

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 10 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820005

研究課題名(和文) 近接場光を利用した局所領域におけるレーザ超音波計測

研究課題名(英文) Novel Laser Ultrasonic Technique for Measuring Ultrasmall Region Utilizing Near-field Optics

研究代表者

松谷 巖 (Matsuya, Iwao)

長岡技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00514465

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：レーザ超音波計測は、照射レーザの集光によってのみ位置分解能を上げているため、極小物体に対する高精度な計測ができない事が問題である。そこで、光の波長以下の極小領域において近接場光を利用したレーザ超音波計測を実現するために、プリズム界面での全反射によるエバネッセント光を利用してアルミニウム試料に超音波の励起を試み、超音波の発生についての実行可能性を評価した。プリズム-試料間は密着した閉じた系を形成しており、プラズマの発生によって約10倍増強された超音波が生成できることを確認した。今後、先鋭なプローブの先端における近接場光を利用して、光の回折限界以下の極小領域での超音波計測の可能性が考えられる。

研究成果の概要(英文)：Generation of ultrasound waves in aluminum utilizing evanescent light during total internal reflection at prism surface is investigated. It has been found that ultrasound can be generated in the aluminum specimen only by the evanescent light. The amplitudes of ultrasound generated by evanescent light were approximately 9 times larger than that generated by direct laser irradiation. The obtained directivity pattern shows considerable intensity at 0° , which reveals that the ultrasound in this experiment is generated by ablation effect. According to the theoretical speculation, when the plasma is generated by laser irradiation in confined geometry, its impulse pressure is significantly enhanced.

研究分野：計測工学

キーワード：近接場光 エバネッセント光 レーザ超音波 プラズマ アブレーション 閉込め効果

1. 研究開始当初の背景

超音波や光を用いた構造物や材料の欠陥や材料物性値、温度分布の計測は、測定対象の物理現象を非侵襲かつリアルタイムで観察できる計測手段であり、非破壊検査分野での応用が期待されている。特に、レーザ超音波計測は、レーザ光を用いて材料の内部や表面に高周波弾性波を励起し、それをレーザ干渉計等により検出することによって、従来困難とされていた超音波計測・診断・モニタリングを可能にする計測手法である。本手法は、材料・構造物のオンライン計測・診断や高温場での材料モニタリングなどへの応用が期待されており、より高精度な計測の実現や測定対象の応用範囲の拡大が求められている。一方、近接場光は光波の回折限界以下のナノ領域に閉じ込められた伝搬しない光であり、これまで生体分子の1分子蛍光観察や高密度光記録、走査型顕微鏡等に利用されてきた。そして、研究開始当初としては、レーザ超音波計測における弾性波励起手段として近接場光を利用し、従来よりもはるかに高分解能な計測の実現を試みることを目的とした。

2. 研究の目的

光の波長より小さい物体に光を照射すると、その物体の直径程度の領域に、指数関数的に減衰して非伝播の近接場光が生じる。近接場光は、光の回折限界を超えた極小領域に光を照射できる技術として注目を集めている。2000年以降にこの原理を利用したプラズモンニックプローブが複数提案されており、空間分解能数十 nm での超音波振動の検出が可能になってきた。最近では、回折格子を備えたプローブにレーザを照射して、表面プラズモンがプローブ先端に移動して近接場を形成することを利用した超音波検出プローブが報告されている。しかしながら、照射レーザのスポット径は光波の回折限界によって物理的に制限されるため、光の波長以下の極小領域での超音波の「発生」が実現できていない。このため近接場光の応用分野では、超音波の発生と検出を同一箇所で行う必要がある、超音波パルスエコーセンサを具現化できていない。これができるようになると、光の波長より小さいスケールで、物体内部の欠陥や生体組織内の病変を可視化できる。このような硬さの変化の情報は、光学的手段では得られない情報も含む点が優れている。当初、近接場光による超音波の発生に関する研究に着手しようとしたが、その前段階として、エバネッセント光による超音波励起に関する研究を通じて、微弱な光で励起する超音波に関する知見を蓄積する事とした。そこで本研究では、プリズム界面での全反射によるエバネッセント光を利用してアルミニウム試料に超音波の励起を試み、超音波の発生についての理解を深める。

