

# 高温 TOFD 法による鋼構造物の遠隔亀裂診断技術の実用化

## Practical Use of Remote Control Crack Diagnosis Technology of Steel Structures Using High Temperature TOFD Method

吉本 松男 YOSHIMOTO Matsuo JFE スチール 西日本製鉄所（福山地区） 設備部設備技術室 主任部員（課長）  
村上 弘一 MURAKAMI Koichi JFE スチール 西日本製鉄所（福山地区） 設備部設備技術室長  
中村 正治 NAKAMURA Masaharu JFE スチール 西日本製鉄所（福山地区） 設備部設備技術室 主任部員（副課長）

### 要旨

JFE スチールでは、鋼構造物の健全性確保の観点から、各種設備診断技術を駆使した劣化度定量評価と余寿命推定を行っている。この一環で溶接部亀裂検出センサを自走台車に搭載した遠隔亀裂診断技術を開発した。亀裂検出センサは、亀裂検出精度に優れ連続測定に適した TOFD (time of flight diffraction) 法を採用し、縦割れと横割れの同時測定、および 200℃ の高温垂直面探傷を特徴とする。自走台車は、表面温度 200℃ の三次元曲面を自在に走行する磁輪吸着式である。開発品を JFE スチールの各熱風炉に適用し、熱風炉鉄皮溶接線の検査精度向上および検査作業の安全化に活用している。

### Abstract:

JFE Steel has been conducting the judgment of steel structure deterioration and remaining life by various diagnosis devices to assure safe safety operations. As a part of these diagnosis devices, the authors have developed a remote control weld crack detection device mounted on self running cart. The authors have adopted a time of flight diffraction (TOFD) method which is suitable for both better accuracy and continuous measurement. Crack detection device allows measurement of vertical cracks and horizontal cracks at the same time against high temperature vertical surface of 200°C. Self running cart is mounted with magnetic wheel which is capable of run against 3 dimension curved 200°C surface. JFE Steel is using this device to diagnosis welding area of hot staves of blast furnaces to achieve both efficiency and safety.

## 1. はじめに

一貫製鉄所のシンボルである高炉は、溶銑製造だけでなく製鉄所全域に副生ガスを供給するエネルギーセンターの役割も持ち、24 時間連続操業しているため定期修理間隔（6 ヶ月）の無事故操業が必須である。

高炉へ 1 200℃ の熱風を供給する熱風炉は、高炉の生産性を律速する重要設備でありその安定稼働が求められている。

本稿では、鋼構造物の健全性確保に向けた取り組み事例として、高温 TOFD 法を用いた熱風炉鉄皮溶接線の遠隔亀裂診断技術について紹介する。

## 2. 従来の熱風炉鉄皮溶接線亀裂検査法

高炉は約 15 年ごとに改修工事が行われ、高炉本体設備はそのつどリフレッシュされる。これに対し熱風炉は、30 ～

45 年と長期間安定稼働が求められるため、構造部材の腐食減肉や疲労亀裂などの未然防止と劣化度管理を確実に行う必要がある。

### 2.1 鉄皮溶接部の亀裂発生要因と防止策

熱風炉鉄皮は、板厚 19 ～ 50 mm の厚鋼板を付き合せ溶接した内径 10 m、高さ 50 m の円筒状鋼構造物である。溶接部には、溶接時の残留応力と送風内圧による引張り応力が作用している。また、鉄皮内面には燃焼ガスに起因した酸性結露水による応力腐食割れ (SCC) の発生が懸念される。そこで、熱風炉建設段階で SCC 防止のため以下の対応を実施している。

- (1) 鉄皮溶接部の応力除去焼鈍
- (2) 鉄皮内面へ耐酸性塗装もしくは耐酸キャストブル施工
- (3) 鉄皮内面での結露を防ぐため鉄皮外面を保温
- (4) 近年では、割れ感受性の低い鋼種を採用

