

Ⅱ．生命・生体分野の研究開発終了報告書

1．研究開発課題名 生物の最適形状・最適行動

1.1 代表研究者 東京大学先端科学技術研究センター 教授 河内 啓二

1.2 概要

自然界の生物は、自然淘汰の歴史を通じて、与えられた環境に見事に適応しており、環境が厳しい場合には最適な状態にまで適応していることが多い。近年、計算機と最適問題解析法の急速な発達により、ようやく生物の形状や行動を支配している最適原理を、数値計算を用いて明らかにできるようになってきた。一方、与えられた環境下で人工物を設計する場合、我々にとって最も困難な課題は何を指標として設計すれば良いかを知ることである。

本研究では、以上の点を考慮して、図1に示すように生物の形状や行動を最適に定めている条件を数値計算によって見つけ出し、その結果を用いて、従来、設計者のひらめきと計算と試行錯誤によって行われていた設計法に指針を与えようというものである。このような指針は設計法に止まらず、生物学や動物行動学等の基礎研究にも広く貢献することができる。

本研究プロジェクトでは、特に流体中の推進運動とその運動器官を支配している最適原理を、メートルからマイクロメートルに至るまでの様々な大きさについて調べた。その結果、生物の飛行運動や泳ぎを支配する要因は、1) 支配的な流体力の成分、2) 最適性の評価関数、3) 制約条件の順に重要になることを見出した。

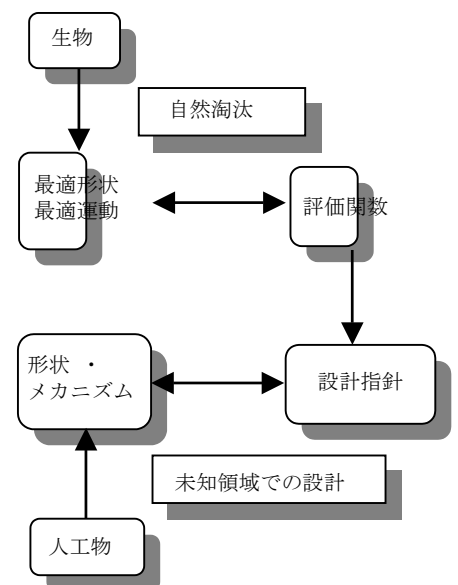


図1 研究の概要

1.3 研究開発実施内容

1.3.1 生物の鰭・翼の最適形状の研究

生物の鰭や翼の形状を支配する重要なパラメタはその大きさである。大きさが異なると作動流体のレイノルズ数が変わり、支配的な流体力の比率が変化する。ある大きさ以下の微小生物はさらに分子レベルの運動量の不均一さによるブラウン運動の影響を受ける。本研究プロジェクトスタート時には、以下のことが解明されていた。

- 1) メートルサイズの運動器官では主に揚力を利用するのが効率的である。
- 2) ミリメートル以下のサイズの運動器官では、粘性力の影響のため揚力を利用するのは得策ではなく、抗力を利用するのが効率的である。
- 3) 上記1)と2)の境界は翼の作動レイノルズ数で規定することができる。揚力を利用する運動器官の最小サイズは、作動レイノルズ数約10で求めることができる。
- 4) 揚力を発生する器官は翼として広く知られているが、その望ましい断面形状はレイノルズ数によっておおよそ整理でき、その特徴もわかっている。

本研究では上記の出発点での知見を活用して、生物の体の小さい順から、ブラウン運動、水の表面張力、繊毛、昆虫の毛翼、昆虫の翅、鳥の翼、魚の鰭を統一的に調べた。流体力の推定は、主として図2に示すように CFD（数値流体の計算法）により行い、これを実験的に確かめてデータとして使用した。その結果、これらの運動器官では、形状を支配する最適原理は、必要エネルギー最小や発生流体力最大などの数少ない評価関数であり、実際の生物に見られる形状の多様性は、その制約条件により生じていることが示された。制約条件は多種に渡るが、パワーや重さの制限、飛行・運動速度の条件等である。また本研究の結果、種々の制約条件下での最適な翼の断面形状（翼型）と平面形状が統一的に示された。さらに、毛翼の持つ優れた特性、表面表面張力下での流体力の特性、微小生物の推進法などが調べられた。

以上の研究から従来知られていなかった昆虫サイズの微小翼の翼型に対する空力データベースを構築した。このデータベースにより微小な機械類の翼に対する定量的空力データが、ネットワークにより簡単に参照できるようになった。

