

平成29年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「焼結冷間鍛造工法及び表面処理による高強度・長寿命かつ

耐摩耗性に優れた焼結部品の開発」

研究開発成果等報告書

平成30年5月

担当局 関東経済産業局

補助事業者 公益財団法人群馬県産業支援機構

目 次

第1章 研究開発の概要	・・・P1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	
1-1-1 焼結冷間鍛造工法+表面熱処理における各工程条件最適化及び金属組織の制御	
1-1-1-1 一次成形・一次焼結後及び冷間鍛造後の金属組織と機械物性評価による最適な成形体密度、焼結温度の更なる追究	
1-1-1-2 最終熱処理後の金属組織及び機械物性評価による最適熱処理条件の更なる追究	
1-1-2 製品レベルでの高機能化	
1-1-2-1 カム用成形鍛造金型及びダイセットの開発・改良	
1-1-2-2 カムの密度評価による一次成形～冷間鍛造最適条件の選定	
1-1-2-3 最終熱処理後の金属組織評価による最適条件の選定	
1-1-2-4 高耐久性自動車部品「カム」の開発実験及びその評価	
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	
1-3 成果概要	
1-3-1 焼結冷間鍛造工法+表面熱処理における各工程条件最適化及び金属組織の制御	
1-3-1-1 一次成形・一次焼結後及び冷間鍛造後の金属組織と機械物性評価による最適な成形体密度、焼結温度の更なる追究	
1-3-1-2 最終熱処理後の金属組織及び機械物性評価による最適熱処理条件の更なる追究	
1-3-2 製品レベルでの高機能化	
1-3-2-1 カム用成形鍛造金型及びダイセットの開発・改良	
1-3-2-2 カムの密度評価による一次成形～冷間鍛造最適条件の選定	
1-3-2-3 最終熱処理後の金属組織評価による最適条件の選定	
1-3-2-4 高耐久性自動車部品「カム」の開発実験及びその評価	
1-4 当該研究開発の連絡窓口	
第2章 本論一（1）焼結冷間鍛造工法+表面熱処理における各工程条件最適化及び金属組織の制御	・・・P7
2-1 一次成形・一次焼結後及び冷間鍛造後の金属組織と機械物性評価による最適な成形体密度、焼結温度の更なる追究	
2-1-1 試験片の表面及び断面の金属組織評価	
2-1-2 試験片の硬さ評価	
2-1-2-1 一次焼結体側面の表面硬さ評価（HRA）	
2-1-2-2 断面の心部硬さ評価	
2-1-3 試験片の衝撃試験による靱性評価	
2-1-4 試験片の静的強度評価	
2-1-5 試験片の最適冷間鍛造荷重の決定	
2-2 最終熱処理後の金属組織及び機械物性評価による最適熱処理条件の更なる追究	
2-2-1 表面及び断面の金属組織評価	
2-2-2 表面硬さ及び硬さ分布評価	

- 2-2-3 衝撃試験による靱性評価
- 2-2-4 静的／疲労強度評価
- 2-2-5 摩耗試験による耐摩耗性評価
- 2-2-6 試験片のマイクロ密度（表層空孔率）評価
 - 2-2-6-1 平均密度（マクロ密度）評価
 - 2-2-6-2 ミクロ密度（表層空孔率）評価

第3章 本論－（2）製品レベルでの高機能化 ・・・P14

- 3-1 カム用成形鍛造金型及びダイセットの開発・改良
- 3-2 カムの密度評価による一次成形～冷間鍛造最適条件の選定
 - 3-2-1 焼結冷間鍛造カムの試作開発
 - 3-2-2 量産化に向けた製品形状試作実験
 - 3-2-3 マクロ密度評価
 - 3-2-4 ミクロ密度評価
- 3-3 最終熱処理後の金属組織評価による最適条件の選定
 - 3-3-1 カーボンポテンシャル(CP)の調整による耐摩耗性の制御
 - 3-3-1-1 硬さ分布計測結果
 - 3-3-1-2 金属組織
 - 3-3-2 浸炭深さの検討
 - 3-3-2-1 硬さ分布計測結果
 - 3-3-2-2 金属組織
 - 3-3-3 残留オーステナイト組織の有効活用の検討
 - 3-3-3-1 硬さ分布計測結果
 - 3-3-3-2 金属組織
 - 3-3-4 熱処理工程における最適熱処理条件の選定
- 3-4 高耐久性自動車部品「カム」の開発実験及びその評価
 - 3-4-1 レーザ顕微鏡による摩耗部解析手法の検討
 - 3-4-2 実環境シミュレート試験装置の開発
 - 3-4-3 開発した高耐久性自動車部品「カム」の耐久性評価

第4章 補助事業の成果に係る知的財産権及び対外発表等 ・・・P28

- 4-1 特許出願
- 4-2 学会発表
- 4-3 論文投稿
- 4-4 受賞

第5章 全体総括 ・・・P29

- 5-1 試験片による焼結冷間鍛造工法＋表面熱処理工程の最適化条件の探索
- 5-2 製品レベルでの高機能化
- 5-3 事業の成果に係る事業化展開について

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

本研究は、主に国内自動車メーカーの要請に基づき、下記課題を研究開発実施機関による新技術で克服し、高レベルの耐摩耗性が要求される実製品に展開することを目的とした。

<従来技術での課題と新技術の特徴>

従来焼結材及びその表面処理技術の課題	新技術の特徴
<ul style="list-style-type: none"> 表面／内部空孔の存在により、 <ul style="list-style-type: none"> a) 低強度、低靱性（脆性破壊） b) 表面処理（熱処理、物理的処理）による金属組織の改質が困難 現在の溶製材を用いた製造では、鍛造工程数が多く、コスト増要因に 	<ul style="list-style-type: none"> 素材の高密度化、表層域の超高密度化による、高強度化、長寿命化、強靱化等の向上 表面処理による金属組織改質で耐摩耗性を大幅に向上 ニアネットシェイプ成形金型の開発により、第二鍛造、第三鍛造工程の省略を実現し、低コスト化

<溶製材鍛造（従来法）と粉末鍛造の工程比較>

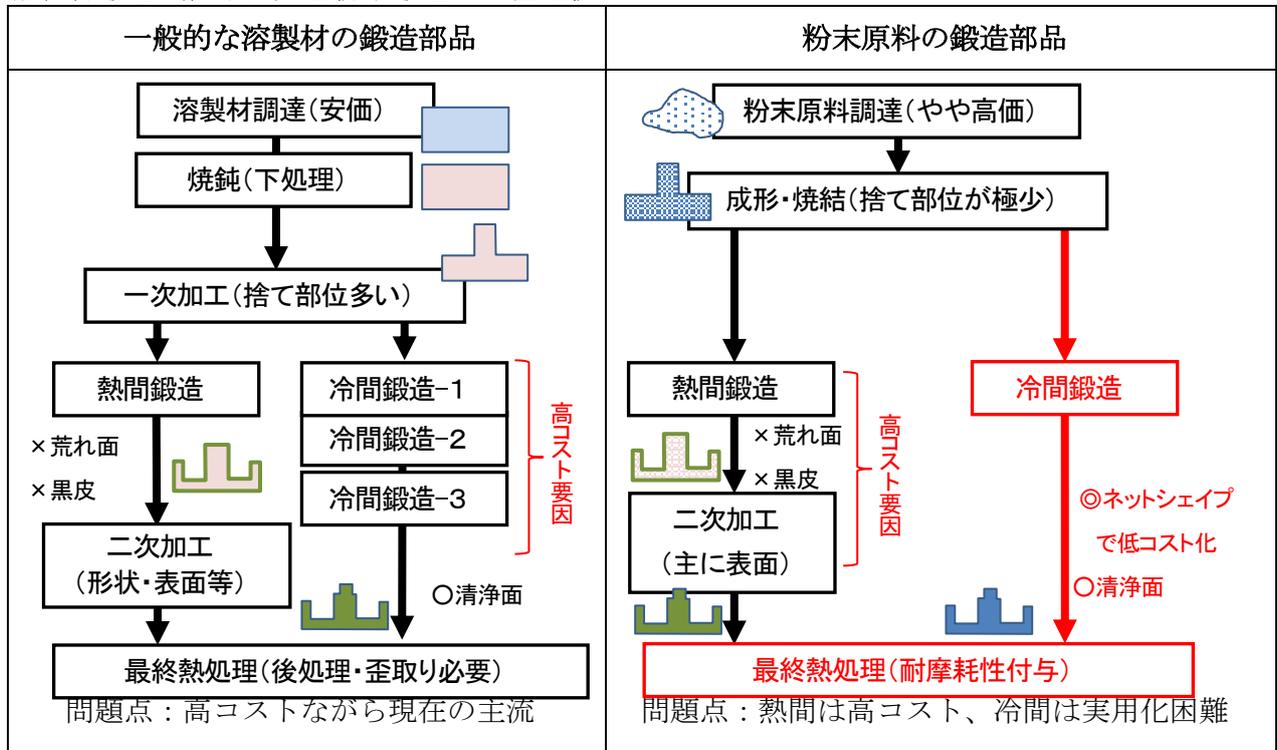


図 1.1 素材別部品製造工程の比較

図 1.1 に一般的な溶製材の鍛造と粉末原料の鍛造及び後工程について示す。本来、鍛造の目的は製品に限りなく近い形状を短時間で得ること（ネットシェイプ、ニアネットシェイプ）にある。しかし、本研究での鍛造は変形目的だけでなく、また単なる素材圧縮による高密度化を狙うものでもない。成形体の形状を工夫し、鍛造時、金型に最もダメージの少ない最適条件での高密度化による高強度化に加え、狙って表層域に塑性流動を生起させ超高密度化を実現することで更なる長寿命化を図る点、そして表面処理により、これまで不可能とされてきた優れた耐摩耗性を付与する点が新技術の特徴である。これまでに、高強度が要求される部品には溶製材が使用され、比較的強度でよい部品は鋳造材や焼結材が使用されるなど、適材適所で棲み分けがされてきた。しかし、近年更なるコストダウンのため、廃材も少なく低コストで小型・高精度・複雑形状品を大量生産できる、価格競争力の高い焼結

材にまで高強度が要求されている。従前より、焼結材は脆く低強度であることが指摘されている。これは、表面及び内部に存在する空孔が主要因であり、溶製材に比較し焼結材は金属組織も不均一なためである。よって、空孔を減らすこと、すなわち成形体の高密度化と、熱処理により金属組織を整えることが重要である。それを高いレベルで実現できるのが、本研究開発で追究する「焼結冷間鍛造工法及び表面処理」の複合技術である。具体的には、特殊原料粉を用いて、圧粉体の成形・仮焼結段階で素材の密度を上げておき、この高密度一次焼結体に新規設計した特殊金型を用いて冷間鍛造を施し、素材の高密度化及び表層域の超高密度化を促進させる。最後に最適化した表面処理（浸炭熱処理、物理的処理）を施し耐摩耗性を向上させ、従来品とは別次元の高機能性（高強度・長寿命・耐摩耗性）を付与しつつ、低コスト化できる工法である。よって、本研究では研究開発の高度化目標及び技術的目標値を以下のとおり設定した。

1-1-1 焼結冷間鍛造工法+表面熱処理における各工程条件最適化及び金属組織の制御

1-1-1-1 一次成形・一次焼結後及び冷間鍛造後の金属組織と機械物性評価による最適な成形体密度、焼結温度の更なる追究

研究開発実施機関が有するこれまでの関連結果に基づき、追加実験を行い最適条件を決定した。

1-1-1-2 最終熱処理後の金属組織及び機械物性評価による最適熱処理条件の更なる追究

最終熱処理後のマイクロ組織及び機械特性を評価し、熱処理条件の最適化を図った。その際の目標値を以下とした。

- ・一次焼結体の密度比（同組成の溶製材 ρ 7.874 g/cm³ を 100%とした場合の比率）で約 91.4% 以上、すなわちマクロ密度で 7.2 Mg/m³ 以上であること。
- ・試験片側面の表面金属組織は、焼結の第一段階である表面拡散が起きていること。（電子顕微鏡像の倍率 200 倍以上で判別可能）
- ・断面の金属組織は、グラファイトが粒界に析出していないこと。（倍率 100 倍～400 倍の金属顕微鏡写真及び電子線マイクロアナライザー・元素マッピング分析で確認）
- ・熱処理済み試験片の硬さは、表面 60 HRA 以上、有効硬化層 (550 HV \sim) 深さ 0.9 mm 以上であること。
- ・試験片のシャルピー衝撃値 (500 J 型の場合) が一次焼結体 16 J 以上、熱処理材 20 J 以上であること。
- ・熱処理済み試験片の静的曲げ強度が 1900 MPa 以上であること。
- ・一次焼結試験片の最適冷間鍛造荷重が 1300 kN 以下であること。
- ・熱処理済み試験片の三点曲げ疲労強度が 1000 MPa 以上であること。
- ・熱処理済み試験片のマクロ平均密度が 7.4 Mg/m³ 以上、表層域マイクロ密度比が 98%以上であること。

1-1-2 製品レベルでの高機能化

製品レベルでの高機能化を達成するために、以下の目標を設定して、研究開発を実施した。研究開発の流れを図 1.2 に示す。基材には焼結冷間鍛造に適したカスタム合金粉を用いて、工程条件（成形・焼結条件、金型形状、鍛造圧、最終熱処理条件等）を最適化することで、高機能焼結部品を開発し、その有効性を機械物性試験、耐久試験、金属組織／表面観察、元素分析、各種測定等により調査した。

