

平成25年度ものづくり中小企業連携支援事業
(戦略的基盤技術高度化支援事業)

「被削性およびコスト低減を可能にするスマート鍛造プロセスの開発」

研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 中国経済産業局

委託先 公益財団法人岡山県産業振興財団

目 次

研究開発の概要

- 1) 研究開発の背景・研究目的
- 2) 研究開発の概要及び目標値
- 3) 実施内容
- 4) 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 5) 成果概要
 - ①制御鍛造による組織制御技術の確立
 - ②制御冷却による組織制御技術の確立
 - ③被削性および耐歪性を兼備したスマート鍛造技術の構築
 - ④連続熱処理炉の製作および評価
- 6) 当該研究開発の連絡窓口

研究開発の概要

1) 研究開発の背景・研究目的

型鍛造品は、金属材料を鍛錬し、微細な金属組織にすることで、強靱な部品を作製することができる。特に型鍛造による鉄鋼製品は、耐疲労性に優れていることから、自動車のシャフト、クランク、足回り部品などの重要保安部品に適用されている。型鍛造は、古い技術ではあるが、現在も自動車製造にとっては必要不可欠な技術である。

一方、自動車製造業を取り巻く環境は厳しさを増しており、特にリーマンショック以降、カーメーカでの急激な減産による生産量の激減や、最近の円高による国際競争の激化、自動車メーカからのV.A.提案要求等、さらに厳しさを増している。加えて、平成23年3月11日に発生した東日本大震災による自動車減産の動きも深刻で、これらの激変する環境に対応するべく、コストダウンを図っているが、既に限界に達している。

こうした状況下、本研究開発事業では、川下産業である自動車産業のニーズである短納期化、高機能化、コスト削減、省エネルギーに対応するため、鍛造に係る技術に関し、鍛造の加工歪と保有熱を制御し、鍛造品の組織を制御する「スマート鍛造プロセス」を開発し、それらのニーズに対応することを目的とする。

2) 研究開発の概要及び目標値

鍛造、特に型鍛造によって作製される部品の多くは、自動車を構成する部品の中でも動力伝達系などの重要保安部品に適用されており、鍛造技術は、必要不可欠な技術として重要性を増している。型鍛造によって部品を製造するには、ピレットから金型に沿った形状に成形、その後、機械加工によって最終形状に加工され、部品となる。最近では、ニアネットシェーピングによって、機械加工部位を減らすことでコスト低減を図っているものの、機械加工の工程を完全に省くことはできないため、鍛造後の被削性を向上させることがエンドユーザより強く要求されている。

現状では、鍛造品に焼準を施すことによって、被削性、耐歪性を付与しているが、鍛造後にさらに焼準を加える2度の加熱工程は非効率で納期遅延とコストアップを招いている。

そこで、本研究では、鍛造の加工と保有熱を活用制御することにより、良好な被削性、耐歪性が鍛造品に兼備でき、低コスト・短納期で需要変動にも対応できるスマート鍛造プロセスを開発する。

<目標値> 本研究開発期間で得られる目標と最終結果を以下に示す。

開発テーマ	目標値
① 制御鍛造による組織制御技術の確立	ハンマー鍛造における γ 粒の再結晶細粒化、粗粒化の挙動および鍛造終了時の γ 粒度を明確にし、既存のハンマー鍛造設備で、粒度 No.3 以上の細粒 γ 粒（現状の粒径の約半分の $140\mu\text{m}$ ）が得られる制御鍛造技術を確立する。さらに γ 粒度を細粒化（No.3）することにより、以降の冷却時の（F+P）変態の促進およびP粒

	<p>径の細粒化を図る。 最終年度までに、投入材料を 300g 以上低減（歩留りで 90%以上）することによって、鍛造性が通常鍛造並に向上でき、さらに材料コスト低減が図れる制御鍛造技術に発展させた。</p>
<p>②制御冷却による組織制御技術の確立</p>	<p>被削性の優れた (F+P) 組織を明確にし、この最適組織を造り込む制御冷却を確立する。また、粗大な P は、浸炭時に歪発生の原因になることから、粒度 No.5 以下の粗大な P を含まない、整粒の (F+P) 組織とする。さらに様々な形状に対して熱伝導解析による冷却条件を求め、量産化の際の指針を確立する。 最終年度までに、スマート鍛造の不可欠な技術として、鍛造後の部分冷却と 2 段高温処理の 2 つの技術を開発した。</p>
<p>③被削性および耐歪性を兼備したスマート鍛造技術の構築</p>	<p>制御鍛造と制御冷却（熱処理）の両方を駆使したスマート鍛造技術を構築する。硬さの目標値は、ユーザから求められる種々のレベルを包括する HB137~207 の範囲とする。 被削性は、従来の焼準材よりも切削応力を 10%低下させる。浸炭性（耐歪性、γ 粒度）は、焼準材と同等以上とする。 最終年度までに、制御鍛造と制御冷却とを組み合わせたスマート鍛造技術を構築し、目標値は達成した。</p>
<p>④連続熱処理炉の製作および評価</p>	<p>実験で得た熱処理パターンが再現できる連続熱処理炉を設計、製作する。炉の全長は 9.1m 以下で、30 分以内の短時間で変態が完了できる効率的で独自性のある連続熱処理炉を目指す。 最終年度までに、連続熱処理炉の熱処理・搬送部の製作を行った。また、鍛造品の温度ばらつきを 50℃以下にする、部分強冷設備を連続炉の入口に設置することによって、鍛造品の硬さ（HB20 以下）、ミクロ組織のばらつき低減を図った。また、連続炉の入口と出口に自動搬送装置を設置することで、鍛造品の連続熱処理ラインを完成させた。</p>

