

鋳物の内部欠陥検査／完了報告

2022/3/15

株式会社 日立ニコトランスミッション
大宮事業所 品質保証部

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved.

Contents

1. 各装置の概要と模擬欠陥による評価
2. 鋳物部品の確認結果(その1)
3. 鋳物部品の確認結果(その2)
4. 鋳物部品の確認結果(その3)
5. 成果と今後の課題

1.各装置の概要と模擬欠陥による評価

メーカー	ダンテック・ダイナミクス(株)	(株) 島津製作所	つくばテクノロジー(株)
方式	シェアログラフィ	シェアログラフィ	レーザー超音波探傷
検出方法	加熱、加振等による表層歪を検出	加振による表層の干渉縞を検出	レーザーによる超音波の反射波を検出
装置外観			
価格	装置一式：17M¥ 圧電型加振器：約3M¥	装置一式：12M¥	装置一式：12M¥
確認(デモ)日	2021年6月18日	2021年6月23日	2021年4月23日 2021年7月30日～8月6日
模擬欠陥確認結果	φ 3mm深さ1.5mm検出不可 金属は難しい	φ 3mm深さ1.5mm検出可 φ 2mm深さ2mmが限界	φ 1.5mm深さ20mm検出可 模擬欠陥10種類検出可
評価	×	×	○

つくばテクノロジー(株)のレーザー超音波装置を選定

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved.

2

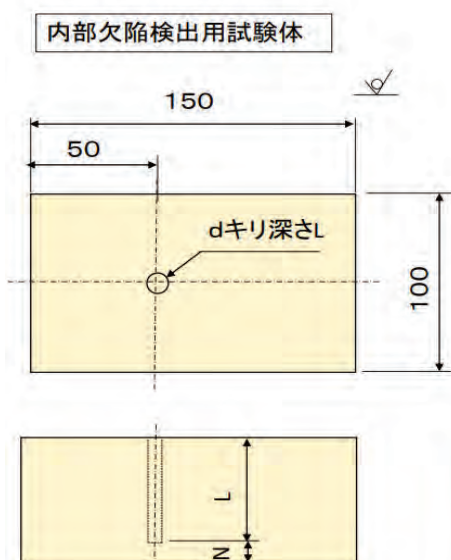
1.各装置の概要と模擬欠陥による評価

模擬欠陥試験体の寸法



キリ穴

外観写真



品番	d	L	N	T
1	3	(33.5)	1.5±0.5	(35)
2	3	(32)	3±0.5	(35)
3	3	(30)	5±0.5	(35)
4	3	(25)	10±0.5	(35)
5	3	(15)	20±0.5	(35)
6	1.5	(33.5)	1.5±0.5	(35)
7	1.5	(32)	3±0.5	(35)
8	1.5	(30)	5±0.5	(35)
9	1.5	(25)	10±0.5	(35)
10	1.5	(15)	20±0.5	(35)

材質：デンスパー(FC)
キリ穴の底は平とすること

図番：LUTTP01-R3-1

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved.

3

1.各装置の概要と模擬欠陥による評価

ダンテック・ダイナミックスの装置と出力例



© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 4

1.各装置の概要と模擬欠陥による評価

島津製作所の装置と出力例



© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 5

レーザー超音波装置の構成



© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved.

6

レーザー超音波装置による確認結果例

キリ穴径変化による比較(前進波あり)



Test No.	欠陥サイズ (TP No.)	走査速度 (Hz)	出力(%)	検出画像
No.4	φ1.5mm 深さ20mm (No.10)	500	100	
No.16	φ3.0mm 深さ20mm (No.5)	500	100	

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved.

7

2. 鋳物部品の確認結果(その1)

部品名	シールレース (円筒素材)	ベルマウス (フランジ部)	ハウジング (フランジ部)
材質	FC250	FCD	FCD
外観写真 寸法	 <p>外径：約φ300 高さ：80</p>	 <p>フランジ外径：約φ300</p>	 <p>フランジ外径：約φ400</p>
確認結果	欠陥と思われる波紋確認	欠陥と思われる波紋確認	欠陥と思われる波紋確認

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 8

2. 鋳物部品の確認結果(その1)

部品名:シールレース

レーザー超音波装置での結果

波紋を多数確認

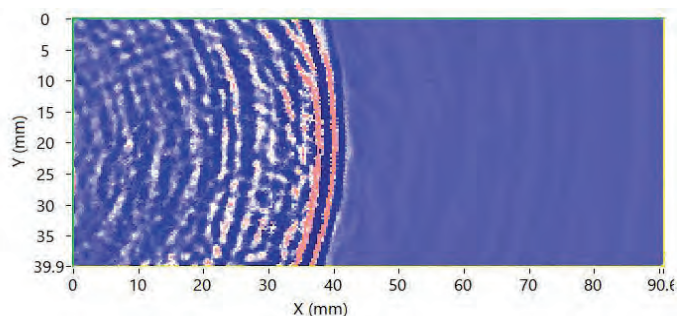
加工の結果



外周から1mmずつ加工
欠陥は認められず



テストNo.8
側面①左側



【考察】

波紋は表面の凹凸か極めて表層近くの欠陥で加工により削り取られたと考える。

- 表面状態の確認が重要
- 表層の加工代少なく

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 9

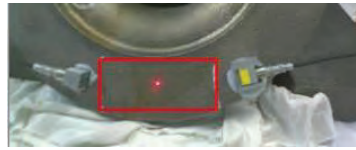
2. 鋳物部品の確認結果(その1)

部品名:ベルマウス

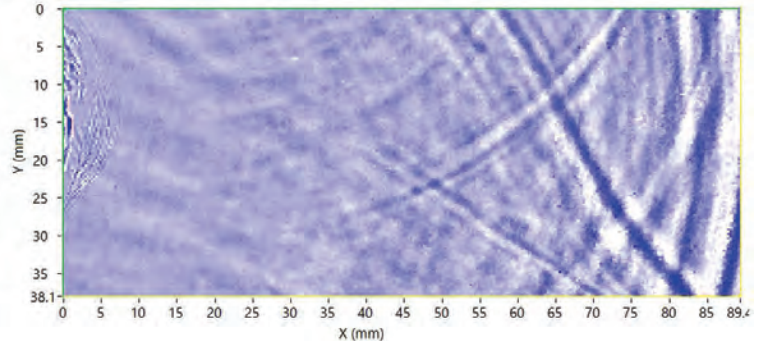
レーザー超音波装置での結果

小さな波紋を多数確認

加工の結果

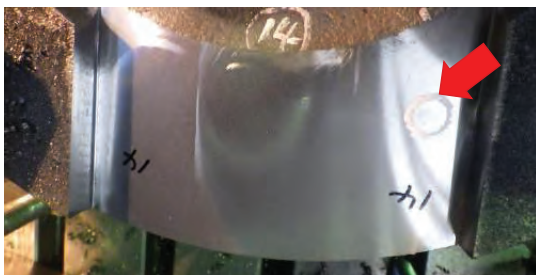


テストNo.14



【考察】

- 欠陥の部位には明確な波紋は確認できなかった。
→波形が不適切(オーバスケール)
電圧のレンジの適正化が必要
- 小さな波紋は表面の凹凸か小さいピンホール



内部欠陥1ヶ所確認

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 10

2. 鋳物部品の確認結果(その1)

部品名:ハウジング

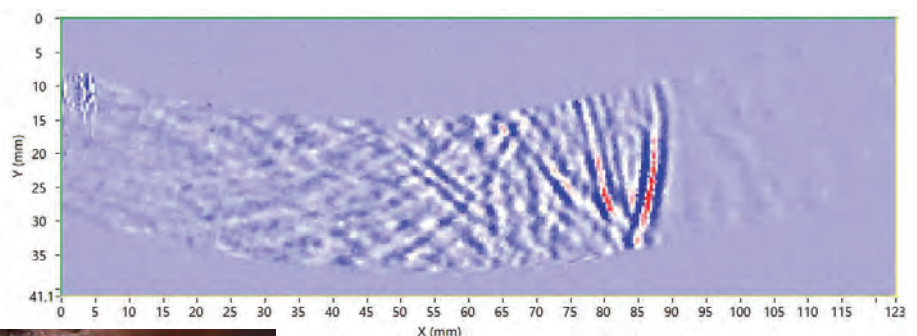
レーザー超音波装置での結果

波紋を2ヶ所確認
1ヶ所は分散した波紋

加工の結果



テストNo.2



【考察】

- 最初の波紋は前進波通過直後であり表面の凸凹と考える。
- 欠陥の位置は後の分散波紋の位置と概ね一致している。



内部欠陥1ヶ所確認

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 11

2. 鋳物部品の確認結果(その1)

【まとめ】

鋳物部品3点について適用して以下を確認した。

- 1)加工により現出した欠陥位置は波紋位置とおおむね一致。
- 2)表面の凹凸で波紋発生するため、表面の状況確認が重要。
- 3)精度良い波紋の確認には、各設定値の適正化が重要。
- 4)加工による欠陥の検証には、表層の加工代を極力少なくする必要あり。

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 12

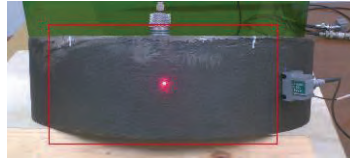
3. 鋳物部品の確認結果(その2)

部品名	シールレース (円筒素材)	ベルマウス (フランジ部)	ハウジング (フランジ部)
材質	FCD450	FCD	FCD
外観写真 寸法	 外径：約φ300 高さ：80	 フランジ外径：約φ300	 フランジ外径：約φ400
確認結果	欠陥と思われる波紋なし	欠陥と思われる波紋確認	欠陥と思われる波紋確認

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 13

3. 鋳物部品の確認結果(その2)

部品名: シールレース
(FCD450)

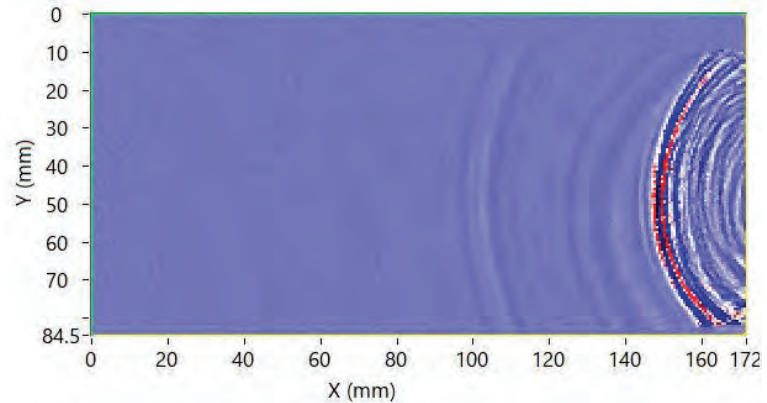


テストNo.3側面①
(9/29 11:17)
センサ: 射角1MHz70度

レーザー超音波装置での結果

明確な波紋なし

加工の結果



外周から0.5mmその後1mmずつ深さ
25mmまで加工、欠陥は認められず
(素材肉厚: 約40mm)

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 14

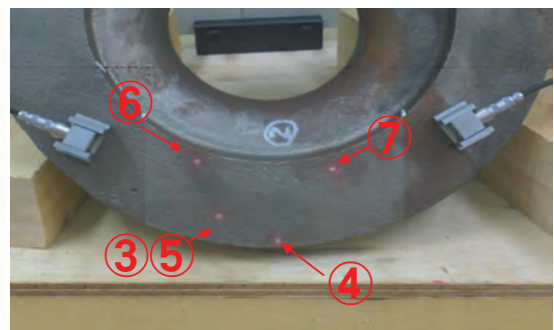
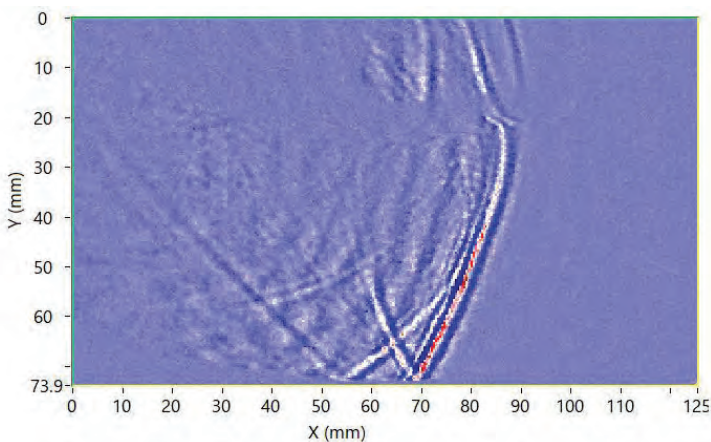
3. 鋳物部品の確認結果(その2)

部品名: ベルマウス



テストNo.13部位②
(9/30 13:29)
センサ: 射角1MHz70度

レーザー超音波装置での結果



欠陥と思われる波紋5ヶ所(③⑤はほぼ同位置)を確認

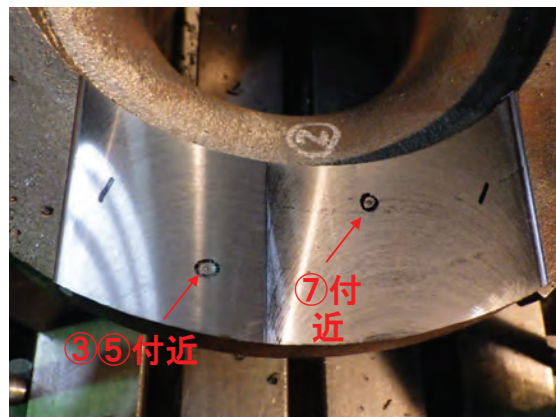
© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 15

3. 鋳物部品の確認結果(その2)

加工の結果

深さ15mmまで加工
深さ1mmで欠陥を2ヶ所確認

欠陥位置	検出深さ [mm]	検出
③	1	○
④	—	×
⑤	1	○
⑥	—	×
⑦	1	○



【考察】

検出できなかった部位については下記の可能性あり

- ・エッジ部の反射エコーを欠陥波紋と見間違えた
- ・1mmの加工代で削り取られた

→加工代を少なくするかX線での評価が必要

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 16

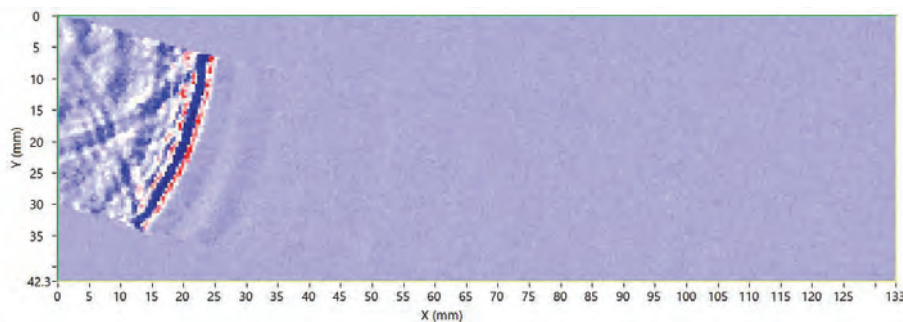
3. 鋳物部品の確認結果(その2)

部品名:ハウジング

レーザー超音波装置での結果



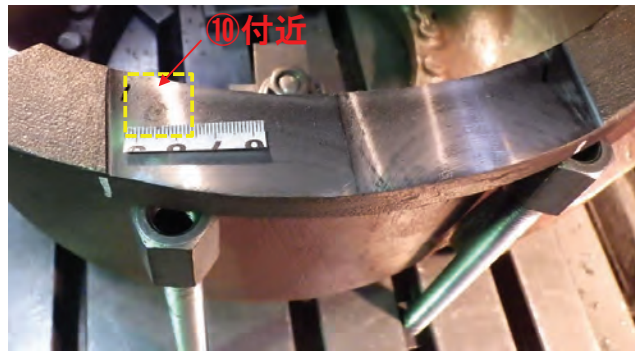
テストNo.17 部位①
(9/30 14:46)
センサ:射角1MHz70度



欠陥と思われる波紋3ヶ所確認

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 17

加工の結果



深さ12mmまで加工
深さ1mmで欠陥が1ヶ所確認

欠陥位置	検出深さ [mm]	検出
⑧	—	×
⑨	—	×
⑩	1	○

【考察】
検出できなかった部位については
1mmの加工代で削り取られた
→加工代を少なくするかX線
での評価が必要

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 18

【まとめ】

鋳物部品3点について適用して以下を確認した。

- 1)欠陥と思われる波紋7ヶ所に対し欠陥を3ヶ所確認。
(検出確率約4割)
- 2)確認できなかった欠陥は加工代の範囲と考える。
- 3)欠陥の評価には、表層以外も加工代を極力少なくするか
X線での評価が必要と考える。

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 19

4. 鋳物部品の確認結果(その3)

部品名	クドウリング	バルブボディ	Pトリツケダイ
材質	FCD500	AC4A-T6	FC250
数量	1個 (1/4周)	10個	7個
外観写真	 識別番号：NO. 4	 識別番号：1～10	 識別番号：1～7
目的	X線、UT結果との照合	欠陥の有無の確認 正規加工との照合	欠陥の有無の確認 正規加工との照合

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 20

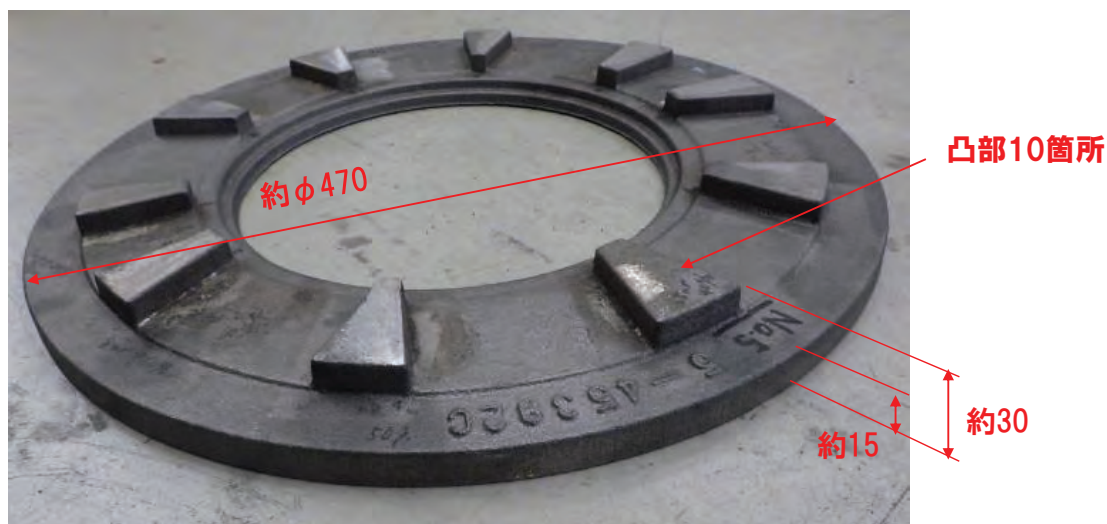
4. 鋳物部品の確認結果(その3)

部品名：クドウリング

材質：FCD500 識別NO.4
鋳物メーカでのX線、UT結果あり

結果を伏せて実施

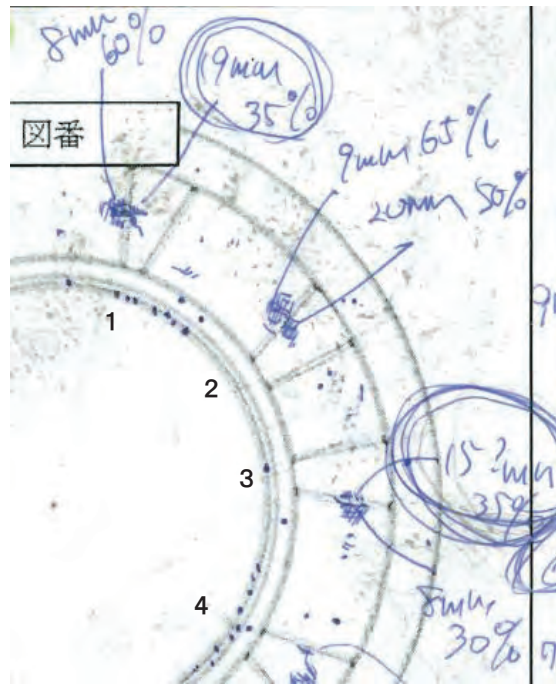
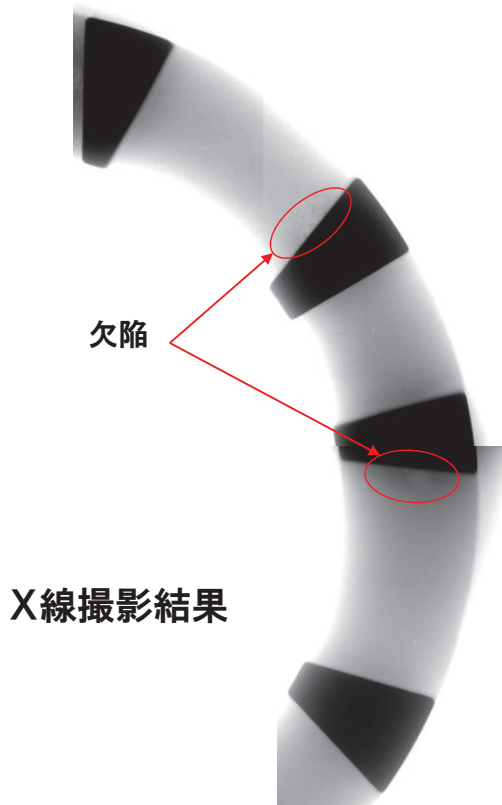
UT:超音波探傷検査



外観写真

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 21

4. 鋳物部品の確認結果(その3)



UT結果

4. 鋳物部品の確認結果(その3)

NO.1-2 1/26 11:25

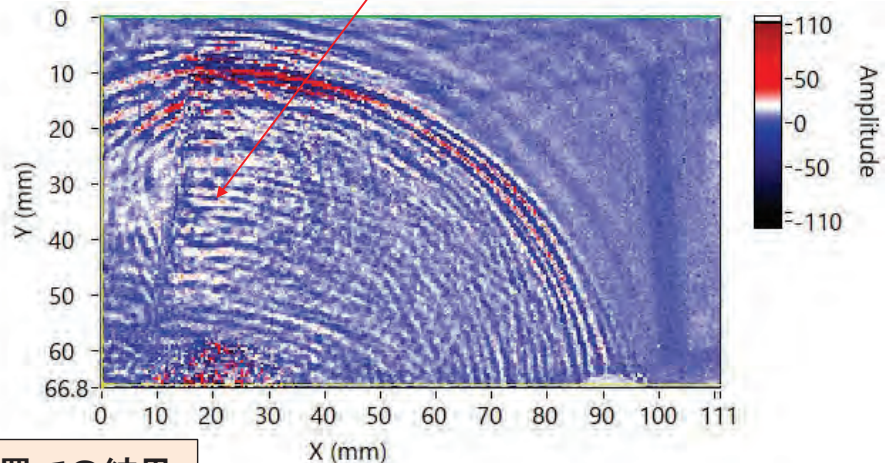


X線撮影結果



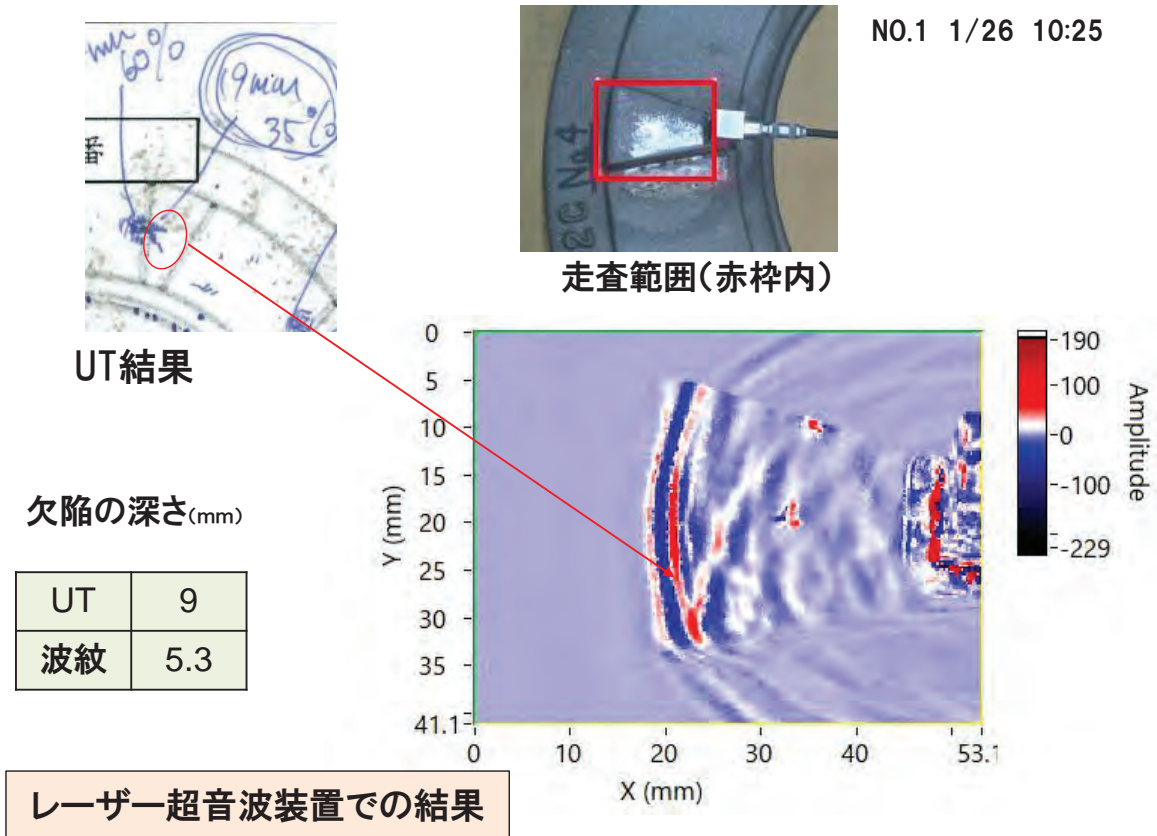
欠陥の深さ(mm)

UT	9
波紋	6.3



レーザー超音波装置での結果

4. 鋳物部品の確認結果(その3)



4. 鋳物部品の確認結果(その3)

部位	UT結果		レーザの結果		備考
	欠陥有無	深さ(mm)	欠陥有無	深さ(mm)	
凸部1	有	9	有	5.3	
凹部1-2 右側	無	—	無	—	
凹部1-2 左側	有	9	有	6.3	
凸部2	有	20	有 (部位相違)	3.5	UT深さ20:脇の凹側に波紋あり
凹部2-3 右側	無	—	無	—	
凹部2-3 左側	無	—	無	—	
凸部3	無	—	無	—	
凹部3-4 右側	有	8	有	10.0	再計測:5.5
凹部3-4 左側	無*	—	有	4.5	

*:小さな欠陥はあり

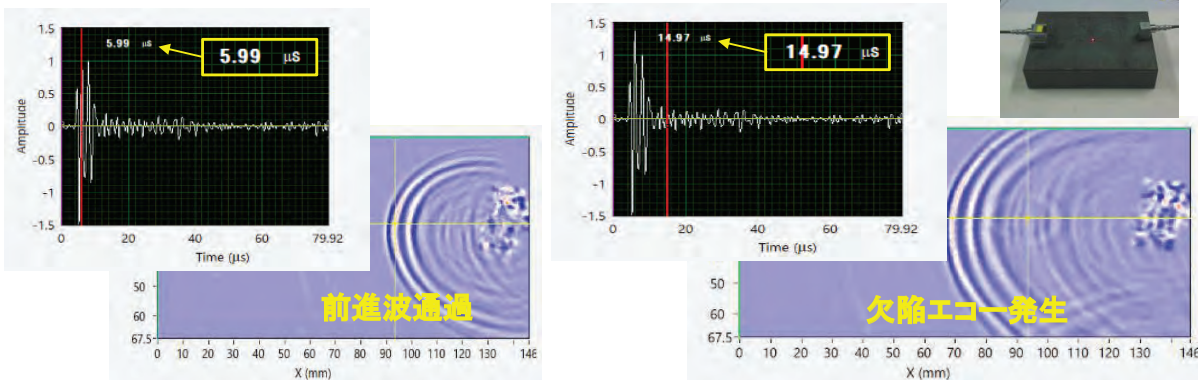
【考察】

欠陥の有無及び位置については1ヶ所を除き一致
 欠陥の深さについてレーザの結果は浅い傾向(約6~7割)

4. 鋳物部品の確認結果(その3)

欠陥深さの算出方法(概略)

$$\text{欠陥深さ} = ((\text{欠陥エコー発生時間} - \text{前進波通過時間}) / 2) \times \text{材料の音速}$$



$$\text{欠陥深さ} = ((14.97 \mu\text{s} - 5.99 \mu\text{s}) / 2) \times 3200\text{m/s} = 14.4\text{mm}$$

計算深さ: 14.4mm (音速3200m/sの場合)
実際の深さ: 20mm

実態に合った計算式の確立と正しい音速の把握が必要

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 26

4. 鋳物部品の確認結果(その3)

部品名: バルブボディ

材質: AC4A-T6
上面に欠陥が出易い



外観写真 寸法: 約120X100X高さ80



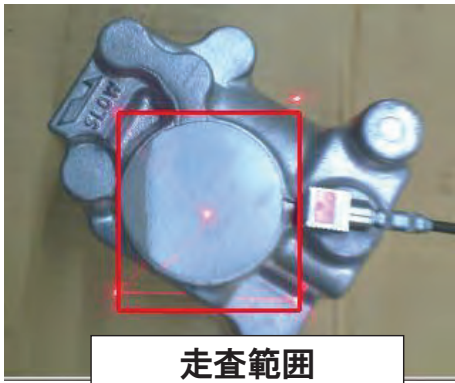
過去後の状況



欠陥の状況

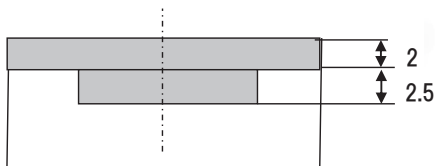
© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 27

4. 鋳物部品の確認結果(その3)



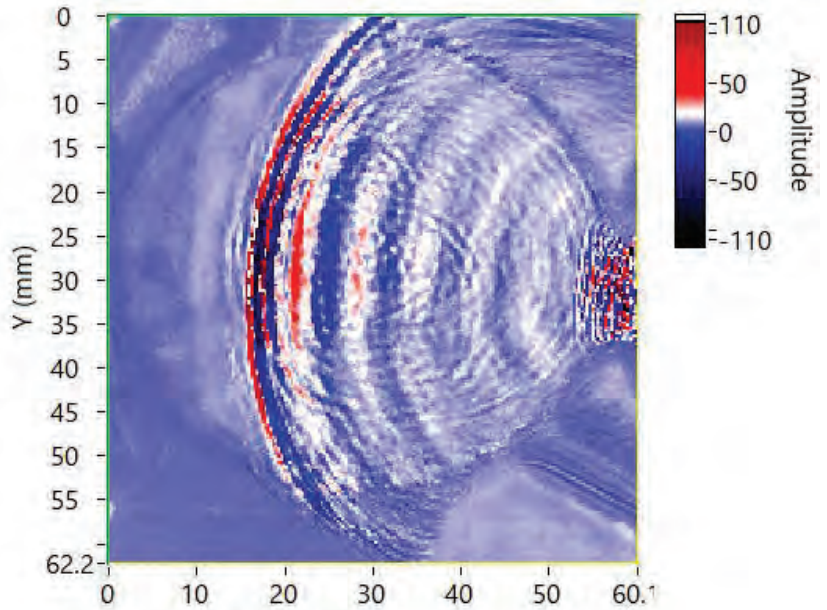
走査範囲

主な欠陥5ヶ所
深さ:2~4mm



加工深さ:2mm&4.5mm

NO.3 1/27 13:49

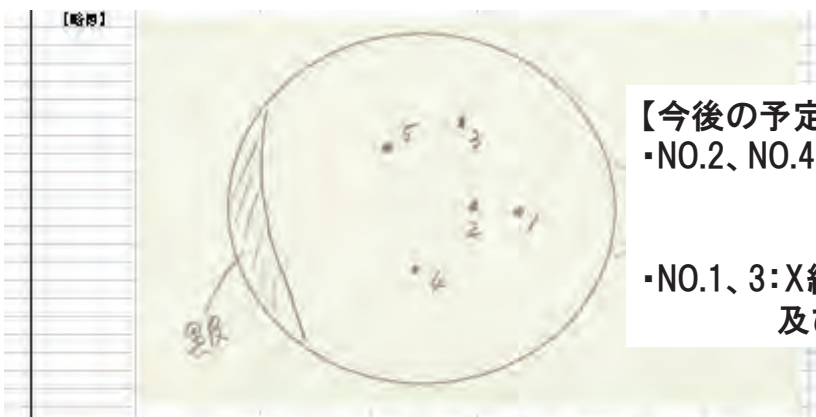


レーザー超音波装置での結果

波紋多数(細かい欠陥あり?)

