

論文 鉄筋節の周期構造のレーダ計測と鉄筋腐食評価への応用

三輪 空司^{*1}・山村 允人^{*2}・羽賀 望^{*3}・小澤 満津雄^{*4}

要旨：簡易で迅速、非接触な鉄筋位置計測法として電磁波レーダ法が知られているが、鉄筋の腐食調査には利用されていない。本論文では、鉄筋の腐食により鉄筋の節の周期構造が変化することに着目し、鉄筋の節の画像化が可能な 10 GHz 帯のレーダを開発し、腐食評価の可能性を検討した。その結果、かぶり 4 cm の健全な鉄筋の節の周期性が画像化できることがわかった。また、電食実験を行い、鉄筋腐食部において鉄筋の節の周期性が見られなくなることから、本システムにより腐食による表面形状変化の評価可能性を示唆した。

キーワード：RC レーダ, 鉄筋腐食, イメージング, 電食実験

1. はじめに

持続可能でかつ、『安全, 安心』な道路, 建物, 橋, 電気, ガス, 水道等の社会基盤設備の再生が叫ばれている。一方, 高度成長期に建設された土木建築構造物の多くは, 40 年以上を経過し, 鉄筋コンクリート (Reinforced Concrete) 構造物の劣化が社会問題となっている。RC 構造物はコンクリートがアルカリ性に保たれることで鉄筋の酸化を防いでいるが, コンクリートの中性化の進行とコンクリート表面部のひび割れから塩化物イオンが侵入し, 鉄筋が腐食する。腐食により鉄筋が膨張し, コンクリートのひび割れが起これば, 剥離や著しい強度の劣化が起こる[1]。そのため重要構造物であればあるほど鉄筋の定期的な腐食検診が必要であるが, そこには大きな課題が残る。従来では RC 構造物内の鉄筋の腐食調査には, まず目視により割れや錆汁の確認を行うが, その後, 詳細な調査として, 自然電位法や鉄筋の研り出しを伴う交流インピーダンス法等[2]が適用されてきた。しかし, いずれも精度に問題があり, 非破壊試験に比べコストと時間, 労力を有することも問題となっていた。したがって, 現状では非破壊的に簡易かつ迅速に鉄筋の腐食を判別する信頼に足る方法は提案されていない。

一方, 安価で, 迅速, 非破壊, 非接触な鉄筋位置の計測法として, 電磁波を利用したレーダ法[3-5]が古くから知られており, 現在, 1~2 GHz 程度の周波数帯域を利用し, RC レーダとして実用化されている。レーダ法はこれまで, 主にかぶり厚の測定や, コンクリート表面から 30 cm 程度の比較的深部までの鉄筋, 空洞の調査に利用されてきたが, 鉄筋の腐食調査には一般に利用されていない。また, RC レーダで得られたレーダ波形を理想的な反射モデルでフィッティングさせることで, 腐食による径変化を評価する手法[6]も提案されているが, コンク

リートの比誘電率を 9 とすると, コンクリート内での電波の波長は 10 cm 以上となり, 従来の RC レーダにより, 鉄筋腐食のようなサブミリオーダーの形状変化を直接評価することは本質的に困難といえる。

そこで, 本研究では波形ではなくレーダイメージによるロバストな鉄筋腐食判別法を提案する。通常使用される異形鉄筋の表面は一般に高さ 1 mm 程度, ピッチ 1 cm 程度の周期的な凹凸を有しているが, 本手法の基本アイデアは, その鉄筋節の周期構造が腐食により変化することをレーダで画像化し, 腐食評価に応用しようというものである。そのため, 評価対象を比較的かぶりの浅い(数 cm)鉄筋のみに限定し, 波長約 1 cm の高周波帯(10 GHz 程度)を使用する。これまで, このような帯域のレーダで鉄筋節のイメージングが行われた例はなく, 腐食の進行による鉄筋周囲も含めた電気的特性の違いをレーダ画像で評価することが期待できる。本論文では, 10 GHz 帯の RC レーダにより, かぶり 4 cm の鉄筋の節形状を画像化可能な計測システムを構築し, 電食実験により鉄筋腐食評価の可能性を検討する。

