

論文 加振パルスドップラレーダの開発と鉄筋振動変位の周波数依存性

三輪 空司^{*1}・松井 隼平^{*2}・中村 和弘^{*2}

要旨: 励磁コイルにより正弦加振された鉄筋の振動変位を定量的に計測する加振レーダ法は鉄筋腐食や水平ひび割れの評価に有効であるものの、既往のシステムは1計測に120秒を要するため迅速な計測が困難であった。そこで、新たに加振パルスドップラレーダシステムを開発し、既往のシステムと同等のSN比で30倍高速に計測できることを示した。また、本システムにより従来の9倍までの高周波で電食試験中の鉄筋振動変位をモニタリングした結果、従来と同様の振動変位増加がみられ、最終的に500~650 Hzで従来の1.6倍の振動変位が得られた。また、高周波では電食初期の振動変位低下が顕著になることも示した。

キーワード: 非破壊検査, 電磁波レーダ法, 鉄筋振動変位, 振動周波数

1. はじめに

非破壊的なRC構造物の劣化評価法として衝撃弾性波法や超音波法、電磁パルス法といった弾性波を用いた手法が知られており、その伝搬速度や振動振幅の周波数スペクトル情報から、コンクリート強度や内部欠陥の評価¹⁾に利用されている。また、鉄筋腐食等の劣化評価²⁾にも適用されているものの、弾性波の波形情報のみでは、鉄筋の劣化と伝搬路の劣化の両方の影響を受けてしまう。

そこで、我々は伝搬路の劣化の影響を受けにくい電磁波に着目し、図-1のように励磁コイルによりコンクリート中の鉄筋を100 Hz程度で正弦振動させながら、ドップラレーダ法によりその鉄筋振動変位を定量的に計測する加振レーダ法を提案してきた³⁾。本手法は従来のレーダ波形に加え、振動物体のみで感度を有する独立なレーダ波形も取得可能であり、鉄筋振動変位は両波形の反射振幅比から得られるため、水分による媒質の減衰等の影響をキャンセルできる利点も有する。これまで、RC供試体を用いた電食試験中の鉄筋振動変位のモニタリングにおいて、振動変位が表面ひび割れ顕在化前から増加し、最終的に4倍程度に達するなど、本手法が鉄筋付着特性に感度を有する可能性が示唆されている⁴⁾。しかし、既往の加振レーダ装置はネットワークアナライザをベースとした周波数領域でのレーダ計測システムであり、計測時間が120秒と長いことが大きな問題点であった。このため、加振レーダ法の適用範囲は限定的であった。

一方、衝撃弾性波法等における構造物の健全性評価で

はひび割れによる多重反射の発生や、内部ひび割れによる高周波減衰などの周波数スペクトル分布の違いがよく議論されてきた¹⁾。しかし、加振レーダ法ではこれまで100 Hz程度の振動周波数でしか検討しておらず、広帯域な鉄筋振動特性は不明であった。原理上、複数の加振周波数で広帯域な鉄筋振動特性を得ることは可能ではあるが、既往のシステムでは計測時間が長く、高周波では誘導加熱により鉄筋の温度上昇が顕著になる問題があり、詳細な鉄筋振動の周波数依存性の議論は困難であった。もし、加振レーダ法において鉄筋振動変位の情報が広帯域に得られれば、衝撃弾性波法等のコンクリート表面で計測される広帯域な振動情報とは独立な鉄筋のピュアな振動情報が得られる可能性があり、今後の劣化評価に有用であると考えられる。また、計測時間の短縮は加振レーダのスキャンによる振動変位の推定精度や空間分解能の向上といった多くの利点も有している。

これまで、加振レーダ計測の高速化のために、パルスレーダ方式を採用する市販のRCレーダ装置を用いたパルスドップラ方式の振動変位計測の基礎検討を行い、10秒程度で既存のシステムと同精度の振動変位が得られることを確認した⁵⁾。しかし、市販のRCレーダ装置はダイナミックレンジが十分でないことや、励磁コイルによる強い磁場がレーダやアンテナ内の電子機器に与える影響を避けるため、コイルをレーダ等の電子機器から遠ざける必要があること等から、実用性は低かった。

そこで、本論文では新たに加振レーダ専用のパルスドップラレーダシステムを試作し、従来法で行われている図-1のようなアンテナとコイル配置で加振レーダ計測が可能であることを示す。また、本システムを用い電食試験中のRC供試体に対して100~900 Hzの広帯域な振動周波数において振動変位をモニタリングし、周波数依存性を検討した結果について述べる。