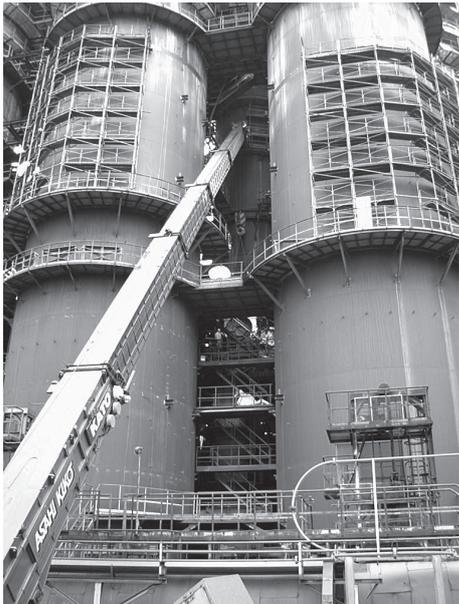


写真 1 熱風炉における溶接線亀裂検査用高層足場

Photo 1 A temporary scaffold for crack inspection on the blast stove iron skin welding line

## 2.2 従来の鉄皮溶接部の亀裂検査法と課題

建設段階で前述の SCC 防止対策を実施しているが、設備管理の安全・安心の観点より以下の点検を行っている。

- (1) 日常点検：目視による鉄皮変形、亀裂点検
- (2) 長周期検査：超音波斜角探傷による溶接線亀裂検査

超音波斜角探傷を実施するには、写真 1 に示すような仮設高層足場が必要のため亀裂検査が長期間となる。

また、超音波斜角探傷を行う鉄皮表面温度は数十から 200℃程度の高温であり、手探傷時の火傷や高層足場からの墜落などの災害発生も懸念される。これらの対策として、TOFD (time of flight diffraction) 法を用いた遠隔亀裂診断装置を開発し、高層足場削減による検査費用低減、および手探傷作業削減による災害発生リスク低減を実現した。

## 3. 高温 TOFD 法による遠隔亀裂診断装置の開発

### 3.1 開発品の主仕様

開発した遠隔亀裂診断装置の外観を写真 2 に示す。

遠隔亀裂診断装置の構成は、亀裂検出センサ部とこれを搭載して熱風炉鉄皮を走行する自走装置からなり、主仕様を表 1 に示す。

### 3.2 高温 TOFD 法亀裂検出センサ開発

#### 3.2.1 亀裂検出センサ部の開発課題

亀裂検出センサ部の開発課題は、以下の 5 点である。

- (1) 亀裂高さを高速で連続的に検出できる。
- (2) 亀裂高さの検出精度が高い。
- (3) 縦割れと横割れを同時に測定し弁別できる。

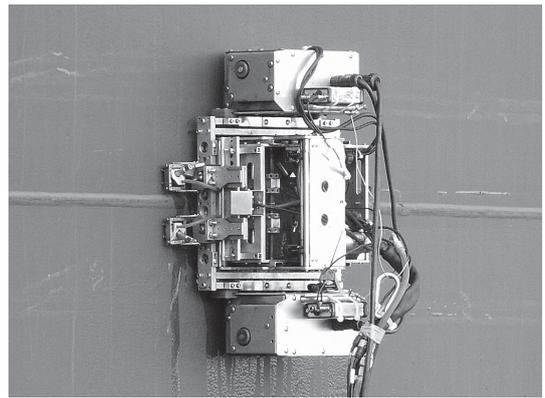


写真 2 TOFD法による遠隔亀裂診断装置外観

Photo 2 The remote control crack diagnosis device appearance by time of flight diffraction (TOFD) method

表 1 遠隔亀裂診断装置の主仕様

Table 1 Specification of remote control crack diagnosis device

The crack detection method	Time of flight diffraction (TOFD) method
Object crack of detection	Longitudinal crack Transverse crack
Crack height detection accuracy	±1 mm
Crack height detection ability	Min. 2.0 mm
An object thickness of inspection	19–50 mm
Temperature of inspection object	0–200℃
Inspection speed	1.5 m/min

