

平成25年度 戦略的基盤技術高度化支援事業(継続事業)

「材料科学的なアプローチによる厚板鍛造の高度シミュレーション技術の確立」

研究開発成果等報告書

(概要版)

平成26年2月

委託者 東北経済産業局

委託先 公益財団法人郡山地域テクノポリス推進機構

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
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 1 成形時の割れ、しわ発生の防止等成形限界に基づいた成形技術の確立
- 2 チタンの金型への焼付き・かじりを防止した複雑形状の成形技術の開発
- 3 熟練工に頼らない工程設計技術の開発

最終章 全体総括

- 1 研究開発成果
- 2 研究開発後の課題・事業化展開

第1章 研究開発の概要

本開発では、川下企業のニーズが高い、アルミ、チタンなどの難加工材の鍛造加工を対象とする。平成25年度は川下企業から要望が強く量産品への適用可能性の高いステンレス鋼も追加対象とした。

材料科学的アプローチとして、金属材料のミクロ組織に関する包括的組織情報（結晶構造解析、残留応力解析、流動解析）を利用し、金属組織の内部因子の可視化、定量化を行い、鍛造工程での成形性を左右する「割れ」・「しわ」・「かじり」などの成形不良の発生原因との関係を明らかにする。

さらに、成形性に影響の大きい金属組織因子を定量化し、マクロな特性をベースとする塑性加工 CAE にフィードバックすることで、高精度な成形限界予測を実現する。塑性加工 CAE へのフィードバックに関しては、ナノオーダーレベルのシミュレーション技術である分子動力学、マクロ・スケールへ拡張する技術を利用する。これら、最適なスケールのシミュレーション・モデルの決定のため、金属組織、結晶粒組織観察を併用する。

材料科学的な情報をシミュレーションに活用し学的な根拠に基づいた工程設計技術を開発する。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

自動車業界を中心に、金属プレス、鍛造加工への、CAE 活用が広がっているが、薄板成形を対象にしたものがほとんどで、厚板鍛造への活用事例は少なく、有効な活用手法が確立されていない。このため、板鍛造では、未だに、多数の試作を要する熟練工に頼ったものづくりが行われているのが現状で、高級腕時計・携帯電話分野で低コスト・短納期を求める川下企業のニーズに応えられていない。

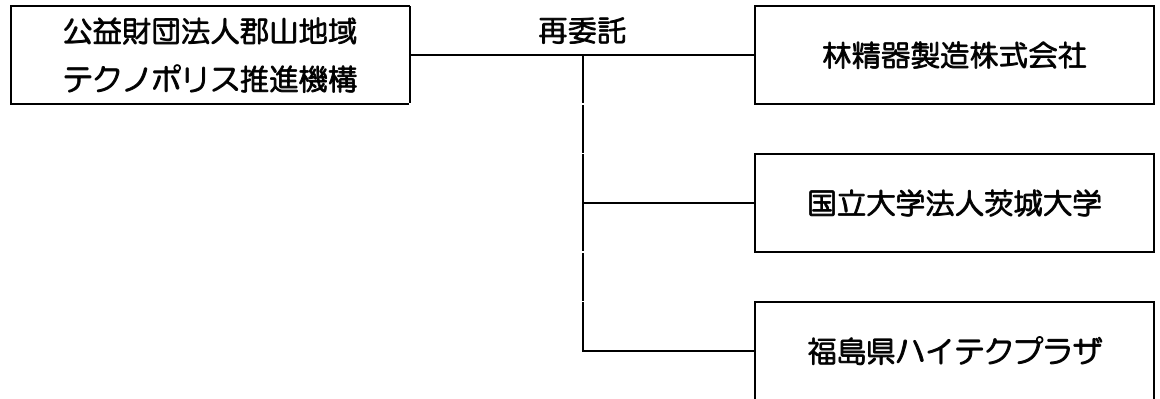
本研究では、材料科学的アプローチで得られた金属組織情報をフィードバックすることが可能な高度シミュレーション技術により、熟練工の暗黙知を可視化、定量化することで、科学的根拠に基づいた工程設計手法を確立し、開発期間 1 / 3、生産効率 3 倍、コスト 1 / 3 を実現することを目的とする。

1－2

●研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

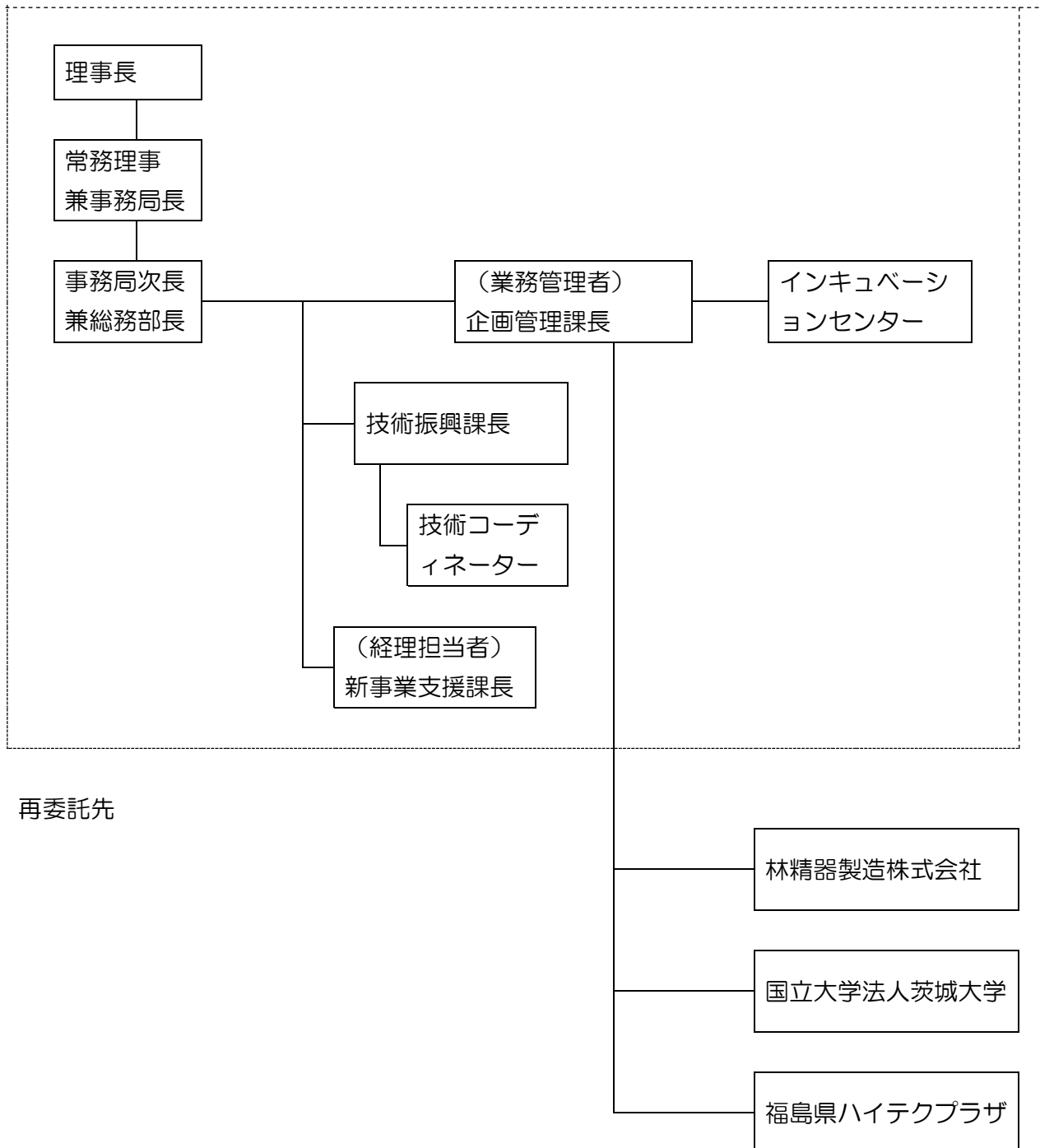
1) 研究組織



総括研究代表者（PL） 所属：精器製造株式会社 経営管理部 役職：技術開発G グループリーダー 氏名：大沼 孝	副総括研究代表者（SL） 所属：茨城大学工学部 役職：教授 氏名：鈴木 徹也
--	---

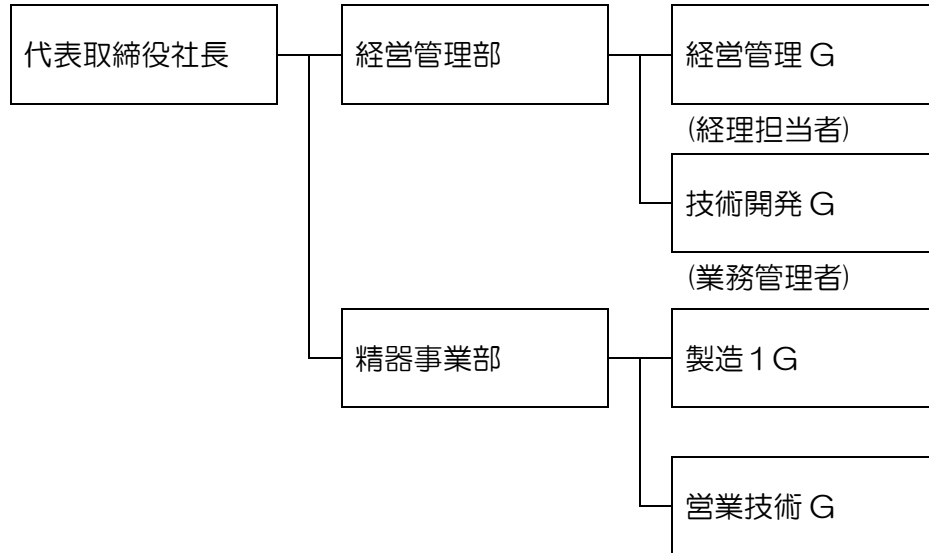
2) 管理体制

① 事業管理者〔公益財団法人郡山地域テクノポリス推進機構〕

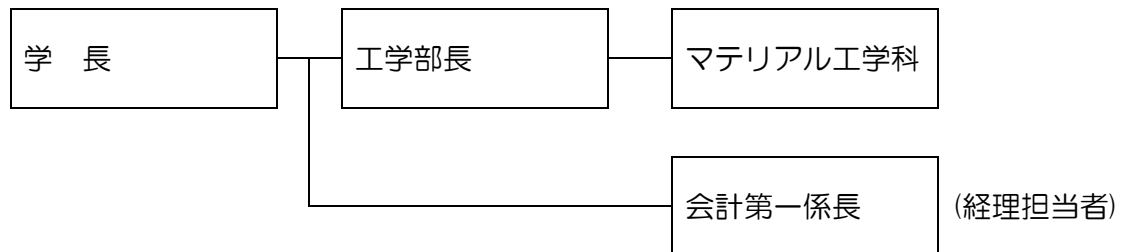


②（再委託先）

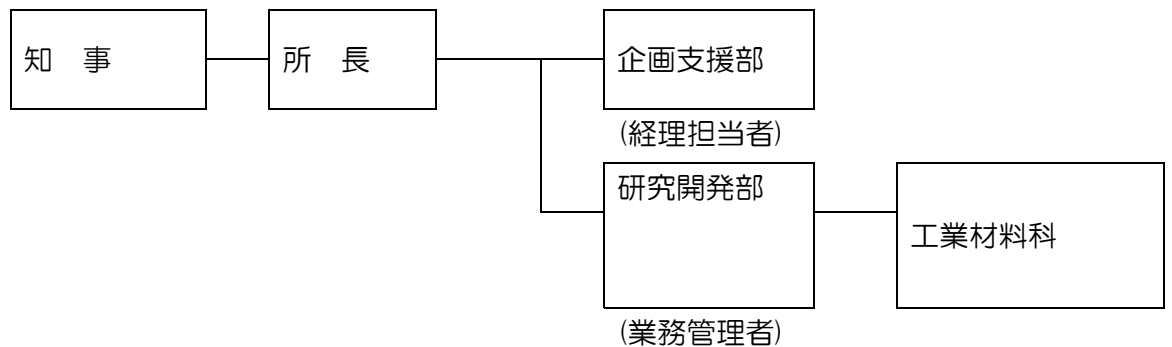
林精器製造株式会社



国立大学法人茨城大学（業務管理者：工学部長）



福島県ハイテクプラザ



(2) 研究員及び管理員（役職・実施内容別担当）

【事業管理者】公益財団法人郡山地域テクノポリス推進機構
管理員

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
安藤 徹	事務局次長兼総務部長	④
小松 信一	企画管理課長	④
佐久間直也	技術振興課長	④
鈴木 一哉	新事業支援課長	④
宮越 稔	インキュベーションマネージャー兼技術コーディネーター	④
佐藤 彰	技術コーディネーター	④

【再委託先（研究員）】

林精器製造株式会社

氏名	役職・所属	実施内容（番号）
大沼 孝	経営管理部 技術開発 G グループマネージャー	PL①,②,③
佐藤 幸伸	経営管理部 技術開発 G 開発 T 副主任	①-1,②-1,②-2, ③-2
和田 泉	精器事業部 特命スペシャリスト	①-1,②-2,③-1 ③-3
八木 秀一	精器事業部営業技術 G 設計技術 T チームマネージャー	①-1,①-2,②-1 ③-1,③-2,③-3
青木 博泰	精器事業部営業技術 G 品質保証 T チームマネージャー	①-1,①-2,②-1 ③-1,③-2,③-3
塩田 隆	精器事業部 製造 1 G グループマネージャー	②-1,③-1
橋本 剛	精器事業部 製造 1 G モールド T チームマネージャー	③-2,③-3
秋田 力	精器事業部 製造 1 G プラス T チームマネージャー	②-2,③-2
吉田 広仲	精器事業部 製造 1 G プラス T 主事補	②-2,③-2
黒澤 祐弥	精器事業部 製造 1 G プラス T 係員	②-2,③-2
遠藤 一成	経営管理部 技術開発 G 開発 T 主事補	①-3,②-1,③-2
村上 真二	精器事業部 製造 1 G モールド T 主事補	②-2,③-1,③-3
青木 和典	精器事業部 製造 1 G モールド T 主任	②-1,②-2
関根 隆雄	精器事業部 製造 1 G モールド T 主任	②-1
飯沢 頼一	精器事業部 営業技術 G 設計技術 T 副主任	①-1,②-1 ②-2 ③-1