3) 実施内容

① 制御鍛造による組織制御技術の確立

熱間鍛造では、 γ 粒度を細粒にすることは容易でない。なぜなら鍛造加工で γ 粒を再結晶によって細粒化させても、鍛造温度が高いため、直ぐに γ 粒が粗大化してしまうからである。鍛造温度を低くすれば、 γ 粒の粗大化が抑制でき、細かな γ 粒が得られるが、鍛造温度の低下は鋼材の変形抵抗を高め、鍛造成形を困難にする。鍛造温度に制限のある中で、ハンマー鍛造による再結晶細粒化を図り、細かな γ 粒を得る鍛造技術を確立する。

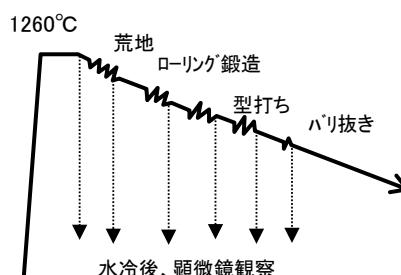


図1 鍛造過程の γ 粒度変化の調査要領

①-1 鍛造時の γ 粒度の粗粒化挙動の解明

【実施機関】 (株)川上鉄工所
岡山県工業技術センター

【実施内容】

鍛造時の γ 粒の再結晶、細粒化および粒成長、粗大化の挙動を調べ、 γ 粒の細粒化策の指針を得る。なお、鍛造時の γ 粒度は、図 1 に示す高温から急冷 (γ 粒を凍結) した各工程での鍛造品を顕微鏡観察し、調査する。

①-2 低温鍛造による微細化と鍛造技術の開発

【実施機関】 (株)川上鉄工所
岡山県工業技術センター

【実施内容】

低温鍛造による細粒 γ と鍛造性が両立できる最適鍛造温度を検討する。また、低温鍛造の変形抵抗を軽減する金型形状の改善も検討し、粒度 No.3 の細粒 γ が得られる鍛造技術を確立する。また、 γ 粒の細粒化によって、(F+P) 変態特性がどのように改善できるか明確にする。

② 制御冷却による組織制御技術の確立

ばらつきの小さい連続熱処理ラインを造るべく、現在、部分冷却設備を製作中である。また、2 段恒温処理による (F+P) 変態特性については、さらに改善を目指していく。

②-1 鍛造後の冷却過程における γ からの変態挙動の解明

【実施機関】 (株)川上鉄工所
岡山県立大学
岡山県工業技術センター

【実施内容】

変態挙動は、図 2 の冷却過程の各温度から急冷した鍛造品を顕微鏡で観察調査する。また、寸法、形状 (質量効果、鍛造加工) の異なる鍛造品のマイクロ組織、硬さの現状を明確にすると

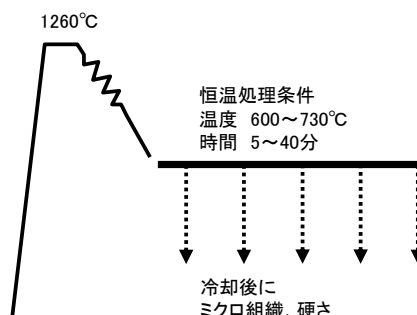


図2 恒温処理実験の調査方法

ともに、冷却過程を熱伝導解析する。これらの現状把握を踏まえて、鍛造後の冷却（熱処理）の制御、および（F+P）組織（変態）の制御に係る研究を行う。また、MHV硬さ計を用い、（F+P）組織の各相の硬さを測定し、軟質なF、Pの生成条件を明らかにする。

②-2 恒温処理による（F+P）変態の解明

【実施機関】 ㈱川上鉄工所
岡山県立大学
岡山県工業技術センター

【実施内容】

図 2 に示す鍛造品に種々の恒温熱処理（温度、時間）を施し、（F+P）組織で効率よく硬さが低下できる熱処理条件を明らかにする。特に硬さの低下に有効なFの生成条件を明らかにするとともに、Pの硬さと微細構造の関係について、重点的に検討する。

②-3 2段恒温処理の開発

【実施機関】 ㈱川上鉄工所
岡山県立大学
岡山県工業技術センター

【実施内容】

2段恒温処理（ステップ冷却）を構築するために、まず、P変態が起こり難い高めの温度域で、軟質のFを優先析出させて、軟化に十分なF量を確保し、次いで、低い硬さのPが効率よく得られる温度に下げてP変態を完了させる。この2段恒温処理は、従来の一定温度で保持する恒温処理よりも効率よく軟化、組織改善が図られ、整粒の（F+P）組織が得られる。なお、上記の研究では、実験用の小型電気炉を用い、研究を推進し、得られた結果を実際の製造ラインでの処理条件に反映する。

③ 被削性および耐歪性を兼備したスマート鍛造技術の構築

鍛造品には、図 3 に示すような切削加工、浸炭・焼入れが川下工程で施されるが、鍛造のままの硬質で粗大な組織では、被削性が著しく低下し、かつ浸炭熱処理

時の歪発生の原因になる。そのため、鍛造後、再度、900℃まで加熱する焼準（熱処理）を行い、 γ 粒を微細化し、焼入性を低下させ、写真 1 に示す軟質な組織（F+P）に調質することによって被削性、耐歪性を付与している。この鍛造+焼準処理による2度の加熱工程は非効率でコストアップを招くとともに省エネルギー、CO₂削減の観点からも工程の削減が強く望まれている。ここでは、焼準処理なし

