

# 非破壊材料検査技術の 最近の動向と化学プラント装置 への適用

住友化学(株) 生産技術センター  
森 久 和  
末 次 秀 彦

## Recent Trend on Nondestructive Material Testing Method and Its Application to Chemical Plant Equipment

Sumitomo Chemical Co., Ltd.  
Process & Production Technology Center  
Hisakazu MORI  
Hidehiko SUETSUGU

Newly developed methods for facility management like RBI (Risk Based Inspection) and FFS (Fitness For Service) have recently been adopted in industrial chemical plants for the purpose of enhancing safe, stable operation and extending their operational lives. These new methods introduced in this paper include an inspection method for stress corrosion cracks, an inspection method for parts with elevated temperatures during operation, an inspection method for reactor tubes under the baffle plates of carbon steel reactors, and diagnostic technology for ball bearings developed through collaboration between academia and industry on research. Non-destructive inspection technologies, which are very applicable to the protection of rotating machines from contamination by foreign objects are also introduced in this paper.

### はじめに

当社は、石油化学・基礎化学等のペトロ系・バルク系工場や医薬・農業化学等のファイン系工場、情報電子材料のような組み立て型工場と種々のプラントを保有し、製品の形態も流体、粉体、成型品と多岐にわたっている。一方、プラントの建設年からみると、1970年代の高度経済成長期、あるいはそれ以前に建設され30年以上経過したプラントと最近建設されたプラントが混在して稼働している。最近では、これら様々なプラントの安全、安定操業を維持し、寿命延長を図るための新しい設備管理手法としてRBI<sup>1)</sup>(Risk Based Inspection ; リスク基準検査)やFFS<sup>2)</sup>(Fitness For Service ; 供用適性評価)が取り入れられようとしている。これらの設備管理手法では、確実な欠陥の検出技術と精度よい欠陥寸法の定量化技術をベースに最適な検査方法の選定や設備の状況に応じた検査周期の決定、あるいは力学的な安全性評価のうえ、従来からの非破壊検査技術を応用あるいは発展させて、設備に欠陥を許容したまま運転の継続可否を検討しようとするものである。

我々のグループでは、これらの設備管理手法に必要な検査技術として、応力腐食割れの検査方法、運転

中検査のための高温部位の検査方法、また、炭素鋼製反応器のパツフル下反応管の検査方法、そして、産学共同研究により転がり軸受診断技術を開発したので本稿ではこれらの事例を紹介する。また、回転設備等からの異物混入防止対策として応用可能であるため、この点についても紹介したい。

### 超音波探傷法による応力腐食割れ検査と高温探傷

超音波とは人間の可聴音(20Hz~20KHz)以上の周波数を持つ音波をいうが、探傷用途にはMHzオーダ以上の周波数領域のものが用いられている。この探傷方法は、検査精度が良いことと非破壊で材料内部を検査できることから材料欠陥の検出に多用されている。ここでは、プラント設備の応力腐食割れ検査と運転中設備の高温探傷事例を紹介する。

#### 1. 応力腐食割れ検査

##### (1) TOFD法による割れ検出

化学プラントでは機器内部で腐食性流体を扱うばかりでなく、機器外面からも腐食性物質(海水等)の飛散があるため、応力腐食割れ(Stress Corrosion Crack ; SCC)は、機器の内外いずれにも発生するこ

とがある。SCCの一例をFig. 1に示したが、炭素鋼、SUS304鋼ともに多数の割れが分岐状に進展している。このため、開口側、非開口側を問わず、従来法の超音波斜角探傷試験では、隣に存在する割れにビームが遮られて深さ推定はできなかった。そこで、新しい超音波探傷方法のTOFD法（Time of Flight Diffraction Technique；伝播時間差回折波法）に着目して、検出性能の確認を行った。

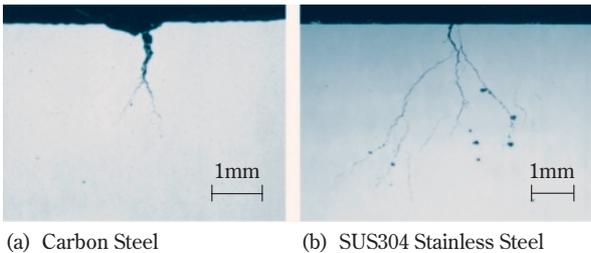


Fig. 1 Cross Section View of SCC Specimen

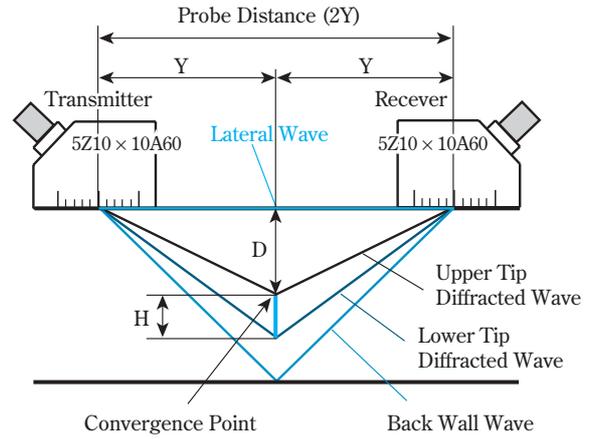
(2) TOFD法の原理

新しい超音波探傷法のTOFD法ではFig. 2に示したように、送信用の探触子と受信用の探触子を、一定の距離をおいて相対して配置する。割れの非開口側に探触子を配置すると、送信用の探触子より発射された超音波（縦波）が割れ先端に当たったとき、微弱な回折波が発生するが、それをもう一方の探触子で受信して、欠陥の位置と寸法を定量化する方法である。

