軸流ファン構造の斜流ファンの設計における可視化手法の応用

島田 行太[○], 萩原 久雄, 坂井 耐事, 大山 耕一
(東洋ラジエーター(株))

Application of Visual Results for Design of Mixed Flow Fan which has an Axial Flow Fan Structure

Kota SHIMADA, Hisao HAGIWARA, Taiji SAKAI, Koichi OHYAMA
(Toyo Radiator Co., LTD)

ABSTRACT

Low pressure axial flow fans without stator blades or guide vanes are generally used in order to achieve light weight, low cost and a simple structure, and to conserve space when mounted for automobile cooling system. However, since flow resistances in front and back of the fan are very strong, air tends to flow diagonally at the fan outlet side. The fan does not operate as an axial flow fan. In this report, we describe work conducted on a motor fan, mainly from the standpoint that analysis and improved understanding of actual air flow conditions lead to improved design. As for the measurement of air flow at the outlet and inlet side of the fan, the five hole-pitot tubes were used. And the reverse flow area was visualized to adhere tracer particles which are in the air flow to the pressure surface of the blades. As a result, we could predict the air flow among fan blades and portion and shape of the reverse flow area. These data were useful for designing the mixed flow fan which has the structure of an axial flow fan.

Key words: Blower, Axial flow fan, Pitot tube, Tracer particles, Three-dimentional flow

1. はじめに

低速・低流量係数の軸流ファンでは、設計点よりも高い負荷で運転された場合に翼根元近傍の流路内に部分的に逆流が発生し、それが斜流ファンの円錐状ハブと同様の効果を持つことによって斜流ファンとして作動する場合がある¹⁾。従来より、ファン内部に発生する逆流はエネルギー損失を伴い、性能低下を招く現象として敬遠されてきた。しかし逆に、この現象は積極的に設計へ応用すると、軸流構造の斜流ファンが設計可能なことを示すものである。よって、簡易な構造・軽量・安価など軸流ファン構造の利点と、軸流ファンに比べて高負荷・低回転・低騒音など斜流ファンの特徴を合わせ持つファンの設計が可能となることを示唆している。逆流の設計への応用に際しては、逆流がファン内部の流れ状態、安定性、性能、作動範囲、騒音などに及ぼす影響を調べ、従来の軸流設計によるファンの場合と比較検討することが必要である。その為には逆流現象の発生及びその範囲を把握することが不可欠であり、ファン入口出口の流れの計測と同時に、可視化による逆流現象の発生及びその領域の確認が重量な役割を担った。

本報では可視化の設計への応用例として、自動車用エンジン冷却系のファンの場合について設計試作・実験研究を実施した。その結果、実際の流れと斜流設計による設計流れとが良く一致を示し、良好な性能が得られた。

2. 軸流ファンの特性と逆流現象

図1¹⁾は、低圧軸流ファンの典型的な圧力-流量特性と、特性曲線上の代表的な作動点における円周方向に平均した翼列内部の子午面流れ状態を示す。図1(a)は特性曲線上に極大値(C点)と極小値(B点)を有する場合である。この両極値B-C間はいわゆる右上り特性を持つ不安定な作動領域であり、安定な作動範囲はC点よりも流量の大きな領域に限定されてしまう。図1(b)は右上り特性の領域がなく、広い作動範囲を有する場合である。両特性の相違を決定づけているのは、子午面流れの状態図に示されるような、流路内に局所的に発生する循環を伴う逆流域の存在である。流量を設計点Dから漸次減少させた場合、逆流域は図1(a)ではまずファン翼先端の入口近傍に発生しており、図1(b)では翼根元の出口近傍に発生している。

さて、安定作動範囲の広い図1(b)のファンの場合、

翼根元の出口近傍に逆流域の発生している作動点Eでは、ファン内部の主流は翼根元部の逆流域を避けて外径側へ方向を変え斜流となって翼列内を通過している。即ち、斜流ファンと同様の流れ状態となって作動しており、逆流域は一般の斜流ファンが有する円錐状のハブと同様の役目を果たしていることがわかる。従って本研究では、このような斜流効果を発揮する場合の逆流域を特に“空力的な斜流ハブ”と名付けることとした。軸流設計され、設計点D及びその近傍では軸流ファンとして作動しているファンが、低流量の作動点E及びその近傍では逆流域の発生によって斜流ファンとして作動している。このことは、視点を変えてみると、空力設計の段階において翼根元部に逆流域を発生させ、空力的な斜流ハブを形成するよう計画すると、ハブ径が一定である軸流構造の斜流ファンが設計可能であり、かつ設計点よりも流量の大きい作動点では軸流ファンとして作動し得ることを示唆している。

