

## 2024年度将来回転翼機研究会／回転翼解析技術交流会 チルトウィング機の風洞試験及び飛行試験事例の紹介

○ 岩本 智文(SUBARU), 高谷 亮太 (SUBARU),

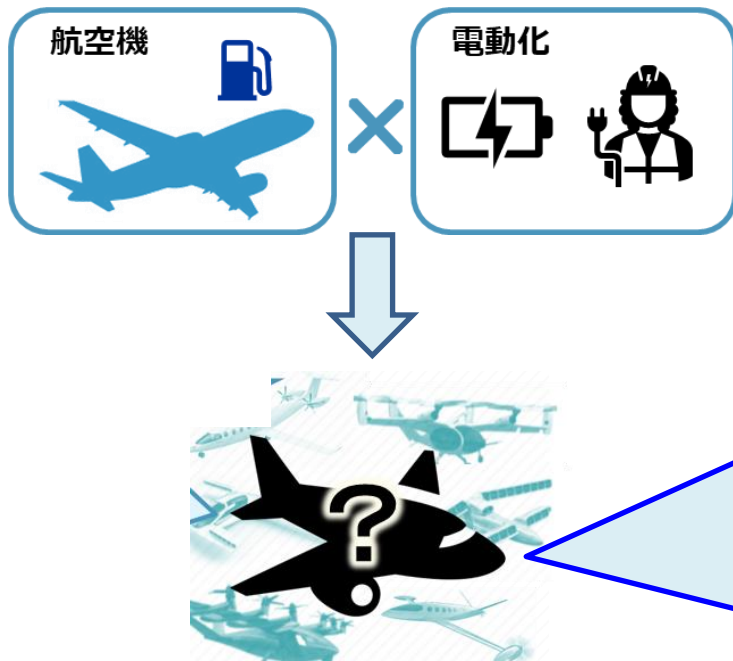


## 目次

1. 目的と研究背景
2. チルトウイング機の風洞試験
  - － 供試体と試験設備
  - － 試験条件と計測項目
  - － 試験結果
3. チルトウイング機の飛行試験
  - － 試験概要と供試体
  - － 試験結果
4. まとめ及び所感

# 1.目的と研究背景（1／2）

- ・ 近年、「空飛ぶクルマ」の研究開発に代表されるようなeVTOL機の研究開発が盛んにおこなわれている
- ・ 電動化に伴い推進系の設計自由度が増し、新しい機体コンセプトが次々に提案されているが、電動化の特性を最大限活用することが可能な機体レイアウトの見極めが重要となる。



【電動化に伴う航空機設計】

## 【eVTOL、電動航空機の例】



## 1.目的と研究背景（2／2）

- ・ 本発表では、将来の電動航空機レイアウト候補の一つである分散推進の機体に関する基礎データの取得を目的として実施した、チルトウィング機の風洞試験と飛行試験の事例を紹介し、その課題について共有する。

風洞試験



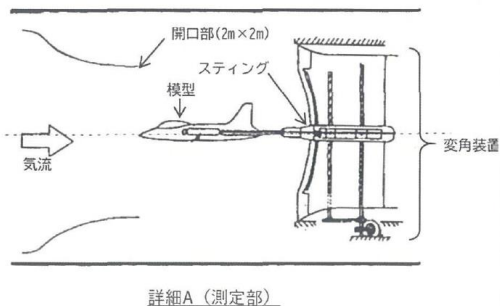
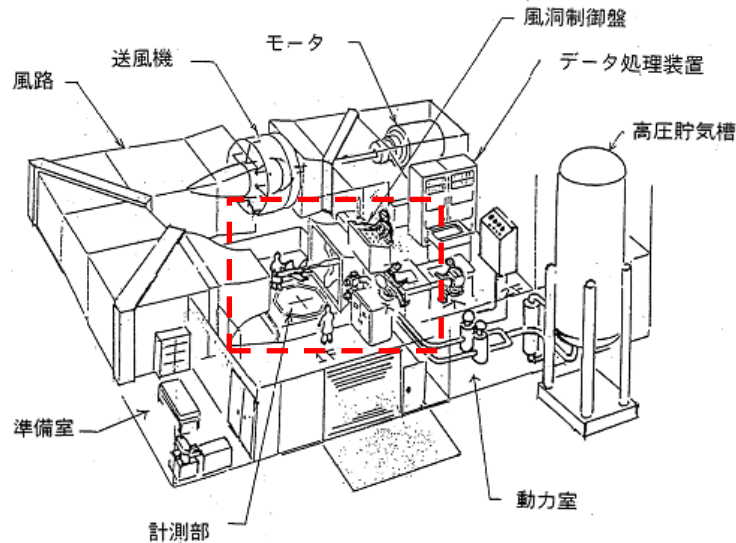
飛行試験



NASAにおいて開発されたeVTOLテストベッドである LA-8 を模した形状を用いた。

## 2.チルトウィング機の風洞試験 供試体と試験設備（1／3）

- 試験実施場所：株式会社SUBARU 航空宇宙カンパニー 2m×2m低速風洞
- 供試体：LA-8模擬形状（NASA Langley eVTOLテストベッド）



風洞諸元

|      |                          |
|------|--------------------------|
| 形式   | 大気圧連続循環式                 |
| 風速   | 0～70 [m/s]               |
| 測定部  | 2m(H)×2m(W)×3m(L)<br>開放型 |
| 模型支持 | ストラット支持及びスティング支持         |

風洞試験模型



<https://evtol.news/news/nasas-la-8-generating-public-evtol-data>

風洞試験模型



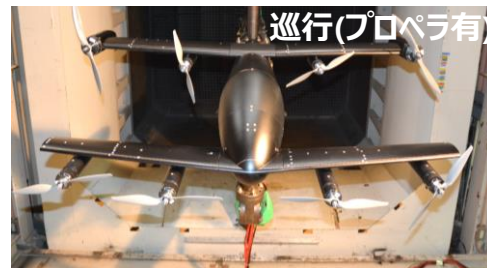
## 2.チルトウィング機の風洞試験 供試体と試験設備（2／3）

- ・チルト機体の全機空力特性把握を目的に、NASAラングレーが公開しているLA8形状を使用  
⇒風洞試験におけるデータ生産性の向上を狙い、**モータによるチルト機構を有する供試体**とした。

