

平成27年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「3D デジタルを活用した高付加価値な
温度分布均一金型を製作する技術の開発と確立」

研究開発成果等報告書

平成 28 年 3 月

委託者 東北経済産業局

委託先 株式会社東北テクノアーチ

目次

第1章 研究開発の概略	4
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	4
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 本論	8
2-1 金型の内部冷却技術に関する研究開発	8
2-1-1 ジェットクールシステム（局部高圧冷却装置）向けの内部冷却回路の最適設計 の確認実験（研究開発項目①-2）	8
2-1-2 真空冷却システム向けの内部冷却回路の最適設計の開発と確立 （研究開発項目①-3）	8
2-1-3 真空冷却システム向けの内部冷却回路の最適設計の確認実験 （研究開発項目①-4）	9
2-2 鋳造シミュレーション冷却事案の高精度化に関する研究開発 実データに基づくシミュレーションの冷却の熱伝達方程式の検討 （研究開発項目②-2）及び実データに基づくシミュレーションの冷却の熱伝達方 程式のプログラム化（研究開発項目②-3）	10
2-2-1 実験内容	10
2-2-1-1 ジェットクールシステムを用いた鋳造実験	10
2-2-1-2 ジェットクール使用時の金型温度解析の検討	10
2-2-1-3 鋳造シミュレーションによる溶湯内圧力伝播の計算	10
2-2-2 結果	11
2-2-2-1 ジェットクールシステムを用いたときの熱伝達係数	11
2-2-2-2 ジェットクールシステム使用時の金型温度解析の検討	12
2-2-2-3 鋳造シミュレーションによる溶湯内圧力伝播の計算	13
2-2-3 考察	14
2-2-4 まとめ	14
2-3 内部冷却を加味した金型変形シミュレーションの高精度化に関する研究開発 ジェットクールシステム（局部高圧冷却装置）を加味した金型変形予測技術の検 討（研究開発項目③-1）及びジェットクールシステム（局部高圧冷却装置）を加 味した金型割れ予測技術の検討（研究開発項目③-2）	15
2-3-1 実験方法	15
2-3-1-1 金型のヒートチェック予測	15
2-3-1-2 シミュレーション条件	15
2-3-2 実験結果	15
2-3-3 考察	18
2-3-4 まとめ	18

2-4	シミュレーション結果を反映した金型 3D-CAD/CAM システムに関する研究開発	19
2-4-1	金型変形・製品変形シミュレーション予想結果の 3D-CAD データへの変換手法の開発 (研究開発項目④-1).....	19
2-4-2	シミュレーション予測を 3D 設計に反映する際の、 工数を削減する手法の開発 (研究開発項目④-2).....	19
2-4-3	三次元測定機器 ATOS で測定した結果をシミュレーション予測との整合性の 確認をする技術の開発 (研究開発項目④-3).....	20
2-5	金型製作及び最終仕上げ工程の自動化技術に関する研究開発 (研究開発項目⑤-2).....	21
2-6	金型の 3D 計測技術に関する研究開発 金型による計測光線散乱を防止する技術の開発と確立(研究開発項目⑥-1) 金型の凹部計測技術の開発と確立(研究開発項目⑥-2) 3D 計測データの 3D-CAD データへの変換技術の開発と確立(研究開発項目⑥-3)	22
2-6-1	実験装置.....	22
2-6-2	ハレーション及び多重反射対策.....	22
2-6-3	凹部の 3D 計測評価.....	23
2-6-4	3D 計測データの 3D-CAD データへの変換.....	25
2-6-5	考察とまとめ.....	25
最終章	全体総括.....	26

第1章 研究開発の概略

金型業界では、新興国の技術向上により、コスト面での日本国内生産金型の優位性は下がっている。そこで、自動車部品業界が求めている自動車部品の軽量化、コスト削減を可能にする高付加価値の金型作製技術と、短納期で試作合格する金型作製能力を持つことが、国内金型メーカーには必須となってきた。

即ち本研究開発にて、従来技術で課題となっていた、

- ・ 鋳造後の仕上げ工数（歪み取り、バリ取り）によるコストアップという課題
- ・ 新規 HV・EHV 部品群では薄肉化で歪み易いという課題
- ・ 金型合格になるまでの時間がかかるという課題

上記3課題を解決するために、「3D デジタルを活用した高付加価値な温度分布均一金型を製作する技術の開発と確立」を目指して、新興国の金型技術に対して日本の金型技術の優位性を確保していく事が研究開発の動機である。

本研究開発項目は、①金型の内部冷却技術に関する研究開発、②鋳造シミュレーション冷却事案の高精度化に関する研究開発、③内部冷却を加味した金型変形シミュレーションの高精度化に関する研究開発、④シミュレーション結果を反映した金型 3D-CAD/CAM システムの開発と確立、⑤金型製作及び最終仕上げ工程の自動化技術に関する研究開発、⑥金型の 3D 計測技術に関する研究開発で構成され当該成果報告書内に各々、2-1、2-2、2-3、2-4、2-5、2-6 章としてまとめて記載した。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

金型メーカーの主たるユーザーであるアルミニウム鋳造業界では、一般的な要求品質の製品はコスト面の理由から海外移管が進んでおり、薄肉化した複雑形状の製品が国内製造の主力となっている。また、川下企業である二輪・四輪自動車部品メーカー並びに二輪・四輪自動車メーカーからは、新興国とのコスト競争力を付けるために加工組付け工程の省人化・無人化が求められており、この際の自動供給システムが重要なポイントとなっている。また、製品の実際の使用スペックよりも格段な寸法精度を要求されているといった現状がある。このために、金型業界では、アルミニウム鋳造業界の前述の現状を金型で解決する技術力を持つことが重要であり、新興国に対する競争力を維持することができる。

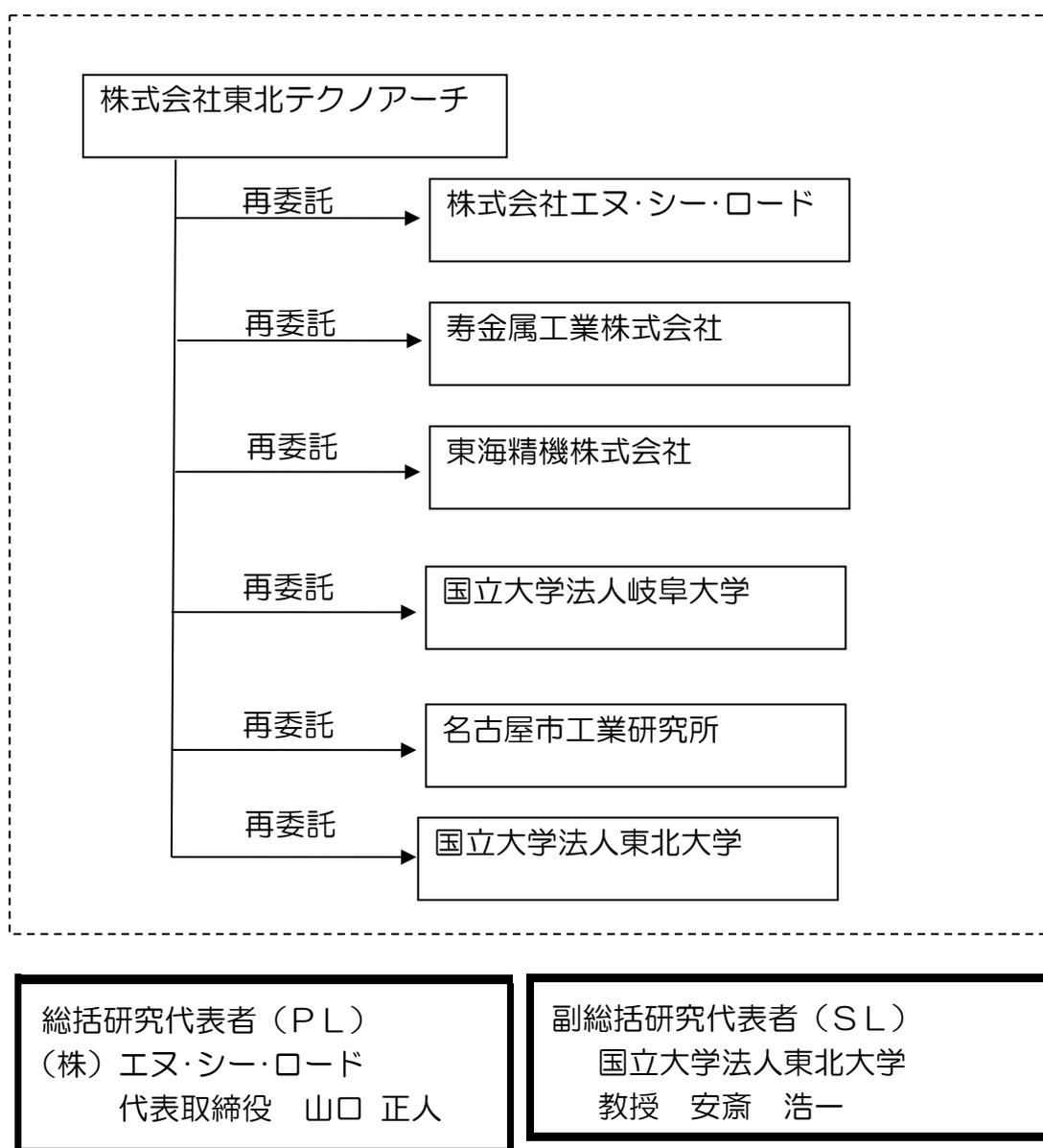
1-1-2 研究目的及び目標

本研究開発では、金型メーカーと鋳造メーカーが、鋳造メーカーの金型使用データを連携して検証し、また、シミュレーション技術と計測技術を有する大学と公設研究機関の技術的指導及び支援を受けて、「3D デジタルを活用した高付加価値な金型を製作する技術の開発と確立」を実現することを目的とする。これによって、鋳造メーカーと共に川下企業である二輪・四輪自動車部品メーカー並びに二輪・四輪自動車メーカーの軽量化、コスト削減要請に答え、我が国の鋳造産業と鋳造技術の付加価値を上げ、新興国との差別化を図り、グローバル化に対応することを目標にする。

具体的には、(1) 金型の内部冷却技術、(2) 鋳造シミュレーション冷却事案の高精度化技術、(3) 同上の金型変形シミュレーションの高精度化技術、(4) シミュレーション結果を反映した金型の 3D-CAD/CAM システム、(5) 金型の最終仕上げ工程の自動化技術、