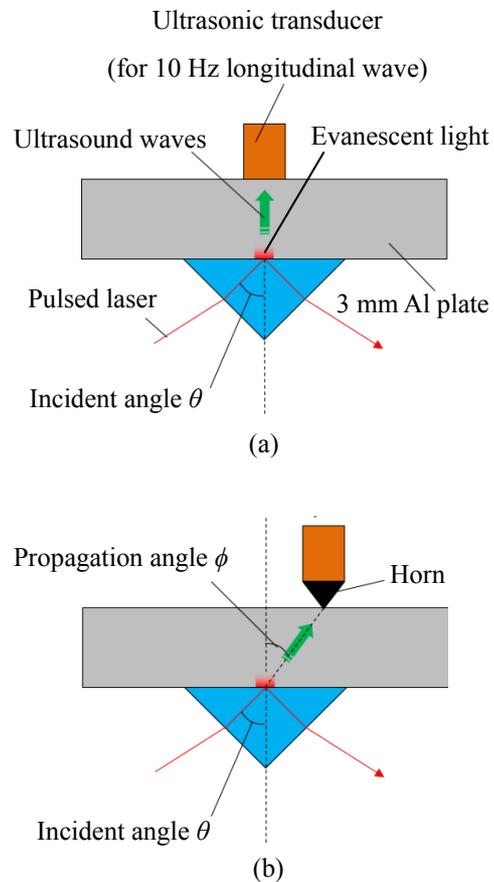


図1 実験セットアップ (a)エバネッセント光による超音波励起実験、(b)励起された超音波の指向性計測実験

3. 研究の方法

図1(a)に、エバネッセント光による超音波励起実験の概要図を示す。プリズムを厚さ3 mmのアルミニウム試料に密着させ、レンズで集光したパルスレーザを照射しプリズム面で全反射させてエバネッセント光を発生させる。それにより励起された超音波を、超音波探触子(縦波用、帯域周波数10 MHz)で検出する。使用するND:YAGレーザのパルス幅は3~5 nsecであり、レーザ光のエネルギー密度(入射光エネルギー/照射面積)は、0.03~0.85 J/cm²に設定する。このエネルギー密度では、プリズムの内部が壊れないことと、試料に当たる前にアブレーションが起こらないことを確認済みである。比較のために、同一の入射角度でプリズムを用いずにレーザを直接照射する条件でも実験を行う。

励起された超音波の性質を調査するために、超音波の指向性を調査する。図1(b)に、指向性測定の詳細図を示す。超音波探触子の先端に先端径約1 mmの円錐状のホーンを付けて、X方向に動かすことで、超音波の伝播角度phiにおける超音波強度を計測する。角度phiの範囲は±65°とする。比較のために、同一の入射角度でレーザを直接照射する条件でも実験を行う。

4. 研究成果

図 2 (a)にレーザ直接照射による超音波波形（縦軸 10 倍拡大）を、図 2 (b)にエバネッセント光によって励起した超音波の波形をそれぞれ示す。エバネッセント光で励起した超音波の振幅値は、レーザ直接照射で得た超音波と比較して約 8.7 倍の大きさであった。1st エコーと 2nd エコーの到達時間差を相互相関法で求めた結果、レーザを直接照射した時は $0.96 \mu\text{s}$ 、エバネッセント光を利用した時は $0.94 \mu\text{s}$ であった。その値から逆算した縦波音速はそれぞれ 6250 、 6380 m/s と見積もられ、アルミニウム試料中の縦波音速の文献値(6260 m/s)と比較しても妥当な値であると考えられる。したがって、エバネッセント光のみによって超音波が励起できることを確認した。しかしながら、エバネッセント光で励起した超音波の方がレーザ直接照射時よりも振幅が大きいという点については予想に反する結果であった。

