受賞記念講演：第 58 回技術功績賞（2019 年度）

自動車用焼結部品の革新的成形技術開発と実用化

中谷 和通*

トヨタ自動車(株) (現 大豊精機(株)出向), 〒471-8571 豊田市トヨタ町 1.

Development and Practical Application of Innovative Compacting Technology for Automotive PM Parts

Kazumichi NAKATANI*

Toyota Motor Corporation, 1 Toyota-cho, Toyota 471-8571, Japan.

Received February 11, 2021; Revised March 9, 2021; Accepted March 10, 2021

ABSTRACT

The filling density decreases rapidly in the initial stage of consecutive compacting. As one of the reasons, it was thought that the history of the movement given to the powder just before the filling would change flowability, and experiments in this study showed that the history affected significantly on it. Based on these results, a high-precision filling system was developed.

In addition, in order to minimize the amount of elastic deformation of the punch, which causes cracking, a tool and a compacting press with a minimum punch length were devised. From the experiments using them, the optimum balance of amount of the elastic deformation for each punch that prevent cracks was clarified. By using the high-precision filling system stabilizing the filling density and the compacting technology preventing cracks, a new system that reduced the number of defective green compacts without adjusting compacting conditions was able to be developed.

KEY WORDS

powder filling, filling density, flowability, compacting, crack

1 緒 言

金型内に充填された原料粉を加圧成形して形状付与する焼結部品は、他工法と比較するとネットシェイプ率が高く高精度である等の特徴があり、自動車に多くの部品が適用されている。粉末成形体は、製品形状に合わせて複数の金型に分割し、部位ごとに原料粉充填量、加圧量を設定する多段成形で得られる。1990 年代には、各金型の高精度な動作制御が可能な油圧サーボ駆動の CNC プレスによる、ネットシェイプ率の高い多段成形技術が量産ラインに導入されてきた。しかし、CNC プレスにより成形動作制御が高精度化した反面、プレスは大型化し金型も長く加圧完了時のパンチの弾性変形量が大きいため、応力変動の原因となる充填密度変動が成形体品質に及ぼす影響も大きくなった。特に金型から成形体を抜き出す際には、加圧によって発生したパンチの弾性変形回復を伴うため、充填密度変動に起因する成形体に加わる曲げ、引張り力の変動は成形体割れの原因となり、ネットシェ

イプ率が高く複雑な形状の成形であるほどその影響は大きい。従って、割れのない高精度で安定した成形品質を得るためには、安定した充填密度と、充填密度変動に対する高い割れ防止ロバスト性が必要となる。

生産ラインでキャビティを一定にして連続成形し、充填密度の代用値とみなせる成形体重量を観測すると、成形開始直後や連続成形を停止した後の成形再開直後の充填密度は成形個数の増加に伴い急激に低下していき、成形を継続するとあるレベルまで低下したところで安定する。成形開始時は、充填密度と整合した成形動作にすべく、オペレーターによる成形条件調整が必要であるが、初期の急激な充填密度低下は成形条件調整を困難にし、調整時間と調整のために廃棄する成形体が多くなる。また時間をかけて成形条件調整しても充填密度が安定するまでは、型動作と充填密度の不整合があると品質不良が発生する。このことは焼結部品の競争力向上を阻害する要因となる。そこで、Fig. 1 に示すように、人による成形条件調整なしで成形不良をゼロにすることを目標とするロスゼロ技術に取り組んできた。

* Corresponding author, E-mail: k.nakatani@tsk.taihonet.co.jp

Fig. 1 Goal of loss-zero line.

Fig. 2 Experimental equipment for synchronizer hub.

