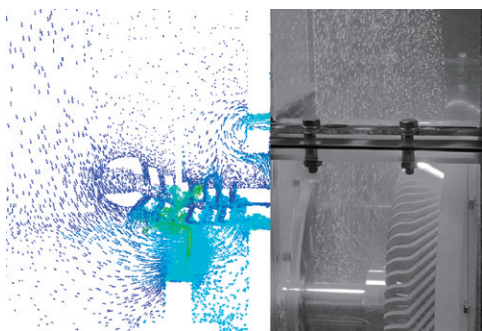


# タービン発電機冷却技術の基礎開発

本間優人 Yuto Honma  
江尻光良 Mitsuyoshi Ejiri  
江島正一 Shoichi Ejima

キーワード 発電機, 冷却, 実験, 解析, 1Dツール

## 概要



縮小模型実験と解析

タービン発電機の冷却技術は、製品の品質や性能向上に必須な要素技術である。当社では「骨太開発」でタービン発電機の試作機を製作するにあたり、数多くの冷却要素を取り入れたが、特に空冷式で課題となる点は、冷却ファンの風量－静圧特性（PQ特性）である。

近年、流体解析技術の発達で3次元解析が多く用いられているが、PQ特性のデータ精度の向上は解析精度の向上に直結する。今回、熱流体解析の精度向上に資するPQ特性を把握するため、タービン発電機の試作機検証に加え、実機大ファン風洞実験・縮小模型実験の各種実験を実施した。実験に際しては3次元流体解析との差異を確認しながら、実験精度と解析精度の向上につながるPQ特性結果を得た。さらに汎用性のある1次元シミュレーションツール（1Dツール）を用いて、通風と熱計算を検討した。

## 1 まえがき

回転機の開発では、3次元解析や1次元シミュレーションによる設計検証が進んでいるが、その予測精度向上のためには実験との比較・評価が重要となる。当社でもタービン発電機の冷却効率向上による小形・軽量化を目指し、実験検証による解析精度の向上、設計検討の迅速化のために、1次元シミュレーションをツール（以下、1Dツール）として整備する取り組みを強化している。本稿では、4極タービン発電機における3次元解析や実験による冷却構造の最適化と今後のシリーズ設計に向けた1Dツールの展開を紹介する。

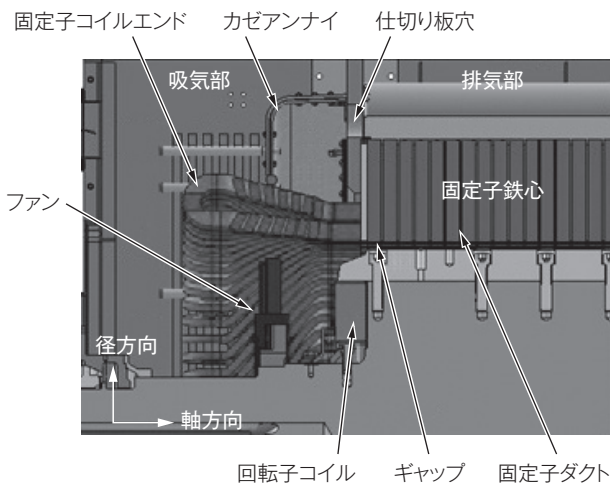
## 2 回転機冷却構造の解析と実験

当社のタービン発電機は空冷式で、回転子両端の

軸流ファンによって冷却風が発電機内部を循環する。小形・軽量化のため、発電機全体の軸方向の長さを短縮した新構造では、固定子ダクト幅の最適化、回転子の通風孔の追加など多岐にわたる改良に取り組んでいる。

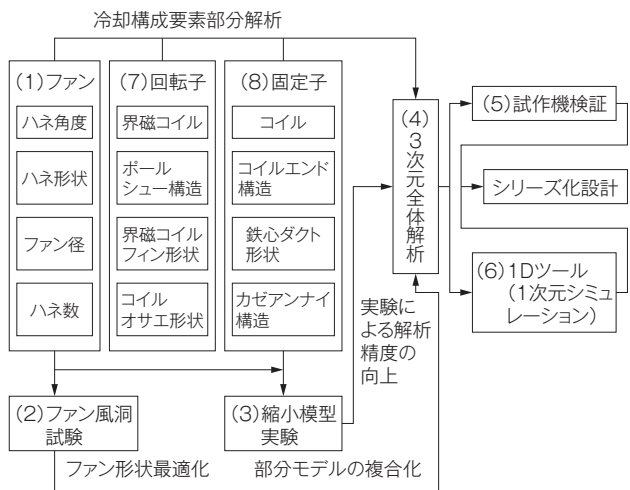
**第1図**に新構造の概要を示す。軸流ファンは周囲をコイルエンドに囲まれる形となり、さらにはファン径の縮小化が図られたことで冷却風の流れが従来と大きく変化し、かつ限られた風量の中で最良の冷却効率を得ることが必要となった。

