



Title	羽ばたき型送風機実現可能性の検討
Author(s)	公文, ゆい
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/105467
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

羽ばたき型送風機実現可能性の検討

公 文 ゆ い

2025年12月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	3
1.3 本論文の構成	4
第2章 フクロウの羽ばたき特性と工学的応用可能性	5
2.1 鳥類の羽ばたき運動の概要	5
2.2 メンフクロウについて	6
2.3 工学的応用の意義	8
2.4 本章のまとめ	8
第3章 羽ばたき型送風機の初期試作と観察	9
3.1 初期試作の目的と概要	9
3.2 初期試作機的设计と構造	9
3.3 羽ばたき運動の解析	11
3.4 風速分布の測定と考察	13
3.5 周波数特性と自然風との比較	16
3.6 官能評価および生理指標による快適性の検証（パイロット実験）	21
3.7 本章のまとめ	26
第4章 数値解析による風速分布の改善	27
4.1 解析の目的	27

4.2 解析モデルと手法	27
4.3 羽ばたき型送風機の実機と解析の整合性	32
4.4 シミュレーションの設定とパラメータの変更	36
4.5 評価指標	38
4.6 代表ケース（Representative Cases）の解析結果	39
4.7 その他の解析パターン	45
4.8 本章のまとめ	50
第5章 改良試作と自然風特性の再現	51
5.1 実験の目的	51
5.2 実機への反映	51
5.3 周波数解析	54
5.4 本章のまとめ	57
第6章 結論	58
謝辞	61
付録A	62
付録B	72
参考文献	87
表一覧	90
図一覧	91
本論文に関連した著者の発表論文	94

第1章 序論

1.1 研究背景

送風機は、空気を移動させるための装置の総称であり、古くから人間の生活環境において、暑熱対策や換気を目的として広く利用されてきた。人が涼を得るための装置としては、エアコン、ミスト噴霧装置、冷却ウェアなどが一般的に用いられているが、その中でも人が直接風を浴びる用途に特化した送風機として、扇風機がある。

本研究では、空気を移動させる装置の総称を「送風機」とし、その中でもプロペラファンを用いて人が風を直接浴びる用途に特化したものを「扇風機」と定義する。

プロペラファンが生成する風は、直進性が高く限られた範囲に集中する傾向があり、送風面積が人間の体の風向に対する投影面積に対して小さいかつ、時間的変動に乏しい。一方、プロペラファンに関するこれまでの研究では、風の快適性[1]、エネルギー効率[2]、騒音低減[3]といった観点からこれらの改善方法が検討されてきた。ところが、生成される風の特性に大きな改善は見られず、使用者にとっては「局所的な風」「人工的な風」として知覚されやすいという課題を有している。これらの課題について、さらに詳しく述べる。

まず、「局所的」については、一般的な扇風機のプロペラファン径は 200 - 400 mm[4] で、そのなかでもリビングルームで使用されるそれは 300 mm のものが多い[5]。生成される風の面積はそのファンの直径の範囲程度の環状の範囲であり[6]、人間の体の風向に対する投影面積に対して小さい。首振り運転をして送風範囲を広げるものも存在するが、首振りをしたとしても涼感が向上するわけではない[7]。風速分布をコントロールし、より広範囲な風を生成し、人がより涼を得られるような送風機が求められる。

次に、「人工的」について、一般的なプロペラファンは、中心軸の周囲に半径方向に配置された 3 - 6 枚の羽根で構成され、250 - 1000 rpm (4.16 - 16.67 回/s) 程度で回転する[8]。ファンの標準直径が 200 - 400 mm 程度であれば、吹出口の風速はおおよそ 1 - 10 m/s の範囲にある。風速の時間的変動はごく小さいが、周波数解析を行うと、羽根の枚数と回転数に依存した特定の周波数で明瞭なピークが現れる[9]。例えば、7 枚羽根の扇風機用プロペラファン[10]が 250 rpm で動作する場合、Table 1 に示すように、約 29 Hz に顕著なピークとその高調波が観測される。測定した風速値を、高速フーリエ変換 (FFT) を用いて周波数と振幅を算出した結果を Fig. 1 に示す。

扇風機は人の近くで使用されるため、送出される風の質は人間の感性という観点で重要である。例えば、生成される気流は触覚に影響を与え、発生する音は聴覚に影響を与える。触

覚的に快適な風の一例は、固有のゆらぎを持つ自然風である。聴覚的な側面を考慮すると、低騒音を目指す必要がある。

すでに「 $1/f$ ゆらぎ」を持つ風を生成するよう設計された扇風機が登場している[11]が、これらは、回転速度を変化させることで不規則な気流の変化を作り出し、ユーザーの快適性を高めることを目的としている。ところが、その多くはファンの回転速度の制御による自然風の擬似的な再現に留まっている。もし羽根の枚数が無限に近づけば、生成される気流は理論的には一様になる。実際の羽根の枚数は有限であるため、周波数スペクトルにはピークが現れる。回転速度を時間的に制御することでこれらのピークを緩和することは可能だが、そのような調整を行っても、ピークが生じる最低回転速度に対応する周波数以下の周波数成分を含む気流を生成することはできない。

このように、風の快適性に関する研究・開発も行われているが、プロペラファンを用いる限り、生成される風の特性に関して大きな変化は現れない。風の質改善のためには、生成される風の周波数特性を制御することが必要である。

したがって、「風の分布」と「風の質」という二つの観点から、新しい送風原理に基づく設計が求められる。この観点から、本研究では従来の送風機的设计とは異なる「生物の動き」に着想を得た送風機を検討する。

Table 1. Peak frequency based on the rotational speed of a 7-blade propeller fan

Rotational speed [rpm]	250
Rotational speed [rps]	4.17
Frequency of 7-blade fan [Hz]	29.17
Double the blade frequency [Hz]	58.33

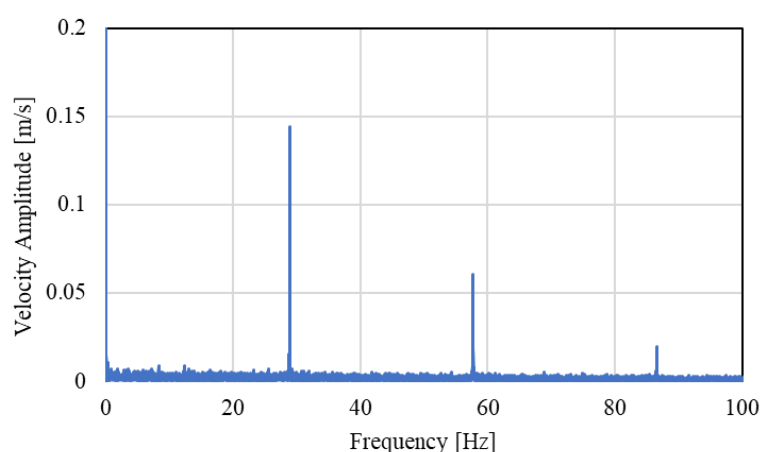


Fig. 1. Frequency characteristics of a 7-blade propeller fan at 50 mm from the fan.

1.2 研究目的

本研究の目的は、鳥類の羽ばたき運動に着目し、その運動特性を模倣した送風機の設計原理を提示することである。提示した設計原理に基づいて作製した羽ばたき型送風機を用い、自然風に近い周波数特性の再現性と、空間的な風速分布の均質化という二つの性能の両立可能性を検証する。

羽ばたき型送風機の送風手法は従来型扇風機とは異なるため、生成される風にも違いがあると考えられる。特に送風のための羽根の駆動周波数がプロペラファンのそれと大きく異なるため、ゆっくりと動く羽根から生じる風は、自然風に近い「ゆらぎ」を持つ風を生成できる可能性がある。羽根の変形や運動条件を適切に制御することにより、扇風機よりも広範囲かつ均一な送風を実現できると期待される。

以上の考察に基づき、メンフクロウ (*Tyto alba*, Barn Owl) の羽ばたき運動を参考にすることで、従来のプロペラファンでは再現できない「自然に近い気流」の実現を目指した。羽ばたき運動と風速分布について数値計算による検討を行った後、その結果得られた羽ばたき運動や翼の柔軟性などの条件に近づける実機を作製して流れ場を確認した。

具体的には以下の3つの研究軸に分けて検討を行った。

1. 初期試作による羽ばたき型送風機の基本特性の把握

メンフクロウの羽ばたき運動を参考に、羽ばたき型送風機の初期試作機を設計・製作し、生成される気流の風速分布および周波数特性を把握する。これにより、自然風に近い「ゆらぎ」を持つ風の可能性を探索し、快適性に関する官能評価も行う。

2. 数値解析による風速分布改善

計算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) を用いて、羽ばたき運動の設計パラメータ（主にピッチ角）が気流特性に与える影響を調査する。有効送風面積 (EFA) および風速の均一度 (CV) を定義し、これらを指標として、広範囲かつ均一な送風を実現するための設計条件を抽出する。

3. 改良試作と自然風特性の再現性検証

数値解析の結果を踏まえて改良試作機を製作し、風速分布・風のパワースペクトルを計測する。従来型扇風機や $1/f$ ゆらぎ制御機構を有する扇風機との比較を通じて、羽ばたき型送風機の生成する風が自然風に近いゆらぎ特性を有するかを再度、検証する。

1.3 本論文の構成

本論文は全6章で構成される。第1章は序論であり、本研究の背景、従来研究の概要、および研究目的を述べる。

第2章では、メンフクロウの羽ばたき運動に着目し、その空力的特性を整理する。自然界における羽ばたきの知見を工学的に応用するための基盤として、羽ばたき運動、翼の変形など模倣の観点から、送風機設計において模倣すべき要素を明らかにする。

第3章では、羽ばたき型送風機の初期試作に関する設計と実験的評価を行い、生成された風の特性を測定し、「自然に近い気流」の再現可能性について検討する。

第4章では、数値解析を用いて風速分布の改善を図る。羽根の変形に関する複数の設計条件を変更し、送風性能に与える影響を評価する。広範囲かつ均一な送風を実現するための指針を提示する。

第5章では、改良試作機を用いた実験により、自然風の周波数特性の再現性を検証する。従来型扇風機との比較を通じて、羽ばたき型送風機によって形成される渦構造の可視化を行い、送風性能の改善効果、羽ばたき型送風機の自然風再現性を考察する。

第6章では、本研究の成果を総括し、今後の展望について述べる。

第2章 フクロウの羽ばたき特性と工学的応用可能性

2.1 鳥類の羽ばたき運動の概要

鳥類は、Fig. 2.のように、翼のプランジ運動（上下運動）とピッチ運動（迎角変化）を組み合わせ、飛行することが報告されている[12]。

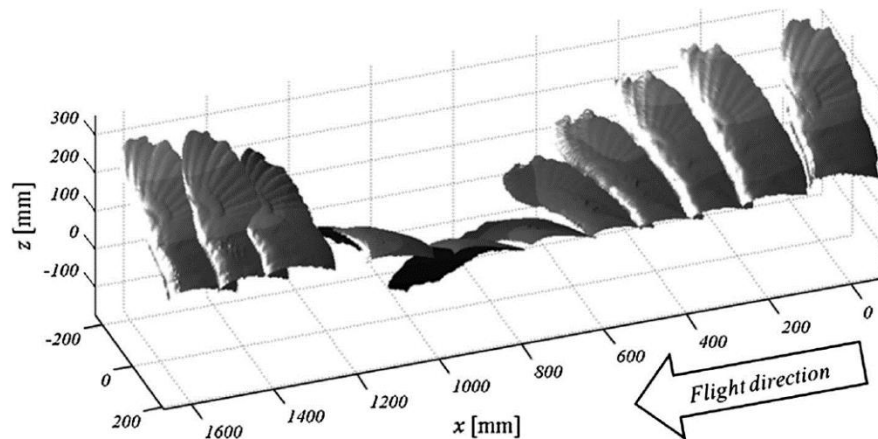


Fig. 2 Wing shape of a barn owl at some time steps of a single flight [12].

翼は単なる剛体ではなく、羽根（あるいは羽毛）や骨格の柔軟性によって受動的に変形し、さらに筋肉による能動的な変形も加わることで、空気の流れや圧力変化に応じて形状を変える。飛行時の翼の周期運動において、ダウンストローク時には翼の迎角が減少し、アップストロークでは迎角が増加する。この一連の運動において、翼の柔軟性は乱流抑制や効率的な渦生成に寄与することが報告されている[13]。このような柔軟な構造と運動により、鳥類は空気の流れに応じて揚力と推進力を得る。

2.2 メンフクロウについて

家庭用送風機の設計において、静かさが人の快適性のために重要である。参考とする鳥類として、羽ばたき音が静かなフクロウ目に属する鳥を選ぶのが良いと考えた。フクロウの静音飛行の能力は、鳥類の中でも特に優れていることが知られているが、この能力はすべてのフクロウに共通するわけではなく、静音飛行を必要としない種もある[14]。静音飛行をするフクロウの中でも Fig. 3(a) に示すメンフクロウ[15]は、これを送風機として使用することを考えた場合、家庭での使用に適したサイズである。メンフクロウの翼の寸法は 450×170 mm (Fig. 3(b)) である。羽ばたき角度は、翼の水平位置を基準に上下に動く範囲を指し、メンフクロウの場合は 120° である。羽ばたき周波数はおおよそ最大で 4 Hz である[16–20]。以上の特性を踏まえ、本研究では、メンフクロウの羽ばたき運動を模倣した送風機の設計、評価を行う。

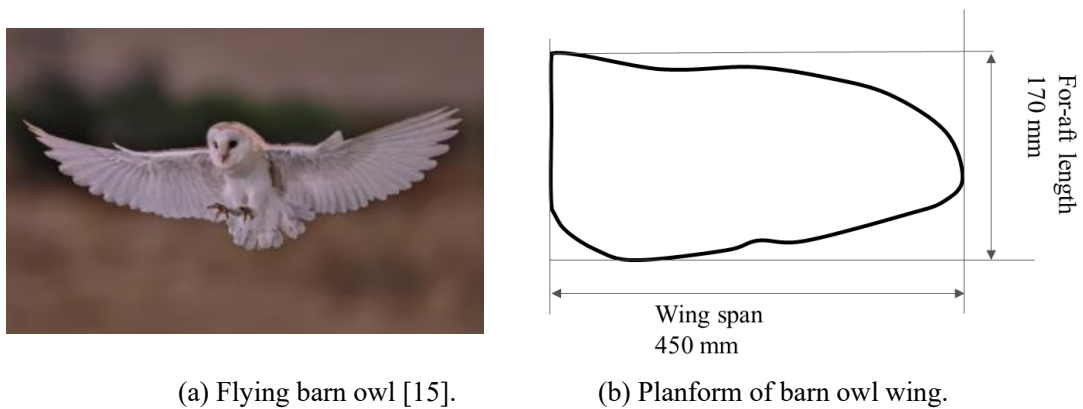


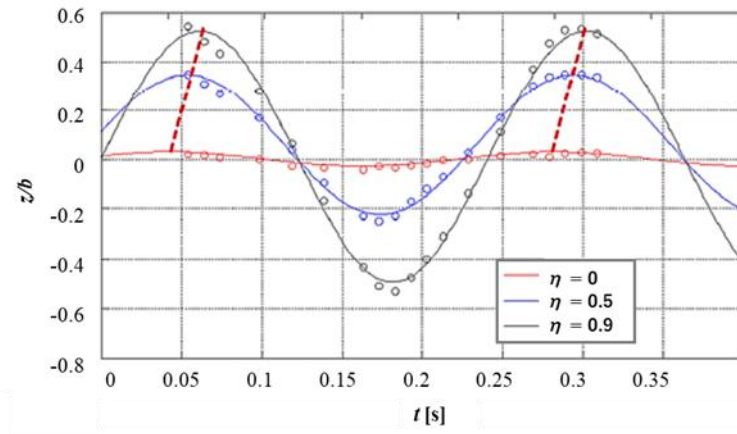
Fig. 3. Barn owl.

メンフクロウの翼が羽ばたき飛行中にどのように変形するかは、文献[12]を参考にした。Fig. 4 は[12]からの引用である。

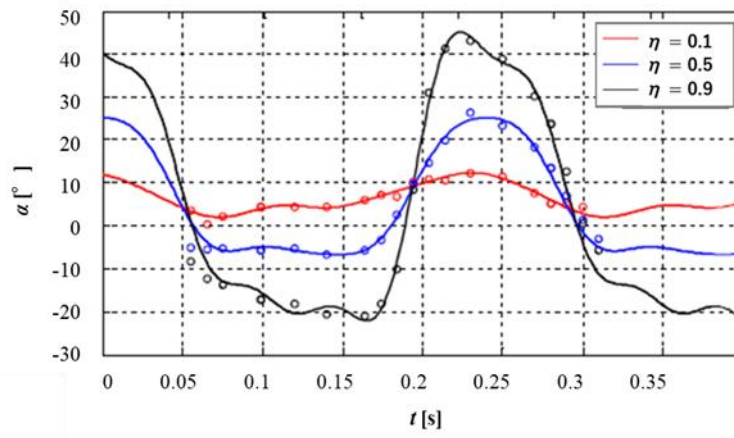
Fig. 4(a) は鳥の胴体固定座標系におけるプランジ運動を示している。横軸は時間、縦軸は翼幅 b に対する変位量 z の比 (z/b) を表す。 η は翼のスパン方向の位置を示し、翼根が 0、翼端が 1 である。プランジ角 θ は、翼が上下に動く際の角度を示し、前方から見たときに水平基準線からの角度で定義される。Fig. 5(a) に示すように、水平位置を 0° とし、変位を角度 θ として表す。

Fig. 4(b) はピッチ運動を示している。Fig. 5(b) に示すように、ピッチ角 α は、翼の前縁から後縁にかけて（翼コード方向）の回転角度を表す。後縁が水平から回転した角度がピッチ角 α であり、正の値は前縁が後縁よりも上がっている状態である。

下降ストロークの間、翼のピッチ角は減少し、下降ストロークの終了から上昇ストロークの開始にかけて最小値に達する。その後ピッチ角は急速に増加する。ピッチ角の角度は $-20^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ の範囲で変化する。

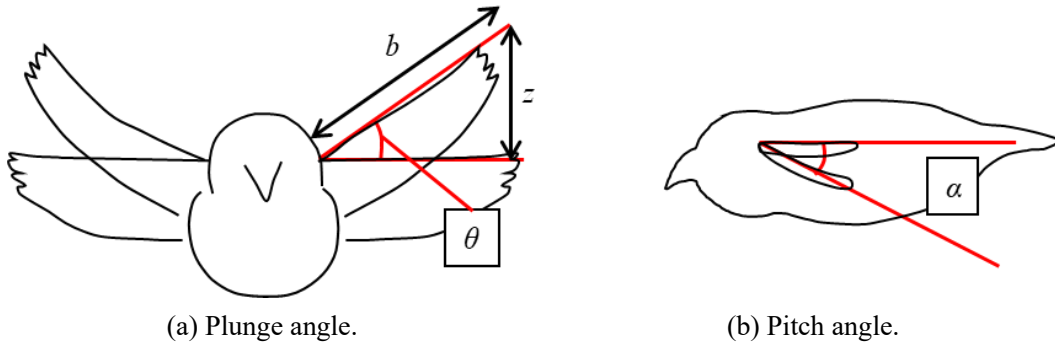


(a) Plunge motion.



(b) Pitch motion.

Fig. 4. Motions of a barn owl wing in flapping flight [12].



(a) Plunge angle.

(b) Pitch angle.

Fig. 5. Definition of angles.

2.3 工学的応用の意義

メンフクロウの羽ばたき運動に見られる機械的および空力的特性は、送風機の設計において多くの示唆を与える。とりわけ、以下の三点において工学的応用が期待される。

第一に、静粛性の獲得である。フクロウは滑空や羽ばたきの際に極めて低い騒音で飛行することが知られており、その翼形状や羽ばたき周波数、翼の材質特性を送風機の羽根設計に応用することで、騒音の低減が可能となると考えられる。本研究では静粛性の定量的評価は行っていないが、今後の設計指針として有望な示唆を与えるものである。これは、家庭用送風機において快適性を左右する重要な要素の一つである。

第二に、自然風特性の再現が挙げられる。羽ばたきによって生じる非定常渦は、自然風が持つ「 $1/f$ ゆらぎ」に類似したパワースペクトル特性を示す可能性がある。このようなゆらぎを再現することで、従来型扇風機では得られなかった、より「自然に近い気流」を生成できると考えられる。

第三に、風速分布の制御である。プランジ角やピッチ角を適切に制御することで、風速分布を広範囲かつ均一に形成することが可能となり、使用者の体表面を包み込むような風を生成できる可能性がある。換言すれば、局所的な風の偏りを解消する設計が実現できる可能性がある。これらの設計条件は、CFD 解析を通じて系統的に導出できると考えられる。

2.4 本章のまとめ

本章では、鳥類の羽ばたき運動の概要と、特にメンフクロウの羽ばたき運動の基本的な構成要素（プランジ運動とピッチ運動）について整理した。次章以降では、これらの特徴を踏まえ、まず、初期試作機を作製し、羽ばたき機構によって生成される気流の基本特性を確認する。次に、数値解析による風速分布の改善手法を検討し、最後に、改良試作機を用いた実験により送風性能と自然風再現性を検証する。

第3章 羽ばたき型送風機の初期試作と観察

3.1 初期試作の目的と概要

プロペラファンが生成する風は、直進性が高く、限られた範囲に高速域が集中する傾向がある。このことにより、送風面積が人間の体の風向に対する投影面積に対して小さく、風速の時間的変動も乏しいため、使用者にとって「人工的な風」として知覚されやすいという課題がある。特に、ファンの回転によって生じる風の周波数特性は、回転数および羽根枚数に基づく特定の周波数にピークを持ち、自然風のようなゆらぎを再現することが困難である。

本章では、自然風に近い気流を生成することを目的として、鳥類の羽ばたき運動に着想を得た送風機の初期試作を行った。メンフクロウの翼の平面形状、骨格構造、羽ばたき周期、および上下方向の羽ばたき角を再現し、羽ばたき時に生じる羽根の受動的な変形を模倣することにより、自然風に近いゆらぎ特性を有する低周波の気流を生成することとした。

初期試作機では、上下に揺動する2枚の羽根によって気流を生成する構造を採用した。これによる風速分布および周波数特性を測定し、従来型扇風機との比較を通じて性能を評価した。

3.2 初期試作機の設計と構造

羽ばたき型送風機に用いる羽根の構造を Fig. 6 に示す。羽根は、羽根布 (Wing cloth) と羽根骨格 (Wing frame) の2つの主要部品を接着して構成される。

1枚 (片羽根) の羽根のサイズは幅 360 mm、最大翼弦長 220 mm であり、これの一对を鳥のように羽ばたかせる。ここで、羽根の前縁部にあたる部分を腕部と呼ぶこととし、腕部は付け根から外側に向かって厚みが徐々に薄くなるようにした。この腕部の基部が駆動系と接続される。(混乱を避けるため、これ以降、フクロウの羽根は「翼」、羽ばたき型送風機の羽根は「羽根」と区別して表記する。)

メンフクロウの翼は、本来、羽ばたきによって揚力と推進力を生み出すが、本研究での羽ばたき型送風機は飛翔を目的としないため揚力の発生は必要なく、羽ばたき運動による気流の生成を目的とする。羽ばたきを固定位置で行うことで、送風に必要な運動量を発生し、後方への気流を生成することを目指した。

羽ばたき型送風機は、Fig. 7(a) に示す構造で、Fig. 7(b) のように腕部を上下に揺動させることにより、それに付随した羽根が受動的に変形し、風を後方に送出するものである。駆動源

は、直流ブラシレスモーターであり、ウォームギアとホイールギアを介して減速し、リンク機構を通じて回転運動を腕部および羽根の上下方向の振動運動に変換する仕組みである。

Fig. 8 に初期試作機の全体像を示す。図中に示す座標系では、正面図における左右方向を x 軸、垂直方向を z 軸、羽根の前後方向を y 軸として定義し、羽根の後縁を $y=0$ とした。 y 軸の正の方向は、気流の流れる方向と一致させた。

羽ばたきの角度および周波数が増加すると羽根の慣性力や空気抵抗が大きくなるため、装置全体に振動が誘発される。そのため、以前の研究[16-20]で報告されているメンフクロウの実際の羽ばたき動作から逸脱しない範囲で、羽ばたき運動を規定するパラメータを設定した。ここでいう羽ばたき角度とは、羽根の水平位置を基準に上下に動く範囲を指し、本試作機では約 90° に設定した。羽ばたき周波数は 1.1 Hz に設定した。

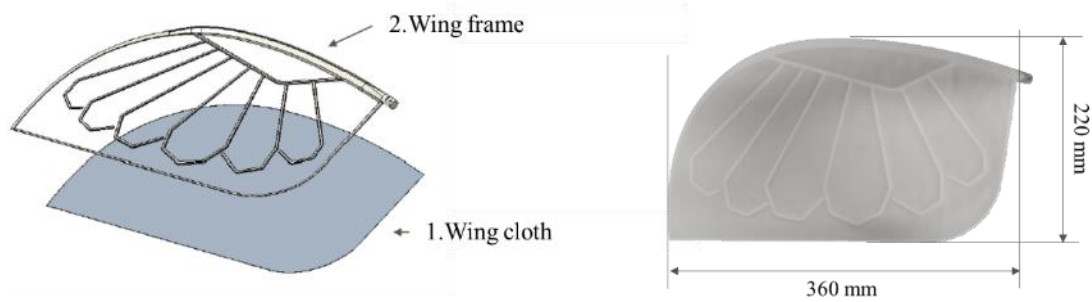


Fig. 6. Structure of the flapping wing.

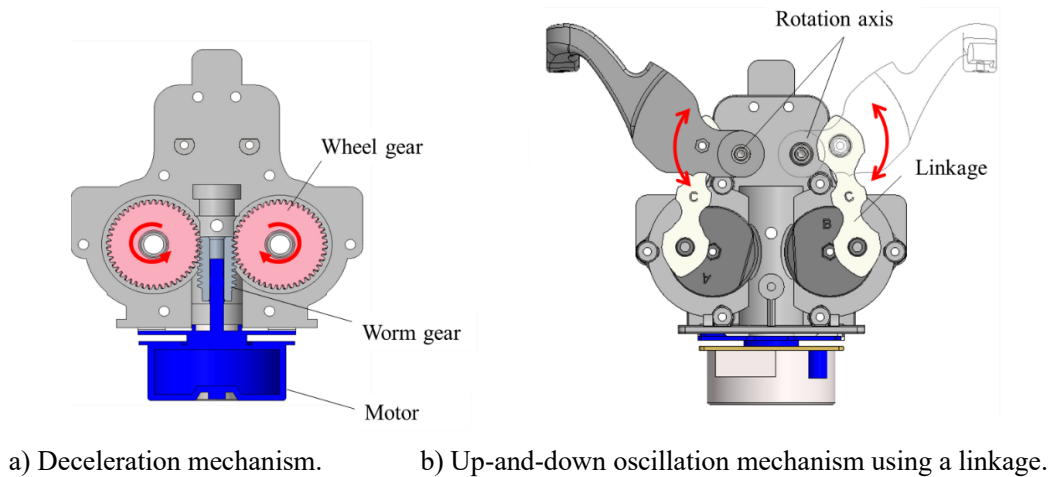
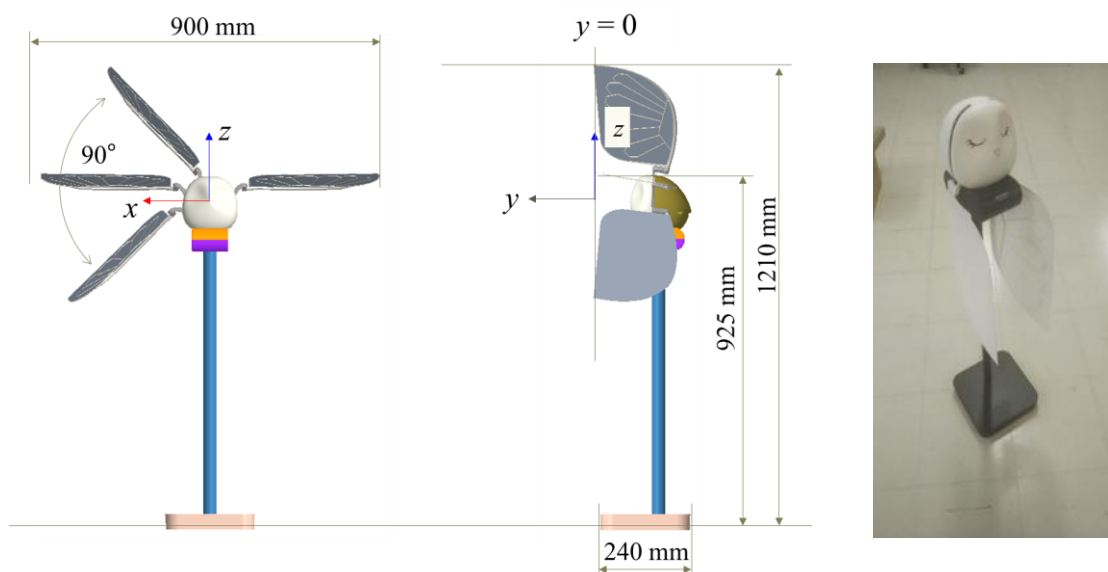


Fig. 7. Drive source.



a) Main dimensions and coordinates of the flapping fan.

b) Photograph.

Fig. 8. Prototype.

3.3 羽ばたき運動の解析

羽根の剛性は、羽根布（Wing cloth）と羽根骨格（Wing frame）の組み合わせによって決定される。剛性の変化が風向および風速に与える影響を調べるため、2種類の剛性を有する羽根を製作し、風速分布を計測することとした。羽根の骨格構造は一定に保ちつつ、羽根布として使用する布を変更することで羽根の剛性を調整した。今回、羽根布として使用した2種類の布は、空気に対する透過性はほぼ無く、布を通過する風はほとんど無い。布表面の平滑性は、境界層の形成に影響を与える可能性がある。一方、本装置での羽ばたきにおける気流の主な形成要因は大規模な剥離渦であると考えられるため、布表面の平滑性は、大規模剥離渦の発生にほとんど関係しないと考えられる。

羽根布として使用した布の詳細を Table 2 に示した。これら2種類の布を用いて作製した羽根をそれぞれ「Wing 1」「Wing 2」と呼称することとする。

Fig. 9(a) に示すように、羽根面上にマーカーを設置した。Fig. 9(a) および (b) に示すように、マーカー同士の間の実際の距離を L_0 、プランジ角を θ と定義した。 η は羽根のスパン方向の位置を示し、根元が 0、外側端部が 1 である。Fig. 9(c) および (d) に示すように羽根固定座標は x' 軸が羽根のスパン方向で、 y' 軸が羽根のコード方向、 z' 軸が羽根面に垂直な方向である。 L は羽ばたき中の $\eta = 0.5$ における y' 方向から見た後縁の z' 軸上の位置を表す。Fig. 9(c) に示す状態では、 L は負の値をとる。

Fig. 10 に示すように、羽根の根元を固定し、羽根後縁の中央（図中の A 点）または外側端部（図中の B 点）に、 z' 方向に荷重を加え、変形量を測定した。Fig. 11 に示す結果から、Wing 1 は Wing 2 の約 2 倍の変形を示しており、より大きな弾性変形の傾向を有することが確認された。

流れ場の測定に先立ち、作製した羽根の変形挙動を確認することを目的として、羽ばたき動作をビデ

カメラで記録し、画像処理によって羽根の変形を解析した。

ピッチ角 α は、前縁が後縁に対して相対的に上昇しているときに正の値をとるため、 L が z 軸負方向に変位すると、ピッチ角 α は正となる。

したがって、ピッチ角 α [°] は以下の式で表される。

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{L}{L_0} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

(1)式は、 $L = -L_0$ の場合に $\alpha = 90^\circ$ 、 $L = 0$ の場合に $\alpha = 0^\circ$ となることを示している。

距離 L の時間変化を測定し、ピッチ角 α を時間の関数として算出した結果をFig. 12 に示す。

プランジ角は、正弦波に近い挙動を示しており、ピッチ角は下降ストローク中に低く、下降ストロークから上昇ストロークへの移行時に最大値に達する。Wing 2 におけるピッチ角の振幅は、Wing 1 の約半分である。

Fig. 12 に示す羽ばたき型送風機のプランジ角とピッチ角の位相差は、Fig. 4 に示した実際のメンフクロウの羽ばたき運動との比較において完全に一致しているわけではないが、最大値および最小値のタイミングにおいて類似した傾向を示している。

Fig. 4(b) に示されるように、メンフクロウの羽ばたき運動中におけるピッチ角の変動範囲は、 $-20^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ である。一方、Wing 1 においては、 $-40^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ であり、実際のメンフクロウの羽ばたき運動とは異なる挙動を示した。

Table 2. Detailed structure of the wing

Wing Number	Wing cloth	Wing frame
1	Product name: Cotton Twill Dump Air Tumbler Model Number: SW11498	Material: PP Minimum thickness: 0.52 mm
2	Product name: Bylin 701 Model Number: SN701 (0.8)	Material: PP Minimum thickness: 0.52 mm

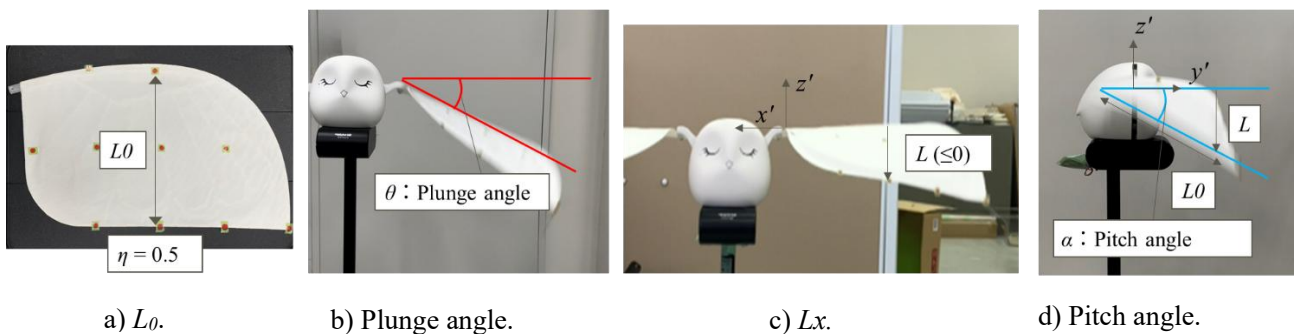


Fig. 9. Definition of dimensions.

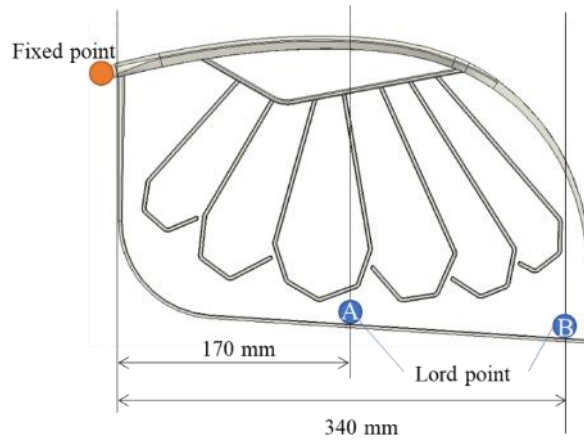
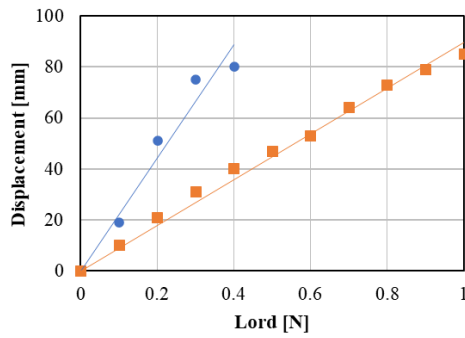
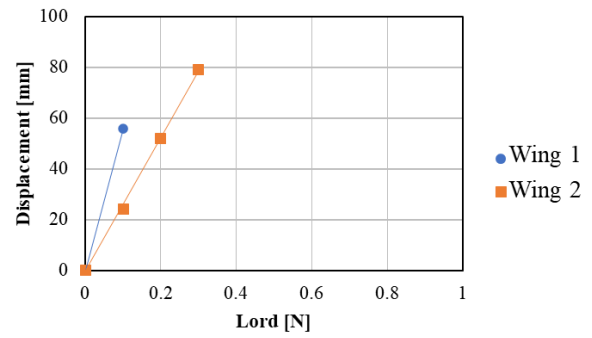


Fig. 10. Point to measure the amount of deformation.

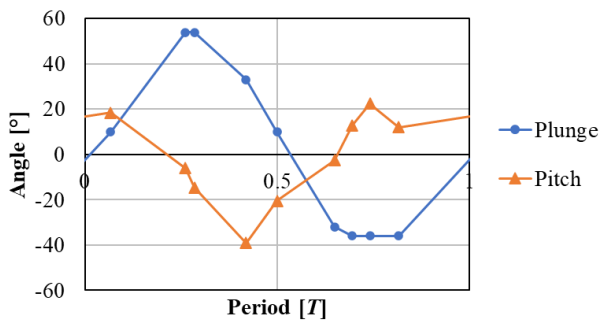


a) Point A.

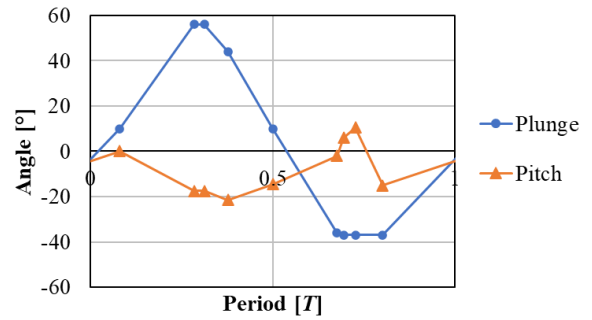


b) Point B.

Fig. 11. Displacement in the z-direction.



a) Wing 1.



b) Wing 2.

Fig. 12. Plunge and pitch angles.