本稿では、これまで取り組んできた充填密度の安定化と成形割れ防止ロバスト性向上の内容と、その結果に基づいて考案し実用化したロスゼロ技術・ロスゼロラインの概要を紹介する。

2 高精度充填技術

2.1 成形初期の充填密度変動と粉箱内の粉密度の関係¹⁾

2.1.1 実験方法

調査方法を Fig. 2 に示す。ホッパーからホースを介して粉箱に原料粉を供給する方式で、マニュアルトランスミッション用の一般的なシンクロナイザーハブを成形し、成形初期の急激な充填密度低下域における粉箱内の粉密度と成形体重量の関係を調査した。原料粉はヘガネス社製の偏析防止粉で、組成は Fe-2 mass%Cu-0.9 mass%C-0.8 mass%Lube である。粉箱内の粉密度は Fig. 3 に示すように、粉箱内に設置した静電容量タイプの粉密度センサーで計測した。連続成形開始後 200 個目で 1500 秒 (25 分) の連続成形を停止し、停止直前と成形再開後それぞれの、粉箱内の粉密度の代用値となる粉密度センサー値と、充填密度の代用値となる成形体重量の関係を調査した。

2.1.2 実験結果および考察

成形個数と成形体重量の関係を Fig. 4 に示す。成形個数の増加に伴い成形体重量は低下し 140 個目あたりで安定し、

Fig. 3 Apparent density sensor in feed shoe.

Fig. 4 Relationship between numbers of production and weight.

1500 秒停止した後の成形を再開した 201 個目は重くなり、その後重量は低下し再び安定した。粉箱内の粉密度センサーから得られる値の例として、充填過程 8 サイクル分の粉密度センサー値を Fig. 5 に示す。Fig. 5 に示すように、充填中の粉密度センサー値は充填過程における粉箱動作により、粉箱内の粉密度計測可能範囲内の粉の密度と体積によって変動する。粉箱前進端付近ではキャビティへ粉が充填され、粉密度計測可能範囲内の粉が減少するため、粉密度センサー値は大きな低下を示し、その後の粉箱のシェイク動作中に、粉密度計測範囲内に粉箱内の粉が流れ戻り、粉密度センサー値も充填前の値付近まで戻る。

1500 秒間連続成形を停止するまでの 200 個目までの中から、1 個目、2 個目、4 個目、21 個目から 29 個目、91 個目から 99 個目、191 個目から 200 個目の充填中の粉密度センサー値の変化を重ね合わせたものを Fig. 6 に、1500 秒停止後の成形 1 個目と 40 個目から 48 個目までの粉密度センサー値の変化を重ね合わせたものを Fig. 7 に示す。充填直前の粉箱内の粉密度は、粉箱が充填のために前進動作する直前の A の位置での粉密度センサー値を代用値と考え、1500 秒停止前後の粉密度センサー値と成形体重量の関係をそれぞれ Fig. 8、Fig. 9 に示す。1500 秒停止前の成形 1 個目と 2 個目は相関から外れた。停止後の 1 個目も粉密度センサー値は低いにもかかわらず、成形体重量は停止直前のものと比較して約 2.8 g (1.3%) 重くなった。いずれも充填直前の粉箱内の粉密度だけでは充填密度は説明できない結果となった。

ここで、粉箱のシェイク動作により粉密度センサーの計測可能範囲に粉が流れ戻るタイミングで同様の考察をする。セ

Fig. 5 A.D. sensor value during filling cycle.

Fig. 6 A.D. sensor value before operation halt.

Fig. 7 A.D. sensor value after operation halt.

センサー値を読み取るタイミングを Fig. 10 の B に示す。このタイミングでの密度センサー値はばらつきが大きいため、密度センサー値は 0.4 秒間の平均値とした。B のタイミングでの粉密度センサー値と成形体重量の関係を Fig. 11 に示す。B のタイミングでは、1500 秒停止前後ともに密度センサー値と成形体重量の相関があり、成形初期は粉密度センサー値が大きく成形体重量が重い。B のタイミングでの粉密度セン

サー値は、キャビティへの充填により粉が減少した粉密度センサーの計測範囲内に、粉箱のシェイク動作により粉が戻りやすいほど大きくなることから、粉箱内の粉の流動性の代用値と考え、Fig. 12 に示すように成形初期は粉箱内の粉の流動性が高く、成形個数の増加に伴い流動性は低下し、あるレベルまで低下したところで安定すると考えることができる。1500 秒停止により成形再開時の成形体重量が重くなっ

Fig. 8 Relationship between A.D. sensor value and weight before operation halt.

