

熱間バルジと高真空ダイカストを用いた アルミサブフレームの開発

Development of Aluminum Subframe Using Hot Bulging and Vacuum Die Casting

福 地 文 亮*
Fumiaki FUKUCHI
小 川 努*
Tsutomu OGAWA

矢羽々 隆 憲*
Takanori YAHABA
岩 崎 晴 之*
Haruyuki IWASAKI

秋 山 浩*
Hiroshi AKIYAMA
堀 出**
Izuru HORI

要 旨

バルジ製メンバとダイカスト製メンバをミグ溶接したアルミサブフレームを開発し、世界で初めて量産車に適用した。

バルジには、新開発の成形性に優れる熱間バルジ製法を適用し、あわせて熱間加工用に開発した展伸材を採用した。ダイカストには、高真空ダイカスト製法と新たに開発した溶接性に優れる合金を適用した。ミグ溶接では、これら新規材料の溶接性を明確にし、溶接手法を確立した。

以上の開発により、従来アルミサブフレームに対し同等以上の機能を有しながら、10%の軽量化と20%のコスト低減を達成した。

ABSTRACT

The first aluminum subframe has been developed in the world, that is composed of bulge-formed members and die cast members welded by MIG.

The bulging employed a newly developed hot process with superior formability together with an alloy developed for the hot process. The die casting employed a newly developed vacuum die casting process and alloy which has superior weldability. A method of MIG welding was established, after the weldability of these new alloys was researched. The developed subframe achieved a 20% cost reduction and 10% weight reduction while keeping functional performance equal to or better than the company's conventional aluminum subframe.

1. まえがき

近年、地球環境保護や省エネルギーの観点および自動車運動性能の向上の観点より、自動車軽量化の必要性がますます高まってきている。この軽量化ニーズに対し、従来の鋼製サブフレームに比べ35%の軽量化を達成したアルミサブフレームをすでに一部車種に採用している。

しかしながら、従来のアルミサブフレームは、アルミパイプを室温成形したクレードルにアルミ板をプレス成形したブラケットをミグ溶接し部品化しており、総部品点数が多くかつ溶接長が長いため、コスト低減には限界があった。

本研究では、部品統合化によるコスト低減効果に着目した。部品統合化手法として熱間バルジ製法と高真空ダイカスト製法を研究し、さらに新製法に最適な材料を開発した。熱間バルジ製法とは、アルミパイプの成形自由度の向上を目的に研究した新しい拡管成形法である。続いてこれら新製法部材のミグ溶接特性を確認し、溶接技術を構築した。

* 栃木研究所

** ホンダエンジニアリング(株)

2. 部品開発のねらい

サブフレームのコスト低減にあたり、以下の目標値を設定した。

- (1) 部品点数：従来比 50%削減
- (2) 接合長：従来比 50%削減
- (3) 重量：従来アルミサブフレーム同等以下
- (4) コスト：従来比 20%削減

部品点数および接合長は、メンバに熱間バルジ製法を、またブラケットとメンバにダイカスト製法をそれぞれ適用し、部品を統合化することで削減を図った。それぞれの構造と適用結果を Fig. 1 - 4 および Table 1 - 2 に示す。

なお本サブフレームは、サスペンション支持やボデー剛性補助の機能を有するため、サスペンション同等の強度や靱性に加え、ボデーと同等の衝撃吸収特性が要求される。これら機能を満足させるよう部品接合位置を設定した。さらに部品統合化により、溶接後の寸法精度向上をねらった。

