

鋼鑄物の変形に関する解析精度

Deformation Analysis Accuracy for Steel Casting

吉沢 亮*
Akira Yoshizawa

王 麟*
Wang Lin

鋼鑄物の鑄型(いがた)内における冷却過程での変形量を予測するために関連報告を調査した結果、鑄物に生じる残留応力と変形は鑄物各部の温度差に起因する熱応力と強い相関があり、鑄物各部の温度分布を正確に予測することが重要であることがわかった。また熱変形解析で求めた試験片の変形量を実験結果と比較・検討した。湯流れ・凝固解析において温度と場所依存性を考慮した鑄物-鑄型間の熱伝達係数を用いることにより、鑄造過程の鑄物各部の冷却曲線を50 K以内の精度で再現することができ、その結果を熱変形解析に用いることで試験片の変形量が5 %以内の精度で予測できた。

To predict the amounts of deformation of steel casting during cooling in a sand mold, several technical papers concerning casting deformation were reviewed. Paper review revealed that the amounts of deformation and residual stress generated during cooling are strongly related to the thermal stress caused by temperature differences between various casting positions. Furthermore, deformation and residual stress obtained by both thermal-deformation analysis and experimental measurements of test pieces were compared. The accurate estimation of the cooling curve within a difference of 50 K in each part of the casting, by means of metal-flow and solidification analysis using heat transfer coefficient between mold and casting with temperature and place dependence, resulted in the accurate prediction of test piece's deformation amounts, within the difference of 5 %.

●Key Word : 鋼鑄物, 熱変形解析, 冷却曲線

●R&D Stage : Research

1. 緒言

自動車用鑄物の開発において、1990年代以降、CAE(Computer Aided Engineering)の導入が進んでいる。鑄物の開発に用いられるCAE技術には、内部欠陥を低減するために鑄造方案^{*注1}の検討に多用される湯流れ・凝固解析や、鑄物の製造過程で発生する製品の変形を予測する熱変形解析などがある。しかし、熱変形解析は、湯流れ・凝固解析に比べるとほとんど普及していない。そのため、開発期間中、試作した製品に寸法不良が発生すると、模型の修正、再試作、製品寸法検査の工程を複数回繰り返すことになり、開発期間の長期化や開発コストの増大につながっている。

また、日立金属は、自動車用鑄物として、1,000℃を超えるエンジン排気温度に対応する耐熱鋼鑄物を量産しており、タービンハウジングとエキゾーストマニホールドを一体化したモニターボ[®]の新製品の開発を進めている。しかし、部品の一体化に伴い製品形状は複雑になり、他部品と

締結するボスなどの厚肉部とポートなどの薄肉部との肉厚差が大きくなり、冷却速度の差から生じる変形や引け巣などの内部欠陥の低減が課題となっている。

前述のとおり内部欠陥対策については湯流れ・凝固解析をすでに利用しているため、変形対策を目的としたCAEによる信頼性の高い鋼鑄物の変形予測技術の開発が急務となっている。

著者らは、既報¹⁾にて、湯流れ・凝固解析によって砂型鑄造した鋼鑄物の冷却曲線を再現することにより、鋼鑄物の残留応力と変形量が高精度に再現できることを示した。本報では、はじめに鑄物の変形予測に関する研究事例を調査し、以下鑄鉄の残留応力と変形、熱変形解析技術の改良、鋼鑄物の変形予測技術に関する課題について概説する。さらに、湯流れ・凝固解析における冷却曲線を再現

*注1「鑄造方案」：鑄物の設計と製造プロセスとノウハウを具体化して示す一種の設計書で、代表的なその内容は模型方案(鑄造姿勢、模型の分割等)、湯口方案(湯口系などの設定)、押湯方案(押湯、冷し金)などからなる。

* 日立金属株式会社 自動車機器カンパニー

* Automotive Component Company, Hitachi Metals, Ltd.

する手段として、熱伝達係数の設定方法に着目して、冷却曲線の温度予測精度が変形量および残留応力の予測精度に及ぼす影響について調査した結果を報告する。

2. 鑄物の変形に関する報告の調査

1900年代初頭から2008年現在にいたるまで、鑄物の変形や残留応力が発生するメカニズムに関する実験やCAEによる検証が実施されている^{2)~15)}。なかでも、鑄鉄の残留応力や変形に関して、多くの研究者による報告事例^{2)~14)}がある。そこで、これらの報告事例を鋼鑄物の残留応力と変形のメカニズムの推測、実験方法の検討に活用した。

2.1 鑄鉄の残留応力と変形

鑄鉄の残留応力について、1900年代前半からHeynによる応力発生の研究^{2),3)}などの海外の研究事例が紹介されはじめ、日本でも1930年代以降、多数紹介されてきた^{5)~10)}。例えば、大和田野⁹⁾は、3本の平行棒からなる鑄物の一端を連結し、もう一端を拘束棒で拘束した棒型試験片(肉厚6.4~12 mm, 幅10~25 mm)を用いて、それら3本の平行棒のうち中央の棒において、注湯から室温まで冷却する過程で発生する応力を連続測定し、残留応力の発生過程について考察している。この報告では、以下のように述べられている。鑄鉄は固体状態であっても高温では粘性に富み、鑄物各部の温度差により熱応力が生じよう¹⁶⁾としても、「粘性変形」によって応力緩和が起り、わずかの応力しか残らない。しかし、600~400℃の臨界温度以下では粘性変形から弾性変形に変わるため、温度の均一化に従って応力が増大し、最終的に室温に冷却されて残留応力となる(要約)。さらに、鑄鉄では粘性変形から弾性変形に移る温度は共析変態温度とすればよい、としている。さらに、大和田野は、試験片の異なる部位の温度差により生じる熱応力¹⁷⁾は共析変態温度以下では引張応力であり、引張応力と鑄物の変形量とを関連づけて考察できることも明らかにしている。

