

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2020

課題番号：19K21987

研究課題名（和文）多チャンネル非破壊評価システムの最適化に関する研究

研究課題名（英文）Optimization of multi-channel measurement system for nondestructive evaluation

研究代表者

廣瀬 壮一（HIROSE, Sohichi）

東京工業大学・環境・社会理工学院・教授

研究者番号：00156712

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、最新の情報技術を利用した多チャンネル計測非破壊評価法の計測の最適化を目的とする。具体的には、FMC/TFMによる画像を入力データとするニューラルネットワークによって裏面スリット部位の判定を行うとともに、弾性波動理論とスパース理論の組合せによって弾性体内に作用する物体力やき裂開口変位の同定解析を行い、多チャンネル計測における超音波の送受信位置、素子の組合せ、周波数などの影響を考察した。その後、CNN、PF、MUSICなどの非破壊評価手法を試行した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

AIをはじめとする最新の情報技術の応用は様々な分野で実施されているが、非破壊検査の分野におけるAIの応用はまだ緒についたばかりであり、その原理は十分に解明されていない。非破壊検査は構造物の安全性に深く関わっており、その判定が人々の生活や社会の安全に直結するため、すべてをAIまかせにするわけにはいかない。本研究は多チャンネル計測における送受信位置や準備すべきデータについて検討しており、今後の非破壊検査へのAIの応用に対して意義のある研究成果を示している。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to optimize the multi-channel measurement system for nondestructive evaluation using the latest information technology. The slit area near the back surface is evaluated by a neural network using FMC/TFM images as input data, and body forces and crack opening displacements acting in an elastic body are identified by the combination of elastic wave theory and sparse theory. The effects of ultrasonic transmission/reception position, element combination, frequency, etc. on multi-channel measurement were discussed. Then nondestructive evaluation methods such as CNN, PF and MUSIC were investigated.

研究分野：応用力学

キーワード：超音波非破壊評価 ニューラルネットワーク スパース解 きず画像化 逆解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

計算機や通信機器の発達に伴って、非破壊検査技術は大きく進展し、多チャンネルでの計測が容易に行えるようになった。例えば、超音波フェーズドアレイ探傷法では探触子に配置された複数の圧電素子を電子制御して超音波を送受信することによって、送信ビームを自在に制御し、得られた複数の波形を画像表示してきずの評価をする。これまで単一の波形による A スキャンと呼ばれる方法に比べて探傷精度は高くなり、探触子を移動させて波形を取得する B スキャンや C スキャンよりも効率的に探傷を行うことができるようになった。その一方で、フェーズドアレイ法の計測条件については、多くの場合、経験に基づいて設定されている。探傷画像にグレーティングローブといった虚像が出ないように、隣接する探触子の間隔を超音波の波長の 1/2 未満にすることは理論的に得られた計測条件としてよく知られているが、圧電素子の数や配置位置および送受信の組合せ方法など、フェーズドアレイ探傷法の計測の基本事項でさえ理論的には明らかにされていないのが現状である。特に溶接部や異方性材料などの複雑形状・材料におけるきずに対しては用いるべき探触子について明確な指針はなく、試行錯誤に依存している。フェーズドアレイ探傷法に用いる探触子は素子数が増えれば当然ながら高価になる。また、素子数が増えれば波形データが増え、解析時間と容量も増加する。したがって、多チャンネル計測が容易になったからといって、むやみに計測点を増やすわけにはいかず、最適な計測条件を見出す必要がある。非破壊検査の分野では、これまで探傷精度の向上を目的とした多チャンネル計測手法に関する研究報告は多くあるものの、適切な探傷精度を保ちつつ、計測点の最適な配置に関する計測の最適条件を扱った研究はほとんどなされなかった。特に複雑な形状や材料におけるきずの評価のための計測条件は試行錯誤に依存している。このような中、様々な分野において利活用が注目されている AI をはじめとする情報通信技術に着目すれば、これまでにない非破壊評価法の最適な計測条件を見出せると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、超音波フェーズドアレイ探傷法に代表される多チャンネル計測非破壊評価法の計測条件を、最新の情報技術を利用して最適化することを目的とする。具体的には、昨今、様々な分野において話題となっている AI とスパースモデリングを適用して、複雑な形状のきずを含む構造材料を対象とした非破壊評価の最適な計測条件を求める。しかし、本研究では情報技術によって得られた結果をそのまま鵜呑みにすることはしない。情報技術を単なるブラックボックスとはせず、なぜ最適な計測条件が得られたかについて物理モデルに立ち戻ってその原因を究明し、最適な多チャンネル計測非破壊評価システムを構築する。非破壊検査の分野においては AI の応用はまだ緒についたばかりであり、AI が何を根拠に最適な計測条件を求めるのかを試行する。

