

非線形超音波フェーズドアレイを用いた 応力腐食割れ検査技術の開発

Development of Testing of Stress Corrosion Cracks Using the Nonlinear Phased Array Method

山口 雄一 技術開発本部生産技術センター生産基盤技術部
 田上 稔 技術開発本部生産技術センター生産基盤技術部 部長 博士(工学)
 小原 良和 東北大学大学院 工学研究科材料システム工学 助教 博士(工学)
 山中 一司 東北大学 未来科学技術共同センター工学研究科材料システム工学 教授 工学博士

発電プラントの寿命診断においては、応力腐食割れ(SCC)の有害性を評価するため、より高精度な深さ計測技術が望まれている。本稿では高温高圧水環境でステンレス鋼溶接熱影響部にSCCを発生させ、サブハーモニック波を用いた非線形超音波フェーズドアレイ法の有効性をシミュレーションと探傷試験によって確認した。シミュレーションによる検討では、弾性体-振動子モデルによってサブハーモニック波の発生を再現できた。また、本手法によってSCCを画像化させた結果、先端部をより明瞭に画像化することを確認した。

More precise measurements of the depth of stress corrosion cracks (SCCs) are being required in the life assessment of power plants to assess the level of risk they present. In this paper, we prepared a specimen with an SCC that was caused by high-temperature, high-pressure water in a stainless steel area affected by the heat of welding, and we proved by simulation and testing the usefulness of the nonlinear phased array method, which uses subharmonic waves. We simulated the generation of subharmonic waves by using the elastic body-oscillator model and also imaged the SCC by using this method. The results of this simulation and testing were that the SCC in the subharmonic image was clearer than in the image created using conventional phased array imaging.

1. 緒 言

発電プラントのオーステナイト系ステンレス鋼配管は、運転中に高温・高圧水環境下にさらされるため、その溶接熱影響部には応力腐食割れ(Stress Corrosion Crack: SCC)が発生する例が報告されている。このため、応力腐食割れのより確実な検査が強く望まれ、検査技量の向上とともに、新検査手法の開発も進められている。特にSCCの深さの正確な測定技術は、破壊力学によってきずの有害性を評価するうえで重要であり、検討が進められている。

一般に、超音波によるSCC深さ計測ではSCC先端からの散乱波を検出し、この音源位置からきず先端位置の深さを求める端部ピーク法が、測定精度の良い方法として用いられることも多い。ただし、き裂先端が閉じている場合は、超音波が密着した割れ面を透過してしまい、き裂の先端部を特定し難い場合も懸念される。

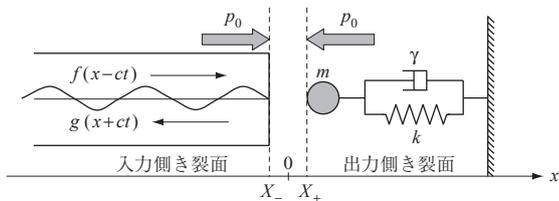
そこで、より確実にき裂先端位置を特定する方法として、非線形超音波法^{(1)~(3)}に着目した。非線形超音波法とは、周波数 f の大振幅の超音波を入射することで、き裂面で閉開振動が起これ、この振動によって周波数 $2f$ 、

$3f$ 、 \dots の高調波あるいは周波数 $f/2$ 、 $f/3$ 、 \dots のサブハーモニック波が生じ、これを検出する手法である。高調波は閉じたきずのほかにも探触子およびカップラントでも発生するのに対し、サブハーモニック波は閉じたきずのみで発生するのが特長である。

本稿において、サブハーモニック波が密着したき裂面で発生することをシミュレーションで確認した。また、実機発電プラントで発生するSCCを模擬し、高温高圧水中オートクレーブで作製したSCC試験体でサブハーモニック波を用いた非線形超音波の有効性を確認したので報告する。

2. シミュレーションでの確認

密着したき裂面でサブハーモニック波が発生する条件を確認するため、シミュレーションを検討した。サブハーモニック波は共振特性が重要となるため、弾性体-振動子モデルを使用した^{(4)~(6)}。モデルの概略を第1図に示す。超音波の入射側き裂面を弾性体、出力側き裂面を周囲からばねで支えられた質点(振動子)として近似する。さらに、き裂面にはき裂開口量に応じた力関数(1)式が作用



