

大型ボディ・シャシー部材ダイカストにおける短時間充填の有効性

佐々木 寛 人

UBEマシナリー(株)

薄肉化に加えて投影面積も増大する傾向にあるボディ・シャシーダイカスト部材は、鑄造欠陥の抑制は当然のことながら、均一微細な凝固組織を得る為に金型キャビティへのアルミ溶湯充填時間を短縮化することが重要である。本報告では短時間充填がボディ・シャシーダイカスト部材の諸特性に及ぼす有効性とそれを具現化する為に開発した新射出機構について解説する。

1. はじめに

カーボンニュートラル社会の実現を目指し自動車のEV化、電動化が急拡大するなか、これまでは主として鉄板プレスの溶接で構成されていたボディ・シャシー（以後、BCと略す）部材は、軽量化とコスト削減の観点から薄肉かつ3次元複雑形状を得意とするアルミダイカストによる材料、プロセスシフトと複数部品統合による超大型化が進行している。薄肉化に加えて投影面積も増大する傾向にある当該部材においては、鑄造欠陥を抑制する為に充填時間をより一層短縮化することが求められる（図1）。当社は、そのような要件を満たし、高品質なBC部材ダイカスト製造に資する技術として、独自のスリーブ真空技術¹⁾や高充填力射出装置の開発に取り組んできた²⁾。前者については、当社試験設備の超高速射出仕様のUH1250ダイカストマシンに、図2に示す自社デザインのショックタワー金型を搭載した要

素テストにて、当該技術が高真空ダイカストの安定稼働とガス量低減に資するものであることを実証している。一方、後者については、上述の設備と金型を用いた種々の鑄造条件で得られたサンプルの機械的性質やマイクロ組織に加えて、鋼板とのSPR (self-piercing rivet) 接合性を検証することで、アルミ溶湯の金型への充填時間短縮化が、BC部材の高品質化に寄与することを実証した。そして、その結果に鑑み、さらなる短時間充填を実現する射出装置、Extreme Shot（以後、ESと略す）の開発に至っている。

本報では、上述のショックタワーサンプルの品質や諸特性に及ぼす充填時間短縮化の有効性、新開発した射出装置、Extreme Shotの詳細と性能検証結果の一例について報告する。

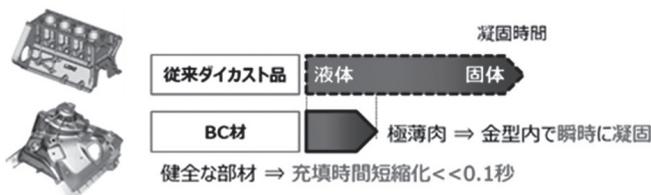


図1 BC材の特徴

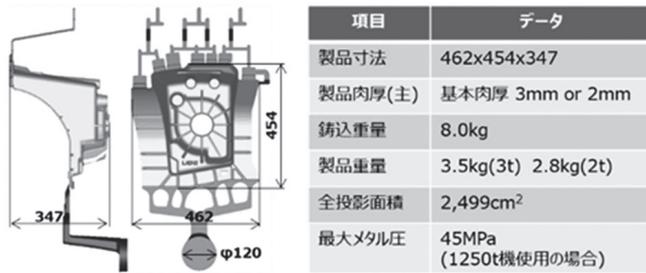


図2 ショックタワーモデル(当社オリジナルデザイン)

2. 短時間充填が BC 部材の諸特性に及ぼす影響

2.1 ショックタワー T7 処理材の引張特性

図3に、基本肉厚が3mmとなるようにキャビティ入れ子を調整した前述のショックタワー試験金型を当社のUH1250ダイカストマシンに搭載し、欧州でBC部材ダイカストに多用されているアルミニウム合金、Silafont-36を用いて得られたサンプルの各所より採取した試験片の引張強度と破断伸びを製品部充填時間に対してプロットした結果を示す。なお、引張試験片は、鋳造後にT7熱処理を施したショックタワーサンプルの各所から切り出した素材に機械加工を施して作製した。ここで、製品部充填時間とは、スリーブ内のアルミ溶湯がゲートを通り製品部に流入し始めるタイミングから金型キャビティ全体を溶湯が満たし、さらに、増圧工程に移行して鋳造圧力が30MPaに到達する迄の時間と定義した。したが、図3の横軸の充填時間は、射出条件毎にモニターに表示される射出波形を上述の定義に基づいて読み取った値である。

