

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03955

研究課題名（和文）同時計測と高解像度数値解析を用いた昆虫羽ばたき音の現象理解と発生プロセスの解明

研究課題名（英文）Numerical and experimental analyses of physical mechanisms and generation process associated with insect flapping wing motion

研究代表者

青野 光 (Aono, Hikaru)

信州大学・学術研究院繊維学系・准教授

研究者番号：10623712

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：飛翔昆虫の羽ばたき運動は、飛行に必要な空気力と個体間のコミュニケーションのために空力音（羽音）を発生させることが可能な機能である。これまでの研究成果によって、羽ばたき運動による独自の流体力発生機構の一定の説明はできているが羽音の発生プロセスは未解明である。そこで、本研究は昆虫の羽音の現象理解と発生プロセスの解明を目的とし計算と実験を行った。数値計算では分離解法と直接解法を用いることで羽ばたき運動中に生じる渦と羽音の発生を翼の運動の変化と詳細な流れ場の変化に基づき議論し、その発生プロセスの一部を明らかにした。さらに、昆虫を用いて実測したデータにより数値解析で得た結果を裏付けることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

昆虫にとって、羽音はコミュニケーションとしては出した方が良く、静粛性の観点では出さない方が良い。この相反関係が羽ばたきの機能とどのように両立しているかについて、進化の観点から注目されている。また、羽音の現象理解と発生プロセスの解明は現在活発に行われる羽ばたき型小型飛行体の開発では静粛性の高い羽ばたき機の設計への活用が期待されている。本研究の成果は工学と生物学の両面の発展への貢献が期待できる。特に、翼の動きと翼まわりの流れ場と音場の関係性の一部を明らかにしたことにより静粛性の優れた羽ばたき翼機の設計や生物のコミュニケーション時の羽の動きと羽音の変化を議論する上で有用な知見となる。

研究成果の概要（英文）：The flapping motion of flying insects on the earth is an excellent function that can generate the aerodynamic force required for flight and aerodynamic sound (flapping wing sound) for communication between individuals. From the research results so far, the unique unsteady aerodynamic force generation mechanisms by the flapping motion can be explained to a certain extent, but the process of wing noise generation has not been clarified. Therefore, in this study, we conducted calculations and experiments to understand the phenomenon of flapping wing sounds and elucidate the developmental process. Discussions were made based on the changes in the wing motion and the the flow field, and some of the developmental processes were clarified. Furthermore, the experimental data measured using insects confirmed the results obtained by those analyses.

研究分野：流体力学

キーワード：羽ばたき音 羽ばたき飛行 高解像度数値計算 同時計測

1. 研究開始当初の背景

地球上の昆虫の中には約百万種の飛翔昆虫がいる。飛翔昆虫の羽ばたき運動は、飛行に必要な空気力だけでなく個体間のコミュニケーションのために空力音(羽音)も生むことが可能な機能として注目されている。これまでの研究成果から、昆虫は羽ばたき運動により作り出した剥離渦を利用し高い揚力発生させる独自の機構を有していることなど、その流体力学的な面は一定の説明ができる。その一方、ハエの羽音実測や前進飛行中のセミの片翼周りの数値解析により羽音の基礎特性が示されているが音源を明確に特定した上で羽音の発生プロセスは未解明である。昆虫にとって、羽音はコミュニケーションとしては出した方が良く、静粛性の観点では出さない方が良い。この相反関係が羽ばたきの機能とどのように両立しているかについては、生物の進化の観点からも注目されている。さらに、ミツバチの羽音には植物の葉っぱを食べる毛虫を減らす効果があることや雄と雌の力が交尾するときに羽ばたき周波数のハーモニクス(倍音)の羽音を利用することなど、羽音の機能は生物学的にも興味深く未解明な部分も多い。また、現在活発に行われている羽ばたき型小型飛行体の開発では利用用途を考えずに飛ばすことに注力した設計が主であり、大きな羽音を発生する試作機を散見する。従って、羽音の現象理解と発生プロセスの解明は静粛性の高い羽ばたき機的设计への活用も期待されている。

