

コンクリート構造物の打音検査用ロボットの開発および実装

宮崎大学・工学教育研究部

李 春鶴

1. はじめに

従来から、コンクリート構造物の劣化に早期に対応し、長寿命化を図るために数年に1度の定期点検や災害の発生時に臨時的に点検が行われていた¹⁾。しかし、平成24年の笹子トンネル天井板崩落により9名が死亡するという大きな事故²⁾が発生した。この事故を期に、平成26年に道路法が改正されて、5年に1度の近接目視を基本とする定期点検が義務化³⁾され、必要に応じて打音検査などが補助的に行われている。さらに、近年ではコンクリート構造物の経年劣化が問題視⁴⁾されてきており、2040年には建設後50年以上経過するコンクリート構造物がトンネルでは53%、道路橋では75%を占めてしまう⁵⁾。それにより、必然的に点検作業が重要視され早期のインフラメンテナンスが必要になるが、昨今では建設事業従事者の減少や高齢化⁶⁾が懸念されている。令和2年では道路法が改正された平成26年に比べて13万人減少しており、打音検査を行うような技能者においては20万人の減少となっている。

本研究では、コンクリート構造物内部欠陥の三次元的な位置推定及び無人検査の実現を目指す。

2. 三次元的欠陥方向推定手法の構築

2.1 モデルの構築

欠陥方向推定を行う工程としては、フィルター処理、環境音除去、波形の切り取り、サンプル数の増加などの前処理を行い、スペクトル解析、位相差取得、角度推定の順序で行った。欠陥方向推定手法についての概要について図-1に示す。

スペクトル解析には、ウェーブレット変換解析と短時間フーリエ変換(STFT)解析の2種類を用いた。ウェーブレット変換について、マザーウェーブレットにはMorse Waveletを用いて解析を行った。STFTについて、リーケージの設定は最小リーケージを使用し、隣接する周波数帯のエネルギー漏れを抑制している。オーバーラップ率は99%に設定し、オーバーラップ率が高いほど時間分解能が上がるが、計算コストも増加する。また、

