

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「自動車エンジン用ピストンの生産効率の向上に資する

ダイカスト鑄造技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 5月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人わかやま産業振興財団

## 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 |
| 1-1-1 研究背景                          |         |
| 1-1-2 研究目的及び目標                      |         |
| 1-2 研究体制                            | ..... 2 |
| 1-2-1 研究組織                          |         |
| 1-2-2 管理体制                          |         |
| 1-2-3 研究者氏名                         |         |
| 1-3 成果概要                            | ..... 5 |
| 1-3-1 ダイカストピストン用アルミニウム合金の開発         |         |
| 1-3-2 鋳造シミュレーションを用いた金型方案の適正化        |         |
| 1-3-3 X線CT画像の3次元化、および超音波画像による内部欠陥検査 |         |
| 1-3-4 ダイカストピストン製作による性能評価            |         |
| 1-4 当該研究開発の連絡窓口                     | ..... 5 |

### 第2章 本論

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| 2-1 ダイカストピストン用アルミニウム合金の開発         | ..... 6  |
| 2-2 鋳造シミュレーションを用いた金型方案の適正化        | ..... 7  |
| 2-3 X線CT画像の3次元化、および超音波画像による内部欠陥検査 | ..... 10 |
| 2-3-1 X線CT画像の3次元化による内部欠陥解析        |          |
| 2-3-2 超音波による微小欠陥の可視化              |          |
| 2-4 ダイカストピストン製作による性能評価            | ..... 19 |
| 2-4-1 試験装置                        |          |
| 2-4-2 試験条件                        |          |
| 2-4-3 試験結果                        |          |

### 第3章 全体統括

|                                       |          |
|---------------------------------------|----------|
| 3-1 複数年の研究開発成果                        | ..... 22 |
| 3-1-1 ダイカストピストン用アルミニウム合金の開発           |          |
| 3-1-2 鋳造シミュレーションを用いた金型法案の適正化          |          |
| 3-1-3 X線 CT 画像の3次元化、および超音波画像による内部欠陥検査 |          |
| 3-1-4 ダイカストピストン制作による性能評価              |          |
| 3-2 研究開発後の課題                          | ..... 23 |
| 3-3 事業化展開                             | ..... 23 |

## 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

#### 1-1-1 研究背景

自動車エンジン用ピストンはアルミニウム合金を重力鑄造法(以下GDC法)で製作し、熱処理を行ない機械加工で仕上げるのが一般的であるが、この鑄造法はダイカスト製法(以下 DC 法)に比べ鑄造サイクルが約2倍になることや長時間の熱処理を要することなどで、製作に要する時間が長く、また材料及びエネルギー使用量において無駄が多い。

このため熱処理を簡略化できる材料の開発と、薄肉でも鑄造が可能な DC 法が有効であるが、通常の DC 法は空気の巻き込み欠陥が発生し、強度、耐圧性に問題があるため実用化の事例は少なく、いまだにGDC法のピストンが主流である。そこで本研究ではピストンをダイカスト化すると共にアルミダイカスト製品内に存在するピンホール欠陥に注目し、非破壊でこれをX線CT画像の3次元化及び超音波画像探傷で検出することを研究した。

重力鑄造法： 溶かしたアルミニウム合金を自然重力によって鑄型に注入する方法。

重力を利用することからグラビティ法、あるいはGDC(Gravity Die Casting)法とも呼ばれている。

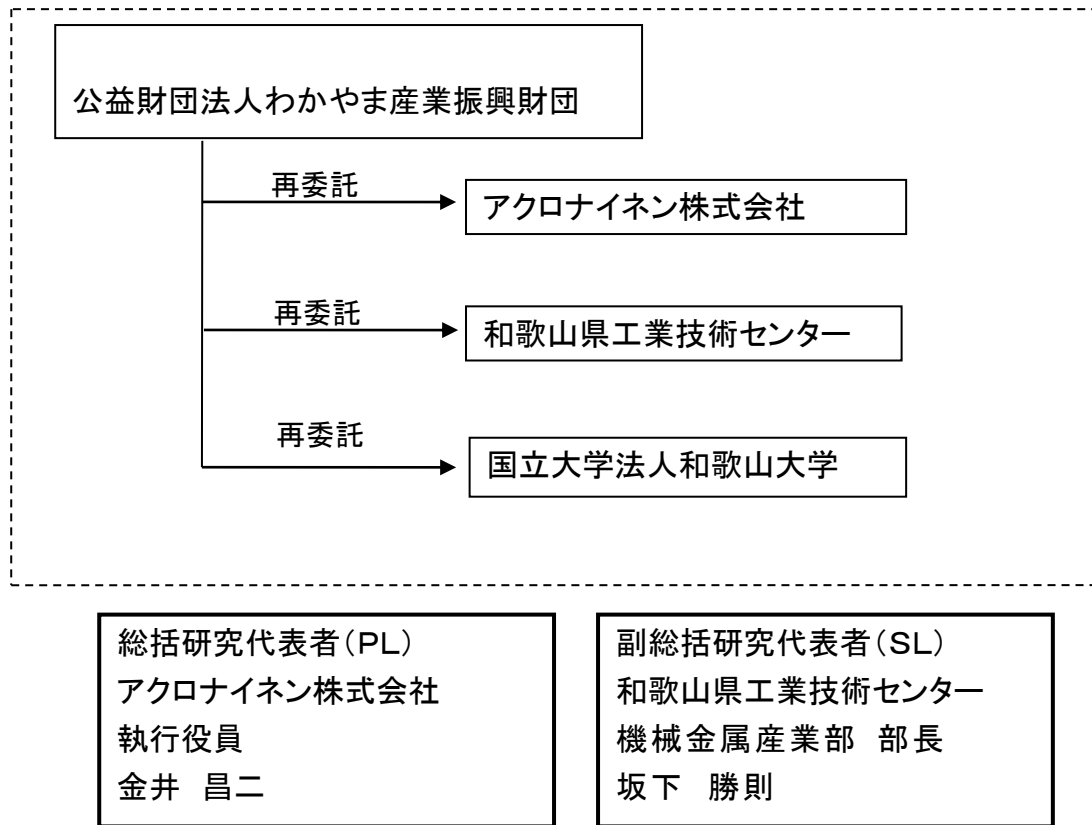
ダイカスト製法： プランジャチップでプランジャスリーブ内の溶湯を高速、高圧で鑄型空隙部に射出する鑄造方法。

#### 1-1-2 研究目的及び目標

本研究開発では、ダイカスト鑄造の出来るピストン用アルミニウム合金の開発や、現状ピストン製造で行われている熱処理方法の改良、及び内部欠陥検査システムの検討などにより、自動車エンジン用ピストンの生産効率向上に資するダイカスト鑄造技術の開発を目的とする。

## 1-2 研究体制

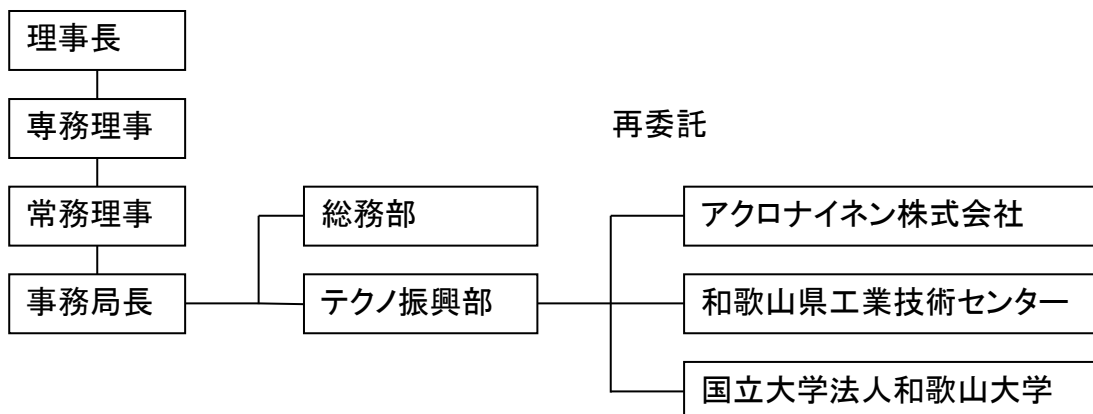
### 1-2-1 研究組織



### 1-2-2 管理体制

#### (1) 事業管理機関

[公益財団法人わかやま産業振興財団]

