

複雑形状部品への適応を可能にした 焼結接合技術の進化

Progressed Sinter Brazing Technology Enables Production of
Complex Shaped Parts

播本 大祐*
Daisuke Harimoto

奥野 麗子
Reiko Okuno

青木 克憲
Katsunori Aoki

小菅 敏行
Toshiyuki Kosuge

粉末冶金法は粉末を金型で圧縮して成形体を作製し、それを焼結することで鋳鉄と同等の強度を得ることが可能であり、形状の自由度は高く、完成品、もしくは完成品に近い形状（ニアネット形状）を得ることができる製法である。このようにニアネット形状で製品を作製することで、鋳鉄からの削り出し品と比較して安価に製造できることが可能で、鋳造切削品のVA*¹としてその市場を拡大してきた。しかしながら粉末冶金法では二次元での形状自由度は高いが、高さ方向（Z方向）の形状は金型からの抜出の制約があり、形状が限定されてきた。我々は粉末冶金法での金型成形での造形技術に接合という技術を加えることで、金型成形の二次元での形状自由度の利点を生かしつつ三次元的にも形状の自由度を持たすことに成功した。本稿では現在量産している接合製品の特徴を示すと共に接合の保証方法についても詳しく紹介する。

Powder metallurgy is a processing method whereby green parts are compacted using dies and sintered. It offers equivalent strength as cast iron and superior design flexibility, and produces near-net shaped parts at lower costs as it reduces the need for machining process. For these reasons, powder metallurgy has expanded its market as a result of value analysis applied to cast iron parts. However, while compaction tooling offers shape design flexibility in two dimensions, it had difficulty in producing parts with height (in the z-axis direction) due to ejection constraints. We have introduced bonding technology to compaction tooling using powder metallurgy and achieved shape flexibility in three dimensions. This paper describes the characteristics of bonding parts and details assurance methods for bonding areas in our current production.

キーワード：粉末冶金、焼結接合、プラネタリキャリア

1. 緒 言

当社の粉末冶金の歴史は古く、1939年住友電工(株)研究部門にて含油軸受の試作製造を開始して以来、70年余りの長きに渡り、焼結製品の設計・製造・販売を手掛け、家電向けエアコンプレッサー部品からギヤをはじめとした自動車部品への適用範囲を広げている。やがて、市場の中心は製品寿命が5～10年で数千～数万とまとまった数量を生産する自動車部品にシフトし、ギヤやスプロケット*²など金型成形で有利な形状を持つ製品を中心に焼結製品の市場拡大を押し進めてきた。

一方で粉末冶金法では、金型成形で成形した製品を金型から抜き出すため、高さ方向に設計的な制約があった。

自動車部品の高機能化が進む中で、形状は複雑化が進み、Z方向にも設計自由度が必要な製品が増加してきた。一部の製品については加工を行うことで対応してきたが、加工を行うことで、粉末冶金法におけるニアネットシェイプ*³のコストメリットが低減する。我々は粉末冶金法という製法を生かしたものづくりを進めていく上で、更なる製品の複合化として接合技術を取り入れることで、新しい市場を開拓でき

た。本稿では焼結接合技術の概要と本技術を取り入れた製品について詳細を述べる。

2. 焼結製品の製造工程と特徴

焼結製品の製造工程と特徴について簡単に説明する。

2-1 製造工程

焼結製品の製造工程を図1に示す。鉄系の焼結製品の場合、粒径数十 μm ～百数十 μm の鉄粉に数 μm ～数十 μm の銅粉、黒鉛粉等の合金原料粉、更に成形金型との潤滑を目的としたステアリン酸等の潤滑剤を添加し、乾式状態で混合を行う。混合された粉末は金型の中へ一定量充填され、成形プレスにて上下方向に加圧成形される。この時の圧力は500～700MPa程度であり、得られた成形体の密度は6.7～7.1 g/cm³（真密度の85～90%）程度に達する。成形体は焼結炉内で加熱され、金属原子の拡散、合金化により粉末同士が結合し、鋳鉄と同等な強度の焼結体が得られる。焼結は1100～1150℃、15～30分程度であるが、特に強い強度、靱性が必要な場合は1200～1300℃、15～90分の高温、長時間

