

ファンプロペラの効率アップ
—風を変えるシンプルな表面加工—

1. 研究の目的

僕がこの研究を始めたきっかけは、ゴルフボールに関する面白い歴史を知ったことだ。昔ゴルフボールは、羽毛を皮で包んで作られていた。その後、ガッタ(Fig.1)と呼ばれるツルツルのボールが登場した。使い込むうちに傷だらけになった(Fig.2)が、不思議なことに傷のあるボールの方が良く飛んだそうだ。これが今のゴルフボールについている小さな凹み(ディンプル)のきっかけになったという。これを知った時、ファンプロペラにディンプルを応用できないかと思いついた。ディンプルの役割は、ボール表面の流れの剥離を防ぐ^{※1}ことである。プロペラは翼の集合体なので、ディンプルのような加工がプロペラの効率を上げるのに役立つのではないかと考えたのだ。

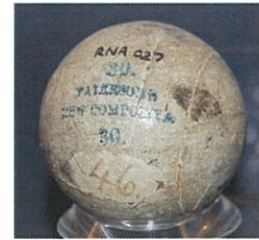


Fig.1 ガッタ



Fig.2 傷のあるガッタ

研究に着手した一昨年に市販されているファンプロペラを調べたところ、すでに騒音を低減させるという目的でディンプルを応用したプロペラの特許が取得されていること^{※2}や、ディンプルの付いたプロペラが販売されていることがわかった。そこで研究の目的を【効率の向上】に絞り、一昨年と昨年は、プロペラの表面に溝や凸などの様々な加工をすることで、効率を上げられる加工方法を探ってきた。その中で、表面の加工によって効率が上がることも少しずつ見えてきた。

そこで、今年はず、これまでに行われてきたプロペラの研究の論文を読み込んだ。すると、軸流ファンに関する研究は、低騒音化^{※3}や高効率化を目的としているものが多く、高効率化を目指す研究においては、新たな形状のプロペラを設計することが盛んに行われていることがわかった。例えばアサギマダラの羽を模した扇風機(Fig.3)は、同一回転数において16%の風量増加を達成し^{※4}、エイの体を模したファン(Fig.4)は、翼端流の縮小によって6%の効率向上が確認されている^{※5}。これらはいずれも、プロペラの形状を変化させることで効率の向上を実現したものだ。一方、プロペラの前進角を変える研究も存在し、最大効率点付近でベースプロペラに比べ約2%の効率向上^{※5}が確認されている。

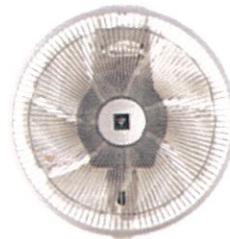


Fig.3.アサギマダラの羽を模した扇風機

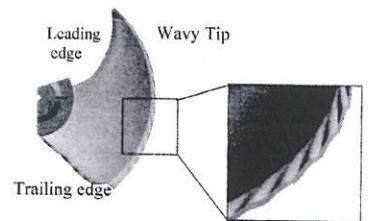


Fig.4.エイの体を模したファン

プロペラの効率を上げるためには剥離の抑制、剥離渦の抑制、翼端流の縮小化、摩擦抵抗の低減などが求められる^{※4,5,6,7,8}。剥離抑制の技術として有名なのが、プラズマアクチュエーターの研究だ^{※9}。これは2種類の電極間に発生するプラズマによって、電極部に流れが引き寄せられることによって剥離を抑制する装置であり、ディンプルのような加工よりも時間的に短いスケールでの反応が可能なことから、実用的な技術として注目されている。しかし、これには電力を入力しなくてはいけないというデメリットも存在する。

しかし、プロペラの表面に加工を施すことで効率を向上させようという研究はほとんど行われていない。このため、この研究では、新たな形状のプロペラを設計することではなく、シンプルな加工を表面に施すことで効率を向上させることを目指した。

2. 研究方法

① プロペラ表面の加工

昨年、一昨年の研究で加工したプロペラから、効率を上げる加工の共通点を探し、120枚のプロペラを加工した。加工は彫刻刀を用い、すべて手彫りで行った。

■凸加工

直径0.3mmの針金を直線、曲線の線状にして、ボンドで貼り付ける。風の流れを考え、貼る場所にも変化を持たせた。

■直線溝加工

太さや深さ、長さの異なる直線溝をプロペラの表面に掘る。溝のサイズは幅2mm×深さ0.7mm、幅1mm×深さ0.3mmをメインに、さらに細く浅い溝やより深く深い溝のプロペラも作成。

■曲線溝加工

太さや深さ、長さの異なる曲線溝をプロペラの表面に掘る。溝のサイズは幅2mm×深さ0.7mm、幅1mm×深さ0.3mmをメインに、さらに細く浅い溝やより深く深い溝のプロペラも作成。

■溝を掘る位置の工夫

プロペラ表面を数等分し、前縁部から見て1:7・7:1、1:3・3:1、2:3・3:2の位置に直線溝と曲線溝を掘った。

■オモテ面とウラ面を加工

凸加工、溝加工ともに、同じ加工をオモテ面、ウラ面に施した。また、効率のアップが期待できる加工は、両面にも加工した。



Fig.5: 実験用プロペラ
ダイワプロペラ
直径11cm
プロペラ厚さ1.4mm

□前提条件として、オモテ面はプロペラが空気を吐き出す方向、ウラ面はプロペラが空気を吸い込む方向を言う。

また、Fig.6に示したように、前縁部とは、プロペラが回転する方向にある羽根のエッジ。後縁部は、その逆方向のエッジを示す。

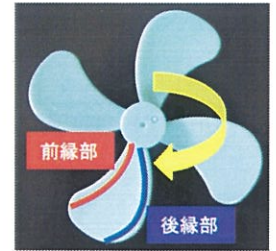


Fig.6 前縁部と後縁部

② 風速の計測

すべてのプロペラで、正面から30, 50 cm離れた位置と、そこから横に5, 10 cm離れた位置(風量半径)で風速を計測した(Fig.7)。

- ・モーターの回転数は2000, 3000, 4000 rpmに、電流と電圧は一定に制御した。
- ・風速は1分間計測し、平均値を求めた。
- ・風速の計測は、エアコンや室外の風の影響を受けない場所で実施した。
- ・気温、湿度などのデータへの影響を考慮し、風速計測時は毎回ベースファンの風速を計測し、データの解析には同一条件下で計測したデータを用いた。

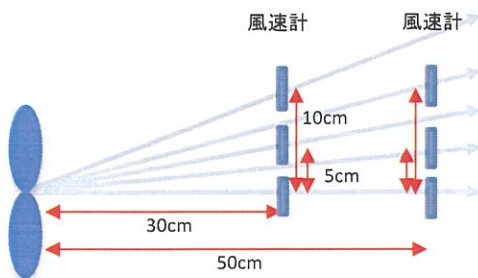


Fig.7 風速の計測ポイント

<実験器具>

- ・モーター: maxon motor EC-max 16 φ 16 mm, ブラシレス, 5 Watt
- ・コントローラー: ESCON 36/3 EC
- ・回転数制御ソフトウェア: ESCON studio
- ・電流電圧計: sanwa DMM PC20 DIGITAL MULTIMETER
- ・直流電源装置: ME-156 保護回路付
- ・電源装置: ウチダ TY-5A2

