



# 低圧鋳造サイクルタイム短縮技術開発

Technology for shortening cycle time in low-pressure casting

## 技術論文

中西 崇雄 小堀 幸伸

### 要旨

近年、自動車やモーターサイクル(以下、MCと略す)においては、地球環境の観点からCO<sub>2</sub>削減、リサイクル性の向上が求められ、軽量でリサイクル性の高いアルミ合金の使用率が高くなっている。当社でもエンジン部品やフレーム部品において、設計自由度の高いアルミ鋳造品の使用比率が増加傾向にある。

一方では、2008年に起こった世界的金融危機や円高の影響により、アルミ鋳造部品の生産コスト低減は重要な課題となっている。本開発では、低圧鋳造の充填溶湯温度を低下させることにより製品凝固を早め、低圧鋳造のサイクルタイム短縮を行う手法について報告する。

### Abstract

The need to reduce CO<sub>2</sub> emissions and improve recyclability for environmental reasons hassled to and increased use of lightweight, highly recyclable aluminum alloys in automobiles and motorcycles in recent years. At Yamaha Motor Co., Ltd. as well, there is a trend to use cast aluminum parts increasingly in the engines and frames of our products for these reasons and for the added freedom of design they offer.

At the same time, reducing the production cost for cast aluminum parts has become an important issue since the 2008 global economic crisis. Here we report on the development of a method to reduce cycle time in low-pressure casting by reducing the temperature of the molten aluminum in order to speed up the solidification process.

## 1 はじめに

当社のアルミ鋳造は、高圧ダイカスト(DC)、重力鋳造(GD)、低圧鋳造(LP)を要求品質に応じて使い分け、製造を行っている。

その中でも低圧鋳造はダイカストに比べ熱処理が可能である事から、薄肉で高強度な部品の製作が可能で、モーターサイクル部品の軽量化には必要な技術となっている。形状においても砂中子(中空部の鋳型)を用いる事で、中空部品が製作可能となっており、シリンダヘッド(以下、H/Cと略す)の

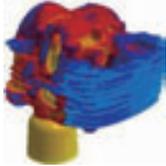
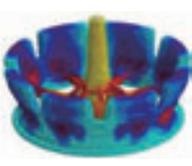
	低圧鋳造 (LP)	高圧鋳造 (DC)	重力鋳造 (GD)
			
強み	熱処理が可能 内部品質が良い 中空部品製作が容易 歩留りが良い	鋳造CTが短い 鋳肌がきれい 寸法精度が良い	熱処理が可能 中空部品 製作が容易
弱み	鋳造CTが長い	熱処理できない 中空部品 製作が困難 型費が高い	歩留りが悪い 寸法精度が 他と比較して悪い
C/T (DC = 1)	5	1	4

図1 鋳造工法比較

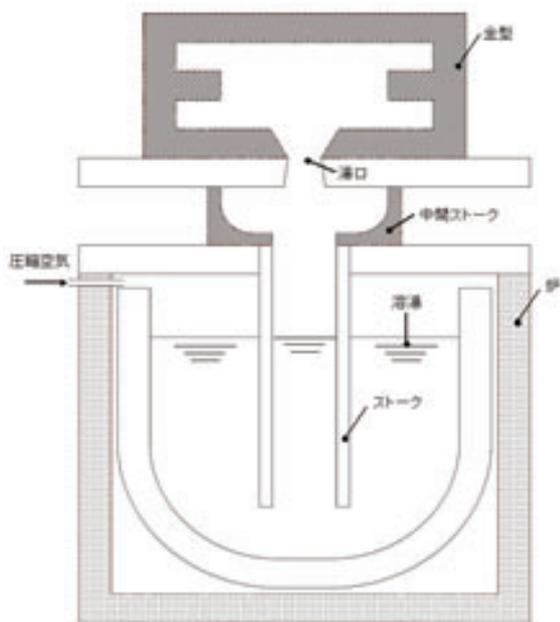


図2 低圧鋳造法の原理

様な複雑形状の製作に適している。また、重力鋳造に対しても、溶湯の充填時に湯の乱れが起き難いため、ブローホール(空気の巻き込みによる内部欠陥)も少なく、高品質な製品の製造が可能である。

しかし、図1に示すように低圧鋳造は他の工法に比べサイクルタイム(以下、CTと略す)が長く、当社の鋳造工法の中で、生産性が最も低い工法である。その為、低圧鋳造品では生産性を確保する為に設備数が増加し、結果として製造コストも割高になってしまう傾向がある。