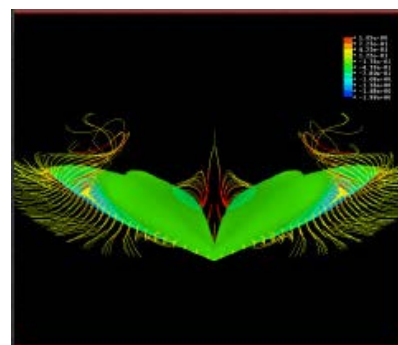


図2 CFDによる昆虫翼周りの流れ

1.3.2 生物の鰭・翼の最適運動の研究

昆虫サイズの生物では、鰭や翼の非定常的な運動により、一定速度で運動したときの2倍もの流体力が発生していることが知られている。本研究では、非定常的な流体力発生メカニズム、効率良く流体力を発生させる翼の動かし方、流体力を最大にする翼の動かし方などを調べた。その結果、ヒービング運動（往復運動）とピッチング運動（回転運動）を行う翼に対し、最大垂直力を発生する運動、最大効率を発生する運動がそれぞれ特定できた。さらに、プロペラやスクリーューなどの人工物に広く使われる回転型の運動器官と、生物で普通に見られる羽ばたき型の運動器官での流体力の違い、効率の違い等を CFD により明らかにした。

1.3.3 群の最適行動の研究

魚の群の行動ルールをベースとした数値モデルを用いて、群が捕食者から逃げる際の逃避行動を分析し、群の持つ意味、群を支配する基本パラメタを調べた。この結果、簡単なルールベースの群モデルで図3に示すような自然界の群の逃避パターンと良く一致したパターンが再現され、その有効性が確認できた。さらに群の逃避パターンを支配する要因が、メンバー間のどのような相互作用によって生じているのかを調べた。また、捕食者からの生存率を高めるうえで群の果たす役割を明らかにした。

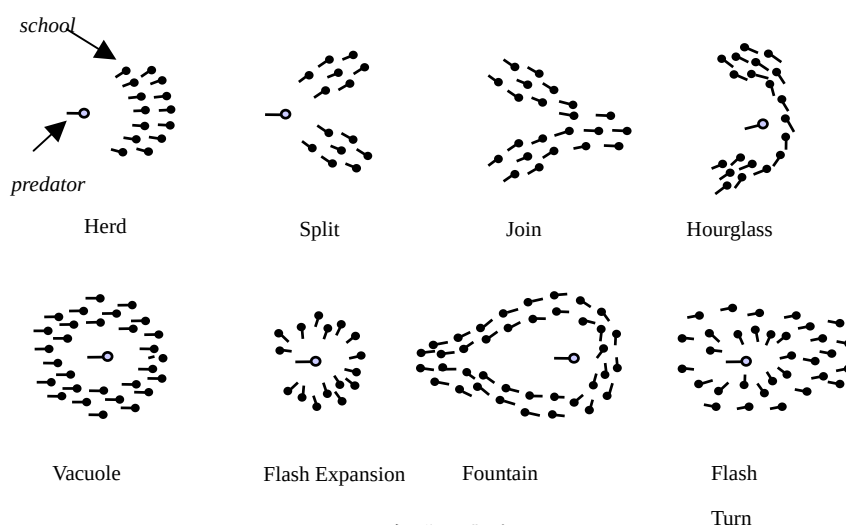


図3 魚群の逃避行動

1.3.4 生物の最適構造の研究

生物の構造を支配する重要なパラメタはその材料である。生物は蛋白質、クチクラ、カルシウムなど種々の材料を用いて、その構造体を形成しており、材料の性質と構造体の構成や大きさは強い関係がある。本研究では、従来知られていなかった昆虫の構造材料の物性を測定し、その結果を用いて最適構造の形状・物理的意味とそれを支配している評価関数を調べた。この研究から、昆虫の構造データベースを構築した。

1.3.5 最適形状・最適行動解析法の研究

従来の最適数値計算法の問題点として、解の収束性、局所解の回避法、計算の不安定性、非線形問題の取り扱いなどがあげられる。本研究では、これらの問題を改良するために遺伝的アルゴリズムを利用した新しい計算法を提案し、その有効性を確認した。また、複雑な非線形問題の解析法として、ニューラルネットワークによるモデル化と分析法の研究を行い、人間パイロットの操縦特性の解明に適用して、その有効性を明らかにした。

1.4 題目別実施内容

(1) 研究開発題目 飛行運動及び群れの行動の最適原理の解明（総括担当者 河内啓二）

飛行運動を行う自然界の生物を数値解析的に調べ、運動器官の形状とその動かし方を支配する最適原理を明らかにした。また魚類の群れの挙動を支配するルールを、数値計算と群れの観察結果を比較することにより明らかにした。

(a) 飛行運動の研究（担当者 河内啓二、東昭、Antonia Kesel）

- ・翼平面形状の最適原理と制約条件を明らかにした。
- ・翼断面形状の最適原理と制約条件を明らかにした。
- ・翼運動の最適原理と非定常流体力発生メカニズムを調べた。
- ・生物の大きさと支配的な流体力及び運動メカニズムの関係を調べた。

