



固相接合を用いた 電磁非破壊検査のための模擬応力腐食割れ試験体製作技術

Fabrication of imitative stress corrosion cracking specimens suitable for
electromagnetic nondestructive evaluations using solid state bonding

東北大学量子エネルギー工学専攻	遊佐 訓孝	Noritaka YUSA	Member
東北大学流体科学研究所	内一 哲哉	Tetsuya UCHIMOTO	Member
東北大学流体科学研究所	高木 敏行	Toshiyuki TAKAGI	Member
東北大学量子エネルギー工学専攻	橋爪 秀利	Hidetoshi HASHIZUME	Member

This study proposes a method to fabricate an artificial defect that is almost identical to stress corrosion cracking from the viewpoint of electromagnetic nondestructive evaluations. The key idea is to realize a region having electrical resistance embedded inside a conductive materials using solid state bonding. A rough region is introduced into the surface of the materials to be bonded so that the region is partially bonded to realize electrical resistance. Experimental demonstrations are carried out using type 316L austenitic stainless steels. Eddy current tests and subsequent numerical evaluations are conducted to discuss the validity of the proposed method.

Keywords: stress corrosion crack, SCC, performance demonstration, nondestructive evaluation, electrical resistance, diffusion bonding

1. 緒言

原子力プラントの高経年化対策において、応力腐食割れ対策は最重要課題の一つに挙げられている。応力腐食割れ対策として、応力腐食割れの発生メカニズムの解明および耐応力腐食性の高い材料開発の重要性は言うまでもないが、それらと併せて、応力腐食割れを早期に発見し、その形状を評価するための非破壊検査技術の開発もまた、欠かすことができない研究課題である。

現状、応力腐食割れの形状評価には超音波探傷技術が用いられているが、保全活動の高度化・効率化という観点から、他の物理現象に立脚した非破壊検査技術、その中でも特に超音波技術とは相互補完関係にあると考えられる電磁現象を利用した非破壊検査技術に関する検討が多く行われている。しかしながら、実機適用に向けては依然として課題が多いというのが実情である。

その最大の理由の一つに、人工スリットや疲労割れと応力腐食割れでは、その電磁非破壊検査に対する応答が大きく異なっているということが挙げられる。即ち、各種技術開発においてはその形状の制御が容易である人工スリットや疲労割れが用いられることが多いのだが、それらに対して良好な検出能・サイジング能が確認されたことをもって、応力腐食割れに対して同程度の性能を発揮することを担保するというこ

とは必ずしも妥当ではない。腐食環境下で人工的・加速試験的に応力腐食割れを導入することは可能であるが、形状の制御が困難である上に、必ずしも実機のきずとは以通ったものとはならず、また必要な費用と時間も大である等の問題がある。形状の制御が比較的容易である疲労割れを圧縮することにより応力腐食割れを模擬するという試みも行われているが、超音波探傷という観点からは応力腐食割れに近い信号が得られるようになるとの報告もあるものの[1]、きずの幅が非破壊検査信号に及ぼす影響は当該非破壊検査技術がどのような物理現象に立脚しているかに依存し[2]、一般的には電磁非破壊検査の観点からはきずの圧縮により応力腐食割れを模擬することは困難とされている[3] [4]。固相接合を用いて材料内部に任意の空洞を設けるという手法も提唱されているが[5]、同様の理由に電磁非破壊検査の観点からは応力腐食割れの模擬性は不十分である。

本研究は以上の背景により実施されたものであり、電磁非破壊検査の観点から応力腐食割れと等価とみなすことができる模擬試験体を、固相接合を用いて製作する技術の開発に関するものである。より具体的には、機械加工により適当な表面粗さを局所的に設けた面を接合することにより、材料内部に応力腐食割れと同等の電磁気的特性不連続部を設けることを試みる。以下続く各節において、試験体の製作手順及び渦電流探傷法の観点からの妥当性検証試験結果を述べる。