つまり、鑄物内の温度差により生じた熱応力が、残留応力や変形の原因であると考えられる。そのため、鑄物内の温度差を湯流れ・凝固解析で正確に計算することにより、残留応力や変形量も予測できると考える。

大和田野の研究成果⁹⁾は、残留応力や鑄物の変形の基本的な考え方として1990年代以降のCAEなどによる残留応力や変形量の予測においても利用されている。例えば中野¹¹⁾は、薄肉部と厚肉部の温度差により発生する熱応力が、反りを発生させる曲げ応力に等しいと仮定して、比較的単純な形状を有するねずみ鑄鉄製工作機械のベッド鑄物の反り量を、はりの曲げ変形の一般式を用いて簡易計算で求めている。しかし、日立金属が製造する自動車用鋼鑄物は、上述のベッド鑄物と比べると複雑形状であり、変形量の予測にこの計算式を使用するのは適切でなく、CAE解析技術の導入が不可欠である。

CAE解析技術を利用した複雑形状鑄物の残留応力の予測に関する報告例に、牧野¹²⁾が行った鑄鉄製シリンダブロックに発生する残留応力のCAEによる予測事例がある。これは、シリンダブロック各部の凝固後の鑄物冷却過程での温度変化の実測値を入力して、汎用構造解析ソフトで弾塑性解析を行ったものである。しかし、熱変形解析に必要な温度分布に実測値を入力しているため、膨大な手間を要する。さらに、形状の異なる鑄物の予測を行うためには、鑄物の各部位、例えば肉厚が異なるすべての場所の温度変化を測定する必要がある、実測値の入力と同様に膨大な手間を要する。したがって、複雑形状の鑄物の温度変化を簡便に予測するためには、注湯してから鑄物が凝固して室温に冷却するまでの温度変化を湯流れ・凝固解析により求める必要があるが、その報告事例はほとんど見られない。以上の背景から、湯流れ・凝固解析から熱変形解析までの一貫したCAE解析技術の開発が不可欠であると判断した。

また、鑄物の変形に周囲の鑄型が影響していることを実験的に示唆するものとして、生型の各種性質とねずみ鑄鉄鑄物の寸法精度の関係を調査した例¹³⁾、砂型の上に載せる重錘の重量が鑄物の寸法精度に及ぼす影響¹⁴⁾などが報告されているがまだ研究事例も少なく、熱変形解析に反映する方法も含めて、不明な点も多い。

2.2 熱変形解析技術の改良

2000年以降、熱変形解析技術の改良が進み、変形量の予測精度を高めるためには、温度予測精度を向上させることが重要であることがわかってきた。一例として、久保¹⁵⁾は有限要素法によるADC12合金ダイカストの変形量予測において、場所と時間の依存性を考慮した熱伝達係数を使用して湯流れ・凝固解析を行った。また、最新の変形解析ソフトでは、金属の持つ熱膨張係数や機械的性質の温度依存性^{11),16),18)}を入力して、弾塑性解析ができる。牧野¹¹⁾の鑄鉄製シリンダブロックの残留応力解析事例においても、材料の機械的性質として温度依存性を考慮した実測値を入力して、残留応力を精度よく予測した。以上のことを考慮のうえ、本報では変形量や残留応力を正確に予測するために、解析対象である鋼鑄物の材料物性値を正確に入力することとした。

2.3 鋼鑄物の変形予測

鋼鑄物の凝固後の反り量を予測して模型に「逆反り」をつけて変形を調整した事例が、技術便覧など^{19),20)}に記述されているが、材質や鑄物形状による、反り量の定量的な基準は明確にされていない。さらに、鋼鑄物の熱変形解析に関する報告事例もほとんど見当たらない。

そこで本報では、鑄鉄品の異なる部位間の温度差によって生じる熱応力¹⁷⁾が、変形量と密接な関係にあるとの前提に立ち、鋼鑄物についても試験片を用いた実験で検証した。具体的には、温度依存性のみを考慮した湯流れ・凝固解析における熱伝達係数と、温度と場所の依存性を考慮した鑄物-鑄型間の熱伝達係数を与えて、湯流れ・凝固解析

における冷却曲線の温度予測精度を比較した。さらに、前述の2条件で湯流れ・凝固解析を行って得られた鋳物各部の温度分布を使って、熱変形解析を行った時の変形量および残留応力の予測精度を、冷却曲線の温度予測結果と関連づけて詳しく考察した。

3. 枠型試験片における残留応力と変形量の予測精度の検証

3.1 試験片および実験方法

日本強靱鋳鉄協会¹⁰⁾ *注2が鋳鉄の変形量の評価用に採用した枠型試験片(図1)を用いて、鋳造過程で生じる残留応力と変形量を測定した。D部の寸法を20 mm(以下、20 mm試験片と記す)、および5 mm(以下、5 mm試験片と記す)の2種類の試験片を用意して、肉厚が変形量に及ぼす影響を調べた。鋳型には、室温の自硬性アルカリフェノール鋳型を用いた。高周波溶解炉にてオーステナイト系鋼(Fe-20Cr-10Ni系合金)を溶解し、1,600℃で注湯した。図1に示した太い柱(幅40 mm)および細い柱(幅20 mm)の中心に相当する位置に直径1 mmのRシー思熱電対を挿入し、注湯してから室温に冷却するまでの温度変化を測定した。

