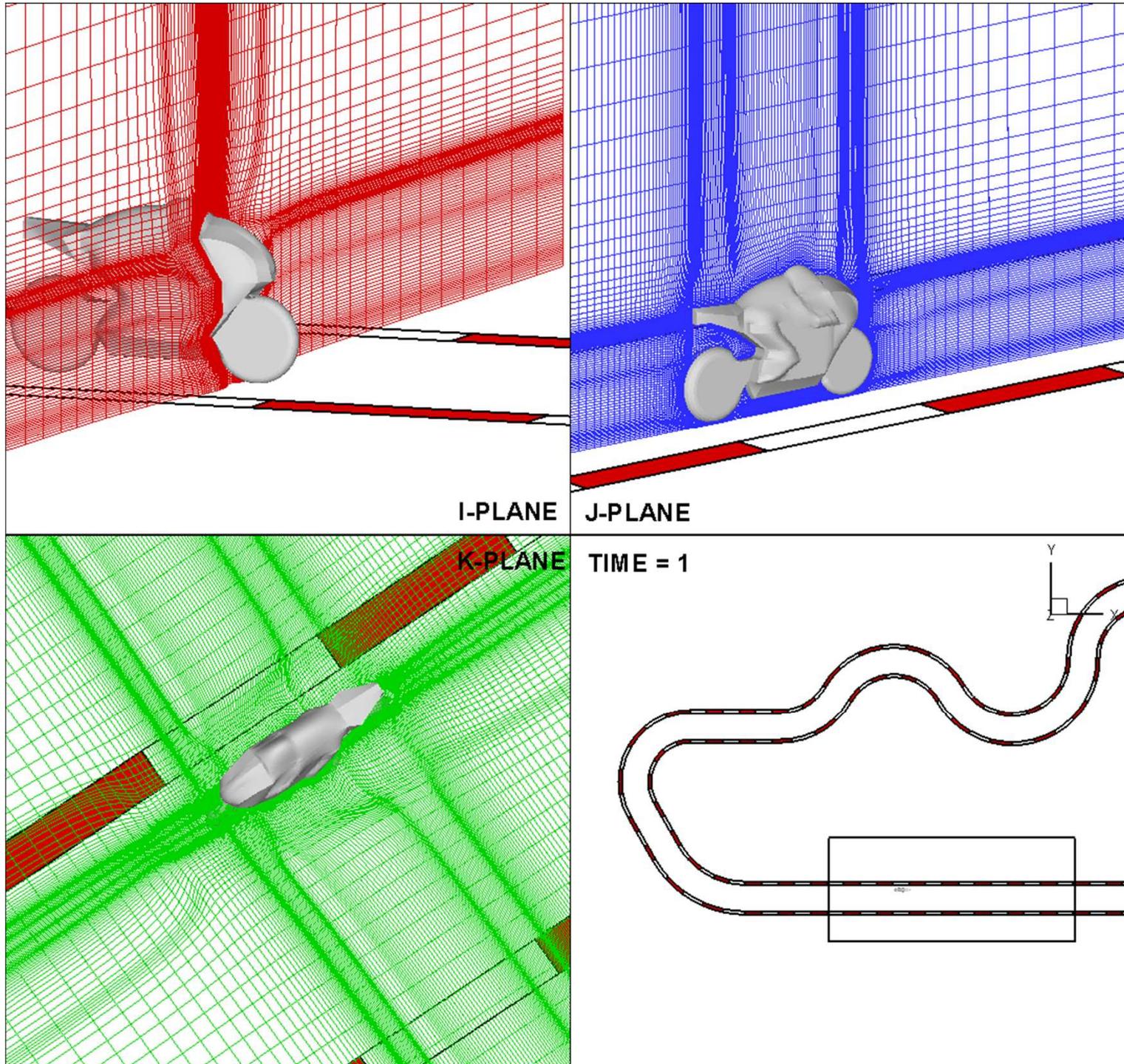
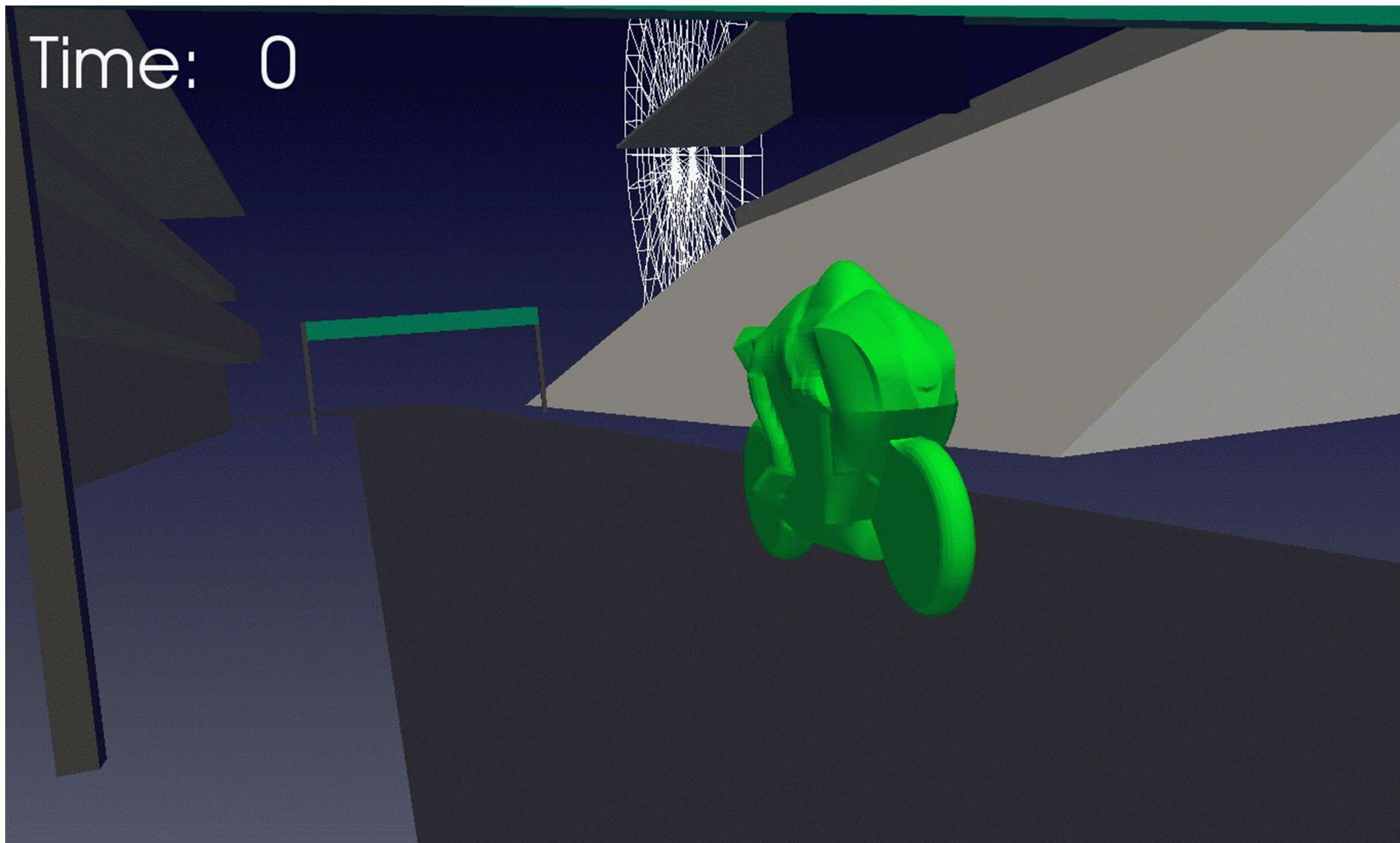


