

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24年5月18日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21360078

研究課題名（和文）昆虫型飛翔ロボットを目指した低レイノルズ数羽ばたき飛行の最適化

研究課題名（英文）Optimization of Low Reynolds Number Flapping Flights for Insect
-inspired Flapping Robots

研究代表者 劉 浩（RYU HIROSHI）

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40303698

研究成果の概要（和文）：

生物飛行の統合力学シミュレータの開発と昆虫型飛翔ロボットを目指した低レイノルズ数羽ばたき飛行の最適化現象の解明を目標とし、羽ばたき飛行の弾性翼構造・材料力学、動力学及び流体力学の諸モデルを構築・統合して昆虫飛行の構造・流体・動力学連成解析シミュレータを開発した。さらに本シミュレータをスズメ蛾やハエと超小型飛行ロボットの空力性能や動的飛行安定性などの運動メカニズム解析に適用し、低レイノルズ数羽ばたき飛行における翼構造や翼運動の最適設計指針を確認した。

研究成果の概要（英文）：

Aiming at developing an effective tool to unveil novel mechanisms in bio-flights and to provide guiding principles for designing bio-inspired Micro Air Vehicles (MAVs) we here propose a new paradigm of *MAV-motivated integrative biomechanics in bio-flights*, which integrates aerodynamics, flight dynamics, flight stability and maneuverability in a manner of computational biomechanics. An integrated and rigorous computational biomechanical model is developed for the simulation of insect flapping flight, containing 1) a biology-inspired, dynamic flight simulator in terms of realistic wing-body morphology, realistic flapping-wing and body kinematics, and unsteady aerodynamics; 2) a finite element method (FEM)-based structural dynamic model for the fluid-structure interaction (FSI) simulation of flexible wing aerodynamics and structural dynamics; 3) a free-flying rigid body dynamic (RBD) model to the Newtonian-Euler equations of 6DoF motion; 4) a specific coupling model for the analyses of nonlinear 6DoF flight dynamics and passive dynamic stability of insect flapping flights, and 5) an optimal approach on wing morphology and kinematics based on the methods of Complex and Genetic Algorithm. A series of systematic simulation-based studies of flapping-wing aerodynamics with rigid and flexible wings, free-flight dynamics and passive dynamic stability in insect and bird flights have therefore indicated that this integrative biomechanical model is capable to not only study insect and/or bird flapping flights in an integrated and systematic way and but also offer an effective tool for designing bio-inspired MAVs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,300,000	2,490,000	10,790,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
2011年度	2,800,000	840,000	3,640,000
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：バイオ流体力学、小型飛行体

1. 研究開始当初の背景

小型飛行体(MAV: Micro Air Vehicle)の研究開発は近年急速に発展を遂げているが、昆虫レベルまでのダウンサイジングの過程における理論体系や設計指針などが確立されていない。これまでの研究は殆ど生物飛行における非定常空気力学や翼柔軟構造等のある単一力学現象に限定しているものであり、昆虫羽ばたき飛行に関する構造・流体・動力学を連成させた統合力学シミュレーションと低レイノルズ数羽ばたき飛行の最適化現象への研究がまだ開始されていない。

2. 研究の目的

本研究では、統合力学シミュレーションと風洞実験を用いて昆虫羽ばたき飛行の最適化現象を解明し昆虫規範型飛翔ロボット設計指針の創出を目指す。1) 弾性膜翼を有する羽ばたき飛行の構造・流体・動力学を連成解析可能な統合力学モデルを構築し、翼形状と羽ばたき運動に対する最適化アルゴリズムを開発して昆虫の羽ばたき飛行に適用する。そのために実際昆虫の自由飛行を高速ビデオカメラで撮影・運動解析してリアリスティックな翼・胴体の幾何学モデル及び羽ばたき飛行運動学モデルを構築する。2) 羽ばたきロボットを用いた風洞模型実験や昆虫を用いたPIV可視化実験などにより力学モデリングや計算手法の妥当性を検証する。3) 低レイノルズ数羽ばたき飛行における翼形状と羽ばたき運動の最適化手法を確立する。

