

機関番号：34406
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20560203
 研究課題名(和文) 電磁力を応用した温度伝導率，縦弾性係数および電気伝導率の同時測定法の開発
 研究課題名(英文) Method to measure thermal diffusivity, longitudinal elastic modulus and electrical conductivity simultaneously by use of electromagnetic force
 研究代表者
 松島 栄次(MATSUSHIMA EIJI)
 大阪工業大学・工学部・准教授
 研究者番号：70268225

研究成果の概要(和文):物性値が既知であるアルミニウムとチタンの無限平板状材料に対して，10Hz から 1.0kHz の交流電流を用いて誘導加熱実験，加振実験および電磁誘導実験を行い，以下が実証された．温度伝導率が小さい場合，誘導加熱された試料の温度比は，熱伝導方程式の理論解と良く一致する．交流電流に対して，その 2 倍となる周波数の弾性変形による音響信号が検出される．試料近傍における電位の振幅と位相差の周波数依存性は，電磁方程式の理論解と良く一致する．

研究成果の概要(英文): For infinite plate metals of aluminum and titanium of which properties were known, electromagnetic experiments to heat samples by the induction, to make ones vibrated by the force and to induce the field around ones were performed by use of an alternate current of which frequency was from 10Hz to 1.0kHz. Those established as follows. In the case of low thermal diffusivity, reduced temperature observed for a sample heated by the induction agreed with the solution of equation for heat conduction. Elastic deformation of which frequency was 2 times larger than one of the alternate current was acoustically detected by a microphone. Dependence of amplitude and that of phase difference for an electric potential on frequency of alternate current agreed with that of the solution for electromagnetic equation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱物性、機械物性、電気物性、電磁力、測定法

1. 研究開始当初の背景

航空宇宙産業における材料工学において，炭素繊維強化炭素複合材料(C/C 複合材料)は，高温で使用する構造材料として発展が期待される先進複合材料である．一般に，その熱的・機械的性質は，炭素化お

よび黒鉛化処理工程(高密度化処理)に大きく依存する．そして，熱処理時間のみによっても，無定形炭素材料中の気孔寸法は変化することが報告されている．このことから，炭素系材料の気孔率が，熱負荷時に時々刻々変化し，熱的・機械的性質が熱負荷時間に依存

することが考えられる。それらの経時変化に関する研究は、材料の使用環境における熱的・機械的な寿命を評価する上で必要不可欠である。

また、原子力産業における炉工学において、傾斜機能材料 (FGM) は、熱負荷による熱応力を緩和する構造材料として発展が期待される新材料である。それらは、性質の異なる材料が板厚内で一次的に層状に重なって構成される多層材料である。その熱的・電気的性質の板厚内分布に関する研究は、材料の使用環境における熱的・電気的性能を評価する上で必要不可欠である。

一方、これまでの測定法は、物性値が関係する現象に対して数学的に理論解が得られる系を測定原理とするものであった。しかし、C/C 複合材料の温度伝導率と縦弾性係数を同時に測定するためには、熱伝導と弾性変形の連成現象に対する測定原理が必要であり、FGM の温度伝導率と電気伝導率を同時に測定するためには、熱伝導と電気伝導の非線形現象に対する測定原理が必要である。また、コンピュータ処理速度の進歩に伴い、数値解法による近似解から物性値を同定する逆解析手法が発展している。

さて、C/C 複合材料や FGM は、高温用構造材料として有望であり、熱物性、機械物性および電気物性に関する研究が個別に国内外で数多く行なわれている。しかしながら、それらの物性値を同時に測定する方法に関する研究は全く見当たらない。さらに、本研究のように、コイルに交流電流を通電することによって、熱伝導、弾性変形および電気伝導を同時に発生させる電磁現象を応用しようとする研究は前例が全くない。

2. 研究の目的

これまで、物性値の経時変化に関する情報を提供することを目的として、熱物性の温度伝導率と機械物性の縦弾性係数を同時に測定する方法を新たに開発している。また、物性値の板厚内分布に関する情報を提供することを目的として、熱物性の温度伝導率と電気物性の電気伝導率を同時に測定する方法を新たに開発している。さらに、測定系に要求される条件を緩和することを目的として、数値解法を用いた同定解析を測定原理とする物性値測定法を新たに開発している。

そこで、C/C 複合材料や FGM における熱物性、機械物性および電気物性を同時に測定する方法を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