京都工芸繊維大学  
山川勝史

# 移動格子法 + 移動計算領域



# サーキット走行するMotoGPマシン



# 数値計算手法

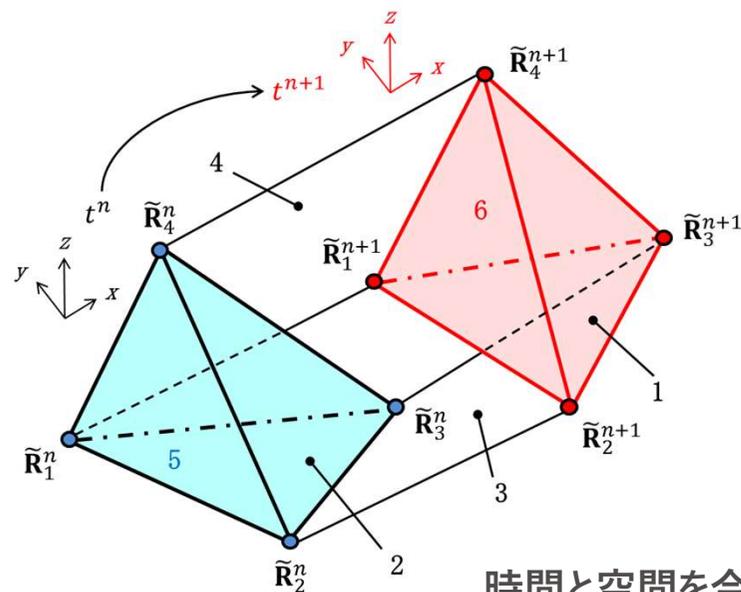
## 流体の基礎方程式と評価法

◆オイラー方程式

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial z} = 0$$

◆非構造移動格子有限体積法

$$\mathbf{q}^{n+1}(\tilde{n}_t)_6 + \mathbf{q}^n(\tilde{n}_t)_5 + \sum_{l=1}^4 (\mathbf{q}^{n+1/2} \tilde{n}_t + \mathbf{E}^{n+1/2} \tilde{n}_x + \mathbf{F}^{n+1/2} \tilde{n}_y + \mathbf{G}^{n+1/2} \tilde{n}_z)_l = 0$$