国立大学法人茨城大学

氏名	役職・所属	実施内容（番号）
鈴木 徹也	工学部マテリアル工学科教授	SL①,②,
永野 隆敏	工学部マテリアル工学科講師	①-1,①-2,
		①-3,②-2
岩瀬 謙二	工学部マテリアル工学科講師	①-1,①-2,②-1

福島県ハイテクプラザ

氏名	役職・所属	実施内容（番号）
工藤 弘行	技術開発部工業材料科主任研究員	①-2,①-3,②-1,
		②-2,③-3
五十嵐雄大	技術開発部工業材料科研究員	①-3,②-2

（３）経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理者】

公益財団法人郡山地域テクノポリス推進機構

（経理担当者）新事業支援課長

鈴木 一哉

（業務管理者）技術振興課長

佐久間直也

【再委託先】

林精器製造株式会社

（経理担当者）経営管理 G グループ マネージャー

渡辺 英雄

（業務管理者）技術開発 G グループ マネージャー

大沼 孝

国立大学法人茨城大学

（経理担当者）工学部 会計第一係長

岡野 修久

（業務管理者）工学部 学部長

米倉 達広

福島県ハイテクプラザ

（経理担当者）企画管理科長

伊藤 嘉亮

（業務管理者）技術開発部長

小川 徳裕

(4) 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

平成25年度戦略的技術高度化支援研究開発推進会議 委員

氏名	所属・役職	備考
大沼 孝	林精器製造株式会社 経営管理部 技術開発 G グループ マネージャー	PL 委 委 委 委
和田 泉	林精器製造株式会社 精器事業部 特命スペシャリスト	
佐藤 幸伸	林精器製造株式会社 経営管理部 技術開発 G 開発 T 副主任	
八木 秀一	林精器製造株式会社 精器事業部 営業技術 G 設計技術 T チーム マネージャー	
塩田 隆	林精器製造株式会社 精器事業部 製造 1 G グループ マネージャー	委 SL アドバイザー
鈴木 徹也	国立大学法人茨城大学工学部マテリアル工学科 教授	
永野 隆敏	国立大学法人茨城大学工学部マテリアル工学科 講師	
岩瀬 謙二	国立大学法人茨城大学工学部マテリアル工学科 講師	
工藤 弘行	福島県ハイテクプラザ工業材料科 主任研究員	
五十嵐雄大	福島県ハイテクプラザ工業材料科 研究員	
船津 隆一	国立大学法人茨城大学 産学官連携コーディネーター	
安藤 徹	(公財)郡山地域テクノポリス推進機構 事務局次長兼総務部長	
小松 信一	(公財)郡山地域テクノポリス推進機構 企画管理課長	
佐久間直也	(公財)郡山地域テクノポリス推進機構 技術振興課長	
鈴木 一哉	(公財)郡山地域テクノポリス推進機構 新事業支援課長	
宮越 稔	(公財)郡山地域テクノポリス推進機構 IM 兼技術コーディネーター	
佐藤 彰	(公財)郡山地域テクノポリス推進機構 技術コーディネーター	
藤沼 良夫	常陽銀行 法人事業部 顧問ものづくり企業支援担当	
折田 幸寛	セイコーインスツル株式会社 ウォッチ事業部 部長	アドバイザー アドバイザー アドバイザー アドバイザー アドバイザー
河合 哲哉	カシオ計算機株式会社 時計事業部 外装設計部 部長	
岸野 邦彦	古河スカイ株式会社 押出加工品部 部長	
小倉 健一	古河スカイ株式会社 押出加工品部 市場開発グループ 長	

1-3 成果概要

① 成形時の割れ、しわ発生の防止等成形限界に基づいた成形技術の確立

本項目の目標である成形回数の削減、内部欠陥防止などを実現するには、成形限界や不良発生条件について、高精度の予測を実現し、1回の成形で成形限界ギリギリまでの加工をすることや、工程全体を見渡した工程設計を行うことで全体として最適な工程を見出す必要がある。さらにサーボプレスが持つ多彩なモーション制御機能により成形限界を高めることが求められる。サーボプレスによる加工性向上のメカニズムは、現在でも明らかになっているとは言えず、本研究では材料科学的アプローチによるシミュレーション技術により、その手掛かりを明らかにしつつ、実製品での工程数削減を目指したものである。平成25年度は、本技術の実製品量産へ適用を早期に実現するため、複雑3次元形状である腕時計量産品を対象サンプルとする「製品形状試験」を実施した。具体的には、量産品への適用可能性の高いステンレス製の腕時計製品を対象とした。ステンレスは、平成24年度まで対象としたアルミ、チタンに比べて強度が高く、加工硬化の程度も大きいことなどから、不良現象としては金型が割れる「型割れ」が、最も優先して生じるため、「割れ」、「しわ」に追加して検討した。サーボプレスのモーションについては、前半工程に関しては「プログラムモーション」を、後半工程に関しては、「コイニングモーション」を適用し、工程数削減効果の検証を行った。これらの工程途中、工程後に得られた「製品形状試験」サンプルを対象に、金属組織解析、CAE解析などを行い、ミクロスケール・マクロスケール両面からの可視化、定量化を行いデータベース化した。マクロスケールの塑性加工CAEに関しては、平成25年度は、製品形状に対応するため、3次元解析を実施した。また、塑性変形による発熱の影響を検討するため、熱-構造連成解析を実施した。また、本技術を、複雑な製品形状の複数の鍛造工程を対象に適用する場合、加工工程中の形状データや、材料特性データを把握することが重要であることが確認されたため、実サンプルの形状測定からCADデータを作成する技術や、実在組織から材料特性を予測する技術についても追加的に検討を行なった。

①-1 成形品の結晶構造解析、内部応力解析

①-1-1 製品形状成形性試験 型製作・実施

＜林精器＞

板鍛造部品の成形性を調べるための試験様式としては、引張試験など単純なものから、実製品の複雑なものまで、多種多様なものが考えられる。本研究では、平成24年度に基礎データの取得を目的に「単純据込み試験」「部分据込み試験」を実施した。平成25年度には「模型試験」と「実製品形状」を検討したが、実用化を推し進めるため、あえて難易度の高い「実製品形状」を選択した。

また、CAE解析に必要な材料特性を取得するための材料試験として引張試験と据込試験を行った。据込試験については円柱試験片に追加して、立方体試験片を実施した。

①-1-2 サーボプレス・モーションの探索

＜林精器＞

成形性向上に有効なサーボプレス・モーションを見出すため、「モーション収録システム」

により、各種モーションに関する基礎データとして、ストロークと荷重の時刻歴データを取得した。モーションの種類としては、最新研究の知見から成形性向上に有効と見られるパルスモーションとコイニングモーションを中心に本製品への適用する妥当性を検証した。

モーションの選定については、平成 24 年度までに、単純据込みや部分据込を対象に加工速度の影響などの基礎データの収集する他、製品形状を対象した試験から、前半工程にプログラムモーション、後半工程にコイニングモーションを適用するのが有効との成果を得た。平成 25 年度はその成果を活かしてステンレス材の製品形状試験を対象とし、モーションの評価を行い転写性等の最適条件を見出した。

①ー1ー3 包括的金属組織解析（ミクロスケールの可視化）

結晶構造解析、残留応力解析

＜茨城大＞

この項目では、ミクロスケールの可視化として、成形品のミクロ組織情報の取得を行う。金属のミクロ組織を結晶方位情報を含む形で得るために EBSP 測定を必要とした。特にチタン試料の組織観察が難しく、試料の研磨条件等で努力を重ね、化学的エッチングを含む形で EBSP 測定を可能とした。以下にチタンの EBSP 組織観察の測定例を示す。組織観察結果の活用に関しては別項で述べることにしたいが、組織観察面を得る手法として化学エッチングと電解研磨の併用が有効であることが分かった。

また、加工限界に関わるミクロ組織状態を得ることを目的としてマイクロビッカース試験を行い、加工方法との相関を検討した。チタンに関してはサーボプレスによるモーションの影響を調査した結果、モーションにより材料の加工硬化の程度が異なることが発見された。これは加工モーションを工夫することにより生産効率の向上、コストの低減につながるができるということを示す。

①ー2 成形品の内部情報の可視化

この項目では、成形品の内部情報について、塑性加工 CAE を用いたマクロスケールの可視化を行う。ここで、マクロスケールとは成形品の表面と内部の違い、複雑形状部と平坦部など製品形状の特徴点の違いを反映するスケールであり、おおよそmm単位を用い、目安として、0.01～10 mmのスケール範囲を対象とする。鍛造加工で生じる大変形まで実施可能な材料試験として円柱、立方体、リング形状試験の据込み試験から材料特性や摩擦係数を取得し、部分据込試験や製品形状試験を対象とするマクロスケールの可視化を行った。

①ー2ー1 据込試験による材料特性把握と成形性試験の可視化 ＜ハイテックプラザ＞

CAE 解析の精度に対して、材料特性パラメータの影響は極めて大きい。板成形分野で一般に利用される引張試験では試験途中で試験片にくびれが生じるため、ひずみ 0.1 から 0.3 程度までしか試験できないため、大ひずみ域まで試験可能な据込試験による材料特性取得も検討した。形状については立方体形状が最適と判断した。これは、CAE 解析において直交 3 軸の降伏点異方性を表現する材料モデルとの整合性が高いためである。

CAE 解析を実施した結果、実試験・実サンプルの存在しない成形性試験「バーチャル試作」、「バーチャル成形性試験」の可視化が現実的であることが確認できた。

①ー2ー2 シミュレーションモデル検討

＜茨城大＞＜ハイテクプラザ＞

現在の塑性加工 CAE は有限要素法によるものが主流であり、結晶粒以下のスケールでは不均質である金属材料を、より大きなスケールで平均的に均質体と捉えるという大きな仮定のもとで計算をしている。これに対し、近年、材料科学分野では、EBSD などマイクロ組織解析技術の向上や、結晶塑性解析、均質化法などシミュレーション技術の進歩により、ナノ、マイクロレベルの挙動・特性とマクロな機械的特性を相互に結びつける技術が多く報告されており、「マルチスケール」あるいは「スケール間のブリッジング（橋渡し）」をキーワードとする技術群への期待が高まっている。本研究では、これら材料科学的なアプローチの実製品への適用を実現するためのシミュレーションモデルを検討した。

①ー3 複雑形状成形加工高度シミュレーション技術の確立

①ー3ー1 工程設計とサーボプレスの有効利用

＜林精器＞

本技術を複雑な製品形状の複数の鍛造工程を対象に適用する場合、加工工程中の形状データや、材料特性データを把握することが重要であることが確認された。実サンプルの形状測定から CAD データを作成する技術について検討した。製造工程の中の実際の形状をデジタル化、データ化しないとシミュレーションが出来ないことから、3次元デジタイザの活用を実施し、形状測定、CADデータ作成を行った。デジタイザをシミュレーションの入力データとしても、精度検証にも活用でき、高度シミュレーション技術の一部に3次元デジタイザも組み込むべきとの知見が得られた。3次元デジタイザによるモデリングによって、データによる可視化、試作品等の評価、データベースが構築できるため、工程設計の実用性を飛躍的に高めることが明確になった。

①ー3ー2 各工程の変形量の可視化

＜ハイテクプラザ＞

塑性加工 CAE に限らずシミュレーション技術は、特定の物理現象に関する計算を行うものであるため、CAE で不良発生予測を行うには各種不良を物理現象として区別し、種類ごとの発生条件を何らかの物理量で定量的に表現する必要がある。また、本研究開発で対象とする工程は、複数工程からなるため、各工程の変形量や成形限界までの余裕度を全体的に把握可能となる手法が必要である。塑性加工 CAE との親和性が高い延性判定破壊式を利用し、最も破壊危険性が高い部位がどこかを限定する事や、初期ブランク作成の際にせん断加工を「せん断試験」として利用して素材の限界値を求める手法などを検討し、素材の時点を0、不良発生を1とする0～1で限界値を表現できる可能性を見いだせた。

①ー3ー3 加工履歴、熱履歴による金属組織の変化の観察、解析手法

＜林精器＞＜茨城大＞＜ハイテクプラザ＞

本開発で対象とする製品群は、複数工程の焼きなましを繰り返すことに特徴があり、鍛造工程、焼きなましに工程を経る毎に、組織、特性の変化がダイナミックに変化する。一般的な塑性加工 CAE ではこのような組織変化には対応できないため、材料特性データを把握することが解析精度を高めることが確認された。また、加工履歴に関する製造現場の暗黙知などにより、焼きなましの重要性が非常に重要であることが確認されたため、「多結晶

モデル」と組織解析結果を関連付け、実在組織から材料特性を予測する技術「特性予測技術」についても追加的に検討を行なった。加工、熱処理に伴い材料のミクロ組織は変化し、それとともに力学的特性は変化する。加工により変化する因子としては結晶方位（およびその統計的な分布である集合組織）、転位密度（硬さ）などであり、熱処理により変化する因子は結晶粒径、回復再結晶による復旧などである。それらの条件を適切に捉えて加工限界、軟化の程度と結晶粒径とのバランスなどを見極めてプロセスを制御することが大変重要となる。ここではそれらの基礎的な材料学的情報をいかに捉えて可視化するのかということに焦点を絞った。焼きなましの影響を、ミクロ組織からは硬さや、EBSD による結晶粒径分布で、変形特性については焼きなまし試験で把握できることが確認できた。実在組織から材料特性を予測する技術「特性予測技術」についても追加的に検討を行なった結果、「結晶強化モデル」の弱点である実在組織の情報（結晶粒形状寸法など）を反映できない点を解決する手法として、「均質化法」、「イメージベース・モデリング」、「ナノスケール硬さによる特性マッピング」と呼ばれる手法の有効性を確認した。「ナノスケール硬さによる特性マッピング技術」は、本グループ独自のアイデアであり、ナノスケール硬さに応じた材料変形特性を有限要素モデルの領域に割り振って解析モデルを作成する技術である。福島県ハイテクプラザでは、「イメージベース・モデリング」並びに、「均質化法」が可能な「イメージベース/マルチスケール CAE システム」を導入済みであり、これらの技術を用いている。焼きなましの挙動は加工度やミクロ組織に大きく影響を受けることが知られるため、上記技術群を活用した補完研究により、多様な条件の焼きなまし特性のデータベース化を行う必要がある。

