

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4月10日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2012

課題番号：21560502

研究課題名（和文）

ウェイクギャロッピングを利用した新型風力発電の開発

研究課題名（英文）

Development of new wind power generation method using wake galloping

研究代表者

比江島 慎二 (HIEJIMA SHINJI)

岡山大学・大学院環境生命科学研究科・准教授

研究者番号：50284526

研究成果の概要（和文）：風の流れに沿って配置された2円柱間に生じる空力振動をフィードバック制御により増幅させ、風力エネルギーを効率的に得る新たな風力発電方式の実現に向け、制御ゲインと時間遅れの2つの制御パラメータが円柱応答特性に及ぼす効果について風洞実験により検討した。バネ支持した下流円柱の応答のフィードバックにより上流円柱を加振した結果、円柱固有周期の80%に相当する時間遅れを与えて上流円柱を加振するとき下流円柱応答が最大となること、その応答振幅は風速に依存せず制御ゲインで決まることが明らかとなった。また、制御ゲインに比例して下流円柱応答は増幅するものの、ある限界値以上の制御ゲインでは増幅しなくなる。

研究成果の概要（英文）：In order to develop a new wind power generation method using feedback amplification of the wind-induced vibration caused between two tandem circular cylinders, wind tunnel experiments were conducted. The effects of two feedback control parameters on the vibrational property were investigated through the experiments. The maximum vibration amplitude is obtained when the windward cylinder is vibrated with the time lag corresponding to 80% of the characteristic period of the leeward cylinder, and prescribed by the control gain independently of the wind speed. Although the vibration amplitude is enhanced in proportion to the control gain, this enhancement diminishes beyond a critical gain.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，風工学

キーワード：ウェイクギャロッピング，流体励起振動，フィードバック制御，風力発電，再生可能エネルギー

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化とオイルピーク到来への懸念から、化石資源に代わる再生可能エネルギーへの関心が高まっている。中でも風力発電は

世界的に導入が盛んで、最近では、より風況の良好な洋上風力発電の開発も進みつつある。風力発電は現在、翼の回転で風力エネルギーを取り出す形式の風車が一般的である

のに対し、橋梁等の構造物で生じる連成フラッターなどの空力振動を利用した新しいタイプの風力発電方式の開発も試みられている。1940年にアメリカのタコマナローズ橋がこのような空力振動で落橋した事故は有名であるが、空力振動の中には自己励起的に振動が増幅するタイプのものが多くあり、構造物を破壊するほどの極めて巨大な振動エネルギーを有している。これまでに耐風工学の分野において、空力振動の制振対策や発生メカニズムの解明に関して多くの研究成果が蓄積されており、このような風力起源の振動増幅効果を逆に有効利用して、効率的に風力エネルギーを取り出そうとしたのが、上記の空力振動による風力発電方式である。

2. 研究の目的

風による自励振動には上述の連成フラッターの他にも様々なタイプが存在するが、我々はウェイクギャロッピング (Wake Galloping) と呼ばれる空力振動に着目した。ウェイクギャロッピングは、風方向に直列に近接配置された2つの円柱において、上流円柱後流に形成される剥離せん断層と弾性支持された下流円柱との間の相互作用により、下流円柱に励起される空力振動である (図1)。

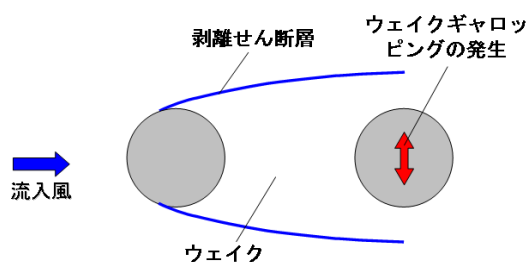


図1 ウェイクギャロッピング

ウェイクギャロッピングでは、通常、上流円柱は静止しているだけで、単にウェイクギャロッピングの原因となる剥離せん断層の供給源としての役割を果たす。これに対し、上流円柱を人為的に強制加振することで剥離せん断層に脈動を生じさせ、下流円柱との相互作用を変化させることができれば、下流円柱の振動を自在に増幅・抑制できる可能性がある。すなわち、上流円柱を下流円柱の空力振動のコントローラとして利用する。電力需要の増大時に振動を増幅して発電量を増やしたり、風速の変動時に制御によって一定振幅を維持することで電力供給を安定化させるなど、応答振幅の自在なコントロール法が確立できれば風力発電装置として有用である。上流円柱を加振するために制御エネルギーを消費するが、下流円柱の振動増幅によりそれ以上のエネルギーを取り出すことが