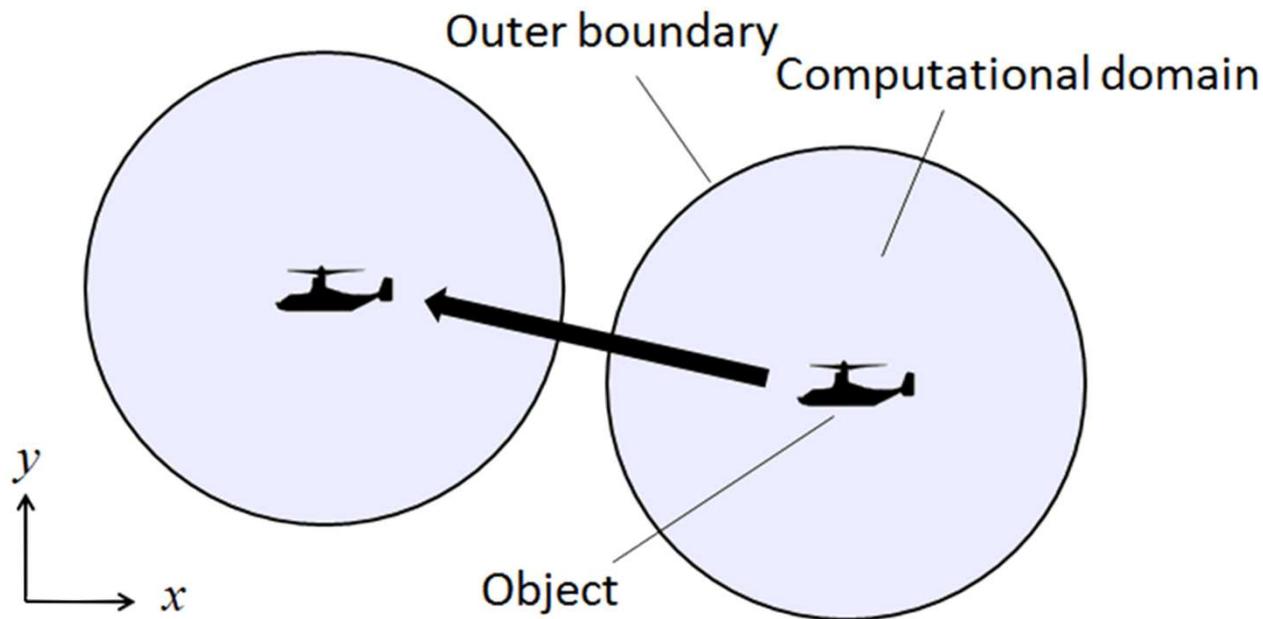


時間と空間を合わせた  
4次元空間の検査体積

# 数値計算手法

## 移動計算領域法(MCD法)

物体と計算領域を一体として移動させる手法

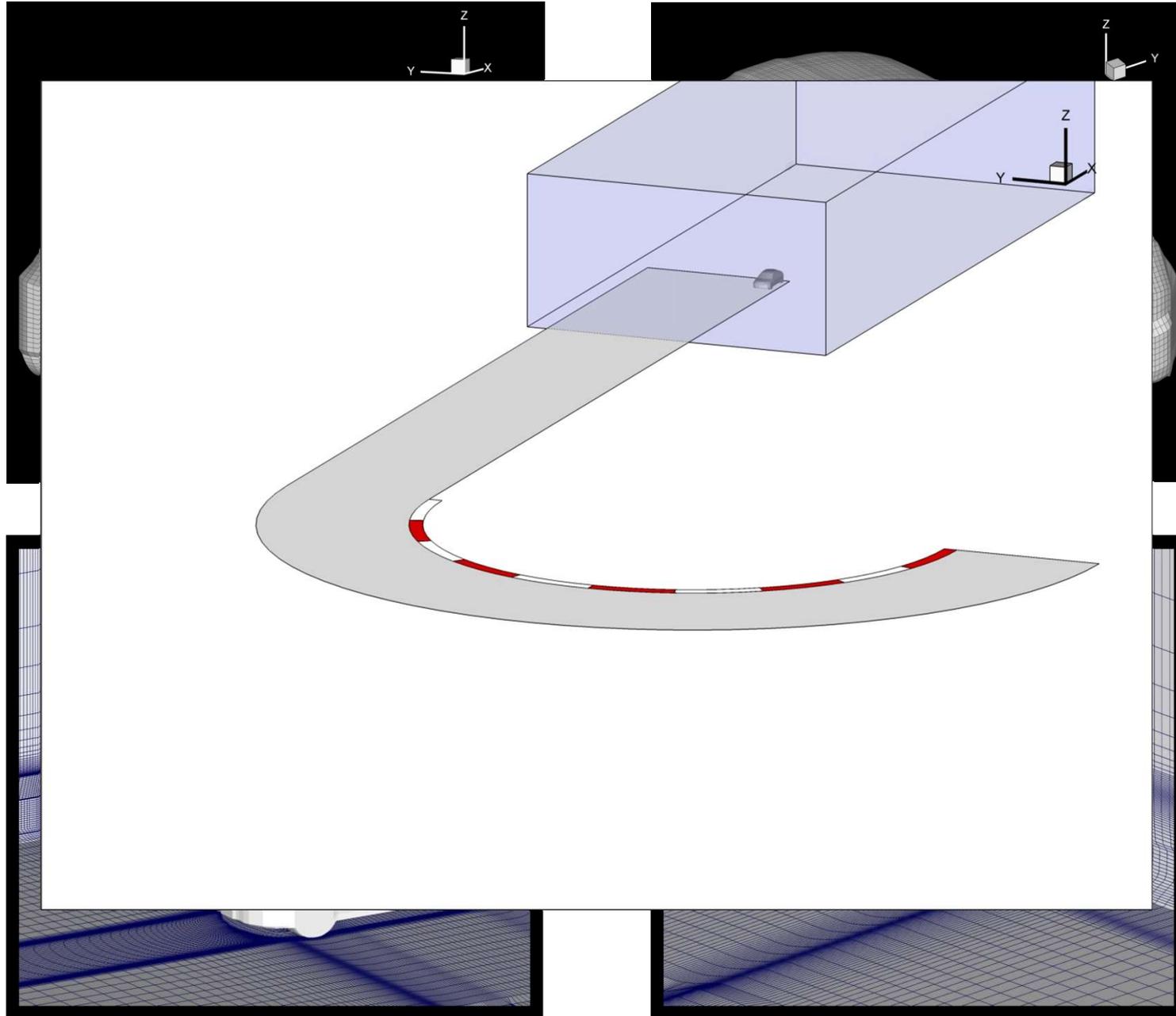


計算空間の制約  
を受けない

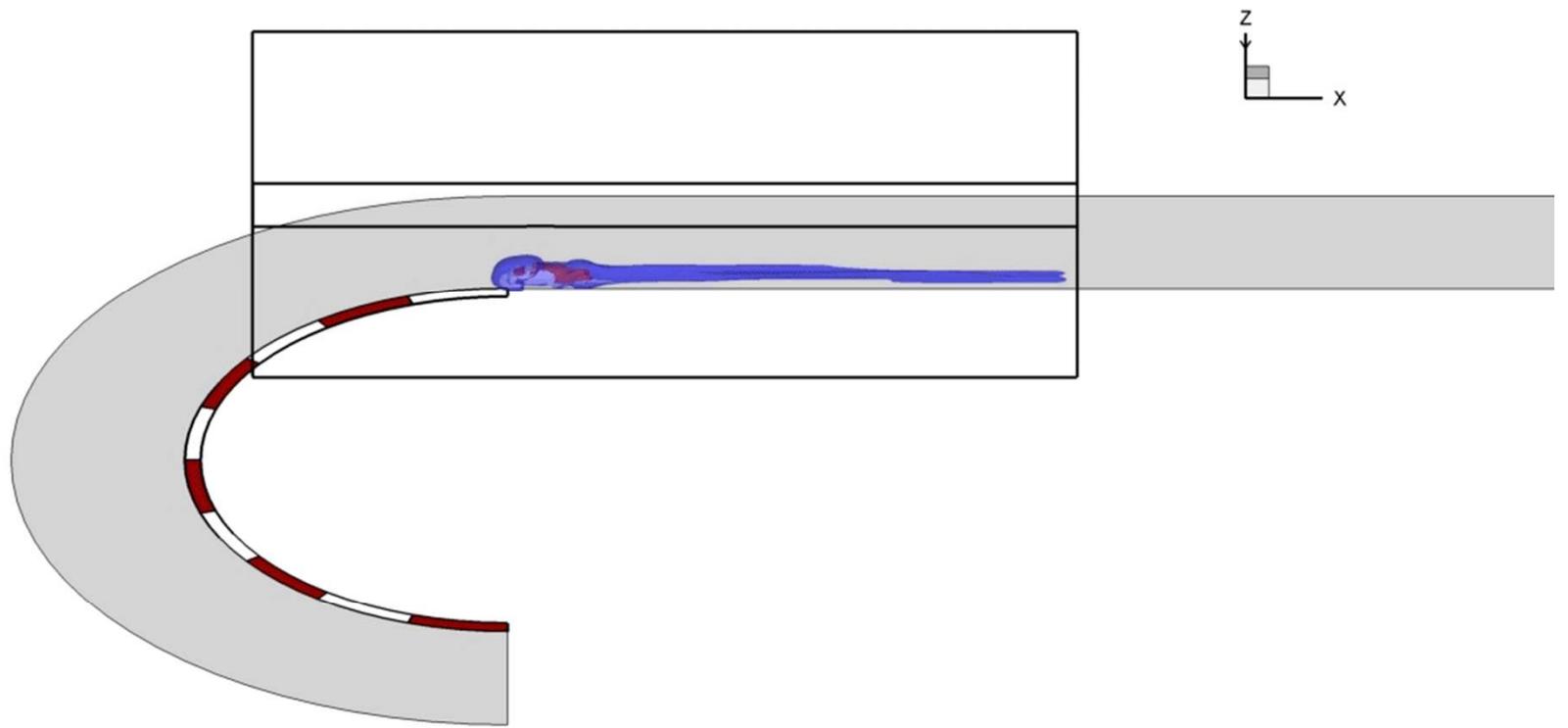
