

# ハイブリッド・フィル・キャストイングにて鑄造した ハイマウントナックルのマイクロ組織と機械的性質

佐々木 寛人

宇部興産機械(株)

投影面積の大きな部品をシンプルかつコンパクトなマシンで鑄造する為、低圧鑄造とダイカストの双方の特徴を合わせ持つハイブリッドフィルキャストイング（HFC）工法を開発した。このプロセスは重力鑄造、低圧鑄造やスクイズ鑄造で製造されている厚肉強度部品、耐圧部品への適用が可能、かつ、生産性や内部品質における優位性が示されている。本報告では、HFC 鑄造設備の概略とそれによって得られたハイマウントナックル鑄造サンプルの健全性、マイクロ組織や機械的性質を紹介する。

## 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<sup>1)</sup>。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鑄造に軸足を移し、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鑄造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 Casting<sup>2),3),4),5),6)</sup>（ハイブリッド・フィル・キャストイング）、略してHFCプロセスと名づけた。本稿では、このプロセスを量産システムとして具現化した全自動鑄造設備<sup>7)</sup>にて連続鑄造した自動車足回り部品のハイマウントナックルの健全性、各部のマイクロ組織、鑄造サンプルの各所から切出した小片の引張特性および疲労強度について報告するとともに、本工法による足廻り部品の軽量化の可能性について検討した。

## 2. HFC 鑄造設備及びプロセスの概要

### 2.1 HFC 鑄造プロセスの概略

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。

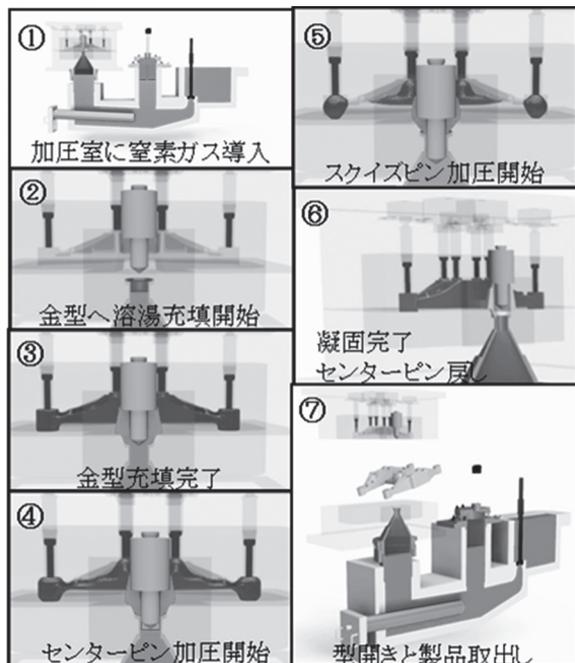


図1 HFCプロセスの概要

## 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

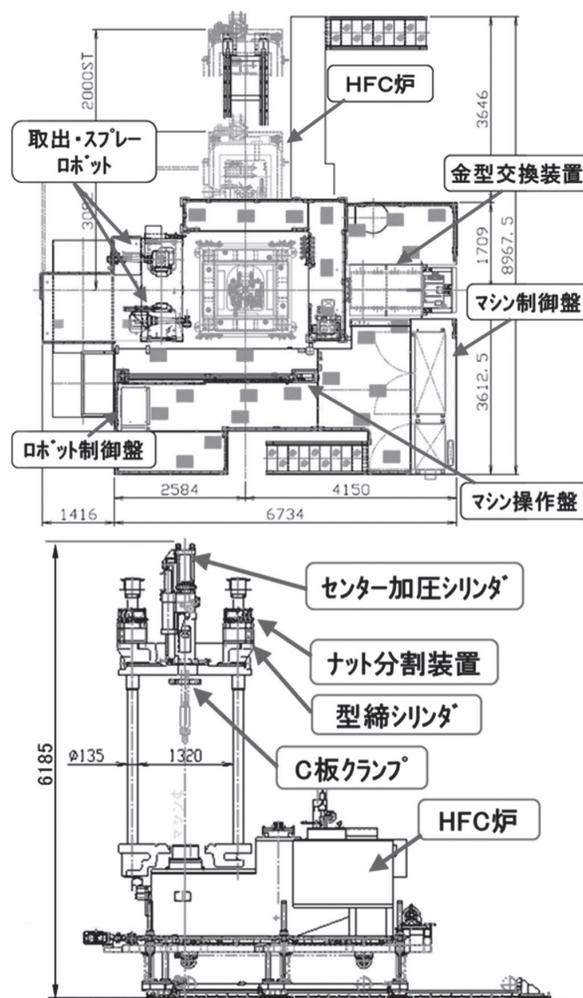


図2 HFC鑄造設備

プリング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。

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、本鑄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。

