

This paper is subject to revision. Statements and opinions advanced in this paper or during presentation are the author's and are his/her responsibility, not the Association's. The paper has been edited by NADCA for uniform styling and format. For permission to publish this paper in full or in part, contact NADCA, 3250 N. Arlington Heights Rd., Ste. 101, Arlington Heights, IL 60004, and the author.

構造部材のレオキャスト化

M.ハートリーブ

Viami International Inc.、カナダ、QC州、ビーコンズフィールド

P.ヤンソン

コンプテックAB (スウェーデン・スキリングアリード)

J.-C.タウィル、S.ベルジュロン

Dynatool Industries Inc.、カナダ、QC州、モントリオール

概要

構造用ダイカストは、過去数十年にわたり、当初はヨーロッパで、その後北米をはじめ世界的に大きく発展してきました。特殊な合金、特殊な溶融処理、高真空、私たちの業界の多くのベストプラクティスを適用した慎重に設計されたダイカスト工程で行われます。構造用ダイカストは、サイズと複雑さが増し、ダイカストマシンはますます大きくなっています。今日、私たちは、レオキャスト（固形分30～45%の半固形スラリーを用意し、キャビティ内にゆっくりと層状に注入するプロセス）が、構造用ダイカストをまったく新しい次元に引き上げ、従来では不可能だった部品の鋳造を可能にすると同時に、構造用ダイカストの現在の問題の一部を軽減または解消できることを発見しました。レオキャストでは、構造用低圧永久鋳造法（LPPM）やその他の類似プロセス（フルT6を含む）と同じ合金と熱処理を使用することができ、同じ特性を得ることができる。レオキャストは、電気通信業界やその他の一部の業界でブレークスルーを果たしましたが、現在では、構造用鋳物を作る際の工具箱として不可欠なツールに最適化されてきています。この論文では、EV用の大型（長さ約4フィート）ヒンジピラーの量産に成功した開発について紹介します。また、合金、熱処理、達成可能な特性に関するプロセスの可能性についても説明します。また、ダイカスターがより複雑な（薄肉・厚肉の）超大型鋳物を最高の品質で製造するために、レオキャストがどのように役立つかを紹介します。また、構造用LPPM鋳物に代わって、肉厚を減らし、公差を改善し、より経済的にすることができます。この技術で開発すべきことはまだたくさんありますが、これまでの実績は、レオキャストがダイカスターの構造物鋳造という新しい市場への参入を可能にし、これまで鋳造が不可能とされていた部品の製造（しかも、考えられていたよりもはるかに小さな機械で）、成長する構造物ダイカスト市場をさらに速く、さらに拡大することができることを示すものです。

イントロダクション

レオキャストは、70年代初頭から存在しています[1]。姉妹技術であるチクソキャストは、他の鋳造プロセスにおける通常の樹枝状凝固とは対照的に、球状の微細構造を形成し、その明らかな利点により、（限られた）初期の工業的成功を収めました [2,3]。しかし、球状化前のビレット（金型に注入する前に液相と固相の間の温度に誘導加熱する）を作るのが複雑で、鋳造工場内で返品やスクラップを簡単にリサイクルできないことから、チクソキャストは経済的に実行不可能とみなされ、ほぼ消滅しました（少なくともアルミニウムでは）。過去数十年の間に多くの異なるレオキャスト技術が開発されましたが、非常に有望なものもありましたが、さまざまな技術的問題や大規模な工業生産への実現性（研究開発ラボでは非常に有望な結果を示していましたが）のために、重要な産業的成功には至りませんでした[4]。

Comptech ABは、新たなレオキャスト技術を発明しようとしたのではなく、2007年にRheoMetal社から最初のライセンスの1つを取得し、その後10年以上にわたってこのプロセスを最適化し、工業的に堅牢で実行可能にすることに取り組みました。2018年には、通信業界において、さまざまな熱交換器、無線フィルター、そしてこの技術が絶対に理想的であることが証明された有名な5Gハウジングのための、真の商業的ブレイクスルーが訪れました。[5]

この通信業界における商業的なブレイクスルーの直後、より多くのダイカスター、そして自動車やトラックなどの他の業界のOEMが、レオキャスト技術の利点と構造鋳造に何ができるかを理解しました：**(1)ダイカストマシンのサイズを小さくすることは、鋳物がますます大きくなり、ダイカストマシンが増え続ける中で非常に価値がある。****(2)部品の品質を向上させ、鋳物の厚い部分と薄い部分を可能にすれば、より多くの機能や部品を統合した複雑な鋳物をより経済的に製造できる。****(3) 金型寿命の延長できる。**特に、現在の構造用ダイカスト合金は、標準的な（二次）ダイカスト合金に比べて金型寿命が短くなるのが一般的であるため、**(4) (a) ダイカストプロセスでの鋳造が困難または不可能な新しい合金を使用する、および/または一般的に一次構造用ダイカスト合金の代わりに、完全にポスト消費者のスクラップを使用した（カーボンフットプリントが最も低い）(b) 二次合金を使用することにより、優れた特性を持つ高精密鋳造品を鋳造できること。**

