

令和 5 年度 修士学位論文

鉄筋腐食時の加振レーダ法による
鉄筋振動変位増加と
AE 発生挙動に関する研究

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

情報通信システム分野第一研究室

指導教員 三輪 空司 教授

学籍番号 T211D019 岡田 矩幸

目次

第1章 序論.....	3
1-1 研究背景.....	3
1-2 研究目的.....	4
第2章 加振パルスドップラレーダシステムの原理.....	5
2-1 加振レーダの原理.....	5
2-2 マイグレーション処理.....	7
第3章 AE法と3次元のAE源位置推定.....	10
3-1 AE法の原理.....	10
3-2 3次元のAE源位置推定原理.....	11
3-3 AICによるAE信号到達時間検出.....	13
3-4 AE解析パラメータ.....	15
第4章 実験概要.....	17
4-1 電食実験概要.....	17
4-1-1 コンクリートの組成.....	17
4-1-2 鉄筋腐食原理.....	18
4-1-3 電食実験.....	19
4-2 加振パルスドップラレーダの計測システムの概要.....	21
4-2-1 計測システムの概要.....	21
4-2-2 ブロックダイアグラム.....	23
4-2-3 計測方法.....	25
4-3 AE源位置推定の計測システム概要.....	28
4-3-1 計測システムの概要.....	28
4-3-2 ブロックダイアグラム.....	30
4-3-3 計測方法.....	31
第5章 実験結果.....	33
5-1 供試体の外観の調査.....	33
5-2 鉄筋振動変位の積算電流依存性.....	35
5-3 AE計測結果.....	38
第6章 考察.....	41
第7章 結論.....	45
7-1 結論.....	45
7-2 今後の予定.....	46
参考文献.....	47
研究業績.....	47

口頭発表.....	47
謝辞.....	48

第1章 序論

1-1 研究背景

道路、橋梁、トンネル、上下水道等のインフラ設備の多くが高度成長期に建設され、建設後 50 年後を超える共用中の橋梁が 10 年後には半数に達するといわれており、インフラ設備の高齢化が社会問題となっている。また、2014 年に笹子トンネルで発生したアンカー腐食に伴う天板崩落事故に端を発し、インフラ設備の 5 年に一度の目視点検が義務化されたが、以前として 9% 超もの橋梁が早期、緊急に措置を要する区分Ⅲ、Ⅳに遷移する例も報告され始めている。鉄筋コンクリート(RC)橋における区分Ⅳの損傷要因の半数はコンクリートのはく離、鉄筋露出といった鉄筋腐食を原因とするものであり、早期にコンクリート内部の鉄筋腐食を定量的に評価し、補修していれば劣化の進行を防げた可能性がある。

既存の鉄筋腐食評価手法には自然電位法が実用的に用いられているものの、コンクリートをはつって鉄筋を露出させる微破壊検査であるため迅速性に問題があることや、乾湿に影響されること、腐食の程度は不明であることが問題点である。一方、非破壊的な手法には腐食ひび割れによる弾性波速度の低下を評価する衝撃弾性波法や鉄筋腐食による透磁率の変化を 2 次磁界から評価する磁気的手法、腐食生成物の比熱が周囲に比べ小さいことを利用した熱的手法等が提案されているものの精度、迅速性、非接触性等に問題があり、広範囲を迅速かつ正確に腐食程度評価することは困難である。

一方、広範囲の鉄筋位置を迅速かつ正確に評価可能な電磁波レーダ法はその欠点を克服しうる特徴を有している。一般に、鉄筋が腐食しサビが発生すると鉄筋とコンクリート間の付着力が低下することから、鉄筋を強制的に振動させ、その「振動し易さ」をドップラレーダ法により鉄筋振動変位として定量化し、間接的に鉄筋腐食量を評価する Fig. 1-1 のような「加振レーダ法」を開発してきた。これまで、強制的に鉄筋を腐食させる電食実験により鉄

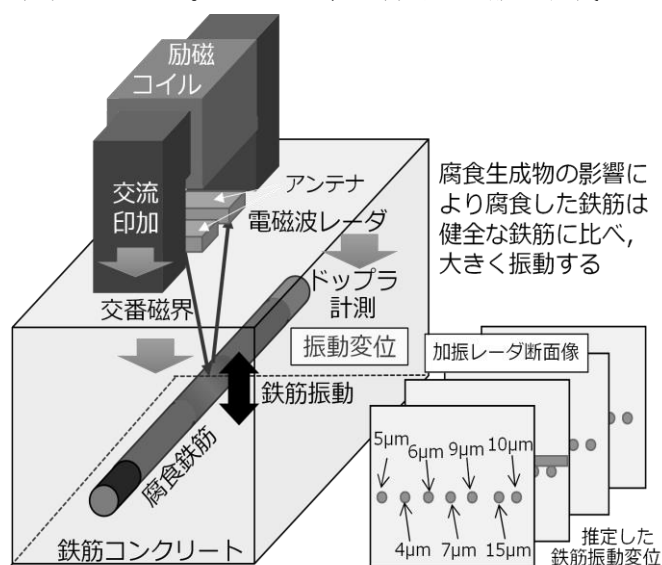


Fig. 1-1 加振レーダ法概念図

筋振動変位をモニタリングした結果、腐食の進行とともに振動変位が健全時の 5 倍程度まで単調増加することを確認しており¹⁾、定量的な非破壊鉄筋腐食評価法の一つとして注目されている。

一方、鉄筋腐食による振動変位増加のメカニズムについては明らかになっておらず、腐食定量評価への支障となっている。Fig. 1-2 に加振レーダ計測における鉄筋振動変位増加の要因の仮説を示す。鉄筋振動変位の局所増加の要因として以下の 3 項目を挙げている。

- ① 腐食生成物の体積膨張によるコンクリート内部の微小ひび割れによる剛性低下
- ② 鉄筋極周囲に柔らかい腐食生成物が付着することによる付着力低下
- ③ 強磁性を有し、変形しやすい腐食生成物中の黒錆が新たに振動する反射体となること

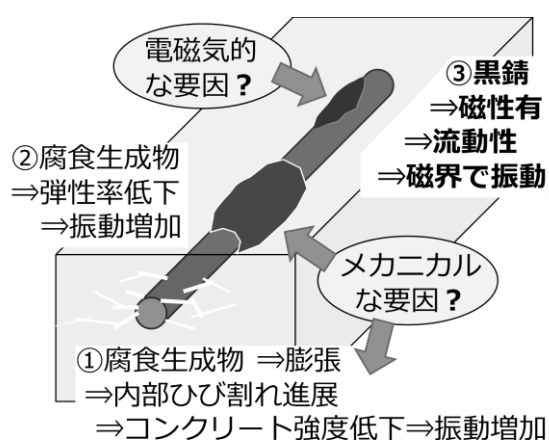


Fig. 1-2 鉄筋振動変位増加の要因

腐食の定量評価には、これらの仮説を検証することで、鉄筋振動変位の増加メカニズムを解明することが必要不可欠となっている。

1-2 研究目的

本研究では、鉄筋腐食時の振動変位増加の局所増加の要因の一つとして挙げている仮説①の微小ひび割れの影響に注目し、その検証を行う。RC 供試体の電食実験により鉄筋を腐食させ、内部ひび割れ進展に伴う AE の発生を AE 法により評価し、その AE 発生挙動と加振レーダによる鉄筋振動変位を同時モニタリングすることにより、鉄筋振動変位増加と内部ひび割れの進展との時間的、空間的相関を調査し、実験的に仮説①の検証を行った結果について述べる。

第2章 加振パルスドップラレーダシステムの原理

本章では、加振パルスドップラレーダの基本的な原理と実際の計測システムについて述べる。

2-1 加振レーダの原理

Fig. 2-1 に加振パルスレーダ法における振動反射体のドップラ計測の概要図を示す。

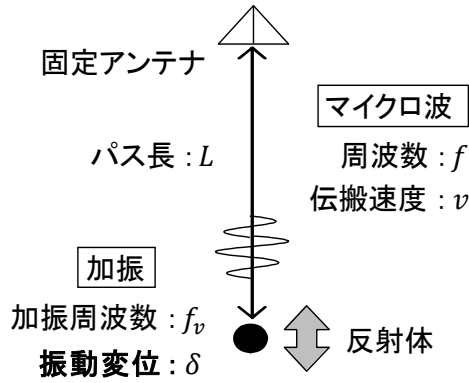


Fig. 2-1 加振パルスレーダ法におけるドップラ成分計測の概要図

加振レーダ法がレーダ波形の取得に単一周波数の連続波を用いることに対し、加振パルスレーダでは、連続波の代わりにパルス波を用いることが最大の相違点である。

パルスレーダに置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 $e(t)$ 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 $\dot{p}(t)$ を式(2-1)のように考える。

$$\dot{p}(t) = e^{j2\pi f_c t} e(t) \quad (2-1)$$

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 $\dot{h}(t)$ は反射係数を R 、電磁波の伝搬速度を v として式(2-2)のように表される。

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

このとき、 $\dot{h}(t)$ 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(2-3)のように表される。

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

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 $\dot{h}(t, T)$ を考えると、式(2-4)のように表される。

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

ここで、 $\dot{p}(t)$ 、 $\dot{h}(t)$ のフーリエ変換をそれぞれ $\dot{P}(f)$ 、 $\dot{H}_0(f) = R\dot{P}(f)e^{-j4\pi f L/v}$ とすると、 $\dot{h}(t, T)$ のフーリエ変換 $\dot{H}(f, T)$ は式(2-5)のように表される。

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

加振レーダ法と同様、電磁波の波長 $\lambda = v/f$ に対し、振動変位 δ は極めて小さいため $f\delta/v \ll 1$ より、式(2-5)を 1 次近似すると式(2-6)が得られる。

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

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(2-6)を計測時間 T 方向にフーリエ変換すれば無変調(直流)成分 $\dot{H}_0(f)$ と振動周波数 f_v での周波数成分 $\dot{H}_D(f)$ が抽出できる。ドップラ成分 $\dot{H}_D(f)$ は無変調成分を用いて式(2-7)のように表される。

$$\dot{H}_D(f) = j2\pi f \dot{H}_0(f) \frac{\delta}{v} \quad (2-7)$$

さらに、 $\dot{H}_0(f)$ 、 $\dot{H}_D(f)$ を正の周波数 f に対して逆フーリエ変換すれば、両成分の複素レーダ波形 $\dot{h}_0(t)$ 、 $\dot{h}_D(t)$ がそれぞれ式(2-8)、(2-9)のように独立に得られる。

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

$$\dot{h}_D(t) = \frac{\delta}{v} \frac{d}{dt} \dot{h}_0(t) \quad (2-9)$$

ここで、無変調成分 $\dot{h}_0(t)$ は従来レーダで計測されるレーダ波形をヒルベルト変換により複素波形化した波形と等価であり、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(2-10)のように表される。

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

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 $\dot{h}(t, T)$ 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 $\dot{h}_0(t)$ と正の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(2-10)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。Fig. 2-2 に振動変位算出の簡単な流れを示す。

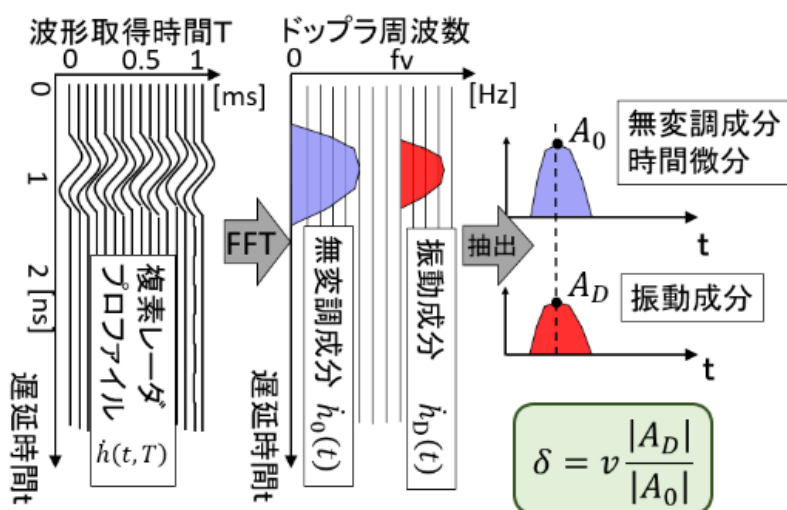


Fig. 2-2 振動変位算出方法

2-2 マイグレーション処理

Fig. 2-3 に計測波形のレーダプロファイルを示す。一般に RC レーダでは孤立した物体の直上を移動しながら波形を取得位置順に並べると以下ようになる。

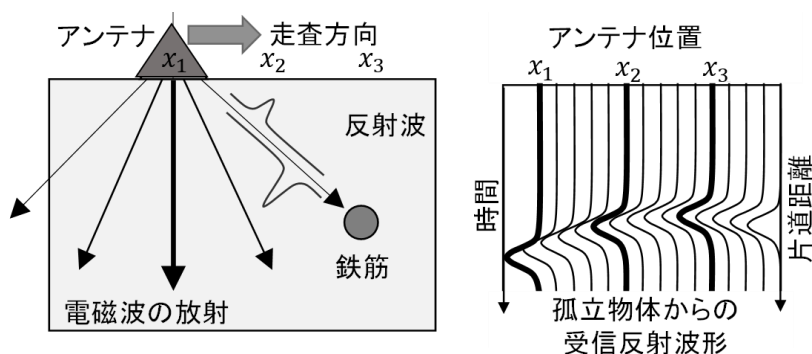


Fig. 2-3 計測波形のレーダプロファイル

反射波の到達時刻は放射線状のプロファイルを示すが、スキャン方向の空間分解能は悪い。そこで本報告では時間シフトしたレーダ波形を重ね合わせるキルヒホッフマイグレーション法と呼ぶ合成開口処理を用いる。送受信一体型レーダ波形の時間軸は、 $\frac{v}{2}$ を乗じてアンテナから反射体までの距離 R の関数とみなせる。このとき、ある距離 R に現れる波は、アンテナを中心とする半径 R の球面上の任意の点から到来したことを示す。その波源位置を推定するため、仮想波源 (x, z) を過程すると、 n 番目のアンテナ位置を x_n とした場合、座標 $(x_n, 0)$ から仮想波源までの距離 R は式(2-11)で表される。

$$R(x_n, x, z) = \sqrt{(x_n - x)^2 + z^2} \quad (2-11)$$

光速を c 、媒質の比誘電率を ϵ_r とすれば、媒質の伝搬速度は $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$ であり、アンテナ位置 $(x_n, 0)$ で得られた受信波形を $\dot{h}(x_n, t)$ と表記すると、ある仮想波源 (x, z) から各アンテナ位置に到来した波の複素振幅は $\dot{h}(x_n, 2R/v)$ と表せる。従って、Fig. 2-4 のようにアンテナ位置を中心に距離 R の同心円状に波形振幅 $\dot{h}(x_n, 2R/v)$ を分布させ、全てのアンテナ位置についてこの操作を足し合わせることで、真の反射点では同一位相の波が足し合わされ評価関数値は増大する。一方で、それ以外の場所においては位相がランダムに足し合わされるため評価関数値は低い値を維持する。無変調成分とドップラ成分に対応したイメージング画像 $\dot{u}_0(x, z)$ 、 $\dot{u}_D(x, z)$ は式(2-12)、(2-13)で表される。

$$\dot{u}_0(x, z) = \sum_{n=1}^N \frac{d}{dt} \dot{h}_0(x_n, 2R(x_n, x, z)/v) \quad (2-12)$$

$$\dot{u}_D(x, z) = \sum_{n=1}^N \dot{h}_D(x_n, 2R(x_n, x, z)/v) \quad (2-13)$$

本処理は反射波の振幅情報も保存されていることから、真の反射体位置 (x_r, z_r) での鉄筋の反射振幅を用いて、式(2-14)により鉄筋の振動変位が得られる。これが、イメージングベースの鉄筋振動変位推定アルゴリズムである。

$$\delta(x_r, z_r) = v \left| \frac{\dot{u}_D(x_r, z_r)}{\dot{u}_0(x_r, z_r)} \right| \quad (2-14)$$

