

令和元年6月11日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04507

研究課題名(和文) 局所的超音波サーモメトリの創成とその非均質物体の内部・界面温度計測への適用

研究課題名(英文) Development of a high resolution ultrasonic thermometry and its application to internal and interface temperature measurements of inhomogeneous media

研究代表者

井原 郁夫 (Ihara, Ikuo)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：80203280

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、多層材や微小構造材の内部や界面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局所領域用の超音波サーモメトリを開発し、その手法の有効性を実証した。まず片面加熱される2層構造材に本手法を適用し、各材料中の温度プロファイル、界面温度および熱流束の計測に成功した。また、界面波(Scholte波、Wedge波)を適切に選択することで異材界面局所領域の超音波サーモメトリが可能であることがわかった。現在、空間分解能の向上を図るためにSN比に優れた極細プローブのサーモメトリへの実用可能性を検証している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、局所的な超音波パルスエコー計測と逆問題解析手法との融合により、多層材や微小構造材の温度プロファイル、特に急激な温度勾配を有する加熱面近傍や異材界面温度などを非破壊的にモニタリングする手法を開発したことに学術的意義がある。その成果は、熱影響を受ける異材接合材、膜構造材、複合材、電子デバイスなどの温度プロファイルの定量的評価や、材料やデバイスの製造プロセスの最適制御にも適用可能であり、その産業上の利用価値は高い。さらに、本手法は非定常熱伝導・熱伝達を伴う加工やトライボロジーに関わる未知現象を解明するための新たな基礎情報を提供するためのツールとしての活用も期待される。

研究成果の概要(英文)：In this work, a high resolution ultrasonic thermometry has been developed to measure and monitor the temperature profile inside and at the interface of multilayer materials and micro-materials in real time and quantitatively. We applied the present method to a two-layer structure whose single side is heated, and succeeded in measuring the temperature profile, interface temperature and heat flux in each material. It was also found that the ultrasonic thermometry of the local region of dissimilar material interface could be possible by appropriately selecting the interface wave (Scholte wave or Wedge wave) to be used for the measurement. In order to improve the spatial resolution, we are verifying the practicability of a thin rod probe with excellent signal-to-noise ratio to the thermometry.

研究分野：超音波を用いた非破壊評価

キーワード：超音波 サーモメトリ 温度分布 界面温度 多層構造体 局所測定 熱流束 非破壊評価

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

工学、工業の幅広い分野において、非均質物体（ここでは、ミクロンオーダー以上の微細構造を有する材料や微小構造体を指す。例えば、膜構造材、異材接合体、コーティング膜や複合材、SMT技術に基づく3次元電子デバイスなどが挙げられる。）の内部温度を非破壊かつ定量的に測定したいというニーズは多数ある。特に、そのような非均質体の製造・加工プロセスやその実用段階では高温加熱や内部発熱による熱的不安定性が強くなるため、その内部や界面の温度分布を局所的かつリアルタイムでモニタリングすることが切望されている。そのような温度モニタリングが可能となることで当該構造体の製造・加工プロセスの最適制御を実現でき、その品質と信頼性の向上に繋がる。しかし、現状の温度計測手法（熱電対法、赤外線法）では、そのような非均質体の内部や界面の温度プロファイルをモニタリングすることは極めて難しく（ほぼ不可能）、何らかの間接測定と数値シミュレーションによる予測に頼らざるを得ないのが実状である。

本研究は上記のニーズに応えるもので、非均質物体に適用可能な新たな超音波サーモメトリを開発し、その実用可能性について検討するものである。超音波による温度計測の原理は媒体中の超音波伝播速度の温度依存性を利用するもので、既にいくつかの検討がなされている。研究代表者らは超音波サーモメトリによる物体内部温度プロファイリングに関する先駆的研究を行ない、その有用性を確認している。しかし、現状の手法は単純な形状の対象物への適用に留まっており、複雑な構造を有する材料への適用は未着手である。特に、膜構造材、複合材、局所領域などの温度測定については全く検討されておらず、未開拓の領域である。本研究はここに一石を投じるものである。