焼結を行う場合もある。焼結は通常変成ガス、もしくは窒素ガス雰囲気で行われる。

焼結後は製品の用途により各種工程に分かれるが、その主なものは①焼結体を金型にて再圧縮し、寸法精度を高めるサイジング、②旋盤やマシニングセンターなどによる機械加工、③浸炭焼き入れ、高周波焼き入れなどの熱処理、④メッキや水蒸気処理等の表面処理、⑤パレル研磨やショットブラストなどの仕上げ処理等があり、製品の要求特性に応じて各種処理を組み合わせ用いる。

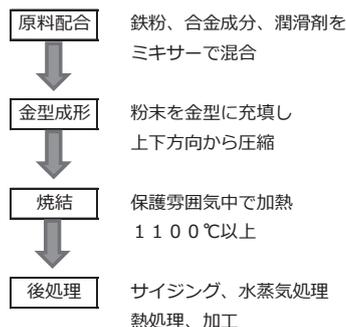


図1 焼結製品の製造工程

2-2 焼結製品の特徴

焼結製品は、その工法から、次の形状的制約がある。

- ①成形体を金型から抜き出せる形状
- ②粉末が均一に充填できる形状

これら制約を克服し、より複雑形状の部品も製造すべく、金型表面の改質、給粉の改善、高密度成形法の開発など、新たな技術改善を積み重ねている。しかし、これらの技術改善では三次元的な制約があるため、接合技術は焼結製品にとっても自由度を高める有効な製造手段である。

3. 焼結製品の接合

3-1 接合の目的

一般に接合は次に示す2つの目的に大別される。

- ①材質的に異なる部品を組み合わせ新しい機能部品を得る
- ②通常の金型成形では製造が不可能、または単一製品での実現が難しい形状の部品を得る

①の例としては、鋼材の先端に超硬合金やセラミックを接合した切削工具、アルミの本体に硬質合金のチップを接合し、軽さと耐摩性を兼ね備えたロッカーアーム等が挙げられる。②の形状を得る点に関しては、焼結部品に限らず接合の大半がこの目的のために行われている。

一般に、ある部品を目的の形状に加工することが不可能、またはコストが掛かる場合、別々に複数の部品を加工し、後

でロウ付け、溶接、ボルト締結等の接合を行う。焼結製品の場合、他の製造法と異なり、形状的制約があるため、他の加工法では可能でも焼結では不可能な場合もある。

3-2 接合の種類

表1に現在焼結製品に使用されている主な接合法を示す。

表1 粉末冶金法における接合法一覧

接合工程	接合法	接合部の強度	接合の信頼性	材質の自由度	形状の自由度	コスト	
焼結と同時に接合	焼詰め・拡散	組合せ焼結接合	○	○	△	○	◎
	液相接合	焼結ロウ付け接合	◎	◎	○	○	○
		銅溶浸接合	○	○	○	○	×
焼結後別工程で接合	機械的接合	液相接合	○	○	×	○	△
		圧入	△	△	○	○	◎
		カシメ	△	△	△	○	◎
	溶融による接合	ボルト締め	○	○	○	△	○
		溶接	○	○	△	○	△
		摩擦圧接	△	△	○	○	△
	その他	接着	△	△	○	○	○
鑄ぐるみ		○	○	○	○	×	

接合を行う工法として、「焼結と同時に接合」を行う工法と、「焼結後に別工程で接合」を行う工法に大別できる。

「焼結と同時に接合」を行う工法は焼結独特の接合方法であり、また焼結製品の製造工程内で行えるため、経済的かつ効率的である。焼結と同時に接合する本工法は、更に下記のように分類できる。

