

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760207

研究課題名(和文) 発電用風車タワーの制振に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Vibration Control in Wind Turbines

研究代表者

原田 祐志 (HARATA, YUJI)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00456691

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、発電用風車における振動解析、および振動抑制に関する研究を行った。風車はタワーと翼の連成系としてモデル化され、高さに依存して変化する風圧を受けて翼が回転する陸上風車の場合、風と波を受ける洋上風車の場合、それぞれの風車に現れる振動現象について、数値計算により明らかにした。さらに、陸上風車において、タワー、または翼自身に動吸振器を取り付け、風車に生じる振動が抑制可能であることを明らかにした。また、洋上風車において、風車土台に生じる振動現象をジャイロを用いることで、抑制可能であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This research investigated the vibrations of wind turbines for electrical power generation and suppression of the vibrations. The wind turbine is modeled as a coupled system of a tower and blades. Wind turbines on the ground are subjected to wind pressure which varies with the height from the ground, while the offshore wind turbines are subjected to the wind pressure and wave. The numerical result showed the occurrence of the nonlinear vibrations of the wind turbines. Some kinds of dynamic absorbers such as tuned mass dampers, pendulums and tuned liquid dampers are installed to suppress the vibrations of the wind turbines on the ground. Gyroscopes is attached to the floating bases of the offshore wind turbines to suppress the vibration caused by the wave. The influences of values of absorber's and gyroscope's parameters on their performance are also examined.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械力学・制御

キーワード：振動学 発電用風車 動吸振器 非線形振動 振動抑制

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内外の関連する研究の中での位置づけ
 発電用風車に関する研究は、風の影響による風車タワーの振動を解析したものが多く、例えば、弾性翼およびばね支持からなる5自由度モデルによる解析 (Janetzke・Kaza, 1983)、ばね支持されたシャフトを有する単純な2自由度モデルによる解析 (市川, 1984)、弾性翼と弾性タワーに対する5自由度モデルを用いた風車の安定性の解析 (山根隆志, 1986) などがある。

一方、実際に風車に生じる振動を抑制することを主眼に置いた研究には、風車の翼のピッチ角度をタワーの振幅に応じて調整するアクティブ制御 (若狭強志ら, 2005)、TMD(Tuned Mass Damper)やIMD(Impact Mass Damper)などを取り付けることにより制振を行うもの (川口晃弘ら, 2003) がある。

洋上発電用風車は、その設置方法の違いから、着底式と浮体式に分けられる。着底式の研究には、波や風の影響によるタワー振動解析 (関田欣治ら, 2001)、浮体式の研究には、浮体式洋上発電の動的応答の高精度評価モデルの開発と実験 (ファンバンフック・石原孟, 2009) などがある。

しかしながら、風車タワーの制振に関する研究、特に浮体式洋上発電用風車の制振に関する研究はほとんどないようである。

(2) 着想に至った経緯

現在、化石燃料の利用による二酸化炭素排出および温暖化現象が世界的に問題になっている。このため、再生可能なクリーンエネルギーとして、風力発電の需要は高まっている。しかし、日本の風車建設や風車製造の世界シェアは2~5%と少ない。この原因のひとつは、風車の故障である。風車は人が風の中で傘を差して立っているような状態で稼働しており、風の影響で大きく振動するため、風車タワーの故障や倒壊の例が数多く報告されている。また、日本では、風車の設置に適した場所は陸上では飽和状態に達し、加えて遠浅の海が少ないことから、今後、浮体式洋上発電用風車の需要が高まることが予想される。

風車はその回転速度に対して多くの共振周波数成分をもつ。また、風も風車の高さによる変化、時刻変化、および翼がタワーの影を通過する際の影響 (インパルス) があるため、さまざまな周波数成分をもつ。さらに洋上では波の影響を大きく受ける。そこで、本研究では動吸振器を用いることで、風車に生じる振動を抑制することを考えた。