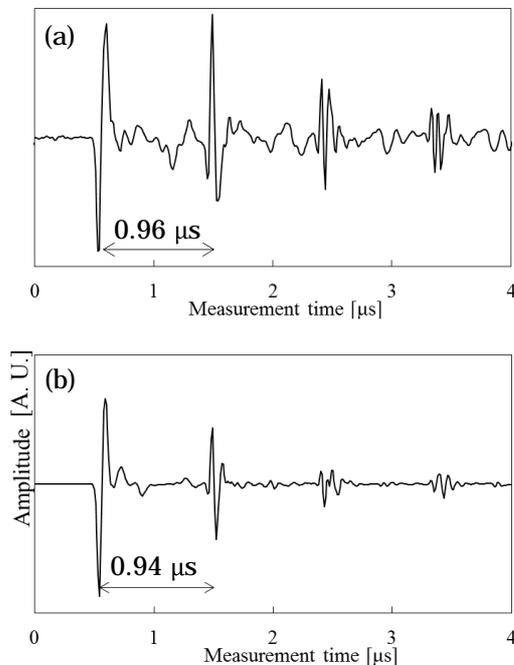


図 2 励起された超音波波形 (a)パルスレーザの直接照射、(b)エバネッセント光

図 3 (a)にレーザ直接照射で励起した超音波振幅の極座標図を、図 3 (b)にエバネッセント光で励起した超音波振幅の極座標図をそれぞれ示す。両者とも、指向性のピーク角度は 0° であることがわかる。このことから、本実験で励起された超音波は、レーザ直接照射、エバネッセント光照射ともに、アブレーション効果によるものであると考えられる。

今回の条件ではエバネッセント光の厚さ (Penetration depth) は 180 nm である。また、レーザ顕微鏡で計測した広範囲の試料のうねりは 1362 nm であり、プリズムとアルミニウム試料の接触が十分にない可能性が考えられる。このため、本実験ではプリズムと試料