Fig. 9 Relationship between A.D. sensor value and weight after operation halt.

Fig. 10 Measurement timing of sensor values.

Fig. 11 Relationship between A.D. sensor value and weight.

Numbers of production	Flowability	Apparent density
No.1	Good	High
No.2	↓	↓
⋮	Bad	Low

Fig. 12 Trends of flowability and apparent density against the numbers of production.

Fig. 13 Schematic illustration of the experimental apparatus.

Fig. 14 Experimental procedure (shaking).

たのは、停止前の連続成形により粉箱内の粉の流動性は低下したところで安定したが、1500秒の停止によって流動性が回復し、成形再開時の充填密度が高くなったと考えられる。

2.2 充填直前までに粉に与えた動きの履歴が充填密度に及ぼす影響²⁻⁴⁾

2.2.1 実験方法

充填密度は充填直前までに粉に与えた動きの履歴に影響されることが考えられることから、粉に与えた動きが充填密度に及ぼす影響を Fig. 13 に示す実験装置を用いて調査した。調査した粉は組成が Fe-2 mass%Cu-0.9 mass%C-0.8 mass%Lube であるシンクロナイザーハブ用である。与える動きは大きな動きと小さな動きの2通りとした。大きな動きが充填密度に及ぼす影響を調査する実験方法を Fig. 14 に示す。実験は、3日前に取り置いた1条件あたり 300 g の粉で実施した。大きな動きは、500 ml のポリ容器に移し替えた粉に与える手動による 10 回/7 秒サイクル、幅約 200 mm のシェイクとし、シェイク回数は 0, 10, 20, 50 回の4水準とした。シェイク完了の 10 秒後に粉を落下によりカップ A に移し、さらに 30 秒後にカップ A の下部に設置したシャッターを開けて、50 mm 下方に設置したカップ B に粉末を充填した。カップ B に充填後の粉末の体積を一定にするために上面をすりきりにより平坦化し、カップ B 内の粉末重量をカップ B の容積で除したものを充填後の粉末密度として算出した。小さな動きが充填密度の及ぼす影響を調査する実験方法を Fig. 15 に示す。実験3日前に取り置いた1条件辺り 300 g の粉に、小さな動きとしてカップ C、D 間の移し替えをした後カップ A に粉を

Fig. 15 Experimental procedure (transfer).

Fig. 16 Experimental procedure (elapsed time).

Fig. 17 Relationship between the number of shaking and filling density change.

移し、カップAからカップBへ充填し、充填密度を算出した。移し替え回数は0, 1, 3, 5, 7, 9, 11回とした。

さらに動きを与えた後から充填までの経過時間と充填密度の関係进行调查した。実験方法をFig. 16に示す。ポリ容器に入れた300gの粉末に手で20回のシェイクを与えた後、10秒後にカップAに粉末を落下させ、シャッターを開いてカップBに充填するまでの経過時間、30秒、180秒、600秒、1200秒、3600秒の5水準の場合のカップB内の充填密度を算出した。

2.2.2 実験結果および考察

Fig. 17に、充填直前のシェイク回数に対する充填密度変化率を示す。充填密度変化率は、充填前のシェイク0回の場合の充填密度に対する各水準の充填密度の変化率とした。充填直前に粉に与えたシェイク回数の増加に伴い充填密度は低下し、50回シェイクした粉の充填密度はシェイク0回の充填密度より約5%低下した。またシェイク回数の増加に伴う流動性の悪化も目視観測された。Fig. 18に移し替え回数と充填密度変化率の関係を示す。充填密度変化率は移し替え0回の場合の充填密度に対する各水準の充填密度の変化率とした。移し替えをすることで移し替え0回の充填密度より充填密度は低下し、3回の移し替えて移し替え0回の場合の充填密度より約2%低下した。

Fig. 18 Relationship between the number of transfer and filling density change.

Fig. 19 Relationship between elapsed time after shaking and filling density change.

