

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：12301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14273

研究課題名(和文)周波数掃引パイロドップラ逆合成開口イメージング技術の創出

研究課題名(英文)Development of frequency swept vibro-Doppler ISAR imaging technique

研究代表者

三輪 空司(Miwa, Takashi)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：30313414

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文):固定センサにより,計測対象のアジマス方向の反射イメージング及び反射位置推定を行うための,周波数掃引加振ドップラ逆合成開口イメージング法を開発した.センシング波として水中超音波を用い,水中の寒天を加振させる実験により原理検証を行った結果,孤立反射体として,針金を用いた場合,針金の位置にピークが得られ位置推定が可能であった.一方,寒天表面の傷を計測対象とした場合,傷の位置にはピークが現れなかった.これは,傷の超音波による反射係数が小さいことが原因である.しかし,傷からの加振波の反射波は計測できることがわかった.これにより,センサ位置を複数点で測定することにより,傷の位置を推定することができた.

研究成果の概要(英文):We developed frequency swept vibro-Doppler inverse synthetic aperture radar imaging method for an azimuth localization method of a target by using a fixed transmitter and receiver. For a derivation of proposed method, we use a ultrasonic wave as a sensing wave in a agar gel. In the case of an isolated target in agar gel, we can detect a target response at a proper position. However, in the case of a cut on the boundary between agar gel and water, we can not detect it the proper position. But, we can observe the reflection of the vibration wave from the cut beneath the sensor position. Therefore, we can clarify that the position of cut can be detected by moving the sensor position.

研究分野:波動応用計測

キーワード:計測 非破壊検査 合成開口 イメージング 加振

### 1. 研究開始当初の背景

高度経済成長に伴い建設された膨大な数の鉄筋コンクリート(RC)構造物や鋼構造物が耐用年数を超え、早急な点検の実施、維持管理が急務となっている。しかし、今後数十年のスパンで維持管理を継続していくには国家財政を圧迫するほどのコストが必要といわれている。点検手法の中でもコンクリートの剥離を検査する打音法は剥落事故低減に有効であるが、検査に時間がかかることや熟練が必要なため、客観的かつ広範囲を迅速に調査可能な新たな一次スクリーニング法の開発が求められている。一次スクリーニングのためには、まず壁面のひび割れが重要な評価対象となり、現在、赤外線カメラなどの画像診断法が研究されている。しかし、その精度はまだ十分とはいえない。

一方、他分野での実用化された手法として、レーザ超音波探傷技術を用いた遠隔壁面探傷システムがある。この手法は、収束パルスレーザ光により遠方から計測対象表面に超音波を発生させ、壁面のひび等からの反射波の有無をレーザドップラ振動計による振動変位から検出する。しかし、この方法の欠点として以下が挙げられる。

- ・画像化には振動波源、振動計測系の空間的なスキャンが必要
- ・スポットサイズが mm オーダと狭く、迅速に広範囲を画像化するには時間がかかる
- ・位相から変位を計測するため、スポットサイズを広げると複数の反射波が干渉し、精度が悪化

また、開口の狭いセンサを空間的にスキャンし、対象を様々な角度から計測する合成開口法や、動く計測対象を固定センサのビームを回転させ計測する逆合成開口法のように対象を傾けることで様々な角度から対象物のコヒーレントな反射波を重ね合わせるにより、空間分解能を得る手法もあるが、いずれもセンサの物理的もしくは電子的なスキャンを伴うため、トンネルや橋梁等の RC 構造物壁面のひび割れ等の広域の非破壊検査に適用すると計測時間やコストの問題が避けられない。

### 2. 研究の目的

これまで申請者らは計測対象を単一周波数で加振し、反射体までのパス長の変化により生じる反射波の位相変化により、反射波の周波数が加振周波数の整数倍の波の成分に分離して受信される加振ドップラ計測(Vibro-Doppler Measurement, VDM)の応用を検討してきた。一般に、振動変位が波長に対し十分小さい場合、高次の変調成分は無視でき、送信信号は送信周波数と同一の受信波と、送信周波数±加振周波数に変調を受けた受信波に分離する。このドップラ周波数における複素振幅応答をバイブドップラ信号(VDS)と呼ぶが、VDSの位相は反射係数分布の位相と空間的に正弦変動する加振波位相(均質媒質では直線位相)との積となる。すなわち、図1

