

平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「新規鑄造材料を用いた金型技術の高度化」

研究開発成果等報告書

平成21年 3月

委託者 東北経済産業局

委託先 財団法人山形県産業技術振興機構

目 次

第 1 章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第 2 章 本論－（1）プラスチック金型用材料設計・評価

- 2-1 特殊熱処理による表面粗さ変化の関係把握
- 2-2 耐摩耗性評価

第 3 章 ダイカスト金型用材料設計・評価

- 3-1 耐ヒートチェック性評価

第 4 章 鑄造（プラスチック金型、ダイカスト金型）

- 4-1 鑄造方案
 - 4-1-1 鑄ぐるみ配管を考慮した鑄造シミュレーション
 - 4-1-2 鑄ぐるみ配管の熱伝導測定
- 4-2 配管加工
 - 4-2-1 塑性加工シミュレーション
 - 4-2-2 曲げ加工および溶接
 - 4-2-4 高精度型枠の作製

第 5 章 金型温調設計・金型加工

- 5-1 金型温調設計
- 5-2 金型設計、金型加工
 - 5-2-2 ダイカスト金型への金型温度調節機の適用
 - 5-2-4 テスト金型による実証試験
- 5-3 成形、検証試験
 - 5-3-4 実用金型による実証試験

第 6 章 3D 自由曲面デザイン、構造設計（プラスチック用金型）

- 6-1 大型成形品の強度予測
- 6-2 実用金型による実証試験

第 7 章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

日本のものづくり産業の国際競争力強化及び新たな事業の創出を図るために、ものづくりの基盤を支える金型技術の重要性が掲げられており、金型技術及び金型材の高度化が求められている。特に、自動車関連業界では、エンジンルーム内の機構部品における、さらなる複雑形状化、加工レス化とともに、外装部品の樹脂化が求められている。また、薄型テレビ等付加価値の高い情報家電分野においては、大型化への対応と3次元形状で意匠性に優れたプラスチック製部品を製造できる金型部材の開発が要求されている。

このような背景から、本研究では、従来の射出成形用金型材料として主流であるプリハードン鋼に代わる新たな鑄造材料を用いて、自動車及び情報家電業界から強く求められているデザイン性、機能、性能を併せ持つプラスチック部品製造に適用可能な金型を開発することを目指した。

川下業界の抱える課題及びニーズを踏まえ、①鑄造材料ではあるが市販金型材に匹敵する材料性能を持つ新規金型材料により、②従来の金型材料と機械加工の組合せでは実現できない金型構造、特に温調管の理想的な配置を実現することで、金型技術に求められている課題の解決を目指した。

図1に示すように、自由形状の温調配管では金型表面近傍での直接温調が可能になる。この効果は①そり、収縮等の変形を抑制できる、②冷却時間を短縮できることである。温調配管の熱交換効率は、配管表面積に比例し金型表面からの距離に反比例することが広く知られており、「より近く、より多く、より均等に」配置することで複雑3次元形状を高精度に成形する技術を構築した。

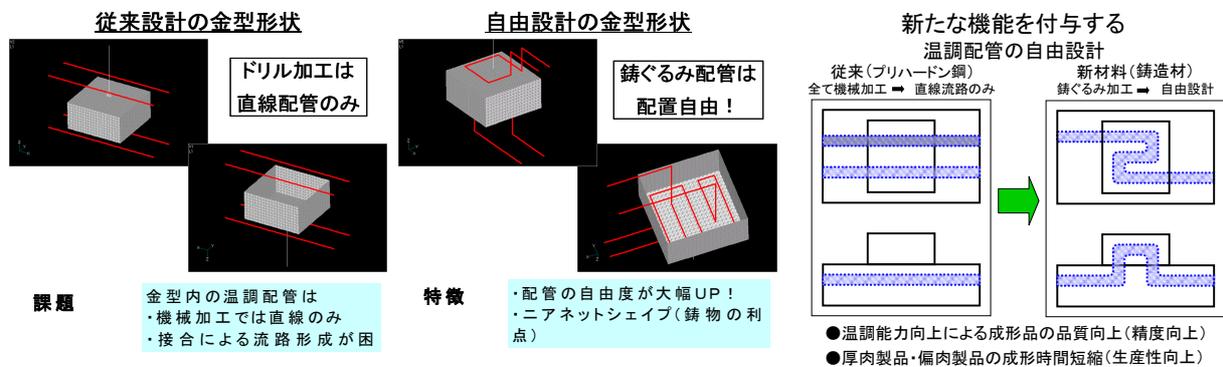


図1 自由形状の温調配管が持つ優位性

1 - 2 研究体制



1-3 成果概要

① プラスチック金型用材料設計・評価

①-1 特殊熱処理による表面粗さ変化の関係把握

(山形県工業技術センター、(有)渡辺鋳造所)

特殊熱処理の効果を明らかにし、プラスチック成形用金型材料として完成させた。熱処理条件を変化させたときの表面粗さを測定し、最適条件を明らかにした。200×200mm の試験片における表面粗さ $0.1\mu\text{m}$ 以下を達成した。

①-1-2 微量成分添加による金属組織変化ならびに表面粗さ変化の関係把握

(山形県工業技術センター、(有)渡辺鋳造所)

微量添加剤の効果を明らかにし、プラスチック成形用金型材料として完成させた。添加する微量成分を変化させたときの金属組織変化ならびに表面粗さを測定し、最適条件を明らかにした。中型の実用金型を対象にして、200×200mm の試験片における表面粗さ $0.05\mu\text{m}$ 以下、鋳造品各部の硬さの偏差 5%以内の目標を達成した。

①-1-3 清浄度向上及び管理手法の検討 (山形県工業技術センター、(有)渡辺鋳造所)

微量不純物の影響および各組成の変動の影響を明らかにし、プラスチック成形用金型材料として完成させた。添加する微量成分等を変化させたときの金属組織変化を観察し、品質維持に必要な不純物許容限度および組成精度を明らかにした。その結果、中型の実用金型を対象にして、200×200mm の試験片における表面粗さ $0.01\mu\text{m}$ 以下を達成した。

①-2 耐摩耗性評価

(秋田大学、山形県工業技術センター)

鏡面部品あるいは透明部品の成形に対応するための金型材質の高品位化を目指し、耐摩耗性、耐久性（衝撃疲労、熱衝撃）及び耐食性を評価した。金型材料の実用性評価項目の中で最も基本的な耐摩耗性について、実用温度領域 200°C から 300°C で評価した。NAK80、CENA1、STAVAX の 3 種の代表的な市販金型材料についても同様の摩耗試験を行い、本開発材料と比較した結果、市販品と同等以上の耐摩耗性を有することが確認できた。

①-2-2 耐食性評価

(秋田大学、山形県工業技術センター)

鏡面部品あるいは透明部品の成形に対応するための金型材質の高品位化を目指し、耐摩耗性、耐久性（衝撃疲労、熱衝撃）及び耐食性を評価した。金型材料の実用性評価項目の中でも高機能金型部材に求められる耐食性について評価した。その腐食面を観察した結果、実際の使用環境でも市販品と同等以上の耐食性を示すことが確認できた。

①-2-3 複合材に対する耐摩耗性評価 (秋田大学、山形県工業技術センター)

鏡面部品あるいは透明部品の成形に対応するための金型材質の高品位化を目指し、耐摩耗性、耐久性（衝撃疲労、熱衝撃）及び耐食性を評価した。実用面で問題となるガラス繊維等の無機複合材に対する耐摩耗性について、高温摩耗試験を行ったところ市販金型材と同等以上の耐摩耗性を持つことが確認された。

②ダイカスト金型用材料設計・評価

②-1 靱性発現機構の解析

(有)渡辺鋳造所、山形県工業技術センター)

熱応力に耐えられる材料特性(靱性)を持つ鋳造材料組成(C-Ni-Mn-Si量の最適値)を解明した。鋳造材料組成及び熱処理条件を変化させた場合のシャルピー衝撃値の変化から、靱性発現に有効な組成及び熱処理条件を明らかにした。その結果、シャルピー衝撃値10J/cm²を達成した。

②-1-2 特殊熱処理による靱性向上

(有)渡辺鋳造所、山形県工業技術センター)

熱応力に耐えられる材料特性(靱性)を持つ改良組成材料について、熱処理方法を改良することでさらなる靱性向上を目指した。鋳造材料組成及び熱処理条件を変化させた場合のシャルピー衝撃値の変化から、靱性発現に有効な組成及び熱処理条件を明らかにした。

鋳造材料組成に対応する鋳造組織、基本物性値とシャルピー衝撃値を比較検討し、靱性発現に有効な組成及び熱処理条件を明らかにした。シャルピー衝撃値12J/cm²を達成した。

②-1-3 靱性向上および管理手法の検討

(有)渡辺鋳造所、山形県工業技術センター)

熱応力に耐えられる材料特性(靱性)を持つ改良組成材料について、さらなる靱性向上を目指した。添加する微量成分等を変化させた場合のシャルピー衝撃値の変化から、靱性発現に有効な組成、品質維持に必要な不純物許容限度および組成精度を明らかにした。最終目標15J/cm²には及ばなかったが、シャルピー衝撃値12J/cm²を達成した。

②-1-3 本鋳造材へのイオン窒化処理(追加項目)

(有)渡辺鋳造所、山形県工業技術センター)

開発材にイオン窒化を施し、試料断面の金属組織観察と硬さ試験により実用化試験を行った。開発材へのイオン窒化処理は十分有効であることがわかった。更に、Cr量が7%以上では表面硬さで1000HVを超える高硬度の窒化層が形成されることが確認できた。

②-2 靱性評価

(秋田大学、山形県工業技術センター)

ダイカスト用金型に求められる性能である耐熱性、耐ヒートチェック性、耐焼付き性及び靱性について評価した。種々の材料信頼性評価項目の中で最も基本的な靱性について評価した結果、シャルピー衝撃値で10J/cm²を達成した。

②-2-2 耐ヒートチェック性評価

(秋田大学、山形県工業技術センター)

ダイカスト用金型に求められる性能である耐熱性、耐ヒートチェック性、耐焼付き性及び靱性について評価した。種々の材料信頼性評価項目の中で金型寿命に大きな影響を与える耐ヒートチェック性について、試料表面の残留応力および熱膨張率で評価した。目標の市販材SKD61と同等の特性が得られた。

②-2-3 テスト金型による実体評価

(秋田大学、山形県工業技術センター)

ダイカスト用金型に求められる性能である耐熱性、耐ヒートチェック性、耐焼付き性及び靱性について評価した。テスト金型を用いた成形実験を行った結果、市販金型材料に迫

る性能を持つことが実証された。

③ 鑄造(プラスチック用金型、ダイカスト用金型)

③-1 鑄造方案 (東北大学、岩手大学、(有)渡辺鑄造所、山形県工業技術センター)

湯流れ凝固解析(鑄造 CAE)による最適化と実証試験を行った。温調配管として使用可能な材料について、造形に必要な塑性加工に関する最適化を行った。

③-1-1 鑄ぐるみ配管を考慮した鑄造シミュレーション

(岩手大学、(有)渡辺鑄造所、山形県工業技術センター)

鑄造 CAE(湯流れ解析等)による最適化と実証試験を行った。通常の砂型及び中子による鑄造シミュレーションと、鑄型内部に配置した温調配管の熱容量及び遮蔽物としての影響を考慮したモデルによるシミュレーションについて、鑄造 CAE を用いて行うことで鑄ぐるみ配管の影響を明らかにした。

③-1-2 鑄ぐるみ配管の熱伝導測定 (山形県工業技術センター)

プラスチック成形用金型及びアルミニウムダイカスト用金型における使用温度領域である、300℃あるいは 600℃近傍での金型温度シミュレーションに必要な鑄ぐるみ界面を含む熱伝導について、熱定数測定装置及び熱定数解析ソフトを用いて測定し解析した。

③-1-3 シミュレーション結果に基づく鑄造方案の最適化

(岩手大学、(有)渡辺鑄造所、山形県工業技術センター)

鑄造 CAE(湯流れ解析等)による最適化と実証試験を行った。通常の砂型及び中子による鑄造シミュレーションと、鑄型内部に配置した温調配管の熱容量及び遮蔽物としての影響を考慮したモデルによるシミュレーションについて、実証試験を行うことで鑄ぐるみ配管の品質向上を目指した。

金型の基本的形状である平板及び凸型の方案に、通常の砂型及び中子によるものと、実際の配管及び冷やし金によるモデルを用いた各々 2 種類、計 4 種類の実証試験を行った。この基本形状を用いた鑄造品の内部構造をカットモデルにより測定、およびデジタル X 線像撮影装置(新規)を用いて非破壊測定した。鑄造欠陥に対する非破壊検査の精度向上が図られた。

