

令和元年度採択
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「ダイカスト金型破損の原因解析と

解析結果を基とした低廉化金型の商品化」

研究開発成果等報告書

令和4年3月

担当局	中部経済産業局
補助事業者	公益財団法人富山県新世紀産業機構
間接補助事業者	魚岸精機工業株式会社 株式会社ナガ工

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
1-2 研究体制	
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	2
1-3 成果概要	4
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 本論	
2-1 低廉化金型製作における各種基準値の設定	6
2-2 ダイカスト金型の熱応力に関する分析課題への対応	8
2-3 低廉化金型の試作開発および鑄造実験結果	10
2-4 鑄造結果による分析と検証	11
2-5 低廉化金型により製作された製品の品質評価	16
最終章 全体総括	17

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) 研究開発の背景

ダイカスト鑄造は、高強度・高精度金型に、溶融金属を高速・高圧で射出することで、多様な形状を有した外観品質、機械的性質に優れた製品をワンショットで製作できる鑄造法である。そのため、自動車エンジン部品を中心に、大量生産加工方法として発展してきた。さらに近年、部品点数の多い自動車足回り構造体を一体成形する技術が開発されるなど、ダイカスト鑄造法の大きな特徴である、省資源、省エネルギー、リサイクル性を更に進めた加工技術として進化している。

一方、近年、自動車のEV化が世界的に進捗し、自動車エンジン部品点数の大幅な削減が予想される中、自動車部品以外の製品、多品種少量製品への対応などダイカストの優位性を活かした需要開拓に向けた技術開発¹⁾が望まれる。これら多種多様な製品へのダイカスト鑄造の適用に際して、従来のダイカスト金型設計技術では、金型コスト比率が高くなる問題がある。そのため、生産量に適した廉価な金型（低廉化金型）を提供する必要がある。また多種多様な製品群に展開するためには、従来金型以上に、金型不具合に対する検討、低コスト化検討、製品品質の評価が必要である。

1) 新ダイカスト産業ビジョン 平成30年 一般社団法人日本ダイカスト協会

(2) 研究目的

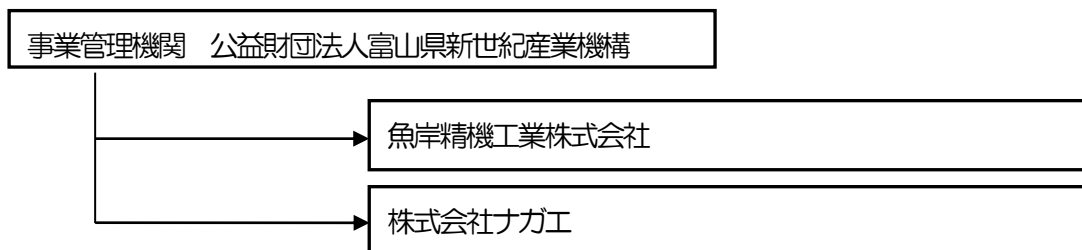
本事業では、多品種少量生産に対応した低廉化金型設計・製造技術の知見を得ることを目的とする。そのために、鑄造時の金型負荷の評価（熱、ひずみ等）、金型材質選定、CAE解析によるメカニズム解明と不具合対策を進める。また低廉化金型により製作された製品の品質を評価する。以上、低廉化金型に関する技術開発を総合的に進める。

(3) 研究目標

ダイカストメーカーでの製造環境や使用頻度に合わせ、使用期限を特定し、且つ費用を抑えた多品種、小ロット品用金型の試作開発を行う。具体的には、平均価格50%以上低減、納期40%短縮化、そして型寿命ショット数500~20,000ショットの間で顧客の要望に対し、適正寿命の金型を開発、提供することを目標とする。

1-2 研究体制

(1) 研究組織



プロジェクトリーダー (PL)

所属：魚岸精機工業株式会社

役職：UPDO CAD課 課長

氏名：梁瀬 正史

サブリーダー (SL)

所属：株式会社ナガエ

役職：製造部 次長

氏名：川崎 聡史

(2) 研究者氏名

【事業管理機関】

- ・公益財団法人富山県新世紀産業機構

管理員

氏名	所属・役職
土肥 義治	イノベーション推進センター長
杉森 博	イノベーション推進センター次長 連携促進課長
九曜 英雄	イノベーション推進センター ものづくり研究開発センター次長
佐山 利彦	イノベーション推進センター参事 プロジェクト推進課長
森松 友宏	イノベーション推進センター プロジェクト推進課 課長補佐
源 卓也	イノベーション推進センター プロジェクト推進課 主事
高川 恭輔	イノベーション推進センター プロジェクト推進課 主事

【間接補助事業者】

- ・魚岸精機工業株式会社

研究員

氏名	所属・役職
魚岸 力	取締役
魚岸 成光	代表取締役社長
荒木 和之	管理課 課長
伊東 琢也	品質保証課 課長
梁瀬 正史	UPDO CAD課 課長
水野 諭史	UPDO CAD課
森本 英樹	UPDO CAD課

- ・株式会社ナガエ

研究員

氏名	所属・役職
川崎 聡史	製造部 次長
宮島 満春	製造部 ダイカスト課 係長
前田 敦志	製造部 ダイカスト課

1-3 成果概要

(1) 低廉化金型製作における各種基準値の設定

- 建材部品を想定した実用製品について、現行金型（SKD61）による方案設計、ダイカスト鑄造における金型温度、冷却水量、溶湯温度、金型変位量、製品外観等を測定・評価した結果、現行金型特性および低廉化金型試作時の設計製作に関する知見を得た。

(2) ダイカスト金型の熱応力に関する分析課題への対応

- 溶湯温度測定を実施し、アルミ溶湯充填から凝固までの温度変化を捉えることで、溶湯と金型との熱伝達係数を求めた。
- 熱応力解析技術において、先に求めた熱伝達率と低廉化金型材料弾塑性材料モデルの設定により、熱応力を精度よく解析できることが可能となった。

(3) 低廉化金型の試作開発および鑄造実験

- 低廉化金型材料選定と設計・製造の検討により、現行金型比で最大、材料費50%、加工費50%の削減を達成した。
- 低廉化金型の鑄造実験において、一定ショット間隔での製品外観評価を実施することで、各低廉化金型の劣化程度の把握や不具合の分類を行った。

(4) 低廉化金型不具合メカニズムの解明と対策の検討

- 低廉化金型による鑄造実験結果と熱応力解析により各種不具合発生メカニズムを明らかにした。
- 応力の高い部位の補強により初期割れを抑制した。
- 各種低廉化金型の限界ショット数把握と熱応力解析から金型寿命評価方法を検討し、具体的な限界ショット数の予測関係を定式化した。

