

令和元年6月12日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K19064

研究課題名(和文) Oscillation deathによる気柱振動抑制技術の開発

研究課題名(英文) Development of suppression method of acoustic oscillations by means of oscillation death

研究代表者

琵琶 哲志 (Biwa, Tetsushi)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：50314034

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,600,000円

研究成果の概要(和文)：気体を充填した共鳴管を加熱すると、強い気柱振動が発生することがある。産業用燃焼器ではしばしば問題となる、この気柱振動をなるべく簡便な方法で確実に抑制する技術の開発を目的とした。2つの自励振動子を相互作用させることで生じるOscillation deathという現象を実現するために、中空の管で二つの共鳴管を接続することで相互作用させた。2本の中空管を使用したところ、特徴的な長さの組み合わせでは振動が完全に停止することを見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中空の管で二つの気柱共鳴管を接続するという著しく簡便な方法でかなり強い音響振動が停止できることがわかった。とくに長さの異なる2本の管で接続するとき効果が大きい。複数の燃焼室を持つ産業用燃焼器で利用できる可能性が高い。2本の管のときにとくに効果が大きい点について、今後理解を深め、振動抑制効果を定量的に予測可能とする必要がある。

研究成果の概要(英文)：When a gas column confined in a resonator is subjected to a heat source, intense acoustic oscillations occur, which can be harmful in various industrial combustors. The objective of this study is to stop those oscillations with a simple and reliable method. We attempted to utilize oscillation death phenomenon occurring in coupled self-sustained oscillators, and introduced a gas-filled tube for mutual interactions between two acoustic oscillators. When two tubes were used, the oscillations were found to stop completely with specific combinations of the tube lengths.

研究分野：熱音響工学

キーワード：熱音響振動 結合振動子系 実験的研究 音響振動 遅延結合

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

熱音響自励振動は、気体が充填された管を熱的な方法で平衡状態から遠ざけたときに観測される気柱の自励振動である。発生する音響モードは気柱の固有モードであり管の長さや形状、また管端が開放端か閉端かに応じて多様な振動数の音響振動が発生する。この熱音響振動は、各種産業機器における燃焼ダクトやガスタービンエンジンの燃焼器で意図せず発生することがある。ひとたび熱音響自励振動が発生すると、これらの機器の正常な運転を阻害するだけでなく部品の破壊にも至ることがある。

燃焼系における熱音響振動の抑制に向けた多様な努力がなされてきた。音響的な負荷としてヘルムホルツ共鳴器や吸音材を追加することに加えて、マイクロホンとスピーカーを用いたアクティブ制御も考案された。ただしそれらの効果は限定的であり、多様な運転条件に対応できるよう、二重、三重の対策が望ましい。現在も決定的な抑制方法の確立に向けて努力が行われている段階である。

本研究で注目した抑制方法は、二つの自励振動系を相互作用させる方法である。散逸結合された二つの van der Pol 振動子では、二つの振動子の相互作用が十分に強い場合、振動が停止することが知られている。しかし、二つの振動子の固有周波数が等しい場合は、散逸結合では決して停止しない。しかし、同一の周波数を持つ二つの振動子を結合する場合、相互作用に時間遅れがあれば振動が停止することが Reddyらにより示された。産業燃焼器では同一タイプの燃焼器が並んで配列されることがあるため、複数の燃焼器を互いに結合して振動停止が実現できれば、即効性と簡便性がある対策となる。

研究代表者のグループでは、二つの Sondhauss 型の熱音響振動子を振動子と同じ気体で満たされた中空の管で接続することにより、熱音響自励振動の抑制が生じることを実証した。中空の管内の音波の伝播時間が時間遅れとして作用し、実行的に遅延結合が実現されたと考えられる。ただし Sondhauss 型の熱音響振動は、燃焼反応を一切伴わないで発生することから振動発生メカニズムは燃焼系の熱音響振動とは異なる。Sujithらはこの違いに注目し、燃焼系の支配方程式を独自に提案し、またその方程式を用いて遅延結合の効果について議論をしている。彼らの結果は Sondhauss 型と定性的に異なる部分があるため、チューブによる結合が燃焼系の熱音響振動系でも普遍的に有効であるかは実験的に検証する必要があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、燃焼系の熱音響振動子を中空の管(チューブ)を介して接続するという簡便な方法で、燃焼振動が抑制できることを実証することとした。自励振動抑制には、遅延フィードバックという方法もある。この方法では、自励振動のシグナルを適切な時間遅れを与えた後で、もとの自励振動系にフィードバックするだけで停止可能である。この方法もチューブを利用して実現することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験装置と振動発生条件