割れの位置情報として、二つの探触子間の距離（Fig. 2の2Y）と割れ先端からの回折波のビーム路程（Fig. 2のW<sub>U</sub>、W<sub>L</sub>）を探傷器の表示画面で読み取ることができるため、計算により深さ推定が可能になる。この測定原理の実用性の確認を化学プラント構成材料の多くを占める厚さ10mm以下の材料に発生した応力腐食割れ試験片（Table 1参照）を用いて行うとともに、深さ推定精度を評価した。一般に普及しているTOFD法は厚肉材料探傷用に開発されたものであるため、化学プラントで多く使われている10mm以下の材料に適用できるよう、本評価では特別仕様の小径探触子（直径3mm）を作製して測定を行うことで測定精度の向上を図る工夫を行った。

(3) 深さ推定精度と実プラントへの適用

SCCの発生した炭素鋼試験片の非開口側からのTOFD探傷信号をFig. 3に示した。Fig. 3(a)にはAスコープ表示画面（横軸に伝播時間t、縦軸にエコー高さh）を示したが、従来型の超音波探傷器の表示画面であり、エコー高さ、ビーム路程等の数値を記録し、これらの数値をもとに三角関数を使用して欠陥位



•Equation to calculate Flaw Depth ; D

$$D = \sqrt{\left(\frac{W_U}{2}\right)^2 - Y^2} \dots\dots\dots (Eq. 1)$$

•Equation to calculate Flaw Height ; H

$$H = \sqrt{\left(\frac{W_L}{2}\right)^2 - Y^2} - \sqrt{\left(\frac{W_U}{2}\right)^2 - Y^2} \dots\dots\dots (Eq. 2)$$

W<sub>U</sub> : Path Length of Top Tip Diffracted Wave (Upper)

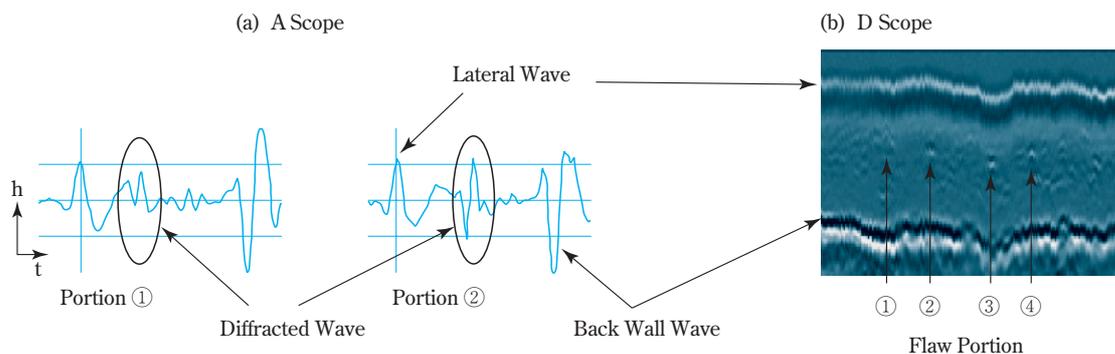
W<sub>L</sub> : Path Length of Top Tip Diffracted Wave (Lower)

Fig. 2 Reflection Echo Path and Flaw Size Estimation Method With TOFD Technique

Table 1 SCC Specimen for TOFD Measurement

Material	Equipment	Thickness (mm)	Cause of SCC	Photo
Carbon Steel	Tower Body	8.1	Caustic Solution	Fig. 1(a)
SUS304 Stainless Steel	Tower Body	9.0	Chloride Enrichment under Insulator	Fig. 1(b)

置、寸法表示のための作図が必要となる。Fig. 3(b)にはDスコープ表示画面（欠陥または溶接線の長手方向に相対する探触子を移動させたときの断面方向の欠陥マッピング図）を示したが、欠陥が断面図のなかに描画して出力されるので、Aスコープと違って作図をしなくても欠陥位置、高さ（材料内部に生じた欠陥の肉厚方向の長さ）をイメージしやすい。A、Dスコープともにき裂先端からの回折波と思われる波を受信しているため、Fig. 2に示した（Eq. 1）のW<sub>U</sub>、Yを用いて、き裂先端までの深さDを求めた。さらに断面観察を行い、その結果をあわせてTable 2に示したが、非開口側からの探傷で測定誤差は炭素鋼で±0.2mm、SUS304鋼で±0.4mmであった。



**Fig. 3** Test Result of TOFD Technique Testing with Carbon Steel Specimen

**Table 2** TOFD Measurement Result of Branched Crack Caused by SCC

Material	Test Surface	Convergence Point	Error*1 (mm)	Detecting Limit (mm)
Carbon Steel (8.1t)	Non Opening Side	2/3t	± 0.2	(> 0.5)*3
	Opening Side	2/3t	NA*2	NA*2
SUS304	Non Opening Side	2/3t	± 0.4	> 0.5
Stainless Steel (9.0t)	Opening Side	2/3t	± 0.3	> 3
	Opening Side	Minimum	± 0.3	0.5 < d < 3

\*1 : Deviation from Average of Measurement Data  
 \*2 : Due to a lot of Pitting (0.5mm Deep) on the Inside Surface of the Specimen  
 \*3 : Shallow Crack Specimen to specify the limitation was not available

TOFD法は、欠陥先端からの回折波を用いているため、欠陥寸法の定量化に優れた探傷方法である。しかし、深さ2mm以下のような微細な欠陥については、Fig. 3(a)に示した回折波と底面波が重なるため、深さ推定が困難になり、最悪の場合は見逃すことになる。そこで、従来法の一つの探触子による斜角探傷法とTOFD法を併用して、反射強度の強い欠陥からのコーナ反射エコーを斜角探傷法で観察することで見逃しをなくしている。