自由な運動が  
可能

移動格子有限体積法を用いることで物体の動きによって流れが生まれる状態を再現

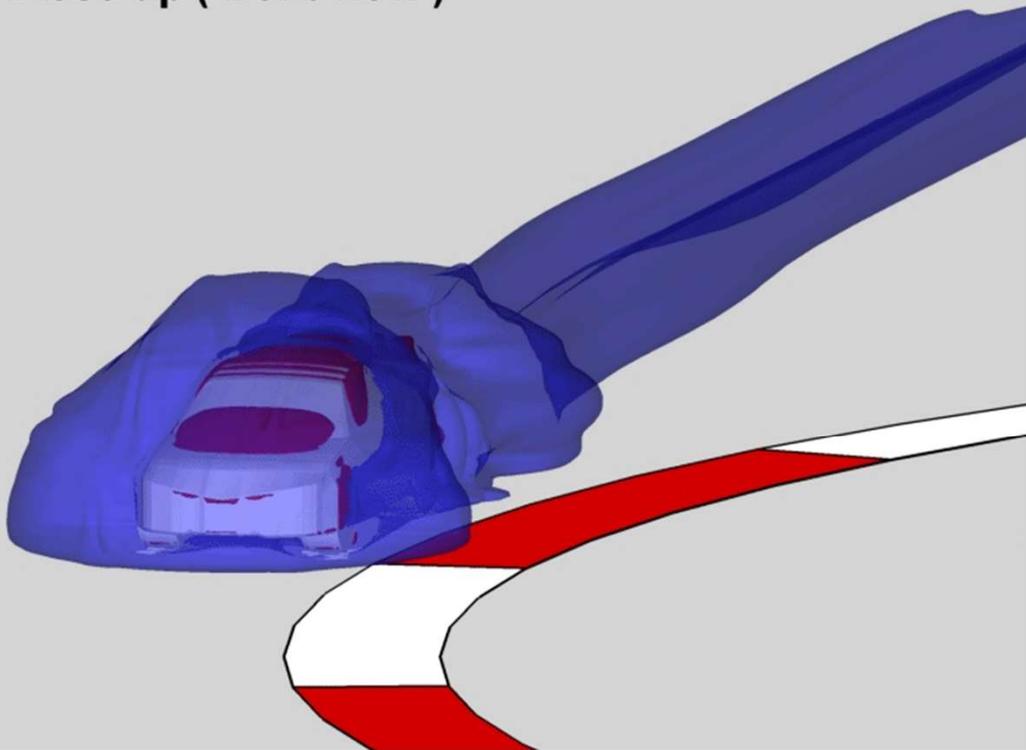
# 旋回する高速移動車両（MCD活用事例）



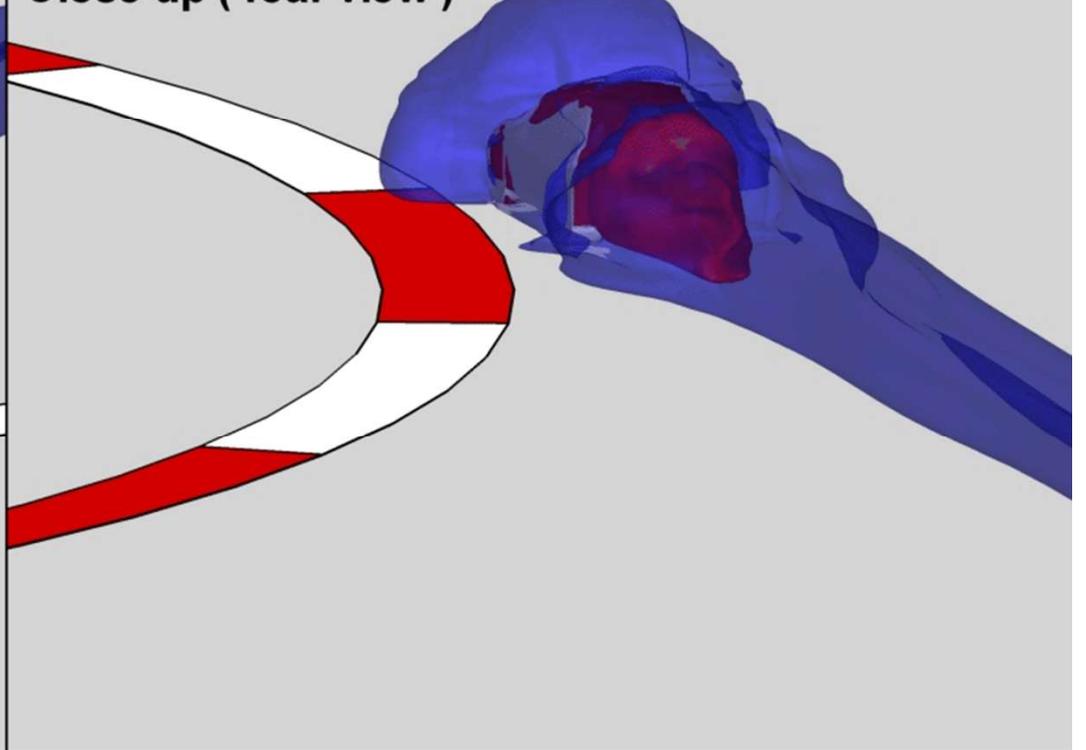
**Perspective view**



**Close up ( front view )**



**Close up ( rear view )**



# ティルトローター機周りの流れ

ティルトローター機 V-22 オスプレイ



<http://ja.wikipedia.org/wiki/V-22>

全体の運動

ホバリング-高速飛行に渡るより自由度の高い飛行運動

部分的な運動

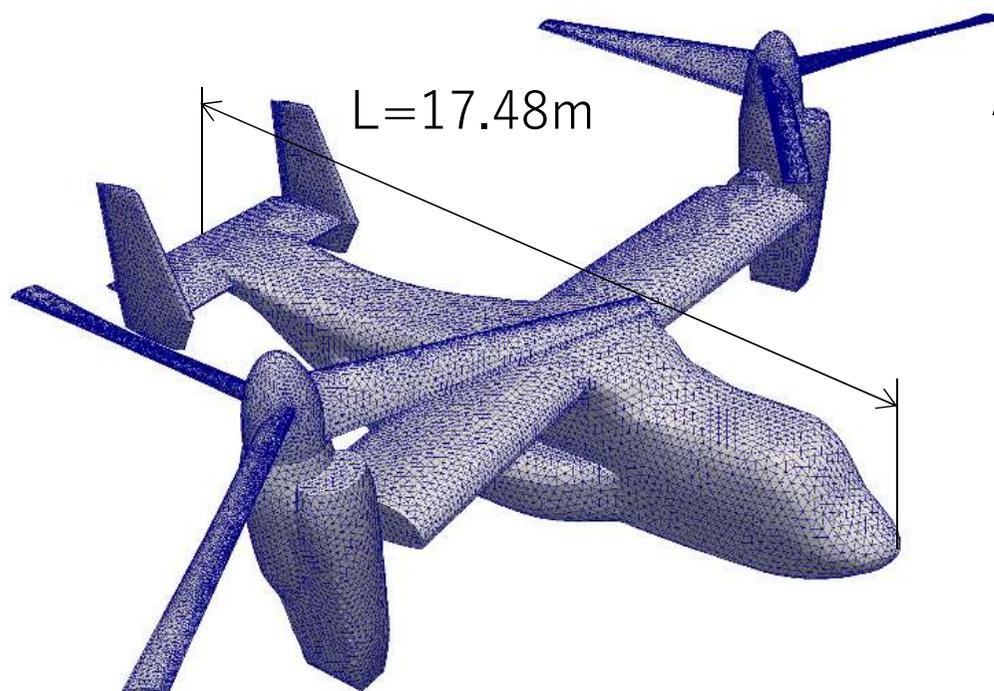
+

双発プロップローターの  
回転

エンジンセルの転換  
(モードチェンジ)