4. 鋳物部品の確認結果(その3)

識別NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
欠陥有無	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有



- 【今後の予定】
- NO.2、NO.4~10: 正規の加工を実施し 欠陥の有無を確認
 - NO.1、3: X線CT検査で欠陥の有無及び深さを確認

欠陥番号	精度検査時周長 [μm]	数値計測時周長 [μm]	径間差 [μm]	径間差の1/2 [μm]	音速/径差 [m/s]	欠陥深さ [mm]
研	599	1497	898	449	3200	14.4
1	864	1072	208	104	3180	3.3
2	1024	1216	192	96	3180	3.0
3	1216	1456	240	120	3180	3.8
4	1264	1482	168	84	3180	2.6
5	1400	1664	264	132	3180	4.1

4. 鋳物部品の確認結果(その3)

部品名:Pトリツケダイ

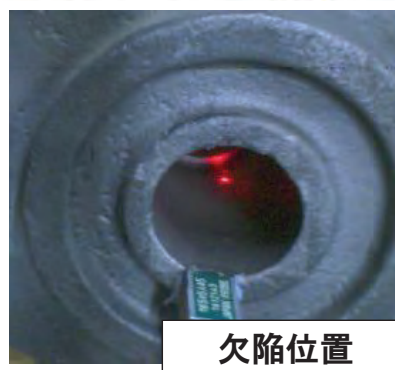
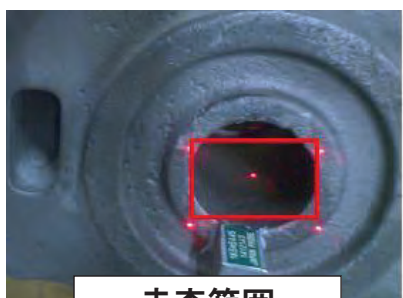
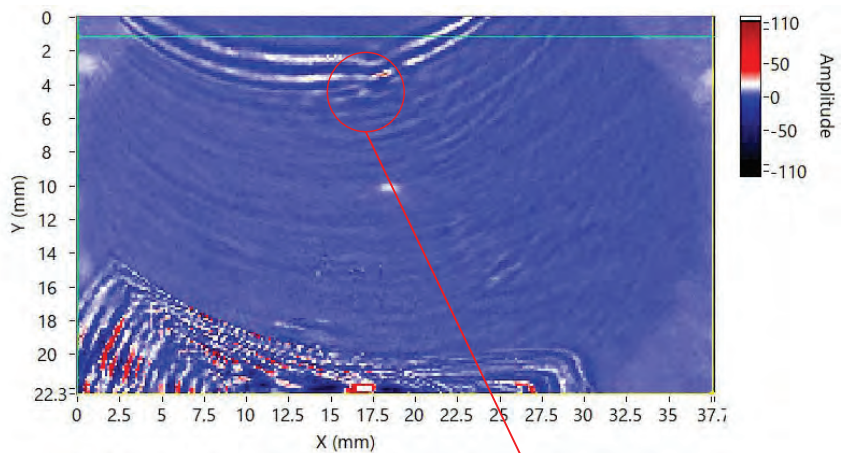
材質:FC250
中央部穴に欠陥出易い



© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 30

4. 鋳物部品の確認結果(その3)

N0.3 1/27 13:49



波紋
欠陥深さ:3.6mm

加工代:約3mm

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 31

4. 鋳物部品の確認結果(その3)

識別NO.	1	2	3	4	5	6	7
波紋有無 (欠陥深さ)	無	無	有(3.6)	無	無?	有 (2.3)(7.3)	有 (1.5)
加工結果	無	無	有*	無	無	有*	有*

*:欠陥の位置が相違 → 再度映像確認

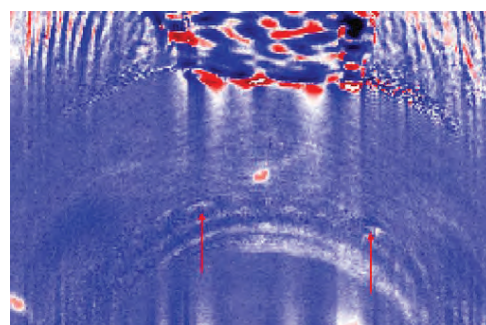
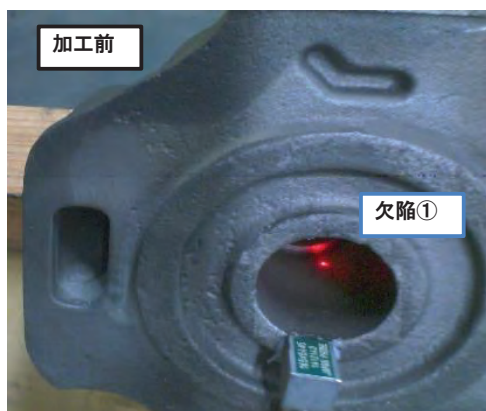
識別NO.	1	2	3	4	5	6	7
加工結果	無	無	有	無	無	有	有
欠陥位置の 波紋有無	—	—	有	—	—	有	無

欠陥ありの3個の映像を再確認した結果、2個に波紋と欠陥の一致を確認

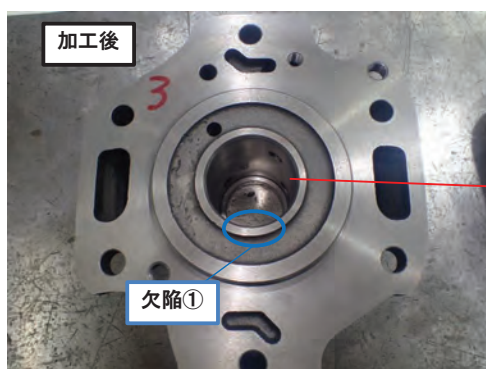
© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 32

4. 鋳物部品の確認結果(その3)

識別NO.3



再確認画像
(欠陥近くに波紋あり)



© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 33

【考察】

- 1.当初確認した波紋位置に欠陥は現出しなかった。
→欠陥の深さが加工面の深さと相違したと考える。
- 2.当初確認した波紋位置と相違した位置に欠陥が現出。
再確認の結果3個中2個の欠陥位置に波紋を確認。
→波紋の確認として前進波消去等を活用し、波紋確認後に前進波を表示して深さを計測する必要あり。

【まとめ】

鋳物部品3点について適用して以下を確認した。

- 1)欠陥の有無及び位置については、クドウリングの評価から約8割の確立で検出可能と考える
- 2)欠陥の深さについては、簡易計算でおおよそ推測可能であるが、更なる改善が必要である。
- 3)波紋確認として前進波消去等のツール活用及び画像評価のスキルアップが必要。
- 4)バルブボディについては、引続き検証確認を実施

【成果】

- 1)内部欠陥検出装置として3社の装置を比較、つくばテクノロジーのレーザー超音波可視化装置を選定。
- 2)同装置を用いて代表的な鋳物部品の検出画像と実欠陥との対比を調査、欠陥の有無、位置については、約8割の確率で欠陥が検出でき実用可能であることを確認。
- 3)鋳造品の形状材質に応じた検査手法を明確にし、センサー類の最適化及び欠陥深さの精度向上を図ることにより実用的な検査手法としての目途が立った。

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 36

【今後の課題】

今回の調査結果を通し、実用化に向けた主な課題

- 1)製品に応じた検査手法の確立(マニュアル含む)
- 2)欠陥波紋の識別の改善
- 3)欠陥深さの算出手法の改善
- 4)検査時間の短縮

本件に関しては、引続き調査を継続して課題解決を図る

© Hitachi Nico Transmission Co., Ltd. 2022. All rights reserved. 37

HITACHI
Inspire the Next[^]

鑄造品表面欠陥限度サンプル (初年度案)

※加工面を添付した主旨は、荒削り後の状況や取り代によるが部位によっては修正可能な場合もあるので代表例を示した。


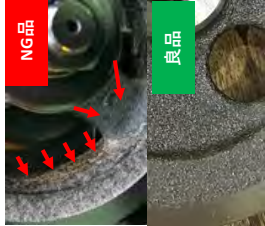


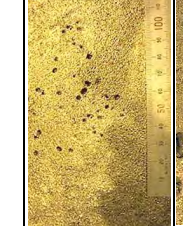
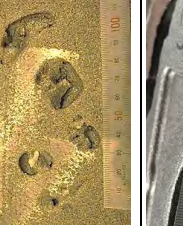

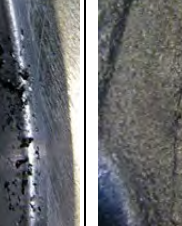
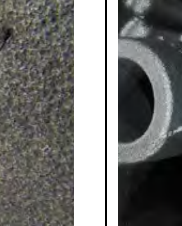


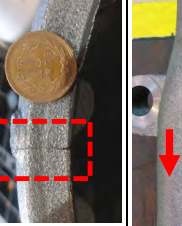
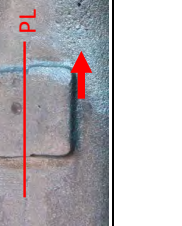
グレード 欠陥レベル	ブローホール		ピンホール		ノロかみ	砂カミ		砂焼付き	湯境	湯じわ	ヒケ		クラック		バリ		
	黒皮面	加工面	黒皮面	加工面	黒皮面	黒皮面	加工面	黒皮面	黒皮面	黒皮面	黒皮面	加工面	黒皮面	加工面	黒皮面		
4																	
	大きな欠陥の点在	Φ2.0を超える大きな欠陥	0.5mm程度の欠陥が幅広く点在している	0.5mm程度の欠陥が幅広く点在している	長手10mm程度の欠陥	表面全体に砂カミがあり、凹凸が随くザラザラ感がある。	一辺15mm程度の砂カミ	外部に砂焼付き大	外部に砂焼付き大	外部に砂焼付き大	外部に砂焼付き大	外部に砂焼付き大	外部に砂焼付き大	外部に砂焼付き大	外部に砂焼付き大	外部に砂焼付き大	外部に砂焼付き大
3																	
	長手8.0mm程度の欠陥、深さ1mm程度	Φ0.5mm～Φ2.0mm程度の欠陥が数個点在している	0.5mm以下の欠陥が数個点在している	0.5mm以下の欠陥が数個点在している	長手5.0mm程度の欠陥	表面全体に砂カミがあり、白い表面になっている。	シール部に大きな砂カミ	中子部に砂が残った状態	中子部に砂が残った状態	中子部に砂が残った状態	中子部に砂が残った状態	中子部に砂が残った状態	中子部に砂が残った状態	中子部に砂が残った状態	中子部に砂が残った状態	中子部に砂が残った状態	中子部に砂が残った状態
2																	
	Φ5.0mm程度の欠陥、深さ2mm程度	Φ1.0mm程度の欠陥が点在している。	0.5mm程度の欠陥が1個程度	0.5mm程度の欠陥が2～3点	長手3.0mm程度の欠陥	数か所凹みがあす砂カミ	部分的に集中した砂カミ	細い鑄抜き溝に砂焼付き	細い鑄抜き溝に砂焼付き	細い鑄抜き溝に砂焼付き	細い鑄抜き溝に砂焼付き	細い鑄抜き溝に砂焼付き	細い鑄抜き溝に砂焼付き	細い鑄抜き溝に砂焼付き	細い鑄抜き溝に砂焼付き	細い鑄抜き溝に砂焼付き	細い鑄抜き溝に砂焼付き
1																	
	Φ1.0mm程度の欠陥が1個所あり。	Φ1.0mm程度の欠陥が1個所あり。	0.3mm程度の欠陥が数個点在している	0.5mm程度の欠陥が1か所あり	Φ2.0mm程度の欠陥	粒状、凸形状の砂カミ	Φ3.0mm程度の欠陥	外部に砂焼付き小	外部に砂焼付き小	外部に砂焼付き小	外部に砂焼付き小	外部に砂焼付き小	外部に砂焼付き小	外部に砂焼付き小	外部に砂焼付き小	外部に砂焼付き小	外部に砂焼付き小
軽度																	



表面欠陥判定基準

初年度案

鋳造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド (補修及びその他確認事項)

欠陥事象	パターン (写真) (10円玉直径：23.5mm)	欠陥状態/特徴	欠陥発生部位	推定原因	使用判定ガイド	補修例 (納入先の許可を得る)	その他確認事項 (懸念事項)
砂カミ (部分的な砂カミ)		・欠陥表面はざらつきあり。 ・欠陥表面に砂が付着。 ・凹凸大。 事例： 砂カミIA1	・角部に発生。 ・砂の破片が内部に介在し加工後表面に現れることがある。 ・表面、内部どの場所でも発生し得る。	・砂のつき固め不足。 ・型や湯道の破壊。(模様) ・抜型時の主型の割れ。 ・砂の破片が鑄型内に侵入。	・オイル浸漬部分は使用不可。 ・外部に発生し強度に影響が無い場合、補修して使用検討可。 ・軸受け部加工面の場合、砂を完全除去して強度に影響が無いと判断できれば使用検討可。 ・シール部分には使用不可	・付着した砂を除去。 ・パテ補修。 ・溶接補修。	・カミ込んだ砂の大きさ、欠陥深さ、シール部にかかっているか十分に観察する。 ・強度の点でも確認が必要。応力を受ける部分は十分注意。
砂カミ (黒皮表面全体の砂カミ)		・黒皮表面全体に砂が焼付いている。 ・表面や表面直下に生じる、かたまり状で不規則な形状。 事例： 砂カミIA1	・黒皮表面全体。 ・塗型が深い部分。 ・凹みが深くシヨットの当たりが悪い部分。 ・鑄抜きが未貫通の袋形状でシヨット玉が流れにくい部分。	・鑄型から砂が落ちる場合、砂が残っていた場合等。 ・塗型が不十分。 ・注湯温度が高い。 ・砂のつき固め不足。	・加工時、チップ破損の可能性が大きいので使用不可。	・補修不可。 ・塗装が乗りにくい。 ・オイル浸漬部分の使用は不可。	・加工時刃物が焼ける。 ・塗装が乗りにくい。 ・オイル浸漬部分の使用は不可。
ノロカミ		・異物が噛み込んだ状態。 ・凹凸大。 ・大きさ20mm程。 ・溶湯酸化物(ノロ)が噛み込み表面に生じる穴や凹み 事例： ノロカミIA1	・表面、内部どの場所でも発生し得る。 ・角部に発生し易い。	・注湯時のノロの除去不足。 ・取柄付着ノロの除去不足。	・加工時、チップ破損の可能性が大きいので使用不可。	・噛み込んだノロを完全除去。 ・パテ補修。 ・溶接補修。	・カミ込んだ砂の大きさ、欠陥深さ、シール部にかかっているか十分に観察する。 ・強度の点でも確認が必要。 ・応力を受ける部分は十分注意。
砂の焼付き		・黒皮表面に砂が固まった状態で焼き付いている。	・中子部分に発生。 ・中子部分角部に発生し易い。	・溶湯温度が高すぎる。 ・砂のつき固め不足。 ・塗型材不良。	・完全除去できない場合、使用不可。 ・完全除去できた場合、使用可能。 ・オイル浸漬部分は使用不可。	・グラインダーにより焼付いた砂を完全除去。	・グラインダー除去後も焼付きが残る可能性があるので注意。 ・グラインダー除去により加工面に傷をつける可能性大。
ピンホール		・表面の小さな穴。 ・黒皮表面全体にΦ2~3mm程度の巣(ピンホール)が点在している。	・黒皮表面に発生。 ・上型面に発生し易い。	・鑄込み温度低下、ガス量増加、鑄砂の水分等。 ・ガス抜きが不十分。	・加工が行われ0リングシールとなる場合は使用不可。 ・黒皮使用部で外部に発生した場合パテ補修も使用検討可。	・パテ補修。	・加工後に欠陥が残る可能性がある。 ・オイル浸漬部分との貫通が無いかに注意すること。
ブローホール		・黒皮表面全体にΦ20~30mm程度の巣(ブローホール)が点在している。 事例： ブローIA1	・黒皮表面に発生。 ・冷し金接触面。 ・上型面に発生し易い。	・冷し金の酸化、乾燥不十分等。 ・ガス抜きが不十分。	・外観上問題あり、使用不可。 ・加工で完全に消失すれば、使用検討可。	・外部に発生するものについては他への影響が無いことを確認(肉厚確保)した後、ガスor電気溶接補修。	・加工後に欠陥が残る可能性がある。 ・オイル浸漬部分との貫通が無いかに注意すること。
外ヒケ		・肉厚部の表面。 ・黒皮表面が凝固収縮により、正常面から大きく凹む。 ・削り代以上の凹み。 ・表面はうねり状態。 事例： 面ヒケIA1	・黒皮表面に発生。 ・肉厚部に発生し易い。 ・押湯直下に発生し易い。 ・凝固が遅い部分周辺。	・押湯不足。 ・鑄型通気度不足。 ・方案の検討不足。	・黒皮使用部の場合、肉厚が確保できれば使用可能。 ・加工する場合、黒皮残りが生じない削り代があれば使用可能。	・ガス溶接。	・加工部分の場合、黒皮残りとなる可能性がある。 ・加工後の表面にヒケ巣が発生している可能性がある。 ・加工後十分注意すること。 ・多発性がある。
ヒケ巣		・加工後に露出するヒケ巣。 ・凝固収縮により、内部でヒケが生じザク巣となる。 ・欠陥の深さ判定が困難。 事例： ヒケ巣IA1	・製品内部に発生。 ・肉厚部分に発生し易い。	・凝固時の収縮による溶湯不足。(押湯不足) ・過度な肉厚不均一。	・シールや強度に対して影響が大きく使用不可。	・補修不可。	・ヒケ部分の範囲を十分観察すること。 ・多発性がある。
湯境		・凝固時に融合しない部分が発生し境ができる。(内外貫通) ・表面のみで内外の貫通が無い場合がある。 ・すじ状の欠陥。 事例： 湯境IA1	・薄肉部分に発生し易い。 ・湯流れ合流部。	・鑄造方案検討不足 ・低い温度や速度による湯の停滞。 ・注湯時のチョコ停。	・亀裂の事象に近く、内外貫通が無い場合でも欠陥の進行性があるので使用不可。	・補修不可。	・欠陥が進行し拡大する可能性がある。 ・欠陥の大きさや深さを確認すること。 ・オイル浸漬部分では、貫通する可能性がある。
バリ		・砂型が割れたスキマ部分へ湯が差し込みバリとなる。 事例： バリIA1	・中子部に発生する。 ・主型部も発生する。 ・発生部位不特定。 ・巾木部分との境界部分。 ・砂型分割部分。	・方策検討不足。 ・中子の強度不足。 ・主型の強度不足。	・グラインダーで除去後使用検討可。	・グラインダー除去。	・砂カミ部分が発生している可能性があるのに注意。 ・寸法公差外の可能性があるので計測確認すること。 ・十分に湯が回っていない部分がないか確認すること。
打痕		・落下等で強く打ち付けられ打痕を付ける。 ・ドラムシヨット工程等の製品間の干渉がある工程で発生し易い。 事例： 打痕IA1	・発生部位不特定。 ・角部分に発生し易い。	・抜型時の落下等で打痕が付く。 ・ドラムシヨット等で部品間の干渉。 ・その他落下等。 ・運転時の干渉等。	・垂の影響が無い場合、削り代範囲内であれば、使用検討可。 ・黒皮のまま使用される部分は滑らかに整えると使用可能。	・黒皮仕様の場合、電気溶接orガス溶接。 ・凸部分はグラインダー除去。	・加工部分では黒皮残りが発生する可能性あり。 ・シール部分では、特に黒皮残り注意のこと。 ・シール面やボルト座面が確保できるか確認が必要。 ・歪や亀裂が無いかに十分確認すること。
亀裂・割れ		・欠陥の深さ判定が困難。 ・割れは進行性があるので、深さが浅い欠陥でも重大欠陥となる。 事例： 亀裂IA1	・薄肉部分に発生しやすい。 ・急冷される部分。	・材質組織の異常。 ・成分値の異常。 ・外的に何らかの衝撃が加わった。 ・急冷による収縮。	・使用不可。	・割れ部分を完全除去後、ガス溶接。 ・加工後は補修不可。	・カラーチェックで深さの程度を確認する。 ・割れは進行する欠陥のため十分注意すること。
型ズレ (PL：砂型分割面)		・砂型の上型と下型のズレ。 ・砂型分割面を境にズレが生じる。 事例： 型ズレIA1	・全ての見切り部分。 ・中子部分砂型分割面のズレ。 ・主型部分砂型分割面のズレ。	・位置決めピンの摩耗。 ・上型と下型セット時に傾けズレる。 ・上型と下型セット後、ライン上で押し出される時にズレる。	・1mm程度のズレは使用検討可。 ・削り代範囲内かつ肉厚が確保できる状態は使用検討可。	・グラインダー成型等。	・加工時黒皮残りの可能性あり。 ・各部位のズレを全て確認する。 ・外観品質を考慮する。 ・肉厚部分が発生するので注意。



鑄造品等表面欠陥 検査技術開発活動報告書

2022年3月15日
 (株) 神崎高級工機製作所
 品質保証部 製品保証G
 林 満広

© 神崎高級工機株式会社 作成日: YYYY/XX/XX

鑄造品表面欠陥収集

黒皮表面及び加工面における様々な鑄造品の表面欠陥を収集

黒皮表面



加工面



鑄造品表面欠陥事象を体系化

鑄造品表面欠陥の様々事象を体系化し、縦軸に欠陥レベルを示すグレードを、横軸に様々な欠陥事象を記載した「鑄造品表面欠陥限度サンプル」を作成した。また荒削り後の状況も参考にできる加工面に現れる事象も示した。

鑄造品表面欠陥限度サンプル (初年度版)

※加工面を添付した写真は、荒削り後の状況や取り代りによる部位によっては修正可能な場合もあるため代表例を示した。

グレード 欠陥レベル	ブローホール		ピンホール		ノロカミ		砂カミ		砂焼付き		湯境		濡じわ		ヒケ		クラック		バリ	
	黒皮面	加工面	黒皮面	加工面	黒皮面	黒皮面	加工面	黒皮面	加工面	黒皮面	加工面	黒皮面	加工面	黒皮面	加工面	黒皮面	加工面	黒皮面	加工面	
4																				
3																				
2																				
1																				
程度	<p>大きな欠陥の点径 φ2.0以上φ2.5以上の欠陥が幅広く存在している</p> <p>長さ8.0mm程度の欠陥、深さ1mm程度の欠陥が数箇所存在している</p> <p>φ5.0mm程度の欠陥、深さ2mm程度の欠陥が1箇所あり</p> <p>0.5mm程度の欠陥が幅広く存在している</p> <p>長さ2.0mm程度の欠陥が2~3箇所存在している</p> <p>φ2.0mm程度の欠陥が1箇所あり</p>																			
正常な状態 (鏡面)																				


鑄造品表面欠陥の特徴や使用判定、補修方法について示す

欠陥事象	欠陥発生部位	判定基準	使用判定	補修方法	その他確認事項 (留意事項)	
砂カミ (部分的な砂カミ)	欠陥状態/特徴 ・欠陥面はざらつきあり、欠陥表面に砂が付着。 ・凹凸大。	欠陥発生部位 ・角部が発生。 ・砂の破片が内部に介在し加工後表面に現れることがある。 ・表面、内部との場所でも発生し得る。	判定原因 ・砂のつき固め不足。 ・型や湯道の破損。(模様、抜型時の主型の割れ。 ・砂の破片が鏡型内に侵入。	使用判定 ・オイル浸漬部分は使用不可。 ・外部に発生し強度に影響が無い場合、補修して使用検討可。 ・軸受け部加工面の場合、砂を完全除去して強度に影響が無いと判断できれば使用検討可。 ・シール部分には使用不可。	補修例 ・付着した砂を除去。 ・バリ補修。 ・溶接補修。	その他確認事項 (留意事項) ・カミ込んだ砂の大きさ、欠陥深さ、シール部にかかっているかを十分確認。 ・強度の点でも確認が必要。応力を要する部分は十分注意。
砂カミ (黒皮表面全体の砂カミ)	欠陥状態/特徴 ・黒皮表面全体に砂が付いている。 ・表面や表面下に生じる、かたまり状で不規則な形状。 事例: 砂カミIAI	欠陥発生部位 ・黒皮表面全体。 ・塗型が薄い部分。 ・凹みが深くショットの当たりが悪い部分。 ・錆抜きが未済の袋形状でショット玉が流れにくい部分。	判定原因 ・鏡型から砂が落ちる場合砂が残っていた場合等。 ・塗型が不十分。 ・注湯温度が高い。 ・砂のつき固め不足。	使用判定 ・加工時、チップ破損の可能性が大きいので使用不可。	補修例 ・補修不可。	その他確認事項 (留意事項) ・加工時刃物が捨ける。 ・塗接が繰り返す。 ・オイル浸漬部分の使用は不可。
ノロカミ	欠陥状態/特徴 ・異物が噛み込んだ状態。 ・凹凸大。 ・大きさ20mm程度。	欠陥発生部位 ・表面、内部との場所でも発生し得る。 ・角部に発生し多い。	判定原因 ・注湯時のノロの除去不足 ・取崩しノロの除去不足	使用判定 ・加工時、チップ破損の可能性が大きいので使用不可。	補修例 ・噛み込んだノロを完全除去。 ・シール部にかかっているかを十分に確認する。 ・溶接補修。	その他確認事項 (留意事項) ・カミ込んだ砂の大きさ、欠陥深さ、シール部にかかっているかを十分に確認する。 ・強度の点でも確認が必要。応力を要する部分は十分注意。
砂の焼付き	欠陥状態/特徴 ・黒皮表面に砂が固まった状態が焼付いている。	欠陥発生部位 ・中子部分に発生。 ・中子部分角部に発生し多い。	判定原因 ・注湯温度が高すぎる。 ・砂のつき固め不足。 ・塗型材不良。	使用判定 ・完全除去できない場合、使用不可。 ・完全除去できた場合、使用可能。 ・オイル浸漬部分は使用不可。	補修例 ・グラインダーにより焼付いた砂を完全除去。	その他確認事項 (留意事項) ・グラインダー除去後、焼付いた砂が残る可能性がある。 ・グラインダー除去により加工面に傷をつける可能性あり。

表面欠陥各事象における欠陥事象、欠陥パターン、欠陥状態、欠陥発生部位、寸法計測判定、使用判定、補修方法などを整理した「鑄造品表面欠陥識別及び判定ガイド」を作成した。

鑄造品の表面欠陥等の検査基準

表面欠陥の検査基準について検討した結果、各鑄造品の使用用途や欠陥の発生部位で判断基準が異なるため、欠陥の「大きさ」、「数」、「間隔」の決め方や、各部の要求に示した判断基準を例示した。

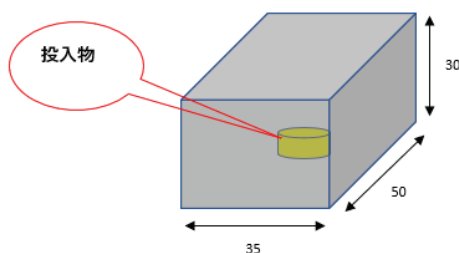
3. 区分基準		5) 各加工面に露出する欠陥の許容範囲を示す。					
1) 欠陥の大きさ		部位	許容最大基準	補修の要否	判断条件		
等級	0級	0級	1級	2級	3級	4級	5級
欠陥サイズ	0.3mm以下	0.5mm以下	1.0mm以下	1.5mm以下	2.0mm以下	3.0mm以下	
※0.3mm以下の欠陥は5mm以上間隔があれば問題無しとする。 ※欠陥の大きさに関係なく外部と内部を貫通する欠陥は全て不適合とする。		Oリング	0-C-口	補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
2) 欠陥の大きさ判定方法		シールワッシャ		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		銅パッキン	1-B-イ	補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
3) 欠陥の間隔		オイルシール		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
等級	A級	B級	C級				
間隔	20mm以上	10mm以上	5mm以上				
4) 欠陥の数		加工合わせ面 (パッキン)	2-B-口	欠陥の大きさ3級レベルであれば充填補修して使用可。	但し、パッキン代70%は健全確保のこと。		
同面中に指定の欠陥の大きさ以内で指定の間隔を有する欠陥の個数。		加工合わせ面 (液体パッキン)	2-B-ハ	欠陥の大きさ3級レベルであれば充填補修して使用可。	但し、パッキン代70%は健全確保のこと。		
区分	イ	ロ	ハ	ニ			
個数	3個まで	5個まで	6個~10個まで	10個を超えるものは全て不適合			
		ベアリング		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		フッシュ		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		ロックピン穴		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		レバー穴		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		タップ穴 (合わせ面)		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		タップ穴 (ケーシング内部)		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		キリ穴 (外部)		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		キリ穴 (内部及び油穴)		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		シール部同一面且つシール材の非接触部		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		製品内部に組込む		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		鑄物加工面		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		製品完成後外部に露出する		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
		その他の加工部分		補修不可	砂・ノロカミは全て不適合		
				必ず充填補修し、加工面と面一に仕上げること。	別途客先の要求がある場合はそれに従うこと。		

鑄造品表面欠陥事象テストピースの製作

鑄造品表面欠陥は、通常の生産では発生させない方案や改善が施されるために、目の当たりする機会是非常に少ないことから情報（写真）収集は非常に難しいものである。よって、鑄造品取引先の協力を得て、意図的に表面欠陥を作り出すテストピース製作を図った。

鑄造品表面欠陥確認用テストピース製作依頼書

1. テストピースサイズ



2. テストピース製造条件及び数量

1) 湯温条件

1430°C~1320°C

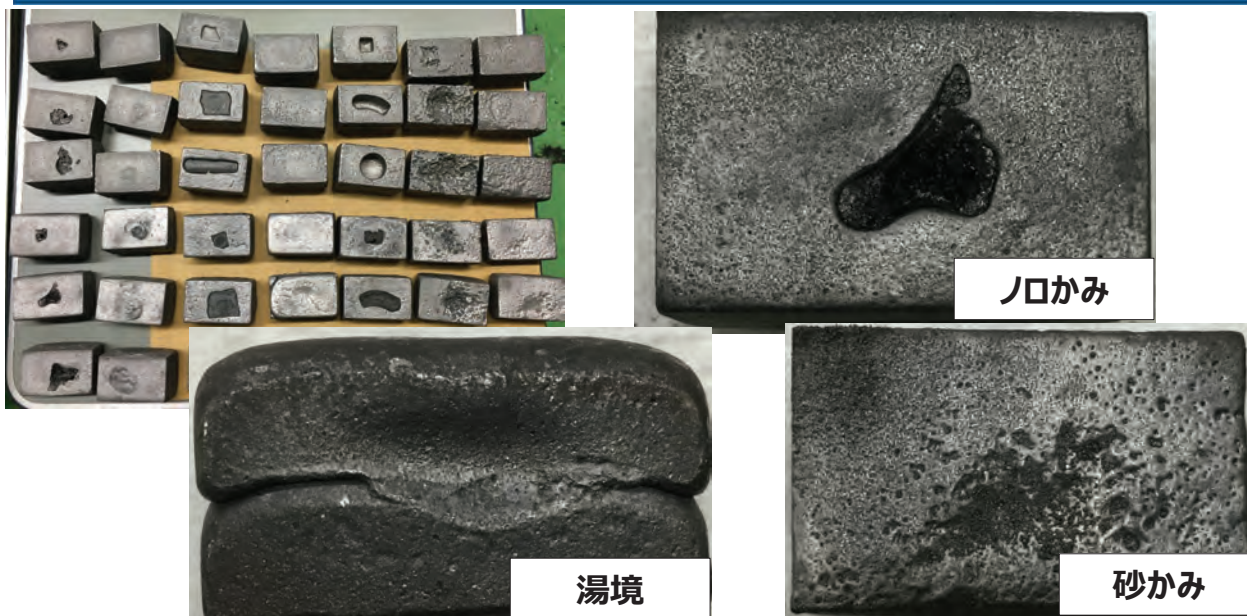
2) 投入物種類及び材質、数量

①ショット有パターン

鑄型内投入材料	FC材No.	FCD材No.	備考
生砂	1	D1	各大・中・小の3個×2
フラン砂	2	D2	〃
中子砂焼成後+塗型	3	D3	〃
2段階注湯	4	D4	〃
冷やし金+塗型	5	D5	〃
発砲	6	D6	〃
ノロ	7	D7	〃