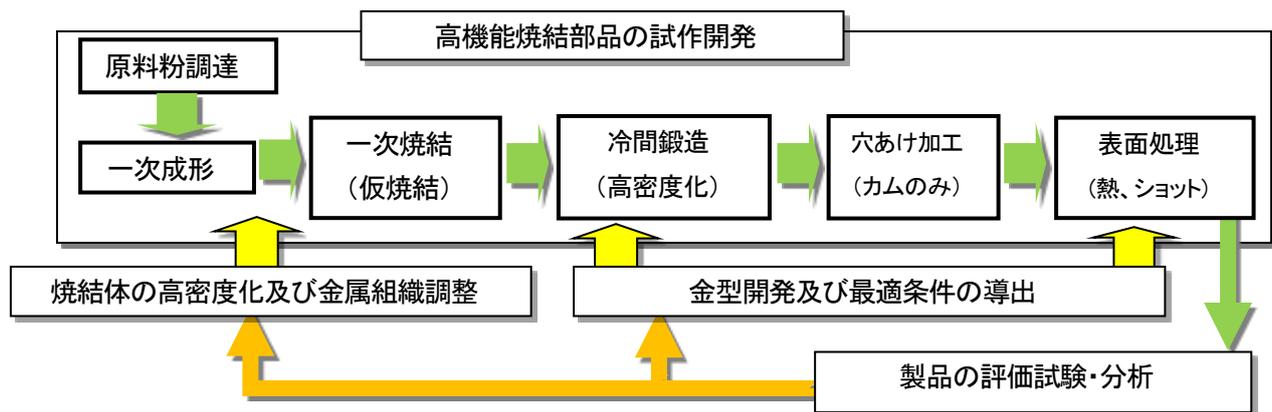


図 1.2 研究開発の流れ

1-1-2-1 カム用成形鍛造金型及びダイセットの開発・改良

以下の目標値を設定して、カム用成形鍛造金型及びダイセットの開発を行った。

- 成形金型の設計変更により、これまでの①横面の鍛造、②上面の鍛造、③上面の鍛造の三段階工程を上面のみの一工程に改善すること。
- 素材マクロ密度が 7.0 Mg/m^3 以上であること。また、摩耗部位及びその周辺で材料の塑性流動が起き表層が高密度化されていること。(断面イオン研磨、電子顕微鏡観察、金属組織観察、マイクロ密度分布画像解析、EPMA 元素マッピング分析等で確認)

1-1-2-2 カムの密度評価による一次成形～冷間鍛造最適条件の選定

一次成形から冷間鍛造までの最適条件を選定するためカムの密度評価を行った。目標値は、

- 表層域空孔分布画像解析による、カム重要部位(ボールプランジャ接触部)の断面で見たとき表面から $200 \mu\text{m}$ 深さまでの範囲とする表層域マイクロ密度比が 97%以上 (7.7 Mg/m^3 以上) であること。

とし、アルキメデス法により測定したカムのマクロ密度を参考値とした。

1-1-2-3 最終熱処理後の金属組織評価による最適条件の選定

最終熱処理の最適条件を選定するために、硬さ分布計測と金属組織観察を行い、耐摩耗性の向上に有効なカーボンポテンシャル(CP)の調整、浸炭深さプロファイルを検討した。さらに、耐摩耗性の向上策として、残留オーステナイト組織及び球状セメントタイトの有効活用を検討した。

1-1-2-4 高耐久性自動車部品「カム」の開発実験及びその評価

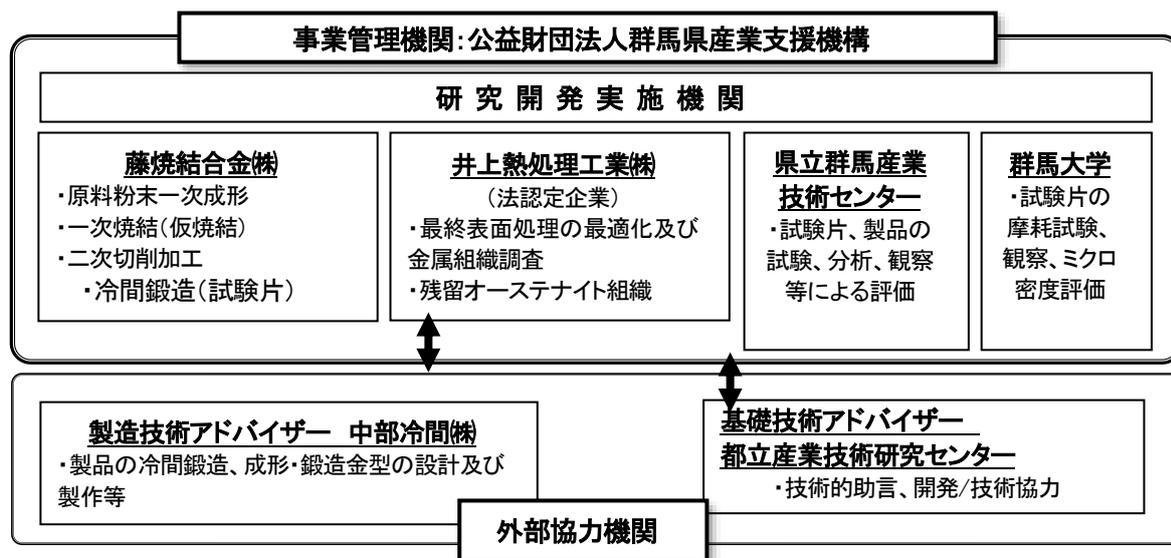
上記で評価した手法にて作製したカムを用いて、耐久性試験(摩耗試験)を行い、製品レベルでの高機能化を検討した。その際の目標値として以下のものを設定した。

- 100 万サイクル時点での摩擦抵抗(プランジャ軸力で評価)が、試験開始初期(10 サイクル時)より低下し、摩耗深さが数十 μm 程度であること。
- 試験片の摺動式摩耗試験後の表面残留応力が試験前より上昇し、表面粗さ(Ra、Rz 値)が低下していること。
- カム摩耗試験後、表面に欠損(チッピング)がないこと。

- ・摩耗痕は比較対象である溶製材相当（最大負荷 200 N で幅約 3 mm 深さ約 0.8 mm 以内）であること。
- ・カム摩耗試験後の表面残留応力が試験前より上昇し、表面粗さ（Ra、Rz 値）が改善（試験後に数値が低下）していること。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

【研究実施体制図】



氏名	所属・役職	備考
奈良 敬一	公益財団法人群馬県産業支援機構 工業支援課長	事業管理機関
井上 吉弘	井上熱処理工業株式会社 取締役会長	PL、研究員
井上 紀子	井上熱処理工業株式会社 取締役	研究員
岩井 智	藤焼結合金株式会社 代表取締役	研究員
阿部 竜一	藤焼結合金株式会社 営業技術部長	研究員
久保原 猛	藤焼結合金株式会社 成形 焼結課長	研究員
鎌腰雄一郎	群馬県立群馬産業技術センター 金属材料係 主幹	SL、研究員
加部 重好	群馬県立群馬産業技術センター 金属材料係長(H27, 28)	研究員
黒岩 広樹	群馬県立群馬産業技術センター 金属材料係長(H29)	研究員
福田 俊二	群馬県立群馬産業技術センター 講師	研究員
荘司 郁夫	国立大学法人群馬大学大学院理工学府知能機械創製部門 教授	研究員
諸隈 湧気	国立大学法人群馬大学大学院理工学府博士前期課程学生(H29)	研究員
菅沼 友章	中部冷間株式会社 代表取締役	アドバイザー
藤木 榮	都立産業技術研究センター 専門技術相談員(H27), 藤木技術事務所 代表(H28, 29)	アドバイザー

1-3 成果概要

1-3-1 焼結冷間鍛造工法+表面熱処理における各工程条件最適化及び金属組織の制御

1-3-1-1 一次成形・一次焼結後及び冷間鍛造後の金属組織と機械物性評価による最適な成形体密度、焼結温度の更なる追究

試験片の金属組織評価、硬さ評価、靱性評価、静的強度評価、最適冷間鍛造荷重の確認実験などから、最適な焼結体密度及び焼結条件を明らかにした。主たる成果を以下に示す。

- ・一次焼結体の密度比で約94%(密度 7.4 Mg/m³)を達成した。
- ・一次焼結体の密度に関係なく、焼結温度 1000℃以上で表面拡散が生起することがわかった。
- ・一次焼結温度 1050℃以上で添加元素の未固溶状態が解消されることがわかった。
- ・一次焼結試験片の高密度化実験より、鍛造荷重 1200 kN が必要十分条件とわかった。

1-3-1-2 最終熱処理後の金属組織及び機械物性評価による最適熱処理条件の更なる追究

最適な一次焼結条件及び冷間鍛造条件を採用した素材に浸炭熱処理を施し、金属組織及び各種機械物性を調査することで、強度・靱性に優れ、特に疲労強度の優れる熱処理法を特定し、その機械物性の向上原理を明らかにした。主たる成果を以下に示す。

- ・ガス浸炭及び真空浸炭で有効硬化層 0.9 mm ~ 1.6 mm を達成した。
- ・熱処理試験片の衝撃値で最高 25 J を達成し、溶製材 ScCr420H 以上の靱性を得た。また、静的強度・疲労強度・耐摩耗性のバランスから 20 J を超えることが必ずしも重要でないことを明らかにした。
- ・熱処理試験片の静的曲げ強度は、熱処理検討過程で 1900 MPa 以上を達成した。ただし、疲労強度の向上に主眼をおいた最適熱処理条件では 1700 MPa であった。
- ・最適熱処理条件で曲げ疲労強度 1000 MPa 以上を達成した。
- ・熱処理済み試験片の平均密度 7.8 Mg/m³ 以上、表層域ミクロ密度比 99.5%を達成した。

1-3-2 製品レベルでの高機能化

1-3-2-1 カム用成形鍛造金型及びダイセットの開発・改良

新工法を実現するための縦方向による高密度圧粉成形体を量産ベースで製造できるよう 成形用金型及びダイセットを設計製作した。その成果として、

- ・成形金型のダイス（外金型）の材質の最適化と面粗度を最大限上げることにより耐凝着性・低摩擦を実現した。
- ・ダイセットはロングストローク対応ダイセットを採用し、更に高剛性・高精度を狙い構造を簡素化した。
- ・焼結鍛造材（低潤滑材原料粉）でのカジリのない成形が可能であることを確認した。

1-3-2-2 カムの密度評価による一次成形～冷間鍛造最適条件の選定

異なる焼結条件及び形状の一次焼結体を用いて、冷間鍛造荷重の最適条件の評価を実施した結果、

- ・一次焼結温度を変えて検討した結果、中温焼結品が高温焼結品より優れていることがわかった。
- ・異なるカム形状の一次焼結体を冷間鍛造し重要部位の高密度化に適した形状がみえてきた。
- ・焼結冷間鍛造に適した液体潤滑の優位性が認められた。

1-3-2-3 最終熱処理後の金属組織評価による最適条件の選定

最終熱処理に有効な工法として、真空高濃度浸炭窒化に着目して、既存のガス共析浸炭処理との比較を行い、熱処理条件を最適化して組織制御を図った。最適条件への取り組みとしてCPの調整による耐摩耗性の制御・浸炭深さの検討・残留オーステナイト組織及び球状セメンタイトの有効活用について評価を行った。主たる成果を以下に示す。

- ・球状セメンタイトが析出し硬さ低下の少ない、深さ 1.5 mm、C=1.098%を達成する熱処理条件を得た。
- ・マルテンサイト変態による圧縮残留応力により耐久性の向上が期待できる、深さ 1.3 mm、残留オーステナイト量(γ_R)=30.1%を達成する熱処理条件を得た。
- ・耐久性・耐摩耗性に優れた条件を選定し、深さ 1.5 mm で最表面から 0.6 mm まで 750 HV 以上を保持したカムを得ることに成功した。金属組織では球状セメンタイトと残留オーステナイトを併せ持った複合組織を得ることができ、C=1.132%・ γ_R =47%の高濃度浸炭窒化組織が得られ、これを最終熱処理条件と決定した。

1-3-2-4 高耐久性自動車部品「カム」の開発実験及びその評価

本研究で最適化した条件で作製したカムを用いて、耐久性試験（摩耗試験）を行い、製品レベルでの高機能化を検討した。主たる成果を以下に示す。

- ・摩耗試験において、表面に欠損（チッピング）が発生しない部品の製作に成功した。
- ・表面の圧縮残留応力が試験前より上昇し、表面粗さ（Ra値）が改善されることを確認した。
- ・相手材とのなじみが良く、負荷低減率が大きくなることで、良好な耐摩耗性が得られることを明らかにした。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属：井上熱処理工業株式会社

