

フェーズドアレイを用いた非破壊試験による溶接欠陥の探傷精度に関する研究

— その6 評価方法の検討 —

正会員 ○西澤秀樹\*1 正会員 中島洋士\*2 正会員 古城豊光\*3 正会員 廣重隆明\*4  
正会員 佐野正\*5 正会員 山本優一郎\*6 正会員 榎本克美\*7 正会員 笠原基弘\*8

溶接欠陥 自然欠陥 非破壊試験 フェーズドアレイ 断面マクロ試験 欠陥高さ

1. はじめに

前報では、溶接技量試験体に発生した自然欠陥を対象としてY方向走査5mmピッチによるフェーズドアレイ (PA) を用いた超音波探傷試験 (UT) 及びX線透過試験 (RT) を実施、またPAにおける探傷精度を確認するために、溶接線全長に渡りマクロ試験を実施し、実欠陥寸法との比較を行った。

本報では、実際に探傷可能なPA手法及びその評価方法について再検討した。

2. 試験体の選定

試験体は、第29次AW検定の溶接試験において、外観検査に合格し、RTで不合格となった試験体を対象として、欠陥の大きいものを7体 (TP-1,2,4,6,7,8,9) 選定した。

試験体の板厚は19mm、溶接長さは鋼製エンドタブ形式 (260mm) と固形エンドタブ形式 (200mm) で、余盛及び裏当て金を1mmまで削除した。

3. 断面マクロ試験

マクロ試験は、一般的な方法ではなく、図3.1に示すように裏当て金を削除後、板厚底 (d=19.4mm) から0.5mmごとに溶接線全長を板厚と平行にスライスし、エッチング後、写真撮影を行い、全断面 (板厚底~d=1.4mm) まで繰返した。

TP-1,TP-2,TP-4,TP-6,TP-7,TP-8,TP-9の7体について全断面マクロ試験を実施後、板厚断面0.5mmごとのマクロ写真を0.5mm×1mmメッシュで読み取り、欠陥長さLmを測定した。欠陥高さHmは、スライス間にも欠陥が存在するものとして、欠陥が検出された部分に+0.5mmを加え、欠陥高さHmrとした。

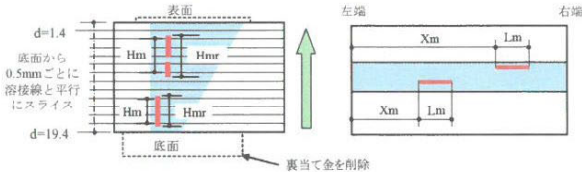


図3.1 断面ごとのマクロ試験方法と欠陥評価

4. フェーズドアレイ (PA) における探傷方法

前報では、図4.1に示すように、横方形走査 (Y1~Y14) を5mmピッチでデータを採取したが、本報では図4.2に示すように、溶接部に最も接近した位置で初層上部の欠陥 (Y1)、初層部及び中間層欠陥を検出するための位置 (Y5)、表層部近傍の欠陥を検出するための位置 (Y10) の3回の走査とした。