そのため、2022年初頭に北米で初の構造用レオキャストの量産が開始されたことは、驚くには値しないことでした。大型のドア構造に溶接された、長さ4フィートのヒンジピラー鋳物（図1）です。これは構造物（ドアを支える）であり、衝突に関連するもので、業界で最も二酸化炭素排出量の少ない100%クリーンなポストコンシューマーホイール（eccomelt356.2）から標準A356-T6の1650トンのダイカストマシンで作られています。このプロセスは、モンリオール（QC）にあるDynatool Industries Inc.で6ヶ月以内に実施され、現在では2台目の機械では、他にも小型のドアブラケットや、さまざまな用途や産業向けの他の合金のレオキャストリングを生産しています。



図1-大型EV用ヒンジピラー鋳造、ダイナツール社製コンプテックレオキャストプロセスで製作。

コンプテックレオキャストプロセス

コンプテック社のレオキャストプロセス（レオメタル™ プロセスに基づく）は、高純度鋳物の製造に不可欠な、最大45%の高固形分率の半固形スラリーを調製することを可能にします。このプロセスでは、まず、ダイカストマシンで鋳造されるのと同じ合金を使用して、小さな永久鋳型でロッド上のエンタルピー交換材料（EEM）を製造することから始まります。複数のEEMをカラーセルで移動させ、総サイクルタイムに影響を与えずに、冷却とそのライザーの取り外しを可能にします。同時に、セラミック製の取鍋によって、必要な量の液体金属（ショット重量からEEMの重量を引いたもの）がスラリーメーカーに運ばれます。EEMは取鍋の液体金属に浸され、非常に制御された回転によって溶解され、目的の固形分率を持つ半固形スラリーが作られます。特殊な技術により、酸化物の巻き込みと溶融物中のHのピックアップを絶対に最小限に抑えます。プロセスの簡単な概略図を図2に示す。スラリー製造工程では、球状（非樹枝状）の粒を持つ均質なスラリーが形成される。このプロセスは通常約20秒かかり、これはDCMのサイクルタイムよりも短いため、全体のサイクルタイムに影響を与えることはありません。スラリーは、合金にもよりますが、最大90秒まで均質な半固形状のままであり、広い動作領域を確保することができます。その後、半固形状の混合物をDCMのショットスリーブに流し込む（最大固形分率45%で可能）ので、ダイカストマシンやショットスリーブの追加改造は必要ありません。

最後にロッドを洗浄し、次のEEMをキャストする。

比較的小型の装置であるため、ダイカストセル内の保持炉やショットスリーブの隣に小さな追加設置スペースが必要で

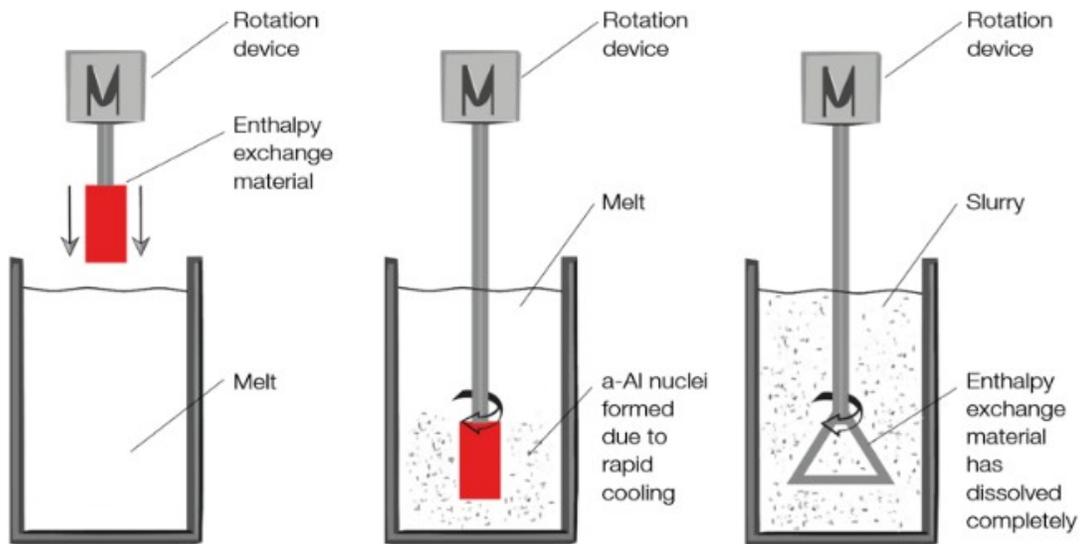
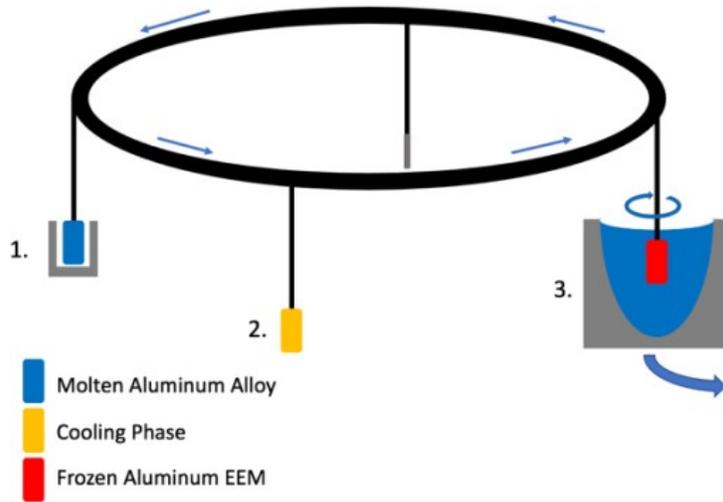


