

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22360179

研究課題名（和文） マルチシグナルプローブを用いたコンクリート内部の  
電磁波・超音波融合画像化システム

研究課題名（英文） Imaging system of internal flaws and inclusions in concrete material  
using ultrasonic and electromagnetic array probes

研究代表者

中畑 和之 (NAKAHATA KAZUYUKI)

愛媛大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：20380256

研究成果の概要（和文）：

コンクリート部材の内部きずや鉄筋の損傷等を非破壊的に評価するために、弾性波・電磁波を同時に利用して画像化する、新しい検査システムを開発することを目的とする。ここでは、超音波・電磁波を送受信する素子（アンテナ）をアレイ状に配列させ、このプローブを用いて波形を記録する。計測された波形は、全波形サンプリング処理方式(FSAP方式)によって、PCメモリ上で集束ビームを合成する。この集束ビームを基に開口合成アルゴリズムに基づく映像化方法でコンクリート内部のきず（空洞欠陥、スリット、鉄筋減肉など）を可視化する技術を開発した。これらの技術は、有限積分法をベースとするシミュレーションや、超音波と電磁波の計測実験によって、その有効性が検証された。また、画像化プロセスはGPGPUによって高速処理され、さらに波形取得から映像化までを一元的に処理するシステムを構築した。

研究成果の概要（英文）：

In this research, a novel nondestructive imaging method in concrete material was developed by means of both ultrasonic and electromagnetic waves. Here, we proposed a phased array imaging technique which makes use of scattered waves of ultrasonic and electromagnetic waves, measured by every two-element combination as a pulser and a receiver, to synthesize high amplitude beams for any points in an inspection area. To validate this full-waveforms sampling and processing (FSAP), the numerical simulation based on the finite integration technique (FIT) and experimental measurement of ultrasonic and electromagnetic waves were performed. Using the FSAP technique, we demonstrated shape reconstructions of internal voids and corrosion parts of reinforced steel bars in concrete specimens. Furthermore, a computation method with a graphics processing unit (GPU) was introduced to execute the FSAP at high speed. We integrated our imaging method into a platform, and showed a prototype of a portable nondestructive imaging system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	9,100,000	2,730,000	11,830,000
23年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
24年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：非破壊検査，コンクリート，電磁波，超音波，電磁界有限積分法(EMFIT)，動弾性有限積分法(EFIT)，欠陥再構成，全波形サンプリング処理(FSAP)方式

### 1. 研究開始当初の背景

PC 橋や大型プラント等に見られるコンクリート部材の内部きずや鉄筋の損傷等を非破壊的に評価するために，放射線透過法(RT)，超音波探傷法(UT)，電磁波レーダ法(EMT)，打音法(IET)等が行われている。この中で，UT や EMT は検査用機材が小規模であり，設置しやすいため，現場検査では広く採用されている。超音波は空隙・空洞の検出には適した方法であり，電磁波は難しい。一方で，鉄筋や塩ビ管の検出には電磁波は適している。従って，両方の波動の性質を理解し，その特徴を活かした利用が望ましい。現在では，UT，EMT 用のそれぞれに対して波形計測装置が市販されている。非常にコンパクトで携帯しやすいハードウェアが安価に手に入る。しかし，これらハード面の進歩に対して，例えば，得られた波形から欠陥像を上手く再構成するとか，結果を高速に出力するといったソフト面の整備が遅れている。また，シグナルノイズ(S/N)比の低い波形から，欠陥推定に寄与する有益な情報を引き出して，欠陥の形状を再構成することがソフト面の担う役割であるのに，この研究が実用化に至っていないのが現状の問題である。

### 2. 研究の目的

コンクリート部材の内部きずや鉄筋の損傷等を非破壊的に評価するために，弾性波・電磁波を同時に利用して画像化する，新しい検査システムを開発することを目的とする。弾性波は音響インピーダンスの異なる材料から，電磁波は特性インピーダンスの異なる材料から散乱波を発生することから，それぞれの波動特性を生かした統合イメージング手法を構築する。ここでは，超音波・電磁波を送受信する素子（アンテナ）をアレイ状に配列させ，このマルチシグナルプローブを用いて波形を記録する。計測された波形は，全波形サンプリング処理方式(FSAP 方式)によって，PC メモリ上で集束ビームを合成する。この集束ビームを基に開口合成アルゴリズムに基づく映像化方法でコンクリート内部のきず（空洞欠陥，スリット，鉄筋減肉など）を可視化する。

