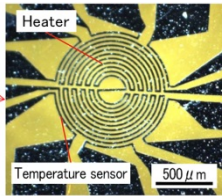
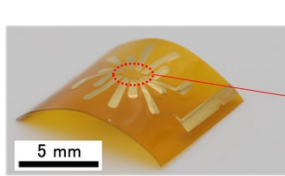


# 薄型センサによる 圧縮機翼端ケーシング流れ角計測技術の開発

Development of Flow Angle Measurement Technology on the Casing Surface of  
Compressor Blade Using Thin Sensor



大村 尚登\*1  
Naoto Omura

大谷 好子\*2  
Yoshiko Oya

村上 晃一\*4  
Koichi Murakami

水見 俊介\*2  
Shunsuke Mizumi

元祐 昌廣\*3  
Masahiro Motosuke

白石 大貴\*4  
Daiki Shiraiishi

ガスタービンやポンプ等に代表される流体機械の高効率化、信頼性向上のためには、流体機械内部の2次流れや剥離の制御と抑制が重要である。流体機械では、動翼先端の隙間流れに起因する損失低減には課題があるが、狭い隙間でのプローブ計測は流れ場を乱すため、計測が難しかった。そこで、流れに対する干渉を最小限にしつつ、非常に狭い隙間でも適用可能な薄型の流れ角計測センサを東京理科大学と共同で開発した。また、軸流圧縮機の試験機に適用し、流れ角計測が可能か検証を行った。本報では開発した薄型の流れ角計測センサの概要と軸流圧縮機試験結果について述べる。

## 1. はじめに

燃料費の抑制のみならず、二酸化炭素排出量の削減のためにも、流体機械の高効率化や信頼性向上は重要である。そのためには、流体機械内部の2次流れや剥離の制御と抑制が課題であり、主流のみならず、静動翼間隙の漏れ流れを含めた流れ場の理解が必要である。例えば軸流圧縮機では、翼端漏れ流れの挙動が性能劣化やサージマージンに影響するため、動翼先端の狭い隙間(翼端隙間)における流れ角計測による現象把握や、流れ角監視のニーズがある。一般に翼端隙間では、計測プローブを挿入すると流れ場に影響を与えるため、従来は、ケーシング壁面でのオイルフローやPIVなどの可視化試験で流れ角や速度場の計測を行ってきた。しかしながら、運転条件変更に伴う変化を逐一計測することができないこと、粒子やオイルにより流路が汚れること、光学窓や光源、カメラの設置が必要であり計測可能な領域が限られること、といった欠点がある。そこで、流れへの影響を最小限に抑制しつつ、光学窓等を設置せずに、リアルタイム計測を実現させる目的で、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を活用した薄型の流れ角計測センサを東京理科大学と共同で開発した<sup>(1)</sup>。

本報では、開発した流れ角センサの概要と、軸流圧縮機のケーシング壁面に適用し作動条件の変化に伴う流れ角変化を計測した結果について紹介する。

## 2. 流れ角計測センサの構造, 原理

### 2.1 センサ構造

薄型の流れ角計測センサの構成と仕様を図1に示す。中央部に円形のヒータ、間に5°のスペースを挟み55°毎、周囲6カ所に温度センサを配した構成である。センサ部は直径1.08mm(ヒータ部:直径1mm)と小型であり、厚みも数十μmと非常に薄いセンサである。センサフィルムには柔軟性を有し機械的特性に優れたポリイミドフィルムを、電極には金、接着層にはクロムを使用して

\*1 総合研究所 ターボ機械研究部

\*3 東京理科大学工学部機械工学科 教授 工博

\*2 総合研究所 ターボ機械研究部 主席研究員

\*4 東京理科大学工学研究科機械工学専攻

いる。センサは薄く柔軟性もあるため、狭い隙間でも流れ場への干渉が少なく、曲面にも設置可能である。さらに、小型であり限られた空間に複数点センサを配置できるため、空間分解能の向上といった利点もある。