(5) 低廉化金型により製作された製品の品質評価

- 低廉化金型で鑄造された製品の品質評価（鑄巣分布、機械的性質、金属組織）を行った結果、現行金型（SKD61）と同等であることを確認した。
- 形状寸法評価を実施した結果、低廉化金型では形状寸法差が大きくなる傾向を確認した。また CAE による製品変形解析の結果と整合していることを確認した。

以上、研究目標である、平均価格 50%以上低減、型寿命ショット数 500~20,000 ショットに応じた低廉化金型の提供、を達成した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

所属：魚岸精機工業株式会社

所在地：富山県射水市北高木 118-1

代表取締役社長 魚岸 成光

TEL：0766-52-5222

FAX：0766-52-5223

MAIL: s_uogishi@uogishi.co.jp

第2章 本論

2-1 低廉化金型製作における各種基準値の設定

低廉化金型の設計・製作にあたり、現行金型における各種測定、鑄造実験を実施した。現行金型の性能や問題点を把握し、低廉化金型の設計・製作へ活かした。

図1に、各種センサーを取り付けた現行金型を示す。測定項目は、残留応力、金型冷却水量、金型温度分布、金型歪み、溶湯温度である。

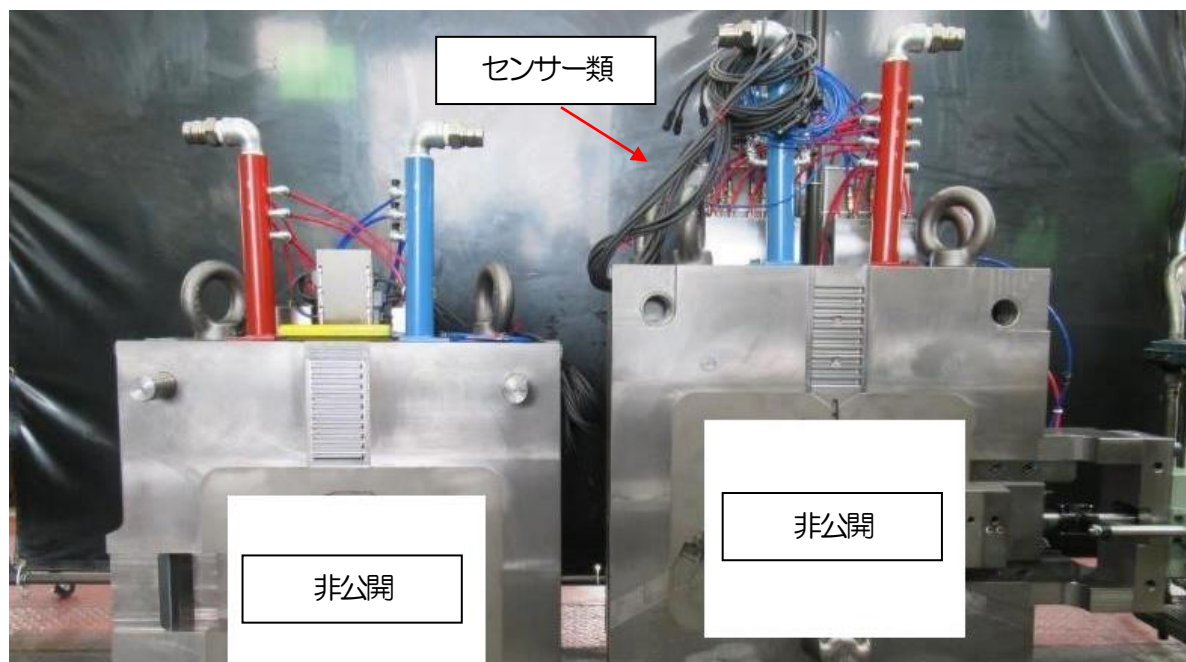


図1 各種センサーを取り付けた現行金型（材料 SKD、FCD）

(1) 残留応力測定

表1に、現行型（SKD61）の製作直後と1,000ショット後、3,000ショット後の残留応力値、硬さを示す。ダイカストショット前は圧縮残留応力800～500MPa、硬さHRC50程度である。1,000ショット後、圧縮残留応力は小さくなり、3,000ショットではスライド型の湯当り部が335MPaの引張応力へ変化した。現行型寿命を5万ショットとした場合、早期（2%程度の使用）に圧縮応力の低下が発生することが判明した。

表1 現行型（SKD61）におけるショット後の残留応力変化

測定	部位	製作直後	1000ショット	3000ショット
残留応力 (MPa)	固定型	-719.8±19.9~820.1±16.7	—	—
	可動型	-501.0±25.5~795.5±17.2	—	—
	スライド型	-600.6±14.8~837.5±21.6	-133~860	-1064~335
硬さ (HRC)	固定型	50~52	50~52	50~54
	分流子	47	44	45

残留応力測定：Rigaku 可搬型X線応力測定装置 SmartSiteRS

(2) 冷却水量測定

ダイカスト金型は、ショット増加に伴う金型の温度上昇を抑制するために、冷却を行う必要がある。ショットサイクルが短くなるダイカスト加工において、冷却水による冷却は金型耐久性、製品と金型との焼付き防止に重要である。そこで、金型冷却能力の把握のため、冷却水流量計測システムの構築と冷却水量の計測を実施した。

図2に、冷却水量測定システムを示す。

測定の結果、冷却水管ごとの変動がみられた（1000~1500CC/min）。また冷却入り戻りを反対にした場合、流量が変化する現象も見られた。流路形態、流れ方向が流量に影響する知見が得られた。

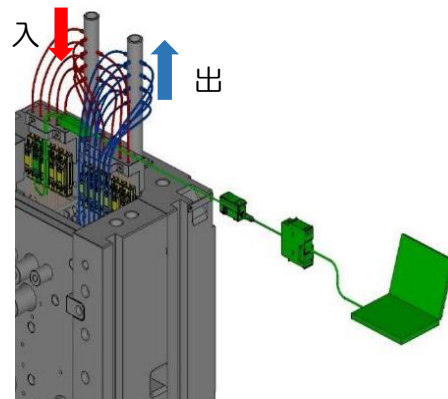


図2 金型冷却流量測定システム

(3) 冷却孔観察

図3に、固定型、可動型における冷却孔底のファイバー顕微鏡観察結果を示す。3,000 ショットで一部亀裂が発生した。これまで冷却孔底の亀裂発生時期は不明であったが、ショット開始後の早い段階で亀裂が発生することが明らかになった。