- (4) 200℃までの高温鉄皮を探傷できる。
- (5) 円筒状垂直面を円周・垂直方向に探傷できる。

#### 3.2.2 TOFD 法の原理

一般的な超音波斜角探傷法と比べ、亀裂高さ検出精度に優れ、連続測定に適した TOFD 法を採用した。TOFD 法は、図 1 に示すように、探傷部位を跨いで 2 個の超音波探触子を配置し、一方の探触子から超音波を送信、他方の探触子で亀裂上端および下端に生じる回折波を検出する手法であ

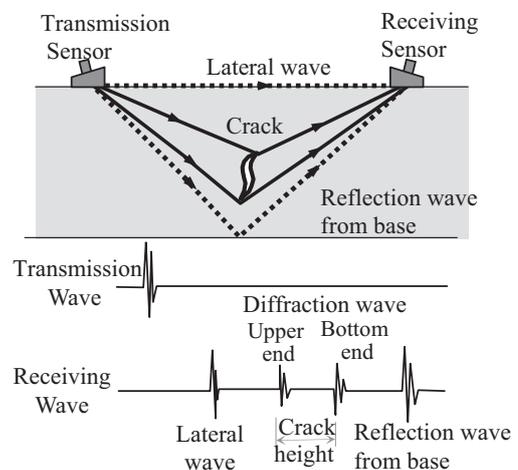


図 1 TOFD 法による亀裂高さ検出原理図

Fig. 1 Crack height detection theory by TOFD method

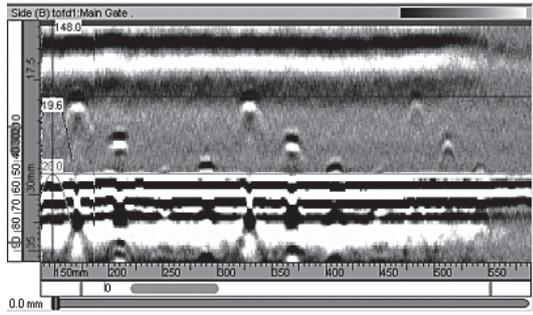


写真3 TOFD 出力画面例 (D スコープ)

Photo 3 Time of flight diffraction (TOFD) screen output example (D Scan)

る。その際、回折波の伝播時間差より亀裂の位置と高さを検出する<sup>1)</sup>。

図1に模式的に示したAスコープ波形を画像処理することにより、写真3に示すDスコープ画面が得られる。Dスコープ画面がTOFD法の標準的な出力画面であるが、亀裂高さや亀裂位置を正確に把握する場合にはAスコープ波形を確認する必要がある。

3.2.3 縦割れと横割れの同時測定

図2に溶接線に対するTOFDセンサ平面配置図を示す。縦割れセンサは溶接線に対し直角に送受信探触子を配置、横割れセンサは溶接線に対し斜め45°に送受信探触子を配置し、一回の走査で縦割れと横割れの両方を測定する。

縦割れと横割れの弁別は、それぞれの亀裂に対する縦割れセンサおよび横割れセンサの検出感度の違いをAスコープ波形を観察することで可能である。表2に縦割れと横割

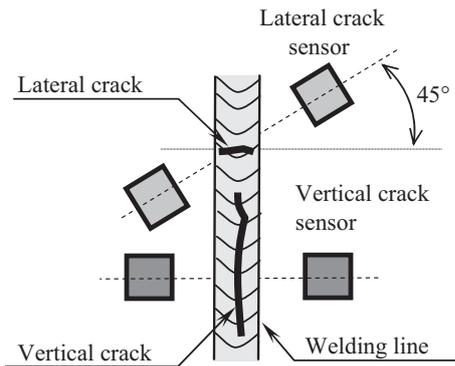


図2 TOFD センサ平面配置図

Fig.2 Time of flight diffraction (TOFD) sensor deployment view

表2 縦割れと横割れの検出感度

Table 2 Detection sensitivity of vertical and lateral crack

	Vertical crack	Lateral crack
Vertical crack sensor	◎	△ - ×
Lateral crack sensor	○	○

◎ : High sensitive detection  
 ○ : Sensitive, but relatively low detection  
 △ - × : Low sensitive or insensible detection