表1 HFC 鑄造設備の主仕様

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

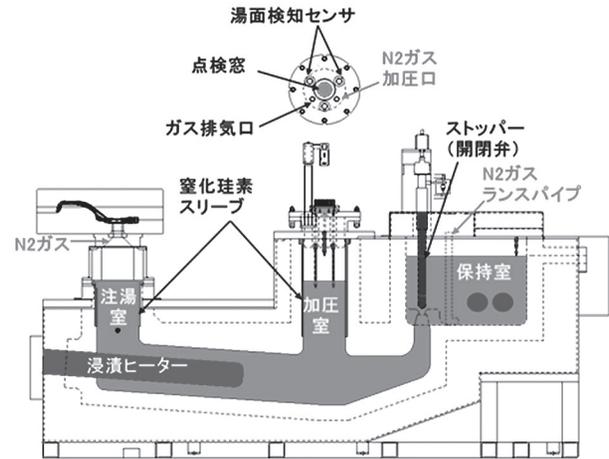


図3 HFC炉

### 3. ハイマウントナックルの鑄造

#### 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個取りキャビティ鑄造品の外形寸法は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939cm<sup>2</sup>、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、湯溜りを含む全鑄込み重量は6.0kgとなっている(製品歩留り約83%)。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。

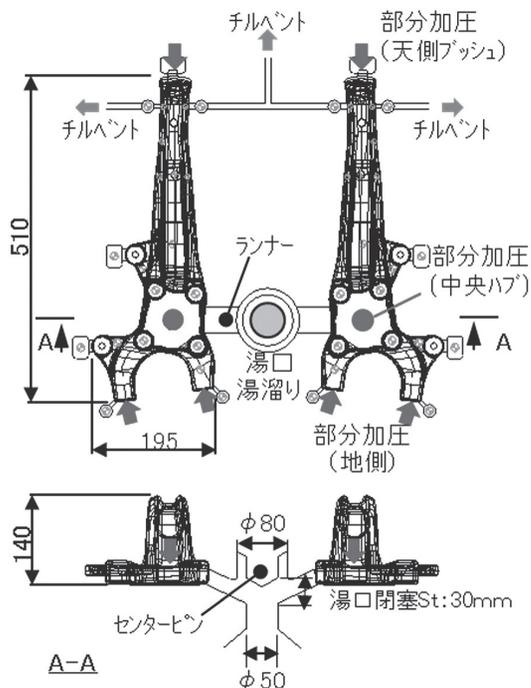


図4 ハイマウントナックル金型キャビティ図

#### 3.2 鑄造条件

##### 3.2.1 合金および金型離型剤

ハイマウントナックルの鑄造には市販の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鑄造を行った。金型離型剤には株MORESCO社製のグラフェースGT-200を希釈率30倍で使用した。

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 |

##### 3.2.2 金型温度制御

金型温度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、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 $200^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ 、下型は $250^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ の範囲で安定した。

### 3. 2. 3 ガス加圧制御

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。

### 3. 2. 4 センターピン加圧制御

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

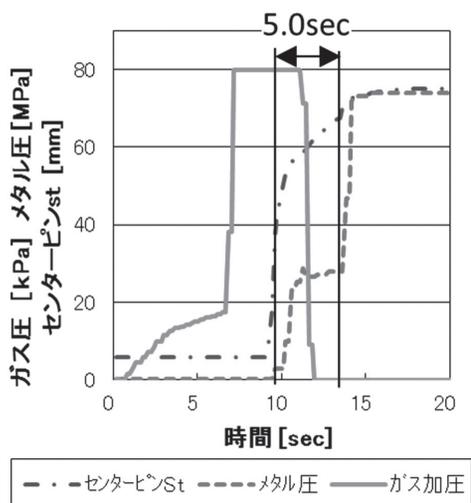


図5 2段加圧による鋳造波形

油圧を調整した。なお、付加するメタル圧については、2段階の増圧を行うことで理論上の限界メタル圧、即ち、金型キャビティ部の全投影面積(939 $\text{cm}^2$ )と本鋳造設備の型締力(315ton)から算出される最大メタル圧(30MPa)よりも大きなメタル圧付加を実現している。具体的には、1段階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が増大する一定時間の遅延の後、1段階の倍以上圧力の70MPaにて2段階の加圧を行った。こうすることで限界メタル圧以上の圧力付加においてもバリの発生を抑制した連続鋳造が可能となっている。なお、上記遅延時間は時間を種々に変更して鋳造を行った予備テストから、バリが発生しない最短遅延時間である5.0秒を得ている。図5に2段階加圧に到る遅延時間を5.0秒とした際の鋳造波形を示す。

