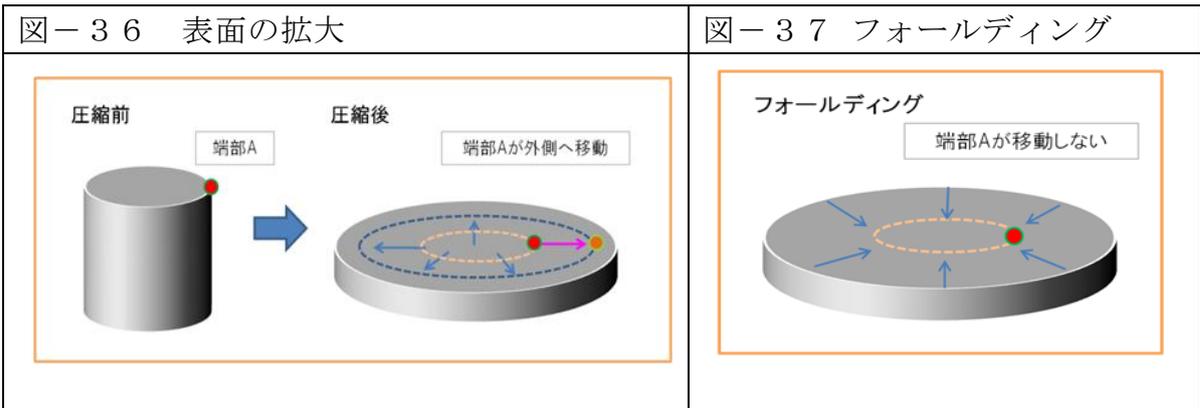


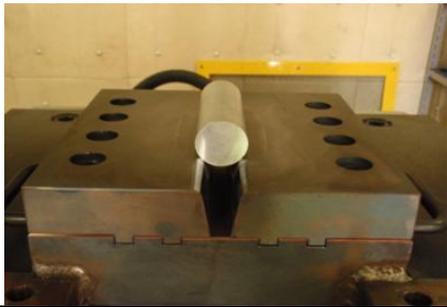
図-38中の左の例では表面の拡大はほとんどなく摩擦せん断係数 $m=1$ となる。また右の写真では(試作-5を使用)表面の拡大半径から摩擦せん断係数は $m=0.4$ となる

(D) 金型形状変更による静電塗布効果の検証

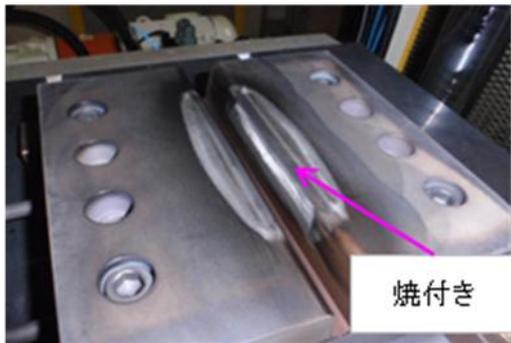
目的：据込み工法で平面による円柱圧縮試験で潤滑性を評価してきたが、実機では金型は複雑な形状をしているため、全ての部位で安定的に厚い潤滑皮膜が形成出来るわけではない。この問題を解決するために付着効率の良い静電塗布による潤滑剤塗布の効果を検証した。

試験方法：S社実機ですぐれた性能を示した試作-5を静電配合にした潤滑剤(試作-5S)を図-39の金型に塗布後、試験片を圧縮した。

金型形状：金型の形状を平面ではなく、アルミ流入部にテープを付け、平面より過酷な形状とした。従って、押込み部の壁面部は通常のスプレー塗布では付着しづらい形状であり、焼付きが起りやすい状況である。そのためより良い潤滑性が必要となる(図-39、図-40)。

図－３９ 金型の外観と試験片	
	<p><試験片> 素材：A2011 サイズ：Φ30×L100 温度：450℃ 金型温度：300℃ 潤滑剤：試作－5 S</p>

試験結果：表－２２に示す様に、通常塗布・塗布量が1ccの条件では、側面部での激しい焼付きが発生した（図－４１）。倍量の2cc塗布では、圧縮荷重が822kNから782kNへ低減した。しかし、若干の焼付きがみられた。一方、同じ潤滑剤を静電塗布することで塗布量が1ccでも、通常塗布時の2cc塗布の荷重より低い圧力で成形が可能となり、試験後の金型についても側面部への焼付きは見られなかった。付着が難しい金型側面部への静電塗布効果は明確であることが確認出来た。

図－４０ 圧縮後試験片	図－４１ 焼付きの様子
	

表－２２ 試験結果

塗布方法	塗布量 (cc)	荷重 (kN)	※塗布量は下型に塗布した量 試料 試作－5 S（静電型）
通常塗布	1	822	
	2	782	
静電塗布	1	761	

(E) 二段階圧縮（荒地成形・本成形）による検討

目的：実機での成形では、荒地成形⇒本成型という二段階で製品が加工されることが多い。円柱試験片の平面圧縮による据込み加工試験法で最終配合（試作－5 S：表－２２参照）を使用し実際の加工を想定して、二段圧縮工程での効果について検討した。

試験方法：評価方法は水溶性潤滑剤による試験で基準値を策定した。

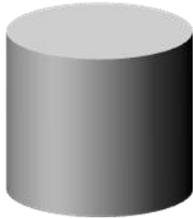
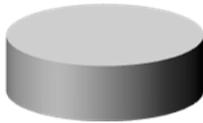
170℃の金型に片面10ccの水溶性潤滑剤を塗布し、450℃に加熱した試験片を圧縮率70%になるよう圧縮し圧縮直後の試験片温度を測定した、試験機の都合上二段階目の圧縮までの間、試験片は電気炉で一段目圧縮後の温度を保持した。再度、金型に潤滑剤を塗布後二段目の圧縮試験を行った。このとき試験機の最大荷重である1000kNで圧縮しその圧縮率を水溶性（金型温度170℃時）での加工限界と見做し、判断基準とした。

油性潤滑剤では金型温度を300℃、潤滑剤塗布量は片面1ccとした。また二段目の圧縮では水溶性で想定した基準圧縮率になるよう設定した。表-23-1に試験結果、また温度条件とイメージ図を併記した表-23-2を示す。

表-23-1 二段階圧縮試験結果

			一段目	二段目
水溶性（基準）		圧縮率（%）	68.71	79.1
		荷重（kN）	418	1000
油性	圧縮率設定試験	圧縮率（%）	70.07	79.48
		荷重（kN）	371	612
	追加試験 （1000kN圧縮）	圧縮率（%）	69.99	83.77
		荷重（kN）	365	1000

表-23-2 二段圧縮試験片温度、圧縮試験片イメージ

		圧縮前	一段目終了後	二段目終了後		
試験片 温度 （℃）	水溶性	450	270	200		
	油性	450	360	313		
条件			圧縮率70%設定	水溶性1000kNを基準		
イメージ						
			圧縮率 （%）	荷重 （kN）	圧縮率 （%）	荷重 （kN）
結果	水溶性		68.71	418	79.1	1000
	油性		70.07	371	79.48	612

試験結果：表－23－1に示すように、基準となる水溶性潤滑剤使用時の二段目圧縮結果は1000kNで79.1%の圧縮率となった。油性潤滑剤で二段目の圧縮率を79.1%となるよう調整し試験した結果、圧縮荷重は612kNと低い荷重となった。即ち水溶性の二段階圧縮での限界加工厚さまで加工するのに要する荷重を39%程度低減出来ることとなる。この優れた結果は、油性潤滑剤を使うことで、金型温度を300℃にできるため、一段目圧縮後の試験片温度低下を防いだ効果が大いと考えられる。また、油性での二段目圧縮時の設定を1000kNとした試験を行った結果、圧縮率は83.77%となり水溶性の79.1%を大幅に上回る圧縮率となった。

(F) 金型温度上昇の検討

本研究では試験時の金型温度を300℃として研究を進めてきたが、最終配合（試作－5S）についてさらに高温の350℃に対応出来るか検討した。試験結果を表－24に示す。

表－24 金型温度350℃据込み試験結果

		通常試験設定	圧縮率設定
型温度 300℃	圧縮率 (%)	78.8	77.38
	荷重 (kN)	612	528
型温度 350℃	圧縮率 (%)	78.77	77.29
	荷重 (kN)	591	504

