

# 渦電流探傷法による環境遮断封止溶接部の 疲労き裂検出及び残肉量推定について

Detection of embedded fatigue cracks in weld overlay and  
evaluation of minimum thickness of the weld by means of eddy current testing

普遍学国際研究所	遊佐 訓孝	Noritaka Yusa	Member
普遍学国際研究所	ラディスラブ ヤノーセック	Ladislav Janousek	
普遍学国際研究所	ミハイ レビカン	Mihai Rebican	
普遍学国際研究所	陳 振茂	Zhenmao Zhen	Member
普遍学国際研究所	宮 健三	Kenzo Miya	Member
関西電力	千種 直樹	Naoki Chigusa	Member
関西電力	伊藤 肇	Hajime Ito	Member

**Abstract:** This study evaluates the applicability of eddy current testing to the detection and sizing of fatigue cracks embedded in Inconel weld overlay. Welded plate specimens, which model head penetration welds and their weld overlay, are fabricated, and fatigue cracks are artificially introduced into the specimens. Eddy current inspections are performed using a uniform eddy current probe driven with 10 kHz, and all of the fatigue cracks are detected with clear signals. Subsequent numerical inversions estimate the minimum thicknesses of the weld overlay are 1.47, 2.17, and 2.23 mm, whereas true thicknesses revealed through destructive testing are 1.51, 3.25, and 2.10 mm, respectively. Whereas potential drop testing and ultrasonic testing are also performed, eddy current testing provides the best estimation.

**Keywords:** nuclear power plant, non-destructive testing, weld overlay, fatigue crack, head penetration, alloy 600

E-mail: yusa@iiu.co.jp

## 1. 緒言

加圧水型原子力プラント上蓋貫通部J溶接部の健全性の確保は、近年の原子力発電所の保全活動における最重要事柄の一つとなっている。当該部に応力腐食割れが確認された場合、必要に応じた上蓋の交換、もしくは補修が行われることになる。しかしながら、割れ発見後直ちに炉容器上蓋を交換することは電気事業者に多大な負担を強いるものである。そのため、適切な補修により、健全性を確保した状態である程度の期間利用を続けることが検討されている。

現状では、当該部に応力腐食割れが確認された場合の補修方法として、表面の割れを690系ニッケル基合金溶接金属にて封止し、1次冷却材の漏えいを防止するとともに、1次冷却材中雰囲気における応力腐食割れを停止させる溶接による補修が実施されている。

補修後のき裂進展は、応力腐食割れが進展したき裂面が1次冷却材から遮断されるために、Fig. 1に示すような大気中のき裂進展を考える。

現在原子力プラント内の大半の構造物は超音波探傷法を用いて検査が行われているが、超音波探傷法は残肉量の小さい割れに対する感度が低く、またインコネル系の溶接金属は超音波の散乱が特に著しいという問題がある。そのため、超音波探傷では当該部に発生した疲労割れの検出、および割れが発生していることが確認された場合の最小残肉量の推定が困難であることが予想される。

以上のような現状を踏まえ、本研究は封止溶接部の健全性評価に対する、渦電流探傷法の適用性について検討する。渦電流探傷法は、従来は溶接部に対しては適用が困難であり、また主として開口欠陥の位置特定のための手法であると考えられてきた。しかしながら、近年の技術開発の結果、溶接ノイズの影響を受けづらい

各種プローブが開発されてきており、また数値解析を援用することで得られた探傷信号から割れの形状を推定することも可能であることが明らかとなってきた[1, 2]。前述のようにインコネル溶接部は超音波探傷においては大きなノイズ源となるが、電磁気的特性の変化は比較的小さいため、当該部の検査手法として渦電流探傷法は有効であることが期待できる。