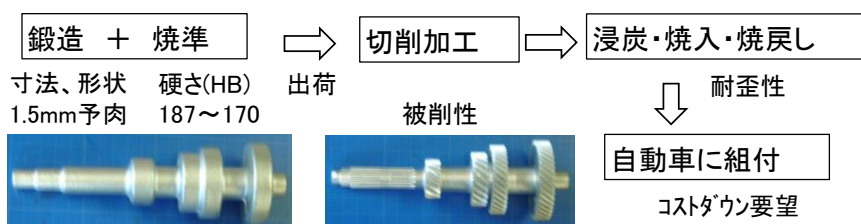


図3 型鍛造の製造工程と要求性



写真1 焼準後

で制御鍛造と制御冷却（熱処理）の両方を駆使したスマート鍛造技術を構築し、被削性および耐歪性の向上を図る。

③-1 制御鍛造&制御冷却の重畳効果

【実施機関】 (株)川上鉄工所
岡山県立大学
岡山県工業技術センター

【実施内容】

制御鍛造による γ 粒の細粒効果および熱処理による組織改善を組合せたスマート鍛造の重畳効果を明確にする。F.A.I 技術（通常鍛造+恒温処理）よりも、スマート鍛造の方が、(F+P) 組織が改善でき、かつ、低い硬さが効率よく短時間で得られる、高度な技術であることを確認するとともに最適な (F+P) 組織およびその最適組織が造り込める条件を明確にし、スマート鍛造技術を確立する。

また、数値シミュレーションにより、制御冷却中の製品内温度分布を解析するとともに、単純形状による制御冷却モデルを構築し、複雑形状に発展させることで数値解析の適応性を示し、制御冷却条件の選定技術を確立する。

③-2 被削性の評価

【実施機関】 (株)川上鉄工所
中国職業能力開発大学校

【実施内容】

スマート鍛造により、被削性および耐歪性の向上を図る。被削性に関しては、従来の焼準材よりも (F+P) 組織の結晶粒を粗くし、延性を低く調節することによって、被削性の向上を図る。被削性の調査は、切削時に刃物が受ける力、切粉の形態を調べ、被削性を評価する。

③-3 浸炭熱処理時の耐歪性、 γ 粒度の評価

【実施機関】 (株)川上鉄工所
岡山県立大学
岡山県工業技術センター

【実施内容】

浸炭熱処理時の耐歪性の評価は、ミクロ組織より、No.5 以下の粗大粒 P が存在しないものを良と判断する。浸炭加熱時の γ 粒については、浸炭を模擬した加熱実験を行い、その加熱時の γ 粒度を調査し、浸炭時の γ 粒が従来の焼準材と同様に細粒であることを確認する。

④ 連続熱処理炉の製作および評価

制御鍛造技術と制御冷却技術における課題を解決し、実用化に向け、両技術を組合せたスマート鍛造技術を実現する連続熱処理炉を作製し、鍛造品のオンライン生産が可能な技術を構築する。

④-1 連続処理炉の製作

【実施機関】 (株)川上鉄工所
岡山県立大学
中国職業能力開発大学校

【実施内容】

連続熱処理炉の概略（仕様設計）を図 4 に示す。平成 23 年度は熱処理・搬送用の 1～3 ゾーンについて、仕様設計を行う。本仕様設計を基に熱処理炉メーカーで製作した装置を導入する。

平成 24 年度は、連続熱処理炉の入口およびその前工程に、シャフト鍛造品の冷却ばらつきを軽減する、部分冷却設備と部分加熱設備を製作、設置した。ばらつき軽減技術を確立し、連続熱処理炉によるスマート鍛造（熱処理）を可能にする。