3.4 風速分布の測定と考察

羽ばたき羽根の剛性の変化が生成される気流の特性に及ぼす影響を調査するため、Fig. 13 に示すように流れ場の計測を行った。以下に計測手法の概要を示す。

風速分布は、正面図の右側 ($0\text{ mm} \leq x \leq 750\text{ mm}$ 、 $-800\text{ mm} \leq z \leq 700\text{ mm}$) の範囲で測定することとした。風速値は2分間の平均値として記録した。測定には、熱線式風速計 (KANOMAX モデル 1011 CTA ユニット) を用いた。羽根後縁を $y=0$ とし、 y 軸の正方向は、気流の流れる方向と一致させた。この条件の下、最大測定距離の設定を行った。

最大測定距離は、不快感の少ない風環境について述べた文献[21] を参考にして定義した。文献[21]によれば、室温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ では $0.6 - 1.7\text{ m/s}$ が適風域、すなわち不満の少ない風とされる。これ以下の風速では「弱すぎる」という不満が現れる。そこで、本機による平均風速についても 0.6 m/s 以上となる距離が適風域と考えることとした。

y 軸方向に 100 mm 間隔で計測を行った結果、羽根から 700 mm までの範囲で平均風速が 0.6 m/s 以上を維持することがわかった。したがって、 $y=700\text{ mm}$ 位置を最大測定距離とした。

羽ばたき運動によって生成された風速分布を Fig. 14 に示す。

Wing 1 および Wing 2 のいずれの羽根の場合でも、 $y=50\text{ mm}$ の位置では、最大風速が $x=0$ から離れた位置で計測された。 $y=700\text{ mm}$ の位置では、Wing 1 では最大風速が $x=0$ に近い位置で見られたが、Wing 2 ではさらに $x=0$ から離れた位置で最大風速を示した。

Wing 1 での気流は、中央に配置された2枚の羽根から発生した風が、羽根から遠ざかるにしたがって中央で合流する流れとなっている。一方、Wing 2は、2枚の羽根から発生した風が合流せず、それぞれ独立した流れとして存在する。

z 方向の風速分布に着目すると、Wing 1、2 ともに $y=50\text{ mm}$ から $y=700\text{ mm}$ にかけて流速の存在域が z 負方向に移動しており、風は z 方向の下向きの風向を有することが確認できる。羽ばたき型送風機において、羽根の上下運動に重力が作用することで、下向きの流れが強調されるためと考えられる。Wing 2 のように羽根の弾性変形が小さい場合、気流が集中しやすく拡散しにくいため、下向きの速度が増大すると考えられる。一方で、プロペラファンによる扇風機では、羽根が水平方向を軸に回転し、運動が重力方向に対して対称であるため生成される風に重力はほとんど影響しない。

これらの結果から、羽根剛性が風速分布と風向に大きな影響を及ぼすことが示された。

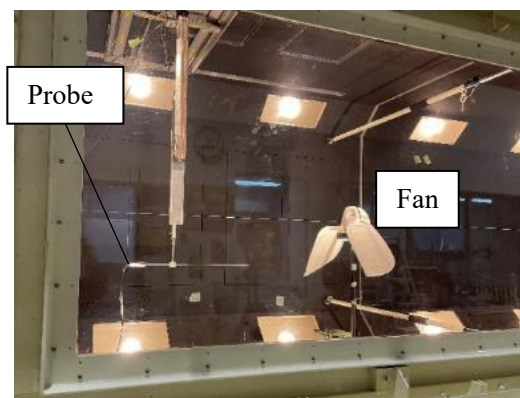


Fig. 13. Measurement scene.

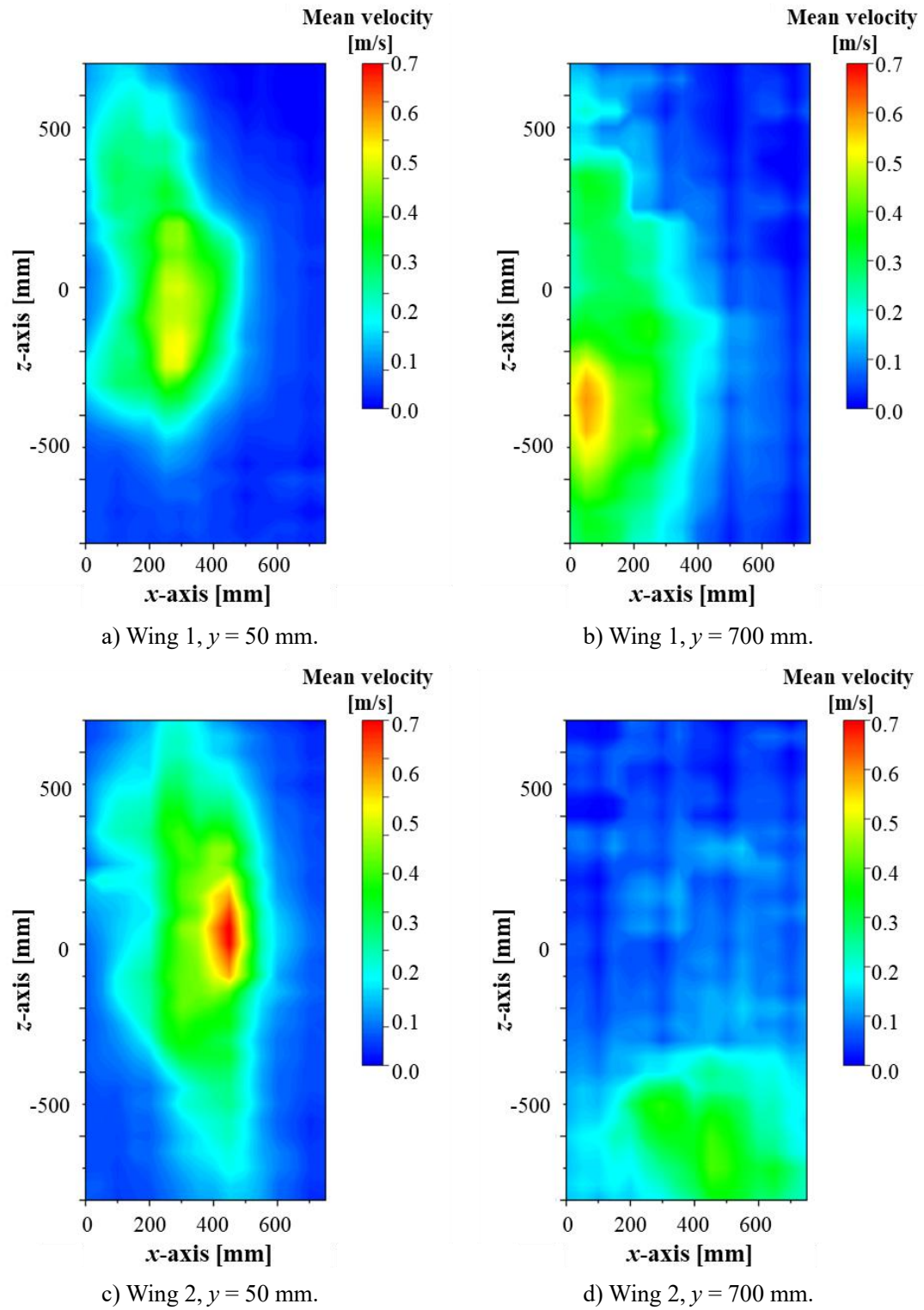
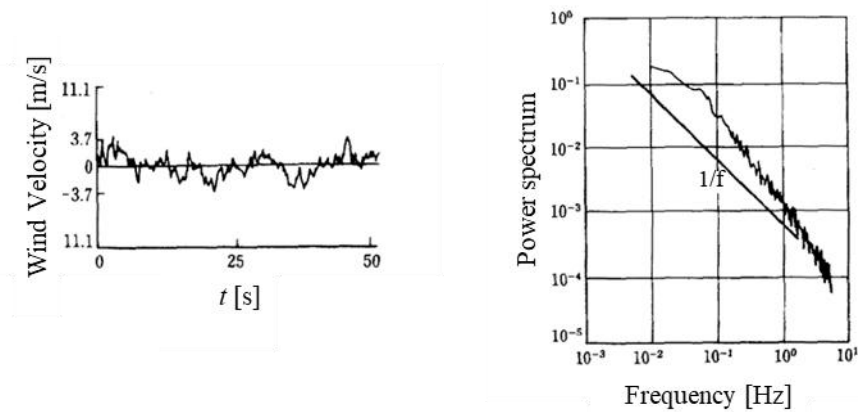


Fig. 14. Distribution of average wind velocity.

3.5 周波数特性と自然風との比較

自然風の時間変動とパワースペクトルは Agu ら[22] によって報告されており、Fig. 15 にそれらを示す。ただし(a) は自然風の時間変化、(b) は風速変動のパワースペクトルである。Agu ら[22]は、 $1/f$ 変動を備えたファンが快適性評価において良好な結果を示すと報告したが、一方で Saji [23]は、自然風で観察される連続的でシームレスな変動を完全に再現することはできないと報告している。

一般的に、「 $1/f$ ゆらぎ」と呼ばれる不規則なゆらぎは、各周波数成分の風の強度が周波数に反比例し、直線的に減少するパワースペクトルを示す。そのため、パワースペクトル分布の周波数に対する傾きが ($1/f^n, n=1$) で表される場合、この現象は「 $1/f$ ゆらぎ」と呼ばれる。



a) Temporal fluctuation of wind velocity. b) Power spectrum of wind velocity fluctuations

Fig. 15. Characteristics of natural wind [22].

本評価を行うために、プロペラファンによる従来型扇風機、 $1/f$ ゆらぎ制御機構を有する扇風機、羽ばたき型送風機 (Wing 1 および Wing 2) によって生成された風速を測定し、周波数解析を実施した。

従来型扇風機においては、プロペラファンの後縁を $y=0$ と定義し、 $y=50\text{ mm}$ 、 500 mm 、 700 mm の位置で測定を行った。 $y=50\text{ mm}$ はプロペラファンに最も近接した位置、 700 mm は人が一般的な使用時に人が風を受ける位置に相当し、 500 mm はそれらの中間位置である。

Wing 1 および Wing 2 については、Fig. 14 に示した風速分布を確認した後、平均最大風速が発生した点における風速の時間変動を測定した。従来型扇風機および $1/f$ ゆらぎ制御機構を有する扇風機では、プロペラファン中心を通る水平方向 ($z=0$) における平均最大風速点に着目して測定を行った。測定点の座標 (x, z) は Table 3 に示している。

周波数解析の結果をFig. 16 に示す。従来型扇風機および $1/f$ ゆらぎ制御機構を有する扇風機では、Table 4 に示す通り、気流発生直後の $y=50\text{ mm}$ の位置において、Wing 1 および2 よりも $n=1$ に近い値を示した。一方で、人が気流を感じると想定される下流の $y=500\text{ mm}$ および $y=700\text{ mm}$ の位置では、Wing

1 および2の方が、従来型扇風機および $1/f$ ゆらぎ制御機構を有する扇風機よりも $n=1$ に近い値を示した。

扇風機の風は、ファンから近距離では、ファンの回転による微細な乱れが風速に現れ、それが $1/f$ ゆらぎに似たスペクトルを生むが、距離が離れるにつれて流れが定常化し、回転の周期的な成分が強調されることで、 $1/f$ ゆらぎのような非定常性が失われると考えられる。

羽ばたき型送風機では、渦の発生が時間的・空間的に変動しており、非定常性が強い。周期的な羽ばたき運棒の中でも様々な大きさの渦が生成され、生成された渦の干渉によって発生する風速が時間とともに変動すると考えられる。さらに、これらの渦の相互干渉によって多様な周波数帯域が生じ、その結果として、 $y=500\text{ mm}$ および $y=700\text{ mm}$ の位置において風のパワースペクトルが $1/f$ に近づいた可能性がある。Wing 1 が $y=700\text{ mm}$ で $n=1$ に近づいたのに対し、Wing 2 が $y=500\text{ mm}$ で $n=1$ に近づいたのは、羽根の剛性に関係すると推察される。

さらに、 $y=700\text{ mm}$ の面内で、測定点を変えて風速を測定した。最大風速位置から x 方向に $+100\text{ mm}$ 、その点から更に z 方向に -100 mm 離れた位置において、測定を行った測定点および周波数解析の結果をTable 5に示す。

Wing 1 では、気流の周波数特性の傾きが従来型扇風機よりも自然風に近いことが、すべての測定点で示された。対照的に、Wing 2 では、気流の周波数特性の傾きが 1 に近い値を取らない測定点が存在した。周波数特性の傾きには羽根の剛性が大きく影響する。自然風に近い周波数特性の傾き ($n=1$) を実現するためには、羽根の剛性の調整が重要であることが明らかとなった。

最後に、風速の時間変化を Fig. 17 に示す。従来型扇風機によって生成された気流と比較して、 $1/f$ ゆらぎ制御機構を有する扇風機によって生成された気流は、より大きな速度変動を示した。Wing 1 および Wing 2 では、変動の大きさは従来型扇風機と同程度であったが、変化はより滑らかである。

Fig. 15(a) に示される自然風は、全体的に滑らかな変化を維持しながら、風速の細かい変動を伴っている。これらの細かい変動と全体的な変動が、 n の値に影響を与え、自然風特性の再現に寄与すると考えられる。

Table 3. Coordinates of the measurement points (x, z) [mm]

	$y = 50 \text{ mm}$	$y = 500 \text{ mm}$	$y = 700 \text{ mm}$
Ordinary fan	(100, 0)	(90, 0)	(80, 0)
Fan with $1/f$ fluctuation control	(100, 0)	(90, 0)	(80, 0)
Wing 1	(350, 0)	(250, -400)	(100, -400)
Wing 2	(400, 0)	(350, -200)	(500, -550)

Table 4. Value of n calculated from $1/f^n$, which is the slope of the graph

	$y = 50 \text{ mm}$	$y = 500 \text{ mm}$	$y = 700 \text{ mm}$
Ordinary fan	0.753	0.746	0.767
Fan with $1/f$ fluctuation control	1.243	0.780	0.821
Wing 1	0.266	0.881	1.104
Wing 2	0.340	1.067	1.167

Table 5. Measurement points and values of n around the maximum wind velocity for Wing 1 and 2

Wing 1	(x, z) [mm]	(0, -400)	(0, -500)
	n	1.115	1.023
Wing 2	(x, z) [mm]	(400, -550)	(400, -650)
	n	1.233	1.303

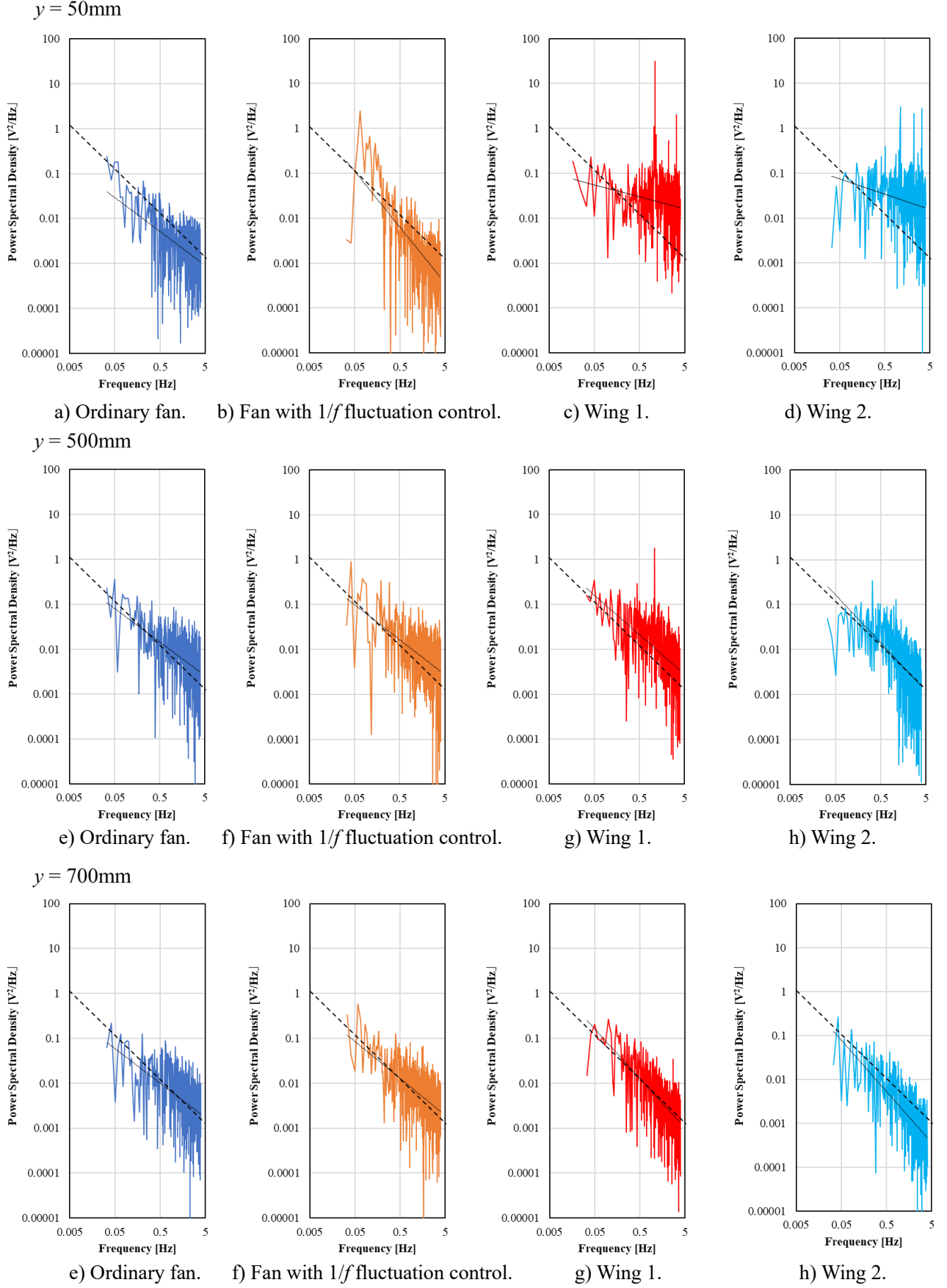
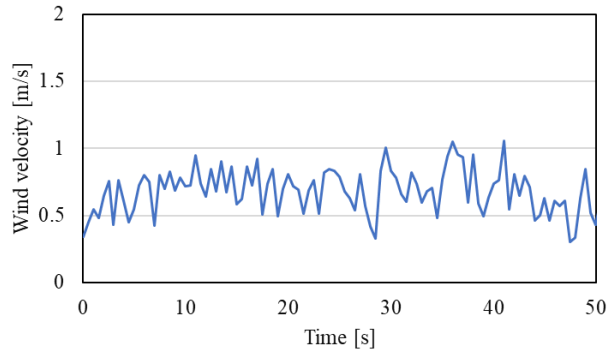
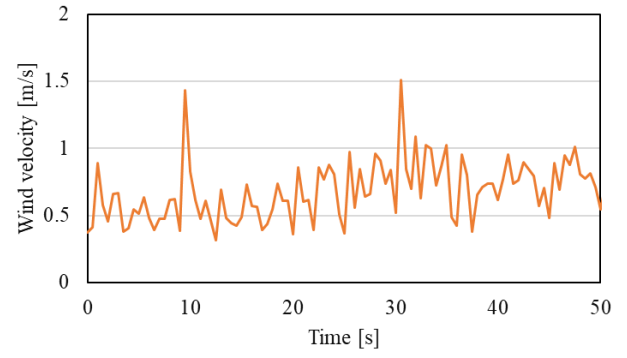


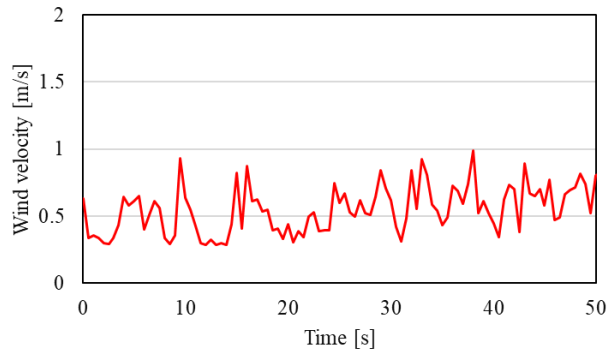
Fig. 16. Power spectrum of wind velocity (The dashed line in the figure indicates the $1/f$ fluctuation).



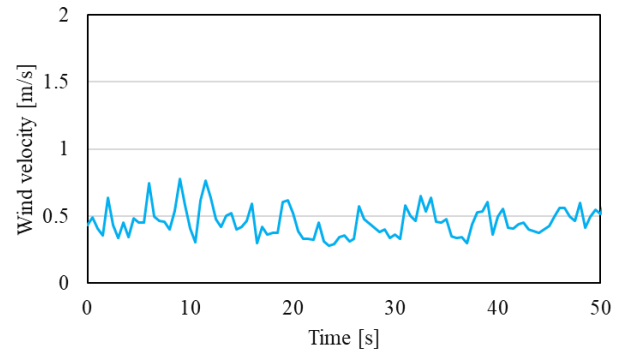
a) Ordinary fan.



b) Fan with $1/f$ fluctuation control.



c) Wing 1.



d) Wing 2.

Fig. 17. Time variation of wind velocity at $y = 700$ mm.

3.6 官能評価および生理指標による快適性の検証（パイロット実験）

羽ばたき型送風機は、従来型扇風機とは異なる送風機構によって、 $1/f$ ゆらぎに近い風を生成することが確認された。本節では、羽ばたき型送風機による気流が、実際の使用者にどのような体感をもたらすか検証するため、社内被験者を対象とした小規模な評価実験を、二度にわたって実施した。試験は生理的指標と官能評価の両面から行い、第1回は2022年8月、第2回は2023年5月に実施し、被験者はそれぞれ成人17名と18名であった。被験者には、事前に実験内容の説明を行い、書面にて同意を得た上で参加していただいた。

第1回試験（2022年8月）では、20-50代の成人男女17名が参加した。各被験者は、羽ばたき型送風機、従来型扇風機、送風なしの3条件のうち、2-3種類の条件について評価を行った。生理的指標として、血圧、心拍変動、皮膚電気活動を測定し、これらの測定には、OMRON HEM-6164（血圧）、Huawei Watch Fit（心拍変動：HRV）、Fitbit Sense（皮膚電気活動：EDA）および、主観的疲労感（VAS）により評価した。

測定プロトコルは以下の通りである。

安静（5分）→ 測定（5分）→

負荷作業（5分）→ 測定（5分）→

風浴び（5分）→ 測定（5分）

羽ばたき型送風機は従来型扇風機と異なる形状を有しており、その外観が使用者の快適性や受容性に影響を与える可能性があるため、風の体感に加えて外観印象についてもSD（Semantic Differential）法による主観的評価を行った。SD法は、両極の形容詞対を用いて対象の印象を評価する手法である。7段階評価を用いたアンケート調査によって、風の体感（快適さ、癒し、穏やかさ、優しさ、広がり、自然さ、リフレッシュ感）および外観印象（おもしろさ、好感度、自然なイメージ、癒し、部屋へのなじみやすさ）について評価を行った。 p 値（ p -value）は、帰無仮説が正しいと仮定した場合に、観測された結果以上の差が偶然に生じる確率を示す指標であり、本研究では $p < 0.05$ を統計的に有意と判断した。

その結果、Fig. 18 に示すように、羽ばたき型送風機は「やさしい風」「自然な風」「癒される風」「おだやかな風」などの項目で高評価を示した。従来型扇風機や送風なしの条件と比較して、「広がりを感じる風」「自然な風」という項目で、有意に高く評価された。外観評価は「面白い」の項目で高評価を得ており、羽ばたきによる送風という新しい動きのユニークさが影響する可能性が示唆された。一方、「部屋になじむ」の項目では、有意な差ではないが、羽ばたき型送風機は低く評価された。

精神的疲労感を評価するVASでは、作業後および休息後の値において、いずれの送風条件間にも統計的に有意な差は認められなかった。血圧の測定結果においても、群間で有意差は見られなかった。Fig. 19 に示す通り、心拍変動においては、羽ばたき型送風機使用時に副交感神経優位の傾向が見られ、リラックス状態を示す指標として、羽ばたき型送風機と送風なしの条件間に有意な差を確認した。これは、羽ばたきによる自然風に近いゆらぎがリラックス反応を促進した可能性を示す。Fig. 20 に示す通り、皮膚

電気活動においても、羽ばたき型送風機は従来型扇風機よりも低い値を示し、緊張状態を緩和する可能性が示唆された。

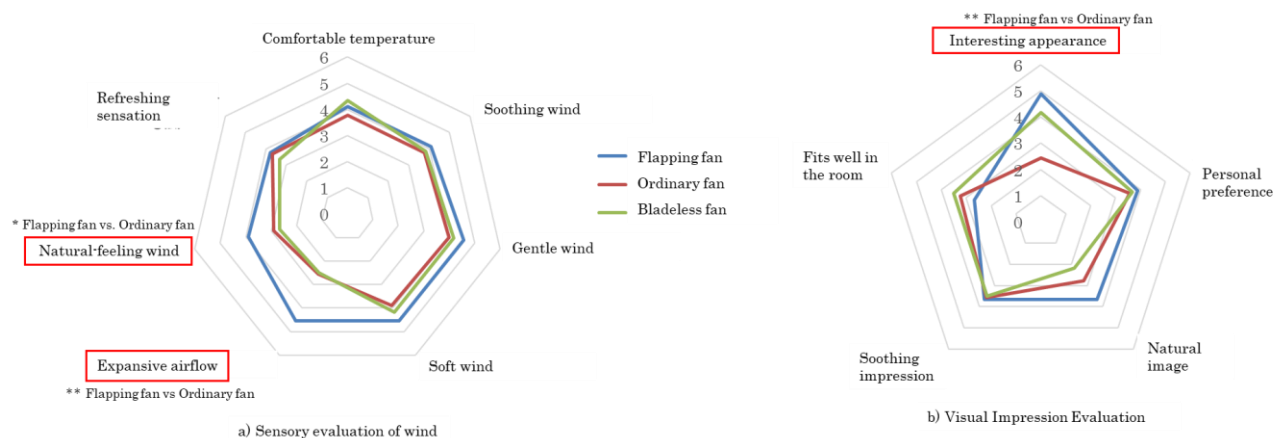


Fig.18. Subjective evaluation.

※Method: Subjective evaluation after 1-minute exposure to airflow at 1 m/s, measured 0.5 m from each fan.
 Participants: Flapping fan ($N=9$), Ordinary fan ($N=9$), Bladeless fan ($N=6$). Rated using 7-point Semantic Differential scale (0–6)
 Wilcoxon rank sum test; † $p < 0.1$, * $p < 0.05$, $p < 0.01$. Comparison between Flapping fan and ordinary fan only.

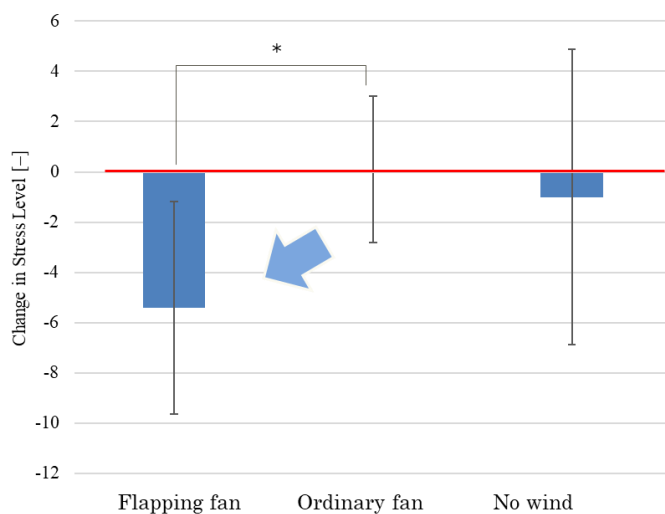


Fig. 19. Change in heart rate variability (HRV) after airflow exposure.

※Kruskal–Wallis test, followed by Steel–Dwass multiple comparisons when significant differences were observed. Significance levels were set as follows: † $p < 0.1$, $p < 0.05$ ** $p < 0.01$

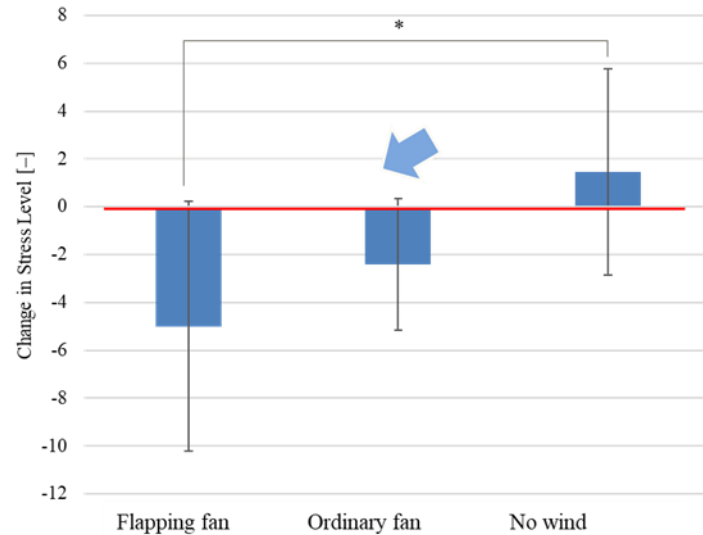


Fig. 20. Change in electrodermal activity (EDA) after airflow exposure.

※Kruskal–Wallis test, followed by Steel–Dwass multiple comparisons when significant differences were observed. Significance levels were set as follows:† $p < 0.1$, $p < 0.05$ ** $p < 0.01$

第2回試験（2023年5月）では、20-40代の成人男女18名を対象に、羽ばたき型送風機、従来型扇風機、送風なしの3条件について評価を行った。本試験では、アンケート調査と血圧、心拍変動、皮膚電気活動に加えて、顔および腕の肌水分量の測定も行い、より詳細な生理的反応の把握を試みた。

アンケート項目には、第1回試験と同様の風体感・外観印象評価に加え、作業効率および集中評価（仕事能率、集中力、スムーズさ、覚醒、疲労感）を追加し、送風条件が作業環境に与える影響についても検討した。

結果は、羽ばたき型送風機は作業効率および落ち着きに関する評価で高く評価された。Fig. 21 に示すように、特に「落ち着いて仕事できた」「仕事が捗った」という項目において、従来型扇風機や送風なし条件を上回り、作業環境における快適性の向上に寄与する可能性が示唆された。

生理的反応として、Fig. 22 に示す顔および腕の水分量の測定結果では、羽ばたき型送風機は従来型扇風機よりも乾燥度が低く、肌への負担が軽減されている可能性が示された。

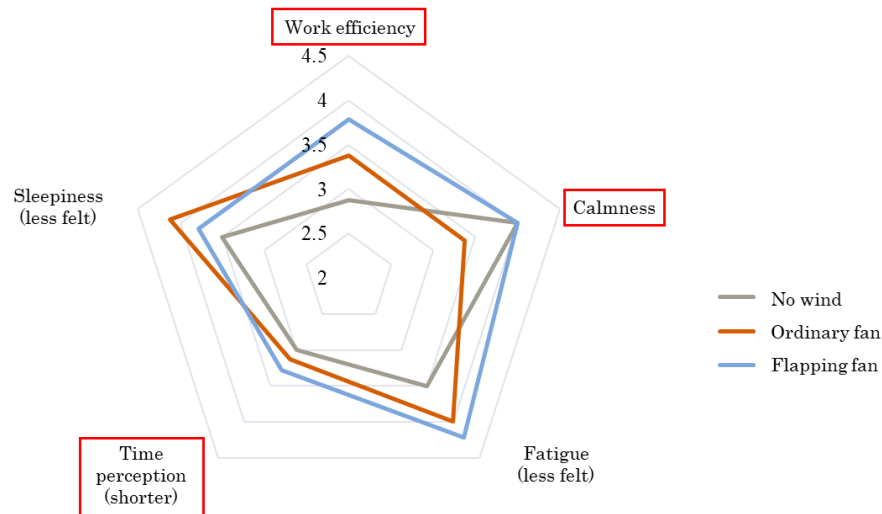


Fig. 21. Evaluation of work efficiency and stress.

Method: Subjective evaluation after 25-minute airflow exposure at 1 m/s. Rated using 7-point Semantic Differential scale (0–6). Participants: 9 (evaluation), 18 (internal trial, May 10–23).

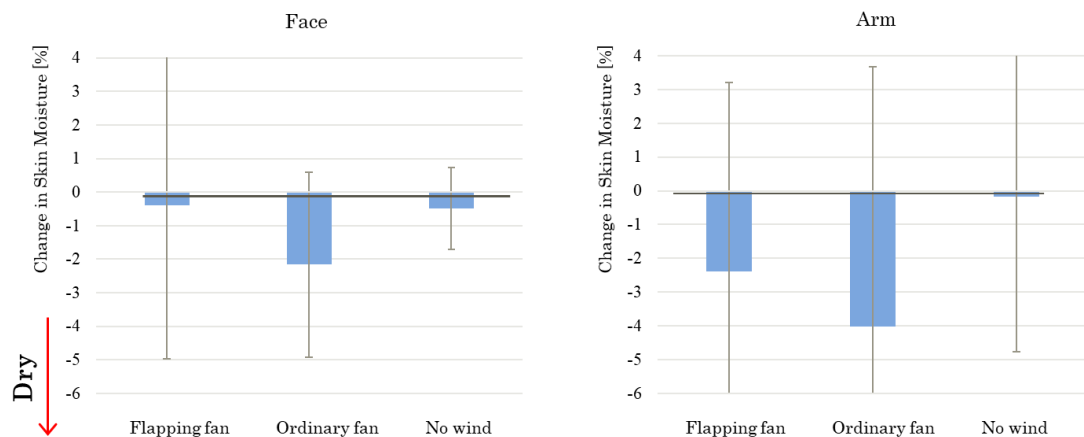


Fig. 22. Evaluation of skin moisture reduction after airflow exposure.

Method: Skin moisture was measured on the face and forearm (3 times each) after 25 minutes of exposure to airflow (flapping fan, ordinary fan, or no wind; wind speed: 1 m/s). Room temperature: 28°C; distance: 0.7 m. Internal trial conducted from May 10 to May 23 with 18 participants.

