

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25420426

研究課題名(和文) 構造体健全性診断のための超音波伝搬可視化法による定量的非破壊評価

研究課題名(英文) Quantitative nondestructive evaluation using ultrasonic wave visualization technique for structural health monitoring

研究代表者

山本 哲也 (YAMAMOTO, Tetsuya)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：30312755

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：大型構造物、エネルギープラント、輸送機、産業機械等における安全性・信頼性の確保は喫緊の課題である。我々は、レーザーにより被検体に超音波を励起し、その伝搬現象を動画像として可視化することで、欠陥・損傷部からの波紋を視覚的に捉えて欠陥検出を行う手法の提案を行ってきた。本研究では、従来明らかにすることが難しかった欠陥・損傷状況を明確に把握できる技術を確立し、本手法の測定適用範囲のさらなる拡充を目指す。さらに、極めて長い金属円管においても瞬時に欠陥の有無が判別できるマイクロ波を利用した手法についても検討を行う。最終的に本研究で得られた知見を、モックアップ等の被検体へと展開し、研究結果の検証を行う。

研究成果の概要(英文)：We are now facing an urgent issue how to maintain the security and reliability in large constructions, energy plants, transportation vehicles, industrial machinery, and so on. In our research group, the visualization system using ultrasonic waves for nondestructive evaluation has been proposed and the effectiveness of this system has been demonstrated. The visualization of scattered waves from the defects/damages facilitates the judgement in nondestructive evaluation. This research targets to establish the technology that can grasp the defects more precisely. Moreover, further expansion for application scope is also investigated. In addition, the nondestructive evaluation method using microwaves is considered, because this method can instantaneously detect the defects for very long metal tubes. Finally, the mock-ups (specimens) are fabricated and tested. The good agreements between calculated and measured results were confirmed and the validity of this research was certified.

研究分野：工学

キーワード：非破壊計測 波動伝搬 劣化予測・診断

### 1. 研究開始当初の背景

大型構造物、エネルギープラント、輸送機、産業機械等における安全性の確保は喫緊の課題である。我々は、パルスレーザーにより被検体に超音波を励起し、その伝搬現象を動画像として可視化することで、欠陥・損傷部からの波紋を視覚的に捉えて欠陥検出を行う手法の提案を行ってきた。

### 2. 研究の目的

本研究では、従来明らかにすることが難しかった欠陥・損傷状況を明確に把握できる技術を確立し、本手法の測定適用範囲のさらなる拡充を目指す。さらに、極めて長い金属円管でも瞬時に欠陥の有無が判別できるマイクロ波を利用した手法についても検討を行う。最終的に本研究で得られた知見を、モックアップ等の被検体へと展開し、研究結果の検証を行う。

### 3. 研究の方法

(1)パルスレーザー走査により得られた画像データにおける円形状エコープロファイルに注目し、試験片の欠陥中心位置の推定について検討を行った。前処理としては、円形孔を有する試験片を用いて得られたエコー信号において、ピーク値の抽出としきい値の適用を行った。この前処理後の2次元データ(静止画)を用い、幾何学的な位置関係から欠陥の中心位置について考察を行う。

(2)次に、より高確度な欠陥検出の確立に向けて、パルスレーザー走査により得られた動画像3次元データからハフ変換を適用し波面の検出を試みた。前処理としては、上記の静止画からの欠陥位置推定の場合と同じ手法を適用した。前記では、静止画(2次元スナップショット画像)に対する欠陥位置・波面の検出を試みたが、ここでは時間軸を含めた3次元動画像データに対してハフ変換を適用することで、入射波成分である平面と後方散乱波成分である円錐面を検出対象図形とし、累積度数に関する分布から、入射波成分とともに、欠陥からの後方散乱波成分の検出を行うことを試みた。

(3)パルスレーザー走査を適用した欠陥検出装置において、センサ(探触子)を複数か所に配置することにより、レーザー励起された超音波の伝搬挙動を異なる場所での多系統の信号として同時にモニタリング・映像化を行うことを検討した。センサを1か所のみ配置して各地点からの散乱波を個別に取り扱う従来の測定法と比較し、計測・映像化(診断)に係る時間を大幅に削減することが可能であるという利点に加え、き裂等の線状欠陥においては散乱現象の面内方向性によりセンサの位置によってはこれまで捉えにくかった現象でも、複数か所からの信号の受信・映像化により、より簡易かつ確実に把握する