図2- RheoMetal™ レオキャストプロセスによるスラリー製造の模式図。
出典コンプテック社

構造用アルミニウムレオキャスト部品の開発

構造用レオキャストのための適切な固形分率の決定

市場には、幅広い固形分率を達成できる多数のレオキャストプロセスが存在する。レオキャストの利点（特に層流）は固形分率が高くなるほど高まることは明らかですが、ある時点を超えるとスラリーは自立したビレットとなり、もはやショットスリーブに流し込むことはできず、別のショットスリーブと供給機構が必要となってきます。この時点は固形分率が50%近くになると到達することがわかった。

さらに、この割合を超えるとメリットが減り、デメリットが一気に増えることがわかったため、最適な最大固形分率は45%程度に決定した。固形分率が基本的にゼロ（完全に液体の金属）から45%までの範囲で、多くの実験が行われました。固形分率が20%程度までは、レオキャストの利点は溶融温度の低下、すなわち金型寿命の向上とシュリンクポロシティの低減に限定されることがわかった。典型的な構造用ダイカストプロセス（脱ガス、清浄化溶湯、高真空、最小限の霧状ダイスプレイなど）において、固形分率約20%で部品を製造した場合、図3（上の写真）に示すように、溶液温度が460°C（860F）を超えるとすぐに鋳物はプリスターを形成しました。固形分率が高くなると、鋳物の気孔が顕著に減少し、この溶体化熱処理温度を上げることができました。同じ構造用ダイカストセル（それ以外は同じ工程）で固形分率が35~45%の場合、図3（下）のように、鋳物はほとんど気孔がなく、510°C（950F）でプリスター（厚切りでも）を生じることなく（ほとんど）溶体化熱処理が可能でした。



図3.固形分率が20%程度の部品（上2枚）は、通常の真空ダイカストと同様に溶体化熱処理でブリストアが発生しましたが、溶湯中の固形分率が35～45%になると解消されました（上3枚）。
 鋳物のポロシティを極限まで抑えた（下2枚）

したがって、構造用真空レオキャストの場合、最高の部品品質、完全性、最適な特性および溶接性を達成し、標準的な真空（構造用）ダイカストセルにレオキャストプロセスを追加することで最大限の利益を得るには、30～45%の固形分率が必要であることが非常に明確である。

構造用レオキャストの溶融処理方法

全体として、構造用レオキャストには、構造用真空ダイカスト（または構造用低圧鋳造）で通常適用されるのと全く同じ溶融処理が必要です：炎に直接さらされることなく、また溶融物を過熱することなく（A356の場合、酸化とHのピックアップを最小限に抑えるために780°C（1436F）以上にならない）、金属を素早く溶かす。適切なガス抜きは非常に重要です（理想的には回転式ガス抜き、そうでない場合はランスを使用して長時間）。溶融物をろ過することは常に理想的であり、酸化と水素ピックアップを抑制するために可能な限りカバーガスを適用する。スラリー製造時に取鍋内の金属表面にカバーガス（ロボット取鍋から塗布）を加えることも推奨されており、この場合、空気より重いアルゴンを使用すると、融液表面に留まってカバーすることができます。また、鋳造前に必ず化学的性質をチェックし（校正された分光計を用い、正しい合金標準を使用）、必要に応じて調整することも重要です（液体構造ダイカストと同様です）。適切な修正とある程度の結晶粒の微細化は推奨され、そのレベルは鋳造前に常にチェックされるべきです。構造用真空ダイカストと同様に、溶湯の水素含有量や密度（減圧試験（RPT）で可能）、介在物の含有量（例えば、Kモールドや理想的にはドロス試験で、以下の表面品質を確認する）を確認することが重要であります。真空凝固した金属を標準と比較する）。これらの溶融品質試験に加えて、次のような試験も行うことが非常に重要である。凝固中の温度曲線を正確に把握するために、融液の熱分析が行われます。これにより、溶融物の固形分率が増加する一方で、溶融物が長時間にわたって一定の温度に保たれる、いわゆる凝固中の「停止点」がわかります（右図4参照）。Dynatool Industries Inc.では、Azterlan社のAluQ（図4左）は、これらのテストを1つの（移動可能な）機器にまとめ、ポータブルタブレットで簡単にHMIできるようにしたものです。