引張強度は、製品部充填時間によらず200～220MPaの一定範囲に収まるのに対し、破断伸びは製品部充填時間が短くなるほど下限値が改善され、ばらつきが収束する。即ち、このショックタワーサンプルの場合、BC部材ダイカストの一般要件とされる破断伸び10%以上を満たすには、製品部充填時間を70ms以下にする必要があることが分かる。

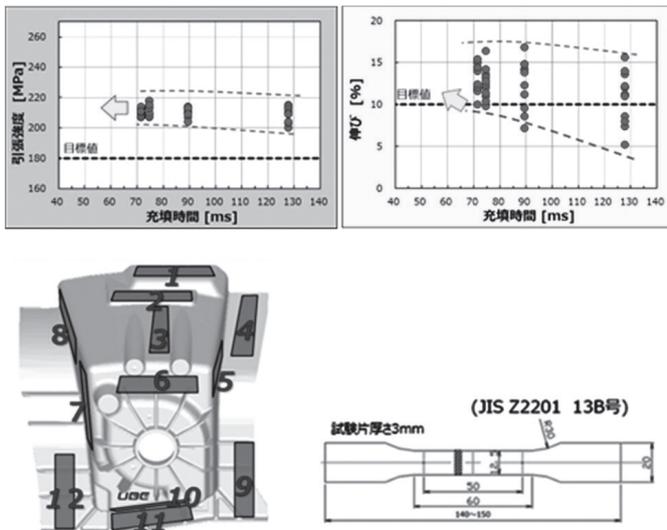


図3 ショックタワーサンプルの引張特性

2.2 ショックタワーのマイクロ組織

図4に、製品部充填時間がショックタワーサンプルのマイクロ組織に及ぼす影響を明らかにする為、

サンプル各所の断面のマイクロ組織を観察した結果を示す。観察箇所は図中に記したNo.1からNo.8の番号に対応している。

図4(a)は、射出速度設定1m/s、図4(b)は同7m/sで鋳造したサンプルであり、前述の定義で求めた製品部充填時間はそれぞれ230ms、72msである。いずれのサンプルも、製品天側付近(No.1およびNo.3)では初晶 α 相の組織は細かく、中央部からゲート側に近づくほど組織が粗くなる傾向が認められるが、その粗大化の度合いや諸組織因子の容態は両者で大きく異なる。即ち、製品部充填時間230msのサンプルの製品ゲート側のマイクロ組織(No.7およびNo.8)には、粗大なデンドライトや花卉状の初晶 α 相が認められ、さらに、それらの間隙には、共晶Siのマイクロ偏析が生じている。一方、製品部充填時間が72msのサンプルの初晶 α 相の形態は、製品全域に渡り微細な等軸晶組織を呈しており、前述の α 相組織間隙に認められる共晶Siのマイクロ偏析も軽微である。このように、製品部充填時間の違いによってマイクロ組織に差異が生じるのは、前者(230ms)では、金型キャビティ内をアルミ溶湯が流動しながら初晶 α 相が成長するのに対し、後者(72ms)では、初晶 α 相の晶出、あるいは晶出した粒子が成長する前に充填が完了し、増圧工程で伝播する高圧の鋳造圧力下で急速凝固する為と考えられる。なお、製品部充填時間230msのサンプルの製品ゲート側のマイクロ組織(No.7およびNo.8)における初晶 α 相粒子のサイズは、製品部充填時間が72msのそれに比べてかなり粗大化していることから、金型キャビティ内