昆虫の翼周りの流れ場・音場を理解するためには、場の可視化が必要である。それを実現するためには小さくて早いという独特の運動に起因した難しさがあり容易ではない。そのため、流れ場・音場の詳細な理解を得るためにナビエ・ストークス方程式を数値的に解く数値解析に期待が高まっている。羽音の幅広い周波数領域を流れ場の圧力変動により予測するためには数値粘性の小さい高精度な計算手法が必要であるなど数値解析にとっても羽音は挑戦的な課題である。そこで、研究代表者らは音源である翼まわりの非定常流れを精度良く計算するために高精度数値解析プログラムの開発および検証を行った。さらに、羽ばたき翼型の小型飛行機の羽音計測実験、昆虫もしくは小型の鳥の羽ばたき翼の軌跡測定も行ってきた。

以上の背景から、本研究ではこれまで開発してきた高精度数値解析プログラムと計測技術を基に昆虫羽ばたき飛行の空力音の発生源を特定しその発生機構(プロセス)の解明をすることを目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は昆虫の羽音の発生機構を羽ばたき運動中の昆虫の翼周りの速度・圧力・音場の詳細データを基に明らかにすることである。そのために、テザード飛行中の昆虫の空気力と音場の同時計測や計測した翼の羽ばたき運動データや様々な羽ばたき運動を基に高精度数値解析を実施し、羽音の発生源を特定し、その詳細な発生機構の解析を行う。

3. 研究の方法

本研究の方法は羽ばたき運動中の時系列計測の同時計測と数値実験である。数値解析では、流体場と音場を分離した方法(分離解法)と流れと音場を同時に解く方法(直接解法)の両方を実施した。同時計測では、マイクロフォンと力覚センサーを用いた計測を行った。

4. 研究成果

本研究の成果として 1)羽ばたき運動の変化と羽音発生との関係、2)理想化された羽ばたき運動中に生じる翼周りの流れ場と音場の関係、3)昆虫の羽音特性について報告する。1)と 2)は数値計算によって得た成果であり、3)実験計測によって得た成果である。また、3)の実験は研究協力者である安藤規泰准教授(前橋工科大学)の協力を得て実施した。

成果 1) 羽ばたき運動の変化と羽音発生との関係

成果 1)では、昆虫の翼の羽ばたき運動を羽ばたき振幅、ピッチング振幅、羽ばたき運動とピッチング運動の位相差の三つの運動パラメータに落とし込み、羽ばたき運動の変化と羽音発生との関係を調べた。ここでは、パラメータの影響をグリッドサーチ的に調べるために分離解法を適用し、遠方場の音響予測には FfllowsWilliams-Hawkings (FW-H) モデルを用いた。静止飛行を対象とした。流体力学的無次元数であるレイノルズ数と無次元周波数はそれぞれ昆虫飛行の範囲である 12,500 と 0.375 に設定した。

解析結果より翼の動きは音圧レベル(SPL)の値に大きな影響があり、特にピッチング振幅と羽ばたき振幅の両方が大きいときに SPL の値が大きくなることが分かった。また、羽ばたき運動の変化に対する揚力の発生についても同様の傾向があることも確認した。さらに、羽ばたきとピッチング運動の位相差が正のときに SPL の値が高く、負のときに SPL が低くなり、対象とした運動の範囲では 10-78dB の範囲の羽音が発生することが分かった。大きな揚力を発生し低い羽音が発生するケースでは、位相差が負でかつ羽ばたき振幅とピッチング振幅の両方が大きい場合である。図 1 にそのケースの流れ場の結果と図 2 に揚力の時間変化の比較を示す。

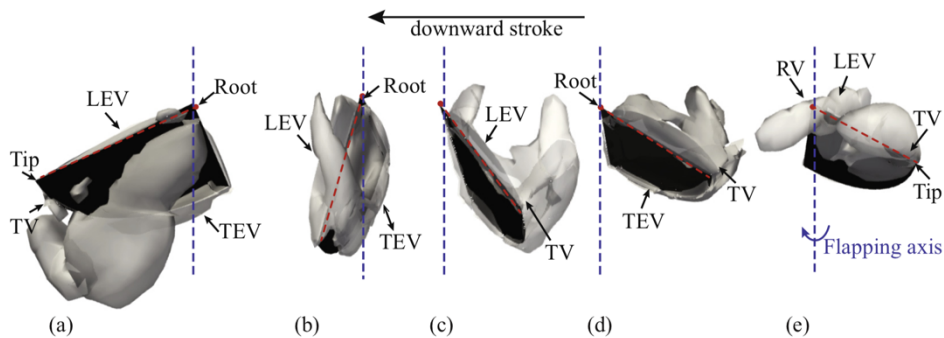


図1 高揚力・低羽音発生時の翼まわりの流れ場の可視化結果。等値面は速度勾配テンソルの第2不変量の Q 値である。図中のLEV、TEV、TVはそれぞれ前縁渦、後縁渦、翼端渦を意味する。羽ばたき運動によって前縁渦、後縁渦、翼端渦が発生させ、それらの渦を活用した非定常流体力学機構により揚力を増加しつつ羽音の発生を抑えているケースである。

