冷間鍛造解析による焼結鋼の耐摩耗向上

群馬県立群馬産業技術センター 鎌腰 雄一郎 国立大学法人群馬大学 西田 進一

1. はじめに

本研究は、焼結材高密度化モデルの数値解析手 法と焼結冷間鍛造法および真空浸炭熱処理法によ り、最終的に耐摩耗性が要求される鉄系自動車用 ミッション部品「焼結冷間鍛造カム」の実用化を目指 すものである.

図1 に示す焼結カムは、従来の製法では転がり 摩耗により早期に欠損を生じてしまい、製品として 不適である.これを数値解析および焼結冷間鍛造 工程条件の最適化による高密度化、そして熱処理 の最適化により耐摩耗性に優れたものへと改良す る必要がある.



図1 焼結冷間鍛造カムの外観および摩耗部

三次元形状の焼結部品全体を冷間鍛造する解 析事例が殆ど存在しないのは,鉄基焼結体では鍛 造中の高密度化と結合粒子の塑性変形が同時に 起き,計算で製品全体を再現することが困難である ためと考えられる.

当研究チームでは、これまで主流である焼結体 断面の気孔形状や分布を忠実に再現し解析する 局所二次元解析手法とは異なる多項式近似法 いと 呼ぶ新たな手法で、角形焼結試験片の密度分布 や形状変化を三次元解析することに取組んできた.

本研究ではそれを更に発展させ,成形・鍛造に よる密度変化の予測により,最適な高密度化金型 を仮想設計できるようにし,さらに耐摩耗性に優れ た真空浸炭熱処理で表面改質をすることで高密度 かつ高い耐摩耗性を有する焼結部品の実現を目 指した.

2. 目的

本研究では、まず金型の試作と共に数値解析手 法を用いて焼結鋼の冷間鍛造を再現し、密度分布 および形状の予測を通じて、高密度を実現しうる金 型形状を決定する.その上で高密度冷鍛材に有効 な真空浸炭熱処理を施し、優れた耐摩耗性を実証 することを目的とした.

3. 実用的な価値(実用の見込み)

これまでに例のない三次元形状部品の圧粉体成

形から冷間鍛造までの局所および全体の密度変化 を表現可能な,多孔質体 FEM 解析手法を確立した.これにより,自動車部品等の重要部位をより高 密度化しうる必要条件(金型形状,荷重など)を算 出する仮想設計を可能とした.

また,高密度焼結冷間鍛造材に対し,耐摩耗性 に優れる高濃度炭素真空浸炭窒化熱処理を施す ことで,表面および金属組織の改質を行った.その 結果,優れた機械的特性および表面特性(高密度, 高強度,高硬度)を獲得できることを示した.

さらに、図2に示すように、製品にかかる転がり摩 耗(a)よりも厳しく摩擦係数で約 100 倍 ²⁾となるすべ り摩耗状態(b)において、基準となる相手材 SUJ2 に対し高い耐摩耗性を示すことに成功した.これに より、高強度かつ耐摩耗性が要求される焼結冷間 鍛造カムをはじめとする様々な高耐久性焼結鍛造 部品の実用化を可能とする基礎技術を確立した.



図2 実製品と本研究のモデル

4. 研究詳細(実験結果と考察)

図3に実験と解析からなる本研究の流れを示す.



図3 本研究の流れ

4.1 原料粉

原料粉には焼結冷間鍛造粉として開発された JFE スチール(㈱製 SGM シリーズを採用した.本報 告では記載を省略するが,原料粉を No.1~No.6 まで C および Mo の組成を変えて角棒試験片を作 製し,冷間鍛造における高密度化特性および塑性 変形能を調査した.その結果,両特性に優れ強度 も期待できる No.6 を以降の実験に採用した.

表1に No.6 原料粉(SGM10MO-35G)の化学組 成を示す.これらは純鉄粉表面に Mo を拡散付着 させた部分拡散合金粉に, グラファイト(Gr)を 0.35%または 0.05%, および Wax 系潤滑剤 0.5%を 添加したものである.

