

小規模トンネル用ジェットファン

Jet Fan for Small-Scale Tunnels

林 憲一郎 新関 良樹 安達 俊朗

HAYASHI Kenichiro

NIIZEKI Yoshiki

ADACHI Toshiro

ジェットファンは、トンネルの天井に据え付けられて用いられるトンネル内の換気用ファンである。交通量の増大、道路網の拡充に伴い、地方幹線道路などでも従来に比べて長大なトンネルが計画されている。今回、比較的小規模なトンネルに適した 600 mm 口径のジェットファンについて、最新の空力設計技術の適用などにより単段で高性能、低騒音を実現し、長野県の木曾川右岸道路倉本トンネル向けの換気設備として納入した。

A jet fan is used for ventilation in a tunnel, and is installed by hanging it from the tunnel head lining. In recent years, plans have been made for increased tunnel construction along regional trunk roads in response to the growth in traffic and expansion of the road network. As a result, the demand for ventilation systems is increasing not only for large-scale tunnels such as those on main highways, but also for comparatively small-scale tunnels.

Toshiba has developed a high-performance, low-noise (single-row) jet fan for small-scale tunnels applying the latest aerodynamic technology. This jet fan has been installed in the Kuramoto Tunnel on the Kiso River right-bank road in Nagano Prefecture.

1 まえがき

道路トンネルで使用されるジェットファンは、トンネルの車道空間を利用して換気風を流し、汚染物質をトンネル坑口から外へ出すことによりトンネル内を換気する強制換気装置である。トンネル換気に必要な換気量や換気方向は、時間や季節による交通量の変動、自然風の影響などによって異なる。トンネル内の自然風と同方向に換気風を流すことにより効率の良い換気を行うことができる。また、トンネル火災時には、消防隊がトンネル内に進入する際の進入路を確保するための排煙にも用いられる。ジェットファンは、このような要求に対応するために電動機の回転方向によって吐出方向を逆転できる特長を持っている。

ここでは、長野県木曾川右岸道路倉本トンネル向けに納入した換気設備の導入事例をもとに、最新の空力設計技術の適用により、単段で高性能、低騒音を実現したトンネル向けジェットファンについて述べる。

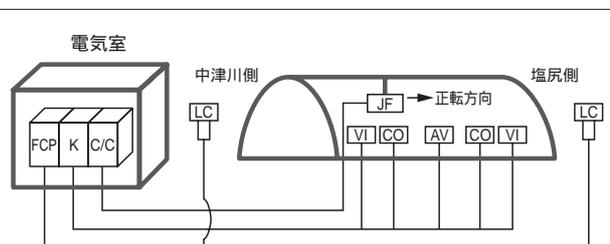
2 倉本トンネル換気設備概要

木曾川右岸道路は、地域の生活道路として、また、木曾川を挟んだ国道19号の迂回(うかい)路として建設が進められており、倉本トンネルは、長野県木曾郡上松町諸原から登玉間に位置している。倉本トンネルは、全長1,215 mの対面通行トンネルである。倉本トンネルの中津川側坑口を図1に示す。また、倉本トンネルの換気設備の構成を図2に示す。



図1. 倉本トンネル中津川側坑口 - 長野県木曾川右岸道路倉本トンネルは、全長1,215 mの対面通行である。

Entrance of Kuramoto Tunnel on Nakatsugawa side



FCP : 換気自動制御盤
K : 計測盤
C/C : 換気コントロールセンタ
LC : 消防隊専用換気制御盤
JF : ジェットファン
VI : 煙霧透過率測定装置
CO : 一酸化炭素検出装置
AV : 風向風速計

図2. 倉本トンネル換気設備の構成 - 倉本トンネルの換気設備は、トンネル坑口の電気室とトンネル内に分散して配置されている。

Configuration of Kuramoto Tunnel ventilation facilities

倉本トンネルの換気設備は、中津川側坑口の電気室とトンネル内に分散して設置している。電気室には、換気自動制御盤、計測盤、換気コントロールセンタを設置し、トンネル内には天井部にジェットファン、壁面部には各種センサを設置している。ジェットファンは、車道空間を十分確保し、効率的に換気風を発生させることができる天井部に設置している。センサは、トンネル内の透過率を測定する煙霧透過率測定装置と、一酸化炭素濃度を測定する一酸化炭素検出装置と、トンネル内の風向と風速を測定する風向風速計を、もっとも有効に計測できる場所を選定しトンネル壁面に設置している。換気自動制御盤は、トンネル内の換気を効率的に行うための換気制御を実施しており、制御方式はフィードバックを採用している。計測盤は、トンネル内に設けられたセンサからの情報を換気制御で使用できる数値にリアルタイムに変換し、計測履歴を保存している。換気コントロールセンタは、ジェットファンに電源を供給するユニット式の配電盤で、盤面に操作ができるスイッチを具備している。消防隊専用換気制御盤は、トンネル火災時などに消防隊がトンネル内に進入する際の、進入路を確保するための排煙運転が可能な屋外式の操作盤であり、中津川側と塩尻側の両坑口に設置している。

