

令和元年5月20日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17638

研究課題名(和文) 昆虫の筋骨格系を規範とした高性能な柔軟羽ばたき機構の研究

研究課題名(英文) Flexible flapping mechanism inspired from the musculoskeletal system of insect

研究代表者

中田 敏是 (Nakata, Toshiyuki)

千葉大学・大学院工学研究院・特任助教

研究者番号：80793190

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：剛体と仮定できる要素で成り立つ従来のドローンのような飛行ロボットに対して、飛翔生物は柔軟な翼や筋骨格系を用いることで、巧みな飛行を実現している。本研究では、翼や筋骨格の柔軟性が、飛翔体の効率や外乱中のロバスト性に及ぼす影響を、理論解析・数値シミュレーション・実験によって、包括的に調べた。その結果、柔軟羽ばたき機構によって、外乱に対して不安定になる可能性があるものの、翼や機構に適切に柔軟性を導入することで、より少ないパワーで、安定した羽ばたき飛行を実現できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、昆虫などの飛翔生物が、適切な柔軟性を持つ翼や筋骨格系と周囲の気流の力学的な相互作用を受動的に利用することで、飛翔体の効率や安定性を向上させている可能性があることが明らかとなった。ドローンによる「空の産業革命」をさらに推進するには、ドローンが墜落しにくく、墜落しても安全であることが必要であり、飛翔生物のような適切な柔軟性をドローンに導入することによって、過酷な自然に対応しつつ、自然エネルギーを効率良く利用する、安全な次世代型ドローンの開発ができると思われる。

研究成果の概要(英文)：Insects flap their flexible wings using their flexible musculoskeletal system in the thorax, unlike human-made aerial systems, called drones. In order to design highly efficient and robust bio-inspired drones, the effects of the flexibility in the wings and the thorax of insects on the aerodynamic performance and gust response were investigated by incorporating a simplified musculoskeletal model into our theoretical, numerical and experimental models. Through the comprehensive analyses, the flexible thorax was found to reduce the power consumption by the resonance, but reduce the stability under the gust by the passive alterations of the wing kinematics. However, the combination with flexible wings was found to mitigate the gust response passively without sacrificing efficiency. These results point out the importance of mechanical feedback through the fluid-structure interaction between the flexible mechanisms and the unsteady aerodynamics of flapping wings for the design of drones.

研究分野：バイオメカニクス、流体力学、構造力学

キーワード：筋骨格系 流体構造連成 ドローン 力学的フィードバック

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

1. 研究開始当初の背景

空中撮影・情報収集・監視等を目的として、小型飛翔体であるドローンの利用が近年急速に広まった。ドローンは、各パーツを剛体と仮定し、複数のプロペラの回転数によって姿勢を制御する[1]。一方で、同じ環境で生息する昆虫は、飛翔筋と外骨格の柔軟な変形によって、翼を運動させ[2]、非常に安定した飛行を実現している。昆虫の場合、飛翔筋が柔軟な外骨格の変形を通して翼を間接的に駆動する間接飛翔筋が広く見られる[3]。このような昆虫の筋骨格系については、主に神経系の信号と翼運動の相関の観察による制御の観点[4]や、筋骨格系による羽ばたきの実現等の動力学的な観点[5]から研究が主に行われてきた。

小型の鳥や昆虫の飛翔を模倣して、Nano-hummingbird[6]、Delfly[7]等の羽ばたき機が実現されてきた。これらの機体は、ドローンと同様に、機構を剛体とみなして翼運動を実現している。Robobee[8]は、圧電材料と柔軟な機構を採用し、十分な揚力を発生する運動を実現するように設計されており[9]、共振を利用して、エネルギーを節約しているとされる[8]。しかし、生物が進化によって獲得した柔軟な羽ばたき機構の機能の有効さはこれまで包括的に調べられておらず、柔軟な機構の性能を最大限発揮するための設計原理はわかっていない。

2. 研究の目的

本研究では、生物の柔軟機構による流体推進メカニズムの解明と、それを規範とした新たな飛行システムを創製することを最終目標とし、その第一歩として、以下の3つの柔軟羽ばたき機構による性能向上を提案し、その発現メカニズムの解明と、柔軟羽ばたき翼と柔軟羽ばたき機構を統合した羽ばたきシステムの設計指針の導出を第一の目的とした。

