

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 5 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360105

研究課題名（和文） 渦列環境を創成する昆虫の羽ばたき飛行における適応的運動能力の発現メカニズム

研究課題名（英文） Mechanism of Adaptive Motion Capability in Insect Flapping Flight Generating Vortices

研究代表者

泉田 啓（SENDA KEI）

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60206662

研究成果の概要（和文）：蝶の羽ばたき飛行を神経（制御）系—身体—環境（流場）の動的相互作用により成立する適応的運動能力（運動知能）と捉え、発現メカニズムの解明を目的とする。生体の蝶を用いた実験観測という生物学的アプローチにより、身体機構と可能な動作を調べる。3種類の数値モデルを用いた工学的アプローチにより、渦列流場と翅の構造柔軟性を用いて不安定性を低減し、能動的制御により飛行を安定化できること、渦との相互作用によりマヌーバが可能なることを示すとともに、流場を精緻に計算して微細で複雑な渦構造を調べている。

研究成果の概要（英文）：A flapping flight of butterfly is an example of the motion intelligence, which emerges the flight by interactions of the nervous system, body, and environment. The objective of this study is to unveil the mechanism of the motion intelligence. This study approaches it by the biological analysis through experimental observations of living butterflies and by the synthetic approach with numerical models. The models clarify effects of vortices and flexibility of wings, maneuverability, detailed structure of flow, etc.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
2011年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2012年度	2,200,000	660,000	2,860,000
総計	9,200,000	2,760,000	11,960,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 知能機械学・機械システム

キーワード：昆虫，羽ばたき飛行，渦列流場，環境，運動知能

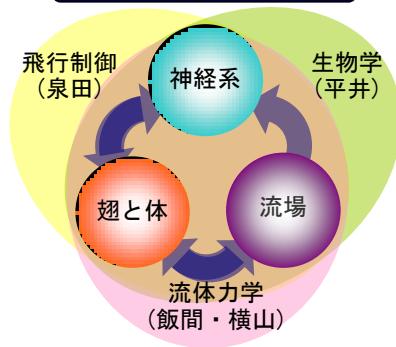
1. 研究開始当初の背景

蝶は環境に渦列流場を創成しつつ羽ばたき飛行する。蝶などの昆虫の飛行では、レイノルズ数は1000程度である。同様のレイノルズ数で一様流中に置かれた円柱周りにカルマン渦列が生じ、周期的に渦を生成する渦列流場パターンへと引き込まれる。このパターンは比較的安定で多少の変動に対してもロバストに渦列を生じ続ける。蝶でも羽ばたき動作により渦列パターンを生成するため、

飛行に適した環境を創成するという環境創成による運動知能という想定をした。

蝶が飛行しているとき、神経系は概ね周期的な制御指令を出し、蝶の翅は振動的に運動し、流場に周期的な渦列が創られる。各要素は個別の振動子のように振舞うが、力学的に情報的に強い相互作用(下図)を持っている。そこで、このような神経系—身体—環境の要素ダイナミクスと力学的相互作用について考える必要性が生じた。

環境創成による運動知能



蝶の羽ばたき飛行では、均質な流場を不均質な渦列流場に変化させることで翅の状態に対する流体力の非線形性が引き出される。この環境と身体との強い非線形性を用いて制御を実現している可能性がある。このように相互作用の力学的非線形性を利用して適応的運動能力（運動知能）を発現させると想定したが、そこにあると期待される運動知能の発現メカニズムは全く解明されていなかった。そのため、蝶の飛行という問題は運動知能の発現メカニズム、特に環境の役割を考える上で重要な意味を持つと考えられた。

2. 研究の目的

蝶の羽ばたき飛行は不安定そうだが安定化されており、ヒラヒラと舞うようにマヌーバして捕食から逃れる。このような飛行は、神経（制御）系—身体—環境（流場）の動的相互作用により成立する運動形態であり、適応的運動能力の発現である。特に、羽ばたきにより創成される渦列流場という環境を用いて飛行の安定化とマヌーバという適応的運動を実現するという観点から、蝶が適応的運動能力（運動知能）を発現するメカニズムを解明することを目的とする。具体的には