## 2. 高温超音波探傷技術の開発

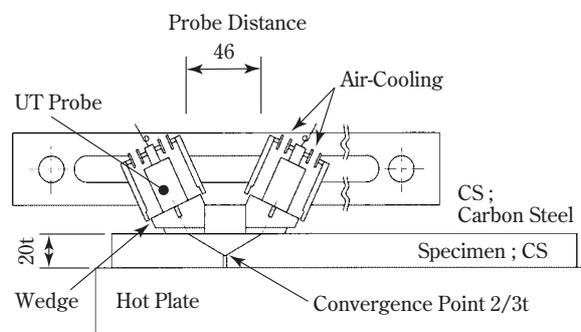
### (1) 運転中検査の必要性

高圧ガス認定設備及びボイラ・一圧（第一種圧力容器）機器においても近年は2年、4年連続運転が可能となっている。これら機器には100 以上の高温部位も多いが、100 以上の機器・配管内部でも圧力があれば湿性環境になりうるため、内表面側からSCCが発生する可能性がある。また、エロージョン・コロージョン等による減肉発生や、繰返し荷重がかかるところでは疲労損傷等によるき裂が発生する可能性があるため、運転中検査は連続運転達成のための必要な検査項目の一つとなる。

### (2) 高温超音波探傷性能

#### ① 試験片と空冷用探触子ユニット

ホットプレートの上にFig. 4に示した炭素鋼試験片(200mm × 300mm × 厚さ20mm、スリット幅0.3mm × 長さ10mm、深さは肉厚の40%)、その上に当グループで製作した空冷式TOFD探傷用プローブを配置した。ウエッジは耐熱樹脂を用いているが、空冷することにより常温用の市販超音波探触子の使用が可能となる。ウエッジの探傷面への接触面積は、幅12mm × 長さ17mmほどで、市販常温用の小型超音波探触子の寸法とほぼ同じ大きさである。接触媒質は市販品の高温用接触媒質を用いた。

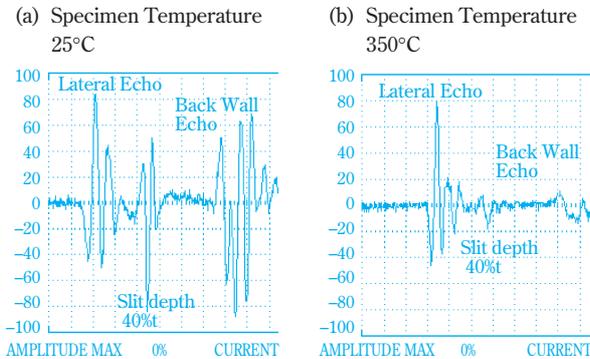


**Fig. 4** Schematic Illustration of TOFD Technique Probe Setting on Hot Plate

#### ② 探傷結果

Fig. 5に示した探傷波形は、300 の炭素鋼、耐熱樹脂の音速を用いて超音波の入射角（ウエッジ内の超音波伝播方向の傾き角度）を決定し製作したウエッジのものであるが、常温時と比べて350 ではラテラル波、底面波ともに減衰が大きくなっている。これは温度上昇による減衰の増大も寄与しているが、それよりも音速変化による交差点のずれが大きく影響している。横波45°用探触子ウエッジでは、炭素鋼、耐熱樹脂とも200 の音速を用いて製作したウエッジでも25 か

ら350 までの温度範囲で使用可能であった。しかし、縦波60°用探触子ウエッジでは屈折角（試験片内の超音波伝播方向の傾き角度）が60°と大きいこともあって、入射角の変動が大きく屈折角に変動を与えるため、200 以上の温度範囲では、50 きざみでウエッジを製作する必要があることが判明した。



**Fig. 5** Echo Pattern from TOFD Technique on Hot Plate

### 3. 溶融塩中に混入した空気量の定量化技術の開発

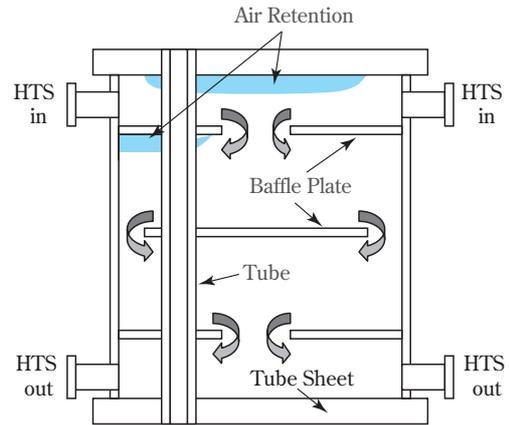
#### (1) 縦型多管式反応器と空気混入

溶融塩（Heat Transfer Salt；HTS）は、多管式反応器の熱媒体等に利用されている。溶融塩中に何らかの原因で空気を巻き込むとFig. 6に示したように縦型多管式反応器では、上管板やバッフル下に滞留し、熱伝達が阻害されることによって、反応管の異常な温度上昇の原因になりうる。