② チタンの金型への焼付き・かじりを防止した複雑形状の成形技術の開発

本項目の目標である「焼付き・かじりの防止」、「コーナーR0.1 mm、切削代0.2mm以下の複雑形状」を達成するためには、焼付き・かじりの発生メカニズムを踏まえた不良発生予測、成形限界予測を確立することが必要である。焼付き、かじりは金型と被加工材の接触部で起こる現象であり、その発生は、接触面圧、温度、すべり距離、潤滑などに左右されることが知られるが、現象のきっかけは、いずれも凝集摩擦であるという理解が得られているため、本研究では両者を統合して取り扱う。本研究で優先して実施したステンレス材、製品形状試験の加工では、焼付き、かじりは発生しなかった。これは、焼付き・かじりの発生は、製品形状の影響を強く受けるためである。そこで、本項目では、かじりに関する暗黙知の整理、発生限界を評価するための試験法案の検討、塑性加工 CAE で発生予測を行うための手法について検討を行った。

②-1 成形品の結晶構造解析、材料流動の解析

②-1-1 焼付き、かじり成形性試験の実施<林精器>

製造現場の暗黙知の整理から、焼付き・かじりが発生しやすい部位は製品形状特有の複雑形状部位で発生することが確認されたため、焼付き・かじり再現に特化した成形性試験法案を検討した。しかし、本研究で対象とする変形様式では大荷重負荷になりやすく、平

成 24 年度の予備試験では金型の破損が生じた。焼付き・かじり発生と関連が深い成形性試験としては、スパイクテスト、後方せん孔試験、ボール通し試験などがあるが、いずれも、金型の一部を交換式にしてサンプルとする高コストの試験である。また、試験の種類は多岐に渡り、変形様式に応じた試験が必要であることが本研究の加工は、独特の加工様式であり、独自の試験の必要性が確認できた。平成 25 年度は、製品形状の複雑形状部位の再現を目指した成形性試験を行うための暗黙知ヒアリングを行った。その結果から、焼付き・かじりは、打ち出し工程での発生が多く、対策として金型製作のトライで熟練工が金型の手修正（スベリ）を行っている事が判明した。修正具合に個人差があり、図面化出来なかったために型を作製する度に修正を施していた。可視化図面化出来なかった修正後の金型を 3 次元デジタイザにより測定し CAD データ化できる事が確認出来た。暗黙知を可視化データ化でき、今後のデータ蓄積により熟練工に頼らない工程設計技術確立が可能となった。今後は、熟練工が金型の手修正の効果を CAE 解析で検証し、焼付き・発生のメカニズムを明らかにした後に、本研究の製品形状に対応する成形性試験を実施する。近年では、これら成形性試験の方法を決める際に、塑性加工 CAE を利用することが有効と報告されている。塑性加工 CAE により発生位置を予測することが可能であると判断する。

②-1-2 焼付き・かじり部の観察、解析

＜茨城大＞

実際に据え込みを行った試験片の断面試験の結果と、シミュレーションにより変形ひずみが多い部分について硬度を測定し比較観察を行った。その結果から変形ひずみと硬度との関係に良い対応がみられた。硬さによる加工限界を導入することでどの部分がもうすぐ破壊するのか理解できる事が確認された。

②-2 複雑形状成形加工高度シミュレーション技術の確立

②-2-1 接触部の可視化、解析手法の検討

＜ハイテクプラザ＞

チタンの塑性変形による発熱がアルミに比べ、非常に大きく、焼付き・かじりの発生を誘発する可能性が高い。このため、塑性発熱の発生と熱伝導を考慮できる「熱-構造連成解析」を実施した。2 次元軸対称の部分据え込みを対象とした熱-構造連成解析の計算結果の分布は塑性ひずみの分布とほぼ同じとなる。現時点では、高温時の流動応力や、金型間と被加工材の熱伝導係数が不明であるため、計算の結果は温度上昇による材料の流動応力の低下や金型や被加工物中の熱伝達を無視しているため、過剰な計算結果になっている。今後の補完研究で精度を高めたい。更に、接触部の可視化として、製品形状の 3 次元解析図による解析を実施した。現時点では得られた情報結果から、焼付き、かじり発生に関する判断をするのが最適であると判断する。

②-2-2 シミュレーションモデル検討

＜茨城大＞＜ハイテクプラザ＞

焼付き・かじり発生予測に寄与できるシミュレーションモデルをマクロ・ミクロの両面から検討した。ミクロスケールのシミュレーションの手法としては、表面の組織の結晶方位が凝着現象に与える影響を把握可能と見られる第一原理計算手法の適用を検討した。しかし、滑条件下における焼付き・かじりは、温度や面圧が高まった時に真実接触部で、金

属同士が直接接触する「油膜切れ」をきっかけとすることが明確になったことから、焼付き・かじり発生予測については、マクロ・ミクロのシミュレーション連携の必要性は薄く、マクロ CAE による温度、面圧による発生予測である Archard の式を用いる手法が最適と判断する。暗黙知の整理から量産品にて焼付き・かじりの発生例に関与すると見られるコーナー R 部の組織観察を行った結果、チタン結晶粒径は 0.01~0.1 mm 程度と十分大きく、コーナー形状の R 部寸法目標値 0.1 mm に対し、塑性変形に対する結晶粒構造の影響が無視できないことが分かった。この解決に有効と思われる中間スケールの「多結晶モデル」適用を、量産品にて焼付き・かじりの発生例に関与すると見られるコーナー R 部に対し、中間スケールの「多結晶モデル」適用を検討した。しかし、現時点では、LS-DYNA では多結晶モデルの解析は不可能であった。また、別の CAE 解析ソフトである ANSYS を用いた解析を検討したが、大変形の解析に難があり、必要な解析はできなかった。今後は、補完研究の中で最適な方法案を検討したい。

③ 熟練工に頼らない工程設計技術の開発

③-1 科学的な根拠・データに基づいた工程設計

〈林精器製造〉

現在は、金型の製作にあたり、焼き入れ後にプレス担当者がトライを重ねて手修正を行ってかじり等の対策を行い経験値、暗黙知になっている。3 次元デジタイザにより手による修正の「前と後」の形状測定を行う事により、暗黙知の可視化、定量化で可視化し、CAD データを作成する事ができた。CAD データから「金型電極の放電加工+手修正」を放電レスの「金型材直接マシニングセンタ直彫り」を実現した。

③-2 型トライデータの収集と活用 〈林精器製造、茨城大学、福島県ハイテクプラザ〉

組織解析、CAE 技術による成形限界に基づいた、金型・サーボプレス条件確立により腕時計製品形状でのプレスモーション収録システムを活用しプレステストを行い工数削減効果の確認とデータ収集を行った。チタンの製品形状による工程削減検証結果は、従来プレス工程 10 工程を 開発工程では 6 工程に、焼鈍工程については 6 回が 3 回に半減する事を確認した。ステンレスの製品形状による工程削減検証の結果は、従来プレス工程 8 工程を 開発工程では 5 工程と減らす事ができた。

③-3 試作品の評価及びプロセス評価検証

チタン製品では 現行工数 368 秒が、本事業による開発工程では 258 秒と 110 秒の短縮となった。目標の 1/3 には届いていないが、今後継続的なデータ蓄積、条件の追い込みで工数削減は 1/3 が達成できると判断できる。科学的データによる生産システムの構築に関しては、素材情報把握、組織解析のフィードバック、3次元形状測定等の手法が確立され、金型設計、プレスモーション標準化、シミュレーション・CAE 解析へのシステム構築が可能となった。今後更にデータ蓄積、CAE 解析・組織解析のフィードバックの高度化を継続的に推進する事により、高度シミュレーションが確立できると確信する。目標達成に向けて継続的に開発を実施する計画である。開発推進会議ではアドバイザーから、事業目標達成までの補完開発を推奨された。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

- 林精器製造株式会社 経営管理部技術開発グループ グループ長 大沼 孝
電話 0248-75-3151 FAX0248-73-3227
E-mail t.oonuma@hayashiseiki.co.jp
- 茨城大学工学部 マテリアル工学科 教授 鈴木 徹也
電話 0294-38-5073 FAX0294-38-5226
E-mail 'tetsuya@mx.ibaraki.ac.jp'
- 福島県ハイテクプラザ 技術開発部工業材料科 主任研究員 工藤 弘行
電話 024-959-1737 FAX024-959-1737
E-mail kudo_hiroyuki_01@pref.fukushima.jp

第2章 本論

1 成形時の割れ、しわ発生の防止等成形限界に基づいた成形技術の確立

本項目の目標である成形回数の削減、内部欠陥防止などを実現するには、成形限界や不良発生条件について、高精度の予測を実現し、1回の成形で成形限界ギリギリまでの加工をすることや、工程全体を見渡した工程設計を行うことで全体として最適な工程を見出す必要がある。さらにサーボプレスが持つ多彩なモーション制御機能により成形限界を高めることが求められる。サーボプレスによる加工性向上のメカニズムは、複数の観点による報告がなされているが、現在でも明らかになっているとは言えず、本研究では材料科学的アプローチによるシミュレーション技術により、その手掛かりを明らかにしつつ、実製品での工程数削減を目指したものである。

平成24年度までは、実製品の変形を単純化した「成形性試験」を研究対象サンプルとしたが、平成25年度は、本技術の実製品量産へ適用を早期に実現するため、複雑3次元形状である腕時計量産品を対象サンプルとする「製品形状試験」を実施した。具体的には、量産品への適用可能性の高いステンレス製の腕時計製品を対象とした。ステンレスは、平成24年度まで対象としたアルミ、チタンに比べて強度が高く、加工硬化の程度も大きいことなどから、不良現象としては金型が割れる「型割れ」が、最も優先して生じるため、「割れ」、「しわ」に追加して検討した。

サーボプレスのモーションについては、平成24年度までで得られた研究成果を基に、前半工程に関しては「プログラムモーション」を、後半工程に関しては、「コイニングモーション」を適用し、工程数削減効果の検証を行った。これらの工程途中、工程後に得られた「製品形状試験」サンプルを対象に、金属組織解析、CAE解析などを行い、ミクロスケール・マクロスケール両面からの可視化、定量化を行いデータベース化した。

マクロスケールの塑性加工CAEに関しては、平成24年度は軸対称2次元解析であったが、平成25年度は、製品形状に対応するため、3次元解析を実施した。また、塑性変形による発熱の影響を検討するため、熱-構造連成解析を実施した。

また、本技術を、複雑な製品形状の複数の鍛造工程を対象に適用する場合、加工工程中の形状データや、材料特性データを把握することが重要であることが確認されたため、実サンプルの形状測定からCADデータを作成する技術や、実在組織から材料特性を予測する技術についても追加的に検討を行なった。

① ー1 成形品の結晶構造解析、内部応力解析

①ー1ー1 製品形状成形性試験 型製作・実施

＜林精器＞

板鍛造部品の成形性を調べるための試験様式としては、引張試験など単純なものから、実製品の複雑なものまで、多種多様なものが考えられる。図1-1に成形性試験の分類を示すが、それぞれに一長一短あるため、その実施に関しては目的を明確する必要がある。本研究では、平成24年度に基礎データの取得を目的に「単純据込み試験」「部分据込み

試験」を実施した。平成 25 年度には「模型試験」と「実製品形状」を検討したが、実用化を推し進めるため、あえて難易度の高い「実製品形状」を選択した。

成形性試験の分類

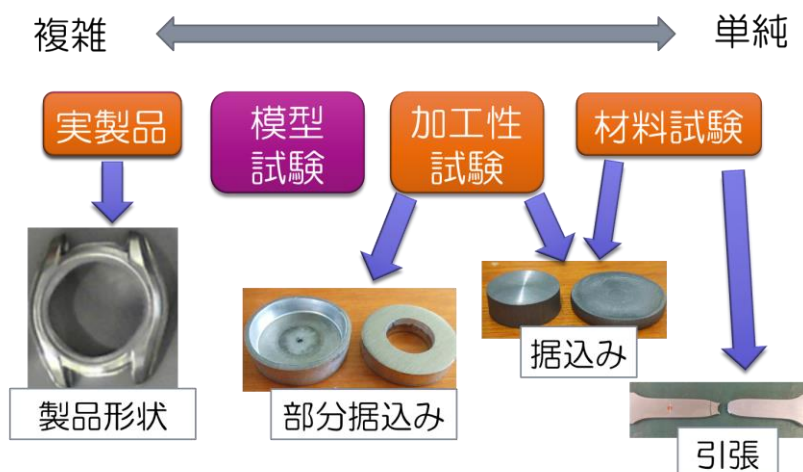


図 1-1 成形性試験の分類

平成平成24年度に「部分据込み試験」は外径40mm、内径20mm、板厚8mmのリング試験片を対象とし、その内径周辺のみを据え込む変形様式とした。アルミとチタンを対象に、内径側の据込み径をφ30、33、35mmの3条件、据込み量は1mm、2mm、4mmの3条件の組合せの9条件の試験を実施し、断面形状寸法の測定などを行った。図1-2に「部分据込み試験」の実施例を示す。