<風速計>

- ・Mother Tool SDカードデータログ式デジタル熱線式風速・風量計 AM-4224SD

③ 効率の算出-1

計測した風速、電圧と電流を元に、次式を用いてそれぞれのプロペラの風量の計算を行い、効率 η^* を算出する。なお、この研究では、ベースファンの効率に対する相対効率を η^* とし、効率を表すデータすべてに適用する。

$$\eta = \frac{\pi \rho R^2 \left\{ \frac{V_0^3}{2} - V_0^2(V_0 - V_1) + \frac{3}{4} V_0(V_0 - V_1)^2 - \frac{1}{5}(V_0 - V_1)^3 \right\}}{V \times I}$$

ρ =空気の密度、 R =風量半径、 V_0 =正面風速、 V_1 =中心から5 cmもしくは10 cmの風速、 V =電圧、 I =電流を示す。分母は電圧×電流、分子は風の仕事率。

式の考え方

全体の風量 $F = \sum \Delta F = \sum v(x) 2\pi x \Delta x = \int_0^R v(x) 2\pi x dx$

風の仕事率 $W = \sum \Delta W = \sum \rho \frac{[v(x)]^3}{2} 2\pi x \Delta x = \int_0^R \rho \frac{[v(x)]^3}{2} 2\pi x dx$

風の仕事率の計算式は、Fig.8に示したように半径 $x \sim \Delta x$ の範囲について、風速 $=v(x)$ 、面積 $\Delta S = 2\pi x \Delta x$ 、風量 $\Delta F = v(x) \Delta S$ とした時、風の仕事率=風量×風圧、つまり

$\Delta W = \rho [v(x)]^2 / 2 \times \Delta F = \rho [v(x)]^3 / 2 \times 2\pi x \Delta x$
と考慮して導き出した。

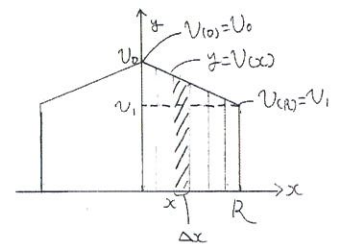


Fig.8 風の仕事率の考え方

以上より、 $v(x) = v_0 - (v_0 - v_1)x/R$ と考え、風量と仕事率を以下のように算出した。

$$F = \int_0^R \left(v_0 - \frac{v_0 - v_1}{R} x \right) 2\pi x dx = 2\pi \int_0^R \left(v_0 x - \frac{v_0 - v_1}{R} x^2 \right) dx = 2\pi \left[\frac{v_0 x^2}{2} - \frac{v_0 - v_1}{3R} x^3 \right]_0^R = 2\pi R^2 \left(\frac{v_0 + 2v_1}{6} \right)$$

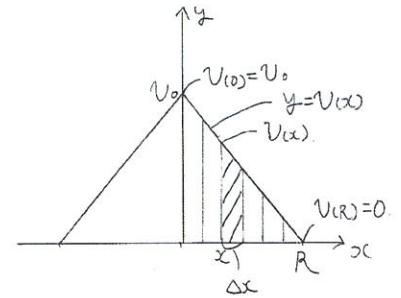
$$\begin{aligned} W &= \int_0^R \frac{\rho}{2} \left(v_0 - \frac{v_0 - v_1}{R} x \right)^3 2\pi x dx = \pi \rho \int_0^R \left(v_0 - \frac{v_0 - v_1}{R} x \right)^3 x dx \\ &= \pi \rho \left[v_0^3 \frac{x^2}{2} - v_0^2 \frac{v_0 - v_1}{R} x^3 + \frac{3}{4} v_0 \left(\frac{v_0 - v_1}{R} \right)^2 x^4 - \frac{1}{5} \left(\frac{v_0 - v_1}{R} \right)^3 x^5 \right]_0^R \\ &= \pi \rho R^2 \left\{ \frac{v_0^3}{2} - v_0^2 (v_0 - v_1) + \frac{3}{4} v_0 (v_0 - v_1)^2 - \frac{1}{5} (v_0 - v_1)^3 \right\} \end{aligned}$$

④ 効率の算出-2

ここまでの結果をもとに、効率の高いプロペラを10枚ほど決定し、③効率の算出-1とは異なる次式で効率 η^* を算出し効率の高さを証明する。

$$\eta = \frac{\pi \rho R^2 v_0^3}{20 V \times I}$$

Fig.9 風の仕事率の考え方-2



式の考え方

プロペラの正面で風速を測ると、ある半径までは風速が計測できるが、それを超えると風速が0になる。この風速が出なくなるギリギリの位置を見極め、中心からその位置までをRとした(Fig.9)。これを、 $v(x) = v_0 - v_0 x/R$ という式で表し、風量と仕事率を以下のように算出。

全体の風量
$$F = \int_0^R (v_0 - \frac{v_0}{R}x) 2\pi x dx = 2\pi \int_0^R (v_0 x - \frac{v_0}{R}x^2) dx = 2\pi \left[\frac{v_0 x^2}{2} - \frac{v_0 x^3}{3R} \right]_0^R = \frac{\pi R^2 v_0}{6}$$

仕事率
$$W = \int_0^R \frac{\rho}{2} (v_0 - \frac{v_0}{R}x)^3 2\pi x dx = \pi \rho \int_0^R (v_0 - \frac{v_0}{R}x)^3 x dx = \pi \rho \left[v_0^3 x - 3v_0^2 \frac{v_0}{R} x^2 + 3v_0 \left(\frac{v_0}{R}\right)^2 x^3 - \left(\frac{v_0}{R}\right)^3 x^4 \right]_0^R = \frac{\pi \rho R^2 v_0^3}{20}$$

⑤ 流れの可視化実験-1

高い効率を出したプロペラについて、自作風洞(Fig.10)を用いてプロペラ周りの流れを可視化する。

風洞は吸い込み式とし、スモークマシンの煙を整流して可視化を行った。風洞のサイズ:縦 30 cm 横 30 cm 幅 45 cm

- ・実験時のレイノルズ数は $R=1.78 \times 10^4$ 。
- ・撮影カメラ: CANON EOS-1D X、使用レンズ: 100 mm micro

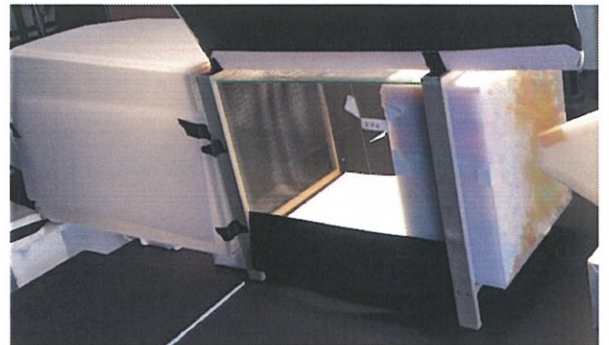


Fig.10 自作風洞を用いた撮影

⑥ 流れの可視化実験-2

高い効率を出したプロペラについて、流れの中に置いた格子に、タフト(糸)を取り付け、格子の面内の流れを観察するタフトグリッドを用いてプロペラから放出される空気の流れを可視化する(Fig.11)。