低圧鋳造において、生産性向上によるコスト削減は、取り組むべき重要な課題となっている。

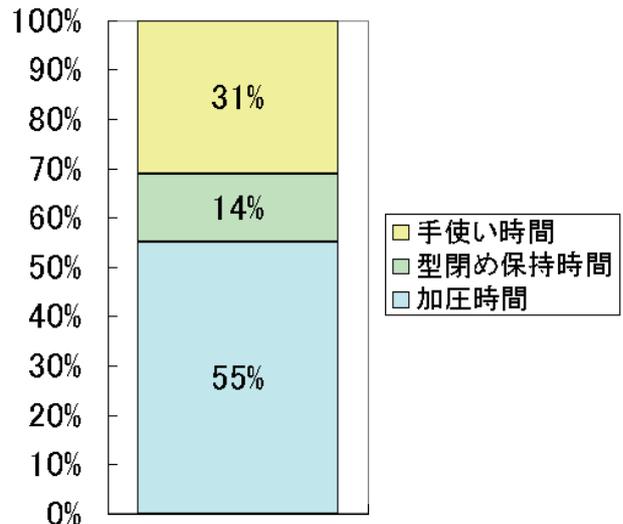
## 2 現状分析

### 2-1. 低圧鋳造の原理

密閉されたルツボ内の溶湯の表面に0.0098~0.0490Mpaの空気圧を加えて、溶湯中に浸してあるストーク(給湯管)を通じて溶湯を上昇させ炉上の鋳型に注湯する。鋳型上方から湯口まで凝固が終了した時点で加圧を停止し、ストーク内の溶湯をルツボ内に戻し鋳型内の鋳物を取り出す方法である。(図2)

### 2-2. 低圧鋳造のCT

低圧鋳造のCTは、鋳造開始～鋳型内の溶湯が凝固するまでの加圧時間と、凝固～型開きまでの型閉め保持時間、型開き～中子セット～次の鋳造開始までの手扱い時間に分類される。これらの時間を調査してみると、加圧時間が最も長い事



2008年MC部品  
CT平均

図3 低圧鋳造平均CT (MC部品)

がわかる。(図3)

鋳造CT短縮の要因図を作成し分析してみると、加圧時間の短縮には、加圧制御(溶湯を充填させるのにかかる時間)、温度制御(溶湯低温化、冷却強化)への対応が考えられる。(図4)

加圧時間の内、溶湯を充填させる時間は約11%、製品が凝固するまでに必要な時間は加圧時間の約89%となっている。また、溶湯低温化を実現する事で、冷却すべき溶湯の熱量が減少する為、冷却効果を効率よく得られる事につながる。この事から、本開発では溶湯を低温で充填させる低温充填技術による低圧鋳造CT短縮に取り組む事とした。

## 3 低温充填技術開発

### 3-1. 低温充填化の問題点

低温で溶湯を充填させた場合、どのような問題が発生するか、空冷単気筒H/Cを用い試行した。

結果、低温で充填させる事で、製品凝固は促進され、加圧時間を短くする事がわかった。(図5) しかし、内部品質では、低湯温で充填させる事で、引け巣(アルミの凝固収縮により発生する内部空隙)が発生することを確認した。(図6)

引け巣とは、鋳型内に充填された溶湯が冷える際、溶湯の充填口(湯口)に向かって温度指向性を持ったまま固まる事が出来ず、凝固収縮分の溶湯が湯口から補給されない為に発生する現象である。