③-1-4 鑄ぐるみ界面制御の高度化

(岩手大学、(有)渡辺鑄造所、山形県工業技術センター)

金型温調設計ルールの進化に応えるためには、鑄ぐるみ界面制御の高度化が必要不可欠であり、追加サブテーマとして取り組んだ。鑄ぐるみ界面の細部構造観察でみられる鑄造材側に生じる変質層が、金型表面の加工精度に影響を及ぼしており、鑄ぐるまれる配管素材にめっき等の表面処理を施した場合の変質層の変化から、最適な表面処理方法を模索した。その結果、この変質層の厚さ 1 mm 以下を達成した。

③ - 1 - 5 鋳造方案最適化実証試験

(岩手大学、(有)渡辺鋳造所、山形県工業技術センター)

鋳造 CAE (湯流れ解析等) による最適化と実証試験を行った。通常の砂型及び中子による鋳造シミュレーションと、鋳型内部に配置した温調配管の熱容量及び遮蔽物としての影響を考慮したモデルによるシミュレーションについて、実証試験を行うことで鋳ぐるみ配管の品質向上を目指した。

「④-1」「④-2」「④-3」で使用するテスト金型を作製した。この鋳造材について、シミュレーションどおりに鋳造されているかを、超音波および X 線を用いた非破壊検査により検証し、求められた配管位置精度および金型製品面の欠陥のない高品質の鋳造材であることを確認した。

③-2 配管加工 (株)ナガセ、山形県工業技術センター)

温調配管として使用可能な材料について、造形に必要な塑性加工に関する最適化を行った。

③-2-1 塑性加工シミュレーション

(山形大学)

配管材料として使用する低炭素鋼の基本物性値による曲げ加工シミュレーションを行った。変形による肉厚変化等を予測し、鋳ぐるみ可能な加工限界を検討した。鋳ぐるみ配管に使用する配管材の中で標準的な内径 8 mm、肉厚 2 mm の低炭素鋼管について、肉厚変化が 0.5mm 以下に抑えられる加工条件を明らかにした。

③-2-1 高温領域塑性加工シミュレーション

(山形大学)

高温引張試験からヤング率等の材料パラメータを実測した。高温領域では、材料パラメータは異なるが、グラフの形状及び変形図は同じ傾向となっており、パイプの変形形状に及ぼす温度の影響は小さいといえる。しかしながら、曲げ加工に必要な最大モーメントは 800°C において室温時の 1/4 程度であることを確認した。

③-2-2 曲げ加工および溶接

(株)ナガセ、山形県工業技術センター)

温調配管モデルの図面指示に対して、溶接変形量を考慮した部材取り・部材分割を行うことで、寸法形状誤差 1.0mm 以下の精度による温調配管組立を安定して行える工法を確立し、平成 18 年度目標である寸法形状誤差 1.0mm 以下を達成した。

③-2-3 立体形状の曲げ加工および溶接

(株)ナガセ、山形県工業技術センター)

大型の温調配管モデルの図面指示に対して、溶接変形量を考慮した部材取り・部材分割を行うことで、寸法形状誤差 0.7mm 以下の精度による温調配管組立を安定して行える工法を確立した。組み立てられた鋳ぐるみ配管の組み立て精度について、3 次元測定機等を用いて測定し寸法形状誤差 0.7mm 以下であることを確認した。

③-2-4 高精度型枠の作製

(株)ナガセ、山形県工業技術センター、山形大学)

大型の温調配管モデルの図面指示に対して、配管等を所定位置に保持し溶接するための型枠の精度を向上させることで、寸法形状誤差 0.5mm 以下の精度による温調配管組立を安

定して行える工法を確立した。組み立てられた鑄ぐるみ配管の組み立て精度について、寸法形状誤差 0.5mm 以下であることを確認した。

④ 金型温調設計・金型加工(プラスチック用金型、ダイカスト用金型)

湯流れ・凝固解析、樹脂流動解析、加工原点・基準面の検討、配管の最適配置を行った。

④-1 金型温調設計 (三菱化学株、ムネカタ株、東北大学、株フジミ、テーピ工業株)

湯流れ・凝固解析、樹脂流動解析を行い、基本的な温調配管の配置と結果予測を行った。

④-1-1 プラスチック用金型の温調配管シミュレーション

(三菱化学株、ムネカタ株)

従来の機械加工による金型温調及び鑄ぐるみ配管による金型温調について、射出成形 CAE を用いて基本形状のモデルによるシミュレーションを行い、最も鑄ぐるみ温調管が効果的な成形品形状および温調管形状を検討した。年度目標である冷却時間を半減(1/2)できる成形品形状と温調配管形状の組合せの基本形を明らかにした。

④-1-2 アルミニウムダイカスト用金型の温調配管シミュレーション (東北大学)

従来の噴流管による金型温調及び鑄ぐるみ配管による金型温調について、箱形、筒型及び平板等の基本形状のモデルによるシミュレーションを行った。従来方式の金型と鑄ぐるみ温調配管を適用した金型について、温調能力の差異を定量化することで鑄ぐるみ温調配管の優位性を検証した。

④-1-3 プラスチック用立体形状金型の温調配管シミュレーション

(三菱化学株、ムネカタ株)

従来の機械加工による金型温調及び鑄ぐるみ配管による金型温調について射出成形 CAE を用いて、大曲率の 2 次曲面で構成された立体形状(かまぼこ形)のモデルによるシミュレーションを行った。この中で、最も鑄ぐるみ温調管が効果的な成形品形状および温調管形状を検討する。製品形状誤差を半減(1/2)できる温調配管形状について、試作の際に使用する樹脂の熔融物性を測定し射出成形 CAE を用いて計算することにより予測値として明らかにした。

④-1-4 アルミニウムダイカスト用高精度金型の温調配管シミュレーション

(東北大学)

従来の噴流管による金型温調及び鑄ぐるみ配管による金型温調について、箱形、筒型の実製品に類似のモデルによるシミュレーションを行った。この中で、最も鑄ぐるみ温調管が効果的な温調管形状を検討した。アルミニウムダイカスト用金型で一般的に用いられている噴流管形式の実用金型と、鑄ぐるみ温調配管による金型温調を適用した同一キャビティ形状の金型について、鑄造 CAE を用いて比較した。

④-1-5 テスト金型による実証試験

(三菱化学株、ムネカタ株)

従来の機械加工による金型温調及び鑄ぐるみ配管による金型温調について射出成形 CAE

AEを用いて、大曲率の3次曲面で構成された立体形状（ドーム形）のモデルによるシミュレーションを行った。この中で、最も鑄ぐるみ温調管が効果的な成形品形状および温調管形状を検討した。

大曲率3次曲面を有する形状において、鑄ぐるみ配管では製品温度分布やそり変形を小さくすることが可能であり、鑄ぐるみ配管の有効性を示した。

④-1-6 テスト金型による実証試験 (東北大学、(株)フジミ)

従来の噴流管による金型温調及び鑄ぐるみ配管による金型温調について、箱形、筒型の実製品に類似のモデルによるシミュレーションを行う。この中で、最も鑄ぐるみ温調管が効果的な温調管形状を検討した。

アルミニウムダイカスト用金型で一般的に用いられている噴流管形式の実用金型と、鑄ぐるみ温調配管による金型温調を適用した同一キャビティー形状の金型について、実用化ベースでの金型の温調設計と加工を行い実製品に近いダイカスト成形及び検証試験を行った。従来技術と比較して大幅なハイサイクル化かつ高精度かつ鑄造欠陥を低減できるアルミニウムダイカスト用金型が製作可能となる知見が得られた。

④-2 金型設計、金型加工 (ムネカタ(株)、(株)フジミ、テープ工業(株))

各解析の結果をもとに加工原点・基準面の検討、配管と内部機構部品の最適配置を行った。

④-2-1 鑄造物からの加工原点・基準面の取得 (ムネカタ(株))

鑄ぐるみ配管及び構造維持のための部材（サポート）等を利用して、配管の取出し位置（穴位置）及び立体的配置を予測できる形状を検討した。その結果、配管位置の精度は誤差1.0mmを得た。また、この金型材モデルに温度センサー及び歪みセンサーを取り付け、金型温調時の熱的負荷に対する挙動を測定した。

④-2-2 ダイカスト用金型への金型温度調節機の適用 (株)フジミ、テープ工業(株)

既存のダイカスト用金型に金型温度調節機を接続し、ダイカストマシンとの連結動作を行った。既存のアルミニウムダイカスト成形品について、金型温調の効果を確認した。既存のアルミニウムダイカスト用金型に金型温度調節機を接続し、金型表面温度を測定した。また、螺旋状の温調配管を鑄ぐるみんだ円柱状金型モデルを試作し、鑄ぐるみ温調配管の優位性を検証した。

④-2-3 鑄ぐるみ温調配管と内部機構部品の最適配置 (ムネカタ(株))

実用金型では温調配管以外にも、突き出し機構、スライド機構等の重要な要素があり、各々を共存させる工夫が行われている。この実用金型に鑄ぐるみ温調管を効果的に活用するために、内部機構部品を共存させたモデル金型設計を行い、鑄ぐるみ温調金型の実用化を目指した。内部機構部品等の製品設計から求められる制約を考慮し、温調管を配置できない部分を設定した金型を設計した。この金型について金型冷却シミュレーションを行い温調能力を確認した。冷却時間の目標値、従来温調の1/2を達成した。

④-2-4 テスト金型による実証試験 (ムネカタ株)

実用金型では温調配管以外にも、突き出し機構、スライド機構等の重要な要素があり、各々を共存させる工夫が行われている。この実用金型に铸ぐるみ温調管を効果的に活用するために、内部機構部品を共存させたモデル金型設計を行い、铸ぐるみ温調金型の実用化を目指した。

温調管を配置できない部分を設定した金型を作製し、この金型について成形実験を行った結果、铸ぐるみ配管を用いることで、通常配管に比べ連続成形後の金型温度上昇は少なく、製品表面温度も低く、寸法制度も良いことが確認された。

④-3 成形、検証試験

(株)フジミ、テーピ工業株、三菱化学株、ムネカタ株、山形大学)

「④-1」及び「④-2」から導かれる新たな温調設計・金型設計基準(新設計ルール)によるデザイン・設計要求スペックに基づいて、スケールアップ試作による検証を行った。

④-3-1 平板モデルによる成形、検証試験 (三菱化学株、ムネカタ株)

「つづら折り(蛇腹)」形状の平板金型による成形実験を行った。金型は「④-2-1」で作製した金型部品を組み込む。冷却時間、1/2(実測値)を達成した。

④-3-2 铸ぐるみ温調配管を活用したアルミニウムダイカスト成形

(株)フジミ、テーピ工業株)

螺旋状の温調配管を铸ぐるみだ円柱状コアを組み込んだダイカスト用金型を試作する。この金型に高性能金型温度調節機を接続し、温調条件を変化させた場合の成形性を評価した。従来構造の金型での成形と比較して、大幅なサイクルタイム短縮およびダイカスト铸造欠陥の低減を目指した。あわせて、デジタルファイバースコープ(新規)を用いてヒートチェック等に代表される金型表面、内部および配管内の損傷等の机上観察ならびに内部の詳細な観察を行った。この観察により技術的課題が抽出できた。

④-3-3 大型金型によるテスト成形 (三菱化学株、ムネカタ株)

これまでの研究成果を取り入れ、実用化ベースでの金型の温調設計と加工を行いスケールアップによる射出成形及び検証試験を行った。平成20年度は、自動車用及び大型家電用の大型プラスチック成形品を想定した、大きさ600×400mmかつ表面粗さ0.01μm以下の精密成形品のハイサイクル成形を目指した。ユーザーニーズを考慮した結果、試作する製品形状をエンジンルーム内精密成形品およびヘッドランプカバーとしたため、大きさを500×300mmとして金型製作を進めた。

④-3-4 実用金型による実証試験 (株)フジミ、テーピ工業株)

これまでの研究成果を取り入れ、アルミニウムダイカスト用金型に適用するための湯流れ凝固解析(铸造CAE)による铸造方案の最適化と実証試験を行った。実用化ベースでの金型の温調設計と加工を行い実製品に近いダイカスト成形及び検証試験を行った。従来技術と比較して大幅なハイサイクル化かつ高精度かつ铸造欠陥を低減できるアルミニウム

ダイカスト用金型が製作可能となる知見が得られた。

⑤ 3D 自由曲面デザイン、構造設計(プラスチック用金型) (三菱化学㈱、山形大学)

鑄ぐるみ配管による飛躍的な熱交換能力を獲得した金型だけが実現可能な、3次元自由曲面を全面に押し出す新たなデザイン及び製品構造設計を追求した。自由な温調配管の効果により高品位かつ生産性の高いシステムがもたらす設計自由度、すなわち新設計ルールによるデザイン・設計要求スペックを決定し、スケールアップ試作による検証を行った。