熱物性、機械物性および電気物性を同時に評価するためには、材料内に熱伝導、弾性変形および電気伝導を同時に発生させる必要がある。そこで、コイルに交流電流を流すこ

とによって、それらの現象は同時に発生する。つまり、導電性材料近傍に置かれたコイルに交流電流を流すと、材料中には熱と弾性変形が発生し、系全体には電磁場が作られる。したがって、熱に対しては温度を、弾性変形に対しては変位を、そして電磁場に対しては電場の強さを、それぞれ観測することにより、温度伝導率、縦弾性係数および電気伝導率の同時測定が可能となるものと考えられる。

これまで、均質材料について、温度伝導率、音速 (縦弾性係数に關係する) および電気伝導率を個々に測定する方法の健全性を実証している。また、温度伝導率と音速の同時測定法の健全性を実証している。そこで、次の段階として、本研究では、期間内に、温度伝導率、縦弾性係数および電気伝導率を同時に測定する方法について検討する。具体的には、電場の強さに対する大きな信号の中から熱伝導による信号と弾性変形による信号を分離する観測方法を開発し、熱伝導、弾性変形および電磁場の連成現象に対する順解析プログラムを作成し、シンプレックス法などの逆解析手法について検討する。

4. 研究成果

(1) 試料

測定原理の健全性を実証するため、物性値が既知であるアルミニウムとチタンを用いた。アルミニウムは、JIS 規格 1100 に準ずる純アルミニウム丸棒 (純度 99.00%以上) から切り出した材料であり、チタンは、同規格 2 種に準ずる純チタン丸棒 (純度 99.31%以上) から切り出した材料である。表 1 にそれらの寸法と物性値を示す。

表 1 試料の寸法と物性値

	単位	アルミニウム	チタン
直径	mm	99.95	100.13
厚み	mm	19.55	19.23
温度伝導率	mm ² /s	96.8	9.25
密度	kg/m ³	2688	4506
縦弾性係数	GPa	70.8	109
電気伝導率	MS/m	36.4	2.1
透磁率	H/m	4π × 10 ⁻⁷	

(2) 温度伝導率

測定原理

本方法では、測定対象に対して、次の仮定をする。(a)形状は、無限平板状であり、熱伝導は、半径方向と厚み方向の軸対称二次元現象である。(b)熱物性は、均質かつ等方性である。(c)初期温度は、内部とその周囲で様である。(d)境界となる上面と下面には、周囲と

の間に熱伝達がある。(e)誘導加熱は、半径方向に正規関数的に、厚み方向に指数関数的に分布し、時間に対して階段状に変化する。

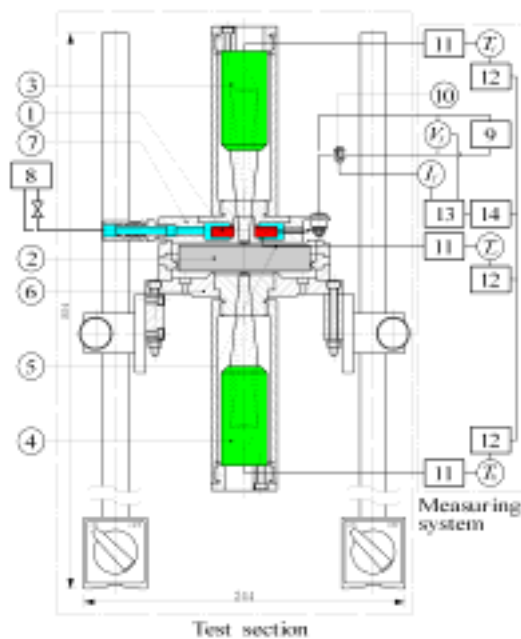


図 1 温度伝導率を測定する実験系統図 . 1, 発生コイル; 2, 試料; 3, 4, 赤外線センサ; 5, 熱電対; 6, 試料支持具; 7, 冷却槽; 8, 冷却水循環装置; 9, 交流電源; 10, 電流変換器; 11, 零接点補償器; 12, マルチメータ; 13, オシロスコープ; 14, コンピュータ; I_f , V_f および T_c , 発生コイルの電流, 電圧および温度; T_t と T_b , 上面と下面の温度.