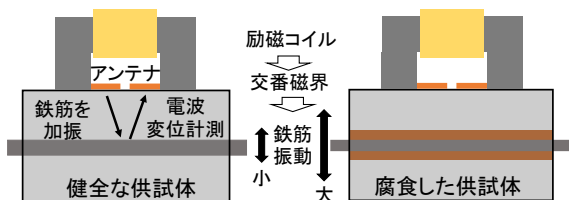


図-1 加振レーダ法のご概念図

*1 群馬大学大学院 理工学府電子情報部門准教授 博士(工学) (正会員)

*2 群馬大学大学院 理工学府理工学専攻電子情報・数理教育プログラム 理工修

2. パルスドップラレーダにおける振動変位計測の原理

図-2 にパルスレーダにおける加振ドップラ変位計測の概念図を示す。パルスレーダにおけるパルス波形として、 $t=0$ でピーク値 1 を持つ任意の単峰性孤立波 $e(t)$ を中心周波数 f_c の複素正弦波で変調した複素変調パルス波 $p(t)$ を考える。

$$p(t) = e^{j2\pi f_c t} e(t) \quad (1)$$

今、送信点から距離 L 離れた反射体に向けパルス波を照射し、反射体からの反射波を同一地点で受信する。このとき、複素受信レーダ波形 $h(t)$ は反射係数を R 、電磁波の伝搬速度を v として式(2)のように表される。

$$h(t) = Rp\left(t - \frac{2L}{v}\right) \quad (2)$$

このとき、 $h(t)$ の実部は通常のレーダ波形、虚部は実部のヒルベルト変換に対応している。さらに、反射体を単一周波数 f_v 、振動振幅 δ で電磁波の伝搬方向に振動させると、振動により反射波の伝搬距離が変化するため、距離の時間変動を $L(t)$ とすると式(3)のように表される。

$$L(t) = L - \delta \cos(2\pi f_v t) \quad (3)$$

レーダ波形の変動は GHz オーダーであるのに対し、 f_v は 1 kHz 以下であり、 $L(t)$ の変化速度は極めて遅い。繰り返し時間 T 毎に対しレーダ波形は瞬時に得られるため、レーダ波形の遅延時間 t とその取得時間 T は独立とみなせる。ここで、レーダ波形を繰り返し毎に並べ変えた 2 次元の複素レーダプロファイル $h(t, T)$ を考えると、式(4)のように表される。

$$h(t, T) = Rp\left(t - 2\frac{L - \delta \cos(2\pi f_v T)}{v}\right) \quad (4)$$

ここで、 $p(t)$ 、 $h(t)$ の時間 t に対するフーリエ変換をそれぞれ $P(f)$ 、 $H(f) = RP(f)e^{-j4\pi f L/v}$ とすると、 $h(t, T)$ のフーリエ変換 $\dot{H}(f, T)$ は式(5)のように表される。

$$\dot{H}(f, T) = \dot{H}_0(f) e^{j\frac{4\pi f \delta}{v} \cos(2\pi f_v T)} \quad (5)$$

さらに、電磁波の波長 $\lambda = v/f$ は cm オーダーであるのに対し、振動変位 δ は μm オーダーと極めて小さいため $f\delta/v \ll 1$ より、式(5)を 1 次近似すると式(6)が得られる。

$$\begin{aligned} \dot{H}(f, T) &\cong \dot{H}_0(f) \{1 + j4\pi f \delta \cos(2\pi f_v T) / v\} \\ &\cong \dot{H}_0(f) \left\{1 + j\frac{2\pi f \delta}{v} (e^{j2\pi f_v T} + e^{-j2\pi f_v T})\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\dot{H}(f, T)$ は時間変動のない項と振動周波数 f_v で正弦変化する項に分離している。式(6)を計測時間 T 方向にフーリエ変換すれば直流成分 $\dot{H}_0(f)$ と振動周波数 f_v での成分 $\dot{H}_D(f)$ が抽出される。従来のネットワークアナライザで計測される無変調成分は $\dot{H}_0(f)$ 、ドップラ成分は $\dot{H}_D(f)$ であり無変調成分を用いて式(7)のように表される。

$$\dot{H}_D(f) = j2\pi f \dot{H}_0(f) \frac{\delta}{v} \quad (7)$$

さらに、 $\dot{H}_0(f)$ 、 $\dot{H}_D(f)$ を周波数 f に対して逆フーリエ変換すれば、無変調成分、ドップラ成分の複素レーダ波形 $\dot{h}_0(t)$ 、 $\dot{h}_D(t)$ がそれぞれ以下のように独立に得られる。