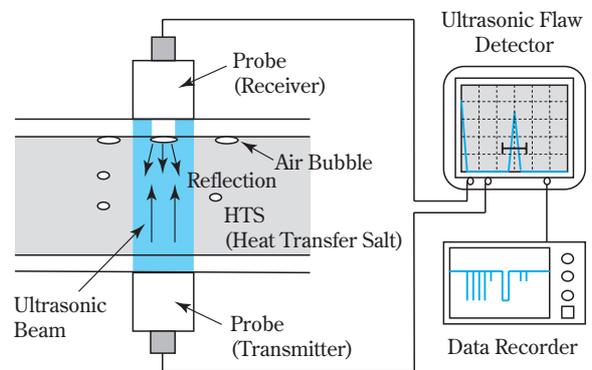
#### (2) 空気量定量化技術と実プラントへの適用

前項で紹介した高温超音波探傷技術を応用して、300 前後の溶融塩配管中に混入した気泡の検出、定量化技術を開発し、当社関連プラントの安全運転に活用している。原理はFig. 7に示すように配管などの測定対象物を挟み込むように対向させて送信用と受信用の超音波探触子を設置する。送信用探触子から送信された超音波ビームは溶融塩中を透過して受信探触子で受信される。溶融塩中に空気が混入すると発生した気泡によって超音波ビームが散乱されるため、溶融塩中を透過して受信探触子で受信される超音波の強度は減少する。このように溶融塩中への空気の混入有無は受信される超音波の強度変化の有無で判断できる。さらに、Fig. 8に示したように10秒間に透過した超音波強度の平均値と、空気量とHTS流速の比との相関関係を予め求めておくことによって、混入した空気量の定量化が可能となる<sup>3)4)</sup>。

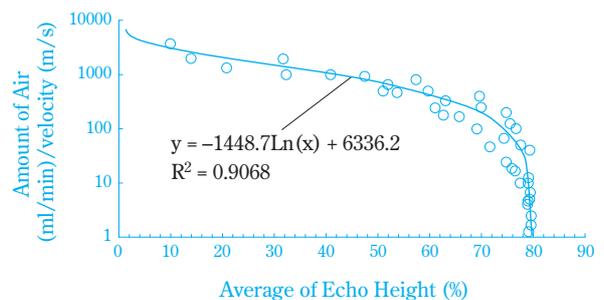
本技術の確立によってHTSへの空気の混入を容易かつ確実にモニタリングできるようになり、反応管の異



**Fig. 6** Air Retention under Upper Tube Sheet and Baffle Plate of Reactor



**Fig. 7** Principle of Air Bubble Measurement in HTS



**Fig. 8** Relation between Average of Echo Height and Amount of Air

常な温度上昇を抑止することによって、より安定・安全なプラント操業が可能となっている。

### 渦流探傷法によるギャップ監視と炭素鋼製反応管の検査

渦流探傷法は、検査スピードが速く、超音波探傷法と違い水などの接触媒質が不要で、取り扱い易いという利点がある。反面、欠陥以外の材料特性の変化、

接触面の変化などにも影響されるため、検査精度が超音波法などに比べて劣っている。しかし、超音波探傷法では材料の向こう側に空気があると材料裏面側で全反射するが、渦流探傷法では、空気中を磁力線が通過し、近距離なら導電性材料の向こう側にある他の導電性材料を検出できる。そこで、渦流探傷法による二つの導電性材料中の磁力線の通過を利用して、ギャップ監視技術の開発を行った。

1. 粉体定量排出器回転羽根のギャップ監視技術の開発

(1) 粉体定量排出器の構造

粉体定量排出器は、ホッパーやサイロの底部に設置され、Fig. 9に示すように、底板の上を薄いフラットな回転大羽根が回転することにより、内容物は円筒外周部に送られる。外周の内容物は、回転小羽根により排出される。回転大羽根は回転軸を軸芯とした片持ち構造であり、内容物の負荷により羽根に撓みが発生する。この撓みによって変化する回転大羽根と底板のギャップを確実に確保しておかなければ、両者が接触して金属の切子等の異物を発生する可能性がある。これらは詳細設計時点で十分な強度、寸法を有するよう設計されているが、排出部の閉塞等が発生すると、回転大羽根が底板方向へ沈み込む現象が起こるため、これらのギャップが十分に確保されているか確認する必要がある。これらのギャップを測定する方法として、従来から材料内の欠陥検査や二つの材料間のギャップ測定に用いられている渦流探傷法を検討した。

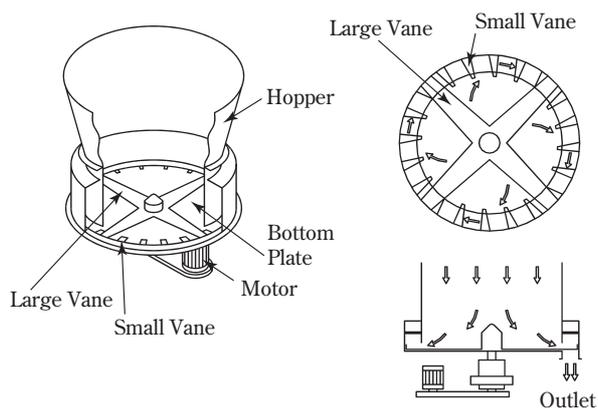


Fig. 9 Schematic Illustration of Table Feeder

(2) 渦流探傷法について

① 渦流探傷法の原理とその種類

コイルに交流を流すと磁束が発生し、このコイルを導体に近づけると導体に渦電流が誘起される。この渦電流の流れを妨げるような欠陥や材料特性（導電率、透磁率）が変化する部位が存在すると、磁束が変化し

渦流コイルに流れる電流が変化する。一般にはこの変化量から欠陥検出などの検査を行う。

Table 3に渦流コイルの種類を示す。検査対象物によって3種類の渦流コイルが使われる。貫通コイル（Encircling Coil）は、材料製造メーカーが棒や伝熱管の素材製造時の検査として使用している。内挿コイル（Inner Coil）は化学、電力、原子力プラントなどに設置された熱交換器伝熱管の保守検査に、上置コイル（Surface Coil）もこれらプラントの塔槽、熱交換器、配管などの壁面の保守検査に使用される。

Table 3 Type of Eddy Current Coils

Encircling Coil	Inner Coil	Surface Coil
For use of production inspection at material supplier	For use of equipment maintenance and inspection	For use of equipment maintenance and inspection