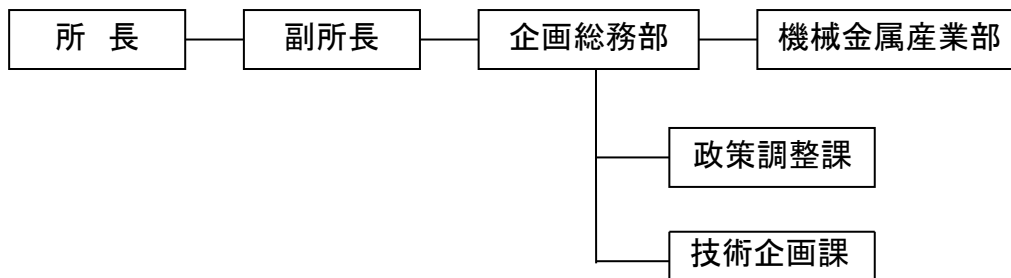


## (2)再委託先

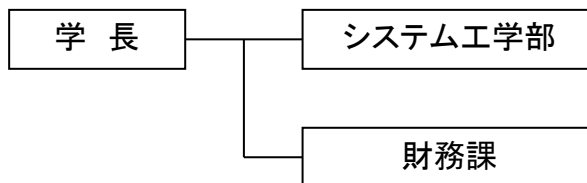
アクロナイン株式会社



和歌山県工業技術センター



国立大学法人和歌山大学



## 1-2-3 研究者氏名

【事業管理機関】 公益財団法人わかやま産業振興財団

管理員

| 氏 名    | 所属・役職               | 項目                       |
|--------|---------------------|--------------------------|
| 三井 誠   | テクノ振興部 部長           | プロジェクト管理<br>運営、契約、<br>経理 |
| 成川 佳弘  | テクノ振興部 テクノ振興班 班長    |                          |
| 大平 美穂  | テクノ振興部 テクノ振興班 班長    |                          |
| 山西 妃早子 | テクノ振興部 テクノ振興班 主任    |                          |
| 阪井 幸宏  | テクノ振興部 テクノ振興班 主査    |                          |
| 西前 浩平  | テクノ振興部 テクノ振興班 主査    |                          |
| 田尻 智子  | テクノ振興部 テクノ振興班 主事    |                          |
| 吉村 ルリ子 | テクノ振興部 テクノ振興班 主事    |                          |
| 杉本 五月  | テクノ振興部 テクノ振興班 事務補助員 |                          |
| 南宅 芳彦  | 総務部 班長              |                          |

【再委託先】

アクロナイネン株式会社

| 氏 名   | 所属・役職         | 研究項目                                                                                            |
|-------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 羽賀 厚郎 | 常務取締役         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・ダイカストピストン用アルミ合金の開発</li> <li>・ダイカストピストン用の性能評価</li> </ul> |
| 金井 昌二 | 執行役員          |                                                                                                 |
| 小林 照幸 | 製造部 技術・開発課 課長 |                                                                                                 |
| 谷口 直也 | 製造部 技術・開発課 課長 |                                                                                                 |
| 仲田 新一 | 製造部 技術・開発課 係長 |                                                                                                 |
| 勝本 悟士 | 製造部 技術・開発課 係長 |                                                                                                 |

和歌山県工業技術センター

| 氏 名    | 所属・役職             | 研究項目                                                                             |
|--------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 坂下 勝則  | 機械金属産業部 部長        | <ul style="list-style-type: none"> <li>・X線CT画像の3次元化による内部欠陥解析および金属組織試験</li> </ul> |
| 古田 茂   | 機械金属産業部 部長        |                                                                                  |
| 花坂 寿章  | 機械金属産業部 副主査研究員    |                                                                                  |
| 時枝 健太郎 | 企画総務部 技術企画課 主査研究員 |                                                                                  |

国立大学法人和歌山大学

| 氏 名   | 所属・役職                     | 研究項目                                                              |
|-------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| 村田 頼信 | システム工学部 光メカトロニクス学科<br>准教授 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・超音波による微小欠陥の可視化</li> </ul> |

### 1-3 成果概要

#### 1-3-1 ダイカストピストン用アルミニウム合金の開発

自動車用ピストン材料として高温強度に優れたアルミニウム合金の成分を決定し、評価用のピストンを製造した。

#### 1-3-2 鑄造シミュレーションを用いた金型方案の適正化

鑄造シミュレーションを用いて鑄造欠陥の少ない金型方案を決定した。  
また凝固解析を行い、最適な部分加圧タイミングを見出す事ができた。

#### 1-3-3 X線CT画像の3次元化、および超音波画像による内部欠陥検査

X線 CT においては、本研究でのダイカスト鑄造品は内部欠陥が少なく微細であるために、ピストン形状に対するスライス面の向きの違いによって検出欠陥が異なる事が確認できた。

超音波による微小欠陥の可視化については差分補償技術による励振(送信)パルスの除去技術を画像探傷に適用させた結果表層面においてもφ0.3 mmの人工欠陥を検出することができた。

#### 1-3-4 ダイカストピストン製作による性能評価

市販されている自動車用ピストンと同等の品質のピストンを製作し、エンジン耐久試験相当の試験にて100時間運転で問題ないことが確認できた。

### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理者 公益財団法人わかやま産業振興財団

代 表 者 理事長 島 正 博

住 所 和歌山県和歌山市本町二丁目1番地  
フォルテワジマ6階

担 当 者 テクノ振興部 テクノ振興班 班長 大平 美穂

連 絡 先 電話:(073)432-5122

FAX:(073)432-3314

E-mail: oohira@yarukiouendan.jp

## 第2章 本論

### 2-1 ダイカストピストン用アルミニウム合金の開発

本研究における材料開発において、自動車エンジン用ピストンに求められる特性を調査し、通常自動車用ピストン材料として用いられる事の多い AC8A-T6(重力鑄造法)を元に目標値を表1と定めた。目標値を基準にさらに耐摩耗性・高温疲労強度・低熱膨張係数を重視した開発を行った結果、ADC12 をベースに Cu7.0wt%、Mg1.5 wt%を添加した「12-7Cu-1.5Mg」を鑄造材料にすることとし T5 処理を施したものは、高温引張試験において、表2に示すように AC8A-T6 材よりも高い強度を得る事が出来た。

表 1 開発材料目標数値

|                       |                                |            |        |
|-----------------------|--------------------------------|------------|--------|
| 機<br>械<br>的<br>性<br>質 | 引張強度<br>(MPa)                  | 常温         | 300    |
|                       |                                | 250℃       | 134    |
|                       |                                | 300℃       | 105    |
|                       | 0.2%耐力<br>(MPa)                | 常温         | —      |
|                       |                                | 250℃       | —      |
|                       |                                | 300℃       | —      |
|                       | 伸び(%)                          | 常温         | (1.0)  |
|                       |                                | 250℃       | (9.9)  |
|                       |                                | 300℃       | (18.6) |
|                       | 硬度(HRB)                        |            | 70     |
| 物<br>理<br>的<br>性<br>質 | 疲れ強さ(MPa)                      |            | (120)  |
|                       | 衝撃値(kJ/m <sup>2</sup> )        |            | (12)   |
|                       | 流動長(mm)                        |            |        |
|                       | 固相線温度(℃)                       |            | 530    |
|                       | 液相線温度(℃)                       |            | 570    |
|                       | 線膨張係数<br>(10 <sup>-6</sup> /℃) | (20~100℃)  | 20.0   |
|                       |                                | (100~200℃) | 21.0   |
|                       |                                | (200~300℃) | 22.0   |

表 2 12-7Cu-1.5Mg(T5) と AC8A(T6) の比較

| 材質           | 引張強さ<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |     |
|--------------|------------------------------|-----|
|              | 常温                           | 高温  |
| 12-7Cu-1.5Mg | 244                          | 143 |
| AC8A-T6      | 300                          | 134 |

## 2-2 鋳造シミュレーションを用いた金型方案の適正化

鋳造シミュレーションソフトは茨城日立情報サービス株式会社製「鋳造シミュレーションシステム ADSTEFAN」を用い、鋳造シミュレーションを行い製品形状および金型方案を決定した。(図 1)

