

論文・解説

20

高精度ダイカストによる機械加工レス成形の実現 Realization of No Processing Manufacture with Highly Accurate Die-cast

佐々木 大地^{*1} 重里 政考^{*2} 山本 綾人^{*3}
Daichi Sasaki Masatoshi Juri Ayato Yamamoto
河野 一郎^{*4} 藤井 祥平^{*5} 小国 英明^{*6}
Ichirou Kouno Shouhei Fujii Hideaki Oguni

要 約

マツダのブランドエッセンスである「走る歓び」を実現するため、クルマの高機能化に合わせて素形材部品には高精度化と軽量化の要求が高まっている。その中で、エンジン構成部品のシリンダーブロックは、軽量なアルミダイカスト工法で製造される。シリンダーブロックは、内部に「メインオイルギャラリ」と呼ばれる潤滑オイル分配用の穴を備えており、鋳抜きピンで成形されるが、この穴が鋳造の過程で曲がる課題があり、後工程の機械加工で曲り部分を切削していた。穴が曲がるメカニズムの解明とモデル化を行い、それを制御する金型技術確立したことで、機械加工レス成形を実現した。本稿ではこの取り組みについて報告する。

Abstract

For the realization of “Celebrate Driving”, Mazda’s brand essence, importance of improving accuracy and saving weight in casting parts is increasing corresponding to higher functionalization of cars. One of those parts, a cylinder block, composes a part of the engine and is manufactured in aluminum die-cast process for saving weight. It has one or two holes called “main oil gallery” to distribute lubricating oil are molded by the core pin. We had an issue that the holes were often bended in die-cast process, therefore the bent area was cut by machining. We elucidated the mechanism of bending, modeled it, and established a mold technology to prevent the core pin from bending. This technology enables us to manufacture the part without cutting by machining. This paper reports our activities.

Key words : Production • Manufacture, Formed and fabricated materials, Casting/forging, Design/prototyping, Die/mold, Die-cast, MBD, Core pin, Die design

1. はじめに

走る歓びと優れた環境・安全性能を備えた商品の実現に向け、パワートレイン鋳造部品の生産技術ではアルミダイカストによる軽量化と低コスト化の両立を図ろうとしている。一般的に、鋳造部品は抜き勾配や素材の鋳造変形、鋳肌面の粗さに起因して仕上げ加工が必要である。そこで、鋳造品の寸法精度を向上させて、最終製品形状を成形することで、仕上げ加工を廃止し、CO₂の排出抑制に貢献できる。

今回、鋳造品の寸法が決まるメカニズムを解明し、その挙動をモデル化した。それをを用いたモデルベース開発を行うことで、エンジン部品の仕上げ加工を廃止したの

で、以下に報告する。

2. ダイカスト鋳抜きピン曲りの実態と課題

エンジンの中で最も大きな部品であるシリンダーブロックは、アルミダイカストで製造されるが、気筒配列方向に貫通する「メインオイルギャラリ」と呼ばれる潤滑オイル分配用の穴が設置されている。この穴は、ダイカスト金型の対面する2つのスライド型に設置した鋳抜きピンで両側から鋳抜いて成形する。例えば2000ccクラスの4気筒シリンダーブロックでは、合わせた長さが約400mmにもなる鋳抜きピンが、突合せ部で1mm以上曲った状態 (Fig. 1) で穴形状が成形される。当初、熔融アルミの熱による膨張が原因と推測し、突合せ部に隙

*1~6 パワートレイン技術部

Powertrain Production Engineering Dept.