2. 実験概要

2.1 供試体

作製したコンクリート供試体の計画調査表を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/m³), 細骨材には佐野市中町産細目砕砂(絶乾密度: 2.60g/m³), 大間々町小平産砕砂(絶乾密度: 2.68g/m³)の 2 種類, 粗骨材には大間々山小平町産輝緑凝灰岩(絶乾密度: 2.83g/m³)を使用した。供試体のサイズは図-1 のように表面 40 cm×40 cm, 厚み 15 cm とした。今回用いた異形鉄筋は, 直径 15.9 mm (D16), 長さ 60 cm で節のピッチ幅は 11 mm となっている。また, かぶりは 2 cm と 4 cm

*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 理工学府電子情報・数理教育プログラム

*3 群馬大学大学院 理工学府電子情報部門助教 博士 (工学)

*4 群馬大学大学院 理工学府環境創成部門准教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 コンクリートの計画調合表

| 粗骨材最大寸法 (mm) | スランプト (cm) | 水セメント比 (%) | 空気量 (%) | 細骨材率 (%) | 水 (kg/m ³) | セメント (kg/m ³) | 細骨材 (kg/m ³) | 粗骨材 (kg/m ³) | AE 減水剤(kg/m ³) : ポゾリス No.70 |
|--------------|------------|------------|---------|----------|------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|---|
| 20 | 7 | 47.2 | 2.9 | 45.5 | 147 | 311 | 860 | 1069 | 1.6 |

である。今回の実験ではかぶり 4 cm の鉄筋を計測対象とする。また、供試体は、コンクリート打込み後 1 日で脱型し、大気中に 15 か月間放置して乾燥させた。

2.2 電食実験

一般に、鉄筋は厚さ 2-6 nm 程度の緻密な不動態被膜を形成し、腐食因子と鉄筋素地との接触を断っている。RC 構造物の腐食のメカニズムとして、塩害等による塩化ナトリウムの浸透によりこの不動態被膜が破壊され、鉄筋が空気と触れることで酸化し腐食する。この酸化を促進するため、鉄筋を介して通電することで鉄筋を腐食させる。図-2 に電食実験における実験系を示す。供試体の側面を防水性テープによりシーリングし、供試体のかぶり 4 cm の面を底面として 10% NaCl 水溶液に 1 日間浸漬した後、電食実験を行った。80 V の定電圧の陽極を鉄筋に印可し、溶液底部に敷いた負極板には大きさ 35 cm × 30 cm の銅板を用いた。

図-3 に電食実験時の印加電流の変化を示す。電流は徐々に上昇し、3 時間 20 分を経過した頃電流値の上昇勾配が増加し、錆び汁による水溶液の濁りも増した。通電は 5 時間行い、積算電流量は 14 Ah、鉄筋表面の平均電流密度は 15.8 mA/cm² であった。これは、文献[7]の電流密度に比べ 17 倍程度大きい。尚、供試体表面には明らかなひび割れは見られなかった。本計測では、電食後の供試体を 3 日間気中放置し、腐食後の供試体とするが、電食実験の前と後に同一の供試体で同様なレーダ計測を行い、そのレーダ画像の比較を行う。

図-4 に電食実験後、レーダ計測を行った後に、取り出した鉄筋の様子を示す。0~10 cm の範囲の鉄筋は赤錆が見られ、腐食が進んでいると考えられる。一方、10~20 cm の範囲の鉄筋はあまり腐食が進んでいない状況であり、場所によって腐食の程度に違いが見られた。

3. 計測システム

本研究では図-5 に示すような 10 GHz 帯のレーダスキャンシステムを開発した。本計測システムはネットワークアナライザ (ADVANTEST R3765CH) をベースとしている。送受信アンテナの単体の伝達特性を $\hat{G}_T(f)$ 、 $\hat{G}_R(f)$ 、アンテナ間の伝搬特性を $\hat{H}(f)$ とすると、ネットワークアナライザは周波数を掃引しながら式(1)のような伝達関数 $X(f)$ を周波数領域で直接計測可能である。

