

# 設備の健全性評価技術 — 振動診断 —

## Evaluation Technology for Reliability of Equipment

### —Vibration Diagnosis—

西名 慶晃 NISHINA Yoshiaki JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (副部長)  
石垣 雄亮 ISHIGAKI Yusuke JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (課長)  
今西 大輔 IMANISHI Daisuke JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (副課長)

#### 要旨

近年、製鉄所においては生産ラインの生産性向上と重大故障回避のため、設備の保守・老朽更新時期の適正化が課題となっている。JFE グループでは、さまざまな設備の健全性を評価する技術開発に成功し、製品の安定供給や設備の高生産性化を実現している。本稿では、振動診断による設備の健全性評価技術の開発事例を紹介する。

#### Abstract:

Recently, maintenance and renovation of aging equipment become a big issue in steelworks to improve the productivity and avoid fatal breakdown of production lines. JFE Group has successfully developed various new evaluation technologies for reliability of equipment that enable the group to assess and maintain equipment properly. They have greatly contributed to the steady delivery of the products, and high productivity of equipment in the steelworks. This paper introduces their typical example by vibration diagnosis.

## 1. はじめに

鉄鋼業は、高度成長にともなう内外需要の増大に支えられて 1960 年代に多くの設備を建設したため、現状老朽化している設備も少なくない。JFE スチールにおいても、建設後 30 年以上経過している設備が多く、生産ラインの生産性向上と重大故障回避の観点から、設備の健全性の評価が重要な課題となっている。JFE グループでは、設備の保守・老朽更新時期の適正化のため、様々な設備の健全性を定量的に評価する診断技術開発を行っている。

本稿では、振動診断による設備の健全性評価技術の開発事例として、脱硫設備の高生産性化のための振動防止対策、加振サーモキ裂診断法によるクレーン走行桁のき裂診断について紹介する。

## 2. KR 脱硫設備の振動防止

インペラーを用いた溶銑の機械攪拌式脱硫プロセスでは、処理時間の短縮や脱硫剤原単位の削減のために攪拌強化による溶銑と脱硫剤の反応促進が重要であり、攪拌を強化する方法としてインペラーの回転を高速化することが有効である。一方、インペラーの回転を高速化すると設備の振動が大きくなり、振動の程度によっては設備の故障につながることから、インペラーの回転数には一定の制限を設けざるをえ

なかった。

福山 3KR (Kanbara Reactor) 脱硫設備では、一定の回転数以上で設備の振動増大が顕著となり設備故障の危険性が高いため、インペラーの回転を高速化することが困難であった。そこで、実機設備の振動特性評価に基づいて振動対策を検討した。

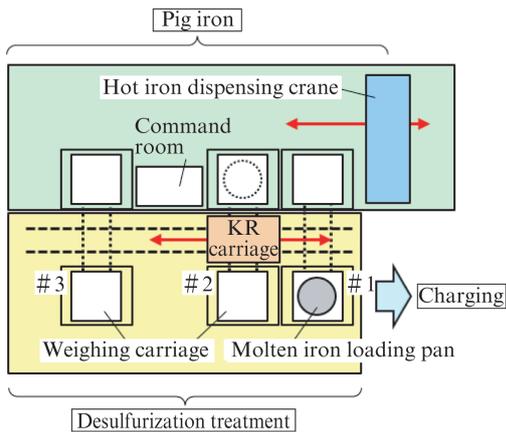
### 2.1 福山 3KR 脱硫設備の概要

図 1 に福山 3KR 脱硫設備のレイアウトおよび設備配置を示す。福山 3KR には秤量ピットおよび台車が 3 基あるが、走行台車がランウェイガーダー上を移動することで 1 つのインペラーで 3 箇所での脱硫処理が行える。ランウェイガーダー上を移動した走行台車は、脱硫処理を行う溶銑装入鍋の位置でランウェイガーダーおよび副原料架構にクランプして固定される。走行台車の内側にはガイドローラーと皿パネにより昇降台車が支持されており、昇降台車自体が昇降することで溶銑にインペラーを浸漬させて攪拌する。

