

自動車用大型構造部材のダイカスト鑄造技術 スリーブ真空技術の適用

石橋直樹

宇部興産機械(株)

自動車用大型構造部材の代表製品であるショックタワーに関し、新開発のスリーブ真空技術を適用し、充填時間、昇圧時間、鑄造圧力が溶湯圧力に及ぼす影響や、製品のガス量、機械的性質を調査したので紹介する。

1. はじめに

近年の環境規制強化にて、自動車業界も厳しい排ガス規制が求められ、燃費向上のための軽量化が急務となった。このため、従来の駆動系のアルミ化だけでなく、自動車重量の約1/4を占める車体構造部のアルミ化、マルチマテリアル化が進展している。このような背景から、リブ構造の複雑形状や複数部品の一体化が可能なダイカストが、自動車用大型構造部材の量産工

法として採用される機会が急増している。

そこで、本稿では自動車用大型構造部材の代表的な製品であり、今後も採用拡大が予測されるショックタワーに着目し、新開発のスリーブ真空技術を適用し、充填時間、昇圧時間、鑄造圧力が溶湯圧力に及ぼす影響や、製品のガス量、機械的性質を調査したので紹介する。

2. 構造部材に必要なダイカスト鑄造技術

構造部材は、従来ダイカストと比較し、投影面積が大きく、軽量で、かつ、薄肉であるという特徴がある。従って、高速区間や凝固時間が非常に短く、構造部材のダイカストには、短時間充填や短時間昇圧がキー技術¹⁾となる。さらに、短時間充填時のガス巻き込みを防止し、構造部材の要求特性である高強度・高延性、熱処理性を満たすためには、高真空技術が不可欠である。図1に上記内容を模式的にまとめる。

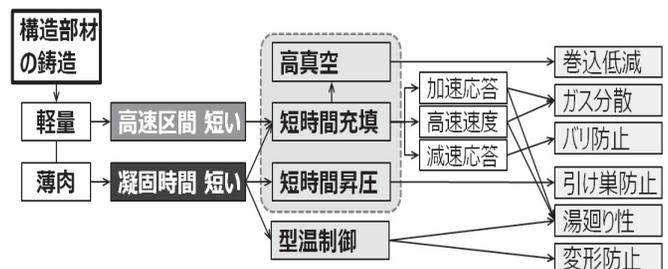


図1 構造部材に必要なダイカスト鑄造技術

3. 実験設備について

3.1 鑄造機仕様

実験に用いた鑄造機は、2プラテンハイブリッド

式の超高速ダイカストマシン UH1250 である。表1にその仕様をまとめる。

表1 UH1250Tの仕様

項目	仕様
型締力	12,258 kN
射出力 (公称)	471 ~ 1,040 kN
射出速度 (空打ち)	最大 10 m/s

3.2 金型仕様

図2に、今回製作した当社オリジナル形状のショックタワーモデルを示す。本モデルは、実際に自動車に搭載されているショックタワーと同等サイズ (W462×H454×D347mm) であり、製品肉厚 3.0mm、鑄込重量 8.0kg、製品重量 3.5kg と設定した。スリーブ径はφ120mmを採用し、ゲート比は13.2、射出開始時のスリーブ充填率は33%である。全投影面積は2,499cm²となり、UH1250の型締力とバランスする最大許容鑄造圧力は、50MPa (安全率=1) である。

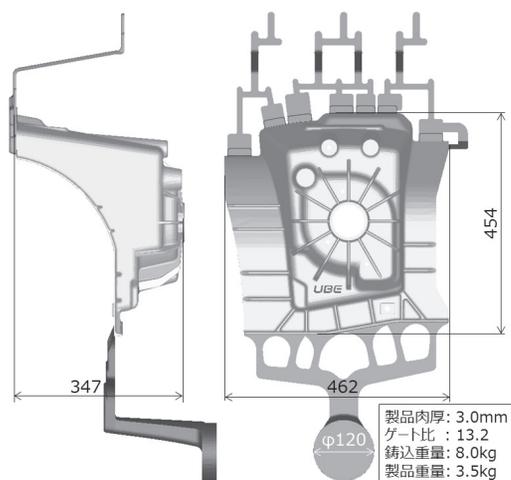


図2 ショックタワーモデル

本金型は図3に示すように、溶湯圧力を4箇所 (天側、中央、地側、ランナー)、金型表面から25mm深さに型内熱電対を4箇所 (固定 / 可動、各2箇所)、ドライ運転時にキャビティ内の真空度を計測するポイントを2箇所 (キャビティとランナー、実鑄造時

