

沸騰水型炉内構造物インコネル溶接部に対する 渦電流探傷逆解析技術の適用可能性評価

- Applicability of eddy current inversion techniques to the sizing of defects
in Inconel welds of BWR internals -

普遍学国際研究所	遊佐 訓孝	Noritaka YUSA Member
日本原子力発電株式会社	町田 栄治	Eiji MACHIDA
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 CHEN Member
普遍学国際研究所	宮 健三	Kenzo MIYA Member

This paper evaluates the applicability of eddy current inversion techniques to the sizing of defects in Inconel welds with rough surfaces. For this purpose, a plate Inconel weld specimen, which models the welding of a stub tube in a boiling water nuclear reactor, is fabricated, and artificial notches machined into the specimen. Eddy current inspections using six probes in weld inspection evaluated. It is revealed that if suitable probes are applied, an Inconel weld does not provide large noise signals in eddy current inspections even though the surface of the weld is rough. Finally, reconstruction of the notches are performed using eddy current signals measured with the use of the uniform eddy current probe that showed the best results among the six probes in the inspection. A simplified configuration is proposed in order to consider the complicated configuration of the welded specimen in numerical simulations. While reconstructed profiles of the notches are slightly larger than the true profiles, quite good agreements are obtained in spite of the simple approximation of the configuration, which reveals that eddy current testing would be an efficient non-destructive testing method for the sizing of defects in Inconel welds.

KeyWords : core internal, non-destructive testing, eddy current testing, weld, reconstruction

1. はじめに

日本における軽水型原子力発電所は、その導入以来、幾多の試練を乗り越え、また、この間の電力を含む原子力業界の技術開発とも相俟って、わが国の電気の約3分の1をまかなうまでに成長するとともに、不可欠な電源のひとつとなっている。しかしながら、軽水型原子力発電所の中には、商業運転開始以来30年を

経過した、いわゆる「高経年化プラント」が出始めており、今後益々こうした高経年化プラントの数は増加する傾向にある。そのため、原子炉機器の検査・評価技術の一層の開発、充実等が益々求められている。

特に、沸騰水型原子力発電所の重要機器である原子炉圧力容器およびその貫通部は、原子炉冷却材圧力バウダリを形成しており、健全性が損なわれた場合の影響が大きいことから、早期に欠陥を発見し、その後の対応が適切に実施できるよう、信頼性の高い検査・評価技術

を開発しておくことが重要である。このような部位の溶接部に派生した欠陥の検出は、現在目視および超音波探傷で実施するのが主流となっているのだが、目視検査については定性的な検査という域を出ず、最終的な確認は超音波探傷によって行っているのが現状である。しかしながら、特にインコネル溶接部に対しては、結晶粒の不均一性などにより超音波が大きく散乱されてしまい、超音波探傷が必ずしも十分といえる検査性能を発揮することができない^[1]ことが、原子炉機器の検査における一つの大きな課題となっている。

こうした状況を踏まえ、現在渦電流探傷法が注目されている。渦電流探傷法は、高速、非接触などの特徴を有する電磁的非破壊検査手法であり、特に表面傷の検出に対して有効である。原子力発電所の検査においては、渦電流探傷法はこれまで加圧水型軽水炉蒸気発生器配管の検査手法として用いられてきており、既に応力腐食割れを対象とした場合の、サイジング性能も含めたその有効性は示されてきている^[23]。しかしながら、これまで渦電流探傷法によるサイジング技術の開発は、管や平板などの比較的単純な形状のものを対象としてきており、炉内構造物溶接部のような部位に対しては十分に行われていないのが現状である。

以上のような背景から、本研究においては炉内構造物インコネル溶接部に対する渦電流探傷法サイジング技術の適用可能性の評価を行う。前述のようにインコネル溶接部はその機械的性質のばらつきが大きいために超音波探傷においては大きな問題となっているが、渦電流探傷法においては材質の異方性の影響は小さく、また結晶粒レベルでの不均一性が信号に影響を与えるほどの分解能を渦電流探傷法が有しているわけではない。よって、渦電流探傷法の適用により、炉内構造物インコネル溶接部に発生した初期欠陥の検出のみならず、それらの欠陥のサイジングも可能となり、ひいては原子炉の信頼性の向上に寄与することが期待される。