図4に、固定型ゲート付近に発生した亀裂を示す。溶湯アルミが流入し金型への熱負荷が最も大きい部位のため、金型冷却を目的に、型表面3.5mmに近接してライン冷却している。ライン冷却の過度の近接によって型に発生する熱応力が大きくなり破壊したと推察する。金型の熱負荷を抑制する目的が熱応力を招く事例として注意が必要である。低廉化金型では、材料特性上より過酷な条件となると予想されることから、このライン冷却設置は廃止した。



ショット数	3,000 ショット
可動型	
固定型	

図3 スポット冷却孔底の割れ



図4 ライン冷却近傍の割れ

2-2 ダイカスト金型の熱応力に関する分析課題への対応

(1) 金型温度変化の分析

図5に、1,000 ショット時の金型表面温度分布（放射温度計測定）を示す。溶湯が最初に当たる分流子や可動型中央部で高く、固定型は温度が低い。これは、凸部が多い可動型部に熱が溜まりやすいこと、凹形状で平坦な固定型では熱が逃げやすいためと推察される。

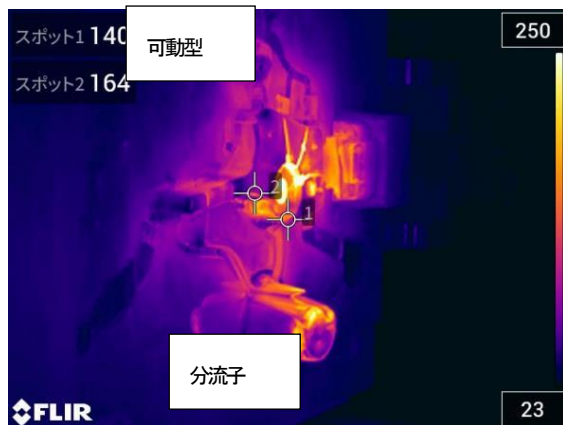


図5 可動型、固定型の表面温度分布（携帯用小型熱画像カメラCHINO CPA-E75S）

(2) 溶湯（溶けたアルミ）の温度測定

図6に、溶湯温度測定結果を示す。番号は測定部位を示す。測定は、可動型突き出しピン位置から金型表面に突き出した K 熱電対にて行う。なお熱電対保護管を外した素線状態で溶湯温度測定することで、精度よく溶湯温度変化を捉えた。この温度測定データから、溶湯と金型温度の熱伝達係数値（CAE 解析設定データ）を求めた。

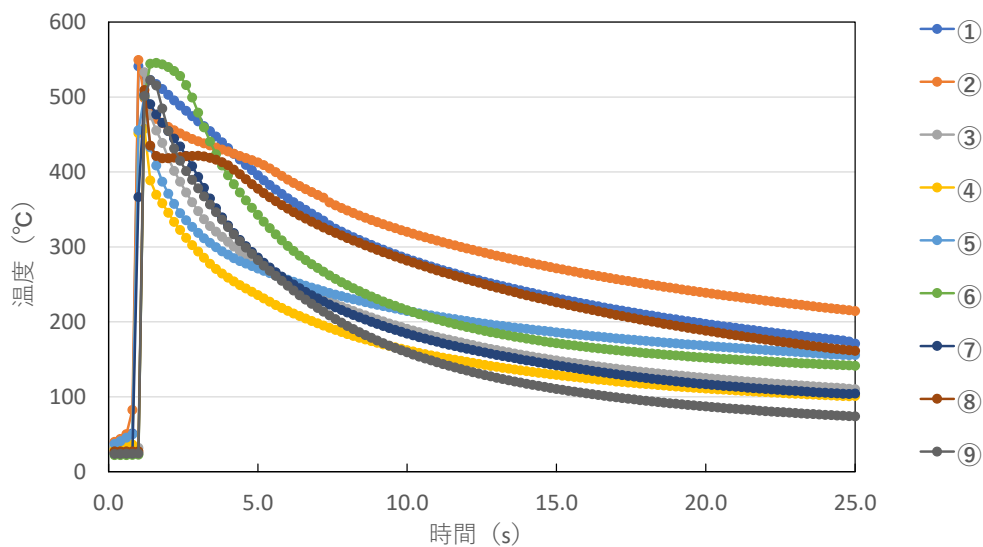


図6 溶湯温度測定部位と測定システム

(3) 設定条件を擦り合わせた熱応力解析

図7に、金型各部位の温度実測値と解析結果*との比較を示す。実測した温度変化傾向と合う熱伝達係数（解析設定値）を種々検討した結果、溶湯と金型の熱伝達係数を液相線温度まで $4000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 、固相温度 532°C 以下は $2000\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ を熱伝達係数が適正值とした。