(b) 群れの行動の研究（担当者 稲田喜信）

- ・魚群の挙動を例にとり、各個体に備わった簡単なルールにより、群れ全体の挙動をシミュレーションする計算手法を確立した。
- ・捕食者からの魚群の逃避行動が、数値解析法によって精度良く模擬できることを検証した。
- ・魚群の逃避行動は、群れからの捕食を減らすために有効であることを示した。
- ・群れの集合と分裂の挙動と各個体に備わった簡単なルールとの関係を明らかにした。

(c) 構造データベースの構築（担当者 渡辺仁、堀澤早霧）

- ・トンボの翅に対して有限要素法を用いた構造解析を行った。
- ・上記の研究に付随してトンボの翅の構造データベースを構築した。
- ・各種の昆虫のはばたき運動に関係する外骨格の弾性・強度を測定した。
- ・理化学研究所の協力を得て、コンパウンド剤で凍結包埋した昆虫の胸部を薄く輪切りにして、はばたき運動の詳細な3次元構造データを得た。
- ・上記の結果を構造データベースに構築した。

(d) 翼運動の測定（担当者 曾理江、Hao Qun）

- ・レーザーを用いて胴体を固定した昆虫のはばたき運動を測定した。
- ・レーザーを用いて自由飛行する昆虫のはばたき運動を測定する新しい手法を開発し、有効性

を検証した。

- ・レーザーを用いて昆虫の翅形状を測定した。

(2) 研究開発題目 最適形状・最適行動解析法の研究（担当者 鈴木真二）

- ・数値解析最適化計算手法のアルゴリズムの研究を行った。
- ・人間パイロットの航空機操縦モデルの作成方法及び操縦の分析手法を遺伝的アルゴリズムを含んだニューラルネットワークによるモデル化により開発した。
- ・上記方法により人間パイロットの操縦履歴の分析を行い、有効な結果を得た。
- ・他研究開発題目で数値解析最適化計算手法の問題が生じた時、その解決に寄与した。

(3) 研究開発題目 最適翼形状の研究（総括担当者 砂田茂）

マイクロメートルからメートルの大きさまでの運動器官に働く主要な流体力を調べ、それにふさわしい形状とメカニズムを明らかにした。

(a) 最適翼形状の研究とその検証（担当者 砂田茂、安田邦男）

- ・昆虫サイズの最適な翼型を明らかにした。
- ・微小昆虫の領域で自然界に広く見られる櫛状翼の最適形状を明らかにした。
- ・昆虫サイズの翼の最適運動とその評価関数を明らかにした。
- ・上記の研究を生かして空力データベースの構築と検証を行った。

(b) 最適泳法の検証（担当者 曲山幸生）

- ・マイクロメートルサイズの鞭毛の推進メカニズムを明らかにした。
- ・マイクロメートルサイズの器官に働くブラウン運動の影響を高分子溶液中で調べた。

(4) 研究開発題目 最適翼形状の研究（統括担当者 劉 浩）

- ・主に数値流体力学（CFD）の手法を用いて、最適翼形状と運動を数値計算より明らかにした。また魚の鰭の最適形状・最適運動を数値計算により明らかにした。

(a) 最適翼運動・最適翼形状の研究（担当者 劉 浩）

- ・変形する物体まわりの非定常流と物体運動との連立解法を開発・検証した。
- ・昆虫サイズの翼型の空力特性を明らかにし、空力データベースを構築した。
- ・昆虫の翅に働く非定常空気力を明らかにした。
- ・昆虫の翅の運動の物理的意味を明らかにした。

(b) 魚の鰭の形状の研究（担当者 劉 浩、Richard J. Wassersug, Wei Shyy）

- ・連立解法により魚の泳ぎのメカニズムを研究した。
- ・魚の鰭の形状と、そこに働く流体力の関係を調べた。
- ・魚の胴体の形状の物理的・生態的意味を明らかにした。

1.5 全体の総括と今後の課題

本研究で以下の事を明らかにした。

- ①生物の鰭や翼の最適形状や最適運動の研究から、生物の飛行運動や泳ぎを支配する要因が、
 - 1) 支配的な流体力の成分、2) 評価関数、3) 制約条件の順に重要となることを示した。支配的な流体力の成分は主に生物のサイズによって決まり、これを解明する最も効果的な手

法は次元解析であった。鰭や翼の形状や運動はまず第一義的に支配的な流体の成分により決まり、その枠内で現在の数値計算法によって最適原理が明らかにできた。数値計算における評価関数の種類は少なく、必要エネルギー最小や発生流体力最大などの少数の評価関数で、統一的に広範囲の生物の鰭や翼の物理的意味を説明できる。生物の鰭や翼の形状や運動の多様性は、主にパワーや重さのなどの制限から生ずる制約条件により発生している。以上の結果より、人工物の設計にもこの順の考察が重要であると考え。また、本研究に用いた解析手法や評価関数は、人工物の設計にも同じように有効に適用できると考える。

