



ハイブリッド・フィル・キャスティングによる ハイマウントナックルの casting

宇部興産機械株式会社

○三吉 博晃・服部 信也
明本 晴生・山下 輝之
工博 佐々木 寛人

Casting of High Mount Knuckle by Hybrid Fill Casting Facility

○Hiroaki Miyoshi, Shinya Hattori, Haruo Akemoto,
Teruyuki Yamashita, Hiroto Sasaki

Abstract

A new casting method of Hybrid Fill Casting (HFC) which took advantage of the low-pressure casting and die-casting is developed to cast large parts having a large projection area by using simple and compact machine. Since the process is based on conventional low-pressure casting, the process could be applied to thick, high strength, pressure-tight parts which are usually produced by gravity casting, low-pressure casting, or squeeze casting, and could be advantageous in productivity and internal quality. In this paper, the outline of HFC facility is introduced and soundness, microstructures and mechanical properties of High-Mount-Knuckle samples cast by this facility are explained.

1. はじめに

ダイカスト品の価格競争が激化するなか、コンパクトな設備で投影面積や流動長の大きい部材を生産したいとの要望がより一層高まっている。そのような要求に応える為、筆者らは可能な限りメタル圧を抑えたダイカスト技術を訴求してきた¹⁾。しかしながら、従来のダイカストの延長線上からのアプローチでは、要求品質を確保しながら低減できるメタル圧は限られ、他方、高圧・高速射出充填を前提とする限り、設備の大幅なコンパクト化は困難である。そこで、筆者らは、設備はダイカストに比して簡素ながら、主として厚肉の強度・耐圧部材に適用されている低圧 casting に軸足を移し、新たに精密ガス加圧制御やダイカストのビスケット加圧機構を付加した casting プロセスを考案した。このプロセスは金型キャビティへの溶湯充填にガス加圧と油圧の双方のソースを利用することから、Hybrid Fill Casting²⁾(ハイブリッド・フィル・キャスティング)、略して HFC プロセスと名づけた。本稿では、先ず、HFC プロセスの概略と³⁾⁴⁾⁵⁾
⁶⁾このプロセスを量産システムとして具現化した全自動 casting 設備の概要について紹介する。次に、この設備に自動車足回り部品であるハイマウントナックル試作型を搭載して実施した種々のテスト結果、具体的には HFC プロセスの主要 casting 因子であるメタル圧が外観、内部巣、製品部重量、マイクロ組織等に及ぼす影響、さ

らに、 casting サンプルの各所から切出した小片の引張特性等について報告する。

2. HFC casting 設備及びプロセスの概要

2.1 HFC casting プロセスの概略

図1に本プロセスの一連の動作を溶湯の動きを中心に模式図にて説明する。

- ①窒素ガスセパレータ、精密レギュレータを介して加圧室に窒素ガスを導入し加圧室の湯面を押し下げる。湯面変位は常時レーザーで監視し金型への溶湯充填状況をモニターする。
- ②加圧室の湯面を下げることで注湯室の湯面が上昇し金型への溶湯充填が始まる。
- ③ガス圧をさらに増大し溶湯を金型に充填する。
- ④金型が溶湯で満たされた後、センターピンを下降させて湯口を閉塞する。湯口閉塞後はガス加圧を止め、湯口付近の溶湯を速やかに注湯室に戻す。
- ⑤センターピンをさらに下降させて湯溜り部を加圧し金型内の溶湯にメタル圧を伝える。湯溜りから離れている厚肉部位には必要に応じてスクイズピンによる部分加圧を行う。
- ⑥凝固完了後、センターピンとスクイズピンを原位置に戻す。
- ⑦型を開いて製品を取り出す。その間、保持室の炉床のタップ弁を開いて注湯室と加圧室に次のショットの溶湯を補給する。