(1) 弾性エネルギーの蓄積と解放の繰り返しによる高効率化：柔軟羽ばたき機構における弾性エネルギーの蓄積と解放を繰り返すことによって、翼運動を剛体で制御するよりも、小さなエネルギーで同じ運動を実現できると考えられる。

(2) 受動的に実現される翼運動の高効率化：機構が柔軟性を有することで、翼の運動が翼に加わる力の影響を受ける。したがって、適切な翼と機構のデザインによって、抗力を受け流し、緻密な制御を必要とせず、非定常な流れ場に対応した翼運動を実現できると考えられる。

(3) ロバスト性の向上：例えば外乱中では、翼の空気力が変動し、姿勢が不安定になるが、筋骨格系での受動的な運動調整によってこの空気力を受け流すことで、最低限の制御で、安定した飛翔を実現できる可能性がある。

上記の機能を発現するには、各種の設計パラメータ（翼や機構の形状や柔軟性）に制約があると考えられ、本研究ではその設計指針の導出を目指した。また、ここで得られた知見を元に、これを利用した高性能な羽ばたきロボットのプロトタイプを創製することも目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、昆虫を規範としたシンプルな柔軟羽ばたき機構モデルを構築し、理論解析・シミュレーション・モデル実験の3つの手法によって、柔軟羽ばたき機構の機能を発現するための設計指針の導出を目指した。対象昆虫は大型の昆虫であるスズメガ（翼の長さは5-7cm程度、羽ばたき周波数は20-30Hz）とした。

(1) 柔軟羽ばたき機構モデル (Dynamic Musculoskeletal Model, DMSM)

本モデルは、図1に示すように、入力での振動(1)をバネ・ダンパ(2)と質量(3)を介して翼に接続することで、昆虫の柔軟な筋骨格系を単純化したものである。翼の基部のバネ(4)によって、さらに高い自由度で、翼の運動と迎角を調整することができる。左右の質量は、バネ(5)によって接続されており、昆虫の翼で見られる左右の翼の機械的な接続を表現した。

(2) 理論解析

DMSMと、研究代表者が開発した羽ばたき翼へ加わる流体力を精度よく高速に評価できる準静的流体モデルを弱連成手法によって組み合わせ、理論モデルを構築した。これを用い、少ない入力パワーで、スズメガの自重を支えられるだけの垂直力を発生できる翼運動を達成できるDMSMの質量・バネ・ダンパの各定数を、遺伝的アルゴリズムに基づくパワー最小化によって同定した。

(3) シミュレーション

より高精度に流体力を評価することのできる、昆虫飛翔に特化した流体シミュレータ[10]とDMSMを組み合わせ、上記の理論モデルで得られた結果の校正と、突風下でのDMSMの応答を調べた。また、羽ばたき翼の柔軟性が、羽ばたき翼の突風応答に及ぼす影響も、研究代表者が以前開発したシミュレータ[11]を用いて、別に評価した。