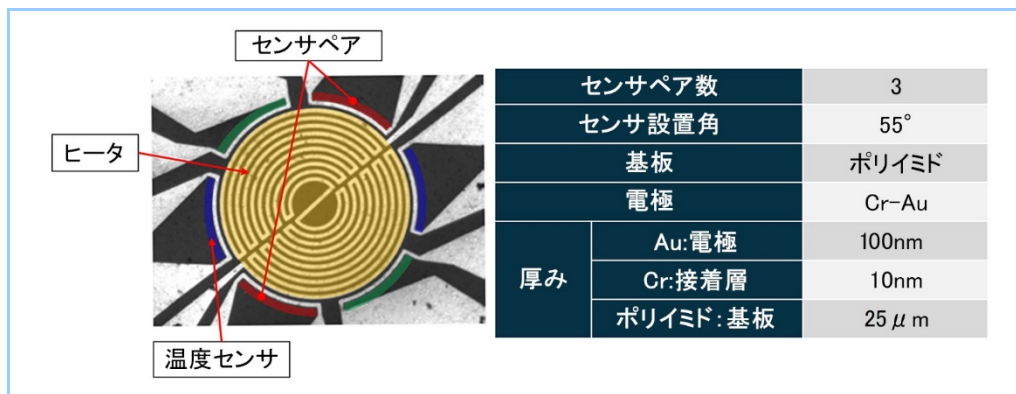


図1 薄型流れ角計測センサの構成と仕様

## 2.2 計測原理

流れ角計測は、熱式流量計と同様の原理を有すものであり、PID 制御により中央のヒータを雰囲気温度よりも一定温度高い値に保った状態で、対向する温度センサをペアとして、そのセンサ同士の温度差を、抵抗値差に変換してからブリッジ回路で取り出すことで計測する。図2に流れ角計測原理の概念図を示す。ヒータ周囲の気体は常に加熱された状態のため、流れが生じると温度場が変化し、ヒータ周辺に気流の流れ方向に沿った温度分布の偏りが生じる。この温度分布の偏りを3組の温度センサペアで計測し、温度センサペアの周方向位置と計測値の関係を三角関数でフィッティングすることで、流れ角度を算出している。

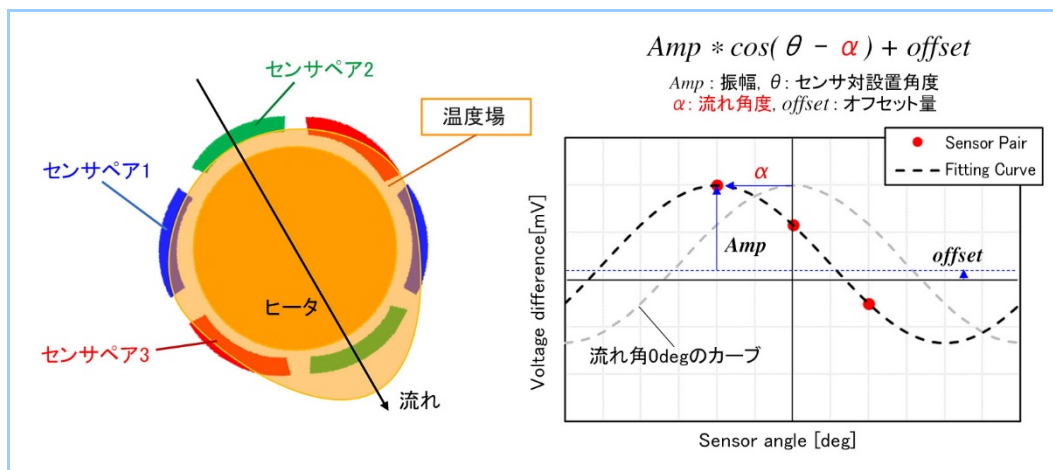


図2 流れ角計測原理

## 3. 流れ角計測センサの特性

流れ角計測センサの特性を確認するために、当社にて流れ角校正試験を実施した。校正試験風洞を図3に示す。流路の高さ10mm、幅100mm、流路長さ600mmであり、センサを入口ノズルから500mm下流の壁に設置し、センサ位置にて十分に発達した乱流となるようにしている。センサ取付け部は任意角度に回転可能な構造としており、センサと主流の相対角度を変更して試験し、角度特性を取得した。マッハ数は0.1~0.5の範囲で変化させ、ヒータ温度はPID制御により雰囲気温度よりも50℃高い状態を保って計測した。