- ・実験は風速計即時と同じモーターを使用して行った。このため、実験時のレイノルズ数は計測時と同様である。
- ・撮影カメラ: CANON EOS-1D X、使用レンズ: 100 mm micro

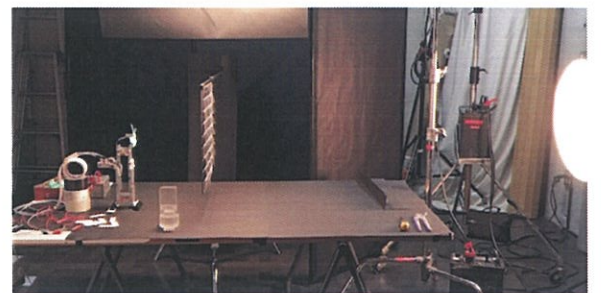


Fig.11 タフトグリッドの撮影

⑦ 効率が上昇したプロペラの再現性実験

もっとも高い効率を出した加工を施したプロペラを再度作成し、計測を行って2-4 ②の方法で効率を算出。加工によって効率を上げることができるかどうかを、再現実験で証明する。

⑧ コンピュータファンへの応用

この研究で効率が上昇した加工方法とレイノルズ数が同程度のプロペラファンを探したところ、市販されているコンピュータの冷却に使われているファン(コンピュータファン)が該当した。そこで効率が上がった加工をコンピュータファンに応用し、この研究結果が有効かどうかを証明する。

3. 研究結果

実験[1] 特定の領域における効率の良いプロペラの傾向を探る

2-②に示した方法ですべてのプロペラの風速を計測し、2-③の方法で効率 η^* を算出。ベースファンの最大効率点1を超えたプロペラのTOP3を、以下のグラフに示した。上段は曲線溝、下段は直線溝の結果である。

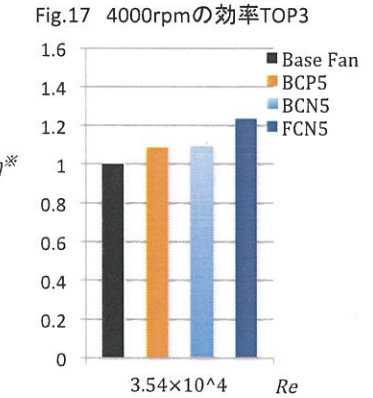
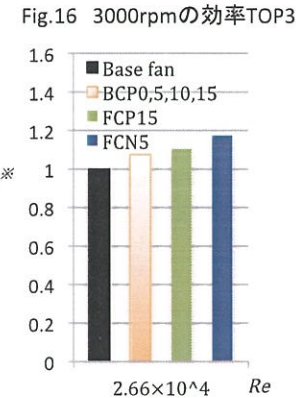
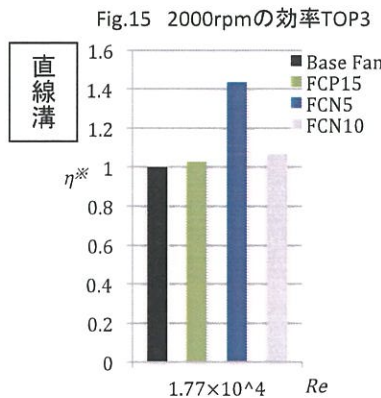
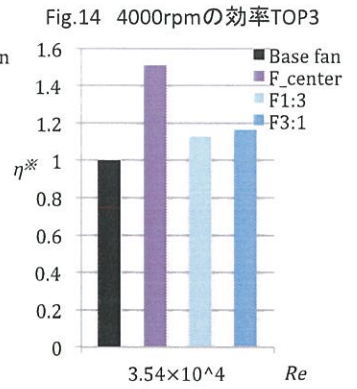
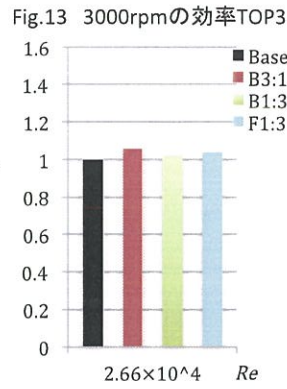
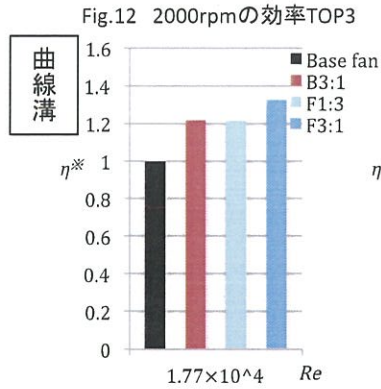
□F3:1=オモテ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅2 mm×深さ0.7 mmの溝を掘ったプロペラ

□F1:3=オモテ面に前縁部と後縁部からの距離の比が1:3になるように幅2 mm×深さ0.7 mmの溝を掘ったプロペラ

□B3:1=ウラ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅2 mm×深さ0.7 mmの溝を掘ったプロペラ

□F center=オモテ面のセンター部に幅2 mm×深さ0.7 mmの溝を掘ったプロペラ

□FCN5=オモテ面のセンターから後縁部に向かって5 mmの位置に幅1 mm×深さ0.3 mmの溝を掘ったプロペラ



【結果】曲線溝では、F3:1、F1:3、B3:1が、満遍なく高い効率を示し、直線溝では、FCN5が、高い効率を示した。曲線溝、直線溝に関係なく高い効率を出したプロペラに共通するのは、比較的プロペラの中心部に近い場所に、溝があるということと、幅1 mm以上の太さがあるという点だった。この実験によって、レイノルズ数ごとに効率が良い加工方法は異なるのではないかとわかってきた。この結果をベースにして、研究を深めていく。

実験[2] 凸加工凹加工は、どちらが有効か？

実験[1]では凸加工のプロペラは効率を上昇させることができなかったが、極めて細かい凸加工であれば効率を上げるのに有効ではないかと考えていたため、凸加工を施したプロペラの中でも効率が良かったFig.18とベースファンFig.19の効率を比べた。

□Fig.18: ウラ面のセンターから前縁部側5 mmの位置に針金を貼ったプロペラ

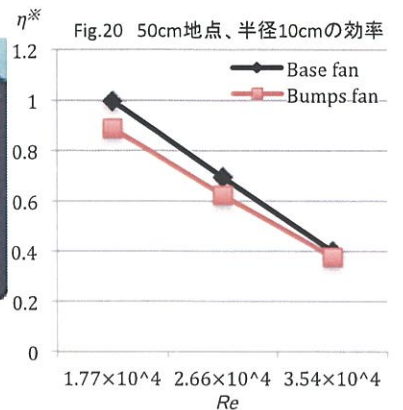
【結果】ベースファンの最大効率点を1とした場合、 $Re=1.77 \times 10^4$ の時に、Fig.18は効率が12%もダウンする結果となった(Fig.20)。物体の表面では流速が0になり、あるところまで行くと一定となる。この変化する区間=境界層の厚さを次式で求めた^{*5}ところ、境界層の厚さ δ は135 μ mであることがわかった。



Fig.18



Fig.19



$$\frac{\delta}{l} \approx \frac{1}{\sqrt{Re}}$$

δ =境界層厚さ、 l =物体の長さ、 Re =レイノルズ数を示す。

実験には直径0.3 mmの針金を使用したため、加工が境界層を超えて、層流(境界層の外側=流れが整っている)部までも乱している可能性が高いのではないかと考えた。しかし、135 μ mの加工物で凸加工を施すことは難しいため、この大きさのプロペラの場合、凸加工によって効率を上げることは不可能であると結論付けた。

