

平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「鍛造金型寿命の向上のための支援システムの開発」

成果報告書

平成21年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 社団法人日本鍛造協会

目 次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	2
1-3 成果概要	3
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	4
第2章 本論	5
II. 金型破損要因の定量化と寄与率の把握及び体系化の研究	5
II-1. 鍛造条件の計測装置の開発	5
II-1-1. インライン計測装置の開発目的	5
II-1-2. インライン計測装置の開発内容	5
II-1-2-1. インライン計測装置開発時の計測対象金型	5
II-1-2-2. インライン計測装置の仕様と製作注意点	6
II-1-2-3. インライン計測装置による採取データ	8
II-1-2-3-1. サーモビューアによる金型表面温度データ	8
II-1-2-3-2. 熱電対による金型温度計測データ	9
II-1-2-3-3. ロードセルによる金型面圧と成形荷重データ	9
II-1-2-3-4. レーザースキャンによる形状測定	9
II-1-3. 計測データ検証	10
II-1-3-1. サーモビューアによる金型表面温度の計測データ検証	10
II-1-3-2. 熱電対による金型内部温度の計測データ検証	12
II-1-3-3. ロードセルによる金型面圧データと成形荷重データ検証	14
II-1-3-4. レーザースキャンによる形状測定データ検証	17
II-1-4. 計測技術の構築まとめ	18
II-2. CAE解析による鍛造金型寿命予測と対策方法の妥当性研究	19
II-2-1. 研究開発の概要	19
II-2-1-1. 研究開発の背景	19
II-2-1-2. 研究開発の目的及び目標	19
II-2-2. 金型の摩耗寿命に対する判断基準作成	21
II-2-2-1. 金型材料の硬さの温度、面圧依存性調査	21
II-2-2-2. 金型材料の硬さ特性とCAE解析との照らし合わせ	24
II-2-3. 金型の割れ寿命に対する判断基準作成	25
II-2-3-1. 金型材料の温間低サイクル疲労特性調査	26
II-2-4. 研究成果まとめ	28

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(研究背景)

生産業界のグローバル化が進む中で、鍛造業界においては、川下産業から 海外展開の要望とともに、国際競争力強化のため 製品の品質向上及びコスト低減が求められている。製品の品質向上は、安定生産の上にもたらされるものであり、鍛造金型寿命向上は、その為のもっとも有効な手段となりうるとともにコスト低減にもつながるものである。特に、熱間鍛造における金型寿命は短く、高温での作業となる為、研究が進んでいないという事実がある。

(研究目的及び目標)

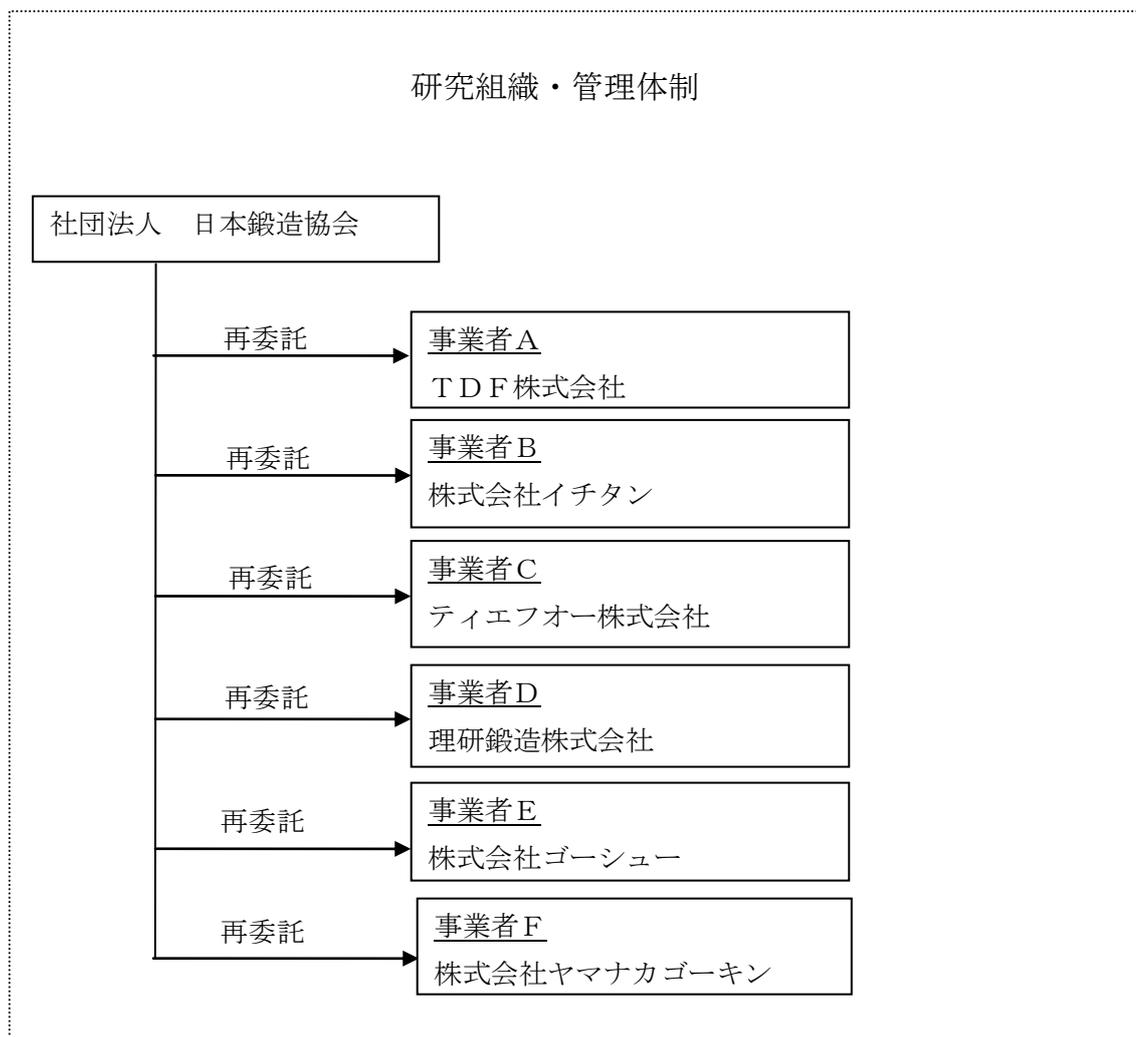
現行量産の鍛造条件を定量的に把握し、鍛造シミュレーションでそれらを再現さらに、要素技術の調査研究により、対策の方向性を見極める。その結果、鍛造金型寿命向上研究の為の支援システムを構築。研究目標は下記のように設定。

1. 現行量産の鍛造条件を定量的に把握する為、インライン計測装置の開発と計測技術の確立（平成18年度、19年度）。また、インライン計測装置の進化改良（事業化を視野にした対応）。
2. 鍛造シミュレーションで鍛造現場での現象を再現のため、鍛造シミュレーションの精度向上。鍛造シミュレーションに使用する係数精度向上、解析条件の改良等。
3. 金型材料、表面改質、潤滑の鍛造金型の寿命に関連する要素技術を調査研究することにより、鍛造金型寿命向上手法の方向性見極め。
4. 鍛造金型寿命の予測判断資料作成。

特に、平成20年度としては、平成18年度より進めてきた鍛造金型寿命向上に関する個別研究の体系化と鍛造金型寿命予測が可能となる技術データ作成を目標として実施。さらに、事業化を視野に入れたインライン計測装置の取り扱い性向上を実施。

1 - 2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)



総括研究代表者 (PL) 株式会社ゴーシュー 代表取締役社長 後藤充啓	副総括研究代表者 (SL) ティエフオー株式会社 代表取締役社長 戸谷克昌	副総括研究代表者 (SL) 社団法人日本鍛造協会 研究員 榎野博喜
---	---	---

研究者氏名

TDF株式会社	工藤 順一	プロジェクト推進室 室長
	瀬川 勝敬	製造部 製造課 課長
	蓑輪 泉	加工部 加工課
株式会社イチタン	永岡 宣人	技術部 担当部長
	吉田 岳史	技術部 生産技術1課
ティエフオー株式会社	武藤 晃司	技術課 ブロックリーダー
	齋藤 暁	技術開発課
	金澤 英之	技術課
理研鍛造株式会社	元廣 嘉光	常務取締役

	大河原 浩明	生産技術部 生技計画グループグループリーダー
株式会社ゴーシュー	田崎 賢児	成形技術部 成形技術グループ スタッフリーダー
	田中 亮	成形技術部 成形技術グループ
	豊田 直臣	生産本部 生産技術グループ
株式会社ヤマナカゴーキン	有馬 達男	営業部 技術サービスグループグループリーダー
	牟禮 昌哉	技術部 ソリューションエンジニアリンググループ 販売・サポートチーム
	金 秀英	技術部 ソリューションエンジニアリンググループ グループリーダー
	久保田 智	技術部 ソリューションエンジニアリンググループ 解析チームチームリーダー
	江藤 洋介	技術部 ソリューションエンジニアリンググループ 解析チーム
	八木 哲司	技術部プロセスエンジニアリンググループ グループリーダー

協力者

名古屋大学大学院	石川孝司	工学研究科 マテリアル理工学専攻 教授
トヨタ自動車株式会社	太田昌貴	第1要素生技部 鍛造・プレス室 主査
日立金属株式会社	浜小路正博	特殊鋼カンパニー 技術部 主管技師
住友重機械テクノフォート株式会社	尾崎 豊	設計部 プレスエンジニアリンググループ 統括技師
大同特殊鋼株式会社	五十川幸宏	技術開発研究所 プロセス研究部 上席研究員
新日本製鐵株式会社	戸田正弘	技術開発本部鉄鋼研究所 鋼材第二研究部 主幹研究員
ホンダエンジニアリング株式会社	北條信明	パートレイン研究開発部 2Kブロック
ヘンケルテクノロジーズジャパン株式会社	大西 豊	製品開発部 課長
理研鍛造株式会社	大高 秀樹	代表取締役社長

オブザーバー

MHI ソリューションテクノロジーズ株式会社	田浦 良治	機械・プラント技術部 主管
------------------------	-------	---------------

管理

社団法人 日本鍛造協会	高橋博之	研究員
	田中良成	事務員

1-3 成果概要

本研究開発により、次のような成果を得ることができた。

1. インライン計測装置の作成と計測技術の構築さらに事業化に向けた取り扱い性向上とコンパクト化への改良
 - ① 温度計測用サーモビューアと、形状測定用レーザスキャナーの単独使用を可能とした。
(コントロールBOXを制御盤より取り出し可能とし、単独での持ち運びが可能となった。)
 - ② データ処理用デスクトップパソコンのノートパソコン化で搬送性向上
 - ③ サーモビューアの保護カバーの小型化と軽量化

2. 鍛造シミュレーションによる現行鍛造状態との相関把握

コンロッド、スリーブ金型の、現行量産鍛造実績の再現と、金型寿命向上

- ① 対策の寿命予測を可能とした。
 - ② 鍛造シミュレーション結果から、鍛造金型寿命予測判断資料作成。
- (a) 疲労破壊による鍛造金型寿命の判断資料作成 :

鍛造金型材料SKD61の高温における引っ張り繰り返しによる疲労破壊線図(SN線図)作成。これにより、発生温度と発生主応力算出により金型寿命ショット数が予測可能となった。

- (b) 金型摩耗による鍛造金型寿命に対する判断基準作成 :