### 3. 研究の方法

以下の6つの主要プロセスによって，本研究を遂行した。

- (1) 数値解析による電磁波・超音波の伝搬・散乱特性の把握
- (2) 超音波・電磁波計測に対する FSAP 方式の構築
- (3) FSAP 用の超音波・電磁波マルチシグナルプローブの設計・製作
- (4) 超音波・電磁波を用いた画像化プロセスの GPGPU による加速
- (5) ハード・ソフトを一元的に制御するプラットフォームの構築
- (6) 計測実験による検証

### 4. 研究成果

- (1) 数値解析による電磁波・超音波の伝搬・散乱特性の把握

動弾性有限積分法(Elastodynamic finite integration technique : EFIT)を用いて，コンクリート中の超音波の伝搬シミュレーションを行った。EFIT は陽解法であるので，並列計算の効率が良好である。図1は128コア(京都大学学術情報メディアセンター)を用いて，EFIT 解析を実施した例である。骨材の存在による超音波の多重散乱がモデル化でき，波頭の乱れおよび S/N 比の低下が再現できた。

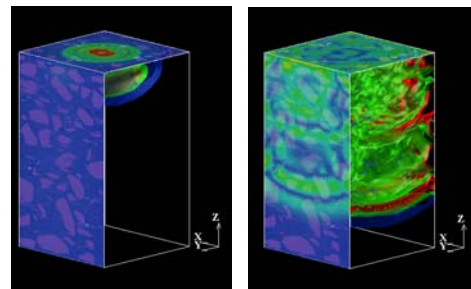


図1：コンクリート中を伝搬する超音波の可視化 (EFIT によるシミュレーション)

また，電磁界有限積分法(Electromagnetic finite integration technique : EMFIT)を用いて，コンクリート中の電磁波の伝搬シミュレーションを行った。図2は，コンクリート床版中に電磁波を送信した場合の鉄筋による散乱を EMFIT で計算したものである。電磁波の場合，骨材による多重散乱は顕著ではないことが分かった。鉄筋によって強い散乱波が得られるが，空洞部からも有意な振幅の散乱が見られることがわかった。

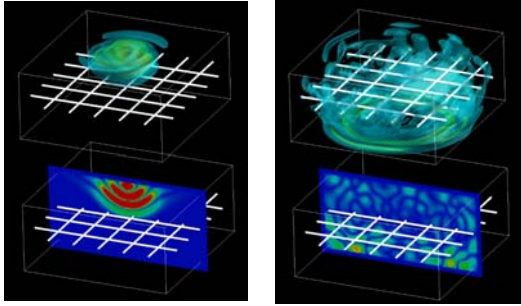


図2：コンクリート中を伝搬する電磁波の可視化（EMFITによるシミュレーション）

(2) 超音波・電磁波計測に対する FSAP 方式の構築

全波形サンプリング処理(Full waveforms sampling and processing：FSAP)方式による画像化性能を，(1)で構築した数値シミュレーション技術によって検証した。FSAP方式はアレイプローブの各素子で送・受信した要素波の複数の組み合わせから，PCメモリ上でそれらを合成し集束ビームを作る方法である。このとき，散乱波形からパルス波を抽出する波形処理，アポダイゼーション等のフィルタ処理技術を組み込んだ。シミュレーションの結果，超音波FSAPによってボイド状の空隙が，電磁波FSAPによって鉄筋が，それぞれ位置と形状について再現できた。

(3)FSAP用の超音波・電磁波マルチシグナルプローブの設計・製作

超音波FSAP用に，コンポジット素子を用いてアレイプローブの設計を行った。これまで，低周波数域で大電圧に耐えうるアレイプローブの製作は難しかった。研究協力者であるジャパンプローブ(株)との共同設計によって，図3のような超音波FSAP用アレイプローブ(400kHz，24素子)を作成した。