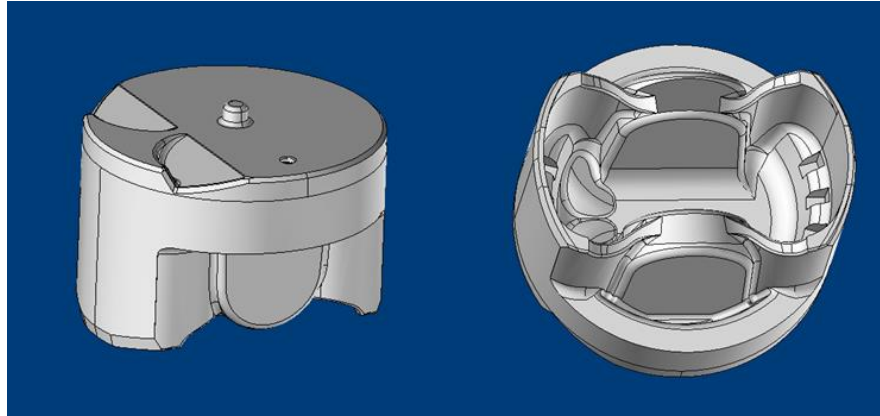
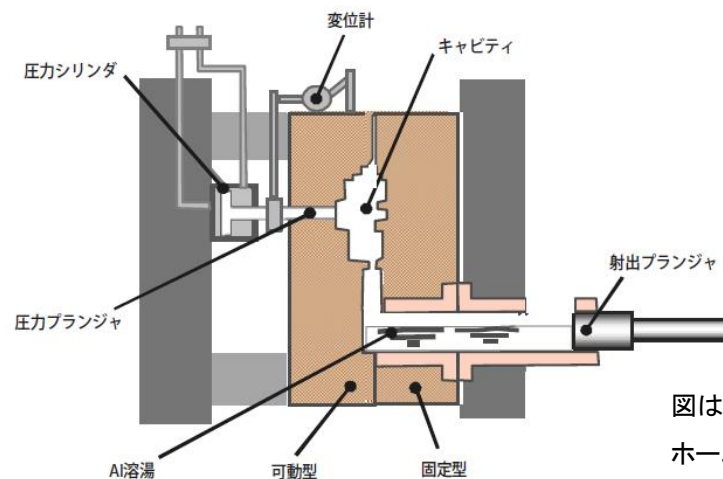


図 1 ピストン形状

H23 年度迄の研究では目標としていた気孔率は満足出来ていなかった。量産での製造上のバラツキを考慮した場合、鋳造品質は出来るだけ高いほうが良い。そこで部分加圧鋳造法を用いてダイカスト時に発生する鋳造欠陥を抑える事を考慮した。部分加圧鋳造法とはキャビティ内に溶湯を充填完了後、凝固過程中にキャビティ内の一部を直接加圧する方法である。直接加圧することにより凝固収縮相当量の溶湯を部分的に補給できるため、ひけ巣の少ない高品質なダイカストを得ることができる。二段加圧や局部加圧とも呼ばれる。



図は日本ダイカスト協会  
ホームページより抜粋

図 2 部分加圧説明図

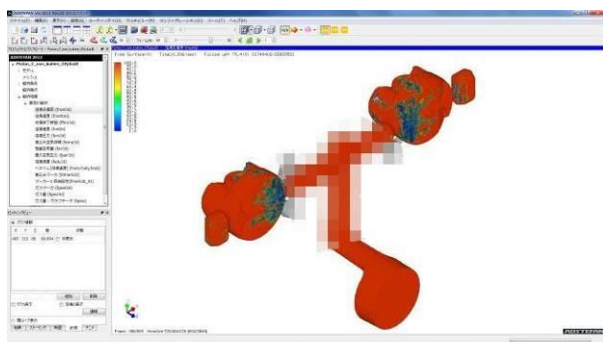


図3 鋳造シミュレート結果



図4 実鋳造品

また部分加圧は金型内に充填されたアルミ合金が固まってしまう前に加圧する必要があるので同じく鋳造シミュレーションソフトを用いて金型内でのアルミ合金の凝固過程の製品部の温度変化をモニターし、射出完了後の経過時間毎の製品部(図5の位置)の温度変化をグラフ化した物を図6に、製品部の凝固過程を示した物を図7に示す。

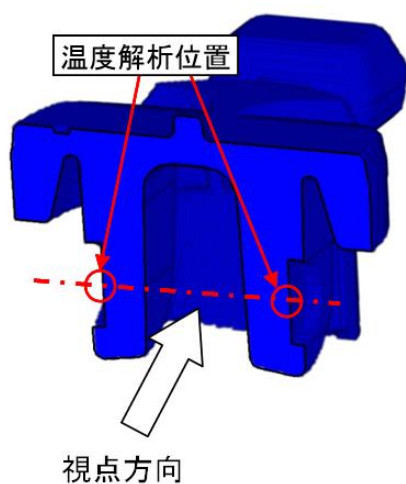


図5 凝固過程温度モニター位置

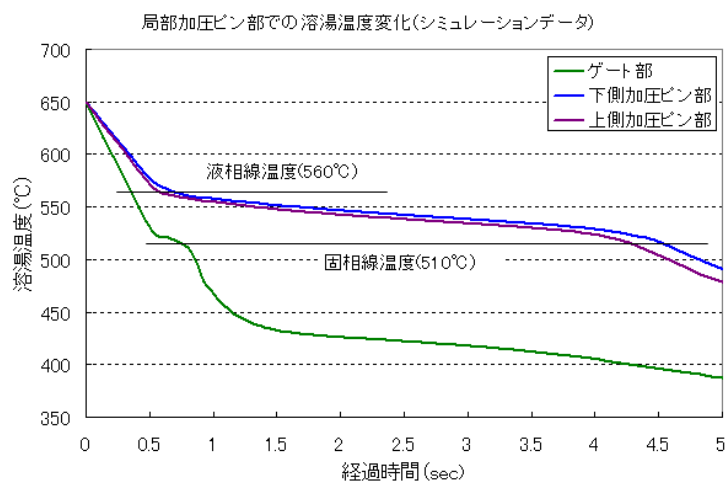


図6 ピン穴部の溶湯温度変化

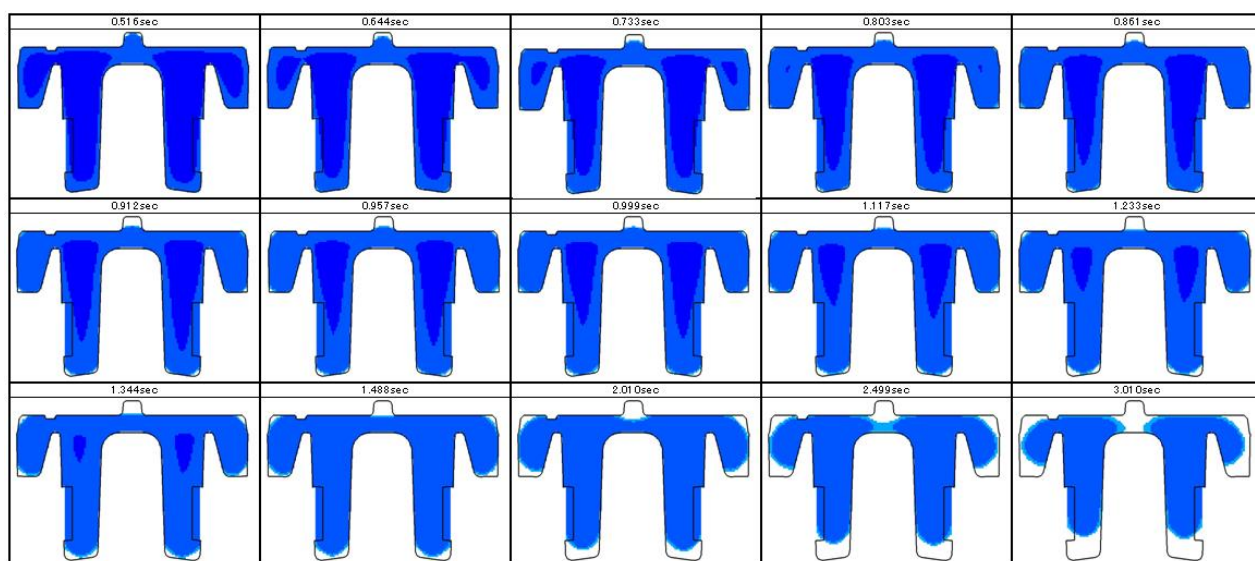


図 7 ピストン凝固過程シミュレート結果

加圧のタイミングはゲート部が固相線温度以下になり製品部（加圧該等部）の材料が液相線温度と固相線温度の間で加圧する事が効果的と考えられるため、本研究での開発材料の液相線温度：560℃及び固相線温度：510℃であることから、図 7 より射出終了後 0.5 秒から1秒の間で加圧する事が最も効果的であるとと考えられ、実鑄造の結果においてもシミュレーションの結果通り0.5 秒～1 秒の条件において断面に目視で確認できる鑄造欠陥は見られなかった。