$$\hat{X}(f) = \hat{G}_T(f)\hat{H}(f)\hat{G}_R(f) \quad (1)$$

本システムでは R3765CH では直接計測できない帯域で

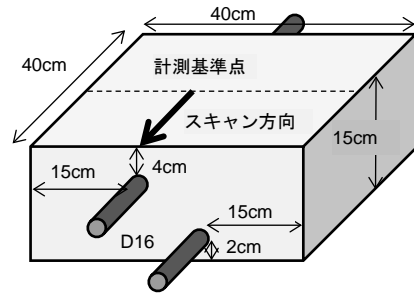


図-1 作製した供試体の外観

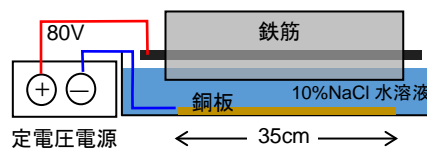


図-2 電食実験の様子

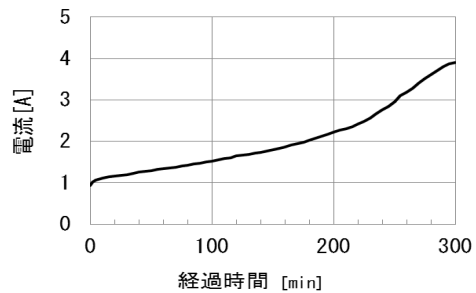


図-3 電食実験における印加電流

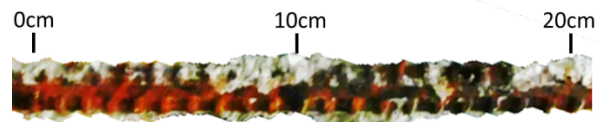


図-4 電食後の鉄筋の腐食の様子

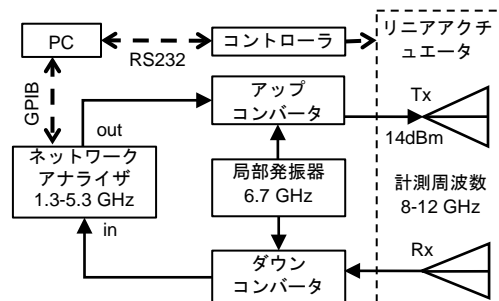


図-5 計測システムのブロックダイアグラム

ある 8~12 GHz の周波数帯域へ、6.7 GHz の局部発振器とアップコンバータにより変調して送信し、受信後ダウンコンバータにより復調することで計測している。計測後、RC レーダにおける入力パルス波形に相当する $P(f)$

を乗じて、逆フーリエ変換することにより式(2)のように通常の RC レーダに相当するパルス応答波形 $\dot{x}(t)$ を得ることができる。

$$\dot{x}(t) = \int_{f_s}^e \dot{X}(f)P(f)e^{j2\pi ft}df \quad (2)$$

このシステムの利点は、高価ではあるが容易に 10 GHz 帯のレーダが実現できることであり、電波の波長がコンクリート内で鉄筋の節の周期に近くなるため、周期構造の検出に有利であると考えられる。

アンテナは図-6 のようなキャビティバック付ボウタイ状スロットアンテナを開発した。キャビティの厚みは 5 mm であり、開口部中央の三角形先端部間にロスが無視できるセミリジッドケーブルにより給電している。このため、図の上下方向に直線的に電波が振動する偏波特性を有している。室内実験より 10 GHz 帯においてアンテナのリターンロスは 10 dB であり、偏波方向を含む面 (E 面) のアンテナ指向性は図-7 のようであった。

一般に、レーダにおいて送受信アンテナの偏波を制御することにより、ターゲットの形状の特徴が評価できるようになる。このようなレーダを偏波レーダと呼んでいるが、鉄筋探索のような比較的アンテナ近傍においても同様な計測が可能である。その際に鉄筋と平行方向の偏波を H 偏波、直交する向きを V 偏波と定義し、図-8 に示したように送受信アンテナの組み合わせによって、HH, HV, VH, VV 系と呼ぶ 4 つの偏波系の組み合わせを計測した。ここで、HH, VV 系は送信・受信アンテナ間の偏波方向が平行な平行偏波系と呼ばれ、平面物体等の波長に対して方向依存性の小さい物体からの反射波を受けやすい。鉄筋は方向依存性を有しているが、波長 1 cm の電波に対しては D16 の鉄筋であれば方向依存性は無視できる。一方、送受が直交した偏波である HV, VH 系は直交偏波系と呼ばれ、反射により偏波が変化した成分、すなわち、偏波の変化をもたらす鉄筋節の凹凸等に感度がある。本計測では腐食前後による鉄筋の形状の違いに焦点を当てるため、反射波の影響を受けやすく形状の違いを見るのに適当と思われる直交偏波系について注目する。