(6) 金型の3D計測技術、を開発する。(1)～(3)の技術開発により「鑄放しにより自動車メーカーの要求品質を得られる高付加価値な金型」の設計が可能となり、(4)と(5)により「高付加価値な金型」を製作することが可能となり、(6)により、「高付加価値な金型」の3D計測と3D情報の提供が可能となり、次世代自動車用部品の金型製作で、精度面とコスト面で優位となり、自動車産業のグローバル化に対応する。自動車産業では、グローバル調達化が鑄造部品だけでなく金型にも進んでいる。特に近年では、新興国の鑄造技術及び金型技術が向上して、コスト面では日本国内生産の優位性が下がっている。そのために、自動車産業では日本国内の工場を「世界生産のマザー工場」と位置づけて、次世代自動車に対応した軽量化或いは低価格車に対応したコスト低減を部品の素材や形状等の見直しを進め、これらの要求に対応した金型の供給と、試作或いは量産に対応した短納期での金型製作を金型業界に求めている。

1-2 研究体制



1-3 成果概要

金型の内部冷却技術に関する研究開発（研究開発項目①、当該成果報告書 2-1 章）に関しては、株式会社エヌ・シー・ロード、国立大学法人東北大学、国立大学法人岐阜大学、寿金属工業株式会社、東海精機株式会社、名古屋市工業研究所の連携体制の下、フィン形状を有する箱型鋳造品において、金型を非常に早く開くことで鋳造品の取出し温度を高く（180～250℃）すると鋳造品の歪み変形が無く取り出せることを確認した。この知見を量産化するに当たり、最終凝固部となるランナーとブッシュの冷却回路設計を見直した。その結果、従来の半分の時間でランナーとブッシュを固めることが出来て、歪み変形が少ない鋳造品を成形する手法を確立した。

鋳造シミュレーション冷却事案の高精度化に関する研究開発（研究開発項目②、当該成果報告書 2-2 章）に関しては、国立大学法人東北大学、国立大学法人岐阜大学、寿金属工業株式会社、東海精機株式会社、名古屋市工業研究所の連携体制の下、ジェットクールシステムを使用したときの冷却特性について、実験をもとにして算出した冷却速度をもとにして熱伝達係数を推定した。また、その結果を過去 2 年間に検討したシミュレーション方法に適用して溶湯内の圧力伝播を計算した結果、実測結果と良い一致を示した。

内部冷却を加味した金型変形シミュレーションの高精度化に関する研究開発（研究開発項目③、当該成果報告書 2-3 章）に関しては、株式会社エヌ・シー・ロード、国立大学法人東北大学、国立大学法人岐阜大学の連携体制の下、過去 2 年間に取得した鋳造実験による情報と金型変形シミュレーション方法をベースにし、鋳ばり発生予測およびヒートチェック発生予測手法について検討した。ヒートチェックの判定には溶湯射出からキュアリング完了までの応力を評価することが明らかになった。

シミュレーション結果を反映した金型 3D-CAD/CAM システムの開発（研究開発項目④、当該成果報告書 2-4 章）に関しては、株式会社エヌ・シー・ロード、国立大学法人岐阜大学、名古屋市工業研究所の連携体制の下、変換精度を向上させるための NCR データ変換システムの技術確立によりサーフェスデータからソリッドデータへの変換した際のデータ品質が良くなり、その結果、以下に示すシミュレーションが可能となり、金型設計方案の良否判断決定を得ることができた。シミュレーション解析により下記のメリットが得ることができた。

1) 湯口位置の良否、2) 湯口ゲートのサイズ良否、3) 冷却回路の位置および数量、4) 金型サイズの良否、5) 金型の変形予測、6) 製品の変形予測。

金型製作及び最終仕上げ工程の自動化技術に関する研究開発（研究開発項目⑤、当該成果報告書 2-5 章）に関しては、株式会社エヌ・シー・ロード、国立大学法人東北大学の連携体制の下、研究開発項目⑤-1 については、最終製品に近い箱型ダイカスト金型の深リブ加工に注目し、類似形状の難易度の高いファン形状の加工が可能となるような知見を得た。当該複雑形状は全体の重量バランスが重要でありフィン形状の均一化や形状（フィン形状幅が 1 ミリ、フィン形

状深さが 20 ミリ以上、リブ形状の抜き勾配が 1 度以下であるため面粗度) が重要であることが判明した。

金型の 3D 計測技術に関する研究開発(研究開発項目⑥、当該成果報告書 2-6 章)に関しては、株式会社エヌ・シー・ロード、寿金属工業株式会社、東海精機株式会社、名古屋市工業研究所の連携体制の下、酸化チタンのエアブラシ塗布によって、探傷スプレーよりも高効率、高品質な 3D 計測が可能となった。穴や溝などの凹部測定の限界を明らかにした。また、測定現場で簡易確認しながら測定することで、無駄な測定を減らすことが可能となった。立体マーカーを使用することで貼りあわせ誤差を低減し測定効率が向上した。3D 計測データの 3D-CAD データ化は全自動で行うことはできない。しかし、変換元となる 3D 計測データの品質を向上させ、かつ簡略化を行うことで自動処理できる部分を増やし工数を削減することが可能となった。これらの技術を株式会社エヌ・シー・ロードの環境において利用可能にした。

以上の通り、平成 25 年度から平成 27 年度までの研究推進により当初目標に掲げていた「鑄放しにより自動車メーカーの要求品質を得られる高付加価値な金型」の設計、「高付加価値な金型」を製作することが鑄造メーカーと金型メーカーとの連携作業により可能となり、金型メーカーである株式会社エヌ・シー・ロードにおいては、「高付加価値な金型」の 3D 計測と 3D 情報の提供が可能となり、次世代自動車用部品の金型製作で、精度面とコスト面で優位となりうる土台を築くことが可能となり、今後の自動車産業のグローバル化ニーズに対応する技術が金型メーカーである株式会社エヌ・シー・ロードと鑄造メーカーである寿金属工業や東海精機に蓄積できた。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社エヌ・シー・ロード
代表取締役 山口 正人

寿金属工業株式会社
生産技術部 次長 谷川 昌司

国立大学法人東北大学
工学研究科 准教授 板村 正行

株式会社東北テクノアーチ
取締役 技術部長 石山 晃

第2章 本論

2-1 金型の内部冷却技術に関する研究開発

(株式会社エヌ・シー・ロード、国立大学法人東北大学、国立大学法人岐阜大学、寿金属工業株式会社、東海精機株式会社、名古屋市工業研究所)

ジェットクールシステム（局部高圧冷却装置）向けの内部冷却回路の最適設計の確認実験（研究開発項目①-2）については、小径ピンにて最適な冷却条件を見つけることができた。真空冷却システム向けの内部冷却回路の最適設計の開発と確立（研究開発項目①-3）については、金型設計の最適化のために岐阜大学で冷却回路のシミュレーションを実施して、「分流子」と「铸ロブッシュ」の内部冷却回路の設計を見直して強化策を考案した。真空冷却システム向けの内部冷却回路の最適設計の確認実験（研究開発項目①-4）については、真空冷却能力の検証実験を行い、「分流子」と「铸ロブッシュ」の内部冷却回路の設計を見直して強化策の有効性を実証して、铸造品の歪み変形を減少させた。

2-1-1 ジェットクールシステム（局部高圧冷却装置）向けの内部冷却回路の最適設計の確認実験（研究開発項目①-2）

平成26年度迄の実験にて、ピンの先端部が冷えやすいことは把握していたが、実铸造を行ったところ铸造品の先端部で充填中の溶湯温度を低下させて、湯回り不良を起こした課題があった。これを解決するために、図1に示すように、ジェットクール通水を遅らせることで、先端部が溶湯充填過程で冷え過ぎて溶湯の湯回り悪化を防止する対策を実施し、上記課題が解決された。

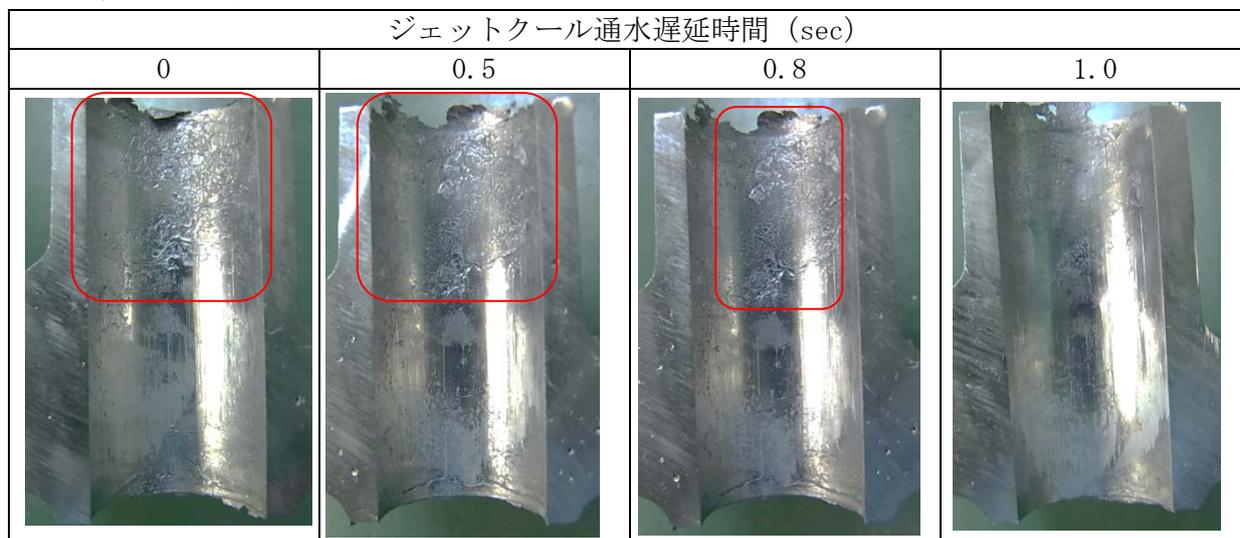


図1 铸造品の外観品質に及ぼすジェットクール通水遅延時間の影響

2-1-2 真空冷却システム向けの内部冷却回路の最適設計の開発と確立（研究開発項目①-3）

フィン形状を有する箱型铸造品において、金型を非常に早く開くことで铸造品の取出し温度を高くすると铸造品の歪み変形が無く取り出せることを確認した。チルタイムを2.0秒など短くすると最終凝固部であるランナーとビスケットが未凝固状態で金型から取り出すために、図2に示すようにランナー内の溶湯が吹き出して、実操業上危険な状況となった。そこで、最終凝固部となるランナーとブッシュの冷却回路設計を見直した。

図3に従来の冷却回路を示す。分流子内の冷却回路は細いスポット型式で、鋳口ブッシュの冷却回路はビスケットから離れていて、ランナーとビスケットを短期間に冷やすには不十分であった。

