

# 高湿分ガスタービン内部の気液流れに関する数値解析 Research about the gas-liquid flow inside humid air turbine

東京大学大学院工学系研究科  
渡辺・姫野研究室 修士1年 吉田弘祐

## Abstract

Over Fogging is one of the methods to tackle the problem which the power of gas turbine declines at high temperature. It is inlet fogging system and some of the drops don't evaporate completely before the compressor and go into it. Temperature at upstream of compressor declines by an evaporative cooling effect, and moreover, intercooling effect is also gained when the incoming droplets evaporate at the inside of compressor. However, some of the incoming droplets collide with the IGV (Inlet Guide Vane) and accumulate on the trailing edge of the vane at the inside of compressor. Finally, the accumulated water could cause erosion because it is shed from the vane as large droplets and they hit the rotating blade in the downstream. In order to suppress these phenomena, figuring out how droplets move in the compressor is necessary. This research aims at understanding the droplets movement around the IGV by CFD.

## 1. 研究背景 / Research Background

2015年に開催された第21回国連気候変動枠組条約締約国会議(21st Conference of the Parties, COP21)ではパリ協定<sup>1)</sup>が合意され、温室効果ガスの削減目標を掲げて再生可能エネルギーの利用が促進されている。しかし、太陽光発電や風力発電のような再生可能エネルギーを利用した発電方式の多くでは出力が自然現象の影響を強く受けるため、それらが単独で安定した電力を恒常的に供給することは難しい。それに対して火力発電の1種であるガスタービン発電は既存の発電方法の中でも高い時間応答性を持つため、悪天候による発電量不安定時や電力需要の高まる時間帯に高効率火力発電を効果的に活用することが重要な課題として注目されている<sup>2)</sup>。

火力発電設備には電力供給の不安定時や夏季日中などのピークロード時における高速応答が期待されている一方で、一般に大気温度が上昇すると、圧縮機の駆動に必要な仕事が大きくなることや、空気の密度が低下して質量流量が小さくなることによりガスタービンの出力は低下するという問題がある。その対策の一つとして、圧縮機上流で微細な水を噴霧して吸気を冷却する吸気噴霧冷却が挙げられる<sup>3)</sup>。これは、吸気ダクトにおける蒸発潜熱による吸気温度の低下の効果が得られるのに加えて、圧縮機内部にまで液滴が入り込み蒸発することで中間冷却の効果も得られる。この中間冷却効果によって、多湿な環境でも十分な出力増加の効果が期待される。

しかし、圧縮機内部に噴霧液滴が入るために、液滴は翼の前縁に衝突・付着して液膜・液脈を形成したのち、翼後縁に液だまりを作る。この液だまりはやがて粗大液滴として下流へ飛散し、エロージョンの原因となりガスタービンの劣化を引き起こす(Fig.1)。従って、圧縮機内部における液滴の挙動を考慮する必要がある。しかし、高湿分流れではプローブの耐水性や計測技術などの問題から流れ場に関する実験計測が困難であるため詳細なデータを集めにくい。したがって、実験・解析ともにガス

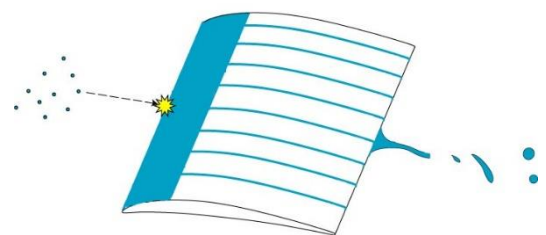


Fig.1 Droplets movement on blade

タービン全体の性能に関するものが多い一方で翼周りの流れまで詳細に調べている研究例は少なく、圧縮機内部の液敵の挙動に関して不明な点が多いのが現状である。

## 2. 本研究室における先行研究 / Previous Research

今後の研究の見通しを立てるために本研究室で行われてきた研究をまとめる。

### 2.1 実験

本研究室では IGV 翼(1 枚)を対象として翼周りの液挙動についての可視化実験が行われてきた。2016 年実験までは通常翼(NACA63 翼)を対象として、翼面背側、腹側の詳細な可視化実験や翼下流での粒径計測を行い、通常翼の液挙動に関する知見がまとめられた。2017 年実験から濡れ性や後縁形状をパラメータとして変化させた翼を通常翼とともに用いることで、翼面上液挙動に関して更なる知見を得られた、以下にその詳細をまとめる。

