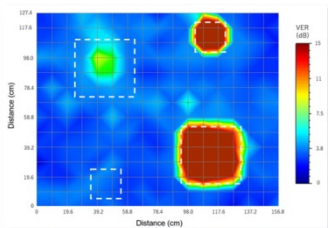


# 非接触音響探査法による火炉プラント耐火壁面の 内部欠陥可視化技術

Defect Visualization Technique Inside Refractory Wall of Furnace Plant  
Using Non-contact Acoustic Inspection Method



石岡 昌人\*<sup>1</sup>  
Masahito Ishioka

山村 一生\*<sup>2</sup>  
Kazuo Yamamura

原田 朋弘\*<sup>3</sup>  
Tomohiro Harada

杉本 恒美\*<sup>4</sup>  
Tsuneyoshi Sugimoto

ごみ焼却設備のボイラに付随する火炉耐火壁の従来の健全性確認は、目視と打音検査にて行われている。特に打音検査は、ハンマー打撃と聴音判定だけの手軽さから広く普及している検査手法であるが、高所・広範囲の大規模な検査では、仮設足場に多くのコストを要するとともに、検査の判定基準が属人的である等の課題がある。今回、三菱重工株式会社(以下、当社)は、桐蔭横浜大学と共同し、それら課題の解決が期待できる非接触音響探査(NCAI: Non-Contact Acoustic Inspection)法について、耐火壁に適用することを想定して、模擬欠陥を付与した供試体を対象に、内部欠陥の識別性能を検証した。この結果、従来法である打音検査で識別できる最小の欠陥サイズ□200mmについて、10m離れた場所からNCAI法で可視化・識別できることを示した。

## 1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設されたトンネルや橋梁等のコンクリート公共インフラが耐用年数を迎えている。これらコンクリートの経年劣化に伴い、剥離・剥落が発生し、重大な事故につながるケースが増えている。このため、これらインフラの維持管理を目的とした欠陥検査技術の重要性が一般に広く認識されるようになった。しかし、一般に適用される目視検査は、コンクリート剥離・剥落の原因である空隙や内部ひび割れが、表面上の亀裂や浮き上がり等の形で外見形状の変化として現れるレベルまで進展してから、ようやく識別できるものである。加えて、目視検査では欠陥の内部進展範囲の推定は容易ではないため、従前から剥離・剥落の予兆である内部欠陥の検査には、打音法が併用されている。

打音法は、ハンマーで被検査対象面を打撃し、欠陥の有無を打撃音の違いから判定する方法である。しかし、本手法は検査員の経験、力量に依存し、検査対象が高所・広範囲にわたる場合、仮設足場や高所作業車の手配、安全確保のための周辺規制が必要である。また、検査結果の判断が属人的であるため、検査品質の客観性を保つことが困難な一面がある。これらを背景に、打音検査の属人的課題を解決するための技術開発がこれまで盛んに行われてきたが、多くの手法は、接触もしくは検査対象へ極めて接近した状態での運用を前提にしているため、それら課題の改善には結びついてない<sup>(1)</sup>。

これらコンクリートインフラと同様の検査課題を持つ当社グループの製品として、ごみ焼却プラ

\*1 三菱重工株式会社 総合研究所 電子・物理研究部

\*2 三菱重工環境・化学エンジニアリング株式会社 エンジニアリング統括部 デジタイゼーション・開発部

\*3 三菱重工環境・化学エンジニアリング株式会社 エンジニアリング統括部 デジタイゼーション・開発部 グループ長

\*4 桐蔭横浜大学大学院 工学研究科 教授 工博

ント等の火炉耐火壁面が挙げられる。仮に、これらプラントの運転中に壁面から耐火材が剥落し、壁内部の水冷管が露出した場合、管が高温に曝されて腐食損傷することが考えられる。また、高所から剥落した大きな耐火材が、炉設備を直撃し損傷させることが原因で運転休止の事態も想定される。これを防ぐために、耐火壁健全性検査を定期的の実施しており、その様子を図1に示す。