### 3-2. 引け巣発生原因調査

温度指向性が確保されない原因を究明する為、金型内に

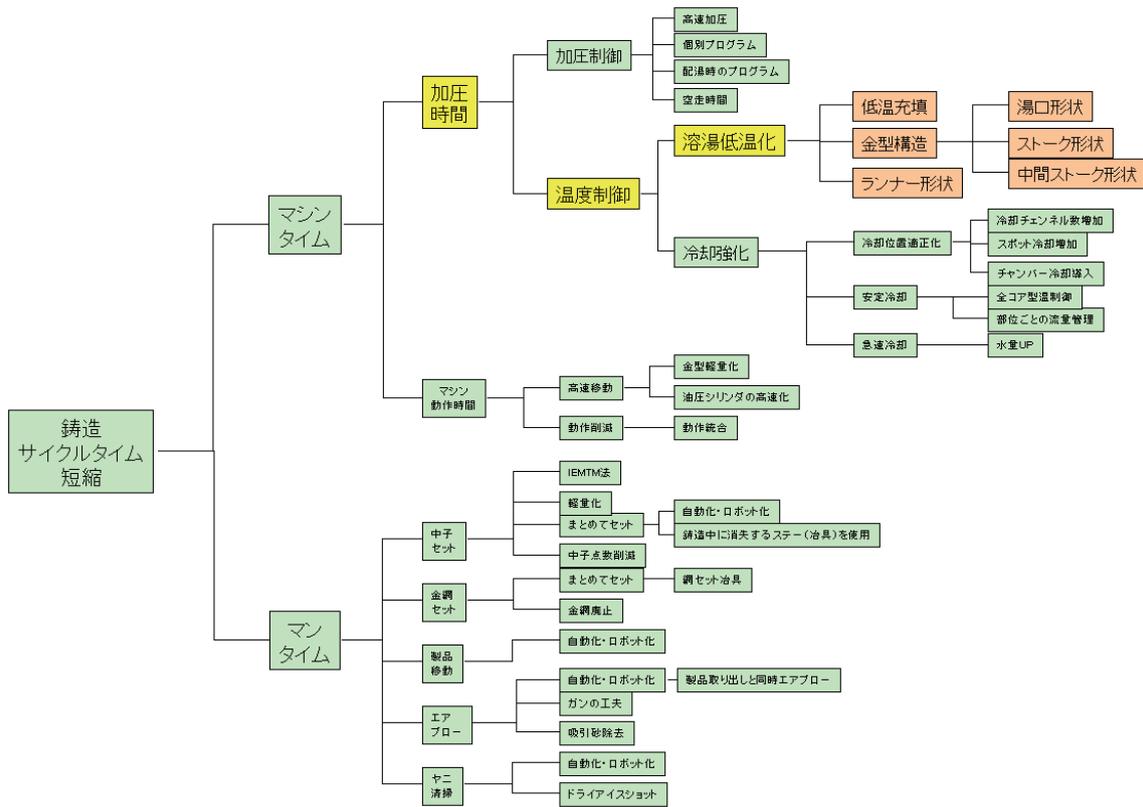


図4 CT短縮要因図

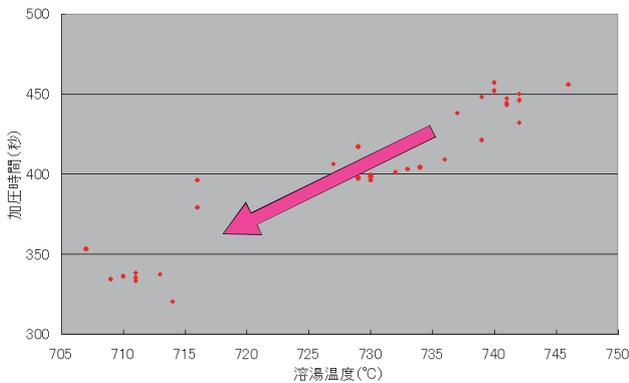


図5 溶湯温度と加圧時間

60箇所温度センサーを設置し、計測を実施した。(図7)

計測結果より、湯口カップ内58の溶湯温度が低下すると、湯口温度59が著しく低下する事がわかる。これにより製品が凝固完了する前に、湯口が凝固してしまい、製品内部に引け巣が発生している事がわかる。(図8)

### 3-3. 引け巣発生対策

湯口カップ内の溶湯温度低下を防ぐ手法として、①湯口周辺を加熱し溶湯温度低下を防ぐ方法、②溶湯体積を増加させ溶湯の温度低下を防ぐ方法が考えられる。

①では温度制御機構が必要となり、金型構造が複雑になる。また、熱を加えると、金型温度を上昇させる事となり、その結果、製品凝固を阻害する事となる。それに対し、②では溶湯による保温の為、制御機構は不要となり、金型への構造追加が容易である。