※ダイカスト鑄造解析およびダイカスト金型熱応力解析：鑄造解析コード ProCAST

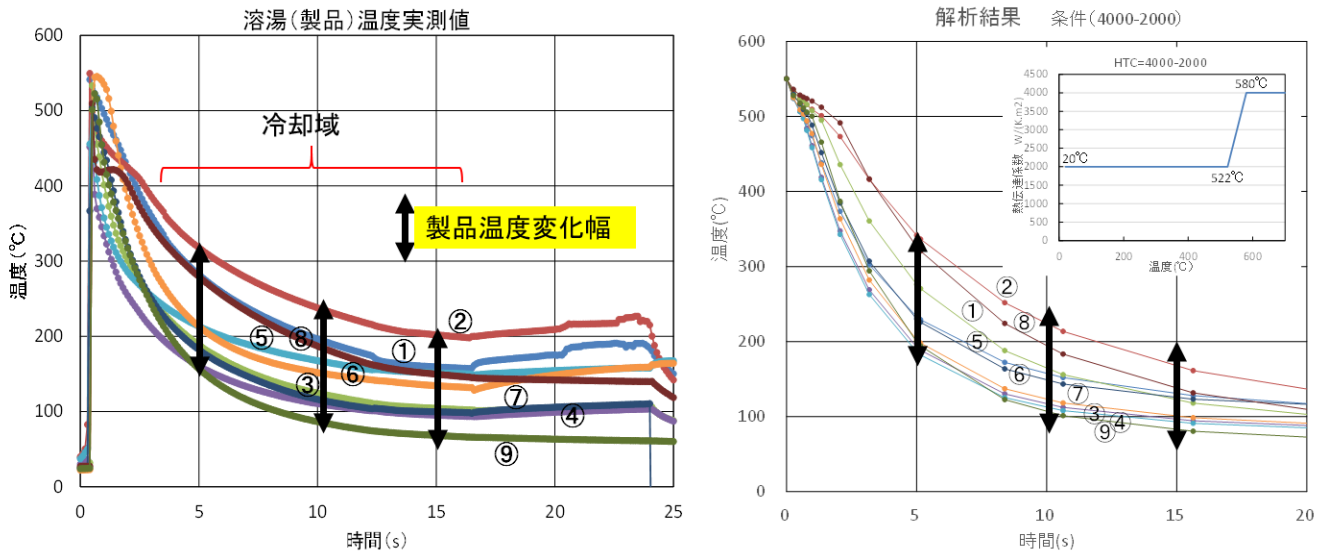


図7 熱伝達係数を合わせた場合の実測値と解析値の比較

図8に、金型初期温度すり合わせのための熱サイクル解析（グラフ）と擦り合わせた熱応力解析結果を示す。また解析コードデフォルト設定（金型初期温度 200°C ）での応力解析数値で示す。ともに相当応力値が最も大きい部位で比較している。デフォルト設定での熱応力は 800MPa 、温度合せ込み設定結果は 784MPa であった。解析用材料モデルとして、弾塑性モデルを使用した。

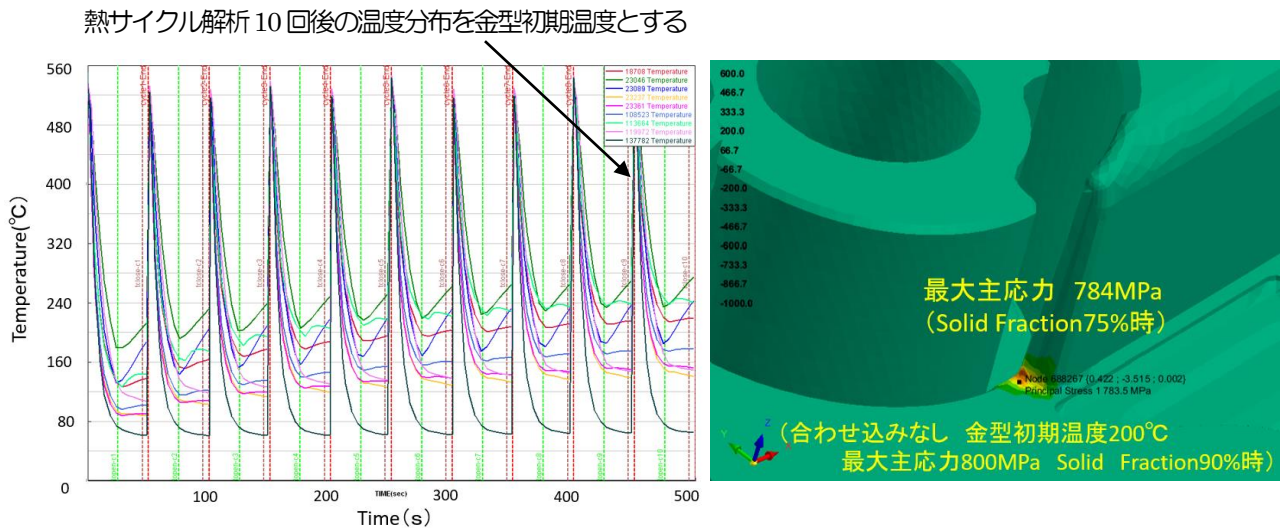


図8 金型初期温度すり合わせのための熱サイクル解析 と 熱応力解析結果

2-3. 低廉化金型の試作および鑄造実験

低廉化金型は、既存金型（SKD61）加工に準じて製作した。ただし、選定鋼材によっては適切な加工工具、加工条件を選定している。本頁では、現行型を含む低廉化金型での鑄造実験結果について示す。評価は、一定ショット毎の製品外観検査や亀裂長さの測定によって行った。

(1) 低廉化金型による鑄造及び各種測定

図9に、低廉化金型で特徴的に見られた製品不具合事例を示す。①の金型初期割れは全ての金型で発生した。初期割れは金型機能を損なう最も問題となる不具合である。②のヒートチェックはショット数が増えると徐々に進行するが、ある程度で不具合進展は緩慢になる。金型機能を損なうまでではないが製品外観上問題となる場合には対策が必要である。③の焼付きは製品が金型に焼付き型開きに製品破壊した事例である。④は、製品の抜き孔部を形成する鑄込みピンが破損し、孔が形成されずに溶湯アルミが充填した不具合である。③と④は発生した時点で金型修正が必要となる不具合である。⑤は、金型の合わせ面にアルミ溶湯が漏れ、バリ生成した不具合である。⑥は現行型（SKD61 25,000 ショット）の溶損により製品側に凸部が形成された事例である。




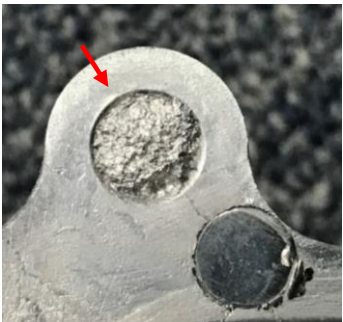
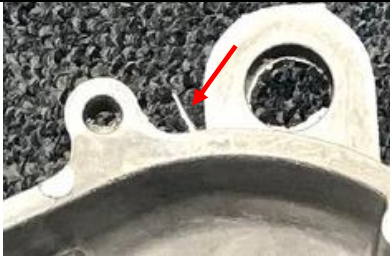

<p>①初期割れ</p> 	<p>②ヒートチェック</p> 	<p>③焼付き（製品破壊）</p> 
<p>④鑄込みピンの破壊</p> 	<p>⑤バリ</p> 	<p>⑥溶損（製品盛り上り）</p>  <p>0.37mm 盛り上り</p>

図9 現行型、低廉化金型で発生した製品不具合（赤矢印部）

2-4. 鋳造結果による分析と検証～CAE解析による不具合要因の考察～

図10に、初期割れ部の熱応力解析結果を示す。ショット直後の金型温度上昇によるリップ根元への高い圧縮応力（降伏点を超える応力）と金型冷却時の引張応力の繰り返し応力が初期割れの要因である。

図11に、ヒートチェック部の応力変化を示す。ショット直後に表面に平面圧縮応力が負荷され、加工終盤に引張応力と変化している。応力値は降伏点を超えないため、熱疲労破壊と考える。ショットサイクル毎の等二軸平面応力が亀甲状き裂開態の形成要因と考える。