- (1) 生体の蝶の感覚器（センサ）入力と身体の応答動作との関係（制御）
- (2) 蝶の安定な飛行とマヌーバを実現する制御機構に環境（流れ場）がどう影響するかの2点について、生体の蝶の実験観測による生物学的な解析と様々なモデルの構成をおとした工学的な実現を併用するシステム論的アプローチにより調査する。流体力学、昆虫学、システム工学の専門家が一致協力し、課題遂行にあたる(上図)。これにより環境創成による運動知能という新領域を開拓しつつ、運動知能の発現メカニズムの解明に迫る。

3. 研究の方法

(1) 生物学的アプローチ

生体の蝶を用いた実験観測という生物学的アプローチで次の項目を解析する。

- ① 生体の蝶の感覚器（センサ）と可能な動作（身体機構）が如何なるものであるか

- ② センサ信号と応答動作の関係（制御）

具体的には、蝶を固定する場合、強制的に固定する姿勢などを変化させる場合、自由飛行させる場合について、蝶の羽ばたき運動、空気力、流場の時系列データを得て、解析する。

(2) 工学的アプローチ

数値モデルを用いたシミュレーションに基づく工学的アプローチにより以下を調べる。

- ③ 創成された流場を利用して安定な飛行を可能にする制御を実現できるか
- ④ 創成された流場を利用して高いマヌーバビリティ（状態遷移能力）を発現できるか

まず、創成される渦列流場が、羽ばたき飛行の安定性と挙動にどのような効果をもつか調べる。創成される渦列流場にはある種の安定化効果が期待できるが、流場のみでは安定化されないことが知られているので、飛行安定化を図る能動的な制御を探る。項目④のマヌーバビリティ発現に関し、モデルのパラメータ変化に対する大域分岐構造や、制御を含む安定飛行状態のベイシン構造を調べる等、数理的手法を活用し遷移ダイナミクスを明らかにする。この際、実験結果の本質的な部分を再現する2次元モデルで適応的運動能力（運動知能）の発現メカニズムを詳細に検討し、現実の蝶に近い3次元モデルで運動知能の構成方法を具体的に検討する。結果的に、創成された流場を利用して、上記項目③と④を調べる。

(3) システム論的アプローチ

生物学的な解析と工学的な実現を併用するシステム論的アプローチをもって

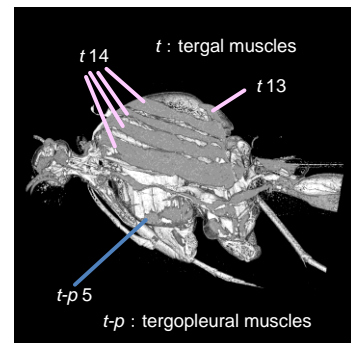
- ⑤ 項目②で解析し③で実現された制御が生体の蝶の制御系として実在し得るか
- を調べ、環境創成による運動知能に迫る。

4. 研究成果

(1) 生物学的アプローチ

① 生体の蝶の解剖学的調査

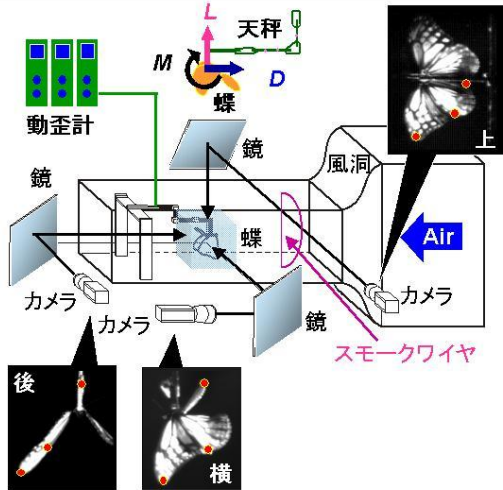
研究に使うアサギマダラ蝶について調べた。飛行制御に使われる感覚器を文献調査したが十分に知られていない。視覚による対地速度計測は可能であるが精度は不明であり、飛行制御に必要な3軸角速度を知る感覚器も定かではない。また、身体機構(可能な能動的動作)について、文献調査では定性的な解剖学的知見のみで、定量的な知見は得られなかった。そこでX線CT画像(右図)を撮影し、筋肉と動作方