- ・金型摩耗量判断式Archardモデル式の提案とその係数の算出

$$W = \int K \frac{P^a V^b}{H^c} dt$$

w = 摩耗深さ、p = 面圧、v = 相対すべり速度
H = 金型材料の硬さ[HRC]

$$a=1, b=1, c=2, \text{ 係数 } K=2.57 \sim 5.96 \times 10^{-6}$$

- ・また、鍛造金型材料の軟化特性データの取得
金型材料SKD61の初期硬度に対し、温度と圧力の影響により軟化傾向のテスト実施データ取得。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

社団法人日本鍛造協会 (担当; 田中)

連絡先 tel 03-5643-5321

fax 03-3664-6470

第2章 本論

II. 金型破損要因の定量化と寄与率の把握及び体系化の研究

II-1. 鍛造条件のインライン計測装置の開発

II-1-1. インライン計測装置の開発目的

生産現場における熱間鍛造用金型（以下、金型と称する）の寿命改善を支援するためにインライン計測装置の開発を行った。

金型寿命改善は、熱間鍛造品のメインユーザーである自動車産業の開発リードタイム短縮、コスト低減要請に応えるためには避けることができず、鍛造業界の将来を左右する非常に重要な技術的課題である。

金型寿命とは、金型を使用して製品を製造した際に、金型が損傷し、使用できなくなることをいうが、熱間鍛造におけるその損傷の主な形態を以下に示す。

- ①割れ
- ②摩耗
- ③ヒートチェック
- ④ヒートクラック

実験室レベルの調査において、上述の①～④の原因は力（面圧、応力）、熱（温度上昇、熱振幅）などの物理量であると同定され、定量されている場合もある。

しかし、実際の生産現場レベルでは、鍛造形状の成立優先、製品納期優先、熟練者のカン、コツ優先という事情があいまって、一部の先進的な取り組みを除いては、損傷原因の計測による同定および定量は後回しにされてきたのが実状である。

よって、金型寿命の改善は、生産現場にて取り組む課題であるものの、実態の把握、つまり、金型損傷の原因である生産中の金型に作用する物理量の把握がなされないままに行われることが通例であり、型材、表面処理、潤滑剤、形状などの金型を構成する要素を替えて試行する方法が主流である。この方法の欠点は、実態の把握がなされていないため対策すべきターゲットが明確となっておらず、試行回数が多く、しかも成果が出ない場合も多々あるということである。言い換えれば、生産現場にて損傷原因である物理量の把握ができれば、金型寿命改善が飛躍的に進歩する可能性があるということである。

そこで、生産現場において金型に作用する物理量の把握ができる計測装置の開発を行った。この計測装置にて採取したデータは、金型寿命改善の対策検討に直接使用するのみにとどまらず、現段階では鍛造形状の成立性の検討におもに使用されている鍛造シミュレーション（以下、CAEと称する）での金型寿命の予測を実現するために必要不可欠であり、また、型材、表面処理、潤滑剤などの金型要素技術の開発にも寄与するため、総合的に金型寿命改善に貢献するものである。

II-1-2. インライン計測装置の開発内容

II-1-2-1. インライン計測装置開発時の計測対象金型

計測対象としたクランクシャフト用金型の使用前後の様子を写真1に示す。本研究では、鍛造時の成形量が多くかつ材料流動が複雑で、激しい摩耗や、場合によっては大割れが発生する自動車用クランクシャフト熱間鍛造の荒成形の下型を対象とした。



写真1 計測対象とした金型（左：新品、中：摩耗したものの、右：割れたもの）

II-1-2-2. インライン計測装置の仕様と製作注意点

計測項目は、金型損傷の原因である物理量、1)金型温度 2)金型面圧 3)成形荷重 4)金型形状であり、時系列的なサンプリングを集約して行えるような装置を構想し作製した。

鍛造協会での計測装置貸し出し等の事業化も考慮し、持ち運びができ、あらゆる生産現場で使用が可能となるように汎用性も重視した。概略図を図1に示す。

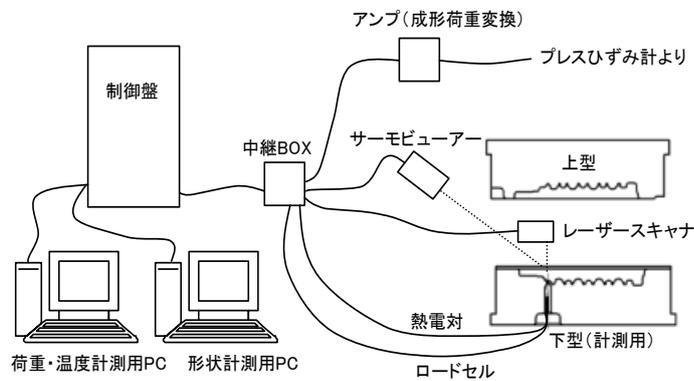


図1 計測装置概略

1)の金型温度は、型材の機械的性質を支配する。また、材料の変形抵抗に関するワーク温度や、摩擦係数を支配する潤滑剤の性能にも関係するため、影響を及ぼす範囲が広く、とくに注目している因子である。この金型温度は、表面温度をサーモビューアー（写真2参照）、内部温度を熱電対にて計測する仕様とした。



写真2 サーモビューアー計測風景

2)の金型面圧は、金型の摩耗や割れなどの破壊に直接関係する因子である。この金型面圧は、材料の圧力を伝達するピンを用いて、ロードセルにて計測する仕様とした。参考として、熱電対とロードセルおよび圧力伝達するピンの配置を図 2、完成した計測用金型の外観と鍛造プレスにセットした状態を写真 3 に示す。

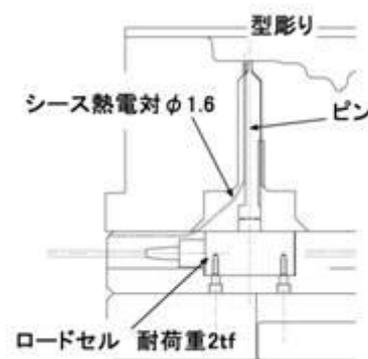


図 2 熱電対およびロードセル、ピンの配置



写真 3 完成した計測用金型 (右：プレスにセットした状態)

3)の成形荷重は金型へかかる力学的負荷を総合的に判断するための数値と考えている。成形荷重は、鍛造プレスのフレームに既に装備されているひずみ計からの出力を荷重換算した。

4)の金型形状は、新型の状態から使用中に摩耗などにより形状変化していく。すなわち、その形状変化は各因子によって導き出された結果である。各因子と結果の相関を定量的に把握するため、この金型形状も定量化する必要がある、レーザースキャナ (写真 4 参照) にて計測を行う仕様とした。計測を実施した際の風景を写真 5 に示す。



写真 4 レーザースキャナによる計測



写真 5 計測実施時の風景

以下に、計測装置を作製するにあたり注意した内容を示す。

1)計測用金型は、ロードセルや熱電対を内蔵するための加工を行った。このため、計測用金型は通常金型と比較して、剛性と熱容量が変化するため、計測中の金型の破壊 (大割れ) や応力分布や温度分布

が大きく変化することが想定された。よって、計測用金型による計測の成立性を事前にシミュレーションを行って確認した。(図3参照)

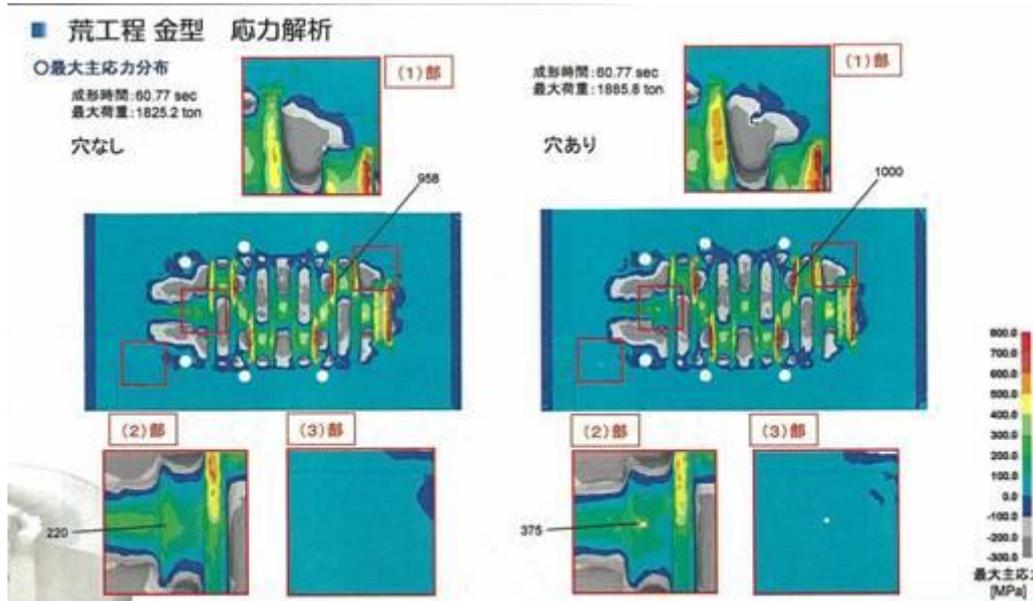


図3 妥当性確認のためのシミュレーション概要

2)熱電対は細径ほど応答性に優れ、計測精度が高くなるが、今回は生産現場での計測で、段取り時の断線などが懸念されたので強度を重視し、 $\phi 1.6$ を選定した。3)ロードセルは、とくに応答性を重視した。今回の計測は0.2秒ほどの現象が対象である。すなわち5Hzの応答性が最低条件であるが、十分余裕をみて2000Hz(0.0005秒)のロードセルを選定した。4)圧力を伝達するピンは、座屈しにくい形状を選定した。ピンと金型のクリアランスなどは最適値がいまのところ解からなかったため、事前にアルミ材を据え込む簡易試験で出力の確認を行った。簡易試験の様子を写真6に示す。5)計測データを確実にサンプリングできるように、サンプリング周期はロードセル出力を5ms、熱電対出力を5と50ms、サーモビューア出力を500msと設定した。



写真6 アルミ材据え込みによる事前確認試験

II-1-2-3. インライン計測装置による採取データ

II-1-2-3-1. サーモビューアによる金型表面温度データ

飽和状態(安定領域)での金型表面温度計測結果を図4に示す。サーモビューアによる計測は放射率の設定により結果が異なってくるが、今回はメーカー推奨値の1.0に設定して計測を行った。ワークが除去された成形直後の金型の最高温度は約450°C、最低温度は約150°Cで、約300°Cの温度差が存在した。