氏名：品質保証部 井上紀子

電話番号：027-268-5959

FAX：027-268-5588

E-mail：iht01@maple.ocn.ne.jp

第2章 本論— (1) 焼結冷間鍛造工法+表面熱処理における各工程条件最適化及び金属組織の制御

2-1 一次成形・一次焼結後及び冷間鍛造後の金属組織と機械物性評価による最適な成形体密度、焼結温度の更なる追究

本研究開発で取扱う試験片は、およそ幅 10 mm、高さ 10 mm、奥行き 55 mm の棒状シャルピー衝撃試験片サイズとし、その密度をアルキメデス法により測定した。一次成形体密度を一般的な密度である ρ 6.80 Mg/m³~7.4 Mg/m³ で変化させ、一次焼結温度を主に 800°C~1120°C (一般的限界温度) として焼結温度を変化させた。様々な条件で作製した試験片の曲げ強度、シャルピー衝撃値及び硬さの変化を調べ、比較した。

2-1-1 試験片の表面及び断面の金属組織評価

平均密度(ρ) 6.8~7.4 Mg/m³、一次焼結温度 800°C~1120°C としたとき、 ρ 7.2 Mg/m³ 以上かつ一次焼結温度 1000°C 以上で表面拡散 (粒界の凹形状) が起きていることが明らかとなった。また、低倍率金属組織撮影結果及び焼結体断面の EPMA 面分析結果から、焼結が進むにつれ、フェライト組織が減り、パーライト組織が増えることがわかった。これらの結果から、一次焼結温度が高くなるほど、強度及び塑性変形能が向上することが想定された。

2-1-2 試験片の硬さ評価

2-1-2-1 一次焼結体側面の表面硬さ評価 (HRA)

一次焼結体側面の表面硬さについては、密度及び一次焼結温度が高いほど、硬さも高くなる傾向が得られ、 ρ 7.4 Mg/m³ 以上、一次焼結温度 1000°C 以上で、有意に表面の平均的硬さが飽和することが明らかになった。

2-1-2-1 断面の心部硬さ評価

一次焼結体の心部の硬さ測定結果から、最適一次焼結温度は、1000°C~1100°C の範囲に存在することがわかり、以下の知見が得られた。

- ・フェライト及びパーライト組織の硬さ (HV) は、低合金鋼の範疇で安定していた。
- ・一次焼結温度が上がるにつれ、素材の脱炭すなわち炭素量が減少したことは、原料粉内酸素/酸化物の還元量が増え、潤滑剤中の炭素だけでなくグラファイトまで消費されたためとわかった。
- ・一次焼結温度が上がるにつれ、心部硬さ (HRA) も上昇した。硬さの変化は、脱炭よりも焼結の進行 (焼結ネック生成及び拡散) が支配的であった。
- ・心部硬さ (HRA) は一次焼結温度 1075°C で飽和し、それ以上一次焼結温度を上げる必要がないことを明らかにした。

2-1-3 試験片の衝撃試験による靱性評価

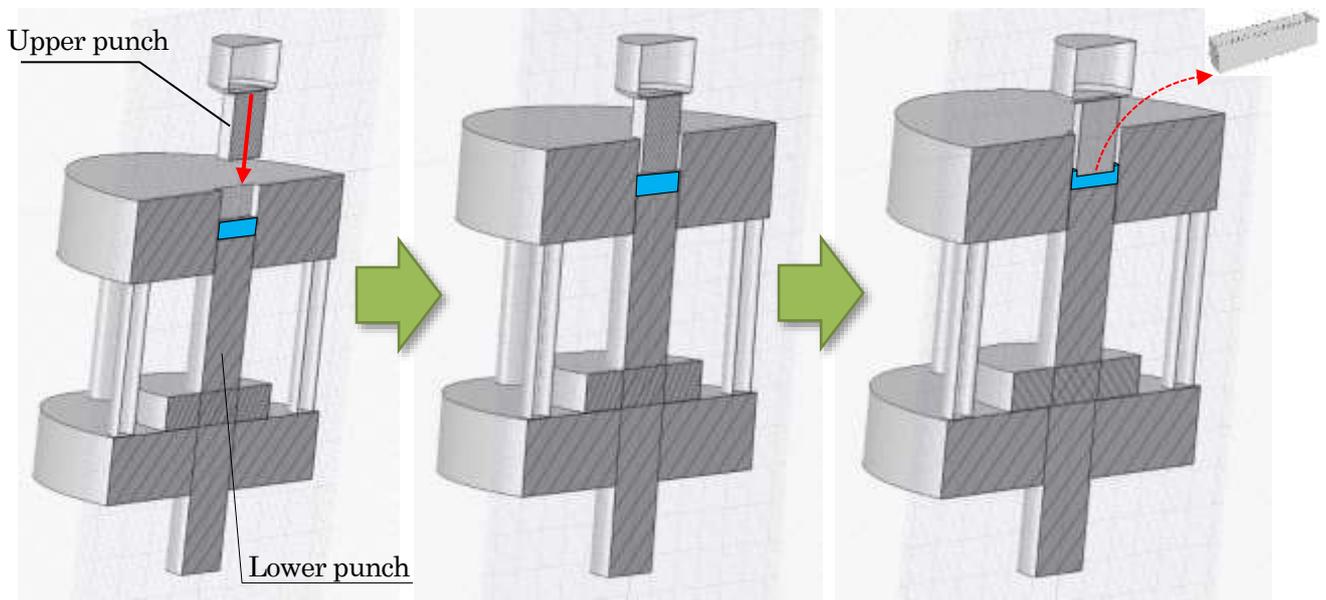
初期密度及び焼結時間一定の場合、一次焼結温度を上げるにつれ、衝撃値は指数関数的に上昇した。特に、 ρ 7.4 Mg/m³ 以上、一次焼結温度 1000°C 以上で衝撃値が 20 J~60 J まで有意に上昇することが明らかとなった。

2-1-4 試験片の静的強度評価

ρ 7.4 Mg/m³で、一次焼結温度を 1000°C~1200°Cで変化させて、3点曲げ強度を求めた。強度の極大値は 1155°Cで約 1040 MPaであった。強度が 1000 MPa 以上となる一次焼結温度 1075°C以上で、心部硬さも飽和することから、最適一次焼結温度を 1075°Cとした。

2-1-5 試験片の最適冷間鍛造荷重の決定

プレス機による冷間鍛造実験概略図(1/2モデル)及び試験片形状を図 2.1(a)(b)に示す。上パンチが 8 mm×53 mm、下パンチ・金型抜き穴形状が 10 mm×55 mmである。この後方押し出しにより発生する余肉は、上パンチの負荷に対し、全体的に上に伸びつつ中央が突出していく様相を示した。これにより、一次焼結温度が高い程、また一次焼結体密度が高い程向上する高密度化特性及び塑性変形特性を明らかにした。



(a) 試験片の冷間鍛造



(b) 鍛造後の試験片形状

図 2.1 一次焼結試験片の冷間鍛造概要及び鍛造後の試験片形状

ρ 7.4 Mg/m³の一次焼結試験片に、油圧プレス機による冷間鍛造実験を行った結果を図 2.2 に示す。図の平均密度をみると、1100 kN～1200 kN で密度が飽和し、それ以上荷重を上げる必要がないことがわかった。荷重 1100 kN～1200 kN 程度であれば、製造現場で量産可能と思われる。1100 kN 以上の場合、全ての一次焼結条件で鍛造面(上面)の表面を高密度化し、素材密度比 98.7%以上を達成した。また、鍛造後の表面粗さ及び寸法測定測定結果から、一次焼結温度 1000℃～1075℃の試料で鍛造することで良好な表面粗さと寸法精度の確保の両立が可能となることがわかった。

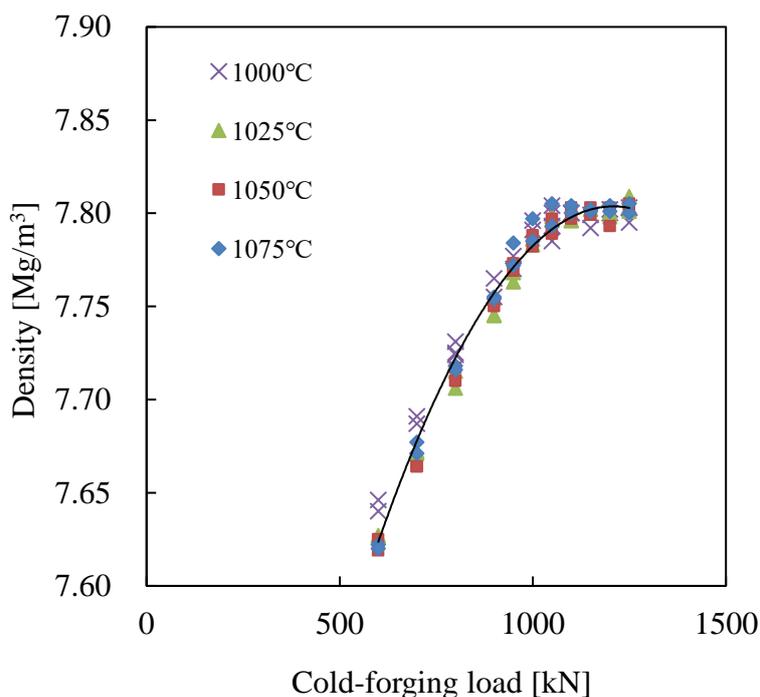


図 2.2 一次焼結試験片の冷間鍛造実験結果 (荷重－密度評価)

2-2 最終熱処理後の金属組織及び機械物性評価による最適熱処理条件の更なる追究

2-2-1 表面及び断面の金属組織評価

検討した熱処理条件をHT-1~5として表2.1に示す。

表 2.1 熱処理一覧

熱処理 No	熱処理内容
HT-1	ガス共析浸炭
HT-2	真空共析浸炭 1
HT-3	真空共析浸炭 2
HT-4	真空高濃度浸炭
HT-5	真空高濃度浸炭窒化

静的曲げ試験を実施し、破断面の電子顕微鏡撮影を行った。その結果、破断面に流線が確認される場合は焼結が不十分であり最終的な高強度化につながらず、平坦な破断面であることが焼結が十分な焼結冷間鍛造材であることがわかった。特に高強度化が期待できるのは、初期密度 ρ 7.4 Mg/m³ で一次焼結温度 1000°C~1075°Cであることがわかった。また、金属組織撮影結果 (図 2.3) から、強度低下につながる炭素及び添加元素偏析組織の減少、高強度化につながるマルテンサイトの微細化、耐摩耗性を向上させる球状セメンタイト及び靱性を向上させる残留オーステナイトが観察された。



(a) HT-1 表面組織



(b) HT-1 断面組織



(c) HT-5 表面組織



(d) HT-5 断面組織

図 2.3 焼結冷鍛材の浸炭熱処理後の金属顕微鏡写真

2-2-2 表面硬さ及び硬さ分布評価

図 2.4 に浸炭熱処理後のマイクロビッカース硬さ分布測定結果を示す。溶製材のガス共析浸炭では粒界酸化を起こし表面硬さが低下した。また、溶製材と焼結冷鍛材で浸炭深さはほぼ同じであった。本研究の高密度焼結冷鍛材は、各種熱処理条件で溶製材と同等の焼入れ性を有していることを確認した。

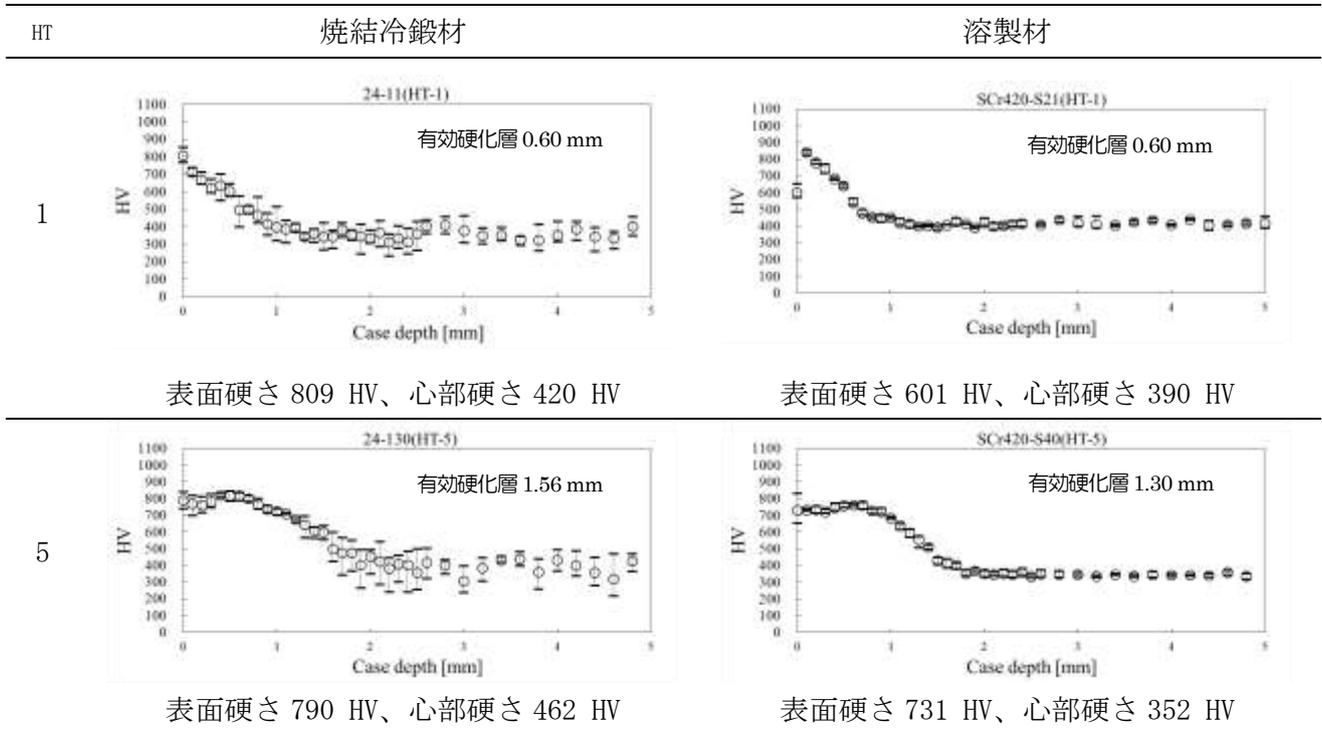


図 2.4 熱処理試験片の硬さ分布測定結果

2-2-3 衝撃試験による靱性評価

最適条件による焼結冷鍛材を熱処理し、衝撃試験を実施して、溶製材の結果と比較した。その結果、以下のことがわかった。

- ・衝撃値は HT-1(ガス共析浸炭) 材が最も高く 25 J で、HT-1 と溶製材 SCr420H の HT-5 材が最もばらつきが少なく安定していた。
- ・衝撃値で HT-3(真空共析浸炭 2) 材は HT-1 材より若干低下するが安定しており、最大衝撃荷重は HT-3 が最も高かつ安定していた。
- ・衝撃値は、検討した全ての熱処理条件で溶製材より優れていた。

