

鑄ぐるみによる多層構造鑄物成形工法および 局部加圧鑄造工法に関する基礎的研究

群馬産業技術センター 応用機械係

坂田 知昭

(2019年度 一般研究開発助成 AF-2019027-B3)

キーワード：塑性加工，鑄ぐるみ，局部加圧

1. 研究の目的と背景

自動車産業において、EV車に代表される環境配慮型自動車の開発が加速する中、数多くの部品が使用されている鑄造についても、環境配慮を重視したCO₂排出量の削減可能な鑄造プロセス技術の開発が求められる。鑄造プロセス技術では、製品化された鑄造品の使用時および鑄造工程でのCO₂排出量削減が考えられる。前者は、鑄ぐるみといわれる多層構造鑄物であり、たとえば鑄鉄層、断熱層、それらを鑄ぐるむアルミニウム合金層の三層構造にて断熱による省エネ効果が期待できる。鑄ぐるみ工法においては、鑄鉄層とアルミニウム合金層の接合部が、熱伝導および接合強度に大きく影響する。そのため、接合部を変更要素とし、熱伝導、ひずみ、接合強度の変化を測定・検証した。後者は、局部加圧鑄造工法によって、従来の重力鑄造法における押し湯による歩留まりの悪さと鑄造サイクル低下というデメリットの改善が期待できる。局部加圧鑄造工法においては、加圧開始時間に対する凝固時間と鑄巣変化の関係、および加圧力の影響範囲の定量把握、そしてシミュレーションへの適合について測定・検証した結果について報告する。

2. 実験方法

2・1 鑄ぐるみ多層構造鑄物成形工法

2・1・1 研究方法

鑄ぐるみ試験品の作製工程について説明する。まず、サイズ内径φ20.5mm、外径φ26.5mm、高さ50mmの内層を鑄鉄(FC450)で鑄造した。次に鑄鉄に断熱層(イソウルBSFペーパー 厚さ3mm)を巻き付けて加熱成形した。断熱層には、後工程の外層アルミニウム鑄造により、内層の鑄鉄と外層のアルミニウム合金との接合部を設けるため、穿孔を施した。穿孔サイズおよび形状を表1に示す。次にサイズ外径φ38.5mm、高さ50mmの外層をアルミニウム合金(AC4A)で鑄造した。尚、鑄ぐるみによる接合状態は(1)心材が熔融消滅し、鑄ぐるみ材と一体化する場合、(2)心材の表面部分のみが熔融し、鑄ぐるみ材と溶接状態で接合する場合、(3)心材は熔融しないが、界面近傍で相互の拡散があり、合金相を形成する場合、(4)心材の熔融も相互拡散も生じず、力学的に接合している場合、以上4つに分類¹⁾されるが本研究においては、実用性を鑑み(4)力学的接合を採用し試験品を作製した。以上の工程を図1に、作

製した鑄ぐるみ試験品を図2に示す。

次に研究方法について説明する。温度およびひずみ測定用の実験装置を図3に示す。鑄ぐるみ試験品の内層中空部にカートリッジヒータ(日本ヒーター(株)製 型式UF0V27改 220V1kw サイズ外径φ20mm、高さ80mm)を挿入し、両端を断熱材で挟み込む。カートリッジヒータに通電加熱し、その時のヒータ温度、アルミニウム合金層の表面温度および表面ひずみを測定した。ヒータ温度はカートリッジヒータ内蔵のK種熱電対、アルミニウム合金層の表面ひずみは高温用ひずみ(株)共和電業 KFU-2-12D-C1-23H3M3)を使用し、データロガー((株)キーエンス NR-600)でデータを取得した。アルミニウム合金層の表面温度は、赤外線サーモグラフィ(日本アビオニクス(株)TVS-500EX)で測定した。

接合強度の試験状況を図4に示す。鑄ぐるみ試験品の外層のアルミニウム合金層を固定し、内層の鑄鉄を治具で押し込み、接合強度を測定した。測定機は材料試験システム(インストロン(株) 5982)、移動速度5mm/secとした。

表1 鑄ぐるみ試験品の接合部寸法

試験品	接合部サイズ	接合面積mm ²
試験品α	φ6mm×8箇所	226
試験品β	φ9mm×8箇所	509
試験品γ	幅6mm帯×2箇所	999
試験品θ	接合部なし	0