#### 2.1.1 翼表面の濡れ性が液挙動に与える影響

村田らによって翼面の濡れ性の異なる 2 種類の翼を用いた可視化実験が行われ、以下の知見が得られた。<sup>[4]</sup>

- ・ 濡れ性を変化させると、翼面上の液挙動が変化するとともに後縁に形成される液だまりのスパン方向の大きさが変わる
- ・ 上記変化に伴い、後縁からの飛散位置は通常翼では離散的に、撥水翼では連続的になる
- ・ 後縁の液だまりの大きさの違いにより微粒化形式が変化し、それに伴い粒径分布も変化する

#### 2.1.2 翼後縁形状が液挙動に与える影響

村田の研究を受けて、後縁形状が後縁に形成される液だまりに感度を持つと考え、筆者らにより後縁形状の異なる 2 種類の翼を用いた可視化実験が行われ、以下の知見が得られた。<sup>[5]</sup>

- ・ 通常翼と尖り翼で翼面上液挙動は同様
- ・ 後縁に形成される液だまりは通常翼は離散的で、尖り翼は後縁全体で繋がり連続的
- ・ 飛散の仕方は迎角によって変化
- ・ 2 次微粒化位置は飛散の仕方に応じて変化
- ・ 液だまりや飛散、2 次微粒化位置の違いはあるが、1 コード下流での粒径に変化は現れない
- ・ 尖り翼に特有な液だまりの原因は流れの剥離であると予想される

### 2.2 数値解析

#### 2.2.1 翼に付着する液量の解析

清水によって翼に付着する噴霧衝突量に関する数値解析が行われ、実験結果と概ね一致する解析結果を得た<sup>[6]</sup>。また、得られた解析手法を用いて、入り口噴霧量、噴霧粒径、入り口流入角に関するパラメトリックスタディを行った。

そこから、翼面に付着する噴霧衝突量は噴霧粒径にもっとも感度をもち、Fig.2,3 に示すような変化が得られた。この結果を整理するパラメータとして、液滴の流れに対する追従性を示すストークス数が用いられ、ストークス数の小さい(液滴径が小さい)領域では、液滴は気流の流線と完全に一致

するため、付着量も少なくなる。一方、ストークス数の大きい(液滴径が大きい)領域では、液滴の流跡線はほぼ直線となり、翼に対する噴霧の衝突量は翼の主流に対する投影面積で予測できるという知見が得られた。

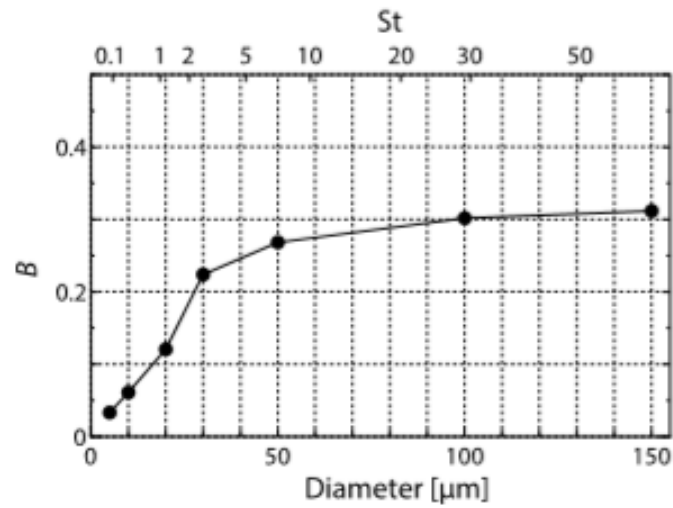


Fig.2 Comparison of B with the different droplet diameters  
B: total impingement amount