2-2-4 静的/疲労強度評価

各種熱処理材の曲げ強度評価より得られた知見を以下に示す。

① 溶製材

HT-2 以降は HT 番号が増すにつれて残留オーステナイトが増加し、強度が低下した。マルテンサイトになりきれなかったこの軟らかい金属組織が多くなることから強度低下は必然といえる。

② 焼結冷間鍛造材

HT-2以降、HT番号が増すにつれてHT-4まで強度が向上した。これは熱処理条件の最適化が進み、溶製材に比べ炭素量の多い焼結原料粉の本来の機械的特性が発揮されるためとわかった。最終的に、HT-5で溶製材と焼結冷鍛材の両方がHT-4よりやや低い同程度の強度となったが、疲労試験を行ったところ、HT-5焼結冷鍛材の疲労強度が極めて高くなった。そこで、X線回折装置(XRD)で各熱処理材の残留応力及び組成比(マルテンサイト:残留オーステナイト:球状セメンタイト)を調べたところ、HT-5焼結冷鍛材は残留応力、残留オーステナイト量及び球状セメンタイト量が他の熱処理法に比べ非常に高く、さらに表面のショット処理によりひずみ誘起マルテンサイトの生成及び上乘せで圧縮残留応力の著しい増加が認められた。

よって、静的強度を第一に追求する必要はなく、HT-5は耐摩耗性及び高疲労強度向けの熱処理として有効に作用することがわかった。以上から、焼結冷鍛材への各種熱処理が及ぼす静的曲げ強度の変化が明らかになったが、その関係がそのまま疲労強度に反映されないことがわかった。

2-2-5 摩耗試験による耐摩耗性評価

一次焼結温度の最適条件(1075℃)と、最適になりうる可能性を持つ他の条件(1000℃)で作製した焼結体を用いた。これらに冷間鍛造及び最終熱処理を施すことで、耐摩耗特性がどう変化するかを調査した。本研究では、ピンオンディスク型摩耗試験を実施し、導入した形状解析レーザー顕微鏡を用いて摩耗試験後の摩耗部三次元形状を評価した。その結果、摩耗幅、摩耗深さ及び表面粗さ全てにおいて、一次焼結温度1075℃の方が値が小さく、耐摩耗性に優れることが明らかとなった。(データは図3.8~3.10参照)

2-2-6 試験片のミクロ密度(表層空孔率)評価

2-2-6-1 平均密度(マクロ密度)評価

一次焼結後試験片及び油圧プレス冷間鍛造後試験片の平均密度測定を行った。平均密度は試験片を水平

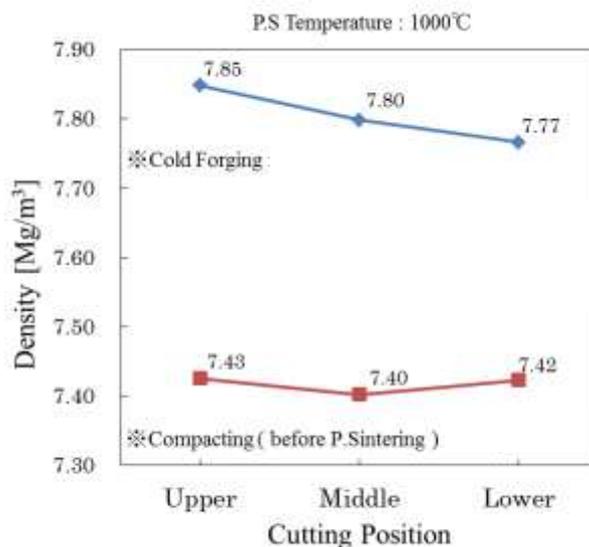


図 2.5 試験片の平均密度変化例

方向に3分割し、上(Upper)、中(Middle)・下(Lower)の各部位についてアルキメデス法にて測定した。冷間鍛造は片押し法のため、特に上(Upper)が高密度化する傾向を示すことを確認した。その際、一次焼結温度による初期密度の差異は殆どなく、例えば図2.5の冷間鍛造前後の密度測定結果から、上下の部位別密度の差異は0.1程度に収まることを確認した。また、最適冷間鍛造条件で余肉除去後の全体密度は平均で7.81 Mg/m³ (密度比99.2%) となった。

2-2-6-2 ミクロ密度 (表層域の空孔率) 評価

図2.6(a)(b)に示すとおり、最適条件での焼結冷間鍛造試験片の断面金属組織 (ノンエッチング状態) を調査した。画像を二値化しピクセル数をカウントすることで得るマイクロ密度を指標として、冷間鍛造荷重に対する密度変化の評価が可能であることを図2.7のとおり確認した。この計算条件を後述の製品評価にも用いることとした。

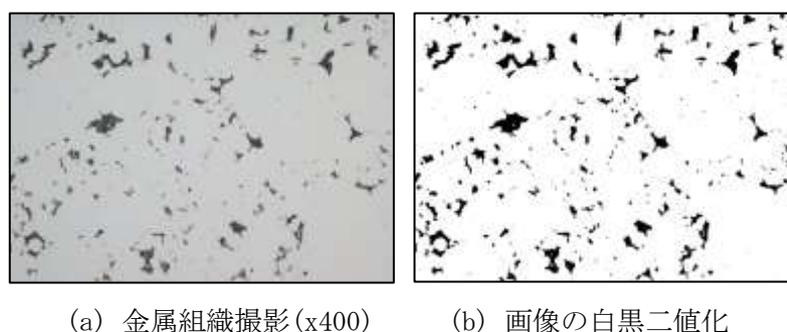


図 2.6 断面のマイクロ密度計算手順

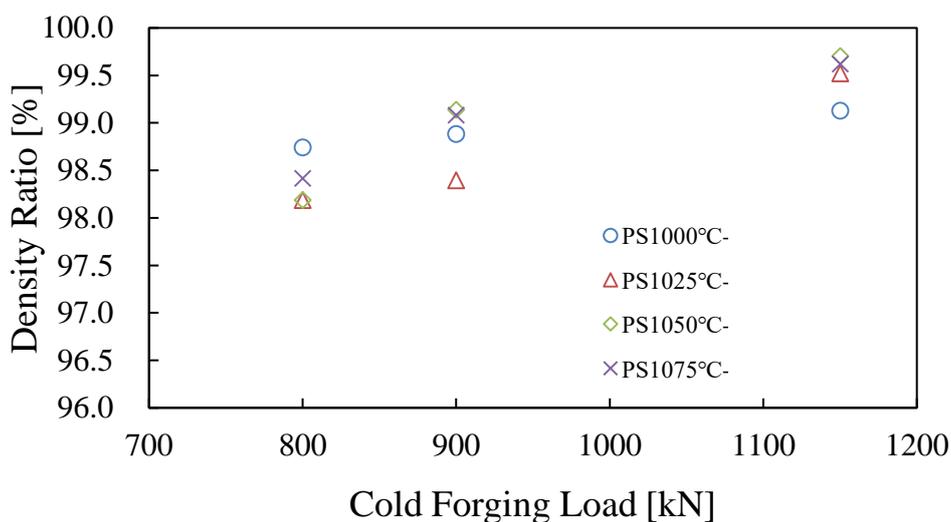


図 2.7 試験片表層域断面のマイクロ密度測定結果例

第3章 本論一（2）製品レベルでの高機能化

3-1 カム用成形鍛造金型及びダイセットの開発・改良

従来法では角型焼結体を第一鍛造にて長手方向に大変形させているため、高強度が必要となるカム重要部（山部）が低密度となった。その後、第二・第三鍛造により密度をあげていたため、鍛造工程は三工程必要となり、

- ① 耐摩耗に重要なカム山部表面に引張応力が発生
- ② 全体密度を上げることに注力していたため、結果として重要な山部の局所密度が低下
- ③ 冷間鍛造が3工程あるためコストアップの要因になっている

という3点の課題を有していた。

本研究開発で考案した新工法「金型ダイセットの重厚化及び縦打ち」による一回成形品を試作するため、成形用金型及びダイセットを設計製作した。その結果、以下3項目を施行することで、縦打ちでの安定した圧粉体成形を可能とした。主な成果を以下に示す。

- ① 成形金型のダイス（外金型）に粉末高速工具鋼を使用し、最大限面粗度を上げることにより耐凝着性・低摩擦を実現した。
- ② ダイセットは、縦成形を実現するためロングストローク対応ダイセットを採用し、更に高剛性・高精度を狙い構造を簡素化した。
- ③ 焼結鍛造材（低潤滑剤原料粉）でのカジリのない成形が可能であることを確認した。

ここで、量産を考慮した成形金型保護の観点から、適正な成形圧及び成形体密度を検証した。圧粉成形体の製作には、新規導入した200tロングストローク対応粉末成形機と縦成形ロングストローク対応ダイセットを使用した。成形金型はダイス（外金型）及び上パンチに高速度工具鋼を使用し、量産ベースの数量に耐えられる条件として密度6.9 Mg/m³と7.0 Mg/m³の圧粉体を製作した。これ以上密度を上げると、高速度工具鋼を使用しても、量産レベルの数量を継続して成形すると金型の破損が懸念されるためである。

よって、今回は密度6.9 Mg/m³を1000個、密度7.0 Mg/m³で100個以上試作した。この圧粉体を、これまでの研究結果（焼結温度、時間、炉内温度分布）を基に、最適条件で焼結した。

3-2 カムの密度評価による一次成形～冷間鍛造最適条件の選定

3-2-1 焼結冷間鍛造カムの試作開発

試験片の調査結果から、一次焼結温度によらずほぼ同じ設定鍛造荷重で上限密度に達することがわかっている。よってカムでは一次焼結条件（条件1～3）を変えながら、冷間鍛造荷重の最適条件の評価を実施した。冷間鍛造時のピーク荷重とカムの鍛造後の高さ変化を照らし合わせることで、鍛造荷重の限界値を調査した。

次に、得られた限界荷重に固定し、平均密度の調査を行った。その結果、条件1のカムでは脱落片が発生し量産には不適であること、各限界荷重及び最終平均密度を見ると、一次焼結条件は条件2よりも条件3が優れていることがわかった。

3-2-2 量産化に向けた一次焼結カムの鍛造実験

初回鍛造実験は、カム上面を完成形状と同様にした相似形（A～Cタイプ）の一次焼結条件を変えて製作し、鍛造後の密度、金属組織の塑性流動、カム上面へのパンチ形状転写状態及び外観特性を追及した。次に、一次焼結カムの上面形状の改良を目的として、カム山部溝なし（Dタイプ）、カム山部溝あり（Eタイプ）2種類の形状の異なる上パンチを製作し、一次焼結カムの最適形状を模索した。さらに、

この鍛造実験の結果を基にカム山部傾斜付形状（Hタイプ）を製作し一次焼結体への鍛造の効果を確認した。また、各タイプ別に、カム山部に塑性流動が起こりうる最適な形状であるかを検証した。その中で以下の冷間鍛造時における問題点解消を図った。（図 3.1 参照）