なお、探触子位置 (Y5) では直射法では初層部欠陥、一回反射法では中間層に存在する欠陥を検出できる。

① ウェッジ遅延校正

STB-A1の横穴 (d=15mm, φ1mm) を使用し、40度~70度

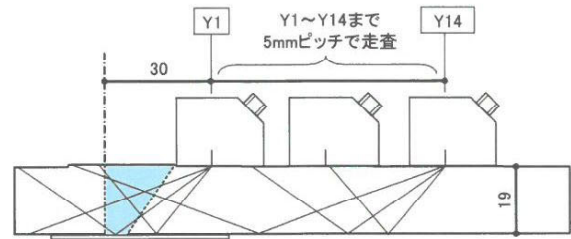


図4.1 前報におけるPAの探触子走査

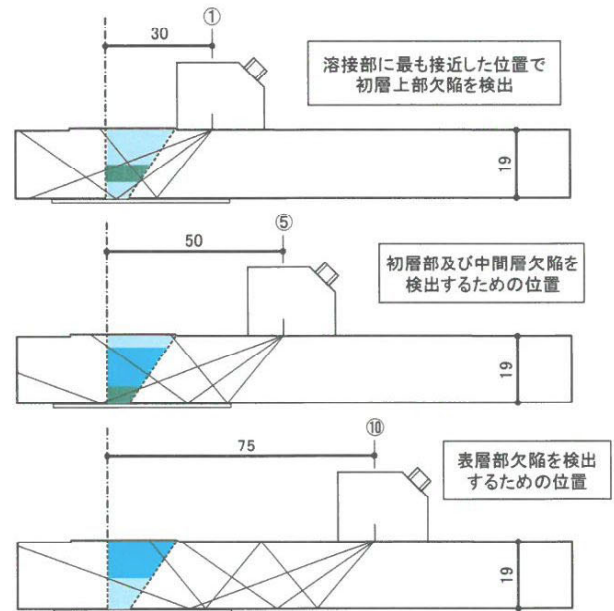


図4.2 本報におけるPAの探触子走査

の屈折角に対するエコーのピークを用いて、ウェッジ遅延の校正を行った。

② 音速校正

STB-A1のR100と屈折角60度を基準に、エコーのピークを80%としたときのエコーの立ち上がりを20%で読み取り、校正を行った。

③ 感度校正 (TCG)

STB-A1に準じた深さがd=10mm, 20mm, 30mmのφ1mmの横穴が40度~70度の屈折角において、エコー高さが80%になるように校正した。

④ 探傷感度

探傷感度はA2形系STBの縦穴φ4×4を使用し、屈折角65度のエコー高さが80%になるようにPAの感度を調整した。

Study on the flaw detection accuracy of welding defects due to non-destructive testing using a phased array - Part.6 Examination of Evaluation method

\*1 Nishizawa Hideki \*2 Nakajima Yoji \*3 Furuki Toyomitsu \*4 Hiroshige Takaaki  
\*5 Sano Tadashi \*6 Yamamoto Yuichiro \*7 Enomoto Katsumi \*8 Kasahara Motohiro