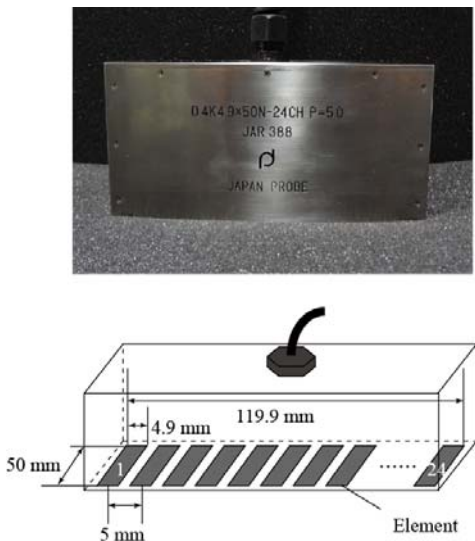


図3：超音波FSAP用アレイプローブ(研究協力者 ジャパンプローブ(株)による製作)

電磁波FSAPでは，アンテナをアレイ化することは予算的に困難であった。しかし，要素波の各組み合わせが計測できればFSAP方式は実現可能である。そこで，研究協力者の検査技術サービス(株)と連携し，市販の電磁波レーダ装置をカスタマイズし，送信と受信アンテナを分離した。これらをメカニカルに移動できるように治具を作成し，アンテナ距離を任意に設定できるようにした。図4に作成した電磁波FSAP用の送信・受信アンテナを示す。

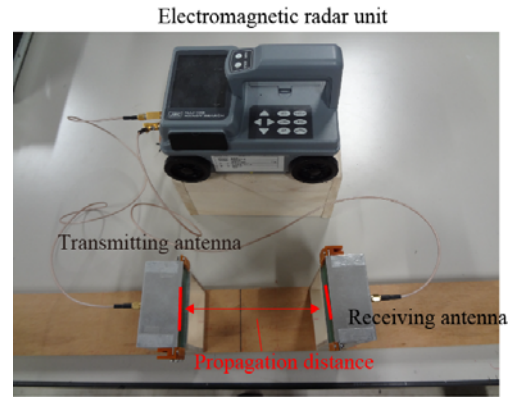


図4：電磁波FSAP用プローブ(研究協力者 検査技術サービス(株)による作成)

(4)超音波・電磁波を用いた画像化プロセスのGPGPUによる加速

GPGPUはGeneral Purpose computing on GPUの略であり，通常マルチCPUだけを使った処理ではなく，GPUも用いて処理することである。ここではNVIDIA社のCUDA統合環境を用いてGPGPUを実装し，波形合成・欠陥再構成を高速化した。FSAP方式では画素毎に集束ビームを作るが，これをGPUコアによって一斉に処理し，ノートPCでも高速実行が可能となった。また，本映像化では，FFTを多用したデコンボリューション処理に基づいた波形処理を採用しているが，これもCUDAライブラリであるcuFFTを用いて高速処理した。従って，波形処理を含めて，断面像の出力(400<sup>2</sup>画素)には1秒程度まで短縮でき，実時間の映像化に十分対応できる。

(5)ハード・ソフトを一元的に制御するプラットフォームの構築

実用化を意図して，ハード(波形計測)とソフト(画像化)の両方を一元的に制御するシステム開発を行った。ここでは，LabVIEWを用いてグラフィカルユーザインターフェース(GUI)を実装した。超音波FSAPについては，波形計測・映像化までの一元化システムを構築し，現場で応用できるレベルまで仕上げたが，電磁波FSAPについては，上述のように計測装置がアレイ化できなかったため，計測と映像化の一元化は未整備である。

### (6)FSAP の検証

超音波 FSAP の性能検証を行った。図 5 に示すようにコンクリート供試体（骨材率 50%）の内部に、欠陥（スリット）を作成した。これを FSAP 方式によって超音波可視化を行った結果、最大で深さ 200mm にあるスリットの位置および形状が良好に再構成できた。