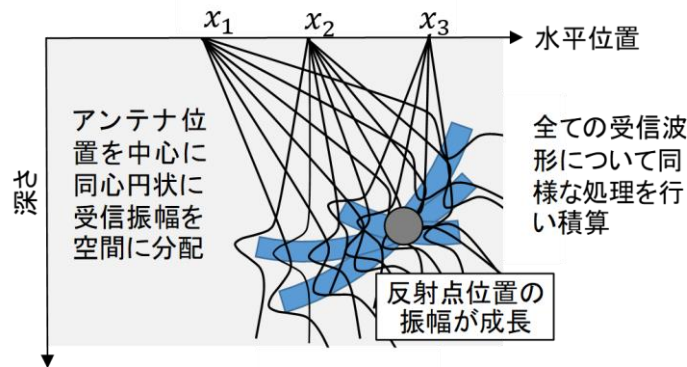


Fig. 2-4 マイグレーション処理

本手法は式(2-13)まではコヒーレントな信号処理の結果であり、線形演算で実施できる。すなわち、イメージングベースでの振動変位はレーダ分解能で分離できる孤立した反射体 1 個に対して適用できる式であることに注意が必要であり、複数の反射体からの反射イメージが重畳した場合、正確な値ではなくなることに注意が必要である。

第3章 AE法と3次元のAE源位置推定

本章では、AE法の原理や特徴・AE発生源の位置推定方法について述べ、AE解析時に用いられるパラメータなどについてまとめる。

3-1 AE法の原理

本節では、アコースティック・エミッション法(以下AE法と称す)について述べる。

Fig. 3-1にAE波動の発生・伝搬・検出の概念図を示す。AEとは、「固体材料内部の微小な破壊あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波現象」²⁾と定義される。本研究で扱うコンクリートから発せられるAEは、1kHz~1MHzのような高周波の微弱な弾性波である。計測ではFig. 3-1に示すように空气中を伝搬する破壊音ではなく、コンクリート表面に直接取り付けられたセンサにより弾性波を検出する手法となる。検出されるAE現象には、クラックの発生時間、発生場所、破壊の規模等の情報が含まれている。また、AEの発生数やエネルギー量の変化を調べることで、損傷過程の活性度や集積を把握することが可能である。そのため、経年劣化や外的被害を受けたコンクリート構造物の健全性を評価するために、有効な非破壊検査法として古くから用いられる。

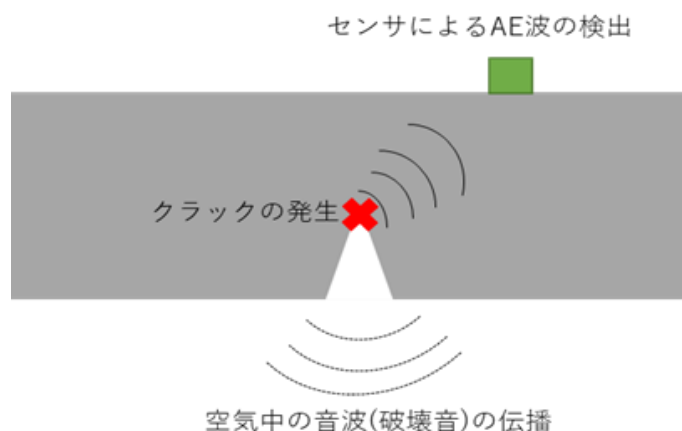


Fig. 3-1 AE波動の発生・伝搬・検出の概念図

AE法はコンクリートの分野においても1960年代以降、種々の研究が行われてきており、1980年代に入ってからでは日本でも多くの研究が発表され、実構造物への適応例も多数報告されるようになってきている。AE法では以下のことを知ることができる。

- 1) AE発生(ひび割れや破壊)の位置
- 2) 発生したAEの特性(ひび割れや破壊の大きさ、種類等)
- 3) 最大履歴応力
- 4) 破壊の進行程度、速度

以上の情報はコンクリート構造物のひび割れの状況を把握するのに有用な情報である。これらの情報は AE 波形からパラメータに変更することができ、本研究においても取得した AE 波形からパラメータ化を行っていく。

3-2 3 次元の AE 源位置推定原理

Fig. 3-2 に波源と複数の AE センサ配置を示す。コンクリート内の弾性波伝播速度 V を一様で既知とすれば AE 源からセンサへ AE 信号が到達する伝搬時間とセンサの座標から幾何学的に波源位置を決定できる。AE 源の三次元位置評定においては、AE 発生絶対時刻 τ_0 を含めて 4 個の未知量を決定する必要があり、4 つの独立なセンサ座標と波源に関する式があれば決定論的に求まる。また、5 つ以上で最小二乗的に到達時刻の推定誤差を最小にするように求められる。本研究ではシステムの関係上 4 つのセンサを用いて波源を推定した。

センサ番号 $i = 1 \sim 4$ に対応するセンサ Q_i の座標を (x_i, y_i, z_i) とし Q_1 を原点に取る。また、波源位置 P の座標を (α, β, γ) 、 i 番目のセンサでの AE 到達時刻を τ_i とする。 $\tau_i - \tau_0$ は波源から各センサまでの伝搬時間であり、伝搬速度を乗じれば波源-センサ間の距離 $|\overrightarrow{Q_i P}|$ に一致するため、以下が成立する。

$$|\overrightarrow{Q_i P}| = v(\tau_i - \tau_0) = l_i - l_0 \quad (i = 1 \sim 4) \quad (3-1)$$

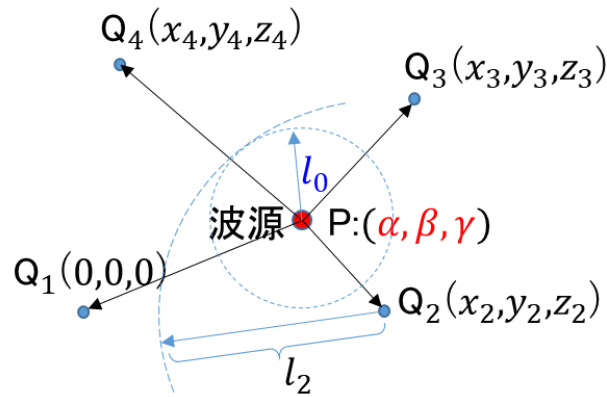


Fig. 3-2 波源と AE センサ配置

ここで、 $l_i = v\tau_i$ とすると i 番目のセンサ位置を中心とする半径 l_i の円は波源から半径 l_0 の円と接することになる。したがって、式(3-2)～(3-5)が求められる。

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = (l_1 - l_0)^2 \quad (3-2)$$

$$(x_2 - \alpha)^2 + (y_2 - \beta)^2 + (z_2 - \gamma)^2 = (l_2 - l_0)^2 \quad (3-3)$$

$$(x_3 - \alpha)^2 + (y_3 - \beta)^2 + (z_3 - \gamma)^2 = (l_3 - l_0)^2 \quad (3-4)$$

$$(x_4 - \alpha)^2 + (y_4 - \beta)^2 + (z_4 - \gamma)^2 = (l_4 - l_0)^2 \quad (3-5)$$

これらは非線形多元連立方程式であり、一意に解が求まらないため、総当たり法により近似解を探索することで解を決定する。以下にその解法を示す。

式(3-3)から式(3-2)を引いて式(3-6)を求める。同様に式(3-7)、(3-8)を求める。

$$x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - 2(\alpha x_2 + \beta y_2 + \gamma z_2) = -(l_1 - l_2)(l_1 + l_2 - 2l_0) \quad (3-6)$$

$$x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 - 2(\alpha x_3 + \beta y_3 + \gamma z_3) = -(l_1 - l_3)(l_1 + l_3 - 2l_0) \quad (3-7)$$

$$x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 - 2(\alpha x_4 + \beta y_4 + \gamma z_4) = -(l_1 - l_4)(l_1 + l_4 - 2l_0) \quad (3-8)$$

(α, β, γ) について取り出すと式(3-9)が得られる。

$$-2 \begin{pmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} (l_1 - l_2)(l_1 + l_2 - 2l_0) + x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ (l_1 - l_3)(l_1 + l_3 - 2l_0) + x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \\ (l_1 - l_4)(l_1 + l_4 - 2l_0) + x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

α, β, γ を未知量 l_0 の関数として $\alpha(l_0), \beta(l_0), \gamma(l_0)$ と表すと、式(3-10)が得られる。

$$\begin{pmatrix} \alpha(l_0) \\ \beta(l_0) \\ \gamma(l_0) \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{pmatrix}^{-1} \left\{ \begin{pmatrix} (l_1 - l_2)(l_1 + l_2 - 2l_0) \\ (l_1 - l_3)(l_1 + l_3 - 2l_0) \\ (l_1 - l_4)(l_1 + l_4 - 2l_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 \\ x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 \\ x_4^2 + y_4^2 + z_4^2 \end{pmatrix} \right\} \quad (3-10)$$

今、適当に定めた \hat{l}_0 が真値 $\tau_0 = \hat{l}_0/v$ であれば、 $\alpha(l_0), \beta(l_0), \gamma(l_0)$ は式(3-2) ~ (3-5)を満たすはずである。そこで、 \hat{l}_0 を探索しながら $\alpha(l_0), \beta(l_0), \gamma(l_0)$ を式(3-2)に代入し、式を満たすかどうか調べる。そのため、以下のような誤差関数を考える。

$$E(\hat{l}_0) = \left| \alpha(\hat{l}_0)^2 + \beta(\hat{l}_0)^2 + \gamma(\hat{l}_0)^2 - (l_1 - \hat{l}_0)^2 \right| \quad (3-11)$$

到達時刻に時差がなければ $\hat{l}_0 = l_0$ のとき 0 となるため、誤差を持つときは $E(l_0)$ は最小値 0 を持ち、 l_0 以外では一般に大きな値を持つ。 $E(\hat{l}_0)$ は 2 次関数のため、 \hat{l}_0 の解一般に 2 個あり、これは式(3-1)で 2 乗を取ったことにより発生する。このとき、 $l_i - l_0 = v(\tau_i - \tau_0) > 0$ を満たす l_0 が真の解となる。もう 1 つの解は、

$$l_i - l_0 < 0 \quad (3-12)$$

$$l_i < l_0 \quad (3-13)$$

となるような l_0 を持つときに発生すると考えられるため、 l_0 の探索範囲を $l_0 < \min(l_i)$ に限定して、 $E(\hat{l}_0)$ の最小値を探せば、 l_0 の真の解を推定できる。

3-3 AIC による AE 信号到達時間検出

AE 源の座標標定を行う上で、各センサの AE 信号到達時間を測定する必要がある。AE 信号到達時刻を検出する方法として、検出波形を目視によって読み取る方法が用いられている。しかし、本研究においては長時間の AE 計測を行っているため、波形データ数が膨大であるため、目視での読み取りによる到達時刻評価を行うことは現実的ではない。そこで、AE 信号到達時間の検出方法として、赤池情報量基準(Akaike Information Criterion, AIC) ⁸⁾を適用する方法を採用した。AIC とは統計学において利用されており、実際のデータとモデルにどの程度一致するのかを評価する統計量であり、値が小さいほど当てはまりが良いとされている。検出波形に直接 AIC を適用し、AIC が最小値を示す点を AE 信号到達時刻としている。この手法は地震学の分野でも使用されており、波形を歪めることなく到達時間を検出することができる有効な手段である。

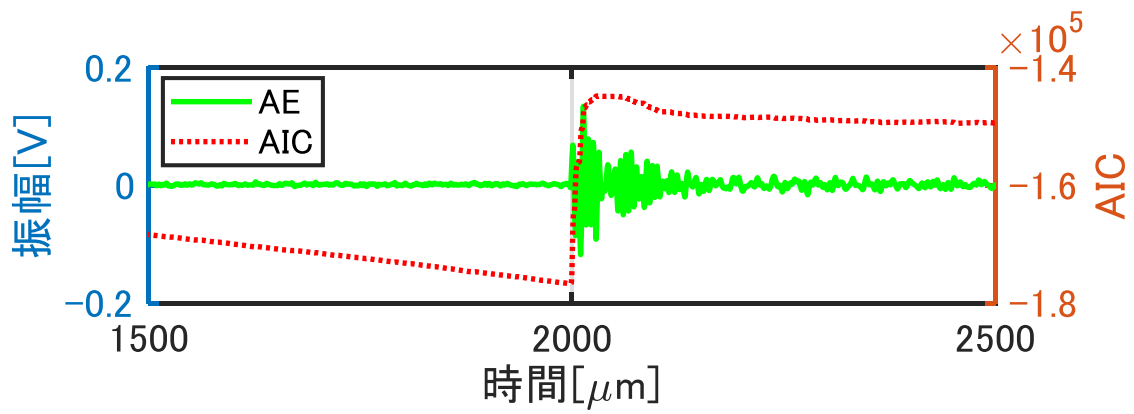
本研究では、 N 個のサンプル数で記録した 1 つの AE 波形に対して、振幅値 $A_i (i = 1, 2, \dots, N)$ として任意の点 $i = k$ での AIC_k は式(3-14)によって計算される。

$$AIC_k = k \cdot \log\{\text{var}(A[1, k])\} + (N - k) \cdot \log\{\text{var}(A[k, N])\} \quad (3-14)$$

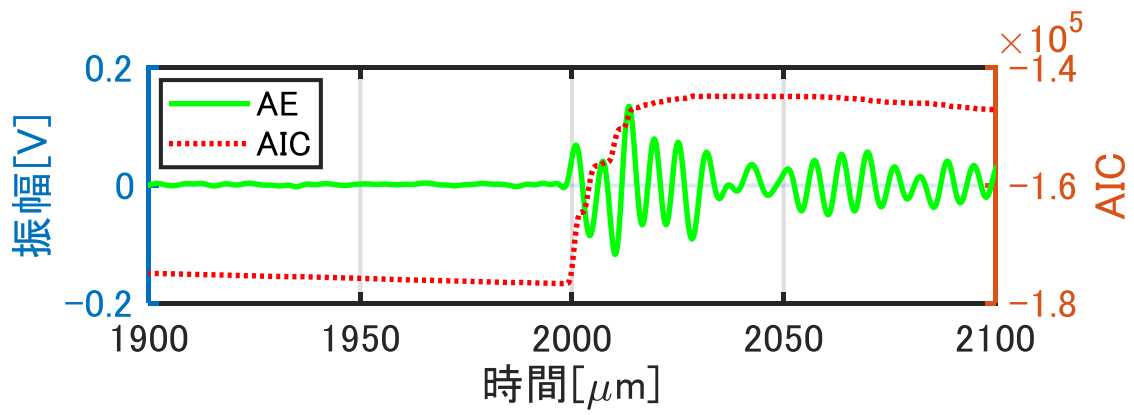
AIC 値が最小値を示す $i = k$ での時刻を $T_k\{\}$ 、 ΔT をサンプリング間隔とすると、AE 信号到達時刻 $P1(AIC\text{-picker})$ は式(3-15)で表される。なお、本研究においてはサンプリング間隔 $\Delta T = 200 \text{ ns}$ である。

$$P1 = T_k\{\text{Min}(AIC_k)\} - \Delta T \quad (3-15)$$

Fig. 2-6 に AE 波形と AIC による到達時刻抽出を示す。橙色線で示す AIC が最小値を示す時刻が波形到達時刻になっていることが確認できる。式(3-14)は、 $i = k$ より前半部分の振幅値の分散と後半部分の振幅値の分散を求め、それらの和により算出している。従って、 k が波形到達時刻の場合、前半部分に関してはノイズの分散を計算していることになる。また、後半部分に関しては、波の分散を計算していることになる。この時、各分散の和は最小となるため AIC を用いると波形の到達を正確に求めることが可能となる。