間を設けた状態 (Fig. 2) で鋳造することで曲り量を軽減した。しかし、隙間を設けることで無用な壁が形成されるため、これを貫通する加工と、軽減したとはいえ残存する曲りを勘案した加工が必要になっていた。そこで、鋳抜きピン曲りのない貫通した穴の最終製品形状を成形することを理想に掲げ、目標値を「穴曲り 0.1mm 以下」と設定した。目標達成に向け、鋳抜きピンが曲るメカニズムの解明とモデル化、それを制御する金型技術の確立に取り組んだ。

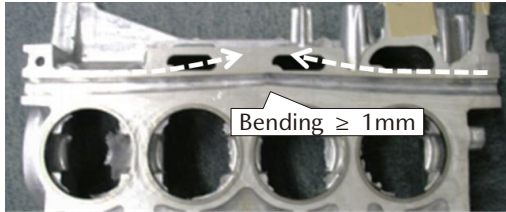


Fig. 1 Conventional Structure (Simply Butting Pins)

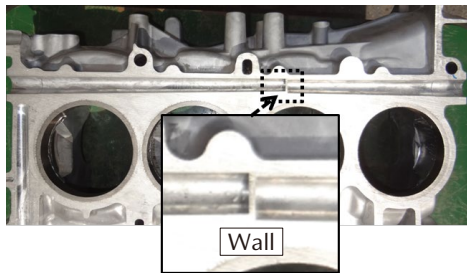


Fig. 2 Current Structure (with Wall)

3. 鋳抜きピン曲りのメカニズム

鋳抜きピン曲りのメカニズム解明に向け、ダイカストの各工程における鋳抜きピン挙動の計測技術を開発した。ダイカストは、閉じた金型のキャビティ内に溶湯を高速 ($\geq 60\text{m/sec}$) で射出して高圧 ($\geq 60\text{MPa}$) で成形する工法のため、キャビティ内にある鋳抜きピンの挙動を直接観察することはできない。そこで、鋳抜きピン内部や金型に固定している構造部に熱電対やひずみゲージを設置した 4 気筒シリンダーブロックのテスト金型を製作し、間接的な挙動測定を実施した (Fig. 3)。

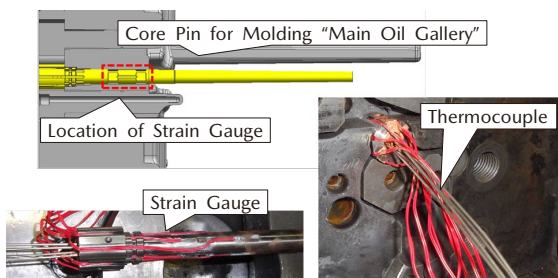


Fig. 3 Measurement Structure (of Verification Die)

ダイカスト工程の最初から最後まで (型締め→注湯→射出→凝固 (チル)→離型) を連続的に測定することで、

鋳抜きピンの曲りに関係していた 2 工程を明確にし、実測データ分析から曲りのメカニズムを推定して定式化 (=モデル化) した。以下、メカニズム解明とモデル化の取り組みを紹介する。

3.1 射出工程での溶湯衝突による曲り

(1) 溶湯衝突曲りメカニズムの推定

射出工程は、高速射出から充填完了までが 0.1sec 以内のため、キャビティ内を流れる溶湯流速は 60m/sec を超える。そのため、溶湯が鋳抜きピンに衝突する際には大きな衝撃荷重が作用し、曲りが発生していると推測した。曲りの発生は溶湯衝突の瞬間から極短時間であると考えられ、溶湯流速等から勘案すると、この現象をとらえるために必要な計測単位の細かさは 0.001sec 以下であり、高速度応答の計測が必須となる。そこで、鋳抜きピンに直接ひずみゲージを貼り付けて計測する構造を考案した。

鋳抜きピンは金型に開けられた勘合穴の裏面から差し込んで設置する構造となっている。そのため、キャビティ部で発生した曲げひずみは金型差し込み部でも検出が可能と考え、キャビティ部から 3mm 内側の勘合部に設けた平面にひずみゲージを設置した。ひずみゲージで曲げを測定するには、曲がりが発生している部分の対面する圧縮面と引張面にひずみゲージを張り付ける必要がある。そのため、一方向の設置では鋳抜きピンの曲がり方向と直角の場合に検出できない可能性があるため、角度を 90°ずらした二方向に配置し計測した。その結果、射出～充填完了の間にインパルス応答関数に近似した振動の発生をとらえることができた (Fig. 4)。