2回にわたる評価試験の結果から、羽ばたき型送風機は、従来型扇風機と比較して、風の質感において「広がりのある風」「自然な風」といった印象を与えることが明らかとなった。これは、羽ばたきによる送風方式が、 $1/f$ ゆらぎに近い風を生み出すことに起因すると考えられる。

生理的指標においても、心拍変動や皮膚電気活動、肌水分量において良好な変化が観察され、身体的なリラックス効果が示唆された。外観印象に関しては、従来型扇風機と同等またはやや低い評価にとどまっており、実使用に至る場合には何らかの改良が必要である。

今回の羽ばたき型送風機による気流を風刺激と捉えると、 $1/f$ ゆらぎに近い周波数特性を持ち、低周波のリズム刺激として機能している可能性がある。

Emori ら（1995）[24]は、揺りかごによる約 1 Hz の振動刺激が母体の心拍数とほぼ一致し、新生児に快適性をもたらすことを報告している。一方で、刺激が過剰な場合には覚醒を促す可能性があることも示唆されている。これらの知見は、低周波刺激が生理的反応に大きく影響することを示している。羽ばたき型送風機による気流は、低周波の周期性とゆらぎを併せ持つ風刺激であり、過度な刺激を避けつつ、リラックス効果を誘発する可能性がある。

Hiroi ら（2010）は、0.33 - 0.67 Hz の周期的なリズム刺激が覚醒意識レベルを低下させ、交感神経活動を鎮静化することを示した[25]。乳幼児の入眠時に行われる背中への「トントン」刺激は、経験的に効果が知られており、この刺激はマッサージとは異なる「振動」という特性を有し、胎児にとっての母親の鼓動に類似する「振動」であるといえる。これは、乳幼児の入眠時に行われる「トントン」刺激が、母体の鼓動に類似した安心感を与えることに起因するとされている。低周波の周期的刺激が乳幼児の入眠促進に寄与することを示しており、羽ばたき型送風機による低周波・ゆらぎ風も、同様の生理的効果をもたらす可能性がある。

これらのように、低周波数の刺激はリラックスや安心感を与えることは、実体験からも想像ができる。

本実験で得られた心拍変動や皮膚電気活動の良好な結果は、これらの先行研究と近いものがあり、羽ばたき型送風機による、自然風に近いゆらぎ特性を有する低周波の気流による風刺激が、覚醒レベルの低下や副交感神経の活性化を通じて、主観的な快適性を高める可能性を示唆している。

羽ばたき型送風機は、従来型扇風機と比較して、風の質感、生理的影響、主観的快適性の各側面において一定の優位性を有する可能性が示された。

実験は各回とも被験者数が 17 および 18 名と小規模であり、統計的検出力は限定的である。今後はサンプル数の拡大に加え、皮膚温や心拍変動スペクトル解析など多指標を組み合わせた評価や、長時間使用時の影響についても検討することで、羽ばたき型送風機の快適性に関する科学的根拠をさらに強化していく必要がある。

3.7 本章のまとめ

本章では、羽ばたき型送風機の初期試作から観察・評価までを通じて、その送風特性と快適性について検討を行った。得られた知見を以下に整理する。

自然風に近い気流を生成することを目的に、メンフクロウの羽ばたき運動に着想を得た送風機を試作した。羽根は羽根布と羽根骨格から構成され、上下揺動による羽根の受動的変形を利用して気流を生成する仕組みを採用した。剛性の異なる2種類の羽根を製作し、その変形挙動を比較した結果、剛性の差異がピッチ角の振幅や位相差に影響することが明らかとなった。初期試作機の羽根の挙動は、実際のメンフクロウの羽ばたき運動とは完全には一致しないものの、類似した傾向が確認された。

風速分布の測定では、羽根の剛性が風向や風速およびその分布に大きな影響を及ぼすことが示され、剛性の小さい羽根では気流が集中しやすく拡散しにくい傾向が見られた。

周波数解析の結果、羽ばたき型送風機は下流域において自然風に近い $1/f$ ゆらぎ特性を示すことが確認された。特に Wing 1 では自然風に近い傾きを示し、羽根の剛性が周波数特性に大きく影響することが明らかとなった。一方で、羽ばたき型送風機の詳細な設計条件については、今後解決すべき課題が多数存在することもわかった。例えば、羽根の剛性がプランジ角やピッチ角の変化に大きく影響し、風速分布が大きく変化することなどである。これは、「自然に近い気流」を実現するためには、プランジ角とピッチ角の最適化が重要な設計課題であることを示す。さらに、本送風機はユーザーの使用を前提として設計されているため、羽ばたき運動により鉛直方向の成分が強調され、気流が下向きに生じることにしても、人間が使用する観点から制御の必要があることも課題であることがわかった。これらの知見は、次章で行う数値解析による設計条件の体系化に向けた重要な基礎情報とする。

官能評価および生理指標による検証では、羽ばたき型送風機は「広がりのある風」「自然な風」といった項目でプロペラファンを用いる従来型扇風機より高評価を得た。心拍変動や皮膚電気活動においては、リラックス効果が示唆され、肌水分量の測定では乾燥度の低減が確認された。一方、外観印象については「面白さ」で高評価を得たものの、「部屋へのなじみやすさ」では改善の余地があることが示された。

以上の結果から、羽ばたき型送風機はプロペラファンを用いる従来型扇風機と比較して、風の質感、周波数特性、生理的影響、主観的快適性の各側面において優位性を有する可能性が示された。ただし、実験は小規模であり、外観評価や長時間使用時の影響についてはさらなる検討が必要である。今後は被験者数の拡大や多指標による評価を通じて、羽ばたき型送風機の快適性に関する科学的根拠を強化する必要がある。

第4章 数値解析による風速分布の改善

4.1 解析の目的

本章では、羽ばたき型送風機の風速分布の改善を目的として、計算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）による数値解析を行った。従来のプロペラファンによる扇風機では、気流が中心軸付近に集中し、空間的な均一性に欠ける。一方、羽ばたき運動によって非定常な気流を生成する羽ばたき型送風機では、羽ばたき運動のプランジ角とピッチ角を調整することで、より広範囲かつ均一な送風を実現できる可能性がある。本研究では、プランジ角やピッチ角の運動プロファイルが風速分布に与える影響を CFD により評価し、設計条件を探索した。計算は 46 ケースを実施し、そのうち代表的な結果を中心に詳細な検証を行った。

4.2 解析モデルと手法

実験的な評価では、羽ばたき運動と風の流れの相関を把握することは困難で、その調整は非常に煩雑である。そこで、数値計算を用いて、人が風を浴びる位置での平均風速を評価する。CFD 解析には、汎用流体解析ソフトウェア scFLOW（Hexagon Cradle）を使用した。

羽ばたき型送風機は、渦を特徴とする後流を発生させる。渦が支配的な流れを解析する場合、LES（Large Eddy Simulation）や DES（Detached Eddy Simulation）を用いる方が有効である。ところが、その計算量や計算時間、メモリ使用量は大きく、多数の羽ばたき運動の計算ケースを実施するのは、現実的ではない。そのため、RANS（Reynolds Averaged Navier-Stokes）モデルを用いて、流れを解析する。これは、羽ばたき型送風機的设计検討においては、流れ場全体の平均的な傾向を把握することが目的であり、微小な渦構造の解明を必須としないためである。乱流モデルには、RANS の範囲では境界層の剥離や遷移を比較的精度良く捉えられることが知られており、精度が高いとされている Menter[26, 27]の SST（Shear-Stress Transport） $k-\omega$ モデルを適用した。

支配方程式は以下の通りで、非圧縮性流体の運動量保存式および質量保存式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \rho \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho g_i \beta (\bar{T} - T_0) - \frac{\partial (\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

ここで、 x_i [m] は位置座標、 $\bar{u}_i$ [m/s] は x_i 方向の時間平均流体速度、 $\bar{u}'_i$ [m/s] は x_i 方向の変動速度であり、 $\overline{u'_i u'_j}$ はレイノルズ応力である。 $i, j = 1, 2, 3$ は次元に対応する。 ρ [kg/m³] は流体の密度で、 $\bar{p}$ [N/m²] は流体の時間平均圧力、 μ [Pa·s] は粘性係数、 g_i [m/s²] は加速度、 β [1/K] が体膨張率である。 $\bar{T}_{temp}$ [K] は流体の時間平均温度で、 $T_{0,temp}$ [K] は流体の基準温度である。運動量保存式の第五項にあたる部分

($\rho g_i \beta (T - T_0)$) は、今回の数値解析では温度変化がないため、この項は考慮されない。

Fig. 23 に示すように、羽ばたきによって生じる風の、上流側の端部を羽根の前縁、後流側の端部を後縁と定義し、羽根のプランジ角とピッチ角はそれぞれ θ と α と定義する。羽ばたき型送風機の羽根は、前縁に太い梁、後縁は細い梁を用いて羽根骨格を構成し、その間に羽根布を貼付することで作製する。後縁側の方が変形しやすいため、羽根のピッチ角は、後縁側では大きく (α_B)、前縁側では小さくなる (α_A)。

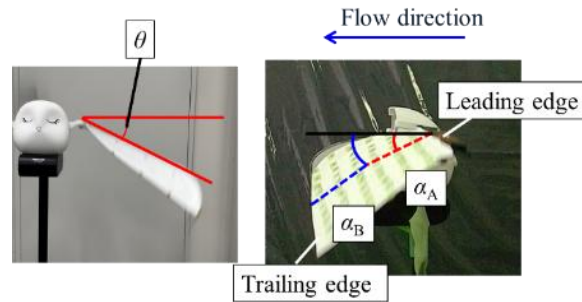


Fig. 23. Deformation of wing.

羽根の動きと受動的変形を完全に再現するには、流体-構造連成解析 (Fluid-Structure Interaction : FSI) が必要であるが、FSI 解析は計算が複雑で計算時間の増大を招くため、設計検討の初期段階には適さないと考え、今回の計算モデルでは羽根の変形構造を簡略化することにした。

具体的には、羽根の前縁側の「前羽根」と、後縁側の「後羽根」に分割し、それらの間に境界を設け、前羽根と後羽根の境界を回転軸として設定することで、前羽根と後羽根が互いに折り畳み可能なモデルを構成し、羽ばたき型送風機の羽根の弾性挙動を近似的に再現することとした。羽根の変形は、前羽根の連続的な動きと、前羽根と後羽根の境界を回転軸として回転する後羽根によって表現する。この数値モデルを「折り畳みモデル」と呼ぶことにする。

この折り畳みモデルを用いた数値解析では、羽根の運動を再現するためにオーバーセットメッシュ法を採用した。オーバーセットメッシュを羽根の周囲に生成し、それらを剛体的に移動させることで、メッシュ自体を変形させることなく羽ばたき運動を再現できる。

このように羽根の弾性変形を、折り畳みモデルで表現するため、このシミュレーション結果は、定量的に一致しない。一方、変形を端的に表現できるパラメータを設定し、それに関する計算が可能である。その結果が妥当な傾向を示すのであれば、羽根変形と生成される風速の関係を把握できると考えられる。

解析領域は、Fig. 24 に示すように、羽ばたき型送風機胴体中心線に関する左右対称性を考慮し、 $x = 0$ を対称面とした。床面は $z = -900$ の水平面である。

Fig. 25 に示すとおり、プランジ角 θ は、点 Op を中心とする水平面からの y 軸周りの回転角として定義した。ピッチ角 α は、羽根の前縁から後縁までの回転角を表す。Fig. 3(b)に示したように、 α は前縁が後縁に対して上昇している場合、正と定義した。前羽根と後羽根は、それぞれピッチ角 α_A と α_B で x 軸周りに回転する。

計算メッシュを Fig. 26 に、各領域のメッシュ仕様を Table 6 に示す。表中のメッシュサイズは、平均翼弦長 L ($=0.187\text{m}$) を代表長さとする L の倍数で表した。今回のモデルの計算メッシュでは合計約 290 万要素で構成した。境界層メッシュは 4 層で構成し、最小セルサイズは $y^+ \leq 5$ となるように設定した。

計算条件として、羽ばたき周波数は 1.1Hz に設定し、1 サイクルを 440 ステップに分割した。このとき、時間ステップ ΔT は 0.00207 秒である。この時間ステップはクーラン数が 1 未満となる条件を満たし、非定常解析における数値安定性を確保した。数値シミュレーションは PISO アルゴリズムを使用した。なお、羽根の平均翼弦長 (0.187m) と平均翼端速度 (1.52m/s) で、無次元化した時間ステップ (Δt^*) は 0.0168 である。本シミュレーションに適用した境界条件を Table 7 にまとめる。これらの設定により、計算機資源の制約内で解析を実施した。

作動流体は、 20°C の非圧縮性空気 (密度 1.206kg/m^3 、動粘性率 $1.52 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$) とした。このとき、羽根の平均翼弦長および平均翼端速度に基づくレイノルズ数は $Re = 1.87 \times 10^4$ である。

送風機の送風性能は、流場が安定した後の平均風速に基づいて評価した。Fig. 27 に示すように、平均化は平均風速が安定する羽根運動の 16–20 周期において行い、平均値は対称評価領域内の 3×3 の格子状に配置した 9 点から算出した。

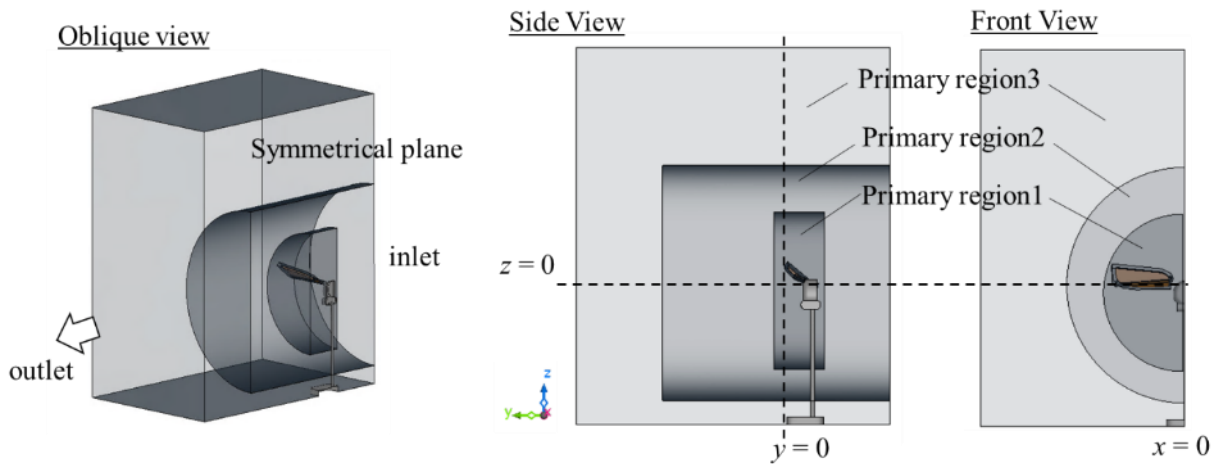
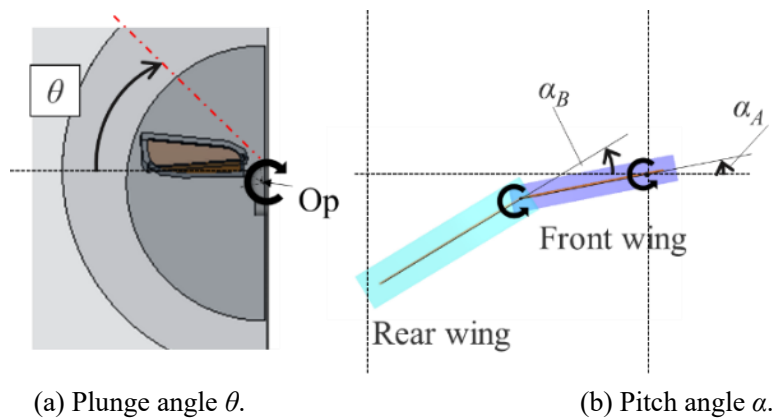


Fig. 24. Numerical model of the flapping fan.



(a) Plunge angle θ .

(b) Pitch angle α .

Fig. 25. Definition of angles.

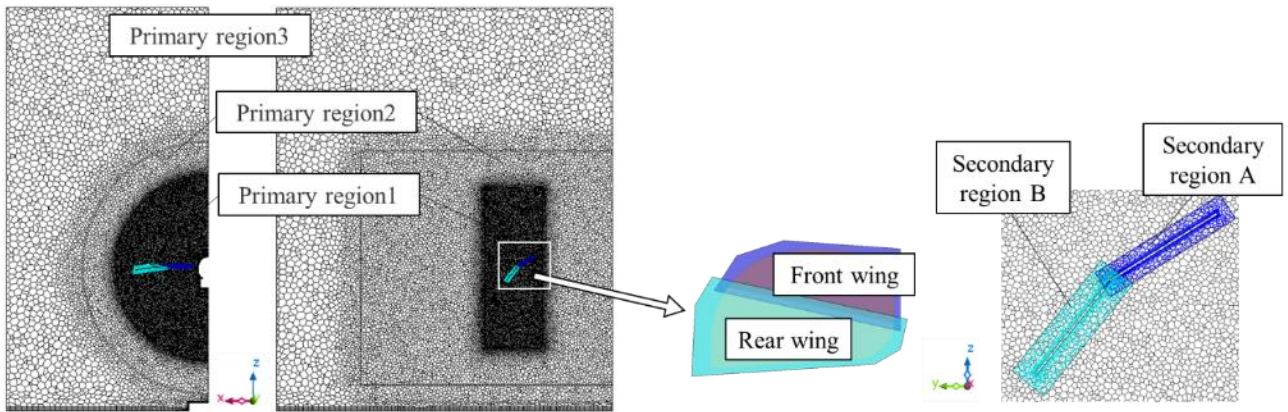


Fig. 26. Numerical model of the wing.

Table 6. Mesh sizes / L and number of elements

Region name	Mesh Size / L	Total number
Secondary region A and B (Edge of the wing)	0.0267 (0.0133)	165,000
Primary region 1	0.0267	1,800,000
Primary region 2	0.107	700,000
Primary region 3	0.214	210,000

Table 7. Boundary conditions

Surface name	Boundary condition
Wall and ceiling surfaces	Free slip
Floor surface	Non-slip
Symmetrical panel	Symmetry
Inlet	Total pressure = 0
Outlet	Pressure = 0

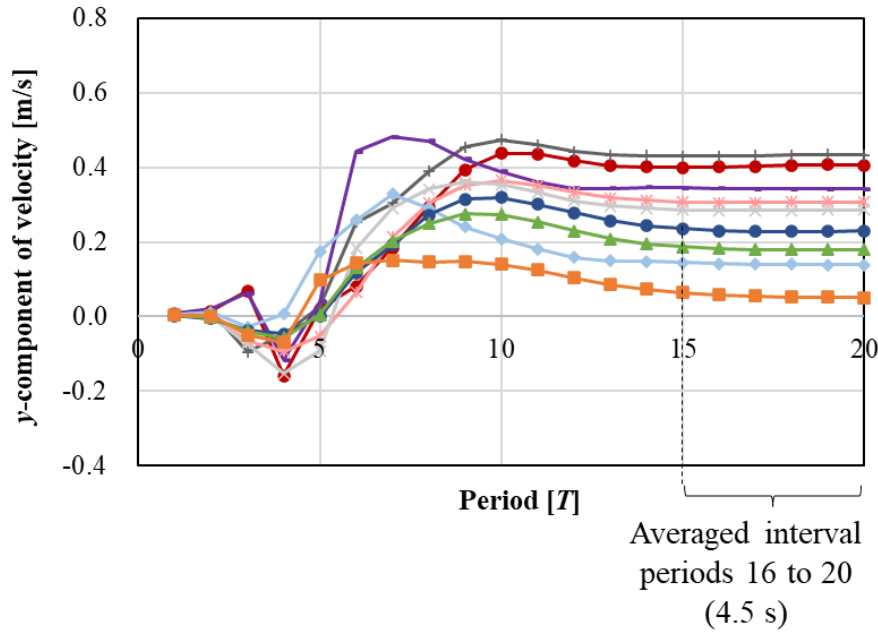


Fig. 27. Temporal displacement of the average wind velocity.

羽ばたき型送風機による気流と、プロペラファンを用いた従来型扇風機による気流を比較するため、プロペラファンが生成する気流と、周囲の流場についても CFD 解析を実施した。プロペラファンの解析には、羽ばたき型送風機と同様に、RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) モデルを用いた。乱流モデルも同じく SST (Shear-Stress Transport) $k-\omega$ である。

解析モデルおよびメッシュ仕様、境界条件を Table 8 および Fig. 28 に示す。代表長さ L はプロペラファン直径の 300mm として、メッシュサイズは L の倍数で表示した。今回のモデルでは合計約 160 万要素を使用した。時間間隔 ΔT は 0.005 s でクーラン数がおおよそ 1 になるように決定した。これは、プロペラファン 1 回転 (1 周期) につき 48 分割した時間である。境界層メッシュは 7 層で構成し、最小メッシュサイズは $y^+ < 2$ 以下となるように設定した。ただし、解析対象のプロペラファンは 7 枚羽根で、回転数 250 rpm で作動する。

計算領域全体をカバーする固定領域を Static region とする。Static region 内で、ファン周辺にスライディングメッシュを適用した領域を Moving region とし、プロペラファン中心軸まわりに回転する運動を与えた。翼端には 40 要素、ブレード間には 35 要素が入るように Moving region のメッシュを決定した。解析は、定常計算結果を初期場として非定常計算を行い、計算時間を短縮した。おおよそ 160 周期までには流れが安定したため、181 - 200 周期の 20 周期分を平均化し平均速度を算出した。解析結果はファン後端から 700 mm の位置で、平均 y 方向流速を評価した。

Table 8. Mesh Size and Boundary condition

Region name	Mesh size / L	Total number
Edge of fan	0.00283	1,100,000
Surface of fan	0.00567	
Moving region	0.0113	
Static region1	0.0227	370,000
Static region2	0.0906	150,000

Surface Name	Boundary condition
Wall	Free slip
Inlet	Total pressure =0
Outlet	Pressure =0

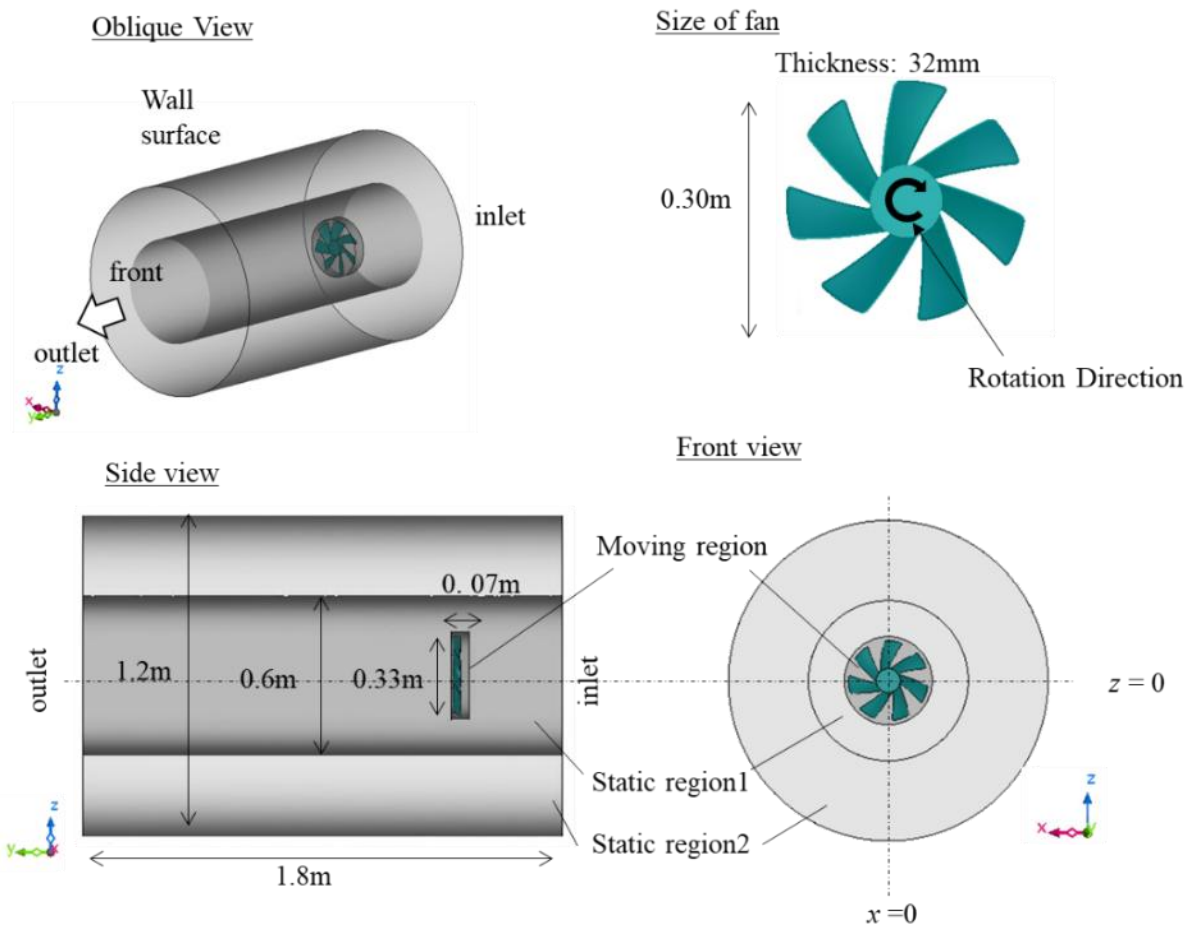


Fig. 28. Numerical model of ordinary fan.

4.3 羽ばたき型送風機の実機と解析の整合性

本節では、第3章で示した Wing 1 について、羽根の運動と変形を測定し、その結果に基づき、羽ばたき型送風機によって生成される気流を、数値モデルを用いて評価できるかどうかを検証した。

まず、Wing 1 の羽根の運動と変形の測定を行った。Fig. 29(a)に示すように、3 台のカメラ (Logitech MX BRIO 700) を設置し、マーカーを貼付した羽根の 3 方向の運動と変形の動画撮影を行った。羽根上のマーカーの座標は、取得した動画を 2 次元/3 次元運動解析ソフトウェア (DIPP-Motion V/3D、DITECT 社製) を用いて解析し、位置を算出した。

Fig. 29(b)に示すように、 $\varphi = 0^\circ$ が x 軸方向と一致する羽根中心点を設定し、分割角 φ で傾いた分割線で、前羽根と後羽根が分かると定義する。例えば、Fig. 29(c)の P50 および P51 の座標からベクトル (P51-P50) を算出し、羽根基準面とのなす角から、P50 と P51 の範囲でのピッチ角を求めた。羽根の内側、中心、外側のピッチ角の変化が最大となる点を結んだラインが、解析条件における分割線に相当する。

実際の羽根の運動と変形を折り畳みモデルに組み込むため、羽根の運動と変形を特徴づけるパラメータであるプランジ角 $\theta [^\circ]$ 、前羽根のピッチ角 $\alpha_A [^\circ]$ 、後羽根のピッチ角 $\alpha_B [^\circ]$ を導出し、Fig. 30(a)に示す。ただし、図中 α^- は α_A と α_B の平均を表す。Fig. 30(b)は、Wing 1 の挙動を近似したもので、オレンジ色の線と灰色の線はそれぞれ前羽根と後羽根の、 x 方向から見た羽根中央の断面を示す。これより、周期 $T \approx 0.125$ 付近では、前羽根と後羽根のピッチ角に急激な差が生じ、羽根断面が大きく折れ曲がることがわかった。さらに、分割角 $\varphi = 10^\circ$ 付近で羽根が変形することを確認した。

風速分布については、初期試作機によって発生する風速を、羽根の後縁から下流 700 mm の位置で、面的に測定した。この計測には、KANOMAX 製多チャンネル風速計 (Model 1580) に取り付けられた薄型方向風速計 (Model 0972-00) を用い、計測値を 2 分間平均し、風速を測定した。Fig. 31(a)に実験結果を示す。実験結果から、風速の高い領域は本体中央より下側に集中していることがわかる。このことは、羽根の運動と変形の改善が必要であることを示唆するものである。

観測された変形は分割角 $\varphi = 10^\circ$ と一致したが、現在の数値モデルでは柔軟な羽根の挙動を完全に再現できていないと考えられるため、分割角 φ のさらなる検証が必要であると考えた。そこで、Fig. 30 に示す羽根の変形パラメータを用いて前述の数値解析モデルを適用し、分割角 φ を 0、10、20 $^\circ$ に変化させて計算を行った。これらにより得られた平均風速分布を Fig. 31(b)、(c)、(d) に示す。

分割角 φ にかかわらず絶対風速には約 20%の誤差が観測され、実際の Wing 1 を定量的に再現することはできなかった。一方、後羽根が外側に向けて折り畳まれることで風速の高速域が広がるという直感的な現象、すなわち、分割角の変化に伴う風速分布の変化の傾向は定性的に正確に捉えられていると判断できた。

計算のメッシュ依存性を確認するため、メッシュ数を増やした計算も実施した。Fig. 31(e)は境界層を 10 層としたシミュレーション結果を示している。Fig. 31(c)に示す現在の 4 層構成と比較して、渦構造はほぼ同じであった。さらに、要素数を 1.4 倍にしてシミュレーションを行った。Fig. 31(c)は約 290 万要素の場合の結果を示し、Fig. 31(f)は約 406 万要素の場合の結果を示している。Fig. 31(c)と比較して、風速分布に大きな変化は見られなかった。

Table 9 にまとめたように、絶対風速は約 20%の誤差を示したため、定量的には差異が見られた。本研究の目的は、数値シミュレーションを用いて、羽根変形を表現するパラメータの変化が流れの挙動と傾

向にどのような影響を与えるかを調査することであり、計算結果と計測結果の定量的一致が必須ではない。羽根変形を表現するパラメータの変化による気流の変化を捉えることは可能である。よって、流れ特性に対するピッチ角変化の傾向は調査可能であると判断し、モーションキャプチャの計測結果に基づき、分割角は $\varphi = 10^\circ$ を採用する。この分割角は、羽根の変形位置で表現すれば、翼端で翼弦長の39.4%、翼根で63.6%の点で結ばれる線分と x 軸のなす角に相当する。境界層は4層、メッシュ要素数は約290万個)を採用した。

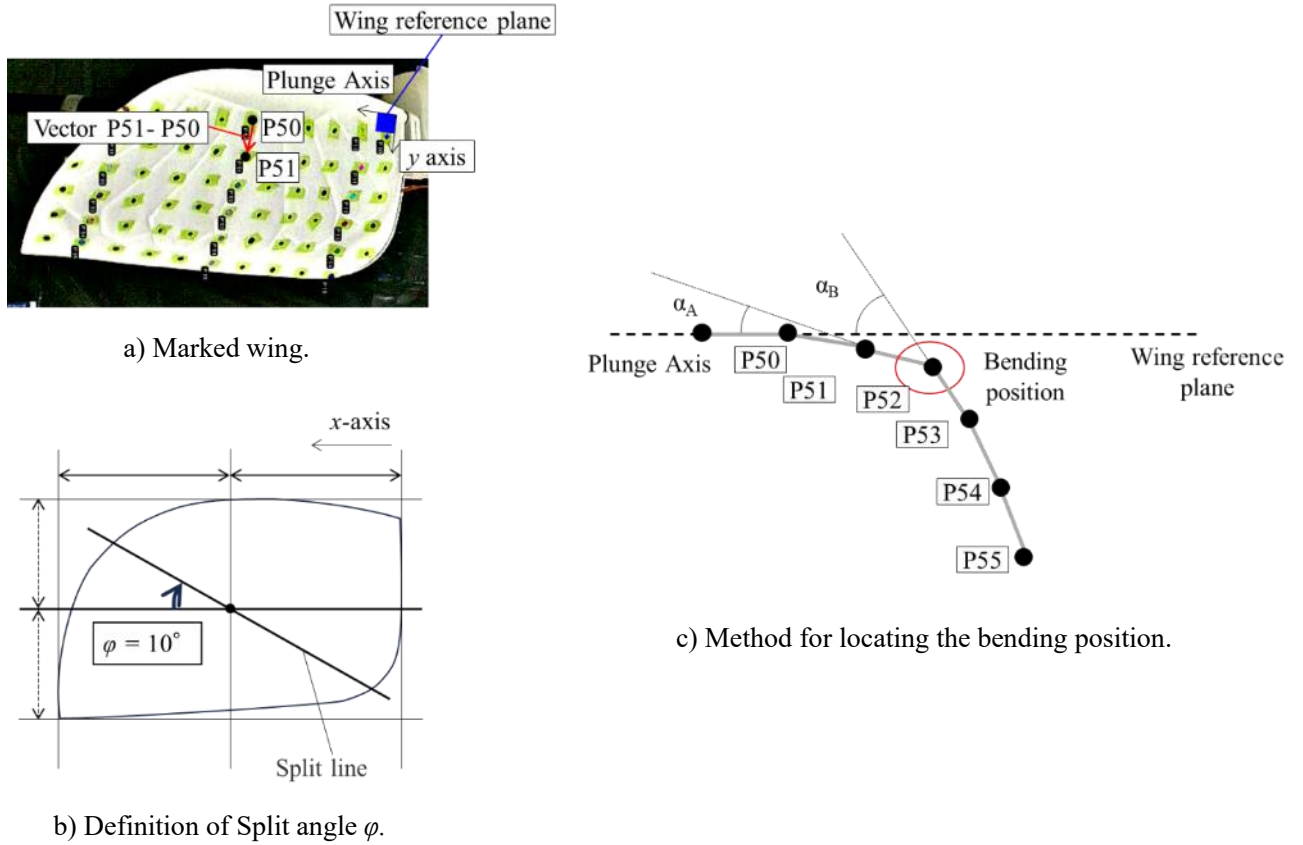


Fig. 29. Wing 1 for motion capture.

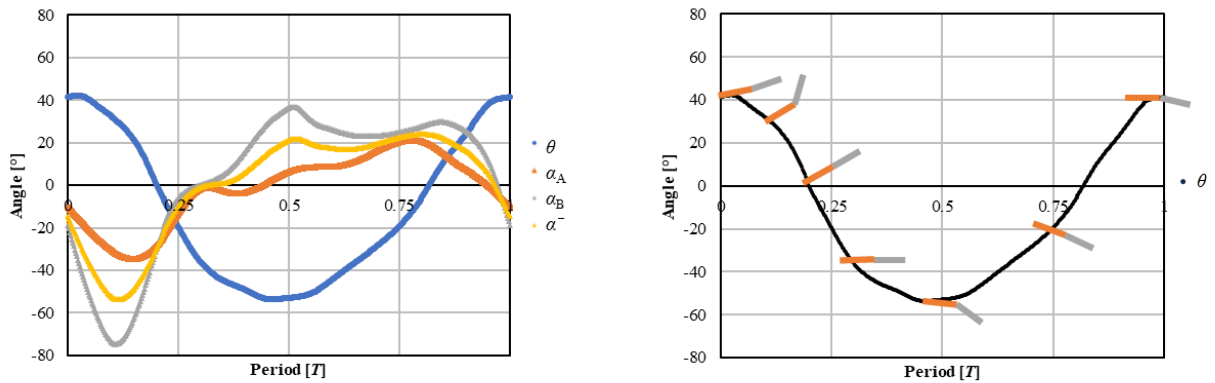


Fig. 30. Motion and deformation of Wing 1.

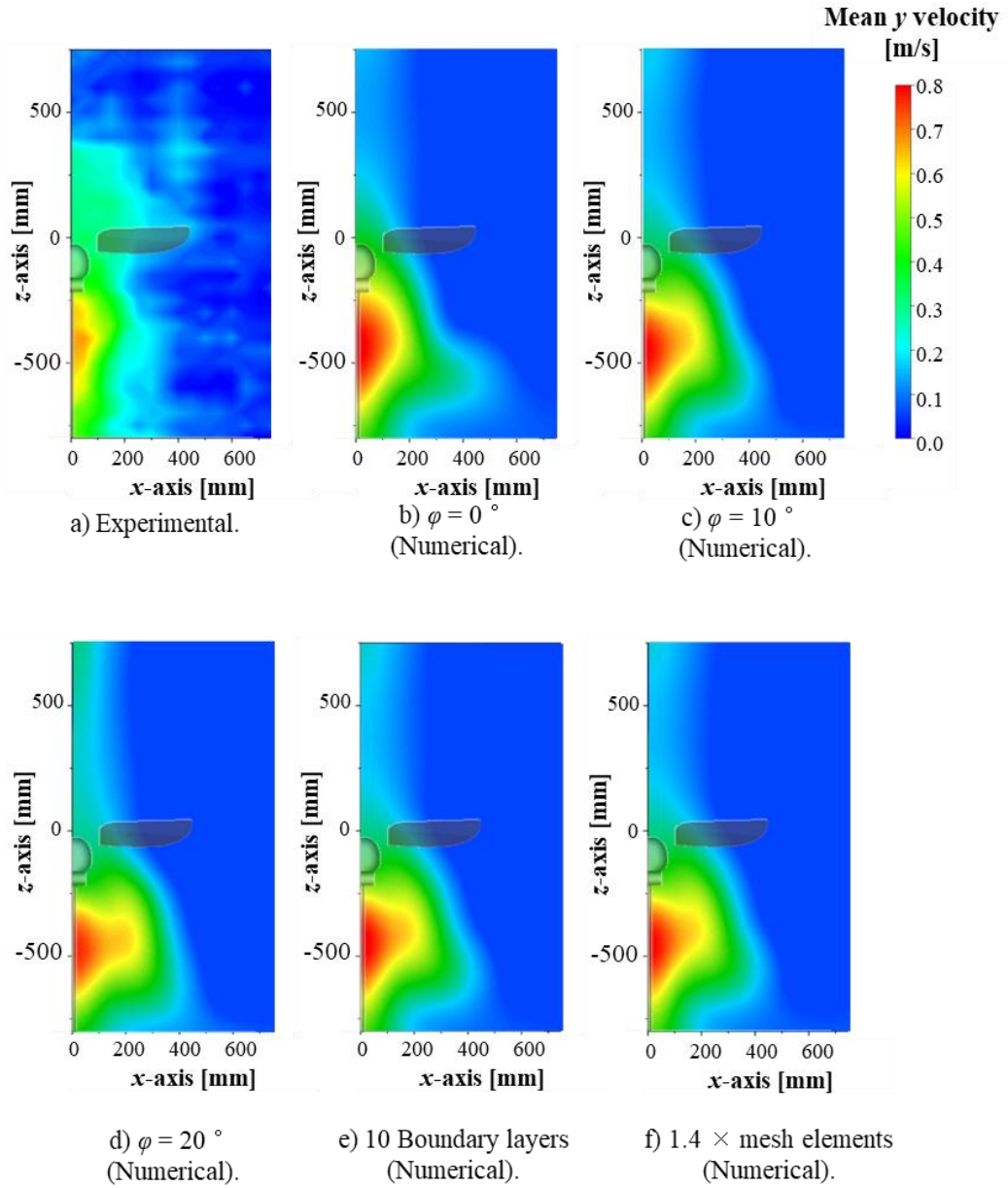


Fig. 31. Wind velocity distribution of Wing 1.

Table 9. Comparison of experimental and numerical results

Wing 1	Maximum wind velocity (x, z) [mm]	Maximum wind velocity [m/s]
Experimental	(50, -400)	0.68
$\varphi = 0^\circ$ (Numerical)	(0, -442)	0.82
$\varphi = 10^\circ$ (Numerical)	(0, -459)	0.81
$\varphi = 20^\circ$ (Numerical)	(0, -475)	0.78
10 Boundary layers (Numerical)	(0, -442)	0.82
$1.4 \times$ mesh elements (Numerical)	(0, -457)	0.81

4.4 シミュレーションの設定とパラメータの変更

前述のように、本研究で採用した羽ばたき運動のパターンは、メンフクロウの羽ばたき飛行に基づいて設計した。文献[12]には、飛翔中のメンフクロウの翼の断面形状についても記載されており、本論文の Fig. 32 にその図を示す。この翼断面図に基づき、本研究で定義する「前羽根」と「後羽根」に相当する部分を翼断面上で推定した結果、両者のピッチ角の差は約 20° であることがわかった。

したがって、 $\eta = 0.9$ (Fig. 3(b)) におけるピッチ角を平均値 α^- として採用し、この平均値と比較して、前羽根の運動は 10° 減少、後羽根の運動は 10° 増加させた。なお、前羽根と後羽根が 20° の角度差で動く条件は、メンフクロウの実際の羽ばたき動作を正確に再現するものではない。先行研究[12]の測定値を参考にして、これらの角度の最大値や最小値、平均値、ゼロクロスのタイミングや、ピッチ運動の全体的な運動プロファイルの調整を行った。

Fig. 33 に、これらを適宜変更した条件 (Case 1–Case 14) におけるピッチ角およびプランジ角の時間変化を示す。このうち Fig. 33(a) が、前羽根と後羽根が 20° の角度差で運動するケース (Case 1) を示しており、この条件を基準として、ピッチ角を複数の条件で変更した。

本研究では、全体で 46 ケースを検討したが、ここでは代表的な 14 ケースを「代表ケース (Representative Cases)」とする。Case 1 - 14 は、前羽根と後羽根のピッチ角の組み合わせを変化させた条件で、ピッチ角の調整により、羽ばたき運動により生成される気流への影響を評価するために設定した。

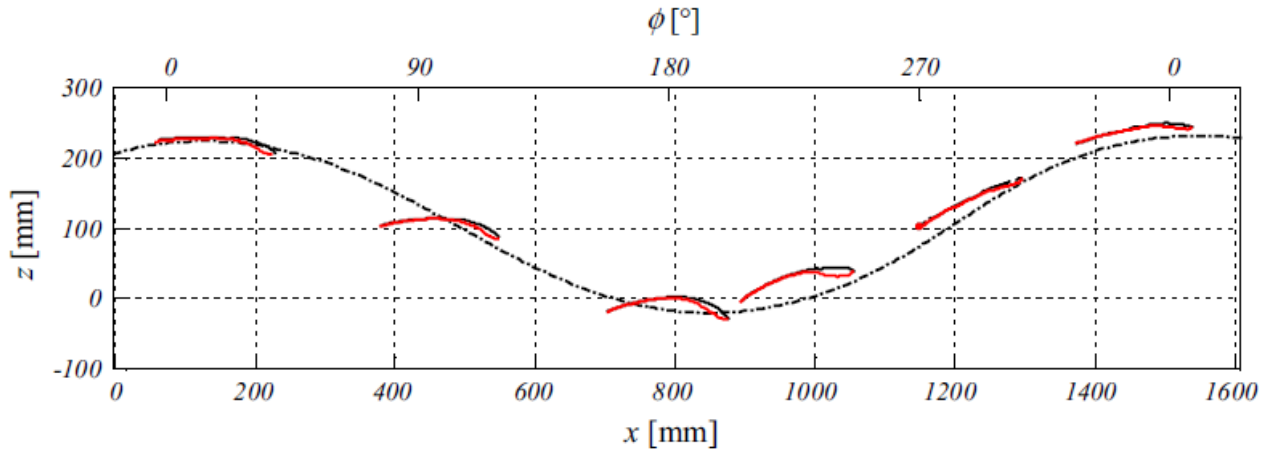
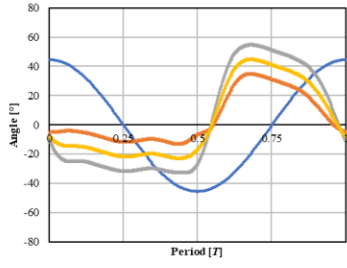
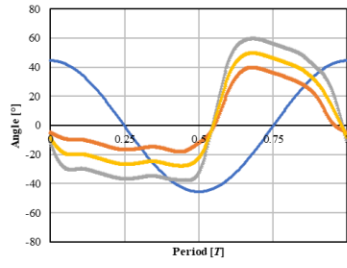


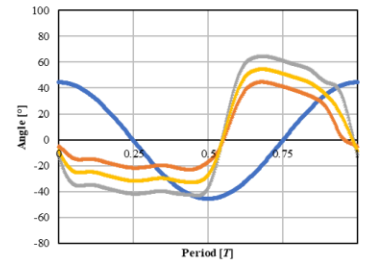
Fig. 32. Wing profiles [12].