20 mm試験片の残留応力を、ひずみゲージ法を用いて測定した。測定位置は図2の太い柱の外側aと内側b、太い柱と接続部のつなぎの隅角部c、および細い柱の内側dと外側eの5箇所とした。なお、図2において太い柱の内側dは表示した裏面に位置する。図2のA、Bの箇所で試験片を切断したときに生じたひずみ量を測定して、残留応力を求めた。なお、5 mm試験片は肉厚が薄く、ひずみゲージを貼る場所を確保できなかったため、残留応力は測定しなかった。

*注2「(社)日本強靱鋳鉄協会」：現(社)日本鋳造協会。2005年、(社)日本強靱鋳鉄協会を含む鋳造3団体が統合され、(社)日本鋳造協会が設立された。

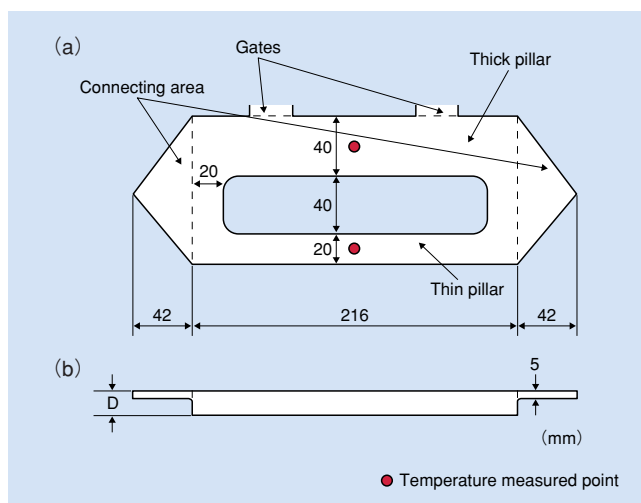


図1 枠型試験片の形状および寸法 (a) 正面図 (b) 断面図
Fig. 1 Shape and dimension of frame specimens (a) front section (b) cross section

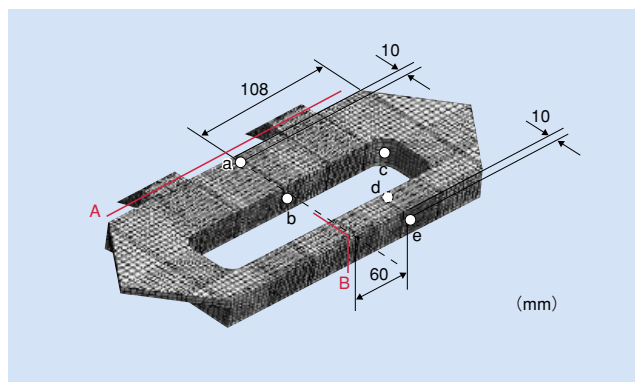


図2 残留応力の測定位置と試験片切断位置
Fig. 2 Residual stress measured points, and cut-line (A, B) when residual stress measuring

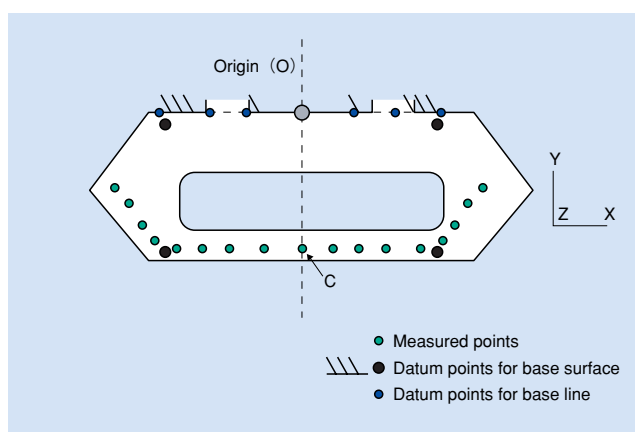


図3 Z方向変位量の測定位置
Fig. 3 Measured points of Z-directional displacement

図3に20 mm試験片と5 mm試験片の変形量の測定に用いた基準点、および変位の測定位置を示す。図中の測定基準を使って基準平面、およびOを原点とする三次元座標系を決定した後、Z方向変位量(紙面下方向が+方向)を測定した。測定位置Cと測定位置C以外の測定位置とのZ方向変位量の差の最大値を変形量と定義した。

3.2 解析方法

解析には市販の有限要素法の鋳造解析ソフトを使用した。はじめに、STL (Standard Triangulation Language)

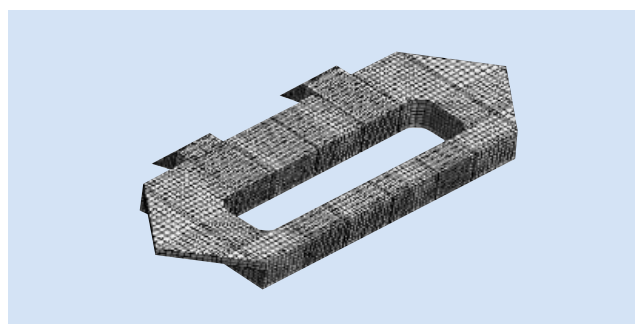


図4 湯流れ解析用モデル(20 mm試験片)
Fig. 4 A finite element model for fluid flow analysis (test piece: 20 mm)

形式の3次元データを使って解析モデルを作成した後、湯流れ解析、凝固解析、ならびに熱変形解析を実施した。図4に20 mm試験片の湯流れ解析用の解析モデル（鋳物の要素数約51,000個）の一部を示す。