⑤-1 大型成形品の強度予測(プラスチック用金型) (三菱化学㈱、山形大学)

大型成形品の樹脂流動シミュレーションを行い、従来構造金型での成形品強度と鑄ぐるみ温調金型での成形品強度の差異を比較した。プラスチック CAE の成形品物性予測を製品強度計算に反映させたうえで、目標値である表面形状誤差、0.5mm 以下(予測値)を目指した。

⑤-2 実用金型による実証試験 (三菱化学㈱、山形大学)

プラスチック成形品、特に大型成形品では、従来は金型温調の限界から製品周辺部と製品中央部の成型品位の差が大きく、製品設計を大きく制約している。この大型成形品について実際に鑄ぐるみ温調金型を作製し成形品を試作することで、従来構造金型との成形品位等の差異を比較した。

モデル形状は、3次元自由曲面で構成された 500×300mm の大きさの成形品で、目標値である表面形状誤差 0.5mm 以下を目指した。ユーザーニーズを考慮した結果、試作する製品形状をエンジンルーム内精密成形品およびヘッドランプカバーとしたため、大きさを 500×300mm として金型製作を進めた。

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

財団法人山形県産業技術振興機構 プロジェクト推進課

〒990-2473 山形県山形市松栄二丁目 2 番 1 号 山形県高度技術研究開発センター内

電話番号: 023-647-3163

FAX 番号: 023-647-3139

E-mail: pro-yamagata@ypoint.jp

第2章 本論－(1) プラスチック金型用材料設計・評価

2-1 特殊熱処理による表面粗さ変化の関係把握

(山形県工業技術センター、(有)渡辺鋳造所)

[研究目的]

120×40mm の小型サイズのブロックについて手磨きにより表面粗さシングルナノの鏡面が得られたことを報告したが、今年度は中型の実用金型を対象にして、200×200mm の試験片において機械的研磨法により表面粗さ $0.01\mu\text{m}$ 以下を目指す。

[実験方法]

プラスチック成形金型として用いるためには、ある程度広い面積を持つ平板の鏡面加工性と材料硬さのばらつきが少ないことが求められる。本研究では、210×210×60mm のサイズで平板のブロックを鋳造し、正面フライスで黒皮を除去して 200×200×50mm のブロックに仕上げた。平板の四隅と中央部の 5ヶ所でブリネル硬さを測定した後、超精密成形平面研削盤（ナガセインテグレックス SGU-52HP2）を用いて鏡面研削加工を試みた。仕上げ面の平面度はオプチカルフラットを用いて観察を行い、表面粗さは表面粗さ計（ミツトヨ SV-C4000）で評価を行った。

[実験結果]

210×210×60mm の平板の鋳物ブロックは、押し湯と冷し金の位置などの鋳造法案を工夫しながら鋳造を行った。

鋳物ブロックの裏面、すなわち注湯面側の四隅と中央部の 5ヶ所でブリネル硬さを測定した。12 枚の鋳物ブロック中 10 枚が最大偏差が 5% 以下であるから、当初の目標値である最大偏差 5% 以内を達成したと言える。溶解炉の容量の制限により注湯作業は数日間に分けて行われたが、熱処理は一括して行ったために鋳造組織が比較的均一に仕上がったものと考えられる。

鏡面加工性の平面度の評価は、直径 130mm のオプチカルフラットをすり合わせて置き、干渉縞の本数と分布を観察して行った（図 2-1-1）。研削方向(GD)では長さ 130mm で赤色干渉縞が 1~2 本であるから、進直度が $0.6\mu\text{m}$ 前後であると推定される。研削方向に直角な方向(TD)ではほぼ 10mm ピッチで平行な縞模様が観察される。

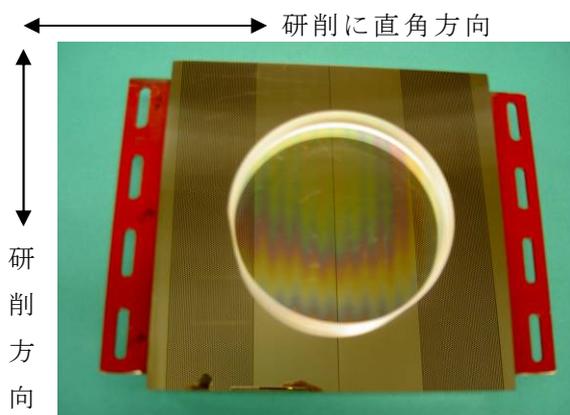


図 2-1-1 オプチカルフラットによる観察



図 2-1-2 表面粗さの測定

次に、表面粗さ計(ミットヨ SV-C4000)を用いて、仕上げ面の表面粗さを測定した(図 2-1-2)。鏡面の定義は、最大高さ $Rz \leq 0.05 \mu\text{m}$ 、算術平均粗さ換算で $Ra \leq 0.01 \mu\text{m}$ であるから、鋳物ブロックの表面粗さ $Rz=0.05 \mu\text{m}$ 、 $Ra=0.01 \mu\text{m}$ を目標値とした。先端半径 $2 \mu\text{m}$ 、測定圧 75mN のダイヤモンド触針を用いて、カットオフ 0.08mm 、測定倍率 $\times 2000$ の測定条件で、鋳物ブロック中央部および両端に近い位置で、研削方向(GD)および研削方向に直角な方向(TD)で粗さ測定を行った。中央部における GD および TD 方向の表面粗さを、それぞれ図 2-1-3 および図 2-1-4 に示す。

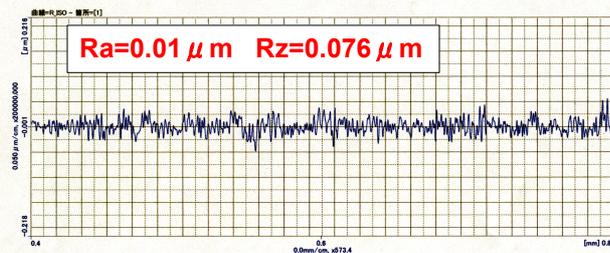


図 2-1-3 研削に直角方向の表面粗さ

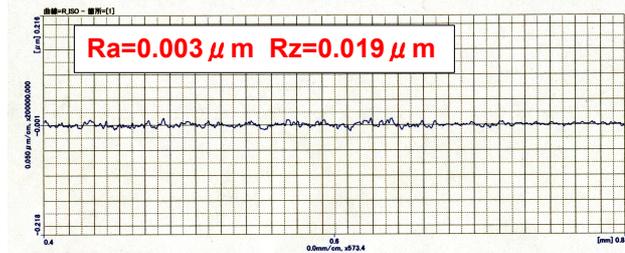


図 2-1-4 研削方向の表面粗さ

以上の測定結果から、本来の粗さ測定方向である TD 方向で算術平均粗さ $Ra=0.01 \mu\text{m}$ に達しているため、ほぼシングルナノの粗さが得られ当初の目標値を達成したと言える。

手磨きによらず機械的研磨法によりシングルナノの鏡面加工が可能であると確認できたことは、市販のプリハードン鋼に遜色のない機械加工性が得られることを示しており、サンルーフやヘッドライトカバーなど鏡面性が要求され、かつ大形で三次元曲面を有するプラスチック成形品の金型材料として適合していると考えられる。

2-2 耐摩耗性評価

(秋田大学、山形県工業技術センター)

[研究目的]

鏡面部品あるいは透明部品の成形に対応するための金型材質の高品位化を目指し、耐摩耗性、耐久性(衝撃疲労、熱衝撃)及び耐食性を評価する。このなかで、実用面で問題となるガラス繊維等の無機複合材に対する耐摩耗性について評価する。

まず、試験片作製用ブロックを鋳造する。この試料に深冷処理、さらに熱処理炉を用いて焼戻し処理を行う。この試験片について実用金型の使用温度領域での試験が可能な高温磨耗試験機を用いた摩耗試験を行い、その摩耗面を光学顕微鏡、SEM を用いて観察するとともに、重量法等により摩耗量を評価する。

次に、代表的な市販金型材料である NAK80 についても同様の摩耗試験を行い、本開発材料と比較する。実用材料として市場での評価を確実なものとするために、市販品と同等以上の耐摩耗性を目指す。

[実験方法]

1. 試料

サブゼロ処理後の焼戻し処理は市販金型材と同程度（400HV～500）に硬さを調整する目的で行った。熱処理後の硬さは476HVであった。比較材として用いた市販金型材（NAK80）の硬さは402HVであった。

2. 摩耗試験方法

試験片は直径55mmの丸棒を厚さ5mmに切断しディスク状にしたものを平面研削後研磨し使用した。相手材ボールには高硬度で耐摩耗性に優れ、温度上昇による硬度変化が少ないと考えられるアルミナボール(直径6mm, 約1400HV)を使用した。

摩耗試験は高温での酸化防止のためアルゴンガス雰囲気とし、すべり速度0.5m/s, 荷重20Nで温度を室温から700℃まで100℃毎に8種類の条件で行った。試験は各試料, 条件毎に3回ずつ行い, 平均値を測定結果とした。

3. 表面粗さ測定

試験後の試料の摩耗痕形状を, 表面粗さ計(ミットヨ SJ-400)を使用して計測した。測定距離は摩耗痕を含む2mmとし, 計測データはMicrosoft Excelにより摩耗痕形状の2次元断面に変換した。得られた2次元断面から摩耗痕の深さ及び面積の算出を行った。

[実験結果]

1. 摩耗に及ぼす温度の影響

(1) 摩耗量と試験温度の関係

図2-2-1は開発材およびNAK80の摩耗量と試験温度の関係である。本試験条件では, いずれの材料においても摩耗量は最大でも30mg程度で, 非常に小さな値である。この値に対応させて表したのが図2-2-1である。開発材は400℃までは摩耗量が少なく, 500℃以上になるとバラツキが大きくなる。とくに600℃以上の摩耗量は摩耗の影響よりも酸化の影響が大きいと考えられる。NAK80は, 室温で摩耗量が多い。100℃から500℃間の変化は少ないが, 600度以上になると質量が増加する。この場合も摩耗減少量よりも酸化増量が多いためと考えられる。

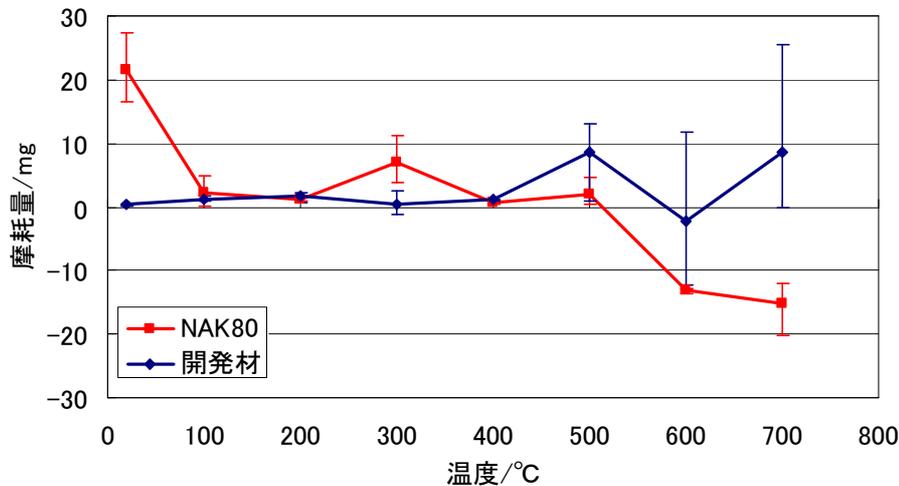


図 2-2-1 摩耗量と試験温度の関係

2. 摩耗に及ぼす荷重と速度の影響

(1) 開発材の摩耗痕

開発材について種々の条件で摩耗試験を行った。摩耗量が多かった荷重 10N ですべり速度 0.25m/s および 0.5m/s の場合は摩耗痕幅が大きくなっているが、それ以外の条件では摩耗痕幅に大きな違いがないことが分かった。

[まとめ]

樹脂に含まれるガラス繊維などの無機強化材料に相当する材料として、高硬度で耐摩耗性、耐熱性に優れるセラミックス材料であるアルミナを相手材に開発材および市販材 (NAK80) の高温摩耗試験を室温から 700℃までの温度で行い以下のことを明らかにした。