4. 鉄筋節のイメージング結果

本計測では鉄筋表面の凹凸を計測することが目的であるため、鉄筋直上を平行にスキャンすることとした。鉄筋上のアンテナのスキャンには図-9 に示すように PC 制御可能なリニアアクチュエータ (SUS 製) を用い、アルミフレームに固定した。スキャンは鉄筋の中央を 0 cm とし、コンクリートの側面に向かい鉄筋に沿って 20 cm の幅でスキャンを行った。また、供試体上面とアンテナ下面の間隔を 2 mm とした。尚、送受信アンテナの給電点間の距離は 5 cm である。

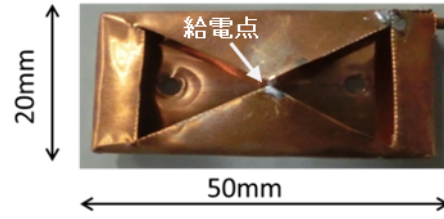


図-6 キャビティバックボウタイスロットアンテナ

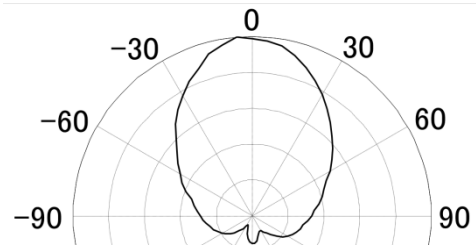


図-7 10GHz 帯でのアンテナの指向性 (電界面内)

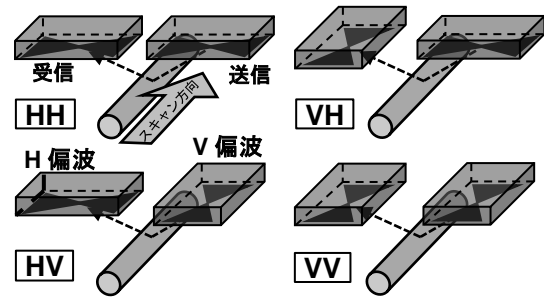


図-8 アンテナ配置と偏波の定義

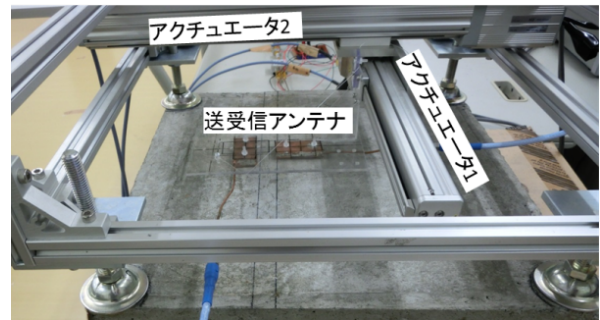


図-9 レーダ計測実験の様子

図-10 に VV 系の 10 cm の位置において得られた伝達関数 $\dot{X}(f)$ のパワースペクトルを示す。本アンテナを使用することにより、これまでの RC レーダでは得られなかった高い周波数での広帯域な情報が得られていることがわかる[5]。また、図-11 に式(2)により得られた複素時間波形 $\dot{x}(t)$ の実部および、その絶対値により得られる包絡線波形も同時に示している。0.2 ns 付近の波は電食実験の前後で見られており、送受信アンテナ間を直接伝わる直達波であることがわかる。また、送受信アンテナ間の距離 w 、かぶりを d 、光速を c 、コンクリートの比誘電率 ϵ_r とすると、反射波の到達時刻 τ は式(3)で表される。