「膨れ」や「溶湯の吹き出し」が起きた。



図2 チルタイム 2.0 s の時のランナーからの溶湯吹き出し

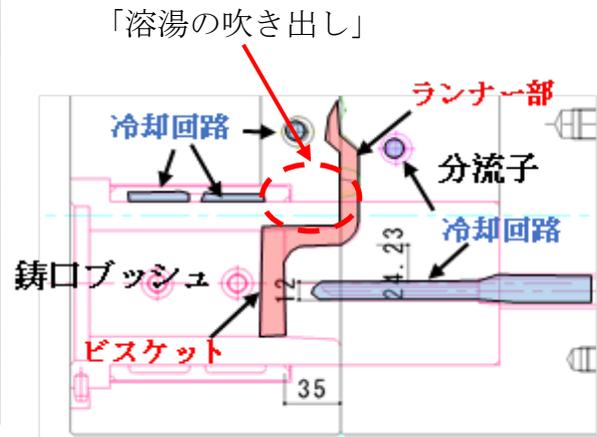


図3 従来の「分流子」と「鋳口ブッシュ」の内部冷却回路

2-1-3 真空冷却システム向けの内部冷却回路の最適設計の確認実験

図4に、内部冷却強化した確認実験の結果を示す。内部冷却強化した実験型では、チルタイムを1.5secまで短くしても、ランナー・ビスケット共に「膨れ」「破裂」が無く連続鋳造することが出来た。

チルタイム	従来法	強化法
5.0 s	○	○
4.0 s	○	○
3.0 s	△	○
2.0 s	×	○
1.5 s	—	○

- ：破裂等の不具合なし
- △：膨れ発生
- ×：破裂



図4 鋳造実験結果「ビスケット」「ランナー」の破裂防止効果

また、その結果、従来の半分の時間でランナーとブッシュを固めることが出来て、従来の量産品に比べて歪み変形が少ない鋳造品を成形する手法を確立した。

2-2 鋳造シミュレーション冷却事案の高精度化に関する研究開発

(国立大学法人東北大学、国立大学法人岐阜大学、寿金属工業株式会社、東海精機株式会社、名古屋市工業研究所)

実データに基づくシミュレーションの冷却の熱伝達方程式の検討(研究開発項目②-2)については、ジェットクールシステムを使用したときの冷却特性を実験的に評価するとともに、その結果を用いて鋳造シミュレーションにより溶湯内圧力伝播の計算を行った。その結果、実験結果と良い一致を示した。実データに基づくシミュレーションの冷却の熱伝達方程式のプログラム化(研究開発項目②-3)については、前項と関連し、凝固過程における鋳物-冷却ピン間の熱伝達係数を算出した。また、平成26年度に実施した、「真空冷却システム向けの内部冷却回路の最適設計の確認実験」において得られた内部冷却による金型温度測定結果を用いて、精度良くシミュレーションができるように熱伝達係数および通水時の水の物性値の扱いについて検討した。以下に、実データに基づくシミュレーションの冷却の熱伝達方程式の検討(研究開発項目②-2)及び実データに基づくシミュレーションの冷却の熱伝達方程式のプログラム化(研究開発項目②-3)に関して詳しく説明する。

2-2-1 実験方法

2-2-1-1 ジェットクールシステムを用いた鋳造実験

200°Cに加熱したS50C製金型にAC4C溶湯を鋳込み、ジェットクールシステムを用いたときの熱分析曲線取得実験を実施した。図5に実験方法を示す。金型と冷却ピンの間のキャビティ部にAC4C溶湯を700°Cで鋳込み、冷却ピン内部の細管部から冷媒を噴出させたときの溶湯の温度変化をK型熱電対(素線径0.32mm)により取得した。このとき、噴出口と冷却ピン底部との距離は21mmである。温度の測定位置は、キャビティ下部から10、25、40mmの位置とした。冷媒は、高圧水(流量=1.20/min)、エアのみ(流量=50/min)および冷媒噴出なしの3種類とした。凝固後の鋳物から試料を切り出し、デンドライト2次アーム間隔(以後、DASⅡ)を測定して冷却速度を算出した。

2-2-1-2 ジェットクール使用時の金型温度解析の検討

ADSTEFAN Ver. 2015を用いた。平成26年度に取得した、通水有無による金型温度の測定結果をもとにして、ジェットクール使用時のシミュレーションに適用できる熱伝達係数および水の物性値を検討した。

2-2-1-3 鋳造シミュレーションによる溶湯内圧力伝播の計算

ADSTEFAN Ver. 2015を用いた。金型温度解析を20ショット分行い、金型温度の最高温度に変化が無い状態となってから凝固解析を行った。このとき、局部加圧の解析を行い、溶湯内の圧力伝播の状況を計算した。図6に解析モデルを示す。押しピンをバスケットが圧縮する方向に移動させることによって局部加圧を再現した。

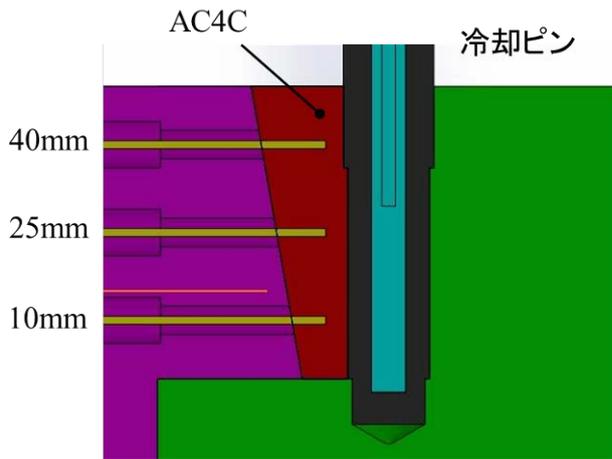


図5 実験金型の概略図

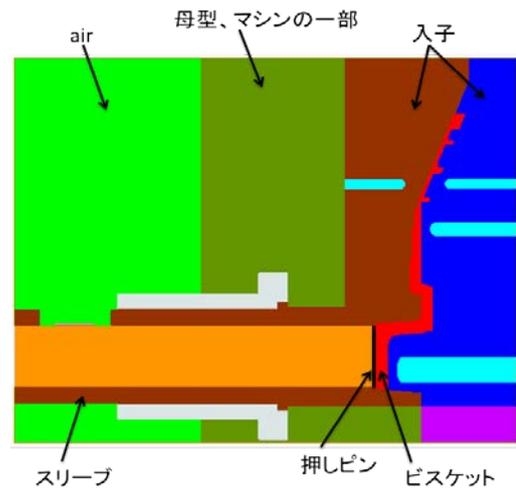


図6 局部加圧による圧力伝播の計算モデル

2-2-2 結果

2-2-2-1 ジェットクールシステムを用いたときの熱伝達係数

図7に冷媒として高圧水を用いたときと強制冷却をさせなかったときの熱分析曲線を示す。キャビティ底部に近い10mmの位置において、高圧水を用いたときの温度低下が大きかった。

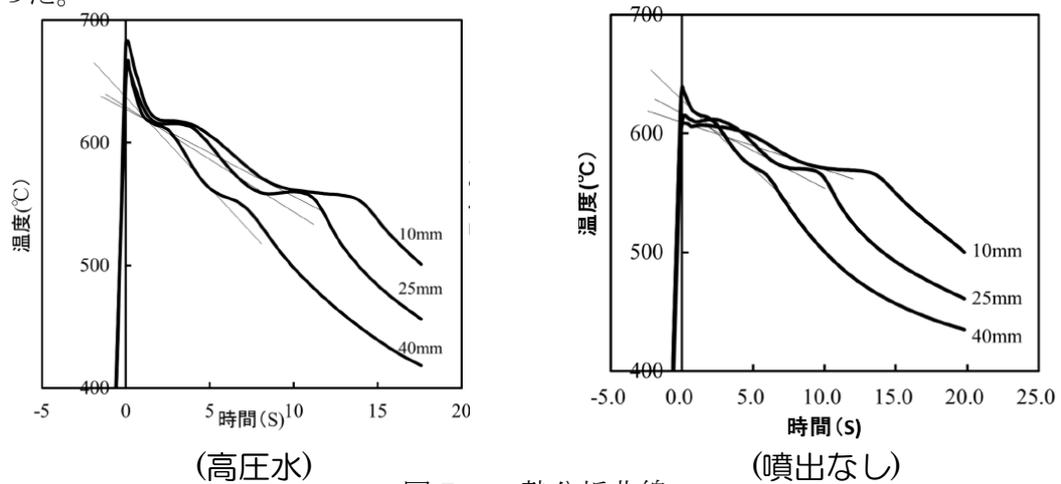


図7 熱分析曲線

図8にピン近傍の組織観察写真を示す。冷却方式の違いにより凝固組織の大きさに違いが確認できる。

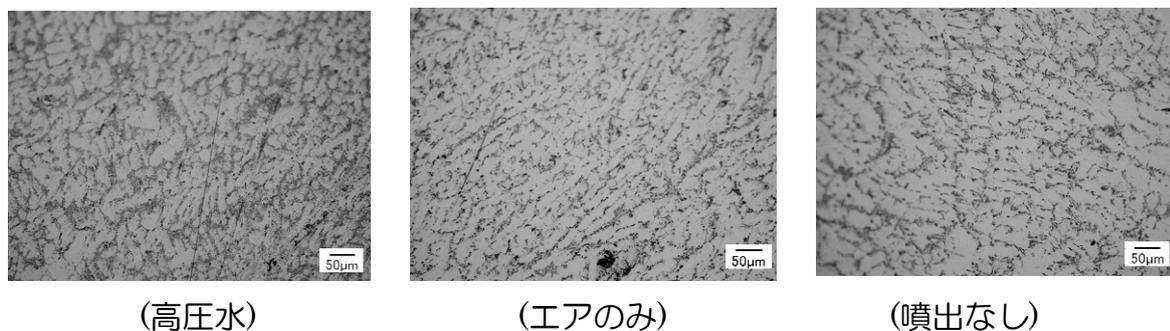


図8 凝固組織写真 (ピン底部からの距離 10mm)

図9に組織写真よりデンドライトアームが10本確認できる箇所を6か所ピックアップし、それぞれのアーム間隔を測定した結果を示す。底部に近い箇所において高圧水を使用したときのDAS IIが小さくなった。図10にデンドライトアーム間隔から算出した冷却速度を示す。ジェットクールシステムを用いて高圧水を噴出した場合、底部からの距離が10mmの位置においては他の冷却方式と比べて大きな冷却速度となった。

