

論文 Article

鑄造用 CAE 技術に関する研究

原稿受付 2010 年 4 月 29 日

ものつくり大学紀要 第 1 号 (2010) 22~27

櫻井大八郎^{*1}, 佐藤宏樹^{*2}, 鈴木克己^{*3}, 木島秀弥^{*4}, 松浦誠^{*5}^{*1}ものつくり大学 技能工芸学部 製造技能工芸学科 教授^{*2}元ものつくり大学 技能工芸学部 製造技能工芸学科 学生^{*3}ものつくり大学 技能工芸学部 製造技能工芸学科 特別客員教授^{*4}株 UES ソフトウェア・アジア 社長^{*5}株 田島軽金属 専務取締役

A Study on CAE Technology for Casting

Daihachiro Sakurai ^{*1}, Hiroki Satou ^{*2}, Katumi Suzuki ^{*3}, Hideya Kijima ^{*4}, Makoto Matsuura ^{*5}^{*1} Prof. of Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*2} Former Student of Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*3} Special Guest Prof. of Dept. of Manufacturing Technologists, Institute of Technologists^{*4} President of UES Software Asia Inc.^{*5} Senior Managing Director of Total Aluminum Corporation

Abstract

More than 500 software for the casting simulation were sold, but few of them were used in the foundries. This study shows the easy way to measure some physical properties in the small foundry and to fit the simulation to the production, and also shows CAE Technology is very useful even in the Aluminum Alloy Sand Mold Castings in order to improve the casting plans and to develop the power of the young generation.

Key Words : casting, solidification, simulation, Aluminum Alloy, sand mold, FEM

1. はじめに

鑄造にコンピュータを用いたシミュレーションが用いられ始めてから 30 年以上が経過しており、すでに市販の鑄造用シミュレーション・ソフトは数多くの種類のもので販売されており、日本国内でも 500 本以上が売られている。しかし、鑄造工場で現実の鑄造方案の検討用として用いられているケースは多くなく、宝の持腐れとなっていることが多い。

その理由として、一つには 3D-CAD を十分に使いこなせるエンジニアが少ないこと、次に高温での各種物性値が十分でないため計算結果と現実とが満足できる程度には一致しないことなどが挙げ

られている。

3D-CAD 対策としては、厚生労働省・埼玉県の協力を得て、離職者向けに 3D-CAD 教育を行い、100 名程度の 3D-CAD を使いこなせる人材を輩出するとともに、製造技能工芸学科の学生にも教科として教育し、当学科の卒業生は 3D-CAD を使いこなせるようになっている。すでに合計 6 期、約 700 名の卒業生が世に出ており、大きな戦力となっている。

高温での物性値は、鑄造する金属、使用する原料砂の種類・粒径、粘結材の種類・添加量、付着/吸水分量、鑄物砂の充填度、塗型の種類・厚み等数多くの要因によって変化し、これらの要因が工場各々によって異なるため、数多くの研究がなされてい

るにもかかわらず、ある工場に適した値が与えられていない。一般的に大企業は多くの技術者を抱え、それなりの投資も可能であるため問題にはならないが、中小企業の場合には工場主が唯一の技術者だったり、いてもごく少数の技術者しかいなかったり、なかなか自社向けの物性値を求めるところまでは手が届かないのが実情である。

本研究は、中小鑄造企業のために、中小鑄造企業と協力して、その工場に適した物性値を求め、その鑄造企業において CAE 技術が使用可能となることを目的としている。

2. 実験方法

2.1 実験 1 (基礎試験)

まず適正な各種物性値を求めるために、当該工場で使用しているフラタリー・サンド、フラン自硬性鑄物砂を用い、また当該工場で生産している製品の平均的な肉厚が 30mm であるため、基本肉厚を 30mm とした、

