

eVTOL機における リフトロータと主翼の空力干渉について

静岡理工科大学大学院
理工学研究科 システム工学専攻

池本拓生(佐藤 彰)



1. はじめに
2. CFD解析による空力干渉の解明
3. 検証実験による妥当性の検討
4. おわりに



1. はじめに

2. CFD解析による空力干渉の解明

3. 検証実験による妥当性の検討

4. おわりに

1. 背景と目的

eVTOL機

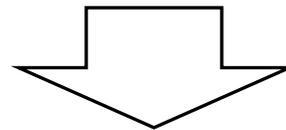
(Electric Vertical Takeoff and Landing Aircraft)

→ 電動垂直離着陸機



特徴

- **垂直離着陸** (回転翼機) + **高速かつ長距離飛行** (固定翼機)
- **電力** → 運航時のゼロエミッション、運用コストの削減、騒音の低減



人や物おける空の移動革命

1. 背景と目的

eVTOL機の主な駆動方式

Vectored Thrust



機体イメージ: S4 2.0

・翼やロータを可変とし、巡航時は水平飛行に、離着陸時は垂直方向に偏向することで、巡航性能と離着陸性能を両立する。

Lift + Cruise



機体イメージ: ALIA 250

・巡航用、離着陸用それぞれのロータを持ち、それらを使い分けることで、巡航性能と離着陸性能を両立する。

Wingless



機体イメージ: EHang 216

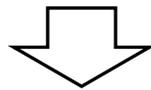
・垂直方向を向いた固定のロータを持ち、ロータの回転数を制御することで、巡航性能と離着陸性能を両立する。

1. 背景と目的

問題点

主翼に対してロータ配置が近い

空力干渉し、機体性能に影響



Lift + Cruise (ALIA 250)

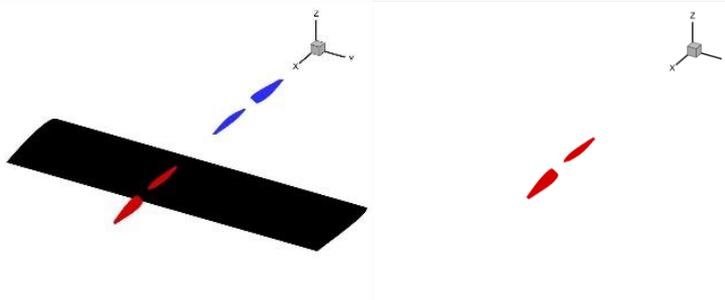
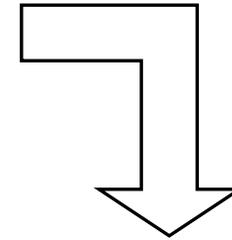
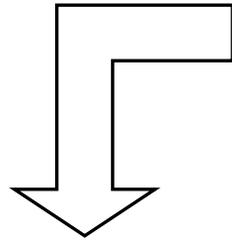
目的

- ・ホバリング時におけるLift + Cruise型 eVTOL機の主翼とリフトロータについて空力干渉を明らかにする。
→CFD解析と検証実験の両面から調査する。

1. 本研究の流れ

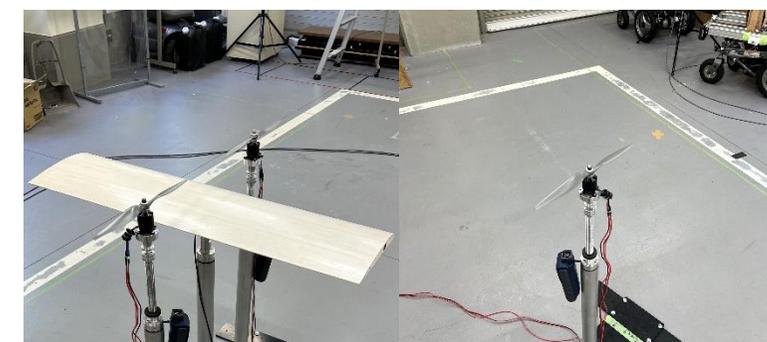


実験機



① rFlow3Dを用いたCFD解析

リフトロータと主翼について
空力干渉の解明



② 空力干渉検証実験

解析結果について
妥当性の検討

1. 研究対象となる実験機





1. はじめに

2. CFD解析による空力干渉の解明

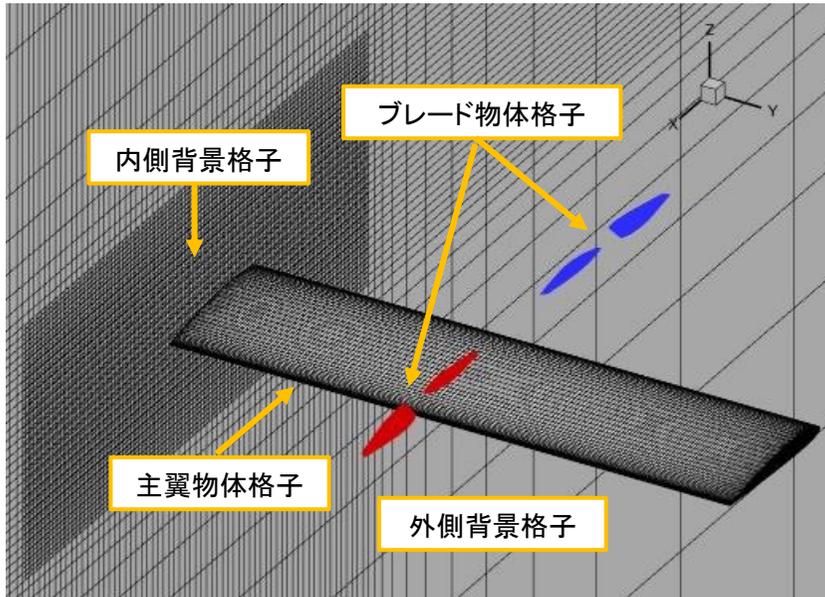
3. 検証実験による妥当性の検討

4. おわりに

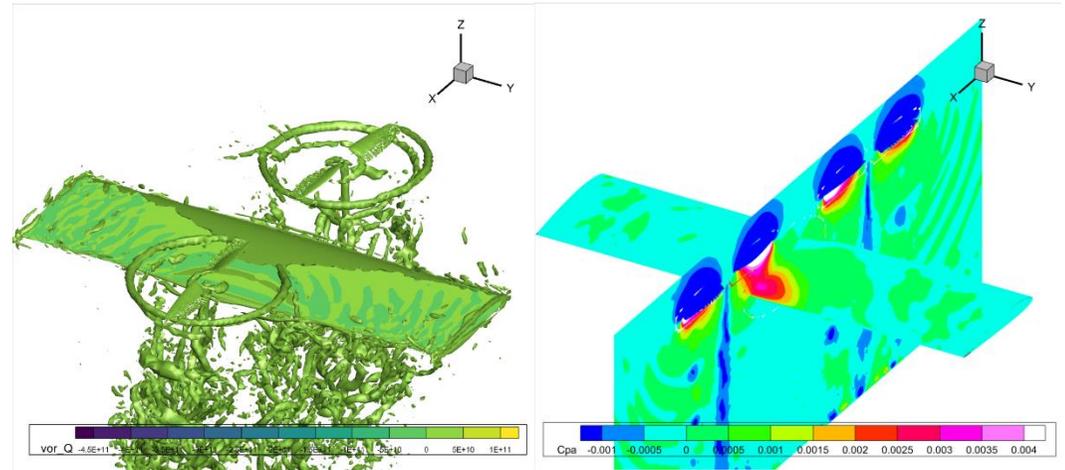
2. rFlow3Dの概要

数値計算:rFlow3D

・背景格子と物体格子を重合させて、回転しているロータ周りの流れを解析するJAXAが開発した回転翼機用CFD解析ツールである。



解析格子の外観



可視化例

2. rFlow3D解析の条件



解析概要

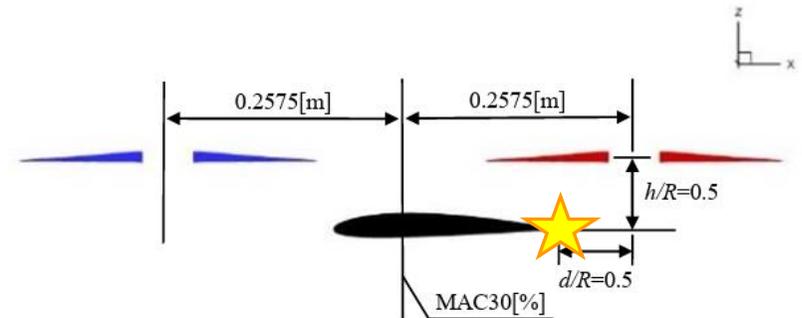
・主翼後縁を基準としてリフトロータの中心を上下前後に変化させた8つのケースを解析する。

