

はしがき

この本はトンボが超小型・超軽量の飛行体として極めて優れていることに気づいてからの、トンボだけが知っていた低速の空気力学およびその応用に関する十数年にわたる科学探検の身と、それらをまとめた結果得られた新しい昆虫模倣の方法を記したものです。

私は子供のころから飛行機が好きで、大学も航空学科で学び、就職先も航空・宇宙系のものづくり会社でした。そして企業を退職した後も大学の航空宇宙工学科で飛行力学などを教えていたわけですから、航空・宇宙関連のものづくりや空気の流れとそれに関わるものの動きについてなら多少の知識があります。しかし、トンボに関しては全くの素人で、トンボがどう飛ぶのかについてもずっと無関心でした。

トンボに出会ったのは、大学で教えるようになり、たまたまトンボの翅の空力特性を明らかにすることのできる小さな流れの可視化装置を開発して、学生と楽しんでいたときのことでした。当初はトンボよりも低速空気力学に興味があったのですが、トンボの翅周りの空気の流れを調べはじめると、自分を夢中にさせてくれる事実が次々に目の前に現れました。トンボと流れの可視化装置が教えてくれる低速流れの意外性と面白さに惹かれ、それを掘り下げ、応用を図っているうちにあつという間に時が経ってしまいました。

研究を進める途中、繰り返しトンボの持つ空力・飛行性能のすごさを教えられ、それらをト

ンボ型の飛行ロボットやマイクロ風車に応用するなかで、トンボから学ぶべきことの多さを痛感するようになりました。そして、現在はトンボに代表される飛行昆虫の特性と彼らの進化手順を組み合わせることで、ものづくりへの応用が大きく広げられるのではないかと考えるようになりました。

もともと、私はどんなにトンボが素晴らしくとも応用ができないのではなあ、と考えていたので研究的な成果にはそれほど関心がなく、発表した研究論文も数本です^{〔文献*1〕}。したがって、別にトンボや低速空気力学の専門家として認められているわけではありません。

しかし、改めて考えて見ると、応用を含めた意味のトンボ飛行技術についてなら、少しは人に話せるかなというくらいには積み上げができたように思います。

私はこの本で次の四点について述べたいと考えております。

- ① トンボの飛行体としての素晴らしさ（飛行の専門家が見てもすごいのです）
- ② トンボの飛行に関わる低速領域の空気力学の魅力
- ③ トンボの空力技術を利用して開発した身近な空力機器
（代表例がマイクロ風車です）
- ④ 上記空力機器の開発手順と、トンボに代表される飛行昆虫の進化の過程を重ね合わせる

ことから考えついた、生物模倣に関わる一つのものづくりの手順

このうち、①②③は専門も近く、不思議を説き明かし人々の期待に応える科学的新事実は何か、という書き方で、特に違和感がなかったのですが、④は科学とは異質なものづくりの話し

なので、書き方ばかりでなく同じ次元で扱うべきかについても大いに悩みました。

これは、一見、市中に多く出回っている「法」と何の違いもありません。しかし、私には従来の手法とは異なる可能性を持っているように思えます。④で提示されるものづくりの手順は、③のトンボの能力を応用した機器の開発手順を整理することで生まれましたが、これまでなかった「もの」の創生にもつながりそうだからなのです。上手くすれば、環境にやさしく、省資源で、なおかつ人の生活を豊かにしてくれるものをいくらでも作ることができると考えられます。こんなわけで、あえて科学とは言えないものづくりの手順も紹介させてもらうことにしました。

もともと、これら科学とものづくりという一見無関係に見えるものをつないでくれたのはネイチャー・テクノロジーですから、完全に非科学的話というわけでもありません。「ネイチャー・テクノロジー」とは、生物模倣の対象を自然にまで広げ、自然から学ぶことで無駄なエネルギーや資源を使わず豊かで新しい生活システムを創り上げるテクノロジーのことで、5章で詳しく採り上げます。