平成 25 年度は、連続熱処理炉の入口と出口に自動搬送設備を設置し、連続熱処理ラインを完成させる。

④-2 実機テスト

【実施機関】 (株)川上鉄工所
岡山県立大学
中国職業能力開発大学校
岡山県工業技術センター

【実施内容】

図 4 の連続熱処理炉を用いて、測温実験、鍛造品の通過実験、熱処理実験、試作実験を重ね、スマート鍛造のオンライン熱処理技術を確立する。

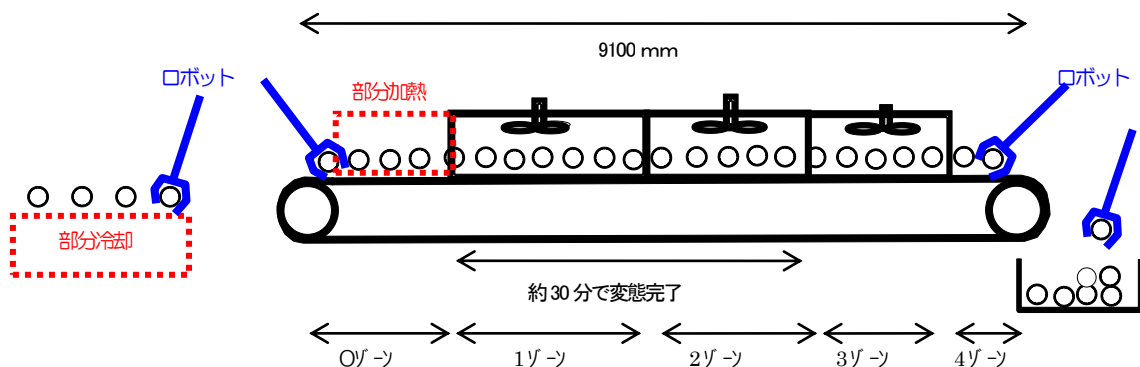


図4 連続熱処理炉

④-3 スマート鍛造品の評価および承認

【実施機関】 (株)川上鉄工所
広島工業大学

【実施内容】

自動車用の量産鍛造品でV.A.提案、試作を行い、サンプル出荷する。川下企業で、スマート鍛造品の被削性、浸炭性を評価して頂き、スマート鍛造への工程変更（焼鈍

省略)の承認を得る。

⑤ 研究全体の統括、プロジェクトの管理運営

【実施機関】 公益財団法人岡山県産業振興財団

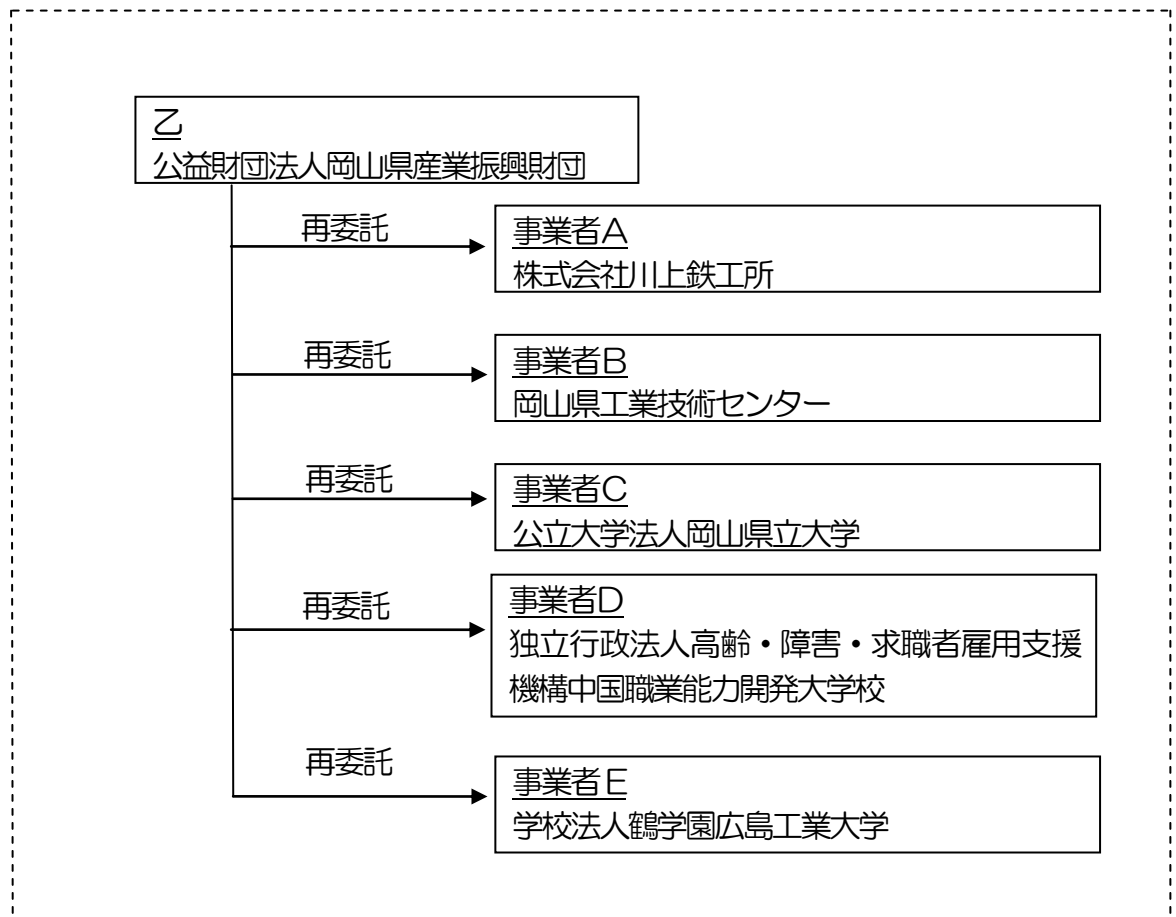
【実施内容】

研究開発の目的を達成するために研究実施プロジェクトの運営管理、各研究開発項目の課題抽出、検討、研究開発の進捗管理、研究成果の評価及び事業化等について推進委員会等により審議・評価を行う。また、研究開発に必要と思われる情報を適宜提供する。

4) 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

ア) 研究組織 (全体)