鑄造品表面欠陥事象テストピースの製作

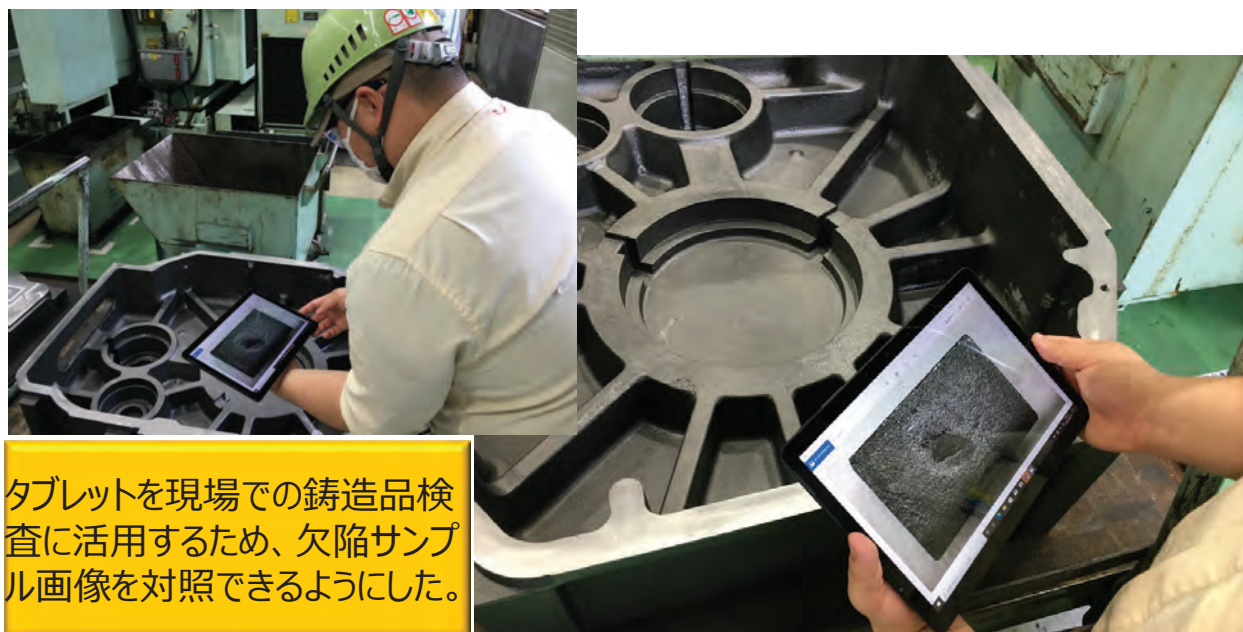
取引先の協力により、鑄造品の表面欠陥を作り出すテストピースの製作が可能となった。しかし、部品形状により変化する様々な欠陥事象を得るには限りがあり、全て下型に発生するような欠陥事象しか得ることができなかった。クラックや上型に発生するブローホール（ガスによる巣）等のテストピース製作には、更に方策を検討する必要がある。



©神崎高級工機株式会社 Page: 7

現場検査タブレット使用状況

鑄造品表面欠陥について、検査を行う新人作業者がタブレットを活用し、不足する知識や経験を補う各種資料を用いて、様々な表面欠陥の使用判定を行う。



©神崎高級工機株式会社 Page: 8

AI解析用写真撮影（鑄造欠陥）



AI画像認識システム構築のため、表面欠陥事象（テストピース含む）を収集し、AIに学習させた。初回の試みであり、今後更にデータを蓄積要。

©神崎高級工機株式会社 Page: 9

鑄造欠陥画像によるA I 学習（初回学習）

準備した鑄造欠陥サンプルをA I に学習させ、訓練した。

画像認識 組織名：神崎高級工機製作所 ユーザID：admin パスワード変更 ログアウト 環境設定

メニュー モデル一覧

AI 画像認識 学習ソフト

学習モデル一覧

新規作成

モデルID: モデル名: 検索

モデルID	モデル名	Ver	最終更新日	状態
000001	20220209-1	1	2022-02-09 14:42:36	利用可

<計算条件>

学習に使用した画像枚数（訓練データ，検証データ）：

計134枚（訓練用写真：111枚、検証用写真：23枚）

学習回数：5,000回

学習時間：4時間程度（今回、同じサーバーで他の大型計算があり、12時間以上計算したが、実質は4時間程度で計算完了）

AIによる鋳造欠陥判定結果（初回学習）

22-03-22 10:20:49

モデル名: テストモデル

10:20:49
Detected

検査数: 7
検出なし: 0
検出あり: 7

加工面に露出する欠陥も精度良く検出できている

監視フォルダ: C:\hinkanDemoGPU\data\input
検出なし格納先: C:\hinkanDemoGPU\data\output\normal
検出あり格納先: C:\hinkanDemoGPU\data\output\defect

¥hinkanDemoGPU\data\input_image¥noroshot.JPG

defect 0.740 defect 0.739

defect 0.801 defect 0.627

defect 0.740 defect 0.759

AI画像認識により、砂カミや肌荒れを検知できる精度に近づくことができた。更に精度を向上させるため様々な欠陥についてAI学習量を蓄積させることが必要である。

AIによる鋳造欠陥判定結果（今後の改良点）

defect detections with possibility ≥ 0.600

defect 0.684

defect 0.691

defect 0.761

defect 0.793

defect 0.715

defect 0.787

defect 0.718

defect 0.768

正常部

鋳造欠陥部

表面へ貫通

製品全体画像では、欠陥部も認識できているが、正常部位も欠陥判定しており、今後の学習により正常部の認識精度を向上させ、併せて欠陥部のズーム機能などの改良等も進めたい。

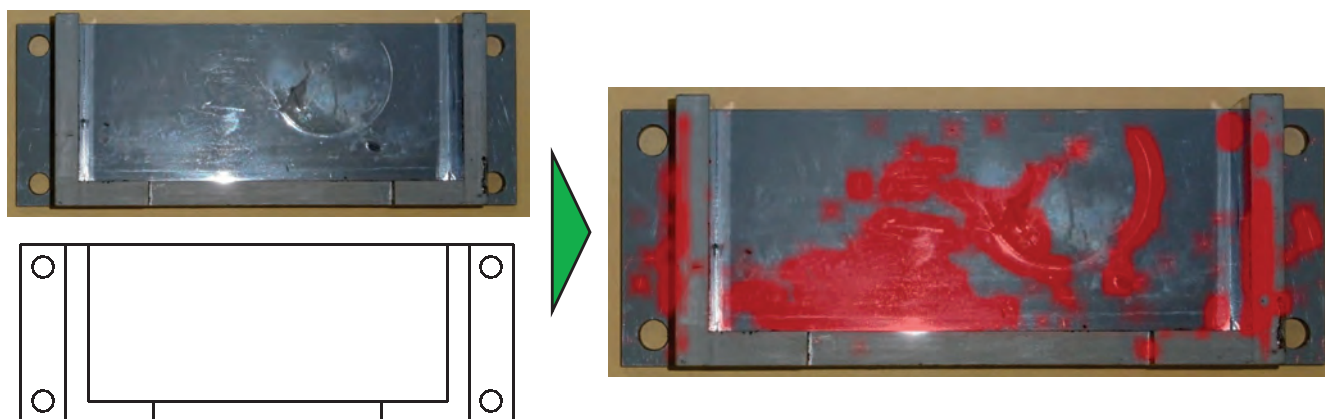
KANZAKI

形状検査用アプリ開発 2021年度報告

海技研

平方 勝
小沢 匠

前回までのアプリ概要



仕様:

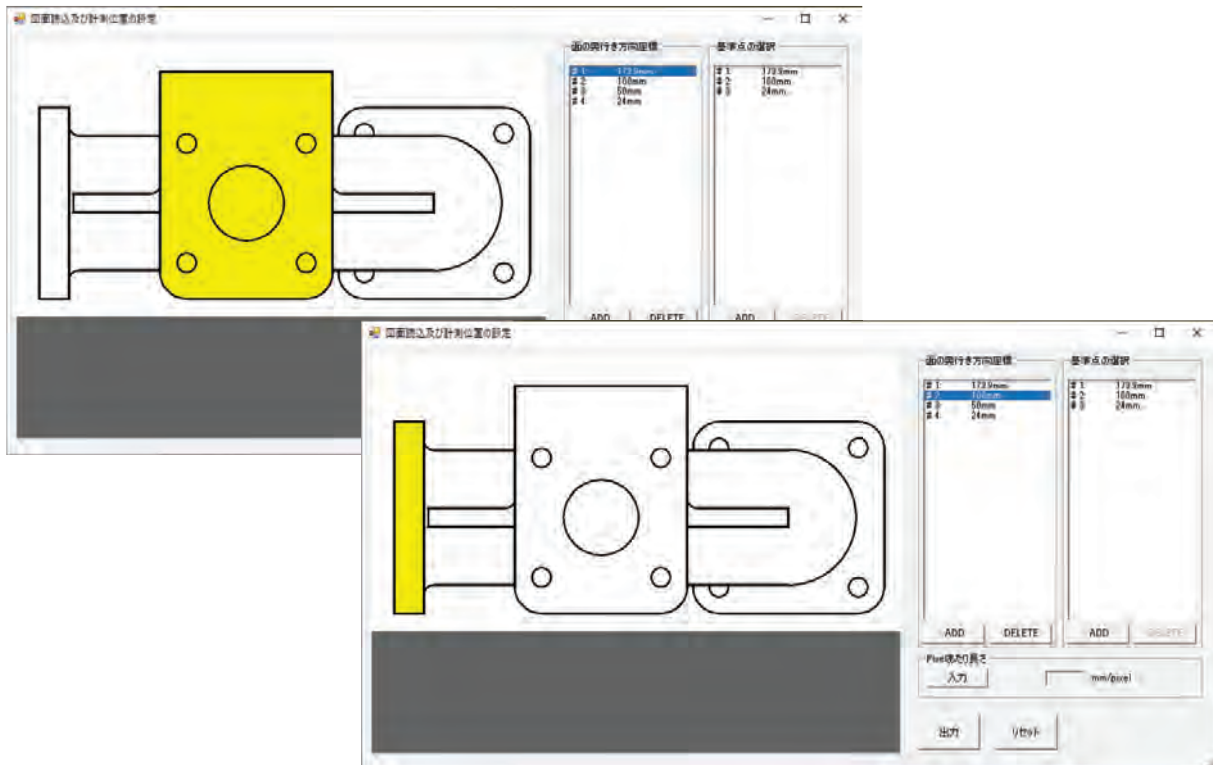
- 写真と図面を比較し、差分のあるところを赤で強調表示

欠点:

- 撮影条件が厳しい(無地の背景 & 正面遠方)
- 基準点(写真と図面の一致箇所)が点しか指定できない

- 写真に図面を重ねることにより背景の制約を取り払う
- 図面に3次元情報を入力することにより(ある程度の)斜めからの撮影に対応
- 基準点を点の他に円及び直線の指定を追加

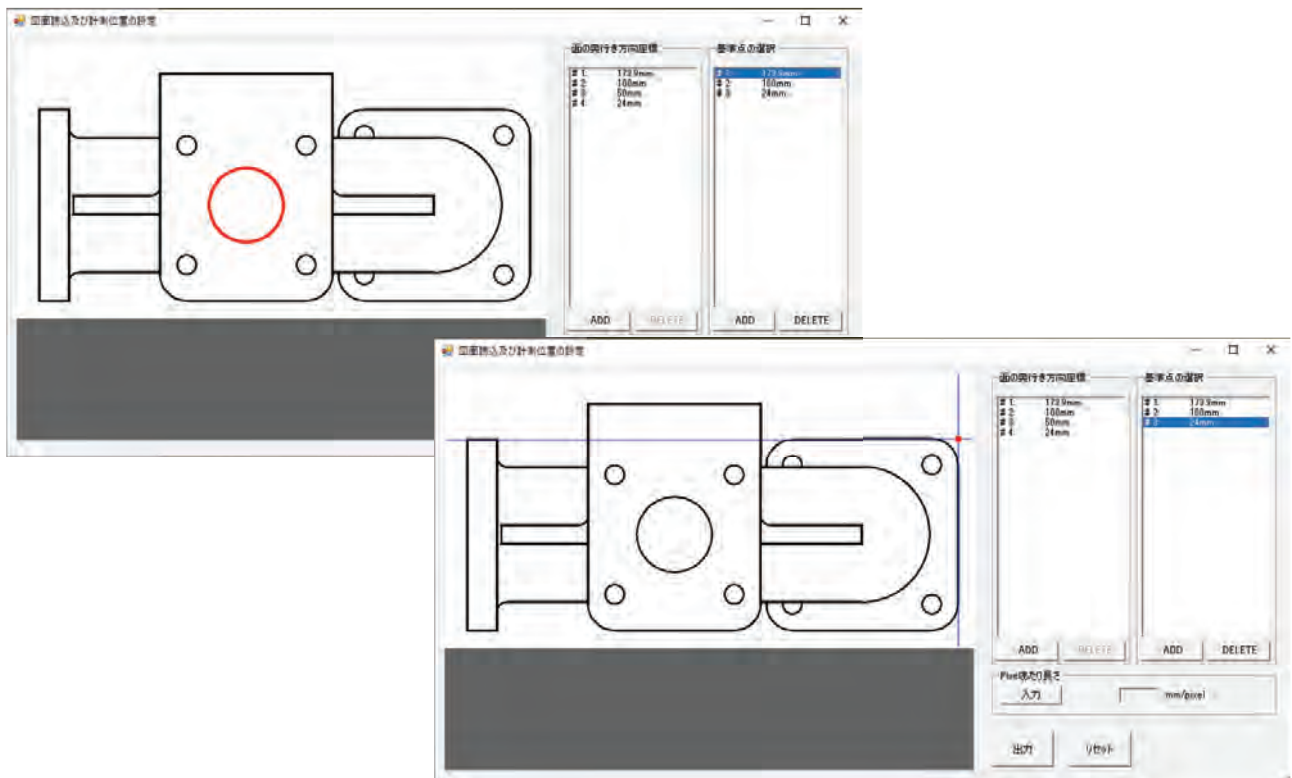
図面情報の入力(3次元情報の入力)



GUIから面とその垂直方向座標を入力し, 2次元図面から3次元情報を取得

2/10

図面情報の入力(基準点の入力)



点の他に円と2直線(の交点)も選択可能

3/10

写真との重ね合わせ(基準点の指定)



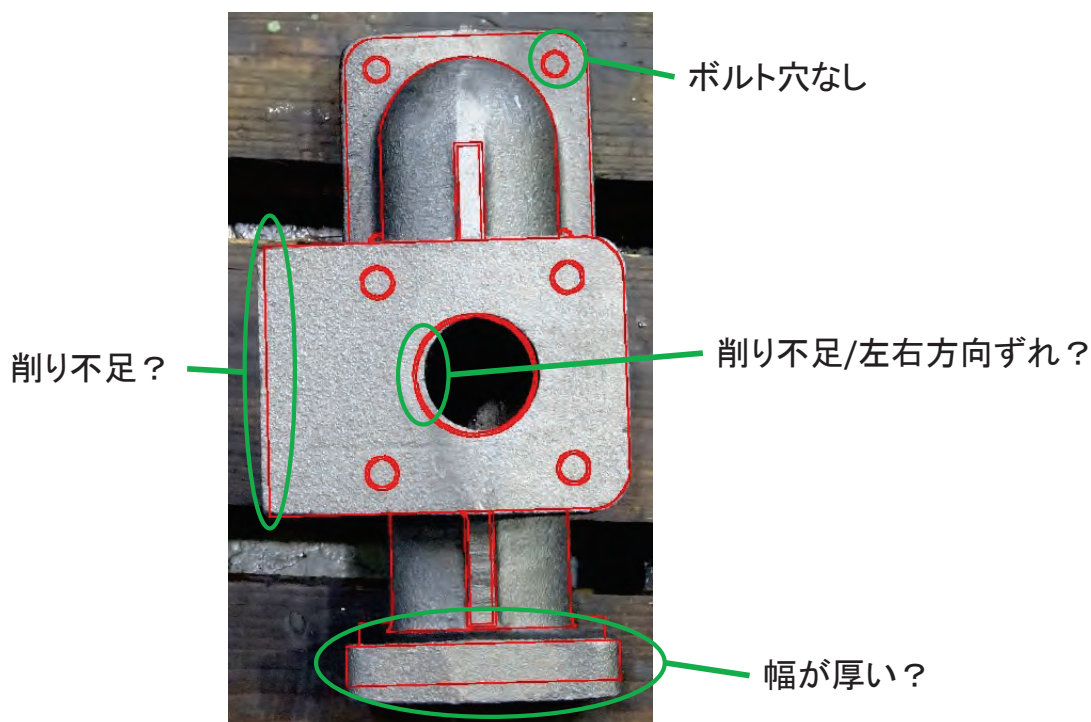
先の図面で指定した基準点を写真上で選択



図面上の基準点と写真上の基準点の誤差が最小となるよう、
対象物の3次元空間上の位置・向きを調整

4/10

写真との重ね合わせ(比較画像)

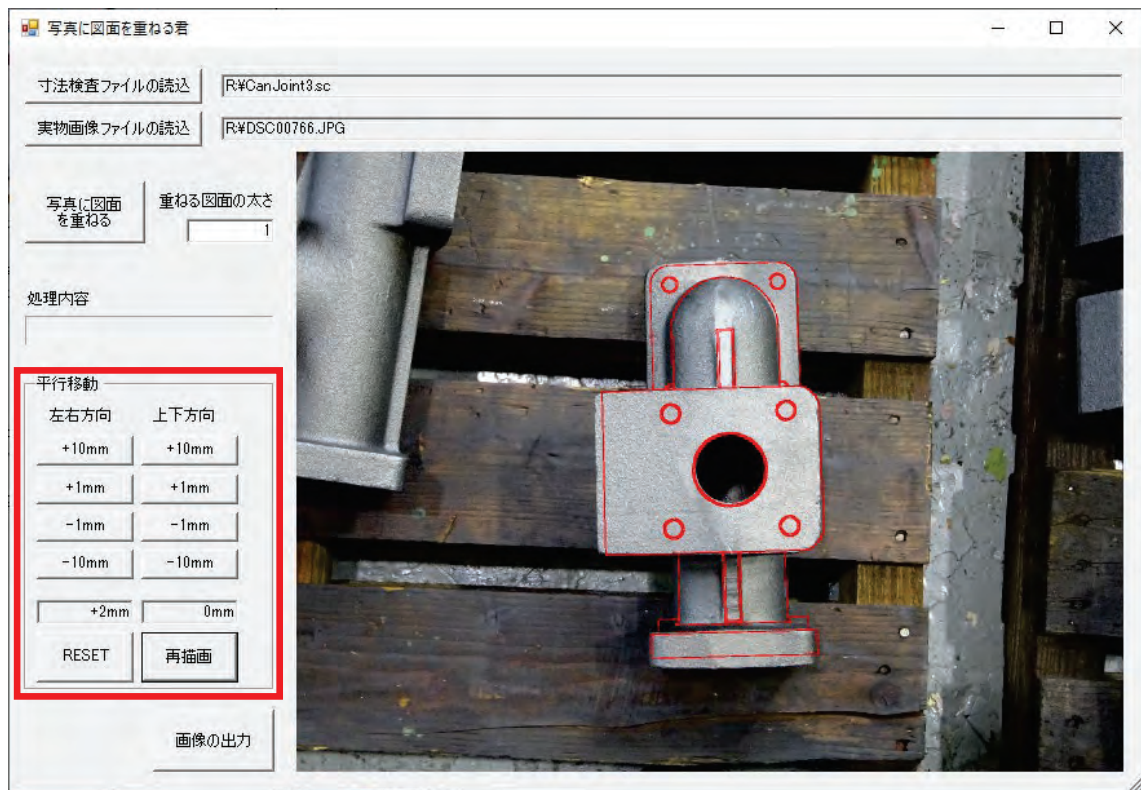


- 赤色で写真上に図面を重ね合わせ
- 図面とのギャップが大きい箇所は要チェック※

※実際のギャップの有無は実物を計測して判定する必要がある。

5/10

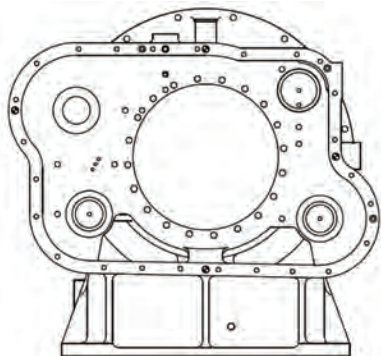
平行移動機能



- 図面を平行移動する機能を搭載
- ギャップの目安に活用

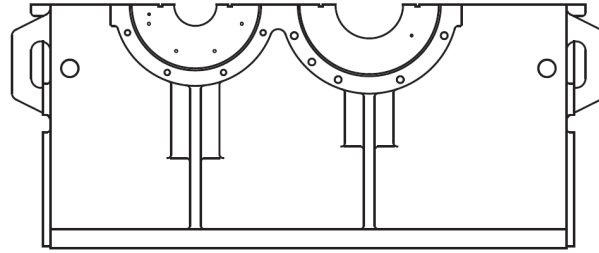
6/10

その他の例 HGS-1



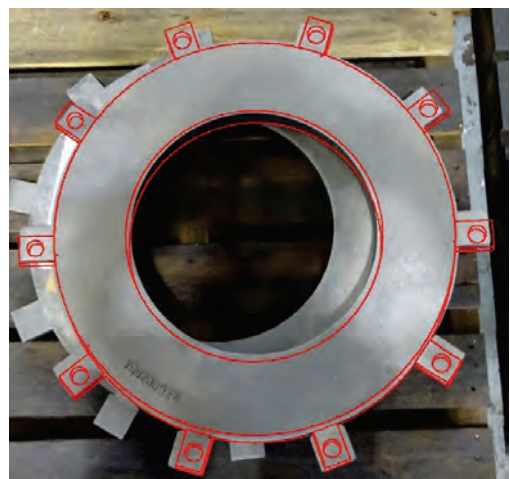
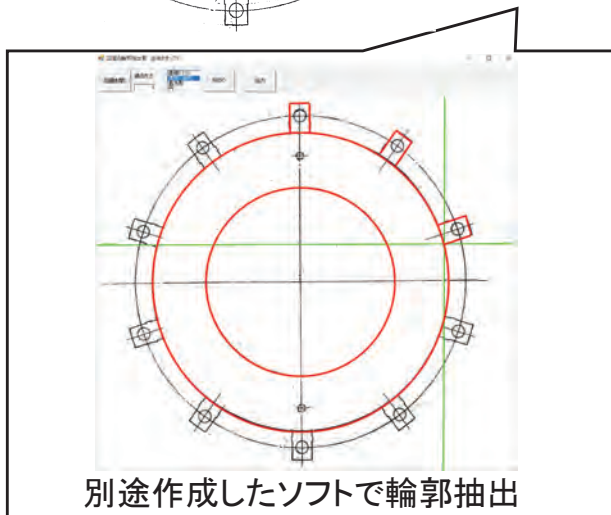
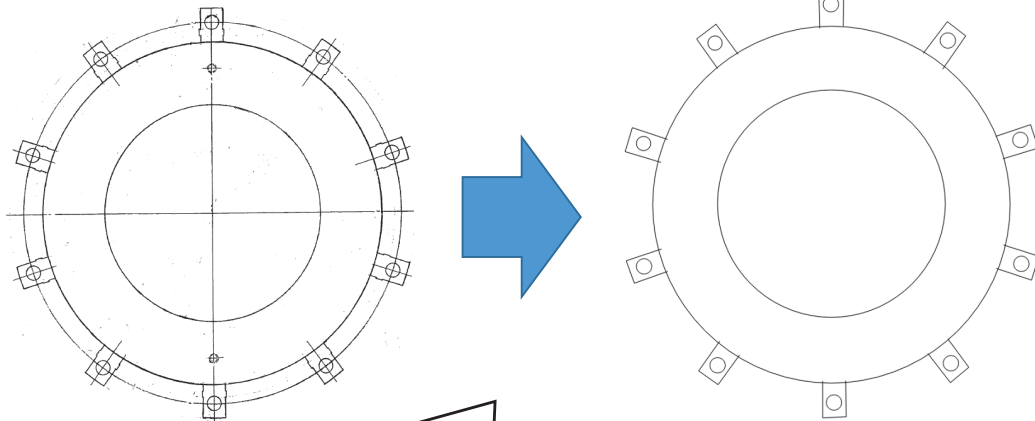
7/10

その他の例 HGS-2



8/10

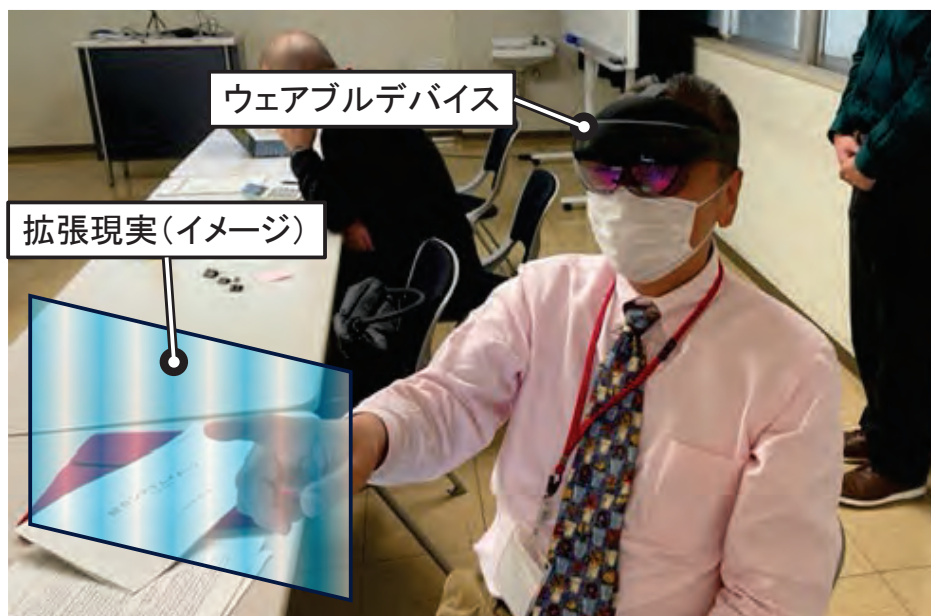
その他の例 CLピストン



9/10

ウェアブルデバイスの適用性検討

ウェアブルデバイス (ARグラス) の一種であるHoloLens (©Microsoft) を使用した
ハンズフリーな形状検査システムを検討

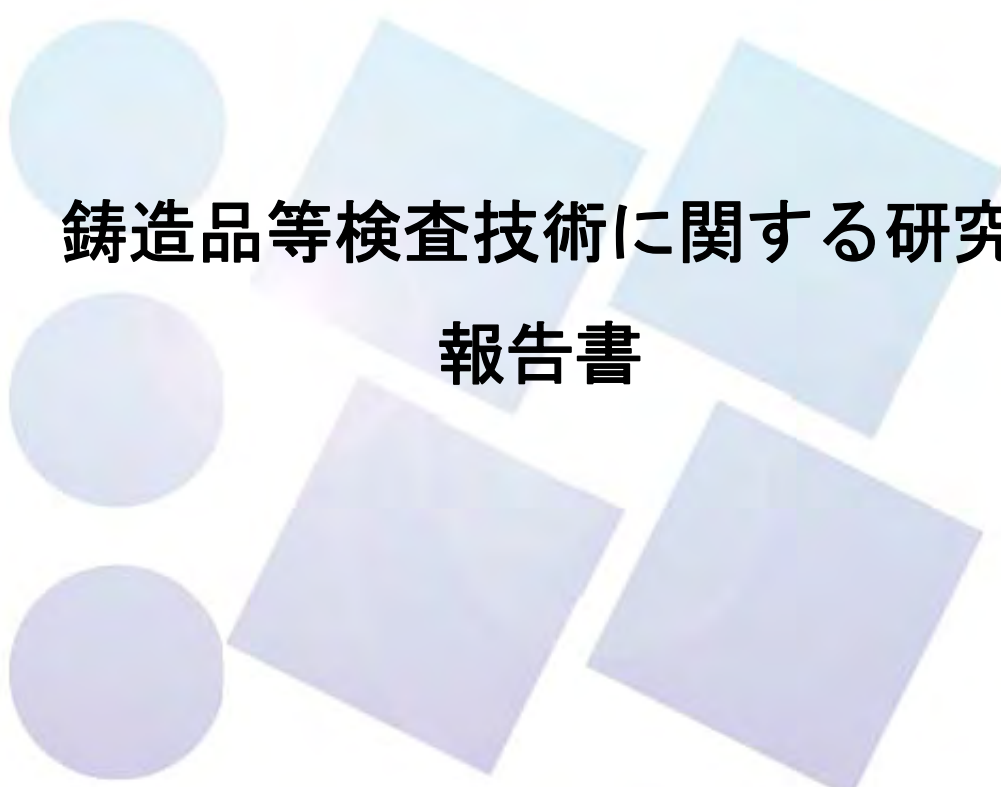


10/10

NMRI

National Maritime Research Institute

日本船舶品質管理協会殿請負研究



鑄造品等検査技術に関する研究 報告書

令和 4 年 3 月

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所

目 次

1. まえがき	1
2. 鋳造品等の形状検査に関する研究	2
2.1 概要	2
2.2 基礎的アプリケーションの開発	2
2.3 実用的なアプリケーションの開発	3
2.3.1 図面情報を取得するアプリケーション	3
2.3.2 実物と比較するアプリケーション	4
3. 鋳造品等の表面欠陥に関する AI 活用等の研究	8
3.1 鋳造品等の表面欠陥と対策に関する実態調査	8
3.2 鋳造品等の表面欠陥検査技術に関する AI 活用方法の調査	9
3.2.1 画像認識 AI	10
3.2.2 画像認識アプリの活用	11
3.3 表面欠陥検出まとめと今後の進め方	
4. 鋳造品等の内部欠陥検査技術に関する AI 活用等の研究	11
4.1 鋳造品等の内部欠陥と非破壊検査技術の実態調査	11
4.1.1 レーザー超音波可視化検査装置について	12
4.1.2 鋳造品非破壊検査への適用可能性の検討	13
4.2 鋳造品等の内部欠陥検査技術に関する AI 活用方法の調査	35
4.2.1 画像認識 AI の適用検討	35
4.2.2 認識精度を改善するための検討	37
4.2.3 自動処理に向けた検討	39
4.2.4 内部欠陥検出画像判定のまとめと今後の進め方	39
5. 検査技術の実用化に向けた検討	39
5.1 内部欠陥検査	39
5.2 表面欠陥検査	40
5.3 形状検査	40
5.4 統合化システム	40
5.4.1 統合化システム概要	40
5.4.2 統合化システムの基本仕様	40
5.4.3 課題と進め方	41
6. まとめ	41
参考文献	41

1. まえがき

本報告書は、国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所（海技研）が、一般社団法人日本船舶品質管理協会から、「鋳造品等検査技術に関する研究」として、受託して実施したものである。本調査研究は、舶用品メーカーの要望を基に日本財団助成事業として、同協会が委員会を設置して進めている「鋳造品等検査技術の開発事業」（令和3年度）の一環である。

製造事業場では、工程毎の各検査を経て、完成検査を行い出荷している。工程内で発生する不適合未然防止のため、外部との接点である受入検査が重要であるが、特に、鋳造品で不適合が多発している実状がある。鋳造品は複雑な形状を容易に造形できるメリットがあるが、反面、内部欠陥や表面欠陥等が生じやすく、特に表面近傍の内部欠陥は切削加工により表面に現れ、工程混乱を引き起こす要因となっている。

このような状況に対し、内部欠陥については、従来の非破壊検査手法である超音波探傷装置があるが、表面近傍の欠陥が発見しにくい等の問題があり多用されていない。また、形状検査や表面欠陥検査については、人の目視に依存しており、これらの問題を解決する安価で簡便な装置を用いた総合的な検査支援技術が求められている。

本調査研究の目的は、「鋳造品等検査技術に関する研究」を課題とし、AI・IoT技術の活用による品質管理の高度化を図ることを視野に入れ、形状検査、表面欠陥検査及び内部欠陥検査に関する研究により、多種少量生産を特徴とする舶用製品の製造現場で活用できる実用的な検査技術の確立に向けた具体的な進め方について立案することにある。

このような全体計画の中で、以下の研究を実施した。

- (1) 鋳造品等の形状検査に関する研究
- (2) 鋳造品等の表面欠陥検査技術に関する AI 活用等の研究
- (3) 鋳造品等の内部欠陥検査技術に関する AI 活用等の研究
- (4) 同検査技術の実用化に向けた進め方の立案

2. 鋳造品等の形状検査に関する研究

2.1 概要

品質管理において、製品が図面どおりの形状・寸法で製作されているかを確認することは、最も重要な要素の一つである。この検査は単純かつ平坦な形状であれば確認すべき箇所が少なくなるものの、実際の製品のような複雑かつ立体的な形状であると、確認すべき箇所が多くなる。これにより、検査の煩雑化はもとより、確認すべき箇所の検査を失念したり、図面と異なる製品を出荷するといった危険性が相対的に高くなるおそれがある。

これを踏まえ、検査の現場でより直感的・簡略的に実際の製品と図面を比較するアプリケーションを開発した。本章ではこのアプリケーションの解説を行う。

2.2 基礎的アプリケーションの開発

実用的なアプリケーション開発に先駆け、2.1の仕様を満足する基礎的なアプリケーションの開発を試みた。このアプリケーションでは実物の写真のエッジを抽出し、そのエッジと図面の輪郭線を比較し、誤差が大きい箇所を赤色でハイライトする仕様となっている。本アプリケーションのフローチャートを図2.2-1に、各プロセスで出力される画像を図2.2-2に示す。メディアンフィルタはエッジ抽出の前処理であり、ノイズを除去するために使用する。メディアンフィルタ後の写真に対してエッジ抽出を行い、図面と合うよう適宜座標変換処理を行う。その結果を図面と比較し、図面の輪郭線とエッジが一致しない箇所を赤色で強調表示した画像を出力する。

図2.2-2に示す例では影や光の反射、及び後天的に生じた傷などが強調された画像となった。

このように、基礎的アプリケーションでは写真と図面を比較する機能を有しており、図面と差がある箇所が一目で判別することが可能である。一方、開発後にいくつかのケースで実運用に足るか検証したところ、下記の課題が挙げられた。

