

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289238

研究課題名(和文) レーザー超音波による高速回転体の温度プロファイリングとその材料加工への応用

研究課題名(英文) Temperature profiling of a rotating object using a laser ultrasonic technique and its application to material process monitoring

研究代表者

井原 郁夫 (Ihara, Ikuo)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80203280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：加熱状態にある回転体の表面や内部の温度プロファイルをリアルタイムでモニタリングするための超音波サーモメトリを創成するとともに、レーザー超音波を駆使した計測手法を加熱される回転円柱に適用し、その有効性を実証した。また、二次元温度場の超音波プロファイリングについても検討した。さらに、この超音波サーモメトリを摺動摩擦による加熱面とその近傍の温度プロファイリングに適用し、その有用性を実証した。このように、材料加工プロセスの非破壊モニタリングへの超音波サーモメトリの有用性が検証された。

研究成果の概要(英文)：In this work, a new ultrasonic thermometry has been developed to provide an effective temperature profiling for both surface and internal temperature distributions of a rotating object. A laser-ultrasonic technique has been applied to a rotating cylinder being heated and its usefulness for non-contact temperature monitoring has been demonstrated. In addition, two-dimensional temperature determination method by the ultrasonic thermometry is studied. Furthermore, temperature profiles near a friction surface of a sliding solid have successfully measured by the ultrasonic method. Thus, practicability of the developed ultrasonic thermometry for material process monitoring has been demonstrated through the present work.

研究分野：非破壊材料評価

キーワード：レーザー超音波 温度プロファイリング 回転体 非接触計測 加熱材料 超音波パルスエコー 摩擦面

1. 研究開始当初の背景

工学、工業の幅広い分野において、加熱状態にある物体内部の温度プロファイルを非破壊・非接触で測定したいというニーズは多数ある。例えば、新しい接合法としてその応用が期待されている摩擦攪拌接合や各種の高速回転をともなう機械加工においては、回転工具の表面(摩擦摺動面)とその内部の温度分布を定量的に把握することが、そのプロセスの最適制御を実現するためのキーポイントとなる。しかし、現状の温度計測手法(熱電対法、赤外線法)では、回転体内部の温度プロファイルをモニタリングすることは不可能であり、加工面(摩擦面)の正確な温度測定も極めて困難な状況である。現在、それらを可能にするような新しい温度計測法の実用化が切望されている。本研究はこのニーズに応えるもので、非接触超音波法(レーザー超音波法)を用いた革新的な温度計測手法を開発し、その実用化をはかるものである。

2. 研究の目的

本研究は、加熱状態にある高速回転体(例えば回転工具)の表面および内部の温度プロファイルをリアルタイムかつ定量的に計測・モニタリングするための新しい超音波手法(超音波サーモメトリ)を創製するとともに、この手法を高温場の材料加工プロセスに適用し、その有効性を実証することを目的とする。このような革新的計測手法を開発することで、従来技術では成し得なかった回転工具(摩擦攪拌接合(FSW)ツール、ドリル等)や被加工材の3次元温度分布の定量的オンプロセスモニタリングを実現し、当該分野のグレイゾーンに一石を投じる。具体的には次の2つの課題に取り組む：(i) レーザー超音波法を用いた高速回転体の非接触温度プロファイル手法の開発、(ii)同手法の回転加工プロセス(FSW加工やドリル加工)への適用。

3. 研究の方法

(1) 回転体の温度分布同定のため逆問題解析モデルを構築し、その妥当性を検証する。まず、超音波パルスエコーを用いた回転体内部の温度プロファイルの同定が原理的に可能かどうかを示すための実証実験を行う。次いで、実用化を前提としたその測定条件と解析条件を明確にする。具体的には、回転する円柱内の超音波速度を指標とした温度プロファイル同定の逆問題モデルを構築し、その解の一意性および安定性を詳細に調べ、適切な解を得るための最適化手法について検討する。この結果を踏まえて、円柱状の加熱材を用いたモデル実験を行い、超音波パルスエコー法による音速測定結果を指標とした逆解析により温度プロファイルを同定する。この実験において、バルク波(縦波、横波)および表面波の非接触計測を行うためのレーザー変位計を活用する。さらに、同定結果の妥当性を検証するために、加熱材中に設置し