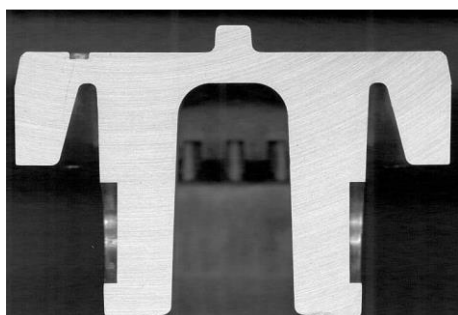


図 8 鑄造品断面カット結果  
（射出終了後 0.5 秒で加圧）

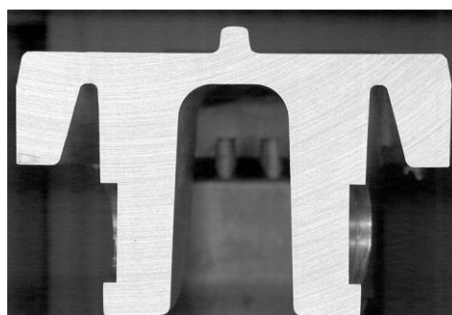


図 9 鑄造品断面カット結果  
（射出終了後 1 秒で加圧）

また現状市販されている自動車用ピストンを購入し、断面カット評価を行い実力値を確認した。

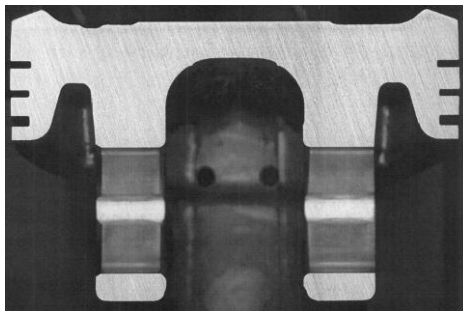


図 10 660cc自動車用ピストン  
(GDC 製)

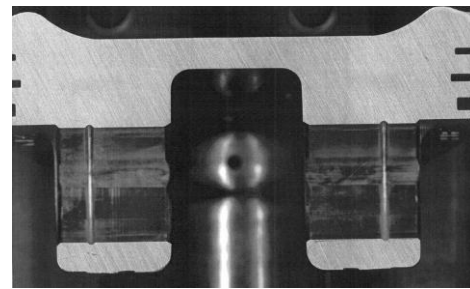


図 11 1,300ccハイブリッド車用ピストン  
(DC 製)

DC 製、GDC 製共に目視で確認出来るレベルの鑄造欠陥は見られなかった。本研究での成果物であるピストンにおいて、断面カットでの確認では市販されている自動車用ピストンと同等の鑄造品質が得られた事が確認出来た。

## 2-3 X線CT画像の3次元化、および超音波画像による内部欠陥検査

### 2-3-1 X線CT画像の3次元化による内部欠陥解析

#### (1)産業用 CT スキャナ(X線CT)と欠陥解析システム

X線CTは産業用CTスキャナ TOSCANER-24200AV(東芝 ITC)を使用した。外観を図 12 に主要仕様と設定条件を表 3 に示す。

産業用 CT スキャナは、X 線出力が大きく透過能力が高い反面、X 線焦点サイズ及び透過線量を取得するためのスライス厚(検出器高さ)も大きいのが特徴であり、断面画像の分解能は期待できない。特にスライス厚が 1.0mm であるため、断面画像は厚み相当の情報を有し、3 次元に積層時に欠落する断面は上下画像から補間する必要がある。

表 3 X 線 CT の仕様と設定条件

| 項 目        | 仕 様・設 定            |
|------------|--------------------|
| スキャン方式     | トラバース/ローテーション      |
| X線出力       | 400kV 2mA          |
| 透過能力       | アルミ300mm, 鉄100mm   |
| 再構成エリア     | φ300 mm            |
| スライス厚      | 1.0 mm             |
| 画像再構成マトリクス | 2048×2048画素        |
| 再構成フィルタ関数  | FC2(CT値 1/4)       |
| 再構成画像階調    | 14ビット              |
| スキャンモード    | 60sec/180° ハーフスキャン |



図 12 X 線 CT 外観

アルミダイカストにはガス欠陥あるいは巻き込み巣と呼ばれる微細な気泡が多数存在するが、これら微細欠陥の検出は分解能不足であるため、引け巣のような比較的大きい欠陥の検出を効率よく行うことを優先した。図 13 に示す様に、1 回の連続スキヤンで4個のダイカストピストンの断面画像を取得することにより、1 個あたりの検査時間は約 16 分となり、検査済み品による各種試験、品質安定化のための継続的な欠陥検査への対応が可能となった。

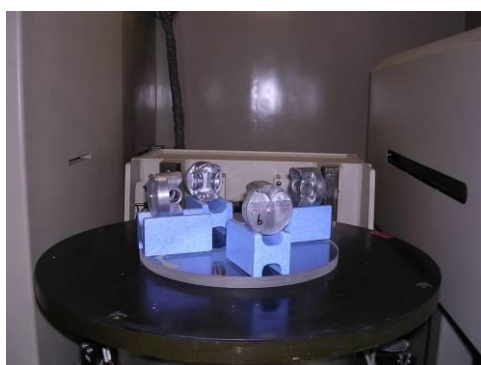


図 13 試料配置

表 4 欠陥解析条件 (VGStudiMax1.2.1)

| 項 目           | 設 定 条 件                       |
|---------------|-------------------------------|
| 空気／アルミ CT 値校正 | 領域指定による個別手動校正                 |
| 欠陥検出アルゴリズム    | 3D - Default                  |
| 最小欠陥サイズ       | 0.037mm <sup>3</sup> (8voxel) |
| 近隣ボクセルチェック    | check neighborhood            |
| 低画質領域シフト      | use quality map               |
| 欠陥の確実性        | Quality Limit 0.3             |

内部欠陥解析は、VGStudiMax1.2.1 を用いて断面画像を積層しボクセル化したモデルを個々のサンプルについて切出して行った。ボクセルサイズは再構成画像のピクセルサイズで、積層方向の分解能不足は直線補間した。欠陥解析条件は欠陥のないピストンで誤検出がないレベルに設定した。欠陥解析条件を表 4 に示す。

ボクセル (voxel)：体積 (volume) とピクセル (pixel) を組み合わせた造語で、体積の要素である。3 次元空間での立方格子単位の値を表し、2 次元画像データがピクセルで表されることに対応し 3 次元データに用いる。

## (2)アルミダイカスト試鑄ピストンの解析結果

欠陥解析の結果例を図 14 に示す。多数の試鑄ピストンの欠陥解析を行った結果、ピストンのピンボス部の片側だけに欠陥が現れたり、2 個取りの一方だけに欠陥が現れるなど、湯流れ凝固のタイミングの微妙なずれによると思われる現象を確認することができた。また、鑄造シミュレーションによる鑄造方案の改良、PF 法や部分加圧の特殊ダイカストによる鑄造欠陥防止効果を確認することができた。

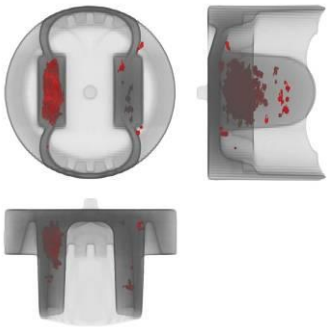
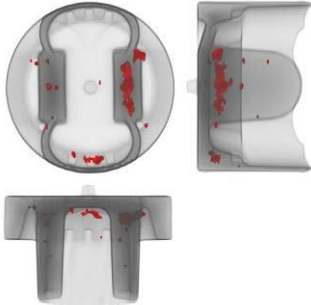
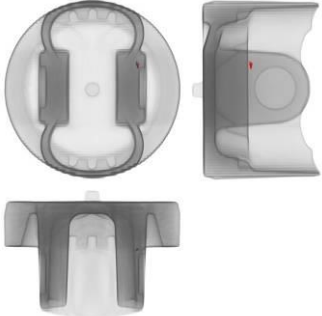
|                                                                                              |                                                                                                   |                                                                                                         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             |                  |                      |
| <p>普通ダイカスト</p> <p>体積 57551 mm<sup>3</sup></p> <p>欠陥 571 mm<sup>3</sup></p> <p>欠陥率 0.98 %</p> | <p>PF 法ダイカスト</p> <p>体積 57493 mm<sup>3</sup></p> <p>欠陥 123.5 mm<sup>3</sup></p> <p>欠陥率 0.214 %</p> | <p>PF 法+部分加圧ダイカスト</p> <p>体積 60449 mm<sup>3</sup></p> <p>欠陥 0.676 mm<sup>3</sup></p> <p>欠陥率 0.0011 %</p> |

