

論文 電磁パルスにより加振したコンクリート内部鉄筋の振動特性に関する基礎研究

宗像 晃太郎^{*1}・鎌田 敏郎^{*2}・内田 慎哉^{*3}・森 和也^{*4}

要旨：本研究では、コンクリート表面に設置した励磁コイルに電流を流すことにより磁場を発生させ、この磁場により内部の鉄筋を振動させ、コンクリートへ伝播した弾性波をコンクリート表面に設置したセンサにより受振する手法を用いて、鉄筋径、かぶり、はく離厚さあるいははく離長さなどに起因する鉄筋の振動特性の違いについて検討した。その結果、鉄筋径やかぶりによらず、はく離厚さやはく離長さとコンクリート表面で得られた受振波形の最大振幅値とは良い相関関係があることが明らかとなった。

キーワード：非破壊検査、電磁パルス、弾性波、振動特性、最大振幅値、はく離、鉄筋

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の調査においては、コンクリート内部鉄筋の位置、かぶりやコンクリートと鉄筋とのはく離状況を的確に評価することが重要である。しかもその評価手法としては、構造物に対して極力非破壊であることが望ましい。鉄筋の位置やかぶりについては、現状では、電磁誘導法や電磁波レーダー法により推定が可能である。これに対して、コンクリートと鉄筋とのはく離状況の把握、それもコンクリート表面に変状が現れる前の初期段階に、コンクリート表面から非破壊によりの確に把握する手法は確立されていないのが現状である。

このような背景に対して、高鍋ら¹⁾は電磁パルスによりコンクリート表面から遠隔で鉄筋を振動させ、この振動により生じた弾性波をコンクリート表面で捉える手法を用いて、コンクリートのはく離および鉄筋位置の推定に関する研究を行っている。この研究では、コンクリート内部鉄筋に振動を付与できる点についてはそのデータが示されているものの、鉄筋のはく離程度の差違とコンクリート表面で受振された弾性

波との関連についての詳細な検討は行われていない。

そこで本研究では、コンクリート表面に設置した励磁コイルに電流を流すことにより磁場を発生させ、この磁場により内部の鉄筋を振動させ、コンクリートへ伝播した弾性波をコンクリート表面に設置したセンサにより受振する手法を用いて、内部鉄筋の状態に起因する鉄筋の振動特性について把握した。実験では、内部鉄筋の直径、かぶり、はく離厚さおよびはく離長さにバリエーションを設けた鉄筋コンクリート供試体を用いて、鉄筋端部あるいはコンクリート表面で受振された弾性波の周波数スペクトルおよび最大振幅値との関係を調べた。

2. コンクリート内部鉄筋の振動特性の評価原理

コンクリート内部の鉄筋を加振するため、写真-1に示す励磁コイルを用いた。この励磁コイルにパルス状の電流を流し、コイル周辺に磁場を発生させる。この磁場内に鉄筋が存在すると、鉄筋に起電流が流れて新たな磁界が生じる。鉄筋による磁界とコイルによる磁界との電磁相互

*1 大阪大学 工学部地球総合工学科 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科 産業創造工学専攻教授 工博 (正会員)

作用によって電磁力が鉄筋に働き、鉄筋が振動する。この振動が鉄筋およびコンクリートへ弾性波として伝播する。そのため、伝播した弾性波には、鉄筋の振動特性が反映されることになる。また、鉄筋周りにはく離が生じている場合は、鉄筋の振動がコンクリートへと伝播する際、はく離によって波の伝播が阻害されることになる。このように、コンクリートに伝播する弾性波には、内部鉄筋の状態に起因する鉄筋の振動特性が含まれる。この情報をコンクリート表面に設置したセンサで捉えることにより、鉄筋の状態、つまりはく離の有無や、はく離厚さあるいは長さの程度などを、非破壊により把握できるものと考えられる。なお、本研究では、鉄筋の振動特性を評価するパラメータとして、センサにて捉えた電圧波形の周波数スペクトルおよび最大振幅値を用いることとした。