②上記の研究に伴い、サイズに最適な運動メカニズムの知見が定量的に広がった。すなわちマイクロメートルからメートルサイズに渡る広い領域で、主要な流体力成分を効果的に利用する運動メカニズムと、その結果持たせられる効率や流体力の大きさが定量的に明らかになった。またこれまで不明であった昆虫サイズの翼型に対して空力データベースを構築し、ネットワークを通して一般に公開できるレベルに形成した。同時に昆虫の翅の微細構造や外骨格構造に対して構造データベースを構築した。

③新しい最適計算法アルゴリズムの提案とニューラルネットワークによる運動解析法の開発を行った。

④ルール規範型のモデルを用いて魚の捕食者からの逃避行動の解析を行い、自然界の群の逃避行動が合理的である知見を得るとともに、このような解析法の有効性と可能性を確認した。

本研究の今後の課題・展開としては、2つのことが考えられる。1つは本研究の深化である。本研究では広範囲の自然界の現象を広い視点からかけ足で調べた。研究期間3年という期日の制約もあり、それぞれのサイズの代表的な運動器官を個別的に調べ、それらに共通に見出される結果を成果としてまとめた。従って対象とする運動器官の種類を増やし、本研究の結論の信頼性を高めることは重要である。また、サイズの領域をさらに広げ、どこまでこのようなアプローチが可能か見極めることも重要である。運動器官のサイズが小さくなると、支配的な流体力成分が制御しにくくなる性質を持つ上に外乱の影響が大きくなり、メートルサイズの世界での常識である決定論的な考え方が成り立ちにくくなると思われる。特にマイクロメートルのサイズではブラウン運動の影響が顕著になり、目的地も運動も確率的な選択にまかされることが多くなる。本研究ではこのような領域でも、比較的本アプローチで取り扱い易い鞭毛の運動等を取り上げて成果を得たが、例えばきのこの孢子や赤血球の動きのようにほとんど確率で支配される現象に対し、どのような最適原理が適用できるのかまだ明らかになっていない。

もう1つの課題としては、本研究で明らかになった最適な運動を可能にする制御系の仕組みの解明である。本研究で取り上げた研究対象についても、生物の運動器官の形状や運動メカニズムが生物独特の制約条件のために生じた例がいくつか見られた。人工物の設計において利用しうる材料、エネルギー供給源等は生物の構成要素とは全く異なっている。生物は運動器官として金属材料やマイクロ電気モータは使えないのである。従って、本研究では生物の形状や運動メカニズムをただ模倣するのではなく、その最適原理を調べ、そこから人工物を生物とは異なった材料やエネルギー供給源等を用いて設計するという手順を提案した。この生物と人工物の構成要素の差異は、最適な運動を可能にする制御系において、最も大きく異なっていると考え。本研究からも明らかになったように、運動体のサイズが小さくなると、急速に運動の時定数が小さくなる。

筆者はこの主な原因は物体の慣性モーメントが寸法の5乗に比例しているためと考えている。このために小さな運動体の制御においては、制御情報の時間遅れが決定的に大事になる。飛行や泳ぎの安定性は情報伝達の時間遅れと運動の時定数の比で支配されるからである。人工物の情報伝達が金属材料のおかげで極めて速いのに対し、生物の神経系の情報伝達はかなり遅い。この構成要素の大きな違いが、運動システムや情報ネットワークにどのような影響を与えるかを調べることは大変重要である。そのような制約を考慮に入れずに、単にシステムレベルの制御系を人工物と生物で比較することは、危険であると思われる。本研究プロジェクトを通じて既にそのような分野の先駆的研究が試行され、ニューラルネットワークを応用して、生物の運動制御に利用される情報源の同定法が新しく開発され、人間パイロットの挙動の解析に有効なことが検証されている。