3. 研究の方法

本研究遂行にあたり、羽ばたき飛行の□構造解析、□動力学解析、□連成解析、□最適化という4つのテーマを設定し昆虫羽ばたき飛行の構造・流体・動力学を連成させた統合力学シミュレータの開発と昆虫型飛翔ロボットを目指した低レイノルズ数羽ばたき飛行の最適化現象の解明を最大目標とする。

テーマ1：羽ばたき飛行における弾性膜翼の

構造・材料力学モデリング

昆虫翼の翅脈や膜構造と翼の曲げ・捻り力学特性を考慮した3次元弾性膜翼有限要素法モデルを構築し、羽ばたき翼の振動特性と羽ばたき翼の能動的変形及び慣性力と空気力による受動的変形に関する構造・材料力学解析を行う。

テーマ2：羽ばたき飛行の運動計測・解析とダイナミクスモデリング

昆虫翼・胴体の多体系ダイナミクスを適用した昆虫羽ばたき飛行の運動学モデル(羽ばたき翼と胴体)と動力学モデルを構築し、胴体6自由度のダイナミクス解析を行う。さらに高速ビデオカメラを使用し自由飛行昆虫の羽ばたき運動と翼の弾性変形を同時に計測・解析し、本ダイナミクスシミュレータを検証・確立する。

テーマ3：羽ばたき飛行の構造・流体・動力学連成モデリング

テーマ1で開発した弾性膜翼構造・材料力学モデル、テーマ2で開発した動力学モデル及び既存の生物型羽ばたき飛行の流体力学モデルを統合させ、昆虫羽ばたき飛行の構造・流体・動力学連成解析シミュレータを開発する。さらに羽ばたきロボットを用いた風洞模型実験や実際昆虫を用いたPIV計測による流れ可視化実験等によりそれらの力学モデリングや計算手法の妥当性を検証する。これにより、1)弾性膜翼の受動的変形乃至流体力学性能を向上させるメカニズムと、2)羽ばたき飛行における非線形の動的安定性や操縦性(速応性)などを解明する。

テーマ4：羽ばたき飛行における翼形状と羽ばたき運動の最適化

静止飛行や前進飛行における最大揚力や最大推力などを目的関数とする、羽ばたき翼形状と羽ばたき翼運動の最適化アルゴリズム(Complex法とGenetic Algorithm法)を構築し低レイノルズ数羽ばたき翼の最適化解析を行う。またこれをもって昆虫を規範した超小型

飛行体の設計方針の創出を目指して、現在開発している5センチのスズメ蛾型羽ばたきロボットを利用し、これらの諸項目を確立する。

4. 研究成果

生物羽ばたき飛行の統合力学シミュレータの開発:

静止飛行・前進飛行・旋回飛行を再現できる、昆虫羽ばたき飛行の構造・流体・動力学連成解析シミュレータを開発した。このシミュレータの妥当性を検証するために、1)チョウ離陸飛行の運動計測・解析による検証、2)スズメガ翼模型風洞実験による流れ場・流体力計測と総合的検証、3)スズメ蛾ロボットを用いたPIVによる流れ場可視化など総合的検証を行い、低レイノルズ数羽ばたき飛行統合シミュレーションにおける有効性を確認した。さらに羽ばたき飛行における最大揚力・推力を目的関数とした羽ばたき翼形状と羽ばたき翼運動の最適化アルゴリズムを導入し低レイノルズ数羽ばたき翼の最適化手法を確立した。

構造・流体・動力学シミュレーション:

ガ、チョウ、ハエ及びハチドリを対象とした静止飛行・前進飛行・旋回飛行の大規模構造・流体・動力学シミュレーションを行ない、弾性翼・胴体の羽ばたき飛行における力発生メカニズム、そして非線形動的安定性や操縦性などの解明を行った。とくに羽ばたき飛行空力性能への弾性翼効果を初めて明らかにした研究成果が高い評価を受けた。

昆虫を規範した超小型飛行体の設計方針の創出:

千葉大劉浩研究室で開発している翼スパン5センチ程度の昆虫規範型羽ばたきロボットを利用し、生物規範型小型飛行体の弾性翼構造・運動の空気力学的設計指針及び羽ばたき安定性や運動制御の設計指針を確立するために、羽ばたき飛行体実弾性翼力学モデルを構築し力学シミュレーションと線形理論による安定性解析を行いその空気力学的設計指針を検証した。