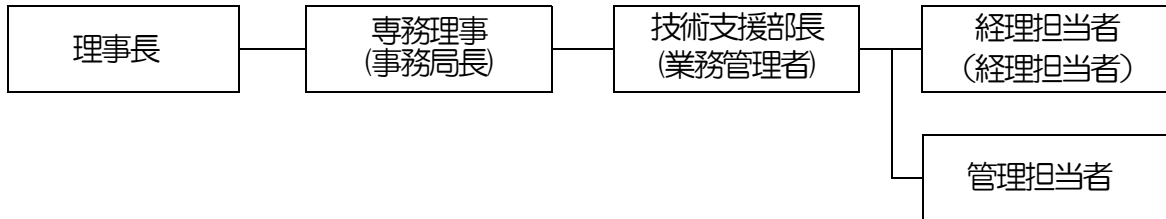
総括研究代表者 (PL)
株式会社川上鉄工所
社長付部長
内田 清

副総括研究代表者 (SL)
学校法人鶴学園広島工業大学
工学部 機械システム工学科 教授
日野 実

イ) 管理体制

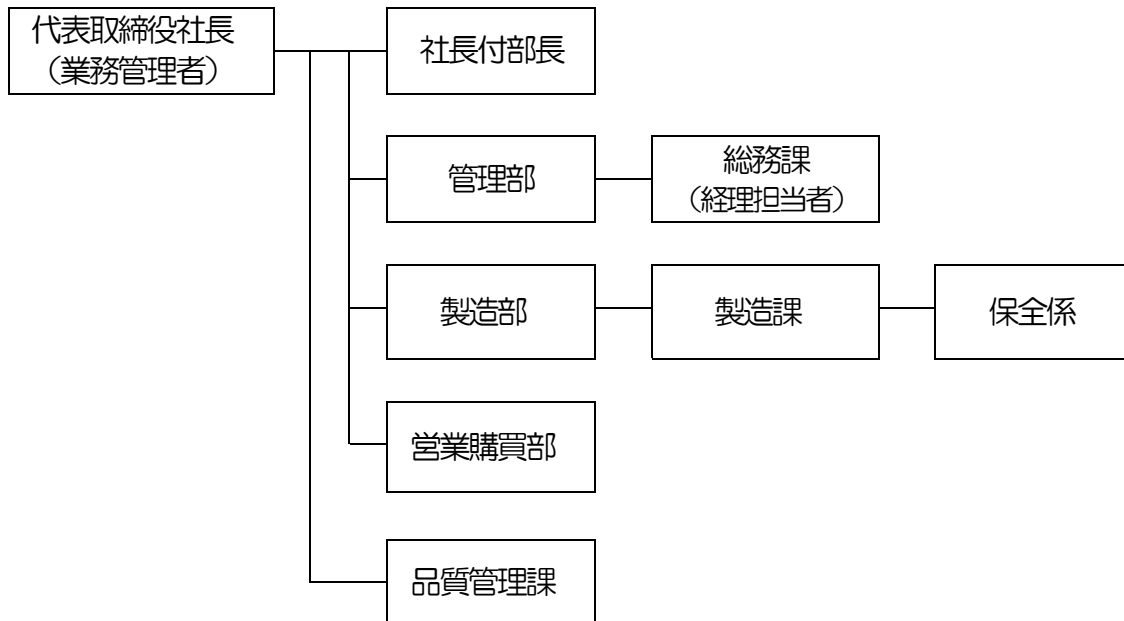
①事業管理者

[公益財団法人岡山県産業振興財団]

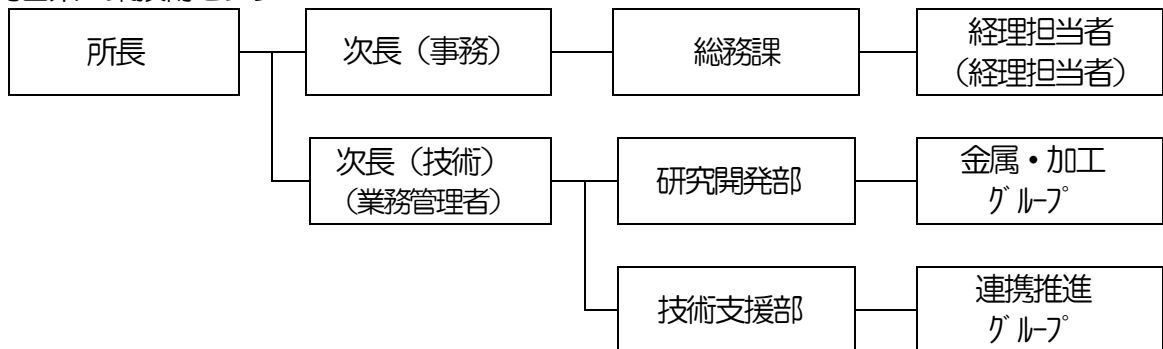


② (再委託先)