本研究の最終配合（試作－5S）は金型温度350℃においても十分な潤滑性能を保持していると言える。また、金型温度を上昇させることで圧縮荷重は低下しており、金型温度を上昇させることは加工性の向上に有効であることを示している。

2－3－3項で得られた知見をまとめる。

1	本研究では据込み加工に効果的な添加剤として『ポリマー』『高粘度』の類から選定した。
2	添加剤の混合による『相乗効果』により、低荷重化・表面拡大性向上を図ることが可能。
3	本研究の最終配合での摩擦せん断係数は $m=0.4$ 程度である。
4	静電塗布により通常塗布よりも低塗布量化（半減）が可能であり、通常付着しにくい側面部への焼付き防止の効果もある。
5	二段圧縮試験において、二段目圧縮時の荷重を現在の水溶性潤滑剤より39%低減可能。
6	水溶性から油性潤滑剤に変更し、金型温度を300℃以上（例 350℃）に高温化することで加工性は更に向上する。

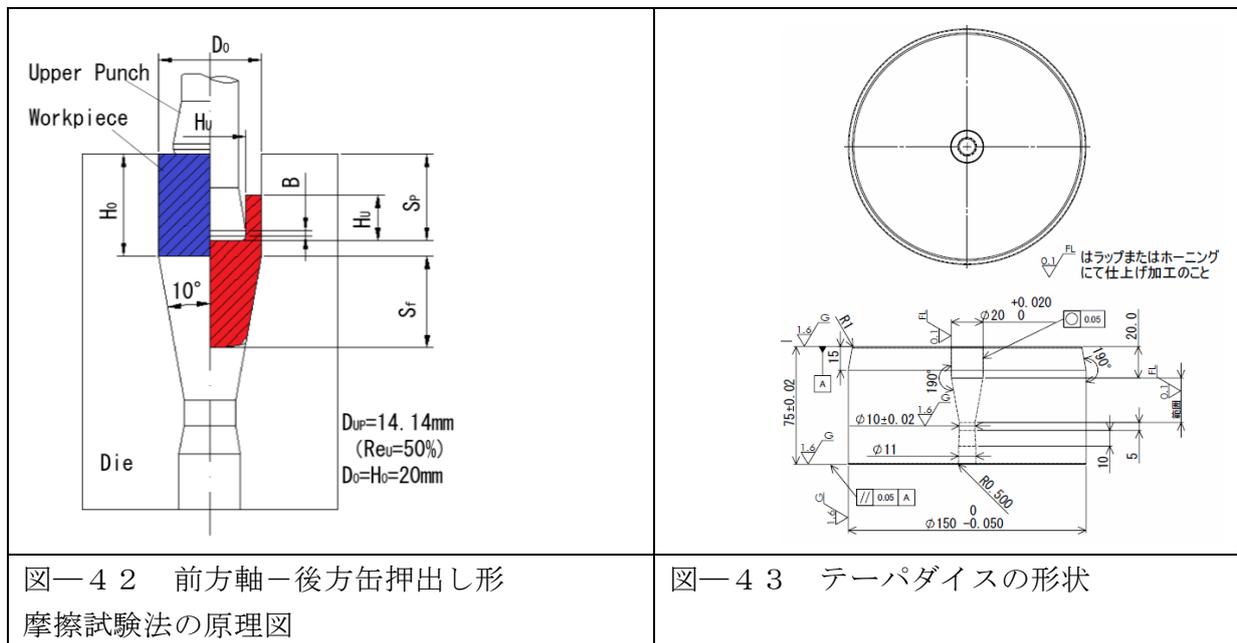
2－3－4 高圧下で膜追従性のある添加剤の探索：押出し工法で評価

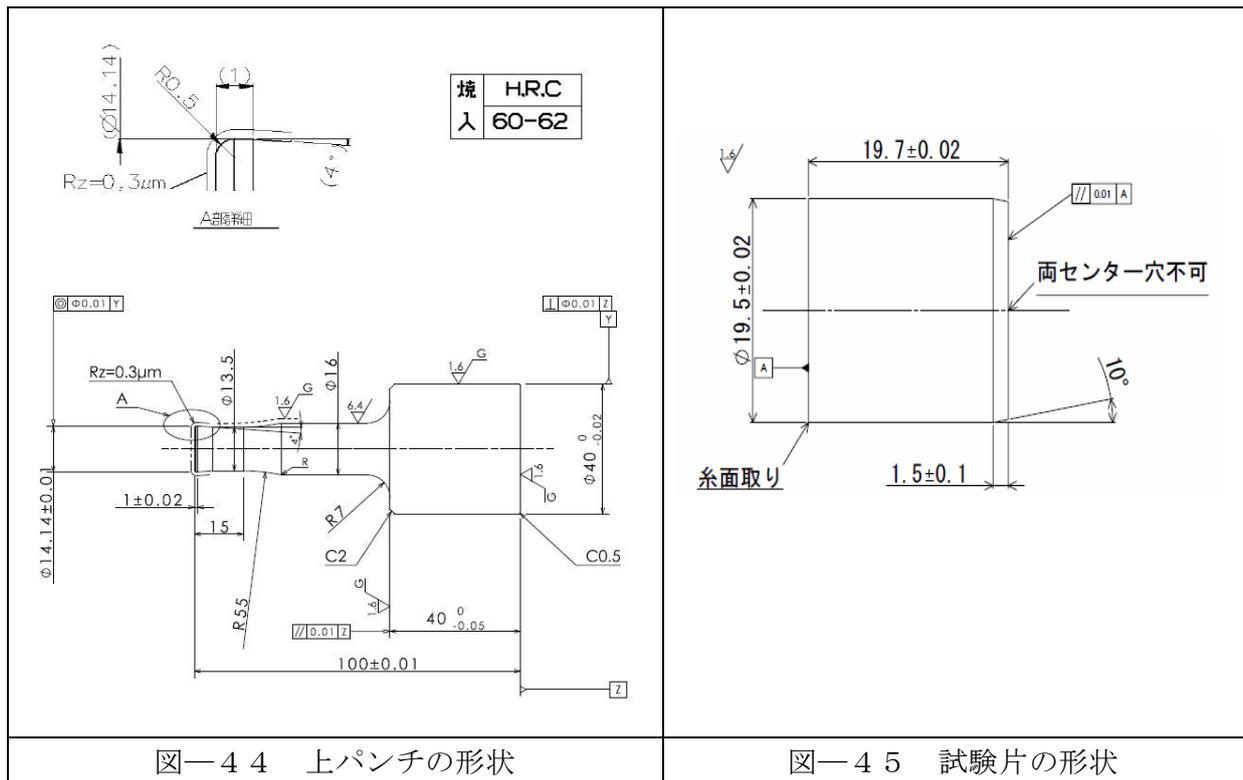
(1) 摩擦試験法

前方軸－後方缶押出し形摩擦試験法の原理を図－42に示す。前方軸押出しは、

軸状の部品の鍛造に多用されるもので、加工前素材の外径を絞り込んで細い径に成形する鍛造法である。前方軸押しでは、表面積拡大率は小さいが、素材がダイスのテーパ面に加圧されながらダイス面上を滑っていくため、テーパ面面圧と滑り距離が大きくなるという特徴を持つ。ビレットから前方押しを行う場合、ビレットエッジ部が最初にダイス面に接触し集中的に変形させられるため、この部分の変形挙動が潤滑状態に大きく影響する。そのため凝着はビレットエッジから生じることが多く、ダイス摩耗にもビレットエッジが大きく関係している。テーパ面で凝着が発生したり、摩擦が高くなったりすると成形荷重が増加し十分な軸の押し出しが出来ないため、前方押しに用いられる潤滑剤についてダイステーパー面の摩擦を評価することは重要である。

入口内径 20mm のテーパダイス (図一4 2) 内に円柱試験片 (図一4 5) を挿入し、断面減少率 $Re=50\%$ のパンチ (図一4 4) で上面から加圧する。ダイスと試験片にはクリアランス 0.5mm 程度があるが、これは試験片の加熱による熱膨張、また潤滑膜厚を考慮している。成形後試験片の前方押し量 S_f ・後方押し量 H_b を測定し、校正線図にプロットすることで摩擦せん断係数を求める。ダイス面摩擦が大きいほど前方押し量 S_f が小さくなり、後方押し量 H_b は大きくなるため成形後試験片の形状を測定することでダイス面摩擦を評価できる。また、成形後試験片の表面の状態から凝着の有無をみることで、耐焼付き性能の評価を行うことができる。