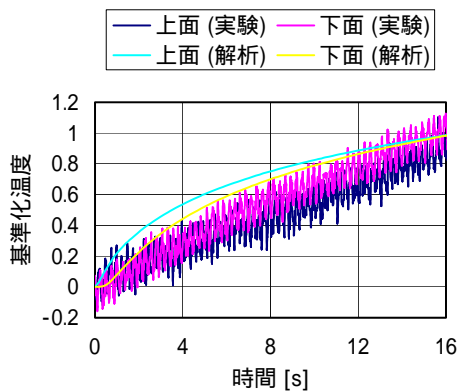


図 2 アルミニウムの温度履歴

実験装置と方法

図 1 に、実験系統図を示す。実験装置には、冷却水循環装置、交流電源、試験部および測定系がある。試験部は、誘導加熱コイル、コイル冷却装置、試料、試料支持具および赤外線センサにより構成される。測定系は、基準零接点補償器、マルチメータ、デジタルメモリおよびコンピュータで構成される。交流

電源の周波数は 1.0kHz とする。赤外線センサによる熱起電力は、マルチメータを介してコンピュータに記録される。

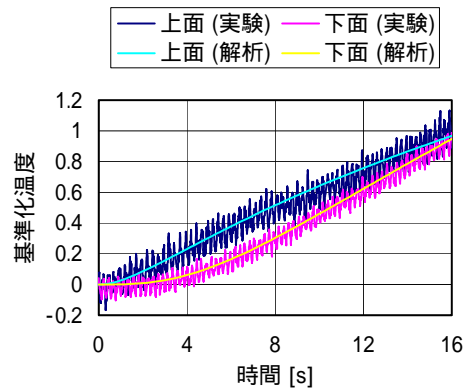


図 3 チタンの温度履歴

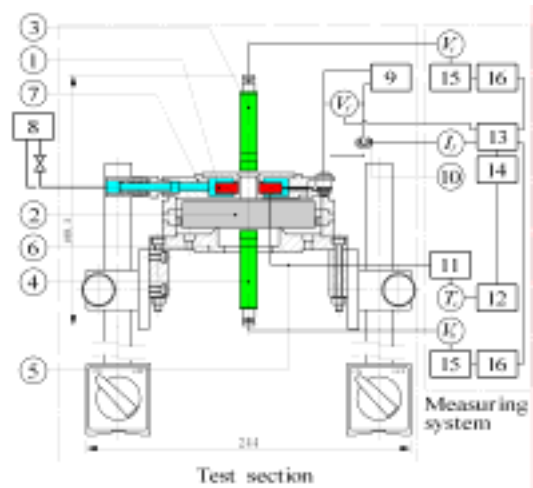


図 4 縦弾性係数を測定する実験系統図 . 1, 発生コイル; 2, 試料; 3, 4, マイクロフォン; 5, 熱電対; 6, 試料支持具; 7, 冷却槽; 8, 冷却水循環装置; 9, 交流電源; 10, 電流変換器; 11, 基準零接点補償器; 12, マルチメータ; 13, デジタルメモリ; 14, コンピュータ; 15, 増幅器; 16, 濾波器; I_f , V_f および T_c , 発生コイルの電流, 電圧および温度; V_t と V_b , 上面と下面のマイクロフォン電圧.

結果と考察

図 2 に、アルミニウムにおける計測最終時刻の熱起電力に対する任意の時刻における熱起電力の比を示す。また、同図に、表 1 の温度伝導率を用いた理論解から求められる温度比の時間変化も示す。上下面の熱起電力比は上に凸な曲線を描きながら上昇し続けるが、実験値の曲線の曲率は、理論解のそれよりも小さい。