- ・ 基礎的アプリケーションでは図面と写真の差を少なくするため、正面かつ遠方から撮影する必要がある。加えてエッジ抽出にあたり、背景は極力無地に近づける必要がある。しかし、現場でそのような撮影状況を常に確保することは困難である。
- ・ 座標変換処理に際し、2.3にて後述する基準点を指定して合わせることになるが、この基準点が写真・図面上の点しか指定できず、円や直線などの指定ができない。

以上を踏まえ、基礎的アプリケーションをアップグレードし、より実用的なアプリケーションの開発に取りかかった。

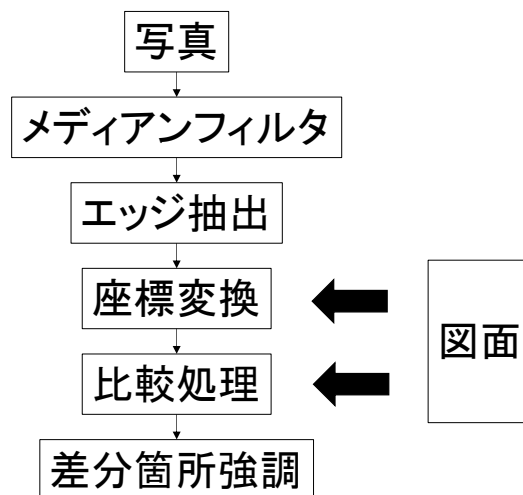


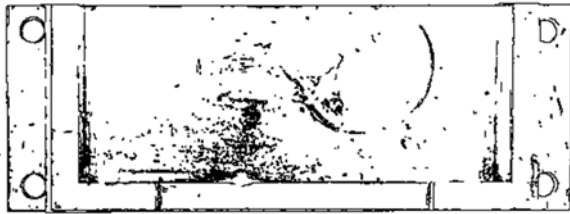
図 2.2-1 基礎的アプリケーションのフローチャート



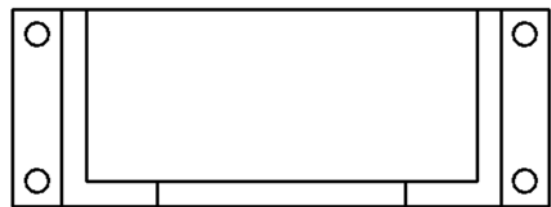
(a) 写真 (元データ)



(b) メディアンフィルタ後の写真



(c) エッジ抽出



(d) 図面 (輪郭線のみ)



(e) 差分箇所強調

図 2.2-2 各プロセスにおける出力画像

2.3 実用的なアプリケーションの開発

2.3.1 図面情報を取得するアプリケーション

図面と実物をより高精度に比較するにあたり、各種寸法などの図面情報を数値データとして出力する必要があると考え、これを実現するアプリケーションを開発した。また、実物が立体的であることに対し、図面は二次元的に作図されることが多いことを踏まえ、図面から二次元情報を取得すると共に三次元的な位置を並行して入力するアプリケーションとして開発した。アプリケーションの外観を図 2.3-1 に示す。このアプリケーションでは画像ファイル形式で保存された輪郭線のみ有する図面を読み込み、その形状データを取得する。加えて、輪郭線によって囲まれた領域を指定し、その面が紙面垂直方向のどの位置にあるのかを入力する。これにより、平面的な情報に過ぎない図面を三次元的な位置データへと変換する。

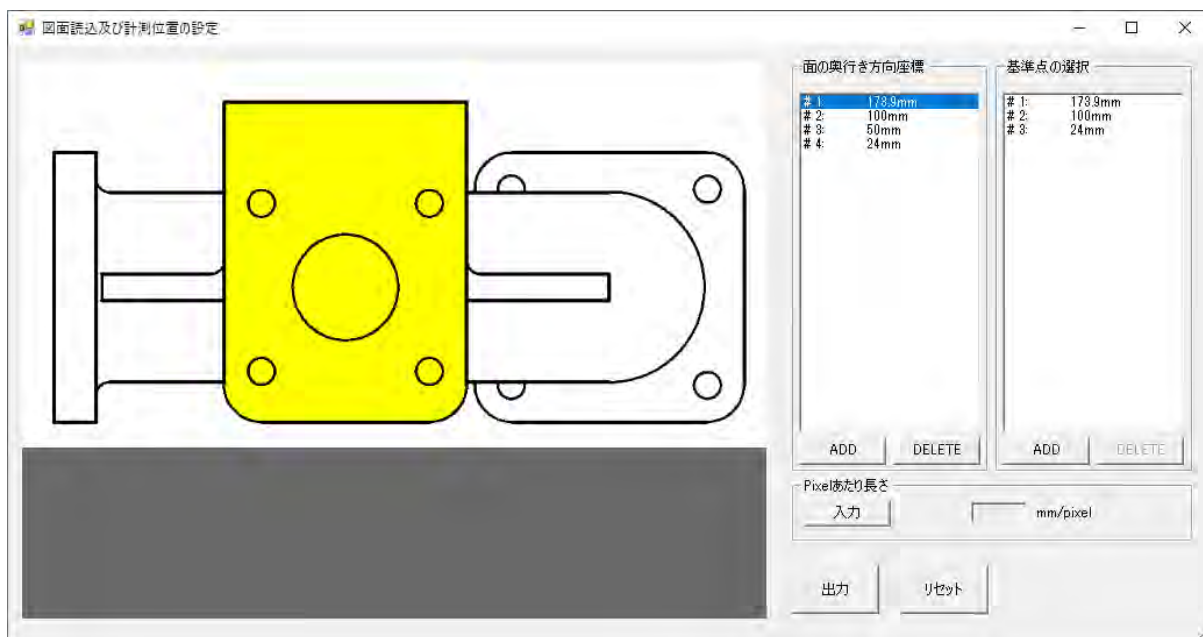


図 2.3-1 図面情報入力アプリケーションの外観

図面の読み込み、及び各面の紙面垂直方向位置を入力後、後述のアプリケーションで使用する「基準点」を選択する。基準点は実物の写真と図面データを重ねる際に基準とする点であり、①図面上の任意の点、②円、及び③2直線の交点のいずれかで最低3点以上選択する。

基準点の選択後、図面上の任意の二点を選択し、その点間距離を入力する。これにより、画像データとして保存された図面において、1ピクセルあたりの実際の長さを取得する。

上記情報の入力後、出力ボタンを押すことにより、これらの情報が整理された一つのファイルで出力される。

2.3.2 実物と比較するアプリケーション

本研究では実物と図面を比較するアプローチとして①実物写真を用いた比較と②三次元スキャナを用いた実物の点群データとの比較の2種類の手法を試み、各アプリケーションを開発した。

1) 実物写真を用いたアプリケーション

アプリケーションの外観を図 2.3-2 に示す。本アプリケーションでは 2.2 にて出力した図面情報ファイル及び実物写真の画像ファイルの2つを用い、実物写真上に図面の輪郭を重ねることによって形状検査を行う。アプリケーションの起動後、これら2つのファイルを読み込み、2.2 のアプリケーションで指定した基準点を同様に実物写真においても指定する。この様子を図 2.3-3 に示す。基準点の選択後、実物写真上の基準点と図面情報にて指定した基準点の距離が最小となるよう、準ニュートン法を用いた最小化問題により、対象の三次元空間上における位置と向きを逆解析する。

対象の位置と向き計算後、図 2.3-4 に示すように実物写真に図面の輪郭を重ねた画像を出力し、実物と図面の比較を行う。例えば図 2.3-4 において実物は図面と異なり、まだボルト穴が空いていない。加えて下部の幅が実物よりもかなり厚いことが確認できる。このように図面の輪郭と乖離が大きい箇所を重点的に調査することによって効率的な検査を実現すると共に、視覚的な情報を提供することによって検査の見落としを防ぐことに貢献できると考える。ただし、実物写真には寸法情報が存在しないため、例えば一律の割合で拡大・縮小した図面と相似ではあるものの合同ではない製品の場合、実物写真と図面の輪郭は重なり図面との乖離を抽出できないことは考慮する必要がある。

図 2.3-3 及び図 2.3-4 は管継手の製品を対象とした比較の様子を示したが、本研究では他にも大小様々な製品でも本アプリを用いて実物と図面の比較を試みた。これらの製品の図面と比較画像を図 2.3-5 に示す。管継手より

も複雑な形状の製品であるものの、いずれにおいても一定以上の精度で実物と図面の比較が行えていると考える。なお、CLピストンにおいては紙媒体の図面のみであり、一般的な製図ソフトのように寸法線や隠れ線を削除し、輪郭線のみ抽出することが容易ではなかった。そこで、この輪郭線のみを抽出するソフトも並行して開発し、それを用いて出力した輪郭画像を2.2のアプリケーションに読み込んだ。

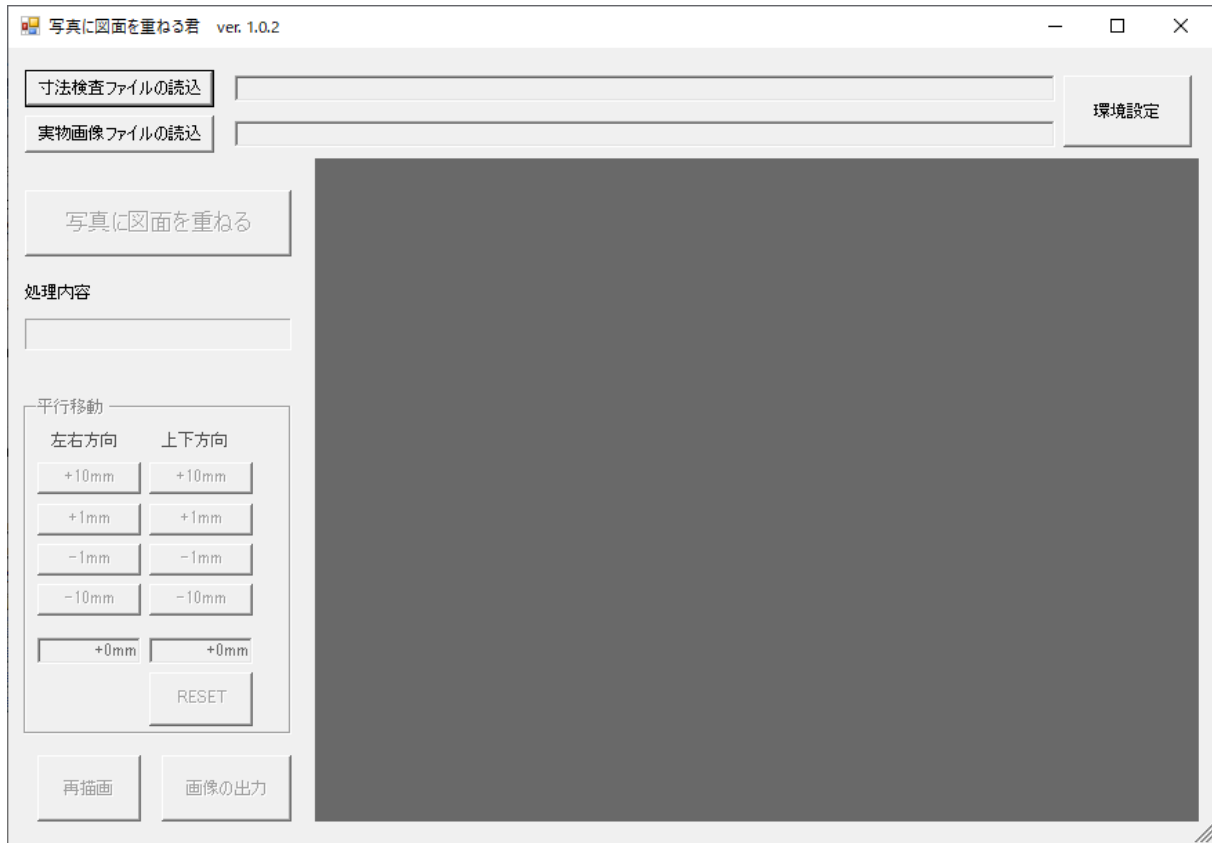


図 2.3-2 実物写真を用いた比較アプリケーション外観



(a) 円を用いた基準点選択



(b) 2直線の交点を用いた基準点選択

図 2.3-3 アプリケーション上における基準点選択の様子

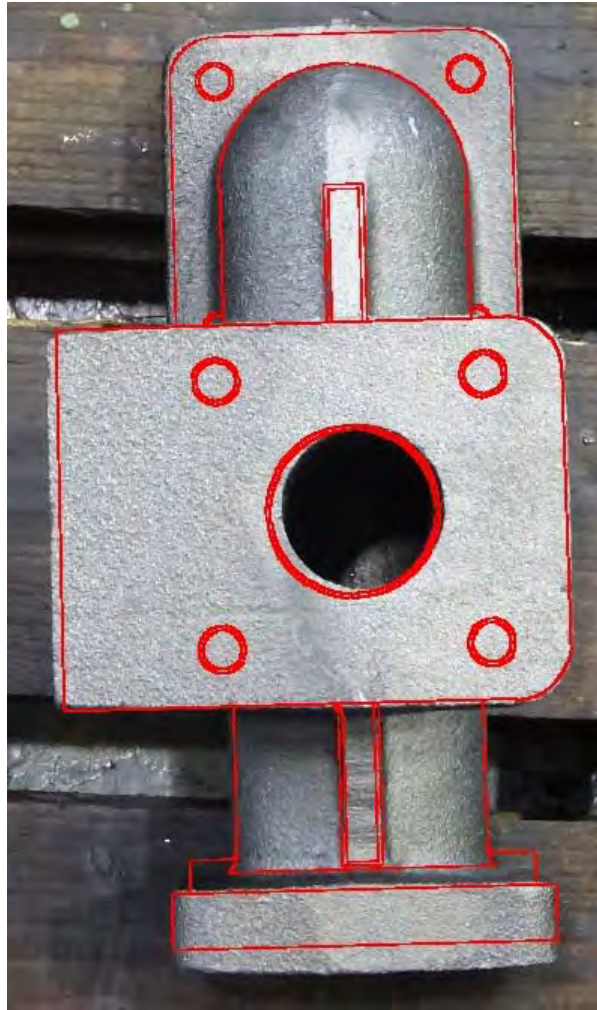
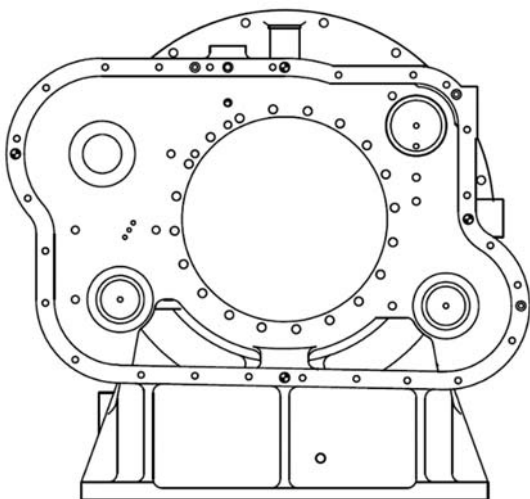
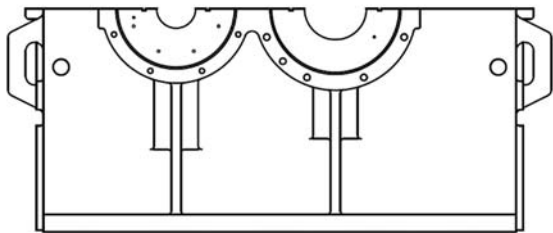


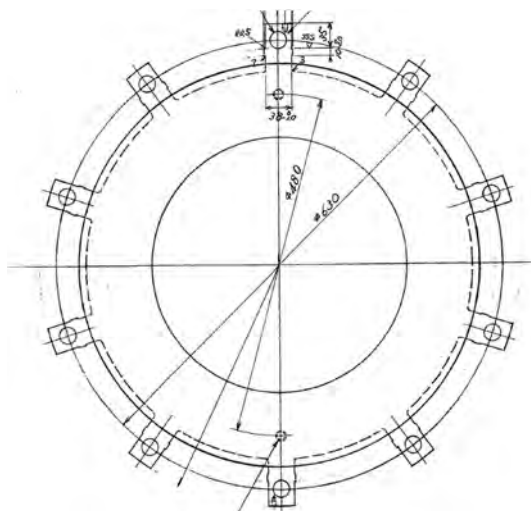
図 2.3-4 実物写真上に図面の輪郭を重ねた画像



(a) HGS-1



(b) HGS-2



(c) CL ピストン

図 2.3-5 その他の製品を用いた比較画像

2) 三次元スキャナを用いた実物の点群データとの比較アプリケーション

アプリケーションの外観を図 2.3-6 に示す。このアプリケーションでは三次元スキャナによって計測された実物の点群データが保存された STL ファイルと 2.2 にて出力した図面の情報を三次元空間上に描画し、これらを平行・回転移動させて重ねることにより実物と図面との乖離を検査する。

実物点群データと図面を比較した様子を図 2.3-7 に示す。灰色の点が実物の点群データ、赤色の点が図面の輪郭を抽出した点群データである。2.3.1 の実物写真を用いたアプリケーションと異なり、一度の計測で様々な角度から実物と図面の乖離を確認できる。加えて、2.3.1 のアプリケーションと異なり、STL ファイルには寸法情報が存在するため、図面と一律の割合で拡大・縮小した製品においても検査で図面との乖離を確認できる。一方、実物の点群データと図面を重ねるには検査員による手作業を要する。

図 2.3-7 の点群データの取得には日本 3D プリンター製の三次元スキャナである EinScan SE を使用した。ただし、STL は点群データを保存する一般的な拡張子であり、他社製の三次元スキャナであっても STL ファイルの形式で保存されていれば本アプリケーションで読み込むことは可能である。ただし、EinScan SE と同様、点群データがミリメートル単位で保存されていない場合、実際の製品に対して拡大・縮小された点群データが表示されることを考慮する必要がある。



図 2.3-6 三次元スキャナを用いた実物の点群データとの比較アプリケーション外観

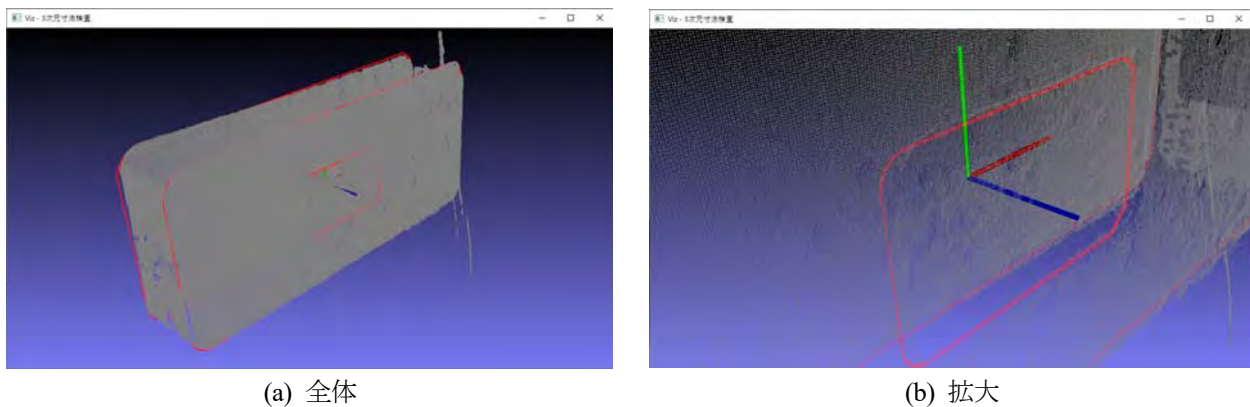


図 2.3-7 実物点群データと図面の比較の様子

3. 鋳造品等の表面欠陥に関する AI 活用等の研究

3.1 鋳造品等の表面欠陥と対策に関する実態調査

鋳造欠陥は、鋳物を生産する立場、加工する立場にある者にとって避けて通れない、長年解決すべき課題として挙げられている。そのため、鋳造欠陥とその対策等は、出版物や論文、技術報告等、様々な形態で報告されている^{1)~7)}。欠陥用語の分類と統一の取り組みも行われているようである。しかしながら、船用鋳造品を加工する事業所において標準化された欠陥識別と使用判定方法は十分でなく、「鋳造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド」を作成することが、本調査の目的の一つとなっている。

日本鋳造工学会が出版している「鋳造欠陥とその対策」¹⁾は、「鋳造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド」を作成していく過程において、大変参考になる。「鋳造欠陥とその対策」¹⁾では、「鋳造欠陥とその対策」事例が、表 3.1-1 に示すような統一した様式で体系的にまとめられている。また、国際鋳物欠陥分類図集⁴⁾による鋳造欠陥の分類では、外観的分类として、①鋳張り、出っ張り、②巣、③割れ、④鋳肌不良、⑤湯回り不良、形状不完全、⑥寸法不良、形状不良、⑦介在物・材質不均一の7分類に分けられている。鋳造欠陥は、製造工程で整理すると、造形（鋳型、中子）、注湯（温度、速度）、そして凝固などの条件によって左右されるといわれている³⁾。

船用鋳造品を加工する事業所において表面欠陥を発見した際の判断基準は、舶用品の使用部位や品質維持の観点から、取り扱いが異なってくる。

表 3.1-1 鑄造欠陥とその対策事例¹⁾ (一例)

名称	B-04-FCD) ざく巣, 多孔質巣
製品名	ケース類
鑄造法	フルモード法
材質・熱処理	800kg (750×600×H500mm)
素材重量	球状黒鉛鑄鉄 (FCD600), 鑄放し
状態	上型面の中央部が凹状の空洞となっている
発生箇所	上型厚肉部の表面
原因 (推定)	1) 凝固時の体積収縮によって肉厚部の溶湯供給が不足し, 未凝固表面が下がり, 凹状の空洞となったものである. 2) 鑄込み温度が高くて液体収縮が大きい 3) CE 値が低く, 黒鉛膨張量が少ない
対策	1) ひどい肉厚差を避ける 2) 鑄込み温度を低くする. (1320±20°C) 3) 可能な範囲で共晶成分に近づける. (CEL=C+0.23Si を 4.3 に近づける) 4) 黒鉛粒数を増やす. 5) 押湯を立てる 6) ざく巣が発生する部分に冷やし金を施工して指向性凝固を取らせる. 7) ずんべ (押湯または湯口の湯を上から突く) を行う
写真1 (上型部に発生したざく巣) (省略)	
写真2 (ざく巣の拡大部) (省略)	

このような観点から, 本事業に設置した作業部会の中で舶用鑄造品に多く見られる欠陥事象をパターン化し, 分類された欠陥事象に対する欠陥の写真をデータベース化した. 欠陥事象に対する特徴を欠陥状態として整理すると共に, それぞれの欠陥発生部位を整理した. 詳細については, 別の報告書に記載するものとし, 本報告書では省略する.

3.2 鑄造品等の表面欠陥検査技術に関する AI 活用方法の調査

前節 3.1 で鑄造品等の表面欠陥と対策について整理した. 鑄造品の表面欠陥検査は, 一般的には目視検査で行われる. 検査員は大量の鑄造品を検査しなければならないため, 検査現場での負担は大きい. 検査員の労力と負担を軽減し, 検査を効率的に行っていくことが求められる. また, 欠陥検査経験の少ない検査員においても, 欠陥を確実に発見できるスキルと欠陥発見後の画一的な判断が求められる. そこで, 目視検査で発見された欠陥について, 「鑄造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド」を作成し, 鑄造品に多く見られる表面欠陥の典型的知識の整理と, 欠陥を発見した後の画一的な対処方法を, 欠陥事象ごとにパターン化 (分類) することから始まる. AI の活用方法としては, 検査員の負担を軽減するために, 撮影された画像の中から AI が自動検出し検査員に報告できるようにすること, または, 検査員の見落としリスクを低減するために, 画面上に欠陥があることを検査員に知らせることが考えられる. ここで適用する AI は, 第三次 AI ブームで牽引役となっている画像認識 Deep Learning 技術が実績の面からも有望である. **次節 3.2.1** において, 表面欠陥検査に活用する画像認識 AI について説明する.

3.2.1 画像認識 AI

ここで活用する画像認識 AI は、畳み込みニューラルネットワーク(Convolutional Neural Network : CNN)を発展させた物体検出技術の一つである Region Proposal Network (R-CNN)である。畳み込みニューラルネットワークは、特定の形状を捉える畳み込み層とプーリング層を階層的に配置した、**図 3.2-1** に示したような構造となっている。これは人間の視覚機能を模したニューラルネットワーク構造である。画像処理としては、畳み込み層はフィルター処理に相当し、プーリング層は画像縮小に相当する。畳み込み層とプーリング層を重ねて層を深くし、最後は全結合層（パーセプトロン）で分類（識別）処理を行う仕組みとなっている。

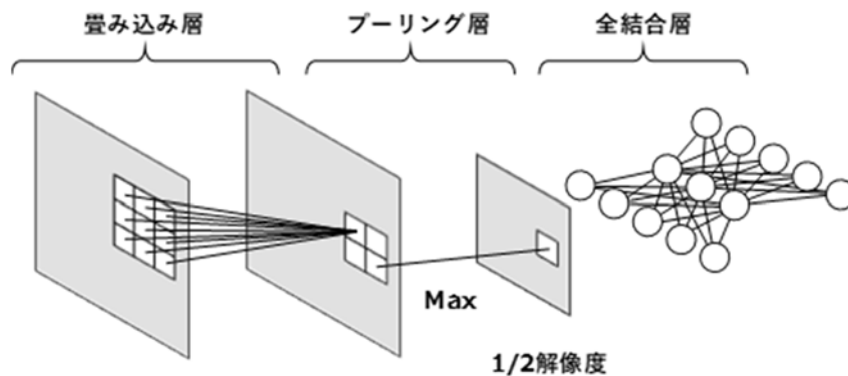


図 3.2-1 畳み込みニューラルネットワーク

畳み込みニューラルネットワークの畳み込み層は、**図 3.2-2** に示すように、入力に対して重みフィルターの内積を計算する。1層目の畳み込み層では、入力サンプルに対して畳み込み処理を行い、特徴マップを求める。2層目以降の畳み込み層では、前層の特徴マップを入力として同様に畳み込み処理を行う。畳み込み処理で得られた値は、そのまま特徴マップの値とはしない。畳み込み処理で得られた値を活性化関数に与えて、その出力を特徴マップの値とする。活性化関数にはシグモイド関数や ReLU などを使用される。

プーリング層は、畳み込み層から出力された特徴マップを縮小する処理を行っている。その時、着目する領域を設定してその領域の特徴マップの値から新たな特徴マップの値を求める。これにより、幾何学変化などに対する普遍性を獲得することができる。プーリング層の処理として最もよく使われるのが、最大値プーリングである。最大値プーリングは、注目領域の中の最大値を新たに特徴マップの値とする手法である。

最後の全結合層は、多層パーセプトロンと同様にシナプスの重みを計算し、活性化関数によりユニットの値を求める。最初の全結合層の入力は、畳み込み層またはプーリング層の出力であり、2次元の特徴マップを1次元に展開して与える。識別層では、各クラスの尤度を求める。尤度が最大となるクラスを分類クラスとして出力する。ここまでの、Deep Learning を利用した物体の識別技術である。

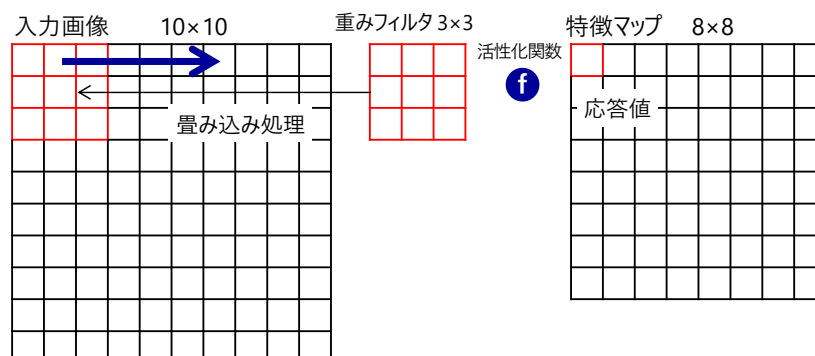


図 3.2-2 畳み込み層の処理

Deep Learning を利用した物体の識別技術を発展させ、物体検出技術が進歩した。物体検出技術（画像認識）は、写真の中にあらかじめ学習した物体がどこにあり、その認識精度を確率表示する技術である。本調査研究では、Faster R-CNN モデルを利用した⁸⁾。Faster R-CNN モデルを図 3.2-3 に示す。

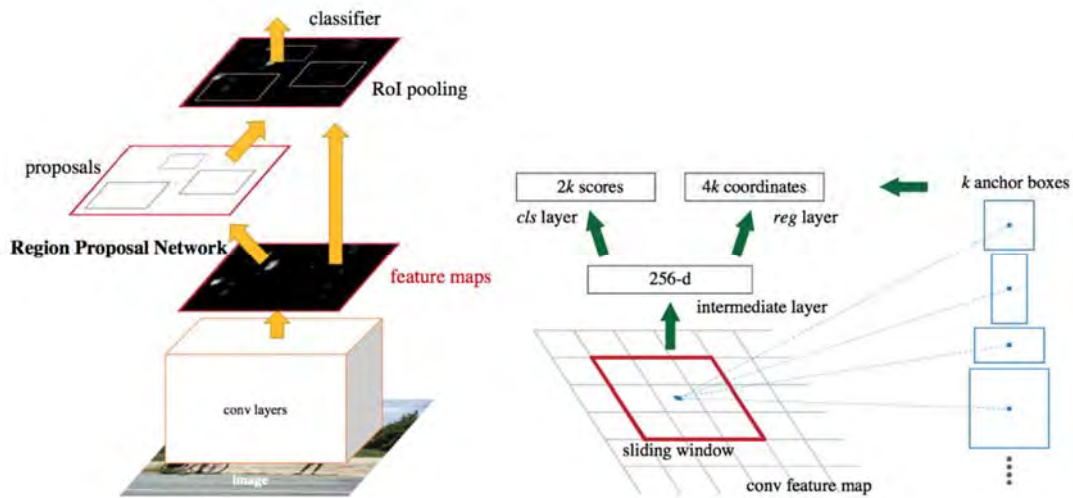


図 3.2-3 Faster R-CNN モデル⁸⁾

3.2.2 画像認識アプリの活用

表面欠陥を学習させるために、表面欠陥が撮影された画像を用意する必要がある。本事業に設置した作業部会メンバー（事業所）は、今後、鋳造品の表面欠陥画像を記録として保存し、蓄積していくことができる。そのため、昨年度事業「AI 技術の活用による不適合未然防止」で開発した「画像認識アプリ」を事業所で活用し、独自に画像認識 AI の学習効果の検証、欠陥認識精度の評価を行うことができる。そこで、今年度は、本作業部会の活動の一環として、「画像認識アプリ研修会」を実施して、「画像認識アプリ」の活用方法について研修を行った。この研修会を踏まえて、事業所で独自に教師データ（欠陥画像）を整備し、画像認識 AI の学習を進めていくことが可能となった。画像認識 AI の学習、認識精度を高めていく工夫（方法）、例えば、欠陥画像の撮影方法、多様で大量の欠陥画像を効率よく整備していく方法等、画一的な方法も検討していく必要がある。

「鋳造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド」に記載した鋳造品表面欠陥の類型化が、画像認識 AI への学習（アノテーション作業等）に参考となる。AI による表面欠陥の判定が実用的なレベルになることで、検査員への支援が可能になると同時に、事業所の生産性が高まることが期待できる。そのための基礎研究を行い実用化への道筋をつけた。

3.3 表面欠陥検出まとめと今後の進め方

画像認識アプリを活用して、事業所に蓄積されていく表面欠陥画像を教師データとした画像認識 AI の認識精度を高める作業を継続していく必要がある。同時に、「鋳造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド」基礎資料の内容を充実し、検査の現場で活用できる資料として完成させていく必要がある。

検査現場における検査員への負担軽減及び事業所の作業効率の向上に向けた現場への適用性を検討していく必要がある。今後、AI による支援技術を実用的レベルにまで高め、AI を用いた検査方法を確立する。また、「鋳造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド」を完成させ、タブレットや AR グラス等を活用し、現場での検査を容易化していくための検討を行っていく。

4. 鋳造品等の内部欠陥検査技術に関する AI 活用等の研究

4.1 鋳造品等の内部欠陥と非破壊検査技術の実態調査

内部欠陥の非破壊検査においては、超音波を送受信して、受信波形の中にある欠陥エコーを信号波形で観察して検出するため、専門性が求められる課題があった。また、広範囲の検査に時間を要すること、さらにセンサー（超音波探触子）直下は不感帯となっており、表面近傍の欠陥が発見しにくい等の課題もあった。最近では、これらの課題を解決するために、内部欠陥を映像で検出できるつくばテクノロジー（株）製の非破壊検査装置が出てきたが、鋳造品検査における適用については、技術調査が必要である。

今次調査研究では、つくばテクノロジー（株）製のレーザー超音波可視化検査装置（Laser Ultrasonic Visualizing Inspector）を使用して、鋳造品の内部欠陥の非破壊検査への適用性について検討した。

4.1.1 レーザー超音波可視化検査装置について

本検査装置⁹⁾は、超音波の伝播をその場で動画映像として観察しながら傷を見つける検査手法であり、

- ① 分かりやすい
 - ② 広い範囲を迅速に検査できる
 - ③ 曲面部等の複雑形状部の検査が容易
 - ④ 不感帯（表面直下の探傷不可領域）がない
- といった特徴がある。