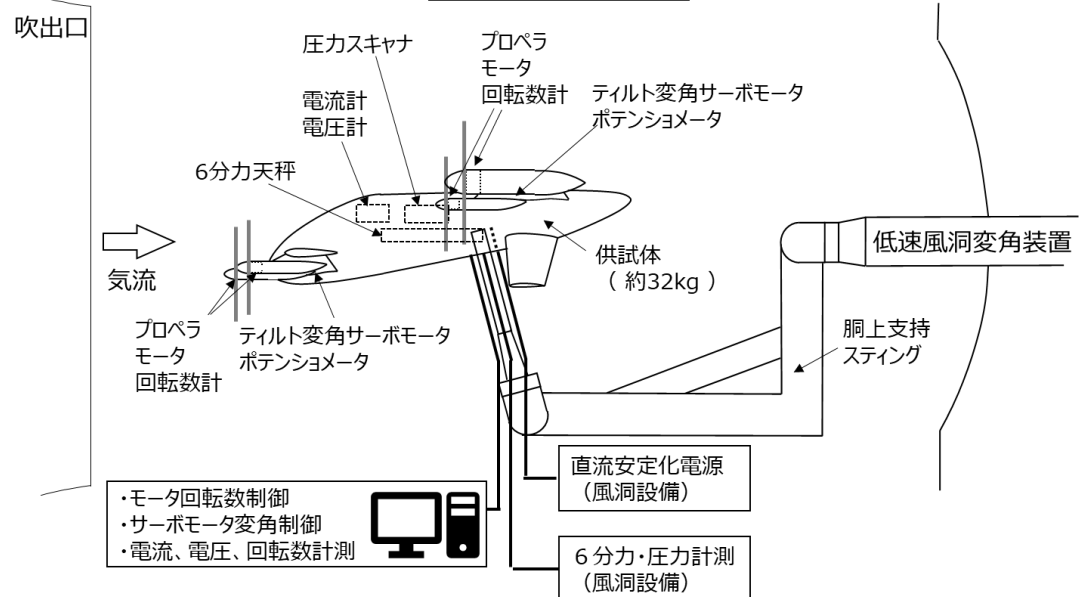
### 【模型諸元】

|      |                          |
|------|--------------------------|
| 模型   | : チルトウイング型eVTOL<br>LA8模型 |
| 全幅   | : 1.44 m（プロペラ除く）         |
| 全長   | : 1.18 m                 |
| 全高   | : 0.32 m                 |
| 総重量  | : 32 kg                  |
| 模型素材 | : 3Dプリント樹脂、アルミ           |

### 【模型形態】

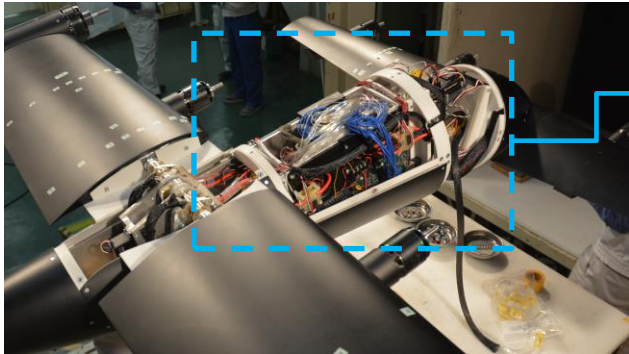


### 【試験概要図】



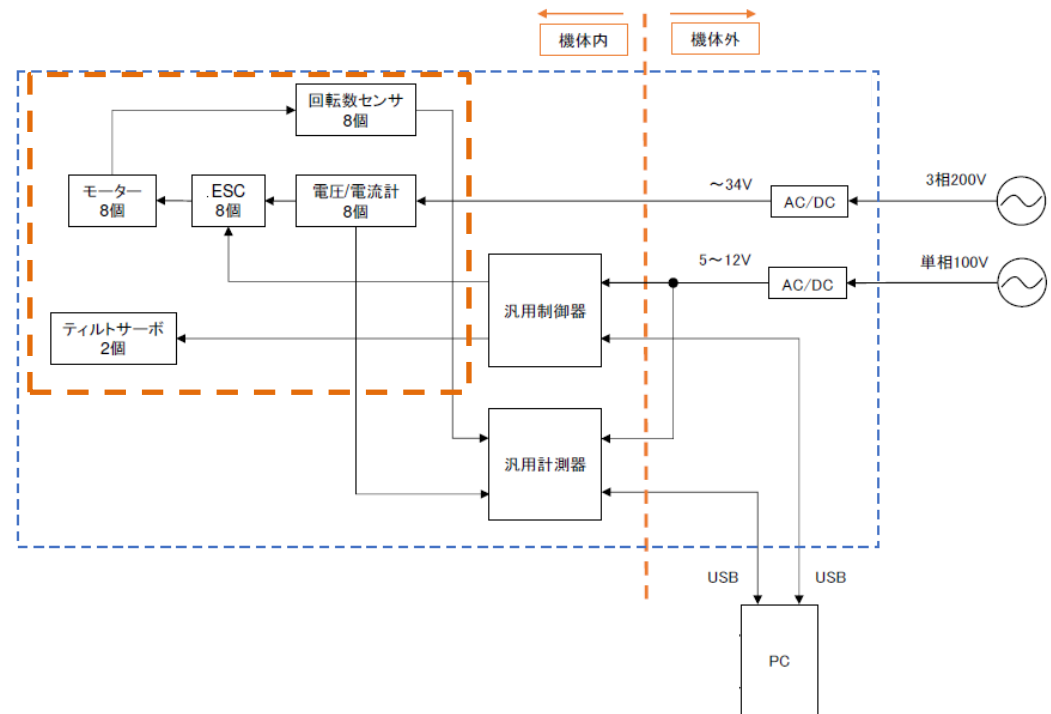
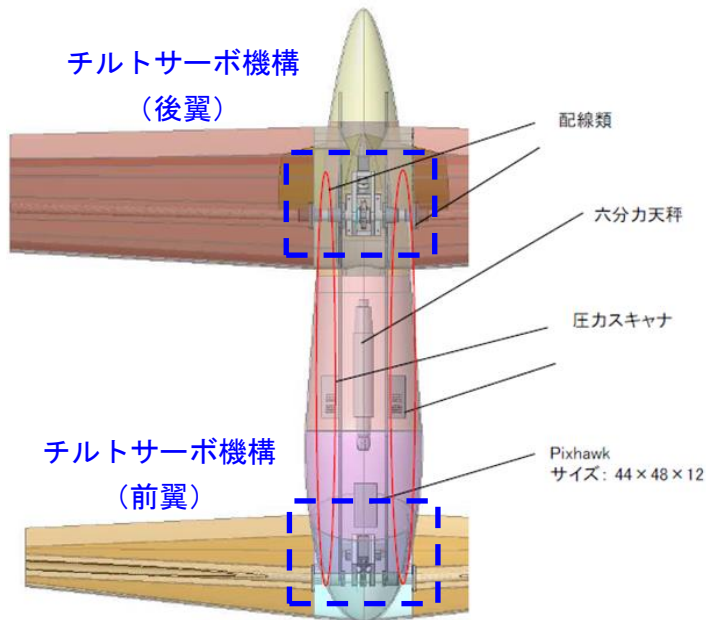
## 2.チルトウィング機の風洞試験 供試体と試験設備（3／3）

