

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05874

研究課題名(和文) 機械音響連成現象を利用した圧電振動発電システム

研究課題名(英文) Electricity Generation System with Piezoelectric Element Using Mechanical-Acoustic Coupling

研究代表者

森山 裕幸 (MORIYAMA, Hiroyuki)

東海大学・工学部・教授

研究者番号：60200458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では新しいエネルギー回収システムが考案され、そのシステムは両端に薄肉板を有する円筒構造であり、端板の中央には圧電素子が貼付され、一方の端板には調和成分あるいはランダム成分の点加振力が付加される。本システムでは、端板に供給された振動エネルギーは圧電素子を介して電気エネルギーに変換され、さらに端板から放射された音響エネルギーは機械音響連成を介し、非加振側端板を励振することになる。本研究では端板に供給されるパワーと発電時の電力、及びそれらより求められる発電効率に注目し、本システムの発電特性を理論解析と実験の両面から検討している。

研究成果の概要(英文)：A new energy-harvesting system with piezoelectric elements is proposed in this study. The system is composed of a cylinder and thin plates at both ends. The piezoelectric elements are installed at the centers of both plates, and one side of each plate is subjected to a harmonic or random point force. In this system, vibration energy is converted into electrical energy via the piezoelectric elements. In addition, the acoustic energy radiated from the plate induces a self-sustained vibration at the other plate via mechanical-acoustic coupling. The characteristics are estimated theoretically and experimentally from the electric power in the electricity generation, the mechanical power supplied to the plate and the electricity generation efficiency that is derived from the ratio of both types of power. In particular, the electricity generation efficiency is one of the most appropriate factors to evaluate the performance of electricity generation systems.

研究分野：機械力学，音響工学，構造力学

キーワード：圧電素子 振動発電 円板 円筒形音場 電気機械連成 機械音響連成

1. 研究開始当初の背景

今日のエネルギー事情を考慮すれば、省エネルギー技術の進歩は経済発展や地球温暖化の抑制に不可欠な要件であり、様々な分野で取り組まれている。その中でも研究代表者が注目しているのは振動力発電及び音力発電技術であり、両発電共に基本的な方式は振動子に供給される振動エネルギーを圧電素子の圧電効果で電気エネルギーに変換するという単純なものである。

本研究では振動子として薄肉の円板を用い、図1に示すように板中央に設置した圧電素子が板振動に伴う伸縮により発電させる。この発電量は振動振幅に依存するため円板を固有周波数付近で加振させ、円板の振動特性及び発電特性を理論的に検討し、理論解析の妥当性を実験で検証してきた。この場合、円板に供給される機械的なパワーで除した発電効率 P_{em} は板厚 h_c の減少に伴い徐々に増加しており、その傾向は実験結果からも明らかである。ただし P_{em} は多くの h_c において 1%以下に抑えられており、実用化に向けて発電効率の向上が最も重要な課題として捉えている。

その対策として研究代表者は音力発電にヒントを得て、上記円形板を両端に配置した円筒構造（以後単一空洞モデルと略称する）を取り上げた。この場合、加振機から供給される振動エネルギーは円板振動を介し、円筒内部音場及びもう一方の端板に伝播する。しかしこのエネルギー流れは一方向に留まらず、板振動（加振側）、内部音場、板振動（非加振側）の3系間を伝播することになり、機械音響連成現象が引き起こされることになる。その結果、単一空洞モデルの振動板面積は、円板モデルに比べて2倍に拡大される。図2はさらに円筒を単一円筒の筒長方向に追加した円筒構造（以後連結円筒モデルと略称する）を示したものであり、上記現象が付加された円筒内部音場と仕切り板及び端板の振動との間でも生じることになる。そのため振動板の面積はさらに拡大され、加振機から供給される振動エネルギーの回収には都合が良い。

このような振動発電に及ぼす機械音響連成現象の影響を検討するため、上記円筒モデルを用い発電実験を行った。その結果、連成が促進されている筒長 L においては、上記円



図1 圧電素子

板のみによる圧電振動発電に比べて効率よくエネルギーを回収できることが分かった。またこの発電特性には、非加振側の発電が強く寄与することを明らかにした。一方、連結円筒モデルでは単一円筒モデルの結果を参考に、加振側空洞の筒長 L_1 を単一円筒モデルで最高効率だった L に一致させ、非加振側筒長 L_2 を変化させた。その結果、連成が促進されている L_2 において、さらに効率よく発電できることを確認している。