$$\dot{h}_0(t) = Rp\left(t - \frac{2L}{v}\right) \quad (8)$$

$$\dot{h}_D(t) = \frac{\delta}{v} \frac{d}{dt} \dot{h}_0(t) \quad (9)$$

したがって、距離 L にある振動する反射体の振動変位 δ は無変調成分の時間微分波形とドップラ成分波形を用いて式(10)のように表される。

$$\delta = v \frac{|\dot{h}_D(\frac{2L}{v})|}{\left|\frac{d}{dt} \dot{h}_0(\frac{2L}{v})\right|} \quad (10)$$

図-3 に振動変位計測のながれを示す。加振中に得られたレーダ波形を繰り返し毎に並べ変えることでレーダプロファイル $h(t, T)$ が得られる。さらにヒルベルト変換により複素レーダ波形 $\dot{h}(t, T)$ を求める。ヒルベルト変換はレーダ波形をフーリエ変換し、負の周波数成分を 0、正の周波数成分を 2 倍した後、逆フーリエ変換することで取得でき、レーダ波形から容易に計算できる。その後、 $\dot{h}(t, T)$ を T 方向にフーリエ変換して、無変調成分波形 $\dot{h}_0(t)$ とドップラ周波数成分波形 $\dot{h}_D(t)$ を抽出し、無変調成分波形を微分して式(10)に代入することで、反射体の振動変位を得ることができる。