図 14 アルミダイカスト試鑄ピストン解析結果の例

### 2-3-2 超音波による微小欠陥の可視化

#### (1)空間フリースキャニングシステムを用いた超音波画像探傷

空間フリースキャニングシステムは、図 15 のように測定者が探触子を手に持ち自由に被検体表面を走査して超音波画像探傷を行うことが可能な非接触型三次元スキャナーシステムである。従来のリニアステージを使った機械スキャン超音波画像探傷では、検査対象物は限定され超音波の入射角度や走査範囲も固定される。また、フェイズドアレイ探触子を使った電子スキャン超音波画像探傷法は、探触子の開口面が大きく、複雑な形状の被検体への適用は困難であり、しかも適用する被検体に応じてくさびを作製する必要がある。一方、本提案システムでは、光学式位置センサを使って非接触で超音波探触子の空間位置（三次元座標）および角度情報（超音波の入射角度）を得るところに特徴があり、被検体の形状に制限がなく、自由な位置および方向から超音波を入射して内部の波動情報を取得することが可能である。また、これらの情報はリアルタイムでの取得も可能であり、撮像結果を見ながら異常があった部分への集中的な探傷（つまり、異常箇所に対し、探傷可能なあらゆる方向から超音波を照射して探傷）も行うことができる。これにより、空間的な平均化処理による撮像品質の向上のみならず、欠陥の形状認識も実現可能である。さらに、このシステムを用いた超音波撮像結果は、被検体の内部欠陥位置や形状を高精度に測定するだけでなく、探傷面の形状（つまり被検体の外形状）も同時に描画されるため、視覚的にも欠陥の位置や性状（欠陥の種類や進展性など）を評価することができる特徴を持つ。本研究では、光学式位置センサとして、POLARIS (NDI 社製)を用いた。このセンサは、赤外線を探触子に取り付けたマーカに照射しその反射を取得することで、探触子の

空間座標(精度:約0.04mm)および姿勢角(精度:約 $0.1^{\circ}$ )を同時にリアルタイム(サンプリングレート:60 サンプル/秒)で測定することが可能である。一方、粗面からの探傷を可能にしたソフトプローブが市販されており、本研究では、このソフトプローブの先端部分の柔軟素材の強度や耐久性を改良し、自由に入射角を変更(垂直探傷を $0^{\circ}$ とした場合、 $\pm 10^{\circ}$ 程度)できるようにした。

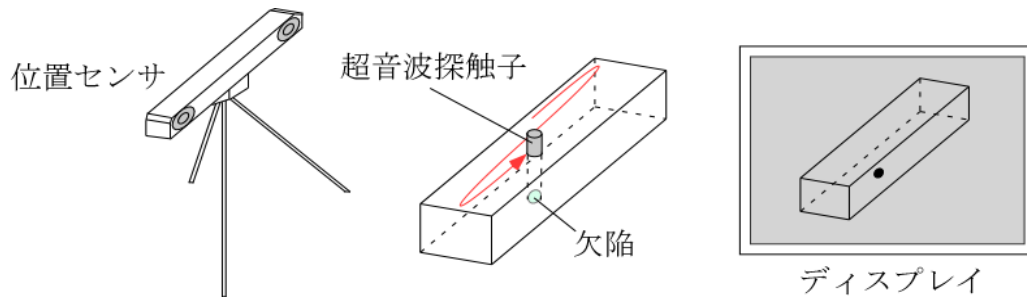


図 15 空間フリースキャニングシステム

## (2) 超音波画像探傷における探傷精度向上に対する検討

空間フリースキャニングシステムを用いた超音波画像探傷では、3次元撮像による粗探傷と、2次元断面撮像による精密探傷の2ステップ探傷を提案している。ここでは、精密探傷における高精度化技術について検討を行った。

### 超音波画像探傷の空間加算平均化処理

空間フリースキャニングシステムでは、3次元粗探傷で欠陥が見つければ、その箇所に対し、あらゆる方向から超音波を照射して集中的に精密探傷を行うことが可能である。この利点を生かして、画像探傷結果の画素ごとに加算平均を行いながら超音波画像探傷を行うことによって、過去の探傷結果を考慮し、あらゆる方向からの探傷結果を空間的に平均する探傷方法(空間加算平均画像探傷法)を検討した。手法として、図 16 に示すように、新しく取得した探傷結果  $A_{ij}$  と前回までの加算平均探傷結果  $B_{ij}$  から、撮像した回数  $n_{ij}$  を用いて画素ごとに空間平均化処理を行った。これにより、異なる入射方向からの探傷結果を蓄積することが可能となり、画質の改善につながると考えられる。例えば、ある位置から探傷した撮像結果では多重反射などが原因で虚像が発生することがあるが、異なる位置からの探傷ではその虚像は発生しない。そのため、多くの位置から探傷を行うと、結果として、虚像は低減され、欠陥画像のみが抽出される効果がある。

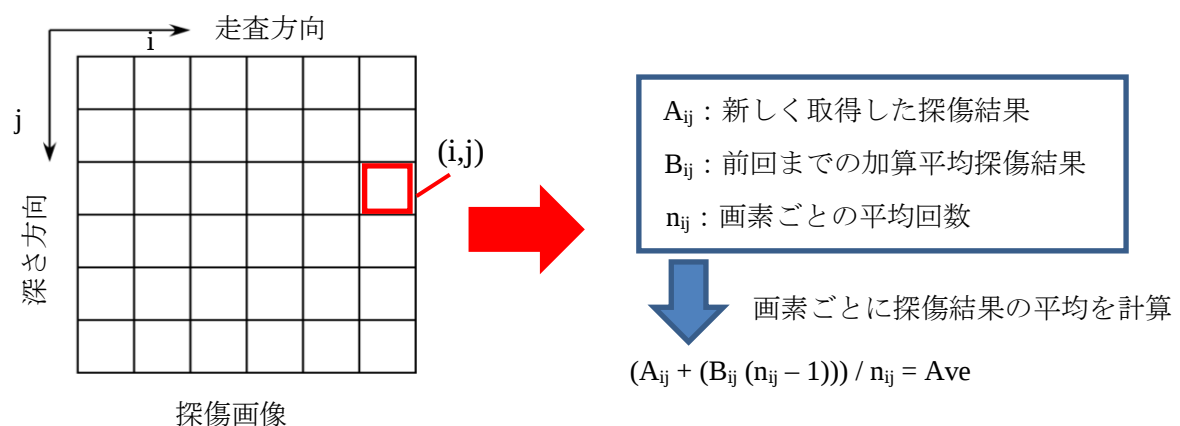


図 16 空間加算平均化処理

### 差分補償技術による超音波画像探傷

超音波探傷では、通常、駆動電気パルスを振動子に与えて振動子を励振させることで超音波を発生させる。このとき、一探触子法では、振動子は送信子だけでなく受信子としても働くため、励振された振動(本報告書では励振(送信)パルスと記す)をそのまま電気信号に再変換して受信する。このため、励振パルスと欠陥エコーが重なる極表層の領域は不感帯となって、この領域に存在する欠陥を超音波探傷するとき、欠陥画像を検出できない。提案した補償技術は、励振パルスと欠陥エコーとの重なりを低減するために、励振パルスのみを探傷波形の時系列データから減算することで欠陥エコーのみを検出する方法、つまり差分補償技術ある。手順として、まず、健全部で励振パルスのみを検出し、欠陥部の探傷波形から励振パルスを減算した。通常の探触子では被検体の接触状態が変わると励振パルスの形状が変わってしまうが、提案するフリーアングルプローブでは、開口面の柔軟材料によって被検体との密着性が良く、探傷位置が変わっても通常の探触子に比べ励振パルスの差異は小さいことが確認できた。

### 提案した探傷精度向上手法の検証

図 17 に示すように、アルミダイカストピストンの上面から深さ 3mm の極表層の位置に側面から  $\phi 0.3\text{mm}$  のドリル穴をあけ、その断面を上面から画像探傷を行うことで提案手法の有効性を検証した。検証には、 $\phi 5\text{mm}$  の開口で中心周波数が 15MHz のフリーアングルプローブを用いた。