できれば、風力発電装置として成り立つ。本研究では、下流円柱応答のフィードバックにもとづく上流円柱の強制加振により、下流円柱に作用する剥離流れを脈動させ、下流円柱との相互作用を効率的に変化させるアクティブ制御法について、その制御効果や制御特性を風洞実験により検討した。

3. 研究の方法

ウェイクギャロッピングに用いる上流および下流の円柱はいずれも直径 $D = 20\text{mm}$ のアクリル製で、軸方向長さは上流円柱 250mm 、下流円柱 200mm である。また、いずれも直径 50mm のアルミ製端板を設置している。下流円柱は図2に示すように、2枚の真鍮 (黄銅) 製の板バネにより弾性支持される。2枚の板バネは一体となってせん断的に変形するため、図に波線で示すように円柱は床面にほぼ平行に振動し、主流直角方向のみの1自由度系である。

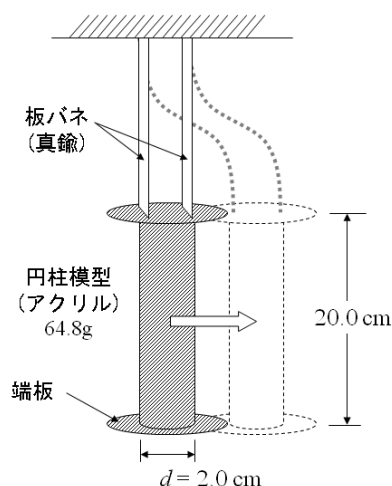


図2 バネ支持円柱模型 (下流円柱)

下流円柱の固有振動数 $f_n = 1.82\text{Hz}$ 、減衰定数 $h = 0.13\%$ であった。また、直径 D を代表長としたレイノルズ数 $Re < 18000$ である。一方、上流円柱はリニアアクチュエータに剛結され、下流円柱の振動変位に応じて主流直角方向にフィードバック強制加振を受ける。

上・下流円柱間のフィードバック制御システムの概略を図3に示す。レーザ変位計で捉えた下流円柱の主流直角方向の応答変位 y_d をフィードバックしてリニアアクチュエータを駆動し、変位 y_u で上流円柱を強制加振する。その際、時刻 t における上流円柱変位 $y_u(t)$ は、式(1)に従い、 τ 時間前の下流円柱変位 $y_d(t - \tau)$ で規定する。すなわち、下流円柱に対して一定の時間遅れ τ の下で上流円柱を強制加振する。さらに、制御ゲイン G を乗じて、上・

下流円柱の振幅比を一定にする.

$$y_u(t) = G \cdot y_d(t - \tau) \quad (1)$$

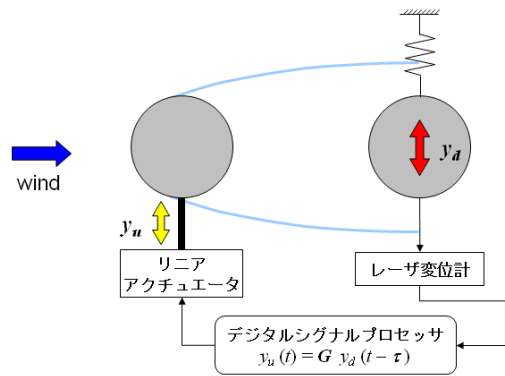


図3 フィードバック制御システム

具体的な時間遅れの与え方としては、レーザ変位計で捉えた y_d を過去にさかのぼって数サイクル分ほどメモリに記憶しておき、 τ 時間前の過去のデータを取り出しながら式(1)に従って上流円柱を駆動する。 $\tau=0$ のとき2つの円柱は同位相の振動となるが、今回用いたリニアアクチュエータでは、信号入力から実際に駆動して円柱を強制加振するまでに機械的な時間遅れ ($=0.081\text{s}$) が存在することが分かっており、 $\tau=0$ の加振は実現できない。そこで、ちょうど1周期後に相当する時間遅れ $\tau=T$ (T は振動周期) を与えることで同位相の加振を実現する。その他の時間遅れを設定する際にも、この機械的な時間遅れを含めて所要の時間遅れが得られるように設定した。