第 1 図 弾性体-振動子モデル
Fig. 1 Elastic body-oscillator model

すると仮定する.

$$L(x) = f_0 \left[\kappa \left(\frac{\sigma}{x} \right)^M - \left(\frac{\sigma}{x} \right)^N \right] \dots \dots \dots (1)$$

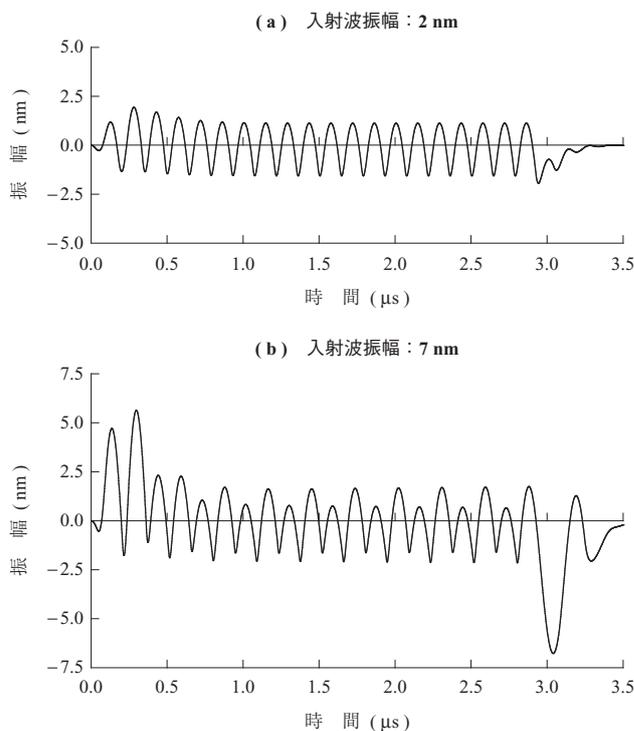
閉じたき裂面に超音波が入射した場合、圧縮時にはき裂面の斥力として扱う。一方、引張時にはき裂面の復元力を引力として扱う。入力側き裂面における境界条件および出力側き裂面における運動方程式は (2) 式および (3) 式で与えられる。

$$2\lambda \dot{f}(-ct) + \rho c \dot{X}_- - p_0 = -L(X_+ - X_-) \dots \dots (2)$$

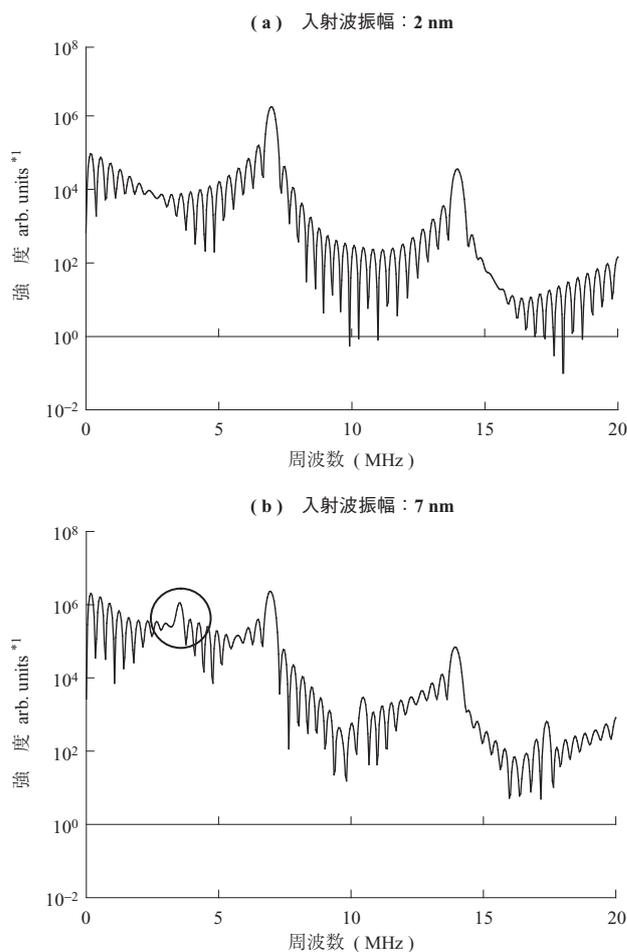
$$m \ddot{X}_+ + \gamma \dot{X}_+ + k X_+ = L(X_+ - X_-) - p_0 \dots \dots (3)$$