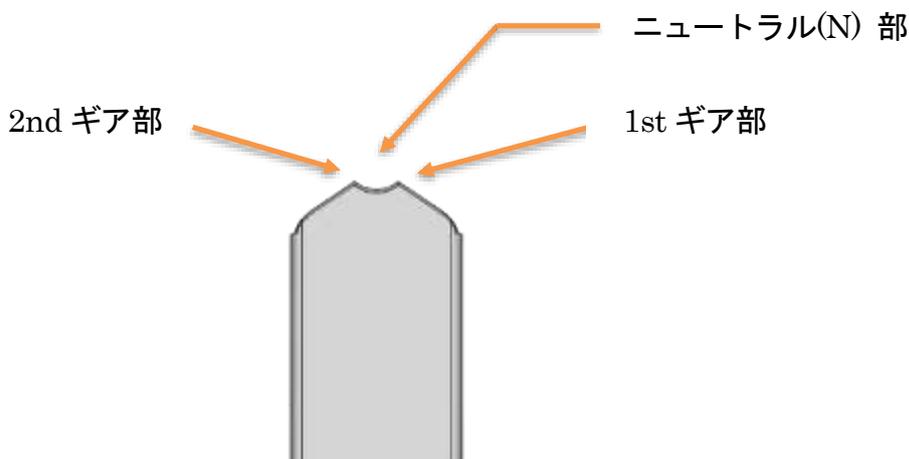


図 3.1 カム試作品

【問題点】

- ① 冷間鍛造時に、カム山部外周から発生した微量なバリが外金型側面に蓄積したことで、製品にカジリが発生し、鍛造不可能となった。よって、形状を改良する必要が生じた。
- ② 固体潤滑の場合、100 個を超えた辺りから潤滑不足によるカジリが起きた。量産を想定した 1000 個以上を冷間鍛造するには潤滑方法の見直しが必要となった。

【対策】

- ① 一次焼結カム外周の形状改良として、最終形状に合わせて製品中心部より傾斜を持たせつつ、カム山部を溝なしタイプにすることにより、冷間鍛造時のバリの発生を極力抑え、更に発生するバリを吸収する空間を設けることで、金型のカジリを防ぐこととした。一次焼結カム山部を溝なしタイプとしたのは、最重要部位であるカム山部の密度低下を防ぐ狙いもある。
- ② 潤滑方法では、個体潤滑および液体潤滑の効果を比較検証した。潤滑性能では、液体潤滑の優位性が認められるが、液体潤滑処理で生じる問題点の有無について確認・検証した。

3-2-3 マクロ密度評価

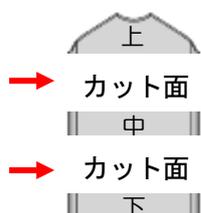
量産を考慮した冷間鍛造カムを上中下に三分割し、アルキメデス法で密度測定を行い評価した。その結果を表 3.1 に示す。

A~C タイプは一次焼結体の焼結温度を変えることにより鍛造時の荷重も段階的に変化することが明確になった。D タイプと E タイプは、一次焼結体の初期形状の影響で山部の変形量が多かった。また山部の密度は、ほぼ目標値の 7.4 Mg/m³に達しているが、変形量が多いために冷間鍛造時にバリが発生し、試料本体が外金型（ダイス）にカジリ、拔出不可能となった。

対策として、バリの発生を抑える目的で H タイプの冷間鍛造実験を行った。その結果、バリの発生を抑えた冷間鍛造が可能となった。しかしながら、現時点では目標である密度 7.4 Mg/m³に到達しなかった。今後、バリの発生を抑える技術を活かしつつ、量産に適した低荷重でカム山部の密度 7.4 Mg/m³を実現する一次焼結体の形状改良を継続していく。

表 3.1 マクロ密度測定結果一覧 単位：[Mg/m³]

試料各部位の詳細



形状／一次焼結	種 類	上	中	下
A タイプ ／条件 1	一次焼結体	6.817	6.802	6.981
	冷間鍛造後	7.401	7.324	7.316
B タイプ ／条件 2	一次焼結体	6.855	6.807	6.939
	冷間鍛造後	7.397	7.314	7.301
C タイプ ／条件 3	一次焼結体	6.804	6.789	6.955
	冷間鍛造後	7.411	7.283	7.258
D タイプ ／条件 4	一次焼結体	6.817	6.830	6.987
	冷間鍛造後	7.416	7.269	7.241
E タイプ ／条件 4	一次焼結体	6.848	6.805	6.968
	冷間鍛造後	7.427	7.289	7.251
H タイプ ／条件 4	一次焼結体	6.832	6.667	6.843
	冷間鍛造後	7.262	7.089	7.124

*原材料にバラつき(見掛密度)がある為、試料に関しても重量で±0.4g、密度で±0.05 Mg/m³程度のバラつきがある。

3-2-4 ミクロ密度評価

試験片と同じ手法でカムの重用部位であるカム山部のミクロ密度測定を行い、各タイプのカム山部表層域を観察した。その結果を表 3.2 に示す。結果 1st ギア部での表層域ミクロ密度は 93.7%~97.4%を達成していること、山部よりカム上面中央のニュートラル位置である谷部の方が高密度化していることが明らかとなった。

表 3.2 ミクロ密度比測定結果一覧 単位：[%]

形状／一次焼結	種 類	1st ギア	2nd ギア
A タイプ ／条件 1	一次焼結体	92.19%	86.78%
	冷間鍛造後	97.40%	97.00%
B タイプ ／条件 2	一次焼結体	96.92%	93.71%
	冷間鍛造後	97.11%	97.03%
C タイプ ／条件 3	一次焼結体	93.37%	92.27%
	冷間鍛造後	96.75%	95.89%
D タイプ ／条件 4	一次焼結体	78.55%	-
	冷間鍛造後	93.71%	92.69%
E タイプ ／条件 4	一次焼結体	91.13%	88.92%
	冷間鍛造後	95.31%	95.69%
H タイプ ／条件 4	一次焼結体	95.84%	-
	冷間鍛造後	94.98%	95.62%

3-3 最終熱処理後の金属組織評価による最適条件の選定

部品の耐摩耗性を向上する技術として浸炭焼入れが広く採用され、中でもガス浸炭焼入れが主流となっている。しかし、ガス浸炭焼入れではガス成分中に CO_2 や H_2O の酸化成分が微量含まれるため、表層に粒界酸化現象が起こる。一方、真空浸炭法ではアセチレン (C_2H_2) ガスによって浸炭されるために粒界酸化現象は起こらず、粉末焼結材には最適な熱処理法である。本研究開発では設備導入時の動作確認テストを経て、ガス浸炭1条件・真空浸炭4条件合わせて27回のテストを行った。

3-3-1 カーボンポテンシャル(CP)の調整による耐摩耗性の制御

浸炭層の表面炭素濃度(CP:カーボンポテンシャル)は、共析成分である0.8% Cが好ましいと言われてきたが、最新の研究ではCP 1.3%の高濃度浸炭組織が特に耐摩耗性に有効である。粉末焼結材の浸炭焼入れにも同様な成果が得られるか検証を行った。比較のために従来法のガス浸炭焼入れについてもテストを行った。

3-3-1-1 硬さ分布計測結果

HT-1条件及びHT-4条件の硬さ分布曲線は図3.2のとおりである。有効硬化層深さは、HT-1で0.6 mm、HT-4で1.3 mmであった。ガス共析浸炭では深さ方向の増加に伴う硬さの低下は大きい。一方、真空高濃度浸炭では硬さ低下は小さく、深さ1.0 mmでも650 HVの硬さが保持されている。

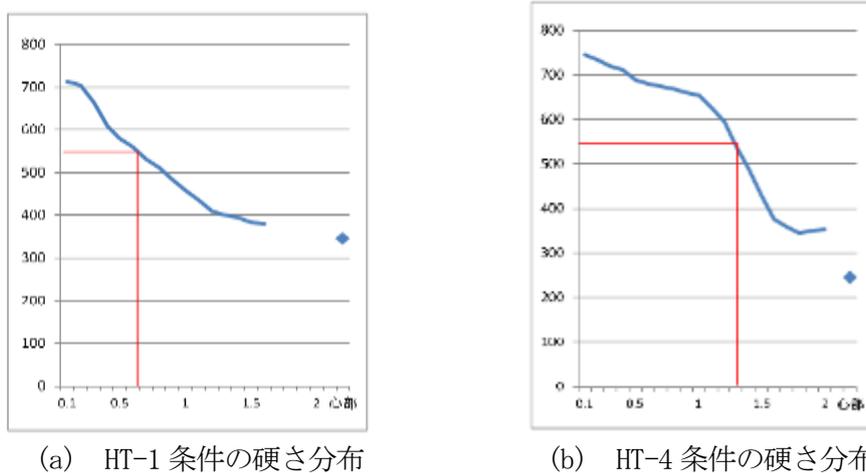


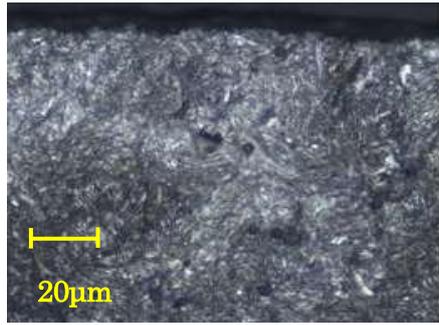
図 3.2 焼結冷鍛熱処理カムの硬さ分布(CPの影響)

3-3-1-2 金属組織

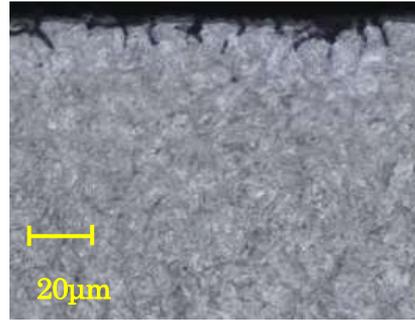
HT-1条件及びHT-4条件での浸炭層表面付近の金属組織をそれぞれ図3.3に示す。比較のために焼結材カムと溶製材カムの組織も併記した。HT-1条件では炭化物(セメンタイト組織)は認められず、C%分析結果と併せて考察すると、共析浸炭組織であることがわかる。

図3.3(b)の表面に深さ5 μm 程度の黒状組織が存在するが、これが粒界酸化組織である。しかし、図3.3(a)のとおり、本研究で開発したカム品には粒界酸化組織がほとんど認められない。これは酸化を促すCrがないためと考える。

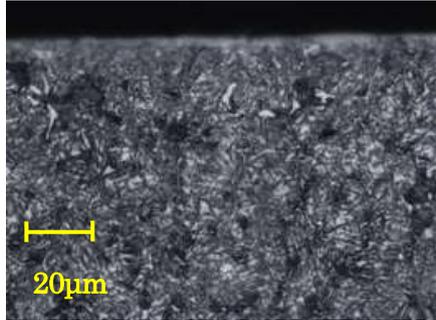
HT-4条件ではカム及び溶製材の両方に白い粒状組織が存在した。これらは球状セメンタイト組織である。スパーク放電発光分光分析装置(カントバック)による定量分析から、CP 1.098%であることがわかった。



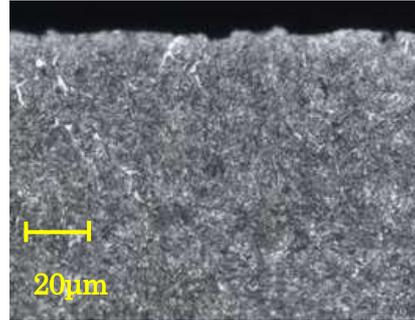
(a) HT-1 条件 (カム)



(b) HT-1 条件 (溶製材)



(c) HT-4 条件 (カム)



(d) HT-4 条件 (溶製材)

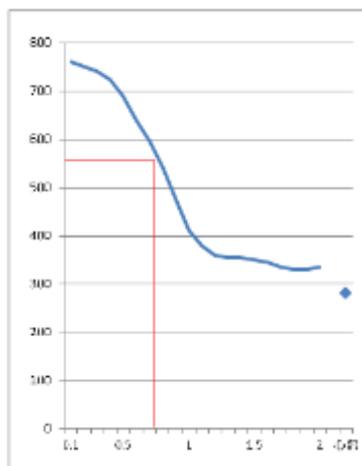
図 3.3 浸炭層表面付近の断面金属組織(CP の影響)

3-3-2 浸炭深さの検討

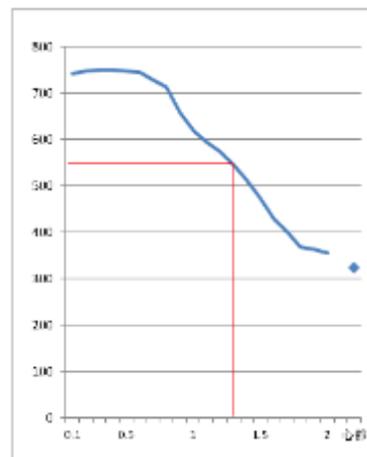
浸炭焼入れでは、浸炭層がマルテンサイト変態を起こし硬化する。マルテンサイト変態は膨張変態であるため、表層に圧縮残留応力が発生し、この圧縮残留応力が耐久性、耐摩耗性を向上させる。よって、浸炭深さが深いほど圧縮残留応力は大きくなり耐摩耗性の向上が期待される。浸炭深さ 0.8 mm (HT-2 条件) と 1.3 mm (HT-3 条件) 狙いの共析浸炭について比較テストを行った。

3-3-2-1 硬さ分布計測結果

HT-2 及び HT-3 条件での硬さ分布測定結果を図 3.4 に示す。HT-2 条件の有効硬化層深さは 0.78 mm、HT-3 条件では 1.28mm となり、狙い通りの結果が得られた。



(a) HT-2 条件の硬さ分布



(b) HT-3 条件の硬さ分布

図 3.4 焼結冷鍛熱処理カムの硬さ分布 (浸炭深さの影響)