図12に、アルミ凝着部における製品温度、金型温度を示す。凝着は、金型温度と製品温度差が小さい部位で発生することがわかる。金型温度と製品温度の差が小さい部位は注意する必要がある。

図13に、鋳込みピン破損部の解析結果を示す。ピンの熱応力が高い部位と亀裂発生部位は一致しており、製品収縮による曲げ応力と製品突き出し時の曲げ戻しの繰り返し曲げ応力による疲労破壊が要因である。

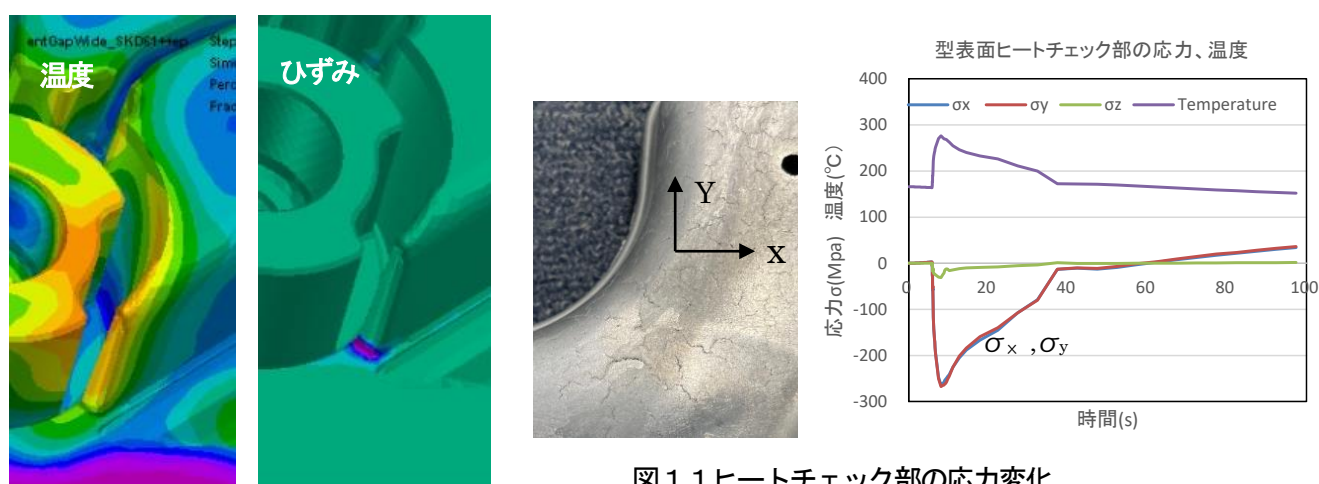


図11 ヒートチェック部の応力変化

図10 初期割れ部の熱応力解析結果

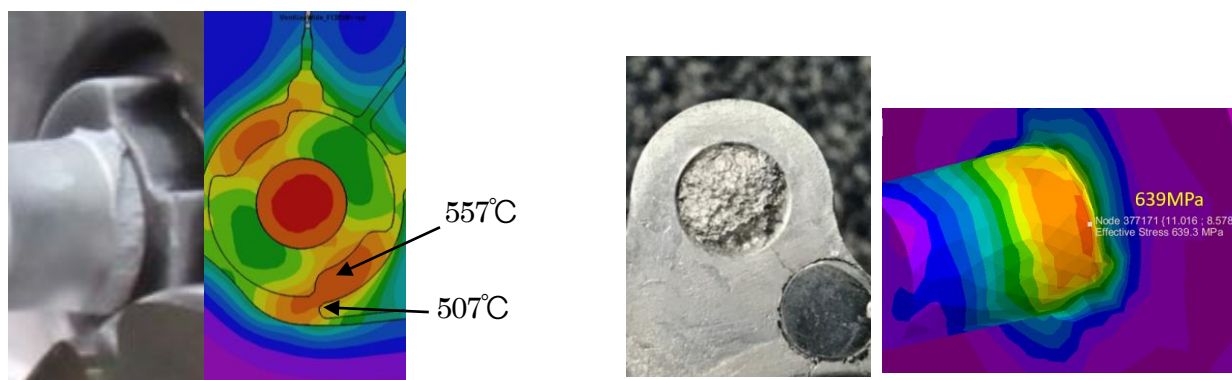


図12 アルミ凝着部における製品と金型の温度

図13 鋳込みピン破損部の解析結果

図14に、バリ発生部の金型変形解析結果を示す。金型の開きによってバリが発生する。

図15に、溶損発生部（可動型表面および断面）における溶湯速度ベクトルを示す。溶損部位（可動型）に溶湯が当たる状況がみられる。エロージョン（機械的溶損）は溶湯速度ベクトル（大きさ、方向）の影響が大きいことから、溶湯速度ベクトル評価が重要である。



図14 バリ発生部の金型変形方向

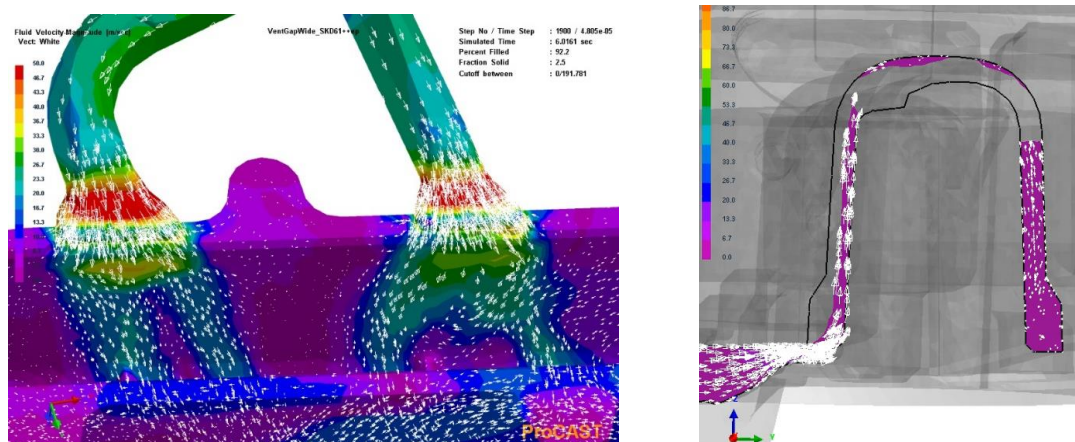


図15 溶損発生部（可動型表面および金型断面）における溶湯流れの速度ベクトル

以上、鋳造実験で発生した各種製品不具合（金型不具合）について、CAE解析結果により考察を行った。CAE解析結果は、不具合発生状況に一致しており、解析の妥当性が確認された。