3.2.1 湯流れ・凝固解析

溶湯、鋳型の物性値、初期温度、ならびに溶湯と鋳型間の熱伝達係数などの境界条件を設定し、湯流れ解析および鋳物が室温近くに冷却するまでの凝固解析を行った。湯流れ・凝固解析で求めた鋳物の冷却曲線の子測精度が熱変形解析結果に及ぼす影響を明らかにするために、鋳物-鋳型間の熱伝達係数に、温度依存性のみを考慮した数値と、温度と場所の依存性を考慮した数値を用いた。温度依存性のみを考慮したものは、試験片全域に図5で示すパターン1の熱伝達係数を用い、温度と場所の依存性を考慮したものには、細い柱と試験片両側の三角形の領域に図5で示すパターン2を、その他の領域にパターン1を用いた。

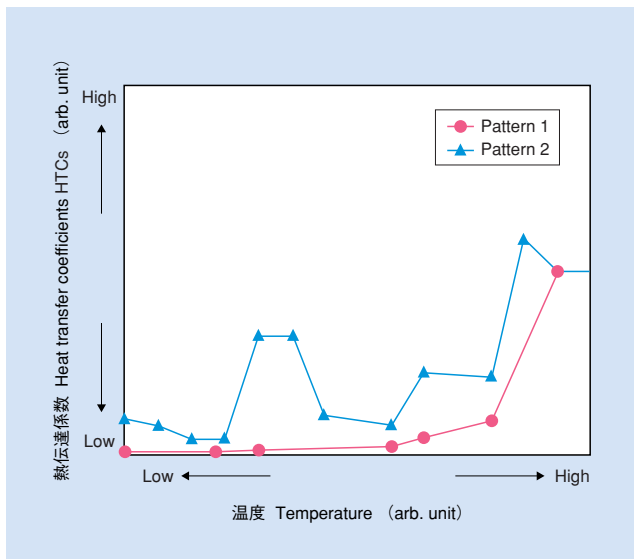


図5 熱伝達係数の設定例
Fig. 5 Heat transfer coefficients setting

3.2.2 熱変形解析

凝固計算で得られた鋳物の温度分布から、予め決められたタイムステップで温度分布データを複数個抽出した。さらに、鋳物要素には温度依存性を考慮した鋳物の機械的性質と熱膨張係数を、鋳物の表面要素には拘束条件を入力して、変形量と残留応力を計算した。

3.3 実験結果と解析結果の比較

3.3.1 実験結果と温度依存性のみを考慮した解析結果の比較

図6、図7に、温度依存性のみを考慮した熱伝達係数を用いて湯流れ・凝固解析を行ったときの冷却曲線と、20 mm試験片および5 mm試験片の実験結果との比較を示す。実験結果によると、20 mm試験片、5 mm試験片とも熱容量

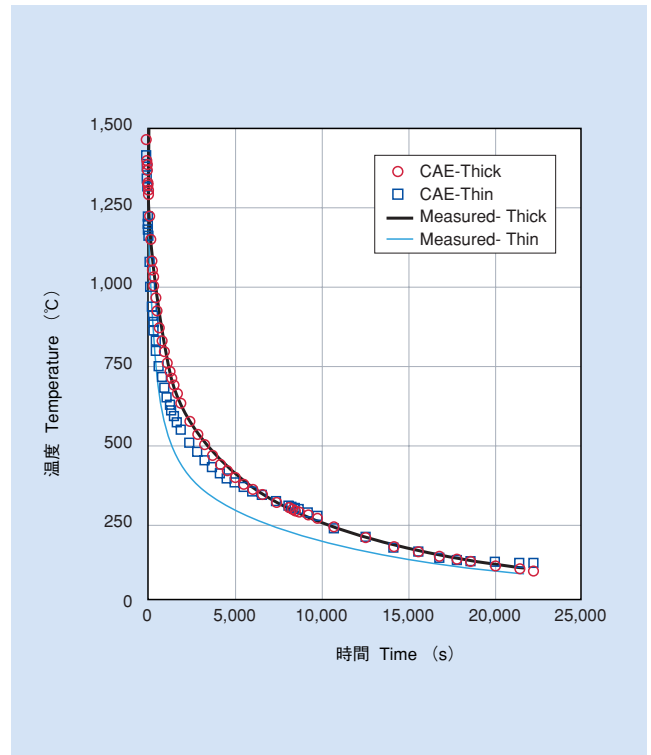


図6 解析によって得られた冷却曲線と実験結果との比較（20 mm試験片、温度依存性のみ考慮した熱伝達係数を使用）

Fig. 6 Comparison of cooling curves between CAE analyzed and measured (20 mm test piece: CAE results with temperature dependent heat transfer coefficients)

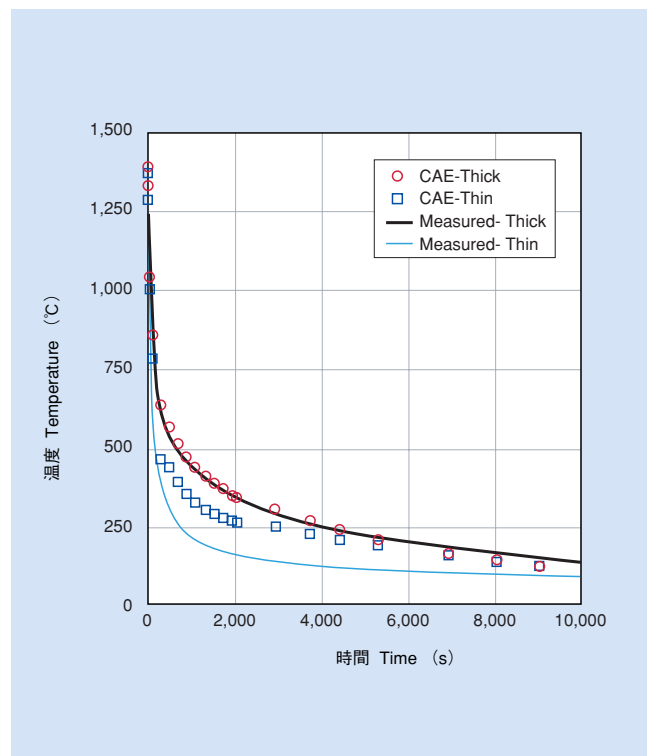


図7 解析によって得られた冷却曲線と実験結果の比較（5 mm試験片、温度依存性のみ考慮した熱伝達係数使用）

Fig. 7 Comparisons of cooling curves between CAE analyzed and measured (5 mm test pieces: CAE results with temperature dependent heat transfer coefficients)

