

チクソ成形による車体継手部品の開発

Development of Frame Joint Parts by Thixocasting

斉 藤 信 広*
Nobuhiro SAITO
黒 木 盛 男*
Morio KUROKI

中 村 武 義*
Takeyoshi NAKAMURA
増 田 栄 二**
Eiji MASUDA

大 谷 輝 幸*
Teruyuki OHTANI
井手籠 隆**
Takashi IDEGOMORI

要 旨

ビレットの攪拌連続 casting から加熱・成形までの、一貫したチクソ成形技術を開発した。その結果、今までの casting 技術では成し得なかった大型・薄肉、かつ高品質な部品の製造に成功した。適用した部品はアルミニウムスペースフレームの継手部品(リアアウトリガー)である。本部品はボデー用の大型 casting 部品であり、下記項目を目標として設定した。

- 1) 大型・薄肉成形が可能であり軽量化が見込める。
- 2) T5処理で必要強度が得られT6処理にともなう矯正処理の必要がない。
- 3) 内部および表面品質が良好で溶接が可能である。

開発したチクソ成形技術をリアアウトリガーに適用することで、溶接の可能な既存 casting 法(GDC, LPDC)を用いた時と比較して約20%の軽量化がはかれた。

ABSTRACT

The thixocasting technology of integrated processes that include continuous casting with stirring, heating and casting has been developed. The technology has allowed the production of large sized, thin walled and high quality components. It was applied to a joint component of an aluminum space frame and a rear out rigger which are a large sized casting components for the body of automobile. The developmental objectives are shown below;

- 1) A large sized thin walled component for the reduction of weight.
- 2) The necessary strength by the T5 process without any remedy after the T6 process.
- 3) Satisfactory inside and surface qualities, and the capability of welding.

The thixocasting technology to rear out rigger presents an advantage of 20% lighter weight than that produced by the conventional casting such as GDC and LPDC.

1. はじめに

近年、素形材製法の革新技術の1つとして、チクソ成形が注目されている。 casting 製法が液相状態で成形するのに対して、チクソ成形は半溶融状態で高圧成形する^{1), 2)}。

このことから、チクソ成形にはいくつかの特徴がある。

- 1) 半溶融状態で流動性を確保するため、攪拌連続 casting で組織を球状化したビレットが必要である。
- 2) 高圧成形するため薄肉成形が可能である。
- 3) 半溶融状態で層流充填するため、ガス含有量が少なく溶接が可能である。

すなわち、高圧 casting 法(HPDC)の持つ薄肉成形性、生産性と重力 casting 法(GDC)、低圧 casting 法(LPDC)の特徴であるガス含有量が少ないことの両者をあわせ持っている。

* 栃木研究所

**ホンダエンジニアリング(株)

このようにチクソ成形の長所は認識されているが、まだ大型部品への適用は進んでいない。これは、製品の方案部をビレットとして再利用できないこと、大きなビレットを半溶融状態で取り扱いにくいことが障害となっていた。そこで、方案部の再利用のためのビレット作製方法、および大型部品のチクソ成形について研究した。

その結果、大型部品のチクソ成形技術を確立するとともに、チクソ成形によるアルミニウムスペースフレームの継手部品(リアアウトリガー)の開発に成功したので、以下に報告する。

2. 開発の狙い

リアアウトリガーの取り付けられている周辺の状況を Fig.1に示す。図からわかるように、リアアウトリガーは、リアフレームとサイドシル、フロントフロアフレームなど

の部材をつなぐアルミニウムスペースフレーム骨格の構成部材となっている。

したがって、以下のような特性が要求される。

1) 強度特性

リアアウトリガーにはトレーリングアームが取り付けられており、走行時の足回りからの入力に耐える強度が必要である。

2) 耐変形性

衝突時の衝撃エネルギーをサイドシルおよびフロントフロアフレームなどの部材へ分散するとともに、燃料タンクを保護するための耐変形性が必要である。

3) 溶接性

ボディ骨格の構成部材であり安定した溶接性が必要である。

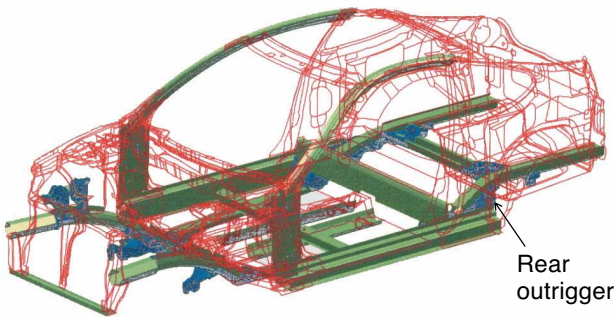


Fig.1 Structure of space frame body

以上のような要求特性をふまえ、リアアウトリガーにチクソ成形を適用した。リアアウトリガーの形状をFig.2に示す。リアアウトリガーをチクソ成形で作製することで得られるメリットを以下に示す。

- ・従来のボディ部材として一般的であるプレス部品に対し、一体成形可能で部品点数削減が可能。
- ・大型・薄肉部品であり、既存の鋳造法で鋳造すると湯流れ性の制約から平均肉厚は4.5mmとなる。
これに対してチクソ成形は高速充填させる圧力鋳造法なので平均肉厚を3.5mmとすることができ、約20%の軽量化が見込める。
- ・T5処理に必要な強度特性が得られることからT6処理の必要がなく矯正処理が不要となる。

