

【工学】
研究論文

フェイズドアレイによる溶接継手部欠陥探傷の
造船現場での実用化に関する基礎検討

鎌 尚憲^{*1}, 田口 浩幸^{*2}, 安東 洋次郎^{*2}, 金子 正幸^{*2}, 荒金 卓也^{*1},
牟田 良太郎^{*2}, 緒方 洋典^{*3}, 松岡 和彦^{*4}, 岡田 公一^{*5}, 矢島 浩^{*6}

Basis Investigation on Practical Use of Weld Defects Inspection using
Ultrasonic Phased Array at Shipbuilding Field

KUWA Takanori^{*1}, TAGUCHI Hiroyuki^{*2}, ANDO Yojiro^{*2}, KANEKO Masayuki^{*2},
ARAKANE Takuya^{*1}, MUTA Ryotaro^{*2}, OGATA Hironori^{*3}, MATSUOKA Kazuhiko^{*4},
OKADA Koichi^{*5} and YAJIMA Hiroshi^{*6}

Summary

Welding of hull structural materials is an indispensable technique for the ship construction. If a serious defect exists in a welded joint and grows up, it can lead to the damage of the ship structure, and finally to some significant accidents, such as pollutant spills or danger to the life of crew member.

As conventional techniques to check the internal defect in welded joints, radiographic testing (RT) and ultrasonic testing (UT) are used. Recently, thanks to the rapid progress and spread of digital technology in various fields, an inspection technique of phased array ultrasonic testing combining visualization technology has been released, which can make it possible to inspect the internal defect in welded joint just after welding and check the defect visually on site. The inspection technique like this is expected to contribute to the improvement of welding technology and upgrading the skills of welding engineers.

In this study, to utilize the phased array ultrasonic testing to the ship construction, many types of welded joint specimens with various welding defects were prepared and inspected for these internal defects in the welded joints by phased array ultrasonic testing. In addition, these results were evaluated, comparing with the inspection results by radiographic testing.

Keywords : non destructive inspection, welding defect, butt welded joint, ultrasonic phased array, shipbuilding site

キーワード : 非破壊検査, 溶接欠陥, 突合せ溶接継手, 超音波フェイズドアレイ, 造船現場

^{*1} 大学院 工学研究科 博士課程・株式会社 白杵造船所

^{*2} 株式会社 白杵造船所

^{*3} 株式会社 白杵造船所 博士 (工学)

2023年9月20日受付

2023年12月14日受理

^{*4} 大学院 工学研究科 教授

^{*5} 大学院 工学研究科 准教授

^{*6} 長崎総合科学大学 名誉教授

1. はじめに

船体構造部材の溶接は、船舶を建造するうえで欠かすことが出来ない手法である。万一、溶接継手部に重大な欠陥があった場合、船体損傷による海洋への汚染物質流出や船員の生命を危険にさらすなど、重大な問題に発展する可能性がある。

現在、溶接継手内部の欠陥を把握・確認する方法として、放射線透過試験 (RT: Radiographic Testing) と超音波探傷試験 (UT: Ultrasonic Testing) が一般的に使用されている。

放射線透過試験は、非常に危険であり容易に取り扱う事が出来ないばかりか、試験実施時には近傍の作業を中止しなければならないことや、撮影したフィルムを現像する必要があるために直ぐに結果が出ないなどの問題がある。

一方、超音波探傷試験を実施するためには、高度な熟練が必要であることと、試験結果が波形でしか把握出来ないため、直観的に理解するのが難しい。技能者の教育に役に立つように、試験結果を“見える化”することは困難である。

近年、デジタル技術の向上により、溶接継手内部欠陥の新たな非破壊検査機器として開発された超音波フェイズドアレイを使用すれば、現場で溶接施工後、直ちに欠陥の検査が出来るばかりか、結果の“見える化”も可能になる¹⁾。したがって、溶接品質の向上と溶接技能者の技量向上に寄与すると考えられる。

本報では、フェイズドアレイを造船現場で活用出来るようにするために、各種の溶接欠陥を内在した試験片を製作・供試して、フェイズドアレイの性能を検証した結果を報告する。

2. フェイズドアレイの概要

一般の超音波探傷の概要を Fig.1 に示す。超音波を送受信する探触子は振動子が 1 個であり、得られる情報も超音波受信信号の振幅を縦軸に、時間 (距離) を横軸にした波形画像 (A スコープ) が一般的である。

