

## 高温での減肉の高精度連続監視

熱田 美道 \*

*Atsuta Yoshimichi*

加藤 明 \*\*

*Kato Akira*

齋藤 勝美 \*\*\*

*Saito Katumi*

荒川 敬弘 \*\*\*\*

*Arakawa Takahiro*

畠中 宏明 \*\*\*\*

*Hatanaka Hiroaki*

高温構造物を超音波で減肉などを常時監視するには高温で耐久性があるセンサが必要である。当社は高温超音波センサを開発し各種高温機器に適用しており、本稿では高温超音波センサの概要と高精度の減肉監視について紹介する。

キーワード：超音波 高温 減肉監視 リアルタイムウエーブレット

### 1. はじめに

高温構造物を超音波探傷するには高温で耐久性のある超音波センサが必要である。特にセンサを高温構造物に取り付けて、減肉などの劣化を常時監視するには数年から数十年にわたり劣化の少ないセンサが必要となる。

圧電素子としてキューリー点が約 1200℃のニオブ酸リチウム単結晶を用い、これを直接にろう付で金属と接合して、耐熱性を大幅に改善した高温超音波センサを開発している。この高温超音波センサを用いれば、減肉量を  $\mu\text{m}$  オーダーの高精度で監視できる。従って、数週間の監視で減肉の傾向を把握することも可能である。高温超音波センサの減肉監視への適用事例と合わせて報告する。

### 2. 高温超音波センサの耐久性

圧電素子にニオブ酸リチウム単結晶を用い、これを金属と直接にろう付で取り付けした高温超音波センサ (1) (2) の耐熱性を検討した。

耐熱試験は超音波センサを電気炉中に放置し、常時センサの感度変化を監視した。センサの感度の監視は、圧電素子をろう付した金属（遅延材）の底面エコーの変化を観察して行った。

図 1 にろう付により作製した高温用超音波センサの耐熱試験結果の例を示している。遅延材の底面エコー高さが 5dB の感度低下が見られた時点を耐熱限界として示している。500℃付近では徐々に感度の低下はあるものの、5dB 感度低下するのに 1 年程度要することが分かる。一方、450℃では 5 万時間（約 6 年）を越えても感度の

\* 研究開発センター 研究開発グループ課長  
 \*\* 研究開発事業部 生産技術部  
 \*\*\* 研究開発センター 研究開発グループ  
 \*\*\*\* フェロー 工学博士  
 \*\*\*\*\* 研究開発センター 研究開発グループ専門課長

低下は見られず、極めて優れた耐熱性を示すことが確認された。超音波センサを構造物に取付けて劣化を常時監視する目的では、超音波センサ部の温度を 450℃ 以下とするのが望ましい。

なお、原子炉の炉心近傍や核融合炉などの高放射線下での適用を考慮して、耐放射線性試験を実施している (3)。試験は、一定時間照射施設の高温度超音波センサを放置し、定期的に遅延材の底面エコーを測定して感度の変化を観察した。

試験結果を図 2 に示す。最大で 10MGy の放射線 (γ 線) 照射においてもほとんど感度変化はなく、放射線に対しても十分な耐久性を持っていることを確認した。有機系の接着剤を廃して、全て

無機系で高温超音波センサを構成していることが耐久性を飛躍的に改善した。

## 2. 減肉の連続監視

### 2.1 監視方法

超音波を試験体に伝達させるのに、通常は液体の接触媒質を試験体表面に塗布し、探触子と試験体の界面に空気の層を排除する。接触媒質には、グリセリン、マシン油や水などが用いられるが、これらは高温で使用できない。耐熱性を向上した接触媒質も市販されているが、数年から数十年にかけての連続監視に対しては信頼性に乏しい。

柔らかく展延性に富む金や銅の軟金属を超音波センサと試験体間に挿入し、超音波センサを試験体に押し付けて軟金属を塑性変形させて界面の空気の層を排除して、試験体への超音波の伝達を可能にしている。液体を用いないこのドライな超音波センサの取り付けにより、長期間の連続監視が可能になる。