- $L(x)$: 力関数
- f_0 : き裂間力の大きさ
- κ : 斥力引力比
- σ : き裂面間の特性距離
- M : 斥力指数
- N : 引力指数
- λ : 弾性率
- f : 入射波の変位
- g : 反射波の変位
- c : 縦波音速
- t : 時間
- ρ : 密度
- p_0 : 閉口応力
- X_+ : 出力側き裂面の変位
- X_- : 入力側き裂面の変位
- m : 有効質量
- γ : 粘弾性係数
- k : ばね定数

入射波周波数 7.0 MHz で入射波振幅 2 nm および 7 nm の場合の時間波形、およびそのパワースペクトルをシミュレーションで求めた結果を第 2 図および第 3 図に示す。また、使用したパラメタを第 1 表に示す。入射波振幅が振幅 2 nm の比較的小さい場合は基本波成分しか観測されていない。一方、振幅 7 nm の比較的大きな場合はサブハーモニック波成分が観測される結果になっており



第 2 図 シミュレーションによる時間波形
Fig. 2 Simulated time waveform



(注) *1: Arbitrary units を示す。

第 3 図 シミュレーションによるパワースペクトル
Fig. 3 Simulated power spectrum

第 1 表 シミュレーションに使用したパラメータ
Table 1 Simulation parameters

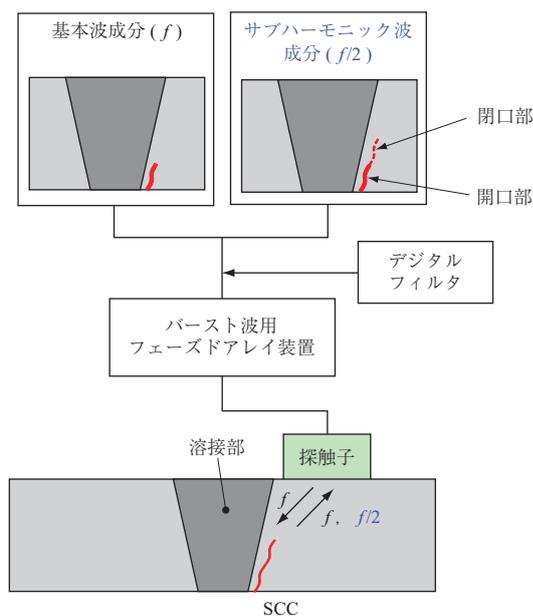
項目	単位	パラメータ
き裂間力の大きさ f_0	kPa	1
斥力 引力比 κ	-	1
き裂面間の特性距離 σ	nm	4
斥力指数 M	-	9
引力指数 N	-	3
弾性率 λ	GPa	193
縦波音速 c	m/s	5790
密度 ρ	kg/m ³	7930
閉口応力 p_0	MPa	1.4
有効質量 m	kg/m ²	1.27
粘弾性係数 γ	kg/s/m ²	2.5×10^6
ばね定数 k	N/m	4.9×10^{14}

(第 3 図の黒丸内), 定性的ではあるが非線形成分が発生することを確認した。

3. 模擬 SCC 試験体での確認

3.1 試験方法

試験に用いたシステムの概要^{(3), (7), (8)}を第 4 図に示す。装置にはバースト波用フェーズドアレイ探傷装置を用いた。本システムでは, 任意の一点に超音波ビームが集束するよう遅延時間を考慮し, 各素子に電圧を印加する。その後, 画像化対象範囲内の各点において各素子までの到達時間を考慮し, 受信波形を加算する。加算された波形のピーク値を算出することによって, 画像化が可能となる。探触子には PZT アレイ (周波数 5 MHz, 素子間