一方、フェイズドアレイによる探傷の探触子は、Fig.2 に示すように複数の振動子を有した構造 (アレイ状) になっている。その一つ一つから送信される超音波ビームを制御し、さらに受信信号をデジタル情報に変換するな

どして、欠陥を有する被検査対象物内部状況を、断面画像 (B スコープ) や平面画像 (C スコープ) などとして得ることが出来る²⁾。検証に使用したフェイズドアレイ (SIUI 社製: SIUI SyncScan, パルス周波数 2-10 MHz, パルス繰り返し周波数 100 Hz-20 kHz, Gain 0-80 dB, 素子数 16, 操作角度 30° ~ 90°, 走査速度: 狙い値 25 mm/s) を Fig.3 に示す。

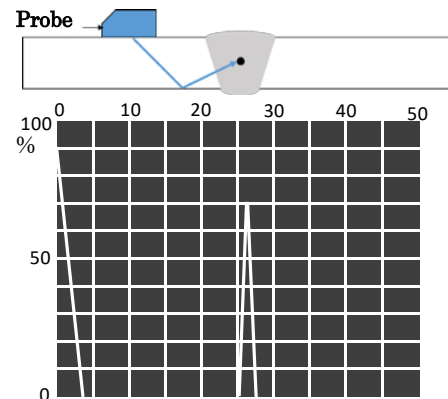


Fig.1 Outline of ultrasonic testing

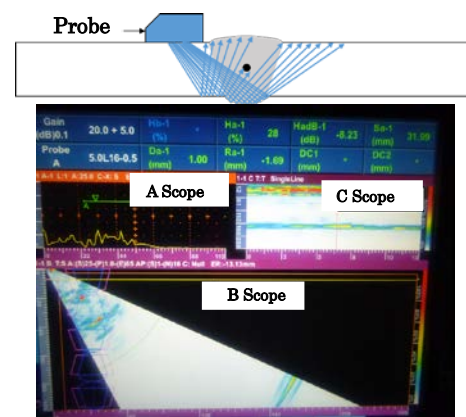


Fig.2 Outline of weld defects inspection using ultrasonic phased array



Fig.3 Phased array

3. フェイズドアレイの探傷性能検証用試験片

3.1 検証用試験片に使用した鋼板および溶接材料

フェイズドアレイ探傷性能検証用試験片に使用した4種類の鋼板すなわち、軟鋼板 (MS)、オーステナイト系ステンレス鋼板 (SUS316LN)、二相ステンレス鋼板 (SUS329J3L)、二相ステンレスクラッド鋼板 (SUS329J3L-Clad)の化学成分を Table 1 に、機械的性質を Table 2 に示す。さらに、試験片の溶接に使用した溶接材の化学成分を Table 3 に、機械的性質を Table 4 に示す。

Table 1 Chemical composition of test steel plates (wt %)

Steel Plate	Thick. t (mm)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	N
MS	15	0.17	0.24	0.85	0.014	0.002	—	—	—	—
SUS316LN	17.5	0.014	0.69	0.53	0.029	0.000	10.59	18.18	2.84	0.17
SUS329J3L	19	0.011	0.56	1.82	0.027	0.000	5.81	22.55	3.08	0.17
SUS329J3L-Clad*	14 (3+11)	0.012	0.32	0.91	0.024	0.000	5.43	22.23	3.20	0.18

* SUS329J3L Steel Plate: Thick. 3mm

Table 2 Mechanical properties of test steel plates

Steel Plate	Thick. t (mm)	Proof Stress Y.S. (N/mm ²)	Tensile Strength T.S. (N/mm ²)	Elongation El. (%)
MS	15	310	462	27
SUS316LN	17.5	381	663	52
SUS329J3L	19	619	783	32
SUS329J3L-Clad*	14 (3+11)	433	550	23

* Full-Thickness Tensile Test (14mm)

Test Specimen: JIS Z No.14B

Table 3 Chemical composition of welding wire (wt %)

Welding Wire	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
NSSW SF-1 *1	0.06	0.50	1.40	0.015	0.010	—	—	—	—	—
GFW 309MoL *2	0.025	0.60	1.23	0.018	0.002	13.16	22.82	2.88	0.09	—
GFW 329J3L *3	0.030	0.45	0.74	0.017	0.003	8.66	23.12	3.60	0.060	0.134