解析条件

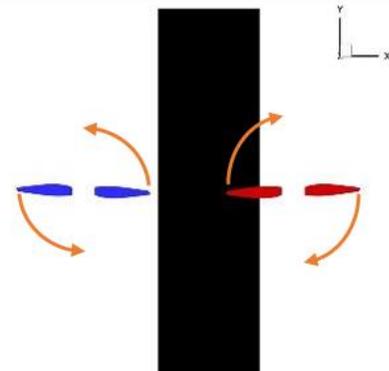
飛行条件	ホバリング
一様流速度: U_∞ [m/s]	0
回転角速度: Ω [rad/s]	741.4
翼端マッハ数: M_{tip}	0.359
最大レイノズル数: Re	1.2×10^5
シャフト角: α [deg]	0
前ロータ回転方向	CCW
後ロータ回転方向	CW

主な諸元

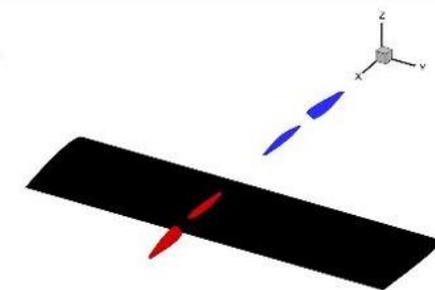
主翼(右翼のみ)諸元	
右翼面積: S [m]	0.225
スパン: b [m]	0.90
コード長: c [m]	0.25
主翼翼型	NACA2411
ロータ諸元	
ロータ半径: R [m]	0.165
ロータピッチ: P [m]	0.101
ブレード翼型	NACA4412



(a) 左側面図



(b) 上面図



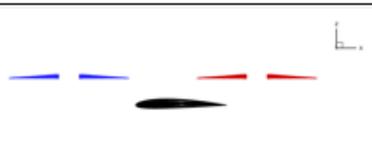
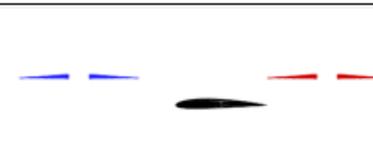
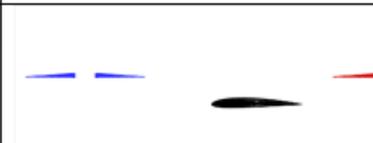
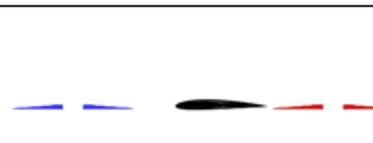
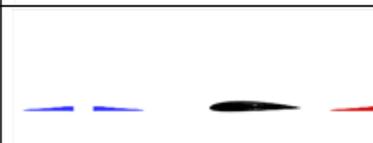
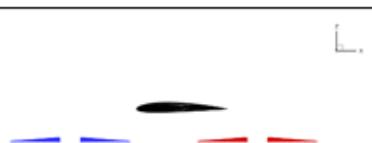
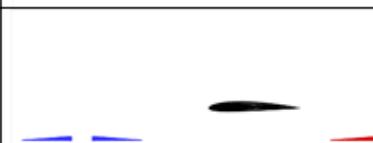
(c) 斜視図

解析モデル

2. rFlow3D解析の条件

ケース表

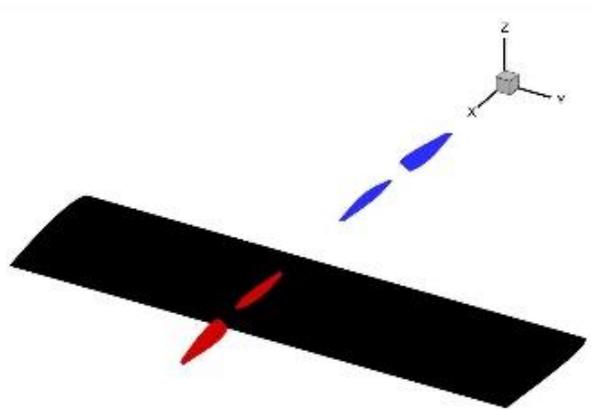
・上下距離 h 、前後距離 d とする。無次元化距離 h/R 、 d/R を用いて、 $h/R=-0.5$ 、 0 、 0.5 、 $d/R=0.5$ 、 1.0 、 1.5 と変化させて解析する。

		d/R		
		0.5	1.0	1.5
h/R	0.5	 Case 1	 Case 2	 Case 3
	0	 Case 4	 Case 5	 Case 6
	-0.5	 Case 7	 Case 8	 Case 9

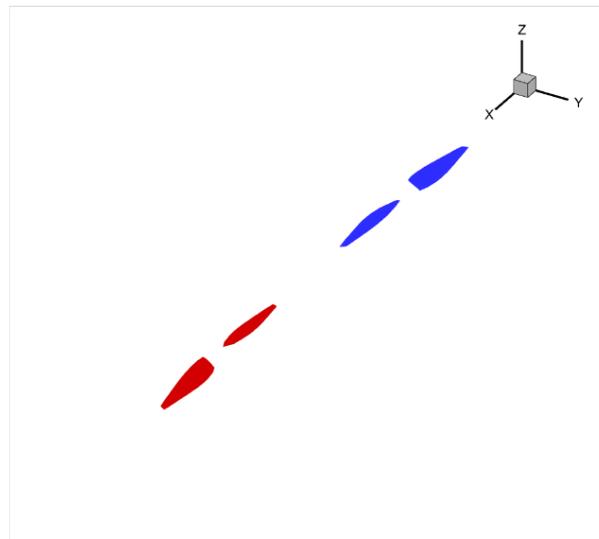
2. rFlow3D解析の条件

解析モデルの形態

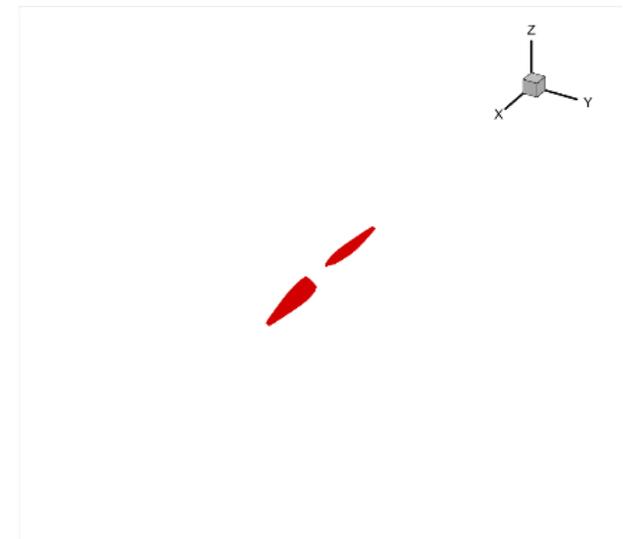
- ・Rotor/wing case、Twin rotor case、Isolated rotor caseの3つとする。



Rotor/wing case
(リフトロータ2つと主翼の
空力干渉形態の全8ケース)



Twin rotor case
(主翼なしのリフトロータ2つのケース)



Isolated rotor case
(主翼なしのリフトロータ単体のケース)

2. rFlow3D解析の条件

リフトロータの空力特性

$$\text{推力係数: } C_T = \frac{T}{\rho \pi R^2 (R\Omega)^2}$$

$$\text{トルク係数: } C_Q = \frac{Q}{\rho \pi R^2 (R\Omega)^2 R}$$

$$\text{フィギュアオブメリット: } FM = \frac{C_T^{3/2}}{\sqrt{2} C_Q}$$

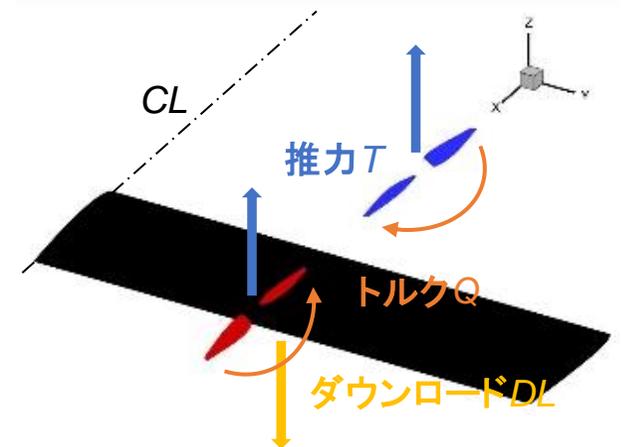
→ FM とは、ロータのホバリング性能を表す値で、必要な誘導パワーと実際の必要パワーとの割合を示し、1に近づくほど良いロータ効率である。

