周波数掃引加振ドップラ計測による逆合成開口イメージング

三 輪 空 司*

Inverse Synthetic Aperture Imaging Using Frequency Sweep Vibro Doppler Measurement

Takashi MIWA*

In imaging of reflection coefficient of targets using a coherent wave, we propose a novel inverse synthetic aperture radar imaging method to obtain cross-range resolution without antenna scan or array antennas. In this method a forced vibration wave is induced outside the region of interest to vibrate the target. Sweeping the vibration frequency, a complex Doppler signal generated by the vibrated target is measured. By the Fourier transformation of the vibro-Doppler signal measured in each swept frequency, spatial reflection profile is obtained without scanning transmitter and receiver. In this paper, we show an algorithm of this method and demonstrate the validity of this method through measurements using an ultrasonic wave.

Key Words: imaging, ISAR, forced vibration, Doppler measurement

1. はじめに

近年, 高度経済成長に伴い建設された鉄筋コンクリート (RC) 構造物や鋼構造物の多くが耐用年数を迎え, 維持管理に向けた早急な点検の実施が急務となっている. しかし, 永続的な維持管理の継続には膨大なコストが必要と試算されている. 維持管理では, 現状把握と劣化予測が重要であり, そのためには非破壊検査技術の高度化が重要とされている. その中でも, コンクリートの剥離を検査する打音法は古くから知られた手法であるが, 主観的な手法であり検査に熟練が必要なことや, 手作業であるため検査に時間がかかることが欠点としてあげられる. したがって, コンクリート壁面のひび割れや剥離などを客観的かつ広範囲を迅速に調査可能な一次スクリーニング技術の新規開発が求められている.

壁面のひび割れ検査などにおける新規技術として, 赤外線カメラなどの画像診断に基づく手法¹⁾が研究されている. しかし, その精度はまだ十分とはいえない. また, レーザ超音波探傷技術は収束パルスレーザ光により計測対象表面に超音波を発生させ, レーザドップラ振動計による振動変位から壁面のひびなどからの反射波の有無を検出する手法であり, 原子炉内の遠隔壁面探傷システム^{2), 3)}に実用化されている. この手法は位相から変位を計測するため, スポットサイズを絞る必要があり, 画像化において広範囲を細密にスキャンするには計測時間やコストの増加が問題となる. したがって, こ

のような機械的なスキャンを伴う技術を RC 構造物壁面のひび割れ検査などの 1 次スクリーニング技術として適用するのは困難である. このことから, 空間的なスキャンを行なうことなく広範囲をイメージング可能な新規技術の開発が重要となる.

一般に, コヒーレント波を用いたイメージング法として, 開口幅の狭い送受信機を空間的にスキャン (本論文では, 通常の反射計測とよぶ) しながら, スキャン方向の空間分解能を得る手法は合成開口法 (SAR)⁴⁾とよばれ, 衛星からのリモートセンシングや物理探査, 地中レーダなどにおいて古くから適用されてきた. また, 軌道が既知の運動物体を固定センサのビームを回転させながらトラッキングし, 計測対象の空間分解能を向上する手法として, 逆合成開口法 (ISAR)⁴⁾も知られている. これらは, 送受信機もしくは計測対象が動くことにより, 対象をさまざまな角度から計測することで空間分解能を向上する手法といえる. このような合成開口法の考え方を, 固定センサによる固定対象物のイメージングに適用できれば, 空間的なスキャンを行なうことなく広範囲をイメージング可能な新規技術の開発につながると考えられる.

一方, これまで著者は, センシング用の波と計測対象加振用の波の二つの波を組み合わせた加振ドップラ計測⁵⁾により, クロスレンジ方向の空間分解能を向上させる手法^{6), 7)}などを検討してきた. 本論文では, この加振ドップラ計測が, 計測対象をさまざまな角度から計測することと等価であることを示し, 固定センサにより固定物体のイメージングが可能な逆合成開口アルゴリズムとして周波数掃引加振ドップラ計測とよぶ新たな計測法を提案する. さらに, 本手法の原理を超音波を用いた寒天内の孤立物体の位置推定を通じて, 実験的に検証した結果について述べる.