た複数個の熱電対(ただし、回転時ではなく静止状態でのみ使用)や赤外線法による実測値、および数値解析による推定値を参照値とし、超音波法による同定結果と比較する。このようなクロスチェックにより解析手法および測定手法の有効性を確認する。

(2) 前年度の結果に基づいてレーザー超音波システムを構築し、その性能評価を行う。まず、超音波計測に基づく回転体の3次元温度分布モニタリングを実現するために、研究代表者が既に開発した手法(レーザー超音波法を用いた1次元温度分布モニタリング)を活用し、レーザーの2次元スキャンニングによる3次元温度分布同定手法を開発する。材料表面へのパルスレーザー照射により材料中への縦波、横波ならびに材料表面上の表面波を励起することができるため、これらを活用した材料内部の温度モニタリングを行う。さらに、回転体の超音波3次元サーモメトリーを想定し、上記システムと前年度に開発した逆解析手法を組み合わせた回転体の超音波サーモメトリーシステムを構築する。

(3) 摩擦面近傍の温度モニタリングへの適用

回転体による加工プロセスの温度プロファイリングを想定して、摺動摩擦界面近傍の温度プロファイリングに関する基礎実験を行う。回転体との摺動摩擦によりその底面が過熱される鋼厚板の摩擦面の温度計測を試み、超音波法による測定結果を熱電対による測定値と比較することでその妥当性を検証する。その有効性および問題点を検証する。被測定物の振動(変位)に起因する超音波信号の劣化に耐えうるレーザードップラー振動計を購入し、温度モニタリングのロバスト化をはかる。マシンの稼働環境下では想定外のノイズ等の悪影響も予想されるので、信号処理を含めてソフトおよびハードの両面から対策を講じ、開発したシステムの有用を検証する。

4. 研究成果

(1) 回転体の温度分布同定のため逆問題解析モデルの構築とその妥当性の検証

回転する円柱内の超音波速度を指標とした表面および内部の温度プロファイル同定の逆問題モデルを構築し、その解の一意性および安定性を調べ、解析モデルと手法の妥当性を確認するとともに最適化手法を開発した。

(2) 超音波パルスエコーを用いた回転体内部の温度プロファイルの同定の実証実験

まず、実用化を前提としたその測定条件と解析条件を明確にした。その結果を踏まえて、鋼製円柱(直径10~100mm)を用いた加熱実験を行い、超音波パルスエコー法による音速測定に基づいて温度プロファイルを同定した。この実験においてはバルク波(縦波、横波)および表面波の非接触計測が不可欠であるため、パルスレーザとレーザー干渉計によ

る計測システムを構築した。次いで、同定結果の妥当性を検証するために、加熱材中に設置した複数個の熱電対（ただし、回転時ではなく静止状態でのみ使用）や赤外線法による実測値（回転中）および数値解析による推定値を参照値とし、超音波法による同定結果と比較した。このようなクロスチェックにより解析手法および測定手法の有効性を確認した。