- 表1	原料粉の	化学組成	(wt%)
11/1	「ホイイイカマノ		(WL70)

No.	С	Si	Mn	Р	S	Mo	Gr
6	0.02	0.01	0.15	0.09	0.006	1.04	0.35

4.2 試験片作製条件および工程

図4に示すように、実験は工程(a)~(d)の順で実施し、FEM解析は工程(a)および(c)について行った.実際に耐摩耗性が要求されている自動車部品である焼結カムの山部を想定し、円柱の先端が円錐形状の簡易モデルとした.円錐は、摺動摩耗を受ける高密度化した突起部を表現可能で、また計算時間短縮のための二次元解析が可能な軸対称モデルとして扱えるため、これについてFEM解析と鍛造実験を行った.成形、一次焼結(Primary Sintering: PS)、冷間鍛造(Cold Forging: CF)における密度変化を調べ、熱処理後耐摩耗性を確認した.



図4 円錐形試験片先端の高密度化工程

4.2.1 実験

(a) 圧粉体成形

型設計には、先端半径 R を製品と同じ 1mm とし、 一次焼結体の先端角度 θ を試験片の取り扱いや すさおよび金型の耐久性の観点から 60° とした.

見かけ密度 3.16 Mg/m³, 円柱直径 12mm, 初期 粉末高さ 27.26mm から粉重量を約 10g とし, 成形 荷重ごと圧粉体の密度変化を調査した. その結果, 目標平均密度約 7.0Mg/m³, 直径 12mm, 高さ 12mm となる圧粉体成形荷重が 70kN となることを 確認した. 以降, 円錐試験片の成形荷重を 70kN に統一した.

(b)一次焼結

過去調査した最適条件を採用した. 真空炉を汚 染しないための脱ワックス工程として大気加熱 550℃で 40min 後炉冷を行い, 一次焼結工程とし て真空 1100℃, 60min 加熱後, 炉冷を行った. (c)冷間鍛造

焼結体の鍛造後先端角度 θ が 120° となるよう

鍛造用上パンチを加工し, 鍛造荷重を 70kN とした. (d) 熱処理(Heat Treatment: HT)および最終評価

焼結体の鍛造による高密度化のみでは,必ずし も高強度化及び長寿命化につながらない.すなわ ち,高密度化に伴う危険密度域で発生するナノ オーダーの粒界亀裂により素材表層域に損傷が起 き,静的強度および疲労強度を低下させる.これに 対し,更なる高密度化と二次焼結を兼ねる真空浸 炭熱処理でナノクラックを消滅させることができ,高 靱性及び高疲労強度が得られる³⁾.よって,これま での研究から有効性が示されている高濃度炭素真 空浸炭窒化処理条件(HT5)を改良した HT6 条件 (真空浸炭 1000℃-150min,窒化 860℃-80min,油 焼入れ,焼戻し 180℃-120min(空冷))を採用する ことで耐摩耗性を向上させ,摩耗試験により最終評 価を行った.

4.2.2 FEM 解析

(a) S-S 線図の取得とFEM 解析

圧粉体成形実験から、荷重-ストローク線図を得 て、密度変化を考慮した真応カー真ひずみ線図を 作成した.有限要素法の材料モデルは多孔質体モ デルとした.真応カー真ひずみ線図を求めるにあ たり、新たに考案した相当ひずみ参照法により補正 した.相当ひずみ参照法は、これまで提案してきた 多項式近似法が積の演算であるのに対し、和と差 の演算を施す S-S 線図補正法である.加えてフ ローティングダイ法も解析に組み込んだ.

その結果, 圧粉体成形実験と解析結果の荷重-ストローク線図および密度を比較し, 良い一致を得 た. 得られた真応力-真ひずみ線図を用いて, 円 錐の圧粉体成形とそれに続く冷間鍛造の FEM 解 析を行い, 密度分布, 荷重-ストローク線図, 形状 変化などのデータを得た.