3 トンネル換気用ジェットファン

ジェットファンは、使用するトンネルの規模などに対応して、表1に示すような各種口径のものが一般に用いられている。

表1. ジェットファンの種類
Specifications of jet fan series

型 式	JF-600	JF-1000	JF-1250	JF-1500
口 径 (mm)	630	1,030	1,250	1,530
全 長 (mm)	3,000	4,250	4,250	4,250
外 形 (mm)	800	1,200	1,450	1,750
吐出平均風速(m/s以上)	30	30	30	30
効 率 (%以上)	60	65	75	70
騒 音 (dB以下)	85	95	95	95
電動機出力 (kW)	9.5	25	30	50

今回納入したJF-600は、比較的小規模な道路トンネル向けのもっとも小口径のファンである。倉本トンネルに納入したジェットファンの据付状況を図3に示す。

3.1 構造

電動機で駆動される羽根車は消音胴の中に収められる。ジェットファンでは、電動機の前後に羽根車を配置した2段式が多く用いられるが、今回開発したファンでは高効率化と低騒音化を狙って、汎用電動機の片側だけに配置した単段式を採用している。従来の2段式に比べ単段式は音の発生



図3. ジェットファン据付状況 - トンネル上部につり金具を用いジェットファンを固定している。
Installed jet fan

源が少ないため、一般には消音に有効と考えられる。また、消音胴と消音コーンの内部には吸音材を充填(じゅうてん)することで低騒音化を図っている。消音コーンの支持支柱は本数、サイズをミニマム化することによって圧力損失の低減を図っている。図4にジェットファンの構成を示す。

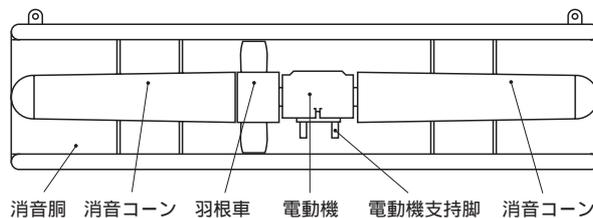


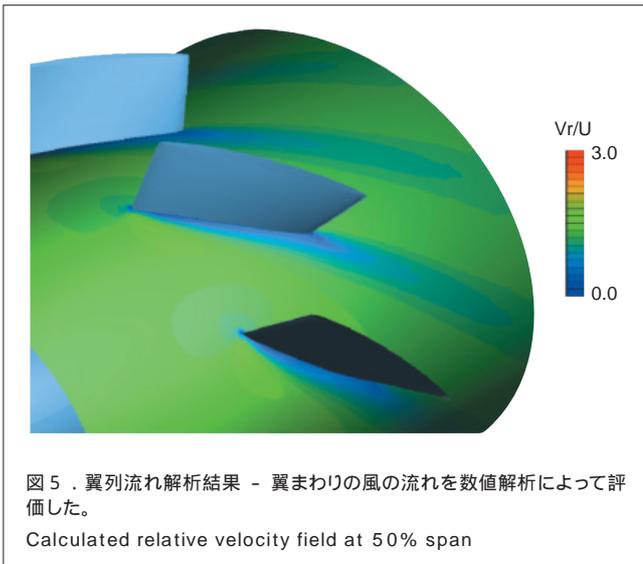
図4. ジェットファンの構成 - 単段式の羽根車で構成している。
Configuration of jet fan

3.2 翼設計

ジェットファンは、羽根車の回転方向によって流れの方向を逆転するため、そりを持たない対称な断面形状を持つ翼型が用いられる。このため、翼高さ方向の翼取付け角分布、すなわち負荷分布の最適化がもっとも重要となる。翼列の設計では、半径平衡式と翼列データを基にした準三次元性能解析ツールによって、翼高さ方向の取付け角分布などの基本設計を行った。この結果を基に、完全三次元粘性解析による評価により調整を行った。高負荷化と高性能化に対応するため、根元から先端にかけてコード長を変化させることによってソリディティ(翼弦長と翼ピッチの比)分布を適正化した。その結果、単段でも十分に性能が出せる翼の設計を行うことができた。有限要素法(FEM)を用いた強度、振動特性解析もあわせて実施し、十分な信頼性を備えているこ