第 4 図 計測の概略
Fig. 4 Summary of measurements

ピッチ 0.5 mm, 素子数 32 ch) を用いた。各素子に周波数 7 MHz, 電圧 150 V, サイクル数 3 を印加した。超音波の送受信には同一の探触子を使用した。

周波数 f の大振幅超音波を SCC が発生している母材側から試験体に入射し, 受信信号から周波数 f の基本波成分および周波数 $f/2$ のサブハーモニック波成分をデジタルフィルタを用いて抽出する。抽出した結果を画像化することによって, SCC の端部を容易に識別でき, この位置からき裂深さを算出することができる。

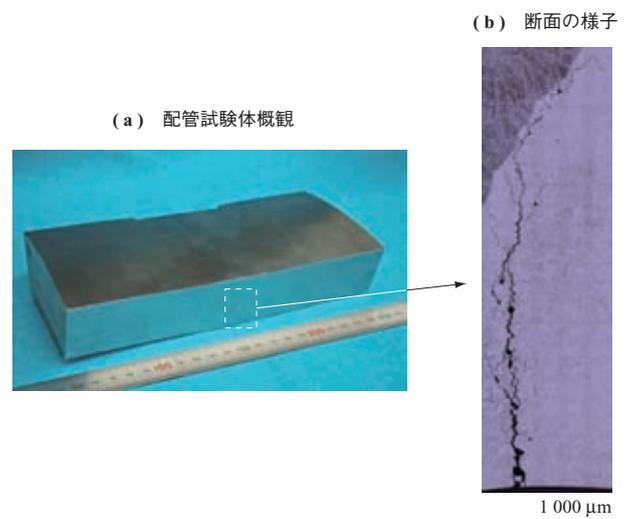
なお, 供試体には, SUS304 (JIS G3459 SUS304TP S-H) 配管突合せ溶接部に導入した SCC 試験体を用いた。母材の化学成分を第 2 表に示す。SCC は 280°C の溶存酸素量をコントロールした純粋のオートクレーブ内で周溶接継手の熱影響部に発生させた。なお, 実機発電プラントの環境を可能な限り模擬するため, 外力による負荷は行わずに, 溶接残留応力のみで SCC を発生させた。SCC を発生させた後に, 板厚 33 mm, 幅 40 mm のブロックに加工し, 超音波探傷試験用の試験体にした。

試験体の断面を第 5 図に示す。断面観察用試験体については探傷試験用試験体の隣接する箇所から切り出し, 製作した。光学顕微鏡で観察した結果, 本試験体にて発生した SCC の形態は粒界腐食であった。

第 2 表 母材の化学成分 (wt%)
Table 2 Chemical components of the base metal (wt%)

	化学成分 (wt%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
母材	0.07	0.44	1.52	0.033	0.001	18.44	8.84

(注) JIS G3459 SUS304TP S-H 相当



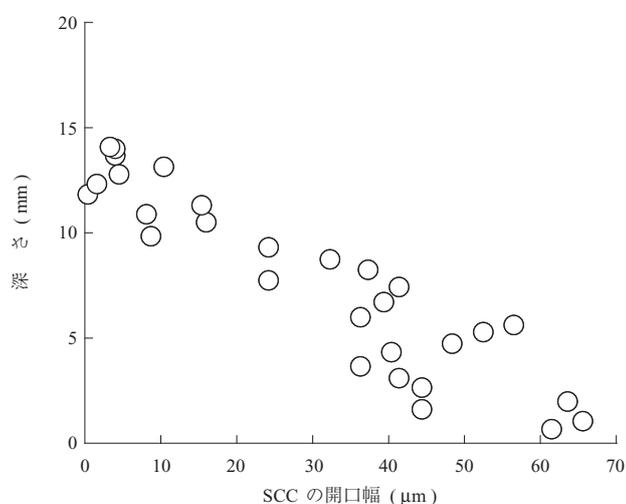
第 5 図 試験体の断面
Fig. 5 Results of cutting the specimen