2. 固相接合による模擬応力腐食割れ試験体製作の試み

上述のように、本研究においては接合面に局所的に機械加工による粗さを設けた材料を固相接合により接合することで、電磁非破壊検査の観点から応力腐食割れと等価である模擬試験体の製作を試みる。接合により、粗さ部の凸部が接合、凹部が非接合となることで、電磁非破壊検査の観点から応力腐食割れの特性付ける、部分的な電氣的接触という特性を再現することができると期待される。

本研究において用いた材料は、20 mm×40 mm×50 mm の SUS316L 鋼である。全て同一ロットであり、材料の引張強度は 534 N/mm²、耐力は 239 N/mm²、そして化学組成は、C:0.09%、Si:0.48%、Mn: 0.86%、P: 0.026%、S 0.01%、Ni: 12.12%、Cr: 17.59%、Mo: 2.1% (いずれも重量濃度) である。接合面は 20 mm×50 mm の面とし、接合面全体を 220, 600, 1200 番の研磨紙による研磨および 6 μm、1 μm のバフ研磨にて鏡面に仕上げた後、接合後材料中央部に表面さび相当の接合不良領域が発生するよう、片方の接合材の接合面にのみ、ハンドグラインダーを用いて長さ 20 mm、深さ 7 mm の矩形領域に凹凸加工を行った。

本研究において製作した 11 体の試験体の接合面凹凸部の粗さを Table 1 にまとめる。粗さの測定は株式会社ミツトヨ製粗さ計 SJ-210 を用いて行なった。Ra、Rq、Rz は凹凸部の粗さ曲線 (R 曲線) より算出された算術平均高さ、二乗平均平方根高さ、そして最大高さであり、評価時の評価基準は ISO1997、評価長さは 15 mm、測定線数は 5 本で

Table 1 Roughness of the prepared specimens

ID	Ra	Rq	Rz	d
TP_A	3.7-5.2	4.7-6.6	27-33	13.8
TP_B	5.5-5.9	7.1-7.3	33-37	14.8
TP_C	6.8-13	8.8-16	41-73	23.6
TP_D	15-19	18-25	68-95	51.9
TP_E	13-17	16-21	66-81	55.2
TP_F	11-14	13-18	50-70	55.6
TP_G	19-23	23-27	87-99	67.9
TP_H	18-23	22-27	77-103	72.8
TP_I	21-33	25-39	93-141	84.3
TP_J	13-19	18-22	64-81	88.7
TP_NC	~0.02	~0.02	~0.1	---

(unit: μm)

ある。d は凹凸加工部と非加工部の境界を含む断面曲線 (P 曲線) より算出された、鏡面部と凹凸部平均高さとの段差である。尚、試験体 NC は比較のために準備したものであり、接合材の接合面には凹凸加工を施さず、全面鏡面のまま接合したものである。

接合試験は、東京真空製ホットプレス兼高温炉 GP-2300 を用いて実施した。予備試験の結果に基づき、接合条件は、圧力 11.5MPa、1100°C、保持時間 30 分である。より具体的には、材料を炉内に装填し、加圧の後、20°C/分にて 1100°C まで昇温した後、1100°C で 30 分保持、その後約 100°C まで炉冷の後、炉から材料を取り出し、室温まで空冷としている。炉内雰囲気は工程を通じて概ね 10⁻²Torr 以下の真空とした。

接合試験後、接合時の材料のずれに起因する表面の段差を除去するため、試験体の表面を 2 mm 削除した。これにより、接合後、幅 50 mm、長さ 80 mm、厚み 20 mm 試験体の中央部に、凹凸の加工に起因した、試験体幅方向長さ 20 mm、深さ 5 mm の矩形領域が不完全接触部として導入されたことになる。