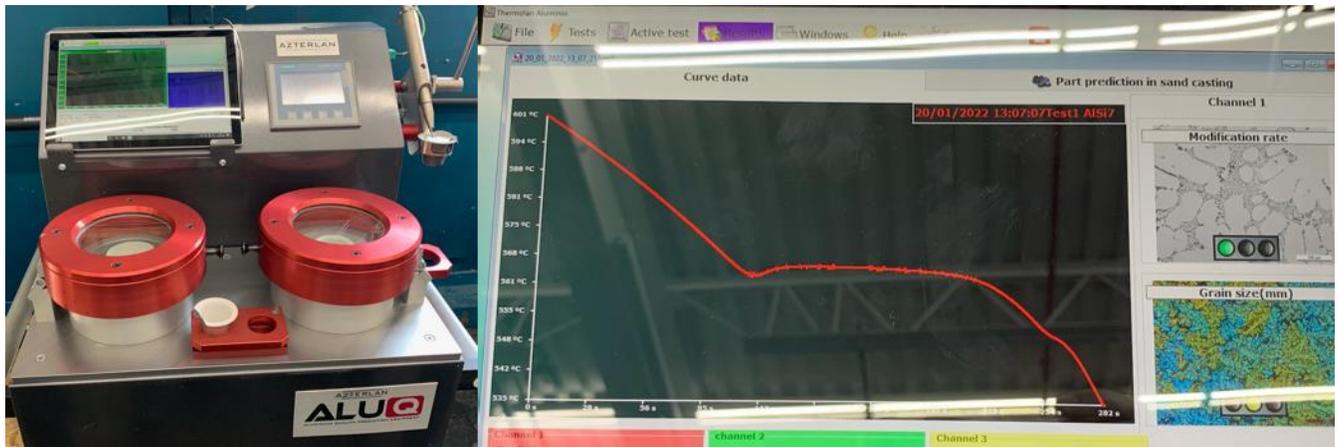


図4.溶融品質試験装置（ALUQ）は、溶融物のRPT、ドロス試験、熱分析に使用されている

誰でも容易に想像できるように、レオキャストでは溶融物の温度制御が非常に重要です。安定したスラリーを得るためには、プロセス、温度、時間を一定にする必要があります。保持炉での必要な溶融温度は、炉からスラリーメーカーへの移送取鍋での熱損失、そしてスラリー製造時の熱損失に依存します。保持炉内の温度、すなわちスラリー製造開始時の温度は、液相線（図5の赤線の線部Cの上端）以上の明確に定義された温度でなければならない。A356の場合、固相線温度は577°C（これ以下では溶融物全体が固体、図5の赤線A部）、液相線は610°C前後、これ以上では溶融物全体が液体（図5の赤線B部は合金の半固体・凝固域を示す）。スラリー作成は通常20秒程度で終了し、作成するスラリーの目標温度や固形分率に応じて、EEMのサイズや形状を調整することができます。スラリーが完全に調製されると、最大90秒間は均質な半固体状態にとどまることができます。しかし、スラリーの製造全体が完全に同期していることが理想的であるため、HPDCのサイクルタイムを遅くしてはならないので、取鍋に長くにとどまることはありません。

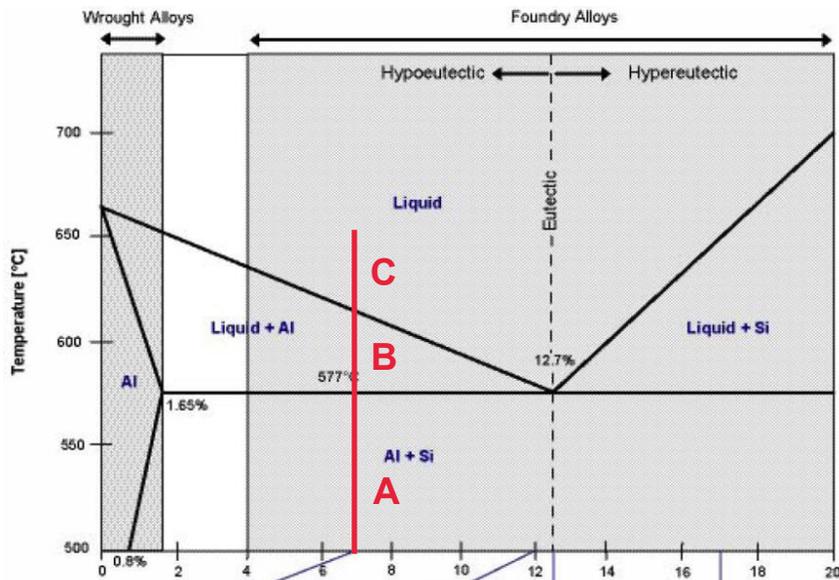


図5.Al-Si相図。Aは完全固体、Bは半固体（液相と固相の間）、Cは過熱により液体となる。

レオキャストの真空

チクソキャストとレオキャストの両方における先行研究では、半固体金属をダイに注入する場合、液体金属を注入する場合よりも真空度の重要性ははるかに低くなるが示されていました。溶湯の層流により、メタルフロントはキャビティから空気を「押し出す」だけで、充填プロセス中に空気を巻き込むことはない、という説明です。これは確かに（理論的には）正しいのですが、半固体金属流では（液体金属とは）異なる現象が観察されます：液体金属を高速でキャビティに注入すると、キャビティのあらゆる角度や隅々まで素早く充填され、あらゆる方向に自由に移動（飛散）することができます。しかし、半固体状のスラリーはそうはいきません！

半固体状態のスラリーは、キャビティ内を単に「直進」するため、任意の垂直な特徴は、最初は金属フロントによって「無視」され、金属フロントがその直進経路で抵抗を感じた後に初めて充填される可能性があることを意味します。そのような特徴（例えば、主な鋳物本体に垂直なリブ）は、したがって、金属がすでに空気排出経路をブロックしたときにのみ完全に充填されることになります。そして、この特徴（リブ）内に残った空気は圧縮され、気孔や表面積が大きくなる可能性があります。欠陥や不完全な充填が発生する。これは、液体ダイカストでは充填できなかった非常に薄く高いリブも充填できるという、構造用鋳物におけるレオキャストの非常に大きな利点を破壊することになります。[5] 液体ダイカストでは、アルミニウムの単一液滴が薄いリブに入り込んですぐに凝固し、残りのメタルフロントがリブを埋めるのを妨げることがありますが、球状の微細構造を持つレオキャストの層状メタルフロントは、（空気が反圧を構築しない場合）薄いリブや高いリブも極めて容易に埋めることができます。これを図6に示します：