図 3 に高温超音波センサの試験体への取付けの様子を示している。測定箇所肉厚より長い遅延材にニオブ酸リチウム単結晶圧電素子を直接ろう付けしている。同図に、肉厚 12 mm に対し 25 mm の遅延材を用い、2 mm 厚の銅軟金属を介して超音波を試験体中に伝達して得られた探傷波形の例を示している。

なお、超音波の音速は温度によって変化する。図 4 に、軟鋼の音速の温度依存性の例を示している。常温と 400℃ とでは、音速は約 4.8% 変化する。従って、同じ音速を用いて超音波の伝播時間より肉厚を求めると誤差が生じる。このため、探触子の設置箇所の温度も監視し、音速を試験体温度で補正して肉厚を監視している。

### 2.2 減肉測定精度の確認

減肉測定における分解能を向上させるには、高周波数の超音波を使用し、短い波長の超音波を用

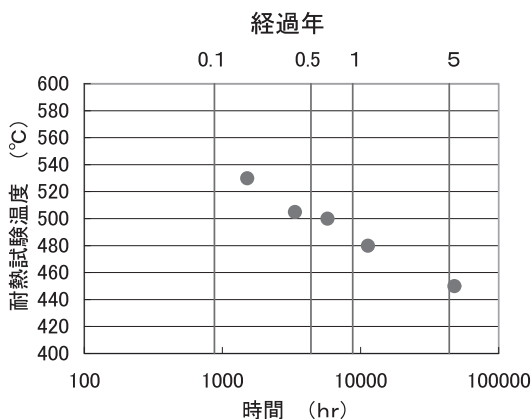


図 1 ろう付式高温用超音波センサの耐熱性

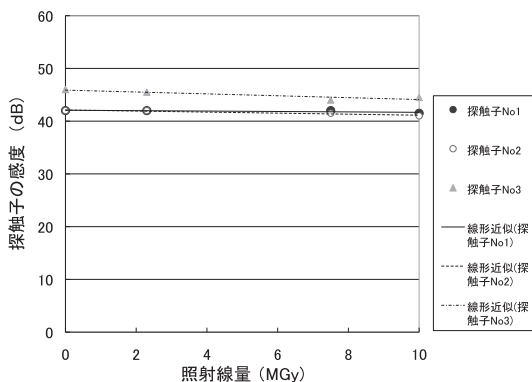
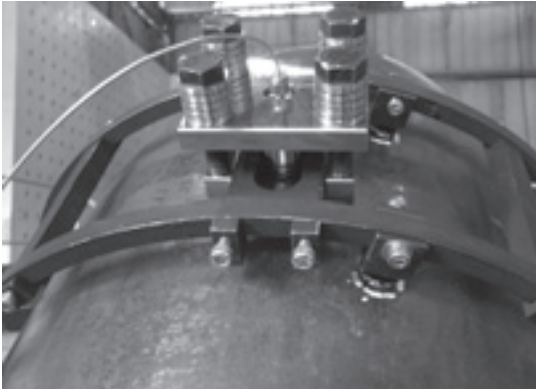
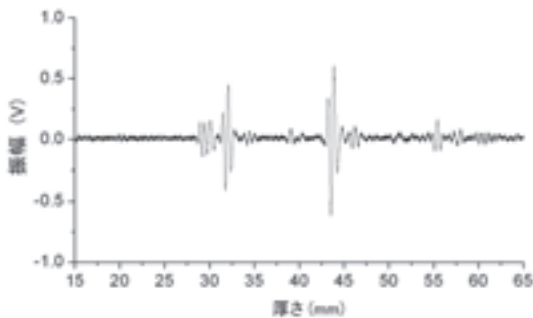