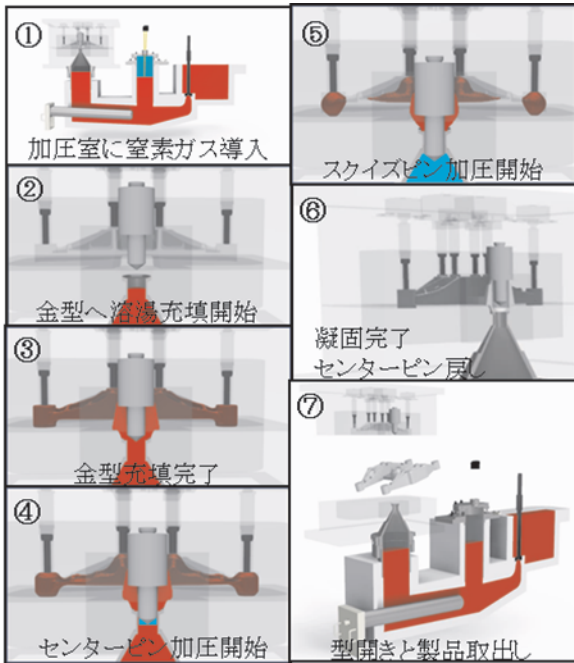


図1 HFCプロセスの概略

2.2 HFC 鑄造設備

図2に HFC プロセスを量産対応可能なシステムとして具現化した全自動鑄造設備の全体レイアウトと主要装置の構造を示す。

HFC プロセスでは金型の下方に位置するHFC 炉よりガス加圧にて金型キャビティへのアルミ溶湯充填がなされることから、型開閉ならびに型締は縦方向の構成としている。型締めユニットは型厚調整機能の装備と(調整代:1000~1,100mm の 100mm)、可動プラテン中央部にセンターピン加圧シリンダユニットを配置するスペースを確保する為、可動プラテン4隅のタイバーそれぞれにナット分割機構と直圧の型締めシリンダを装備した2枚プラテン方式とした。固定プラテンは型締め力が金型中央部に導かれるセンタープレス構造を採用して軽量化を図ると共に、直下に収容する HFC 炉は湯替えやメンテナンスの際に炉体の機外搬出が行えるように昇降ならびに走行機構を付帯している。HFC プロセス最大の特徴であるセンターピン加圧ユニットは、金型側部品であるセンターピンの脱着を容易にする為にカップリングを用いて連結ロッドに接続すると共に、連結ロッド内部にはセンターピンに連通する冷却水回路を設けて温度調整が行えるようにした。押出ユニットはセンターピン加圧シリンダの両サイドに取付けた2本の押出シリンダとそれらに連結された C 板からなり、これを介して金型の押出し板にシリンダ推力が伝達される仕組みとした。HFC 鑄造設備の主仕様を表1に、本設備に導入した HFC 炉の詳細を図3に示す。

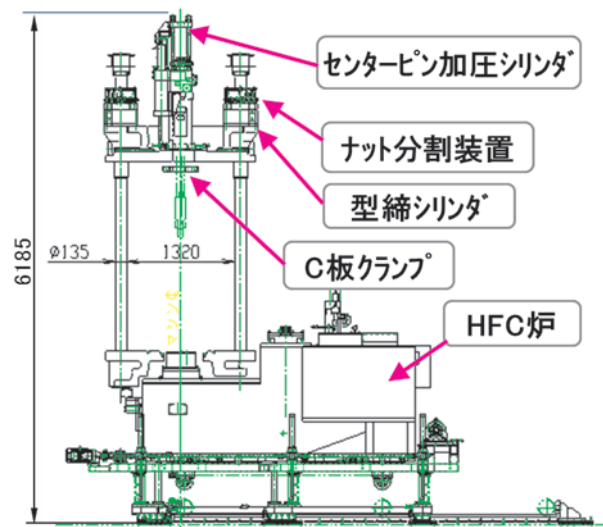
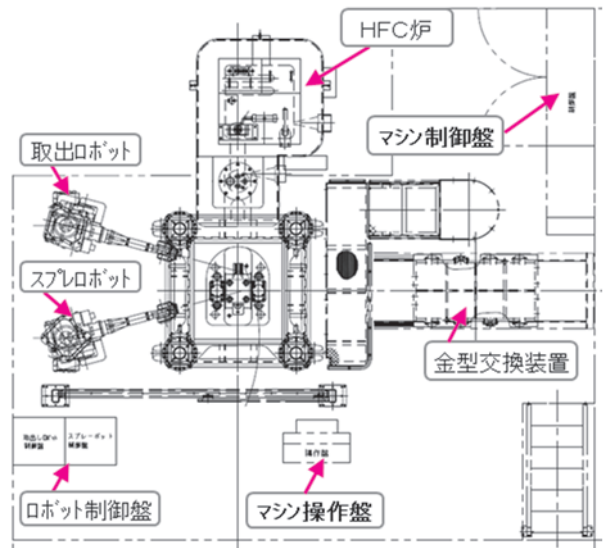


図2 HFC鑄造設備

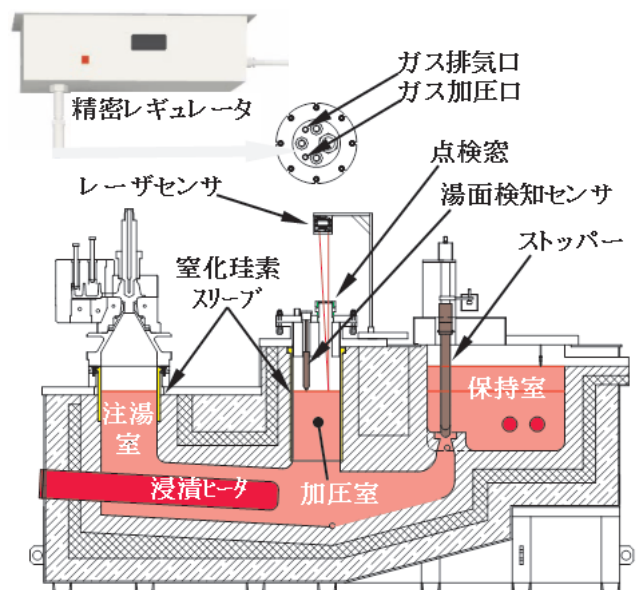


図3 HFC 炉

表1 HFC 鋳造設備の主仕様

項目	定格
型締力	315ton
型開閉ストローク (メンテナンス時)	795mm (1195mm)
タイバー径	135mm
タイバー内法	1320/1220mm
取付け金型厚さ	1000~1100mm
センターピン加圧シリンダ推力	30ton
センターピンストローク	100mm
センターピン速度【標準】	60mm/s
センターピン速度【ACC仕様】	500mm/s
押出力	25ton
押出ストローク	50mm

