

平成 21 年 6 月 15 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560178

研究課題名（和文） 植物の生命現象に関連する流体流動の役割

研究課題名（英文） The role of fluid flow in plant life process

研究代表者

須藤 誠一（SUDO SEIICHI）

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：90006198

研究成果の概要：植物種子の営みは、命を子孫に代々つないで生存するための一つの生命現象のあらわれである。そのような植物プロセスを途中で断ち切ろうとした場合、様々な生命現象が発現する。当該研究では、気流を利用して種子を分散するための飛行器具である冠毛の形態構造学を航空力学的な観点から究明し、また、切断した植物内での流体流動が成長・果序展開などの生命現象に及ぼす役割を極普通に見られる多年草植物タンポポを用いて流体工学的観点から明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

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：流体力学，植物工学，プラントミメティクス，バイオミメティクス，タンポポ，航空力学，抗力，生物

1. 研究開始当初の背景

最近、生物の優れた機能・機構を学び応用するバイオミメティクスの分野の研究が活発になり、動物の移動機構の解明、飛翔・遊泳の流体力学、植物の生存・成長・分化機能の解明に関する研究が多数報告されるようになってきた。

このような状況から著者らも、これまで、幾多の危機的試練にもかかわらず数億年もの長い地球の歴史を通して生き延びてきた、飛行を主な移動手段とする昆虫の航空力学的な特性を解明する目的で、トンボの翅構造

と飛行メカニズムの関係、膜翅目昆虫の翅構造と3次元飛行解析、双翅目昆虫の翅構造、様々な昆虫の翅の3次元表面形状計測などに関する研究を進めてきた。また、水中を巧みに遊泳する魚類や水棲昆虫に関しても、ホシザメなどの鱗の3次元表面形状計測、トンボのヤゴの遊泳メカニズムの解明とマイクロ遊泳ロボットの試作、マメゲンゴロウの遊泳解析とゲンゴロウ型マイクロ遊泳ロボットの遊泳特性、高粘性流体で満たされた微小パイプ内を非接触エネルギー供給システムによって遊泳するマイクロロボットの周波

数特性などを調べてきた。

そのようなバイオミメティクス研究を通して、抗力によって飛行する冠毛を有する植物種子（タンポポやアキノノゲシなど）の形態構造の精密計測を開始し、その計測の研究過程で、著者らは生物機能と形態構造との関連による生命機能の発現に気づいた。しかも、多くの文献を調査した結果、植物の生命現象を流体力学的な観点から解明するような研究は誰によっても行われていないことが判明した。そのため、当該研究計画の遂行は新しい学問分野の構築にも関連するものである。

2. 研究の目的

地球の表面近傍は、生物にとって最も重要な部分で、活発な物質交代が営まれ、物質が循環し、エネルギーが流れている。当該研究は、地球生命にとって極めて重要な大気と水の移動の観点から植物の生命現象の解明に取り組むものであり、研究の目的は下記の通りである。

- (1) 多数の細毛を飛行用具として用いている種子を有する植物を対象として、植物の形態構造とその形態の機能を調べる。
- (2) 発芽から植物が成長する場合、物質流動を伴い、その流動が植物の成長に大きく影響してくるため、流体微小流動を微視的な観点から観察究明する。
- (3) 土中に根を張った植物の茎を切断し、大気中に放置した場合の植物現象と、切り取り植物に水を与えた場合の植物成長現象を比較検討する。
- (4) 上述の水や大気としての環境流体が植物の生命現象に及ぼす影響と、動物の生命現象に及ぼす影響を比較検討して、それぞれの特質を明らかにする。

3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するため、下記に示すような方法および手順により当該研究を遂行した。

- (1) 環境流体の流動に大きく関連する細毛を有する動物および植物の、細毛構造の精密形状計測：工学顕微鏡および電子顕微鏡を用いて微小水棲生物の遊泳細毛、植物種子の細毛の形態を計測した。
- (2) 動物および植物の細毛の形態構造と細毛機能の関連性の解析：顕微鏡観察によって得られたデータを使用し、細毛の形態構造と細毛の有する機能を理論的に解析した。
- (3) 動物および植物が直接に細毛と接す

る部分の、細毛展開における機能性の究明：細毛は基本的に開閉展開を行うため、それらと直接連結している部分の生物構造の機能を解析した。特に、植物種子の展開プロセスを微速度写真撮影によって詳細克明に解析した。