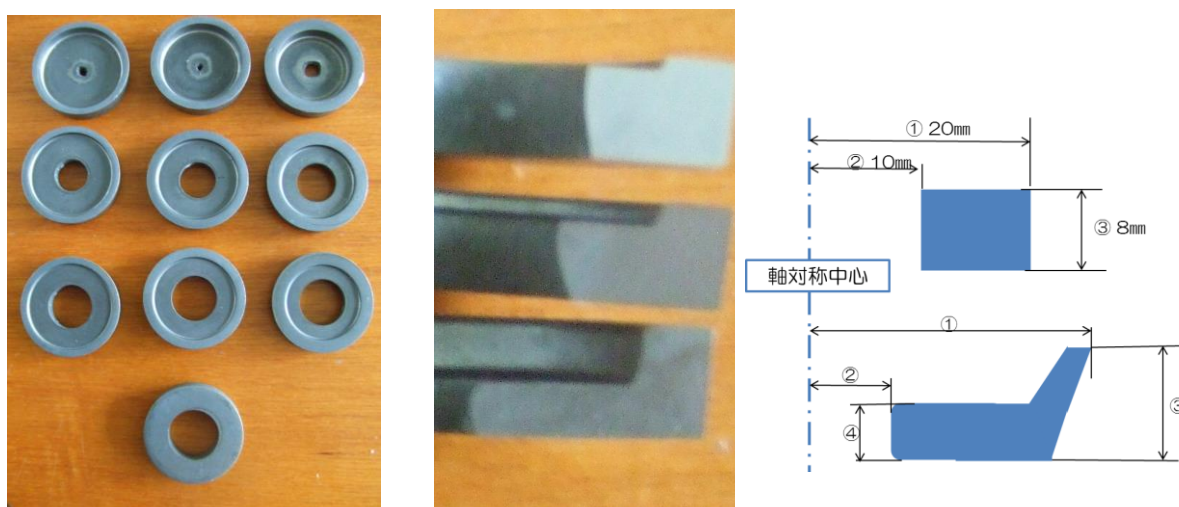


図1-2 部分据込み試験の実施例

平成25年度は、複雑3次元形状である腕時計量産品を対象サンプルとする「製品形状試験」として、量産品への適用可能性の高いステンレス製の腕時計製品を対象とした成形性試験を実施した。ステンレスに関しては、平成24年度まで対象としたアルミ、チタンに比べて強度が高く、加工硬化の程度も大きいことなどから、不良現象としては金型が割れる「型割れ」を生じるため、型割れ解析用の加工試験を実施した。

①ー1ー2 サーボプレス・モーションの探索

<林精器>

成形性向上に有効なサーボプレス・モーションを見出すため、「モーション収録システム」により、各種モーションに関する基礎データとして、ストロークと荷重の時刻歴データを取得した。モーションの種類としては、最新研究の知見から成形性向上に有効と見られるパルスモーションとコイニングモーションを中心に、本製品への適用する妥当性を検証した。

暗黙知の整理により、モーションの良否については、特定の部位の加工後の形状を見ることで判断できることが分かっている。現場では形状の良否を「形状の出具合」と呼んでいる。図1ー3に、形状の出具合を判断する箇所を示す。



図1ー3 形状の良否を判断する箇所

モーションの選定については、24年度までに、単純据込みや部分据込を対象に加工速度の影響などの基礎データの収集する他、製品形状を対象した試験から、前半工程にプログラムモーション、後半工程にコイニングモーションを適用するのが有効との成果を得た。平成25年度はその成果を活かしてステンレス材の製品形状試験を対象とした。

初めに、表2ー1に23年度に基礎実験を実施しアルミ、チタン、ステンレスなど材料加工性と適用モーションの調査の例を示す。

表 1－1 材料加工性と推奨されるサーボモーションの関係

・材料別加工性（平成 23 年度からの結果）

材料	加工性 加工硬化 焼きなまし効果	不良	適用 サーボモーション
アルミ 5000系	柔らかく 加工硬化 小	割れ しわ	プログラム コイニング
チタン 純チタン2 種	アルミに比べ硬い 加工硬化 中 (変形量により焼き鈍し選択)	焼付き かじり	プログラム (打ち出し) コイニング (4回～8回)
ステンレス 316L	硬く塑性変形しにくい 加工硬化し 大 焼き鈍し重要	型割れ (しわ:抱き込み)	プログラム (打ち出し) コイニング (2回～4回)

次に、平成 25 年度実施したステンレス材の製品形状を対象としたモーション選定事例を記載する。

（1）仕上げ工程 1 回目のモーション選定

チタン材同様にプログラムモーションを用いて成形を行い、材料違いによる相違点を確認し、ステンレス材に最適なモーションの選定を行った。1～3 パンチ目は標準工程の 3 工程分を、4 パンチ目以降は疑似的なコイニングモーションを行う様、プログラムを作成した。

表 1－2 モーション設計の例

表 1. パンチ毎の仕様と荷重

パンチ回数	スライド目標位置 (mm)	ストローク数 (回/分)	停止時間 (秒)	荷重 (t)
1	1.50	30.0	0.3	20
2	0.90	30.0	0.3	44
3	0.30	30.0	0.3	79
4	0.02	30.0	0.3	98
5	0.02	30.0	0.3	98
6	0.00(下死点)	30.0	0.3	100

〔成果物〕

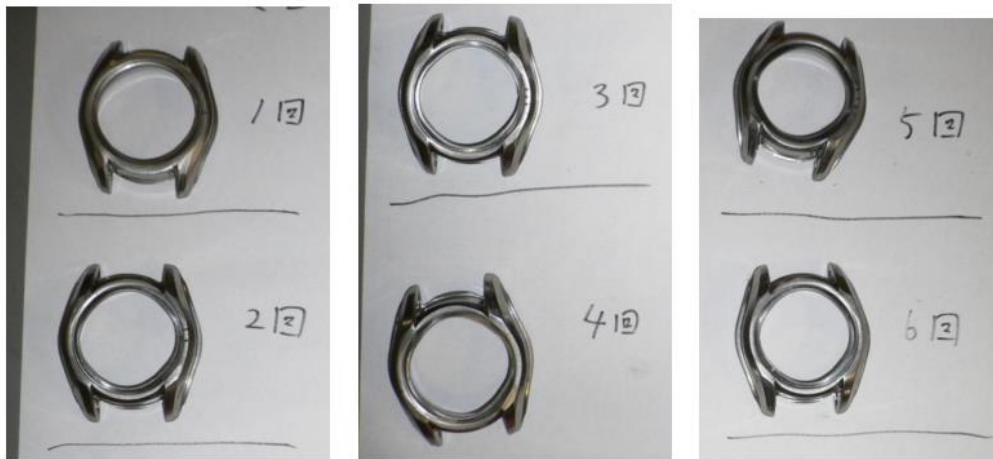


図1-4 加工サンプルの例

- ・ モーションの評価

4パンチ目以降は寸法の変化がほとんど見られず、出具合も変わらない。よって、成形 2 回目のモーションパターンはプログラムモーションによる標準工程 3 工程分+100 t の成形とする。

(2) 仕上げ工程 2 回目以降のモーション選定

コイニングで 1 回成形 6 パンチの成形を行った。(チタン材の実績に併せて回数を設定) 1 パンチずつ成形性の検証を行った。4 パンチ目以降は寸法変化がほとんど見られず、出具合も変わらない。よって成形 2 回目以降の モーションパターンはコイニングモーションによる 4 パンチ成形とする。また、併せて下死点での停止時間による転写性の効果を確認した。停止時間の検証の結果、停止 時間を長くすることで転写性の向上が見られた。(停止時間：0.5sec)

①-1-3 包括的金属組織解析 (ミクロスケールの可視化)

結晶構造解析、残留応力解析

＜茨城大＞

この項目では、ミクロスケールの可視化として、成形品のミクロ組織情報の取得を行う。金属のミクロ組織を結晶方位情報を含む形で得るために EBSD 測定を必要とした。特にチタン試料の組織観察が難しく、試料の研磨条件等で努力を重ね、化学的エッチングを含む形で EBSD 測定を可能とした。以下にチタンの EBSD 組織観察の測定例を示す。組織観察結果の活用に関しては別項で述べることにしたいが、組織観察面を得る手法として化学エッチングと電解研磨の併用が有効であることが分かった。

また、加工限界に関わるミクロ組織状態を得ることを目的としてマイクロビッカース試験を行い、加工方法との相関を検討した。以下にチタン、アルミニウム、ステンレスに関して加工の速度が組織に与える影響を調査した結果を示す。加工速度の影響が最も大きい

のがチタンであり、ステンレス、アルミニウムにも若干の影響がみられる。また、チタンに関してはサーボプレスによるモーシヨンの影響を調査した結果、モーシヨンにより材料の加工硬化の程度が異なることが発見された。これは加工モーシヨンを工夫することにより生産効率の向上、コストの低減につなげることができることを示す。

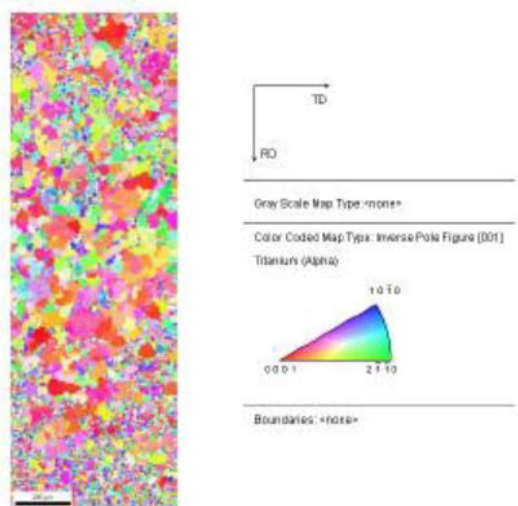


Fig. TiのEBSP測定結果

図 1－5 EBSP 測定例

硬さのひずみ速度依存性

- 硬さのひずみ速度依存性は、チタンにおいては顕著にみられ、アルミニウムおよびステンレスにおいては、あまりみられなかった。
- チタンは加工速度を減少させることで加工硬化を抑えることができる。

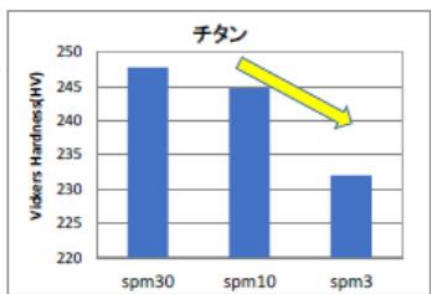


Fig.5(a) 加工速度の違いによる硬さ試験結果

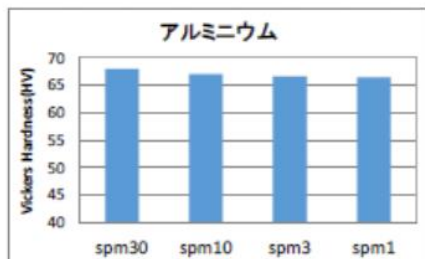


Fig.5(b) 加工速度の違いによる硬さ試験結果

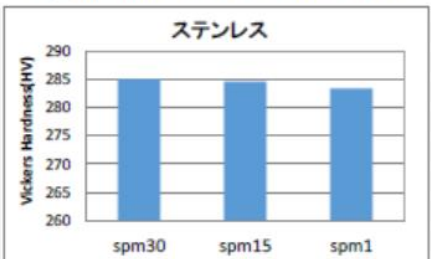


Fig.5(c) 加工速度の違いによる硬さ試験結果

図 1－6 ひずみ速度による硬さ変化の違い

①-2 成形品の内部情報の可視化

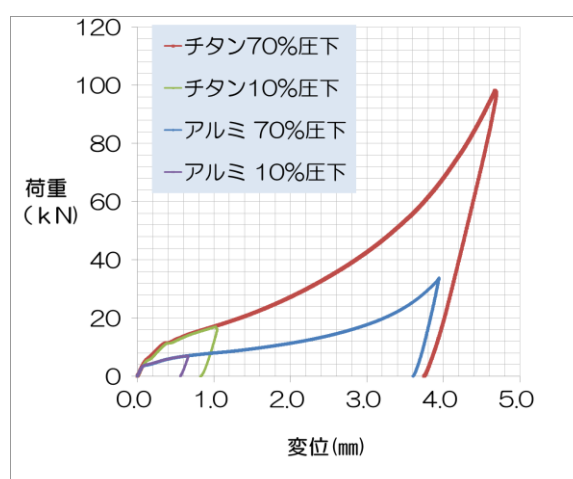
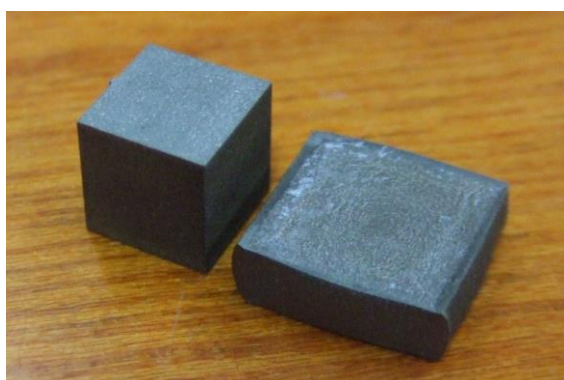
この項目では、成形品の内部情報について、塑性加工 CAE を用いたマクロスケールの可視化を行う。ここで、マクロスケールとは成形品の表面と内部の違い、複雑形状部と平坦部など製品形状の特徴点の違いを反映するスケールであり、おおよそmm単位を用い、目安として、0.01~10 mmのスケール範囲を対象とする。鍛造加工で生じる大変形まで実施可能な材料試験として円柱、立方体、リング形状試験の据込み試験から材料特性や摩擦係数を取得し、部分据込試験や製品形状試験を対象とするマクロスケールの可視化を行った。

①-2-1 据込試験による材料特性把握と成形性試験の可視化

<ハイテクプラザ>

CAE 解析の精度に対して、材料特性パラメータの影響は極めて大きい。板成形分野で一般に利用される引張試験では試験途中に試験片にくびれが生じるため、ひずみ 0.1 から 0.3 程度までしか試験できないため、大ひずみ域まで試験可能な据込試験による材料特性取得も検討した。形状については立方体形状が最適と判断した。これは、CAE 解析において直交 3 軸の降伏点異方性を表現する材料モデルとの整合性が高いためである。

