

3-4 室外ファンの静音化

(二次元翼周りの乱流特性)

工学部・機械システム工学科

高野 剛

1. はじめに

室外機の騒音は、コンプレッサーによる騒音と送風ファンによる騒音の二つの発生源がある。ファンによる騒音の直接的な発生源は①翼に対する流体の流入乱れ、②翼面上における境界層剥離、③翼後縁における放出渦、④翼表面上における圧力変動等が、原因とされている^{(1)~(7)}。乱流騒音は、流体の圧力変動⁽⁸⁾と大小さまざまな渦の混在が乱流騒音の原因となる。乱流騒音の中で音圧に対する寄与率の高い周期性騒音は、Grosche らにより回転翼においても観測されており、工学的見地からも興味深い現象と考えられる。Tam が実験的裏付けなしに提案したフィードバックループ仮説「後流中にフィードバックループが形成される」と秋下のフィードバックループ仮説⁽⁵⁾「後縁直後の強い乱れと翼負圧面の層流はく離バブル再付着点後の乱れとの間に形成されるフィードバックループ」が、提案されている。新形ファンは、既存のファンに比べ騒音値で 1.5dB (31.6%) 低減できた。新形ファンは翼先端部より 9mm 下流位置の正圧面側と負圧面側にリブ (トリップワイヤ) を付けた翼である。既存のファンが発生する周期性騒音のメカニズムについては、現在も明確にされていない。製品の翼周りの乱流諸量を測定することは、翼が回転しているため大変難しい。回転するファンは、無限に翼列が続く状態と同じことから直列二次元翼モデルを採用する。ファンの翼と同じ翼長の既存の直列二次元翼モデルと直列二次元新形翼モデルを比較検討する。負圧面(裏面)の流れについては前縁はく離を起こし、前縁より約10mm下流によどみ点が見られ、20mm付近で再付着することは従来の研究によれば「層流はく離バブル」と呼ばれている。このことについては確認済みである。正圧面上に置かれたリブが、境界層はく離に及ぼす影響について検討する。それが翼後流域の周期性放出渦に及ぼす影響に深い関わりを持つ時間平均速度・速度変動の二重相関・速度変動の多重相関 (Skewness: 確率分布のゆがみ, Flatness: 確率分布の偏平度)・速度変動のパワースペクトルおよび速度変動の2点二重相関などの測定結果を提示し、併せてこれらの乱流特性について考察する。

主な記号

t : 時間	u : 速度の変動
(X, Y, Z) : 座標	$S(u)$: u の Skewness
U : 時間平均速度	$F(u)$: u の Flatness
U_m : 主流部時間平均速度	$\overline{u^2}$: u^2 の時間平均値

2. 実験装置と実験

本研究に用いた実験装置の風洞は、図1に示す。この部分は閉回路型風洞に組み込み、水平に据え付けてある。絞りと加熱部を通過した空気は一樣な速度と温度に整流された後、長さ2100mm、縦300mm×横300mmの断面を持つ測定部へ導かれる。実験風洞内の二次元翼は、翼長250mm、幅130mm、厚さ3mmアクリル樹脂製の直列二次元翼である。新形翼モデルのリップについては、製品翼と同寸法の幅3mm、高さ3mmを翼先端部より9mm下流位置に取り付けた。流線と二次元翼の角度は、製品翼の回転時における流体と翼の迎え角と同じ、 -5° の正圧面（表面）に傾けて設置した。