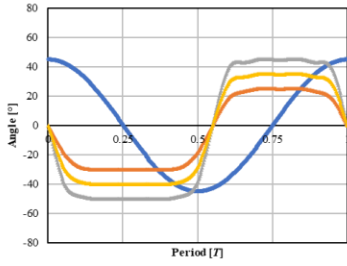
a) Case 1.



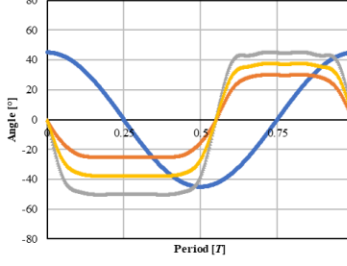
b) Case 2.



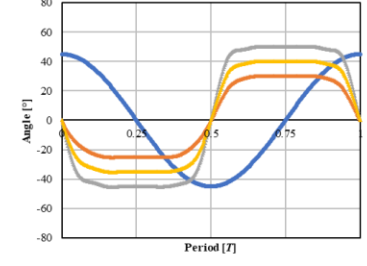
c) Case 3.



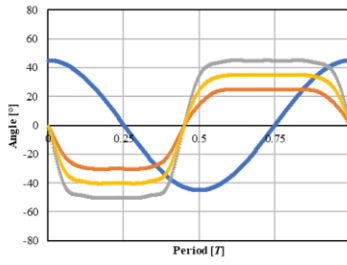
d) Case 4.



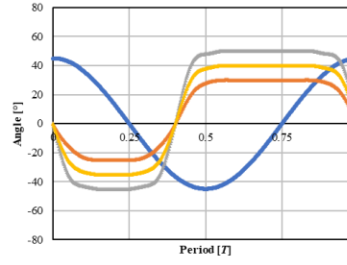
e) Case 5.



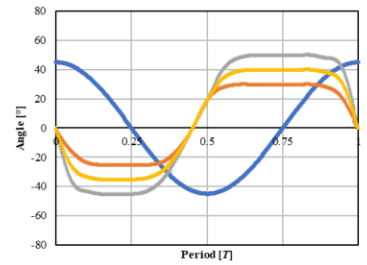
f) Case 6.



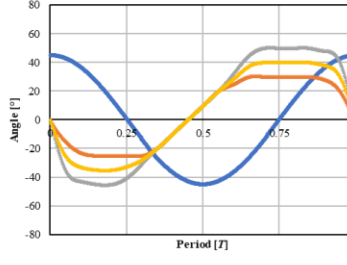
g) Case 7.



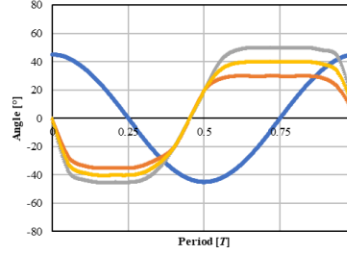
h) Case 8.



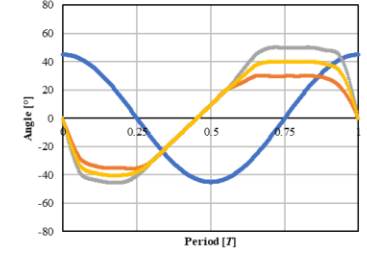
i) Case 9.



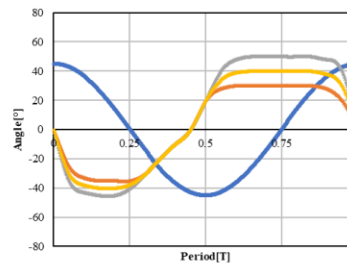
j) Case 10.



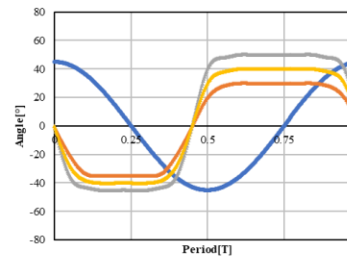
k) Case 11.



l) Case 12.



m) Case 13.



n) Case 14.

Fig. 33. Pitch and plunge angles of Representative Cases.

4.5 評価指標

計算結果を用いて、羽ばたき型送風機によって生成される風の評価を行った。本研究では、以下の二つの指標を定義した。

4.5.1 有効流量面積 Effective Flow Area (EFA)

Fig. 34 に示すとおり、羽根後端から 700 mm の位置にターゲット領域を設定した。この領域は、座っている人間が、正面から風を浴びる場合に、肩幅と顔の下から腰までの高さをカバーできる領域である。

ターゲット領域の高さと幅は、文献[28][29]に基づいて設定した。日本人の平均肩幅は 432.8 mm [28] であるから、幅方向は $-215 \text{ mm} \leq x \leq 215 \text{ mm}$ とし、高さ方向は[29]より、 $-230 \text{ mm} \leq z \leq 200 \text{ mm}$ とした。ターゲット領域内で、人間が適していると体感できる風速 0.6 - 1.5 m/s[21]となる面積を EFA と定義する。EFA は次式で表される。

$$\text{EFA} = \frac{A_{\text{comfort}}}{A_{\text{target}}} \quad (2)$$

ここで、 A_{comfort} は風速が 0.6 - 1.5 m/s の面積、 A_{target} はターゲット領域の総面積である。

CFD 解析では、ポスト処理により風速が 0.6 - 1.5 m/s の範囲にある領域を抽出し、その面積をターゲット領域面積で除して EFA を算出した。実験では、ターゲット領域を 50 mm 間隔で格子状に分割し、各計測点の風速が 0.6 - 1.5 m/s の範囲にある点数に分割面積を乗じて算出した。

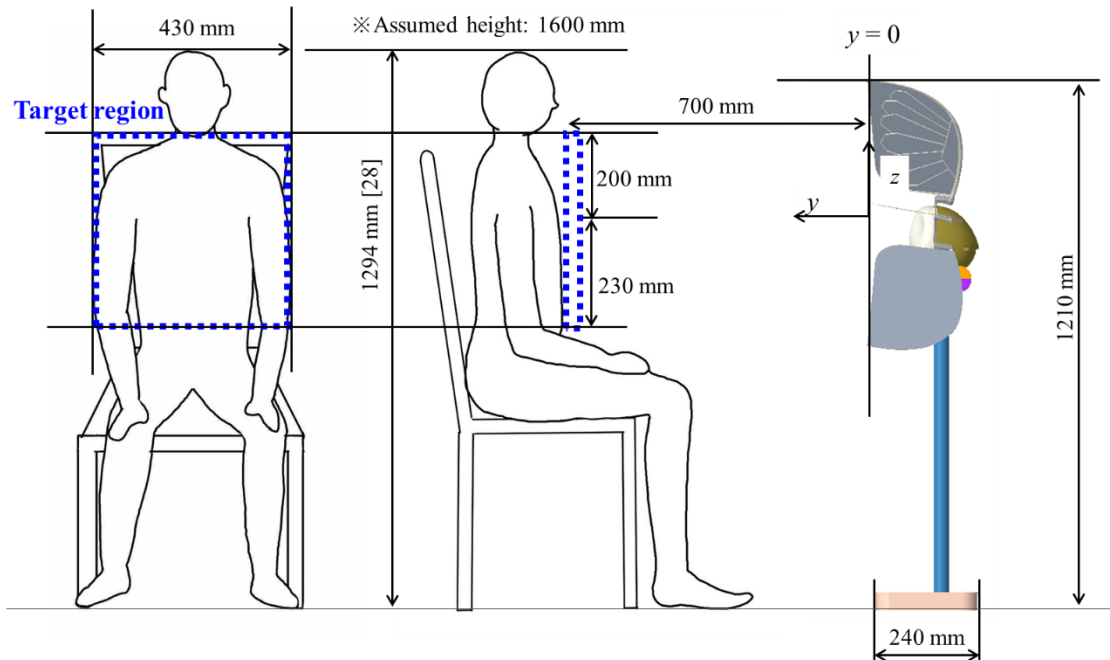


Fig. 34. Target region.

4.5.2 均一度指標 Uniformity: Coefficient of Variation (CV)

先行研究[30]では、扇風機による風は風速の不均一性が大きく、その結果、使用者が不快感を生じることが報告されている。そこで、本研究では風速の「相対的なムラ」を定量化する指標として CV を導入した。解析、実験共に、 $y = 700 \text{ mm}$ の位置で、ターゲット領域（幅方向 $-215 \text{ mm} \leq x \leq 215 \text{ mm}$ 、高さ方向 $-230 \text{ mm} \leq z \leq 200 \text{ mm}$ ）内に 50 mm 間隔の格子状に分割する 9×8 の 72 点を設け、それぞれの点の風速の平均値 ($\mu [\text{m/s}]$) と標準偏差 ($\sigma [\text{m/s}]$) から、式(2)のように算出する。CV が低いほど、均一性が優れていることを示す[31]。

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (3)$$

4.6 代表ケース (Representative Cases) の解析結果

Table 10 は、代表ケースである Case 1 - 14 の羽根の変形、運動に関する各パラメータを変化させた場合の解析条件と、2 つの評価指標の結果をまとめたものである。

Fig. 35 は、EFA 算出位置での平均風速分布を示す。Fig. 35 では、計算結果を羽ばたき型送風機胴体中心線に関する左右対称面を挟んで反転したものも加え、 $-0.65 \text{ mm} \leq x \leq 0.65 \text{ m}$ の範囲で表示している。各図の右下隅のインセットは、対象領域から抽出された EFA 該当範囲を表している。これにより、風速が快適範囲 ($0.6 - 1.5 \text{ m/s}$) に収まる領域を強調して表示した。

どの Case においても、下降ストロークの間、羽根の前縁が後縁よりも低い位置にある。前縁が後縁よりも低い位置にある場合を「前下げ」、前縁が後縁よりも高い位置にある場合を「前上げ」と呼ぶことにする。

文献[12]の Fig. 27 に示されたピッチ角を平均値として採用し、前羽根の運動を 10° 減少、後羽根の運動を 10° 増加させた Case 1 の風速分布を Fig. 35 (a)に示す。風速が小さいため、EFA は 0 % となった。

風速を増加させるために、まず、ピッチ角の振幅を大きくすることにした。ピッチ角の振幅を大きくすることで、羽根の運動速度と変形量が増加し、その結果風速が向上すると考えられる。Case 2 と 3 では、ピッチ角の振幅を 10° ずつ増やした。振幅が増加するにつれて風速は向上し、EFA 値もそれに応じて増加した。Case 3 では、EFA は 28%に達したが、幅方向の高風速領域が減少したため、CV 値は 0.41 と高くなった。

フクロウの羽ばたき飛行と本論文で検討する羽ばたき型送風機の主な違いは、ピッチ運動の非対称性にある。フクロウは飛行のために揚力を発生させる必要があるため、ピッチ角は非対称であり、羽ばたき運動中は、「前下げ」の状態が「前上げ」の状態よりも長い時間維持される。さらに、ピッチ角の大きさは「前上げ」の際により大きくなる。一方、羽ばたき型送風機には、揚力発生のためのピッチ運動の非対称性は不要である。したがって、ピッチ運動が対称であれば、羽ばたき羽根の後ろに直線的な気流が

発生すると予想されるため、平坦区間を持つ上下対称のピッチ運動プロファイルを検討した。

ピッチ角のゼロクロスタイミング（羽根が水平になるタイミング）は、Case 1 において $T=0.55$ で発生する。Case 4 および Case 5 では、このゼロクロスタイミングは $T=0.55$ で維持し、ピッチ角の分布をそれぞれ 10° および 15° 下方にシフトさせ、ピッチ運動の振幅の中心をゼロに近づけたプロファイルを形成した。

続いて、Case 6、7、8 では、ピッチ角のゼロクロスタイミングを変更し、「前下げ」と「前上げ」の時間配分を調整した。ゼロクロスタイミングを $T=0.4$ に変更した Case 8 では、床面 ($z=-900$) 近傍に速い流れが生じた。Case 7 で、EFA 55 %、CV 0.11 を達成した。

Case 8 から 10 は、羽根が「前下げ」から「前上げ」に遷移する際の時間「遷移時間 (duration)」を変更した。ゼロクロスタイミングは Case 1 と同じとし、遷移に要する時間のみを変化させた。結果として、遷移時間が長い場合、風速が上下方向に広がったり、風速の大きい部分の位置が移動したりして、EFA が低下する傾向が確認された。

Case 11 から Case 14 では、「前下げ」の間のピッチ角を前羽根と後羽根で近づけ、変形を小さくすることで風速の大きい位置を上方に移動する試みを行ったが、Case 7 の性能を上回る結果は得られなかった。

羽根の往復運動によって生じる流れは、先行するストロークで生成された渦と相互作用する可能性がある[32][33][34]。さらに、羽根のピッチ角が正と負の間で切り替わる際に、渦が羽根から分離し、以前に生成された反対方向の渦と相互作用する。この相互作用により、結果として生じる風速と風向が決定されると考えられる。

初回試作で作製した Wing 1 の、実験により得られたデータを基に、折れ畳みモデルで数値計算を行った結果を、「Wing 1-CFD」と定義する。Wing 1-CFD と Case 7 の解析結果の比較を行った。Fig. 36、37 は、Wing 1-CFD および Case 7 の、1 サイクルを 8 等分したものから渦構造と風速の瞬間場が特徴的なものを選択した $T=0.125$ 、 0.375 、 0.75 および 1.0 における、 x 方向から見た羽根の中心断面での羽根の運動、渦度、および風速の瞬間場を示す。

Wing 1-CFD では、 $T=0.125$ において渦が上方に剥離し、逆流が発生する。その結果、上昇流と下降流の交互発生は見られず、気流は主に下向きに流れる。Case 7 では、下降時に上昇流が発生し、上昇時に下降流が発生し、交互に発生して後方に向かう流れが生成される。CV 値は、一般的なプロペラファンと比較しても小さい。

Fig. 38 は、羽根後端から 700 mm の位置に人が着座し、正面から風を浴びる場合の配置図である。a) は Wing 1-CFD、b) は Case 7 の結果である。前述のように、肩幅と、顔の下から腰までの高さをカバーしていることがわかる。

Table 10. Conditions for numerical analysis with variations in each parameter

Case No.	α_A Min / Max [°]	α_B Min / Max [°]	α^- Min / Max [°]	α^- range [°]	T ($\alpha = 0$)	EFA [%]	CV
1	-10 / 35	-30 / 55	-20 / 45	65	0.55	0	0.14
2	-15 / 40	-35 / 60	-25 / 50	75	0.55	25	0.30
3	-20 / 45	-40 / 65	-30 / 55	85	0.55	28	0.41
4	-25 / 30	-45 / 50	-35 / 40	75	0.55	42	0.16
5	-30 / 25	-50 / 45	-40 / 35	75	0.55	33	0.24
6	-25 / 30	-45 / 50	-35 / 40	75	0.50	40	0.11
7	-25 / 30	-45 / 50	-35 / 40	75	0.45	55	0.11
8	-25 / 30	-45 / 50	-35 / 40	75	0.40	43	0.12
9	-25 / 30	-45 / 50	-35 / 40	75	0.45	42	0.20
10	-25 / 30	-45 / 50	-35 / 40	75	0.45	0	0.08
11	-35 / 30	-45 / 50	-40 / 40	75	0.45	45	0.21
12	-35 / 30	-45 / 50	-40 / 40	75	0.45	0	0.13
13	-35 / 30	-45 / 50	-40 / 40	75	0.45	9	0.26
14	-35 / 30	-45 / 50	-40 / 40	75	0.45	55	0.13
Ordinary fan						43	0.72

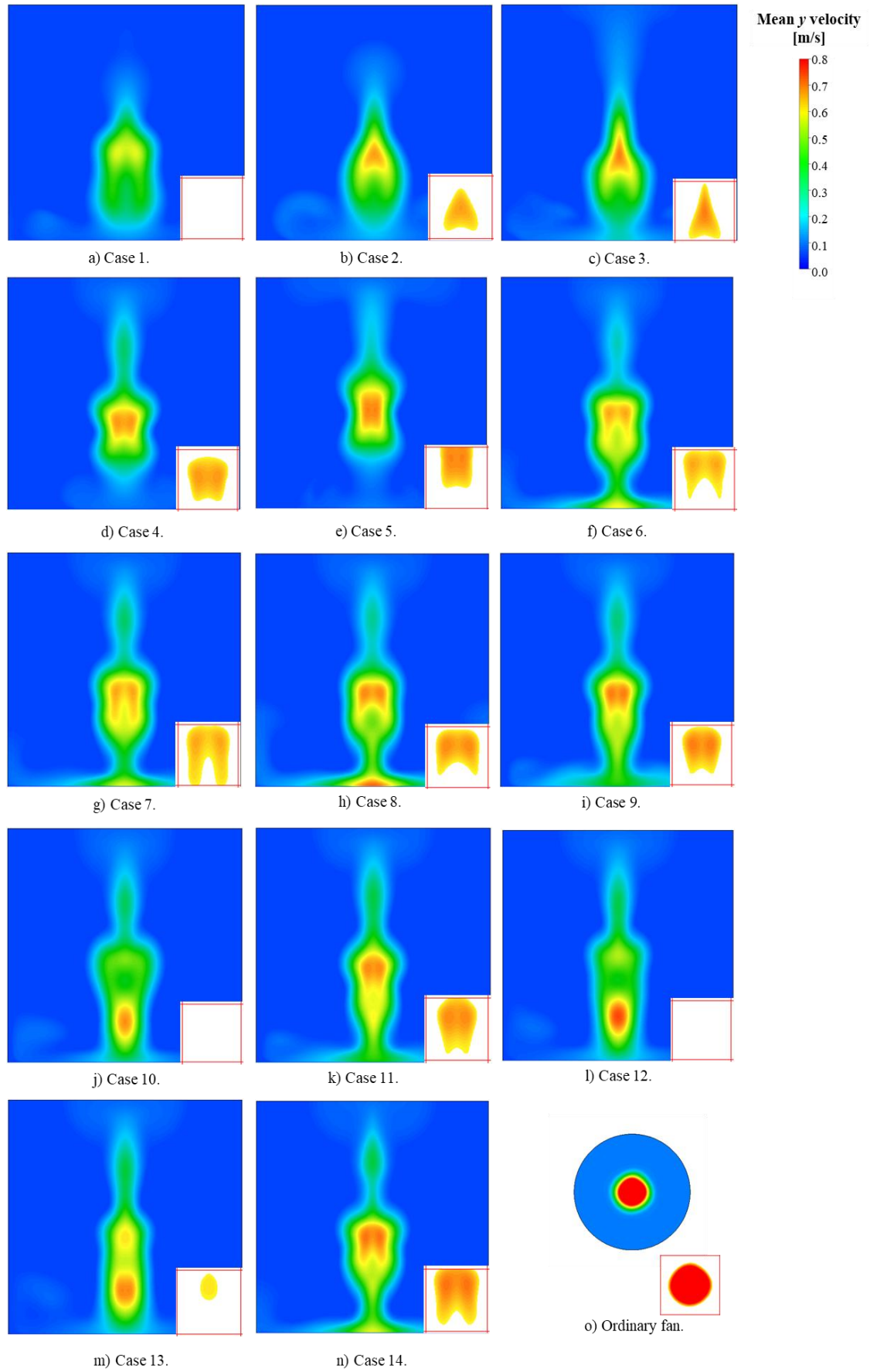


Fig. 35. Wind velocity distributions from numerical results under varying pitch angles.

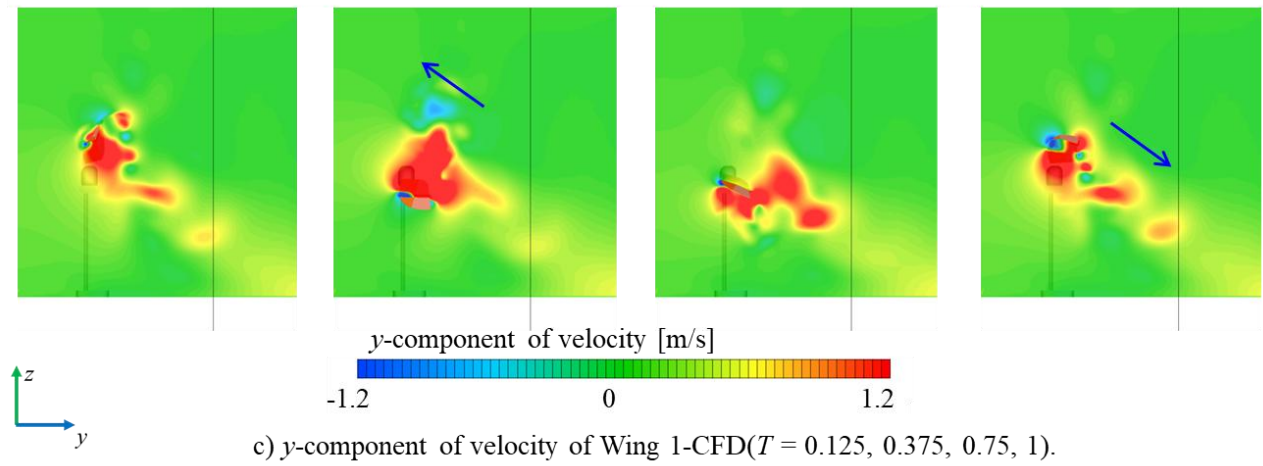
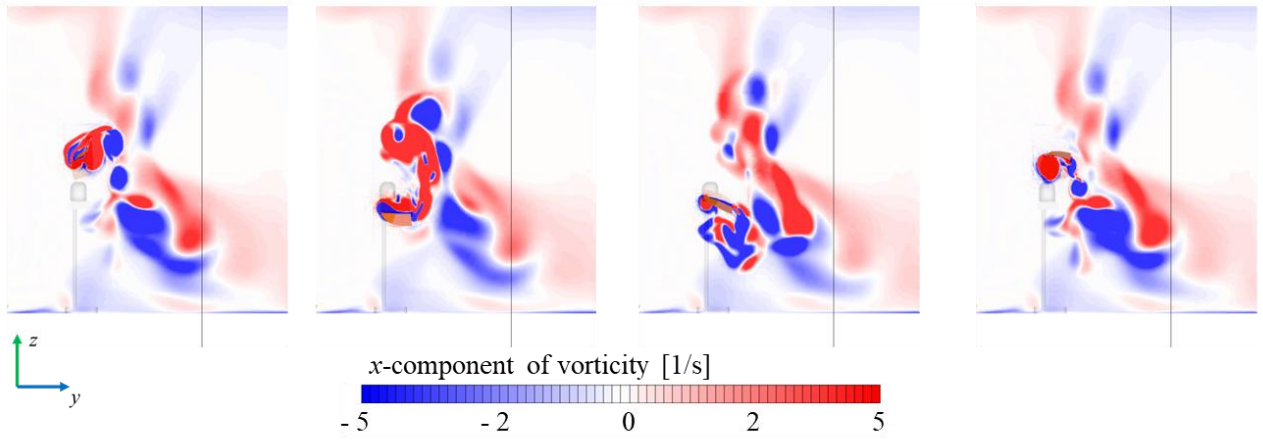
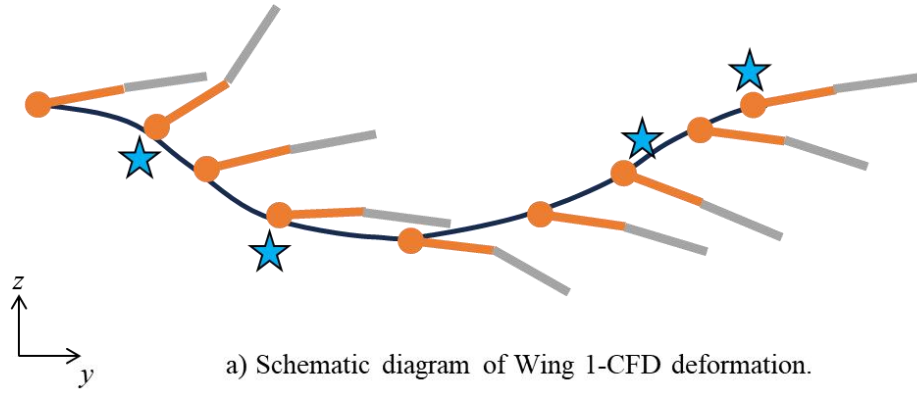


Fig. 36. x -direction view of mid-span wing motion, vorticity, and velocity: Wing 1-CFD.

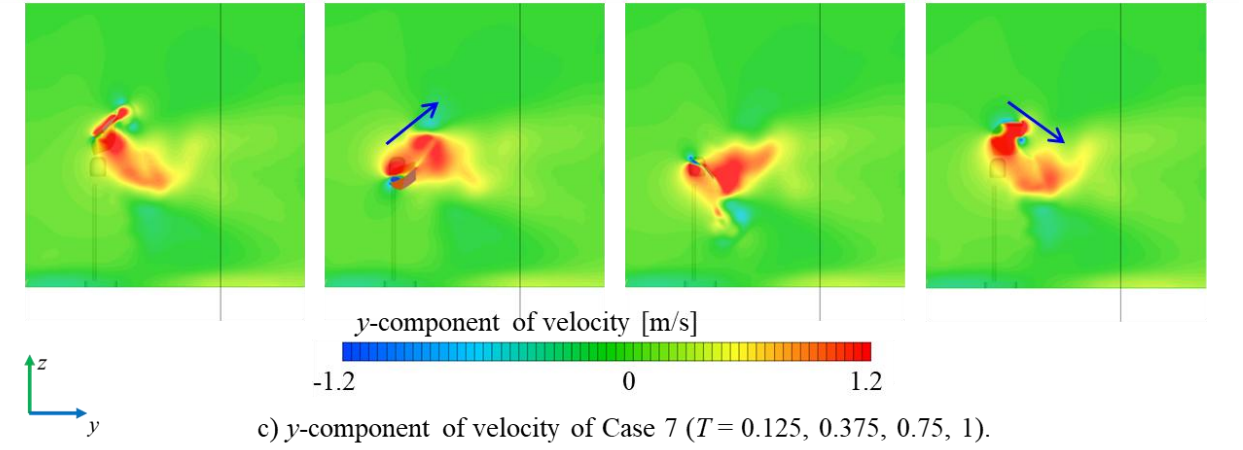
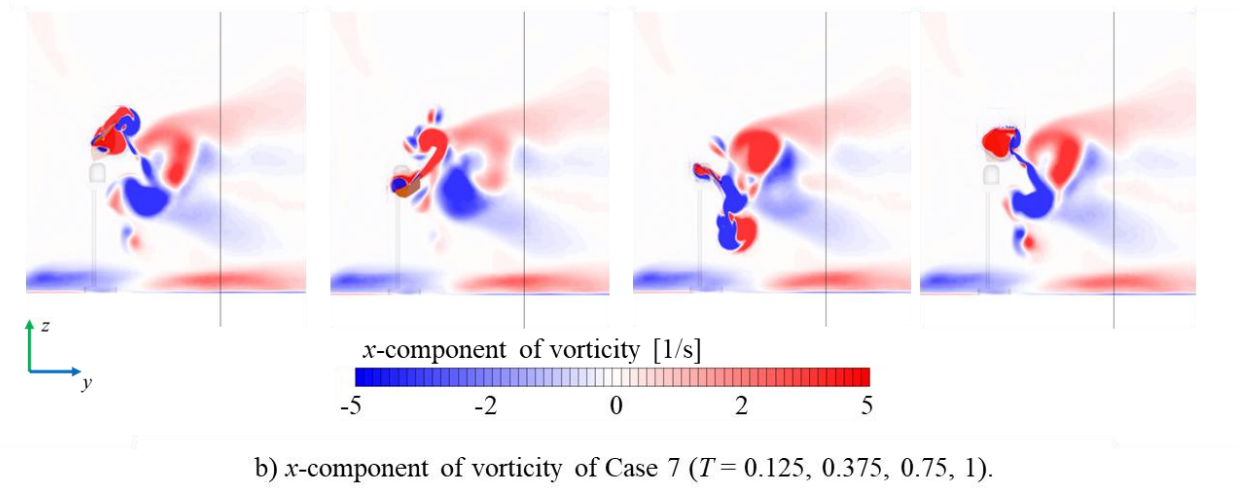
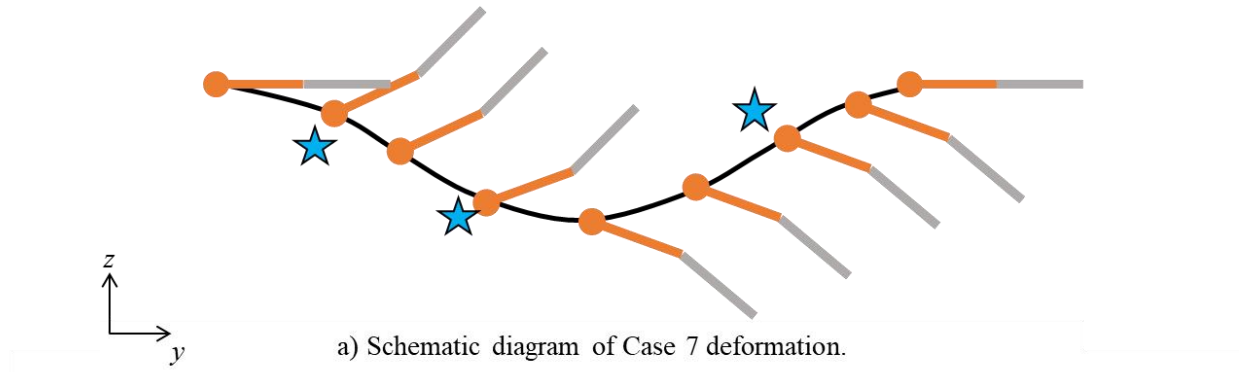


Fig. 37. x -direction view of mid-span wing motion, vorticity, and velocity: Case 7.

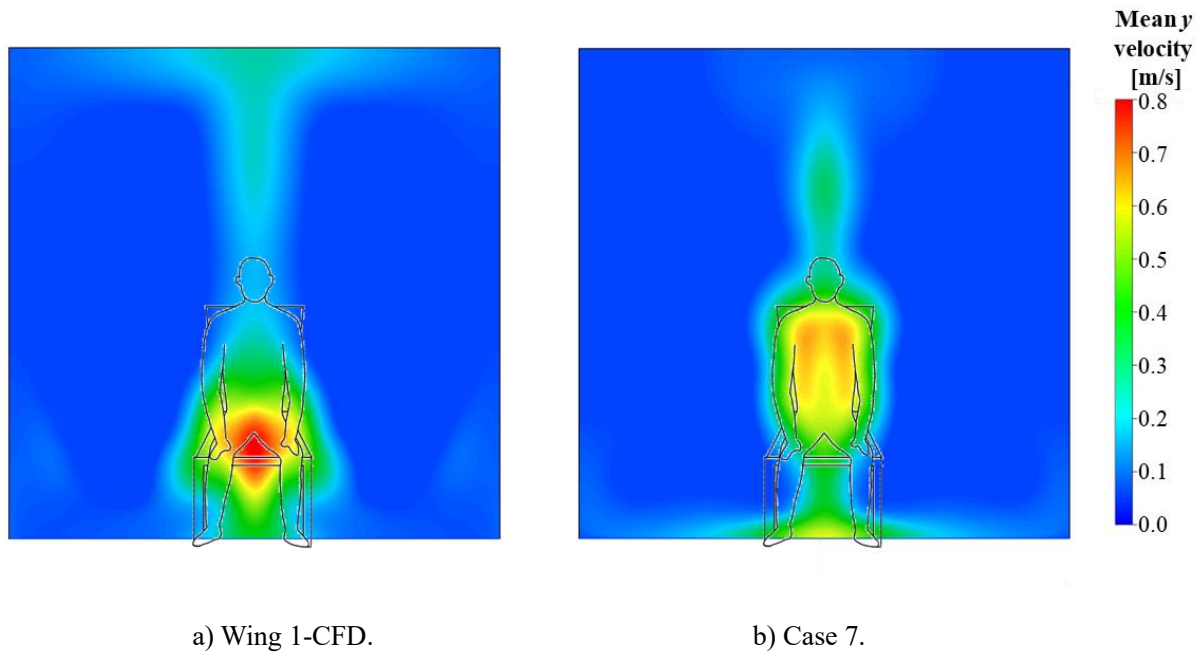


Fig. 38. Wind velocity distribution and wind exposure on a human.

4.7 その他の解析パターン

本章では、ピッチ角、プランジ角、分割角などの各パラメータを系統的に変更し、計 46 パターンの数値解析を実施したもののうち、代表ケース以外で調査を行ったものについて、簡潔に結果を述べる。全ケースの条件と解析結果は付録 A に一覧としてまとめている。

解析パターンの分類は以下の通りである。

Case 1-1 ~ 1-5 : サインカーブによる羽ばたき

Case 2-1 ~ 2-7 : ピッチ角振幅変更

Case 3-1 ~ 3-8 : 折り畳みモデルの導入

Case 4-1 ~ 4-6 : ピッチ角の加速度変更

Case 5-1 ~ 5-5 : 分割角 φ の影響

Case 6-1 ~ 6-3 : ピッチ角の上下対称性

ここでは、各グループから代表的なケースを選び、その特徴と解析結果を簡潔に述べる。

4.7.1 サインカーブによる羽ばたき (Case 1-1 ~ 1-5)

折れモデルを採用する前に、平板を振った場合にどのような風が生成されるかを確認するため、文献 [12] を参考に、プランジ角、ピッチ角ともに一般的なサインカーブで、位相差は 90° の条件を設定した。位相差は固定し、ピッチ角とプランジ角の振幅および周波数を変更して解析を行った。

その結果、ピッチ角とプランジ角の振幅が大きいほど風速は向上したが、風速分布は上下に分離し、所望の均一な分布は得られなかった。羽ばたき周波数を増加させると風速は向上するが、風速分布の改善にはつながらないことが確認された。

Fig. 39 は、プランジ角、ピッチ角ともに $\pm 45^\circ$ の振幅を持ち、位相差 90° で運動する Case 1-1 のプランジ角とピッチ角の時間変化、および得られた平均風速分布である。

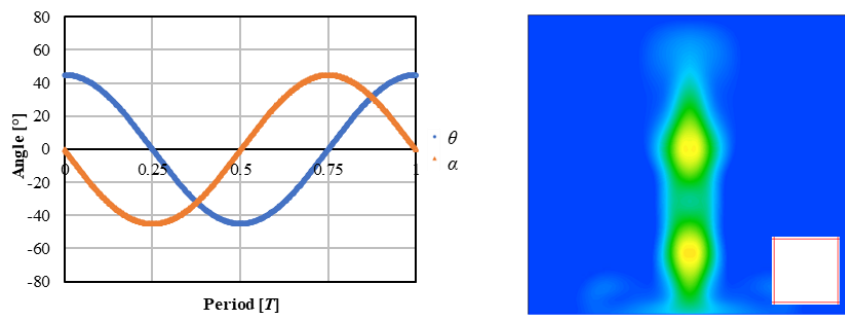


Fig. 39. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Case 1-1.

4.7.2 ピッチ角振幅の変更 (Case 2-1 ~ 2-7)

実際のフクロウの羽ばたき[12]を平板で再現した場合に、どのような風速分布が得られるかを調査した。ピッチ運動プロファイルは文献[12]の Fig. 27 に基づき、ピッチ角の振幅を変化させて解析を行った。

その結果、風速の強い領域は、上下方向の中央付近に集中した。ピッチ角の振幅が大きくなると風速が向上するが、振幅が大きくなるにつれて風速分布が上下に分離する傾向が見られた。解析の結果、ピッチ角の振幅は $65 - 80^\circ$ 程度が適していることが判明した。その中で、 75° 付近が、上下方向における風速の偏りが小さく、強風域がターゲット領域中央付近に分布した。 80° 以上では分離する傾向が強まった。

Fig. 40 は、ピッチ角が $-20^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ で、振幅 65° の条件である Case 2-6 のプランジ角とピッチ角の時間変化、および得られた平均風速分布である。

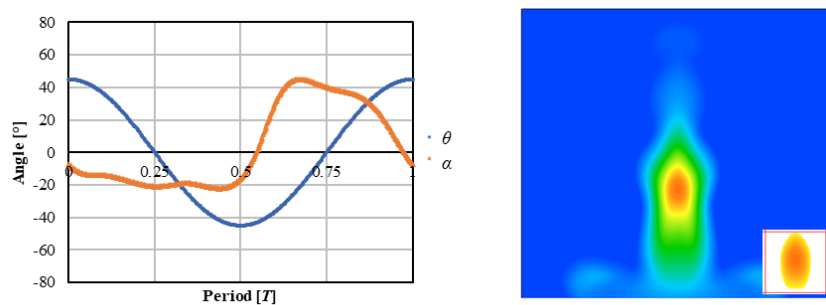


Fig. 40. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Case 2-6.