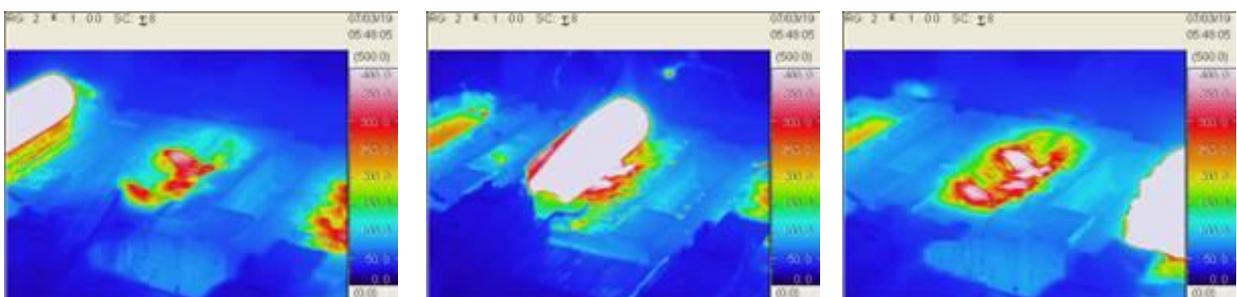
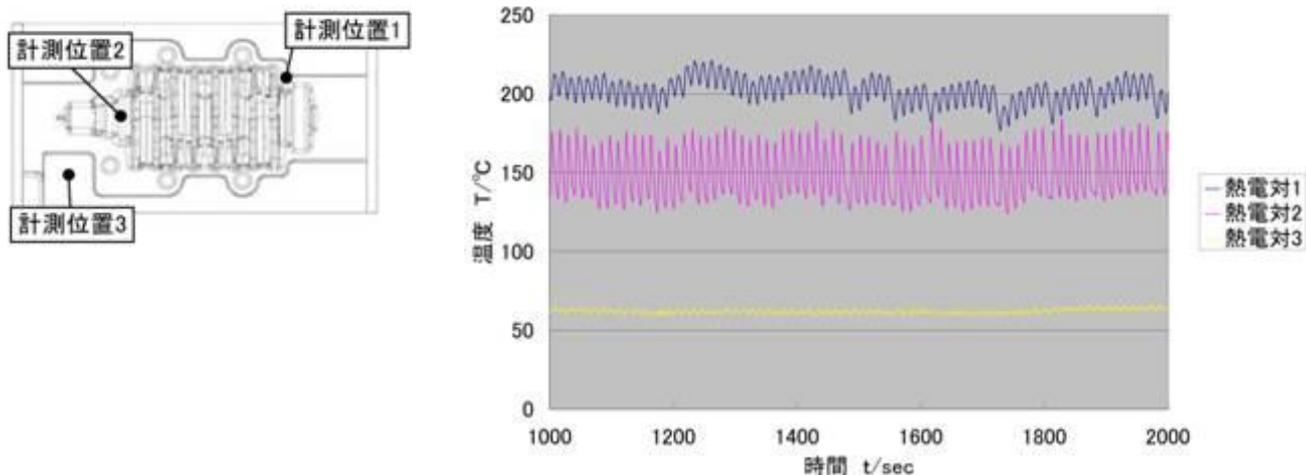


図4 金型表面温度計測結果

II-1-2-3-2. 熱電対による金型温度計測データ

飽和状態(安定領域)での計測結果をグラフ1に示す。型彫り内に内蔵した熱電対1および2からは、ノコ波状の波形で振幅を繰り返す結果を得た。型彫りとは関係のない場所に内蔵した熱電対3からは、振幅のない一定の結果を得た。熱電対は彫り込み面から2mmの場所に先端がくるように狙って配置した。

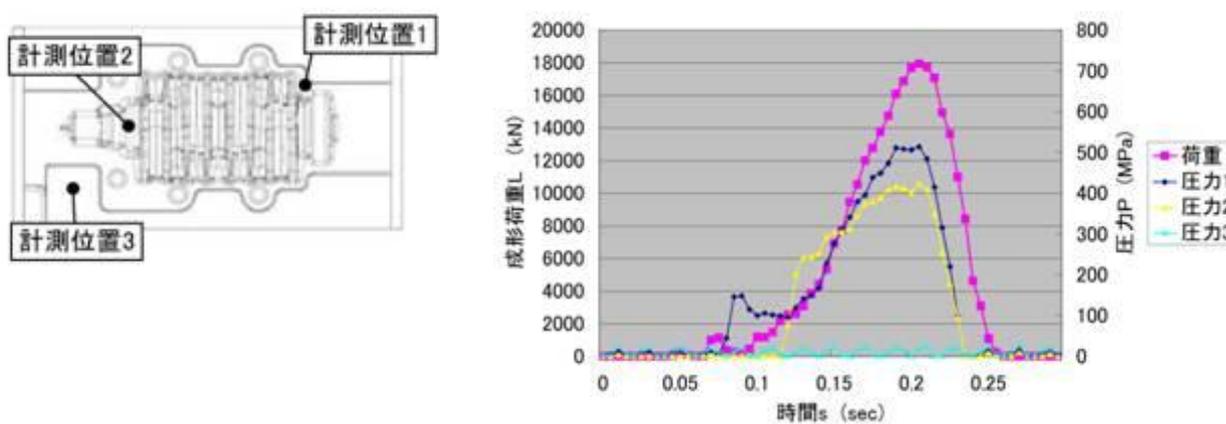


グラフ1 熱電対による温度計測結果

II-1-2-3-3. ロードセルによる金型面圧と成形荷重データ

任意のショット数における計測結果をグラフ2に示す。最大面圧は計測位置1にて約510MPa、計測位置2にて約420MPaであった。

計測位置3はノイズ計測用として内蔵したものであるが、計測前後で安定していた。すなわち、ノイズの影響はないことが確認できた。成形荷重の最大値は約18000kNであった。面圧のピークと成形荷重のピーク発生時刻は、ほぼ一致した。



グラフ2 ロードセルによる成形荷重と金型面圧計測データ

II-1-2-3-4. レーザースキャンによる形状測定

スキャンを行った部位を写真7に示す。初期状態と200ショット後を処理ソフトにて照合した結果を図5に示す。200ショット後の金型は凹む方向に形状が変化していることが確認できた。

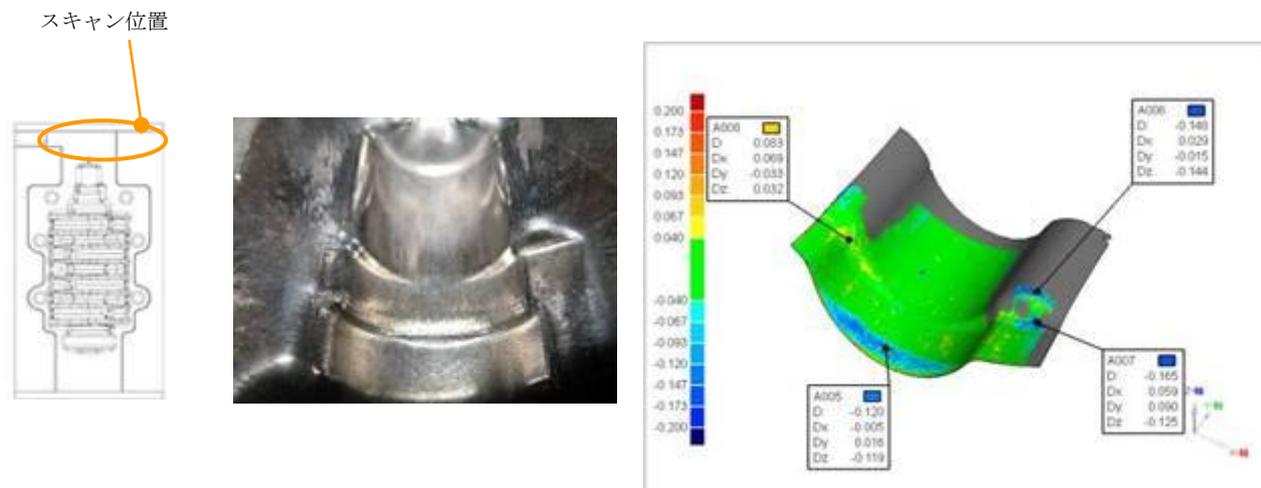


図5 レーザースキャン結果
(処理ソフトで初期状態と照合)

II-1-3. 計測データ検証

II-1-3-1. サーモビューアによる金型表面温度の計測データ検証

サーモビューアは放射温度計の一種であり、計測の際には放射率 ϵ の設定が必要となる。この放射率 ϵ は物質の表面性状により異なり、金属の光沢面は低く酸化面は高い値をとる。放射率が高い物質ほど周囲からの反射の影響が少ない。計測する物体に、黒色ペンキ ($\epsilon = 0.98$) 等を塗布すれば、反射の影響が少ない状態で計測が可能となる。このように、被測物の温度を計測する為には、あらかじめその物体表面の放射率を正確に特定しておく必要がある。

写真8は使用後の計測用金型彫り込み部の写真である。使用後の金型は、変色し光沢が消失して黒色になっている部分と、使用前金型のように光沢ある部分とが混在することがわかる。すなわち、同一金型内でありながら放射率が一定ではなく、一定の放射率しか設定できないサーモビューアでは、高精度な計測を求めることが困難であると考えられる。

参考として、簡易的に表面性状の違いがサーモビューア計測に与える影響を調査した。調査方法を図6に、調査用の試料を写真9に示す。試料Aは金属光沢面、試料Bは二硫化モリブデンを塗布し金属光沢面を被覆したサンプルである。



写真8 使用後の計測用金型

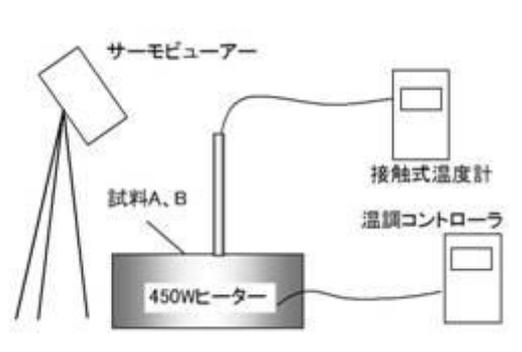


図6 表面性状の影響調査方法

調査結果を図7に示す。ともに、350℃に均熱しているが、同一放射率にてサーモビューアで計測すると結果が一致しない。つまり、生産中の鍛造用金型の温度計測をサーモビューアにて、高精度に行うた