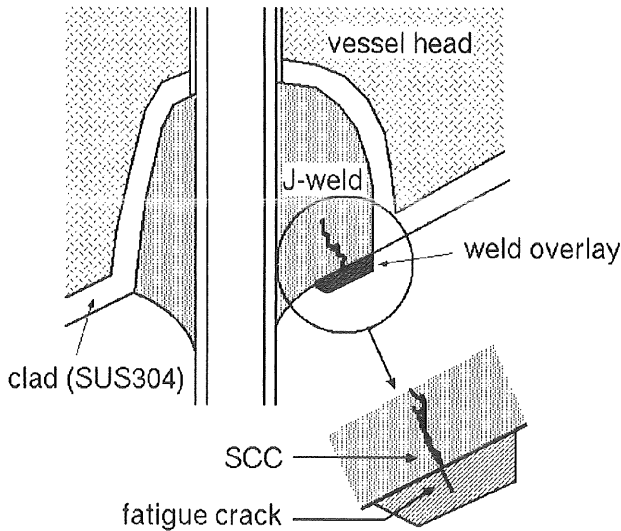


Fig. 1 Configuration of the problem

## 2. 試験体の設計と製作

### 2.1 溶接平板試験体の製作

本研究は上蓋貫通部のJ溶接部に施した封止溶接部に発生した疲労割れを主たる対象とする。当該部を厳密に模擬するためには上蓋内面の曲率を考慮する必要があるが、本研究の目的は渦電流探傷法の適用性評価であり、通常渦電流探傷法では構造物の極めて局所的な情報が得られるものであることを考慮すると、そのような形状の影響は小さいものと考えられる。よって、ここでは Fig. 2 に示すような溶接平板試験体を製作し、これを用いて評価検討を行うこととした。

試験体は、上蓋内面クラッド溶接を模擬した SUS309 材と貫通部を模擬した SUS316 材を突合せ溶接したものにインコネル 690 系合金で溶接を施した、厚さ約 10 mm の平板試験体である。溶接金属の材料特性は特に重要であると考えられたため、実機で用いられ

ているものと同等の材料を用いて、溶接を行った。いずれの溶接にも自動 TIG を用いており、また溶接部の表面には溶接後グラインダー加工などの平滑化処理は施していない。それに対し、実機での溶接の表面には平滑化処理を施すとされている。よって、本試験体の探傷試験においては表面の凹凸によるノイズが実際よりも大きなものとなると予想され、信号対ノイズ比という観点からは安全側より評価が行われると考えられる。

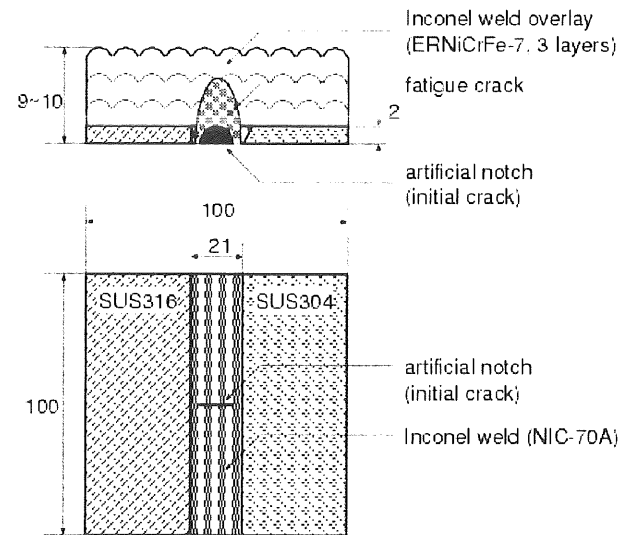


Fig. 2 Plate specimen fabricated in this study

このような溶接平板試験体を計 5 体製作した。

### 2.2 疲労割れの導入

製作した溶接平板試験体に対し、突合せ溶接面側（溶接を施したのと反対側）に疲労割れを導入した。割れの発生箇所の制御のため突合せ溶接金属内にはあらかじめ人工ノッチを施し、疲労試験機により繰り返し引っ張り荷重を加えることで、この人工ノッチを予き裂として疲労割れを進展させた。割れ進展のモニタリングをポテンシャルドロップ法により行い、5 体の試験体それぞれに加工した疲労割れの深さがばらつくように試験条件は調整している。

試験終了後溶接面側に浸透探傷試験を施した結果、2 体の試験体は割れが溶接面側まで貫通してしまっていることが確認された。それ以外の試験体に対しては超音波探傷法（縦波 60 度の斜角探傷試験）により最小残肉厚の測定を