実験[3] プロペラに掘る溝は、深く、広い方が効率が上がるのではないかと

去年までの研究から、溝はある程度深い方が効率が上がることがわかってきたため、今年の研究では幅2mm×深さ0.7mmの溝を多く加工した。Fig.21は、実験[1]で高い効率を示したプロペラだが、これよりも溝を浅く、狭くしたFig.22を加工し、深さの違いによる効率を比較した。

□ B3:1=ウラ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅2mm×深さ0.7mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.21)

□ B3:1N=ウラ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅1mm×深さ0.3mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.22)

【結果】ベースファンの最大効率点を1とした場合、 $Re=1.77 \times 10^4$ の時に、溝の幅が狭く浅いFig.22は、ベースファンとほとんど効率が変わらなかったが、幅が広く深いFig.21は、効率が20%アップしたことがわかった(Fig.23)。これより、溝はある程度の深さと広さがある方が、効率を上げるには効果的であることがわかった。溝が深く、広くなると抵抗が生じ、効率が落ちるのではないかと考えていたが、風の流れを変える適切な太さと深さの溝であれば、剥離の制御ができると考えられる。

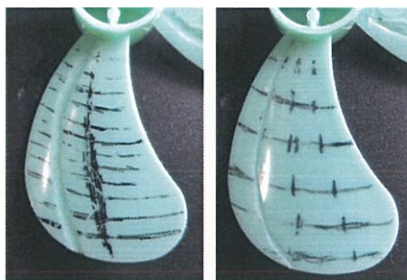
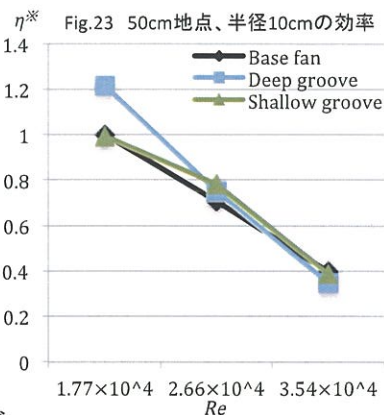


Fig.21

Fig.22



実験[4] プロペラ前縁部と後縁部、どちらへの加工が効果的か？

飛行機の例を見ると、翼面の流れの剥離を抑制し、失速を防ぐ目的を持つボルテックスジェネレーターは翼の前縁部に付いている。プロペラの場合も前縁部への加工が有効かどうかを調べるため、検証を行った。

□ F7:1=オモテ面の後縁部に幅2mm×深さ0.7mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.24)

□ F1:7=オモテ面の後縁部に幅2mm×深さ0.7mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.25)

□ B1:7=ウラ面の前縁部に幅2mm×深さ0.7mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.27)

□ B7:1=ウラ面の後縁部に幅2mm×深さ0.7mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.28)

【結果】ベースファンの最大効率点を1とした場合、 $Re=1.77 \times 10^4$ の時、オモテ面後縁部の加工であるFig.25は、ベースファンに比べて13%効率が上がったが、前縁部の加工であるFig.24は、すべての計測点で効率がダウンした(Fig.26)。

またウラ面加工の場合は、Fig.27、Fig.28とも、ベースファンよりも効率が下がる結果となった(Fig.29)。プロペラのエッジ近くに溝を付ける場合は、オモテ面の後縁部への加工が効果的であると言えそうだ。

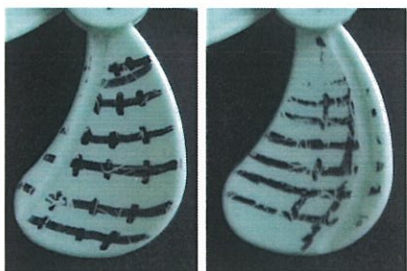


Fig.24

Fig.25

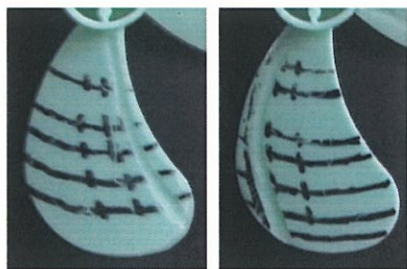
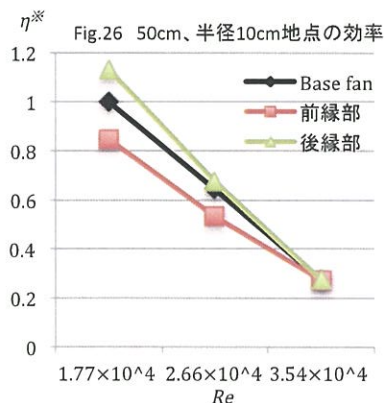
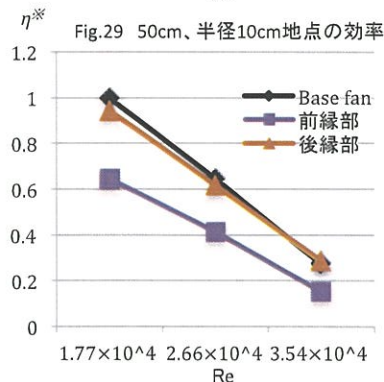


Fig.27

Fig.28



実験[5] オモテ面とウラ面、どちらへの加工が効果的か？

実験[1]の結果から、プロペラの中心よりも後縁部側に加工を施したプロペラの中で高い効率を示したプロペラを選び、オモテ面とウラ面のどちらへの加工が効果的かを調べた。

□ F3:1=オモテ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅2mm×深さ0.7mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.30)

□ B3:1=ウラ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅2mm×深さ0.7mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.31)

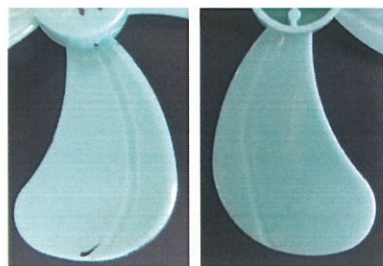
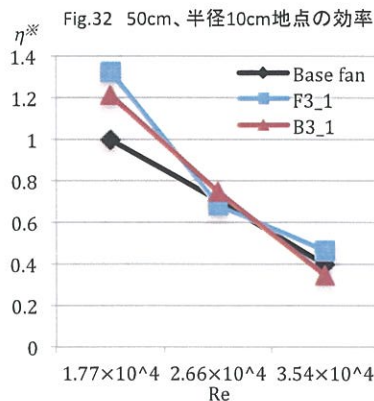


Fig.30

Fig.31



□ (FCN5)=オモテ面のセンターから後縁部に向かって5 mmの位置に幅1 mm×深さ0.3 mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.33)

□ (BCN5)=ウラ面のセンターから後縁部に向かって5 mmの位置に幅1 mm×深さ0.3 mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.34)