Fig. 19に、20回シェイクした後から充填までの経過時間に対する充填密度変化率を示す。各経過時間の充填密度変化率は、20回のシェイクを与えてから30秒後に充填した場合の充填密度に対する変化率とした。経過時間とともに充填密度が上昇し、3600秒経過した粉の充填密度は、シェイク後30秒で充填した場合の充填密度より約1.8%増加した。

以上の実験により、生産ラインで観測できる成形開始直後の急激な成形体重減少とその後の重量安定を次のように考える。成形開始直後あるいは連続成形停止後の成形再開直後は、その直前まで粉箱を含む給粉経路内で粉の動きが停止していたため流動性が良く充填密度が高い。成形を継続していくと給粉経路内の粉末には成形サイクルにあわせて一定量ずつ移動するという動きが与えられることにより、流動性悪化とともに充填密度が低下を続け、動きの大きさに合わせてあるところで一定になると説明することができる。粉に与えた動きの履歴による流動性変動の原因は、粉同士に作用する付着力の発生と減衰によるものと考えられる。付着力の発生は正の相関を持ち、付着力の減衰は負の相関を持ち、この付着力を静電気力と推定した。そこでFig. 13と同じ実験装置を使い、シェイク動作4水準0, 10, 20, 30回と移し替え3水準1, 5, 9回を与えた粉の、カップAに移し替えた直後の粉の表面電位を非接触電位測定器で測定し、30秒後にカップBへ充填した後の充填密度との相関进行调查した。Fig. 20に充填直前のカップA内の粉の表面電位とカップB内の充填密度の関係

Fig. 20 Relationship between surface potential and filling density change.

Fig. 21 Relationship between the number of shaking and filling density (difference by lubricant amount).

を示す。計測した電位値にばらつきが多かったが弱い相関は見られた。

また、静電気力と考える付着力の大きさに影響する要因の一つとして原料粉の組成を考え、種々の組成の粉で充填直前のシェイク回数に対する充填密度変化率を調査した。充填密度変化率への影響が大きかったのは混合する潤滑剤の量であった。Fig. 21に結果を示す。ベースとなる組成はFe-2 mass%Cu-0.9 mass%Cであり、混合する潤滑剤量を0.4 mass%, 0.6 mass%, 0.8 mass%とした。シェイク回数が同じでも潤滑剤の量が多いほど充填密度の低下は大きくなった。ただし混合プロセス等が異なる(a)に示す一部銘柄の粉については、潤滑剤の量が多くても充填密度変化の大きさが小さいことから、潤滑材量だけでなく混合プロセス等も流動性変動の大きさに影響する。

2.3 移し替え給粉による充填密度安定化⁵⁾

以上の結果から、成形サイクルに合わせて必要な一定量の粉に適正な動きを付与する手段として、ホッパーから粉箱への給粉をロボットによる移し替え方法を考案し、評価を実施した。Fig. 22に概略と評価結果を示す。ホッパーから成形体約1.1個分の重量の粉を切り出し、切り出した粉をロボットハンドへ移し替え、ロボットハンドから粉箱上のカップを介して汎用粉箱へ給粉し、粉箱から金型へ充填する。ホッパーから金型への移し替えは5回である。粉箱は汎用粉箱である

Fig. 22 Developed highly precise filling system and filling density stability.

ため、製品により異なるが粉箱上部のカップ容量も含め成形体の約15個分程度の容量を持つため、移し替え給粉により粉箱を満たした直後に成形を開始するようにした。評価は粉箱内に設置した粉密度センサー値と充填密度の代用値である成形体重量をVVT用ローターで実施した。ロボットによる移し替え給粉に加えて、成形直前に粉箱を粉で満たす途中に適正な操作を追加することで²⁾、成形1個目から安定した充填密度が得られることが成形体重量により観測できた。