将来、短時間、かつ高精度な検査で壁面劣化の進展を定量的に捉えることができれば、定量的な検査結果に基づいた確度の高い補修工事の計画立案が可能となり、予防保全、計画補修の観点から、効率的(工程短縮, コスト低減)な定検工事が可能となる。そこで本報では、これまでの打音検査で難しかった検査の効率化と品質記録の課題解決が期待できる NCAI 法の計測技術及び耐火材供試体による内部欠陥計測の結果について報告する。

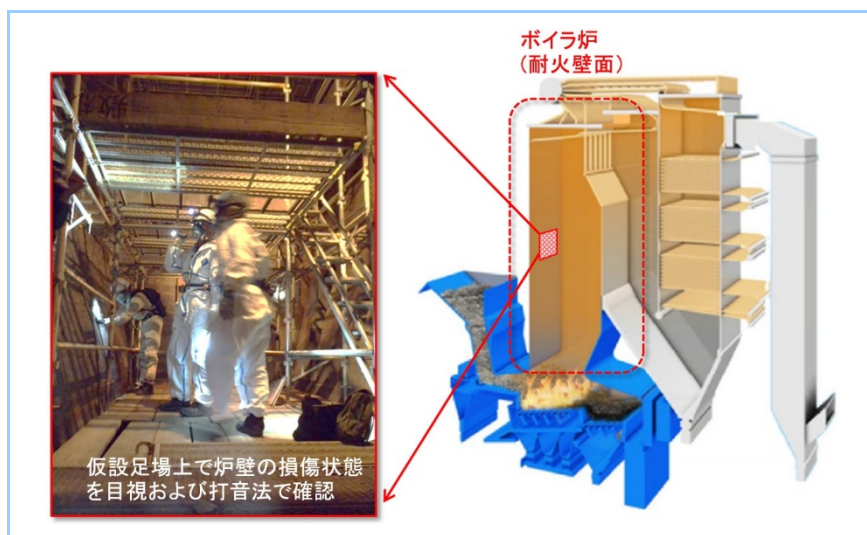


図1 ごみ焼却プラントのストーカ炉における炉内耐火壁面検査の様子  
三菱重工環境・化学エンジニアリング HP より抜粋

## 2. 非接触音響探査法の計測原理(“近くで聴く”より“遠くから見る”)

NCAI 法における欠陥部(剥離・空隙)と健全部との音の違いを発生させる原理は、従来の打音法と同等である。一方、NCAI 法では、ハンマー打撃の代替手段として、スピーカから発する空中音響波により計測対象面を加振する。加振表面直下に欠陥が存在すれば、その直上部は健全部に比べ曲げ剛性が低下しているため、たわみ振動が生じやすい。

図2にNCAI法の計測原理を示す。表面からの深さ $h$ に寸法 $a$ の欠陥部が存在する場合、その部分のたわみ振動は、両端を単純支持された梁構造の共振モデルの1次固有振動数(共振周波数)による共鳴となり、その共鳴周波数分布の違いから欠陥部とそれ以外の健全部とを判別することができる。対象材質(ヤング率, ポアソン比, 密度)の違いも関係するが、同材質においては、欠陥部のたわみ共振周波数は、欠陥の深さと面サイズに比例する。

また、打音法では、その欠陥直上表面の振動で発生した音について、健全部との僅かな音の違いが認められ、これを検査員が聴覚で判別している。一方、NCAI 法では、欠陥直上表面の振動をレーザ振動計で直接計測し、健全部との違いを振動エネルギーで定量的に可視化する。このためNCAI 法では、ハンマーの代わりにスピーカから発する音響波、そして聴音の代わりにレーザ振動計から発するレーザ、といった非接触な計測手段により、遠隔からの非破壊検査が可能である。

ただし、実際の構造物内部に発生する欠陥は様々な形状を持つことから、複雑な共振ピークの周波数スペクトラムを有する。このため、未知欠陥の特徴周波数の複数のピークを、都度個別に捕捉する方法は現実的ではない。そこで、予め一定の深さとサイズに対応した欠陥の共振周波数帯域の音響波を、検査対象に照射し表面を加振させ、健全部との振動エネルギーの違いに