* 群馬大学大学院理工学府 桐生市天神町 1-5-1

* Graduate School of Science and Technology, Gunma University, 1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu

(Received March 25, 2016)

(Revised July 11, 2016)

2. イメージングの原理

Fig. 1 に加振ドップラ計測の概念図を示す。加振ドップラ計測は、図のようにセンシング用のコヒーレント波のパスと直交する方向から、加振用の弾性波を単一周波数で励振し、計測対象を調和振動させる。振動によるドップラ効果により、センシング波の反射波のパスが変動し、反射波の位相が変化する。その位相変化により、直流成分とは独立なドップラ周波数成分における複素振幅応答（加振ドップラ信号）が計測される。本章ではこの定式化を通じて、周波数掃引加振ドップラ法によるイメージングの原理を述べる。

2.1 加振ドップラ計測の定式化

まず、センシング波として開口の狭いセンサによるモニスタティック計測を考える。本計測系では点 (x_s, z_s) にある送信機から計測対象に向け正弦波を送信し、反射体から反射された反射波を同一位置の受信機で受信する。この波はレンジ分解能を得るためにパルス化されていてもよいが、定式化では簡便のため単一周波数とする。同時に、原点にある加振器により単一周波数で加振を行ない、加振波が x 方向に様に伝搬するものとする。加振波により $(x_m, 0)$ にある m 番目の反射体が振動するとき、反射体の z 方向変位 $u_z(t, x_m)$ は一般に (1) 式のように表わされる。

$$u_z(t, x_m) = \delta \sin(2\pi f_v t - k_v x_m + \varphi) \quad (1)$$

ここで、 δ , f_v , k_v , φ はそれぞれ加振波の振動振幅、加振周波数、加振波数、初期位相である。さらに、センサから反射点までのパス $L(t, x_s, x_m)$ は時間とともに変動し、 $u_z/z_s \ll 1$ とすると、(2) 式で近似できる。

$$L(t, x_s, x_m) = z_s \sqrt{1 - 2 \frac{u_z(t, x_m)}{z_s} + \left\{ \frac{x_s - x_m}{z_s} \right\}^2} \cong l(x_s, x_m) - u_z(t, x_s, x_m) \quad (2)$$

ここで、 $l(x_s, x_m)$ は (3) 式で表わされるセンサと反射体位置のみに依存する項である。

$$l(x_s, x_m) = z_s + \frac{(x_s - x_m)^2}{2z_s} \quad (3)$$

Fig. 1 Co-ordinate system in vibro-Doppler measurement

これにより、センシング波の受信点での直交検波後の複素振幅 $\dot{e}(t, x_s, x_m)$ は、反射体の反射係数 $\dot{R}(x_m)$ を用いて (4) 式のように表わされる。

$$\dot{e}(t, x_s, x_m) = \dot{R}(x_m) e^{j2k_s L(t, x_s, x_m)} \quad (4)$$

$\dot{e}(t, x_s, x_m)$ はセンシング波の反射パスの微小変化により、ドップラ効果を受け、反射により周波数（位相）が変調される。ここで、一般に $J_n(r)$ を n 次のベッセル関数とすると、(5) 式のような関係がある。

$$e^{jr \sin \theta} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(r) e^{jn\theta} \quad (5)$$

これにより、 $\dot{e}(t, x_s, x_m)$ は (6) 式のように展開される。

$$\dot{e}(t, x_s, x_m) = \dot{R}(x_m) e^{j2k_s l(x_s, x_m)} \times \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(-2k_s \delta) e^{jn(2\pi f_v t - k_v x_m + \varphi)} \quad (6)$$

よく知られているように、 $\dot{e}(t, x_s, x_m)$ はドップラ周波数 f_v の n 倍の周波数の正弦波の重ね合わせで変調を受けており、このスペクトルはセンシング波の周波数 $\pm$ 加振周波数の整数倍の線スペクトル列となる。一方、ベッセル関数の係数の関係から $k_s \delta \ll 1$ のとき、(7) 式のような近似が成立する。

$$J_0(-2k_s \delta) \cong 1, \quad J_{|n|>1}(2k_s \delta) \ll J_1(2k_s \delta) = k_s \delta \quad (7)$$