*1: JIS Z 3313 T49J0T1-1CA-UH5

*2: JIS Z 3323 TS309LMo-FC0

*3: JIS Z 3323 TS2209-FC0

Table 4 Mechanical properties of welding wire

Welding Wire	Proof Stress Y.S. (N/mm ²)	Tensile Strength T.S. (N/mm ²)	Elongation El. (%)
NSSW SF-1 *1	520	580	28
GFW309MoL *2	535	715	27
GFW329J3L *3	645	818	21

*1: JIS Z 3313 T49J0T1-CA-UH5

*2: JIS Z 3323 TS309LMo-FC0

*3: JIS Z 3323 TS2209-FC0

*4: Test Specimen: JIS Z No.1

3.2 欠陥を内在した突合せ溶接継手試験片

供試した欠陥を内在した突合せ溶接継手試験片の形状・寸法一例を、Fig.4 に示す。また、供試した試験片一覧を Table 5 に示す。検証に使用した欠陥を内在した試験片は、試験片 A (ブローホール)・試験片 B (スラグ巻き込み)・試験片 C (融合不良)・試験片 D (不純物混入)・試験片 E (板厚差・目違いあり)・(ブローホール)・試験片 F (ナックル・ブローホール)・試験片 G (縦割れ)・試験片 H (帯形平面きず)・(ビード オン プレート) および 試験片 I (横割れ) である。

代表例として、試験片 A (ブローホール) の溶接条件を Table 6 に、試験片 H (帯形平面きず)・(ビード オン プレート溶接) の溶接条件を Table 7 に示す。さらに、試験片 H の断面概略図を Fig.5 に示す。

供試した試験片の代表例として、試験片 A (ブローホール) を Fig.6 に、試験片 H (帯形平面きず)・(ビード オン プレート溶接) を Fig.7 に示す。

また、後述する検証が終了した後、供試試験片を切断して確認した断面のマクロ組織の代表例を、Fig.8~ Fig.10 に示す。想定した位置に溶接継手内部欠陥が内在していることが確認できた。

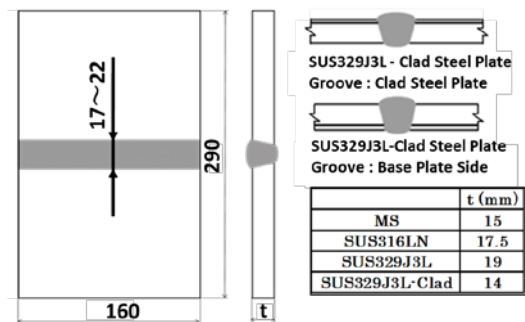


Fig.4 Shape and size of specimen A (Blow Hole)

Table 5 Specimen list

Specimen	No.	Steel Plate	Memo
Specimen A (Blow Hole)	A-1	Mild Steel	
	A-2	SUS316LN	
	A-3	SUS329J3L	
	A-4	SUS329J3L-Clad	Groove: Clad S. P. Side
	A-5	SUS329J3L-Clad	Groove: Base Plate Side
Specimen B (Slag Inclusion)	B-1	Mild Steel	
	B-1-2	Mild Steel	
	B-1-3	Mild Steel	
	B-2	SUS316LN	
	B-3	SUS329J3L	
	B-4	SUS329J3L-Clad	Groove: Clad S. P. Side
Specimen C (Lack of Fusion)	B-5	SUS329J3L-Clad	Groove: Base Plate Side
	C-1	Mild Steel	
	C-2	SUS316LN	
	C-3	SUS329J3L	
	C-4	SUS329J3L-Clad	Groove: Clad S. P. Side
Specimen D (Mingling of Impurities)	C-5	SUS329J3L-Clad	Groove: Base Plate Side
	D-1	Mild Steel	
	D-2	SUS316LN	
	D-3	SUS329J3L	
	D-4	SUS329J3L-Clad	Groove: Clad S. P. Side
Specimen E (Thickness Difference Misalignment) (Blow Hole)	D-5	SUS329J3L-Clad	Groove: Base Plate Side
	E-1	Mild Steel	
	E-2	SUS316LN	
	E-3	SUS329J3L	
	E-4	SUS329J3L-Clad	Groove: Clad S. P. Side
Specimen F (Angular Distortion) (Blow Hole)	E-5	SUS329J3L-Clad	Groove: Base Plate Side
	F-1	Mild Steel	
	F-2	SUS316LN	
	F-3	SUS329J3L	
	F-4	SUS329J3L-Clad	Groove: Clad S. P. Side
Specimen G (Longitudinal Crack)	F-5	SUS329J3L-Clad	Groove: Base Plate Side
	G-1	Mild Steel	
	G-2	SUS316LN	
	G-3	SUS329J3L	
	G-4	SUS329J3L-Clad	Groove: Clad S. P. Side
Specimen H (Strip Plane Defect) (Bead on Plate Weld)	G-5	SUS329J3L-Clad	Groove: Base Plate Side
	H-1	Mild Steel	
	H-2	SUS316LN	
	H-3	SUS329J3L	
	H-4	SUS329J3L-Clad	Thin Steel Plate Weld on Clad Steel Plate Surface
Specimen I (Transverse Crack)	H-5	SUS329J3L-Clad	Thin Steel Plate Weld on Base Plate Surface
	I-1-1	Mild Steel	
	I-1-2	Mild Steel	
	I-4-1	SUS329J3L-Clad	Clad Steel Plate Surface
Specimen TEST (Blow Hole)	I-4-2	SUS329J3L-Clad	Clad Steel Plate Surface
	TEST-1	SUS329J3L-Clad	Groove: Base Plate Side
	TEST-2	SUS329J3L-Clad	Groove: Base Plate Side
	TEST-3	SUS329J3L-Clad	Groove: Clad S. P. Side