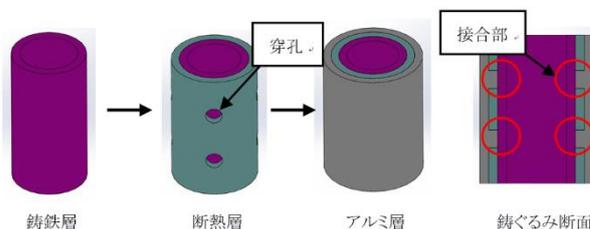


図1 鑄ぐるみ試験品の製造工程



図2 鑄ぐるみ試験品



図3 実験装置

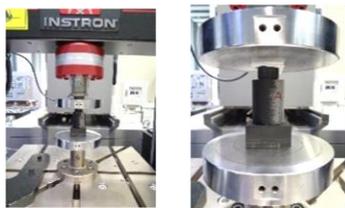


図4 接合強度測定

2・1・2 研究結果

まず、断面写真の図5から铸ぐるみ試験品の接合部は力学的な接合状態であることが確認された。図6に示すように、力学的接合状態において外層と内層の温度差は約3℃であり、接合部の熱伝導の影響が大きいことが推定された。



図5 試験品の断面

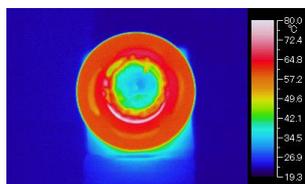


図6 断面の温度分布

カートリッジヒータの出力を消費電力 20.7~21.1w に設定した時の、試験品α、β、γ、θの接合面積とヒータ温度およびアルミニウム合金層表面温度の関係を図7に示す。横軸は各試験品の内層の铸铁と外層のアルミニウム合金の接合面積、縦軸は温度である。図7から、接合面積が小さい方が熱の流出が少ないためヒータ温度は高く維持され、アルミニウム合金層表面温度は低く維持された。つまり接合面積とヒータ温度は負の相関、接合面積とアルミニウム合金層表面温度は正の相関があり、多項式近似式で表せることが示唆された。

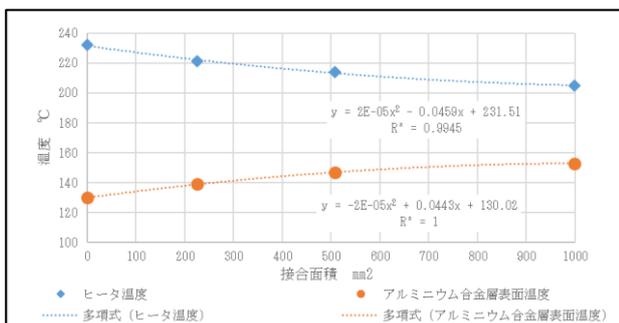


図7 試験品の接合面積と温度の関係

試験品α、β、γのアルミニウム合金層表面温度とひずみの関係を表2に示す。接合面積にかかわらず、ひずみは同等の値であった。铸铁に比べアルミニウム合金の線膨張係数は2倍程度大きいため、(1)心材が熔融消滅し、铸ぐるみ材と一体化する場合、(2)心材の表面部分のみが熔融し、铸ぐるみ材と溶接状態で接合する場合、(3)心材は熔融しないが、界面近傍で相互の拡散があり、合金相を形成

する場合であれば、接合面積でひずみの差がみられた可能性はあるが、(4)心材の熔融も相互拡散も生じず、力学的に接合している本試験品の場合は、接合面積によるひずみの差がみられないことが示唆された。

試験品α、β、γの接合面積と接合強度の関係を図8に示す。横軸は各試験品の内層の铸铁と外層のアルミニウム合金の接合面積、縦軸は接合強度である。接合面積と接合強度は正の相関があり、線形近似式で表せることが示唆された。一般的な運動方程式は

$$F = m \times a \quad \dots (1)$$

F:接合強度(N) m:質量(kg) a:加速度(m/s²)

で表せる。本試験品α(接合面積226mm²)の場合、铸铁の質量0.084kg、接合強度8775Nである。加速度をJISの自動車部品振動試験方法²⁾記載の振動条件において最も厳しいD種(懸架装置のばね下に取り付けられる場合及びエンジンに取り付けられ、比較的振動の大きい場合)の加速度500m/s²を採用し、式(1)に代入すると、安全率209倍が算出された。つまり、質量と使用条件加速度に基づき、必要な接合面積が算出可能であることが示唆された。