ことが可能となる。

(4)上記では、センサ(探触子)を複数か所に配置することにより、レーザー励起された超音波の伝搬挙動を異なる場所での多系統の信号として同時にモニタリング・映像化を行う手法を提案し、き裂等の線状欠陥を有する薄板試験片においてその有効性の検証を行ったが、次のステップとして、当該装置において2センサを裏面欠陥を有する厚板試験片に対して適用した際の映像化に関して検討を行った。平板における欠陥に加え厚板における欠陥への適用を含めてその有効性を検討することでレーザー励起超音波計測手法の適用可能性の範囲拡大に資する効果が期待できる。

(5)パルスレーザー走査を適用した欠陥検出装置において、従来は基本的に1箇所のみ欠陥を有する試験片に対して探傷を実施してきたが、ここでは、特に複数か所に近接配置された欠陥の分離判定の可能性に関して、その有効性の検証を行った。垂直探触子を試験片の側面に適用し、欠陥中心間の距離:15~5mmの5種類の貫通欠陥を有する試験片に関して考察を用い、入射波に対して欠陥が前後に並んで近接配置された場合において、欠陥中心間距離が最も近い5mmのケースにおいて2か所の欠陥からの散乱現象(波頭面)を別々に視認可能であるかどうかに関して検討を行った。

(6)より高い信頼性を有する欠陥検出法の確立に向けて、マイクロ波を用いた欠陥検出に関して検討を行う。具体的には、金属円形パイプの内部にマイクロ波を給電するための給電部の最適設計を行った。極めて長い距離を有する金属円管の検査に関してはマイクロ波を用いることで瞬時に欠陥の有無を判定することが可能であるので、サブミリサイズの極めて微小な欠陥検出が可能であるレーザー励起超音波装置と併用することで高速・高精度な欠陥検出が可能となる。

(7)金属円形パイプ内部にマイクロ波を伝搬させるための給電回路に関して、著者らはこれまで11GHz帯において当該回路の最適設計を行い文献値と一致することを確認してきたが、次に5GHz帯において同様にモーメント法を用いて反射特性が最適となる中心導体の長さの最適化、並びに、外導体内径の形状をステップ状に変化させた広帯域構造におけるパラメータの最適化を行い、当該パラメータを用いてプロトタイプを作製した。計算値と実験値とが一致するかどうか検討を行う。

(8)著者らはこれまで11GHz帯において金属円形パイプ内部にマイクロ波を伝搬させるための給電回路の最適設計を行い文献値と

一致することを確認し、当該回路を向かい合わせに配置した際の伝搬特性に関して検討を行ってきた。次に、実際に金属円管に欠陥が存在するケースに関して検討を行う。具体的にはステップ状の不連続が円管に存在する場合のマイクロ波の反射・透過特性に関して検討を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 画像データにおける円形状エコープロファイルからの、試験片の欠陥中心位置の推定については、前処理後の2次元データ（静止画）を用いて幾何学的な位置関係から欠陥の中心位置について考察を行い、欠陥からの散乱直後の時刻におけるスナップショット画像データ（図1(a)）から、ほぼ適切な欠陥中心位置の算出を行うことに成功（図1(c)）した。

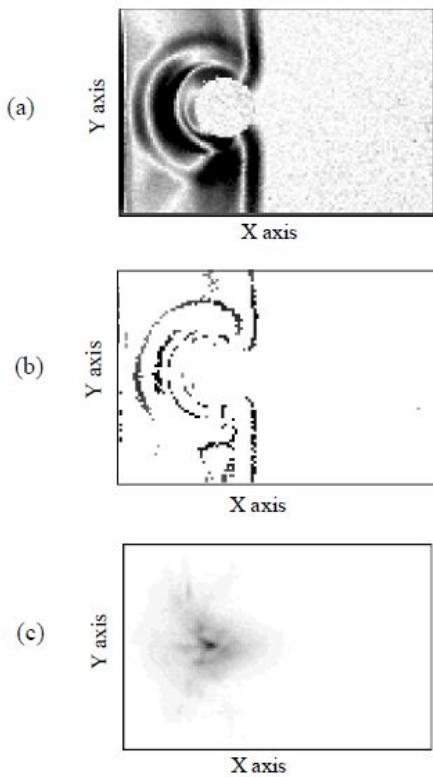


図1 スナップショット画像 (a)オリジナル測定値, (b)前処理後の画像, (c)計算により得られた欠陥の推定位置.