2. 試験体の設計と製作

沸騰水型原子炉炉内構造物のうち、原子炉压力容器下鏡にインコネルを用いて溶接されている部位としては、シュラウドサポート、CRDスタブチューブ、インコアモニタハウジング等がある。本研究においては、最近の損傷事例から技術開発上重要な部位であるとみなされている、CRDスタブチューブ部をこれらの代表

部位として選定し、当該部位を模擬した試験体を設計した。被検査部位へのアクセス性の確認等は今回の研究の範囲外であることから、試験体は技術的に合理的な範囲でコストミニマムである、図-1に示した平板試験体とした。管体系と平板体系とで渦電流探傷信号に有意な差はないことはあらかじめ解析によって確認済みであり、用いた材料は実機で用いられているものと同一である。

溶接は1層目(裏波)および2層目は1パスのみの手動TIGとし、3層目以降は1層多パスの自動TIGにて行った。溶接後の表面平滑処理は行っておらず、よって溶接部表面は凹凸が存在したままの状態である。また、図-1に示されたように、溶接線方向に沿った溶接肉盛りの高さも一定ではない。試験体溶接部の表面を撮影した写真を図-2に示す。

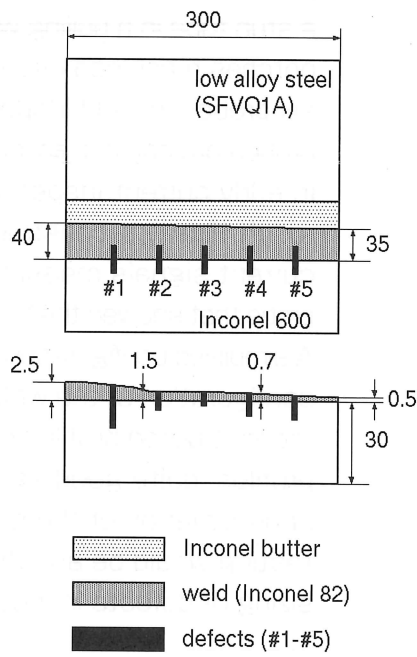


図-1 溶接試験体形状

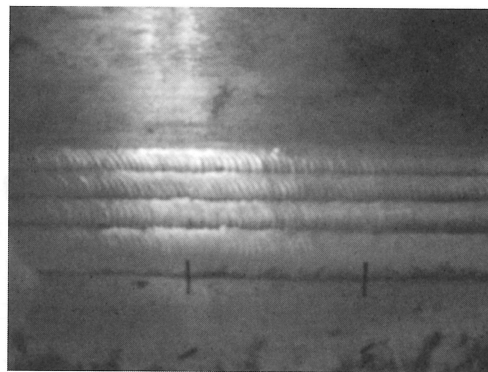


図-2 試験体溶接部写真

表-1 EDMノッチ寸法

ノッチ番号	長さ(mm)	幅(mm)	深さ(mm)
1	10	0.9	10
2	10	0.9	1
3	10	0.9	0.5
4	10	0.9	3
5	10	0.9	6

試験体には、溶接部とインコネル600母材とにまたがるような、それぞれ深さの異なる計5つのEDMノッチを加工した。各ノッチの形状は矩形であり、それらの寸法は表-1に示されるとおりである。

3. 渦電流探傷実験

続いて、製作した平板溶接試験体に設けられた人工ノッチの渦電流探傷を行った。探傷システムを図-3に示す。渦電流探傷プローブはPCによって制御された自動XYZステージに取り付けられており、渦電流探傷信号はXYZステージの出力であるプローブの位置情報とともに、PCによって収集される。

近年いくつかのプローブが溶接部探傷に有効であるとして発表されているが、それらに対する統一の見解は十分に得られていない。そのため、本研究においては、(1) 自己誘導絶対値型パンケーキプローブ (2) 自己誘導差動型パンケーキプローブ (3) 相互誘導差動型パンケーキプローブ (TRプローブ) (4) 自己誘導差動型プラスポイントプローブ (5) 相互誘導型