羽ばたき機vsプロペラ機

羽ばたき機とプロペラ機が風擾乱に遭遇した際の空気力の変化を数値計算し、それらの性能を比較した。その結果は、プロペラ機に比べ羽ばたき機が風擾乱に対しロバストであることを確認した。

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 16 件)

- 1) H. Liu, X. Wang, T. Nakata and K. Yoshida, Aerodynamics and Flight Stability of a Prototype Flapping Micro Air Vehicle, *Proceedings of IEEE CME2012*, pp1-6, 2012
- 2) R. Noda, M. Maeda and H. Liu, Effect of Passive Body Deformation of Hawkmoth on Flight Stability, *Proceedings of IEEE IAS2012*, pp1-8,2012
- 3) T. Nakata and H. Liu, Aerodynamic performance of a hovering hawkmoth with flexible wings: a computational approach, *Proceedings of Royal Society B*, doi:10.1098/rspb.2011.1023 (2011).
- 4) T. Nakata and H. Liu, A fluid-structure interaction model of insect flight with flexible wings, *Journal of Computational Physics*, doi:10.1016/j.jcp.2011.11.005.
- 5) T. Nanaka, H. Liu Y. Tanaka, N. Nishihashi, X. Wang, and A. Sato, Flexible wings aerodynamics of a bio-inspired flapping micro air vehicle, *Bioinspiration & Biomimetics*, doi:10.1088/1748-3182/6/4/045002. 2011
- 6) Q. Xiao, K. Sun, H. Liu, and J. Hu, Computational study on near wake interaction between undulation body and a D-section cylinder, *Ocean Engineering*, doi:10.1016/j.oceaneng.2010.12.017, 2011.
- 7) H. Liu, T. Nakata, N. Gao, M. Maeda, H. Aono, and W. Shyy, Micro Air Vehicle-Motivated Computational Biomechanics in Bio-flights: Aerodynamics, Flight Dynamics and Maneuvering Stability, *Acta Mechanica Sinica*, Vol.26, pp.863-879,2010
- 8) N. Gao, H. Aono, H. Liu, Perturbation analysis of 6DoF flight dynamics and passive dynamic stability of hovering fruitfly *Drosophila melanogaster*, *Journal of Theoretical Biology*, Vol.270, pp.98-111,2010
- 9) N. Gao and H. Liu, A Numerical Analysis of Dynamic Flight Stability of Hawkmoth Hovering Passive dynamic stability of a hovering fruitfly: a comparison between linear and nonlinear methods, *Journal of Biomechanical Science & Engineering*, Vol.5, pp.591-602,2010
- 10) M. Maeda, N. Gao, N. Nishihashi and H. Liu, A Free-Flight Simulation of Insect Flapping Flight, *Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms*,Vol.1, pp.71-79, 2010
- 11) W. Shyy, H. Aono, S. K. Chimakurthi, P. Trizila, C.-K. Kang, C. E. S. Cesnik, and H. Liu, Recent Progress in Rigid and Flexible