図一 4 4 上パンチの形状

図一 4 5 試験片の形状

(2) 実験方法・手順

試験機は「サーボプレス」である。図一 4 6 にサーボプレスの外観を示す。加工速度は下死点上 10mm で 80mm/s を用いた。最大加工荷重は 150MN である。

実験手順として、あらかじめ上パンチにモリブデンのスプレーを塗布しておく。ダイスをセットし、その外周部にヒータを取り付ける。芯合わせ用ソケットを用いて上パンチとダイスの芯を合わせ、ダイスを目標温度まで加熱する。並行して試験片もマッフル炉を用いて目標温度まで加熱する。ダイスが目標温度まで上昇した後、使用する潤滑剤をスポイトを用いて規定量塗布し、試験片をダイスに挿入し加圧する。

試験片素材は A2011、テーパダイス素材には SKD-61 を使い、上パンチは高速度工具鋼 SKH51 を HRC60~62 に焼入れし、表面は最大粗さ $Rz = 0.3 \mu m$ 以下に仕上げたものを使用した。工具は 1 回の試験ごとにエタノールで拭き、ダイスはさらに高周波研磨機を用いて凝着部を研磨した。

図一 4 6 サーボプレスの外観



(3) 校正線図の作成

本試験において、実験結果からのみではダイスと試験片との摩擦を測定することはできない。そのためあらかじめ校正線図を鍛造用剛塑性 FEM 解析ソフト DEFORM-2D にて作成した。摩擦せん断係数の導出は、作成した校正線図に測定点をプロットし、内挿法にて求める。本試験における校正線図とは、各試験条件でのストロークを横軸にとり、縦軸に前方押し出し量 S_f または後方押し出し量 H_b をとったものである。作成方法としては、シミュレーションソフト上で実験とまったく同じモデルを作成し、摩擦せん断係数のデータを収集し、そこで得られたデータをエクセルでグラフ化という手順をとっている。

DEFORM-2D の解析条件を表-25 に示す。実際の試験片素材は A2011 だが、データベースに材料データがなかったため、A2014 の材料データを用いている。ダイステーパ面と試験片との間の摩擦せん断係数を、 $md=0.01\sim 1$ でシミュレーションを行った。なお、ここで試験片と上パンチの接触面の摩擦は終始一定と仮定し、摩擦せん断係数 $mp=0.1$ 一定で解析した。本試験法では、前方押し出し量 S_f と後方押し出し量 H_b の2つの観点から摩擦せん断係数を評価することが可能である。上パンチ R 部とテーパダイスのビレットエッジ部では変形が著しく起こるため、解析ではそれら箇所のメッシュを細かく設定し、解析精度を上げている。ストローク S_p - 前方押し出し量 S_f の関係を図-47 に、ストローク S_p - 後方押し出し量 H_b の関係を図-48 に示す。

表-25 DEFORM-2D 解析条件および校正線図一覧

モデル	要素数	温度[°C]	校正線図
試験片：剛塑性体	3000	400	前方伸び (S_f) による摩擦せん断係数 後方伸び (H_b) による摩擦せん断係数
上パンチ：剛体	1000	20	
テーパダイス：剛体	2000	300	

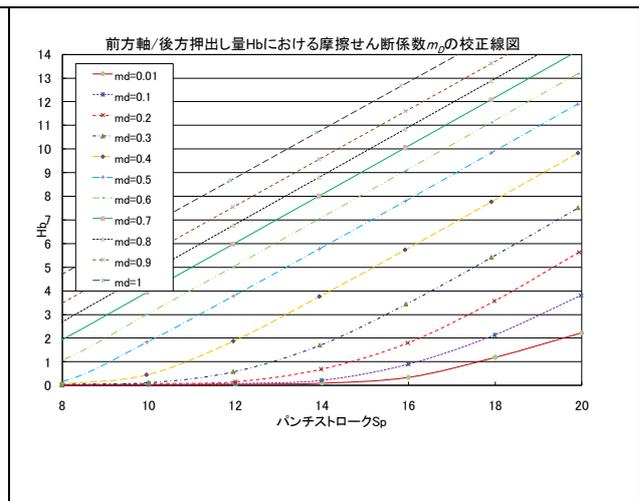
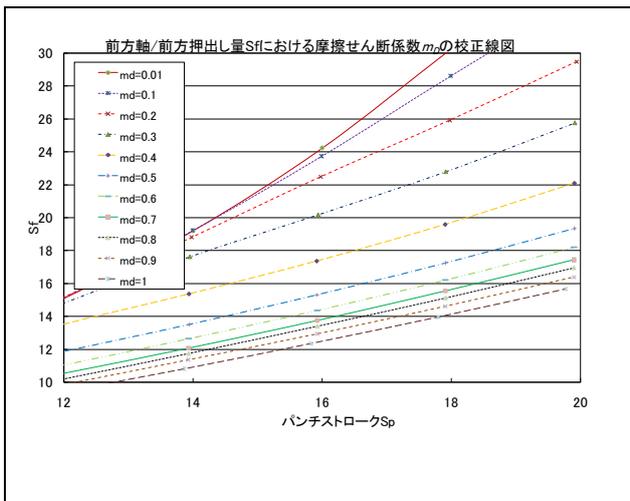


図-47 前方押し出し量 S_f によるテーパダイスの摩擦せん断係数の校正線図

図-48 後方押し出し量 H_b によるテーパダイスの摩擦せん断係数の校正線図

(4) 摩擦試験条件

今回評価を行った潤滑剤、設定温度をまとめたものを表-26に示す。

表-26 試験条件

試料	名称	タイプ	潤滑成分	金型 [°C]	塗布量 (cc)
A	水ガラス	水溶性	カルボン酸塩、ワックス	170	8
A	水ガラス	水溶性	カルボン酸塩、ワックス	300	8
B	oil dag	油性	鋳物油・バインダー、黒鉛(10%)	300	8
C	試作-4	油性	炭化水素ポリマー	300	8
D	試作-5	油性	試作-4 + シリコン + 高粘度含酸素 ポリマー	300	8
E	試作-6	油性	試作-5 + 硫化油、有機MoDDC	300	8

上記の通り5種類の潤滑剤、6つの条件で評価を行った。試験片設定温度は全て400°Cである。

(5) 摩擦試験結果

① 摩擦せん断係数の測定

試験結果を表-27-1に示す。前述したように前方押し量 S_f が大きいほど低摩擦で、後方押し量 H_b が大きいほど高摩擦となる。次にこの結果を校正線図にプロットし摩擦せん断係数を求めた結果を図-50に示す。その際、 m_p が0.01以下のものは0.01、1以上のものは1と明記している。 m_p の平均値から、摩擦は潤滑剤Eが最も小さく、B、D、A(170°C)、A(300°C)の順で大きくなっている。Cは2発で大きく差の出る結果となった。

表— 27— 1 試験結果

潤滑剤	荷重 (kN)	パンチ押込み量 Sp (mm)	前方押し出し量 Sf (mm)	後方押し出し量 Hb (mm)	ロックアウト時 破裂音の有無
A (水ガラス 170°C)	77	17.88	22.53	3.54	有
A (水ガラス 170°C)	62	18.00	25.60	2.03	無
A (水ガラス 300°C)	67	18.35	14.26	12.73	無
A (水ガラス 300°C)	61	18.32	15.05	11.41	無
B(oildag)	55	18.16	24.87	2.76	有
B(oildag)	52	18.21	25.56	2.27	有
試作 C (FS-1101)	73	18.38	14.26	12.76	無
試作 C (FS-1101)	61	18.13	25.89	1.74	こすった様な音
試作 D (FS-1102)	55	18.21	25.68	2.02	無
試作 D (FS-1102)	56	18.27	23.34	3.53	有
試作 E (FS-1102-GM)	50	18.14	27.77	0.81	無
試作 E (FS-1102-GM)	43	18.27	28.08	0.84	無