のようにセンシング波をスキャンしながら反射応答を計測するとき、加振波としてスキャン方向と平行に伝搬する平面波を導入したVDMにより得られたVDSの複素応答の位相は、加振波1波長のスキャン距離で位相が1回転する。これは、計測面の傾きが加振波1波長分に対してセンシング波の半波長の勾配の場合のセンシング波の反射応答と等価な位相変化となる。したがって、VDMにおける加振周波数を変化させれば、等価的に計測対象へのスキャン方向を制御できることになり、固定計測系において計測系の回転と等価な逆合成開口処理が可能になると考えられる。

本研究では、VDMにおいて加振周波数を掃引して得られる周波数掃引加振ドップラ計測法(FSVDM)を用いて、固定センサにより遠方から反射率の空間分布を計測する手法を創出し、超音波を用いた基礎実験を通じて原理検証を行い、非破壊検査への応用を検討することを目的とする。

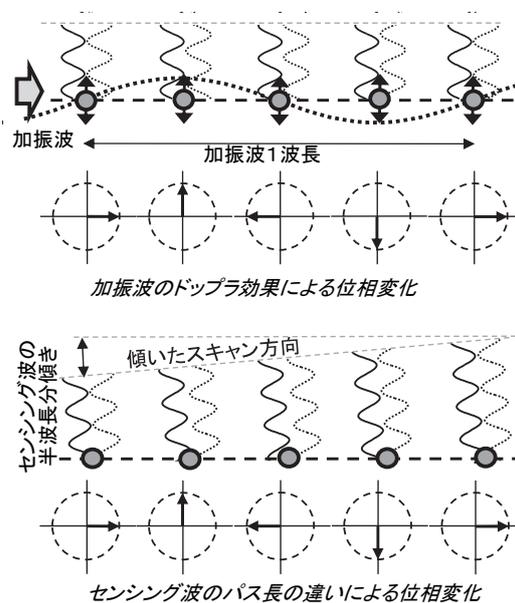


図1 加振ドップラ計測の概念図

### 3. 研究の方法

イメージングの原理としては、孤立物体を加振波により振動させたときに固定センサで得られるVDSは、その複素反射係数に反射体位置  $x$  に対応した加振波の応答  $\exp(-j2\pi fx/v)$  が乗じられるため、加振周波数  $f$  を変えながらVDSを集め、加振周波数方向に逆フーリエ変換することにより、反射体位置でピークが現れる。

実験的に本手法の妥当性を検証するため、実験的検討を行った。図2に実験状況を示す。センシング波として水中超音波を用いる、水中では加振波が横波として伝搬できないが、伝搬速度が水に近く、ずり弾性波も伝搬可能な寒天も用い、その境界面を計測部位として用いることとする。計測対象は寒天表面下部に埋設した孤立物体(実験1)と寒天表面の傷(実験2)とした。

加振ドップラ計測は中心周波数 5.2 MHz, 帯域幅 0.4 MHz センシング用超音波パルスを用い, 直交検波により任意の深さの反射体において, VDS を評価する. また, その際, 加振周波数を 300~700 Hz まで 10 Hz 刻みで掃引する. 加振器 (旭製作所, SL0105) にはファンクションジェネレータ (NF, WF1973) からパワーアンプを介して 2A の駆動電流を印加した. センシング波に用いる超音波トランスデューサは図に示すように  $x$  方向に 2 mm の幅の平面形状を有しており, 送受信を分離させて水中内に配置し, 固定させる.

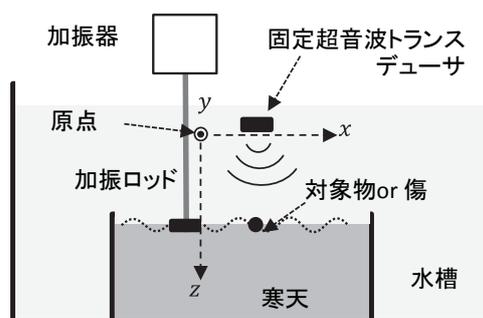


図 2 実験状況

#### 4. 研究成果

##### (1) 実験 1 の結果

実験 1 では反射体は水槽内のトランスデューサ下方  $z=100$  mm の寒天内部に埋め込んだ直径 0.6 mm の金属線とし,  $y$  方向に配置する. 尚, 寒天表面は  $z=80$  mm である.

図 3 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.