めには、金型表面の放射率を知り、かつ放射率を一定に保つような工夫が必要である。

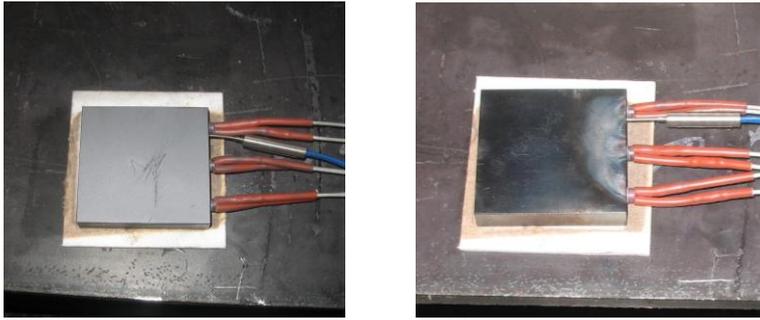


写真9 表面性状の影響調査用試料（左：試料A、右：試料B）

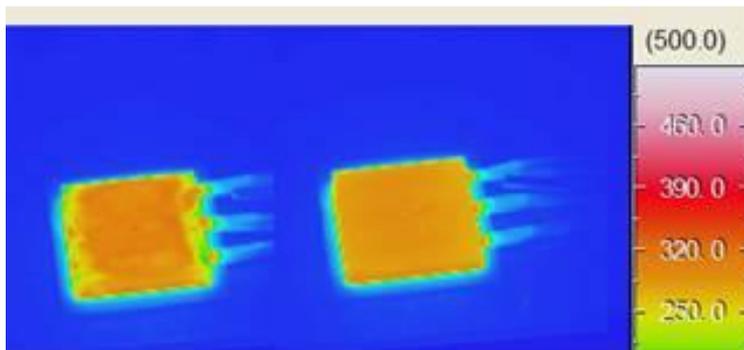
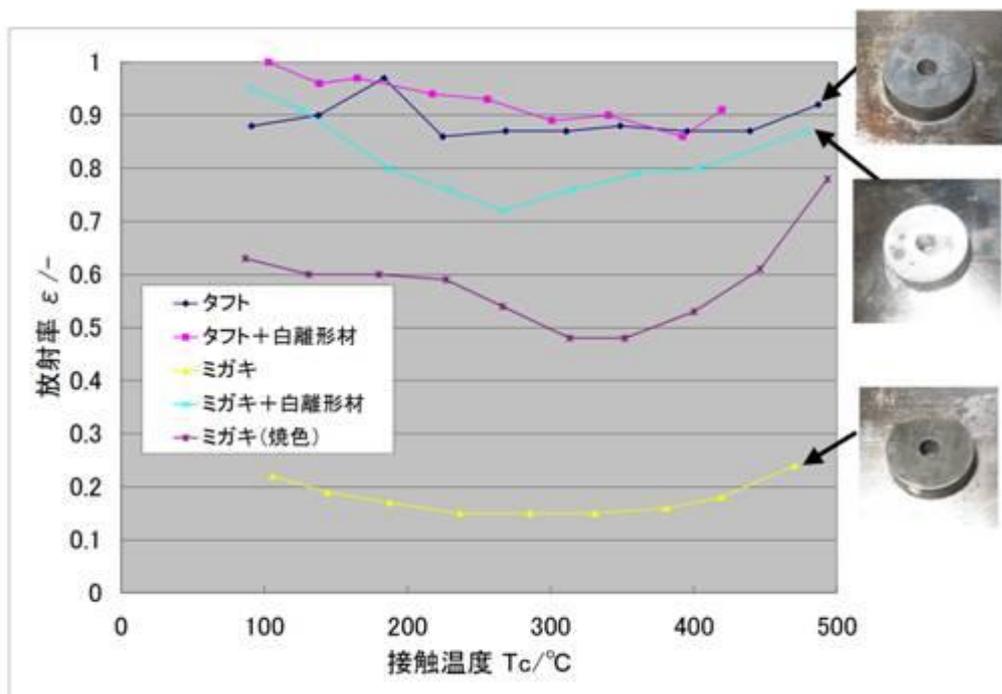


図7 表面性状の影響調査結果（左：試料A、右：試料B）

そこで、生産中の金型表面状態を場合分けし、放射率の調査を行った。調査結果をグラフ3に示す。



グラフ3 放射率の調査

計測した金型はミガキを施しており、計測中はグラフ3におけるミガキの3条件に相当する放射率が混

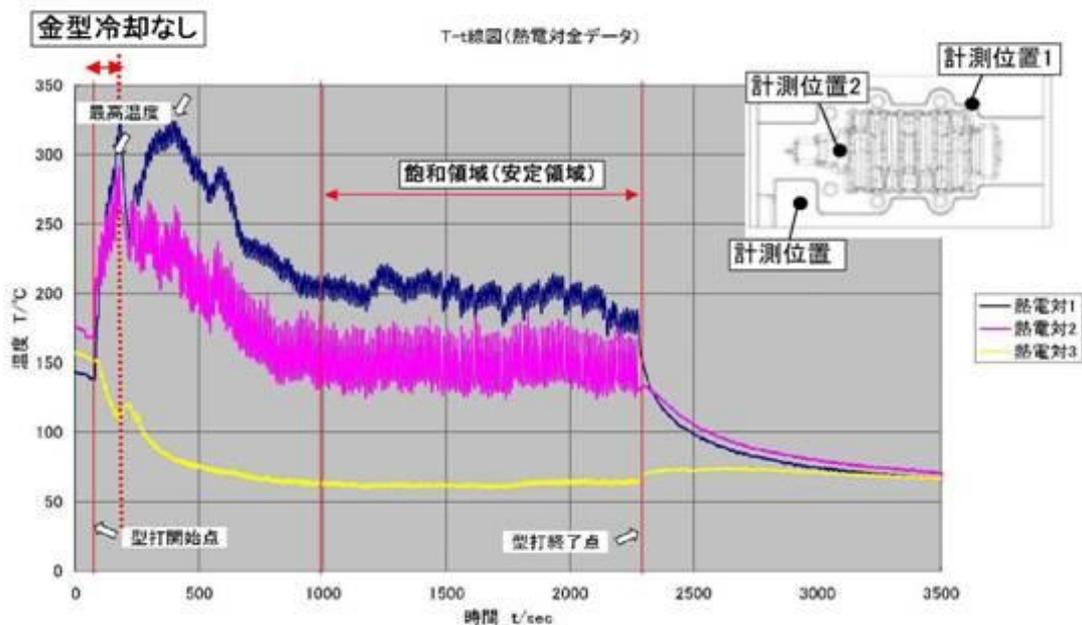
在しており、放射率は 0.15～0.95 の間で部位ごとに大きなバラつきが発生していたと推定される。ミガキを施した銀色の金属光沢面は温度が上昇すると酸化により変色し、放射率が安定しない。しかし、表面が黒色となるタフトライドを施したサンプルの放射率は 0.85～0.96 の間で安定しており、またタフトライドに白色潤滑剤を塗布した条件も 0.87～1.0 付近で安定している。つまり、計測対象の金型には、表面の色が黒色となるような表面処理を施せば、放射率のバラつきを極小化できるため、計測精度が大幅に向上すると考えられる。

II-1-3-2. 熱電対による金型内部温度の計測データ検証

熱電対で計測したデータの妥当性は下記の項目を検証することで評価できると考えた。

- ① 鍛造時の金型冷却条件に対する応答
- ② 計測時のノイズの有無
- ③ 熱電対の線径（シース径）が計測結果に与える影響

①および②は鍛造時の金型冷却の有無で 2 種類の条件を設定しデータを採取し評価を行った。採取したデータをグラフ 4 に示す。



グラフ 4 鍛造時の熱的條件調査および計測ノイズ調査

金型冷却を行わずに連続的に成形を行うと金型温度が上昇を続けて最高温度を迎え、金型冷却を開始すると金型温度は低下し、熱の収支が均衡したところで飽和領域（安定領域）に入った。今回の計測では、鍛造時の金型冷却の有無で応答を確認したが、想定どおりの結果を得たといえる。よって、この結果により定性的には正しい応答が得られていることを確認した。熱電対 3 は計測時のノイズの有無を確認するために、鍛造時に入熱しない箇所に意図的に装入したものである。鍛造プレスおよびインダクションヒーターなどの周辺機器、他の熱電対 1 および 2 の信号をノイズとして拾っている様子は見られず、想定どおりの計測結果となった。

次に③の項目を調査するために簡易試験を行った。（㈱ヤマナカゴーキンが実施）その概略図を図 8 に示す。この試験は、200℃に均熱した擬似金型の中にφ0.5 と φ1.6 の熱電対を装入し、1200℃に加熱

した熱源を擬似金型に載せて、その際の温度変化を装入した熱電対で計測する試験である。これにより、熱電対の線径が応答速度に及ぼす影響が調査できると考えた。伝熱ゾーンの厚みの実測値は、 $\phi 0.5$ 熱電対用で 1.79mm と 2.99mm、 $\phi 1.6$ 熱電対用で 2.59mm であった。CAE での予測をグラフ 5、試験結果をグラフ 6、簡易試験の様子を写真 10 に示す。

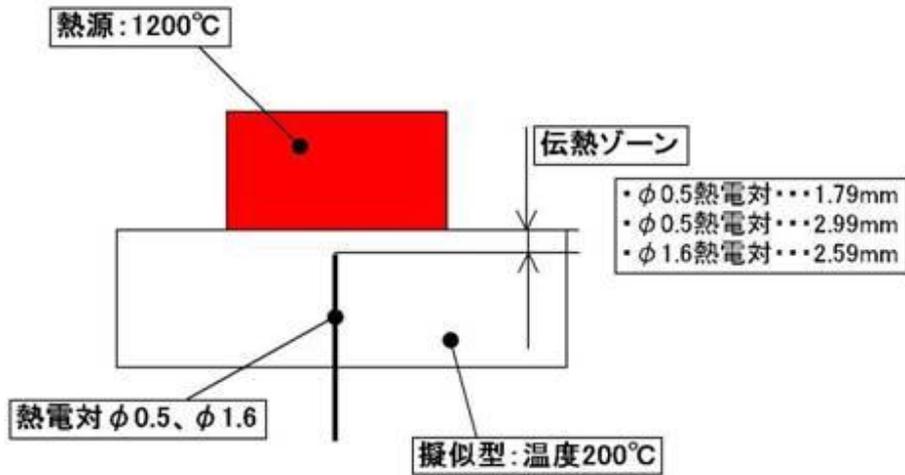
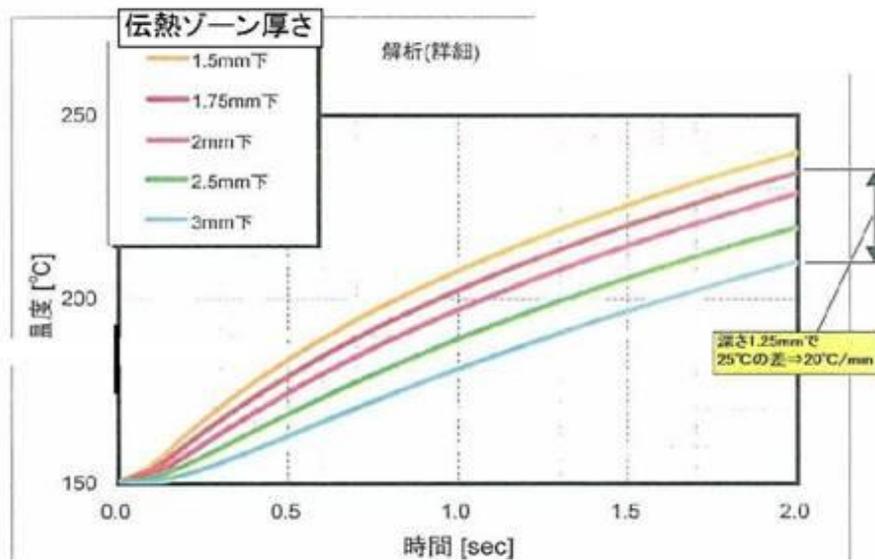
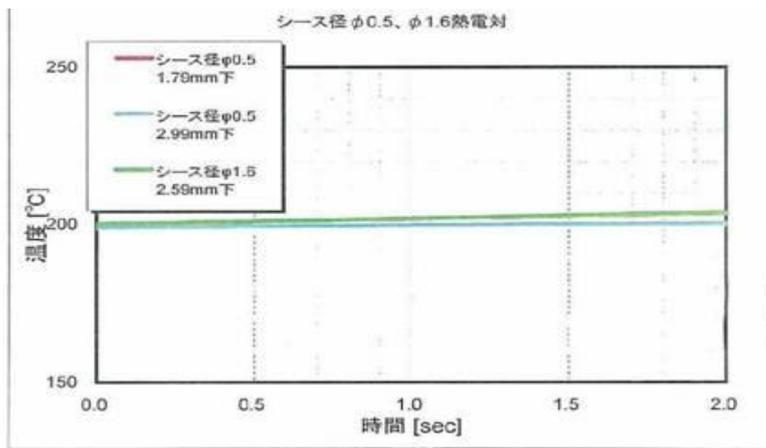