とを確認している。

翼まわりの流れを数値解析によって評価した結果を図5に示す。解析には非構造格子を用いた完全三次元粘性流れ解析コード⁽¹⁾を用いた。色の違いが相対速度の差であり、色むらの少ない翼が設計としては望ましい。図5は相対流速(V_r)を周速(U)で無次元化した相対速度の50%翼高さにおける分布を示すが、対称翼としては良好な流れが得られていることがわかる。

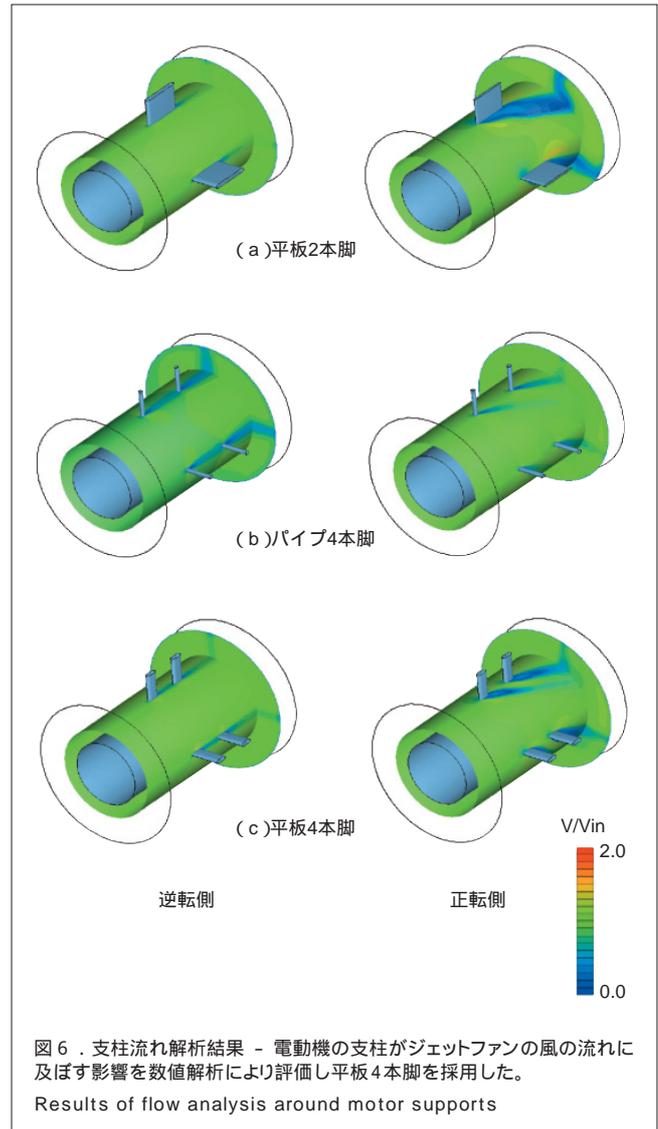


3.3 電動機支持支柱

ジェットファンの性能向上には、翼列の高効率化だけでは不十分であり、静止部における圧力損失を低減することが重要となる。吸込部の形状、消音胴や消音コーンの表面摩擦、消音コーンの支持部材などが静止部の圧損の原因となるが、電動機を支持する支柱は、圧力損失の要因となるとともに、下流に位置する翼列に周方向不均一な乱れを与え、騒音発生の原因となる。また、電動機を用いた単段式では、図4に示すように運転方向によって流れに対する電動機と翼列の位置が逆転するため、性能や騒音特性が異なる。したがって、高性能化とともに、運転方向による特性の差異を最小限とすることを目的として、電動機支柱形状の検討を行った。

電動機支柱が下流に及ぼす影響を、平板2本脚、パイプ4本脚、平板4本脚、とした場合について、翼の評価に用いたものと同じ粘性流れ解析コードによって評価した結果を図6に示す。

それぞれ、翼列の下流側に電動機がある場合(正転側と呼ぶ)を想定して流れが旋回成分を持つ場合と、翼列の上流側に電動機がある場合(逆転側と呼ぶ)を想定して旋回成分のない場合の流速(V)を入口平均流入速度(V_{in})で無次元化した速度分布を示している。平板2本脚は逆転側では色



むらが少なく良好な結果が得られているが、正転側では流れが大きく剥離(はくり)するため、損失が大きくなる。平板4本脚にすると、逆転側の流れは平板2本脚の場合とほとんど変わらないが、正転側の流れは大きく改善される。パイプ4本脚は、平板4本脚とよく似た傾向を示すが、旋回のない逆転側においても後流は平板4本脚より若干大きい。逆転側では電動機の下流に羽根車が位置するため、損失が大きくなるとともに、騒音にも悪影響を与える。同じ強度を持つパイプと平板を比較した場合、平板の方が損失と騒音の両面で有利であることがわかったため、平板4本脚を採用した。