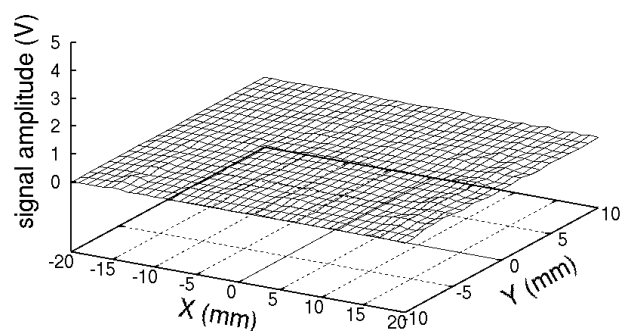
3. 検証試験

3.1 渦電流探傷試験

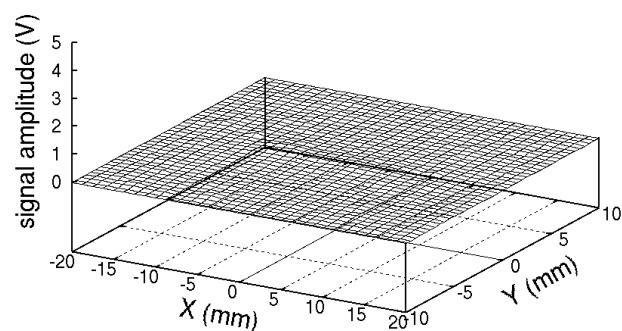
製作した模擬応力腐食割れ試験体の妥当性評価のための渦電流探傷試験を実施した。測定に用いた渦電流探傷装置はアスワン電子製渦電流探傷装置 assort-PC II であり、探傷に用いたプローブは自己誘導差動型のパンケーキ型プローブである。プローブは内径 2 mm、外径 5 mm、高さ 2 mm のパンケーキコイル 2 体が 10 mm 離れて同軸に配置された構造となっている。両者のインピーダンスの差がプローブ信号として出力される。探傷時はコイル軸が被検査面に対して垂直になるようにプローブを配置し、自動 XY ステージによる走査を行なった。励磁周波数は 50 kHz、リフトオフは 0.2 mm である。

接合面に凹凸を施さずに接合を行った試験体である TP_NC の表面を 2 次元走査した場合の渦電流探傷信号振幅の空間分布を Fig. 1(a) に、また接合面に施した粗さの度合いが最も小である TP_A と最も大である TP_J、そして中程度である TP_E からの同様の信号振幅分布を Fig. 1(b), (c), (d) に示す。図中 X 軸が接合面に対して平行方向であり、Y=0 の面が接合面に相当する位置である。探傷装置の出力信号は、深さ 5 mm、長さ 10 mm、幅 0.3 mm の矩形人工スリットからの最大信号が、振幅 10 V、位相角 45 度となる

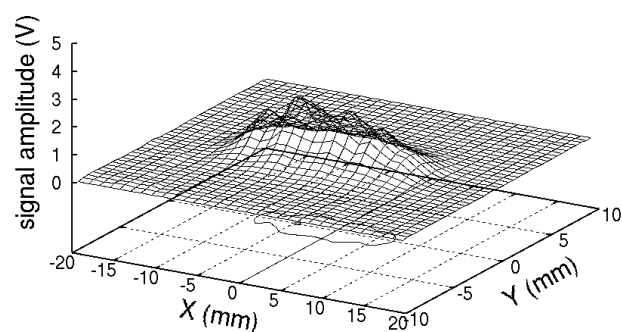
ように調整されている。Fig. 1(a)においては有意な信号を確認することが出来ず、よって接合面自体の電磁気的な特性は母材と同等であると言うことが出来る。TP_A の接合部からは有意な信号を認めることは困難であるが、TP_E と TP_J の接合部からは振幅がそれぞれ約2Vと5Vの信号が確認することができる。TP_E、TP_J の信号共にその空間分布も長さ20mmのきずという観点からは妥当なもので