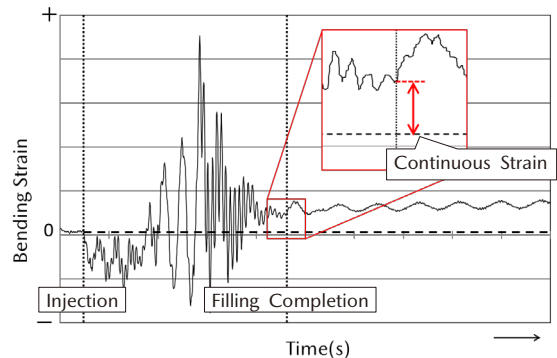


Fig. 4 Bending Strain of Core Pin

以上より、鋼材の構造体である鋳抜きピンに衝撃荷重が作用して曲げ (振動) が発生していると考えた。この振動波形を分析すると、射出直後から振動が発生し始め、その後次第に減衰しているが、減衰中心が振動発生前と比べてずれている。このため、振動発生時に鋳抜きピン突合せ部に発生した隙間に溶湯が侵入、急冷凝固して堆積し、鋳抜きピンが曲がった状態で成形されるメカニズムであると推定した。

(2) 溶湯衝突曲りのモデル化

溶湯衝突曲りのメカニズムは、Fig. 5 に示すように、鋳抜きピンを金型に差し込まれた側を固定端とした片持ち梁として、溶湯衝突による分布荷重が作用して振動（たわむ）する物理現象（=モデル）と考えられるので、分布荷重に対する弾性体のたわみ式によるモデル化が適切である。

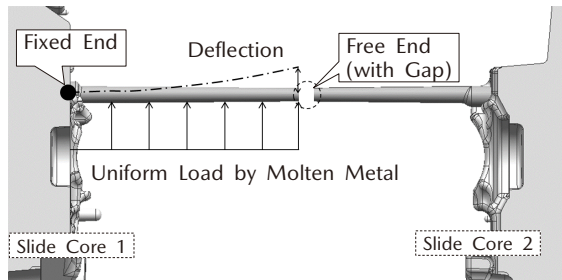


Fig. 5 Cantilever Model of Core Pin

自由端の変位量は、曲げモーメントを一定とした場合、ヤング率と断面二次モーメントに反比例するが、どちらの変更にも制約がある。例えば、必要な断面二次モーメントをたわみ量から算出すると鋳抜きピン径がΦ30mm以上必要であり、製品形状が成立しない。一方、片持ち梁はたわみが発生しやすいので、自由端側を固定端化するという考え方もある。ただ、自由端のない1本の鋳抜きピンの両端を金型で固定してメインオイルギャリ穴を成形すれば両端固定梁に近い状態になるが、長い鋳抜きピンを離型するためのスライドストロークを確保するために、設備や金型汎用部の改造が必要になる。更に、抜き勾配によって、鋳抜きピンが太くなる。そこで、現状の鋳抜きピン2本を対面させる方式で、互いのピンが押し合うことで疑似的な両端固定梁を構築した。

このときの力のつり合いモデルを Fig. 6, 7 に示す。軸荷重をかけて押し当てた鋳抜きピンは接触面が一致して一様な圧縮荷重が発生した両端固定梁状態となっている (Fig. 6)。その状態で溶湯による横荷重を受けると、鋳抜きピンの突き当て部では、圧縮荷重による縮み変位に加えて曲げ荷重による縮み変位と引張り変位が発生する (Fig. 7)。このときに、曲げによる引張変位が軸荷重の圧縮変位より大きいと、接触面が開いてしまい、突き当てを維持できなくなって隙間が発生する。その瞬間に、突き当て面にアルミが差し込むことで曲がって成形されてしまう。