3-3-2-2 金属組織

HT-2 及び HT-3 条件での浸炭層表面近傍の金属組織をそれぞれ図 3.5 に示す。HT-2 条件の表面炭素濃度は 0.694%で亜共析組織である。一方、HT-3 条件では、表面炭素濃度は 0.989%で過共析組織となり、最表面に若干炭化物の微細な粒が認められる。炭素量の多い HT-3 条件では HT-2 条件に比べて残留オーステナイトも多く観察される。

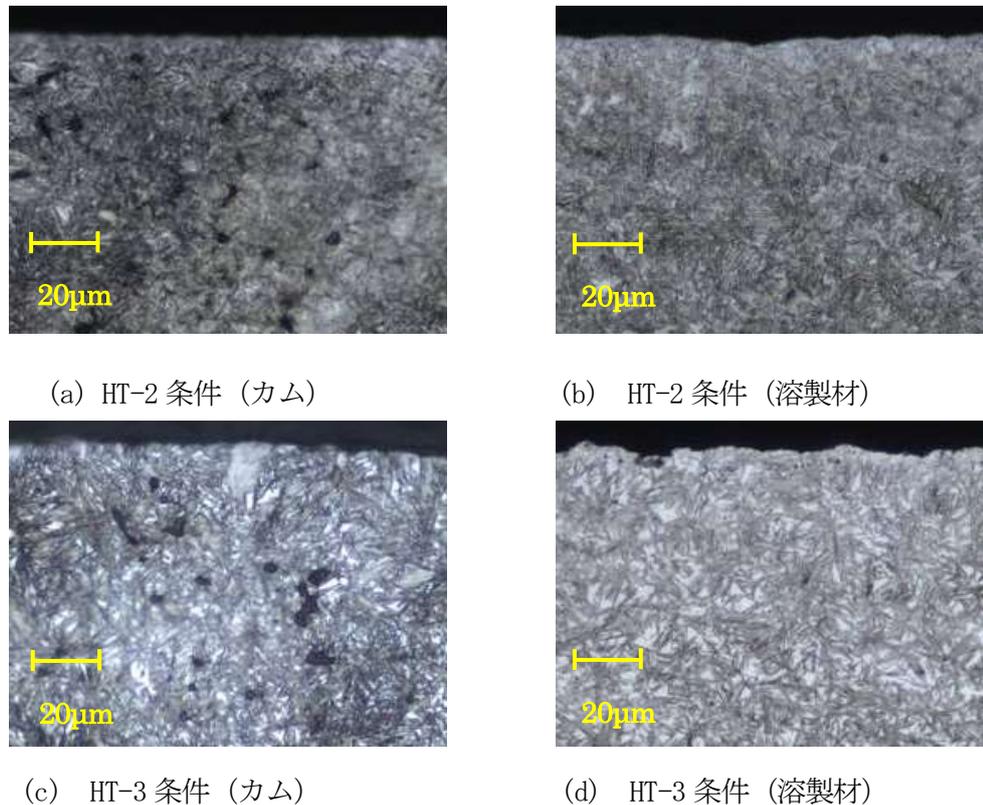


図 3.5 浸炭層表面付近の断面金属組織 (浸炭深さの影響)

3-3-3 残留オーステナイト組織の有効活用の検討

最近の研究によれば、污染环境下での転がり疲労に対して残留オーステナイト組織の存在は、耐摩耗性や疲労強度を著しく向上させるとの報告がある。井上熱処理工業におけるローラーピッチング疲労試験において 40~50%の残留オーステナイトによって疲労強度が 41%向上した実績もある。カムの使用状況はカム山部形状に沿ってΦ 8 mm ボールが転がる挙動であり、残留オーステナイト組織の有効活用が期待される。残留オーステナイトの出現には浸炭層へ過剰な炭素及び窒素を侵入させ焼入れする方法を採った。井上熱処理工業の研究成果から、残留オーステナイト 40%を出現させる目的で計算式： $\gamma R\% = 27(C + N)\%$ を用いて C = 1.3%、N = 0.2%をねらい、熱処理条件の選定を行った。また、炭化物の球状化のために浸炭処理後、再加熱処理を行った。

3-3-3-1 硬さ分布計測結果

図 3.6 に HT-5 条件における硬さ分布曲線を示す。550 HV 評価の有効硬化層深さは 1.50 mm である。最表面から 0.6 mm までは 750 HV 以上で深さ方向に対する硬さ低下は全くなく、高い耐摩耗性が期待される。

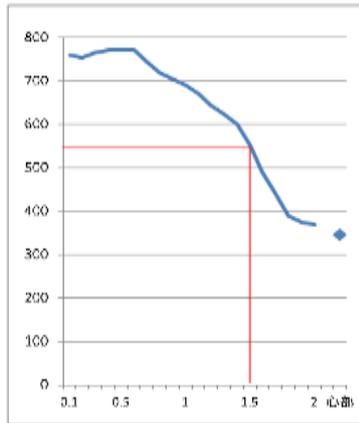
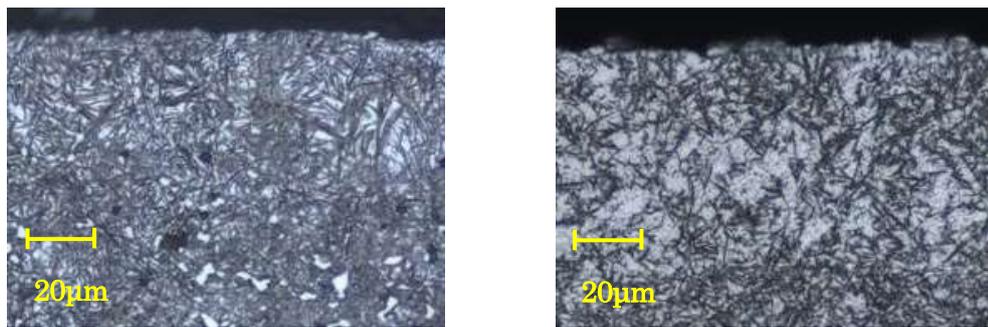


図 3.6 HT-5 条件の硬さ分布

3-3-3-2 金属組織

HT-5 条件で処理したカム及び溶製材の金属組織を図 3.7 に示す。カムにおいては、粒界に沿って球状セメンタイトが析出し、さらに残留オーステナイト組織も確認できる。X 線回折装置による測定



(a) HT-5 条件 (カム)

(b) HT-5 条件 (溶製材)

図 3.7 浸炭層表面付近の断面金属組織 (HT-5 条件)

では $\gamma_R = 47.0\%$ と計測された。比較のための溶製材では際立ったセメンタイトは確認できないが、残留オーステナイトは多量であり、測定結果では $\gamma_R = 49.0\%$ であった。最終的な評価は、耐久試験結果と併せ判断されるが、金属組織評価では本研究の評価の中で HT-5 が最も期待される。

3-3-4 熱処理工程における最適熱処理条件の選定

本開発では、真空浸炭による HT-2~HT-5 条件について、従来工法のガス浸炭焼入れ (HT-1) との比較データを取得して検討を行った。主な結果は次のとおりである。

① 表面硬さ

ガス共析浸炭 (HT-1) では 715 HV、真空浸炭 (HT-2~5) では 744~770 HV で、同一焼もどし条件 ($180^{\circ}\text{C} \times 120$ 分) にも関わらず、真空浸炭では表面硬さが向上した。これらの差は若干の粒界酸化の影響と判断される。

② 超微小硬さ

他社による開発において金属組織上の暗色組織は不完全焼入れによるベイナイト (又はトルースタイト) 組織の出現が示されている。本開発において種々の結晶粒を超微小硬さ測定した結果、828 HV~838 HV であり、不完全焼入組織はないと判断される。

③ カントバック測定結果

C%、N%はそれぞれテスト目的に合致した結果が得られ、残留オーステナイト量との整合性も良い。

④ 残留応力 (σ_R)

残留応力 σ_R はガス共析浸炭のHT-1 が-115.32 MPa と高く、HT-3 では-10.29 MPa、HT-5 では-57.24 MPa であった。残留応力は残留オーステナイト γ_R と相対関係があり、実車使用中に γ_R はマルテンサイト変態を誘起するため残留応力 σ_R は著しく上昇して耐摩耗性を向上することが期待される。

⑤ シャルピー衝撃値

浸炭深さの増加と共に衝撃値は低下するが、HT-5 では浸炭深さ 1.5 mm であってもカムでは 12.03 J あり、溶製材の 9.64 J よりも優れていた。焼結条件と熱処理の最適化により、気孔の影響が減り、炭素量が素材強度に妥当に反映されたためと考えられる。

⑥ 残留オーステナイト (γ_R)

浸炭条件番号(HT-1~HT-5)の増加と共に γ_R は上昇し、熱処理条件と γ_R とは整合していた。 γ_R の観点から評価すると、HT-4 及び HT-5 条件が耐摩耗性は良好と期待される。

⑦ 金属組織

各条件での金属組織は熱処理条件を反映した組織となる。狙い通りの球状セメンタイトの析出や残留オーステナイトの出現が確認された。

⑧ 摩耗試験

後述するがいずれも 100 万回をクリアし、耐久性に問題はないことが確認された。カムは高負荷の転がり摩擦を受け、若干の汚染環境で使用される状況を勘案すると、HT-5 条件が最適と考えられる。

3-4 高耐久性自動車部品「カム」の開発実験及びその評価

3-4-1 レーザ顕微鏡による摩耗部解析手法の検討

本研究では、表面処理による高強度、長寿命かつ耐摩耗性に優れた焼結部品の開発を目的として、摩耗試験を実施して開発部品の耐摩耗特性を評価した。摩耗試験による表面性状変化を調査することにより有効な熱処理条件を選定するために、非接触式の形状解析レーザ顕微鏡を用いた。

始めに、解析手法を検討するために、一次焼結を 1075°C と 1000°C で実施し、その後最終熱処理（浸炭・二次焼結）を施した試験片（55x10x10 mm サイズ）に摩耗試験を実施した。

摩耗試験は、ピンオンディスク型摩擦摩耗試験機（RHESCA FPR-210）を用いて、回転往復モードで、荷重 2000 gf、半径 3.0 mm、回転速度 24.0 rpm、角度 90 度、往復回数 10000 回で室温にて行った。相手材のピン材には SUJ2 のボール材（ Φ 4.763 mm）を用いた。摩耗試験後の摩耗部の三次元形状を形状解析レーザ顕微鏡にて評価した。

摩耗試験による摩擦力の測定結果を図 3.8 に示す。本研究では、90 度の回転往復モードで試験を行ったため、摩擦力は正負の値が検出されるが、絶対値をプロットした。最大摩擦力を比較すると、一次焼結温度 1000°C の方が 1075°C と比較して摩擦力が大きいことがわかる。

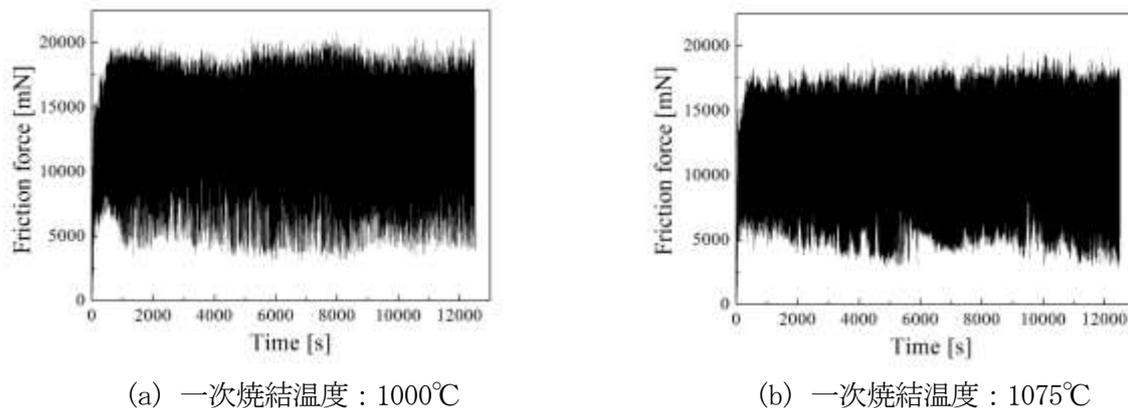
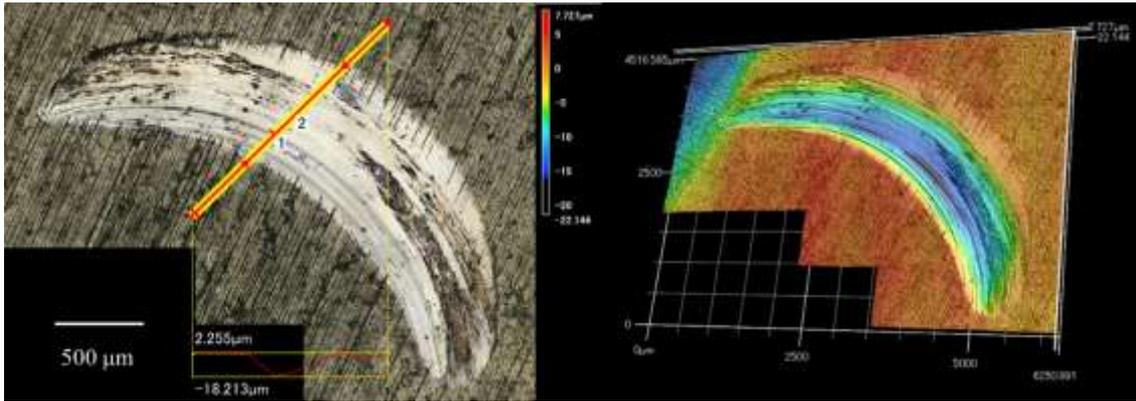