したがって、0 次、1 次の展開項を用いて $\dot{e}(t, x_s, x_m)$ を書き直すと (8) 式が得られる。

$$\dot{e}(t, x_s, x_m) \cong \dot{g}_0(x_s, x_m) \{ 1 - k_s \delta e^{j(2\pi f_v t - k_v x_m + \varphi)} + k_s \delta e^{-j(2\pi f_v t - k_v x_m + \varphi)} \} \quad (8)$$

ここで、(8) 式第 1 項 $\dot{g}_0(x_s, x_m)$ は (9) 式のように時間に依存しない直流成分であり、加振ドップラ計測を行なわない通常の反射計測における応答と等価である。

$$\dot{g}_0(x_s, x_m) = \dot{R}(x_m) e^{j2k_s l(x_s, x_m)} \quad (9)$$

また、同様に (8) 式第 2, 3 項はそれぞれ時間的に加振周波数で変動する 1 次の正負の加振ドップラ周波数成分である。ここで、正の加振ドップラ周波数における応答を $\dot{g}_{VD}(t, x_s, x_m)$ とすると、(10) 式のように定義できる。

$$\dot{g}_{VD}(t, x_s, x_m) = -k_s \delta \dot{g}_0(x_s, x_m) e^{j(2\pi f_v t - k_v x_m + \varphi)} \quad (10)$$

両者ともこのままでは x 方向の空間分解能は得られず、反射体の x 方向の位置情報を精度よく取り出すことは困難である。

2.2 加振ドップラ計測による計測方向の変化

Fig. 2 に加振ドップラ計測の概念図を示す。通常の反射計測では、(9) 式のように反射係数 $\dot{R}(x_m)$ にセンシング波のパス変化による位相回転項 $e^{j2k_s l(x_s, x_m)}$ が乗せられた信号が得

(a) Normal reflection measurement for inclined scan

(b) Vibro-Doppler measurement for normal scan

Fig. 2 Concept of vibro-Doppler measurement

られる。したがって、(a) 図のようにスキャン方向を計測面から傾けた場合、計測面と並行にスキャンした通常の反射計測の信号は、並行な場合に比べ、場所により図のように位相が変化する。一方、(b) 図のように同一の対象で、スキャン方向に平行に加振波を伝搬させ加振ドップラ計測を行なうと、(10) 式のように、平面上を伝わる加振波の波長に対応した位相変動が $\dot{g}_{VD}(t, x_s, x_m)$ に現れる。ここで、 $\dot{g}_{VD}(t, x_s, x_m)$ はその複素反射係数とセンサ位置による位相回転項、加振波の伝搬にとまう位相回転項の積が計測されることになる⁷⁾。

このことから、加振ドップラ計測はスキャン方向を $\tan^{-1}$ (センシング波の半波長 ÷ 加振波の 1 波長) だけ傾けて計測した通常の反射計測と類似している。その傾き角は加振波長に依存するため、加振波長を変化させながら加振ドップラ計測を行えば、通常の反射計測においてさまざまな傾き角で対象を計測した場合と等価な信号が得られると考えられ、センサを固定していても空間分解能を得ることが原理的に可能となると考えられる。

2.3 合成開口法

まず、センサをスキャンすることによりクロスレンジ分解能を向上する通常の合成開口について述べる。 $\dot{g}_0(x_s, x_m)$ はセンサ位置の移動による位相変化項をもち、その位相変化項は位相が x_s の変化に対して 2 次関数で変化するチャープ波形状の空間変動を示す。ここで、仮想反射点の位置を x とすると、センサ位置 x_s を x_L から x_H まで動かして得られる位相変化項は既知であり、その複素共役を乗算して x_s で積分

する評価関数 $\dot{g}_{SAR}(x)$ を考えると (11) 式が得られる。

$$\begin{aligned}\dot{g}_{SAR}(x, x_m) &= \frac{1}{x_H - x_L} \int_{x_L}^{x_H} \dot{g}_0(x_s, x_m) e^{-j2k_s l(x_s, x)} dx_s \\ &= \dot{R}(x_m) e^{j \frac{k_s x (x_H + x_L - 2x_m - x)}{2z_s}} q(x - x_m)\end{aligned}\quad (11)$$