図4に計測結果を示す。図中の横軸は実際の流れ角度、縦軸は開発した薄型センサによって計測された流れの角度である。0度を除いて測定角度の誤差は10度未満となっており、亜音速領域で、流れ角を測定できることを確認した。誤差は主にセンサ製造上の欠陥によるものと考えら

れるので、今後、電極設計を含めた製造プロセス最適化や、ブリッジ回路にアンプを導入することで、誤差低減を進めていく予定である。

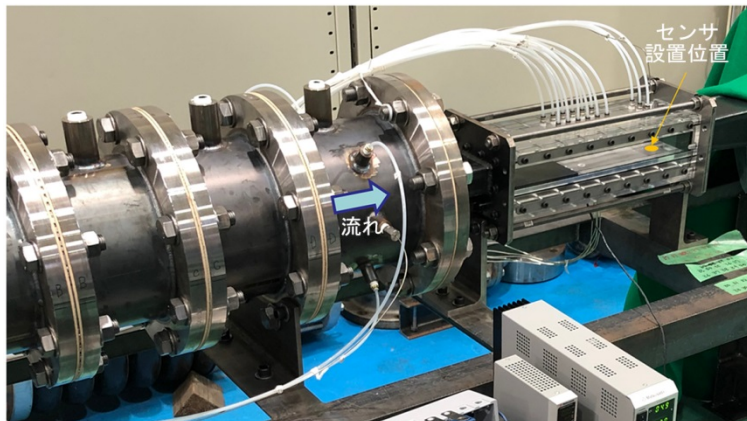


図3 校正試験風洞外観

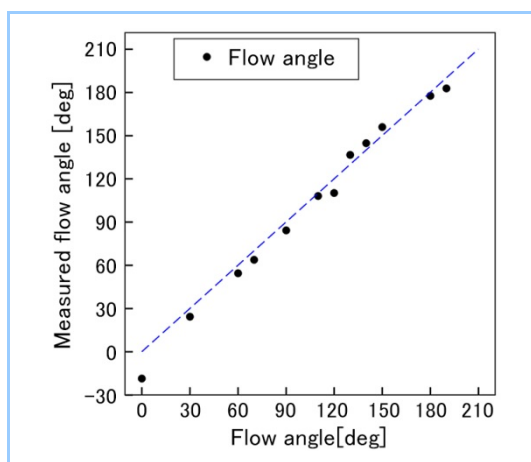


図4 流れ角計測の校正試験結果

## 4. 軸流圧縮機試験

### 4.1 試験装置

軸流圧縮機試験には、図5に示す当社が保有する1.5段のリグ試験装置を用いる。なお、定格回転数は5500rpm、計画圧力比は1.08、動翼隙間は約3.4%翼高さである。円筒面であるケーシングにセンサを設置するため、センサ配線を含むフレキシブルシートを活用した。図6に示す通り、1段動翼のケーシング面に軸方向4点の流れ角計測センサを配したフレキシブルシートを設置し、流れ角計測を行った。なお、流れ角計測センサは1段動翼前1点、1段動翼通過領域に3点配置している。フレキシブルシートは専用の取付け板に貼り付けた上で、流路面との段差が生じないように注意して、内周ケーシングに組み込んでいる。また、フレキシブルシートはセンサ配線を含んでいるが、その柔軟性から狭い空間内でも数回曲げることで外部への配線引出しを可能としている。引き出したシートは、計測用の各種基板と試験装置外部で結線し、計測用PCと接続してデータを取得している。