上にあげたチクソ成形の特徴を考慮し、LPDCと比較してFig.3に示した値を目標として開発した。

3. 半溶融金属の特性

チクソ成形技術の核となる半溶融金属の特性について検討した。

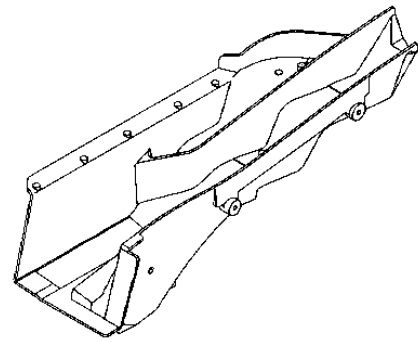


Fig.2 Outline of rear outrigger

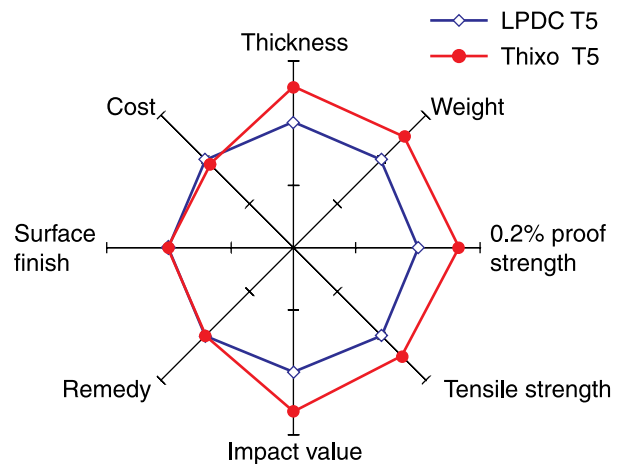


Fig.3 Composition of characteristic features between thixocasting and LPDC

3. 1. 試験・評価方法

1) 攪拌鋳造条件の試験

Fig.4に攪拌ビレット作製装置の概要を示す。電磁コイルで作られた回転磁場内に水冷SUSルツボをセットし、そこにアルミニウム溶湯を注ぎ攪拌凝固させ円柱状のビレットを作製した。攪拌条件はインバータの周波数でアルミニウム溶湯の回転数を、電磁コイルに流す電流でルツボ内壁面の磁束密度を変化させた。各攪拌条件で作製したビレットについて、それぞれ以下に示す特性を測定した。

- ・ビレット組織
- ・チクソ成形直前の半溶融状態に加熱した組織
- ・レオロジー特性(柔軟性)
- ・チクソ成形時の充填に必要な溶湯圧力
- ・成形品の欠陥率

2) レオロジー特性の評価方法

レオロジー特性を数値化し、各種特性とレオロジー特性との関係を定量的に把握できるようにした。Fig.5はレオロジー特性を測るために自作した測定器である。誘導加熱により軟化したビレットに、ある重さのロッドがビレット内に10mm変位した時のビレット温度を測定してペネトレーション温度と規定した。すなわち、ペネトレーション温度が低いほどビレットのレオロジー特性が良好である。

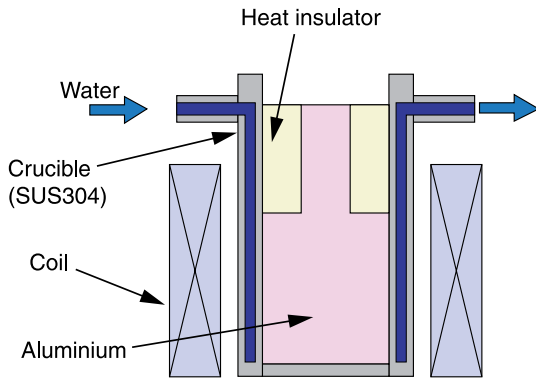


Fig.4 Equipment of casting with stirring

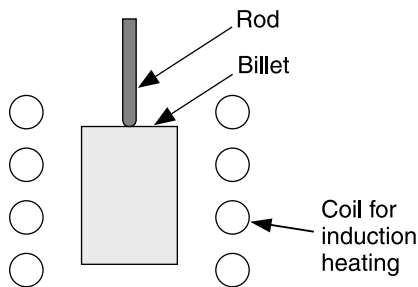


Fig.5 Measurement of penetration temperature

3. 2. 半熔融金属の特性

1) 攪拌鑄造組織

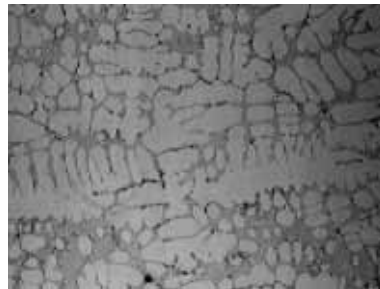
チクソ成形用ビレットのレオロジー特性はビレットの組織によって変化する。そこで、鑄造時の攪拌条件と組織の関係を調べた。Fig.6に、攪拌しない場合のビレット鑄放し組織と585℃まで再加熱した組織を水冷凍結して示す。また、Fig.7には攪拌した場合の組織を示す。Fig.6の攪拌しない場合には、マクロ組織は壁面が柱状晶に、内部が大きな等軸晶組織になっている。ミクロ組織はデンドライト組織となっており、再加熱水冷するとデンドライト状の α -Alがつながった大きな α -Al組織となった。Fig.7の攪拌鑄造においては、マクロ組織は均一で細かい等軸晶、ミクロ組織においては球状になった α -Alが存在し再加熱しても分離した球状組織となっている。

2) 攪拌条件と組織の関係

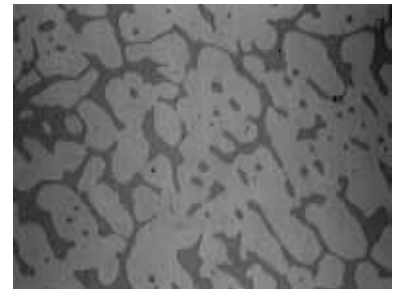
チクソ成形直前の半熔融状態に加熱した組織を水冷凍結して観察した。その組織における個々の α -Al面積および形状係数をFig.8に示す。形状係数 $4\pi S/l^2$ (S : α -Alの面積, l : α -Alの周長)は1に近いほど円形になることを表わしている。この結果から、攪拌条件としてコイルに高い周波数の大きな電流を流すほど、 α -Alは小さな球状になることがわかった。すなわち、攪拌鑄造することで α -Alは小さな球状になり、半熔融状態に加熱してもその状態を保つことがわかった。



a) Macrograph of as cast



b) Micrograph of as cast

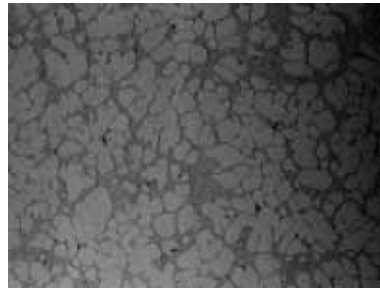


c) Micrograph of reheating

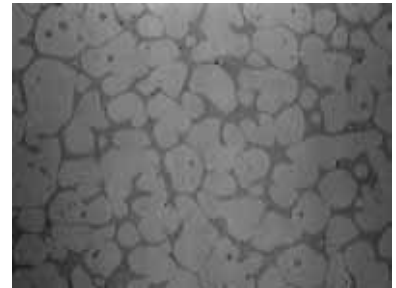
Fig.6 Casting with no stirring



a) Macrograph of as cast



b) Micrograph of as cast



c) Micrograph of reheating

Fig.7 Casting with stirring (Stirring condition: 10A, 100Hz)