HFC 炉のガス加圧制御には精密かつ高応答ガスサーボバルブを活用した精密レギュレータを採用し、金型キャビティ内の溶湯充填の各段階に合わせた昇圧が行えるようにした。一方、加圧室蓋の上方にはレーザー変位センサを配置し、点検窓を介して湯面変位を常時モニターできるようにした。これにより溶湯充填挙動、例えば、溶湯の湯口、製品ゲート到達、あるいはキャビティ充填完了タイミングを検知することが可能となっている。

なお、本鋳造設備は上述の装置、機器以外に、金型交換装置、取出し・スプレロボット、各種制御盤、油圧ユニット、作業床ならびに安全柵を装備している。

3 鋳造テスト

3.1 試験金型

図4に市販部品形状を参考に製作したハイマウントナックル金型キャビティ図を示す。

左右2個取りキャビティ鋳造品の外形寸法は510mm(長さ)×195mm(幅)×145mm(高さ)、最小肉厚と最大肉厚はそれぞれ10mm、38mmである。金型キャビティの投影面積は939cm²、製品のゲート寸法は51.0mm(幅)×19.5mm(厚さ)、製品重量は2.5kg、ランナー、オーバーフロー、湯溜りを含む全鋳込み重量は5.8kgとなっている(製品歩留り約86%)。センターピン加圧がなされる湯溜りは左右製品の中央に配置し、センターピン径はφ80、湯口径は製品ゲート2個分の断面積に相当するφ50とし、センターピンが30mm前進したところで湯口が閉塞され湯溜り部の加圧がなされる仕組みとした。なお、センターピン以外の加圧手段として、部分加圧(スクイズ)ピンを厚肉のハブ中央部(ピン径φ40)、製品ゲートから最も離れた位置にある天側ブッシュ(同φ20)と地側に位置する二股先端部(同φ12現状は使用していない)に配置した。キャビティ内のエア排気は、溶湯の最終充填部付近となるアーム先端左右にベントランナーを、天側ブッシュの先端にはオーバーフローを配置し、溶湯充填の際に残留するエアがそれらから排出される方案とした。

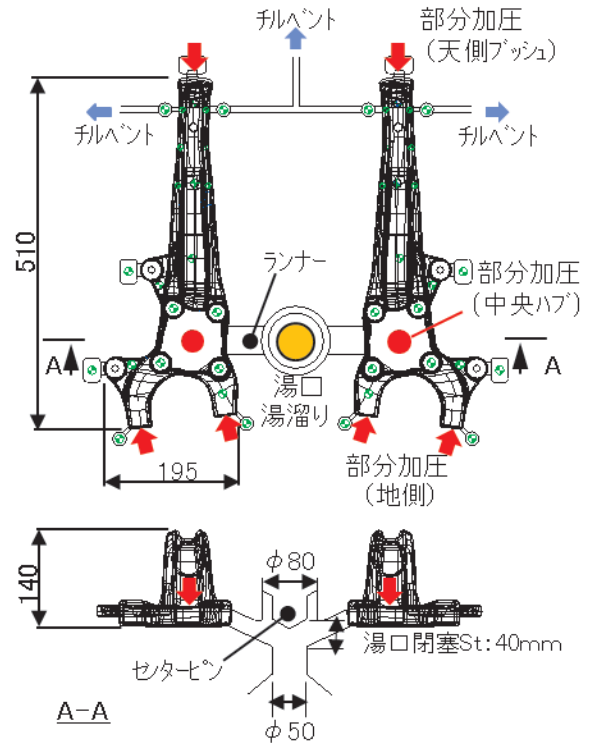


図4 ハイマウントナックル金型方案図

3.2 鋳造条件

ハイマウントナックルの鋳造には市販のAC4CH合金を使用し(表2)、HFC炉の保持室及び注湯室の溶湯温度が710℃となるよう付帯の浸漬ヒーターを調整して鋳造を行った。金型離型剤には(株)MORESCO社製のグラフフェースGT-200を希釈率30倍で使い、型温制御は温度が上がり難いアーム先端部周辺には油温調ラインを配して熱媒体油を循環させると共に、逆に、型温が上昇し易い湯口周辺部やアーム先端部以外の製品キャビティ周辺にはライン冷却やスポット冷却を配置しサイクル毎に一定時間通水を行うことで型温の安定化を図った。上述の操作により連続鋳造中の離型剤塗布後の表面温度は、上型は200℃±15℃、下型は250℃±15℃の範囲で安定した。