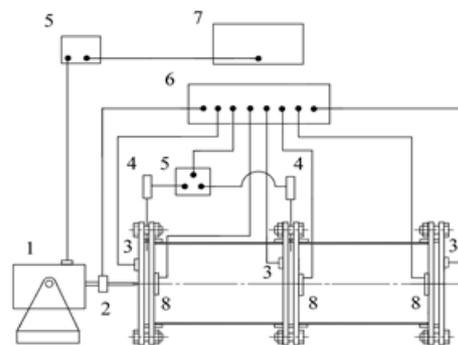
2. 研究の目的

(1) 円板振動における面外変位の増大

面外変位の増大には円板の曲げ剛性低下と支持条件の緩和が有効な手段であるが、実験を考慮すると円板の薄肉化が最も単純で現実的な手法である。そこで本研究では板厚変化に伴う総発電量及び発電効率の変化を理論的に検討し、その結果を実験により検証する。

(2) 圧電素子の面積拡大

発電量は圧電素子に生じる面内ひずみの大きさだけではなく、その面積にも依存することになる。発電特性に及ぼす圧電素子面積の影響を検討するため、圧電素子の径を徐々に大きくしたり、圧電素子を同一面上に複数設置したり両面に配置することで、設置面積の拡大を試みる。一方、機械音響連成現象を利用するため円筒構造を用いるが、圧電素子の設置面積拡大を図るため特に連結円筒モデルに注目する。ここで紹介している2円筒の連結空洞モデルは、単一空洞モデルに比べて幾何学的パラメータの組み合わせがかなり多くなる。そのためこのような連結空洞モデルにおける発電特性をパラメトリックに検討し、電気機械音響連成現象に基づく発電機構を解明すると共に、効率の最大化に寄与するパラメータを明らかにする。これらの成果を参考に連結数を増したモデルを取り上げ、さらなる圧電素子の設置面積拡大を図り、



1: Vibration generator	6: FFT Analyzer
2: Load cell	7: Multifunction generator
3: Acceleration sensor	8: Piezoelectric element
4: Condenser microphone	9: Resistance circuit

図2 連結円筒モデル

発電効率の向上を試みる。

(3) ランダム加振による発電

上記は円板の固有周波数による検討を示したが、実用上そのような条件で加振されることは稀である。そこで本研究では実際の環境に存在し得るランダム加振を取り上げ、円板モデル、単一空洞モデル、連結空洞モデルで上記と同様に発電特性の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 面外変位の増大

①理論的検討

本研究ではアルミニウム合金製の円板の中心に圧電素子を貼付し、その円板に点加振力を負荷することで振動発電をする解析モデルを想定している。この解析モデルは図1に示した実験モデルに近づけるために、圧電材料は電極板として用いられている黄銅板を介して円板に設置されている。この解析モデルで発電特性を検討するためには、圧電素子を含めた円板の力学的な特性と共に、圧電材料の変形時に生じる圧電効果も考慮しなければならない。そこで電気的特性と機械的特性を関連付ける電気機械連成方程式を導出し、本解析モデルによる円板の振動特性及び発電特性を検討する。

本研究では円板の面外変位を増大させるため、上記円板を両端に設置した円筒構造（単一円筒モデル）を用い、端板振動と内部音場間の連成現象（機械音響連成現象）を利用して発電特性の改善を図る。単一周波数の加振における機械音響連成の理論解析に関してはほぼ検討を終了しており、連成現象が促進される条件は明らかにされている。またこれらの結果は実験的に検証されており、その成果は様々な場で公表されている。理論解析では圧電素子による振動発電を表現した電気機械連成系の支配方程式を、圧電部を考慮した機械音響連成系の支配方程式と連立することで、振動・音響特性だけでなく発電特性も求めることが可能になる。本解析では端板振動における面外変位を増大させるため端板の薄肉化に注目しているが、薄肉化による曲げ剛性の低下は圧電素子による剛性変化及び発電時の電場による影響が機械音響連成現象に及ぶことも想定しなければならない。そのため本解析での電気機械連成現象の導入は単に発電特性を理論的に求めるというだけでなく、機械音響連成現象への影響を考慮するために不可欠な設定として見なしている。