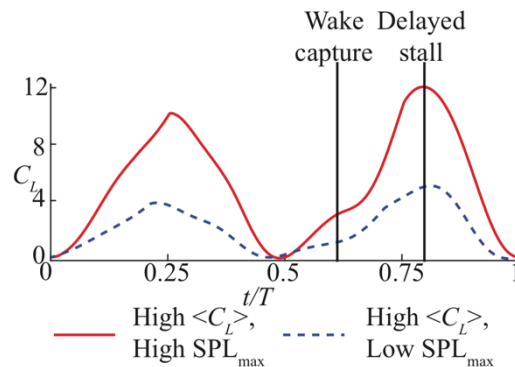


図2 高い揚力が発生するケースの中で最も低い羽音と高い羽音が発生する時の揚力の時間変化。図中のWake captureとDelayed stallは後流捕獲と失速遅れという羽ばたき翼の流体力学特有の非定常流体力学機構、 T は羽ばたきの周期、 C_L は揚力係数を意味する。

成果2) 理想化された羽ばたき運動中に生じる翼周りの流れ場と音場の関係

成果1)により羽ばたき運動と遠方場での羽音発生との関係が明らかになったが翼まわりの近傍場と羽音発生との関係は不明であった。そこで、成果2)では羽ばたき運動中に生じる翼まわり近傍の流れ場と音場の関係を調べるために、高解像度計算手法を用いた羽ばたき運動中の翼周りの流れと発生した音場を同時に数値的に解く解析を実施した。なお、直接解法を行うためには1)で適用した分離解法より格段に大きくなる計算負荷を抑える工夫として、本研究では理想化した代表的な羽ばたき運動を対象にしかつ6次精度計算スキームを用いた計算を実施した。図3にモデルとした昆虫、流体力学的無次元数、理想化された羽ばたき運動を示す。

Bumblebee (*Bombus terrestris*), hovering flight



<https://ja.wikipedia.org/>

Wing chord c	Wing span b	Wing frequency f
0.8cm	1.7cm	170Hz
Reynolds number Re	Reduced frequency k	Mach number Ma
8,800	0.251	0.0485

Wing Motion: Pitch and plunge (figure of eight)

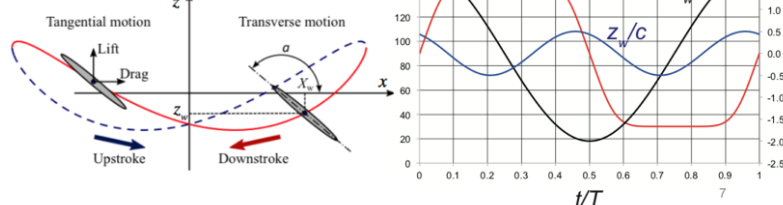


図3 モデル昆虫と理想化された羽ばたき運動の概要

解析結果より羽ばたき運動中に生じた前縁渦(LEV)と後縁渦(TEV)が発生させる圧力場の時間変化、剥離した前縁渦と後縁渦によって後流中に形成された双子の渦(Twin vortex)、迎角の小さい時に生じる翼の上下面に生じたせん断層の剥離流れとその干渉が羽音の発生プロセスに強く関連していることが分かった(図4参照)。さらに、図5に示す羽ばたき運動の軌跡の中心から翼の翼弦長の15倍離れた4つの位置での周波数解析結果から羽音の指向性を示すことができた。羽ばたき面に対して平行な位置にある計測点では卓越した周波数が羽ばたき周波数と同じであるが、垂直な位置では卓越した周波数が羽ばたき周波数の2倍になっていることが分かった。この解析結果は、過去の3次元羽ばたき運動の数値解析データに対して分離解法で得た遠方場の傾向とも一致しており、本研究で明らかにした羽ばたき運動中に生じた流体现象と羽音の発生プロセスの関係は一定の一般性があると考えている。