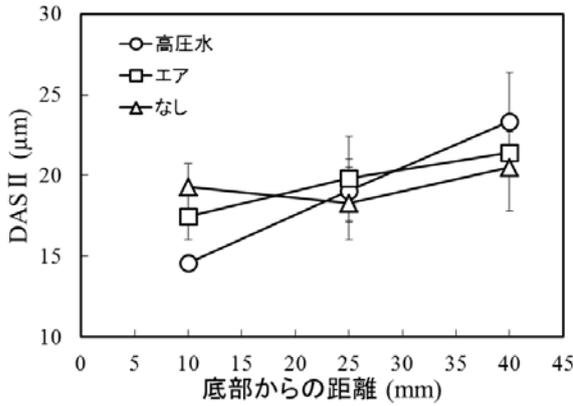


図9 DAS IIの測定結果

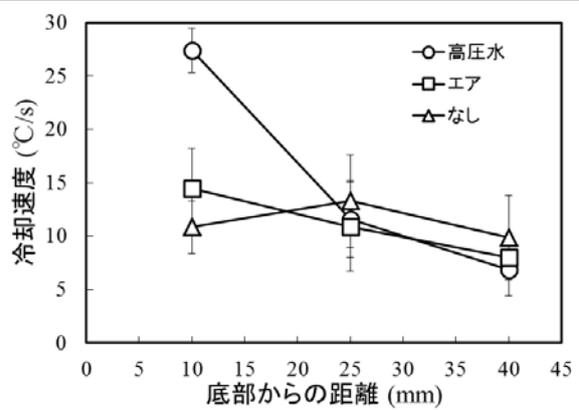


図10 冷却速度の算出結果

2-2-2-2 ジェットクールシステム使用時の金型温度解析の検討

まず、水の物性値の検討を行った。表1に検討に用いた水の物性値および水-金型間の熱伝達係数の値を示す。表中の水の物性値のうちMODI_Wと記載した箇所は、水の密度、熱伝導率および比熱と比較して大きな値としたものである。

表1 計算に用いた水の物性値と熱伝達係数

	水の物性値	水-金型間の熱伝達係数 (kW/m ² K)
Type1	MODI_W	4.19
Type2	MODI_W	∞
Type3	20°Cにおける一般値	4.19
Type4	20°Cにおける一般値	∞

図11に各計算条件における金型表面温度の計算結果を示す。サーモカメラによる金型表面温度の測定結果と比較すると、水の物性値を変化させたType1とType2のほうが実際の温度分布に近かった。そこで、熱伝達係数をチューニングし、水の温度とのFittingを試みた。表2に計算条件を示す。

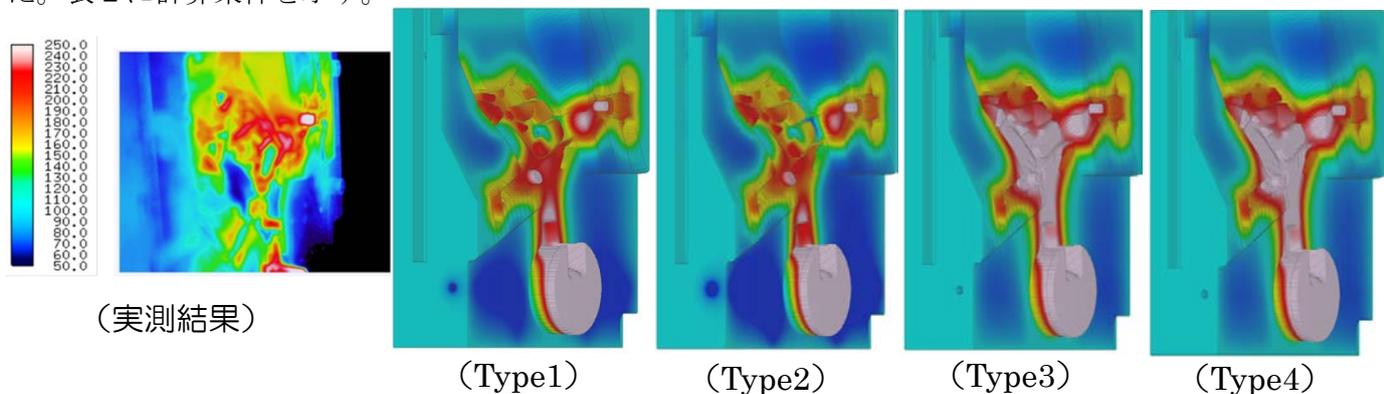


図15 金型表面温度の実測結果と計算結果

表2 計算に用いた水の物性値と熱伝達係数

	水の物性値	水-金型間の熱伝達係数 (kW/m ² K)
Type2-1	MODI_W	∞
Type2-2		20.9
Type2-3		9.3

図12にシミュレーションにより計算した水温の変化を示す。Type2-3の解析条件で実測結果と良い一致（誤差-1°C~+2°C）となった。これらより、熱伝達係数に加えて水の物性値を考慮することによって、より正確な金型温度を計算することが可能であるといえる。

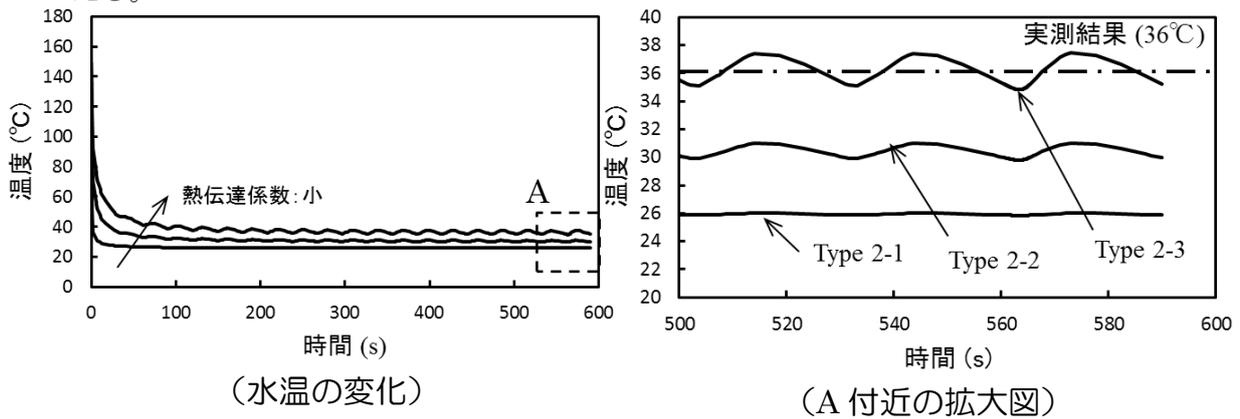


図12 熱伝達係数を変化させたときの水温の変化の比較

2-2-2-3 鋳造シミュレーションによる溶湯内圧力伝播の計算

2-2-2-1にて得られた熱伝達係数を使い、溶湯内の圧力伝播の計算を行うことによって算出した熱伝達係数の妥当性を検討した。図13に局部加圧時の溶湯の圧力変化の計算結果と実測結果を示す。解析値の初期の圧力が高いのは、初期条件として定義した圧力の影響である。図より、時間の増加（つまり、凝固の進展）に伴う製品端部および製品中央部の圧力の低下傾向がほぼ一致している。このことより、今回算出したジェットクールシステムを用いたときの熱伝達係数および物性値は妥当であり、本手法により鋳造シミュレーションによる高精度な計算が可能になると考えられる。

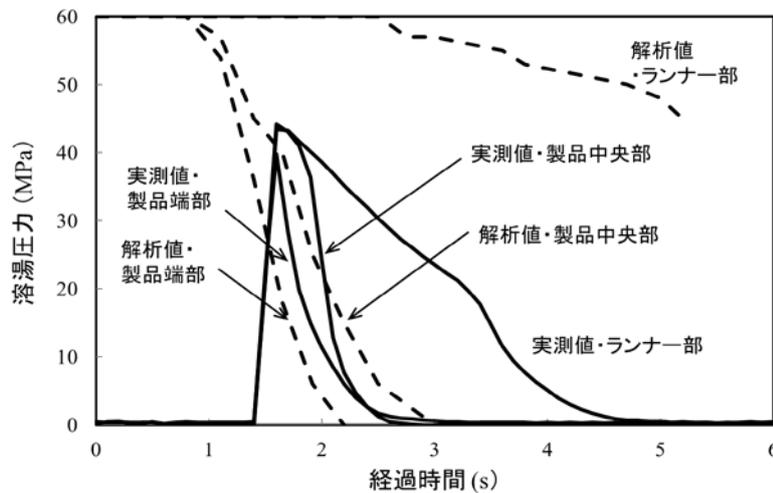


図13 溶湯内圧力変化の計算結果

2-2-3 考察

ジェットクールシステムのように、熔融金属に対する強力な冷却特性を鋳造シミュレーションで表現をする場合、以下の2つの方法が考えられる。

- ① 冷却ピン内の噴流の流れ解析を行うとともに、その流れ場による非定常熱伝導・熱伝達解析を実施する。
- ② 非定常の流れ場解析を行わず、非定常熱伝導・熱伝達解析による鋳造過程の計算を実施する。

本検討は、②にあたる。つまり、鋳造工程で時々刻々と変化する熱伝達係数がある代表値に置き換えて計算するとともに、冷却媒体の物性値を変化させて媒体の温度が上がらない（つまり、強力な噴流を使用した際には冷却媒体の温度にも変化がない）状態でモデル化させることにより計算を行ったものである。この仮定は、平成26年度の確認実験の結果から妥当なものであると考える。①のような計算も可能である。しかし、その場合極めて膨大な計算を実施することとなり、スピードが要求される開発、設計、製造の現場においては必ずしも適しているとは言えない。市販ソフトを活用した高精度な解析手法を確立することは工業的に極めて有益であるといえる。

2-2-4 まとめ

研究開発項目② 鋳造シミュレーションの冷却事案の高精度化を目的として、ジェットクールシステムを用いたときの冷却速度を実験的に求めた。また、その結果から熱伝達係数を鋳造シミュレーションによる逆解析的手法で算出した。次に、ジェットクールシステムを鋳造シミュレーションで表現するため、水の物性値に着目して検討した。それらの値の妥当性を検討するため、鋳造時の溶湯圧力変化を計算した。得られた結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) ジェットクールシステムを用いたときの冷却ピン近傍の冷却速度は、用いない場合と比較して大きかった。
- (2) 水の物性値を文献値より大きくし、抜熱に伴う水温上昇を緩和させたときの冷却水の温度解析結果は、実際の測定結果とほぼ一致した。
- (3) 溶湯内の圧力伝播を計算した結果、凝固の進展に伴う圧力の低下割合の計算結果は、実測結果の傾向とおおよそ一致した。