4.7.3 折り畳みモデルの導入 (Case 3-1 ~ 3-8)

羽根の弾性変形を再現するために、折り畳みモデルを導入した。ここでも、文献[12]の Fig. 27 に示されたピッチ角を平均値 (α) として採用し、前羽根と後羽根のピッチ角の最大値、最小値を変更した。ただし、Case 3-1 ~ 3-8 の全てのケースで、平均値の運動プロファイルは変更していない。

解析の結果、プランジ角を変更しなくても、ピッチ角の変更のみで、風速の強い領域を上下方向に移動できることが確認された。これらの計算のうち、分割角 $\phi = 10^\circ$ 、 $\alpha^- \text{ range} = 75^\circ$ の組み合わせが最も良好な風速分布を示した。

Fig. 41 は、前羽根のピッチ角が $-20^\circ \leq \alpha_A \leq 35^\circ$ 、後羽根のピッチ角が $-40^\circ \leq \alpha_B \leq 35^\circ$ 、平均のピッチ角が $-30^\circ \leq \alpha^- \leq 35^\circ$ の条件である Case 3-5 のプランジ角とピッチ角の時間変化、および得られた平均風速分布である。

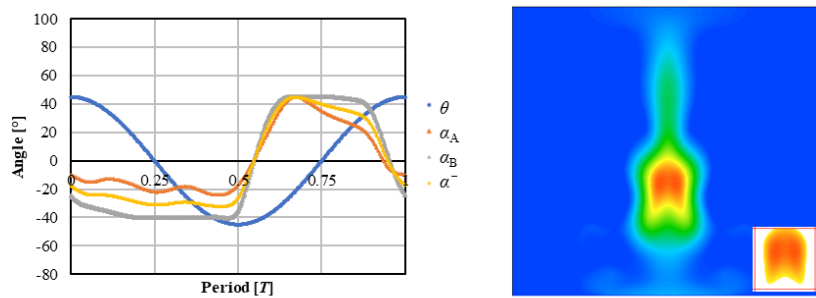


Fig. 41. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Case 3-5.

4.7.4 ピッチ角の加速度変更 (Case 4-1 ~ 4-6)

ここでは、文献[12]の Fig. 27 に示されたピッチ角の運動プロファイルを変更した。具体的には、ピッチ角が最大値を取ってから最小値を取るまでの時間、言い換えると、「前下げ」から「前上げ」に切り替わる間のピッチ角の変化速度（加速度）を変更した。

解析の結果、「前下げ」から「前上げ」に切り替わる間のピッチ角の変化が緩やかな（加速度が小さい）場合、風速分布は高速域の幅方向が狭まり、上下に広がる傾向がみられた。高速域を幅方向に広げるためには、羽根のピッチ角をある程度速く変化させる方が有効である。

Fig. 42 は、加速度が大きい Case 4-2 と、Case 4-2 と比較すると加速度が小さい Case 4-6 のプランジ角とピッチ角の時間変化、および得られた平均風速分布である。

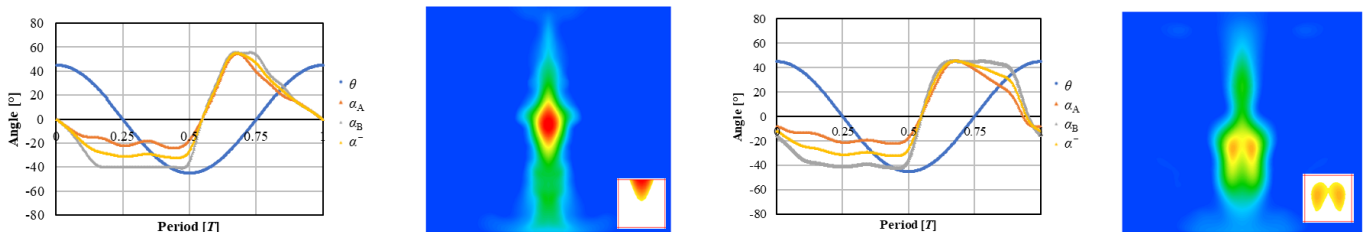


Fig. 42. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Case 4-2 and 4-6.

4.7.5 分割角 φ の影響 (Case 5-1 ~ 5-5)

ピッチ角の条件が、 $-20^\circ \leq \alpha_A \leq 45^\circ$ 、 $-40^\circ \leq \alpha_B \leq 45^\circ$ 、 $-30^\circ \leq \alpha^- \leq 45^\circ$ であり、分割角 $\varphi = 10^\circ$ である Case 3-5 をベースに、分割角 φ の影響を調査した。具体的には、分割角 $\varphi = 5^\circ$ 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° まで変化させた。

解析の結果、分割角 φ が大きくなると、風速分布は羽ばたき型送風機胴体中心線に関する左右方向に広がる傾向を示した。ただし、中央部の風速ピークは低下し、全体の分布形状には大きな変化は見られなかった。分割角 φ の調整は、風の広がりを制御する手段となるが、風速の高い範囲の面積とのバランスを考慮する必要がある。

Fig. 43 は、分割角が 5° と 30° の場合の風速分布を示す。

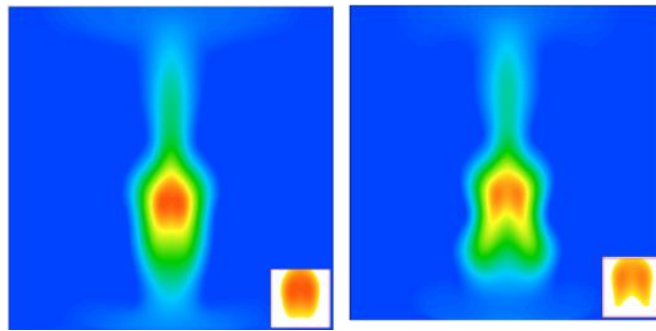


Fig. 43. Wind velocity distribution at split angles of 5° and 30° .

4.7.6 ピッチ角の上下対称性 (Case 6-1 ~ 6-3)

ここでは、平坦区間を持つ上下対称のピッチ角の運動プロファイルを用いるのではなく、文献[12]の Fig. 27 の一部を反転する方法で上下対称性を付与した。具体的には、 $\alpha < 0$ のプロファイルを反転して $\alpha > 0$ にも適用した。この際、ゼロクロスタイミングを $T = 0.5$ ($\alpha = 0$) に設定した。

解析の結果、風速分布は上下対称となったものの、風速分布の高速域が上下方向に広がり、幅方向の広がりが減少した。Fig. 44 は、Case 6-1 のプランジ角とピッチ角の時間変化、および得られた平均風速分布である。

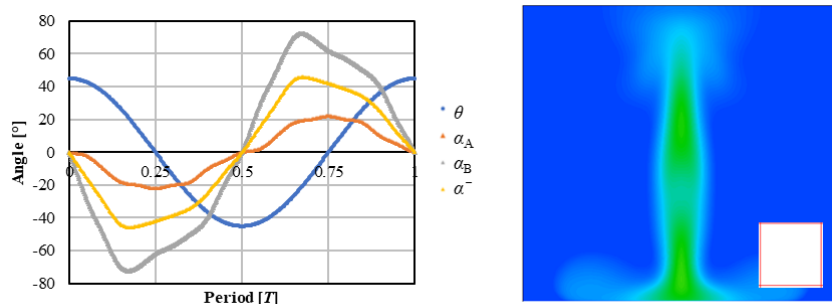


Fig. 44. Wind velocity distribution of the symmetric profile (Case 6-1).

以上、本章では、ピッチ角、プランジ角、分割角などの各パラメータを系統的に変更し、計 46 パターンの数値解析を実施した。全ケースの条件および解析結果は、付録 A に一覧としてまとめている。

4.8 本章のまとめ

本章では、鳥の羽ばたき運動に着想を得た羽ばたき型送風機において、羽根を前羽根と後羽根に分割し、それらを適切に移動させることで羽根の弾性変形を近似的に表現し、ピッチ角 α が風速分布に与える影響を数値解析により調査した。特に、人が涼を得ることを評価するため、有効送風面積（EFA）と風速の均一度（CV）を評価指標として定義し、羽根のピッチ角 α の条件を調査した。

実際のフクロウの羽ばたきと羽ばたき型送風機の最も異なる点は、揚力の要否である。羽ばたき型送風機では揚力が不要のため、ピッチ角の上下対称性を考慮し、ピッチ角の時間推移に平坦区間を持つ上下対称のプロファイルにすることにより、風速が向上し、CV も改善した。「前上げ」の時間よりも「前下げ」の時間を同じか若干長くすることが、EFA および CV の改善に効果的であることがわかった。

数値解析の結果、前羽根、後羽根のピッチ角をそれぞれ $-25^\circ \leq \alpha_A \leq 30^\circ$ 、 $-45^\circ \leq \alpha_B \leq 50^\circ$ と設定した Case7 で、EFA = 55%、CV = 0.11 という良好な値を得た。

その他のケースでも以下のことが明らかになった。

1. よく知られた鳥類の翼運動、プランジ角とピッチ角が時間的にサインカーブを描くような運動を羽ばたき型送風機に適用すると、風速分布が上下に分かれ、ターゲット領域で所望の風速を得ることができない。
2. 実際のフクロウの羽ばたきを適用した場合、高速域はターゲット領域の中央付近に集まる。ピッチ角の振幅が大きくなると風速は向上するが、振幅が大きくなるにつれて高速域が上下に分離するため、ピッチ角の振幅は $65^\circ - 80^\circ$ 程度が適切である。
3. 折り畳みモデルでは、平均のピッチ角の振幅を 85° にすると CV が悪化し、ターゲット領域内での風速の均一度が低下する。平均のピッチ角の振幅が 75° の場合に、ターゲット領域内で良好な風速分布を示した。
4. ピッチ角が正から負に変化するタイミングでピッチ角の変化する速度（加速度）が小さい場合、高速域が上下方向に広がり、幅方向の広がりが狭まる傾向を確認した。風速分布の高速域を幅方向に広げるためには、ピッチ角の正から負への切り替えをある程度速く行うことが有効である。
5. 分割角 φ を変化させた結果、 φ が大きくなると高速域は幅方向に広がる傾向を示したが、中央部の風速ピークは低下し、全体の分布形状は大きく変化しなかった。したがって、分割角 φ の調整は風の広がりを制御する手段となるが、高速域の面積とのバランスを考慮する必要がある。
6. 代表ケースで良好な結果を示した Case 7 のように、平坦区間を持つ上下対称プロファイルではなく、文献[12]のピッチ角プロファイルを反転適用して上下対称化した場合、風速分布は上下対称となったものの、流れが上下方向に広がり、幅方向の広がりが減少した。

次章では、実際の試作機を用いた実験的検討を通じて、「自然に近い気流」の再現性について検証する。

第5章 改良試作と自然風特性の再現

5.1 実験の目的

本章では、第4章で得られたCFD解析結果に基づき、羽ばたき型送風機の改良を行う。初期試作を改良した改良試作機を用いて、実際に生成される気流を測定し、CFD解析結果に基づく改良の妥当性を検証するとともに、自然風の特性が初期試作機と同様に再現可能であることを明らかにする。

特に、従来型扇風機との比較を通じて、羽ばたき型送風機の特徴あるいは優位性を明らかにすることを目的とする。これは、羽ばたき型送風機を実現しようとした狙いが、自然風に近いゆらぎ特性を有する低周波の気流を生成することにあるためである。

改良試作機によって生成された風の風速分布、パワースペクトルを計測し、従来型扇風機や1/f ゆらぎ制御機構を有する扇風機との比較を通じて、羽ばたき型送風機の改良試作機が自然に近いゆらぎ特性を有するかを検証する。

5.2 実機への反映

数値解析結果に基づいて、第4章のCase 7におけるピッチ角 α を改良試作機で再現することを試みた。基本的にはFig. 45に示すような構造を考案し、羽根の折り畳みモデルを再現することとした。

ピッチ角に関しては、 α_A は構造上の制限によって最大値と最小値を模擬し、 α_B の調整に関しては羽根のフレーム構造の一部に局所的な薄肉領域を設け、その薄肉部の厚さを変更することにより曲げ剛性を調整した。薄肉領域で局所的な柔軟性を高め、ピッチ角の変化を容易にする設計とした。

新たに作製した羽根をWing 3とする。Wing 3の運動を、2次元/3次元運動解析ソフトウェア（DIPP-Motion V/3D、DITECT社製）を用いて計測した。羽根の分割角 ϕ に対応する角度が 10° であることを確認した上で、 θ 、 α_A 、 α_B を測定した。この結果をFig. 46に示す。比較のため、第4章のCase 7の条件を破線で示す。Wing 3のピッチ角の最大値と最小値は、Wing 1のそれよりもCase 7の値に近づいた。Case 7ではプランジ角がサインカーブ状であったが、Wing 3のそれはサインカーブに沿わず、プランジ角が負の値となる時間が長くなった。これは、骨格構造の変更により振り下げ時の反動の影響が大きくなったためと考えられる。

Fig. 47に、Wing 3によって生成された風の計測値とCFD解析での風速分布の比較を示す。a)が羽根後縁から700 mmの位置で測定した風速分布、b)がCFD解析結果である。初期試作機のWing 1の風速分布（Fig. 14(b)）と比較して、Wing 3は風向が改善され、風速も増加した。ただし、風速が最大値となる位置は依然、ターゲット領域中央より下方に存在する。これは、Case 7の運動パターンと比較して、ピッチ角が正（前上げ）の持続時間が長くなったためと考えられる。

Table 11 は、Case 7、初期試作機の Wing 1、改良試作機の Wing 3 におけるピッチ角と 2 つの評価指標 (EFA,CV) を示す。Wing 3 は特に EFA の値が向上し、ターゲット領域内の広い範囲に気流を生成し、人がより涼を得られるような送風機となったことが示唆されている。

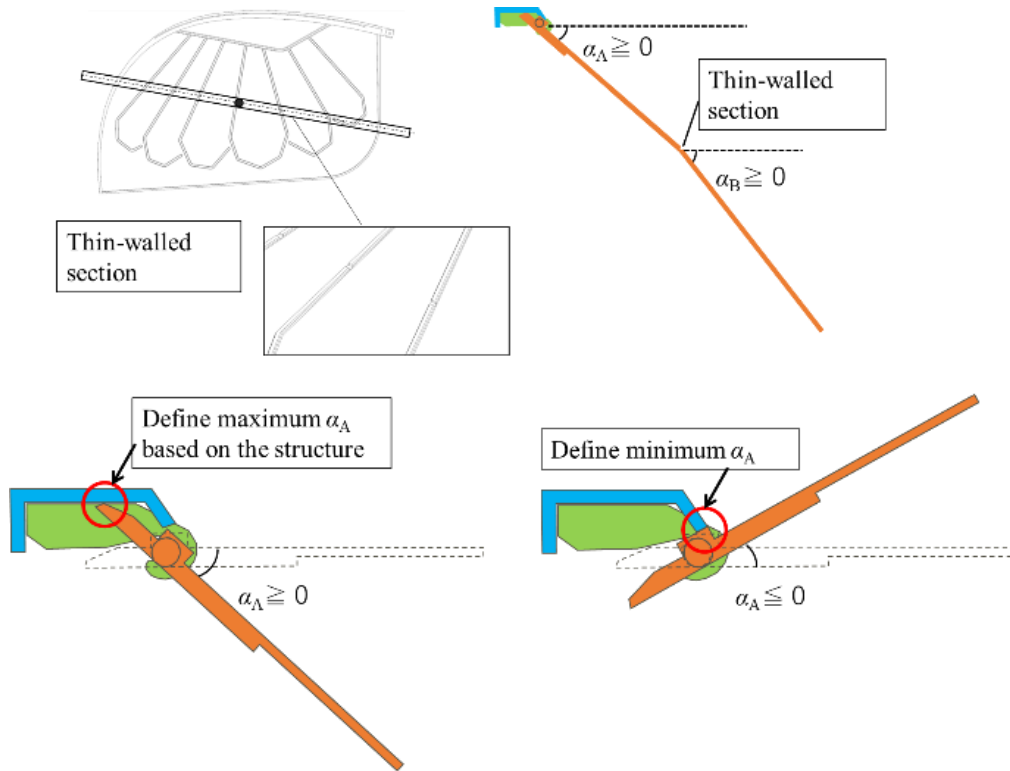


Fig. 45. Schematic diagram of Wing 3.

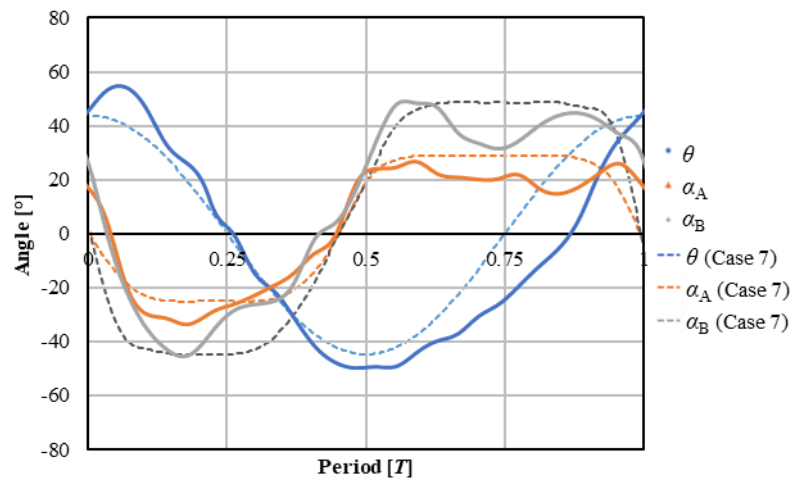
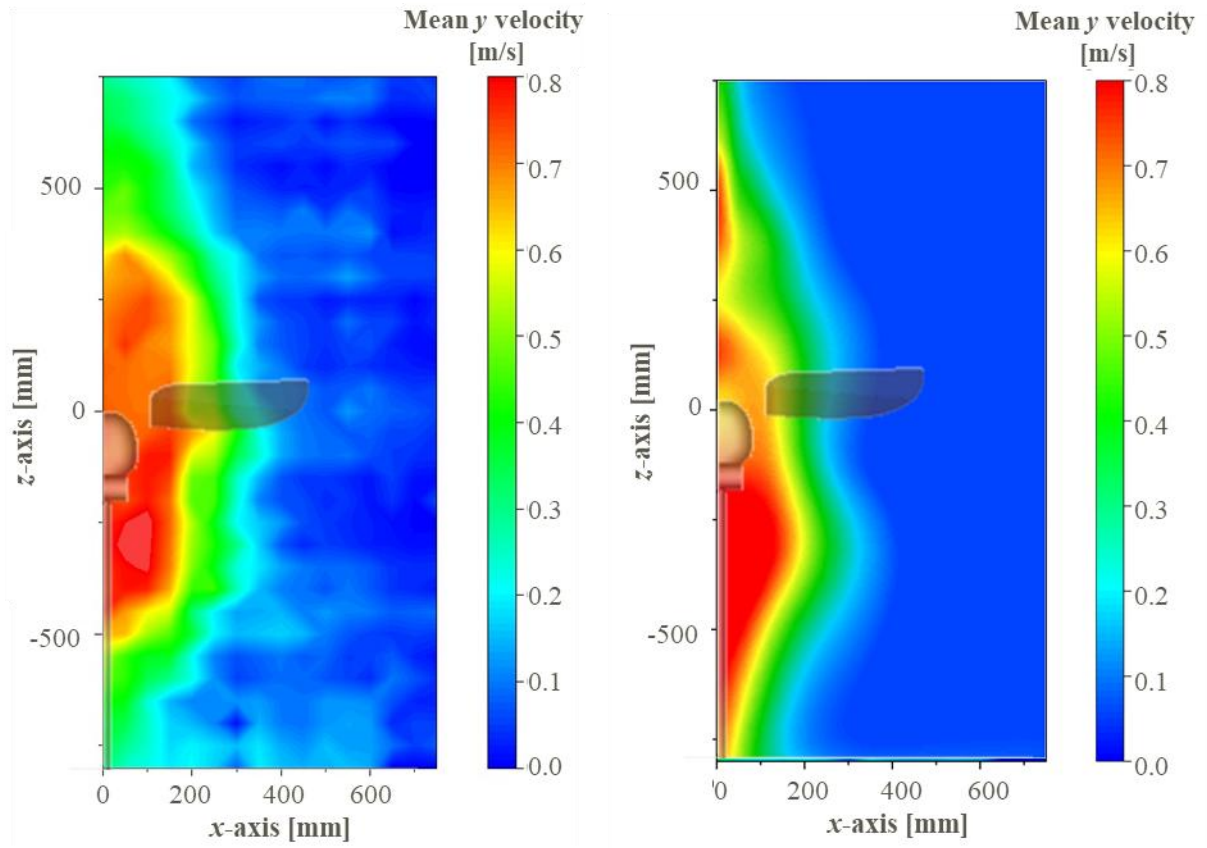


Fig. 46. Plunge and pitch angles of Wing 3 and Case 7.



a) Measurement results.

b) CFD analysis results.

Fig. 47. Wing velocity distribution at $y = 700$ mm for Wing 3.

Table 11. Comparison between numerical and experimental results

	α_A Min / Max [°]	α_B Min / Max [°]	α^- Min / Max [°]	α^- range [°]	T ($\alpha = 0$)	EFA [%]	CV
Case 7 (Numerical)	-25 / 30	-45 / 50	-35 / 40	75	0.45	55	0.11
Wing 1	-33 / 25	-74 / 37	-53.5 / 31	84.5	0.30	0	0.19
Wing 3	-34 / 27	-45 / 49	-39.5 / 38	77.5	0.45	78	0.12

5.3 周波数解析

Wing 3によって生成された風速を測定し、周波数解析を実施した。この結果をFig. 48 およびTable 12に示す。羽根から700 mm 下流の位置の風速が最大となる箇所で、風のパワースペクトルの傾きを示す $1/f^n$ の指数が $n=0.941$ となった。加えて、参考として $y=50$ mm、500 mm、900 mm における同様の平均値も算出し、距離による特性の変化を確認した。

羽根から700 mm 下流の位置の風速が最大となる箇所における n の値を、初期試作の Wing 1、Wing 1より羽根の弾性変形が少なかったWing 2、改良試作の Wing 3、従来型扇風機、ならびに $1/f$ ゆらぎ制御機構を有する扇風機と比較したものが Table 13およびFig. 49である。

従来型扇風機および $1/f$ ゆらぎ制御機構を有する扇風機では、近距離 ($y=50$ mm) では羽ばたき型送風機と比較して、 $n=1$ に近い特性が得られるものの、距離が離れるにつれてその特性が失われ、羽ばたき型送風機の方が $n=1$ に近づく。Wing 3の場合、 $y=800$ mm 付近で、 $n=1$ となる。

従来型扇風機においても、離れた位置で使用したり、至近距離で使用したりと、用途に応じた風の到達距離や性質の使い分けがなされているが、従来型扇風機では、 $y \leq 300$ mm でしか $n=1$ を達成できない。一方、Wing 1、2、3を比較すると、羽ばたき型送風機が生成する風は、羽ばたき方や翼の柔軟性、変形を適切に設計することで、 $1/f$ ゆらぎに近いスペクトル特性を達成する羽根後縁からの距離を調整可能であると考えられる。

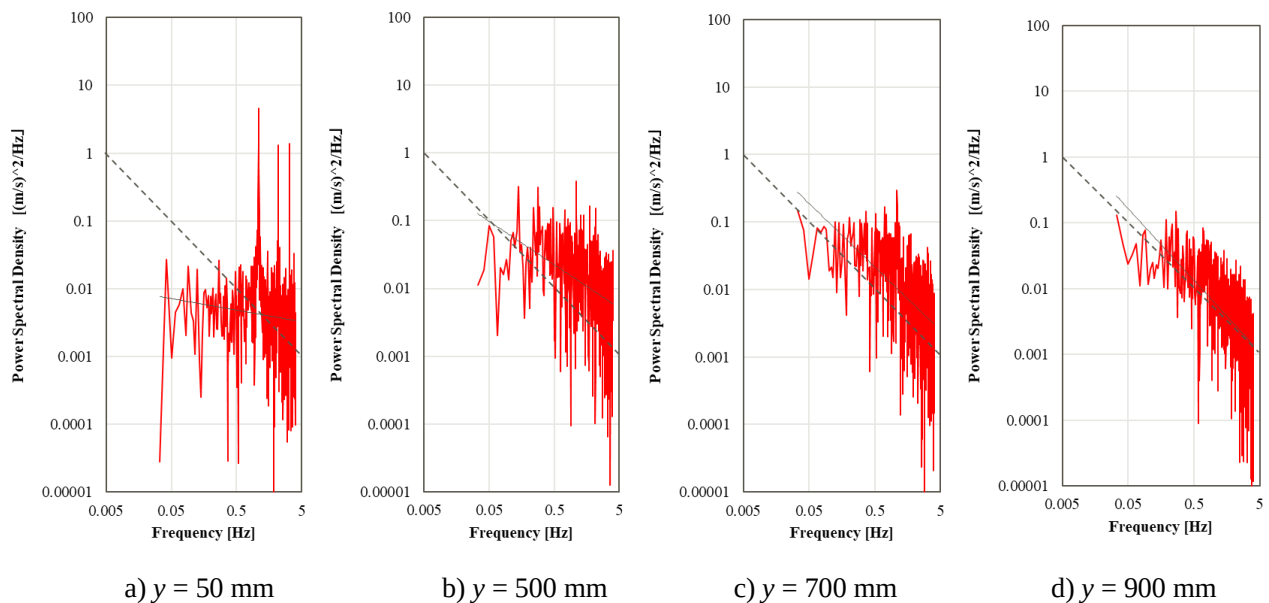


Fig. 48. Power spectrum of wind velocity of Wing 3 (The dashed line in the figure indicates the $1/f$ fluctuation).

Table 12. Coordinates of the measurement points and Value of n calculated from $1/f^n$

Wing 3	$y = 50 \text{ mm}$	$y = 500 \text{ mm}$	$y = 700 \text{ mm}$	$y = 900 \text{ mm}$
Measurement points $(x, z) \text{ [mm]}$	(250, 0)	(100, -300)	(100, -300)	(50, -500)
n calculated from $1/f$	0.171	0.640	0.941	1.091
n_{ave} (Average of 9 Points in the target region)	0.386	0.752	0.888	0.989

Table 13. n Values at various distances from the fan

	$y = 50 \text{ mm}$	$y = 500 \text{ mm}$	$y = 700 \text{ mm}$	$y = 900 \text{ mm}$
Ordinary fan	0.753	0.746	0.767	
Fan with $1/f$ fluctuation control	1.243	0.780	0.821	
Wing 1	0.266	0.881	1.067	
Wing 2	0.482	1.067	1.167	
Wing 3	0.171	0.640	0.941	1.091

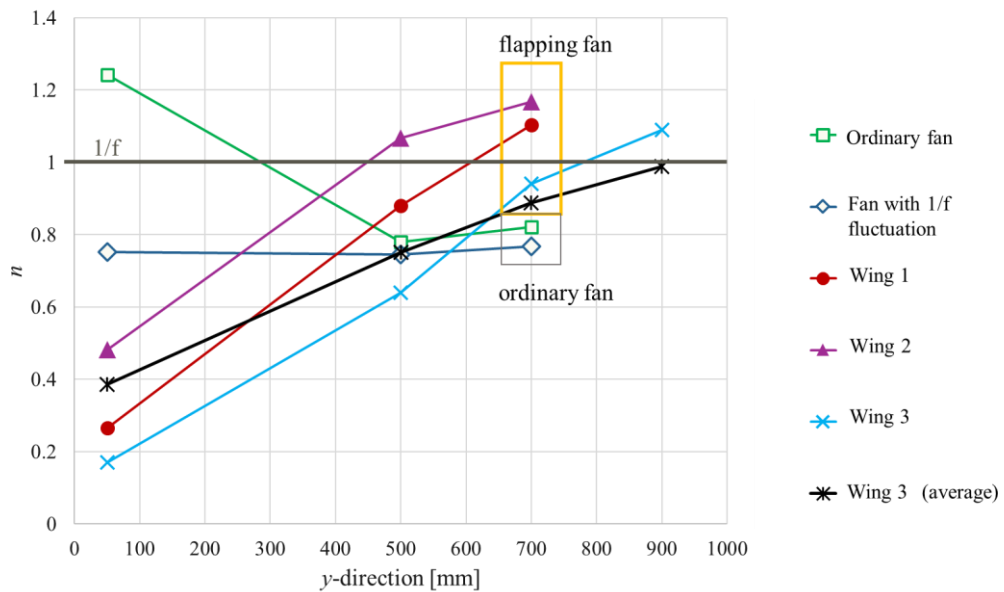
Fig. 49. Relationship between the distance from fans and the value of n

Fig. 50 は、一般的な扇風機に用いられるプロペラファンおよび羽ばたき型送風機から送出される渦構造を比較するために解析をおこなった結果を示したものである。左側はプロペラファン、右側は羽ばたき型送風機であり、a)、b) はそれぞれ、渦度の強さおよび渦度の等値面である。

プロペラファンの渦度の等値面は、流れの方向に沿って連続的に伸びている。渦の発生位

置は固定的で、ファンから遠くなればなるほど離れると周期性や変動はほとんど消失する。
渦の強度や広がりも局所的で、流れ場全体の変動が少ない。

Fig. 50 c) は、 y 方向風速の瞬間場である。

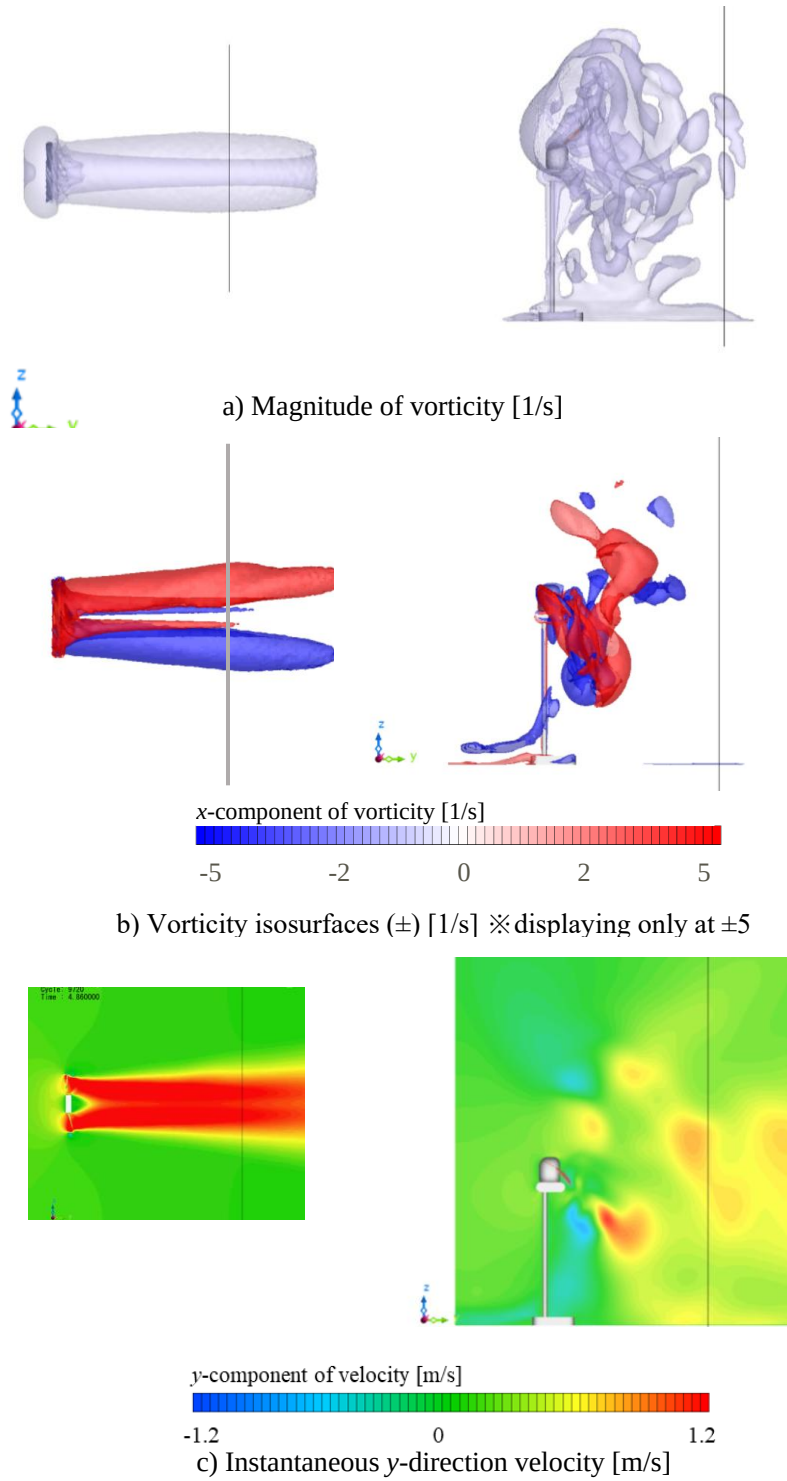


Fig. 50. Comparison of vortex structures between ordinary fan and flapping-type fan.