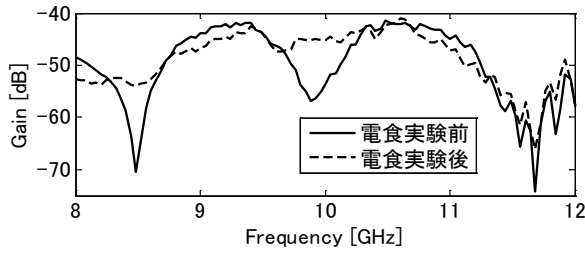


図-10 W系において得られた伝達特性の例

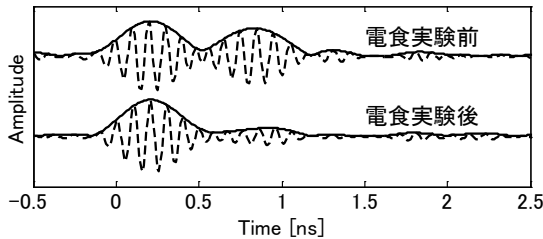


図-11 W系におけるレーダ波形と包絡線波形の例

$$\tau = \sqrt{\epsilon_r(w^2 + 4d^2)} / c \quad (3)$$

ϵ_r を 9 とすると $\tau = 0.94$ ns であり、鉄筋からの電食実験前に見られる 0.9 ns 付近の波が対応する。この波が電食後に低下している理由は、電食の際の塩水浸漬によりコンクリート表面付近の導電率が増加し、鉄筋からの反射波が減衰したものと思われる。

図-12 に各 4 つの偏波系において得られた包絡線波形を計測位置毎に並べ、その振幅をカラースケールで表示したレーダプロフィールを示す。カラースケールは VV 系での波形の 3 ns 区間での実効値ですべての図を正規化している。HH, VV 系では送信・受信アンテナ間の偏波方向が同一なため空中を伝わる直達波の影響を受けやすく、0 ns 付近に強い波が到来しているのがわかる。また、0.9 ns 付近に強い波が表れており、これは、鉄筋上面からの反射波であると考えられる。一方、HV, VH 系に関しては送信と受信アンテナで偏波方向が 90° 違うため、直達波の影響が大きく低減されている。平行偏波系と同様、0.9 ns 付近に鉄筋からの反射と思われる何らかの波が見られるが、平行偏波系で見られたスキャン方向に連なった反射波ではなく、孤立した反射イメージとして表れている。これは、鉄筋の節の周期性が反映されている可能性がある。

一般に、RC レーダに比べ波長が短いため、本レーダでは異形鉄筋の節からの反射が卓越してくると考えられる。したがって、鉄筋節のピッチが L の鉄筋を平行にスキャンした場合、反射プロフィールは理論的に周期 L の空間的な周期性を有しているはずである。その周期性を強調する手法として移動平均減算処理がある。今、計測間隔を s とすると $L/s \cong 2m + 1$ となるような m を選ぶことができ、 i 番目の計測位置でのレーダ波形を $\hat{x}_i(t)$ とすると、移動平均減算後の波形 \hat{y}_i は式(4)で表される。