ラスポイントプローブ (6) Θ プローブ (7) 一様渦電流プローブ (8) 差動パンケーキ検出型渦電流プローブ (9) 矩形垂直検出コイル型渦電流プローブ (10) 3ユニット型プローブ、の計10種類のプローブを用いて探傷実験を行い、溶接部に加工されたノッチの再構成に適したプローブの選定を行った。各プローブの概観を図-4に示す(ただし自己誘導パンケーキ型プローブについては省略、自己誘導差動型プラスポイントプローブと相互誘導型プラスポイントプローブは端子結線のみが異なるものであるため、まとめて示した)。これらのうち自己誘導絶対値型パンケーキプローブは軽水炉SG管検査のために用いられているものと同じであるため、100-400kHz程度の高周波で用いられることを想定されて設計されているが、それ以外のプローブは可能な限り同条件で評価を行うために、1-20kHz程度の低周波で駆動されるようインピーダンスを調整して設計されている。

探傷により得られた知見を以下に列挙する。

- (1) 上記パンケーキ型のプローブおよび Θ プローブのような、パンケーキコイルを用いて励磁を行う方式のプローブは、溶接表面の凹凸によるノイズ信号が比較的大きい。
- (2) プラスポイント型プローブ、一様渦電流プローブ、3ユニット型プローブは溶接ビードによるノイズ信号が得られるが、それらは溶接線に沿った方向ではほぼ一様に分布しているため、信号処理を用いて容易に除去することが出来る。溶接表面の凹凸によるノイズ信号は非常に小さい。一様渦電流プローブと