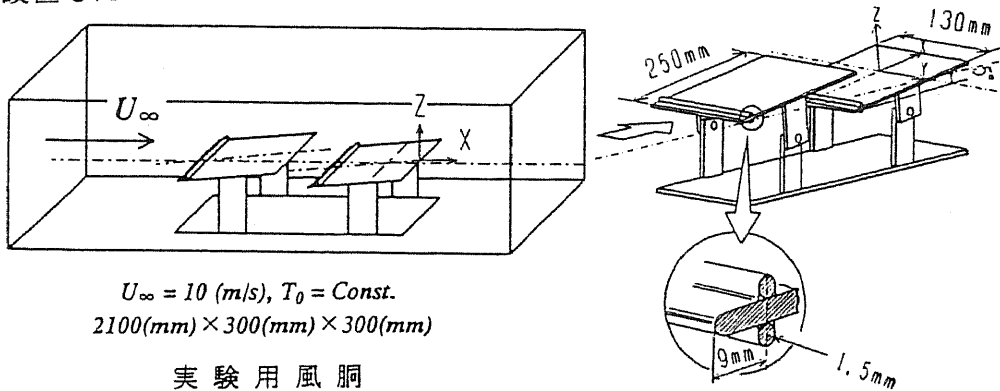


図1 実験装置

実験は、室外機の軸流ファン平均速度と同じ平均速度 10m/sについて行い、定温度形熱線風速計を用いて直列二次元翼周りを測定した。速度変動の測定には、直径 $3.1\mu\text{m}$ のタングステン線を有効長約 0.4mmを残し直径約 $40\mu\text{m}$ に銅めっきした熱線を、先端を細くとがらせた直径 0.3mmのマンガン線にはんだ付けしたプローブを用いた。速度変動の相関は、データの信頼性を得るためにサンプル周期 9KHz、サンプル個数 42万個のデータを一つのデータとした。速度変動の周波数（スペクトル）解析は一度 TEAC DATA レコーダーに録音してから解析を行った。測定は、前翼の先端部から水平線を延長し後翼正圧面上で交差する点を翼面上における正圧面上のX軸の0とし、上流方向へ $X=-150\text{mm}$ 下流方向へ $X=+90\text{mm}$ 翼面をZ軸0とし、翼面から垂直に $Z=0.5\text{mm}$ 、 $Z=5.5\text{mm}$ の位置で測定した。後翼の後流域では、翼厚さ 3.0mmの中心を垂直方向のZ軸0とし、翼端面を下流方向のX軸の0とし、 $X=5\text{mm}$ 、 $X=10\text{mm}$ の距離で、垂直方向 $Z=-7\text{mm}$ 、 $Z=+7\text{mm}$ の範囲で行った。

3. 実験結果と考察

3.1 時間平均速度

時間平均速度分布は図2・3に示す。既存の翼モデル（以後 R,Nと表示する）における翼面上 $Z=0.5$ の無次元平均速度 U/U_∞ は前縁付近をのぞいて、0.5m/s前後の変動を持つ速度分布である。翼面上 $Z=5.5$ の平均速度は前縁付近でわずかに高くなり、後縁より20mm前方まで全く変化なく後縁より

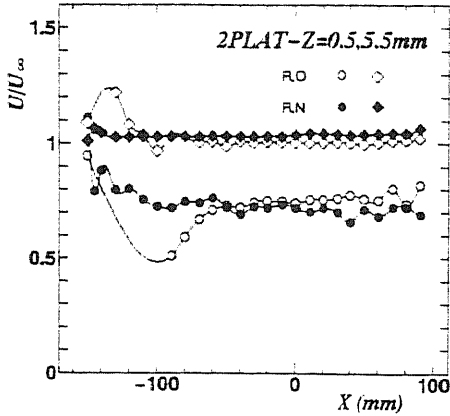


図2 翼面上の時間平均速度分布 (U/U_∞)

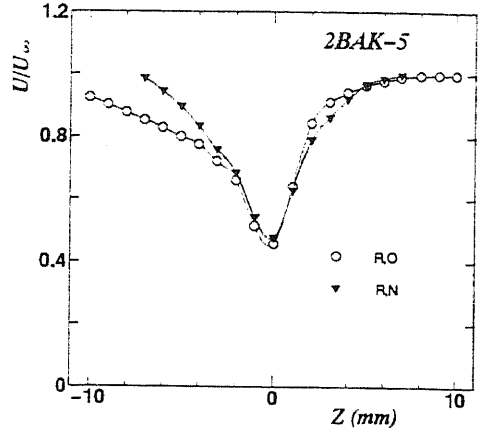


図3 翼後流の時間平均速度分布 (U/U_∞)

10mm前方で 0.2m/s 程度高くなる速度分布である。新形翼モデル（以後 R,0 と表示する）の翼面上 $Z=0.5$ の平均速度は前縁付近で R,Nと同じ平均速度を示し、リップの後流では低い平均速度を示し徐々に高い平均速度へ発達する。それは乱流境界層の平均速度へと発達したことがうかがえる。翼面上 $Z=5.5$ の平均速度は前縁付近でリップによって、盛り上がるように加速されて大きくなり、以後安定した平均速度である。R,N と R,0の翼後流域の翼に近い $X=5, Z=0$ での平均速度は、翼端で速度欠損を受けて最も低い平均速度である。Z 軸+方向は正圧面で加速を受けた流体が対流によって輸送されるため高い平均速度となり、大きな速度勾配を持つ平均速度分布である。それに対して、Z 軸-方向は負圧面の翼の陰に入り減速を強く受けた流体が輸送されるため低い平均速度で、緩やかな速度勾配を持つ平均速度分布である。翼後流域の時間平均速度分布は非対称である。