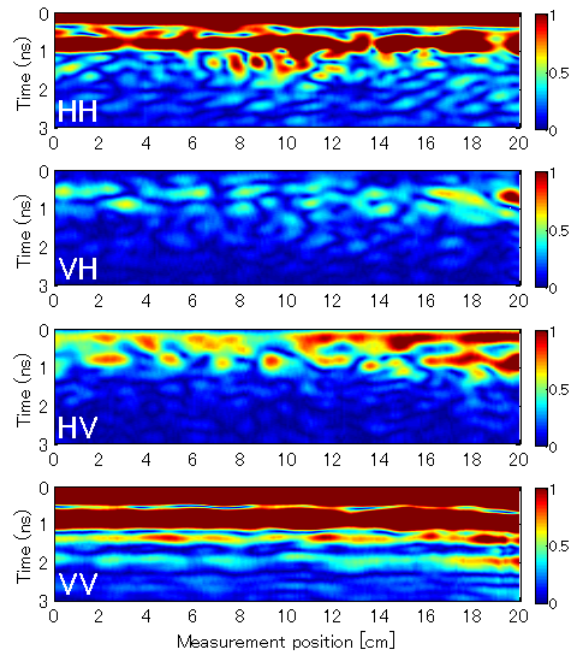


図-12 健全な鉄筋コンクリートのレーダプロフィール

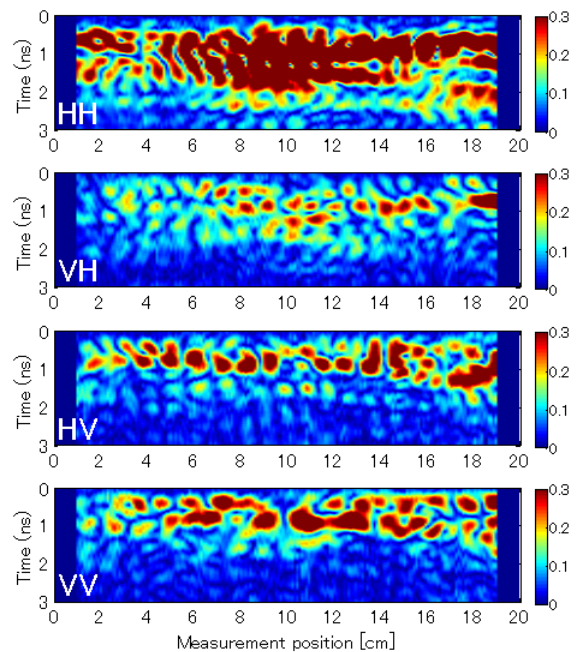


図-13 レーダプロフィールの移動平均減算処理結果

$$\hat{y}_i = \hat{x}_i(t) - \frac{1}{2m+1} \sum_{i-m}^{i+m} \hat{x}_i(t) \quad (4)$$

この処理は L より短い周期の変動を残すような空間的なハイパスフィルタと等価であり、局所的な変化成分すなわち、節による凹凸の影響が強調されることになる。図-13 に $m=10$ としたときの移動平均波形減算後のレーダプロフィールを示す。図より、各偏波において 0.9 ns 付近を中心とする楕円状の孤立反射イメージが多く表れていることがわかる。また、0.9 ns 付近だけではなくより浅い場所にも多くみられており、粗骨材等からのランダムな不要反射の応答も表れていると考えられる。これら

は特に平行偏波系に多く表れている。また、HH系は上面だけではなく、鉄筋下面からと思われる反射波が1.5 ns付近にも見られ、これは、VV系には見られない現象である。移動平均減算処理は空間的に変動する信号を強調するため、鉄筋の節が強調されるが、これらの孤立イメージの周波数解析を行えば、反射イメージの周期性が評価できる。図-14に図-13のスキャン方向にフーリエ変換して得られる空間周波数スペクトル分布を示す。縦軸は到達時刻、横軸は空間周波数に相当する。尚、図中の白い波線は周期11 mmに対応する空間周波数を示している。図より、HV系の0.9 nsにおいて11 mmの周期を有する孤立イメージが卓越していることがわかる。これは鉄筋の節の周期の応答を反映していると考えられる。VH系でも見られているが、平行偏波系では11 mmの周期性は明確に確認できない。これは、平行偏波系では不要反射波が強いために節の周期性が確認できなくなっていると考えられる。このことは、直交した偏波系が鉄筋節からの周期性をより効果的に検出できることを示している。そこで、以降はHV偏波系に関して議論する。

図-15にHV系における電食実験後のレーダプロファイルを示す。図-11からもわかるように電食実験時には10%食塩水に浸漬させたため、図-12のHV偏波系と比べて電食後は、0.9 ns付近の鉄筋からの反射波の振幅が低下している様子がわかる。浸漬によって浸透した水分は深度方向に分布を持つものの、スキャン方向には均質であると仮定すると、塩水浸漬による反射波の振幅低下はスキャン方向に一樣と考えられる。さらに、腐食によって鉄筋形状が滑らかになれば、移動平均波形減算処理により、反射波の振幅はより低下するはずである。

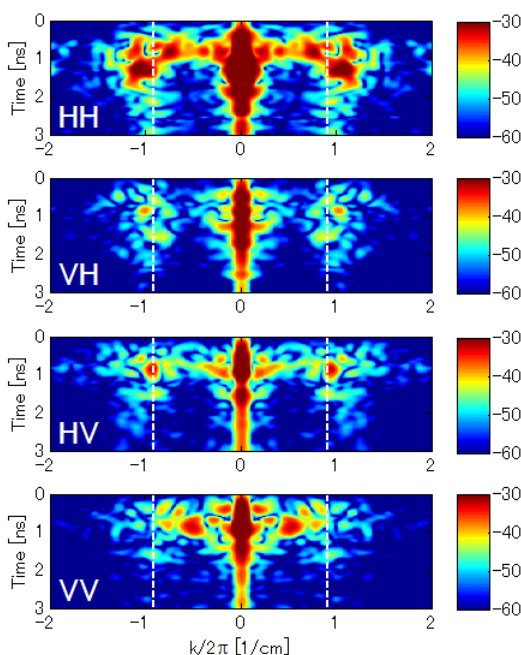


図-14 図-13の空間周波数スペクトル (白破線は空間周波数11mmに対応)