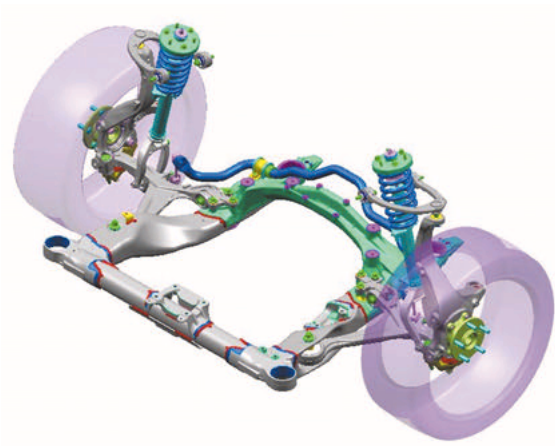


Fig. 1 Front chassis system

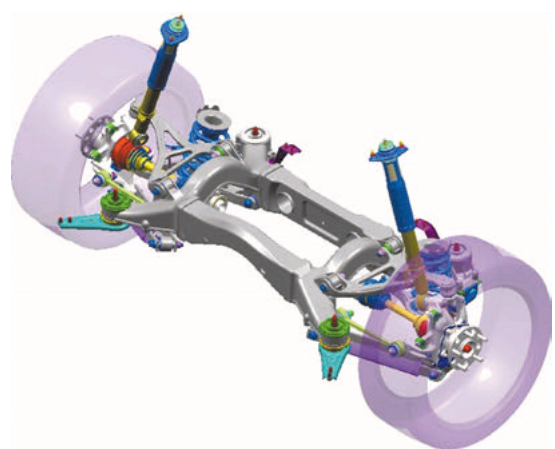


Fig. 2 Rear chassis system

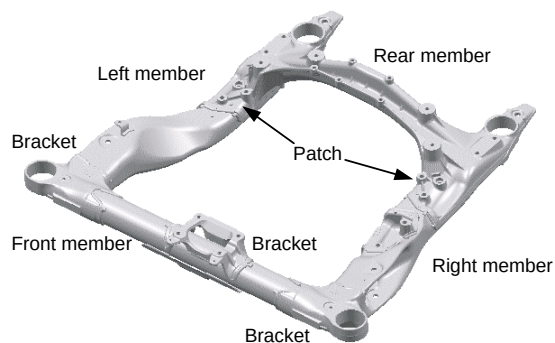


Fig. 3 Front subframe components

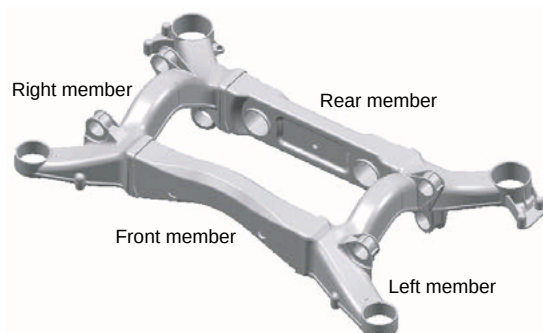


Fig. 4 Rear subframe components

Table 1 Application of process and alloy to front subframe components

Parts	Process	Alloy
Front member	Extrusion	Al-Mg
Rear member	Vacuum die casting	Al-Si-Mg
Left member Right member	Hot bulging	Al-Mg
Brackets	Squeeze die casting	AC4CH-T6
Patch	Stamping	A5052P-O

Table 2 Application of process and alloy to rear subframe components

Parts	Process	Alloy
Front member Rear member	Hot bulging	Al-Mg
Left member Right member	Vacuum die casting	Al-Si-Mg

重量は、主に構成部品の高剛性化と閉断面の最適配置、部品薄肉化等により低減を図った。特にバルジ製メンバは、熱間バルジ製法によりメンバ断面係数の増大をねらった。また鋳造製メンバの薄肉化や駄肉除去は、ダイカスト製法の適用により解決を図った。

3. 熱間バルジ技術

3.1. 従来製法における課題

従来よりバルジ製法はパイプの成形法として工業化されており、特に液圧で成形するハイドロフォーム製法は材料を問わずサブフレームに広く用いられている。サブフレームの場合、以前は多くのプレス部品を溶接し形成されたクレードルが、この製法により一体成形が可能になり、大幅に部品点数が削減された。しかしながら従来製法では常温での塑性加工(冷間加工)のため成形性能の限界が比較的低く、成形性能の指標である周長変化率(素管の周長に対する成形後の周長の比率)は130%程度であった。このため構成部品のさらなる統合化は困難であった。

3.2. 熱間バルジ製法の開発

上記課題に対して、アルミの熱間時の特性に着目し、成形性能の向上を図った。具体的には Fig. 5 に示すように、510℃の熱間時におけるアルミ材の変形抵抗(耐力)は常温時に比べ 1/10 に減少し、伸びは6倍に増大する⁽¹⁾⁻⁽³⁾。

本特性を利用して、素管を熱間状態に保ちながらバルジ成形(熱間バルジ)することにより、周長変化率は190%となり従来の1.5倍に増大した。この結果、複雑形状が成形可能となり、部品統合化が可能となった。同時に拡張成形時の内圧がハイドロフォーミングに比べ1/100以下に低減され、生産設備の小型化も達成した。

ところでバルジ製法においては、成形量と成形後板厚は相反し、特に複雑形状部における板厚減少が顕著になる。従ってバルジ部品の設計をするためには成形後の板厚分布の予測が必要であった。そこで熱間におけるアルミ材料特性や、バルジの成形工程を考慮した成形シミュレーション技術の開発をおこなった。

特に解析に用いる物性値は、アルミの材料物性が温度やひずみ速度に大きく影響を受けるため、実際の成形条件に近い温度およびひずみ条件下での材料特性試験結果に基づき設定した。また境界条件および成形条件は、板厚分布に影響の大きい条件を見極め、再現性に優れたデータベースを作成した。本研究の結果、 $\pm 10\%$ 以内での板厚予測が可能である。Fig. 6, 7に成形シミュレーションによる板厚予測結果と実成形成品の板厚分布の比較を示す。