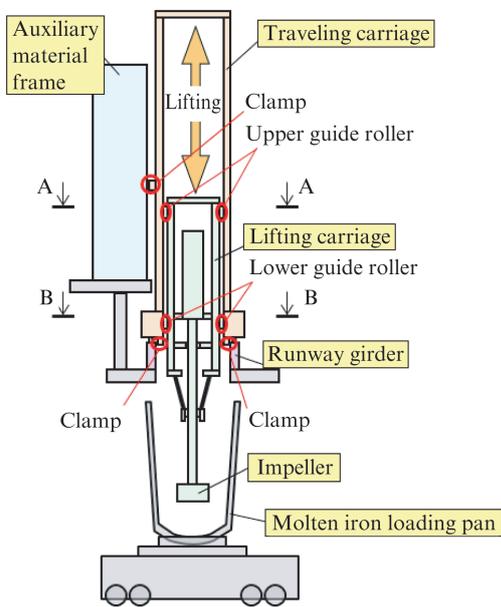
### 2.2 振動対策

#### 2.2.1 実機設備の振動測定

実機設備の振動増大状況を把握するため、加速度計を用いて振動測定を実施した。測定の際はインペラーの回転数を段階的に変化させ、各条件で回転数を 30 秒保持して溶銑の攪拌を実施した。加速度計の取り付け位置を図 2 に示す。ここでは各加速度計の測定方向を青矢印で示している。走行台車と昇降台車および副原料架構のそれぞれの振動を測



(1) レイアウト  
(1) Layout



(2) 設備配置 (側面図)  
(2) Facility arrangement (side view)

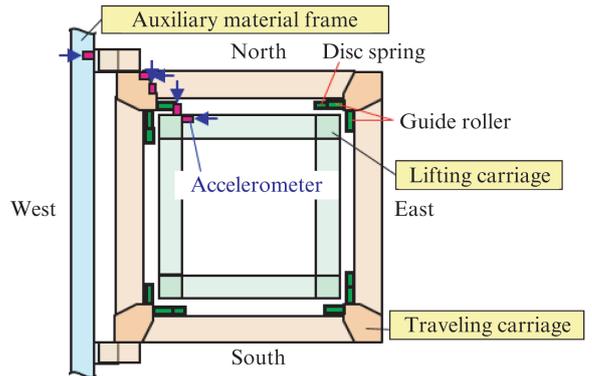
図1 福山 3KR 脱硫設備の概要

Fig. 1 Outline of Fukuyama 3KR desulfurization facility

定し、当該振動発生時の走行台車と昇降台車の動きを把握するため、上部ガイドローラー位置と下部ガイドローラー位置で水平方向2成分（東西方向と南北方向）の振動を測定できるように加速度計を取り付けた。

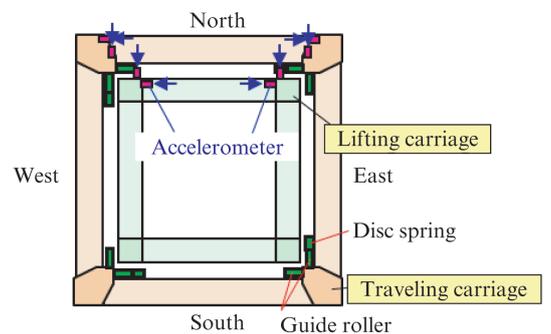
図3に振動測定で得られたインペラー回転数と振動加速度との関係を示す。横軸は設備の許容加速度を超え始める回転数を1として正規化した回転数を表している。横軸が1を超えると設備全体の振動が回転数に応じて4倍程度にも増大していることから、インペラーの回転により設備が共振していると推測できる。

また、正規化したインペラー回転数を1とした条件について振動を可視化した結果を図4に示す。インペラーの回転に伴い走行台車と昇降台車が大きく振れ回っていることが



(1) 上部ガイドローラー断面図 (図1(2)A-A 断面図)

(1) Upper guide roller position cross-sectional view (Fig.1 (2) A-A cross-sectional view)



(2) 下部ガイドローラー断面図 (図1(2)B-B 断面図)

(2) Cross-sectional view of lower guide roller (Fig.1 Cross-sectional view of (2) B-B)

図2 加速度計の取付位置

Fig. 2 Accelerometer mounting position (13 points in total)