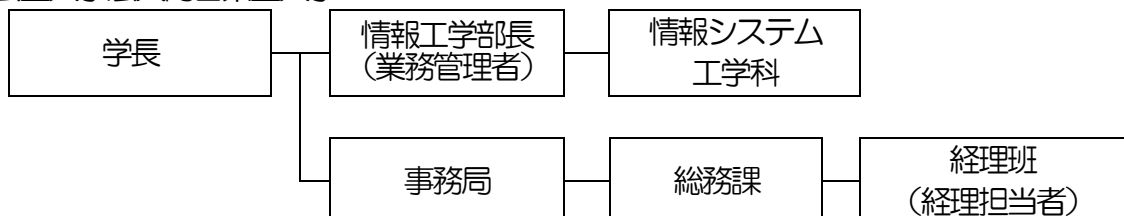
株式会社川上鉄工所



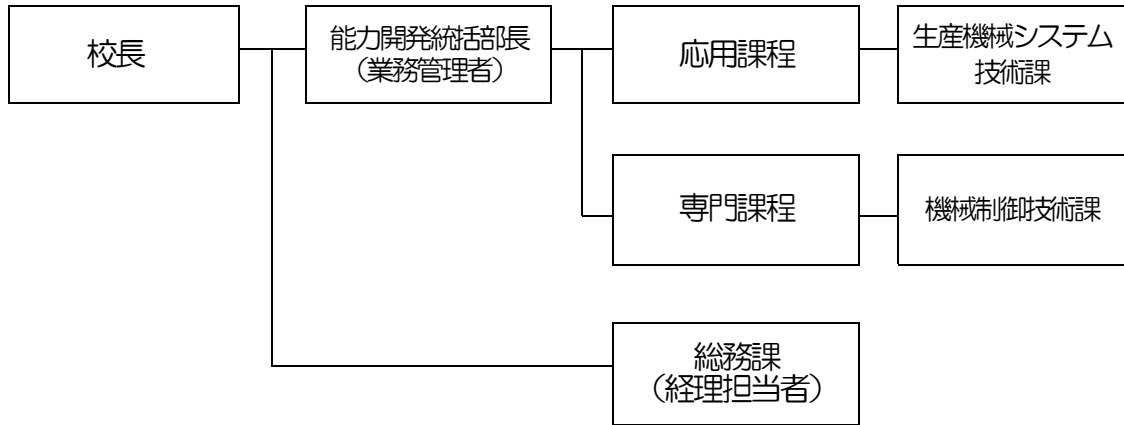
岡山県工業技術センター



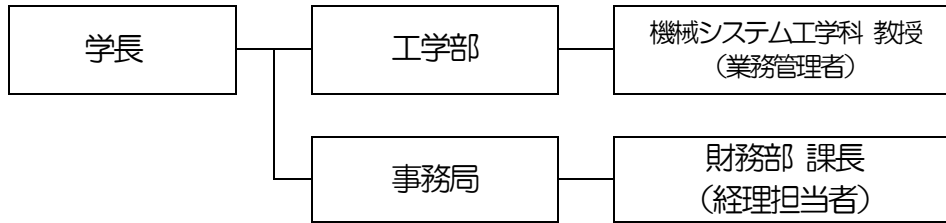
公立大学法人岡山県立大学



独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構中国職業能力開発大学校



学校法人鶴学園広島工業大学



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】公益財団法人岡山県産業振興財団

管理員

氏名	役職・所属	実施内容 (番号)
深井 康光	技術支援部 部長	⑤
横田 尚之	技術支援部 研究開発支援課 課長	⑤
小川 洋子	技術支援部 研究開発支援課 主任	⑤
喜井 敏恵	技術支援部 研究開発支援課 主事	⑤
山本 展子	技術支援部 研究開発支援課 主事	⑤
末森 靖治	技術支援部 研究開発支援課 主事	⑤

【再委託先】※研究員のみ

株式会社川上鉄工所

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
川上 陽亮	代表取締役社長	②-1,②-2,③-2,③-3,④
内田 清	社長付部長	②-1,②-2,③-2,③-3,④
林 祥次	営業購買部 部長	②-1,②-2,③-2,③-3,④
山本 邦彦	製造部 次長	②-1,②-2,③-2,③-3,④
川上 朋弘	営業購買部 課長	②-1,②-2,③-2,③-3,④
川井 英史	製造課 保全係長	②-1,②-2,③-2,③-3,④
岩藤 健太	製造課 保全職場	②-1,②-2,③-2,③-3,④

岡山県工業技術センター

氏名	役職・所属	実施内容 (番号)
村岡 賢	研究開発部 金属・加工グループ 研究員	②-1,②-2,③-3,④-2
村上 浩二	研究開発部 金属・加工グループ 研究員	②-1,②-2,③-3,④-2
吉川 満雄	技術支援部 連携推進グループ 専門研究員	②-1,②-2,③-3,④-2

公立大学法人岡山県立大学

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
尾崎 公一 福田 忠生	情報工学部 情報システム工学科 教授 情報工学部附情報システム工学科 准教授	②-1,②-2,③-3,④-1,④-2

独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構 中国職業能力開発大学校

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
亀山 寛司 川坂 将史	生産機械システム技術科 教授 機械制御技術科 特任教授	③-2,④-1,④-2 ③-2,④-1,④-2

学校法人鶴学園広島工業大学

氏名	役職・所属	実施内容(番号)
日野 実	工学部 機械システム工学科 教授	④-3

ウ) 他からの指導・協力者

氏名	所属・役職	備考
杉本 幸弘	マツダ株式会社 技術研究所 主幹研究員	推進委員会アドバイザー
清水 信之	アイシン・エーアイ株式会社 調達部 部品グループ グループマネージャー	推進委員会アドバイザー
石川 直樹	アイシン・エーアイ株式会社 調達部 部品グループ	推進委員会アドバイザー
杉浦 和夫	三遠機材株式会社 取締役管理部 部長	推進委員会アドバイザー
田中 達也	三遠機材株式会社 STC 拡販部第二Gr	推進委員会アドバイザー
上井 清史	JFE スチール株式会社 スチール研究所 鋼材研究部 主任研究員	推進委員会アドバイザー

5) 成果概要

① 制御鍛造による組織制御技術の確立

鍛造性が良好で、コスト低減が図れ、細粒 γ が得られる、制御鍛造技術の確立を検討した。その結果、投入材料を大幅に削減した新鍛造工法の制御鍛造を適用することで、通常鍛造と同等の成形性、寸法精度を維持しながら、粒度 No.3 以上の細粒 γ (従来の γ 粒径の半分) を確保することができた。制御鍛造を行ったシャフト試作品の γ 粒度は、図 5 に示す全ての部分において、粒度 No.3 よりも細かい γ 粒を得ることができた。

制御鍛造で γ 粒を細粒化することによって、以降の (F+P) 変態において、初析 F の析出促進、F 分率の増加、および P 粒の整粒化が図れる長所を確認した。