(a) 全体図



(b) 拡大図

Fig. 3-3 AE 波形例と AIC による到達時刻抽出

3-4 AE 解析パラメータ

Fig. 3-4 に AE 波形パラメータの一例を示す。AE 波形の各成分から AE 解析パラメータを抽出する。

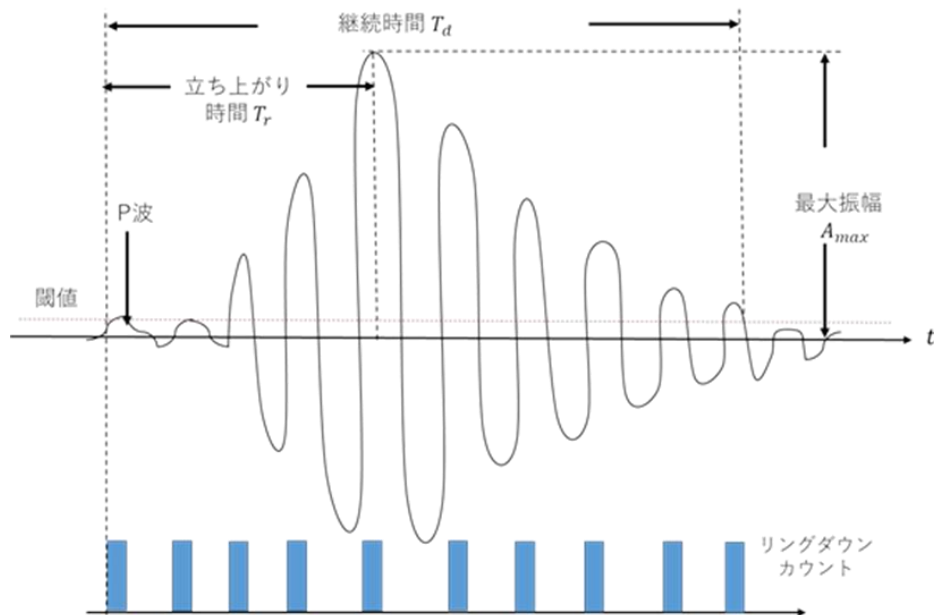


Fig. 3-4 AE 波形パラメータの一例

1. 発生頻度³⁾

Fig. 3-4 の波形が AE の事象数(イベント数)として数えられる。一つの AE 波形に対して、一事象として計数するものである。なお、閾値を超える振幅に対して、その回数をすべて計数した頻度はリングダウン・カウント、通称カウント数と呼ぶ。さらに、事象数でも多チャンネルで計測した場合には、各チャンネルによって計数される事象数は異なる。この場合にいずれかのチャンネルで検出されるものを計数したものはヒット数と名付ける。AE の発生頻度は、ひび割れが起こる条件下で、いかにアクティブに AE が発生しているかを表す指標として扱う。

2. 最大振幅値(AE 尖頭値)

最大振幅値は、AE 発生源での微小破壊の規模と関係しているパラメータと考えられ、破壊の規模に応じて大小の振幅値が得られる。このパラメータ単体ではなく振幅規模別頻度分布を得るために利用されている。なお、AE 波形は、波形の継続時間が数 ms 以下の過渡的な波動現象であるため、最大振幅値は生波形から直接求めるのではなく、包絡線波形の絶対値の最大値として決定を行うことが一般的である。そこで、本研究においても最大振幅値の決定には生波形を包絡線波形に変換して算出を行っている。

3. ひび割れの識別⁴⁾

AE 波形の特徴として、ひび割れの種類によって、AE の立ち上がり時間と周波数の分布において異なる挙動を示すことが確認されている。それらの分析パラメータである RA 値を式(3-16)に平均周波数を式(3-17)に示す。

$$RA = \frac{T_r}{A_{max}} \quad (3-16)$$

$$\text{平均周波数} = \frac{\text{カウント数}}{T_d} \quad (3-17)$$

RA 値は閾値の設定による立ち上がり時間への影響を考慮するために最大値振幅値から立ち上がり時間を除した値であり、波形の最大振幅値までの平均的な傾きの逆数を示す。一方の平均周波数は、周波数分布の相違の影響を考慮するため、AE の周波数特性値に関する継続時間からカウント数(リングダウン回数)で除した値である。

Fig. 3-5 に RA 値と平均周波数の関係を示す。RA 値が大きく、平均周波数が低い場合には「せん断型ひび割れ」、反対に、RA 値が小さく、平均周波数が高い場合には、「引張型ひび割れ」であるとされる。本研究では、コンクリート内部のひび割れが進展し、表面ひび割れが発生するまでの時間の間に、RA 値や平均周波数が時間によって分布が異なることが推測される。

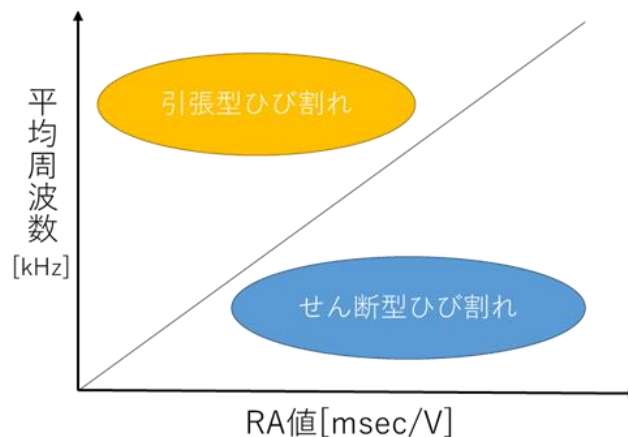


Fig. 3-5 RA 値と平均周波数の関係

第4章 実験概要

電食によって生じる腐食生成物に対し、膨張圧によって発生する内部ひび割れの進展の空間的、時間的变化を AE 源位置推定標定により評価し、さらに、加振レーダによる鉄筋振動変位の空間分布の時間変化と比較を行う。

Fig. 4-1 に実験全体図を示す。緑線で囲まれた器具が電食実験、赤線で囲まれた器具が加振パルスドップラレーダの計測、水色線で囲まれた器具が AE 計測で使用した装置である。各装置の説明はそれぞれの節にて行う。

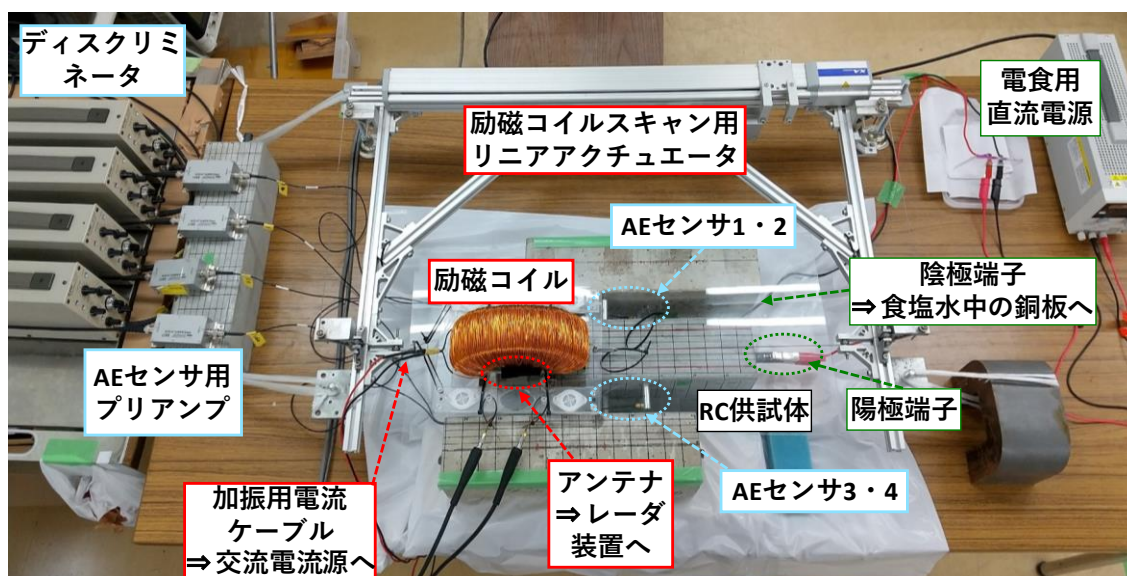


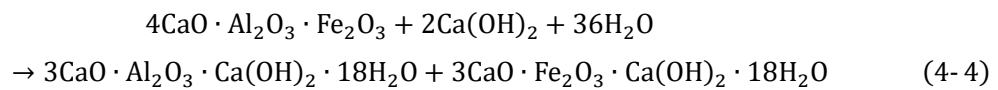
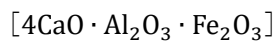
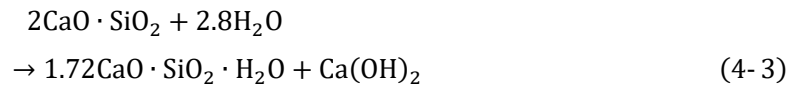
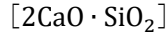
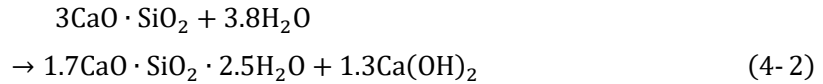
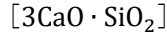
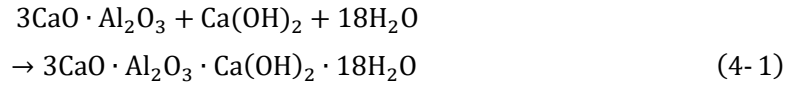
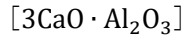
Fig. 4-1 実験全体図

4-1 電食実験概要

本節では、電食実験原理に先立ってコンクリート組成、並びに鉄筋コンクリート内部の鉄筋が腐食する原理について述べる。また、電食実験概要や使用装置についても述べる。

4-1-1 コンクリートの組成

まず、コンクリートの生成手順について簡単に述べる。コンクリートは、主に骨格となる石や砂利などの骨材を主とし、セメント、水等から成るが、コンクリートの凝固、硬化の中心はセメントと水である。セメントをつくる代表的な鉱物組織は、アルミン酸三カルシウム ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)、ケイ酸三カルシウム ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、ケイ酸二カルシウム ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)、鉄アルミン酸四カルシウム ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) の酸化カルシウムを主成分とした 4 種類である。これらの物質の水和反応を式(4-1)から式(4-4)に示す。



式(4-1)から式(4-4)の反応によりコンクリートは凝固、硬化していくが、これらの反応生成物は、水酸化カルシウムが中心となっている。

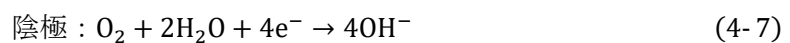
よってコンクリートの水和反応は式(4-5)のように簡単化できる



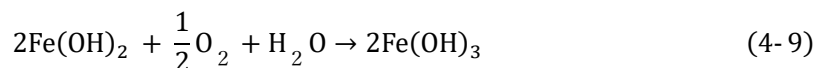
これより、生成されたコンクリートは強いアルカリ性を示すことがわかる。コンクリートの劣化の中に中性化というものが存在するが、これは外部から侵入した酸性物質によりコンクリートが強アルカリ環境を保てなくなり強度が落ちるものである。

4-1-2 鉄筋腐食原理

前項でも述べた通り、コンクリートは強アルカリ環境となっているが、鉄筋表面は厚さ2~6 nm の緻密な水和酸化物($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)から成る不導体被膜を形成することにより、腐食の要因から保護されている。しかし、コンクリートの中性化や、外部からの塩化物イオン(Cl^-)の侵入により鉄筋を保護している不導体被膜が破壊されると鉄筋の腐食が進行し始める。したがって、鉄筋の腐食はコンクリートの劣化が大きな原因因子となっている。不導体被膜が破壊され水分が浸透すると、鉄筋表面に局部電池が形成され、陽極となる鉄筋から鉄イオン(Fe^{2+})が水に溶解し、コンクリート内部へと流出することで鉄筋の腐食が進行していく。この際に起こる化学反応を以下に示す。



式(4-6)、(4-7)で生成した鉄イオン(II)と水酸化物イオンが以下のような反応を示す。



式(4-8)より、鉄筋から溶け出した Fe^{2+} が $\text{Fe}(\text{OH})_2$ として鉄筋表面に発生する。この化合物が酸化し、水酸化第二鉄 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ となる。その後、水分を失うことで式(4-10)にあるような Fe_2O_3 (赤錆)、または式(4-11)のような水和酸化物(FeOOH)となる。この時、一部は酸化が不十分となり Fe_3O_4 (黒錆)となり鉄筋表面に層状の酸化物を形成する。これらの他に、X線等の分析に鮮明な反応を示さない極微細な結晶の集合体である無定形錆と呼ばれる錆も存在する。

Table 4-1 に環境による腐食生成物の違いを示す。環境別に支配イオン並びに生成する錆の成分をまとめた。また、鉄筋に発生する錆は周囲の環境のイオンにより変化する。

Table 4-1 環境による腐食生成物の違い

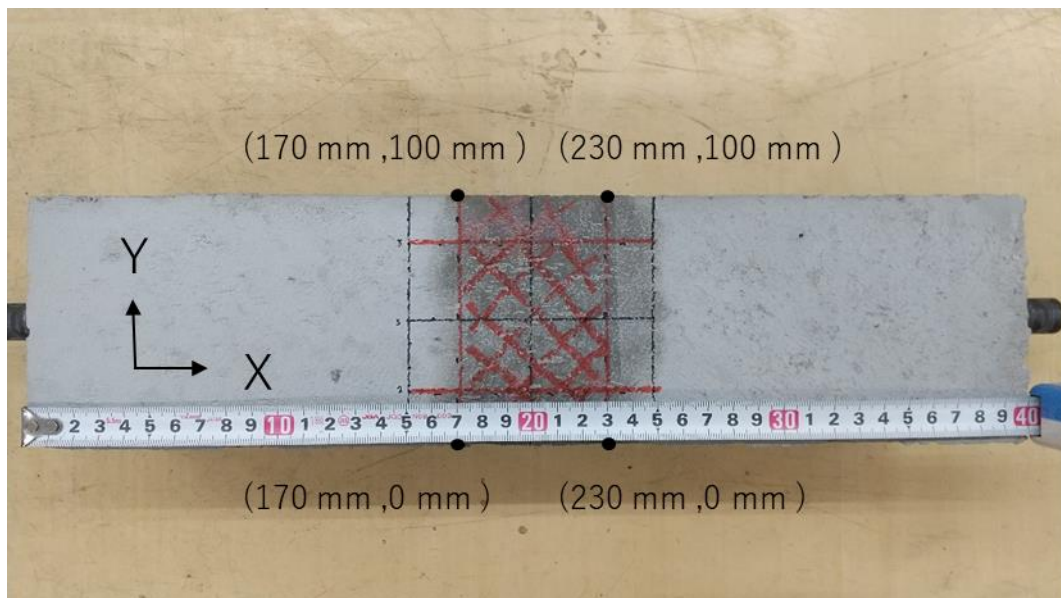
錆生成環境	支配イオン 液性	錆の成分
工業地帯	SO_2 、 SO_4^{2-} 酸性~中性	$\alpha - \text{FeOOH}$ 、 $\gamma - \text{FeOOH} \gg \text{Fe}_3\text{O}_4$ 硫酸鉄塩、無定形錆
海岸地帯	Cl^- 中性~アルカリ性	$\text{Fe}_3\text{O}_4 > \alpha - \text{FeOOH} > \gamma - \text{FeOOH}$ $\beta - \text{FeOOH}$ 、無定形錆
田園地帯	- 中性	$\gamma - \text{FeOOH}$ 、 $\alpha - \text{FeOOH}$ 、 Fe_3O_4 無定形錆

4-1-3 電食実験

Fig. 4-2 に使用した供試体、Table 4-2 に供試体の配合表を示す。使用した供試体は太平洋セメント株式会社に発注依頼をして作成したものである。供試体の寸法は $\text{L}400 \times \text{W}100 \times \text{H}100 \text{ mm}$ であり、かぶりは 42 mm で供試体の断面の中央から $\text{D}16$ の鉄筋が埋設されている。電食に使用した食塩水の濃度は 10% であり、 $\text{X}=170 \sim 230 \text{ mm}$ 、 $\text{Y}=0 \sim 100 \text{ mm}$ の領域に RC 供試体下面からスポンジを用いて導入させた。尚、電食前に直流電流が数 100Ω に低下するまで予め吸水させた。



(a) 食塩水を吸水中の供試体



(b) 食塩水を吸水後の供試体

Fig. 4-2 使用した供試体

Table 4-2 供試体の配合表

粗骨材 最大寸法 [mm]	W/C [%]	s/a [%]	単位量[kg/m ³]				
			W	C	S	G	混和剤
20	36.3	46.0	170	469	756	912	4.69

Fig. 4-3 に電食試験の配置を示す。電食実験では鉄筋を陽極、食塩水中に浸した銅板を陰極として電流を印加し、鉄筋を腐食させる。ここで、鉄筋-銅板間にはスポンジにより供試体中央部にのみ塩水が浸透することになっている。これにより、鉄筋が腐食し、腐食生成物の膨張による膨張圧により供試体中央部から内部ひび割れが進展し、内部から表面に到達する。鉄筋腐食減量は通電した電荷量に比例するものとして、印加電流と印加時間の積である積算電流値で腐食減量の調査を行う。本研究では印加電流を 100 mA とし、200 mA 毎に電食を一時停止し、鉄筋の振動変位を移動計測した。適宜、供試体の変化を記録し、錆汁の漏出が十分に見られた 50 時間後(積算電流 5 A-h)まで電食実験を行った。