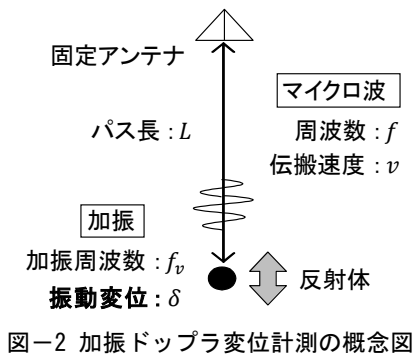


図-2 加振ドップラ変位計測の概念図

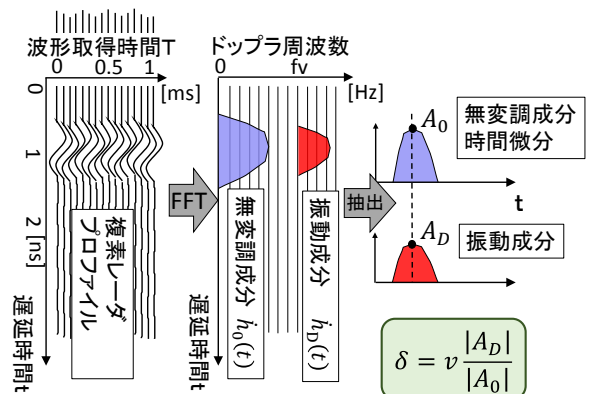


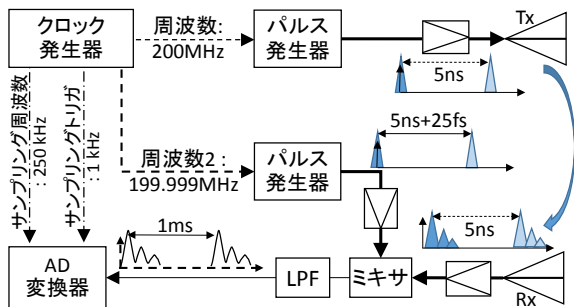
図-3 振動変位計測のながれ

3. 加振パルスドップラレーダシステム

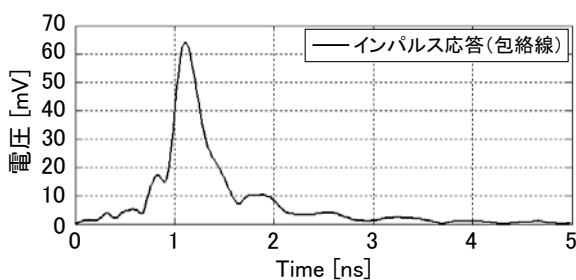
3.1 パルスレーダシステムの概要

一般に GHz 帯の高周波信号を直接サンプリングする方式は高コストであり、SN 比は低下するものの高速に変化する周期信号に対しその周期よりわずかに長い周期で低速にサンプリングする等価時間サンプリング方式が一般的である。図-4(a)に開発したパルスレーダシステムの概要を示す。パルス発生器はパルス幅 0.1 ns の矩形パルスを生周期で生成する。生成パルスはアンテナによりレーダ信号として受信された後、繰り返し周波数 199.999 MHz のサンプリングパルス（送信パルスと同形の矩形パルスで繰り返し周期が 25 fs 長い）と波形の乗算（ミキシング）を行い、低周波成分を取り出す。n 回目のサンプリングパルスではレーダパルスに対し $n \times 25$ fs 遅れるため、 $n=200000$ パルスにより 1 周期分（5 ns）のレーダ波形が $n \times 5$ ns = 1 ms 周期に引き伸ばされて生成される。本システムでは計測対象が損失性媒質であるコンクリートであるため、可探距離を極めて短くでき、レーダパルスの繰り返し周期を 5 ns（周波数 200 MHz）程度に高速化させることで、従来のレーダに比べパルス繰り返し数を増加させ、SN 比を向上させた。また、低周波化により白色雑音電力に比例する信号帯域幅も低下できる。AD 変換器は 12 bit であり、標本化周波数は 250 kHz であるため、1 波形は 250 ポイントで構成される。

図-4(b)に本システムにおいて、送受信アン間を 40 dB の減衰器を介して直結させたインパルス応答の包絡線波形を示す。尚、横軸は 1 ms を 5 ns に換算している。ミキサの出力限界は 80 mV 程度であるが、図からピーク



(a) ブロックダイアグラム



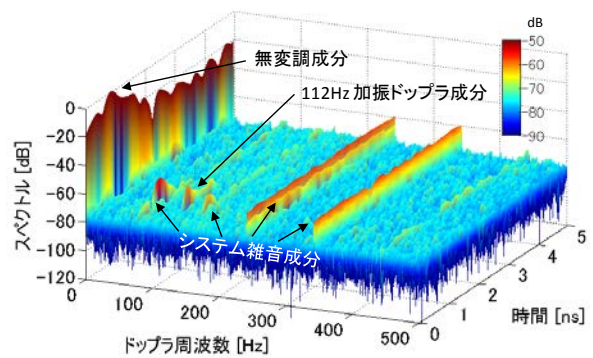
(b) インパルス応答

図-4 開発したレーダシステムの概要

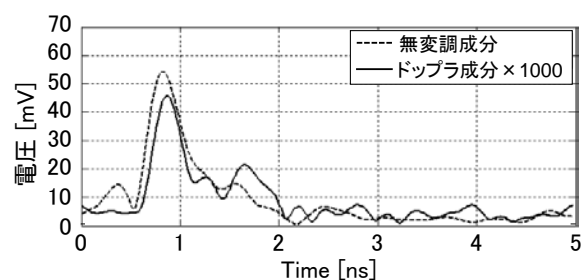
電圧はほぼ上限に近い 65 mV のピーク電圧が得られている。また、パルス幅は 0.25 ns 程度であり、帯域幅は 0.5~4 GHz 程度と考えられる。これは、市販の RC レーダの信号帯域である 2 GHz 程度の帯域をカバーしている。

3.2 加振パルスドップラレーダ計測

次に、ドップラレーダとしての性能を評価するため、かぶり 40 mm、鉄筋径 16 mm の鉄筋コンクリート供試体の鉄筋直上に鉄筋に沿って励磁コイルを配置し、印加電流 8 A、周波数 56 Hz で加振を行いながら、その鉄筋の振動を本システムにより 4 秒間で加振ドップラ計測した。尚、アンテナにはボウタイスロットアンテナを用いた⁴⁾ 図-5(a)は 1 ms 周期毎に得られるレーダ波形を 4000 個並べ、全遅延時間に対して、計測回数方向にフーリエ変換して得られたドップラスペクトルを示す。横軸はドップラ周波数であり、奥行軸はレーダ波形の遅延時間である。ドップラ周波数 0 Hz のレーダ波形は無変調成分 $|h_0(t)|$ であり、通常のレーダ波形と等価な波形である。縦軸は無変調成分の最大振幅を 0 dB としてデシベル表記されている。また、56 Hz で加振された鉄筋は交番磁界により加振周波数の 2 倍で振動するため、ドップラ周波数 112 Hz に見られるピークが加振による鋼材のドップラ応答のレーダ波形 $|h_D(t)|$ となる。この振幅は約 -60 dB となっており、無変調成分の約 1/1000 小さい。これは従来法でのドップラ成分の特徴と一致する。また、この信号以外にも 73, 146, 241, 341 Hz 等に顕著なピークが見られるが、これらの信号は加振の有無にかかわらず常に発生するシステムの内部雑音成分である。