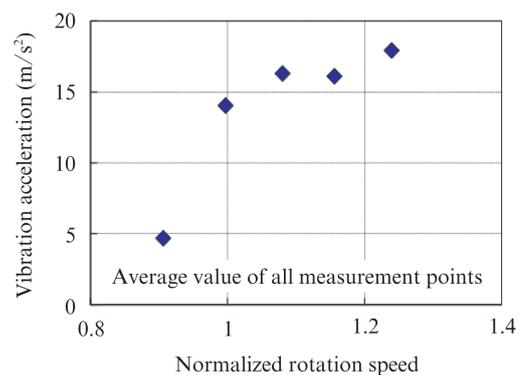


図3 従来インペラーの振動測定結果

Fig. 3 Vibration measurement result of conventional impeller

わかる。

### 2.2.2 インペラーの振動特性評価

インペラーの振動特性を評価するため、ハンマリング振動試験を実施した。図5に測定点および加振点の位置を示す。溶銑がない状態でインペラーを処理位置まで下降させ、南北方向と東西方向のそれぞれについてフランジ部分をインパクトハンマーで加振して、発生する振動を測定した。

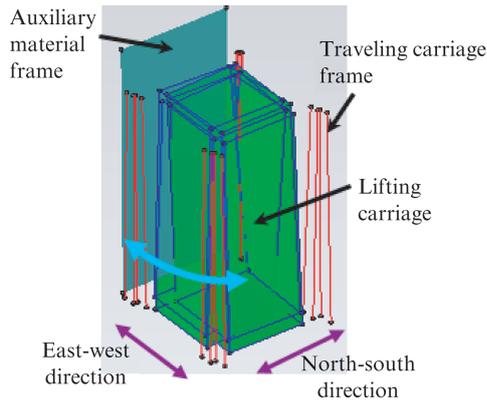


図4 実機振動可視化

Fig. 4 Visualization of actual machine vibration

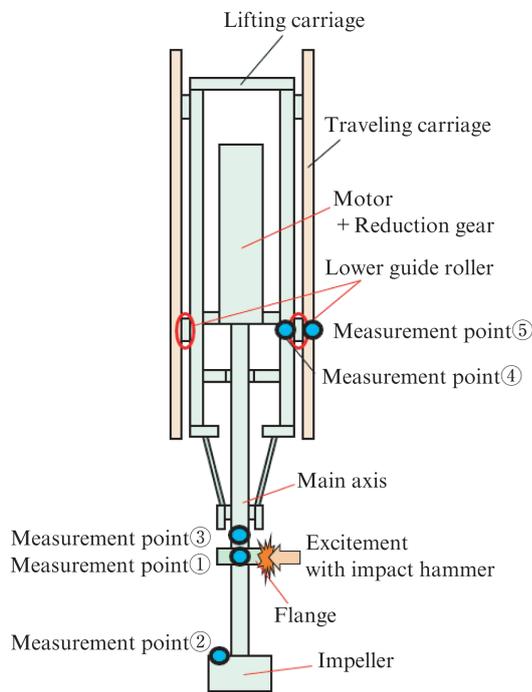


図5 測定点および加振点

Fig. 5 Position of measurement point and excitation point

図6にハンマリング振動試験で得られた周波数応答の結果を示す。ここで2.9 Hzと8.6 Hzの周波数に共振を表す加速度応答のピークが見られ、実験モード解析により振動モードを評価すると、それぞれインペラーの1次曲げと2次曲げに対応することが明らかになった。1次曲げの固有振動数2.9 Hzはインペラーによって生じる振動周波数とも近いため、インペラーの回転を高速化した際の振動増大はインペラーの1次曲げ振動の共振に起因するものと考えられる。従って、インペラーの1次曲げ振動の固有振動数をインペラー回転によって生じる振動周波数から離すことが振動対策として有効であるといえる。