S. P.: Steel Plate

Table 6 Welding parameters of specimen A
(Blow Hole)

Steel Plate (No.)	Welding Groove	Welding Wire	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
KA (A-1)		SF-1	190~240	24~30	17~21	14~24
SUS 316LN-315M (A-2)		GFW 309MoL	190~220	24~32	17~24	14~23
SUS 329J3L (A-3)		GFW 329J3L	190~220	24~32	17~24	14~23
SUS 329J3L-Clad (A-4)		1,2 Pass: SF-1 3,4 Pass: GFW 329J3L	190~240	24~30	17~21	14~24
SUS 329J3L-Clad (A-5)		GFW 329J3L	190~220	24~32	17~24	14~21

Table 7 Welding parameters of specimen H
(Strip Plane Defect)
(Bead on Plate Weld)

Steel Plate (No.)	Welding Groove	Welding Wire	Welding Current (A)	Arc Voltage (V)	Travel Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
KA (H-1)		SF-1	210~220	30~32	20~24	16~21
SUS 316LN-315M (H-2)		GFW 309MoL	210~220	30~32	18~22	17~23
SUS 329J3L (H-3)		GFW 329J3L	210~220	30~32	18~22	17~23
SUS 329J3L-Clad (H-4)		1,2 Pass: GFW 329J3L 3 Pass: SF-1	210~220	30~32	20~24	16~21
SUS 329J3L-Clad (H-5)		1,2 Pass: SF-1 3 Pass: GFW 329J3L	210~220	30~32	18~22	17~23

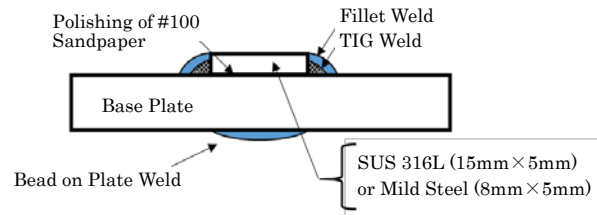


Fig.5 View of section for specimen H



A-1

A-2

A-3



A-4



A-5

Fig.6 View of specimen A (Blow Hole)

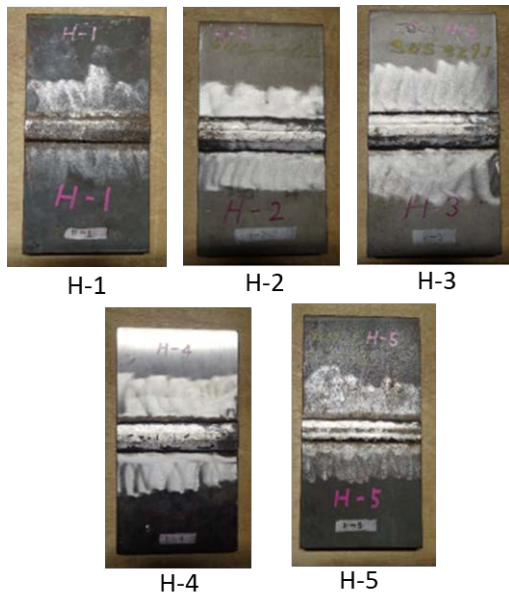


Fig.7 View of specimen H (Strip Plane Defect)
(Bead on Plate Weld)