ここで、 $q(x)$ はセンサ移動による空間解像関数であり、(12) 式で定義される sinc 関数である。

$$q(x) = \text{sinc}\left\{\frac{k_s(x_H - x_L)x}{2z_s}\right\}\quad (12)$$

$\dot{g}_{SAR}(x, x_m)$ は (12) 式から、 $x = x_m$ のときのみ最大値をもち、 x が x_m から離れるにつれて小さい値となることから、反射体の x 方向の位置情報が得られる。これが、合成開口法によるイメージングの原理である。また、この空間分解能は $\lambda_s z_s / (x_H - x_L)$ で表わされ、移動幅に逆比例して向上し、センシング波の波長と深さに比例して悪化する。

2.4 加振ドップラ逆合成開口法

つぎに、周波数掃引加振ドップラ計測による逆合成開口法の原理を示す。センサ位置を固定とすると、(10) 式の 1 次のドップラ応答は $\dot{g}_{VD}(t, x_m)$ と表わされ、反射体の位置によって位相が回転する項となっている。今、 $\dot{g}_{VD}(t, x_m)$ を時間に対してフーリエ変換し、加振周波数 f_v におけるフーリエ成分 $\dot{G}_{VD}(f_v, x_m)$ を取り出すと、(13) 式のように表わされる。

$$\dot{G}_{VD}(f_v, x_m) = -k_s \delta \dot{g}_0(x_m) e^{j\varphi} e^{-j2\pi f_v x_m / v}\quad (13)$$

ここで、 $k_v = 2\pi f_v / v$ を用いた。この信号を加振ドップラ信号と呼ぶが、この信号は f_v によって正弦的に変動するため、加振波の伝搬速度 v が既知であれば、その変化から x_m を推定できる。すなわち、加振周波数 f_v を f_L から f_H まで掃引しながら $\dot{G}_{VD}(f_v, x_m)$ を計測し、 f_v に関して逆フーリエ変換すれば (14) 式のような $\dot{g}_{VDISAR}(x, x_m)$ が得られる。

$$\begin{aligned}\dot{g}_{VDISAR}(x, x_m) &= \frac{1}{f_w} \int_{f_L}^{f_H} \dot{G}_{VD}(f_v, x_m) e^{j2\pi f_v x / v} df_v \\ &= -k_s \delta \dot{g}_0(x_m) e^{j(2\pi f_c x / v + \varphi)} p(x - x_m)\end{aligned}\quad (14)$$

ここで、 $f_c = (f_H + f_L)/2$ 、 $f_w = f_H - f_L$ はそれぞれ、掃引周波数の中心周波数、帯域幅であり、また、 $p(x)$ は (15) 式で表わされるような加振ドップラ計測による空間解像関数である。

$$p(x) = \text{sinc}\left(\pi f_w \frac{x}{v}\right)\quad (15)$$

ここで、 $\dot{g}_{VDISAR}(x, x_m)$ は $x = x_m$ にピークをもち、その点での振幅は $k_s \delta |\dot{R}(x_m)|$ より、センシング波の反射係数と加振波の振動振幅に比例する。したがって、 $\dot{g}_{VDISAR}(x, x_m)$ はセンサ固定であるものの、センサをスキャンする合成開口法と等価なイメージング能を有している。この空間分解能 x_{res} は sinc 関数のゼロクロス点の間隔と等しいため、(16) 式のよ

Fig. 5 Example of vibro-Doppler signal

を設置した。また、加振ロッドは金属線と同じ深さに埋め込み、 x 方向に伝搬する加振波が金属線に直交するように配置した。

Fig. 5 に加振周波数 400, 600 Hz において本計測により得られる加振ドップラ信号の例を示す。同図 (a) はネットワークアナライザにより得られたドップラ成分の周波数スペクトルである。受信信号は小さいものの、広帯域なスペクトルが得られていることがわかる。同図 (b) にこのスペクトルを逆フーリエ変換し複素インパルス応答を求めた結果を示す。横軸は、超音波の伝搬速度を 1500 m/s としたときの深さ方向の深度プロファイルに変換している。 $z = 80, 100, 120$ mm に強い反射が見られるが、幾何学的配置からこれらはそれぞれ水と寒天境界、金属線、寒天底面からの反射である。また、金属線からの反射に対して加振周波数 600 Hz においても 25 dB 以上の比較的高い SNR が得られていることがわかる。なお、通常の反射計測で計測される送受信超音波トランスデューサ間の強い直接結合は計測されていない。これは、送受信トランスデューサは水中にあり、横波である加振波が伝わらないためことが原因である。また、それ以外の水槽の端部や水面からの不要な反射なども同様な理由により計測されない。