本開発では、②を採用し、単純構造での低温充填化を可能にする事を目指す。

#### 3-3-1. 低温充填用解析精度向上

溶湯の温度低下を防ぐ事の出来る形状を検討する為には、鋳造解析にて事前に効果を予測し、不具合に対しては対策を織り込む必要がある。事前検討なしに金型製作を行った場合



図6 引け巣発生状況

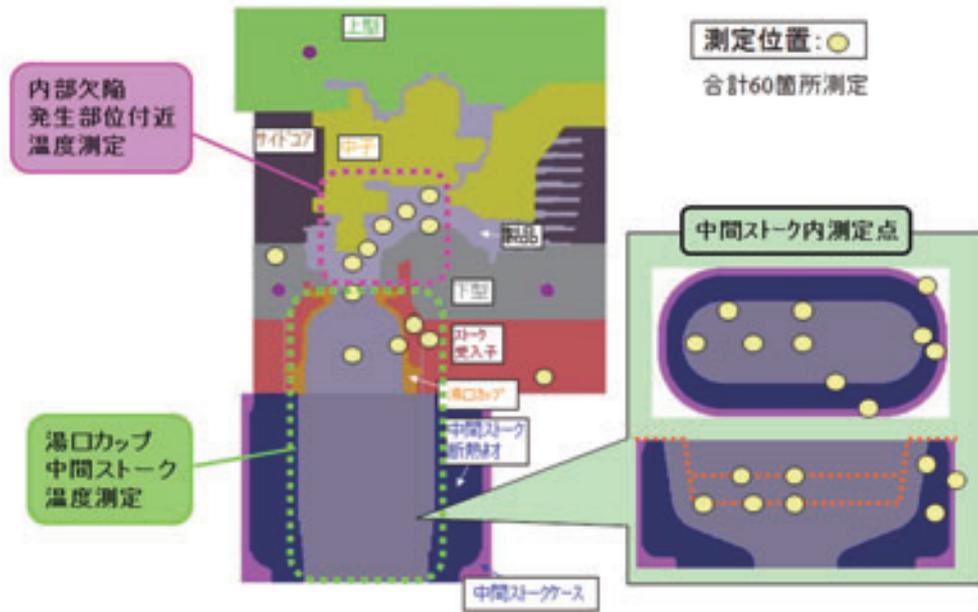


図7 センサー設置位置

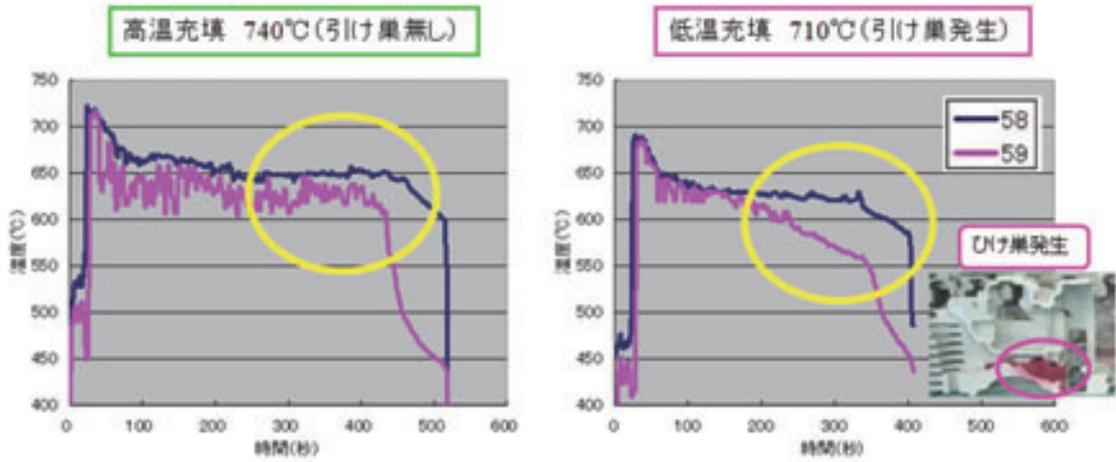


図8 湯口カップ内容湯温度変化

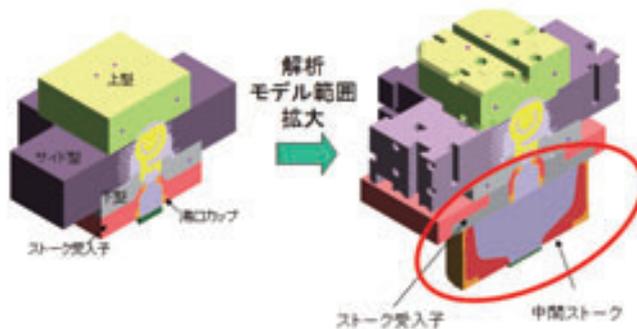


図9 解析モデル拡大

には、製作後の品質不良対策の為に多くの費用と工数が必要になる事は容易に予測できるからである。

溶湯の温度低下を防ぐことの出来る形状の事前予測を可能にするには、これまでの鋳造解析では考慮してこなかった、溶湯体積増加部分であるストーク受け入子、中間ストークの形状を考慮する必要がある。(図9)

追加される形状に関する境界条件を、基礎実験を行うことにより導き出す事とした。ストーク受け入子部は通常の金型材(SKD61相当)となっており、これまでの解析条件からの変更は不要であるが、中間ストーク部はこれまでの鋳造解析では使用していない材質となる為、新たに解析条件を導き出す必要がある。その為、簡易テスト型を用い中間ストークと溶湯との熱の受け渡し(熱伝達係数)を調査する事で解析の精度向上を図った。基礎実験で得られた溶湯の冷却曲線に対し、解析結果が最も近くなる様に、幾パターンかの解析を行い熱伝達係数の条件を作り込んだ。その結果、鋳造解析を用いた事前検討を行うことが可能になった。(図10)

### 3-3-2 溶湯温度維持形状検討

精度向上により、追加形状の検討が可能になった鋳造解析を用い、湯口カップ内で溶湯温度が低下する原因を調査した。湯口カップ内溶湯温度は湯口カップ壁面より熱量を奪われる為に起こるが、この距離が長い為、中間ストーク内湯溜まり部の熱が湯口まで効率よく伝わっていない事が確認された。(図11)

湯口カップ内溶湯温度を維持する為に、湯口カップの高さを低くする事で、熱損失を低減させ、中間ストーク内溶湯上面位置を湯口側へ近づける事で、中間ストーク内湯溜まり部の熱を効率よく伝えることが出来ると予測した。

予測に基づき、鋳造解析にて形状検討を行った。形状の制

約条件としては、検討した形状が容易に展開できる様に、必要最低限で形状変更する事である。

当社のLP鋳造では、ストークは1種類、中間ストークは大・小2種類が使用されており、湯口の設置位置によって選択されるようになっている。

今回のテストモデルの空冷単気筒H/Cは、中間ストーク・小を使用している。この現行形状を元に、中間ストークを大に変更した“中間ストーク拡大形状”、そこから湯口カップの長さを