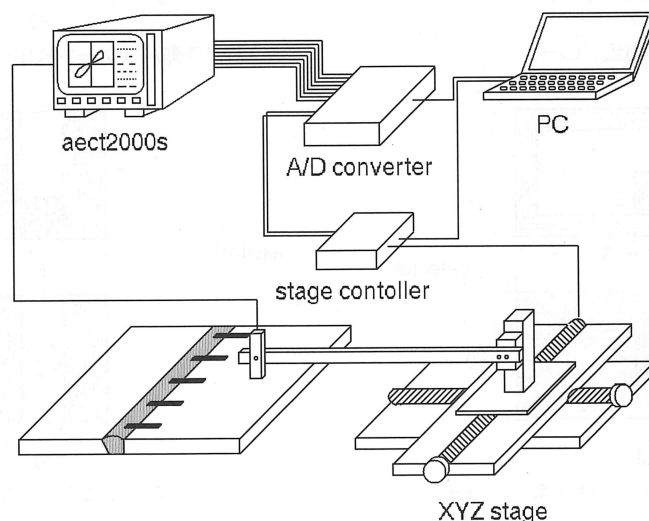


図-3 渦電流探傷システム

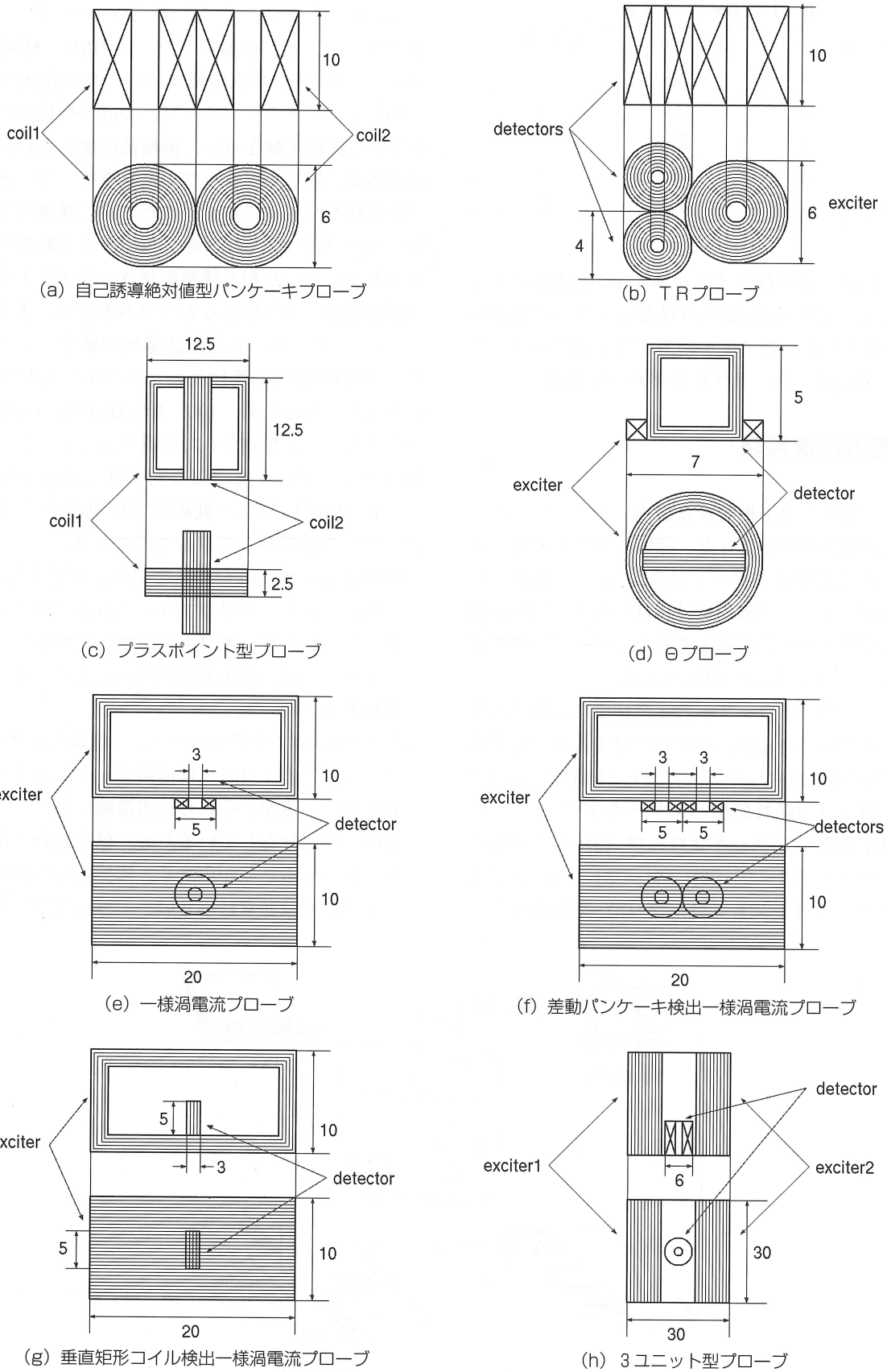


図-4 プローブ形状

3ユニット型プローブは信号の特徴がよく似ているが、3ユニット型プローブは検出コイル直下での渦電流密度が小さくなるため、一様渦電流プローブの方がより明瞭なノッチ信号を与えるものであった。

(3) 差動パンチキー検出一様渦電流プローブ、矩形垂直検出コイル一様渦電流プローブは、溶接ビード信号、溶接表面の凹凸の信号共に小さいが、得られる探傷信号の波形が複雑なものとなり、再構成アルゴリズムが複雑化する可能性がある。

4. 溶接部ノッチの再構成

前節の探傷で得られた知見に基づき、本研究では一様渦電流プローブをノッチ逆解析用のプローブとして選定し、測定された渦電流探傷信号よりノッチ形状を再構成する試みを行った。前述のようにプラスポイント型プローブも溶接用面の凹凸の影響は小さいものであったが、一様渦電流型プローブがノッチ端部で信号が最大となるのに対し、プラスポイント型プローブはノッチ中央で信号振幅が最大となるという特徴を有している。そのため、ノッチ中央に試験体のもっとも大きな形状不連続部が存在する今回の試験体の探傷に対しては、後述する近似的体系を用いて解析を行うことが困難になると考えられ、今回は一様渦電流プローブを選定した。