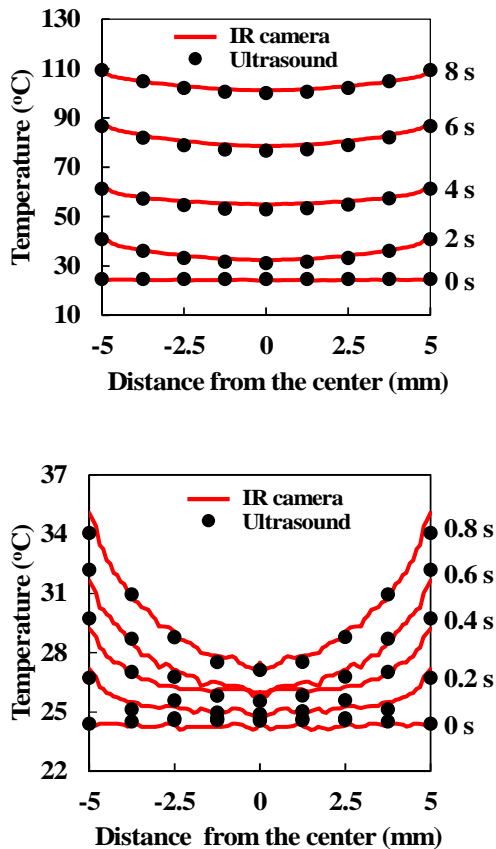


図1 レーザ超音波法を用いた回転円柱内部の温度分布モニタリング結果：(上) 加熱開始から8秒間の温度変化、(下) 加熱開始から0.8秒間の温度変化

(3) レーザ超音波法を用いた円柱体のバルク波および表面波の非接触計測に関する検討

円柱体側面にパルスレーザーを照射したときに励起される縦波、横波および表面波の伝播挙動を、レーザー干渉計またはレーザードップラー変位計で計測し、各波の伝播経路ならびに信号 SN 比の観点から、温度プロファイリングに適した計測条件ならびに計測系を詳細に調べた。直径 30mm 程度のアルミニウム円柱を用いた実験により、レーザードップラー振動計を用いることで、縦波、横波および表面波のいずれも検出可能であることが実証された。

(4) 2 種類のバルク波をパラメータとした円柱端面近傍の温度プロファイリング法の開発

上記の結果に基づいて、2 種類のバルク波の同時計測による円柱端面温度およびその近傍の温度プロファイリングのための逆解析手法を開発した。具体的には、上記アルミニウム円柱の側面にパルスレーザーを照射したときに励起される横波が約 45 度の入射角にて円柱端面に入射し、同端面で反射する成分と、同時に側面で励起される縦波の半径方向伝播成分の二つの波を指標とすることで、同端面近傍の 1 次元温度分布（軸方向に 1 次元分布している）を同定する手法を開発した。一端が加熱されるアルミニウム円柱を用いてこの手法の妥当性を検証した。

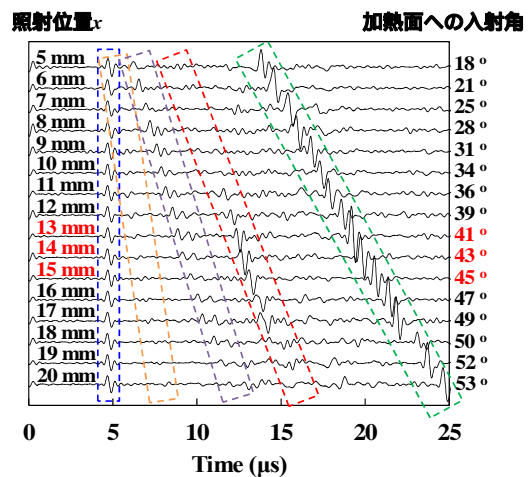


図2 円柱端面近傍からのレーザー照射により励起される縦波、横波および表面波の挙動

(5) 2次元温度プロファイリングの検討：まず、2次元熱伝導解析と2次元温度場の超音波伝播解析を行い、2次元温度プロファイリングのための逆解析手法について検討した。次いで、この解析手法の有効性を実証するための実験装置を構築した。これらの解析手法の妥当性を検証するために、市販の32チャンネル2次元アレイプローブを改良し、その基本性能評価を行うとともにRF波形解析プログラムを開発した。このアレイプローブを片側加熱される鋼厚板に適用し、2次元温度分布の時間変動をモニタリングし、その妥当性を検証した。

(6) 摺動摩擦面近傍の温度分布モニタリングの検討：回転体による加工プロセスの温度プロファイリングを想定して、摺動摩擦界面近傍の温度プロファイリングに関する基礎実験を試みた。まず、フェルトとの摺動摩擦によりその底面が過熱される鋼厚板の摩擦面の温度計測を試み、超音波法による測定結果を熱電対による測定値と比較することでその妥当性を検証した。この実験により、摩擦発熱をともなう摺動面近傍の急激な温度プロファイルの過渡応答が、超音波法により正確に捉えられることが実証された。