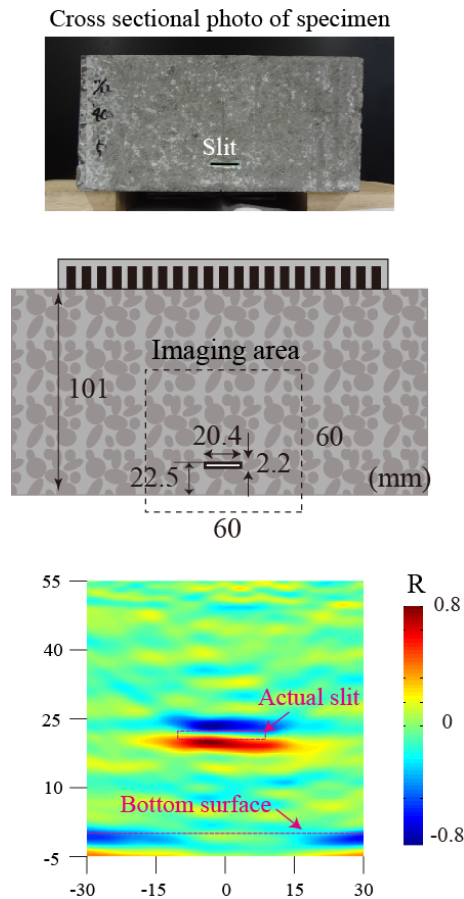


図 5：超音波 FSAP によるスリットの再構成（400kHz アレイプローブを使用）

また、電磁波 FSAP による鉄筋の可視化について、EMFIT による数値シミュレーションによる検証結果を図 6 に示す。これは、鉄筋を深さ方向に 2 つ配置したモデルである。通常の電磁波レーダ法では、深い鉄筋は再構成できなかった。しかし、電磁波 FSAP 方式を用いれば、深い鉄筋へも電磁波を集束して送信できることから、深い鉄筋の再構成が可能である。なお、実験については、現在供試体を作成し、検証を行っているが、良好な結果が得られており、近いうちに論文発表する予定である。

今回の研究では、超音波 FSAP と電磁波 FSAP をそれぞれ構築することができた。今後はこれらを組み合わせた統合イメージングの可能性について検討を行っていく予定である。

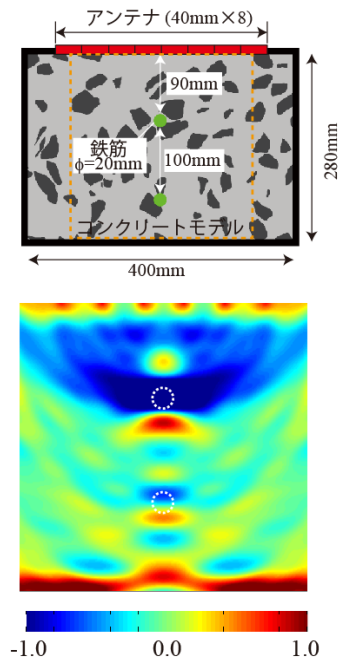


図 6：電磁波 FSAP によるスリットの再構成（3GHz のパルス状の電磁波を送受信）

### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 19 件）

- (1) 超音波シミュレーションときずの画像化への応用, 廣瀬壯一, 中畑和之, 非破壊検査, Vol. 62(1), pp. 21-28, 2013. 査読無し
- (2) EMFIT を用いた電磁波の伝搬解析とアレイアンテナを用いた鉄筋の映像化シミュレーションへの応用, 中畑和之, 中 民矢, 飯田洋志, 石井 武, 松田吉人, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol. 4, pp. 253-262, 2012. 査読あり
- (3) 低周波アレイ探触子を用いた FSAP 方式によるコンクリート中の空洞欠陥の超音波映像化, 中畑和之, 川村 郡, 岡崎慎一郎, 廣瀬壯一, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol. 4, pp. 105-114, 2012. 査読あり
- (4) GPU 計算を用いたイメージベース EFIT の高速化と超音波計測による解析妥当性の検証, 中畑和之, 田中貴之, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 68, No. 2, pp. I227-I236. 2012. 査読あり
- (5) Reconstruction of flaws in heterogeneous media using image-based FIT and time reversal approach, K. Nakahata and K. Kimoto, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 771-781, 2012. 査読あり