(a) 加振レーダ波形のドップラスペクトル



(b) 加振レーダ波形包絡線

図-5 加振周波数 56Hz における加振レーダ計測例

図-5(b)に0 Hzの無変調成分と112 Hzのドップラ周波数成分を抽出したレーダ波形包絡線を示す。通常のレーダ信号と等価な無変調成分(破線)は50 mV程度である。コンクリートの比誘電率を9とすると電磁波のコンクリート内の伝搬速度は約0.1 m/nsであるため、鉄筋とアンテナ配置の幾何学的位置関係から0.85 nsの最も大きいピークは鉄筋からの反射波と考えられる。また、ドップラ成分を振幅1000倍にして同図に実線で示すが、無変調成分とほぼ同時にピークを有しており、振動する鉄筋の反射波が得られていることがわかる。また、0.4 ns付近に無変調成分で見られるピークはアンテナ間の直達波であり比較的大きいが、ドップラ成分では小さくなっている。これはアンテナが磁性の低い銅製であり鉄に比べて磁気吸引力が小さいことに対応している。

また、図-5(a)より白色雑音レベルは-80 dB程度であり、ドップラ成分のSN比は20 dB程度である。これは、既往のシステムにおけるSN比とほぼ同様であり⁴⁾、これまで120秒要していた鉄筋振動変位計測が、その1/30の4秒に高速化された。また、計測限界はノイズレベルで決まるため、低ノイズのAD変換器を用いればさらに20 dB程度のSN比向上(3倍の高速化)も期待できる。

4. 電食中の多周波加振レーダ計測実験概要

4.1 多周波加振システム

本システムでは交流電源を用いて8 Aの電流をコイルへ印加するが、高周波ではインピーダンスのリアクタンス成分が増加し、同一電流を印加できない。そこで、印加周波数においてリアクタンスをキャンセルさせるようコンデンサをコイルに直列に接続し共振させた。この静電容量 C は共振周波数を f_r として式(11)で与えられる。

$$C = \frac{1}{L(2\pi f_r)^2} \quad (11)$$

L は一定であるため周波数毎に共振となる C が異なるため、多周波の加振では図-6のように手動スイッチによりコンデンサを切り替えることとした。整合コンデンサ部は5つのスイッチから構成され、スイッチがオンの状態では対応するコンデンサが短絡し、合成容量が変化する。各コンデンサは全て耐圧2000 V、静電容量1.5 μF であり、スイッチが全てオフのとき1 μF 、全てオンでは6 μF の合成容量となる。

本実験に用いる励磁コイルはこれまでかぶり40 mmのRC供試体での腐食評価に使用してきた実績のあるコイル⁴⁾として、断面積50 mm \times 50 mm、磁路長180 mmのコの字型の100層積層鋼板コアに、耐熱200 $^{\circ}\text{C}$ 、直径1.2 mmのエナメル線を500巻したコイルを用いた。コイルのインダクタンス L は118 mHであり、直流抵抗は2.5 Ω である。したがって、共振周波数はオンスイッチの個数

に対応して187, 263, 324, 374, 420, 465 Hzの6種類とし、従来の56 Hzも合わせて7種類の加振周波数で実験を行った。尚、鉄筋の振動周波数 f_b は加振周波数の2倍の112, 374, 526, 648, 748, 840, 930 Hzとなる。

4.2 電食試験の概要

図-7に電食試験の概要を示す。電食試験に用いるRC供試体はD16鉄筋をかぶり40 mmに配したコンクリート供試体であり、断面100 mm四方、長さ400 mmである。計測面を上向きにし、加振用コイルを鉄筋中央のコンクリート面直上に配置し、コイルの空洞部にパルスレーダ用の送受信アンテナを給電点間隔40 mmとして固定した。交流電源からは実効値8 Aの電流を印加する。

電食試験は80 Vの直流定電圧源を用い10%食塩水中に浸漬した銅板を陰極、鉄筋に陽極を接続した。コンクリートに食塩水を導入し、電食しながら同時に振動変位のモニタリングを行うために、写真-1のように底面の