着目することで、それらの課題を解決した。加えて、レーザを検査面上でスキャンさせることで、検査領域各点の振動エネルギーを計測し、相対的に高い振動エネルギーの面分布から欠陥の範囲を推定した。なお、その基準となる健全部は、欠陥部に比べ全ての周波数帯域で一定の範囲で振動エネルギーが低いことが知られている<sup>(2)</sup>。

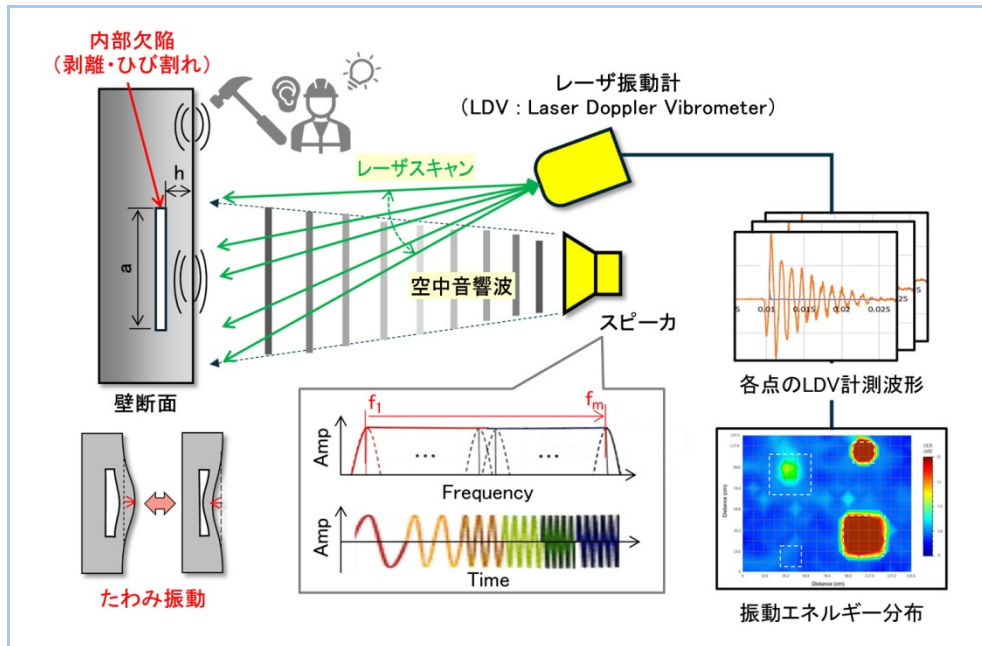


図2 非接触音響探査法(NCAI)の計測原理(人のハンマー叩き打音との比較にて)

### 3. 模擬欠陥供試体と内部欠陥の計測検証結果

#### 3.1 ボイラ周壁管耐壁構造を模擬した人工欠陥供試体

一般的なボイラ炉壁内部構造を模擬した耐壁の人工欠陥供試体を図3に示す。本供試体は、周壁配管パネル上に厚さ 70mm の SiC キャスタブル耐火材を施工した縦 1600mm×横 1900mm の供試体である。なお、内部構造は、複数のYスタッドと周壁配管、及び剥離を模擬した人工欠陥(4箇所)で構成されている。

本図で示すように人工欠陥は、所定の位置に厚さ1mm のポリエチレンシートを予め敷設した状態で、耐火材を流し込み自然乾燥固化することで付与したものである。ここで人工欠陥の仕様は、表面からの深さと平面サイズの2つのパラメータで設定した。欠陥の深さ方向は、アンカ腐食による剥落を想定し、配管曲面に沿った(表面から深さ 36mm~70mm)タイプAと、Yスタッド頂上部(深さ 12mm で水平)のタイプBの2種類とした。そして平面サイズは、検査員が通常判別できてくる代表的なサイズとして□400mm のタイプ1と、□200mm のタイプ2の2種類、計4種類(A1, A2, B1, B2)を配置した。