Fig. 6 に 300~700 Hz の加振周波数において得られた複素反射プロファイルのパワーのデシベル値を濃淡表示した結果を示す。どの加振周波数においても同様に $z = 80$ mm における水と寒天境界からの反射波や、 $z = 100$ mm における金属線からの反射波が得られていることがわかる。また、加振周波数が高くなるにつれ振幅が減衰しているが、これは、寒天の粘性の影響により横波の伝搬において、高周波ほど減衰を受けることや、周波数の変化に対して、駆動信号の振幅が

Fig. 6 Power of impulse response of frequency sweep vibro-Doppler signal

Fig. 7 Complex amplitude of impulse response of frequency sweep vibro-Doppler measurement at $z = 100$ mm

一定である電圧を加振器に印加しているため周波数が高くなるにつれて、加振振幅が低下することが原因であると考えられる。

Fig. 7 に金属線の位置に対応する $z = 100$ mm における加振ドップラ信号の複素応答を抜き出し、その振幅と位相を求めた結果を示す。Fig. 7(a) の点線は金属線の加振ドップラ信号であり、振幅が加振周波数とともに低下しているため、ここでは Fig. 7(a) の破線で示されるような中心周波数 800 Hz、帯域幅 550 Hz のガウシアン型の形状のフィルタにより、Fig. 7(a) の実線のように振幅補正を行なうものとする。また、Fig. 7(b) に金属線からの加振ドップラ信号の位相を示す。位相は直線的に変化していることがわかる。Fig. 7 の複素振幅は Fig. 5(b) のインパルス応答における $z = 100$ mm での複素振幅から得られており、その応答は (13) 式において Fig. 5(a) の中心周波数である 5.2 MHz の正弦波をセンシング波とする周波数掃

Fig. 8 Result of proposed frequency sweep vibro-Doppler ISAR image ($x_1 = 20$ mm)

Fig. 9 1D plot of conventional reflection profile at $z=100$ mm obtained with scanning for x direction without vibration

引加振ドップラ信号と等価であり、Fig. 7(b) は線形な位相特性が得られていることから単一の反射体が存在することを示している。

Fig. 8 にすべての深さに対して加振周波数の振幅補正を行ない、その補正した加振ドップラ信号を加振周波数方向に逆フーリエ変換することによって得られる周波数掃引加振ドップラ逆合成開口法によるイメージング結果を示す。同図 (a) は 2 次元イメージであり、同図 (b) は $z = 100$ mm における x 方向の 1 次元プロットである。加振点からの距離 $x = 22$ mm の位置に強い応答が見られ、反射体の存在が確認できる。また、比較のため同一の超音波トランスデューサを用いて、加振せずにスキャンを行なって得られた x 方向の反射プロファイルを **Fig. 9** に示す。これは (9) 式の直流成分において x_s を変化させる機械式走査の B モード像と等価であり、得られたインパルス応答の $z = 100$ mm での振幅をプロットした。図より $x = 20$ mm の位置のみに反射波の存在が確認で

Fig. 10 Result of proposed frequency sweep vibro-Doppler ISAR image for two separated metallic wires ($x_1 = 20$ mm, $x_2 = 30$ mm)

きる。Fig. 8(b) の反射体の位置とずれが見られるが、これは加振ロッドと金属線の深度が一致しておらず、ずり弾性波の伝搬方向が x 方向と一致していないこと、および寒天のずり弾性波伝搬速度はセンサをスキャンしながら加振ドップラ計測を行なった際の寒天表面の波数計測より 3.2 m/s と推定されている⁷⁾、この推定誤差の影響が考えられる。

つぎに、空間分解能について議論する。Fig. 7(a) における振幅補正後のスペクトルからでは明確に帯域幅を定義できない状況ではあるが、おおむね 400~700 Hz を信号の帯域とみなして帯域幅 300 Hz とすると、空間分解能は理論的に (16) 式より 10 mm と推定できる。Fig. 8 よりパルス幅は 10 mm 程度とみられ、理論値とおおむね一致した結果が得られた。

