

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 8日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656454

研究課題名（和文） 表面波スペクトロスコピーを利用した極表面層の温度プロファイリングの実証研究

研究課題名（英文） Feasibility study on surface temperature depth profiling by surface acoustic wave spectroscopy

研究代表者

井原 郁夫 (IHARA IKUO)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号：80203280

研究成果の概要（和文）：本研究は、超音波を用いた材料表面温度勾配の定量的評価に関するもので、数値シミュレーションと実験の両面から検討を行なった。まず、Bi 数を指標とした理論的検討によって、多くの工業金属材料では表面層に急激な温度勾配をある一定時間、安定的には存在させるのは難しいことが確認された。そこで、差分法数値シミュレーションによる検討を行った結果、表面波分散による温度勾配の評価は理論的には可能であるが、現実に予想される音速測定の実験誤差を考慮すると、温度勾配定量計測は現状ハードウェアでは難しいことがわかった。しかし、比較的緩やかな温度勾配であれば既存の超音波計測手法を用いて評価できることが実証された。

研究成果の概要（英文）：In this work, feasibility study on surface temperature depth profiling by surface acoustic wave (SAW) spectroscopy has been made theoretically and experimentally. At first it has been demonstrated theoretically that it seems difficult for many of industrial materials to have a steep temperature gradient in which the material surface is being heated. Based on the prior information, numerical simulations rather than experiments are performed to examine the feasibility of surface temperature depth profiling by SAW. The results show that although surface temperature gradient might be able to be determined from SAW dispersion, it must be very difficult to realize such quantitative determination with experimental data measured using a conventional ultrasonic instrumentation. This is basically because of measurement uncertainty in ultrasonic signals of the present apparatus. It is fortunately demonstrated that ultrasonic pulse-echo technique with an effective inversion method provides an appropriate surface temperature depth profiling if the temperature gradient near material surface is gradual.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：非破壊検査、表面温度、弾性表面波、温度勾配、表面波スペクトロスコピー

1. 研究開始当初の背景

工学、工業の幅広い分野で用いられる構造材料や機能材料の諸特性は温度と強い関わりを持っている。特に、材料の使用環境や製

造工程によっては、その表面近傍に急激な温度勾配が生じることがあり、それによって局所的に発生する熱応力が材料の力学特性（主に表面強度）を著しく低下させることが指摘

されている。また、そのような局所的な温度勾配は材料の機能特性（電気特性、磁気特性など）にも影響を与えることが知られている。そのような理由から、各種の電子デバイスや微小構造体（MEMS）の開発・実用化においては、それらの信頼性の確保・向上の観点から、極表面層の温度勾配の正確な把握が要求されている。しかし、現在用いられている温度計測手法（熱電対法や赤外線法）では、そのような極表面層の温度を計測することは極めて困難であり、その温度勾配（深さ方向のプロファイル）の計測は実質的に不可能である。

一方、超音波の伝搬特性が温度に敏感であることはよく知られており、近年、研究代表者らは超音波パルスエコー法を駆使した全く新しい温度モニタリング手法を開発した。この手法の原理と表面波計測を組み合わせることで、これまで不可能と考えられていた極表面層の温度勾配の定量的な計測が可能になると考えられる。

学術的特色および予想される結果の意義としては、次の2点が挙げられる：

①超音波による極表面層の温度プロファイリングの可否を実証することが最大の特色である。熱工学の分野においても局所領域の温度プロファイリングは切望されているにもかかわらず、未だに実現されていない技術である。本研究はそこに一石を投じるものである。

②極表面層の温度プロファイリングが可能になることで、ナノ構造体や薄膜を駆使した先進デバイスやMEMSの実用化・信頼性確保に繋がることはもちろんのこと、温度計測に関わる物理・工学の幅広い分野への波及効果が期待される。