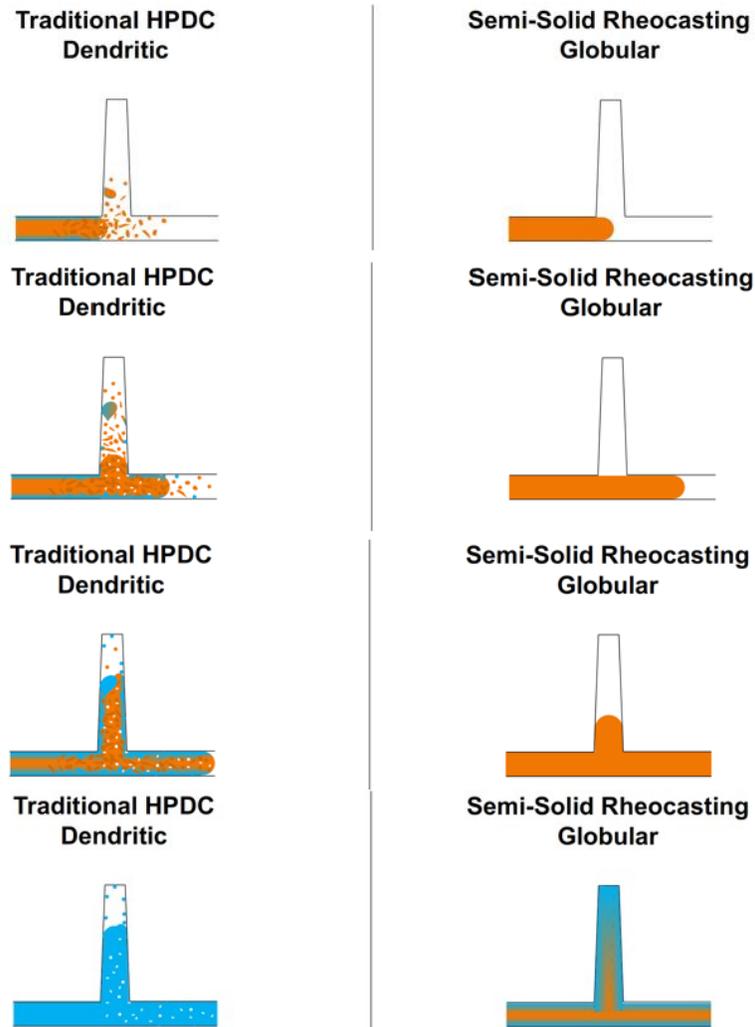


図6.液体中（左）とレオキャスト中（右）のメタルフローに直交するリブのフィリング

そのため、構造用レオキャストでは、高度に複雑な構造用鋳物を鋳造する際に、まずキャビティを高真空にすることが非常に重要です。また、真空度が高いほど、鋳物の表面品質が向上することがわかりました（液体真空ダイカストと同じです）。また、ブリストア（特にメタルフローに直交するリブ）の発生も、小さいながらも顕著な影響を与えることが確認されました。

このヒンジピラー鋳造では、1650tダイカストマシンにPfeiffer Vacu2 2ステージ真空システム（高真空構造ダイカストに通常使用され、最適なキャビティ圧力制御による真空度を実現）が搭載されています。第1ステージは通常、ショットスリーブに接続されます。これは、最も大量の空気が存在する場所であり、大径の円形で障害物のない排気孔からわずか約1秒で簡単に排気することができるためです。図7に示すように、液体真空ダイカストでは、プランジャーの先端が退避孔に到達したときに、金属の充填レベルが80%を超えないような状態であれば、これは非常にうまく機能します。[6]