2. 研究の目的

本研究は、非均質物体（例えば、何らかの構造不均一性を有する材料や構造体）の内部や界面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規な超音波法（局所的超音波サーモメトリ）を創成するとともに、この手法を材料の加熱プロセスに適用し、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複雑構造材（例えば、膜構造材料、複合材料、コーティング薄膜、MEMSなど）の内部および界面の非破壊的溫度計測の実現を目指す。具体的には次の2つの課題に取り組む：(i) 超音波パルスエコー法を用いた多層構造体内部の温度プロファイリング法の開発、(ii) 同手法の高空間分解能化とその微小構造体・材料への適用。

3. 研究の方法

まず、異材界面を有する多層構造体において、その界面から流入する熱流束を、超音波法により定量評価のための解析手法を構築し、その妥当性を実験により検証する。これにより多層構造体への超音波サーモメトリの適用可能性を見出す。

次いで、2次元温度場への適用を想定し、その空間内の超音波パルスエコー計測を実現するために、レーザドップラー振動計を活用したレーザ走査による2次元超音波計測システムを構築する。これにより2次元構造物（多層構造体を含む）への超音波計測の可能性を探る。

また、多層構造体の温度プロファイリングにおいて欠かせない材料界面の界面温度、界面近傍の温度プロファイル、界面に流入する熱流束を定量的に同定するための逆解析手法を構築し、異材接合体（拡散接合）を用いた検証実験により、超音波サーモメトリの新たな有用性を実証する。さらに、上記の一連の研究による成果や知見を基に、異材界面、薄材、微小構造ならびに溶融材料への超音波サーモメトリの適用について検討する。

4. 研究成果

(1) 異材界面を有する多層構造体において、その界面から流入する熱流束を、超音波法により定量評価のための解析手法を構築し、その妥当性を実験により検証した。具体的には、片面加熱される2層構造体に超音波パルスエコー法を適用し、その界面から流入する熱流束を非破壊的に同定し、その妥当性を検証するために市販の熱流束センサーによる測定値と比較した。これにより、当該手法の有効性が実証された。さらに、LabVIEWを駆使することで、当該超音波手法を活用した温度分布と熱流束のリアルタイムモニタリングシステムを構築した。

(2) 上記評価における異材界面での接触熱抵抗の影響を検討するために、多層構造体の接触状況（真実接触状態）が超音波挙動に及ぼす影響を理論的に考察した。ガウシャンならびに非ガウシャン粗さを有する材料表面での超音波反射・散乱をKirchhoff理論を駆使して定量的に検討した。これらの結果は、超音波パルスエコー法を用いた多層構造体内部の温度プロファイリングを実施するための有益な知見となった。

(3) 2次元構造を有する構造体に対する超音波サーモメトリの適用を試みた。まず、研究代表者は既に超音波法を用いた1次元温度分布プロファイリングを実現しているため、この技術に基づいて2次元温度分布の簡便な同定手法を提案した。次いで、2次元構造または2次元温度場に対して64チャンネルのアレイ探触子による超音波パルスエコー測定を実施した。鋼材について検討した結果、各チャンネルの超音波RF波形信号は一樣ではなくSN比に差が現れたため、現行のアレイ探触子の使用は適切ではないと判断し、アレイの代用としてレーザドップラー振動計を活用したレーザ走査による2次元超音波計測システムを構築した。さらに、多層

構造体の温度プロファイリングにおいて欠かせない材料界面の界面温度、界面近傍の温度プロファイル、界面に流入する熱流束、接触熱抵抗を定量的に同定するための逆解析手法を構築し、異材接合材（拡散接合）を用いた検証実験により、超音波サーモメトリの有用性を検証した。