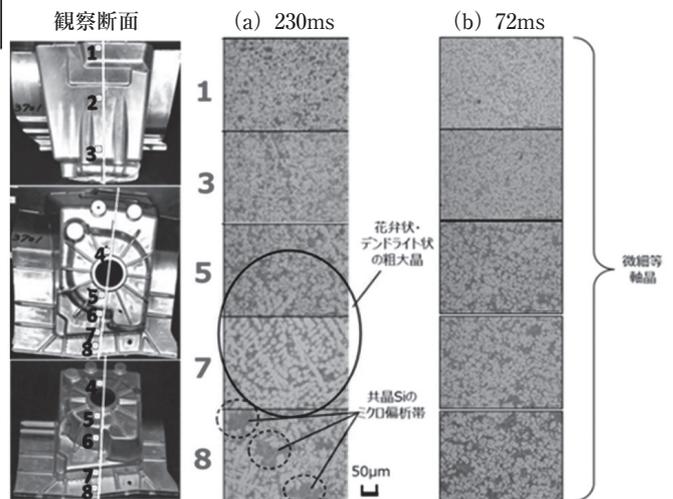


図4 ショックタワーサンプルのマイクロ組織 (基本肉厚 3mm Silafont-36)

をアルミ溶湯が流動する時間が長いことに加えて、スリーブ内の溶湯が金型キャビティに移送されるまでの時間、即ち、スリーブ内に滞留する間に溶湯温度が低下することで初晶 α 相が晶出し、それらが成長した可能性が考えられる。前述の引張特性において、製品部充填時間が長いほど破断伸びの下限値が低下しばらつきが大きくなるのは、初晶 α 相粒子が粗大化したことにより、延性に乏しい共晶Siのマイクロ偏析が生じることも原因の一つとして考えられる。このように、高速射出による短時間充填は、アルミ溶湯が速やかにキャビティに充填され増圧工程に移行することに加えて、スリーブ内のアルミ溶湯を速やかに金型キャビティへ払い出すことにも繋がることから、均一微細な凝固組織を得るうえで重要な因子であると言える。さらなる製品部充填時間の短縮化がどれほど破断伸びの向上に寄与するかは不明であるが、上述の結果はその可能性を示唆するものと言える。

2.3 ショックタワー F 材の SPR 接合性

図5に、ショックタワーサンプル端部より切り出した板材と鋼板とをSPR接合したテストピースの外観を示す^{※1}。ダイカスト素材のSPR接合は、通常、T7処理等の熱処理を施したうえでなされるが、ここに示すテストピースのダイカスト素材はF材（非熱処理材）である。それにも拘わらず接合部のアルミ側には割れや成形不足等の不具合は生じておらず、ほぼ健全な状態で接合がなされている。なお、後述するが、T7処理を施したダイカスト素材の接合テスト結果もF材同様健全である。

上述のSPR接合状態を詳しく調べる為にF材およびT7処理ダイカスト素材によるテストピース接合部断面のマイクロ組織観察を実施した。

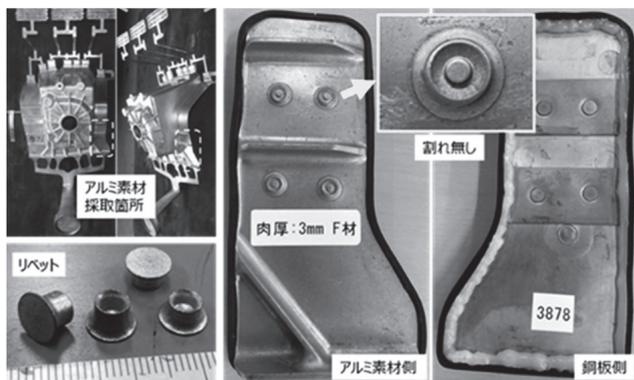
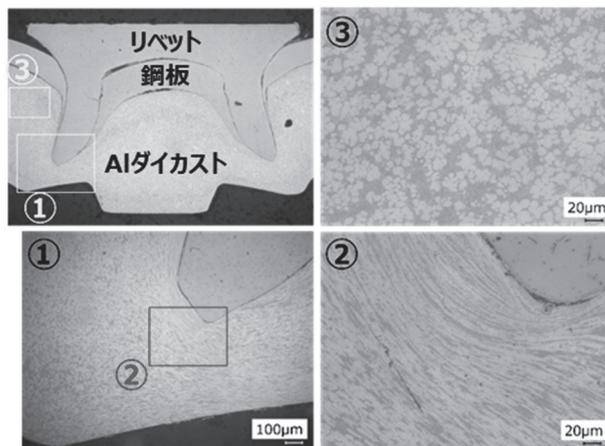