- Flapping Wing Aerodynamics, *Progress in Aerospace*, Vol.46, pp.284-327, 2010
- 12) H. Liu and H. Aono, Size effects on insect hovering aerodynamics: an integrated computational study, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol.4, pp.1-13,2009
 - 13) Ulrike K Müller, Johan L van Leeuwen, Stephan van Duin, and Hao Liu, An Un-momentous Start to Life: Can Hydrodynamics Explain Why Fish Larvae Change Swimming Style?, *Journal of Biomechanical Science & Engineering*, Vol.4(1), pp.41-53,2009
 - 14) Yohei Katumata, Ulrike K Müller and Hao Liu, Computation of self-propelled swimming in larva fishes, *Journal of Biomechanical Science & Engineering*, Vol.4(1), pp.54-66,2009
 - 15) Na Gao, Hikaru Aono and Hao Liu, A Numerical Analysis of Dynamic Flight Stability of Hawkmoth Hovering, *Journal of Biomechanical Science & Engineering*, Vol.4(1), pp. 105-116,2009
 - 16) Y. Inada, H. Aono, H. Liu, T. Aoyama, Numerical Analysis of Sound Generation of Flapping Wings of Insect, *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, Vol.57, pp.437-446,2009
- [学会発表] (計 52 件)
- 1) H. Liu, T. Nakata, N. Gao, and M. Maeda, Micro air vehicle-motivated computational biomechanics in bio-flights and insect-inspired biomimetics (*Keynote*), Workshop on bio-inspired robotics, Nantes, France, 2011.4.7
 - 2) H. Liu, Computational biomechanics in bio-flights and bio-inspired Micro Air Vehicles (*invited*), Workshop on Biomimetics Aero-/Hydro- dynamic Applications, Glasgow, UK, 2011.6.15
 - 3) H. Liu, and T. Nakata, Coupling the flexible wing aerodynamics and structural dynamics in insect flapping flight (*invited*), Coupled Problems 2011 IV International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, Kos Island, Greece, 2011.6.21
 - 4) H. Liu, Flexible Wing Aerodynamics in Insect Flight and Bio-inspired Micro Air Vehicles (*invited*), Nonlinear Mechanics Workshop in Beijing 2011, Beijing, China, 2011.12.18
 - 5) 劉浩, 生物規範飛行システム (招待講演), 日本化学会第 92 春季年会, 慶應義塾大学、横浜市, 2012.3.26
 - 6) T. Nakata and H. Liu, Are insect wings designed to be aerodynamically optimized?, SEB Annual Meeting, Glasgow, UK, June 31, 2011
 - 7) M. Maeda, T. Nakata, S. Ozawa and H. Liu, Estimating the Impact of the Ground in Butterfly Takeoff, SEB Annual Meeting, Glasgow, UK, June 31, 2011
 - 8) M. Maeda, T. Nakata and H. Liu, An Investigation on the Issues in Modelling of Free Flight in Animal Locomotion, AJK 2011, Hamamatsu, Japan, 2011.7.28
 - 9) G. Li, U. Müller, J. van Leeuwen, and H. Liu, Swimming hydrodynamics and maneuverability in C-start of zebrafish larvae: an integrated computational study, AJK 2011, Hamamatsu, Japan, 2011.7.28
 - 10) X. Wang, T. Nakata, N. Nishihashi and H. Liu, Aerodynamics of a bio-inspired flexible flapping wing micro air vehicle, ICIUS 2011, Chiba, Japan, 2011.11.1
 - 11) K. Yoshida, M. Tabata, T. Nakata, X. Wang, H. Suzuki, T. Hashimoto and H. Liu, Thrust Performance of Flapping-Wing Micro Air Vehicles, ICIUS 2011, Chiba, Japan, 2011.11.1
 - 12) H. Liu, Biomechanics in Bio-flights and Bio-inspired Flying Robots, The 1st Joint Scientific Symposium of Shanghai Jiao Tong University and Chiba University (JSSSC2011), Chiba, Japan, 2011.11.30
 - 13) 王曉嵐, 中田敏是, 西橋直志, 劉浩, 超小型羽ばたき飛行体の空力性能評価, 日本流体力学会年会 2011, 首都大学東京, 2011.9.8
 - 14) 野田龍介, 中田敏是, 前田将輝, 劉浩, 羽ばたき飛行における胴体弾性力学の流体構造連成解析, 日本機械年会バイオエンジニアリング講演会, 大阪大学, 2012.1.8
 - 15) Sunada, S. and Tsuji, K., Advantages of a flapping wing over a propeller, 50th AIAA Aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition, Nashville, USA, 2012.1.10
 - 16) 早川真央, 砂田茂, 横風に対する羽ばたき機の応答について, 日本航空宇宙学会第 49 回飛行機シンポジウム, 金沢歌劇座, 2011.10.26
 - 17) H. Liu, Computational biomechanics in bio-flight: aerodynamics, flight dynamics and maneuvering stability (*invited*), *Animal Flight Mechanics & Muscle Performance: a symposium in honour of Prof. Charlie Ellington FRS*, The University of Cambridge, UK, Sept. 20-21, 2010
 - 18) H. Liu, Y. Katumata, U. K. Müller and J. L. van Leeuwen, Trade-off between thrust production and propulsive efficiency in a burst of larval zebrafish (*invited*), *Proc. 6th WCB 2010*, Singapore, Aug. 2-8, 2010