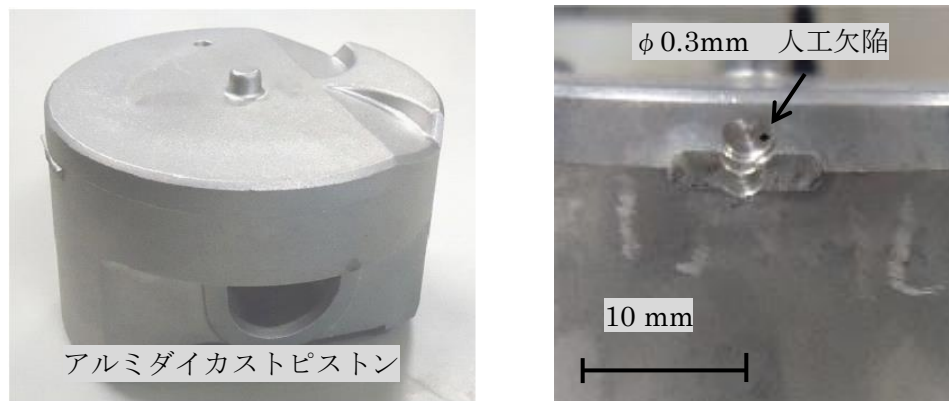
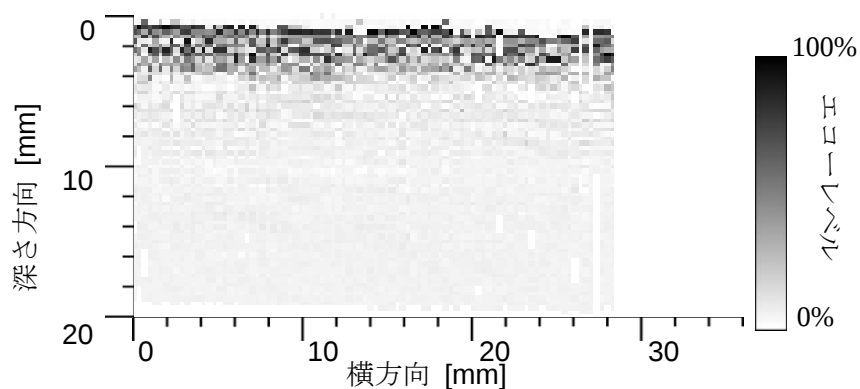


図 17 アルミダイカストピストン表層部の微小人工欠陥

図 18 に、従来探傷法と比較して、提案手法による探傷結果を示す。この結果から、従来探傷法(図 18(a)参照)では粒状のノイズが画像全面にわたって分布していることが確認される。一方、空間加算平均処理減算処理を行うことで、画質が向上(SN 比が約 10dB 改善)し欠陥画像が表れていることが確認できる(図 18(b)参照)。さらに、図 18(c)に示すように、差分補償処理を行うことで、欠陥エコーと送信パルスが重なった場合でも、送信パルスの像が減少し、深さ 3mm の極表層の位置に存在するφ 0.3mm の微小人工欠陥の像を検出可能であることがわかった。一方で、筋状の像が少し残っていることも確認できた。これは、フリーアングルプローブであっても、表面粗度による送信パルス形状の違いを完全に消し去ることができなかったことが考えられる。



(a) 従来探傷結果

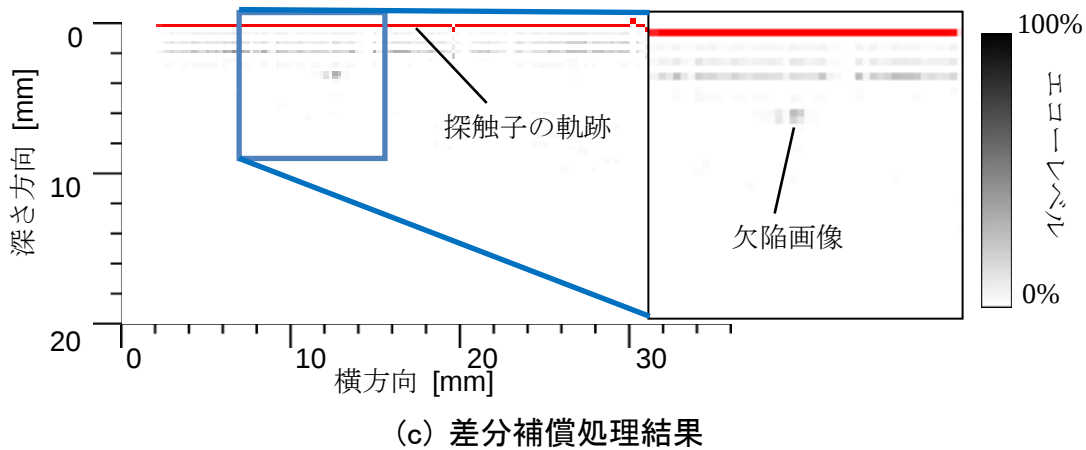
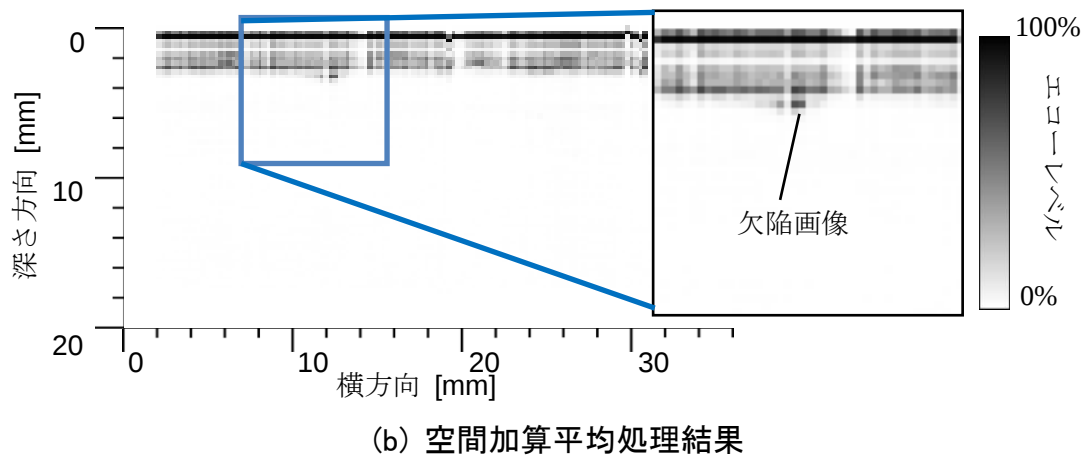


図 18 提案する高精度化手法による超音波画像探傷結果 (15 MHz)

### (3) アルミダイカストピストンのピンホール欠陥に対する超音波画像探傷

実際のアルミダイカストピストンに対して内在するピンホール欠陥の超音波画像探傷を行った。図 19 に示すようにフリーアングル探触子を走査線 A と走査線 B 上で走査させ超音波画像探傷を行った。また、アルミダイカストピストンを、フライス盤を用いて断面観察を行い、X 線 CT 検査結果、超音波画像探傷結果と比較した。なお、探触子は口径  $\phi 5\text{mm}$ 、中心周波数 15MHz のフリーアングル探触子を使用した。

走査線 A の超音波画像探傷結果を図 20 に、走査線 B の超音波画像探傷結果探傷結果を図 21 に示す。また、走査線 A、走査線 B の X 線 CT 検査結果を図 22 に、走査線 A、走査線 B のフライス盤による断面観察結果をそれぞれ図 23、図 24 に示す。