表— 27— 2 試験結果

潤滑剤	Sf からの md1	md1 の 平均	Hb からの md2	md2 の 平均	md1 と md2 の 平均 (md)	Md の 平均
A (水ガラス 170°C)	0.307	0.26	0.204	0.146	0.257	0.203
A (水ガラス 170°C)	0.212		0.089		0.150	
A (水ガラス 300°C)	1.000	0.956	0.724	0.657	0.893	0.806
A (水ガラス 300°C)	0.912		0.590		0.751	
B(oildag)	0.245	0.235	0.132	0.114	0.204	0.174
B(oildag)	0.225		0.095		0.160	
試作 C	1.000	0.605	0.724	0.389	0.776	0.497
試作 C	0.210		0.053		0.132	
試作 D	0.221	0.260	0.074	0.126	0.185	0.193
試作 D	0.300		0.177		0.238	
試作 E	0.144	0.143	0.010	0.010	0.099	0.077
試作 E	0.143		0.010		0.076	

②試験片の焼付き判定

試験後の試験片外観を図— 49 に示す。潤滑剤（試作—E）がほぼ焼付きなし、A（170°C）・B・D がほぼ同程度、A が最も焼付きが強くみられた。C は md の結果同様、焼付きの程度に大きな差が生じた。前方押し出し量 Sf が大きかったものはビレ

ットエッジ部に焼付きが起こり、後方押し量 H_b が大きかったものはテーパ導入部周辺で焼付きが強くみられる傾向がある。ただ潤滑剤 B は比較的 SP が大きかったにも関わらずテーパ導入部の上部（後方伸び側）に焼付きがみられた。

図一 4 9 試験後の試験片外観

潤滑剤 A (170℃) ①	潤滑剤 A (170℃) ②	潤滑剤 A (300℃) ①	潤滑剤 A (300℃) ②
			
潤滑剤 B①	潤滑剤 B②	潤滑剤 C①	潤滑剤 C②
			
潤滑剤 D①	潤滑剤 D②	潤滑剤 E①	潤滑剤 E②
			

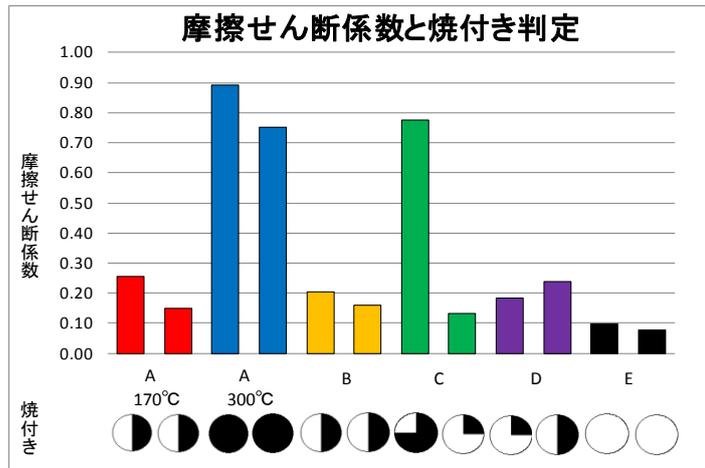
③考察

摩擦せん断係数 m_d 、焼付き判定の結果をまとめたものを図一 5 0 に示す。焼付き判定は焼付きほぼなしの白丸、小、中、大、特大の黒丸の 5 段階で評価した。2 つの結果から 潤滑剤 E が最も潤滑性に優れていることがわかった。

m_d が大きいと焼付きの程度も大きくなっている。逆に m_d が最も小さかった潤滑剤 E では焼付きが殆どみられなかったことから摩擦と焼付きの程度には相関が確認できた。潤滑剤 C は 2 回の試験で大きく差が生じ再現性を得ることができなかったので再度評価を行う必要がある。焼付き箇所は、前方押し量 S_f が大きかったものはビレットエッジ部に、後方押し量 H_b が大きかったものはテーパ導入部周辺でみ

図一50 摩擦せん断係数と焼付き

られた。これは表面積拡大の違いにより潤滑膜の切れやすい箇所の違いが生じたからだと思われる。また潤滑剤Bのみ逆の傾向となった。今回は塗布量を8ccに固定して行ったが条件を増やして試験を行う必要がある。



2-3-5 アルミ表面粗さと潤滑膜形成の関係

(1) 目的

アルミ試験片の表面粗さを変えた際の圧縮荷重への影響を調査した。

(2) 実験

本来なら金型の表面粗さを変えて試験したほうが実機に還元するデータとして有効であるが、ここでは簡易的な試験法として、試験片の表面（金型および潤滑膜の接触面）を処理してプレス試験を行った。300°Cに加熱した上下の金型に潤滑剤を2ccずつ塗布し、プレス荷重を測定した。試験片の表面粗さと荷重値の結果を表-28に示す。なお、表面粗さと荷重値はN=3の平均値を記載した。

(3) 結果

試験片の表面状態とプレス荷重値とに相関は見られなかった。試験片に荷重が掛った瞬間にアルミ表面の組織が軟化したため、荷重値に影響が出るほどの表面硬度を有していなかったものと判断する。今後、金型表面を処理して検討する余地がある。

表-28 表面粗さと荷重の関係

	アルミ試験片処理法	粗さ (Ra)	荷重 (kN)	圧縮率 (%)
①	処理なし (標準)	0.6	620	78.8
②	研磨 (#2000)	0.3	632	78.4
③	研磨 (金属ヤスリ)	2.6	629	78.2

2-3-6 鍛造後の内部組織観察と製品強度

鍛造加工では加工により製品を決まった寸法・形状に塑性変形させその強度を上げることが目的としている。潤滑剤の違いにより圧縮表面の拡大またはフォールディングが起こることが本研究からもわかっている。その場合アルミ内部の組織の移動も変

わることが予測される。

本研究で作成した試験片を共同研究者の埼玉県産業技術総合センターにおいて、潤滑剤の違いにより内部組織の流動性の違いを確認するため圧縮後の試験片の金属組織の流れの状態（ファイバーフロー）について観察を行った。またその時の試験片強度を測定した。

(1) 内部組織の観察

図-51に示すように圧縮後の試験片を4分割しその側面部について断面を薬品で観察面を調製し、顕微鏡で観察した。観察結果を図-52に示す。

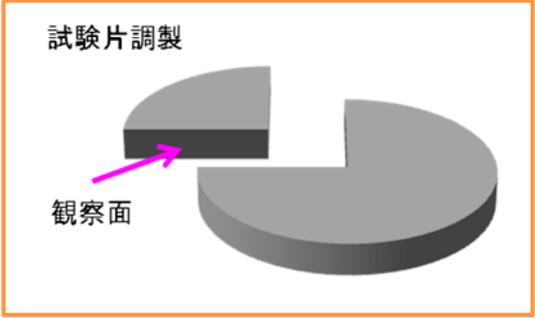
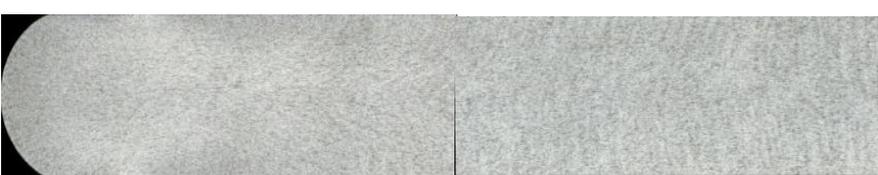
図-51 観察用試験片	試験条件		
		潤滑剤	
		型温度	
	試験片①	無潤滑	300℃
	試験片②	水溶性	170℃
試験片③	試作-5	300℃	

図-52 ファイバーフロー観察	
	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> 端部 中心部 </div>
試験片①	
試験片②	
試験片③	

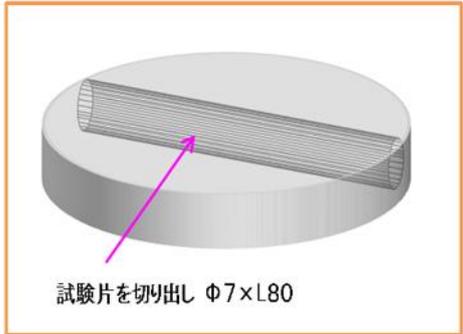
ファイバーフローを観察すると、無潤滑での試験片①では潤滑剤を使用した試験片②③とは明らかな違いがみられる。即ち無潤滑では圧縮面の表面拡大がないため中心部の金型接触面は全く組織が移動していない、いわゆるデッドメタルとなっている。厚さ方向中心部の組織は外側に押し出され流動している様子が観察出来る。

潤滑剤を使用した試験片②③では、表面の拡大が観察された部位では組織の流れ

も一様に層流状態で流れており、組織の大きさも均一になっている模様である。水溶性と油性では金型温度が違うため、加工中の冷却性に差があると思われる。観察してみると、水溶性潤滑剤では縦じま模様が観察出来るが、N=1 の観察結果であり、冷却性の違いからくるものかは断定できない。継続して研究を進めたいと考える。