1.6 研究開発実施体制

代表研究者氏名 河内啓二

所属・役職 東京大学先端科学技術研究センター・教授

(1) 研究開発題目 飛行運動及び群れの行動の最適原理の解明

A. 参加研究者

河内啓二 東京大学先端科学技術研究センター、教授、研究全体の統括、飛行運動の研究

稲田喜信 東京大学先端科学技術研究センター、助手、群れの行動の研究

B. 研究協力者

渡辺仁 ヤマハ発動機、シニアエンジニア、構造データベースの構築、飛行運動の数値解析

東 昭 東京大学、名誉教授、研究全般への協力

志村和樹 科学技術振興事業団研究基盤情報部、職員、スーパーコンピュータの利用法

C. 招聘研究協力者

曾理江 清華大学、教授、生物の形状の精密測定、昆虫の飛行運動の位置測定システムの開発

滞在先：東京大学先端科学技術研究センター

滞在期間：1999. 8. 5～8. 8、2000. 2. 10～2. 27、2001. 1. 9～1. 22

Hao Qun 北京理工大学、助教授、昆虫の移動機構の解析、昆虫の形状及び飛行運動の計測システムの開発

滞在先：東京大学先端科学技術研究センター

滞在期間：1999. 12. 1～2000. 2. 28、2000. 9. 21～2001. 1. 20

Antonia Kesel ザールランド大学、助教授、飛行運動の研究結果の比較検討

滞在先：東京大学先端科学技術研究センター

滞在期間：2001. 9. 4～2001. 9. 14

(2) 研究開発題目 最適形状・最適行動解析法の研究

A. 参加研究者氏名

鈴木真二 東京大学大学院工学系研究科、教授、最適形状・最適行動解析法の研究

(3) 研究開発題目 最適翼形状の研究

A. 参加研究者氏名

砂田 茂 産業技術総合研究所、主任研究官、(現) 大阪府立大学大学院工学研究科、
助教授、最適翼形状の研究

B. 研究協力者

安田邦男 日本大学理工学部、助教授、最適翼形状の検証

曲山幸生 食品総合研究所、研究員、最適泳法の検証

堀澤早霧 東大先端研、研究生、構造データベースの検証

C. 招聘研究協力者 なし

(4) 研究開発題目 最適翼形状の研究

A. 参加研究者氏名

劉 浩 理化学研究所、前任研究員、最適翼運動・最適翼形状の研究

B. 研究協力者 なし

C. 招聘研究協力者

Richard J. Wassersug Dalhousie 大学、教授、生物の自由遊泳ダイナミクスに関する
共同研究

滞在先：理化学研究所

滞在期間：2001. 1. 20～2001. 1. 26

Wei Shyy Florida 大学、chairman、計算力学とバイオメカニクスに関する共同研究

滞在先：理化学研究所

滞在期間：2001. 1. 27～2001. 2. 3

7. 本事業により得られた研究成果

(a) 原著論文

発表年	論文タイトル	掲載雑誌名	著者名	整理番号
1999	昆虫の飛行メカニズム	生物物理第 39 巻 5 号 pp279-284	河内啓二	11/10B-1 発 02
1999	A Numerical Study of Undulatory Swimming	Journal of Computational Physics, Vol.155、 pp223-247	劉 浩 河内啓二	11/10B-1 発 11
2000	Aerofoil characteristics at a low Reynolds number	Journal of Flow Visualization and Image Processing, Vol.7, pp207-215	砂田茂 尾崎浩一 田中誠 安田知央 安田邦男 河内啓二	12/10B-1 発 16

2001	A new method for explaining the generation of aerodynamic forces in flapping flight	Mathematical methods in the applied sciences Vol.24, No.17-18, pp1377-1386	砂田茂 Ellington, C.P.	12/10B-1 発 20
2000	ソニックブームを考慮した上昇飛行経路の最適化	日本航空宇宙学会誌 Vol.48, No.563, pp405-410	高木聡 鈴木真二 吉川彰	12/10B-1 発 21
2000	A scanning projected line method for measuring a beating bumblebee wing	Optics Communications, Vol.183, pp37-43	Zeng, L. Hao, Q. Kawachi, K.	12/10B-1 発 25
2001	Unsteady forces acting on a two-dimensional wing in plunging and pitching motions	AIAA Journal, Vol.39, No.7, pp1230-1239	Sunada, S. Kawachi, K. Matsumoto, A. Sakaguchi, A.	13/10B-1 発 26
2001	鞭毛を模擬した小型ポンプ、小型粘度計	日本機械学会誌 B 編 pp119-123	砂田茂 信賀信孝 安田邦男 尾崎浩一 田中誠	12/10B-1 発 28
2001	ニューラルネットワークを用いたパイロットの着陸操縦の解析	日本航空宇宙学会誌 Vol.49, No.564, pp21-26	林幸平 鈴木真二 上村常治	12/10B-1 発 32
投稿中	Wing characteristics at ultra-low Reynolds number	Journal of Aircraft	Sunada, S. Yasuda, T. Yasuda, K. Kawachi, K.	13/10B-1 発 33
2000	An approximate added-mass method for estimating the induced power for flapping flight	AIAA Journal Vol.28, No.8 pp1313-1321	Sunada, S. Ellington, C.P.	12/10B-1 発 35
2001	Leading-edge Vortices of Flapping and Rotary Insect Wings at Low Reynolds Number	AIAA Journal, Special issue on Fixed, Flapping and Rotary Wing Vehicles at Low Reynolds Number Pp275-285	Liu, H. Kawachi, K.	13/10B-1 発 37
2001	A Numerical Study of Micro-Fluid Dynamics of Undulatory Locomotion	日本理論応用力学学会英文論文集 Vol.150, pp257-270	劉 浩 難波啓一	13/10B-1 発 38
2001	Bacterial swimming speed and rotation rate of bundled flagella	FEMS Microbiology Letters, Vol.199, Pp125-129	Magariyama, Y. Sugiyama, S. Kudo, S.	13/10B-1 発 42