図-16に電食実験後のHV系でのレーダプロファイルの移動平均波形減算処理結果を示すが、電食前に鉄筋の節が確認できていた0.9 nsにおいて、12~20 cmの間では11 mmの周期イメージは見られるが、0~11 cm付近では周期イメージが明確に見られないことがわかる。水分による減衰はスキャン方向に一樣と考えられるため、この場所による違いは、腐食による影響であると考えられる。図-4より、腐食により鉄筋の節は視認してわかるほどの断面欠損や節形状の変化はないが、0~10 cmには鉄筋腐食による腐食生成物が多く付着しており、周期イメージの大きさが低下した領域と一致している。これは、錆汁や腐食生成物が鉄筋の表面やその周囲に浸透することにより、鉄筋節の凹凸をぼやけさせ、1 cmの波長のレーダで見たときに鉄筋表面が電氣的に滑らかに見えていたことを示唆していると考えられる。

5. 鉄筋表面の粗さ評価

一般に、鉄筋節からの周期的な反射イメージの大きさは鉄筋の形状だけではなく、かぶりの深さやコンクリートの水分量が影響するが、減衰特性の空間分布が数 cmの範囲で一定であるとする移動平均減算処理の前後での波形エネルギーの比は鉄筋の形状の変化のみを反映していると考えられる。そこで以下のように鉄筋コンクリートの腐食の有無の評価のための新たな指標を導入する。反射波の到達時刻はかぶり厚や、波形の確認によりある程度可能であり、その到達時刻 τ を中心とした0.3 nsの時間幅、及び計測位置 X を中心とした20 mmの空間幅の包絡線波形群の実効値をその点 (τ, X) での反射波の波形実効値 $E(\tau, X)$ と定義する。移動平均減算前を $E_0(\tau, X)$ 、減算後を $E_s(\tau, X)$ とすると、鉄筋表面の粗さを評価する指標 $R(X)$ として式(5)のように定義できる。

$$R(X) = E_s(\tau, X) / E_0(\tau, X) \quad (5)$$

移動平均減算は空間的なハイパスフィルタと等価でありスキャン方向の変動が小さい、すなわち表面の滑らかな

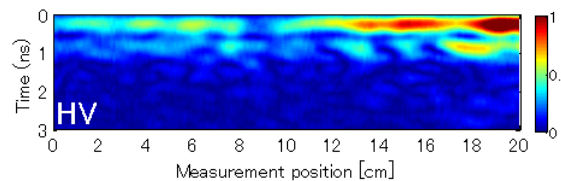


図-15 電食実験後のHV系でのレーダプロファイル

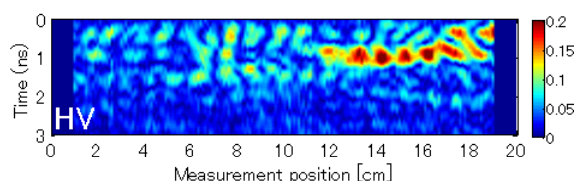


図-16 電食実験後のHV系でのレーダプロファイルの移動平均波形減算処理結果

ところでは $E_s(\tau, X)$ は小さくなる。よって腐食によって鉄筋表面が滑らかに見えたとしても、粗さを表す指標 $R(X)$ の値が小さくなる。図-17 に各偏波系において得られる $R(X)$ を示す。HH 系では腐食前の方が大きくなっておりこの偏波系ではこの指標は形状の情報を反映していないと考えられる。VV 系では腐食前後で明確な差を見出しにくい。一方、直交した偏波系では、電食実験後に、 $R(X)$ が小さくなっており、鉄筋の形状が電氣的に滑らかに見えていることに対応している。