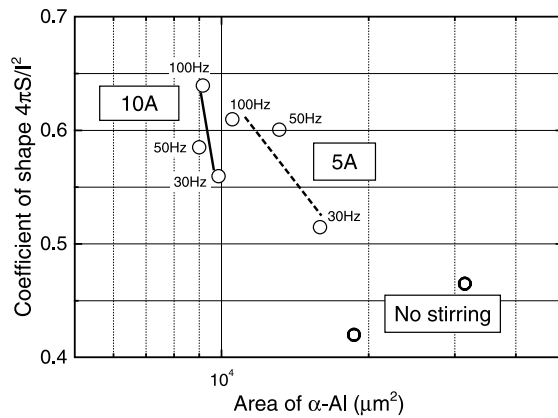


Fig.8 Relationship between coefficient of shape and area of α -Al

3)レオロジー特性と成形性

Fig.9に、攪拌条件とペネトレーション温度の関係を示す。攪拌条件は、回転数を決める周波数(f)と電流・周波数・半径によって決まる攪拌力(F)をかけたパラメータ Ff で表している。Fig.9から分かるように攪拌効果が高くなるほどペネトレーション温度は低下する。すなわち、攪拌条件を表すパラメータ Ff が大きいほどレオロジー特性は良くなる。Fig.10に、ペネトレーション温度と充填に必要な溶湯圧力、欠陥率の関係を示す。図からわかるように、ペネトレーション温度が低くなると充填に必要な圧力および欠陥率は低くなる。したがって、攪拌条件を表すパラメータ Ff が大きいほど、チクソ成形性は良くなる。

以上の結果から、十分な攪拌を加えた球状組織を持つビレットを使うことで、欠陥のない品質の良好な成形品ができることがわかった。そこで、充填に必要な溶湯圧力が十分に低下するような攪拌パラメータ Ff を設定した。さらに、攪拌連続鋳造用金型に必要な回転数(周波数)と磁束密度(電流)を設定した。

4. チクソ成形

4. 1. 固相率の求め方

半溶融金属の固相率を実験的に求める方法として、急冷凝固法や冷却曲線を使う方法などが提案されている^{3), 4)}。しかし、前者は局所的なデータから全体を推定する点で、また、後者は過冷却などの影響を受けやすい点で、いずれも測定精度に問題がある。そこで、固相率は実験ではな

く、状態図シミュレーションソフト(Thermo-Calc)によって求めた。このソフトは成分と温度を指定すれば半溶融時の固相率が算出できる⁵⁾。ビレット加熱時においては均質な組織となることから平衡状態で計算した値が実際と一致すると考えられる。A356とA357、A6061の成分をTable 1に示す。各合金の温度と固相率の関係はFig.11のようになる。

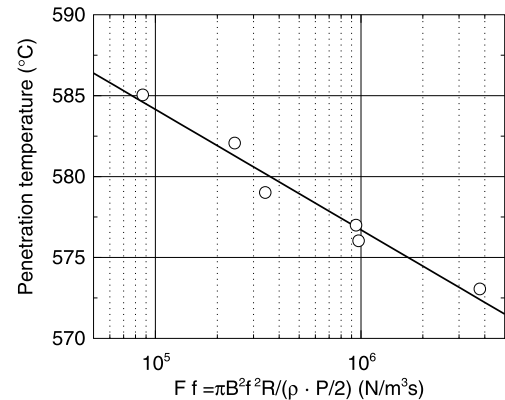


Fig.9 Relationship between penetration temperature and stirring condition

$$\text{Frequency of rotate (1/s)} = \frac{f}{P/2}$$

$$F \text{ (N/m}^3\text{)} = \frac{\pi B^2 f R}{\rho \cdot P/2} \propto I^2 f R$$

f : Frequency

P : Number of poles

R : Radius

μ : Permeability

ρ : Electric resistance

I : Electric current

B : Magnetic flux density

F : Stirring force

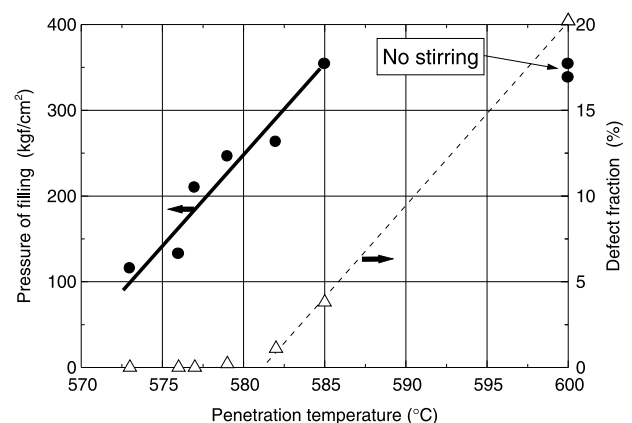


Fig.10 Pressure of filling and defect fraction affected by penetration temperature

Table 1 Chemical composition of aluminum alloys (wt%)

	Si	Mg	Cu	Fe	Zn	Mn	Ni	Ti
A356	6.5-7.5	0.2-0.4	<0.20	<0.20	<0.10	<0.10	<0.05	<0.20
A357	6.5-7.5	0.4-0.7	<0.20	<0.20	<0.10	<0.10	—	<0.20
A6061	0.4-0.8	0.8-1.2	0.15-0.40	<0.70	<0.25	<0.15	—	<0.15