以上より、溶湯衝突による曲りを抑制するためには、鋳抜きピンを突き合わせる軸荷重制御が必要である。そのときの軸荷重： F を求める関係式を Fig. 8 以下に示す。両端固定梁状態の鋳抜きピンに軸荷重： F が作用しており、溶湯衝突荷重： W が加わって、式(a)に示すたわみ量： X が発生している。片側の鋳抜きピンに着目すると、 h_0 から h' 圧縮変位すると同時に、 X のたわみ量が発生し

ていることで見かけ上は長さ： h'' となっている。このとき、見かけ上の鋳抜きピン長さ： h'' が元の長さ： h_0 より短ければ、接触面全面に圧縮応力が働いていることになるため、接触面が開かないと判定できる。その判定式を (b)に示す。判定式を基に、軸荷重： F を求める式に展開したのが式(c)である。式の中で、鋳抜きピン径、長さ、断面形状については製品機能要求から決まり、溶湯衝突荷重については溶湯湯流れシミュレーションを使って算出する。

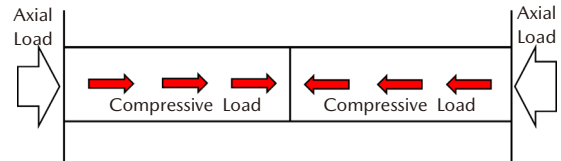


Fig. 6 Core Pin in The State of Both Ends Fixed Beam

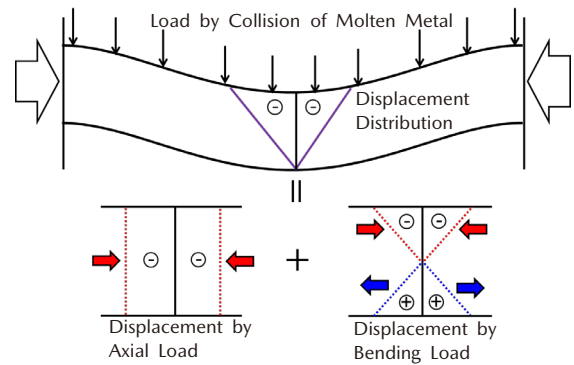


Fig. 7 Equilibrium of Forces at Fixed End Beam

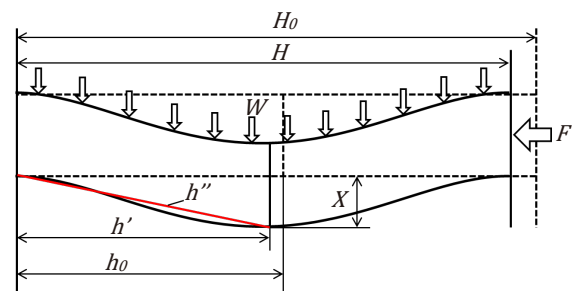


Fig. 8 Illustration of Variables in Equations (a, b, c)

$$X = v_{st}(1 + \sqrt{1 + 2H/v_{st}}) \quad \dots\dots (a)$$

ただし、 $v_{st} = \frac{Wh^3}{192EI}$

$$h_0 \geq h'' = \sqrt{X^2 + h'^2} \quad \dots\dots (b)$$

ここで、 $h' = h_0(11 - \epsilon) = h_0\{1 - (F/EA)\}$ より

$$F \geq EA(1 - \sqrt{1 - X^2/h_0^2}) \quad \dots\dots (c)$$

ここで、 X ：たわみ量 [mm]、 E ：ヤング率 [MPa]、 W ：溶湯荷重 [N]、 I ：断面二次モーメント [mm⁴]、 v_{st} ：静荷重でのたわみ量 [mm]、 H_0 、 h_0 ：元の長さ [mm]、 H ：変形後の長さ [mm]、 F ：荷重 [N]、 h' ：片側ピン長さ [mm]、 h'' ：見かけ上のピン長さ [mm]

