

令和 2 年 5 月 31 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14132

研究課題名（和文）回路論に基づく音響メタマテリアル設計理論と音響透明マントへの応用

研究課題名（英文）Design theory for acoustic metamaterials based on transmission-line theory and its applications to acoustic cloaks

研究代表者

永山 務（Nagayama, Tsutomu）

鹿児島大学・理工学域工学系・助教

研究者番号：80781997

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では回路論に基づく音響メタマテリアルの設計理論を確立した。回路モデルによる電磁メタマテリアルの設計方法を音響メタマテリアルに適用し、材料パラメータと回路パラメータとの対応関係を明らかにした。モデルを用いて音響カーペットクロークを設計し、回路シミュレーションにより動作を確認した。また、回路モデルと等価な音響メタマテリアルの構造パラメータを決める設計式を導出し、音響透明マントの一種である音響カーペットクロークを設計した。COMSOLを用いた音圧レベル分布の計算結果から音響カーペットクロークが動作することを確認し、回路論に基づく音響メタマテリアルの設計理論の妥当性を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、座標変換に基づく高度な音波の経路制御を実現可能な音響メタマテリアルを回路モデルを用いて設計することが可能になった。これにより、従来の反射等を用いる音波の経路制御に比べて遥かに自由度が高い、新たな音波制御技術を開拓できる可能性がある。また、音響メタマテリアルの構造パラメータも大量の数値計算に頼らずに設計式から一意的に決められるため、非常に画期的である。また、本研究により電信方程式と音響方程式の双対性から、材料パラメータと回路パラメータの対応関係を明らかにしているが、同様の考えを適用すれば波及効果として、水波や地震波などの異分野の流体解析や設計への展開も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, the design theory for acoustic metamaterials has been proposed based on the transmission-line theory. The theory of the circuit model for electromagnetic metamaterials has been extended to acoustic metamaterials, and correspondences between material parameters and circuit parameters have been revealed. An acoustic carpet cloak for hiding an object on a flat surface has been designed by using the circuit model, and its operations have been confirmed by circuit simulations. Also, design formulas for acoustic metamaterials equivalent to the circuit model have been derived, and an acoustic carpet cloak for hiding an object on a flat surface has been designed as an example. Sound pressure level field distributions have been calculated by using a COMSOL Multiphysics, and operations of the designed acoustic carpet cloak have been shown from the calculated results. Therefore, the validity of the proposed design theory for acoustic metamaterials can have been confirmed.

研究分野：音響メタマテリアル、マイクロ波工学、電磁メタマテリアル

キーワード：変換音響学 音響透明マント 音響メタマテリアル 回路モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

座標変換に基づく光や電磁波の経路制御技術を音波に拡張した概念、変換音響学に基づく音波の経路制御技術が提案されている。変換された座標系と等価な不均質異方性音響メタマテリアルを設計することで座標変換と等価な音波の経路制御を実現でき、この応用として、覆った物体を音波に対して見えなくする音響透明マント実現に向けた研究が盛んに行われている。

音響透明マントのような高度な音波の経路制御を実現するためには、図1に示すような非対角項が非零の質量密度テンソルと体積弾性率の値を操作した音響メタマテリアルが必要であるが、非対角項の値をどのようにして設計すれば良いか分かっていなかった。このため、従来は非対角項の値を無視する設計方法が用いられ、本来必要な物性値を無視しているため適用範囲が大幅に限られるという課題があった。