の密着性を高めるために、両者を押しつけている。

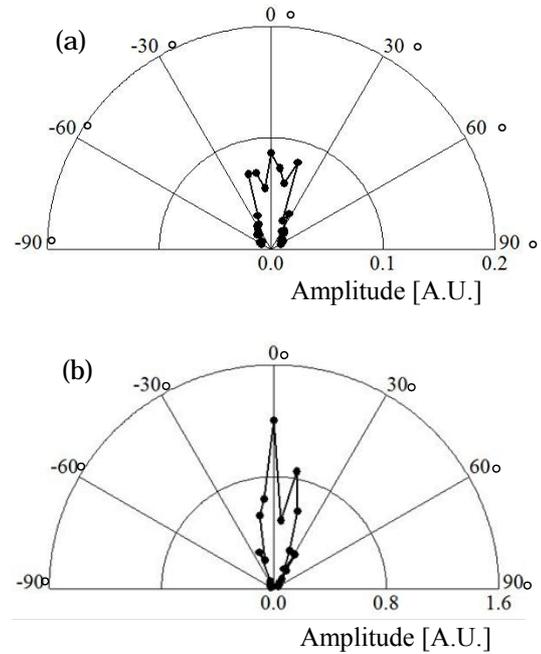


図 3 超音波の指向性 (a)パルスレーザの直接照射、(b)エバネッセント光

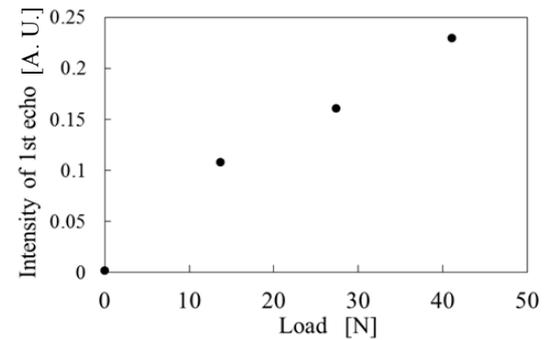


図 4 励起された超音波波形 (a)パルスレーザの直接照射、(b)エバネッセント光

図 4 にプリズムに対してアルミニウム試料を押しつけたときの、押しつけ力に対する超音波強度を示す。レーザのエネルギー密度は、レーザ直接照射時の超音波強度が 0.003 [A.U.] の条件で実験を行った。押しつけ力ゼロの場合には超音波の励起は観測されなかったが、押しつけ力に比例して超音波強度が明確に増加していることがわかる。

エバネッセント光で励起した超音波の方がレーザ直接照射時よりも振幅が大きいという結果を考察する。本実験で励起された超音波はアブレーション効果によるものと判明した。また、アルミニウム試料へのプリズムの押しつけ力が、励起した超音波の強度に本質的な影響を与えることも確認された。そこで、レーザを直接照射した場合（開放系）と、プリズムを配置して加圧した場合（閉じた系）において、レーザ照射時のアブレーションで生じる衝撃圧力を理論計算する。レー

ザ直接照射によって試料にかかる衝撃圧力 P_d は、以下の実験式(1)で表すことができる(R. Fabbio et al., J. Appl. Phys. 68, 775, 1990)。

$$P_d = 3.93 I^{0.7} \lambda^{-0.3} \tau^{-0.15} \times 10^2 \text{ [MPa]} \quad (1)$$

ここで、 I はレーザーのエネルギー密度 GW/cm^2 、 λ は波長 μm 、 τ はパルス幅 nm である。次に、エバネッセント光を照射したときに試料にかかる衝撃圧力 P_c は、閉じた系における熱力学第一法則を元に、以下の式(2)のように表すことができる。

$$P_c = 0.1 (\alpha / (2\alpha + 3))^{0.5} Z I \times 10^2 \text{ [MPa]} \quad (2)$$

ここで、 α は内部エネルギーのうち熱エネルギーになる割合であり、典型的な値として 0.1 とする。 Z は衝撃インピーダンスであり、ガラス-金属界面では $2.1 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ である。図 5 に照射レーザーのエネルギー密度を変えたときの衝撃圧力 P_d および P_c を示す。照射レーザーのエネルギー密度を $1.0 \text{ J}/\text{cm}^2$ とすると、エバネッセント光による衝撃圧力は 1300 MPa 、レーザー直接照射時の衝撃圧力は 150 MPa であり、この差は約 8.7 倍となった。このことから、エバネッセント光で励起した超音波の方がレーザー直接照射時よりも振幅が大きくなる理由は、エバネッセント光で超音波を励起するときは閉じた系を形成しており、レーザー直接照射時の開放系と比較して衝撃圧力が高まったためと理解することができる。

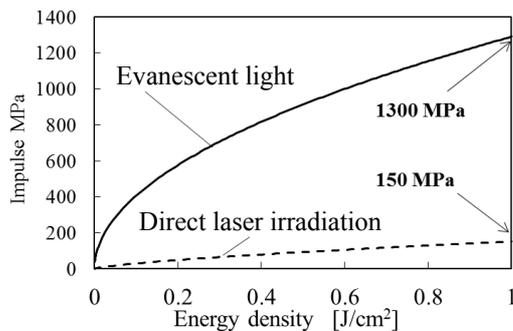


図 5 励起された超音波波形 (a)パルスレーザーの直接照射、(b)エバネッセント光

以上の知見によれば、液体等の透明媒体で閉じた系を形成すれば、微弱な近接場光であっても超音波の発生ができると考えられる。今後、先鋭なプローブの先端に発生する近接場光を利用すれば、平面方向において光の回折限界以下の極小領域にも超音波励起の可能性が示唆される。さらに超音波の検出機構を付加すれば、超高分解能なパルスエコーセンサを構築できる可能性があると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