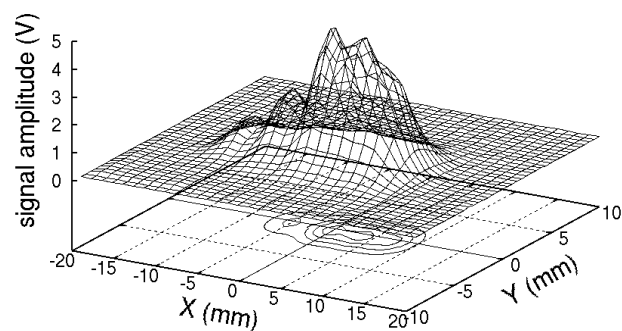
(a) TP_NC



(b) TP_A



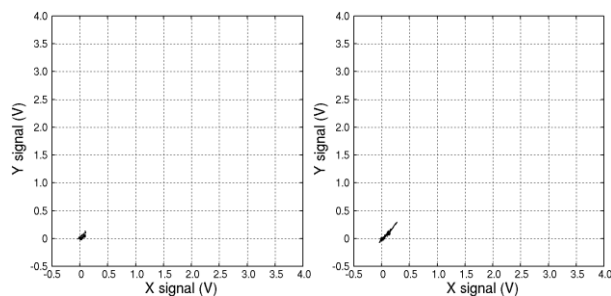
(c) TP_E



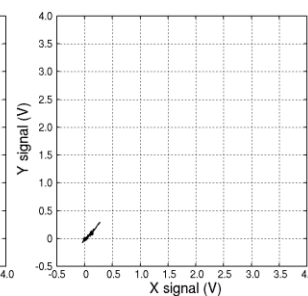
(d) TP_J

Fig. 1 Distribution of the amplitude of measured eddy current signals.

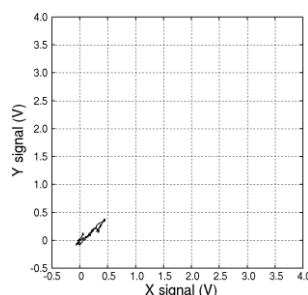
あり、また粗さとともに信号振幅が増大していることから、接合面に施した凹凸に起因する信号と判断される。



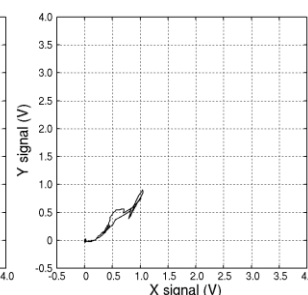
(a) TP_A



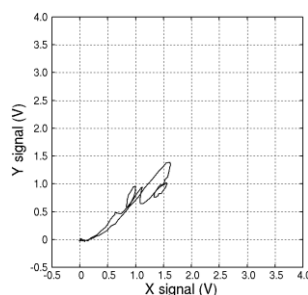
(b) TP_B



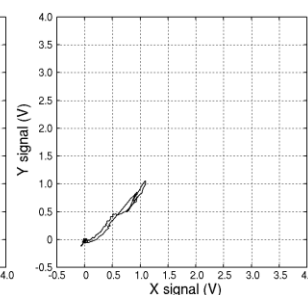
(c) TP_C



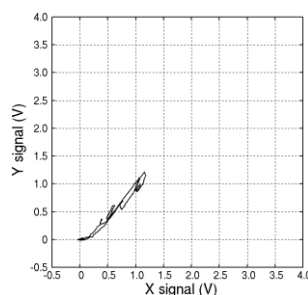
(d) TP_D



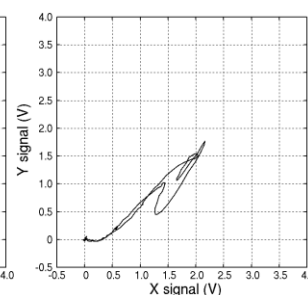
(e) TP_E



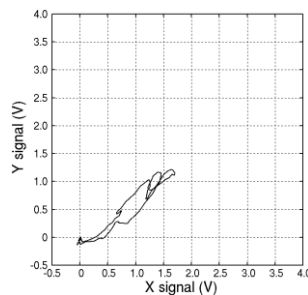
(f) TP_F



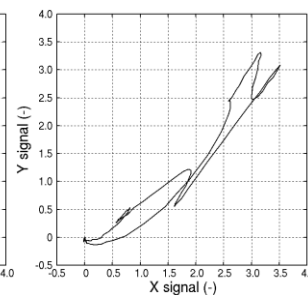
(g) TP_G



(h) TP_H



(i) TP_I



(j) TP_J

Fig. 2 Trajectories of signals when the probe scans along the bonded surface.