また、任意の位置における SCC 開口幅の計測結果を第 6 図に示す。試験体切出し時に SCC 開口幅が変化した可能性はあるものの、定性的に SCC の先端に近づくにつれて開口幅も小さくなっていることを確認した。

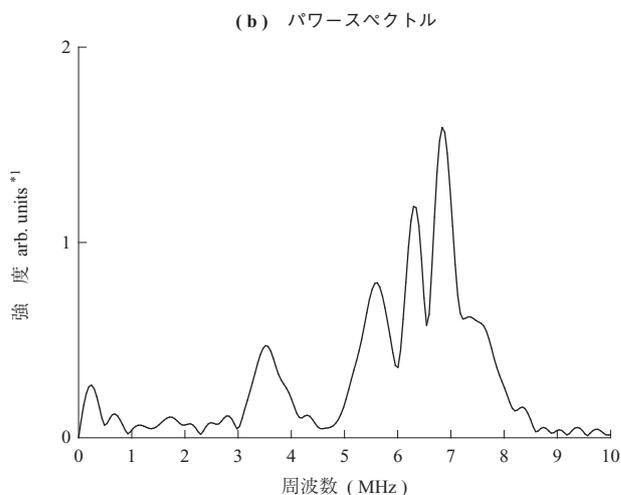
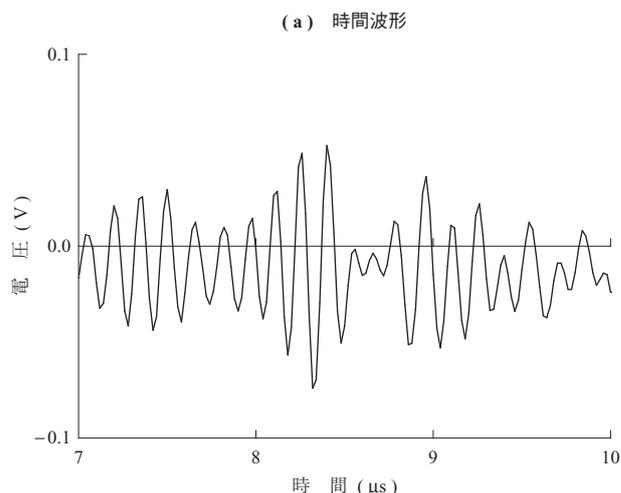
3.2 試験結果

試験結果を第 7 図に示す。基本波像において SCC は画像化されなかったのに対し、サブハーモニック波像では SCC の先端部が明瞭に画像化されていることを確認した。

第 7 図 - (c) の領域 A におけるデジタルフィルタ処理前の時間波形およびそのパワースペクトルを第 8 図に示す。パワースペクトルにおいて 3.5 MHz のサブハーモニッ



第 6 図 SCC 開口幅計測結果
Fig. 6 Measurements of SCC width



(注) *1: Arbitrary units を示す。

第 8 図 領域 A における時間波形およびパワースペクトル
Fig. 8 Time waveform and power spectrum at region A

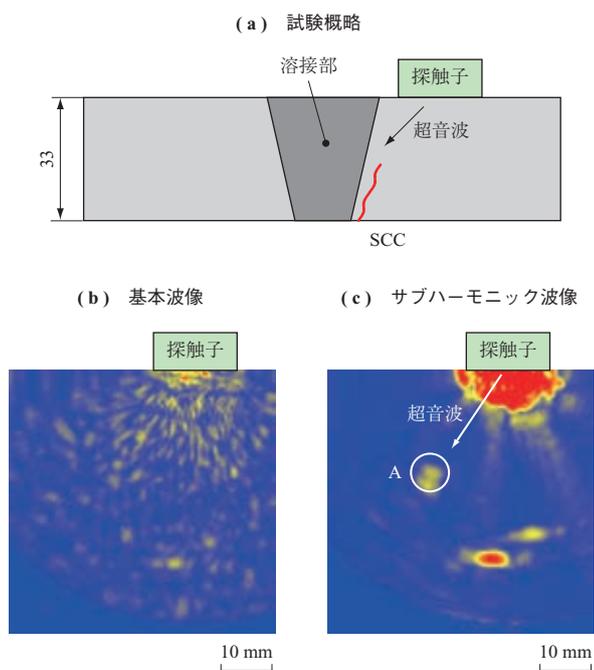
ク波成分の明瞭なピークを確認した。なお、7.0 MHz の基本波成分のピークが分離されて観測されたが、これは多数の結晶粒からの散乱波の干渉によるものと考えられる。