図 2 ろう付式高温用超音波センサの耐放射線性



(a) 高温超音波センサ取り付けの概要



(b) 肉厚監視時の探傷波形の例

図3 ろう付け式高温用超音波センサの試験体への取り付け概要と探傷波形の例

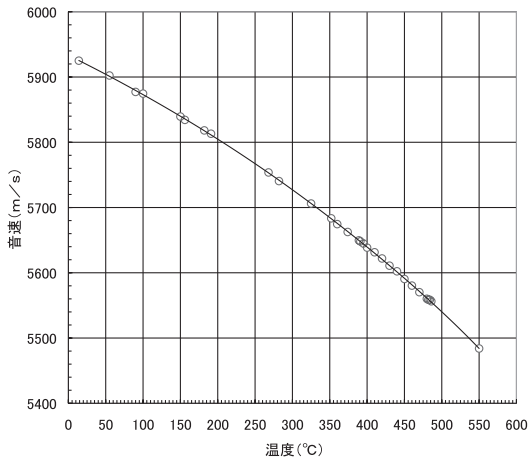
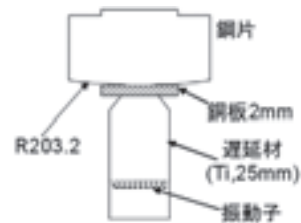


図4 軟鋼の音速の温度依存性

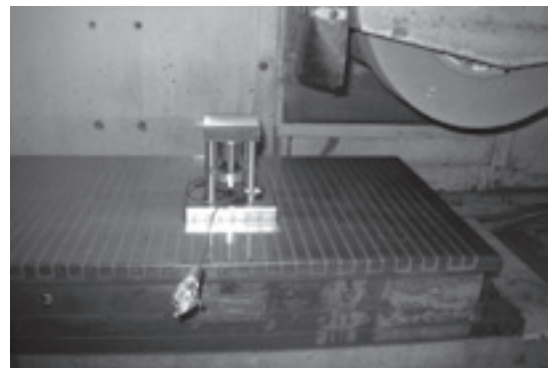
いることや、信号のサンプリング周波数を上げ、読み取り分解能を向上させることなどが考えられる。前者の場合には、板厚の増加に伴い、超音波の高周波数成分の減衰が増大することが課題として挙げられる。ここでは高サンプリング周波数により採取した信号での減肉量の分解能向上に関する検討と確認を行った。

試験には周波数 5 MHz の高温探触子を使用した。図 5 (a) に示すように、厚さ 2 mm の銅板を超音波センサと試験体との間に挿入して密着させることで超音波を試験体に伝達させている。この状態で試験体の厚みを監視し、同時に裏面側（図中では上側の面）を平面研削器により僅かずつ研削し、試験体の減肉量を監視した。試験状況を図 5 (b) に示す。

超音波信号採取のサンプリング周波数は 1 GHz (1 ns ピッチ) とし、さらに採取した信号を 10 倍



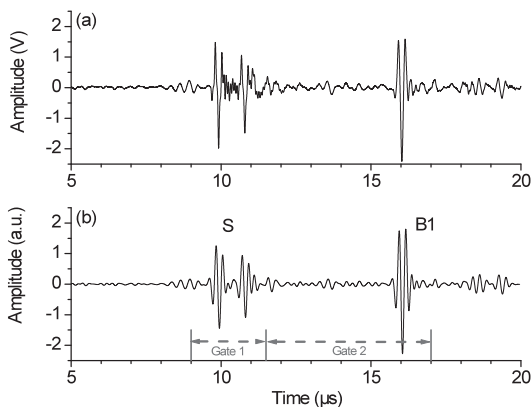
(a) 超音波センサの配置状況



(b) 試験状況

図5 減肉量の監視精度確認試験

にスプライン補間し、演算に供した。演算はまず補間後の信号をリアルタイムウェーブレット (4) により中心周波数である 5 MHz の成分を抽出した。図 6 (a) に採取、補間後の信号を、図 6 (b) に 5 MHz 成分をリアルタイムウェーブレットで抽出した結果を示す。抽出した信号から、銅板と試験体表面との界面の S 波と底面エコーの B1 波をそれぞれ含む 2 つの信号を抽出し、それらの相互相関により 2 つのエコーの時間差を演算した。



