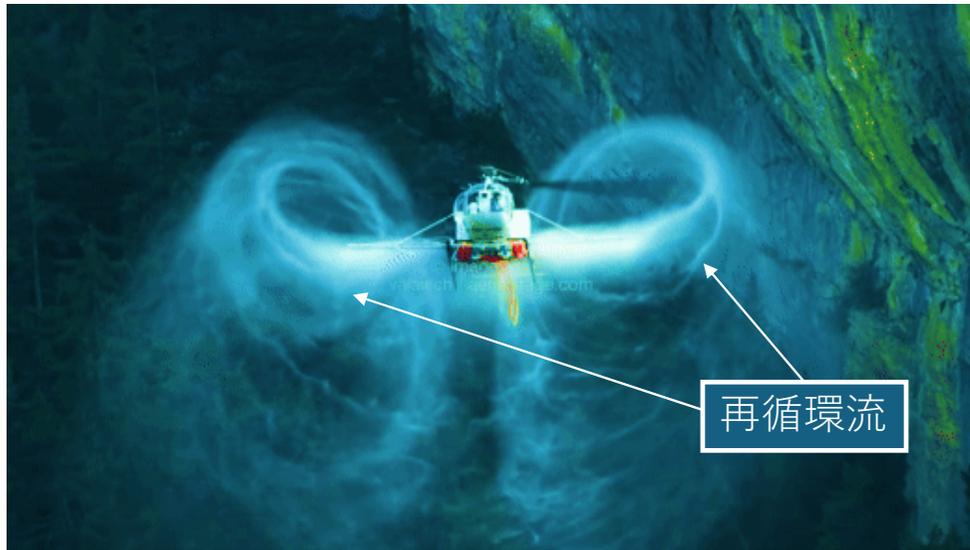


# Vortex Ring State と回復機動について

防衛大学校

有田 俊作

# Vortex Ring State (VRS)



低速前進，高降下率時に発生。

自らの吹き降ろしの中に降下していくことで，再循環流が構成され，推力が得られなくなる，あるいは必要パワーが急増する現象。

Settling with powerともいわれる。

<https://www.youtube.com/watch?v=HjeRSDsy-nE>

# VRS領域

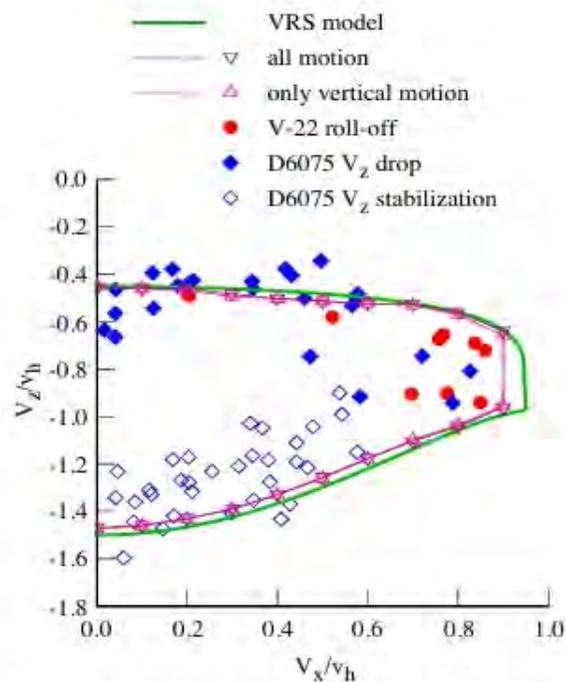


Figure 55. Calculated flight dynamics stability boundary for helicopter.