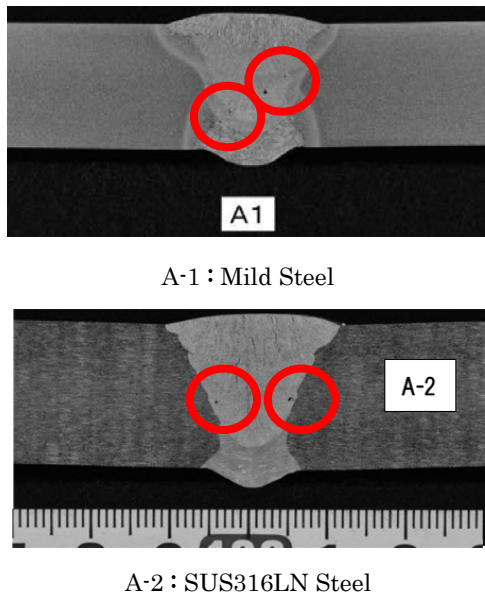
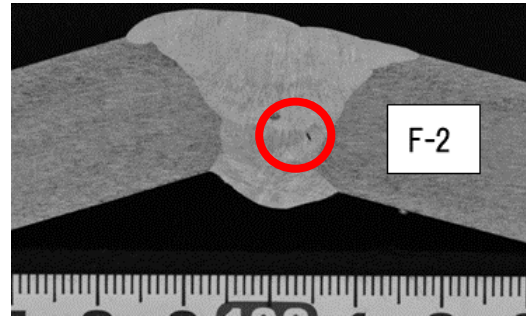


Fig.8 Macro-structures of specimen A-1 and A-2 cross section (Blow Hole)

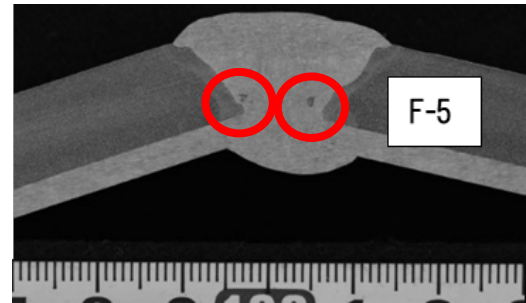
4. 欠陥を内在した突合せ溶接継手試験片の放射線透過試験結果

フェイズドアレイによる探傷結果を評価するために、供試した欠陥を内在した突合せ溶接継手試験片全てに対しての放射線透過試験を実施した。

代表例として、試験片 A-1 (ブローホール) の放射線透過試験結果のフィルムと、フィルムをスケッチした例を Fig.11 に示す。

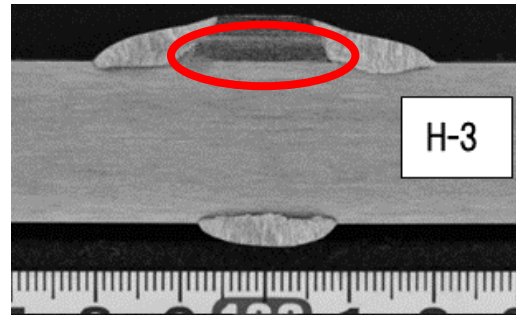


F-2 : SUS316LN Steel

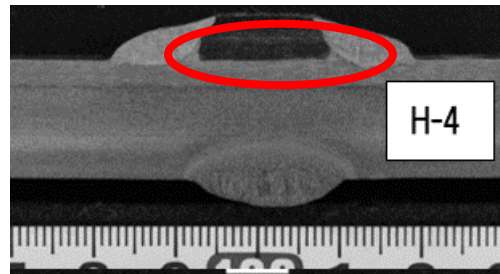


F-5 : SU329J3L-Clad Steel
(Groove : Base Plate Side)

Fig.9 Macro-structures of specimen F-2 and F-5 cross section (Angular Distortion) (Blow Hole)



H-3 : SUS329J3L Steel



H-4 : SUS329J3L-Clad Steel
(Groove : Clad Steel Plate Side)