現実の産業用燃焼器は大型でしかも複雑な構造をしていることから、燃焼振動の実験では、比較的簡単な構造の Rijke 管型の燃焼振動がモデルとして採用されることが多い。これにならって本研究でも図 1 に示すような両端開放の共鳴管にバーナーを挿入して、Rijke 管型の燃焼振動子を作成した。装置は支持台に鉛直に固定された全長 1.53 m、内径 40 mm のステンレスパイプと市販のブンゼンバーナーで構成される。元々のバーナーは燃料供給管とバーナーノズルが直角であり、そのままではパイプに挿入できないためバーナーを管内に挿入できるように燃料供給管をバーナーと直線的に配置するように改良した。供給燃料は仙台市の都市ガス 13A で、組成は CH₄: 90.84%, C₂H₆: 5.39%, C₃H₈: 2.87% である。また、ガス供給量はブンゼンバーナーにあらかじめ備え付けられたバルブで調整可能である。

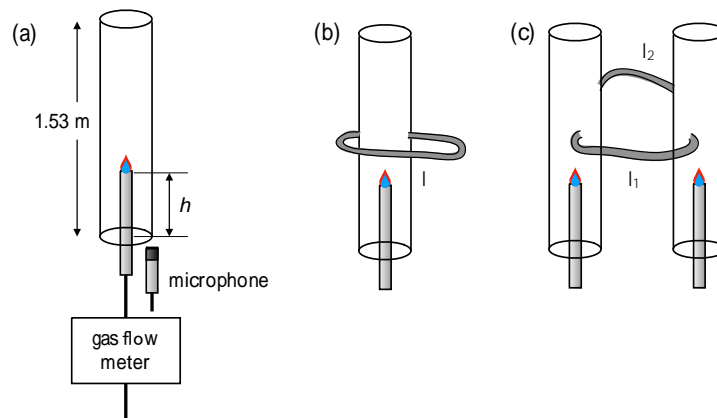


図 1 (a)Rijke 管型燃焼振動子の模式図, (b) チューブ(長さ l) による遅延フィードバックを持つ振動子, (c) 2 本のチューブ(長さ l_1, l_2) により結合された振動子。

本装置における燃焼振動を支配するパラメータは、パイプ下端から挿入するバーナーの先端位置 h である。ある一定の燃料を供給したブンゼンバーナーに点火した後で、バーナー下部にあらかじめ備えつけられた空気調整ネジを使って空気量を調整し、完全燃焼することを確認した後パイプ内に挿入した。予備実験的に h を変更したところ、広い範囲の燃料供給量で燃焼振動が発生することを耳で確認できたが、燃料供給量が $2.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ の場合に最も広範囲の h について燃焼振動が観測された。そのため燃料供給量をこの値に固定して実験を行うことにした。

振動の圧力変動は管の下端から軸方向に距離 0.01 m、管の中心から径方向に距離 0.03 m だけ離れた位置に固定したマイクロホン（小野測器，MI-1271M12）で計測した。なお、径方向の位置は h を変更して実験する上で、全 h に関して同等な位置で計測できる最も近い距離となっている。また、得られた信号をスペクトルアナライザ（小野測器，DS-2000）で解析した。サンプリング点数は 16384 点とし、サンプリング周波数は 2 kHz とした。得られた電圧信号は、メーカーにより検定されたマイクロホンの感度（47.9 mV/Pa）を用いて圧力に変換した。