表2 試験品の表面温度とひずみの関係

試験品	接合面積mm ²	ひずみμST/°C
試験品α	226	2.36
試験品β	509	2.33
試験品γ	999	2.34

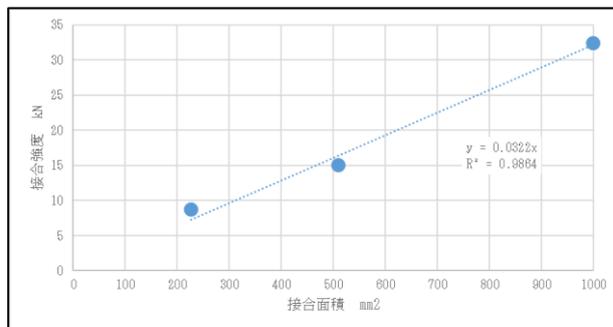


図8 試験品の接合面積と接合強度の関係

2・2 局部加圧铸造工法

2・2・1 研究方法

従来工法の重力铸造法は、铸巢防止、つまり品質保証のために大きな押し湯を使用するが、それにより铸造サイクルタイムと材料使用量が増加する。本研究の局部加圧铸造工法は、加圧ピンで発生した铸巢を潰す工法のため、サイクルタイムと材料使用量の削減効果が期待できる。

まず、局部加圧铸造工法の効果検証のため、図9に示す铸物試作品の局部加圧あり・なしの時の铸巢欠陥の有無を測定した。実施した局部加圧ありの時の加圧ピンの加圧力と加圧開始時間を表3に示す。ストロークは10mmとした。



図9 局部加圧試作品

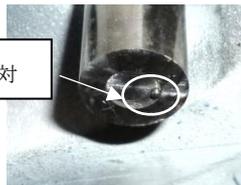


図10 加圧ピン先端部

表3 局部加圧条件

	加圧力MPa	加圧開始時間sec ※注湯完了後
試験品A	0.3	12
試験品B	0.3	5
試験品C	1.0	5

次にシミュレーションへの適合性検証のために、物体の接触面の熱の伝わりづらさを示す熱抵抗値の最適値を検討した。熱抵抗値は物性値とは異なり、物体の組み合わせで異なる値であり、実験で求める必要がある。鑄造実験で、加圧ピンの先端部に熱電対 (K 種) を設置し (図 10)、加圧ピン先端部に接する注湯の温度を測定した。シミュレーションは熱抵抗値を変えながら実施し、温度測定結果とシミュレーション結果が近い時の熱抵抗値を最適値とした。ソフトは鑄造シミュレーションシステム ADSTEFAN ((株) 日立産業制御ソリューションズ) を使用した。熱抵抗値を最適化した後、局部加圧シミュレーションを実施し、最適な加圧条件を算出した。

2・2・2 研究結果

鑄物試作品の局部加圧あり・なしの時の鑄巣欠陥の有無を測定したところ、局部加圧なしの場合、26 試作品中 26 ケすべて図 11 に示す鑄巣欠陥がみられた。次に加圧ありの時の結果を図 12 に示す。試験品 A の場合、鑄巣減少効果はみられたが、加圧ピンは 10mm ストロークしなかった。



図11 加圧なし



図12-A 試験品 A



図12-B 試験品 B



図12-C 試験品 C

せん断跡および組織の流れがみられたため、一度凝固した後に加圧していると推定され、すなわち加圧のタイミングが遅いことが示唆された。試験品 B の場合、加圧ピンは 10mm ストロークしたが、試験品 A よりも鑄巣が若干散見しており、すなわち加圧のタイミングが若干早いことが示唆された。試験 C の場合、接触面をむしり取りながらピンがストロークしているため、加圧力をあげることで推進力が増すことが確認されたが、鑄巣改善の効果はみられなかった。以上から、局部加圧による鑄巣減少効果がみられたが、本鑄造条件においては、最適な加圧開始時間は注湯完了後 5~12 秒後の間になることが示唆された。また、局部加圧の効果範囲は局部的であることが示唆された。