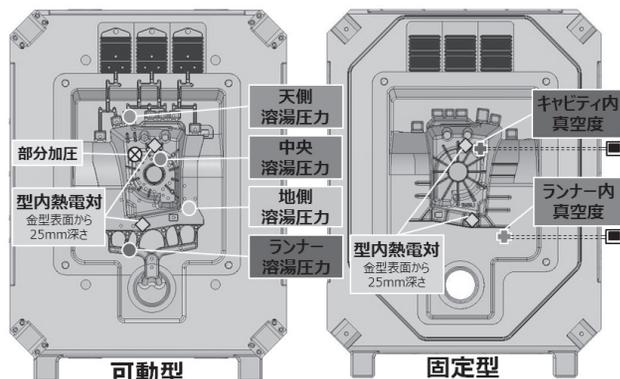


図3 金型のセンサー配置

には栓をする) 設け、厚肉部に部分加圧を1箇所設置した。溶湯圧力は、押出ピンを介して計測する方法もあるが、本稿では、溶湯圧力の直接測定が出来るように、ダイアフラム式の圧力センサー (耐熱600℃、圧力レンジ100MPa) を採用した。

3.3 真空装置仕様

金型からの減圧は、図3に示すチルベント (0.5t×120W×240L [10山]) 3箇所から実施する。しかし、吸引面積は180mm²と小さく、短時間で高真空に到達しないと考え、新たにスリーブ真空技術²⁾を開発した。これは、図4、図5に示すように、スリーブに大きな複数の真空吸引口を設け、容積の大きいスリーブ内を短時間で減圧すると共に、キャビティ内も同時に高真空状態にするという技術である。このため、金型やスリーブには図4の丸印部にシールを設けた。ただし、各押出ピンはシールせず、押出板の空間を密閉BOX構造とし、常時真空引きとした。図4の高真空システムの目標到達真空度を、1.0秒以内に-95kPa以下と設定した。