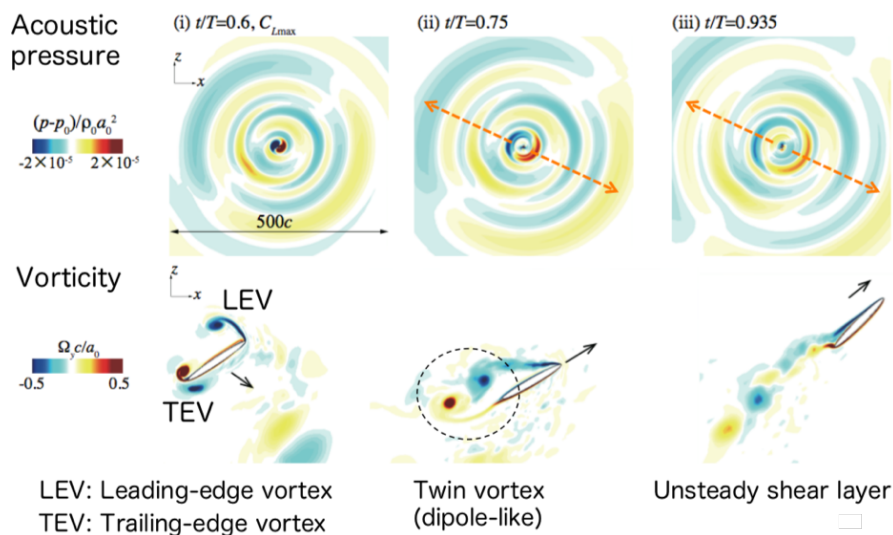


図4 翼のスパン方向に平均した翼まわりの音場と渦度の空間分布。(i) $t/T=0.6$ は揚力が最大になるタイミング、(ii) $t/T=0.75$ は羽ばたきストロークの中心、(iii) $t/T=0.935$ はストロークの終期。オレンジ色の矢印は音圧が伝搬していく方向、黒色の矢印は翼の動く方向を示す。

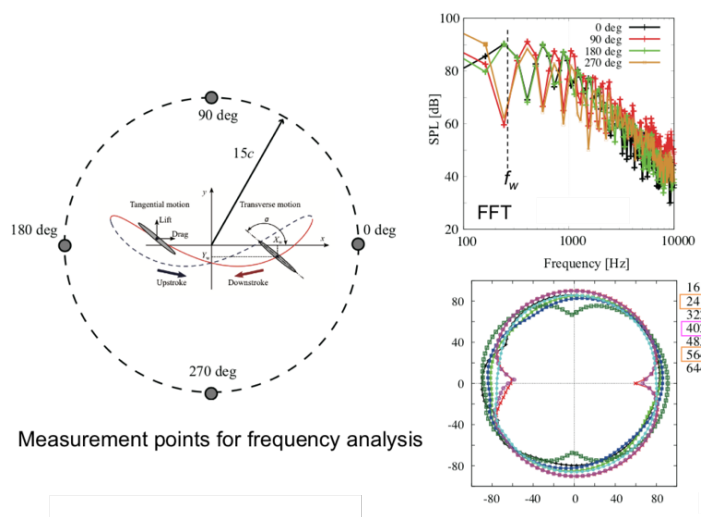


図5 スパン方向に平均した翼周りの音場の時間履歴の周波数解析：計測位置と結果

成果3) 昆虫の羽音特性

1)と2)では数値計算を用いた羽音の発生プロセスに関する研究成果を示した。3)では実際に昆虫の羽音を計測した結果から羽音特性を考察した。実験は安藤規泰准教授(前橋工科大学)の協力の基に行った。図7に実験の概要図を示す。計測した昆虫は体長5cmのスズメガであり、羽ばたき周波数は20-30Hzである。スズメガは棒に固定されたテザード状態であるために四方のモニターから視覚刺激を入れることで羽ばたき運動を誘起した。なお、自由飛行時の羽ばたき運動と比べて固定された条件ではartifactとしてバイアスがかかっていることを把握した上で解析を進めた。

計測結果より、スズメガの羽音の音圧レベルが 30-70dB の範囲であること、羽ばたき周波数とその周波数のハーモニクスに卓越したピークが出ていることを明らかにした (図 8 参照)。特にマイクロフォンの設置位置が羽ばたき面におおよそ 45 度になっていることから 2 倍の羽ばたき周波数での音圧レベルが大きくなっていることが分かった。また、これは 2) の成果で確認した羽ばたき音の指向性と羽ばたき面の関連性を裏付ける結果である。