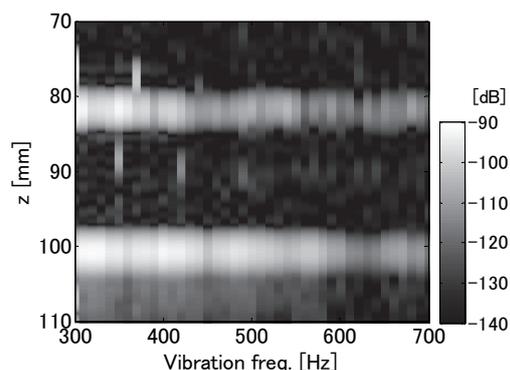


図 3 VDS の加振周波数依存性

図 4 にトランスデューサを移動させたドップラ計測により得られる寒天表面の反射から得られる弾性波の伝搬速度を示す. 図のように加振周波数により伝搬速度は顕著に異なるため, 弾性波の伝搬速度  $v$  を加振周波数  $f$  の関数として, 近似式から求めることとする.

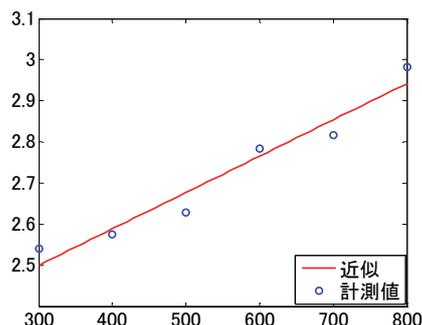
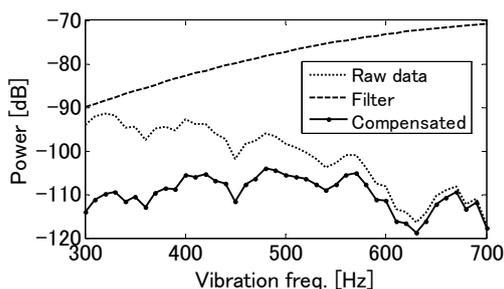
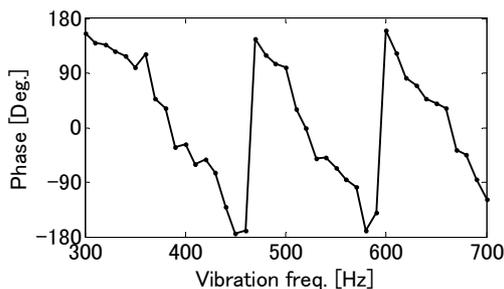


図 4 弾性波伝搬速度の加振周波数依存性

図 5 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. 図 5(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, ここでは図 5(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, 図 5(a)の実線のように振幅補正を行うものとする. また, 図 5(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.



(a) パワー



(b) 位相

図 5  $z=100$  mm の断面におけるドップラ信号

図 6 に  $z=100$  mm の FSVDS の振幅補正や, 速度依存性の補正を行い, 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  $z=100$  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って得られた  $x$  方向の反射プロファイルを図 6(b)に示す. これは従来の 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きる. 図 6(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、及び寒天のずり弾性波伝搬速度の誤差と考えられる。

## (2) 実験 2 の結果

実験 2 では非破壊検査における探傷を考慮し、表面の傷の検出可能性について検討した。反射体は水槽内のトランスデューサ下方  $z=120$  mm の寒天表面の  $x=100$  mm の位置にカッターにより、 $y$  方向に 10 mm、深さ 10 mm 程度の切れ目をもうけ、傷を模擬した。

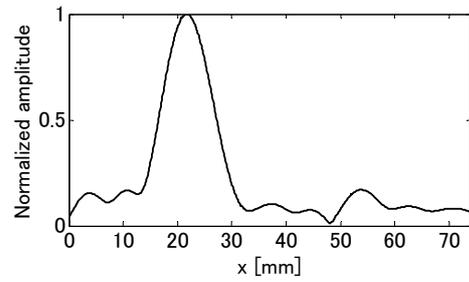
図 7 にセンサ位置  $x=40$  mm において、VDS を取得し、寒天表面の深さにおける反射波振幅を加振周波数ごと得たのち、逆フーリエ変換することで傷の位置推定を行った結果を示す。図より 2 つの顕著なピーク応答が確認できる。1 つ目のピークは、センサ位置が  $x=40$  mm であり、センサ指向性が真下を向いていることから、センサ真下の観点表面からの反射に相当するピークだと思われる。しかし、傷の位置に相当する  $x=100$  mm には明らかなピークは見られない。このことから、比較的深さ方向に大きな傷であっても傷自身がセンシング波を反射しないため、傷の位置での反射応答は計測できないことがわかった。