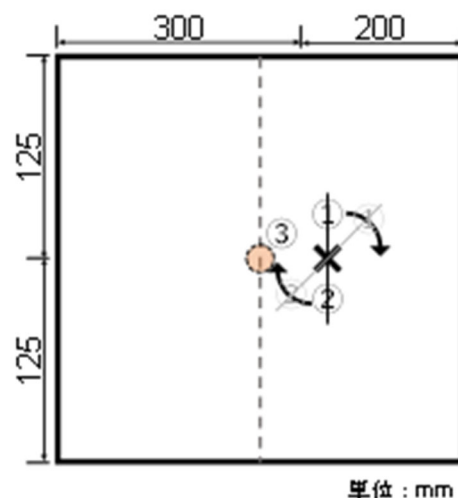


図-1 方向推定手法の概要

周波数分解能を 3kHz に設定し，スペクトルの解析に使用する周波数帯の幅を指定

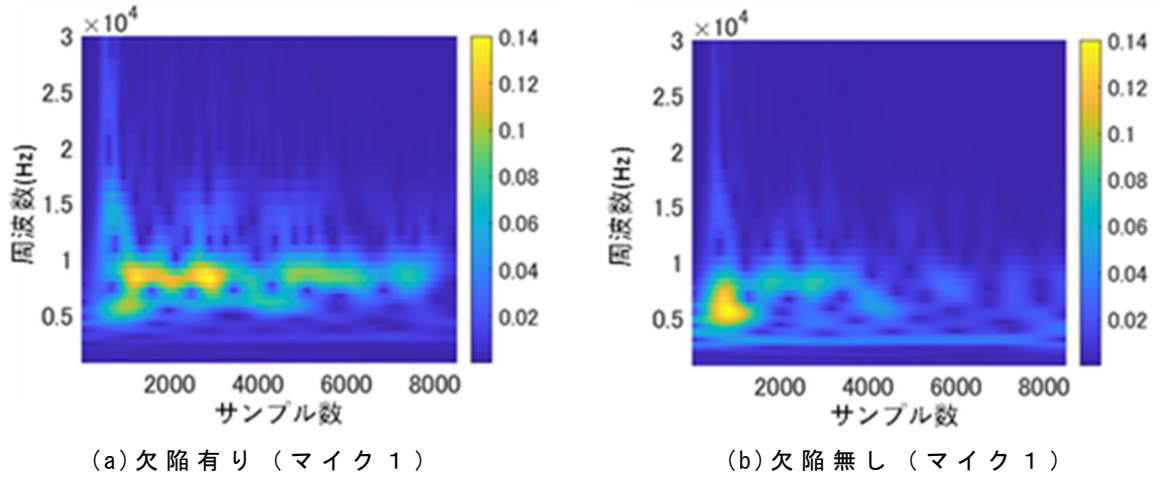


図-2 ウェーブレット変換結果

した．マイク①における欠陥有り無しでの，ウェーブレット変換によるスペクトル解析結果例を図-2(a)および(b)に示す．

スペクトル解析後，欠陥有りでのスペクトル結果から欠陥無しのスペクトル解析結果を，各マイク間で差し引き処理を行う．これにより，欠陥からの影響，欠陥からの反射波のみを抽出することができるという考えである．スペクトルの引き算結果例を図-3に示す．引き算後のスペクトルについて，引き算前に支配的であった周波数成分が，引き算によって抑制され，欠陥からの

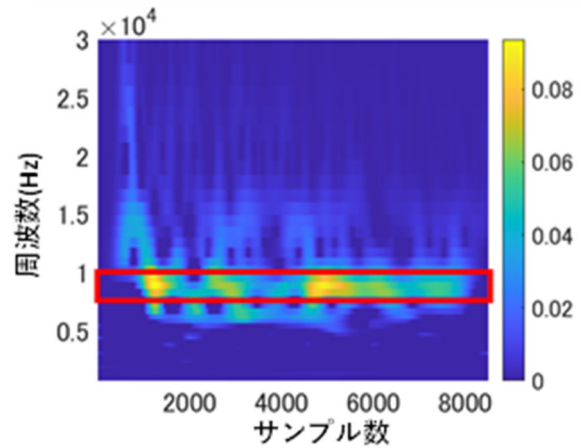


図-3 スペクトル引き算結果例
（ウェーブレット）

反射波だと考えられる周波数成分が確認できる．成分の抽出方法に関しては，各周波数帯の成分を合計し，その最大成分を示す周波数成分を反射波として抽出した．

抽出したマイク①，マイク②の反射波に対して，相互相関関数である式(1)を用いて位相差を算出し，その後，式(2)を用いて欠陥方向推定を行う．

$$\phi_{xy}(m) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M x(n)y(n+m) \quad (1)$$