の小さい細い柱の方が太い柱よりも早く温度が低下した。また、太い柱では実験結果と解析結果はほぼ一致していたが、細い柱の解析結果は、20 mm 試験片、5 mm 試験片のいずれでも解析結果と実験結果の差異は大きく、最大で 100～150 K に及ぶ。

図 8 に、温度依存性のみを考慮した熱伝達係数を用いて湯流れ・凝固解析、熱変形解析を行ったときの、20 mm 試験片の残留応力の解析結果と実験結果とを比較して示す。正の値は引張側の残留応力を、負の値は圧縮側の残留応力を示す。実験結果によると、太い柱の内側（図 2 の b, c）には引張側の残留応力が生じ、その最大値は太い柱と接続部のつなぎの隅角部（図 2 の c）に現れた。一方、細い柱の内側（図 2 の d）には圧縮側の残留応力が発生した。また、細い柱の外側（図 2 の e）には引張側の残留応力が発生したが、その絶対値は内側（図 2 の d）の測定値よりも小さい値を示した。

以上のように、主に太い柱など冷却の遅い部位に引張残留応力が発生し、細い柱など冷却の速い部位には圧縮残留応力が発生する傾向が示され、試験片の内側には大きな残留応力が発生した。大和田野⁹⁾が鋳鉄において同様の結果を報告しており、棒型試験片における残留応力の発生傾向は鋳鉄と銅鋳物とで同様の傾向を示した。また、大和田野⁹⁾の試験片の最小肉厚 6.4 mm が本実験における 5 mm 試験片の肉厚と近い値であることから、残留応力測定を実施できなかった 5 mm 試験片においても、同様の残留応力の分布になっていると推定される。

熱変形解析で得られた残留応力の傾向（引張側または圧縮側）は、解析結果と実験結果で一致したが、残留応力の値は、実験結果の約 1/2～1/3 の値となり、差異は大きかった。

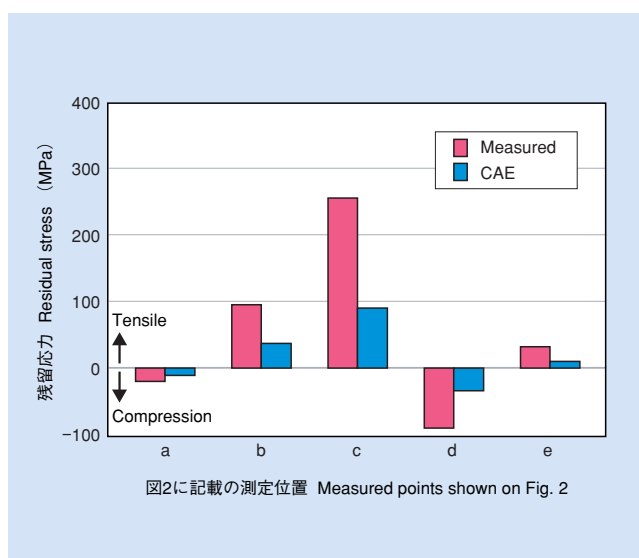


図 8 残留応力の解析結果と実験結果との比較（20 mm 試験片，温度依存性のみ考慮した熱伝達係数使用）
Fig. 8 Comparisons of residual stress between CAE analyzed and measured (20 mm test piece: CAE results with temperature dependent heat transfer coefficients)

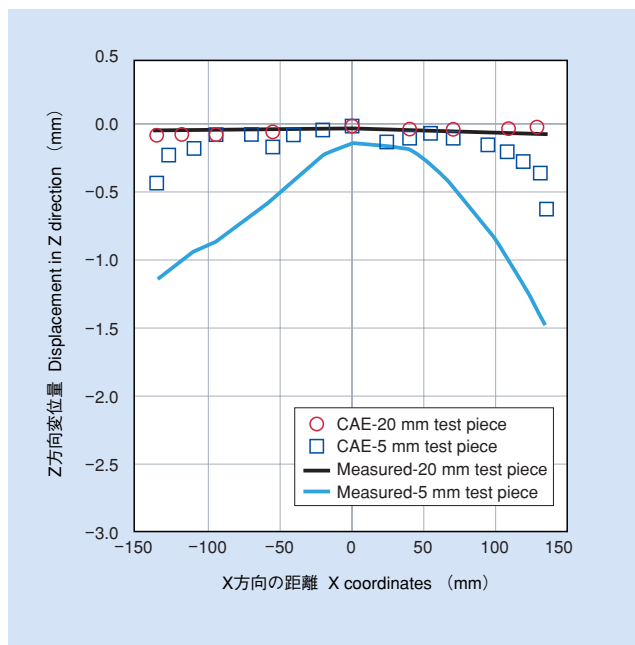


図 9 Z 方向変位量の解析結果と実験結果の比較（5 mm および 20 mm 試験片，温度依存性のみ考慮した熱伝達係数使用）
Fig. 9 Comparisons of X coordinates dependence of Z-directional displacement between CAE analyzed and measured (5mm and 20 mm test pieces: CAE results with temperature dependent heat transfer coefficients)