**第2図**に新構造開発の流れを示す。発熱と伝熱に関連する構成要素に対して、解析と実験を相互に比較しながら3次元全体解析の精度を高め、試作機設計と実機による冷却効果を検証した。以下に、PQ特性に着目した通風冷却の内容の詳細と1Dツールを説明する。



第1図 新構造の概要

新構造の概要を示す。固定子コイルエンドの軸方向内側にファンがあり、吸気部から入った空気が固定子コイルを通りファンで昇圧された後、軸方向のギャップ-固定子ダクトを通る流れと、カゼアンナイ-仕切り板穴を通る流れに分かれ、排気部の前で合流する。

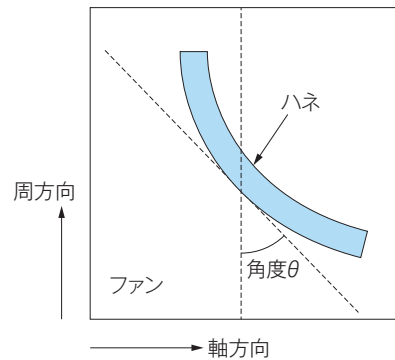


第2図 新構造開発の流れ

実験と解析及び設計との関連性を示す。要素部分解析と各種実験によって全体解析の精度の向上を図り、試作機検証と1Dツールの整備によってシリーズ化設計へ展開する。

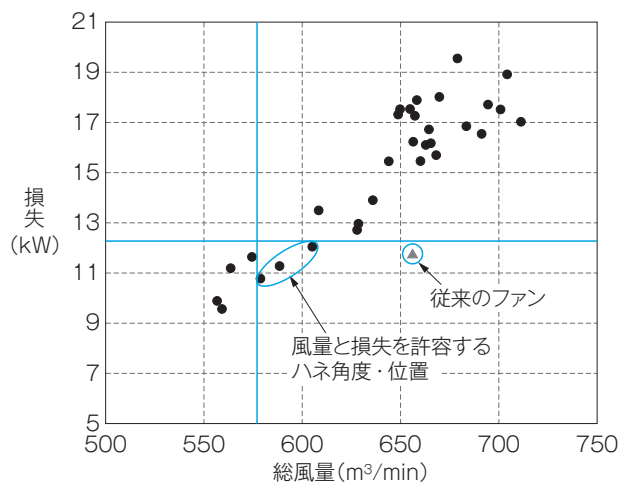
## 2.1 ファン特性解析

はじめにファンの最適設計を行うため、3次元定常解析によってファンのハネ取り付け角度や配置を検討した。第3図にファンのハネ角度の定義を、第4図にハネ角度と位置の検討結果を示す。最終的に選択したファンは従来のファンより外径が小さいため、損失を同等とすると風量は減少するが、冷却に必要な風量と損失の各々が許容できるハネ角度と位置が得られた。



第3図 ファンのハネ角度の定義

ファンの角度の定義を示す。ハネの中心の接線と周方向の成す角度 $\theta$ をハネ角度とする。



第4図 ファンのハネ角度・位置の検討結果

ファンのハネ角度・位置を変えた場合の風量と損失の結果を示す。従来のファンより外径が小さいため、損失を同等とすると風量は減少するが、冷却に必要な風量と損失の各々が許容できるハネ角度・位置を得られた。