② 渦流コイルの信号出力

市販の渦流探傷器には、Fig. 10に示すように、ホイートストンブリッジ回路が組み込まれている。差動

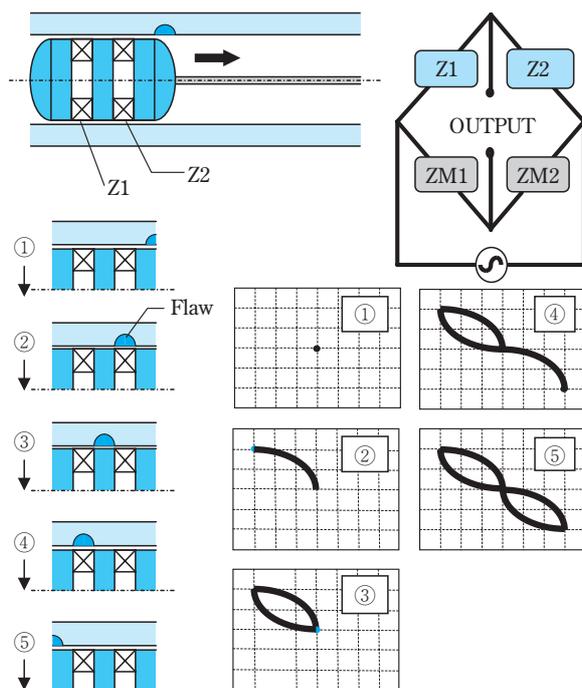


Fig. 10 Eddy Current Impedance Plane Signals from Differential Coil

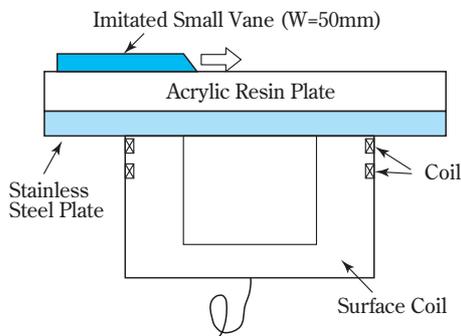
方式の渦流コイルそれぞれのインピーダンス（交流抵抗） $Z_1$ 、 $Z_2$ が、渦流探傷器が持っている固有抵抗 $Z_{M1}$ 、 $Z_{M2}$ と平衡するように設定する。その状態で内挿コイルを管軸方向に移動させると、欠陥などがあれば渦電流に乱れが生じ、インピーダンス変化が探傷器にリサージュ波形としてFig. 10の①～⑤のように表示される。

### (3) ギャップ測定用上置コイルと実プラントへの適用

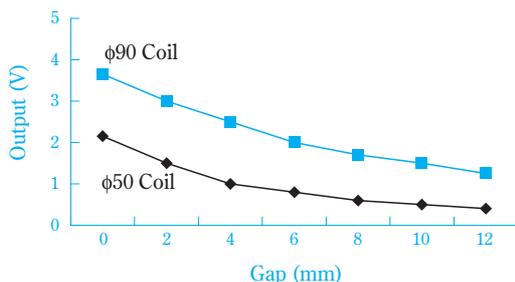
#### ① 非磁性体用上置コイルと実プラントへの適用

粉体定量排出器の底板は、厚さ9mmのSUS316製で、その向こう側にあるSUS304製大羽根と子羽根を5mm以上のギャップをあけ、検出する必要があった。そこで、外径50mmと90mmの上置コイルを試作して、検出感を比較した。

Fig. 11に示したように、厚さ9mmのSUS316製模擬底板の下側に試作した上置コイルを配置した。その模擬底板の上側にギャップを作るための厚さを変えたアクリル板、さらに、その上側に台形状SUS304製模擬小羽根を置き、上置コイル中心が模擬小羽根の幅50mmの位置を通過するよう調整して電圧変化を測定した。その試験結果をFig. 12に示した。出力電圧は、コイル外径を大きくしたほうが大きく、ギャップ5mm



**Fig. 11** Test Configuration of Imitated Small Vane and Surface Coil Without Permanent Magnet



**Fig. 12** Relation of Output Signal with Gap between Bottom Plate and Small Vane

で検出信号は2.2V、ギャップ10mmで1.5Vであった。試験片として用いた模擬子羽根も充分検出していることから実機へは、検出感度の大きい外径90mmの上置コイルを適用することにした<sup>5)</sup>。

#### ② 強磁性体用上置コイル

炭素鋼製粉体定量排出器では、底板の炭素鋼板を磁化し透磁率を1に近づける必要がある。厚さ10mm程もある炭素鋼製底板を磁化するには電磁石を使用すれば容易である。しかし、現場のスペースを考慮して、希土類磁石による磁化方式を採用し、非磁性体用上置コイルとほぼ同寸法（外径90×高さ40mm）の大きさで、炭素鋼板の磁化厚さを確認すべく磁石配置について検討した。

コイル外側に、リング状の希土類磁石を重ねて嵌め込むためコイル外径は70mmとし、コイル内側にも円柱状の希土類磁石を挿入した。これらコイル内外の磁石で磁気回路を形成させた。

上置コイル中心を台形状の炭素鋼製模擬大羽根の幅が100mmの位置で通過させ、電圧変化を測定した。その結果、厚さ5mmの炭素鋼板であればギャップ5mmで検出信号は1.5V、ギャップ10mmでも1Vあり、実用上問題のない検出感度が得られた。

今回製作した希土類磁石を重ねると、人の力では扱いかねるほどの吸着力となり、取り扱いが困難となる。粉体定量排出器の底板が5mmより厚いときは、設置場所を穴くりなどで薄くするか、上置コイルの寸法は大きくなるが電磁石方式を採用する必要がある。

