

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「焼結機械部品の革新的生産技術の開発」

成果報告書

平成 22 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 J F E テクノリサーチ株式会社

第1章 研究開発の概要	3
1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
（1）背景及び目的	3
（2）目標	3
（3）研究開発実施内容	6
1－2 研究開発体制	7
（1）研究組織及び管理体制	7
1）研究組織	7
2）管理体制	8
（2）管理員及び研究員	8
（3）経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	9
（4）他からの指導・協力者	10
1－3 成果概要	11
（1）D社向け自動車部品の開発	11
（2）長尺均一密度成形	
（3）成果達成状況	11
1－4 当該プロジェクト連絡窓口	12
第2章 本論	13
2－1 HD-LD工法の実用化研究	13
2－2 HD-LD工法の基礎技術開発	25
2－3 HD-LD工法の周辺技術開発	31
第3章 まとめ	38
3－1 複数年の研究開発成果	38
3－2 研究開発後の課題	40
3－3 事業化展開	40

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) 背景及び目的

焼結機械部品は、複雑形状の部品が高い生産性で得られることから、自動車、電気機器、事務機器用の機械部品に、幅広く利用されている。平成16年度の国内の鉄系焼結機械部品出荷量は約9.7万トン、市場規模はおよそ1,140億円であり、平成8年度の出荷量7.8万トンの1.24倍に増大している。また、全世界の焼結機械部品の市場は約87万トンで、全世界の市場規模は約1兆円と見積もられる。その約70%を自動車用が占めている。日本や欧米でウォーターポンプやオイルポンプに加えて、シンクロハブや焼結鍛造コンロッドなどの高性能焼結部品が搭載されている。2004年の一台の自動車に搭載された焼結部品は、日本、北米、欧州は各々8.4kg、19.5kg、9.0kgである。日本、欧州と北米との差は鍛造や鋳物など他の素形材のコストとの差で、北米では6気筒などの大型エンジンに重量の大きな焼結鍛造コンロッド(@540g)、ベアリングキャップ(@230g)を多く採用しているためとされている。北米、日本では重量の大きな新規部品としてプラネタリキャリアーや可変動弁機構部品が搭載されつつあるが、現状の技術での新規部品は飽和しつつある。そこで日本、欧米の焼結部品メーカーでは、自動車焼結部品として市場規模の大きく残された最後の分野で、従来実現していなかった変速機用歯車の開発が進められている。

一方、北米、日本では自動車用が占める比率はそれぞれ約70%、約90%であるが、中国ではまだ約40%と言われ、今後、既存の自動車部品に順次代替使用されることが予想されるため、大きな需要増が見込まれる。従来これらの歯車は主に溶製鋼材丸棒を切断後に熱間鍛造などで先ずブランク形状材に加工し、その後に芯出し、歯切りの切削加工などを行い、用途によっては熱処理後に歯研削加工を行って製造されている。このため材料歩留まりが低く、消費エネルギーが大きい問題点がある。焼結機械部品は材料歩留95%、消費エネルギー690kcal/kgとされているのに対し、従来切削加工はそれぞれ、40~50%、2000kcal/kgとされている。自動車変速機用歯車の市場は日本の歯車生産額全体の75%を占める最も大きな市場である(2005年機械統計年報)。本研究開発の焼結歯車が車1台当たり4kg適用されるだけで年間約3.5万tの材料使用量が削減される。消費エネルギーも年間12万Gcalの製造エネルギーの低減が期待される。これは、石油換算で年間1.3万KL、排出CO₂で年間3.5万tの削減に相当する。

本研究開発では、以上の背景から焼結機械部品製造技術で実現できていない自動車変速機用等の高強度・高精度歯車を、焼結機械部品製造技術の特徴である高い材料歩留まり、低い消費エネルギーの特徴を活かしながら、新たな焼結機械部品製造技術によって実現することを研究開発の目標としている。

(2) 目標

本研究開発では、自動車変速機やOA機器用など高精度・高強度が要求される歯車を、効率よく製造する技術の開発をテーマに、複雑形状且つ高密度化のためのHD-LD工法の開発、高強度・高精度化のための潤滑・焼結・表面改質、CNT含有技術の開発、省エネルギーのための低変形焼結、焼結炉・工法の開発を行う。併せて試作品の評価・分析では効率的な成形体欠陥検出、焼結材料特性評価法を開発する。具体的に開発対象とする部品は、自動車変速機部品等の直歯歯車(スパーギヤ)、斜歯歯車(ヘリカルギヤ)、また情報機器やOA機器の高強度・高精度小型歯車等である。

粉末冶金技術に関する特定ものづくり基盤技術の高度化技術指針において達成しようとする高度化の目標としては、

1)自動車に関する事項

①川下製造業者の抱える課題及び要請(ニーズ)

・高機能化

自動車機械部品に要求される高強度化、高精度化、複雑形状化

- ・コスト低減

機械部品のコスト削減に向け、低コストかつ多量生産に適した粉末冶金部品への置き換え

- ・省資源・環境配慮

車両の軽量化による省資源と燃費向上による CO₂排出量の低減

②上記を踏まえた高度化目標

- ・CO₂排出量低減に寄与する軽量化技術の開発

部品の小形化や一体化による軽量化と、部品の高機能化・高性能化による摺動ロス低減などの性能向上

- ・グローバル化に対応する成形及び焼結技術の開発

革新的な生産技術の開発により品質、コスト両面においてグローバル化に対応

2)情報機器・家電に関する事項

①川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）

- ・高機能化

小形・高性能化のため、高強度で摺動性の高い部品

- ・コスト低減

一体化や複雑形状化による部品点数の削減や、機械加工部品→金型成形部品への置き換え

②上記を踏まえた高度化目標

- ・製品の高機能化に対応する高精度化、高強度化技術の開発

成形、焼結と熱処理プロセスの開発により高精度と高密度の両立に対応

- ・小型軽量化に対応したネットシェイプ化、複合一体化技術の開発

前述したように、現状、これらの歯車は主に溶製鋼材丸棒を切断後に熱間鍛造などで先ずブランク形状材に加工し、切削加工や研削加工を行って製造されているため、材料歩留まりが低く、消費エネルギーが大きい問題点がある。一方、通常の1回成形・1回焼結による粉末冶金工法ではその得られる密度は7.0 Mg/m³程度であり、十分な強度が得られない。そこで、従来から焼結材料を熱間鍛造する焼結鍛造法、一度成形焼結した材料を再度圧縮成形、焼結する2回成形・2回焼結法（2P-2S法）など高強度焼結部品を製造する技術が検討されているが、工程が複雑で高寸法精度や複雑形状が得られないなどの課題があった。また、一度成形・焼結した後、再度加圧圧縮する2回成形・1回焼結法も行われている。しかし得られる焼結密度が低く、高い強度や高寸法精度や複雑形状が得られない課題がある。また、中密度の焼結体の表面のみを転造で緻密化する方法も行われているが、本開発の対象とする部品には実用化されていない。

焼結部品の高強度化には、①気孔の減少、②材料内部の内部ノッチ効果の減少、③粉末粒子結合部（焼結ネック）の肥大化、④低強度相の低減及び分散、⑤マトリックス強化及び焼入れ性の改善が求められる。このためには、圧縮性・焼結性・焼入れ性に優れた原料粉末を用いて、高圧力成形、緻密化焼結を行い均質な焼結組織を得る必要がある。

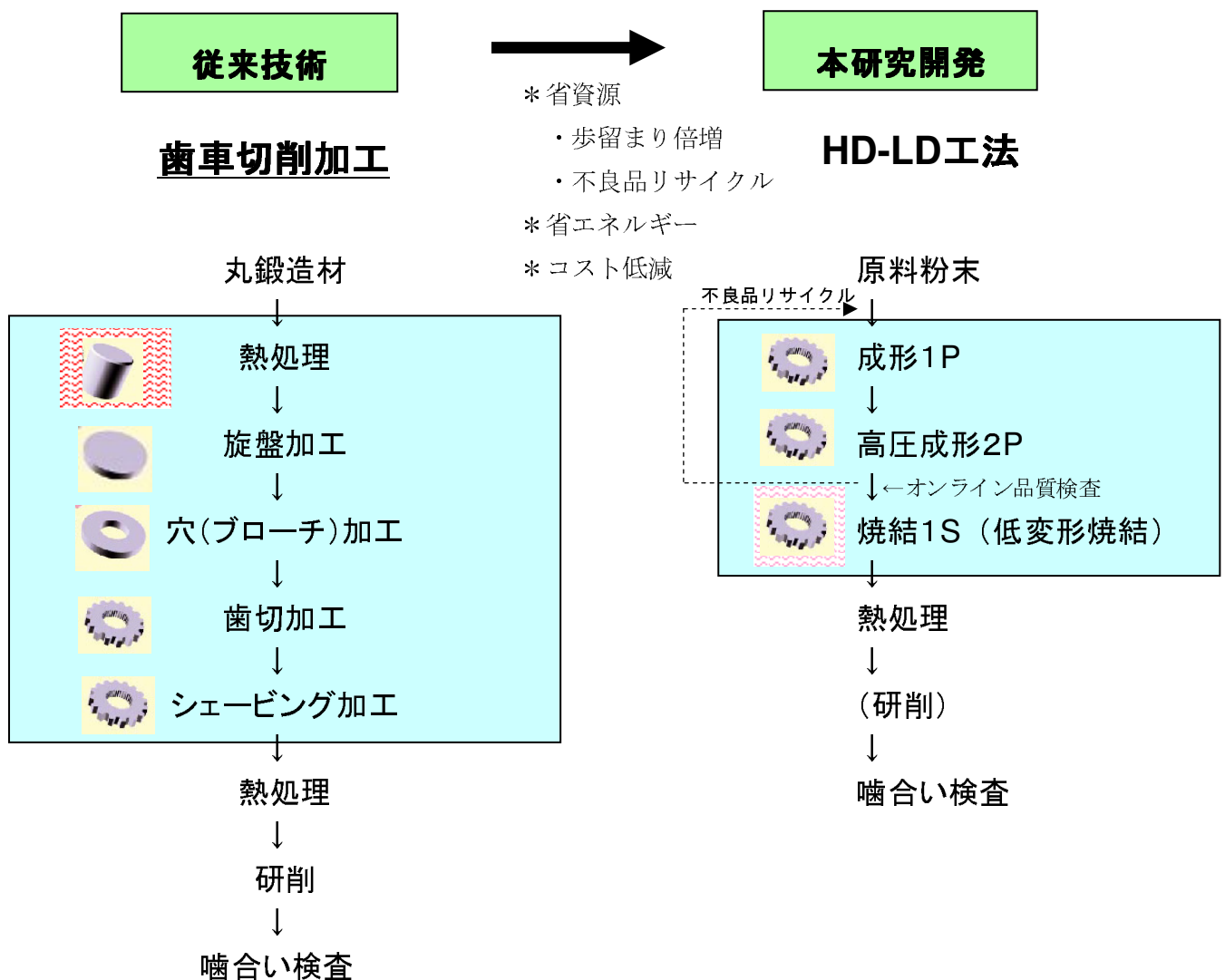
焼結部品の高精度化には、圧粉体、焼結体、再圧縮体、熱処理体の高精度化が求められる。このためには圧粉体個内および個間の密度の均一化、焼結体のロット内およびロット間の焼結条件の均一安定化、寸法矯正技術、熱処理条件の均一安定化を図る必要がある。

焼結部品の複雑形状化には、加工機械による後加工なしに形状を得ることが、生産性・コ

スト面から求められる。このためには、高度な多段成形のための装置および金型、成形、原料粉充填技術とこれに適した原料粉が求められる。

そこで、これらの点に留意しながら、高強度・複雑形状品の製造を高精度でかつ低価格、省エネルギーで達成させるため、HD-LD 工法(High Density-Low Deformation、高密度低変形)を新規開発する。(下図参照)

<HD-LD 工法と従来工法との比較>



(3) 研究開発実施内容

① HD-LD 工法の実用化研究：

実施者－ナパック株式会社

自動車トランスミッション部品である D 社向け製品において、昨年度に実験室レベルでハイブリッド Mo 合金鋼粉に HD-LD 工法を適用することにより平均密度 7.27 Mg/m^3 (D 社仕様 7.3 Mg/m^3) を達成した。今年度は 2 次成形用高強度金型の開発、2 次成形時の圧粉体潤滑及び供給装置の開発を中心に量産プロセスを確立する。また、使用原料の最終選定、圧粉体潤滑方法の検討、低変形焼結技術の開発、ギヤ部を含めた高精度な寸法評価、機械的強度の評価などを進める。

目標値：D 社製品平均密度 7.6 Mg/m^3 以上（顧客仕様 7.3 Mg/m^3 以上）
量産プロセス確立

② HD-LD 工法の基礎技術開発：

実施者－ナパック株式会社、長野県工業技術総合センター

昨年度より研究開始した長尺品技術開発、組み合わせ成形技術開発において当 HD-LD 工法が有効であることを見出したので、今年度のテーマとして継続する。

また、1 次成形混粉潤滑と 2 次成形時の圧粉体最適潤滑剤組み合わせの最適化、浸炭処理等熱処理技術、一般鉄系材料へ展開も研究する。

目標値：長尺品($L/W \geq 8$)製品内密度バラツキ $\pm 0.1 \text{ Mg/m}^3$ 以下
組み合わせ成形・焼結体密度 7.6 Mg/m^3 以上
熱処理技術開発・回転曲げ疲労強度 550 MPa 以上