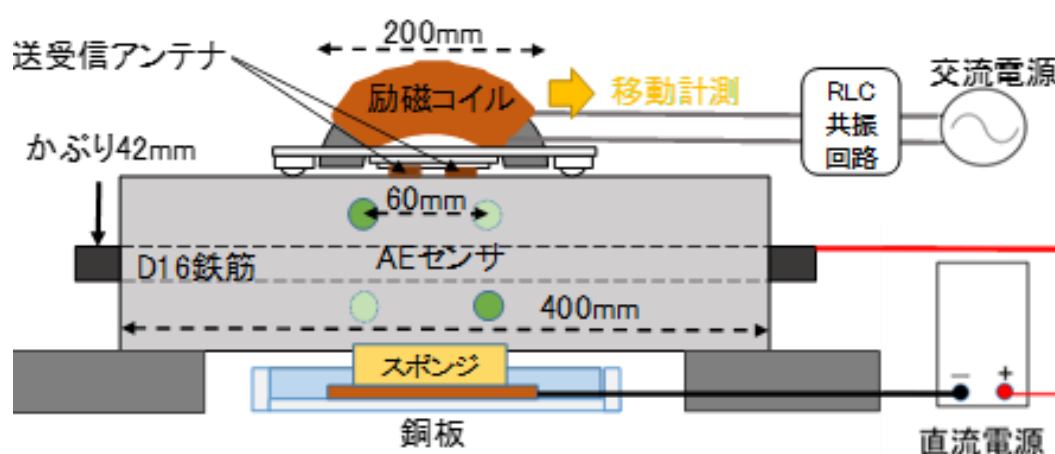


Fig. 4-3 電食試験の配置

4-2 加振パルスドップラレーダの計測システムの概要

本節では、加振パルスドップラレーダのシステムについて述べる。また、電食実験時の振動変位計測や使用装置についても述べる。

4-2-1 計測システムの概要

Fig. 4-4 に等価サンプリング概念図を示す。通常レーダシステムでは、取得波形のサンプリングを行う際、標本化定理に則り、取得波形の 2 倍以上のサンプリング周波数を設定する。しかし、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、一般的には、S/N 比が低下することと引き換えに、等価サンプリング方式を使用する。

まず、高周波信号であるパルス波の周期を T とした時、パルス波から δT だけ周期をずらした周期 $T + \delta T$ のパルス波を生成する。この周期がずれたパルス波とレーダの受信パルスのミキシングを行うと、周期 T の受信パルスに対し、 δT だけずれた 1 点をサンプリングできる。

2 回目のパルスでは $2\delta T$ の値がサンプリングされ、 n 回目のパルスでは $n\delta T$ の値がサンプリングされる。 δT の値を極めて小さく設定することで、高周波信号が多数のパルスで等価的にサンプリングできる。等価サンプリングの周期を $T + \delta T$ とした場合、 $n(= T/\delta T)$ のパルス波で T 秒のレーダ波形をサンプリングすることができる。この時取得したレーダ波形は時間が n 倍に引き伸ばされる。例えば、 $n=100000$ とした場合、GHz 帯の信号を kHz 帯の低周波信号として扱うことができ、通常のシステムでも容易にサンプリングが可能となる。

レーダシステムにおいて、空間的なエイリアシングを防ぐため、パルスの繰り返し周期を実験環境にて計測される不要反射波のうち、最も遅い到達時刻よりも長く設定する必要がある。製作したパルスレーダシステムでは、計測対象を損失性媒質であるコンクリート内部(伝搬速度 10 cm/ns)としているため、5 ns (200 MHz)を繰り返し周期と設定した。

送信パルス周波数を 200 MHz($T=5$ ns)、等価サンプリングに用いる周波数を 199.999 MHz、繰り返し周波数を 1 kHz($\delta T = 25$ fs)とした。したがって、 $n=200000$ となり、1 つ 5 ns のパルス波を 200000 パルスで生成するため、 $5 \text{ ns} \times 200000 = 1 \text{ ms}$ となり、5 ns のレーダ波形を 1 ms として扱うことができる。

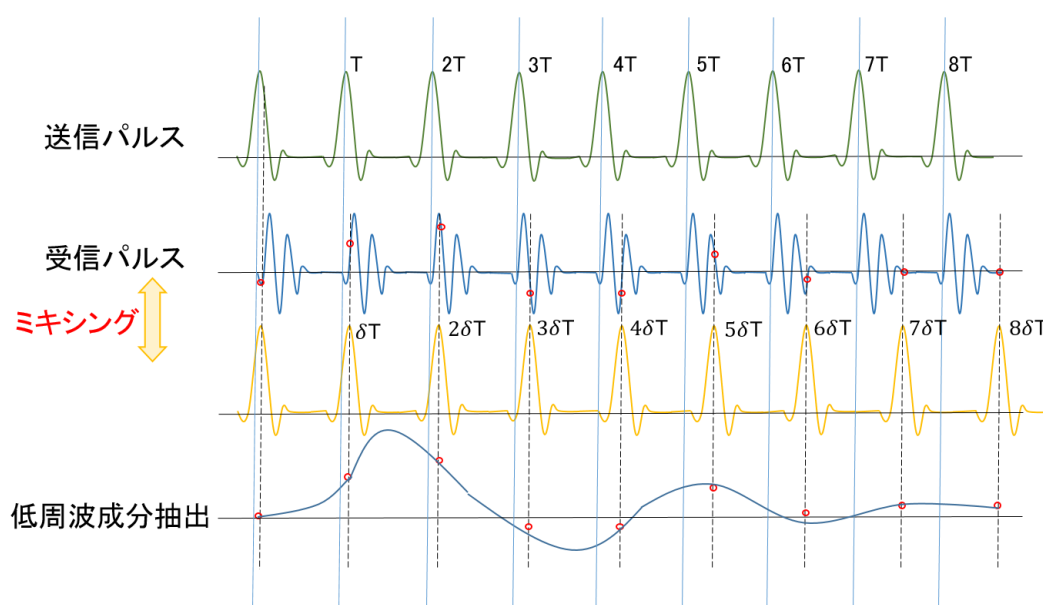


Fig. 4-4 等価サンプリング概念図

4-2-2 ブロックダイアグラム

Fig. 4-5 に加振パルスドップラレーダのブロックダイアグラムを示す。また、本システムによる計測の流れについても以下に示す。

1. クロックジェネレータから送信パルスの繰り返し周波数にあたる 200 MHz の矩形波と、等価サンプリング用のサンプリングパルスの繰り返し周波数に用いる 1 kHz の周波数差を持った 199.999 MHz の矩形波の 2 種類を出力する。このとき、A/D コンバータでのサンプリングに用いる 4 MHz の矩形波とレーダパルスの繰り返し周波数のトリガ信号となる 1 kHz の矩形波も同時に出力する。
2. 生成した 200 MHz と 199.999 MHz の矩形波を 2 つのパルスジェネレータへのトリガ信号として入力し、同一周波数で繰り返す 0.1 ns のパルス幅のベースバンドパルス波を出力する。
3. 200 MHz のパルス波は増幅器で増幅された後、送信側のアンテナからセンシング波として出力される。出力されたパルス波は励磁コイルによって加振周波数 f_0 で加振された計測対象によって反射し、ドップラ効果を受けて受信される。励磁コイルによって磁性体を加振する場合、励磁コイルに印加される周波数の 2 倍の周波数で振動するため、加振周波数を設定するファンクションジェネレータでは目標とする振動周波数の 1/2 の周波数を出力することに留意する。
4. 3. で得られた受信波形と 2. で生成した 199.999 MHz のパルス波をミキサで掛け合わせ、LPF により低周波成分を抽出することで、GHz 帯の受信アンテナへの受信信号を周波数差 1 kHz 分ずつの繰り返し周波数でオーバーサンプリングし、5 ns の繰り返し周期のレーダパルス波形は 1 ms の繰り返し周期のレーダ波形へと引き伸ばされる。
5. 1 ms に引き伸ばされたレーダ信号をクロックジェネレータにて生成したサンプリング周波数で A/D コンバータにて取得する。A/D コンバータではサンプリング周波数を外部クロックで指定するが、入力周波数の 32 分周でサンプリングされる構成のため、クロックジェネレータから 4 MHz を外部クロックとして入力した場合、サンプリング周波数は 125 kHz となる。したがって、1 kHz の繰り返しのレーダ波形は 1 波形 125 ポイントでサンプリングされる。
6. サンプリングされたレーダ波形は例えば 1 秒間で 1000 波形が繰り返されるパルス列となり、この間のレーダ物標が 100 Hz (10 ms 周期) で正弦的に変化する場合、その物標の遅延時間に対応する反射波の複素振幅は 100 Hz を基本周期とする位相変化が見られるはずである。また、このとき、特定遅延時間の応答のドップラスペクトルとして、基本周期 100 Hz の整数倍のスペクトルが現れることになる。

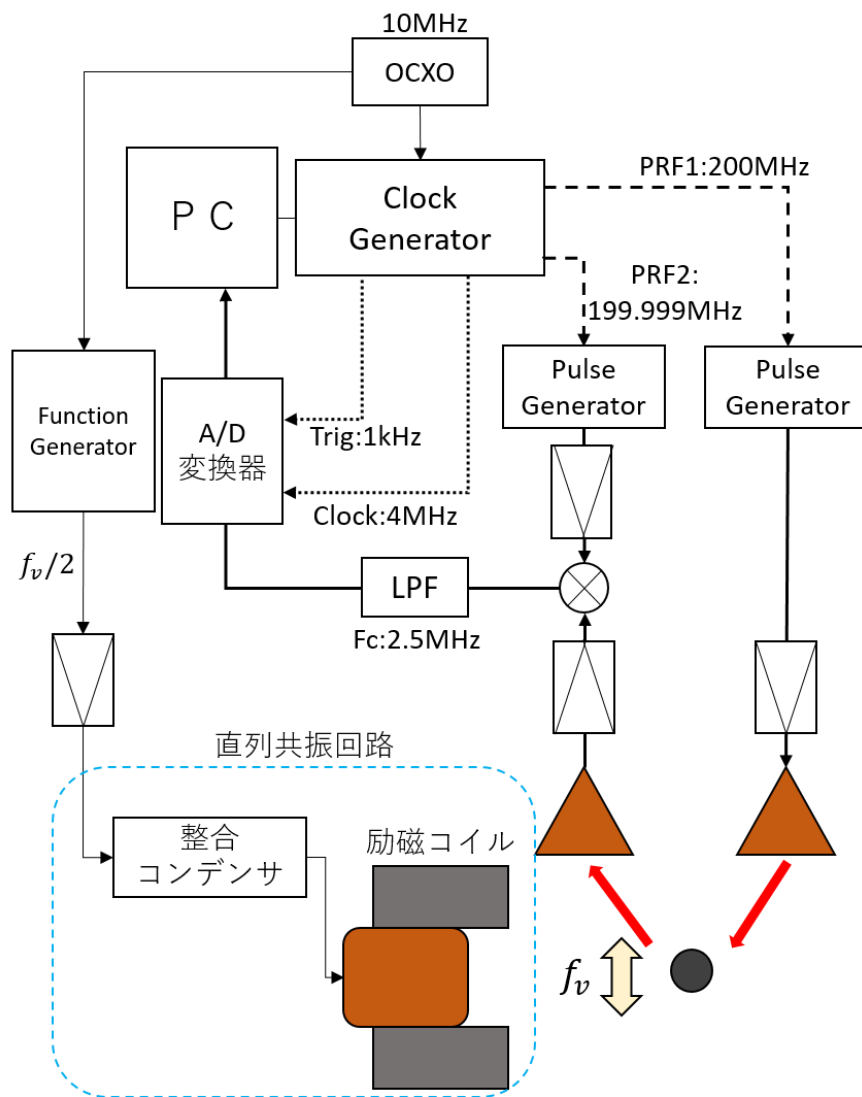


Fig. 4-5 加振インパルスドップラレーダのブロックダイアグラム

4-2-3 計測方法

Table 4-3 に加振パルスレーダシステム使用機器を示す。また、Table 4-4 に加振パルスドップラレーダ計測使用機器を示す。

Table 4-3 加振パルスレーダシステム使用機器

名称	メーカー名	型番
Clock Generator	Silicon labs	Si5340-D-EB
Pulse Generator	Alnair Labs	EPG-210M
OCXO	Oscillo quartz	8788
Power Amplifier 1	Mini-circuit	ZVA-183-s
Power Amplifier 2	Mini-circuit	ZX60-83LN12+
Current Feedback Amplifier	Texas Instrument	THS300 1 EVM

Table 4-4 加振パルスドップラレーダ計測使用機器

名称	メーカー名	型番	設定
Multi-Function Generator	NF 回路設計 ブロック	WF1973	周波数:53Hz 出力電圧:1~3V
AC/DC Power Source	NF 回路設計 ブロック	EC1000SA	AC-EXT
DC Power Supply	GwINSTEK	GPS-4303	出力電圧:24V
XA actuator	SUS	XA-50H-600	
A/D コンバータ	タートル工業	TUSB-0224ADM	外部クロック 外部トリガ

Fig. 4-6 に加振パルスレーダシステムを示す。赤線で囲まれているのがパルスジェネレータである。Fig. 4-1 で示した実験全体図内のリニアアクチュエータを移動させ、供試体の振動変位を移動計測した。移動計測では、再現性向上のためアクチュエータ制御で移動を行った。計測区間 300 mm を 5 mm 間隔、計 61 点の計測とした。また、計測時間、計測間隔共に 1 秒とし、300 mm、61 点を約 2 分で計測する。

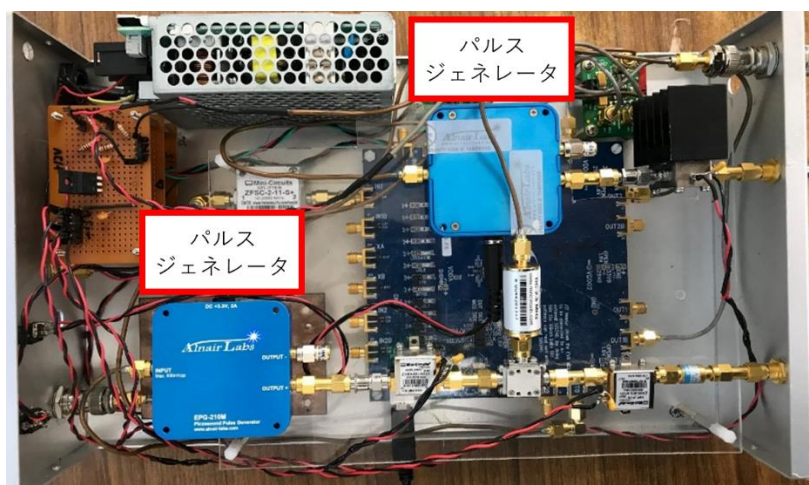


Fig. 4-6 加振パルスレーダシステム

Fig. 4-7 に励磁コイルを示す。励磁コイルとは、強磁性体である電磁鋼板でできた鉄心(以降コアと呼称する)などに励磁巻線を施し、交流電流をコイルに印加することで交番磁界を発生させ、鉄筋などの磁性体を磁気吸引力で加振するコイルを指す。コイルのコアには渦電流損低減のため、断面積 38×60 mm、横幅 205 mm のトロイダル形状の積層電磁鋼板を用いている。周囲に巻いたエナメル線は直径 1.3 mm のものを 750 巻きした。この励磁コイルはリアクタンス L : 173.7 mH、巻線抵抗 r : 4.8Ω であった。



Fig. 4-7 励磁コイル

Fig. 4-8 にボウタイスロットアンテナを示す。計測に用いるアンテナであるボウタイスロットアンテナは 2 枚の銅板とセミリジッドケーブルを用いている。アンテナ給電点間隔を 40 mm とし、コイル下部の足の間に配置した。アンテナ特性への影響やコイルの振動の伝達を低減させることを目的とし、アンテナとコイルの固定治具の間には電磁吸収体を挟んだ。また、Fig. 4-9 に空中におけるアンテナ周波数特性を示す。計測時と同じ設定でキャリブレーションを行い、空中で取得した周波数特性である。共振周波数は空中では 11 GHz 程

度とみられるが、 Q は低く、比較的広帯域である。この特性はコンクリートに近づけることで、コンクリートの比誘電率（約 9）により共振周波数は 1/3 程度に低下する。