再構成を行うにあたり、まず最初に数値解析上の解析モデルを構築する必要がある。溶接線に沿った凹凸

を考慮せず、可能な限り単純化した体系の断面図を図-5に示す。溶接金属表面は母材よりもやや盛り上がりしており、また母材、溶接金属、そしてバタリング部の材料は異なったものであるために、それらの電磁気的特性の差異を考慮することも必要である。しかしながら、厳密な肉盛りの高さの程度および電磁気的特性の分布を解析に反映することは困難であり、このような形状ですら、体系を厳密にモデル化することは非現実的である。そのために、ここでは図-6に示すような、近似的な解析体系を用いて逆解析を行うこととする。試験体はインコネル600のそれと同じ電磁気特性を有する、平滑かつ均一な平板であると仮定する。溶接肉盛りの影響は、プローブのリフトオフ変化として近似するものとし、その変化の度合いは0.5mmとした。

これまでに多くの逆解析アルゴリズムが渦電流探傷信号から欠陥形状を再構成するために提唱されてきているが^[4]、本研究では、著者らが以前の研究で開発した、タブー探索に基づく逆解析アルゴリズムを用いる^[5]。本アルゴリズムは本来応力腐食割れの再構成のために開発されたものであり、本研究でその有効性が確認されたならば、実機で特に問題となる応力腐食割れ^[6]の形状サイジングに対しても将来有効である可能性が高いと期待される。アルゴリズム自体は、欠陥のある導電率を有する領域と仮定し、欠陥の境界形状と内部導電率分布を未知数として、再構成された欠陥形状からの渦電流探傷信号と測定されたものとの差が最小となるよう、これらを反復的に修正するもので

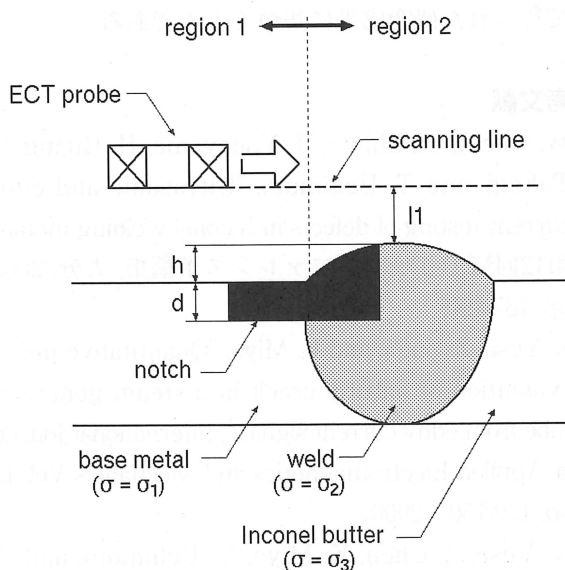


図-5 溶接試験体断面図

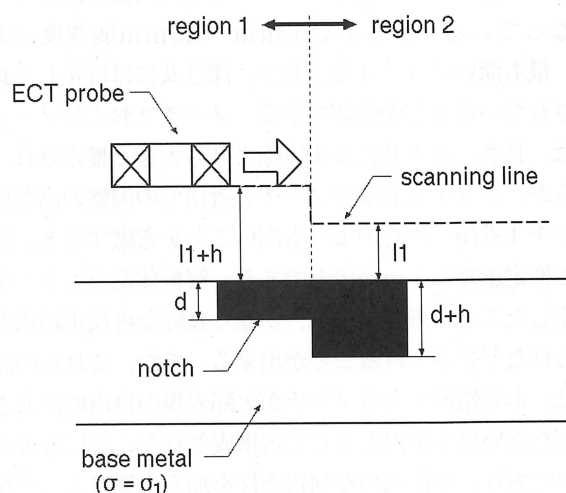


図-6 解析体系

ある。しかしながら、本研究で対象とするのは人工ノッチであり、欠陥領域の内部導電率を未知数とする必要はない。そのため、ここでは欠陥領域内の導電率は0と固定して、境界形状のみを探傷信号よりすることとした。以前の研究では計算時間の短縮のために大型計算機上での並列計算を行っていたが、欠陥領域の導電率を0と固定することで逆問題の性質が大きく改善されることが予想されるため、今回は並列計算を行わず、逆解析は通常のワークステーション上で行った。逆解析には、ノッチ直上、溶接線に垂直な走査線上からの、1mm間隔計29点からの信号のX信号およびY信号を用いた。