A. Kosugi, I. Matsuya, and I. Ihara;

“Feasibility Study on Noncontact Monitoring of Temperature Distributions of Rotating Tool”, **Applied Mechanics and Materials**, 372 巻, 336 頁 ~ 339 頁, 2013 年 7 月 15 日, 査読有

松谷 巖, 片村立太, 井原郁夫, 谷井孝至, 仁田佳宏, 西谷 章, “相対変位と局所傾斜角度の同時計測に関する実験的研究”, **日本建築学会技術報告集**, 19 巻, 43 号, 951 頁 ~ 954 頁, 2013 年 10 月 20 日, 査読有

I. Matsuya, K. Matozaki, A. Kosugi, and I. Ihara; “A Feasibility Study on Generation of Acoustic Waves Utilizing Evanescent Light”, **Journal of Physics: Conference Series**, 520 巻, 012003 頁, 2014 年 6 月 3 日, 査読有

A. Kosugi, Y. Ono, I. Matsuya, and I. Ihara; “Application of Laser Ultrasound to Noncontact Temperature Profiling of a Heated Hollow Cylinder”, **Journal of Physics: Conference Series**, 520 巻, 012015 頁, 2014 年 6 月 3 日, 査読有

I. Ihara, K. Ohtsuki, and I. Matsuya; “Influence of Uniaxial Stress on the Stress-Strain Curve Measured by Nanoindentation”, **Applied Mechanics and Materials**, 597 巻, 17 頁 ~ 20 頁, 2014 年 7 月 3 日, 査読有

I. Matsuya, F. Matsumoto, and I. Ihara; “Experimental Study on Lateral Displacement Measurement using Air-Coupled Ultrasound Transducers”, **Mechanical Engineering Journal**, 2 巻, 1 号, 14-00379 頁, 2014 年 12 月 5 日, 査読有

A. Nishitani, C. Matsui, Y. Hara, P. Xiang, Y. Nitta, T. Hatada, R. Katamura, I. Matsuya, and T. Tani; “Drift Displacement Data Based Estimation of Cumulative Plastic Deformation Ratios for Buildings”, **Smart Structures and Systems**, 15 巻, 3 号, 881 頁 ~ 896 頁, 2015 年 3 月 1 日, 査読有

〔学会発表〕(計 34 件)

A. Kosugi, I. Matsuya, and I. Ihara; “Feasibility Study on Noncontact Monitoring of Temperature Distribution of Rotating Tool”, The 2nd International Conference on Advanced Materials Design and Mechanics, Kuala Lumpur, Malaysia, 2013 年 5 月 17 日

I. Matsuya, K. Matozaki, A. Kosugi,

and I. Ihara; "A Feasibility Study on Generation of Acoustic Waves Utilizing Near-Field Optics", 3rd International Symposium on Laser Ultrasonic and Advanced Sensing, Yokohama, Kanagawa, Japan, 2013年6月28日

A. Kosugi, Y. Ono, I. Matsuya, and I. Ihara; "Application of Laser Ultrasound to Noncontact Temperature Profiling of a Heated Hollow Cylinder", 3rd International Symposium on Laser Ultrasonic and Advanced Sensing, Yokohama, Kanagawa, Japan, 2013年6月28日

I. Matsuya, F. Matsumoto, and I. Ihara; "Feasibility Study on Ultrasonic Lateral Displacement Measurement for Structural Health Monitoring", 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Conference, Baltimore, MD, USA, 2013年7月25日

I. Ihara, Y. Ifuku, A. Kosugi, and I. Matsuya; "Real-Time Ultrasonic Monitoring of Internal Temperature Profiles of Heated Materials", 40th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation Conference, Baltimore, MD, USA, 2013年7月26日

伊福悠伍, 小杉 祥, **松谷 巖**, 井原郁夫; "リアルタイム超音波サーモメトリシステムの開発", 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山大学, 2013年9月11日