図5 SPR接合テストサンプル外観（基本肉厚3mm）

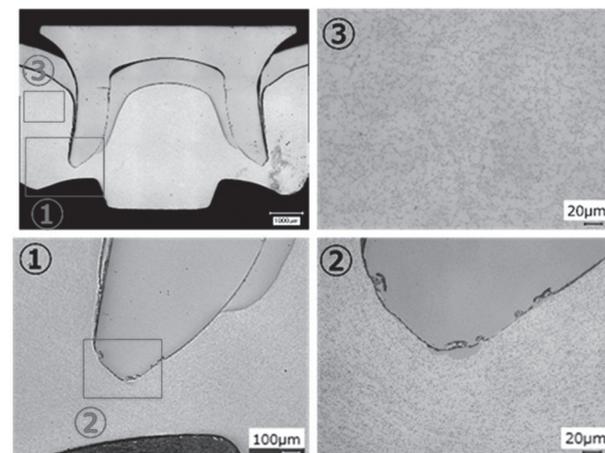
※1 SPR接合テストはベルホフ株式会社（名古屋市中央区丸の内1丁目10番29号）にて実施。

図6(a)に、F材のSPR断面のマイクロ組織を示す。外観が示すとおり組織は健全な状態であり、リベット圧入による不具合は認められない。また、ダイカスト素材は急冷凝固の影響の為か、いずれの部位のマイクロ組織も微細な α 相粒子と共晶Si相で形成されている。但し、リベットの先端領域(②)と、それより十分離れた鋼板に近接する領域(③)とでは組織の様相が異なる。即ち、前者は、リベット圧入によって、 α 相粒子と共晶Si相が局所的に引き延ばされると共に、それらがともに塑性流動していることが分かる。このように、通常、Al-Si系ダイカスト素材の破壊の起点となり得る共晶Si相において、破壊や剥離が生じることなく強制的な局部変形に追従出来ているのは、ダイカスト素材の組織、特に共晶Si相が極微細である為と考えられる。

一方、T7処理材において[図6(b)]、リベット先端領域(②)と、それより十分離れた領域(③)とを比較すると、前者における α 相粒子と共晶Si相は、リベット圧入によって組織が凝縮している状況が認められるが、その様相の違いは前述のF材に比べて



(a) F材



(b) T7処理材

図6 SPR断面のマイクロ組織

遙かに軽微である。これは、T7 処理材は、もともと F 材よりも延性があることから、リベット圧入による塑性変形が局所に集中せずに、均一に分散する為と推察される。

上述の結果は、ダイカスト素材の鑄造過程で金型キャビティ内の溶湯を急冷凝固し、共晶 Si 組織を微細化すれば、非熱処理の F 材であっても、SPR リベット圧入による強制変形に初晶 α 相や共晶 Si 相組織が追従し、健全な接合が可能となることを示唆するものと言える。

2. 4 ショックタワー F 材の引張特性

ごく薄肉の BC ダイカスト部材における F 材（非熱処理状態）の塑性変形能を調査する為、前述のショックタワー金型において、基本肉厚が 2mm となるよう、キャビティ入れ子を調整のうえ、Silafont-36 合金を用いて、UH1250 ダイカストマシンで鑄造したショックタワーサンプルより採取した試験片の引張特性を示す（図 7）。この時の実鑄造速度は当該マシン能力最大の射出速度 5.3m/s であり、その際の製品部充填時間は、前述 2.1 項で記述した定義より 53ms となっている。引張特性は、横軸の破断伸びに対し、縦軸に引張強度、0.2% 耐力をプロットするかたちで整理した。引張強度データに併記した No. は、ショックタワーサンプルからの引張試験片の採取箇所を示している。