③ HD-LD 工法の周辺技術開発：

実施者－JFE テクノリサーチ株式会社、ナパック株式会社

高感度・高速度赤外線カメラによる疲労限界の迅速評価技術の開発を行う。

焼結部品の疲労限界測定の迅速計測法を開発し、焼結部品強度の迅速評価や品質保証の向上を目標とする。

目標値：1 疲労限界試験/半日

④ プロジェクトの管理・運営

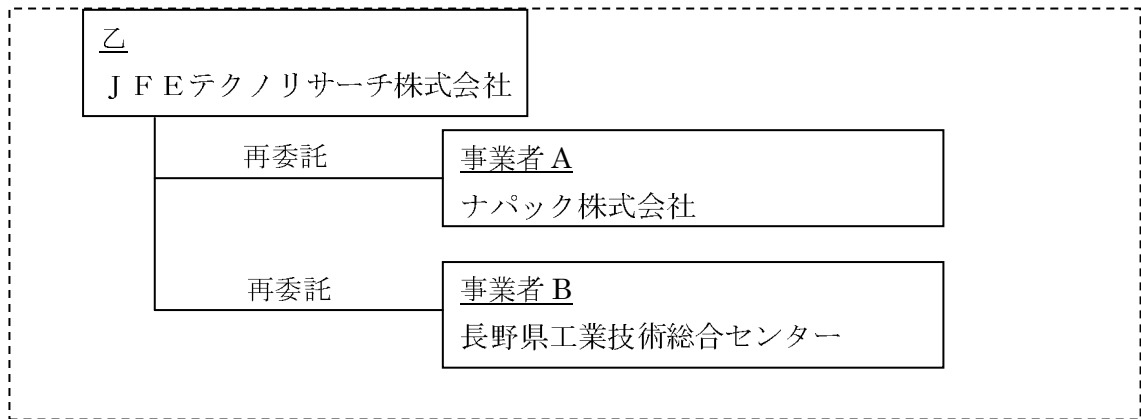
実施者－JFE テクノリサーチ株式会社

研究開発進捗管理、経理管理、研究開発委員会の開催（3 回程度）などプロジェクト全体の管理・運営を行う。

1－2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）

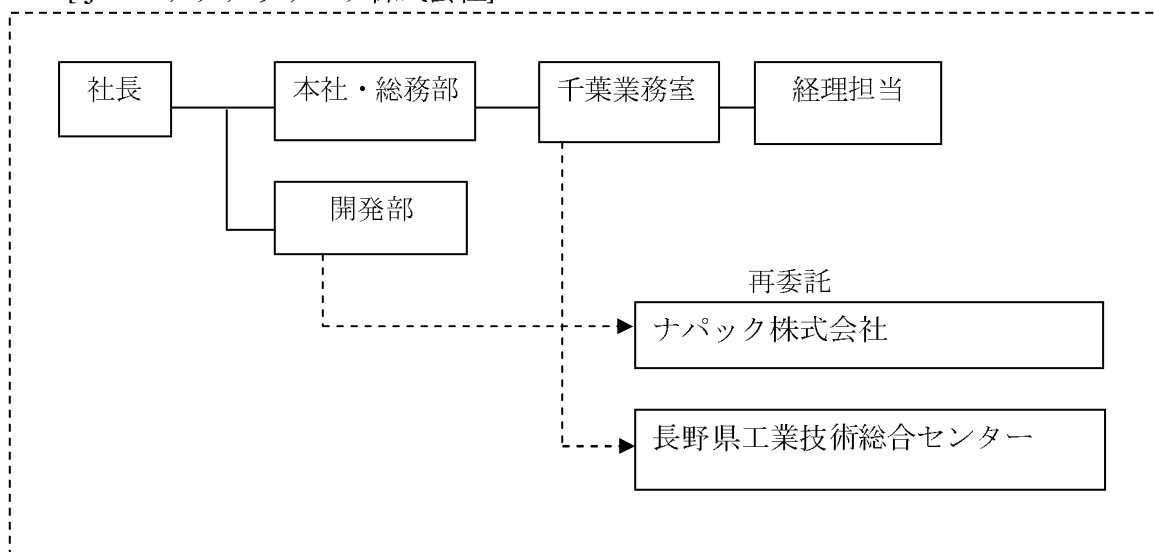


総括研究代表者（PL） 所属組織名：ナパック株式会社 技術営業部技術課 所属役職：副部長 氏名：黒田直人	副総括研究代表者（SL） 所属組織名：ナパック株式会社 技術営業部技術課 所属役職：主担当員 氏名：小林浩史
--	--

2) 管理体制

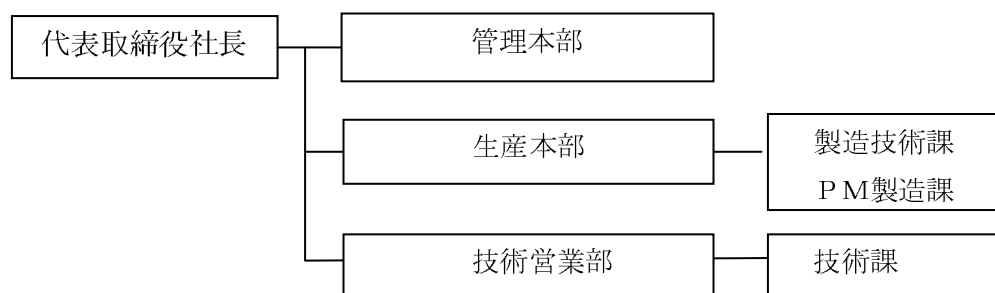
①管理事業者

[J F Eテクノリサーチ株式会社]

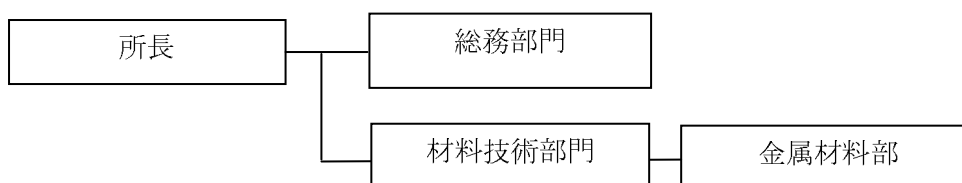


②（再委託先）

ナパック株式会社



長野県工業技術総合センター



(2) 管理員及び研究員

[事業管理者] J F Eテクノリサーチ株式会社

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
渋谷 清	開発部・部長	④
苅米 友美	開発部・経理担当係員	④

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
渋谷 清	開発部・部長	③

[再委託先]

ナパック株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
黒田直人	技術営業部・副部長	①～③
小林浩史	技術営業部技術課・主担当員	①②
北原二三男	生産本部製造技術課・課長	①
秋山好広	生産本部技術課・主任	①
紫芝修	生産本部 PM 製造課・係長	①③
中島俊治	生産本部 PM 製造課・担当員	①

長野県工業技術総合センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小池 透	材料技術部門 金属材料部	②

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

[事業管理者]

J F E テクノリサーチ株式会社

(経理担当者)	開発部・経理担当係員	苅米 友美
(業務管理者)	開発部・部長	渋谷 清

[再委託先]

ナパック株式会社

(経理担当者)	管理本部 常務取締役	田畑 宏喜
(業務管理者)	代表取締役社長	鈴木 隆

長野県工業技術総合センター

(経理担当者) 総務部門 宮下 隆
(業務管理者) 金属材料部 部長 滝澤 秀一

(4) 他からの指導・協力者

研究開発委員会メンバー

氏名	所属・役職	備考
1. 黒田直人	ナパック株式会社 技術営業部・副部長	PL
2. 小林浩史	ナパック株式会社 技術営業部技術課・主担当員	SL
3. 鈴木 隆	ナパック株式会社 代表取締役社長	
4. 小池 透	長野県工業技術総合センター 材料技術部門 金属材料部	
5. 浅見淳一	独立行政法人 中小企業基盤整備機構	アドバイザー
6. 島田一男	ファインシンター三信株式会社 代表取締役社長	アドバイザー
7. 柏木敏雄	オリジン電気株式会社 代表取締役社長	アドバイザー
8. 水野豊	株式会社ファインシンター 代表取締役社長	アドバイザー
9. 渋谷 清	JFEテクノロジー株式会社 開発部・部長	

1-3 成果概要

(1) D 社向け自動車部品の開発

HD-LD 工法を用いて図 1-3-1.に示すの D 社向け自動車部品(4WD 切替用部品)の開発試作を行った。当該部品に HD-LD 工法を適用した狙いは高密度化と外周円筒形状である。

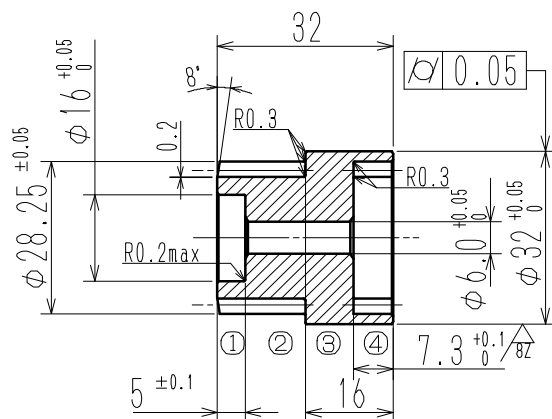


図 1-3-1. D 社向け自動車部品図面

開発試作の結果、2次成形での成形圧 13.5t/cm^2 で平均密度 7.42Mg/m^3 の焼結体得到了。厚み方向の密度バランスは図 1-3-2 の通りで、ギア部密度が均一化しており、③の円板部は限界密度に達している。

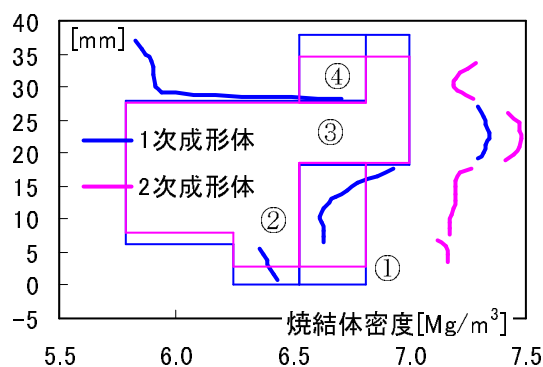


図 1-3-2. 成形体密度バランス

外周円筒度は図 1-3-3 に示す通りで、綺麗な円筒形状を得ることができた。

(左から、HD-LD 工法、従来工法(成形・焼結・サジング)、従来焼結体)

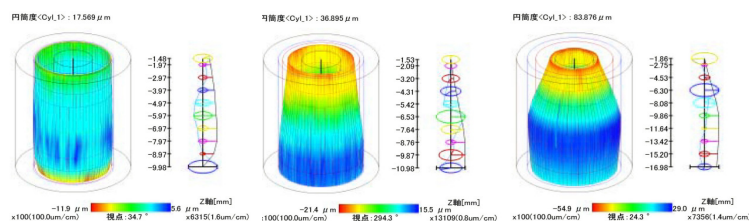


図 1-3-3. 外周円筒度マップ

③の円板部密度が限界に達していた影響で、更なる高圧縮を行ったところダイス割れに至ったが、1次成形体の密度均一化など、金型構造の変更と成形条件の調整で量産化は可能である。表 1 に主な要求仕様と評価値を示す。何れの項目も顧客要求値を満足し、

評価サンプルを提出することができた。

表 1-3-1. D 社向け製品の主な要求仕様と評価値

特性	顧客要求	評価値
平均密度	7.3Mg/m ³ 以上	7.42Mg/m ³
硬度	HRC31 以上	HRC32
歯すじ誤差	JIS 8 級	JIS 4 級
外周円筒度	0.05	0.018

(2) 長尺均一密度成形

HD-LD 工法は高圧成形により高密度品の成形を目指した工法であるが、研究の中で長尺成形品の均一密度成形に有効な工法であることが判明した。図 1-3-4 は 500MPa で成形した 1 次成形体を 600~2000MPa で 2 次成形した平均密度データである。低い 2 次成形圧力でも高密度化、均一密度化を達成している。

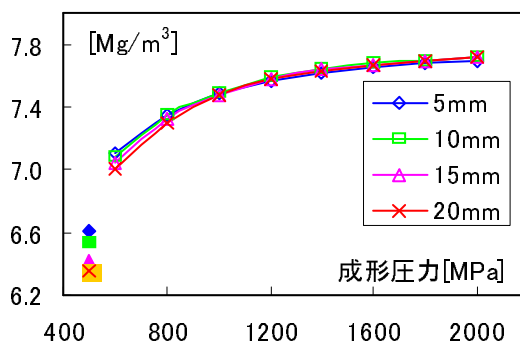


図 1-3-4. 長さ寸法別焼結体密度

(3) 成果達成状況

研究開発の目標である HD-LD 工法の開発において、自動車部品メーカーからの具体的引き合いを元に応用開発を進めた。また、基礎技術、周辺技術開発も実施した。具体的な目的及び目標に対する結果を表 1-3-2 に示す。

表 1-3-2. 目標値と結果 *達成した項目は青字で示す。

テーマ	項目	目標値	結果
①HD-LD 工法の実用化研究	D 社向け製品の平均密度 (要求仕様)	7.3Mg/m ³ 以上	7.42Mg/m ³
	D 社向け製品の平均密度 (プロジェクトチーム目標)	7.6Mg/m ³ 以上	
	D 社向け製品の量産工程確立	確立	ほぼ確立
②HD-LD 工法の基礎技術開発	長尺品製品内密度バラツキ	±0.1 Mg/m ³ 以下	±0.085Mg/m ³
	組み合わせ成形・焼結体密度	7.6Mg/m ³ 以上	7.61Mg/m ³
	回転曲げ疲労強度	550MPa 以上	420MPa(密度 7.4)
③HD-LD 工法の周辺技術開発	焼結部品の疲労限界迅速測定法の開発	1 疲労限界試験 / 半日	1 疲労限界試験 / 3hr~半日

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

J F E テクノリサーチ株式会社 開発部長 渋谷 清

連絡先 TEL043-262-2675, FAX043-262-2665

E-mail : k-shibuya@jfe-tec.co.jp

2-1 HD-LD 工法の実用化研究

実用化検討のテーマとして、現在、従来工法(成形→焼結→サイジング→浸炭焼入れ・焼き戻し)で顧客にサンプル提出済みで顧客評価中の、4WD 切替え用の多段複雑形状な自動車部品を取上げた。

金型構造上(上段をパンチの突っ込みで成形する為)内歯部分の密度が上がらず、低密度ほど焼結での収縮が大きい為に上端ほど外径が小さくなりテーパ形状となる。

強度要求も高く、平均密度 7.3Mg/m^3 は従来工法(6.8Mg/m^3 程度)では達成出来ない。

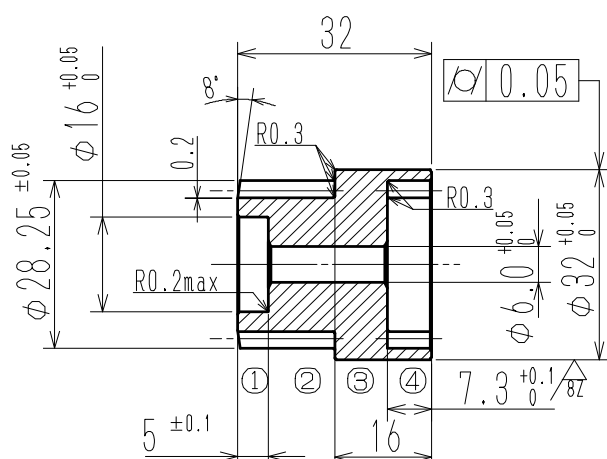


図 2-1-1 D 社向け自動車部品

平均密度		7.3Mg/m ³ 以上
硬度		HRC31 以上
歯車仕様	モジュール	1.25
	歯数	20
	圧力角	20°
	標準ピッチ円直径	φ 25
	歯先円直径	φ 28.25
	歯すじ誤差	JIS 8 級

先ず、要求特性に見合った材料の選定を低コストに配慮しながら行った。

この熱処理には、次の問題点が挙げられる。

- 1) 生産コストがアップする
- 2) 変形が大きく、変形後の修正は出来ない
- 3) 変色する

そこで、熱処理無しで硬度要求を満足できる材料として、シンターハードニング材（焼結後の炉内冷却速度でも焼入れが可能な材料）のヘガネス社製 DISTALLOY HP-1 で検討を行った。

密度が 7 Mg/m^3 程度通常の工法では、HP-1 でも HRC28 程度であるが、HD-LD 工法で高密度化した場合には要求規格の HRC31 以上を満足する可能性がある。本テーマはシンターハードニング材である DISTALOY HP-1 を使用し、昨年までのハイブリットMo合金鋼粉での基礎検討結果を元に、目標値を以下に設定して実験を開始した。