次項では、低廉化金型使用上、大きな問題と考えられる初期磨れ、およびヒートチェックの対策について検討した結果を示す。なお、凝着、バリについては解析結果から対策を実施し、効果を確認した。

(3) 金型不具合対策の検討

金型初期磨耗は、最も金型性能を損なう不具合であり、先ず対策が必要である。初期磨耗を抑える目的で、応力の高い部位の補強を検討した。また補強効果をCAEにて解析した。

図16に、低廉化金型における応力分布と補強解析モデルを示す。番号は補強部位番号を示す。応力の高い部位を補強することによって、亀裂が抑制された。

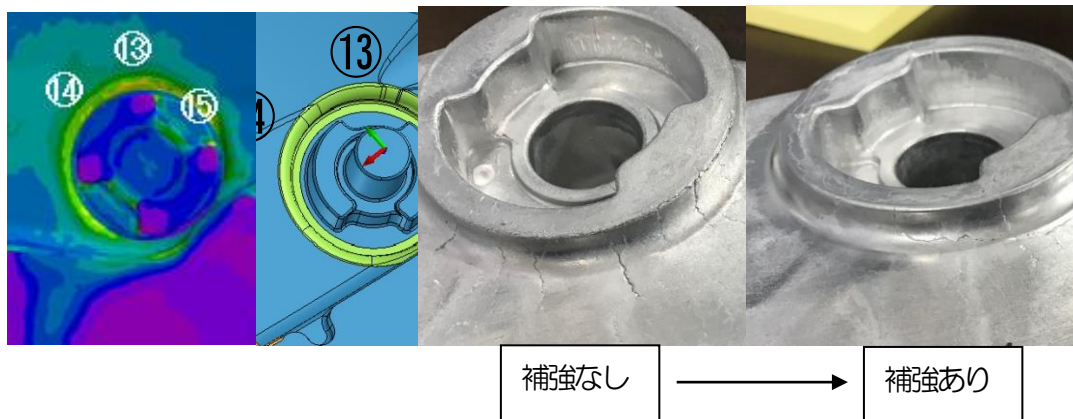


図16 500ショット型における応力分布、補強解析モデルおよび鑄造結果

ヒートチェック対策として、熱処理・表面処理による検討を行った。検討にあたり、熱処理、表面処理の影響を効率的に評価できるよう多数個取り金型を設計・製作した。またダイカスト流れ解析、熱応力解析を実施し、入子それぞれにかかる熱負荷、応力が同様であることを確認した。

図17に、金型でのショットサンプル及び熱処理・表面処理条件、および鑄造結果を示す。固定型側、可動型側ともに焼入れ・焼戻し処理で表面品質が良い傾向がみられた。







熱処理・ 表面処理	固定型側	可動型側
焼入れ・ 焼戻し +窒化		
焼入れ・ 焼戻し		
なし		

図17 多数個取り金型による熱処理・表面処理条件評価結果

(4) 金型寿命の定量的予測方法の検討

図18に、金型寿命予測方法の流れを示す。各低廉化金型の鑄造実験と金型熱応力解析結果の関係を定式化することで、金型寿命を予測する。低廉化金型の要求寿命ショット数は20,000ショット以下であり、一般に低サイクル疲労破壊則であるManson-Coffin則（マンソン コフィン）の適用が考えられたが、低廉化金型では塑性ひずみ発生以下での亀裂進展が進んだ。そのため、応力で評価されるBasquin則（バスキン）に準じた寿命評価とした。

ダイカスト金型劣化は、熱的負荷サイクル（金属溶湯充填時の熱衝撃と金型冷却の繰返し）と金型材質変化（金属組織変化、亀裂への溶湯浸入、金属間化合物形成、等）の相互作用下で進展する。本予測方法は、そうした状況を考慮しないものであるが、実験データで補われた方法であり、今後、低廉化金型事例を増やすことで、予測の精度を上げることが可能と考える。