図 8 簡易試験概略図



グラフ 5 CAE による試験結果の予測



グラフ 6 試験結果



写真 10 簡易試験の様子

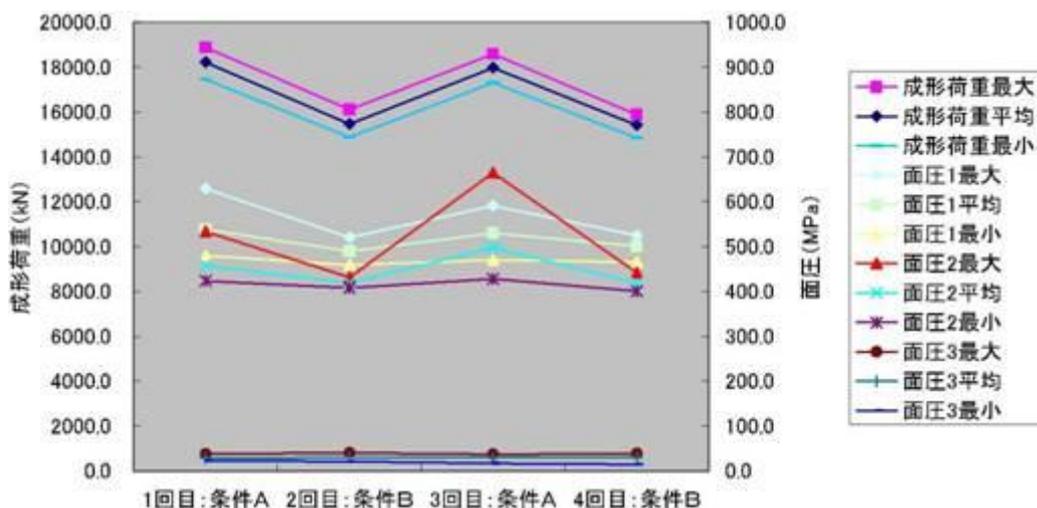
事前の予測では、2秒間の接触により 50~80°C程度の温度上昇が見込まれた。しかし、簡易試験においては2秒間の接触においてもほとんど温度上昇が発生しなかった。したがって、応答速度の差は確認できなかった。予測と試験結果の乖離が生じた原因の一つとして、熱源表面に発生した酸化スケールが擬似金型と熱源の接触を妨げたことが挙げられる。

酸化スケールの影響を受けずに試験を行うためには、熱源と擬似金型に圧力を与えて、密着させた状態で試験を行う必要があり、このほうが実際の鍛造現場での計測に近い条件での検証となるはずである。

II-1-3-3. ロードセルによる金型面圧データと成形荷重データ検証

ロードセルによる金型面圧データと成形荷重データの妥当性は、下記の項目を検証することで評価できると考えた。

- ① 鍛造時の加圧条件に対する応答
 - ② 計測時のノイズの有無
 - ③ 面圧計測用のピンの突き出し量と金型とのクリアランスが計測結果に与える影響
- ①及び②は鍛造時の加圧条件をAとBの2種類を設定し、AとB条件を交互に繰り返した際のデータを採取して評価を行った。AはBより成形荷重が高くなる条件である。また、試験パターンはA、B、A、Bとし、AおよびBとも10ショットずつ鍛造を行った。採取したデータをグラフ7に示す。



グラフ 7 鍛造時の条件ごとの応答調査

グラフ 7 は 10 ショット中の最大、平均、最小をプロットしたものである。条件 A、B、A、B を繰り返したところ、成形荷重および面圧とも条件に応答していることが確認できた。また、その応答性に再現性があることも確認できた。面圧 3 はノイズ計測用として配置したロードセルであり、条件が変化しても出力は一定であった。鍛造プレスおよびインダクションヒーターなどの周辺機器、他の熱電対 1 および 2 の信号をノイズとして拾っている様子は見られず、想定どおりの計測結果となった。

次に③の項目を調査するために簡易試験とその結果の予測を CAE で行った。(ヤマナカコーキン社が実施) その試験の概略図を図 9、CAE のモデルを図 10、試験の様子を写真 11 に示す。これは、計測型に内蔵したロードセルおよび計測用のピンと同様のものを擬似ダイスに内蔵し、そのダイス上で冷間材を据えこみ、面圧を計測する試験である。その際、計測用ピンのダイスからの突き出し量は+0.2、0、-0.2 を狙った 3 条件を設定した。

試験結果と CAE による予測をグラフ 8 に示す。試験におけるピン突き出し量の実測値は+0.220mm (ダイス端面より凸)、-0.010mm (ダイス端面と平行)、-0.195mm (ダイス端面より凹) であった。

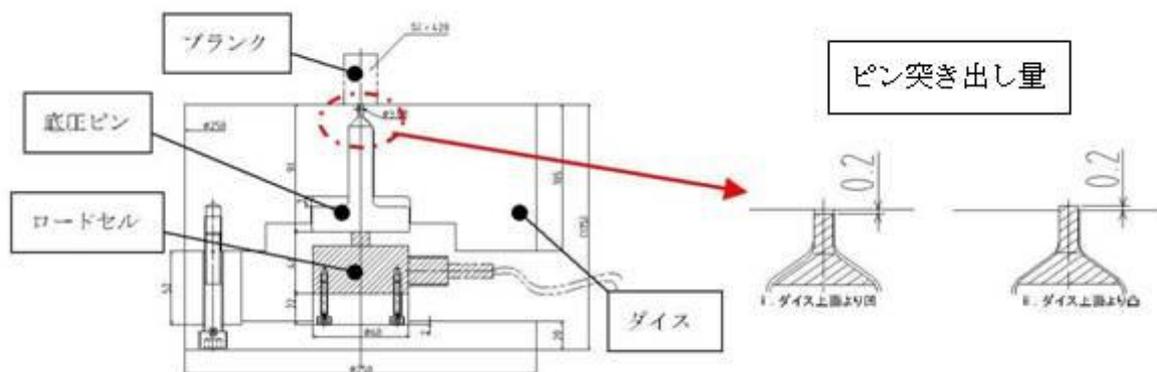


図 9 簡易試験概略図

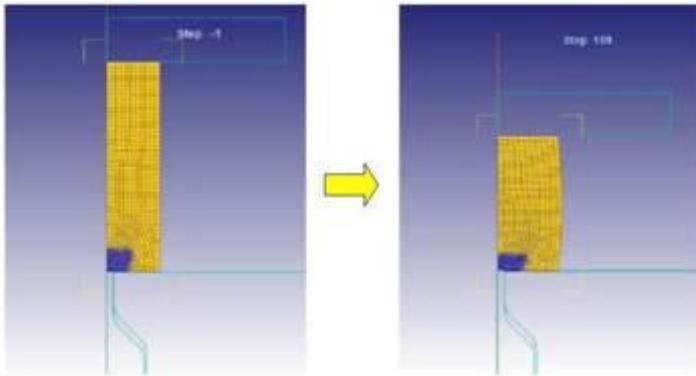
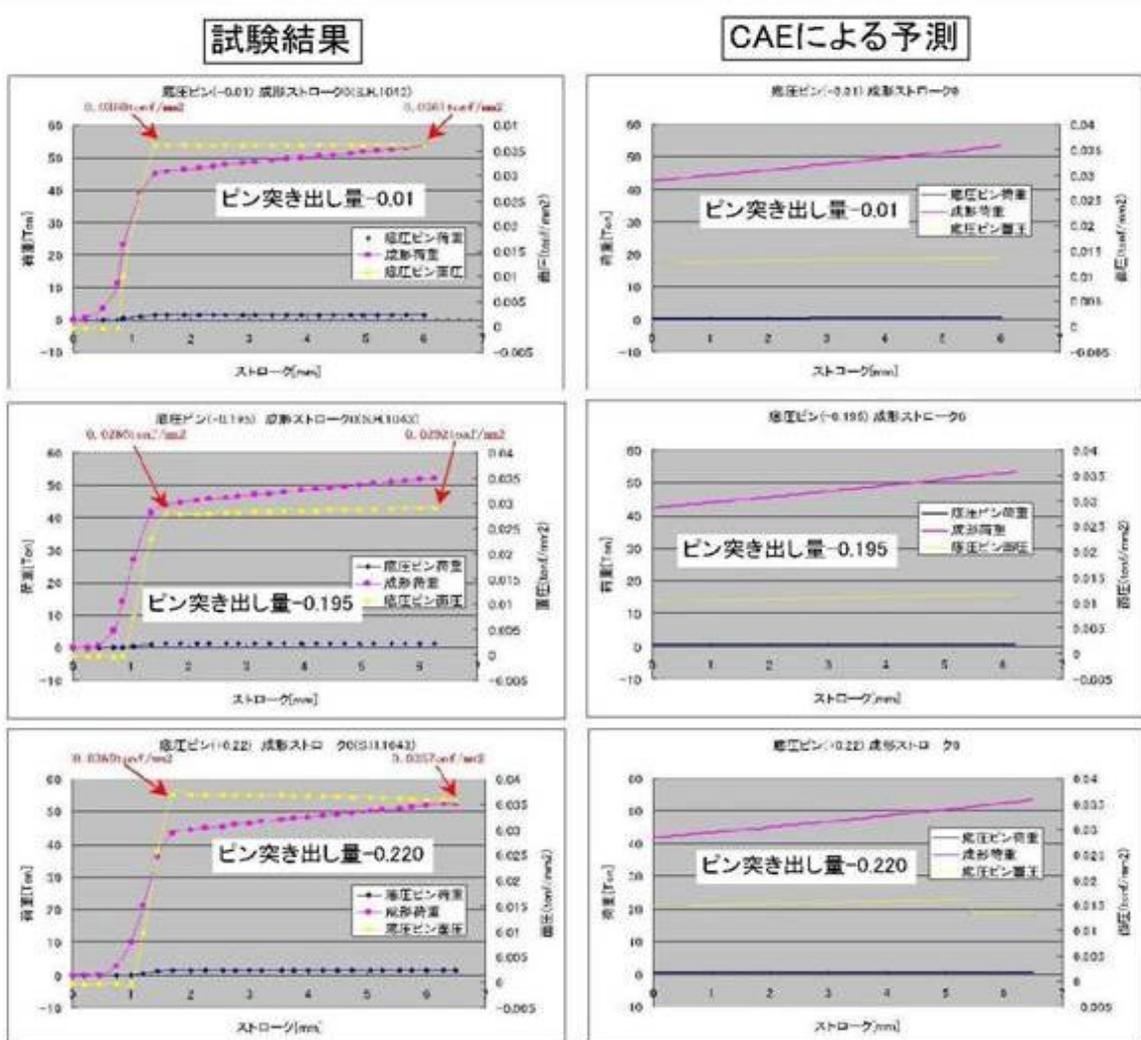


図 10 予測用CAEモデル



写真 11 簡易試験の様子 (左：据え込んだビレット、右：据え込み時の様子)



グラフ 8 簡易試験結果 (左) および CAE による予測 (右)

試験結果と予測において成形荷重は近い値となったが、面圧（底圧ピン荷重）は大幅に異なる値を示した。しかし、突き出し量が多くなるほど計測値が大きくなる傾向は一致した。