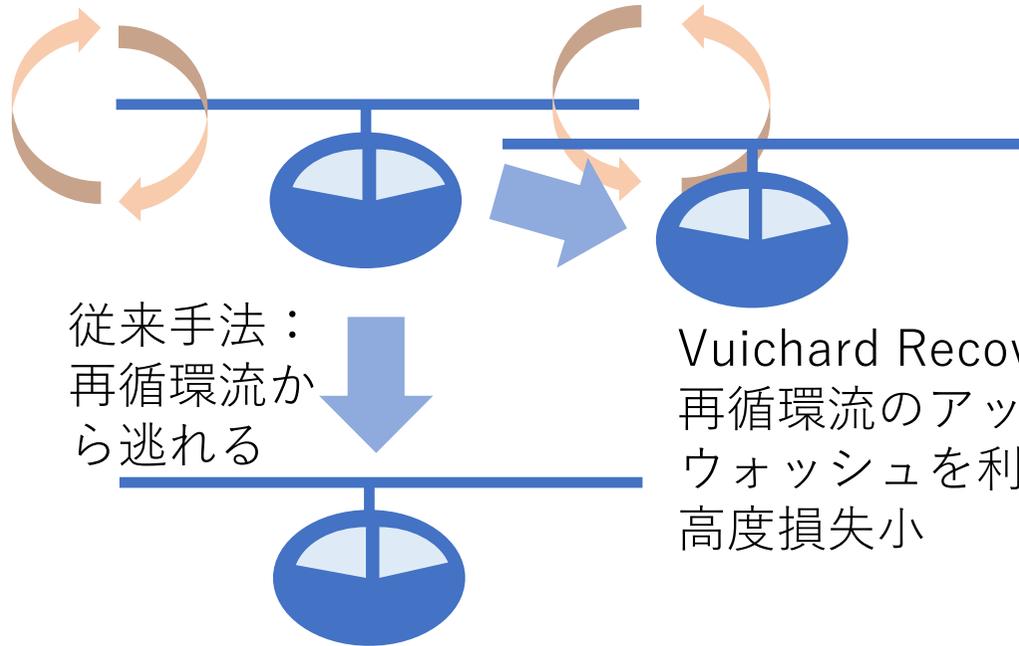
Johnson, 2004

2000年代に飛行試験を伴う検証がなされている。

- 降下速度がホバリング時誘導速度の1/2程度でVRSに入る。
- 前進速度がホバリング時誘導速度程度になるとVRSにはならない。

# VRSからの回復機動

再循環流



従来手法：  
再循環流から逃れる

Vuichard Recovery：  
再循環流のアップ  
ウォッシュを利用  
高度損失小

## Vuichard Recovery

1. 最大のパワー（コレクティブ引き）
2. ヘディング維持でテールロータ推力（反時計回りロータの場合右方向）を利用
3. 同時にロールを20度程度
4. 約1秒後，アップウォッシュ到達後にロールを戻す

（チルトロータはナセルを前に倒す）



<https://www.youtube.com/watch?v=HjeRSDsy-nE>

# Vuichard Recovery

- ロビンソン社のマヌーバガイドに明記 (2013)
- FAAのハンドブックに紹介 (2019)
- Airbus社の安全通知に紹介 (2020)
  
- Stalewski(2019) : CFDと組み合わせ機動をシミュレート (アクチュエータディスクFLUENT)
- Georgiopoulos(2023) : オンラインシミュレーションで機動の有効性とシリア検討
- Binet(2024) & EASAのプロジェクト(2022-2024) : FennecおよびDauphinによる飛行試験でVuichard Recoveryを検証し有効性示す. ただし研究の主眼はオンラインシミュレータの精度向上.
  
- ★ Vuichard Recoveryの認知のされ方に比してアカデミックな研究は限られている.
- ★ 海上自衛隊51空による飛行試験によるとワークロードの面で問題も . . .
- ★ 手法の細部現象等については研究されていない.