2. 研究の目的

本研究は、各種材料の極表面層の温度勾配を非破壊的に計測・モニタリングする新しい手法を創出するものである。すなわち、材料表面を伝搬する超音波（一般に表面弾性波と呼ばれるもので、以下では表面波と略す）の伝搬挙動が材料表面特性に極めて敏感であることに着目し、これを材料表面近傍の温度勾配の評価に活用することを提案するものである。具体的には、表面波の位相速度の周波数依存性を指標として、他の計測手法では得ることができない極表面層（数ナノから数ミクロン、あるいは数ミリメートル程度まで）に存在する急激な温度勾配を定量的に同定することを試み、その有効性を実証するものである。

期間内に明らかにすべき事項としては：

①表面波スペクトロスコピー（表面波の周波数分散を利用した計測・解析手法）による極表面層の温度プロファイリング（深さ方向

の温度分布計測）の可否を実証する。

②もし可能な場合にはその精度や適用限界を実験により明らかにする。

3. 研究の方法

表面波スペクトロスコピーを利用した極表面層の温度プロファイリングに関する実証研究を遂行するために、以下の実験および検討を行う：

①高温での高精度な表面波スペクトロスコピーを実現するために、非接触での超音波計測が可能なシステムを構築する。このシステムにより高温場での表面波の伝播挙動（位相速度および減衰特性）を高精度でモニタリングする。

②表面加熱媒体の表面波データに基づく表面温度勾配同定のための逆解析手法を提案・具現化し、その妥当性・有用性をシミュレーションにより検証する。

③上記同定手法の実用性を実証するために、高温場で計測した表面波データに基づいて極表面層の温度プロファイリングのモニタリング実験を行い、得られた結果の妥当性を検証する。

年度毎の計画は次のとおりである：

(1) 平成23年度

表面加熱された材料の高精度な表面波スペクトロスコピーを行うための計測システムを構築する。ここで重要なことは、加熱表面の表面波挙動をいかに高精度に計測できるかという点である。これを実現するために、まず非接触超音波法を援用した表面波計測システムを構築する。表面波の励起にはパルスレーザー（現有設備）を使用し、加熱表面上を伝搬する表面波の計測にはレーザードップラー変位計を用いる。これを用いる理由は計測のロバスト性、安全性、簡便性、経済性に優れているためである。本計画では比較用として二光波混合レーザー干渉計（借用予定）による計測も試みる。さらに、150℃以下の温度域の測定については、接触型の高温探触子による表面波計測を行い、非接触法による結果の検証用とする。なお、何れの測定もスペクトロスコピーを想定した広帯域パルス波（初年度は0.1MHz～20MHz）を用いて行い、表面波の周波数依存性を高精度でモニタリングするシステムを完成させる。

次いで、構築したシステムによる表面波スペクトロスコピーの絶対精度を検証する。

(2) 平成24年度

前年度の結果に基づいて、表面が加熱された媒体の表面波データに基づく表面温度勾配同定のための逆解析手法を創成し、その妥当性・有用性をシミュレーションおよび実験により検証する。

まず、表面波速度の温度依存性と表面温度勾配を考慮した表面波分散特性の順解析を

系統的に行う。この結果を踏まえて、表面波分散から未知の温度勾配を同定するための逆問題を創成し、さらに逆解析モデルの構築および解析手法を開発する。解の収束安定性と精度を高めるための補助データ（既知データ）としては、表面温度（赤外線またはバルク波による従来法を利用）、内部の大局的温度分布（熱電対、バルク波による従来法を利用、または理論予測）を活用する。

次に、結果の検証を行う。これには上述の従来法による測定結果ならびに数値シミュレーションによる理論予測値を活用する。理論上、周波数の増加とともに評価領域の空間分解能も向上するが、その実質上の限界を、実験を交えて明確にする。

4. 研究成果

(1) 工業材料の極表面の温度勾配の存在に関する理論的検討

本研究では材料表面層の温度勾配、特に極表面層に存在する急激な温度変化ならびにその過渡変化を高周波表面波により検出し、その定量評価を行うことを目的としているため、その実証試験の方法を吟味することは非常に重要である。そこで、加熱される金属材料（鋼、アルミニウム）を対象として表面層の温度勾配の存在について Bi 数を指標とした理論的検討を行なった。その結果、通常環境下では多くの金属材料では数ミリメートル以下の表面薄層に急激な温度勾配を安定的には存在させるのは難しいことがわかった。この結果を踏まえて、次年度の実証実験の方法を精査することとした。