# ティルトローター機周りの流れ

## ボディ周りの計算格子



V-22 Osprey

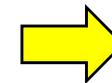
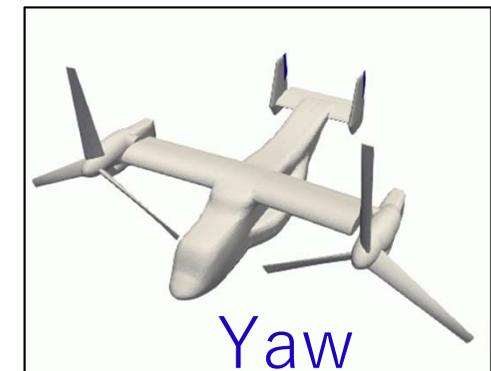
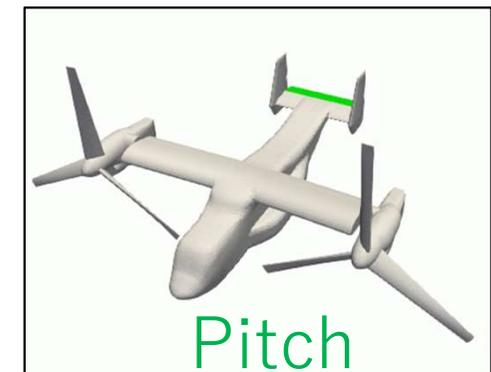
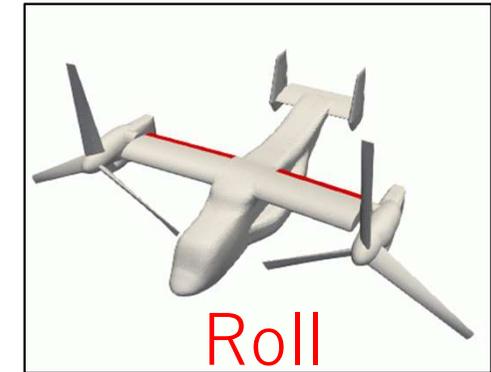
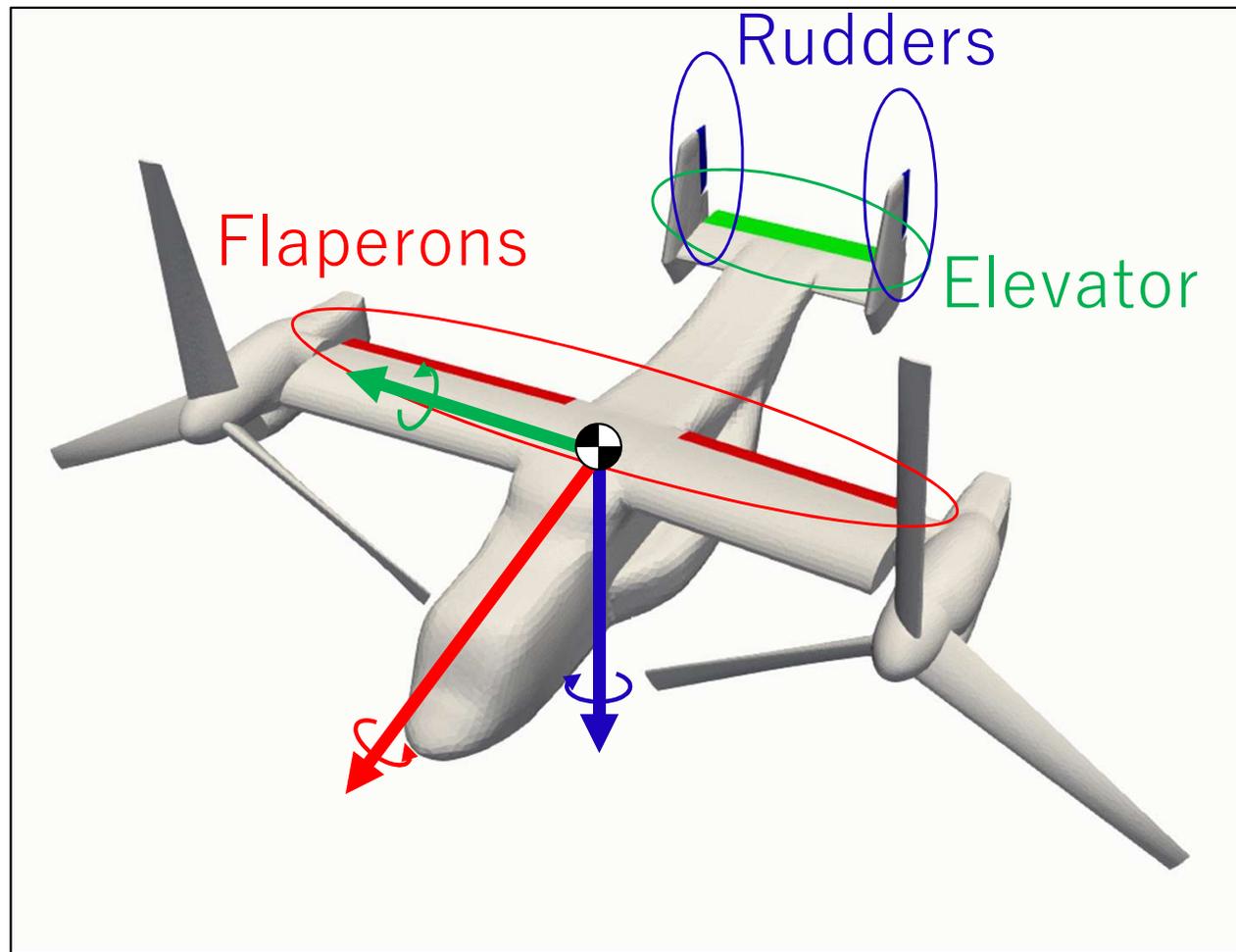
## 計算条件等

Air	Density	: 1.247kg/m <sup>3</sup>
	Sound Speed	: 340.29m/s
Aircraft	Length	: 17.48m
	Weight	: 21,545kg
	Rotor speed	: 397rpm