向との対応関係をおおよそ理解した。ただし、明確な理解は今後の課題である。

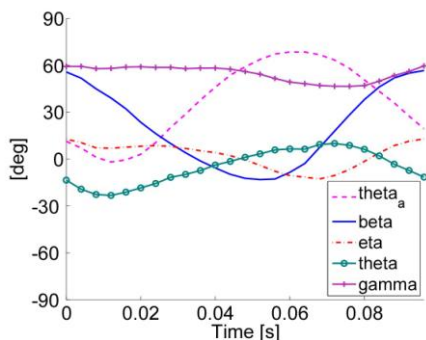
② 運動・空気力・流れの観測装置

下図のように、カメラによる運動観測、蝶に作用する空気力・トルク計測が可能な実験システムを構築した。

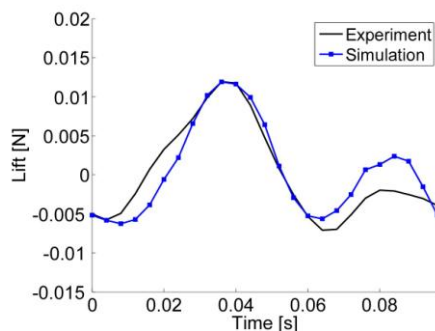


③ 運動・空気力・流れの観測実験

様々な主流速度、迎角で蝶の動作を観測した。(下図は一例)



空気力、可視化映像などから、数値シミュレーションの妥当性を検証した。下図では、3次元渦法(後述)のシミュレーションの揚力が実験結果と概ね一致している。異なった動作についても同様に観測した。さらに、自



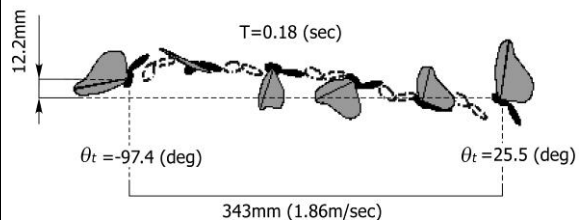
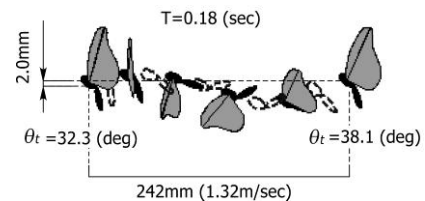
由飛翔する蝶の運動を高速カメラで撮影した。定常飛翔や飛翔状態を変える様子を観測し、羽ばたき動作が胸部の位置・姿勢運動

に及ぼす影響について考察した。

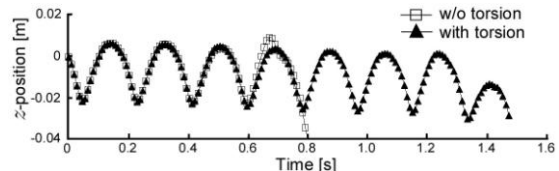
(2) 工学的アプローチ

① 飛翔安定化の解析と実現

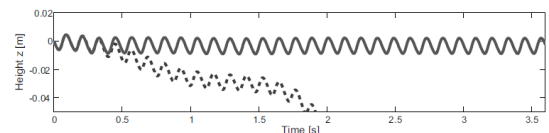
数値モデルを用い、蝶が自由飛翔する場合の安定性に関して次の手順で解析した。3次元渦法(パネル法)の計算コードを開発し、以下の計算を行った。先述のように実験観測の条件で数値シミュレーションを行い、モデルの妥当性を検証した。次に、周期的な羽ばたき飛翔(平衡点)になるよう羽ばたき動作を探索し、下図のような軌道を得た。図上側は創成される渦列流場が蝶に及ぼす影響を考慮する場合、下側は影響を考慮しない場合である。両方に同じ初期摂動を加えている。この結果から渦列流場が蝶の飛翔の不安定性を低減することがわかる。また、翅の構造