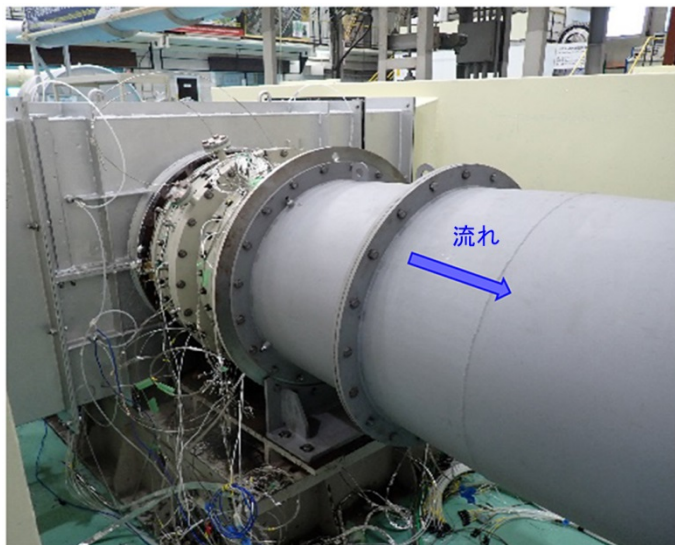


図5 軸流圧縮機リグ試験装置

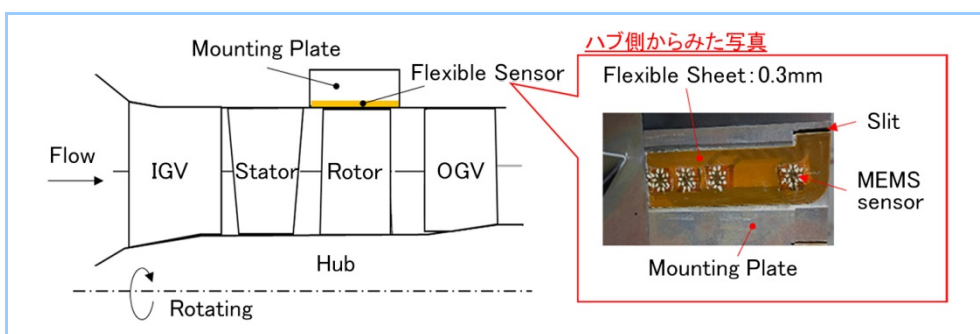


図6 計測位置とセンサ配置

### 4.2 試験条件

図7に示すとおり、試験は6作動点で実施した。設計作動点(Q1)を含む右肩下がり3点(Q1～Q3)では、主として作動点変化による流れ角変化を捉えることを目的に計測し、数値解析結果との比較を行う。また、右肩上がり3点(Q4～Q6)では、1段動翼の圧力変動が大きく非定常性の強い作動域のため、主にセンサの健全性確認を目的として試験をした。なお、試験装置への組込み時に1つのセンサが破損していることが判明したため、計測結果は軸方向3点のみ評価している。残りのセンサについては、Q4～Q6を含めた全ての作動点で、試験中にセンサ信号が途絶えることなく計測できることを確認している。