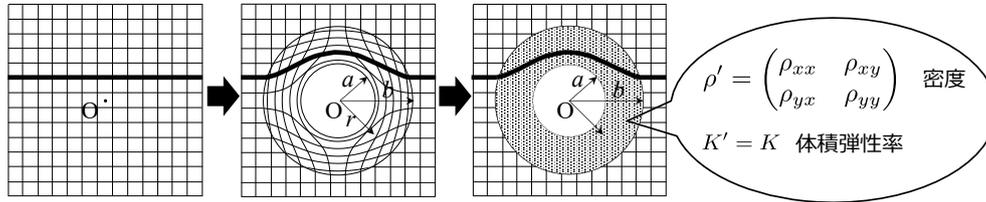


図1 座標変換と等価な音響メタマテリアルによる音波の経路制御

2. 研究の目的

座標変換に基づく電磁波の経路制御の実現に必要な、非対角項が非零の透磁率テンソルと誘電率の値を有する電磁メタマテリアルの設計において、材料を回路で表現する手法である回路論的アプローチに基づく設計方法が取り入れられている(文献①)。同理論を音波に対しても適用できるように拡張すれば上述の課題を解決できると考え、本研究では、非対角項が非零の質量密度テンソルと体積弾性率の値を有する音響メタマテリアルのための回路論に基づく設計理論の確立を目指す。さらに、理論に基づき音響透明マントを実現し、電磁波の経路制御技術を音波の経路制御技術に発展・展開する。

3. 研究の方法

(1) 回路パラメータと質量密度および体積弾性率との対応について

電磁波の分野の研究で提案されている、異方性媒質に対する回路モデル(図2)の回路方程式と異方性媒質に対する音響方程式を対応させ、回路モデルの回路パラメータと質量密度テンソルおよび体積弾性率との対応関係を明らかにする。

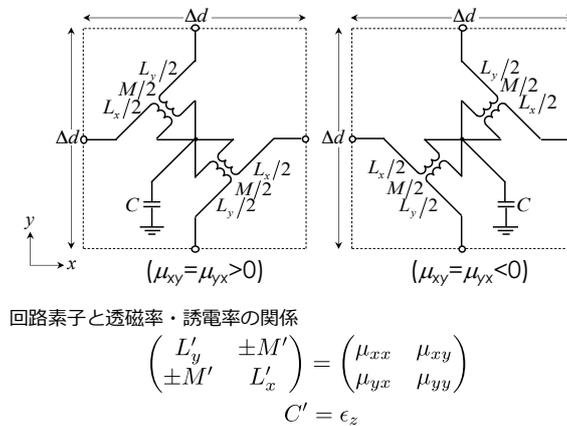


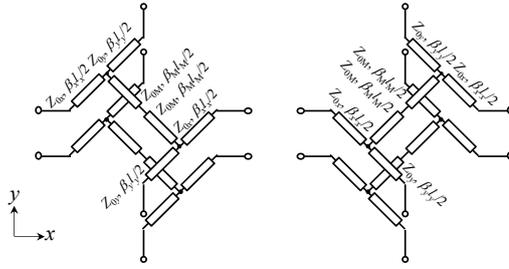
図2 異方性媒質に対する回路モデルと電磁波に対する材料パラメータとの対応関係

(2) 回路モデルを用いた音響カーペットクロックの設計, 回路解析

導出した対応関係の妥当性を確認するために、平らな面上にある物体を音波に対して見えなくする音響透明マントの一種である音響カーペットクロックを設計し、回路シミュレーションにより動作を検証する。

(3) 回路モデルと等価な音響メタマテリアルの設計式の導出

電磁波の分野の研究では、等価回路モデルを分布定数線路に置換した、分布定数異方性メタマテリアルモデル(図3)が提案されており、回路モデルと等価な特性を持つメタマテリアルの構造パラメータを決めるための設計式(図3)が導出されている。この設計式に、回路パラメータと質量密度および体積弾性率との対応関係を代入することで、音響メタマテリアルの構造パラメータを決めるための設計式を導出する。



モデルの設計式

$$L'_x - M' = \frac{2Z_{0x}}{\omega\Delta d} \tan \frac{\beta l}{2} \quad L'_y - M' = \frac{2Z_{0y}}{\omega\Delta d} \tan \frac{\beta l}{2}$$

$$M' = \frac{2}{\omega\Delta d} \frac{Z_{0M}^2 (Y_{0x} + Y_{0y}) \tan \frac{\beta l}{2} + Z_{0M} (\operatorname{cosec} \beta_M l_M - \cot \beta_M l_M)}{\cos^2 \frac{\beta l}{2} + Z_{0M} (Y_{0x} + Y_{0y}) \sin \beta l \cot \beta_M l_M - Z_{0M}^2 (Y_{0x} + Y_{0y})^2 \sin^2 \frac{\beta l}{2}}$$

$$C' = \frac{1}{\omega\Delta d} \left\{ (Y_{0x} + Y_{0y}) \sin \beta l \cos \beta_M l_M + Y_{0M} \cos^2 \frac{\beta l}{2} \sin \beta_M l_M - Z_{0M} (Y_{0x} + Y_{0y})^2 \sin^2 \frac{\beta l}{2} \right\}$$