実験に用いる風洞は正方形断面 $225\text{mm} \times 225\text{mm}$ の吹き出し口を有する開放型風洞であり、軸流ファンで吸い込んだ風を2つのハニカムで整流して吹き出す簡易なものである。吹き出し口から $1.25D$ 下流に中心軸を鉛直に立てて上流円柱を置き、さらにその下流に下流円柱を2枚の板バネで吊り下げて設置する。このとき風洞断面寸法からすると閉塞率は9%程度となるが、2つの円柱の設置場所はいずれも風洞吹き出し口より下流の開放部に位置しており、閉塞率の影響は小さいと考えられる。

4. 研究成果

風速 $U = 6.5 \text{ m/s}$ において、フィードバック時に与える制御ゲイン G と時間遅れ τ_0^* ($=\tau/T_0$, T_0 は無制御時の各風速における下流円柱の振動周期) を様々に変化させたときの下流円柱の無次元応答振幅 A_d^* ($=A_d/D$, A_d は制御時の下流円柱の応答振幅) と無次元振動数 f_d^* ($=f_d/f_n$, f_d は制御時の下流円柱の振動数) の変化を図4および図5に示す。

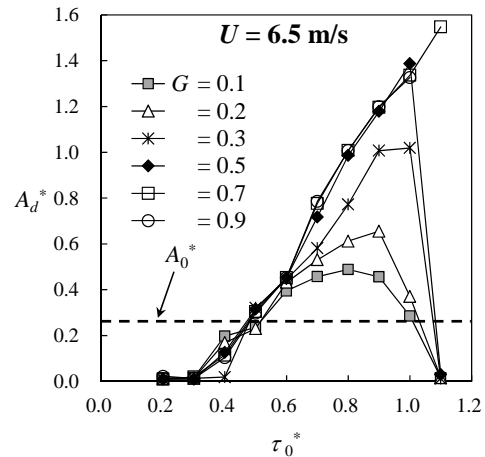


図4 フィードバック制御時の下流円柱応答振幅

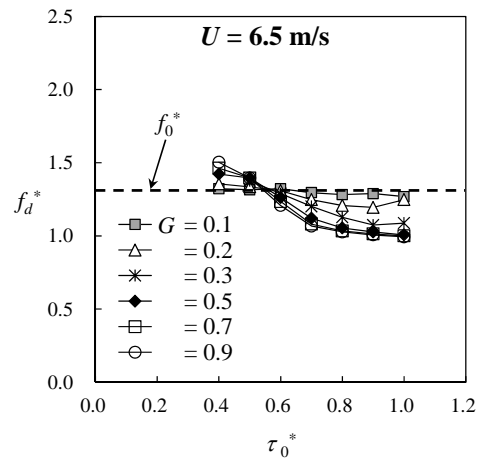


図5 フィードバック制御時の下流円柱振動数

図4には、無制御時の応答振幅 A_0^* を波線で示しているが、制御ゲイン G に関わらず、いずれも $\tau_0^* = 0.5 \sim 1.0$ 付近で A_0^* に比べて振幅が増幅し、 $\tau_0^* < 0.5$ あるいは $\tau_0^* > 1.0 \sim 1.1$ 付近の時間遅れでは逆に振幅が抑制されているのが分かる。すなわち、見かけ上、下流円柱より少し早い位相で上流円柱を加振するときに増幅し、下流円柱より少し遅れた位相で上流円柱を加振するときに抑制されることになる。また、 G が大きいほど振幅はより大きく増幅され、振幅が最大となるときの τ_0^* も大きくなる傾向が見られる。一方、 $\tau_0^* < 0.5$ あるいは $\tau_0^* > 1.0 \sim 1.1$ 付近の抑制時には、比較的小さい G の下でも、ほぼ完全に振動が消滅している。