混粉潤滑剤量 0.2w%

1 次成形圧力 平均 500 MPa

2 次潤滑方法 圧粉体潤滑 4w%濃度 IPA 溶液

2 次成形圧力 1600 MPa

焼結体密度 7.6 Mg/m^3

3) 1 次成形での混粉潤滑剤検討

高密度化のためには少しでも混粉潤滑剤を減らしたい、反面、1 次成形体の強度確保のために成形圧力は下げられず、少量でも潤滑性能の良い潤滑剤の選定を行った。

昨年までは高压成形用の wax 系潤滑剤を使用していたが、これを含め下記の金属石鹼 2 種類と wax 系潤滑剤 3 種類で粉末特性及び 500 MPa での 1 次成形体抜き圧の検討を行った。

ZnSt：最も一般的な金属石鹼系の潤滑剤

LiSt：高密度成形で用いられる金属石鹼系の潤滑剤

waxA：弊社で一般的に使用している wax 系潤滑剤

waxB：本研究に使用してきた高压成形用 wax 系潤滑剤

waxC：金属石鹼に近い流動性・見掛け密度を実現する wax 系潤滑剤

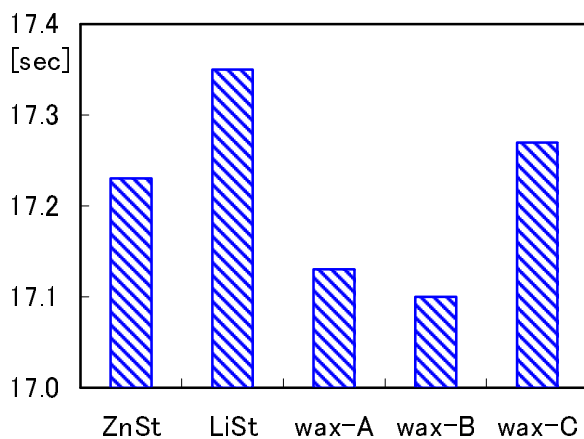


図 2-1-2 潤滑剤(0.2%)種類別 流動度

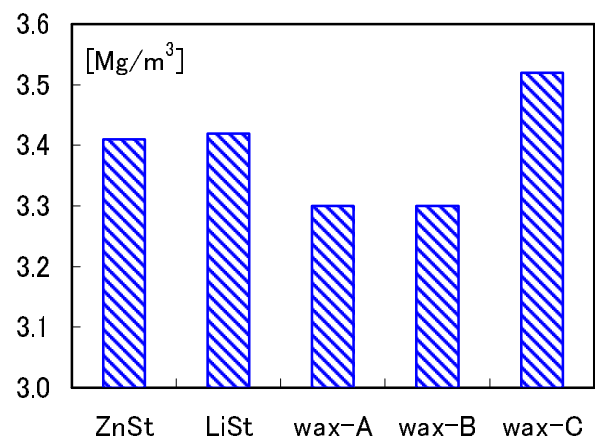


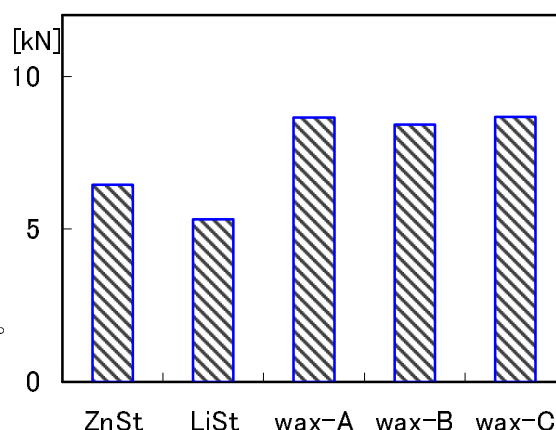
図 2-1-3 潤滑剤(0.2%)種類別 見掛け密度

粉末特性は図 2-1-2、図 2-1-3 に示す通りで、結果は次の通りである。

流動性（流動度が小さい方が良い）：waxB > waxA ≧ ZnSt > waxC ≧ LiSt

見掛け密度（高い方が良い）：waxC ≧ LiSt > ZnSt ≧ waxA = waxB

抜出力に関しては図 2-1-4 の通りで、
LiSt が優れた結果が得られた。
今回の形状では、比較的肉厚が厚く、
充填深さも浅いことから、充填性より
抜出力優先で、1 次成形の混粉潤滑
剤は LiSt を採用した。
続いて、HP-1 と LiSt の組合せでの
最適な混粉潤滑剤量の検討を行った。



実験水準

混粉潤滑剤 : LiSt
 混粉潤滑剤量 : 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5w% の 5 水準
 1 次成形圧力 : 500MPa
 1 次成形体形状 : $\phi 15.8 \times \phi 10.0$ の円筒形状 9.5g
 2 次成形圧力 : 600~2400MPa, ピッチ 200MPa の 10 水準
 2 次成形体形状 : $\phi 16.0 \times \phi 10.0$ の円筒形状
 焼結条件 : 1120℃分解アンモニアガス雰囲気中 30min
 評価項目 : 1 次成形抜出力, 焼結体密度

結果は図 2-1-5、2-1-6 に示す通りで、目標値を達成する適正值は見出せない。

密度目標 : 1600MPa で 7.6Mg/m³ → 混粉潤滑剤量 0.1w%以下

抜き力目標 : ハイブリット Mo 合金鋼粉+0.2w%waxB 同等→0.4w%以上

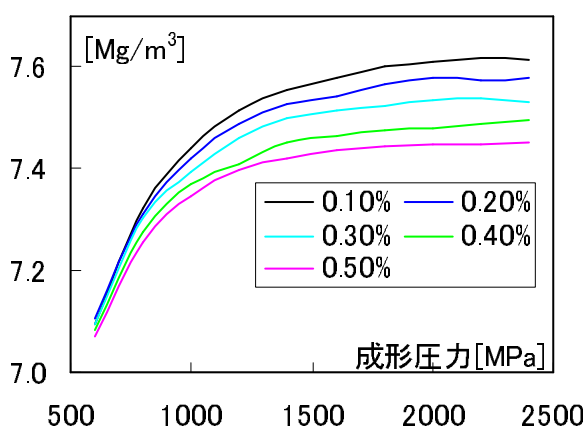


図 2-1-5 混粉潤滑剤量別 焼結体密度

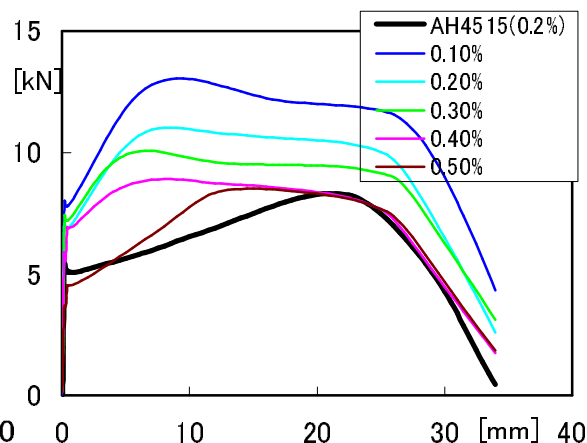


図 2-1-6 潤滑剤量別 1次成形体抜き力

HP-1 はハイブリット Mo 合金鋼粉に比べ、材料構造上成形性・焼結性が劣り、
金型との摺動性も良くないことが判明した。裏返せば、ハイブリット Mo 合金鋼
粉が成形性・焼結性・金型摺動性に優れた材料であるといえる。
この結果を受け、目標値を次の通り変更した。

混粉潤滑剤量 0.4w%

焼結体密度 7.46 Mg/m³

その他の目標値に変更は無く、この変更で顧客要求を満足しなくなる事は無い。

4) 金型設計

潤滑剤量検討でのスプリングバック量や焼結寸法変化のデータを元に、
表 2-1-2 の通り金型設計を行った。

表 2-1-2 金型設計 (径方向)

	内径	内径	内歯車 歯先円直径	外歯車 歯先円直径	外径
規格	$\phi 6^{+0.05}_0$	$\phi 16^{+0.05}_0$	$\phi 28.25^{+0.05}_{-0.05}$	$\phi 28.25^{+0.05}_{-0.05}$	$\phi 32^{+0.05}_0$
焼結体狙い値	6.035	16.035	28.25	28.25	32.025
焼結寸法変化率	0.27%	0.27%	0.27%	0.41%	0.41%
二次成形体狙い値	6.029	16.019	28.222	28.227	31.999
スプリングバック	0.17%	0.17%	0.17%	0.33%	0.33%
二次成形金型	6.019	15.992	28.174	28.135	31.894
金型クリアランス	0.05	0.1	0.2	0.2	0.2
一次成形体狙い値	6.069	16.092	28.374	27.935	31.694
スプリングバック	0.20%	0.20%	0.20%	0.19%	0.19%
一次成形金型	6.057	16.060	28.317	27.882	31.634

まずは金型の径方向の寸法設計を行った。

製品寸法 (= 焼結体狙い値) & 焼結寸法変化率 ⇒ 2 次成形体狙い値

2 次成形体狙い値 & スプリングバック ⇒ 2 次成形金型寸法

2 次成形金型寸法 & 1 次成形体とのクリアランス ⇒ 1 次成形体狙い値

1 次成形体狙い値 & スプリングバック ⇒ 1 次成形金型寸法

以上の手順で各製品の狙い値及び金型の寸法を決定した。

ただし、焼結寸法変化率やスプリングバックは単純形状で 1 次成形圧
500MPa、2 次成形圧 1600MPa で測定した結果を使用しているため、後述する様に密度バランスのバラツキによって部分的に設計値から外れるが、最終製品寸法はある程度密度バランスが整えられた 2 次成形体の密度バランスのみが影響する為、この設計方法で目的の製品寸法は得られると考える。

表 2-1-3 金型設計 (加圧方向)

	①			②			③			④		
規格	5			11			8.7			7.3 ^{+0.1} ₋₀		
焼結体狙い値	5			11			8.7			7.35		
焼結寸法変化率	-0.23%			-0.23%			-0.23%			-0.23%		
二次成形体狙い値	5.01			11.03			8.72			7.37		
一次成形体狙い値	6.18			13.34			9.81			9.66		
	体積	密度	重量	体積	密度	重量	体積	密度	重量	体積	密度	重量
焼結体狙い値	1.551	7.46	11.57	5.319	7.46	39.68	6.759	7.46	50.42	2.156	7.46	16.08
二次成形体	1.553	7.49	11.62	5.323	7.50	39.84	6.764	7.50	50.62	2.159	7.49	16.15
一次成形体	1.832	6.35		6.284	6.35		7.456	6.80		2.630	6.15	

加圧方向の寸法については、径方向寸法と 1 次成形体の密度分布予測値（H20 年度の実験で得られた値）を元に設計を行った。

製品寸法（= 焼結体狙い値）& 焼結寸法変化率 ⇒ 2 次成形体狙い値

2 次成形体狙い値 & 部分断面積 & 焼結体密度 ⇒ 焼結体部分重量

焼結体部分重量 & 混粉潤滑剤量 ⇒ 成形体部分重量

成形体部分重量 & 部分密度予測値 & 部分断面積 ⇒ 1 次成形体狙い値

以上の手順で、1 次 2 次成形体の加圧方向寸法と、部分重量を設定した。

この方法は、1 次成形⇒2 次成形において、分割した各部分間での粉末の移動は無いという前提での設計であり、現実には成形条件により多少の移動が考えられる。どの程度の移動があるかは、実際に作成しながら確認する。

5) 1 次成形体評価と目標値の見直し

設計によって得られた 1 次成形体の目標形状を図 2-1-7 に示す。

この形状と、部分密度の合計値

全体重量：118.2 g

を目標に、1 次成形を行った。

成形体評価結果は表 2-1-4 の通りで、今回使用したの粉末の充填性が過去の経験より目論んだ値より優れていた為、彫り込み部（③，④）の重量が大きくなった。

寸法としては②部が -0.3mm と狙い値を下回った他は目論見通り総重量も 118.6g と目論見通りに仕上がった。

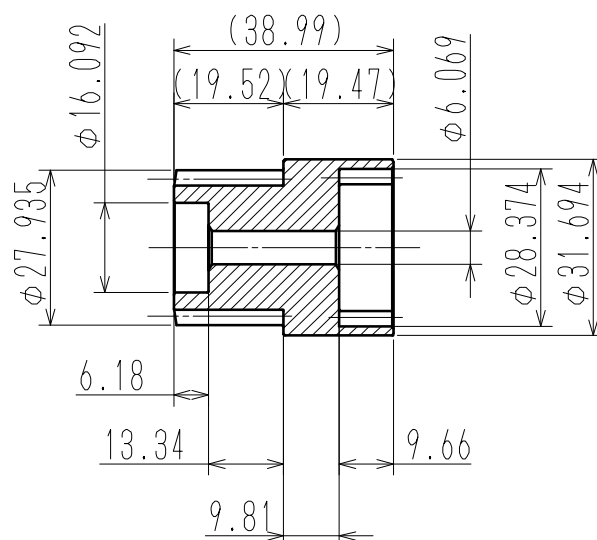


図 2-1-7 1 次成形目標形状

表 2-1-4 1 次成形体評価結果(加圧方向寸法と部分密度)

	①			②			③			④		
一次成形体狙い値	6.18			13.34			9.81			9.66		
一次成形体評価値	6.21			13.02			9.75			9.65		
	体積	密度	重量	体積	密度	重量	体積	密度	重量	体積	密度	重量
一次成形体狙い値	1.832	6.35	11.86	6.284	6.35	38.31	7.456	6.80	52.03	2.630	6.15	16.38
一次成形体評価値	1.842	6.44		6.134	6.25		7.410	7.03		2.626	6.25	

寸法，総重量は目論見に対する差異が殆ど無く問題ないが，密度バランスが特に③部において目論みより外れてしまった。

このままで当初の設計通り 2 次成形を行うと③部の密度が限界(真密度)に達し，2 次成形体の密度バランスが大きく崩れると共に，金型へ異常な荷重が掛かり破損の恐れがある。

1 次金型の彫り込み寸法を変更すれば対策は可能な内容であるので，今回は 1 次成形体の評価結果で 2 次成形体及び焼結体の狙い値を変更して実験を進めた。

2 次成形体の狙い寸法及び焼結体の見込み寸法を表 5 に，焼結体の見込み寸法図を図 2-1-8 に示す。

表 2-1-5 2 次成形体狙い寸法(加圧方向)と焼結体見込み寸法

	①			②			③			④		
規格	5			11			8.7			7.3 ^{+0.1} ₋₀		
焼結体狙い値	5.10			10.58			8.94			7.45		
焼結寸法変化率	-0.23%			-0.23%			-0.23%			-0.23%		
二次成形体狙い値	5.11			10.60			8.96			7.47		
一次成形体評価値	6.21			13.02			9.75			9.65		
	体積	密度	重量	体積	密度	重量	体積	密度	重量	体積	密度	重量
焼結体狙い値	1.583	7.46	11.81	5.115	7.46	38.16	6.947	7.46	51.82	2.186	7.46	16.31
二次成形体狙い値	1.584	7.49	11.86	5.118	7.50	38.31	6.952	7.50	52.03	2.190	7.49	16.38
一次成形体評価値	1.842	6.44		6.134	6.25		7.410	7.03		2.626	6.25	