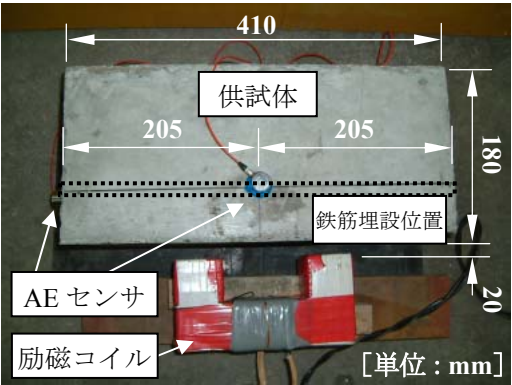
3. 実験概要

実験では、コンクリート内部鉄筋の振動挙動にバリエーションを設けるため、内部鉄筋の状態を次のとおり設定することにした。「実験 1」では、鉄筋のかぶりおよび直径の違いが振動特性に与える影響について把握することを目的とした。また、「実験 2」では、はく離厚さおよびはく離長さの違いが鉄筋の振動特性に与える影響について検討した。以下にその詳細を示す。

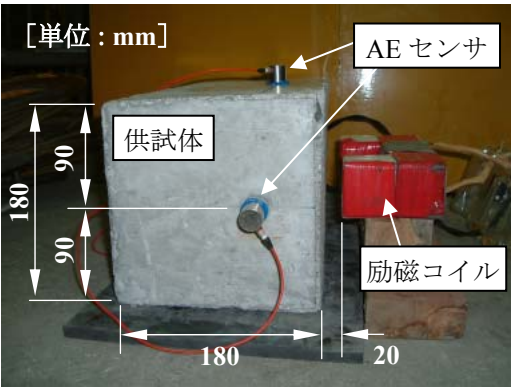
3.1 実験 1

(1) 供試体

ここでは、表－1 に示すとおり、鉄筋径を 16mm で固定し、かぶりを 30、50 および 120mm と変化させたものと、かぶりを 50mm と一定とした上で鉄筋径を 16、25 および 32mm と変化させた供試体を作製した。コンクリートの寸法は、高さ 180mm×幅 180mm×長さ 410mm (写真－1 参照) である。いずれの供試体においても、鉄筋長手方向の全周にわたってポリ塩化ビニリデン製ラップを厚さ 3mm で巻き付けた供試体 (はく離供試体「はく離厚さ 3mm」および「はく離長さ 410mm」とする。) と、ラップを巻き付けずに



a) 平面状況



b) 断面状況

写真－1 供試体概要および計測状況

表－1 実験 1 の検討ケース

かぶり \ 直径	供試体名	16mm	25mm	32mm
30mm	健全	○	－	－
	はく離	○	－	－
50mm	健全	●	○	○
	はく離	◎	○	○
120mm	健全	○	－	－
	はく離	○	－	－

●：実験 2 の検討ケース (表－3 中の●) と同じ供試体

◎：実験 2 の検討ケース (表－3、4 中の◎) と同じ供試体

表－2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (g)
		W	C	S	G	
50	41.0	184	368	694	1002	1472

鉄筋を所定のかぶりに配置した供試体 (健全供試体) をそれぞれ作製した。使用した鉄筋は、いずれの直径についても、長さ 410mm の普通丸鋼である。コンクリートの配合を表－2 に示す。

(2) 電磁パルスの発振方法

電磁パルスの発振に使用した励磁コイルは、電磁鋼板にマグネットワイヤーを巻き付けたものである。コイル設置位置は、鉄筋を安定して加振できるように、鉄筋の長手方向と磁束線とをほぼ平行にする必要がある²⁾。そこで、写真－1に示すとおり、鉄筋直上で、供試体とコイルの長手方向中央位置を一致させ、かつコンクリート表面から 20mm の位置にコイルを設置した。電気信号発生器を用いて、最大電圧 622V でパルス状の電流を励磁コイルに流すことにより、電磁パルスを発振した。

(3) 弾性波の受振方法

電磁パルスによって加振された鉄筋の振動は、鉄筋端部およびコンクリート表面に貼り付けた AE センサにより受振した。センサ貼り付け位置を写真－1 に示す。AE センサで受振した波形は、サンプリング周波数 2MHz でデジタル化した後、波形収集装置に記録した。なお、使用した AE センサは、評価パラメータごとに異なる仕様のものを用いることとした。すなわち、周波数スペクトルを算出する際は、広帯域の AE センサをコンクリート表面にのみ設置した。これに対して、最大振幅値を測定する場合は、60kHz 共振型の AE センサを、鉄筋端部およびコンクリート表面にそれぞれ貼り付けた。