3.2 チル工程での熱膨張による曲り

(1) 熱膨張曲りメカニズムの推定

チル工程は溶湯充填から凝固までであり、充填前に金型を冷却する内冷水によって常温まで冷却された鑄抜きピンは溶湯熱の影響を受けて温度上昇する。このとき、金型によって両端が拘束されているため、これを起点に長さ方向に熱膨張し、突き当て面で大きな圧縮応力が発生する。この応力がチル工程中に鑄抜きピンの座屈応力に達することで座屈変形していると推測した。

この現象をとらえるため、鑄抜きピン内部に複数の熱電対を設置して温度を測定し、同時に前出の鑄抜きピン勘合部に設置したひずみゲージで圧縮ひずみを測定した。その結果、充填直後から鑄抜きピン温度が上昇し、同時に圧縮ひずみが発生した。その後、温度上昇が続くが、途中で圧縮ひずみの減少（青矢印）と曲げひずみの発生（赤矢印）が観察された（Fig. 9）。圧縮ひずみが曲げひずみに変換されており、鑄抜きピンがチル工程中に座屈変形を起こしたことが確認できた。

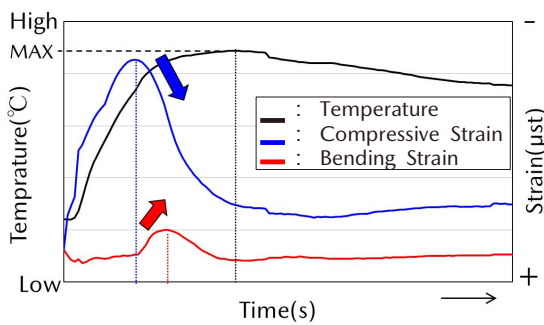


Fig. 9 Temperature and Strain at Chill Time

(2) 熱膨張曲りのモデル化

座屈変形を引き起こす応力はオイラーの式で求められるが、3.1節で述べた、射出工程での曲り抑制のための軸荷重による圧縮応力と、熱膨張により発生する圧縮応力の合算となる。熱膨張による圧縮応力を抑えるには、鑄抜きピンの温度が上がらないようにするか、熱膨張しない材質とするか、金型で吸収する構造が必要である。そこで、ロバスト性を確保するために熱膨張量を金型で吸収する方向で対策を考案する。

そこで、鑄抜きピンの温度推移を観察すると、初期温度から最高温度に達する時間は充填完了後約 1sec であり、その後緩やかに温度低下して次サイクル開始時には初期温度に戻っている。一方、金型全体は鑄造サイクルを重ねるにつれて徐々に温度上昇する（Fig. 10）ため、熱膨張してわずかに大きくなる。これも鑄抜きピンの見かけ上の熱膨張量に影響する。

以上より、鑄抜きピンの熱膨張による座屈変形を抑制するためには、式(d)より求まる熱膨張量を吸収できる金型構造が必要である。

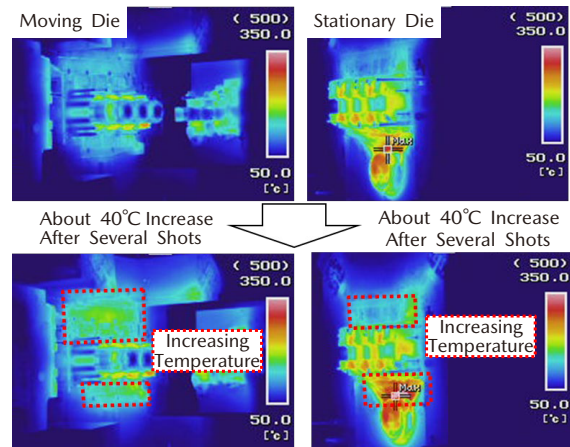


Fig. 10 Die Temperature Before and After Several Shots

$$\Delta h = \alpha H_0(T' - T'') + \alpha H_0(T - T') \dots\dots (d)$$

ここで、 Δh ：熱膨張量 [mm]、 α ：線膨張係数 [1/°C]、 H_0 ：元の長さ [mm]、 T ：数サイクル後の最高温度 [°C]、 T' ：1 サイクルの最高温度 [°C]、 T'' ：初期温度 [°C]