(c) 鍛造解析結果と実際の比較

金型への負荷を低く抑え,かつ高密度化を実現 するため,冷間鍛造荷重を圧粉体成形と同じ 70kN とした.実際の円錐形試験片の密度分布および形 状変化を解析結果と比較し,視覚的及び数値的に その妥当性を検証した.

4.3 評価方法および調査結果

4.3.1 気孔分布およびミクロ密度算出

図 5-1~5-3 に,円錐形試験片の断面の気孔 分布状態を示す.図5-1 および5-2 から,一 次焼結体の時点では尖っている先端が冷間鍛造 により圧縮され,高密度化していることがわか る.また,図5-3 に示すように,縦切断面が中 央より若干ずれている場合,より表面付近まで 高密度化していることから,表層域の高密度化 状態が山の高さ位置により異なっており,山先端 の高密度化が最後に起こること,すなわち高密度 化が最も難しいことがわかる.この傾向は,後述す る FEM 解析結果と一致する.



図6に示すように,FEM 解析による要素単 位の密度分布と比較検証のため、山先端の表層 域から心部までの連続画像からミクロ密度分布 を求めた.計算に使用したノンエッチング断面 画像(倍率 400 倍)は、351.56 µ m×263.56 µ m の矩形領域である.



図6 ミクロ密度計算位置

撮影した断面画像を白黒二値化処理し,二次 元ミクロ密度分布を算出した.結果については, 次項の FEM 解析結果と併せて後述する.

4.3.2 圧粉体成形および冷間鍛造の FEM 解析

当初の計画(多項式近似法³⁾)を発展させ,解析 の有効性を高めることを目的として,圧粉体成形お よび冷間鍛造での密度予測が可能な解析モデル (相当ひずみ参照法)を新たに構築した.解析ソフト はヤマナカゴーキン社製 CAE ソフトウェア DEFORM を使用した.密閉型による円柱の圧粉体 成形実験の解析を行い,多孔質体および相当ひず み参照法により,本研究で対象とする粉末の密度 変化を考慮した真応力-真ひずみ線図を取得した. 表2に FEM 解析条件を示す.

表2 解析条件

要素数[count]	1000			
計算ステップ数[step]	100			
ステップ増分[sec/step]	0.1			
工具速度[mm/sec]	180			
試験片とパンチ間のせん断摩擦係数	0.12			
停止設定[mm]	8.8			
リメッシュ干渉深さ[mm]	0.1			

図7に円柱の圧粉体成形実験から得た真応力– 真ひずみ線図,一般的な低炭素鋼から想定した S-S線図による解析値(初期値)および相当ひずみ参 照法を採用した補正後の解析値を示す.



補正前後) 図7に示されるように,パンチストローク 9mm まで ほぼ一致する結果が得られた.なお,密閉圧縮の ため,ストローク 9~10mm 付近のように圧縮量が増 えるほど解析では高荷重になる傾向が見られる.こ

れは金型の弾性変形によるもので、最後に肉の逃 げ場がなくなり急激に上がっていると考えられる.し かし、実際はここまで圧縮することはないので問題 ないとみる.よって、適正な真応力-真ひずみ線図 の補正がなされたと判断し、これを円錐形の圧縮解 析に用いた.

図8に円錐形圧粉体成形の解析結果を示す.

実験値に対し、メッシュを 1000 とした場合より 2000 とした方がより解析精度が上がることがわかる.よっ て以降の解析ではメッシュを 2000 とした.



最後に円錐形試験片の一次焼結材(圧粉体)お よびその冷間鍛造材について,相対密度分布の実 験値と解析値を比較検証した.

図9に相対密度分布の解析結果を示す.図から 一次焼結(PS)材および冷間鍛造(CF)材ともに圧縮 による密度分布を視覚化できていることがわかる.