ρ : 空気密度 [kg/m³]
 Ω : 回転角速度 [rad/s]
 T : 推力 [N]
 Q : トルク [N]
 DL : ダウンロード [N]

主翼の空力特性

$$\text{ダウンロード係数: } C_{DL} = \frac{DL}{\rho \pi R^2 (R\Omega)^2}$$

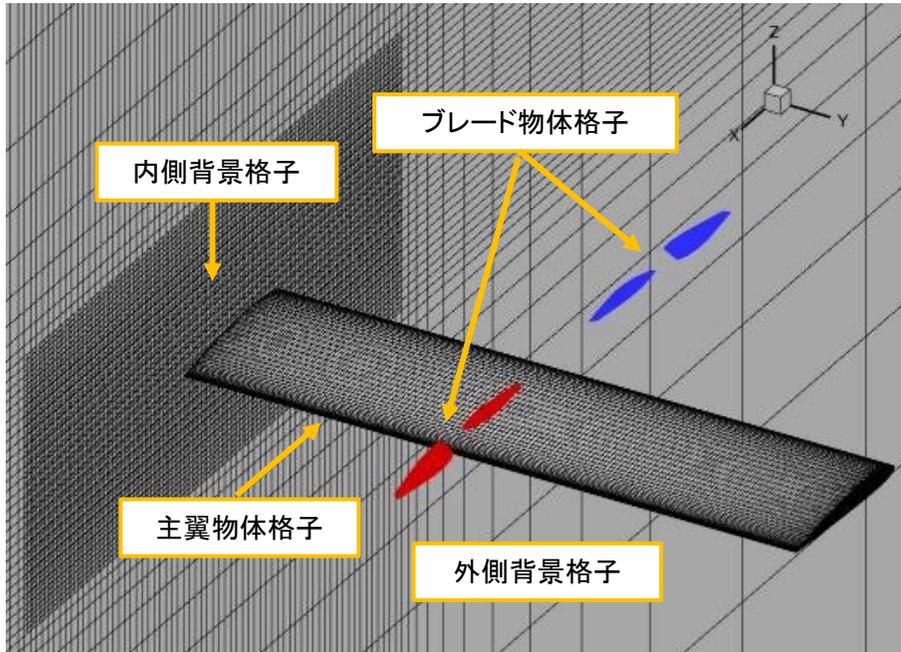
→ DL とは、主翼に対して下向きに作用する力である。



2. rFlow3D解析の条件



解析格子



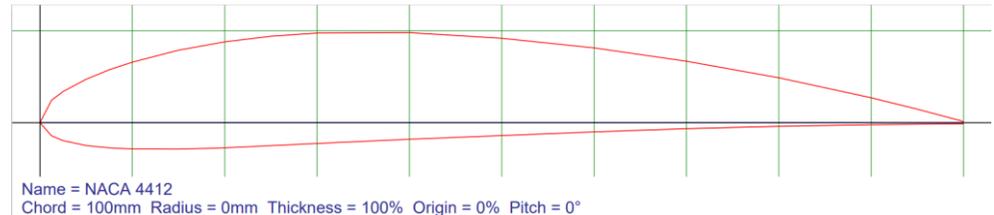
解析格子の外観 (Case 1)

格子点数

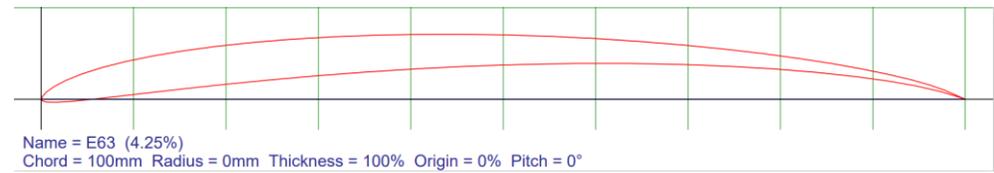
外側背景格子	261 × 223 × 159=9254277
内側背景格子	359 × 285 × 155=15858825
主翼物体格子	213 × 121 × 31=798963
ブレード物体格子	101 × 121 × 61=745481
格子総数	26657546

ブレード物体格子の翼型

・実物の翼型 (E63 → NACA4412)

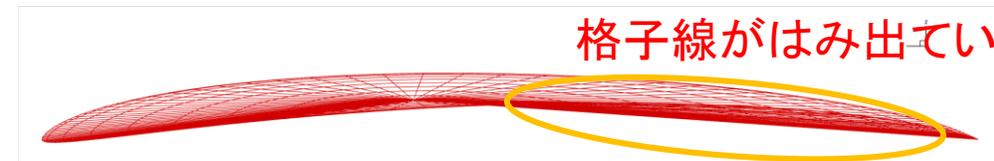


NACA4412の翼型



E63の翼型

・解析モデルの翼型 (NACA4412)



格子線がはみ出ている

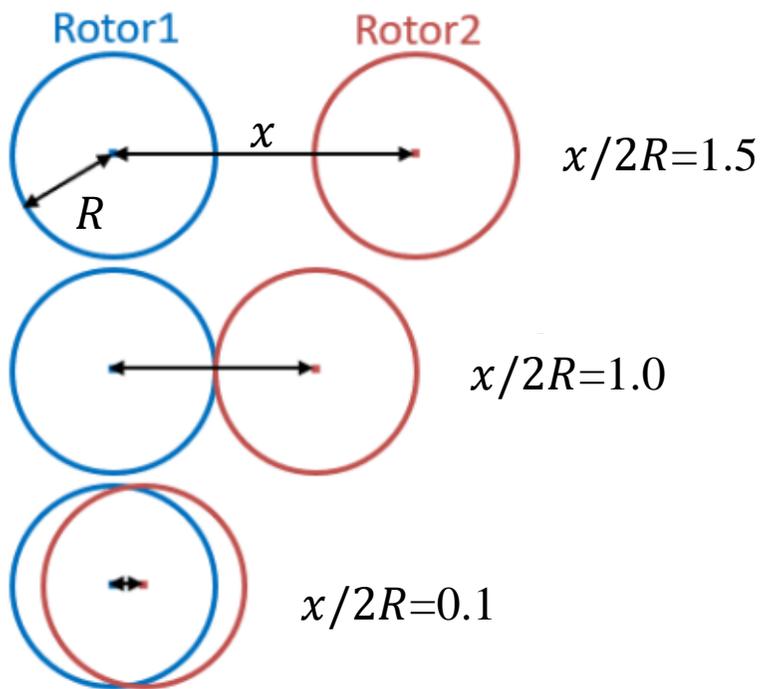
自動格子生成ツールで生成できなかったE63の2次元格子

2. Twin rotor caseによる証明

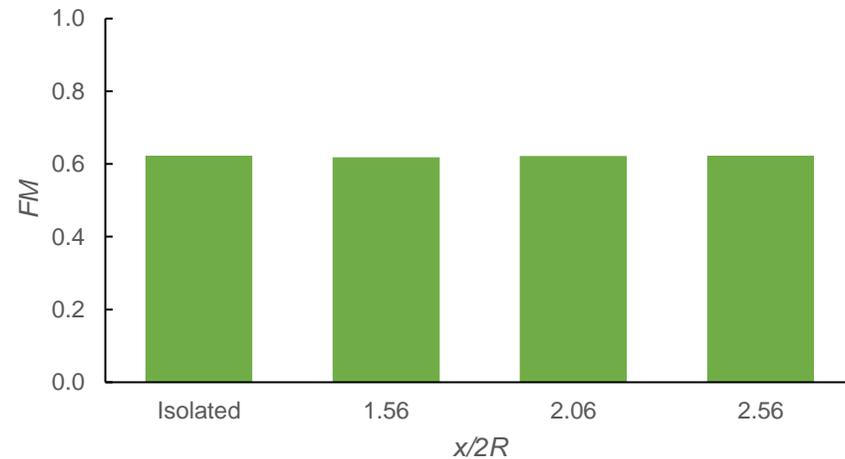


解析結果

▪ 本研究におけるリフトロータの軸間距離によって、リフトロータ自体に空力干渉が起こらないことが証明された。



ロータ2つによる軸間距離の例
($d/R=0.5, 1.0, 1.5 \rightarrow x/2R=1.56, 2.06, 2.56$)