- 19) H. Liu, Y. Tanaka, N. Gao, and M. Maeda, Nonlinear behavior in flying biomechanics: flexible wing aerodynamics, flight dynamics and dynamic stability (*invited*), *Proc. 6th WCB 2010*, Singapore, Aug. 2-8, 2010
- 20) H.Liu, Micro Air Vehicle-Motivated Biomechanics and Biomimetics in Insect Flight (*invited seminar*), *CNRS and Aix-Marseille University*, France, Marseille, France, April 26, 2010
- 21) H. Liu, K. Yanaoka and M. Maeda, How Can A Butterfly Take off: Integrated Modelling of Unsteady Aerodynamics and Flight Dynamics, SEB Annual Meeting, Prague, Czech, June 31, 2010
- 22) M. Maeda, K. Yanaoka and H. Liu, Free-Flight Simulation of A Butterfly Take off, *Proc. 6th WCB 2010*, Singapore, Aug. 2-8, 2010
- 23) T. Nakata and H.Liu, Effect of Three-Dimensional and Unsteady Deformation of Flapping Wings on Aerodynamic Performance of Insect Flight, *Proc. 6th WCB 2010*, Singapore, Aug. 2-8, 2010
- 24) N. Gao and H. Liu, A numerical study of passive stability and active control in fruitfly hovering, *Proc. 6th WCB 2010*, Singapore, Aug. 2-8, 2010
- 25) T. Nakata and H. Liu, Size effect on wing deformation and aerodynamics in insect hovering flight, SICB2011, Seattle, USA, Jan. 3-7, 2011
- 26) N. Gao and H. Liu, Nonlinear stability of hovering fruitfly with in numerical study, ISAC2010, Kobe, Japan, Sept. 19-23, 2010
- 27) 西橋直志、坪田健一、劉浩, 生物羽ばたき翼の形状最適化の研究, 日本機械学会 2010 年度 年次大会, 名古屋工業大学, 2010.9.5-8
- 28) 劉浩, 生物飛行に学ぶバイオミメティクス研究の動向 (招待講演), 「次世代バイオミメティック材料の研究動向と異分野連携」に関するジョイントシンポジウム, 国立科学博物館, 東京, 2010.6.8
- 29) 前田将輝, 柳岡 和弘, 小澤 周平, 中田敏是、劉浩, 蝶の離陸の自由飛翔シミュレーション, 日本流体力学会 年会 2010, 札幌, 2010.9.9
- 30) 高娜, 劉浩, 昆虫羽ばたき飛行の動的安定性とアクティブ制御について, 飛行機シンポジウム, 山梨大学, 2010.11.21-22
- 31) H. Liu, Engineering insect flight: from biomechanics and bio-inspired micro air vehicles, Workshop on Bio-inspired Mechanical Engineering, Chiba university, 2010.10.4
- 32) T. Nakata and H. Liu, Size effect on wing deformation and aerodynamics in insect hovering flight, SICB2011, Salt Lake city, USA, 2011.1.4-7
- 33) M.Maeda,S.Ozawa,T.Nakata,K.Yanaoka and H.Liu, Effect of Wing Deformation on Butterfly Takeoff, SICB2011, Salt Lake city, USA, 2011.1.4-7
- 34) 西橋直志、坪田健一、劉浩, 昆虫羽ばたき翼の形状最適化の解析と検討, 日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 熊本大学, 2011.1.6-8
- 35) H. Liu, Biomechanics and Biomimetics of Insect Flight (*invited*), International Symposium on Engineering Neo-Biomimetic 2009, Tokyo, Japan, Oct. 1-2, 2009
- 36) H.Liu, Flying Biomechanics and Insect-inspired Biomimetics (*invited*), KU-ICCAS_1st Joint-Symposium 2009, Tokyo, Japan, Dec. 9-10, 2009
- 37) H. Liu, Computational biomechanics: from bioflights, micro air vehicles to the cardiovascular system (*invited*), National University of Singapore 2009, Singapore, May 4, 2009
- 38) H.Liu, Integrated Modeling of Bio-flights for MAV Applications: Aerodynamics, Maneuverability and Optimization (*invited*), University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, June 25, 2009
- 39) H.Liu, Computational biomechanics: Swimming, flying, biorobotics and bioengineering (*invited*), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Nov. 5, 2009
- 40) 劉浩, Bio-flights and Micro Air Vehicle-Motivated Aerodynamics (招聘講演), マイクロ流体技術研究所公開研究発表会, 日本文理大学(大分), 2009.10.24
- 41) T. Nakata and H. Liu, Biofluidynamics of Flapping Flexible Wings in Insect Flight: A Fluid-Structure Interaction (FSI) Study, FEF09, Tokyo, Japan, 2009.4.1-2
- 42) T. Nakata and H. Liu, Aerodynamic performance of Flapping Flexible Wing in Insect Flight (Best Presentation Award, 2nd place), SEB09, Glasgow, Scotland, UK, 2009.6.28-7.1
- 43) N. Gao and H. Liu, Nonlinear passive dynamic stability of hawkmoth hovering: a computational study by coupling equations of 6DOF motion with Navier-Stokes equations, SEB09, Glasgow, Scotland, UK, 2009.6.28-7.1
- 44) T. Nakata and H. Liu, Effect of Structural Flexibility on Aerodynamic Performance of Flapping wing in Insect Flight (Best student award, 1st place), ISABMEC09, Shanghai, China, 2009.8.28-9.2