図-1に示されたように、最も深いノッチ1近傍では溶接肉盛りの高さが急激に変化しており、また用いた励磁周波数10kHzに対してノッチ1の深さ10mmはかなり深いものである。よって、ノッチ1の逆解析は困難さの度合いが高いと考え、ここではノッチ2-5を取り扱うこととした。実際には、探傷時の励磁電流密度や探傷信号の位相原点が不明であるために、実験で得られた信号と解析値とを直接比較することが出来ない。そのため、6mm深さであるノッチ5からの信号によって探傷信号波形の拡大率・回転角を求め、これらの値を用いてその他の探傷信号の校正を行った。そのため、ここで逆解析を行うのはノッチ2、3、4である。

再構成されたノッチ形状を図-7に示す。表-1に示されたノッチ深さはいずれも試験体インコネル側母材表面からの深さで定義されているため、図-5に示した近似的な解析体系における実効的な深さは、肉盛の高さの分だけ深いものとなる。ノッチごとに肉盛の高さやや異なっているが、およそ1mm-1.5mm弱程度である。最も深いノッチ4は、長さ、深さ共にほぼ正しく推定されていることが確認できる。ノッチ2およびノッチ3は、長さ、深さ共に多少実際よりも大きく推定されているが、ノッチ2およびノッチ3近傍での肉盛の高さはノッチ4近傍でのものよりも高いことを考慮すると、深さの推定誤差は1mmほどであり、解析体系を大きく単純化したことを考慮すると、かなり良好な再校正結果が得られたと結論づけることが出来る。また、これらの誤差は、本来矩形であるノッチが欠陥表現の自由度が大きかったために半楕円形として再構成されたことにもよるものであり、今後適当な制約条件を加える等によって精度の向上も期待できる。

5. まとめ

沸騰水型原子炉炉内構造物インコネル溶接部に対する、渦電流探傷法の適用可能性を評価した。適切な渦電流探傷プローブを用いれば、表面に凹凸が存在していたとしてもインコネル溶接部は渦電流探傷法においては大きなノイズ源とはならず、超音波探傷のような欠陥検出能の大きな劣化を招くものではないということを確認した。続いて、測定された渦電流探傷信号より、インコネル溶接部に加工されたノッチの形状再構成を行った。用いた試験体は肉盛りや溶接部表面の凹凸、材料の不均一性など様々な特徴を有したものであったが、再構成時にはこれを単純な平板として模擬し、肉盛りの影響はプローブのリフトオフ変化として近似した。このような単純化にもかかわらず良好な再構成結果が得られたことから、渦電流探傷法が、平滑材のみならず、インコネル溶接部等の形状不連続部に発生した欠陥のサイジングに対しても有効であり、またその際の数値解析においては体系の厳密なモデル化を行うことは必要ではないということが明らかとなった。

謝 辞

本論文の一部は、東北電力株式会社、東京電力株式会社、中部電力株式会社、北陸電力株式会社、中国電力株式会社、日本原子力発電株式会社によるもちより委託研究「高度非破壊検査技術の適用性評価研究」^[7]にて得られた研究成果に基づくものである。

参考文献

1. W. Cheng, H. Shiwa, H. Yoneyama, H. Huang, T. Takagi, and T. Uchimoto. "Ultrasonic and eddy current testing of defects in Inconel welding metals", 第12回MAGDAコンファレンス予稿集, 大分. 2003, pp. 187-190.
2. N. Yusa, Z. Chen, and K. Miya, "Quantitative profile evaluation of natural crack in a steam generator tube from eddy current signals", International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol. 12, pp. 139-150 (2000).
3. N. Yusa, Z. Chen, K. Miya, T. Uchimoto, and T. Takagi, "Large-scale parallel computation for the re-