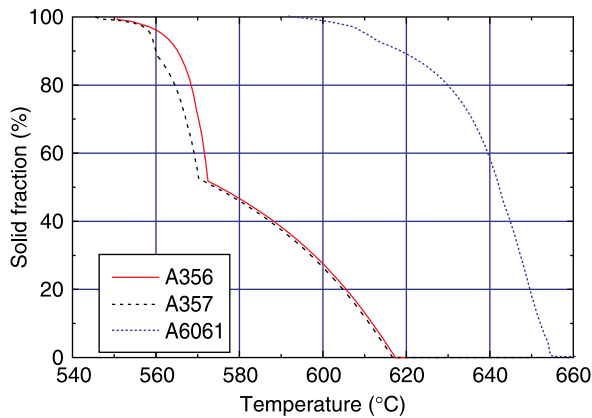


Fig.11 Solid fraction of aluminum alloys

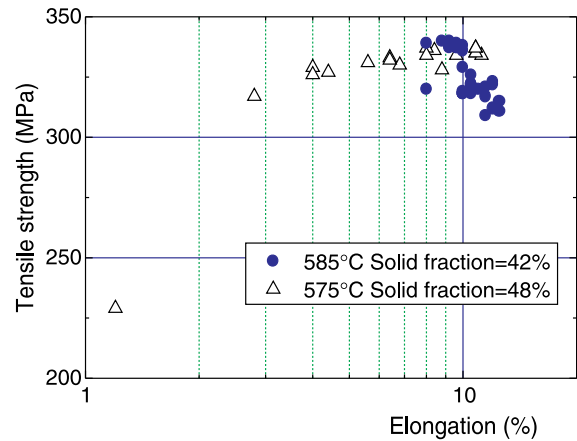


Fig.12 Mechanical properties of thixocasting

4. 2. 加熱方法

チクソ成形は加熱して成形する時の加熱条件によって成形品の品質および組織が大きく変化する。十分な温度まで加熱しないとFig.12のように、強度・伸び特性に大きなバラツキが生じる。Fig.13に、強度・伸び特性の悪い試料の組織を示す。同図からわかるように塊状のSiが晶出しており、これが伸び特性のばらつきの原因と考えられる。この塊状Siは、過共晶成分を鋳造した時に生じる組織である。過共晶成分が部分的に存在するのは、共晶成分が溶解した共晶濃度溶液では凝固過程においてミクロ的な成分変動を起こすことによる。このような塊状Siをなくすためには、液相が亜共晶となる領域でチクソ成形を行う必要がある。そこで、加熱温度をFig.11の変極点よりも十分高い温度である585°Cに設定した。

ところで、従来のチクソ成形では、自立しているビレットをそのまま加熱し、つかんで搬送・成形するという方法のため、加熱温度を高くするには問題があった。すなわち、加熱温度を高く設定するとビレットは自立しなくなり、その液相成分が滴れ落ちてアルミニウムの仕込み重量が不足する。このことは大型製品を成形するための大径ビレットを加熱・搬送する時にさらに大きな問題となる。そこでFig.14のようなSUS容器を採用した。SUS容器中でビレットを加熱し、DCマシンに投入するまで容器中に保持することによって、仕込み重量の減少を防いでいる。

その結果、加熱ビレットの温度を585°C、すなわち固相率を42%にしたチクソ成形ができた。このようにして成形した試料の組織をFig.15に示す。同図に示すような塊状Siが晶出しない組織が得られた結果、安定した強度が得られるようになった。そして、これらの検討結果に基づいて、チクソ成形時の固相率は45%以下と設定した。

4. 3. 合金特性

鍛造用合金として一般的なA6061合金について攪拌連続鍛造ビレットを作製した。引き続きビレットを42%の固相

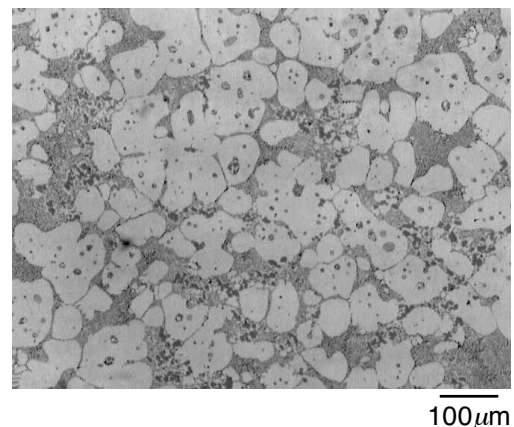
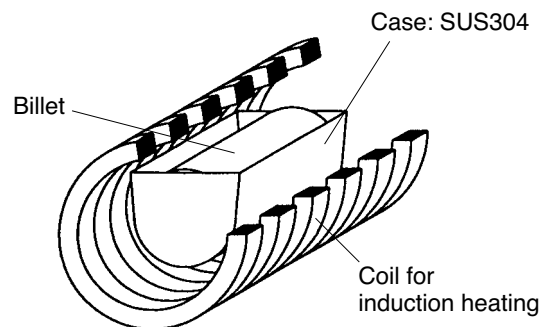
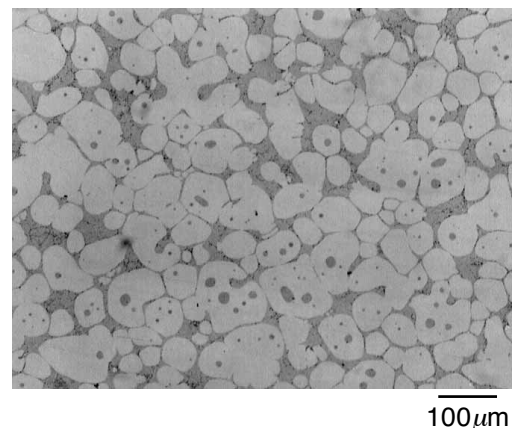
Fig.13 Micrograph of thixocasting
(Casting temperature: 575°C)

Fig.14 Equipment of billet heating

Fig.15 Micrograph of thixocasting
(Casting temperature: 585°C)

率まで加熱してテストピースを成形した。攪拌連続鋳造ビレットを用いることによって良好な充填性が得られたが、A6061合金の成形品には微小なポロシティが残存した。このポロシティによって、耐力や引張り強度はあまり変わらないが、疲労強度は大きく低下した。

疲労強度の低下した試料の組織をFig.16に示す。この微小なポロシティはすべて α -Alの粒界部分に生じている。この原因は半溶融金属が充填され、 α -Alが凝固する際に生じた凝固収縮に対して溶湯が供給できないことに起因していると考えられる。

Fig.11からわかるように、A356、A357合金は固相率50%程度で変極点が生じる。これは両合金は亜共晶合金であるが、共晶成分が存在することによるものである。さらに、各合金の温度における比熱特性をFig.17に示す。A356、A357両合金はSiを約7%含有する亜共晶合金なので、高融点相である α -Al成分と低融点相である共晶成分を含む。この低融点相は固相率50%においては完全な液相となり、大きな比熱をもつ。したがって、充填後のキャビティ凝固時における溶湯供給性にすぐれていると考えられ