さらに成形工程においては、成形時に素管の軸方向への押込み工程(軸押し)を追加し、材料の流入促進が板厚減少の抑制におよぼす影響を確認した。Fig. 8に示す様に、軸押し

量の増大に伴い材料が補給され、板厚減少率が低減した。特に複雑形状部品の成形においては、成形内圧および軸押しストロークを数ステップに分割制御をすることで、目標とする板厚を得ることができた。成形時における内圧および軸押しの制御プログラムのシミュレーション設定値と制御結果を Fig. 9 に示した。

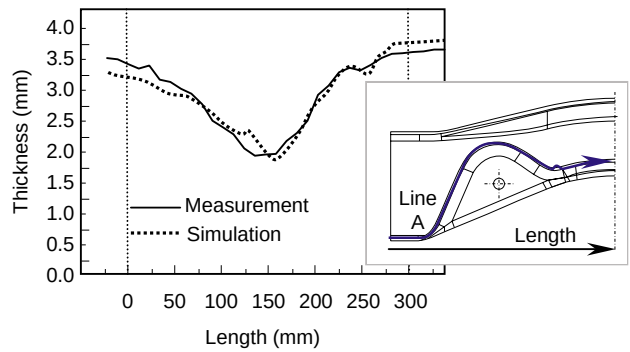


Fig. 7 Thickness distribution on line A

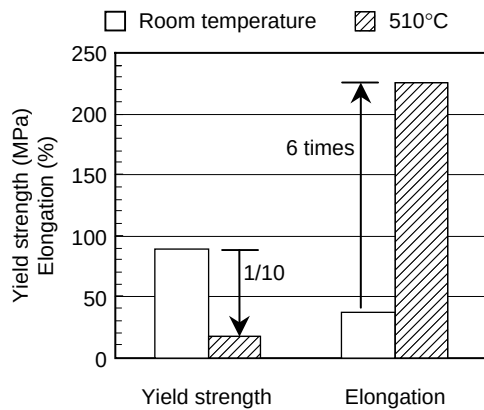


Fig. 5 Influence of bulging temperature on yield strength and elongation

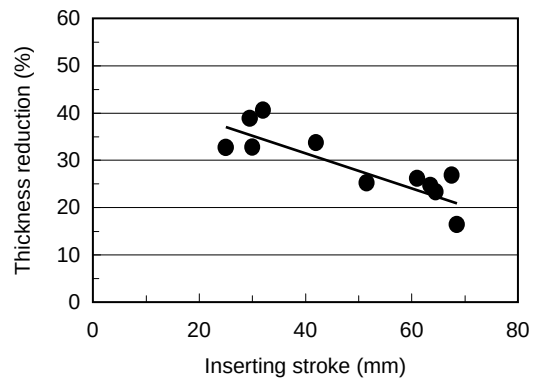


Fig. 8 Influence of inserting stroke

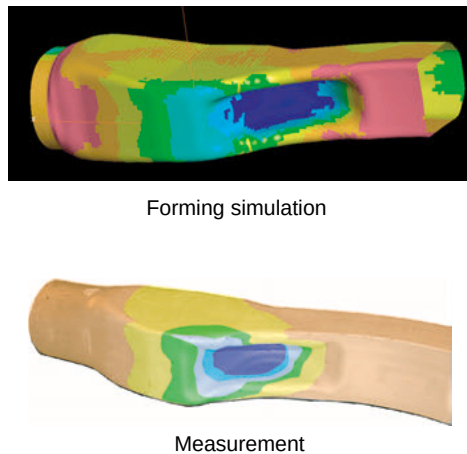


Fig.6 Comparison of thickness distributions by forming simulation and measurement

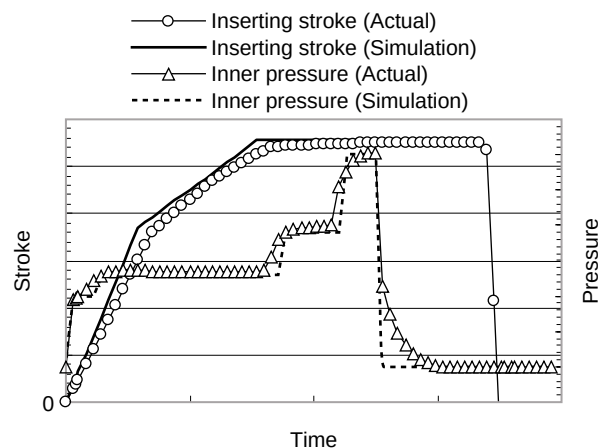


Fig. 9 Control of inserting stroke and inner pressure

3.3. 熱間加工用材料の開発

従来材を熱間バルジ製法に用いた場合、材料特性の劣化につながるグレインクロス(結晶粒異常成長)とキャビティ(空孔)が加工後に生じる可能性があるため、対策として新たに Al-Mg 系の熱間加工用材料を開発した。