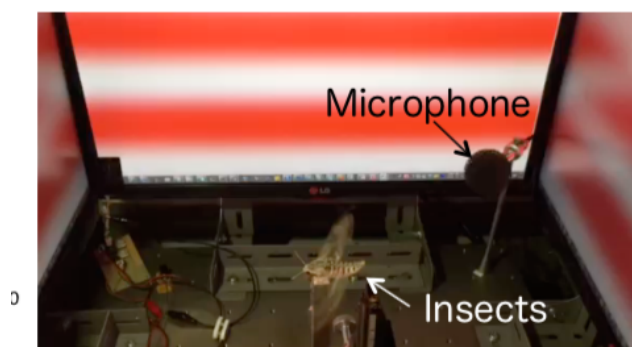


図 6 昆虫の羽ばたき音の実験計測の概要

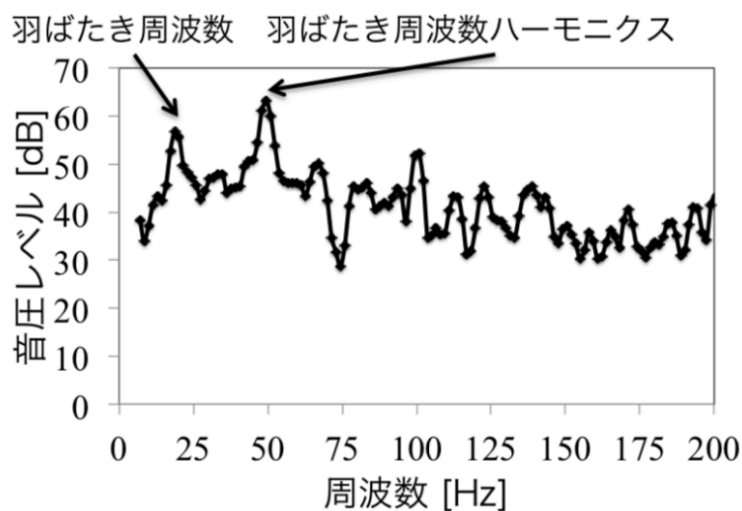


図 7 昆虫の羽ばたき音の計測音圧レベル (SPL) のスペクトル

まとめ

本研究は、昆虫の羽ばたき音の現象理解と発生プロセスの解明を目的とし数値計算と実測を行った。成果として、上述の 3 つの点があげられ、分離解法と直接解法を用いて羽ばたき運動中に生じる渦と羽ばたき音の発生の関係を翼の運動の変化と流れ場の変化に基づき解析し、その発生プロセスの一部を明らかにすることができた。さらに、昆虫を用いた実測データから数値解析で得た結果を裏付けることもできた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nedunchezian Kabilan, Kang Chang-kwon, Aono Hikaru	4. 巻 442
2. 論文標題 Effects of flapping wing kinematics on the aeroacoustics of hovering flight	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 366 ~ 383
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jsv.2018.11.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 青野光
2. 発表標題 理想化された羽ばたき運動する楕円翼まわりの高解像度CFD
3. 学会等名 エアロ・アクアバイオメカニズム学会第45回定例講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青野光、吉川晃平、石川仁
2. 発表標題 羽ばたき運動中に生じる渦と空気力と空気力音の発生に関する研究
3. 学会等名 第51回流体力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青野光、石川仁、C.K. Kang
2. 発表標題 昆虫羽ばたき運動が生み出す流れ・音に関する数値解析とその制御の検討
3. 学会等名 日本機械学会第30回バイオフロンティア講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青野光
2. 発表標題 羽ばたき運動の計算流体解析とデータマイニング
3. 学会等名 日本学術会議第9回計算力学シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Aono, K. Kikkawa, H. Ishikawa, Kang, C.K.
2. 発表標題 A numerical study of sound generation on pitch and plunge wing at low Reynolds numbers
3. 学会等名 AIAA Scitech 2020 Forum（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉川晃平、青野光、石川仁
2. 発表標題 二次元数値実験による羽ばたき運動中に生じる空気力と渦流れの解析
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第25期総会・講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	劉 浩 (Liu Hao) (40303698)	千葉大学・大学院工学研究院・教授 (12501)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	安藤 規泰 (Ando Noriyasu)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	アラバマ大学ハンツビル校			