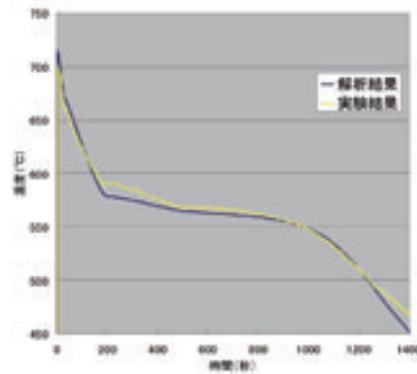


図10 実機 - 解析温度比較

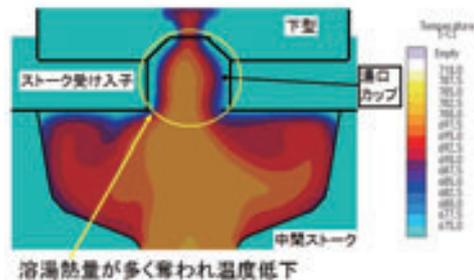


図11 溶湯温度分布解析結果

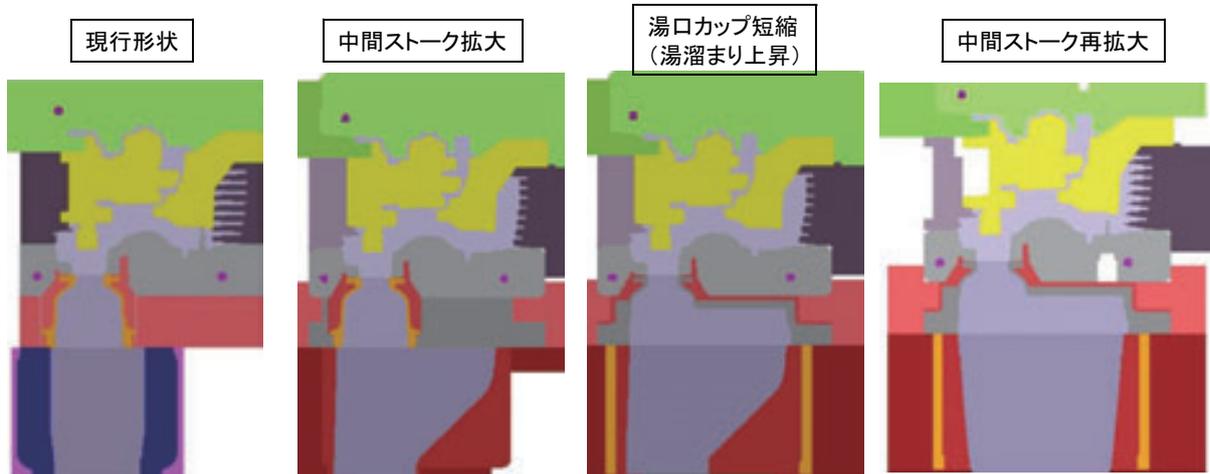


図12 解析により検討した対策形状 (代表例)

短縮した“湯口カップ短縮形状”、そして更に中間ストークを拡大させ、湯溜まり体積を増加させた“中間ストーク再拡大モデル”等を検討する事で、変更形状を必要最低限に抑え、且つ効果を得られる対策形状を検討した。(図12)

解析により検討した対策形状例での湯口温度解析結果で、中間ストーク拡大710℃では、現行形状710℃と大きな違いは得られず、湯溜まり拡大のみでは湯口部溶湯温度の維持は難しい。しかし、湯口カップ長さを短縮した形状710℃では、現行形状740℃とほぼ変わらぬ溶湯温度低下を示した。更に、中間ストーク再拡大710℃の結果では、湯口カップ短縮とほぼ変わらぬ溶湯温度低下を示したことから、湯口カップ溶湯温度を維持する為に必要かつ十分な形状は、湯口カップ短縮形状であると予測される。(図13)

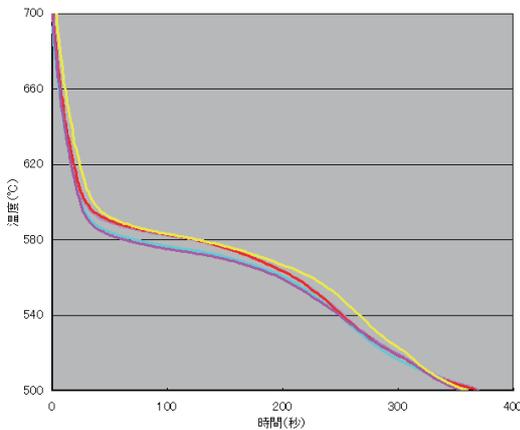


図 13 湯口温度解析結果

この事から、湯口カップ長さ短縮と溶湯体積増加による湯口溶湯温度維持が可能であると判断し、テスト型を作成し評価を実施した。

### 3-3-3 溶湯温度維持対策効果確認

鋳造解析により得られた形状を元に、生産に用いているストーク、中間ストーク大・小に加え、生産仕様より更に大きなストーク、中間ストーク再拡大形状、湯口カップ短縮形状を組み合わせながら効果確認トライを実施し、評価する事とした。(図14)