オスプレイ関係の資料は著作権の関係で公開できかねます。  
必要であれば 山川 (yamakawa@kit.ac.jp) まで連絡ください。

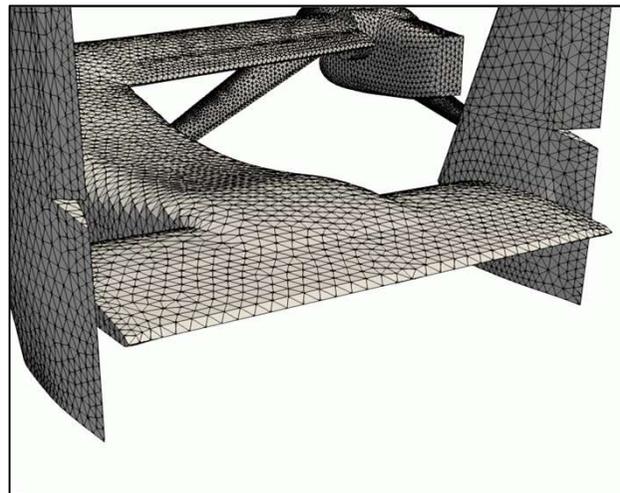
# ティルトローター機周りの流れ



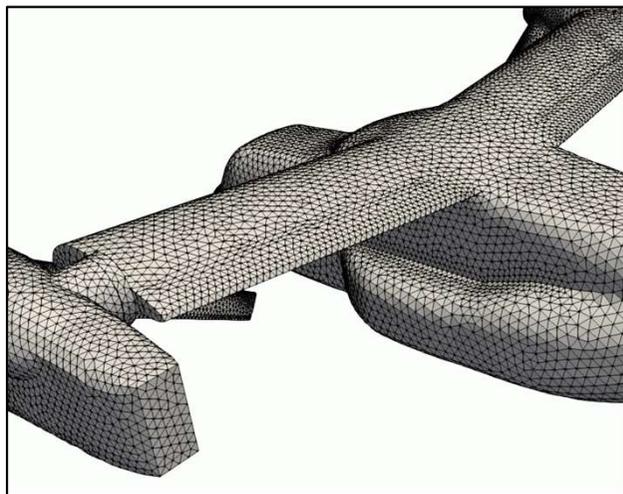
3方向  $(x, y, z)$  + 3軸 ➡ 6自由度の動きを表現

# テイルトローター機周りの流れ

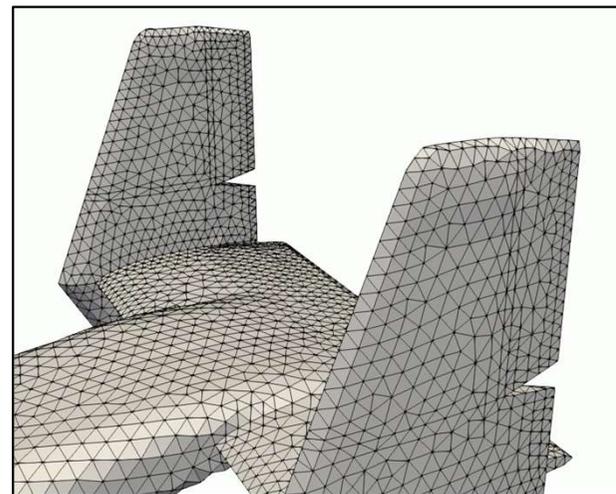
---



Elevator



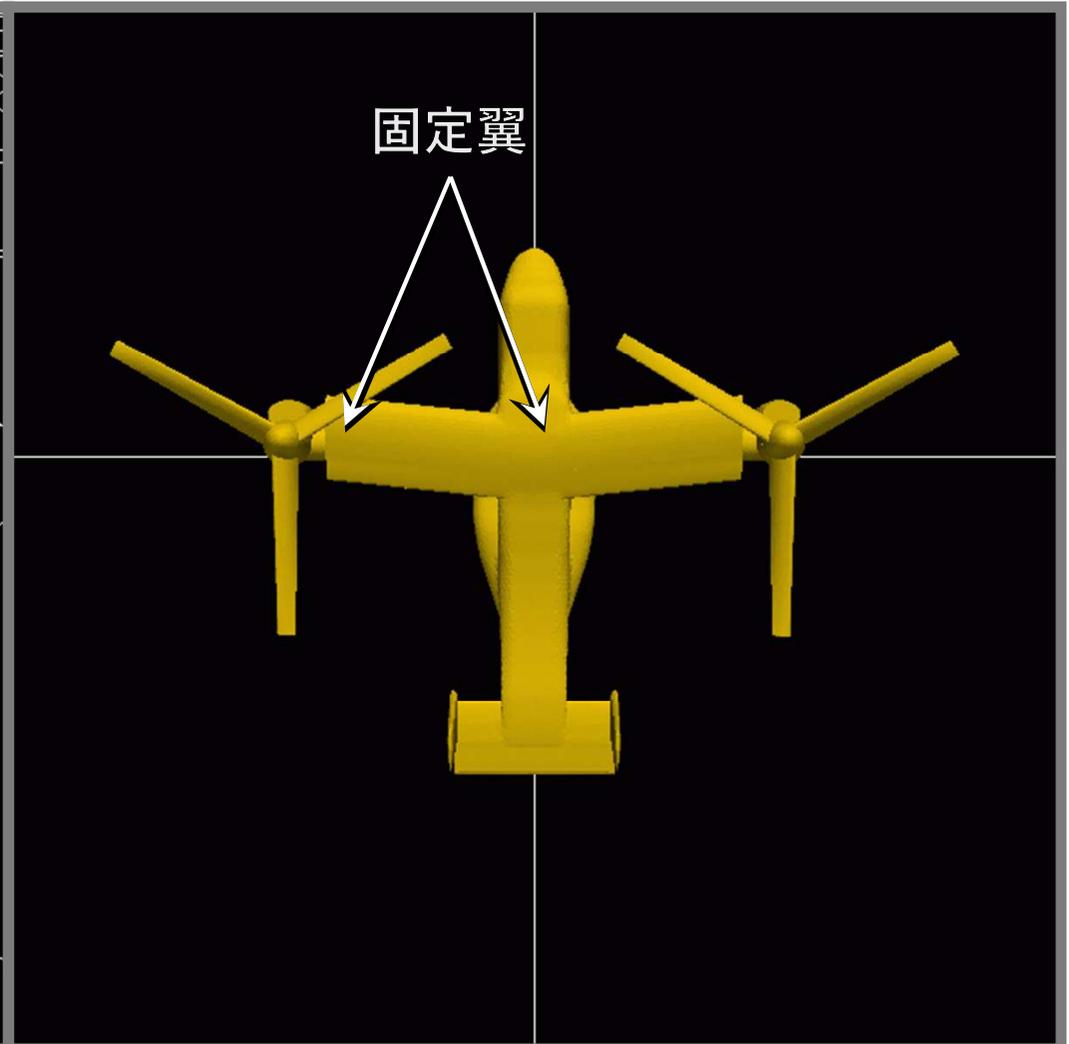
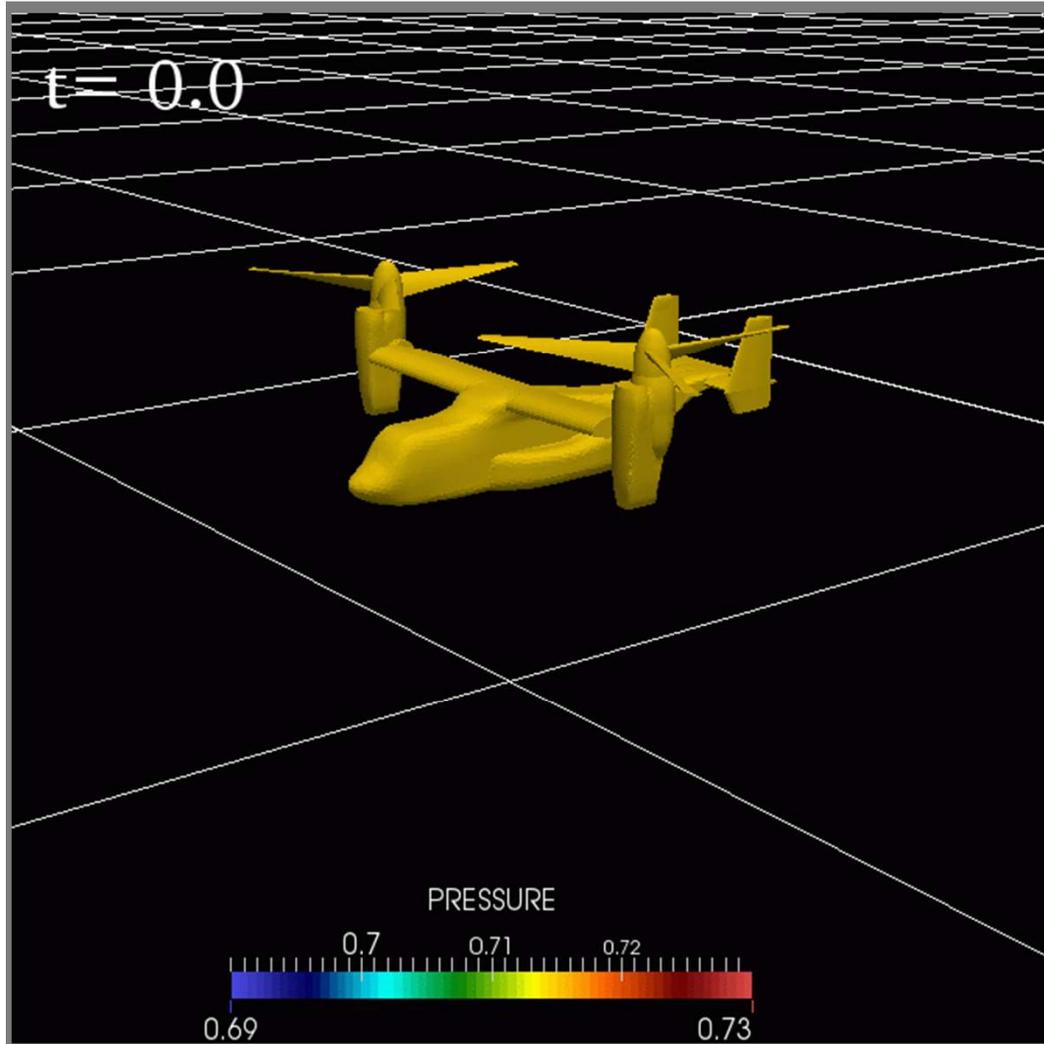
Flaperons