ガス加圧については、精密レギュレータ使用により加圧を開始し、溶湯が湯口に到達する圧力となる13kPaまでは3.0秒をかけて圧力を上げ、それより製品部の溶湯充填が概ね完了する20kPaまではエア巻き込みを抑制する為にさらに3.5秒をかけて緩やかに圧力を上げる。そして、圧力が20kPaに到達した後は一気に80kPaまで圧力を増大する設定とした。

センターピンは上述のガス圧が80kPaに達した1.5秒後から予め5mm前進させた位置から前進動作を開始させ、湯口が閉塞される30mmストロークまでは油圧シリンダに最大圧を付加し最大速度で前進させるが、それ以降はメタル圧力制御に切換えて湯溜り部に付加されるメタル圧が所定の値となるよう油圧を調整した。センターピンにて付加するメタル圧は30MPaを基本条件とし、15MPaから45MPaの範囲でメタル圧を変更して鋳

造を行った。その際、メタル圧以外の条件、例えば、ガス加圧や後述する部分加圧条件については基本条件と同一である。なお、この金型の製品キャビティ部の全投影面積(939cm²)と本鑄造設備の型締め力315tonとの関係から求められる理論上の限界メタル圧は30MPa強であるが、本鑄造においては45MPaまで鑄バリを生じることなく加圧することが可能となっている。これはセンターピン加圧動作が金型キャビティ内のメタル凝固と均衡する緩慢な挙動であることから、最大圧が付加される時点においては、鑄物表面に形成された凝固殻により、金型分割面へのメタル差込が抑制される為と推察される。センターピンはキャビティ内メタルの凝固収縮に見合う量の溶湯を湯溜りから供給しながら前進動作を継続し、その後、湯溜りの凝固とバランスする位置で停止する。

部分加圧については、前述のとおり、天側ブッシュ、および中央ハブの2箇所の加圧を行うが(地側二股先端は不使用)、加圧力はセンターピンによるメタル圧を上回る50MPaとした。一方、加圧開始タイミングについては、湯溜りから離れた位置にある天側ブッシュはセンターピン動作開始から3.5秒後とし、湯溜りに近いハブ中央部についてはセンターピン動作開始から7.0秒後に駆動を開始させる設定とした。なお、加圧体積の大きいハブ中央部については(左右2系統)、加圧ストロークのフィードバック制御を行い個別に所望のストロークパターンに追従する仕組みとした。

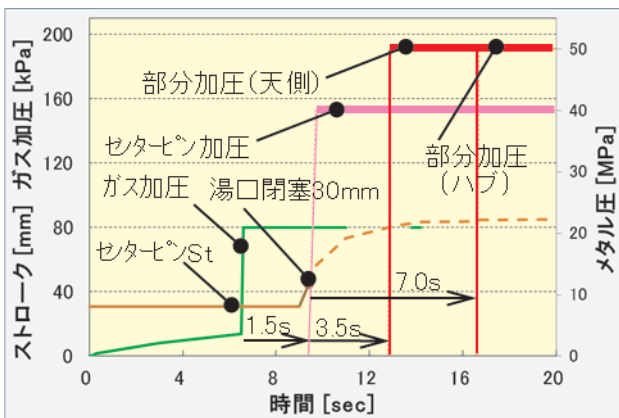


図5 ガス加圧 センター加圧 部分加圧制御パターン

上述のガス加圧、センターピン加圧ならびに3箇所の部分加圧の制御パターンを図5に示す。なお、ハイマウントナックルの連続鑄造において、上述のセンターピン加圧ならびに部分加圧工程を含むチルタイム(型内冷却時間)の35秒、製品取出し、単一スプレヘッドからなるスプレユニットによる金型への離型剤スプレ時間75秒を含めた全体の鑄造サイクルは163秒となっている。

表2 AC4CH 合金成分[wt%]

Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Cu	Ti	Al
7.02	0.38	0.00	0.18	0.03	0.02	0.14	Bal

4. 鑄造テスト結果

4.1 鑄造波形

図6にセンターピン加圧によるメタル圧を 15MPa、30MPa および 45MPa に変更して鑄造を行った際の鑄造波形を示す。

ガス加圧パターン、センターピン加圧開始タイミング等はいずれも同一であるが、図中に記したセンターピンの挙動はメタル圧によって異なり、メタル圧 15MPa では他のふたつの条件に比べて最終のストロークが短くなっている。さらに、最終昇圧段階のメタル圧およびストローク波形の挙動も不安定であることから、15MPa のメタル圧付加では充填抵抗に対する余力が不足し、十分な溶湯補給がなされていないものと推察される。