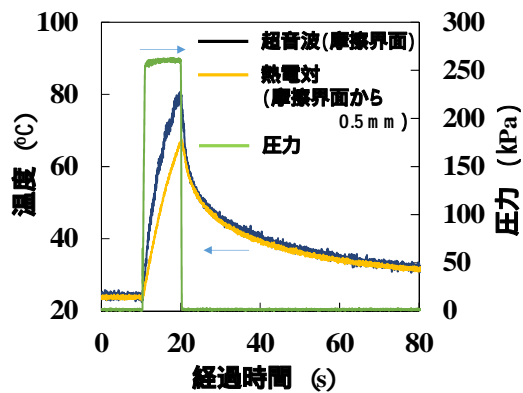


図3 超音波法によりモニタリングした鋼板の摩擦面温度の変化の様子

(7) 計測手法の精度と適用限界の検証

超音波パルスエコーに基づく温度プロファイリングのための計測条件を、時間分解能と空間分解能と測定精度との観点から理論的に詳細に検討し、温度プロファイリングの適用限界について実験を交えて検討した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計10件)

Farhana MOHD FOUZDI and Ikuo IHARA, Numerical study on optimum design of a clad waveguide for ultrasonic pulse-echo measurements with high signal-to-noise ratio, Mechanical Engineering Letters, 査読有 Vol.2, No.15-00727(2016), DOI:10.1299/mel.15-00727

Shingo Aoki, Ikuo Ihara, Feasibility Study on Ultrasonic In-Situ Measurement of Friction Surface Temperature, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol. 2 (2015), No. 1, p.14-00431. DOI: 10.1299/mej.14-00431

Akira Kosugi, Yasuhiro Ono, Iwao Matsuya, and Ikuo Ihara, Application of Laser Ultrasound to Noncontact Temperature Profiling of a Heated Hollow Cylinder, Journal of Physics: Conference Series 査読有 520 (2014) 012015. doi:10.1088/1742-6596/520/1/012015

Ikuo Ihara, Kohei Ohtsuki, Iwao Matsuya, Influence of Uniaxial Stress on the Stress-Strain Curve Measured by Nanoindentation, Applied Mechanics and Materials, 査読有 Vol. 597, pp 17-20 (2014). Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.597.17

Iwao Matsuya, Fumiya Matsumoto and Ikuo Ihara, Ultrasonic Lateral Displacement Sensor for Health Monitoring in Seismically

Isolated Buildings, Sensors, 査読有 15, pp.17000-17012(2015), doi:10.3390/s150717000

Iwao Matsuya, Fumiya Matsumoto, Ikuo Ihara, Experimental Study on Lateral Displacement Measurement using Air-Coupled Ultrasound Transducers, Mechanical Engineering Journal, 査読有 Vol. 2 (2015), No. 1, p. 14-00379. 10.1299/mej.14-00379

Muhammad Nur Farhan Saniman, and Ikuo Ihara, Application of Air-Coupled Ultrasound to Noncontact Evaluation of Paper Surface Roughness, Journal of Physics: Conference Series 査読有 520 (2014), 012016,

doi:10.1088/1742-6596/520/1/012016

Farhana Mohd Foudzi and Ikuo Ihara, Development of Polygonal Buffer Rods for Ultrasonic Pulse-Echo Measurements, Journal of Physics: Conference Series 査読有 520 (2014) 012025 doi:10.1088/1742-6596/520/1/012025

Iwao Matsuya, Kento Matozaki, Akira Kosugi, and Ikuo Ihara, A Feasibility Study on Generation of Acoustic Waves Utilizing Near-Field Optics, Journal of Physics: Conference Series 査読有 520 (2014) 012003,

doi:10.1088/1742-6596/520/1/012003

I. Ihara, A. Kosugi, Y. Ono and I. Matsuya, Noncontact Temperature Profiling of Rotating Cylinder by Laser-Ultrasound in "Sensing Technology: Current Status and Future Trends III", Smart Sensors, Measurement and Instrumentation Volume 11, Mason, Alex, Mukhopadhyay, Subhas Chandra, Jayasundera, Krishanthi Padmarani (Eds.), pp.327-339, Springer International Publishing, 2015, 査読無 DOI: 10.1007/978-3-319-10948-0_16 Print ISBN: 978-3-319-10947-3