一方、円板のみで圧電振動発電するモデルでは、周辺媒質（空気）の影響を考慮していない。しかし周辺媒質の存在は音響放射や振動板への付加質量を引き起こし、無視できない事態に遭遇することも考えられる。そこで本解析モデルに関しては、放射インピーダンスを想定した解析も実施している。

②実験的検討

実験ではスチール製の円筒部及びアルミ

ニウム合金製の端板で製作した円筒モデルを用い（図2参照）、一方の端板を小型加振機（図中1）で加振すると共に筒長を広範囲に変化させる。円板振動と内部音場の挙動は円板表面に設置した加速度検出器（図中3）とプローブチューブ付きコンデンサーマイクロホン（図中4）を用いてFFTアナライザー（図中6）で測定するが、加速度検出器に関しては加速度だけでなく両端板振動間の位相差も同時に測定する。また圧電素子は測定用抵抗回路に接続され、発電に伴う電力はパワーハイテスタで測定する。パワーハイテスタはかなり小さい電力にも対応するが、電気機械連成及び機械音響連成現象の促進状況によっては測定できない場合もある。そのためパワーハイテスタによる電力測定と共に、FFTアナライザーによる電圧測定と微小電流測定装置による電流測定も同時に行う。本実験においては端板の薄肉化により端板振動時の面外変位を増大させ、発電特性に及ぼす薄肉化の影響を検討するため、円板（半径が153mm）の板厚は1~4mmの範囲で変化させる。

また円筒を取り外し機械音響連成現象の影響を受けない円板振動のみの発電に対する各諸量との対比で評価する。さら円板の振動特性及び内部音場の音響特性から機械音響連成現象との関連性を明らかにし、発電特性を総合的に検討すると共に、理論解析結果の検証も同時に行う。さらに円板振動における放射インピーダンスの影響を確認するため、円板両面近傍にコンデンサーマイクロホンを設置し、円板振動により形成された放射音場の音圧レベル及び位相を測定する。

(2) ランダム加振による発電

本研究では主に、単一円筒における一方の端板のみをランダム加振した時の発電特性に注目している。実験装置はこれまでのものを流用することになるが、準備段階の実験からランダム加振時の発電効率は、円板振動のみによる発電と円筒構造を用いた発電の双方において、円板の固有周波数による加振に比べて極めて抑制されることが分かっている。そこでランダムな振動成分から円板の固有モード成分を抽出するため、付加質量を円板表面に設置する。ここでは発電特性と付加質量の大きさ及び位置との関係を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 円板振動による圧電振動発電

まずここでは円板振動のみによる圧電振動発電、すなわち機械音響連成を伴わない発電を取り上げる。図3は理論解析で得られた円板に供給されるパワー P_m と発電時の電力 P_e に関して、板厚 h_c に対する推移を示している。 P_m は h_c の増加に伴い徐々に減少しているが、これは加振点における面外変位 w_{c1} に依存した変化である。 w_{c1} も h_c に対して徐々に変化することを確認しているが、その変化は P_m に比

べてやや緩やかなものである。これは w_{c1} が加振力と正比例の関係にあるため、 P_m は w_{c1} の2乗に比例することに起因する。同図に P_e の変化も併記しているが、 P_m と同様な変化を呈することになる。この場合、 v_1 は w_{c1} に対応しており、 P_e は v_1 の2乗に比例することになる。

(2) 発電特性の改善

ここでは円筒構造の両端に円板を設置した解析モデルを用い、機械音響連成を発電特性改善に利用する。解析モデルにおいては、円板と同径の円筒構造を用い、筒長 L は 100 ~ 2000 mm の範囲で変化させている。図 4 は板厚 $h_c = 3$ mm で加振周波数 $f = 280$ Hz に設定したモデルについて、内部音場における平均音圧レベル L_{pv} と、加振側及び非加振側端板近傍で測定した音圧レベル L_{p1} 、 L_{p2} の L に対する推移をそれぞれ示したものである。理論解析結果である L_{pv} は $L = 610, 1230, 1840$ mm でピークとなっているが、これは円板に生じている (0, 0) 次の振動モードと、それぞれの筒長で生じる (0, 0, 1), (0, 0, 2), (0, 0, 3) 次の音響モード間において、機械音響連成が促進されたことに起因する。