0.2% 耐力は、部位によりばらつきがあるが 180MPa を中心に ± 20 MPa の範囲に収まっている。

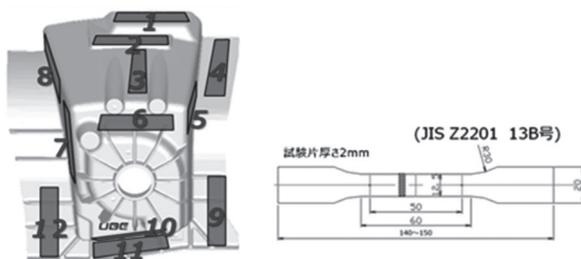
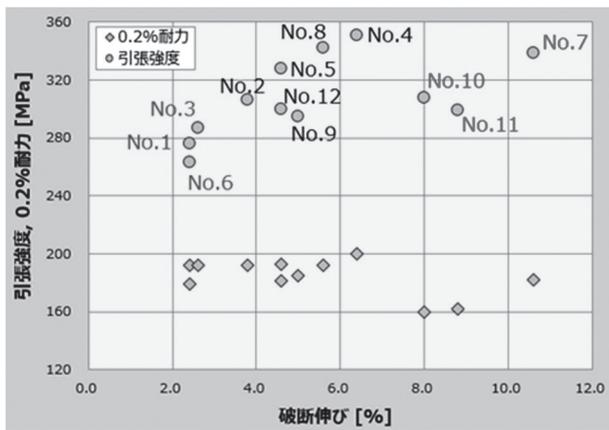
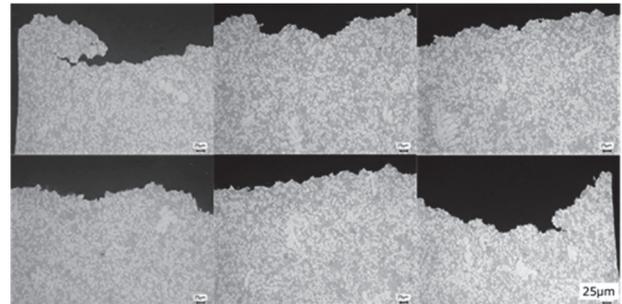


図 7 ショックタワーサンプル (F 材) の引張特性

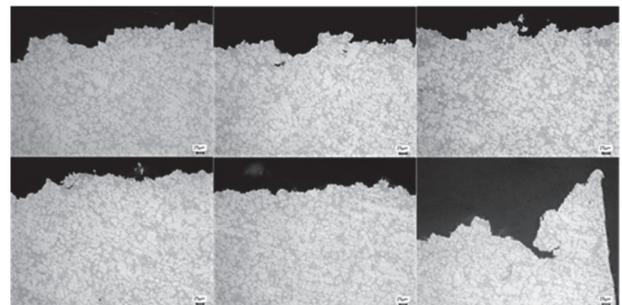
引張強度は天側中央部から採取したテストピース (No.1, No.3, No.6) の値が若干低い、その他の部位は概ね 300MPa 以上の値を示している。一方、破断伸びについては、天側中央部 (No.1, No.2, No.3, No.6) の値が 4.0% 以下と低いのに対し、製品ゲート中央部付近 (No.10, No.11) および製品中央部 (No.7) では、F 材としては大きな値である 8.0% 以上を示し、それ以外の部位では概ねその中間の 4.0% から 8.0% に収まっている。

図 8 (a)、図 8 (b) および図 8 (c) に、上述の 3 つの伸び値区分における引張試験片破断部のマイクロ組織の代表例を示す。ここに示す組織は、破断した板状試験片の幅方向にわたり、両端を含む 6 箇所のマイクロ組織を抽出したものである。