プロペラファン近傍では、回転による微細な乱れが風速に現れ、それが $1/f$ ゆらぎに似たスペクトルを生む。距離が離れるにつれて流れが一定に近づき、回転の周期的な成分が強調されることで、 $1/f$ ゆらぎのような非定常性が失われ、定常的な送風が支配的になる。羽ばたき型送風機では、渦度の等値面がより複雑で三次元的な構造を持ち、羽根の羽ばたき運動に追従して波打つような形状が見られる。渦の発生が時間的、空間的に変動しており、非定常性が強い。羽ばたきの可動域が大きいことも理由ではあるが、渦がより広範囲に及び、混合や拡散効果が高く、周期的な運動の中でも様々なスケールの渦が生成される。生成された渦どうしの干渉によって風速が時間とともに変動し、自然風に近いゆらぎ特性を生み出している。

5.4 本章のまとめ

本章では、鳥の羽ばたきに着想を得た羽ばたき型送風機の改良試作機を用いて、自然風に近いゆらぎ特性を有する低周波の気流を再現できるかを検証した。

Wing 3 を製作し、モーションキャプチャによる羽根変形の計測と風速分布の測定を実施した結果、羽根の変形は、CFD 解析で最も良好な結果を示した条件と似た変形になることが確認された。風速測定では、 $EFA = 78\%$ 、 $CV = 0.12$ を達成した。CFD 解析の結果と比べてもさらに改善され、広範囲かつ均一な送風分布の両立が確認された。さらに、周波数解析の結果、羽ばたき型送風機が生成する風は、 $y = 800 \text{ mm}$ 付近で $1/f$ ゆらぎ特性 ($n=1$) に近づくことが確認され、自然風の再現による快適性が向上した。実機化にともなって骨格構造を変更したため、振り下げ時の反動の影響が大きくなり、プランジ角が意図したサインカーブ通りに動かない課題は今回解決できなかった。

プランジ角とピッチ角の位相差や、周波数など複雑な要因が性能に影響すると思われ、詳細な条件の影響の確認および最適化については、多くの課題が残っている。今後、布素材や骨格材料や骨格形状の改良により、羽ばたき型送風機がより効果的な涼感や「自然に近い気流」を提供できる可能性が示唆された。

第6章 結論

本研究では、プロペラファンを用いた従来型扇風機が抱える「風の質」と「風の分布」に関する課題を克服するために、鳥類の羽ばたき運動に着想を得た新しい送風原理の構築を目指し、羽ばたき型送風機的设计、試作、評価を系統的に行った。特に、メンフクロウ (*Tyto alba*) の羽ばたき特性を工学的に模倣することで、「自然に近い気流」の生成と、広範囲かつ均一な送風分布の両立を図った。

第1章では、従来型扇風機の課題として、プロペラファンによる風は直進性が高く限られた範囲に集中する傾向があり使用者の体の一部分にしか当たらないこと、風速の時間的変動が乏しいため、使用者にとって「人工的な風」として知覚されやすいことを示した。これらの課題を踏まえ、生物の羽ばたき運動に着想を得た新しい送風原理の必要性を提示した。

第2章では、メンフクロウの羽ばたき運動の特徴と、送風機設計への応用可能性を整理した。プランジ運動とピッチ運動を組み合わせた柔軟な翼構造が、「自然に近い気流」の特性、および広範囲な風速分布の形成に有効であることを示し、これらの特性が新しい送風機設計において重要な示唆を与えることを明らかにした。

第3章では、メンフクロウの羽ばたき特性を模倣した初期試作機を製作し、風速分布、周波数特性の測定を通じて、羽ばたき型送風機がプロペラファンによる従来型扇風機とは異なる非定常かつ広がりのある気流を生成することを実証した。特に、羽根の剛性が風速分布に与える影響を定量的に評価し、柔軟な羽根がより広範囲に風を拡散させる傾向を確認した。

第4章では、数値解析により羽ばたき型送風機の風速分布改善のための設計条件を明らかにした。CFD解析を用いて弾性羽根を再現するため、羽根を前羽根と後羽根に分割した折り畳みモデルを考案し、この数値モデルを用いてピッチ角の変化が送風性能に与える影響を評価した。評価指標として有効送風面積 (EFA) と風速の均一度 (CV) を採用し、計46ケースを検討した結果、ピッチ角を上下対称に設定し、前下げと前上げの時間配分を調整したCase 7で、EFA = 55%、CV = 0.11 を達成した。これにより、ピッチ角の非対称性を排除し、折り畳み角度や加速度の調整が風速分布の改善に有効であることを示した。

第5章では、改良試作機を用いて自然風特性の再現性を検証した。数値解析で得られた設計条件を反映したWing 3を製作し、生成された風の風速分布、周波数特性を測定した結果、EFA が78%、CV が0.12 を達成し、広範囲かつ快適な送風が可能であることを確認した。周波数解析では、羽ばたき型送風機は距離が離れても $1/f$ ゆらぎに近い特性を保持し、従来型扇風機より自然風に近い非定常性を示すことを明らかにした。一方で、骨格構造の変更に伴う反動によるプランジ角の制御課題が残り、今後は構造改良や素材検討が必要であることを示した。

本研究により、以下の知見を得た。

1. 自然風再現性：羽ばたき型送風機は、従来型扇風機では再現困難であった自然風に近い気流を生成できる。
2. 風速分布の改善：羽根の柔軟性および羽ばたき運動の設計パラメータを適切に制御することで、広範囲かつ均一な風速分布を実現できる。
3. $1/f$ ゆらぎ特性の再現：羽ばたきによって生じる非定常渦は、 $1/f$ ゆらぎに類似したスペクトル特性を示し、快適性の向上に寄与する。
4. 工学的有効性：羽ばたき型送風機は、静音性、快適性、空力性能の観点から高い工学的有効性を有し、送風機設計における新たな原理となり得る。

今後の課題として、以下を挙げる。

1. プランジ角、ピッチ角の最適化：羽ばたき運動の基本構成要素であるこれらの角度は、気流の方向と分布に大きく影響するため、詳細な設計検討が不可欠である。
2. 下向き気流の制御：本送風機は人の快適性を重視して設計されているため、重力方向への気流偏りを抑制し、より水平で包み込むような風を生成する工夫が求められる。
3. 駆動源の静音化：モーターに代わる人工筋肉などの静音アクチュエータの導入により、機械的騒音を排除し、より自然風に近い感覚を実現する。
4. 羽根材料の進化：フクロウの翼断面形状やセレーション（鋸歯状構造）を模倣した羽根設計により、風切り音の低減と空力性能の向上を図る。滑らかな表面とギザギザのエッジを併せ持つ素材の開発も重要である。
5. 羽根運動の最適化：柔軟羽根の流体構造連成（FSI）解析や大規模渦構造を捉えるLES（Large Eddy Simulation）などの高精度数値解析手法を導入し、羽根の変形と気流の相互作用を詳細に把握する。
6. 感性設計の深化：人の五感に対して心地よいと感じられる送風機を目指し、触覚だけでなく、光、音、振動といった自然界のリズムを伴った風の設計も視野に入れる。今回は触覚に着目したが、今後は聴覚や視覚への配慮も含めた統合的な快適性設計が求められる。
7. 外観デザインの工夫：鳥らしさを感じさせる造形を取り入れることで、視覚的にも癒し効果を高め、使用者の心理的快適性を向上させる。生物的な形態美を活かしたプロダクトデザインは、機能性と感性価値の融合を促進する。

これらの課題に取り組むことで、羽ばたき型送風機は単なる送風装置を超え、心地よい風で人の日常に小さな幸せを届ける存在へと進化するだろう。本研究で示した生物模倣の設計思想は、空調機器の枠を超えて、流体制御や環境調和技術の分野にも応用可能性を秘めてお

り、船舶海洋工学や地球総合工学における新しい発想の一助となることが期待される。羽ばたき型送風機は、自然の知恵を取り込むことで、人と環境の調和を目指す工学の未来に確かな一歩を刻んだものとする。

謝辞

本研究の遂行にあたり、幾度となく丁寧なご指導を賜りました大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻船舶海洋工学科目教授 鈴木博善 先生に、心より深く感謝申し上げます。私は修士課程を経ることなく博士後期課程へと進学する機会を得ましたが、研究者としての基礎的素養に乏しく、学術の深奥に触れるには程遠い未熟な状態でした。そのような私に対し、鈴木先生は懇切丁寧なご指導と親身なご助言を下さり、常に温かい眼差しで見守って下さいました。鈴木先生のご指導は、学術的な厳密さに加え、寛容で、時にユーモアを交えたものであり、研究の道を歩む上で心強い支えとなりました。先生のお人柄とご姿勢に、深い敬意と感謝の念を抱いており、先生のような方にご指導いただけたことは、私にとって何よりの幸運であり、人生における大きな財産です。

また、このような貴重な機会を与えていただいた、シャープ株式会社 菅原靖文 常務執行役員 Co-COO 兼 スマートライフビジネスグループ長には格別のご高配を賜り、心より御礼申し上げます。Smart Appliances & Solutions 事業本部 永峯英行 事業本部長には、現職との兼務に際し、ご自身のご経験からも研究活動に対する励ましのお言葉をいただき、大きな力となりました。ここに深く感謝の意を表します。

Smart Appliances & Solutions 事業本部要素技術開発部ネイチャーテクノロジー開発チームの皆さまには、試験実施および解析業務で多大なるご助力をいただき、心より感謝いたします。特に、頼もしい先輩である三角勝主任研究員、若狭加奈子研究員には精神面でも支えていただき、何とか研究に取り組みました。

多くの方々のご支援をいただきながら、博士後期課程の研究を進めることができました。誠にありがとうございました。これからも、学問と研究の発展を通して社会貢献できるように精進して参ります。

付録 A

本付録 A では、本研究で実施した数値解析の条件および解析結果をまとめる。解析は、ピッチ角、プランジ角、分割角などのパラメータを系統的に変更し、計 46 ケースを対象とした。

各ケースの条件は Table 14 に示し、ピッチ角の範囲、 T のゼロクロスタイミング、EFA、CV を記載している。

Fig. 51 ~ 56 は、全解析ケースにおけるプランジ角およびピッチ角の時間変化と、得られた平均風速分布を示す。各図の上段はプランジ角とピッチ角の時間変化、下段は平均風速分布を表している。

Table 14. Conditions for numerical analysis with variations in each parameter

Case No.	α_A Min / Max [°]	α_B Min / Max [°]	α^- Min / Max [°]	α^- range [°]	T ($\alpha = 0$)	EFA [%]	CV
1-1			-45 / 45	90	0.5	0	0.26
1-2			-45 / 45	90	0.5	0	0.42
1-3			-45 / 45	90	0.5	1	0.37
1-4			-30 / 30	60	0.5	0	0.16
1-5			-30 / 30	60	0.5	61	0.15
2-1			-20 / 45	65	0.55	37	0.25
2-2			-40 / 45	85	0.55	42	0.22
2-3			-30 / 45	75	0.55	39	0.26
2-4			-10 / 45	55	0.55	0	0.20
2-5			-20 / 65	85	0.55	0	1.00
2-6			-20 / 55	75	0.55	23	0.45
2-7			-20 / 35	55	0.55	0	0.15
3-1	-10 / 35	-30 / 55	-20 / 45	65	0.55	0	0.14
3-2	-10 / 45	-30 / 45	-20 / 45	65	0.55	20	0.14
3-3	-20 / 35	-40 / 35	-30 / 35	65	0.55	1	0.18
3-4	-10 / 45	-30 / 45	-20 / 45	65	0.55	15	0.13
3-5	-20 / 45	-40 / 45	-30 / 45	75	0.55	51	0.19
3-6	-20 / 55	-40 / 55	-30 / 55	85	0.55	34	0.28
4-1	-55 / 20	-55 / 40	-55 / 30	85	0.55	3	0.34
4-2	-20 / 55	-40 / 55	-30 / 55	85	0.55	28	0.24
4-3	-20 / 55	-40 / 55	-30 / 55	85	0.55	0	0.35

4-4	-20 / 55	-40 / 55	-30 / 55	85	0.55	5	0.43
4-5	-20 / 55	-40 / 55	-30 / 55	85	0.55	15	0.53
4-6	-20 / 55	-40 / 55	-30 / 55	85	0.55	24	0.39
5-1	-20 / 45	-40 / 45	-30 / 45	75	0.55	50	0.2
5-2	-20 / 45	-40 / 45	-30 / 45	75	0.55	51	0.17
5-3	-20 / 45	-40 / 45	-30 / 45	75	0.55	51	0.16
5-4	-20 / 45	-40 / 45	-30 / 45	75	0.55	50	0.17
5-5	-20 / 45	-40 / 45	-30 / 45	75	0.55	48	0.15
6-1	-20 / 20	-70 / 70	-45 / 45	90	0.5	0	0.28
6-2	-40 / 40	-50 / 50	-45 / 45	90	0.5	7	0.75
6-3	-10 / 10	-35 / 35	-22.5 / 22.5	50	0.5	0	0.35

Fig. 51 は、プランジ角およびピッチ角をサインカーブで与えられた Case 1-1 ~ 1-5 におけるプランジ角とピッチ角の時間変化、および得られた平均風速分布を示す。

折り畳みモデルを採用する前段階として、平板を羽ばたかせた場合の気流を確認した。プランジ角およびピッチ角は文献[12]を参考に、一般的なサインカーブで与え、位相差は 90° に固定した。

Case 1-1 ではプランジ角、ピッチ角ともに振幅は $\pm 90^\circ$ とした結果、風速分布は上下方向に分離した。

Case 1-2 では、プランジ運動の最大値と最小値を近づける目的でプランジ角を $\pm 90^\circ$ から $\pm 60^\circ$ に変更したが、風速分布は分離したままであり、全体的な風速が低減した。

Case 1-3 は、プランジ角とピッチ角は Case 1-2 と同条件で周波数を倍に設定したものであり、風速の最大値は顕著に上昇したものの、風速分布形状に変化はなかった。

Case 1-4 では、プランジ角の振幅を $\pm 90^\circ$ のまま維持し、ピッチ角の振幅を $\pm 60^\circ$ に変更した。その結果、Case 1-1 と比較すると風速が全体的に低下し、風速分布は上下左右の 4 箇所高速域が偏在した。ピッチ角を小さくしたことで、風速分布は、高さ方向の広がりには大きな変化はなく、幅方向にのみ広がった。

以上より、ピッチ角およびプランジ角の振幅を大きくすると、風速の絶対値は向上する傾向が確認された。しかし、ピッチ角およびプランジ角がサインカーブ状に変化する運動によって生成される風は、上下方向に分離し、所望の広範囲かつ均一な送風は得られない。ピッチ角の変更は、幅方向の風速分布を変更できる可能性がある。また、羽ばたき周波数を大きくすると速度は向上するが、風速分布は改善には寄与しないことがわかった。

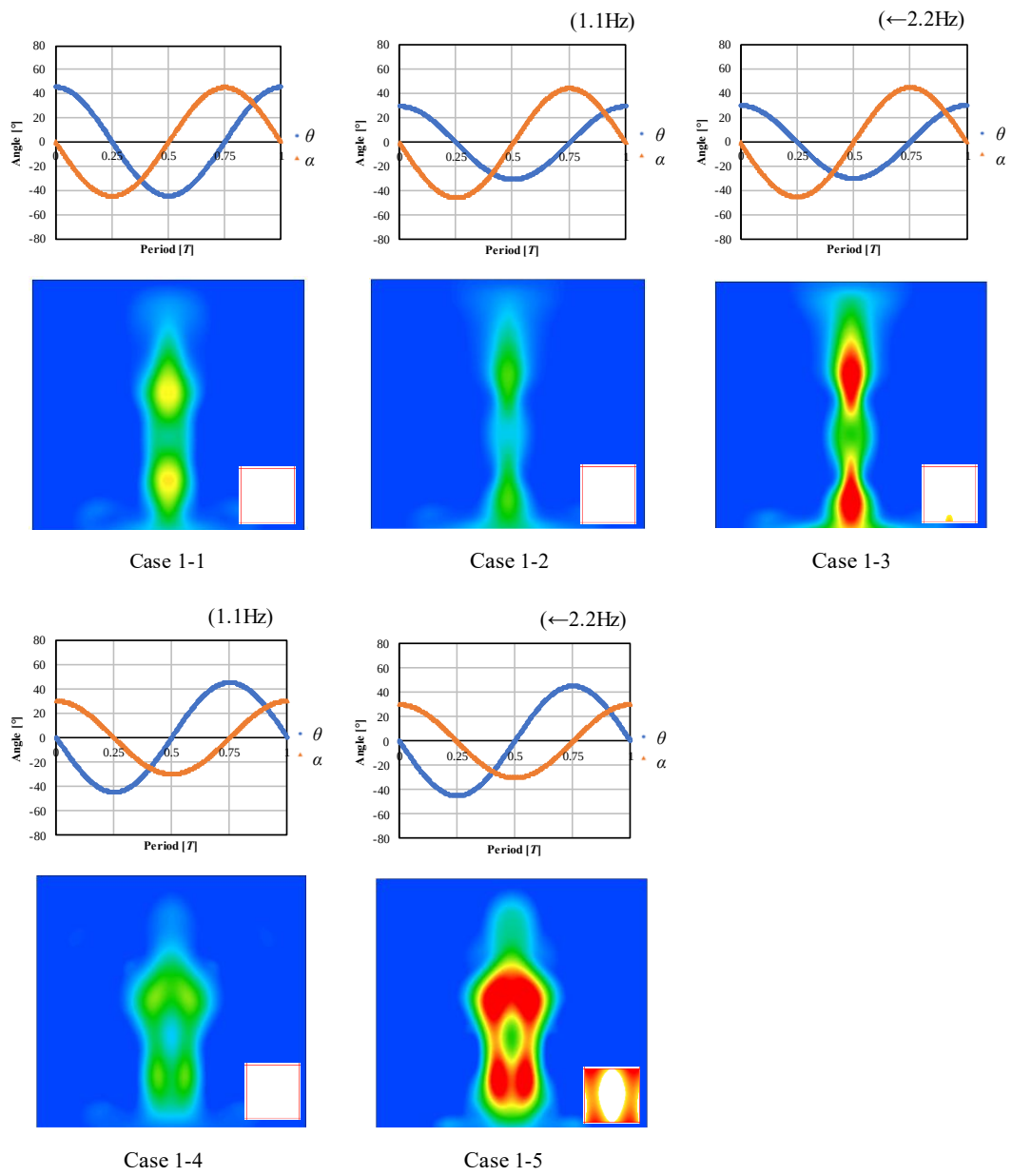


Fig. 51. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 1-1 to 1-5.

Fig. 52 は、ピッチ角とプランジ角をサインカーブではなく、フクロウの羽ばたき運動[12]を再現した場合の風速分布を調査した、Case 2-1～2-7におけるプランジ角とピッチ角の時間変化、および得られた平均風速分布を示す。ピッチ角の運動プロファイルは [12]の Fig. 27 (本論文の Fig. 4) に基づき、ピッチ角の振幅を変更して解析を行った。

Case 2-1 は、[12]の Fig. 27 そのものを採用した条件であり、ピッチ角の振幅は 65° である。この場合、風速の高い領域は上下方向の中央付近に集中した。

Case 2-2～Case 2-4 では、 $\alpha \leq 0$ となる $0 \leq T \leq 0.5$ までのピッチ角を変更することで、それぞれ振幅を 85° 、 75° 、 55° とした。その結果、ピッチ角の振幅が大きくなると風速は向上したが、EFA の幅が減少し、CV が増大する傾向を示した。

Case 2-5～Case 2-7 では、 $\alpha > 0$ となる $0.5 \leq T \leq 1$ の範囲でピッチ角を変更することで、それぞれ振幅を 85° 、 75° 、 55° とした。結果、Case 2-5、Case 2-6 では風速分布が上下方向の下側（床付近）に分布した。Case 2-2 と Case 2-5、Case 2-3 と Case 2-6、Case 2-4 と Case 2-7 のように、ピッチ角の振幅値が同一であっても中央値が異なる場合、風速分布は大きく異なることが確認された。

以上の結果から、上下方向への流れの分離を抑制しつつ、幅方向の送風面積を狭めず、ターゲット領域内での風速を高めるために、折り畳みモデルの導入を試みた。

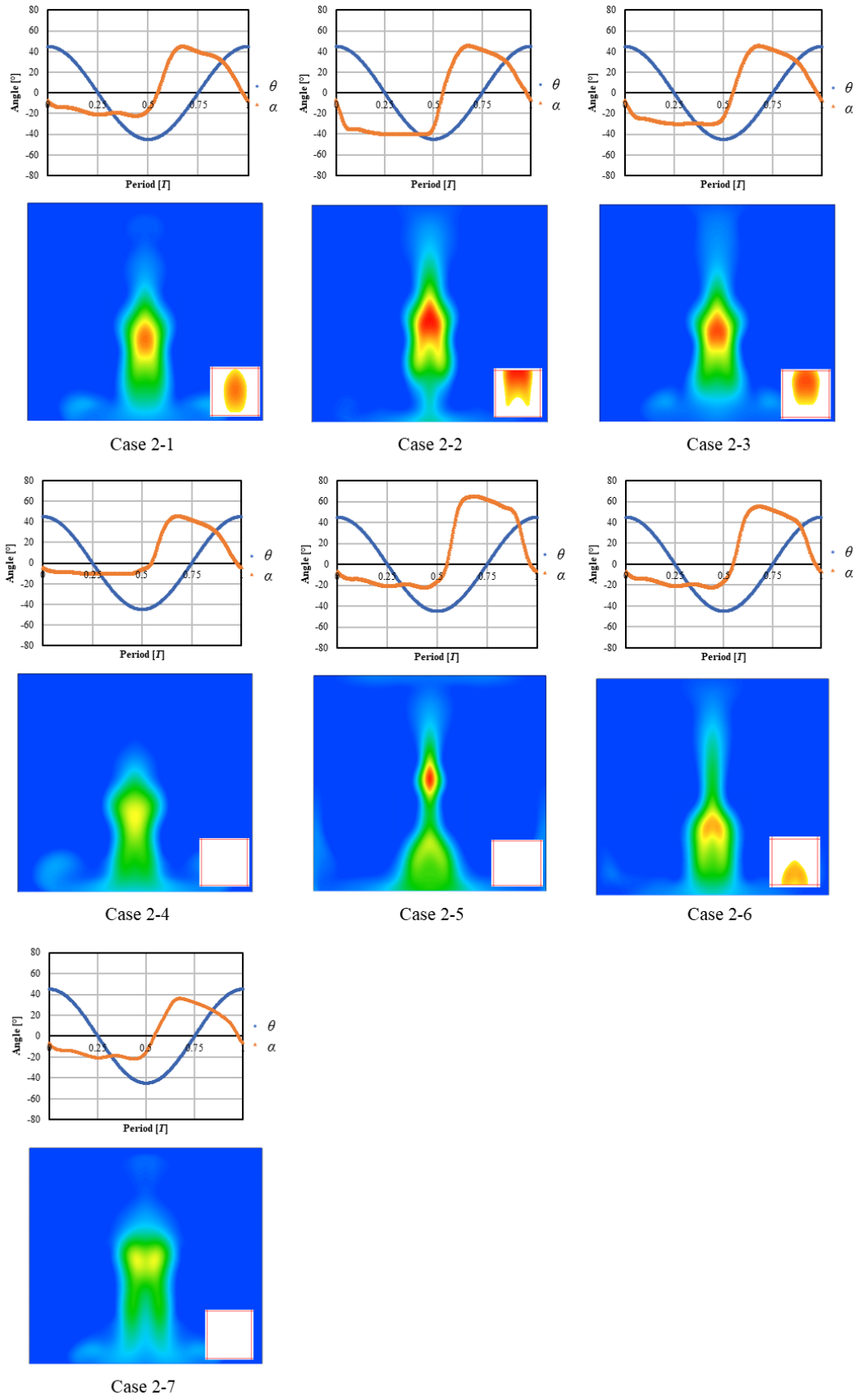


Fig. 52. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 2-1 to 2-7.

Fig. 53 は、Case2-1 を基準に、ピッチ角の基本的な運動プロファイルは維持したまま、前羽根と後羽根を有する折り畳みモデルを採用した Case 3-1 ~ 3-6 における、ピッチ角、プランジ角の時間変化および生成された風速分布を示す。

Case 3-1 は、[12]の Fig. 27 に示されたピッチ角を平均値(α)として採用し、前羽根を $+10^\circ$ 、後羽根を -10° オフセットした条件である。平板モデルから折り畳みモデルへの変更により、Case 2-1 と比較して風速分布の最大値は減少したが、幅方向の広がりには若干増加した。

Case 3-2 は、下方向の広がりを抑制する目的で、羽根の「前上げ」が最大になるタイミングで後羽根の最大値を減少させ、前羽根と後羽根のピッチ角が一致するように設定した。その結果、Case 3-1 と比較して、ターゲット領域内の流速が向上した。

Case 3-3 は、風速分布をさらに中央に集めることを目的として、ピッチ角を全体的に負方向へオフセットした。結果、流速の最大値は増加したが、ターゲット領域からは外れた位置に流速が分布した。

Case 3-5 は、前羽根のピッチ角が $-20^\circ \leq \alpha_A \leq 35^\circ$ 、後羽根が $-40^\circ \leq \alpha_B \leq 55^\circ$ 、平均ピッチ角が $-30^\circ \leq \alpha \leq 45^\circ$ で運動する。この場合、風速の高い領域が中央付近に集中した。

Case 3-6 では、ピッチ角の振幅をさらに増加させたが、風速分布は縦方向に著しく広がった。

以上の結果から、Case 3-5 がもっとも良好な風速分布を示した。折り畳みモデルの導入によって、前羽根と後羽根の細かい設定が可能となった。これを踏まえて、4 章に記載の代表ケースを実施した。

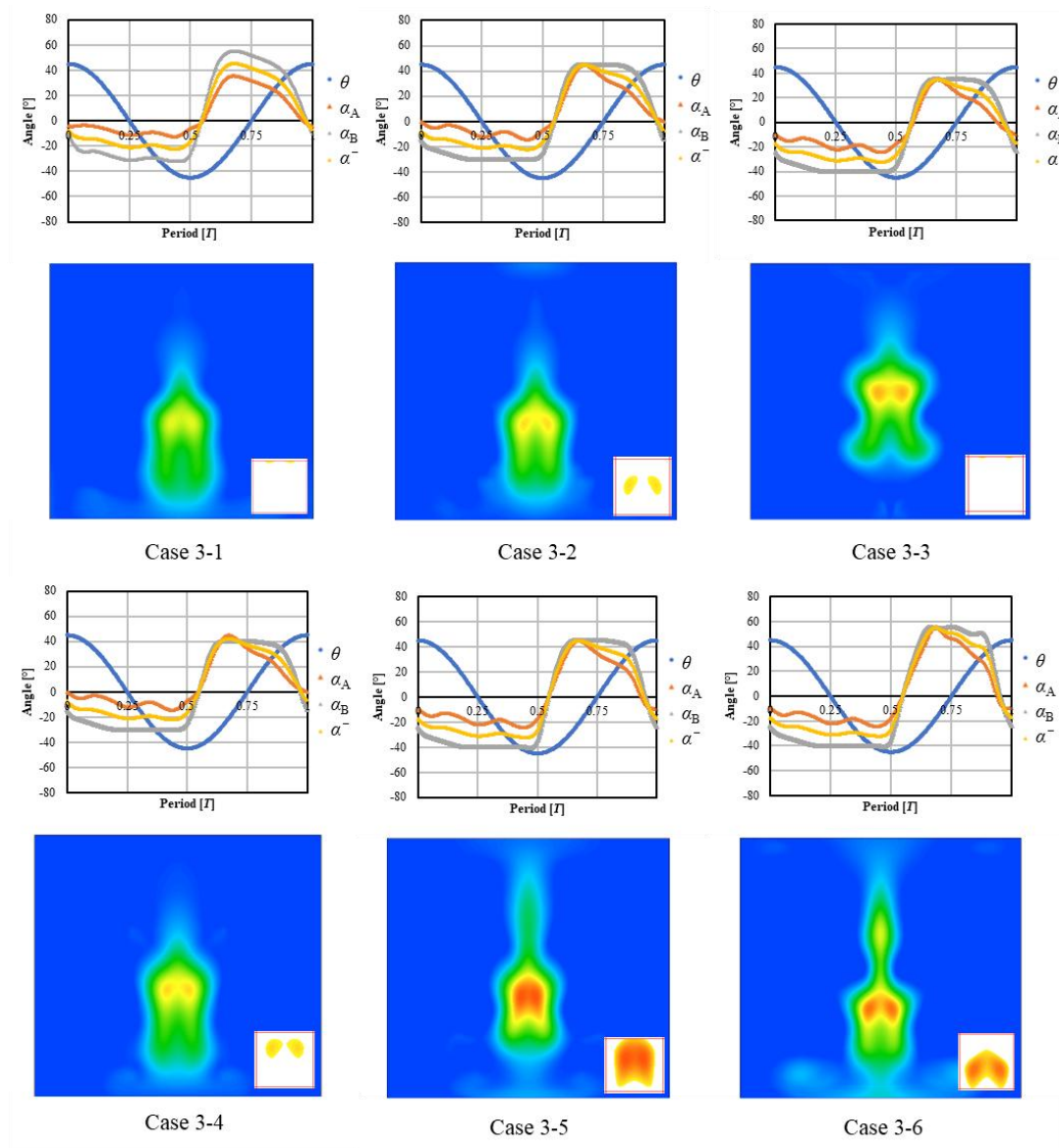


Fig. 53. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 3-1 to 3-6.

Fig. 54 は、羽根が前下げから前上げに変化する区間 ($0.75 \leq T \leq 1$, $0 \leq T \leq 0.25$) における、ゼロクロスタイミングでのピッチ角の変化速度（加速度）を変更した Case 4-1 ~ 4-6 のピッチ角、プランジ角の時間変化、およびそれらから生成された風速分布である。

代表ケースでは、平坦区間を持つ上下対称のピッチ運動プロファイルを検討したが、ゼロクロスタイミングでの加速度を変更することは、平坦区間の時間が変化することに繋がる。

Case 4-1 ~ 4-6 では、ピッチ角の振幅は $-30^\circ \leq \alpha^- \leq 55^\circ$ に固定し、 $0.75 \leq T \leq 1$ および $0 \leq T \leq 0.25$ におけるピッチ角の加速度を変更した。

その結果、ピッチ角の加速度が小さい場合、風速の最大値は高くなる傾向を示したが、高速域は集中し、幅方向の送風領域が狭まった。この傾向は Case 4-6 に顕著である。

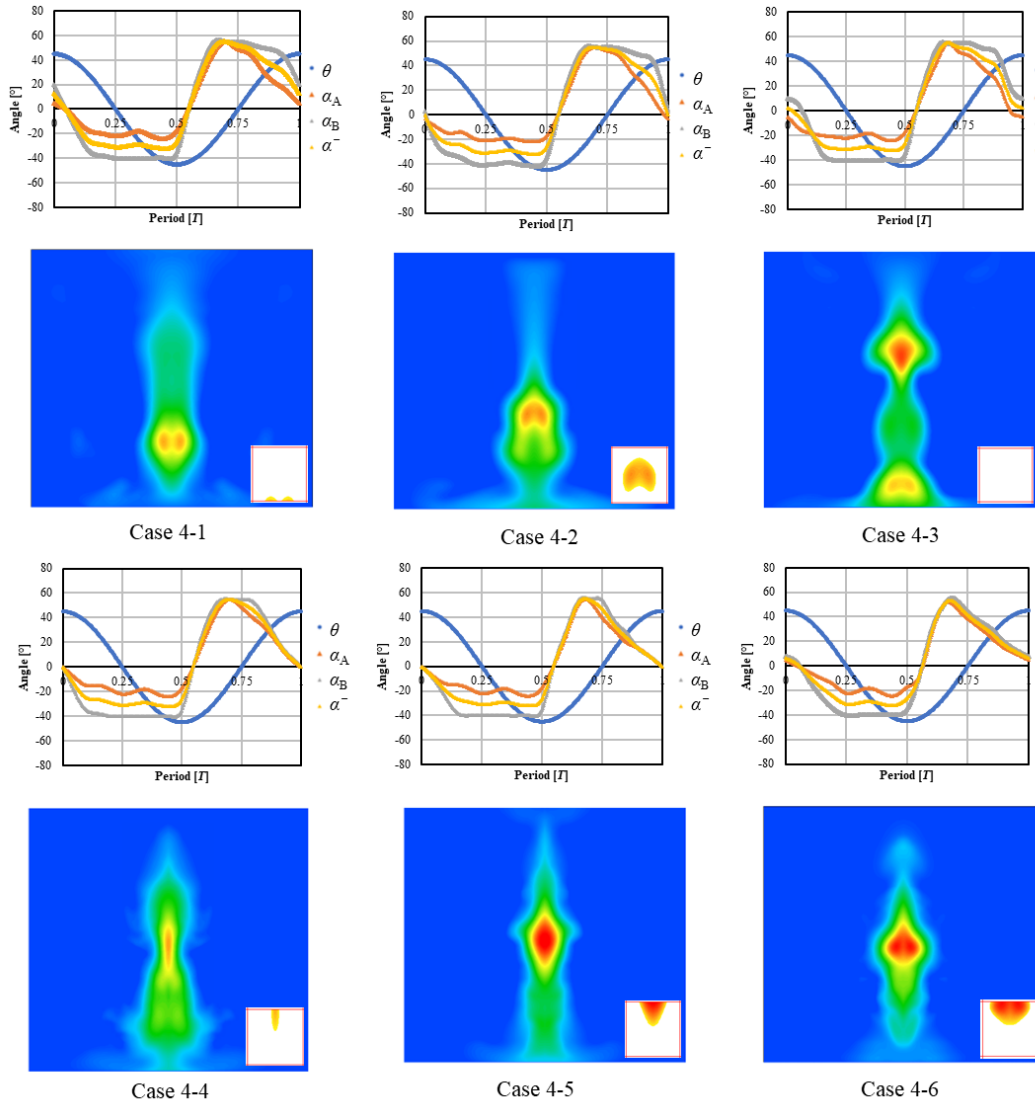


Fig. 54. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 4-1 to 4-6.

続いて、分割角 φ の影響を調査した。

Fig. 55 は、ピッチ角の条件が、 $-20^\circ \leq \alpha_A \leq 45^\circ$ 、 $-40^\circ \leq \alpha_B \leq 45^\circ$ 、 $-30^\circ \leq \alpha^- \leq 45^\circ$ で分割角 $\varphi = 10^\circ$ とした Case 3-5 を基準に、分割角 $\varphi = 5^\circ$ 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° まで変化させた Case 5-1 ~ 5-5 のピッチ角、プランジ角の時間変化、およびそれらから生成された風速分布である。

Case 5-1 ($\varphi = 5^\circ$) では、風速分布は上下左右方向においてターゲット領域内に集中したが、幅方向の広がり小さく、EFA = 50%、CV = 0.2 であった。

Case 5-5 ($\varphi = 30^\circ$) では、送風機胴体中心線に対する左右方向への広がりが増大したものの、分布形状は大きく変化せず、中央部のピーク値はさらに低下した。EFA = 48%、CV = 0.15 となり、均一度は改善したが風速の高い範囲が減少した。

以上の結果から、分割角 φ の増加は風速分布の左右方向の広がりを制御する有効な手段であるが、中央部のピーク風速とのトレードオフが存在することが確認された。

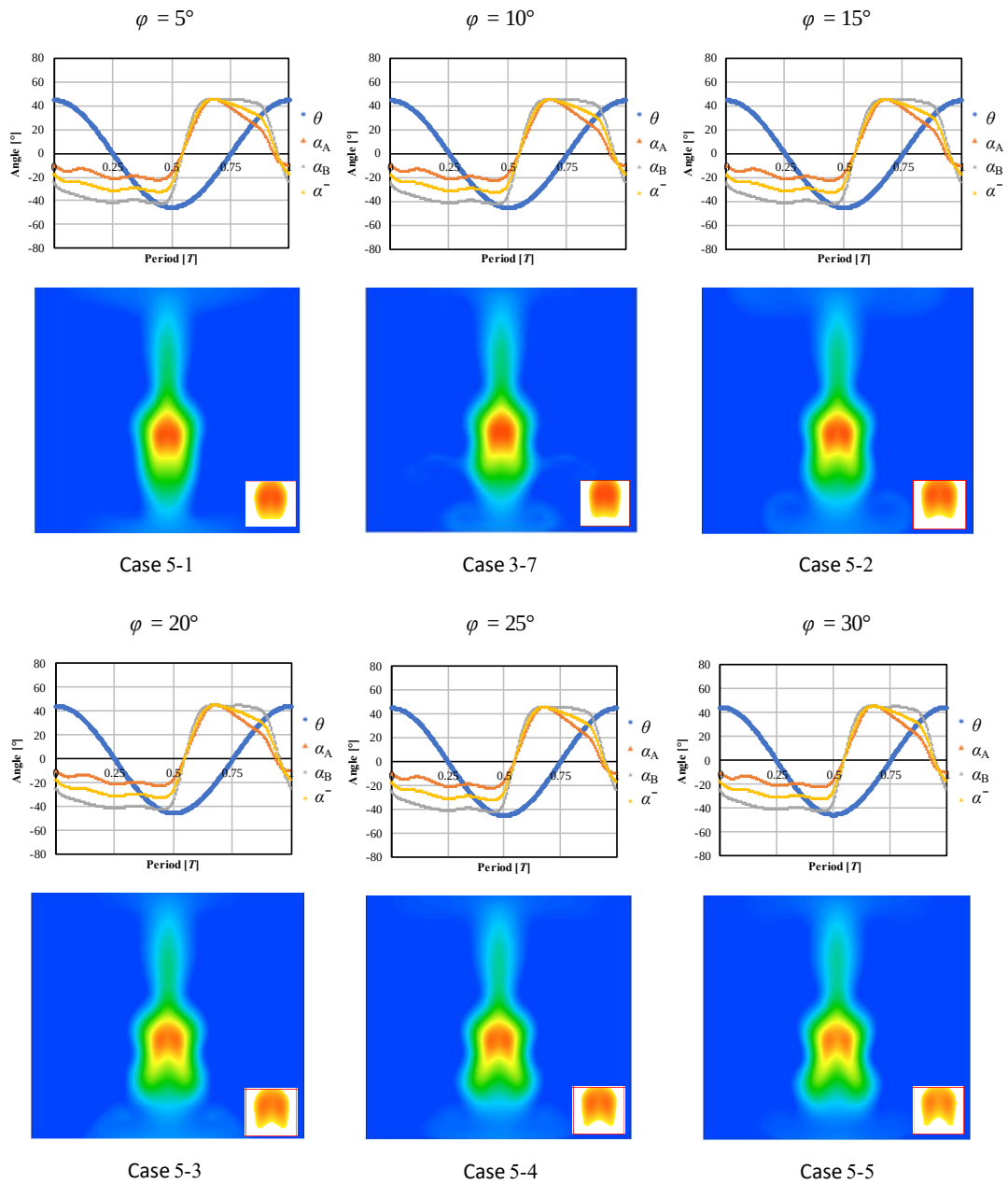


Fig. 55. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 5-1 to 5-5 and 3-7.

代表ケースでは、平坦区間を持つ上下対称のピッチ角の運動プロファイルを採用したが、ここでは文献[12]の Fig. 27 の一部を反転する方法により、上下対称のピッチ角の運動プロファイルを検討した。具体的には、文献[12]の Fig. 27 における $\alpha < 0$ のプロファイルを反転し、 $\alpha > 0$ に適用した。この際、 $T = 0.5$ ($\alpha = 0$) に設定した。Fig. 56 は、Case 6-1 ~ 6-3 のプランジ角とピッチ角の時間変化、および得られた平均風速分布である。

結果として、いずれのケースにおいても、風速分布は概ね上下対称となったものの、高速域が上下方向にのみ広がり、幅方向の広がりが著しく減少した。送風機胴体中心線に対する左右方向への広がりに関しては、平坦区間が有効であることが示唆された。

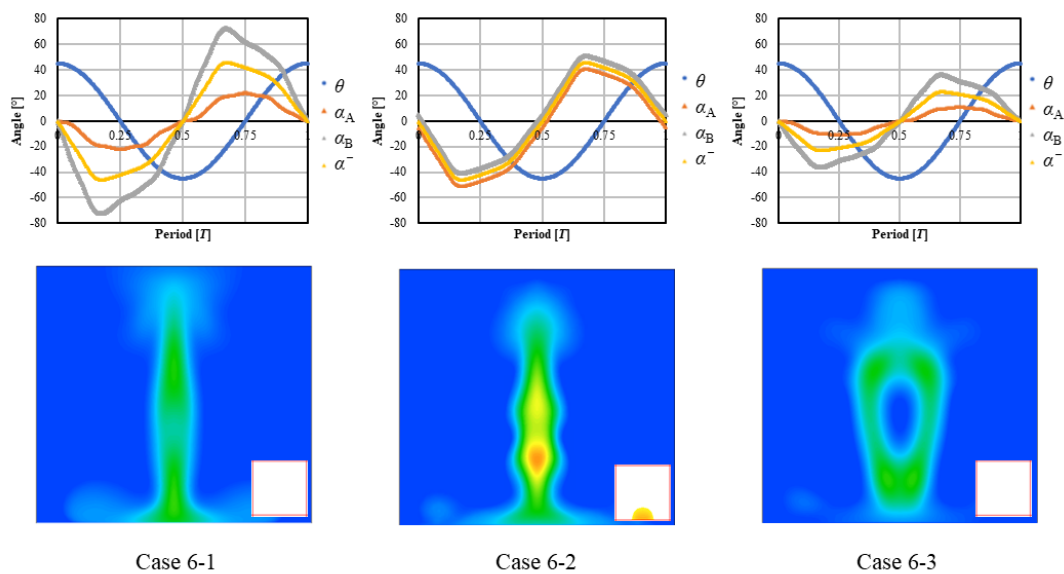


Fig. 56. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 6-1 to 6-3.