6) 2 次成形

修正した狙い値を目指して，2 次成形を行った。

2 次成形の潤滑は，濃度 4w%IPA 溶液での混粉体潤滑法を用いた。

2 次潤滑剤も混粉潤滑剤と同様に潤滑剤の種類を検討した。

1 次成形で検討した 5 種類の潤滑剤で混粉潤滑処理を行い，φ16.0×φ10.0 の円筒形状の 2 次成形体 (9.5g) を，2 成形圧力を

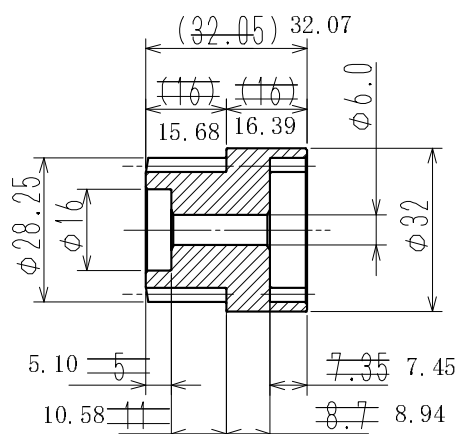


図 2-1-8 焼結体見込み寸法図

600~2400MPa（ピッチ 200MPa）で 10 水準成形し、金型からの抜出力を評価した。

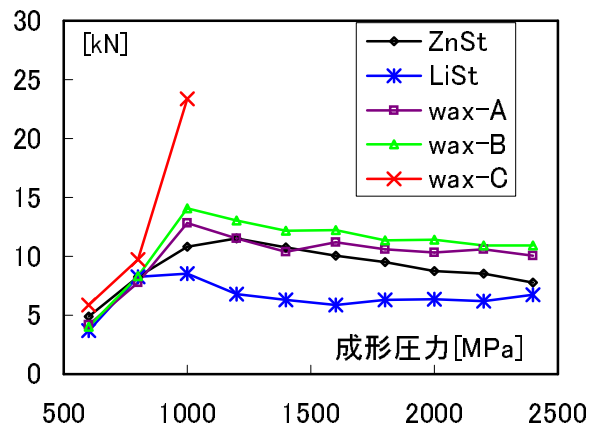
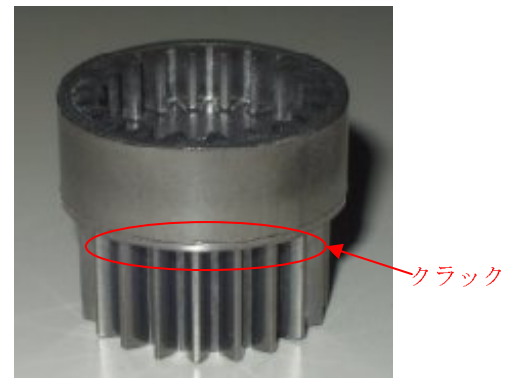


図 2-1-9 潤滑剤種類別 2次成形抜き力

評価結果は図 2-1-9 の通りで、LiSt が最も低い抜出力となり、かつ、1200MPa ~2400MPa の広い範囲にわたって低い抜き出し力で安定していた。

また、wax-c は流動性や見掛け密度を ZnSt に近付けた wax 系潤滑剤であるが、高压成形には全く適さない結果となった。

2 次成形金型については、昨年度の研究で成形体にクラックが発生する問題が発生した。最も一般的で製作が容易な割りダイス構造を採用したことにより、加圧力でダイスが変形し、ダイスの合わせ目に粉末が入り込むことが原因と判明した。対策として、一体ダイスに変更して一旦はクラックが収まったものの、目標とする高压力に達する前にクラックが再発した。



真 2-1-1 2次成形体クラック

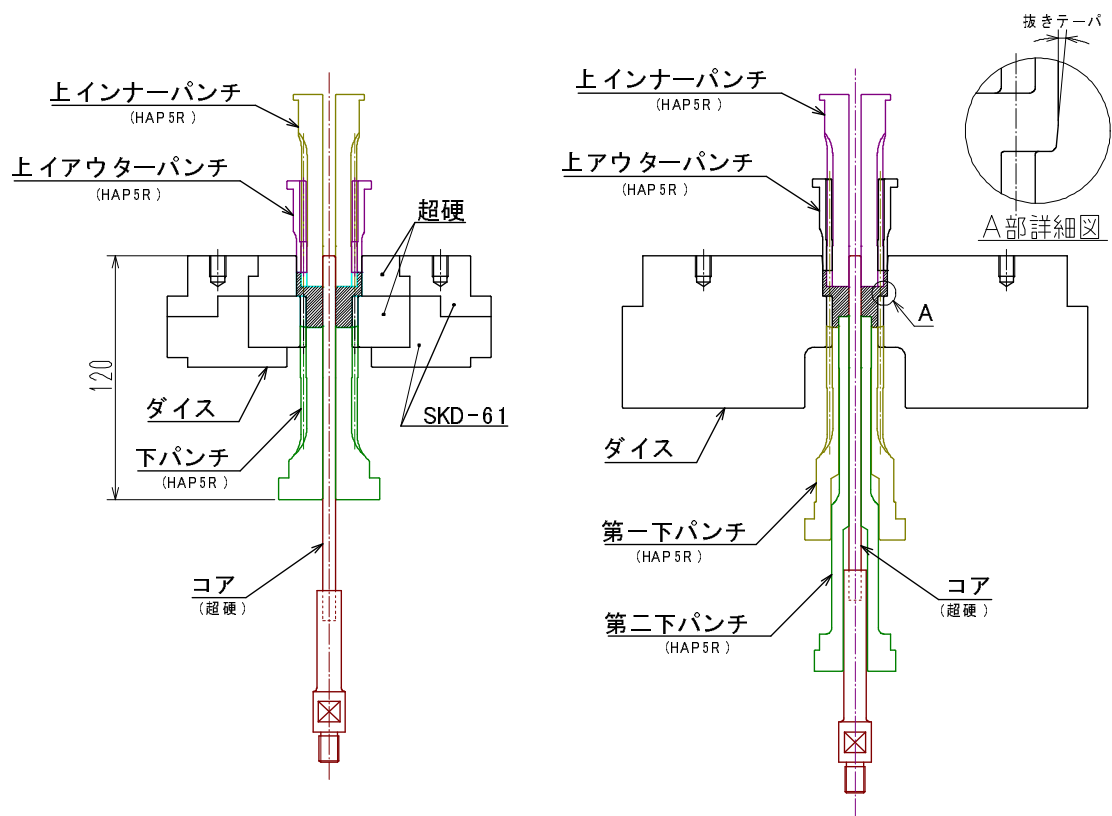
再発したクラックの原因を以下に推測した。

- ・ ダイス受けの変形でダイスが変形する
- ・ 彫り込みダイスの底の部分で型離れが悪い
- ・ ダイスから抜け出るときのストレス

そこで、ダイスはダイス受けと一体化し、直接ダイプレートに取り付ける構造として強度確保を図った。

また、ダイスの彫り込み部底と出口部に抜きテーパを設けて、型離れと型抜けストレスの低減を目指した。

昨年度の割りダイスでの金型構造と、改良した金型構造を図 2-1-10 に示す。



a) 割りダイス

b) 一体型ダイス(改良品)

図 2-1-10 金型構造

7) 自動化

HD-LD 工法を実用化する為には、通常の工法と異なる 1 次成形体のハンドリング及び 2 次潤滑方法の開発が必要となる。

2 次潤滑に関しては実験では圧粉体潤滑法を使用していたが、実用化する場合は業界では一般的な工法になりつつある、金型潤滑法が利用できる。

ここでは、1 次成形体のハンドリングの自動化を目指す。

HD-LD 工法では、成形体密度を極限まで高める目的で混粉潤滑剤を極端に減らして 1 次成形を行うが、1 次成形体の金型からの抜出力を低減する為に低圧力での成形とならざるを得ない。

この結果、低密度な成形体となり強度が低下し、割れ・欠けなどが発生し易く、一般的な蹴り出し除材やシュートでの排出は出来ない。

そこで、1 次成形体の除材と 2 次金型への給材を自動化すべく、ロボット化の検討を行った。

汎用性を考慮し、直行軸型ではなく多間接ロボットを採用し、1 次成形体の除材→トレイへ整列及びトレイ→2 次金型への給材の両方を可能な構成とした。

現有の映像認識技術との組合せにより、2 次金型への給材においてはワークの形状自動認識により位置合わせが可能である。



写真 2-1-2 除材給材ロボット

8) 製品評価

作成した高密度成形体を、1140℃変成ガス雰囲気中で 30min 焼結を行い、出来上がった製品（HD-LD 工法焼結体）を評価した。

焼結体の長さ寸法及び部分密度の狙い値との比較を表 6 に示す。

表 2-1-6 焼結体長さ寸法及び部分密度の狙い値と実測値

	①			②			③			④		
規格	5			11			8.7			7.3 ^{+0.1} -0		
焼結体狙い値	5.10			10.58			8.94			7.45		
焼結体実測値	4.94			10.51			8.98			7.47		
	体積	密度	重量	体積	密度	重量	体積	密度	重量	体積	密度	重量
焼結体狙い値	1.583	7.46	11.81	5.115	7.46	38.16	6.947	7.46	51.82	2.186	7.46	16.31
焼結体実測値	1.543	7.40	11.40	5.117	7.42	37.90	7.024	7.48	52.45	2.206	7.33	16.15

①の寸法はプレス構造上比較的簡単に調整が可能であった事と、部分密度が目論見に対し低めであった為、規格値やや下目に成形できている。

②の寸法は狙い値より小さく成形できているにもかかわらず、密度が目論み値に達していない。

③は部分密度が高く狙い寸法まで圧縮できなかった。

④はスパーサーで金型寸法が決まる為、細かな調整はできず、ほぼ狙い寸法となったものの密度は狙い値を下回った。

2次成形において寸法で調整を行った結果密度バランスにバラツキが生じ、この分平均密度は目論みの 7.46Mg/m^3 には達しなかったものの、 7.42Mg/m^3 を達成した。

顧客要求特性に対する製品評価値を表 2-1-7 に示す。

表 2-1-7 主な要求仕様と評価値

特性	顧客要求	評価値
平均密度	7.3Mg/m^3 以上	7.42Mg/m^3
硬度	HRC31 以上	HRC32
歯すじ誤差	JIS 8 級	JIS4 級
外周円筒度	0.05	0.018

何れの項目も顧客要求値を満足できた。

なお、長さ方向寸法については金型修正により顧客要求を満足することは容易である。

ただし、粉末の特性（見掛け密度・流動度・成形性）のバラツキにより、1次成形での重量（密度）バランスが乱れる可能性があるため、1次成形の金型構造を上2段・下3段に変更するのが望ましい。

各評価項目の従来工法との比較を表 2-1-8 に示す。

表 2-1-8 各評価項目の HD-LD 工法と従来工法との比較

項目	単位	HD-LD 工法	焼結体	サイジング
平均密度	Mg/m^3	7.42	6.51	6.82
密度バランス	Mg/m^3	0.27	0.80	0.52
外周円筒度	μm	17.569	86.876	36.895
内歯	歯形精度	JIS8 級	JIS8 級	JIS9 級
	歯筋精度	JIS4 級	JIS8 級	JIS8 級
外歯	歯形精度	JIS10 級	JIS9 級	JIS7 級
	歯筋精度	JIS6 級	JIS6 級	JIS5 級

HD-LD 工法（1次成形－2次成形－焼結）は、平均密度・密度バランス・外周円筒度・内歯歯筋精度に優れている。

その他の歯車精度はほぼ同レベルであるが、HD-LD 工法では外歯の精度が従来工法に対しやや劣る結果となった。

これは、後述の低変形焼結検討にあるように、低混粉潤滑剤での高密度成形により成形時の内部応力が影響していると考えられる。

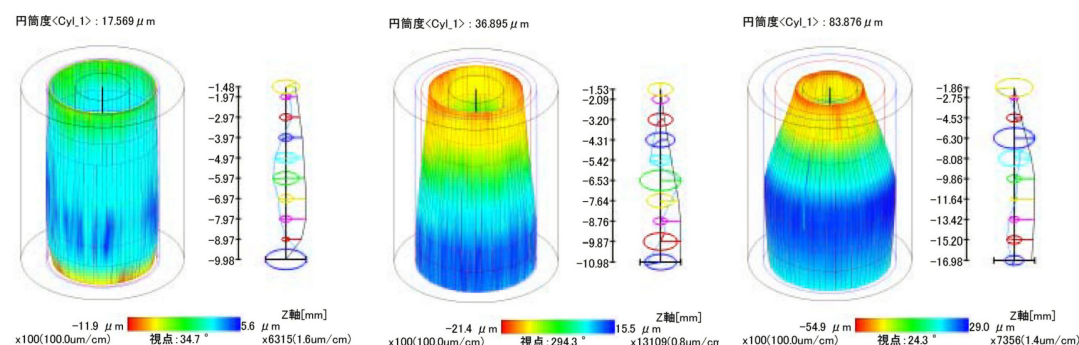


図 2-1-11 外周円筒度マップ

外周円筒形状の従来工法との比較を図 2-1-11 に示す。左が HD-LD 工法、中が従来工法（成形－焼結－サイジング）、右は焼結体（成形－焼結）であり、円筒度はサイジングにより規格の 0.05 以下とはなっているが、先端の細いテーパ形状になっている。

1 次成形体（左）と 2 次成形体（右）の外観を写真 3 に示す。
密度が全体的に上昇しているのが外観からも見て取れる。



写真 2-1-3 1 次及び 2 次成形体外観

1 次成形体と 2 次成形体を、およそ 1mm ピッチで切削しながら密度測定した結果を図 12、13 に示す。

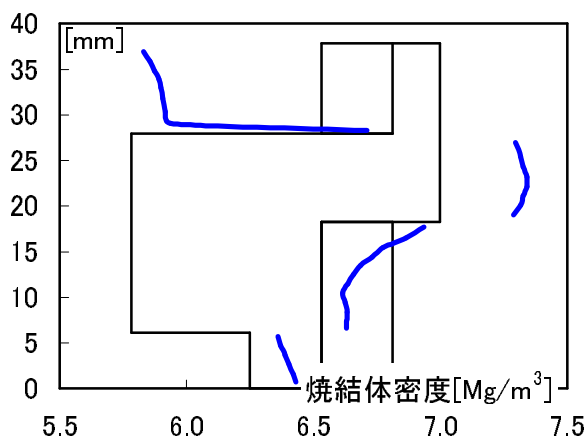


図 2-1-12 1 次成形体 長さ方向の密度分布

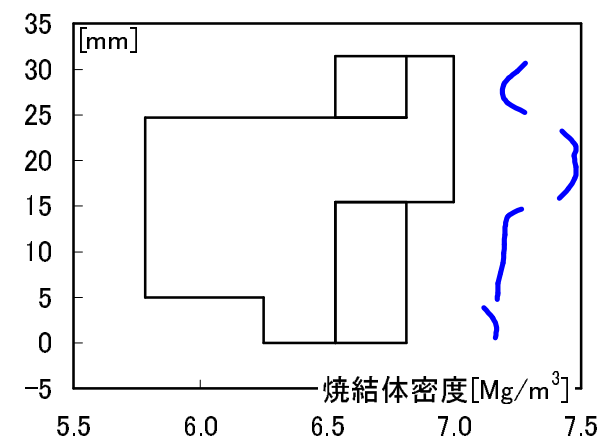


図 2-1-13 2 次成形体 長さ方向の密度分布

左の1次成形体では内歯部の密度が極端に低くかつ、上面ほど低下している。これは、彫り込みダイス構造で上パンチの突っ込みのみで粉を内歯部に充填させ、充填しながらも圧縮が進行するために上面まで粉末が回らない結果である。逆に下歯車の内段部ではパンチ面から離れるにつれて密度の低下が見られ、パンチの圧力が内部まで伝わらない結果である。