図 ①-2-1 (左) は、据込試験に用いた立方体試験片である。立方体試験片は、3 辺を素材の板厚である 5 mm や 7 mm に合わせた立方体とした。①-2-1 (右) は、アルミとチタンについて 5 mm 立方体試験片に対する据込試験結果である。試験はスプリングバック特性の把握のため、除荷時も測定している。摩擦の影響を極力排除するため、テフロンシートを用いている。最大で 70%の圧下率を得ており、真ひずみ表現では 1.2 までの大ひずみまでの特性を得ることに成功した。グラフ変曲点は、圧縮耐力に対応する。概ね引張試験と類似の関係性を得ており、引張試験の代わりに据込試験を利用することは概ね問題なさそうである。



図①-2-1 立方体据込試験サンプル(左)と試験結果(右)

鍛造加工のように非常に短い時間で大きな変形、すなわち大きなひずみ速度における材料特性は、ゆっくりした変形による静的な材料特性とは異なることが知られる。この特徴は、材料特性の「ひずみ速度依存性」と呼ばれる。また、材料特性は温度によっても変動するし、この特徴を「温度依存性」と呼ぶ。鍛造加工に関して、高精度の CAE 解析を実現するには、ひずみ速度依存性、温度依存性を考慮する必要がある。本家級では試行錯誤の結果、温度依存性ならびに速度依存性の試験は専用の設備が無いと実施が困難であることが明らかとなったため、今後の補完的な研究が必要である。

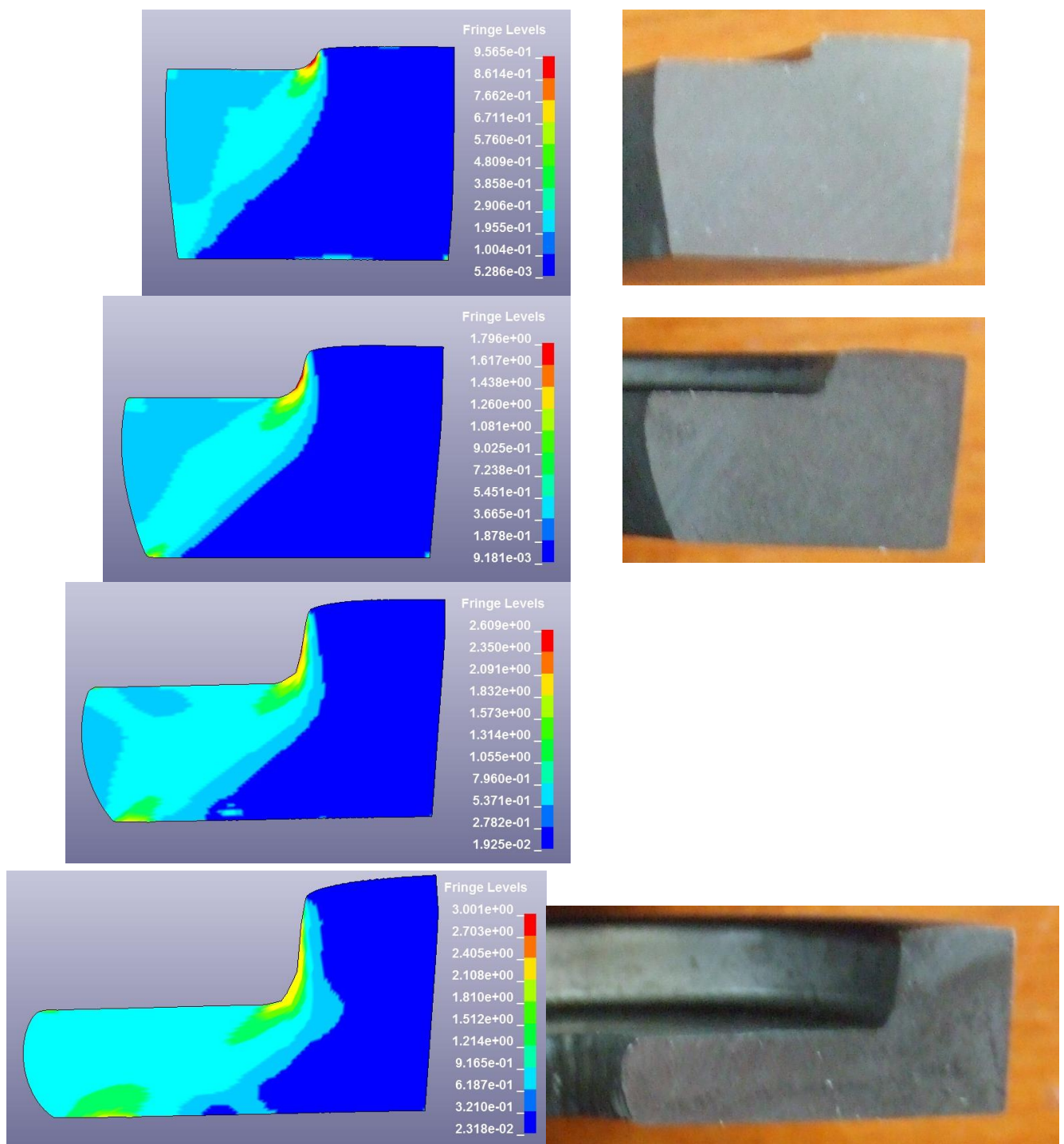
・摩擦特性について

材料特性と並んで、CAE 解析の精度に影響するのが、摩擦特性である。塑性加工分野で実加工における摩擦特性を把握する手法としては、リング圧縮試験による方法がよく知られている。本研究では、類似のリング試験片を部分据え込み試験として実施しているため、同一の試験片を利用したリング圧縮試験を実施し、逆解析手法により摩擦特性を算出し、実工程の離型剤存在下での摩擦係数は 0.14 程度と同定した。また、材料特性と摩擦特性を同時に逆同定する手法も確立した。

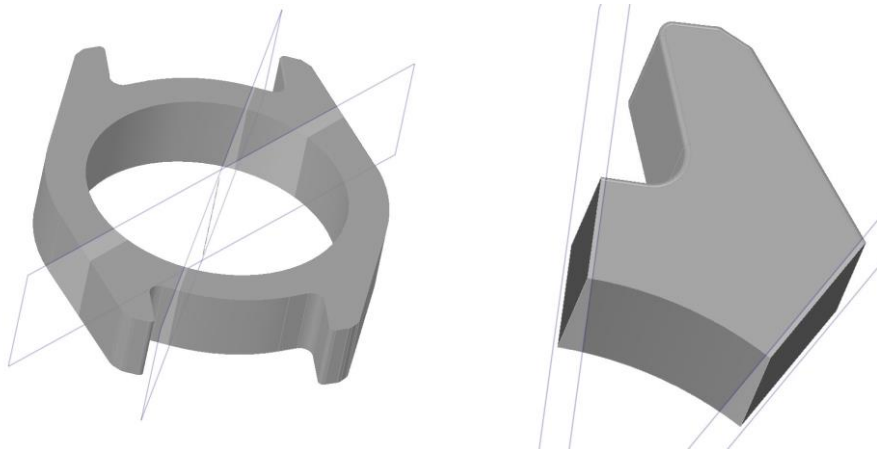
・成形性試験の可視化

以上で得られた物性値を元に、図①-2-2に「部分据え込み試験」に対するマクロスケールの可視化の例を示す。チタンφ30の条件で、上から1mm、2mm、3mm、4mm圧下させた後に除荷した時点の塑性ひずみを表示した場合である。このように、概ね実変形と一致することが確認できる。ここで、3mm圧下の条件は、実サンプルが無い条件であるが、前後の結果より一定の信頼性があると考えてよく、実試験・実サンプルの存在しない「バーチャル試作」、「バーチャル成形性試験」が現実的であることが確認できた。

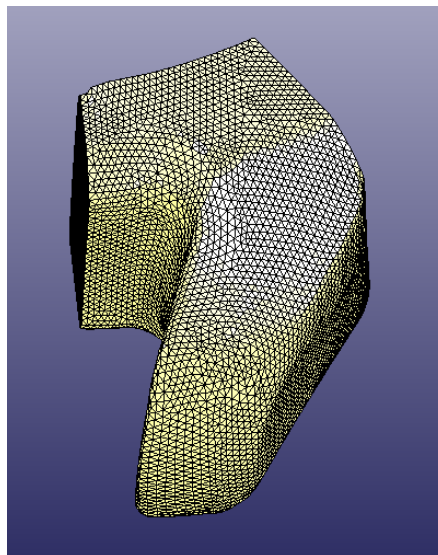
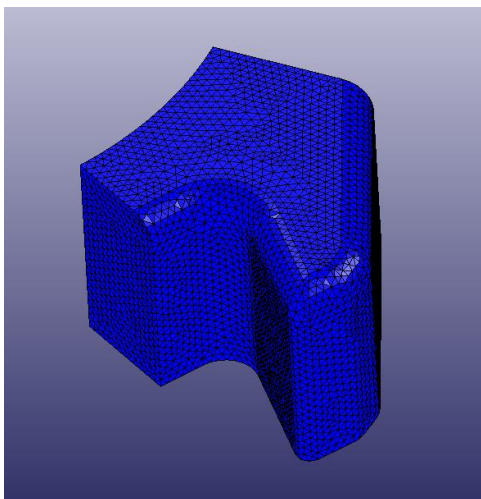
次に、製品形状試験では複雑な形状を計算するためには、3次元解析が必要である。3次元解析をするにあたり、実製品のモデリング技術が必要になったため、3次元デジタルやX線CTを利用した手法も検討した。また、3次元解析では計算量が膨大になるため、解析モデルの工夫も必要である。図1-2-3は、平成25年度に導入したCAD修正ソフトにより、ブランク形状から重要な40度だけを切り取った例である。図1-2-4は解析事例であるが、十分に加工の良否が判断できるほど精密なモデルでの解析が実現できた。本解析ではブランクの角が解析自体にも悪影響を及ぼしたため、ブランク角に曲率を付けることでより正確な解析が可能となった。



図①ー２ー２ 部分据え込み試験解析例と対応する試験片断面（チタンφ30 mm）
上から 1 mm、2 mm、3 mm、4 mm 圧下の場合

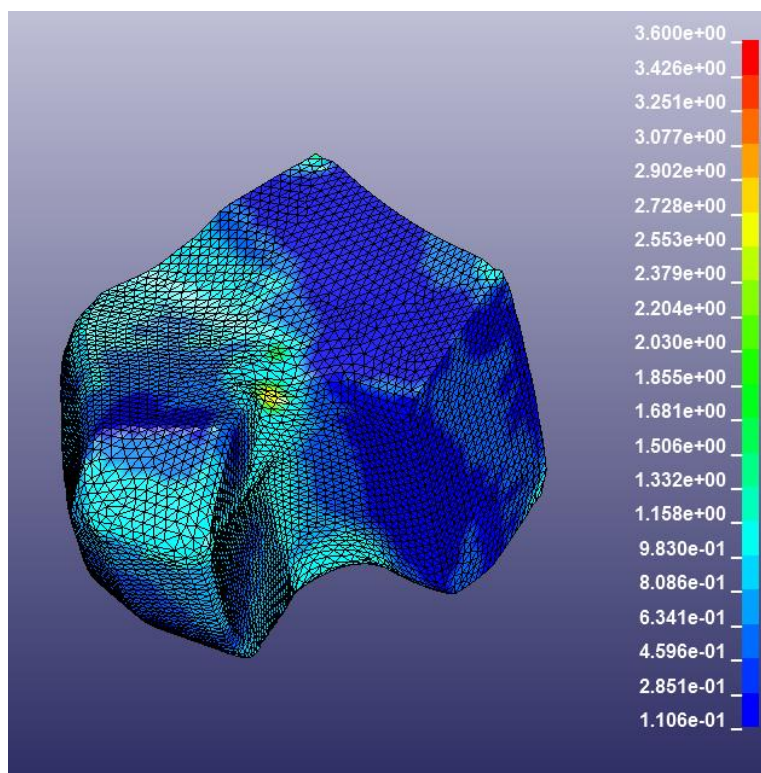


図①－２－３ 部分モデルによる３次元解析の例

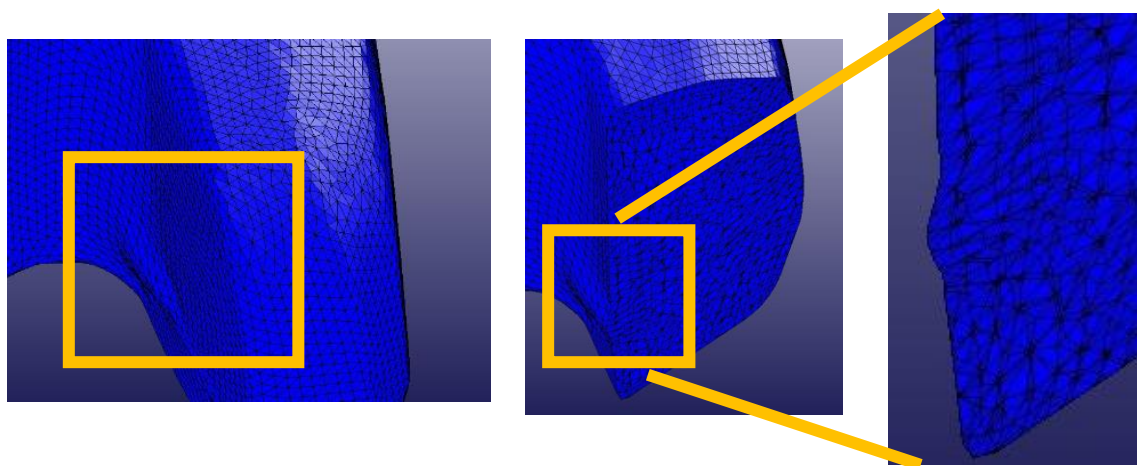


図①－２－４ 部分モデルによる３次元解析の例（左：加工前、右：加工後）

図①-2-5 は塑性ひずみ分布図であるが、実際に割れが生じる危険性が高い場所で高い値が示され、製品形状試験の可視化についてもバーチャル試験の可能性を確認した。また、図①-2-6はしわの評価事例であり、製品の一部を切断、あるいは、断面表示した例である。解析の形状精度を高めることで、「しわ」については表面の形状で直接評価した方が妥当と判断する。