2-3 内部冷却を加味した金型変形シミュレーションの高精度化に関する研究開発

(株式会社 エヌ・シー・ロード、国立大学法人東北大学、国立大学法人岐阜大学、名古屋市工業研究所)

ジェットクールシステム（局部高压冷却装置）を加味した金型変形予測技術の検討（研究開発項目③-1）およびジェットクールシステム（局部高压冷却装置）を加味した金型割れ予測技術の検討（研究開発項目③-2）について、金型変形解析手法および割れ予測手法の結果を用いてヒートチェック発生時の判定方法について検討した。その結果、射出開始時からキュアリング終了時までの応力を総合的に評価する必要があることがわかった。また、金型変形解析手法を用いて、箱形モデルのフィン入子部の応力解析を行った。その結果、塑性変形の危険性があることがわかった。以下、ジェットクールシステム（局部高压冷却装置）を加味した金型変形予測技術の検討（研究開発項目③-1）およびジェットクールシステム（局部高压冷却装置）を加味した金型割れ予測技術の検討（研究開発項目③-2）に関して詳しく説明する。

2-3-1 実験方法

2-3-1-1 金型のヒートチェック予測

鋳造中の射出工程、キュアリング工程、鋳物取出し工程・スプレ・エアブロ工程、型締め工程における金型温度分布を計算し、その結果を用いて金型変形解析を実施することによって金型表面の応力状態を計算した。金型は弾塑性体として計算を行った。得られた結果を用いて材料の各温度における耐力と相当応力の差から割れ判定を行った。

2-3-1-2 シミュレーション条件

解析モデルは母型までを再現し、前述した金型温度分布の計算結果を FEM モデルに適用したうえで型締め力(3430kN)、型内圧力(60MPa)を負荷させて計算を行った。

2-3-2 実験結果

図14に鋳造1サイクル中の金型温度の計算結果を示す。金型内において最高温度となる時間は同一ではない。これまでの検討結果から、溶湯射出時に生じる圧縮応力でヒートチェックの原因となるき裂が発生する可能性を示している。そこで、1サイクル中で金型表面温度が高くなるキュアリング中の3か所(t1、t2、t3)の金型表面温度をそれぞれピックアップし、FEMメッシュにその情報を統合した上で割れ予測を行った。

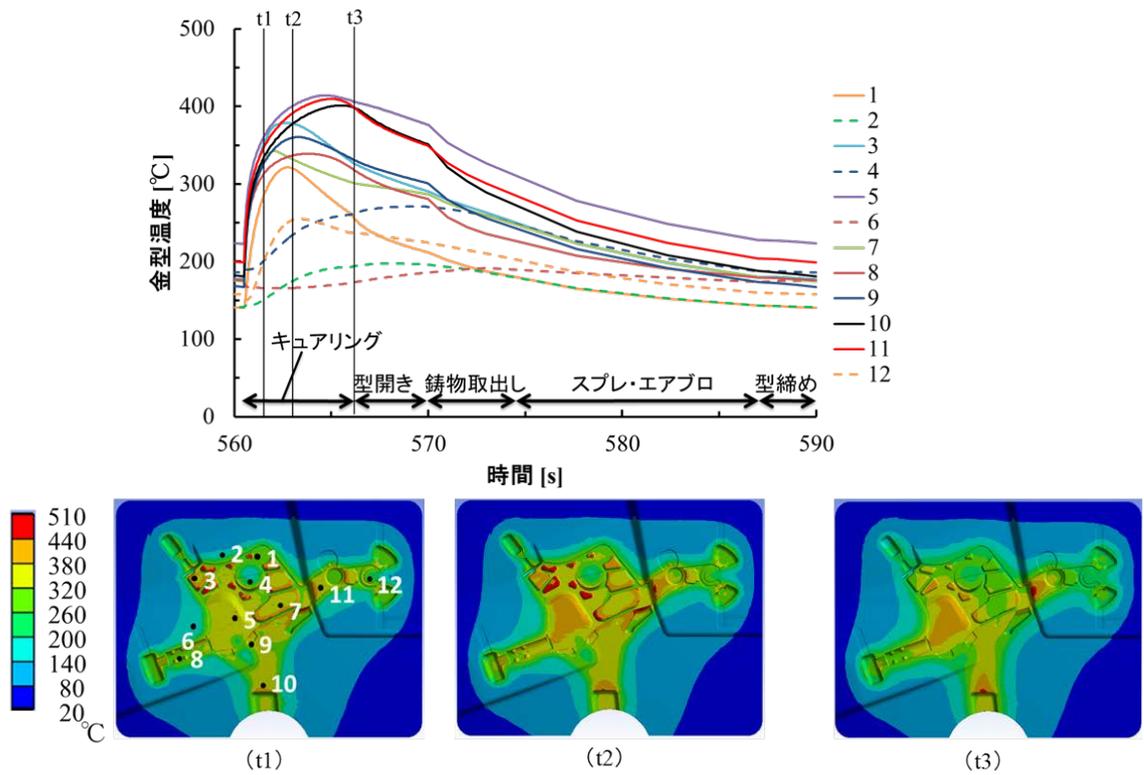


図 1 4 金型表面温度の計算結果

図 1 5 に図 1 5 の t1、t2、t3 各位置における金型表面温度から算出したき裂判定結果を示す。き裂の判定は、金型各位置の温度における材料の耐力と計算された相当応力（ミーゼス応力）の差により実施した。図より、キュアリング中の金型温度の変化に対応してき裂判定結果も変化している。このことから、ある時間の現象のみを評価するのではなく、射出からキュアリング完了までの間で評価するべきであると考えられる。

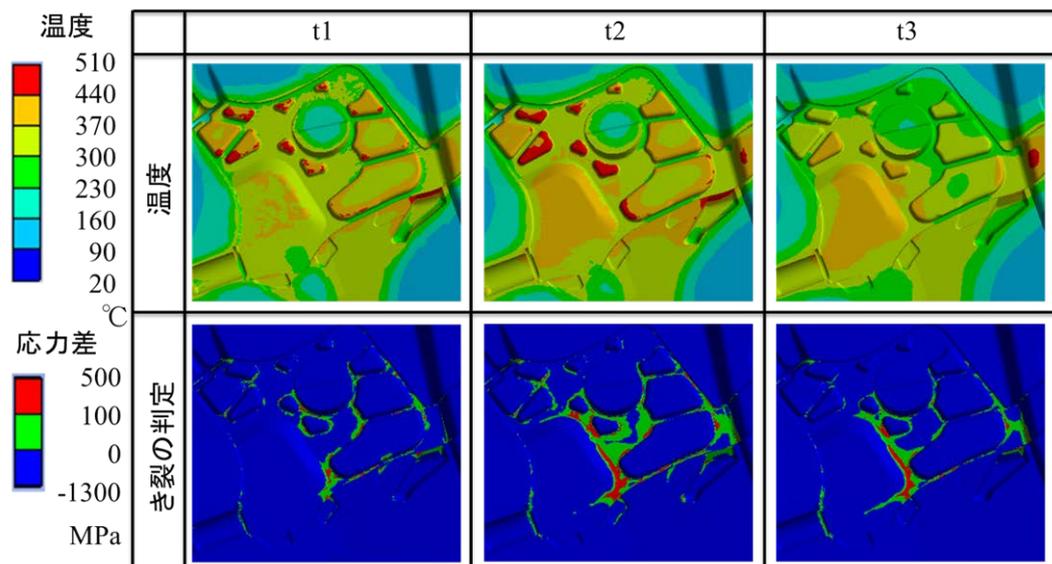


図 1 5 キュアリング中のき裂発生判定の推移

図16に射出からキュアリング完了時までの各時間におけるき裂判定の履歴を考慮したときのキュアリング完了時におけるき裂判定結果と実際に発生したヒートチェックが鋳物表面に転写された結果を示す。鋳物写真中の赤線で描かれた箇所が、金型表面のヒートチェックが転写された部分を示している。図より、き裂判定により発生危険性が高い領域（図中赤）と鋳物にヒートチェックが転写された箇所はよく一致した。これらの結果より、検討した金型変形解析手法および金型割れ判定手法は有効であるといえる。

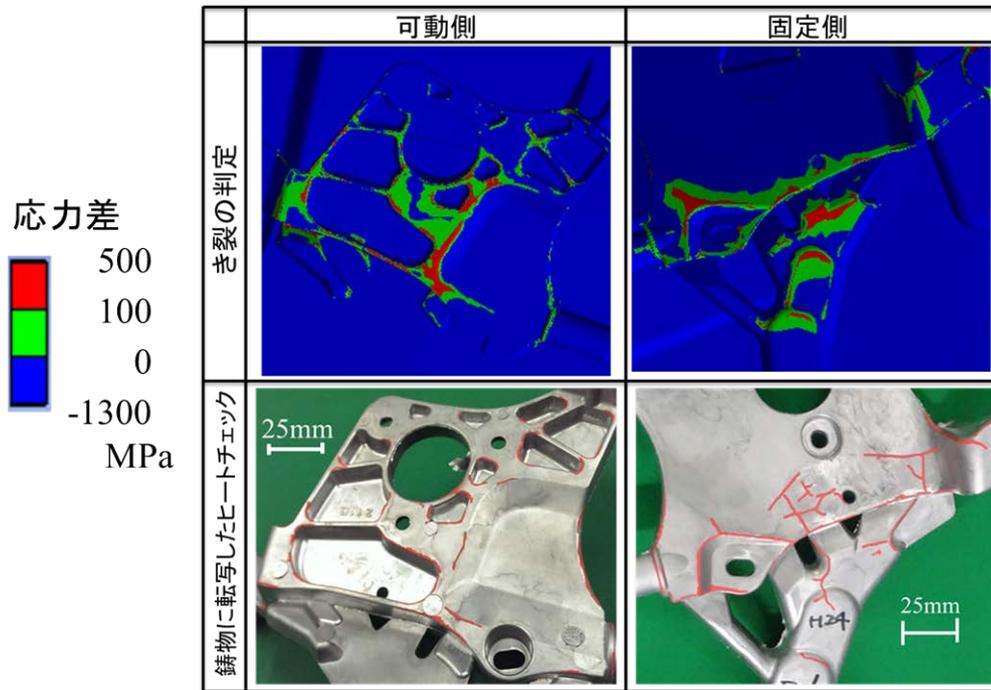


図16 き裂判定の履歴を考慮した判定結果とヒートチェックの転写状況

図17に箱形モデルの固定型金型温度解析の結果を示す。フィン部で高い温度域が存在すると計算された。

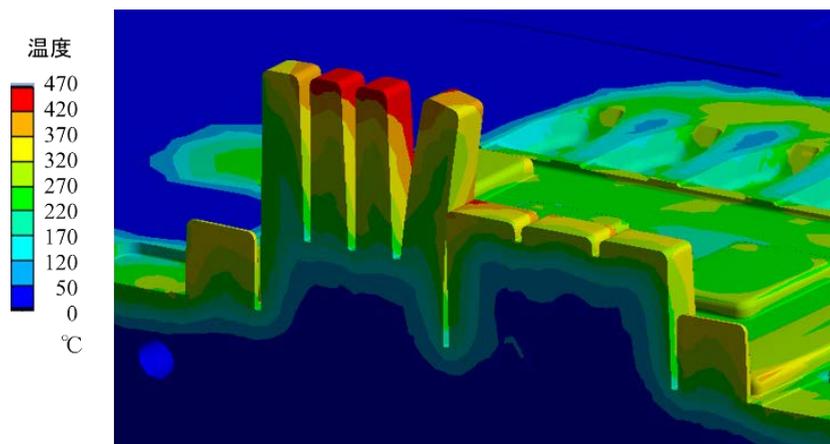


図17 金型温度解析結果

図18に図17の結果を用いた金型変形解析結果を示す。フィン部において降伏応力（約1350MPa、@300°C）を超える箇所があると計算された。しかし、それ以外の箇所では耐力（約1150MPa、@300°C）以下であり、降伏していないと計算された。