Fig.1 Performance Characteristics and Flow Pattern on the Meridian Plane

3. 試作ファンの設計及び試験・計測装置

3.1 試作ファンの設計

本研究では設計試作の対象として自動車用エンジン冷却系のファンを選定した。これらのファンは、前述の如く一般に軸流構造のファンが採用され、設計においても軸流ファンとして取扱われて来た。しかし実際の使用状態では、設計点よりも高負荷・低流量の作動領域で運転される場合があり、ファンの入口では軸流、出口では斜流の流れ状態となっている。すなわち、いわゆる斜流ファンの状態で作動していることがしばしば存在する。このような場合、前節で述べたように空力的な斜流ハブの形成を応用し軸流構造の斜流ファンとして設計すると、軸流ファンの場合よりも実際の使用状態に適応した設計が可能となり、ファンの性能向上・低回転・低騒音化など期待できる。

試作ファンは二種類設計され、試作ファンAは軸流設計による軸流ファンであり、試作ファンBは斜流設計

による軸流構造のファンである。両ファンは設計法の比較を明確にする為、各ファンの設計を特徴づける各設計断面での翼の反り、食い違い角及びファン回転数など以外は、構造・形状など全て共通とした(図2)。両ファンは外径 300mm, 内径 111mm, NACA 65 系を用い回転方向は反時計回りである。

Fig.2(a) Prototype Fan A Fig.2(b) Prototype Fan B

まず設計方針として、ファンAは通常の軸流設計とし、従来通り図3に示す様な、低速登坂走行時抵抗曲線上に所要の作動点を定め、設計点の流量と圧力を設定した。その理由は、低速登坂走行時のエンジンの熱負荷が最も高い場合が多く、ファンの性能が特に要求されるからである。又、より圧力の高い停車時抵抗曲線上の作動点においても、従来より軸流ファンの設計点外の低流量域での性能改善に関する研究¹⁾が行われて来ており、この領域での圧力を維持することは比較的容易である。このことも本作動点を設計点とする理由の一つである。

次に、ファンBの設計点は、停車時抵抗曲線上においた。その理由は、近年停車時のファン騒音は問題となっており、特に騒音の観点から停車時抵抗曲線上におけるファン性能全般の改善が、無視出来なくなってきた為である。又、ファンAと同一の作動点における比較を容易にする為、この抵抗曲線上のファンAの作動点をファンBの設計点とした。しかし、低速走行時抵抗よりも高い圧力の所へ設計点を設けることになるファンBの場合、前節でも述べたように空気は斜流方向に流れはじめ、そもそも軸流ファンとしての設計が難しくなって来る。

Fig.3 Design points of Fan A and Fan B, and Performance Characteristic of Fan A

その為ファンBの設計手順としてまずファンAの設計試作・試験計測を実施し、性能・内部流れの計測及び流れの可視化を行った。これより設計点での性能・流れ状態を確認すると共に、ファンBの設計点に指定される作動点での計測及び可視化結果より、翼根元部の逆流域の確認及びその発生条件を検討することにした。

設計としては、翼根元部における逆流の発生条件及び逆流域を推定し、空力的な斜流ハブを利用した斜流ファンの設計を目指した。この斜流設計により、遠心力の影響を考慮し、一般的な軸流設計と比較してより高圧な領域での設計が可能となる。よって結果的にファンは、設計上高負荷となり得る。

3.2 試験装置及び方法

使用した試験装置及び計測項目は以下の通りである。

- ・試験用風洞：流量、ファン入口出口の圧力、ファンの軸動力などファンの全般的な性能計測。
- ・五孔ピトー管：ファン入口出口の流れの三次元的な計測。ファン入口側では、入口流れを乱さぬよう小径のアロー形五孔ピトー管を、出口側では大きな流れ角度に対応可能な、リンク機構によりピッチ方向にプローブ先端が可動な、首振り式球形五孔ピトー管を用いた。
- ・熱式流速計：逆流及び微少な流速域の計測は、ピトー管では精度上の限界があり計測が難しい。よって、ピトー管による計測の補助として、直径2 mmのアルミ球を風速感知部に有する熱式流速計を用いた。
- ・可視化装置：トレーサーの噴霧による逆流域の確認の為、ファン入口出口の流れを乱すことの無い、直径1 mmのノズル部を有するトレーサー噴霧器を用いた。