2. 研究の目的

風による発電用風車タワーの振動は風車を破壊する原因のひとつであり、風車タワーの倒壊の事例が数多く報告されている。この

ため、風車タワーの振動は風力発電の促進の妨げとなっている。また、日本は四方を海に囲まれており、今後の風車の設置場所として洋上が注目されている。そこで、本研究では風車に生じる振動現象を明らかにし、その振動を動吸振器を用いて低減し、陸上、および洋上に設置した風車タワーの振動問題を解決することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、陸上、洋上風車のモデル化を行い、運動方程式を導出し、その系の固有振動数、共振曲線、時刻歴波形、およびFFT解析により、風車に現れる振動現象を明らかにする。さらに、風車に動吸振器を取り付け、運動方程式の導出、振動解析を行うことにより、動吸振器による風車の振動抑制の効果を明らかにする。特に以下の三点について調べる。

(1) 発電用風車に生じる振動、(2) 発電用風車の制振、(3) 浮体式風車に生じる振動および風車土台の制振。これらの結果より発電用風車の振動抑制に用いる動吸振器の設計方法を提案する。

4. 研究成果

以下の3項目に分けて、得られた研究成果について記述する。

4. 1. 発電用風車に生じる振動

4. 1. 1. 二枚翼風車に生じる不安定振動
 二枚翼を回転軸にリジッドに取り付けた風車ロータとタワーの連成系を5自由度系にモデル化し (図1参照)、翼が回転速度 ω で回転する際の振動解析を行い、得られた結果を以下にまとめる。

① 5自由度系は、連成の観点より、翼の回転面内の(I)2自由度系 (x と ϕ_x)、および(II)翼の回転面に直角方向の3自由度系 (z と ϕ_z と ψ) の2つのグループに分けられる。

② 二枚翼の慣性モーメントの非対称性に起因する係数励振作用により、上記(II)の系において、最大5箇所回転速度範囲に不安定振動が発生する (図2参照)。

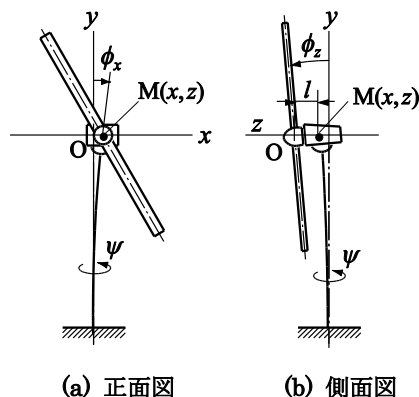


図1 二枚翼風車の解析モデル

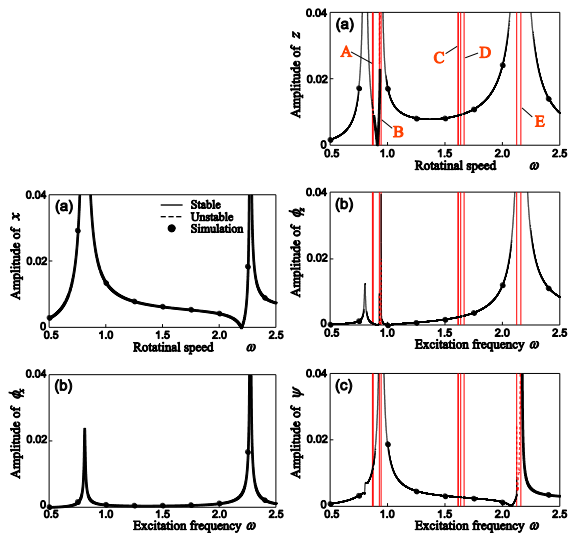


図2 二枚翼風車の共振曲線

- ③ 不安定振動の主成分が ω の1モードタイプ、および主成分が $\omega \pm \sigma$ の2モードタイプの2種類の不安定領域が存在する。
- ④ 系のパラメータの値に依存して、不安定領域の位置と幅は変化する。
- ⑤ 回転体の不釣り合いによる強制振動において、1モードタイプの不安定領域の境界では、強制振動の振幅は無限大になり、その外側付近では大きな振幅となる。2モードタイプでは、振幅は安定解から不安定解へ連続的に移行する。