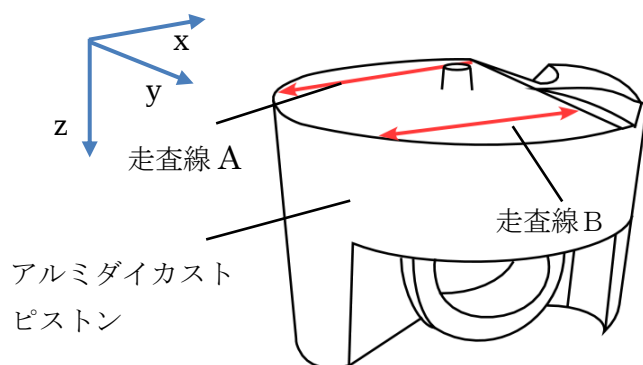
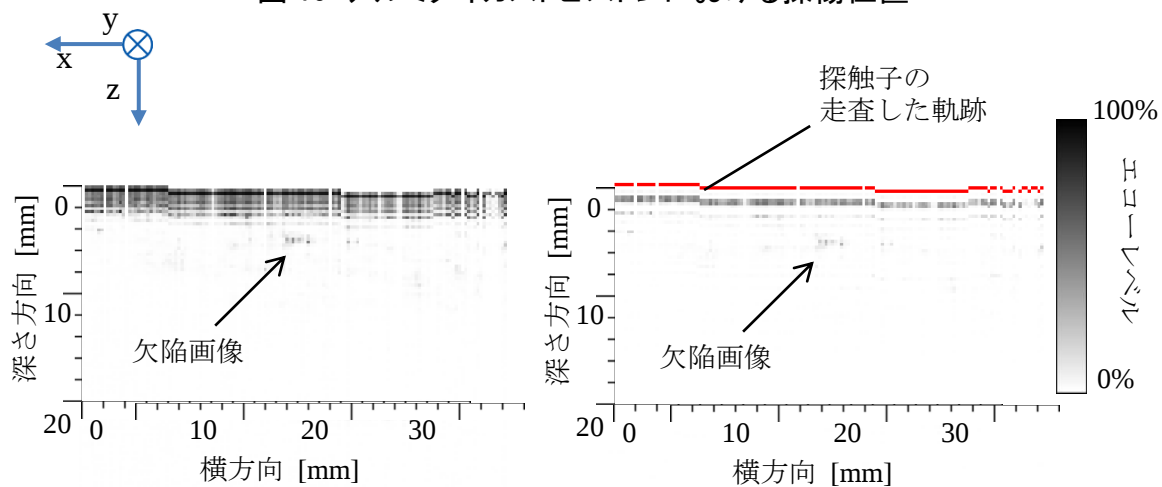


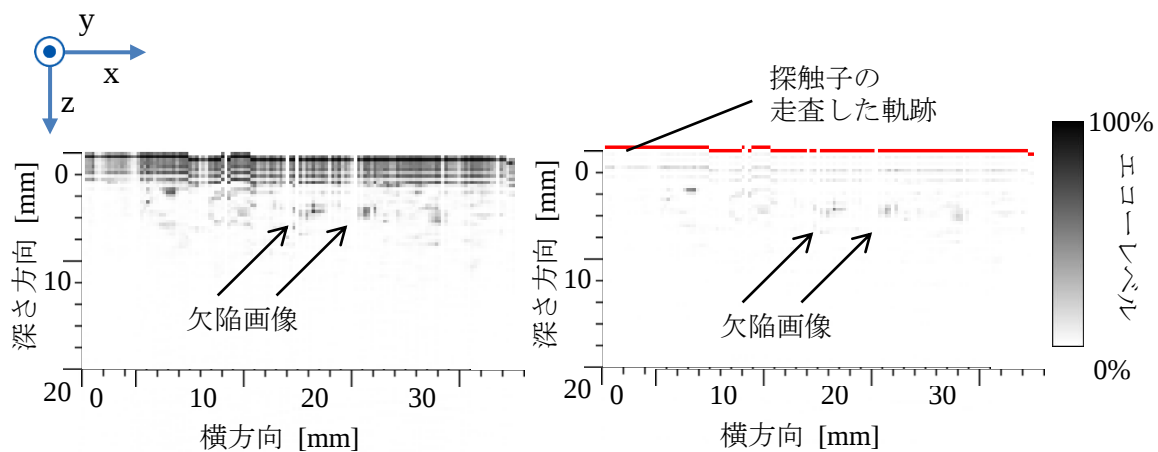
図 19 アルミダイカストピストンにおける探傷位置



(a) 空間加算平均画像探傷

(b) 差分補償＋空間加算平均画像探傷

図 20 走査線 A における超音波画像探傷結果



(a) 空間加算平均画像探傷

(b) 差分補償＋空間加算平均画像探傷

図 21 走査線 B における超音波画像探傷結果

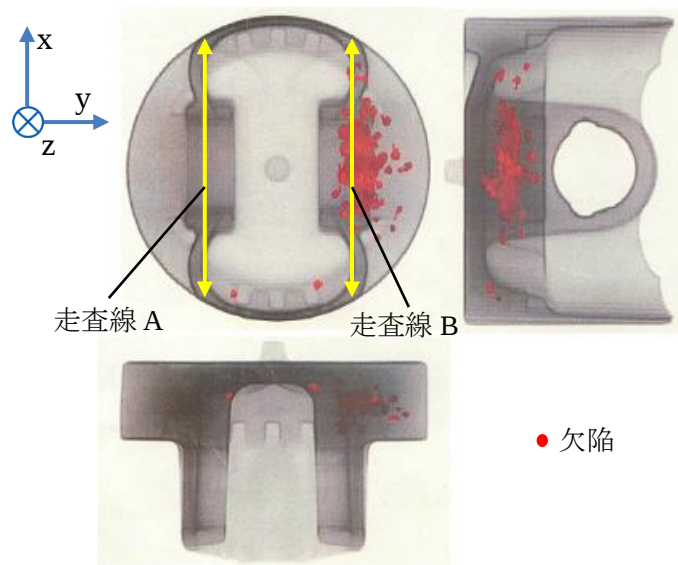


図 22 X 線 CT 検査結果

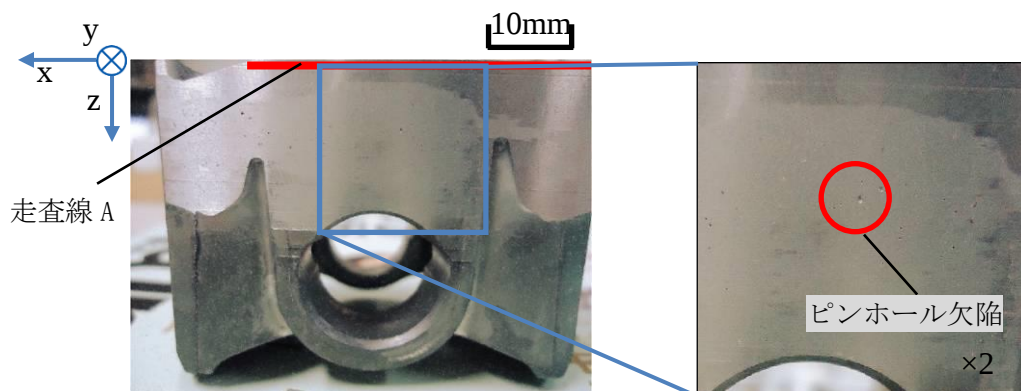


図 23 走査線 A における断面観察結果

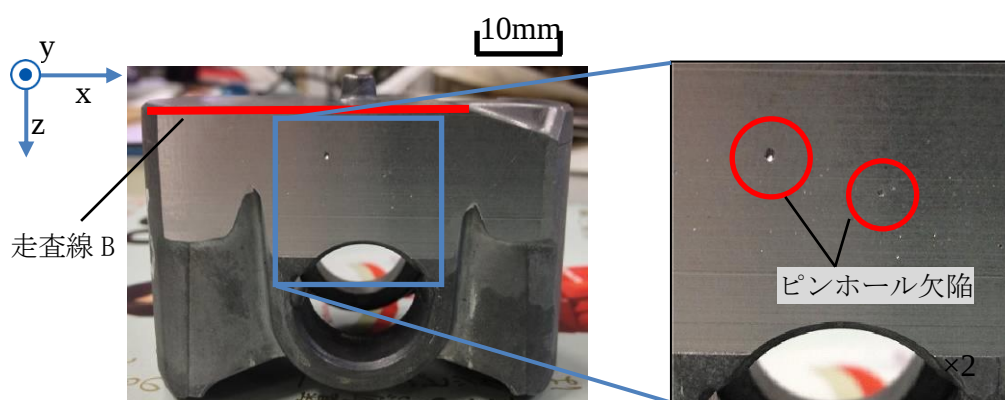


図 24 走査線 B における断面観察結果

図 20 に示すように、走査線 A では中心部表層のピンホールの存在が超音波撮像により確認できた。また、図 22 に示す X 線 CT と比較した結果、X 線 CT 検査で確認