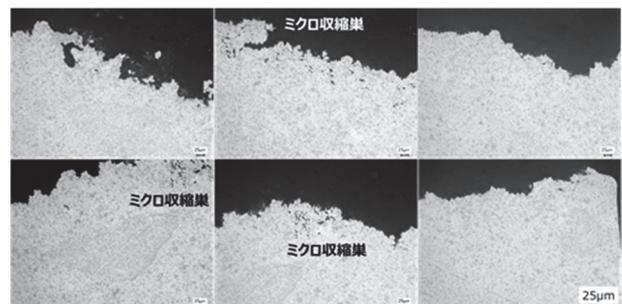
図 8 (a) は、製品中央部より採取し、最も大きな伸び値、10.6% を示した試験片 No.7 の破断部のマイクロ組織である。 α 相はほとんどが微細なセル状を呈



(a) 伸び値：10.6%



(b) 伸び値：8.8%



(c) 伸び値：2.4%

図 8 引張試験片破断部のマイクロ組織

しており、花卉状に成長したデンドライトはごく僅かである。また、その α 相粒子の間隙は共晶Siに富んだ相で埋め尽くされていることから、この付近は液相が潤沢な状態で充填されたことが窺われる。なお、このように共晶Si相がリッチな状態においても10%以上の伸び値が得られているのは、前述2.3項でも考察したとおり、急冷凝固により共晶Si組織がごく微細、かつ、均一に分布している為と推察される。

図8(b)は、製品天側側面より採取し、伸び値8.8%を示した試験片No.11の破断部のマイクロ組織である。共晶Si相の量や分布は上述の試験片No.7とほぼ同様ながら、 α 相粒子はやや成長し花卉状に粗大化したものが所々に認められる。

図8(c)は、製品天側側面より採取し、最も低い伸び値2.4%を示した試験片No.1の破断部のマイクロ組織である。 α 相デンドライトは上述の試験片No.11同様、セル状を呈し、所々に花卉状に粗大化したデンドライトが認められる。但し、共晶Si相については、上述のNo.11と比較してもかなり少なくなっており、所々にマイクロ収縮巣の集合帯も認められる。このことから、試験片No.1の採取位置であるショックタワーの天側中央部において、破断伸びや強度が

とりわけ低下しているのは、液相が枯渇した状態で溶湯の充填がなされたことから、マイクロ収縮巣等の铸造欠陥が生じた為と考えられる。なお、ショックタワー天側中央部において液相が枯渇した状態となるのは、この部位が溶湯の最終充填がなされる部位である為と推察される。

以上の引張試験片破断部のマイクロ組織観察から、亜共晶Al-Si合金系を用いたごく薄肉のBC部材ダイカストにおいて、非熱処理で延性や強度を維持する為には、共晶Si成分からなる液相が潤沢な溶湯の充填がなされることが重要であることが分かる。なお、基本肉厚2mmの本ショックタワーにおいては、上述のとおり、金型キャビティ内を溶湯が流動して天側中央部付近に辿り着く間に液相が枯渇していることから、さらなる短時間充填が必要と言える。

以上のことから、ダイカスト過程の溶湯の急冷凝固を促進することは、BC部材ダイカストへの非熱処理材の適用可能性を拡げると共に、鉄系品出物の微細化による無害化にも寄与し、使用する合金材料のリターン材比率を高めることに繋がるものと考えられる。

3. BC部材ダイカスト用高充填射出装置の開発

3.1 高充填力射出装置のコンセプト

前項の諸実験結果に基づき、当社は、薄肉で投影面積が大きいBC部材ダイカストに適用する射出装置が具備する要件として以下を掲げ、新射出装置、Extreme Shot (ESと略す)を開発した。

- 1) 充填抵抗に打ち克ち終盤まで失速しない充填力
 - 2) 短時間充填を実現する高速射出速度
 - 3) 目標速度に俊敏に到達する加速度
- 上記コンセプトの実現に当たり、当社は、充填力

のみならず射出速度性能にも着目し、双方をバランス良く向上させることが、BC部材ダイカストの実铸造における射出速度域におけるマシンラインの充填余力の合理的な拡張に繋がるものと考えた(図9)。そして、その考えに基づき、前述の当社試験設備であるUH1250に、充填用アキュムレーター(以下、ACCと略す)の高圧化と容量増大、多量の作動油を瞬時に流す為のマニホールド管径の拡張、応答性を改良した新型の射出速度制御バルブ(新型HS-