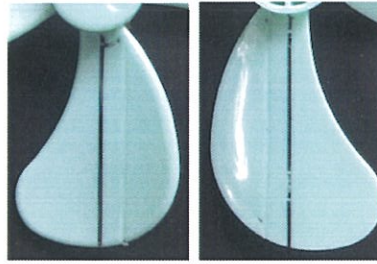
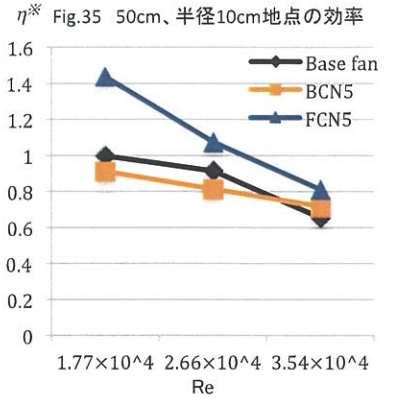


Fig. 33

Fig. 34

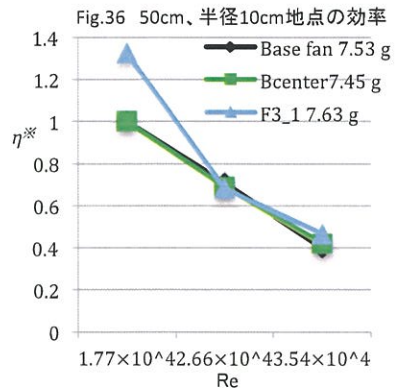
【結果】曲線溝のプロペラでは、ベースファンの最大効率点を1とした場合、 $Re=1.77 \times 10^4$ の時に、Fig. 30は32%、Fig.31は21%効率が上昇し、オモテ面への加工の方がより効果的であることがわかった(Fig.32)。また直線溝のプロペラでは、ベースファンの最大効率点を1とした場合、 $Re=2.66 \times 10^4$ の時に、Fig.33は80%、Fig.34は21%効率が上昇し、オモテ面への加工の方が効果的であることがわかった(Fig.35)。プロペラは翼の集合体のため、それぞれのプロペラのウラ面はオモテ面よりも圧力が低下し、プロペラの前から後ろへ流れる翼端流が発生する。オモテ面への加工によって、プロペラのオモテ・ウラ間の圧力差を減らし、翼端流を減少させたことが効果的だったのではないかと。



実験[6] 効率が上がるのは、加工によって重量が軽くなるのが原因ではないのか？

□ベースファン=重さ7.53 g □F3:1=加工後の重さ7.63 g □B center=加工後の重さ7.45 g

【結果】ベースファンと、F3:1では、F3:1の方が0.1 g重いにもかかわらず効率が32%上昇している。一方、ウラ面センターに溝を掘ったB centerは、ベースファンよりも0.8 g軽いにもかかわらず、効率はベースファンとほぼ同じだった(Fig.36)。加工によって軽くなったプロペラの重量変化は平均-0.05 gであるため、加工による重さの減少は効率上昇には影響しないと結論付けた。



実験[7] 広い領域における効率の良いプロペラを見極める

実験[1]では、プロペラの中心から5 cm、10 cm離れた地点の風速も取り込んで効率の計算を行ったが、ここでは計測地点に左右されない広い領域の効率を導き出すという考えにもとづき、効率 η^* を算出した。以下は、レイノルズ数ごとに分けた効率TOP3のグラフである。この検証では、実験[2]よりもさらに細かなデータを取るため、1500rpmから3500rpmまで、500rpmごとに風速を計測した。

Fig.37 1500rpmの効率TOP3

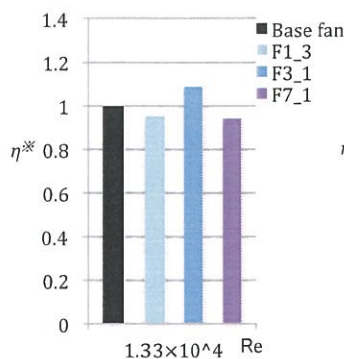


Fig.38 2000rpmの効率TOP3

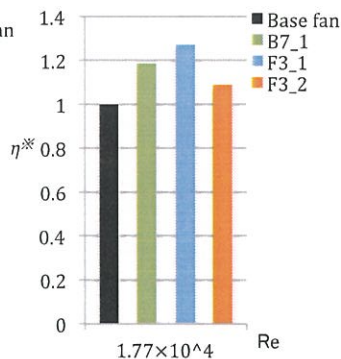


Fig.39 2500rpmの効率TOP3

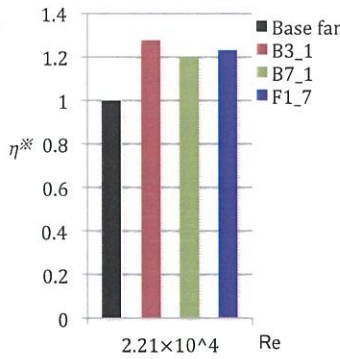


Fig.40 3000rpmの効率TOP3

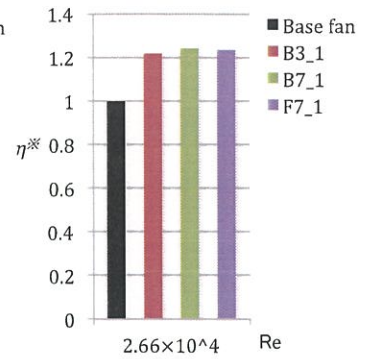


Fig.41 3500rpmの効率TOP3

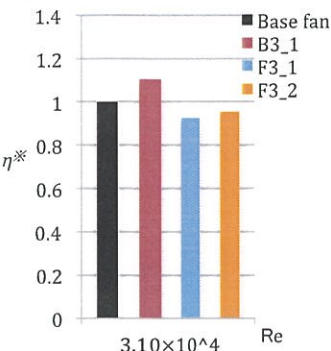


Fig.42



Fig.43



Fig.44

□ F3:1=オモテ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅2 mm×深さ0.7 mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.42)
 □ B7:1=ウラ面に前縁部と後縁部からの距離の比が7:1になるように幅2 mm×深さ0.7 mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.43)
 □ B3:1=ウラ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅2 mm×深さ0.7 mmの溝を掘ったプロペラ(Fig.44)

【結果】1500 rpm ($Re=1.33 \times 10^4$)時と3500 rpm ($Re=3.10 \times 10^4$)時にベースファンよりも効率が上がったプロペラはそれぞれ1種類しかなかったが、2000 rpm ($Re=1.77 \times 10^4$)~3000 rpm ($Re=2.66 \times 10^4$)時には、複数のプロペラがベースファンよりも高い効率を示した。特に低回転域ではF3:1(Fig.42)が、中回転域ではB7:1(Fig.43)が、高回転域ではB3:1(Fig.44)の効率が高くなった。