〔学会発表〕(計22件)

Farhana Mohd Foudzi, Ikuo Ihara, Newly Designed Waveguide Probes for Ultrasonic Pulse-Echo Measurements, Malaysia-Japan Joint International Conference 2015 (MJJIC2015), Ube, Yamaguchi, JAPAN on November 13-15, 2015.

Ikuo Ihara, Shingo Isobe, Akira Kosugi, Yudai Honma, Iwao Matsuya, and Yuya Ichige Quantitative Evaluation of Transient Heat Flux through Solid Surface by Ultrasonic Thermometry, Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol. 36, 2P2-6, Tuskuba, November 5-7, 2015.

I. Ihara, A. Kosugi, S. Isobe and I. Matsuya, Simultaneous Measurements of Temperature and Heat Flux Using Ultrasound, Proceedings

of the 2015 Ninth International Conference on Sensing Technology(ICST2015), Edited by S.C. Mukhopadhyay, O. Postalache, K. P. Jayasundera and A. Swain, pp.254-257, Auckland, New Zealand, December 8-10, 2015. (ISBN 978-1-4799-6313-3)

Muhammad Nur Farhan Bin Saniman and Ikuo Ihara, Noncontact Method for Characterizing Non-Gaussian Rough Surfaces by Air-Coupled Ultrasound, Proceedings of JSNDI Fall conference, International Session, pp.141-142, Sapporo, Japan, October 15-16, 2015.

Farhana Mohd Foudzi, and Ikuo Ihara, Newly Designed Ultrasonic Waveguide Probes for Pulse-Echo Measurements at High Temperatures, The 4th International GIGAKU Conference in Nagaoka, p.80, Nagaoka, June 19-21, 2015.

Muhammad Nur Farhan Saniman, and Ikuo Ihara, Development of Ultrasonic Method for Roughness Evaluation of Non-Gaussian Surface, Proceeding of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2015 (ATEM'15), Toyohashi, Japan, October 4-8, 2015.

Shingo Isobe, Ikuo Ihara, and Akira Kosugi, In-Situ Noninvasive Heat Flux Evaluation by Ultrasound for High Temperature Material Process Monitoring, Proceedings of 4th Asian Symposium on Materials and Processing (ASMP2015), pp.1-2, Lombok Island, Indonesia, August 10-13, 2015 (ISSN 1411-1284)

Akira Kosugi, Ikuo Ihara, Iwao Matsuya and Shotaro Shinoda, Laser Ultrasonic Thermometry for Measuring Internal Temperature Profiles Near Heating Surface by Reflected Waves at Oblique Incidence, 4th International Symposium on Laser Ultrasonics & Advanced Sensing (LU2015), June 29th - July 2nd, 2015, Evanston, Illinois, USA.

Iwao Matsuya, Takamasa Saito, Kiyoshi Ohnuma, Takashi Kuwahara, Mizuki Kondo and Ikuo Ihara, Simultaneous Ultrasound Velocity and Thickness Measurement for Thin Film, 4th International Symposium on Laser Ultrasonics & Advanced Sensing (LU2015), June 29th - July 2nd, 2015, Evanston, Illinois, USA.

Muhammad Nur Farhan Saniman, and Ikuo Ihara, Evaluation of the Skewed Rough Surface Profile based on the Johnson Distribution by Ultrasonic Wave Scattering, Proceedings of 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35, pp.245-246, Tokyo, December 3-5, 2014.

Farhana Mohd Foudzi, and Ikuo Ihara, Polygonal buffer rods having irregular

cross-sectional shapes for improving the SNR in ultrasonic pulse-echo measurements, Proceedings of 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35, pp.231-232, Tokyo, December 3-5, 2014.