以上の結果、SCC に対してサブハーモニック波成分による非線形超音波法の有効性を確認した。

4. 結 言

本研究では SCC き裂先端部をより正確に特定する手法として、非線形超音波フェーズドアレイ法に着目し、その有効性について把握することを目的とした。その結果、以下を明らかにした。

- (1) 弾性体-振動子モデルをシミュレーションに用いることによって、サブハーモニック波成分の発生を確認した。
- (2) 実機発電プラントで発生する SCC を模擬し、高温高圧水環境で作製した SCC 試験体に対して、サブ



第 7 図 SCC 画像 (単位: mm)
Fig. 7 SCC images (unit: mm)

ハーモニック波を用いた非線形超音波フェーズドアレイ法による探傷試験を実施し、本手法の有効性を確認した。

探傷試験条件の選定に時間を要することが現状の課題として挙げられる。今後は送信焦点を可変とする装置改良および高精度なモデルのシミュレーション⁽⁷⁾、⁽⁹⁾によって、条件選定の時間短縮化を図っていく。

— 謝 辞 —

本技術の開発に当たっては、東北大学の関係各位から多くの助言とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 川嶋紘一郎, 村瀬守正, 小原良和, 山田龍三, 松嶋正道, 植松充良, 藤田文雄, 宮 武和: ナノメートルオーダーの隙間を持つ微細損傷・不完全結合部検出のための非線形超音波画像化システム 非破壊検査 第54巻第9号 2005年9月 pp. 509 - 514
- (2) 小原良和, 佐々木良太, 尾形寿弘, 三原 毅, 山中一司: 非線形超音波による閉じたき裂画像化の基礎的検討 日本非破壊検査協会大会講演概要集 Vol. 2006 春季 2006年5月 pp. 121 - 124
- (3) Y. Ohara et al. : Ultrasonic imaging of stress corrosion crack formed in high temperature pressurized water using subharmonic phased array POMA Vol. 10 (2010. 12) 045007
- (4) K. Yamanaka et al. : Evaluation of Closed Cracks by Model Analysis of Subharmonic Ultrasound Jpn. J. Appl. Phys. 43 (2004) pp. 3 082 - 3 087
- (5) I. Solodov et al. : Nonlinear Self-Modulation and Subharmonic Acoustic Spectroscopy for Damage Detection and Location Appl. Phys. Letts. Vol. 84 Issue 26 (2004. 6) pp. 5 386 - 5 388
- (6) K. Yamanaka et al. : Analysis of subharmonic phased array for crack evaluation (SPACE) using elastic-body-oscillator model Nonlinear Acoustics Fundamentals and Applications (ISNA 18) (2008) pp. 577 - 580
- (7) 小原良和, 新宅洋平, 堀之内聡, 柴崎 亮, 山口雄一, 田上 稔, 山中一司: サブハーモニック超音波フェーズドアレイによる閉じたき裂の映像化と時間領域差分法による解析 日本非破壊検査協会大会講演概要集 Vol. 2011 春季 2011年5月 pp. 11 - 12
- (8) 小原良和, 堀之内聡, 新宅洋平, 柴崎 亮, 山口雄一, 田上 稔, 山中一司: 単一アレイのサブハーモニック超音波フェーズドアレイ SPACE の開発とステンレス鋼溶接部の閉じた応力腐食割れの高選択性映像化 非破壊検査 投稿中
- (9) K. Yamanaka et al. : Two-Dimensional Analyses of Subharmonic Generation at Closed Cracks in Nonlinear Ultrasonics Applied Physics Express 4 (2011) 076601