### 3. 2. 5 部分加圧制御

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1.5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。なお、ハイマウントナックルの連続鋳造において、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55秒を含めた全体の鋳造サイクルは約145秒となっている。

## 4. 鋳造テスト結果

### 4. 1 鋳造サンプルの外観

図6に上述のガス加圧、センターピン2段階増圧ならびに部分加圧にて得られたサンプルの外観を示す。湯溜り、ランナー部のみならず製品全体に黒鉛系離型剤が転写された黒々とした外観となっており、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態を示している。

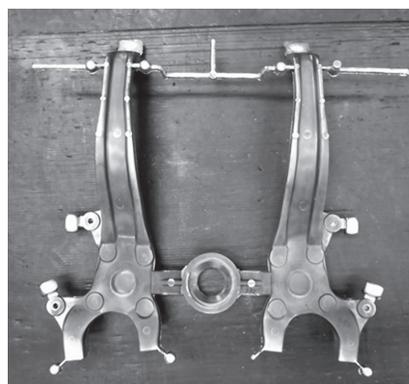


図6 鋳造サンプルの外観

## 4.2 内部巣

図7に上述のサンプルの内部巣の状況をX線にて確認した結果を示す。厚肉部位となるハブやその近傍のアーム部の付け根、アーム先端の天側ブッシュ付け根さらに最大肉厚部となるハブ下方の二股部先端の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、巣の無い健全な鋳物が得られるのは、センターピンによるメタル圧の効果的付加に加えて、精密レギュレータを介したガス加圧制御や複数個所の部分加圧条件の最適化によるものと言える。

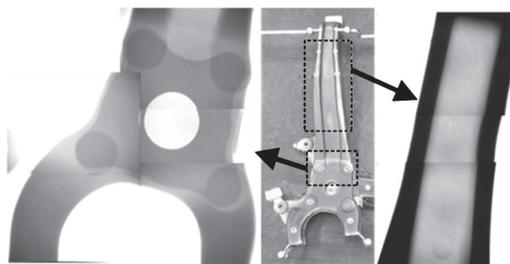


図7 内部巣の状況

## 4.3 ミクロ組織

図8に上述のサンプルの各部、PartAからPartEの5箇所の断面における下型側表層のミクロ組織を示す。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10~16 $\mu\text{m}$ の値を示し、重力鋳造や低圧鋳造では得られない細かさとなっていることが判る。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。

## 4.4 酸化物の巻き込み状況

図9に上述と同一鋳造条件にて得られたサンプルにおいて、酸化物やその他の介在物の混入有無を調べる為に、サンプルの数箇所に浅いノッチを入れて強制破断し露出させた破面の観察結果を示す。いずれの破面にも肉眼で確認できるサイズの酸化物や異物は認められていない。これは本プロセスにおいては、酸化が抑制された清浄な溶湯が金型に供給される効果の一例と言える。