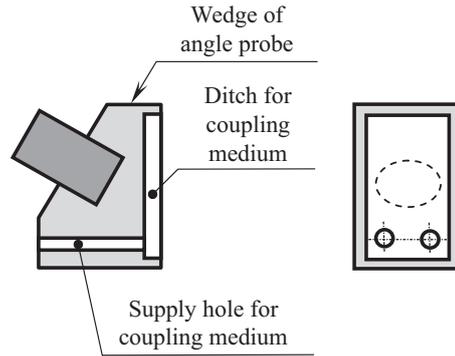


図3 探触子ウエッジの接触媒質溜り加工

Fig.3 Machining ditch for wedge coupling medium

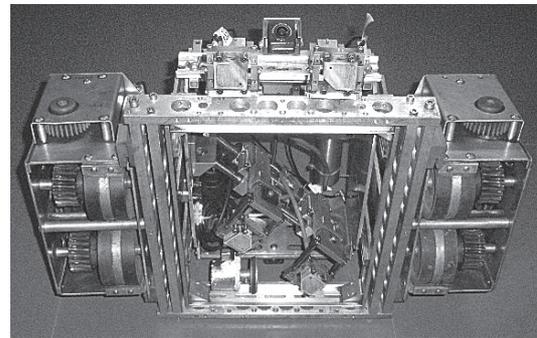


写真4 センサ部裏面外観

Photo 4 Back of the sensor overview

れの検出感度を示す。

3.2.4 垂直面探傷のための接触媒質供給

高感度で安定した超音波探傷を行うには、被探傷面と探触子間に接触媒質を安定供給し、超音波の伝播効率を高める必要がある。本ケースは、探傷面が垂直面のため探触子ウエッジに接触媒質を塗布するだけでは不十分であり、ウエッジの冷却も兼ねて水を連続供給することとした。

ここで、探触子と被探傷面の水膜を一定に保つため、ウエッジに深さ0.2mmの接触媒質溜りを設けた(図3)。

また、接触媒質の種類を被探傷面の温度により水および粘性液体の使い分けを予定していたが、実機にて200℃まですべて水で対応できることを確認した。

3.2.5 探触子の懸架機構と外観

探触子を被探傷面へ一定押付け力で接触させるため、自走装置からリンク機構とスプリングで懸架する方式を採用し、走行面の凹凸による測定データへの影響を排除した。

また、被探傷面の板厚に応じて探触子間隔を調整可能な構造とした。写真4にセンサ部裏面外観を示す。

3.3 自走装置の開発

自走装置に求められる機能は以下の4点である。

- (1) 三次元曲面を自在に走行できる。
- (2) 前後進、旋回動作を有線で遠隔操縦できる。

(3) 溶接ビードなどを考慮し 10 mm までの段差乗り越えが可能である。

(4) 200℃までの高温鉄皮を走行できる。

このうち (1) ~ (3) は、先に開発済みの架空配管腐食診断装置<sup>2)</sup>に採用した自走装置の改良とし、(4) を今回の開発課題とした。

### 3.3.1 永久磁石の選定

市販されている永久磁石の特性比較を表 3 に示す。

永久磁石および車輪を空冷し、200℃の高温鉄皮走行時の永久磁石および車輪表面温度を 60℃以下とすることで、劣位の温度特性の問題を解消し、磁力・保磁力および韌性に優れたネオジウム磁石を採用した。

### 3.3.2 車輪の軽量化

市販永久磁石はサイズが限定（外径φ 59、穴径φ 19、厚さ 10 mm）されるため、軽量で吸着力の高い車輪形状を磁場解析により求めた。車輪外径はφ 80 mm 付近で吸着力が最も強いことが判明したため、外径をφ 80 mm とした（図 4 (a)）。

吸着力は図 4 (b) に示すように、車輪厚みに比例するため必要な吸着力と装置の小型化を考慮し 12 mm とした。

車輪断面形状については、図 5 (b) の軽量化案が図 5 (a) の無垢材に対し重量が 67%、吸着力は 90% となり、吸着力重量比に優れるため、これを採用した。