それでは、偶然出会ったトンボに不思議を感じ、それを調べることによって世界観までもが変わるにいたった私の科学探検譚をはじめます。

目次

はしがき i

プロローグ ● トンボの飛行能力はすごい！ 1

1章 ● 低速空気力学と流れの可視化 15

渦と流れに魅せられて 15

可視化でわかったゆっくりとした流れの性質 17

低速流における新発見 30

2章 ● トンボに学ぶ空気力学 35

トンボ翼の可能性 35

トンボの翅は空気の渦を部品にしたマイクロマシン 43

トンボ翼は風速に左右されない 46

滑空の達人ウスバキトンボ 49

3章 ● トンボに学ぶ飛行テクノロジー …… 53

トンボ型紙飛行機の優れた直進安定性 …… 53

超小型トンボ型飛行ロボットの開発 …… 63

回転円柱付トンボ型飛行ロボット …… 67

落ちない飛行機は実現できる? …… 68

火星探査用トンボ型飛行ロボット …… 70

4章 ● トンボ技術の空力装置への応用 …… 73

紙製トンボ翼マイクロ風車 …… 79

PET製トンボ翼マイクロ風車 …… 82

環境変化の影響を受けにくい風車の設計 …… 87

マイクロ・エコ風車の実用化に向けて …… 94

広がるトンボ翼の応用 …… 103

小型プロペラの設計 …… 104

小水力発電への応用 …… 106

5章 ● 昆虫模倣論としての進化アルゴリズム …… 111

ネイチャー・テクノロジーとバイオミミクリー …… 111

生物模倣から昆虫模倣へ	113
ものの進化に必要なもの、それは手である	115
昆虫模倣の意義と可能性	117
デザインノイドとマクロ模倣	119
飛行昆虫のマクロ模倣としての薄板・薄膜構造	121
飛行昆虫に学ぶ省資源と持続可能性	125
進化アルゴリズムの提唱	128
進化アルゴリズム品の特徴	133
エピローグ	
● トンボと進化アルゴリズムの描く夢	137
付録 A 翼と飛行に関する基本用語	143
付録 B スマート・メモ	149
参考文献	152

プロローグ



トンボの飛行能力はすごい！

約四十五億年前に太陽系の一員として誕生した地球は、我々の感覚では理解できないくらい長い時を刻み、生命を育んでいます〔文献*3〕。今から約三億六〇〇〇万年前から約七〇〇〇万年続いた時代を石炭紀と言います〔*4〕。現在、石炭に化しているシダ類が全盛だった時期です。翅を持つ昆虫の最古の化石は、この石炭紀初期の地層から見つかっています。ただ昆虫は化石として残りにくく、恐竜に比べ研究する人もはるかに少ないので、その進化の過程はよくわかっていないそうです〔*5〕。

石炭紀を代表する昆虫に、メガネウラという巨大トンボがいます。翅の幅は七十センチメートル以上もあつたようです。精密な模型が展示されている〔*6〕くらいですから、状態のよい化石があるのでしよう。またそれは当時メガネウラが栄えていたことを示す証拠とも考えられます。

1

メガネウラは巨大トンボと言われるくらいトンボに似ていますが、彼らから一億年以上も後に登場した今のトンボが共通して持っている形上の特徴を一部備えていないようです。したがってトンボと分けて考えなければなりません。もつとも、飛行力学的な形態に関してはトンボと差がないように見えます。その後メガネウラは絶滅しましたが、はるかに小さいトンボは二億年以上経つた今も絶えることなく栄えています。

メガネウラや原初のトンボが飛んでいたことは証明されていますが、今のトンボとそっくりの形をしているので飛んでいたであろうと考えられます。約二億年前には花が出現し、昆虫は花と共生することで一大進化を遂げました。メガネウラが現れた石炭紀にはまだ花は存在していませんでした。これら共生型昆虫を次世代型ということにすると、



図 0-1 滑空中のウスバキトンボ

のウスバキトンボを **図 0-1** に示します。チョウも滑空をしますが、トンボの本格的な滑空と異なり、翼面積の大きさを生かして風に乗って空中を移動するといったほうがいいでしょう。

チョウをはじめとする次世代型昆虫は四枚翅を持ちながら、いつの間にか前後の翅をつなぐフックを開発し、飛ぶときには実質二枚にして羽ばたいています。中には、ハエのように後翅が退化してしまった昆虫もいます。羽ばたき飛行は二枚翅で十分なのです。

次世代型昆虫はトンボと翅の折り畳み方だけでなく、飛行法に関しても著しい相違点を持っています。飛び方が羽ばたき中心になり、翅の凸凹が弱くなり平滑面が増えていきます。

昆虫の飛行には羽ばたきと滑空という二つの方法があります。もともと、滑空らしい滑空をするのはトンボ以外の昆虫で見ることがないので、滑空は極少数派です。滑空中

羽ばたき中心の飛行は、彼らが新しい環境に適合するために最初にあった滑空能力を犠牲にしたのではないかと想像させます。後に説明するように、四枚翅であれば滑空飛行ができますから、この想像はあながち見当外れではないでしょう。次世代型昆虫は周囲環境にあわせて、滑空するよりも、羽ばたきによるホバリング能力と高機動性の獲得のほうを選んで進化したと考えられます。