4. 1. 2. 三枚翼風車に生じる振動

- 三枚翼風車の翼とタワーが連成する系において、ナセルをタワーの一部として考え、タワーは z_0 方向、および x_0 方向に平面内を移動可能であるとし、ナセルに三枚の剛体翼が取り付けられた5自由度系を考える(図3参照)。高さに依存して直線的に変化する風圧が翼に作用するものと仮定し、翼の回転速度 ω の低速域で発生する共振に注目し、振動解析を行うことにより、以下の結果が得られた。
- ① 翼には、翼の係数励振作用と風圧による強制外力との相乗効果により、翼の回転速度 ω の整数倍の振動数で共振が起こるが、発生振動数が高次の振動数になるにつれて共振ピークは小さくなる。
 - ② 翼の振動には、回転速度の整数倍の複数の振動数成分が含まれる。

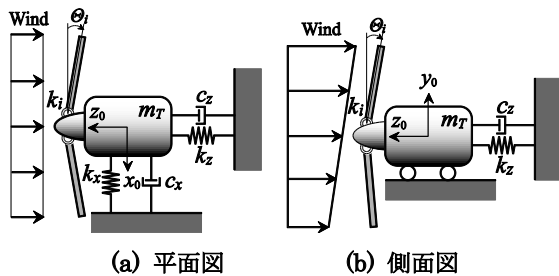


図3 三枚翼風車の解析モデル

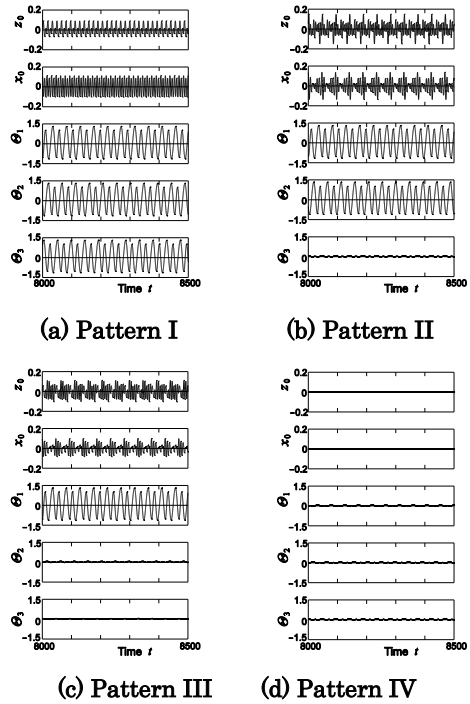


図4 時刻歴波形

- ③ 低速域で発生する共振ピークは、 3ω の振動数のものが最も大きく、その共振曲線の形状は、翼の回転支持による復元モーメントの非線形性に起因して漸軟形となる。
- ④ タワーの振動の一部は、翼の枚数に依存して共振ピークの発生位置や振動数が異なる。
- ⑤ 翼の質量と寸法が同一の場合でも、翼の復元モーメントの非線形性に起因して、各翼は異なった振幅で振動する局在化現象が生じる(図4参照)。従って、翼の振動を監視する際には、すべての翼の振動を計測する必要がある。

4. 2. 発電用風車の制振

4. 2. 1. 動吸振器による風車タワーの制振

- 図3の解析モデルに、従来型の動吸振器、または円筒型の同調液体ダンパーを設置したモデル(図5参照)に対して、風車タワーの制振を行い、以下の結果を得た。
- ① 動吸振器を x_0 方向の固有振動数に同調させたとき、主共振点($\omega=1$)において振動が抑制されると同時に、副共振点付近においても、 z_0 方向の振動が抑えられる。
 - ② 円筒型の液体ダンパーを用いることにより、風車のタワーに発生する振動のうち、風向きに対して垂直な方向では、静不釣り合いに起因する共振ピーク、および回転速度の3倍の振動数で起こる共振ピークを同時に抑えることが可能である。さらに、風向き方向では回転速度の3倍の振動数で起こる共振を抑えることが可能である。(図6参照)