ただし汎用粉箱であり粉箱への最初の給粉以降の粉箱は成形体1個分以上の粉で満たされるため、連続成形開始以降でサイクル停止した場合は、粉箱内に粉が停留したまま時間が経過する。経過時間の長さに応じた流動性向上とともに成形再開時の充填密度は高くなるが、粉箱内に停留している粉の金型への充填時にはロボットによる移し替え動作を与えない。この対応として、連続成形を停止した場合プレスは停止時間を計測し、停止時間に合わせて成形再開時に2通りの動作を自動選択するようにプログラムした。1つは停止時間が比較的短い場合の動作である。停止後の経過時間長さに合わせて上昇する推定充填密度と金型動作が整合するように、成形再開時の充填キャビティ深さを浅くする動作させるようにした。2つめは長時間停止の場合である。長時間停止後に充填深さを浅くすることだけで対応しようとする、粉種や金型構成によっては粉箱による粉の摺り切り面より金型の一部が高くなってしまふほど充填深さを浅くしなければならない。このような場合には、成形再開1個目のサイクルタイムが若干長くなるが、粉箱内の粉の自動回収により粉箱を空にして、ロボットによる粉箱への移し替え給粉から行うようにプログラムした。以上2通りの動作プログラムにより、連続成形停止後の成形再開時でもプレスオペレーターが起動操作をするだけで、停止時間に応じてプレスが動作を自動選択する。これらに充填密度のばらつきを低減できるエアレート充填法⁶⁾を組み合わせることにより、型段替とサイクル停止後の成形再開時のいずれの場合も、成形条件調整の廃止が可能になった。

3 成形割れ防止技術

3.1 成形割れの種類

成形割れは発生過程別に、加圧途中に発生する割れと加圧後に発生する割れの2つに分類できる。加圧途中に発生する代表的な割れであるすべり割れをFig. 23に、加圧後に発生する割れの例をFig. 24に示す。

形状に合わせて分割したパンチを相対移動させて加圧成形する多段成形において、加圧途中に発生する割れの一つであ

Fig. 23 Slip crack during compacting.

Fig. 24 Crack caused by elastic deformation recovery of punches.

るすべり割れは、加圧完了以前に浮動パンチ面側面部の密度が粉が塑性変形する程度まで高くなり、かつ浮動パンチ上で成形する部位の密度が低い場合、浮動パンチ側面で塑性変形した粉で形成される面が加圧完了までに低密度部に入り込んだ、粉同士の絡み合い不良による内部欠陥である⁷⁾。すべり割れの防止の基本的な考え方は、各部位の密度上昇を等しくしながら加圧する、いわゆる比例圧縮成形である。加圧過程全域で各金型動作の同期制御が可能なCNCプレスにより容易に防止できるようになり、ネットシェイプ率は向上した。

加圧後に発生する割れは、成形体を金型から抜き出す過程で、加圧力により発生した各金型や設備の弾性変形回復に伴い成形体に曲げ・引張力が作用することが原因である。各パンチ系の適正な剛性バランスを持つ型設計と各部位の成形密度調整による加圧完了時の弾性変形量バランスの調整や、CNCプレスでは抜き出し前の弾性変形回復のキャンセル動作量（除荷動作量）の調整により発生を防止している。しかし前述のように条件調整中に充填密度が変動する上に、パンチが長く加圧完了時のパンチの弾性変形量が大きいCNCプレスによる成形は、充填密度変動に対する割れ防止ロバスト性が低く、時間をかけて成形条件調整しても、調整による成形体のロスや調整時間のロスとともに、生産中にも充填密度変動により発生する割れをはじめとする加工不良が一定量発生していた。

3.2 成形割れ防止ロバスト性向上

3.2.1 型構成

そこで、充填密度変動に対する割れ防止ロバスト性の画期的向上を目的として、パンチ長さを最小にする型構成のダイセットと、それに合わせた成形プレスを開発した。対象部品は原料粉組成がFe-2 mass%Cu-0.9 mass%C-0.8 mass%Lubであるシンクロナイザーハブである。Fig. 25に開発したダイセットと一般的なCNC用との型構成の比較を示す。本開発ダイセットでは各パンチの成形面とメカストップパーによる受

Fig. 25 Comparison of tool: (a) General CNC tool adapter and (b) Developed die set.