まず、グレインクロスは素材成形時の残留応力と熱間成形時の熱エネルギーによる素材結晶の再結晶化で、展伸材の熱間成形では避け難い現象である。本研究ではこのグレインクロスの抑制に、結晶粒微細化に効果的なCr⁽⁴⁾を添加した。Fig. 10 に示すように、Cr 添加量の最適化によりグレインクロスを抑制することができた。なお工程条件の観点からは、Fig. 11に示すように成形温度がグレインクロス発生に大きな影響を及ぼすため、成形温度と成形時間の最適化を図った。

次にキャビティは、大加工時に素材マトリックス中の晶出物または粒界三重点等を起点にして発生する微小空洞である。Fig. 12に示す組織写真中の黒い点がキャビティである。キャビティの低減にあたっては、まず部品機能の観点よりキャビティ率(観察面におけるキャビティの面積率)の上限を見極めた。続いてキャビティ発生を抑制するため、Fe とSiの添加量とキャビティ率の関係を明確化した。Fig. 13に示すように添加量を減らすと晶出物量が減少し、キャビティ率を抑制することができる。これらの関係より Fe と Si の成分管理幅を設定した。

以上の開発により、熱間加工後も従来合金と同等の材料特性を有する Al-Mg 系合金を開発することができた。

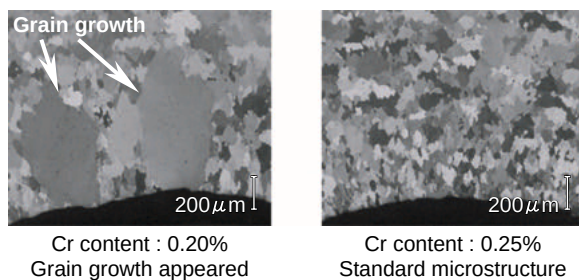


Fig. 10 Influence of Cr content on grain growth

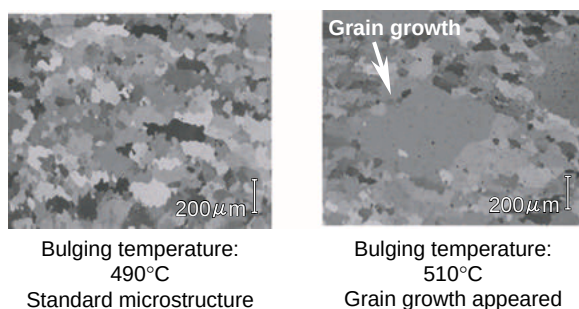


Fig. 11 Influence of hot bulging temperature

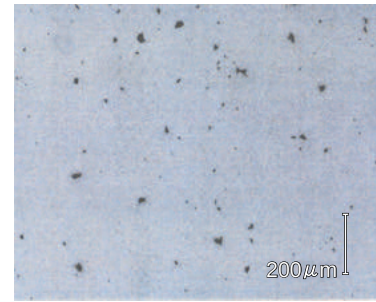


Fig. 12 Cavity in aluminum microstructure

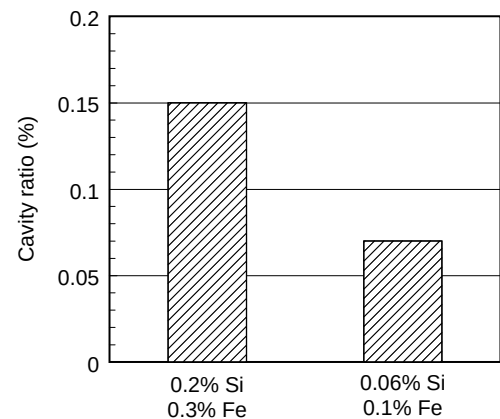


Fig. 13 Influence of Fe and Si content on cavity ratio

4. 高真空ダイカスト技術

4.1. 従来製法の課題

ダイカストは瞬間的に溶湯を金型内に充填するという製法の特徴より、酸化物巻き込みや鑄巣等の鑄造欠陥が発生し易く、サブフレームに適用可能なダイカスト品質を保証することは困難であった。また金型内ガスを巻き込みやすく、ダイカストのガス含有量は一般に 20cm³/100gAl 以上になる。このためダイカストを溶接すると溶接ビード内にブローホールが多数発生し、溶接強度の保証は困難であった。よってダイカストをサブフレームに適用した事例は限られ、特に溶接構造に適用した事例は稀有である。