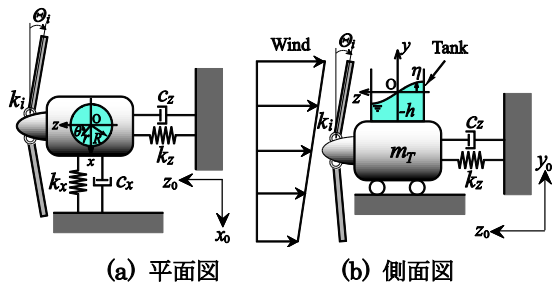
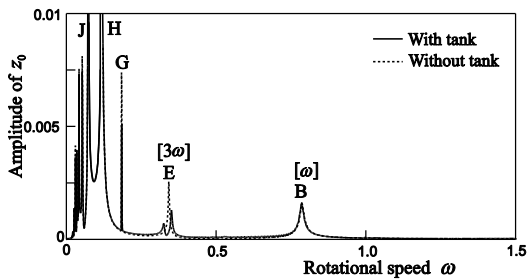
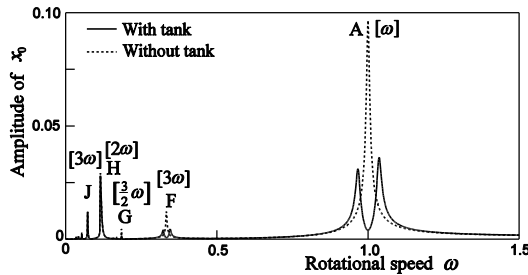


図5 解析モデル (液体ダンパー)



(a) タワー z_0



(b) タワー x_0

図6 共振曲線 (液体ダンパー)

4. 2. 2. 動吸振器による翼の制振

回転軸に取り付けられた剛体翼に従来型の動吸振器、または振子型動吸振器を取り付けた系 (図7参照) に、高さに依存して風圧が変化する風を受け翼が回転する場合、動吸振器による制振解析を行い、以下の結果を得た。

- ① 風圧と係数励振の相乗効果により、翼には回転速度の整数倍の振動数成分の振動が現れる (図8参照)。
- ② 一つの動吸振器により複数の共振ピークがすべて低減できる (図8参照)。
- ③ 動吸振器の質量は全体の5%以上必要であり、その設置位置は翼の先端に近いほどよく機能する。
- ④ 振子型動吸振器も、同時に複数の共振ピークに作用するが、翼の回転速度が小さい場合、機能しなくなる。

4. 3. 浮体式風車に生じる振動および風車土台の制振

4. 3. 1. 浮体式風車に生じる振動

浮体式風車の土台とタワーを一つの剛体と仮定し、三枚の翼が取り付けられた系 (図9参照) に、高さに依存して風圧の変化する

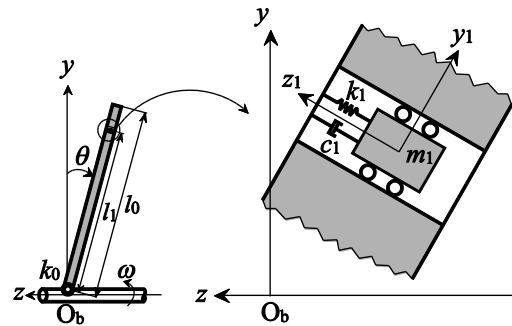


図7 風車翼の解析モデル (動吸振器)

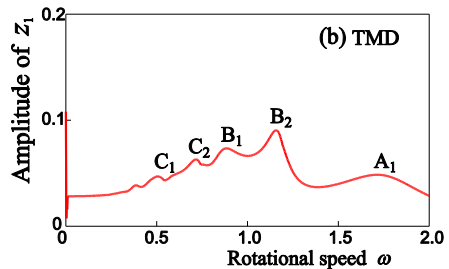
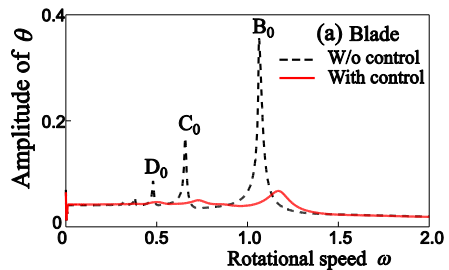