発生する燃焼振動の一例をマイクロホンで観測された圧力波形として図 2 に示す。燃焼振動はうなりを伴うが、図 3 に示すフーリエスペクトル（振幅スペクトル）から分かるように明確なピークを持つ。最も卓越するピークは 140 Hz に位置し、使用している気柱管の基本振動数に対応する。ほかの h の場合にも基本振動数成分がもっとも大きいことがわかった。そこで、以下で遅延時間を考える場合には、基本振動数の逆数である基本周期をもとに検討を進めることにした。

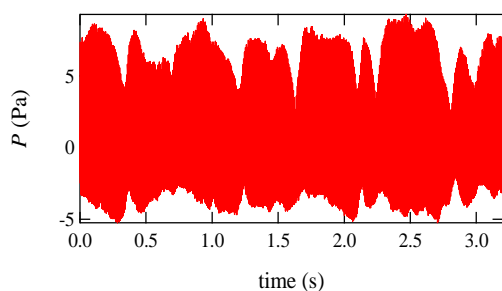


図 2 $h=0.1 \text{ m}$ の時の時間軸波形

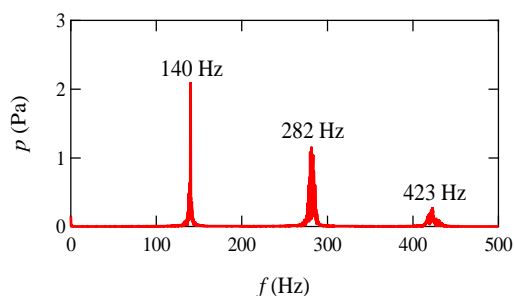


図 3 $h=0.1 \text{ m}$ の時のフーリエスペクトル

(2) チューブ接続の方法

本実験で使用するチューブは肉厚のシリコンブレードホースであり、内径が 3 mm, 8 mm, 16 mm のものを用意した。Sondhauss 型の実験において、チューブを接続する位置は、気柱共鳴管に生じる音響モードの圧力の腹の位置がもっとも効果的であったことから、図 1(b)および(c)に示すように Rijke 管型燃焼器の基本モードにおける圧力の腹の位置にチューブを接続することにした。一様な共鳴管の場合、ちょうど管の中心に圧力の腹が形成されるが、本実験では火炎による温度分布のためにその位置は管の中央とは異なる。しかし、近似的には成り立つと考えて、管の中央に 2 つの短い金属製ダクトを固定し、これ介してチューブを接続することにした。チューブの長さを l とするとき、音波の伝播時間は $\tau = l/c$ で与えられる。ここで c は音速であり大気圧室温の空気の値で代用できる。2 本の Rijke 管型振動子を結合する場合には、チューブの数を 1 本の場合と 2 本の場合で実験を行なった。

(3) 遅延フィードバックの結果

チューブ長さが $l=1.33 \text{ m}$ で内径 8 mm のチューブを接続した際の $h=0.3 \text{ m}$ の場合について、図 4 に圧力変動の時間発展を示す。チューブ接続前の測定データを赤色で、チューブ接続後の測定データを青色でそれぞれ示している。計測結果から得られた振幅の実効値（圧力の二乗の平均値）は $A = 2.8 \text{ Pa}$ から 0.09 Pa に減少し、高い抑制効果が確認された。