行い、割れの深さがそれぞれ異なっていることを確認した。試験条件を Table 1 に、ポテンシャルドロップと超音波探傷法による最小残肉厚推定値を Table 2 に、それぞれ示す。

Table 1. Experimental condition

試験体名	最大, 最小荷重 (kN)	繰り返し回数
fc1	23, 230	204, 000
fc2	23, 230	190, 000
fc3	23, 230	232, 000
fc4	23, 230	141, 900
fc5	23, 230	179, 100

Table 2. Estimated minimum wall thickness

試験体名	PD 推定値 (mm)	UT 推定値 (mm)
fc1	----*1	----*1
fc2	----*1	----*1
fc3	4.0	4.0
fc4	1.5	6.0
fc5	2.0	1.8

\*1 割れが表面にまで貫通

### 3. 渦電流探傷法の適用性評価

#### 3.1 疲労割れの検出

製作した試験体に対し、溶接面側より渦電流探傷試験を行った。用いたのは一様渦電流型の渦電流探傷プローブ[3]であり、その励磁周波数は 10 kHz と設定した。

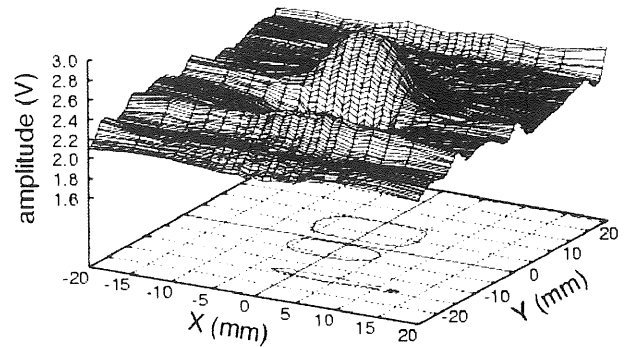
割れが溶接面にまで貫通していなかった 3 体の試験体の探傷試験結果を Fig. 3 に示す。割れは図中 XY 平面原点付近に、Y 軸に平行に発生しているのだが、いずれの場合においても割れからの信号を明瞭に確認することが出来る。

#### 3.2 最小残肉量の推定

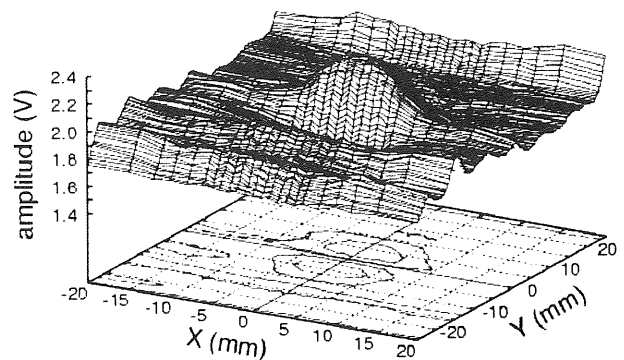
続いて、測定された信号より数値解析を用いて最小残肉量を推定する試みを行った。

解析に先立ち、Fig. 2 に示した試験体を数値解析で考慮するための解析モデルを構築する必要があるが、試験体内部の電磁気的特性の分布、および表面の凹凸を解析にて厳密に考慮することは困難である。よってここでは、Fig. 4 に示すような単純化した体系を用いて解析を行うこととした。試験体は、表面が平滑であり、また電磁気的特性は内部で均一であるインコ

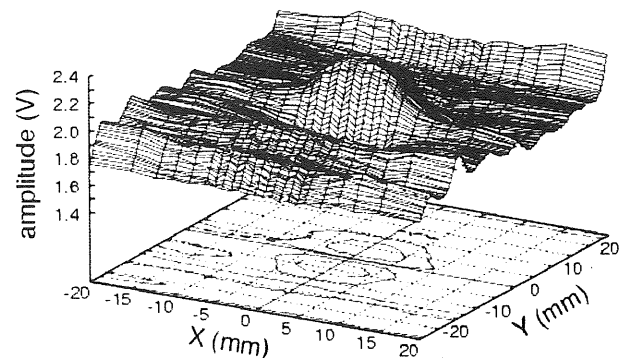
ネル平板 600 であるとし、前述のような複雑性はここでは一切考慮しない。



a) fc3



b) fc4



c) fc5

Fig. 3 Measured eddy current signals

本研究で対象とするのは疲労割れであるが、疲労割れの形状は比較的単純であることが多い。実際に問題となるのは溶接部の最小残肉量であり、割れの厳密な断面形状までは必ずしも必要ではないと考えられる。よって、ここでは対象とする割れは Fig. 4 のような半楕円形をしているものと仮定して形状推定は行った。割れの幅は 0.3 mm と固定し、破面の微細な接触は割れ領域に一律な導電率を与えることで