- ①焼結中に液相を生成させてその液相により部品を接合する方法
- ②焼結中の高温下で固相拡散により部品を接合する方法
- ③焼結での材質違いによる寸法変化の差を利用した一種の焼詰め、および一部固相拡散により接合する方法

一方、「焼結後に別工程で接合」を行う工法は通常の溶製材でも広く行われている方法であり、製法としては安定したもので、一般的に使用しやすいものである。焼結部品の場合も基本的には溶製材と同様な考え方が適用できるが、焼結部品であるがために配慮を要する場合がある。その主な要因は、焼結部品が有する気孔に起因するものである。

当社では組合せ焼結接合、焼結ロウ付け接合、圧入、カシメ、摩擦圧接を用いた製品を量産化した実績がある。現在では接合の信頼性が最も高い焼結ロウ付け接合を主として多数の自動車部品を量産している。

4. 焼結ロウ付け接合法の特徴

ロウ付けの方法としては、トーチ法、高周波加熱法などの大気中で行う方法と、炉内保護雰囲気で行う方法があり、信頼性、量産性の点から炉内保護雰囲気でのロウ付け法が優れている。

焼結ロウ付け接合のメカニズムを図2に示す。接合する複数の部品を組み立て、その部品の接触界面にロウ材をセットする。組み立てた製品を焼結することで溶けたロウ材が融液となる。融液となったロウ材は毛細管現象により成形体の気孔および接合界面に優先的に浸透する。一般的なロウ材を使用すると、ロウ材融液が制御されず気孔に浸透するため、接合面に適量のロウ材を供給することが困難となる。

そこで我々は焼結部品用のロウ材の開発に着手し、Cu-Ni-Mn合金のロウ材を開発した⁽¹⁾。本ロウ材の融点は鉄系の焼結温度より低い約900~1000℃で融解する。その融液は、二部品の界面に浸透していくと同時に、母材の気孔にも浸透していく。内部へ浸透すると同時にロウ材融液が母材のFeと反応して、融液中にFeが固溶していき、融液の固相線の温度が高くなる。その結果、ある一定のFe量がロウ材融液に含まれると固相線が高くなったことで融液が凝固し、それ以上内部へのロウ材融液の浸透が抑制される。ロウ材融液の浸透が抑制されたことで、二部品間の界面にロウ材が安定的に供給され、気孔を有する焼結部品でも接合が可能となる。

この適度なロウ材の内部への浸透は、結果的にアンカー効果として働き、強固な結合状態となる。

我々が新しく開発したロウ材により、焼結部品の二部品以上の接合が容易となり、従来の二次元的な形状設計から三次元的な形状設計へと設計自由度を飛躍的に高めることが可能となった。

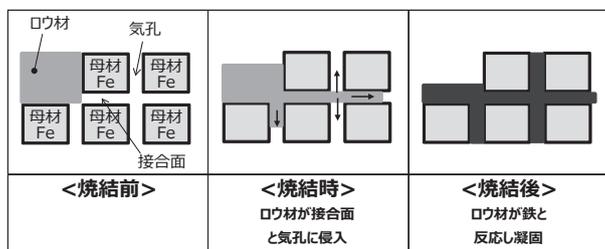


図2 焼結ロウ付け接合のメカニズム

5. 焼結ロウ付け接合法の製品事例

我々はこの焼結製品に適したロウ材を開発することで、従来の金型成形法では得られない中空部品を開発した。当社で焼結ロウ付け接合を用いた最初の製品は1982年にさかのぼる。主な製品事例について紹介する。

5-1 パワーステアリングポンプ用部品

本製品はパワーステアリング用ポンプの油の流れる方向を規定する部品であり、製品の内部に油路となる中空部を有する複雑な形状にすることによって、ポンプの小型化を実現した。写真1に製品写真と断面写真を示す。粉末冶金法では中

空部を形成できないため、成形可能な形に二分割し、接合することによって一つの部品として製造可能にした。二部品間の隙間はロウ材によって完全に埋められ、使用時に油が漏れるようなことはない。