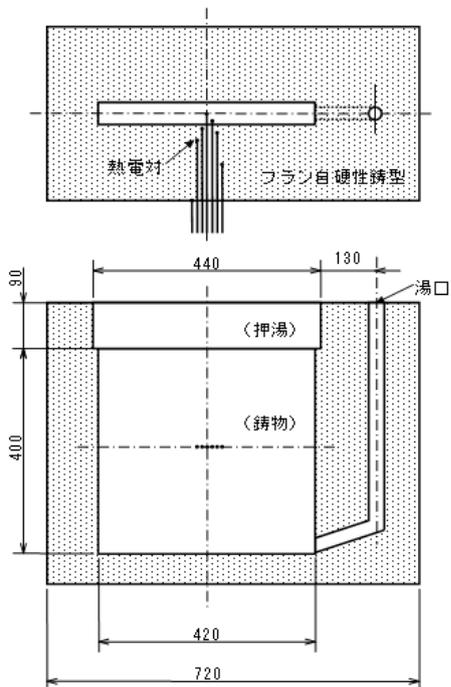


Fig.1 Mold Shape of Experiment 1

Fig.1 に示す試験体用鑄型を 2 体 (冷金ありと冷金なし) 作成し、JIS の AC4C 材をガス加熱式溶融炉で溶融した後、Ti-B 微細化剤および Sr 改良処理剤を添加し、窒素脱ガス処理を行って、約 970K で鑄造した。鑄込量は 22kg、鑄込時間は約 30 秒であった。Fig.1 の試験体の中央部 (一方向熱流と考えられる範囲 40mm × 60mm) には K 熱電対を取り付けてあり、A-D 変換後ノート型パソコンに鑄込み後の温度変化を取り込んだ。この結果と、FEM 鑄造計算ソフトである ProCAST を用いたシミュレーション結果を比較し、ソフトに入力する物性値を変化させ、試行錯誤法により適正な物性値を決定した。鑄造計算のメッシュ分割と初期設定条件としての AC4C の物性値を Fig.2 に示す。

2.2 実験 2 (実物試験)

実験 1 で得られた適正な物性値を用い、当該工場 で生産している製品の中で比較的鑄造歩留まりの悪い製品 (フレーム、製品重量 145kg) をモデルとして取り上げ、これに高周波押湯加熱システムを適用する場合の押湯設定と引巣発生に関し鑄造シミュレーションを実施した。押湯に関しては本当は加熱条件であるが、今回は簡単に断熱条件で計算した。押湯位置、数量、サイズ等に関しては従来の経験からこれでいけるのではないかと考えられるものを選定し、押湯数 2 か所、3 か所、4 か所のものと、従来の押湯数 12 か所のものについて ProCAST を用いて計算し、押湯 2 か所では引巣発生の可能性があるが (Fig.3 に示す)、3 か所以上であれば引巣発生の可能性は少ないことがわかった。そこで、Fig.4 に示す製品を、Fig.5 に示す鑄造方案 (押湯 3 か所方案) で鑄造し、結果を確認することにした。鑄型・溶融・鑄造条件は実験 1 と同様である。鑄込み後高周波押湯加熱システムを作動させ、5 分後には押湯に差し湯を行い、30 分後まで同システムを作動させた。温度は押湯部 2 点、鑄物本体部 3 点で測定した。