図 9 に、温度依存性のみを考慮した熱伝達係数を用いて湯流れ・凝固解析、熱変形解析を行った時の 20 mm 試験片および 5 mm 試験片の Z 方向変位量の解析結果と実験結果の比較を示す。20 mm 試験片の Z 方向変位量の実験結果は最大でも約 0.1 mm であるのに対し、5 mm 試験片の Z 方向変位量は、1.5 mm と大きくなった。計算で得られた Z 方向変位量は 20 mm 試験片では 0.1 mm 以下、5 mm 試験片では最大で約 0.3 mm であり、特に、変形量の大きかった 5 mm 試験片では、解析結果は実験結果（1.5 mm）の約 20% の値しか得られなかった。

3.3.2 実験結果と温度と場所の依存性を考慮した解析結果の比較

図 10、図 11 に温度と場所の依存性を考慮した熱伝達係数を用いて湯流れ・凝固解析を行った時の冷却曲線と 20 mm 試験片と 5 mm 試験片の実験結果の比較を示す。温度依存性のみを考慮した場合と同様、熱容量の小さい細い柱の方が早く温度が低下した。また、実験結果と解析結果はよく一致していた。

図 12 に温度と場所の依存性を考慮した熱伝達係数にて湯流れ・凝固解析を行った後に熱変形解析を行ったときの、20 mm 試験片の残留応力の解析結果と実験結果との比較を示す。熱変形解析で得られた残留応力の傾向（引張側または圧縮側）は実験結果と一致した。また、太い柱側の測定位置 a～c では実験結果と解析結果の精度は 5% 以内であり、よく一致したが、細い柱の d, e では、解析結果と実験結果の差が大きかった。

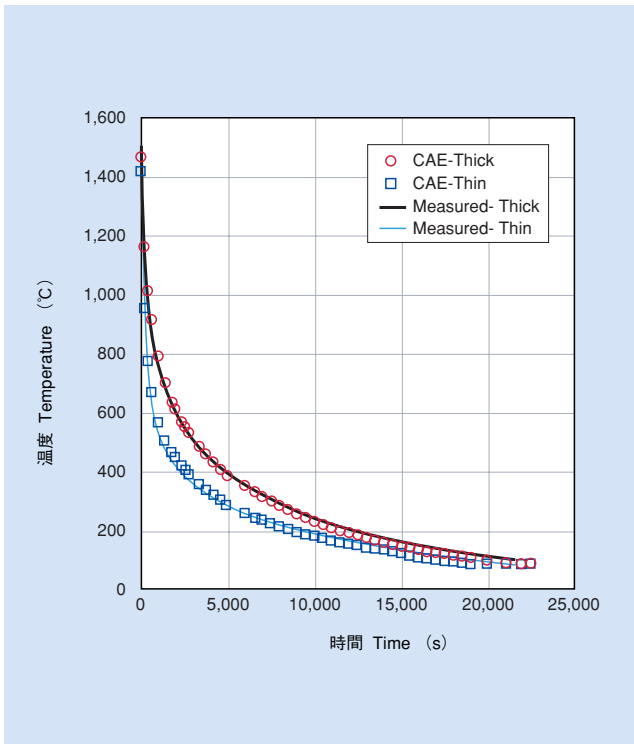


図10 解析によって得られた冷却曲線と実験結果の比較 (20 mm 試験片, 温度と場所依存性を考慮した熱伝達係数使用)
 Fig. 10 Comparison of cooling curves between CAE analyzed and measured (20 mm test piece: CAE results with temperature and place dependent heat transfer coefficients)

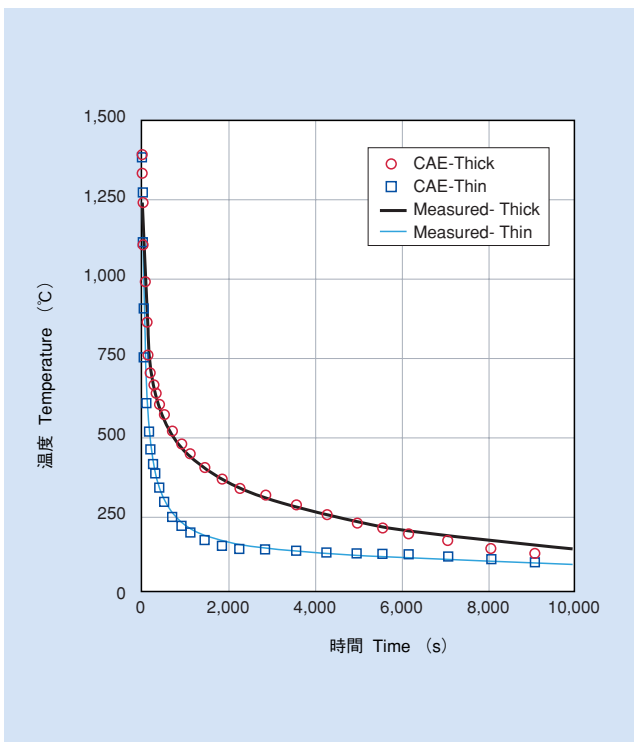


図11 解析によって得られた冷却曲線と実験結果の比較 (5 mm 試験片, 温度と場所依存性を考慮した熱伝達係数使用)
 Fig. 11 Comparison of cooling curves between CAE analyzed and measured (5 mm test piece: CAE results with temperature and place dependent heat transfer coefficients)