## 2. 炭素鋼製反応器バッフル下反応管の検査技術開発

### (1) 渦流探傷法での検査不能部位

これまで炭素鋼製反応器の反応管や熱交換器伝熱管（以下、管という。）の検査には、検査スピードは速いが、超音波探傷法や放射線透過試験などに比べ検査精度の劣る検査方法（粗探傷法）として、磁気飽和渦流探傷法やリモートフィールド渦流探傷法が採用されてきた。これらの検査方法ではバッフル下の管部位については検査不能であった。そこで最近では、バッフルプレート下の管部位も検査可能で、以前に比べて検査スピードの速くなった超音波水浸法で検査されることが多くなってきた。この超音波水浸法は、検査スピードが速くなったとはいえ渦流探傷法に比べれば検査スピードが遅く（50～100本/1日）全数検査は不可能である。そこで、管に存在するであろう最大減肉値を推定するため、極値統計法が併用されることが多い。

先述したように溶融塩を扱う縦型多管式反応器では、空気を巻き込むとバッフルプレート下、管板下、及び、その近傍の管で異常昇温が生じ、管外面側に腐食が生じる懸念がある。また、管外面側通水の縦型・



法、全面減肉検査法には標準比較法が採用されてきた。その人工欠陥の検出状況をFig. 15に示した。バッフルプレート信号、人工欠陥のみの信号、そしてバッフルプレート下の管部位に位置する人工欠陥からの信号（位相）を見比べてもバッフルプレートと欠陥との識別ができない。具体的には以下に述べる。

差動法でのバッフルプレートからの信号をFig. 15(1)に示した。この信号とFig. 15(3)に示したバッフルプレート下の0.5mm深さの全周階段状溝からの信号、Fig. 15(5)に示したバッフルプレート下のφ5mm×1.3mm深さ平底穴からの信号位相がよく似ているため、現場では識別できない。また、標準比較法では、バッフルプレートからの信号をFig. 15(6)に示したが、Fig. 15(10)に示したバッフルプレート下のφ5mmの1.3mm深さ平底穴からの信号（位相）がよく似ているため、こちらも現場では識別できない。

ホール素子

ホール素子でのバッフルプレートからの信号をFig. 16(1)に示したが、プラスの山形信号である。人工欠陥のみの信号、バッフルプレート下の人口欠陥からの信号をFig. 16(2)~(5)に示したが明らかに信号（位相）に違いが認められる。

ホール素子からの信号は、バッフルプレート、人口欠陥も含めて厚肉側にプローブが移動するとプラス位相、薄肉側に移動するとマイナス位相に振れるため、直感的にも理解しやすい。Fig. 16(2)の階段状の人工欠陥で、図とは反対側に厚肉側へプローブが移動するとプラス信号になるため、バッフル信号と識別できない。しかし、バッフルプレートは等間隔で配置されているため、識別可能と思われる。確実な確認方法と

しては、プローブを管の反対方向から入れてマイナス側に振れば欠陥信号と容易に識別できる<sup>6)</sup>。

ホール素子1個だけでは、管周方向での検査範囲が限られているため、2~3個あるいはできれば90°ピッチに4個配置したものでの検査が望ましい。今後、現場適用を図るなかで技術を完成させたい。

転がり軸受摩耗と適用診断法

化学プラント構成機器のなかでも動機器の長期にわたる連続した安定運転の達成は、プラントの安定操作の維持だけではなく、品質の向上、製品コストの抑制にもつながり、また、安全な事業所として、地域との共存をはかるためにも重要な課題である。そこで、小型回転機に多い転がり軸受損傷の早期診断方法を実証試験で確認するとともに、新たな診断方法として超音波法の有効性について確認した。

1. 転がり軸受の摩耗の進行と診断方法

ころがり軸受損傷診断方法として、従来から温度測定、振動法（速度、加速度）ショックパルス法、AE法が用いられている。これらに超音波法を加えて、軸受損傷の検出時期を確認するため、新たに軸受寿命試験機を製作し、実証運転を行った。Fig. 17にその実証試験機と周辺機器の状況を示した<sup>7)</sup>。

これら各種診断法で異常摩耗が発生した場合の検出可能時期を模式的にFig. 18に示した。振動（加速度）法、ショックパルス法は、軸受損傷の判断基準まで備わった方法で広く用いられているが、軸受損傷の末期でないと検出できなかった。しかし、新たに加わ

