燃焼器用・高吐出し圧力多翼ファンの最適化設計*

内山 寛信^{*1}, 倉田 純一^{*1}, 田中 輝夫^{*1}
伊藤 淳^{*1}, 柴田 聡^{*2}

Optimization Design on Centrifugal Fan with High Discharge Pressure for Burner Use

Hironobu UCHIYAMA, Junichi KURATA, Teruo TANAKA,
Atsushi ITOU and Satoshi SHIBATA

In order to eliminate the counterflow phenomenon of flame at the combustion point of fuel as well as design a compact burner with high capacity, it is desirable that a centrifugal fan with the characteristic of high discharge pressure should be developed. On the design condition that impeller shapes are fixed, the relationship between the discharge performance and the various design factors of the casing was evaluated by systematic experiments. As a result, the most suitable casing shapes and new assembly parts to increase the discharge pressure were proposed, and an investigation of its effectiveness was performed.

Key Words: Fluid Power System, Combustion, Measurement, Centrifugal Fan, Optimization Design

1. はじめに

同一周速度の他形式ファンに比べ吐出し圧力が高く、風量、騒音性能がともに良好で小形な多翼ファンは、広範な工業製品に使用され、古くから研究⁽¹⁾がなされている。しかし、多翼ファンは翼車部の流れ状態が複雑であるため、運動量理論、および、翼理論を用いた解析的な設計が困難である。そのため、翼ならびに流路の内部流れの解析^{(2)~(4)}に基づいた空力性能の予測⁽⁵⁾、設計要因の解明⁽⁶⁾、あるいは、騒音の低減化⁽⁷⁾、などの系統的な実験的解析手法による設計指針の確立が進められている。

本報では、液体燃料用ボイラのバーナ部に装備される、押込通風用多翼ファンを研究対象とする。ファン性能は、高負荷時に高吐出し圧力特性をもつことが必須条件であり、従来のはん用的多翼ファンに比べ、特例的な設計仕様となる。そこで、バーナ用多翼ファンのケーシング設計に関する基礎的な指針を得るため、

翼および翼車形状を一定として、スプリット板のど部後流側の流路形状、ならびに、流路幅の拡大量を設計パラメータとするポリユート部形状を、系統的な実験により評価する。その結果より、ファンの基礎的性能に対するケーシング形状の効果を明確にする。ついで、高吐出し圧力特性を得るに有効な新しいケーシング形状と、吸込口付属部品の最適化設計の指針を述べ、その有効性を実験的に確認する。

2. ファン性能と試験装置

2・1 燃焼器用ファンの設計仕様 ボイラ運転時の燃焼室内圧力の変動状態例を図1(a)に示す。このボイラは定格出力が80 000 Kcal/hで、白灯油を燃料とする容量100 000 Kcal/hのバーナが装備されている。同図1(b)には、燃焼室内の残留ガスの排出、ならびに、燃焼に必要な空気量の送風機能をもつバーナ部ファンの特性例を示す。ボイラの消火時Aおよび定常的燃焼時Cの場合には、ファンは軽圧力負荷状態で運転されている。しかし、着火時Bでは燃焼室内にインパルス状の急峻な圧力上昇が発生し、火炎がファン側へ逆流して、ファンの損傷、着火不良、騒音、振動、などの現象を誘起する。そのため、定常的燃焼状態における平均負荷圧力Eに対して、数倍の高吐出し圧力

* 平成元年3月24日 関西支部第64期定時総会講演会において講演、原稿受付 平成元年11月13日。

^{*1} 正員、関西大学工学部 (〒564 吹田市山手町3-3-35)。

^{*2} 関西大学大学院。

^{*1} 正員、(株)タクマ京都工場 (〒601 京都市南区久世殿城町600-1)。

特性をもつ大容量ファンを装備する必要がある。

以上のことにより、大容量バーナの小型、軽量化を計るために、高負荷・低風量域で高吐出し圧力特性をもち、着火時の瞬時的な圧力上昇に対処できる。小形で効率の良い多翼ファンの開発が待望されている。

2.2 ファンの構造と試験装置 実験に使用する多翼ファンは、前傾円弧翼状の羽根 30 枚が外径 ($2R=140\phi$) の主板とかしめ接合された翼車をもち、モータ直結形で駆動される。翼形状は曲率半径 13 mm、弦の長さ 17 mm であり、取付形状は表 2 に示す。ケーシングは板金のプレスと曲げ加工による部材を溶接した、案内翼がない平行壁の簡単な構造である。ケーシング背板のポリュート部形状は、半径の異なる 4 種類の円弧により滑らかに構成されている。