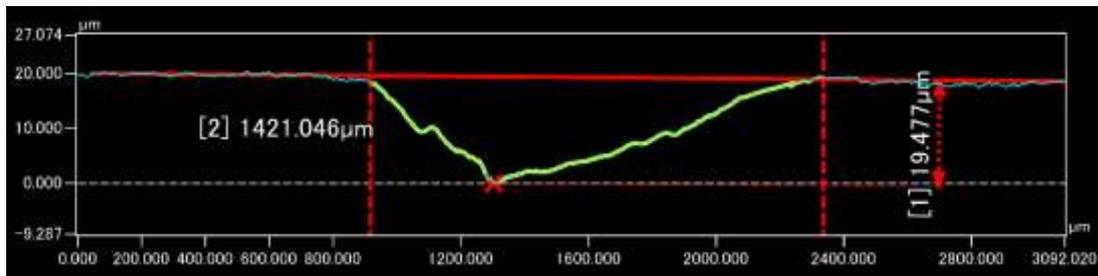
図 3.8 試験片の摩耗試験結果

図 3.9 及び図 3.10 に摩耗試験後の摩擦部を形状解析レーザ顕微鏡により解析した結果を示す。更に、表 3.3 には、図 3.9 及び図 3.10 の結果より得られた摩耗幅、摩耗深さ及び表面粗さをまとめて示す。両試験片共に摩耗部のみに円弧状に摩耗痕が生成することが確認できる。表 3.3 より、摩耗幅、摩耗深さ及び表面粗さすべてについて、一次焼結温度 1075°C の方が小さく耐摩耗性に優れることが明らかとなった。同解析手法を用いて、開発するカム製品の耐摩耗性解析を行うこととした。

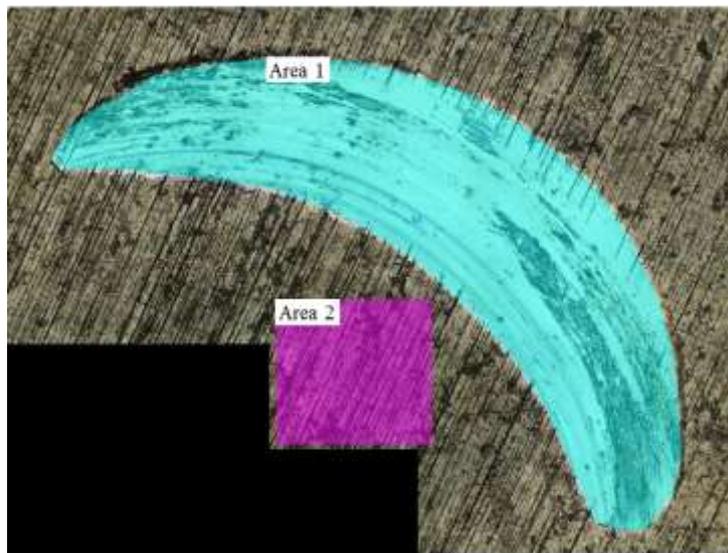


(a) 摩耗部

(b) 摩耗部 (3D 解析図)

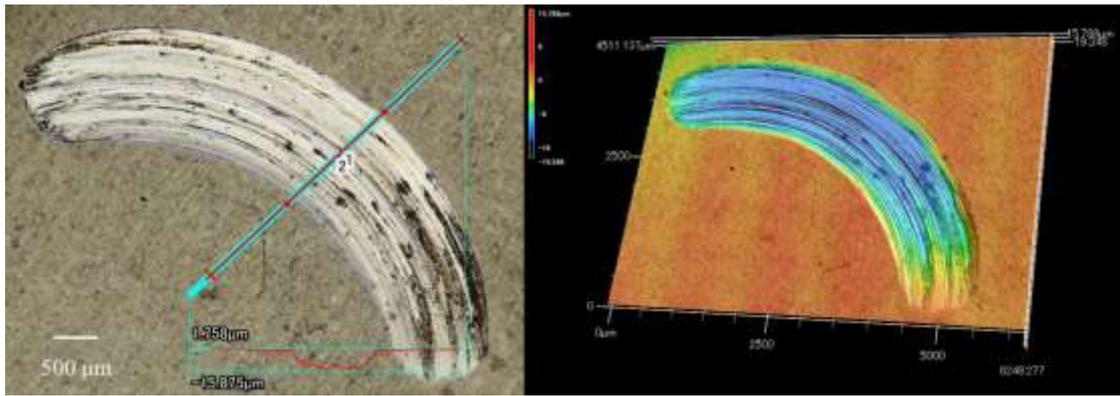


(c) 表面粗さプロファイル (図(a)のライン部に対する解析結果)



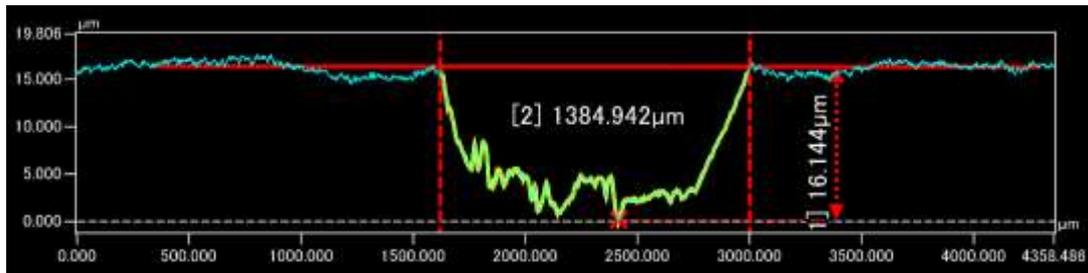
(d) 表面粗さ測定領域 (Area 1 : 摩耗部、Area 2 : 非摩耗部)

図 3.9 摩耗試験後の形状解析結果 (一次焼結温度 : 1000°C)

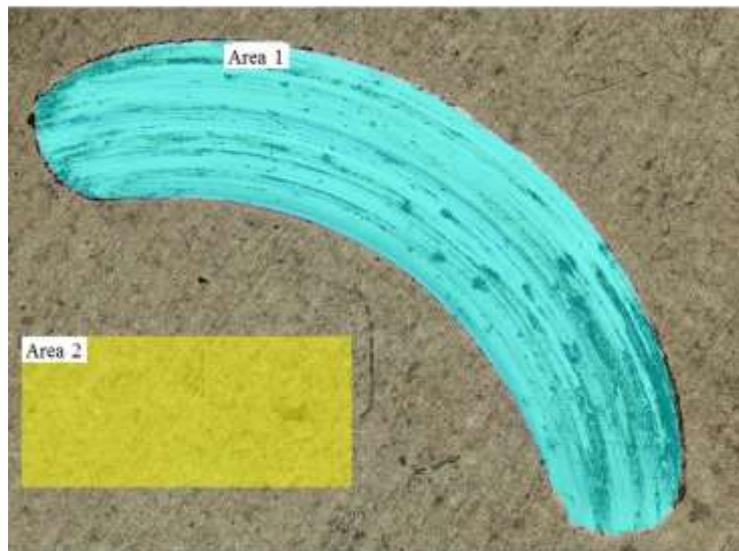


(a) 摩耗部

(b) 摩耗部 (3D 解析図)



(c) 表面粗さプロファイル (図(a)のライン部に対する解析結果)



(d) 表面粗さ測定領域 (Area 1 : 摩耗部、Area 2 : 非摩耗部)

図 3.10 摩耗試験後の形状解析結果 (一次焼結温度 : 1075°C)

表 3.3 試験片の摩耗試験による摩耗幅、摩耗深さ及び表面粗さ

一次焼結温度 (°C)	摩耗幅 (μ m)	摩耗深さ (μ m)	表面粗さ (μ m)	
			Area 1	Area 2
1000	1421.046	19.477	4.599	1.239
1075	1384.942	16.144	3.220	1.104

3-4-2 実環境シミュレート試験装置の開発

本事業で最適化した条件にて作製された「カム」部品の耐久性を評価するため、ボールプランジャを用いた実環境シミュレート試験装置を製作して、カム摩耗評価試験を実施した。図 3.11 に試験機の外観を示す。カム摩耗評価試験は、試験開始時に潤滑油を摩耗面に塗布し、カムの回転角を $\pm 20^\circ$ として実施した。試験時の負荷荷重は、試験中にボールプランジャ側が破損しない条件を検討し、初期位置で 180 N の設定とした。カム部品上の試験位置は、端部から 5 mm の位置とした。なお、試験は目標サイクルを 100 万回として実施した。本研究では、カム摩耗評価試験時に図 3.12 に示すような負荷荷重-時間曲線（負荷曲線）を取得して 1 サイクル当たりの面積を評価し、100 万サイクル（試験終了時）と 10 サイクル時（負荷曲線安定時）における面積比(式(1)参照)を、負荷低減率として定義し調査した。

$$\text{負荷低減率} = S_{1M} (\text{100 万サイクル時の負荷曲線の面積}) / S_{10} (\text{10 サイクル時の負荷曲線の面積}) \quad \text{--- (1)}$$



図 3.11 実環境シミュレート試験装置（カム摩耗評価試験装置）の外観

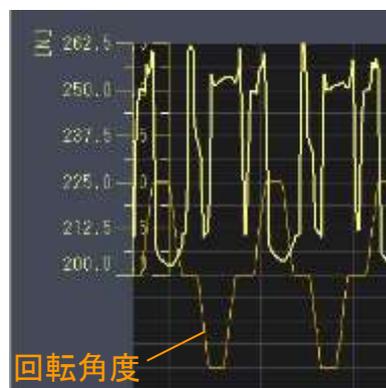


図 3.12 カム摩耗評価における負荷荷重-時間曲線（負荷曲線）の例

3-4-3 開発した高耐久性自動車部品「カム」の耐久性評価

摩耗評価試験用として、一次焼結体形状及び最終熱処理条件を変化させた 4 種のカム(試料 ID:E-HT-1, E-HT-3, E-HT-5, H-HT-5)を準備した。試料 ID に示すとおり、熱処理条件としてガス共析浸炭(HT-1)、真空共析浸炭(HT-3)、真空高濃度浸炭窒化(HT-5)の 3 種類を用いた。

また、一次焼結体の形状として、カム山部溝あり(E)及びカム山部傾斜付形状(H)としたものを準備し、EタイプにはHT-1、HT-3 およびHT-5 を、HタイプにはHT-5 を施した。

摩耗評価試験に先立ち、各試験片に対し、表面性状評価、マイクロ組織観察、表面部の硬さ及び残留応力測定を実施した。

マイクロ組織については、本事業で実施した熱処理条件の最適化に関する実験結果と同様のものが、カムにおいてもみられた。すなわち、ガス共析浸炭(HT-1)では、粗大マルテンサイトと残留オーステナイトが確認された。真空共析浸炭(HT-3)では、粗大マルテンサイトと残留オーステナイトに加え、粗大なセメンタイト相の析出も見られた。真空高濃度浸炭窒化(HT-5)では、他の熱処理材に比べ、マルテンサイトが微細になり、残留オーステナイトの生成領域が多くなり、それに加えて微細なセメンタイトの生成が見られた。なお、主に真空高濃度浸炭窒化試験片に見られる黒色部はエッチング処理による孔食部である。

表面粗さは、いずれの試験片についても、1~1.6 μm 程度となり、熱処理前の母材の値と顕著な差は見られず、熱処理による影響は認められなかった。

硬さについては、カムとボールの接触部の測定は困難であるため、側面部で実施した。本研究の熱処理は均一に行われているため、カムの位置によるマイクロ組織及び硬度の差はないものと考えられる。熱処理後ショットブラストを施したいずれの試験片においても、硬さに多少の差はみられるものの、838~995 HV の範囲で表面の硬化がなされていることが確認された。

残留応力についてはいずれの試料でも、214~368 MPa の範囲の圧縮残留応力が確認され、摩耗試験等における機械的特性の向上が期待できることがわかる。特に、真空高濃度浸炭窒化(HT-5)では、これまでの調査と同様に残留オーステナイトを比較的多量に残しつつ、300 MPa 程度の残留応力を確保することにより、耐摩耗特性の向上が期待できることを確認した(表 3.4 参照)。

また、表 3.4 に示した 4 種の試験片及び既存の溶製材(試料 ID: I-HT-1)にて製作したカムに対して、目標サイクルを 100 万回として摩耗評価試験を行った。その結果、すべての試験片において、摩耗部に欠損は発生せず、本事業で開発した焼結冷間鍛造工法及び表面処理により作製したカムは、いずれの試験片においても既存の溶製材による試験片と同様に、摩耗欠損が発生しない良好な耐摩耗特性を有することが明らかになった。

図 3.13 に試験後の試験片の表層をレーザ顕微鏡で観察した結果を示す。この測定結果をもとに、摩耗部の各種形状を調査した結果を、表面部の硬さ(試験前のカム部品側面部で測定)及び表面部における残留応力の測定結果と共に、表 3.4 にまとめて示す。図 3.13 と表 3.4 より、負荷低減率の値が小さいものほど、ボールとのなじみが良好となることが確認され、本研究で定義した負荷低減率(式(1)参照)は、摩耗抵抗の低減を表現する指標として有効であることが示唆された。