Isolated rotor caseとTwin rotor caseの
フィギュアオブメリットFM

Twin rotor caseと関連論文における空力干渉の有無

研究著者	軸間距離	空力干渉の有無
池本(本解析)	$x/2R=1.56, 2.06, 2.56$	なし
光崎ら	$x/2R=1.12, 1.25$	なし
西尾ら	$x/2R=1.1, 1.5, 2.0$	なし
大西ら	$x/2R=0.8$ 前後	あり

2. Rotor/wing caseの解析結果

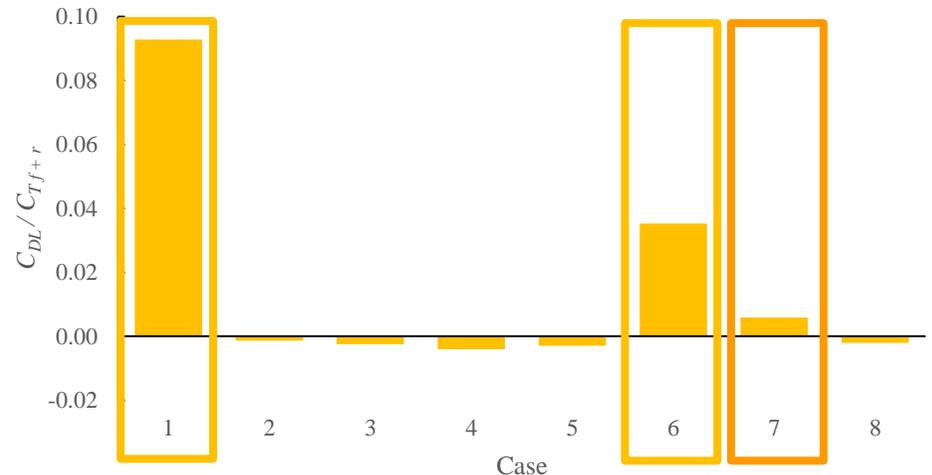


主翼の空力特性

- ・Case 1、Case 6、Case 7の強さ順に、**主翼にダウンロードが発生**
- Case 1では、後ロータのダウンウォッシュが平均的、Periodic Airloadが瞬間的に空力干渉し、主翼上面が正圧となり、主翼にダウンロードを与えている。
- Case 6、Case 7では、後ロータの吸い込み風が瞬間的に空力干渉し、主翼下面が負圧となり、主翼にダウンロードを与えている。

