

生物の最適形状・最適行動

東京大学先端科学技術研究センター ○河内 啓二

Optimal Shape and Optimal Behavior of Living Creature

Keiji KAWACHI, RCAST, The University of Tokyo

Abstract:

It is widely observed in nature that living creature acquires optimal shape or behavior through their long history of natural selection. Recent progress of numerical calculation method and computational power of high-speed computer makes it possible to determine an optimal shape or movement of an object by assuming a performance index. In the present research, we inversely applied this analytical process to elucidation of the performance indices governing shapes or behaviors of living creatures. These indices and the analytical method are useful for designing an artificial object working under unfamiliar surrounding. Thus, we can use the information developed by the long history of natural selection for engineering design.

1. はじめに

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、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。

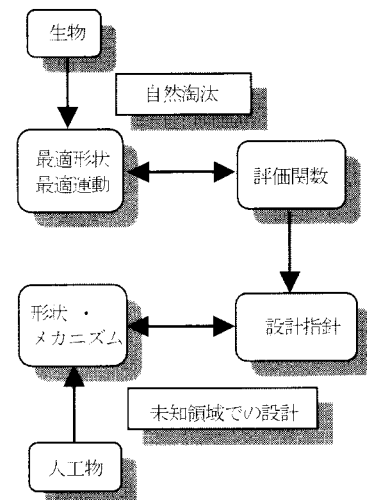


図1 研究の概要

2. 研究の内容

2.1 生物の鱗・翼の最適形状の研究

生物の鱗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。本研究では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、魚の鱗を統一的に調べた。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、表面張力下での流体力特性、微小生物の推進法などが調べられた。

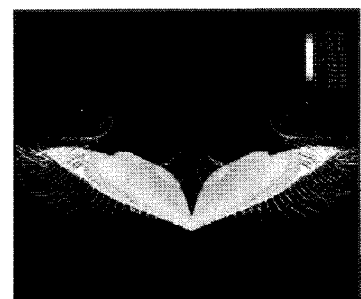


図2 CFDによる昆虫翼周りの流れ

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る。

2.2 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、ヒービング運動とピッチング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。

2.3 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研究した。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。

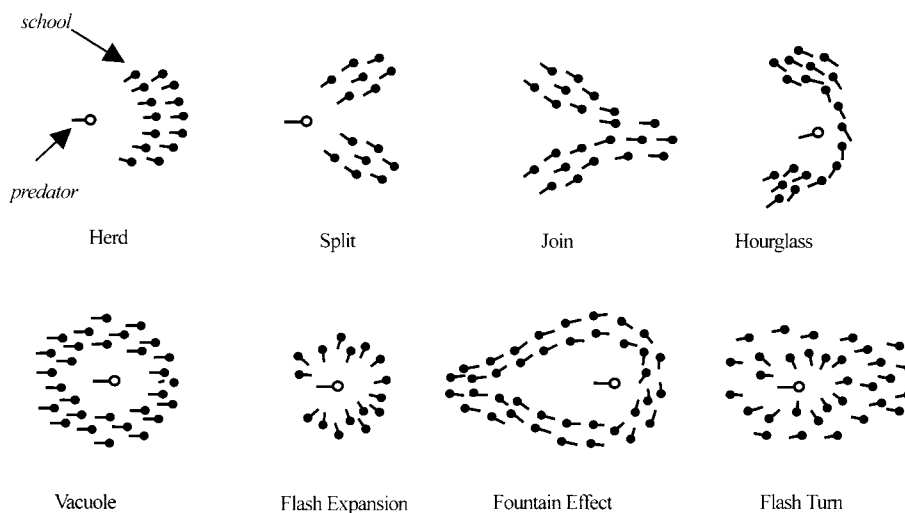


図3 魚群の逃避行動

2.4 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。

2.5 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。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。

3. ネットワークの活用について

本研究テーマは計算科学、流体力学、構造力学、最適制御工学、生物学と多岐にわたるため、チームのメンバーも各地に点在していた。各地の研究成果を比較検証して、統合的なデータベースを構築するため、ネットワークを活用して研究の効率化を図った。即ち、データベースは基盤のサイトに共通のものを一つだけ構築しておき、各地の研究が進展するに従い、ネットワークによりその共通データベースを拡張した。これにより、各研究サイトでは常に最新の研究成果に基づいた唯一のデータベースが参照できた。以上の結果として、微小翼に対する空力データベースおよび昆虫の構造データベースが構築されたので一般に広く公開する。