3.4 工場試運転結果

工場試運転における性能試験結果を表2に示す。試験はJIS B 8330で規定されている送風機試験方法に準拠している。仕様を十分に満足する風速と、大口径機に匹敵する高い効率を得ながら低騒音を実現している。また、汎用電動機を用いた単段式でありながら、正転側と逆転側でほぼ同

表2. 試運転結果と仕様比較表

Measured performance of JF-600

項目	仕様	実測値	
口径 (mm)	630	630	
全長 (mm)	3,000	3,000	
外形 (mm)	800	800	
吐出平均風速 (m/s 以上)	30	正転 32.1	逆転 31.9
効率 (% 以上)	60	正転 74.2	逆転 71.8
騒音 (dB 以下)	85	正転 83.7	逆転 81.2
電動機出力 (kW)	9.5	9.5	

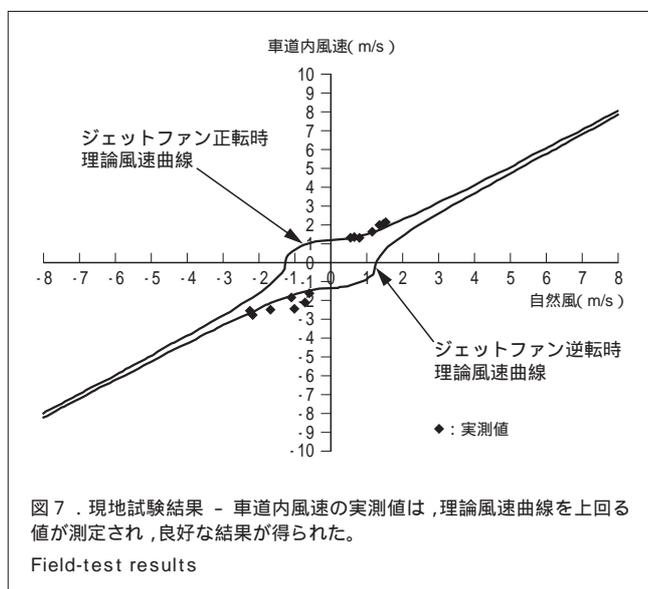
等の特性を得ている。

3.5 現地試験結果

現地試験結果を図7に示す。グラフ上にトンネル内の8か所で計測した実測風速と理論換気風速曲線を示す。実測風速は、正転時及び逆転時に13点の計測点で熱線風速計によって計測した風速の平均値である。また、理論換気風速は、次式によって算出した⁽²⁾。

$$Pr = Pn \pm Pj$$

ここで、 Pr は通気抵抗、 Pn は自然風による換気力、 Pj はジェットファンによる昇圧力である。正転、逆転いずれの場合においても、理論換気風速値を上回る平均風速が得られたことがわかる。



4 あとがき

トンネル換気設備の目的は、ドライバーがトンネル内を安全に走行できる環境を維持するとともに、強制換気装置を効率よく運用し消費電力の低減を図ることにある。また、昨今は地球環境保護や省エネルギーに対するニーズが高まっており、トンネル換気設備においては、トンネル周辺環境の保護、高効率な換気運用が望まれている。今回、倉本トンネルに納入したジェットファンは、最新の空力設計技術を適用することにより、単段で高効率、低騒音を実現することができた。

当社は、豊富なトンネル換気制御システムの構築で培ったシステム技術力と他分野での技術を融合させ、新製品の開発に努めていくとともに、縦流式トンネルに適用できる換気設備の構築を進めていく。

文献

- (1) SANO, T., et al. "Numerical Study or Rotating Stall in a Pump Vaned Diffuser". Proceedings of ASME FEDSM'01. FEDSM2001-18079, 2001.
- (2) (社)日本道路協会. 道路トンネル技術基準(換気編)・同解説. 2001-10.



林 憲一郎 HAYASHI Kenichiro

電力・社会システム社 社会システム事業部 官公システム技術部主務。道路システムのエンジニアリングに従事。電気学会、電気設備学会会員。
Infrastructure Systems Div.



新関 良樹 NIIZEKI Yoshiki, D. Eng.

電力・社会システム社 京浜事業所 原動機部参事, 工博。ターボ機械の開発に従事。日本機械学会会員。技術士(機械部門)
Keihin Product Operations



安達 俊朗 ADACHI Toshiro

電力・社会システム社 社会システム事業部 官公システム技術部課長。道路システムのエンジニアリングに従事。電気設備学会会員。技術士(電気・電子部門)
Infrastructure Systems Div.