### 2.2.3 インペラー剛性向上による振動低減

インペラーの共振による振動増大を防止するため、インペ

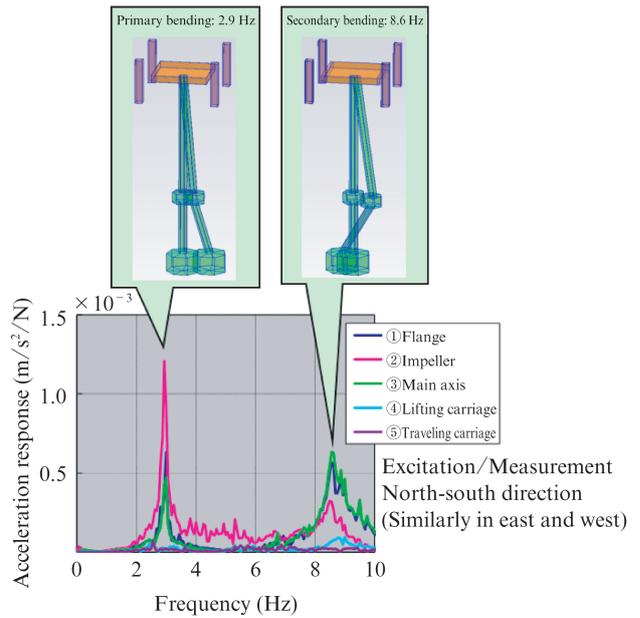


図6 周波数応答と振動モード

Fig. 6 Frequency response and vibration mode

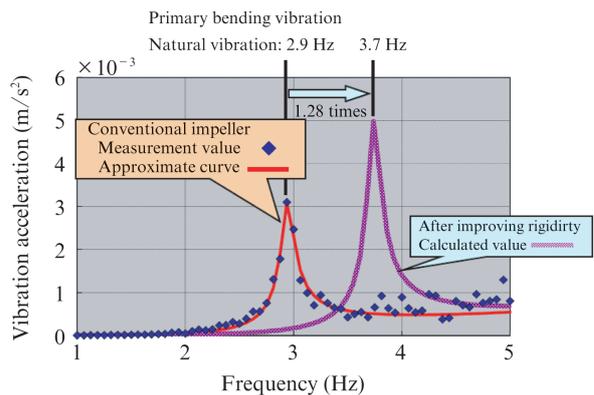


図7 インペラーの振動応答特性の検討

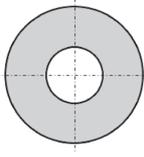
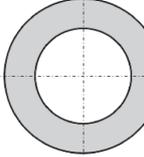
Fig. 7 Examination of vibration response characteristics of impeller

ラーの剛性向上を検討した。インペラーのハンマリング振動試験の結果から、インペラーの回転による遠心力の増大を考慮して振動応答特性を評価した結果を図7に示す。この結果に基づきインペラーの回転を高速化した場合にも設備の振動が許容範囲内に収まることを目標に検討を行い、従来の1次曲げ振動の固有振動数2.9 Hzを1.28倍の3.7 Hzに大きくすることで共振による振動増大を抑制でき、インペラーの回転を高速化しても振動加速度を大幅に低減可能と推定した。

一般的に、はりの曲げ振動の固有振動数  $f_n$  は次式で表される。

$$f_n = \frac{\lambda_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \dots\dots\dots (1)$$

表1 インペラー断面形状の変更  
Table 1 Changing sectional shape of impeller

	Conventional impeller	Large diameter impeller
Cross-sectional shape		
Outer diameter ratio	1	1.18
Thickness ratio	1	0.68
Cross-sectional area ratio = weight ratio	1	0.96
Section moment of inertia ratio	1	1.65
Natural frequency	2.9 Hz (Experimental value)	3.7 Hz (Calculated value)

ここで、 $\lambda n$  は境界条件によって決定する係数、 $E$  は縦弾性係数、 $I$  は断面 2 次モーメント、 $\rho$  は密度、 $A$  ははりの断面積、 $L$  ははりの長さである。インペラーの曲げ振動は片側が固定端のはりの曲げ振動と見ることから、インペラーの曲げ振動の固有振動数は断面 2 次モーメントの平方根に比例する。よって、インペラー軸の断面 2 次モーメントを従来の 1.63 倍にすることで 1 次曲げ振動の固有振動数を 1.28 倍にすることができる。

インペラー軸の断面 2 次モーメントを大きくするためにインペラー軸の大径化を検討した。表 1 に従来インペラーと今回検討した大径インペラーの断面形状を示す。どちらも中空構造であり、大径インペラーでは軸芯金の外径を従来インペラーの 1.18 倍に大径化することで断面 2 次モーメントを大きくした。ただし、断面積が増加すると固有振動数が低下するため、断面積が従来と同等以下になるように薄肉化を図った。その結果、断面 2 次モーメントを 1.65 倍にしなが断面積を維持し、固有振動数を 1.28 倍にできたため、従来インペラーから大径インペラーに変更することで振動低減が期待できることとなった。

#### 2.2.4 大径インペラーの効果検証

大径インペラーを用いて溶銑を攪拌した場合の振動測定を、前述の従来インペラーの振動測定と同様に実施した。インペラー回転数と振動加速度との関係を従来インペラーの結果と合わせて図 8 に示す。ここでは図 3 と同様にインペラー回転数を正規化して表している。