上述課題に対し、本研究では以下目標を設定しそれらの解決を図った。

- (1) サブフレームに適用可能な高い鑄造品質の達成
- (2) 溶接性に優れるダイカスト合金の開発

4.2. 鑄造品質の達成

品質の向上に対しては、まず金型方案および鑄造条件の最適化を図った。検討には Fig. 14 に示す様に湯流れシミュレーションを活用し、ゲートやオーバーフロー位置、鑄造条件を解析した。方案(A)では多くのガス巻き込みが予測されるのに対し、方案(B)では湯が一様に充填しガス巻き込みの低減効果が予測された。またゲート断面積は、

短時間に溶湯充填が完了するように大型化した。 casting 条件においては、射出条件は、短時間で溶湯充填が完了するよう射出速度の増大(高速時に従来の2倍以上)や、金型温度

制御を図った。

ガス含有量の低減に対しては、ガス発生原因となる離型剤や潤滑剤の塗布量を低減し、さらに Fig. 15 に示すように型内を減圧し高真空状態にする(高真空ダイカスト)ことで対策を図った。 真空回路は、ガス巻き込み低減に最も効果が高い溶湯の最終充填部⁽⁵⁾など数カ所に配置し、型内圧力は 5kPa 以下に減圧した。 さらに減圧タイミングを最適化することで、ガス巻き込みがより低減され、ダイカストのガス含有量は Fig. 16 に示すように $3\text{cm}^3/100\text{gAl}$ 以下となった。 なおガス含有成分は、その 85 - 95%が H_2 であり、残部が N_2 やその他であった。