3. 実験結果

3.1 実験 1 の結果

冷し金なしの場合の鑄造後の温度変化の実験結果と比較検討用としての初期設定値そのままの計算結果を Fig.6 に示す。実験結果では①凝固時間が計

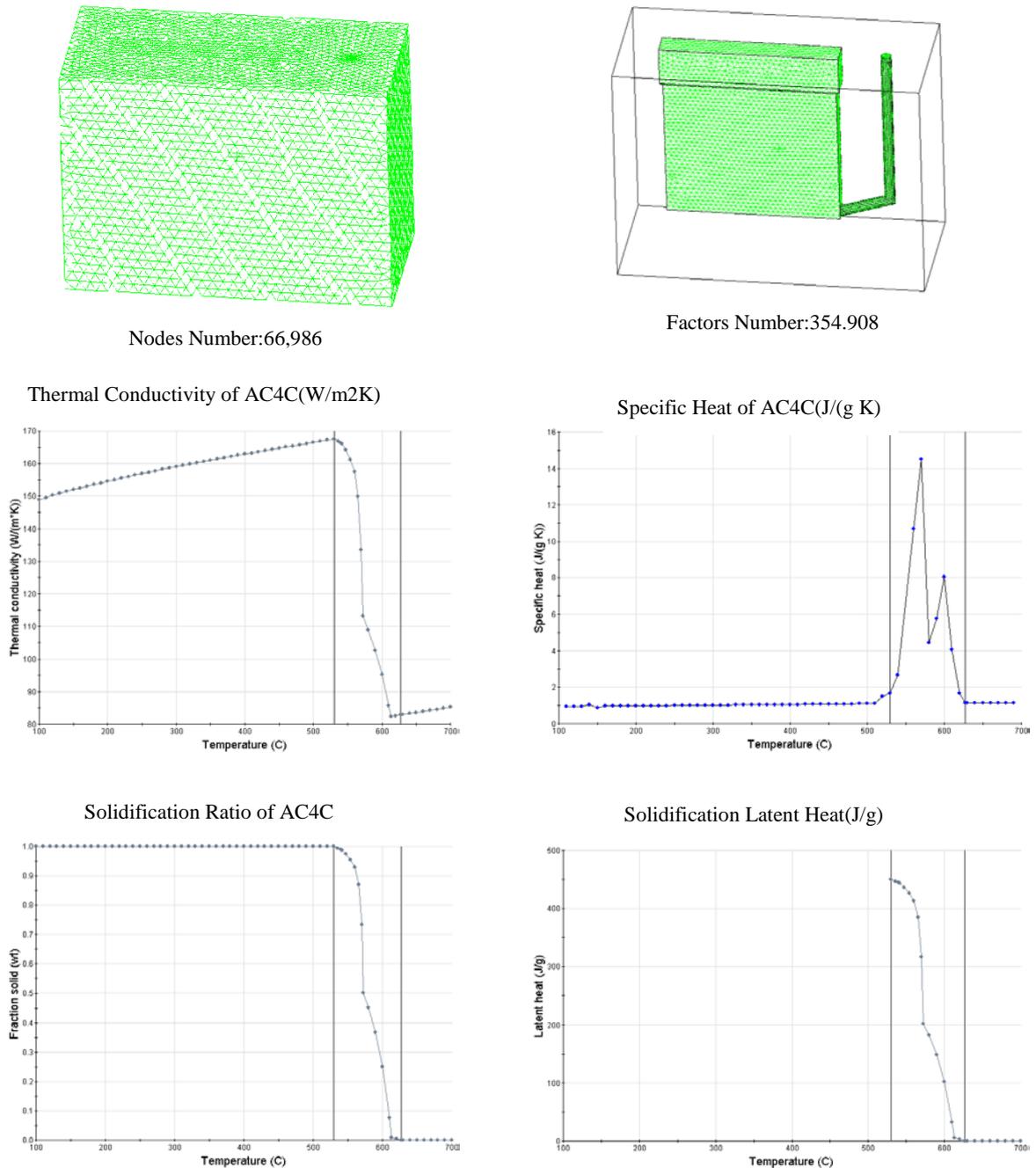


Fig.2 Input Physical Properties and Mesh Design

算値の約 1/2 と短い、②砂型側への熱伝達が計算値よりも少ない(温度上昇が遅く、到達温度が低い)、③砂型の 100°C 近傍で温度停滞がある等の計算値との差が認められた。そこで、まず熱伝達係数を初期設定値の 300W/(m²K) を 200 W/(m²K) とし、鋳型水分の蒸発潜熱を鋳型比熱に加え、100°C 近傍での鋳型比熱を初期設定値の 1.15kJ/(kgK) を 2.15kJ/(kgK) とした。これで再計算したが凝固時間