レーザー超音波可視化システム（以下 LUVI と呼ぶ）は、**図 4.1-1** に示すような構成をしている。本検査システムの外観を、**図 4.1-2** に示す。パルスレーザーから周期的に発振されたレーザー光を検査体表面で高速走査させる。各走査点では急激な熱歪によって超音波が発生し、その伝搬波形を固定点に取り付けた超音波探触子で検出する。検出波形は、A/D 変換されてパソコンに収録される。収録された波形列をデータ処理して固定点の超音波探触子から発信された超音波の伝搬映像をパソコン画面上に動画表示する。

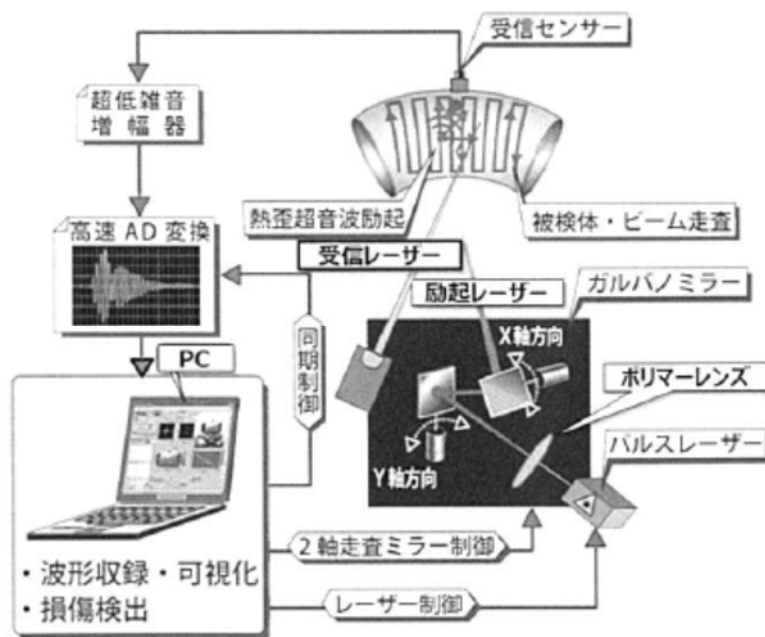


図 4.1-1 レーザー超音波可視化システムの構成図⁹⁾



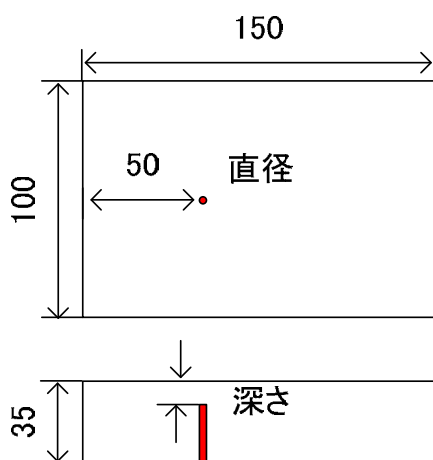
図 4.1-2 レーザー超音波可視化システム外観⁸⁾

4.1.2 鋳造品非破壊検査への適用可能性の検討

LUVI は、製品の内部に存在する欠陥を、欠陥から発生する波紋という形で可視化することで欠陥位置を特定しやすいという特徴を持つ一方、欠陥以外の波紋が混在するため、欠陥の波紋の特定が困難な場合がある。例えば、受信探触子から放射される前進波（これはつくばテクノロジーの命名であり学術用語ではない）、試験体の境界面（側面、底面）で反射される反射波が欠陥からの反射波と混在している。更に、前進波も伝搬速度が異なる波動があり、同じ伝搬速度の前進波も受信探触子から異なった時間に放射されるものも存在する。現状では、前進波、境界面からの波紋および欠陥からの反射波をどのように区別するかについて試験データが不足している。

そこで、動画の中の波動を理解するために模擬試験片を用いて各種の計測条件で試験を行うとともに、混在する波動の中から欠陥からの反射波を特定するための計測方法について調査を行った。

なお、試験に用いた試験体は、日立ニコトランスミッションが製作した 10 種類の試験体（材質 FC）の内 4 種類である（図 4.1-3）。模擬欠陥は、試験体の底部より円柱状の穴を開け頂部は平面になるように加工することによって作製してある。



模擬欠陥の大きさ

試験体 No.	直径(mm)	深さ(mm)
1	3	1.5
4	3	10
6	1.5	1.5
9	1.5	10

図 4.1-3 実験に使用した試験体および模擬欠陥の形状

1) 試験体の超音波計測

まず、LUVI から作られる動画中の波紋を解釈するのに必要な試験体の縦波および横波の音速をパルスエコー法で求めた。測定にあたっては縦波、横波とも 5MHz に中心周波数をもつ広帯域探触子を用いた。またパルスの送受信にはパルサーレシーバー 5052PR (パナメトリクス社製) を使用した。求めた縦波および横波の波形を図 4.1-4 に示す。縦波では、第 1～3 底面エコー、横波では第 1, 2 底面エコーがそれぞれ表示されている。

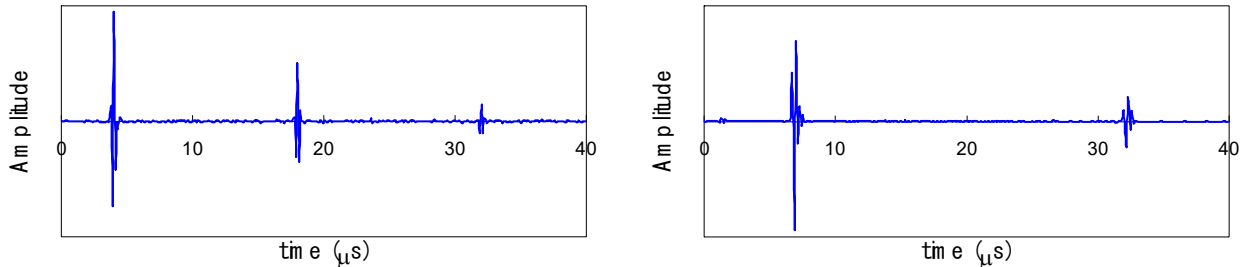


図 4.1-4 試験体の超音波エコー (左図：縦波、右図：横波)

底面エコー間の時間差 $\Delta\tau$ と試験体の板厚 d により音速は、 $2d/\Delta\tau$ により求まる。求めた結果、縦波および横波の音速の値として

縦波： 4,990m/s,

横波： 2,770m/s

が得られた。また、音速から超音波の周波数と波長の関係を求めると表 4.1-1 のようになる。

表 4.1-1 周波数と波長の関係

周波数 (MHz)	波長 (mm)	
	縦波	横波
1	5.0	2.8
2	2.5	1.4
5	1.0	0.6

表 4.1-1 からわかるように同じ周波数で比較すると横波の方が縦波より波長が短い、すなわち分解能が高いことがわかる。よって欠陥検出にあたっては横波を使用の方が有利であると言える。また、横波 1MHz の探触子を用いた場合、帯域が 0～3MHz 程度あれば大きさが 1.5mm 程度の欠陥は十分検出できるが、0.1mm 程度になると難しいと考えられる。

次に縦波および横波の第 1 底面エコーと第 2 底面エコーをスペクトル解析した結果を図 4.1-5 に示す。縦波のスペクトルは第 2 底面エコーの減衰が 5MHz 付近の成分を保っているが、横波の方では、高周波成分の減衰が大きく第 2 底面エコーの 5MHz 以上の成分はほぼゼロになっている。しかしながら、横波では、縦波に較べると 1～3MHz の低周波領域での減衰は少ない。

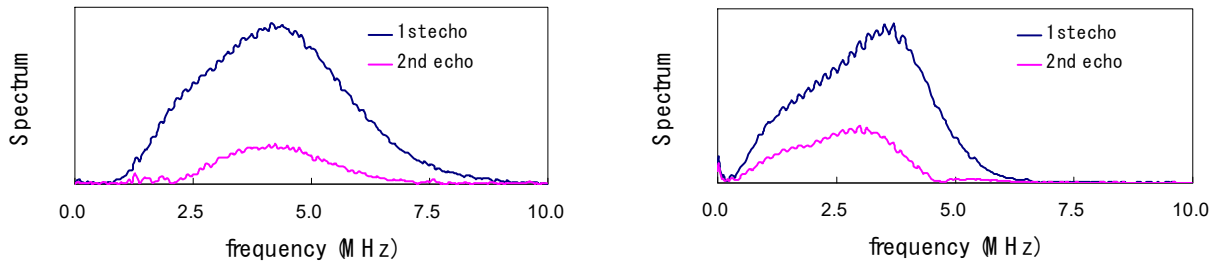


図 4.1-5 超音波エコーのスペクトル解析（左図：縦波，右図：横波）

図 4.1-3 から第 1 底面エコーと第 2 底面エコーの振幅の絶対値の最大値の比を A_2/A_1 、減衰率 α (neper/mm)、板厚 d (mm) とすると、減衰比 $A_2/A_1 = \exp(-2\alpha d)$ の関係があるから、縦波及び横波のおおよその減衰率として、それぞれ、 1.07×10^{-2} 、 1.95×10^{-2} (neper/mm) が得られる。この α から得られる、伝搬距離による振幅の減衰比を参考のため表 4.1-2 に示す。

表 4.1-2 伝搬による減衰比 A_2/A_1

伝搬距離 (mm)	振幅の減衰比 A_2/A_1	
	縦波	横波
50	0.59	0.38
100	0.34	0.14
150	0.20	0.05

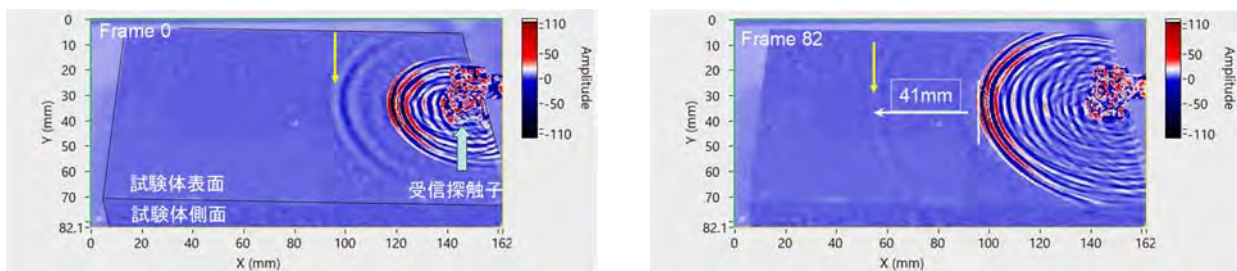
横波は、縦波に較べて若干減衰が大きく、150mm 伝搬した場合振幅は 1/20 に減衰すると言える。

2) 前進波の速度測定

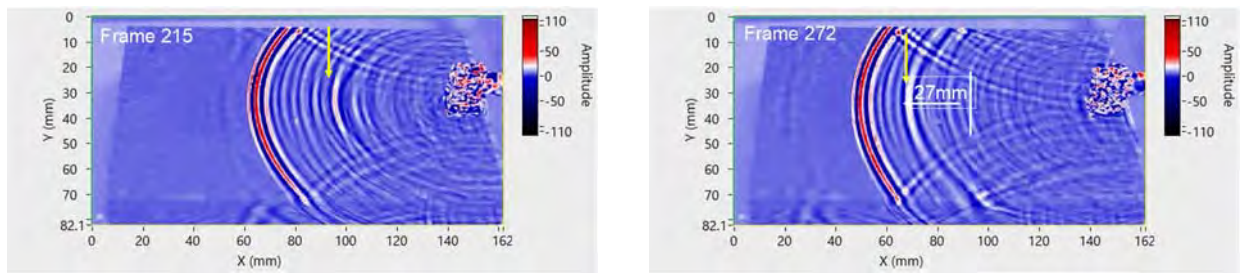
LUVI の動画から前進波の速度の測定を行い、パルスエコー法で求めた値と比較する。

前進波もレーザー照射面直下を伝搬する波動に相当すると考えられるが、速度が違うものが動画から観察できる。図 4.1-6 は試験体 No.9 を 1MHz 斜角探触子で測定して得られた動画から切りだしたものだが、左図の波紋の先端が時間の経過とともに右図のように進行している。パルスエコー法で求めた縦波音速と速い前進波の速度と比較すると、速い前進波の方が、20~25%程速かった。同様に横波音速と遅い前進波と比較すると、20%程度遅い前進波の方が速かった。振幅の減衰を比較すると横波は 72mm 伝搬すると振幅は約 1/4 になるが、前進波は図の (c) から判断するとほとんど減衰していないように見える。

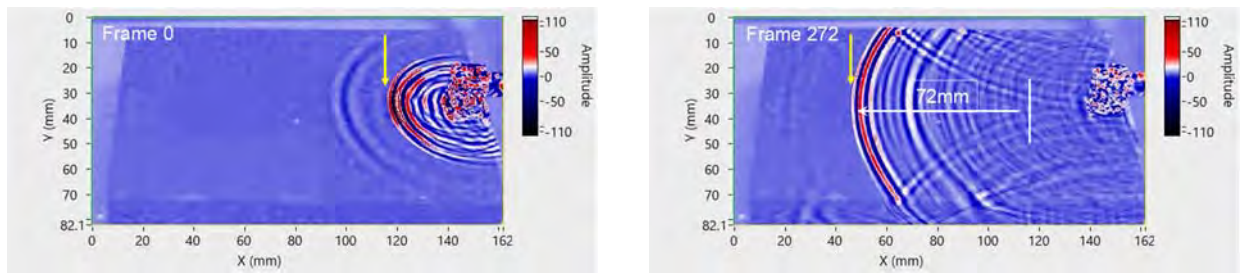
なお、LUVI でも操作画面の中に動画を B スコープに変換する機能があり、それを使用すれば波紋の速度を求めることが可能である。ここでは LUVI を所有していない場合でも使える方法で解析を行った。



(a) 速い前進波 1 (左右の時間差：6.56 μ s)



(b) 速い前進波 2 (左右の時間差 : 4.56 μ s)



(c) 遅い前進波 (左右の時間差 : 21.76 μ s)

図 4.1-6 前進波の速度測定

表 4.1-3

	速度 (mm/s)
速い前進波 1	6,300
速い前進波 2	6,000
遅い前進波	3,300

3) LUVIによる波紋動画の作成法

動画の中の波紋を解釈する上でレーザー超音波のスキャンデータからどのような手順で動画が作成されるかを理解しておくことは重要と考えられるため、以下にまとめる。

基本となる原理は、以下に述べる音響学における相反定理である¹⁰⁾。図 4.1-7 の左図に示すように 3 次元的に広がる媒質の A 点において強度 P で超音波が発生し周囲の媒質に振動が伝播したとき、その中の一部は受信機がある B 点に到達する。その時 B 点で時系列 $f(t)$ として波動が記録されるものとする。今度は逆に B 点から P で超音波を発生させると A に向かう超音波を A で受信するとき $g(t)$ という時系列で記録されると仮定すると、相反定理は、 $g(t) = f(t)$ であることを言っている。

しかし、実際の試験体には底面や側面などの境界によって限界があるだけでなく、欠陥も存在している。そのため、波動の発生点から受信点に直接到達する波動だけでなく、境界で反射される波動や欠陥によって散乱される波動も存在するのでこれらの一部は受信点で受信される。ここで、内部に一つの欠陥を有する直方体型の試験体を想定し、その表面上のある点にレーザーを照射して超音波が発生した場合にどのような波形が受信されるかについて検討を行ってみる。図 4.1-8 で上図は試験体のレーザー照射面を上から、下図は試験体を横から見た状態である。

受信探触子に到達する経路について、図 4.1-9 に示すケースを想定した。

LUVIによる測定では、試験体面上のある点 A にレーザーを照射して発生した超音波を点 B の探触子で記録したとすると、点 A から点 B に到達する超音波として図 4.1-9(a)のようなものが考えられる。

①, ①', ①'' 試験体表面に沿って受信探触子に到着するケース。ここでは、①のように直接受信探触子に到達するものや①'や①''のように表面と側面が交わる辺で反射されるものが考えられる。辺で反射される波は無数にあるが反射の条件を満たす一部の波だけが受信探触子に到達できる。また図には書かなかったが受信探触子と反対側の辺で反射されるものも考えられる。

- ② 超音波が欠陥で反射されその一部が受信探触子に到達するケース
- ③ 底面で反射した波で反射の条件を満たしたものが受信探触子に到達するケース
- ④ 底面で2回反射された波のケース
- ⑤ ④の波でたまたま経路上に欠陥があった場合に散乱された波のケース.

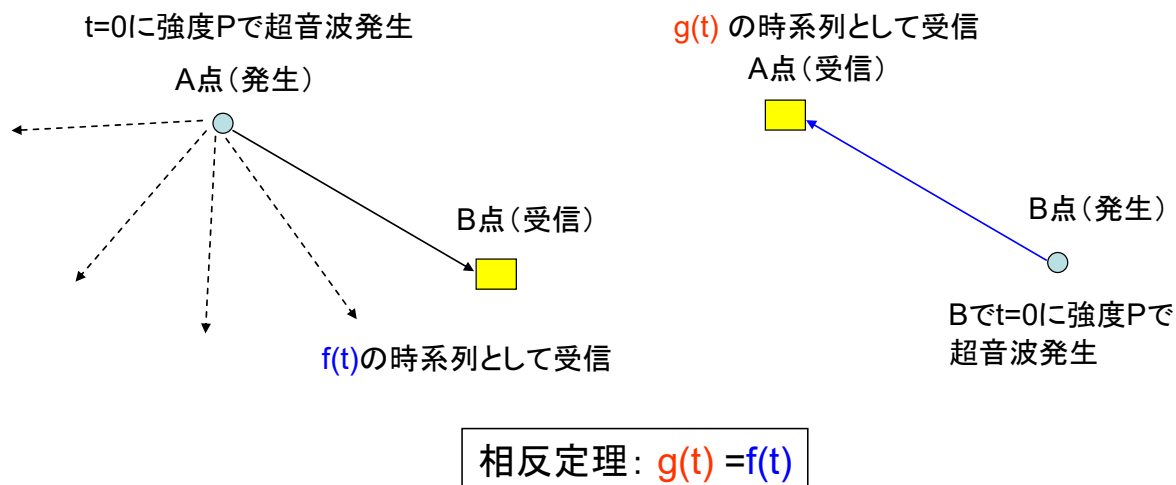


図 4.1-7 相反定理

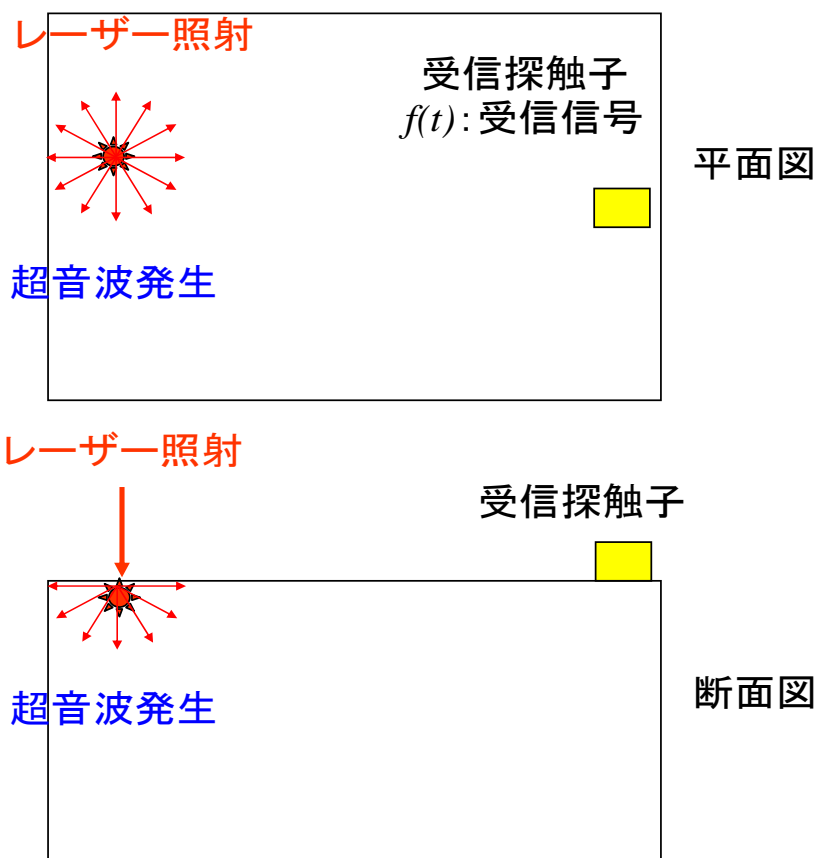
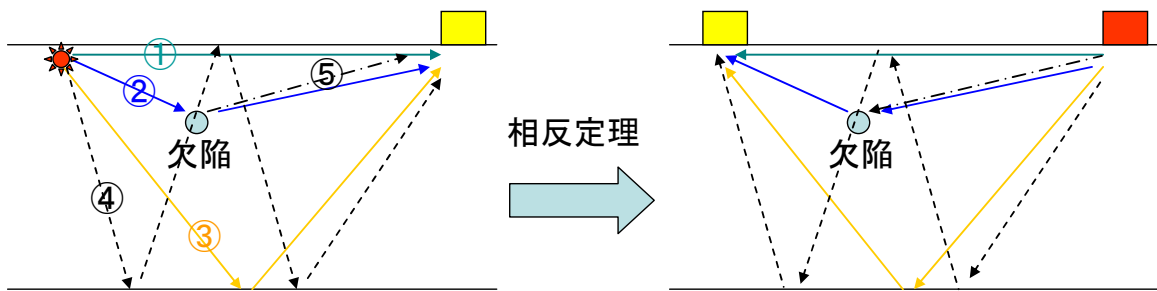
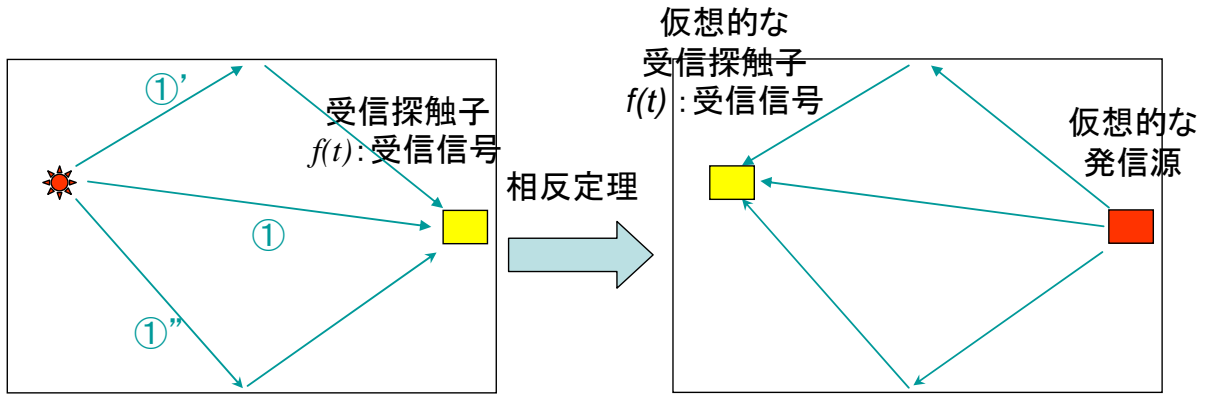


図 4.1-8 直方体型の試験体および超音波の送受信系



(a) 実際に発生する超音波 (b) 相反定理を適用した場合
 図 4.1-9 受信探触子に到達する超音波および相反定理 (上図：平面図, 下図：断面図)

さらに、レーザーによって発生する超音波は、伝播速度が違う縦波および横波が同時に含まれる。さらに境界面での反射により縦波→横波、横波→縦波というモード変換が発生するため、受信探触子で受信する波動はさらに複雑になることが予想される。なお、①～⑤に挙げた場合が大部分と考えられるが、LUVI で得られた測定データを解析すると①～⑤で説明できない波もあるように思われる。

次に、図 4.1-9 の場合、受信される $f(t)$ はどのようなものになるか考察する。簡単のため、発生する波はパルス状とし縦波または横波のどちらかとする。基本的な考え方は、波の発生点から受信点までの伝搬距離 L とすれば受信点に到達する時間は、 L/v となるので、 L が大きければ大きい程遅く受信される。また、 L が大きくなるに従って波の減衰も大きくなる。以上のことを考慮すると $f(t)$ は、例えば図 4.1-10 のようになる (境界面での反射は媒質によっては位相が反転する場合もあるので注意する)。

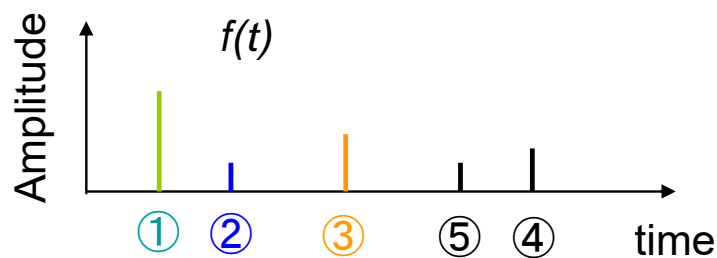


図 4.1-10 受信探触子受信される信号

$f(t)$ は相反定理によりレーザーの照射された点で受信される波と等しいので、複数の波がレーザーの照射点で受信されることになる。そして、これが元になって LUVI により動画を観察したとき、受信探触子から時間差をおいて波紋が発生する原因となる。次に $f(t)$ からどのようにして動画が作成されるかについて説明する。

計測時にレーザーは図 4.1-11 のように一定の間隔で試験体面上をスキャンし、照射点で発生した波形を受信探触子で検知し、波形の振幅はサンプリング間隔 Δt で A/D 変換されてデジタルデータとしてパーソナルコンピュータのハードディスクに保存される。例えば、 $(i\Delta x, j\Delta y)$ で発生した波は $L\Delta t$ の間測定を行いデジタルデータとして保存されてから次の場所にレーザーが照射され別の計測が行われる。全体で NML 個のデータが得られるが、 $f(i,j,k)$ に相反定理を適用すると、受信探触子を仮想的な発信源としたとき、 $(i\Delta x, j\Delta y)$ で受信した波形は $f(i,j,k) (0 \leq k \leq L-1)$ という時系列データになることがわかる。

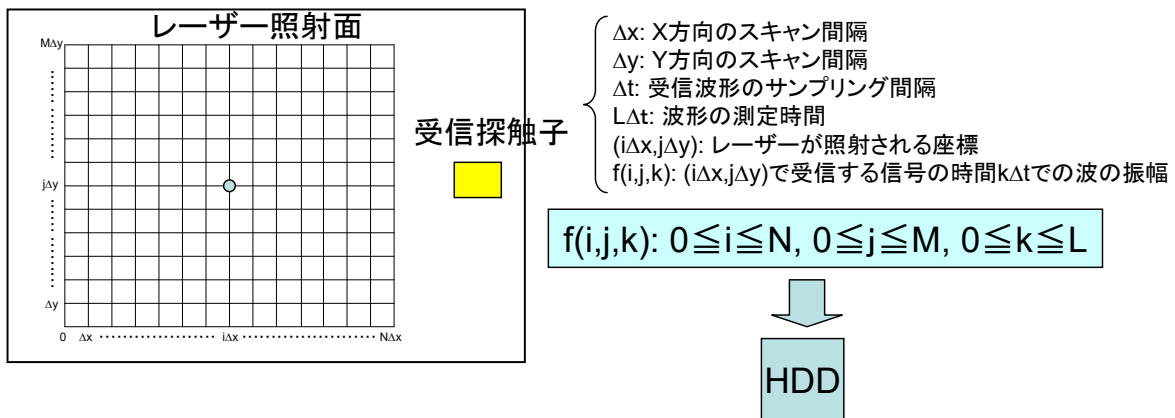


図 4.1-11 測定データの空間・時間に関するデジタル化

次に図 4.1-11 の左図の面を時間に関してサンプリングした回数 L だけの枚数用意し、 $k (0 \leq k \leq L-1)$ 枚目の面の $(i\Delta x, j\Delta y) (0 \leq i \leq M-1, 0 \leq j \leq N-1)$ の位置には振幅 $f(i,j,k)$ の値に応じて事前に決めた色を割り当てると 1 枚の静止画像が得られる。この画像化の手順をすべての時間について行くと全部で L 枚の静止画像が得られる (図 4.1-12)。これらの L 枚の画像にスケールやカラーマップ等を入れ時系列順に並べ、1 枚 1 枚を動画のフレームに変換し、順番に 1/30 秒間に 1 枚ずつディスプレイ上に映すようにしたものが、LUVI が作り出す動画ファイルである (図 4.1-13)。簡単に言うと、静止画からフレームレート 1/30 秒の avi (Audio Video Interleave) 形式のファイルを生成している。

なお、静止画像間の時間的な隔たりがサンプリング間隔に等しいので、動画の 1/30 秒はサンプリング間隔に相当する。すなわち、動画の 1s は実際の波形の $30\Delta t$ に相当する。

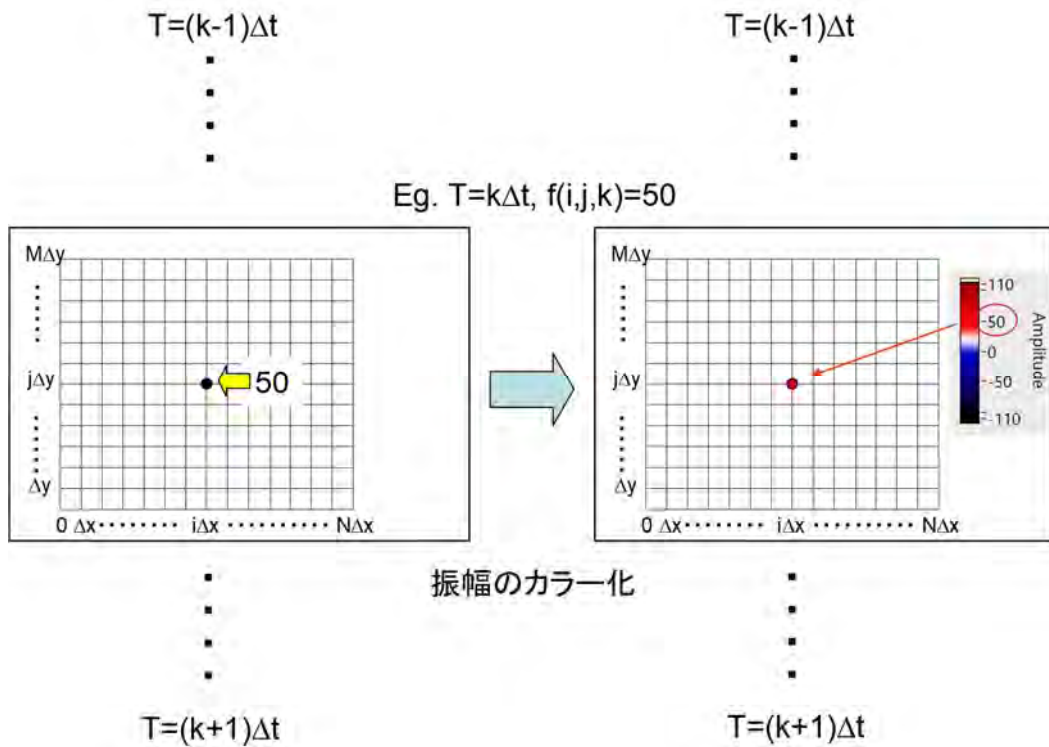


図 4. 1-12 ある時間における振幅の数値データのカラー化

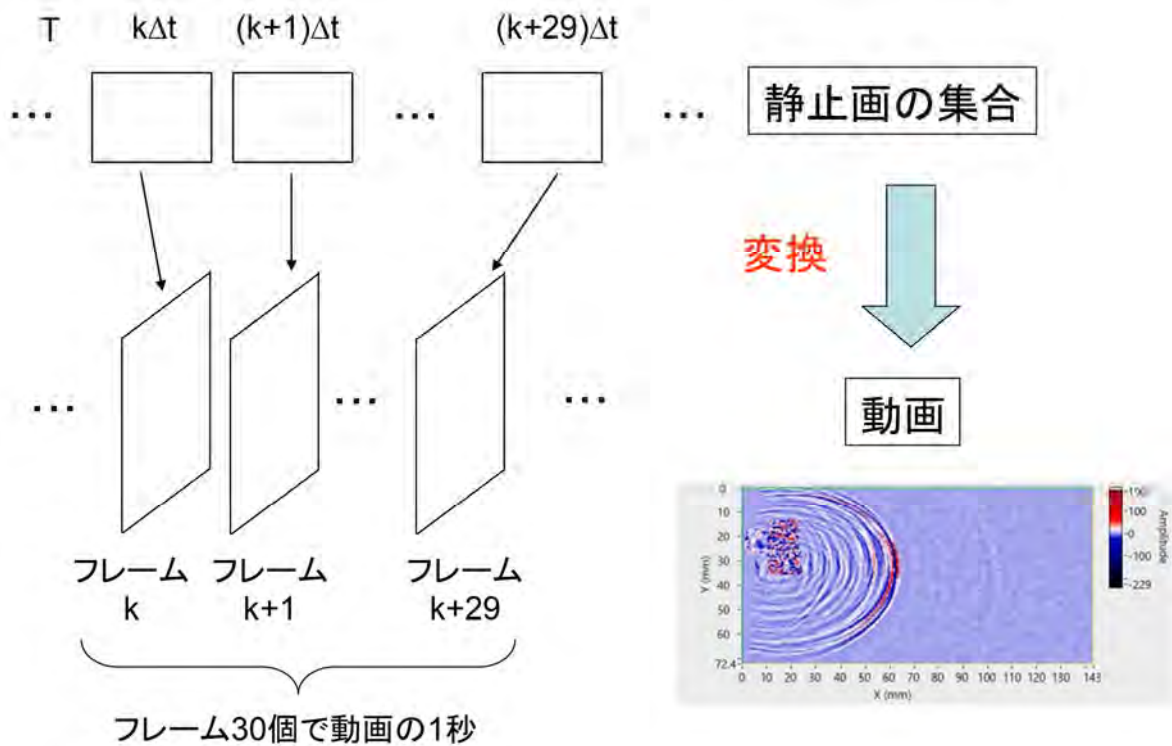


図 4. 1-13 カラー化した画像の動画化

動画の波紋を観察するとき、受信探触子や欠陥から波紋が発生しているように見えるが、基本的にはレーザーを照射される点の間には関係がないのに波紋という形でお互いに連携しているように見えるのは不思議である。