- (1) 開発材の耐摩耗性を質量減少量、摩耗痕幅、深さ、および断面積で評価した場合、いずれの値も試験温度の上昇に伴い増加するが、600℃以上では、増加挙動が変化する。
- (2) NAK80 は、室温で摩耗量が極端に多いが、100℃から 500℃でほぼ同じような摩耗量となるが、600℃以上で摩耗量がマイナスになる。
- (3) 600℃以上の摩耗の挙動は、試料全体が酸化することによる質量の増加や表面状態の変化が影響している。
- (4) 耐高温摩耗性の観点から、開発材は射出成形用金型材としては 500℃以下の温度域では、市販金型材より優れた耐高温摩耗性を有するため、代替材料になり得るとみなすことができる。

第3章 ダイカスト金型用材料設計・評価

3-1 耐ヒートチェック性評価

(秋田大学、山形県工業技術センター)

[研究目的]

ダイカスト用金型に求められる性能である耐熱性、耐ヒートチェック性、耐焼付き性及び靱性について評価する。このなかで、種々の材料信頼性評価項目の中で金型寿命に大きな影響を与える耐ヒートチェック性について、試料表面の残留応力および熱膨張率で評価する。

まず各組成の試料を作製する。この試料から残留応力測定用試験片および熱膨張率測定用試験片を作製する。この試験片について、熱機械分析装置（新規）を用いて熱膨張率を測定し、残留応力測定機を用いて試料表面の残留応力を測定する。目標は正の残留応力および SKD61 と同等の熱膨張率とする。

[実験方法]

4. 試料

サブゼロ処理後の焼戻し処理は市販金型材と同程度（400HV～500）に硬さを調整する目的で行った。熱処理後の硬さは 479HV であった。

5. 熱膨張試験方法

熱膨張試験は開発材の熱膨張係数を求めるための試験と、加熱・冷却を繰返して試料の膨張・収縮挙動を調査する試験(繰返し熱膨張試験)を行った。熱膨張試験における一般的な加熱・冷却速度は $\pm 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以下となっている。本研究では、熱膨張係数を決定する際は、加熱・冷却速度を $\pm 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とし、繰返し熱膨張試験では加熱・冷却速度を $\pm 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした。

熱膨張係数や膨張・収縮を調査するための試験の温度範囲は、室温(25°C)～ 1000°C に設定し、1サイクルで試験をした。また、繰返しによって起こる膨張・収縮の変化を調査する繰返し熱膨張試験は、開発材がプラスチック射出成型用金型およびダイカスト用金型に用いられることを想定し、温度範囲は 200°C ～ 400°C 、 600°C ～ 800°C に設定し、それぞれ8サイクル試験をした。なお、繰返し熱膨張試験は熱処理をした試料のみで行った。

6. 引張試験方法

引張試験は静的引張試験機（サーボパルサ EHF-EG100KN TF-20L 形 島津試験機）を用いて行った。応力緩和試験は、引張試験時にひずみが 7%に達した時点の荷重で 1000s 保持し、時間の経過とともに生じる応力変化を測定した。

[実験結果]

7. 熱膨張試験

鑄放し試料の熱膨張曲線では、加熱の過程で 380°C ～ 450°C および 650°C ～ 700°C 付近で 2 度の収縮が観察された。このうち後者は A_{c1} 変態点と考えられる。また、冷却の過程では、 170°C が M_s 点であることがわかる。一方、熱処理をした試料の熱膨張曲線では、 600°C ～ 700°C の間でのみ A_{c1} 変態にともなう収縮が観察され、変態温度は 700°C であることがわかる。また、 M_s 点は 180°C と見積もられる。一方、室温以下～ 115°C までの温度範囲で

熱膨張試験を行った結果、 M_f 点は -56°C であった。金型材の使用温度範囲における熱処理試料の線膨張係数は $12.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \sim 13.9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の範囲である。市販材の熱膨張率（カタログ値）は STAVAX が $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (200°C)、 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (400°C)、CENA1 が $11.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (200°C)、 $12.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (400°C) であるので、開発材もこれらとほぼ同等であるとみなすことができる。

8. 硬さ測定結果

焼戻しされた場合でも A_{c1} 変態点 700°C 以上に加熱されるとオーステナイトになり再度マルテンサイト化するために硬さは 600HV 以上になる。したがって、熱膨張試験結果からもわかるように 700°C 以下であれば、組織は焼戻しマルテンサイトの状態を維持する。

9. 引張試験結果

図 3-1-1 は 200°C 、 400°C 、 600°C における応力-ひずみ曲線である。この図よりもとめたヤング率および 0.2% 耐力を表 3-1-1 に示す。ちなみに、市販材のカタログ値の 0.2% 耐力は、NAK80 が 1016MPa 、STAVAX が 1280MPa 、CENA1 は引張強さで 1225MPa である。開発材は、 200°C でも 1235MPa と高い値を示し、ヤング率も STAVAX の 180GPa (400°C) とほぼ同等である。なお、引張試験はひずみが 7% に達したところで、応力緩和試験に移行したため、引張試験で定義される最大引張強さを求めることができないが、ひずみ 7% の範囲での各温度における最大引張強さは、 1424MPa (200°C)、 1263MPa (300°C)、 911MPa (400°C) である。

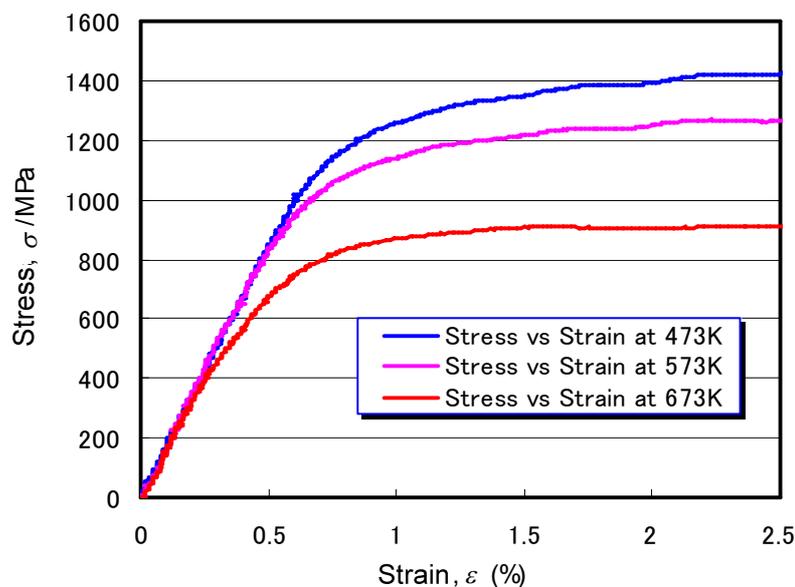


図 3-1-1 応力-ひずみ曲線

表 3-1-1 各温度におけるヤング率および 0.2%耐力

Temp. [K]	E [GPa]	$\sigma_{0.2}$ [MPa]	σ_B [MPa]
473	168	1235	1424
573	173	1089	1263
673	168	781	911

※ σ_B は 2.5%ひずみにおける値

[まとめ]

熱膨張試験により、開発材の変態温度は、 A_{c1} が 700℃、 M_s が 170℃～180℃、 M_f が 56℃であることがわかった。また、開発材の線膨張係数 ($12.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \sim 13.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) は 3種の市販金型材と同等であることがわかった。

金型の使用温度を想定して 3種類の温度で開発材の引張強さを測定した結果、200℃で引張強さ：1424MPa、0.2%耐力：1235MPa、300℃で引張強さ：1263MPa、0.2%耐力：1089MPa、400℃で引張強さ：911MPa、0.2%耐力：781MPaとなり、市販材に匹敵するかそれ以上の強さを有することがわかった。また、各温度で得られたデータは金型使用時の変形をシミュレーションするために有効なデータとなる。

第4章 鋳造（プラスチック金型、ダイカスト金型）

4-1 鋳造方案（東北大学、岩手大学、（有）渡辺鋳造所、山形県工業技術センター）

4-1-1 鋳ぐるみ配管を考慮した鋳造シミュレーション

（岩手大学、（有）渡辺鋳造所、山形県工業技術センター）

[研究目的]

鋳造CAE（湯流れ解析等）による最適化と実証試験を行う。通常の砂型及び中子による鋳造シミュレーションと、鋳型内部に配置した温調配管の熱容量及び遮蔽物としての影響を考慮したモデルによるシミュレーションについて、鋳造CAEを用いて行うことで鋳ぐるみ配管の影響を明らかにする。

[実験方法]

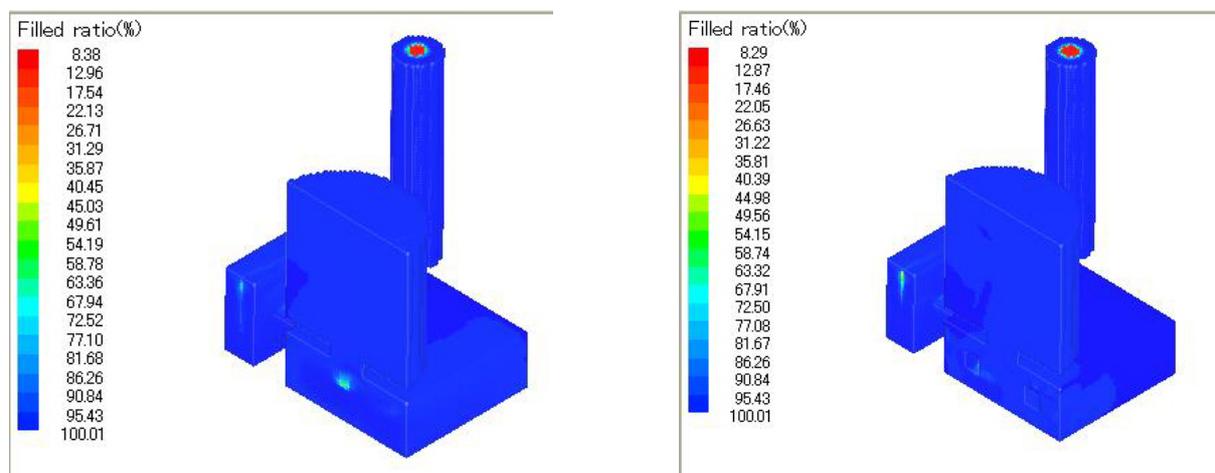
金型の基本的形状である平板及び凸形の方案に、通常の砂型及び中子によるものと、実際の配管及び冷やし金によるモデルを用いた各2種類、計4種類のシミュレーションを行う。シミュレーションを行った条件を表4-1-1-1に示す。

表 4-1-1-1 シミュレーション条件

	密度 g/cm ³	熱伝導率 cal/cm・s ^{°C}	比熱 cal/g・°C	初期温度 °C	潜熱 cal/g	液相線温度 °C	固相線温度 °C
鋳型	1.5	0.03	0.27	20	—	—	—
鋳物	7.5	0.05	0.11	1530	62	1480	1420
パイプ	7.6	0.08	0.1434	20	—	—	—
冷し金	7.0	0.1	0.13	20	—	—	—

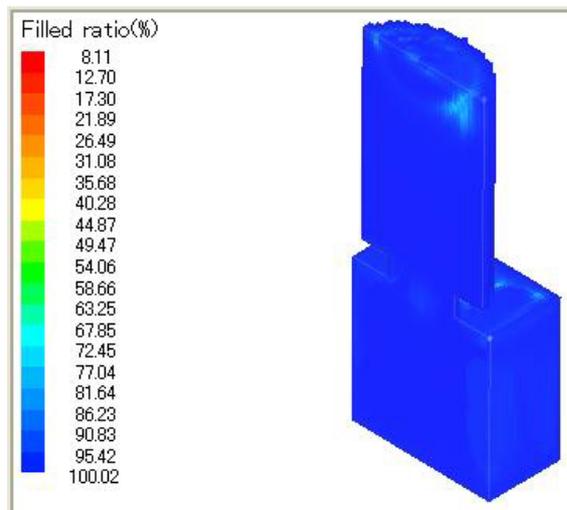
[実験結果]

ADStefanを用いて行った鋳造シミュレーションの結果を図4-1-1-1に示す。

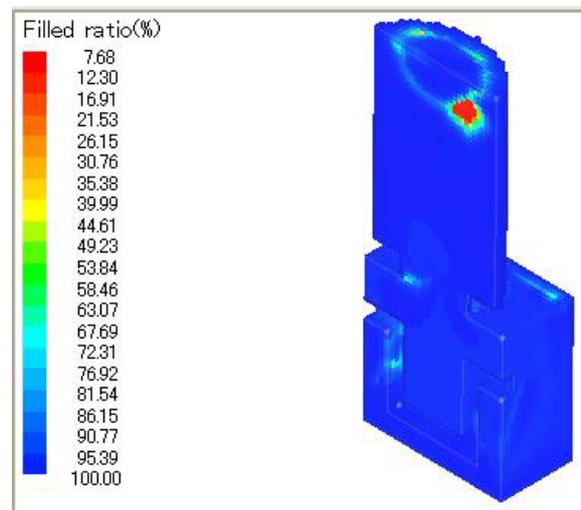


(a) 平板（配管なし）

(b) 平板（配管あり）



(c) 凸型（配管なし）



(d)凸型（配管あり）

図 4-1-1-1 鋳造シミュレーションの結果

押湯を付けることにより平板の配管なし、平板の配管ありでも引けのない鋳造が可能であることが予測できる。また、平板の配管ありの方が引けの発生する可能性が少ない。これは配管を配置することにより凝固速度が大きくなり凝固遅れの場所がなくなり、引け巣が発生しにくくなると考えられる。