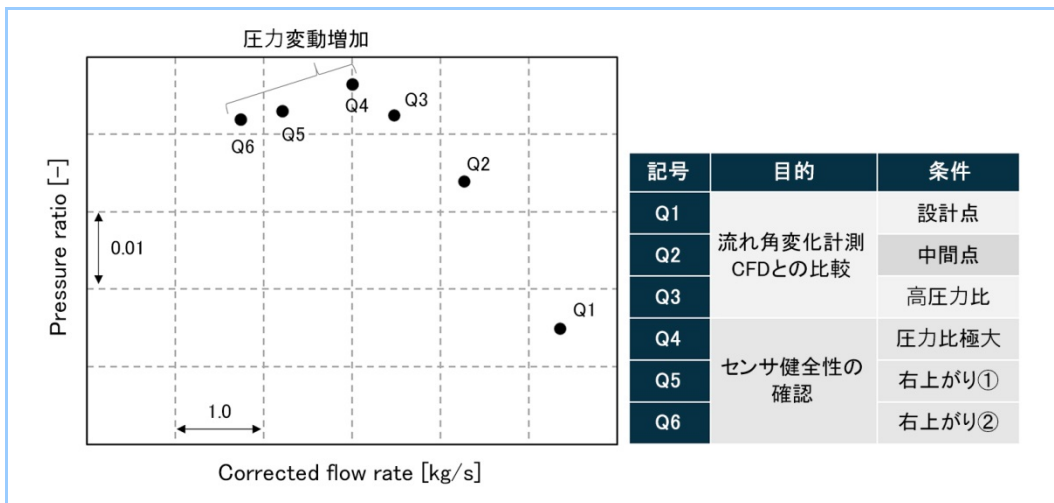


図7 試験条件



## 5. 流れ角計測結果

### 5.1 数値解析手法

試験を実施したリグ試験装置の吸気ダクトから排気部までの1翼列分をモデル化し、試験条件を模擬する数値解析を実施した。数値解析では、構造化マルチブロック RANS ソルバのインハウスコードを使用し、乱流モデルには Spalart-Allmaras モデルを採用して、定常解析を行った。解析格子は全て構造格子で作成し、セル数は全体で約 2000 万である。入口境界条件には全圧と全温を、また出口境界条件には静圧を与えて試験時の圧力比と一致するように調整している。

### 5.2 計測結果との比較

試験結果と解析結果の作動点比較を図8に示す。解析結果は破線で示し、試験の圧力比と同じ点をプロットで示している。設計点(Q1)から圧力比のピーク手前(Q3)までの結果は、Q3 のみ修正流量に若干ずれがあるが、概ね試験条件を模擬していることが分かる。次に、図9に Q1～Q3 の作動点について、計測結果と解析結果における絶対流れ角の比較結果を示す。横軸は軸方向位置、縦軸は絶対流れ角を示す。また、計測値は時間平均で算出した値であり、動翼回転に伴う周方向の流れ変化を平均したものと同等である。なお、エラーバーは時間平均値に対する標準偏差を示す。解析結果は、軸方向同位置における周方向平均値であり、平均流れを表す。

設計点である Q1 の作動点では、計測と解析は全体的に良好に一致しており、本センサにより動翼隙間部のケーシング端面において流れ角計測ができることが確認できた。さらに、逆流域となる最下流の計測位置(Sensor4)でも、解析値と良く一致しており、逆流領域でも流れ角が計測でき、逆流判定にも使えることが分かる。一方で、Q1 より高圧力比側の作動点(Q2, Q3)ほど、計測値と解析値の乖離が拡大し、特に1段動翼前縁(L.E)の下流計測位置(Sensor2)では乖離が大きい結果となっている。図 10 に解析で得られた動翼ケーシング面における限界流線を示すが、Sensor2 付近では、高圧力比側で周方向に翼端漏れ渦による順流と逆流が混在して周方向に変化の大きい流れとなっているため、センサの時間応答性不足や解析の予測精度などが影響していると推察される。今後、センサの時間応答性検証を進めるとともに、非定常解析結果との比較を行うことで、センサの更なる精度向上を図る予定である。