続いて、接合面直上を接合面に沿ってプローブを走査させた場合に得られた探傷信号のリサージュを Fig. 2 に示す。前述のように位相角 45 度、振幅 10V が同一深さの人工スリットからの信号最大値であるが、いずれの信号も位相角は人工スリットからの信号のものと似通っているものの、振幅という観点からは、最も大である TP_J からの信号でも、人工スリットのものの半分程度となっている。

実際の応力腐食割れの性状はその発生箇所、発生過程により様々であり、一概にその渦電流探傷信号を議論することは現時点では困難である。一例として、文献[6]においては、実機 PWR の蒸気発生器伝熱管にて確認された SCC の渦電流探傷信号と同形状の人工スリットからのものの信号比較が行われており、両者の位相角はほぼ変わらないものの、SCC からの信号の振幅は人工スリットからのものの約 4 割であったと述べられている。プローブ形状、使用周波数などの差異はあるものの、今回製作した試験体では、TP_GJ から、概ねそのような信号を確認することが出来る。

3.2 数値解析による評価

本研究にて製作した試験体の応力腐食割れの模擬性を評価するための数値解析を実施した。

ここでの解析に用いたのは、A-Φ法及び有限要素法—境界要素法併用法に基づく 3 次元渦電流解析プログラム [7] である。用いた要素は 6 面体節点要素、試験体の有限要素分割数は 10,260 要素 11,780 節点である。母材の導電率は 1.35 MS/m、比透磁率は 1.0 と設定した。解析では接合面の凹凸に起因する電磁気的特性不連続領域を、長さ 20 mm、深さ 5 mm、一定幅かつ一定の内部導電率を有する、きず長さ方向 20 要素、きず深さ方向 10 要素、そして幅方向 1 要素から成る矩形領域としてモデル化した。きず信号の校正条件は探傷試験と同様である。

きず領域の内部導電率を 0 とし、領域の幅のみを変化させた場合の探傷信号振幅最大値の変化の様子を Fig. 3 に示す。図より、本研究にて用いた渦電流プローブは、概ね幅が 0.1 mm 以下であればきずの幅が探傷信号に及ぼす影響は小さいということが確認できる。これは他のパンケーキ型のプローブを用いたきず幅に関する報告例[8] [9] とも合致した結果であり、探傷試験において測定された渦電流探傷信号振幅は最大でも 5 V 程度ということは、きず領域の幅以外の要因、即ちきず領域を横切って流れる渦電流が存在していたことを示した結果となっている。一般的に疲労割れや人工スリットと応力腐食割れの電磁

非破壊検査の観点からの最大の差異は、きずを横切って流れる電流の有無であるとされており[10]、本研究により提唱する手法が模擬応力腐食割れ試験体の製作手法として妥当であることを示唆した結果となっている。

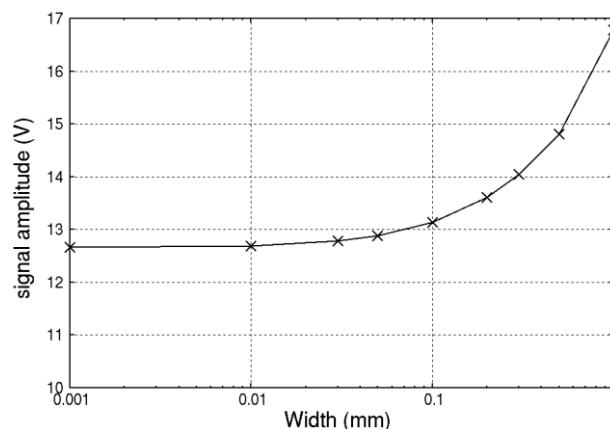


Fig. 3 Effect of crack width on the maximum signal amplitude.