また、凸型の配管なし、配管ありでも押湯の付けることにより引けのない鋳造が可能であることが予測できる。

[まとめ]

基本形状を用いたシミュレーションを行うことで、鋳造欠陥の発生を回避しやすい鋳造方案の基本形を抽出した。

4-2 配管加工（櫛ナガセ、山形県工業技術センター、山形大学）

[研究概要]

温調配管として使用可能な材料について、造形に必要な塑性加工に関する最適化を行う。

4-2-1 塑性加工シミュレーション（山形大学）

[研究目的]

配管材料として使用する低炭素鋼の基本物性値による曲げ加工シミュレーションを行う。変形による肉厚変化等を予測し、鋳ぐるみ可能な加工限界を検討する。

[実験方法]

平成18年度は、鋳ぐるみ配管に使用する配管材の中で標準的な内径8mm、肉厚2mmの低炭素鋼管について、肉厚変化が0.5mm以下に抑えられる加工条件を明らかにする。

パイプ材に大変形曲げ加工を与えると、板厚は引張り側で減少、圧縮側で増加するとともに、断面は円形から徐々に扁平な形状に変化する。ここでは、弾塑性純曲げ下における

パイプ材の変形挙動を数値解析により調べ、板厚変化と断面形状変化の観点から曲げ加工限界の評価方法に関する基礎的研究を行う。

Fig. 4-2-1-1に今回使用するパイプの形状(内径 8 mm、外形 12 mm)と有限要素モデル(3次元、1/2対象部分)を示す。要素には20節点アイソパラメトリック要素を用い、管長方向1分割、板厚方向4分割、円周方向40分割とする。2次要素を使用するため管長方向は1分割で純曲げ変形を表現可能である。弾塑性モデルとしては、等方性のミーゼス材を仮定して、 J_2 流れ則を採用する。ひずみ硬化は n 乗硬化則に従うものとし、ひずみ硬化関数 $g(\epsilon^p)$ を次式で与える。

$$g = \sigma_0 \left(1 + \frac{\epsilon^p}{\epsilon_0} \right)^n \quad (1)$$

ここに、 σ_0 は初期降伏応力、 ϵ^p は相当塑性ひずみを表し、 ϵ_0, n は材料定数である。本解析では、材料はSS400級鋼材を想定し、 $\sigma_0 = 200$ [MPa]、 $\epsilon_0 = 0.002$ 、 $n = 0.2$ を用いる。弾性特性として、ヤング率 $E = 200$ [GPa]、ポアソン比 $\nu = 0.3$ を仮定する。ひずみ硬化指数(n 値)の影響を見るために、上記の値に加えて、 $n = 0.1$ と $n = 0.3$ のケースも解析した。

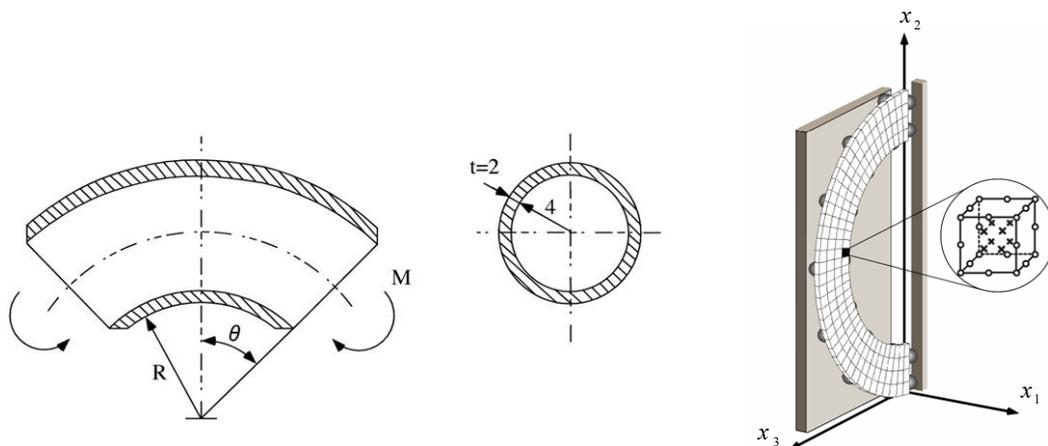


Fig. 4-2-1-1. Geometry of a tube and finite element model.

Fig. 4-2-1-2に曲げモーメント(円形全断面に対する値)と換算曲げ角 $\bar{\theta}$ の関係と、曲げ角 $\bar{\theta}$ が $25^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ のときの断面変形図に相当塑性ひずみのコンターを重ねたものを併せて示す。換算曲げ角 $\bar{\theta}$ は、 $\bar{\theta} = \theta H / L$ で定義し、ここに、 H はパイプの外径、 L はパイプの長さ方向寸法である。つまり、 $\bar{\theta}$ は外径と長さの比が1のときの曲げ角に相当する。

管断面は曲げの進行とともに上下方向に潰れ、管の内側で接触が起こったと判定された点で解析を終了している。

Fig. 4-2-1-3は板厚と曲げ角の関係を表すグラフであり、パイプの引張側と圧縮側(中心線上)における板厚の変化を示す。

引張り側、圧縮側共に板厚は単調変化ではなく、頭打ちが起こっている。引張り側の板厚減少は曲げ角 $\bar{\theta}$ が 50° 付近でほぼ止まり、これ以降は **Fig. 4-2-1-2**に見られるように断面形状の変化が著しい。

本解析では、曲げ角の大きさにかかわらず、安定した純曲げ変形が継続することを前提

に解析し、断面形状の変化を観察することを主眼においた。実際には、途中で不安定現象（座屈）が発生し、曲げ変形が阻害されると思われ、この影響を取り入れた解析は今後の課題である。

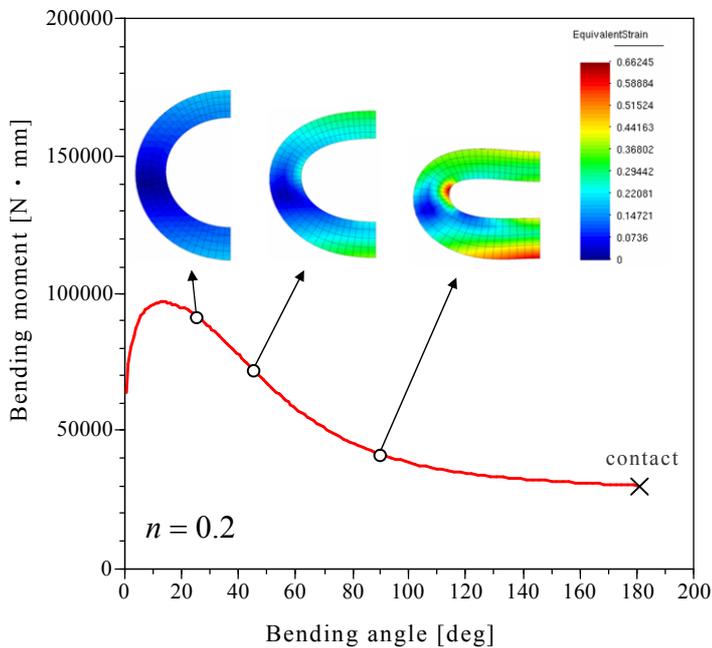


Fig. 4-2-1-2. Curves of bending moment versus bending angle ($n=0.2$).

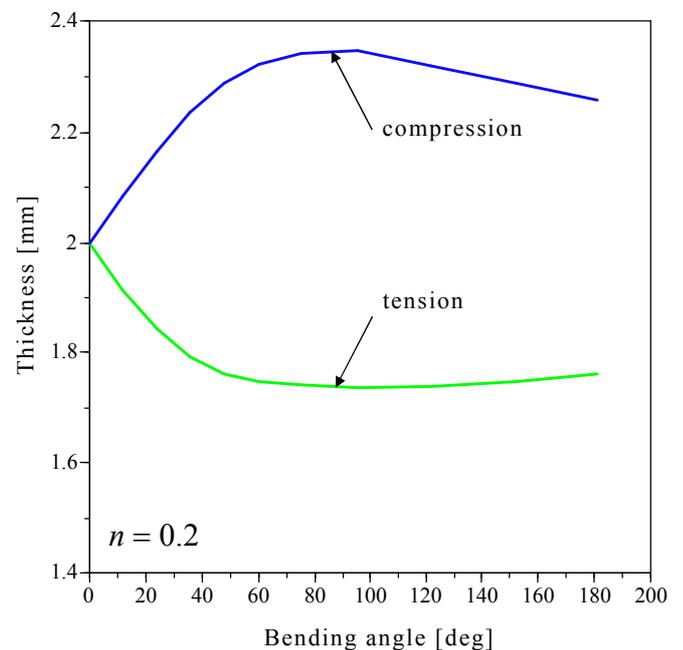


Fig. 4-2-1-3. Curves of thickness versus bending angle ($n=0.2$).

4-2-2 曲げ加工および溶接（株ナガセ、山形県工業技術センター）

[研究目的]

温調配管モデルの図面指示に対して、溶接変形量を考慮した部材取り・部材分割を行うことで、寸法誤差 0.1mm 以下の精度による温調配管組み立てを安定して行える工法を確立する。

[実験方法]

まず、「4-2-1」で導かれた加工限界の曲げ半径を含む「つづら折り（蛇腹）」形状の平板金型用鋳ぐるみ配管を試作する。配管全体組図、分割部品の加工図面及び溶接段取りに用いる組図は、3次元CADを用いて行う。分割部品の加工は、パイプベンダを用いて行う。この分割部品及び鋳型内に固定するための支柱等を、TIG溶接機及びMIG溶接機を用いて高精度に組み立てる。

次に、組み立てられた鋳ぐるみ配管の組み立て精度を3次元測定機等を用いて測定し、寸法形状誤差 1.0mm 以下であることを確認する。

[実験結果]

図面を基にパイプベンダ等を用いて配管の加工を行った。配管材質は低炭素鋼、寸法は外径 10mm、内径 6mm であり、バーナーで熱をかけながらゆっくりと曲げていき、円管断面のつぶれが発生しないように細心の注意を払った。配管の中心軸における最小曲率半径は R10mm であり、同じく最密配管ピッチは P20mm である。

実際に曲げ加工された配管ピッチの測定位置を図 4-2-2-1 に、測定結果を表 4-2-2-1 に示す。4 個製作した一体化した配管の寸法は、外形の目標値の 170mm、各ピッチの目標値 30mm にきわめて近い値に仕上がっていることが確認された。また、サポートも上下することなくほぼ同一平面上に溶接されており、外観上不都合な点は認められなかった。

表 4-2-2-1 配管ピッチの測定結果 (mm)

	No.1	No.2	No.3	No.4
①	168.40	169.4	170.15	169.70
②	170.00	170.00	169.40	170.00
③	170.20	169.80	169.70	170.30
④	170.50	170.00	171.00	170.50
⑤	29.40	29.60	29.30	30.00
⑥	29.40	29.70	29.70	30.00
⑦	29.40	29.70	29.20	30.00
⑧	29.40	29.00	29.00	29.00
⑨	29.60	29.00	28.80	28.80
⑩	28.70	28.50	29.00	29.00
⑪	29.30	28.70	28.90	29.00
⑫	29.50	29.00	28.80	29.30
⑬	29.50	29.00	28.80	29.50
⑭	29.40	29.00	29.00	28.80
⑮	29.30	29.30	29.00	29.10
⑯	29.00	29.20	29.00	29.10