考慮した。

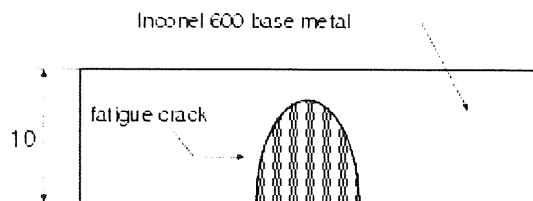


Fig. 4 Numerical model

形状推定には、以前の研究で開発した、勾配法に基づく逆解析アルゴリズムを用いた[4]。このアルゴリズムは、推定された形状の欠陥からの探傷信号と測定された信号との差が最小となるよう、誤差関数の勾配値に基づいて反復的に欠陥形状の修正を行うものである。

アルゴリズム自体は任意の欠陥パラメータを考慮することが出来るのであるが、欠陥の内部導電率を未知数として逆解析を行った場合、その収束が急速に悪化するという問題点がある。そのため、本研究においては欠陥内部の導電率はあらかじめ決められた固定値とした。内部導電率を試験体母材の0, 0.1, 1, 3, 5, 7, 10, 13, 15%として逆解析を行い、最も信号の一致の度合いが良好であったものを最終的な推定結果として採用する。

逆解析によって得られた溶接部の最小残肉推定値を、破壊試験によって明らかとなった真の値と併せてTable 3に示す。fc4試験体に対する推定値は真値と1mm程度ずれてしまっているが、それ以外の2体に関しては良好な推定結果が得られている。Table 2に示した値も考慮すると、渦電流探傷法が、今回適用した3種類の非破壊検査手法の中では最も精度良く溶接部の最小残肉量を推定できていたことがわかる。また、今回製作した試験体の最大残肉量は3.25mmであったことから、溶接部の残肉量3mm程度の疲労割れは渦電流探傷法により十分に検出することが出来ると結論付けることが出来るが、前述のように今回用いた試験体の表面は実機よりもかなり粗いものであるために、実際にはより深い割れの検出

も可能であると期待できる。

Table 3 Results of eddy current inversions

試験体名	内部導電率(%)	推定値(mm)	真値(mm)
fc3	3	1.47	1.51
fc4	3	2.17	3.25
fc5	0.1	2.24	2.10

#### 4. 結言

溶接部内部の疲労き裂検出及び残肉量推定に対する渦電流探傷法の適用性を評価した。平板溶接試験体を用いた検証試験の結果、溶接部の残肉量3.25mmの疲労割れは明瞭に確認することが出来ることが判明した。また残肉量推定においても、渦電流探傷法は電位差法、および超音波探傷法と比べて優れたものであるということが明らかになった。

#### 参考文献

- [1] B.A. Auld and J.C. Moulder, "Review of advances in quantitative eddy current nondestructive evaluation", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 18, pp. 3-36.
- [2] N. Yusa, Z. Chen, K. Miya, T. Uchimoto, and T. Takagi, "Large-scale parallel computation for reconstruction of natural stress corrosion cracks from eddy current testing signals", NDT&E international, Vol. 36, pp. 449-459.
- [3] K. Koyama and H. Hoshikawa, "Eddy current testing by uniform eddy current probe", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Asian Joint Seminar on Applied Electromagnetics, pp. 1-6.
- [4] Z. Chen and K. Miya, "ECT inversion using a knowledge based forward solver", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 17, pp. 157-165.
- [5] S.J. Norton and J.R. Bowler, "Theory of eddy current inversion", Journal of Applied Physics, Vol. 73, pp. 501-512.