図3 分布定数異方性メタマテリアルモデルと設計式($\beta l \equiv \beta_x l_x = \beta_y l_y$)

- (4) 音響メタマテリアルによる音響カーペットクロックの設計, 音響シミュレーション
分布定数異方性メタマテリアルモデルの分布定数線路を音響導波路で置換した音響メタマテリアルを提案し, 同メタマテリアルの構造パラメータを設計式から決めて音響カーペットクロックを設計する. COMSOL を用いた音響シミュレーションにより音圧レベルを計算し, 覆った物体を音波に対して見えなくすることができるか確認する.

4. 研究成果

- (1) 研究方法(1)の検討により, 図2の回路モデルの回路パラメータと質量密度テンソルおよび体積弾性率の対応関係が以下のように分かることが分かった.

$$\begin{pmatrix} L'_x & \mp M' \\ \mp M' & L'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} \end{pmatrix} \quad C' = \frac{1}{K}$$

図2に示している電磁波の場合の対応関係と比較すると, 対角項が単位長さ辺りの自己インダクタンスに対応している点は同じであるが, x と y の成分が入れ変わっていることが分かる. また, 非対角項も電磁波の場合と同様に単位長さ辺りの相互インダクタンスに対応するが, 正負が反転していることが分かる. 体積弾性率については逆数(=圧縮率)が回路の単位長さ辺りの容量に対応する. これらの違いは, 電界および磁界, 電圧および電流, 圧力および速度を対応させる時に, 波の伝搬方向に対するこれらの向きの関係上, 方向成分の違いや正負の違いが生じるためである(図4および図5を参照).

- (2) 回路モデルを用いて図6に示すような, 平らな剛体面上の剛体こぶを音波に対して見えなくする音響カーペットクロックを設計した. 図6のように剛体こぶに入射された音波は散乱するが, これを音響カーペットクロックで覆うとあたかもそこが平らな剛体面であるかのように反射し, 剛体こぶは見えなくなる(*剛体こぶの内部に空洞を作り, そこに入れた任意の物体も剛体こぶごと見えなくすることもできる). このような動作をするかどうかを, 回路シミュレーションにより電圧の振幅分布と位相分布を計算して確認した. 図7は計算結果で, 平らな面上の物体を設計したカーペットクロックで覆っている場合と覆っていない場合を同図で比較し, それぞれに対してガウシアンビームを真上から垂直入射している

マクスウェル方程式	回路方程式
$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\epsilon_z E_z$	$\left(-\frac{I_{x+1} - I_x}{\Delta d} \right) - \left(\frac{I_{y+1} - I_y}{\Delta d} \right) = j\omega C' V_c$
$\frac{\partial E_z}{\partial x} = j\omega\mu_{yx} H_x + j\omega\mu_{yy} H_y$	$\frac{V_{x+1} - V_x}{\Delta d} = \pm j\omega M' \left(\frac{I_{y+1} + I_y}{2} \right) + j\omega L'_x \left(-\frac{I_{x+1} + I_x}{2} \right)$
$\frac{\partial E_z}{\partial y} = -j\omega\mu_{xx} H_x - j\omega\mu_{xy} H_y$	$\frac{V_{y+1} - V_y}{\Delta d} = -j\omega L'_y \left(\frac{I_{y+1} + I_y}{2} \right) \mp j\omega M' \left(-\frac{I_{x+1} + I_x}{2} \right)$