- り, DOI: 10.1299/jmmp.6.771
- (6) Simulation of ultrasonic and electromagnetic wave propagation for nondestructive testing of concrete using image-based FIT, K. Nakahata, K. Terada, T. Kyoya, M. Tsukino and K. Ishii, *Journal of Computational Science and Technology*, Vol. 6, No. 1, pp. 28-37, 2012. 査読あり, DOI: 10.1299/jcst.6.28
- (7) Real-time image-based FIT simulation using GPU computing and its application to nondestructive testing, K. Nakahata, K. Kimoto, *Proceedings of the 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012)*, 2012. 査読無し
- (8) Acceleration of the 3D image-based FIT with an explicit parallelization approach, K. Nakahata, S. Ichikawa, T. Saitoh and S. Hirose, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 31, pp. 769-776, 2012. 査読無し, DOI: 10.1063/1.4716303
- (9) コンクリート中を伝搬する超音波のモデル化と欠陥の映像化シミュレーション, 中畑和之, *超音波 TECHNO*, 第 24 巻, 第 2 号, pp. 72-76, 2012. 査読無し
- (10) イメージベースモデリングによる超音波伝搬シミュレーション, 中畑和之, *日本音響学会誌*, 第 67 巻, 7 号, pp. 273-278, 2011. 査読無し
- (11) 有限積分法 (FIT) のイメージベース波動伝搬シミュレーションへの応用, 中畑和之, 高田恭兵, *非破壊検査*, 第 60 巻, 第 4 号, pp. 204-209, 2011. 査読無し
- (12) 斜角探傷用アレイ探触子を用いた FSAP 方式による内部欠陥の超音波画像化, 中畑和之, 竹内裕幸, 木本和志, *日本機械学会論文集*, A 編, 77 巻, 779 号, pp. 106-116, 2011. 査読あり, DOI: 10.1299/kikaia.77.1112
- (13) A flaw reconstruction method in heterogeneous media with image-based FIT and time reversal approach, K. Nakahata and K. Kimoto, *Proceedings of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, OS02F026*, 2011. 査読無し
- (14) Simulation of ultrasonic- and electromagnetic-wave nondestructive testings for concrete with image based FIT, T. Iga, K. Nakahata, M. Isshiki and S. Ido, *Proceedings of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, OS11F081*, 2011. 査読無し
- (15) Image-based FIT modeling for coupled elastodynamic and acoustic problems, K. Takata, K. Nakahata, F. Schubert and B. Koehler, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 30, pp. 720-727, 2011. 査読無し, DOI: 10.1063/1.3591920
- (16) 3-D image-based simulation for ultrasonic wave propagation in heterogeneous and anisotropic materials, K. Nakahata, F. Schubert and B. Koehler, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 30, pp. 51-58, 2011. 査読無し, DOI: 10.1063/1.3591839
- (17) 全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式を用いた逆散乱イメージング法による欠陥の超音波, 中畑和之, 上甲智史, 廣瀬壯一, *応用力学論文集*, Vol. 13, pp. 89-97, 2010. 査読あり
- (18) 全波形サンプリング処理方式を利用した散乱振幅からの欠陥再構成, 中畑和之, 平田正憲, 廣瀬壯一, *非破壊検査*, Vol. 59, No. 6, pp. 277-283, 2010. 査読あり
- (19) イメージベース波動伝搬シミュレーションと超音波探傷法のモデル化への応用, 中畑和之, 徳永淳一, 廣瀬壯一, *非破壊検査*, Vol. 59, No. 5, pp. 231-238, 2010. 査読あり
- [学会発表] (計 25 件)
- (1) イメージベース波動伝搬解析による非均質異方性材料中の超音波伝搬シミュレーション, 紙田聖也, 菅原弘貴, 中畑和之, 土木学会四国支部技術研究発表会, 松山, 2013. 5. 11.
- (2) 全波形サンプリング処理方式による電磁波レーダ法の高精度化に関する検討, 松本大史, 伊賀達郎, 岡崎慎一郎, 中畑和之, 土木学会四国支部技術研究発表会, 松山, 2013. 5. 11.
- (3) GPU 計算を実装した全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式の開発とコンクリートの超音波映像化への応用, 堀口貴志, 川村郡, 岡崎慎一郎, 中畑和之, 土木学会四国支部技術研究発表会, 松山, 2013. 5. 11.
- (4) 全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式を応用した電磁波レーダ法による鉄筋再構成に関する検討, 伊賀達郎, 松本大史, 中畑和之, 第 62 回理論応用力学講演会, 東京, 2013. 3. 7
- (5) 非均質異方性材料中の超音波伝搬の有限要素・差分モデルに関する検討, 中畑和之, 斎藤隆泰, 廣瀬壯一, 第 20 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, 2013. 1. 28.
- (6) コンクリート中を伝搬する超音波のモデ