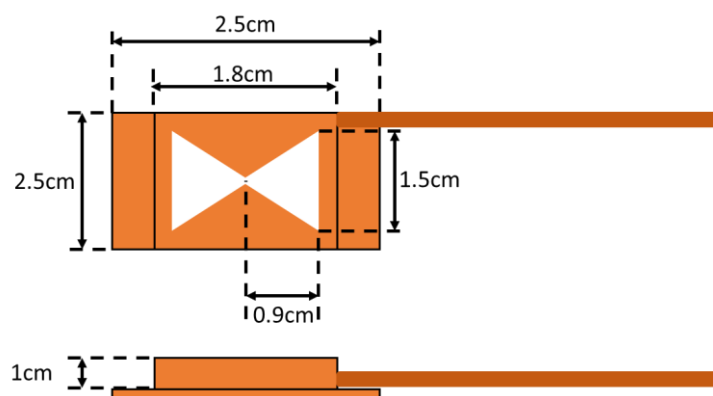


Fig. 4-8 ボウタイスロットアンテナ（上：上面、下：側面）

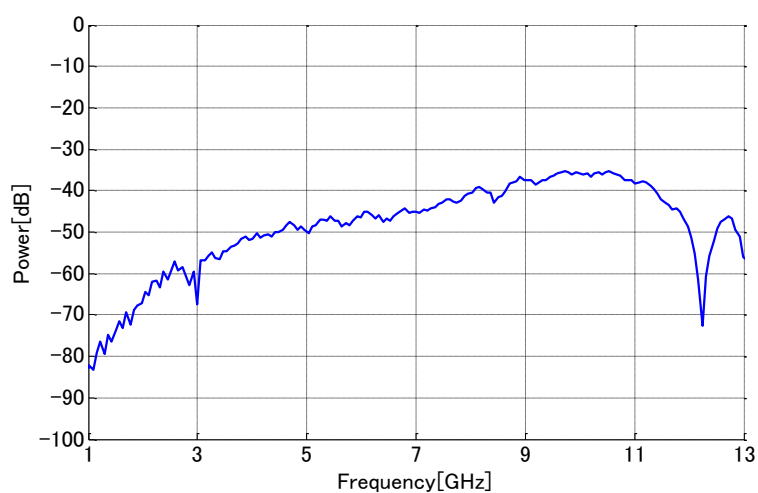


Fig. 4-9 空中においてアンテナを対向させたときの伝達特性

4-3 AE 源位置推定の計測システム概要

本節では、AE 源位置推定のシステムについて述べる。また、電食実験時の AE 波形や使用装置についても述べる。

4-3-1 計測システムの概要

Fig. 4-10 に AE 計測システムを示す。AE 現象に伴い発生した弾性波は固体内を伝播し、固体内部または表面に取り付けた AE センサに到達すると、そこで電気信号すなわち電圧に変換される。この電気信号は微弱であるため、これをプリアンプやメインアンプで増幅を行う。その後、バンドパスフィルタ等を用いて不要な信号の除去を行う。尚、通常、ディスクリミネータは設定した閾値以上の AE 波形を識別し、サンプリング用のトリガ信号を発生することで、AE 発生時のみ AE を計測できる機能を有するが、閾値の設定には試行錯誤が必要であり、本システムでは AE 波形も含めて計測時間中の信号を全て連続サンプリングするため、ディスクリミネータを単に増幅器としてのみ使用している。このシステムが AE センサ毎に 4 セットあり、AD コンバータを用いて 4 チャンネルの AE 波形をサンプリング周波数 1 MHz で PC に記録する。

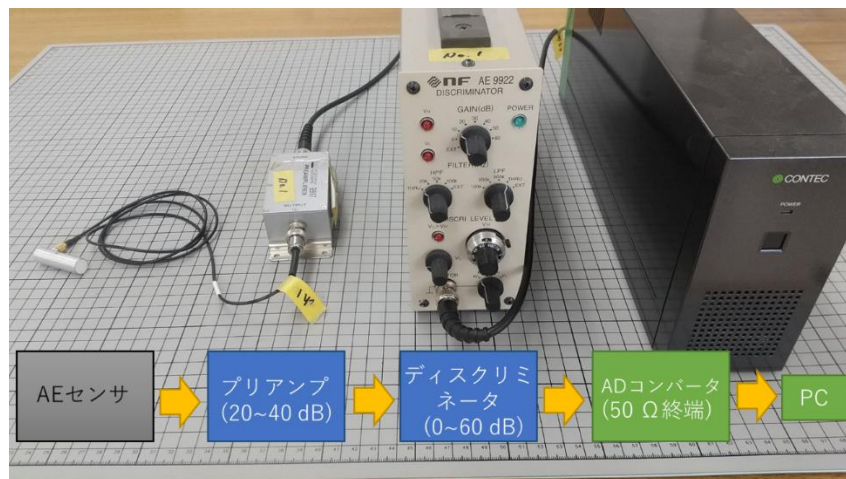


Fig. 4-10 AE 計測システム

1. AE センサ

AE センサは、圧電素子の圧電効果を利用して AE 波を電気信号へと変換している。圧電素子には、AE 波の伝播による微小な歪みを検出するために、変換能力の高い圧電セラミックスが用いられている。一般的に圧電セラミックスの材料としてチタン酸ジルコン酸鉛 ($\text{Pb}(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$) が使用されており、電気出力が大きくかつインピーダンスが低いという特徴も持ち合わせている。

Fig. 4-11 に AE センサ周波数特性を示す。2012 年製の共振型センサ型番号 4664 は接触法による感度測定結果となっている。6266~6268 の 3 チャンネルは絶対感度更校正法を用いているが、特性に大きな差はないという回答を販売元のエヌエフ回路設計ブロック社から頂いているため、実験結果に大きな影響はないと考えられる。

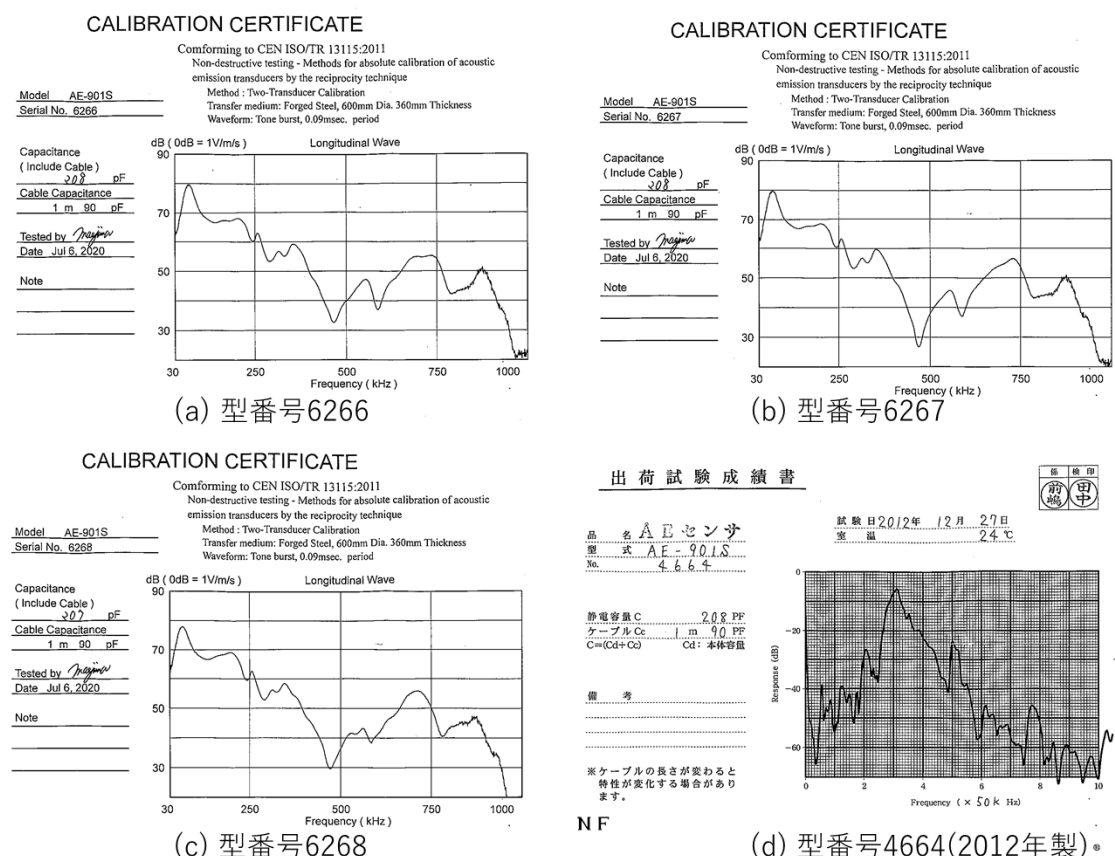


Fig. 4-11 AE センサ周波数特性

2. プリアンプ

プリアンプは、AE 計測システムのノイズレベルを定める機器であるため、重要な要素である。プリアンプの入力インピーダンスは数 kΩ 以上と高く、出力インピーダンスは数 10 Ω オーダーとなっている。これより、AE センサからプリアンプまでの距離を大きく取るとプリアンプの高い入力インピーダンスにより信号電圧が小さくなってしまふ。従って、AE センサから測定機器までの距離が長くなる場合であっても、プリアンプは AE センサから 1 m 以内に設置する必要がある。本研究でも AE センサからプリアンプまで 30 cm のケーブルを使用しているため、このような影響は無視できると考えられる。

このように、プリアンプの役割はインピーダンス変換が主となる。そのため、プリアンプ

の増幅度は 20 dB ~ 40 dB 程度の固定利得で良い。しかし、大きい振幅値の入力信号に対しても、増幅度が飽和しないように、ダイナミックレンジは大きく保つことが必要である。仮に、大きい振幅の入力によって増幅度が飽和した場合、その飽和区間は直線状の出力となり、飽和前後であたかも飽和電圧に相当する最大振幅値を持つ別個の信号が出力されているかのようになる。すると、AE パラメータを解析した際、振幅分布が高振幅域に計数ピークが出現してしまう等の悪影響の原因と生んでしまう。

3. ディスクリミネータ (弁別器)

メインアンプとバンドパスフィルタ及び、閾値の設定と横断時のパルス出力、包絡線検波などを行う電気回路を備えた計測器を AE 計測システムではディスクリミネータ (弁別器) と呼ぶ。ディスクリミネータに内蔵されているメインアンプでは、AE 信号や環境ノイズの大小に対応できるように、40 dB ~ 100 dB のトータルゲインが得られる可変の増幅度を有している。これにより、信号処理に適した電圧値まで増幅を行う。また、バンドパスフィルタは、帯域外減衰度を十分に大きく取ることが必要である。なお、本研究においては、前述のようにディスクリミネータのイベント信号出力機能は使用せず、アンプによる増幅とハイパスフィルタのみを使用している。

4-3-2 ブロックダイアグラム

Fig. 4-12 に AE 計測のブロックダイアグラムを示す。また、本システムによる計測の流れについても以下に示す。

AE 波が受信された際の流れは以下ようになる。

1. コンクリート中を弾性波として伝搬してきた AE は、コンクリート表面に接着させた AE センサにより電気信号に変換される。
2. プリアンプにより 20 dB ~ 40 dB の範囲で増幅を行い、さらにプリアンプ内蔵されたカットオフ周波数 50 kHz のハイパスフィルタによりノイズを除去する。
3. ディスクリミネータに内蔵されているメインアンプ 0 dB ~ 60 dB の範囲で増幅を行い、プリアンプと併せてトータルゲイン 20 dB ~ 100 dB の範囲で増幅を行う。さらに、ディスクリミネータに内蔵されているカットオフ周波数 50 kHz のハイパスフィルタ及びローパスフィルタによりノイズを除去する。プリアンプとディスクリミネータで 2 段の 50 kHz のハイパスフィルタを実装し、加振時に発生するノイズを大きく低減させることを目的としている。
4. 50 Ω 終端の AD コンバータを使用して PC に AE 波形の取り込みを行う。

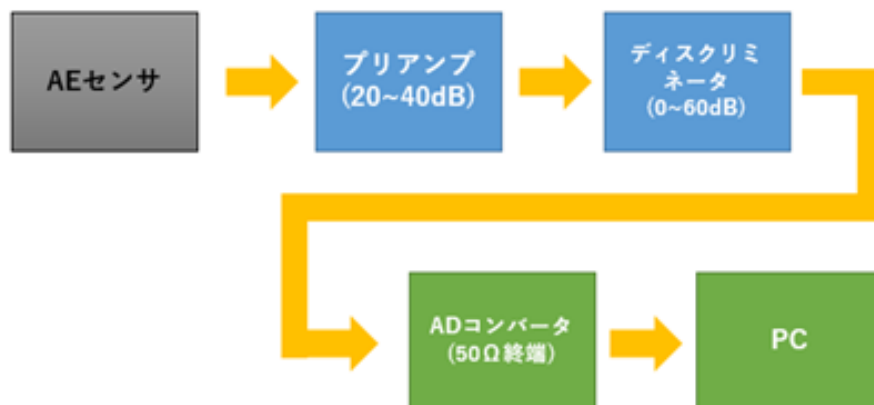


Fig. 4-12 AE 計測のブロックダイアグラム

4-3-3 計測方法

Fig. 4-13 に供試体の概要とセンサ配置を示す。また、Table 4-5 に AE 計測使用機器を示す。かぶり 42 mm で供試体の断面の中央から D16 の鉄筋が埋設されている。そのため、鉄筋を囲う様にセンサ 1・2 を Y=100 mm 面、センサ 3・4 を Y=0 mm 面で対角線上に AE センサを配置した。一般に、弾性波が鉄筋を通過する際にはコンクリートと速度が同一とみなせないため厳密な位置推定は困難である。そのため、腐食生成物の発生が予測される鉄筋付近を取り囲むように広範囲にセンサを配置し、AE の発生分布の時間的、空間的変化の系統的な変化に着目する

本研究では、印加電流 100 mA で電食し、200 mA 毎に鉄筋の振動変位を計測するため、受信した AE を 2 時間毎に計 50 時間(積算電流 5.0 A-h)記録した。AE センサは共振型を使用し、プリアンプで 20 dB、ディスクリミネータで 20 dB 増幅させ、トータルゲイン 40 dB 増幅させた。

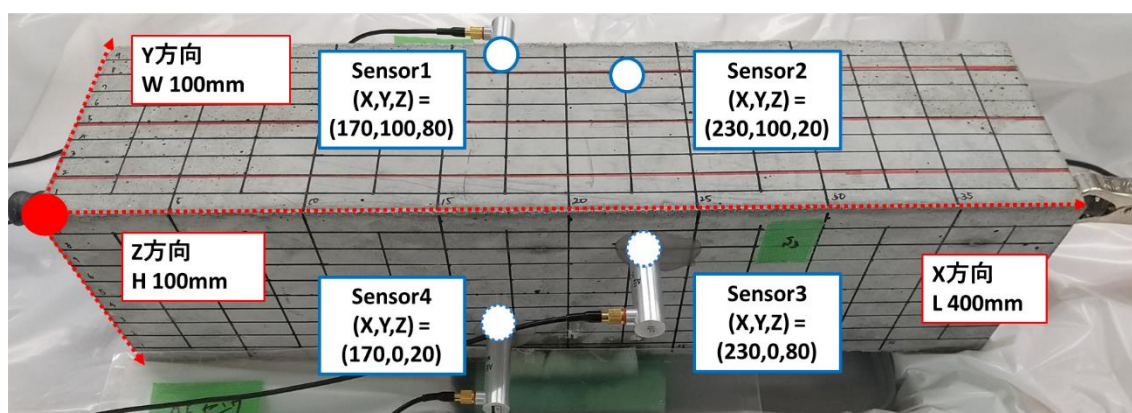


Fig. 4-13 供試体の概要とセンサ配置

Table 4-5 AE 計測使用機器

名称	メーカー名	型番	定格
ADC	CONTEC	A1-1204Z-PCI	Input Range : ± 1.25 V Resolution : 12 bit Input Impedance : $50\ \Omega / 1\ \text{M}\Omega$ サンプリング周波数 : 1.25MHz 4 チャンネル
AE Sensor	エヌエフ回路設計ブロック	AE-901S	Resonance Frequency : 70 kHz 4 個
Preamp	エヌエフ回路設計ブロック	9917	Gain : 20~40 dB HPF : 50 kHz (24 dB/oct) 4 台
Discriminator	エヌエフ回路設計ブロック	AE9922	Gain : 0~60 dB HPF/LPF : 50 kHz/THRU or 500 kHz Analog Output : RF/ENV/EVENT 4 台
PC			SSD (M. 2 NVMe : 5 GB)