図8 共振曲線

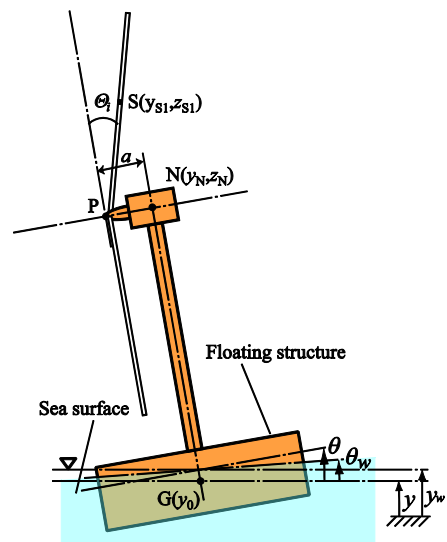
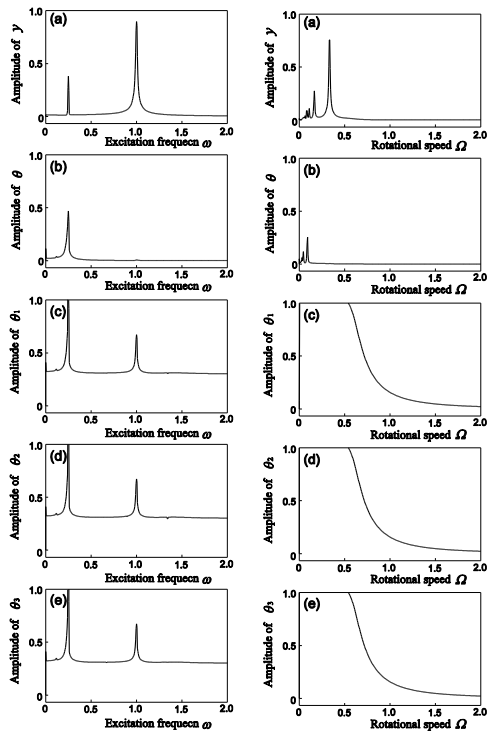


図9 解析モデル



(i) 波の影響 (ii) 風車の回転速度
図 10 共振曲線

風、および波が作用する場合、浮体式風車の振動解析を行い、以下の結果を得た。

- ① 波の周波数が増加する場合、複数の共振ピークが現れる (図 10 (i)参照)。
- ② 風車の回転速度が増加する場合、複数の共振ピークが現れる (図 10 (ii)参照)。
- ③ 風車の回転速度が低速の場合、翼に作用する重力の影響が、翼に作用する遠心力の影響を上回るため、翼の振動振幅が非常に大きくなる (図 10 (ii)参照)。

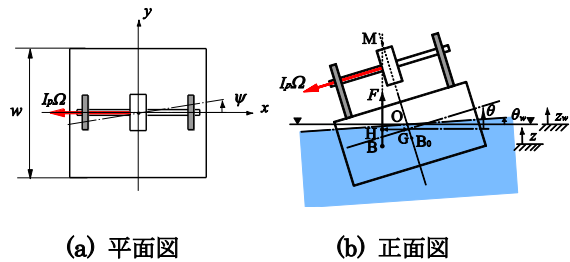
4. 3. 2. ジャイロを利用した浮体式風車の制振

浮体式洋上発電風車の土台の制振を目的とし、波が作用する長方形浮体構造物にその水平軸方向に回転軸をもつジャイロスコップを設置 (図 11 参照) し、ジャイロ作用を利用して、浮体構造物のローリング θ とヨーイング ψ に対する制振性能を解析的に調べた結果、以下のことが明らかとなった。

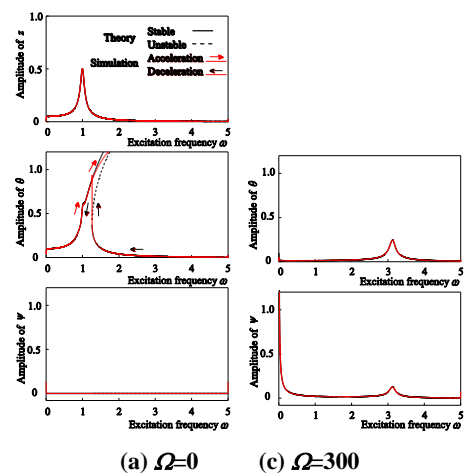
- ① 系の固有振動数のうち、ローリングに対する固有振動数はジャイロ作用を受け、ジャイロの回転速度に依存して、増加・減少する。浮体のヒービングとヨーイングに対する固有振動数は、ジャイロの回転速度に依存せず、一定となる。
- ② ジャイロを回転させることにより、浮体の θ と ψ の共振曲線には二つのピークが現れる。ジャイロの回転数が高くなるにつれて、共振曲線における浮体のローリングとヨーイングの振幅のピークが波浪の高周波側に