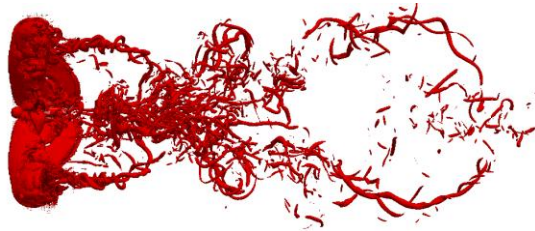
柔軟性により飛翔安定性がどのように変化するか解析した。翅のねじれをモデル化すると、下図のように不安定化するまでの期間が伸びた。すなわち、構造柔軟性は飛翔の不安定性を低減化することがわかる。さらに、飛



翔を安定化させる制御系を設計した。下図のように、制御せず同じ羽ばたき動作を繰り返すだけでは墜落する(点線)が、制御を行うことにより定常的な飛翔(実線)が実現された。

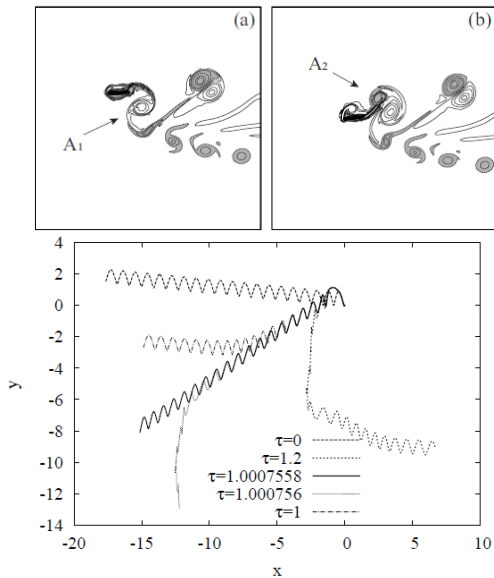


これらは、渦列流場と翅の構造柔軟性が低位、能動的制御が上位の制御系として動作する階層的制御(多重フィードバック)の存在を示唆している。さて、埋め込み境界法によるモデルを構築し、流場を精緻に計算した。下図から、流場に微細で複雑な渦構造があること、上述のパネル法モデルが大域的渦構造を概ね捉えていることがわかった。



② マヌーバビリティの発現

下図に、渦との相互作用で飛行する2次元モデルの数値計算結果を示す(上側)。このモデルは羽ばたき方を変えることで渦構造が変化し、数回の羽ばたきの後、下側のように左、左下、右方向などへの方向転換が可能である。3次元蝶モデルでも適切な制御系で同様の結果を得た。



(3) システム論的アプローチ

「(1) 生物学的アプローチ」に基づき蝶が可能な能動的動作の生物学的データを得た。

「(2) 工学的アプローチ」で実現した制御動作には生物学的データと符合する部分があり、ある程度は生体の制御系を再現できたと考えられる。しかし、符合しない部分も多く、生体の制御系の再現は今後の課題である。

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 19 件)

- (1) Aerodynamic forces and vortical structures in flapping butterfly's forward flight, N. Yokoyama, K. Senda, M. Iima, N. Hirai, A Physics of Fluids, 有, 25 (2013) 21902, doi:10.1063/1.4790882
- (2) Controlling Flow Structures by Wing Motion in a Flapping-flight Model, M. Iima, N. Yokoyama, N. Hirai, K. Senda, Advances in Science and Technology, 有, 84 (2013)