図 3 は、チタンにおいて計測された熱起電力比と理論解による温度比を示す。上面の熱

起電力比はわずかに上に凸な曲線を描きながら上昇し続け、下面の熱起電力比は下に凸な曲線を描きながら上昇し続ける。それらは、理論解の温度比と良く一致する。

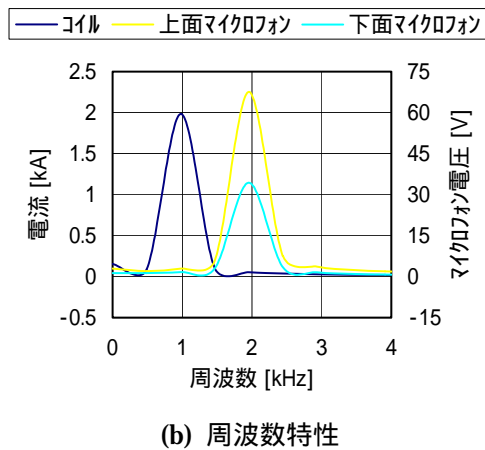
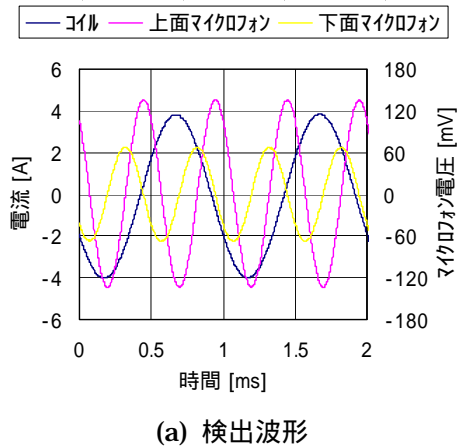


図5 アルミニウムの検出信号

(3) 縦弾性係数 測定原理

本方法では、測定対象に対して、次の仮定をする。(a)形状は、無限平板状であり、弾性変形は、半径方向と厚み方向の軸対称二次元現象である。(b)機械物性は、均質かつ等方性である。(c)弾性変形は、時間に対して三角関数的に変化する。(d)境界となる上面と下面には、表面力がある。(e)外力は、半径方向と厚み方向にデルタ関数的に分布し、時間に対して三角関数的に変化する。

実験装置と方法

図4に、実験系統図を示す。試験部は、誘導加熱コイル、コイル冷却装置、試料、試料支持具およびマイクロフォンにより構成される。測定系は、増幅器、濾波器、デジタルメモリおよびコンピュータで構成される。誘導加熱コイルに加えられる交流電流は電流変換器により電圧に変換され、マイクロフォンの電圧は増幅器と濾波器を介して、それぞれ、デジタルメモリに記録される。

結果と考察

図5に、アルミニウムにおいて、周波数を1.0kHzとして計測された交流電流とマイクロフォンの電圧を示す。また、図6に、チタンにおいて検出された信号を示す。アルミニウムとチタンとも、マイクロフォンの検出波形には、交流電流の周波数の2倍となる弾性変位による信号が検出されている。また、アルミニウムの弾性変位による信号の振幅は、チタンのそれよりも大きい。

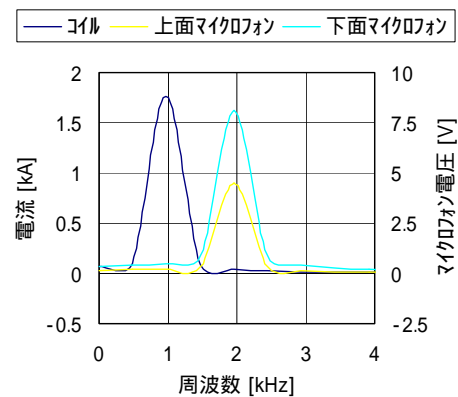
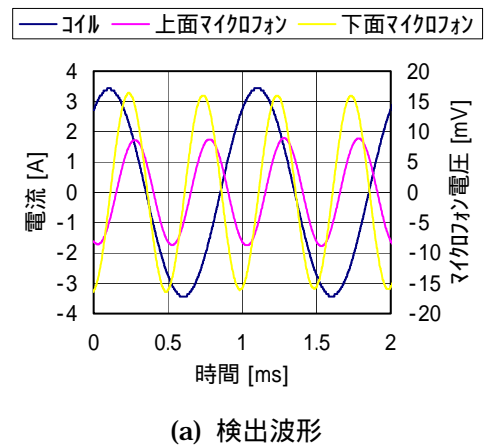


図6 チタンの検出信号

(4) 電気伝導率

測定原理

本方法では、測定対象に対して、次の仮定をする。(a)形状は、無限平板状であり、電磁場は、半径方向と厚み方向の軸対称二次元現象である。(b)電気物性は、均質かつ等方性である。(c)電磁場は、時間に対して三角関数的に変化する。(d)電荷と変位電流は存在しない。(e)交流電流は、半径方向と厚み方向にデルタ関数的に分布し、時間に対して三角関数的に変化する。

実験装置と方法

図7に、実験系統図を示す。試験部は、誘導加熱コイル、コイル冷却装置、試料、試料支持具および検出コイルにより構成される。

測定系は、増幅器、デジタルメモリおよびコンピュータで構成される。誘導加熱コイルに加えられる交流電流は電流変換器により電圧に変換され、検出コイルの電圧は増幅器を介して、それぞれ、デジタルメモリに記録される。なお、交流電流の周波数は、10Hz から 1.0kHz まで可変である。