- 本風洞模型のシステムブロック概要図を以下に示す。  
⇒天秤配線・圧力配管に加え、モータの配線、センサ配線等で計測を行った。



圧力配管・天秤配線に加え、モータ等のハーネス配線も格納  
⇒計測器の搭載に注意する必要がある。

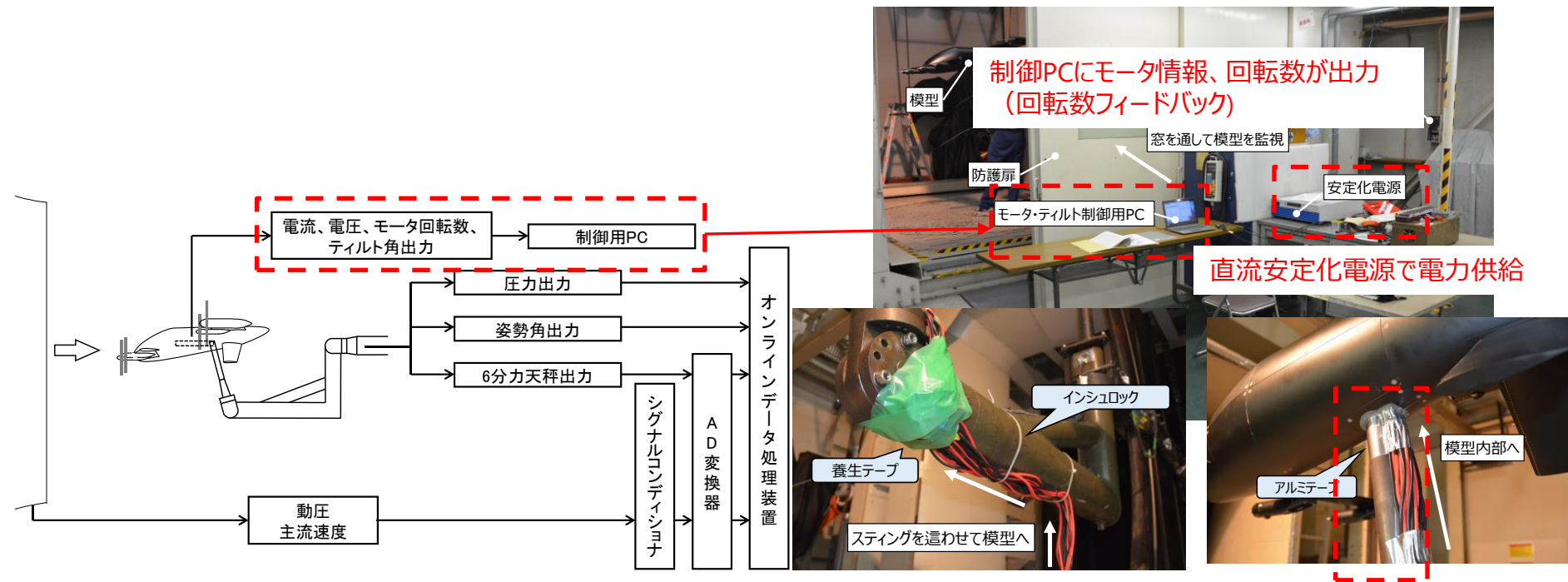
モータ電流/電圧、回転数センサの値を記録



## 2.チルトウィング機の風洞試験 試験条件と計測項目（1／2）

### 【計測項目】

- ・ 6分力計測
- ・ 圧力孔計測（今回結果は割愛）
- ・ モータ電流、電圧、プロペラ回転数



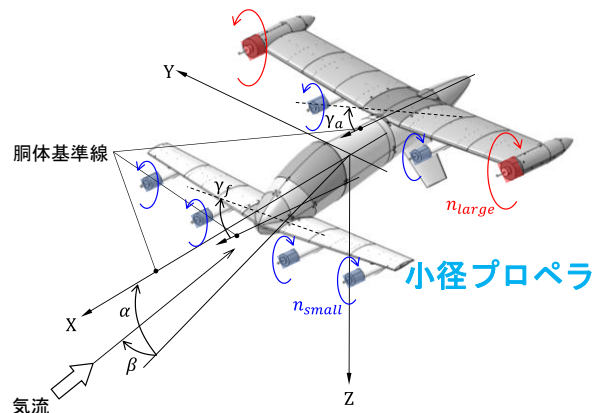
【計測システムと配線状況】

配線を模型内部に入れる必要がある

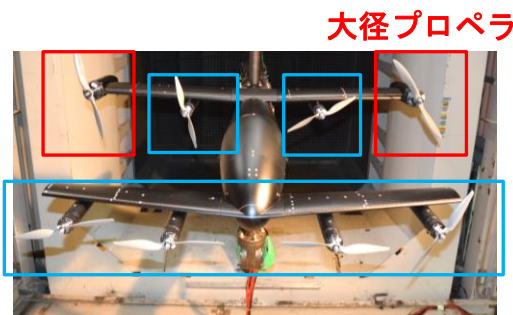
## 2.チルトウィング機の風洞試験 試験条件と計測項目（2／2）

### 【試験条件】

- ・ LA8形状における試験条件を下表に示す。
- ・ プロペラは12inchと16inchの2種類を搭載する（後翼のTip側のプロペラ径は大径）



【プロペラの回転方向】

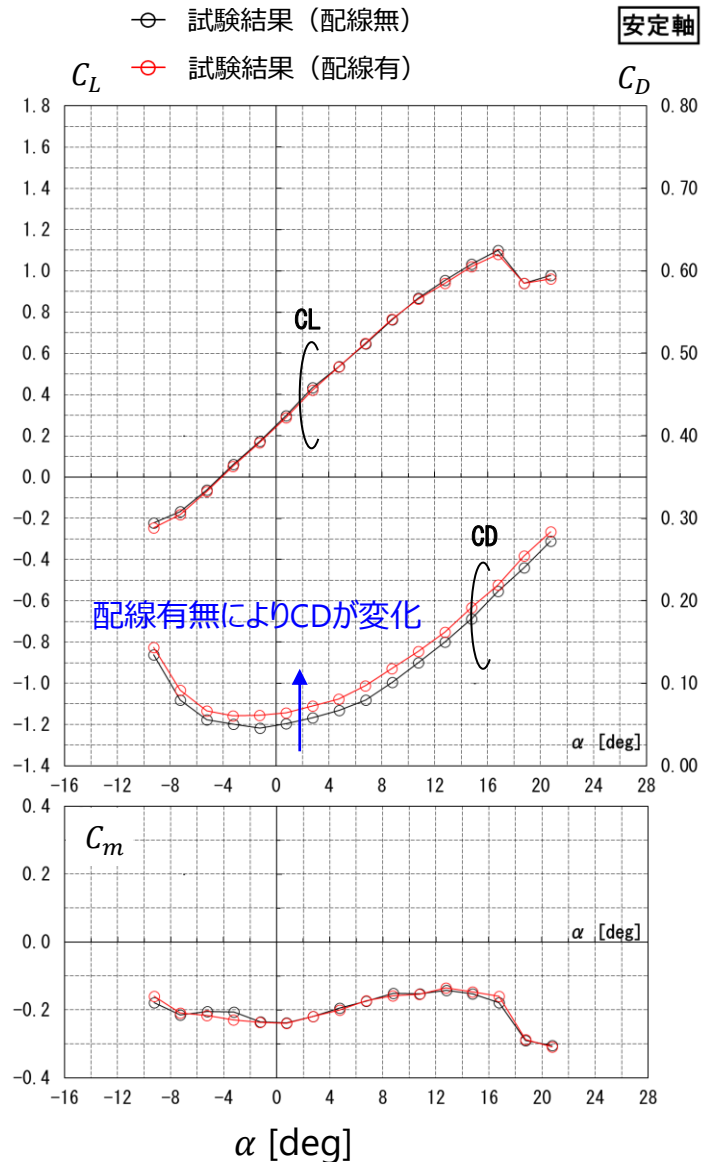


【チルト角変更】

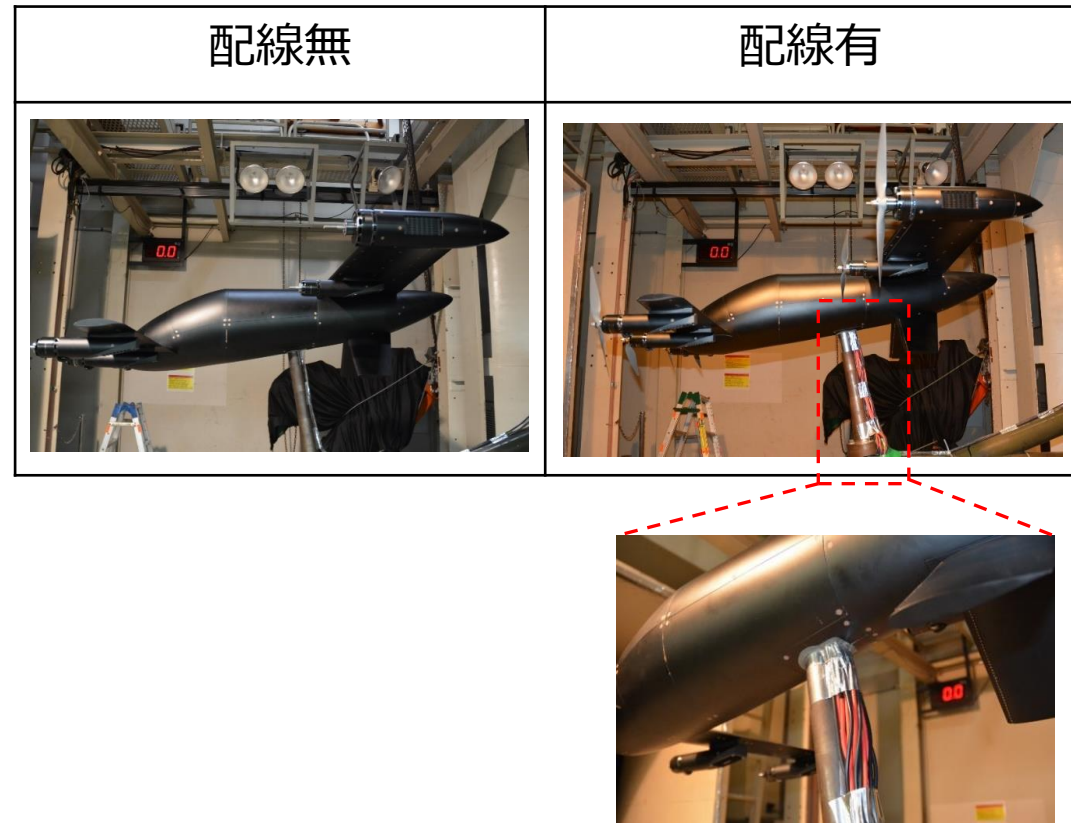
### 【試験条件】

| 試験項目／条件          | 主流流速<br>[m/s] | 迎角 $\alpha$<br>[deg] | 迎角 $\beta$<br>[deg] | 前翼チルト角<br>[deg] | 後翼チルト角<br>[deg] | 小径プロペラ<br>回転数 [rpm] | 大径プロペラ<br>回転数 [rpm] |
|------------------|---------------|----------------------|---------------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| 基本特性<br>(プロペラ有無) | 15            | -10～20               | -18～18              | 0               | 0               | 0～5000              | 0～3750              |
| 基本特性<br>(チルト変化)  | 15            | -10～20               | 0                   | 22.5～67.5       | 22.5～67.5       | 4000                | 3250                |
| ホバー特性            | 0             | 0                    | 0                   | 90              | 90              | 0～5000              | 0～3750              |