- (4) 種子に細毛を有する植物の成長プロセスの定量化：背丈が低く種子に飛行機能としての細毛を有する植物としてタンポポを取り上げ、その成長プロセスを計測した。さらに、花茎を切断したタンポポの給水による成長プロセスについても計測し、水流動による植物成長を解析した。
- (5) 移動するための運動機能に細毛を有する微小水棲生物の脚運動と細毛運動の関連性の究明：微小水棲生物のテザード状態での運動特性を顕微鏡高速動画撮影により明らかにした。
- (6) タンポポの果序展開およびコペポダの尾叉運動に倣うマイクロ機械システムの応用の考察：マイクロ遊泳ロボットなどを試作しその運動特性を求めた。

4. 研究成果

植物の有する機能・機構および植物の生命現象における流体流動とその機能を、流体力学およびバイオメカニクス的な立場から解明する目的で、おもに試料植物としてタンポポを取り上げ、タンポポの種子の冠毛の観察と計測、冠毛展開、切断した頭花の花序展開、切断した頭花の開花過程などの微速度写真撮影による解析を行い、背丈の低い多年草植物の持つ機能と生命現象について調べた。さらに、植物のように定着しないで移動する動物との特質の相違を調べるために微小水棲生物および飛行昆虫を取り上げ、それらの運動器官および移動機構・機能についても究明し、植物機能との比較検討を行った。

これらの研究によって得られた成果を国際会議において公表した際には、多くの研究者から高い評価を頂いた。また、国内の学術雑誌（日本機械学会論文集など）に投稿した際に頂いた査読者からのコメントには、当該研究の成果を高く評価する記述がなされていて、優れた国際学術雑誌への掲載についても推奨を受けている。

当該研究によって得られた結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 周辺に他の雑草が存在する場合、タンポポの成長に伴う葉長 l_1 の変化は日齢に伴って徐々に増大するが、花茎長 l_2 は 2 段階での成長を示し、von Bertalanffy 式とは異なった成長を呈することもある。

- (2) タンポポの頭花は日中開花し夜間は閉花するが、花茎の切断によっても閉花する。また、花茎を切断したタンポポの閉花過程は吸水によって緩やかに進行するが断水したタンポポのように委縮することはない。
- (3) 花期を終えたタンポポの花茎を切断すると果序への展開を誘発できる。また、切断したタンポポに水を供給した場合、花茎は成長しながら果序展開へと進行する。その際、成長速度はピークを示した後に減少に転じ、果序展開前後では成長速度に大きな変化は観察されない。
- (4) タンポポの種子の冠毛は乾燥に伴って展開し、抗力を利用する飛行用具としての機能を備える。実験試料として用いたタンポポの1個の種子の冠毛の細毛数は100本~200本となっていた。細毛の太さは数十 μm であり、このような細長物体の抗力係数はより細いほど大きな値となるように変化し、タンポポの細毛の抗力係数は数十の値を示した。また、細長物体の抗力は物体の長さに比例するため、タンポポの細毛長さの総和が1mを超えて、低レイノルズ数流れの領域において抗力を増大する構造が観察された。
- (5) 花期を終え倒伏状態のタンポポの花茎を切断し、水を供給すると直立する。その花茎が直立する過程において、直立速度の変化は次第に増大するような変化を示す。
- (6) タンポポとキバナムギナデシコの放射状に広がる冠毛の本数を比較すると、タンポポの細毛数は、キバナムギナデシコの数倍の数を有する。しかし、キバナムギナデシコの冠毛の太さおよび長さは数倍~5倍程度である。キバナムギナデシコの場合、放射状に広がる冠毛の間に、タンポポの細毛程度の太さの細毛が網の目状に張り巡らされていて、より大きな抗力生成はこの部分が担っている。
- (7) キバナムギナデシコの種子の重量はおよそ $5 \times 10^{-5}\text{N}$ から $11 \times 10^{-5}\text{N}$ 程度に分布し、冠毛の形成する円形の直径はおよそ30mm~55mm程度に分布する。
- (8) タンポポの種子を、冠毛部分を下方に向けて落下させた場合、冠毛周りに回転して下位瘦果を下に向けるように姿勢制御し、降下速度も姿勢に合わせて上昇・下降変動を示し、最終的には終端速度で落下する。
- (9) 海洋性プランクトンの体長が10mm