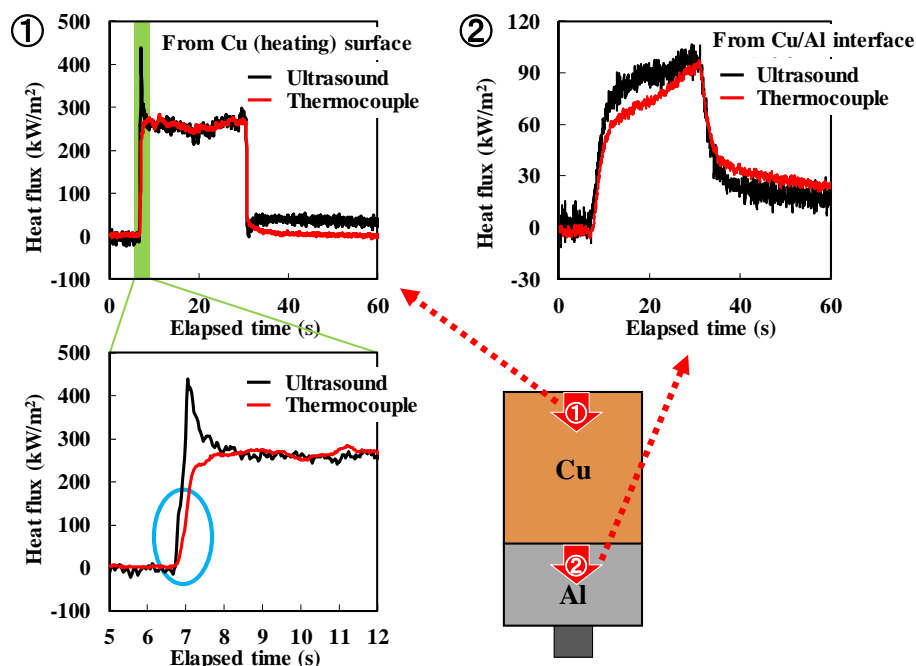


図1 開発した超音波サーモメトリを用いたCu/Al摩擦接合材の各界面における熱流束のリアルタイムモニタリングの実測例：①は加熱面から流入する熱流束の変化の様子、②は接合界面から流入する熱流束の変化の様子