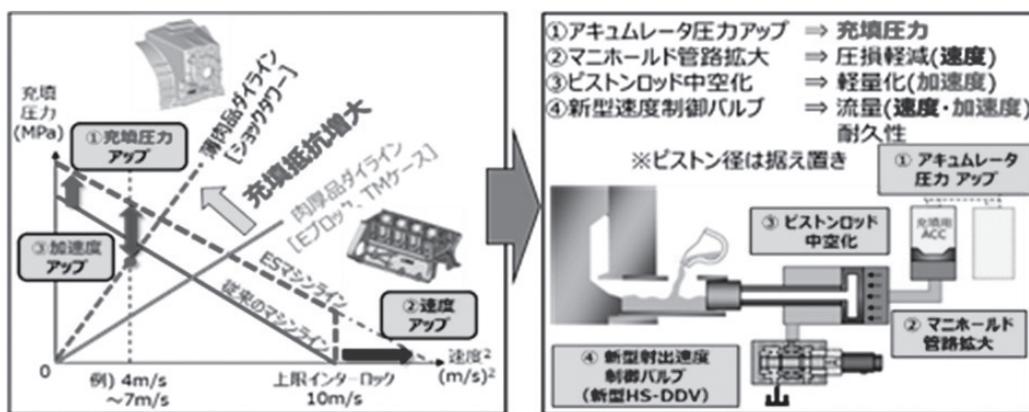


図9 Extreme Shot 開発コンセプトと具現化手段

DDV) を搭載する等の改造を施した。

3. 2 Extreme Shot のマシン能力線図

図 10 に、上述の新射出装置 ES と、当社の標準仕様である iV 射出を比較するために、それぞれのマシン能力を示す PQ2 線図を 2250t 機ベースで重ねたものを示す。iV 射出の上位型式である L 射出（ casting 圧力が最大）と ES のそれを比較すると、縦軸の充填力については、ES は従来比約 1.3 倍、一方、横軸の射出速度（2 乗値で記載）については、速度制御範囲は従来相当の 10m/s^{*2} ながら、ポテンシャルとしては 1.5 倍の 15m/s を実現している。上述の能増範囲、即ち、当社標準の iV 射出に対する ES のマシン能力の差異は黄色のハッチング領域となる。一方、緑破線および実線、青実線は日欧他社ダイカストマシンメーカーのハイエンド機の PQ2 線図を示すが、ES の仕様はそれらを上回ることから、本射出装置は業界最高水準の充填力を有していると言える。これは、本装置が充填力と速度の双方をバランスよく増大したことで達成された結果であり、この ES を BC 部材ダイカストに適用することで、さらなる短時間充填が実現されることが期待できる。

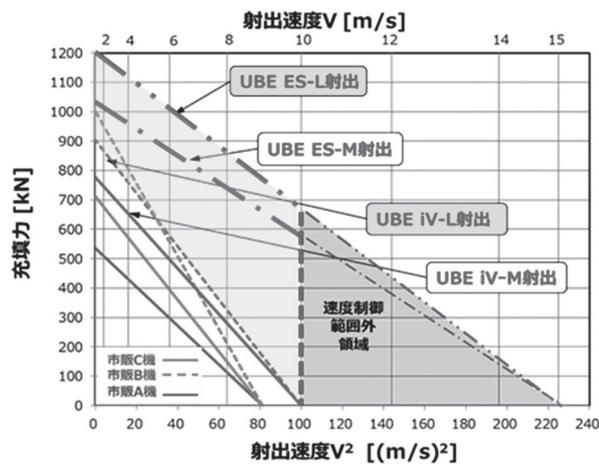


図 10 Extreme Shot の PQ2 線図 (2250t 機ベース)

※ 2 実铸造において、実測 10m/s 以上の射出速度を使用する可能性は低いと考え、射出速度制御上の上限は従来と同一の 10m/s とした。

3. 3 Extreme Shot の性能検証結果

図 11 に、当社試験設備の UH1250 ダイカストマシンの空打ち（ドライショット）における射出性能検証結果、ならびに、このマシンに基本肉厚を 2mm に変更したショックタワー金型を搭載して得られた実铸造時の射出速度波形を改造前後で比較したものを示す。