一方、 $x=160$  mm 付近には比較的大きな反射が現れており、しかし、傷の位置  $x=100$  mm から第 1 ピークまでの距離は 60 mm、傷から第 2 ピークまでの距離も 60 mm であることから、図 8 のように、加振点から傷方向に向かう波が傷で反射し、加振点方向に戻ってきた反射波をセンサ位置直下で捉えている可能性がある。つまり傷自体の揺れ成分を検出しているのではなく、傷から反射してきた表面波を検出している可能性がある。

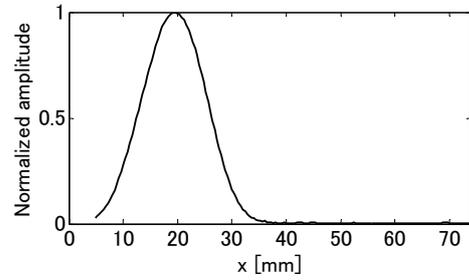
図 9 に同様の加振ロッド、傷の配置において、センサを加振ロッドから離れていく方向に 10 mm ずつ動かして第 1 ピークと第 2 ピークの位置推定を行った。図より、青で示された第 1 ピークはセンサ位置に正比例して変化しており、センサ下からの反射であることがわかる。一方、赤で示された第 2 ピークは、センサ位置が傷からの応答は共に、傷の位置 100 mm を中心に移動していることがわかる。

これらの結果から、2 つ目の応答は傷の揺れ成分を検出しているのではなく、加振波が傷から反射してくる波の応答だということが明らかとなった。つまり、センサと加振ロッドの配置をあらかじめ把握しておけば、ロッドから傷までの位置推定が可能である。

この研究により、周波数掃引加振ドップラ計測により、孤立した反射体のようなそれ自身がセンシング波を散乱させる物体の場合は、反射体位置の推定が可能であった。一方、センシング波照射方向にできた傷のようにセンシング波の反射を起こしにくいものについては直接の位置推定が困難であった。また、この場合、加振波が傷に反射するためセンサ位



(a) 提案法 (固定センサ)



(b) 従来法 (センサスキャン)

図 6 孤立物体の位置推定の様子

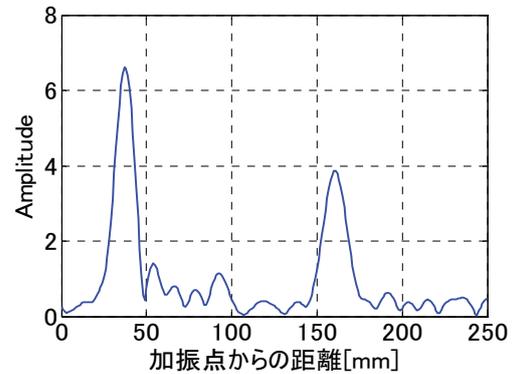


図 7 寒天表面の傷の位置推定結果

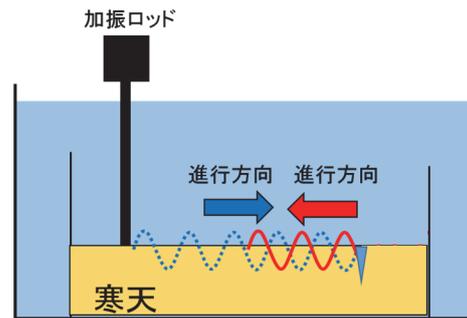


図 8 加振波の傷からの反射の様子

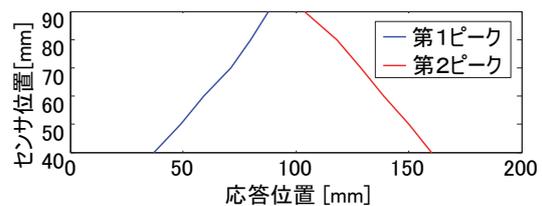


図 9 センサ位置を動かして得られた二つのピーク応答の位置 (傷の位置  $x=100$  mm )