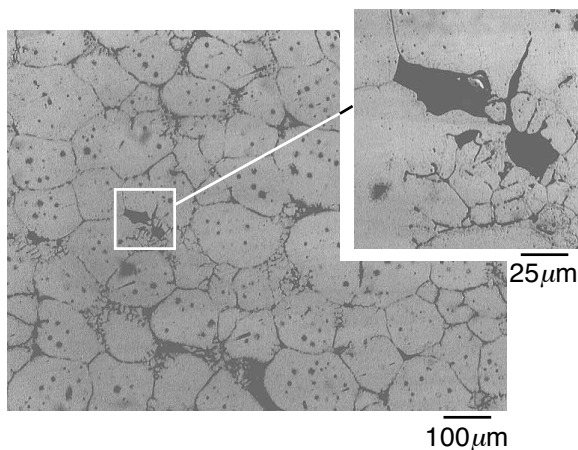


Fig.16 Micrograph of thixocasting with 6061 alloy

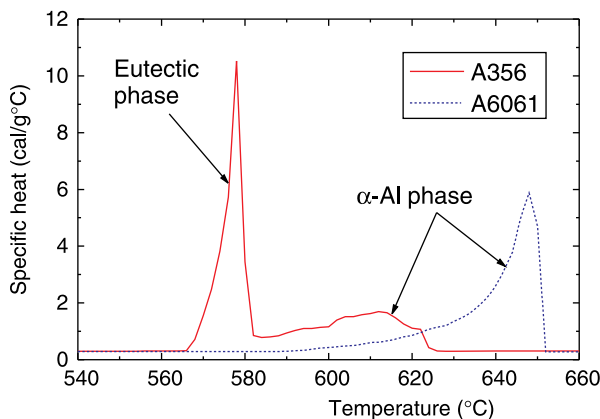


Fig.17 Relationship between specific heat and temperature

る。すなわち、高融点相と低融点相の2つのピークをもつ比熱特性の合金を使うことによって微小なポロシティを消滅させることができる。

それに対して、A6061合金は、 α -Alの一相組織であるため固相率42%の状態では完全な液相となる相が存在しない。よって、 α -Al相の凝固収縮に対して溶湯の補給が不十分になる。

以上の現象は鋳造合金の一般的な特性とも言える。凝固収縮によって生じるポロシティの溶湯を補給するには押湯の設定、高圧鋳造などの手法があるが、上記のような熱的材料特性も大きく関与しているということがわかった。

5. 攪拌連続鋳造ビレット

チクソ成形の方案部分はビレットとして再利用できず、溶解して溶湯として使用するしかなかった。すなわち、既存の鋳造設備があり、そこで同一の合金を使用することが好ましくなる。本研究ではビレットを作製することで、製品の方案部をビレットとして再利用できるようにした。ビレット作製のための電磁攪拌コイル付き金型をFig.18に示す。この金型を用いて、チクソ成形用攪拌連続鋳造ビレットを作製した。本金型の特徴は下記の通りである。

- 1) 金型用冷却水で電磁攪拌用コイルを冷却しており、コイル冷却用の冷却水が不要。
- 2) ビレットの全域を効果的に攪拌するための湾曲した断熱材形状(スパウト形状)。
- 3) アルミニウム溶湯に遠心力が加わっても、潤滑油供給路にアルミニウムが侵入しないようにした潤滑油供給機構。
- 4) アルミニウム溶湯の遠心力による面圧に対しても十分な潤滑性をもつテフロン添加鉱物油系潤滑油。

攪拌連続鋳造ビレットの表面品質を向上させるためには鋳造速度を適正に設定する必要がある。さらに、チクソ成形用の組織とするための攪拌力は非常に強力であるため、0.2mm程度のクリアランスがあると、そこに溶融状態のアルミニウムが侵入して凝固する。その結果、凝固した丸棒は金型にそって下降しなくなり、ついには表面近傍の凝固したアルミニウムが破断し内部の溶融したアルミニウムが下部に流出する。これらの問題を解決するには、性能の良い潤滑油と潤滑油供給機構が重要な因子となる。

そこで、潤滑通路と潤滑油の両方について改良した。すなわち、0.1mm程度の潤滑油供給路を安定して確保できる潤滑供給機構を設定した。そして、潤滑性能に優れ、狭い供給路で詰まりを生じないよう改良を加えたテフロン添加鉱物油系潤滑油を適用した。その結果、良好な表面を持つチクソ成形用攪拌連続鋳造ビレットが作製できるようになった。その外観写真を比較してFig.19に示す。