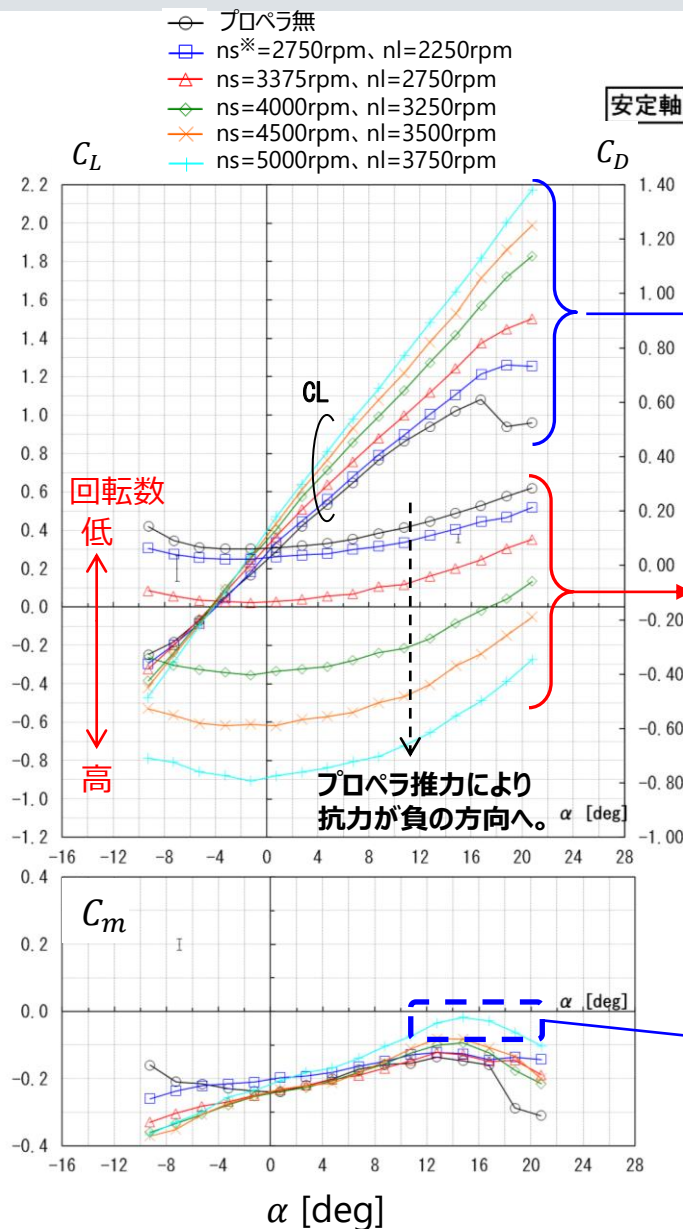
## 2. チルトウィング機の風洞試験 試験結果（配線干渉）



- 複数プロペラを有する機体の空力特性把握には、電力の供給が不可欠
- 配線有無により、**抵抗値  $C_D$  が大きく変化。**  
（100cnt程度。他の空力係数に比べて影響大）  
⇒ プロペラ有では補正して評価