(2) 試験後の試験片強度

図-52で観察した条件と同条件の圧縮試験で作成した試験片について万能評価試験機にて引張強度の測定を行った。図-53に試験片の調製および表-29に試験結果を示す。

図-53 引張試験用試験片	表-29 試験結果								
 <p data-bbox="288 1010 528 1039">試験片を切り出し Φ7×L80</p>	<table border="1" data-bbox="916 792 1359 981"> <thead> <tr> <th></th> <th>引張強度 (N/mm²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>無潤滑</td> <td>225</td> </tr> <tr> <td>水溶性</td> <td>230</td> </tr> <tr> <td>試作-5</td> <td>223</td> </tr> </tbody> </table>		引張強度 (N/mm ²)	無潤滑	225	水溶性	230	試作-5	223
	引張強度 (N/mm ²)								
無潤滑	225								
水溶性	230								
試作-5	223								

引張強度試験の結果には明らかな差は確認できなかった。残念ながらこちらの測定についてもN=1となっており十分な考察には至っていない。金属組織のファイバーフローと併せて、強度についても潤滑剤が及ぼす影響についての詳細は今後も研究を進めることとしたい。

この項で得られた知見をまとめる。

1	無潤滑状態で表面が拡大しないようなフォールディング状態では、金型接触部位の金属組織は圧縮時に全く移動しない。
2	その時、金属組織は緻密にならない（初期の組織を保つ）。またムラが出来る。
3	潤滑性が良く表面の拡大がある場合、金属組織は層流で流れながら圧縮される。
4	本研究の試験では潤滑剤あり、無潤滑また金型温度170℃、300℃で試験した試験片の引張強度に違いは見られない。

2-3-7 粉体添加剤の粒度と焼付き防止性の研究

(1) 背景

2-3-2項に説明するように、アルミ試験片を金型上にセットすると直ちに熱交換が開始され、試験片の温度が低下する。そこで、試験片と金型との間に粉体を介在させれば熱交換が阻害され、試験片を高い温度に保持した状態で試験できるため、より低荷重で目標の圧縮率に到達できると考えた。また、介在させる粉体の粒子径が大きければ試験片と金型が接触できなくなるため焼付きの発生を抑えられ

るので、粉体を配合する意義があるとも考えた。

(2) 目的

粉体の粒度を変えることでプレス荷重の値や焼付き性に変化が見られるか研究を行った。

(3) 試験

通常、数多くの粉体は吸水・吸油性を有しており、潤滑油の系に投入すると直ちに膨潤したり、粉体同士が凝集して粒子径が肥大化するので、粉体原料そのものをレーザー回折式粒度分布計などで測定した粒子径の数値はあまり参考にならない。

そこで、実際に使用する潤滑剤の系に粉体を投入した状態にて、粒子径を測定することのできる粒度分布計（図-54-1）を使用した。この装置により粒子径の異なるサンプル（表-30、図-54-2）を用意できたので、300℃に加熱した上下の金型にサンプルを2ccずつ塗布し、450℃のアルミ試験片をプレスした際の圧縮荷重を測定することで評価を行なった。試験で用いたサンプルの組成を表-30に、プレス試験の結果の一覧を表-31にそれぞれ示す。

(4) 結果

粉体の粒子径と圧縮荷重の数値とに相関は見られなかった。また、粉体を配合しなくても本試験の結果より低い荷重を有し、焼付き性の優れたサンプルをすでに見出しているため、果たして粉体を配合する意義があるのか今後も継続し検討したい。

図-54-1 粒度分布計	表-30 試作潤滑剤の組成、wt%				
	原料名	サンプル名			
		Ca-A	Ca-B	T-A	T-B
	溶剤	77	77	77	77
	炭化水素ポリマー	20	20	20	20
	炭カルA (1.1 μm)	3			
	炭カルB (22 μm)		3		
	タルクA (0.6 μm)			3	
	タルクB (4 μm)				3
サンプル粒子径 μm	1.6	18.5	1.3	4.4	

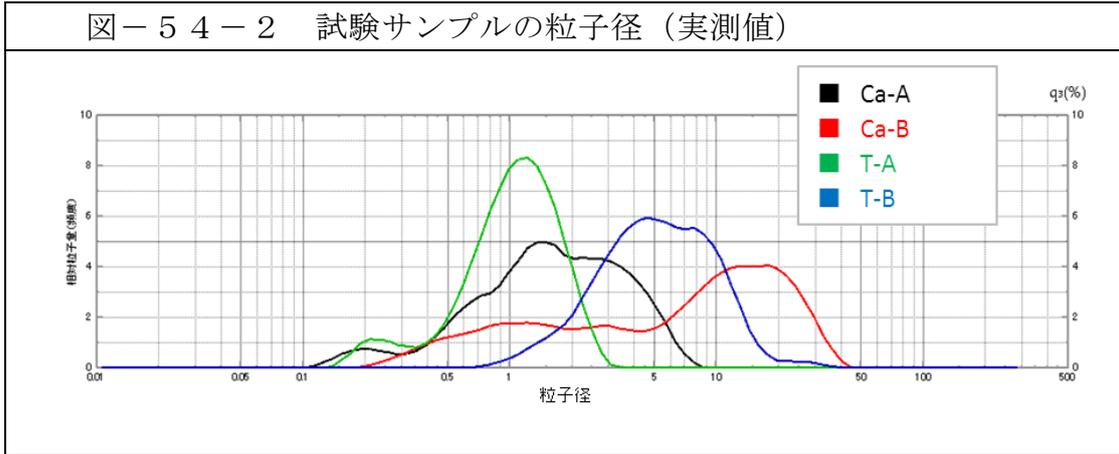


表-31 プレス試験結果

サンプル名	粒子径 (μm)	荷重 (kN)	圧縮率 (%)	焼付き
Ca-A	1.6	693	77.7	なし
Ca-B	18.5	759	77.6	なし
T-A	1.3	741	77.6	なし
T-B	4.4	740	77.5	なし

2-4 潤滑剤の配合の選択

2-4-1 実機用配合の試作

(1) 研究の背景

2-3項までに、試験室的なベンチ試験機を使い、溶媒、添加剤の選択範囲を確認した。これらの知見に基づき、数種類の潤滑剤を試作できるようになった。

(2) 課題

同試作品は、ベンチ試験だけで確認された性能であり、実機での性能確認が未確認である。

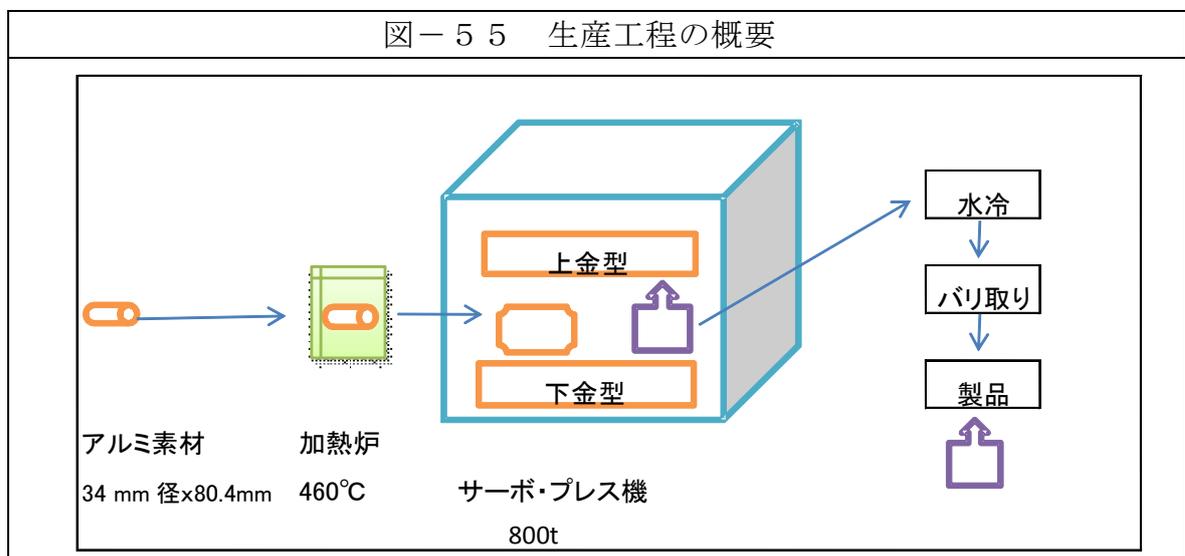
(3) 対策

実機での鍛造潤滑性を確認する。大手鍛造メーカーA社の紹介で、中堅の鍛造メーカーS社にて実機試験を2回実施した。

(4) 評価方法

①生産工程

図-55に示すように、同社は、800tプレス機でアルミ鍛造により自動車部品を生産している。実生産を中断し、青木科学の試作潤滑剤に切り替え、実生産での潤滑剤評価を行った。