次にこの理由について考察する．基本的には，媒質が等方的である場合，ある点を同じ位相で任意の方向に伝播する波動は，伝搬距離が同じなら波の位相（山，谷など）が変わらない性質で説明可能である．

前進波は動画において受信探触子から同心円状に発生する波紋であって最も強度の高いものであり，試験体表面近傍を伝搬する波動によって生成される．前進波はレーザーでスキャンされた各点で発生し，その一部が受信点に到達するが，その挙動を考えると図 4.1-14 のようにスキャンされた領域を受信点 O を中心とする同心円上に存在する点として分類するとわかりやすい．なお図は試験体を上から見ているものとしている．

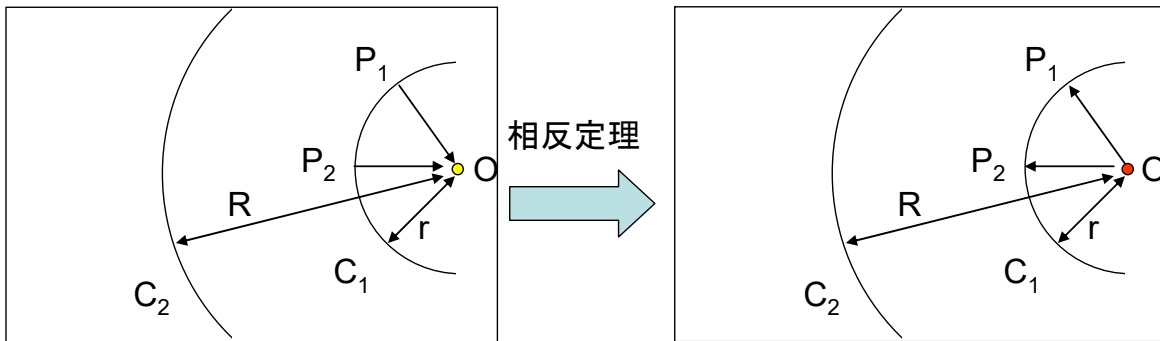
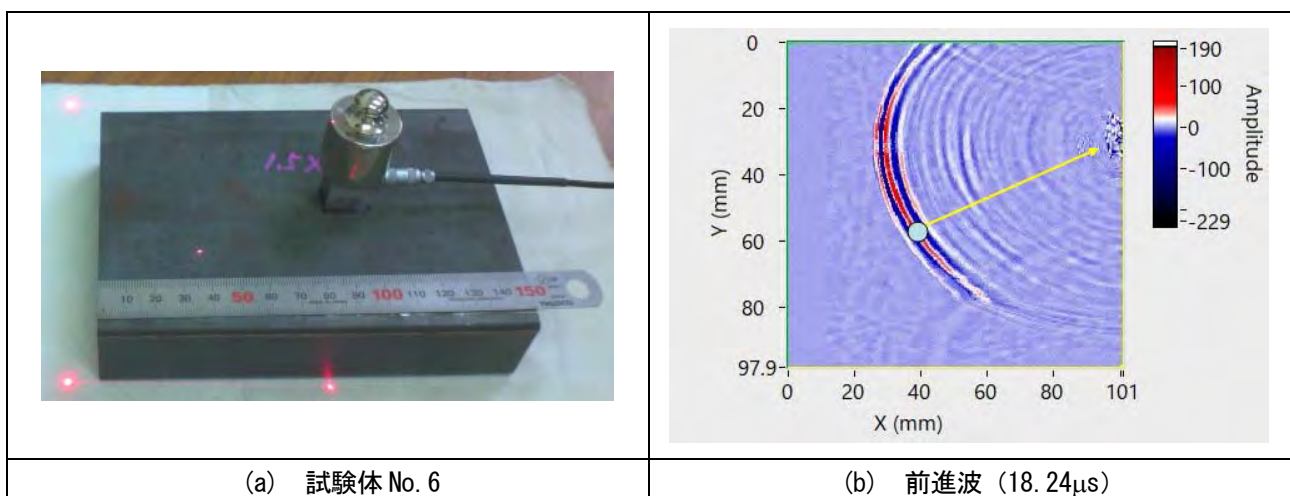


図 4.1-14 前進波発生のメカニズム

C_1 と C_2 はそれぞれ半径が r および R で中心が波形の受信点 O にある円とする．左図で C_1 上の点，例えば P_1 および P_2 にレーザー超音波が発生したとすると O に等しい時間 r/v で到達する．すなわち， C_1 上の点はすべて O に r/v で到達する． C_2 上の点の場合は， R/v ですべて等しい時間で到達する．これを相反定理により O を音源とみなすと， r/v 時間後に C_1 という波紋が存在しているように見える．また， R/v 時間後は C_2 という波紋が存在しているように見える．すなわち，円の半径を r から R まで連続的に変化させれば，波紋 C_1 が連続的に伝搬していき C_2 になるように見えるわけである．

図 4.1-15 に前進波と側面からの反射波の例を示す．図は試験体 No.6 であり受信探触子として斜角 1MHz (1K5x5A70) を使用し模擬欠陥のない側 (図の赤い点で囲まれた部分) をレーザーがスキャンしている．図では， $X=40\text{mm}$ ， $Y=60\text{mm}$ の位置に発生した超音波のうち受信探触子に到達するのにどのような経路がありうるかを矢印で示している．なお，側面からの反射波と述べたものは欠陥がない部分をレーザーでスキャンすることによって発生しているので，側面からの反射波と断定しても問題とないと考えられる．



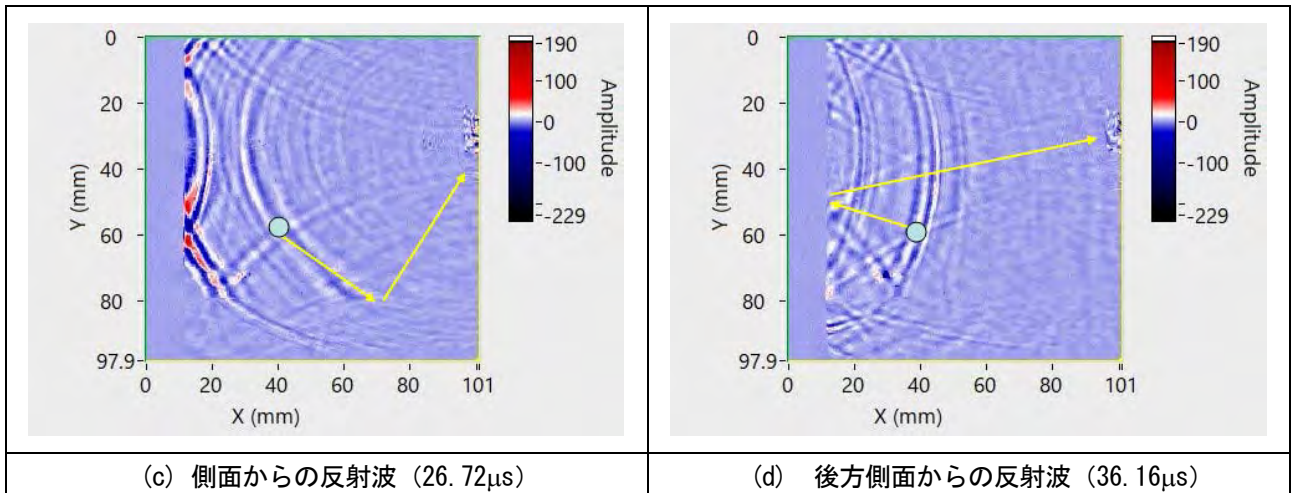


図 4.1-15 試験体にレーザーが照射した場合 (X=40mm, Y=60mm) に
超音波が受信探触子に到達する経路の例

次に試験体内部に欠陥がある場合について考える。図 4.1-16 のように D を頂点とする半径 r、高さ h の直円錐を考え、その底面の円はレーザーが照射される試験体の面上にあるのとし、その円周を C とする。また、欠陥から受信点までの距離を X とする。このとき C 上の任意の点から放射し欠陥 D で散乱され受信点 O に到達する音波の伝搬距離は、すべて $\sqrt{r^2 + h^2} + X$ (=S) となり等しい伝搬時間で O に到達する。相反定理を用いて O を仮想的な音源とした場合は、O から出た音波は、S/v 時間後に C に現れる。このときの振幅をカラーマップによって表現してやれば一つの波紋として認識されることがわかる。

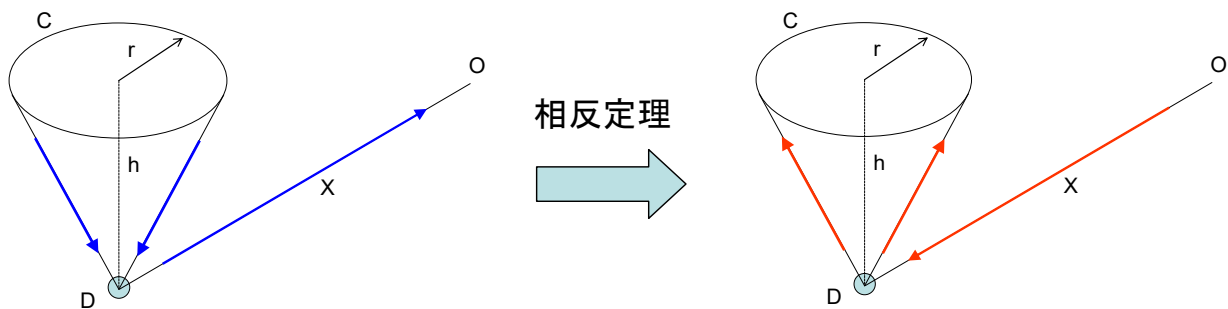


図 4.1-16 欠陥から反射した波動が受信点に到達するメカニズム

半径 r を変化させて考えると、r が大きくなると S/v も大きくなるが逆も成り立つので、時間が経過するに従い、円の半径は大きくなると言える。仮想的な音源 O から出た波動で D で散乱されて試験体面上に到達する場合、図 4.1-17 のように円錐の底面の中心から時間が経つに従い、円が、C1→C2→C3 のように拡大する波紋のように見えることになる。

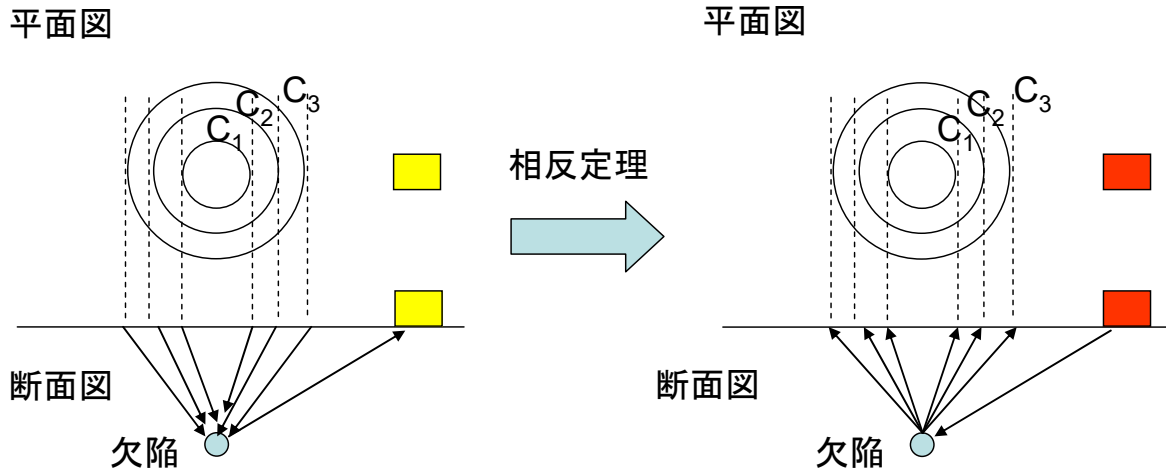


図 4.1-17 動画において欠陥から波紋が発生するメカニズム

4) LUVI を用いた計測について

LUVI で得られる動画による欠陥検出の基本的な方法は、受信探触子から放射された前進波が欠陥により散乱されることにより生じる波紋から欠陥位置を推定するというものである。しかし、前進波にも受信探触子から放射される時間が違うものが複数存在するだけでなく、試験体の側面から反射される波紋も混在することがあり更に複雑な波紋が形成されることがある(図 4.1.6 参照)。そこで欠陥以外の波紋が混在しないような計測手法ないしは計測条件がないかについて調査を行った。検討した項目は以下の通りである。

- i) 厚さ測定や欠陥の深さ測定に使われる垂直型の超音波探触子を使用して欠陥位置の深さを計測することが可能か確認
- ii) 受信探触子を横波用から縦波用に変えて縦波だけ検出できるか確認。また、接触媒質を液体にすることによって縦波のみを受信できるかを確認。
- iii) 受信探触子(周波数 1MHz, 2MHz, 5MHz)と欠陥間の距離と欠陥からの反射波の強度の関係の調査。目的は探触子が欠陥からどの位離れていても欠陥の検出が可能かの確認
- iv) 現在の AI による欠陥検出の問題点は、動画における欠陥からの波紋が前進波や境界からの反射波に較べて弱いため検出精度が悪いことである。そこで、LUVI が持つバンドパスフィルターや前進波除去の機能などを使って欠陥からの波紋を強調できないか確認
- v) 測定のプログラム化が可能かの検討。例えば、レーザーの照射範囲を格子状に区切って順番に測定することにプログラム化が可能か？ または、大きな範囲をレーザー超音波でスキャンしてから、小さい領域に分割して解析することが可能か調査する。

- i) 厚さ測定や欠陥の深さ測定に使われる垂直型の超音波探触子を使用して欠陥位置の深さを計測することが可能か確認

試験体 No.6 ($\phi 1.5$, $d=1.5\text{mm}$) および試験体 No.9 ($\phi 1.5$, $d=10\text{mm}$) に対して、垂直型の縦波探触子を使用して計測したところ、欠陥からの反射波は得られなかった。なおパルサーレーザとして 5052PR を用いた。反射波が得られなかった原因として以下のことが考えられる。すなわち、5052PR では励起パルスは exponential 型で減衰するため、パルスエコー法のような使用では問題ないが、欠陥検出の場合は欠陥からの反射波が小さいと励起パルスの中に埋まってしまうからと考えられる。例えば、欠陥の直径 1.5mm の場合、直径 0.5”の探触子を使用したとすると、欠陥から反射の振幅は、 $0.01 (=1.5^2/12.5^2)$ 程度と弱くなる。

今回の計測ではうまくいかなかったが、専用の超音波探傷装置を使えばうまくいくと思われる。ただし、深さ 1.5mm の欠陥の場合は専用の装置を使用しても欠陥からの反射波が励起パルスに埋もれてしまう可能性がある。

その場合は、探触子の周波数が高く（10MHz～20MHz）広帯域のものを使用するか、図 4.1-18 のような 2 振動子型探触子を使用すると検出できる可能性がある。

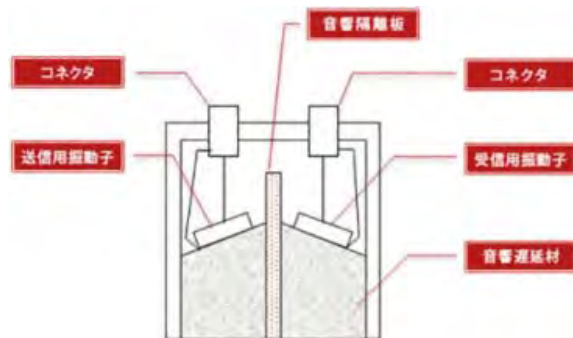


図 4.1-18 2 振動子型探触子 (<http://超音波探傷.jp/principle/index.html>)

ii) 接触媒質を横波用から縦波用に変えて縦波だけ検出できるか確認。

試験体 No.9 に対して垂直型縦波の中心周波数 2.25MHz の探触子を用いて測定した。横波のときに比べて波紋が複雑になった。原因として側面からの反射を別にすれば遅い前進波、速い前進波とも探触子から数度にわたって放出されたことが挙げられる。欠陥からの波紋も検出できたが、波紋全体が複雑になるので欠陥以外の波紋はなるべく抑えようという目的には適さないと感じた。また、縦波は横波より波長が長くなるので分解能が低下することにも注意が必要である。結局、縦波用の探触子でも遅い前進波が検出されるので、この方法では縦波のみを検出することはできないことがわかった。

計測例を図 4.1-19 に示す。静止画で見ると欠陥の波紋がわかりにくいですが、動画で見ると識別が可能である。

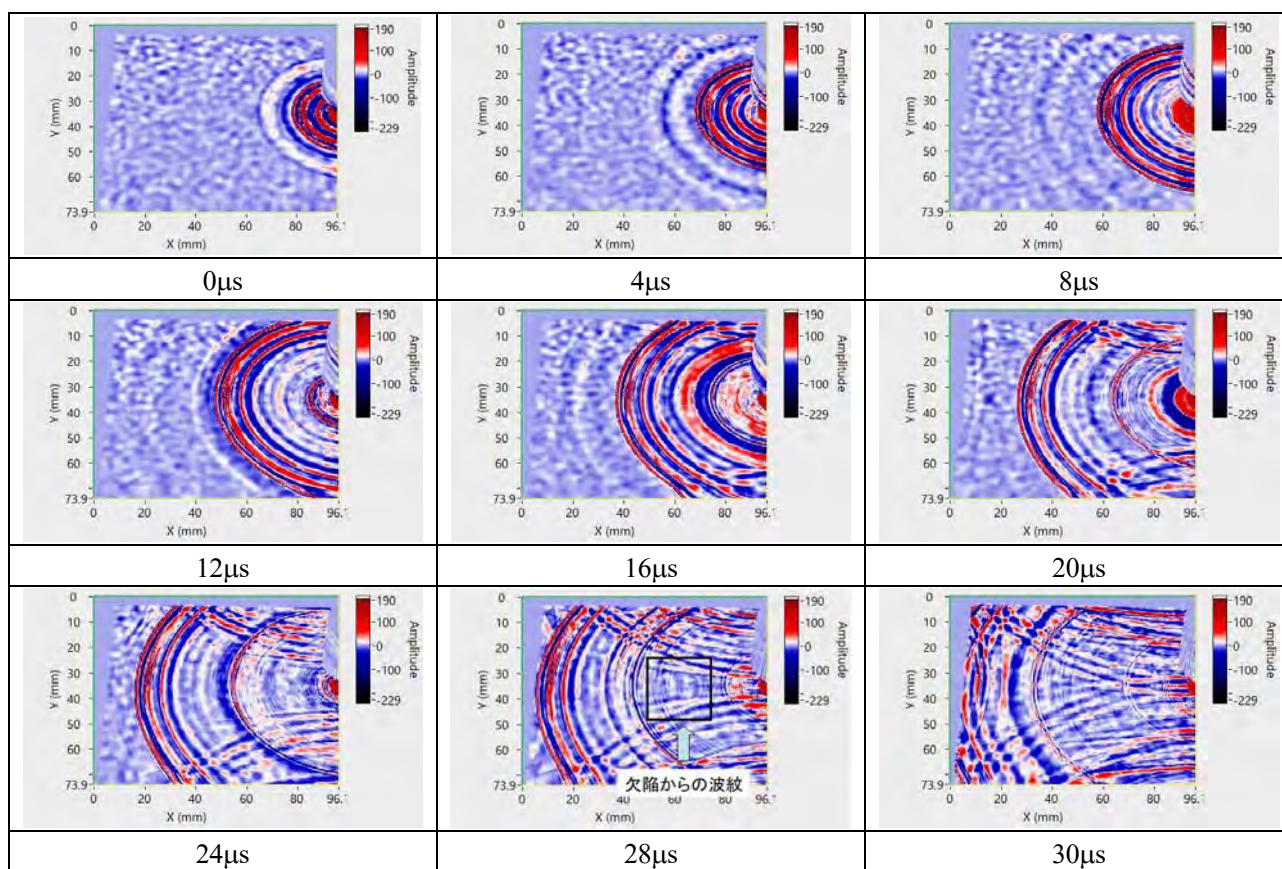


図 4.1-19 垂直型縦波探触子による波紋

次に接触媒質を横波用から縦波用に変えて縦波だけ検出できるか確認した。液体中では横波は伝搬しないので試験体と探触子の間に挿入される接触媒質を液体にすることによって、縦波だけを検出できるのではないかと考えた。接触媒質として、エタノールおよびグリセリンを使用したところ波紋は横波用の接触媒質を使った場合とほとんど変わらないことがわかった。液体を用いた場合は、若干背景のノイズが減ったように見えた。

計測例を図 4.1-20 に示す。試験体は No.1, 受信探触子は 1K5x5A70 を使用した。

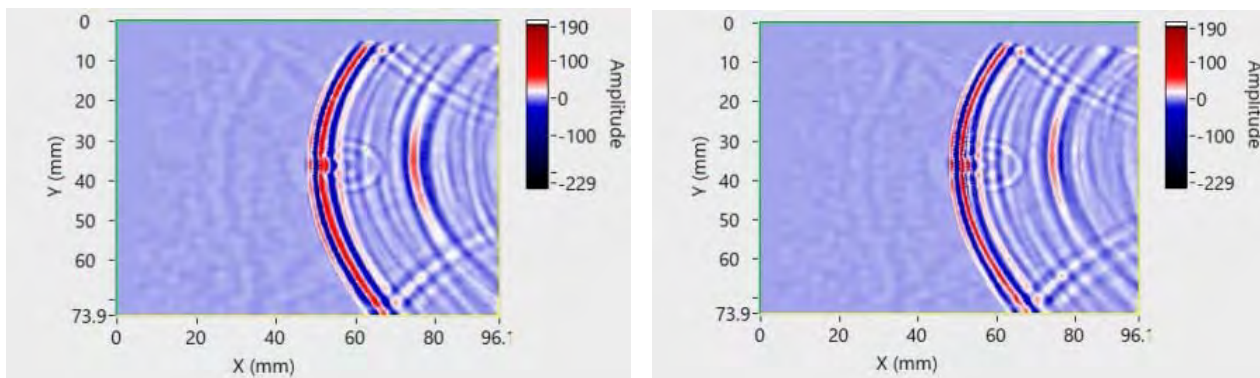


図 4.1-20 接触媒質による波紋の違い（左図：HIVAC-G, 右図：グリセリン）

iii) 受信探触子（1MHz, 2MHz, 5MHz）と欠陥の間の距離と欠陥からの反射波の強度の関係の調査

試験体は、表面を貫通する欠陥を模擬するものとして No.9 を裏返したもの、欠陥深さ 1.5mm は No.6, 欠陥深さ 10mm は No.9 を使用した。貫通試験片と欠陥深さ 1.5mm の試験体は、探触子を試験体の端に置いて検出が可能であったが、欠陥深さ 10mm の場合は検出できなかった（レーザー強度 58%）。欠陥が表面に貫通している試験体の写真と波紋の一例を図 4.1-21 に示す（レーザー強度 51%）。

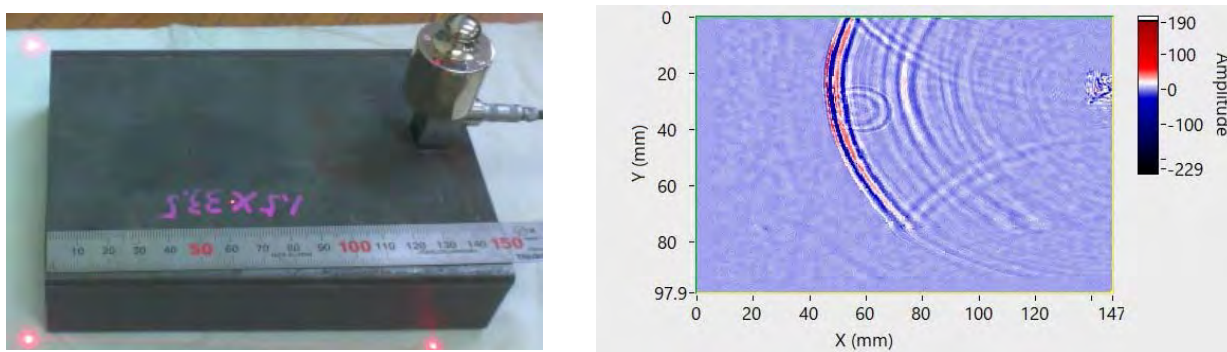


図 4.1-21 貫通試験体の波紋（左図：試験体の写真, 右図：波紋）

欠陥深さ 1.5mm の場合は、レーザー強度 51%では波紋が微弱であったが、58%に上げるとはっきりした波紋が得られるようになった（図 4.1-22）。使用した探触子は 1K5x5A70 である。なお、左右の図の縦横比の違いは、レーザーでスキャンする範囲が右図の場合は横方向が狭いことによるものである。

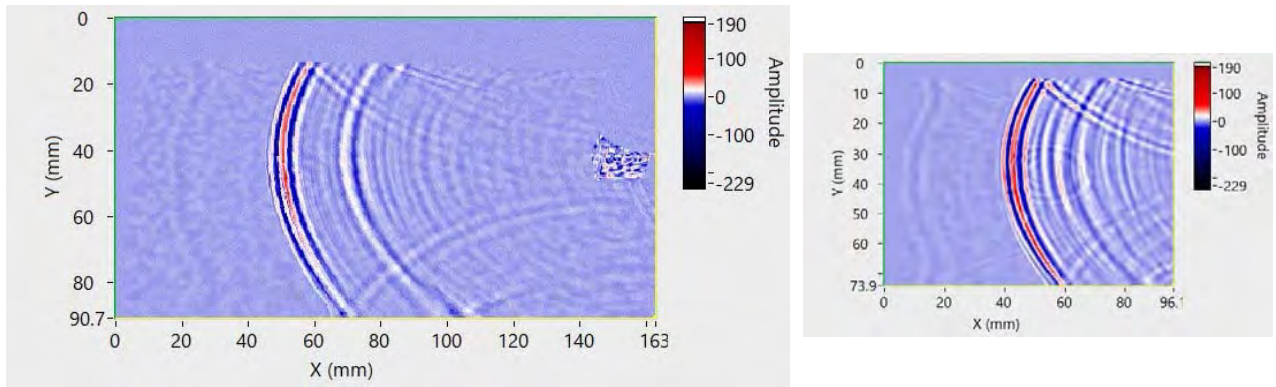
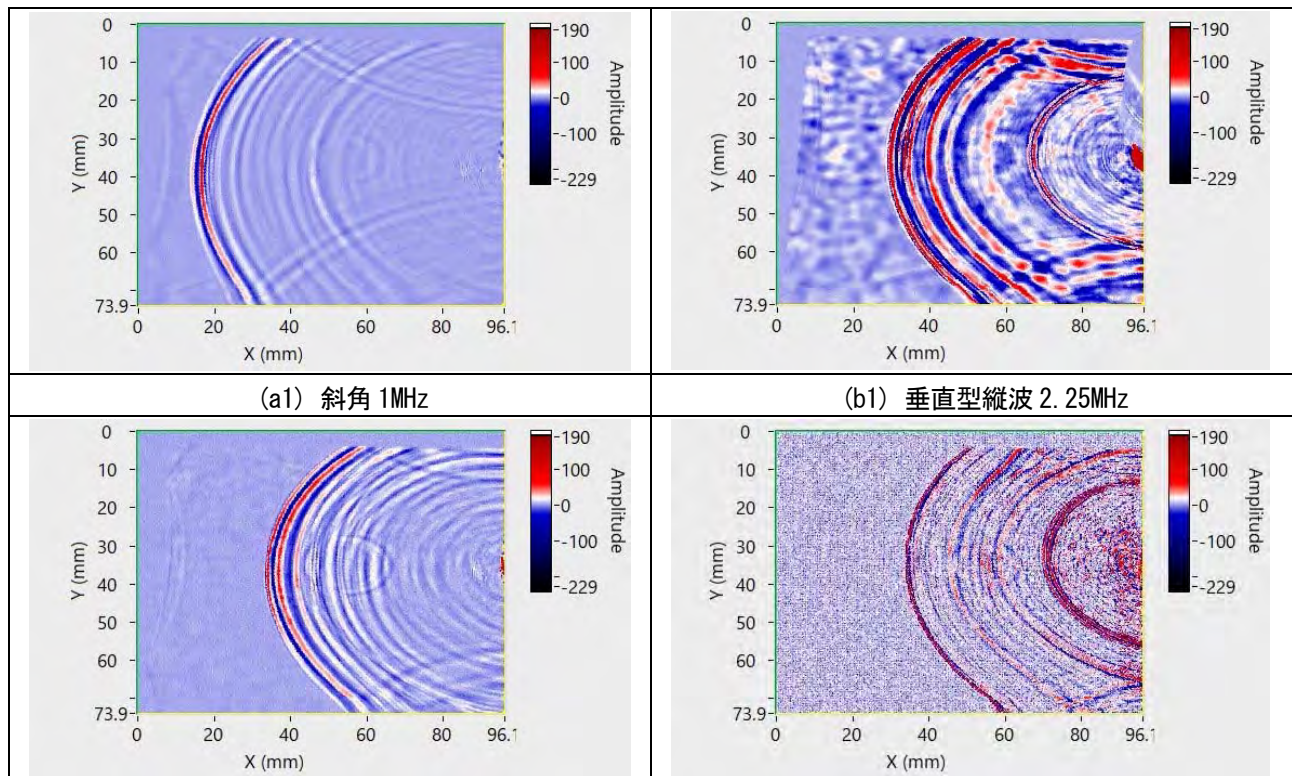


図 4.1-22 欠陥深さ 1.5mm の試験体の波紋（レーザー出力：左図 51%，右図 58%）

欠陥深さ 10mm の場合の試験体 No.4 および 9 は受信探触子が斜角の場合、図 4.1-21 のように欠陥から離れて位置していると動画に欠陥からの波紋が現れなかった。そこで、検出可能な受信探触子の位置を決定するため、探触子先端と欠陥の間の距離を 80mm, 60mm, 40mm と近づけて測定を行った。レーザー強度 58% で、探触子は、斜角 1MHz (1K5x5A70), 斜角 2MHz (B2K3x3A70), 斜角 5MHz (5K3x3A70) を使用した。間隔が 40mm のとき欠陥からの波紋が現れるようになった。1MHz はかすかな波紋であったが、2MHz でははっきりした波紋が得られた。5MHz は、1MHz と 2MHz の中間の波紋だった。図 4.1-23 は試験体 No.9 の計測によって得られたものだが、各振動数における波紋と参考のために付け加えた垂直型振動子の場合の波紋を示す（縦波 2.25MHz は V125, 縦波 5MHz は A109S 5.0, 横波 5MHz は V155 5.0 を使用）。

なお、この試験を行った時のレーザー出力は 60% 弱であるため、出力を上げることによって欠陥の波紋を発生させる可能性は残っている。

垂直型縦波 2.25MHz の受信探触子を使って試験体 No.9 で試験を行った場合、欠陥と受信探触子の距離が 80mm の場合でも欠陥からの波紋が検出できた。どのような波紋が検出できたかは、フィルターの効果について論じた部分を参照願う。