第 5 章 実験結果

実験結果を電食実験、加振レーダ法、AE 計測の順で各節にて示す。

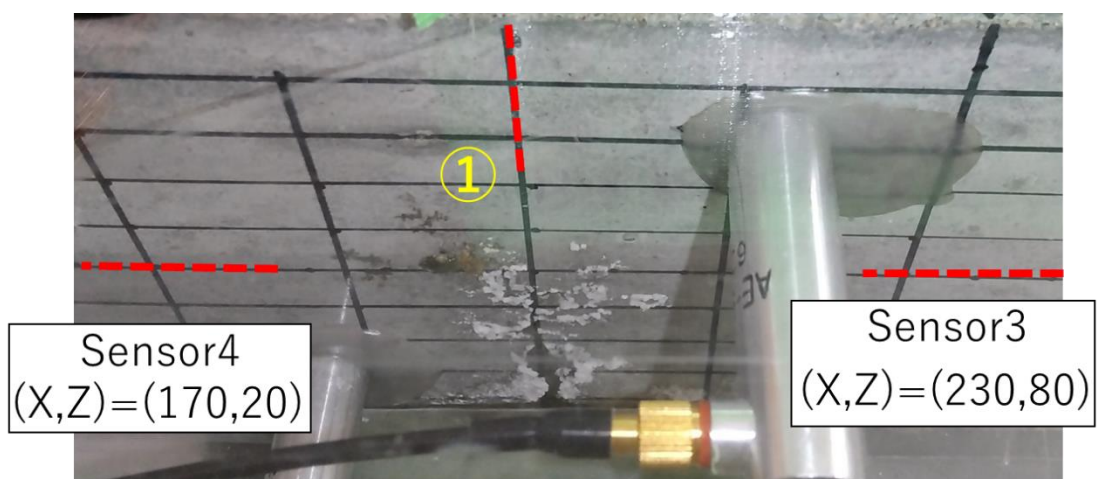
5-1 供試体の外観の調査

Table 5-1 に発生した錆汁の情報を示す。また、Fig. 5-1 に錆汁発生箇所の様子を示す。Fig. 5-1(a)のように 2.6 A-h に $Y=0$ 面の $(X,Z)=(190\text{ mm}, 50\text{ mm})$ で初めて表面ひび割れと錆汁漏出が確認され、その後、錆汁の量が増加した。さらに、3.2、3.5 A-h に別の場所でも錆汁漏出が確認された。Fig. 5-1(b)は 4.3 A-h での $Y=0$ 面の様子であるが、積算電流の増加とともに複数個所で錆汁が漏出していることがわかる。Fig. 5-2 にひび割れ発生箇所の様子を示す。 $Z=100\text{ mm}$ (底面)のスポンジ接触部にあたる中央部に鉄筋と直行する方向に腐食ひび割れが現れており、30 mm 内部までひび割れが伸びていた。

積算電流 2.6 A-h 時の写真にて、表面に白い結晶が付着しているが、これは吸水させている食塩水、もしくはコンクリート内部のカルシウムが供試体の側面($Y=0\sim 50\text{ mm}$)に析出しているものである。内部に比べて表面の方が食塩水の浸透がしやすいことが要因だと思われる。

Table 5-1 発生した錆汁の情報

	積算電流[A・h]	X[mm]	Y[mm]	Z[mm]
①	2.6	190	0	50
②	3.2	180	0	50
③	3.5	200	0	70
④	3.8	170~200	100	30~50
⑤	4.3	170	0	50



(a) 積算電流 2.6A-h センサ 3・4 側 (Y=0 mm)



(b) 積算電流 4.3A-h センサ 3・4 側 (Y=0 mm)

Fig. 5-1 錆汁発生箇所の様子

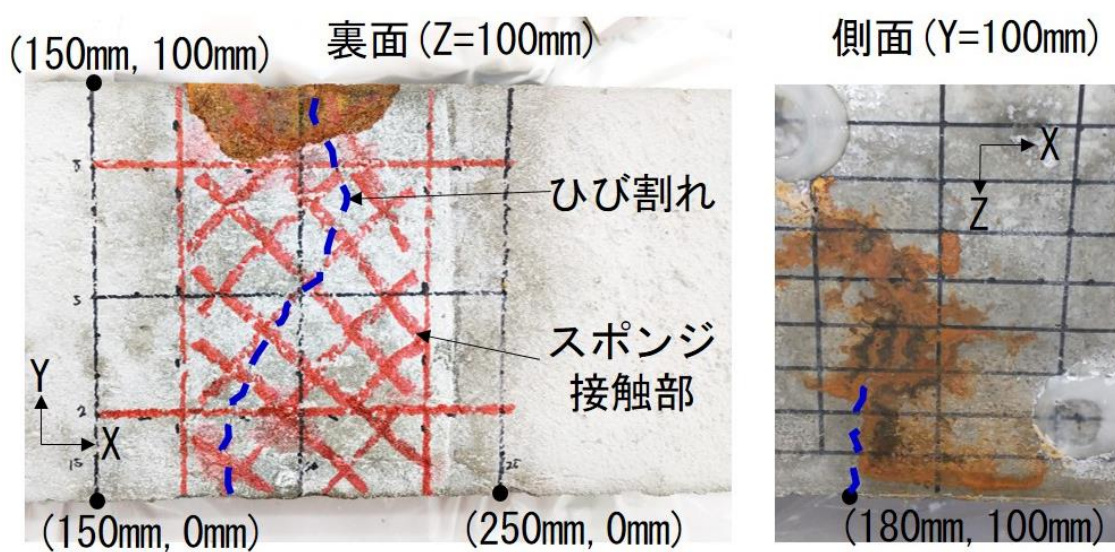
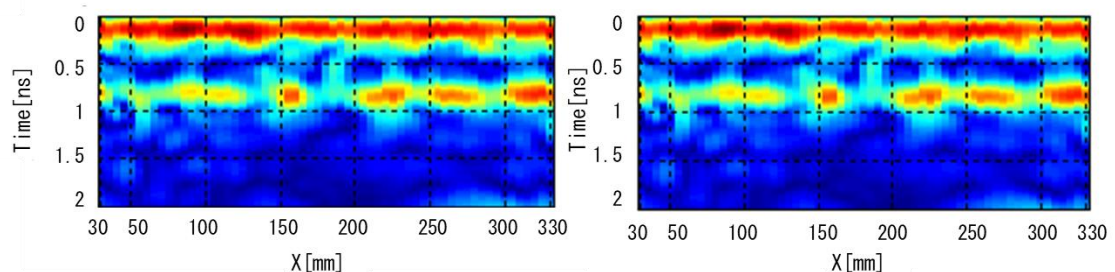


Fig. 5-2 ひび割れ発生箇所の様子

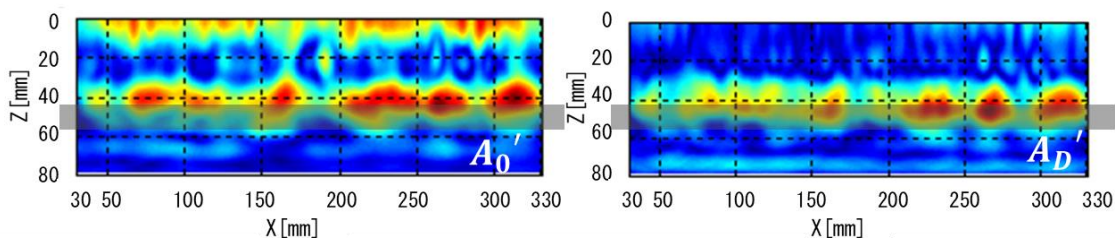
5-2 鉄筋振動変位の積算電流依存性

Fig. 5-3 にレーダプロファイルとイメージング例(積算電流 3.0 A-h)を示す。レーダプロファイル、イメージング結果共に、左側が無変調成分、右側がドップラ成分となっている。Fig. 5-3(a)のレーダプロファイルにおいて、0.8 ns 付近にみられる反射波はかぶり 42 mm の鉄筋からの反射波と考えられる。ここで、モルタルなどでは均一な反射振幅となるが、コンクリートでは粗骨材の影響により振幅が変動することは実験的に確認している。一方、0.2 ns 付近の波はアンテナ間を直接伝わる直達波であり、無変調成分では強く計測される。

Fig. 5-3(b)の供試体断面のイメージングより、無変調成分、ドップラ成分について式(2-12)、(2-13)より得られる供試体断面のイメージング結果を示す。なお、鉄筋の位置をグレーで示しているが、鉄筋イメージのピークが鉄筋上端の $Z=42$ mm になるように比誘電率を 7.5 とした。一般に RC 供試体であっても比誘電率は深くなるにつれ増加し、横方向にも分布をもつ可能性があるが、計測対象がスキャン方向に平行な鉄筋ではイメージング画像も概ね鉄筋に平行な反射プロファイルになるため、比誘電率に空間分布があったとしても鉄筋の深さが変わって見える程度の影響となる場合が多い。さらに、この影響は無変調成分と同じ伝搬パスを通過するドップラ成分のイメージングにも同様の変動を与えるが、式(2-14)では両者の振幅比を取るため、比誘電率分布によるイメージの乱れや誘電率分布などによる振幅変動の影響は振動変位の評価によってもキャンセルされる。



(a) レーダプロファイル



(b) イメージング結果

Fig. 5-3 レーダプロファイルとイメージング例(積算電流 3.0 A-h)

Fig. 5-4 にイメージングベースの振動変位(積算電流 3.0 A-h)を示す。Fig. 5-3(b)のイメージング結果より、式(2-14)を用いて実際に鉄筋振動変位を計算したものである。

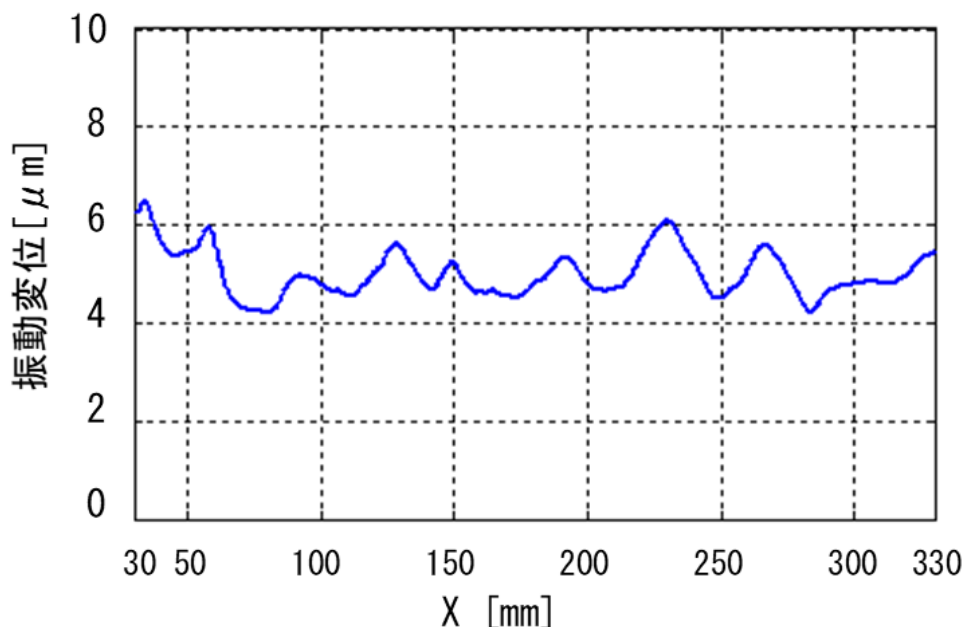


Fig. 5-4 イメージングベースの振動変位(積算電流 3.0A-h)

同様に、Fig. 5-5 に鉄筋振動変位 $\delta(X, 42 \text{ mm})$ の空間分布を示す。Z=42 mm における両成分の振幅を抽出し、鉄筋振動変位の空間分布 $\delta(X, 42 \text{ mm})$ を求めた結果の一例である。場所により、1.5 倍程度の変動があるものの、積算電流 3.0 A-h 程度では鉄筋振動変位は概ね 4~6 μm で分布した結果が得られている。なお、計測の始点と終点付近は励磁コイルのコアが鉄筋端部よりも外側に存在し、適切な加振が行われていない可能性が高く、計測結果の両端 50 mm 区間の値は正しい結果にはならない。

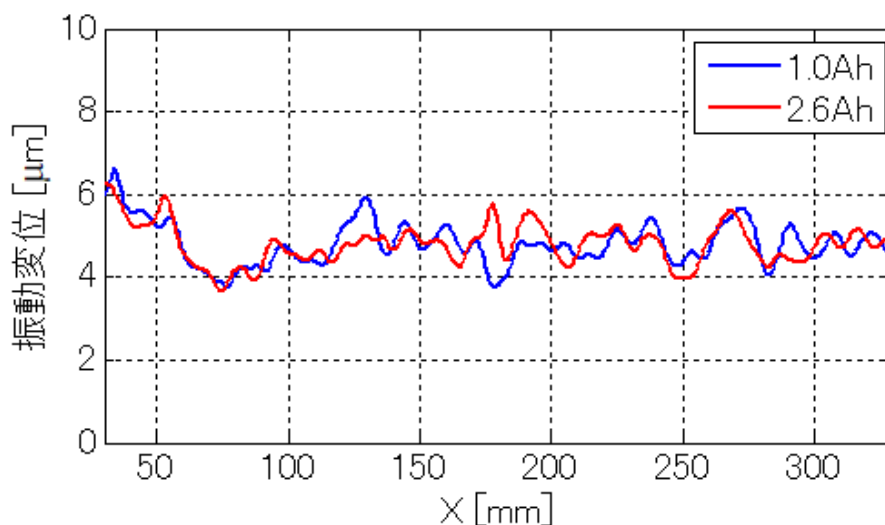


Fig. 5-5 鉄筋振動変位 $\delta(X, 42\text{mm})$ の空間分布

Fig. 5-6 に鉄筋振動変位分布の積算電流依存性を示す。Fig. 5-3 と Fig. 5-4 で行ったように各積算電流 0.2 A-h 毎の鉄筋振動変位を求め、両者の依存性を調べる。Fig. 5-5 で示したように 3.0 A-h までは振動変位が 4~5 μm 程度で明確な増加はみられなかった。一方、積算電流 2.6 A-h 時に供試体表面から確認された錆汁はセンサ 3、4 側の(X,Y,Z) = (190,0,50)mm 地点であるが、3.0 A-h 以降は X=190 mm、220 mm 辺りから少しずつ振動変位が増加していることがわかる。吸水スポンジは供試体中央に配置しており、積算電流の増加とともに振動変位が増加する領域が、200 mm から両端に広がるように分布していく様子がわかる。また、4.0 A-h 以降は振動変位が急増し、190 mm、220 mm 付近の振動変位は健全状態の 2 倍程度の 8 μm まで増加している。

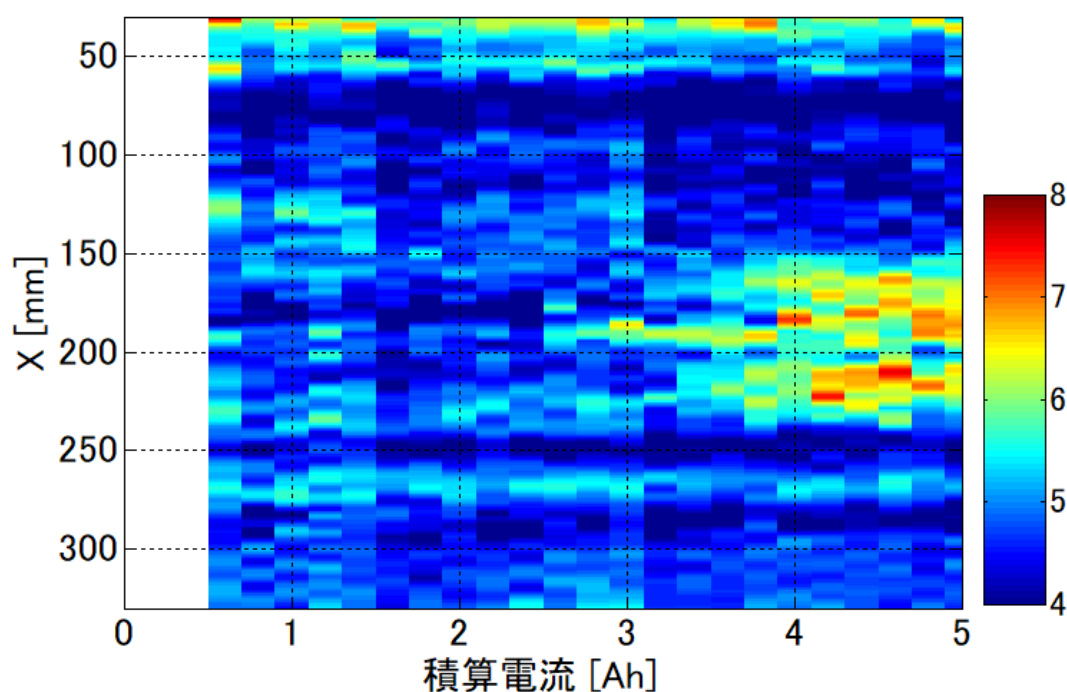


Fig. 5-6 加振レーダ計測による鉄筋直上の振動変位分布の積算電流依存性

5-3 AE 計測結果

Fig. 5-7 に AE 波形例を示す。発生した AE ノイズレベルに対し、各チャンネルのノイズ実効値から算出した閾値を設け、4 チャンネル全てが 3 ms 以内に閾値を超えた場合を 1 つの AE としてカウントした。AE 波形は最も早い到達時刻の 2 ms 前から 10 ms 間を抽出し、AE が発生してから収束するまで全 4 ch の波形を議論する。