続いて、Fig.3 に示した結果に基づき、きず領域の幅を 0.01 mm とした場合に、探傷試験結果を最もよく再現する、きず領域内部導電率の値の評価を行った。解析に用いたパラメータの値を Table 2 に示す。これらの値について数値解析を行ない、得られた数値の内挿を行うことで、任意の導電率に対する探傷信号を計算し、

$$\{ (V_x^{\text{exp}} - V_x^{\text{simu}})^2 + (V_y^{\text{exp}} - V_y^{\text{simu}})^2 \}^{1/2} \quad (1)$$

を最小化する導電率の値を評価した。ここで $(V_x^{\text{exp}}, V_y^{\text{exp}})$ 、 $(V_x^{\text{simu}}, V_y^{\text{simu}})$ はそれぞれ、探傷試験及び数値解析により得られた探傷信号の最大値の X 及び Y 成分である。即ち、ここでの評価においては、きず信号の最大値のみを評価対象としている。

信号が明瞭でなかった TP_A 以外の試験体からの信号について、(1)式を最小化する導電率の値を Table 3 にまとめる。表中 R とあるのは、きず領域の幅(0.01mm)を得られた導電率の値(%母材導電率)で除した、いわばきずの等価的な抵抗値に相当する値である。応力腐食割れの適切な数値モデルに関しては現状統一した見解は得られていないのだが、近年このような幅を導電率で除した値で議論が可能であり[11]、またその際の値は最小で 0.005 (mm/%母材導電率) 程度であると報告されている。Table 3 より、今回製作した試験体の大半がこの基準を満たしていることが確認できる。

Table 2 Parameters for the numerical simulations

Parameter	Value
Conductivity (% σ_0^*)	0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10

* σ_0 : conductivity of base material

Table 3 Results of the simulations

Specimen ID	Conductivity (% σ_0^*)	R (mm/% σ_0)
TP_B	7.20	0.00139
TP_C	4.59	0.00218
TP_D	1.84	0.00544
TP_E	1.07	0.00935
TP_F	1.71	0.00585
TP_G	1.57	0.00637
TP_H	0.79	0.01266
TP_I	1.12	0.00893
TP_J	0.35	0.02857

* σ_0 : conductivity of base material

前述のように、定性的には接合面に施した凹凸の凸部が接合、凹部が不接合となったことにより、部分的な電気的接触を有する領域が実現されたと考えられる。ここで、TP_A の接合面から得られた探傷信号が極めて微弱であったことから、TP_A の接合面に施した凹凸の大半が接合したと考え、鏡面部との段差が TP_A の凹凸部の $(d+R)/2$ 以下、即ち $28.8 \mu\text{m}$ 以下である領域が接合すると仮定する。このとき、他の試験体について、粗さ測定時の R 曲線において、高さが $d-22.8 \mu\text{m}$ 以上であった測定点数比の逆数と上記 R の値の関係を示したものが Fig. 4 である。実際には誘導される渦電流は表層部に集中するため、きず領域全体における接触部の割合できずの抵抗を評価することは定量的には不適切であるが、今回の試験結果の範囲では両者の間に強い相関を確認することが出来、これは接合面に施した凹凸による部分的な接触に起因する導電率の発生を支持する結果となっている。

尚、Fig. 1 において X=0 の面に対する対称性は高くはないことから、本研究において製作した試験体内部の模擬きずのモデル化に際しては、内部で一様な導電率とすることは実際には必ずしも適切ではないとも考えられる。ただし、これは本研究においては接合面の機械加工がハンドグラインダーによるものであったために、局所的に

は粗さのばらつきが大であったことにも起因すると考えられ、今後より微細かつ定量的に制御された加工とすることで、導入されるきず性状の定量的な制御が可能になると考えられる。

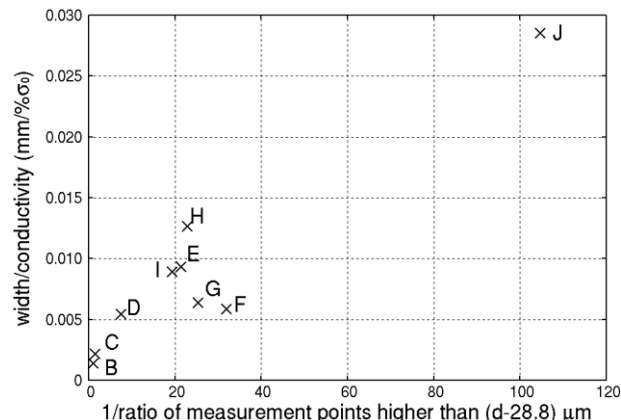


Fig. 4 Relationship between machined roughness and equivalent resistance of introduced simulated cracks