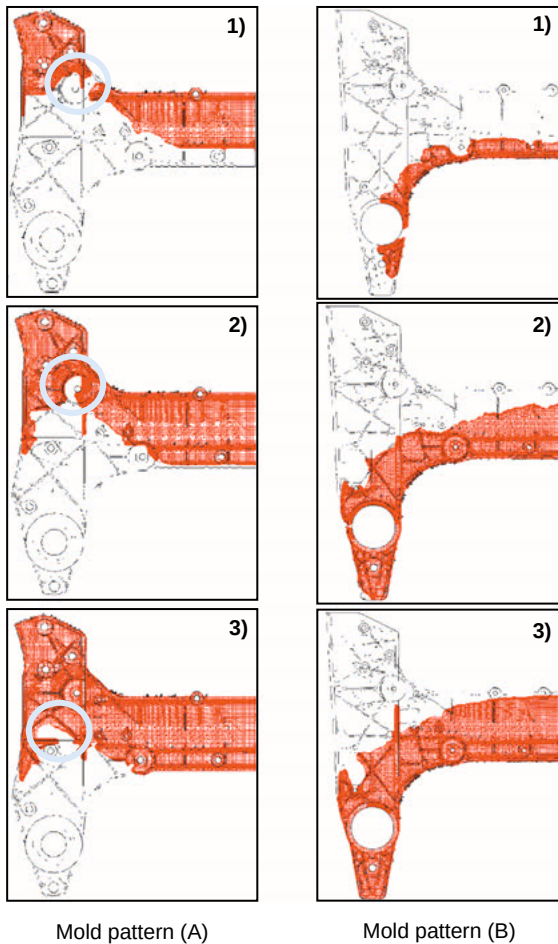


Fig. 14 Comparison of mold patterns by flow simulation of molten metal

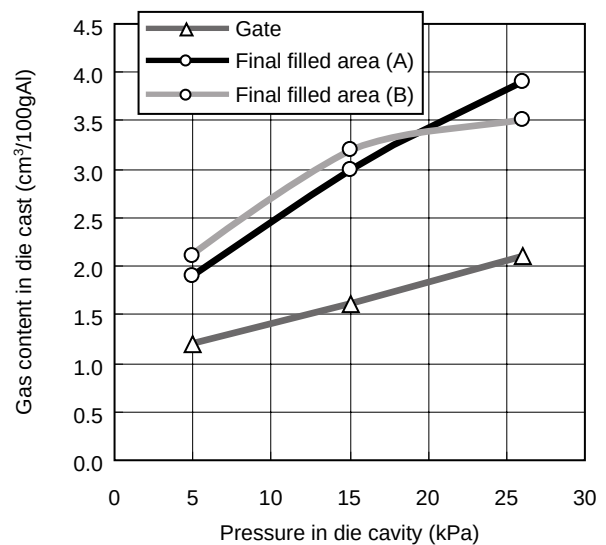


Fig. 16 Relation between pressure and gas content in die cast

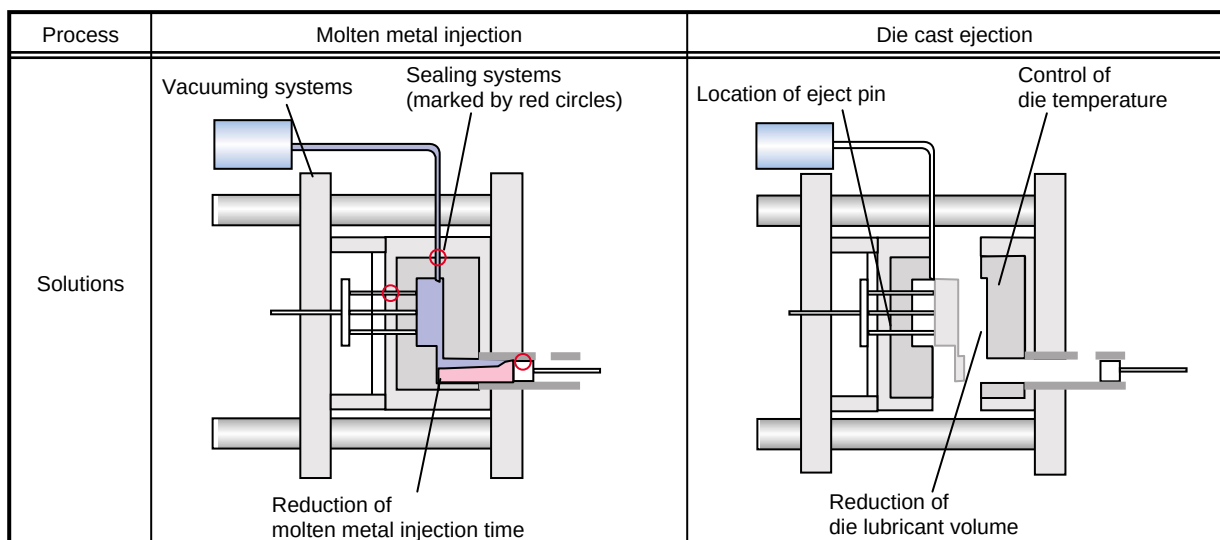


Fig. 15 Outline of solutions for vacuum die casting

4.3. ダイカスト合金の開発

サブフレーム用アルミ鋳造合金としては、Al-Si-Mg 系合金が一般的に広く用いられている。設計要求特性を検討した結果、強度および鋳造性に優れる本合金系をベースに新たにサブフレーム用ダイカスト合金を開発した。また熱処理は T5 処理とし、T6 溶体化処理時に発生するひずみの矯正工程廃止を図った。

次に材料成分の設定にあたっては、まず Si および Mg 含有量を検討した。200ton ダイカストマシンで鋳造した ASTM 試験片を用いて材料特性を評価し、さらに T5 熱処理条件を調査した。続いて平板試験片を鋳造し、溶接後のビード品質や継ぎ手強度等から溶接性を評価した。以上の結果から、材料基本成分を Al-Si 亜共晶系合金とし、Mg 含有量は設計要求特性を満足できる範囲とした。Fe と Mn の含有量は、金型への耐焼き付き性より設定した。一般に耐焼き付き性は Fe 含有量を 0.8wt% 以上、または Mn 含有量を 0.4wt% 以上にすると確保できる^{(6), (7)}。本合金では Fe と Mn の相乗効果も考慮して、耐焼き付き性を確保しつつ靱性を阻害しない範囲とした。Fig. 17 に製品における金属組織の確認結果を示す。従来合金に対し Al-Si 共晶組織や Al-Mn-S 金属間化合物の析出量が低減していることがわかる。

