

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360037

研究課題名（和文） 超音波による電気・磁気特性の画像化

研究課題名（英文） Imaging of Electromagnetic Properties via Ultrasonic Excitation

研究代表者

生嶋 健司（IKUSHIMA KENJI）

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：20334302

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、超音波照射により発生する電磁波を検出することにより、物体の電気・磁気特性を非侵襲に計測する手法（音響刺激電磁法）を開拓することである。本研究成果は、（1）新しく開発した上記手法が、骨質を評価する新たな骨診断法への可能性があることを示唆した、（2）超音波による磁気イメージングを実演し、ステンレス鋼材などの非破壊検査に応用できることを示した、（3）振幅変調超音波を用いた高感度音響刺激電磁計測システムを開発した、ことである。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a nondestructive sensing technique (acoustically stimulated electromagnetic method) for measuring electromagnetic properties of matters through ultrasonic excitation. We showed that our method can evaluate (1) a bone quality related with collagen crystals and (2) magnetic distribution of ferromagnetic iron alloys. Furthermore, we improved the sensitivity of rf detection scheme by using amplitude-modulated ultrasonic waves.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2011年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用物理学一般

キーワード：音、電磁波、非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

超音波計測は人体や構造物への無侵襲検査として広く利用されている。その重要な利点のひとつは、光の透過が困難な生体、金属、コンクリートブロックのような対象物に対して超音波は内部透過性が高いことである。また、音速と光速の大きな違いに起因して、音波は電磁波に比べて同一周波数で波長が約 5 桁短い。これは、実時間波形の取得が容

易な MHz/GHz 周波数帯においてミリメートル／マイクロメートルスケールの空間分解能が可能であることを意味する。しかしながら、超音波のこれらの利点にもかかわらず、その多くの利用は対象物の質量密度分布や弾性率などの力学特性の計測に限られている——すなわち、電氣的、或いは磁氣的な性質をプローブしない。そこで我々は平成 18 年に以下で述べる計測概念を提案し、超音波

による電気・磁気特性の画像化計測の開発に着手した。

弾性波である音波は、電磁波のように直接的に電気・磁気特性と結合しない。しかしながら、弾性変調は、固体の格子歪みや液体の密度変化を通してしばしば対象物の電荷や磁気モーメントに時間変調を与えることができる。このことは、超音波照射により、双極子放射を通して超音波と同一周波数の電磁波（通常 RF 波—マイクロ波）が発生し得ることを意味する。ここでは、超音波によって励起される電磁波を音響刺激電磁波（Acoustically Stimulated ElectroMagnetic (ASEM) waves）と呼ぶことにする。固体物質ならピエゾ効果や磁歪効果を通して ASEM 波が放射されるだろう。液晶や燃料電池などに含まれるコロイド溶液・イオン電解水の場合なら、製品動作時に生じる局所的な電荷中性条件の破れ（すなわち、電束密度勾配の発生）が ASEM 場の発生原因になり得る。また、神経組織や筋組織においても局所的なイオン濃度の分布（あるいはそれに伴う媒体の電束密度勾配）があるため、活動状態の非侵襲検知の可能性も示唆される。以上が、我々が提案した計測原理である。

音波計測の長い歴史の中で、音波により誘起される電磁放射に関する学術論文や特許は少ない。関連するものとして、音響デバイスのワイヤレス動作に関するもの、地球物理学における岩石破壊によって生じる電磁波などが挙げられるが、測定対象物からの微弱な信号を検出してイメージング計測へ応用するといった報告は我々の調べた限り皆無である。また、本計測を反転した方法、すなわち電磁波（RF 波～近赤外光）照射により発生した超音波を検知する方法は、Photoacoustic imaging と呼ばれ医療診断への応用が期待されている。しかしながら、この方法は、電磁波吸収を通して人体の水濃度分布や血液中の酸素濃度分布を画像化しようとするものであり、体内部位の電気・磁気特性を獲得するものではない。よって、ASEM 法は全くの新技术構想であり、各要素技術を発展させることによって、医療診断や材料評価など、広範囲な応用が期待される。

本研究開始当初は、GaAs などの典型的な圧電体、骨や木材などの生体組織、強磁性体において ASEM 放射が検出できることを立証してきたが、理論的な基礎付けと応用可能性についてはまだ未知数であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、超音波照射により発生する電磁波を検出することにより、物体の電気・磁気特性を非侵襲に計測する手法（音響刺激電磁法）を開拓することである。これまでの基礎研究を発展させて、