(2) パルスレーザー走査により得られた動画画像3次元データからのハフ変換の適用による波面の検出に関しては、平面の方程式を適用して入射波成分の検出を行い、縦波成分と表面波（横波）成分が、度数の極大点と2番目の集積点として現れることを確認した。欠陥からの散乱波に関しては、そのまま円錐面の方程式を適用すると、透過波成分の速度勾配に影響を受け適切な円錐面を検出することができない。この場合には、同期差分法の適用が必要であり、当該手法を適用し進行波成分を除去することで、ほぼ正確な欠陥の中心位置を捉えることができた（図3）。

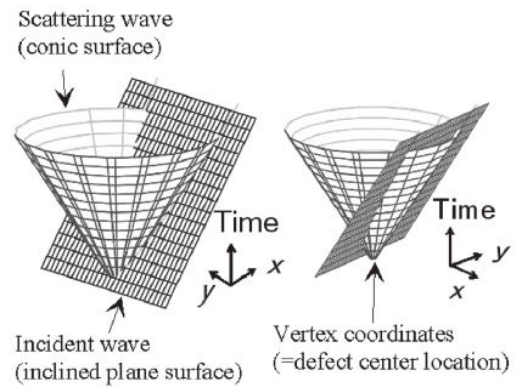


図2 時間軸を考慮した際の斜平面（入射波）と円錐面（欠陥からの散乱波）との3次元的な関係性に関する概念図.

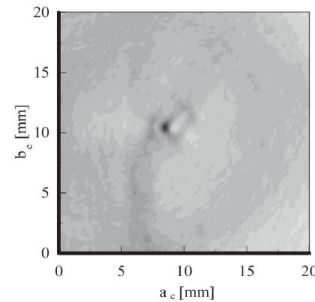


図3 ハフ変換により最終的に求められた円形孔中心位置（円錐面の頂点）.

(3) センサ（探触子）を複数か所に配置することにより、レーザー励起された超音波の伝搬挙動を異なる場所での多系統の信号としてモニタリング・映像化を行う手法に関しては、特に平板に線状欠陥が存在している薄板試験片において測定を行い、き裂等の線状欠陥においては散乱現象の面内方向性によりセンサの位置によってはこれまで捉えにくかった現象でも、複数か所からの信号の受信・映像化により、より簡易かつ確実に把握することが可能であることを実験により具体的に示した。

(4) パルスレーザー走査を適用した欠陥検出装置において、複数センサを裏面欠陥を有する厚板試験片に対して適用した際の映像化に関しては、センサを2か所に向かい合わせに（対向）配置して映像化した場合には、欠陥からの散乱波が確認し難いが、1か所のみセンサを配置した場合には欠陥から拡がる波が適切に確認できる。裏面欠陥を有する厚板試験片に対してセンサを対向配置にして映像化を行うと、底面からの反射波が原因で欠陥からの弱い散乱波が判別し難くなってしまふことをBスコープの図から明らかにした。

(5) パルスレーザー走査を適用した欠陥検出装置における複数か所に近接配置された欠陥の分離判定の可能性に関しては、垂直探触

子を試験片の側面に適用し、欠陥中心間の距離：15～5mmの5種類の貫通欠陥を有する試験片に関して考察を用い、入射波に対して欠陥が前後に並んで近接配置された場合（欠陥中心間距離 5mm）において、2か所に配置された欠陥からの散乱現象（波頭面）を別々に視認することが可能であることを動画像で示した。

(6) マイクロ波を用いた金属円形パイプにおける欠陥検出に関しては、様々なパイプ径に対して電力を供給するための給電回路（図4）を適用した際のマイクロ波の反射特性が良好となる内導体（センターピン）の長さを最適化（図5）した。さらに、同軸構造において外導体内径の形状を変化させたステップ構造（図4(c)）を新たに提案し、本構造を適用することで、さらなる広帯域化が図れることを示した。