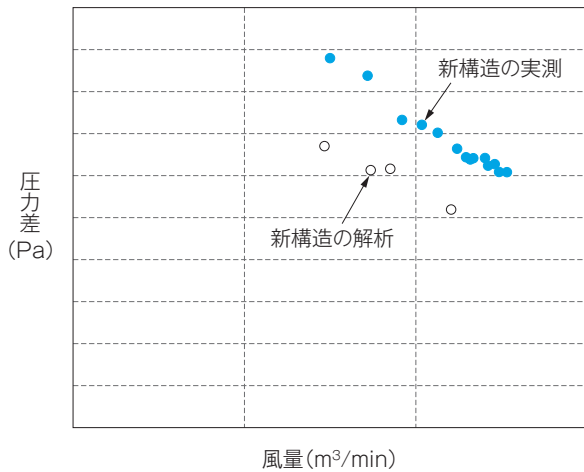


第5図 風洞装置

基本構成をJIS B 8330に準拠した風洞装置の外観を示す。入口ダクトから流入した空気が、軸方向下流側へ流れる構造となる。

## 2.2 風洞実験によるファン特性の確認

新構造の試作検証に先だて、解析結果を検証するため、基本構成をJIS B 8330<sup>(注1)</sup>に準拠した風洞装置を製作し実験した。第5図に風洞装置の外観を示す。圧力測定は径方向と周方向の異なる複数の



第 6 図 風洞実験で得られたPQ特性結果

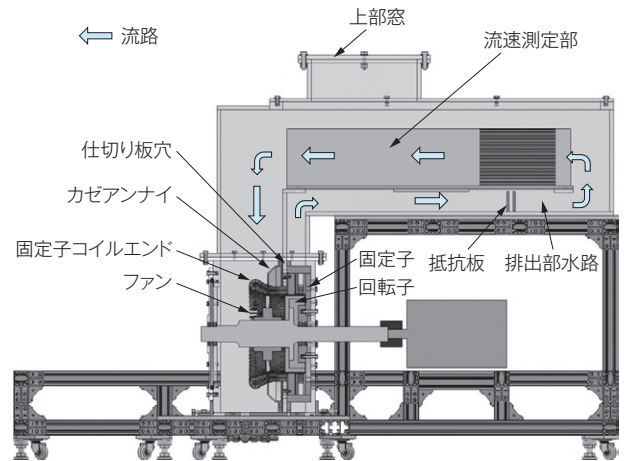
新構造における風洞実験のPQ特性を示す。実測と解析で風量と圧力差の変化、傾きは一致しているが、同一風量における圧力差はやや高い傾向となった。

位置で、ファンの上流側と下流側を測定した。風速測定は熱線式風速計とピトー管（流体の流れの速さを測定する計測器）を併用している。第 6 図に風洞実験で得られたPQ特性の結果を示す。事前に実施した同モデルの3次元解析と比較している。実験では同一風量における圧力差はやや高い傾向が見られたが、風量と圧力差の変化、傾きは一致した。

### 2.3 縮小模型実験

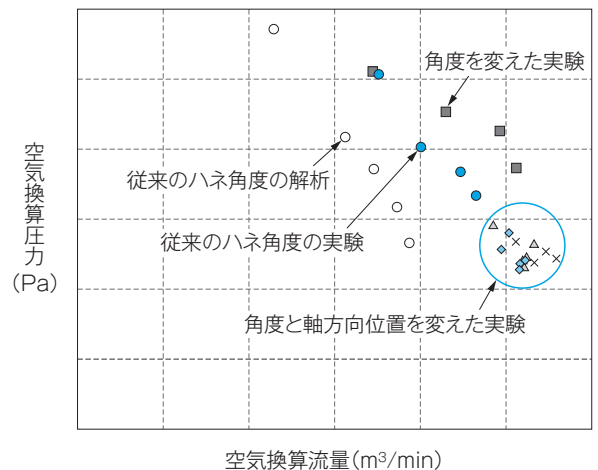
解析で得られたファンの周辺構造やハネ角度の変更による影響を検証するために、縮小模型実験装置を製作した。縮小にあたり、流動条件をできる限り試作機と等しくするため、ファン周辺のレイノルズ数を合わせ、寸法は5分の1、使用する流体はフッ素系不活性液体、回転数は0.6倍とした。

軸流ファン・固定子コイルエンド・カゼアンナイなどの各構造は、3Dプリンタを使用してナイロン樹脂で忠実に縮小再現した。これらを透明アクリル製の水槽で構成されたフレームの内部に配置した。第 7 図に縮小模型実験装置の概要を示す。装置はPQ特性を取得するため、排出部水路内に設置した抵抗板の大きさを変えることで流路抵抗を変え、圧力と流量を計測する構造となっている。当初は、流量を通常の管状流量計で直接測定する計画であった。しかしながら流体解析で、縮小模型に対して一



第 7 図 縮小模型実験装置の概要

縮小実験装置の概要を示す。上部に流速測定用の流路を持ち、内部が仕切り板でファン前後に区切られている透明アクリル製の水槽の中に、3Dプリンタで成形した固定子・コイルエンド・カゼアンナイ・ファン・回転子を設置した。仕切り板の前後の空間の圧力を圧力計で測定し、上部窓から流速計を挿入して流路の流速分布を測定する。