3.2 実験 2

(1) 供試体

ここでは、実験 1 の $\phi 16\text{mm}$ 、かぶり 50mm のはく離厚さ 3mm の供試体に加えて、ラップ厚さを 0.1mm で巻き付けてはく離厚さを 0.1mm とした供試体（「はく離厚さ 0.1mm」とする）と、丸鋼長手方向中央部に 308mm のラップを巻き付けた供試体（「はく離長さ 308mm」とする）とをそれぞれ作製した。表－3 および表－4 に、実験 2 のケースを示す。なお、コンクリート部分の寸法および配合は、実験 1 と同じである。

(2) 電磁パルスの発振方法および弾性波の受振方法

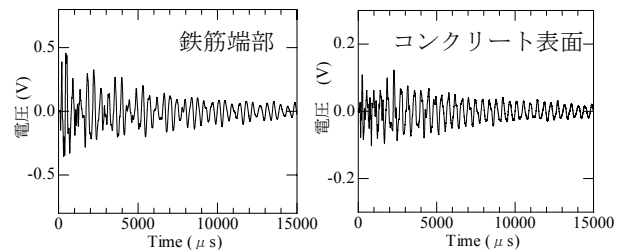
ここでは、実験 1 と同じ方法を用いた。

表－3 実験 2 の検討ケース（はく離厚さ）

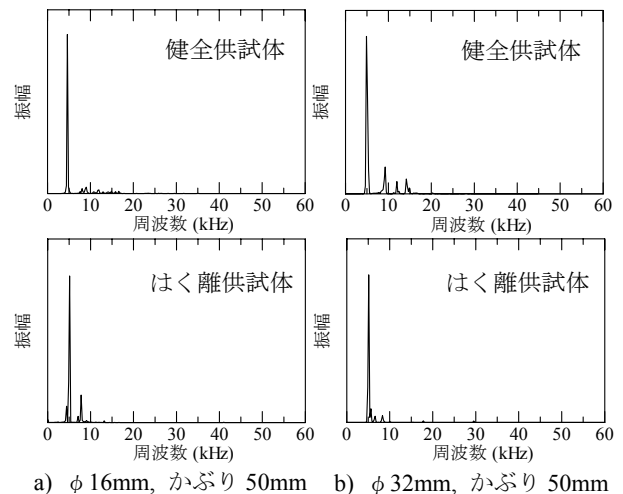
径・かぶり \ はく離厚さ	0mm	0.1mm	3mm
$\phi 16\text{mm}$ ・かぶり 50mm	●	○	◎

表－4 実験 2 の検討ケース（はく離長さ）

径・かぶり \ はく離長さ	308mm	410mm
$\phi 16\text{mm}$ ・かぶり 50mm	○	◎



図－1 受振波形の一例



図－2 鉄筋径の違いによる周波数スペクトル

4. 実験結果および考察

4.1 かぶりおよび鉄筋直径の違いがコンクリート表面での振動特性に与える影響（実験 1）

図－1 に、健全供試体におけるコンクリート表面及び鉄筋端部で受振した波形の一例をそれぞれ示す。この図より、得られた波形には周期性が見られ、かつ最大振幅値を容易に判読できるものであった。したがってこれ以降は、周波数スペクトル及び最大振幅値の結果のみを示すこととする。続いて、図－2 に鉄筋のかぶりが 50mm で、鉄筋径が 16 および 32mm における健全およびはく離供試体のコンクリート表面で得られた周波数スペクトルをそれぞれ示す。なお、本研究では、スペクトル解析手法に高速フーリエ変

換（FFT）を使用している。

いずれの供試体においても、周波数の分布形状に若干の違いはみられるものの、およそ 5kHz の位置にのみ、単一のピークが発現している。これより、鉄筋径の違いは、鉄筋のはく離の有無に関わらず、周波数スペクトルに与える影響は小さいことがわかる。また同時に、スペクトル上には、はく離の有無の違いはほとんど現れないこともわかる。ただし、健全およびはく離供試体におけるピーク周波数（約 5kHz）から想定される振動挙動については、今後詳細に検討する必要がある。