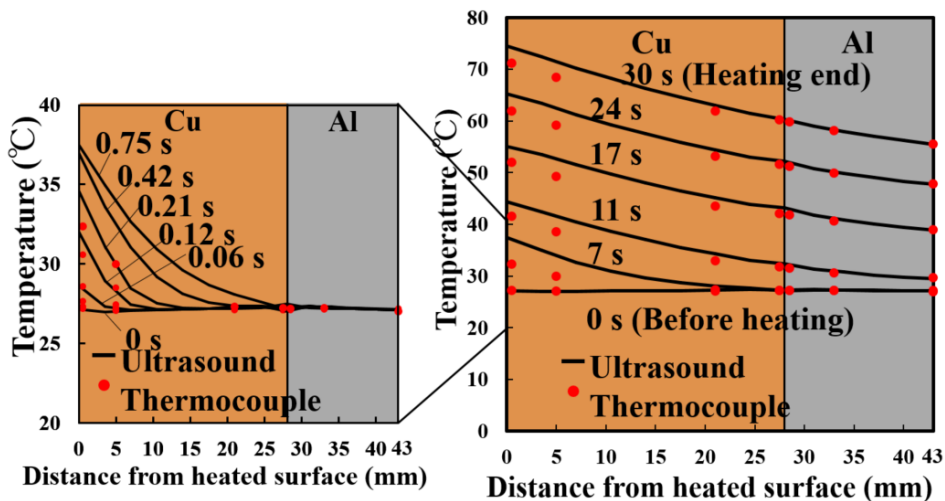


図2 開発した超音波サーモメトリを用いたCu/Al摩擦接合材内部の温度プロファイリングの実測例：加熱面（Cu表面）温度および内部温度プロファイルの変化の様子

(4) 3次元超音波伝搬シミュレーションにより漏洩表面波（Scholte波）の解析を行い、サーモメトリへの適用を検討した。さらに、極局所領域の計測を目指した近接場光の活用についても検討し、エバネッセント光による超音波励起に関する検証実験を行った。まず、異材界面および材料先端部の超音波伝播特性を把握するために、界面波（表面波（Scholte波）、ウェッジ波）の伝播挙動を数値解析により詳細に調べた。2次元および3次元有限要素波動伝播シミュレーションにより漏洩表面波（Scholte波）とウェッジ波の伝播挙動を解析し、それらの位相速度や減衰挙動の周波数依存性や伝播モード依存性について定量的に明らかにするとともに、その予測の妥当性を実験により検証した。これらの結果から、界面波の種類と伝播条件を適切に選択することで異材界面（界面近傍）の超音波サーモメトリが可能であることが、またウェッジ波のような局所伝播波を活用することで局所領域への適用も可能となることが明らかになった。

た。最後に、局所領域計測を実現するための新たな手法としてテーパロッドプローブ（プローブ端部が小さくアスペクト比の大きな導波棒）の活用について検討した。これに際しては、これまでに研究代表者が培ってきた超音波バッファロッドの設計ノウハウを活かすことで、信号SN比に優れた高性能プローブの開発に成功した。3次元波動伝播シミュレーションによる材料・形状・構造の最適設計を行い、試作品の性能を評価した。このプローブを用いることで、鋼などの金属のみならず樹脂（溶融樹脂を含む）を評価対象とした超音波サーモメトリが可能となった。

以上のように、従来技術では成し得なかった複雑構造材の内部や界面の非破壊的温度プロファイリングの実現可能性が確認できた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 18 件)

- ① 高橋学、井原郁夫、渡辺弘和、阿部将典、超音波とレーザを併用した水温の非侵襲計測、非破壊検査、Vol. 67, No. 9, pp. 486-492 (2018)
- ② Iwao Matsuya, Yudai Honma, and Ikuo Ihara, Experimental Study on Liquid-Level Measurement Based on Laser Ultrasonic technique and Wedge Acoustic Wave, The Proceedings of Meetings on Acoustics: a serial publication of the Acoustical Society of America, Vol. 32, Issue 1, 030012 (2018), doi.org/10.1121/2.0000714
- ③ Ikuo Ihara, Masanori Abe, Farhana Binti Mohd Foudzi, and Takeyuki Kurauchi, Ultrasonic Monitoring of Molten Polymer during Unidirectional Solidification using Polygonal Buffer Rod Probe, The e-Journal of Nondestructive Testing, Vol. 23 No. 3 (March 2018), ID59 (pp. 1-8), ISSN 1435-4934.
- ④ Iwao Matsuya, Yudai Honma, Masayuki Mori and Ikuo Ihara, Measuring Liquid-Level Utilizing Wedge Wave, Sensors, 18(1), 2, 2018; doi:10.3390/s18010002
- ⑤ Muhammad Nur Farhan SANIMAN and Ikuo IHARA, Feasibility Study on Characterization of Non-Gaussian Rough Surface by Ultrasonic Reflection Method with the Kirchhoff Theory, Mechanical Engineering Journal, Vol. 3, No. 6, (Paper No. 16-00162) pp. 1-13 (2016), DOI:10.1299/mej.16-00162
- ⑥ 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, Vol. 2, No. 15-00727 (2016), [DOI: 10.1299/mel.15-00727]

[学会発表] (計 71 件)