工程	二段階圧縮、1個の金型台座に、粗仕上げと成型用金型の計2個を配置
圧縮	1回の圧縮で「粗仕上げ」と「成型」を同時に行う方式。
サイクルタイム	約12秒（6秒×2回圧縮）
金型温度	初期は200℃設定。数時間の生産中の途中加熱は無い。温度調節も無い。しかし、約12秒サイクルで生産すると、圧縮による加工熱で温度上昇と、放熱による温度低下のバランスで均衡化。金型の温度は通常計測していない。
圧縮圧	表示されるが、圧制御ではなく、位置制御である。
潤滑剤	灯油で10倍希釈した黒鉛含有の油性である。以降、現行油と称す。
塗布量	約1cc/回であり、手動塗布
アルミ素材	A-2000系の丸棒材
製品	手のひらサイズ、厚さは2-3mm（図-56）

②評価試験：②-1) 予備試験

- ・目的：本試験用配合が決定する前の試験条件を洗い出すこと。
- ・評価条件：S社の条件に従った。1試料当たり50個の製品を作った。

組成, wt%	表-32 試料				図-56 S社の製品
	現行品	試作-1	試作-2	試作-3	
灯油	90				
GA385(他社油)	10				
溶剤-1		77	80	86	
高粘度基油/植物油		10	10	5.5	
シリコンA		2	2	5	
極圧剤		4	4	1.5	
クレー(粉体)		3	0	0	
他3種		4	4	2	

・評価結果

表-33 予備試験の結果

項目	現行品	試作-1	試作-2	試作-3
製品面の色(目視)	○	△	△	○
摩擦係数(バリから推定)	○	○	◎	○~△*
耐焼付き性	○**	◎	◎	○

* 図-56の写真に示す文字が克明でなかった。

** 2回ほど焼付きを起こした。塗布量が少なめと思われた。
数分で修復できるのでギリギリの操業をしている模様。

知見－１： 予備試験、②－１）の項

1	鍛造用配合が研究される前であり、試作油－１、２、３共に鑄造用の配合に近いものであった。しかし、鍛造でも使えそうな感じであった。
2	但し、試作－１は製品面に油分の残りに起因する黒いシミがあった。塗布量を低減すると改善されそう。粉体が摩擦を悪い方に引っ張っている模様。
3	試作－２はシミが少なくなったが、まだ残っていた。
4	試作－３は添加剤濃度が低く、若干成型性に劣る。
5	これらのことから、Ｓ社の操業条件を本研究の試験条件として採用できることが分かった。但し、本試験の際は、金型温度の計測をすることとした。

①－２）本試験

- ・目的：２－３項の焼付き防止技術及び予備試験で得られた知見をもとに、実機試験用の配合を組んだ。その潤滑性を実機で確認する。

表－３４：試料

組成, wt%	現行品	試作-4	試作-5
灯油	90		
GA385(他社油)	10		
溶剤-1		80	80
シリコーンB			4
高粘度含酸素ポリマー			4
炭化水素ポリマー		20	12

・評価結果

表－３５ 本試験の結果

項目	現行品	試作-4	試作-5
製品面の色(目視)	○	○	○
摩擦係数(バリから推定)	○	○	○
耐焼付き性	○	○	○
厚み	○	○	○

知見—2：本試験、②—2)の項

1	全体に試作油—4及び5は現行油と同等であり、優位差は見つからなかった。
2	2—3項の「焼付き防止技術」で述べたように、プレス機での評価では、次の順で潤滑性が良くなっていた。 現行品 < 試作—4 < 試作—5 実機では3油とも良い性能であったことから、もっと過酷な条件で別の実機試験を実施する必要性を感じた。
3	試作—5の塗布量を半減した時、張り付きが起こった。予備試験では、現行品の塗布量のバラツキからと思われる張り付きが起こったので、試作—5が劣るとは言えない。
4	金型温度を高めるため、ガスバーナーで金型をあぶったが、殆ど温度は上がらなかったため、目的の300℃での実機試験はできなかった。温度関連のデータが実機では不明確（バラツキ大）であったので、プレス機でのデータに基づき考察をする。（2—5項参照）

2—4—2 実機性能の評価と配合の見直し

実機の据込み工法の本試験で使用した最終配合の配合見直しは不要であり、試作—5を選ぶ予定であった。しかし、押出し工法では試作—5はベストではなく、極圧剤を加えた試料—Eが優れていた。だが、試料—Eは据込み工法での試験では高い圧縮圧が必要であり、若干、性能が劣る。そのため、配合の共通化には向かわず、表—36に示す様に、工法別の配合とすることにした。

表—36 最終配合の方向性

根拠	配合番号	用途
2-4-1の実機試験より	試作-5	据込み工法用
2-3-4の押出し工法より	試作-E *	押出し工法用

* 試作 E = (試作 5)+(2 種類の極圧添加剤を計 4%混合)したものである。

最終配合は「試作—5」とその配合を静電塗布型にした「試作—5 S」とする。どちらを選ぶかは顧客の選択とする。

本研究終了後（H23/9）から製品化（H24/4）までに、両最終配合の副作用の評価を実施する。その間に必要に応じ、配合の若干の手直しをすることもある。副作用としては、低温貯蔵安定性、分離、金型への堆積等を検討する。

2-5 最終配合の決定

2-5-1：最終配合の品質と性能

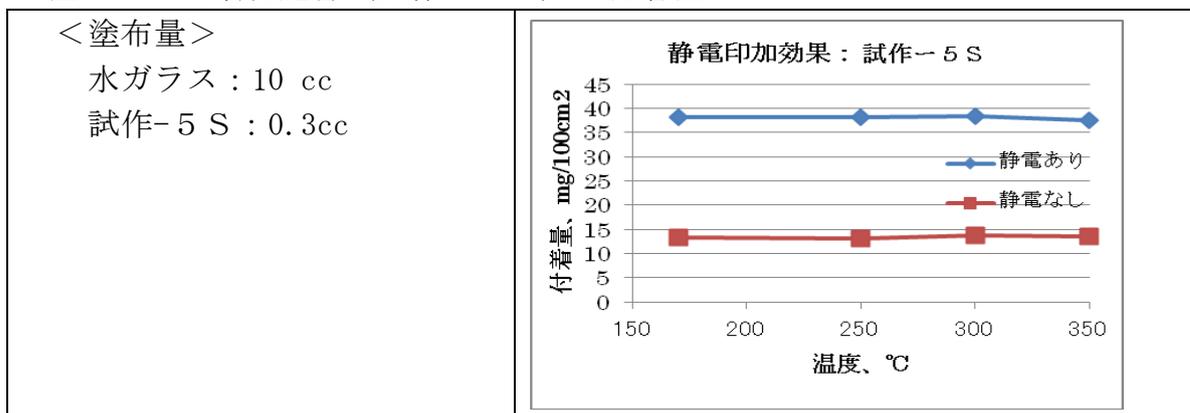
① 配合と物性

表-37 最終配合とその品質

潤滑剤		試作-5	試作-5S	試作-E
用途-1：工法		据込み工法		押出し工法
用途-2：塗布方法			静電塗布	
組成, wt%	溶剤-1	80	78	76
	シリコンB	4	4	4
	高粘度含酸素ポリマー	4	4	4
	炭化水素ポリマー	12	12	12
	極圧剤2種	0	0	4
	水+可溶化剤	0	2	0
物性	外観	透明	透明	透明
	色相	白色	白色	淡緑色
	比重, 15/4℃	0.822	0.822	0.830
	引火点, °C	90	90	90
	粘度, 40°C, mm/s	18.7	17.5	19.1
	粘度, 100°C, mm/s	6.1	6.0	6.3