従来インペラーを用いた場合、低回転数域から回転を高速化するのに伴い振動が急激に増大している。一方、大径インペラーを用いた場合は回転を高速化しても低回転数域の振動を維持できている。このことから、大径インペラーでは共振による振動増大を抑制できたといえる。なお、低回転数域において従来インペラーと大径インペラーで振動の大

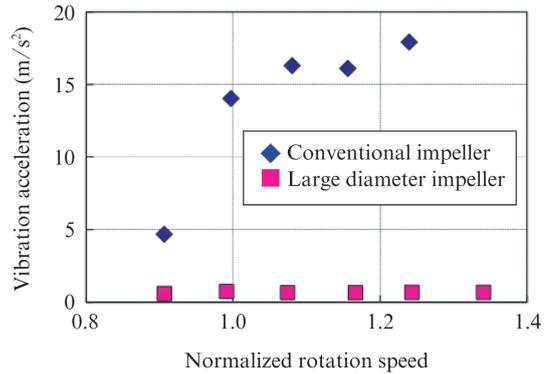


図 8 インペラーの振動応答特性の検討

Fig. 8 Vibration measurement result of actual equipment (comparison between conventional impeller and large diameter impeller)

きさが異なるのは、測定タイミングにより軸芯金の曲がりや地金の付着状況が異なるためと考えられる。

以上の結果、大径インペラーにより剛性を向上したことでインペラー回転による共振を避け、設備振動の低減を実現できた。

### 2.3 まとめ

インペラー高速化による精錬効率化を目的として福山 3KR 脱硫設備の振動対策を行い、以下の結論を得た。

- (1) インペラーの振動特性評価によりインペラーの 1 次曲げ振動の固有振動数が 2.9 Hz であることを明らかにした。
- (2) インペラー芯金の外径を大きくすることで、インペラー曲げ振動の共振を抑制し、インペラーの回転を高速化できることを明らかにした。

## 3. 加振サーモキ裂診断技術

製鉄所内の各製造ラインには、溶鋼搬送、鉄鋼スラブ搬送、製品コイル搬送等のため、多数の大型天井クレーンが稼働している。図 9 に一般的な天井クレーンの装置構成を示す。天井クレーンは建屋の両壁に設けられた走行桁（ランウェイガーダー）とクレーンガーダーおよびクラブトロッリから構

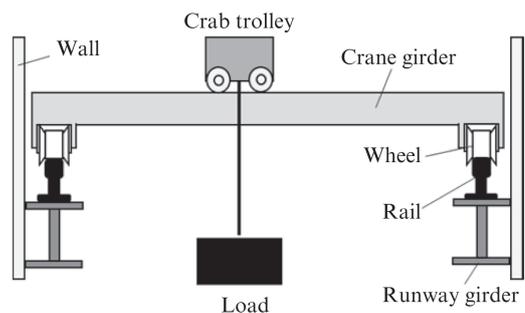


図 9 一般的な天井クレーンの装置構成

Fig. 9 Schematic illustration of overhead traveling crane

成され、クレーンガードが走行桁上を走行し、クラブトロリを巻き上げ、巻き下げすることで対象物を搬送する。

天井クレーンは一旦設置すると長期間使用されることが多く、また走行桁には搬送物重量かつクレーンガード自重が繰り返し荷重として作用するので、多くの疲労損傷発生事例が報告されている<sup>1)</sup>。天井クレーンの走行桁の損傷は死傷事故等重大事故につながりやすく、また生産ラインに与える影響も大きいことから、損傷を防止するため計画的に走行桁のき裂検査、メンテナンスを行っている。走行桁のき裂検査方法としては、地上およびクレーン上歩廊からの目視検査、足場を組んでの超音波探傷法 (UT 法)、磁粉探傷法 (MT 法)、浸透探傷法 (PT 法) が挙げられる。しかし、走行桁には長期間の使用によって、粉塵や汚れが付着しており目視でき裂を発見するのは非常に困難である。また、UT 法、MT 法、PT 法は検査のために対象物に機器を直接接触させる必要がある。しかし、一般的に走行桁は高所に設置されており、これらの手法を適用するためには検査足場を設置する必要がある。そのため、検査効率が悪く、検査コストも多大となる。本稿では、これらの問題を解決するため、赤外線サーモグラフィを用いた構造物劣化検出手法の1つである超音波励起サーモグラフィ法<sup>24)</sup> (Sonic-IR 法、あるいは Vibro-Thermography 法) を、製鉄所の天井クレーン走行桁に発生する疲労き裂の遠隔高効率検査への適用を検討した結果を述べる。