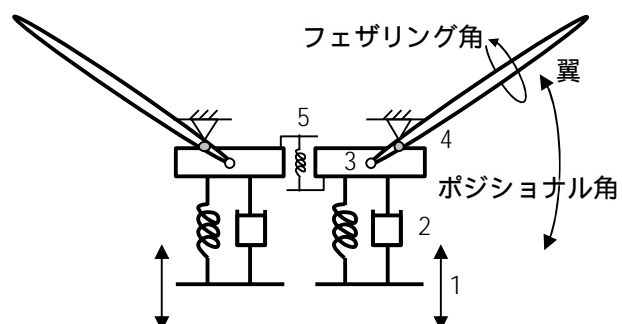


図1 昆虫の筋骨格系を規範とした柔軟羽ばたき機構モデル。

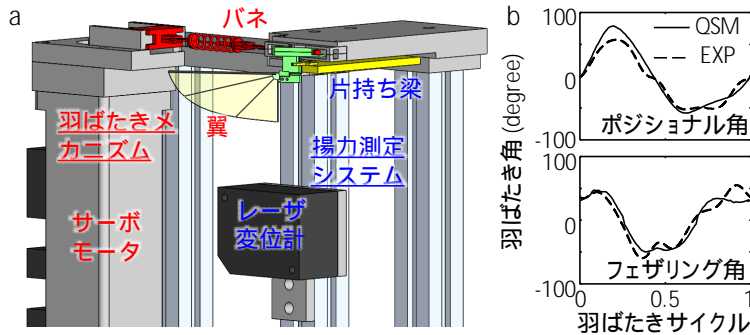


図 2 柔軟羽ばたき機構の実験モデルと翼運動の測定結果。(a) 実験モデル. 羽ばたきメカニズムによって DMSM の運動を実現し, 揚力測定装置によってその性能を評価する。(b) 理論モデル (QSM) と実験 (EXP) によって得られるポジショナル角とフェザリング角.

(4) 実験モデル

サーボモータ, その回転運動を羽ばたきに変換するクランク, 柔軟なバネの組み合わせによって, 実験システムを構築した (図 2). この実験モデルの翼は片持ち梁の上に乗っており, この片持ち梁の振動をレーザー変位系で測定することで, 羽ばたき翼によって生じる流体力を測定することができる. 受動的に得られる翼の運動は 2 台の高速カメラによって測定した. 上記の理論解析やシミュレーションで得られる翼運動は, 図 2 に示すように, この実験モデルで得られる翼運動とよく一致しており, これらの手法の信頼性は高いと考えられる. 柔軟な翼と機構を組み合わせただけの場合, シミュレーションを行うのが難しいため, 柔軟翼と柔軟機構を組み合わせただけのモデルの性能は, この実験モデルによって評価した.

4. 研究成果

上記の手法によって, 柔軟羽ばたき翼と羽ばたき機構の空気力学的性能を調べた結果, 柔軟羽ばたき翼と羽ばたき機構を適切にデザインすることで, 剛体の翼・機構と比較して, 羽ばたき飛行の効率を維持・向上させつつ, ロバスト性を向上させられることが明らかとなった. 柔軟翼と機構の性能について, 本研究のように包括的に評価された例はなく, 次世代型ドローンの創製に向けて, 新しい設計の指針を示すことができたと考えられる. 既にシミュレータの開発が完了していた柔軟羽ばたき翼に関する研究成果から結果を公表し, 論文の一つは, Bioengineering division of the Japan Society of Mechanical Engineers and Korean Society of Biomechanics より, JBSE Graphics of the Year Awards と JBSE Papers of the Year Awards を 2019 年に同時受賞した. 以下に, 得られた主な成果を示す.

(1) 柔軟羽ばたき翼の効率とロバスト性

柔軟羽ばたき機構のシミュレータを開発すると同時に, 柔軟翼でも同様の性能評価を行った結果, 柔軟翼の効率・ロバスト性についても様々な知見が得られた. 柔軟翼は, 流体と構造の相互作用によって, 流れ場の変動に対応して素早く形状変化し, これによって翼面上の流れ場を安定化させ, 羽ばたき翼の性能を向上させること, 昆虫の翼に見られるねじれやキャンバ等の変形は, 羽ばたき翼の効率を向上させることを確認した. また, 図 3 に示すように, 羽ばたき翼の柔軟性によって, 突風の影響を受け流すことができ, 昆虫の飛行中の姿勢が安定化される可能性があることがわかった.

(2) 柔軟羽ばたき機構の効率

理論モデルを用いた入力パワー最小化の結果, 機構への入力の振幅が小さい場合には, 機構がより柔軟になり, 共振に近い状態で振動することで, 大きな流体力を維持できることが明らかとなった. 理論計算とシミュレーションの両方で, 共振に近い場合, より小さなパワーで羽ばたき運動を達成できることが確認でき, 柔軟羽ばたき機構による高効率化が確認できた (図 4).