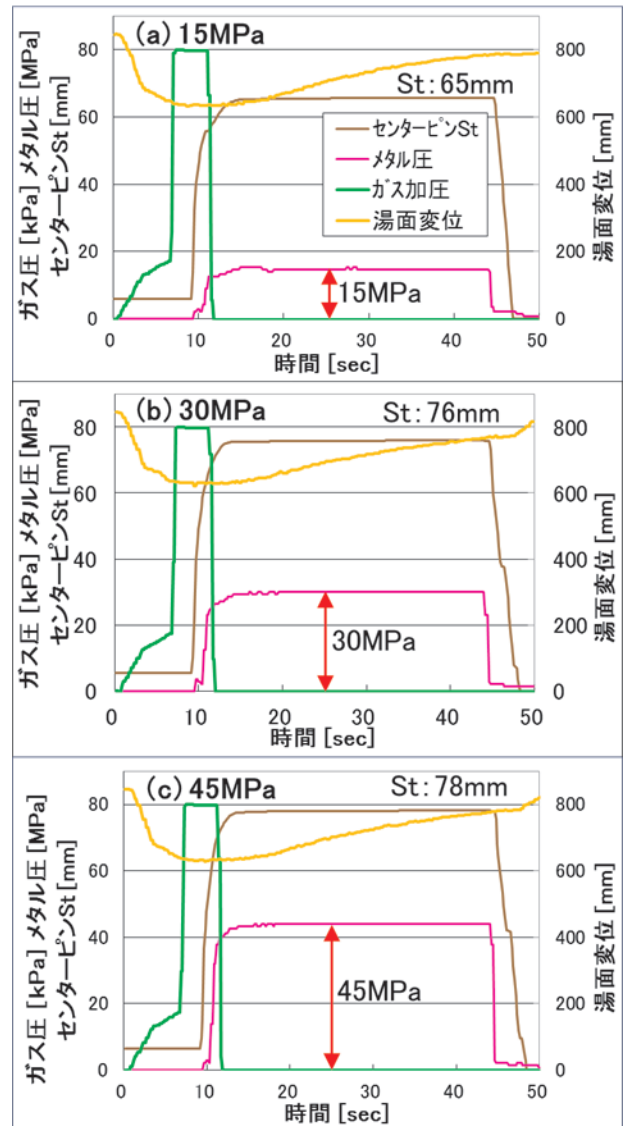


図6 各メタル圧による鑄造波形

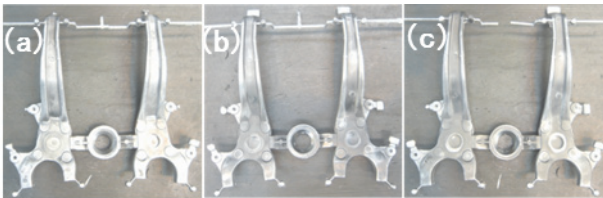


図7 各メタル圧による鑄造サンプル
[(a)15MPa (b)30MPa (c)45MPa]

4.2 外観に及ぼすメタル圧の影響

図7にセンターピン加圧によるメタル圧を 15MPa、30MPa および 45MPa にて鑄造したサンプルの外観を示す。

メタル圧 15MPa では、離型剤の転写が他の2条件よりも弱く、黒鉛系離型剤による黒々とした外観が得られている部位は製品ゲート近傍かつ部分加圧がなされるハブ周辺に限定されている。特にゲートから離れた部位にある天側ブッシュ、地側二股端部、アーム部のリブはアルミ素地の銀白色を呈している。一方、メタル圧 30MPa のサンプルは、製品全体に離型剤が転写されており、加圧力が金型内のメタルに有効に作用したことが窺われる状況となっている。なお、メタル圧 45MPa のサンプルの外観も 30MPa と同様であり、離型剤の転写性に及ぼす加圧力の作用はほぼ同等と見られる。

4.3 製品部重量と体積に及ぼすメタル圧の影響

図8に各メタル圧で鑄造したサンプルの製品部重量とアルキメデス法にて測定した製品部体積を示す。測定は左右2個取り鑄造サンプルの湯溜り、ランナー、オーバーフローおよびエアイベントを除去し、左側キャビティ製品部のみについて行った。なお、アルキメデス法で求めた体積は、3箇所部分加圧ピンの挿入深さの違いによる影響を除外する為、標準的な挿入深さを用いて同一に補正した値を表示した。

製品部重量はメタル圧の増加と共に増大しているが、メタル圧 30MPa で約 2,530g に達し、それ以上メタル圧を上げて重量変化はほとんど認められない。一方、製品部体積も傾向は上述の製品部重量と同様で体積はメタル圧の増加と共に増大するものの、メタル

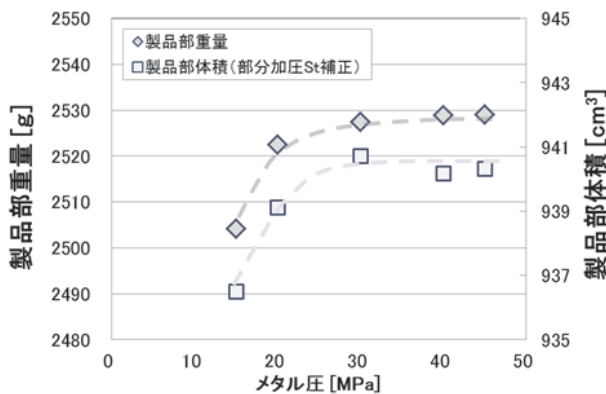


図8 製品部重量および体積とメタル圧の関係

圧を 30MPa 以上では約 940cm³ の一定値となりほとんど変化していない。これらの結果から、本ハイマウントナックルの鑄造では、製品ゲートや製品部の充填抵抗にうち克って鑄物表面の凝固収縮(外引け)や内部の凝固収縮に対する溶湯補給を行う為には 30MPa 以上の加圧力が必要であることが分かる。因みに、メタル圧 30MPa で得られた製品部サンプルの密度は 2.683g/cm³ であり、AC4CH 合金を用いて得られる健全な鑄物として遜色無いレベルであることが判る。なお、ここには示さないが、鑄造品全体の鑄込み重量はメタル圧に依らず 6,000g から 6,020g のほぼ一定値で安定し、製品部重量や体積の変化とは相関を示さなかった。これは、鑄込み重量はガス加圧充填にのみ依存して変化する量である為である。