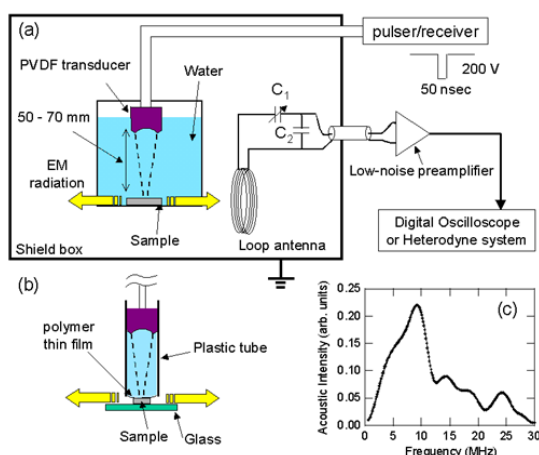


図1 測定概念図。(a)水浸タイプ。(b)非浸水プローブタイプ。(c)超音波のスペクトル

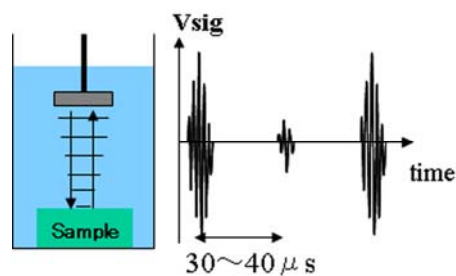


図2 パルス信号概念図

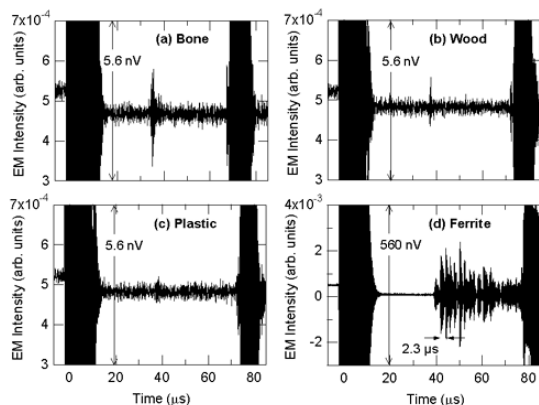


図3 圧電・磁性材料からのASEM信号

- (1) 医療診断への応用可能性、
 - (2) 材料評価・非破壊検査への応用可能性、
 - (3) より高感度な計測方法、
- を示す。

3. 研究の方法

本測定方法で重要な点は、超音波振動子からの電磁ノイズと測定対象物からの目的信号を区別することである。超音波パルス法（時間領域測定法）によって音波遅延時間を利用して、電磁ノイズと目的信号を時間的に分離する（図1）。超音波励起パルスと超音波エコー信号に起因する大きなパルス信号は振動子からの電磁ノイズであり、エコー信号の半分の遅延時間でASEM信号が得られる（図2）。このパルス法を用いて、これま