小杉 祥, 小野裕洋, **松谷 巖**, 井原郁夫; "レーザー超音波を用いた厚肉中空円筒の温度分布モニタリング", 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山大学, 2013年9月11日

的崎健斗, **松谷 巖**, 井原郁夫; "近接場光を利用した超音波の発生に関する検討", 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山大学, 2013年9月11日

K. Matozaki, I. Matsuya, and I. Ihara; "Generation of Acoustic Waves and Its Directivity Pattern Utilizing Evanescent Light", MJIT-JUC Joint International Symposium 2013, Tokai University, Japan, 2013年11月6日

大槻興平, **松谷 巖**, 井原郁夫; "ナノインデンテーションによる応力ひずみ応答評価における巨視的応力の影響", 第 21 回機械材料・材料加工技術講演会 M&P2013, 首都大学東京南大沢キャンパス, 2013年11月9日

小野裕洋, 小杉 祥, **松谷 巖**, 井原郁夫; "レーザー超音波による回転体の非接触温度プロファイリング", 第 21 回機械材料・材料加工技術講演会 M&P2013, 首都大学東京南大沢キャンパス, 2013年11月10日

内田駿太, **松谷 巖**, 井原郁夫; "超音波反射率スペクトロスコピーを用いた電着膜厚の2次元マッピング", 第 21 回機械材料・材料加工技術講演会 M&P2013, 首都大学東京南大沢キャンパス, 2013年11月10日

I. Ihara, Y. Ifuku, I. Matsuya and A. Kosugi; "Real-Time Nondestructive Monitoring of Temperature Profiles of Heated Materials by Ultrasound", 1st International Conference of the Science and Engineering of materials, Kuala Lumpur, Malaysia, 2013年11月14日

A. Kosugi, S. Isobe, I. Ihara, I. Matsuya; "Simultaneous Ultrasonic Measurements of Temperature and Heat Flux in a Heated Medium", The 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, Kyoto, Japan, 2013年11月20日

I. Matsuya, K. Matozaki, I. Ihara; "Directivity Patterns of Ultrasound Generated by Evanescent Light at the Interface between Prism and Aluminum Surface", The 34th Symposium on Ultrasonic Electronics, Kyoto, Japan, 2013年11月21日

I. Ihara, A. Kosugi, I. Matsuya, and Y. Ono; "Noncontact Temperature Profiling of Rotating Cylinder by Laser-Ultrasonic Sensing", The 7th International Conference on Sensing Technology 2013, Wellington, New Zealand, 2013年12月4日

松本二三也, **松谷 巖**, 井原郁夫; "空気超音波による横変位計測に関する検討", 第 21 回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, 2014年1月21日

井原郁夫, 小野裕洋, **松谷 巖**, 小杉 祥; "最近のレーザー超音波技術の進展と応用", 第 61 回応用物理学会春期学術講演会, 青山学院大学, 2014年3月17日

松谷 巖, 的崎健斗, 井原郁夫; "エバネッセント光による超音波の励起と指向性に関する研究", 第 61 回応用物理学会春期学術講演会, 2014年3月17日

I. Ihara, K. Ohtsuki, and I. Matsuya; "Influence on Uniaxial Stress on the

Strain-Stress Curve Measured by Nanoin dentation”, 2014 the 3rd International Conference on Advanced Materials Design and Mechanics ,Singapore, 2014年5月24日

⑳ I. Matsuya, F. Matsumoto, and I. Ihara; “Experimental Study on Lateral Displacement Measurement by Air-Coupled Ultrasound for Structural Health Monitoring”, 5th JSME/ASME 2014 International Conference on Materials and Processing (ICMP 2014), Detroit, USA, 2014年6月13日

㉑ I. Ihara, A. Kosugi, Y. Ifuku, I. Matsuya, and Y. Ono; “Real-Time Ultrasonic Thermometry for Internal Temperature Profiling and Its Application to Heated Material Monitoring”, The Fifth US-Japan NDT Symposium, Hawaii, USA, 2014年6月18日