ケース表

		d/R		
		0.5	1.0	1.5
h/R	0.5			
	0			
	-0.5			

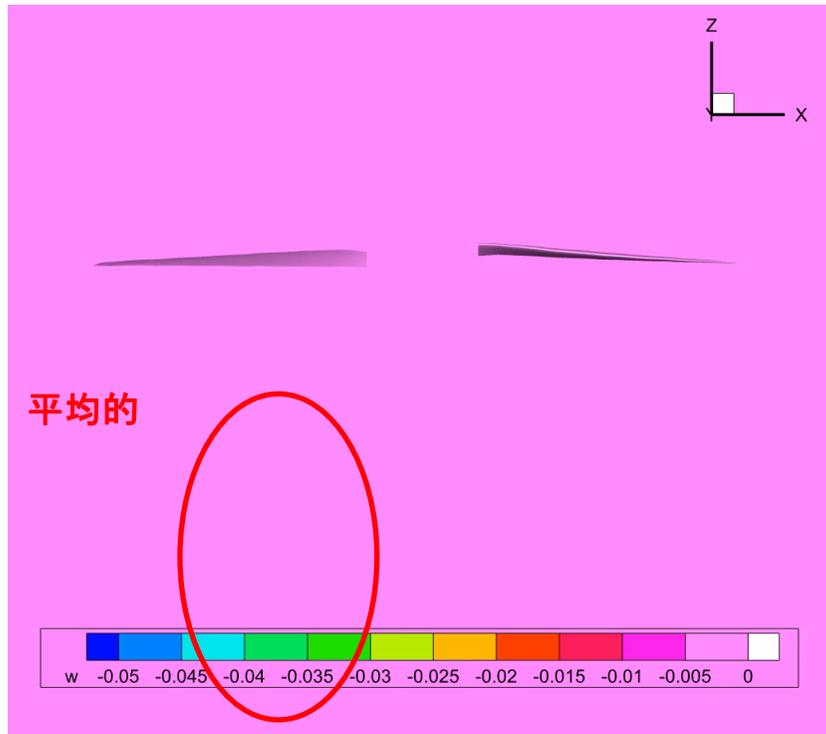


主翼ダウンロードとリフトロータ推力の比 C_{DL}/C_{Tf+r}

2. Rotor/wing caseの解析結果

ダウンウォッシュ

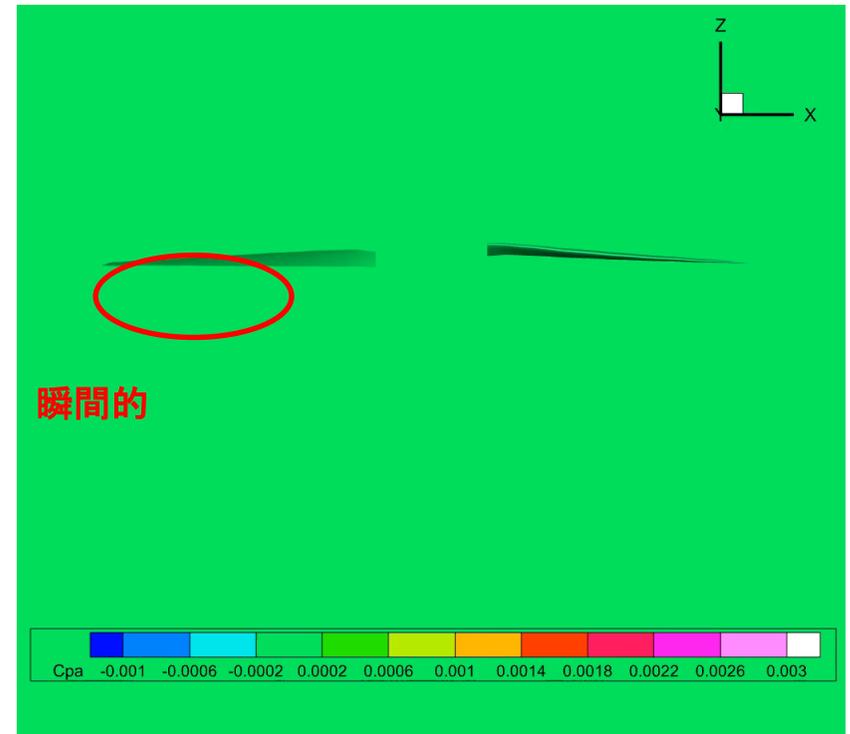
- ・メインローターを通過しベンチュリー効果によって加速された空気のこと。



吹き下ろし分布

Periodic Airload

- ・ロータ面に近い位置でロータブレードが主翼上部を通過する際に生じる空力荷重のこと。

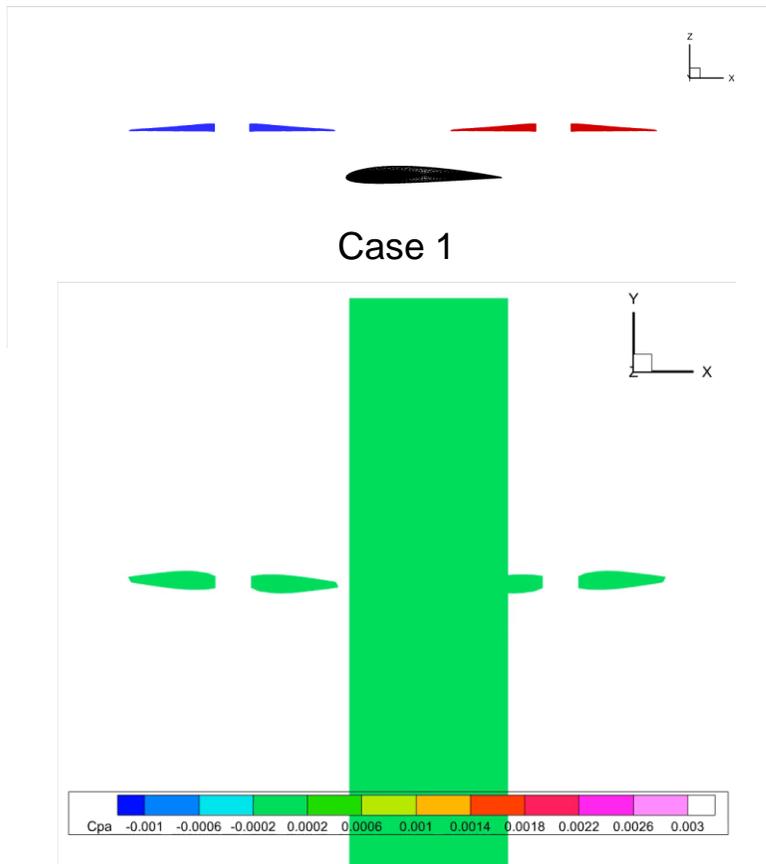


圧力分布

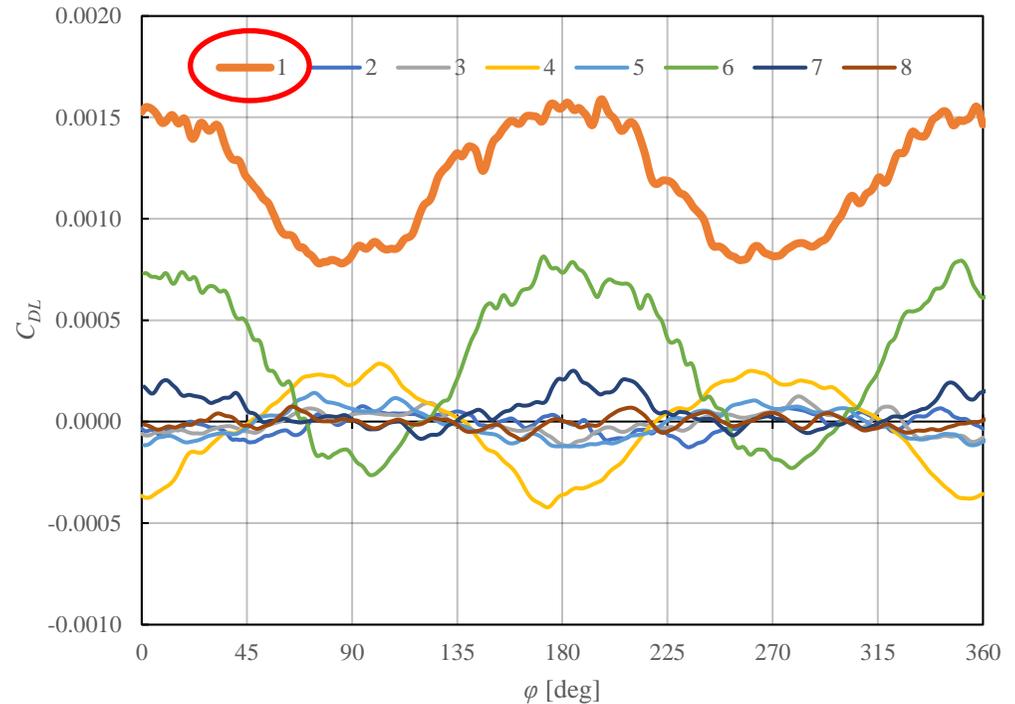
2. Rotor/wing caseの解析結果

主翼の空力特性

・Case 1では、後ロータのダウンウォッシュが平均的、Periodic Airloadが瞬間的に空力干渉し、主翼上面が正圧となり、主翼にダウンロードを与えている。



表面圧力分布(主翼上面図)



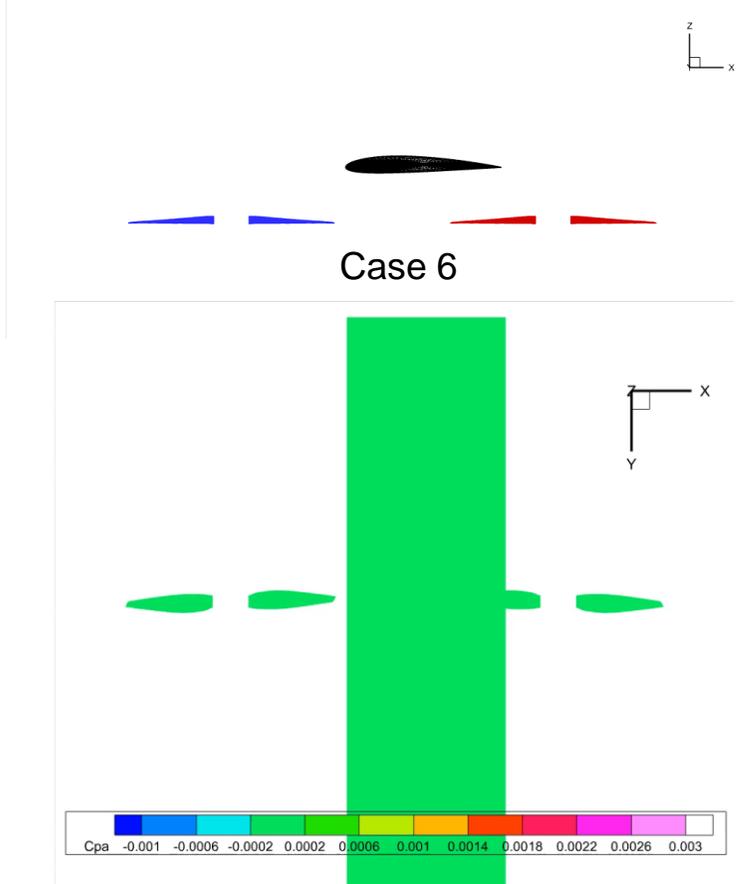
位相角 ϕ におけるダウンロード係数 C_{DL}
($\phi=0,180,360\text{deg}$ のときにロータと主翼が重なる)

2. Rotor/wing caseの解析結果

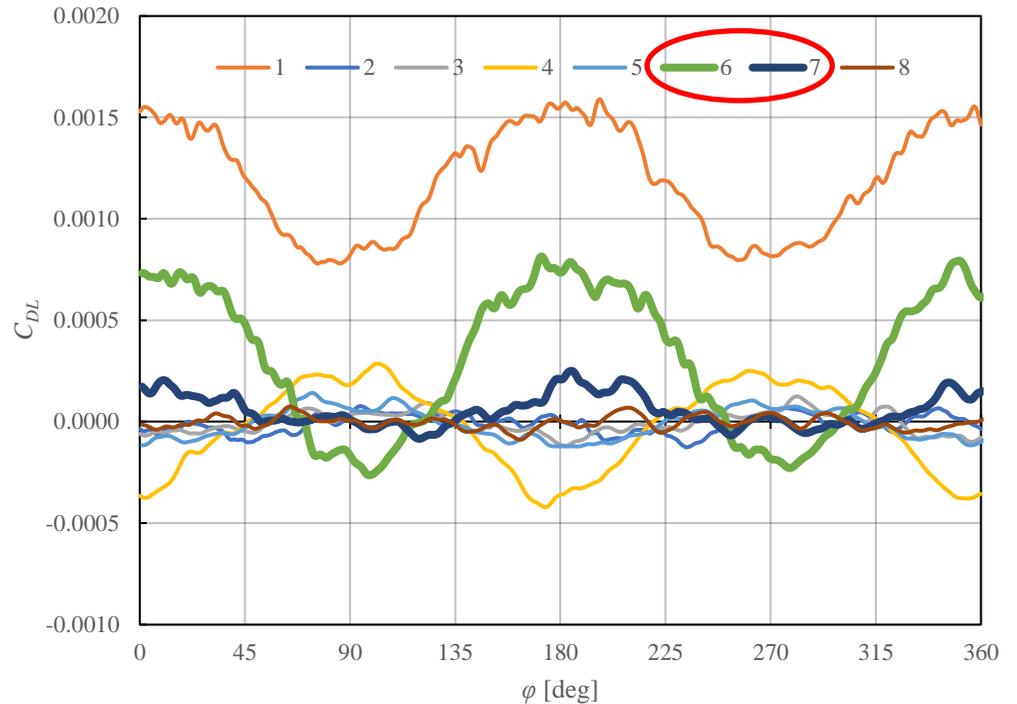


主翼の空力特性

・ Case 6、Case 7では、後ロータの吸い込み風が瞬間的に空力干渉し、主翼下面が負圧となり、主翼にダウンロードを与えている。



表面圧力分布(主翼下面図)



位相角 ϕ におけるダウンロード係数 C_{DL}
($\phi=0,180,360\text{deg}$ のときにロータと主翼が重なる)