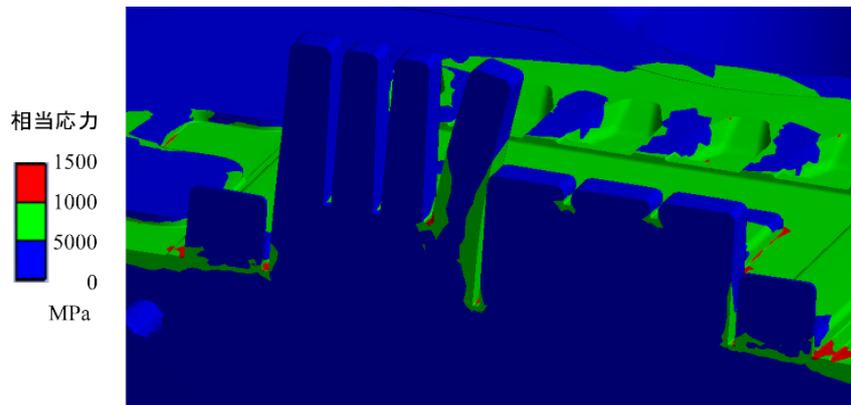


図 1 8 金型変形解析結果

2-3-3 考察

金型表面の相当応力と各温度における材料の耐力から割れ判定を行った。平成 26 年度までの結果から、割れの起点となる箇所には圧縮応力が作用している可能性を示した。割れの進展は動的な現象ではあるが、今回行った静的解析により割れの判定は可能であると考えられる。また、割れ発生のおしきい値としては、材料の耐力より 100MPa 以上大きな応力が発生した場合であると推察される。

2-3-4 まとめ

金型変形解析および金型割れ判定解析により、金型表面に発生するヒートチェックの発生予測を行った。金型表面に発生する応力を相当応力により評価し、材料の耐力との差により発生したヒートチェックと比較した。また、金型変形解析により箱形モデルの入子の割れ検討を行った。得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 金型温度の変化により割れ判定結果が異なる。
- (2) 射出からキュアリング完了までの割れ判定結果の履歴を反映させて評価を行うことにより、発生する割れを予測することは可能である。
- (3) フィン部で一部割れが懸念される箇所がある。

2-4 シミュレーション結果を反映した金型 3D-CAD/CAM システムに関する研究開発

(株式会社エヌ・シー・ロード、国立大学法人東北大学、国立大学法人岐阜大学、名古屋市工業研究所)

変換精度を向上させるためのNCRデータ変換システムの技術確立によりサーフェスデータからソリッドデータへの変換した際のデータ品質が良くなり、その結果、以下に示すシミュレーションが可能となり、金型設計方案の良否判断決定を得ることができた。シミュレーション解析により下記のメリットが得ることができた。

1) 湯口位置の良否、2) 湯口ゲートのサイズ良否、3) 冷却回路の位置および数量、4) 金型サイズの良否、5) 金型の変形予測、6) 製品の変形予測

2-4-1 金型変形・製品変形シミュレーション予想結果の 3D-CAD データへの変換手法の開発 (研究開発項目④-1)

シミュレーション結果をソリッド形式で3D-CADに変換する手法を確立できた。

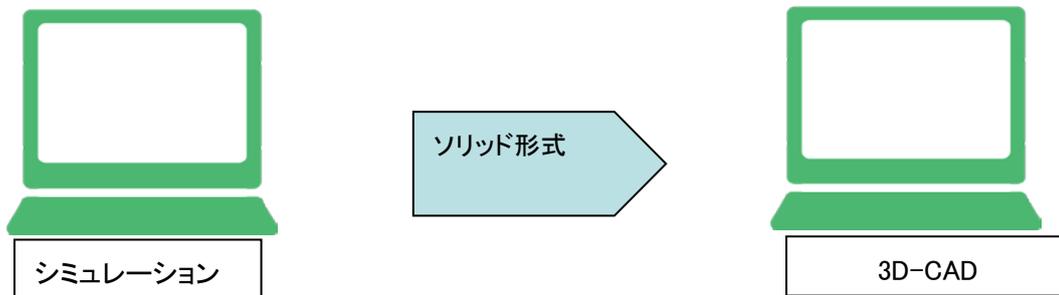


図19 シミュレーションから3D-CADへの変換

2-4-2 シミュレーション予測を3D設計に反映する際の、工数を削減する手法の開発 (研究開発項目④-2)

シミュレーション結果を3D設計に反映する自動化ソフトは見つかっていない為、反映するには、手動的な方法になる。特に細部のシミュレーション反映にはソリッドよりもサーフェスの方法が設計しやすく工数も削減することができた。

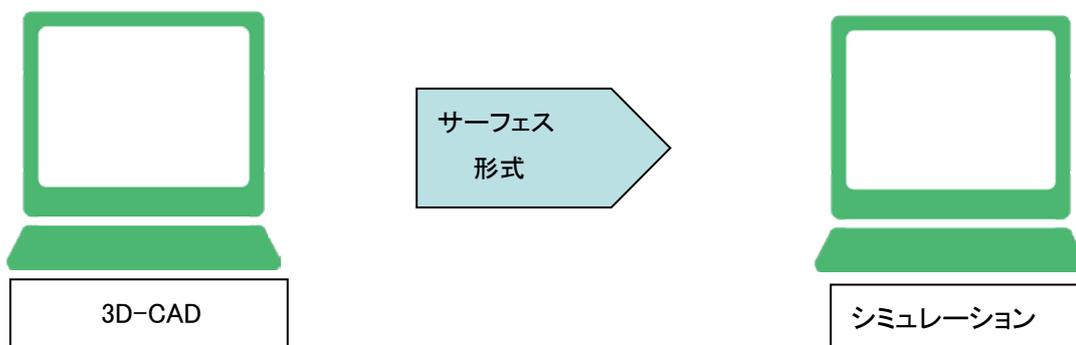


図20 3D-CADからシミュレーションへの変換

2-4-3 シミュレーション予測を 3D 設計に反映する際の工数を削減する手法と 3Dモデル化する技術の開発（研究開発項目④-3）

シミュレーション予測を 3D 設計に反映する際の工数削減する手法を活用したデータ変換作業に関して、社内標準化マニュアルを作成し自動化と手動箇所を明確にしデータ変換ができるようになった。（図 2 1、図 2 2）