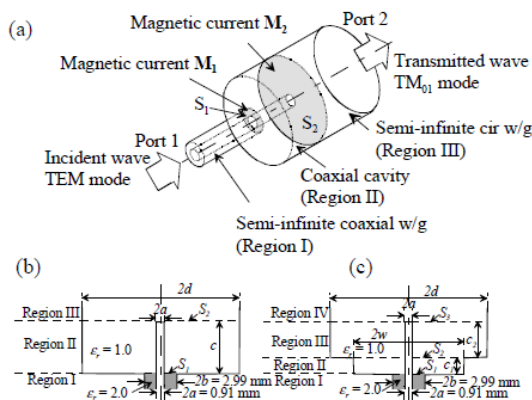


図4(a) マイクロ波給電回路の解析モデル，(b)通常のモデルにおける断面図，(c)広帯域化を意図したステップ構造モデルの断面図．

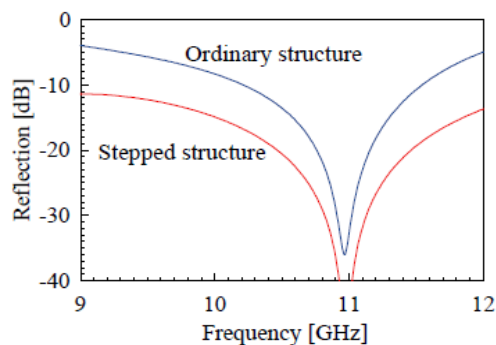


図5 反射特性(通常のモデルと広帯域化を意図したステップ構造モデル)．

(7) マイクロ波を金属円形パイプ内部に伝搬させるための給電回路に関して、実際に5GHz帯においてモーメント法を用いて反射特性が良好となる中心導体の長さの最適化、並びに、外導体内径の形状をステップ状に変化させた広帯域構造におけるパラメータの最適化を行い、最適化されたパラメータを用いてプロトタイプ（モックアップ）を製作した。ベクトルネットワークアナライザを用いて実験的検証を行い、計算値と測定値とが一致

することを確認した。

(8) 金属円管内に減肉を模擬したステップ状の不連続を複数仮定した際の反射・透過特性に関して検討を行った。2箇所配置した不連続部の距離が4分の1波長離れている場合には反射波がお互いに打ち消し合い良好な透過特性が得られるが、距離が2分の1波長離れている場合には反射波が重ね合わさってしまい、より大きな反射特性に帰結されることを計算において確認した。

### 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11件)

Tetsuya Yamamoto, Kei Urabe, and Hiroshi Tsuda, Measured performances of coaxial-to-circular waveguide transitions, Proceedings of 2017 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp.737-738, Jul. 2017, 査読有, DOI:10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072411.

Tetsuya Yamamoto, Kei Urabe, Takashi Tokizaki, Characteristics of circular waveguide with step discontinuities including coaxial feeders, Proceedings of 2016 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 1353-1354, Jul. 2016, 査読有, DOI:10.1109/APS.2016.7696383.

Tetsuya Yamamoto, Nobuyuki Toyama, Hidetaka Miyachi, Hiroshi Tsuda, Novel inspection technique for simultaneous visualization of two waveforms obtained by two-channel simultaneous monitoring, International Journal of Instrumentation Science, vol.5, no.1, pp.6-14, Jul. 2016. 査読有, DOI:10.5923/j.instrument.20160501.02.

山本 哲也, 遠山 暢之, 宮内 秀和, 津田 浩, レーザー励起超音波伝搬現象の映像化による非破壊欠陥診断技術, 分析計測標準研究部門第2回シンポジウム報告集, pp.139-143, 2016年10月, 査読無, <http://www.aist.go.jp/>.

山本 哲也, 卜部 啓, 時崎 高志, 同軸-円形導波管変換器の周波数特性, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.115, no.506, pp.1-6, 2016年3月, 査読無, <http://www.ieice.org/>.

Tetsuya Yamamoto, Kei Urabe, and Hiroshi Tsuda, Transmission characteristics of circular waveguide with coaxial-to-circular waveguide transitions, Proceedings of 2015 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 1050-1051, Jul. 2015, 査読有, DOI:10.1109/APS.2015.7304913.

Tetsuya Yamamoto, Kei Urabe, and Hiroshi Tsuda, Analysis of coaxial-to-circular waveguide transition, Proceedings of 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp.1497-1498, Jul. 2014, 査読有, DOI:10.1109/AP S.2014.6905074.