鑄造実験時の加圧ピン先端部の温度実測値と熱抵抗値を変化させた時のシミュレーション結果を図 13 に示す。結果から、熱抵抗値は 1cm2s deg/cal の時が実測値に最も近い傾向を示した。

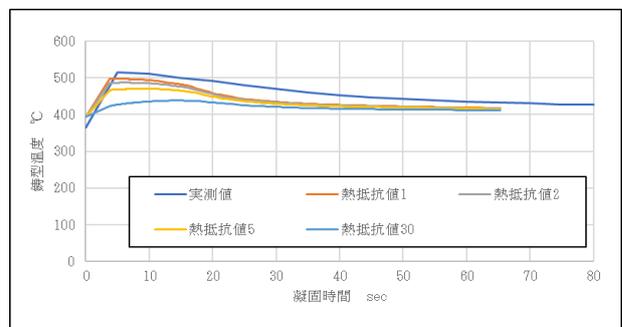


図13 温度実測値とシミュレーション結果比較

熱抵抗値 1cm2s deg/cal にて、注湯後加圧開始時間を実験と同じ 5 秒、12 秒に加えて 8 秒、10 秒でシミュレーションを実施した結果を図 14 に示す。ADSTEFAN のポスト機能である鑄物健全度を評価指標としており、色の異なる (赤色、水色) 部分が鑄巣欠陥の高いことを示す。また、加圧ストロークは 10mm、加圧速度は 2mm/sec とし、いずれも実験条件と同等条件である。注湯 5 秒後に加圧した場合、加圧完了後に鑄巣欠陥が発生しているため、加圧のタイミングが早いことを示唆しており、実験結果と同じ傾向である。注湯 8 秒後に加圧した場合、加圧完了後に鑄巣欠陥が発生しているため、加圧のタイミングが早いことを示唆している。注湯 10 秒後に加圧した場合、12 秒後に発生した鑄巣を潰すことができている。注湯 12 秒後に加圧した場合、鑄巣の発生はないが 7mm でストロークが停止しており、加圧開始のタイミングが遅いことを示唆しており、実験結果と同じ傾向である。以上の結果より、本実験条件においては、注湯 10 秒後に加圧を開始するのが最適であり、またシミュレーションで事前予測可能であることが示唆された。

局部加圧鑄造工法による鑄造サイクルタイムの短縮効果のシミュレーションによる検証結果を図 15 に示す。従来の押し湯モデルでは凝固完了まで 45.4 秒を要していた

が、局部加圧鑄造工法では凝固完了まで 16.3 秒であり、凝固時間を約 3 分の 1 に短縮できることが示唆された。尚、詳細は省略するが加圧力の差異による鑄巣減少効果はシミュレーションではみられなかった。

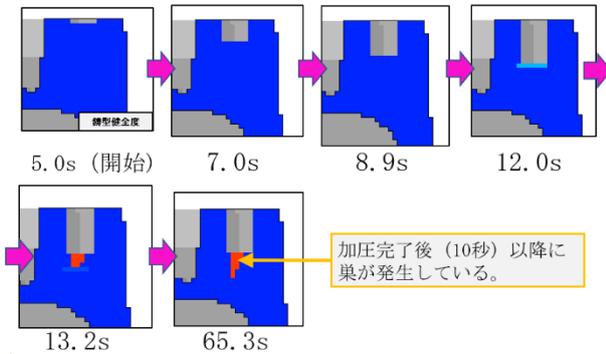


図 14-1 注湯完了 5 秒後に加圧開始した場合 (CAE)

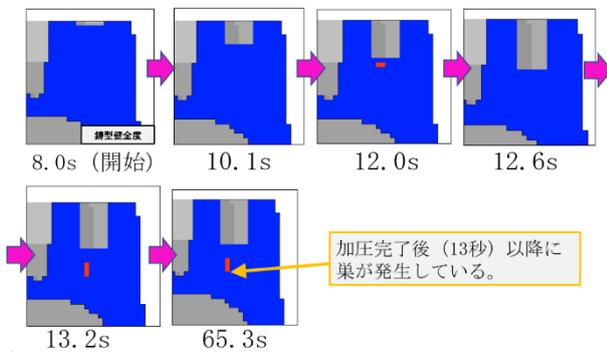


図 14-2 注湯完了 8 秒後に加圧開始した場合 (CAE)