続いて、 $\phi 16\text{mm}$ 、かぶり 30mm の健全およびはく離供試体の場合のコンクリート表面での周波数スペクトルを図-3 に示す。この図の周波数スペクトルにおいても、図-2 と同様に、およそ 5kHz の周波数にピークが生成されており、かぶりの違いについても、本実験の範囲内においては、鉄筋のはく離の有無によらず、周波数スペクトル性状に与える影響は小さいことが明らかとなった。

上記の結果を踏まえて、ここでは、時間領域の関数である波形に着目して、鉄筋径やかぶりの違いによる振動特性の評価を行うこととした。図-4 に健全およびはく離供試体で得られた最大振幅値と鉄筋径との関係を、弾性波を受信した位置、すなわちコンクリート表面および鉄筋端部とに分けて示す。図中に示す数字は、健全供試体に対するはく離供試体の最大振幅値の比率である。この図によれば、鉄筋端部で振動を受振した場合（図-4 a)）、鉄筋径によらず、はく離供試体の最大振幅値は、健全供試体でのそれと比較して、大きくなっていることがわかる。はく離供試体では、鉄筋周りのはく離によってコンクリートによる拘束の影響は比較的小さいものと考えられる。また、電磁力によって加振された鉄筋は、コンクリートへ振動を伝達する際、はく離層と鉄筋との間の音響インピーダンスの著しい差により、境界面で伝達される波のエネルギーが小さくなる。そのため、はく離供試

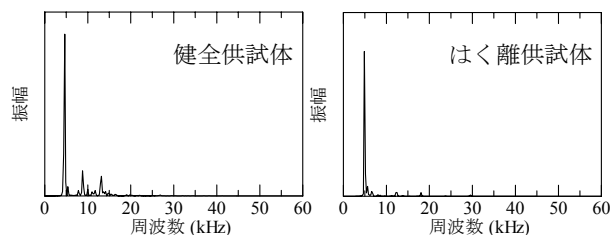
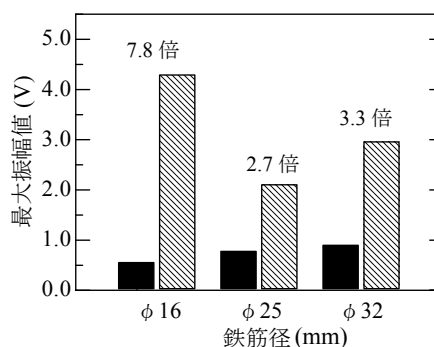
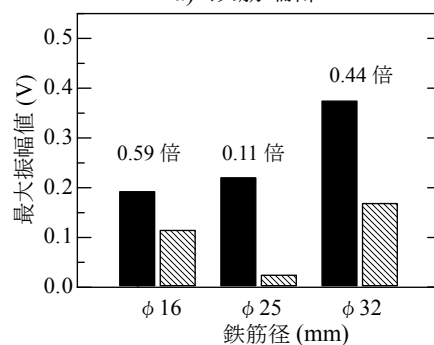


図-3 周波数スペクトル
($\phi 16\text{mm}$ 、かぶり 30mm)



a) 鉄筋端部



b) コンクリート表面

■ 健全供試体 ▨ はく離供試体

図-4 最大振幅値と鉄筋径との関係

体の最大振幅値が、健全供試体でのそれと比較して大きくなったものと考察できる。これに対して、コンクリート表面振動を受振した場合（図-4 b)）は、健全供試体と比較して、はく離供試体の振幅値が小さくなっていることがわかる。しかもこの傾向は、いずれの鉄筋径においても確認された。はく離供試体では、鉄筋そのものの振動は健全供試体と比較して大きくなるものの、はく離によりコンクリートへ伝播する波のエネルギーが阻害されることにより、コンクリート表面において検出される振幅値は、健全のそれと比較して小さくなったものと考察できる。