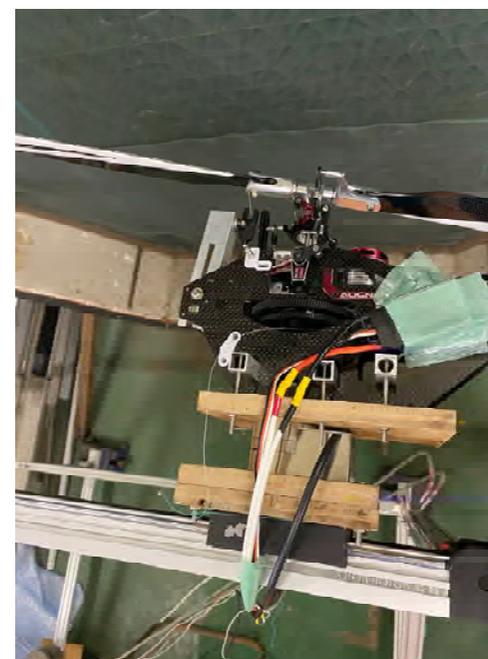
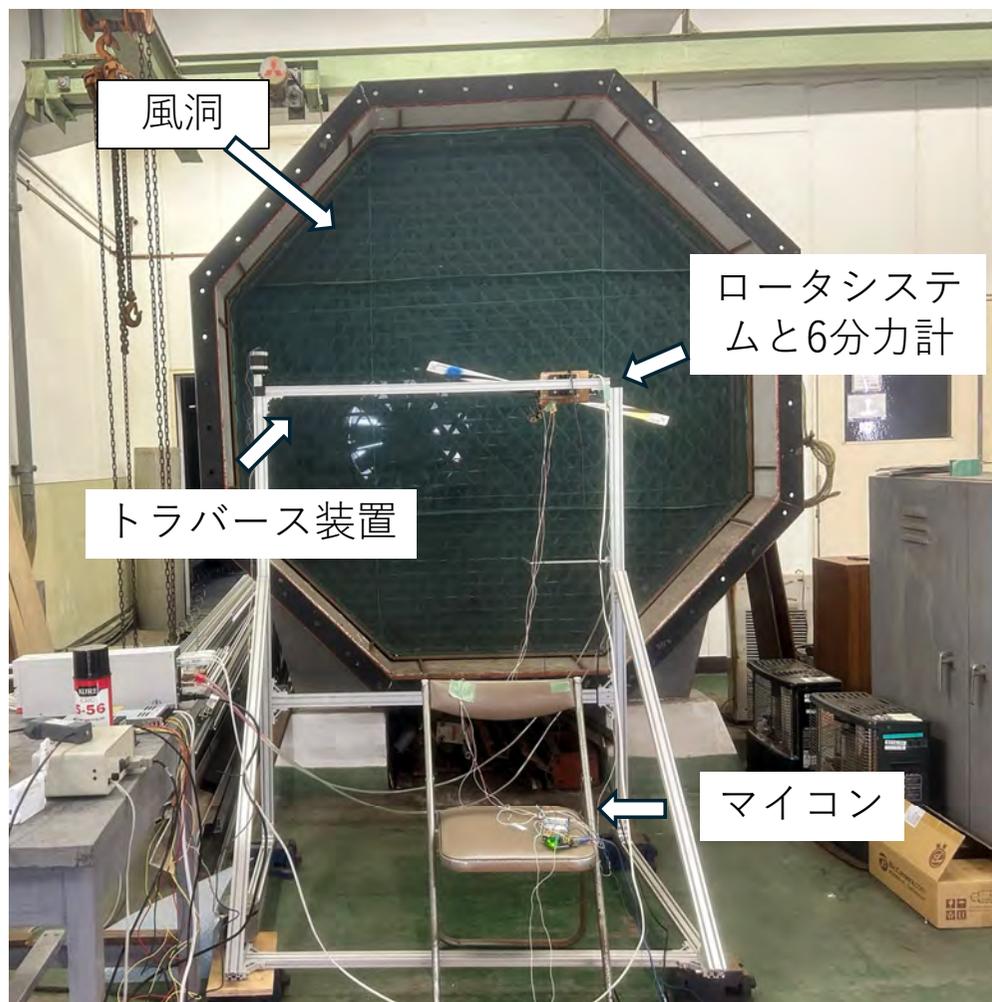
# 研究の目的