4. 結言

固相接合を用いて材料内部に電磁気的物性値不連続領域を設けることで、電磁非破壊検査の観点から応力腐食割れを模擬する試みを行った。接合面に局所的な凹凸を施した後に接合を行うことにより、材料内部に電磁気的物性値不連続領域を設けることが可能であること、電磁非破壊検査の一種である渦電流探傷法の観点からは、このような技法により、応力腐食割れを模擬する試験体の製作が可能であることを確認した。

実際の応力腐食割れは通常結晶粒に沿って進展するため、その電磁気的特性は厳密には結晶粒以下の空間分布でばらついていると考えるのが妥当である。しかしながら、一般的な電磁非破壊検査は結晶粒レベルでの空間分解能は有しておらず、信号に影響をあたえるのはよりマクロな、空間的に平均化された電磁気特性である。本研究により、比較的単純にそのような電磁気的特性を材料内部に実現できること、またその値も定量的に制御することが可能であることが確認されたという事が出来る。

本技術は機械加工のみで実現が可能であることから、その性状を高精度に制御が可能でありつつも、従来技術と比べて遥かに安価かつ短時間に試験体の製作が可能であるという特徴を有している。本研究においては固相接合法として拡散接合を用いたが、熱間等方圧接合 (HIP 接合) を適用することにより、同一の手順で複雑形状試

験体の製作も可能である。性状を制御した試験体を安価に提供することが可能であることは、非破壊検査技術開発及びメカニズム解明のみならず、保全の観点からは検査員の技能研鑽等にも有益であり、原子力プラントの保全高度化に資するところが大きいと考えられる。

参考文献

- [1] PH. Savahn, K. Hogberg, “Defect simulation for interdendritic stress corrosion cracks in Alloy 182 welds, CD-ROM Proceedings of the 16th World Conference on NDT (available at NDT.net)
- [2] R. Clark, WD. Dover, LJ. Bond, “The effect of crack closure on the reliability of NDT predictions of crack size”, *NDT International*, 20, 269-275 (1987).
- [3] N. Yusa, S. Perrin, K. Mizuno, Z. Chen, K. Miya, “Eddy current inspection of closed fatigue and stress corrosion cracks”, *Measurement Science and Technology*, 18, 3403-3408 (2007).
- [4] CCH. Lo, N. Nakagawa, “Effects of dynamic and static loading on eddy current NDE of fatigue cracks”, *AIP Conference Proceedings*, 1096, 355-362 (2009).
- [5] 松井, 糸賀, 緒方, 平澤, 廣瀬, 裏垣, “超音波探傷試験のための模擬欠陥試験体の製作”, *軽金属溶接*, 28, 431-438 (1990).
- [6] N. Yusa, Z. Chen, K. Miya, “Quantitative profile evaluation of natural cracks in a steam generator tube from eddy current signals”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 12, 139-150 (2000).
- [7] 坪井, 内藤, “実践数値電磁界解析法”, 養賢堂 (1995)
- [8] F. Villone, “Simulation of thin cracks with finite resistivity in eddy current testing”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 36, 1706-1709 (2000).
- [9] N. Yusa, W. Cheng, T. Uchimoto, K. Miya, “Profile reconstruction of simulated natural cracks from eddy current signals”, *NDT&E International*, 35, 9-18 (2002).
- [10] N. Yusa, S. Perrin, K. Mizuno, K. Miya, “Numerical modeling of general cracks from the viewpoint of eddy current simulations”, *NDT&E International*, 40, 577-583 (2007).
- [11] N. Yusa, H. Hashizume, “Evaluation of stress corrosion cracking as a function of its resistance to eddy currents”, *Nuclear Engineering and Design*, 239, 2713-2718 (2009).

(平成22年9月16日)