電磁界, 電圧, 電流の対応関係

$$E_z \longleftrightarrow V_c \quad \frac{\partial E_z}{\partial x} \longleftrightarrow \frac{V_{x+1} - V_x}{\Delta d} \quad H_y \longleftrightarrow -\frac{I_{x+1} + I_x}{2} \quad \frac{\partial H_y}{\partial x} \longleftrightarrow -\frac{I_{x+1} - I_x}{\Delta d}$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} \longleftrightarrow \frac{V_{y+1} - V_y}{\Delta d} \quad H_x \longleftrightarrow \frac{I_{y+1} + I_y}{2} \quad \frac{\partial H_x}{\partial y} \longleftrightarrow \frac{I_{y+1} - I_y}{\Delta d}$$

図4 マクスウェル方程式と回路方程式の対応関係(電磁波の場合)

音響方程式	回路方程式
$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} = j\omega \frac{1}{K} p$	$-\left(\frac{I_{x+1} - I_x}{\Delta d}\right) - \left(\frac{I_{y+1} - I_y}{\Delta d}\right) = j\omega C' V_c$
$\frac{\partial p}{\partial x} = -j\omega \rho_{xx} v_x - j\omega \rho_{xy} v_y$	$\frac{V_{x+1} - V_x}{\Delta d} = -j\omega L'_x \left(\frac{I_{x+1} + I_x}{2}\right) \pm j\omega M' \left(\frac{I_{y+1} + I_y}{2}\right)$
$\frac{\partial p}{\partial y} = -j\omega \rho_{yx} v_x - j\omega \rho_{yy} v_y$	$\frac{V_{y+1} - V_y}{\Delta d} = \pm j\omega M' \left(\frac{I_{x+1} + I_x}{2}\right) - j\omega L'_y \left(\frac{I_{y+1} + I_y}{2}\right)$

圧力、速度、電圧、電流の対応関係

$$\begin{array}{ccccccc}
 p & \longleftrightarrow & V_c & \frac{\partial p}{\partial x} & \longleftrightarrow & \frac{V_{x+1} - V_x}{\Delta d} & v_x & \longleftrightarrow & \frac{I_{x+1} + I_x}{2} & \frac{\partial v_x}{\partial x} & \longleftrightarrow & \frac{I_{x+1} - I_x}{\Delta d} \\
 & & & \frac{\partial p}{\partial y} & \longleftrightarrow & \frac{V_{y+1} - V_y}{\Delta d} & v_y & & \frac{I_{y+1} + I_y}{2} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \longleftrightarrow & \frac{I_{y+1} - I_y}{\Delta d}
 \end{array}$$

図5 音響方程式と回路方程式の対応関係(音波の場合)

(波長は回路モデルの単位セルの大きさの20倍に設定). なお, 回路で計算する際は剛体に対して音波を入射した時の同相反射を再現するために, 回路モデルに開放境界を与えている. 同図より, 平らな剛体面に対して音波を入射した時と同じように, カーペットクロックによって音波が入射方向に向かって反射している様子が分かる. 以上の結果から, カーペットクロックの動作および提案した理論の妥当性を確認することができた. なお, 本稿では省略するが広帯域動作や入射角度によらない動作も確認済みである.

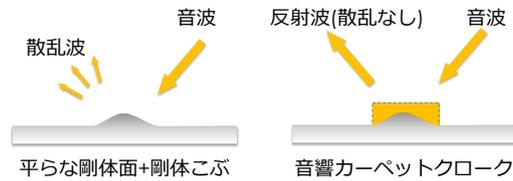


図6 平らな剛体面上にある剛体こぶを音波に対して見えなくする音響カーペットクロック

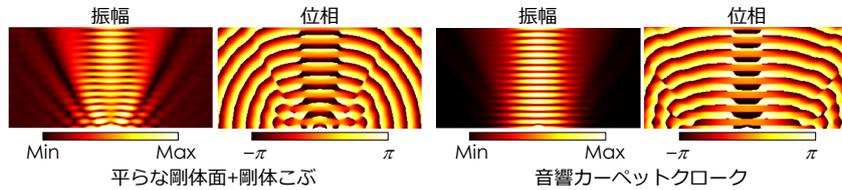


図7 回路シミュレーションによる電圧の振幅および位相分布の計算結果(波長: $\lambda = 20\Delta d$)