付録 B

本付録 B では、初期試作機の Wing 1 に対して 4 章で記載した数値解析モデルを適用した計算結果 (Wing 1-CFD) と、代表ケースのうち Case 7 について、羽ばたき運動によって生成される流れ場の時間変化を、複数の断面における渦度および速度分布を取り上げることで詳しく分析した。

Fig. 57 に示すように、 z 方向は羽根の水平位置 $z = 0 \text{ mm}$ を基準とし、 $-300 \text{ mm} \leq z \leq 300 \text{ mm}$ の範囲を 150 mm 間隔で水平断面を設定した。 x 方向は $x = 0 \text{ mm}$ が羽ばたき型送風機の胴体中心線、 $x = 270 \text{ mm}$ が羽根の翼幅方向中央、 $x = 440 \text{ mm}$ が羽根の外側端の位置とし、これらの位置に垂直断面を設定した。以上の断面における渦度および風速分布の時間変化を、 $1/8$ 周期刻みで確認した。

羽根の運動の位相は、 $T = 0$ で羽根はプランジ角が最大となる上死点であり、 $T = 0.25, 0.75$ で水平位置となり、 $T = 0.5$ でプランジ角が最小となる下死点に対応する。

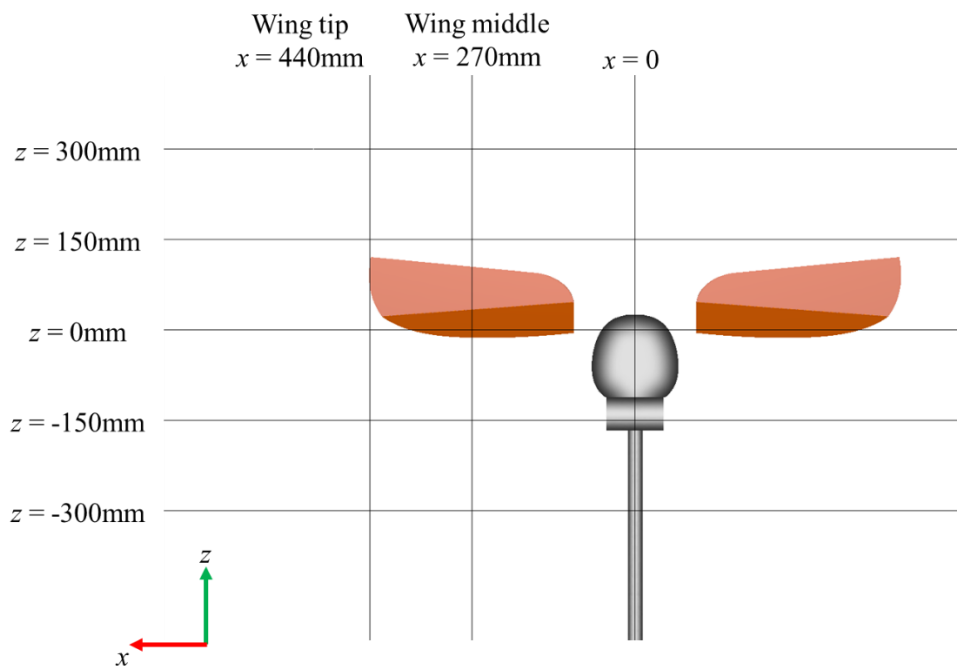


Fig. 57. Wing positions and reference planes.

Fig. 58～62 は、Wing 1-CFD の計算結果における、 $z = 300 \text{ mm}$ 、 150 mm 、 0 mm 、 -150 mm 、 -300 mm の水平断面で、渦度の z 方向成分を示したものである。これらの断面図から、羽ばたき周期と同期して渦度の符号が交互に変化する様子が確認できる。赤が半時計周り、青が時計回りの渦を示し、両者が接する箇所で y 方向の流れが生じる。いずれの断面においても、羽根の近傍では複雑な渦が発生、消滅を繰り返している。

全体的な傾向として、 $z = 300 \text{ mm}$ の位置よりも $z = 150 \text{ mm}$ 、 $z = 0 \text{ mm}$ 、さらに $z = -150 \text{ mm}$ 、 $z = -300 \text{ mm}$ と z 方向が低い位置ほど色が濃く、渦の発生面積も広い。渦度の z 方向成分は、羽ばたき型送風機の上下方向中心よりも下側で強く生じていることがわかる。

Fig. 58～62 内には、 $y = 700 \text{ mm}$ の位置を薄線で示しているが、その地点まで渦度の z 方向成分の絶対値が ± 2 を超える値を保っているのは $z = -300 \text{ mm}$ の水平断面においてのみである。特に、 $z = 300 \text{ mm}$ 、 150 mm の水平断面では、羽根近傍では強い渦が生成されるが、これらの渦は近距離で消滅する傾向がある。 $z = 0$ では、他の断面と比較して渦の数が少なく、 $y = 700 \text{ mm}$ の位置まで流れを誘導可能な渦はほとんど存在しない。

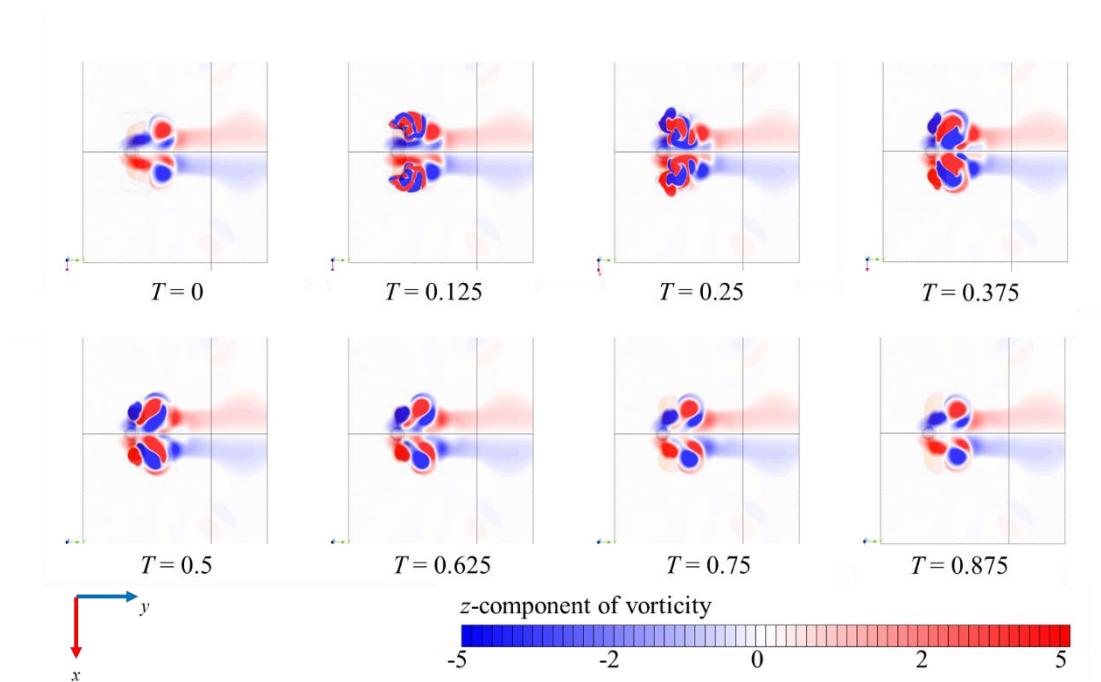


Fig. 58. Time series of vorticity (z -component), Wing 1-CFD, $z = 300 \text{ mm}$.

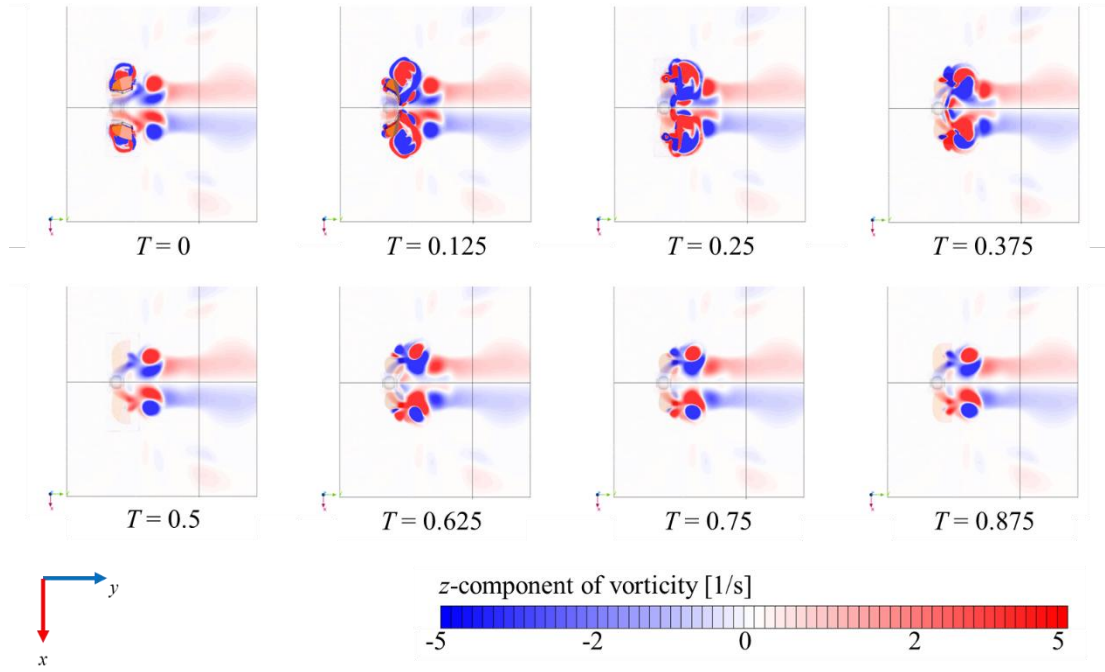


Fig. 59. Time series of vorticity (z-component), Wing 1-CFD, $z = 150$ mm.

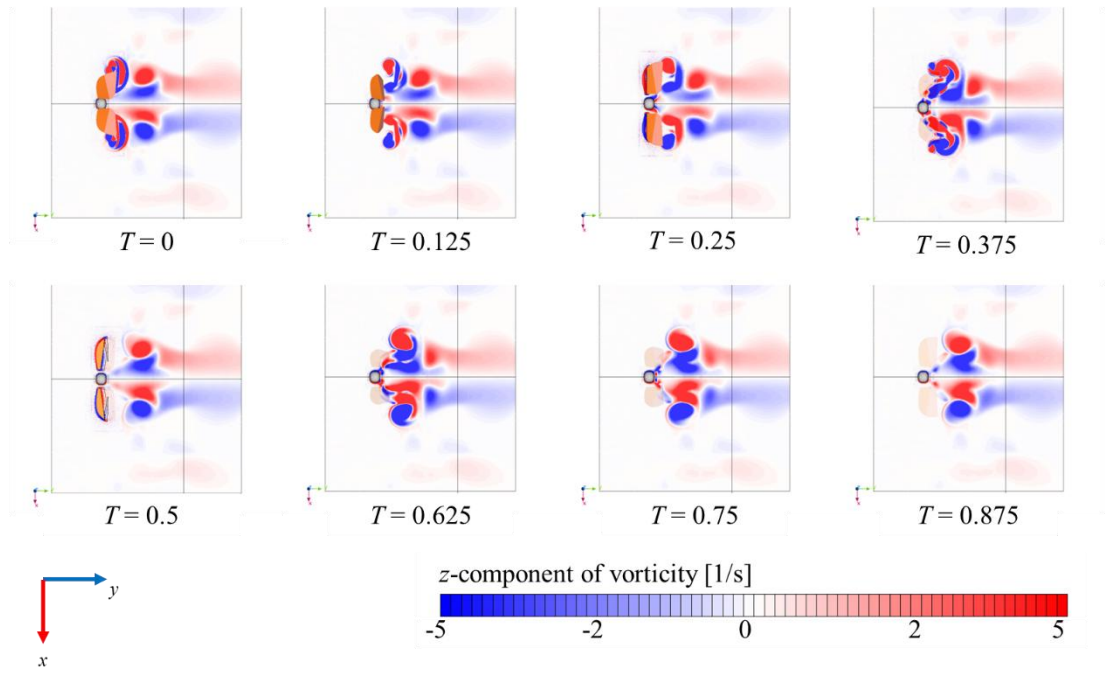


Fig. 60. Time series of vorticity (z-component), Wing 1-CFD, $z = 0$ mm.

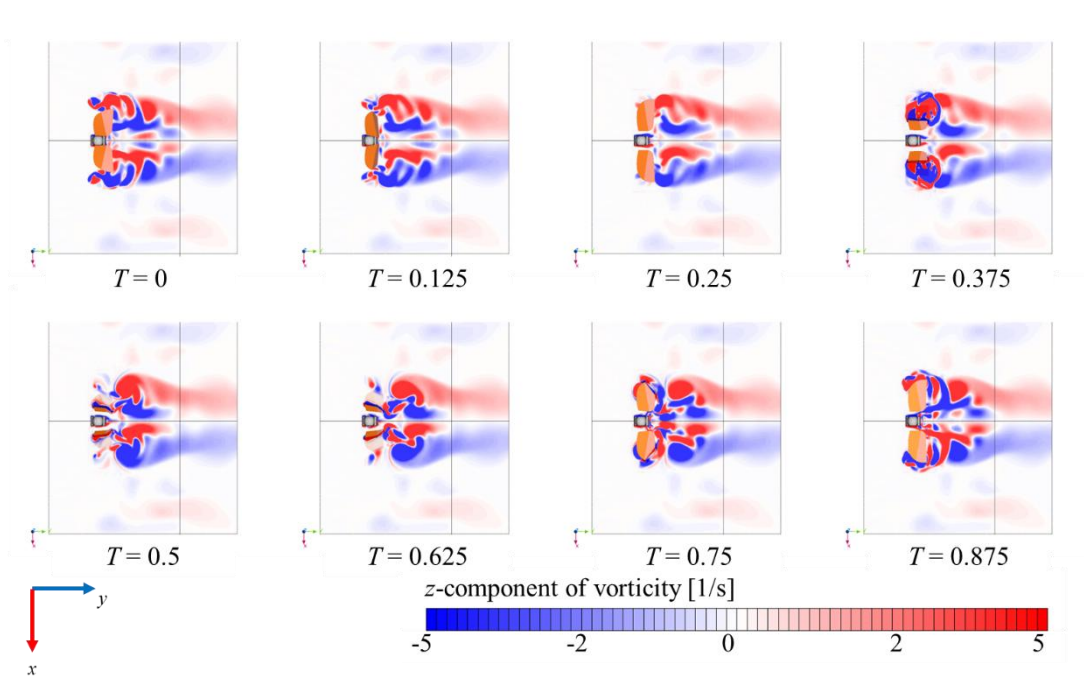


Fig. 61. Time series of vorticity (z-component), Wing 1-CFD, $z = -150$ mm.

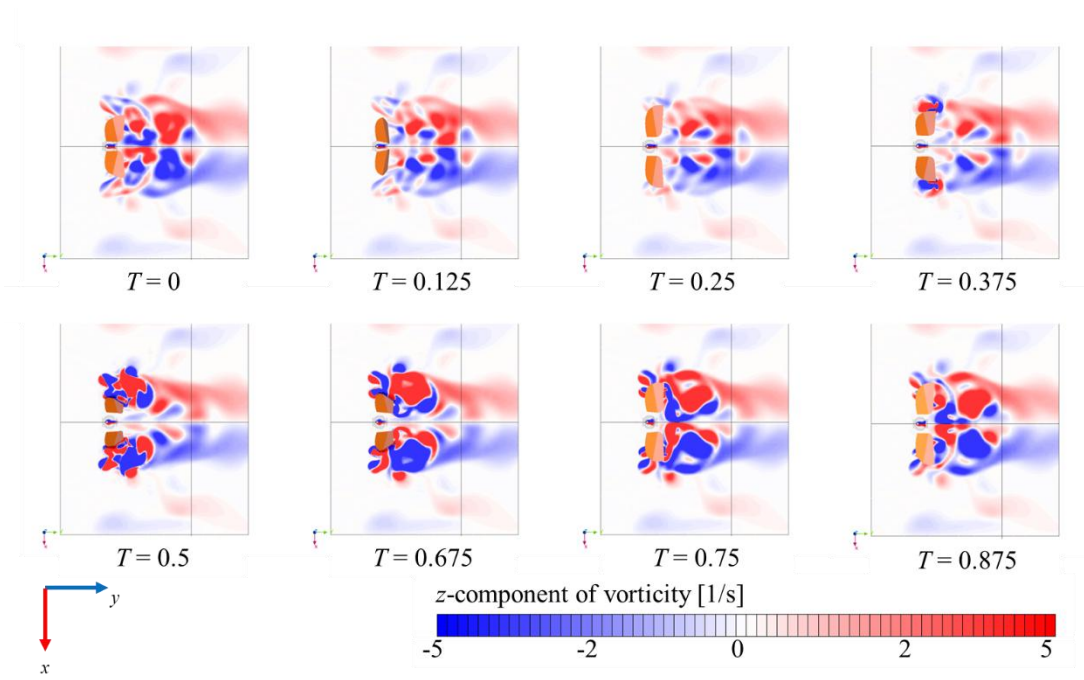


Fig. 62. Time series of vorticity (z-component), Wing 1-CFD, $z = -300$ mm.

Fig. 63 ~ 65 は Wing 1-CFD の計算結果における $x = 0$ mm、270 mm、440 mm の垂直断面で、渦度の x 方向成分を示したものである。

Fig. 63 は羽ばたき型送風機の胴体中心線 ($x = 0$ mm) における垂直断面であり、1 周期の前半に大きな渦度が確認できる。 $0 \leq T \leq 0.375$ では、符号の異なる二つの渦が、画面右下（下流側床面に向く方向）に流れる様子が顕著であるが、 $0.5 \leq T \leq 0.75$ では、渦度は大幅に減少する。羽ばたき型送風機胴体付近から画面上向きにも符号の異なる渦の組み合わせが生じているが、この流れは床面に向かう渦よりも弱い。主にこの二つの渦の組み合わせが確認された。

Fig. 64 は、 $x = 270$ mm における垂直断面であるが、Fig. 63 ($x = 0$ mm) より強い渦度が確認できる。 $0 \leq T \leq 0.25$ では、符号の異なる二つの渦が下流側床面方向に向かって流れている。 $T = 0.375$ のタイミングでは、羽ばたき型送風機上方へ流れを巻き込むような反時計回り（赤）の強い渦が発生している。Fig. 65 は $x = 440$ mm における垂直断面であり、渦構造は Fig. 64 と概ね類似しているが、渦度が全体的に小さい。下流側床面に向かう二つの符号の異なる渦が強く発生するタイミングが、 $x = 0$ mm、270 mm の場合とは異なり、 $0.625 \leq T \leq 0.875$ に見られる。

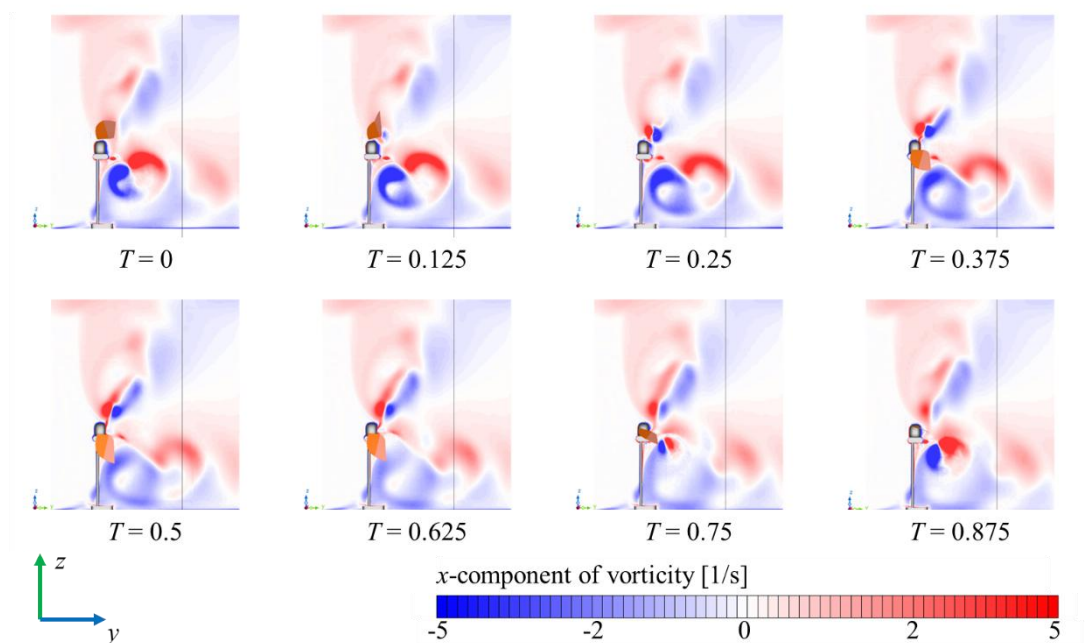


Fig. 63. Time series of vorticity (x -component), Wing 1-CFD, $x = 0$ mm.

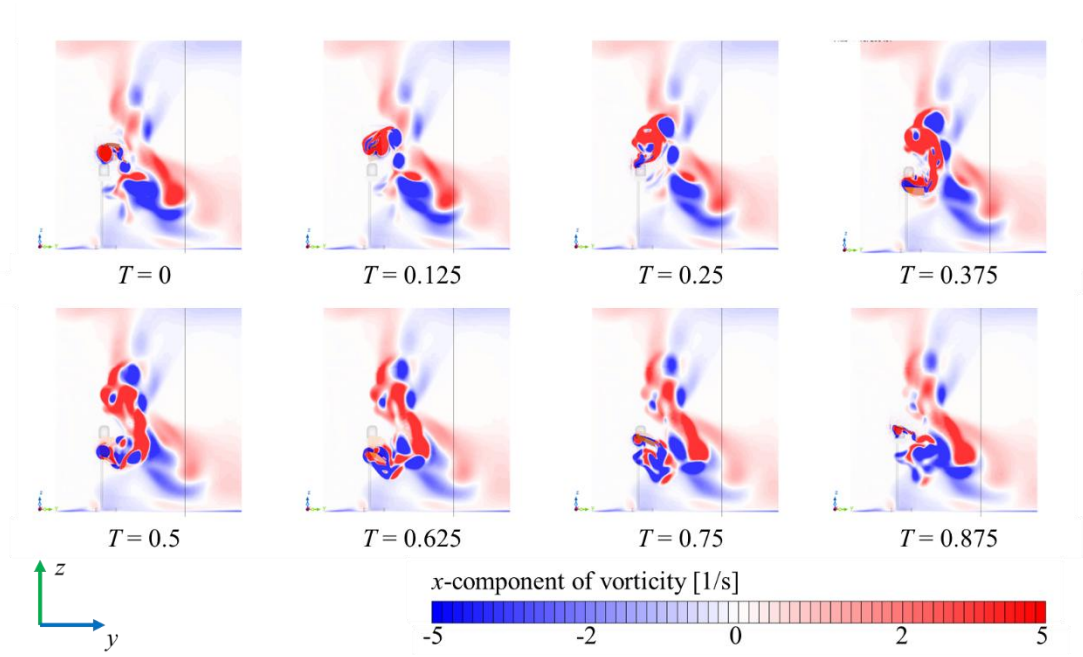


Fig. 64. Time series of vorticity (x-component), Wing 1-CFD, $x = 270$ mm.

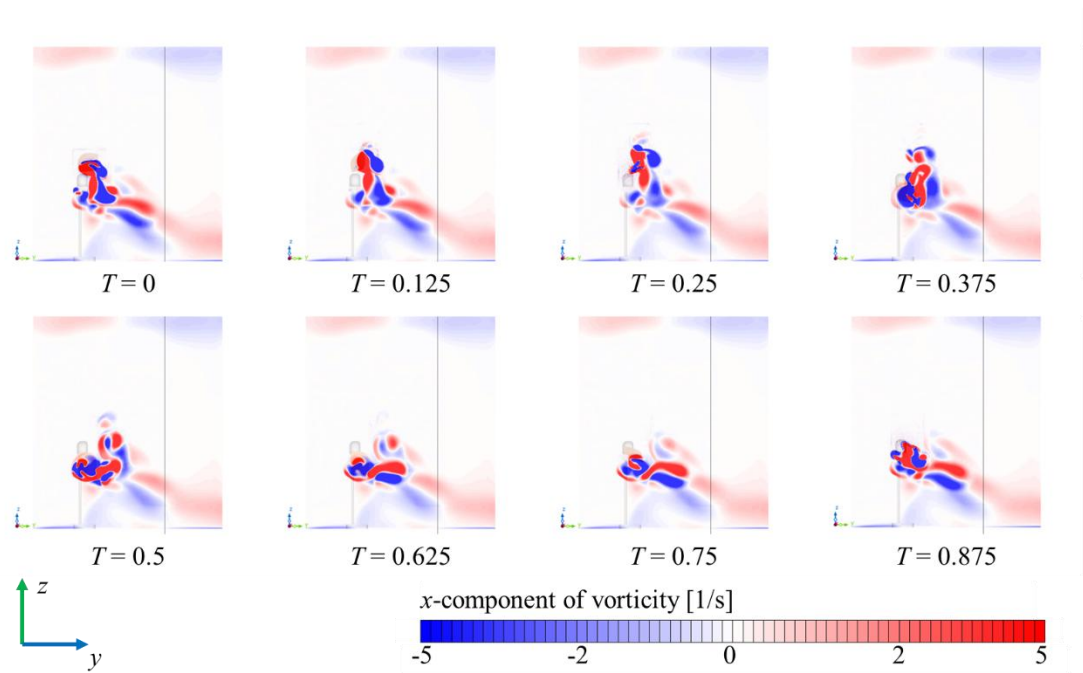


Fig. 65. Time series of vorticity (x-component), Wing 1-CFD, $x = 440$ mm.

Fig. 66～68 は Wing 1-CFD の計算結果における、 $x = 0$ mm、270 mm、440 mm の垂直断面で、風速の y 方向成分を表したものである。Fig. 63～65 で確認された渦度の強い領域に、主流が形成されていることがわかる。

Fig. 66 では、 $T = 0.75$ 、 0.875 に逆流領域が見られる。

Fig. 67 では $T = 0$ 、 0.375 に、逆流領域が見られる。

Fig. 68 では Fig. 65 の渦構造に対応して、斜め下方向に弱い風速が発生している。

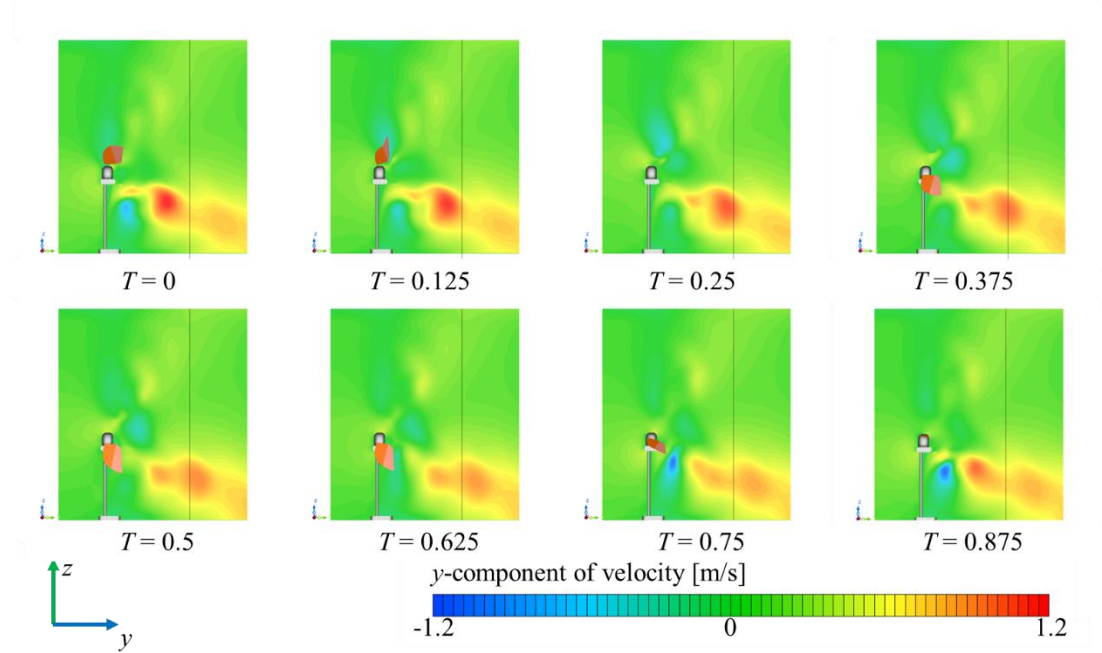


Fig. 66. Time series of velocity (y -component), Wing 1-CFD, $x = 0$ mm.

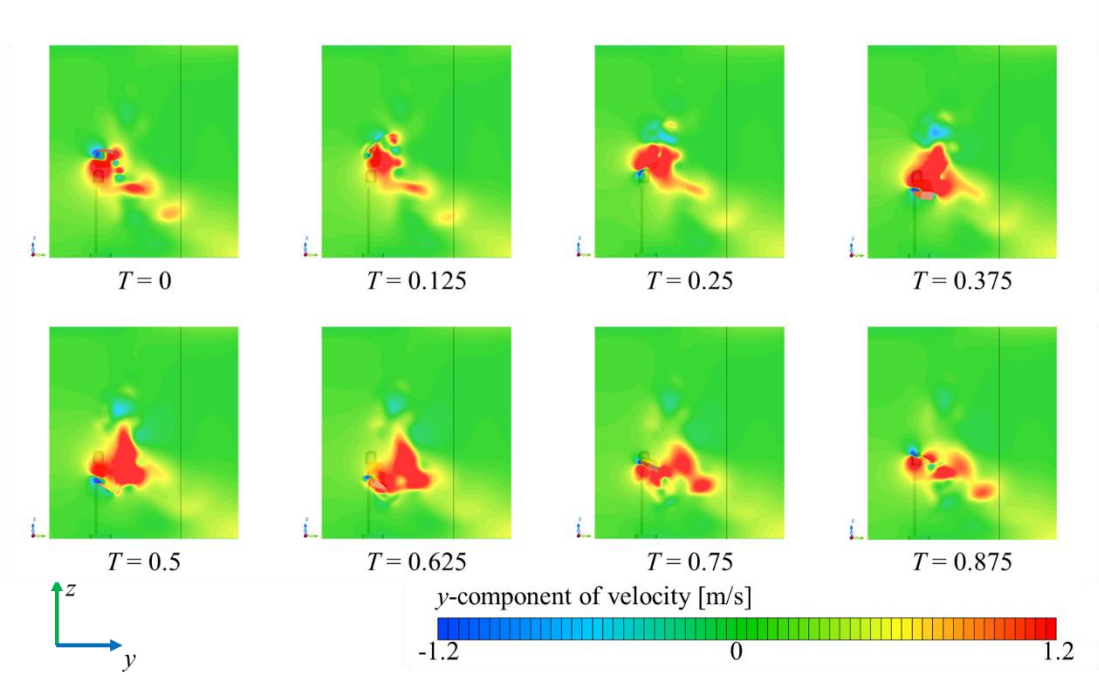


Fig. 67. Time series of velocity (y-component), Wing 1-CFD, $x = 270$ mm.

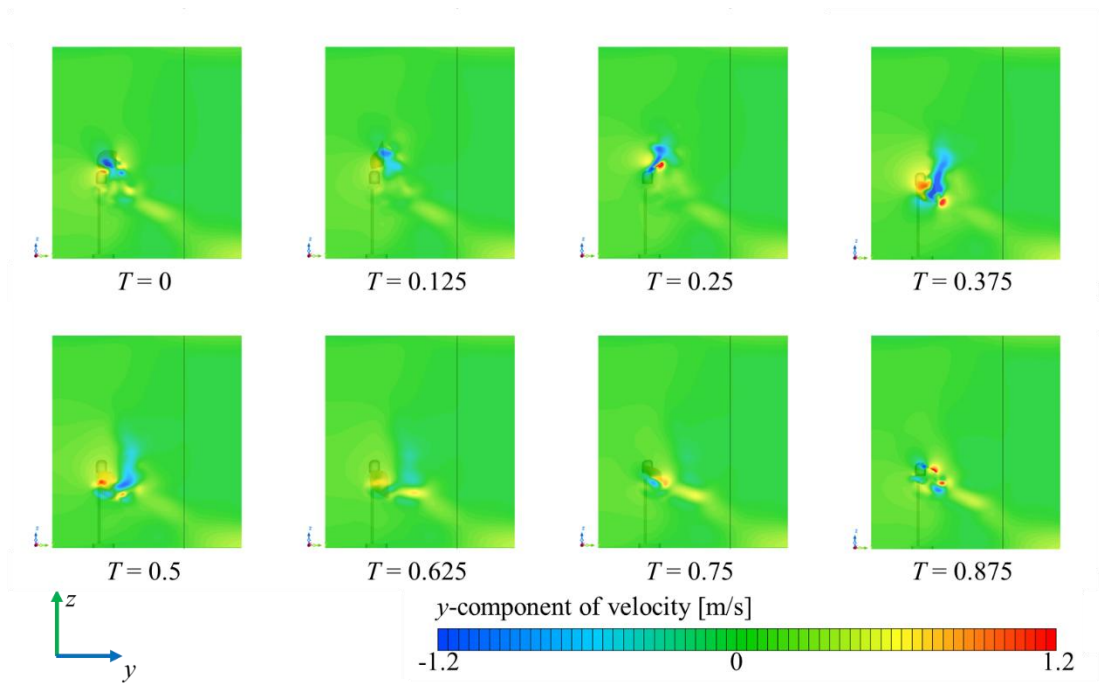


Fig. 68. Time series of velocity (y-component), Wing 1-CFD, $x = 440$ mm.

Fig. 69 ~ 73 は、Case 7 の計算結果における、 $z = 300 \text{ mm}$ 、 150 mm 、 0 mm 、 -150 mm 、 -300 mm の水平断面で、渦度の z 方向成分を示したものである。Wing 1-CFD の結果と比較すると、 $z = 300 \text{ mm}$ 、 150 mm 、 0 mm において渦度が強く、より下流の位置でも強い渦度が確認できる。Fig. 69 ~ 73 内に、 $y = 700 \text{ mm}$ の位置を薄線で表示しているが、 $z = 150 \text{ mm}$ 、 0 mm 、 -150 mm の断面において、その地点まで渦度の z 方向成分の絶対値が ± 2 を超える値を保持している。また、全体的な傾向として、Wing 1-CFD の計算結果では、渦度の z 方向成分が x 方向に散逸しているのに対し、Case 7 では $x = 0 \text{ mm}$ の両側に集中して下流側まで持続していることが確認された。

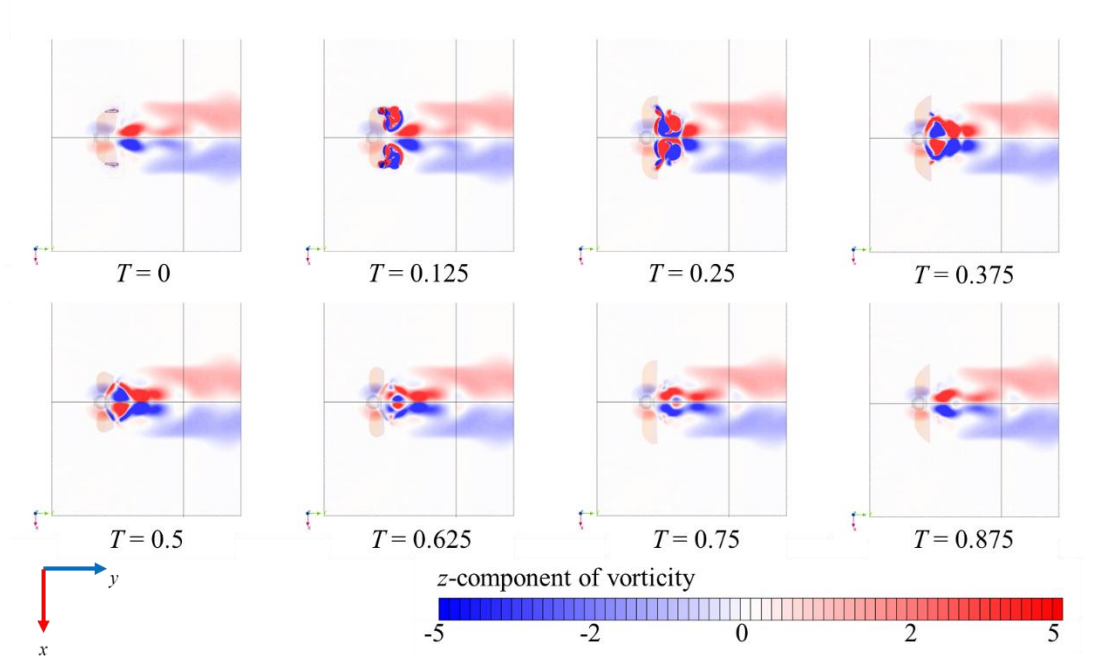


Fig. 69. Time series of vorticity (z -component), Case 7, $z = 300 \text{ mm}$.

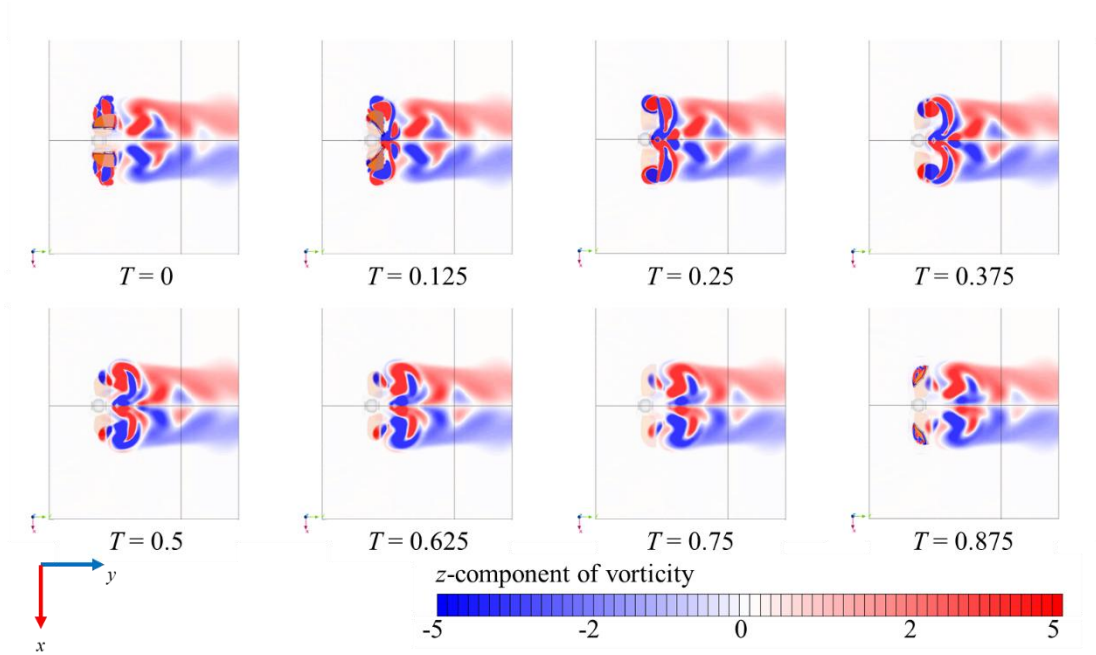


Fig. 70. Time series of vorticity (z-component), Case 7, $z = 150$ mm.