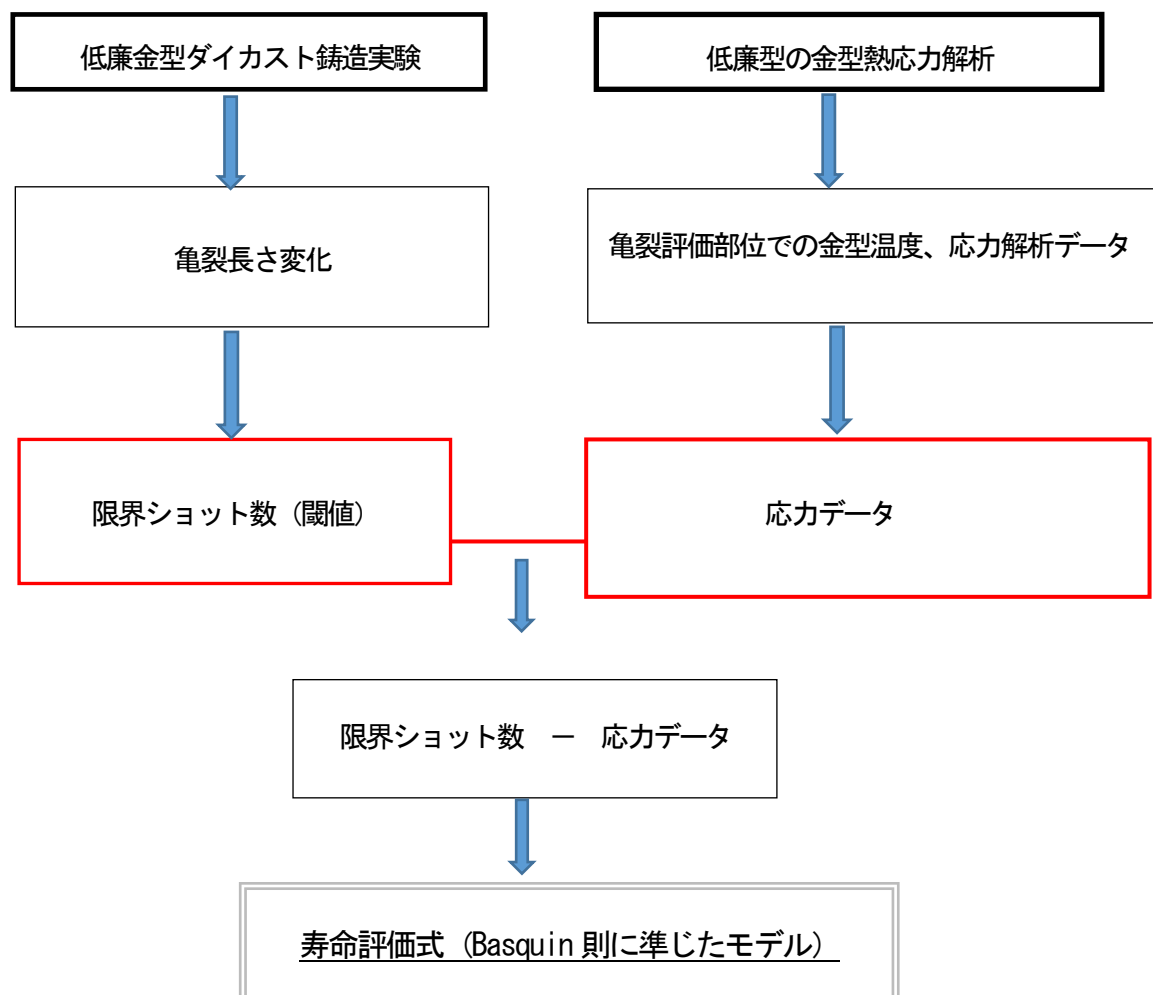


図18 金型寿命の定量的予測方法（結果の詳細は非公開）

2-5. 低廉化金型により製作された製品の品質評価

低廉化金型の使用に際し、鑄造製品の品質保証は重要である。本章では、鑄巣欠陥、機械的性質、金属組織、製品寸法の比較結果を示す。なお各種評価は、富山県産業技術研究開発センター依頼試験・設備利用にて実施した。

(1) 製品内部の鑄巣分布 (X線CT)

図19に、現行型 (SKD61) および低廉化金型における X線 CT 検査結果を示す。いずれの低廉化金型も現行型と鑄巣分布状況や鑄巣欠陥体積率は1~2%と、同等であった。

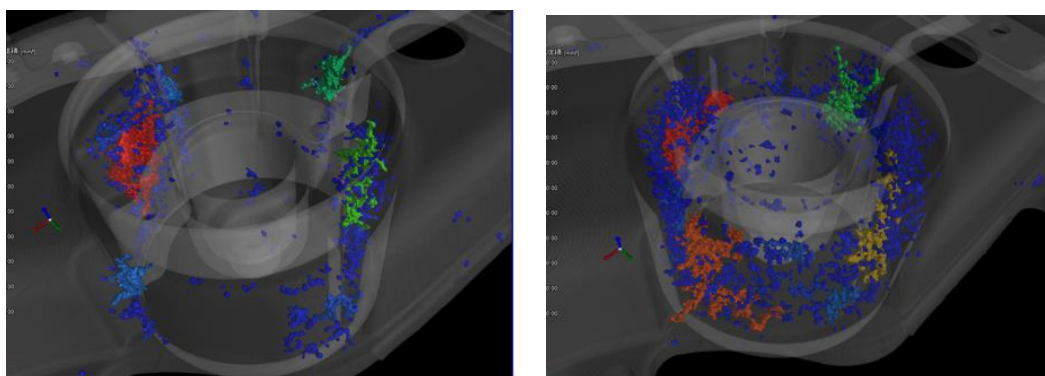


図19 現行型 (SKD61) および低廉化金型における X線 CT 検査結果

(2) 製品各部の引張試験結果

図20に、現行型および低廉化金型化の鑄造製品の引張強さを示す。横軸は、金型種類、ショット数、試験片部位を示す。現行金型と各種低廉化金型の引張強さデータの t 検定の結果、材質間の有意差はなかった。伸びはいずれも1~3%であり、一般的なダイカスト製品の伸びであった。

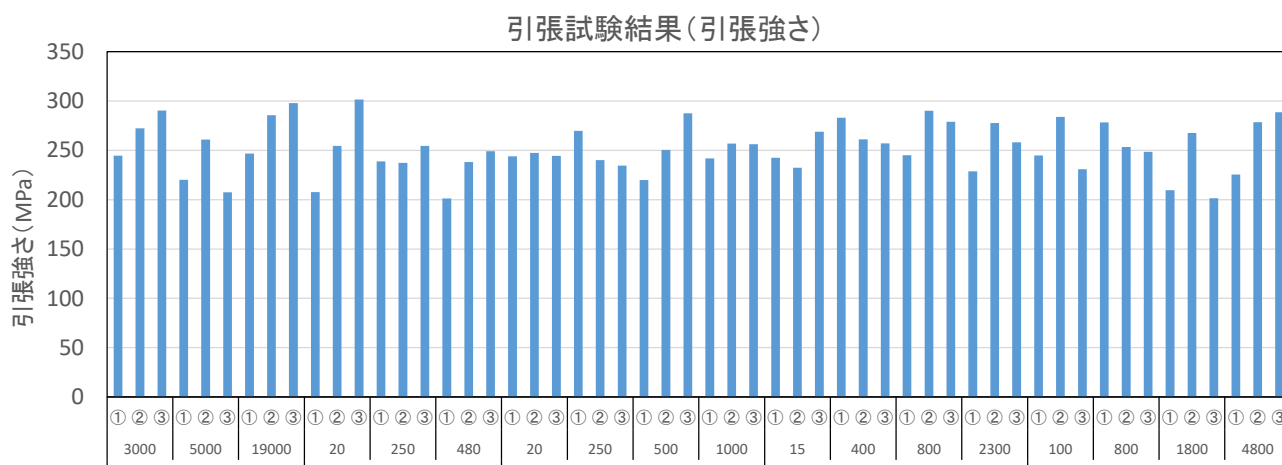


図20 現行型および低廉化金型製品の引張試験結果 引張試験片 (JIS Z 2201 13B号)

(3) 製品の金属組織観察

図21に、現行型および各種低廉化金型（ショット数）における金属組織（引張試験片採取位置）を示す。いずれの組織も初晶組織（20 μ m程度）、共晶組織は同等であった。