円板部（内歯も外歯ない部分）は上パンチ突っ込みの影響で高密度化しており、その影響で内歯・外歯とも円板部に近いほど高密度となっている。

右の2次成形体は、円板部で $7.4\sim 7.5\text{Mg/m}^3$ の高密度となっており、他は $7.2\sim 7.3\text{Mg/m}^3$ で均一な密度となっている。

円板部で狙い値より高密度となっているが、1次成形体の時点で 7.3Mg/m^3 を超える高密度となっていた為、2次成形の圧縮（パンチによる加圧）は最も後で行われる事となり、先に圧縮が進行した部分の粉末がこの円板部に流れ込んできた為と考えられる。

対策としては、下記が考えられる。

① 次成形体の密度バランスの均一化を金型構造の変更で整える。

② 2次成形に CNC 成形機を導入し独立パンチ加圧成形を行う。

①の対策でも十分な均密度化が可能と考えられるが、様々なバラツキなどにより限界に近い密度での成形となった場合は、金型への負担が大きくなる。

安全に限界に近い密度での成形を行う為には CNC 成形機の導入は非常に有効と考える。

9) まとめ

(ア) シンターハードニング材の“DISTALOY HP-1”と HD-LD 工法の組合せにより、顧客要求を満足できる製品を安価に量産できる工程が確立された。

(イ) 潤滑剤として、1次成形での混粉潤滑剤と2次成形での潤滑剤（圧粉体潤滑または金型潤滑）ともに LiSt が潤滑性に優れていることが確認された。

(ウ) HD-LD 工法では圧縮方向の密度バラツキを低減させることが出来、高密度かつ高精度な製品を作成できる。

(エ) 1次成形で密度バランスの大きく崩れた成形体であっても、2次成形で密度バランスの整った成形体とすることは可能。

(オ) 1次成形で密度バランスの大きく崩れた成形体の場合、カムプレスでの2次成形の圧縮進行に時間差が生じ、粉末の移動が発生し重量バランスが崩れる。

(カ) 究極の高密度製品を多段形状で目指す場合は、1次成形体の密度バランスを整えると共に、2次成形では各パンチの動作と加圧力を独立で制御できる、CNC 成形機の導入が望まれる。

2-2 HD-LD 工法の基礎技術開発

1) 長尺成形体の均密度成形

1-1) 経過

H20 年度の研究において、 $\phi 16.0 \times \phi 10.0$ の円筒形状で圧縮方向寸法 5,10,15,20mm の成形体を HD-LD 工法で作成したところ、1 次成形体では圧縮方向寸法が長くなるほど同じ成形圧力では平均密度が低下する。

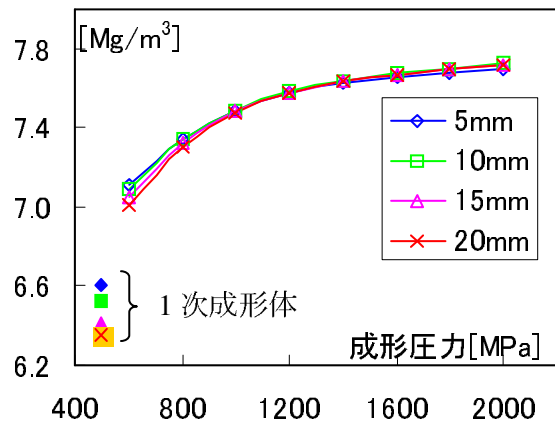


図 2-2-1 長さ寸法別 焼結体密度(0.05w%)

これに対し、HD-LD 工法を用

いると、600~1000MPa までは圧縮方向寸法が長い方が平均密度は低くなる傾向を示したが、1000MPa を越えると圧縮方向寸法の影響は見られず、1600MPa 以上では圧縮方向寸法の短い物の方が平均密度は低くなる傾向も見られた。

(図 2-2-1) 1 次成形体では、上下から加圧するパンチの圧力が、粉末同士の摩擦力や金型との摩擦力によりパンチ面から離れるにしたがって低下することにより、圧縮方向の中心部ほど加圧力が低下し低密度部となる為、平均密度は圧縮方向寸法が長くなるほど低下する。

これに対し 2 次成形においては、加圧の初期段階は密度の低い部分（圧縮方向の中央部）から粉末の再配列が始まり、この時点では 1 次成形体の端面に近い部分は形状を保ったまま低剛性のパンチとして機能し、圧力の上昇に伴って徐々に再配列部が広がり、端面部まで再配列部が達した圧力で金型内に再配列充填は完了し、その後再圧縮が進行していくと考えられる。

このメカニズムは、2 次成形時の SS 曲線を測定・分析すれば判明できると考えるが、500kN レベルの圧縮試験機が容易に利用できる環境にないため、ここでは、得られた成形体で密度の圧縮方向の分布を測定しメカニズムを推測する。

1-2) 密度分布の測定

以下の条件で実験を行った。

原料粉末：ハイブリッド Mo 合金鋼粉 AH4515

混粉潤滑剤：高压成形用 WAX 系潤滑剤

混粉潤滑剤量：0.05wt%

1 次成形体： $\phi 15.8 \times \phi 10.0$, 19 g

1 次成形圧：500MPa

圧粉体潤滑：潤滑剤濃度 4wt% の IPA 溶液に浸漬後乾燥

2 次成形圧：600~2000MPa (ピッチ 200MPa)

焼結条件：1120℃, 変成ガス雰囲気中, 30min

評価内容：1 次・2 次成形体の焼結後の密度

密度分布の測定は、20mm 狙いの焼結体で端面から 1mm 狙いで切削を進めながら、重量と圧縮方向長さを測定し、径方向寸法の測定値を用いて計算で切削した

部分の平均密度を求める方法で行った。

結果は図 2-2-2 に示す通りで、2 次成形品は密度上昇と共に密度バラツキも低減している。

成形圧力に対する部分密度の最大値 max, 最小値 min 及び分散 R は図 2-2-3 の通りで、密度バラツキは 1 次成形体の 0.55Mg/m^3 に対し 2 次成形 600MPa で 0.26Mg/m^3 と半減、800MPa 以上の成形圧力範囲では $\pm 0.1\text{Mg/m}^3$ 以下となった。1200MPa 以上ではやや密度バラツキが上昇する傾向に有るがその傾きは小さい。

1-3) まとめ

評価結果より、1200MPa までの圧力範囲では再配列が再圧縮より優勢に進行し、1200MPa 以上では再配列は終了し再圧縮が進行していると考えられる。

均一密度な成形体を得る為には、1200MPa 以上の 2 次成形圧範囲が適当で、それ以上の圧力範囲では 1 次成形と同様にパンチ面に近い部分ほど密度上昇が進行する為、密度バランスは僅かながら悪化する。

推測したメカニズムが正しければ、金属粉末自体の特性や混粉潤滑剤の種類や配合量により適正值は変動すると考えられるため、個々に確認が必要となるが、詳細な密度分布測定は不要で、圧縮方向寸法を変えた成形体の 2 次成形圧と平均密度の挙動で、長さに因らず平均密度一定となる成形圧を適正值として判断できる。適正圧力以下の 2 次成形圧 600MPa においても、密度バラツキが 1 次成形体に対し半減することは、HD-LD 工法の核となる 2 回成形法は高密度化以上に均一密度成形に非常に有効な手段であり、CNC 成形機などの高性能かつ高価なマシンを利用しても達成し得ないことを考えると、粉末冶金製造において均一密度化に関し画期的な工法と考える。

2) 低変形焼結

2-1) 均一密度成形体と低変形焼結

HD-LD 工法は均一密度の成形体を得るのに非常に有効な工法であり、特に圧縮方向寸法の長い製品に対しても均一密度成形が可能である。

通常の焼結において、成形体密度により焼結での変形（収縮・膨張）が異なる為、

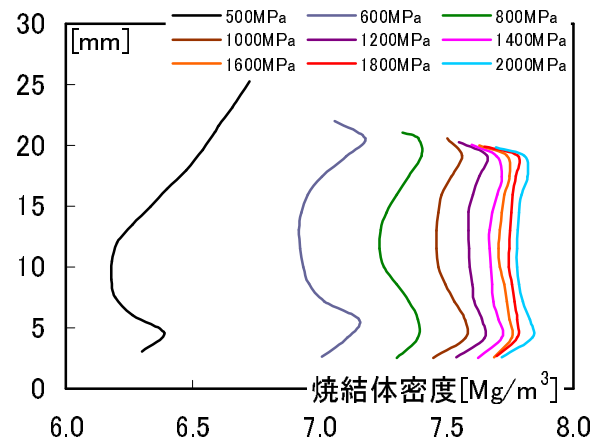


図 2-2-2 成形圧力別 長さ方向の密度分布

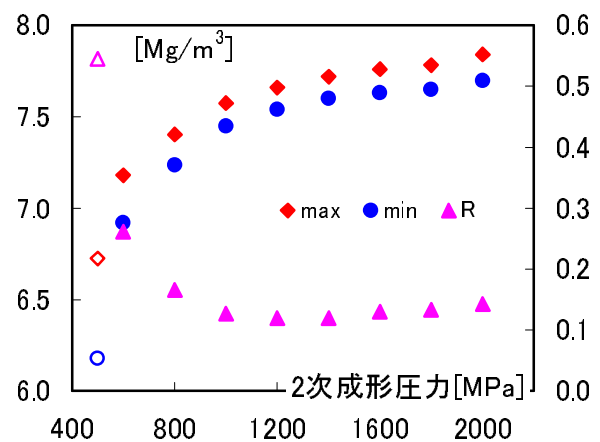


図 2-2-3 成形圧力と長さ方向の密度分布

密度バラツキの大きな成形体では変形が大きくなる。

とすれば、均一密度の成形体では変形の少ない焼結体を得られる可能性がある。

そこで、HD-LD 工法での焼結の変形度合いを下記にて確認した。

原料粉末：ハイブリッド Mo 合金鋼粉 AH4515

混粉潤滑剤：LiSt, BAP（高圧成形用 WAX 系潤滑剤）

混粉潤滑剤量：0.05, 0.2, 0.5, 0.8wt%

1 次成形体： $\phi 15.8 \times \phi 10.0$, 19 g

1 次成形圧：500MPa

圧粉体潤滑：潤滑剤濃度 4wt% の IPA 溶液に浸漬後乾燥

2 次成形圧：500, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000MPa

焼結条件：1120℃, 変成ガス雰囲気中, 30min

評価内容：焼結後の密度と外周円筒度

外周円筒度は三次元測定器を用い、外周下端面から 5mm 位置より上端面までを 10 等分した位置での 10 個の円測定データから求めた。

焼結体は表面に鉄粉の付着や荒れが見られ、そのままでは円筒評価が困難なため、表面を #1000 のサンドペーパー掛けを行った。

2-2) 円筒形状の比較

1 次成形体の外周円筒度を図 2-2-4 に示す。

圧縮方向中央部の密度が低い為、焼結での収縮が大きく、両端面に比べて外径が小さくなっており、鼓形状となっている。

これに対し HD-LD 工法での焼結品は圧縮方向中心部が大きく、両端面に近い方が小さい。(図 2-2-5) この形状は、混粉潤滑剤の量や成形圧力などに因らないが、成形圧力が大きくなるにつれ円筒径上に歪みが見られる。

2-3) 各パラメータに対する外周円筒度

各水準での焼結体密度と外周円筒度の関係を

図 2-2-6 に示すが、焼結体密度が高いほど外周円筒度は悪くなる傾向を示した LiSt と BAP では高密度域で BAP の方が外周円筒度の小さい物が多いように思えるが、全体としては明らかな差は見られない。

成形体密度が高いほど、成形後のスプリングバックや残留応力が大きい影響が焼結体に出た結果と考える。

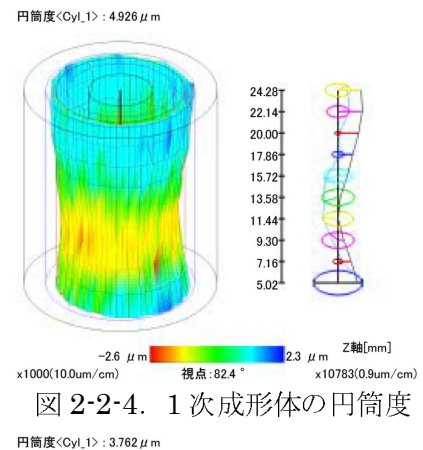


図 2-2-4. 1 次成形体の円筒度

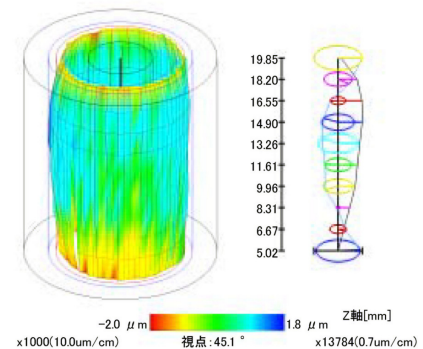


図 2-2-5. 2 次成形体の円筒度

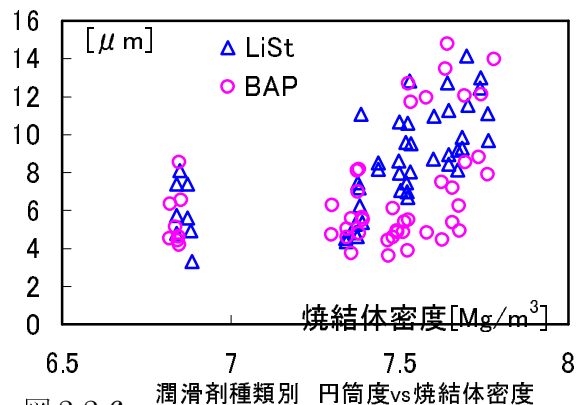


図 2-2-6

焼結での重量変化率（＝混粉潤滑剤比率）と外周円筒度の関係は図 2-2-7 に示す通りで、混粉潤滑剤が少ない方が外周円筒度は大きくなる傾向を示し、LiSt と BAP では明らかな優位さは見られない。