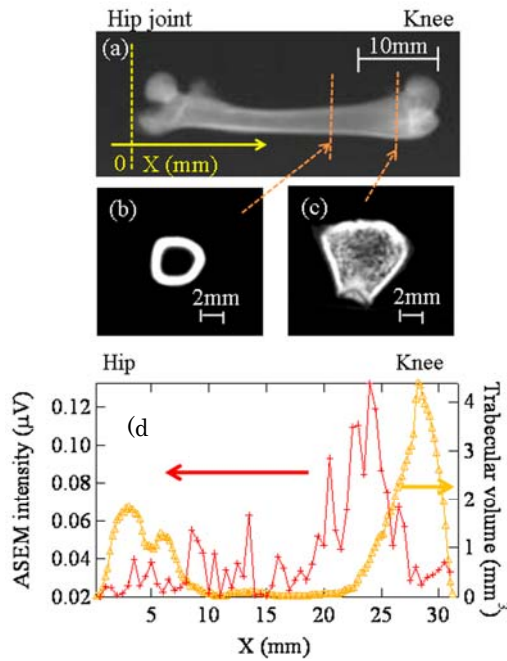


図4 (a)-(c) ラット大腿骨の μ CT像。(d) ASEM信号強度と骨梁体積のプロファイル。

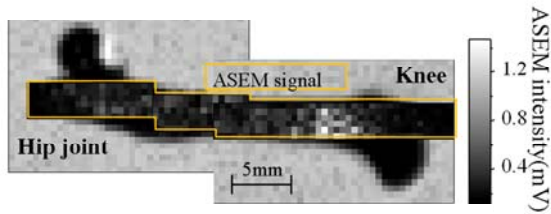


図5 ラット大腿骨のASEMイメージング図

で様々な圧電・磁性材料においてASEM信号が検出されてきた(図3)。

4. 研究成果

以下、研究の目的における(1)～(3)について報告する。

- (1) 医療診断への応用
(論文[3,4,6], 学会発表[2,5,8])

本研究では、骨の物性とASEM応答との相関に着目した。骨は表面を覆う薄く硬い皮質骨(cortical bone)とその内部にあるスポンジ状の海綿骨(cancellous bone (骨梁: trabecular bone))の二つの構造からできている。さらにその骨組織は主にハイドロキシアパタイトとコラーゲン結晶から構成されている。骨の健康状態の指標として、これまでミネラル成分の濃度を示す骨密度(BMD)が用いられてきたが、近年、コラーゲンの結晶性が関与した“骨質”が骨の強度に依存することがわかってきた。骨密度の測定は通常、X線CTや超音波測定で行われてきたが、骨質の評価方法はまだ確立していない。そこで我々が着目したのが骨の圧電効果である。骨の圧電効果は半世紀前に報告されているが、その起源は主に

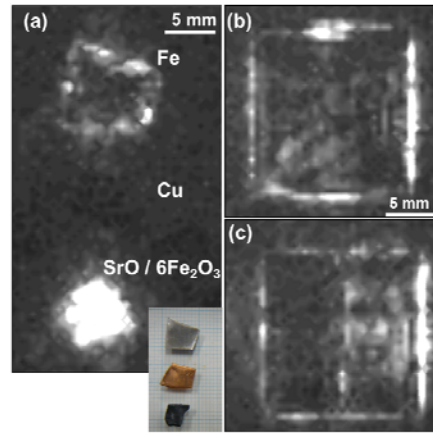


図6 超音波による磁気イメージング

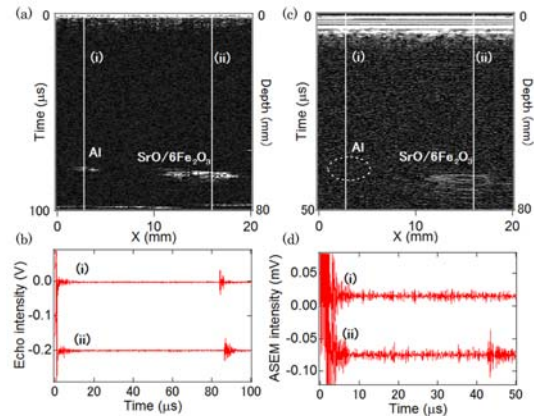


図7 ASEM トモグラフィによる磁性体検出実験

骨軸にそって配向したコラーゲンの圧電効果であると考えられている。

図4(a)-(c)にラット大腿骨の μ CT像を示す。骨梁は関節部に分布し、骨幹部は中空構造であることがわかる。図4(d)は、骨軸方向に測定したASEM信号強度の1次元プロファイルである。ここで、ASEM信号のパルス遅延時間の解析から、各点のASEM信号は皮質骨で生じていることが確認されている。図4(d)および図5のイメージング結果から、膝側関節に近い骨幹部部分でASEM信号強度が最大になることが分かった。この傾向は同一ラットの右足、左足、また、別のラットの大腿骨でも同様に観測されている。まず考えられることは、皮質骨の厚みモードに依る機械共振による信号増強だろう。しかし、皮質骨厚みとASEM信号スペクトルを分析したところ、膝側関節近傍の信号強度増大を音波モードの共振では説明できないことがわかった。したがって、ASEM信号強度の局所的な増大は幾何学的構造ではなく、骨の圧電特性を反映していると考えられる。そこで、膝側骨幹部と股関節側骨幹部における物性の違いについて着目した。 μ CT解析では、膝側関節近傍の骨幹部で骨密度が小さいことが示唆されている。つまり、相対的にミネラル成分の濃