本製品は1984年日本粉末冶金工業会デザイン部門の新製品賞を受賞している⁽²⁾。



製品写真

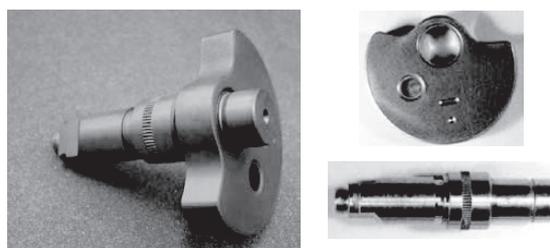
断面写真
(枠部が接合部)

写真1 パワーステアリングポンプ用部品

5-2 自動車用半ドア自動ロック機構用部品

本製品は自動車の半ドア自動ロック機構に使用される部品であり、カム面は耐摩耗性が必要とされる。写真2に製品の写真を示す。熱処理を施したカムとシャフトを溶接する方法では、内部の気孔などで溶接時にブローホール*4が生じやすく、製造が困難であった。

本製品はカム部を金型成形で形状を実現し、鋼材のシャフトと焼結ロウ付け接合し、更に一体化した製品を浸炭焼入れまで実施した事例である。



製品写真

成形体カム (上) と
鋼材シャフト (下)

写真2 ドア自動ロック機構用部品

5-3 トランスミッション用プラネタリキャリア

プラネタリキャリアは車のトランスミッションに搭載される部品の一つで、遊星歯車機構*5に使用される。遊星歯車機構の模式図を図3に示す。遊星歯車機構は、遊星ギヤ、サンギヤ、インターナルギヤ、プラネタリキャリアの四つの部品から構成されている。プラネタリキャリアは遊星ギヤを

保持するために中空形状を有し、エンジンやモーターからの回転をドライブシャフトに伝達する働きを持つため、ギヤ形状、潤滑性を高める油溝や油穴などの端面複雑形状が要求仕様として挙げられる。

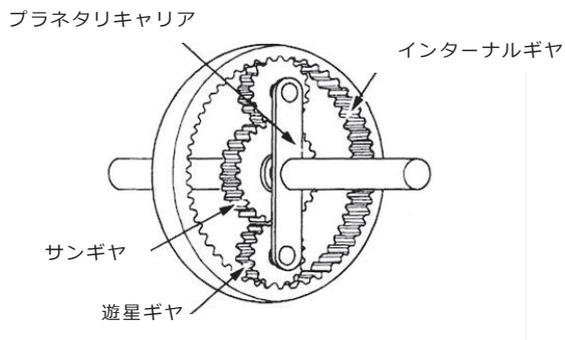


図3 遊星歯車機構

プラネタリキャリアでは、①鋼板を折り曲げて作製する板金法、②鋳鉄またはアルミから切削する方法、などが挙げられるが、自動車部品で数千～数万の単位の月生産量で、中空部、端面の複雑形状やギヤ形状などの形状を付与するため、金型成形でニアネットシェイプ化できる焼結ロウ付け接合での製法が適している。

開発例を図4に示す。本製品は4WD車の副変速機構に使用する遊星歯車の支持部品である、内歯スプラインに機械式ドグクラッチ機能と、柱部に遊星歯車のキャリア機能を合わせ持つ高機能製品である。従来は鍛造+機械加工+溶接接合等の工法であったが、形状精度・加工工数と経済性及び溶接強度に問題があった。そこで焼結ロウ付け接合技術を用いることで、上記の問題について解決し、焼結での製品を実現している。開発の主な内容は下記四点である。