(a) 超音波原信号、(b) 5MHz 抽出信号

図 6 減肉量監視試験における探傷波形 (a図) とリアルタイムウェーブレットによる 5MHz 抽出波形 (b図) の例

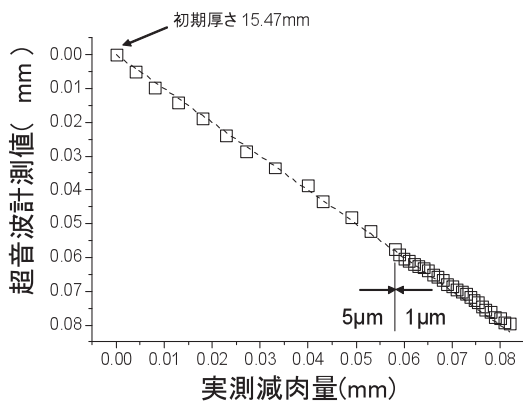


図 7 減肉量監視結果

補間後の信号は 100 ps 間隔で採取された信号と同等の分解能を持つ。銅片の材料音速は約  $5.9 \mu\text{m/ns}$  であるため、計算上では減肉の分解能は  $0.3 \mu\text{m}$  を実現できることになる。図 7 に研削時における減肉量監視結果を示す。  $1 \mu\text{m}$  の研削量に対しても高い分解能で減肉量の指示値が変化することが確認でき、  $\mu\text{m}$  オーダーでの減肉監視が可能であると考えられた。

### 3. 減肉監視への適用

本誌 21 号において、平成 6 年から平成 8 年に (財) 石油活産業活性化センターの委託により、東燃株式会社 (現; 東燃ゼネラル石油株式会社) 殿と共同で実施した石油プラントの高温配管の減肉監視試験の様子を報告している<sup>(5)</sup>。この他の例として、カナダの CANDU 炉の炉心近傍の小口径配管に取付けて減肉を 10 年以上連続監視している例の概要を紹介する<sup>(6)(7)</sup>。

図 8 に監視部位近傍の概要を示している。多数の小口径配管が炉心部に配置されている。減肉

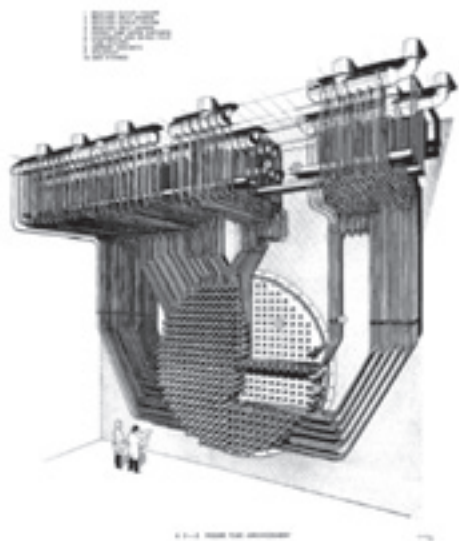


図 8 監視部位の模式図

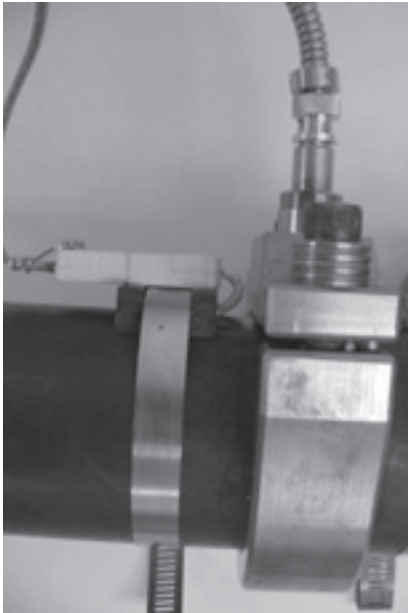


図9 高温での減肉連続監視方法の例

を連続監視して、水処理による腐食制御が行われる。図9に高温探触子の配管への取付けの例を示している。ここではセンサと配管の間に柔らかい金箔を挟み、ねじで締め付けて、取付けたパネによって加圧することで金箔を介して超音波を試験体に直接に伝搬させている。