スリーブ真空装置の構成を図5に示す。スリーブ

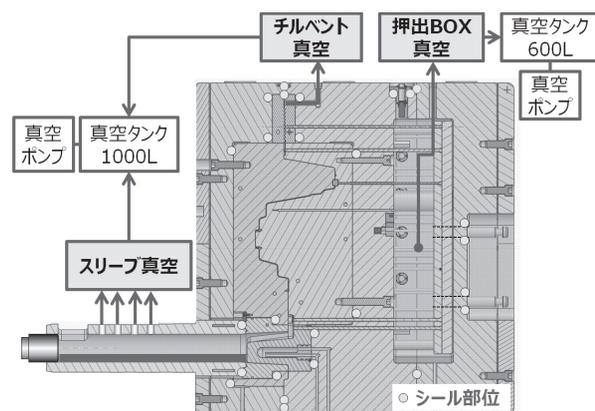


図4 新開発の高真空システム

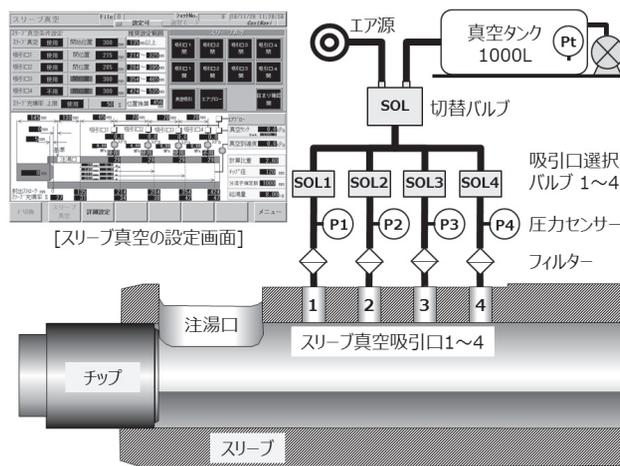


図5 スリーブ真空装置の構成

には、スリーブ真空吸引口 (1B) を4箇所設け、各吸引口はフィルター、圧力センサー、吸引口選択バルブを介し、切替バルブに合流後、真空タンクやエア源へ繋がる。動作工程は、まず、スリーブ真空吸引口の設置数やスリーブ充填率等にて、使用する吸引口を選択すると、選択された吸引口選択バルブが開く。設定した真空開始位置 (プランジャーが注湯口を閉塞後) に到達後、切替バルブが真空タンクと繋がり真空吸引を開始する。吸引口選択バルブは、設定した射出位置や上限スリーブ充填率にて自由に閉じることが出来、プランジャーが吸引口を通過完了するまでに閉塞することで、真空タンクと外気が連通することを防ぐ。到達真空度は、圧力センサー (1~4を選択可能) にて上下限を設けて管理できる。プランジャーが設定した増圧位置に到達後、切替バルブがエア源に接続され、閉じられた吸引口選択バルブが1箇所ずつ開き、各真空ラインのエアブロー清掃を実施するとともに、圧力センサーで発生する正圧値を確認し、アルミ詰まりの判定を行い動作完了する。スリーブ真空の条件設定や操作は、ダイカストマシンの操作画面に専用画面 (図5) を設けた。

高真空システムの真空能力を確認するため、チルベント真空単独、スリーブ真空単独、チルベント真空とスリーブ真空を複合した高真空システムの3条件にて、射出速度 0.2m/s 一定の空打ちで、キャビティ内の真空度 (図3) を測定した結果を図6に示す。1.0秒後の到達真空度は、チルベント真空単独で -33kPa、スリーブ真空単独で -83kPa、高真空システムで -96kPa であった。今回開発した高真空システムでは、1.0s 以内で -95kPa という目標真空度を達成できた。

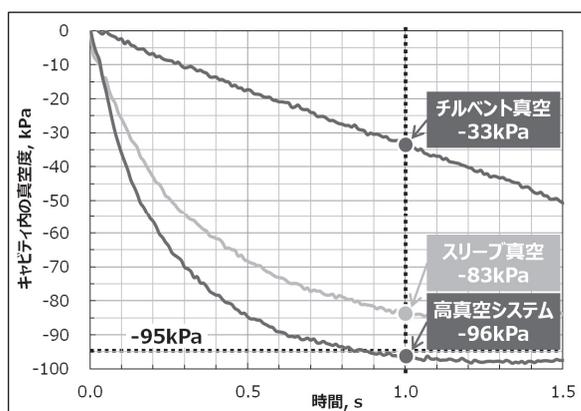


図6 キャビティ内部の真空度測定結果

3.4 スリーブ真空技術の課題と対策

スリーブ真空技術の課題として、真空吸引時の溶湯による真空ラインの閉塞 (アルミ詰まり) が挙げ

られる。当社でも、開発当初は、スリーブ充填率が低い場合でも、スリーブ吸引口のアルミ詰まりが発生した。

この詰まりのメカニズムを調査するため、スリーブを十分予熱後、固定型のスリーブ開口部に観察窓付きの密閉蓋を設け、減圧中のスリーブ内の溶湯挙動を観察した。その結果を図7に示す。スリーブに溶湯を注湯 (図7(a)) 後、射出が前進。真空開始位置に到達し、スリーブ内の減圧を開始すると同時に、スリーブ内の溶湯がスリーブ上部まで跳ね上がり、暴れる様子 (図7(b)) が観察された。このことから、スリーブ真空ラインの詰まりは、プランジャーチップとスリーブの隙間から、減圧時の吸引力により外気が流入し、溶湯が暴れることで発生すると考えた。