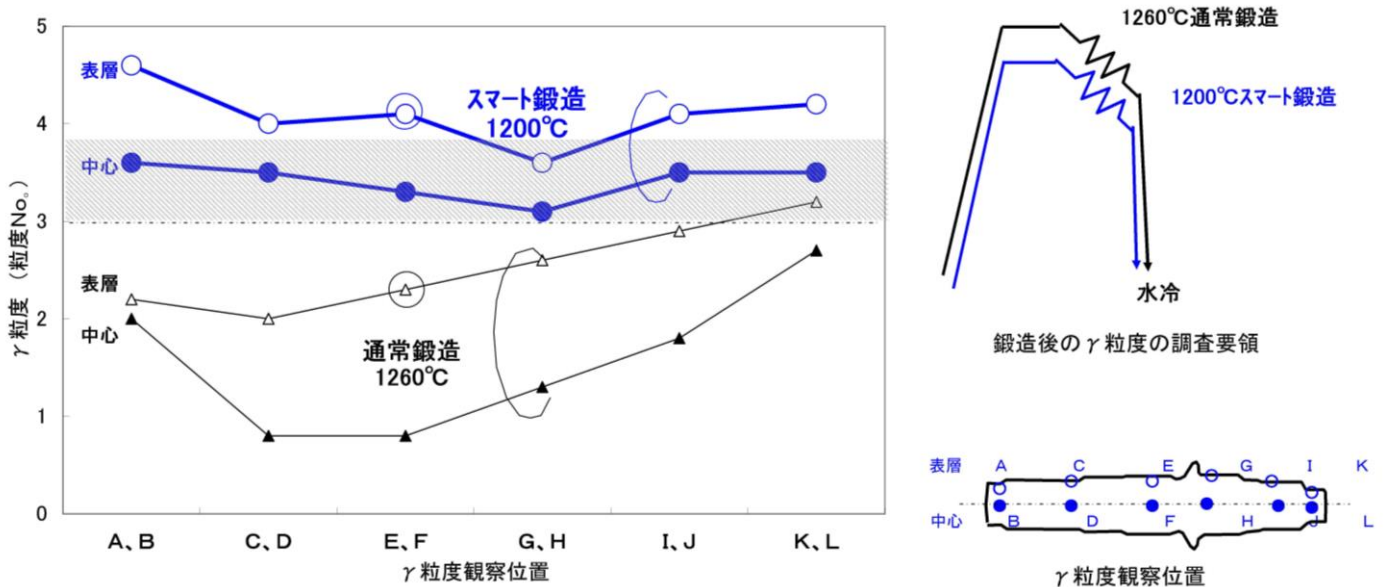


図 5 制御鍛造を行ったシャフト試作品の γ 粒度

② 制御冷却による組織制御技術の確立

制御鍛造によって γ 粒の細粒化が可能になったが、その後の空冷では (F+P) 組織に変態できるほどの細粒化には至っていない。そのため冷却速度を遅くして (F+P) 組織に変態させる必要がある。冷却温度は高温の 800°C よりも低温の 700°C の方が、以降の恒温熱処理中における初析 F の析出増加が速く、硬さの低下 (軟化) が顕著であることを明らかにした。また、予備冷却温度は、温度不均一による P 変態が起こり難い高温で、かつ F 析出、軟化が図れる低温を両立する 700°C 程度が適切であった。

次に、低い硬さが得られ、被削性、浸炭性に適した (F+P) 組織が短時間で得られる 2 段恒温処理を開発した。この 2 段恒温処理は、685°C の高温領域で細粒の F を大量にかつ均一に析出分散させた後、660°C の低温領域で速やかに (F+P) 変態を完了させ、図 6 に示す初析 F の分率が 50% 以上で粗大な P が存在しない整粒の初析 F+P からなる微細構造を得る組織制御技術を確認した。

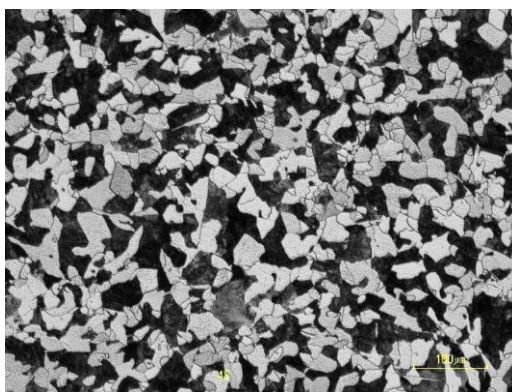


図6 2段恒温処理により得られた (F + P) 組織

③ 被削性および耐歪性を兼備したスマート鍛造技術の構築

焼準処理なしで制御鍛造と制御冷却（熱処理）の両方を駆使したスマート鍛造材について、被削性および耐歪性を調査した。被削性に関して、使用工具の標準的な切削条件において、スマート鍛造材の切削応力が従来品のそれに比べ、4%低下することを明らかにした。しかし、切削応力を 10%低下させるという目標値を満足するには至らなかったが、被削性は従来品と同等以上であることを確認した。

一方、耐歪性に関して、浸炭後の歪、 γ 粒度、有効浸炭深さを調査した。歪測定では、スマート鍛造材は従来品と比べ、平均値では遜色がなく、その最大値は従来材より低かった。また、図 7 に示した有効浸炭層深さより、スマート鍛造材と従来品では差がなく、内部組織および γ 粒もスマート鍛造材は従来品と同様の傾向を示した。これらの結果より、スマート鍛造技術が現行プロセスの代替技術として適用可能であることを明らかにした。