Fig. 26 Force on the floating punch during compacting.

圧面間距離は最小になり、加圧完了時の各パンチの弾性変形量の最小化が可能である。

3.2.2 加圧過程のすべり割れ防止

各パンチの加圧完了位置はメカストップにより決定されるので、すべり割れ防止は比例圧縮成形ではなく、浮動する上下パンチに与える適正な保持荷重（浮動荷重）による浮動成形とした。Fig. 26に示すように加圧過程では浮動パンチ内外周面で成形する部位の密度上昇に伴い増加する浮動パンチ側面と粉の間の摩擦力が、浮動パンチに対して浮動荷重と同様の作用をするため、成形体形状に合わせて適正な浮動荷重を与えれば、CNCプレスほどの動作制御の自由度はないが、すべり割れ防止は可能である⁸⁾。CNCプレスによる加圧過程全域の比例圧縮成形では、浮動パンチの動作に必要な制御荷重は加圧完了時の浮動パンチによる成形荷重でありダイセット・成形機が大型化する。成形体形状と摩擦を考慮したすべり割れ防止に必要な最小限の浮動荷重は、原料粉や成形体形状により差はあるが、比例圧縮成形に必要な制御荷重のおよそ1/10程度である。上下の浮動パンチのうち油圧サーボによる制御は下浮動パンチのみとし、上の浮動パンチは油圧による保持のみとした。

本型構成での上下対称形状のシンクロナイザーハブ成形時の、加圧成形中の上下浮動パンチの変位 U 、 L と、上下浮動パンチにより加圧される a 部の密度上昇の例を Fig. 27に示す。安定した浮動成形をするために、上下の浮動パンチが加圧に伴いそれぞれのメカストップに向けて浮動動作を開始する成形体密度が約 4.8 g/cm^3 付近での各部位の密度と成形体形状が整合するように予備成形動作をするようにした。予備成形は粉の塑性変形のない領域での動作であり比例圧縮成形の必要はないため、本成形プレスによる予備成形では、例えば上下対称形状でも上下浮動パンチは非対称動作になるが、浮動成形開始時はほぼ上下対称形状となり、最小限の浮動荷重ですべり割れの無い良好な成形体が得られた。パンチ長さを最小にして充填密度変動に対する割れ防止ロバスト性を向上するために考案した型構成であるが、油圧サーボによる浮動パンチの動作制御は下パンチのみとした上で、すべり割れ防止に必要な最小の浮動荷重による成形方法にすることで、Fig. 28に示すように成形機の小型化、シンプル化、低価格化にも寄与した。

Fig. 27 Position of upper and lower floating punches and density of portion (a) during compacting.

Fig. 28 Press and die set.

3.2.3 抜き出し過程の割れ防止

パンチ長さを最小にする本型構成で、各下パンチの弾性変形量バランスと割れの関係を調査した。弾性変形量バランスは、 500 MPa での弾性変形量が約 $0.16 \text{ mm} \sim 0.3 \text{ mm}$ 程度となるように形状設計した各下パンチを組み合わせた3水準とした。さらに3水準それぞれにおいて、パンチ1、2で成形するA部、B部の原料粉充填量を変更することで各部位の密度を変更し、加圧完了時の成形面圧とともに弾性変形量 balan

スを変更した。成形面圧変更による各パンチの加圧方向の弾性変形量変動は約0.05 mm程度である。

A部、B部の成形体密度バランスでの割れ発生有無をFig. 29に示す。発生した割れは2種類であり、発生部位とそれらの割れの原因となる力の加わり方も図中に示した。500 MPaにおけるパンチ1の弾性変形量を0.19 mm、パンチ2、3の弾性変形量をそれぞれ0.31 mm、0.29 mmとした条件(3)の場合は、ねらい密度内ではほぼ割れの発生は無く、割れ防止ロバスト性が極めて高いことがわかった。500 MPaにおけるパンチ1の弾性変形量を0.21 mm、パンチ2の弾性変形量を0.27 mmとした条件(1)、(2)ではねらい密度範囲内では割れ発生無し成形可能範囲が狭くなった。特にパンチ3の弾性変形量を小さくした条件(2)ではねらい密度内における割れ無し成形可能領域は半分以下となった。ねらい密度内での割れ無し成形可能領域の狭い条件(1)と条件(2)で