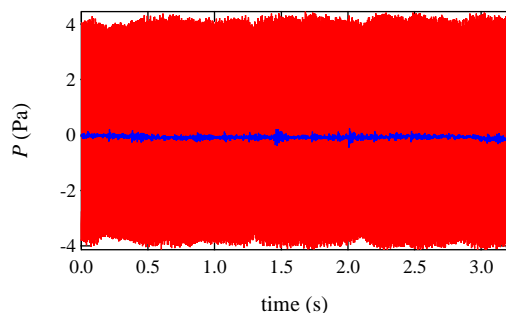


図 4 遅延フィードバック用のチューブ ($l=1.33 \text{ m}$) を接続する前後の圧力波形（接続前：赤色，接続後：青色）。

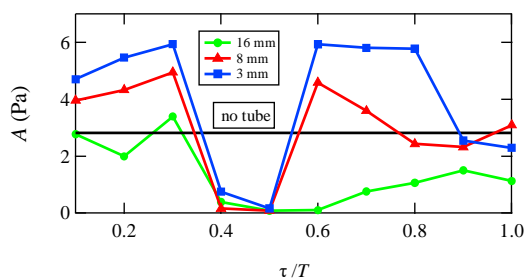


図 5 遅延フィードバック用のチューブを接続する前後の圧力振幅の実効値。

バーナー位置が $h = 0.3 \text{ m}$ のときは振動周波数は 130 Hz であるための、 $l = 1.33 \text{ m}$ のチューブ長さに対応する遅延時間 τ は振動周期 T の半分である ($\tau/T = 0.5$)。遅延時間の影響を見るために、ほかのチューブ長さでも実験を行なった。またチューブの内径を 8 mm から変更して同様の実験を行い、これらの結果を図 5 にまとめた。これを見ると、チューブの直径に関わらず、抑制効果が大いのは振動周期のおよそ半分の遅延時間を与える長さのチューブである。この結果は Sondhauss 型について得られた先行研究の結果と同じである。チューブの直径が大きいほど全体的な抑制効果が大きくなったが、 3 mm でも抑制可能なことが分かる。Rijke 管の本体の直径と比べて 10% に満たない直径でも十分な抑制効果が得られることが示された。

(4) 遅延結合の結果

2 本の Rijke 管型振動子を直径が 8 mm のチューブ 1 本で結合して見たところ、図 6 に示すように、 $0 < \tau/T < 1$ の範囲のどのチューブ長さでも振動停止は観測されなかった。(図 6 で示した黒い横線は結合前の振動振幅を表している。この実験ではマイクロホン位置を Rijke 管に近づけたために図 2 よりも大きな振幅値として記録されているが、実質的には先の実験と音響レベルは変わらない。)そこで相互作用の強さを強くするために、より太い 16 mm のチューブでも実験を行なった。図 7 に示すようにこの太さでも停止には至らなかった。 16 mm の場合に相互作用が強くなったことは、2 つの振動子の振動が相互同期したことから見て間違いない。それにも関わらず停止しなかったのは相互作用が振幅の大きさに作用するほどには大きくないからだと考えた。そこで結合に使用するチューブの本数を 2 本にして同様の実験を行なった。

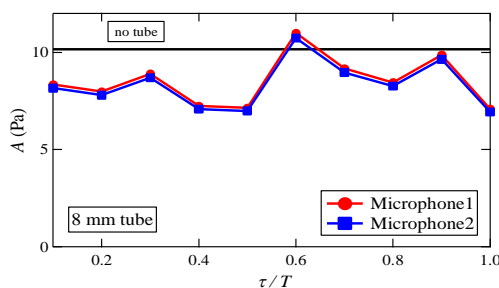


図 6 結合するチューブ長さを変えたときの結合後の振動振幅の実効値 (直径 8 mm)。

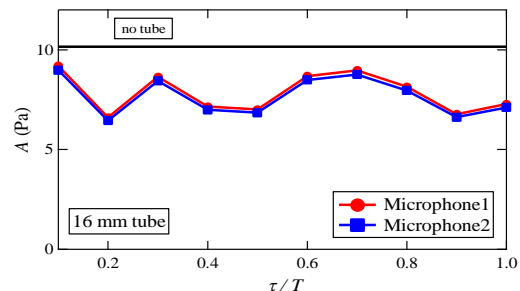


図 7 結合するチューブ長さを変えたときの結合後の振動振幅の実効値 (直径 16 mm)。

チューブ 2 本で振動子を結合する場合について、接続する 2 本のチューブ (直径 8 mm) の長さをそれぞれ変更しながら振動を計測した結果を示す。2 本の Rijke 管の直下にそれぞれ置かれたマイクロホン (マイクロホン 1 および 2) で得られた結果をそれぞれ図 8 と図 9 に示す。縦軸と横軸は 2 つのチューブによって導入される遅れ時間 τ_1, τ_2 を振動の周期 T で無次元化して示している。また、各チューブの組み合わせで計測された振動の振幅値を左に示すカラスケールで表している。図 8、図 9 より、 $\tau_{1,2}/T = 0.5$ と $\tau_{2,1}/T = 1.0$ となるチューブの組み合わせ付近では、2 つの振動子の振幅値が同時に小さくなっていることが分かる。この結果は、燃焼を伴わない振動子を 2 つのチューブで遅延結合する場合について先行研究で示された結果と一致した結果となっている。