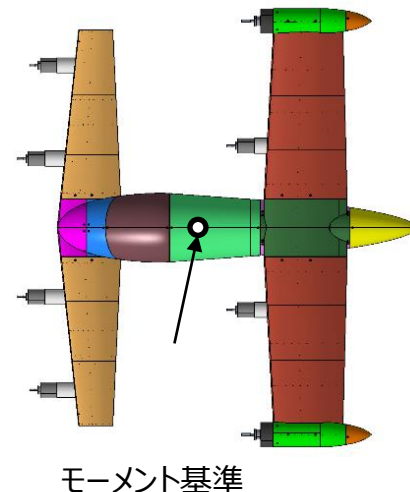


## 2.チルトウィング機の風洞試験 試験結果（プロペラ効果）



- ・抵抗には、機体に作用する空気力に加えプロペラの推力も加わる。
- ・複数のプロペラの空力干渉も入る  
⇒機体特性の把握には工夫が必要

プロペラ後流により前翼が失速せず  
前翼の吹き下ろしが後翼へ干渉  
⇒前翼優位の強い頭上げモーメント

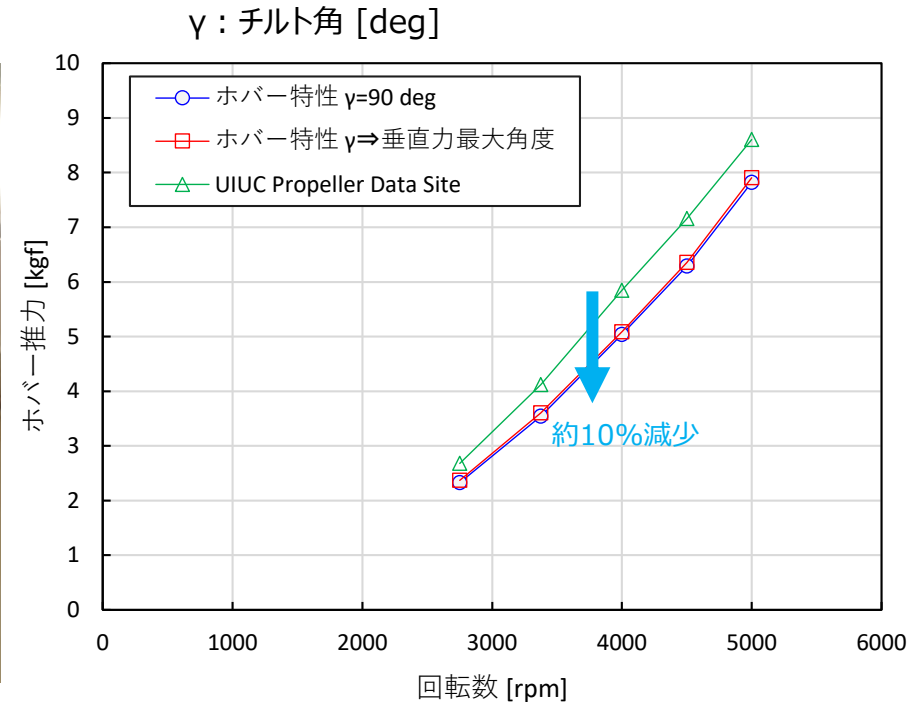
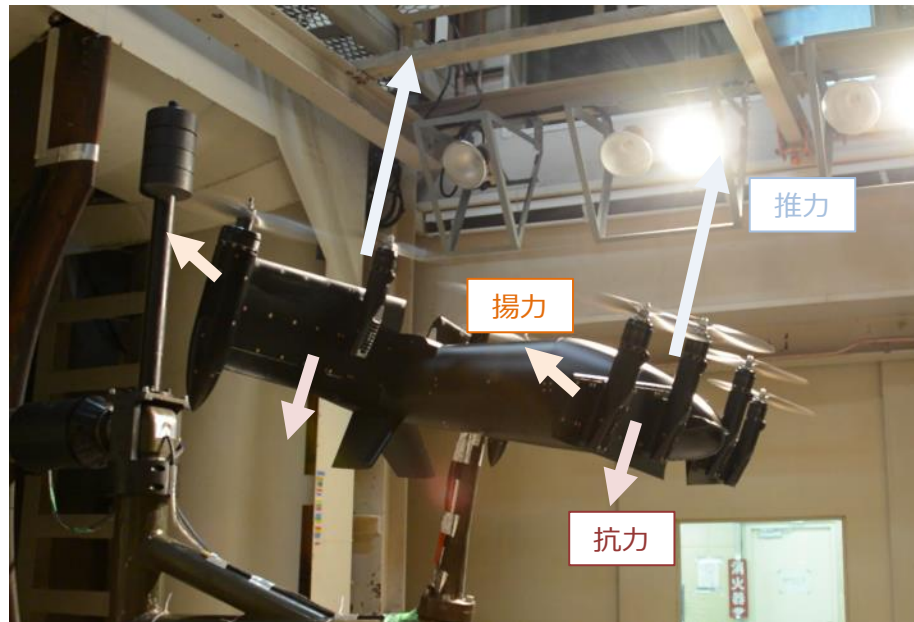


※ ns : 小径プロペラ回転数、nl : 大径プロペラ回転数

## 2.チルトウィング機の風洞試験 試験結果（静止推力計測）

- ・ 風速0m/sでチルト角90degでプロペラを回転させ、プロペラ単体実験データ※と推力を比較。

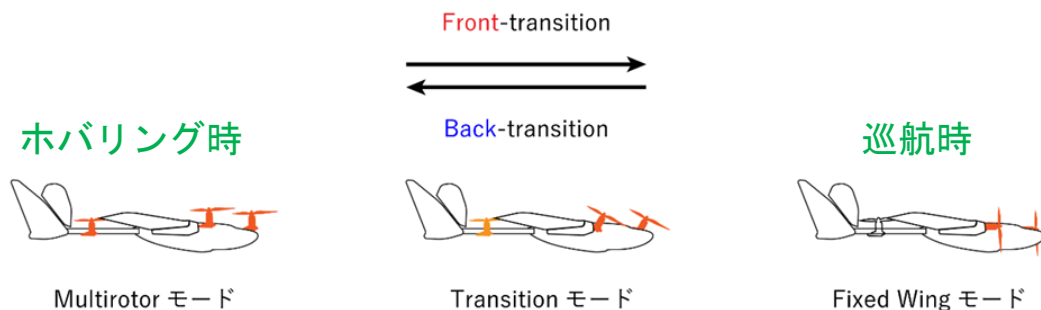
※J.B. Brandt, R.W. Deters, G.K. Ananda, O.D. Dantsker, and M.S. Selig (insert date downloaded), *UIUC Propeller Database, Vols 1-4*, University of Illinois at Urbana-Champaign, retrieved from <https://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html>.



- ・ チルト角  $\gamma = 90^\circ$  でホバ-させる
  - ⇒ 推力はプロペラのダウンウォッシュによりプロペラ単体推力から **9~13% 減少**
  - ⇒ **プロペラ後流が主翼に当たり、その抗力のため減少**

### 3.チルトウィング機の飛行試験 試験概要と供試体

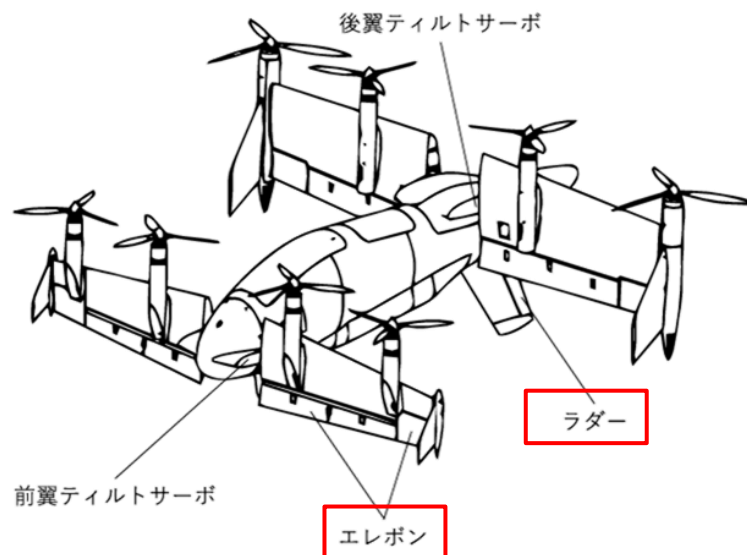
- ・ 実環境におけるチルトウィング型eVTOL機の飛行中のデータ取得を行い、飛行特性を取得した。
- ・ 飛行試験としては、①ホバリング試験、②遷移飛行試験の2種類を実施