以上により、熱風炉鉄皮亀裂診断時の装置脱落防止安全率：10.7 を確保した。

### 3.3.3 診断装置取付け、取外し作業の安全化

磁輪吸着力は約 2000 N と非常に強力であり、診断装置を鉄皮へ取付けおよび取外し作業の安全確保には、診断装置重量（約 180 N）とともに磁輪吸着力も考慮する必要がある。

簡便な吸着カコントロール方法は、鉄皮と磁輪間にゴムシートを入れ任意のエアギャップを設定する方法である。

実験結果、エアギャップと磁輪吸着力の関係は図 6 のとおりであり、診断装置総重量の 2.5 倍の吸着力に相当するエアギャップ：2.0 mm で診断装置の取付けおよび取外し作業を行い、作業の安全化を図っている。

表 3 市販永久磁石の特性比較

Table 3 Property comparison of the commercial permanent magnet

Item	Neodymium	Al-Ni-Co	Samarium-Cobalt	Ferrite
Magnetic force	◎	○	○	△
Coercivity	◎	△	○	○
Toughness	◎	○	△	△
Curie point	300℃	860℃	750℃	450℃
Heat-resistant	△	◎	○	△

◎ : Excellent

○ : Possible to be used

△ : Relatively inferior

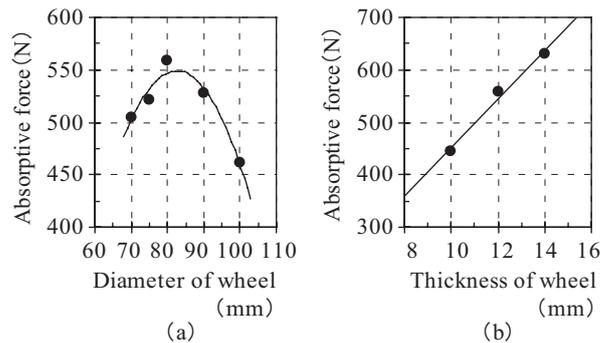


図 4 磁輪の磁場解析結果

Fig. 4 Result of magnetic field analysis on the magnetic wheel

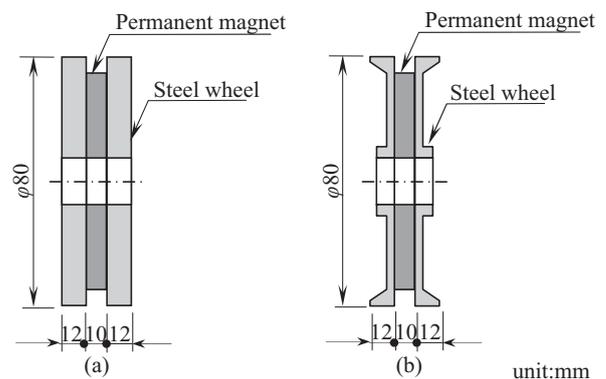


図 5 車輪断面形状の最適化

Fig. 5 The optimization of the wheel cross-section

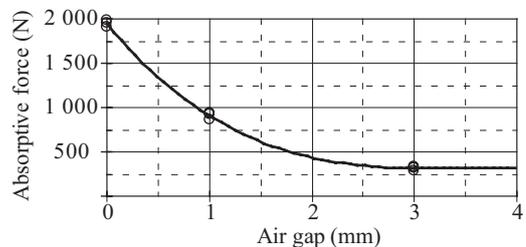


図 6 エアギャップと磁輪吸着力

Fig. 6 Air gap and magnetic wheel absorptive force

## 3.4 亀裂検出精度

自然亀裂を模擬したスリット溝（幅 0.5 mm、放電加工）の試験片を用い、開発品の亀裂検出精度を確認した<sup>3)</sup>。実験条件は、表 4 に示すとおり、亀裂高さを 4 水準、試験片温度を 2 水準とし、20℃における実験結果を図 7 に、200℃における測定結果を図 8 に示す。