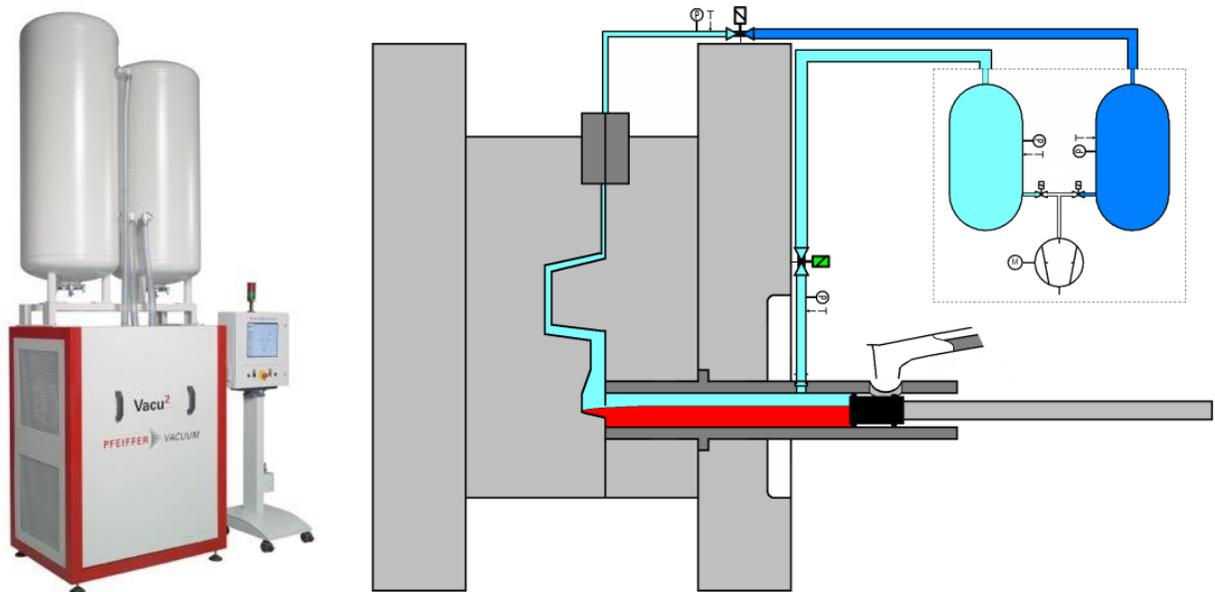


図7.Pfeiffer Vacu2 2ステージ真空システムによる典型的な構造用真空ダイカスト。第1ステージはショットスリーブから、第2ステージはダイキャピティのバルブまたはチルブロックから真空引きを行う。

液体金属は、ショットスリーブ内でも、半固体金属とは大きく異なる挙動を示します。プランジャーの先端で押し出された液体金属は、波が発生することはあっても（正確な加速度と速度のコントロールが重要）、全体としては、アクティブショットスリーブの全長にわたって、ほぼ同じレベルにとどまる。そのため、ショットスリーブの真空孔に金属が飛び散るような波が発生しない限り、このシステムは非常にうまく機能します（図8左）。しかし、半固体スラリーでは、押し進めたときに波が発生しない。液体金属が水のような挙動を示すのとは逆に、半固体スラリーは基本的に除雪機で押したときの雪のような挙動を示す（図8、右）！つまり、金属はすぐにショットスリーブの上部（プランジャーの前）に取り付けられ、これを前進させる。これは空気を前方に押し出す（巻き込まない）には実に理想的なのですが、ショットスリーブの退避がほとんど不可能になってしまいます。

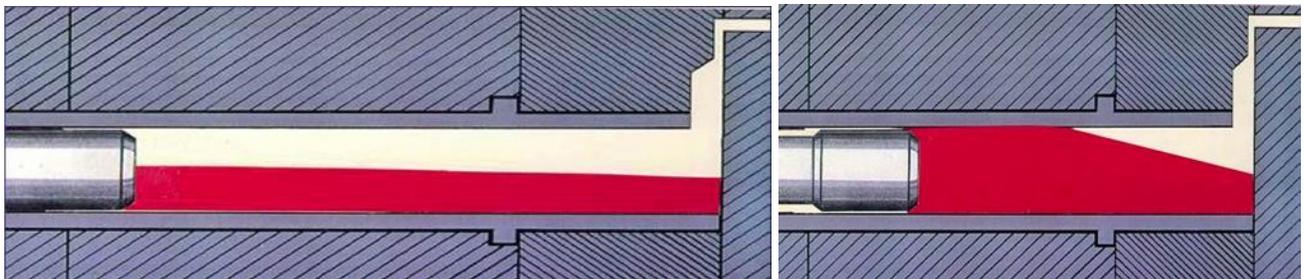


図8.ショットスリーブ内の金属：液体(左)は均等化し、半固体スラリーは除雪機で押し進められた雪のような挙動をする。

この現象により、ショットスリーブによる排気とは別に、空気の大部分に十分近づける（第一段階で非常に迅速に排気できる）方法を見つけることが重要になりました。その解決策は、右図9に示すように、シングルランナーに小さなアームを追加し、この小さなアームを通してVacu-2システム（ステージ1）の最初の（大きな）タンクに接続されている大きな油圧バルブで排気することによって見出されました。

構造用レオキャストのプロセス開発

この鋳物のプロセス開発は、基本的に高真空構造ダイカストと何ら変わりはありません。ここでも同じルールとベストプラクティスが適用され、開発される必要がありました。例えば、2ステージのVacu2システムの適用による最高の真空度の使用、非常にリークタイトなダイ、経年劣化を補正しコールドチャンバーのリークタイトを保つCaro-Bull V（特殊真空）プランジャーチップによる温度制御されたショットスリーブ、プランジャーチップ裏からの霧状の最小量システム（Caro-Lub）による潤滑、最小ダイなど、

Wollin社製スプレーヘッドを使用し、必要最小限の金型潤滑剤のみを塗布し、金型熱管理の最適化により、金型スプレーによる金型表面の外部冷却を必要としない。また、液体ダイカストと同様の低速ショットでありながら、液体ダイカストに比べて高速ショット速度を大幅に削減（約1/4の速度）した最適な射出プロファイル。このように、レオキャストはダイカストプロセスそのものをより寛容にし、プロセスウィンドウを大きく開くことができるため、多くの構造用ダイカストメーカーに高く評価されていることがわかります。ヒンジピラー鑄造の鑄造パラメータ（速度、圧力）を比較的広範囲に変化させたが、その結果、鑄造速度への影響はほとんど見られなかった鑄造品質です。まるで「悪い鑄物を作ることができない」かのような（ダイキャストプロセスエンジニアが何度も言っていたことです）。液体ダイカストと同様に射出速度を上げた場合のダイソルダリングも、液体ダイカストに比べてはるかに少ないです。これは単に熔融温度が低いためだと考えられます。しかし、「最適な速度と圧力」でプロセスを実行することが推奨されます。