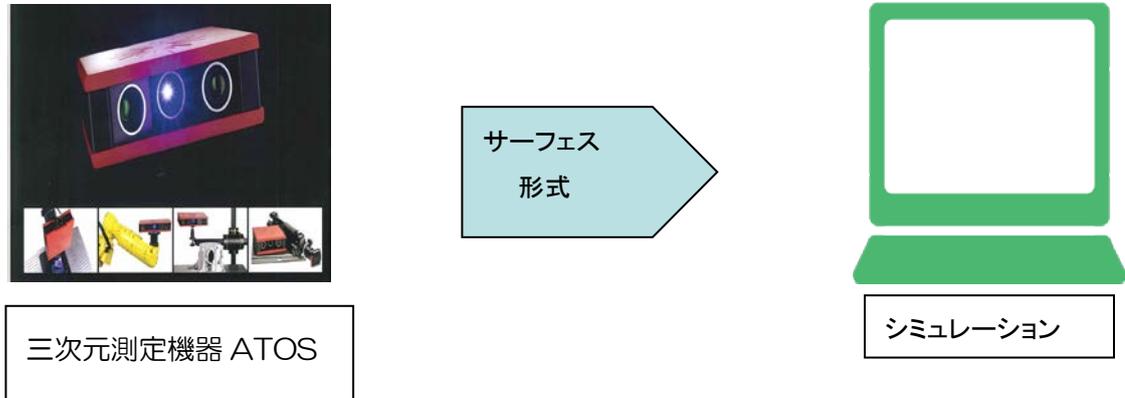


図 2 1 三次元測定機器 ATOS からシミュレーションへの変換

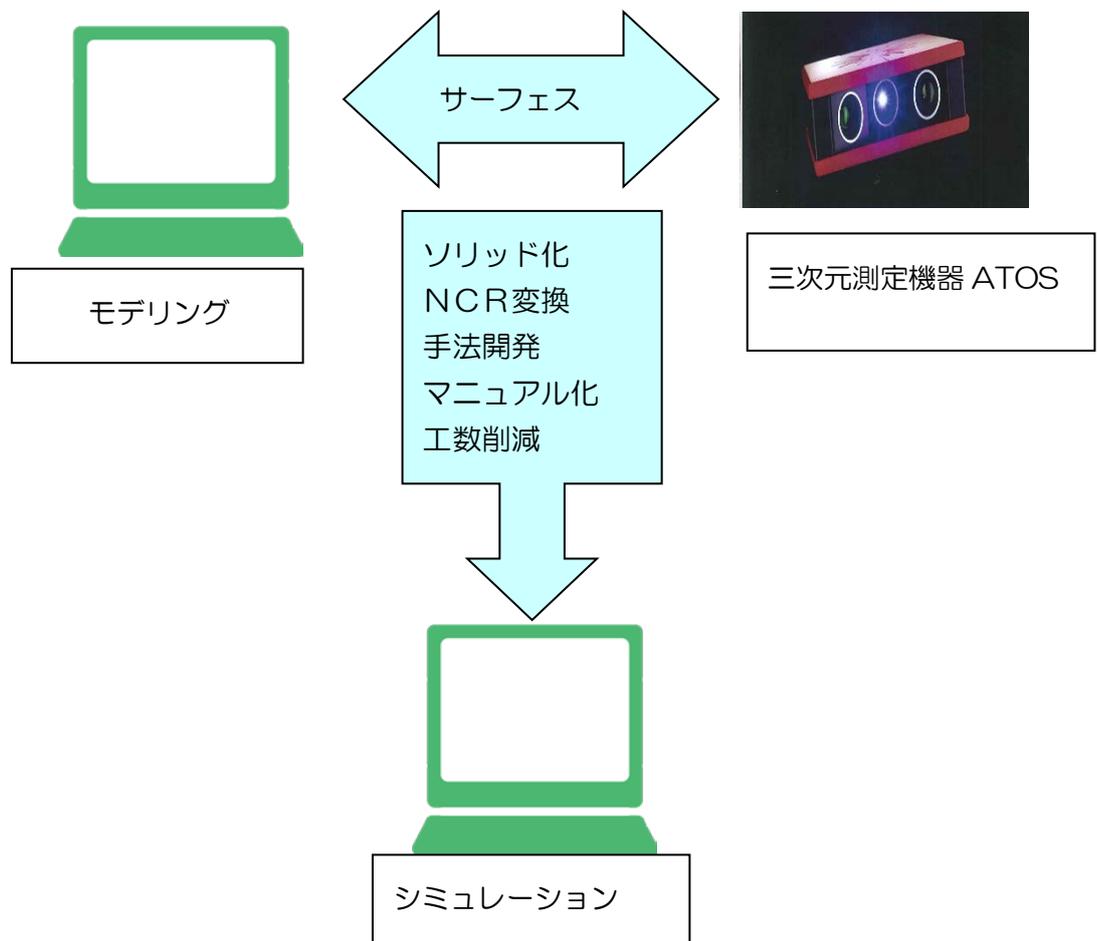
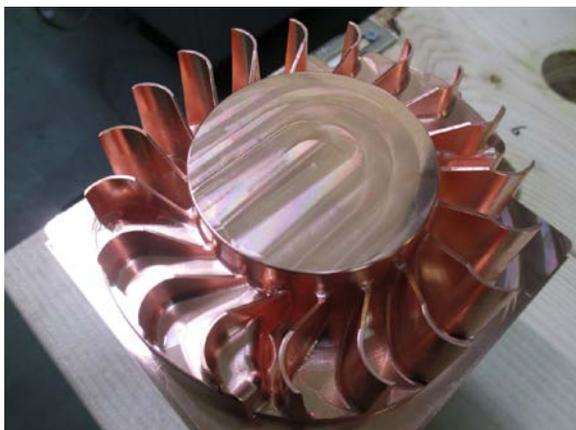


図 2 2 サーフェス/ソリッド NCR 変換とシミュレーション解析処理

2-5 金型製作及び最終仕上げ工程の自動化技術に関する研究開発

(株式会社エヌ・シー・ロード、国立大学法人東北大学)

最終製品に近い箱型ダイカスト金型の深リブ加工に注目し類似形状の難易度の高いフィン形状の加工に関して放電条件の安定化、長時間自動化を行うためのアルミ粉末の最適配合比率の確立ができ、無人化、自動化のミガキレス連続加工 40 時間以上が可能となった。その結果を図 2 3 に示す。



(a)



(b)



(c)

図 2 3 磨きレス放電加工仕上工程で制作した金型 (a)、(b)、(c)

2-6 金型の3D計測技術に関する研究開発

(株式会社エヌ・シー・ロード、名古屋市工業研究所)

2-6-1 実験装置

本研究で使用した実験装置は下記の通りである。

非接触三次元デジタイザ：ATOS III TripleScan (図24) ATOS Core300 (図25)

3D-CAD データ変換：Geomagic DESIGN X、Geomagic XOS、SpaceClaim Engineer



図24 ATOS III (名古屋市工業研究所)



図25 ATOS Core300 (NCロード)

	ATOS III	ATOS Core300
CCD 画素数	800 万画素	500 万画素
測定範囲	320x240	300x230mm
測定距離	830mm	440mm
点間距離	0.104	0.12mm
ソフトウェア	Ver. 8SR1	Ver. 7.5SR2

表3 非接触三次元デジタイザ仕様

2-6-2 ハレーション及び多重反射対策

金型による計測光線散乱を防止する技術の開発と確立(研究開発項目⑥-1)について、一般的に用いられる探傷スプレーを用いたハレーション対策では端部、隅部等のデータ取得が難しく(図26)、塗膜の厚さが計測データに影響を与えることが分かっている。そこで、ハレーションを効果的に防止する材料として、酸化チタン粉体を用いることで探傷スプレーの問題点を解決した。また、測定効率も上がることから、短時間で高品質な3Dデータ取得が可能となることを確認した。また、本研究で使用した測定器はソフトウェアバージョンによって、出力される測定点群データに違いがあることが分かった。株式会社エヌ・シー・ロードが使用している ATOS Core300 のソフトウェアバージョンにおける対策として、隣接面のプロジェクター光をマスキングする手法を提案した。

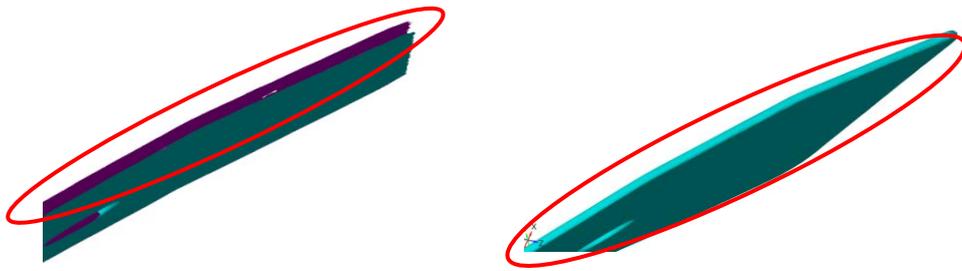


図 2 6 端部データ取得比較 (探傷スプレー (左)、酸化チタン (右))

2-6-3 凹部の 3D 計測評価

金型の凹部計測技術の開発と確立 (研究開発項目⑥-2) については、円筒穴側面、溝側面の測定評価を行った。穴の直径が 5mm を下回る場合や溝の場合は 4mm 以下の場合には測定に制限が現れる (図 2 7, 2 8) ことを確認した。

本研究で使用する測定器で 3D データを取得するためには、測定対象物に対してプロジェクターから照射されるフリンジパターンが投影されていることが必要条件であり、かつ CCD カメラでそのフリンジパターンが撮影されている必要がある。しかし、CCD カメラで撮影できていても、実際には 3D データ取得が出来ない場合もあり測定中の凹部評価は困難である。そこで、実際に測定中は作業の中断を減らすため、測定対象物に対して測定器がどのような位置から測定し (図 2 9)、その位置における測定画像 (図 3 0) を確認することで、大まかな測定限界を把握する程度に留めるべきである。

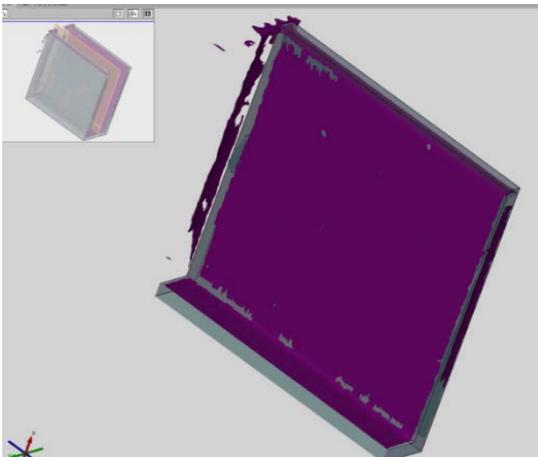


図 2 7 測定結果 (6mm)

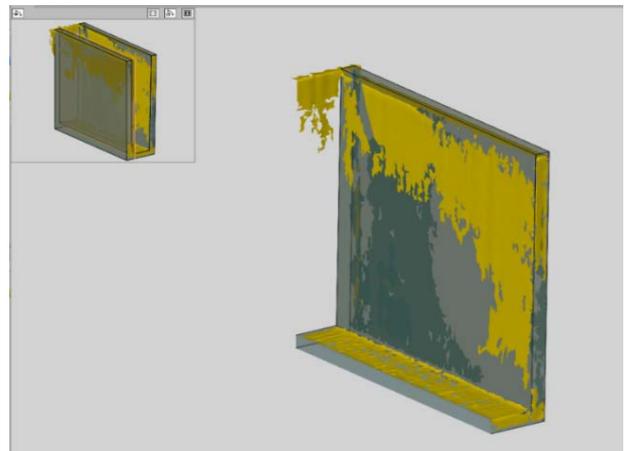


図 2 8 測定結果 (4mm)

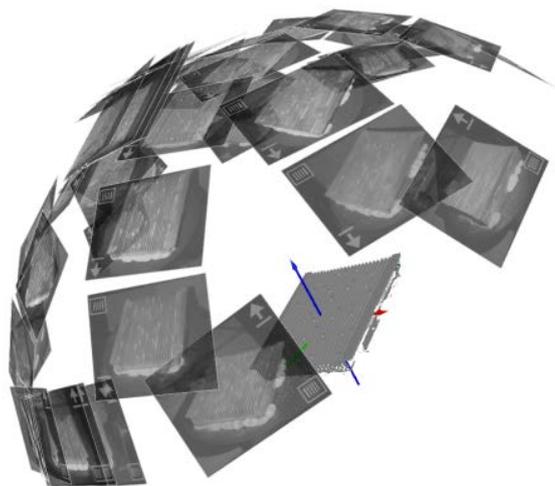


図 2 9 測定対象と測定器の位置関係

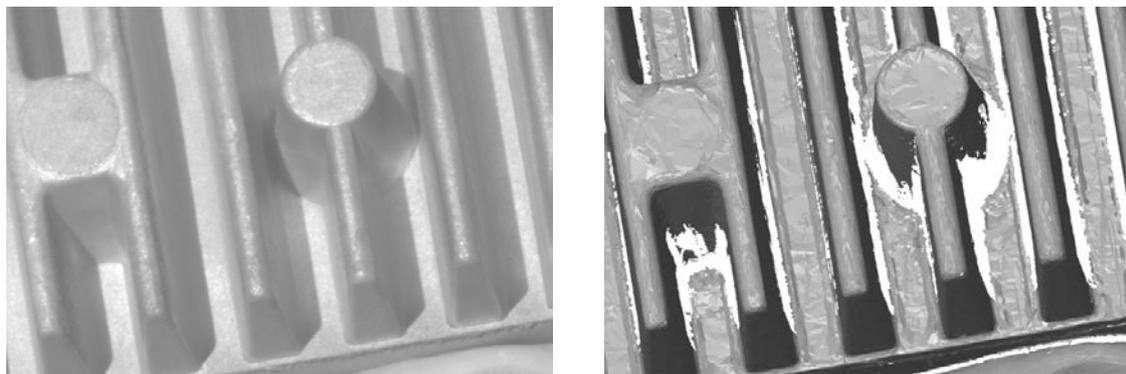


図 3 0 同一角度から見た測定画像（左）と測定データ（右）

上記の研究開発結果に基づき、金型の 3D 計測に関する技術移転を株式会社エヌ・シー・ロードにて実施した。(図 3 1)