実鋳造トライより得られた湯口カップ内の溶湯温度変化を見ると、鋳造解析で予測された通り、中間ストーク大・小のみの変更では、溶湯温度に大きな違いは見られない(現行形状－中間ストーク拡大)。また、湯口カップの長さを短縮する事による効果についても、鋳造解析の予測結果の通り、湯口カップ内溶湯温度は大きく変化を示し、溶湯温度が高く維持されるようになる事がわかる(中間ストーク拡大－湯口カップ短縮)。しかし、中間ストークを再拡大した形状に関しては、鋳造解析結果より大きな効果が得られ、湯口カップ短縮形状より更に溶湯温度を高く維持できる事が確認された(湯口カップ短縮－中間ストーク再拡大)。(図15)

### 3-3-4 引け巣削減効果確認

湯口カップ内溶湯温度が維持される事が確認できた為、実際に引け巣が改善されているかを確認する。



図 14 湯口下トライ形状

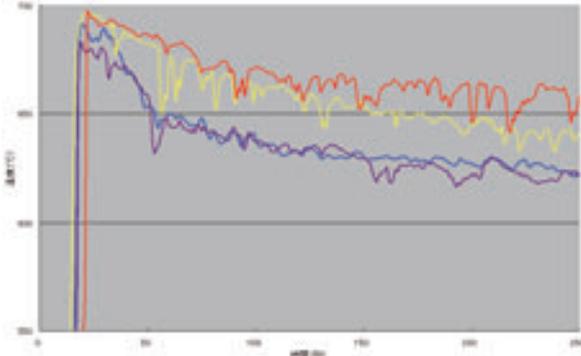


図 15 湯口下形状変更による湯口カップ内溶湯温度変化グラフ



図 16 製品内センサー位置

引け巣発生は溶湯温度の指向性が湯口に向かって確保されているかどうかで判断できる為、製品内溶湯温度を直接測定して確認する事とした。製品内にはK熱電対を4箇所設置し、湯口に向かって温度指向性が確保できているかを確認する。(図16)

測定結果より、現行形状での低温充填では、温度センサー62, 63が温度センサー61と逆転する部分が発生している。これが凝固指向性を確保できず、引け巣が発生していることを示している。中間ストーク拡大での低温充填では、計測した温度カーブの間隔が非常に狭く、温度指向性が弱い事がわかる。これは、引け巣が発生しやすい状態にあることを示している。3-3-3の結果と同様に、中間ストークのみの変更では温度カーブに大きな違いは見られなかったが、湯口カップ形状を短縮することにより、温度カーブの間隔が広がり、温度指向性が強く保たれるようになっている事が確認できる。(図17) 溶湯温度を低下させ、内部品質を確保する為には、湯口カップ短縮形状を使用するか、中間ストーク再拡大形状を使用する必要がある事がわかる。しかし、中間ストーク再拡大形状では、温度センサー60の温度低下が他の形状に比べて非常に遅い事がわかる。これは結果としてCT短縮を阻害する事につながる。この事から、低温で溶湯を充填させる形状は湯口カップ短縮形状を用いる事とし、この仕様を低温充填仕様と呼ぶ事とした。