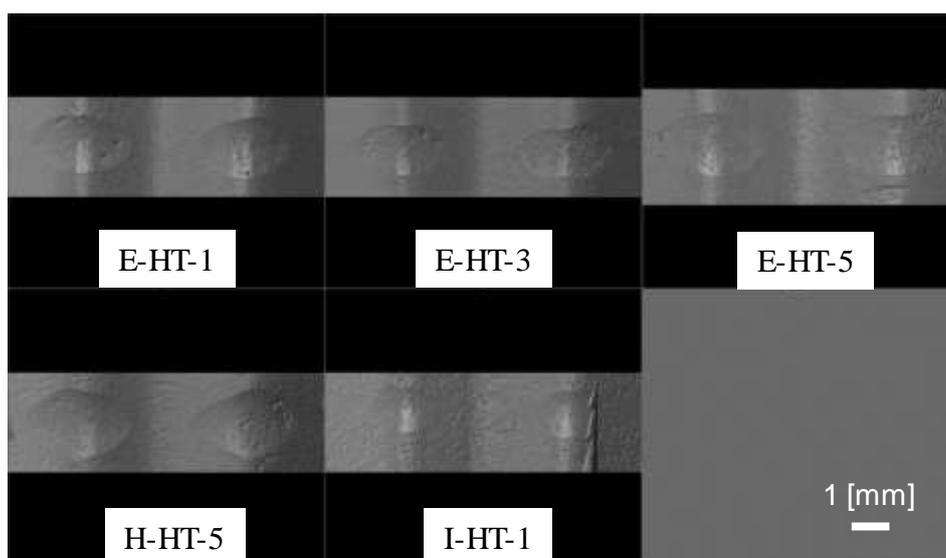


図 3.13 摩耗評価試験後のカム表面のレーザ顕微鏡観察像

表 3.4 カム摩耗評価試験結果

試料 ID	表面欠損	摩耗痕 (μm)		負荷低減率	表面粗さ (Ra)		表面硬度 (HV)	残留応力 (MPa)	
		深さ	長さ		試験前	試験後		試験前	試験後
E-HT-1	なし	78.3	1630	0.972	1.011	1.250	887	-368	N. A.
E-HT-3	なし	57.9	1348	0.958	1.616	1.772	845	-214	N. A.
E-HT-5	なし	71.5	1491	0.772	1.345	1.780	995	-308	N. A.
H-HT-5	なし	103.4	1954	0.749	1.573	1.166	838	-289	-333
I-HT-1	なし	35.7	1218	0.954	2.016	1.455	817	N. A.	N. A.

本事業では、実用化に向けた作製条件として、Hタイプの成形体形状にHT-5(真空高濃度浸炭窒化)の熱処理を施したもの(試料 ID:H-HT-5)が適切であると考えた。

表 3.4 に示したように、H-HT-5 のカムでは、摩耗試験後に、溶製材カム(I-HT-1)と同様、表面粗さは小さくなる傾向を示し、ボールとのなじみが良くなることが示唆された。さらに、H-HT-5 のカムにおける残留応力は、試験後において圧縮応力がやや増加する傾向が見られ、表面の欠損が起こりにくいことも示された。

溶製材カムの表面粗さは、試験後には他の試験片と同程度の値になるものの、試験前は一番粗い値を示した。試験前の表面粗さが粗くなっていたため、他のカムに比べ、ボールとの接触面積が増加するまでの過程に時間を要し、結果的に負荷低減率が大きな値を示した(負荷荷重があまり緩和されなかった)可能性があるが、摩耗痕が小さいことに関しては更なる調査が必要であると考えている。

よって、Hタイプの成形体形状に焼結冷間鍛造およびHT-5(真空高濃度浸炭窒化)の熱処理を施したカムにおいて、1-1-2-4で掲げた製品レベルでの目標値を達成できることが確認された。

第4章 補助事業の成果に係る知的財産権及び対外発表等

本研究開発の成果発表などを以下に示す。

4-1 特許出願

出願番号：特願 2017-145912 号、出願年月日：平成 29 年 7 月 27 日、

発明等の名称：鍛造材の製造方法

権利者名：群馬県、井上熱処理工業（株）、藤焼結合金（株）、国立大学法人群馬大学

4-2 学会発表

1. Y. Kamakoshi, I. Shohji, Y. Inoue, S. Fukuda: Improvement of Mechanical Strength of Sintered Mo Alloyed Steel by Optimization of Sintering and Cold-forging Processes with Densification, ICMER2017 Proceedings, IC011, pp.13-14 (2017), Pahang, Malaysia
2. Y. Kamakoshi, S. Nishida, K. Kanbe, I. Shohji: Finite Element Method Analysis of Cold Forging For Deformation and Densification of Mo alloyed Sintered Steel, ICMER2017 Proceedings, IC012, pp.15(2017), Pahang, Malaysia
3. 諸隈湧気, 荘司郁夫, 鎌腰雄一郎: 鉄系焼結冷間鍛造材の塑性変形シミュレーション, 日本金属学会講演概要 DVD(第 161 回), 306 (2017)
4. 諸隈湧気, 鎌腰雄一郎, 西田進一, 荘司郁夫: 有限要素法による多孔質材料の大変形シミュレーション, Mate 2018 (Microjoining and Assembly Technology in Electronics) Proc., pp.257-260 (2018)

4-3 論文投稿

1. Y. Kamakoshi, I. Shohji, Y. Inoue, S. Fukuda: Improvement of Mechanical Strength of Sintered Mo Alloyed Steel by Optimization of Sintering and Cold-forging Processes with Densification, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 257 (2017) 012011
2. Y. Kamakoshi, S. Nishida, K. Kanbe, I. Shohji: Finite Element Method Analysis of Cold Forging for Deformation and Densification of Mo alloyed Sintered Steel, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 257 (2017) 012012
3. Y. Morokuma, S. Nishida, Y. Kamakoshi, K. Kanbe, T. Kobayashi, I. Shohji: Plastic Deformation Simulation of Sintered Ferrous Material in Cold-forging Process, Materials Science Forum, to be submitted

4-4 受賞

1. ICMER(International Conference on Mechanical Engineering Research)2017 BEST PAPER AWARD
Y. Kamakoshi, I. Shohji, Y. Inoue, S. Fukuda
“Improvement of Mechanical Strength of Sintered Mo Alloyed Steel by Optimization of Sintering and Cold-Forging Processes with Densification”

第5章 全体総括

本研究開発では、焼結材の車載部品への適用を目的として、高密度一次焼結体に冷間鍛造を施して素材の高密度化及び表層域の超高密度化を図り、さらに表面処理を施すことで耐摩耗性を向上させる低コスト工法の開発を目指した。はじめに、試験片を用いて焼結冷間鍛造工法＋表面熱処理における各工程における最適化条件を調査し、金属組織を制御した。その成果を、製品レベルに展開して耐摩耗性の評価を行った。得られた成果を以下にまとめる。

5-1 試験片による焼結冷間鍛造工法＋表面熱処理工程の最適化条件の探索

試験片レベルでの焼結冷間鍛造工法＋表面熱処理工程条件の最適化を図り、当初掲げた目標値に対して以下の成果を達成した。

- ① 目標が一次成形・一次焼結体の密度比で約 91.4%以上、マクロ密度で 7.2 Mg/m^3 以上であることに対し、密度比約 94%、マクロ密度 7.4 Mg/m^3 を達成した。
- ② 試験片側面の表面金属組織：焼結の第一段階である表面拡散が焼結温度 1000°C 以上で起きていることを確認した。
- ③ 断面の金属組織観察により、焼結温度 1050°C 以上でグラファイトが粒界に析出していないことを確認した。
- ④ 熱処理済み試験片の硬さは、目標が表面で 60 HRA 以上、有効硬化層深さ 0.9mm 以上に対し、60 HRA 以上、有効硬化層 $0.9\text{mm}\sim 1.6\text{mm}$ を達成した。
- ⑤ 試験片のシャルピー衝撃値が、目標が一次焼結体 16 J 以上、熱処理材 20 J 以上に対し、一次焼結体で 20～60 J、熱処理材で最高 25 J を達成した。また、静的強度・疲労強度・耐摩耗性のバランスから 20 J を超えることが必ずしも重要ではないことも見出した。
- ⑥ 熱処理済み試験片の静的曲げ強度が目標 1900 MPa 以上に対し、熱処理検討過程で 1900 MPa 以上を十分達成したが、疲労強度の向上に主眼をおいた最適熱処理条件では 1700 MPa となることが明らかとなった。
- ⑦ 一次焼結試験片の最適冷間鍛造荷重が目標 1300 kN 以下に対し、最適値が 1200kN であることを確認した。
- ⑧ 熱処理済み試験片の曲げ疲労強度 (10^7 回) で、目標 (1000 MPa) 以上の 1020MPa を達成した。
- ⑨ 熱処理済み試験片の目標でマクロ平均密度が 7.4 Mg/m^3 以上、表層域マイクロ密度比が 98% 以上に対し、平均密度 7.8 Mg/m^3 以上、表層域マイクロ密度比 99.5% を達成した。

5-2 製品レベルでの高機能化

製品レベルでの高機能化を達成するために、カムを対象として、成形鍛造金型及びダイセットの開発を行い、一次成形から冷間鍛造までの最適条件を選定した。さらに、最終熱処理の最適条件を選定するために、硬さ分布計測と金属組織観察を行い、耐摩耗性の向上に有効なカーボンポテンシャル (CP) の調整、浸炭深さプロファイルを検討し、耐摩耗性の向上策として、残留オーステナイト組織の有効活用を検討した。最適化した条件で作製したカム部品を用いて、耐久性試験 (摩耗試験) を行い、製品レベルでの高機能化を検討した。その結果として、以下の成果を達成した。

- ① 既存の横面及び上面の鍛造の二段階工程を上面のみの一工程に改善する成形／鍛造用金型・ダイセットを開発してカムの試作を行い、量産に向けた課題の抽出を行った。素材マクロ密度 7.0 Mg/m^3 以上の目標値に対し、およそ 7.4 Mg/m^3 を達成でき、摩耗部位付近での材料の塑性流動による表層の高密度化が確認された。また、目標値を 97%以上とした表層域マイクロ密度比については、97.4%を達成する条件も見出したが、本研究で耐摩耗性向上に最適な条件とした試料においては、約 95%となり、今後の検討課題となった。
- ② 最終熱処理に有効な工法として、真空高濃度浸炭窒化に着目して、既存のガス共析浸炭処理との比較を行い、熱処理条件を最適化して組織制御を図った。その結果、真空高濃度浸炭窒化処理では、不完全焼入組織がない処理ができており、その表面硬さはガス共析浸炭処理よりも高くなることを示した。また、既存の溶製材と本研究の焼結材に対する真空高濃度浸炭窒化処理の効果を比較したところ、焼結材の方がシャルピー衝撃試験値に優れることを示した。耐摩耗性の向上策として、圧縮残留応力の負荷及び残留オーステナイトの有効活用を検討し、それらを可能とする熱処理条件を確立した。
- ③ カム摩耗試験については、当初目標としたカム摩耗試験後、表面に欠損（チッピング）がないことを確認した。また、最終熱処理条件を最適化したカムにおいて、表面残留応力が試験前より上昇し、表面粗さ（Ra 値）が改善されることが確認された。さらに、本研究で最適化したカムでは、相手材とのなじみが良く、負荷低減が大きくなることで、良好な耐摩耗性が得られた。そのため、当初目標とした摩耗痕（溶製材と同レベルの摩耗深さ：数十 μm 程度、幅約 3 mm 以内）については、摩耗深さは 100 μm 程度となった。この差の要因としては、焼結材のなじみ性が良いこと他に、溶製材の表面粗さが大きいことも影響しているものと考えられ、実装試験での評価も含め、今後の検討課題となった。

5-3 事業の成果に係る事業化展開について

本開発の焼結冷間鍛造工法で製作するカムは、事業化に向けての試作途中であり、タイプ別のカムの冷間鍛造後のカム面転写性を既存部品（溶製材カム）と比較評価も行っている。コスト面では既存溶製部品と本開発による焼結鍛造品を原材料、各工程でコスト比較した結果、新工法（本開発縦成形）の効果で既存部品より原材料のアップ分を工程削減実現により吸収することができ、現時点ではコストダウンを実現している。今後、Tier1 企業にて最終型カムの実装試験を実施する予定である。

最終目標は、焼結冷間鍛造カムの量産化と技術の水平展開である。現在取組んでいるカムは複雑な 3D 形状であり開発難易度が高い方である。これに並行してベアリング、スプロケット、その他小型複雑形状の部品などで水平展開を行い、焼結冷間鍛造工法での量産実績を積み重ねていく予定である。

本研究開発では、試験片ベースでの一次焼結条件及び冷間鍛造条件の最適化のための実験及び評価をほぼ終え、成形／鍛造金型・ダイセットの開発とカムの試作及びその高密度化した金属組織の評価を行った。よって、今後量産化を見据え、自動化した最適形状の圧粉体成形及びより優れた焼結冷間鍛造用の潤滑工程について、引き続き研究開発に取り組んでいくものである。