## 5. マクロデータの読み取りとPA画像

### 5.1 PA断面画像の読み取り方法

断面マクロ写真の読み取りと各探触子位置 (Y1・Y5・Y10) におけるPA断面画像の表示例、溶接断面における欠陥位置との関係を図5.1に示す。

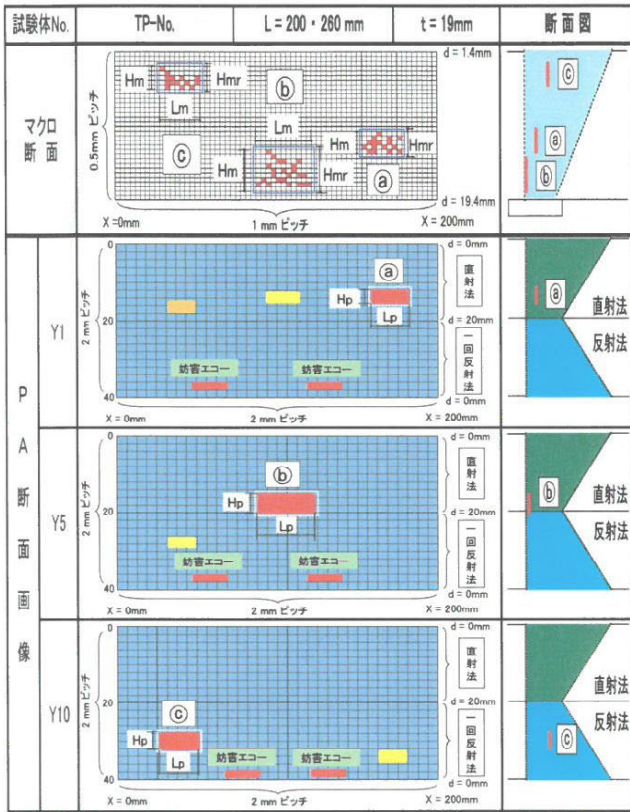


図5.1 断面マクロの読み取りとPA画像の表示例

### 5.2 各試験体におけるマクロデータとPA断面画像

TP-1,TP-2,TP-8,TP-9の4体の断面マクロ写真の読み取りとY1, Y5, Y10におけるPA断面画像を図5.2～図5.5に示す。

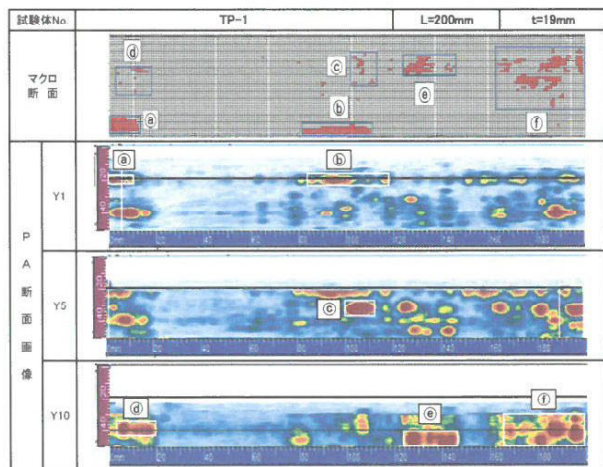


図5.2 断面マクロとPA画像 (TP-1)

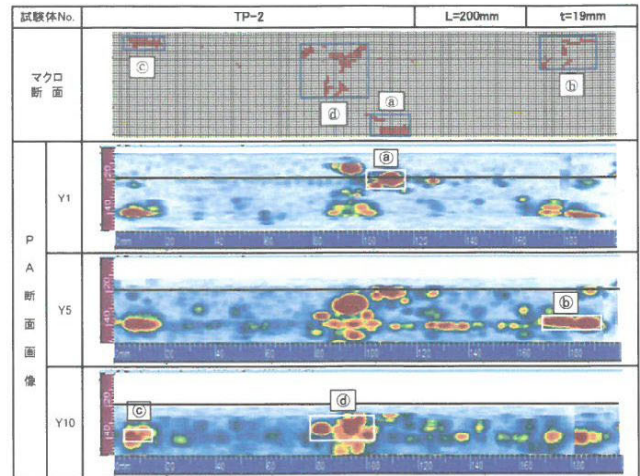


図5.3 断面マクロとPA画像 (TP-2)

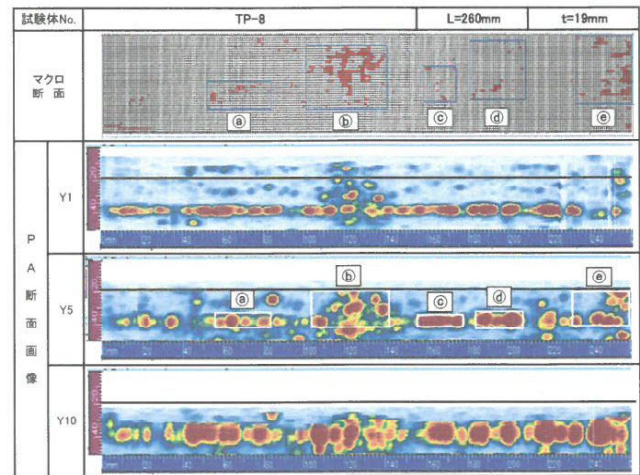


図5.5 断面マクロとPA画像 (TP-8)

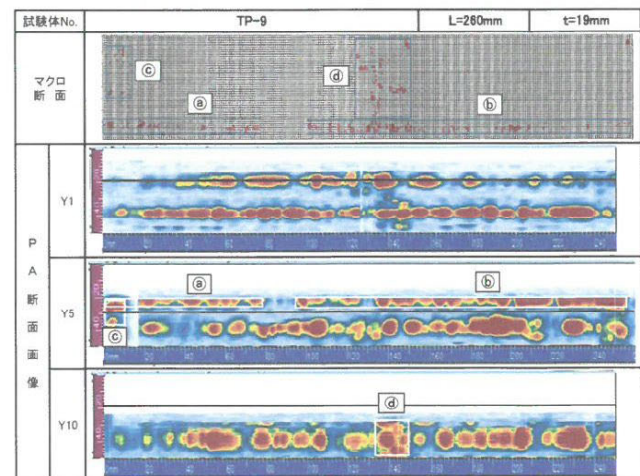


図5.5 断面マクロとPA画像 (TP-9)

### 謝辞

本研究において、オリンパス(株)に機器の提供及びデータの解析を、またマクロ試験ではJFEテクニカ(株)に技術協力を頂いたことに謝意を表す。

\*1 アラップ \*2 (株)大建設 \*3 (株)鴻池組  
\*4 (株)竹中工務店 \*5 (株)大林組 \*6 オリンパス(株)  
\*7 清水建設(株) \*8 (有)アクトエーションハート

