セミソリッド加工の新しい展開

セミリキッドダイカストプロセスの開発

柴田良一* 金内良夫**
早田智臣*** 山根英也****

1. 緒言

1970年代初頭に米国マサチューセッツ工科大学において開発された半溶融(チクソキャスト)・半凝固(レオキャスト) 鋳造技術⁽¹⁾は現在、欧米主導により実用化の緒につきはじめたところである。技術の概要については既に多くの文献によりより明らかにされている。この技術の名称については様々な議論が有り統一されていないが、この文では機械攪拌や電磁攪拌を用いて溶湯を攪拌しながら、一端完全に凝固させた材料を、再度加熱して固相と液相が共存する状態で鋳造するものを半溶融ダイカスト、溶湯状態からの冷却過程で初晶を粒状化し、固相と液相が共存する状態から鋳造するものを半凝固ダイカストとする。また、Semi-solid か Semi-liquid かとの議論もある。これは、固相と液相が共存している状態において力がかからない状態で自立するか流動するかによって区別する。前者は Semi-solid (準固体)、後者は Semi-liquid (準液体)である。この境界は概ね固相率50%を境としている。今回、筆者らが開発した方法はどちらにも対応可能であるが、主として半凝固および Semi-liquid の状態で鋳造を実施する。そして、材料は金型内を流動中に金型に熱を奪われ、最終充填時には固相率は50%近くまで高まっている。

半溶融・半凝固鋳造法は融液中に粒状化した固体を含む場合には粘性がせん断応力により低下するレオロジー現象によ

り湯流れが層流になりやすいことを利用している。すなわち、粒状化した固体を20~60%含み残部が液体の状態で、水飴や蜂蜜の流れのような層流状態で、鋳型に充填後加圧するものである。

この鋳造法では鋳物の引けが少なく、また、鋳造時の冷却速度が大きく、加圧により欠陥がさらに減少するため耐圧性や機械的性質が良好であることが知られている。

半溶融法は2回鋳造法となるため、半凝固法に比較して製造工数が増加する。しかし、半凝固法に適した攪拌手法は操業の安定性や攪拌時の介在物の混入、攪拌工具の問題などで製造上問題が多く、実用化では半溶融法が先行していた。

現在実用化されている半溶融ダイカスト法(図1にその概略工程を示す。一般にチクソキャストと呼ばれる)は通常のダイカスト鋳造法と比較して、連続鋳造の工程、ビレット切断工程、再加熱工程などを含むため原価が大幅に上昇することが問題であった⁽²⁾。

また、この製造方法では連続鋳造を必要とするため、鋳造メーカーでの独自の材料開発が困難であることも問題であった。さらに、加熱時に素材が流動しないことを前提としているため、鋳造条件として固相率を低くすることが困難であった。

筆者らは、これらの問題を解決する方法として、ダイカストの射出スリーブの中で初晶を粒状化する半凝固ダイカスト技術を開発したので紹介する⁽³⁾。

* 日立金属株式会社素材研究所主管研究員(〒321-43 真岡市鬼怒ヶ丘11)

** 日立金属株式会社熊谷工場

*** 日立金属株式会社九州工場

**** 日立金属株式会社素材研究所

Development of Semi-liquid Die Casting Process; Ryoichi Shibata*, Takao Kaneuchi**, Tomomi Souda***, Hideya Yamane**** (*,****Casting Technology Research Laboratory, Hitachi Metals Ltd., Maoka. **Kumagaya Works, Hitachi Metals Ltd., Kumagaya. ***Kyushu Works, Hitachi Metals Ltd., Kanda)

Keywords: aluminum alloy, semi-liquid casting, electromagnetic stirring, spheroidization of α phase, mechanical properties, aluminum-silicon-iron compound

1997年11月18日受理

図1 チクソキャストの製造工程。

2. 新技術の概要

図2に開発した半凝固ダイカスト技術の概要を示す。まず溶湯がダイカストの射出スリーブに注入される。通常のダイカストではそのまま溶湯状態で金型空間に射出充填されるが、半凝固ダイカストでは、溶湯はスリーブ外周に設置された誘導コイルによる電磁力を受け攪拌される。一方、水冷されたスリーブにより強い冷却を受けることにより、電磁力による加熱効果を打ち消して冷却される。これにより、固相を含む半溶融状態まで攪拌されながら温度は低下してゆく。この過程で粒状の初晶が形成され、半凝固ダイカストに適した粒状の固体と液体の混合状態が形成される。