3. 研究の方法

- a. データ収集 - 多チャンネル計測においてすべてのチャンネルの送受信の組み合わせが可能な FMC(フルマトリックスキャプチャ)方式で計測を行うと、ある一つの試験体に対しては多くのデータの収集が可能となる。しかし、非破壊検査で対象とするきずは、貫通横穴や切り欠きといった単純な形状をしたきずだけではなく、凸凹の表面形状を持つ溶接部や異方性材料内のき裂など、複雑で様々なきずを評価の対象としなければならない。そのようなすべての場合を想定して試験体を準備し多くの実験を実施することは容易ではなく現実的ではない。そこで本研究では実験によるデータ収集はいくつかの代表的なきずのみとして、多くのデータを数値シミュレーションによって作成した。
超音波非破壊検査ならびに数値シミュレーションでは波形データが得られるが、一般に AI には画像データが用いられる。そこで本研究では FMC/TFM(Total Focusing Method:計測後の処理ですべての点を焦点とする開口合成法)によって波形データを画像データに変換して、ニューラルネット(NN)への入力データとした。
- b. AI を用いたきず部位の判別 - シミュレーションおよび実験によって集められた大量のデータに NN を適用して、多チャンネル計測非破壊評価法によるきずの識別に取り組んだ。FMC(フルマトリックスキャプチャ)方式ではすべてのチャンネルによる送受信の組み合わせで波形が得られているので、後処理による波形の重ね合わせによってあらゆるパターンの超音波送受信を再現することが可能である。本研究では 64 チャンネルのアレイ探触子を用いて FMC 方式ですべての素子の組み合わせによる波形を計測して保存した後に、チャンネル数を様々な探触子位置で 8、16、32 と変化したときの開口合成画像を作成して、きず部位の判別について検討した。
- c. スパース理論を用いた最適計測条件を与える主要データの抽出 - AI は大量のデータから最適な計測条件を求めるが、多くの場合、最適条件に影響を及ぼすデータ数は限定されると考えられる。そこで、大量のデータから主要因となるデータを抽出する技術であるスパース理論を用いて、どのデータが最適な計測条件の形成に大きく寄与しているかを検討する。波動論に基づく物理モデルに立ち戻って計測点数やその配置の最適条件を議論する。
- d. 多チャンネル計測非破壊評価への適用と展開 - 多チャンネルデータを用いた画像評価に基づく非破壊評価は多くある。ここでは CNN(畳み込みニューラルネットワーク)、PF(粒子フィルタ法)、MUSIC(Multiple Signal Classification)の 3 つの画像評価法の適用性を検討した。

また、他分野へのスパース理論の応用として、地盤や岩盤における探査技術への展開を行った。

4. 研究成果

a. データ収集: 図1に示すような64チャンネルの1次元アレイ探触子(素子サイズ0.8×12mm, 素子ピッチ0.9mm, 中心周波数2MHz, K GK社製)を人工的に導入した裏面スリットを持つ鋼材の上面に設置してFMC方式で64×64個の波形を計測した。その波形の一部を重ね合わせて得られるTFMによるスリットの開口合成図を作成した。例を図2に示す。角度 $\theta=90^\circ$ 、長さ7.5mmの斜めスリットに対して47~62番目の素子による横波を用いた開口合成図である。同様の開口合成図をいくつかの供試体による実験データ及び数値シミュレーションによって作成した。