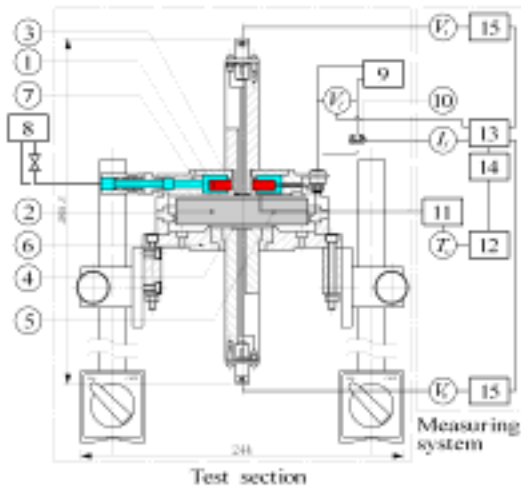


図 7 電気伝導率を測定する実験系統図。1, 発生コイル; 2, 試料; 3, 4, 検出コイル; 5, 熱電対; 6, 試料支持具; 7, 冷却槽; 8, 冷却水循環装置; 9, 交流電源; 10, 電流変換器; 11, 基準零接点補償器; 12, マルチメータ; 13, デジタルメモリ; 14, コンピュータ; 15, 増幅器; I_c , V_t および T_c , 発生コイルの電流, 電圧および温度; V_t と V_b , 上面と下面の検出コイル電圧。

結果と考察

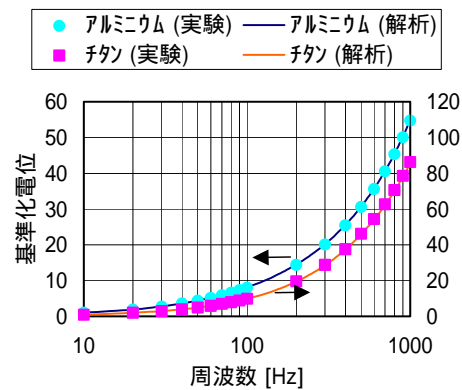
図 8 に、誘導加熱コイルの交流電流に対する上面側検出コイルの電圧の振幅比と位相差の周波数依存性を示す。ただし、振幅比は 10Hz における値を基準として示す。アルミニウムの振幅比は、チタンのそれよりも低い値となる。また、アルミニウムの位相差は下に凸な変化となり、チタンのそれは上に凸な変化となる。一方、理論解の振幅比と位相差は、実験値のそれらと同様の傾向を示す。

図 9 に、誘導加熱コイルの交流電流に対する下面側検出コイルの電圧の振幅比と位相差の周波数依存性を示す。アルミニウムの振幅比が最大となる周波数は、チタンのそれよりも低い値となる。また、アルミニウムの位相差の減少傾向は、チタンよりも低い周波数範囲で発生する。一方、理論解の振幅比と位相差は、実験値のそれらと同様の傾向を示す。しかし、理論解と実験値との差は、1.0kHz に近い周波数域において大きくなる。

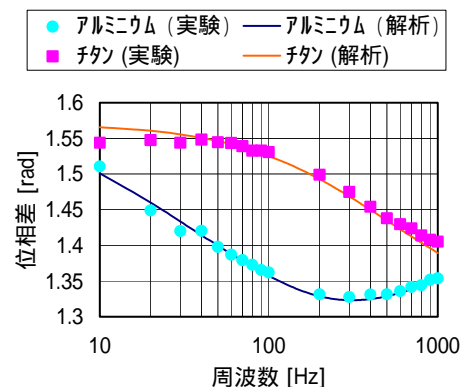
(5) まとめ

無限平板状材料に対する誘導加熱実験を行った結果、下記が確認された。

- ・温度伝導率がチタン程度に小さい場合、直径が発生コイルの 2 倍である金属材料の温度比は、無限平板を仮定した理論解と良く一致する。
- ・温度伝導率がアルミニウム程度に大きい場合、直径が発生コイルの 2 倍である金属材料の温度比は、側面の境界条件を考慮した理論解に近づく。