は、パンチ1の弾性変形量に対するパンチの弾性変形量の差は0.06 mmであり、割れ無し成形可能領域の広い条件(3)では0.12 mmである。以上より、型長さ最小化により加圧方向の弾性変形量を小さく設定することで充填密度変動に対する割れ防止ロバスト性は向上する。しかし、これまで一般的に考えられてきた各パンチの弾性変形量を等しくすることが割れ防止方法ではなく、ねらいの成形面圧における割れ防止のための適正な弾性変形量バランスが存在することがわかった。この理由は成形体段差部の加圧方向のスプリングバックの存在によると考える。

加圧方向スプリングバック量の算出方法をFig. 30に示す。また種々の条件で成形したシンクロナイザーハブの各段差部寸法、密度などから算出した段差部a~dの加圧方向のスプリングバック量の一例をFig. 31に示す。厳密には成形体の上パンチも含めた型からの解放順序や形状にもよるため詳

Fig. 29 Experimental results.

Fig. 30 Calculation of spring back in the compacting direction.

Fig. 31 Spring back of each portion.

細は割愛するが、加圧方向のスプリングバック量の平均値は約0.1 mm程度となった。これは各パンチでの成形面圧が等しければ、加圧完了時のパンチ1とパンチ2の長さの差よりも成形体段差の方が約0.1 mm大きいということである。そのため、抜き出し過程で成形体に作用する引張力や曲げ力等による割れが発生しない各パンチの弾性変形量は、加圧方向の約0.1 mmのスプリングバック量を考慮したものでなければならない。例えばシンクロナイザーハブ形状では抜き出し過程に発生するFig. 29の割れは、成形体をダイスから抜き出していく過程で、成形体がパンチ1から受ける力が大きい場合に発生するため、加圧完了時のパンチ1の弾性変形量はパンチ2の弾性変形量より、段差c部の加圧方向スプリングバック量である約0.1 mm分だけ小さくすることが割れ防止条件となる。これはFig. 29で割れ無し成形可能領域の広がっ

た条件(3)のパンチ1の弾性変形量0.19 mmに対するパンチ2の弾性変形量0.31 mmとの差である0.12 mmとほぼ等しい。このような段差部のスプリングバックは、加圧によるダイスや各パンチの径方向の弾性変形が、抜き出し過程で回復することによる成形体の加圧方向の伸びと考えられる。その大きさは、成形体形状、各部密度バランス、抜出時のホールドダウン条件等によっても異なるが、シンクロナイザーハブでは約0.1 mm程度と考えてパンチの弾性変形量を設計することを割れ防止条件とした。

4 ロスゼロ技術実用化

以上の高精度充填技術と割れ防止技術を組み合わせたロスゼロ技術により、2005年からトヨタ自動車の焼結部品内製ラインで、VVT部品とシンクロナイザーハブの生産を成形条件調整レスで開始した。シンクロナイザーハブでは、成形体精度に及ぼす成形温度の影響を明らかにし、上パンチ温度計測による加圧完了位置の自動補正条件としておりこみ、Fig. 32に示すように成形条件調整レスでボス部厚さ ± 0.05 mmの精度を達成した。

5 ラビニヨキャリア用一貫ライン

近年では、2つの成形体を組み合わせ、焼結時にろう付け接合するラビニヨキャリアの一貫ラインの粉末成形工程に、高精度充填技術の精度向上と粉末成形プレスの動作制御の電動化も組み合わせで導入した⁹⁾。Fig. 33にラインの概要図と成形生産イメージを示す。成形後に工程内在庫となるキャリアAは、成形直後のキャリアBと組み合わせて焼結炉に投

Fig. 32 Improvement of height accuracy by correcting compacting position with upper punch temperature feedforward: (a) without and (b) with correcting.