JIS 規格 B 8330, B 8762 のファンの検査方法、および、流量測定法に基づいて製作した性能試験装置を図 2 に示す。この装置により、圧力・流量特性とともに、ケーシングの壁部、翼車部の圧力分布および速度分布特性、などが試験・計測される。

ファンの負荷はオリフィス流量計の管路部後流の絞り弁機構により調整される。流量計の差圧、吐出し圧力およびケーシング壁部の複数点の静圧信号などは、空気用走査器 A、圧力変換器 B を介し、計算機にオンライン接続されている。また、ファン駆動用モータの運転状態は、電力計 C、回転計 D の信号によって自動

計測され、全信号の処理結果は図式表示される。ケーシング内の流れ状態は、熱線風速計、二孔あるいは五孔ピトー管によって計測される。

3. ケーシング形状と性能評価

3.1 供試ケーシングの形状 ケーシング形状の説明図を図 3 に示す。高負荷・低風量域において高吐出し圧力特性をもつ多翼ファンの設計法には、翼および翼車の形状を一定として、系統的な実験によりケーシング形状の最適化を図る手法を採用する。

ケーシング形状の代表的な設計パラメータとして、スプリッタののど部を起点とする一定流路幅(半径： $P+R_{bn}$)部の持続角： θ_t 、翼車中心からのスプリッタ板の設置距離： R_s 、および、ポリュート部の最大流路幅： R_{bx} を選択する。ただし、ポリュート部の最小流路幅は、 $R_{bn}=7\text{ mm}$ で一定である。なお、ケーシング形状のパラメータは、翼車半径 R で無次元化した次式により表示する。

$$\text{スプリッタ位置係数: } C_s = R_s/R$$

$$\text{ポリュート拡大係数: } C_b = R_{bx}/R$$

試作したケーシング形状のパラメータを表 1 に、翼車の主要パラメータを表 2 に示す。従来より流体機械の分野において広範囲に採用されている対数らせん形状に類似するものは、 $\theta_t=5^\circ$ 、 $C_s=0.78$ 、 $C_b=1.3$ のケーシングである。

表 1 形状パラメータ

θ_t	120, 90, 5 [deg.]
C_s	1.00, 0.78, 0.65
C_b	1.7, 1.5, 1.3, 1.1

(a) 着火時の圧力変動 (b) ファンの出力特性

図 1 ボイラ燃焼室内の圧力変動

図 2 性能試験装置系の構成

図 3 ケーシング形状

また、ケーシングの吸込カバー側の形状に関しては、吸込口部に付属部品を一切設置しない場合と、図3上図に示す形状の遮へい・昇圧板を設置した場合とについて検討する。

3・2 性能の無次元化表示 ファン性能は、以下に示す無次元量を用い表示する。

$$\text{圧力係数} : \phi = 2 \cdot P / (\rho \cdot u^2)$$

$$\text{流量係数} : \phi = Q / (\pi \cdot D \cdot b \cdot u)$$

$$\text{ファン効率} : \eta = P \cdot Q / L$$

$$\text{軸動力係数} : \lambda = 2 \cdot L / (\rho \cdot \pi \cdot D \cdot b \cdot u^3)$$

ここで使用した記号は、 D ：翼車外径、 L ：軸動力、 P ：ファン全圧、 Q ：吐出し風量、 b ：翼車幅、 u ：翼車外周の周速度、 ρ ：密度である。なお、羽根弦長を代表長さとする実験時の Re 数は、 2.5×10^{-4} 程度である。羽根弦長は 16 mm である。

4. 設計パラメータの最適化

ファンの性能は、前述した ϕ , ϕ , η , λ の基礎的な性能表示係数とともに、羽根の有効運動流路幅⁽⁵⁾、流路内の速度分布および壁部の静圧分布特性、などにより評価する。本報では、ファン性能に対するケーシング形状の効果を、基礎的性能係数による表示法を主に用いて系統的に記述する。なお、本章の実験特性は、すべて吸込口部に付属品を設置しないケーシングを使用した場合である。

4・1 一定流路幅部の持続角度 θ_t の影響 ケーシング形状は、スプリッタのど部から一定流路幅 $R_{bn} = 7 \text{ mm}$ の状態が角度 θ_t 持続し、その後、ポリュート部が幅 R_{br} まで拡大する。持続角度 θ_t の影響を図4に示す。ただし、翼車は吸込カバーとの間げきが $d =$

11 mm である上下側板の中央位置に設置されている。

これらの特性より、対数らせん形状に類似した $\theta_t = 5^\circ$ のケーシングに比べ、 $\theta_t > 5^\circ$ の場合は、高負荷領域において高吐出し圧、高こう配の圧力特性を得る形状として有効であることが判明する。しかし、ファン効率 η 、および騒音面に関しての性能は悪化する。