3.2 速度変動の二重相関 R,N とR,0 の翼面上・翼後流における速度変動の二重相関 $\overline{u^2}(\text{m/s})^2$ は図4・5に示す。R,N の $Z=0.5$ の u の二重相関は翼先端付近で境界層の発達過程のため層流境界層と考えられる小さな値を示す。遷移層で

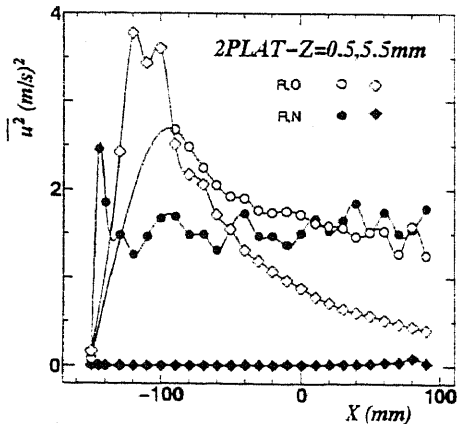


図4 翼面上の速度二重相関 $\overline{u^2}(\text{m/s})^2$

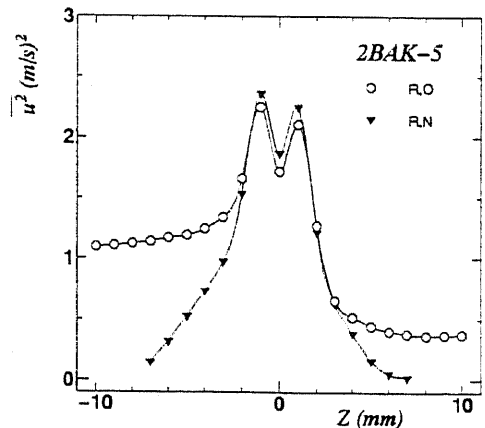


図5 翼後流の速度二重相関 $\overline{u^2}(\text{m/s})^2$

は大きな値を持ち乱流境界層へと発達する。それは変動しながら翼後縁へ移行する特徴を示す速度変動の二重相関分布である。R,0 の $Z=0.5, 5.5$ の u の二重相関は翼先端付近でリブの陰に入り小さな値を示すが、遷移層では突出した値を示す。乱流境界層が発達するにつれて小さな値を示す。翼後流の R,N と R,0 の u の二重相関は速度勾配の大きい $Z=-1, +1$ で最大値を示し、速度欠損の起こる $Z=0$ は落ち込む大きな値である。ここでは速度勾配が 0 となることから速度変動の生産はなく、速度勾配の大きい $Z=-1, +1$ の位置からの拡散により大きな値となる。その他の領域において、R,N より R,0 が大きな二重相関値を示す。

3.3 速度変動の多重相関 翼面上・翼後流における乱流の組織的構造を支配する境界層剥離の様子は流れ方向速度変動の三重相関 $\overline{u^3}$ やその Skewness $S(u)$ または速度変動の四重相関 $\overline{u^4}$ やその Flatness $F(u)$ を測定することにより、間接的に調べられる。図 6 に翼面上の u の Skewness $S(u)$ を示す。Skewness は式 $(S(u)=\overline{u^3}/(\overline{u^2})^{3/2})$ で求められる。R,N $Z=5.5$ の $S(u)$ は前縁で 0 の値を示し、 $X=-100$ で正の値を示す。 $X=-50$ より負の値を示し変動を繰り返しながら、 $X=70$ で負の最大値を示す。それはその場の速度より低い速度を持つ流体塊が、境界層の内部より突発的に飛び出してくる現象を意味する。R,0 $Z=5.5$ は前縁で突発的な速度変動を示すが、後縁に向かうに従って 0 の値に近づく。これは突発的な速度変動がないことを意味する。図 7 に翼後流域の u の Skewness $S(u)$ を示す。R,0 の $S(u)$ は 0 に近い値を示す。それに対して、R,N は $Z=-7, 6$ で負の最大値を示すほぼ対称な $S(u)$ である。 $Z=6$ で大きな負の値を示すのは翼面上から突発的に低い速度の流体塊が飛び出し、翼後流域へ対流により輸送されたと考えられる。図 8 に翼面上の u の Flatness $F(u)$ を示す。Flatness は式 $(F(u)=\overline{u^4}/(\overline{u^2})^2)$ で求められる。R,N の $X=20$ より後縁まで $F(u)$ が突然大きな値を示す。この速度変動の大きな値は境界層はく離現象の存在を示唆する。それは速度変動を度数分布に表したとき正規分布であるならば $F(u)=3$ となり $F(u) \gg 3$ の場合には、振幅の大きな