実験[8] 効率の良いプロペラの両面加工は効果的か？

ここまでの実験により、F3:1とB3:1の効率の良さが目立つため、この加工を両面に施した場合の効率 η^* を調べ、両面加工の可能性を探った。

Fig.45 1500rpmの効率

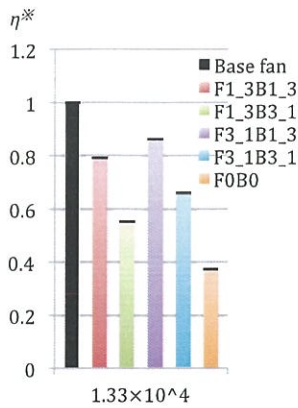


Fig.46 2000rpmの効率

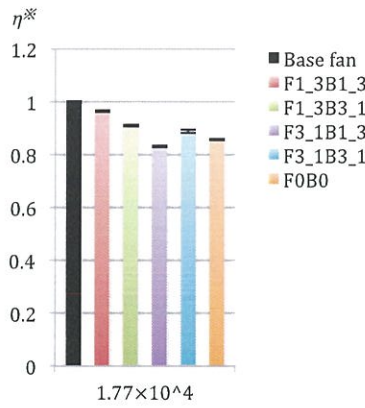


Fig.47 2500rpmの効率

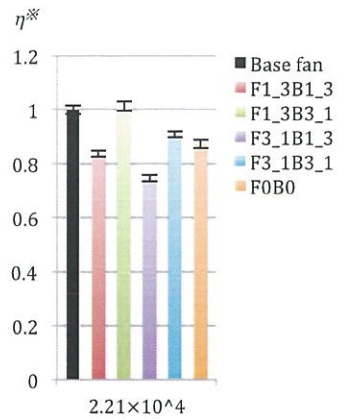


Fig.48 3000rpmの効率

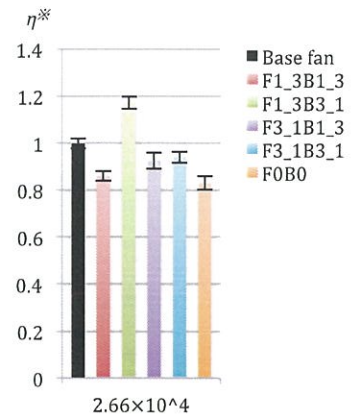
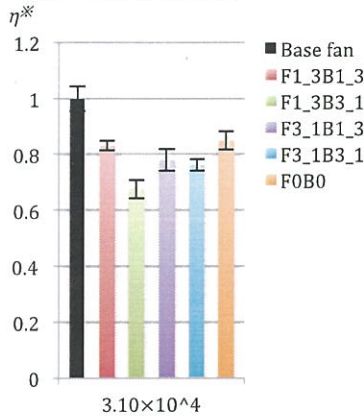


Fig.49 3500rpmの効率



【結果】単独で高い効率を出したF3:1、F1:3、B3:1などを組み合わせて両面加工としたが、ベースファンの効率を超えたプロペラは、3000rpm時のF1:3×B3:1のみだった。しかも、F1:3×B3:1の効率は、実験[7]のFig.40と比べても突出したものではないため、これより両面加工は効果的でないことがわかった。

実験[9] 流れの可視化実験 -1 加工によって剥離点をずらすことで、剥離を抑制できないか？

ここまでの実験で、同じ太さ、同じ深さの溝でも、加工する位置によって効率が変わることがわかった。その理由は剥離点にあると考え、可視化実験によって剥離の様子を観察しようと考えた。実験時のレイノルズ数は、 $Re=1.78 \times 10^4$ とし、風速計測時の2000rpm時のレイノルズ数 $Re=1.77 \times 10^4$ に揃えた。



Fig.50 ベースファンの可視化写真

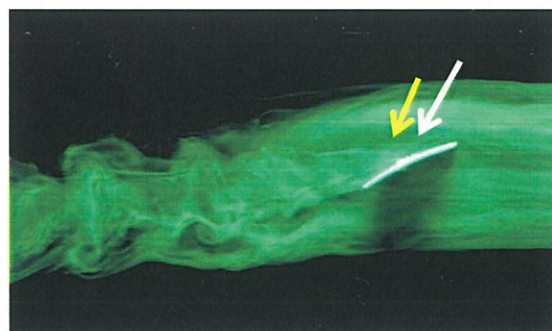


Fig.51 ウラ面に加工したB3:1の可視化写真

□B3:1=ウラ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅2mm×深さ0.7mmの溝を掘ったプロペラ

【結果】ベースファンFig.50は、赤い矢印の地点、プロペラの前縁部から剥離が始まっているのに対し、ウラ面に加工したプロペラFig.44は流れの剥離が遅い(黄色矢印)ことがわかった。また、この時の剥離ポイントは、加工した位置(白い矢印)よりも後方であることもわかった。これにより、プロペラのウラ面に加工を施すことで流れの剥離を遅らせることが可能であり、剥離点よりも前に加工を施せば、効率的に剥離を遅らせることができるともわかってきた。

実験[10] 流れの可視化実験 -2 オモテ面への加工によって、翼端流を抑制できるのではないか？

実験[5]でわかった通り、オモテ面の適切な位置に加工を施した場合、一定のレイノルズ数においては効率が32%も上昇した。これを翼端流が抑制されたことに起因すると考え、その流れを確認するために、風洞を用いて可視化実験を行った。実験時のレイノルズ数は、 $Re=1.78 \times 10^4$ とし、風速計測時の2000 rpm時のレイノルズ数 $Re=1.77 \times 10^4$ に揃えた。

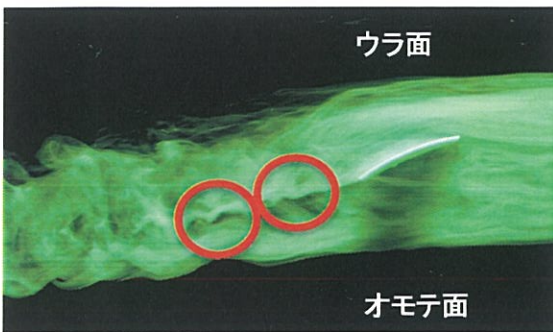


Fig.52 ベースファンの可視化写真

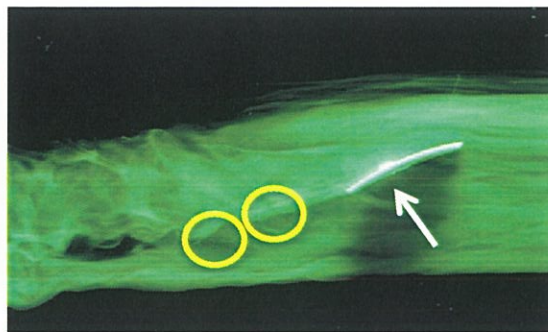


Fig.53 オモテ面に加工したF3:1の可視化写真

□F3:1=オモテ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅2mm×深さ0.7mmの溝を掘ったプロペラ

【結果】 Fig.52のベースファンとFig.53のオモテ面加工のプロペラの後方にできる流れの渦の大きさを比べると、Fig.52はプロペラの幅の2/3程度であるのに対し、Fig.53ではプロペラの幅の1/3程度になっていることが確認できた。加工位置は白矢印の点で、ウラ面には加工を施していないため、実験[9]のような剥離の遅れは生じていないが、オモテ面に加工を施すことで翼端流を抑制できることがわかった。

実験[11] 流れの可視化実験-3 タフトグリッドで流れを確認する

高い効率を示したF3:1とB3:1のプロペラから放出される流れを見るために、タフトグリッドを用いて可視化実験を行った。
・実験に用いたグリッドは、45 cm×45 cm。一つのグリッドに絹糸を3本ずつ垂らし、吹き出される風の流れを撮影した。