(2) 非接触超音波法の適用に関する検討

本研究の目的達成のためには高温材料の表面波挙動を高精度で測定することが不可欠である。それを具現化するために、レーザー超音波法を援用した非接触計測システムを構築した。また、赤外線カメラ（本研究により購入）を同システムに組み込み、表面波と表面温度との同期モニタリング・解析システムを構築した。これにより加熱材料表面の高精度な表面波スペクトロスコーピーによる温度計測実験の基礎が築かれたものと考えられる。

(3) 表面温度勾配の定量評価に関する数値シミュレーションによる検討

Bi 数を指標とした理論的検討によって、多くの工業金属材料（鋼、アルミニウム）では通常環境下では数ミリメートル以下の表面層に急激な温度勾配をある一定時間、安定的には存在させるのは難しいことがわかった。そこで、まず、差分法を用いた数値シミュレーションにより、温度勾配を有する材料表面上の弾性表面波の分散特性評価を行い、温度勾配と無次元周波数分散の関係について調べた。その結果、表面波分散による温度勾配

の評価は理論的には可能であるが、現実に予想される音速測定の実験誤差を考慮すると、実用レベルで信頼性のある温度勾配の定量計測は現状ハードウェアでは難しいことがわかった。

(4) 非接触超音波法による緩やかな温度勾配の評価

これまでの結果に基づいて、比較的緩やかな温度勾配の評価を試みることにした。ここでは、直径 10mm から 100mm の鋼性円柱を対象として、その表面加熱時の深さ方向の温度勾配のモニタリングを行った。まず、レーザー超音波法を援用した加熱材料の表面波計測システムを構築した。このシステムを用いた円柱表面近傍の温度勾配の非接触定量評価法を提案した。ガスバーナで加熱した円柱に同システムを適用し、円柱の表面温度ならびに表面近傍の温度勾配を定量的に評価・モニタリングした。得られた結果は赤外線カメラによる円柱側面温度計測結果とほぼ一致したことから、ここで提案した手法の妥当性が示された。

以上により、超音波法による表面温度勾配計測の基礎が築かれたものと考えられる。

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 14 件）

- ① Akira Kosugi, Ikuo Ihara, and Iwao Matsuya, Accuracy Evaluation of Surface Temperature Profiling by a Laser Ultrasonic Method, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.51, No.7, 07GB01-1-8, (2012). 査読有
- ② Iwao Matsuya, Randy Gui Guan Fatt, and Ikuo Ihara, Quantitative Evaluation of Stress-Strain Curves by Spherical-Tip Nanoindentation with Variable Radius Method, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.7 No. 2, pp.155-162 (2012). 査読有
- ③ A. Roshanghias, A. H. Kokabi, Y. Miyashita, Y. Mutoh, I. Ihara, R. G. Guan Fatt, H. R. Madaah-Hosseini, Nanoindentation Creep Behavior of Nanocomposite Sn-Ag-Cu Solders, *Journal of Electronic Materials*, Vol.41, No.8., pp.2057-2064(2012). DOI: 10.1007/s11664-012-2086-6 (2012) 査読有
- ④ Moriyasu Kanari, Takashi Wakamatsu, Randy Gui Guan Fatt, and Ikuo Ihara Improved Density and Mechanical Properties of a Porous Metal-Free Phthalocyanine Thin Film Isotropically Pressed with Pressure Exceeding the Yield