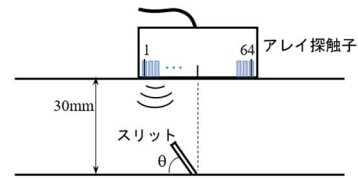


図1 アレイ探触子による計測

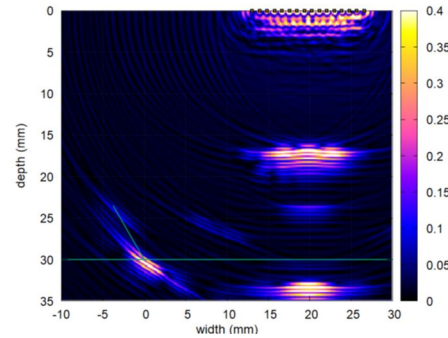


図2 $\theta=60^\circ$ 、長さ7.5mmの斜めスリットに対して47~62番目の素子による横波を用いた開口合成図。

b. AIを用いたきず部位の判別: 様々な角度 θ と長さを持つスリットに対して、図2のように得られた開口合成図を実験データ及び数値シミュレーションによって作成し、それを入力データとして裏面スリットの先端部、開口部(コーナ部)、スリット面及び試験体裏面を識別するNNを構築した。図3は $\theta=45^\circ$ 、長さ7.5mmの斜めスリットに対して28~59番目の素子による横波を用いた開口合成図をテストデータとしてスリットの部位をNNに判別させた結果の一例である。スリット先端部(緑)、スリット面(赤)、スリット開口部(橙)、裏面(紫)及び反射のない部位(黒)を適切に判別していることがわかる。送受信位置、素子の組み合わせ、訓練データ用の試験体の違いがきず部位の判別に及ぼす影響を検討した。

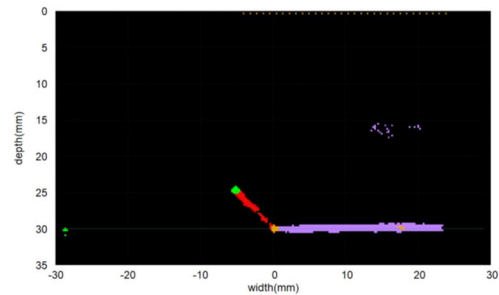


図3 $\theta=45^\circ$ 、長さ7.5mmの斜めスリットに対するNNの判別結果

c. スパース理論を用いた最適計測条件を与える主要データの抽出: 2次元面外弾性波動の数値シミュレーションとスパース理論の組合せによって、弾性体内に作用する物体力やき裂開口変位の同定解析を行った。解析モデルの一例を図4に示す。中央部の赤線で示した斜めき裂を想定して、そこに定常なき裂開口変位 $[u]$ を複素数の形で $[u^R] + [u^I]i = 1 + 2i$ として与え、周囲に配置した32個の観測点(紫色の点)で波動場を計測するとした。得られた観測点での波動場からき裂

の位置と向き(法線ベクトル $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$)及び開口変位 $([u^R], [u^I])$ を推定するが、き裂の位置も未知とするので、き裂が存在すると考えられる領域を格子状に分割し、それぞれの格子におけるき裂の開口変位と法線ベクトルを求めた。実際にき裂が存在する格子は数個に限定されるので、スパースな解を推定する逆解析となる。表1に結果を示す。よい精度でき裂開口変位と向きが推定できていることがわかる。このような解析を観測点の位置や様々な条件のき裂に対して実施し、最適な計測条件について検討した。もちろんデータが多いほど逆解析の精度は良くなるが、許容される精度の下で解析に必要なとするデータ数を推定できることを明らかにした。

表1 与えたき裂開口変位と向き、及び、推定された値

	$[u^R]$	$[u^I]$	n_x	n_y
Given	1.000	2.000	0.447	0.894
Estimated	1.008	1.988	0.391	0.920