②付着性能

図-57 最終配合（試作-5S）の付着性



試作-5Sを静電塗布すると、多量に付着する。厚い油膜の形成が優れた潤滑性の理由の一つである。過剰な分をそぎ落とし、少量塗布に活用できる。

③潤滑性：据込み試験結果

潤滑剤	試作-5S
荷重 kN	612
圧縮率 %	78.8

④複数配合

静電塗布装置は数百万円である。顧客によっては経済的な「非静電型」を選ぶことも考慮し、非静電型の試作－5も最終配合の一つとして残す。

2-5-2 目標達成度合いの検証

(1) 目的

据込み工法用に開発した試作－5 Sの鍛造潤滑剤が、本委託事業の目標を達成しているかどうかを検証する。

(2) 方向性

最終目標（1-1-2項より）

生産工程の目標

生産工程のハイサイクル化	20%短縮
生産工程のダウンサイジング化	30%低減

潤滑側の目標達成手段

潤滑剤の配合改善 塗布方法の改善



アルミ素材温度の 低下を削減

(3) 具体的な目標

(表－3より)

項目	細目	従来	本研究
温度	金型初期設定	170℃	300℃
	一段圧縮後の素材	300℃	330℃
	再加熱後の素材	350℃	なし
	二段圧縮後の素材	300℃	300℃
潤滑剤	溶媒	水溶性	油性（炭化水素）
塗布量		基準	1/10
気化熱		539 cal/g	90 cal/g
塗布方法	潤滑剤組成 スプレー方法	非静電塗布型 通常スプレー	静電塗布型 静電ガン
潤滑膜	膜追従性	有	10倍に強化

(4) 検証－1

表－3 中の「潤滑剤側」の目標を100%以上達成した。

表－38 潤滑側の具体的目標項目の達成度

内容	目標・手段	達成度合い
潤滑剤の溶媒	油性化 (炭化水素)	水から溶剤－1へ変更し、目標達成。 L Fを400℃まで高め、付着効率を高めた。
塗布量	1/10	油性化、静電塗布により1/33の塗布量で目標達成。
気化熱	90 cal/g	水から溶剤－1へ変更で目標達成。 冷却熱ベースでは1/200を達成
潤滑剤組成 塗布、スプレー方法	静電塗布型 静電ガン	潤滑剤に伝導性を付与し、目標達成。 静電スプレーが可能となり、目標達成
潤滑・膜追従性	10倍に強化	79%の高圧縮率でも、潤滑性を確保し目標達成

今後の課題：潤滑・追従性は確保できた。しかし、強化の度合いに関しては、「10倍」かどうか、今後 確認すべき項目である。

表－38に述べる潤滑側の達成度合いの根拠を以下のa)からd)に説明する。

a) 潤滑剤の品質・性能比較

水溶性潤滑剤のL F温度は190℃、油性潤滑剤のL F温度は400℃以上であり、油性潤滑剤は300℃の金型でL F現象（突沸）を起こさないの、付着効率は良い。事実、水溶性潤滑剤は、300℃で金型への付着量がかなり低く、潤滑膜が薄かった。一方、油性の試作－5配合は300℃でも、付着が多く、油膜が厚かった。このため、水溶性潤滑剤は300℃で焼付き、試作－5は焼付かなかったと言える。

表－39 最終配合の付着性能

潤滑剤タイプ	水溶性潤滑剤	油性潤滑剤
潤滑剤	水ガラス	試作－5 S
L F温度	190℃	400℃以上
塗布方法	通常・霧吹きガン	静電塗布
塗布量	10 cc	0.3 cc
付着量、170℃	10.5 mg	38.2 mg
付着量、300℃	7.5 mg	38.5 mg
付着量、350℃	4.5 mg	37.5 mg

b) 少量塗布化

上記、付着量試験結果（170℃）から推定し、試作－5 Sの塗布量は、水溶性潤滑剤の1/121と極少量で、潤滑膜を確保できると言える（表－40）。即ち、具体的目標の1/10を遥かに超え、目標を達成した。

表－４０ 最終配合の塗布量

塗布量の差	10 cc / 0.3 cc = 33.3 倍
付着量の差	38.2 mg / 10.5 mg = 3.64 倍
差の合計	33.3 x 3.64 = 121 倍

c) 溶媒と気化熱

溶媒を水から溶剤－１（石油系炭化水素の高度精製溶剤）に替えることで、気化熱は 1/6 倍となる。具体的目標の 90cal/g を達成した。

表－４１ 最終配合の冷却性

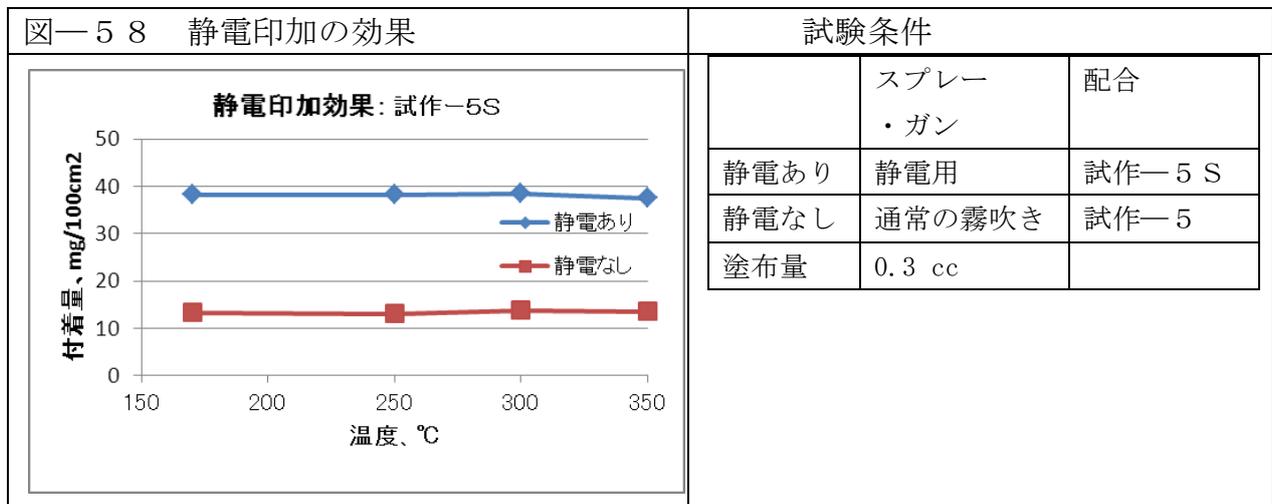
潤滑油タイプ	水溶性潤滑剤	油性潤滑剤
潤滑剤	水ガラス	試作－５ S
溶媒	水	溶剤－１
気化熱	539 cal/g	90 cal/g

b) 項の少量塗布と c) 項の気化熱を組み合わせると、水溶性潤滑剤に比べ油性潤滑剤がアルミ素材から奪う熱は「1/726」と殆ど無視できる程に少ない。

d) 静電塗布

油性潤滑剤の電気伝導度を高めるよう配合を工夫した。その結果、静電塗布が可能となり図－５８に示す様に高い付着量を示し、具体的目標の「静電塗布」を達成した。なお、水溶性潤滑剤は電気伝導性が過剰に良すぎ、静電塗布はできない。この点でも、油性の試作－５ Sは優れている。

なお、「静電塗布の効果」を更に検討した。図－５８に示すように、通常のスプレーで試作－５を塗布する場合と比べ、静電スプレー・試作－５ Sの「静電あり」の付着は 3 倍近く多い。膜厚が厚くできるので、その分、少量塗布へ活用できる。



(5) 検証－2

表－3中の生産工程上の目標を100%以上達成した。

表－4 2 装置側の目標達成度

細目	従来	目標	達成度合い
金型初期設定温度	170℃	300℃	300℃に高められる。潤滑膜は形成する。
一段目圧縮後の素材温度	300℃	330℃	360℃であり、目標を達成した。
再加熱後の素材温度	350℃	なし	素材が高温で有り、再加熱が不要。
二段目圧縮後の素材温度	300℃	300℃	313℃であり、目標を越えた。 (水溶性潤滑剤では200℃)

表－4 3 本委託事業の最終目標

項目	最終目標	達成度
生産工程のハイサイクル化	20%短縮	21%短縮でき、目標達成
生産工程のダウンサイジング化	30%低減	39%低減でき、目標達成

A) 根拠－1 ハイサイクル化

表－4 4 ハイサイクル化の内訳

	現行 秒数	油性潤滑剤 秒数	短縮効果	説明
全体	240	189	21%	①
再加熱工程	40	0		②
スプレー	7	3		③
エアブロー	5	0		④
素材移動	3	0		⑤
他工程	183	183		