回復に必要な横移動速度等に関する定量的知見無し



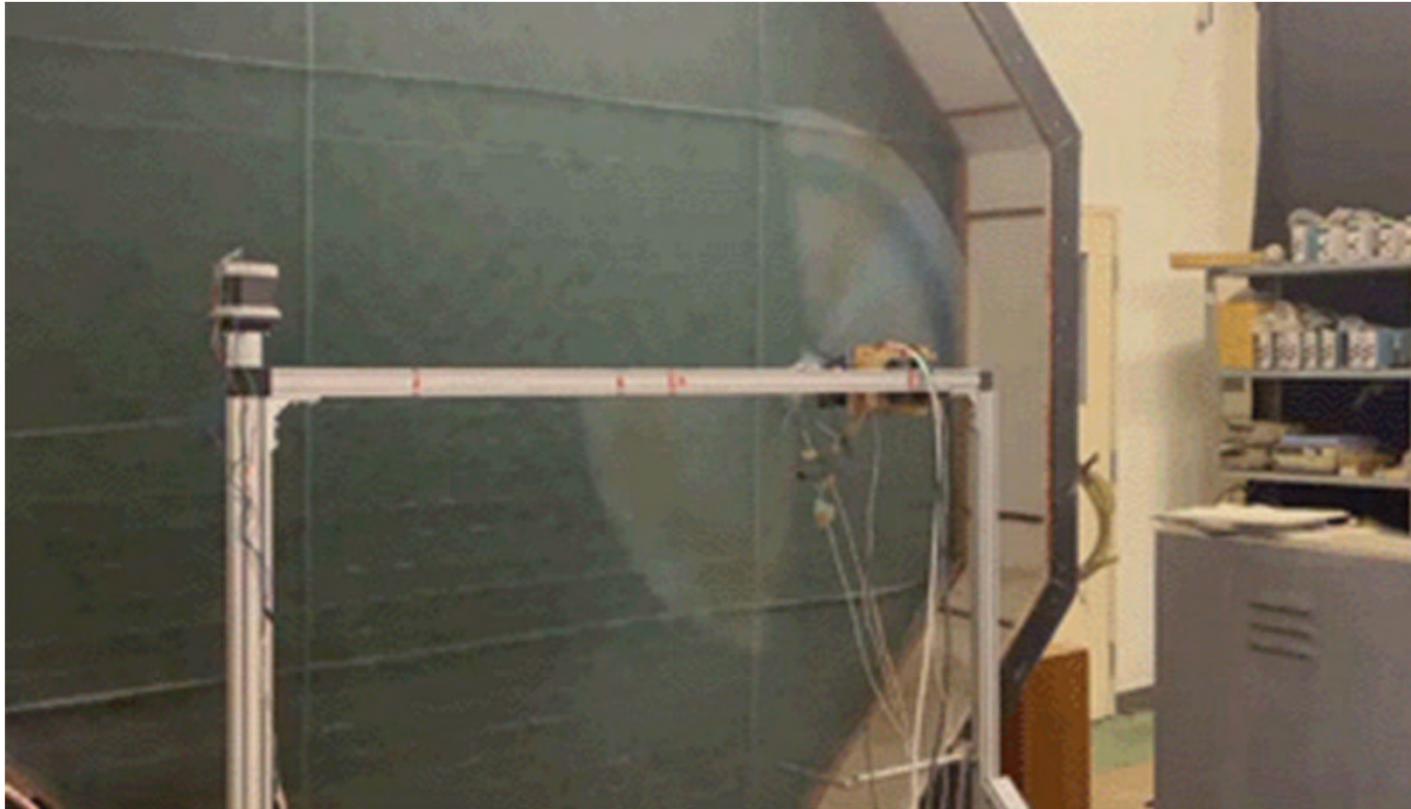
横移動による推力回復を実験的に検証

# 実験装置の概要と実験方法



移動量：おおむねロータ半径分  
移動速度：0.06vh~0.24vh

# 計測の様子



# ロータおよび風洞の運転条件など

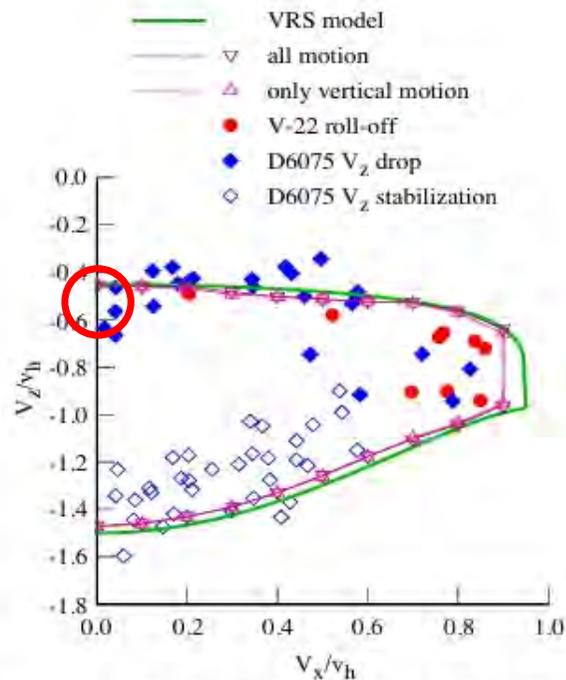
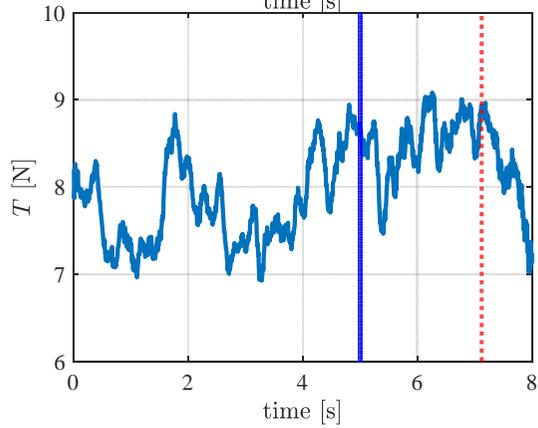
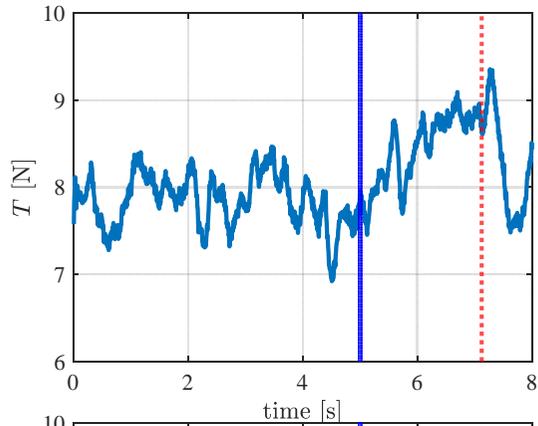