- (1) 遊星歯車が装着される四か所のギヤポケット部のキャリア機能と、ドグクラッチ機能の高精度逆テーパースプラインの二箇所アンダーカット形状を実現させるため、三部品に分割するデザインとしている。本部品では金型成形で得た三部品を精度良く組み合わせ、16か所に装着したロウ材による接合により三部品を一体化し製品を実現化した。
- (2) ドグクラッチ機能となる非対称面取り付内歯スプライン(片チャンファ形状)は、金型成形で型出し後、焼結ロウ付け接合法で一体化した後、サイジング金型での特殊な形状矯正法を考案し、逆テーパースプラインを機械加工なしで達成できた。
- (3) 遊星歯車が装着され、摺動面となるキャリア機能の四か所ギヤポケット平面には金型成形時に給油溝形状を付与し、接合することで機械加工では困難な中空部への形状を付与することができた。

- (4) 製品を設計する上でFEM応力解析手法を用いて強度解析を行い、強度を必要としない部位を除肉することで要求特性を満足させると同時に軽量化も実現した。

本製品は1996年日本粉末冶金工業会デザイン部門新製品賞、素形材産業技術賞「素形材センター会長賞」を受賞すると共に、米国の1996年度MPIF P/M Part-of-the-yearのグランプリを受賞している⁽³⁾。

現在生産しているプラネタリキャリアの例を写真3に示す。高い精度が必要な部位については機械加工しており、ギヤ形状は金型による形状付与、中空部は焼結ロウ付け接合法を駆使することで製品実現可能となった。焼結ロウ付け接合を用いたプラネタリキャリアはAT、CVT車だけでなく、ハイブリッドカーの動力分割機構、電動4WD車にも使用さ

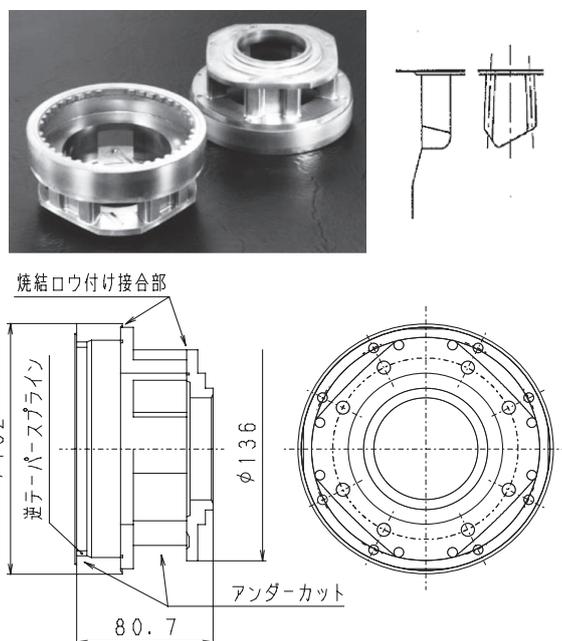


図4 焼結ロウ付け接合を用いた4WD副変速機構用プラネタリキャリア
(上左：製品写真、上右：非対称・バックテーパースプライン、下：製品断面図)



写真3 焼結ロウ付け接合法を用いたCVT用プラネタリキャリア

れ、今後もその用途拡大が見込まれ、当社における焼結ロウ付け接合法を適用している主力製品である。

6. 焼結ロウ付け接合製品の保証方法

焼結ロウ付け接合では、接合界面は目視で検査できないため、接合状態の検査が生産技術・品質管理の面で非常に重要なポイントとなる。ロウ付け接合の状態が不十分だと、車が走行中に破損し、重大な市場不具合を発生しかねない。この接合部の保証方法としては、図5に示すように3つの手段が挙げられる。

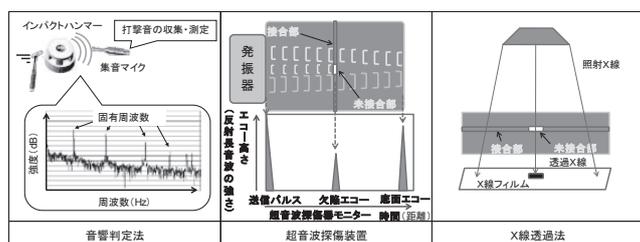


図5 焼結ロウ付け接合製品の接合保証方法

音響判定法は、製品を銅棒などで打撃した後、反響音にて良否判断する判定法である。製品が接合により一体化している場合の反響音は固有の振動・波形が反響音となって検出される。一体化していない場合は反響音が打ち消し合って固有の周波数とは異なった波形が得られる。この反響音の違いで良否を判定している。