#### 【VTOL機の遷移概要】



【LA8形状をトレースした試験飛行機】



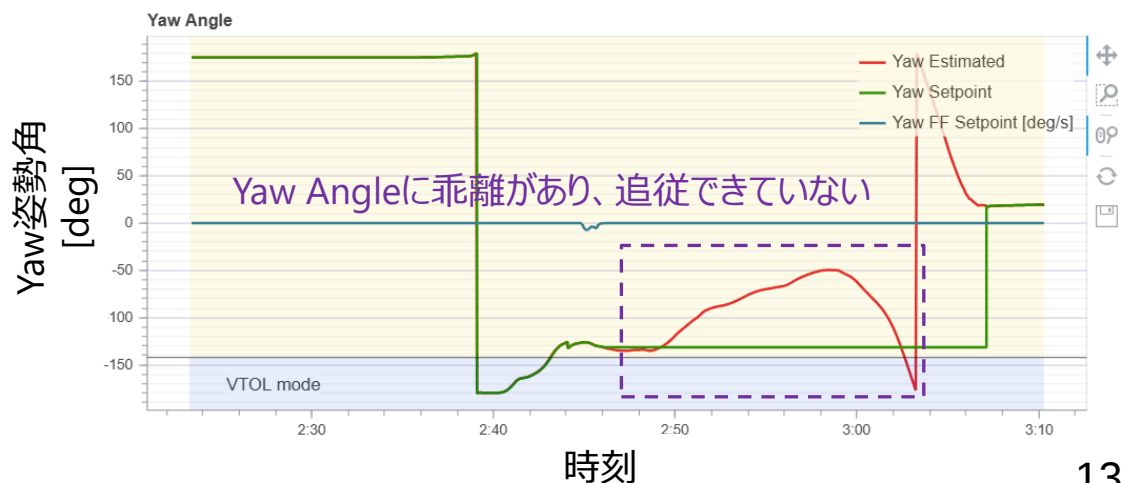
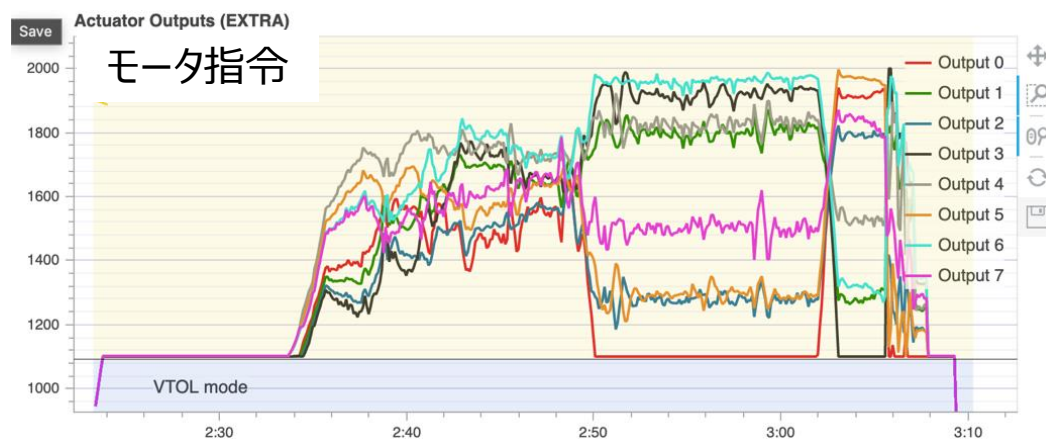
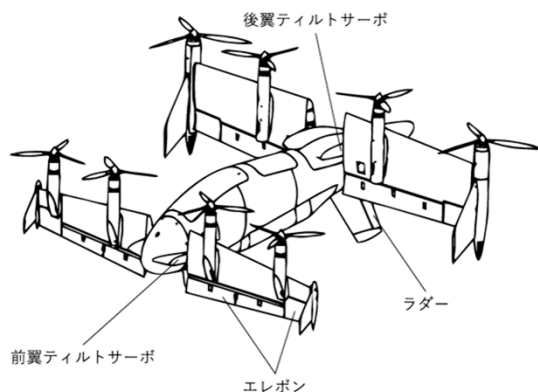
【舵面構成】

### 3. チルトウィング機の飛行試験 ①ホバリング試験（1 / 2）

- ホバリング試験の結果を以下に示す。
- マルチロータモードでは、機体のヨー方向制御をロータ反トルクによる回転数制御で行ったが、**制御力が十分ではなく、ヨー方向の制御が追従できていない。**  
⇒ロータの吹き下ろしを積極的に活用したエレボン舵面を使用してヨー制御改善を行った。



【ホバリング試験その1】

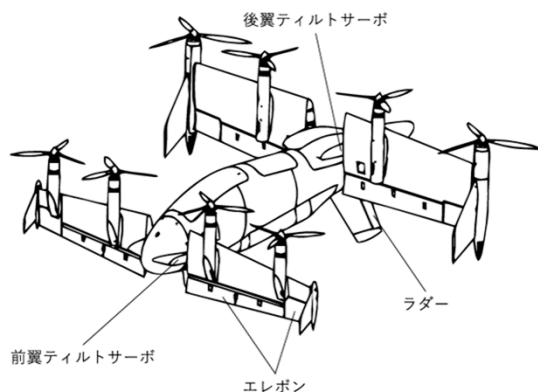


### 3. チルトウィング機の飛行試験 ① ホバリング試験 (2 / 2)

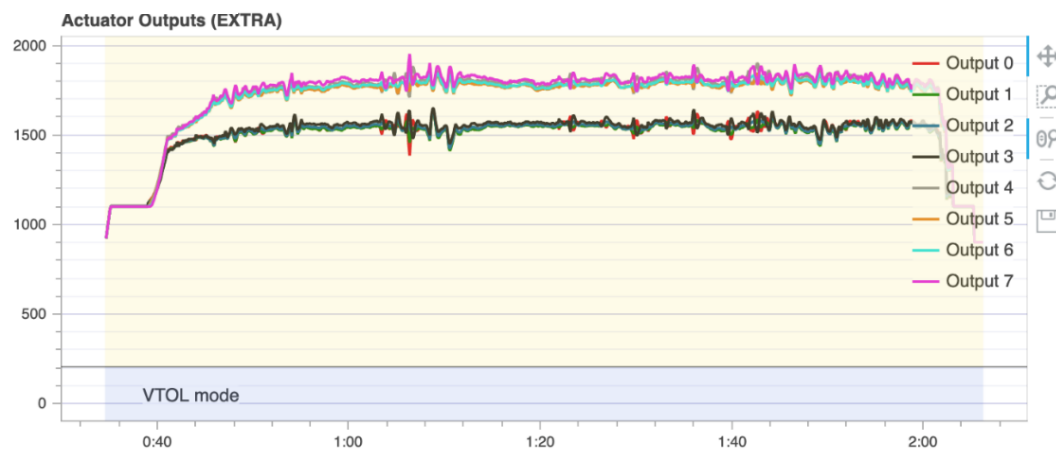
- ホバリング試験の結果を以下に示す。
- エレボン舵面を使用した制御ロジックに改修したところ、**ヨー方向制御の追従性が改善された。**