II-1-3-4. レーザースキャンによる形状測定データ検証

ロードセルによる金型面圧データと成形荷重データの妥当性は下記の項目を検証することで評価できると考えた。

① 散乱光とレーザー照射方向が計測精度に与える影響

①を調査するために、測定時のレーザー照射により散乱光が発生しやすい表面性状のサンプルの測定を行った。サンプルの外観を写真 12、測定結果を図 11 に示す。



部: 計測範囲

写真 12 測定サンプル外観



部: データ欠落範囲

図 11 測定結果

測定の結果、レーザー照射方向と水平な面のデータが欠落した。また、レーザー照射方向と垂直な面でもデータの欠落する部分が発生した。レーザー照射方向と垂直な部分で発生したデータ欠落は散乱光によるものと考えられる。よって、レーザー照射方向と水平な面がほとんど存在しない測定部位に変更し、散乱光が発生しにくくなるように表面の光沢を処理し再度計測を行った。変更した測定部位を写真 13、測定結果を図 12 に示す。

図 12 に示すように測定データにデータの欠落はほとんど発生しなかった。今回使用したレーザースキャナで高精度な測定を行うためには、制約条件があることがわかった。



写真 13 変更した測定部位外観

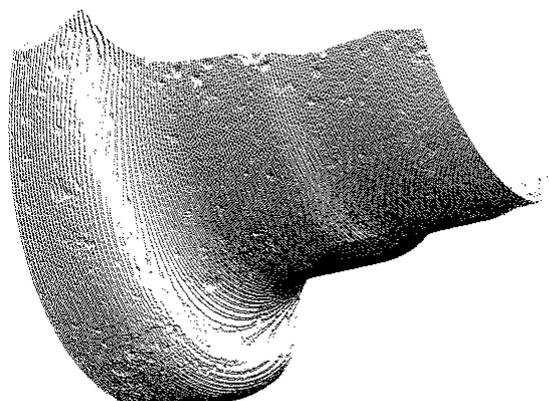


図 12 変更した部位での測定結果

II-1-4. 計測技術の構築まとめ

金型寿命改善の支援を目的として、熱間鍛造金型に作用する物理量を把握する計測装置を開発し、その実績の評価を行った結果、以下の計測技術を構築することができた。

①サーモビューアーによる金型表面温度計測

- ・計測を行う対象物の放射率が一定となるような工夫が必要である。金型表面が黒色となる表面処理を施して白色潤滑剤を用いた鍛造条件で計測を行う場合、放射率を 0.85~1.0 の間で設定すれば誤差の小さい計測が可能である。

② 熱電対による金型温度計測

- ・データサンプリング分解能は、小さいほど波形が厳密に採取できるが、使用する鍛造機がクランクプレスならば、50ms で波形の採取は可能である。

- ・熱電対の応答性は径が細いほど優れるが、線径（シース径） $\phi 0.5$ と $\phi 1.6$ を比較したところ、応答性の差は確認されなかった。かなり高速な現象の計測でなければ、鍛造現場での計測に用いる熱電対は堅牢さを重視し、できる限り大きな線径（シース径）を選択するべきであると考ええる。

- ・金型表面から計測位置（熱電対と金型との接点）までの温度分布は計算を用いて推定するべきであると考ええる。これは、サーモビューアーと熱電対により採取したデータを用いれば可能である。

③ ロードセルによる金型面圧と成形荷重計測

- ・データサンプリング分解能は、物理量作用時間を 0.2 秒と見積もった場合、5ms あれば波形の採取は可能である。

- ・面圧計測に用いるロードセルであるが、許容荷重の入力に対する安全率 2.5 とったところ破損は発生しなかった。

- ・ロードセルの応答性は、物理量の作用時間を 0.2 秒と見積もって 2000Hz (0.0005 秒) のものを使用したところ、確実に波形を採取することができた。

- ・計測用ピンは金型からの突き出し量が大きくなるほど計測値が大きくなるようである。突き出し量は計測精度に影響を及ぼすため、寸法関係を厳密に把握しておく必要がある。

④ レーザースキャンによる形状測定

- ・レーザー照射方向と水平な面の測定は困難である。散乱光の発生を抑えないとデータの欠落やノイズが入ってしまう。よって、これらの制約条件がないカメラ式のスキャナーの使用を検討すべきである。

II-2. CAE解析による鍛造金型寿命予測と対策方法の妥当性研究

II-2-1. 研究開発の概要

II-2-1-1. 研究開発の背景

熱間鍛造における金型寿命を左右する多くの要因の寄与率を実験（計測基礎実験・計測装置の検証）と解析によって明確にし、金型寿命向上の最も有効的な手段の選定方法の確立を目指し、その事前検証システムとして、CAE解析による寿命予測の実用化の検討を進めている。これまでの研究成果からは、金型寿命と相関のある要因として金型材料の硬さや疲労特性が大きく影響を与えていることが明らかとなっており、金型の寿命予測や寿命向上の方向性検討のためには、金型材料の特性調査を行うことが必要となってきた。本年度は、使用している金型の負荷状態を解析計算によって把握することおよび金型寿命向上を狙うために必要な金型特性データを揃えて、CAE解析を用いた金型の負荷評価手法についての検討を行う。

II-2-1-2. 研究開発の目的及び目標

本研究はこれまでに、計測時の実機条件を解析条件に反映させて、CAE解析の精度向上に努めたが、その中で得られた結果として、鍛造中の金型に現れる面圧、応力、温度などが確認出来るようになったことが挙げられる。図1は、解析対象となった各アイテムに対する金型の温度分布、接触面圧および金型の応力（最大主応力）分布を表したものである。鍛造品形状、つまり、金型形状が異なると鍛造中の金型に現れる温度分布や応力分布が異なってくること、またそれに伴って、金型にかかる負荷の影響も大きな違いとなって現れることを示している。CAE解析の特徴は、同じ手法を使用して様々なアイテムを評価できることにあり、さらに実際の金型に現れている情報（図中には摩耗、割れと表記）を付加することによって、CAE解析で求めた面圧、応力、温度の情報を金型寿命の観点から考察することが可能となる点にある。

図2は、鍛造中の金型にかかる面圧と温度を解析計算によって求め、各アイテム毎にまとめたマップ図を示したものである。金型の寿命形態（摩耗と割れ）で比べると金型にかかる面圧に対しては、面圧の高低にかかわらず摩耗や割れが発生するといえる。しかし、温度に対して比較すると、割れによって寿命となる金型は金型温度が300℃より低い範囲に分布しており、摩耗によって寿命となる金型は、金型温度が300℃より高い範囲に分布することがわかる。これは、摩耗による寿命が金型の温度に大きく影響されていることを示唆している。

同様に金型にかかる応力（最大主応力）と温度の関係を各アイテムについて比較したマップ図が図3である。最大主応力が正（プラス）である場合と負（マイナス）である場合、つまり引張応力（正）か圧縮応力（負）によって寿命の形態（摩耗、割れ）が異なることがわかる。金型温度が高く圧縮負荷を受けている場所では、割れではなく摩耗が優先となり、また逆に、金型温度が低く引張応力を受けるような部分では割れの可能性が高いと推定できる。

今回このような寿命形態の予測を可能とするにあたって、摩耗による寿命の判断および割れ（特に疲労破壊）による寿命に対しての知見を得ることを目的に、金型材料の硬さが温度および面圧に対してどのような特性を持っているのか、また、温間（およそ100～600℃の範囲）における繰返し応力負荷を受けた場合の金型材料特性（温間低サイクル疲労特性）の調査を実施した。

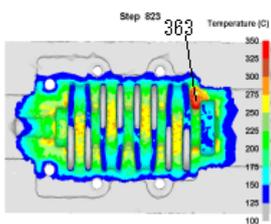
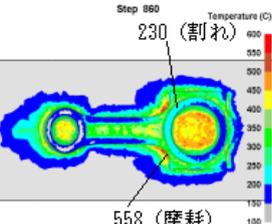
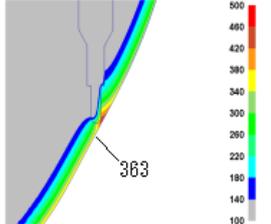
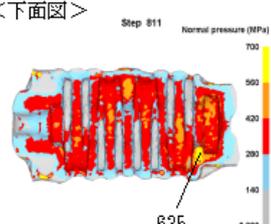
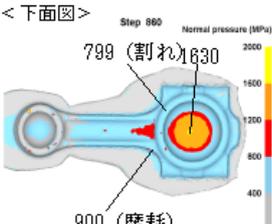
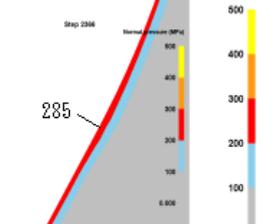
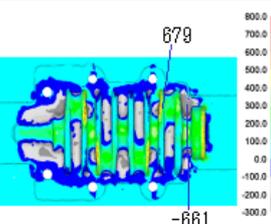
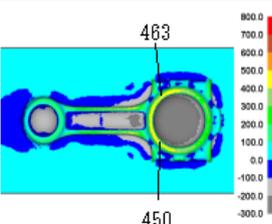
アイテム名	クランクシャフト	コンロッド	スリーブ
測定対象金型	荒工程 下金型	荒工程 下金型	3工程 上パンチ
成形荷重	1512 ton	2464 ton	602.0 ton
温度 [°C]	 Step 823 363	 Step 860 230 (割れ) 558 (摩耗)	 363
接触面圧 [MPa]	<下面図>  Step 811 Normal pressure (MPa) 635	<下面図>  Step 860 Normal pressure (MPa) 799 (割れ) 1630 900 (摩耗)	 Step 238 Normal pressure (MPa) 285
最大主応力 [MPa]	 879 -661	 463 450	解析未実施