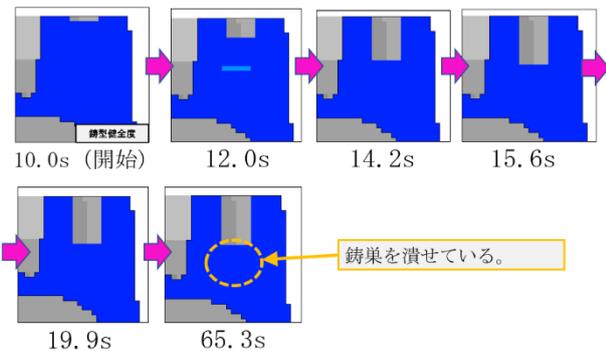


図 14-3 注湯完了 10 秒後に加圧開始した場合 (CAE)

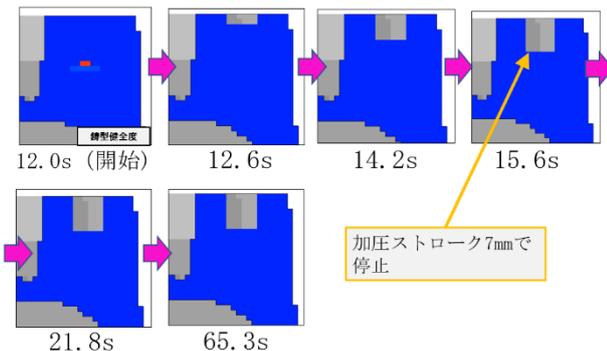


図 14-4 注湯完了 12 秒後に加圧開始した場合 (CAE)

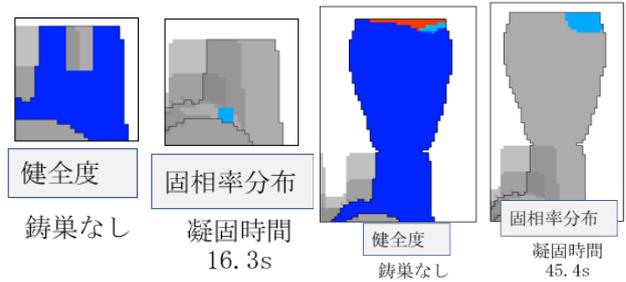


図 15 局部加圧鑄造工法 (左)、従来の押し湯モデル (右)

3. 結言

自動車産業において、CO₂ 排出量の削減可能な鑄造プロセス技術の開発が求められる中、鑄ぐるみ多層構造鑄物成形工法および局部加圧重力鑄造工法に関する基礎的研究を実施した。これらの結果から以下の結言を得た。

3・1 鑄ぐるみ多層構造物成形工法

- (1) 外層のアルミニウム合金と内層の鑄鉄との接触による接合面積とヒータ温度は負の相関、接合面積とアルミニウム合金層表面温度は正の相関があり、多項式近似式で表せることが示唆された。
- (2) 力学的に接合している本試験品の場合、加熱によって生じるひずみについて、接合面積によってひずみに差がみられないことが示唆された。
- (3) 接合面積と接合強度は正の相関があり、線形近似式で表せることが示唆された。

3・2 局部加圧重力鑄造工法

- (1) 局部加圧用加圧ピンの始動のタイミングに関しては、注湯完了 10 秒後の始動が最適であることがシミュレーション上で示唆された。
- (2) 加圧ピンの鑄巣を潰す効果について、実測結果とシミュレーション結果を、注湯完了 5 秒後および 12 秒後のモデルで比較したところ、同様の傾向を示した。したがって、シミュレーションで局部加圧効果の事前予測が可能であることが示唆された。
- (3) 鑄造サイクルタイムについて、従来の押し湯を用いた重力鑄造工法に比べて、局部加圧重力鑄造工法はシミュレーション上では凝固時間を約 3 分の 1 に短縮できることが示唆された。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり (公財) 天田財団より令和令和元年度一般研究開発助成 (AF-2019027-B3) をいただきました。ここに心より感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 野口 徹・鴨田秀一：鑄造工学, 第 70 巻 (1998) 第 12 号, P920-927
- 2) JIS D 1601:1995 : 自動車部品振動試験方法