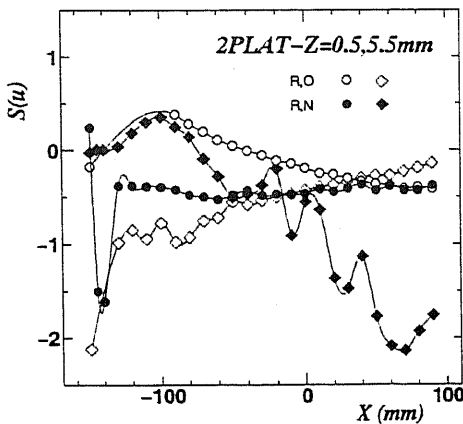


図 6 翼面上の Skewness

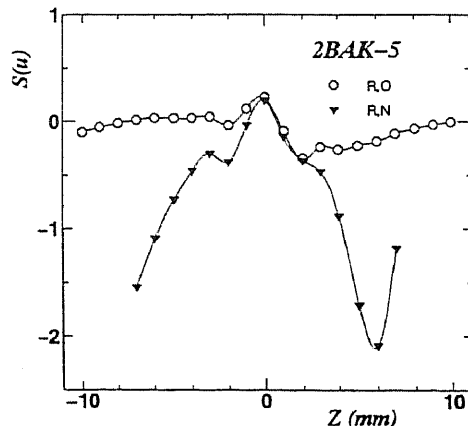


図 7 翼後流の Skewness

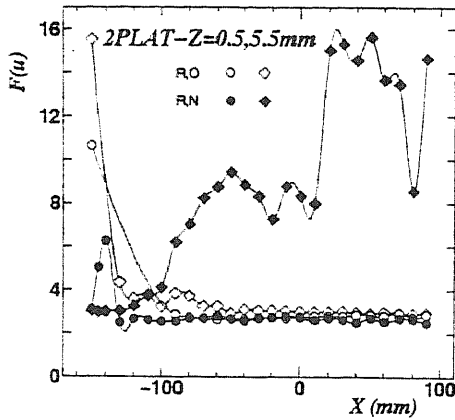


図8 翼面上の Flatness

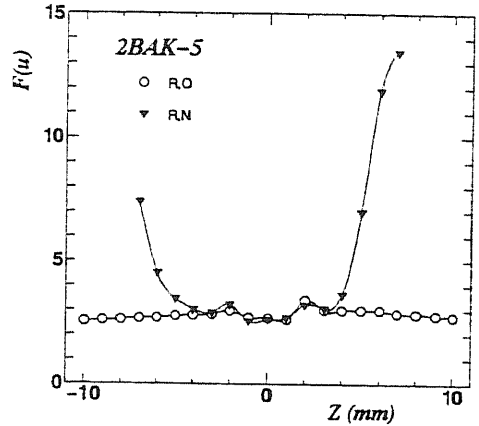


図9 翼後流の Flatness

速度変動が多く偏平形の度数分布であることを意味する。R,0 の翼前縁における速度変動の振幅は大きい。それ以降の $F(u)$ は3の値を示す。図9に翼後流域の u の Flatness $F(u)$ を示す。R,N の $Z=-7$ で大きな値を示し $Z=7$ で最大値を示す。翼面上で発生した境界層はく離渦が対流によって、翼後流域へ輸送されたと考えられる。R,0 の Flatness は全領域で正規分布に近い値を示す。

3.4 パワースペクトル・2点二重相関 R,N の翼面上の速度変動のパワースペクトルは $Z=5.5, X=7, 8$ において大きな値を示す平均周波数は 869.7Hzであった。速度変動のパワースペクトルを図10に示す。翼後流域に発生する周期性速度変動の周波数は869.57Hzである。それらは境界層はく離が、翼後流域に発生する周期性速度変動を励起することを示唆する。R,N $X=5, Z=1$ の速度変動のパワースペクトルは、 $20.5(\text{m/s})^2$ であるが、R,0 の速度変動のパワースペクトルは、 $14.9(\text{m/s})^2$ で 27.3%の低減である。新形ファンは、既存のファンに比べ騒音値で 1.5 dB(31.6%)の低減であった。以上のことから直列二次元翼の信頼性は高い。翼後流域における速度変動の2点二重相関(時間差の二重相関)を図11に示す。相関