説明

- ① A社（大型鍛造部品生産）の場合で、アルミ素材を投入してから製品として出てくるまでの秒数。但し、並列作業を考慮しないケースとした。
- ② 油性潤滑剤を使うと、再加熱工程は不要である。
- ③ 油性潤滑剤の塗布量は1/33程の少量であり、塗布時間を半減可能。
- ④ 油性潤滑剤は殆ど水を含んでいないので、金型へスプレー後でも水が残らない。その為、エアブローによる乾燥工程が不要である。
- ⑤ 再加熱工程へのアルミ素材の移動時間が不要となる。

B) 根拠－2 ダウンサイジング化

2－3－4項に説明するように、実機をシミュレートしたプレス機で、ダウンサイジングに係る次のデータを得た。

表－４５ 二段圧縮試験(荒地成形・本成型)での温度と圧縮荷重

	初期			一段目圧縮			二段目圧縮		
潤滑剤	金型	塗布量	素材	素材	圧縮	荷重	素材	圧縮	荷重
単位	℃	CC	℃	℃	%	kN	℃	%	kN
水溶性	170	20	450	270	68.7	418	200	79.1	1000
油性①	300	2	450	360	70.0	371	313	79.5	612
油性②	300	2	450	360	70.0	371	313	83.7	1000

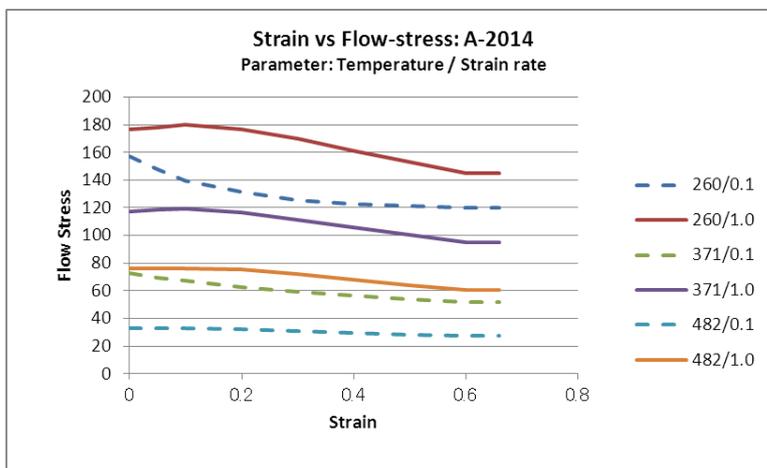
a) 試験条件

- ・潤滑剤の塗布は、初期と、二段目圧縮前に実施した。
- ・二回目塗布前に、アルミ素材の温度を一段目圧縮後の温度へ加温した。即ち、水溶性の場合、二段目圧縮は素材が 270℃から開始した。一方、油性の場合、360℃から開始した。

b) 評価結果

- ・再加熱の無い「水溶性潤滑剤」の場合、79%圧縮するには 1000kN の荷重が必要であった。一方、油性潤滑剤の場合、612kN の荷重で 79% 圧縮できた。油性の場合、アルミ素材温度が高く柔らかいので、61.2%の力で圧縮できた。
- ・加えて、試作—5 S の摩擦係数が低いこともダウンサイジングに寄与している。水溶性潤滑剤は 170℃で $m=0.4$ と低いが、300℃では潤滑膜が形成できないので摩擦係数は測定できていない。一方、試作—5 S は 300℃の高温で $m=0.4$ を保っており、この低摩擦もダウンサイジングに寄与した結果として、612 kN の圧縮圧力となったと考える。これは、文献のアルミ変形抵抗と良く一致していた(図－59)。即ち、39%も小さな力で圧縮が可能であり、その分、圧縮装置のダウンサイジング化は可能と言える。
- ・水溶性で圧縮した際の 1000kN で、油性②は「どこまで圧縮できるか」を検討した結果、83.7%まで圧縮でき、4.2%も圧縮の余力があった。

図－５９ アルミ材の変形抵抗



第3章 全体総括

3-1 研究開発成果

本委託事業の目的である「鍛造生産工程で20%のハイサイクル化及び装置の30%ダウンサイジング化」を達成できる鍛造用潤滑剤を開発した。

その技術的手法の骨子は、従来の水溶性潤滑剤に代えて、**油性潤滑剤**とすることであり、アルミ素材の温度低下を抑え高温で圧縮することである。その結果、次の効果が表れる。

- (1) 一段目圧縮工程で金型温度を170℃から300℃へ高めても潤滑膜を形成できるため、金型によるアルミ素材の温度低下を抑えることができる。その結果、二段目圧縮前のアルミの再加熱工程が不要となるので、21%のハイサイクル化が可能となる。
- (2) 二段目圧縮時でも金型温度が高いため、アルミ素材の冷却が少なく、二段目圧縮終了後もアルミ素材が313℃と高温のため柔らかく、必要な圧縮圧力も低い。その結果、装置の39%ダウンサイジング化が可能となる。

この潤滑剤の開発は、主に次の4種類の技術で達成できた。

- ①油性化することで、高温の金型上でのLF現象(突沸)を抑え、金型温度を170℃から300℃へ高温化できた。その結果、アルミ素材の温度低下を抑えられた。
- ②静電塗布を可能とする潤滑剤配合とし、付着効率を高め、その分少量塗布とした。
- ③油性化による気化潜熱の低減と少量塗布による冷却性の低減により、金型及びアルミ素材の温度低下を抑えた。
- ④油性化により潤滑添加剤の選択肢が増え、優れた潤滑性の添加剤が選択でき、1/10の少量塗布でも潤滑が可能となった。

これらの技術は一社でできるものではなく、青木科学研究所、小山高専、埼玉県産業技術総合センター、静岡大学、鍛造メーカーA社及びS社の貢献による賜物であった。

3-2 研究開発後の課題

本委託事業を通し、鍛造用油性潤滑剤の性能面から骨格となる配合を開発した。しかし、製品化し販売するためには、次の点を確認する必要がある。

1	数社での実機性能
2	製品の長期保存安定性(常温分離、低温貯蔵性等)
3	添加剤の金型・アルミ素材への副作用(堆積物の生成、腐食等)
4	使用者の労働安全性に係る調査:MSDの作成

3-3 事業化計画（青木科学研究所）

（1）スケジュール

内容	時期
課題の検討	23年10月～24年3月
製品配合の確定	24年3月末
販売プログラム策定（優先順位、価格設定、生産準備）	23年10月～24年3月
販促ツールの作成（パンフレット、実機使用状況の映像）	23年10月～24年3月
既知の初期顧客へ製品供給	24年4月
販売の拡大—1：国内	24年中
販売の拡大—2：海外	25年

（2）製造

少量塗布のため顧客の消費量が少なく、生産量も多くはならない。従って、既存の設備で十分生産可能である。

（3）製品の特徴・謳い文句（従来の「黒鉛系」、「粉体系」、「水溶性系」と比較）

- 工程のサイクルタイムの短縮、装置のダウンサイジングに貢献
- 少量塗布（1/10以下）
- 作業現場を汚す黒鉛・粉体を含まない潤滑剤
- 排水処理の不要な潤滑剤
- 引火性の極めて低い潤滑剤

（4）販売網

既存10代理店を通して販売を予定している。全て、鑄造関連の代理店ではあるが半数以上は鍛造関連でもある。初期導入時、顧客への技術的説明は青木科学研究所が担当する。販売の価格については、販売開始までに検討する。

参照文献

- 1 日本機械学会論文集、2004-12, 小山高専、高島等
- 2 ダイカスト新聞社、ダイカストを考える、10-3 項、ダイカスト協会の西氏
- 3 2004 日本ダイカスト会議論文集、JD-04-05, 図 15、リョービ、井澤等
- 4 ダイカスト新聞社、ダイカストを考える、10-2 項、ダイカスト協会の西氏
- 5 コロナ社 日本塑性加工学会編 プロセストライボロジー P-191
- 6 気化熱、ヘキサン <http://comtecquest.com/Practice/practice.html>
- 7 コロナ社 日本塑性加工学会編 プロセストライボロジー P-71
- 8 塑性加工におけるトライボロジー研究の役割、日本機械学会論文集、7 1 巻
7 0 4 号、中村