は短縮できなかった。ところで、ProCAST の凝固潜熱は定数でのみ入力できるが、JMatPro で計算された温度依存データの最初の値 488kJ/kg で設定されていたため、これを 250kJ/kg へと変更した。これは初晶発生を除く共晶凝固部分の凝固潜熱に相当し、鋳込み時点で初晶が発生しており、注湯完了後は共晶凝固しているものと想定した。以上の修正を加えたもので再計算を実施した結果を Fig.7 に示

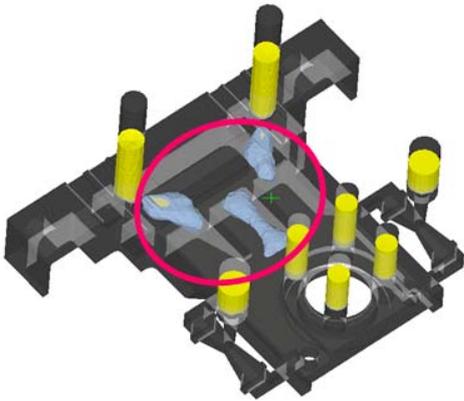


Fig.3 Simulation Result of Experiment 2

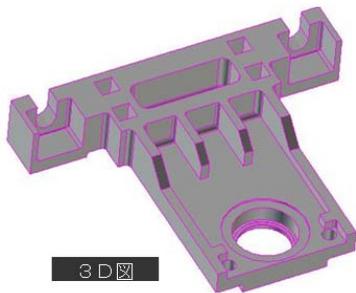


Fig.4 Shape of the Product

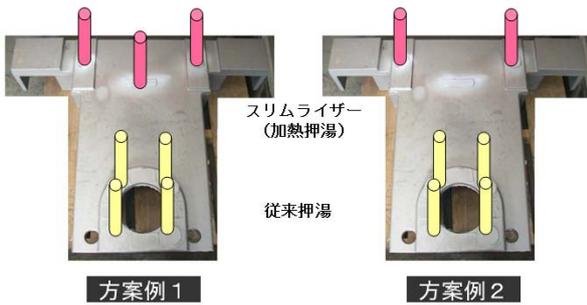


Fig.5 Casting Plans for Experiment 2

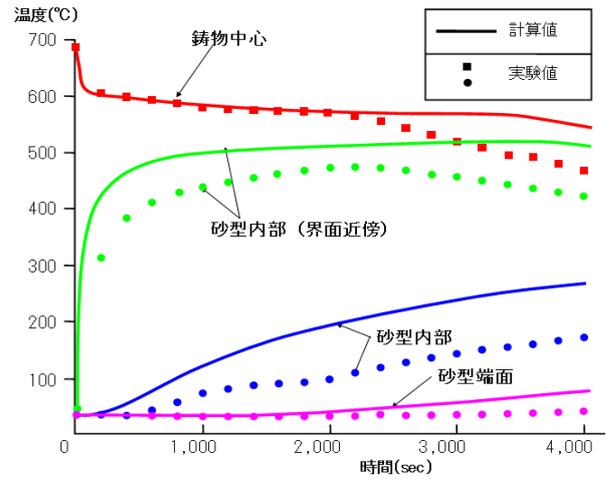


Fig.6 Results of Experiment 1 and 1st Simulation (without chiller)

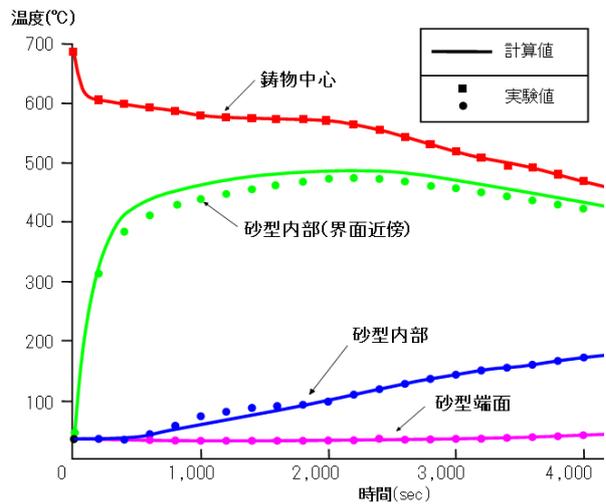


Fig.7 Fitted Simulation Result (without chiller)