図 5 は供給パワー P_m と板厚 h_c との関係を示したものであるが、各 h_c において (0, 0) 次と (0, 0, 1) 次モード間において最も連成が促進されたときの P_m 値が採用されている。また比較のために、上記の円板振動のみで発電した結果も提示している。 P_m は h_c の増加に伴い減少しており、円板振動のみと類似な結果を示しているが、そのレベルは相対的に小さく抑えられている。これは円板振動のみでは供給

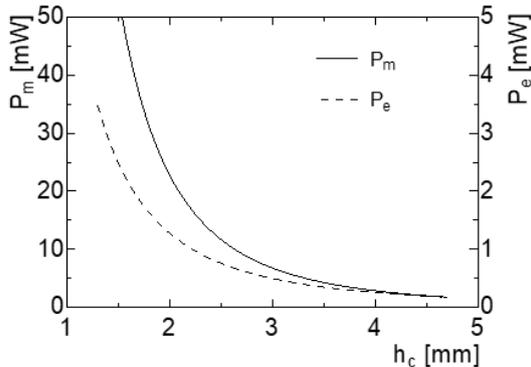


図 3 供給パワーと電力

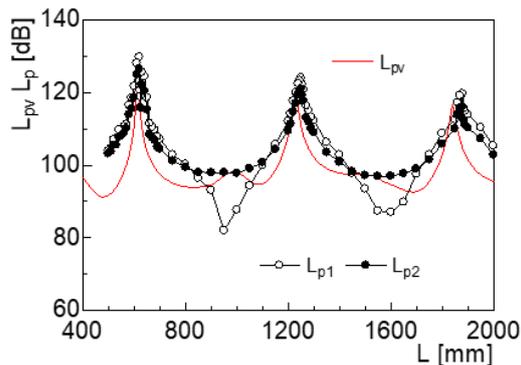


図 4 音圧レベル

パワーの多くが振動に費やされるのに対し、円筒構造を利用した際には円筒内の音場系形成及び非加振側端板の振動励起にも費やされることに起因するものと考えられる。図 6 は上記 P_m に対応する電力 P_e について、 h_c に対する推移を示している。当然、 P_e の変化は、 P_m と類似の傾向を有することになる。

上記のように、 P_m と P_e には密接な関係が存在するが、その関係を具体的に表現して検討するため、発電効率 P_{em} を以下のように定義する。

$$P_{em} = \frac{P_e}{P_m} \times 100 [\%]. \quad (1)$$

図 7 は図 5, 6 の P_m と P_e から得られた理論解析値 P_{em} について、 h_c に対する変化を示したものである。ただしこれら理論解析の妥当性を検証するために、実験で得られた P_{em} 値も併記している。円板振動のみの発電において、理論値は h_c と共に増大する傾向にあるが、実験値は全く逆の傾向で推移している。一方、機械音響連成を利用した場合、理論値は h_c と共に増大しており、円板振動のみで発電したときの結果と非常に近い傾向を有している。さらに実験値は類似の傾向を呈しており、理論との差は生じているものの、円板振動のみで発電したときのような大きな食い違いは認められない。

円板のみの解析モデルにおいては、円板周辺に媒質が想定されておらず、言い換えれば円板が真空中に設置されたモデルと見なせる。そのため円板振動によって放射音場は形成されず、そのエネルギーの多くは発電に費