\*1 ARUP \*2 DAIKEN SEKKELINC \*3 Konoike Construction Co.Ltd  
\*4 Takenaka Corporation \*5 OBAYASHI CORPORATION \*6 Olympus Corporation  
\*7 SHIMIZU Corporation \*8 Act-Creation-Heart Co.,Ltd

フェーズドアレイを用いた非破壊試験による溶接欠陥の探傷精度に関する研究

— その7 欠陥寸法の算出方法とその精度 —

正会員 ○佐野正\*1 正会員 廣重隆明\*2 正会員 古城豊光\*3 正会員 山本優一郎\*4  
正会員 西澤秀樹\*5 正会員 中島洋士\*6 正会員 榎本克美\*7 正会員 笠原基弘\*8

溶接欠陥 自然欠陥 非破壊試験 フェーズドアレイ 断面マクロ試験 欠陥高さ

1. マクロ試験とPAによる探傷結果

TP-1,2,4,6,7,8,9におけるマクロ試験とPAによる探傷結果の一覧表を表1.1に示す。各試験体ごとにマクロ試験で得られた欠陥高さHm及び欠陥長さLmのあるものを2～6個選定した。

表1.1 マクロ試験とPAによる探傷結果一覧表

試験体 No.	断面マクロ試験 (mm)			フェーズドアレイ PA (mm)				
	欠陥 No.	欠陥高さ		探触子位置	欠陥高さ			
		Hm	Hmr		Hp	Hpr	Lp	
TP-1	Ⓐ	3.0	3.5	Y1	直射	4.0	3.3	10
	Ⓑ	2.0	2.5		直射	4.0	3.3	34
	Ⓒ	6.0	6.5	Y10	反射	8.0	6.6	12
	Ⓓ	5.5	6.0		反射	9.0	7.4	17
	Ⓔ	4.0	4.5		反射	8.0	6.6	22
	Ⓕ	12.5	13.0		反射	19.0	15.6	35
TP-2	Ⓖ	3.5	4.0	Y1	直射	6.5	5.3	14
	Ⓗ	6.0	6.5		反射	8.0	6.6	22
	Ⓒ	2.0	2.5	Y10	反射	6.0	4.9	11
	Ⓙ	10.0	10.5		反射	14.0	11.5	25
TP-4	Ⓐ	3.0	3.5	Y1	反射	5.0	4.1	16
	Ⓑ	4.0	4.5		直射	7.0	5.7	73
	Ⓒ	2.5	3.0	Y5	直射	6.0	4.9	16
	Ⓓ	3.0	3.5		反射	6.0	4.9	28
TP-6	Ⓐ	3.0	3.5	Y5	直射	3.5	2.9	233
	Ⓑ	6.5	7.0		反射	7.5	6.2	12
	Ⓒ	2.5	3.0	Y10	反射	3.0	2.5	232
TP-7	Ⓐ	10.5	11.0	Y5	反射	13.5	11.1	66
	Ⓑ	6.0	6.5	Y10	反射	8.5	7.0	62
TP-8	Ⓐ	5.5	6.0	Y5	反射	8.0	6.6	28
	Ⓑ	13.0	13.5		反射	19.0	15.6	38
	Ⓒ	7.0	7.5		反射	7.0	5.7	20
	Ⓓ	12.0	12.5		反射	14.0	11.5	23
	Ⓔ	14.0	14.5		反射	20.0	16.4	26
TP-9	Ⓐ	2.5	3.0	Y5	直射	4.0	3.3	78
	Ⓑ	2.5	3.0		直射	3.5	2.9	160
	Ⓒ	10.5	11.0	Y10	反射	14.0	11.5	10
	Ⓓ	16.0	16.5		反射	20.0	16.4	18

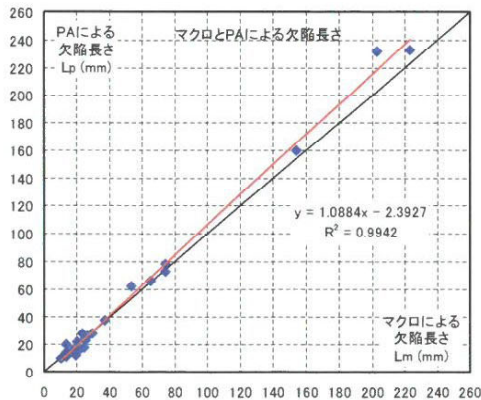


図2.1 マクロ試験とPAにおける欠陥長さ

2. 探傷結果の比較

2.1 欠陥長さの精度

TP-1,2,4,6,7,8,9におけるマクロ試験による欠陥長さLmとPAによる欠陥長さLpとの関係を図2.1に示す。なお、PAにおける欠陥長さLpはPA画像における赤色部分とした。