2001	Measuring the body vector of a free flight bumblebee by reflection beam method	Measurement Science and Technology Vol.12, pp1886-1890	Zeng, L. Hao, Q. Kawachi, K.	13/10B-1 発 44
2001	昆虫のホバリング飛行	パリティ、Vol.16, No.11, pp54-57	河内啓二	13/10B-1 発 45
印刷中	Difference between forward and backward swimming speeds of the single-polar-flagellated bacterium, <i>Vibrio alginolyticus</i>	FEMS Microbiology Letters	Magariyama, Y. Masuda, S. Takano, Y. Ohtani, T. Kudo, S.	13/10B-1 発 46
印刷中	Order and Flexibility in the Motion of Fish Schools	Journal of Theoretical Biology	Inada, Y. Kawachi, K.	13/10B-1 発 47
投稿中	Hydrodynamic characteristics of bristled wings	Journal of Experimental Biology	Sunada, S. Takashima, H. Hattori, T. Yasuda, K. Kawachi, K.	13/10B-1 発 48
印刷中	Computational Biological Fluid Dynamics	Recent Advances in Biomechanics (Springer) Pp200-213	Liu, H.	13/10B-1 発 49
2001	CFD で見る生物流れ	日本機械学会流体工学部門ニュースレター、2001 年 9 月号 pp1-3	劉 浩	13/10B-1 発 50
2001	Aerodynamic Characteristics of Wings at Low Reynolds Number	AIAA Journal Pp341-398	Azuma, A. Okamoto, M. Yasuda, K.	13/10B-1 発 53
投稿準備中	Aerodynamic force acting on thrips wings	J. of Experimental Biology	Tanaka, S. Kawachi, K. Ellington, C.P.	13/10B-1 発 56
投稿中	Computational Biological Fluid Dynamics: digitizing and visualizing swimming and flying	SICB Book, Special Issues on Dynamics and Energetics of Animal Swimming and Flying	Liu, H.	13/10B-1 発 57

(b) 口頭・ポスター発表

発表年月日 開催場所	発表タイトル	学会等の名称 (予稿集名、掲載ページ)	発表者	整理番号
1999.3.29～ 3.30 つくば市	魚群の行動	日本機械学会第 11 回 バイオエンジニアリン グ講演会、講演論文集 pp34-37	稲田喜信	11/10B-1 発 01
1999.5.16～ 5.19 米国ハワイ	Aerofoil characteristics at a low Reynolds number	第 2 回流れの可視化と 映像処理学会講演集 pp1-6	砂田茂 尾崎浩一 田中誠 安田知央 安田邦男	11/10B-1 発 03
1999.6.29～ 7.3 オランダ	Estimation of the stability of grouping motion of a fish school	Proceedings of Theory and Mathematics in Biology and Medicine(TMBM/99) p1	稲田喜信 河内啓二	11/10B-1 発 04
1999.10.7～ 10.8 鳥取	微小毛群の流体性能と アザミウマの飛行	日本機械学会流体工学 部門講演会講演論文集 pp439-440	砂田茂 安田知央 安田邦男 尾崎浩一 田中誠	11/10B-1 発 05
1999.7.18～ 7.22 米国サンフ ランシスコ	Validation in CFD Modeling of Biological and Physiological Flows	Proceedings of ASME/JSME Joint Meeting (Fluid Engineering Division) pp1-7	劉 浩 山口隆美	11/10B-1 発 06
1999.7.27～ 7.29 仙台	細菌鞭毛に関する計算 流体力学的解析	日本機械学会年次大会 講演会 (99 年度) 講演 論文集 pp1-2	劉 浩 山口隆美	11/10B-1 発 07
1999.9.27 東京	群行動の秩序と柔軟性	関東・東北ブロック水 族館技術者研究会	稲田喜信	11/10B-1 発 08
1999.10.13 ～10.15 東京	低レイノルズ数におけ る翼型特性 (実験と数 値計算の比較)	第 37 回飛行機シンポ ジウム講演集 pp265-268	砂田茂 安田知央 安田邦男 河内啓二 田中誠	11/10B-1 発 09
1999.10.14 ～10.16 東京	魚群行動の安定性の評 価	第 9 回数理生物学シン ポジウム講演集、p10	稲田喜信 河内啓二	11/10B-1 発 10
2000.1.4～ 1.7 ハイファ	An approximate added-mass method for estimating induced power for flapping flight	バイオ流体力学国際会 議講演集 p1	砂田茂 Ellington, C.P.	12/10B-1 発 12