置を変えた計測を行えば、傷の位置の特定が可能になることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

1. 本多秀聡, 三輪空司, 志岐仁成, 鬼束俊一, 加振レーダ法による塩害を受けた RC 部材への鉄筋腐食評価の適用, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, Vol. 17, 2017, pp. 125-130.
2. 三輪空司, 本多秀聡, 小澤満津雄, 栗田伸幸, 鉄筋腐食評価のための加振 RC レーダ法による鉄筋振動変位計測, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 39, 2017, pp. 1777-1782.
3. 本多秀聡, 三輪空司, 栗田伸幸, 小澤満津雄, 励磁コイル加振による鉄筋微小振動のマイクロ波変位計測と鉄筋腐食評価への応用, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 査読有, Vol. 16, 2016, pp. 365-370.
4. 三輪空司, 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, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 52, 2016, pp. 538-544. (計測自動制御学会論文賞, 蓮沼賞受賞)
5. 三輪空司, 栗田伸幸, 碓氷淳, 励磁コイルを用いた加振ドップラレーダによるコンクリート内振動体の選択的イメージング, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 38, 2016, pp. 2073-2078.

〔学会発表〕(計 12 件)

1. 本多秀聡, 三輪空司, 加振レーダ法による実構造物 RC 部材への鉄筋腐食評価の適用, 電気学会北関東支部群馬栃木支所合同発表会, 桐生, 2018.3.1
2. 堀内亮太, 三輪空司, 鉄筋部位の加振ドップライメージングによる振動変位推定, 電気学会北関東支部群馬栃木支所合同発表会, 桐生, 2018.3.1
3. 飯野和樹, 三輪空司, 加振レーダ法によるコンクリート内振動変位の弾性係数依存性の検討, 電気学会北関東支部群馬栃木支所合同発表会, 桐生, 2018.3.1
4. 清水俊秀, 三輪空司, 加振ドップラレーダにおける励磁コイルの最適化, 電気学会北関東支部群馬栃木支所合同発表会, 桐生, 2018.3.1
5. 本多秀聡, 三輪空司, 志岐仁成, 鬼束俊一, 加振レーダ法による塩害を受けた RC 部材への鉄筋腐食評価の適用, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, 京都, 2017.10.13
6. 三輪空司, 本多秀聡, 小澤満津雄, 栗田伸幸, 鉄筋腐食評価のための加振 RC レーダ法による鉄筋振動変位計測, コンクリート工学年次大会, 仙台, 2017.7.7

7. 小林誠也, 服部真治, 三輪空司, 加振ドップラ計測を用いた波数スペクトル合成による超解像イメージング, 電気学会北関東支部群馬栃木支所合同発表会, 足利, 2017.3.3
8. 服部真治, 小林誠也, 三輪空司, 周波数掃引加振ドップラ計測を用いた固定センサによる表面の傷計測, 電気学会北関東支部群馬栃木支所合同発表会, 足利市, 2017.3.3
9. 本多秀聡, 三輪空司, 栗田伸幸, 小澤満津雄, 励磁コイル加振による鉄筋微小振動のマイクロ波変位計測と鉄筋腐食評価への応用, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, 京都市, 2016.10.13
10. 三輪空司, 本多秀聡, 鉄筋腐食評価のための電磁波ドップラレーダ法による鉄筋のアクティブ振動変位計測, 非破壊検査協会秋季講演大会, 仙台市, 2016.10.6
11. 三輪空司, 本多秀聡, 栗田伸幸, 励磁コイル加振マイクロ波ドップラ変位計による鉄筋振動計測, 電気学会産業応用部門大会, 前橋市, 2016.8.30
12. 三輪空司, 栗田伸幸, 碓氷淳, 励磁コイルを用いた加振ドップラレーダによるコンクリート内振動体の選択的イメージング, コンクリート工学年次大会, 福岡市, 2016.7.8

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 加振レーダ装置及びデータ解析装置  
発明者: 三輪空司  
権利者: 国立大学法人群馬大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2017-034707  
出願年月日: 2017年2月27日  
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: 映像装置及び映像形成方法  
発明者: 三輪空司  
権利者: 国立大学法人群馬大学  
種類: 特許  
番号: 第 6161028 号  
取得年月日: 平成 29 年 6 月 23 日  
国内外の別: 国内

〔その他〕ホームページ等

<http://www.el.gunma-u.ac.jp/~miwalab/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

三輪 空司 (MIWA Takashi)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号: 30313414