- ① Ikuo Ihara, Ryoichi Sawada, Youji Ogawa, Application of Ultrasonic Thermometry to Condition Monitoring of Heated Materials, to be presented in 2nd World Congress on Condition Monitoring (WCCM2019), December 2-5, Singapore
- ② Ikuo Ihara, Takeyuki Kurauchi, and Masanori Abe (Invited), Ultrasonic Detection of Solidification Front of Molten Polymer Using Buffer Rod Probe, to be presented in IEEE 2019 Far East Forum on Nondestructive Testing & Evaluation, June 24-27, 2019, Qingdao, China
- ③ Ryoichi Sawada, Youji Ogawa and Ikuo Ihara, Study on Accuracy Improvement in Ultrasonic Thermometry Based on Pulse-Echo Method, to be presented in International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics (ATEM' 19), October 7-11, 2019, Niigata, Japan
- ④ Yasuaki Kawano, and Ikuo Ihara, Noninvasive Measurement of Heat Flux at an Interface between Dissimilar Materials based on Ultrasonic Thermometry, Proc. of The 5th Asian Symposium on Materials and Processing (ASMP2018), December 7-8, 2018, Bangkok, Thailand, pp. 116-117.
- ⑤ Ikuo Ihara, Shingo Aoki, Akira Kosugi, Yugo Ifuku, Yasuhiro Ono, Iwao Matsuya, and Takeyuki Kurauchi, Visualization of Temperature Profiles in Heated Materials by Ultrasonic Thermometry, The Sixth Japan-US NDT Symposium, Oahu, Hawaii, USA, July 8-12, 2018.
- ⑥ Ikuo Ihara and Akira Kosugi, Noncontact Temperature Sensing of Heated Cylindrical End using Laser Ultrasonic Technique, Proceedings of the 2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST2017), pp. 371-374, Sydney, Australia, Dec 4-6, 2017,
- ⑦ I. Matsuya, Y. Honma, and I. Ihara, Measuring Liquid-level Utilizing Wedge Wave, 2017 International Congress on Ultrasonics (2017 ICU), Honolulu, Hawaii, USA, Dec 18 - 20, 2017.
- ⑧ Masayuki Mori, Ikuo Ihara, Iwao Matsuya, and Masanori Abe, Numerical Simulation Study

on Wedge Elastic Waves Propagating along Sharp Edge, Proceedings of 38th Symposium on Ultrasonic Electronics, Vol.38, 2P2-11-1-2, Tagajyo, October 25-27, 2017.

- ⑨ Ikuo Ihara, Shingo Isobe, Yudai Honma, Iwao Matsuya, and Yuya Ichige, In situ Noninvasive Ultrasonic Measurement of Heat Flux through a Heated Solid Surface, 5th International Symposium on Laser Ultrasonics & Advanced Sensing (LU2016), July 4th - July 8th, 2016, Linz, Austria.

〔図書〕(計1件)

- ① I. Ihara, A. Kosugi, Noncontact Temperature Sensing of Heated Cylindrical Rod by Laser-Ultrasonic Method in "Modern Sensing Technologies", Smart Sensors, Measurement and Instrumentation Volume 29, Subhas Chandra Mukhopadhyay, Krishanthi P. Jayasundera, Octavian Adrian Postolache(Eds.), pp.253-266, Springer Nature Switzerland AG, 2018, ISBN 978-3-319-99540-3, ISSN 2194-8402, DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-99540-3>

②

〔産業財産権〕

○出願状況(計3件)

① 名称:液面位置検出装置

発明者:井原郁夫、森雅之、粉川えみい、木村満、杉本和之、小林悠太、白井健朗、原田卓治

権利者:長岡技術科学大学、日本精機(株)

種類:特許

番号:特願 2019-036013

出願年:平成 31 年

国内外の別:国内

② 名称:液面位置検出装置

発明者:井原郁夫、森雅之、粉川えみい、木村満、杉本和之、小林悠太、白井健朗、原田卓治

権利者:長岡技術科学大学、日本精機(株)

種類:特許

番号:特願 2019-036016

出願年:平成 31 年

国内外の別:国内

③ 名称:検査装置および検査方法

発明者:坂口賢治、井原郁夫、渡辺拓也

権利者:長瀬フィルター(株)、長岡技術科学大学

種類:特許

番号:特願 2018-018032

出願年:平成 30 年

国内外の別:国内

○取得状況(計0件)

〔その他〕

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名:松谷巖

ローマ字氏名:Iwao Matsuya

所属研究機関名:長岡技術科学大学

部局名:工学研究科

職名:助教

研究者番号(8桁):00514465

(2)研究協力者

研究協力者氏名：鎌土重晴

ローマ字氏名：Shigeharu Kamado

研究協力者氏名：Subhas C. Mukhopadhyay

ローマ字氏名：Subhas C. Mukhopadhyay

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。