攪拌効率を高めることおよび、射出スリーブ自体の温度上昇を防止し、剛性を確保する目的で図3に示すようなスリーブに縦方向の溝を形成する構造を採用した。この構造は溶解や連続铸造においてコールドクルーシブル法⁽⁴⁾として知られているものであるが、ダイカストへの適用は本技術が最初である。

通常の導電性の有るスリーブに電磁気力を付加すると、誘導電流によりスリーブ自身が発熱し、冷却を行うことが困難である。また、スリーブが高温となるため高い負荷を受ける射出スリーブへの適用は困難であった。さらに、他の方法として高温でも剛性を保持できるセラミックスを単体で使用する事が考えられるが、高い射出力や熱応力により容易に破損するため実用化には程遠かった。コールドクルーシブル構造の採用によりスリーブ内の溶湯への電磁攪拌の効率が高くなり、しかも射出スリーブ自身は低温であるため、十分に高い剛性を保っている。また、スリーブ内容湯の冷却効率も高いため、铸造に必要な時間も短く、周囲への熱放射の問題もない。

新しい半凝固ダイカストでは必要な粒状の固体がダイカストの射出スリーブ中で形成されるため、再加熱用の特殊なビレットやチップを購入する必要もなく、再加熱時の溶け出し

図2 半凝固ダイカストの铸造工程。

図3 半凝固ダイカストの射出スリーブの構造。

の問題も発生しない。したがって固相率を自由に設定できる。

しかも、金型寿命の増加、高い耐圧性、高い機械的性質などの利点はそのまま保持される。

3. スリーブ内での初晶粒状化

半溶融・半凝固ダイカストでは通常、7%Si付近の合金が使用される。図4にAl-Si系の2元系状態図を示す。この場合、最初に固体が発生する液相線温度は893 K付近であり、共晶の冷却が始まる温度は850 K付近である。共晶凝固直上の固相率は60%前後の値となる。これらの値は合金の添加量により変化する。

図5にスリーブ内の溶湯の冷却曲線に及ぼす攪拌の影響を図式的に示す。また、溶湯の中央部付近の顕微鏡組織を図6に示す。図6には再加熱後(853 K, 600 s 保持)のチクソキャスト用素材の組織も合わせ示す。いずれも初晶の α 相が粒状化している。

攪拌による初晶組織の粒状化機構に関しては、デンドライ

トが攪拌により破断されて結晶核となり、それが成長すると
の解釈が主流である⁽⁵⁾。しかし、電磁攪拌の効果については
十分に解明されているとは言えない。確かにデンドライトの
破断機構も存在しているが、最近の検討では、それ以外に、
液相線付近で均熱化された溶湯が凝固する際に、多数の結晶

図4 Al-Si合金2元状態図。

図5 冷却曲線の模式図。

(a) スリーブ内粒状化 (b) チクソキャスト素材再加熱後

図6 スリーブ内で電磁攪拌したマイクロ組織の例。

核から小粒径の等軸晶が生成し、結晶核間の距離が小さいた
めデンドライト成長ができず、粒状化するとの考えも出てき
ている⁽⁶⁾⁽⁷⁾。電磁攪拌による溶湯の攪拌により、スリーブ内
溶湯が均熱化された状態で冷却されることにより、後者のメ
カニズムで粒状化するとの説である。後者の説については、
液相線近傍で均熱保持すれば攪拌を必要とせず初晶が粒状
化することも示されている⁽⁷⁾。今後、そのメカニズムの理論
的解明が望まれるところである。

スリーブ内で電磁攪拌しつつ冷却した材料のマイクロ組織に
つき、円相当径および円形度を以下に定義して初晶粒子の測
定を行った。

$$\text{円相当径} = 2 \cdot \sqrt{\text{粒子面積の平均値} / \pi} \quad (1)$$

$$\text{円形度} = \pi \cdot \text{円相当径} / \text{粒子外周の平均値} \quad (2)$$

この結果を再加熱後(853 K, 600 s 保持)のチクソキャスト
用素材の結果と合わせて図7に示す。このように半凝固ダイ
カストでは鋳造前の初晶粒子の平均の円相当径がチクソキャ
ストより小さく、円形度はほぼ同等である。

筆者らの初晶粒径への保持時間影響に関する実験⁽⁶⁾では、
図8に示す如く保持時間の増加とともに円相当径は増加す
る。この増加は概ね時間の1/3乗に比例している。チクソ
キャストでは再加熱時に通常600 s程度の間853 K付近の
温度に保持される。一方、今回開発した半凝固ダイカストで
は半凝固域での冷却時間は20 s程度である。このため、チ
クソキャストでは半凝固ダイカストに比較して、粒子が粗大
化するものと考えられる。なお、結晶粒径に及ぼす冷却速度

