

## 複雑形状金属製品等の非破壊検査に関する技術開発

内海 宏和\*, 氏家 博輝

材料開発・分析技術部, (\* 現 自動車産業振興室)

鋳造品の機械加工面に欠陥が発見されると、廃棄または補修が必要となる。加工前に非破壊で欠陥を発見できれば、無駄な工程を回避でき、不良対策にも有効である。近年、超音波による探傷結果を画像化する手法が普及しつつあるが、鋳造品の材質に適した検査条件や検出限界を検討した例は少ない。そこで、最新の超音波検査技術を複雑な形状を持つ製品へ適用するために必要な技術開発を実施する。まずは単純な形状のアルミ鋳造品に人工きずを導入し、検出限界を確認した。さらに実製品、具体的にはアルミ重力鋳造品およびアルミと鋳鉄の鋳ぐるみ接合面への超音波画像検査の適用を試みた。

キーワード：非破壊検査, 超音波, 鋳造, 接合

## 1 緒言

超音波探傷は、物体の内部に存在するきずを調べる手法で、材質やサイズの制約が少ないことから、様々な製品の品質保証に適用されている。一般的な超音波探傷は一探触子を用いてきず等の反射源から返るエコー波を見てきずの位置や大きさを推定する。これに対して、近年反射エコーの分布を画像化する手法が普及しつつある。当センターでは、超音波による探傷結果を比較的簡便に画像化できる3D超音波検査装置(Matrixeye LT, 東芝電力検査サービス株式会社)を導入し、県内企業に対して技術支援を実施している。

非破壊検査は、どのような手法を用いるにしろ、検出限界を把握して適用する必要がある。しかしながら、用いる装置、検査対象、検査条件によって検出限界は異なると考えられる。そこで、一般的に超音波による検査が難しいとされるアルミニウム鋳造品の内部きずの3D超音波検査装置による検出限界を明らかにすることを目的に、単純な形状の試験片に人工きずを導入し検出限界を確認した。さらに、実製品への超音波画像検査の適用を試みた。

## 2 アルミニウム鋳造品の適用限界検討

## 2.1 実験方法

図1に、検出限界確認用の試験片形状を示す。図1に示す金型に所定の温度で鋳込んだ後、約40mm長さの円柱状に切断した。円柱の両端面を旋盤で仕上げた後、片側の端面に人工きずを導入した。形状は直径3mmと直径

1mmの円形で、それぞれ深さ2mmの平底穴とした。材質はAC7A (Al-4Mg), AC4A (Al-9Si-0.5Mg)とした。AC7Aについては、検出限界に与える結晶粒径の影響を調べるため、微細化材(Al-5Ti-1B)の添加と鋳込み温度および金型温度を調整して結晶粒径を100～500  $\mu$ m程度としたサンプルを6種類用意した。また、AC4Aについては共晶Siの形状による影響を調べるため、Srを約150ppm添加したサンプルを別に用意した。

表1に、3D超音波探傷装置における探傷条件を示す。得られた人工きず底面を含む領域の探傷像に対して、バックグラウンドときず部のS/N比を算出し、組織の影響と検出限界を確認した。

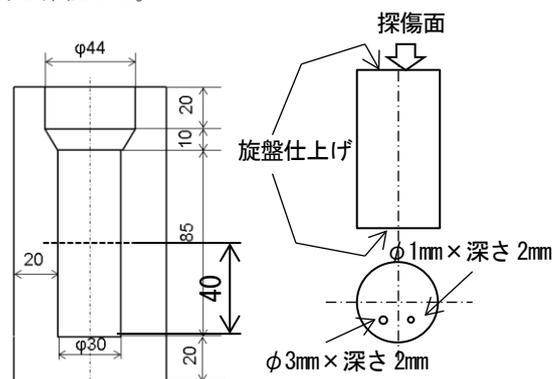


図1 アルミニウム鋳造品試験片の形状

表1 探傷条件

検査方法	水浸法, 垂直探傷
周波数	5MHz
素子数, ピッチ	64, 0.9mm
サンプリング周波数	40MHz
テストピース音速	6400m/sec
Mesh size	0.5mm×0.6mm