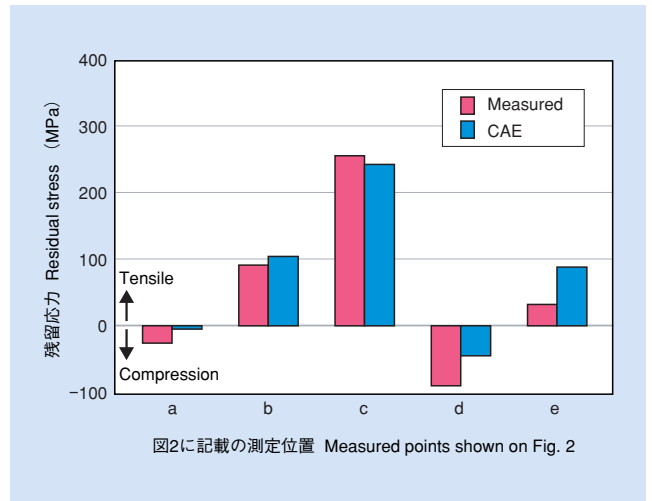


図12 残留応力の解析結果と実験結果との比較 (20 mm 試験片, 温度と場所依存性を考慮した熱伝達係数使用)
 Fig. 12 Comparisons of residual stress between CAE analyzed and measured (20 mm test piece: CAE results with temperature and place dependent heat transfer coefficients)

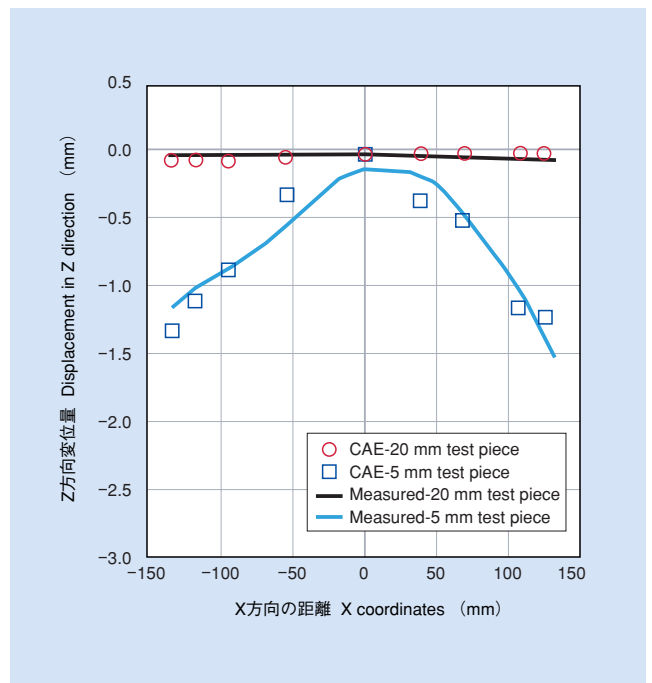


図13 Z方向変位量の解析結果と実験結果の比較 (5 mm および 20 mm 試験片, 温度と場所依存性を考慮した熱伝達係数を使用)
 Fig. 13 Comparisons of Z-directional displacement between CAE analyzed and measured (5 mm and 20 mm test pieces: CAE results with temperature and place dependent heat transfer coefficients)

図13に温度と場所の依存性を考慮した熱伝達係数を用いて湯流れ・凝固解析, 熱変形解析を行った時の, 20 mm 試験片および5 mm 試験片のZ方向変位量の解析結果と実験結果の比較を示す。20 mm 試験片, 5 mm 試験片とも, Z方向変位量の分布は解析結果と実験結果でよく一致し, 最大変位量で定義する変形量も差異0.1 mm (5%以内)で精度よく予測できた。

3.4 考察

3.4.1 変形量、残留応力の予測精度に及ぼす冷却曲線の再現性の影響

鋳物内の温度差が残留応力と変形量に及ぼす影響を明らかにするために、図6、図7、図10、図11で得られた冷却曲線をもとに、注湯後の経過時間と太い柱と細い柱の温度差（以下、温度差と記す）を算出し、実験結果と2種類の解析結果とを比較した。この2種類とは、温度依存性のみ、および温度と場所の依存性を考慮した熱伝達係数による解析結果である。図14に20 mm試験片の比較結果、図15に5 mm試験片の比較結果を示す。

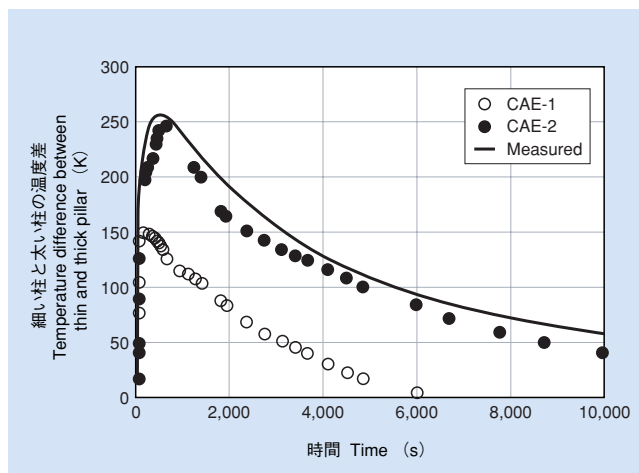


図14 細い柱と太い柱の温度差の解析結果と実験結果との比較 (20 mm試験片)

Fig. 14 Comparisons of temperature differences of a thin and thick pillar between CAE and measurement (20 mm test piece)
CAE-1: with temperature dependent heat transfer coefficients
CAE-2: with temperature and place dependent heat transfer coefficients