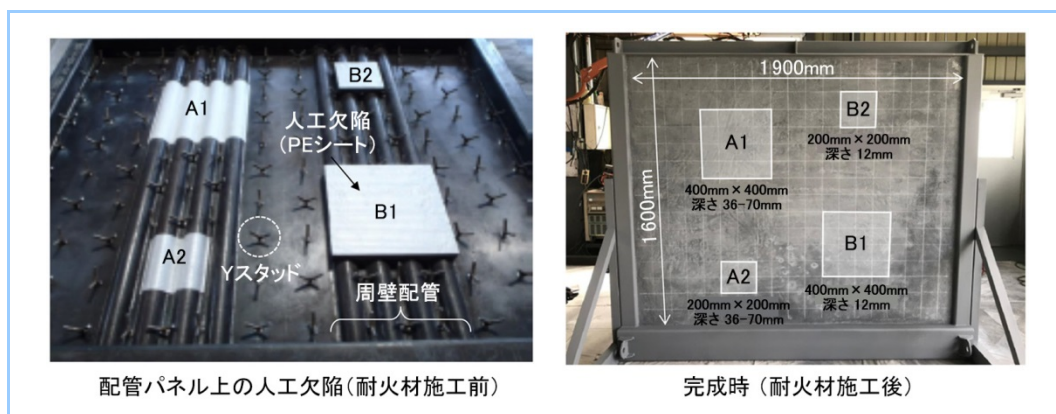


図3 ボイラ周壁管耐火材構造を模擬した人工欠陥供試体



### 3.2 打音検査との性能比較

NCAI 法の音響加振周波数条件を特定するために、各欠陥部と健全部との表面振動特性を計測した。ハンマーの加振力を入力応答に、レーザ振動計による表面振動を出力応答とし、それらの比を用いることで、健全部と欠陥部のたわみ振動特性の違いを比較した。その結果を図4に示す。

本結果から、500~4000Hz 帯域において健全部と欠陥部で有意な振幅差を確認できた。この結果を踏まえ、測定対象の欠陥位置とサイズを網羅したたわみ共振帯域を含むマルチトーン周波数の音響波形を生成し、図5に示す試験配置にてスピーカから5m離れた正対する供試体に向けて音響波を照射した。同時に、レーザ振動計でレーザビームをスキャンして供試体表面の縦1400mm×横1700mmの範囲を、100mm 間隔 14pt×17pt=計 238pt で計測し、各点における周波数帯域の振動エネルギーを面分布にて可視化した。

得られた NCAI 計測結果と、経歴 20 年の検査員によるハンマー打音との結果比較を図5に示す。従来の打音検査員は、浅い欠陥 B1, B2 を判別できたが、深い欠陥 A1, A2 はいずれも判別できなかった。一方、NCAI 法では、周囲の健全部と比べ 15dB の振動エネルギー差で B1, B2 を識別でき、かつ検査員が識別できなかった深い欠陥 A1 (□400mm) についても、健全部と比べ6~8dB の振動エネルギー差で欠陥部を識別することができた。

しかし、NCAI 法で位置を特定できた欠陥 A1 について、その欠陥識別範囲は実際の欠陥寸法よりも小さく、部分的な範囲であった。その理由として、欠陥Aタイプは、B1, B2 のような表面に対し平行な平面欠陥ではなく、内在するパイプ曲面に沿って場所により深さが異なる三次元的な欠陥形状であるため、単純に一樣なたわみ振動特性の場合よりも計測条件が複雑であったためと推測される。また欠陥 A2 は、従来の検査員と同様に NCAI 法でも識別できなかった。以上のことから、NCAI 法は、健全部との比較における欠陥識別の目安となる3dB 以上の計測上有意な信号レベル差で、欠陥部を識別できたことから、打音検査員と同等もしくは、それを上回る能力で、非接触にて内部欠陥を判別できることを実証した。