図①-2-5 塑性ひずみ分布図



図①-2-6 しわの評価事例

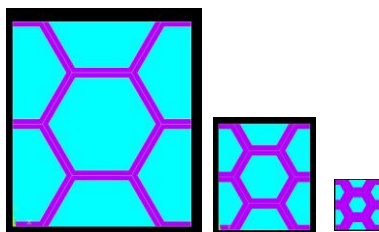
①-2-2 シミュレーションモデル検討

＜茨城大＞＜ハイテクプラザ＞

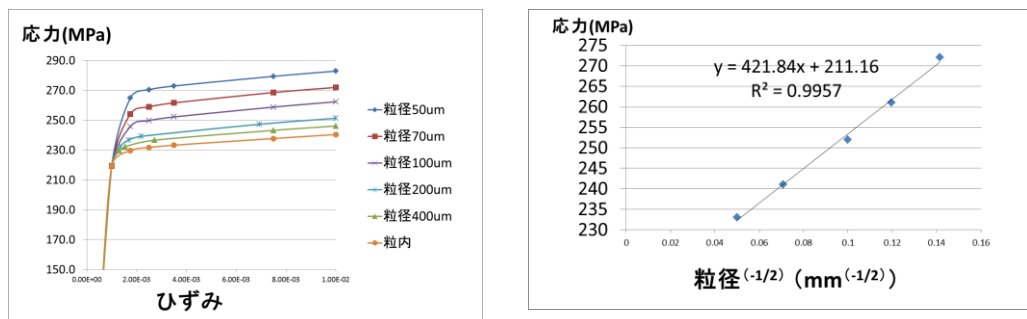
現在の塑性加工 CAE は有限要素法によるものが主流であり、結晶粒以下のスケールでは不均質である金属材料を、より大きなスケールで平均的に均質体と捉えるという大きな仮定のもとで計算をしている。ナノ、ミクロレベルの挙動・特性とマクロな機械的特性を相互に結びつける「マルチスケール」的な観点、材料科学的なアプローチの実製品への適用を実現するためのシミュレーションモデルを検討した。

ミクロ-マクロ間の連携を可能とする中間スケールの材料モデルとして、複数の結晶粒を対象とした「多結晶モデル」適用し。金属組織観察・解析で得られるミクロ情報などをマクロスケールの弾塑性 CAE に反映させる手法を用いる方針を決定した。

本研究では、図①-2-7に示す結晶粒界近傍の物性値を変化させる手法（粒界近傍強化モデル）を採用することとした。このモデルでは粒界近傍で強化された幅を $10\mu\text{m}$ 程度であり、粒径によらず一定と仮定し、粒内より粒界近傍の方が高い耐力となる特性を仮定した。多結晶の金属材料では、降伏点が、結晶粒径の $(-1/2)$ 乗に比例して強度上昇するという「ホール-ペッチの関係」が知られる。これは、結晶粒が細かくとなると降伏点強度が上昇する「結晶粒微細化による強化」を説明するものである。本解析モデルで粒径 $50, 70, 100, 200, 400\mu\text{m}$ の計算を行い「ホール-ペッチの関係」が成り立つか検証した。図①-2-8に、粒界強化モデルによる計算例として、図左に粒径の違いによる耐力点の変化、図右にホール-ペッチ関係の検証を示す。このモデルにて高い相関係数で「ホール-ペッチの関係」を満たすことが確認できた。



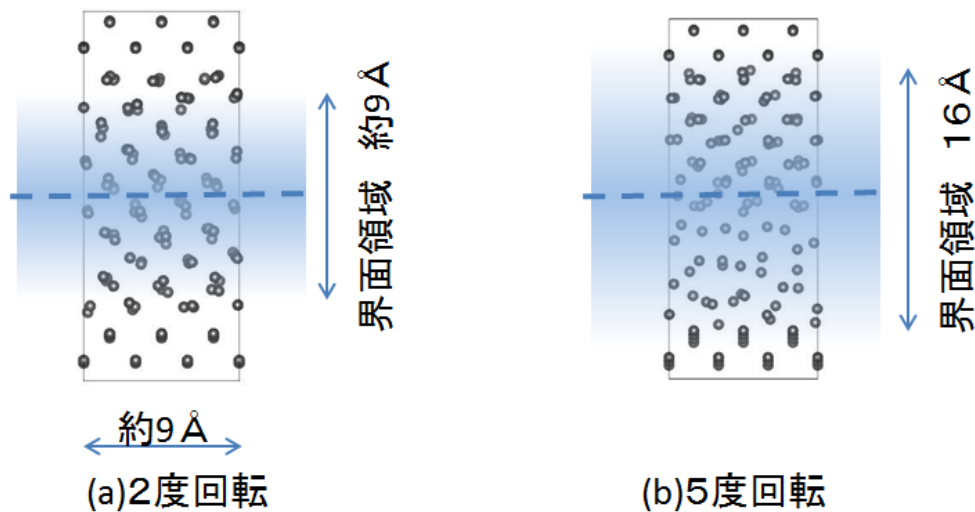
図①-2-7 粒界近傍強化モデルの例（左：粒径 $200\mu\text{m}$ 、中： $100\mu\text{m}$ 、右： $50\mu\text{m}$ ）



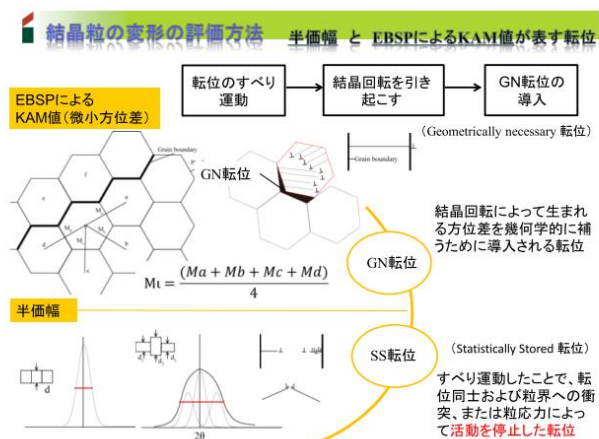
図①-2-8 粒界強化モデルによる計算例

（左：粒径の違いによる耐力点の変化、右：ホール-ペッチ関係の検証）

この手法に関し、妥当な物性値の付与し信頼性を向上させるため、分子動力学を用いて結晶粒界近くの界面から粒内方向への構造の乱れを評価した。この結果、界面は構造的には「面」ではなく、「領域」であることが示されたが、その幅は、硬さ試験結果で知られる 10 μm より大きくスケールが異なる。多結晶体における粒界強化のメカニズムは、かつては、粒界に蓄積した転位による応力集中の影響などと説明されていたがこれを裏付ける実験的根拠が乏しく、現在では、結晶粒界近傍に転位密度の高い領域が形成されるためとの見方が主流となっている。よって、「粒界近傍強化モデル」の近傍領域の幅は、結晶構造の乱れの寸法ではなく、転位密度が高い領域と関連するパラメータとすべきである。多結晶体の変形では、図①－2－10 に示すように、結晶粒界近傍に GN 転位が生じることが知られており、EBSP による KAM 値と「粒界近傍強化モデル」の近傍領域の幅を関連付ける検討も将来的には有望と結論付けられる。



図①－2－9 分子動力学による解析例



図①－2－10 EBSP による KAM 値と GN 転位の関係

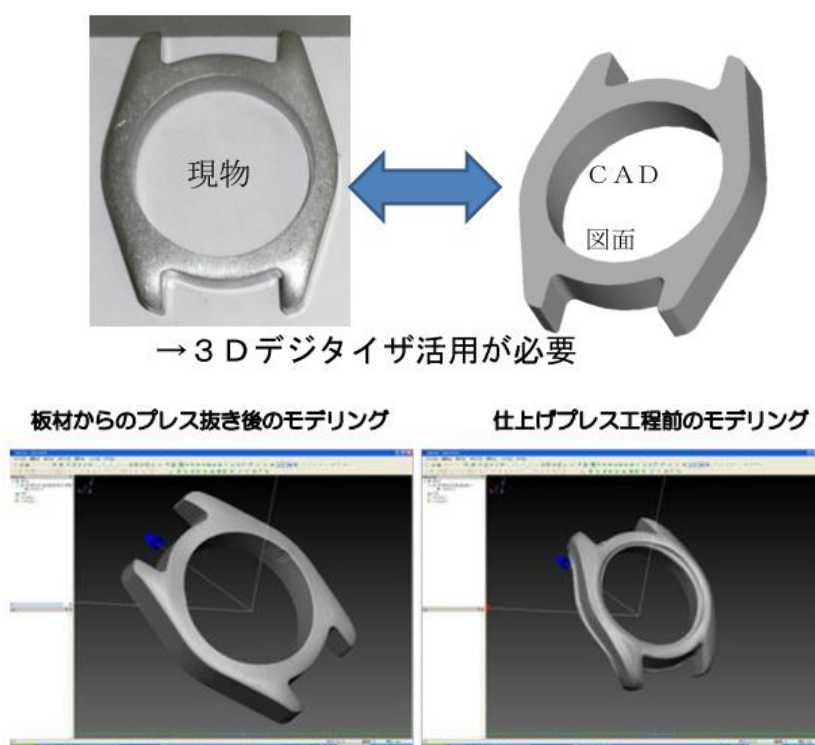
① ー 3 複雑形状成形加工高度シミュレーション技術の確立

①ー 3ー 1 工程設計とサーボプレスとの有効利用

＜林精器＞

本技術を複雑な製品形状の複数の鍛造工程を対象に適用する場合、加工工程中の形状データや、材料特性データを把握することが重要であることが確認された。実サンプルの形状測定から CAD データを作成する技術について検討した。現在の製造工程の中では、実際の製品形状の現物には CAD 図面には無い R やテーパが存在していることが確認された。製造工程の中の実際の形状をデジタル化、データ化しないとシミュレーションが出来ない事から、3次元デジタイザの活用を実施し、形状測定、CAD データ作成を行った。デジタイザをシミュレーションの入力データとしても、精度検証にも活用でき、高度シミュレーション技術の一部に3次元デジタイザも組み込むべきとの知見が得られた。

現工程では、加工工程の途中での数か所の寸法測定と、過去の外観サンプルとの比較でプレス製品の出来具合を判断しているが、3次元デジタイザによるモデリングによって、データによる可視化、試作品等の評価、データベースが構築できるため、工程設計の実用性を飛躍的に高めることが明確になった。



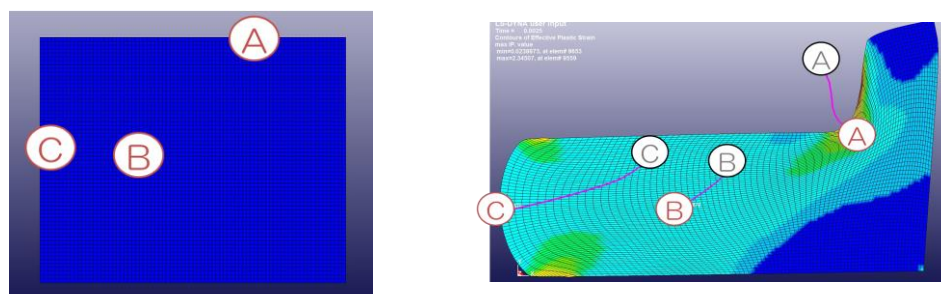
図①ー 3ー 1 現物と CAD の形状の違いを解消する 3D デジタイザによるモデリング

①－３－２ 各工程の変形量の可視化

＜ハイテクプラザ＞

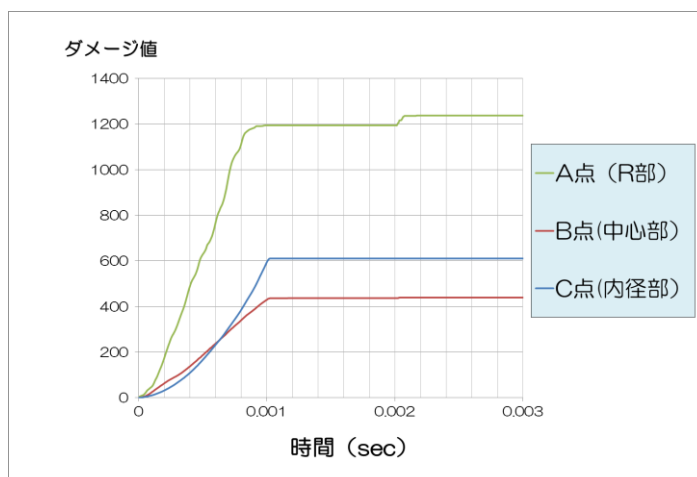
塑性加工分野における過去の知見により、「割れ」は物体全体に渡り塑性変形が大きく広がった後に生じる「延性破壊」であることが知られており、延性判定破壊式を利用する方法が実績を挙げている。延性判定破壊式は、加工開始時から破断時までの積分を行い、蓄積的な損傷値である「ダメージ値」を計算し、ある閾値に達したら破壊と判定することから、時刻ごと、要素ごとに結果出力可能な塑性加工 CAE との親和性が高く、どの部位が最も破壊危険性が高いかを明らかにすることが可能である。

図①－３－２に示す代表的な３ポイントについて、「ダメージ値」計算例を示す。A 点は R 部、C 点は内径部、B 点は断面中心付近である。チタンφ35、3 mm 圧下の結果である。プレスモーションは 0 秒から 0.001 秒までが等速の圧下、0.002 秒までが停止、0.003 秒まで等速で除荷である。ダメージ値の算出は Cockcroft & Latham の式により行った。ダメージ値の算出は Cockcroft & Latham の式により行う。