### 3.1 原理

赤外線サーモグラフィは、温度検出素子の分解能向上および計算機の性能向上により、現在様々な分野で利用されている。特に、非接触、遠隔で測定が可能であり、広範囲を面測定できることから、近年、非破壊検査の分野で高効率検査手法として注目されている。その中でも Sonic-IR 法は、赤外線サーモグラフィと超音波加振機を組み合わせたき裂検出手法である。測定原理のモデルを図 10 に示す。き裂を含む構造物を大振幅超音波により連続加振するとき、圧縮応力を受けたき裂破面の摩擦・打撃の作用により、き裂部で局所的な温度上昇が生じる。これを赤外線サーモグラフィで計測し、高温部としてき裂を検出する。本手法はき裂面

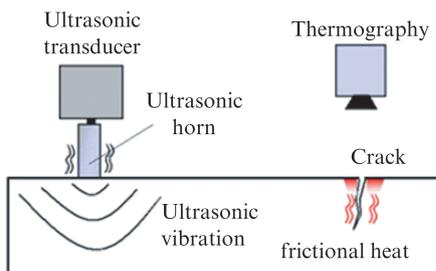


図 10 Sonic-IR 法の測定原理

Fig. 10 Schematic illustration of principle of Sonic-IR method

の摩擦・打撃による温度上昇を利用しているため、他のき裂検査手法では検出が難しいとされている閉き裂の検出に適している。疲労によるき裂の多くは、目視では検出が難しい閉き裂であるため、本手法は疲労き裂検出に有効である。

### 3.2 ラボ検討結果

#### 3.2.1 実験装置構成について

本検討では振動発生装置として超音波ウェルダ (カイジョー社製 C-6281A 型) を用いた。超音波ウェルダは、振動子で発生した振動を SUS304 製超音波ホーンで増幅し、超音波ホーンを対象物に接触させることにより対象物に振動を入射する。入射振動は周波数 19.5 kHz、振幅 20 μm とした。振動入射時のき裂周辺の温度分布は赤外線サーモグラフィ (Cedip 社製 Jade III) を用いて計測した。本試験で用いた赤外線サーモグラフィ装置は、InSb を検出素子としており、温度分解能は 0.02 K である。本試験では、き裂検出精度向上の為、ロックイン処理<sup>5)</sup>を行った。この手法は、測定された時系列温度データに対して、温度変動に関する参照信号との相関処理を取ることで、S/N 比を向上させる手法である。今回、参照信号として、超音波加振機と検査対象との接触発熱の時間変動を用いた。

#### 3.2.2 最小き裂深さ性能評価

図 11 に示すように、140 mm × 235 mm × 50 mm の平板に、深さが 2 mm から 25 mm の疲労き裂を導入したサンプルを用いて、本手法の最小き裂検出深さを求めた。結果を図 12 に示す。き裂深さが大きくなるほど温度が上昇している。また、今回計測した最小サイズである深さ 2 mm、長さ 10 mm のき裂の赤外線画像を図 13 に示す。き裂サイズが深さ 2 mm の場合、平均発熱量は 0.05 K 程度であり、十分検出が可能である。また、今回の実験にあたっては、き裂進展解析により、走行桁中のき裂最小検出目標をき裂深さ 24 mm とした。これは、十分に振動が伝搬すれば本手法で達成可能な目標である。

#### 3.2.3 き裂検出性の確認

走行桁中のき裂の検出距離限界を検討するため、走行桁を模擬した SS400 製試験体を作成し基礎検討を行った。試験体形状を図 14 に示す。超音波振動は、一般的に距離、溶接線の影響を受け減衰する。実用化のためには、クレーン