Figure 55. Calculated flight dynamics stability boundary for helicopter.

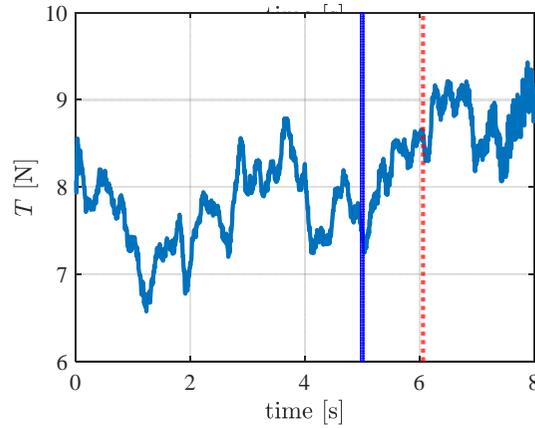
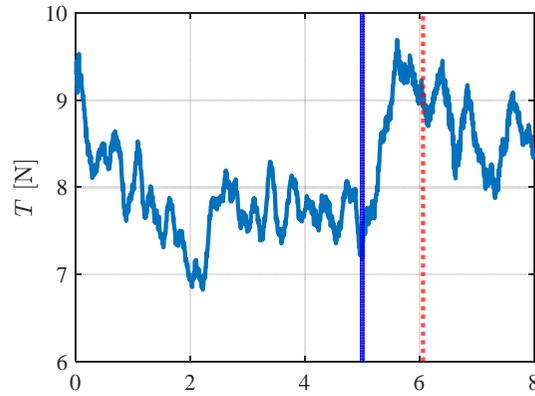
→実験時の条件

$C_T$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$T_h$ [N]	$v_h$ [m/s]
$2.7 \times 10^{-3}$	1.22	8.4	2.46
$3.9 \times 10^{-3}$	1.22	12.0	2.94
$5.5 \times 10^{-3}$	1.24	17.3	3.50

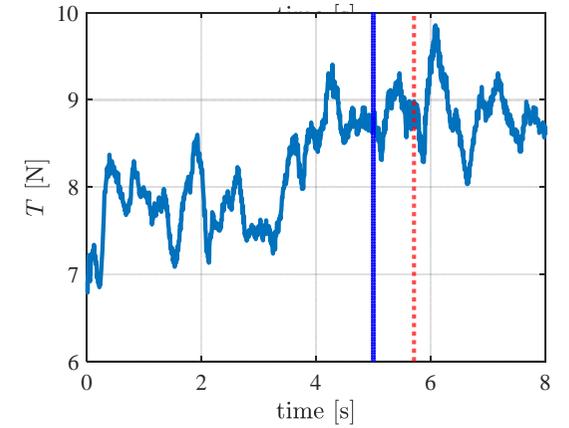
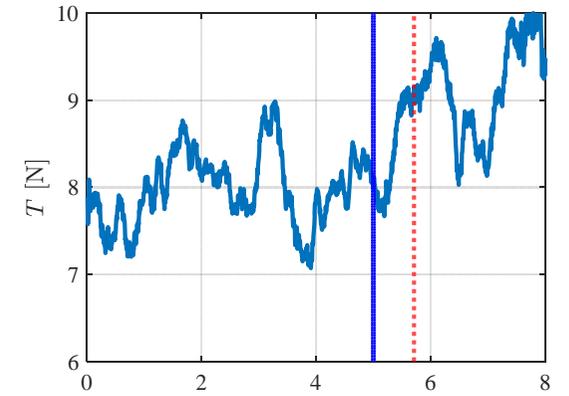
※風洞運転は1/2v<sub>h</sub>