2001.1.11～ 1.12 石川県	羽ばたき翼による小型 ポンプ	日本機械学会第 12 回 バイオエンジニアリン グ講演会講演論文集 pp309-310	砂田茂 信賀信孝 安田邦男 尾崎浩一 田中誠	12/10B-1 発 13
2000.3.23～ 3.24 東京	微小落下物体の挙動	日本航空宇宙学会年会 講演集 pp283-284	趙政晃 砂田茂 安田邦男 河内啓二	12/10B-1 発 14
2000.3.27～ 3.31 英国エクセ ター	Flight Mechanism of Thrips Flight	実験生物学会年会講演 集 p1	砂田茂 安田知央 安田邦男	12/10B-1 発 15
2000.8.28～ 8.30 米国ハワイ	Flight mechanism of a thrips	第 1 回アクアバイオメ カニズム国際シンポジ ウム講演集 pp251-256	砂田茂 河内啓二 安田知央 信賀信孝 安田邦男	12/10B-1 発 17
2000.6.5～ 6.7 米国インデ ィアナ	The Aerodynamic Characteristics of Wings at Low Reynolds Numbers	Conference on Fixed, Flapping and Rotary Wing Vehicles at Very Low Reynolds Num. pp216-264	東 昭 岡本正人 安田邦男	12/10B-1 発 19
00.7.17 東京	昆虫の飛行メカニズム	可視化情報学会可視化 情報シンポジウム講演 集、ppS0001-1～6	河内啓二	12/10B-1 発 22
2000.6.4～ 6.8 米国インデ ィアナ	Leading-edge Vortices of Flapping and Rotary Wings at Low Reynolds Numbers	Conference on Fixed, Flapping and Rotary Wing Vehicles at Very Low Reynolds Numbers pp34-43	劉 浩 河内啓二	12/10B-1 発 23
2000.9.10～ 9.13 仙台	高分子溶液中における マイクロビーズのブラ ウン運動解析	日本生物物理学会第 38 回年会予稿集 p148	曲山幸生 工藤成史	12/10B-1 発 24
2000.10.8 ドイツ、ハイ デルベルグ	Order and Flexibility of schooling motion of fish	Proceedings of trends in nonlinear analysis (Tina 2000) pp49-50	稲田喜信	12/10B-1 発 27
2001.8.27～ 8.30 福井	低レイノルズ数におけ る翼特性データベース	日本機械学会年会講演 論文集 pp187-188	砂田茂 劉 浩 稲田喜信 河内啓二 安田邦男	13/10B-1 発 30
2000.11.19 ニュージー ランド	Steering mechanism of fish schools	Proceedings of Complex Systems 2000, pp372-381	稲田喜信	12/10B-1 発 31

2001.11.23 東京	屈曲運動におけるマイクロ流体力学に関する数値流体力学的研究	第 50 回理論応用力学講演会講演論文集 pp413-414	劉 浩	12/10B-1 発 36
2001.8.27～ 8.30 福井	昆虫の羽ばたき機構（第 1 報 3 次元内部構造顕微鏡による昆虫の飛翔筋形態観察）	日本機械学会 2001 年年次大会講演論文集 pp83-84	堀澤早霧 橋本巨 横田秀夫 中村佐紀子 牧野内昭武	13/10B-1 発 39
2001.8.27～ 8.30 福井	昆虫の羽ばたき機構（第 2 報胸部外骨格の構造特性と翅の振動特性）	日本機械学会 2001 年年次大会講演論文集 pp85-86	堀澤早霧 橋本巨	13/10B-1 発 40
2001.10 蔵王	CFD による昆虫飛翔メカニズムの解析	第 79 回日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 pp701-1～4	劉 浩	13/10B-1 発 51
2001.2 米国 Anaheim	Computational Biological Fluid Dynamics : digitizing and visualizing swimming and flying	SICB symposium on Dynamics and Energetics of Animal Swimming and Flying	Liu, H.	13/10B-1 発 52
2001.7 中国北京	Computational Biological Fluid Dynamics	Workshop on Advances in Biomechanics pp1-13	Liu, H.	13/10B-1 発 54

(C) 著書

出版年	題名 (分担箇所)	出版社	著者	ISBN	整理番号
印刷中	メカノクリエチャー (第 5 章)	コロナ社	劉 浩 砂田茂 他		13/10B-1 発 29
2001	身近な流体力学 (pp1-12)	丸善	河内啓二 他	4-621-04811-2	13/10B-1 発 41
2001	バイオミメティックス ハンドブック (pp1000-1005)	NTS 出版	河内啓二 他	4-900830-61-5	13/10B-01 発 43
2000	生物に学ぶマシン (pp128-137)	クバプロ	河内啓二 他	4-906347-74-6	13/10B-1 発 55
印刷中	マイクロマシンフォーラム (第 4 節)	産業技術サービスセンター	河内啓二 他		13/10B-1 発 58
印刷中	生物学データ集 (pp4103-4105)	朝倉書店	河内啓二 他		13/10B-1 発 59