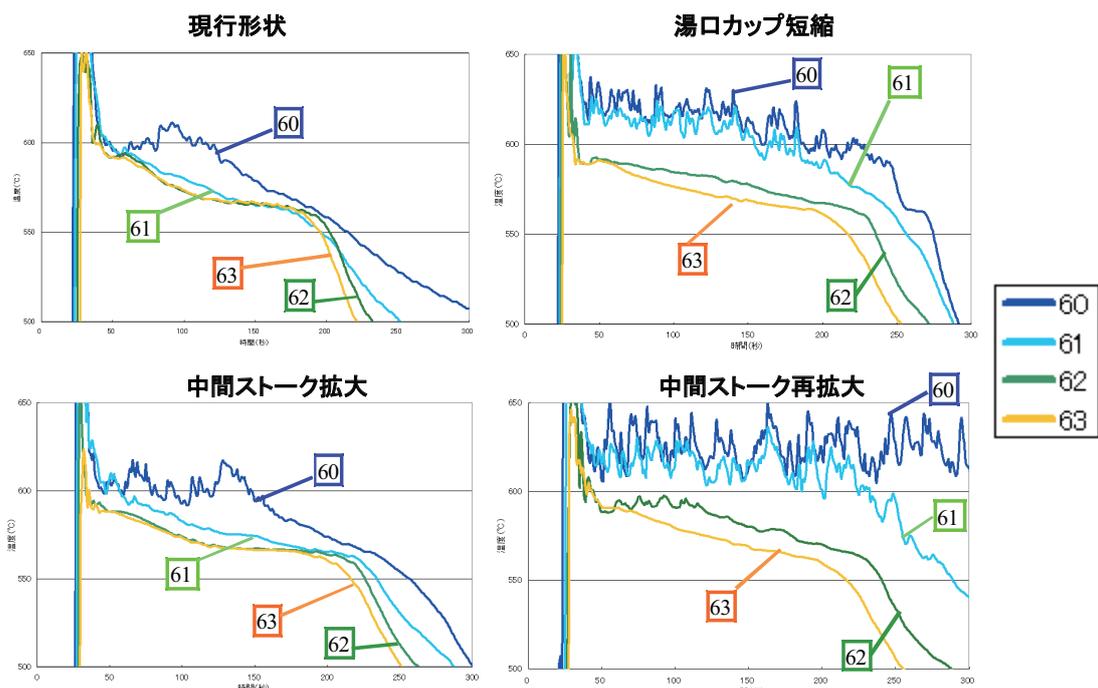


図 17 仕様変更による製品内溶湯温度変化比較

3-4 低温化への更なる課題

3-4-1 低温連続鋳造時の不具合

低温充填仕様とする事で、現行生産条件より低い溶湯温度でも、内部品質が良好な製品を得られることは確認されたが、より低温化させていく中で新たな課題が確認された。

溶湯温度700℃付近で連続鋳造を開始した場合、ストーク受け入子内にアルミの凝固塊が発生する。(図18)



図 18 アルミ凝固塊

アルミ凝固塊は、低湯温で鋳造開始した場合に発生しており、高湯温から鋳造開始し、低湯温へ変化させた場合には、凝固塊は発生しない。これは、ストーク受け入子内の溶湯が金型側から熱を奪われる量に関係していると考えられる。

鋳造解析により、凝固塊発生部位付近の状況を確認すると、ストーク受け入子への熱移動により、ストーク受け入子内の溶湯温度が低下している事が確認された。(図19)

ストーク受け入子内の凝固塊は、外周部から発生が始まるが、一度発生してしまうと、鋳造を繰り返す度にアルミの凝固塊に接触した充填中のアルミが凝固塊の表面に積層し、溶湯

体積を縮小させる事となる。これは低温充填仕様で対策した保温効果を損なう事となり、低温充填での鋳造が出来なくなる。

よって、ストーク受け入子内に発生する凝固塊の対策を実施する必要がある。

3-4-2 アルミ凝固塊への対策

溶湯からストーク受け入子への熱移動を抑える為には、ストーク受け入子を熱飽和させ、溶湯から熱を奪わなくさせる必要があるが、ストーク受け入子を加熱する方法では、下型入子も同時に加熱されてしまう為、製品の凝固を阻害してしまう。

低温充填仕様のストーク受け入子形状は必要最低限の肉厚となっている為、ストーク受け入子自体の熱容量を下げる事は困難である。その為、ストーク受け入子に移動した熱量が下型入子へと移動しないよう、ストーク受け入子と下型入子の間にクリアランスを持たせる事で断熱し、溶湯からは最低限の熱を奪う程度で抑える形状へ変更した。(図20)

これにより、溶湯温度700℃でもストーク受け入子内にアルミの凝固塊が発生することは無くなった。

3-5 効果確認

空冷単気筒H/Cのテストモデルでは、生産時の充填開始溶湯温度を45℃下げる事で、加圧時間-37%、平均CT-22%とする事が出来た。

低温充填化する事で加圧時間、CT共に短縮する事が可能である事を確認した。(図21)