59-65, doi: 10.4028/www.scientific.net/AST.84.59

- (3) Effects of Structural Flexibility of Wings in Flapping Flight of Butterfly, K. Senda, T. Obara, M. Kitamura, N. Yokoyama, N. Hirai, M. Iima, Bioinspiration & Biomimetics, 有, 7-2, 025002 (2012) 1-15, doi:10.1088/1748-3182/7/2/025002
- (4) Modeling and Emergence of Flapping Flight of Butterfly Based on Experimental Measurements, K. Senda, T. Obara, M. Kitamura, T. Nishikata, N. Hirai, M. Iima, N. Yokoyama, Robotics and Autonomous Systems, 有, 60-5 (2012) 670-678, doi:10.1016/j.robot.2011.12.007
- (5) Bifurcation Structures in Flapping Flight Problems, M. Iima, Proceedings of Ninth International Conference on Flow Dynamics, 無, (2012) 220-221
- (6) Direct and trans-generational responses to food deprivation during development in the Glanville fritillary butterfly, M. Saastamoinen, N. Hirai, S. van Nouhuys, Oecologia, 有, 171 (2012) 93-104, doi: 10.1007/s00442-012-2412-y
- (7) モンシロチョウの夏季没姿は成虫の移動によるものか, 石井 実, 平井規央, 山埜めぐみ, 昆虫と自然, 無, 47-14 (2012) 25-28
- (8) アオタテハモドキの温度日長反応と分布拡大, 平井規央, 谷川哲朗, 石井 実, 昆虫と自然, 無, 47-6 (2012) 20-23
- (9) Modeling for Structural Flexibility of Wings in Flapping Butterfly, K. Senda, N. Yokoyama, K. Yokoi, M. Kitamura, IASTED International Conference on Modelling, Simulation, and Identification, 有, 755-046 (2011) 1-8
- (10) On Control of Flapping Flight of Butterfly with Experimental Observation, K. Senda, N. Yokoyama, M. Matsusaka, N. Hirai, M. Iima, International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines, 有, P037 (2011) 53-54
- (11) Indirect Control Effects of Structural Flexibility of Wings in Flapping Flights of Butterfly, K. Senda, N. Yokoyama, T. Obara, K. Yokoi, International Workshop on Bio-inspired Robots, 有, P73 (2011) 1-8
- (12) Time-periodic traveling solutions of localized convection cells in binary fluid mixture, T. Watanabe, K. Toyabe, M. Iima, Y. Nishiura, Theoretical and Applied Mechanics Japan, 有, 59 (2011) 211-219
- (13) Development, seasonal polyphenism and cold hardiness of the blue pansy, Junonia orithya orithya (Lepidoptera, Nymphalidae),