脱脂時に潤滑剤が膨張・蒸発する事での変形は少なく、潤滑不足によりスプリングバックや内部の残留応力の影響が大きいと考える。

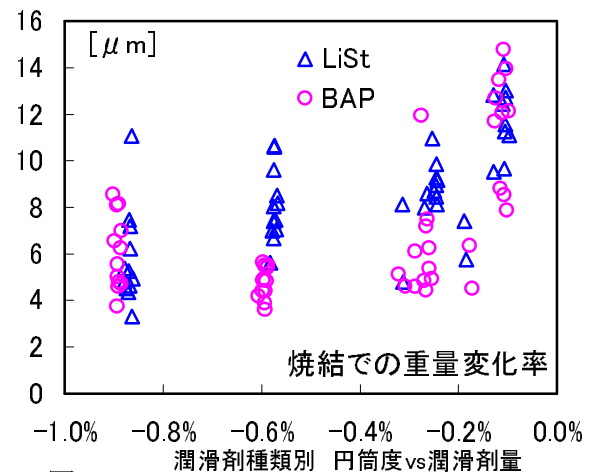


図 2-2-7

2-4) まとめ

内部潤滑剤を減らし高压成形を行うほど、外周円筒度は悪化する傾向を示した高密度化を目指すとは変形は大きくなる結果となったが、変形の増加は緩やかであり顧客要求により最適条件を見出すことは可能と考える。

変形増大の要因は以下と考える。

高压成形時の粉末再配列不完全（潤滑剤量に影響されることより）

内部残留応力の増大（高密度品ほど変形が大きい）

形状としては、通常圧縮方向中央部が小径となるのに対し、HD-LD 工法では逆に通常圧縮方向中央部が膨らむ形状となった。

これは、ギヤなどを成形した場合に焼結後にクラウニング形状が後加工無しに得られる可能性を示しており、本工法特有の優れた特徴と考える。

高密度を目指さなければ、混粉潤滑剤 0.8wt%，1 次成形圧力 500MPa，2 次成形圧力 600MPa 程度の加工条件で、長尺でも均一密度で寸法精度に優れた製品を生産することが可能である。

3) 長尺ギヤの精度

3-1) 長尺ギヤの作成

長尺ギヤの歯形精度を評価する為に、次の実験を行った

歯車形状：モジュール 0.8 ， 歯数 12

原料粉末：ハイブリッド Mo 合金鋼粉 AH4515

混粉潤滑剤：LiSt 0.8wt%

1 次成形体：2.41g(5mm 狙い)，4.81g(10mm 狙い)，7.22g(15mm 狙い)

1 次成形圧：500MPa

圧粉体潤滑：潤滑剤濃度 4w% の IPA 溶液に浸漬後乾燥

2 次成形圧：750，1000，1250MPa

焼結条件：1120℃，変成ガス雰囲気中，30min

評価内容：歯筋形状誤差

3-2) 長尺ギヤの評価

歯筋形状誤差の評価結果を

図 2-2-8 に示す。

500MPa は 1 次成形のみ、他は 2 次成形を行ったデータである。

2 次成形 750MPa では 1 次成形品より歯筋形状誤差は小さくなったが、圧縮方向寸法 5mm を除いてそれ以上の圧力では歯筋形状誤差が大きくなる傾向を示した。

前の円筒形状での結果と同様、高圧成形での歪の影響と考えられる。

歯車がクラウニングになっているかどうかについては、評価方法が確立できず、現在検討中である。

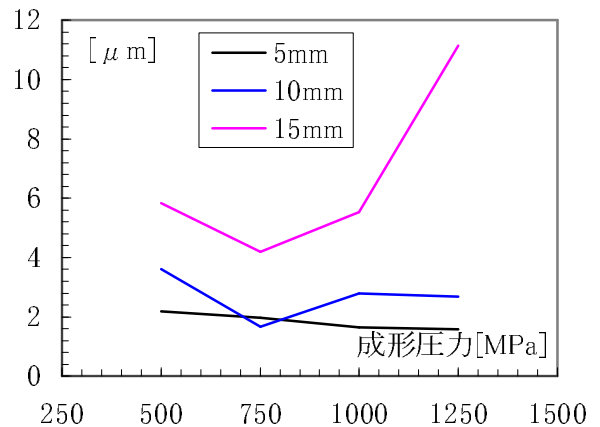


図 2-2-8 圧縮方向寸法別 歯筋形状精度

3-3) まとめ

HD-LD 工法を用いた場合、1000MPa 以下の成形圧であれば歯筋形状誤差は 1 次成形体より小さくなり、中密度 (7~7.3Mg/m³) で精度良い長尺ギヤの作成が可能である。

4) 組合せ成形

4-1) 組合せ成形

2 回成形法では 2 個以上の 1 次成形体を径方向に組合せて 2 次成形を行うことが出来る。

下記の 2 個の 1 次成形体の組合せ成形を行ったところ、成形圧力に対する密度は単純形状の製品と同等であり、1600MPa で 7.61Mg/m³、1800MPa で 7.64Mg/m³ (図 2-2-9) の均密度な製品を得られた。

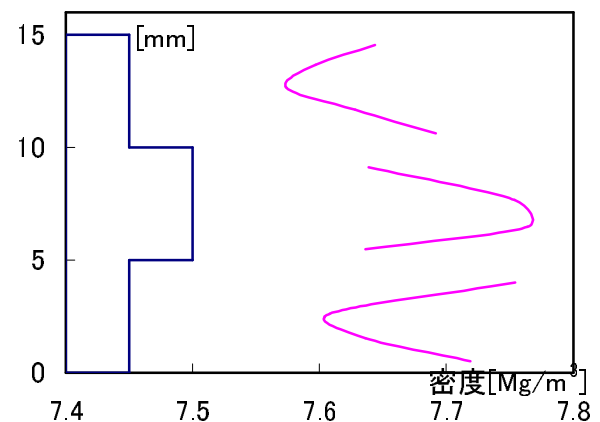


図 2-2-9 組合せ成形品密度バランス

軸部 1 次成形体 : $\phi 9.8$

ツバ部 1 次成形体 : $\phi 15.8 \times \phi 10.0$

4-2) 量産化製品への適用

この組合せ成形法を①の量産化部品へ適応することが可能と考えられる。

組合せ部品図を図 2-2-10 に示す。

上 2 段, 下 3 段の多段複雑形状部品が、上 1

段, 下 2 段部品と上下 1 段部品に分割して 1 次

成形を行うことが可能で、1 次成形金型が単純構造となることにより以下のメリットが生まれる。

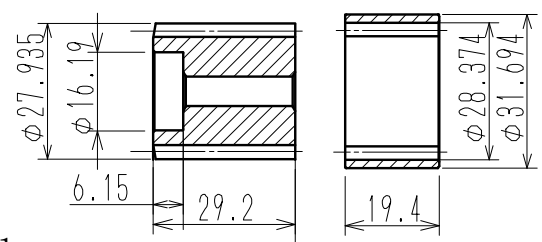


図 2-2-10. 1 次成形

- ・ 単純機構の成形機を使用できる
- ・ 部分密度バランスの調整が容易
- ・ 金型メンテナンスが安易

金型面数が増える、2次金型へのセットに時間を要すなどのデメリットも有るが、より高密度で均一密度の製品を生産することが可能となる。

4-3) まとめ

多段複雑形状部品であっても、径方向組合せ可能な複数部品に分割して1次成形を行う事により、安定した製品を生産することが可能となる。

5) 高疲労強度

5-1) ハイブリッド Mo 合金鋼粉の特徴

ハイブリット Mo 合金鋼粉は、その焼結機構により粗大気孔が減少し疲労強度が向上する特徴を持ち、更に、気孔周辺の Mo 濃化部が焼結ネックを強化している。メーカーデータに因れば、回転曲げ疲労強度は密度に比例して増加し、密度 7.6Mg/m^3 で 500MPa を越える。(図 2-2-11)

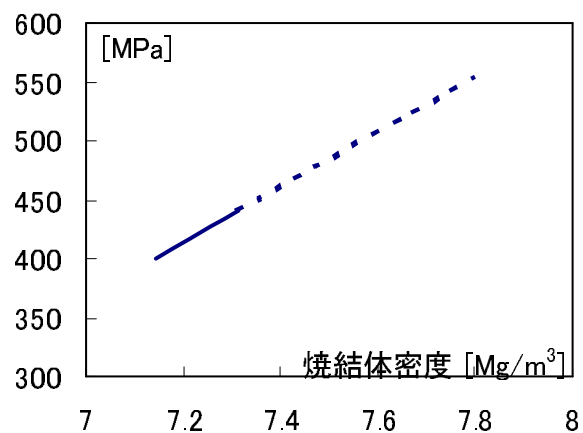


図 2-2-11 焼結体密度と回転曲げ疲労強度

また、ハイブリット Mo 合金鋼粉を用い歯先鍛造により歯先密度を向上させた結果、密度・硬度・強度は上昇したが、疲労強度は密度比で上昇が小さかったとの研究結果がある。焼結後のストレス・変形により強化されていた焼結ネック部にクラックなどが発生し、疲労強度が向上しなかったと考える。

5-2) HD-LD 工法への適応性

HD-LD 工法においては均一密度な製品の作成が可能であり、疲労強度に対してネックとなる部分（低密度部）が存在しない。また、成形で密度を上昇させている為、焼結後のサイジングを最小限に抑えることが可能で、焼結ネック部にクラックなど発生しないため、密度 7.6Mg/m^3 で 500MPa を越える回転曲げ疲労強度製品の製作が可能と考える。

5-3) まとめ

ハイブリット Mo 合金鋼粉は疲労強度に優れた材料であり、HD-LD 工法に使用した場合その特徴を十分に発揮することが出来る。

HD-LD 工法は、1次成形体の脱脂工程を追加する、2次成形への温間成形法の導入などを適応した場合、真密度 7.8Mg/m^3 の製品を作成する事が可能な工法であり、多段複雑形状部品も CNC 成形機により真密度製品の生産が可能と考える。この密度が達成できれば、 550MPa の疲労強度製品も夢ではない。

2-3 HD-LD 工法の周辺技術開発

焼結部品の疲労限界測定 of 迅速計測法を開発し、焼結部品強度の迅速評価や品質保証の向上を目標とした。従来法と迅速法による疲労限界値の測定精度は図 2-3-1 3 に示すように比較的良く一致している。その際の迅速性については、従来 1 週間程度要した疲労限界測定に対し、目標値を 1 疲労限界試験/半日としたが、結果として、3hr.~半日で 1 疲労限界を測定することが出来た。

1) 全体スケジュール

下記の様なスケジュールで研究開発を実施した。

表 2-3-1 全体スケジュール

作業項目	H21.4	7	10	H22.1
1. 試験片形状 検討	■ 2 種類			
2. 材質、成形・ 焼結条件検討	■ 4 種類			
3. 試験片製作	■ 50 本			
4. 従来法 疲労試験		■ 42 本		
5. 迅速法 疲労試験		■ 4 本		
6. データ解析			■	
7. 報告書、特 許作成			■	

2) 試験片

a. 試験片形状

軸部径：平滑材 $\phi 8 \text{ mm}$ 、切欠材 $\phi 7 \text{ mm}$ 、チャック部径：平滑&切欠材 $\phi 12 \text{ mm}$

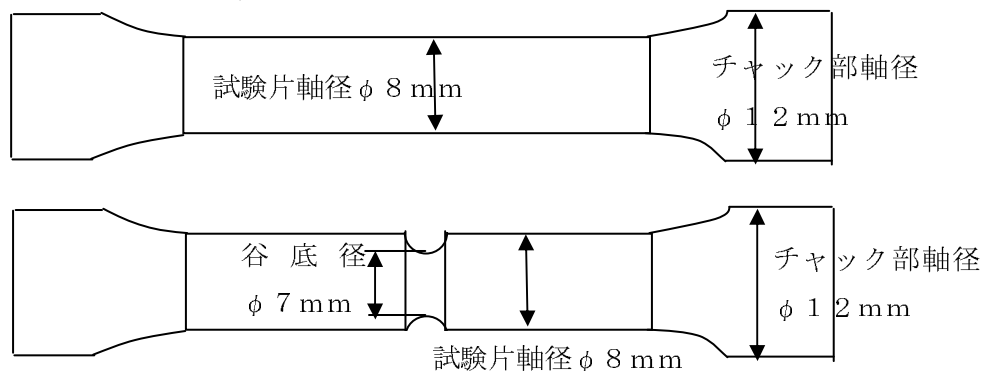


図 2-3-1 試験片形状

b.応力条件

試験回転曲げ応力：

平滑材 1 5 0 ～ 3 0 0 MPa

切欠材 1 5 0 ～ 5 5 0 MPa

c.材 質

表 2-3-2 材質

試験片番号	成分設計	密度 (Mg/m3)	形状
1	Fe-Ni-Cu-Mo-C	6.94	平滑材
2	Fe-Mn-Mo-C	7.10	平滑材
3	Fe-Mn-Mo-Cu-C	7.10	平滑材
4	Fe-Mn-Mo-C	7.40	切欠材

d.焼結、表面処理条件

表 2-3-2 焼結、表面処理

試験片番号	焼結温度 (℃)	表面処理	形状
1	1130	焼結のまま	平滑材
2	1130	浸炭	平滑材
3	1130	浸炭	平滑材
4	1130	高周波焼入れ	切欠材