図5では無制御時の振動数 f_0^* を波線で示してあるが、制御時の振動数 f_d^* の変化の様子は図4の応答振幅の変化の傾向とほぼ対応している。すなわち、応答振幅が無制御時よりも増幅するケースでは、 f_d^* は無制御時の f_0^* よりも減少し、逆に応答振幅が抑制されるケースでは f_d^* が増加する傾向が見られる。このとき、

応答振幅が大きいほど $f_d^* = 1.0$ すなわち元々の円柱の固有振動数 f_n に漸近することが分かる。

図5に示したように、制御後は下流円柱の振動数が変化することから、図4の横軸を τ_0^* の代わりに τ_d^* ($= \tau/T_d$, T_d は制御時の下流円柱の振動周期) で表示し直したのが図6である。なお、振動が完全に抑制されるケースでは T_d を測定できないため、図6には表示されていない。図6を見ると、ほとんどの制御ゲイン G において、最大振幅となる時間遅れが $\tau_d^* = 0.8$ 付近に集中することが分かる。 τ_d^* は制御開始から十分時間が経過した後の上流円柱と下流円柱の位相関係と見なせることから、上流円柱は下流円柱より0.8周期遅れ、すなわち見かけ上、下流円柱が0.2周期遅れで上流円柱を追いかけるような位相関係で振動するときに最大振幅となることを示している。このとき上流円柱の後流ウエイクも上流円柱の動きに少し遅れた位相で追随しながら脈動すると考えられることから、増幅時には下流円柱が常に上流円柱の後流ウエイク内に含まれるように振動する可能性が推測されるが、流れの詳細については明らかではない。また、図5に示したように大振幅時には円柱振動数 f_d は固有振動数 f_n に近づくことから、最大振幅を得るためには、多くの場合、風速や制御ゲインに関係なく $\tau = 0.8T_n$ の時間遅れを与えればよいことになる。

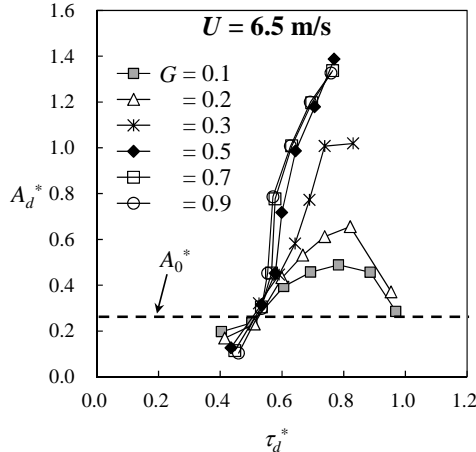


図6 制御後の振動周期で無次元化した時間遅れに対する下流円柱の応答振幅

図4で一定ゲイン G の下で応答振幅が最大となる時間遅れ τ_0^* を与えて制御したとき、その最大応答振幅 A_{dmax}^* を G に対して示したのが図7である。図4に示した風速 $U = 6.5\text{m/s}$ 以外の風速の結果も示している。なお、 $G = 0.0$ は無制御時の値である。

$U = 1.5\text{m/s}$, 11.0m/s 以外は A_{dmax}^* の曲線がほぼ重なり、 A_{dmax}^* がほとんど風速に依存せず、制御ゲインで決まる傾向がうかがえる。また、 $G = 0.4$ 付近を境に、より小さな G 領域では G

にほぼ比例して A_{dmax}^* が増加するものの、より大きな G 領域では A_{dmax}^* がほぼ一定となっており、 G の増大に伴う応答増幅率の鈍化傾向が見てとれる。このような G の増大に伴う応答増幅率の鈍化は図4で A_{dmax}^* 以外の応答振幅でも見られることから、それ以上の増幅が望めなくなる制御ゲインの限界値が存在すると思われる。

なお、 $U = 1.5\text{m/s}$ は、もともと無制御時にウエイクギャロッピングが発生しない風速であるため、流れによる励振力が弱く、他の風速域に比べて A_{dmax}^* がやや小さめに現れたと考えられる。また、 $U = 11.0\text{m/s}$ 程度の高風速域では、主流方向に小振幅の不規則振動が下流円柱に生じることを目視で確認しており、その分、本来の主流直角方向の応答に供給される流体エネルギーが低下し、他の風速域に比べて A_{dmax}^* が小さくなった可能性などが考えられるが、詳細については明らかではない。