## 2.2 実験結果及び考察

図2に、AC7Aにおける結晶粒径と人工きずのS/N比の関係を示す。結晶粒径が100~500  $\mu\text{m}$ 程度の範囲では、S/N比はほぼ一定であった。図3に、材質によるS/N比の変化を示す。AC7Aと比較すると、AC4AはS/N比が小さかった。Srを添加すると、S/N比が僅かに大きくなった。S/N比が小さくなる要因は超音波の減衰の影響と考えられる。超音波の減衰は、波長と結晶粒径、晶出物の量や形状により変化する。本検討では探傷に用いた周波数が5MHzのみであるため、波長による影響はない。図4に、AC7Aの結晶粒径が異なるサンプルのマイクロ組織を示す。図5に、AC4AとAC4A+Srのマイクロ組織を示す。AC7Aは固溶体であり、若干量の不純物による晶出物が存在するのみで、共晶組織はほとんど認められない。これに対してAC4Aは共晶Siが存在する。これらより、共晶Siにより超音波が減衰し、結果的に人工きずのS/N比が小さくなり検出性が悪化するものの、Sr添加により共晶Siが微細化し、S/N比が改善すると考えられる。

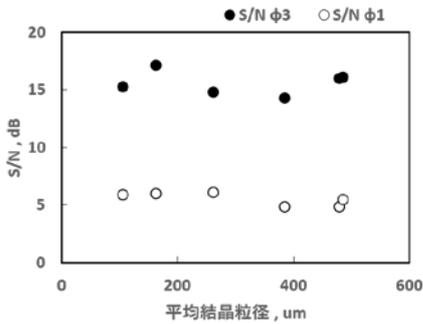


図2 AC7A 材の結晶粒径と人工きず S/N 比の関係

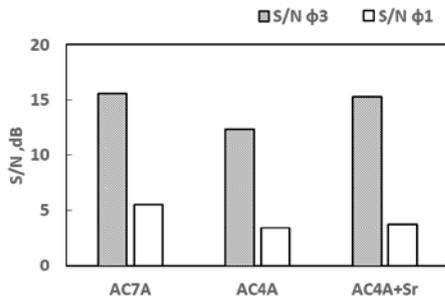


図3 材質による S/N 比の変化

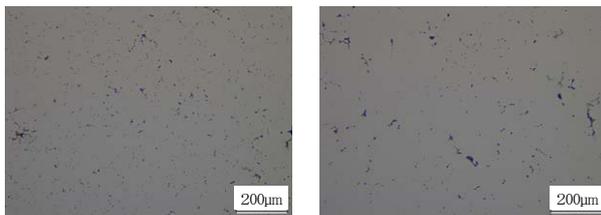


図4 AC7A のマイクロ組織(エッチング無し)

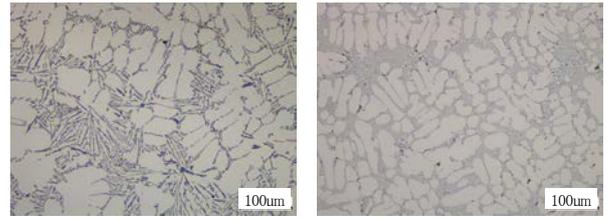


図5 AC4A のマイクロ組織(エッチング無し)

図6に、AC7AとAC4Aについて、3D超音波探傷装置における検出限界を検討した結果を示す。得られた探傷画像から、弁別可能なS/N比を3dBとした。この場合、検出限界はAC7Aで0.5mm, AC4Cで0.9mmと考えられる。図3より、AC4CにSrを添加すると、AC7A程度まで検出限界は向上すると考えられる。

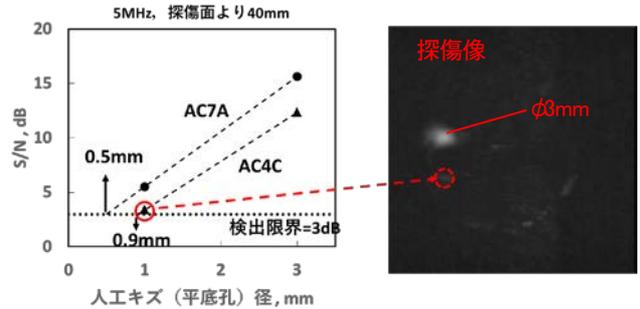


図6 アルミニウム鋳造合金の検出限界

## 3 実製品への適用例

### 3.1 アルミニウム重力鋳造品

県内企業が製造するアルミニウム重力鋳造品について、3D超音波探傷装置を用いて内部きずの検出を試みた。図7に探傷の様子を示す。プローブ周波数は15MHzとし、水浸法にてネジ穴加工予定部周辺を探傷した。なお、探傷面は鋳肌のままであり、仕上げ加工は施さなかった。