図7 鋳造前の結晶粒径、円形度の比較。

図8 攪拌時間による結晶粒径の変化。

の影響については文献(8)を参照されたい。

また、最近では低温で注湯するのみで α 相を粒状化させることが可能なことも明らかになってきており⁽⁸⁾、スリーブ内で初晶を粒状化する技術も、今後多様になってくると考えられる。

4. 試験鋳物の鋳造

半凝固ダイカスト法および層流ダイカスト法により図9に示す平板状の鋳物を鋳造してその特性を調査した。平板状の鋳造品は機械的性質調査用に使用し図10の位置より引張試験片および平面曲げ疲労試験片を採取した。各試験片の形状も図中に合わせ示す。また、比較のため市販素材によるチクソキャスト品についても調査を行った。表1に試験鋳物の化学

図9 鋳造した鋳物。

	引張 TP	疲労 TP
掴み部幅 W_0	10	20
幅 W_1	6.5	30
全長 L_1	100	90
掴み部長さ L_0	39	25
板厚 t	4	4

図10 引張および疲労試験片採取位置と試料形状。

組成を、また表2に鋳造条件を示す。

図11には引張試験結果を示す。半凝固ダイカスト材は層流ダイカスト材およびチクソキャスト材と比較して高い特性を示した。この原因を調査するため各種の試験を実施した。試験材の顕微鏡組織を調査した結果が図12である。

この結果から、共晶 Si の円相当径および円形度を調査した。その結果が図13である。これからは3者に有意差は見られない。

3者の組織を詳細に観察すると層流ダイカスト材および市販のチクソキャスト材では図14に示すように板状(顕微鏡組織では針状)の Al-Si-Fe 系化合物が多く見られた。一方、半凝固ダイカスト材では粒状の Al-Si-Mg-Fe 系化合物が大部分で針状の Al-Si-Fe 化合物はほとんど見られなかった。

また、全体の傾向を見るため共晶部の X 線回折により晶出物の解析を行った。この結果も SEM による組織写真と同様に層流ダイカスト材の偏析部およびチクソキャスト材には Al-Si-Fe による回折が見られるが、半凝固ダイカスト材ではこれが見られなかった。これからチクソキャスト材および層流ダイカスト材は靱性に対して有害な板状の Al-Si-Fe 系化合物量が多く、これが伸びが低い理由と考えられる。

表1 調査試料の化学組成(質量%)。

鋳造法	Si	Mg	Fe	Sr	Ti	Al
半凝固ダイカスト	6.83	0.68	0.13	0.0076	0.13	Bal.
チクソキャスト	6.81	0.57	0.13	0.0152	0.12	Bal.
層流ダイカスト	6.66	0.65	0.13	0.0120	0.12	Bal.

表2 各種鋳造法による板状試験鋳物の鋳造条件。

鋳造法	鋳造温度 (K)	鋳造速度 (m/s)	Fe 含有量 (質量%)	T6 条件
半凝固ダイカスト	863	1.0	0.13	813 K, 14.4 ks
チクソキャスト	848	1.0	0.13	333 K 温湯冷却
層流ダイカスト	993	0.4	0.13	433 K, 14.4 ks

図11 各種鋳造法による鋳物の引張特性。

Shivkumar ら⁽⁷⁾は $\text{Al}_8\text{Si}_6\text{Mg}_3\text{Fe}$ の生成は下記の反応によるとしている。

表3にEPMAで調査した分析結果と共晶部のMg量の推定値を示す。ここでは α 相面積率を60%として計算している。チクソキャスト材においては α 相へのMgの固溶度が最も高い温度域で長時間保持されるため初晶内にMgが0.9%程度存在し、これだけで、添加したMg量(0.57%)に近くなり、共晶部にはほとんどMgが存在しないと考えられる。また、層流ダイカストでは初晶内のMg量は0.7%で

共晶部にもMgが存在するが、共晶部でのFeの偏析により、存在するMgがすべて化合物に変化しても、それを上回る量のFeが存在していると考えられる⁽⁹⁾。これによりAl-Si-Fe化合物が多量に残存する。これに対し半凝固ダイカストでは発生した鉄化合物がほぼすべてAl-Si-Fe-Mg化合物に変化したものと考えられる。