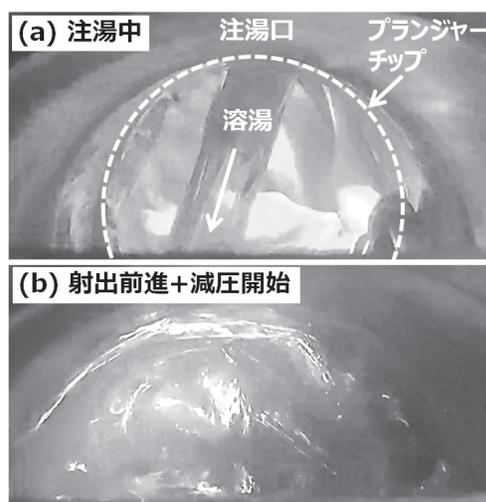


図7 減圧中のスリーブ内容湯挙動

この外気流入を抑制するため、図8に示すような凹部を有するプランジャーチップを考案した。図8(a)のスリーブ真空開始時には、注湯口に近い吸引

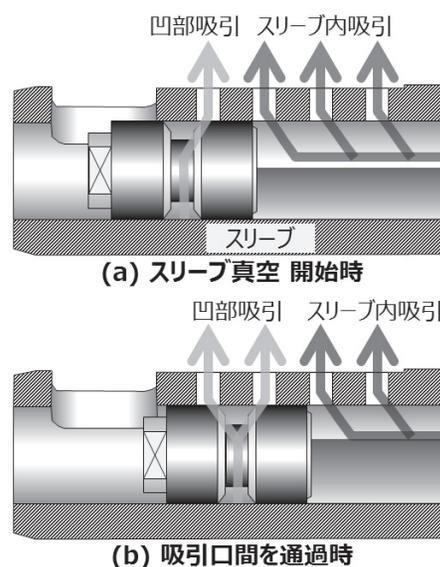


図8 スリーブ真空のアルミ詰まり対策事例

口1箇所が凹部を減圧し、他の3箇所がスリーブ内を減圧する。更に、射出が前進し、図8(b)の吸引口間を通過する際は、2箇所の吸引口が凹部を減圧し、他の2箇所がスリーブ内を減圧する。このように、射出前進中に、スリーブ真空の吸引口が凹部の

減圧を順番に、途切れることなく担うことで、スリーブ内への外気流入が抑制され、スリーブ内の溶湯暴れを防止出来た。以降、真空ラインのアルミ詰まりは皆無となった。

4. 実験方法

4.1 充填時間の影響調査方法 (表2参照)

充填時間の影響を調査するため、690℃に保持したADC12を用い、高速切替位置を固定し、高速設定を2.0、4.0、6.0m/sと変化させることで、充填時間を57～111msの範囲で変化させた。なお、増圧条件は固定し、その際の昇圧時間は約90ms、鑄造圧力は約45MPaである。

4.2 昇圧時間の影響調査方法 (表2参照)

昇圧時間の影響を調査するため、690℃に保持したADC12を用い、射出速度条件は固定し、増圧弁開度の設定値を変化させることで、昇圧時間を20～174msの範囲で変化させた。なお、その際の充填時間は約95ms、鑄造圧力は約60MPaである。

4.3 鑄造圧力の影響調査方法 (表2参照)

鑄造圧力の影響を調査するため、690℃に保持したADC12を用い、射出速度条件、増圧弁開度設定は固定し、鑄造圧力を41～57MPaの範囲で変化させた。なお、その際の充填時間は約95ms、昇圧時間は約20msである。

表2 充填時間、昇圧時間、鑄造圧力の調査条件

	充填時間の調査条件	昇圧時間の調査条件	鑄造圧力の調査条件
充填時間	57～111ms	95ms	95ms
昇圧時間	90ms	20～174ms	20ms
鑄造圧力	45MPa	60MPa	41～57MPa

4.4 溶湯圧力の評価方法

充填時間、昇圧時間、鑄造圧力の影響を評価するため、図3に示す4箇所の溶湯圧力を測定した。図9に実鑄造時の射出波形、および溶湯圧力波形の例を示す。上述の影響を評価するにあたり、得られた各波形から、①充填時間、②溶湯圧力持続時間、③最大溶湯圧力、④圧力伝達率を表3のように定義し計測した。

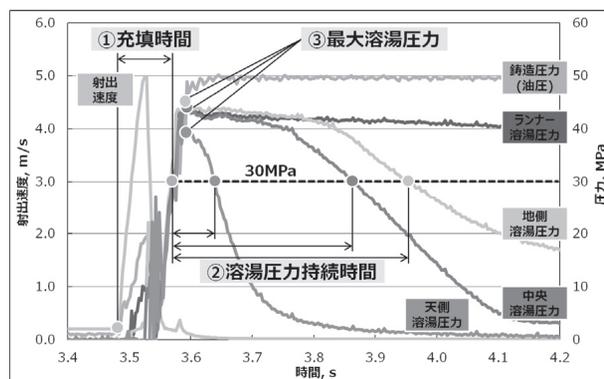


図9 射出波形と溶湯圧力波形の例

4.5 Silafont-36の鑄造サンプル評価方法

製品部のガス量や機械的性質の評価には、自動車用大型構造部材で採用実績が多いRheinfelden社のSilafont-36³⁾を使用した。700℃に保持したSilafont-36を、高速設定2.0、4.0、5.0、6.0m/sとし、充填時間を72～128msと変化させ鑄造サンプルを採取した。その際の昇圧時間は約32ms、鑄造圧力は45MPaである。得られた鑄造サンプルから11個の小片を切出し、T7熱処理後に引張試験片(JIS Z2201 13B号)へと加工し、試験に供した。なお、熱処理条件は、490℃ x1.5時間→エア焼入→220℃ x1.5時間である。