- ル化と内部ボイドのアレイ映像化に関する研究, 川村郡, 矢野智之, 中畑和之, 廣瀬壯一, 第 20 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, 2013.1.28.
- (7) 低周波アレイ探触子を用いたコンクリート中の空隙の超音波イメージング, 中畑和之, 川村郡, 廣瀬壯一, 平成 24 年度第 5 回アコースティックイメージング研究会, 東京, 2013.2.19.
- (8) アルタイム波動伝搬シミュレータを援用した時間反転法による欠陥の映像化, 中畑和之, 木本和志, 廣瀬壯一, JSNDI 秋季講演大会, 東京, 2012.10.22.
- (9) 電磁界有限積分法による電磁波レーダ法のモデル化とその検証, 松本大史, 伊賀達郎, 中畑和之, 土木学会 第 67 回年次学術講演会, 名古屋, 2012.9.5.
- (10) 低周波アレイ探触子による非均質材料内部の空隙の超音波画像化, 矢野智之, 川村郡, 中畑和之, 岡崎慎一郎, 土木学会 第 67 回年次学術講演会, 名古屋, 2012.9.5.
- (11) 電磁界有限積分法による電磁波レーダ法の 3 次元モデリング, 松本大史, 伊賀達郎, 中畑和之, 土木学会 四国支部技術研究発表会, 高知, 2012.5.19.
- (12) 低周波アレイ探触子を用いた FSAP 方式による非均質材料内部の欠陥画像化, 矢野智之, 川村郡, 中畑和之, 土木学会 四国支部技術研究発表会, 高知, 2012.5.19.
- (13) Application of real time image-based FIT to simulations of nondestructive testing, K. Nakahata, 2nd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE), Jeju, Korea, 2012.11.14.
- (14) Image-based FIT simulations for ultrasonic and electromagnetic wave propagations and their experimental verifications, K. Nakahata, T. Matsumoto, T. Yano, 2nd International Conference on Computational Design in Engineering (CODE), Jeju, Korea, 2012.11.14.
- (15) Image-based FIT simulations for nondestructive testing of concrete and its validation by electromagnetic wave measurement, K. Nakahata, T. Matsumoto, T. Iga, 6th Korea-Japan Workshop on Computational Mechanics, Kyoto, 2012.5.31.
- (16) GPU 計算による非破壊検査のための超音波イメージングの高速化, 中畑和之, 斎藤隆泰, 廣瀬壯一, 第 17 回計算工学講演会, 京都, 2012.5.30.
- (17) GPU 計算によるリアルタイム波動伝搬シミュレーション, 田中貴之, 中畑和之, 第 19 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, 2012.1.26.
- (18) GPGPU を用いた欠陥再構成処理の高速化, 渡邊 怜, 中畑和之, 第 19 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, 2012.1.26.
- (19) 全波形サンプリング処理方式によるコンクリート内部の欠陥画像化に関する基礎的検討, 川村郡, 中畑和之, 廣瀬壯一, 第 19 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, 2012.1.26.
- (20) 全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式のコンクリート電磁波・超音波検査への応用, 中畑和之, 伊賀達郎, 川村郡, 廣瀬壯一, JSNDI 秋季講演大会, 淡路, 2011.10.19.
- (21) 電磁界有限積分法 (EMFIT) による電磁波レーダ法のモデリング, 伊賀達郎, 中畑和之, 土木学会 第 66 回年次学術講演会, 松山, 2011.9.7.
- (22) 全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式による固体中の欠陥形状の再構成, 川村郡, 中畑和之, 土木学会 第 66 回年次学術講演会, 松山, 2011.9.7.
- (23) 電磁界有限積分法 (EMFIT) による電磁波非破壊検査のシミュレーション, 伊賀達郎, 中畑和之, 土木学会 四国支部技術研究発表会, 高松, 2011.5.14.
- (24) 全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式による金属・非金属の超音波イメージング, 川村郡, 竹内裕行, 中畑和之, 土木学会 四国支部技術研究発表会, 高松, 2011.5.14.
- (25) 超音波アレイ探触子を用いた非均質材料中の欠陥映像化の試み, 中畑和之, 木本和志, 第 60 回理論応用力学講演会, 東京, 2011.3.9.
- [その他]  
ホームページ等  
<http://www.mech.cee.ehime-u.ac.jp>
6. 研究組織
- (1) 研究代表者  
中畑 和之 (NAKAHATA KAZUYUKI)  
愛媛大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号：20380256
- (2) 研究分担者 なし
- (3) 連携研究者  
岡崎 慎一郎 (OKAZAKI SHIN-ICHIRO)  
愛媛大学・理工学研究科・講師  
研究者番号：30510507