- N. Hirai, T. Tanikawa, M. Ishii, *Lepidoptera Science*, 有, 62 (2011) 57-63
- (14) Two Strains of Wolbachia and sex ratio distortion in a population of an endangered butterfly, *Zizina emelina* (Lepidoptera: Lycaenidae), in northern Osaka Prefecture, central Japan, Y. Sakamoto, N. Hirai, T. Tanikawa, M. Yago, M. Ishii, *Annals of the Entomological Society of America*, 有, 104 (2011) 483-487, doi: 10.1603/AN09168
- (15) Effects of photoperiod and temperature on development and diapause in a noctuid moth, *Asota ficus* (Fabricius) (Lepidoptera: Noctuidae), of the Osaka population, N. Hirai, Y. Sakamoto, M. Ishii, *Lepidoptera Science*, 有, 62 (2011) 166-174
- (16) Analysis of Flapping Flight of Butterfly based on Experiments and Numerical Simulations, K. Senda, T. Obara, N. Hirai, M. Iima, N. Yokoyama, *World Automation Congress*, 有, ISAC-286 (2010) 1-6
- (17) Effects of Structural Flexibility of Wings in Flapping Flight of Butterfly, K. Senda, N. Yokoyama, T. Obara, K. Yokoi, *World Automation Congress*, 有, ISAC-555 (2010) 1-6
- (18) 海を越えて渡りをする蝶, 平井規央, 高翔, 無, 54 (2010) 26-29
- (19) First recorded migration of the butterfly, *Parantica sita* (Lepidoptera: Danainae), from Japan to South Korea, N. Hirai (他 4 名, 5 番目), *Trans. lepid. Soc. Japan*, 有, 61 (2010) 120-122
- [学会発表] (計 38 件)
- (1) 2 次元はばたきモデルにおける不安定飛行状態を用いた制御, 飯間 信, 横山直人, 平井規央, 泉田 啓, 日本物理学会第 68 会年次大会 (2013/3/27) 東広島
- (2) 生物の飛翔・遊泳ダイナミクスの数理構造に基づく解析, 飯間 信, 日本機械学会 第 25 回バイオエンジニアリング講演会, 招待講演 (2013/1/9) つくば
- (3) A flight control through unstable flapping flight, M. Iima, N. Yokoyama, N. Hirai, K. Senda, 65th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (APS meeting) (2012/11/18) San Diego, USA
- (4) 前進飛行する蝶のつくる流れとその力, 横山直人, 泉田 啓, 飯間 信, 平井規央, 日本流体力学会年会 (2012/9/17) 高知
- (5) 異なる寄主植物を利用するシルビアシジミ 2 個体群間の幼虫の発育と雌成虫の産卵選好性の比較, 坂本佳子, 平井規央, 石井実, 第 72 回日本昆虫学会大会 (2012/9/17) 東京
- (6) マダラヤドリバエの産卵行動における寄主と植物の影響, 土田大希, 平井規央, 石井実, 第 72 回日本昆虫学会大会 (2012/9/17) 東京
- (7) ヒメシルビアシジミの生活史と温度・日長反応, 平井規央, 矢後勝也, 坂本佳子, 石井実, 第 72 回日本昆虫学会大会 (2012/9/16) 東京
- (8) Brood size and sex ratio regulation in the pupal ectoparasitoid, *Pteromalus apum* parasitizing the Glanville fritillary butterfly, *Melitaea cinxia*, N. Hirai, S. van Nouhuys, 24th International Congress of Entomology (2012/8/21) Daegu, Korea
- (9) Effects of leaf shape and host larva on oviposition preference of a tachinid fly, *Sturmia bella*, between two butterfly host plants, T. Tsuchida, N. Hirai, M. Ishii, 24th International Congress of Entomology (2012/8/21) Daegu, Korea
- (10) Difference in larval development and female oviposition preference in host plants between two populations utilizing different plants as larval hosts in an endangered lycaenid butterfly, *Zizina emelina*, T. Tsuchida, N. Hirai, M. Ishii, 24th International Congress of Entomology (2012/8/21) Daegu, Korea
- (11) Aerodynamics of chestnut tiger butterfly in forward flight, N. Yokoyama, K. Senda, M. Iima, N. Hirai, ICTAM 2012 (2012/8/20) Daegu, Beijing, China
- (12) Controlling Flow Structures by Wing Motion in a Flapping-flight Model, M. Iima, CIMTEC 2012 - 4th International Conference on Smart Materials, Structures and Systems, 招待講演 (2012/6/12) Montecatini Terme, Italy
- (13) グランヴィルヒョウモンモドキの蛹に寄生する多寄生蜂 *Pteromalus apum* の産卵行動と性比調節, 平井規央, Saskya van Nouhuys, 日本応用動物昆虫学会 (2012/3/29) 奈良
- (14) Comparison of male mating behavior between two lycaenid butterflies, *Zizina emelina* and *Pseudozizeeria maha*, Y. Sakamoto, N. Hirai, M. Ishii, 5th EAFES International Congress (2012/3/18) 大津
- (15) Oviposition preference of a generalist tachinid fly, *Sturmia bella*, between two butterfly host plants, T. Tsuchida, N. Hirai, M. Ishii, 5th EAFES International Congress (2012/3/18) 大津
- (16) 中レイノルズ数領域における振動物体間同期の数値解析, 飯間 信, 中筋 真生, 第 61 回理論応用力学講演会 (2012/3/9) 東京
- (17) 昆虫飛翔モデルの解析, 飯間 信, 数理