Fig. 33 Developed line for ravigneaux planetary carrier.

Fig. 34 (a) Feed shoe for 1 compact and (b) image of filling.

入されるため、省人化・小ロット化には成形条件調整レスで加工不良を出さないロスゼロ技術と短時間での型段替えが必須である。

前述の移し替え給粉に加え、Fig. 34に示すような成形体約1個分の粉だけで満たす容積となる部品ごとの専用粉箱による充填方法とした。金型へ充填される粉は充填直前にホッパーから粉箱へ移し替えられ、成形1サイクルでほぼ使い切るので粉箱内の粉の停留は最小限に抑えることができる。これにより連続成形停止時間の長さに関わらず成形再開時の成形初期には、粉箱内の粉回収～再給粉のためにサイクルタイムを長くすることなく安定した成形品質を得ることが可能になった。また、成形制御精度の向上を目的に開発した電動サーボ成形プレスを導入した。浮動パンチ軸に設置したロードセル値のモニタリングによる浮動荷重のPID制御により、前述の油圧サーボによる浮動成形より成形精度は大幅に向上した。成形プレスの電動化は品質の安定化に加え、従来あった設備間の動作機差を無くすことにもなり、生産拡大に伴う本ラインのグローバル展開に大きく寄与した。短時間段替えについては、型段替え毎に発生する機内作業を廃止し、ロスゼロ技術による成形条件調整レスと合わせ160秒以下の全自動段替えを実現した。これにより小ロットの生産を可能とし、工程内の在庫量を大幅に削減した。本ラインは2016年より生産を開始した。

6 結 言

- (1) 成形初期の充填密度変動の原因を推定し、実験により実証した。
- (2) その結果をもとに、移し替え給粉により初期から充填密度が安定する高精度充填システムを開発した。
- (3) 多段成形において各パンチ長さを最小にする型構造と、

除荷時の型の弾性変形回復に起因する割れ防止に最適な各パンチの弾性変形量バランスにより、充填密度変動に対する割れ防止ロバスト性が画期的に向上した。

- (4) 高精度充填システムと割れ防止ロバスト性向上技術により成形条件調整レスラインを構築し、2005年よりシンクロナイザーハブ、VVT用部品の生産を開始した。
- (5) 成形体1個分の粉箱によりさらに精度向上した高精度充填と、成形精度が大幅に向上した電動サーボ成形プレスをラビニョキャリア専用ラインに導入した。これにより成形条件調整レスと短時間段替えを合わせて小ロット生産を可能にし、工程内の在庫量を大幅に低減した。本ラインでは2016年より低コストのラビニョキャリアの生産を開始した。

謝 辞

今回の受賞に際して、ご評価いただいた粉体粉末冶金協会の諸先生方に深く感謝いたします。また長年にわたりご指導・ご協力いただいた(株)豊田中央研究所、JFEスチール(株)、ヘガネスジャパン(株)、(株)神戸製鋼所、実用化に携わっていただいた大豊精機(株)、トヨタ自動車(株)の関係各位に深く感謝いたします。

文 献

- 1) K. Nakatani, Y. Katsukawa, T. Kobayashi, S. Takemoto: Abstracts of Autumn Meeting JSPM, (2007) 112.
- 2) K. Nakatani: Abstracts of Autumn Meeting JSPM, (2009) 119.
- 3) K. Nakatani: Abstracts of Spring Meeting JSPM, (2010) 227.
- 4) K. Nakatani: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **58** (2011) 125-127.
- 5) K. Nakatani: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **64** (2017) 55-60.
- 6) I. Urata, S. Takemoto, K. Nakatani, M. Kondoh: Toyota Technical Review, **48** (1999) 106-111.
- 7) S. Takemoto: Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials (1996) 7-87-100.
- 8) Y. Kanai, Y. Aizawa, K. Nakatani: Proceedings of 2000 Powder Metallurgy World Congress, (2000) 567-569.
- 9) Toyota Motor Corporation: J. Jpn. Soc. Powder Powder Metallurgy, **65** (2018) 216.