程度のイサザアミの遊泳脚にはタンポポなどの細毛と同じように細毛が多数生えていて、細毛を広げて後方に漕ぐことにより抗力を生成して推進する。

- (10) イサザアミよりもさらに微小な炭水プランクトンである体長2mm以下のコペポダの遊泳脚にも多数の細毛が生えていて、細毛を払って後方に蹴るように漕ぐことによって推進する。
- (11) イサザアミおよびコペポダともにパワーストロークでは遊泳脚の多数の細毛を払って脚を漕ぎ、リカバリーストロークでは細毛を閉じて元の位置に戻す。
- (12) 動物の形態は移動のために移動の方向に抵抗が少なくなるような形態構造であり、植物は太陽の光を受光するために便利な構造となっている。
- (13) 微小水棲生物を真似た非接触エネルギー供給方式によるマイクロ遊泳ロボットを試作し、遊泳させることに成功した。また、遊泳移動速度は特定の条件で速い速度を示した。

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 8 件)

- ① 須藤誠一, 松井 直, 芝崎哲也, 辻野智二, 植物の生命現象における流体流動の機能, 日本機械学会論文集 (B編), 第75巻, 第970号, pp.1059-1069(2009). 査読有
- ② S.Sudo, K.Sekine, M.Shimizu, S.Shida, T.Yano, and Y.Tanaka, Basic Study on Swimming of Small Aquatic Creatures, Journal of Biomechanical Science and Engineering, Vol.4, No.1, pp.23-36(2009). 査読有
- ③ 須藤誠一, 松井 直, 生物と環境流体の相互作用に観られる生命現象, 実験力学, Vol.8, No.4, pp.313-322(2008). 査読有
- ④ 松井 直, 須藤誠一, 低レイノルズ数流れに関連する植物冠毛構造, 実験力学, Vol.8, No.4, pp.351-358(2008). 査読有
- ⑤ S.Sudo, K.Tsuyuki, T.Yano, and K.Takagi, Magnetic Fluid Micro Device using Insect Wings, Journal of Physics: Condensed Matter, Vol.20, pp.204142(5pp)(2008). 査読有
- ⑥ S.Sudo, K.Takagi, K.Tsuyuki, and T.Yano, Dynamic Behavior of Dragonfly Wings, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, Vol.8,

- pp.163-168(2008). 査読有
- ⑦ S.Sudo, K.Tsuyuki, and T.Honda, Swimming Mechanics of Dragonfly Nymph and Application to Robotics, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.27, No.3, pp.163-175. 査読有
- ⑧ 須藤誠一, 菅 康彦, 矢野哲也, 露木浩二, ゲンゴロウの遊泳原理に基づく泳動メカニズムの運動特性, 日本機械学会論文集 (B編), 第 73 巻, 第 736 号, pp.2440-2449(2007). 査読有

[学会発表] (計 18 件)