- 情報科学セミナー，招待講演 (2011/12/21) 広島
- (18) Aerodynamics of chestnut tiger in forward flight, N. Yokoyama, K. Senda, NIMS hot topic workshop on fluid dynamics, 招待講演 (2011/12/14) Daejeong, Korea
- (19) A Control Using Unstable Flight in a Flapping Model, M. Iima, Vortex Dynamics, Biofluids and Related Fields, 招待講演 (2011/12/12) Daejeong, Korea
- (20) 地上と屋上に設置した寄主植物上のアゲハチョウ類の発育の比較, 平井規央, 石井実, 日本環境動物昆虫学会 (2011/11/13) 宮崎
- (21) Unstable flapping state and flapping control in a flight model, M. Iima, CCS Symposium Autumn, 招待講演 (2011/11/1) 名古屋
- (22) シルビアシジミの寄主植物選好性と共生細菌の感染状況および配偶行動, 坂本佳子, 平井規央, 石井実, 日本昆虫学会 (2011/9/18) 松本
- (23) 日本におけるクロマダラソテツシジミの分布拡大, 平井規央, 日本昆虫学会 (2011/9/18) 松本
- (24) シルビアシジミとヤマトシジミの雄の配偶行動の比較, 坂本佳子, 平井規央, 石井実, 日本昆虫学会 (2011/9/18) 松本
- (25) Functions generated by the structural change and the associated flow, M. Iima, 第49回日本生物物理学会大会, 招待講演 (2011/9/16) 姫路
- (26) 飛翔モデルにおけるはばたき運動制御と不安定飛翔の役割, 飯間信, 横山直人, 平井規央, 泉田啓, 日本流体力学会年会 (2011/9/7) 東京
- (27) はばたき飛翔における動的渦構造, 飯間信, 広島大学数学教室談話会, 招待講演 (2011/7/5) 広島
- (28) グランヴィルヒョウモンモドキの蛹に寄生する多寄生蜂 *Pteromalus apum* の寄生個体数と性比, 平井規央, Saskya van Nouhuys, 日本応用動物昆虫学会 (2011/3/29) 福岡
- (29) Numerical Simulation and mathematical analysis of flapping flight problem, M. Iima, Int'l Symp. on Computational Science, 招待講演 (2011/2/15) Kanazawa
- (30) 蝶の羽ばたき飛翔に関する研究, 泉田啓, 計測自動制御学会ニューラルネットワークフォーラム, 招待講演 (2011/1/22) 岡山
- (31) アサギマダラ飛翔の2次元モデルにおける不安定飛行状態の役割, 飯間信, 平井規央, 泉田啓, 2010年応用数学合同研究集会 (2010/12/16) 瀬田
- (32) 万博公園における植生管理と昆虫相の関係, 平井規央, 藤澤貴弘, 鳥居美宏, 川崎典晃, 山田竜平, 山田倫章, 千原裕, 日

- 本環境動物昆虫学会 (2010/11/23) 滋賀
- (33) 大阪府南部におけるコガタブチサンショウウオの生息環境と遺伝的多様性, 秋田耕佑, 平井規央, 石井実, 日本環境動物昆虫学会 (2010/11/23) 滋賀
- (34) 大阪府内におけるメダカの分布と遺伝的多様性, 鳥居美宏, 平井規央, 石井実, 日本環境動物昆虫学会 (2010/11/23) 滋賀
- (35) 守口市の学校プールの水生昆虫群集, 平賀耕介, 秋田耕佑, 鳥居美宏, 平井規央, 石井実, 日本環境動物昆虫学会 (2010/11/23) 滋賀
- (36) はばたき飛翔と遊泳の数理解析, 飯間信, 日本機械学会第88期流体力学部門講演会, 招待講演 (2010/10/30) 米沢
- (37) 3次元空間における空中停止飛行の理論解析, 飯間信, 日本流体力学会年会 (2010/9/9) 札幌
- (38) 二成分混合流体対流に現れる様々な流れとその性質, 渡辺毅, 鳥谷部和孝, 飯間信, 西浦廉政, 第59回理論応用力学講演会 (2010/6/8) 東京

〔図書〕 (計3件)

- (1) 数理解析研究所講究録「RIMS 共同研究『生物流体および関連する問題の研究』」, 飯間信(編), 数理解析研究所 (2012) 総ページ数 132
- (2) 「イチジクヒトリモドキの分布拡大と休眠性」, 平井規央, 地球温暖化と南方性害虫(積木久明編), 北隆館 (2011) 総ページ数 236
- (3) 「イチジクヒトリモドキ」「クロマダラソテツシジミ」, 石井実, 平井規央, 昆虫の低温耐性(積木久明, 田中一裕, 後藤三千代編), 岡山大学出版会 (2010) 総ページ数 343

6. 研究組織

(1) 研究代表者

泉田 啓 (SENDA KEI)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60206662

(2) 研究分担者

飯間 信 (IIMA MAKOTO)
広島大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：90312412
平井規央 (HIRAI NORIO)
大阪府立大学・大学院生命環境科学研究科・助教
研究者番号：70305655
横山直人 (YOKOYAMA NAOTO)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：80512730

(3) 連携研究者 なし