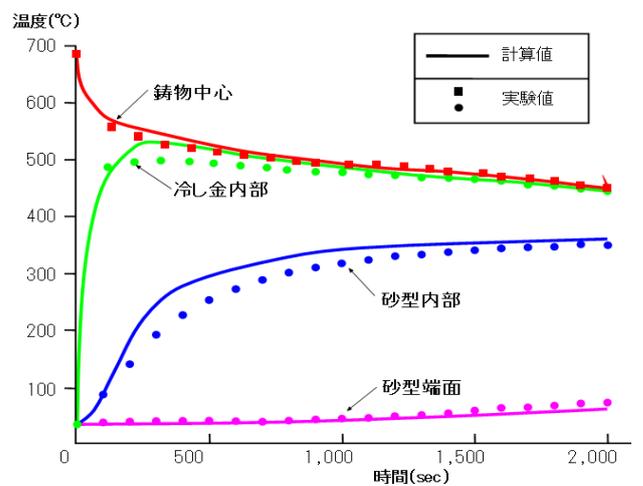


Fig.8 Fitted Simulation Result (with chiller)

すが、実験値と計算値とはかなり良く一致している。

次いでこれらの数値を用いて、冷金ありの場合に関し、鋳物—冷金、冷金—鋳型間の熱伝達係数を検討した。初期設定ではそれぞれ、 $3000\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 、 $500\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ としていたが、計算値の温度低下が十分でないため、 $2000\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 、 $110\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ に変更した。その結果を Fig.8 に示すが、結果的に、計算値と実験値とは良い一致をみている。

3.2 実験 2 の結果

実験 2 (実物試験) で製作した製品の外観を Fig.9 に示し、押湯下の浸透探傷試験後の状況を Fig.10 に、温度測定結果を Fig.11 に示す。AC4C 材の場合、高温強度が十分でないため、内引けが発生すると、外面がくぼむ傾向があり、また押湯下にパイプが形成されることもあるが、Fig.9、Fig.10 に示されるように引け巣のないことが確認できた。温度測定は、高周波加熱の影響によると考えられるハンチングが強く出たことおよび押湯加熱（実際）と押



Fig.9 Outlook of the Product



Fig.10 PT Result of the Product

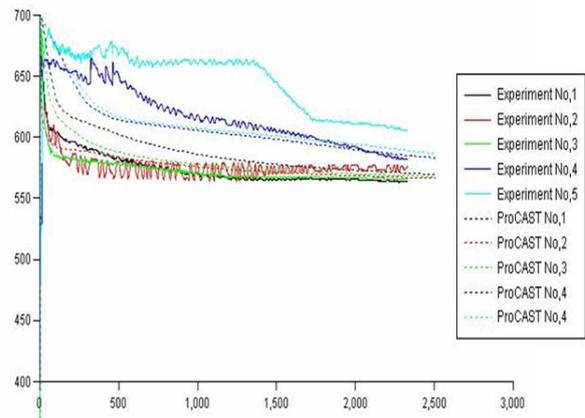


Fig.11 Temperature Measurement Results of Experiment 2

湯断熱（計算）の条件差から計算値と実験値とは大きな差が発生したが、断熱よりも加熱の方が安全側であることから、計算上引け巣が出ない場合には実際にも引け巣発生はなかったものと考えられる。

4. 考察

4.1 シミュレーションの信頼性

一般に、シミュレーションというのは、自然現象等複雑な要因を抽象化し、寄与率の高い要因を選択して、簡素化した状態で実施される、このため、各種仮定や近似が用いられ、これらによりシミュレーション精度は低下する、特に、温度依存性のある特性値に対し、一定値（温度依存性のない値）を与えて近似的に解を求めることはよく行われるが、これなども近似精度を下げる大きな要因となっている。今回のシミュレーションも、極力温度依存性等はそのまま表現したが、特に鋳物砂に関しては、そのもの自身の物性文献値が見当たらなかったため、実験 1 を行うことにした。繰り返し精度がどの程度になるかは今後の課題ではあるが、造型作業・混練作業等の作業ばらつき、熱電対設定等の計測ばらつきもあり、すべてが計算のばらつきと言えないところに悩みはある。