超音波探傷法は超音波を製品にあて製品の中に含まれる欠陥からの反射を検出する。接合品においてはその超音波の焦点を接合面に設定し、接合界面からの反射を検出し接合面の欠陥率にて良否を判定している。

X線透過法は接合製品にX線を透過させることにより欠陥を検出する手法である。

当社では音響判定法と超音波探傷法を用いている。特に音響判定法は設備的にも安価であるためインラインで全数検査できるシステムを採用し製品を保証している。

また上記非破壊検査に加え、実際に製品を抜き取り、破壊することで、接合部の破断面の確認や破断強度の傾向管理を実施し、保証している。

7. 製品設計から評価までの一体化システム

図6に示すように当社ではコンピューターによる強度解析(FEM解析)→製品設計→試作→評価までの一貫サイクルを自社内で繰り返すことが可能で、顧客からのレイアウト情

報、仕様(発生トルク、スラスト力^{※6}等)など必要な情報を入手するだけで、形状を提案し実際に製品を作製・評価まで行うことができる。この一貫した開発体制を有効に活用することで、従来の粉末冶金法では対応困難な形状も対応可能にした。

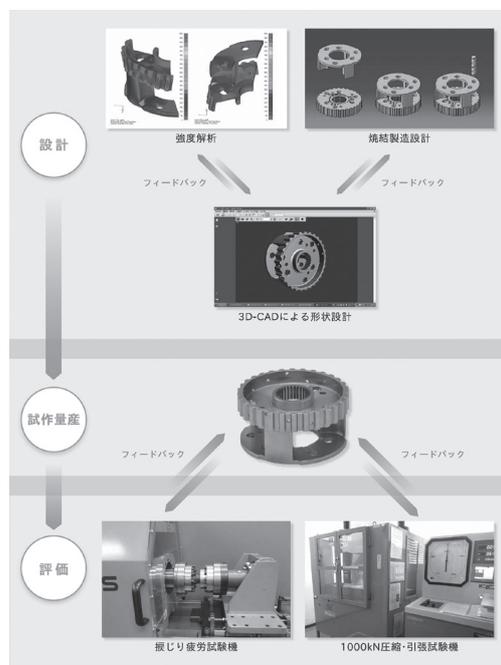


図6 製品設計-評価一体化システム

8. 結 言

粉末冶金法での金型成形に焼結ロウ付け接合法を加えることにより、設計の自由度が三次元まで広がり、従来の金型成形では得られなかった、製品内部の油路形状やギヤポケットなどの中空形状、更には鋼材との一体化部品などの複雑形状を得ることが可能となった。

用語集

※1 VA

Value Analysis：価値分析、製品を機構と価格の面から分析しコストダウンに役立てること。

※2 スプロケット

軸の回転をローラーチェーンに伝達したり、ローラーチェーンの回転を軸に伝達するための歯車。

※3 ニアネットシェイプ

最終完成品の複雑形状を機械加工等の後加工を施すことなく実現する粉末成形技術。

※4 ブローホール

溶接部に発生する球状の空洞欠陥。

※5 遊星歯車機構

サンギヤを中心として、複数の遊星ギヤが自転しつつ公転する構造をもった歯車減速機構。

※6 スラスト力

回転体の軸方向に働く力。

参考文献

- (1) 特開平2-15875
 - (2) 第5回日本粉末冶金工業会賞(1984年)
 - (3) 第18回日本粉末冶金工業会賞(1997年)
-

執筆者

播本 大祐*：住友電工焼結合金(株) 主席技師



奥野 麗子：住友電工焼結合金(株) 主任技師



青木 克憲：住友電工焼結合金(株) 開発グループ長



小菅 敏行：住友電工焼結合金(株) 伊丹製造部長



*主執筆者