表3 波形評価用の定義項目

定義項目	内容
① 充填時間	高速立上り～鑄造圧力(油圧)が30MPaに到達するまでの時間
② 溶湯圧力持続時間	各部の溶湯圧力が、30MPa以上を維持している時間
③ 最大溶湯圧力	各部の溶湯圧力の最大値
④ 圧力伝達率	③最大溶湯圧力を鑄造圧力(油圧)で除した値の百分率

5. 実験結果

5.1 充填時間が溶湯圧力や外観に及ぼす影響

図10に高速速度を変化させた場合の①充填時間と②溶湯圧力持続時間、③最大溶湯圧力、④圧力伝達率、及び、アルキメデス法で計測した製品部の密度の関係を示す。

充填時間を短縮すると、製品地側や中央の変化に比べ、天側は②溶湯圧力持続時間は微増で、③最大溶湯圧力は顕著に増加した。これは、充填時間が短いことによって、溶湯が生きている上、高速速度の増加による水撃作用⁴⁾が働いたと考える。このように、短時間充填によって、天側の④圧力伝達率が向上し、製品全体に均一な圧力が負荷されたことが分かる。しかし、充填時間が短いほど、製品部の密度は低下した。これは、射出速度を大きくすると、微細な巻き込みが増加する、真空排気ランナーが早く閉塞する、引け量が多くなる等の影響があるものと推察する。

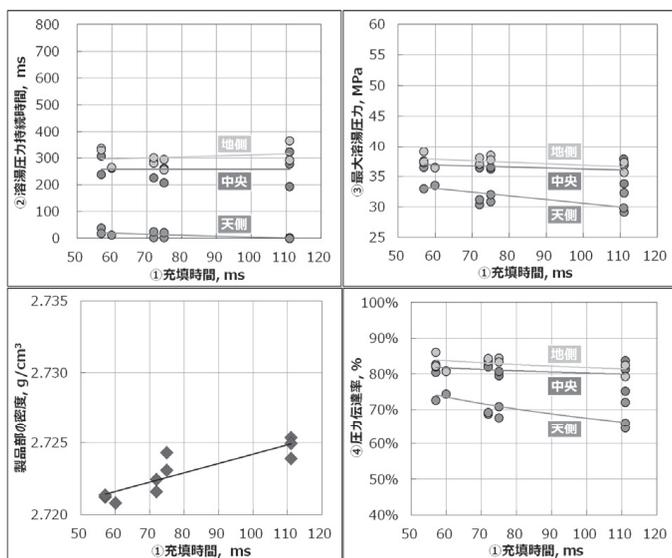


図10 充填時間が溶湯圧力、密度に及ぼす影響

図11に、高真空を使用した高速設定4.0m/s、6.0m/s、および、大気開放（真空なし）6.0m/sの外観写真、プリスタ試験結果を示す。同図は、最終充填部となる製品上面を示す。

高真空の高速設定4.0、6.0m/sを比較すると、4.0m/sでは製品天側に白色模様が残留している。しかし、6.0m/sでは白色模様が大幅に解消し、外観品質が格段に向上した。これは、高速射出によって、溶湯温度低下が最小限となり、水撃作用にて、金型表面の転写性が向上したためと推察する。