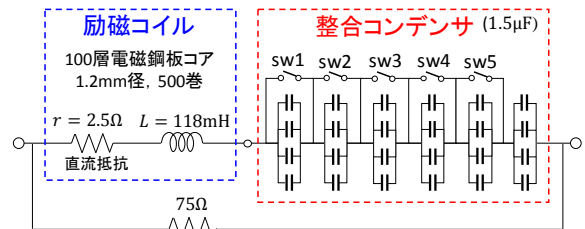


図-6 多周波LC共振回路

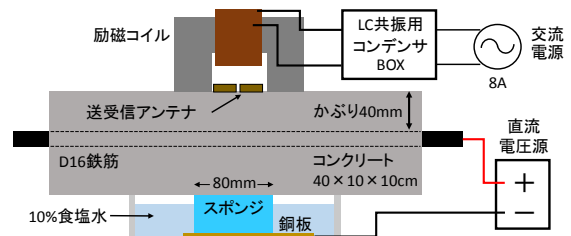


図-7 電食試験の概要

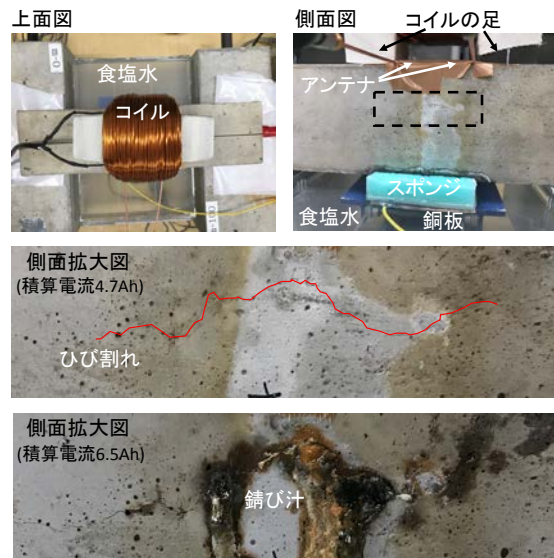


写真-1 電食試験の様子

中央部から長さ 80 mm 吸水スポンジを用いて局部的に浸透させた⁹⁾。電食は電流を 1 時間通電し、各周波数での加振レーダ測定後、再通電するプロトコルを 30 回繰り返した。80 V の定電圧で印加したため、各測定で電流を計測し積算電流を求めた。電流は通電後徐々に増加し、電食終了時には 0.4 A 程度、積算電流は 7 A・h 程度であった。電食開始後 3 A・h でコンクリート中央部の側面にひび割れが確認され、5.5 A・h でひび割れから錆び汁の漏出が確認できた。ひび割れ、錆び汁の様子を写真-1 の側面拡大図に示す。

5. 実験結果

図-8 に健全状態における振動周波数 112, 648, 930 Hz での加振レーダ波形の例を示す。本加振パルスドップラレーダ計測は 1 ms 周期でレーダパルスが得られるため、ナイキスト周波数は 500 Hz が上限となる。一方、振動周波数が 500 Hz を超える 648, 930 Hz ではエイリアシングにより 352, 70 Hz に折り返されるため、その成分をドップラ成分として計測すればよい。図中、112 Hz の振動成分は図-5 (b) とほぼ同様の波形が得られている。648, 930 Hz においても概ね 112 Hz と同様な加振レーダ波形が得られており、ノイズレベルに関してもほぼ同様であることから高周波の振動変位についても低周波とほぼ同程度の大きさ、精度の振動変位が得られることが期待できる。

また、ドップラ成分の 1.6~1.7 ns の付近のピークは鉄筋とアンテナ間の多重反射に対応し、アンテナでの反射の際にアンテナの振動が重畳した可能性がある。

図-9 に各振動周波数において得られた加振レーダ波形包絡線を積算電流毎に並べた経時変化を示す。無変調成分は振動周波数に依存しないため 1 種類のみ示すが、電食が進むにつれて鉄筋反射波の振幅がなだらかに低下していく様子が見える。一方、ドップラ成分では、ひび割れが顕在化した 3 A・h までは、振幅が横ばいか若干低下する傾向にあり、いずれの振動周波数においても 3 A・h 以降急激に増加していく様子が見られている。これらの