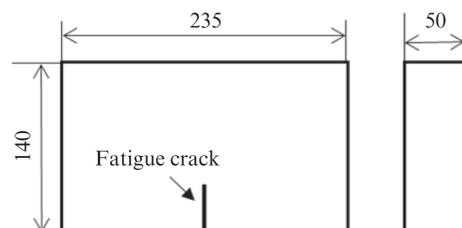


図 11 板状試験片の形状と疲労き裂の位置

Fig. 11 Plate specimen shape and position of fatigue crack

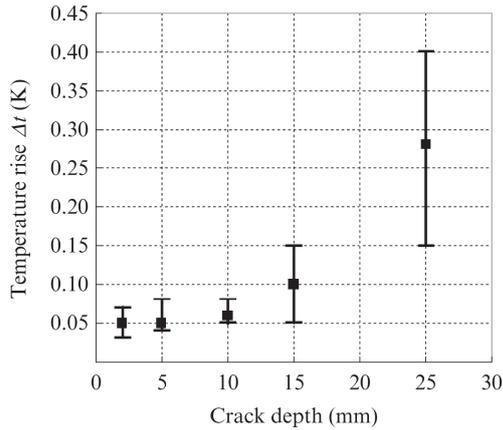


図 12 き裂深さと温度上昇の関係

Fig. 12 Relationship between crack depth and temperature rise

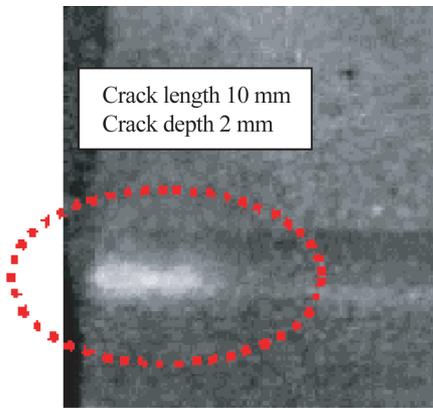


図 13 き裂の赤外線画像

Fig. 13 Infrared image of the crack

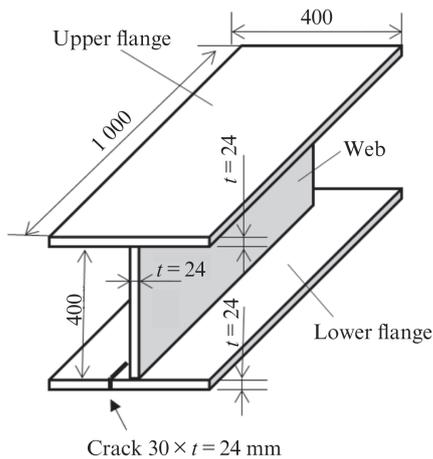


図 14 走行桁の模擬試験体と疲労き裂位置

Fig. 14 Runway girder specimen shape and position of fatigue crack (Unit: mm)

走行桁中での減衰の影響を調べる必要がある。試験体は実際のクレーン走行桁と同様に溶接構造を用いて製作し、下フランジ部に疲労き裂を模擬した閉き裂（深さ 24 mm、長さ 30 mm）を導入した。本試験では上フランジ

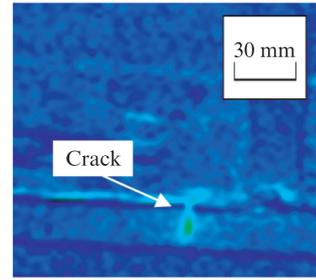


図 15 き裂の赤外線画像

Fig. 15 Infrared image of the crack (Measured distance = 10 m)

表 2 各計測距離でのき裂検出可否

Table 2 Result of remote crack detection (Crack depth: 24 mm)

	Measured distance (m)				
	1	5	10	15	20
Normal lens (Focal distance = 50 mm)	○	○	×	×	×
Telephoto lens (Focal distance = 200 mm)	○	○	○	○	×

○Detectable; ×Non-detectable

部に振動を入射し、赤外線サーモグラフィを用いて計測した。赤外線カメラには、焦点距離 50 mm のノーマルレンズ、200 mm の望遠レンズの 2 種類を装着した。

測定距離 10 m での赤外線画像を図 15 に示す。き裂が十分に発熱し検出できたことから、上フランジ部から振動を入射し、ウェブ部の溶接線を介してき裂に振動を伝達できることがわかった。従って、実際の走行桁においても、歩廊からアクセスが容易な上フランジ部に振動発生装置を設置し振動を伝搬させることにより、下フランジ部、ウェブ部のき裂を検出することが可能であるといえる。

次に、赤外線サーモグラフィの計測距離を変えた場合のき裂検出可否を検討した。赤外線サーモグラフィと対象物の距離を大きくすると、1 ピクセルあたりの単位大きさ（画素分解能）は拡張されていく。可検出き裂サイズにはこの画素分解能が大きく関わっており、理論的には計測距離が長くなるほどき裂検出性能は悪くなる。表 2 に各計測距離でのき裂検出可否を示す。表 2 より、望遠レンズを装着すれば 10 m の距離から目標サイズのき裂を十分に検出できることがわかる。製鉄所に設置されている天井クレーン走行桁の多くは地上からの高さが 10 m 以下であるため、地上に赤外線サーモグラフィを設置して走行桁中のき裂を遠隔検出できることになる。