ところで、メガネウラにせよトンボにせよ初期のトンボ類は、復元図を見ると胸部筋肉が貧弱で、長時間の羽ばたきは難しかったようです。おそらく現在のトンボのような



図 0-2 トンボの胸の筋肉

ホバリングはできなかったでしょう。現トンボの羽ばたき飛行能力の素晴らしさは、改めて説明するまでもないと思いますが、その能力は翅の下の胸の部分に埋め尽くされている強力な筋肉あつてのことです〔*8〕(図 0.2)。

どちらの能力が先に取得されたかは別にして、トンボが滑空と羽ばたき双方で優れていることは間違いありません。現トンボは滑空と羽ばたきの両刀使いで、しかも双方

3 プロローグ ● トンボの飛行能力はすごい!

の達人、すなわち昆虫界の飛行スーパーマイスターということになります。

地球環境が変化し続けるなかで、昆虫類は生き残るために進化を続けてきたわけですが、メガネウラをトンボと見なすと、こと飛ぶことに関しては三億五千万年以上前からトンボがナンバーワンの座を占めていると言つてよいでしょう。最近、メキシコからインドまで一万マイル以上の距離を移動するトンボがいることがわかったそうです〔*9〕。これは、日本の本州の長さの十倍以上の距離になりますから、滑空をメインにして飛んでいるのでしよう。改めて飛行距離を示されると、トンボはすごいと言わざるを得ません。地上に最初に現れた飛行昆虫と言つてもよいトンボが、はじめからこのような高い飛行のポテンシャルを備えていたことに、生命体の誕生と進化の神秘を感じます。

これまでトンボのすごさを述べてきましたが、そのすごさを応用した「ものづくり」につなげるためには、トンボの形状や性能などをもう少し具体的に評価しなければなりません。そもそも、「飛行能力がすごい」とはどういうこ

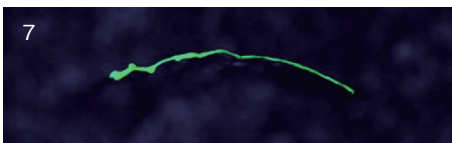
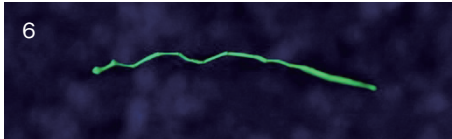
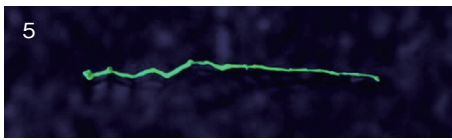
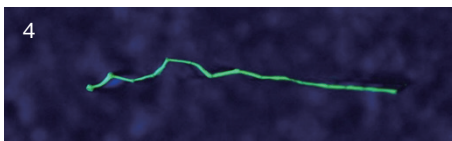
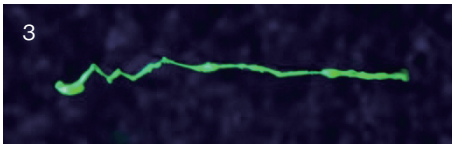
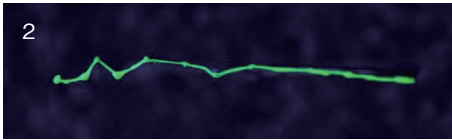
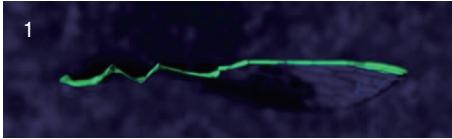
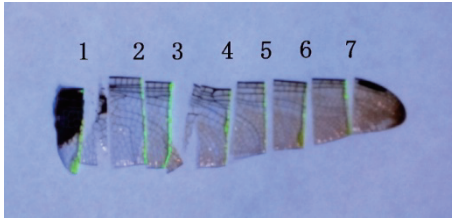


図 0-3 ショカラトンボの翅断面 (右、後翅)

となのかを明らかにする必要があります。

私は数々の模型実験を通して、こと飛行に関して「トンボは本当にすごい」と考えるようになりました。我々が気にもとめなかったトンボの翅や体の形状が、空力や飛行力学の専門家でもあせんとするような、「超」高度な設計を施されたものだったのです。個々の素晴らしさについては、別途、2章以下をごらんいただくとして、以下にその幾つかを紹介したいと思います。