ES の空打ちにおける最大射出速度は 15.6m/s、最大加速度は 124G であり、改造前の最高射出速度、最大加速度 11.7m/s、92G より大きく向上している。ここで、最高加速度とは低速速度から高速速度に立ち上がる区間における射出速度波形の勾配の最大値である。一方、実铸造においては、改造前の最大射出速度は 5.2m/s、加速度は 51G であるのに対し、改造後の最大射出速度、加速度はそれぞれ、7.2m/s、88G となり、最大値はドライショットより低下するものの、ES に改造したことで、マシン性能が大幅に向上していることが示された。但し、ここに示す結果は、空打ち、実铸造ともに、マシンの最大ポテンシャルを比較した結果、即ち、射出速度設定において、速度の向上が認められなくなるまで設定値を増大して得られた結果である。一方、加速度については、射出速度設定が小さい範囲では（例えばこの金型では 5m/s 以下）、改造前後の差異は小さく、射出速度が増大するほど ES の加速度優位性が顕著となる傾向が確認されている。

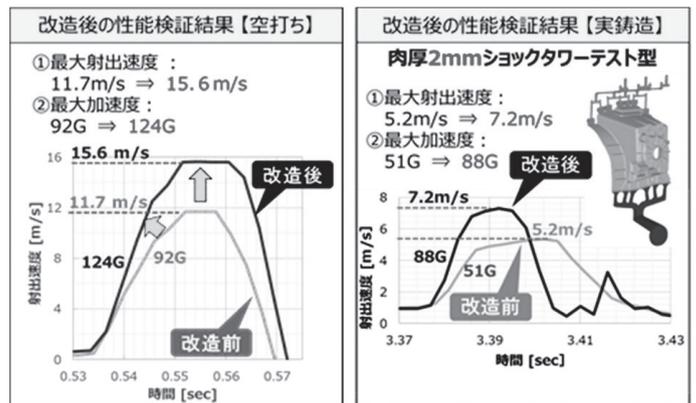


図 11 Extreme Shot の射出性能検証結果

4. まとめ

薄肉で投影面積の大きいショックタワー型を超高速度仕様のダイカストマシンに搭載したテストを実施することで得られた知見、ならびに、それらの結果より導出された BC 部材ダイカストマシンが具備すべき要件を以下に示す。

- (1) 薄肉で投影面積の大きい BC 部材においては、製品部充填時間が短縮されるほどマイクロ組織は均一微細になり、機械的性質、特に、伸び値が高位安定化する。

- (2) 製品部充填時間短縮化によるダイカスト過程の溶湯の急冷凝固をさらに促進することは、BC部材への非熱処理ダイカスト素材の適用可能性の拡大に繋がるものと考えられる。
- (3) 製品部短時間充填を実現する為には高充填力を具備した射出装置が有効であり、当社の新射出機構 Extreme Shot は従来よりも目標速度に速やかに到達し、短時間充填に寄与することが期待できる。

5. 今後の展開

今回紹介した当社の新射出機構 Extreme Shot は、薄肉あるいはリブ構造の BC 部材のみならず、厚肉と薄肉が混在する EV や HV 向けの大型ダイカスト部品、例えば、バッテリーケースの短時間充填を実現する手段として有効と考える。今後、これらのダイカスト品の品質に及ぼす効果を見極めながら、必要なスペックを明確にし、市販機に反映していくと共に、特に、複数部品の統合による一体型超大型ダイカストの良品率向上や高品質化、材料、製造コスト低減に繋がる技術としてこの ES を確立していく所存である。

参考文献

- 1) 村上, 田中, 小江, 釧, 石橋: 2018 日本ダイカスト会議論文集 (2018), P201-208
- 2) 小江, 西, 大西, 釧, 宮本, 田中, 石橋, 村上, 佐々木: 2022 日本ダイカスト会議論文集 (2022), P153-157