第1段階（スローショット）の速度は、溶融物の波動形成（前述のとおり）ではなく、主にキャビティから排気するのに必要な時間によって決定されます。このため、標準的な真空ダイカストよりも多くの時間を確保することができます。高速ショットの速度は、金型上でできるだけ「柔らかく」、層流充填のメリットを最大限に得るために、比較的遅くすることができます（液体構造ダイカストの約4分の1）。

また、半固体スラリーの流動長は極めて長いことが判明。実験的な金型では、A356 (AlSi7Mg) の場合、溶融物が固形分30~45%の範囲にあるときに、3mmの厚さで2200mmの最大流動長（すなわち、1mmの壁厚あたり733mmの流動長）を達成できることが判明しました。これは、構造用真空ダイカストにおける同種の合金の液体金属鑄造の約3倍の長さである。増圧は通常、液体HPDCよりも低くすることができますが、鑄物の肉厚に依存します。ヒンジピラー鑄造の場合、非常に厚い部分を扱っていましたが、それらは（比較的厚い）インゲートに十分に近く、理想的に供給できる部品の設計上の特徴によってインゲートに接続されています。そのため、一般的な構造用真空ダイカストと同様の総強化圧力で十分であることがわかります。

構造物レオキャスト用金型・ダイカストマシン

レオキャストの大きなメリットは、より小さなダイカストマシンで鑄物を作ることができることです。今回のヒンジピラーの鑄造でも、この点が大きなメリットとなりました。当初の構造用真空ダイカストのゲートデザインは、左の図9に示すように、全長にわたって部品に入り、反対側にはオーバーフローが発生する予定でした（予想通り）。この場合の投影面積は4124cm²であった。一方、レオキャストの場合（図9右）、中央の1本の鑄込み口だけで十分であり、金属は層流で容易に左右に広がるので、鑄物の両端に小さなオーバーフローがあればよい。そのため、投影面積は液体ダイカスト設計の半分以下の2006cm²しかなく、この鑄物を大幅に小型のダイカストマシン（2600トンマシンではなく1650トン）で生産することができました。

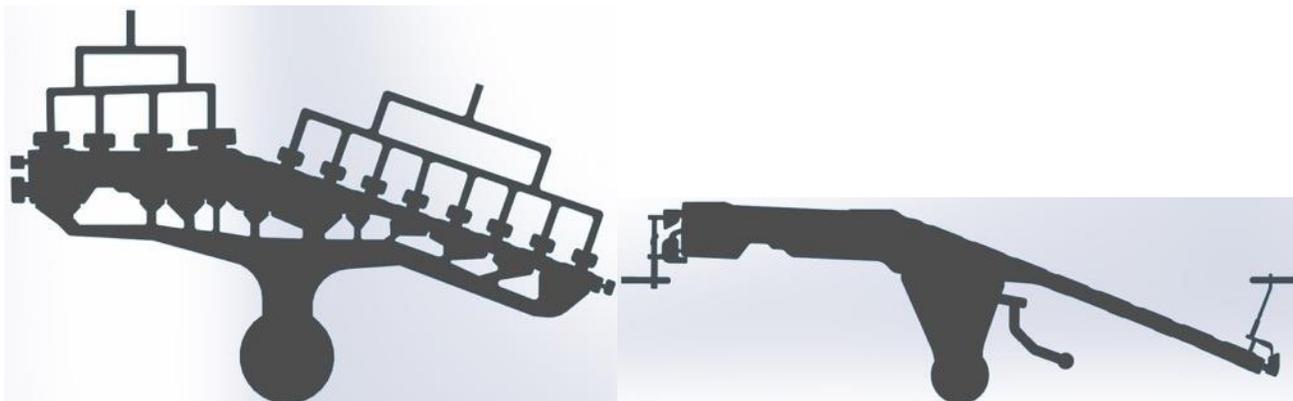


図9.典型的な構造であるHPDCのゲートとオーバーフロー（左）とレオキャストのゲートとオーバーフロー（右）を備えたヒンジピラー鑄造法

金型そのものは、構造部品の真空ダイカストと大差はない。ダイ・スプレーによる外部冷却の必要性をできるだけ回避するために、可能な限り最高の熱管理を組み込む必要があります。また、金属は低温・高速で射出されるため、ダイソルダリングはあまり問題にならず、非常に高価なダイス鋼やコーティングの必要性、さらには大量のダイス潤滑油の必要性も低減されます。そのため、金型表面への熱衝撃を低減するために、スプレーの噴霧を最小限に抑えることができます。

金型は、高真空構造ダイカストと同じように高温で操業することで、熱衝撃を最小限に抑え（金型スプレーを最小限に抑え非常に長い金型寿命を保証します）。

合金の選択と代表的なA356-T6特性

ヒンジピラー鑄造の開発に着手する前に、A356（タイプ）合金から作られたコンテック・レオキャスト（スウェーデン）で広範囲なテストが行われました。一般的にF調質は、YS100~140MPa、UTS200~250MPa、伸び8~13%の範囲である。ヒンジピラー鑄造では、より高い特性が要求されるため、適切なT6熱処理を開発する必要がありました。溶体化熱処理では、510°C、2時間、水冷で最高の特性が得られることがわかりました。このT4熱処理後の鑄物には基本的にプリスターが発生せず、測定された特性は約120~140MPaのYS、230~250MPaのUTS、15%以上の伸びでした。この溶体化熱処理後、165°C、190°C、220°Cで時効曲線を作成した（その後、最低8~12時間の自然時効）。表1に、達成された機械的特性を示します：