4. 鑄抜きピン曲りを抑制する型構造

鑄抜きピン曲りを抑制するためには、①溶湯衝突による曲りと、②熱膨張による座屈を同時に抑制する必要がある。

ここで、金型設計における抑制の考え方は、①に対しては、対面する鑄抜きピンを互いに強く押し付けることで溶湯衝突によるたわみ量を突合せ面に隙間ができないレベルに軽減する、②に対しては、熱膨張量を吸収することで圧縮応力の発生を座屈応力以下に軽減する、となる。

前項で定式化したとおり、①のたわみ量は軸荷重と溶湯衝突による「分布荷重」から、②の圧縮応力は鑄抜きピンの後退量と「熱膨張量」から算出可能である。このうち、軸荷重と後退量は金型設計で設定する値なので、「分布荷重」と「熱膨張量」を求め必要がある。そこで、金型設計時にこれらを算出するために、鑄造シミュレーションを利用して、それぞれを溶湯流速と金型温度の解析値から求めた。

次に、この軸荷重と鑄抜きピンの後退量を制御する金型構造として、バネによる突き当て構造を考案した（Fig. 11）。型閉じ時に対面する鑄抜きピンは互いを押す関係にあり、この時、鑄抜きピン根本部に設置したバネの反発力により必要な軸荷重を発生するが、その状態から鑄抜きピンが熱膨張してもバネの収縮ストロークによりそれを吸収する仕組みである。

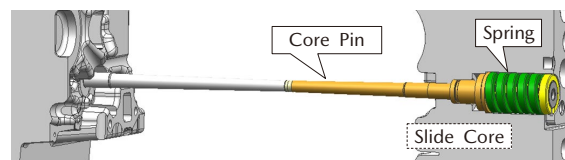


Fig. 11 Butting Structure with Spring

そこで、この構造をテスト型に織り込んで実鑄造にて確認した。このときに、バネの動作と鑄抜きピンの動きを数値化するため、鑄抜きピンに軸方向の変位センサーを設置して鑄造した。そのときの変位量測定結果を Fig. 12 に示す。スライドの型締め動作を利用してバネを収縮させて軸荷重を与え、射出工程ではバネの収縮により熱膨張量を吸収することができた。

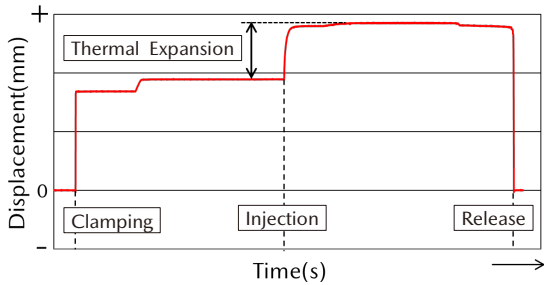


Fig. 12 Core Pin Displacement in One Cycle

しかし、金型が開いて製品が離型されることで鑄抜きピンは初期位置に戻るが、サイクルを重ねると初期位置に戻らなくなる現象が発生した。そのときの状態を確認すると、鑄抜きピンと金型の摺動部に薄いアルミの破片が入り込んでおり、摺動抵抗が増加して鑄抜きピンが動かなくなっていた (Fig. 13)。