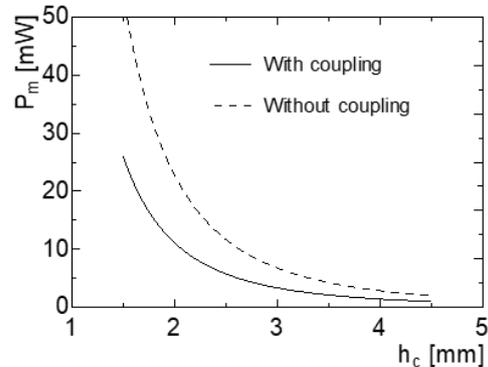


図 5 円板に供給されるパワー

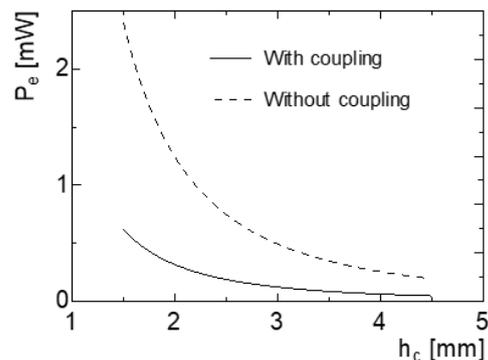


図 6 発電時の電力

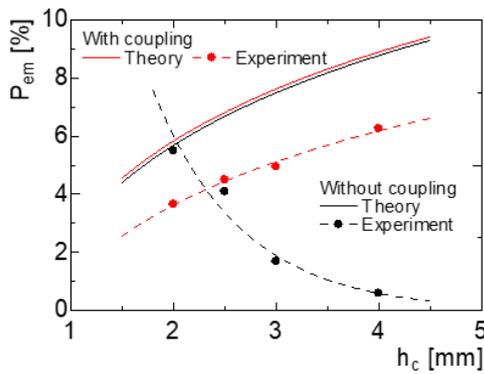


図7 発電効率

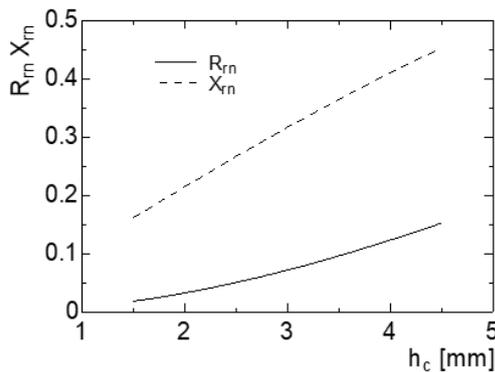


図8 放射抵抗と放射リアクタンス

やされることになる。その結果、理論と実験には上記のような食い違いが生じたものと考えている。しかし機械音響連成を利用した発電においては、円板振動に起因する内部音場が想定されているため、円板振動のみの発電のような食い違いが生じなかったものと考えている。

(3) 圧電振動発電に及ぼす放射インピーダンスの影響

ここでは円板振動のみの圧電振動発電を取り上げ、放射抵抗 R_r と放射リアクタンス X_r で構成された放射インピーダンス Z_r を理論解析に反映させる。ただし取り扱いを容易にするために、円板振動はピストン振動と仮定する。この場合、 R_r は Z_r の実数部に相当して音圧と同位相になるため、円板振動による音響放射に寄与することになる。一方、 X_r は虚数部であり、音圧とは 90° の位相差を有しているため放射音場には関わらないが、円板への付加質量として機能することになる。

図8では上記 R_r と X_r を無次元化した R_{rn} と X_{rn} を用い、板厚 h_c に対する推移を示している。ただしここでの h_c 変化は、加振周波数 f の変化を意味している。 R_{rn} と X_{rn} は h_c と共に増加する傾向にあるため、 h_c の増加は振動エネルギーが音響放射に寄与する比率を増大させることになる。さらに h_c の増加による付加質量の増大を考慮すれば、供給される振動エネルギーの内、発電以外に消費されるエネルギーは、 h_c と共に増大することになる。そのため円板振動のみの発電では、理論と実験にお