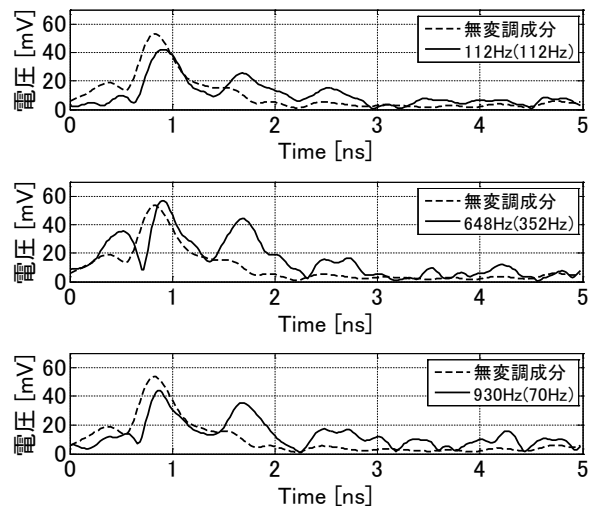


図-8 健全時の多周波における加振レーダ波形例

傾向は既往のシステムにおける 56 Hz のモニタリング結果でも得られており⁴⁾、電食による錆び汁の膨張圧の増加や、それに伴う内部ひび割れの進展により鉄筋周囲の膨張圧が低下したために、鉄筋振動変位が増加したものと考えられる。また、374, 526, 748 Hz の 1 A・h 付近において局部的に振動変位が増加しているが、これは、この特定の周波数に突発的に表れており、計測システムへの外来雑音の影響が考えられるため議論しない。

図-10 (a) に図-9 から式(10)により推定される鉄筋振動変位の積算電流-振動周波数依存性を示す。尚、5 点の移動平均により平滑化した。ひび割れ発生前までは各周波数において 4~7 μm 程度の振動変位で変化は小さいが、ひび割れ発生後時付近から振動変位が急増し、振動変位は最大 25 μm 程度まで増加した。また、顕著な周波数依存性も見られる。

図-10 (b) に 112, 648, 930 Hz における振動変位の積算電流変化を示す。いずれも若干の変動はあるもののひび割れ発生前の 2.5 A・h から増加が始まっていることがわかる。従来の 112 Hz は振動変位の増加勾配が緩やかであり、電食終了時には 15 μm となった。一方、648 Hz で

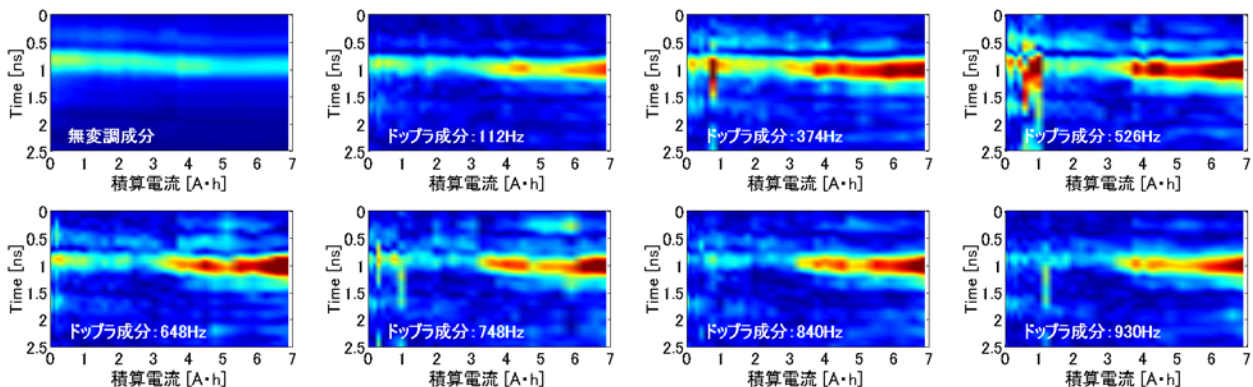
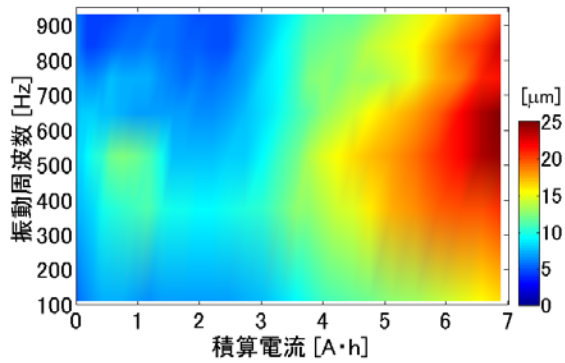
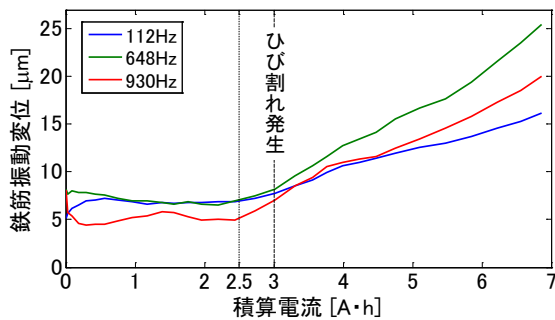