Fig.10 Macro-structures of specimen H-3 and H-4 cross section (Strip Plane Defect) (Bead on Plate Weld)

なお、放射線透過試験は危険な作業であることに加え、試験終了後に現像する必要があるため、評価に時間を要し、その場で判定することが出来ない。さらに、放射線透過試験結果では溶接継手部に内在する欠陥の深さ方向の位置が特定できない。

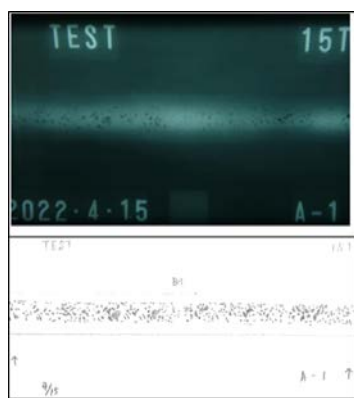


Fig.11 Result of radiographic test (Upper Part) and its sketch (Lower Part) (Specimen A-1)

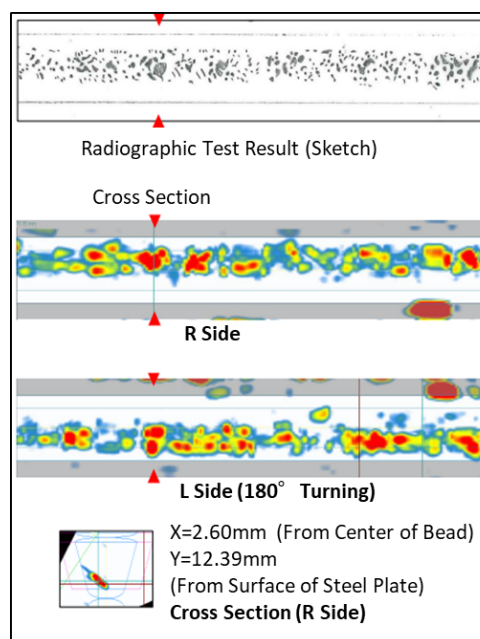


Fig.12 Relation between radiographic test result (Sketch) and ultrasonic phased array inspection (Specimen A-1)

5. 欠陥を内在した突合せ溶接継手試験片 溶接部のフェイズドアレイによる探傷 の検証結果

供試した全試験片のフェイズドアレイによる探傷結果と、放射線透過試験結果のフィルムのスケッチとを比較・評価した。

フェイズドアレイによる探傷結果と放射線透過試験結果のスケッチとを比較した例を、Fig.12に示す。

その結果、フェイズドアレイによる探傷の走査速度により、溶接線方向の溶接継手内部の欠陥位置に若干のばらつきがあるが、溶接線を平面で（溶接線を上から）見た C スコープでは、略同様に欠陥を判定出来ることが明らかになった。

また、放射線透過試験結果では判定出来ない溶接継手断面での欠陥の位置（深さ）は、マクロ試験結果の欠陥位置とフェイズドアレイによる探傷の B スコープ（溶接継手断面画像）結果の位置とが略一致したことから、フェイズドアレイによる探傷を利用すれば、溶接継手断面での欠陥の位置も判定出来ると考えられる。

ただし、フェイズドアレイによる探傷では、放射線透過試験結果と比較して、欠陥の範囲が多少広く認識されることが明らかになった。

また、先に Fig.5 に示したような、鋼板母材とその表面に密着した薄い鋼板との接触面、すなわち“帯板平面きず”（試験片 H）に対しては、放射線透過試験結果では認識出来ないが、フェイズドアレイによる探傷でも認識出来ないことが明らかになった。また、一般の超音波探傷試験でも認識出来なかった。

さらに、Fig.13 に示す“横割れ”（試験片 I-4-2）は、溶接ビードの表面模様と欠陥との区別がつき難いため、フェイズドアレイによる探傷は困難であることが明らかになった。目視検査または浸透探傷試験によって確認することが望ましい。

なお、一般の超音波探傷試験では、炭素鋼板溶接継手部とステンレス鋼板溶接継手部を、同一の機器で探傷することは出来ない。また、ステンレス鋼板溶接継手部の超音波探傷は難しいとされている。

しかし、フェイズドアレイによる探傷では、Fig.14 に示す通り、Gain を調整すれば同一機器で炭素鋼板溶接継手部とステンレス鋼板溶接継手部の探傷が可能であることが明らかになった。