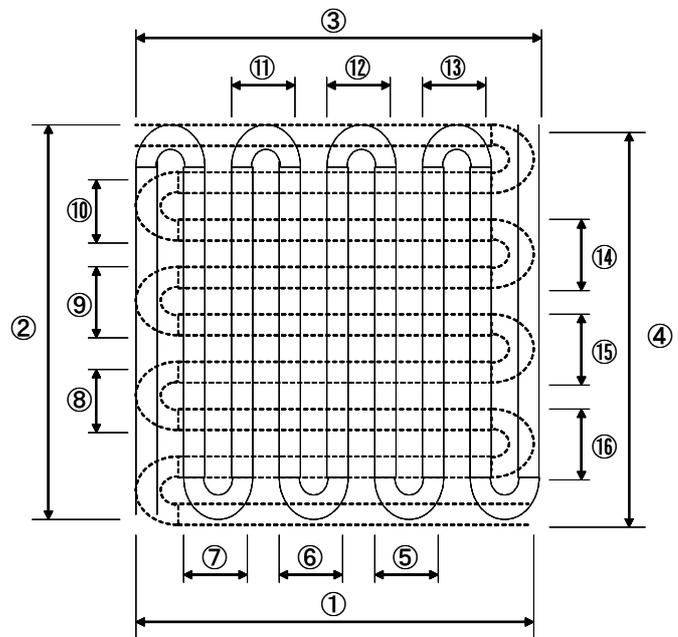


図 4-2-2-1 配管ピッチの測定位置

設計値を 30mm とする配管ピッチの加工精度について考察する。No.1~No.4 のサンプル間での配管ピッチ測定値には偏りが見られず、また、⑤~⑯の測定位置間での偏りもないことから、これらの 48 個の測定値を一つのデータ群と見なし、EXCEL 計算により平均値 $m = 29.202$ と標準偏差 $\sigma = 0.3564$ を求めた。平均値が設計値より小さめに偏っていることは溶接時の収縮などの影響が考えられるが、ばらつきを示す標準偏差よりもコントロールしやすいと考えられる。

一般に、曲げ加工時のスプリングバックや溶接時の熱ひずみ発生などによる寸法変化が心配されたが、正確な曲げ加工と溶接時の適正な固定ジグにより、寸法形状誤差をほぼ 1.0mm 以下に抑えることができた。4 個の配管ともほぼ同一精度で加工されていることが確認され、温調配管組み立てを安定して行う工法が確立したと言える。

4-2-4 高精度型枠の作製

(株)ナガセ、山形県工業技術センター)

[研究目的]

大型の温調配管モデルの図面指示に対して、寸法形状誤差 0.5mm 以下の精度による温調配管組立を安定して行える工法を確立する。

[実験方法]

まず、型枠の原型となる金枠を作製する。この型枠を配管材支持用型枠とする。配管材の加工は、パイプベンダを用いて行う。この分割部品及び鋳型内に固定するための支柱等を作製した型枠にセットした後、TIG溶接機、MIG溶接機を用いて高精度に組み立てる。

[実験結果]

金型キャビティ側およびコア側の形状、内部の配管形状は、射出成形シミュレーションにより最適化を行った。これらの図面は 3 次元 CAD により作製し、鋳造方案作製を経て金型加工に至るまで共有可能な手法を確立した。

この図面をもとに配管加工用の型枠を作製した。型枠の加工精度は、実測で図面指示との誤差 0.5mm 以内であることを確認した。配管材を冷間および熱間加工し各配管部材とした。これらの配管部材を仮組みした様子を図 4-2-4-1 に示す。



キャビティ側配管



コア側配管

図 4-2-4-1 仮組みした温調配管

[まとめ]

組み立てられた鋳ぐるみ配管の組み立て精度について、寸法形状誤差 0.5mm 以下であることを確認した。

第5章 金型温調設計・金型加工(プラスチック金型、ダイカスト金型)

5-1 金型温調設計 (三菱化学(株)、ムネカタ(株)、東北大学、(株)フジミ、テープ工業(株))

[研究目的]

従来の機械加工による金型温調及び鑄ぐるみ配管による金型温調について射出成形CAEを用いて、箱形、筒型及び平板等の基本形状のモデルによるシミュレーションを行う。この中で、最も鑄ぐるみ温調管が効果的な成形品形状および温調管形状を検討する。

冷却時間を半減(1/2)できる成形品形状と温調配管形状の組合せの基本形について射出成型CAEを用いて計算による予測値として明らかにする。

[検証方法]

冷却時間を半減(1/2)できる成形品形状と温調配管形状の組合せの基本形について、試作の際に使用する樹脂の熔融物性を測定し射出成形CAEを用いて計算することにより予測値として明らかにする。シミュレーションに供するモデルは、箱形、筒型及び平板の3種類に対し、従来工法の温調配管と鑄ぐるみ配管の2種類、計6種類とする。

箱形、筒型及び平板等の基本形状のモデルにより最も鑄ぐるみ温調管が効果的な成形品形状および温調管形状を検討する。

[解析条件]

・材料 Mitsubishi Chemical/Iupilon MB2211R PC+ABS

樹脂温度 250℃

充填時間 1秒

金型温度 75℃

保圧時間 10秒

冷媒温度 65℃

保圧圧力 最大充填圧力 80%

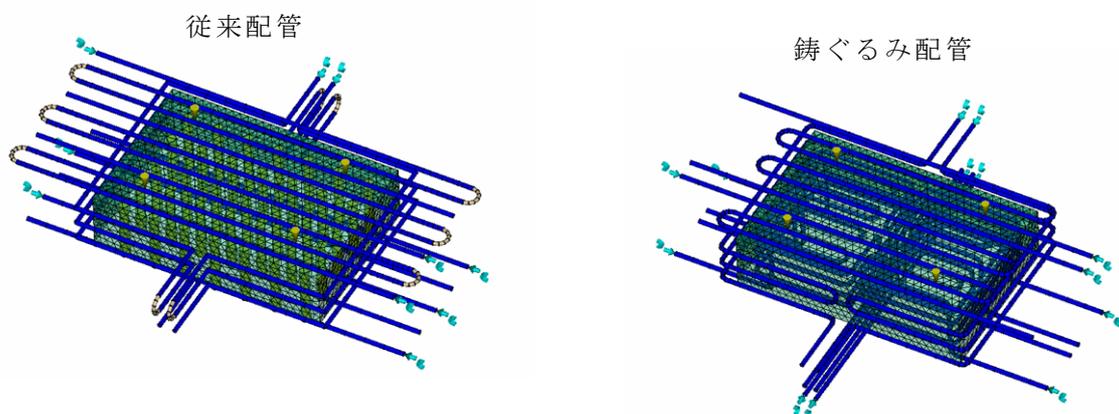
冷却時間 自動設定

・解析ソルバー

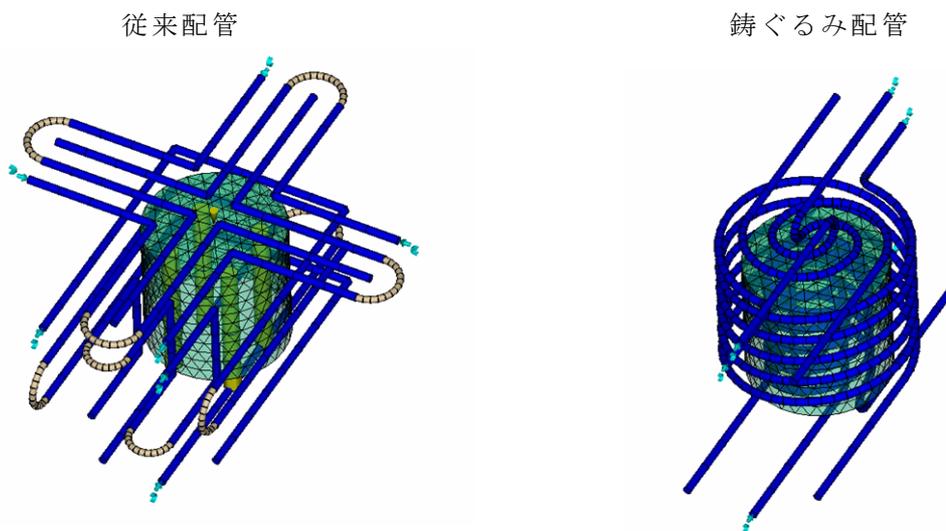
株式会社プラメディア社/PLANETS

・解析モデル

箱形 外形：600×400×150mm



円筒形 外形：φ200×200mm



[評価方法]

冷却時間を自動設定したときに成形品が100%突出し可能温度になるまでのサイクルタイムから射出保圧時間を差し引いた冷却時間で評価した。

[解析結果]

- ・冷却時間の短縮

いずれの成形品形状でも従来の温調配管より铸ぐるみ温調配管のほうが冷却時間は短くなり、開発の目標である冷却時間を1/2にするのに適した成形品形状は箱形と円筒型が適していることが明らかとなった（表5-1-1、図5-1-1）。

表 5-1-1 解析結果

	温調配管 加工方法	サイクルタイム	射出保圧時間	冷却時間	短縮率
		sec	sec	sec	%
平板	ドリル加工穴	28.49	11.09	17.4	-
	铸ぐるみ配管	23.74	11.09	12.65	27
箱形	ドリル加工穴	74.21	11.06	63.15	-
	铸ぐるみ配管	38.46	11.06	27.4	56
円筒	ドリル加工穴	77.98	11.09	66.89	-
	铸ぐるみ配管	44.98	11.08	33.9	49

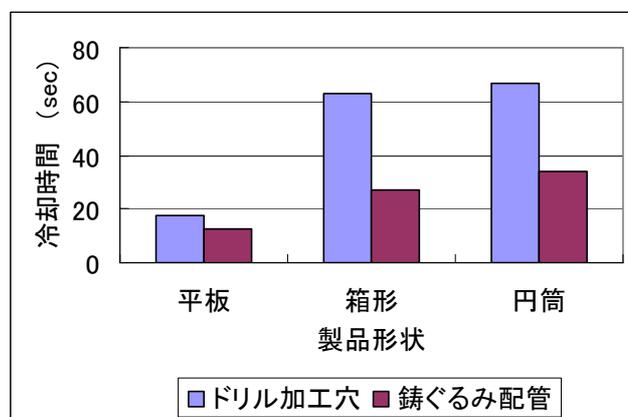
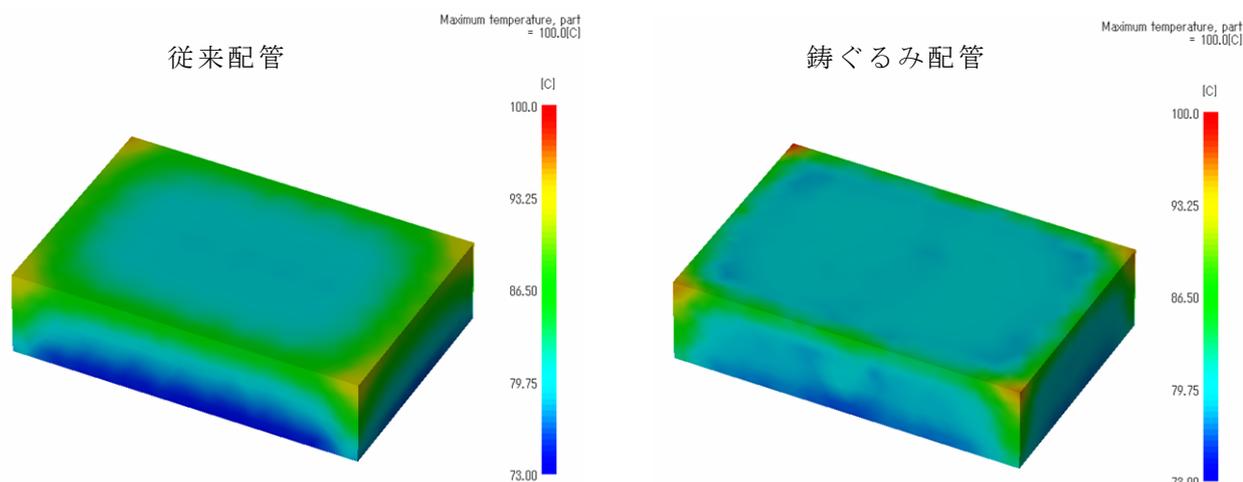


図 5-1-1 冷却時間の比較

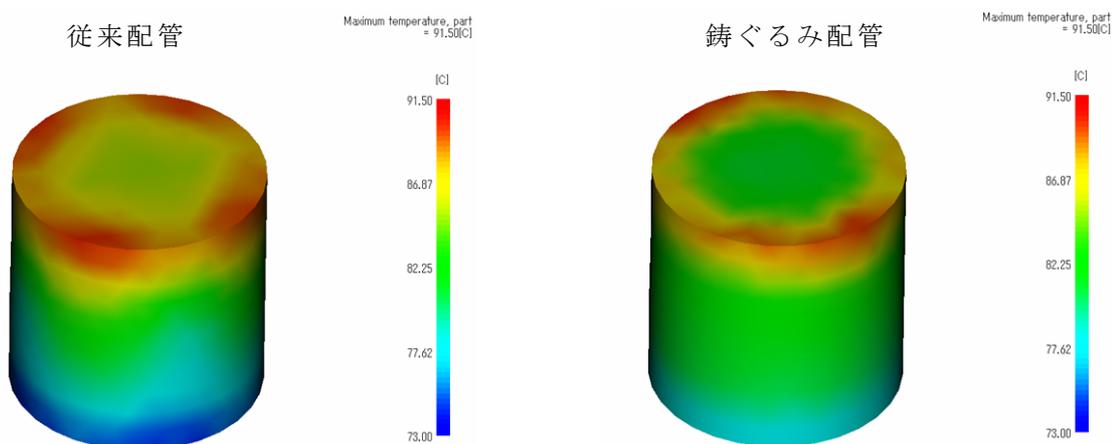
・ 成形品温度分布

平板形状以外の箱形および円筒形では従来の温調配管より鑄ぐるみ温調配管の方が冷却完了時の成形品全体の温度差は小さくなった。

箱形



円筒形



[まとめ]