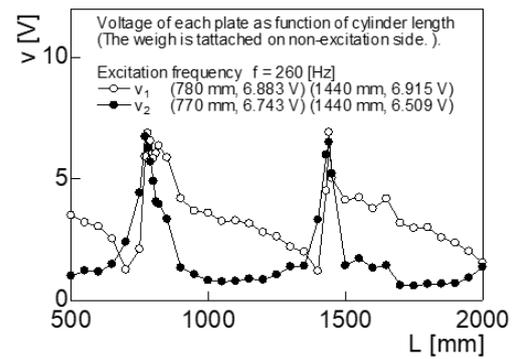


図9 電圧特性

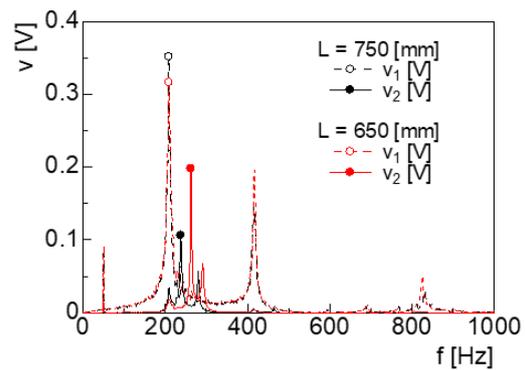


図10 電圧特性

いて上記のような食い違いが生じたものと考えられる。

(4) ランダム加振時の発電特性

本発電システムでは円筒両端に同径、同厚の円板を同じように支持させても、加振側には加振棒の付加質量や加振機によるダンピングの影響を受けるため、固有周波数は非加振側より低周波数側に移行することになる。そのため加振周波数を加振側あるいは非加振側の固有周波数に設定することにより、発電特性は異なることになる。しかし加振側では円板の厚肉化あるいは支持剛性を強化により固有周波数を高めに設定するか、非加振側では円板の薄肉化あるいは錘等による付加質量で固有周波数を低めに設定することにより、両端板振動特性のマッチングによって更なる特性改善が期待できる。図9は非加振側円板に錘を付加して固有周波数を加振側の固有周波数に近づけ、その周波数で加振させたときの両円板における電圧の筒長変化に対する推移を示したものである。

図10は加振機にランダム信号を供給した際の発電特性を電圧のパワースペクトルで示したもので、連成が促進され易い筒長が選択されている。その中でも筒長 $L = 650$ mm では非加振側電圧 v_2 の $f = 260$ Hz 成分における増大が顕著である。一方、加振側電圧 v_1 が最大となる $f = 205$ Hz の v_2 ではほとんど増大が認められない。また上記の通り、この v_1 の周波数は単一周波数の発電実験から確認できた $(0, 0)$ 次モードの固有周波数から大き

く低周波数領域に移行しており、さらにこれらの電圧値は図9に示した単一周波数の発電実験の最大値で比べれば、ランダム加振実験の結果は1/20程度に抑えられている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

①H. Moriyam, 機械音響連成現象を利用した圧電振動発電, 日本音響学会誌, 査読無, Vol. 72, No. 11, pp. 721-727, 2016
http://www.asj.gr.jp/journal/04_contents/2016_11.html

②土屋 寛太朗, 森山 裕幸, 岩森 暁, 非軸対称の円板モードを考慮した圧電振動発電, 東海大学工学部, 査読有, Vol. 56, No. 1, pp. 101-106, 2016
http://www.u-tokai.ac.jp/academics/undergraduate/engineering/kiyou/wabun_2016.html

③H. Tsuchiya, H. Moriyama, S. Iwamori, Electricity Generation Characteristics of Energy-Harvesting System with Piezoelectric Element Using Mechanical-Acoustic Coupling, Advance in Acoustics and Vibration, 査読有, Vol. 2016, Article ID 4217517, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1155/2016/4217517>

〔学会発表〕(計6件)

①H. Moriyama, Vibration Power Generation with Piezoelectric Element Using Mechanical-acoustic Coupling in Actual Environment, MTM' 17, 2017

②H. Moriyama, Vibration Power Generation with Piezoelectric Element Using Coupling with Cylindrical Sound Field Enclosed by End Plates Having Different Thickness, MTM' 16, 2016

③ H. Moriyama, Electricity Generation System with Piezoelectric Elements Using Mechanical-Acoustic Coupling of Cylindrical Structure, WESPAC 2015, 2015

④H. Moriyama, Energy Harvesting by Piezoelectric Power Generation using Mechanical-acoustic Coupling, WECC 2015, 2015

⑤森山 裕幸, 円筒構造内音場を利用した圧電振動発電の効率, 日本音響学会, 2015

⑥森山 裕幸, 円筒構造における音振動連成を利用した圧電振動発電の効率改善, 日本音響学会, 2015

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森山 裕幸 (MORIYAMA, Hiroyuki)

東海大学・工学部・教授

研究者番号: 60200458