4.2 鋳物砂の熱伝導率

鋳物砂の場合その熱伝導率は、骨材（原料砂）の種類・純度・粒径・粒形・混粒率、粘結剤の種類・添加量、硬化剤の種類・量、造型時の充填率等により変化し、さらにこれが鋳込みにより、蒸発・燃焼・凝

結等の物理・化学的な変化をする。これらすべてを個別に表現することは、多大の労力を要することになる。そこでこれらを鋳物砂の比熱・熱伝導率等の温度依存として表現し、近似的に適正化を図っている。従って、今回得られた各種物性値等は、あくまでも当該工場でアルミニウム合金鋳物を鋳造する場合のものであって、当該工場でも鋳込み温度が大きく異なる鋳物の場合では、鋳込みに伴う化学変化・物理変化が異なるため、シミュレーション誤差は大きくなるものと考えられる。

4.3 AC4C アルミニウム合金の凝固潜熱

今回の試験では、凝固潜熱が定数でしか入力できないため、推奨値（488kJ/kg）をそのまま用いたが、実験1の結果からは250kJ/kg程度とするのが最適であった。文献1)では390kJ/kgが示されており、今回の実験では低めの値となった。これは、一般的には凝固潜熱＝溶融潜熱であり、溶融過程の潜熱を凝固潜熱として用いるが、凝固過程では鋳込み時に取鍋～大気～湯道～鋳型と移動する間に温度が低下し、一部では凝固が始まっていたのではないかと考えられる。また、390kJ/kgと250kJ/kgの差はちょうどAC4Cの初晶析出に伴うエンタルピー変化に相当することから、今回の実験1では鋳込み時に凝固が始まっていたのではないかということも裏付けている。なお、今回シミュレーションに利用したソフトはエンタルピーで入力でき、温度依存も表現できるので、凝固潜熱ではなく、エンタルピーで入力した方がよかったかもしれない。

4.4 シミュレーションの有用性

今まで述べてきたように、鋳造・凝固シミュレーションは本質的に誤差を含んでいるが、おおよその傾向は十分に近似しており、現象確認用としては大いに役立つ。例えば、鋳型内部での溶湯の動きや固まり具合のように、直接観察しにくいものを、ヴィジュアルに表現し、現象の理解を深めるため

には非常に有効である。シミュレーションには誤差がつきものであるということを理解した上でこれを用いれば、鋳造方案の改善、技術レベルの向上、技術の伝承等に大いに有効であると考えられる。

しかし、現状の中小の鋳造企業では3D-CADも十分には使いこなせておらず、また前述のごとく、入力すべき物性値等がそれぞれの企業の事情によって異なるため、鋳造シミュレーションも使いこなせてはいない。3D-CADもそれほど難しい技術ではなく、物性値等を求めることもあまり難しくはないので、各企業が地道に取り組んでいけば、もっと簡単に使いこなせるようになるのではないかと期待している。

5. まとめ

本研究では中小鋳造企業と共同で、その企業向けの鋳造シミュレーション用物性値等を求め、その数値を用いて鋳造方案を検討したアルミニウム合金鋳造製品を実際に製作し、シミュレーションの当否を検討した。鋳造製品の引け巣は、押し湯数・量を減少させたにもかかわらず、予測通り発生は認められなかった。このことから、鋳造シミュレーションは入力する物性値等が適正であれば、かなり良く鋳造結果を予測できることが確認できた。

なお、本研究は佐藤宏樹の平成17年度卒業論文の一部であり、平成18年5月に日本鋳造工学会第148回全国講演大会で口頭発表したものを纏めなおしたものである。

参考文献

- 1) 新山英輔：「鋳造伝熱工学」—鋳造設計の基礎—（2001.9）pp209 アグネ技術センター