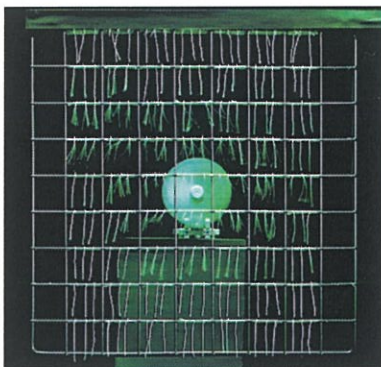


Fig.54 ベースファン1500rpm

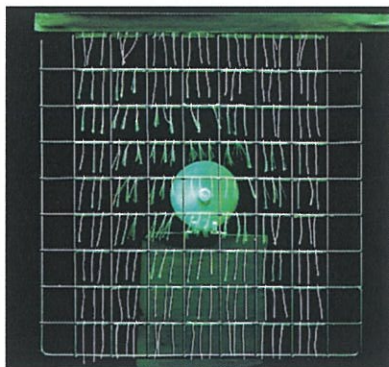


Fig.55 F3:1 1500rpm



左
Fig.56
ベースファン1500rpm



右
Fig.57
F3:1 1500rpm

【結果】 Fig.54～Fig.55は、1500rpm時のベースファンの流れと、F3:1の流れを比較した写真である。正面の写真では、Fig.54のベースファンの方がFig.55よりも広範囲に風が広がっているのがわかる。一方、側面の写真を見ると、Fig.57のように、F3:1の方がタフトが動く角度が大きいことがわかる。これより、F3:1は、風の広がりを抑え、正面に勢いのある風を放出するプロペラであることがわかった。

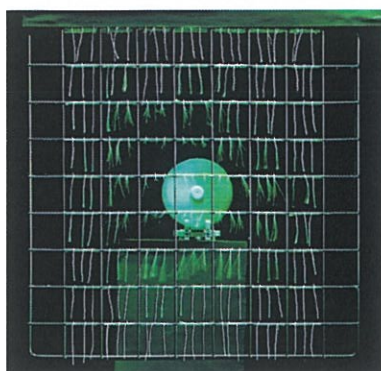


Fig.58 ベースファン3500rpm

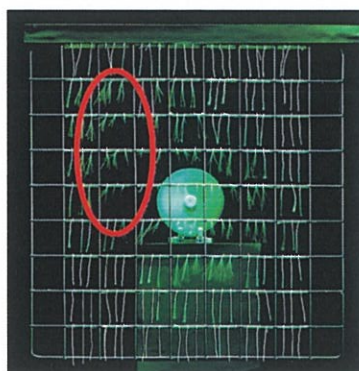


Fig.59 B3:1 3500rpm



左
Fig.60
ベースファン3500rpm

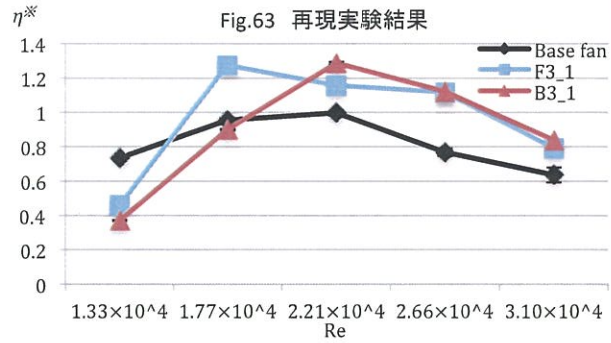
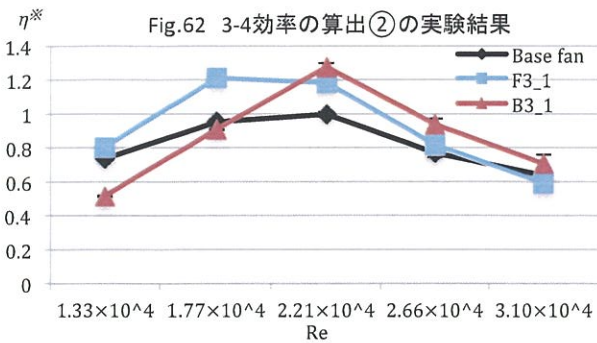


右
Fig.61
B3:1 3500rpm

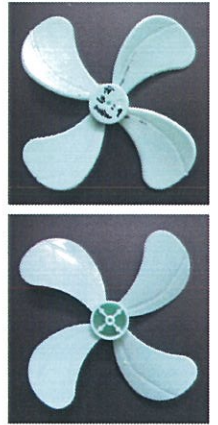
【結果】 Fig.58～Fig.59は、3500rpm時のベースファンの流れと、B3:1の流れを比較した写真である。側面の写真ではベースファンの方が風の勢いが強いように見えるが、正面の写真ではFig.59のB3:1のプロペラの方がFig.58よりも風が広範囲に広がっているのがわかる。これより、B3:1は、風を広範囲に放出するプロペラであることがわかった。

実験[12] 効率が上昇したプロペラを再現する

ここまでの実験でF3:1とB3:1の効率の高さが際立っているため、2枚のプロペラを再度作成し、計測を行って実験[7]の計報で効率を算出した。この研究の加工はすべて手作業で行っているため、加工のムラや誤差が生じやすい。このため、多少の加工ムラがあっても、同じ加工方法であれば効率を上げることができるかどうかを、再現実験で証明する。



【結果】Fig.62とFig.63からわかる通り、それぞれの数値の誤差が極めて小さく、グラフの線形もほぼ同様になった。F3:1は $Re=1.77 \times 10^4$ 時に最大効率を記録するという結果は再現実験でも確認することができ、B3:1は $Re=2.21 \times 10^4$ 時に最大効率を記録するという結果も確認することができた。



上: Fig.64 再現したF3:1
下: Fig.65 再現したB3:1

実験[12] コンピュータファンへの応用

この研究の目的の一つに、実用化につながる加工法を確立したいという思いがあった。そこで、実験時とレイノルズ数がほぼ同じ市販のコンピュータファンを加工し、研究結果を検証した。



Fig.66 実験に使用したコンピュータファン オモテ面

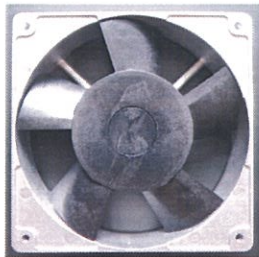


Fig.67 実験に使用したコンピュータファン ウラ面

- ・実験に使用したファン: SANYO DENKI San Ace 120
- ・回転数: 2200rpm
- ・半径5cm地点での回転スピード: 11.5m/s
- ・羽根幅: $3.0 \times 10^{-2} m$
- ・回転時のレイノルズ数: $Re=2.15 \times 10^4$



Fig.68 オモテ面加工

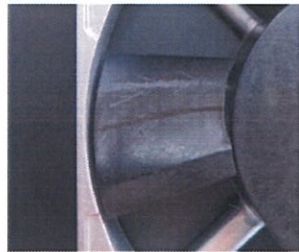
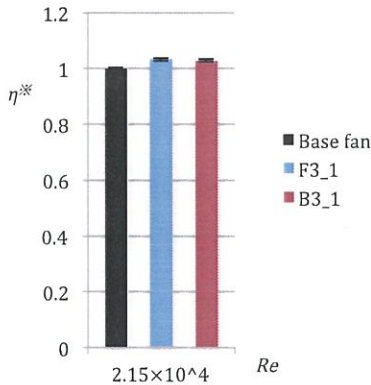