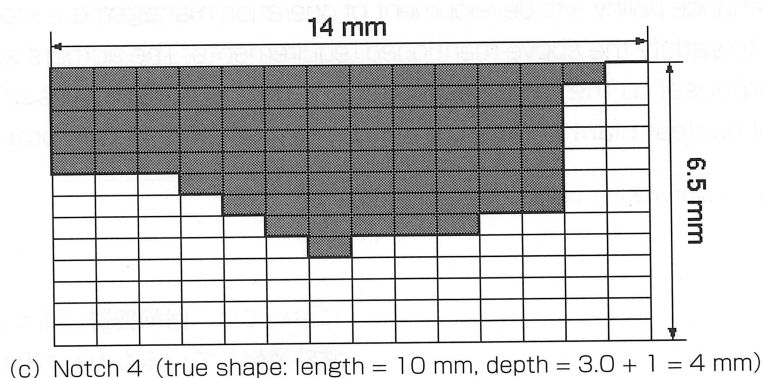
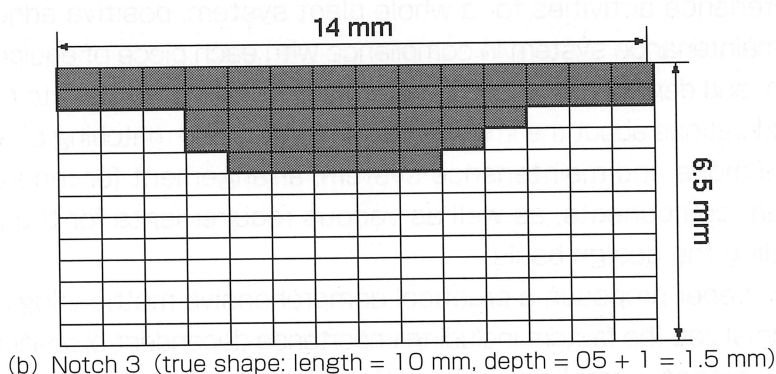
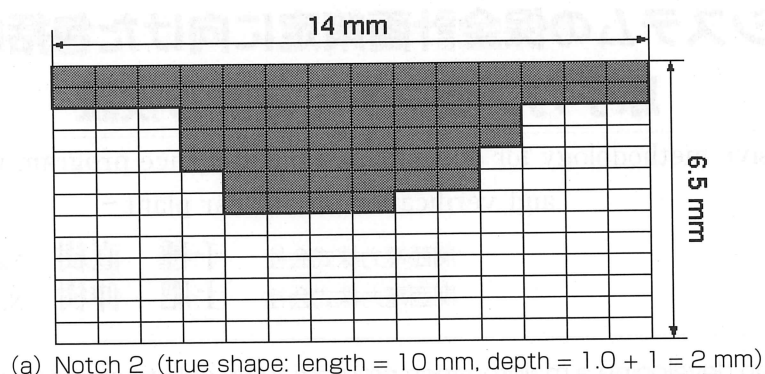


図-7 再構成結果

construction of natural stress corrosion cracks from eddy current testing signals", NDT&E international Vol. 36, pp. 449-459 (2003).

4. B.A. Auld and J.C. Moulder, "Review of advances in quantitative eddy current nondestructive evaluation", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 18(1), pp. 3-36 (1999).
5. N. Yusa, Z. Chen, and K. Miya, "Sizing of stress corrosion cracks on thick austenitic stainless piping in a nuclear power plant from eddy current NDT signals", Journal of Nondestructive Evaluation (投

稿中)

6. R.M. Horn, G.M. Gordon, F.P. Ford, and R.L. Cowan, "Experience and assessment of stress corrosion cracking in L-grade stainless steel BWR internals", Nuclear Engineering and Design Vol. 174, pp. 313-325 (1997).
7. 町田栄治, "渦電流探傷検査技術の実機適用性評価研究", 平成15年度火力原子力発電大会, 2003/10/15-17, 福岡国際会議場

(平成15年12月1日)