続いて、健全およびはく離供試体で得られた最大振幅値とかぶりとの関係を、鉄筋端部およ

びコンクリート表面とに分けて図-5に示す。鉄筋端部で受振した場合(図-5 a)では、健全供試体の最大振幅値よりも、はく離供試体の振幅値の方が大きくなっている。なお、図中では健全とはく離供試体との差が判読しにくいいため、かぶりごとに、健全供試体に対するはく離供試体の最大振幅値の比率として図中に示す。これに対して、コンクリート表面で受振した健全供試体の最大振幅値(図-5 b)は、はく離供試体のそれよりも大きくなっているものの、かぶりが大きい方が、その差がより小さくなっていることがわかる(図-5 b)中での判読が難しいため、健全とはく離供試体との比率を、図中に併せて示す。これは、磁束密度の低下が原因と考察できる。磁束密度は、コイルからの距離の2乗に反比例して小さくなる³⁾。そのため、かぶりが大きい場合、鉄筋を加振する力も低下し、これにより振幅値の差も小さくなったためと考えられる。しかしながら、受振センサの設置位置に関わらず、かぶり120mmにおける健全供試体とはく離供試体での最大振幅値の差(鉄筋にて受振した場合:2.1倍、コンクリートで受振した場合:0.7倍)より、最大振幅値は、はく離の有無を十分検知できる程度の感度を有しているものと思われる。

以上のことから、本実験で使用した電磁パルスは、鉄筋径32mmに対しても十分加振することができ、かつ、かぶり30から120mm程度までの内部鉄筋の振動特性を検知できる可能性が示された。

4.2 はく離厚さおよび長さの違いがコンクリート表面での振動特性に与える影響(実験2)

はく離厚さ0.1mmおよびはく離長さ308mmの場合における周波数スペクトルを図-6に示す。いずれの場合も、図-2および3と同じく、ピーク周波数は5kHzであった。これより、コンクリート表面で検出された周波数スペクトルから、はく離厚さやはく離長さの違いによる振動特性を把握することは困難であった。

図-7にはく離厚さが異なる場合の最大振幅

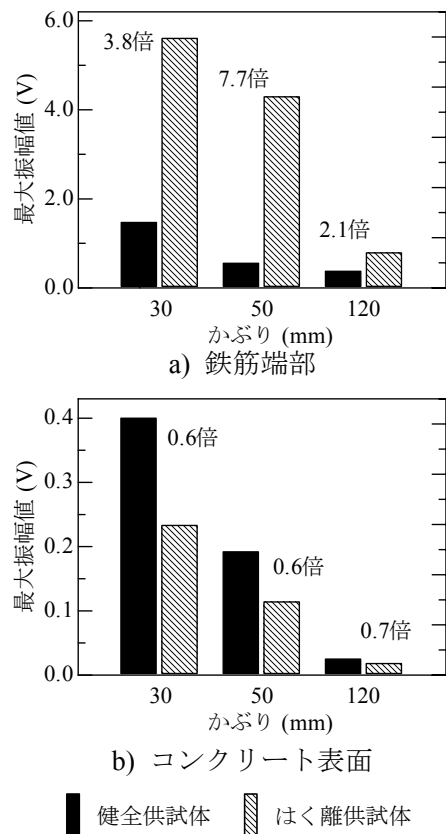


図-5 最大振幅値とかぶりとの関係

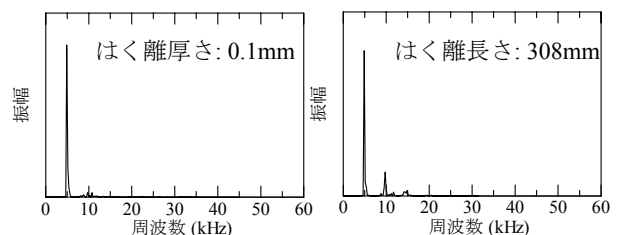
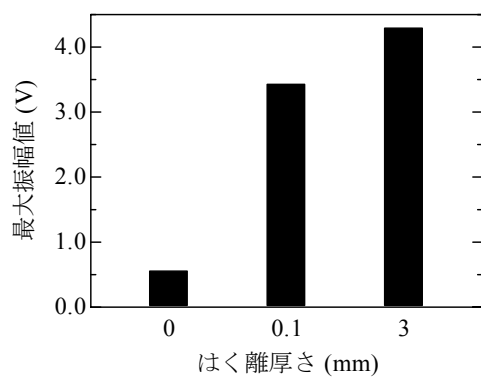