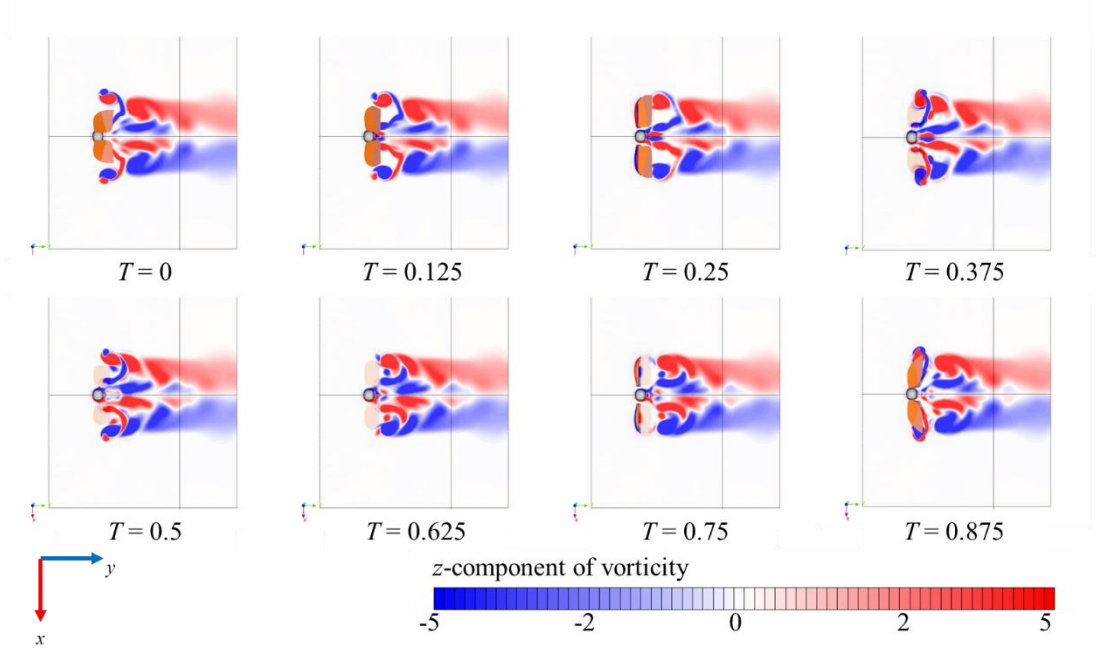


Fig. 71. Time series of vorticity (z-component), Case 7, $z = 0$ mm.

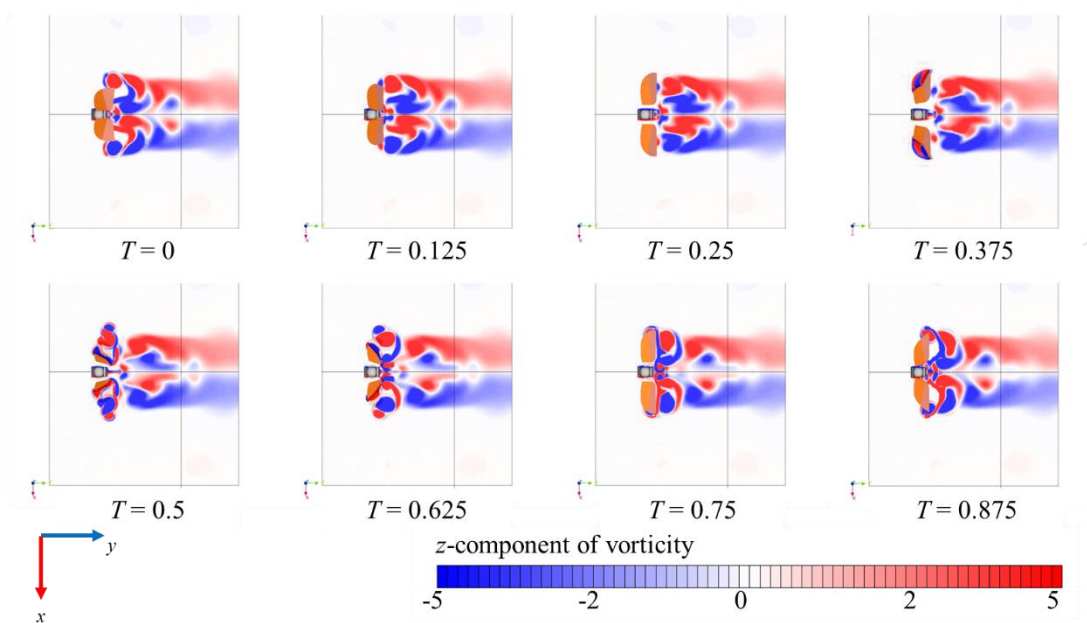


Fig. 72. Time series of vorticity (z-component), Case 7, $z = -150$ mm.

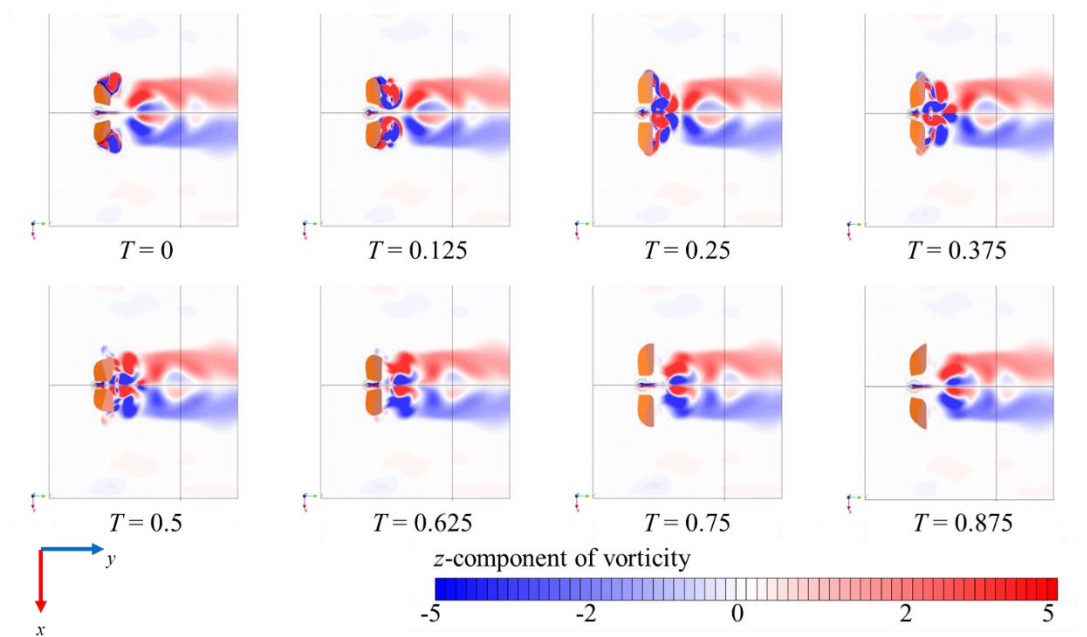


Fig. 73. Time series of vorticity (z-component), Case 7, $z = -300$ mm.

Fig. 74 ~ 76 は Case 7 の計算結果における、 $x = 0$ mm、270 mm、440 mm の垂直断面で、渦度の x 方向成分を示したものである。

Fig. 74 は羽ばたき型送風機の胴体中心線 ($x = 0$ mm) における垂直断面であるが、Wing 1-CFD の結果と比較して、1 周期のいずれのタイミングにおいても、同程度の強さの渦が z 方向上下に向かって生成されている。

Fig. 75 は、 $x = 270$ mm における垂直断面であり、 $x = 0$ mm の位置より強い渦度が確認できる。Wing 1-CFD の結果では、羽ばたき型送風機上方へ流れを巻き込むような反時計回り（赤）の強い渦が発生していたが、Case 7 では反時計回り（赤）の下方に時計周り（青）の渦が随伴し、下流側への流れを誘導している。Wing 1-CFD の結果では特定のタイミングで強い渦が生成されていたが、Case 7 では周期全体を通じて渦の強さに大差がなく、これはピッチ角の運動プロファイルを上下対称に設定したためと考えられる。Fig. 76 は、羽根の外側端部における断面であり、ここでは渦の発生が少なく、強い渦が二枚の羽根の内側で生成されていることがわかる。

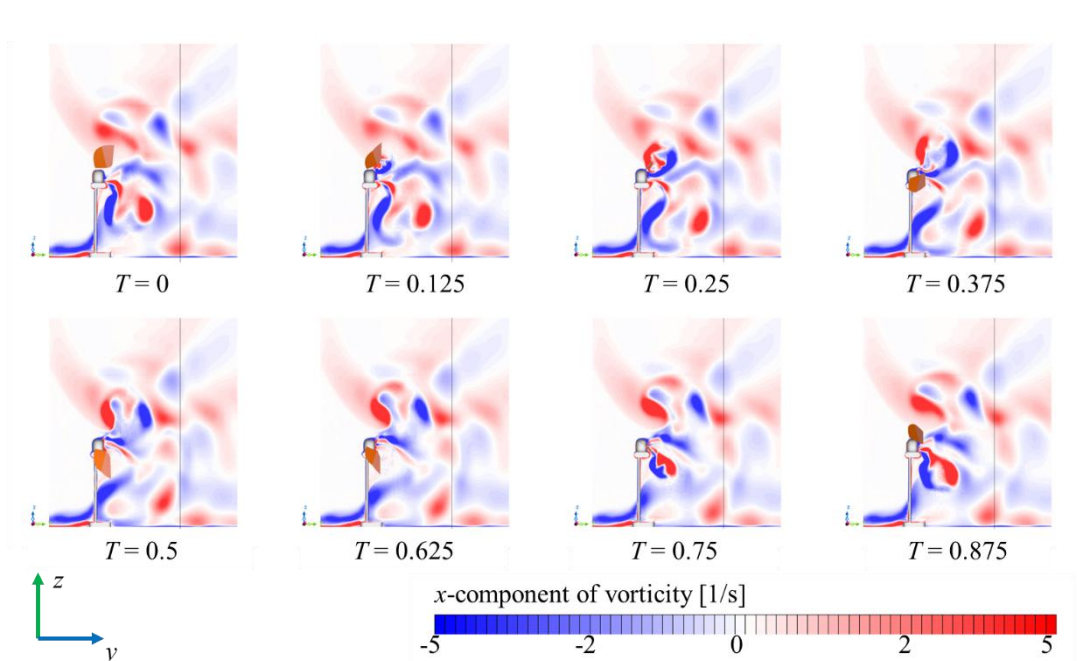


Fig. 74. Time series of vorticity (x-component), Case 7, $x = 0$ mm.

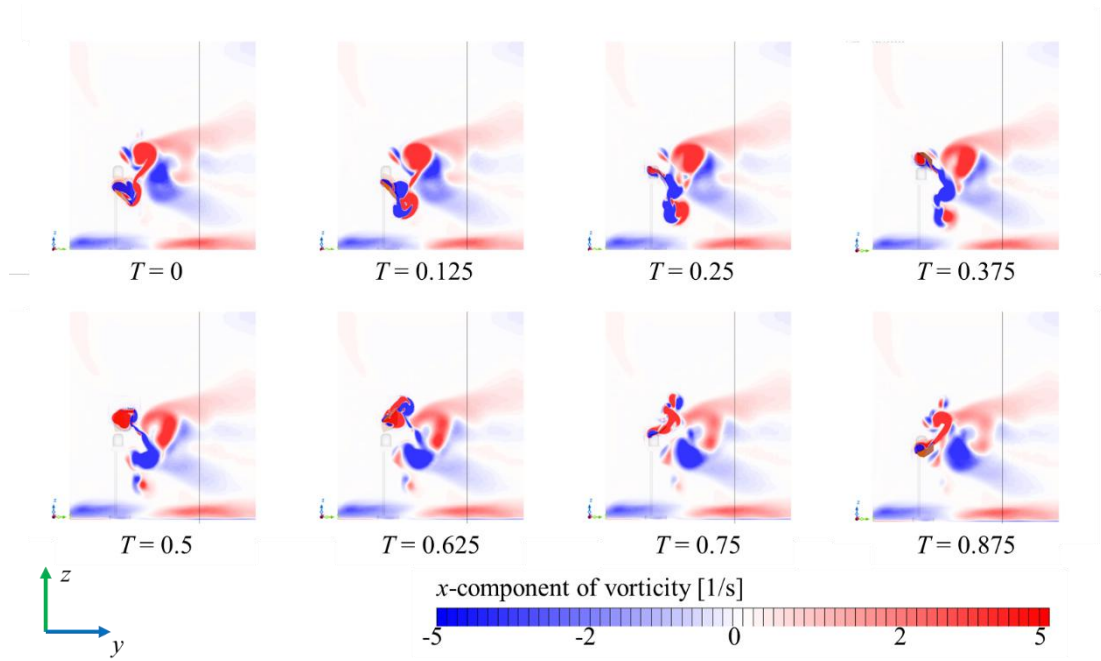


Fig. 75. Time series of vorticity (x-component), Case 7, $x = 270$ mm.

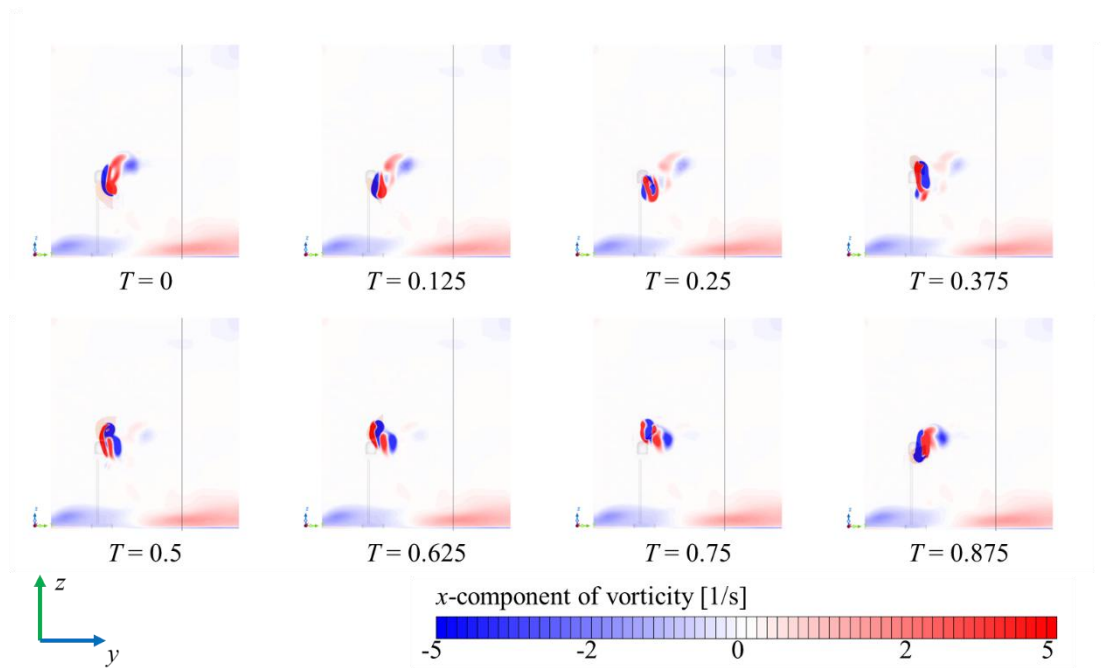


Fig. 76. Time series of vorticity (x-component), Case 7, $x = 440$ mm.

Fig. 77 ~ 79 は Case 7 の計算結果における $x = 0$ mm、270 mm、440 mm における垂直断面で、風速の y 方向成分を表したものである。Wing 1-CFD の Fig. 66 と Case 7 の Fig. 74 を比較

すると、Case 7 では風速の大きい箇所が断続的に生成され、脈動するように風が発生している。Wing 1-CFD で見られたような逆流は見られず、 y 軸の正方向に風が流れている。

Fig. 78 は、羽根の幅方向中央位置の断面であるが、 $0 \leq T \leq 0.375$ では風がやや下向きに、 $0.5 \leq T \leq 0.875$ ではやや上向きに出ている。これらの流れは上下に分離するのではなく、相互に影響し合い、後方に向かって風を生成している。

Fig. 79 では流速が 0 に近い。Wing 1-CFD の計算結果ではこの位置 ($x = 440$ mm) にも流速が生じていたが、Fig. 38 に示した $y = 700$ mm での計算結果からもわかるように、Wing1-CFD は z 方向の低い位置で幅方向に風が広がる傾向があるのに対し、Case 7 はターゲット領域内に風が集中する傾向を示している。

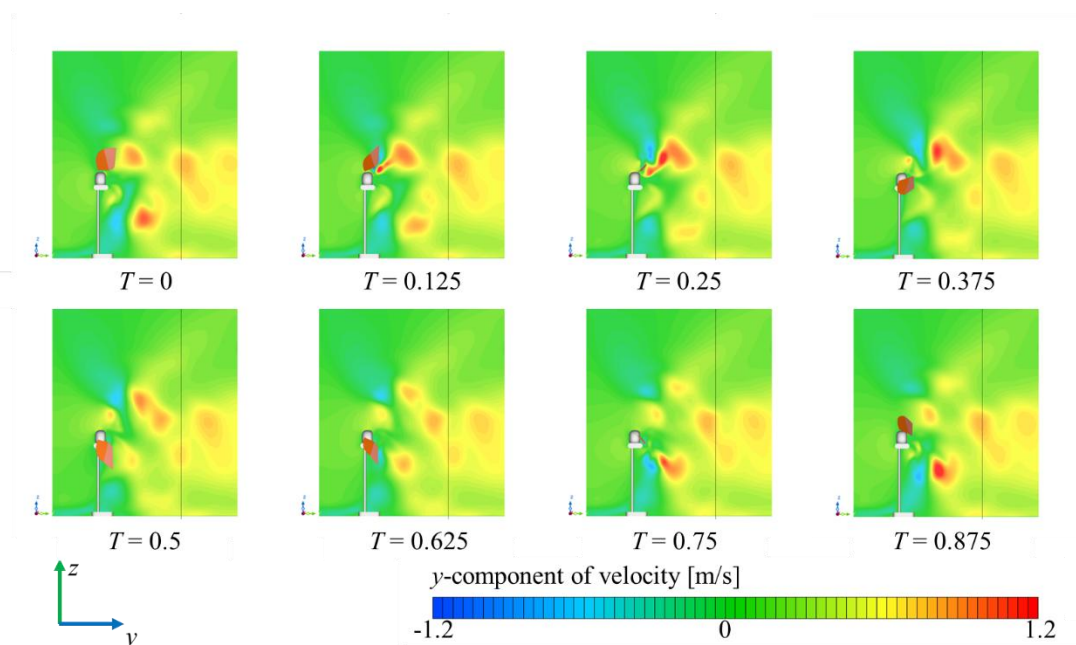


Fig. 77. Time series of velocity (y-component), Case 7, $x = 0$ mm.

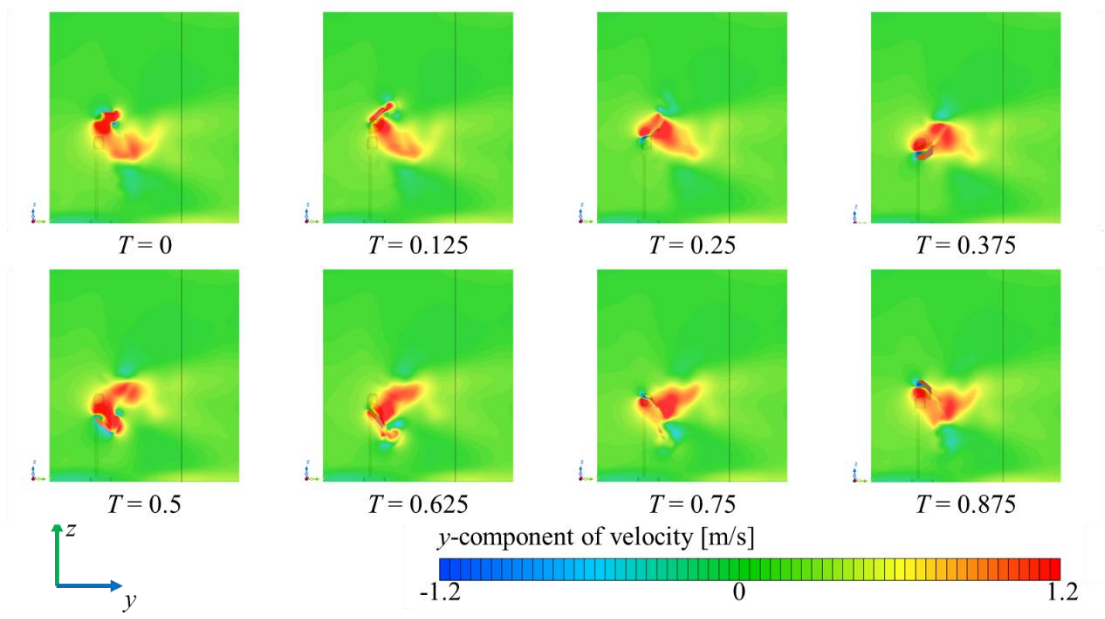


Fig. 78. Time series of velocity (y-component), Case 7, $x = 270$ mm.

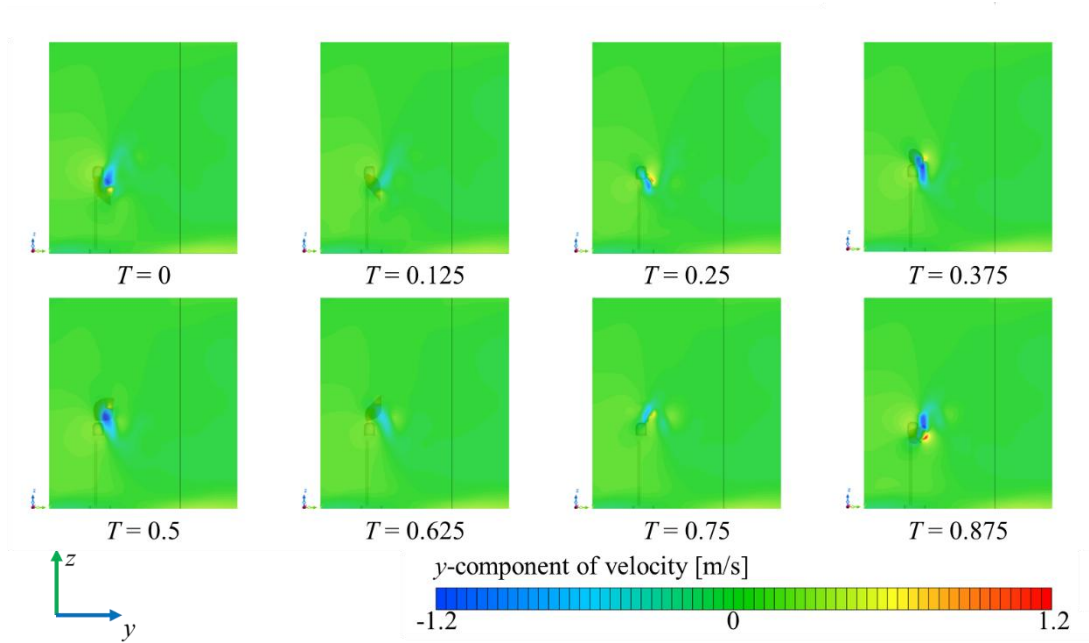


Fig. 79. Time series of velocity (y-component), Case 7, $x = 440$ mm.

参考文献

- [1] Sumiya, M. and Agu, M., Evaluation of wind comfort with fluctuation control of wind direction and speed, The IEICE transactions on information and systems, Pt. 2. 80(7), 1997.07, pp.1994–2001 (in Japanese).
- [2] Sasaki, S., Tokushige, T., Torise, K., and Murakami, H., Aerodynamic noise of a propeller fan at maximum efficiency point and off-design point, Turbomachinery, 41(12), (2013), pp.754–761.
- [3] Iwase, T., Hioki, T., Kato, Y., Tanno, T., Sekiguchi, O. and Furukawa, M., Influence of interaction with tangential lean blade and box type casing on blade passing frequency noise level in small axial-flow fans, Transaction of Japan Society Mechanical Engineering B, 77 (2011), pp. 1620–1629.
- [4] Japanese Industrial Standards (2007), JIS C 9601:1990 (Fans) (online), available from https://www.intertekinform.com/en-gb/standards/jis-c-9601-1990-630962_saig_jsa_jsa_1447530/?srsltid=AfmBOop6dKStDG-UYyizgn7G9iVOBlkC68H-X_Rb1d1vAjgImW0ztTr, (accessed on 29 07, 2025).
- [5] Tokyo Metropolitan Government, Bureau of Citizens and Cultural Affairs, Consumer Affairs Division (2011), Effectiveness of Fan Covers for Accident Prevention (online), available from <https://www.shouhiseikatu.metro.tokyo.lg.jp/anzen/test/documents/6017r500.pdf>, (accessed on 29 07, 2025). (in Japanese)
- [6] Yu, D., et al., Influence of load conditions on the propeller wake evolution, Journal of Marine Science and Engineering, Vol.11, No.9 (2023), Paper No.1674.
- [7] Kaneko, S., A study on the hygienic aspects of electric fans: the dispersion of dust and coolness (Report 4): measurement of coolness by sensory evaluation, Journal of Home Economics, Vol.18, No.4 (1967), pp.259–263.
- [8] Sudo, S., History and current status of household electric fans, Turbomachinery, Vol.8, No.7 (1980), pp. 391–397(in Japanese).
- [9] Koyama, Y. and Yamaguchi, N., Noise and Its Mitigation in Fans and Compressors, Turbomachinery, Vol.5, No.3 (1977), pp. 153–162(in Japanese).
- [10] Kumon, Y. and Otsuka. M., Development of electric fan propeller featuring chestnut tiger butterfly wing characteristics, Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, 3(1), (2013), pp.103–108.
- [11] Development of electric fan in the Showa latter period, Journal of the Science of Design, Vol. 56, (2009), p. E14.
- [12] Wolf, T. and Konrath, R., Avian wing geometry and kinematics of a free-flying barn owl in flapping flight, Experiments in Fluids, Vol.56, (2015), p.28.

- [13] Azuma, A. (2018). *Dictionary of Biological Motion* (New edition). Tokyo: Asakura Publishing. ISBN: 978-4-254-10282-6.
- [14] Jaworski, J. W., & Peake, N. (2020). *Aerodynamic noise from owls: Mechanisms of silent flight*. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 52, 395–420.
- [15] Phil Robson, R0T-2U-O5fc, Unsplash, <
<https://unsplash.com/ja/%E5%86%99%E7%9C%9F/%E7%99%BD%E3%81%84%E3%83%95%E3%82%AF%E3%83%AD%E3%82%A6%E3%81%8C%E7%A9%BA%E3%82%92%E9%A3%9B%E3%82%93%E3%81%A7%E3%81%84%E3%81%BE%E3%81%99-R0T-2U-O5fc>>, (2025-2-5)
- [16] Azuma, A. and Kira, Y., Statistical values related to the flight performance of birds, *Journal of the Japan Society for Aeronautics and Astronautics*, Vol.28, No.323 (1980), p. 581 (in Japanese).
- [17] LePiane, K. and Clark, C. J., Evidence that the dorsal velvet of barn owl wing feathers decreases rubbing sounds during flapping flight, *Integrative and Comparative Biology*, Vol.60, No.5 (2020), pp. 1068–1079.
- [18] Wagner, H., Weger, M., Klaas, M., and Schröder, W., Features of owl wings that promote silent flight, *Interface Focus*, Vol.7, No.1 (2017), 20160078.
- [19] Lang, X. Bifeng, S., Wenqing, Y., and Wenping, S., Aerodynamic performance of owl-like airfoil undergoing bio-inspired flapping kinematics, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol.34, No.5 (2021), pp. 239–252.
- [20] Lawley, J., Ben-Gida, H., Krishnamoorthy, K., Hackett, E. E., Kopp, G. A., Morgan, G., Guglielmo, C. G., and Gurka, R., Flow features of the near wake of the Australian boobook owl (*Ninox boobook*) during flapping flight suggest an aerodynamic mechanism of sound suppression for stealthy flight, *Integrative and Comparative Biology*, Vol.1, No.1 (2019), obz001.
- [21] Murakami, S. and Morikawa, Y., A study on wind environment assessment criteria considering the effect of temperature: Setting suitable and unsuitable wind environments based on daily average wind speed and daily average temperature, *Transactions of Architectural Institute of Japan, Journal of architecture, planning and environmental engineering*, Vol.358, (1977), pp. 9–17 (in Japanese)
- [22] Agu, M. and Oguchi, K., 1/f Fluctuation that provides comfort to humans and its applications in home appliances, *The Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, Vol.113, No.1 (1993), pp. 27–33 (in Japanese).
- [23] Saji, H., Physics of comfortable spaces. *Applied Physics*, Vol.60, No.3 (1991), pp. 247–253 (in Japanese).
- [24] Emori, Y., Aoki, K., & Yoshida, Y. (1995). Effect of the whole body vibration to the infants on a cradle. *Journal of Human Engineering*, 31(6), 369–377.

- [25] Hiroi, T., Kaneko, Y., Yanagi, N., & Koitabashi, K. (2010). Effect of regular rhythmic stimuli for ten minutes on consciousness level. *Japanese Journal of Nursing Art and Science*, 9(2), 29–38.
- [26] Menter, F. R., “Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows,” AIAA Paper 93-2906, 1993.
- [27] Menter, F. R., “Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,” *AIAA Journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598–1605, 1994.
- [28] Industrial Technology Institute, Biotechnology Research Institute; Ministry of International Trade and Industry: Human body dimensions data for ergonomic design, Human Life Engineering Research Center (1996), p.129, available from, (accessed on 29 07,2025). (in Japanese)
- [29] Togami, H. and Noro, K., Optimum height of VDT work table, *Ergonomics*, Vol.23, No.3 (1987), pp.155–162.
- [30] Zhang, Y., et al., Experimental study on fan-induced airflow evaluation by comparing the power spectrum, turbulence intensity and draught rate methods, *International Journal of Ventilation*, Vo.12, No.3 (2013), pp.257–270.
- [31] Fanger, P. O., et al., Air turbulence and sensation of draught, *Energy and Buildings*, Vo.12, No.1 (1988), pp.21–39.
- [32] Michael H. Dickinson et al., Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight, *Science*, Vol.284 (1999), pp.1954–1960. DOI: 10.1126/science.284.5422.1954
- [33] Nabawy M. R. A., A simple model of wake capture aerodynamics, *Journal of the Royal Society Interface*, Vol.20, No.206 (2023):20230282.
- [34] Sane, S. P., The aerodynamics of insect flight, *Journal of Experimental Biology*, Vol.206 (2003), pp.4191–4208. DOI:10.1242/jeb.00663.

表一覽

Table 1. Peak frequency based on the rotational speed of a 7-blade propeller fan

Table 2. Detailed structure of the wing

Table 3. Coordinates of the measurement points (x, z) [mm]

Table 4. Value of n calculated from $1/f^n$, which is the slope of the graph

Table 5. Measurement points and values of n around the maximum wind velocity for Wing 1 and 2

Table 6. Mesh sizes / L and number of elements

Table 7. Boundary conditions

Table 8. Mesh Size and Boundary condition

Table 9. Comparison of experimental and numerical results

Table 10. Conditions for numerical analysis with variations in each parameter

Table 11. Comparison between numerical and experimental results

Table 12. Coordinates of the measurement points and Value of n calculated from $1/f^n$

Table 13. n values at various distances from the fan

Table 14. Conditions for numerical analysis with variations in each parameter

図一覽

- Fig. 1. Frequency characteristics of a 7-blade propeller fan at 50 mm from the fan.
- Fig. 2. Wing shape of a barn owl at some time steps of a single flight [12].
- Fig. 3. Barn owl.
- Fig. 4. Motions of a barn owl wing in flapping flight [12].
- Fig. 5. Definition of angles.
- Fig. 6. Structure of the flapping wing.
- Fig. 7. Drive source.
- Fig. 8. Prototype.
- Fig. 9. Definition of dimensions.
- Fig. 10. Point to measure the amount of deformation.
- Fig. 11. Displacement in the z -direction.
- Fig. 12. Plunge and pitch angles.
- Fig. 13. Measurement scene.
- Fig. 14. Distribution of average wind velocity.
- Fig. 15. Characteristics of natural wind [22].
- Fig. 16. Power spectrum of wind velocity (The dashed line in the figure indicates the $1/f$ fluctuation.)
- Fig. 17. Time variation of wind velocity at $y = 700$ mm.
- Fig. 18. Subjective evaluation.
- Fig. 19. Change in heart rate variability (HRV) after airflow exposure.
- Fig. 20. Change in electrodermal activity (EDA) after airflow exposure.
- Fig. 21. Evaluation of work efficiency and stress.
- Fig. 22. Evaluation of skin moisture reduction after airflow exposure.
- Fig. 23. Deformation of wing.
- Fig. 24. Numerical model of the flapping fan.
- Fig. 25. Definition of angles.
- Fig. 26. Numerical model of the wing.
- Fig. 27. Temporal displacement of the average wind velocity.
- Fig. 28. Numerical model of ordinary fan.
- Fig. 29. Wing 1 for motion capture.
- Fig. 30. Motion and deformation of Wing 1.
- Fig. 31. Wind velocity distribution of Wing 1.

Fig. 32. Wing profiles [12].

Fig. 33. Pitch and plunge angles of Representative Cases.

Fig. 34. Target region.

Fig. 35. Wind velocity distributions from numerical results under varying pitch angles.

Fig. 36. x -direction view of mid-span wing motion, vorticity, and velocity: Wing 1-CFD.

Fig. 37. x -direction view of mid-span wing motion, vorticity, and velocity: Case 7.

Fig. 38. Wind velocity distribution and wind exposure on a human.

Fig. 39. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Case 1-1.

Fig. 40. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Case 2-6.

Fig. 41. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Case 3-5.

Fig. 42. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Case 4-7 and 4-9.

Fig. 43. Wind velocity distribution at split angles of 5 and 30 °.

Fig. 44. Wind velocity distribution of the symmetric profile (Case 6-1).

Fig. 45. Schematic diagram of Wing 3.

Fig. 46. Plunge and pitch angles of Wing 3 and Case 7.

Fig. 47. Wing velocity distribution at $y = 700$ mm for Wing 3.

Fig. 48. Power spectrum of wind velocity of Wing 3.

Fig. 49. Relationship between the distance from fans and the value of n .

Fig. 50. Comparison of vortex structures between ordinary fan and flapping-type fan.

Fig. 51. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 1-1 to 1-5.

Fig. 52. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 2-1 to 2-7.

Fig. 53. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 3-1 to 3-8.

Fig. 54. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 4-1 to 4-6.

Fig. 55. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 5-1 to 5-5 and 3-7.

Fig. 56. Pitch, plunge angle and wind velocity distribution of Cases 6-1 to 6-3.

Fig. 57. Wing positions and reference planes.

Fig. 58. Time series of vorticity (z -component), Wing 1-CFD, $z = 300$ mm.

Fig. 59. Time series of vorticity (z -component), Wing 1-CFD, $z = 150$ mm.

Fig. 60. Time series of vorticity (z -component), Wing 1-CFD, $z = 0$ mm.

Fig. 61. Time series of vorticity (z -component), Wing 1-CFD, $z = -150$ mm.

Fig. 62. Time series of vorticity (z -component), Wing 1-CFD, $z = -300$ mm.

Fig. 63. Time series of vorticity (x -component), Wing 1-CFD, $x = 0$ mm.

Fig. 64. Time series of vorticity (x -component), Wing 1-CFD, $x = 270$ mm.

Fig. 65. Time series of vorticity (x -component), Wing 1-CFD, $x = 440$ mm.
Fig. 66. Time series of velocity (y -component), Wing 1-CFD, $x = 0$ mm.
Fig. 67. Time series of velocity (y -component), Wing 1-CFD, $x = 270$ mm.
Fig. 68. Time series of velocity (y -component), Wing 1-CFD, $x = 440$ mm.
Fig. 69. Time series of vorticity (z -component), Case 7, $z = 300$ mm.
Fig. 70. Time series of vorticity (z -component), Case 7, $z = 150$ mm.
Fig. 71. Time series of vorticity (z -component), Case 7, $z = 0$ mm.
Fig. 72. Time series of vorticity (z -component), Case 7, $z = -150$ mm.
Fig. 73. Time series of vorticity (z -component), Case 7, $z = -300$ mm.
Fig. 74. Time series of vorticity (x -component), Case 7, $x = 0$ mm.
Fig. 75. Time series of vorticity (x -component), Case 7, $x = 270$ mm.
Fig. 76. Time series of vorticity (x -component), Case 7, $x = 440$ mm.
Fig. 77. Time series of velocity (y -component), Case 7, $x = 0$ mm.
Fig. 78. Time series of velocity (y -component), Case 7, $x = 270$ mm.
Fig. 79. Time series of velocity (y -component), Case 7, $x = 440$ mm.

本論文に関連した著者の発表論文

1. Yui Kumon, Hiroyoshi Suzuki, Kanako Wakasa, Masaru Misumi, Development of a Fan Inspired by Bird Flapping, Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, 2025, Volume 11, Issue 1, Pages 1-9
2. Yui Kumon, Hiroyoshi Suzuki, Masaru Misumi, Kanako Wakasa, Isamu Nakajima, A Numerical Study for Improving Wind Velocity Distribution in a Bio-Inspired Flapping Fan, Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms, 2025, Volume 11, Issue 1, Pages 38-46