図①－３－２ 延性破壊ダメージ値の算出ポイント
(左：加工前、右：加工後)

この結果、A 点、B 点、C 点での積分値は、それぞれ、1237、439、611 (単位：MPa) と定量的な比較を可能とし、R 部のダメージ値が飛びぬけて大きいことが確認できる。図①－３－３はダメージ値を時刻歴変化として表示した場合の結果である。



図①－３－３ 特徴点におけるダメージ値の時刻歴変化

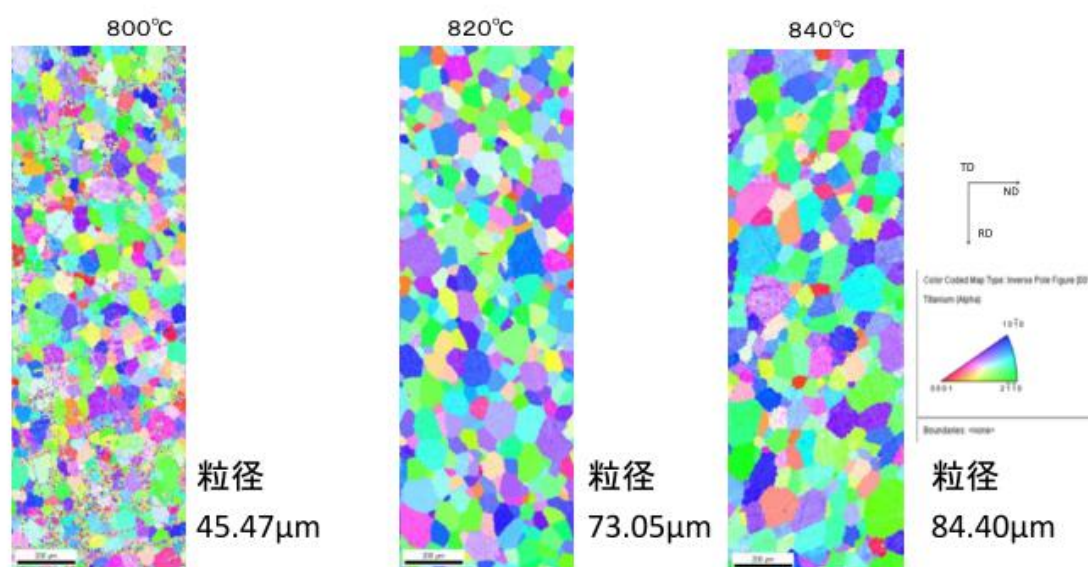
①－3－3 加工履歴、熱履歴による金属組織の変化の観察、解析手法

＜林精器＞＜茨城大＞＜ハイテクプラザ＞

本開発で対象とする製品群は、複数工程の焼きなましを繰り返すことに特徴があり、鍛造工程、焼きなましに工程を経る毎に、組織、特性の変化がダイナミックに変化する。一般的な塑性加工 CAE ではこのような組織変化には対応できないため、特に2工程目以降の材料特性データを把握することが解析精度を高めることが確認された。

加工、熱処理に伴い材料のミクロ組織は変化し、それとともに力学的特性は変化する。熱処理により変化する因子は結晶粒径、回復再結晶による復旧などである。熱処理に伴う結晶粒径の変化を EBSP で捉えたものを示す。熱処理温度が高くなるほど結晶粒径が大きくなっていることが分かる。また、変化は小さいが結晶方位の分布にもやや変化が認められる。

多結晶の場合、隣り合う結晶粒とのひずみの連続性が重要となるため、粒界近傍と粒内では異なる変形挙動を示し、連続性を保つために必要な GN 転位が生じる。この粒界近傍と粒内の変形の差をいかに見積もるかが重要となると思われる。本研究では以上により、焼きなましの影響を、ミクロ組織からは硬さや、EBSD による結晶粒径分布で、変形特性については焼きなまし試験で把握できることが確認できた。これらの情報は、「結晶強化モデル」にて統合的に扱うことが可能であり、2工程目以降の材料特性の把握が可能であることを示した。これにより2工程目以降の解析精度向上が見込まれる。



図①－3－4 焼きなましによる組織の変化

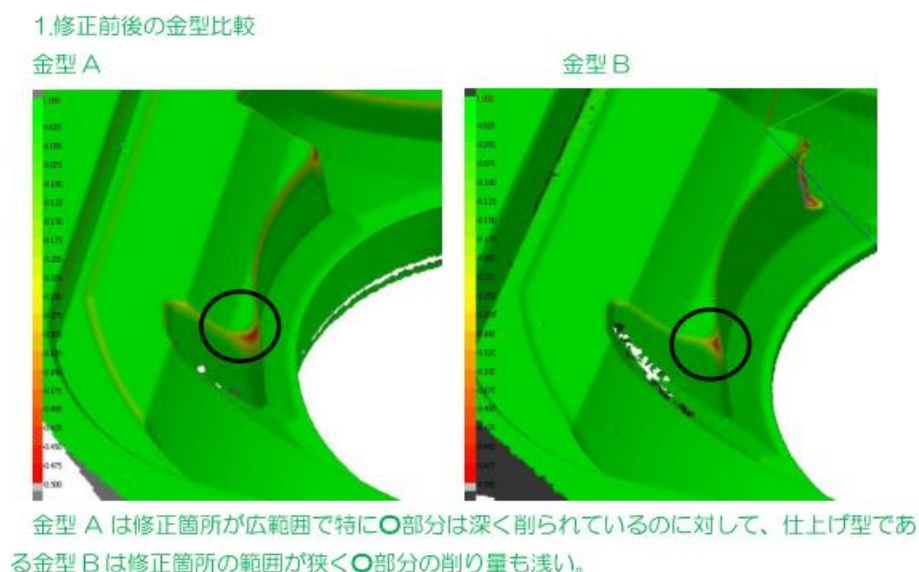
2 チタンの金型への焼付き・かじりを防止した複雑形状の成形技術の開発

本項目の目標である「焼付き・かじりの防止」を達成するためには、焼付き・かじりの発生メカニズムを踏まえた不良発生予測、成形限界予測を確立することが必要である。焼付き、かじりは金型と被加工材の接触部で起こる現象であり、その発生は、接触面圧、温度、すべり距離、潤滑などに左右されることが知られるが、現象のきっかけは、いずれも凝集摩擦であるという理解が得られているため、本研究では両者を統合して扱う。

②-1 成形品の結晶構造解析、材料流動の解析

②-1-1 焼付き、かじり成形性試験の実施 <林精器>

製造現場の暗黙知の整理から、焼付き・かじりが発生は、打ち出し工程での発生が多く、対策として金型製作のトライで熟練工が金型の手修正（スベリ）を行っている事が判明した。修正具合に個人差があり、図面化出来なかったために型を作製する度に修正を施していた。可視化図面化出来なかった修正後の金型を3次元デジタイザにより測定しCADデータ化できる事が確認出来た。暗黙知を可視化データ化でき、今後のデータ蓄積により熟練工に頼らない工程設計技術確立が可能となった。



図②-1-1 焼きなましによる組織の変化

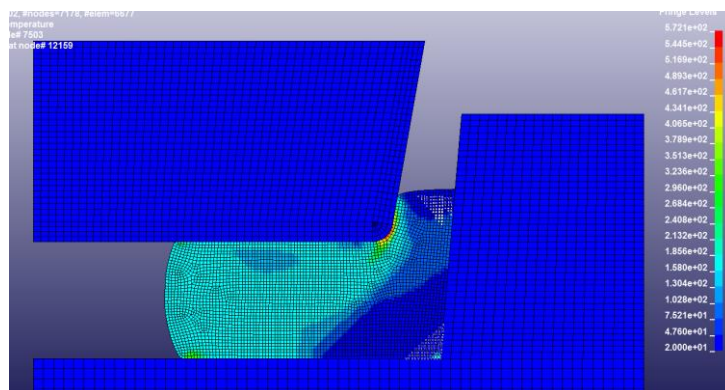
②-2 複雑形状成形加工高度シミュレーション技術の確立

②-2-1 接触部の可視化、解析手法の検討

<ハイテクプラザ>

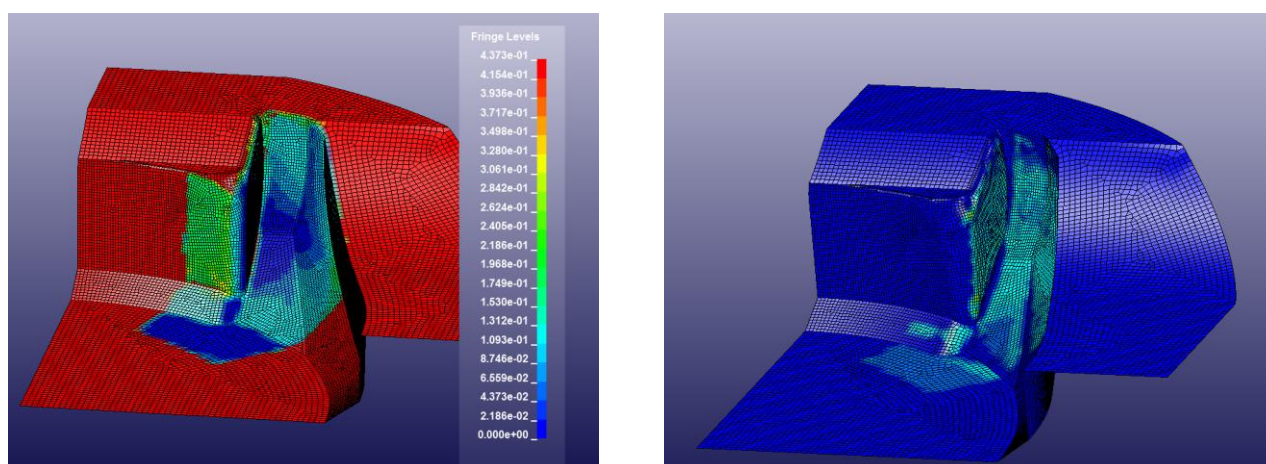
チタンの塑性変形による発熱がアルミに比べ、非常に大きく、焼付き・かじりの発生を誘発する可能性が高い。このため、塑性発熱の発生と熱伝導を考慮できる「熱-構造連成解析」を実施した。2次元軸対称の部分据込みを対象とした熱-構造連成解析の結果例を

図②－２－１に示す。計算結果の分布は塑性ひずみの分布とほぼ同じとなる。現時点では、高温時の流動応力や、金型間と被加工材の熱伝導係数が不明であるため、計算の結果は温度上昇による材料の流動応力の低下や金型や被加工物中の熱伝達を無視しているため、過剰な計算結果になっている。今後の補完研究で精度を高めたい。



図②－２－１ 熱 - 構造連成解析の例

次に、接触部の可視化として、製品形状の３次元解析図による例を、図②－２－２に示す。図左はコンタクトギャップを、図右は接触面圧を示したものである。現時点ではこれらの情報から、焼付き、かじり発生に関する判断をするのが最適である。



図②－２－２ 熱 - 構造連成解析の例

次に、焼付き・かじり発生予測に関する限界パラメータについて検討する。「焼付き」、「かじり」現象は、凝集摩擦をきっかけとし、微小な磨耗物の蓄積による摩擦係数の増加、摩擦力の増加という経緯をたどることが知られ、その発生には、面圧、温度、すべり距離などが影響するという理解が得られている。また、チタンと鋼材

は親和性が高く、直接接触した場合は凝着が生じるため、潤滑剤が利用される。以上より、本開発品では、「油膜切れ（潤滑剤切れ）」が起こるかどうかにより、すなわち、マクロな視点により限界パラメータを算出する方針とする。

焼き付き・かじりに関する成形限界予測に関しては、凝着摩耗をきっかけとするメカニズムから考えて、金型摩耗に関する寿命予測式・摩耗予測式である Archard の式を用いた。

$$W_a = \alpha PL$$

ここで P は面圧、L は摺動距離、 α は定数項である。上記式は基本式であり、CAE 解析を利用する場合、面圧やすべり速度の時刻歴変化を計算できる。

②-2-2 シミュレーションモデル検討

＜茨城大＞＜ハイテクプラザ＞

焼付き・かじり発生予測に寄与できるシミュレーションモデルをマクロ・ミクロの両面から検討したが、そのメカニズムの検討から、マクロ CAE による温度、面圧による発生予測である②-2-1 の Archard の式を用いること手法が最適と判断する。

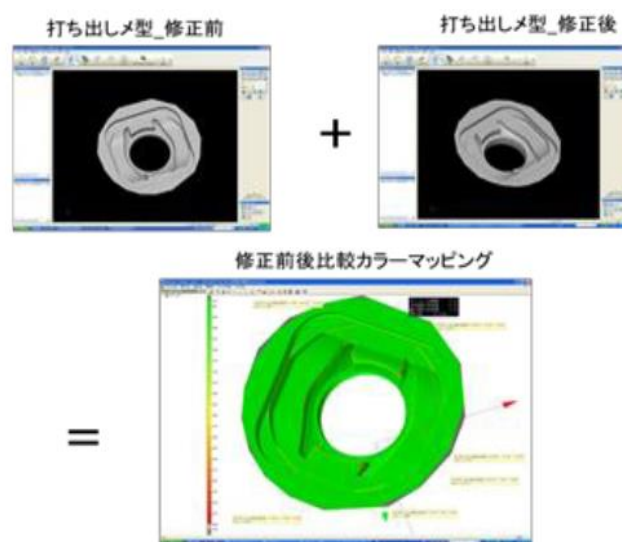
次に、量産品にて焼付き・かじりの発生例に関与すると見られるコーナー R 部に対し、中間スケールの「多結晶モデル」適用を検討した。しかし、現時点では、LS-DYNA では多結晶モデルの解析は不可能であった。今後は、補完研究の中で最適な方法案を検討したい。