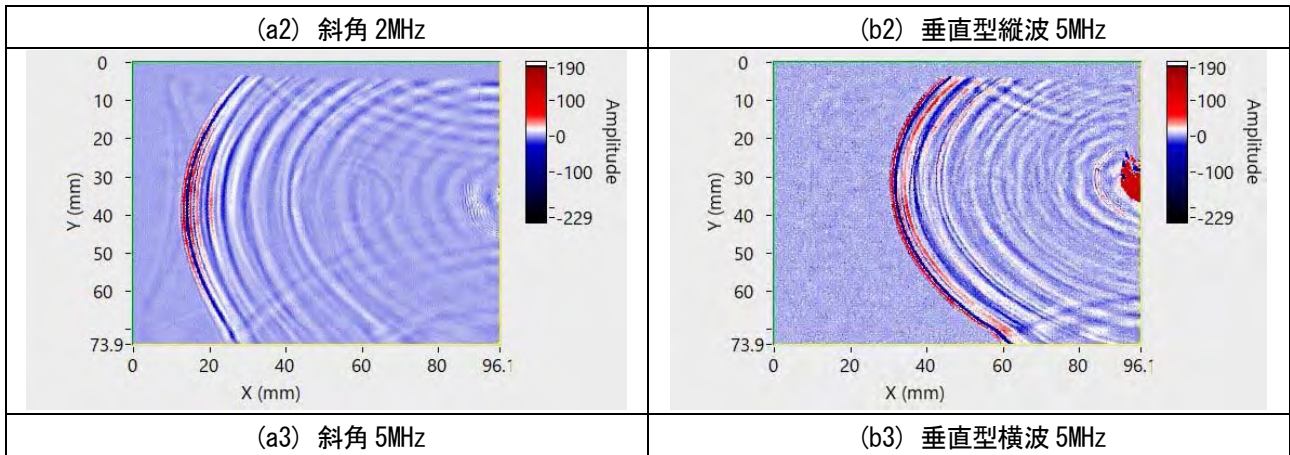


図 4.1-23 欠陥深さ 10mm の試験体による波紋（左図：斜角型探触子，右図：垂直型探触子）

なお、図 4.1-23 では波紋が一つだけ見えるが、動画を観察していると波紋が欠陥のある場所から複数回出てくることがわかった。最も波紋がはっきりしていた斜角 2MHz でまとめると図 4.1-24 ようになる。図中の時間は動画開始からの経過時間を実時間に変換したものである。1 番目の波紋は速い前進波に伴って現れたが非常に弱い。3 番目の波紋が一番遅れて現れたが最も強度が高かった。

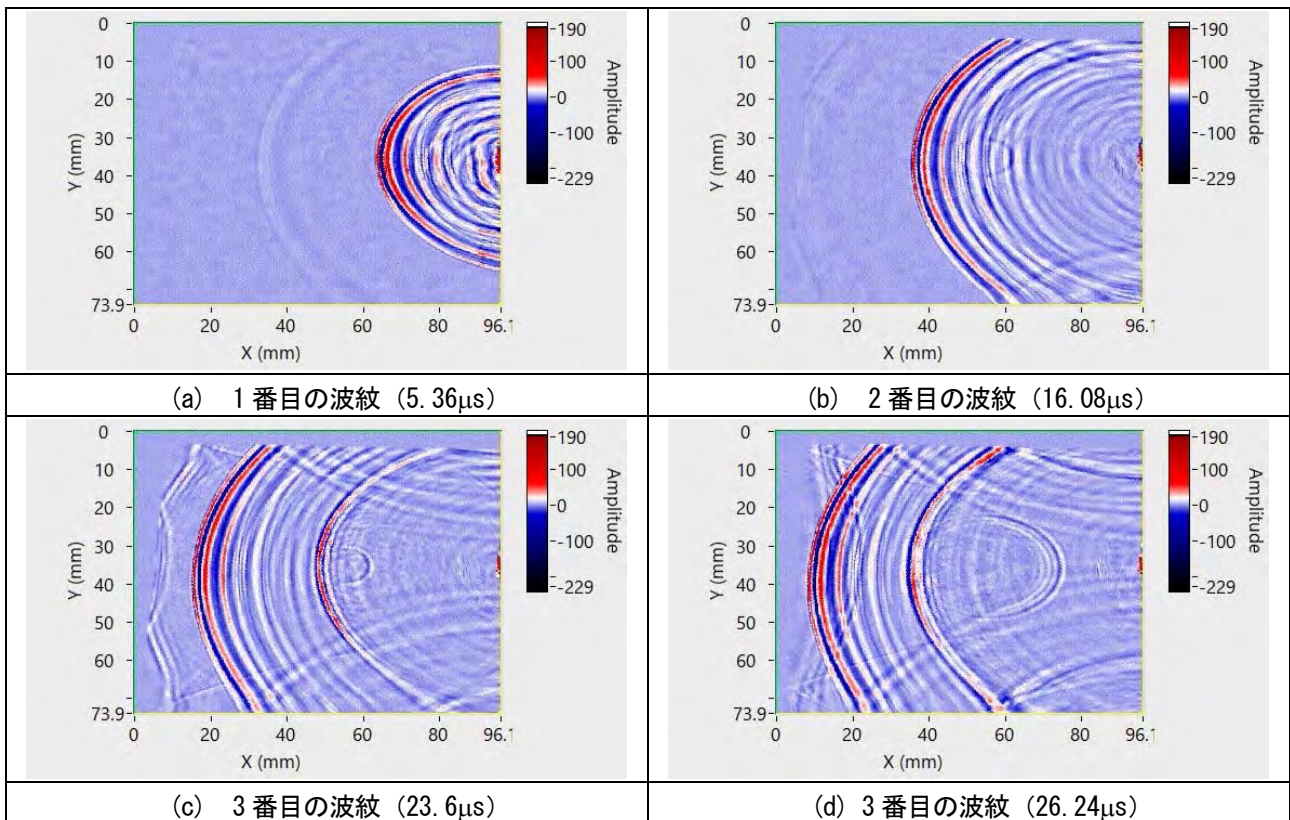


図 4.1-24 欠陥深さ 10mm の試験体に異なった時間に現れる欠陥からの波紋

欠陥が浅い場合は、受信センサーが欠陥から離れていても検出可能だが、深い場合は離れていると検出できない場合があることがわかった。

試験体における欠陥からの波紋が時間軸上に複数現れる原因として、模擬欠陥が局所的に存在しているのではなく貫通する円柱状の穴によって実現しているため、この中空の円柱による音波の散乱が可能性として考えられる。

iv) 現在の AI による欠陥検出の問題点は、動画における欠陥からの波紋が前進波や境界からの反射波に較べて弱いため検出精度が悪いことである。そこで、LUVI が持つバンドパスフィルターや前進波除去の機能などを使って欠陥からの波紋を強調できないか確認

次に LUVI の解析機能のバンドパスフィルター (BPF) を使用した例を示す。図 4.1-25 は図 4.1-23 の斜角 2MHz の波形データに 1.8~4.0MHz のバンドパスフィルターを適用している。この場合は前進波の強度が弱くなり欠陥の波紋が強調されるような結果が得られた。

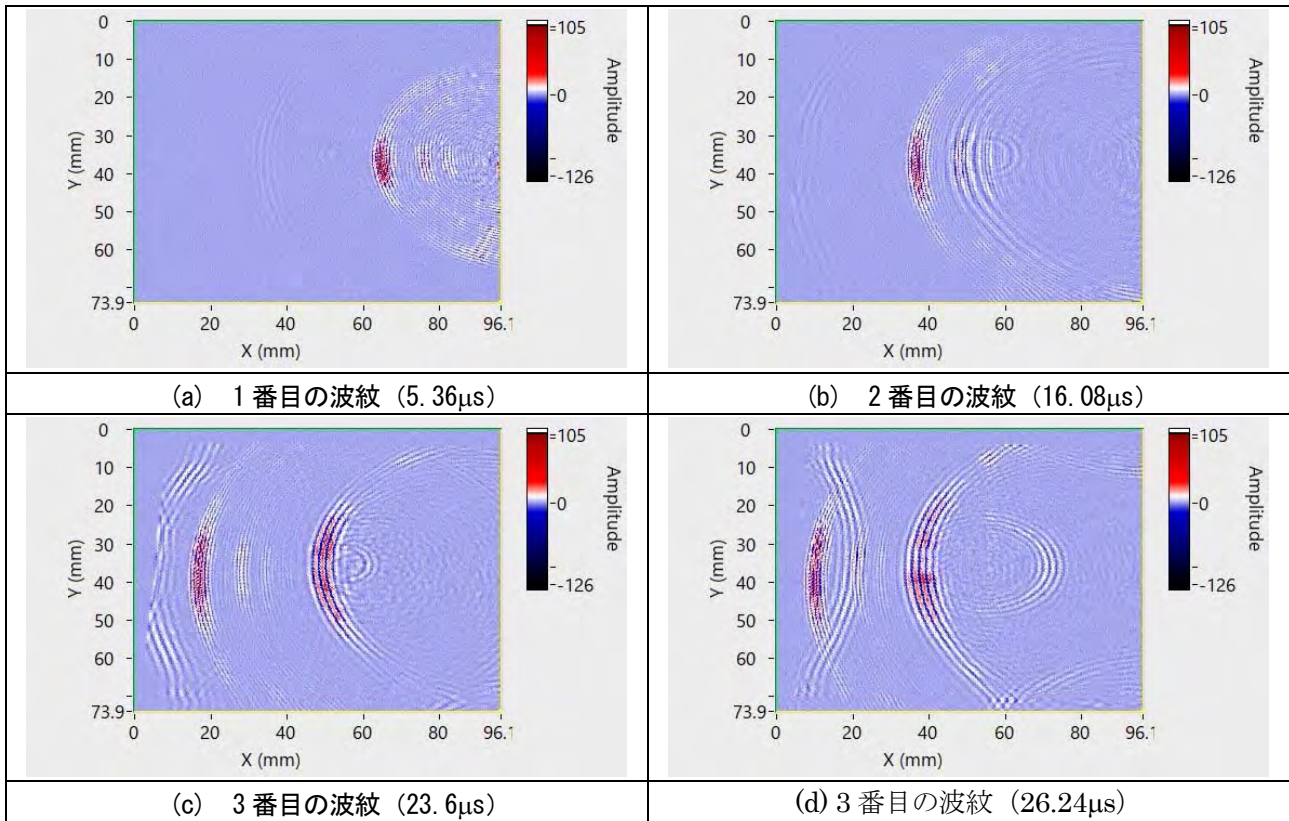
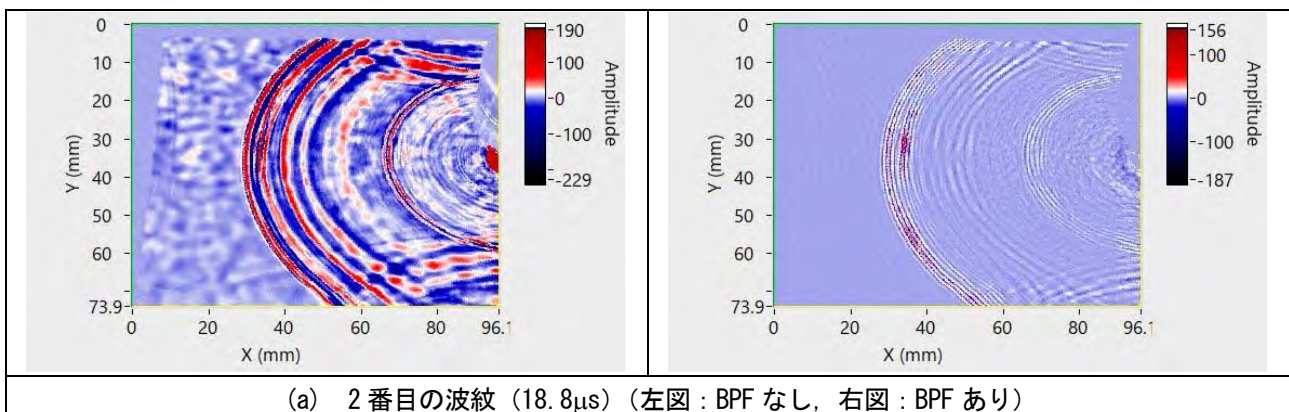


図 4.1-25 欠陥深さ 10mm の試験体に異なった時間に現れる BPF 適用後の欠陥からの波紋 (斜角横波 2MHz)

垂直型縦波探触子を用いた図 4.1-23(b1)に 1.8~4.0MHz のバンドパスフィルターを適用した場合を図 4.1-26 に示す。フィルターの効果により前進波および側面からの反射波の強度が小さくなり欠陥からの波紋がより明瞭になった。



(a) 2 番目の波紋 (18.8 μs) (左図 : BPF なし, 右図 : BPF あり)

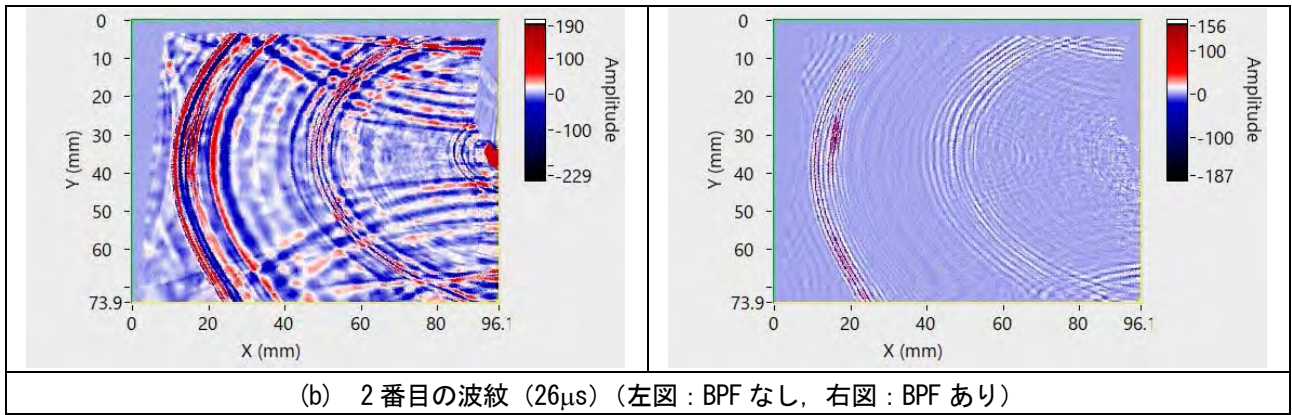
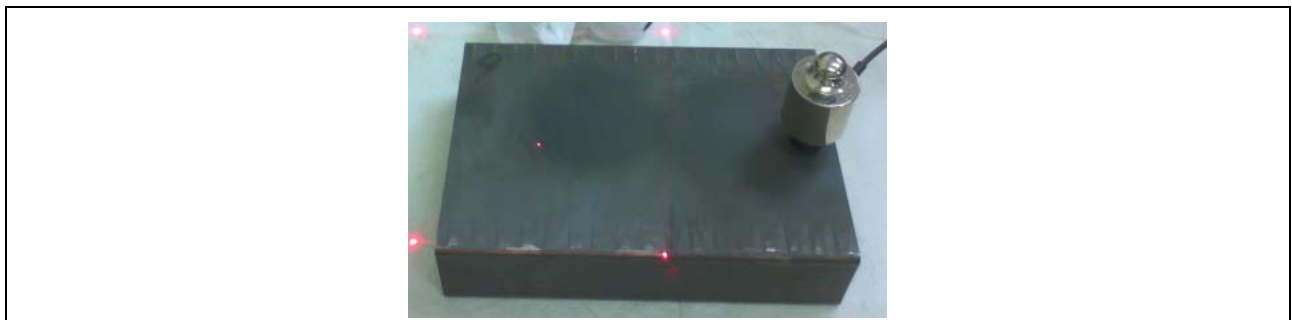
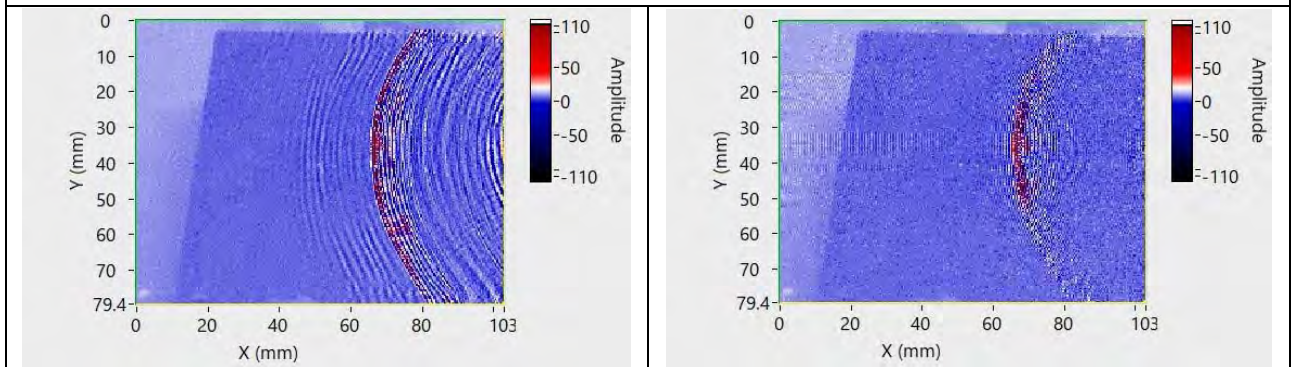


図 4.1-26 欠陥深さ 10mm の試験体に異なった時間に現れる BPF 適用後の欠陥からの波紋
(垂直型縦波 2.25MHz)

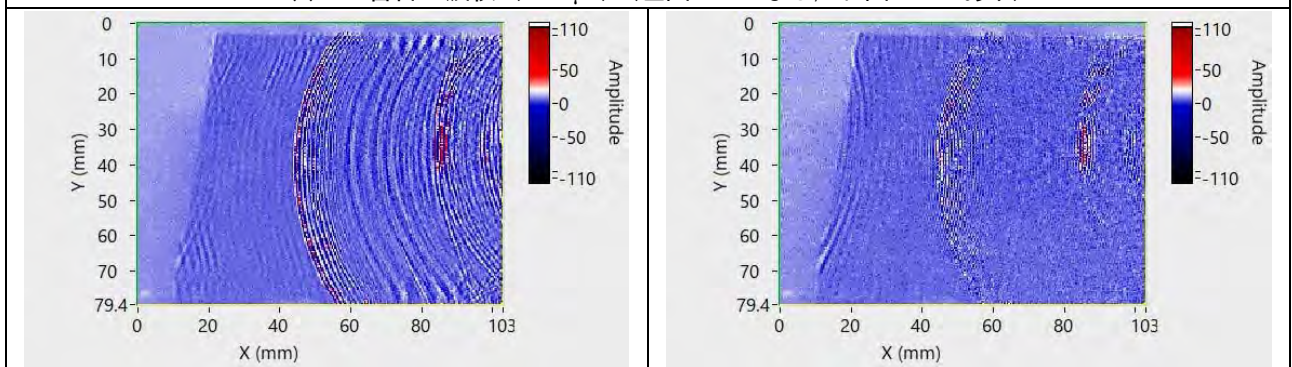
同じ試験体および受信探触子を使用し、欠陥と受信探触子の距離が 80mm の場合について図 4.1-27 に示す。バンドパスフィルターは 1MHz 以上を通すハイパスフィルターとして使用したが、フィルターにより欠陥からの波紋がより明瞭になった。



(a) 試験体 No. 9 の計測範囲および受信探触子 (垂直型縦波 2.25MHz)



(a) 1 番目の波紋 (6.24 μ s) (左図 : BPF なし, 右図 : BPF あり)



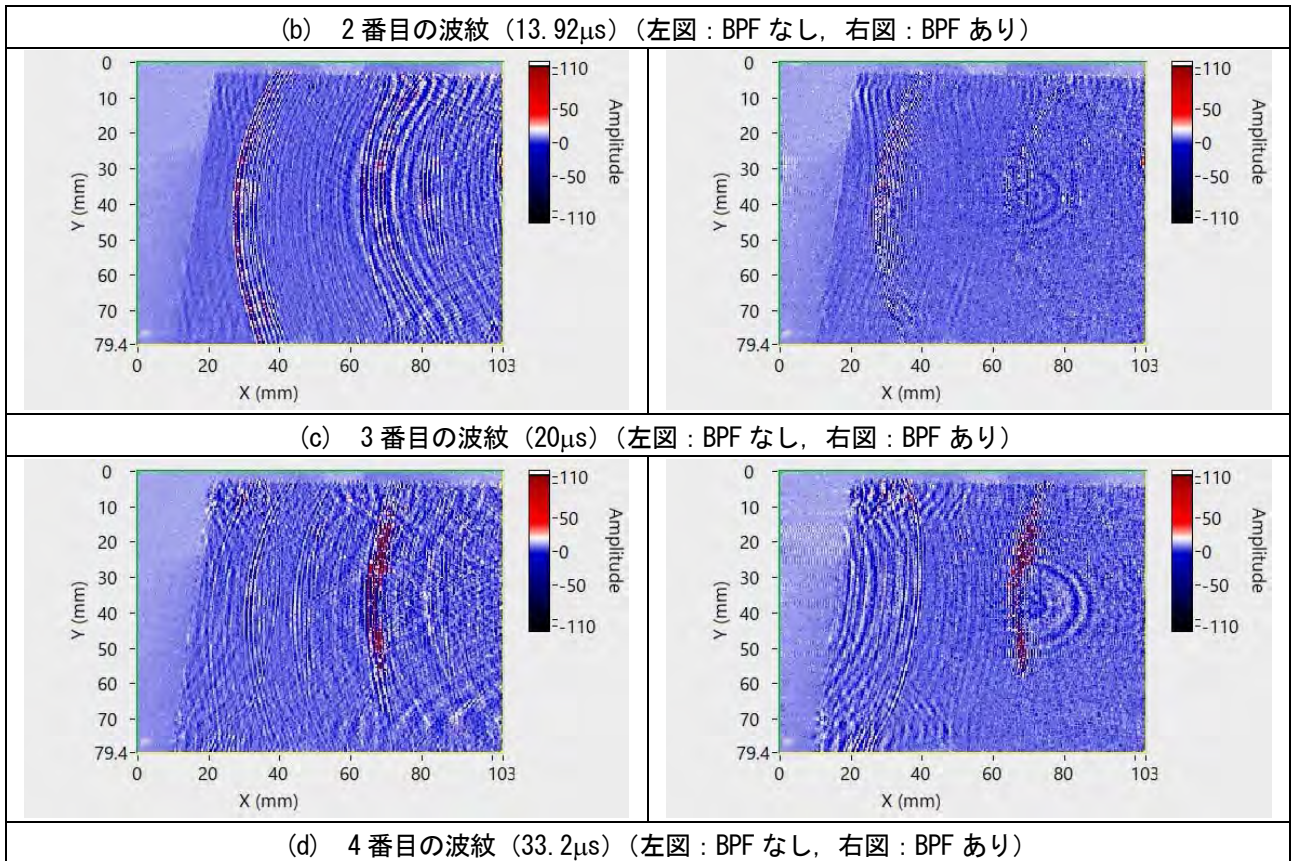
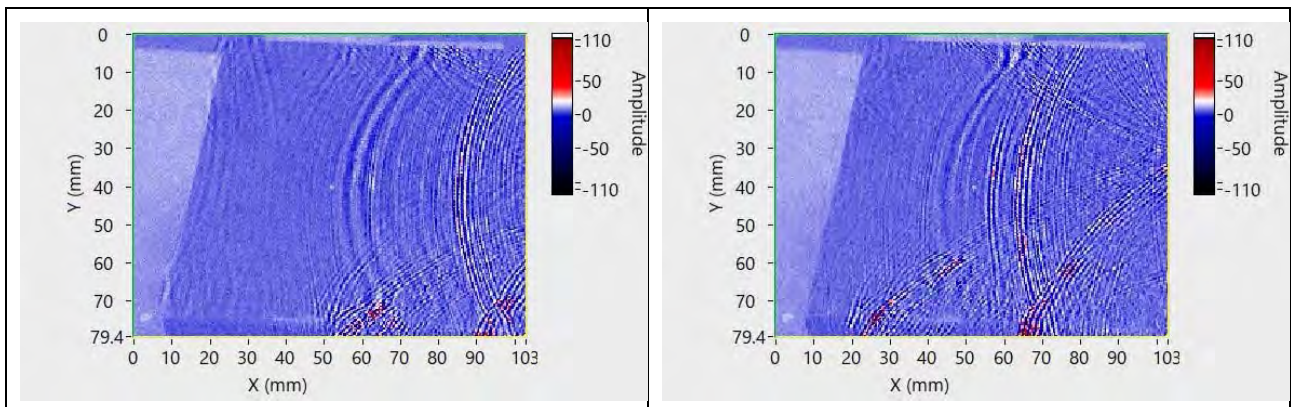


図 4.1-27 欠陥深さ 10mm の試験体に異なった時間に現れる BPF 適用後の欠陥からの波紋
(垂直型縦波 2.25MHz)

次に図 4.1-27 で受信探触子を(a)の受信探触子の裏側に置いた場合の測定を行った。目的は前進波と欠陥からの波紋の分離である。前進波はレーザー照射面上を伝搬する波動が起源と考えられるので、受信探触子を裏側に置けば欠陥からの波紋だけが動画上に現れると考えた。しかしながら、この場合は欠陥からの波紋は現れなかった。原因としては、模擬欠陥からの反射が、模擬欠陥が平面であることから、上の方向に向かっているためと考えられる。参考までに波形を図 4.1.28 に示す。受信探触子をレーザー照射面の裏側に置いても前進波は消えないことがわかる。これは以下のように考えれば理解できる。受信探触子を中心とする任意の長さを半径に持つ球を考え、この球のレーザー照射面との交わりは一つの円になるが、この円と球の中心の間の距離は等しい。すなわち、この円上に存在する点にレーザーが照射された場合、同じ時間かつ位相で受信探触子に到達する。相反定理によって受信探触子が音源になったと考えるとき、レーザー照射面に同じ位相で到達するので波紋の一つの筋に見えることになる。



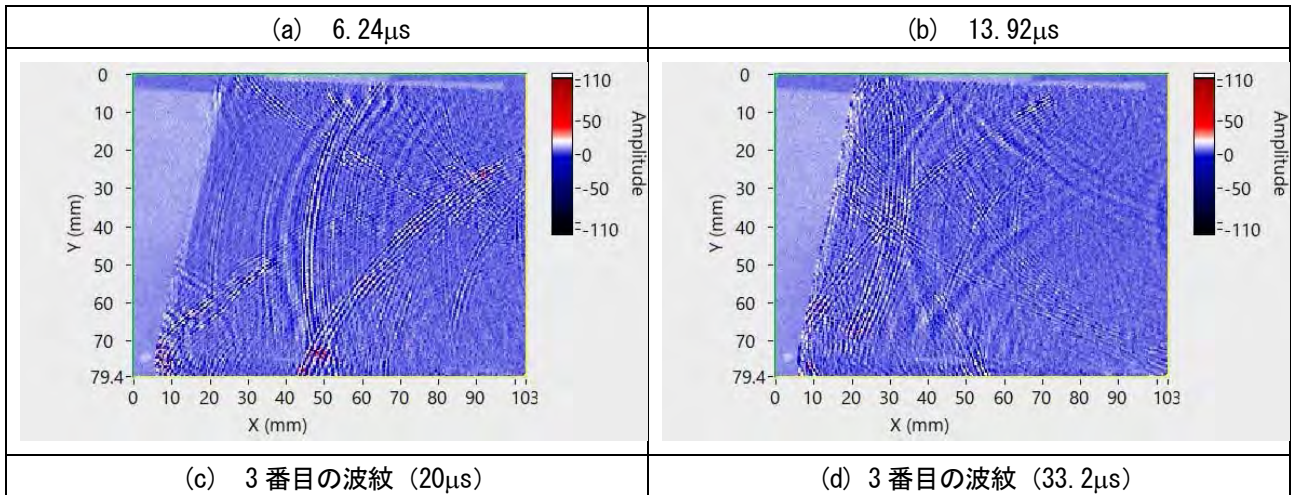
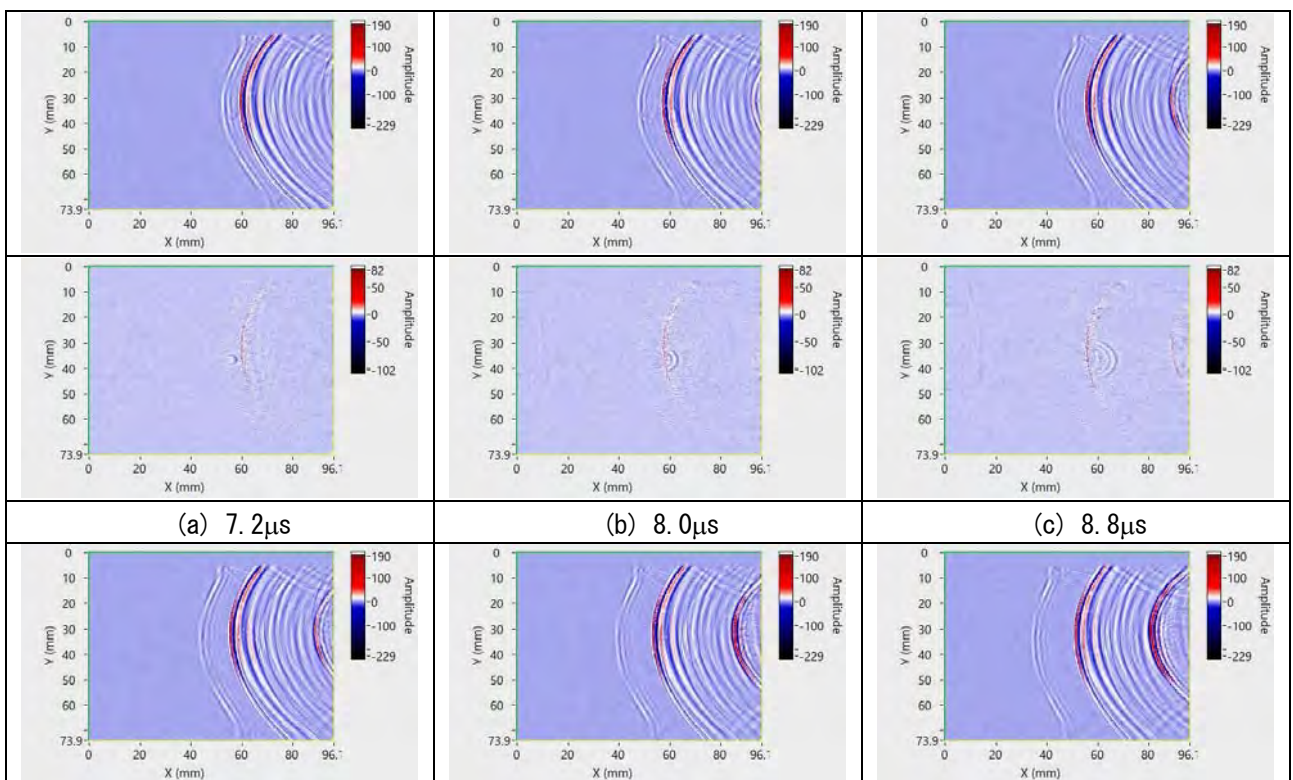


図 4.1-28 図 4.1-27 で受信探触子を裏側に置いた時の波紋

次に LUVI の解析機能の前進波除去を試した例を示す。前進波除去の機能は、つくばテクノロジーが開発したアルゴリズムによって実現している。同社に確認したところアルゴリズムについて教えることは可能とのこと。なお、下記の例では前進波は完全に除去されていないが、ユーザーから前進波と欠陥からの波紋との関係を知りたいとの要望があるため残しているとのことであった。図 4.1-29 は試験体 No.6 を斜角 2MHz 探触子 (B2K3x3A70) で測定したものである。図からわかるように前進波の除去を行うことによって、欠陥からの波紋がより明瞭に表示できるようになった。なお、前進波除去を行うとき、前進波と同じ向きに進行する波紋の左側の部分も除去されてしまうので、欠陥からの同心円状の波紋は前進波と逆向きに伝搬する部分が残ることに注意を要する。



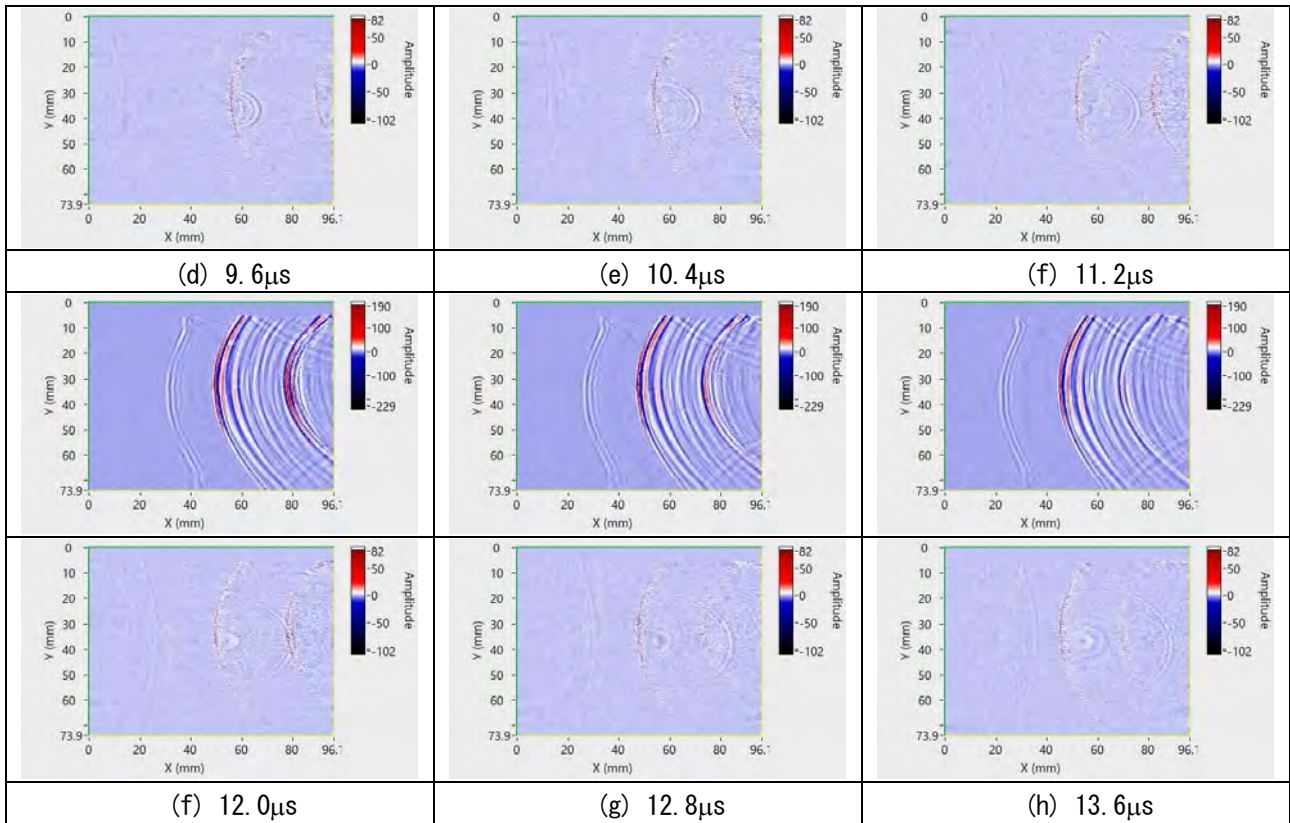


図 4.1-29 前進波除去機能の効果

(上図：元の波紋，下図：前進波除去後，時間は動画開始からの経過時間)

v) 測定のプログラム化が可能かの検討

次に測定のプログラム化の可能性について検討した (図 4.1-30)。これまででは、測定は試験体全体をレーザーでスキャンするやり方であったが (左図)，右図のようにスキャン領域を細かく区切ることによって精密な測定が可能になることが期待できる。現時点での LUVI のシステムは右図のように領域 1 から 8 をスキャンするには手でスキャン領域を設定して順番に行うしかない。しかし、つくばテクノロジーに確認したところ、自動化については別途対応が可能とのことであった。