㉒ I. Matsuya and I. Ihara; “Feasibility Study on Ultrasound Generation Taking Advantage of Evanescent Light”, 超音波による非接触非破壊計測・先進評価技術研究会, 東京, 2014年7月9日

㉓ 松本二三也, 松谷 巖, 井原郁夫; “構造損傷評価のための空気超音波を利用した相対変位センサの検討”, 日本機械学会 2014年度年次大会, 東京, 2014年9月8日

㉔ 松谷 巖, 的崎健斗, 井原郁夫; “閉じた系でのエバネッセント光による増大された超音波の励起”, 日本機械学会 2014年度年次大会, 東京, 2014年9月8日

㉕ I. Matsuya, K. Matozaki, Y. Takahashi, and I. Ihara; “Enhancement of Ultrasound Generated by Evanescent Light in Confined Geometry”, IEEE Sensors 2014, Valencia, Spain, 2014年11月3日

㉖ T. Saito, I. Matsuya, K. Ohnuma, T. Kuwahara, M. Kondo, and I. Ihara; “Measuring Thickness of Thin Film Whose Sound Velocity is Unknown Utilizing Acoustic Resonant Spectroscopy”, The 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Tokyo, 2014年12月3日

㉗ A. Kosugi, S. Shinoda, I. Matsuya, and I. Ihara; “Ultrasonic Temperature Monitoring near Heating Surface by Measuring Oblique Incident Bulk Waves using Laser Ultrasound”, The 35th Symposium on Ultrasonic Electronics, Tokyo, 2014年12月5日

㉘ 渡辺弘和、井原郁夫、松谷 巖、高橋 学; “レーザードップラー法を用いた超音波パルスの非接触検出による液体温度モニタリングの検討”, 第22回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, 2015年1月29日

㉙ 齊藤崇允、松谷 巖、大沼 清、桑原敬司、近藤みずき、井原郁夫; “音響共鳴現象を利用した薄膜の音速と膜厚の同時計測に関する研究”, 第22回超音波による非破壊評価シンポジウム, 東京, 2015年1月30日

㉚ 齊藤崇允、松谷 巖、大沼 清、桑原敬司、近藤みずき、井原郁夫; “音響共鳴法と時間計測を利用した基板表面上の薄膜の音速と膜厚の同時計測に関する研究”, 日本機械学会北陸信越支部学生会 第44回学生員卒業研究発表講演会, 新潟県柏崎市, 2015年3月6日

㉛ 松本二三也、松谷 巖、井原郁夫; “構造ヘルスマニタリングのための空気超音波による横変位計測に関する研究”, 日本機械学会北陸信越支部 第52期総会・講演会, 新潟県柏崎市, 2015年3月07日

㉜ 齊藤崇允、松谷 巖、大沼 清、桑原敬司、近藤みずき、井原郁夫; “音響共鳴現象と超音波パルスエコー法を利用したヒトiPS細胞塊の厚さと音速の実測【注目講演】”, 第62回応用物理学会春期学術講演会, 東海大学, 2015年3月11日

㉝ I. Matsuya, T. Saito, K. Ohnuma, T. Kuwahara, M. Kondo, and I. Ihara; “Simultaneous Determinations of the Ultrasonic Velocity and Thickness of Thin Films by a Combined Method of Acoustic Resonant Spectroscopy and Pulse-echo Measurement”, 4th International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing (LU 2015), Evanston, Illinois, USA, 2015年7月1日

〔その他〕
ホームページ等
超音波非破壊センシング研究室
<http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~ihara/>

長岡技術科学大学研究者総覧
<http://souran.nagaokaut.ac.jp/view?!=ja&u=100000161&i=j30&sm=name&sl=ja&sp=2>

6. 研究組織
(1)研究代表者
松谷 巖 (MATSUYA, Iwao)
長岡技術科学大学大学院工学研究科機械創造工学専攻・助教
研究者番号: 00514465