4.4 内部巣に及ぼすメタル圧の影響

図9に各メタル圧で鑄造したサンプル中、15MPa および 30MPa で得られたものの内部巣の状況を X 線にて確認した結果を示す。

メタル圧 15MPa のサンプルには、厚肉のハブとアーム付け根にき裂状の粗大巣が、さらに、アーム先端の天側ブッシュ付け根付近には小さな巣が複数発生している。これらはいずれも凝固収縮により発生した引け巣と推察され、15MPa のメタル圧では厚肉部や湯溜りから離れた部位には十分な溶湯補給がなされないことが分かる。一方、メタル圧 30MPa のサンプルにおいて、上述の 15MPa サンプルの巣発生部位に相当する部位、ならびにそれ以外の部位を調べたところ、いずれにも引け巣やエア巻き込みによる気泡状巣の発生は認められなかった。このように、巣の無い健全な鑄物が得られるのは、センターピンによるメタル圧の適性付加に加えて、精密レギュレータを介したガス加圧制御や複数箇所部分加圧条件、即ち、加圧タイミングや動作速度を調整した結果と言える。

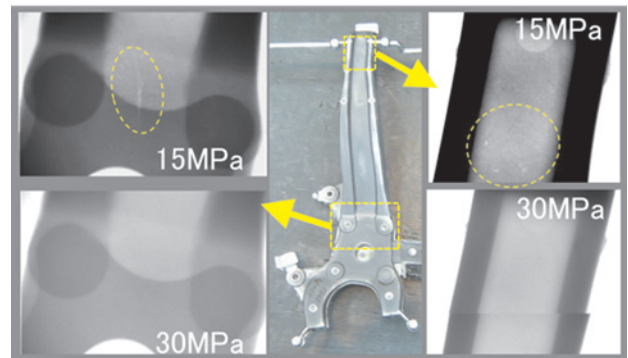


図9 内部巣とメタル圧の関係

4.5 表層マイクロ組織に及ぼすメタル圧の影響

図10にメタル圧 30MPa ならびに 15MPa にて鑄造したサンプル各部、PartA から PartE の6箇所断面のマイクロ組織を示す。組織はいずれも上側金型面に接する鑄物表層の領域のみを示している。