3) 疲労試験



図 2-3-2 疲労限界測定状況（奥：回転曲げ疲労試験機、手前：赤外線カメラ）

4) 疲労限界測定結果：従来法

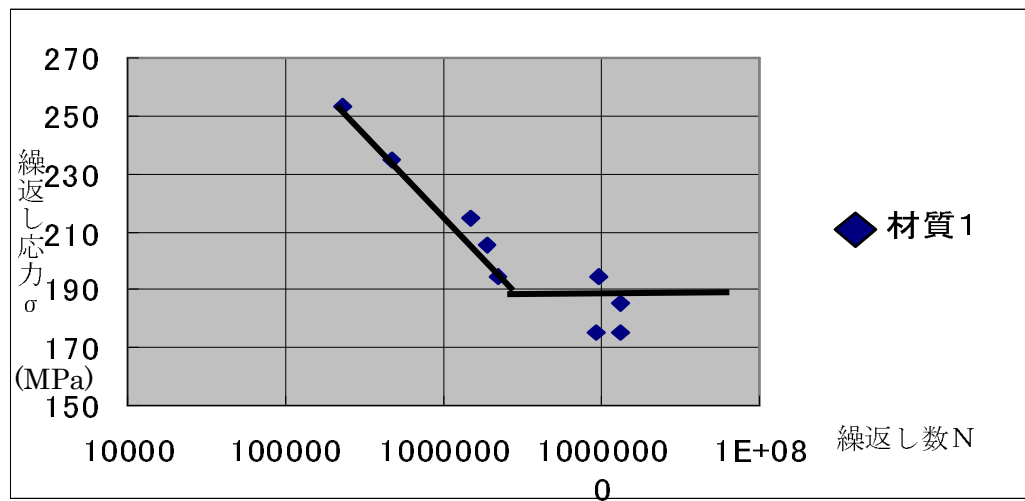


図 2-3-3 試験片番号 1 疲労限界：従来法

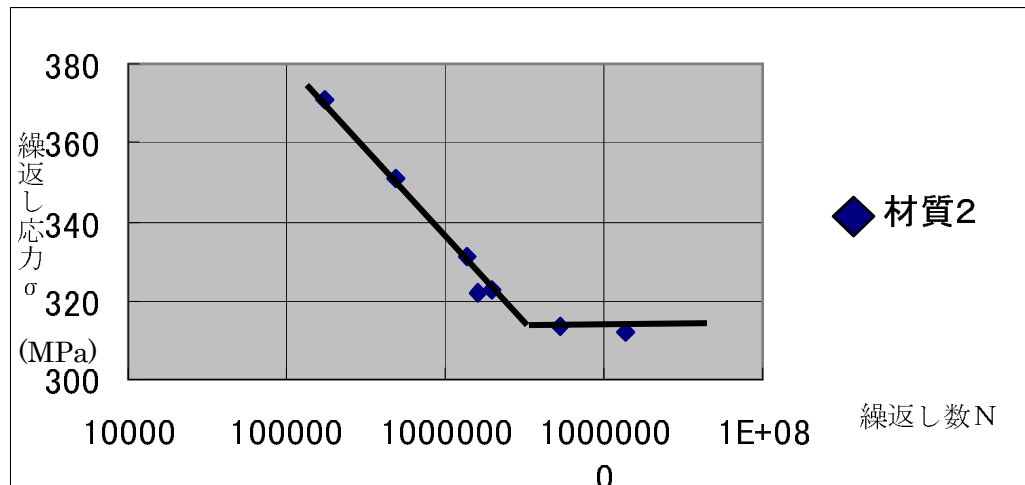


図 2-3-4 試験片番号 2 疲労限界：従来法

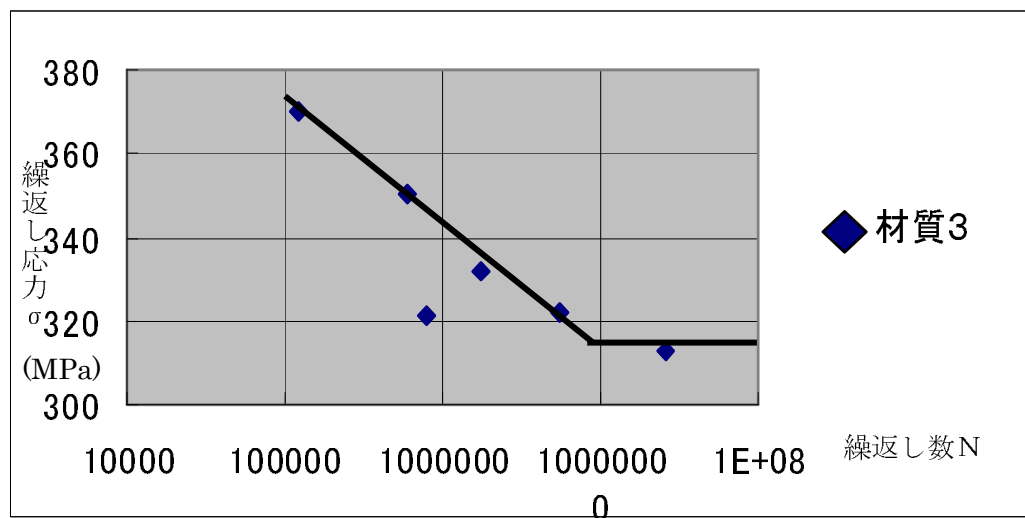


図 2-3-5 試験片番号 3 疲労限界：従来法

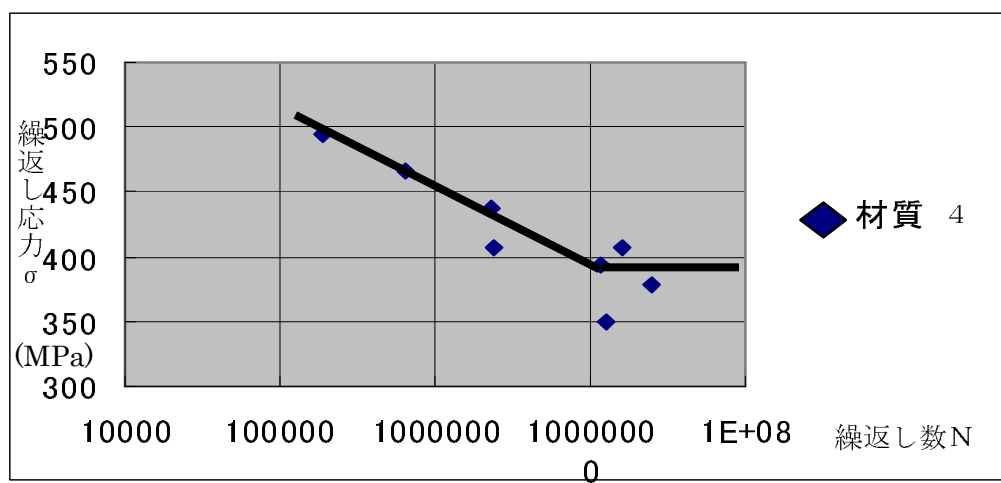


図 2-3-6 試験片番号 5 疲労限界：従来法

5) 疲労限界測定結果：迅速法

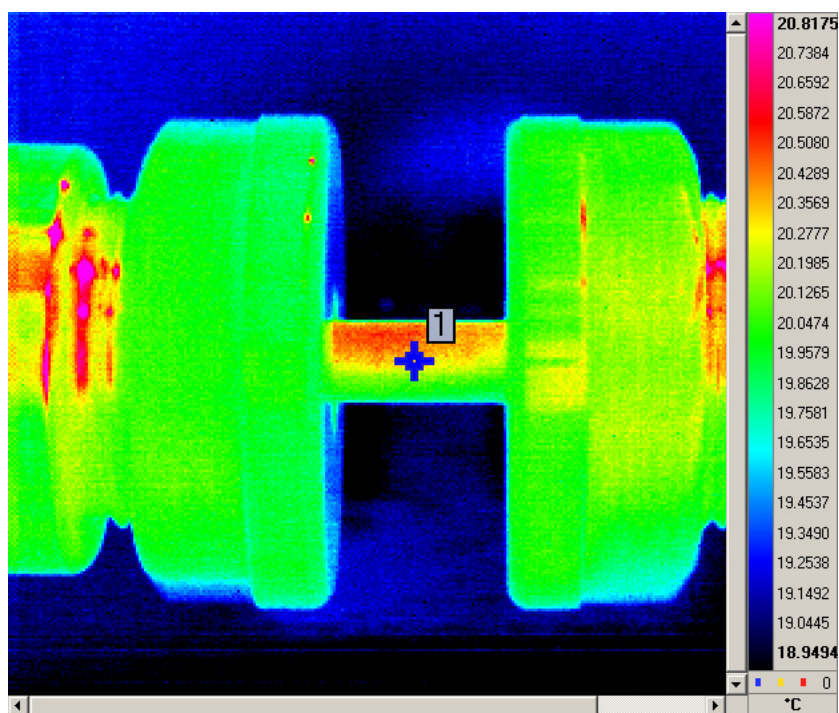


図 2-3-7 平滑材の疲労限界迅速測定時の温度分布

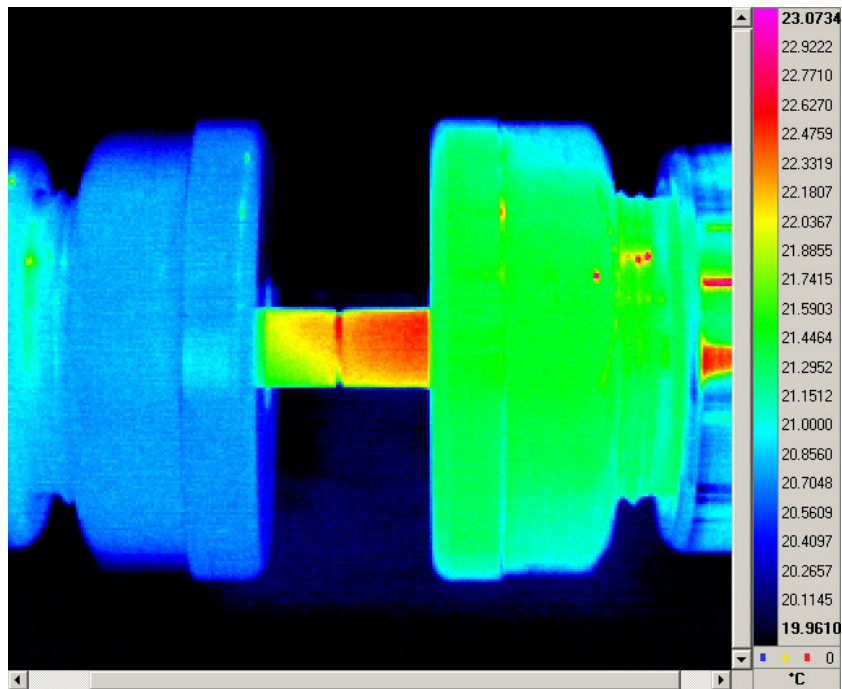


図 2-3-8 切欠材の疲労限界迅速測定時の温度分布

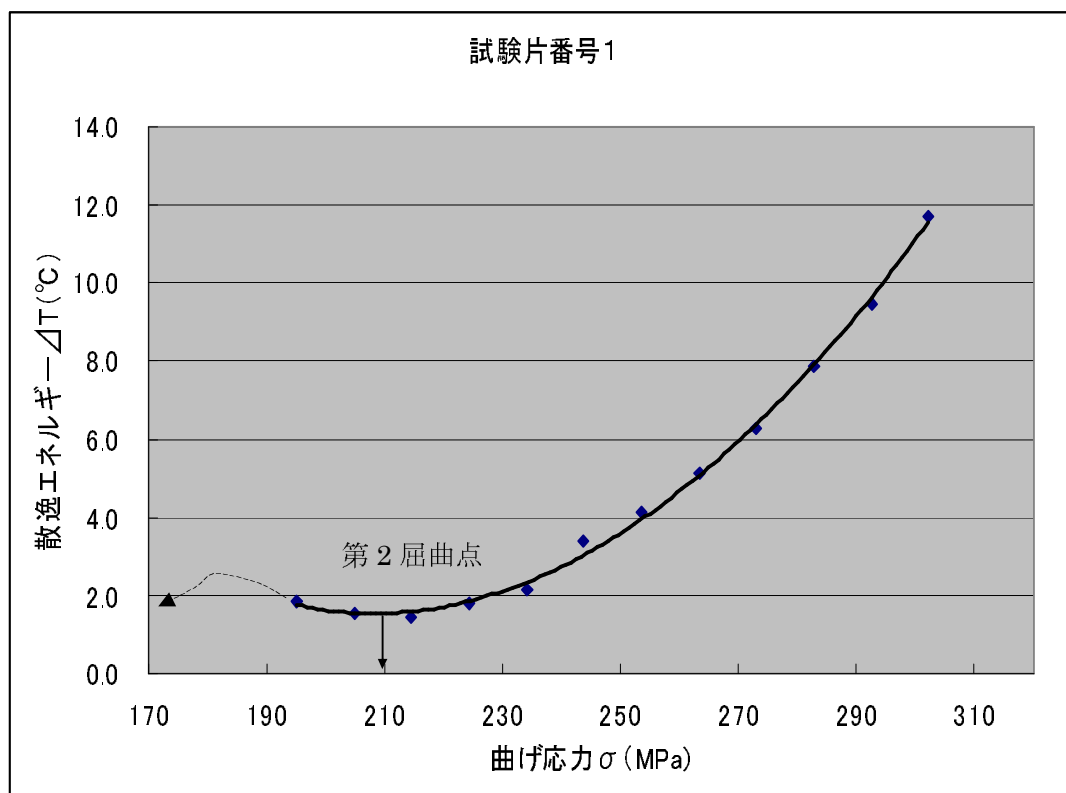


図 2-3-9 試験片番号 1 (平滑材) 疲労限界 : 迅速法

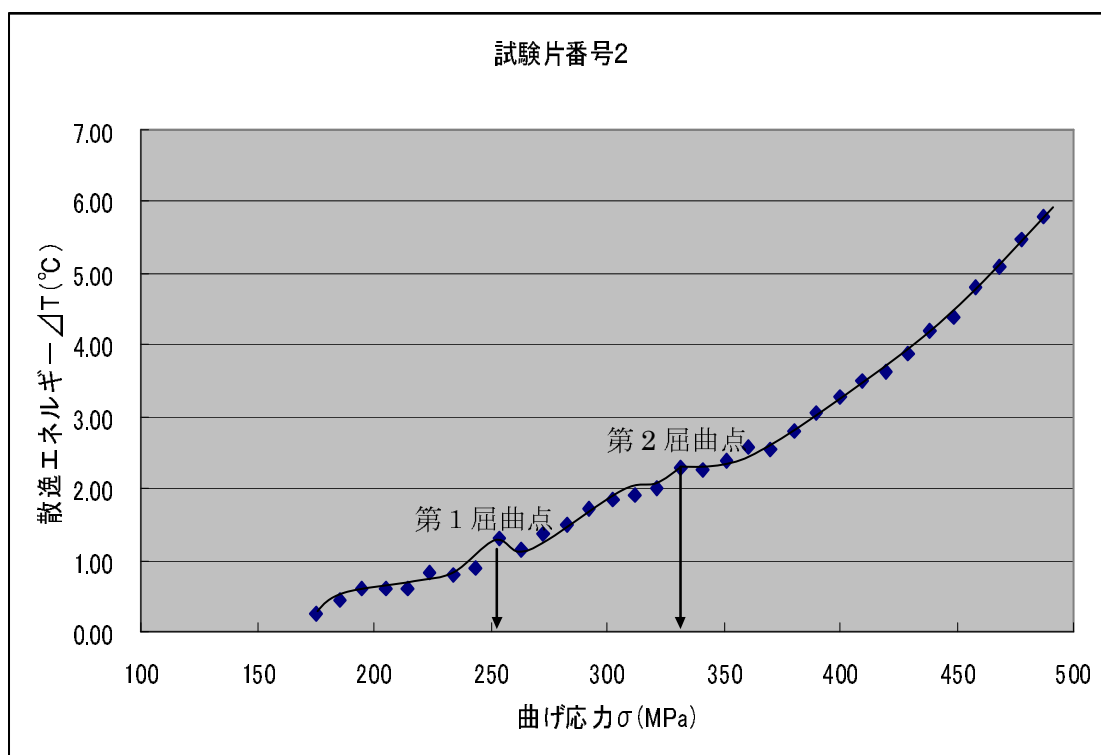


図 2-3-10 試験片番号 2（平滑材）疲労限界 : 迅速法

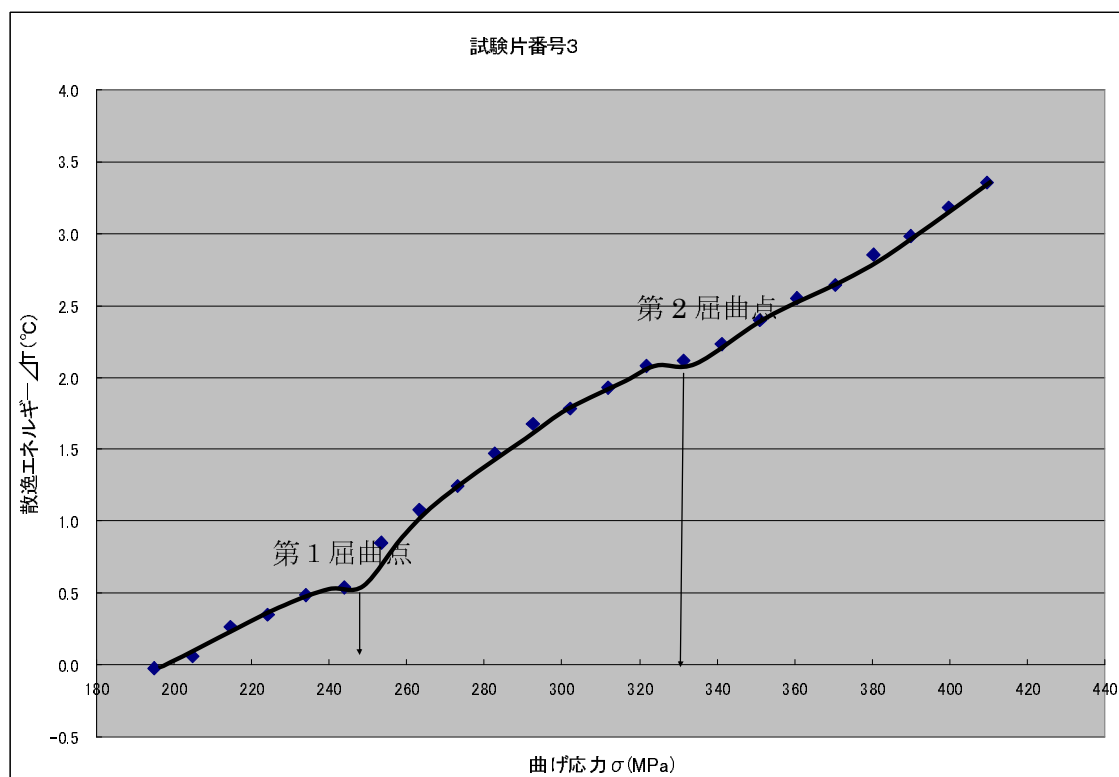


図 2-3-11 試験片番号 3（平滑材）疲労限界 : 迅速法

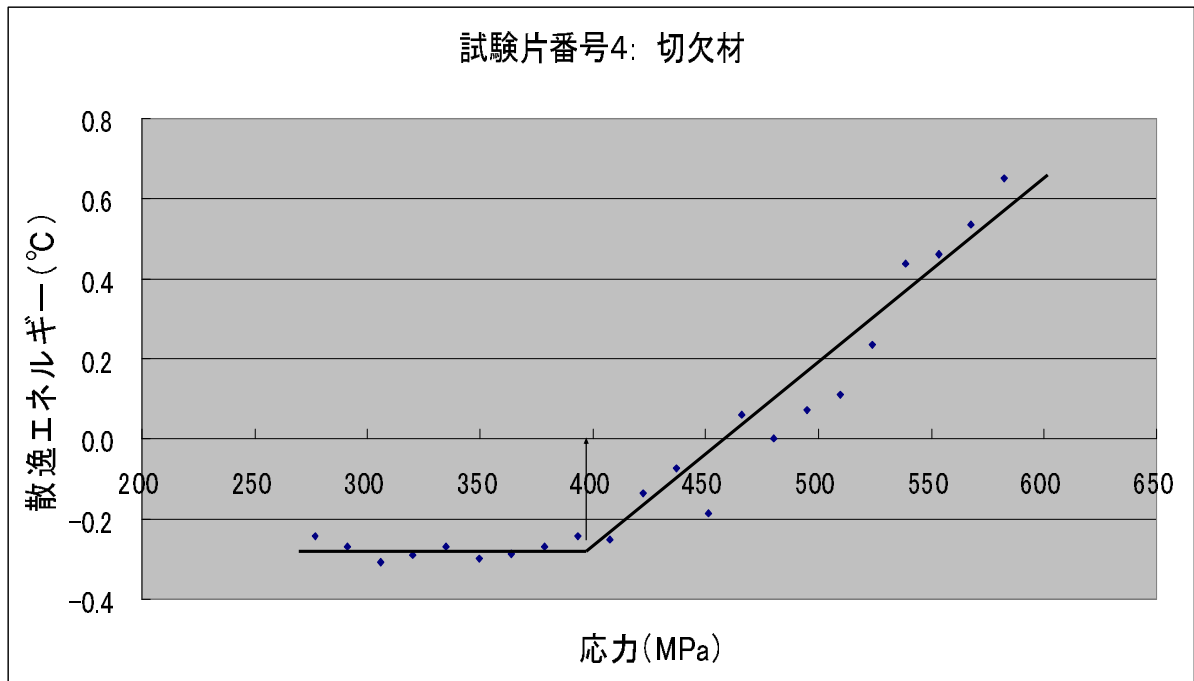


図 2-3-12 試験片番号 4 (切欠材) : 迅速法

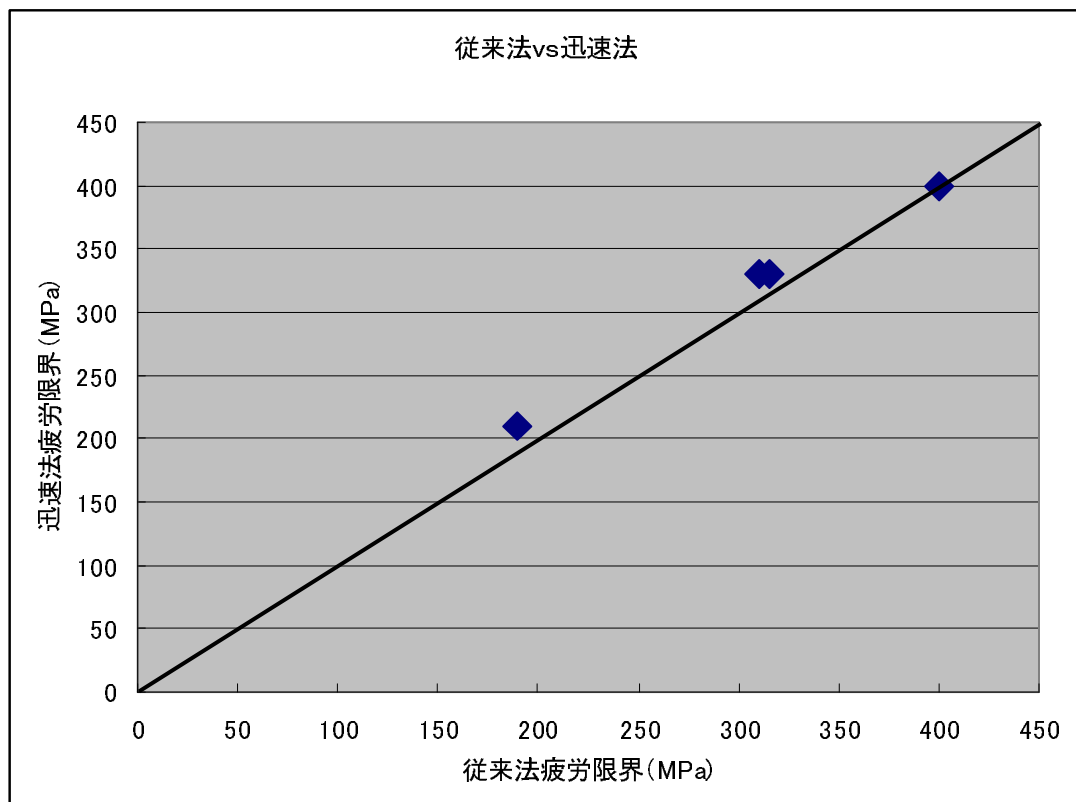


図 2-3-13 疲労限界 従来法 v s 迅速法

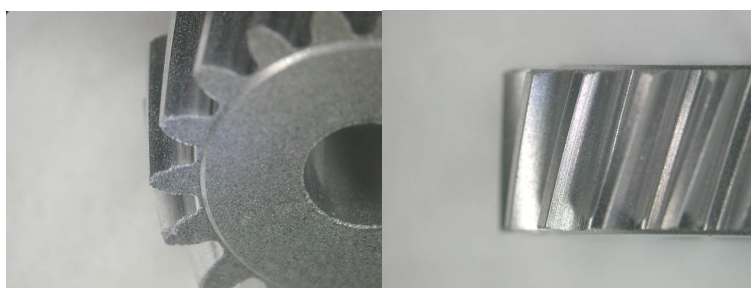
第3章 最終章

3-1 複数年の研究開発成果

3ヶ年にわたるHD-LD工法の研究・開発において、初年度のH19年度には次の研究成果が得られた。

<H19年度研究成果概要>

- ① リング状の単純形状による基礎実験にてハイブリットMo合金鋼粉JIP-AH4515をHD-LD工法で成形することにより密度 7.74Mg/m^3 の焼結体が作成でき、混粉潤滑剤を少なくすることで焼結での寸法が安定することが確認できた。
- ② 高圧成形に耐え得るようにダイセット、金型及び周辺ツールの設計を見直しHD-LD工法によるヘリカルギヤの作成を試みた。その結果、混粉潤滑剤量 0.6%の市販粉末JIP-AH4515-CX065Gで密度 7.43Mg/m^3 のヘリカルギヤが得られ、本開発の当初目標(7.3Mg/m^3)は達成した。また、基礎実験の結果より混粉潤滑剤量の最適化によって最終目標 7.6Mg/m^3 を達成できる可能性を見出した。



試作成形品：ヘリカルギヤ・成形圧力 1200MPa

- ③ カーボンナノチューブ含有による高強度化についてはハイブリタイザーにより混合可能であることを確認し、次年度以降の焼結実験、強度評価につなげた。
- ④ 赤外線カメラによる迅速評価技術の開発（オンライン品質検査）については、赤外線カメラにより成形時の加工発熱が測定できることを確認し、課題の抽出を行った。
- ⑤ 焼結機の製造開発については、高強度・複雑形状の焼結機械部品の製造を、高精度でかつ低価格、省エネルギーで実現するための焼結機の選定を行い、その建設、立ち上げ、試運転まで実施し、問題なく焼結できることを確認し、次年度以降のエネルギー原単位の評価、雰囲気・均熱の安定性の評価等を実施後、HD-LD工法の本格実験に使用した。

また、2年次のH20年度にはHD-LD工法の適用に相応しい具体的アイテムへの取り組みが始まり、その研究開発への取り組みが加速した。H20年度の研究成果概要を以下に示す。

<H20年度研究成果概要>