横移動速度0.2m/s (0.07vh)



横移動速度0.4m/s (0.14vh)



横移動速度0.6m/s (0.20vh)

ホバー時推力係数 $C_T$  :  $3.9 \times 10^{-3}$

ホバー時推力 $T$  : 12 N

ロータ面吹き降ろし $v_h$  : 3 m/s

風洞流速 : 1.5 m/s

————— : 移動開始時間  
 - - - - - : ロータ半径分  
 移動終了時間

顕著な推力回復は確認できなかった。

- わずかな推力回復が見られる場合もあるが、移動による推力変化量は、移動しない場合の変動幅と大きく変わらないため、それが移動によるものなのかは確実ではない。
- 移動による推力変化が無いケースもある。

移動速度と推力変化の起こりやすさに明確な関係は認められない。

VRSにおける推力変動は，翼端渦の蓄積と崩壊に起因する再循環流の強弱によってロータ面誘導速度の変動が大きくなることによる。

ロータ面流入速度は  
上から下

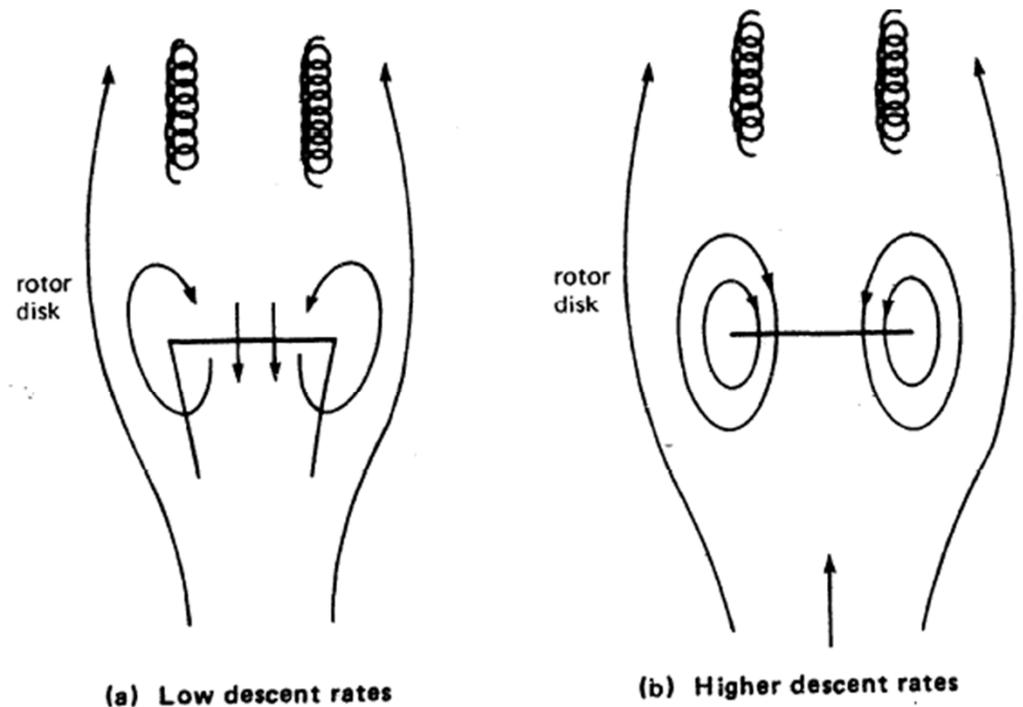


Figure 3-4 Rotor flow in the vortex ring state.

Vuichard Recoveryが成功すれば，アップウォッシュによりVRS変動より大きな推力回復がみられるはず・・・



<https://www.youtube.com/watch?v=HjeRSDsy-nE>

## 結論

- 今回の条件（降下速度変化無、横移動速度最大 $0.24V_h$ ）ではアップウォッシュを利用した推力回復は再現できなかった。
- Vuichard Recoveryは、横移動すれば必ず達成できるわけではない。少なくとも降下速度に変化が無い場合、 $0.24V_h$ 以上の横移動速度が必要。

# 今後の予定

- コレクティブの変更など，条件を工夫する
- 再循環流を可視化して検討する
- ロータ径を小さくして移動量を増やす
- 可能であれば飛行試験による機動特性等の検証も . . .