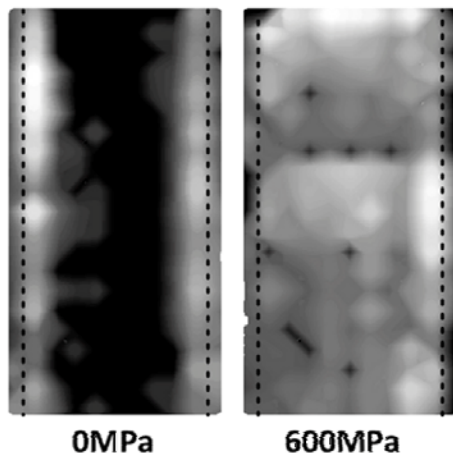


図8 ステンレス合金の圧力誘起磁化の観測

度が低く、コラーゲン架橋構造の違いを示唆している。ASEM 信号強度と骨のミクロな構造・物性との相関に対しては今後の課題であるが、通常の超音波エコー法や μ CTでは得られない骨の物性情報が本計測法により可視化されることが明らかになった。昨年度から医療機器メーカーとの共同研究が始まり、今後 ASEM 応答と骨の健康状態（骨質）との相関を追及する。

(2) 材料評価・非破壊検査への応用 (論文[1,5], 学会発表[1,4,7,8])

本研究では、超音波による磁気測定、および磁気イメージングに成功したので報告する。線形近似の範囲内で、音波圧力 T により変調される磁束密度 B は圧磁定数 d を用いて $dB/dt = d \cdot dT/dt$ と与えられる。したがって、ASEM 信号強度は応力摂動による磁化（磁束密度）の敏感性を反映する。圧磁近似を通して変調された磁化（磁束密度）をもとに磁気双極子放射として理論的基礎付けを行い、フェライト磁石による実験と比較しその整合性を確認した。さらに、我々は磁化曲線の立ち上がり領域（高微分透磁率領域）で信号強度が増大し、飽和領域に至ると減少する傾向を見出した。飽和領域での信号減少の原因は、強磁場による磁区構造の安定化のためと解釈される。つまり、外部応力に対する磁化の敏感性はバルクハウゼン効果が出るような不安定な領域で顕著になると考えられる。この結果は、超音波を用いて磁化曲線の定性的特性を測定できることを意味する。少なくとも超音波を用いて強磁性体の飽和磁化が測定できることがわかり、非接触測定の利点を活かし、新たなニーズの開拓を始めている。次に、我々は超音波を用いた磁気イメージングを実演した（図6）。特に、図6(b)と6(c)は興味深い。純鉄は多重磁区構造をとるため、マクロなスケールでは磁化は相殺されて、

ASEM 信号は期待されない。しかしながら、試料側端部では切断時による応力ストレスにより磁化が発生していることがわかる（図6(b)）。これを確認するために、試料中央部を折り曲げて測定した結果が図6(c)である。ストレス部で誘起された磁化が超音波測定により可視化できることがわかる。このことは、磁気分布を通して強磁性金属における残留応力を超音波検査できることを示唆している。さらに、図7に ASEM トモグラフィの実験結果を示す。音波分解能をもって十分な磁気コントラストが得られていることがわかる。本測定はエコー信号と同時測定が可能であるから、エコーで見つけた異物に対して即座にその磁気特性を判断できる利点がある。

応用例として、オーステナイト系ステンレス合金の応力誘起磁化検出について報告する（図8）。オーステナイト系ステンレス合金は、圧力や放射線照射によりマルテンサイト型結晶へと構造変化し、強磁性転移する。磁化された部分は脆くなることが知られており、磁気イメージングによる強磁性転移発見は脆化を早期に発見する有望な非破壊検査と考えられている。ASEM 法による磁気イメージングは超音波を用いるため、通常の磁気センサーを走査する接触型の検査法よりはるかに広範囲の応用が可能である。図8に引張り応力の印加前後のオーステナイト系ステンレス合金のイメージング結果を示す。圧力印加前（0 MPa）に試料側端部で観測されている ASEM 信号は試料切断時に生じた磁化を検出している。転移臨界圧力以上印加した試料（600 MPa）では全領域にわたり磁化していることがわかる。また、引張り試験機において圧力印加過程における磁化誘起のダイナミクスの検出にも成功し、塑性変形と磁化発生との相関が得られた。また、技術的な側面として、工場現場内での引張り試験と組み合わせた ASEM 測定の意義は大きい。電磁シールドやグラウンド線を配慮することにより、ノイズの多い屋外での測定が可能であることを示している。昨年度から鉄鋼メーカーとの共同研究が始まり、鋼材の非破壊検査へ向けた開発を本格化する。