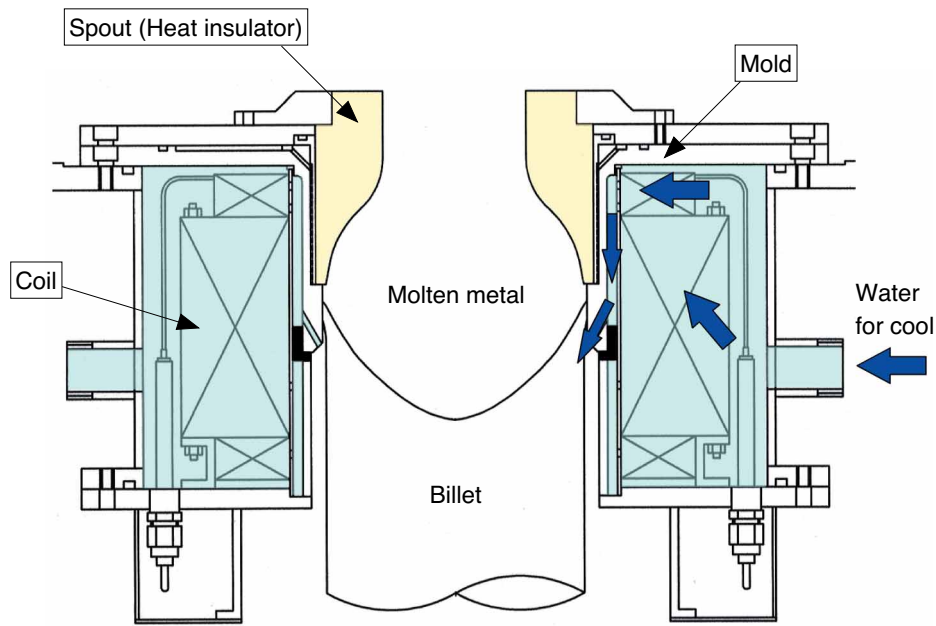


Fig.18 Construction of the mold for continuous casting with stirring

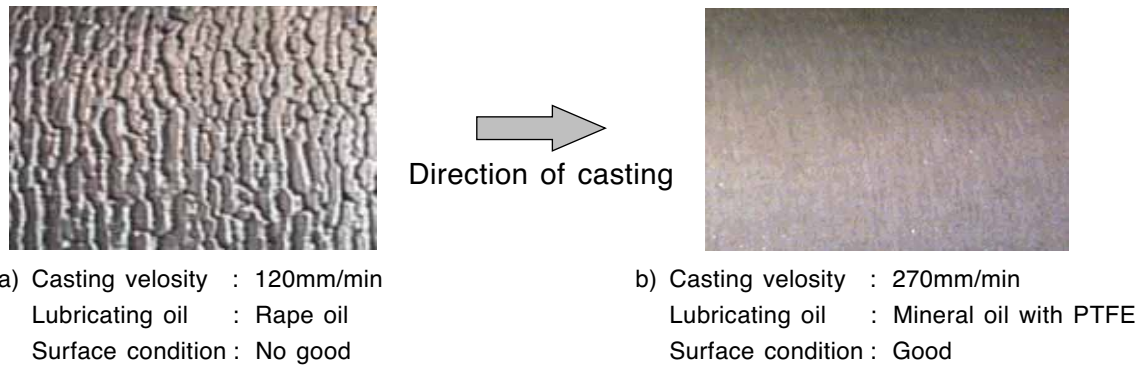


Fig.19 Surface condition of the continuous casting billet with stirring

6. リアアウトリガーへの適用

6. 1. 熱処理ひずみと機械的特性

まず最初に、リアアウトリガーの熱処理方法の違いによる熱処理歪みの大きさを調べた。比較した条件はT5処理、T6処理の2条件であり、いずれもチクソ成形品である。

T5処理は成形・水冷後に時効温度で保持する処理である。また、T6処理は成形と時効の間に溶体化処理を追加した処理であり、T5処理に比べて一工程多い。Fig.20に寸法変化の測定箇所を、Fig.21には各熱処理における寸法変化の測定結果を示す。Fig.21からわかるように、リアアウトリガーのような大型部品は、T6処理で大きく歪むのが避けられない。これに対して、T5処理品の歪みは小さい。

つぎに、チクソ成形品について、機械的特性に及ぼす熱処理条件の影響(T5処理、T6処理の2条件の違い)を調べた。なお、機械的特性の判断基準にするために、量産実績があるLPDC品についても同様に調べた。その結果をFig.22に示す。T6処理の場合は、チクソ成形品とLPDC品との間に機械的特性の差はあまりない。一方、T5処理にす

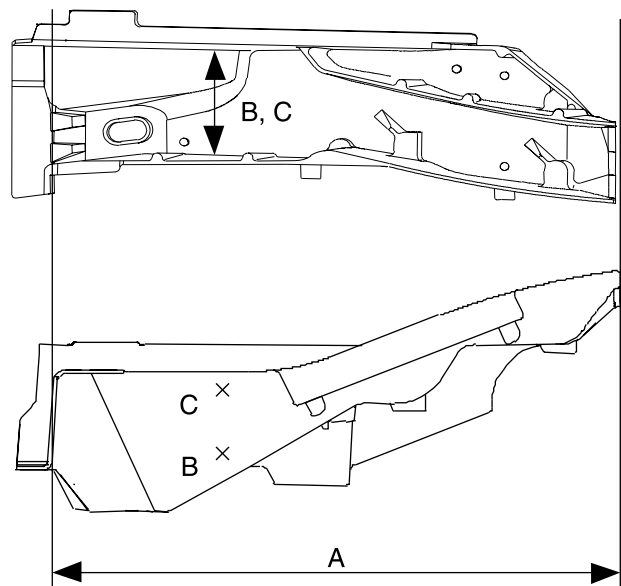


Fig.20 Measured points of dimension

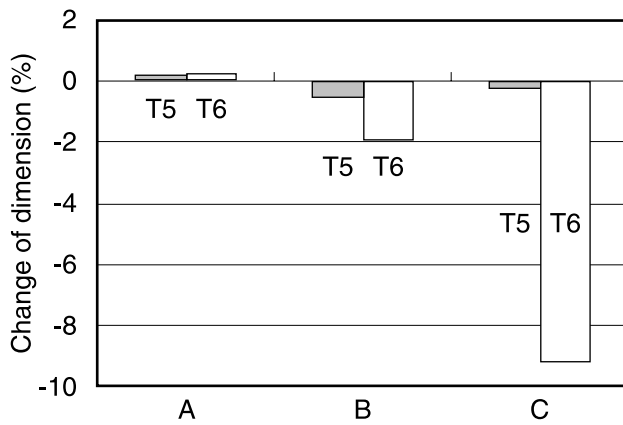


Fig.21 Change of dimension

ると、LPDC品の強度がT6処理にくらべて大きく下がるのに対して、チクソ成形品では大きく低下しない。このことから、素材製法をLPDC製法からチクソ成形に変えることで、T6処理を廃止してT5処理にできた。さらに、熱処理後の歪み矯正も廃止することができた。

6. 2. T5処理品の解析

先に、チクソ成形品ではT6処理をT5処理にしても強度が落ちないのに対して、LPDC品では下がることを述べた。本節では、その理由について考察する。

一般に、時効とは過飽和固溶体の分解・析出を利用した処理である。そして、過飽和固溶体を作るのが溶体化処理である。LPDC品の溶体化処理温度は530℃～540℃、チクソ成形のための加熱温度は585℃である。したがって、チクソ成形品の場合、成形のための585℃への加熱段階で、均質な飽和固溶体である α -Alが形成されたと考えられる。なお、チクソ成形では250℃程度の金型内に成形するが、この成形による急冷が溶体化の焼き入れの意味も持つことになる。

つぎに、チクソ成形では鑄込み過程で溶体化されるのに対して、LPDC製法では溶体化が起こらない点について考察する。LPDC品の α -Al内Si濃度分布の面分析結果をFig.23に示す。また、チクソ成形品、ビレットの分析値も加え α -Al中のSi濃度分布の線分析結果をFig.24に示す。Fig.23とFig.24から分かるように、LPDC品やチクソ成形用のビレットの場合、 α -Al内にSi濃度の勾配がある。これに対して、チクソ成形品ではSiの濃度は均一である。これは、チクソ成形の過程で同時に溶体化が起こっていることを証明するものである。

ところで、LPDC品とビレットのSi濃度勾配を比較すると、粒界から粒内へ向かっての濃度勾配が逆になっている。これは、つぎのように考えられる。まず、 α -Al中へのSi固溶限と温度の関係のシミュレーション計算結果をFig.25に示す。