次に強度部材において重要な疲労強度に関する調査を行った。この結果を図15に示す。半凝固ダイカスト材の疲労強度は展伸材並みの値を示し、層流ダイカスト材よりもばらつきが小さかった。また、回転曲げ試験においてはさらに高い疲

図13 各種鋳造法による鋳物の共晶Siサイズの比較。

表3 各種鋳造法による各相中のMgとFe(共晶部は状態図より推定)の含有量(質量%)。

α 相中 Mg量	$0.60 \times \alpha$ 相中 Mg量	分析値	$0.4 \times$ 共晶中 Mg量	共晶中 Mg量	共晶中 Fe量
0.73	0.438	0.66	0.222	0.555	0.253
0.895	0.537	0.57	0.033	0.0825	0.253
0.7	0.42	0.65	0.23	0.575	0.253

図12 各種鋳造法による鋳物の引張試験片のマイクロ組織。

図14 各種鋳造法に現れたAl-Si-Fe化合物の例。

図15 疲労強度の調査結果.

疲労強度が得られている⁽¹⁰⁾。これらは半凝固ダイカストでは欠陥が微小であることおよび冷却速度が速く、共晶部の Si 粒子が細かいことおよび Al-Si-Fe 化合物の減少により共晶部における疲労強度が高まっているものと推定している⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。この点については、今後さらに検討を進めたい。

5. 他の合金への適用

緒言にも述べたように、半凝固ダイカストでは材料の変更が容易である。その例として、Mg 合金および AC4B 合金の例を図16に示す。これらの合金でも初晶が粒状化した、半凝固ダイカスト特有の組織が得られた。

6. 結 言

ダイカストスリーブ内において溶湯から直接粒状化した初晶を得る技術を開発した。この技術を用いて溶湯からの冷却仮定において、固液共存状態から金型空間に加圧充填する、新しいプロセスによる半凝固ダイカスト技術を開発し、Al-Si 系合金に適用して以下の結論を得た。

- (1) 射出スリーブへのコールドクルーシブル法の適用によりスリーブ内の材料を攪拌しつつ冷却する技術を開発した。
- (2) この方法によりスリーブ内で粒状化した初晶粒径はチクソキャストより細かい。
- (3) 得られた鋳造材では共晶部における板状の Al-Si-Fe 化合物が少ない。
- (4) 引張特性はチクソキャストや層流ダイカストより良好

図16 半凝固ダイカストした Mg 合金および AC4B 合金のマイクロ組織.

である。

(5) 疲労強度は一部の展伸材と同等で良好である。

(6) 多様な合金への対応が容易である。

半溶融・半凝固ダイカスト技術は鋳造品として最高レベルの特性を有しており、21世紀の一般産業用の素形材として一定の位置を占めることが予想される。そのためにはコストパフォーマンスの向上と品質ばらつきの減少が不可欠と思われる。本技術がその一助となれば幸いである。

文 献

- (1) M. C. Flemings: Mater. Sci. Eng., **25**(1976), 103.
- (2) K. P. Young: NADCA Transactions Indianapolis T95-115, p. 403-410.
- (3) 柴田良一, 金内良夫, 早田智臣, 山根英也, 影山 望: 日立金属技報, **13**(1997), 71.
- (4) たとえば浅井滋生: Jour. JSME; 1993/10.
- (5) たとえば平居正純: 学位論文「溶融合金およびスラリー状半凝固金属の粘度挙動に関する研究」, (1993).
- (6) 柴田良一, 金内良夫, 山根英也, 梅田高照: 鋳造工学, **69**, No. 11(1997), 893.
- (7) S. Shivkumar, L. Wang and D. Apelian: JOM, Jan, (1991), 26.
- (8) 柴田良一, 早田智臣, 山根英也, 梅田高照: 鋳造工学, **69**, No. 7(1997), 549.
- (9) 柴田良一, 金内良夫, 早田智臣, 山根英也: 鋳造工学, **69**, No. 11(1997), 845.
- (10) 越智保雄, 柴田良一: 軽金属学会第93回秋季大会講演概要, (1997), 311.
- (11) 鈴木秀人, 龔偉民, 永井邦和, 松山健也, 伊藤吉保, 柴田良一: 日本機械学会論文集(A編), **61**, No. 585(1995-5), 894.
- (12) 鈴木秀人, 龔偉民, 伊藤吉保, 柴田良一: 日本機械学会論文集(A編), **61**, No. 586(1995-6), 1165.
- (13) 久保田祐信, 越智保雄, 石井 明, 柴田良一: 日本機械学会論文集(A編), **61**, No. 591(1995-11), 2342.