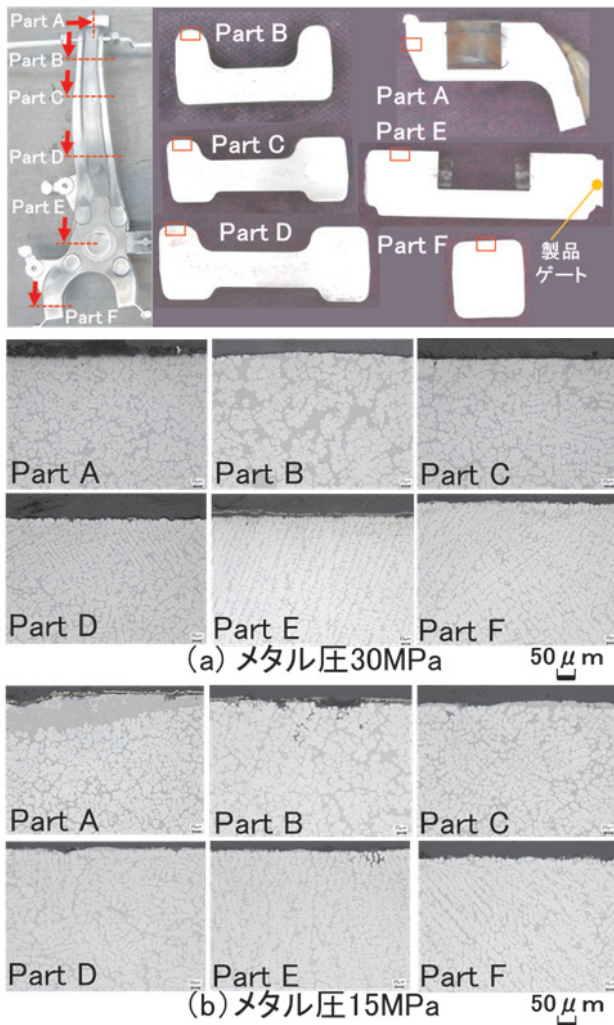


図10 表層マイクロ組織とメタル圧の関係

メタル圧 30MPa にて得られたサンプルのマイクロ組織は、ハブ部の PartE、PartF ならびにハブ周辺部の PartD では非常に細かい α 相デンドライト組織(樹枝状晶)が認められる。それぞれの観察領域における代表的な DAS (Dendrite Arm Spacing; デンドライト2次枝間隔)を測定したところ平均で $10 \sim 16 \mu\text{m}$ の値を示し、重力鋳造や低圧鋳造では得られない細かさであることが判る。これは、射出スリーブやプランジャーチップ等の鋳込み部品による抜熱が生じない本プロセスの溶湯温度低下抑制と、金型キャビティに導入された高温の溶湯がセンターピン加圧によるメタル圧付加にて型表面に圧着され急速凝固した双方の効果による結果であると考えられる。但し、ハブ部から離れた部位にあるアーム部の PartA、PartB、PartC では、 α 相は微細ながら等軸晶セルあるいは花卉状の形態を呈している。これは製品ゲートより流入した溶湯がキャビティ内を流動する過程で湯温の低下により結晶核を晶出し、それがその場に留まらず初晶粒子として成長しながらアーム先端に到達した為と考えられる。したが、鋳物全体において微細な凝固組織を実現する為には製品ゲートからの流動距離、鋳込み温度、金型温度に留意

する必要があると言える。

一方、メタル圧 15MPa のマイクロ組織は、ハブ部の PartE、PartF ならびにハブ周辺部の PartD では上述の 30MPa とほぼ同様の傾向を呈しているが、表層の一部にマイクロシュリンケージの発生や凹凸の著しい箇所が生じている。また、アーム部の PartA、PartB、PartC では、上述の傾向がより一層顕著となることに加えて、アーム先端の PartA においては溶質 (Si) リッチの共晶層が表層に染み出した偏析層も認められる。これは、鋳物表面の外引けに対し、センターピン加圧による溶湯補給が追いつかず、後から遅れて流動性の良い溶質リッチな融液がその隙間に充填された為と考えられる。

4.6 センターピン多段増圧テスト

上述の外観、製品部重量、内部巣、表層マイクロ組織の状況から、センターピン加圧によるメタル圧として 30MPa の付加を行うことで健全なハイマウントナックル鋳造サンプルが得られることが判った。しかしながら、このサンプルを上回る厚肉製品や、製品形状の制約から部分加圧ピンの適用が困難な製品の鋳造においては、さらに大きなメタル圧付加が必要となることも想定される。理論上の限界メタル圧を大きく上回るメタル圧付加において金型割り面からのバリ吹きを回避する手段として、センターピン加圧の多段増圧によるメタル圧付加を試みた。即ち、1段目のメタル圧付加では限界メタル圧以下の 30MPa にて加圧を行い、鋳物表層に形成される凝固殻の強度増大を図る一定時間遅延の後、1段目の倍以上の 70MPa にて2段目加圧を行うテストを実施した。

図11に上記の2段目加圧に到る遅延時間を種々変化させて鋳造した際の波形を示す。遅延時間を 5.0 秒(a)、4.5 秒(図示せず)、4.0 秒(b)、3.5 秒(c)と次第に短縮したところ、遅延時間 3.5 秒にて湯溜り周辺に少量の鋳バリが発生した。合わせて遅延時間 3.5 秒では2段目加圧によるセンターピンのストロークの増分も他の2条件より顕著になっている。この結果から、4.0 秒超の遅延時間を設けることで理論上の限界メタル圧の2倍に近い圧力の付加が可能であることが示された。但し、2段目加圧の大きさやそれに到る遅延時間は、湯溜りからの圧力伝達のし易さに依存すると考えられることから、湯口、ランナー、製品ゲート各部の断面積、金型温度、メタル温度によって変動することが予想される。したが、これらの2段加圧条件については繰り返し十分な検証を行ったうえで決定する必要があると言える。なお、2段目加圧がどの程度キャビティ内に伝播し、内部品質にどのように影響するかについては、キャビティ内圧力計測の実施を含めた今後の調査で明らかにしていく所存である。

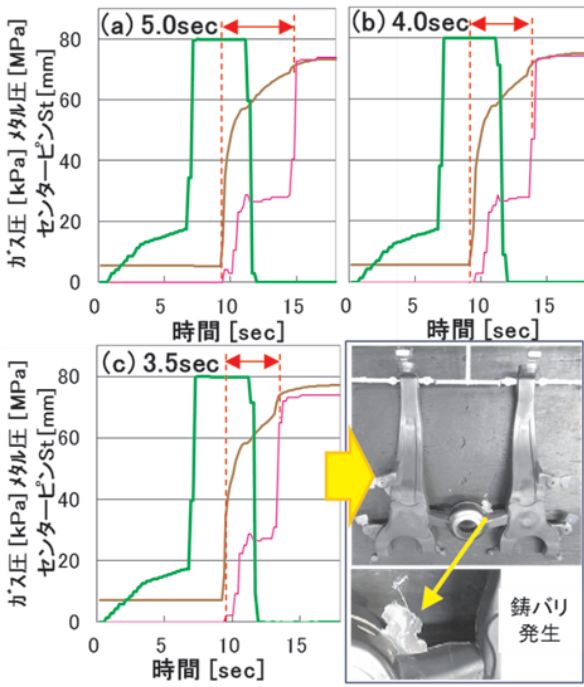


図11 センターピン多段増圧テスト

4.7 鑄造サンプルの引張特性

図12に基本条件、即ち、センターピン加圧メタル圧が30MPa、ならびに、70MPaの2段目加圧を遅延時間5.0秒にて実施した2種類の鑄造サンプルの各部から切り出した小片の引張特性を示す。