Akira Kosugi, Shotaro Shinoda, Iwao Matsuya, and Ikuo Ihara, Ultrasonic Temperature Monitoring near Heating Surface by Measuring Oblique Incident Bulk Waves Using Laser Ultrasound, Proceedings of 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35, pp.445-446, Tokyo, December 3-5, 2014.

Hirokazu Watanabe, and Ikuo Ihara, New Method for Liquid Temperature Sensing by Use of a Combination of Laser Doppler Velocimetry and Ultrasonic Pulses, Proceedings of 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35, pp.267-268, Tokyo, December 3-5, 2014.

Takamitsu Saitoh, Iwao Matsuya, Onuma, Kuwabara, Kondoh, and Ikuo Ihara, Measuring the Thickness of Thin Film of Unknown Sound Velocity by Acoustic Resonant Spectroscopy, Proceedings of 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.35, pp.53-54, Tokyo, December 3-5, 2014.

Ikuo Ihara, and Shingo Aoki, In Situ Monitoring of Temperature Rise in Friction Surface Using Ultrasonic Technique, The 8th International Conference on Sensing Technology (ICST2014), Liverpool, UK, 2-4 September, 2014, Abstract book, pp.48.

Iwao Matsuya, Kento Matozaki, Yuki Takahashi, and Ikuo Ihara, Enhancement of Ultrasound Generated by Evanescent Light in Confined Geometry, Proceedings of IEEE Sensors 2014, pp.598-602, (2014), Valencia, Spain, November 2-5, 2014.

Ikuo Ihara, Kohei Ohtsuki, and Iwao Matsuya, Influence of Uniaxial Stress on the Stress-Strain Curve Measured by Nanoindentation, The 3rd International Conference on Advanced Materials Design and Mechanics (ICAMDM2014), May 23-24, 2014, Singapore.

Ikuo Ihara, and Shingo Aoki, Ultrasonic Method for Measuring Frictional Temperature Rise in Rubbing Surface, 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT2014), October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic., Published in The e-Journal of Nondestructive Testing - ISSN 1435-4934, Vol.19 No.12, 2014.

Shingo Aoki and Ikuo Ihara, Nondestructive Monitoring of Temperature in Friction Surface by Ultrasonic Thermometry, Proceeding of the 4th JSME/ASME International Conference on Materials and

Processing (ICM&P2014), June 9-13, 2014, Detroit, Michigan, USA.

Iwao Mastuya, Fumiya Matsumoto, and Ikuo Ihara, Experimental Study on Lateral Displacement Measurement by Air-Coupled Ultrasound for Structural Health Monitoring, Proceeding of the 4th JSME/ASME International Conference on Materials and Processing (ICM&P2014), June 9-13, 2014, Detroit, Michigan, USA.

- 21 Ikuo Ihara, Akira Kosugi, Yugo Ifuku, Iwao Matsuya, and Yasuhiro Ono, Real-Time Ultrasonic Thermometry for Internal Temperature Profiling and Its Application to Heated Material Monitoring, The Fifth US-Japan NDT Symposium, June 16-20, 2014, Maui Island, Hawaii, USA
- 22 Ikuo Ihara, Akira Kosugi, Yugo Ifuku, Iwao Matsuya, and Yasuhiro Ono, Recent Advances in the Ultrasonic Thermometry for Monitoring Internal and Surface Temperatures of Heated Materials, Abstract book of Ultrasonics2014, pp.113, 15-17 September, 2014, Caparica-Almada, Portugal

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

井原 郁夫 (IHARA, Ikuo)

長岡技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 : 8 0 2 0 3 2 8 0

(2)研究分担者

松谷 巖 (MATSUYA, Iwao)

長岡技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号 : 0 0 5 1 4 4 6 5

(3)連携研究者

宮下幸雄 (MIYASHITA, Yukio)

長岡技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 0 0 3 0 3 1 8 1

(4)海外研究協力者

Subhas Mukhopadhyay

Professor, School of Engineering and Advanced Technology, Massey University, New Zealand