圧力振幅の実効値 A を圧力波形から求めたところ、チューブ接続前は $A = 7.6 \text{ Pa}$ であったのに対し、チューブ接続後は $A = 0.38 \text{ Pa}$ であり、強い抑制効果が実証された。2 本のチューブでは直径 8 mm のチューブで抑制できたことは、1 本のチューブでは 16 mm の直径の場合でも抑制できなかったことと対照的である。単にチューブの全断面積であれば 16 mm のチューブの方が大きいので、 $\tau/T = 0.5$ と $\tau/T = 1.0$ の組み合わせとなるようなチューブの長さに意味があると言える。

(5) モデル方程式による遅延フィードバックと遅延結合の解析

自励振動を表す代表的な方程式に van der Pol 方程式がある。この方程式を修正して Atay は遅延フィードバックされた van der Pol 方程式

$$\ddot{x} + \epsilon(x^2 - 1)\dot{x} + \omega_0^2 x = \epsilon k \dot{x}(t - \tau) \quad (1)$$

を検討している (ϵ は非線形パラメータ、 k は遅延フィードバックの強さ、 τ は遅延時間を表す。)平均化法により導出された結果によれば、遅延時間が自励振動子の固有振動周期 $T = 2\pi/\omega_0$ の半分のとき、つまり $\tau/T = 0.5$ のときに最も抑制効果が高い。これは本実験の結果とも符合する結果である。また遅延結合された van der Pol 方程式は、結合が 1 つか 2 つかに応じてそれぞれ、次のように書ける。

$$(1 \text{ つ}) \quad \ddot{x}_{i,j} + \epsilon(x_{i,j}^2 - 1)\dot{x}_{i,j} + \omega_0^2 x = B (\dot{x}_{j,i}(t - \tau) - \dot{x}_{i,j}) \quad (2)$$

$$(2 \text{ つ}) \quad \ddot{x}_{i,j} + \epsilon(x_{i,j}^2 - 1)\dot{x}_{i,j} + \omega_0^2 x = B_1 (\dot{x}_{j,i}(t - \tau_1) - \dot{x}_{i,j}) + B_2 (\dot{x}_{j,i}(t - \tau_2) - \dot{x}_{i,j}) \quad (3)$$

ここでも同じように平均化法を用いて解析すると、結合が 1 つの場合 (2) 式, 振動抑制に最も効果的なのは $\tau/T = 0.25$ の場合であり、そのときに必要な結合強さは $B = \epsilon$ である。また結合が

2つの場合(3式)振動抑制に最も効果的なのは、遅延時間 τ_1 および τ_2 が $\tau_1/T \pm \tau_2/T = 0.5 \pm n$ を満たす場合であり、そのときに必要な結合強さは $B = B_1 = B_2$ の場合には $B = \epsilon/2$ である。この τ_1 と τ_2 の組み合わせは図10に示すように格子状に現れる。1本の場合には、実験で停止状態が観測されなかったことから比較するのは困難であるが、2本の場合の実験で $\tau/T = 0.5$ と $\tau/T = 1.0$ の組み合わせでのみ強い抑制効果が確認された結果とは明らかに異なることがわかった。真空管回路を元に考案された van der Pol 方程式が必ずしも燃焼振動の複雑なダイナミクスを表すわけではない。そこで Sujith らにより提案された燃焼振動の支配方程式をもとに、(3)式右辺と同様の結合項を仮定して数値解を求めてみた。その結果でもやはり図10と同様な格子状の領域で高い抑制効果が示された。そのため2本結合で得られた強い抑制効果はチューブ内の音波伝搬に特有の効果であると考えている。