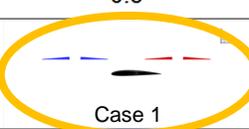
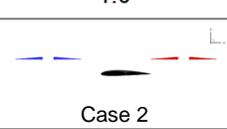
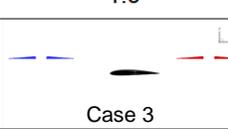
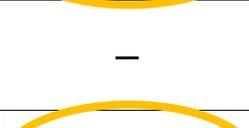
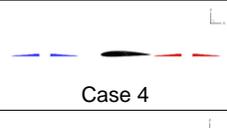
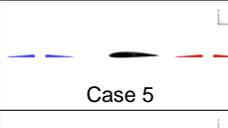
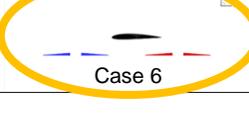
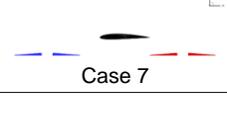
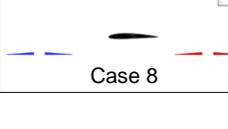
2. Rotor/wing caseの解析結果

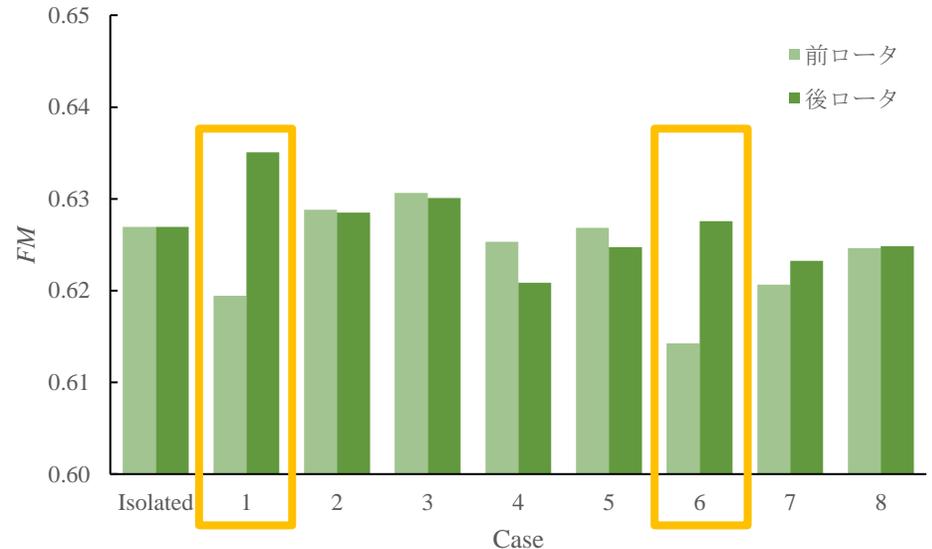


リフトロータの空力特性

- ・Case1の後ロータにおけるFMが上昇
→後ロータのダウンウォッシュが主翼上面に干渉し、地面効果が発生したため。
- ・Case6の前後ロータにおけるFMの差が大きい
→後ロータの吸い込み風が主翼下面に干渉し、主翼を吸い寄せているため。

ケース表

		d/R		
		0.5	1.0	1.5
h/R	0.5	 Case 1	 Case 2	 Case 3
	0	 Case 4	 Case 5	 Case 6
	-0.5	 Case 7	 Case 8	 Case 9



フィギュアオブメリットFM

2. Rotor/wing caseの解析結果

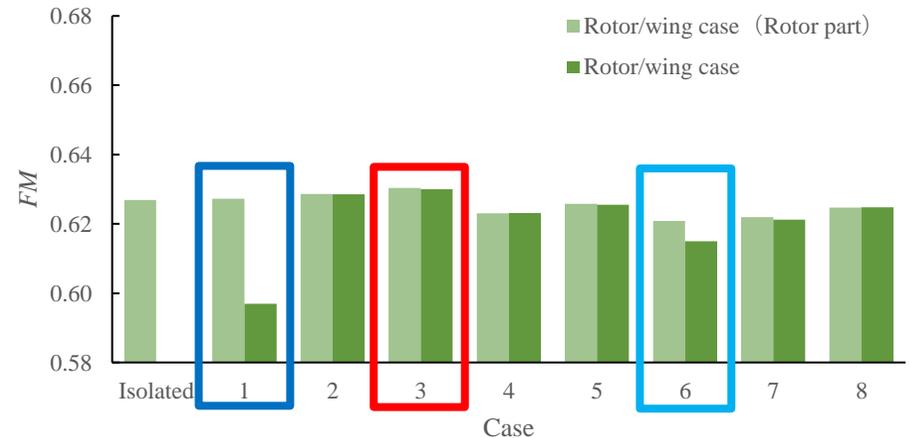


全体の空力特性

- ・ Case 1、Case 6では、主翼にダウロードが発生しているためFMが低下している。
→機体性能に悪影響を与える配置であることが明らかになった。
- ・ Case3が、ホバリング性能が最も良い結果となった。
→他のケースを比較したときの差は微小であるため、有意性はないと考えられる。

ケース表

		d/R		
		0.5	1.0	1.5
h/R	0.5	 Case 1	 Case 2	 Case 3
	0	 Case 4	 Case 5	 Case 6
	-0.5	 Case 7	 Case 8	 Case 9



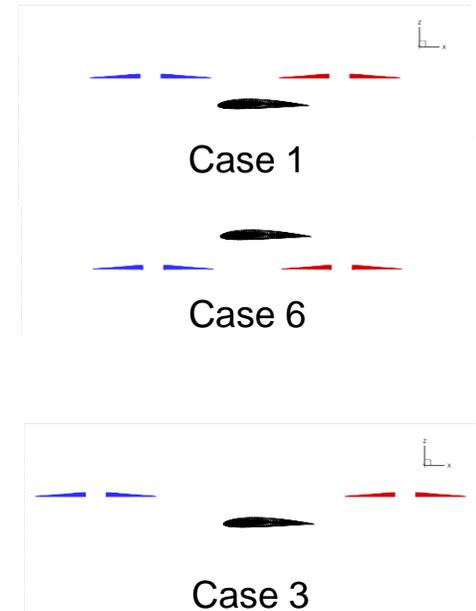
フィギュアオブメリットFM

2. 解析結果のまとめ

- ・本研究におけるリフトロータの軸間距離によって、リフトロータ自体に空力干渉が起こらないことが証明された。

- ・ Case 1、Case 6では、主翼にダウンロードが発生しているため、機体性能に**悪影響を与える配置**であることが明らかになった。

- ・ Case 3が、**ホバリング性能が最も良い**結果となった。しかし、他のケースを比較したときの差は微小であるため、有意性はないと考えられる。





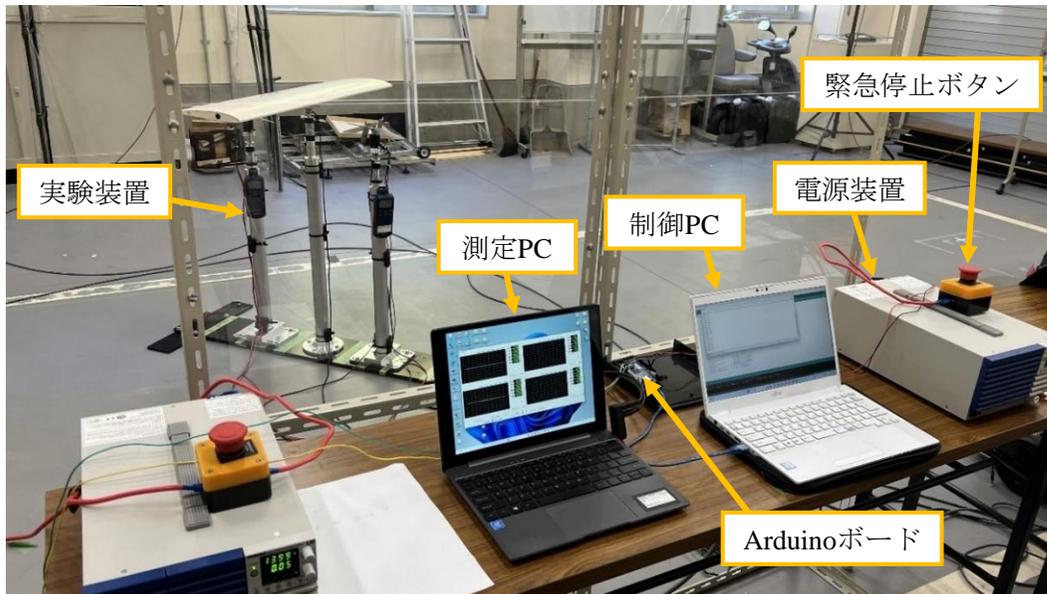
1. はじめに
2. CFD解析による空力干渉の解明
- 3. 検証実験による妥当性の検討**
4. おわりに