$\theta_t = 5^\circ$ の形状では、のど部直後から流路部への流入風量があり、さらに翼車とともに回転する再循環空気流が増加するため、ケーシング壁面での流体摩擦損失が増大し吐出し圧力が低下すると考えられる。また、極端な持続角度の増大 ($\theta_t = 120^\circ$) は、流路部への総流入風量を減少させ、吐出し圧力を低下させる。以上のことより、 $\theta_t = 90^\circ$ のケーシング形状の採用が望ましい。

4・2 スプリッタ位置 C_s の影響 スプリッタは、流路内の空気流を吐出し口へ導き、翼車とともに回転する再循環流の発生を防止する重要な要素である。そして、スプリッタ板の設置位置により、ノーズ部にうずを伴うはく離域を生成し、ファン効率の低下や騒音の発生を招くことが予測される。

実験特性を図5に示す。検討する $0.65 \leq C_s \leq 1.00$ の範囲内においては、スプリッタ位置係数 C_s の諸性能に及ぼす影響は他の設計パラメータと比較して小さい。スプリッタ位置係数 $C_s = 0.78$ のケーシング形状が、最も良好な吐出し圧力特性を示す。翼車外周より極端に内側にスプリッタが設置される $C_s = 0.65$ の場合には、スプリッタ板に衝突する回転流の風量が増加するため、損失仕事が増しファン効率 η が低下する。

4・3 ポリュート拡大係数 C_b の影響 ポリュート拡大係数 C_b は、ケーシングの大きさをほぼ一意的

表 2 翼車の主要形状

Impeller :	
outer diameter	140φ
inner diameter	110φ
width	65mm
Blade :	
outlet angle	160°
inlet angle	90°
number	30
Casing :	
width	87mm

($C_s = 0.78$, $C_b = 1.3$, $d = 11 \text{ mm}$)

図 4 一定流路幅持続角 θ_t の影響

($\theta_t = 90^\circ$, $C_b = 1.3$, $d = 11 \text{ mm}$)

図 5 スプリッタ位置 C_s の影響

に決定する。吐出し口部の面積は C_b に比例する。また、流路内の空気流のもつ運動エネルギーを静圧に変換する性能に影響を与える。図6にポリュート拡大係数 C_b を変化させた場合の実験特性を示す。

ポリュート拡大係数 C_b にほぼ比例して、吐出し圧力 ϕ ならびに軸動力係数 λ は増加し、ファン効率 η は低下する。高負荷時に、高吐出し圧力を得るためには、ポリュート拡大係数 $C_b=1.7$ 近傍のケーシング形状を採用することが望ましい。しかし、本実験のモータ容量(100 V, 150 W, 2 極)に対しては、軸動力係数が $\lambda \geq 1$ となるため、 C_b 値は 1.5 を最適値として採用する。

4.4 翼車と吸込カバーとの間げき d の影響 翼車上端と吸込カバーとの間げき d が減少した場合には、図7に示すように吐出し圧力が低下する。これは、吸込口部から翼車シュラウド側に、滑らかに流入し偏向する風量が減少し、有効な仕事をする翼車の等価的流路幅が減少するためである。また、間げき d が増大すると、ポリュート部の高圧空気流の一部が、間げきを介して吸込口側に逆流する現象が確認された。特に、スプリッタのど部では、この現象が顕著である。

翼車とカバーとの間げき d は、間げきの増大に伴う吸込口側への漏えい流量の増加の防止と、翼車の軸方向の偏心量に対する余裕を勘案し、 $d=20$ mm とする。

4.5 ケーシング形状の設計指針 主要設計パラメータに関する系統的な実験特性から、高負荷時に高吐出し圧力である性能を要求する燃焼器用ファンのケーシング形状としては、

(1) 翼車はケーシング側板近傍に設置し、吸込カバーとの間げき d を広くする。

(2) ケーシング背板部の形状については、スプリッタのど部を起点とする最小流路幅の持続角度 θ_t は、吐出し風量が減少しない範囲内で大きくする。

(3) スプリッタ位置係数 C_s は、軸動力係数が増加しない範囲内で、小さくする。

(4) ポリュート拡大係数 C_b (吐出し口面積に比例) は、軸動力係数が $\lambda < 1$ の条件下で大きくする。

以上の判明事項より、供試翼車に対しては、 $d=20$ mm, $\theta_t=90^\circ$, $C_s=0.78$, $C_b=1.5$ のケーシングが最適化された形状と考える。