図7 アルミニウム鋳造品の探傷状況

図8に、探傷像を示す。参考のためX線CTにて撮影した結果を合わせて示す。超音波探傷像とX線CTで確認される内部きずの検出位置はほぼ同じであった。ネジ穴加工位置にきずの反応は認められなかった。本製品の材質はAC4A (Sr添加)であることから、検出限界は0.5mm程度と考えられる。従って本製品を加工した場合、ネジ穴加工部には0.5mm以上のきずは無いと予測できる。

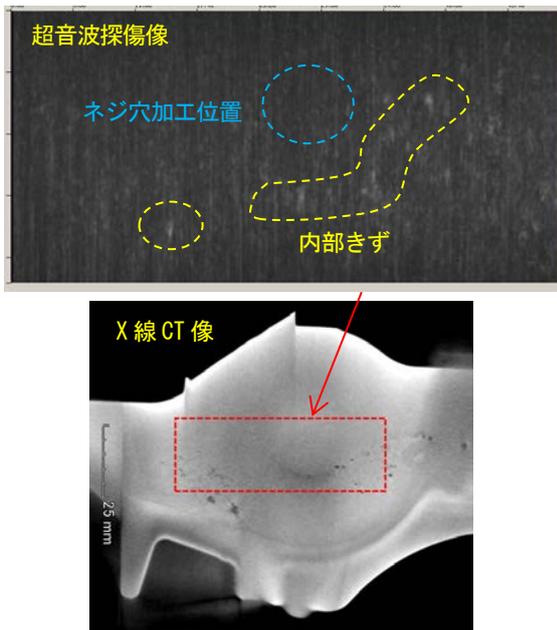


図8 アルミニウム鋳造品の探傷結果

### 3. 2 アルミと鋳鉄の鋳ぐるみ界面への探傷例

#### 3. 2. 1 背景および目的

外周に突起を持つ鋳鉄パイプをアルミニウムで鋳ぐるんだ製品の鋳鉄とアルミ界面の接合状態は、実際の断面を観察して空孔率を算出する、または実際に接合部を引張試験することで評価していた。これらの評価方法は局所的な評価であること、またコストと時間を要するため、非破壊による評価が望まれている。X線CTは、透過力と検出したい空孔のサイズが両立できず適用が困難である。また、超音波においても接合部が異種材料であること、さらに界面の形状が複雑なことから得られる探傷像の解釈が問題となる。そこで、本検討においては、既存の評価方法である断面観察による空孔率および接合強度と、超音波探傷により得られる空孔率の関係を得ることで、本評価対象について、超音波探傷が工学的に適用可能であるか確認することを目的とした。

#### 3. 2. 2 実験方法

図9に、検討対象の外観と接合界面の断面を示す。異なる接合状態を持つサンプルを得るために、鋳鉄側接合面に樹脂をコートしてアルミニウムで鋳ぐるんだ。通常のダイカストによる鋳ぐるみで、樹脂コート無し、樹脂コート厚さを変えた2種類(15  $\mu$ m, 30  $\mu$ m)、さらにPFダイカストによる鋳ぐるみで、樹脂コート無しの計4種類のサンプルを作成した。

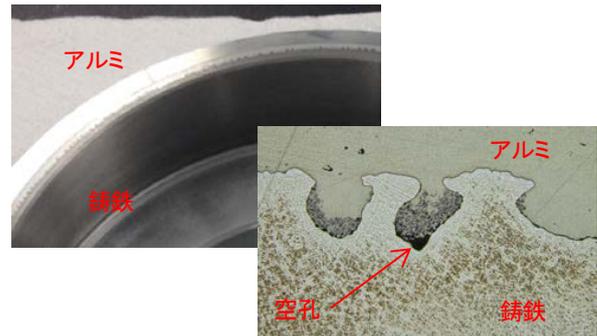


図9 鋳鉄-アルミ鋳ぐるみ品の外観および断面

超音波探傷による接合状態は、全周で得られた探傷像を二値化し、ある閾値以上の面積率を算出することで評価した。探傷条件は、接合状態が悪いと考えられる普通ダイカストの樹脂コート品と、PFダイカストの面積率の比が最も大きくなる条件とした。図10に、探傷状況を示す。図11に、プローブ周波数が評価結果に与える影響を調べた結果を示す。