第 8 図 縮小模型実験におけるPQ特性（試作機換算）

実験装置の測定したPQ特性を試作機相当に変換した結果を示す。従来のハネ角度のファンのPQ特性に対して、ハネ角度を大きくすると流量・圧力とも増加する。さらに軸方向位置を変えると流量は若干増えるが圧力は減少する。解析の結果は流量と圧力とも小さい。

般的な流量計では流路抵抗が大きく、その影響による不要な箇所での逆流が生じることが分かった。そこで実験に影響を与えない箇所での流速分布を測定し、計算から流量を得ることとした。第 8 図に縮小模型実験におけるPQ特性（試作機換算）を示す。実験値は、上部水路の流速分布とファンの上流側及び固定子背面の圧力を測定して得たものである。これにより、ハネ角度を大きくするとPQ特性の流量・圧

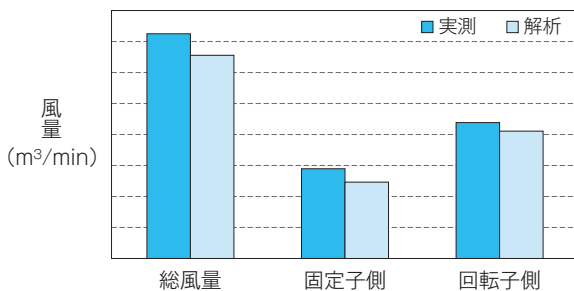
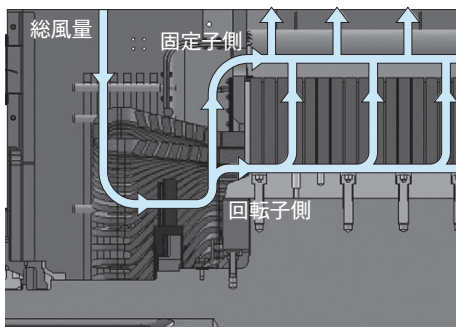
力とも増加し、更にファンの位置を変えると前後どちらも流量は増加し、圧力は減少する結果が得られた。実験と解析の比較では、解析結果の方が流量・圧力とも小さい。これは解析時間の短縮のため、定常解析で行っていることによると考えられる。

## 2.4 試作機検証

新構造に対して、設計と同時にファン周辺の求める実験と3次元全体解析を行い、その結果を試作機に反映した。試作機は今後の設計の基準となるため、ファンは今後の相似則計算のモデルファンとなる。そこで試作機のPQ特性を詳細に取るため、試作機の排気部に開口部で通風抵抗を変えることができるダクトを配して、風量分布と圧力分布を測定した。

第9図に試作機の風量分布について、実測と解析結果の比較を示す。タービン発電機の構造は駆動機側と反駆動機側ではほぼ対称であることから、3次元解析は解析領域を軸方向で2分割した片側のみとしている。

さらに解析精度向上のため、従来の3千万メッシュから約1億5千万メッシュへ規模を拡大し、メッシュ数と形状を最適化した。また計算時間短縮のため、



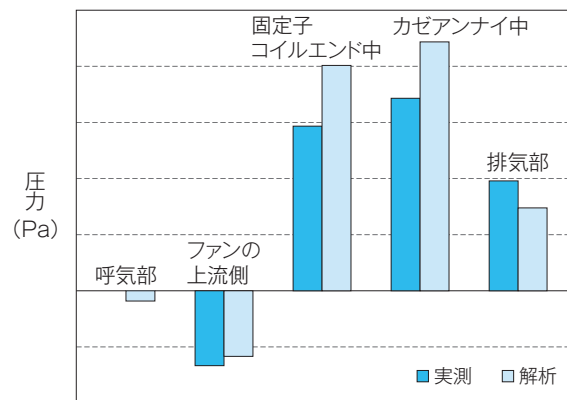
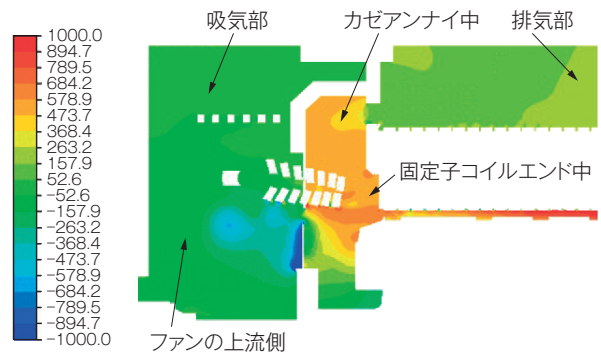
第9図 試作機の風量分布