5. 遮へい・昇圧板を設置した場合

翼車の羽根幅中心位置における、流路内回転流の速度ベクトル線図の一例を図8に示す。測定条件は、流量係数 $\phi=0.03$ の負荷状態であり、ピトー管と熱線風速計を併用して計測している。スプリッタのど部近傍においては、再循環を阻止された流体は、翼車中心方向に偏向している。この偏向した流体は、翼車の上端部および吸込カバーと翼車の間げきを経由し、吸込口部へ逆流する現象を生ずる。従来は、吸込口部に設けたベルマウスの効果により、この逆流現象を防止して圧力特性の改善を図っている。

本報においては、この逆流現象を有効的に活用する一方策として、図3に示す形状の遮へい・昇圧板を吸込口部に設置することを提案する。この遮へい・昇圧板は、逆流した流体が吸込口の外部に漏えいすることを防止する半円形状の遮へい板部と、スプリッタのど

図6 ポリュート拡大係数 C_b の影響

図7 翼車の取付位置 d の影響

図8 流路部の速度ベクトル線図

(鎖線：対数らせん、実線：提案するケーシング)

図9 翼車の半径方向速度ベクトル線図

部後流の流路断面が拡大したポリュート部に逆流した高速、高圧の流体を再循環させる、翼車ハブ側に傾斜した遮へい板より構成される。この両付属部品効果により、のど部近傍において吸込口側に逆流する高圧流体流れは、運動方向が強制的に偏向され、漏えいすることなく翼車および流路内部に再循環するため、吐出し圧力が増大する。また、吸込口部への流入流体と逆流流体との干渉による流入風量の減少を防止できる。図9には、のど部を基準位置とする時計方向回りの座標系として、翼車外周10mmの地点における翼車半径方向の吐出し流速分布図を、対数らせん形状のケーシングの場合と比較して示す。これより、吐出し流速が遮へい・昇圧板の効果により増加し、流路部流体の圧力が増大することが確認される。

4章で実験解析的に決定した最適ケーシング形状の吸込口部に、遮へい・昇圧板を設置した場合のファン特性を図10に示す。なお、翼車ハブ側に傾斜した遮へい板部の幅と傾斜角には、吐出し圧力を最大とする最適値を採用している。遮へい・昇圧板の設置により、流量 ϕ -圧力 ϕ 特性は、高負荷領域において、高圧となりそのこう配も急峻化する。遮へい・昇圧板の効果は、等価的に多段翼車形式のファンに類似する機能をもつ。そして、吸込口近傍での逆流流体と吸入流体との干渉による抵抗が減少するため、軸動力係数 λ も大きく変動せず、むしろ減少する傾向を示している。

これより、予期されたファン性能と遮へい・昇圧板の効果の有効性を確認できた。

6. ま と め

ボイラ用バーナの主要構成部である通風用多翼ファンの最適流路形状について、実験解析的に検討し設計指針を導いた。

通風用多翼ファンの特性は、燃料着火時の燃焼室内の急激な圧力上昇による火炎の逆流現象を防止するため、高負荷時の吐出し圧力が高圧であることが要求さ

図10 遮へい・昇圧板付き最適化形状ケーシングのファン特性

れる。そこで、多翼ファンの翼および翼車形状を一定とした条件下で、要求仕様を満足するケーシング形状を設計した。ケーシングの設計パラメータとして、ポリュート部の流路幅(断面)一定の持続角度ならびに最大流路幅、スプリット位置、翼車の取付位置を重要視し、ケーシング背板は4種類の円弧により構成した。そして、実機試験による性能解析より、設計パラメータの設計指針とその最適値を明示した。さらに、ケーシング流路内の流れ状態、および、スプリットのど部における逆流現象の実験的解析結果に基づいて、吸込口に遮へい・昇圧板を設置し、圧力特性の向上を図る手法を提案した。

これにより、従来のケーシング形状の多翼ファンに比べ、高負荷時の圧力特性が、60~80%向上する高効率の燃焼器用通風ファンの設計が可能であり、高容量バーナの小型、軽量化に極めて有効であると考えられる。

最後にあたり、ご指導を賜った(株)タクマ 小川朝久氏、ケーシングの製作にご援助をいただいたオリンピア工業(株)に厚くお礼申し上げる。

文 献

- (1) 例えば、原田、機論、13-45(1957)、217; 14-56(1948)、192.
- (2) Raj, D., ほか1名、Trans. ASME, 103(1981)、393.
- (3) 清森、有明高専紀要、22(1985)、83.
- (4) 鈴木、流れの可視化、2-6(1982)、469.
- (5) 山崎・ほか1名、機論、52-484(1982)、3989; 53-485(1987)、108; 53-490(1987)、1730.
- (6) 小泉、東芝レビュー、30-13(1975)、1039.
- (7) 森田、機論、50-459 B (1984)、2583.