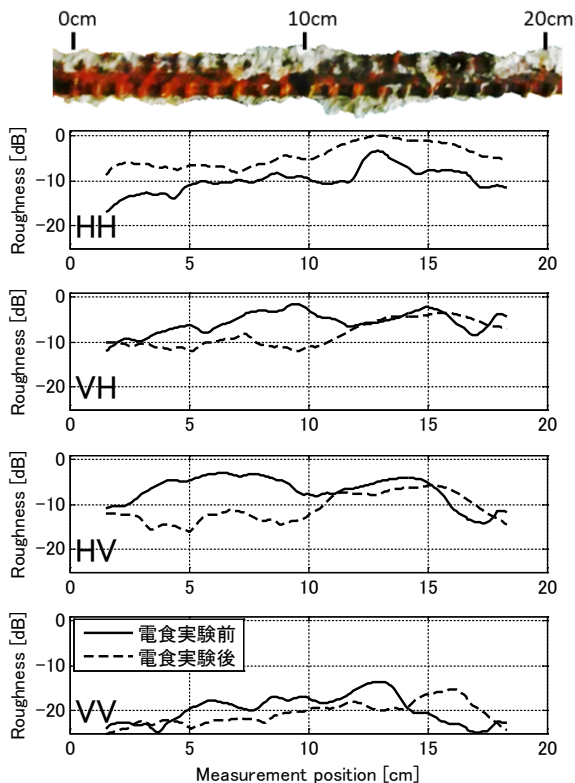


図-17 鉄筋表面の粗さ評価結果

6. まとめ

本論文では RC 構造物の鉄筋腐食の非接触、かつ簡易な評価のために、腐食による鉄筋の節の周期イメージの変化に着目した 10 GHz の高周波レーダ計測による評価法を提案した。その結果以下のことがわかった。

- (1)鉄筋と平行にスキャンする計測において、鉄筋反射波のスキャン方向に対する変動に感度のある移動平均減算処理を行うことにより、直交偏波 (HV 偏波) 系において鉄筋節の周期性をイメージングできた。
- (2)電食実験により鉄筋を腐食させた際に、電食前に見られた周期的なイメージが見られなくなる部分が見られた。
- (3)鉄筋を取り出した結果、周期イメージが消えた場所と、鉄筋の腐食による赤錆びが多く付着していた部分は一致していることがわかった。このことは、電食によ

り鉄筋の表面の凹凸が電氣的に滑らかになったように見えていることを示唆しているものと考えられる。

(4)表面粗さの指標 $R(X)$ を定義し、この指標により鉄筋の腐食の有無を評価できる可能性を示唆した。この指標は移動平均波形減算前後での実効値を比較するので、大域的なコンクリートの水分量等や、かぶり厚に影響を受けにくく鉄筋形状に依存した量であることが期待できる。

(5)本論文の場合、VH 系ではやや不明瞭だったものの、HV 系では $R(X)$ が -10 dB を腐食判定スレシヨルドとして利用できる可能性がある。

今後の課題として鉄筋の径やかぶり、コンクリート強度を変えた供試体での実験の再現性の確認、孤立点イメージの周期性や指標によって鉄筋の腐食度を定量的に評価する方法についての考察を行っていく予定である。

謝辞

本研究は科学研究費補助金基盤研究 B (26282092) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 片脇清士, 蒔田実: コンクリート中の鉄筋の腐食機構に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 4, pp. 61-64, 1982.4
- 2) 後藤信弘, 松岡和巳, 伊藤叡: 交流インピーダンス法によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング, コンクリート工学年次論文集, Vol. 12, pp. 527-532, 1990.6
- 3) 荒井郁男, 鈴木務: 地中レーダシステム, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J66-B, No. 6, pp. 713-720, 1981.6
- 4) 朴錫均, 魚本健人, 吉沢勝: レーダ法によるコンクリート内部の空隙計測に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 17, pp. 1191-1196, 1995.6
- 5) 前松塚忠政, 森濱和正, 小松原健: 実構造物における電磁波レーダによる比誘電率およびかぶりの推定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 1919-1924, 2006
- 6) 田中正吾, 岡本昌幸: 電磁波レーダを用いた鉄筋のかぶり腐蝕の高精度非破壊検査技術, 検査技術, Vol. 14, No. 6, pp. 62-71, 2009
- 7) 河村圭亮, 中村光, 国枝稔, 上田尚史: 鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1075-1080, 2009