(2) 成果プログラム等

(a) 空力データベース

本データベースは従来知られていなかったレイノルズ数100～1000（昆虫サイズの翼）の領域の翼型特性を本プロジェクトの研究成果を中心として広く集め、作動レイノルズ数、翼厚比、最大翼厚比位置、反り比、最大反り比位置などをパラメタとして検索できるように整理したものである。本来は本プロジェクトの研究者用の利用に供していたものであるが、一般の翼型データも比較のために付け加え、2001年10月現在、156翼型についてインターネットを用いて広く一般に公開できるレベルに整理した。このデータベースを利用して、昆虫サイズの微小機械の設計利便性の向上や微小生物の運動メカニズムの研究の進展が期待されている。

(b) 構造データベース

本データベースは主に2つの部分よりなっている。1つは昆虫のはばたき機構の詳細な3次元画像である。これは理化学研究所の協力を得て、微小幅で輪切りにした昆虫胸部の断面写真をコンピュータで画像処理し、4種類の昆虫（キアシナガバチ、シオカラトンボ、トノサマバッタ、アブラゼミ）について、昆虫の筋肉や骨格構造が理解しやすい角度で連続写真として再構築し表示したものである。もう1つは有限要素法解析に使用したトンボの翅の詳細な数値データである。各データの性質上、前者は一般から広く利用できるようにインターネット上でホームページとして整備したが、後者は研究結果を除き研究者間のみに公開する予定である。

(c) 最適計算プログラム

プログラム名称、最適計算プログラム

機能概要、「タブー探索法」と「焼きなまし法」による効率的な最適解の計算方法を組み合わせ、多変数からなる評価関数の最大値または最小値を自動的に算出する計算機プログラムである。

使用言語、Microsoft Visual C++(Ver.6)。

サイズ、17kb

備考 特許出願中

(d) 魚群運動の3次元可視化プログラム

プログラム名称、魚群運動の3次元可視化プログラム

群行動のシミュレーションによって得られた群の運動データをもとに、魚の3次元モデルを用いて、その運動を3次元空間の中に表示し、個体間の位置関係や群全体の3次元的な構造を、視覚的に理解しやすくするために開発されたプログラムである。

使用言語、gcc, g++, Sun Workshop C++, MIPS PRO C++

サイズ 1.5MB

(3) 特許出願記録

出願日	発明の名称	発明者	出願人	整理番号
2001.6.4	最適化プログラム、最適化計算プログラムを記録した記録媒体、最適化計算方法及び最適化計算装置	鈴木真二（50） 高木聡（50）	事業団（100）	

2001.4	低レイノルズ数における櫛状翼	砂田茂（１００）	事業団（５０） 産業技術総合研究所（５０）	
--------	----------------	----------	--------------------------	--

(4) 新聞記事、雑誌記事、テレビ報道 等

媒体	題	日時	その他
CS スカイパーフェクト	ぼくたち科学特捜隊第５回「飛翔の秘密を生き物から学べ」	1998.10	
ニュートン別冊	自然にひそむ数のミステリー	1999.6	
日刊工業新聞	すき間のある「くし状羽」条件次第では効率的	1999.7.26	
SONY CX・PAL	オタマジャクシの戦略	1999.10	pp6-7
日本経済新聞	カオス運動で演出効果	1999.12.18	
毎日新聞	紙吹雪に飛行機の墜落挙動解析の糸口をみつけた	2000.3.6	
赤旗	紙吹雪はカオスの舞い	2000.3.26	
NHK 教育テレビ	「やってみよう なんでも実験」	2000.6.2	
科学技術振興事業団 バーチャル科学館	「スポーツの科学」監修	2000.6	
科学技術ジャーナル	少年の心で昆虫を見る	2000.7	p55
CS スカイパーフェクト	Techno Gallery 「生物に学ぶ航空力学」	2001.4.14	
日経サイエンス	「昆虫飛翔の空気力学」を翻訳	2001.9	pp46-54
Nature Interface	生物の飛翔メカニズム	2001.11	

(5) 受賞 等

米国ヘリコプタ学会 Technical Council Member に選出、河内啓二、1998～2001 年
 米国航空宇宙学会 Associate Fellow に選出、河内啓二、1998 年

(6) ワークショップ 等

月 日	名称	場所	内容	参加人数	備考
1999.10.28	生物の最適形状・最適行動	東大先端研	本研究テーマについて研究成果の発表と討論を行った。	10	
2000.6.23	生物の最適形状最適行動	東大先端研	本研究テーマについて研究成果の発表と討論を行った	10	
2001.1.30	Computer and Biology	理化学研究所	計算機を用いた生物学の研究について成果の発表と討論を行った。	6	
2001.9.12	生物の飛行運動	東大先端研	生物の飛行運動の最適性について研究成果の発表と討論を行った	10	