翼間流路内に発生する渦や逆流を、直接明確に解析或いは可視化することは容易ではない。従ってここでは、ピトー管による流れ計測とトレーサーによる可視化の結果より判断して、流線曲率法による空力設計に必要なデータ即ち翼間流路における主流と逆流域の形状・範囲を得ることに限定した。可視化は液状アクリル樹脂のトレーサーを流れの中に噴霧し、このトレーサー粒子が翼の正圧面に付着する状態より、逆流域の有無及び形状を判断することにした。トレーサーはファン入口では赤色を、出口では黒色をのものを、主流と逆流の判別を容易に行えるようにした。さらに、翼面には酸化チタンによって白色に着色された微量のオレイン酸を含む流動パラフィン塗布して、トレーサー粒子が付着し易くかつ鮮明な色調となるようにした。又、トレーサーの噴霧は翼間の流れに影響を与えることの無いよう、噴霧の流速を入口側ではファン直前で入口流量よりも遅い3 m/s、出口側ではファン直前で逆流速度と同等以下の1 m/sとなるよう噴霧圧力を調整した。尚、噴霧器の噴射広がり角度は約20度である。

ピトー管による入口出口の流れ計測位置を図4に、可

視化実験での入口出口のトレーサー噴霧位置を図5に示す。

Fig.4 Position of Pitot-Tubes for Flow Measurement

Fig.5 Position of Spray Nozzles for Visualization

4. 試験及び計測結果

4.1 ファンAの計測結果

ファンAのそれぞれの作動点における流れ状態、及び逆流域の可視化結果を図6に示す。翼面に現れた黒色の三角形状の部分は、翼の正圧面に付着したファン出口側から噴霧された黒色トレーサーによるもので翼根元部の逆流域を示す。設計点流量 $Q^*=25\text{m}^3/\text{min}$ では設計通り軸流流れであり、逆流域は認められない。ファンBの設計点と同じである停車時抵抗曲線上での作動点の流量 $Q=19\text{m}^3/\text{min}$ では、翼根元出口側に逆流域が発生し斜流ファンとして作動していることが判る。

4.2 逆流域の予測

逆流域は、複雑な流れ場によって形成されていると思われる。厳密に解析によって求めることは容易ではない。よって近似的な方法として、図6の可視化の結果より図7の如く単純にモデル化し、点ABCで囲まれる三角形の領域を逆流域とみなしA点・B点を求めると逆流域の予測が可能となる。A点については、ファン翼によって作動流体に加えられる軸方向力と、ファン入口と出口の軸方向速度差及び圧力差との平衡関係より、出口軸流速度 $C_{z2}=0$ の条件を満たす半径位置がA点として求まる。すなわち、それよりも内径側では $C_{z2}<0$ となって逆流の範囲となる。又、B点については、

翼根元部において翼出口より逆流する量と、翼が逆流を押し戻そうとする量は等しいという連続の条件より求めることが出来る。このようにして求めたA点・B点は、ファンAの可視化の結果と良く合っており、この手法をファンBの設計に適用することとした。

Fig.6 Flow Analysis and Visualization of Fan A

Fig.7 Flow Pattern on the Meridian Plane

4.3 ファンBの計測結果

ファンBは、前述の逆流域の推定法により求めた逆流域を空力的な斜流ハブとみなし、斜流ファンとして設計した結果、ファンAよりも15%低回転にて同等の性能を得る設計が可能となった。図8にファンA及びファンBの性能を示す。両ファンはいずれも設計点で良好な特性を示し、全般的に同等の性能を示した。図9にファンBの各作動点における流れ状態及び逆流域の観測結果を示す。翼面に現れた翼根元の逆流域以外の微小斑点の点在する部分は、ファン入口側から噴霧された赤色トレーサーによるもので主流の流路を示す。設計点流量 $Q^* = 19 \text{ m}^3/\text{min}$ では、逆流域が発生して斜流ファンとして作動している。この時、空力的な斜流ハブと呼ばれる逆流域は、設計の段階で力学的な平衡関係より求められた領域とほぼ等しく、かつ主流を成す斜流はほぼ設計流線上を流れていることがこれらの解析より明らかとなった。さらにファンAの設計点に近い流量 $Q = 23 \text{ m}^3/\text{min}$ では軸流ファンとして作動している。

Fig.8 Performance Characteristics of Fan A and Fan B

Fig.9 Flow Analysis and Visualization of Fan B

5. おわりに

- (1)トレーサーを用いた簡易的な可視化手法を用いることによって、翼根元部正圧面の逆流部位を可視化することが出来た。
- (2)この可視化手法とピトー管によるファン入口出口の流れの三次元計測を組合せることにより、ファン翼間の流れをある程度予測することが可能となった。その結果、より高圧な領域で効率良く作動し得る軸流構造の斜流ファンの設計を行うに当たり、有益な指針を得た。

参考文献

- 1)生井, 井上, 九郎丸, 他3名: 機械の研究, Vol.25 No.10-12, (1973).