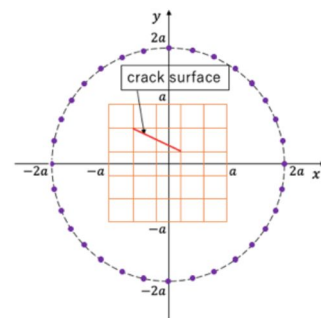


図4 スパース理論を用いたき裂同定のためのモデル

d. 多チャンネル計測非破壊評価への適用と展開: 多チャンネル計測による非破壊評価には様々な手法がある。そこで本研究ではb., c.で得られた結果を参考にして、CNNを用いた表面欠陥の自動検出、PFを用いた効率的なきず同定、MUSIC法による構造物内部のきずの映像化を実施した。いずれの手法においても、精度が高く、かつ、効率的なきずの画像が得られており、多チャンネル非破壊評価の有効性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nakahata Kazuyuki, Maruyama Taizo, Hirose Sohichi	4. 巻 40
2. 論文標題 Application of a Particle Filter to Flaw Identification for Ultrasonic Nondestructive Evaluation: Assimilation of Simulated and Measured Data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Nondestructive Evaluation	6. 最初と最後の頁 34-45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10921-021-00765-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takamatsu Ryosuke, Fujisawa Kazunori, Nakahata Kazuyuki, Murakami Akira	4. 巻 44
2. 論文標題 Shape detection of multiple subsurface cavities by particle filtering with elastic wave propagation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics	6. 最初と最後の頁 2025 ~ 2041
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nag.3117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 都築 幸乃、齋藤 泰彦、中畑 和之、蓑輪 里歩、斎藤 隆泰	4. 巻 1
2. 論文標題 畳み込みニューラルネットワークを用いたWavefieldデータからの表面欠陥の自動検出	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AI・データサイエンス論文集	6. 最初と最後の頁 339 ~ 348
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11532/jsceiii.1.J1_339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 中畑和之, 天野裕維, 溝田裕久, 斎藤隆泰, 木本和志	4. 巻 75
2. 論文標題 Wavefield データを利用 した数値モデルの構築と時間反転イメージングへの応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 71-81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.75.2_1_71	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 K. Nakahata, K. Karakawa, K.Ogi, K. Mizukami, S. Wada, T. Namita, T. Shiina	4. 巻 98
2. 論文標題 Three-dimensional SAFT imaging for anisotropic materials using photoacoustic microscopy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Ultrasonics	6. 最初と最後の頁 82-87
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ultras.2019.05.006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 古川 陽, 斎藤 隆泰, 廣瀬 壮一	4. 巻 24
2. 論文標題 演算子積分時間領域境界要素法を用いた様々な材料の波動解析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計算工学	6. 最初と最後の頁 3931-3934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 武藤健太, 中畑和之, 橋爪謙治
2. 発表標題 低周波アレイ探触子を用いたアスファルト舗装内部の映像化
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2020年度秋季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 廣瀬 壮一, 高田 知廣
2. 発表標題 スパースモデリングによる波源同定に関する研究
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2020年度秋季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松尾太聖, 丸山泰蔵, 中畑和之
2. 発表標題 MUSIC 法によるアレイ超音波イメージングの基礎的検討
3. 学会等名 第28回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣瀬壮一, 脇田 歩美
2. 発表標題 スパースモデリングを用いた波動逆解析によるき裂開口変位の推定
3. 学会等名 電子情報通信学会 信学技報
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀合孝太郎, 古川陽
2. 発表標題 Haar waveletを用いた弾性波トモグラフィの開発
3. 学会等名 土木学会北海道支部令和2年度年次技術研究発表会論文報告集第77号
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xiaoyuan Qiu, Sohichi Hirose, Yoshiaki Yamanaka, Tomoko Emoto, Hiroshi Imai, Shunichiro Ito
2. 発表標題 Seismic Wave Tomography Based on Sparse Modeling for Time-lapse Data
3. 学会等名 物理探査学会第141回学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takahiro SAITOH, Masahiko TASHIRO, and Sohichi HIROSE
2. 発表標題 Inverse scattering based on topology sensitivity for defect detection using convolution quadrature time-domain BEM for 3-D elastodynamics
3. 学会等名 The 6th Asia-Pacific International Conference on Computational Methods in Engineering (ICOME2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 榑谷拓馬, 古川陽, 廣瀬壯一, 山中義彰, 江元智子, 今井博
2. 発表標題 スパースモデリングを用いた弾性波トグラフィ手法の検討
3. 学会等名 物理探査学会第141回学術講演会論文集(2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sohichi HIROSE
2. 発表標題 Application of sparse modeling to elastic wave tomography
3. 学会等名 The 6th Joint-Symposium on Mechanics of Advanced Materials & Structures (JSMAMS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Furukawa, T. Saitoh, S. Hirose
2. 発表標題 Time-domain finite element method for wave propagation in fluid-saturated porous solid
3. 学会等名 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanic (APCOM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Supawat Wongthongsiri and Sohichi Hirose
2. 発表標題 A Boundary Element Technique for Scattering of Lamb Waves in Double-Layered Plate with Interface Crack
3. 学会等名 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanic (APCOM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松岡 芳宜, 古川陽, 廣瀬壯一
2. 発表標題 機械学習とFMC/TFM を用いたきずのイメージングに関する基礎的研究
3. 学会等名 第27回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	中畑 和之 (NAKAHATA KAZUYUKI) (20380256)	愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授 (16301)	
研究 分担者	古川 陽 (FURUKAWA AKIRA) (60724614)	北海道大学・工学研究院・准教授 (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------