図9の解析結果を検証するため,図 10 に PS 材 および CF 材の表層域断面のミクロ密度測定結果 と解析結果を併せて示す.

図から, 高密度の PS 材が CF によってさらに高 密度化していることがわかる. ここで, 実際の PS 材 の 500 µm 深さ付近の1点で密度が低く見えるが, これは突発的に大きな気孔が計算用画像に入って いたためである. また, 試験片で確認した CF 材の 山先端から山心部に向かうほど真密度に近づく傾 向も本モデルで表現できている.

よって, 圧粉体成形および一次焼結体の冷間鍛造に用いた本研究の高密度化 FEM 解析手法(相当ひずみ参照法)は, 実際と同傾向となる良好な結果が得られることが示された.

4.3.2 機械物性試験結果

表3に熱処理材の表面硬さ試験,曲げ強度試験, シャルピー衝撃試験結果を示す.なお,曲げ強度 およびシャルピー衝撃値は円錐形試験片と同時に 熱処理したノッチなし角棒(10×5×55mm)の値であ り,参考値とする.各値から,真空熱処理であるが 故に最表面の硬さを下げる要因となる浸炭異常層 がない優れた表面硬度を有していること,低炭素の 焼結鋼であるにもかかわらず,高強度かつ高靱性 が実現できていることがわかる.

表3 熱処理材の機械物性試験結果

No. and HT	Hardness HV0.2	Bending	Impact
No. and III		[MPa]	[J/cm ²]
No.6-HT6	958	1445	18.3~28.0

4.3.3 表面組成分析結果

表4に, 熱処理した各試験片表面について X 線 回折装置(XRD)によるスペクトル解析を行い, リート ベルト法により求めたα': γ: Fe₃C の定量値を示す. ここで,α'はマルテンサイト,γは残留オーステナ イト, Fe₃C は析出セメンタイトとしている.表から, No.6-HT6 材には析出セメンタイトが 10%程度ある ことが明らかとなった.セメンタイトは非常に硬いた め,耐摩耗性に有利に働くと期待されるが,気孔が 多い場合や編目状に成長している場合はむしろ欠 損につながる可能性が増すと考えられるため, 微細 な粒子状で分布していることが重要である.

表4 熱処理材表面の組成比定量結果

No. or d UT	Phase ratio by XRD [%]			
No. and HI	α'	γ	Fe ₃ C	
No.6-HT6	61.9	27.7	10.4	

4.3.4 金属組織観察結果

図 11-1 に熱処理材の最表層付近における金 属組織観察結果を示す.図から,外観上 No.6-HT6 材はマルテンサイトと残留オーステナイ トが主な組織とみられ,表3で示された硬さは マルテンサイトが主であると推察される. XRD 解析結果と併せると,焼戻し表層組織中のセメ ンタイトは極微細なものとして分布していると 考えられる.また,図 11-2 に示した耐摩耗性 を狙った熱処理実験例(Fe₃C:30%)では,表 層域のセメンタイトが編目状に成長していると わかる.これは 1000HV 以上の極めて硬い表 面となるが,一般にセメンタイトは細かい粒子 状に分散させた方が良く,これで摩耗試験をし た場合,特に焼結材では欠損など不利に働くと 推定されたため,本研究の目的には不適と判断 した.



図 11-1 No.6-HT6 断面金属組織



図 11-2 析出セメンタイトが多い状態

4.3.5 摩耗試験結果

図 12 に示すとおり,高密度化および熱処理した 円錐先端部を逆さに取付けて圧子とし,押しつける 相手材に SUJ2 ガス浸炭板材を用意して,ピンオン プレート式で円弧状に往復摺動させた.試験には RHESCA 製 FPR-2100 型摩擦摩耗試験機を用い た.摩擦摩耗条件として,荷重 200g,往復摺動速 度 10rpm,往復回転角 30°で,10 万回摩耗試験 を実施した.