引張試験は鑄造サンプルのアームならびにハブ取り付け部より鑄造サンプル一個につき8本の素材を切出して熱処理を施した後、機械加工にて丸棒タイプの試験片を作製して実施した(図13)。その際の熱処理条件は530℃で3.0時間の溶体化処理の後水焼入れし、引続き160℃で3.0時間の人工時効処理を行うT6処理とした。

引張強度ならびに0.2%耐力はそれぞれ、330MPa、240MPa前後で高位安定した値を示し、基本条件と多段増圧の差異はほとんど認められない。一方、破断伸びは値がばらついているが、一部を除くほとんどの値が10%を上回り、最低値も6%が確保されている。なお、基本条件と多段増圧の破断伸びはデータの分布がほぼ完全に重複していることから、上述の引張強度や0.2%耐力と同様に概ね同等であると言える。

以上の結果から、引張特性の上では多段増圧の効果は認められなかったが、本試験結果はいずれもAC4CHを用いて得られる鑄物の引張特性としては最良に近いレベルであることから、本ハイマウントナックル鑄造においては、30MPaのメタル圧付加にて十分な品質が得られることが検証されたと言える。なお、これらの結果に基づき、Mg含有量や人工時効処理条件を調整することで、自動車足回り部品としての要求仕様

に適合する特性、例えば、高延性や高疲労強度を導き出すことが可能であると考えられる。

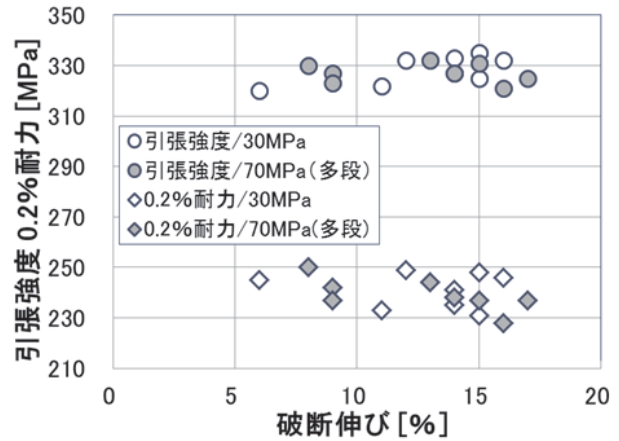
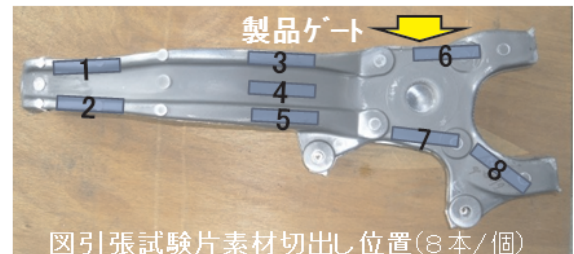


図12 引張試験結果



図引張試験片素材切出し位置(8本/個)

図13 サンプル切出し位置及び引張試験片

5. まとめ

低圧鑄造にダイカストのビスケット加圧機構を組込んだ新しい鑄造プロセスを量産向け設備として具現化し、厚肉の足廻り部品であるハイマウントナックル型を搭載して種々の鑄造テストを実施した。得られた知見は以下のとおり。

- (1) 本プロセスの精密ガス加圧制御、センターピン加圧、部分加圧の最適制御にてエア巻きみや引け巢の無い健全な厚肉足廻り部品を鑄造することが可能である。なお、本ハイマウントナックルの連続鑄造において、30MPaのセンターピン加圧を行うことで良好な品質が得られることが判った。
- (2) 本プロセスでは、溶湯の温度低下が抑制されると共に、金型内に導入された溶湯がセンターピンや部分加圧ピンの作用によって型表面に圧着されることから、鑄物表層は急冷凝固による微細組織となる。

(3)各部位より切出した試験片の引張特性はAC4CH合金を用いて得られる鋳物として良好なレベルを示した。

参考文献

- 1) 佐々木寛人,石橋直樹,明本晴生,釧祐一郎
:2010 日本ダイカスト会議論文集(2010),89-95
- 2) 登録商標 第5725474号
- 3) 三吉,明本,山下,中嶋,佐々木
:2014 日本ダイカスト会議論文集(2014),61-67
- 4) 佐々木寛人:素形材(2015),vol56,No.3,9-14
- 5) 佐々木寛人:アルトピア(2015),11月号
- 6) 佐々木寛人:型技術(2016),3月号