【ホバリング試験その2】



モータ指令



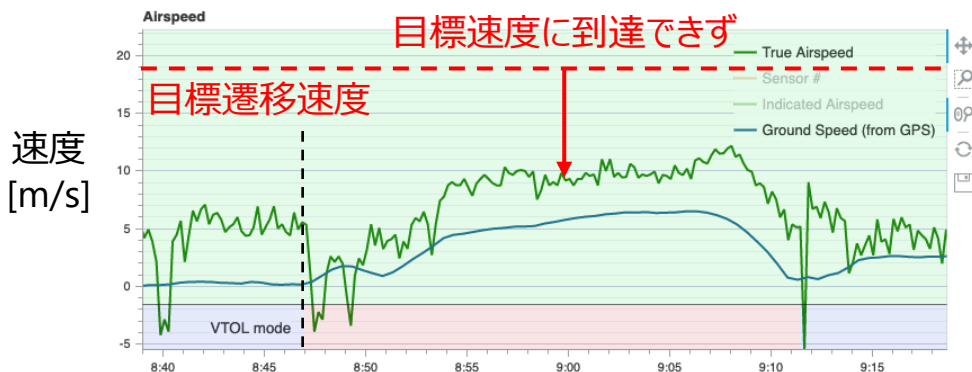
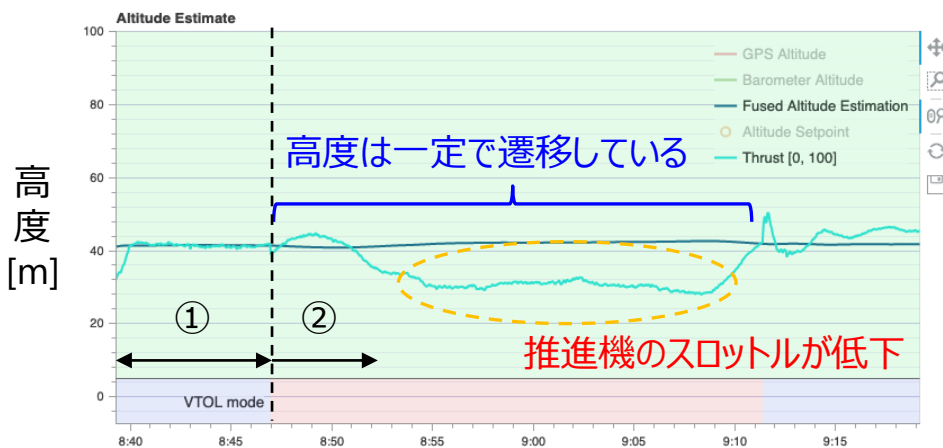
Yaw姿勢角  
[deg]



時刻

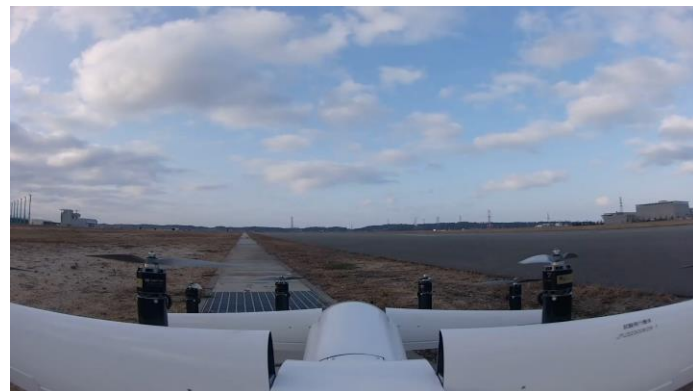
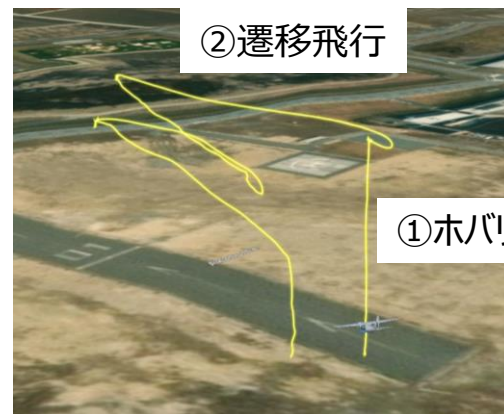
### 3. チルトウィング機の飛行試験 ② 遷移飛行試験

- ホバリングから高度保持による巡航への遷移を試みたが、**目標遷移速度に到達できなかった。**  
⇒ 遷移時におけるロータ推力上向き成分変化と機速増加による揚力増加の関係より、高度を保持するためにスロットルが低下し、加速できていないことが判明した。  
⇒ **推進器の推力と主翼との空力バランスや、遷移飛行状態での過渡的な空力特性**を考慮した、飛行評価の確立が必要になる。



時刻

SUBARU Proprietary



【遷移飛行試験】

## 4.まとめ及び所感

- ・ チルトウィング型の供試体の風洞試験と飛行試験の事例を紹介した。  
得られた知見や課題は以下の通り。

### 【風洞試験】

- ・ ドローン等の市場発展に伴い、パワー風試の供試体製作のハードルは低下した一方で、多数の電動機器を搭載した供試体においては、
  - － 従来のパワー風試の課題は更に影響が大きくなることに加え、**推進器作動条件の管理や各種干渉への対策**といった新たな課題が生じる。
  - － ホバリング状態や遷移状態を模擬した空力データを効率的に取得するため、風洞試験における**データ生産性の向上**がより一層重要になる（供試体の工夫等）

### 【飛行試験】

- ・ 複数の推進器を有する機体の飛行検証について、
  - － **複数のプロペラと機体の空力干渉の積極的な活用**による飛行特性（操縦性）改善に関して概念実証を行い、その有効性を確認した。
  - － 機体制御に空力舵面に加え推力を用いることで、運用範囲の拡大が見込める一方で、飛行データ評価においては、**飛行状態に応じた推進器推力と機体空気力及びそれらの干渉の考慮が必要**となる。

# Thank You!