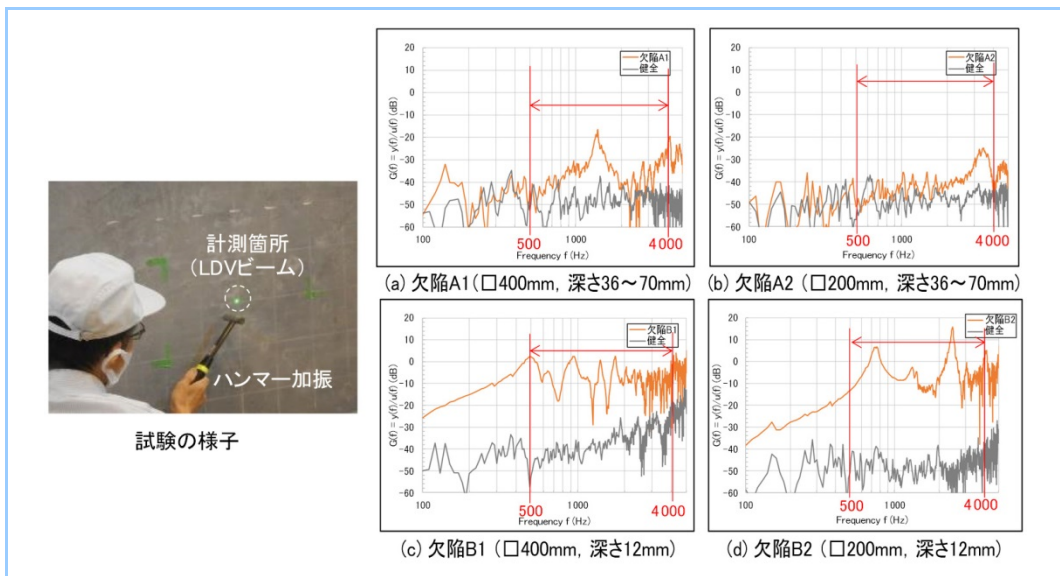


図4 各欠陥部と健全部のたわみ振動特性の比較

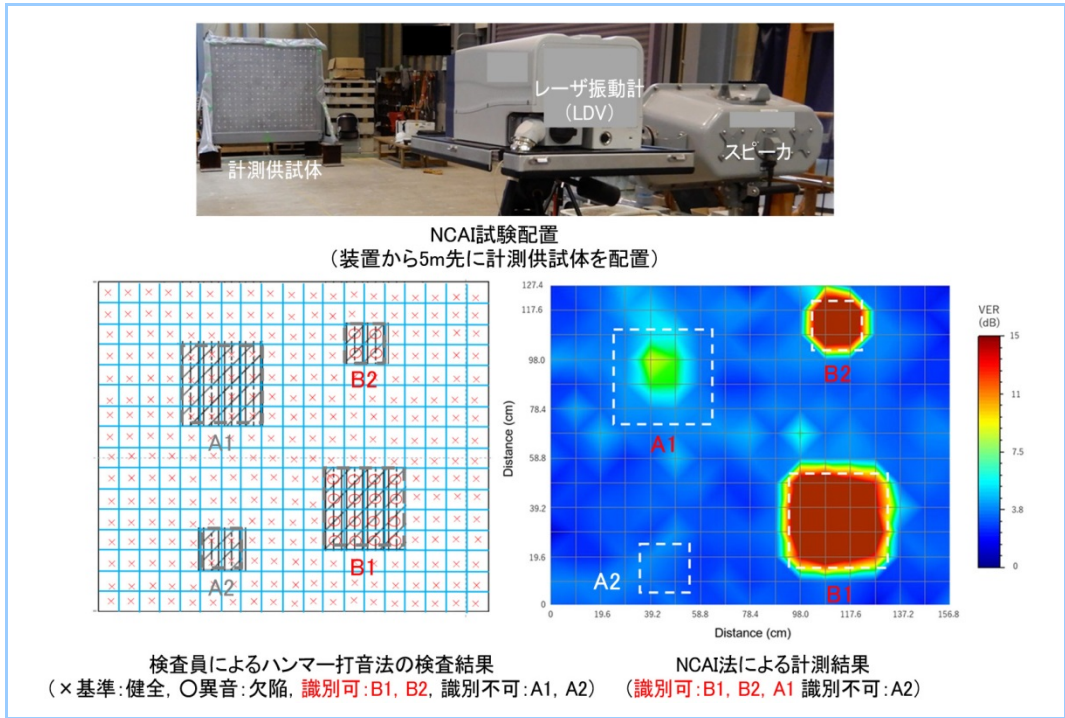


図5 NCAI 試験配置及びハンマー打音法との欠陥識別結果の比較

#### 4. 高所・広域検査適用のための計測性能評価

今回、実機として想定した図1に示すごみ焼却炉の構造と大きさを念頭に、適用時における装置から被検査対象面までの姿勢角度と直線距離が計測性能に与えるロバスト性を検証した。