山本 哲也, 卜部 啓, 遠山 暢之, 津田 浩, 高坪 純治, 複数センサを用いたレーザー励起超音波伝搬現象の映像化, 計測フロンティア研究部門第 11 回シンポジウム報告集, 計測フロンティア研究部門第 11 回シンポジウム報告集, pp.146-150, 2014 年 10 月, 査読無, <http://www.aist.go.jp/>.

Tetsuya Yamamoto, Hidekazu Miyachi, Hiroshi Tsuda, and Junji Takatsubo, Detection of wavefront using Hough transform from time-sequential images recorded by pulsed laser scan, Proceedings of 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp.1990-1991, Jul. 2013, 査読有, DOI: 10.1109/APS.2013.6711653.

山本 哲也, 宮内 秀和, 岩下 哲雄, 津田 浩, 高坪 純治, レーザー励起超音波検査により得られた動画像からのハフ変換による波面の検出, 材料試験技術, vol.58, no.4, pp.176-181, 2013 年 10 月, 査読有, <http://www.mtraj.jp/>.

Tetsuya Yamamoto, Hiroshi Tsuda, and Junji Takatsubo, Estimation of a drill hole's center location from the wavefront in scattering waves visualized by pulsed laser scanning, Journal of Basic and Applied Physics, vol.2, no.5, pp.19-28, Dec. 2013, 査読有, <http://www.academicpub.org/jbap/>.

〔学会発表〕(計 11 件)

Tetsuya Yamamoto, Kei Urabe, and Hiroshi Tsuda, Measured performances of coaxial-to-circular waveguide transitions, 2017 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, CA, USA, Jul. 11 2017.

山本 哲也, 遠山 暢之, 宮内 秀和, 津田 浩, 複数欠陥を有する試験片における超音波伝搬現象の映像化, 2016 年度計量標準総合センター成果発表会, 産業技術総合研究所, 茨城県つくば市, 2017 年 1 月 27 日.

山本 哲也, 遠山 暢之, 宮内 秀和, 津田 浩, レーザー励起超音波伝搬現象の映像化による非破壊欠陥診断技術, 分析計測標準研究部門第 2 回シンポジウム, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県千葉市, 2016 年 9 月 9 日.

Tetsuya Yamamoto, Kei Urabe, Takashi Tokizaki, Characteristics of circular waveguide with step discontinuities including coaxial feeders, 2016 IEEE

Antennas and Propagation Society International Symposium, Fajardo, Puerto Rico, Jun. 30 2016.

山本 哲也, 卜部 啓, 時崎 高志, 同軸 - 円形導波管変換器の周波数特性, 電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会, かんぼの宿石和, 山梨県笛吹市, 2016 年 3 月 10 日.

山本 哲也, 遠山 暢之, 宮内 秀和, 時崎 高志, 2 か所に配置したセンサからの厚板裏面欠陥における超音波伝搬現象の映像化, 2015 年度産業技術総合研究所計量標準総合センター成果発表会, 産業技術総合研究所, 茨城県つくば市, 2016 年 2 月 9 日.

Tetsuya Yamamoto, Kei Urabe, and Hiroshi Tsuda, Transmission characteristics of circular waveguide with coaxial-to-circular waveguide transitions, 2015 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Vancouver, BC, Canada, Jul. 22 2015.

山本 哲也, 卜部 啓, 遠山 暢之, 津田 浩, 高坪 純治, 複数センサを用いたレーザー励起超音波伝搬現象の映像化, 計測フロンティア研究部門第 11 回シンポジウム, 幕張メッセ国際会議場, 千葉県千葉市, 2014 年 9 月 5 日.

Tetsuya Yamamoto, Kei Urabe, and Hiroshi Tsuda, Analysis of coaxial-to-circular waveguide transition, 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Memphis, TN, USA, Jul. 10 2014.

Tetsuya Yamamoto, Hidekazu Miyachi, Hiroshi Tsuda, and Junji Takatsubo, Detection of wavefront using Hough transform from time-sequential images recorded by pulsed laser scan, 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Orlando, FL, USA, Jul. 8 2013.

山本 哲也, 宮内 秀和, 岩下 哲雄, 津田 浩, 高坪 純治, レーザー励起超音波検査により得られた動画像からのハフ変換による波面の検出, 第 257 回材料試験技術シンポジウム, 工学院大学, 東京都新宿区, 2013 年 10 月 17 日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山本 哲也 (YAMAMOTO Tetsuya)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号: 30312755