4. まとめ

本研究で以下の事を明らかにした。

①生物の鱗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鱗や翼の物理的意味を説明できる。生物の鱗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られる。

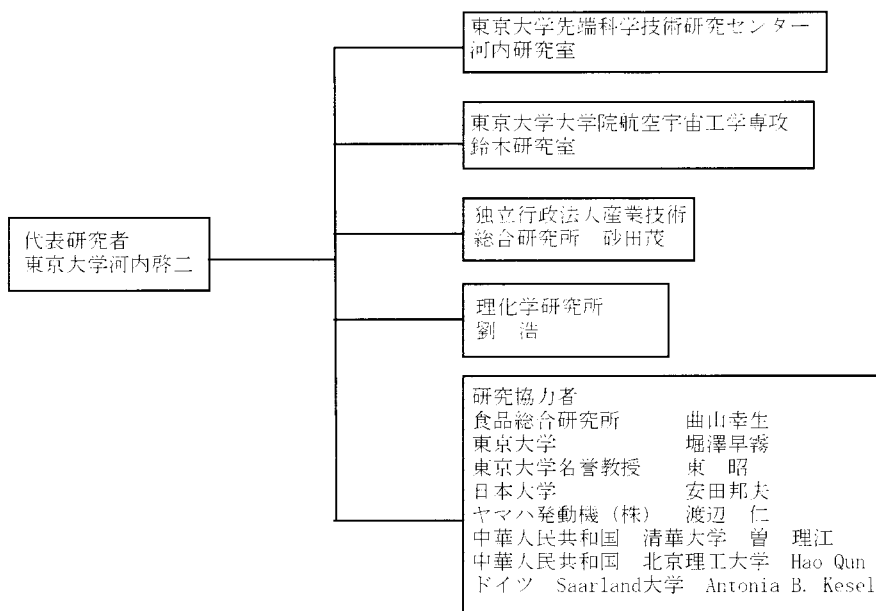
②上記の研究に伴い、サイズに最適な運動メカニズムの知見が定量的に広がった。またこれまで不明であった昆虫サイズの翼型に対して空力データベースを構築し、ネットワークを通して一般に公開できるレベルに形成した。同時に昆虫の翅の微細構造や外骨格構造に対して構造データベースを構築した。

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。

5. 研究実施体制

研究実施体制は年により変動したが、最終的には次図のように構成した。



河内研究室では、鰭・翼の最適形状の研究、鰭・翼の最適運動の研究、群の最適行動の研究を数値計算を主に用いて行った¹⁾²⁾。鈴木研究室では、最適形状・最適行動解析法の研究を行うとともに、各研究サイトで数値計算上の問題が発生したときのサポートを行った³⁾。独立行政法人産業技術総合研究所では鰭・翼の最適形状の研究、鰭・翼の最適運動の研究を行い、さらにこれに付随して実験に裏付けられた空力データベースの構築を行った⁴⁾⁵⁾。理化学研究所ではCFDにより、流体力の解析を行い、鰭・翼の最適形状の研究、鰭・翼の最適運動の研究に尽力した⁶⁾⁷⁾。研究協力者はこれらの研究に協力するほかに、食品総合研究所では生物のブラウン運動や微小生物の推進法について、東京大学では昆虫の構造材料の物性と外骨格構造について、ヤマハ発動機では有限要素法を用いて昆虫の翅の微細構造を調べた。

6. 参考文献

- 1) 河内啓二、昆虫の飛行メカニズム、生物物理第39巻5号、1999.
- 2) Inada, Y. and Kawachi, K.: Order and Flexibility in the Motion of Fish Schools, *J. of Theo. Biol.*, in press.
- 3) 林幸平、鈴木真二他：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*、2001.
- 4) Sunada, S. and Ellington, C.P.: An approximate added-mass method for estimating the induced power for flapping flight, *AIAA Journal*, 2000.
- 5) Sunada, S. , Kawachi, K. et.al.: Unsteady forces acting on a two-dimensional wing in plunging and pitching motions, *AIAA Journal*, 2001.
- 6) Liu, H. and Kawachi, K.: Leading-edge Vortices of Flapping and Rotary Insect Wings at Low Reynolds Number, *AIAA Journal*, in press.
- 7) Liu, H. and Kawachi, K.: A Numerical Study of Undulatory Swimming, *J. of Comp. Physics*, 1999.