移り、共振曲線の右側のピークの大きさが低減される (図 12 参照)。

- ③ 浮体のローリングに対して、ジャイロの制振効果が十分に得られるには、ジャイロの質量を系全体の 10%程度にする必要がある。
- ④ 極慣性モーメントが大きいほど、共振曲線の右側のピーク位置はより高周波側へ移動し、 θ のピークの大きさも低減される。
- ⑤ 浮体構造物の重心とジャイロの重心との距離が遠いほど、共振曲線の右側のピーク位置は低周波側へ移動し、ピークを低減することができる。



(a) 平面図 (b) 正面図
図 11 解析モデル



(a) $\Omega=0$ (c) $\Omega=300$
図 12 共振曲線

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 11 件)

- ① 原田祐志, 池田隆, 石田幸男, “風と波浪を受ける浮体式洋上発電風車の振動解析,” Dynamics & Design Conference 2014, 東京, 2014. 8.26-29 (発表決定)。
- ② Takashi Ikeda, Yuji Harata, Yusuke Sasagawa, Yukio Ishida, “Vibration suppression of wind turbine blades using tuned mass dampers” Proceedings of the 2013 ASME International Design Engineering Technical Conferences, #DETC2014-34336, pp.1-10, Buffalo, USA, Aug. 17-20, 2014 (accepted), 査読有。

- ③ Takashi Ikeda, Yuji Harata, Yukio Ishida, “Vibration suppression of wind turbine blades using pendulum-type dynamic absorbers” Proceedings of Grand Renewable Energy 2014, Tokyo, Japan, Jul. 27-Aug. 1, 2014(accepted), 査読有.
- ④ 池田隆, 原田祐志, 成石久弥, 石田幸男, “ジャイロスコープによる浮体構造物の制振解析,” Dynamics & Design Conference 2013, #619, 博多, 2013.8.26-30.
- ⑤ Takashi Ikeda, Yuji Harata, Hisashi Takahashi, Yukio Ishida, “Localization phenomena of nonlinear vibrations in three-blade wind turbines,” Proceedings of the 2013 ASME International Design Engineering Technical Conferences, #DETC2013-12773, pp.1-11, Portland, USA, Aug. 4-7, 2013, 査読有.
- ⑥ 池田隆, 原田祐志, 高橋尚志, 石田幸男, “風車の翼とタワーの連成振動,” Dynamics & Design Conference 2012, #830, 横浜, 2012.9.18-21.
- ⑦ 池田隆, 原田祐志, 石田幸男, “ジャイロ作用を利用した浮体式構造物の制振解析,” Dynamics & Design Conference 2012, #832, 横浜, 2012.9.18-21.
- ⑧ Takashi Ikeda, Yuji Harata, Yukio Ishida, “Unstable vibrations of a wind turbine tower with two blades,” Proceedings of the 2012 ASME International Design Engineering Technical Conferences, #DETC2012-71551, pp.1-10, Chicago, USA, Aug. 12-15, 2012, 査読有.
- ⑨ 池田 隆, 原田祐志, 住田淳, 石田幸男, “動吸振器による風車タワーの制振解析,” 日本機械学会中国四国支部第 50 期総会・講演会,# 605, 広島, 2012.3.8.
- ⑩ 池田隆, 原田祐志, 石田幸男, “二枚翼型風車タワーの不安定振動,” Dynamics & Design Conference 2011, A18, #538, 高知, 2011.9.5-9.
- ⑪ 池田隆, 原田祐志, 高橋尚志, 石田幸男, “円筒型同調液体ダンパーによる風車タワーの制振解析,” Dynamics & Design Conference 2011, A18, #537, 高知, 2011.9.5-9.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 祐志 (HARATA YUJI)
広島大学・工学研究院・助教
研究者番号 : 00456691

(2) 研究協力者

- ・池田 隆 (IKEDA TAKASHI)
広島大学・工学研究院・教授
- ・石田 幸男 (ISHIDA YUKIO)
名古屋大学・工学研究科・名誉教授