### 3.2.4 振動計測による振動伝達確認

クレーン走行桁模擬試験体において、加振時のき裂付近の振動をレーザ式振動計（キーエンス社製 LKG-15）で計測した。図 16 に加振周波数（19.5 kHz）の周波数成分を取り出し、その振動振幅とき裂発熱量の関係を調べた結果を示す。図中の○はき裂がサーモグラフィ装置で検出できた場

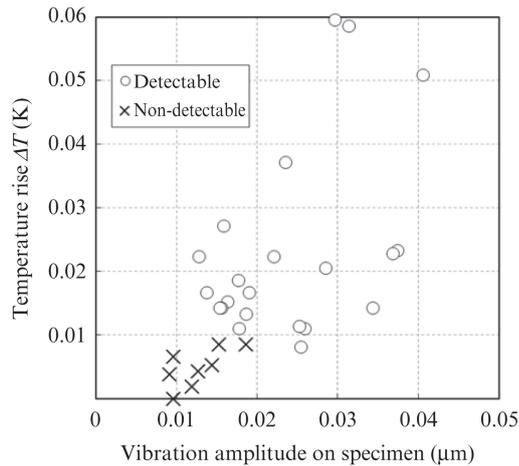


図 16 振動振幅とき裂発熱量の関係

Fig. 16 Relationship between vibration amplitude and temperature rise

合であり、×はき裂が検出できなかった場合である。振動振幅が閾値  $0.02 \mu\text{m}$  を超えた場合はすべてき裂が検出できており、き裂発熱に十分な振動がき裂まで達していることがわかる。Sonic-IR 法を走行桁のき裂検出に適用するにあたり、超音波ホーンと振動入射面の接触、あるいは振動入射面の形状、表面状態によって振動を効率的に入射することができない場合が想定される。そのような場合は、当然き裂が発熱することはなく、き裂を検出することはできない。しかし、振動伝達を同時に確認することで、振動伝達が不十分な場合には加振面の清掃、加振位置の変更等の対応をとることができる。これにより、き裂検出漏れを防ぎ、検査精度を高めることができる。

### 3.3 まとめ

本稿では天井クレーン走行桁の高効率遠隔き裂検査に、赤外線サーモグラフィを利用した手法である Sonic-IR 法の適用をラボ検討した結果について述べた。アクセスが容易な上フランジ部に加振装置を設置し、地上に赤外線サーモグラフィを設置することにより、き裂進展解析から導出した

最小目標のき裂を十分検出できることがわかった。また、き裂検出のために必要な振動振幅を明らかにし、振動伝達不良によるき裂検出漏れを防ぐシステムを開発した。

## 4. おわりに

本稿では、振動診断による設備の健全性評価技術の開発事例として、脱硫設備の高生産性化のための振動防止対策、加振サーモき裂診断法によるクレーン走行桁のき裂診断について紹介した。JFE スチールでは、これらの開発技術を有効活用することにより、生産ラインの生産性向上と重大故障回避を図っている。

### 参考文献

- 1) 橋内義男, 前田豊. 天井クレーンの経年損傷による倒壊防止に関する研究—クレーンの経年損傷状況. 産業安全研究所特別研究報告. NIIS-SRR, 1966, no. 15, p. 7-15.
- 2) Henneke II, E.G.; Reifsnider, K.L.; Stinchcomb, W.W. Thermography-An NDI method for damage detection. J. Metal. 1979, vol. 31, p. 11-15.
- 3) Favro, L.D.; Han, Xiaoyan.; Ouyang, Zhong.; Sun, Gang.; Sui, Hua.; Thomas, R.L. Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse. Review of Scientific Instruments. 2000, vol. 71, P. 2418-2421.
- 4) 川嶋紘一郎, 村瀬守正, 鋤柄直, 玉山千雅, 奥村毅, 安井誠. サーモソニック法による表面閉口き裂の広領域検出. 機会学会 材料力学部門講演会講演論文. 2004, p. 93-94.
- 5) 阪上隆英, 西村隆, 久保司郎. 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の開発とき裂モニタリングへの適用. 評価・診断に関するシンポジウム講演論文集. 2004, vol. 2004, no. 3, p. 123-127.



西名 慶晃



石垣 雄亮



今西 大輔