- ① 松井 直, 須藤誠一, タンポポの果序展開, 日本機械学会東北支部第 44 期総会講演会講演論文集, pp. 14-15 (2009 年 3 月 13 日, 東北大学工学部).
- ② 須藤誠一, 松井 直, 生物と環境流体の相互作用に観られる生命現象—植物現象—, 日本実験力学学会第 3 回機能性流体に関する公開研究会講演資料集, pp. 17-26 (2008 年 12 月 13 日, 同志社大学京田辺キャンパス).
- ③ S.Sudo, N.Matsui, K.Sekine, M.Shimizu, K.Tsuyuki, T.Yano, and S.Shida, Hydrodynamic Function of Cilia in Living Creatures, Proceedings of the 3rd International Symposium on Advanced of Fluid/Solid Science and Technology in Experimental Mechanics, Tainan, Taiwan, pp.1-5(2008).
- ④ 須藤誠一, 自然界における機能性流体, 日本フルードパワーシステム学会「機能性流体を活用した次世代型フルードパワーシステムに関する公開シンポジウム」講演論文集, pp. 23-26 (2008 年 11 月 6 日, 東北大学流体科学研究所).
- ⑤ 須藤誠一, 松井 直, 植物現象の流体力学, 日本実験力学学会分科会合同ワークショップ 2008 講演論文集, No. 8-1, pp. 1-6 (2008 年 11 月 1 日, 湯沢東映ホテル).
- ⑥ 松井 直, 須藤誠一, タンポポに観察される生命現象に関する基礎的研究, 日本機械学会東北支部第 44 期秋季講演会講演論文集, No. 2008-2, pp. 35-36 (2008 年 9 月 27 日, 弘前大学理工学部)
- ⑦ 須藤誠一, 西田健一, 矢野哲也, 双翅目昆虫のはばたき解析と翅を利用したマイクロデバイス, 日本実験力学学会 2008 年度年次講演会講演論文集, No. 8, pp. 114-117 (2008 年 6 月 30 日-7 月 3 日, 北海道大学学術交流会館).
- ⑧ 須藤誠一, 清水美規子, 矢野哲也, 信田重成, イサザアミの遊泳挙動解析, 日本実験力学学会 2008 年度年次講演会講演論文集, No. 8, pp. 110-113 (2008 年 6 月 30 日-7 月 3 日, 北海道大学学術交流会館).
- ⑨ 須藤誠一, 関根克也, 信田重成, 矢野哲也, 星加恭平, コペポーダの遊泳移動機構に関する研究, 日本実験力学学会 2008 年度年次講演会講演論文集, No. 8, pp. 106-109 (2008 年 6 月 30 日-7 月 3 日, 北海道大学学術交流会館).
- ⑩ S.Sudo, N.Matsui, K.Tsuyuki, and T.Yano, Morphological Design of Dandelion, Proceedings of the 2008SEM XI International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Orlando, Florida USA, CD-ROM, pp.1-8(2008).
- ⑪ S.Sudo, K.Takagi, K.Tsuyuki, T.Yano, and K.Nishida, The Dragonfly Flight by a Pair of Wings and Frequency Characteristics of Wings, Proceedings of the 2008SEM XI International Congress and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Orlando, Florida USA, CD-ROM, pp.1-8(2008).
- ⑫ 須藤誠一, 松井 直, 植物の力学と機能, 日本実験力学学会第 2 回機能性流体に関する公開研究会講演資料集, pp. 17-23 (2007 年 12 月 7 日, 名古屋工業大学).
- ⑬ 関根克也, 矢野哲也, 須藤誠一, コペポーダの遊泳挙動に関する基礎的研究, 日本実験力学学会分科会合同ワークショップ 2007 講演論文集, No. 7-1, pp. 30-33 (2007 年 10 月 30 日-31 日, ウエルハートピア田沢湖).
- ⑭ 須藤誠一, 矢野哲也, 露木浩二, 水棲昆虫の遊泳挙動と昆虫遊泳に倣うメカニズム, 日本実験力学学会分科会合同ワークショップ 2007 講演論文集, No. 7-1, pp. 39-43 (2007 年 10 月 30 日-31 日, ウエルハートピア田沢湖).
- ⑮ 松井 直, 須藤誠一, 低レイノルズ数流れに関連する植物冠毛構造, 日本実験力学学会分科会合同ワークショップ 2007 講演論文集, No. 7-1, pp. 44-47 (2007 年 10 月 30 日-31 日, ウエルハートピア田沢湖).
- ⑯ 高城和人, 矢野哲也, 露木浩二, 須藤誠一, トンボの翅の周波数特性と翅欠損飛行, 日本実験力学学会分科会合同ワークショップ 2007 講演論文集, No. 7-1, pp. 70-73 (2007 年 10 月 30 日-31 日, ウエルハートピア田沢湖).
- ⑰ 松井 直, 須藤誠一, タンポポのデザイン, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 講演論文集, CD-ROM, pp. 1-4 (2007 年 5 月 10 日-12 日, 秋田拠点センターALVE).
- ⑱ S.Sudo, K.Tsuyuki, T.Yano, and K.Takagi, Magnetic Fluid Micro Device using Insect

Wings, Book of Abstracts of 11th International Conference on Magnetic Fluids, p.606(July 23-27, Lekarska Fakulta UPJS, Kosice, Slovakia).

[図書] (計 1 件)

- ① S.Sudo, K.Nashimoto, K.Tsuyuki, T.Yano, and M.Futamura, Chapter 25: Micro-energy Converter Using Insect Wings, "Bio-mechanisms of Swimming and Flying", ed. by N.Kato and S.Kamimura, Springer, pp.307-318(2007).

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

なし

○取得状況 (計 件)

なし

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

須藤 誠一 (SUDO SEIICHI)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：90006198

(2) 研究分担者

矢野 哲也 (YANO TETSUYA)

秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号：70404853

(3) 連携研究者

露木 浩二 (TSUYUKI KOJI)

いわき明星大・学科学技術学部・助手

研究者番号：00265224