大気開放（真空なし）の6.0m/s場合、広範囲に渡

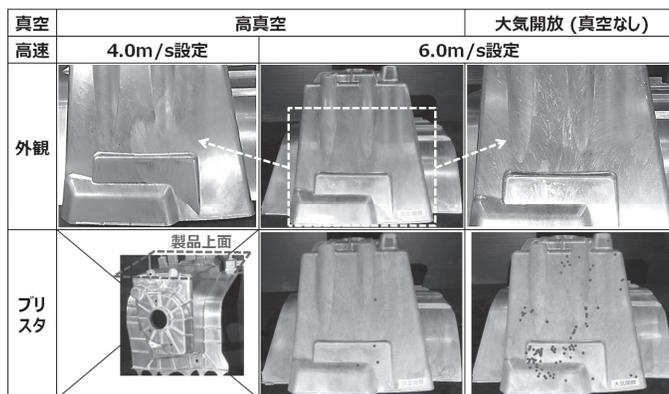


図11 各条件の外観品質およびプリスタ結果

り白色線状の湯流れ模様が確認され、フクレはこの模様近傍に広範囲に点在する。このことから、白色線状の湯流れ模様は、空気や発生ガスが関与した模様であると考えられる。高真空6.0m/sでは、この湯流れ模様は発生せず、フクレもわずかに点在する程度であった。これは高真空による大幅なガス量低減効果によるものと考えられる。

5.2 昇圧時間が溶湯圧力や密度に及ぼす影響

図12に、昇圧時間を変化させた場合の結果を示す。昇圧時間を短縮すると、各部の②溶湯圧力持続時間、③最大溶湯圧力、④圧力伝達率が増加した。注目すべきは、ゲートから遠い天側の③最大溶湯圧力、④圧力伝達率が急激に上昇し、製品全体に伝達する圧力が均一化する点である。製品部の密度も、昇圧時間を短縮するに伴い向上した。この結果より、昇圧

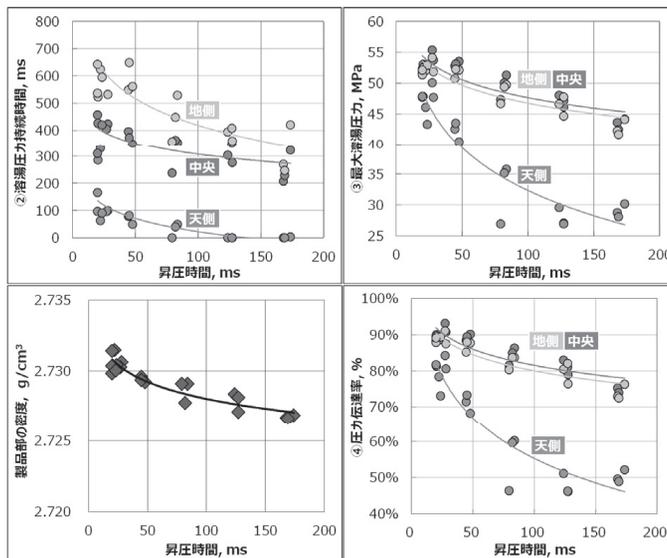


図12 昇圧時間が溶湯圧力、密度に及ぼす影響

時間と圧力伝達には強い相関があり、短時間昇圧によって、製品全体へ、均一な高い圧力が長く伝播することが分かる。

5. 3 鋳造圧力が溶湯圧力や密度に及ぼす影響

図13に、鋳造圧力を変化させた場合の結果を示す。鋳造圧力を増加すると、各部の②溶湯圧力持続時間、③最大溶湯圧力、および、製品部の密度が直線的に増加した。しかし、④圧力伝達率は変化せず一定値を示した。このことより、鋳造圧力は、伝わる圧力や時間は変化するが、圧力伝達率には寄与しないため、使用するダイカストマシンの型締力の範囲内で、要求品質を満たす適正値を選定することが重要であると考える。

以上の結果から、構造部材のような大型薄肉品のダイカストには、選定した鋳造圧力を効率良く、製品全体へ均一に圧力伝播させ、外観品質、内部品質を向上させる必要がある。このためには、短時間充填・短時間昇圧、および、高真空技術が必要であることがわかる。