(3) 研究方法(3)の検討により, 音響メタ材料の構造パラメータを決めるための設計式は以下のようになることが分かった.

$$\begin{aligned}
 \rho_{xx} \pm \rho_{xy} &= \frac{2Z_{0x}}{\omega\Delta d} \tan \frac{\beta l}{2} & \rho_{yy} \pm \rho_{yx} &= \frac{2Z_{0y}}{\omega\Delta d} \tan \frac{\beta l}{2} \\
 \mp \rho_{xy} = \mp \rho_{yx} &= \frac{2}{\omega\Delta d} \frac{Z_{0M}^2 (Y_{0x} + Y_{0y}) \tan \frac{\beta l}{2} + Z_{0M} (\operatorname{cosec} \beta_M l_M - \cot \beta_M l_M)}{\cos^2 \frac{\beta l}{2} + Z_{0M} (Y_{0x} + Y_{0y}) \sin \beta l \cot \beta_M l_M - Z_{0M}^2 (Y_{0x} + Y_{0y})^2 \sin^2 \frac{\beta l}{2}} \\
 \frac{1}{K} &= \frac{1}{\omega\Delta d} \left\{ (Y_{0x} + Y_{0y}) \sin \beta l \cos \beta_M l_M + Y_{0M} \cos^2 \frac{\beta l}{2} \sin \beta_M l_M - Z_{0M} (Y_{0x} + Y_{0y})^2 \sin^2 \frac{\beta l}{2} \right\}
 \end{aligned}$$

また, 図3のモデルを分布定数線路を音響導波路(側面は剛体壁)で置換した, 図8に示す音響メタ材料を提案した. 上述の設計式から音響カーペットクロックの実現に必要なモデルの特性インピーダンスと電気長を算出し, これらから音響導波路の幅と長さを決定した. 図9は算出した幅と長さ元に音響メタ材料で構成した音響カーペットクロックの全体図(*クロックの外部には音響導波路からなる等方性単位セルで構成したインピーダンス整合用の背景媒質を接続), 図10は周波数が可聴域の2500Hzで波長が97.1mm(単位セルの大きさの9.71倍)となる時のCOMSOLによる音圧レベル分布の計算結果を表している. また, 図10には比較として, 剛体こぶをカーペットクロックで覆っていない場合の計算結果も示している. 同図の音波の反射・散乱の様子から音響カーペットクロックが平らな剛体面であるかのように動作していることが分かる. さらに, 図11に示している, 同様の条件で分布定数異方性メタ材料モデルを用いて回路シミュレ

シミュレーションにより計算した、剛体こぶをカーペットクロックで覆っている場合と覆っていない場合の電圧の振幅分布結果と比較すると、同様の結果が得られていることが分かる。