Fig.69 ウラ面加工

Fig.70 加工したファンの効率



金属製のケースの取り外しができないため、オモテ面、ウラ面とも、プロペラの前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように、幅2mm×深さ0.7mmの溝を掘った。この溝の考え方は、F3:1、B3:1と同様である。

【結果】加工を施したコンピュータファンは、未加工のベースファンに比べ、効率が上昇した。オモテ面加工Fig.68は3.3%、ウラ面加工Fig.69は3%の上昇だった。この結果は、この研究で結果が出た表面加工が、プロペラの枚数や形に関係なく有効であることを示していると考えられる。

4. 考察

この研究によって、以下のことが明らかになった。

- ・曲線溝、直線溝に関係なく、比較的プロペラの中心部に近い場所に溝を付けることで、効率を上げることができる。
- ・効率を上げる加工方法は、レイノルズ数ごとに異なる(以上実験1より)。
- ・凸加工は物体に対して極小さい出っ張りである必要があり、現実的には凸加工でプロペラの効率を上げることは難しい(実験2)。
- ・実験に用いたプロペラで効率を上げるためには、1mm以上の幅と0.3mm以上の深さの加工が必要。細すぎる、あるいは浅すぎる溝では効果が出ない(実験3)。
- ・プロペラのエッジ近くに溝を付ける場合は、オモテ面の後縁部への加工の方が効果的である(実験4)。
- ・レイノルズ数が低い場合は、オモテ面への加工が有効である。その理由は、オモテ面に適切な加工をすることで、プロペラのオモテ・ウラ間の圧力差が減り、翼端流の減少につながっているためではないか(実験5)。

- ・加工による重量変化は、効率の上昇に影響を及ぼさない。(実験6)
- ・広い領域の効率を検証することで、低回転域、中回転域、高回転域それぞれで効果的な加工法が明確になった。回転域によって有効な効率方法や効率場所は異なると思われる(実験7)。
- ・両面加工は、ファンプロペラには有効ではない(実験8)。
- ・プロペラのウラ面、剥離点よりも前に加工を施すことで、流れの剥離を遅らせることができる(実験9)。
- ・プロペラのオモテ面に加工を施すことで翼端流を抑制することができる(実験10)。
- ・オモテ面加工をしたF3:1は、風を狭い範囲に送り出している。これは翼端流を抑えることによるものではないか。
- ・B3:1は、風を広範囲に送り出している。剥離を遅らせたことで、風が広がった可能性がある(以上実験11)。
- ・プロペラの加工を手作業で行っているため結果に誤差が生じることは避けられないが、効率が上昇したF3:1とB3:1の再現実験が成功したことで、効率を上げられる加工を証明できた(実験12)。
- ・コンピュータファンへの応用によって、表面加工がプロペラの枚数や形に関係なく有効であることを示すことができた(実験13)。

以上より、表面加工によってファンプロペラの効率を上げる鍵は、剥離の制御、翼端流の抑制にあるのではないかと考えた。翼端流はプロペラの前から後ろへと流れる流れであり、この流れはプロペラのオモテ面とウラ面の圧力差が原因で生じる。翼の集合体というプロペラの構造によって生じるこの流れを減らすことができれば、プロペラから前へ吹き出される風も多くなり、効率がより上がるのではないかと推測したのだ。

F3:1のプロペラで効率が上がった原因は、プロペラのオモテ面への加工が風の流れを滑らかにし、それによってプロペラのオモテ面とウラ面での流れの速さの差が減り、圧力差が小さくなって翼端流が小さくなるというプロセスだと考えている。また、B3:1のプロペラで効率が上がった原因は、ウラ面の流れの剥離を防ぐことで、1回転あたりに前へと送り出せる風量を増やすことができたことだと考えている。

この実験で特に効率の上昇が認められると考えられた加工は、レイノルズ数によって異なってくることもわかった。範囲は限定的になってくるが、表面加工で流れを変えることは可能だと証明できた。この研究成果は、さまざまなプロペラファンに応用が可能だと考えている。

5. 結論

ファンプロペラは、シンプルな表面加工によって効率をアップさせることが可能である。

- 特定の領域の効率では、オモテ面に前縁部と後縁部からの距離の比が1:3になるように幅2 mm×深さ0.7 mmの溝を掘ったF3:1で32%、ウラ面に前縁部と後縁部からの距離の比が3:1になるように幅2 mm×深さ0.7 mmの溝を掘ったB3:1で21%の効率上昇を達成した。
- 広い領域の効率では、F3:1が $Re=1.77 \times 10^4$ 時に26%、B3:1が $Re=2.21 \times 10^4$ 時に27%の効率上昇を達成した。
- この加工方法をコンピュータファンに応用し、コンピュータファンでも3%の効率上昇を達成することができた。

今後は、さらにレイノルズ数に合う加工方法や加工サイズを追求し、扇風機や工業製品などのプロペラにもこの研究を生かしていきたい。

6. 謝辞

進めれば進めるほどハードルが高くなっていく研究ですが、多くの方にご指導とご協力をいただき、一つずつハードルを越えながら研究を進めることができました。研究全体においてさまざまな質問に答えてくださった筑波大学の吉田恭先生、尾嶋好美先生、院生の中嶋慧さん、名古屋大学の木村芳文先生、適切なアドバイスをくださった東北大学の安藤晃先生に感謝いたします。また、モーターの制御について詳しく教えてくださったmaxon社の久松様、可視化の実験にご協力くださった株式会社スタジオワークと松本龍二カメラマンにも大変お世話になりました。心からありがとうございました。

<参考文献>

- ※1. 専門基礎ライブラリー 流体力学 シンプルにすれば「流れ」がわかる 2009年3月27日発行 金原稔 築地徹浩 青木克己 川上幸男 君島真二 桜井康男 清水誠二
- ※2. 空気調和機用プロペラファン、特許公開番号1995259795
<https://rdnlite.navi.cybernet.ne.jp/patent?pubNo=1995259795>
- ※3. 日本機械学会論文集B編 第725号・2006年3月 小型軸流ファンの性能と騒音に関する実験的研究 伊藤孝宏 御法川学 長松昭男 鈴木昭次
- ※4. シャープ技報 第105号・2013年7月 生物模倣応用による家電製品の価値創造 大塚雅生 公文ゆい
- ※5. ターボ機械 第480号・2015年1月 空調用プロペラファンの効率向上技術に関する開発事例 鄭志明
- ※6. 日本機械学会論文集 第774号・2011年2月 小型軸流ファンにおける翼周り流れの数値解析 笹島知佳 川口清司
- ※7. 三菱電機 換気送風機用低騒音プロペラファン 2016年8月9日
<http://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/spotlight/spotlight19.html>
- ※8. 日本機械学会講演文集 第114号・2011年3月 生物模倣学「鳥の翼の平面形」応用による高効率・軽量型プロペラファンの開発 大塚雅生
- ※9. 日本機械学会論文集B編 第727号・2007年3月 プラズマアクチュエータを用いた翼前縁はく離の制御における位置および個数の影響 椿野大輔 田中義輝 藤井孝藏

- ・流体力学 流体力学、気体力学、空気力学実験 E.クラウゼ著 大島耕一監修 丸善出版
- ・空気力学入門 一般社団法人日本航空宇宙学会編 李家賢一、新井隆景、浅井圭介著 丸善出版