3. 空力干渉検証実験

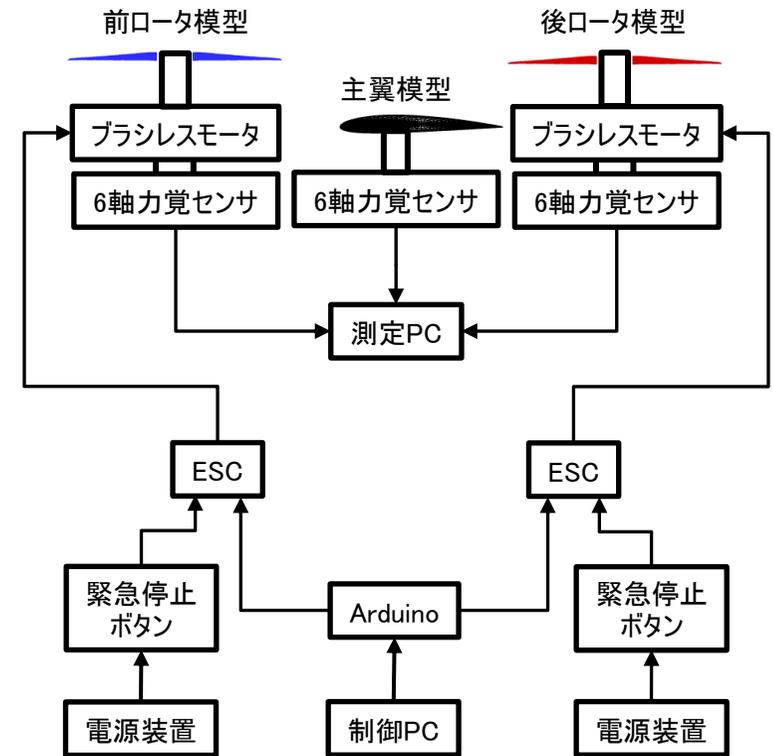


実験装置の諸元と構成

・実験装置は、rFlow3D解析と同様に、主翼後縁に対してリフトロータの上下前後距離を変更可能に設計した。



実験装置と周辺機器の外観



実験装置の構成図

3. 検証実験の条件



3. 検証実験の条件



ケース表

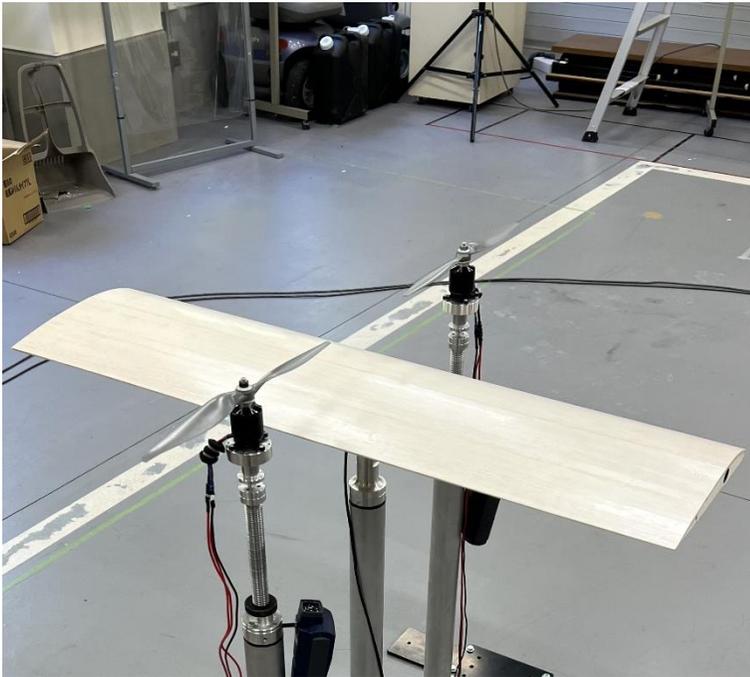
・解析と同様に、無次元化距離 h/R 、 d/R を用いて、 $h/R=-0.5$ 、 0 、 0.5 、 $d/R=0.5$ 、 1.0 、 1.5 と、変化させて検証する。

		d/R		
		0.5	1.0	1.5
h/R	0.5	 Case 1	 Case 2	 Case 3
	0	 Case 4	 Case 5	 Case 6
	-0.5	 Case 7	 Case 8	 Case 9

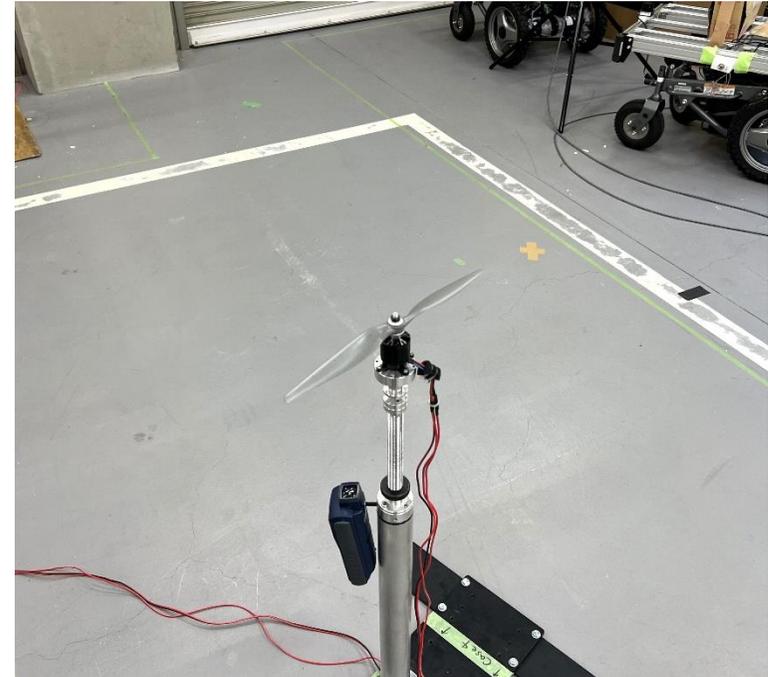
3. 検証実験の条件

実験模型の形態

- Rotor/wing case、Isolated rotor caseの2つとする。



Rotor/wing case
(リフトロータ2つと主翼の
空力干渉形態の全8ケース)



Isolated rotor case
(主翼なしのリフトロータ単体のケース)

3. 検証実験の条件

リフトロータの空力特性

$$\text{推力係数: } C_T = \frac{T}{\rho \pi R^2 (R\Omega)^2}$$

$$\text{トルク係数: } C_Q = \frac{Q}{\rho \pi R^2 (R\Omega)^2 R}$$

$$\text{フィギュアオブメリット: } FM = \frac{C_T^{3/2}}{\sqrt{2} C_Q}$$

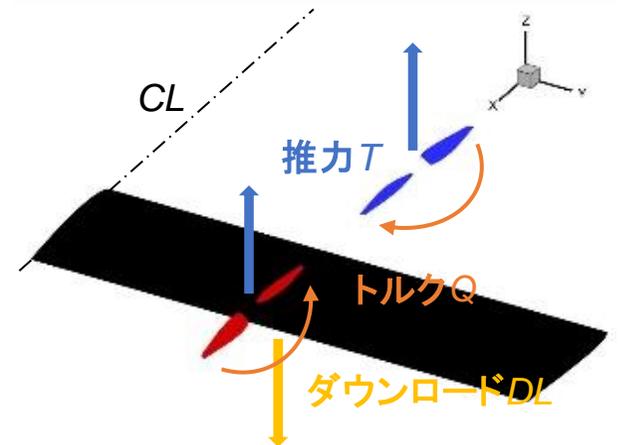
→ FM とは、ロータのホバリング性能を表す値で、必要な誘導パワーと実際の必要パワーとの割合を示し、1に近づくほど良いロータ効率である。

ρ : 空気密度 [kg/m³]
 Ω : 回転角速度 [rad/s]
 T : 推力 [N]
 Q : トルク [N]
 DL : ダウンロード [N]