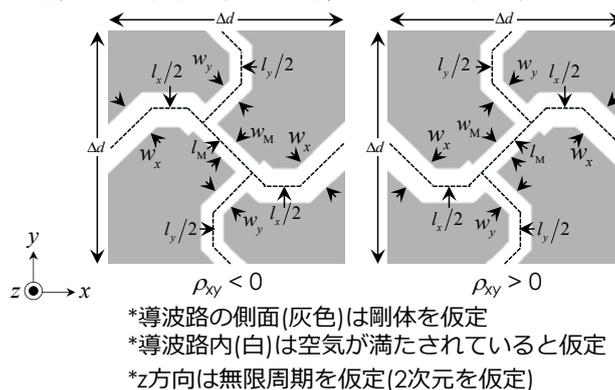


図 8 提案した分布定数異方性メタ材料モデルと等価な音響メタ材料

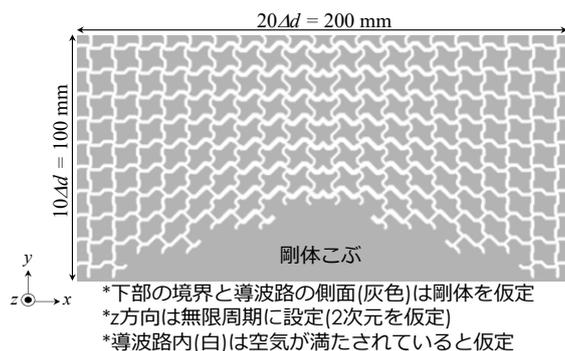


図 9 提案した音響メタ材料で構成した音響カーペットクロック

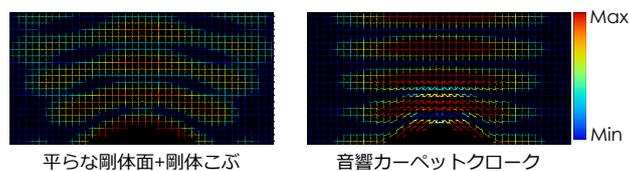


図 10 COMSOL による音圧レベル分布の計算結果(周波数:2500Hz, 波長:97.1 mm)

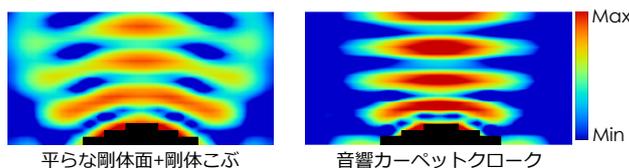


図 11 回路シミュレーションによる電圧の振幅分布の計算結果(周波数:2500Hz, 波長:97.1 mm)

(4) 以上の(1)-(3)より、本研究により非対角項が非零の質量密度テンソルと体積弾性率の値を有する音響メタ材料のための設計理論を確立した。また、理論に基づき音響メタ材料を用いて音響透明マントを設計し、動作を確認することができた。現在、3D プリンタを用いた音響カーペットクロックの試作および実証実験の検討をしており、データが纏まり次第論文誌にて結果を報告する予定である。また、本成果により非対角項の実現方法を明らかにしたことから、電磁波の分野で検討されている、任意の物体からの散乱波を模擬する、いわゆるイリュージョンについても音波への展開が可能となるため、今後は音波に対して物体からの散乱波を模擬する音響イリュージョンの実現も視野に入れる。さらに、本研究で提案した回路論に基づく設計手法は、電磁波、音波、および回路の各方程式の共通項を見つけ、それぞれを対応させることでメタ材料の設計を可能としているため、波及効果として水波や地震波など異分野の流体解析や設計への展開も考えられ、これらに対する本手法の適用についても検討する予定である。

<引用文献>

① T. Nagayama and A. Sanada, "Planar distributed full-tensor anisotropic metamaterials for transformation electromagnetics," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-63, no. 12, pp. 3851-3861, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Tsutomu Nagayama, Shuntaro Uchida, Seiji Fukushima, Toshio Watanabe
2. 発表標題 Equivalent Circuit Models for Acoustic Metamaterials Based on Transformation Acoustics
3. 学会等名 メタマテリアル第187委員会 第9回電磁メタマテリアル講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsutomu Nagayama, Shuntaro Uchida, Seiji Fukushima, Toshio Watanabe
2. 発表標題 2次元異方性媒質等価回路モデルの変換音響学への適用
3. 学会等名 2018年第79回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tsutomu Nagayama, Seiji Fukushima, Toshio Watanabe
2. 発表標題 2次元異方性音響メタマテリアルのための媒質モデルについて
3. 学会等名 2019年第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tsutomu Nagayama, Shuntaro Uchida, Seiji Fukushima, Toshio Watanabe
2. 発表標題 Equivalent Circuit Models for Two-dimensional Full-tensor Anisotropic Acoustic Metamaterials
3. 学会等名 2019 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (Fall) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

永山研究室ホームページ
<http://www.eee.kagoshima-u.ac.jp/~t-nagayama/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	福島 誠治 (Fukushima Seiji)	鹿児島大学・理工学域工学系・教授 (17701)	
研究協力者	渡邊 俊夫 (Watanabe Toshio)	鹿児島大学・理工学域工学系・准教授 (17701)	
研究協力者	内田 俊太郎 (Uchida Shuntaro)	鹿児島大学・工学部 (17701)	