測定データから, 試験片先端の摩耗痕直径およ び摩耗量(損失体積), 摩耗高さ, 相手材(焼入れ SUJ2)の摩耗痕深さおよび摩耗量, そして両者間の 摩擦係数で比較評価した.



図 12 摩擦摩耗形態

図 13 に摩耗痕直径測定結果を例示する. 図に 示すとおり, 平板上に円錐形試験片を設置し, 上か ら光学顕微鏡により摩耗痕を撮影して, 解析ソフト ウェアで摩耗直径を測定した.



図13円錐形試験片の摩耗痕直径測定例

図 14-1~14-3 に摩耗試験結果(摩耗量,摩耗 高さまたは摩耗深さ,摩擦係数)を示す.図 14-1 は 円錐形試験片について,図 14-2 は SUJ2 について である.図 14-3 を含む各図からわかるように,摩擦 係数が転がり摩耗の約 100 倍となるすべり摩耗の ため,摩擦係数も極めて高く,円錐形試験片の摩 耗高さは約 160 µ m であった.



図 14-1 No.6-HT6 円錐形試験片の摩耗状態



図 14-2 SUJ2 板表面摩耗量(vs No.6-HT6 材)



図 14-3 摩擦係数の時系列変化(No.6-HT6)

開発初期の焼結カムは、図1に示したとおり摩擦 係数の低い転がり摩耗状態で、同程度サイクル負 荷後の欠損を伴った摩耗深さがおよそ 100µm で あった.よって、欠損もなく、また摩耗量も非常に少 ない本研究結果は、格段に耐摩耗性が向上したと いえる.

5. まとめ(結言)

本研究は,新たに提案する解析手法を用いて,ま ず円錐形試料の成形/冷間鍛造解析結果と,実 物の成形/冷間鍛造実験結果との比較調査を 行った.

これにより,多孔質体の FEM 圧縮解析手法の妥 当性を示した.さらに,高密度焼結材に有効な真空 浸炭熱処理により,高レベルの耐摩耗性の実現を 試みた.

以上の取り組みから、次のことが明らかとなった.

- Mo 系部分拡散合金鋼粉の場合, 塑性変形能, 高密度化特性, 最終的な基礎機械物性(強度, 衝撃値, 硬さ)に優れているのは, 1wt% Mo, 0.35wt% C である.
- 2) 多孔質体の FEM 成形/鍛造解析において, 本研究での提案手法「相当ひずみ参照法」を用 いることで,補正真応カー真ひずみ線図を算出 し,焼結鋼の密度分布を適切に表現可能とした.
- 3) 高濃度炭素真空浸炭窒化熱処理により、優れた表面特性を高密度焼結冷間鍛造材に付与し、 欠損も起きない極めて高い耐摩耗性を実現した.

本 FEM 解析手法は, 金型の長寿命化を前提と した, 製品の重要部位や局所の高密度化など, 目 的に合わせた金型設計および製品設計に活用可 能である. また, 今後更なる表層域の高密度化追 究や, 粉末冶金素材の多段鍛造における密度変 化追跡などの検討にも有用であると考える.

三次元解析や形状の異なる焼結製品にも適用 できるので、今後有効な仮想設計の一手段として、 様々な実製品への応用が可能であることを示して いきたい.

本研究の実施にあたり,助成いただきました公益

財団法人 金型技術振興財団に深く感謝の意を表 します.

6. 参考文献等

1) Y Kamakoshi, S Nishida, K Kanbe and 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).

 野口昭治:機械設計特論,転がり軸受の基礎
(1)滑り摩擦と転がり摩擦の基礎,東京理科大学, https://www.rs.noda.tus.ac.jp/nog/documents/kikaise kkeitokuron/kikaisekkeitokuron.html

3) 鎌腰雄一郎: Mo 系焼結鋼の冷間鍛造および熱 処理による機械的特性向上に関する研究, 群馬大 学博士論文(2019).