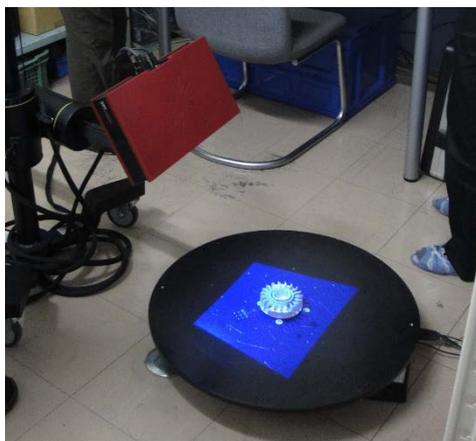


図 3 1 ATOS Core300 による評価測定の様子

2-6-4 3D計測データの3D-CADデータへの変換

3D計測データの3D-CADデータへの変換技術の開発と確立（研究開発項目⑥-3）については、株式会社エヌ・シー・ロードと名古屋市工業研究所で使用しているソフトウェア機能に違いがあるため、差違を考慮しながら変換手法を最適化する技術の提供を行った。高品質な3D計測データの取得が可能となったことによって、形状の認識率が向上した。平成26年度までに開発した3D計測データの簡略化を行い、細かなフィーチャーを排除することで効率よくデータ変換を行う。また、金型用CAD-CAMシステムはサーフェスの編集が中心となるため、3D計測データ（ポリゴン）に対する自動面貼りを基本とした。自動面貼り機能を用いた3D-CADデータ化はサーフェスの連続性がG0の場合、シャープエッジを定義することで面分割におけるエラー回避が可能である。簡略化で失われた形状は、計測ソフトウェアから幾何要素としてIGES出力可能であり、これを用いてブーリアン演算することで最終形状を取得する。

2-6-5 考察とまとめ

酸化チタンのエアブラシ塗布によって、探傷スプレーよりも高効率、高品質な3D計測が可能となった。穴や溝などの凹部測定の限界を明らかにした。また、測定現場で簡易確認しながら測定することで、無駄な測定を減らすことが可能となった。立体マーカーを使用することで貼りあわせ誤差を低減し測定効率が向上した。3D計測データの3D-CADデータ化は全自動で行うことはできない。しかし、変換元となる3D計測データの品質を向上させ、かつ簡略化を行うことで自動処理できる部分を増やし工数を削減することが可能となった。これらの技術を株式会社エヌ・シー・ロードの環境において利用可能にした。

最終章 全体総括

平成25年度の研究実績は、局部高圧冷却装置向けの内部冷却回路の最適設計を行ない3MPaまでの高圧仕様の設計及び機械装置等の準備が達成し、平成26年度に向けた冷却用実験（ハード側）としての実験準備が整った。また、鋳造シミュレーション（ソフト側）としては、適切な鋳物-金型間の熱伝達係数を算出することにより、鋳造シミュレーションの高精度化が達成され、冷却強化策に関しては鋳造シミュレーションで模擬実験することで、実際の実験工数を減らし、鋳造シミュレーションと確認のための実際のアライメントと間に相関関係を見出すことができた。以上の結果、製品歪みの削減、バリ発生を削減する条件を見出す方向性が見えてきた。また、金型製作及び最終仕上げ工程の自動化技術に関して、リニアモータ搭載の放電加工機を用いて実施し、その結果、1G以上の加速度で最大速度まで加速する超高速ポンピング作用により、電極と加工物との間に介在するチップやタール、ガス等が効率よく排出されるため、無噴流でリブ加工が可能になり、従来の噴流加工のようにチップだまり等によって発生する集中放電や2次放電が抑制され、ギャップのバラツキや放電面の不均一が発生しないことにより均一な金型表面ができることが明らかになった。また、50 μ m程の金型表面粗さを持った金型に対して、アルミ粉末添加の放電加工液を利用する磨きレス放電加工を用いることで、従来の職人による手作業である5 μ m程まで金型表面粗さを上げることができた。最後に、金型の3D計測技術に関する研究開発では、酸化チタン塗布法など光線散乱を防止する技術、凹部計測技術、計測データの3DCADデータへの変換技術の確立がなされ、その寸法精度は25 μ mを達成した。平成26年度の研究実績は、金型の内部冷却技術に関する研究開発に関しては、冷却の対象部位に関して冷却効果範囲の制約があることが判明し、小径ピンでは有効であるが、フィン形状では向かないことが実験によって明らかになり最適冷却法案を立案できた。一方、真空冷却能力の検討を行い、金型の冷却性能を調査するための真空冷却装置が導入され、簡単な金型モデルにおいて内部冷却の影響が明らかになることができた。さらに、鋳造シミュレーション冷却事案の高精度化に関するバリ発生予測の研究開発、内部冷却を加味した金型変形シミュレーションに関しては、前者ではバリ発生を抑制する冷却条件を求めることができ、後者では金型変形を精度よく再現するシミュレーション結果を得ることができた。また、三次元測定機器であるATOSから測定した結果によって生まれるソリッドデータをANSYS移行したところソリッドの品質が悪くANSYSでのシミュレーションができないといった課題を見出すなど、具体的な最終年度の研究目標を立案できた。3D計測技術に関する研究開発に関しては、凹部の測定を調査した結果、測定限度を明確にできた。以上、本研究プロジェクトの最大の目標である、最終製品に近い箱型ダイカスト金型製作（2015年3月中旬完成）が完了し、一方、予備実験としての簡易版での金型実験やシミュレーションが完了し、最終年度である平成27年度には実際的な箱型鋳造実験とシミュレーションを行った上で、実運用での箱型ダイカスト鋳造に即して当該研究をまとめる段階まで平成26年度に到達することができた。最終年度の平成27年度はこれまでの研究実績に関し、全体総括を以下研究開発項目の章ごとにまとめを行った。

金型の内部冷却技術に関する研究開発（研究開発項目①、当該報告書2-1章）に関しては、フィン形状を有する箱型鋳造品において、金型を非常に早く開くことで鋳造品の取出し温度を高く（180～250℃）すると鋳造品の歪み変形が無く取り出せることを確認した。この知見を量産化するに当たり、最終凝固部となるランナーとブッシュの冷却回路設計を見直

した。その結果、従来の半分の時間でランナーとブッシュを固めることが出来て、歪み変形が少ない鋳造品を成形する手法を確立した。

鋳造シミュレーション冷却事案の高精度化に関する研究開発（研究開発項目②、当該報告書 2-2 章）に関しては、ジェットクールシステムを使用したときの冷却特性について、実験をもとにして算出した冷却速度をもとにして熱伝達係数を推定した。また、その結果を過去 2 年間に検討したシミュレーション方法に適用して溶湯内の圧力伝播を計算した結果、実測結果と良い一致を示した。

内部冷却を加味した金型変形シミュレーションの高精度化に関する研究開発（研究開発項目③、当該報告書 2-3 章）に関しては、過去 2 年間に取得した鋳造実験による情報と金型変形シミュレーション方法をベースにし、鋳ばり発生予測およびヒートチェック発生予測手法について検討した。ヒートチェックの判定には溶湯射出からキュアリング完了までの応力を評価することが明らかになった。

シミュレーション結果を反映した金型 3D-CAD/CAM システムの開発（研究開発項目④、当該報告書 2-4 章）に関しては、変換精度を向上させるための NCR データ変換システムの技術確立によりサーフェスデータからソリッドデータへの変換した際のデータ品質が良くなり、その結果、以下に示すシミュレーションが可能となり、金型設計方案の良否判断決定を得ることができた。シミュレーション解析により、湯口位置の良否判断、湯口ゲートのサイズ良否判断、冷却回路の位置および数量判断、金型サイズの良否判断、金型の変形予測、製品の変形予測等のメリットが得ることができた。

金型製作及び最終仕上げ工程の自動化技術に関する研究開発（研究開発項目⑤、当該報告書 2-5 章）に関しては、研究開発項目⑤-1 については、最終製品に近い箱型ダイカスト金型の深リブ加工に注目し、類似形状の難易度の高いファン形状の加工が可能となるような知見を得た。当該複雑形状は全体の重量バランスが重要でありフィン形状の均一化や形状（フィン形状幅が 1 ミリ、フィン形状深さが 20 ミリ以上、リブ形状の抜き勾配が 1 度以下であるため面粗度）が重要であることが判明した。

金型の 3D 計測技術に関する研究開発（研究開発項目⑥、当該報告書 2-6 章）に関しては、酸化チタンのエアブラシ塗布によって、探傷スプレーよりも高効率、高品質な 3D 計測が可能となった。穴や溝などの凹部測定限界を明らかにした。また、測定現場で簡易確認しながら測定することで、無駄な測定を減らすことが可能となった。立体マーカーを使用することで貼りあわせ誤差を低減し測定効率が向上した。3D 計測データの 3D-CAD データ化は全自動で行うことはできない。しかし、変換元となる 3D 計測データの品質を向上させ、かつ簡略化を行うことで自動処理できる部分を増やし工数を削減することが可能となった。これらの技術を株式会社エヌ・シー・ロードの環境において利用可能にした。

以上のように、最終年度である平成 27 年度迄の 3 年間の研究推進により当初目標に掲げていた「鋳放しにより自動車メーカーの要求品質を得られる高付加価値な金型」の設計、「高付加価値な金型」を製作することが鋳造メーカーと金型メーカーとの連携作業により可能となり、金型メーカーである株式会社エヌ・シー・ロードにおいては、「高付加価値な金型」の 3D 計測と 3D 情報の提供が可能となり、次世代自動車用部品の金型製作で、精度面とコスト面で優位となりうる土台を築くことが可能となり、今後の自動車産業のグローバル化ニーズに対応する技術が金型メーカーである株式会社エヌ・シー・ロードと鋳造メーカーである寿金属工業や東海精機に蓄積できた。