(3) さらに高感度化へ向けて (学会発表[3,6])

これまで、超音波パルス法（時間領域測定法）によって音波遅延時間を利用して、電磁ノイズと目的信号を時間的に分離する手法が用いられてきた（図1）。しかしながら、パルス法では実質的な積分時間が短いため、イメージング取得には長時間測定をする必要があり、実用化への障害となっていた。本研究では、振幅変調された連続超音波を用い

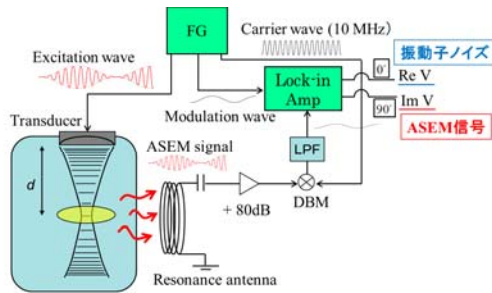


図9 振幅変調法の測定概念図

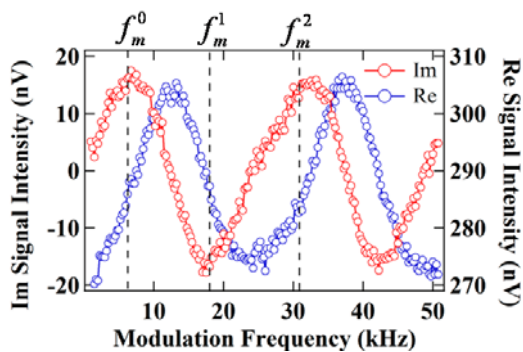


図10 振幅変調法によるASEM信号(ラット大腿骨)

て周波数領域で目的信号を分解し、ASEM応答を高感度に検出する方法を開発した(図9)。振動子と対象物の距離が $(2n+1)\lambda_m/4$ のとき (λ_m : 変調周波数に対応する水中音波波長)、振動子ノイズとASEM信号の位相差が90度となることを利用し、RF位相検波およびロックイン検波により目的信号を位相差として検出する。実施上のプロセスは以下である。まず、ロックインアンプ出力信号の実部と虚部の変調周波数依存性を測定し、最大・最小値を取るピーク周波数を求める(図10)。このピーク周波数が振動子—試料間距離から計算した $(2n+1)\lambda_m/4$ に対応する周波数であることを確認し、所望の変調周波数に固定してイメージング等の測定をする。図10の実施例に示すように、 $(2n+1)\lambda_m/4$ に対応する変調周波数 f_m のとき、実部がゼロとなり、虚部が最大値を取ることから、振動子ノイズ(実部)と目的信号(虚部)が明確に分離される。この振幅変調法によりパルス法と比べて、約300分の1(原理的には約3万分の1)の測定時間短縮に成功した。これは実用化にとってきわめて大きな成果である。

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8件)

[1] H. Yamada, K. Takashima, K. Ikushima, H. Toida, M. Sato, Y. Ishizawa, Magnetic sensing via ultrasonic excitation,

Rev. Sci. Instrum. 84, 044903 (2013).

DOI:10.1063/1.4803188

査読 有

[2] N. Ohno, H. Yamada, K. Ikushima, N. Niimi, Y. Kojima,

Imaging of Electromagnetic Properties via Acoustic Excitation,

2012 IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings 487-490 (2012).

DOI: 10.1109/ULTSYM.2012.0121

査読 有

[3] N. Ohno, M. Uehara, H. Yamada,

K. Ikushima, N. Niimi, Y. Kojima,

Acoustically Stimulated Electromagnetic Response in Bones,

Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics 33, 523-524 (2012).

<http://www.use-jp.org/USE2012/proceedings/USE12/pdf/3J5-4.pdf>

査読 無

[4] K. Takashima, H. Yamada, K. Ikushima,

M. Sato and Y. Ishizawa,

Nondestructive inspection of austenitic stainless steels by detection of acoustically stimulated electromagnetic response,

Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics 32, 349-350 (2011).