4

想像を超えるトンボの派手な飛行は主に羽ばたきによって生まれるので、羽ばたきの素晴らしさに目を奪われがちですが、実は滑空能力にも素晴らしいものがあります。私が着目したのは、このトンボの滑空能力です。トンボの翅を細断して写真に撮って拡大すると、断面が凸凹していることがわかります。本当にこれでちゃんと飛べるの？と思うくらい凸凹しています(図 0-3)。

これは、考えてみると不思議なことです。飛行機の翼は

流線型をしているのに、同じ空を飛ぶトンボの翅はなぜ凸凹しているのでしょうか？ 翼が流線型でなくてどうして飛べるのでしょうか？ このほかにも、トンボと飛行機を比較してみると、上手く説明できないところがたくさん出てきます。

例えば、飛行機の主翼は一つですが、トンボの主翼は二つあって前後に並んでいます。これについては、飛行機も水平尾翼を勘定に入れると翼としては前後二つになると考えられなくもありません。しかし、トンボは飛行機の垂直尾翼に相当する方向安定板を持っていません。方向安定板がないのに、どうして真直ぐ飛べるのでしょうか？ 滑空中にしばらくを左右に動かしているようにも見えませんか、これも考えてみれば不思議です。

さらに不思議なのは、風の中を低速で滑空できることなのです。我々は当たり前のこととして疑問にも思いませんが、飛行機としてみると驚異です。トンボは小さくてしかも方向や速度を急に変えるので、その飛行速度を正確に測ることは難しいのですが、見た感じでは最高で毎秒十メートルぐらいでしょうか。一方、ゆっくりと滑空している

5 プロローグ ● トンボの飛行能力はすごい！

ときには、トンビのように風の中で空中静止することがあります。これから推測すると、草地を時々羽ばたきながらゆっくり滑空しているときの速度は、無風状態で毎秒二メートルぐらいに思われます。ところで、屋外では毎秒一米ートルぐらいの風はしょっちゅう吹いていますし、しかも風はどの方向から来るのかわかりません。すなわち、トンボは自分の飛行速度の半分ぐらいの強さで吹いている、向きのわかりにくい風の中を平然と滑空していると言つてよいことになります。

飛行速度の半分の風が方向を定めず吹いている環境は、飛行機には厳しすぎます。例えば、トンボを軽飛行機に見立てると、台風並みの毎秒四十メートルの風が吹く中をその倍の速度である時速三〇〇キロメートル弱の速度で飛んでいることを意味します。台風の中を軽飛行機が飛ぶなど考えられませんし、そんなことは許されてもいません。飛行機ではあり得ないことを、トンボはどのようにして実現できるのでしょうか？

これらについては、すべてが解き明かされたわけではありませんが、その鍵となるようなトンボの空力的、飛行力

著者紹介

小幡 章 (おばた・あきら)

- 1941年 新潟県に生まれる
1965年 東京大学工学部航空学科卒業
1970年 東京大学工学系大学院航空学専修博士課程修了
(1972～1974年 米国プリンストン大学留学)
1970年 日本飛行機(株)入社, 以来30年にわたり, 宇宙機器を中心とした軽量機能構造の開発に従事
2001年 日本文理大学教授
2004年 小型低速流可視化水槽発明
2005年 学内トンボ研究プロジェクトに参画, 低流速の可視化とトンボ技術の応用研究に従事
2016年 日本文理大学名誉教授, 特任教授

工学博士

専門は低速空気力学, 超小型機の飛行力学, 開発方法論

トンボに学ぶ 飛行テクノロジーと昆虫模倣

定価はカバーに表示してあります。

2017年2月20日 1版1刷発行

ISBN 978-4-7655-3266-2 C3053

著 者 小 幡 章
発 行 者 長 滋 彦
発 行 所 技報堂出版株式会社
〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-2-5

日本書籍出版協会会員
自然科学書協会会員
土木・建築書協会会員

電話 営業 (03) (5217) 0885
編集 (03) (5217) 0881
FAX (03) (5217) 0886
振替口座 00140-4-10
<http://gihodobooks.jp/>

Printed in Japan

© Akira Obata, 2017

装幀 田中邦直 印刷・製本 愛甲社

落丁・乱丁はお取り替えいたします。

JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構 (電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp) の許諾を得てください。