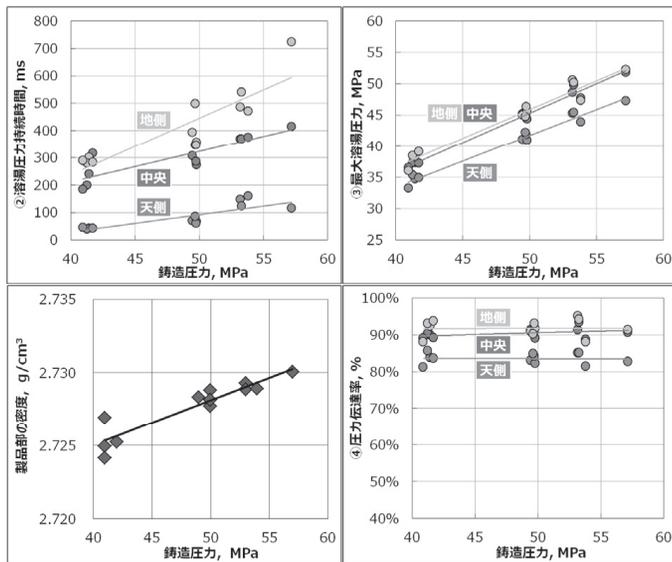


図13 鋳造圧力が溶湯圧力、密度に及ぼす影響

5. 4 Silafont-36 サンプルの品質評価

5. 4. 1 製品部のガス量測定結果

高速設定 6.0m/s の製品部を4分割し、製品中に含まれるガス量を測定した。図14にガス量の測定部位と測定結果を示す。

チップ潤滑剤は油性黒鉛系を使用し、注湯口に1.5cc/shot 滴下、エアブローしているが、製品全体の平均ガス量は、1.8cc/100gAL と良好な結果が得られた⁵⁾。部位別に見ると、最終充填部を含む製品の上半分(測定部位 A, B) のガス量が若干、高い傾向

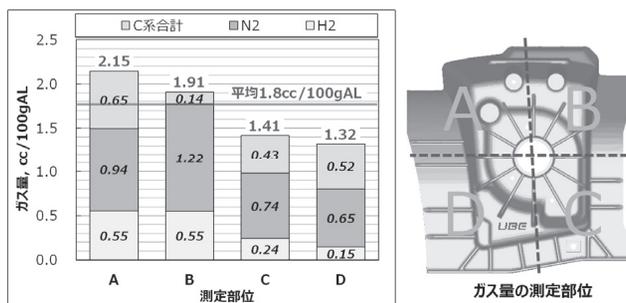


図14 Silafont-36 ガス量測定結果

にある。その際、ガス成分では、窒素、水素が増加していることから、チルベント真空の排気面積の最適化や、離型剤等の水残り対策が必要と考える。

5. 4. 2 引張試験結果

Silafont-36 (T7 熱処理) の引張試験結果を表4、および、図15に示す。ショックタワーに要求される引張特性は、引張強度、0.2% 耐力、伸びが、それぞれ 180MPa 以上、120MPa 以上、10% 以上である⁶⁾。

表4 Silafont-36 (T7) の引張試験結果一覧

高速設定 [m/s]	最高速度 [m/s]	充填時間 [ms]	引張速度		0.2% 耐力		伸び	
			平均値 [MPa]	標準偏差	平均値 [MPa]	標準偏差	平均値 [%]	標準偏差
6.0	5.4	72	210	2.1	141	2.5	13.0	1.6
5.0	4.8	75	213	3.6	146	4.3	12.5	1.8
4.0	4.1	89	211	3.0	142	5.1	12.5	2.9
2.0	2.2	128	209	4.6	142	5.4	10.8	3.0

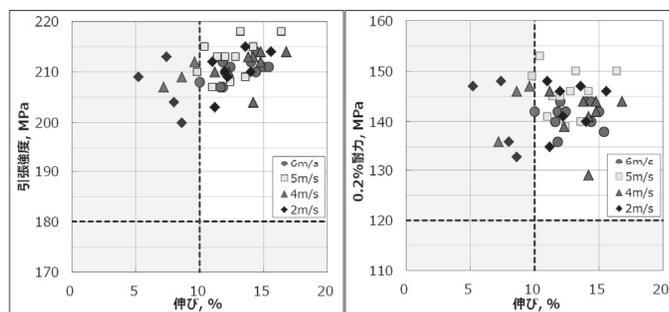


図15 Silafont-36 (T7) の引張試験結果

型締力の関係上、鋳造圧力は45MPaと比較的低いものの、引張強度、0.2%耐力に関しては、いずれの高速速度においても要求値をクリアし、その平均値は高速速度によらず、ほぼ一定であった。これに対し、伸びは高速速度の影響を受け、速度の増加に伴い、その平均値は増加し、高速設定5.0m/s以上(充填時間75ms以下)で10%以上という要求値をほぼ満足した。