(a) 電位



(b) 位相差

図 8 誘導加熱面近傍における電位と位相差の周波数依存性。

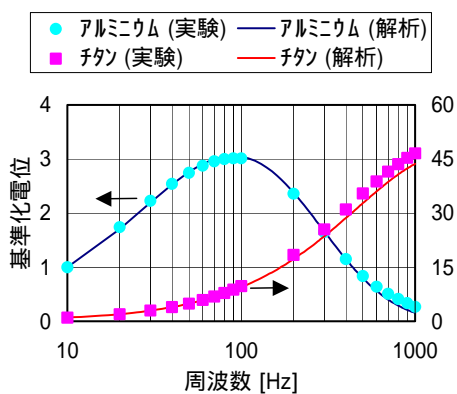
無限平板状材料に対する加振実験を行った結果、下記が確認された。

- ・0.10kHz ~ 3.0kHz の交流電流に対して、その 2 倍となる周波数の信号が音響的に検出された。
- ・音響信号には、0.50kHz 程度の電氣的雑音が含まれる。

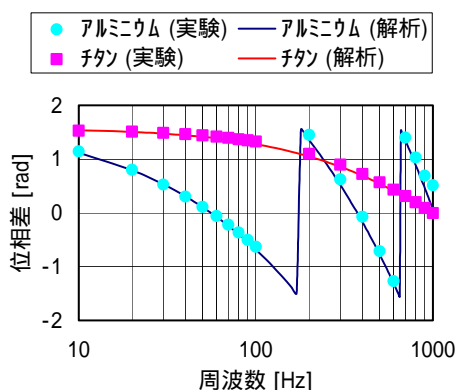
無限平板状材料に対する電磁誘導実験を行った結果、下記が確認された。

- ・振幅と位相差の周波数特性は、誘導加熱面近傍より試料下面近傍の方が電気伝導率に大きく依存する。

- ・直径が発生コイルの2倍で、検出コイルの7倍である金属材料の振幅と位相差の周波数依存性は、無限平板を仮定した理論解と良く一致する。
- ・振幅と位相差の10Hz～1.0kHzの周波数依存性を観測することで、電気伝導率が2.1～36.4 MS/mの金属材料を識別できる。



(a) 電位



(b) 位相差

図9 試料下面近傍における電位と位相差の周波数依存性。

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 0件)

[学会発表](計 10件)

松島 栄次, 古賀 広樹, 無限平板状材料における熱伝導の誘導加熱周波数依存性に関する実験, 日本機械学会関西支部第86期定時総会講演会, 2011年3月20日, 京都工芸繊維大学。

松島 栄次, 西村 陽子, 無限平板状材料周りにおける電磁場の交流電流周波数依存性に関する実験, 日本機械学会関西支部第86期定時総会講演会, 2011年3月20日, 京都工芸繊維大学。

松島 栄次, 上野 恵, 無限平板状材料における弾性変形の交流電流周波数依存性に関する実験, 日本機械学会関西支部第86期定時総会講演会, 2011年3月20日, 京都工芸繊維大学。

松島 栄次, 河合 寛紀, 音響検出法による誘導加熱面の電磁力に関する実験, 日本機械学会関西支部第85期定時総会講演会, 2010年3月17日, 神戸大学。

松島 栄次, 磯野 貴啓, 無限平板状材料における誘導加熱面の熱伝導に関する実験, 日本機械学会関西支部第85期定時総会講演会, 2010年3月17日, 神戸大学。

松島 栄次, 蔵本 和志, 無限平板状材料周りにおける誘導加熱面近傍の電磁場に関する実験, 日本機械学会関西支部第85期定時総会講演会, 2010年3月17日, 神戸大学。

松島 栄次, 八重嶋 省吾, 薄板材料の誘導加熱実験, 第46回日本伝熱シンポジウム, 2009年6月3日, 国立京都国際会館。

松島 栄次, 盛岡 祐亮, 無限平板状材料の誘導加熱実験, 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会, 2009年3月17日, 近畿大学。

松島 栄次, 川島 唯宏, 誘導加熱時に発生する無限平板状材料周りの電磁場に関する実験, 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会, 2009年3月17日, 近畿大学。

松島 栄次, 榊家 雅史, 誘導加熱時に発生する電磁力の音響検出法に関する実験, 日本機械学会関西支部第84期定時総会講演会, 2009年3月17日, 近畿大学。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松島 栄次 (MATSUSHIMA EIJI)
大阪工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 70268225

(2) 研究分担者

なし。

(3) 連携研究者

なし。