上に機内を流れる冷却風の模式図、下に試作機実験における風量分布を示す。総風量における実測と解析の差異は約10%で、風量比率は固定子側が約40%、回転子側が約60%と実測と解析でほぼ同等になっている。

大規模計算サーバを導入し、計算環境を刷新した。固定子側・回転子側並びに総風量の解析値と実測値との差異は約10%とほぼ一致する結果が得られた。

第10図に試作機の圧力分布を示す。発電機内合計5か所の圧力の実測値と解析値の差異は、固定子コイルエンド中点で最大約26%であるが、圧力分布における差異が風量分布のそれと比較して大きくなった原因は、本解析で採用した乱流モデルにある。また本解析では、固定子コイルエンド中及びカゼアンナイ中で剥離が顕著に見られるが、剥離領域では静圧が過大評価される傾向がある。いずれにしても実用的な解析精度で発電機内部の冷却風の流れ予測手法としての有用性を確認できた。

第11図に試作機のPQ特性を示す。解析値に対して実測値が20%程度小さく、実測値が解析値より大きい結果となり、風洞実験や縮小模型実験とは異なる傾向となった。しかしながら動作点風量の差異は約10%で、PQ特性の傾きはほぼ一致しているため、定常解析でのファンの動作点予測の精度としては良好な結果が得られたと考える。

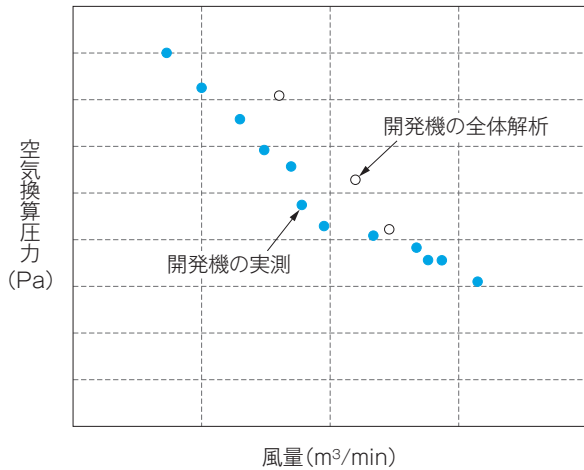


第10図 試作機の圧力分布

圧力分布の解析結果と、実測と解析の比較を示す。

## 2.5 1Dツール

タービン発電機のシリーズ化設計で、設計検討の迅速化を図るため、FloMASTER（メンター・グラフィックス社製）を使用し、伝熱と流動の1次元シミュレーションを行う1Dツールを検討した。1D