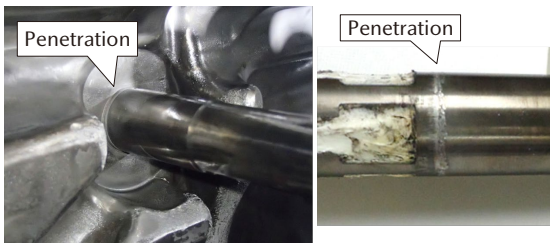


Fig. 13 Aluminum Penetration to Sliding Part

アルミの破片は、溶湯充填時に鑄抜きピンと金型型合穴の間へ溶湯が侵入して凝固したものであり、鑄造を重ねるにつれて少しずつ堆積していく。鑄抜きピンの摺動時には、金型型合穴との摩擦力に加えてアルミ破片の剪断力が摺動抵抗となる。この摺動抵抗がバネによる軸荷重よりも大きくなることで鑄抜きピンが動かなくなったと考えられる。そのため、金型離型時にアルミ破片を排出するための軸荷重と摺動量を満たすバネ荷重特性を検討した。このとき、バネ定数が大きいと熱膨張時に鑄抜きピンの座屈荷重に達してしまうため、バネ定数はできる限り小さくする必要がある。

ここまでを踏まえたバネ荷重特性を Fig. 14 に示す。アルミ破片を排出する軸荷重をかけた状態で金型に組み込み、突き当て後に摺動量分を更に押し込んだ状態で鑄造開始する。そのときに、前出の軸荷重判定制以上の荷重となっている必要がある。鑄造中は熱膨張吸収の摺動があっても鑄抜きピンの座屈荷重未満で推移する。

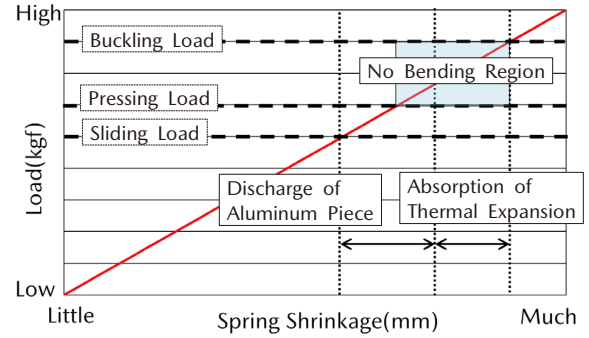


Fig. 14 Spring Load Characteristic

しかし、以上の条件を満足するバネを単純に選定すると金型サイズに対して非常に長い自由長となる。そこで、各過程で理想のバネ荷重特性を考えると、鑄抜きピンを突き当てたときにアルミ破片排出のための必要荷重以上に瞬時に達し、その後は荷重を維持したまま摺動すればよい。つまり、初期の短い摺動間ではバネ定数を大きくし、一定の荷重に達したときにバネ定数の小さく長いストロークのバネに変化する2つの荷重特性をもつことである。そこで、バネ定数の違う2つのバネを直列に並べた「2重バネ構造」を考案し、理想のバネ荷重特性を実現した。そのときの荷重特性を Fig. 15 に示す。

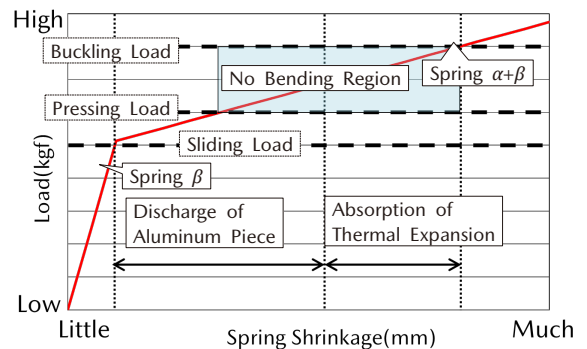


Fig. 15 Double Spring Load Characteristic

2つのバネのうち、バネ定数の小さいバネ α についてアルミ排出荷重を掛けて縮めた状態でセットしておき、その荷重まではバネ定数の高いバネ β 単独の荷重特性で摺動させる。このときの式は (e) であり、僅かな摺動量で荷重を増加させることができる。バネ β がバネ α の荷重に達すると、バネ双方が縮み始めるが、このときバネ α とバネ β が直列合成された式 (f) となり、摺動量に対して荷重が小さくなる。