主翼の空力特性

$$\text{ダウンロード係数: } C_{DL} = \frac{DL}{\rho \pi R^2 (R\Omega)^2}$$

→ DL とは、主翼に対して下向きに作用する力である。



3. 解析結果と実験結果の比較



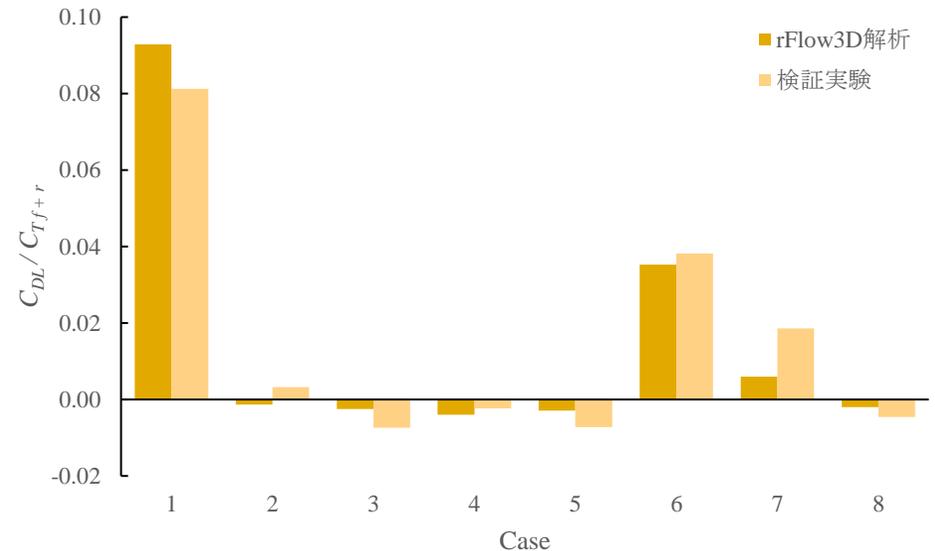
主翼の空力特性

・各ケースにおいて僅かな値の差はあるが、主翼に発生しているダウンロードの有無についての傾向が一致している。

→rFlow3D解析と検証実験は**非常に良い相関を示している**。

ケース表

		d/R		
		0.5	1.0	1.5
h/R	0.5	Case 1	Case 2	Case 3
	0	Case 4	Case 5	Case 6
	-0.5	Case 7	Case 8	Case 9



主翼ダウンロードとリフトロータ推力の比 C_{DL}/C_{Tf+r}

3. 解析結果と実験結果の比較

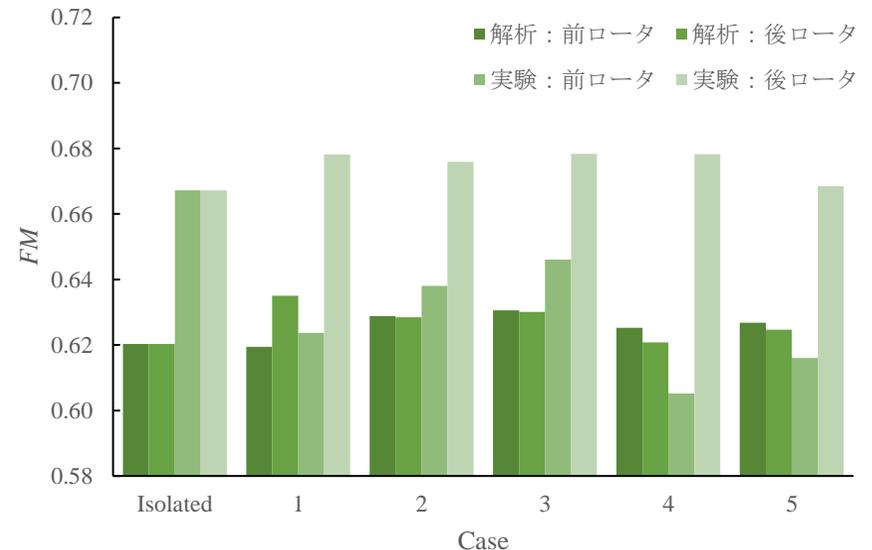


リフトロータの空力特性

- ・解析結果と比べ、実験結果のFMが高い
 - ・解析結果と実験結果について前後ロータの差の傾向が異なる
- rFlow3D解析と検証実験は異なる相関を示している。

ケース表

		d/R		
		0.5	1.0	1.5
h/R	0.5	Case 1	Case 2	Case 3
	0	Case 4	Case 5	Case 6
	-0.5	Case 7	Case 8	Case 9



フィギュアオブメリットFM

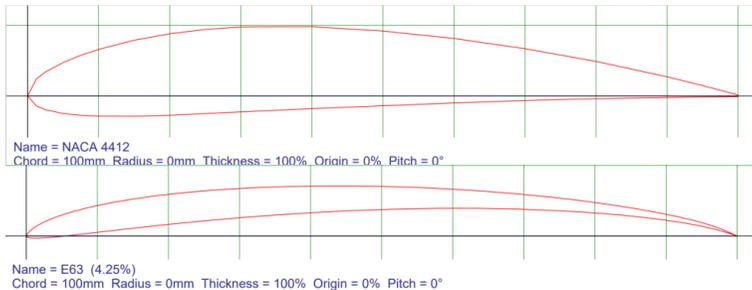
(機器の故障により、Case 6~8のデータ取得ができていない)

3. 解析結果と実験結果の比較



リフトロータの空力特性

- ① 解析結果と比べ、実験結果の値が高い
→実物模型(E63→NACA4412)と解析モデル(NACA4412)の違い



NACA4412の翼型(上図)とE63の翼型(下図)

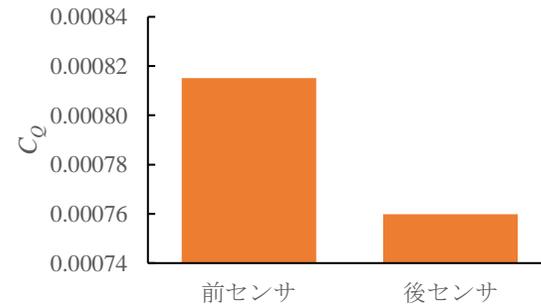


自動格子生成ツールで生成できなかったE63の2次元格子

- ② 解析結果と実験結果について前後ロータの差の傾向が異なる
→機器の故障、実験方法と実験装置の精度の低さ



6軸力覚センサの故障箇所



前センサと後センサのトルク係数 C_Q

3. 実験結果に基づく解析結果の妥当性



- ① 主翼の空力特性について、**妥当性は確認できた。**
→ 各ケースにおいて僅かな値の差はあるが、主翼に発生しているダウンロードの有無について傾向が一致していることから、**非常に良い相関**を示していたため。

- ② リフトロータの空力特性について、**妥当性は確認できなかった。**
→ 解析結果と比べ実験結果の値が高いことや、前後ロータの値における差の傾向が異なることから、**異なる相関**を示していたため。

目次

はじまりを、つくる

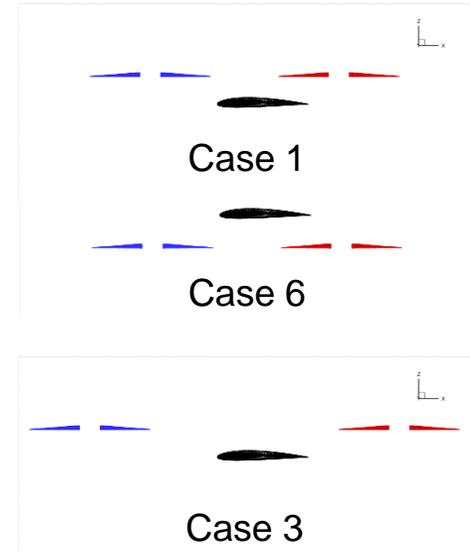


1. はじめに
2. CFD解析による空力干渉の解明
3. 検証実験による妥当性の検討
4. おわりに

4. まとめ

リフトロータと主翼について空力干渉の解明

- ・ Case 1、Case 6では、主翼にダウンロードが発生しているためホバリングが低下していた。
→機体性能に**悪影響を与える配置**であることが明らかになった。
- ・ Case 3が、**ホバリング性能が最も良い**結果となった。
→他のケースを比較したときの差は微小であるため、有意性はないと考えられる。



解析結果について妥当性の検討

- ・主翼の空力特性について、**妥当性は確認できた。**
- ・リフトロータの空力特性について、**妥当性は確認できなかった。**

4. 今後の展開



- ① 解析モデルの翼型をNACA4412からE63→NACA4412に変更
- ② 実験方法と実験装置の改善による測定精度の向上
→ ホバリングについて、再度、解析と実験を行い、リフトロータの空力特性についてrFlow3D解析の妥当性を検証する。



- ③ 前進飛行について解析と実験機によるテストフライトを行う
→ 前進飛行における上下前後位置について、空力干渉を解明する。
→ 実験結果に基づく、解析結果についての妥当性を検証する。



ホバリングと前進飛行の2つの観点から、
総合的に主翼に対してリフトロータの上下前後位置について
空力干渉を解明する。