図1 アイテム（鍛造品）別に比較した素材面圧，金型温度，金型応力分布

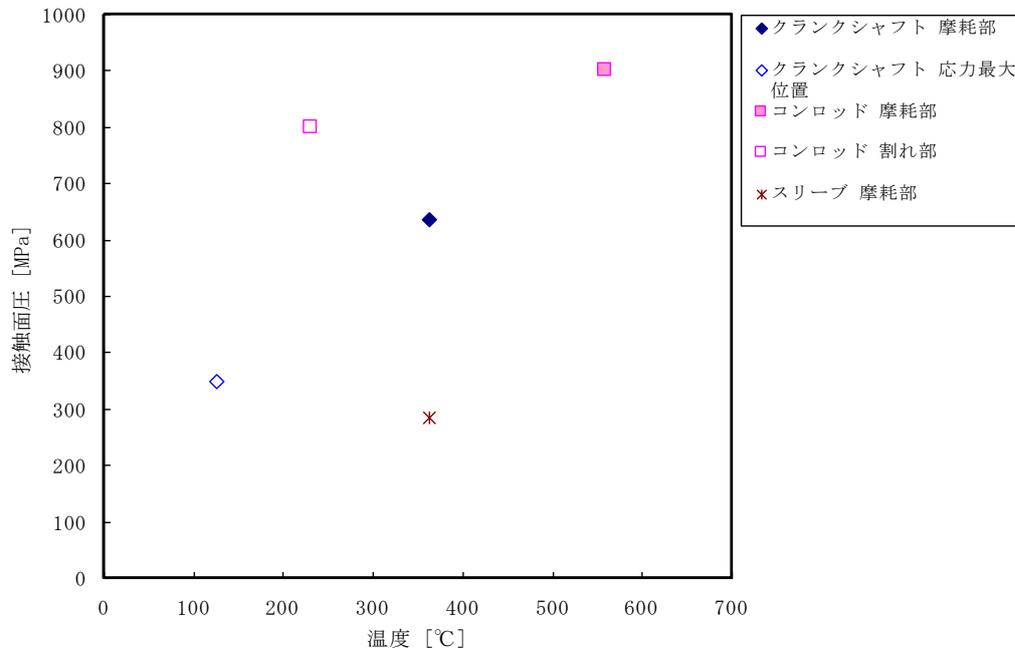


図2 鍛造金型の摩耗部および割れ部に現れる面圧と温度の関係

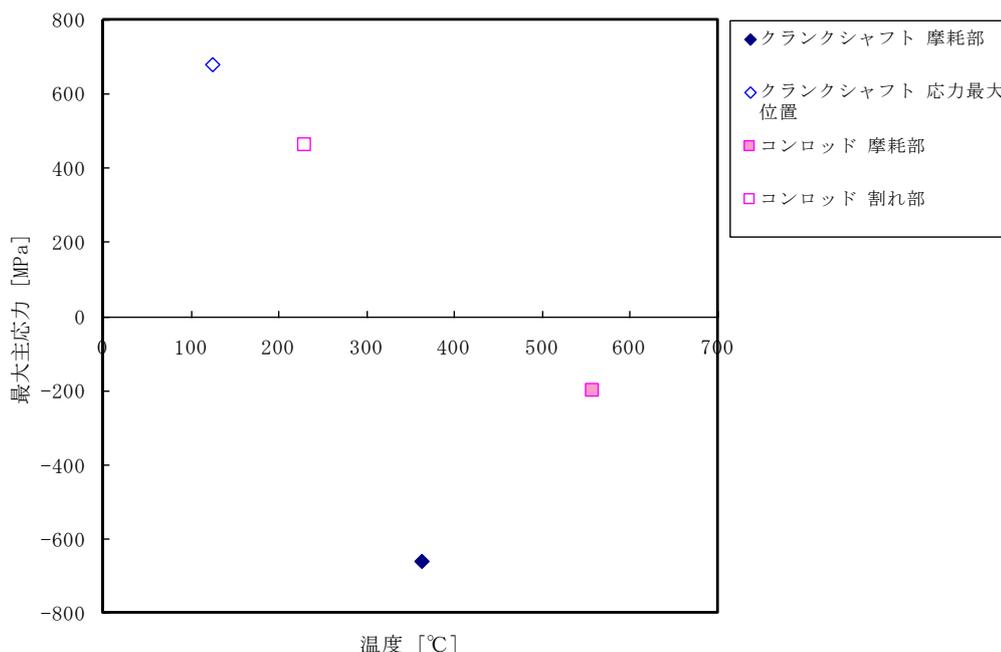


図 3 鍛造金型の摩耗部および割れ部に現れる最大主応力と温度の関係

II-2-2. 金型の摩耗寿命に対する判断基準作成

金型の摩耗は図 2 に示したように、鍛造中の金型温度に大きく影響していると考えられる。つまり、金型材料の硬さが温度に対してどのように変化するかを捉えることは、現状の金型の摩耗状況の把握と摩耗に対する寿命対策を施す際の手立てとして重要といえる。さらに、CAE 解析を実施して得られた情報（面圧、温度）と照らし合わせることによって、定量的な比較評価（現状に対する効果の程度）の実施が期待できる。

今回は金型材料の硬さの温度および面圧に対する依存性を調べることによって、摩耗寿命に対する評価基準の設定の検討を行った。

II-2-2-1. 金型材料の硬さの温度、面圧依存性調査

鍛造中の金型が受けている温度、面圧は、どのようなアイテムを鍛造しているかによって変わるが、本研究で対象としているコンロッドやクランク、スリーブでは、温度（およそ 100~600°C）、面圧（およそ 200~900MPa）の範囲で使用されていることが前年度までの研究で分かってきた。今回の調査ではこの状況下における金型の硬さの変化を捉えることを目的として試験を実施した。

・調査方法

調査対象は一般的な熱間加工用金型材料の SKD61 である。表 1 に示すように、3 種類の硬さの異なる試験素材を用意して、硬さの違いによる変化についても調査した。図 5 に使用した試験設備を表す。試験温度に保持しつつ試験素材に加圧負荷をかける装置であり、指定の温度において指定の面圧相当を与えた後に試験片を室温へ冷却して硬さの測定を行った。ここで、加圧試験は荷重負荷をかけてから硬さを測定する試験を表し、無負荷試験は荷重負荷のない状態、つまり温度の硬さに対する影響のみを調査した試験を指す。

材質	熱処理	硬さ (HRC)
SKD61	焼入れ 1020℃×2 時間 焼戻し 600℃×4 時間, 615℃×4 時間	40.3
	焼入れ 1020℃×2 時間 焼戻し 610℃×4 時間, 585℃×4 時間	43.4
	焼入れ 1020℃×2 時間 焼戻し 585℃×4 時間, 550℃×4 時間	51.2

表 1 試験用素材

試験は以下の条件で実施した。

圧縮試験装置：熱間加工再現試験装置（富士電波工機製：サーメックマスター Z 試験機）
（装置外観を図 5 に示す。）

加熱方法：高周波加熱（使用コイル：圧縮用コイル）

圧縮試験環境：He ガス雰囲気

試験片形状：①加圧用 $\phi 10 \times 12\text{mm}$

②無負荷用 $\phi 10 \times 4\text{mm}$ （硬さ 3 種類を重ねて同時処理）

サイクル条件：①30℃/sec にて試験温度の 20℃下まで昇温

②試験温度まで 1℃/sec にて昇温

③試験温度にて 1 分間保持

④指定荷重をかけたまま 1 時間保持

⑤試験終了後、He ガスにて急冷

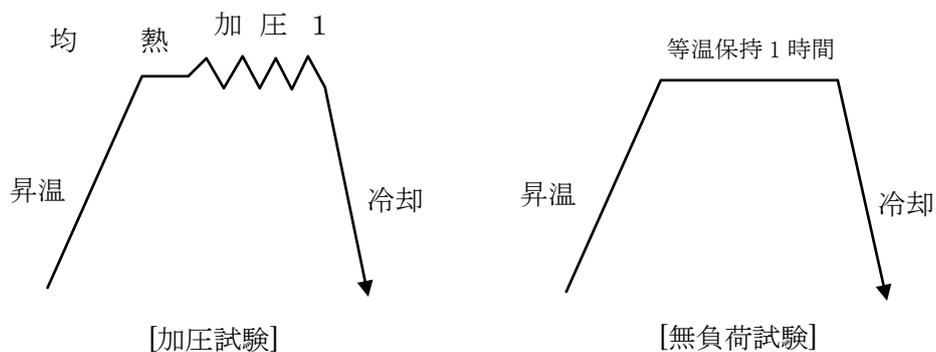


図 4 試験パターン

硬さ測定装置：ロックウェル硬さ試験機（MATSUZAWA SEIKI 製）

硬さスケール：C スケール

硬さ測定位置：断面中央

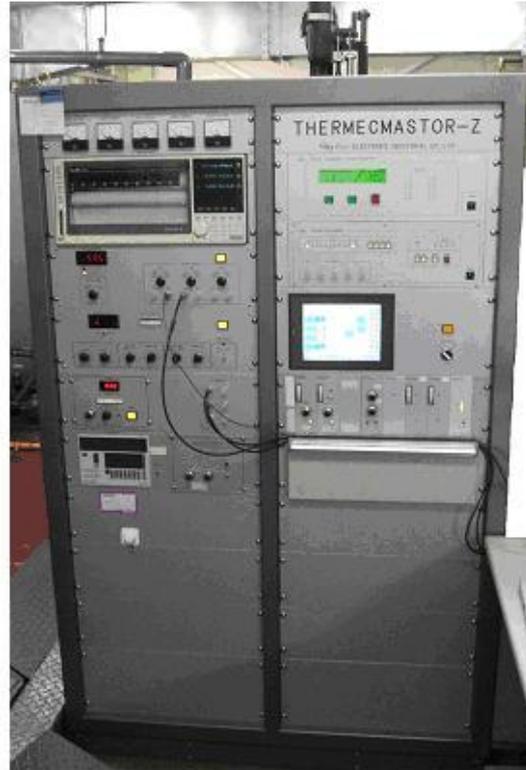
硬さ測定温度：室温

硬さ測定点数：各 3 点

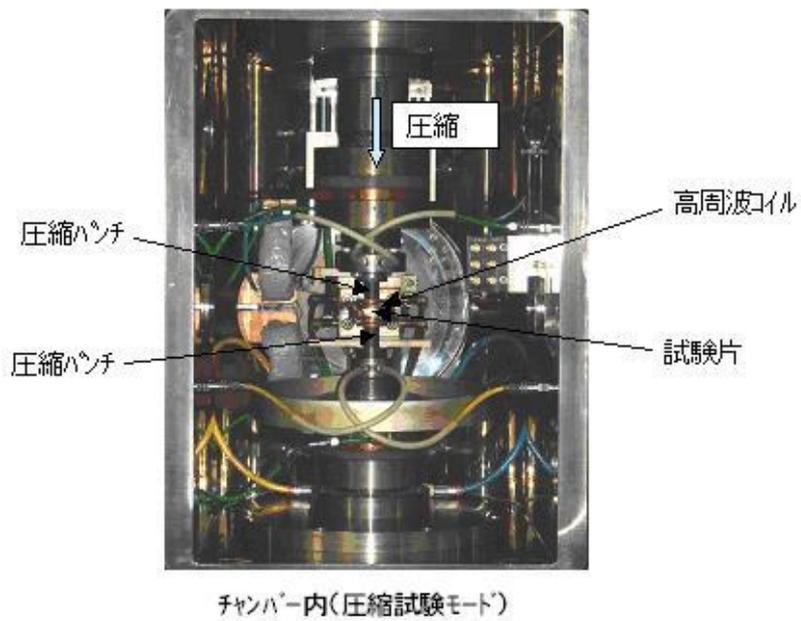
測定項目：HRC 硬さ



試験機本体



制御操作盤本体



チャンパー内(圧縮試験モード)

図5 熱間加工再現試験装置 (サーメックマスター Z) の外観

・調査結果

調査結果の代表例を図 6 に示す。データは測定した 3 点の平均値を表している。接触面圧に対する硬さの変化は小さいが、500℃以上の温度では硬さの低下（軟化）が顕著になるといえる。