## 4.5 鋳造サンプルの引張特性

図10に上述の条件で得られた鋳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。

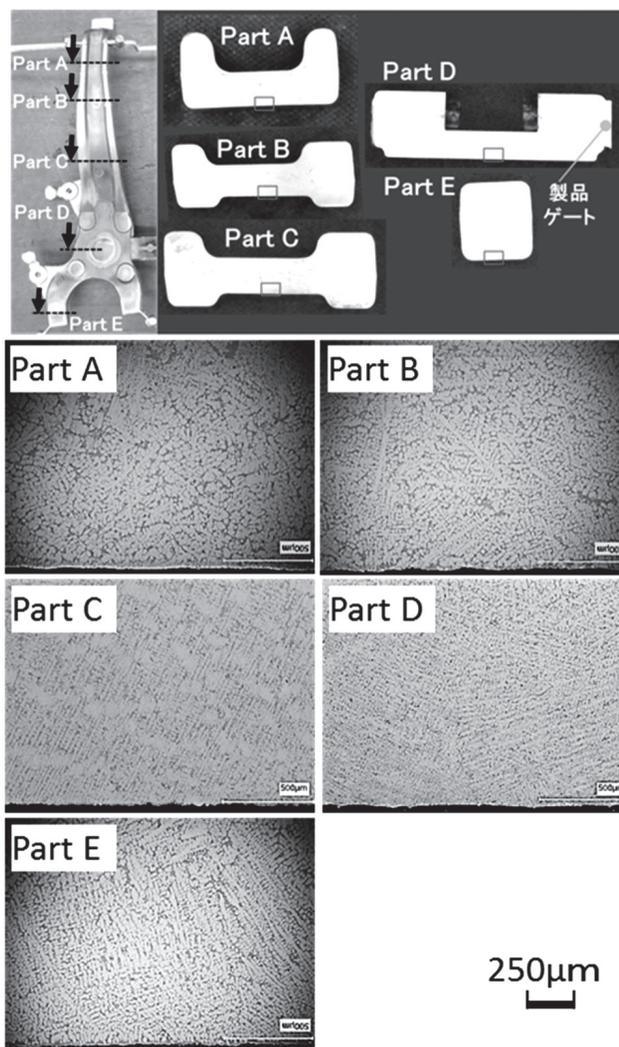


図8 表層ミクロ組織 (下型側)

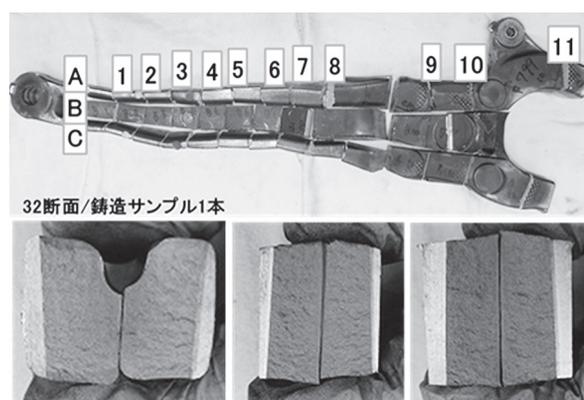


図9 酸化物調査結果

引張試験は鋳造サンプルのアームならびにハブ取付け部より鋳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11)。その際の熱処理条件は530 $^{\circ}\text{C}$ で3.0時間の溶体化処理の後水焼入れし、引続き160 $^{\circ}\text{C}$ で3.0時間の人工時効処理を行うT6処理とした。

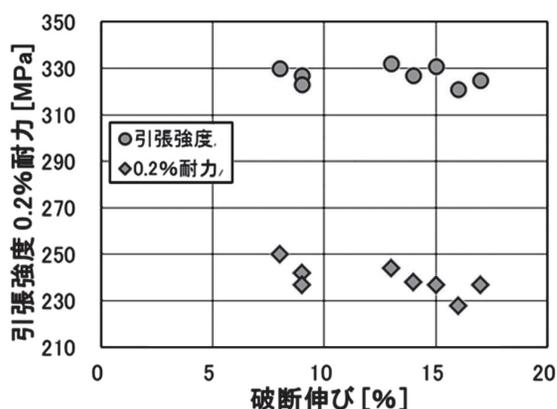
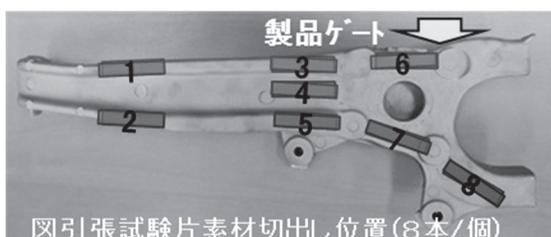


図10 引張試験結果



図引張試験片素材切出し位置(8本/個)