- Strength
Applied Physics Express, Vol.4 (2011) pp. 111603-1 – 3 査読有
- ⑤ Akira Kosugi and Ikuo Ihara
 A Simple Method for Profiling Surface Temperature Distributions by Laser-ultrasound
Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.5, No.12, pp.705-708 (2011) 査読有
- ⑥ Hirokazu Kamada, Ikuo Ihara, Hong Dae Kima, Tadachika Nakayama, Munehiro Kimura, and Tadashi Akahane
 Alignment Film Abrasion Caused by Rubbing
Journal of Information Display, Vol. 12, No. 4, pp.179–183(2011). 査読有
- ⑦ Hiroyuki Yamada, Akira Kosugi and Ikuo Ihara
 Non-Contact Monitoring of Surface Temperature Distribution by Laser Ultrasound Scanning
Japanese Journal of Applied Physics, Vol.50, No.7, 07HC06, pp.1-5, (2011). 査読有
- ⑧ Chenyan XU, Ikuo IHARA, Kohmei KENZAKI, and Manabu TAKAHASHI
 Non-contact Measurement of Nugget Size of Spot Welding Using Focused Air-coupled Ultrasound
Applied Mechanics and Materials, Vol.83, pp.151-156(2011). 査読有
- ⑨ 徐 晨艶、高橋 学、井原 郁夫
 空気超音波によるスポット溶接ナゲット径の定量評価法の検討
 日本機械学会論文集 A, Vol. 77, No. 777, pp.745-748 (2011). 査読有
- ⑩ L.F. He, J. Shirahata, T. Nakayama, T. Suzuki, H. Suematsu, I. Ihara, Y.W. Bao, T. Komatsu, and K. Niihara
 Mechanical properties of $Y_2Ti_2O_7$
Scripta Materialia, Vol.64, Issue 6 (2011) 548-551. 査読有
- ⑪ 井原郁夫、現場適用を目指した空気超音波センシング、プラントエンジニアリング、Vol. 44, No. 6, pp. 10–16, 2012. 査読無
- ⑫ 井原郁夫、超音波を用いた非接触センシングの新展開、ケミカルエンジニアリング、Vol. 57, No. 1(2012. 1. 1)、pp. 59–65, 2012. 査読無
- ⑬ 井原郁夫、山田浩之、高橋学、非接触温度モニタリングへのレーザー超音波法の適用、超音波 TECHNO, 23-4(2011. 8. 1), pp. 18-22, 2011. 査読無
- ⑭ 井原郁夫、超音波を用いた新しい温度プロファイリング手法とその応用、ケミカルエンジニアリング、Vol. 56, No. 2, pp. 1-8、

2011. 査読無

[学会発表] (計 38 件)

- ① Akira Kosugi, Iwao Matsuya, and Ikuo Ihara, Feasibility Study on Noncontact Monitoring of Temperature Distribution of Rotating Tool, The 2nd International Conference on Advanced Materials Design and Mechanics (ICAMDM2013), May 17-18, 2013, Kuala Lumpur, Malaysia, p.13.
- ② Koki Okada, Manabu Takahashi, Ikuo Ihara, Study on the use of ultrasonic trailing echoes for measuring temperature distributions in aluminum plates, The Second International Symposium on Technology for Sustainability (ISTS2012), November 21-24, 2012, Bangkok, Thailand, pp.1-4 (PID0079). (Reviewed)
- ③ Ikuo Ihara, Akira Kosugi, Yasuhiro Ono, and Iwao Matsuya, New Application of Ultrasound to Temperature Profiling of Industrial Processes and Heated Materials, Abstracts book of the 3rd UKN-NUT Joint Seminar 2012, 13 October 2012, Bangi, Malaysia, pp.10-11.
- ④ Akira Kosugi, Yuya Yoshihara, Iwao Matsuya, and Ikuo Ihara, Noncontact Monitoring Of Temperature Distributions of Rotating Objects Using A Laser Ultrasonic Technique, Proceeding of the 3rd Asian Symposium on Materials and Processing (ASMP2012), August 30-31, 2012, Chennai, India, (pp.1-2). (Reviewed)
- ⑤ Iwao Matsuya, Randy Gui Guan Fatt, and Ikuo Ihara, Quantitative Evaluation of Stress-Strain Curves at Local Area by Spherical-Tip Nanoindentation, Proceeding of the 3rd Asian Symposium on Materials and Processing (ASMP2012), August 30-31, 2012, Chennai, India, (pp.1-2). (Reviewed)
- ⑥ Moriyasu Kanari, Takashi Wakamatsu, Ikuo Ihara, Nanoindentation behaviours of Low Molecular Weight Organic Semiconducting Films: Fundamentals and Practical Applications for The Materials Design, Proceeding of the 3rd Asian Symposium on Materials and Processing (ASMP2012), August 30-31, 2012, Chennai, India, (pp.1-2). (Reviewed)
- ⑦ Ikuo Ihara, Hiroyuki Yamada, Akira, Kosugi, and Manabu Takahashi, New Ultrasonic Thermometry and Its Applications to Temperature Profiling of Heated Materials, Proc. The 5th International Conference on Sensing Technology (ICST 2011), (Edited by: S. C. Mukhopadhyay, A. Fuchs, and K. P. Jayasundera), Palmerston North, New Zealand, Nov 28-Dec 1, pp.65-70, 2011.