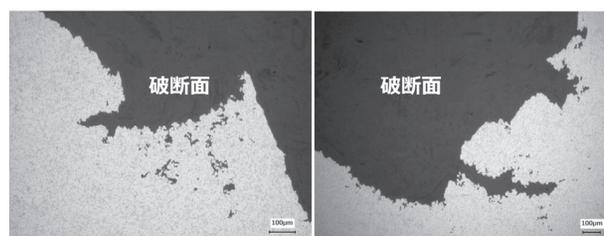
高速設定4.0m/s以下で、伸びが10%未満となっ

た原因を調査するため、引張試験片の破断面近傍のマイクロ組織観察を行った。図16(a)は、高速設定2.0m/s(伸び8.6%)のマイクロ組織で、破断面に、微細な凹凸を持つ鑄巣が観察された。図10の製品部の密度測定結果より、充填時間が長いと製品部の密度が高いことから、高速設定2.0m/sでは、比較的層流に近い状態で充填し、巻き込み巣が少ない反面、充填時間は128msと長く、充填不良による微細な空洞欠陥が内在したものと考えられる。

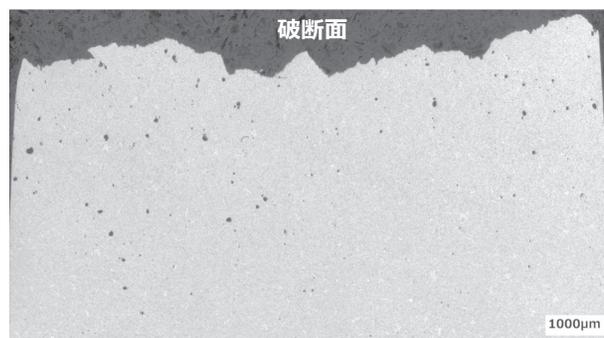
これに対し、図16(b)の高速設定4.0m/s(伸び8.6%)では、破断面近傍に無数の巻き込み巣が観察された。熱処理後のフクレ発生はなく、内圧の低い巻き込み巣と考えられる。高速設定4.0m/sでは、キャビティ充填中にエアが微細分散されず、型温の低い部分では、巻き込み巣を十分に圧縮できなかったものと推測する。

以上の結果から、高速設定5.0m/s以上で、伸びの下限値が改善した理由として、充填不良による空洞欠陥や、微細な巻き込み巣が、短時間充填によって改善したためと考える。

更に、各値のばらつきの指標として、表4に標準偏差を示す。引張強度、0.2%耐力、伸びの標準偏差は、高速速度が大きく、充填時間が短いほど低下する。このことから、短時間充填によって、引張特性



(a) 高速設定 2.0m/s (伸び 8.6%)



(b) 高速設定 4.0m/s (伸び 8.6%)

図16 引張試験片の破断面マイクロ組織

のばらつきが減少し、内部品質が安定することが分かった。これは高真空システムによる含有ガス量低減効果と短時間充填・短時間昇圧が効果的に作用するためと考える。

6. おわりに

自動車用大型構造部材の代表的な製品であるショックタワーの鑄造を通じ、様々な知見を得た。

鑄造条件では、キャビティを短時間で充填することで、製品天側の圧力伝達率が増加し、外観品質が向上した。引張特性においては、伸びが向上し、かつ、各値のばらつきが低減した。増圧工程では、要求品質や型縮力に応じた鑄造圧力を選択し、その鑄造圧力を製品全体に伝播させ、高品質化するためには、短時間昇圧が重要であることが分かった。新開発のスリーブ真空技術は、プリスタやガス量の低減にて、その有効性が確認でき、アルミ詰まり対策も完成した。

当社は、自動車用大型構造部材を安定して鑄造できる新射出装置や、キャビティ内の真空度を予測で

きるソフトも開発している。今後、更に、お客様のニーズにお応えできるよう、ユニークな商品開発を進める所存である。

参考文献

- 1) 村上工成：ダイカスト No.147 2018, 60-62
- 2) 石橋直樹他：2018 ダイカスト会議論文集 JD18-36, 201-208
- 3) 渡邊 修一郎：素形材, 50 (2009), 9, 23-29
- 4) 西直美他：鑄物 第69巻 (1988) 第12号
- 5) 大杉康夫他：素形材, 32 (2007), 12, 31-35
- 6) Gilberto Edgardo Saldivar abes: N. America Automotive lightweight procurement symposium: 2015,121-131