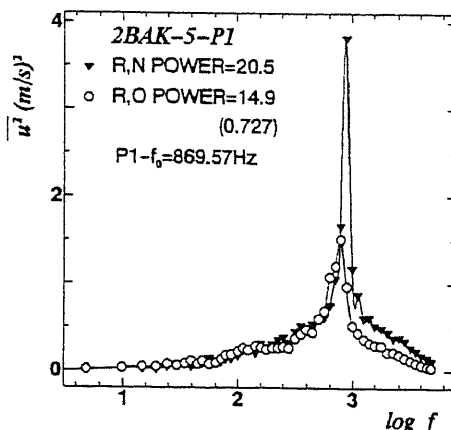


図10 翼後流のパワースペクトル

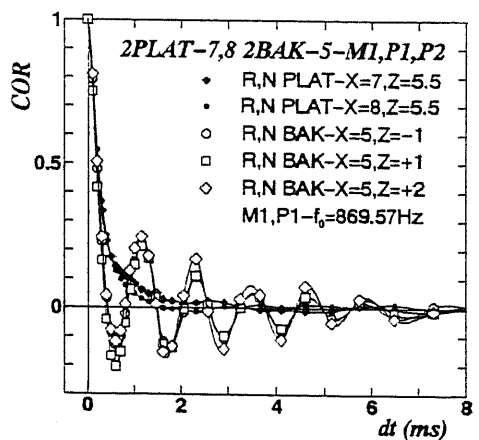


図11 翼面上・後流の2点二重相関

係数は $X=5, Z=+2$ において $+0.246(dt=1.15ms)$ の大きな値を示す。 $X=5, Z=+1$ の相関係数は $+0.213(dt=1.15ms)$ で、 $X=5, Z=-2$ の相関係数は $+0.218(dt=1.15ms)$ である。このように翼後流域における速度変動の 2 点二重相関係数が局部的に $869.57Hz$ の同じ周期の高い相関を示す。それらに対して、翼面上の 2 点二重相関係数は単調に減少するだけである。以上のことから、翼後縁で発生する周期性速度変動は正圧面の翼後縁から 25% の範囲で発生する周期性境界層はく離に励起される。周期性速度変動は一度発生すると Tam が実験的裏付けなしに提案したフィードバックループ仮説「後流中にフィードバックループが形成される」に従う。翼後流域における速度変動の 2 点二重相関は、 Tam が提案した「フィードバックループ仮説」を実験的に立証するものである。しかし、翼後流域の周期性速度変動と圧力面に発生する周期性境界層はく離の間には、フィードバックループの形成は存在しない。

4. まとめ

既存の二次元翼モデルとリブ付き翼モデルの翼周りの時間平均速度・速度変動の二重相関・速度変動の多重相関 (Skewness: 確率分布のゆがみ, Flatness: 確率分布の偏平度) ・速度変動のパワースペクトルおよび速度変動の 2 点 2 重相関等の乱流特性によって得られた知見はつぎのように要約される。

- (1) 翼後縁で発生する周期性速度変動 ($869.57Hz$) は正圧面の翼面上の後縁から 25% の範囲で発生する周期性境界層はく離 ($869.7Hz$) により励起される。
- (2) 翼後流域における速度変動の 2 点二重相関は、 Tam が実験的裏付けなしに提案した「フィードバックループ仮説」を実験的に立証するものである。
- (3) 翼後流域の周期性速度変動と圧力面に発生する周期性境界層はく離の間には、フィードバックループ形成は存在しない。
- (4) リブのない直列二次元翼に対してリブ付き直列二次元翼の後流域に発生する速度変動のパワースペクトルは、27.3% の低減であった。新形ファンは、既存のファンに比べ騒音値で 1.5dB (31.6%) の低減があったので直列二次元翼の信頼性は高い。

文 献

- (1) 深野・ほか 2 名, 機論, 41-345, B (昭50), 1479.
- (2) 深野・ほか 2 名, 機論, 43-375, B (昭52), 4168.
- (3) 秋下・ほか 2 名, 機論, 44-387, B (昭53), 3797.
- (4) 秋下, 機論, 47-418, B (昭56), 947.
- (5) 秋下, 機論, 47-424, B (昭56), 2243.
- (6) 深野・ほか 3 名, 機論, 51-468, B (昭60), 2505.
- (7) 深野・ほか 3 名, 機論, 51-469, B (昭60), 2828.
- (8) von J. C. Rotta., TURBULENTE STRÖMUNGEN, B. G. Teubner, Stuttgart, (1972)