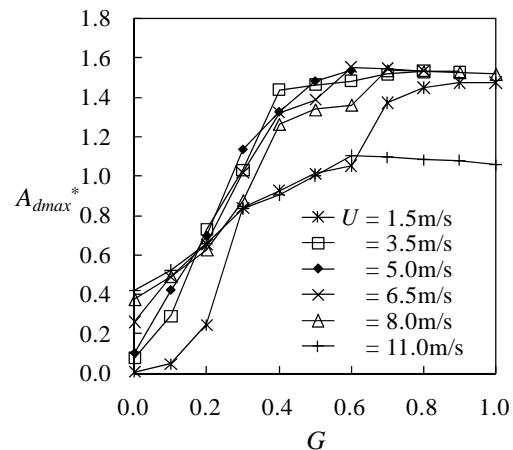


図7 制御ゲインに対する下流円柱応答振幅の最大値の変化

以上の結果から得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 下流円柱より少し早い位相で上流円柱を加振するときに下流円柱応答は増幅し、下流円柱より少し遅れた位相で上流円柱を加振するときに下流円柱応答は抑制される。
- (2) 応答増幅時には、下流円柱の振動周期は無制御時よりも増大する。この増幅後の振動周期を基準として0.8周期の時間遅れで制御すると、制御ゲインや風速に関係なく、下流円柱の応答が最大となる。下流円柱応答が大きいほどその振動周期は固有周期に近づくことから、多くの場合、固有周期の0.8倍の時間遅れを与えれば、その制御ゲインの下で最大の応答振幅が得られる。
- (3) 0.8周期の時間遅れで下流円柱応答が最大となるとき、その応答振幅は、同じ制御ゲインであれば風速に関わらずほぼ同程度の値になる。このことは、自然の風速変動下でも

応答振幅を一定に維持し、風速変動に対して安定性の高い風力発電を実現できる可能性を示唆する。

(4) 下流円柱の応答振幅は制御ゲインにほぼ比例して増幅するものの、一定以上の制御ゲインでは増幅が鈍化し、それ以上の増幅が見られなくなる制御ゲインの限界値が存在した。本実験では、制御ゲイン 0.4 ~ 0.5 程度でほぼ限界値に達した。

(5) 無制御時にウェイクギャロッピングが発生しない低風速域であっても、適切な時間遅れを与えれば、0.1 程度の小さな制御ゲインで下流円柱に振動を励起でき、より大きな制御ゲインを用いれば、高風速域と同程度の大振幅まで増幅可能である。低風速域の風力エネルギーの有効活用につながる可能性がある。

(6) 適切な時間遅れを上流円柱に与えて加振すれば、0.1 ~ 0.2 程度の小さな制御ゲインであっても、ほぼ完全に下流円柱の応答を消滅させることが可能である。振動抑制技術への応用も期待される。

以上は上流円柱と下流円柱の中心間距離 $S = 2D$ のときの結果であるが、 $S = 3D, 4D$ についても同様なフィードバック制御を試みた。また、加振円柱の配置についても、バネ支持円柱上流側に代えて下流側への配置による制御の可能性も検討した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) $S = 2D$ の場合と同様に、 $S = 3D, 4D$ のいずれの場合も 0.8 周期程度の時間遅れによる制御時に高い増幅効果が得られた。また、低風速域では S が大きいほど振動を励起するのに強い制御ゲインが必要になるものの、高風速域ではいずれの S でも小さな制御ゲインで振動が励起された。

(2) 高風速域では S が大きいほど最大振幅が大きくなる傾向が見られた。これは、 S が大きいほど、バネ支持円柱位置での加振円柱の後流ウェイク幅が広がるため、バネ支持円柱の振動可能範囲が広がったのが原因と考えられる。

(3) バネ支持円柱の下流に加振円柱を配置してフィードバック制御したところ、 $S = 2D$ で多少の増幅効果は見られるものの、 $S = 3D, 4D$ では制御ゲインを強くしてもほとんど増幅効果が得られなかった。 $S = 4D$ では振動が全く励起されなかった。