ここで， M ：振動波形のサンプル数

x, y ：比較する二つの信号

ϕ_{xy} ：相互相関関数

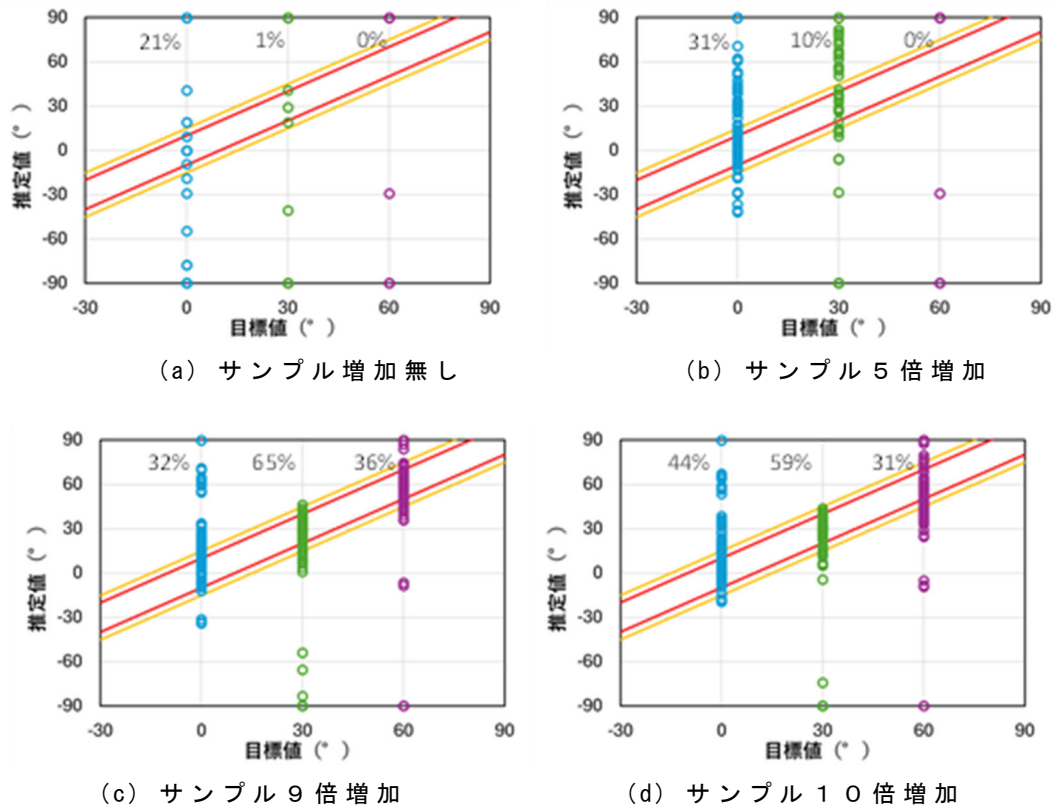


図-4 欠陥方向推定結果（ウェーブレット）

$$\theta_{defect} = \text{Arctan2} \left(\frac{d_{12}}{2}, \sqrt{\left(\frac{d_M}{2} \right)^2 - \left(\frac{d_{12}}{2} \right)^2} \right) \quad (2)$$

ここで、 d_M ：位相差を距離に変換した値

d_{12} ：マイク間距離

θ_{defect} ：欠陥方向($^{\circ}$)

欠陥方向推定手法に関しては、マイク①、②、③を使用して行う。その後、マイク①とマイク②を使用した際の推定角度方向へ引いた直線と、マイク①とマイク③を使用した際の推定角度方向へ引いた直線の交点を算出し、その点から直下方向に直線を作成する。その地点を欠陥直上の供試体表面座標とし、樺山ら⁷⁾の報告を参考にし、欠陥からの反射波周波数を使用し打撃点から欠陥までの距離を算出する。その時に用いた式について以下に示す。

$$L = \frac{c}{2f} \quad (3)$$

ここで、 c ：伝播速度(m/s)

f ：伝播成分の周波数(Hz)

L ：打撃点から欠陥までの距離(m)