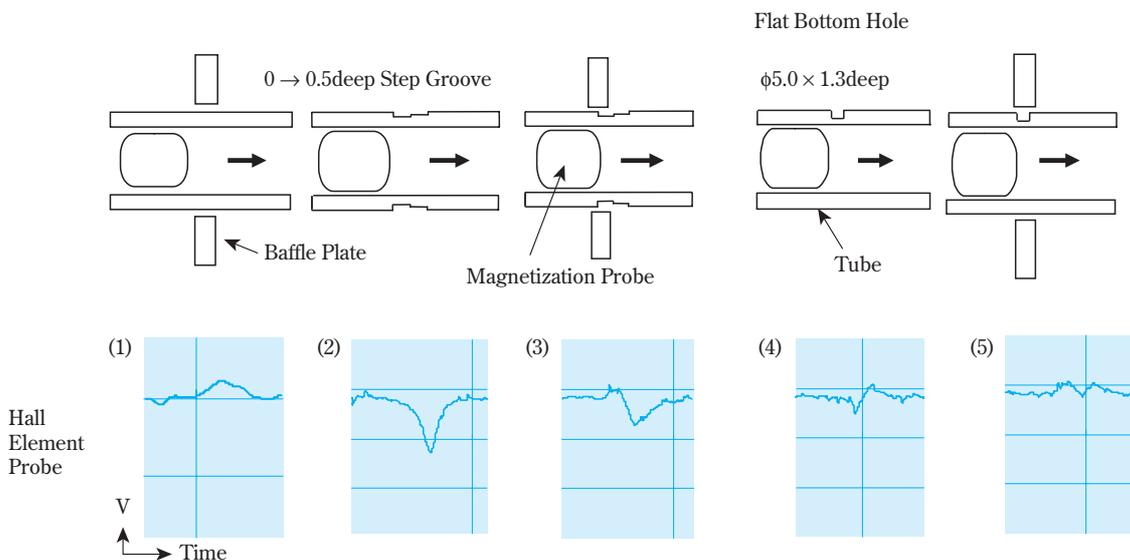
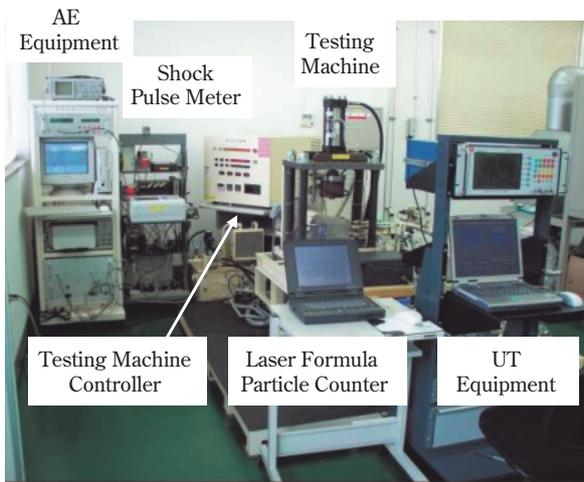
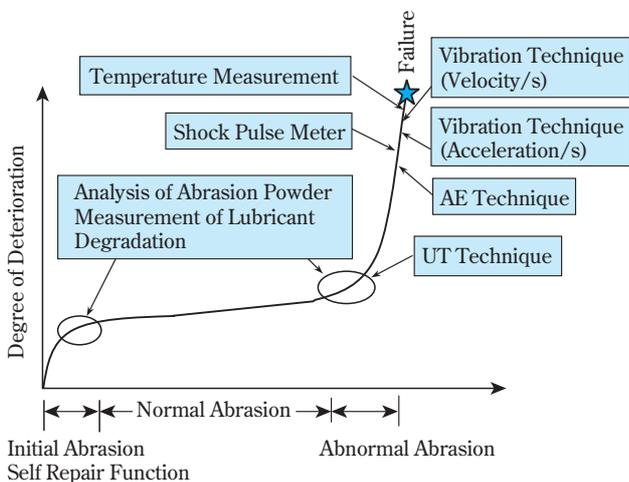


Fig. 16 Artificial Defect Signals of Hall Element with Internal Probe under Magnetic Baffle Plate (STB340 × φ30 × t2.3, Density of Magnetic Flux in Tube Wall ; 1.0 Tesla, Carbon Steel Baffle Plate Thickness ; 15.5mm)



**Fig. 17** Panoramic View of Testing Machine and Life Measurement System of Ball Bearing



**Fig. 18** Wear Progression and Diagnosis Method for Ball Bearing and Detection Availability Stage of each Method

った超音波法<sup>8)9)</sup>は、異常摩耗の初期段階を検出できる診断方法であることが確認された。AE法は、振動(加速度)法に比べて軸受損傷検出時期は早い、これは軸受、その他からのノイズ源を抑制できた場合のことであって、現実的には課題が多い。

2. 超音波法による診断技術の開発

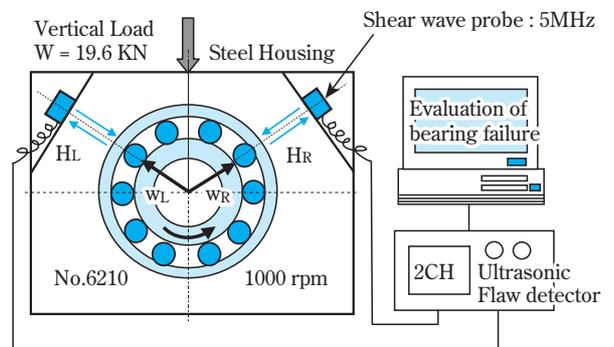
Fig. 19は実験に用いた装置の概略構造であり、軸受(単列深溝玉軸受6210)の損傷は鋼製のハウジング外周に取り付けた5MHzの超音波横波探触子により、ハウジングと軸受外輪のはめ合い面に横波超音波を入射させて調べている。入射された音波の一部は、主に照射領域の固体接触面積に応じて透過し、残りは反射する。

そして、探傷器画面上では、受信音圧に比例した反射エコーが観測される。本測定法では、探触子直下に

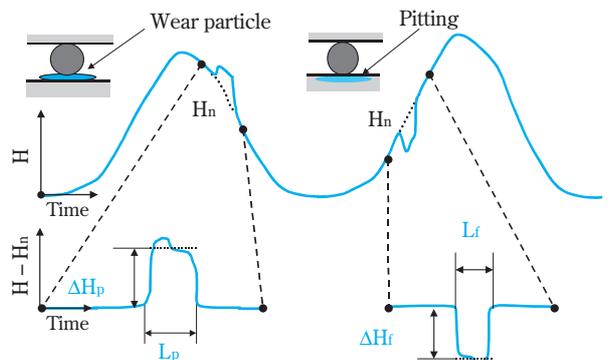
転動体が移動してきた場合のハウジングと外輪とののはめ合い面からのエコー高さ $h$ (Fig. 19の転動体の位置)と、隣接する2個の転動体の中央に探触子が位置したときのエコー高さ $h_0$ との比により定義されるエコー高さ比 $H = [(1 - h/h_0) \times 100]$ により評価を行う。