さらに、円柱の並進振動によるフィードバック加振に代えて、角柱の回転振動によるフィードバック加振による制御を試みた。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 時間遅れを様々に変化させてフィードバック制御したところ、角柱加振の位相が円柱振動の位相より遅いときに円柱振動が増幅

し、逆に、角柱加振の位相が円柱振動の位相よりも早いときに円柱振動が抑制された。特に、角柱の位相が 0.3 ~ 0.4 周期遅いときに増幅効果が大きく、0.3 ~ 0.4 周期早いときに抑制効果が高い。

(2) フィードバック増幅時には、制御ゲインが大きいほど高い増幅効果が得られる。ただし、制御ゲインが 0.4 ~ 0.6 程度以上になると、円柱の応答振幅がそれ以上増幅しなくなる。一方、抑制時には、比較的小さな制御ゲインであっても、ほぼ完全に円柱振動を消滅させることができた。

(3) 制御ゲインの増加に伴い円柱の応答振幅がそれ以上増幅しなくなる限界値が存在する要因として、円柱の弾性支持部の線形変形の限界や角柱後流ウェイク幅の限界が要因である可能性が示唆されたが、それだけでは説明が付かなかった。今後さらに詳しく検討していく必要がある。

(4) 角柱の辺長が大きいほど、あるいは流速が高いほど、円柱をより大きな応答振幅まで増幅できる傾向が見られた。角柱の辺長が大きいほど後流ウェイク幅が広がると考えられることから、フィードバック増幅で得られる最大の応答振幅は角柱の後流ウェイク幅に依存することが示唆される。このことから、より高い増幅効果を得るためには、角柱以外に後流ウェイクがより広い断面形状の物体で加振するのが効果的かもしれない。

(5) 無制御時にほとんど振動が生じないケースでは、ある程度大きな制御ゲインを与えないと円柱振動が励起されず、角柱と円柱の中心間距離が長いほど、円柱の振動励起のためにより大きな制御ゲインを要する。ただし、十分な制御ゲインを与えてフィードバック制御すれば、無制御時の円柱振動の有無や応答振幅の大きさ、あるいは角柱と円柱の中心間距離に関わりなく、同程度の大きさの応答振幅まで増幅可能である。

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 5 件)

① 比江島慎二、川東一幸、角柱回転振動によるウェイクギャロッピングのフィードバック制御、日本風工学会論文集, Vol. 38, No. 2 (No. 135), 2013 (掲載決定)

② 比江島慎二、中野正史郎、空力振動発電のためのフィードバック増幅特性の検討 (円柱間距離の影響)、日本風力エネルギー学会論文集, Vol. 105, 2013 (掲載決定)

③ 比江島慎二、中野正史郎、フィードバック増幅を利用した空力振動発電の制御パラメータに関する実験的研究、土木学会論文集

A1(構造・地震工学), Vol.68, No.1, 2012, 88-97

④ 比江島慎二, 樋吉佑一, 空力振動を利用した発電のための振動増幅法, 風力エネルギー, Vol.96, 2011, 135-141

⑤ 比江島慎二, 中野正史郎, 上流側円柱加振によるウェイクギャロッピングのフィードバック制御, 第21回風工学シンポジウム論文集, 2010, 363-368

〔学会発表〕 (計2件)

① 岡圭人, 比江島慎二, 林健一, 井上浩男, 倒立振り子の流力振動を用いた潮流発電のエネルギー取得性能, 土木学会年次学術講演会, 2012年9月7日, 名古屋大学

② 比江島慎二, 岡圭人, 林健一, 井上浩男, 流体励起振動を利用した潮流発電のための基礎的実験, 「フラッターの制御と利用」に関する第1回シンポジウム, 2011年9月16日, 東京大学

〔図書〕 (計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計1件)

名称: 振動体制御装置および振動体制御方法

発明者: 比江島慎二, 林健一

権利者: 三井造船株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2011-121170

出願年月日: 23年5月31日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.cc.okayama-u.ac.jp/~hiejima/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

比江島 慎二 (HIEJIMA SHINJI)

岡山大学・大学院環境生命科学研究科・准教授

研究者番号: 50284526