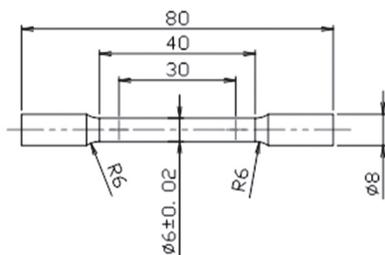


図11 サンプル切出し位置及び引張試験片



試験片採取箇所

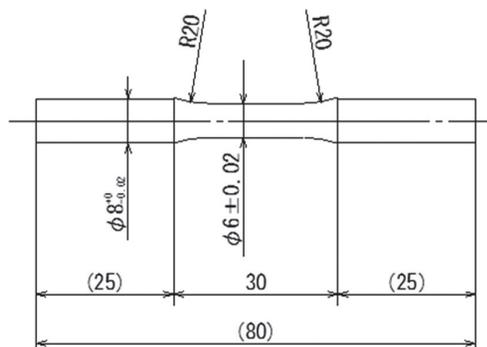


図12 サンプル切出し位置及び疲労試験片

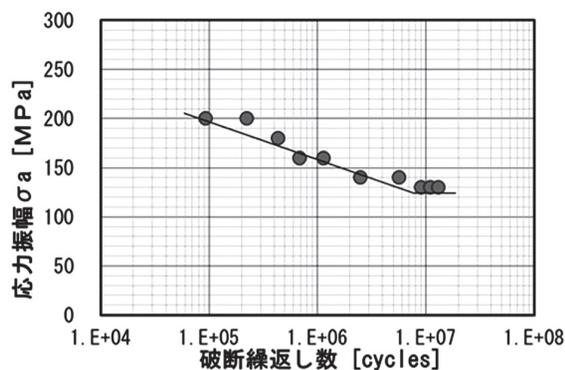


図13 疲労試験結果

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8%が確保されている。

#### 4.6 鋳造サンプルの疲労強度

疲労強度は、鋳造サンプルのハブ取付け部周辺のアーム縁部より鋳造サンプル一体につき4本(上型側および下型側各1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(図12)、回転曲げ疲労試験にて求めた。図13に、本試験にて得られた応力振幅と繰返し数の関係を示す。疲労強度は120MPa以上を示しており、上述の引張特性と同様にAC4CH合金鋳物の特性としては最良に近いレベルであることが分かる。

図14に応力振幅120MPaにて繰返し数 $10^7$ 回をクリアした疲労試験片平行部中央断面のマイクロ組織を示す。マイクロシュリンケージ、酸化物巻込み等の鋳造欠陥は認められず、前述の表層部より若干粗い

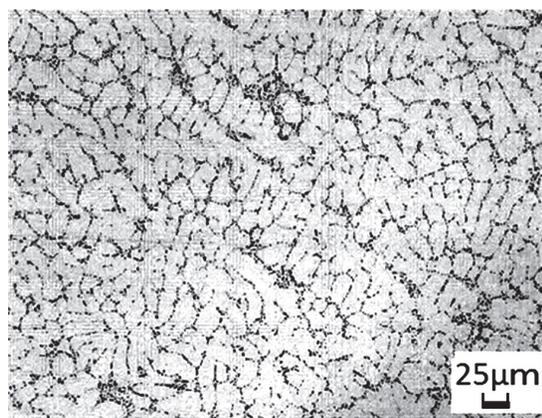


図14 疲労試験後の試験片中央部のマイクロ組織

ものの、微細なデンドライト組織を呈している。また、それらのデンドライト間隙に晶出した共晶Siも熱処理によって微細粒状に改質されている。 $\alpha$ 相デンドライトのみならず、共晶Siが微細粒子形態となるのは本プロセスにおける急速凝固によるものと考えられ、回転曲げ疲労試験で示された高い疲労強度は、

マイクロシュリンケージや酸化物巻込みが無いことに加えて、上述の微細な凝固組織により導き出されたものと推察される。

以上の結果、即ち、本工法ではスクイズ鑄造を始

めとする他の工法では得られない高いレベルで安定した引張特性と疲労強度が実現されることから、ナックルを始めとする足廻り部品の軽量化への貢献が期待される。

## 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み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込みや引け巣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。

(2) センターピン加圧において2段階増圧制御を行うことで、金型キャビティ部の全投影面積と型締力から算出される限界メタル圧よりも大きなメタル圧付加が可能となる。

(3) 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。

(4) 各部位より切出した試験片の引張特性、疲労強度は AC4CH 合金を用いて得られる鑄物として良好

な値を示した。これは、マイクロ収縮巣、酸化物の巻込みなどの鑄造欠陥が少ないことに加えて、本プロセスにて得られる微細な凝固組織により導きだされたものと推察される。

(5) 本工法で得られる素材は、スクイズ鑄造を始めとする他の工法では得られない高いレベルで安定した機械的性質を示すことから、今後、足廻り部品等の軽量化に貢献することが期待される。

### 参考文献

- 1) 佐々木寛人, 石橋直樹, 明本晴生, 鍛祐一郎: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
- 7) 三吉, 服部, 明本, 山下, 佐々木:2016 日本ダイカスト会議論文集 (2016), 125-132