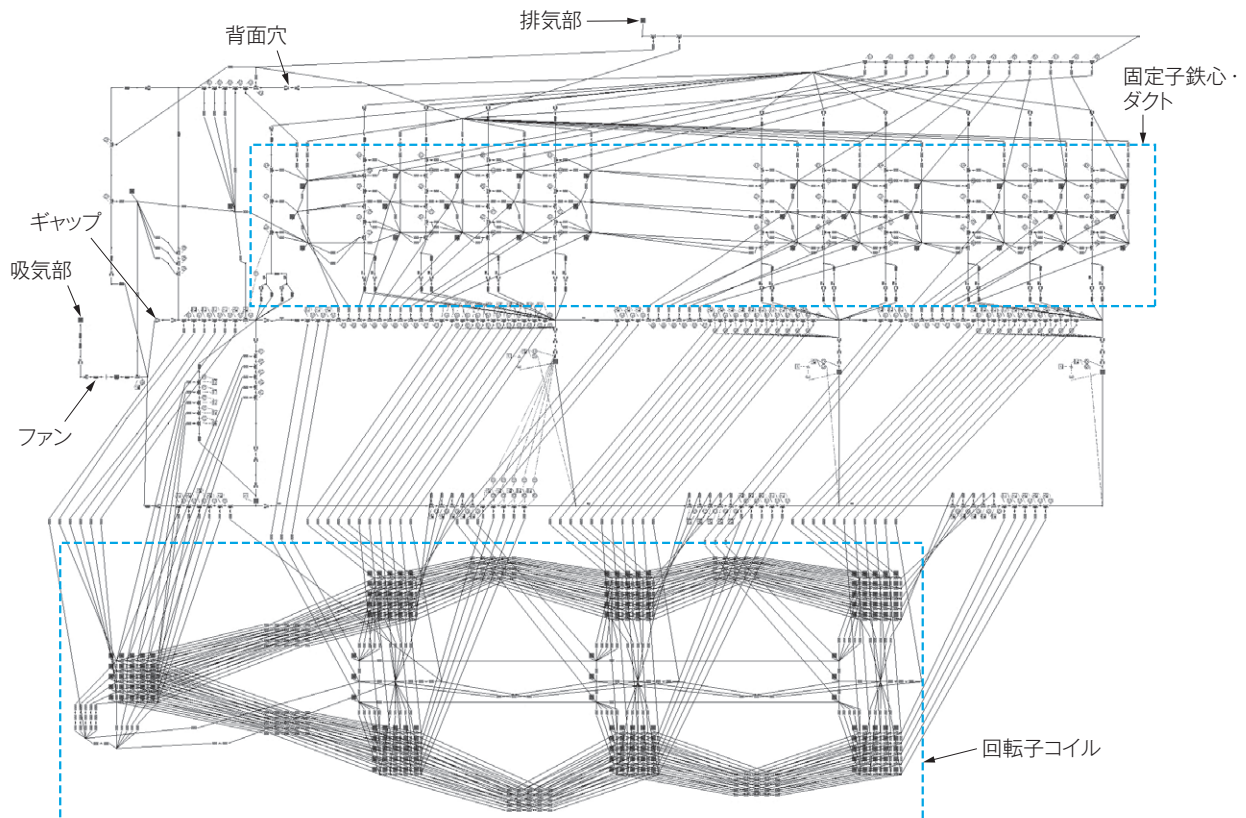


第11図 試作機のPQ特性

試作機検証におけるPQ特性の結果を示す。実測の方が解析より20%程度小さくなり、風洞実験や縮小模型実験とは異なる傾向となった。

ツールとは、製品の動作原理や機能をユニットや部品に相当するブロック図で表現し、ブロックの中は方程式で記述される。また3次元解析よりも抽象化したモデルとなるため、計算負荷が小さく、モデル修正やパラメータ変更を行いながら深く設計を検討できる。当社の1Dツールでは、前述の検討で得られたモデルファンのデータのほか、通風の構造や形状に関する変数及び発熱量を入力することで、発電機の軸方向断面図上に風量分布と温度分布を出力できる。また汎用性が高く、発電機の大きさに対応できる。

計算モデルは、3次元解析と同様に軸方向で半分領域を対象とした。また軸方向の長さによって固定子ダクトやギャップの分割の数が変わるため、これらの数を選択して通風経路を自動的に構成できるようにした。これにより、ギャップの軸方向における管路縮小損失や管路拡大損失などを考慮した計算ができるようになった。第12図に1Dツールのモデル概要を示す。本ツールの通風モデルを使用した



第12図 1Dツールのモデル概要

1Dツールのモデル概要を示す。各部分の固体や空間を節点としている。固定子にはダクトが並んでおり、回転子にはコイルが断面を5×5点で表現されている。入力シートに必要な変数を入力することで、バックグラウンドでFloMASTERが通風計算を行う。

試作機の風量計算結果は、実測結果とよく一致し、通風計算を設計実務として行うためのツールとしての有用性を確認できた。なお、別途熱流体解析を基にした熱計算モデルとの統合を進めており、通風冷却と温度計算の1Dツールとして完成に向け、最終的な調整を行っている。

### 3 むすび

4極タービン発電機の解析や実験による冷却構造の最適化とシリーズ設計に向けた1Dツールへの展開を紹介した。ファン風洞実験や縮小モデルなどの基礎的な検証から解析の精度を高めて試作機に反映し、設計の基準となるモデルファンデータを得た。

今後は、タービン発電機の高品質・高信頼設計をより強化していくために、1Dツールの完成度を高めていく。また、今回得られた詳細な試験結果と解析に関する知見を生かし、更なる冷却基盤技術の強化を継続していく所存である。

・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

#### 《注記》

注1. JIS B 8330：送風機の試験及び検査方法

#### 《執筆者紹介》



本間 優人  
Yuto Honma  
基盤技術研究所  
発電機の開発業務に従事



江尻 光良  
Mitsuyoshi Ejiri  
基盤技術研究所  
解析技術の開発に従事



江島 正一  
Shoichi Ejima  
回転機システム工場  
発電機の開発業務に従事