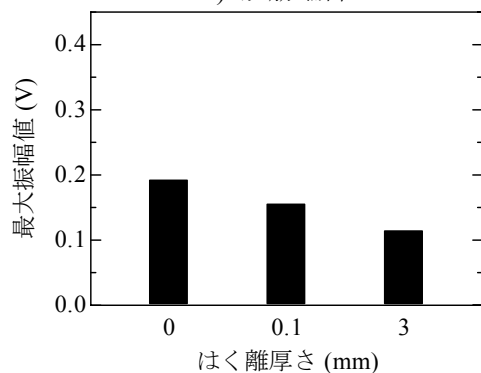
図-6 周波数スペクトル(実験2)

値を、図-8にはく離長さと最大振幅値との関係をそれぞれ鉄筋端部受振およびコンクリート表面受振について示す。ここで、図-7のはく離厚さ0mmは、健全供試体での値を示す。図-7および図-8ともに、鉄筋端部での最大振幅値は、はく離厚さおよび長さの増加とともに大きくなっている。これに対して、コンクリートでは、鉄筋での変化傾向とは逆に、はく離厚さおよび長さの増加に伴って、最大振幅値は小さくなっている。これは前節において考察したとおり、鉄筋周りのコンクリートによる拘束条件の違いによる影響が、最大振幅値の変化として現れたものと考えられる。

これより、はく離厚さや長さの違いによる鉄

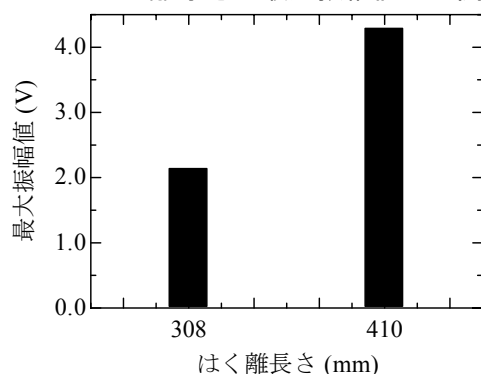


a) 鉄筋端部

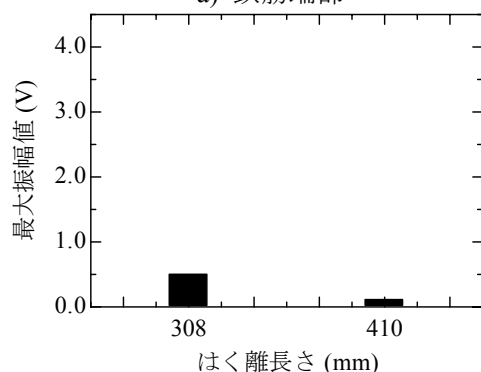


b) コンクリート表面

図-7 はく離厚さと最大振幅値との関係



a) 鉄筋端部



b) コンクリート表面

図-8 はく離長さと最大振幅値との関係

筋の振動特性の差違を、コンクリート表面での受振波の最大振幅値により把握することが可能であることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 鉄筋径やかぶり、はく離長さや厚さの違いに起因する鉄筋の振動特性の変化は、コンクリート表面で捉えた弾性波の周波数スペクトル上には、現れにくいことが確認された。
- 2) 本実験の範囲内においては、コンクリート表面で得られた受振波形の最大振幅値は、鉄筋径やかぶりによらず、はく離の有無により大きく異なり、はく離厚さおよびはく離長さとの良い相関関係があることが明らかとなった。
- 3) 本実験で用いた電磁パルスによって、かぶり30mm～120mm程度とした埋設条件下で、鉄筋径32mm程度までの加振が可能であり、コンクリート表面で有意な波形を受振することができた。
- 4) 以上より、本手法によれば、コンクリート内部鉄筋の振動特性をコンクリート表面で検知した上で、健全供試体とはく離供試体との比較を行うことにより、コンクリートと鉄筋とのはく離程度の違いを評価できる可能性があることがわかった。

今後は、鉄筋周辺の拘束条件の違いに関して詳細に検討し、コンクリート表面での振動特性から、鉄筋のはく離状態を定量的に評価する手法について研究を進める予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（萌芽研究 18656124）の援助を受けて行ったものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 高鍋雅則, 橋本光男: 鉄筋コンクリート診断のためのパルス電磁力音響法の提案, 非破壊検査, Vol.52, No.11, pp.628-632, 2003
- 2) 福田 務: 絵とき電気磁気, オーム社, p.138, 1987
- 3) 吉野純一: 電磁気学の基礎と演習, コロナ社, p.87, 2002