- (Abstract, pp.56) (Reviewed)(Invited)
- ⑧ Ikuo Ihara, Recent Advances in Ultrasonic Techniques for Materials Evaluation and Monitoring, 韓国産業団地公団海外専門家招聘技術講演会, Proceedings, pp. 24-47, October, 28-29, 2011, Ulsan, Korea (Abstract, pp.24-46) (Invited)
- ⑨ Randy Gui Guan Fatt, Ikuo Ihara, Takahiro Yudate, Masatoshi Ichimura, Jun-ichi Uegaki, and Yoshikazu Shima, Microscopic Determination of Stress-strain Relationship by Continuous Multiple Nano-indentation Technique, Proceeding of the 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing (ICM&P2011), June 13-17, 2011, Corvallis, Oregon, USA, ICMP2011-51147(pp.1-5), (Reviewed)
- ⑩ Akira Kosugi and Ikuo Ihara, Non-contact Techniques of Profiling Surface Temperature Distributions by Laser-ultrasound, Proceeding of the 3rd JSME/ASME International Conference on Materials and Processing (ICM&P2011), June 13-17, 2011, Corvallis, Oregon, USA, ICMP2011-51148(pp.1-4). (Abstract, pp.209), (Reviewed)
- ⑪ Ikuo Ihara, R. Guan Fatt, Takahiro Yudate, Jun-ichi Uegaki, and Yoshikazu Shima, Microscopic Determination of Stress-Strain Curves by Nanoindentation With A Spherical Tip, The 2nd International Symposium on Hybrid Materials and Processing (HyMaP 2011), October 27-29, 2011, Busan, Korea, abstract, p.38.

[図書] (計3件)

- ① Ikuo Ihara, Takuya Tomomatsu, Manabu Takahashi, Akira Kosugi, Iwao Matsuya, and Hiroyuki Yamada, Ultrasonic Thermometry for Temperature Profiling of Heated Materials in “Advancement in Sensing Technology, New Developments and Practical Applications”, (Smart Sensors, Measurement and Instrumentation 1) edited by S.C. Mukhopadhyay et al., Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2012), pp. 211-236. (分担執筆)
- ② I. Ihara, M. Takahashi, and H. Yamada, New Ultrasonic Methodology for Determining Temperature Gradient and its application to Heated Materials Monitoring, Nondestructive Testing of Materials and Structures, RILEM Bookseries, Vol.6, Büyüköztürk, Oral, Taşdemir, Mehmet Ali Güneş, Oğuz; Akkaya, Yılmaz (Eds.), pp.531-537,

Springer, 2012. Hardcover version ISBN 978-94-007-0722-1, Due: October 31, 2012 (分担執筆)

- ③ Subhas Chandra Mukhopadhyay and Ikuo Ihara, Sensors and Technologies for Structural Health Monitoring: A Review in “New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring” (Lecture Notes in Electrical Engineering, Volume 96) edited by S. C. Mukhopadhyay, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2011), pp.1- 14. (分担執筆) (426 pages in total)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

- ①名称：液面位置検出装置及び液面位置検出方法
 発明者：井原郁夫、市村政稔、島崎義之
 権利者：長岡技術科学大学、日本精機(株)
 種類：特許
 番号：特願 2013-085096
 出願年月日：平成 25 年 4 月 15 日
 国内外の別：国内

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・工学部・教授
 研究者番号：80203280

(2) 研究協力者

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