そして、交点から引いた直線上かつ、式(3)で算出した距離を満たす点を算出し、三

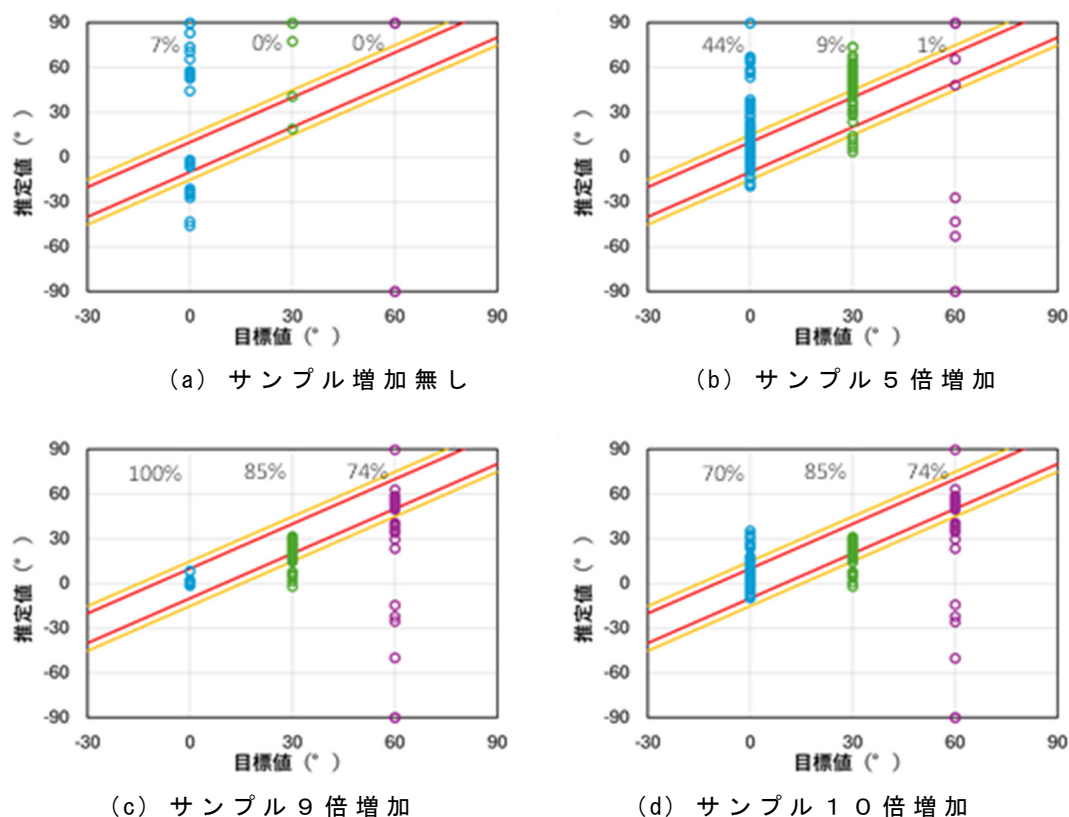


図-5 欠陥方向推定結果 (STFT)

次元的な欠陥方向推定とする。

2.2 実験検証結果

ウェーブレット変換を用いた欠陥方向推定結果を図-4(a)から(d)に示す。図には、サンプル数を増加させていない結果、5倍、9倍、10倍にした結果を示している。増加させていない場合の方向推定が 0° では21%の成功率であるが、他の角度では全く成功していない。これは、伝播速度に対するサンプリング周波数が小さいため、少ないサンプルのずれでも、大きな距離の差を生み出してしまい、結果として角度推定が 90° や -90° など振り切れた結果となってしまったと考えられる。そして、サンプル数を徐々に増加させていき、9倍に増加させた結果では、 0° で32%、 30° で65%、 60° で36%の成功率となっており、10倍に増加させた結果では、 0° で44%、 30° で59%、 60° で31%の成功率と、ある程度収束的な結果が確認できた。これらより、ウェーブレット変換を用いた方向推定では、伝播速度などの影響を考えた場合に、サンプル数を10倍程度増加させると、欠陥方向推定の精度が向上することが確認できた。また、目標値に対する推定値の傾向が、角度に対して正しい推移を示していることから、マイクと欠陥の距離差による反射波の位相差を検知できていることが確認できた。

STFTを用いた欠陥方向推定結果を図-5(a)から(d)に示す。図には、サンプル数を増加させていない結果、10倍、19倍、20倍にした結果を示している。増加させてい

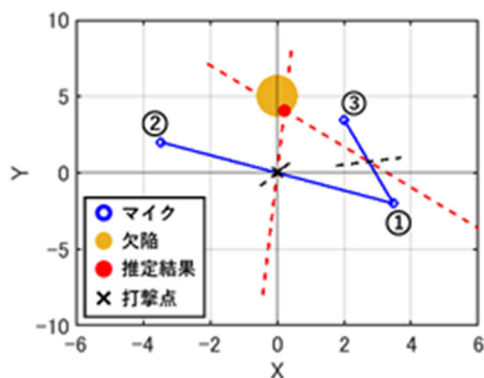


図-6 二次元的な欠陥方向推定結果
(ウェーブレット)

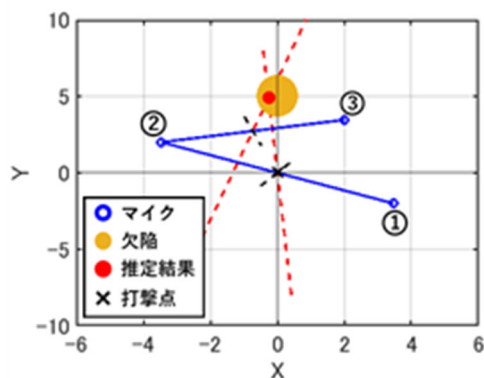


図-8 二次元的な欠陥方向推定結果
(STFT)