いま、探触子直下に転動体が移動してきた場合を考える。この時、はめ合い面の応力は上昇し、固体接触面積が増加するため、エコー高さは $h_0$ から $h$ まで低下する。そして、転動体の移動に伴う応力変化により、エコー高さが増減し、損傷のない軸受が良好な潤滑条件下で稼動する場合には、ほぼ正弦波状の変動を繰り返す。

一方、排出された摩耗粉の混入やピッチング等の損傷部を転動体が通過する場合には、一時的に転動体への負荷が増減する。その結果、Fig. 20の模式図(縦軸はエコー高さ比 $H$ のため、Fig. 19の転動体の位置が正弦波状の変動のピーク)のようにエコーの波形に局部的な乱れが生じ、軸受の劣化を含む潤滑状態の評価が可能になる<sup>8)9)</sup>。このFig. 20に示した凹みの維持時間から推測した内輪に生じたフレーキングの損傷長さが0.9mmのものも検出された<sup>7)</sup>。この時点では他の診断方法では、異状は検知されていない。さらに試作した解析ソフトを用いることにより、低速回転(500rpm)



**Fig. 19** Outline of Experiment Apparatus



**Fig. 20** Schematic Diagram of Echo Height Variation

であるが、0.5mm幅のピッカーズ圧痕が検出可能であった<sup>10)</sup>。

この超音波法は、転がり軸受の損傷の初期段階から検出できる利点を有しているが、適用できる場所は振動乾燥機等、ハウジングと軸受がしまりばめのところに限定される。今後、軸受の早期診断を目指すべく、動機器の製作にあたっては、外輪に直接超音波探触子が接触できるように設計されることが望まれる。

## まとめ

超音波TOFD法 (Time of Flight Diffraction Technique ; 伝播時間差回折波法) を厚さ8~9mmまでの炭素鋼、SUS304鋼に発生した分岐状の応力腐食割れの深さ測定に用いた。その結果、炭素鋼では $\pm 0.2\text{mm}$ 、SUS304鋼では $\pm 0.4\text{mm}$ の精度で検出できることが確認できたので、現場機器の健全性評価に適用している。高温超音波探傷試験では、ウエッジと常温タイプの探触子を空冷することで350 までの垂直探傷、斜角探傷、TOFD探傷が可能となった。この高温超音波探傷技術を用いて300 前後の溶融塩 (Heat Transfer Salt) 中に混入した空気量を、配管外面から超音波透過法を用いて定量化する技術を確立し、現場に適用している。

粉体定量排出器の回転羽根と底板とのギャップを測定監視することで両者の接触による欠損異物の混入防止を図ることが可能である。そこで、渦流探傷法の上置コイルを用いて、非磁性体製 (SUS304等) や強磁性体製 (炭素鋼等) の回転羽根と底板とのギャップを測定するため、コイルデザインを検討し、現場適用を行っている。炭素鋼製反応器のバッフル下の反応管 (伝熱管) 部位は、従来用いられてきた粗探傷法の磁気飽和渦流法やリモートフィールド渦流法では検査不能域であったが、磁化渦流コイルとホール素子を組み合わせることで、欠陥の識別が可能となる。現在、現場適用検討を行っている。

転がり軸受損傷が早期に検出可能な診断方法を確立

するため、軸受寿命試験機を製作し、実証運転を行った。その結果、軸受外面からの診断法のなかでは、超音波法が最も早く検出可能で、続いてAE法、ショックパルス法、振動法の順であった。新しい検査方法の超音波法は、摩耗粉分析や潤滑油劣化と同程度の早期に診断可能であったが、適用できる場所は振動乾燥機等、ハウジングと軸受がしまりばめのところに限定される。今後、早期診断を目指して、軸受外輪に直接超音波探触子が接触できるように設計されることが望まれる。

謝辞 転がり軸受摩耗と適用診断法については、平成10~12年度地域コンソーシアム研究開発事業による研究の一部をベースに、その後も研究を継続された竹内彰敏先生 (高知工科大学) から多岐に渡るご指導を頂戴した。ここに付記して感謝を申し上げます。

## 引用文献

- 1) 石丸 裕, 政友 弘明, 圧力技術, 44 (4), 33 (2006) .
- 2) 小島 郁夫, 菊池 務, 田原 隆康, 圧力技術, 44 (4), 18 (2006) .
- 3) 住友化学(株), 特許申請中 .
- 4) 住友化学(株), 特許申請中 .
- 5) 住友化学(株), 特開2005-140769 (2005) .
- 6) 住友化学(株), 特許申請中 .
- 7) 新エネルギー・産業技術総合開発機構, 地域コンソーシアム研究開発事業, 横断的メンテナンス技術の開発研究, 第3年度 (平成12年度報告書), 124 (2001).
- 8) 竹内 彰敏, 坂本 顕史, 若林 利明, 木村 好次, 石丸 裕, 森 久和, 加藤 彰久, 末次 秀彦, 高橋 達彦, 日本機械学会九州支部 第55期総会講演会 講演論文集 No. 028-1, 241 (2002) .
- 9) 住友化学(株), 特開2002-257797 (2002) .
- 10) 竹内 彰敏, 谷 直樹, 日本設計工学会 平成18年度春季大会研究発表講演会講演論文集, 99 (2006) .

## PROFILE



森 久和  
Hisakazu Mori  
住友化学株式会社  
生産技術センター  
主席研究員



末次 秀彦  
Hidehiko SUETSUGU  
住友化学株式会社  
生産技術センター  
主任研究員