以上の結果より、機械的特性は、Fig. 18 に示すように、

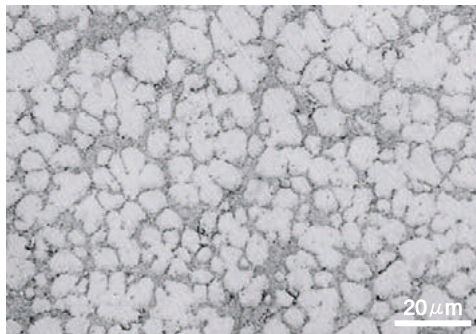


Fig. 17 Microstructure of developed alloy

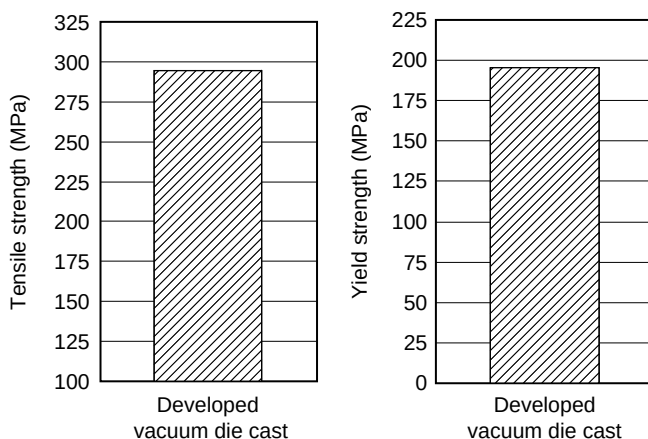


Fig. 18 Mechanical properties of developed vacuum die cast

抗張力と耐力、伸び、衝撃値がバランス良く高くなった。これらのばらつきは、従来合金に対し破断チルが減少したため、小さくなっている。

5. アルミ溶接技術

アルミ溶接品質は、被溶接材の合金成分や材料品質に加え、溶加材を含めた溶接施工諸条件の因子の影響を強く受ける。このため被溶接材毎に適切な溶接仕様を設定する必要がある。

本研究では、熱間バルジと高真空ダイカストの溶接特性を明らかにし、ミグ溶接仕様を構築した。

5.1. 熱間バルジの溶接性

熱間バルジ製法に用いる素材は押出し管であるため、表面品質を中心に溶接性を検討した。本製法では、潤滑材塗布と高温に保持するという成形条件のため製品表面に 100nm 以上の皮膜が形成される。この表面皮膜により、溶接アークが不安定になり、溶接ビードの溶け込みも不十分になるため、皮膜除去が必要となった。

皮膜除去の検討結果を Fig. 19 に示すが、アルカリや酸で洗浄することにより、バルジ素材同等の表面皮膜厚さに削減できることを確認した。

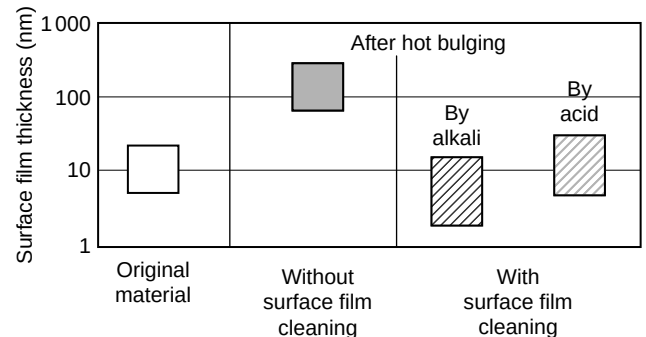
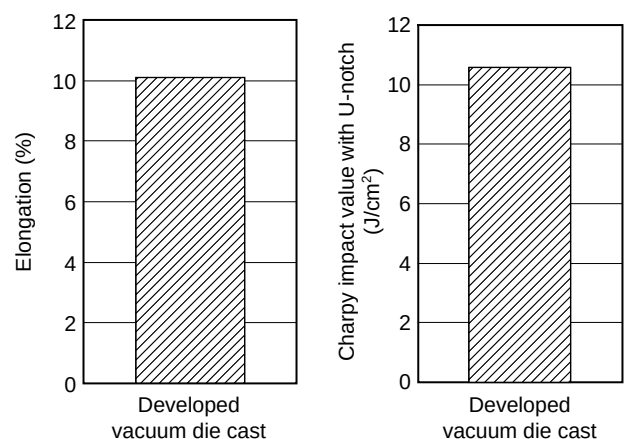


Fig. 19 Comparison of surface film thickness



また表面皮膜の有無が溶接品質に及ぼす影響を Fig. 20 に示した。表面皮膜除去と表面性状の均一化により、アークが安定し、溶接ビードの溶け込み深さが向上している。

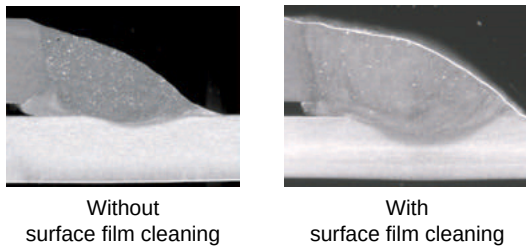


Fig. 20 Influence of surface film cleaning on welding quality

5.2. 高真空ダイカストの溶接性

高真空ダイカストのガス含有量は、Fig. 21に示すように $3\text{cm}^3/100\text{gAl}$ 以下で、過去に検討したチクソダイカストと同等⁽⁸⁾であった。ガス含有量と溶接ビード品質の関係を Fig. 22 に示したが、 $6\text{cm}^3/100\text{gAl}$ ではブローホールの発生が確認され、 $8\text{cm}^3/100\text{gAl}$ ではビード上部に多数のブローホールが発生した。ブローホールにより溶接継手強度に有効な厚が減少し、継ぎ手特性が低下するので、ミグ溶接に対してはガス含有量を $3\text{cm}^3/100\text{gAl}$ 以下に管理することが必要である。また今回新たに開発したダイカスト合金は、ブローホール発生が低減でき溶接品質確保に有効であることを確認した。