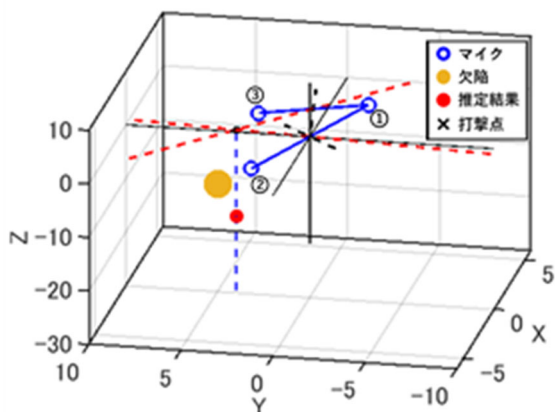


図-7 三次元的な欠陥位置推定結果
(ウェーブレット)

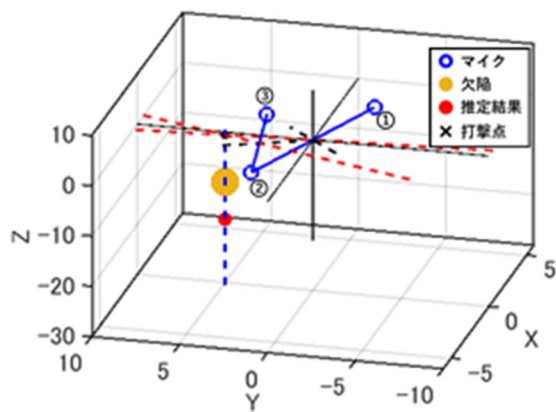


図 19 三次元的な欠陥位置推定結果
(STFT)

ない場合の方向推定が 0° では7%の成功率であるが、他の角度では全く成功していない。これは、ウェーブレット変換同様、伝播速度に対するサンプリング周波数が小さいため、少ないサンプルのずれでも、大きな距離の差を生み出してしまい、結果として角度推定が 90° や -90° など振り切れた結果となってしまったと考えられる。そして、サンプル数を徐々に増加させていき、10倍に増加させた結果では、 0° で44%， 30° で9%， 60° で1%の成功率となっており、20倍に増加させた結果では、 0° で70%， 30° で85%， 60° で74%の成功率と、ある程度収束的な結果が確認できた。これらより、STFTを用いた方向推定では、伝播速度などの影響を考えた場合に、サンプル数を20倍程度増加させると、欠陥方向推定の精度が向上することが確認できた。また、同様に目標値に対する推定値の傾向が、角度に対して正しい推移を示していることから、マイクと欠陥の距離差による反射波の位相差を検知できていることが確認できた。

ウェーブレット変換とSTFTのどちらを使用した場合でも、 30° 目標時の精度よりも 60° 目標時の精度が低く推定されている原因として、欠陥とマイクの距離が考えられる。 30° にマイクを設置している場合よりも、 60° ではマイク②が欠陥に近く、マイク①が欠陥から遠くなる。そのため、マイク②では打撃による直達波と欠陥からの反射波が区別しにくく、マイク①では欠陥からの反射波が減衰し、検出しにく

いのではないかと考えた。

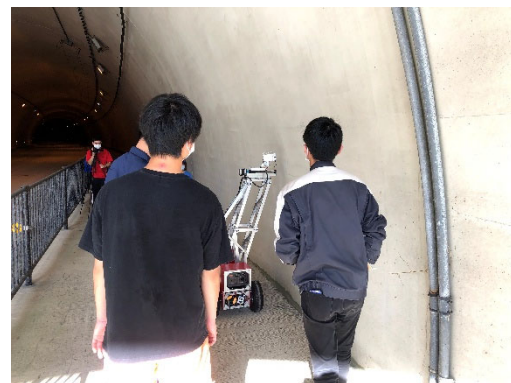
ウェーブレット変換での方向推定結果とSTFTでの方向推定結果において、精度の向上に適したサンプル数の増加倍率が異なる。これは、ウェーブレット変換とSTFTの特性の違いによるものであると考えられる。ウェーブレット変換は、周波数に対応した窓関数の幅を調整して、周波数帯に対応した分解能を保つ特性があるため、時間的なロスが比較的抑えられる。対して、STFTでは周波数帯によらず同じ幅の窓関数を適用するため、周波



写真-1 実験室レベルでの検証
(垂直面)



(a) 検証トンネル



(b) 検証実験

写真-2 検証実験

数分解能か時間分解能のどちらかしか向上させることしかできず、周波数分解能をある程度保った場合、比較的に時間的なロスが現れてしまう、そのため、STFTではサンプル数をより増加させた場合に、欠陥方向推定の精度が向上したと考えられる。