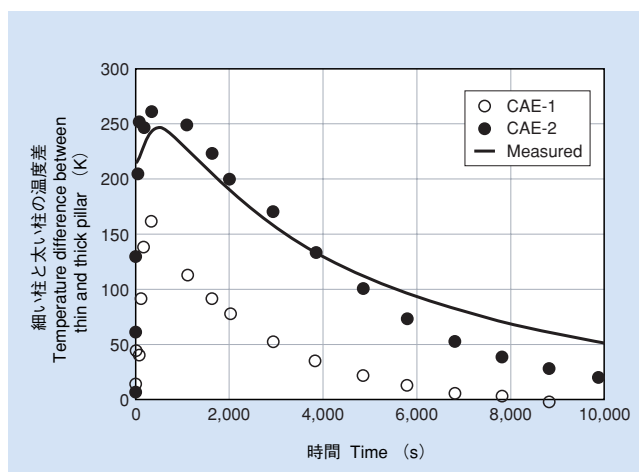


図15 細い柱と太い柱の温度差の解析結果と実験結果との比較 (5 mm試験片)

Fig. 15 Comparisons of temperature differences of a thin and thick pillar between CAE and measurement (5 mm test piece)
CAE-1: with temperature dependent heat transfer coefficients
CAE-2: with temperature and place dependent heat transfer coefficients

温度依存性のみを考慮した熱伝達係数による解析結果は、図8、図9に示すように変形量と残留応力の差異が大きく、図14、図15に示すように温度差においても解析結果は実験結果よりも100~150 K小さかった。一方、温度と場所の依存性を考慮した場合、図12、図13に示すように変形量と太い柱の引張側の残留応力が5%以内の精度で予測され、図14、図15に示すように温度差においても、解析結果は実験結果とほぼ同じ値(50 K以内)を示した。

本考察から変形量と残留応力の予測精度は、湯流れ・凝固解析における細い柱と太い柱の温度差の予測精度と関係が深いことを示唆している。したがって、鋳物と鋳型の熱伝達係数には温度の依存性だけでなく、場所依存性まで考慮し、冷却曲線を精度よく再現することが重要である。

3.4.2 細い柱での残留応力の解析差異について

上述のように冷却曲線の再現性を向上し、鋳物内の温度差を精度よく計算することにより、変形量と残留応力が高精度に予測できることが明らかになった。しかし、図12から、温度と場所の依存性を考慮しても、細い柱では残留応力の解析結果と実験結果との差は大きく、改善の余地があることを示唆している。本報の試験鋳物のような単純な形状であれば、さらに細かく鋳物を分割すれば温度差の予測精度も向上すると考えられる。今後、複雑形状の製品の変形量を予測するためには、製品形状に応じた適切な解析条件を設定する必要がある。

4. 結 言

有限要素法を用いて砂型鋼鑄物の枠型試験片の変形量を予測し、以下の結果を得た。

- (1) 注湯から室温付近に冷却するまでの鑄物の冷却曲線を、湯流れ・凝固解析で50 K以内の差異で精度よく再現することにより、枠型試験片の変形量が5 %以内の精度で予測できた。鑄物の冷却曲線を精度よく再現するためには、鑄物と鑄型の熱伝達係数に温度だけでなく、場所依存性を考慮することが重要である。
- (2) 鑄物の変形量に影響の大きい引張側の残留応力が発生した枠型試験片の太い柱では、5 %以内の精度で残留応力を予測できた。
- (3) 圧縮側の残留応力が発生した枠型試験片の細い柱では、残留応力の絶対値に違いが生じて改善の余地が残された。

今後、熱伝達係数などを製品形状に応じて細かく設定することにより、精度の向上を検討する。

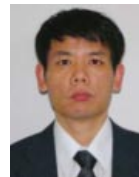
引用文献

- 1) 吉沢, 王: 素形材, 49 (2008), vol5, 1.
- 2) E.Heyn: Stahl u. Eisen 27 (1907), 1309.
- 3) E.Heyn: Stahl u. Eisen 27 (1907), 1347.
- 4) R.V.Steiger: Stahl u. Eisen 33 (1913), 1442.
- 5) 石川: 鑄物, 7 (1935), 593.
- 6) 石川: 鑄物, 7 (1935), 656.
- 7) 石川: 鑄物, 7 (1935), 749.
- 8) 千々岩: 鑄物, 27 (1955), 247.
- 9) 大和田野: 鑄物, 31 (1959), 583.
- 10) (社)日本強靱鑄鉄協会: 「鑄鉄の内部応力測定に関する研究」, 48, (1965)
- 11) 中野: 鑄物, 63 (1991), 977.
- 12) 牧野, 小野, 大塚, 松原: 鑄物, 63 (1991), 959.
- 13) 牧野, 小林, 阪口, 二宮, 大田: 鑄物, 63 (1991), 971.
- 14) 葉袋, 野村, 内藤, 原賀: トヨタ技術 28 (1978), 302.
- 15) 久保: 「鑄造CAEによる現象解明と最適化に関する研究」, (社)日本鑄造工学会, (2004), 43.
- 16) (財)総合鑄物センター編: 「鑄造品のエンジニアリング・データブック」II 鑄鉄の高温特性 (1981)
- 17) 竹内: 「熱応力」, 日刊出版, (1989), 3.
- 18) (財)総合鑄物センター編: 「鑄造品のエンジニアリング・データブック」I 鑄鉄の高温特性 (1980)
- 19) 新日本鑄造鍛造協会編: 「鑄鋼鑄物鑄造-技能検定基準細目準拠-」(発行年不詳), 122.
- 20) (財)素形材センター編: 「模型製作技術マニュアル」, (1988), 34-35.



吉沢 亮

Akira Yoshizawa
日立金属株式会社
自動車機器カンパニー
素材研究所



王 麟

Wang Lin
日立金属株式会社
自動車機器カンパニー
素材研究所
博士 (工学)