さらに、保持溶湯温度を低温化する事で、保持炉内溶湯温

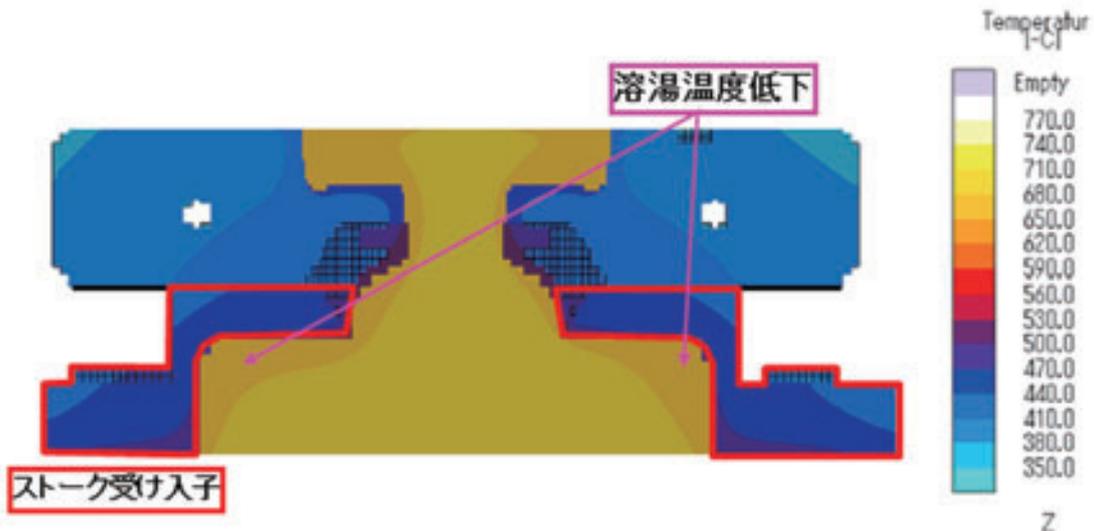


図 19 不具合部解析結果

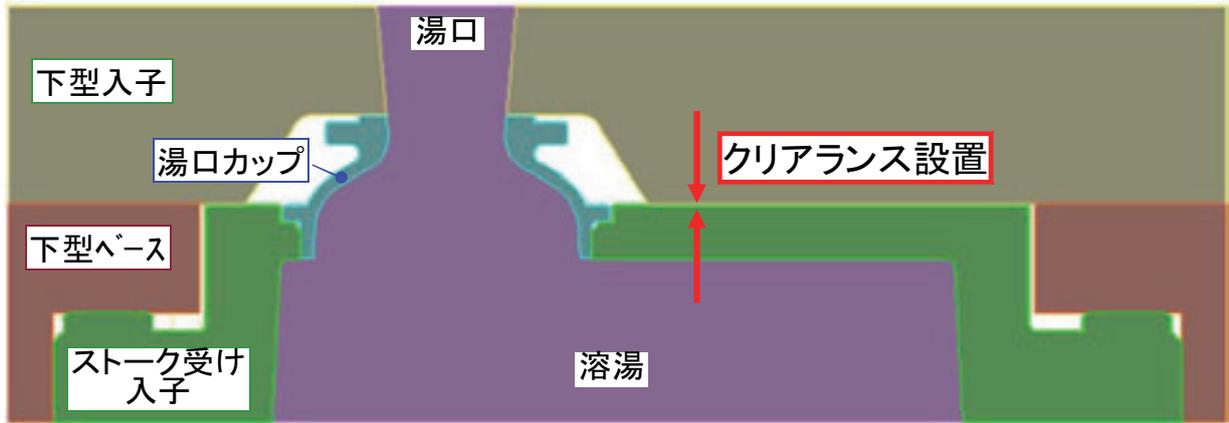


図 20 金型クリアランス

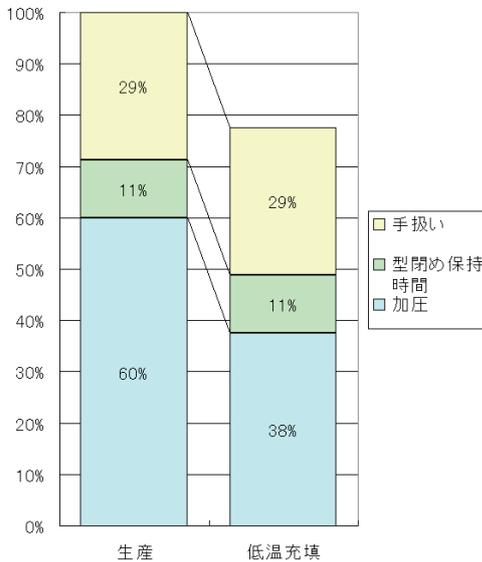


図 21 CT比較

度のバラツキを±6℃と抑える事が出来た。これにより鋳造条件のバラツキが抑えられ鋳造品質安定につなげる事が出来る。

以上の評価結果から、本開発より得られた低温充填技術を生産部品に展開した。

#### 4 生産展開効果

本開発にて得られた低温充填技術は、これまでに25機種の生産工程に折込まれ、展開機種の平均では、溶湯温度を従来より22.6℃低く抑える事ができ、加圧時間は9.4%削減、CTも11.5%削減することが出来た。また、保持溶湯温度を低下させることにより、溶湯保持に要する消費電力も16%の削減が可能となりCO2削減にも貢献できている。

#### 5 おわりに

本開発では、溶湯を低温化する事で加圧時間を短縮し、CTを削減する事が可能となり、低圧鋳造の課題である「生産性の向上によるコストダウン」に寄与することができた。

しかし、他の鋳造法に比べ未だに生産性が劣っていることに違いは無く、今後の低圧鋳造の生産を支える為には更なる取り組みの継続が必要である。今後は加圧制御、手扱いをも含めたCT短縮技術開発を推進し、低圧鋳造の強みを活かし、弱みを克服する取り組みにより、アルミ鋳造部品の品質向上、コスト削減に貢献していく所存である。

#### 6 参考文献

[1] 神部洋史 アルミニウム合金鋳造技術の最近の動向 素形材39(1998),7

#### ■著者



中西 崇雄  
Takao Nakanishi  
生産本部  
EC製造統括部  
第2SyS部



小堀 幸伸  
Yukinobu Kohori  
技術本部  
生産技術統括部  
生産技術部