表1: A356型合金のT6調質におけるコンテック・レオキャストの代表的な性質

T4 510°C - 2h water quench				
aging time (h)	Aging 165°C			
	YS	UTS	EL	Q
0,5	130	248	15,1	425
1	137	253	16,1	434
2	163	266	15,8	446
4	207	280	8,7	421
aging time (h)	Aging 190°C			
	YS	UTS	EL	Q
0,5	179	224	9,1	403
1	190	260	7,4	355
2	237	286	7,3	416
4	237	283	7,9	417
aging time (h)	Aging 220°C			
	YS	UTS	EL	Q
0,5	213	260	8,7	401
1	205	253	9,3	398
2	193	241	6,0	358

OEMは、190°Cで2~4時間の人工時効処理を行った後の特性パッケージを選択し、これらの鑄物に必要な最小限の特性として、220MPa YS、260MPa UTS、7%伸びを決定しました。

カーボンフットプリント

開発プロセスでは、クリーンな粉碎ホイール（eccomelt356.2）と内部リターンを混合することで、ほぼ無添加・無改造で使用できることが判明しました。射出速度が遅いため、ダイはんだ付けに必要な高FeやMnをほとんど必要とせず、Mg含有量、Sr（改質用）、TiB2（粒状化用）をわずかに調整するだけでストレートA356を使用できるようになりました。OEMの重要な目的のひとつは、鑄物の二酸化炭素排出量を最小限に抑えることでしたが、この方法は簡単に達成できました：低炭素アルミニウムメーカーが製造する同様の合金の標準的な一次鑄塊は、それでも4トン以上のCO₂e/t Al（世界平均の一次アルミニウムは17トン近いCO₂e/t Alとされています）であり、ほとんどリサイクルアルミニウムから作られる二次鑄塊は約0.9トンのCO₂e/t Al（アルミニウム協会による）であると考えられます。Eccomelt社のトロント工場生産されるクリーンなシュレッターホイールは、EXW（国際標準規格）で0.089トンのCO₂e/t Alで、Dynatool社の施設に納入される0.139トンのCO₂e/t Alでした。鑄造、T6熱処理、機械加工などの全工程で、この鑄物のカーボンフットプリントは1.1tのCO₂e/t Al（GHGプロトコル企業基準スコープ1-3）となり、他の構造用ダイカストをはるかに下回ることがわかりました。

真空レオキャストは、通信用鋳物、ヒートシンク、高圧リークタイト部品など、さまざまな用途で使用されるようになり、現在では構造成用鋳物にも使用されています。真空レオキャストは、

- (1)厚肉部でも完全性が高く、薄肉部でも鋳造できる、
- (2)投影面積と圧力を小さくすることでダイカストマシンのサイズを小さくできる、
- (3)溶湯温度が低く、充填が遅いため金型の寿命を長くできる、
- (4)合金に柔軟性があり、もちろん優れた機械性能を実現することができる

などの利点から、これらの部品には真空レオキャストの工程が用いられています。また、二次合金であっても、T6まで熱処理することが可能である。レオキャストリングプロセスは、液体金属から作られる真空ダイカストや構造成用ダイカストで使用される他のベストプラクティスや技術に取って代わるものではありません。しかし、ダイカストプロセスをより「寛容」にし、プロセスウィンドウを開くことができます。適切な固形分率（理想的には30~45%）は、高い完全性を持つ構造成用鋳物を製造するための鍵であり、適切な溶融処理、温度、品質管理は不可欠です。したがって、レオキャストプロセスは、高付加価値の鋳物で構造成用鋳物のような新しい市場に参入しようとするダイカスターの道具箱の中の単なる1つのツールである。また、小型のダイカストマシン（多くの場合、サイクルタイムが速い）で部品を生産できる場合は、さらに速くなります。

謝辞

ケベック・メタルリーセンター（CMQ）での本研究の一部に資金を提供して下さったカナダ自然科学・工学研究評議会の支援と、このプロジェクトを継続的に支援して下さったCMQのスタッフの方々に感謝します。

参考文献

1. Spencer, D. B., Mehrabian, R., Flemings, M.C.: "Rheological Behavior of Sn-15%Pb in the Crystallisation Range", Metallurgical Trans., Vol. 3 1925-1932 (1972)
2. Gabathuler, J.P., Ditzler, C., "Quality and Properties of Thixoformed Suspension Components for the Automotive Industry", Proceedings of the 4th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield(UK), 331-336 (1996)
3. Garat, M., Blais, S., Pluchon, C., Loue, W.R., "Aluminium Semi-solid Processing: From the Billet to the Finished Part", Proceedings of the 5th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites, Colorado School of Mines 199-213 (1998)
4. Langlais, J., Lemieux, A., Kunlunk, B., "Impact of the SEED Processing Parameters on the Microstructure and the Resulting Mechanical Properties of A356 Alloy Castings", AFS Transactions, Vol.114, 289-298 (2006)
5. Jansson, P., Zetterström, S, Hartlieb, M., „High vacuum Rheocasting for the production of large, ultra-thin-walled telecom castings with high thermal conductivity”, NADCA Transactions 2021
6. Hartlieb, M.: Vacuum Die Casting, Die Casting Engineer, September 2019, pages 20-26