(3) 柔軟羽ばたき機構のロバスト性

シミュレーションを用いて柔軟羽ばたき機構の突風応答を調べた結果, 柔軟羽ばたき機構は, その柔軟性によって, より少ないエネルギーで羽ばたかせることが出来るが, 突風に対して敏感に翼運動が変化してしまうため, 安定性を低下させることが明らかとなった (図 5). このことから, 効率と外乱応答が, トレードオフの関係になることがあきらかとなった. 昆虫の場合, 左右の翼を同位相で羽ばたかせるために胸部がつながっており, その影響を数値モデルによって調べた結果, この左右の翼の機械的なリンクが, 翼の突風応答を抑制し, 安定性を向上させることがわかった. 機構の柔軟性による外乱への翼運動の変化による力学的な応答は, 神経系を

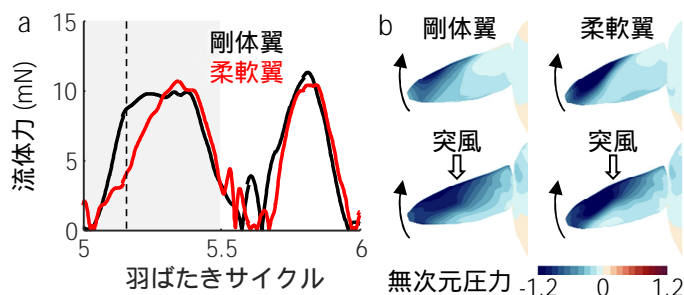


図 3 柔軟羽ばたき翼の突風応答。(a) 前方からの突風に対する剛体羽ばたき翼と柔軟羽ばたき翼が発生する流体力. 翼の柔軟性によって, 特に羽ばたきの前期に, 力の変動が抑制される。(b) 前方からの突風による翼表面の圧力の変動. 剛体翼に比較して, 柔軟翼の方が, 突風による圧力の変動が少ない.

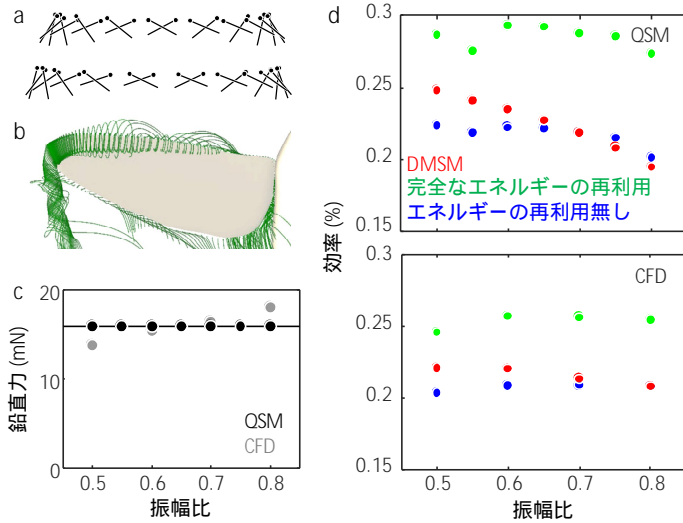


図4 柔軟羽ばたき機構の空気学的性能。(a) 入力振幅が、スズメガの羽ばたき振幅に対して50% (上)と80% (下)の翼運動。この翼運動によって、(b)翼表面には前縁渦が生じ、(c) スズメガの自重(横線)を支えるだけの鉛直方向の力を発生できる。(d) 振幅比が小さく、胸部のパネが柔軟なことによって、胸部での弾性エネルギーの蓄積によってエネルギーを完全に再利用する状態に近づき、効率を向上できる。理論モデル(上)とシミュレーション(下)で同様の結果が得られた。

用いた能動的なフィードバックに対して、力学的フィードバックと呼ばれる。力学的フィードバックは、センサの情報変換のための遅延やノイズに影響されることがなく姿勢を安定化できる。予測のつかない外乱の中で飛行する生物にとって、この力学的フィードバックは極めて重要であると考えられ、生物の力学的デザイン原理を解明することで、さらに高性能なドローンを創製できると考えられる。

(4) 柔軟羽ばたき機構と柔軟翼の安定性

柔軟な筋骨格系と翼を組み合わせた場合、数値計算は困難であるため、実験モデルを用いて、羽ばたき機構と翼の様々な柔軟性の組合せが、羽ばたきロボットの突風応答に及ぼす影響を調べた。その結果、羽ばたき機構の柔軟性による効率と安定性のトレードオフが、適切に柔軟な翼によっても解決され得ることがわかった(図6)。したがって、羽ばたき機的设计には、機構と翼それぞれの柔軟性を適切に決定することが重要である。