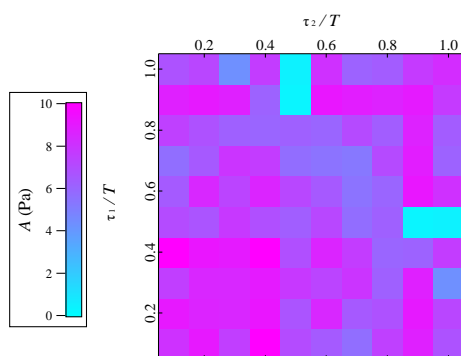


図8 結合する2本のチューブ長さを変えたときの結合後の振動振幅の実効値(マイクロホン1による計測値)。

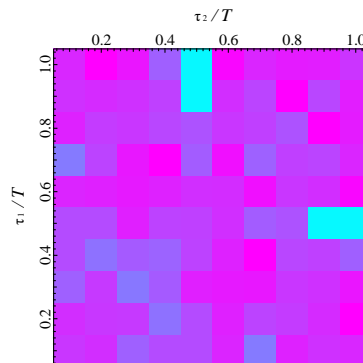


図9 結合する2本のチューブ長さを変えたときの結合後の振動振幅の実効値(マイクロホン2による計測値)。

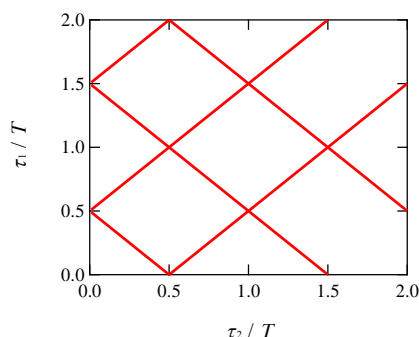


図10 2重遅延結合された結合 van der Pol 方程式における抑制条件 $\tau_1/T \pm \tau_2/T = 0.5 \pm n$ 。

4. 研究成果

本研究では、Rijke 管型の燃焼振動子に対して、チューブを接続することによる抑制効果が示された。チューブを接続する、という比較的簡単な方法で振動を停止できることから工業的には十分な価値があると考えている。よりこの方法を発展させるために、次の点を明らかにする必要があると考えている。

- (1) 音波伝搬に基づくチューブ接続の効果の検証：遅延フィードバックでは van der Pol 振動子の場合と同様の遅延時間で抑制効果が高いが、2本で結合する場合には明らかな違いが観測された。こうした違いをチューブ内の音波伝搬を記述する方程式(波動方程式)に基づいて理解を深め、振動抑制効果を予測できるようになる必要がある。
- (2) 予混合型燃焼器での検証：産業用燃焼器では予混合型燃焼が採用されることが多く、Rijke 管とは異なる振動発生メカニズムが関与している可能性がある。引き続き予混合型燃焼器でもチューブ接続が振動停止に有効化を検証する必要がある。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 2 件)

1. H. Hyodo, T. Biwa, "Stabilization of thermoacoustic oscillators by delay coupling," Physical Review E, 98 52223 (2019). (<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.98.052223>) (査読あり)

2. 琵琶哲志, 兵頭弘晃, 「熱音響振動の振動抑制に関する研究」, 日本燃焼学会誌, 60 巻 93-98 (2018) . (https://doi.org/10.20619/jcombsj.60.192_93) (査読あり)

〔学会発表〕(計 3 件)

1. 兵頭弘晃, 琵琶哲志, 「遅延結合した熱音響自励振動に対する安定性解析」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 .
2. 寺田 健悟, 琵琶 哲志, 兵頭 弘晃, 「チューブを使った時間遅れフィードバックによる燃焼振動の抑制」, 日本流体力学会年会 2018 , 2018 年 .
3. 寺田健悟, 琵琶哲志, 兵頭弘晃, 「チューブを用いたフィードバックによる中空管内の燃焼振動の抑制」, 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会, 2017 年 .

〔図書〕(計 1 件)

1. 琵琶哲志, コロナ社, 熱音響デバイス, 2018 年

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年 :
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名 :

ローマ字氏名 :

所属研究機関名 :

部局名 :

職名 :

研究者番号 (8 桁) :

(2)研究協力者

研究協力者氏名 : 寺田 健悟

ローマ字氏名 : Terata Kengo

研究協力者氏名 : 兵頭 弘晃

ローマ字氏名 : Hyodo Hiroaki

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。