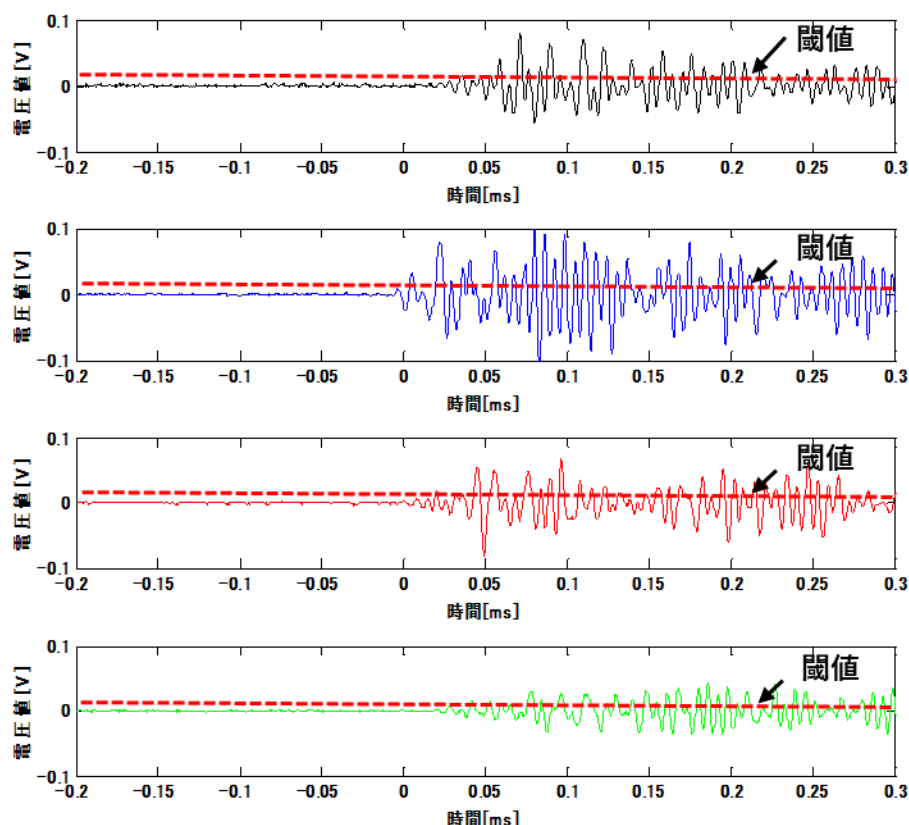


Fig. 5-7 AE 波形例

Fig. 5-8 に AE ヒット数の積算電流依存性を示す。AE 検出の閾値をノイズレベルの 5 倍として抽出した AE 信号のヒット数の積算電流依存性である。赤線が推定可能な AE ヒット数の累計である。電食試験を終了した積算電流 5.0 A-h の時点で抽出された AE は 4234 個であり、このうち位置推定可能な AE は 1207 個とおおよそ 3 割程度だった。また、全 AE から求めた 10 mA-h 毎の瞬時的なヒット数を青線、位置推定可能な AE の瞬時的なヒット数を緑線でそれぞれ示す。AE の発生は 1.9~2.6 A-h に集中しており、以降は大きく減少している。これは、錆汁が表面に確認されたタイミングと重なっており、腐食生成物の膨張により

発生した内部の膨張圧が解放され、膨張圧の増加が起きにくくなり、カイザー効果により AE の発生が減少したのではないかと考えられる。

Fig. 5-9 に AE 源の三次元位置推定結果を示す。AE が集中して発生している 1.9~2.6 A-h では、X 方向では 150~250 mm 間で均等に発生しているのに対し、Y 方向では 20~70 mm で集中して発生し、Z 方向では 40~60 mm で集中して発生している。錆汁が確認された後は、AE の発生に目立った偏りはみられない。

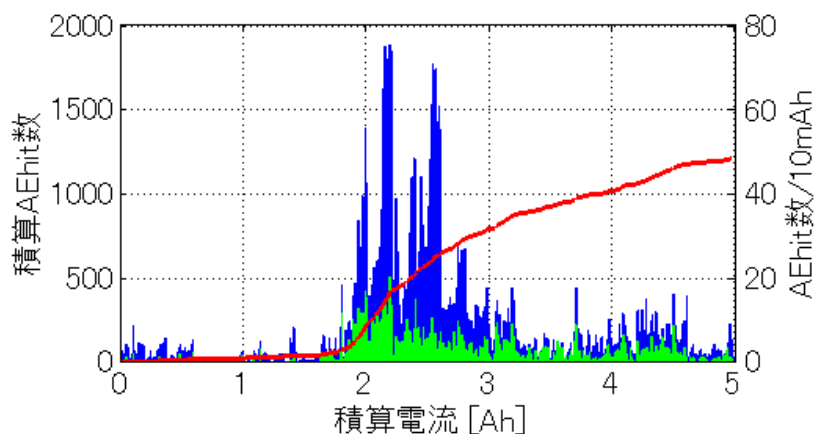


Fig. 5-8 AE ヒット数の積算電流依存性

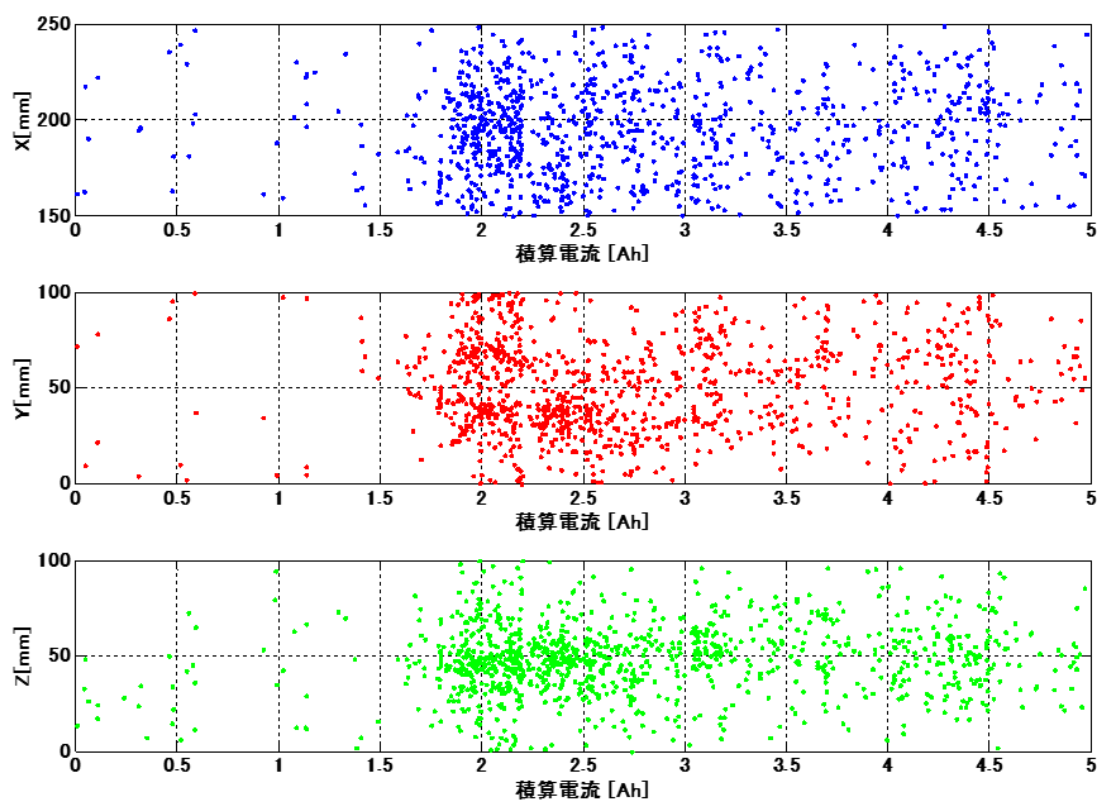


Fig. 5-9 AE 源の三次元位置推定結果

Fig. 5-10 に AE 源の三次元位置推定頻度を示す。Fig. 5-9 では発生した AE のおよその発生傾向しかわからないため、発生頻度でまとめる。位置推定が可能だった 1207 個の AE 源の空間的なヒストグラムの成分毎の積算電流依存性である。AE 源の時空間分布について、空間方向 1 mm、積算電流方向 0.1 mA-h のビンで 4 次元ヒストグラムを作成し、各 X、Y、Z 成分毎に積算電流との二次元コンターで表示した。したがって、暖色ほどビン内で発生個数が多いことを表わしている。集中して発生している積算電流 1.9~2.6 A-h を方向毎に比較する。X 方向は 2.2 A-h までは 180~220 mm まで均一に分布している。センサ 3・4 側の面の錆汁の発生タイミングである 2.6 A-h まで AE の分布が Y<50 mm 側に偏るなど、妥当な結果を示していると考えられる。

Fig. 5-6 と Fig. 5-10 を比較すると、AE が多数発生したタイミングでは鉄筋振動変位の明瞭な増加は見られないことがわかる。一方、AE の発生頻度が少なくなった 3.0 A-h から徐々に振動変位が増加しており、膨張圧の解放により鉄筋が動きやすくなったため振動変位が増加した可能性が考えられる。

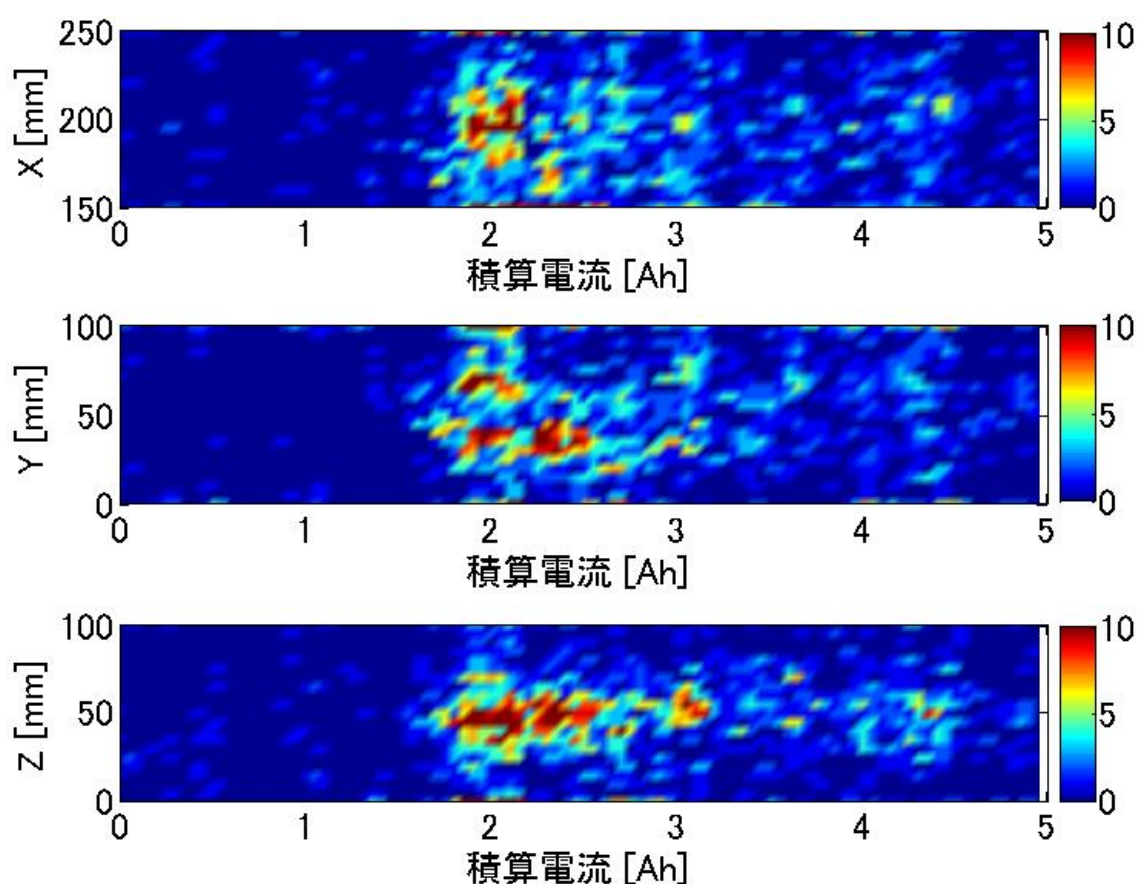


Fig. 5-10 AE 源の三次元位置推定頻度

第6章 考察

鉄筋腐食時の振動変位増加の局所増加の要因の一つとして挙げている微小ひび割れに注目し、内部ひび割れ進展に伴う AE 発生挙動と鉄筋振動変位の同時モニタリングを行った。AE が集中して発生し微小ひび割れによる剛性低下と鉄筋振動変位のタイミングが一致しなかったかについて考察する。

Fig. 6-1 各センサの最大振幅値を示す。位置推定が可能だった AE の最大振幅値を各センサ毎にまとめる。積算電流 1.6 A-h までは発生していた AE が少なく、位置推定可能だった AE も少なかったため、いびつになっている。また、センサ 1・2 側に比べてセンサ 3・4 側の最大振幅値が大きい要因としては、Fig. 5-10 の AE 源の三次元位置推定頻度で示したようにセンサ 3・4 側で AE が発生していたため、AE が受かりやすかったことが考えられる。

AE が集中して発生していた積算電流 1.9-2.6 A-h の最大振幅値が大きい AE が多いが、錆汁が確認されたタイミング以降も同程度の大きさの AE も多くみられる。Fig. 5-8 の AE ヒット数の積算電流依存性でも同様に、瞬時的な AE ヒット数に対して位置推定可能な AE が多くみられる。