なお高真空ダイカストの表面皮膜は、オージェ電子分光法による測定の結果、その厚さが 20nm 程度であり、溶接性への影響は少なかった。

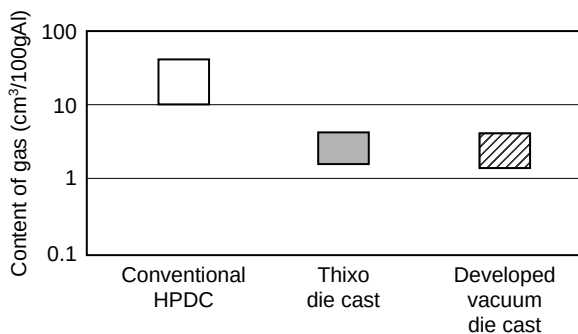


Fig. 21 Comparison of gas content

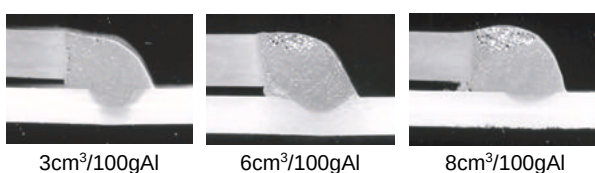


Fig. 22 Influence of gas content on blowhole

以上の新規開発材の溶接性に関する研究をもとに、サブフレームに最適な溶接仕様を確立した。さらにその仕様が管理できるよう、各製造工程の条件を設定した。

6. まとめ

部品統合化によるコスト低減を狙ったアルミサブフレームの開発にあたり、熱間バルジ製法および真空ダイカスト製法を研究し、以下の成果を得た。

- (1) バルジ製メンバとダイカスト製メンバをミグ溶接することで、軽量で低コストなアルミハイブリッド構造を構築できた。
- (2) バルジでは、熱間バルジ製法と熱間加工用合金を研究し、周長変化率が従来製法比 1.5 倍になる高い成形自由度が得られ、複雑形状部品の成形が可能になった。
- (3) ダイカストでは、高真空ダイカスト製法と Al-Si-Mg 系ダイカスト合金を研究し、バランス良く優れた機械的特性を有しかつ溶接可能なダイカスト部品の casting が可能となった。
- (4) ミグ溶接では、熱間バルジの表面酸化皮膜を低減し、かつ高真空ダイカストのガス含有量を $3\text{cm}^3/100\text{gAl}$ 以下にすることで、溶接継ぎ手特性を確保できることを明確化し、それらの溶接仕様を確立することができた。

以上により従来アルミサブフレームに対し部品点数を 70 %、接合長を 55 %、重量を 10 %、そしてコストを 20 % それぞれ削減することができた。

本技術により、アルミサブフレームの適用が拡大し、自動車軽量化に貢献することができる。

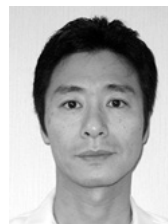
参考文献

- (1) 大上哲郎, 高田健ら: 5000系アルミニウム合金板の温間深絞り成形性, 軽金属, 第50巻, 第9号, p.451-455 (2000)
- (2) 堀内良: アルミニウム合金の高温変形と破壊, 軽金属, 第31巻, 第6号, p.431-444 (1981)
- (3) 佐藤益弘, 藤本幸一: 0.4%以下の Mn および Cr を含む Al-Mg(0-5%)合金の異常粗粒化現象, 軽金属, 第20巻, 第6号, p.278-282 (1970)
- (4) 大上哲郎, 高田健: 5000系アルミニウム合金板の機械的特性と角筒深絞り成形性の温度, ひずみ速度依存性, 軽金属, 第51巻, 第8号, p.414-418 (2001)
- (5) Masuda, E.: Application of mold filling simulation to die-casting processes, Modeling of casting, welding & advanced solidification process 7, p.747-754 (1995)
- (6) 西直美, 神重傑: アルミニウム合金ダイカストの離型力に及ぼす鉄, マンガン量の影響, 鑄造工学第70巻,

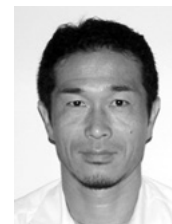
p.648-654(1998)

- (7) 伊藤忠雄, 望月史郎, 花田章: 軽金属学会 47 回秋季
大会講演概要, p.13(1974)
- (8) 斎藤信広, 中村武義, 大谷輝幸, 黒木盛男, 増田栄二,
井手籠隆: チクソ成形による車体継手部品の開発,
HONDA R&D Technical Review, Vol.11, No.2, p.149-158

■ 著 者 ■



福地 文亮



矢羽々隆憲



秋山 浩



小川 努



岩崎 晴之



堀 出