3 熟練工に頼らない工程設計技術の開発

③ー1 科学的な根拠・データに基づいた工程設計

〈林精器製造〉

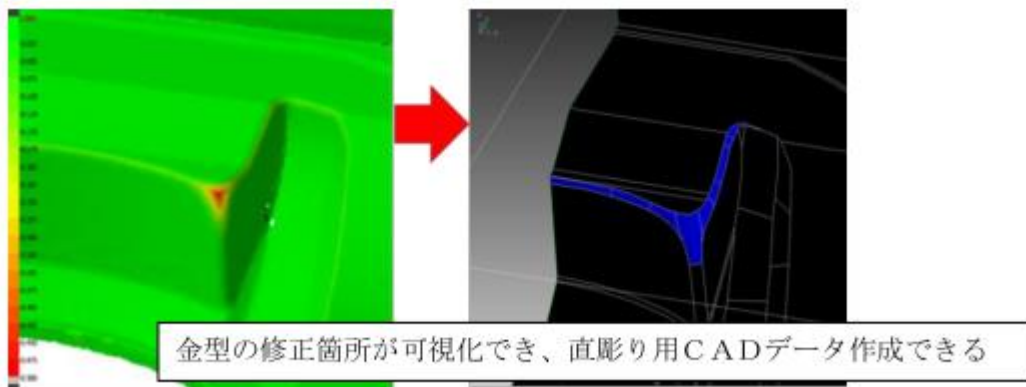
現在は、金型の製作にあたり、焼き入れ後にプレス担当者がトライを重ねて手修正を行ってかじり等の対策を行っている。経験値、暗黙知になっている。3次元デジタイザにより手による修正の「前と後」の形状測定を行う事により、暗黙知の可視化、定量化で可視化し、CAD データを作成する事で、最終的に、CADデータから「金型電極の放電加工＋手修正」を放電レスの「金型材直接マシニングセンタ直彫り」を実現できた。



〈修正部拡大〉

左：現物を測定したモデルと設計データの比較

右：設計データと異なる部分に面を張り直して作ったCADデータ

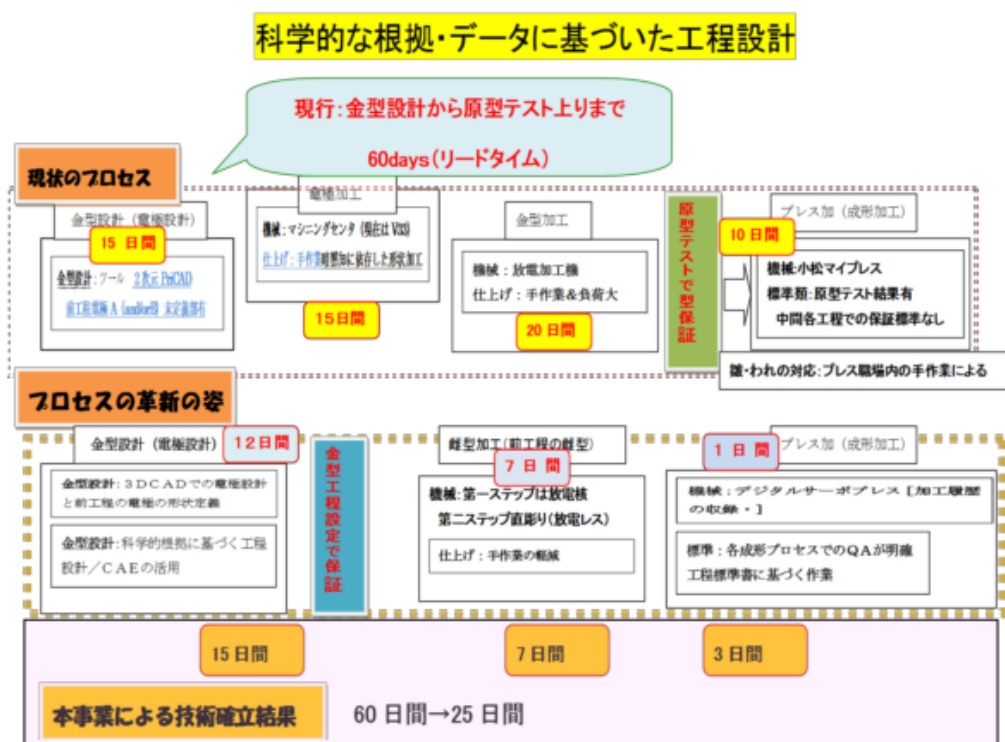


「金型設計のリードタイム60.日間を1/3にする」について

金型設計では、3次元デジタイザの採用によりCADデータ化、形状定義が可能となった。現在は、3次元CADの取り扱いに手間取り、まだ15日かかっているが、慣れとデータ蓄積があれば12日を達成できると判断する。

金型加工については 放電加工からマシニングセンタによる金型材料直彫りを可能とし20日間を7日間に達成できた。

原型テストと呼んでいるプレステストでは、サーボプレスによる標準化ができ、熟練工による型修正が無くなった事により、3日間に短縮できた。平成25年度は、この事業の最大の目標である、量産品の工程を減らす、ということを重点的に実施しました。結果は、目標60日間に対して25日間と目標に近いリードタイム短縮を実現できた。本事業の目標の、1/3という目標値は、これからのデータ蓄積、CAE解析・組織解析のフィードバックにより確実に達成できると判断する。



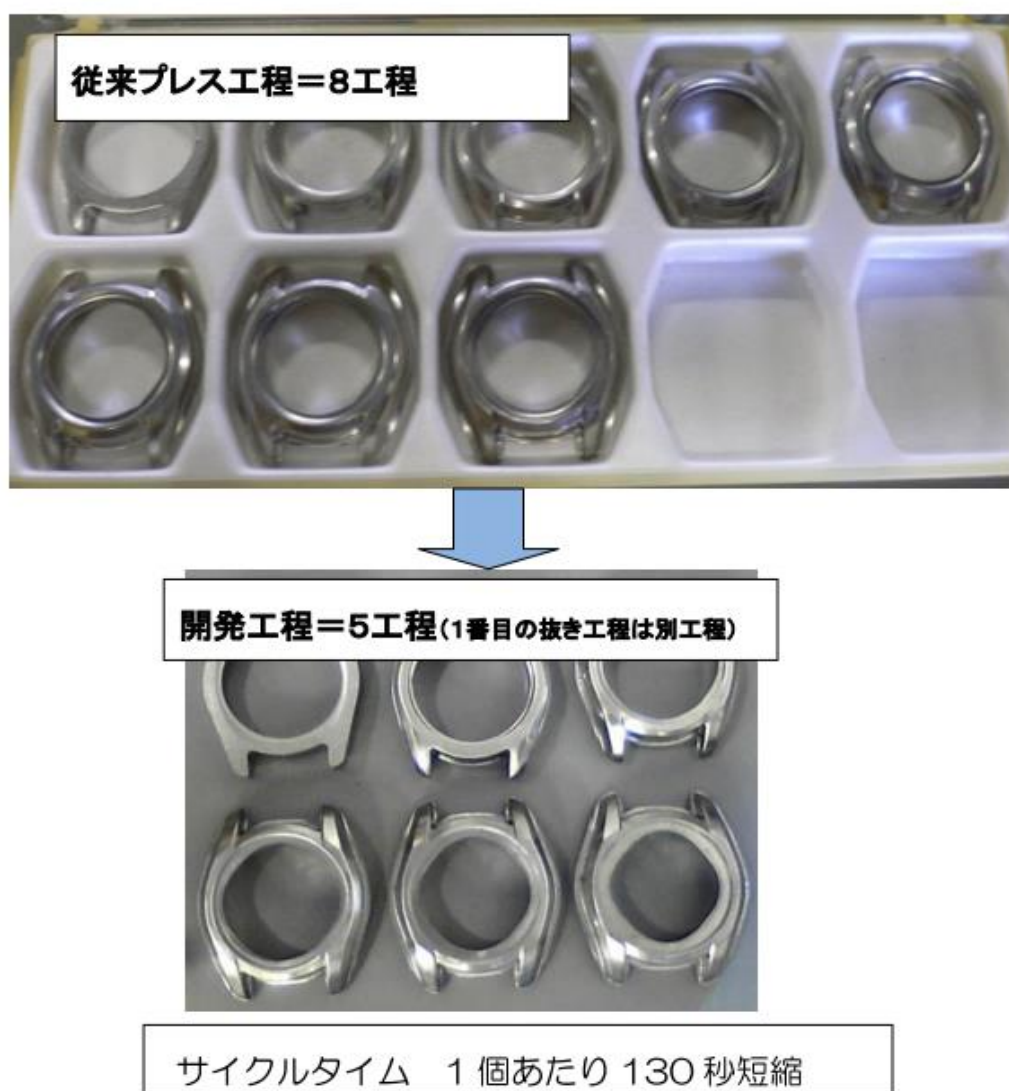
③ー2 型トライデータの収集と活用〈林精器製造、茨城大学、福島県ハイテクプラザ〉

組織解析、CAE技術による成形限界に基づいた、金型・サーボプレス条件確立により腕時計製品形状でのプレスモーション収録システムを活用しプレステストを行い工数削減効果の確認とデータ収集を行った。

チタンの製品形状による工程削減検証結果は、従来プレス工程10工程を 開発工程では6工程に、焼鈍工程については 6回が3回に半減する事を確認した。

ステンレスの製品形状による工程削減検証の結果は、従来プレス工程8工程を 開発工程では5工程と減らす事ができた。

〈ステンレス製品形状成形回数削減テスト結果〉



③-3 試作品の評価及びプロセス評価検証

プレス工程全体での工数削減効果の検証をチタン製品形状で実施した。このチタン製品では 現行工数368秒が、本事業による開発工程では258秒と 110秒の短縮となった。目標の1/3 には達していないが、今後継続的なデータ蓄積、条件の追い込みで工数削減は1/3 が達成できると確信する。

本事業の具体的目標「成形回数1/3、リードタイム1/3、コスト1/3」について整理すると 成形回数1/3→実績2/3 リードタイム1/3→実績2/3、コスト1/3→実績2/3(労務費・副資材)と確実な成果を上げる事ができた。

科学的データによる生産システムの構築に関しては、素材情報把握、組織解析のフィードバック、3次元形状測定等の手法が確立され、金型設計、プレスモーション標準化、シミュレーション・CAE解析へのシステム構築が可能となった。今後更にデータ蓄積、CAE解析・組織解析のフィードバックの高度化を継続的に推進する事により、高度シミュレーションが確立できると確信する。目標達成に向けて継続的に開発を実施する計画である。開発推進会議ではアドバイザーから、事業目標達成までの補完開発を推奨された。

最終章 全体総括

1 研究開発成果

成形限界の定量的な把握を目的に、金属組織解析、CAE解析などを行い、ミクロスケール・マクロスケール両面からの可視化、定量化を行いデータベース化できた。ミクロ組織の可視化に際して結晶方位および結晶粒界の情報を含むEBSP測定に関して成形性試験材の観察用試料調製条件を模索し、化学的エッチングを含む試料平滑処理によりEBSP測定を可能とした。

サーボプレスのモーションについては、前半工程に関しては「プログラムモーション」を、後半工程に関しては、「コイニングモーション」を適用し、工程数削減効果の検証を行った。これらの工程途中、工程後に得られた「製品形状試験」サンプルを対象に、金属組織解析、CAE解析などを行い、ミクロスケール・マクロスケール両面からの可視化、定量化を行いデータベース化できた。塑性加工CAEについては、成形品内部の変形状態の可視化、接触面の可視化、塑性変形による発熱の可視化に成功した。部分据込み試験や製品形状試験を対象とした可視化を実施し、バーチャル試作の可能性を確認した。

本事業の具体的目標「成形回数1/3、リードタイム1/3、コスト1/3」については、成形回数1/3→実績2/3 リードタイム1/3→実績2/3(プレス工程全体)、コスト1/3→実績2/3(労務費・副資材)と確実な成果を上げる事ができた。

製品形状による工程(成形回数)削減検証結果は、従来プレス工程10工程を 開発工程では6工程に、焼鈍工程については 6回が3回に半減する事を確認した。ステンレスの製品

形状による工程削減検証の結果は、従来プレス工程8工程を 開発工程では5工程と減らす事ができた。

金型設計の量産開始までのリードタイムでは、この事業の最大の目標であるリードタイムを減らす、という目標に対しては、目標60日間に対して25日間と目標に近いリードタイム短縮を実現できた。本事業の目標の1/3という目標値は、これからのデータ蓄積、CAE解析・組織解析のフィードバックにより確実に達成できると判断する。

2 研究開発後の課題・事業化展開

(1) 研究開発後の課題

○3次元デジタイザによるモデリングの活用拡大

形状測定からCADデータ作成や、シミュレーションの入力データとしても精度検証にも活用でき、高度シミュレーション技術の一部に3次元デジタイザも組み込むべきとの知見が得られた。データによる可視化、試作品等の評価、データベースの構築を目的に、工程標準に取り込む環境整備を行う必要がある。

○シミュレーションの材料物性値について

CAEについて解析精度向上のため、入力データである材料物性値について温度依存性、ひずみ速度依存性の情報を知る必要性を確認したが、技術的な困難からサポイン計画の方法では、試験することができなかった。これを解決する加工フォーマスタ試験や、材料特性計算シミュレーション技術の活用が有望であり、補完的な研究が必要である。

(2) 事業化展開

本事業のアドバイザーからは、事業の目標値の達成に対する期待と要望が確認できた。事業化展開に向けて早急にサンプル製作提出する計画である。目標の達成については、今後更にデータ蓄積、CAE解析・組織解析のフィードバックの高度化を継続的に推進する事により、高度シミュレーションを確立する。

(3) 事業化に向けた取り組み

当該事業により開発した厚板鍛造技術により、リードタイムが短く、低コスト、軽量の製品を実現し、生産・販売する。更に当技術を生かして切削加工分野への参入を開拓する。

腕時計に関しては、付加価値の高い高級品に限定されている日本国内製造への中級品以下の、海外特に東南アジア生産の引き込みを図るものである。川下企業からは強いニーズがある。新機種の案内には、取引先との関係から中級品まであり、今までは低コスト化が困難であったが、本開発で低コスト化を図り中級品まで受注拡大を図る計画である。