(5) 小型柔軟羽ばたき機構の創製

上記の結果から、機構や翼の柔軟性を適切に設計することで、センサ等を用いず、力学的な応答による受動的な制御である力学的フィードバックを実現できること、柔軟羽ばたき機構が、高効率・高ロバスタな新しい飛行ロボットの創製に有用であることがわかった。したがって、その実現に向

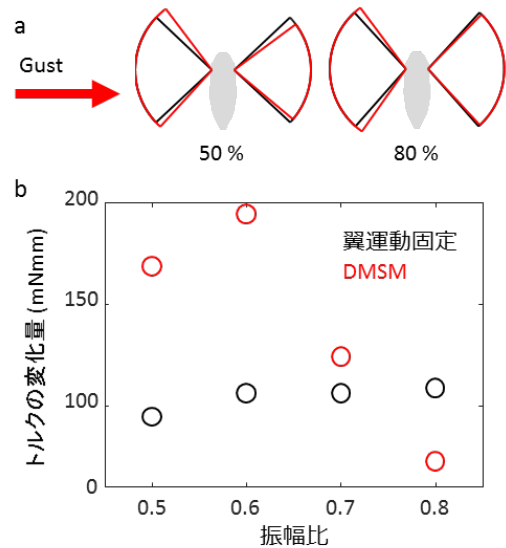


図5 柔軟羽ばたき機構の突風応答。(a) 振幅比が50%の場合と、80%の場合の、横からの突風による翼運動の振幅の変化(赤)。元の翼運動は黒線で示した。(b)空気トルクの変動量。振幅比が小さくより機構が柔軟なほどトルクの変動が大きくなり、翼運動が柔軟性によって変動しない方がロバスタ性が向上する。

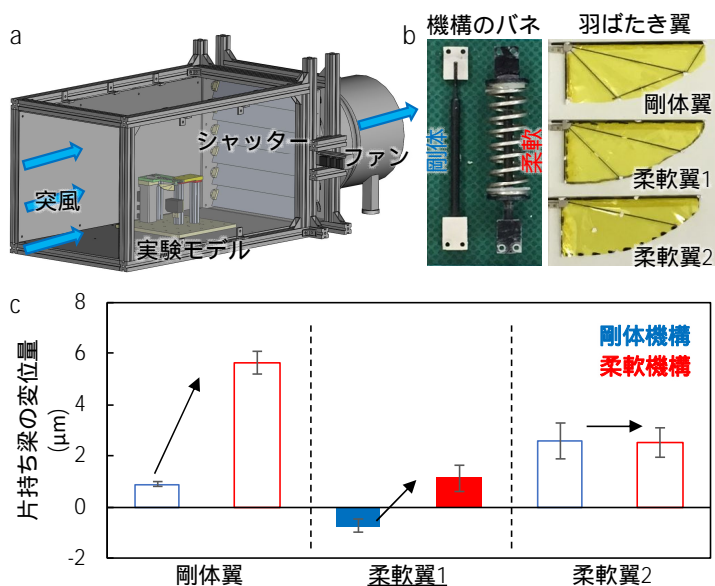


図6 柔軟羽ばたき翼と柔軟羽ばたき機構の突風応答。(a) 突風発生装置。サーボモータによって制御するシャッターが高速に開くことで、実験モデルの空間に風が流入する。(b) 機構のパネには剛体とより柔軟なパネ、羽ばたき翼には剛体翼、後縁のロッドを外した柔軟翼1、さらにロッドを減らした柔軟翼2を用いた。(c) 突風が当たった際の羽ばたき翼を乗せた片持ち梁の変位の変動量。片持ち梁の変動量は力の変動の大きさを表している。剛体翼の場合、柔軟機構(赤)によって力の変動量が大きくなるが、柔軟翼1の場合には、この力の変動量を著しく抑制できる。