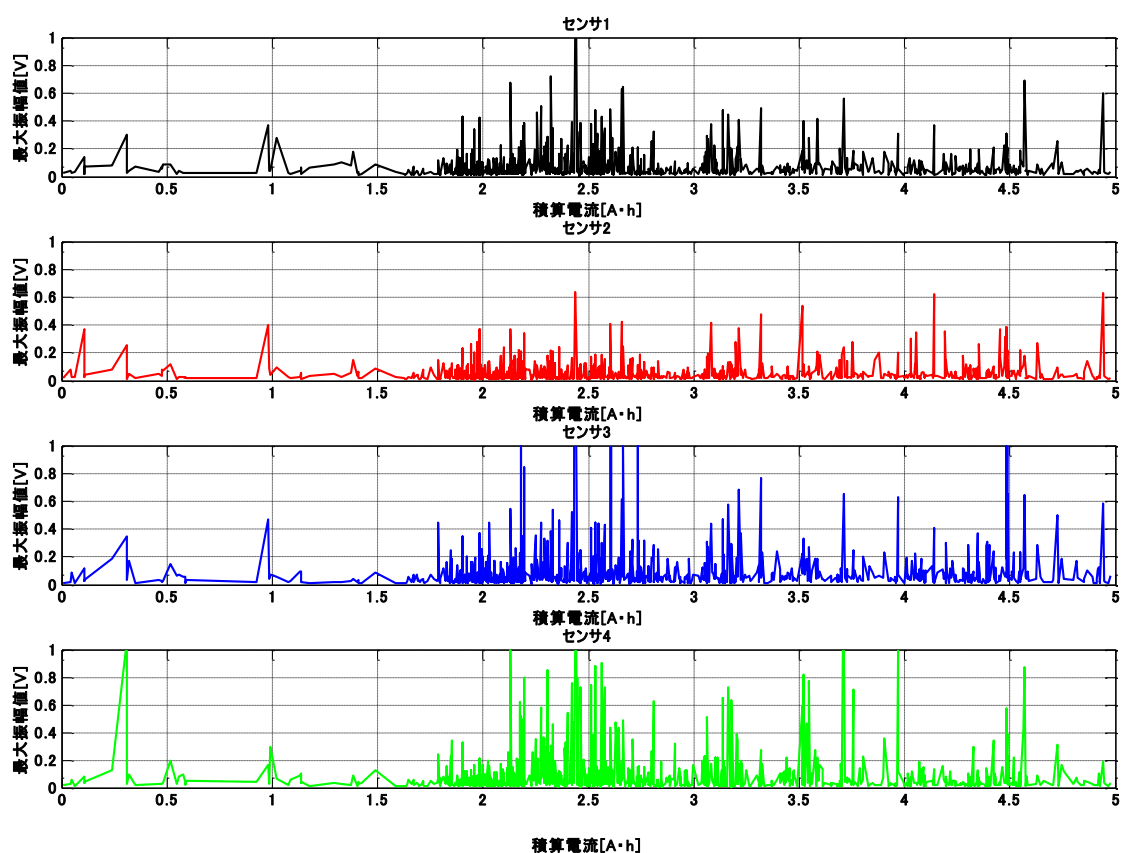


Fig. 6-1 各センサの最大振幅値

Fig. 6-2、6-3 にセンサ 1・2 側のひび割れ識別、センサ 3・4 側のひび割れ識別を示す。

3-4 項にて述べたひび割れ識別についてセンサ 1・2 側、センサ 3・4 側に分けて「せん断型ひび割れ」、「引張型ひび割れ」の識別を行った。センサ 1・2 側は錆汁が確認された積算電流 2.6 A-h 前後で大きな変化はみられなかった。センサ 3・4 側では錆汁が確認されるまでは RA 値が大きいせん断型の AE が多くみられるのに対して、鉄筋腐食の進行が進むと引張型の割合が増加することが分かった。

錆汁が確認された積算電流 2.6 A-h まで AE が集中していることにより剛性が低下し、鉄筋振動変位が増加するのではないかと考えた。しかし、振幅の小さい AE が大量に発生し、供試体側面まで錆汁が到達することで膨張圧が徐々に解放されたことにより、鉄筋が動きやすくなったため振動変位が増加した可能性が考えられる。

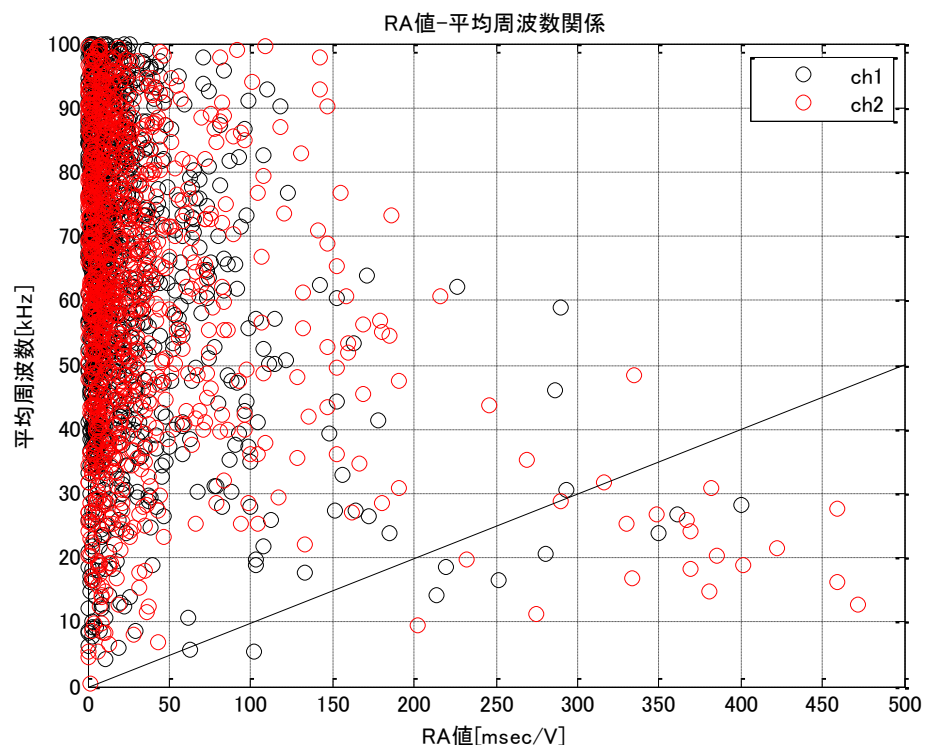
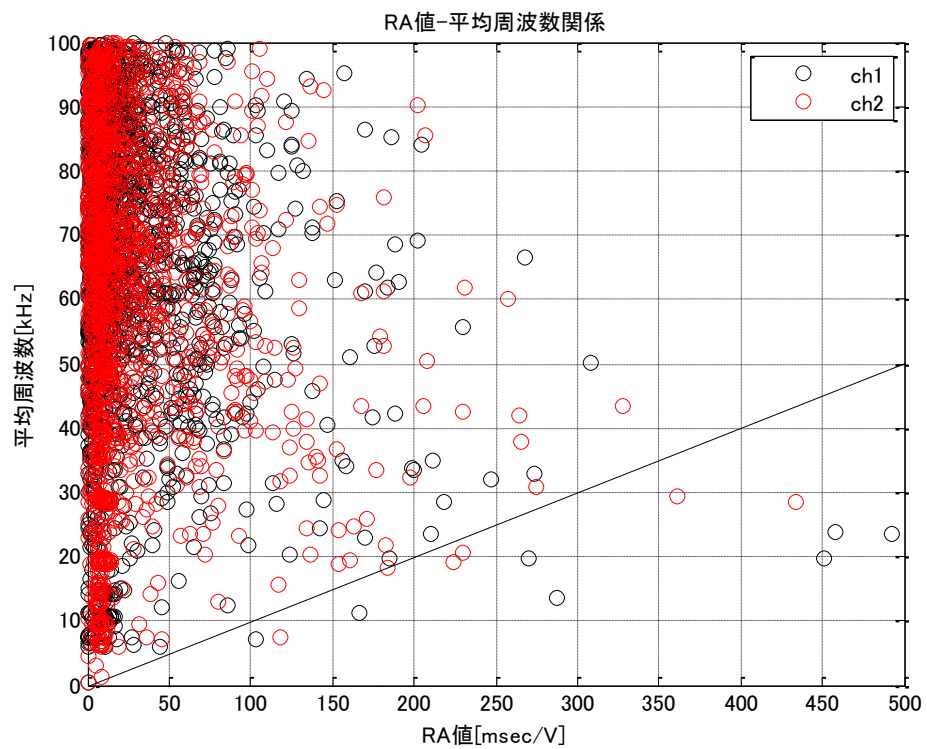
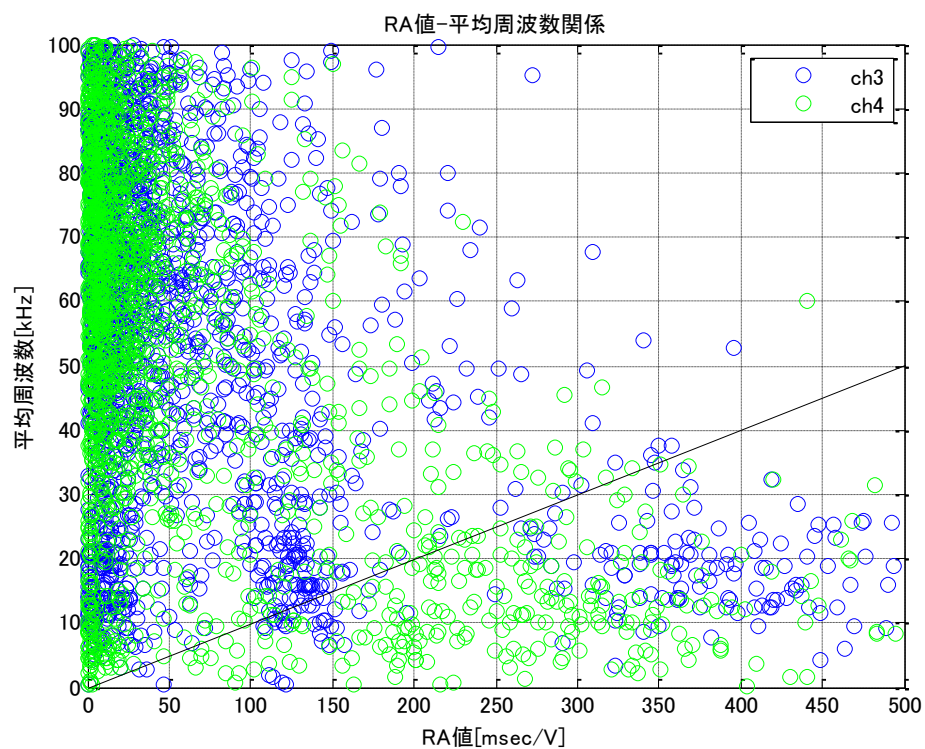
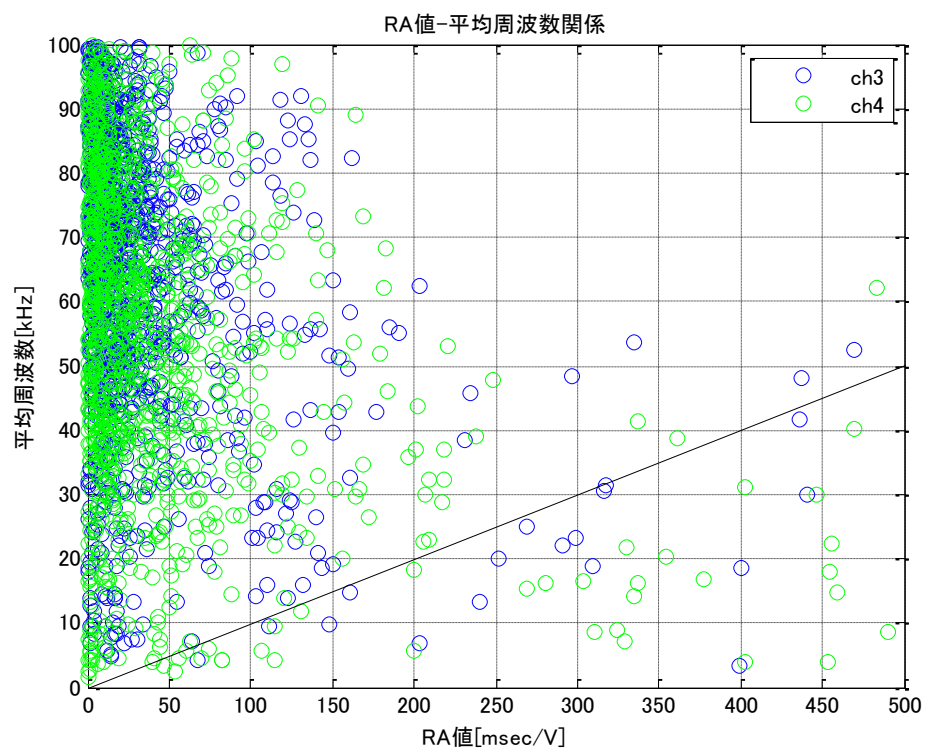


Fig. 6-2 センサ1・2側のひび割れ識別



(a) 積算電流 0～2.6 A-h



(b) 積算電流 2.6～5.0 A-h

Fig. 6-3 センサ3・4側のひび割れ識別

第 7 章 結論

7-1 結論

本研究では、鉄筋腐食時の振動変位増加の局所増加の要因の一つとして挙げている微小ひび割れに注目する。RC 供試体の電食実験により鉄筋を腐食させ、内部ひび割れ進展に伴う AE 発生挙動と鉄筋振動変位の同時モニタリングを行った。

第 1 章では序論であり、我々が提案している加振レーダ法によって、電食実験により振動変位が増加することに触れ、その増加機序についての仮説について述べた。

第 2 章では、加振レーダ法、マイグレーションの原理について述べた。

第 3 章では、古くから用いられている AE 法の原理について述べた。また、複数の AE センサを用いた AE 発生源位置推定方法や AIC による AE 信号到達時間検出、AE のパラメータ算出方法について述べた。

第 4 章では、電食実験の方法と腐食生成物に述べた。また、加振パルスドップラレーダ・AE 発生源位置推定の計測システムについて、システム概要・ブロックダイアグラム・計測方法について述べた。

第 5 章では、4 章で述べた電食実験について加振パルスドップラレーダ・AE 発生源位置推定の計測システムによる計測結果を述べた。鉄筋振動変位の空間分布とひび割れの進展の際に AE の時間的空間分布をモニタリングしたことより、以下のことが分かった。

- ・内部ひび割れ進展に伴い鉄筋周囲に AE 源が現れる。
- ・表面ひび割れ発生前に AE の発生が活発になるが、鉄筋振動変位に増加はみられない。
- ・表面ひび割れ発生後、AE の発生頻度が低下し、それ以降で鉄筋振動変位が増加し始める。

第 6 章では、AE の最大振幅値やひび割れ識別を行った。錆汁が確認される前と後で発生している AE の傾向が異なる可能性があることにより、鉄筋周囲の微小ひび割れが振動変位増加に寄与しないことを示唆した。

実験結果として、振動変位増加時の AE は鉄筋周囲ではなく比較的広範囲に散発的に発生しており、鉄筋周囲の微小ひび割れ等が振動変位の増加に寄与していないということが確認された。これは第 1 章の仮説①の可能性を棄却するに十分な根拠であると考えており、鉄筋振動変位の増加メカニズムは二つに絞られたといえる。

7-2 今後の予定

本研究では、鉄筋振動変位の局所増加の要因の 1 つとして挙げていた腐食生成物の体積膨張によって生じるコンクリート内部の微小ひび割れによる剛性低下は鉄筋振動変位の増加に寄与しないことが確認された。今後は、打設時に鉄筋に薄膜を巻き付け、付着力を低下させた供試体について、振動変位の評価を行うことで、仮説②の付着力の影響を評価することや、黒錆と同様の強磁性を有する、磁性流体や Fe_3O_4 粉末等を用いて、腐食生成物中の黒錆を模擬した供試体を用いて、振動変位計測を行うことにより、仮説③の妥当性検証をする必要がある。

参考文献

- 1) 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, 2018.7
- 2) コンクリート構造物の非破壊検査 魚本健人他 2 名著 小林一輔編集 森北出版株式会社発行 1990 年 5 月 22 日
- 3) アコースティック・エミッションの理論と実際 -非破壊検査におけるフラクタル評価法- 仲佐博裕著 株式会社地人書館発行 1994 年 10 月 30 日発行
- 4) 西山航平、渡邊健、福富隼人、橋本親典、石丸啓輔、“超音波法及び AE 法による鉄筋腐食に起因するひび割れの評価”、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、Vol.18, pp. 113-118, (2018.10)

研究業績

口頭発表

岡田矩幸、久保田遼平、三輪空司、“加振レーダ法における鉄筋腐食時の振動変位増加機序に関する AE 解析”、第 38 回センシングフォーラム、2021 年 10 月 1 日、大阪電気通信大学(オンライン開催)

・査読付き論文

三輪空司、岡田矩幸、“鉄筋腐食時の加振レーダ法による鉄筋振動変位計測と AE 法による内部ひび割れ進展の同時モニタリング”、コンクリート工学年次論文集, Vol 44, pp. 1252-1257、2022 年

謝辞

本論文は、筆者が群馬大学大学院 理工学府 理工学専攻 電子情報・数理教育プログラム 情報通信分野第一研究室に在籍中に実施した研究成果をとりまとめたものであります。

本研究を行うにあたり基礎から応用にわたる丁寧なご指導、ご協力を賜りました群馬大学大学院理工学府電子情報部門、三輪 空司 教授に心より感謝申し上げます。

本研究をまとめるにあたり、群馬大学大学院理工学府電子情報部門、本島 邦行 教授、弓仲 康史 教授から懇切丁寧なご指導、ご協力を賜りました。深く感謝申し上げます。

本研究を進める上で、供試体の打設にご協力いただきました群馬大学理工学府環境創生理工学部門、小澤 満津雄 教授に心より感謝申し上げます。

本論文は、多くの方々のご理解、ご指導、ご協力のもと遂行されたものであります。ここで改めて深く感謝の意を表し、本論文の謝辞といたします。