つぎに空間分解能が 10 mm であることから、反射体を 2 本とし両者を識別可能か検討を行なった。本手法は線形な演算であり、複数の反射体に対しても多重反射がなければ、各反射体単体の反射プロファイルの重ね合わせで議論できると考えられる。二本の金属線はそれぞれ加振ロッドからの距離 $x_1 = 20$ mm, $x_2 = 30$ mm, 深さ $z = 88$ mm 付近に埋設し、同様の計測を行なった。**Fig. 10** に本手法によるイメージング結果を示す。同図 (a) は 2 次元イメージング結果である。 $z = 80$ mm に見られる反射は水と寒天の境界からの反射であり、 $z = 88$ mm 付近に金属線からの二つの反射が見られていることがわかる。同図 (b) は二つの金属線の反射応答が重なる $z = 88$ mm における x 方向の空間プロファイルであるが、本手法により二つの反射体を識別できていることがわかる。

5. ま と め

本研究はコヒーレントなセンシング波を用いた反射体イメージング系において、計測対象に加振波を伝搬させ、その振動によるドップラ周波数成分を計測する加振ドップラ計測の加振周波数を変化させることでセンサを移動させることなく、クロスレンジ方向の空間分解能を得る周波数掃引加振ドップラ逆合成開口法の原理、およびその原理検証を行なった。

本手法の定式化を行ない、合成開口と同様なクロスレンジ分解能が得られることを示した。また、分解能が掃引帯域幅に逆比例することも示した。

さらに、ネットワークアナライザを用いた周波数掃引加振ドップラ計測システムを構築し、超音波を用いて、原理検証を行なった結果、センサを固定したまま1個の反射体の位置推定が可能であることを示した。また、2個の反射体においても両者を識別できることも実験的に示した。

分解能は提案法では加振周波数帯域幅、通常のBモード計測ではセンサの指向性によって定まるが、両者は独立な原理で分解能を向上させる手法であるため、両者を同時に適用し分解能を向上させたり、さらに合成開口処理も行なって、より高解像度化せたりすることも可能であると考えられる。

今後は、クロスレンジ方向に直交する2次元面内での空間分解能を得るための定式化、原理検証を行ない、非破壊検査への応用を検討することが課題である。

謝辞 この研究は科学研究費補助金、挑戦的萌芽研究(26630179)の一部として行なわれた。ここに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 岩波, 松本, 大郎, 鎌田: サーモグラフィによるコンクリートのひび割れ評価, 第2回サーモグラフィによる非破壊評価技術シンポジウム講演論文集, 5/10 (1998)
- 2) M. Ochiai, D. Lévesque, R. Talbot, A. Blouin, A. Fukumoto and J.-P. Monchalain: Detection and characterization of discontinuities in stainless steel by the laser ultrasonic synthetic aperture focusing technique, *Materials Evaluation*, **62**-4, 450/459 (2004)
- 3) 落合, 仏円, 三浦, 黒田, 空本, 兼本: レーザー励起広帯域表面波を用いた微小き裂サイジング手法, *日本原子力学会誌*, **43**-3, 275/281 (2001)
- 4) M.I. Skolnik: *Radar Handbook*, Chapter 21, McGraw Hill (1970)
- 5) Y. Yamakoshi, J. Sato and T. Sato: Ultrasonic imaging of internal vibration of soft tissue under forced vibration, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **37**-2, 45/53 (1990)
- 6) T. Miwa: Improvement of horizontal resolution by Doppler image under forced vibration, *Key Engineering Materials*, **596**, 152/157 (2013)
- 7) A. Kaneko and T. Miwa: Spatial modulation measurement by the SFCW vibro-Doppler measurement system, *Proc. of Symp. on Ultrasonic Electronics*, **35**, 59/60 (2014)

[著 者 紹 介]

三 輪 空 司 (正会員)

1994年東北大学工学部資源工学科卒業。99年東北大学大学院工学研究科地球工学専攻博士後期課程修了。同年、電気通信大学電子工学科助手。2005年群馬大学工学部電気電子工学科助手。2011年より群馬大学准教授、現在に至る。レーダシステム、レーダ信号処理、地中レーダ、医用超音波計測、波動を用いた非破壊検査応用などの研究に従事。(博士(工学))。IEEE、電子情報通信学会、日本コンクリート工学会、日本非破壊検査協会、物理探査学会、各会員。