けて、モータを一つの翼の駆動に使い、モータと翼の間に柔軟性を導入した小型柔軟羽ばたき機構を考案し、そのプロトタイプ(図7)を作製することで、その性能を調べた。その結果、柔軟性が翼の羽ばたき振幅に大きな影響を与え、共振等の利用によって小型モータでも、大型昆虫の羽ばたき周波数付近(10 Hz程度)で、大きな羽ばたき振幅を得られることがわかった。

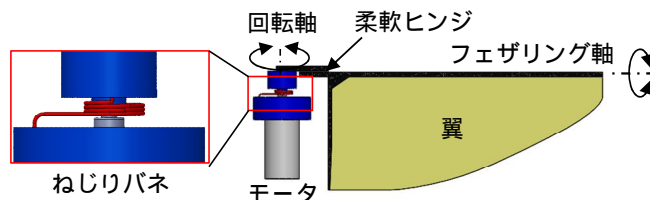


図7 小型柔軟羽ばたき機構。バネと柔軟ヒンジを介して翼をモータにつけ、これによって、より少ない入力パワーで大きな流体力の発生を目指す。

<引用文献>

- [1] Rothstein, Drone (Object Lessons), Bloomsbury Academic (2015).
- [2] Dickinson, M.H. & Tu, M.S. The function of dipteran flight muscle. *Comp. Biochem. Physiol.* 116A, 223-238 (1997).
- [3] Dudley, R. The biomechanics of insect flight, Princeton University Press (2000).
- [4] 例えば Sponberg, S. & Daniel, T.L. Abdicating power for control: a precision timing strategy to modulate function of flight power muscles. *Proc. R. Soc. B* 279, 3958-3966 (2012).
- [5] 例えば Harne, R.L. & Wang, K.W. Dipteran wing motor-inspired flapping flight versatility and effectiveness enhancement. *J. R. Soc. Interface* 12, 20141367 (2015).
- [6] Keennon, M. *et al.* Development of the nano hummingbird: a tailless flapping wing micro air vehicle. AIAA 2012-588 (2012).
- [7] de Croon, G.C.H.E. *et al.* Design, aerodynamics and autonomy of the DelFly. *Bioinsp. Biomim.* 7, 025003 (2012).
- [8] Ma, K.Y. *et al.* Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot. *Science* 340, 603-607 (2013).
- [9] Sreetharan, P.S. & Wood, R.J. Passive aerodynamic drag balancing in a flapping-wing robotic insect. *J. Mech. Design* 132, 051006 (2010).
- [10] Liu, H. Integrated modeling of insect flight: From morphology, kinematics to aerodynamics. *J. Comput. Phys.* 228, 439-459 (2009).
- [11] Nakata, T. & Liu, H. A fluid-structure interaction model of insect flight with flexible wings. *J. Comput. Phys.* 231, 1822-1847 (2012).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① Nakata, T., *et al.* A simulation-based study on longitudinal gust response of flexible flapping wings. *Acta Mechanica Sinica*, 査読有, 34(6), 2018, 1048-1060. DOI: 10.1007/s10409-018-0789-5
- ② Nakata, T., Noda, R. & Liu, H. Effect of twist, camber and spanwise bending on the aerodynamic performance of flapping wings. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 査読有, 13(2), 2018, 16-00618. DOI: 10.1299/jbse.17-00618
- ③ Nakata, T., Noda, R. & Liu, H. Fluid-structure interaction enhances the aerodynamic performance of flapping wings: a computational study. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 査読有, 13(2), 2018, 16-00666. DOI: 10.1299/jbse.17-00666

〔学会発表〕(計8件)

- ① 中田敏是, 劉浩, 柔軟な飛翔昆虫の突風応答シミュレーション. 日本機械学会 第31回計算力学講演会(CMD2018), 2018.
- ② Nakata, T., Koizumi, S., Ueyama, K. & Liu, H. Aerodynamic efficiency and robustness of insect-inspired flexible flapping mechanisms. Seventh International Symposium on Aero Aqua Bio-mechanisms (ISABMEC 2018), 2018.
- ③ 中田敏是, 上山浩平, 劉浩, 筋骨格系を有する昆虫羽ばたき翼の流体構造連成モデル. 日本機械学会第30回計算力学講演会(CMD2017), 2017.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名: 劉 浩

ローマ字氏名: Hao Liu

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。