この2重バネ構造により、バネ単体構造に対して約半分のスペースで、金型内に設置可能となった。

$$F_{\beta} = k_{\beta}x \quad \dots\dots (e)$$

$$F_{total} = \frac{k_{\alpha}k_{\beta}}{k_{\alpha} + k_{\beta}}x \quad \dots\dots (f)$$

ここで、 F_{β} : バネ β の荷重 [N], k_{β} : バネ β のバネ定数

[N/mm], x : ストローク量 [mm], F_{total} : バネ α とバネ β の合成荷重 [N], k_{α} : バネ α のバネ定数 [N/mm]

5. 成果

以上の構造を金型に織り込み製造確認した結果、目標値のメインオイルギャラリ穴曲り 0.1mm 以下に対し、半減の 0.05mm 以下で完全突合せを達成し、機械加工レス成形を実現した。測定結果を Fig. 16 に示す。

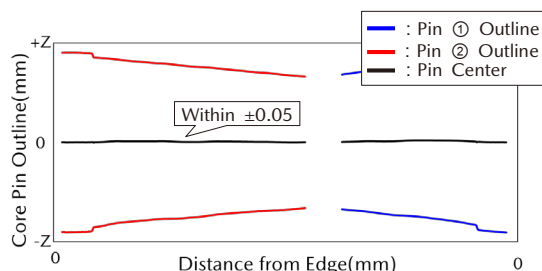


Fig. 16 (Measured) Pin Bending of Double Spring

また、鋳抜きピン曲りのメカニズムを解明してモデルを構築したことで、溶湯衝突時に必要な軸荷重から熱膨張量までを CAE で検証する方法も確立した。その CAE 結果から、鋳抜きピン位置を溶湯流速の速い鋳込みゲート側に設置したテスト型を製作して実製造確認したところ、同様に曲りのない突合せ穴を成形することができた。Fig. 17 にそのときの試作品を示す。

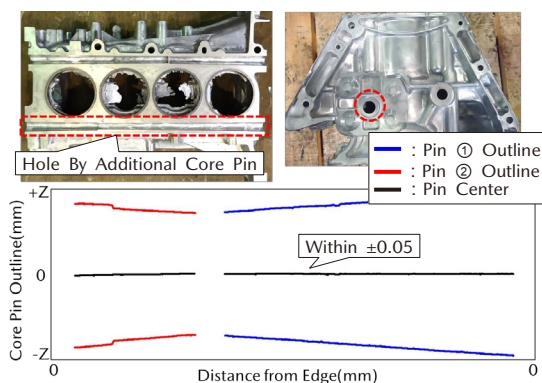


Fig. 17 Trial with Mold Equipped Additional Pin

以上のように汎用性の高い技術であり、今後さまざまなダイカスト部品へ応用することで、更なる製品機能の向上に貢献する。

6. おわりに

これまでダイカストにおける鋳抜きピン曲りは常に発生するものであり、発生した曲りに対して金型を補正することで対処してきた。今回、鋳抜きピン曲りを事前評価する金型設計技術を確認したことで、製品設計の段階から製品機能と生産性を両立する鋳抜きピン提案ができるようになった。この活動を通じて、現状に満足しない

問題意識の構築と現象の現場現物による詳細な分析、課題解決まで諦めずに考え抜くことの重要性を再認識できた。

また、ダイカストにおいて高精度な品質の製品を造りだすためには、瞬間的な溶湯の挙動や金型温度変化を正確にとらえることが必要であると分かった。現在、溶湯から金型内部までの詳細温度分布測定に取り組んでおり、新製品のモデルベース開発による評価・改善・改良と機能向上に貢献する金型技術の更なる向上を目指していく所存である。

今後も、全てのステークホルダーへ笑顔を届けられるクルマ作りに向けて、技術革新への挑戦を続けていく。

この論文は(株)日刊工業新聞社 技術 2021 年 7 月号に投稿した内容に追記・転載したものです。

■ 著 者 ■



佐々木 大地



重里 政考



山本 綾人



河野 一郎



藤井 祥平



小国 英明