マクロ試験とPAによる欠陥長さは、相関係数R<sup>2</sup>=0.9942と非常によく一致している。

2.2 欠陥高さの精度(補正前)

TP-1,2,4,6,7,8,9におけるマクロ試験による欠陥高さHmrとPAによる欠陥高さHpとの関係を図2.2に示す。なお、PAにおける欠陥高さHpはPA画像において最も赤色部分が多いY1,Y5,Y10探触子距離のうち、最大の欠陥高さのものを採用した。マクロによる欠陥高さHmrに比べて、PAによる欠陥高さHpは相関係数R<sup>2</sup>=0.8347とよく一致しているものの、マクロ試験に比べてPAによる欠陥高さHpが過大評価される傾向がある。この傾向は欠陥高さが大きくなるほど、また直射法に比べて一回反射法による探傷で過大評価する傾向がみられる。

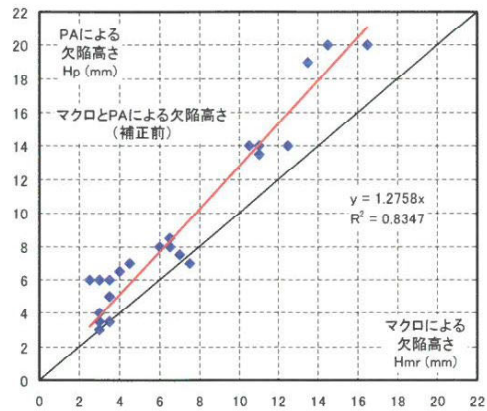


図2.2 マクロ試験とPAによる欠陥高さ(補正前)

2.3 PAにおける欠陥高さ評価法の提案

PAでは一般の斜角探傷法と異なり、探触子から屈折角θ=55°を中心にθ=40～70°まで超音波ビームが広がり、一定の探触子位置においても、常に屈折角θ=40～70°までの超音波が伝搬している。そのため、欠陥を種々の屈折角をもつ超音波ビームで捉えることになるため、欠陥高さHpが過大に評価されることになる。また、この超音波ビームは距離が遠くなるほど広がるため、直射法に比べて一回反射法による探傷では過大評価されることになる。

そこで、超音波ビームが同一の距離(ビーム路程:W)に

Study on the flaw detection accuracy of welding defects due to non-destructive testing using a phased array - Part.7 The method of calculating the defect size and its

\*1 Sano Tadashi \*2 Hiroshige Takaaki \*3 Furuki Toyomitsu \*4 Yamamoto Yuichiro  
\*5 Nishizawa Hideki \*6 Nakajima Yoji \*7 Enomoto Katsumi \*8 Kasahara Motohiro

おける探触子から屈折角  $\theta = 55^\circ$  を中心に  $\theta = 40 \sim 70^\circ$  までの超音波ビームの広がりや幾何学的に算出される欠陥位置の関係を考慮した場合には、屈折角が  $\theta = 40 \sim 70^\circ$  では屈折角  $\theta = 55^\circ \pm 15^\circ$  に超音波ビームが広がっていることになる。なお、この関係は屈折角  $\theta = 55^\circ$  を中心にした場合、超音波ビームの広がりが  $\pm 15^\circ$  でなくとも同様であるため、PA における欠陥高さは、PA 画像から得られた欠陥高さ  $H_p$  の 82% となる。図 2.3 に PA における超音波ビームの広がりや欠陥高さとの関係を示す。したがって、超音波ビームの距離に関わらず、PA による欠陥高さは(2.1)式により求めることができる。

$$\text{PA における欠陥高さ } H_{pr} = \text{PA 画像における欠陥高さ } H_p \times 0.82 \quad \dots (2.1)$$