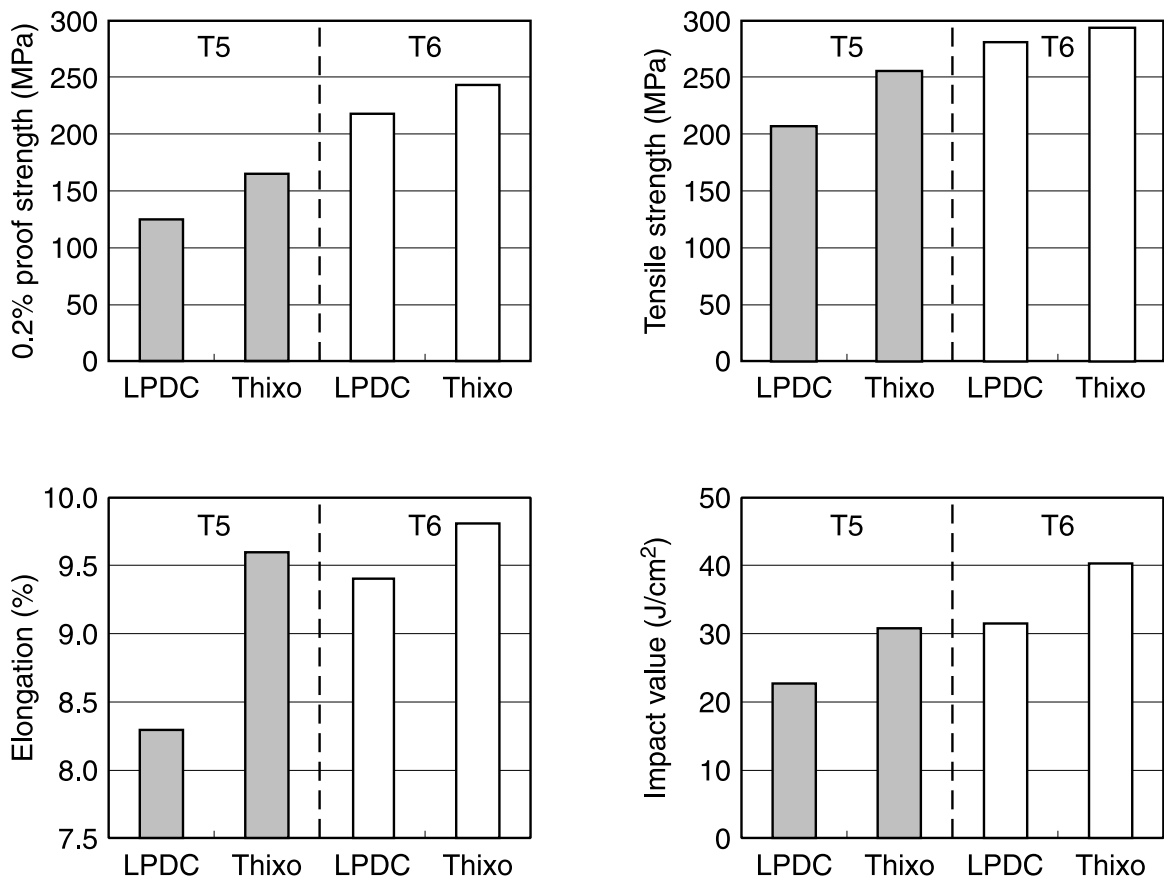


Fig.22 Mechanical properties of thixocasting and LPDC

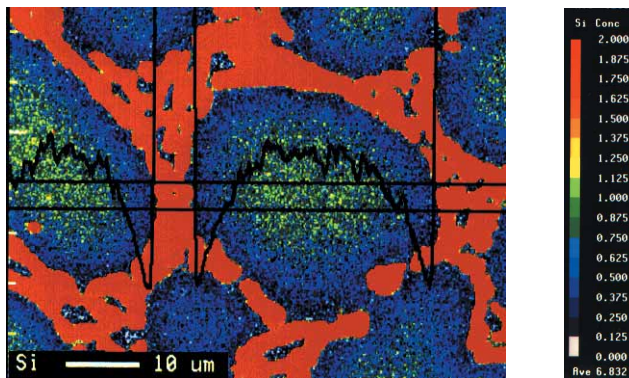


Fig.23 Distribution of Si in α -Al of LPDC

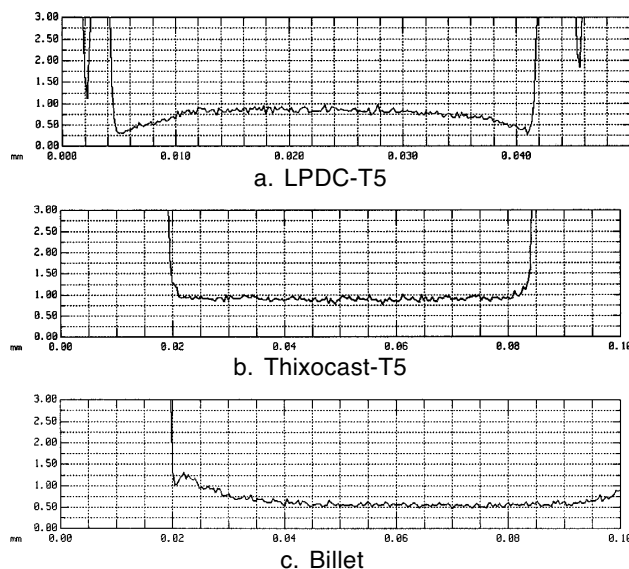


Fig.24 Distribution of Si in α -Al with each process

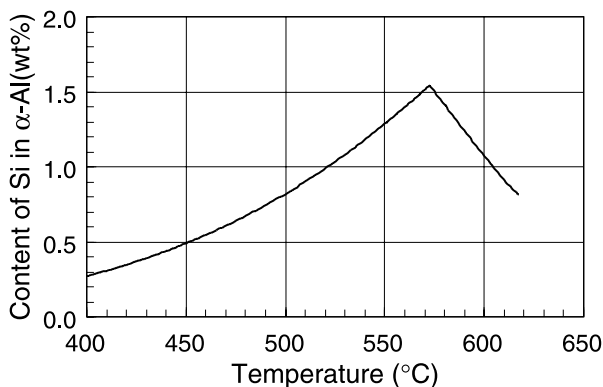


Fig.25 Content of Si in α -Al at each temperature

ビレット casting では水冷により速やかに200℃以下に下がる。これに対して、LPDCでは鋳込み後の金型温度が400℃程度になり、長時間その温度にとどまる。このことと Fig.25 から、ビレットのSi濃度分布は、各凝固温度における飽和Si濃度がそのまま水冷・凍結されたことによると考えられる。また、LPDCのSi濃度分布は、400℃付近での過飽和分のSiが粒界へ向かって拡散した結果と考えられる。

6. 3. 溶接性

リアアウトリガーと溶接される3つの相手部材をFig.26に示す。それぞれに対して溶接条件設定と特性を確認した。内部品質、とくにガス含有量が良くないと溶接時にガスが発生し溶接欠陥となる。また、表面品質に問題のある部材を溶接すると表面の酸化皮膜や離型剤層を巻き込んだりポロシティ、溶け込み不良が生じる。チクソ成形品のガス含有量を Fig.27 に示す。チクソ成形品のガス含有量は、溶接可能な従来製法であるGDC, LPDCより大きいが、HPDCと比較するとその約1/10となっている。その結果、チクソ成形品のガス含有量は、溶接可能な4 cc/100g Al以下となっている。