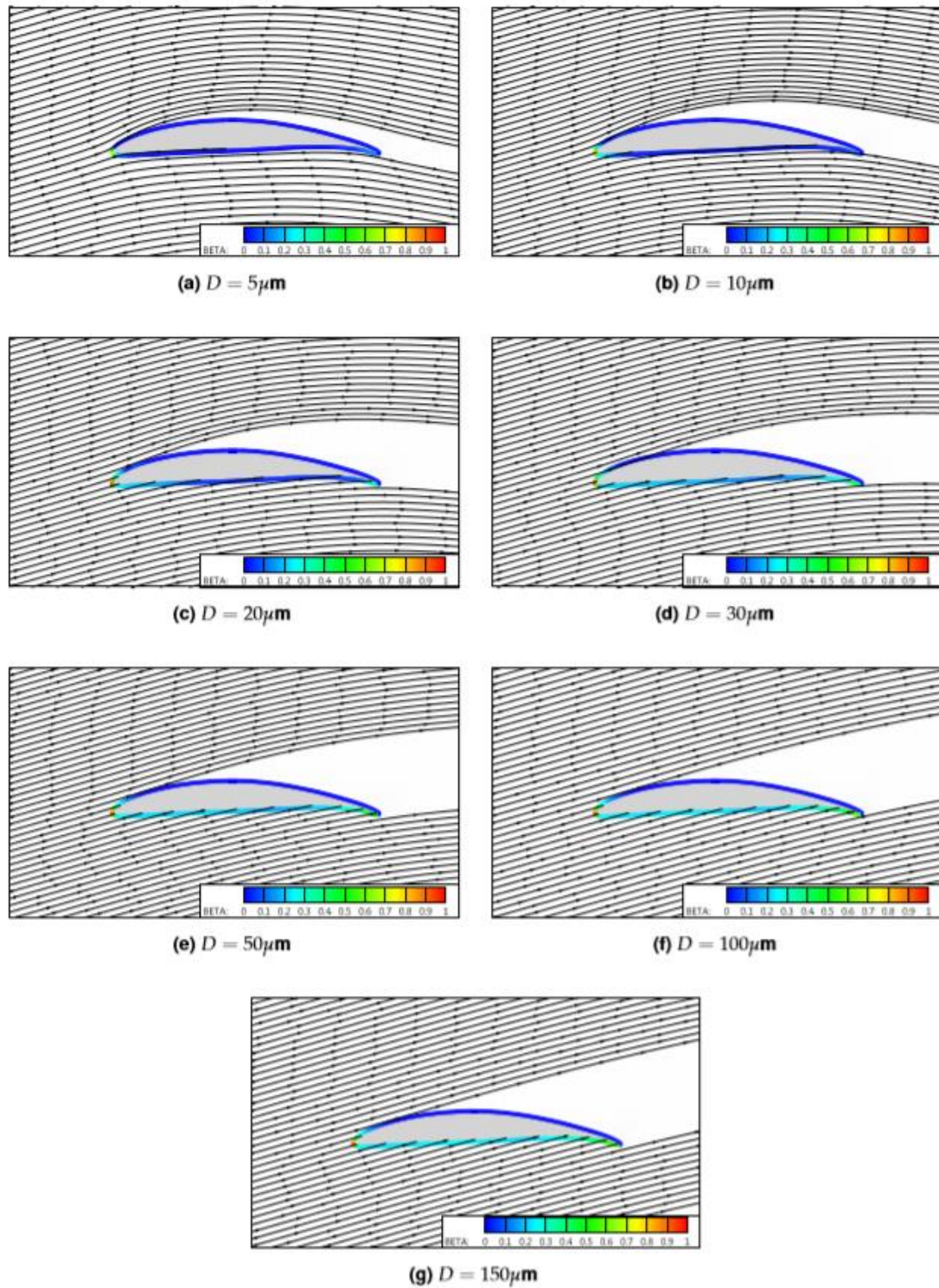


Fig.3 Droplet trajectories and droplet impingement amount with different droplet diameters

### 3. 研究目的 / Research Objectives

翼周りの液挙動について Fig.4 にまとめる。先行可視化実験から、液膜や液脈などの翼面上液挙動や液だまりの挙動に関する知見は整理されてきた。一方で、飛散に直接的な影響を及ぼす液だまり形成の変化については、翼後縁での流れ場による影響であるという予想はされているが、高湿分流れではプローブの耐水性や計測技術などの問題から流れ場に関する実験計測が困難であるため、その予想は検証できていない。従って、姫野らが開発した気液二層流解析コード CIP-LSM を用いた CFD からのアプローチが求められる。

また、翼面上液挙動に関しても、液膜・液脈それぞれの振る舞いに関する知見は整理されているが、液膜から液脈に遷移する現象についての知見は得られていない。この現象に関しては、翼表面の濡れ性が及ぼす影響が大きいと考えられるが、実験で濡れ性を連続的に変化させた翼を用意するのは困難である。しかし、CFD によりこの現象を再現できれば、濡れ性によるパラメトリックスタディにより、液膜遷移に関して知見を得られることが期待される。