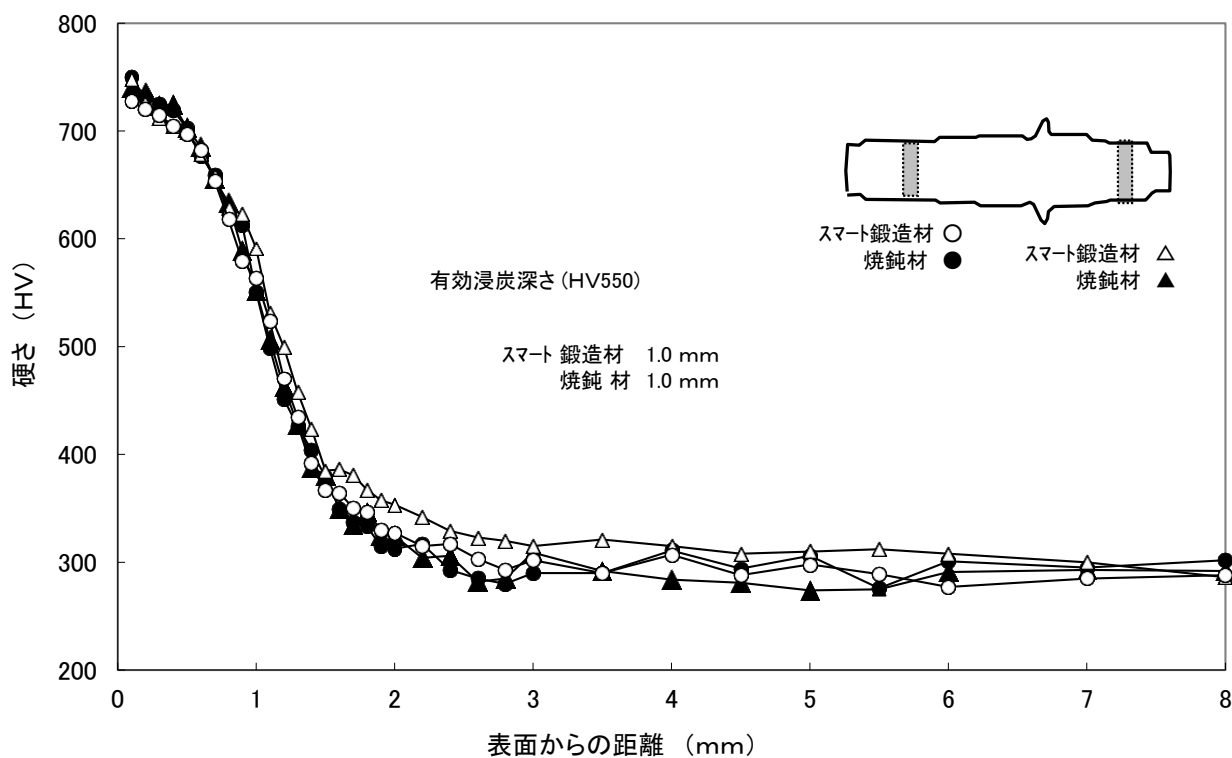


図7 有効浸炭層深さ測定結果

④ 連続熱処理炉の製作および評価

鍛造・熱処理を一貫して行うための連続生産ラインの開発を行った。図8に開発したラインの概略を示す。まず、製品特性のばらつきを軽減させる目的に、部分冷却・部分加熱の両設備を作製した。さらに既存のハンマー鍛造設備を部分冷却・部分加熱・連続熱処理炉に接続するとともに、鍛造直後の製品を熱処理工程に自動搬送するための設備を導入することで、連続生産ラインを完成させた。この連続生産ラインでスマート鍛造品を試作した結果、外部形状・寸法・微細構造・硬さ・生産性は、本事業の目標を達成した。

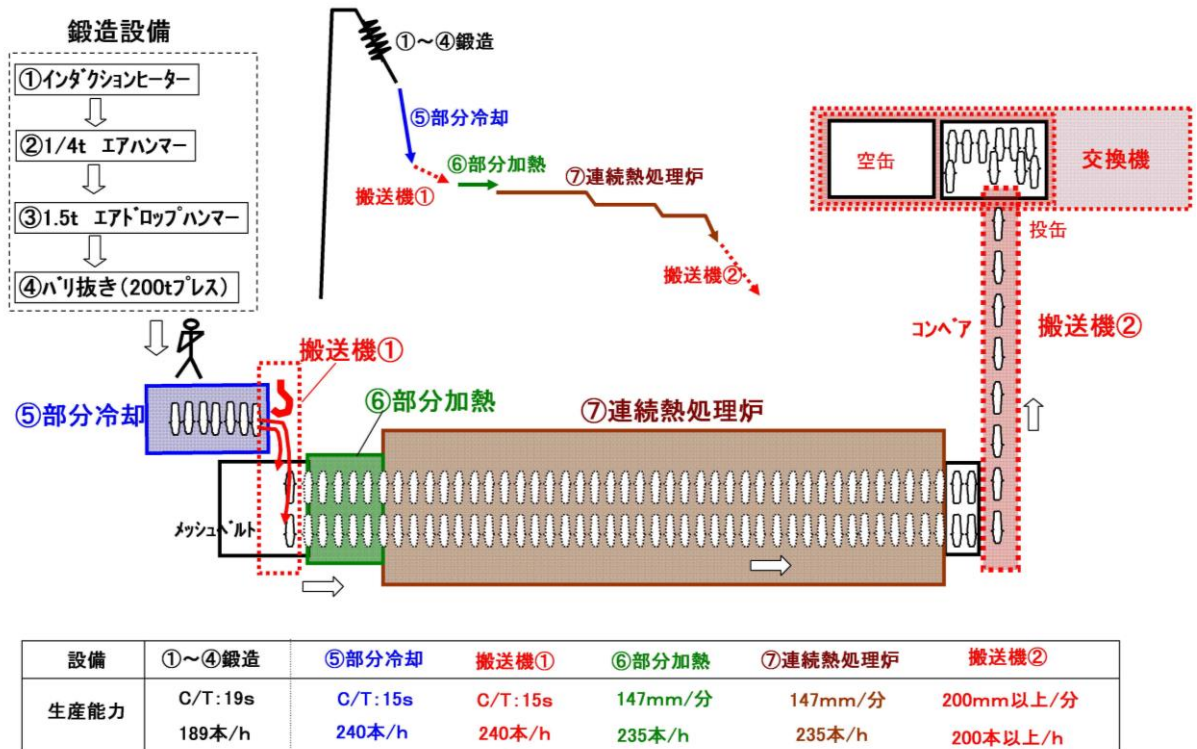


図8 スマート鍛造の連続生産ライン

6) 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人岡山県産業振興財団 技術支援部 研究開発支援課長 横田 尚之
 TEL 086-286-9651 FAX 086-286-9676
 E-mail: nyokota@optic.or.jp