チクソ成形は圧力鋳造なのでその表面性状は表面粗さが小さく良好である。したがって、溶接性に影響を及ぼす表面性状は、表面酸化膜と離型剤と考えられる。なお、離型剤とは鋳造時に金型へ噴霧するものである。上記の表面皮膜厚さを測定するため、オージェ法により酸素濃度を分析した。継ぎ手効率と表面皮膜厚さの関係をFig.28に示す。Fig.28によると、保温特性重視のタルク系離型剤を使うと表面皮膜厚さは3000Åとなり溶接性は低下する。この場合、表面仕上げ(面削仕上げ: 40Å, ショットブラスト仕上げ: 100Å)を行えば、溶接性(継ぎ手効率)は問題なくなる。よって、表面皮膜厚さが大きくならない離型剤を使うことで表面仕上げ無しで溶接が可能となると考え、変性シリコン系離型剤を選択した。その結果、チクソ成形品の表面皮膜厚さは130Åとなり、表面仕上げ無しで溶接が可能となった。

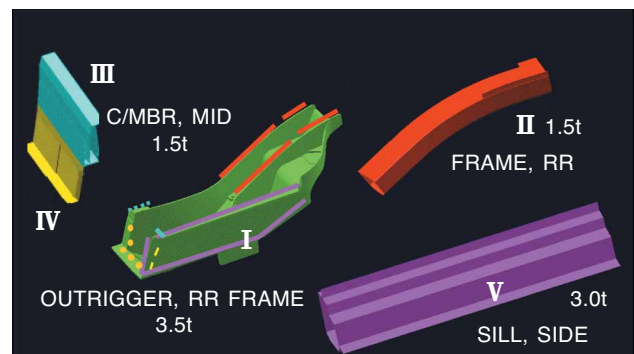


Fig.26 Weld parts with rear outrigger

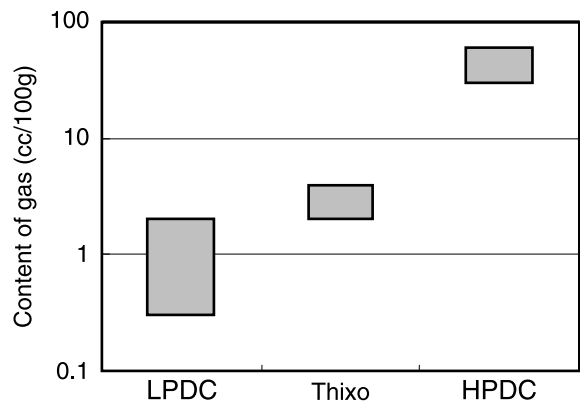


Fig.27 Comparison of gas content

$$\text{Joint efficiency} = \frac{\text{Tensile strength of weld}}{0.7 \times \text{Thickness of upper plate} \times \text{Width} \times \text{Tensile strength of the parent metal}}$$

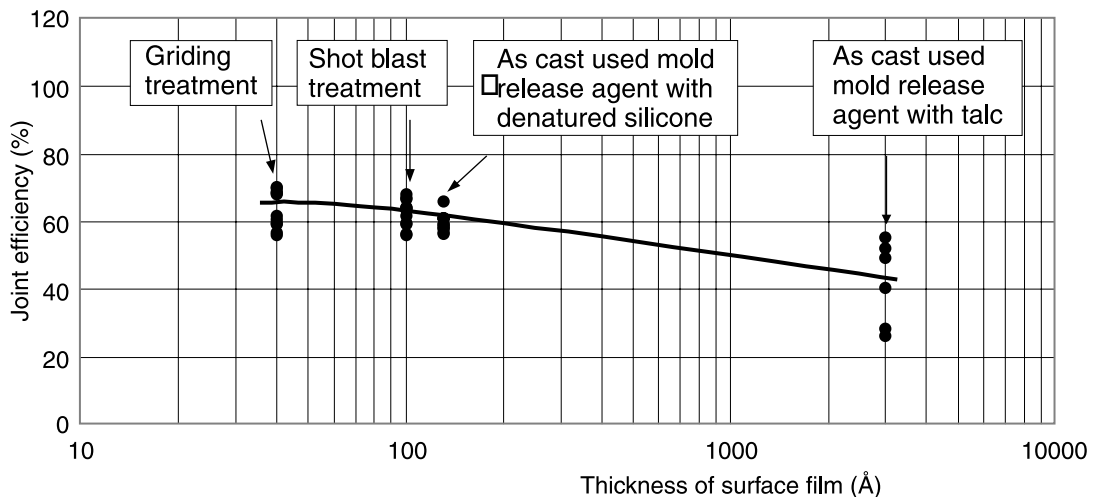


Fig.28 Relationship between joint efficiency of MIG weld and thickness of surface film

7. まとめ

高品質な大型薄肉鋳物を実現させるためチクソ成形技術の研究・開発し、アルミニウムスペースフレーム車体の継手部品であるリアアウトリガーに適用した。

その結果、大型の鋳物部品でも3.5mmの薄肉成形が可能であり、既存の溶接可能な鋳造法(GDC, LPDC)と比較して20%の軽量化が達成できた。

以下に本開発で得られた技術内容を示す。

- (1) チクソ成形技術の核となる電磁攪拌が及ぼす組織への効果を明らかにし、攪拌連続鋳造技術を確立した。
- (2) 高品質な大型薄肉鋳物を実現させるための加熱手法、加熱条件、求められる合金特性を明確にした。
- (3) チクソ成形品のT5処理で機械的特性が得られるメカニズムを解明し、変形のない素材で強度が得られることから矯正処理の必要がないことがわかった。

チクソ成形法は上記のような特性を生かし、今後車体部品のアルミニウム化に貢献するものとする。

8. 参考文献

- 1) Flemings, M. C., Riek, R. G. and Young, K. P.: Rheocasting Processes, International Cast Metals Journal, vol.1, p.11 (1976)
- 2) Moschini, B.: Manufacture of automotive components by semi-liquid forming process, Proceedings of the Second International Conference on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, p.149 (1992)
- 3) Mehrabian, R., Flemings, M. C.: Die Casting of Partially-solidified Alloys, July-August, p.50 (1973)

4) Chai, G., Rolland, T., Arnberg, L., Backerud, L.: Studies of dendrite coherency in solidifying aluminum alloy melts by rheological measurements, Proceedings of the Second International Conference on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites, p.193 (1992)

5) Saunders, N.: Computer Aided InnoVation of New Materials 2, p.731 (1993)

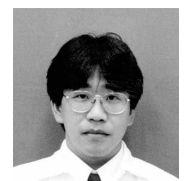
■ 著 者 ■



斉藤 信広



中村 武義



大谷 輝幸



黒木 盛男



増田 栄二



井手 龍隆