図10 鋳鉄-アルミ鋳ぐるみ品の超音波探傷状況

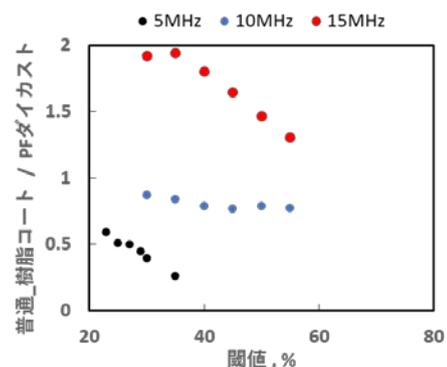


図11 プローブ周波数が評価結果に与える影響

図11より、周波数を大きくすると、実際の接合状況をより反映することがわかった。周波数を上げることで解像度が向上するためと考えられる。これらの検討から、超音波探傷による接合状態の評価は表2に示す方法とした。

表2 鋳鉄-アルミ鋳ぐるみ品の超音波探傷条件

検査方法	水浸法, 垂直探傷 (接触媒質: ミシン油)
周波数	15MHz
素子数, ピッチ	64, 0.4mm
サンプリング周波数	80MHz
テストピース音速	5950m/sec
Mesh size	0.4mm×0.4mm

超音波探傷による評価と比較するため、各サンプルを15°毎に切断して断面を観察し、空孔面積率を算出した。また、切断したサンプルをX線CTで3次元データを得たのち、グレイバリューをアルミ、鋳鉄、空隙部界面に分けて空隙体積率を算出した。なお、樹脂コート品はアルミと鋳鉄の界面に一部樹脂が残存していたことから、上記の空隙率は残存した樹脂を含んだ結果である。さらに、これらの空隙率を算出したサンプル全てについて引張試験を行い、接合強度を測定した。

### 3.2.2 実験結果および考察

図12に、各サンプルについて、断面観察による空孔面積率、X線CTによる空孔体積率、超音波探傷による評価結果と、接合強度を比較した結果を示す。普通ダイカスト（樹脂コート無し）を1として基準化した。面積率、X線CT、接合強度は測定した結果の平均値である。

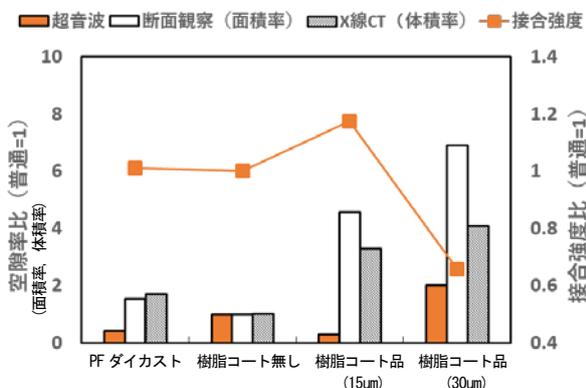


図12 鋳鉄-アルミ鋳ぐるみ品の接合状態評価方法の違いによる比較

樹脂コート品の評価結果について、断面観察による空孔面積率とX線CTによる空孔体積率がコート無し品に比べて大きいものに対し、超音波による評価では、それほど差は生じなかった。しかしながら、接合強度と比較した場合、超音波による評価が最も傾向が合致していた。断面観察またはX線CTによる評価は残存した樹脂も含むため、接合強度との傾向が異なったものと考えられる。なお、樹脂コート30μmは樹脂層が厚いことから、接合強度が大きく低下し、断面観察による空孔面積率、X線CTによる空孔体積率、超音波による空隙率も大きくなったと考えられる。

これらの結果から、本製品のような複雑な形状を持つ接合部に対して、超音波による評価システムが構築可能であると考えられる。ただし、超音波探傷像においてコントラストが強く得られる領域が、実際に存在する空孔を完全に反映しているとは考えにくいことから、空隙率のみで接合強度が決定しないことが示唆された。今後は、超音波により得られる結果の原理的な解釈を検討する必要がある。

## 4 まとめ

本研究により、以下のことが明らかになった。

- (1) アルミニウム鋳造品について、3D超音波探傷装置を用いて周波数5MHzで探傷する場合、検出限界は材質によって異なり、0.5～1mm程度と考えられる。
- (2) アルミニウム重力鋳造品(金型)の実製品において、探傷面が鋳肌のままでも、内部きずを超音波探傷で検出することができた。
- (3) 外周に突起を持つ鋳鉄パイプをアルミニウムで鋳ぐるんだ製品の鋳鉄とアルミ界面の接合状態を超音波で評価した結果と、接合強度の傾向が合致した。

## 参考文献

- 1) 坂代一郎, 鋳造工学 No85, vol12(2013), 906-910
- 2) 唐沢博一, 非破壊検査 No56, vol10(2007), 1-5
- 3) 横野泰和, 溶接学会誌, 62(1993), 7, 522-527