<http://www.use-jp.org/USE2011/proceedings/USE11/pdf/3Pa2-11.pdf>

査読 無

[5] N. Ohno, Y. Kiyama, H. Yamada,

K. Takashima, and K. Ikushima,

Measurements of acoustically stimulated electromagnetic response from piezoelectric materials

Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics 32, 211-212 (2011).

<http://www.use-jp.org/USE2012/proceedings/USE11/pdf/2Pb2-11.pdf>

査読 無

[6] 生嶋健司, 山田尚人, 超音波による電気・

磁気測定、非破壊検査 60, 599 – 605 (2011).

査読 無

[7] 生嶋健司, 生体機能の非侵襲検査へ向けた新たな取り組み—超音波で電気・磁気を測る—, Material Integration vol. 23, 30 – 39 (2010).

査読 無

[8] 生嶋健司, 超音波による電気・磁気特性の画像化、超音波テクノ 5-6, 75-81 (2010).

査読 無

査読 無

〔学会発表〕(計9件)

[1] H. Yamada, K. Takashima, S. Naito, and K. Ikushima,

Magnetic imaging by ultrasonic technique, The 32nd International Acoustical Imaging Symposium (AI-32), Apr. 30, 2013 (Singapore).

[2] N. Ohno, H. Yamada, and K. Ikushima,

Imaging of Electromagnetic Properties via Acoustic Excitation, 2012 IEEE International Ultrasonics Symposium, Oct. 8 2012 (Dresden, Germany).

[3] 内藤駿、大野奈津美、生嶋健司、新実信夫、骨の音響刺激電磁応答の測定、応用物理学会学術講演会、2012年3月28日、神奈川工科大学。

[4] 山田尚人、高島和也、生嶋健司、強磁性体の音響刺激電磁応答、応用物理学会学術講演会、神奈川工科大学2012年3月28日。

[5] 大野奈津美、上原美貴、山田尚人、生嶋健司、新実信夫、小島良績、骨の音響誘起電磁応答、超音波シンポジウム(USE2012)、2012年11月15日、千葉大学。

[6] 内藤駿、高島和也、生嶋健司、振幅変調法による音響誘起電磁応答の測定、応用物理学会関係連合講演会、2012年3月18日、早稲田大学。

[7] 高島和也、山田尚人、生嶋健司、佐藤通隆、石沢嘉一、超音波誘起電磁応答の検出によるオーステナイト系ステンレス合金の非破壊検査、超音波シンポジウム(USE2011)、2011年11月10日、京都大学。

[8] 大野奈津美、木山優子、山田尚人、高島和也、生嶋健司、圧電材料からの超音波誘起電磁応答の測定、超音波シンポジウム、(USE2011) 2011年11月9日、京都大学。

[9] 山田尚人、中本圭亮、生嶋健司、超音波による磁化分布の可視化Ⅲ、応用物理学会学術講演会、2010年9月14日、長崎大学。

〔産業財産権〕

○出願状況(計3件)

名称:「被測定対象の特性測定装置及びその方法、並びに被測定対象の特性測定プログラム」

発明者: 生嶋健司

権利者: 東京農工大学

種類: 特許権

番号: 特願 2011-158637

出願年月日: 2011年7月20日

国内外の別: 国内

名称:「音波誘起電磁波による物体の特性測定方法及び装置」

発明者: 生嶋健司、小宮山進

権利者: JST

種類: 特許権

番号: 特願 2011-221814

出願年月日: 2011年10月6日

国内外の別: 国内

名称:「音波誘起電磁波による物体の特性測定方法及び装置」

発明者: 生嶋健司、小宮山進

権利者: JST

種類: 特許権

番号: 特願 2011-221815

出願年月日: 2011年10月6日

国内外の別: 国内

○取得状況(計1件)

名称:「音波誘起電磁波による物体の物性測定方法及び装置」

発明者: 生嶋健司、小宮山進

権利者: JST

種類: 特許権

番号: 第4919967号

取得年月日: 2012年2月10日

国内外の別: 国内

〔その他〕

[1] 受賞 大野奈津美(修士院生)「圧電材料からの超音波誘起電磁応答の測定」超音波エレクトロニクス若手奨励賞、授賞式:平成24年11月14日。

[2] 研究室ホームページ
<http://www.tuat.ac.jp/~ikushima/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

生嶋 健司 (IKUSHIMA KENJI)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 20334302

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4)研究協力者

新実 信夫 (NIIMI NOBUO)

日本シグマックス株式会社