- ・ 射出成形C A Eの解析結果において鑄ぐるみ配管は従来のドリル加工による配管よりも冷却時間を短くする効果が確認できた。
- ・ この効果は成形品の形状が箱形や円筒形の立体的な形状になるほど有利な結果が得られた。
- ・ 箱形や円筒形では成形品の温度差も小さくする効果が確認できた。

5-2 金型設計、金型加工 (ムネカタ(株)、(株)フジミ、テープ工業(株))

[研究概要]

各解析の結果をもとに加工原点・基準面の検討、配管と内部機構部品の最適配置を行う。

5-2-2 ダイカスト金型への金型温度調節機の適用 (株)フジミ、テープ工業(株)

[研究目的]

既存のダイカスト金型に金型温度調節機を接続し、ダイカストマシンとの連結動作を行う。既存のアルミニウムダイカスト成形品について、金型温調の効果を確認する。

[実験方法]

井水による温調を行っている既存のアルミニウムダイカスト用金型に、金型温度調節機を接続する。熱媒体温度を変化させた場合の金型表面温度を測定し、既存の金型の温調能力と問題点を抽出する。

次に、螺旋状の温調配管を铸ぐるんだ円柱状金型モデルを試作する。このモデルに金型温度調節機を接続し既存金型と比較することで、大幅なサイクルタイム短縮につながる知見等に代表される温調能力の差異を定量化し、铸ぐるみ温調配管の優位性を検証する。

[実験結果]

井水による温調を行っている既存のアルミニウムダイカスト用金型に、金型温度調節機を接続した。室温から金型温度を上げる昇温側、および成形温度から金型温度を下げる降温側の双方を測定した。

螺旋状の温調配管を铸ぐるんだ円柱状金型モデルを試作した。このモデルに金型温度調節機（新規）を接続し既存金型と比較することで、大幅なサイクルタイム短縮につながる知見等に代表される温調能力の差異を定量化し、铸ぐるみ温調配管の優位性を検証した。

本課題への直接のニーズである、シリンダライナー铸ぐるみ成形の様子および不具合品を図 5-2-2-1 および図 5-2-2-2 に示す。図 5-2-2-2 の金属光沢部がアルミダイカスト、内部の暗褐色部分が铸ぐるまれたシリンダライナーである。



図 5-2-2-1 ダイカスト铸ぐるみ成形



図 5-2-2-2 铸ぐるみ時の不具合品

図 5-2-2-2 にみられるバリの原因は、シリンダライナーと金型コア部分の隙間にアルミニウム溶湯が入り込むためである。この不具合は物質の熱膨張に起因するものであり、各々の温度差を最小にすることでしか解決できない。よって、従来構造の金型では得られない高い熱交換能力を持つ金型部材が開発できれば、金型温調によるクリアランスの適正化が図られ不具合が改善されると思われる。この铸ぐるみ材を円筒状砂型にセットし铸造した。铸ぐるみ温調配管を内蔵した金型コアを図 5-2-2-3 に示す。この高度な温調配管が铸ぐるまれた金型材を用いれば不具合が改善されると思われる。



図 5-2-2-3 アルミニウムダイキャスト成形用金型部品（コア）

[まとめ]

既存のダイキャスト金型に金型温度調節機を接続し、ダイキャストマシンとの連結動作を行った。既存のアルミニウムダイキャスト成形品について金型温調の効果を確認した。その結果、従来構造の金型では得られない高い熱交換能力を持つ金型部材が開発できれば、金型温調によるクリアランスの適正化が図られ不具合が改善されると思われる。

5-3-4 実用金型による実証試験

(株)フジミ、テープ工業(株)

[研究目的]

アルミニウムダイキャスト用金型に適用するための湯流れ凝固解析（ casting CAE ）による casting 方案の最適化と実証試験を行う。実用化ベースでの金型の温調設計と加工を行い実製品に近いダイキャスト成形及び検証試験を行う。従来技術と比較して大幅なハイサイクル化かつ高精度かつ casting 欠陥を低減できるアルミニウムダイキャスト用金型の開発を目指す。

[はじめに]

ダイキャストは注湯、射出、冷却、型開き、製品取出し、離型剤塗布、型締め、の工程で決まったサイクルを繰り返す。通常の casting 等と比較してハイサイクルであり、生産性は非常に高い。ダイキャスト金型は一種の熱交換器と考えられ、如何に効率よく熱交換を実施するかが生産性及び品質維持のポイントになる。

また、金型温度が製品品質に及ぼす影響は大であり、製品寸法への影響、焼付き等の発生による外観品質の低下、部分的過熱によるヒケ巣の発生等、品質、生産性にとって重要である。しかし、金型温度のコントロールは比較的難しく、重要にもかかわらず、結果の把握のみに終わっているケースが多い。

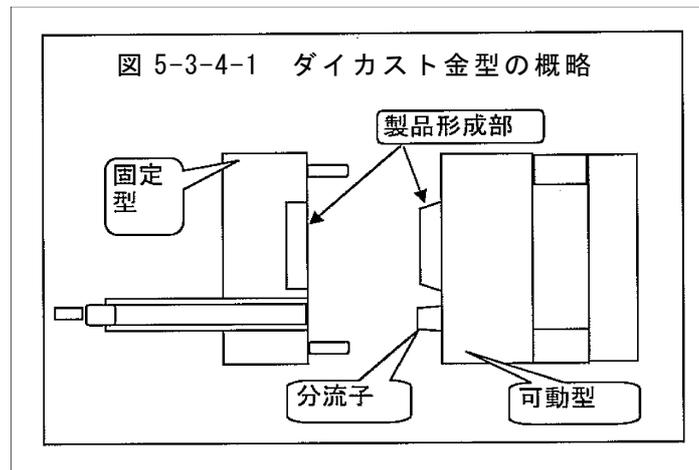
これは金型設計の段階で押出ピンの配置が優先されたり、加工方法の関係で金型冷却孔位置に制約を受けたりするためである。また、冷却方案設計は経験的なものが多く、設計者によっては冷却方案が後回しにされてしまっていることも原因でもある。

今回のプロジェクトにおいては、先ず必要な冷却を中心に考え、冷却の自由度を大きくし、その後、製品部の形状を加工する方法が提案され、試作品が作成された。この試作品の冷却効果、耐久性、また実際のダイキャスト casting において当初の効果を発揮するのかを、量産型にて試験しその結論を得ることを目的とした。

[試験方法]

(1) 分流子のサンプル選定について

金型の分流子の位置を図 5-3-4-1 に示す。分流子にはスリーブ内に注がれた溶湯をキャビティ（製品形成部）に導く為に、方向付けする機能がある。また一般にこの部分は金属のマスが多く、冷却が重要になる部分である。このことにより金型にはヒートクラックが発生しやすくなる部位でもある。今回は铸ぐるみ分流子の性能評価のために、あえてこの部位に使用することにした。



(2) 試験方法

試験品と現状品は量産金型に対して互換性があり、試験品の評価は量産型と同等の条件で铸造できるようにした。現状品を使用した量産金型にて金型温度、冷却水温度、流量、分流子のヒートクラックの状況等を予め調べておき、試験品に交換後、試験铸造を実施し、同様な内容を評価した。

(3) 試験铸造機等

試験日：2008 / 12 / 22 ~ 12 / 23

铸造機：当社保有 350T 铸造機

使用金型：K 型（量産金型）

評価ショット数：1000 ショット

[試験結果について]

(1) 金型冷却水による除去熱量の比較

図 5-3-4-1 に現状品と試験品を比較して、冷却水により除去された熱量をしめした。測定は連続铸造の中で、スタート時、450 ショット後、900 ショット後とした。

除去される熱量とは以下の式で示す。

$$(\text{除去熱量}) = (T1 - T2) * M \quad (\text{kcal/分})$$

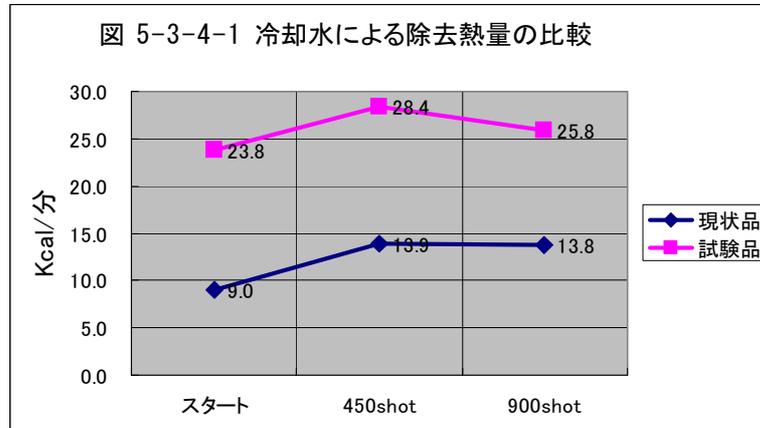
分流子への冷却水入り温度 T1 (°C)

分流子からの冷却水戻り温度 T2 (°C)

流量 M (ℓ/分)

(結果)

鑄ぐるみ分流子は従来品に比較して、スタート時2.6倍、450ショット及び900ショットでは2.0倍、の冷却能力がある。



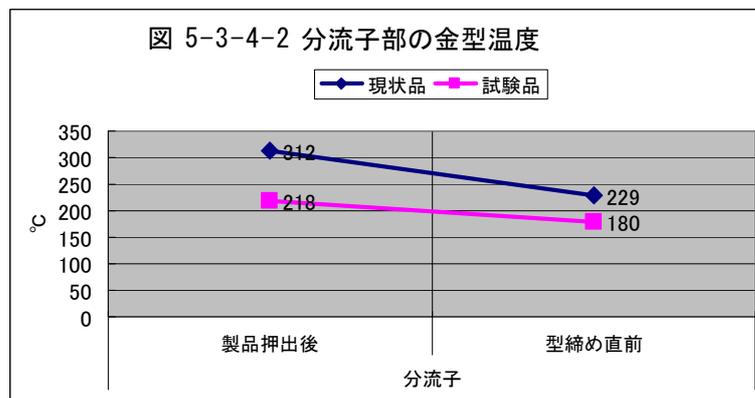
(考察)

現状品の噴流式冷却タイプでは先端付近の表面積を $14.3 \text{ (cm}^2\text{)}$ とすると、除去熱量の経験値 $55 \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{Hr}$ を適用すると、 13.1 (kcal/分) となり、上記の実際値に近い。試験品については全体の伝熱面積は従来型に比べて大きいのが、効いてくるのは先端部付近と考えれば、先端部の一卷きのみ考慮した計算では上記の結果が裏付けられる。いずれにせよ、鑄ぐるみ分流子は大きな冷却能力を持っている。

現場的には鑄造サイクルアップの為に、課題となるのは分流子部の凝固であり、この凝固が促進できれば、サイクルアップが期待できる。また、溶湯が金型に射出された時に金型を急冷し、製品が除去されたら金型を冷やさないようにする、間欠冷却と組み合わせることにより、金型温度の変動を小さくすることが期待できる。

(2) 分流子部の金型温度への影響

図 5-3-4-2 に、鑄造時における現状品と試験品の金型温度を示す。金型温度は鑄造サイクルにおいて、製品が金型から排出された瞬間（製品押出後）及び、金型締め直前（離型剤塗布後）の温度をサーモビューアで調査した。



(結果)

現状品と試験品を比較すると、製品押出後で 94℃、型締め直前で 49℃、試験品のほうが分流子部金型温度が低下している。製品押出後と型締め直前までの温度変化では現状品で 83℃、試験品では 38℃の温度低下となっている。

(考察)

試験品においては製品押出後の温度が 218℃まで低下し、現状品における型締め直前の温度 229℃付近まで低下している。このことから、試験品においては製品押出後の冷却の必要性はあまりないと思われる。間欠冷却と組み合わせ、金型温度を有効にコントロールできる可能性がある。

[まとめ]