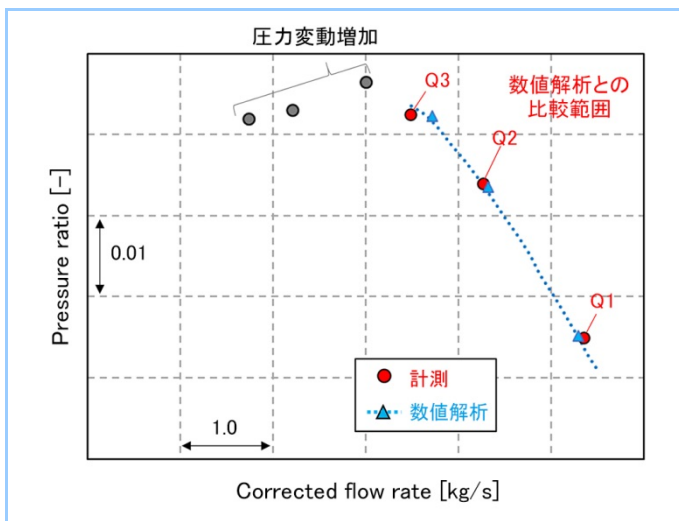


図8 試験作動点と数値解析結果の比較

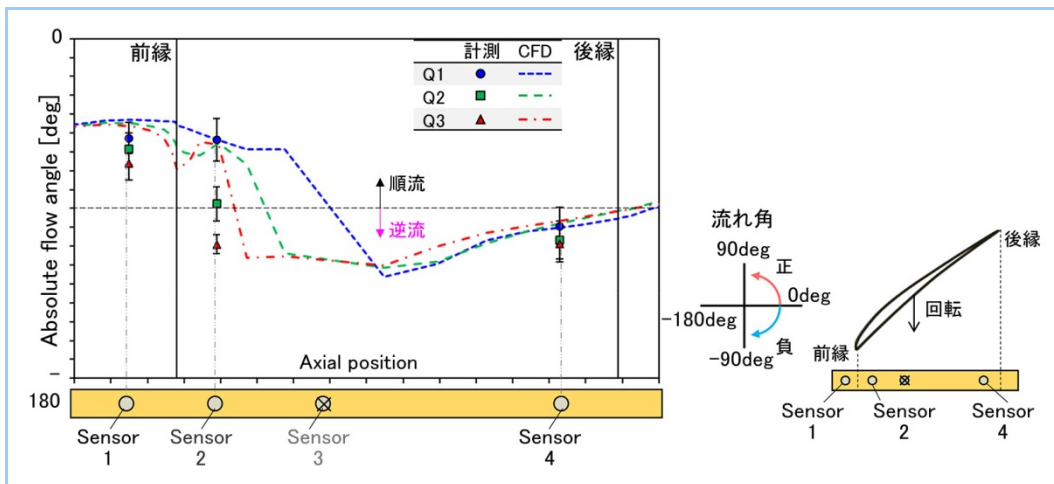


図9 流れ角計測結果と数値解析結果の比較

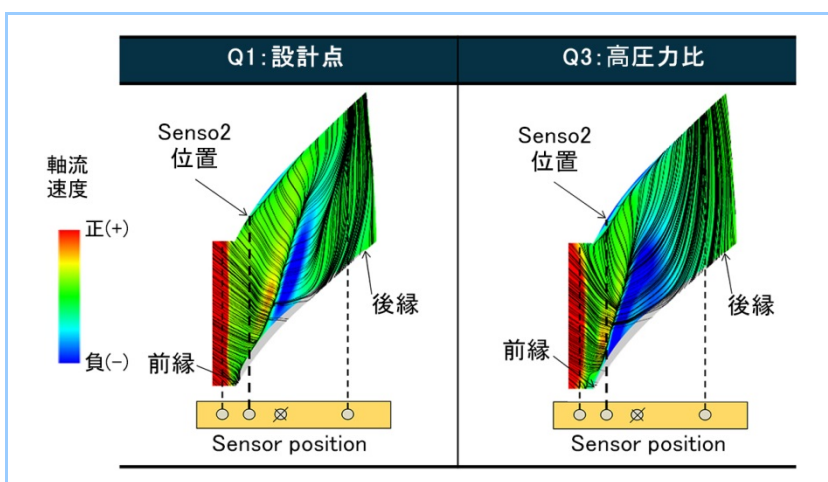


図10 動翼ケーシング面の限界流線比較

## 6. まとめ

当社は、流体機械の高効率化、信頼性向上に向けて、従来計測が困難であった狭い隙間部に適用可能な薄型の流れ角センサを、東京理科大学と共同で開発した。開発した薄型の流れ角計測センサを軸流圧縮機の動翼先端ケーシング面に適用し、設計点における流れ角計測ができること、逆流領域の判定にも使えることを確認した。また、本センサを流体機械の翼端部やシール部などに複数適用することで、起動停止等の繰り返して生じるクリアランス拡大等による流れ角変化を捉え、クリアランス拡大の生じる段落位置を分解前に把握でき、性能回復提案に貢献することが期待される。今後、計測精度の向上と生産性向上に向けて、電極設計を含めた製造プロセス最適化やセンサの時間応答性検証を実施していくとともに、センサをより幅広い流体機械へ適用していくため、ニーズに応じたセンサ改良を行う予定である。

## 参考文献

- (1) Koichi, M. et al., Development of a flexible MEMS sensor for subsonic flow, Micromachines, Vol. 13, Issue 8, 2022, 10.3390/mi13081299
- (2) 大村尚登ほか, フレキシブル MEMS センサを用いた圧縮機翼端ケーシング壁面における流れ角計測, 日本機械学会第 100 期流体工学部門講演会, OS07-04