また、ステンレス鋼板溶接継手部では、妨害エコーが検出されることを念頭に置いて、フェイズドアレイによる探傷を行う必要がある。



a) View of Transverse Crack



b) Result of Penetrant Test

Fig.13 Result of penetrant test (Specimen I-4-2) (Transverse Crack) (SUS329J3L-Clad Steel Plate Groove : Clad Steel Plate Side)

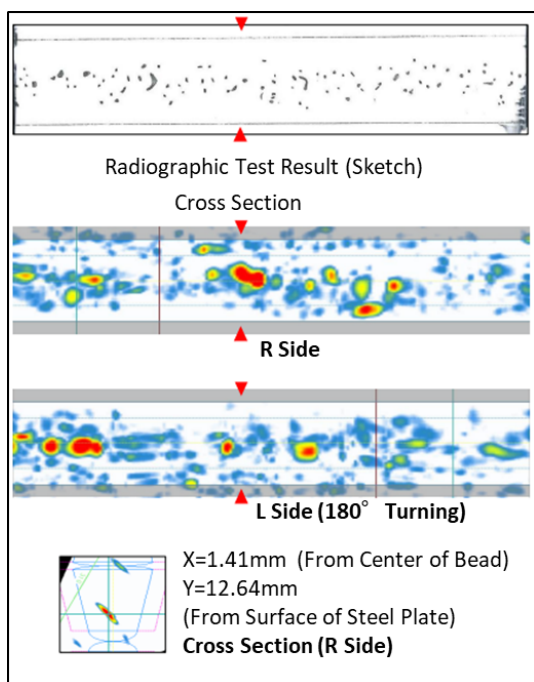


Fig.14 Relation between radiographic test result (Sketch) and ultrasonic phased array inspection (Specimen A-2)

6. 合否判定

以上述べてきた検証の結果、明らかに欠陥が存在する試験片では、横割れを除き放射線透過試験結果と同様、

フェイズドアレイによる探傷で欠陥の確認・判定が可能であることが明らかになった。

ただし、合否判定が際どい溶接欠陥に対しては、合否判定の線引きを行う必要がある。そこで、合否判定の線引きを行うための検証を行い、以下のような知見が得られた。

例えば、試験片 B-3 (Table 5 参照) での検証の結果、多少の妨害エコーが確認された。また、Fig.15 に示すように、B・C スコープだけでなく A スコープも活用し、A スコープでエコー高さ 30%を下限値とし、30%を超えれば、溶接欠陥として認められることが明らかになった。さらに、欠陥の位置は、A・B・C スコープを連携させて確認すれば特定出来ることが明らかになった。

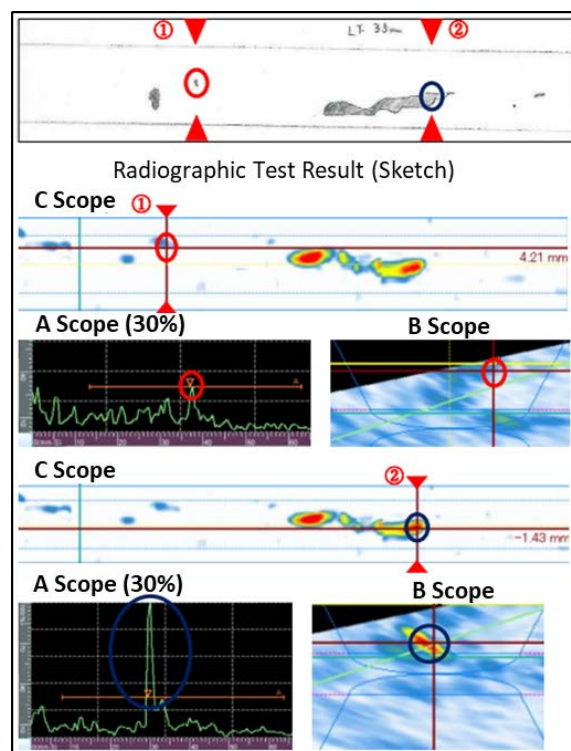


Fig.15 Relation between radiographic test result (Sketch) and ultrasonic phased array inspection (Specimen B-3)