鑄ぐるみ分流子の冷却効果が確認された。ダイカストにおいて、本分流子は冷却効果が高い為、入熱時（溶湯注入時）に冷却を開始し、製品離型後は冷却を止めることにより、ヒートサイクルの幅を小さくできると思われる。このことにより、金型温度を必要な温度に維持し、かつ、鑄造サイクルを短縮、金型寿命延長も期待できる。

第6章 3D自由曲面デザイン、構造設計(プラスチック用金型) (三菱化学㈱、山形大学)

鑄ぐるみ配管による飛躍的な熱交換能力を獲得した金型だけが実現可能な、3次元自由曲面を全面に押し出す新たなデザイン及び製品構造設計を追求する。自由な温調配管の効果により高品位かつ生産性の高いシステムがもたらす設計自由度、すなわち新設計ルールによるデザイン・設計要求スペックを決定し、スケールアップ試作による検証を行う。

6-1 大型成形品の強度予測(プラスチック用金型) (三菱化学㈱、山形大学)

[研究目的]

大型成形品の樹脂流動シミュレーションを行い、従来構造金型での成形品強度と鑄ぐるみ温調金型での成形品強度の差異を比較する。

大型かつ立体形状の成形品としてドーム型の成形品を選定し解析用モデルとした。このドーム型成形品を対象にしたプラスチック流動解析を行い、鑄ぐるみ温調配管の有効性を検証した。

[実験方法]

まず、成形品の強度予測をする際に必要不可欠となる基本的なプラスチック流動解析を行い、次に射出成形終了直後の成形品形状を予測するための金型冷却解析を行った。

[検証方法]

射出成形品に生じるそり変形の要因の一つに冷却速度分布による収縮差が挙げられ、これらの問題点を解決するためには製品を均一に冷却する必要がある。

一般的に大曲率を有した製品の冷却管はバツフル管や噴流管を用いるが、冷却管レイアウトには制限があり、製品近傍部に冷却管を配置出来ず、製品には温度分布が生じてしまう。本検証では、大曲率二次曲面形状を対象とし、通常配管と鑄ぐるみ配管での冷却効率の差を解析により、検討する。

[解析条件]

使用ソフト: Planets (金型冷却解析実行)
(PC)

材料: 三菱エンブラ製 YupilonGS2040

樹脂温度: 300°C

金型温度: 90°C

射出時間: 0.95sec

冷却時間: 20sec、40sec

保圧圧力: 50MPa

保圧時間: 10sec

本検討では自動車用ヘッドランプを模擬した形状とし、製品の大きさは 300×150mm、製品厚さ 3mm、曲率: R300 とした (図 6-1-1、図 6-1-2)

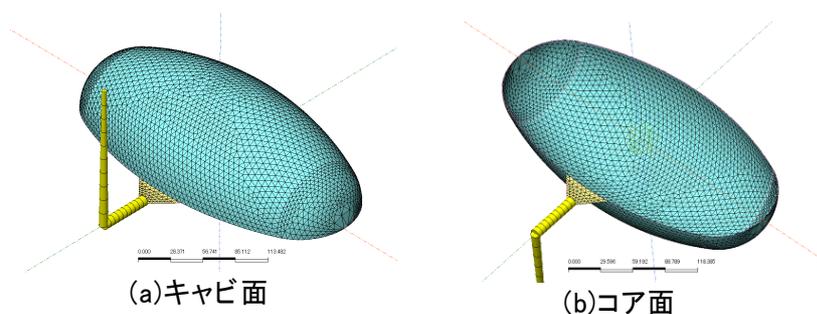


図 6-1-1 解析モデル

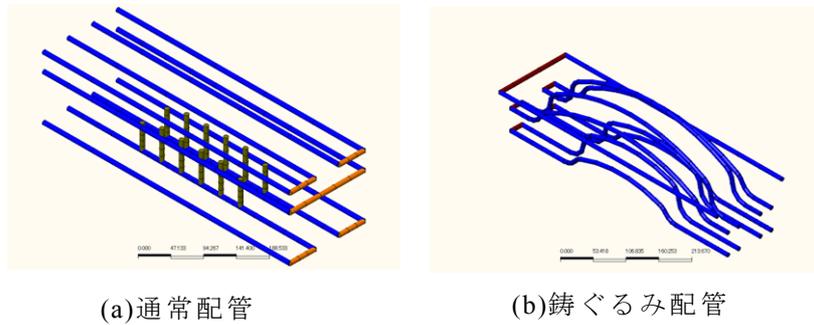


図 6-1-2 冷却管レイアウト

[評価方法]

解析は金型冷却解析により、冷却時間を 40sec、20sec のキャビコア金型温度を計算し、三箇所のカビコア温度差を算出した(図 6-1-3)。

[解析結果]

解析の結果より、鑄ぐるみ配管では各場所でカビコア温度差は小さく、場所ごとの分布も小さいことを確認した。また、冷却時間を 20sec にしてもその影響は小さいことを確認した(図 6-1-4)。

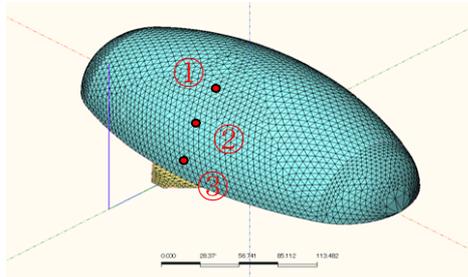


図 6-1-3 キャビコア金型温度差算出箇所

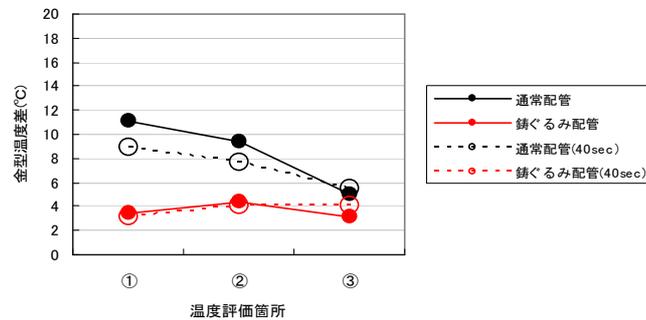


図 6-1-4 キャビコア温度差算出結果

[まとめ]

- ・ 鑄ぐるみ配管を用いることでキャビコア金型温度差を小さくできることが確認できた。
- ・ 製品面内の温度分布を小さくできることが確認できた。
- ・ 大曲率二次曲面を有する形状において、鑄ぐるみ配管は有効との結果が得られた。

6-2 実用金型による実証試験

(三菱化学㈱、山形大学)

[研究目的]

プラスチック成形品、特に大型成形品では、従来は金型温調の限界から製品周辺部と製品中央部の成型品位の差が大きく、製品設計を大きく制約している。この大型成形品について実際に铸ぐるみ温調金型を作製し成形品を試作することで、従来構造金型との成形品位等の差異を比較する。

モデル形状は、3次元自由曲面で構成された500×300mmの大きさの成形品とする。目標値である表面形状誤差0.5mm以下を目指す。

[実験方法および実験結果]

試作するモデル形状は、乗用車のヘッドランプカバーを模した3次元自由曲面で構成された約500×300mmの成形品である。その基本形状を図6-2-1に示す。

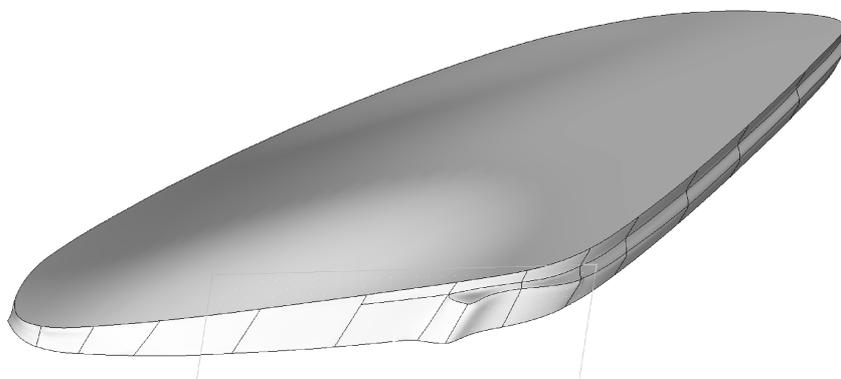


図 6-2-1 試作するモデルの基本形状

図6-2-1の基本形状を用いた射出成形シミュレーションから、射出成形可能な金型形状および温調配管形状を導き出した。次に、温調配管設計どおりの温調配管を製作した。この温調配管の概略を図6-2-2に示す。



キャビティ側



コア側

図 6-2-2 温調配管の概略

一方、金型部材を鋳造するための鋳型を高精度に造形するためには、精度良く加工された鋳型原型が必要である。この高精度な原型製作を行うために、金型 CAD データから直接加工が可能なマシニングセンタを用いて発泡スチロールを加工し鋳型原型とした。この設計意図に忠実な形状の鋳型（砂型）と鋳造された金型材を図 6-2-3 に示す。



図 6-2-3 鋳造用鋳型と鋳造された金型材

当初の目標どおりの寸法精度で加工された温調配管と、精度良く造形された鋳型を用いることで、従来技術では製作困難な構造を持つ射出成形用金型が完成する予定である。

[まとめ]

大型成形品について実際に鋳ぐるみ温調金型を作製し成形品を試作することで、従来構造金型との成形品位等の差異を比較することを目標とした。モデル形状は、3次元自由曲面で構成された 500×300mm の大きさの成形品とし、目標値である表面形状誤差 0.5mm 以下を目指した。

第7章 全体総括

平成18年度は①特殊熱処理による表面粗さ変化の関係把握および耐摩耗性評価、②靱性発現機構の解析および靱性評価、③鋳ぐるみ配管を考慮した鋳造シミュレーションと塑性加工シミュレーションならびに試作、④プラスチック用金型の温調配管シミュレーションおよび鋳造物からの加工原点・基準面の取得を研究目標とし、①プラスチック金型用鋳造材料の鏡面加工性および耐摩耗性の改善、②アルミダイカスト用金型材料の靱性改善、③鋳造方案の改善および温調配管の加工精度向上、④複雑形状の鋳造物から高精度に加工原点・基準面を取得できる工法の開発を行った。

さらに、平成19年度は①微量成分添加による金属組織変化ならびに表面粗さ変化の関係把握および耐食性評価、②特殊熱処理による靱性向上および耐ヒートチェック性評価、③シミュレーション結果に基づく鋳造方案の最適化および立体形状の曲げ加工および溶接、④鋳ぐるみ温調配管と内部機構部品の最適配置および試験成形、検証試験、⑤大型成形品の強度予測、を研究目標とし、①プラスチック金型用鋳造材料の鏡面加工性及び耐食性の改善、②アルミダイカスト用金型材料の耐久性改善、③鋳造方案の改善および温調配管の加工精度向上、④実用化に向けた鋳ぐるみ温調配管の最適配置及び検証試験、⑤製品構造設計の自由度向上 を目指す技術開発を行った。

これらの成果をもとに、平成20年度は①清浄度向上及び管理手法の検討および複合材に対する耐摩耗性評価、②靱性向上および管理手法の検討およびテスト金型による実体評価、③鋳造方案最適化実証試験および高精度型枠の作製、④テスト金型による実証試験および大型金型によるテスト成形、⑤実用金型による実証試験、を研究目標とし、①プラスチック金型用鋳造材料の実用性能の向上および検証試験、②アルミダイカスト用金型材料の実用性能の向上および検証試験、③さらなる鋳造方案の改善および温調配管の加工精度向上、④テスト金型および実用金型による実証試験を行った。

結 言

我が国製造業者の国際競争力の強化と新たな事業の創出を目指すべく、ものづくりの基盤技術である金型技術の高度化に資する革新的な研究開発課題として「新規鋳造材料を用いた金型技術の高度化」を提案し、3年間にわたって実施してきた。

本事業を取り巻く社会情勢に目を向ければ、事業開始時点においても地球温暖化防止に向けた活発な動きがみられ、3年が経過した現在この動きはさらに加速している。中でも本事業が取り組んでいる自動車関連産業向けの技術開発は、ごく近い将来の市場ニーズそのものと言える。

一方、事業最終年度に入ってから顕在化した世界的な経済危機の中心に、本事業と密接な関係にある自動車産業が存在しているのは確かである。本事業の枠組みでは、地域の中小企業が中心となって基盤技術を開発し川下産業と良好な取引関係を構築することで、我が国製造業の国際競争力の強化を目指すことになっている。

しかし、これまでの状況を顧みれば、川下産業が持つ国際競争力を一方的に頼るわけにはいなくなりつつあることも確かである。開発された技術が広く産業界に受け入れられるためには、地域の中小企業はもちろんユーザーである川下産業をも含めた国際競争力を維持できるか、すなわち世界的な規模での技術的優位性を確保できるかが今後の課題になっていくと思われる。