図 26 負荷装置



図 27 ピストン組込治具

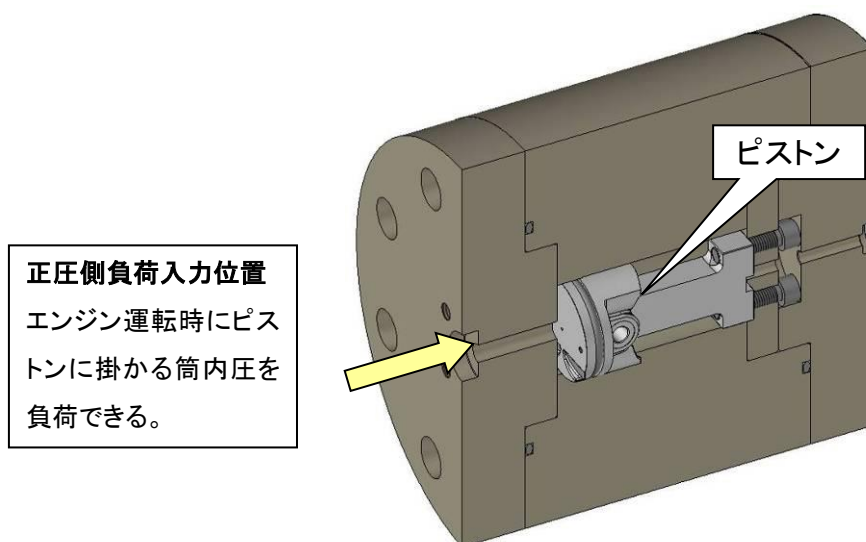


図 28 ピストン組込治具断面イメージ(正圧側)

#### 2-4-2 試験条件(表5)

内圧試験の条件として軽自動車のエンジン爆発時のシリンダ内の筒内圧力を想定し、正圧7MPa、またエンジン回転時のピストン自体の慣性力を計算し、背圧を1.5MPa、エンジンの回転数に相当する負荷の繰り返し速度をエンジンの6,000r.p.m.に相当する50Hz(4サイクルエンジンにおいて6,000r.p.m.で運転した場合は1秒間に50回の頻度で爆発が起こる為)、試験温度をエンジン運転時のピストンピン穴付近の温度を想定して210℃とし、300時間の試験を行なった。

表5 ピストン内圧試験条件

|   | 試験項目        | 試験条件                |
|---|-------------|---------------------|
| 1 | 正圧(筒内圧)     | 7 MPa               |
| 2 | 背圧(ピストン慣性力) | 1.5 MPa             |
| 3 | 繰返し負荷速度     | 50Hz(6,000r.p.m.相当) |
| 4 | 試験温度        | 210℃                |
| 5 | 耐久時間        | 300時間               |

### 2-4-3 試験結果

上記試験条件で試験を行なった後、ピストンを試験機より取り出し、ピン穴近傍にクラックが入っていないかの確認を行なった結果を図 29 に示す。総耐久時間は300時間であるが今回は100時間終了時点での確認結果となっている。

確認方法は浸透探傷試験法を用いて行った。今回は浸透探傷試験の中でも最も多く採用されている溶剤除去性染色浸透探傷試験を行なった。原理は表面のクラックを容易に目視できるようにするために毛細管現象および知覚現象を利用し、より拡大した像にして指示模様を検知する方法である。赤または蛍光の浸透液を毛細管現象でクラック(きず)の中に浸透させた後、表面の浸透液を洗浄液による拭取りまたは水洗などで除去する。残ったクラック(きず)内の浸透液を、白色微粉末の現像剤で吸出し、赤色または蛍光の拡大指示模様を形成させこれを観察することで、微細なクラック(きず)を検出できる。



図 29 ピストン内圧試験品クラック確認結果(100時間終了後)

浸透探傷試験の結果、ピストン外観、ピストンヘッド部、およびピストン内部にはクラックによる発色は見られなかったため問題ないと判断する。

本研究期間ではエンジン運転相当試験において100時間までは問題ないことが確認できた。

## 第3章 全体統括

### 3-1 複数年の研究開発成果

#### 3-1-1 ダイカストピストン用アルミニウム合金の開発

本研究における材料開発において、自動車エンジン用ピストンに求められる特性を調査し、耐摩耗性・高温疲労強度・低熱膨張係数を重視した開発を行った結果、ADC12 をベースに Cu7.0wt%、Mg1.5 wt%を添加した「12-7Cu-1.5Mg」を鑄造材料にすることとし、高温引張試験においては通常自動車用ピストン材料として用いられる事の多い AC8A 材よりも 250℃で 6%高い強度を得る事が出来た。

#### 3-1-2 鑄造シミュレーションを用いた金型方案の適正化

鑄造シミュレーションソフトと実鑄造との整合性を確認し、市販されている自動車用ピストンの品質と遜色の無い鑄造品質のダイカストピストンが鑄造できる金型方案の最適化に成功した。

#### 3-1-3 X線CT画像の3次元化および超音波画像による内部欠陥検査

X 線 CT による非破壊試験では、断面画像の観察や画像処理により欠陥の判定を行っているが、画像を積層して3次元化することで欠陥の大きさや分布状態を解析することができ、原因と対策案の指針とすることができた。内部欠陥の検出限界については、X 線 CT の構造仕様として、焦点サイズ 2mm、スライス厚 1mm であり原理的に微細な欠陥は画像としてボケるため境界は特定できず、数多く分布する微細欠陥の検出限界は特定できない。

X 線 CT の今後の活用については、欠陥解析したピストンでの強度試験、耐久試験を行うことによる欠陥による性能低下への影響の研究や鑄造品質の安定化のための非破壊検査等への活用が期待できる。

また本研究では、空間フリースキャニングシステムとフリーアングルプローブを用いた新しい超音波画像探傷法を提案し、アルミダイカストピストン内部の健全性評価を検討した。表面近傍の微小欠陥に対し、より探傷精度を向上させるために、探傷結果を蓄積して空間平均化処理を行う新しい撮像方法および差分補償技術による励振（送信）パルスの除去について検討を行った。結果として、X 線 CT 探傷でも検出が困難な表層部の  $\phi 0.3\text{mm}$  の人工欠陥を検出することができた。さらに、通常の超音波探傷では探傷困難な深さ 3mm の位置の微小人工欠陥を探傷した結果、差分補償技術により励振パルスによる影響を低減し、極表層に存在する微小欠陥を撮像することが可能となった。実際のアルミダイカストピストンにおけるピンホール欠陥の超音波画像探傷を試みた結果、切断した断面観察による内部のピンホール欠陥位置と超音波画像探傷の欠陥像の位置と一致する箇所があり、アルミダイカストピストン内部のピン

ホール欠陥に対して本手法が有効であることが実証できた。

以上のことから、今回提案した空間フリースキャニングシステムを用いた超音波画像探傷技術は、アルミダイカストピストンの極表層を含めた全領域に対し精密に内部検査することが可能であり、出荷前の最終検査において有用であるといえる。

#### **3-1-4 ダイカストピストン製作による性能評価**

エンジン試験と同等の試験（油圧サーボピストン内圧疲労試験）において100時間運転にて問題ない事が確認出来た。

#### **3-2 研究開発後の課題**

今後量産に向けては品質の安定性が重要な課題となる。ダイカスト鑄造時の鑄造欠陥をいかに安定して制御できるかが鍵となる。今後本研究中に見出した金型方案及び開発材料を用いて量産条件でのテスト生産を行い、品質の安定性を確認する必要がある。

また性能評価についても本研究中では100時間まで問題ないことは確認出来たが、目標である300時間に向けて引き続き評価を行なう必要がある。

超音波画像による内部欠陥の検査については表層部でも $\phi 0.3\text{mm}$ の欠陥を検出でき、装置の有効性は確認できた。但し量産化を考慮するとインラインでの全数検査が必要になることが考えられる為、送信パルスの入射位置や角度などを再考し、検出のスピードアップが大きな課題となる。

#### **3-3 事業化展開**

本研究において、ピストンについては現在市販されている自動車用ピストンの鑄造品質に遜色の無いピストンが開発できた。今後1年間で量産性の確認及びエンジン耐久試験同等の試験にて目標300時間をクリアし、実験データをまとめ自動車メーカーへのアピールを行う。3年後に実際の自動車メーカーのスペックを満足するピストンの設計、試作を行いエンジン試験を行なって行く事を目標とする。また超音波画像による内部欠陥の検査については3年後までにインラインで検査可能な状態に持って行き、自動車メーカー要求のスペックを満足するピストンの形状に合わせた測定方法を確立し、5年後の量産化を目指して取り組みたいと考える。