- ① 具体的アイテムである自動車用途の複雑ギヤ形状による量産初期評価にてハイブリッドMo合金鋼粉をHD-LD工法で成形することにより平均密度 7.27Mg/m^3 、密度バラツキ $\pm 0.1\text{Mg/m}^3$ 以下の成形体を作製することが出来た。(写真1)得られた密度は当製品の要求仕様である 7.3Mg/m^3 (本開発の当初目標と同じ) にほぼ近い値であった。さらに、混粉潤滑量、2次成形の金型構造を見直すことにより、この複雑ギヤ形状にて本開発の最終目標 7.6Mg/m^3 を達成できる可能性を見出した。これにより、HD-LD工法の量産化が現実的になってきた。

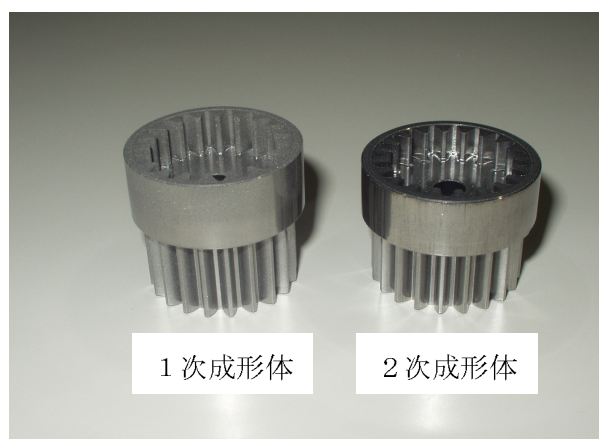


写真1 複雑形状部品（自動車用途）

- ② 基礎実験では、混粉潤滑剤及び1次成形体に塗布する5種類の潤滑剤を評価し、本工法に適した潤滑剤を見出した。さらに、2次成形時に2種の1次成形体を接合出来ること、単純形状の1次成形体を2次成形時に複雑形状（ギヤ）に出来ること、1回成形では密度バラツキが避けられない長尺品でも2回成形で高密度かつ均一な密度を有する成形体が見出されることなどを見出した。また、金型の表面コーティングも検討し、スリックコート(DLC系)が潤滑性に優れることを確認した。
- ③ 平成19年度に導入した省エネルギー焼結機においては、現行機種と比べてエネルギー原単位を評価し、当社現有機に対して $\Delta 7.4\%$ 削減できることを確認した。
- ④ その他、周辺技術として赤外線カメラで成形直後の温度を観察することによりワレを迅速に判定し、オンラインで品質検査できる可能性を見出した。
- また、機械的強度向上を狙ってCNT(カーボンナノチューブ)添加し、強度評価を実施したが、無添加品に対して強度が半減することを確認した。

3-2 研究開発後の課題

1) 1次成形技術

2-1で取上げた多段複雑形状部品の安定した量産に向けては、1次成形体の密度バランスを改善する為に金型構造の変更が急務である。

CNC成形機が導入できればベストであるが、現有のカムプレスでも上2段下3段の金型構成に変更する事で、1次成形体の密度バランス及び重量調整を大幅に改善することが出来る。

この改善により、混粉潤滑剤の混合量を低減することが可能となるため、更なる高密度品の成形に挑戦したい。

また、比較的低圧力ではあるが過去に経験のない低潤滑剤量での成形であり、金型の寿命や最適なメンテナンス方法なども量産の中で確立していきたい。

2) 2次成形技術

研究では圧粉体潤滑処理を行ってきたが、本格的な量産では金型潤滑法の適応が好ましいと考える。この技術は業界では確立した技術であるので、早期に導入し実施したい。

現有のカム式成形機では各パンチの加圧力をコントロールできない為、パンチごとの加圧力に差が生じて全体の密度を均一にすることが出来ない。この為、高密度となる部分が限界密度に達しない範囲で成形を行う事となり、平均密度は理論値まで上げられない。

1次成形体の密度のズレやバラツキを極力押さえることでより高密度での成形が可能となると考えるが、その調整及び評価に多くの時間を要する。

CNC成形機であれば調整は安易であろうが、高压成形のため300～500tクラスの能力が必要で、導入は不可能である。

よって、評価時間自体の短縮と精度向上による調整機会の低減を目指し、成形体の部分密度の簡単で正確な評価方法の確立を目指したい。

3-3 事業化展開

本開発の実用化研究対象であるD社向け4WD切替用歯車部品は、顧客仕様を満足した為、顧客へサンプル提出し評価中である。社内的には量産試作を継続して実施している。

本製品は平成23年度より年間約0.42億円を見込んでいる。その他数社向けにプレゼンテーション、サンプル提供等拡販活動を展開中である。また、自動車用プラネタリーギヤ等への展開も狙っており、シェア10%獲得すると年間約3.2億円(当社独自試算)の売上が期待される。売上が想定される品名、金額等を表1に示す。

表1 売上予想

品名	顧客	年間売上金額	量産化時期
自動車・4WD切替部品	D社向け	0.42億円	2011年
自動車・ドアミラー部品	O社向け	0.55億円	2013年頃
自動車・ブッシュ	F社向け	0.65億円	2015年頃
自動車・プラネタリーギヤ各種	各社	3.2億円	2020年頃



この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。