亀裂高さ 2.0 mm 未満では、20℃および 200℃ともに検出できなかったため、亀裂高さ検出限界は 2.0 mm である。

亀裂検出精度は、20℃において標準偏差  $\sigma = 0.31$  mm、200℃において標準偏差  $\sigma = 0.58$  mm と超音波斜角探傷法よりも高精度、かつ必要十分な測定精度を有することを確認した。

表 4 亀裂検出精度試験条件

Table 4 Test condition of crack height detection

Item	Test condition
Specimen piece thickness (mm)	25
Sham crack width (mm)	0.5
Sham crack length (mm)	20
Sham crack height (mm)	1.0, 2.0, 5.0, 10
Specimen piece temperature (°C)	20, 200

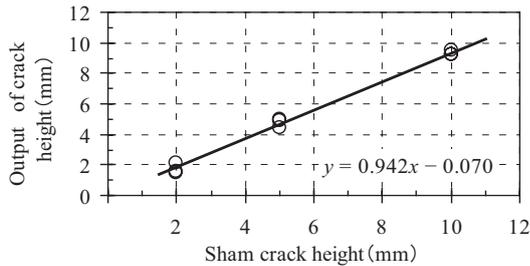


図 7 20℃における模擬亀裂高さ検出精度

Fig. 7 Sham crack height detection accuracy in 20 °C

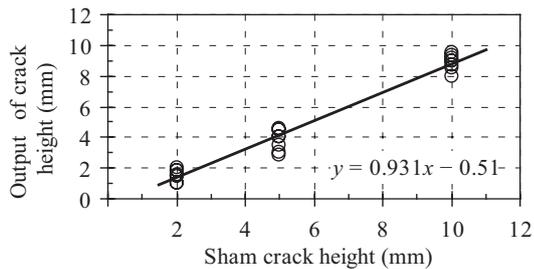


図 8 200℃における模擬亀裂高さ検出精度

Fig. 8 Sham crack height detection accuracy in 200 °C

#### 4. 実機適用効果

開発した遠隔亀裂診断装置を西日本製鉄所福山地区第 4 高炉 2 号熱風炉に適用した結果を表 5 に示す。

溶接線と常設点検デッキの近接部、保温材取付けボルトとの干渉部などには本開発品を適用できないため、適用率は 48% に留まっているが、熱風炉全面に渡る高層足場設置が不要となり、亀裂検査に要する工事期間を半減できた。

また、斜角手探傷作業の半減、足場設置範囲の大幅削減により火傷や高所からの転落などの災害リスクを低減することができた。

表 5 遠隔亀裂診断装置実機適用事例  
(西日本製鉄所福山地区第 4 高炉 2 号熱風炉)

Table 5 Actual application examples of the remote control crack diagnosis device (No. 4 Blast Furnace-2 Hot Stove at West Japan Works (Fukuyama))

Item	Past way	This time
Total inspection length (m)	993	993
Inspection length by angle beam technique (m)	993	520
Inspection length by TOFD (m)	0	473
An application rate of TOFD (%)	0	48

TOFD : Time of flight diffraction

#### 5. おわりに

本稿では、高温 TOFD 法による熱風炉鉄皮溶接線遠隔亀裂診断技術を開発し、検査精度向上、検査作業の安全化、および検査期間短縮事例を紹介した。本技術は、JFE スチール西日本製鉄所福山地区の各熱風炉ですでに活用しているところであり、2010 年度下期より JFE スチール他地区へも適用拡大中である。

なお、本技術の開発は、JFE スチールの保有する磁輪式自走装置と住重試験検査(株)殿保有の高温 TOFD 診断技術を元に共同研究により短期間で実用機を開発した。

住重試験検査(株)殿のご協力に感謝する。

#### 参考文献

- 1) TOFD 法によるきず高さ測定方法. 日本非破壊検査協会規格. NDIS2423-2001.
- 2) 横山康雄, 植上武克ほか. JFE 技報. 2006, no. 11, p. 23.
- 3) 田中秀秋, 大島俊之, 萬年利克. TOFD 法に於ける亀裂と超音波散乱の関係. 土木学会年次学術講演会講演概要集. 1997.



吉本 松男



村上 弘一



中村 正治