図-9 各振動周波数における電食時の加振レーダ波形の経時変化 (加振電流 8A, 鉄筋かぶり 4cm, D16) ドップラ成分は振幅 1000 倍で表示



(a) 積算電流-振動周波数依存性



(b) 積算電流依存性

図-10 電食時の鉄筋振動変位 (5点の移動平均後)

は 2.5 A・h 以前は 112 Hz と同様の振動変位であるが、2.5 A・h 以降増加し、その勾配も急である。また、電食終了時には 112 Hz の 1.6 倍の 25 μm の振動変位となった。930 Hz では電食後早期に振動変位が低下したまま推移し、同様に 2.5 A・h 以降急な勾配で増加した。

図-11 に従来の 112 Hz を基準とした振動変位変化率の振動周波数依存性を示す。健全時、523 Hz をピークとして 1.5 倍大きく、930 Hz で同程度となる周波数依存性を持っており、ひび割れ後の 4.2、6.5 A・h もほぼ同様な傾向であり、6.5 A・h では 523、648 Hz が最も高い振動変位を示した。一方、ひび割れ前の 2.2 A・h では、高周波で振動変位の顕著な低下が見られ、930 Hz では 70% の振動変位低下となる。これは、膨張圧の増加により鉄筋周囲の剛性が上がり、高い周波数ほど振動が抑えられたものと推察され、腐食の早期評価に有効な可能性がある。

6. まとめ

本論文では、既往のネットワークアナライザを用いた加振レーダシステムの高速化のために、新たに加振パルスドップラレーダシステムを開発し、本システムを用いて電食中の RC 供試体の鉄筋振動変位の 100~900 Hz における振動周波数依存性を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ・新ハードウェアは既往のシステムに比べ 30 倍高速となる 4 秒でかぶり 40 mm の鉄筋振動変位計測が可能。

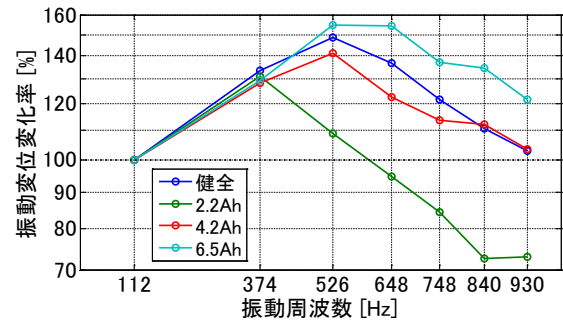


図-11 鉄筋振動変位の振動周波数依存性 (従来法の 112Hz で正規化)

- ・既報の 112 Hz と同様に高周波でも腐食による表面ひび割れ発生前から振動変位が増加する。
- ・積算電流 6.5 A・h では 500~650 Hz 付近の振動周波数で 112 Hz に比べ 1.6 倍程度の振動変位が観測された。
- ・高周波を用いるほうが、ひび割れ発生前の振動変位の低下の現象を捉えやすい。

今後、振動変位の周波数依存性のメカニズムや、劣化による鉄筋付着特性との関係を検討していく予定である。

謝辞

本研究は総務省 SCOPE(191503004)の委託を受けた。

参考文献

- 1) 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭: 衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1521-1526, 2002.
- 2) 内田慎哉, 鎌田敏郎, 稲熊唯史, 長谷川昌明: 鉄筋腐食に伴うコンクリート表層部の変状調査への非破壊試験の適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.823-828, 2008.
- 3) 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, Vol.39, No.1, pp.1777-1782, 2017.
- 4) 三輪空司, 本多秀聡, 富田沙希, 中川貴之: 加振レーダ法を用いた電食中の鉄筋振動変位計測による早期鉄筋腐食検出の試み, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, pp.1605-1610, 2018.
- 5) 三輪空司, 高橋一徳, 松井隼平: 加振パルスドップラレーダによる RC 構造物内鉄筋振動変位計測, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, pp.1781-1786, 2019.
- 6) 濱田洋志, 加藤絵万, 岩波光保, 横田弘: 局所的に生じた鉄筋腐食が RC はりの構造性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.1729-1734, 2007.