測定した超音波波形は波形相関を用いることで、数 $\mu\text{m}$ での減肉測定を可能にしている。図10に本方法によって配管の減肉を連続監視した結果の例を示しているが、微小な減肉の過程をよく評価できている。なお、温度による音速変化は、

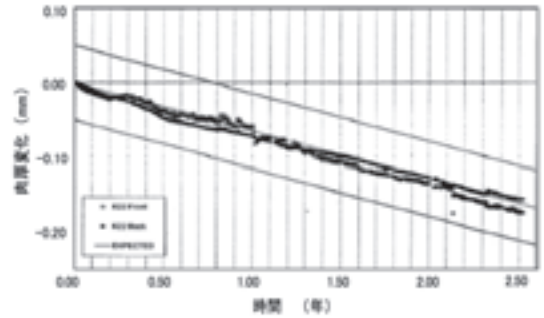


図10 高温での減肉連続監視結果の例

配管近傍に取付けた熱伝対で温度を測定することで補正している。

#### 4. まとめ

開発した高温超音波センサを用いて高温構造物の減肉を高精度に監視するシステムについて紹介した。肉厚の測定には波形相関を用いることで $\mu\text{m}$ の精度で減肉量を監視できることを確認している。この高温超音波センサはカナダのCANDU炉の炉心近傍の小口径配管に取付けられ、 $310^{\circ}\text{C}$ の高温環境において10年以上の減肉監視実績を持っている。

ここでは、減肉監視システムに関して紹介したが、高温超音波センサはこの他にPb-Biの次世代高速増殖炉の高温超音波流量計や超音波温度計など多くの方面で活用いただいていることも併せて紹介しておく（例えば(8)）。

## 参考文献

- (1) 三島他「高温・低温用超音波探触子の開発と高温下の割れ監視方法」非破壊検査 第38巻10号(1989) pp.904-908
- (2) T.Arakawa et al. "Application of Brazed-Type Ultrasonic Probes for High and Low Temperature Use" Nondestructive Characterization of Materials V (1991-May) pp.263-272
- (3) 佐々木、畠中、荒川、小原 耐放射線性超音波探傷技術の開発、石川島播磨技報(2000)、Vol.40、No.4、pp.199-202
- (4) 中島 リアルタイムウェーブレットの超音波探傷への応用、IIC REVIEW(2007年4月)、No.37、pp.19-28
- (5) 熱田 : 超音波を用いたコロージョンオンラインモニタリングシステムの開発、IIC REVIEW 21号(1999年4月)、pp.33-42
- (6) P.Kielczynski et al. : Recent Developments in Ultrasonic Devices for Monitoring Critical Parameters in Canadian Nuclear Reactors, 1998 IEEE International Ultrasonic Symposium, 1998 Oct.
- (7) 笹原、荒川 高温でのモニタリング、RUMPES(CIW通信:日本溶接協会)、Vol.17、No.2、pp.8-9
- (8) Hirabayashi et al., "Development of Ultrasonic Flow Meter for Liquid Lead-Bismuth Flow", ICONE 13-50346(2005)



研究開発センター  
研究開発グループ課長  
熱田 美道  
TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547



研究開発事業部  
生産技術部  
加藤 明  
TEL. 045-759-2120  
FAX. 045-759-2155



研究開発センター  
研究開発グループ  
齋藤 勝美  
TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547



フェロー  
工学博士  
荒川 敬弘  
TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547



研究開発センター  
研究開発グループ専門課長  
畠中 宏明  
TEL. 045-791-3522  
FAX. 045-791-3547