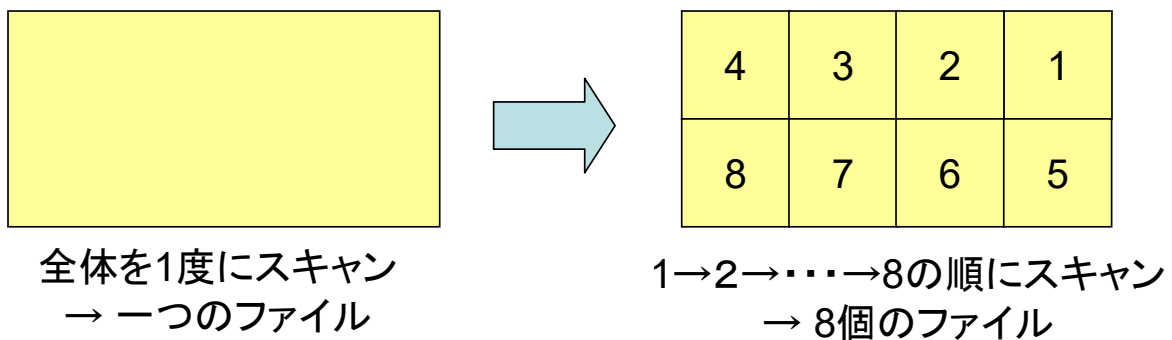


図 4.1-30 測定の自動化

なお、領域を小さくした場合、どのような動画が得られるか試したところ、例えば上図で領域 3 をスキャンした場合、左図の全体スキャンで得られた動画で領域 3 だけが見えるようにした動画と同じであることがわかった。故に領域 i ($1 \leq i \leq 8$) だけレーザーでスキャンした動画を得るために、全体をスキャンしたときに出来る wave.dat というファイルからソフト的に抽出することで実現可能である。その際に必要な wave.dat のデータフォーマット

は、つくばテクノロジーによると LUVI ユーザーには公開しているとのことであった。ただし、測定の結果を AI で判別し、疑わしい領域をレーザー出力するに際し、スキヤンの間隔を変えたり、BPF を適用したりといったことを自動的に行うことが可能であれば、測定のプログラム化は有効だと思われる。

以上調査した結果についてまとめる。ただし、今回は材質が FC の試験体について試験した結果であり、材質が変わればいくつかの結果は変わってくる可能性がある。

- LUVI による欠陥検出では特に浅い欠陥の検出にすぐれている。
- 受信探触子の選択においては、斜角 1MHz がもっとも汎用性があり、測定においてはまずこれを用いて行うのがよいと考えられる。その次に、斜角 2MHz を試すべきである。5MHz は信号の減衰が大きいため使用は適当ではない。
- 縦波だけ取り出すために、垂直型縦波用受信探触子を用いる方法と接触媒質に液体を用いる方法を試したが、期待した効果はなかった。
- 垂直型縦波用受信探触子を用いることによって斜角探触子では検知できない距離でも検知することが可能だったものの、波紋が斜角探触子と比較してより複雑になるため、使用にあたっては注意する必要がある。
- 欠陥からの波紋を強調するためのバンドパスフィルターや前進波除去の機能は有効である。
- 測定のプログラム化はつくばテクノロジーに外注することによって可能である。

最後に上に示した図の動画を得るときに用いた測定条件を表 4.1-4 に示す。表の受信探触子において、斜角探触子はつくばテクノロジーから借用したもの、垂直型探触子は海上技術安全研究所が所有するものである。

表 4.1-4

図番号	試験片	探触子				LUVI試験条件					その他			
		振動方向	垂直/斜角	周波数 (MHz)	メーカー	型番	接触媒質	スキヤン周波数 (Hz)	スキヤンピッチ (mm)	データ長		サンプリング回数 (MS/s)	AVG	レーザー出力 (%)
図4.1-4左図	No.9	縦	垂直		5 パナメトリクス	A10R 5.0	グリセリン	500	0.2	500	12.5	1	58	縦波波形
図4.1-4右図	No.9	横	垂直		5 パナメトリクス	V155 5.0	グリセリン	1000	0.4	500	12.5	1	51	横波波形
図4.1-5左図	No.9	縦	垂直		5 パナメトリクス	A10R 5.0	グリセリン	500	0.2	500	12.5	1	58	図4.1-4左図のスペクトル
図4.1-5右図	No.9	横	垂直		5 パナメトリクス	V155 5.0	グリセリン	500	0.2	500	12.5	1	71	図4.1-4右図のスペクトル
図4.1-6	No.9	横	斜角70°		1 ジャパンプローブ	1K5x5A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	51	
図4.1-15	No.6	横	斜角70°		1 ジャパンプローブ	1K5x5A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	51	
図4.1-19	No.9	縦	垂直		2.25 パナメトリクス	V125	グリセリン	500	0.2	500	12.5	1	58	
図4.1-20左図	No.1	横	斜角70°		1 ジャパンプローブ	1K5x5A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	51	
図4.1-20右図	No.6	横	斜角70°		1 ジャパンプローブ	1K5x5A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	51	
図4.1-21	No.6	横	斜角70°		1 ジャパンプローブ	1K5x5A70	HIVAC-G	1000	0.4	500	12.5	1	51	
図4.1-22左図	No.6	横	斜角70°		1 ジャパンプローブ	1K5x5A70	HIVAC-G	1000	0.4	500	12.5	1	51	
図4.1-22右図	No.6	横	斜角70°		1 ジャパンプローブ	1K5x5A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	58	
図4.1-23(a1)	No.9	横	斜角70°		1 ジャパンプローブ	1K5x5A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	58	
図4.1-23(a2)	No.9	横	斜角70°		1 ジャパンプローブ	1K5x5A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	58	
図4.1-23(a3)	No.9	横	斜角70°		2 ジャパンプローブ	B2K3x3A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	58	
図4.1-23(b1)	No.9	横	斜角70°		5 ジャパンプローブ	5K3x3A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	58	
図4.1-23(b2)	No.9	縦	垂直		2.25 パナメトリクス	V125	グリセリン	500	0.2	500	12.5	1	58	
図4.1-23(b3)	No.9	縦	垂直		5 パナメトリクス	A109S 5.0	グリセリン	500	0.2	500	12.5	1	58	
図4.1-24	No.9	横	垂直		5 パナメトリクス	V155 5.0	グリセリン	500	0.2	500	12.5	1	58	
図4.1-25	No.9	横	斜角70°		2 ジャパンプローブ	B2K3x3A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	58	BPF 1.8~4MHz
図4.1-26	No.9	横	斜角70°		2 ジャパンプローブ	B2K3x3A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	58	BPF 1.8~4MHz
図4.1-27	No.9	縦	垂直		2.25 パナメトリクス	V125	グリセリン	500	0.2	500	12.5	2	58	BPF 1MHz以上通過
図4.1-28	No.9	縦	垂直		2.25 パナメトリクス	V125	グリセリン	500	0.4	500	12.5	2	58	
図4.1-29	No.6	横	斜角70°		2 ジャパンプローブ	B2K3x3A70	HIVAC-G	500	0.2	500	12.5	1	58	前進波除去

注) スキヤン周波数とスキヤンピッチはレーザーの照射条件に関係する。
サンプリング回数のMS/sは、1sに10⁶回やることを示す。
AVGはそこに書かれて回数だけ測定し平均をとる

4.2 鋳造品等の内部欠陥検査技術に関する AI 活用方法の調査

4.2.1 画像認識 AI の適用検討

4.1 で述べたように、レーザー超音波可視化システムを使用した非破壊検査では、超音波の伝搬が動画映像としてモニターに表示され、検査員はその動画を見ながら内部欠陥があるか否かを判定する。図 4.2-1 は、レーザー超音波可視化システムを使用した実験状況の一例である。

内部欠陥があることを確認済みの実鋳造品を対象に、図 4.2-2 に示したように、1MHz 斜角センサーを用いてデモ実験した。図 4.2-2 の画像中で緑枠にて囲まれた内側に、レーザーが照射されている。内部欠陥を検出できた瞬間は、図 4.2-3 に示すように画面の下方方向に向かう進行波と同時に、内部欠陥位置で画面の上方方向に向かう反射波が表れる波紋がモニター上に可視化された。図 4.2-3 に表示されている映像（画像）は、図 4.2-2 の緑枠で囲まれたレーザーが照射された範囲にあたる。



図 4.2-1 レーザー超音波可視化システムを使用した鋳造品内部欠陥検査デモ風景

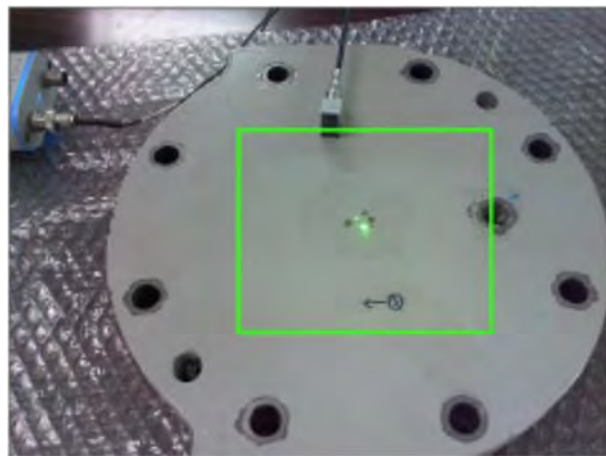


図 4.2-2 実鋳造品内部欠陥デモ検査

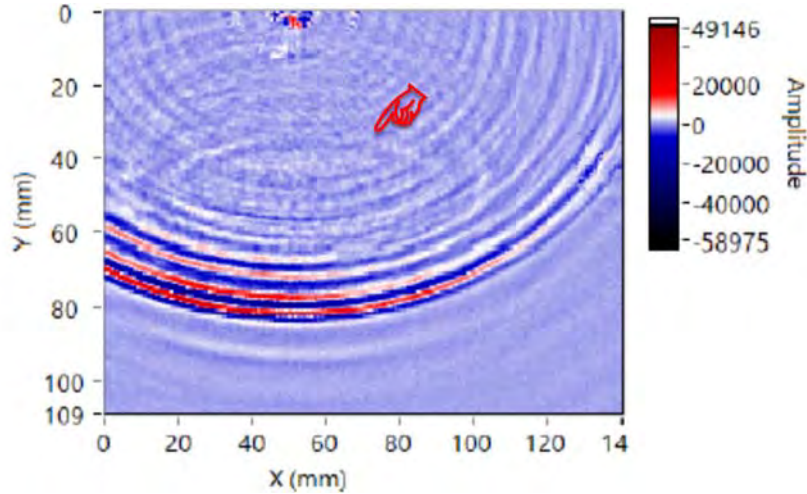


図 4.2-3 内部欠陥が発見された後の波紋画像

図 4.2-4 は、超音波の伝搬映像から、一定間隔で切り出した画像である。図 4.2-3 に写っている波紋の源に内部欠陥があることを人間は視覚で認識する。このような視覚認知機能を画像認識 AI で認識できるように、3.2 で述べたような AI モデルを用いて機械学習を行い認識できるようにすることになる。

3.2 で述べた機械学習を行うには、認識させたい特徴を学習させる必要がある。そこで、一般的にはアノテーションと呼ばれる作業を行う。図 4.2-5 は、欠陥からの反射（波紋形状）を画像中に赤枠で囲んでアノテーション（波紋と学習させたい範囲を指定して、「内部欠陥」という単語を関連させる）を行っている一例である。このようなアノテーション作業を図 4.2-4 に示した静止画像に対して行った。ここでは、1 枚の静止画像に対して、人間が波紋と認識した 1 箇所を赤枠で囲んでアノテーションした。

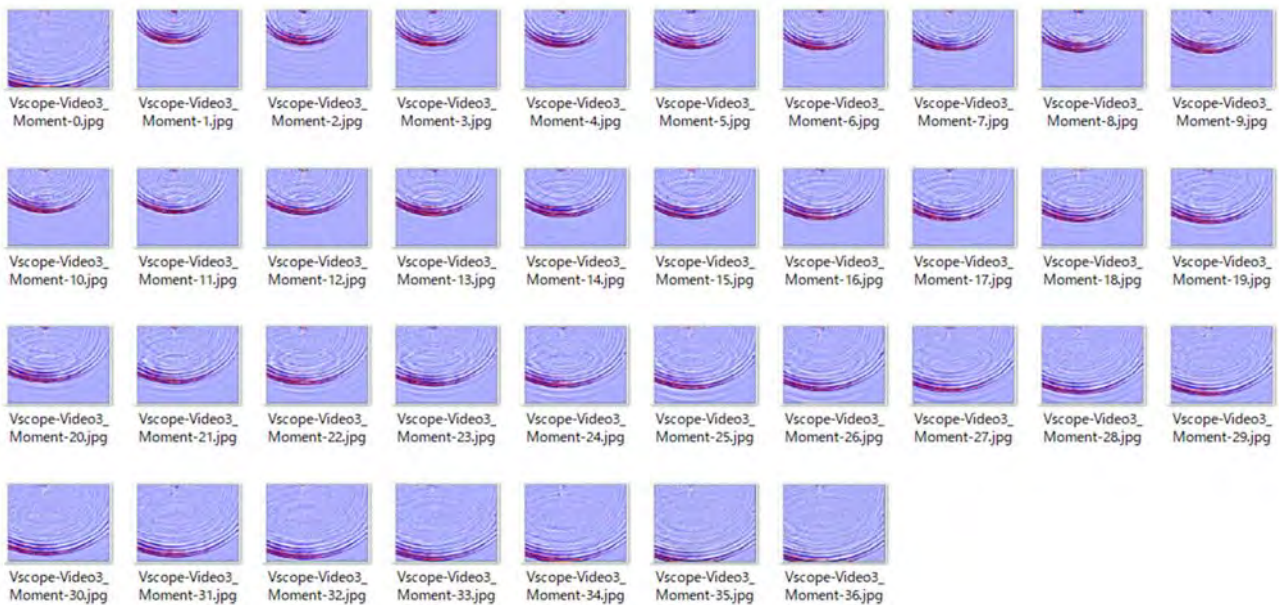


図 4.2-4 鋳造品内部欠陥検査動画から切り出した静止画像

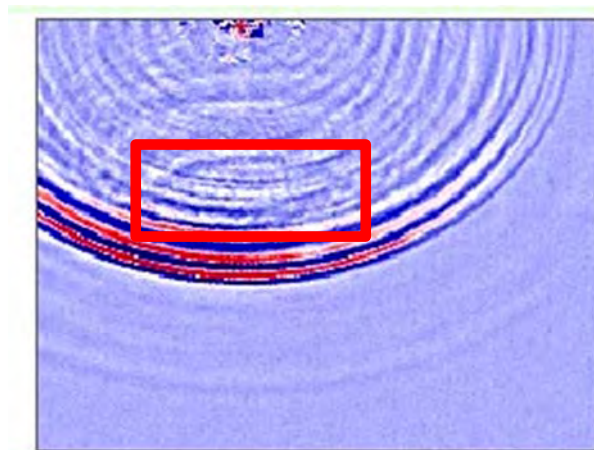


図 4.2-5 波紋形状をアノテーションした一例

このようにしてアノテーションして作成されたデータセットを機械学習の教師データとした。図 4.2-4 に示した静止画像の数だけでは、教師データの数としては決して十分でない。そこで、教師データの数を膨らませる水増し作業を行った。ここでは、画像に対して周囲の明るさやピントのずれ等で環境条件を変化させた画像を模擬的に作成した。今水増し作業では、①画像のコントラストを調整、②ガンマ補正、③平滑化をそれぞれ3水準で組み合わせを変えて、模擬的な画像を作成した。しかしながら、模擬的な画像を確認したところ、画質が落ちてしまい、人間が見ても波紋を読み取れるような状況でなかったことから、水増しで作成された模擬的な画像を使用することなく、少量のオリジナル画像のみで機械学習させた。学習回数は10万回とし、そのAIモデルを用いて認識させた。33枚中5枚は認識(0.6以上の確率)できたものの、図 4.2-6 に示したように、期待したレベルではなかった。

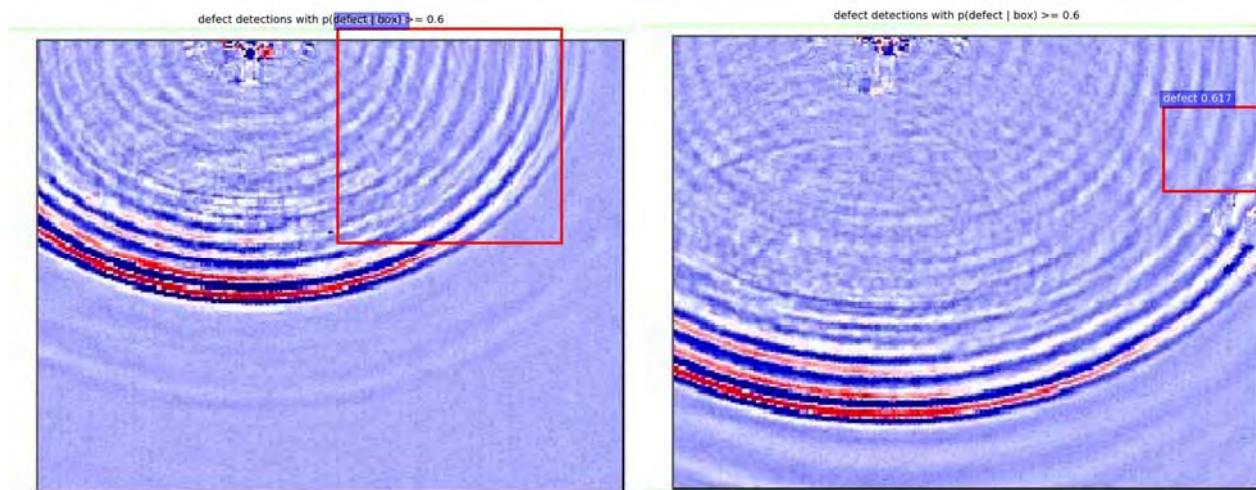


図 4.2-6 波紋形状をアノテーションした一例

4.2.2 認識精度を改善するための検討

正しく認識できなかった理由は、教師データ数が少ないこと、1静止画像に対して1箇所の波紋のみをアノテーションしたこと、その他複数のことが考えられる。認識精度を改善するために、動画における変化成分を機械学習させることとした。

4.1.2 で述べたように、レーザー超音波可視化システムで鋳造品の内部欠陥を正しく認識させるために、図 4.2-7 に示したような模擬欠陥試験体を製作した。模擬欠陥試験体は、試験体裏側からキリで人工的な穴を、表 4.2-1

に示す寸法（穴径，深さ）であけた試験体である．内部欠陥試験では，穴をあけた側を裏側にして，反対側に超音波センサーを置いて測定することになる．

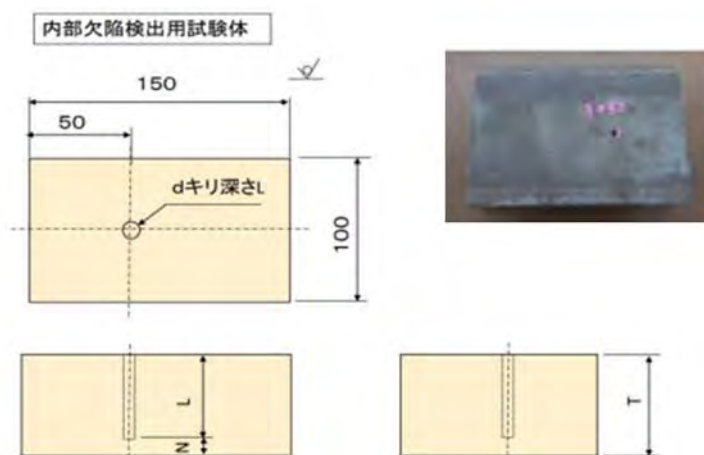


図 4.2-7 模擬欠陥試験体

表 4.2-1 模擬欠陥試験体寸法

試験体 No.	d	L	N	T
1	3	33.5	1.5±0.5	35
2	3	32	3±0.5	35
3	3	30	5±0.5	35
4	3	25	10±0.5	35
5	3	15	20±0.5	35
6	1.5	33.5	1.5±0.5	35
7	1.5	32	3±0.5	35
8	1.5	30	5±0.5	35
9	1.5	25	10±0.5	35
10	1.5	15	20±0.5	35

試験体 No.10 を対象に画像認識 AI による欠陥検出のテストを行った．計測を開始すると画面右側にある超音波センサーから進行波が画面右側から左側に進行する．模擬欠陥位置（画面中央部 X=40mm，Y=30mm 付近）において，進行波と同時に，模擬欠陥位置（画面中央部 X=40mm，Y=30mm 付近）から画面右側に向かって反射波が表れる．その瞬間を切り出した画像が，図 4.2-8 である．図 4.2-8 に示した模擬欠陥を超音波がとらえた瞬間を，画像認識 AI では，欠陥位置と認識した場所として緑色でハイライトするようにプログラムした．この瞬間においては，画像認識 AI は，模擬欠陥位置を正しく認識した．ただし，同時に別の箇所（画面 X=15mm 付近）にも誤認識で緑色にハイライトしている．今後，このような誤認識を減らす改善を行っていく必要がある．

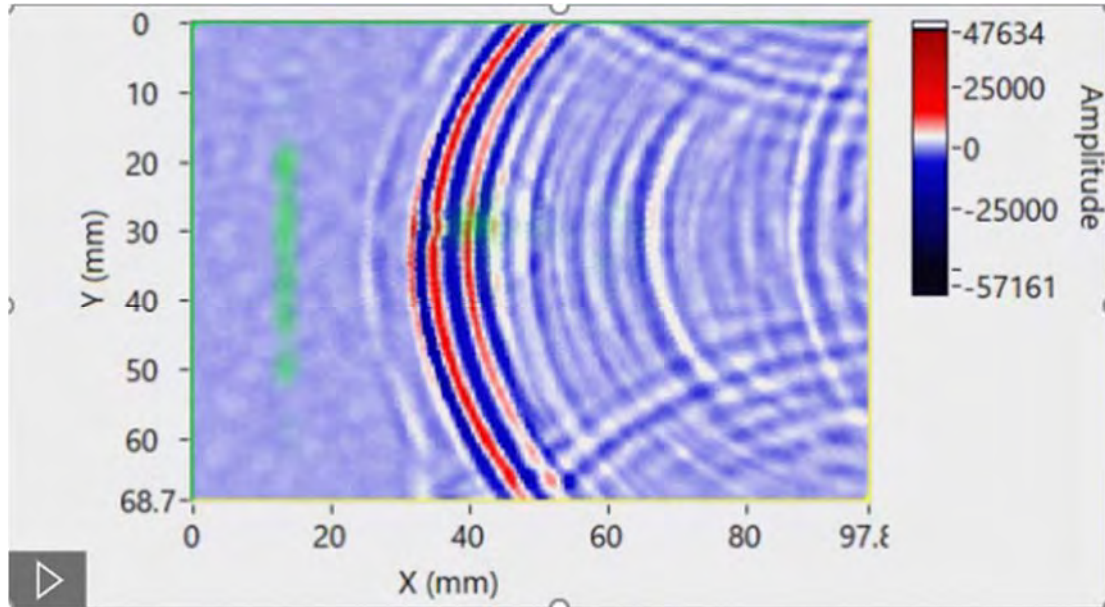


図 4.2-8 画像認識 AI による欠陥位置の認識結果（緑ハイライト位置が欠陥判定箇所）

4.2.3 自動処理に向けた検討

4.2.1 及び 4.2.2 で説明した入力データの元映像は、モニターに表示された伝搬映像の動画データを avi ファイルに加工処理した映像であった。今後のシステム化にあたっては、このような加工処理が入ることなく、レーザー超音波可視化システムで計測され、取り込まれる超音波センサーの振幅(Amplitude)バイナリーデータ(dat ファイル)をそのまま処理することによって、一連の自動処理が行えないか検討している。

4.2.4 内部欠陥検出画像判定のまとめと今後の進め方

検出波形の読み取りを容易化するための検出画像の分析研究を行い、欠陥波形の着色手法を活用して画面判定を容易化した。今年度実施して明らかになった内部欠陥検査システムの特徴をもとに、鋳造品の形状、表面粗さ等各種条件に対応した検査手法を明確化していく。これにより、経験の浅い技術者を想定した比較的容易な欠陥判定を可能とするための目途を立てることができた。

実用化に向けた調査結果に基づき、鋳造品の種類、形状、部位等に応じた検査方法を確立し、マニュアルを整備していく。これにより、検査現場で活用できる有用な内部欠陥検査手法の実用化を目指す。

5. 検査技術の実用化に向けた検討

今年度の調査研究の結果を踏まえ、継続して①内部欠陥検査、②表面欠陥検査、③形状検査を対象にした検査技術の実用化に向けた検討を行った。

5.1 内部欠陥検査

今年度調査した検査装置「レーザー超音波可視化装置」を活用して、船用鋳造品の内部欠陥検査技術を確立する。そのために、以下の検討を実施する。

- ・ 大型・肉厚など船用鋳造品の特性に応じた計測方法や欠陥検出波形の判断基準などを明確化し、船用鋳造品への適用方法を体系化する。
- ・ AI による欠陥検出波形パターンの判定支援機能の開発等により、検査による見落としを減らしていく手法を確立する。

- ・ 現場の検査技術者が容易に使用できるよう、操作性や手順等についての機器の改善とマニュアルを整備する。

5.2 表面欠陥検査

今年度作成した「鋳造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド」を基に、品質判定に関する用途別判断基準、次の受け入れ部品に適用すべき対策等の検査情報を拡充させることを検討する。また、検査技術者が必要な検査情報を一元的に確認可能とし、タブレットまたはARグラス等を活用するなど、現場での利便性の高い検査手順を確立する。

5.3 形状検査

今年度の調査研究の成果を踏まえ、「形状検査アプリケーション」を完成する。タブレットまたはARグラスを活用するなど、現場で利用可能な形状検査技術を確立する。

5.1 から 5.3 について、現場での利便性を求めたシステムに関する各種アプリケーションの作成を行っていく。

5.4 統合化システム

5.4.1 統合化システム概要

本事業で制作していく統合化システムは、「内部欠陥検出」、「表面欠陥検査」、「形状検査」の各機能を実装化したアプリケーションが、システム内で利用できる形態とする。現場での検査業務を効率化し検査技術者を支援するためには、統合化システムはタブレットやARグラス等の端末において、一元的に使用できるようにしていく必要がある。

5.4.2 統合化システムの基本仕様

統合化システムの全般的な基本仕様と各検査アプリケーション機能を検討した。

1)基本事項

現場での利便性を考えて、タブレットまたはARグラスで使用できることとする。検査対象部品の認識を行うために、部品に付された識別表のバーコードを読み取るか、又は、工番と部品番号を入力し、検査対象品を特定することを考える。

2)各検査アプリケーション基本仕様

<形状検査アプリケーション>

形状検査では、検査対象の鋳造品をタブレットのカメラで撮影した状態で、対応する図面を呼び出し、重ね合わせと形状比較を行うことができるようにする。

<表面欠陥検査アプリケーション>

表面欠陥検査では、下記の二つの機能を選択可能とする。

①目視判定

検査対象部をタブレットのカメラで撮影した状態で、「鋳造品表面欠陥一覧表」を画面内に表示しコマ送りで比較可能とする。状態が近い欠陥をクリックすると、「鋳造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド」の該当部をハイライトし画面内に表示する。

②AI判定

検査対象部を固定カメラ等で撮影し、画像判定システムにアクセスし判定する。欠陥判定の結果があった場合、検査員に明示、報告できるようにする。欠陥判定があった場合は、目視判定と同様、欠陥に対応する「鋳造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド」を表示する。

<内部欠陥検査アプリケーション>

内部欠陥検査では、別途レーザー超音波可視化装置で検出した登録済み画像ファイルを検索し、検査対象部品に関連する画像を表示して検査の参考に供する。

5.4.3 課題と進め方

統合化システム基本仕様に基づき、システム開発を行い現場での運用検証の上、現場の検査で活用できる実用的な統合システムとして完成させていく。

6. まとめ

鋳造品を加工する船用製品製造事業所は、工程内で発生する不適合未然防止のため、外部との接点である受入検査において、①鋳造品の形状検査、②表面欠陥検査、③内部欠陥検査をより高めていくための、総合的な検査支援技術が求められている。今年度は、以下の研究を実施した。

(1) 鋳造品等の形状検査に関する研究

- ・ 写真画像と2次元図面を対比し、相違点を抽出する「基礎的アプリケーション」を作成した。
- ・ 基礎的アプリケーションの課題を踏まえ、より実用的なアプリケーションの開発を行った。
- ・ 5種類の製品に対して実用的なアプリケーションを使用し、その精度を検証した。
- ・ 実際の鋳造品への適用を重ねて実用化への目途を立てた。
- ・ タブレットやARグラスを活用し、現場での検査に適用できる道筋をつけた。

(2) 鋳造品等の表面欠陥検査技術に関するAI活用等の研究

- ・ 欠陥事象・欠陥パターン、欠陥状態、欠陥発生部位、寸法計測判定、使用判定、補修方法等を整理した「鋳造品表面欠陥識別及び使用判定ガイド(案)」を作成した。
- ・ 「画像認識アプリ」を活用していくために、「画像認識アプリ研修会」を実施し、事業所で独自に教師データを整備し、画像認識AIの検証を行える見通しを立てた。
- ・ タブレットやARグラスを活用し、現場での検査に適用できる道筋をつけた。

(3) 鋳造品等の内部欠陥検査技術に関するAI活用等の研究

- ・ 鋳造品の内部欠陥を検出するために、つくばテクノロジー(株)製「レーザー超音波可視化システム」の基本特性を把握し、内部欠陥検出レベルを系統だて調査した。
- ・ レーザー超音波可視化システムからモニターに出力される映像(画像)を教師データとして画像認識AIの学習を行い、欠陥画像を自動着色により判定を容易化する検討を行った。これにより、精度の改善を行うと共に、今後の方向性を示すことができた。

(4) 統合化システム

上記(1)～(3)の成果を踏まえ、各種システムを統合して現場検査に活用するための統合化システムについて概念を明確にした。

参考文献

- 1) 社団法人 日本鋳造工学会, 鋳造欠陥とその対策, 社団法人 日本鋳造工学会, 平成21年
- 2) 一般社団法人 日本鋳造協会, SEMによる鋳造欠陥の解析事例, 一般社団法人 日本鋳造協会, 2019年
- 3) 張博, 鋳鉄鋳物の不良対策, SOKEIZAI, Vol.53 No.6, 2012

- 4) 国際鋳物欠陥分類図集, (社) 日本鋳物協会
- 5) 松山秀, 鋳造品の非破壊検査及び評価技術 (その1) - 各種非破壊検査法 -, 鋳物, 第63巻第8号, 1991, pp. 706-713
- 6) 松山秀, 鋳造品の非破壊検査及び評価技術 (その2) - 試験結果の評価方法 -, 鋳物, 第63巻第9号, 1991, pp. 781-789
- 7) 堤信久, 鋳造欠陥とその考え方, 鋳物, 第61巻第12号, 1989, pp.852-860
- 8) Shaoqing Ren et. al., Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks ,2015
- 9) 高坪純治, 王波, 鈴木俊一, 劉小軍, 齊藤典生, レーザー超音波可視化探傷技術の新展開<特集: レーザー超音波の革新性①>, 光アライアンス, 2020
- 10) 鈴木英男, 音響学における相反定理とその応用, 日本音響学会誌, 第58巻第4号, 2002, pp.239-24