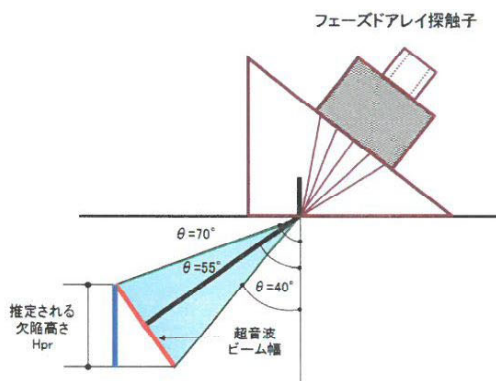


図 2.3 PA における超音波ビームと欠陥高さ

#### 2.4 欠陥高さの精度 (補正後)

TP-1,2,4,6,7,8,9 におけるマクロ試験による欠陥高さ  $H_{mr}$  と PA による欠陥高さ  $H_p$  を図 2.3 における超音波ビームの広がりを考慮して補正を行った後の欠陥高さ  $H_{pr}$  との関係を図 2.4 に示す。

マクロ試験における欠陥高さ  $H_{mr}$  と PA における超音波ビームの広がりを考慮して補正した欠陥高さ  $H_{pr}$  との相関係数は、 $R^2=0.9347$  と非常によく一致している。

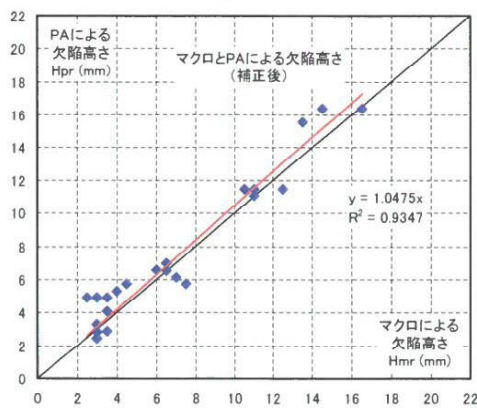


図 2.4 マクロ試験と PA による欠陥高さ (補正後)

この補正を行うことで、超音波ビーム距離 (ビーム路程) や直射法/一回反射法に関わらず、PA における欠陥高さ  $H_{pr}$  を推定することが可能であることがわかった。

### 3. PA における問題点

#### 3.1 欠陥高さの精度

本報で用いた PA 装置は汎用性のある 16ch の探触子であるため、32ch の探触子に比べて超音波ビームを欠陥深さ位置によって適切に集束させることができず、超音波ビームの広がりを考慮した欠陥評価を行わないと、欠陥高さを過大に評価することになる。補正を行わない場合には安全側の評価となる。欠陥高さを適正に評価する必要がある場合には、本報で提案した補正式を用いて欠陥高さを評価することも可能となる。

#### 3.2 欠陥長さの精度

本報では、図 3.1 に示すように一般的に使用されているエンコーダを用いて、溶接線方向の位置及び欠陥長さを記録・保存している。しかし、(その6) 図 5.5 に示した TP-9 における PA 画像のように、溶接線長さが 260mm に対して PA 画像が 250mm 程度と短く表示されてしまうことがある。

これは、エンコーダの起点を支持しているマグネットの固定が探触子の走査中に緩んだか、または探触子と探傷表面の接触が走査時にズレてしまい、実際の溶接線長さと PA 画像の記録が一致しなかった可能性がある。



図 3.1 PA 時におけるエンコーダによる走査

### 4. まとめ

現場で実際に探傷可能な PA における走査方法により、マクロ試験と PA による探傷結果の比較を行い、欠陥寸法を精度よく推定することができた。高精度で欠陥高さを評価するためには PA 画像の補正が必要であり、そのための補正式を提案した。今後は、試験体の PA 実施後に PA 画像の評価を行った後、本研究で行った溶接線全線に渡ってスライスする断面マクロ試験を実施し、本報で提案した PA 手法の妥当性を検証する予定である。

\*1 (株)大林組(株) \*2 (株)竹中工務店 \*3 (株)鴻池組  
\*4 オリジナル \*5 アラップ \*6 大建設  
\*7 清水建設(株) \*8 (有)アクトエーションハート

\*1 OBAYASHI CORPORATION \*2 Takenaka Corporation \*3 Konoike Construction Co.Ltd  
\*4 Olympus Corporation \*5 ARUP \*6 DAIKEN SEKKELINC  
\*7 SHIMIZU Corporation \*8 Act-Creation-Heart Co.,Ltd