装置から5m先に正対 ( $\theta = 0^\circ$ ) する供試体の状態 (図5) から  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  と変化させた計測結果の比較を図6の(a)~(c)に示す。欠陥 B1, B2 は、 $45^\circ$  までは周囲健全部との識別が可能であるが、 $60^\circ$  になると健全部と欠陥部の境界は不明瞭となり、欠陥 A1 は、 $45^\circ$  で不明瞭となった。この原因は、加振音響波面の入射角度に伴う各点での位相の違いから、表面で複数の振動モードが励振し相互に影響するためと考えられる。

次に、装置から直線距離で最大 10m 離れた供試体における計測結果を図7に示す。5m 先の図5と比較して、欠陥 A1 の振動エネルギーが周囲の健全部に比べ相対的に低くなり識別が困難になったが、欠陥 B1, B2 は明瞭に識別できており、検査員と同等な欠陥識別性能を持つことが示された。これらの検証結果から、5m~10m 先の遠方にて $\pm 45^\circ$  視野の遠隔条件ならば、最大約 14m 四方エリアを同一地点から一度に検査できる可能性が得られた。

なお、実機では、閉鎖空間での使用を想定している。その場合、NCAI 法では、スピーカからの音響波を被検査対象面に照射することで表面を加振しているが、その目的以外の音は、被検査対象面からの直接反射音や床面や壁からの周囲の残響音となる。この残響音がレーザー振動計本体に外乱振動を与え計測内部ノイズを増大させ、計測性能を低下させていると推定されることから、今後、実機適用時の欠陥識別におけるロバスト性向上のためには、レーザー振動計の防音・防振対策が必要である。

表1に耐火壁面健全性検査における従来の打音法と、NCAI 法との比較結果を示す。前述したように、従来の打音検査は、都度仮設足場が必要であるが、NCAI 法による検査の場合は、足場は基本的に不要である。また、従来の打音検査では、検査範囲を人が移動しながら検査を行いその場で欠陥の有無を判別し、○, ×の検査記録 (欠陥範囲のマーキング写真等) を残している。一方、NCAI 法では、欠陥の有無はデジタルデータ (可視化画像) として保存できることから、検査後もそのデータを元に検査結果の再検証や、客観的な指標を基に一定の品質保証が可能であることが利点となる。

以上の結果から、将来、壁面健全性検査に本技術が適用されれば、付帯工事が最小化でき、検査効率の向上が期待できる。更に、本計測結果は、デジタルな検査記録、及びその記録に基づく確度の高い補修要否の判断が可能となるため、それを用いて次定検の確度の高い補修計画が立案できる。