- 45) N. Gao and H. Liu, NONLINEAR PASSIVE DYNAMIC STABILITY OF FRUITFLY, *DROSOPHILA MELANOGASTER* (Best student award, 2nd place), ISABMEC09, Shanghai, China, 2009.8.28-9.2
- 46) M. Maeda and H. Liu, Insect Free Flapping Flight Simulation *via* Fluid-Dynamics Coupling, ISABMEC09, Shanghai, China, 2009.8.28-9.2
- 47) Y. Katumata, U. Muller and H. Liu, Hydrodynamics and maneuverability of free swimming in Zebra fishes, ISABMEC09, Shanghai, China, 2009.8.28-9.2
- 48) Y. Inada, H. Aono, H. Liu, and T. Aoyama, Numerical Analysis of Sound Generation and Transmission from Flapping Wings, ISABMEC09, Shanghai, China, 2009.8.28-9.2
- 49) T. Nakata and H. Liu, Aerodynamic Performance Enhancement by Insect Wing Flexibility, SICB10, Seattle, USA, 2010.1.4-7
- 50) 田中義章、佐藤彰訓、坪田健一、劉浩、羽ばたき MAV のための弾性翼変形と空力性能についての研究開発, 日本機械学会 2009 年度 年次大会, 岩手大学, 2009.9.13-16
- 51) 柳岡和宏、坪田健一、劉浩、チョウ自由飛翔の流体・飛行ダイナミクスシミュレーション, 日本機械学会バイオエンジニアリング講演会, 岡山理科大学, 2010.1.8-10
- 52) 辻和樹、砂田茂、得竹浩、青野光、劉浩、稻田喜信、河内啓二、回転翼と羽ばたき翼, 日本航空宇宙学会第 47 回飛行機シンポジウム, 長良川国際会議場, 2009.11.4

[図書] (計 7 件)

- 1) S. Sunada, H. Liu, H. Tokutake and D. Kubo, Handbook of Unmanned Aerial Vehicles, Springer (Total 5pages), 2012
- 2) 劉浩, 次世代バイオミメティクス研究の最前線 - 生物の飛行に学ぶ -, シーエムシー出版, (総頁 10), 2011
- 3) 劉浩, ネイチャーテクノロジー - ハチドリロボット -, 学研パブリッシング株式会社, (総頁 4), 2011
- 4) H. Liu, Micro Air Vehicles (MAVs), *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, Wiley, (Total 200pages), 2010
- 5) 劉浩, 生物流体力学, 朝倉書店, (総頁 30), 2011
- 6) 劉浩, ネオバイオミメティック・エンジニアリング, シーエムシー, (総頁 16), 2010
- 7) H. Liu and W. Shyy, Micro Air Vehicles (MAVs), *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, Wiley, (Total 153 pages), 2009

6. 研究組織

(1) 研究代表者

劉浩 (RYU HIROSHI)
千葉大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40303698

(2) 研究分担者

砂田 茂 (SUNADA SHIGERU)
大阪府立大学・工学部・准教授
研究者番号：70343415
得竹 浩 (TOKUTAKE HIROSHI)
金沢大学・工学部・准教授
研究者番号：89295716

(3) 連携研究者

()
研究者番号：