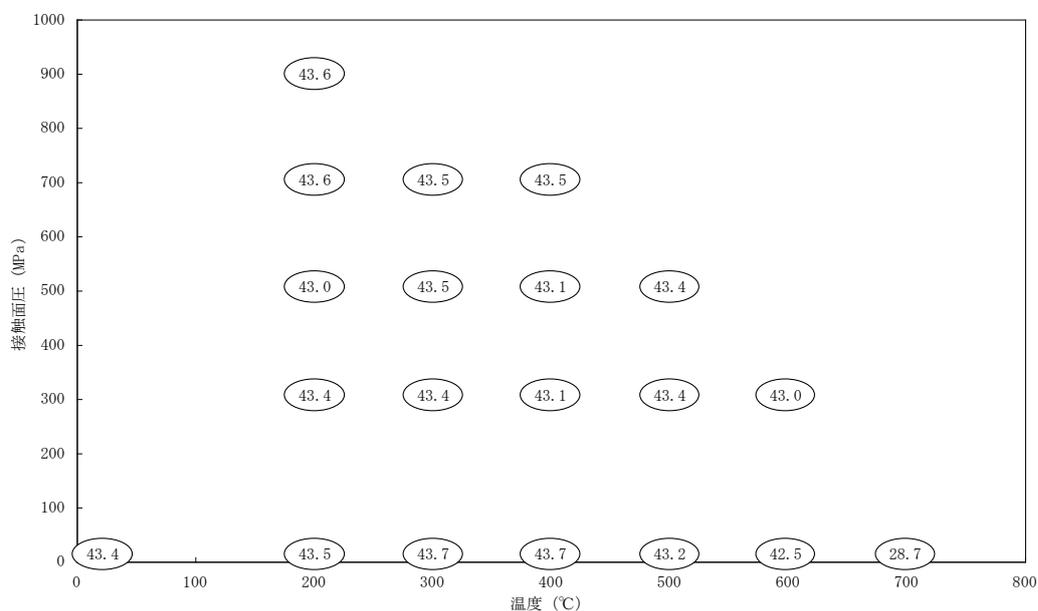


図 6 初期硬さ 43.4HRC 金型材料（SKD61）の温度および接触面圧による硬さの変化

II-2-2-2. 金型材料の硬さ特性とCAE解析との照らし合わせ

ここでスリーブ成形におけるパンチの表面温度をCAE解析によって推定したデータを図 7 に示す。グラフ中の赤丸で表されているスリーブパンチの表面温度は、鍛造終了直後に最も温度が上昇し、表面では約 665℃となることがわかる。またこのときのスリーブパンチにかかる面圧は約 195MPa であり、スリーブパンチの初期硬さが約 50HRC であることから図 8 を用いて 665℃、195MPa 相当の条件における硬さを見積ると、約 37HRC までパンチの硬さが低下していると推察できる。

式 1 は摩耗量を予測する式を表しており、Archard モデルとして一般的に用いられている。この式に対して、硬さ H に 50HRC を代入した場合と 37HRC を代入した場合で単純な比較をすると摩耗量として $(50 \times 50) / (37 \times 37) \approx 1.8$ 倍の差が現れると予測できる。

実際、適切な冷却条件でスリーブパンチの表面温度の上昇を抑制した場合、摩耗量の差が実測で約 1.6 倍であったことから、金型の摩耗量評価の方法としては、今回の硬さデータおよびCAE解析を用いることによって妥当性のある結果が得られるといえる。

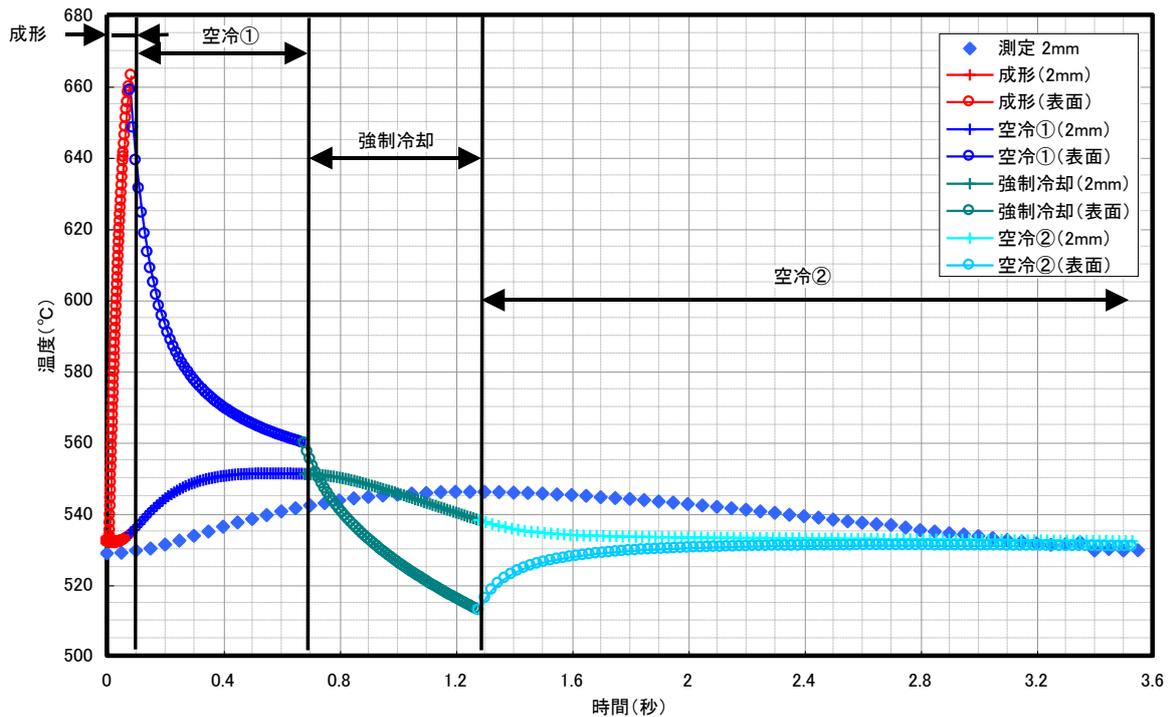


図7 CAE解析によって求めたスリーブパンチの温度推移

$$w = \int K \frac{p \ v}{H^2} dt$$

- w = 摩耗深さ
- p = 面圧
- v = 相対すべり速度
- H = 金型材料の硬さ [HRC]
- K = 材料定数

式1 摩耗量の予測式 (Archard モデル式)

II-2-3. 金型の割れ寿命に対する判断基準作成

一般的に金型の割れは、破断に至るまで（熱間鍛造ではおよそ数千回）繰返しの応力負荷にさらされることが主な原因と考えられている。中でも図3で示したように、引張応力が割れに対して大きな影響を及ぼしており、どの程度の引張応力の大きさが繰返し印加されると破断するかを捉えることが、金型の割れに対する寿命を予測する上で必要となる。

ここでは金型材料の疲労特性を温度および応力に対して調査を行い、CAE解析から得られる金型の温度および応力の情報と合わせて、割れ寿命に対する評価基準の設定について検討を行った。

II-2-3-1. 金型材料の温間低サイクル疲労特性調査

硬さ調査と同様に、本研究で対象としているコンロッドやクランク、スリーブの鍛造で金型にかかっていると想定される、温度（およそ 200～600℃）、面圧（およそ 200～900MPa）の範囲を本調査の試験条件範囲として設定した。本調査では、応力負荷がかけられた場合の金型材の疲労特性を得ることを目的とする。

・調査方法

調査対象は硬さ調査で使用した SKD61 である。表 2 に示す試験素材を用意して疲労試験片を作成し、次に示す試験条件の下で疲労特性のデータを採取した。

材質	熱処理	硬さ (HRC)
SKD61	焼入れ 1020℃×2 時間 焼戻し 595℃×4 時間, 595℃×4 時間 585℃×4 時間	43.5

表 2 試験用素材

試験は以下の条件で実施した。

使用試験機 : 島津製作所製電気油圧サーボ型疲労試験(図 8 参照)

試験温度 : 5 水準 (200, 300, 400, 500, 600℃)

試験環境 : 大気中

負荷様式 : 軸力引張

制御波形 : 正弦波

制御方法 : 荷重制御

応力比 : R=0

周波数 : 5～20Hz 程度

最大繰返し数 : 5×10^4 サイクル

昇温速度 : 任意

加熱方式 : ボックス炉

加熱保持時間 : 試験温度到達後 15～30min 保持し、試験開始



図8 島津製作所製電気油圧サーボ型疲労試験の外観

・調査結果

調査結果を図9に示す。300℃においては1200MPa以上の応力負荷がかかると破断までの繰返し数が数千サイクルまで下がり、1300MPaでは数百サイクルまで下がることから一割程度の応力低減で一桁の寿命向上は期待できることが伺える。なお、応力負荷が1000MPa程度であれば100万サイクルを越えている。

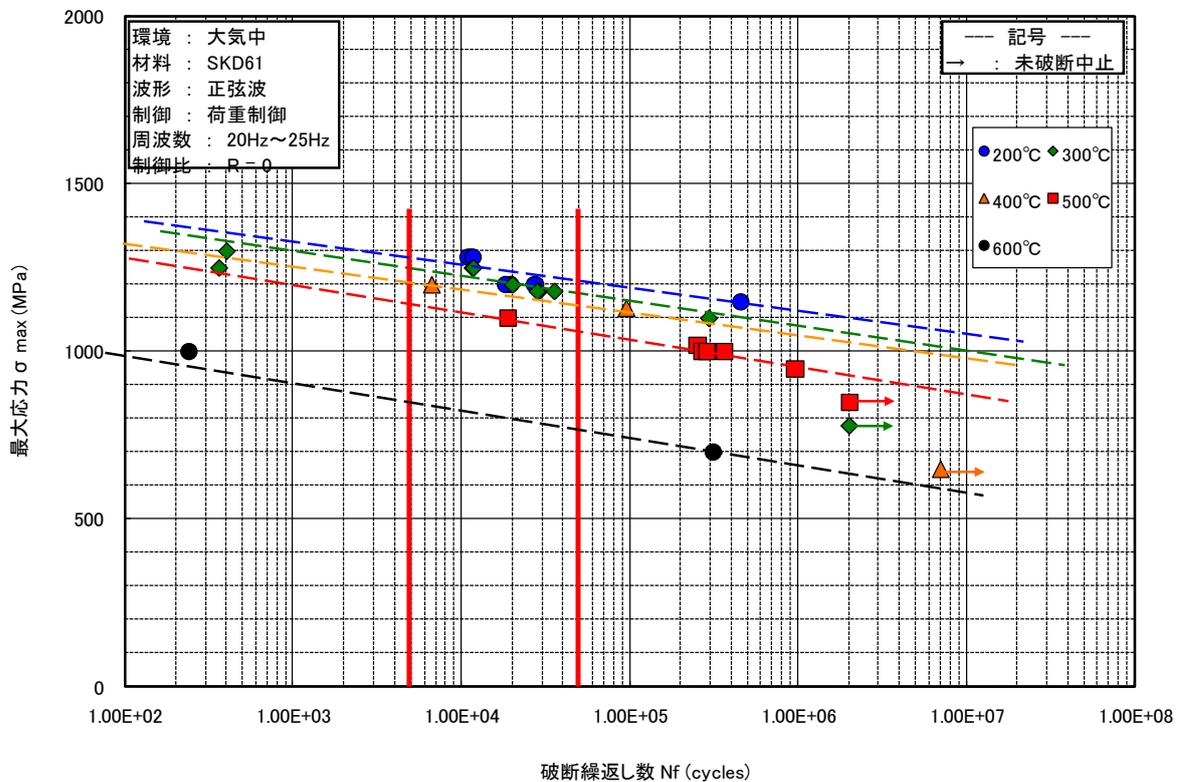


図9 温間低サイクル疲労特性調査結果

Ⅱ－２－４．研究成果まとめ

本研究は、18、19年度とCAE解析による実機鍛造の再現および金型寿命向上を検討する上で必要となる解析手法や基礎データの収集を中心として実施してきたが、本年度はCAE解析技術および金型材料データをベースとした用いた金型摩耗、割れ評価手法の開発を行った。

本研究の成果として次の項目を挙げる。

- ①CAE解析による金型摩耗の予測方法と摩耗対策のための方向性検討データの提供
- ②CAE解析による金型割れの予測方法と割れ対策のための方向性検討データの提供

いずれについても鍛造中の金型の負荷状態や金型材の特性は、これまでに明らかとされていなかった情報であり、金型の寿命向上を図る上で重要な技術といえる、また、本研究によって開発された手法は今回対象となったアイテム以外にも適用可能であり、応用範囲は広いと考える。