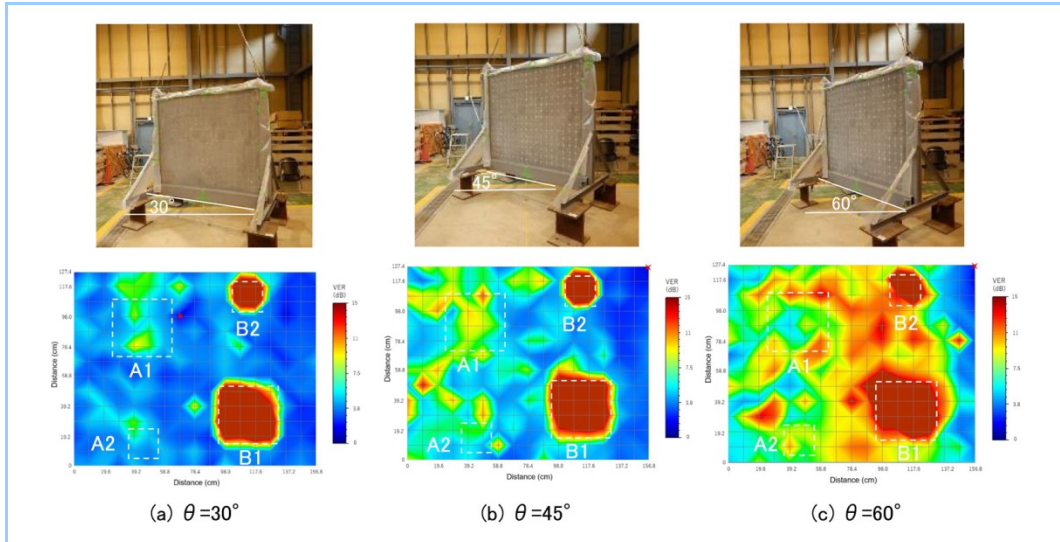


図6 NCAI法の計測角度依存性(上図:供試体の姿勢, 下図:計測結果)

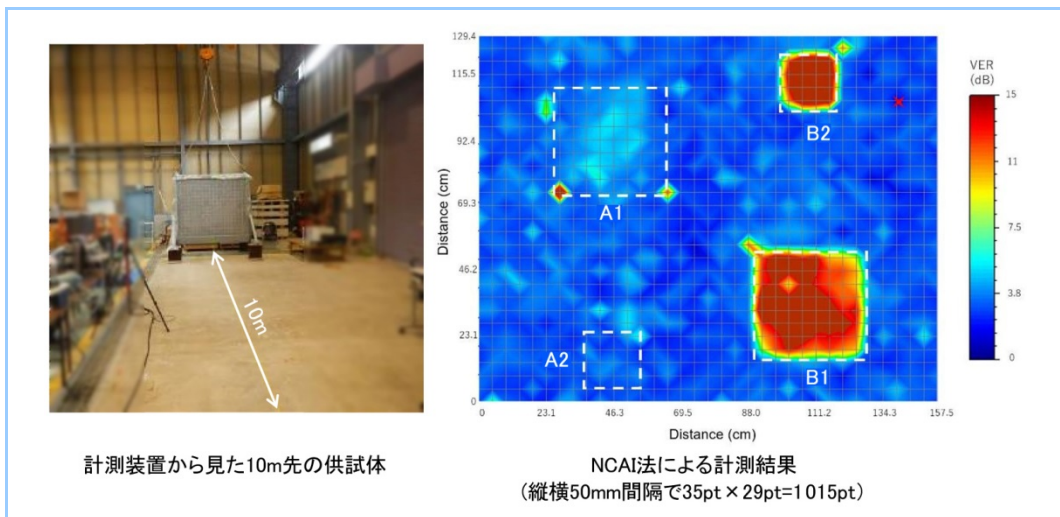


図7 10m先供試体におけるNCAI法の計測結果

表1 従来手法とNCAI法の比較

項目	従来手法(打音法)	NCAI法
仮設足場	検査部位全てに必要	基本的に不要 (人作業レベルの足場)
検査範囲	人の可動範囲で検査 (定点移動にて)	装置定点で一度に 10mクラス四方を検査
欠陥判別能力	検査員の力量による	ベテラン検査員と同等以上 (再現性有)
検査(品質)記録	○, ×判別 アナログ	定量記録 デジタル

## 5. まとめ

当社の大型構造製品の内部欠陥の検査もしくはスクリーニングで問題を抱えているお客様やサービス現場を対象に、本報では、従来の打音検査に代わる検査手法として、非接触音響探査法(NCAI)について報告した。定検工事におけるごみ焼却ボイラに付随する耐火壁面の健全性検査を想定し、本計測技術を検証した結果、一度に10mクラス四方の検査を打音検査と同等もし

くは、それ以上の欠陥識別性能にて、完全非接触で検査できることを示した。今後は、各ニーズの適用に向け実機課題を解決し、検査サービスの効率化、及びプラントの信頼性向上を目指す。

## 参考文献

- (1) 杉本恒美ほか, 音波照射加振とレーザドップラ振動計による土木構造物の非接触・非破壊検査法(前編), 検査技術 2017.8 p.7~17
- (2) 杉本恒美, インフラ検査のための音波照射加振による高速非接触音響探査法, 超音波 TECHNO 2019.11-12 p.92~96