以上より、本研究では実験によるアプローチを補完し、翼周りの液挙動に関する更なる知見を得ることを目的として、CFD による翼面上液挙動の解析を行う。

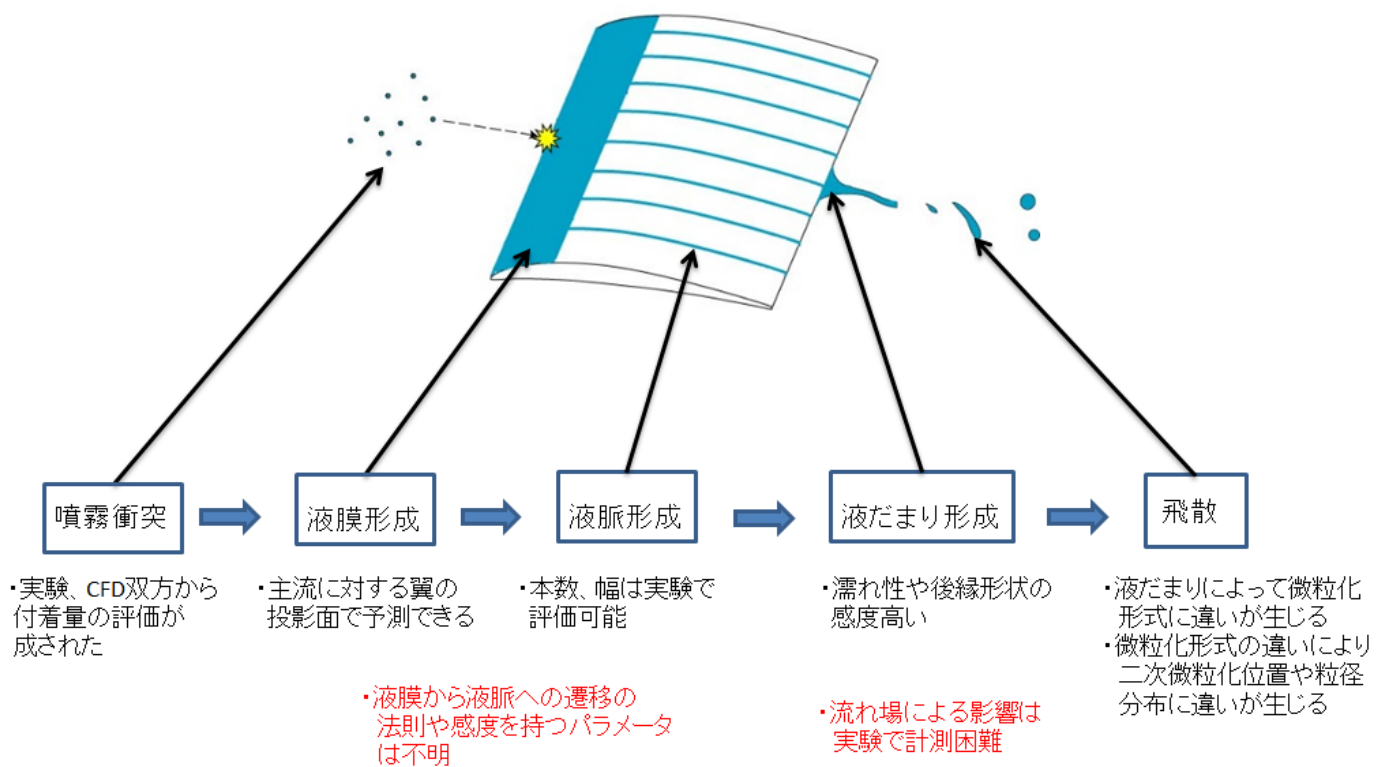


Fig.4 Flow chart of droplets movement

### 4. 今後の予定

- CIP-LSM コードを用いて計算練習を行い、コードの理解を深める
- 上記コードを用いた翼面上液挙動解析モデルを考える

## 参考文献 / References

- [1] "Adoption of the Paris Agreement", Conference of the Parties, Twenty-first session, United Nations Framework Convention on Climate Change, FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1
- [2] 経済産業省エネルギー庁, "平成 26 年度エネルギー白書", (2014)
- [3] 宇多村元昭, "ガスタービン吸気水噴霧冷却技術", 日本ガスタービン学会誌, Vol.37, No.4(2009), pp.203-209.
- [4] 村田遼, "噴霧流れ中の翼面上液挙動と翼後縁から飛散する液滴に関する研究", 東京大学修士論文, (2017)
- [5] 吉田弘祐, "噴霧流れにおける翼面上の液体挙動に及ぼす後縁形状の影響", 東京大学学士論文(2018)
- [4] 清水敦司, "過飽和噴霧を用いた翼列流れ中の 液滴挙動に関する数値解析", 東京大学修士論文, (2015)