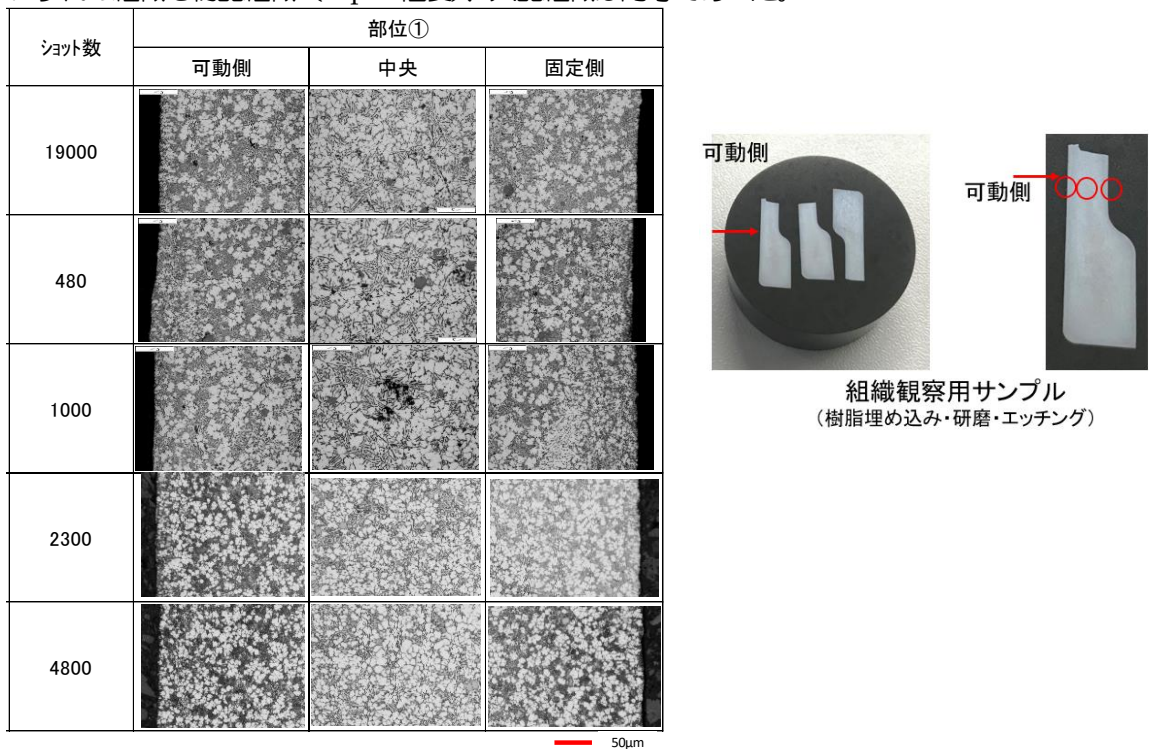


図21 現行型(19,000 ショット)および各種低廉型（480～4,800 ショット）における金属組織

(4) 製品の形状評価

図22に、現行型と低廉化金型製品における形状評価方法および結果を示す。形状評価は三次元測定機による触れ測定を実施し、現行型との角度比較、輪廓照合を実施した。結果、現行型に比べ低廉化金型製品の形状寸法差が大きくなる傾向を把握した。また CAE による変形解析を実施し、実測値と傾向を一致することを確認した。CAE による変形解析は、低廉化金型による製品変形を予測し、金型設計へ活かすために重要なステップと考える。

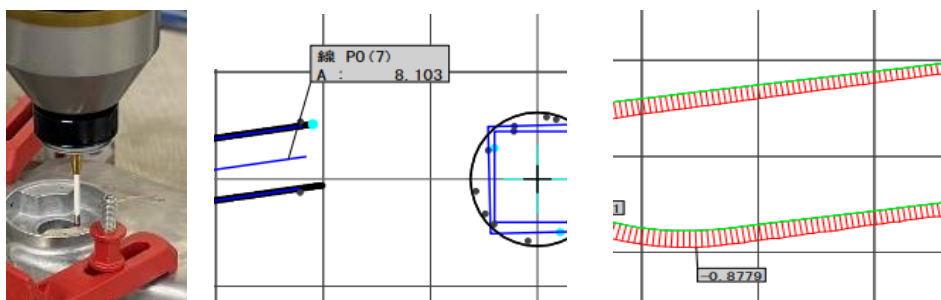


図22 現行型と各種低廉型製品における形状評価

最終章 全体総括

令和元年

- 建材部品を想定した実用製品について、現行型（SKD61）による方案設計、ダイカスト鑄造における金型温度、冷却水量、製品温度、金型変位量、製品外観等を測定・評価した結果、現行金型における基本特性や問題点が明らかになるとともに、低廉化金型試作にむけての技術評価ポイントを明らかにした。
- ダイカスト鑄造時の溶湯温度測定を実施した結果、アルミ溶湯充填から凝固までの材料温度変化を捉えることができ、溶湯と金型との熱伝達係数の設定が可能となった。

令和2年

- 溶湯と金型との熱伝達係数を設定した熱応力解析の結果、実操業におけるダイカスト金型に発生する熱応力を精度よく解析できた。
- 低廉化金型の鑄造実験を実施し、所定ショット数まで一定間隔で製品外観観平面を実施した。その結果、各低廉化金型における不具合傾発生向が明らかになった。
- 低廉化金型による鑄造結果と CAE による鑄造 CAE 解析各種不具合発生メカニズムの解明、不具合対策の検討を実施した結果、不具合を抑制する方法（補強、熱処理）を見出した。
- 試作した低廉化金型の設計・製造コストにおいて、現行金型（SKD61）に比べて最大 50%のコスト削減が出来た。

令和3年

- 低廉金型ダイカスト実験による限界ショット数データと熱応力解析結果を基に、金型寿命評価方法を検討した。結果、具体的なショット数の予測が可能となる関係式を得た。
- 低廉化金型で鑄造された製品の品質評価（内部鑄巣分布、機械的性質、金属組織）および形状寸法評価を実施した結果、製品品質について、現行型（SKD61）と同等であること、形状寸法変化傾向に関する知見を得た。

「研究開発後の課題・事業化展開」

本事業により低廉化金型における課題と対策を進めた結果、事業化にむけた基礎的知見を得ることができた。また研究目標とした、現行型（SKD61）に比べて材料費、製作費を最大 50%削減することが可能となった。

一方、ヒートチェック不具合については、製品要求品質に応じた金型熱処理、表面処理の更なる技術検討が必要である。また低ショット数での破壊が懸念される低廉化金型について、金型センシング技術による金型寿命予測精度の向上、メンテナンス時期の提案など、顧客ニーズにフレキシブルかつ迅速に対応できるサービスを低廉化金型付加価値技術とすることが今後の課題である。

低廉化金型の事業化ターゲットとして、今後ますます需要が見込まれるEV関係部品、試作分野、砂型鑄造製品分野、多品種少量（～1,000 ショット）製品をターゲットとする。

表は、事業化計画を示す。

事業年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度	2025 年度	2026 年度
サンプル出荷	➡				
追加研究	➡	➡			
設備投資			➡		
製品等の生産			➡	➡	➡
製品等の販売			➡	➡	➡

以上