さらに、試験片 TEST-1 (Table 5 参照) (直径 1mm×1 個のブローホールのみで合格になった試験片) での検証の結果、溶接欠陥が微小であるため、Fig.16 に示すように、B・C スコープのみでは判定が難しく、A スコープも活用することが望ましいことが明らかになった。

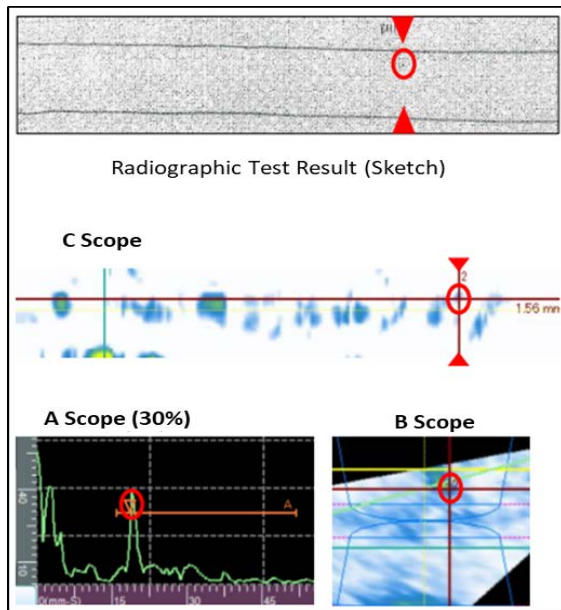


Fig.16 Relation between radiographic test result (Sketch) and ultrasonic phased array inspection (Specimen TEST-1)

さらに、欠陥の位置はA・B・Cスコープを連携させて確認すれば特定出来る。

以上のような検証を踏まえて、合否判定が際どい溶接継手内部欠陥を、造船現場で即断するための手順を以下のように定めた。なお、本合否判定基準は、一般財団法人日本海事協会 鋼船規則の放射線透過試験を参考にした³⁾。

- ① フェイズドアレイにより探傷を行う場合、画面にA・B・Cスコープを表示させる。
- ② Aスコープのエコー高さ下限を30%とする。したがって、Aスコープのエコー高さが30%を超える場合は、欠陥と認められる。
- ③ Aスコープのエコー高さが30%を超える欠陥が2個以上あった場合は、不合格とする。
- ④ Aスコープのエコー高さが30%を超える欠陥が1個であっても、Cスコープでの欠陥長さが5mm以上の場合は、不合格とする。
- ⑤ 溶接欠陥の位置(深さ)は、BスコープとCスコープで確認する。
- ⑥ 炭素鋼板、ステンレス鋼板およびステンレスクラッド鋼板いずれも、Gainは28dBで探傷可能である。

7. まとめ

以上のフェイズドアレイによる探傷の検証結果から、概略、以下の知見が得られた。

- ① フェイズドアレイ探傷により、放射線透過試験結果と同様、溶接欠陥を確認出来ることが明らかになった。
- ② フェイズドアレイによる探傷では、放射線透過試験では確認出来ない溶接継手断面での欠陥位置も確認出来る。ただし、放射線透過試験結果では、ある程度の欠陥の種類は判別出来るが、フェイズドアレイによる探傷では、欠陥の種類判別は困難である。
- ③ フェイズドアレイによる探傷では、溶接継手の両側を走査することが望ましい。手前の欠陥を探傷した場合、奥の欠陥を探傷出来ない可能性があるからである。
- ④ フェイズドアレイによる探傷では、Gainを調整すれば、同一機器で軟鋼板溶接継手部とステンレス鋼板溶接継手部の探傷が可能である。

以上述べてきた検証結果により、合否判定が際どい溶接継手内部欠陥を、造船現場で即断出来る基準を決めることができた。

さらに、フェイズドアレイによる探傷によって溶接継手内部が確認出来ることになり、溶接品質が保証出来るだけでなく、“見える化”により溶接技能者の技量向上にもつながると考えられる。

謝辞

本研究実施に当たり、種々有益な御意見を戴きました、一般財団法人日本海事協会 技術研究所 福井 努 主管殿、材料艙装部 松本 和幸 主管殿、沢登 寛 技師殿に、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本工業出版：超音波フェイズドアレイ技術－基礎編－最新版，(2020)。
- 2) 日本工業出版：超音波フェイズドアレイ技術－実技・応用編－最新版，(2021)。
- 3) 一般財団法人日本海事協会：鋼船規則 M編 附属書，(2021)，pp.25-29。