結果として、ウェーブレット変換を使用した際の欠陥方向推定と比較して、STFTを使用した際の欠陥方向推定の方が高い精度で推定できていた。しかし、STFTではウェーブレット変換よりも解析にかかる時間が長く、サンプル数をより増加させなければならないことから、プログラムによる処理に、より時間がかかってしまうといったデメリットも確認された。

図-6にウェーブレット変換を用いた際の結果を示す。マイク③を加えて、マイク三つを使用して解析した結果では、二次元的な位置はかなり近い位置を推定できている。さらに、マイクを増やしても各マイク間で同じ位置を推定できていることから、欠陥方向推定モデルの正確性を担保するものだと考えた。また、打撃点からの距離パラメータを追加し、三次元的な推定を行った結果を図-7に示す。どちらの結果も多少の誤差は存在しているものの、かなり欠陥に近い点を推定できており、距離的な誤差は5cm以内に抑えられていた。

次に、図-8にSTFTを用いた際の結果を示す。二次元的な位置推定では、ウェーブレット変換使用例より、かなり近い位置を推定できている。さらに、ウェーブレ

ット変換使用例同様に，マイクを増やしても各マイク間で同じ位置を推定できていることから，欠陥方向推定モデルの正確性を担保するものだと考えた．そして，三次元的な推定を行った結果を図-9に示す．どちらの結果も多少の誤差は存在しているものの，二次元的な位置は正確であったため，深さ方向の誤差のみという結果であり，同様に距離的な誤差は5cm以内に抑えられていた．

3. ロボットへの搭載と現場での実証

まず，平滑で垂直な構造物壁面を対象とした打音検査ロボット及び打音ユニットの開発を行った（写真-1）．打音ユニットは打音検査に必要な装置をユニット化したものであり，検査条件または，検査環境などに応じた迅速な交換を可能とする．また，打音検査ロボットは，複数二自由度のロボットアームをもつ移動ロボットであり，アーム先端に取り付けられた打音ユニットを対象の構造物に適切に対応できる．評価実験では，ロボットは一般道の走行や登坂といった走行性能，障害物を回避する旋回性能を確認した．次に，トンネルでの走行可能時間実験と打音検査実験を行い，その性能を検証した．

4. まとめ

本研究では，欠陥の位置推定において，当初の二次元的推定から，三次元的位置推定可能なモデルを開発したのが本研究の最大の成果である．また，ロボットへ搭載して現場での性能確認も実施し、無人検査実現の可能性を示した．トンネル現場使用の制約条件により，欠陥確認までは至っていないが，今後は精度の向上，廃棄トンネルを用いて精度確認も行い，検査の効率化，省力化に挑戦する．

謝辞

本研究を遂行するにあたり，公益財団法人天野工業技術研究所から多大なご支援を頂きました．ここに記して謝意を示します．

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書【維持管理編】．
- 2) 国土交通省：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書，https://www.mlit.go.jp/r-road/ir/ircouncil/tunnel/pdf/130618_houkoku.pdf，(閲覧日R7.1.20)
- 3) 国土交通省：国土交通省インフラ長寿命化計画(行動計画)，<http://www.mlit.go.jp/common/001051276.pdf>，(閲覧日R7.1.20)
- 4) 加藤佳孝，伊代田岳史，伊藤正憲，小島正朗，西脇智哉，兼松学：社会情勢とコンクリート産業構造の関連性検討委員会，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.25-32，2012
- 5) 国土交通省：令和4年版国土交通白書，<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r03/hakusho/r04/html/n2220000.html>，(開

覧日 R7.1.20)

- 6) 国土交通省：最近の建設業を巡る状況について【報告】，<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001428484.pdf>，(閲覧日R7.1.20)
- 7) 樫山好幸，熊野賢二，宮川豊章，野村勝義，今田和夫：反射波法を用いた非破壊試験のコンクリート構造物空隙調査への適用性に関する研究，土木学会論文集，No.665/VI-49，pp.31-44，2000.12
- 8) 原元功士，河野哲也，魚住龍太郎，李根浩，李春鶴：ウェーブレット変換を用いたコンクリート構造物の欠陥方向推定に関する研究，令和6年度土木学会西部支部研究発表会，VI-002，pp.847-848，2025.03.08（琉球大学）