Rudders

# ティルトローター機周りの流れ

垂直離陸～フライトモードチェンジ



# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

環境問題・都市の交通問題

→電気駆動式で垂直離着陸可能な「空飛ぶクルマ」

  
  
[https://www.bellflight.com/-/media/site-specific/bell-flight/images/2-products/bell-nexus/bell\\_nexus\\_website\\_flight-controls.png?h=1494&w=2400&la=en&hash=611FC6C4A033B11C7339F58D5F296918](https://www.bellflight.com/-/media/site-specific/bell-flight/images/2-products/bell-nexus/bell_nexus_website_flight-controls.png?h=1494&w=2400&la=en&hash=611FC6C4A033B11C7339F58D5F296918)

  
  
[https://skydrive2020.com/wp-content/uploads/2020/08/slide\\_sd03\\_01.jpg](https://skydrive2020.com/wp-content/uploads/2020/08/slide_sd03_01.jpg)

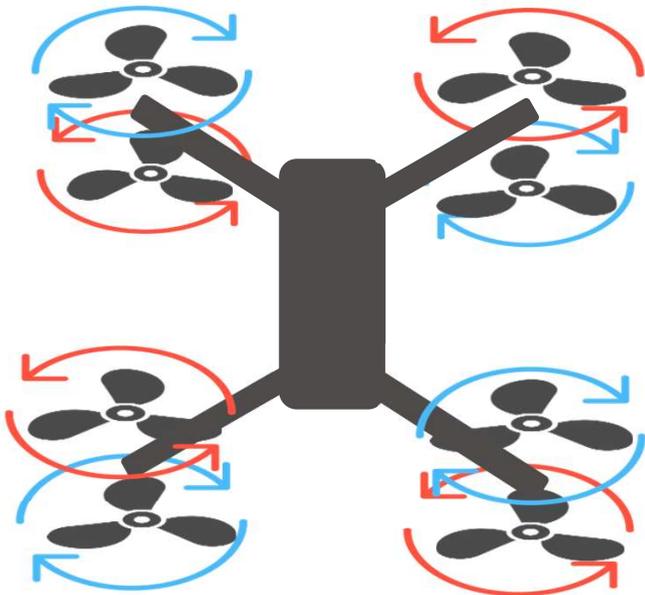
  
  
[https://evtol.news/\\_media/Aircraft%20Directory%20Images%20Wingless%20\(Multicopter\)/VoloCity/volocopter-volocity.jpg](https://evtol.news/_media/Aircraft%20Directory%20Images%20Wingless%20(Multicopter)/VoloCity/volocopter-volocity.jpg)

  
  
[https://img.news.goo.ne.jp/image\\_proxy/compress/q\\_80/picture/trafficnews/m\\_trafficnews-108175.jpg](https://img.news.goo.ne.jp/image_proxy/compress/q_80/picture/trafficnews/m_trafficnews-108175.jpg)

# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 使用モデル

二重反転式オクトロータ型の機体は冗長性やコンパクトさから日本国内での実用化の有力な候補



# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

- 車両寸法 約 $4 \times 4 \times 2$  m (W  $\times$  D  $\times$  H)
- 重量 400 kg(乗員の体重を含む)
- ローター 3枚羽  $\times$  8



要素数 約300万

# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 初期条件・計算条件

密度	1.0
$x, y, z$ 方向速度	0.0
圧力	1/1.4
時間刻み	0.001

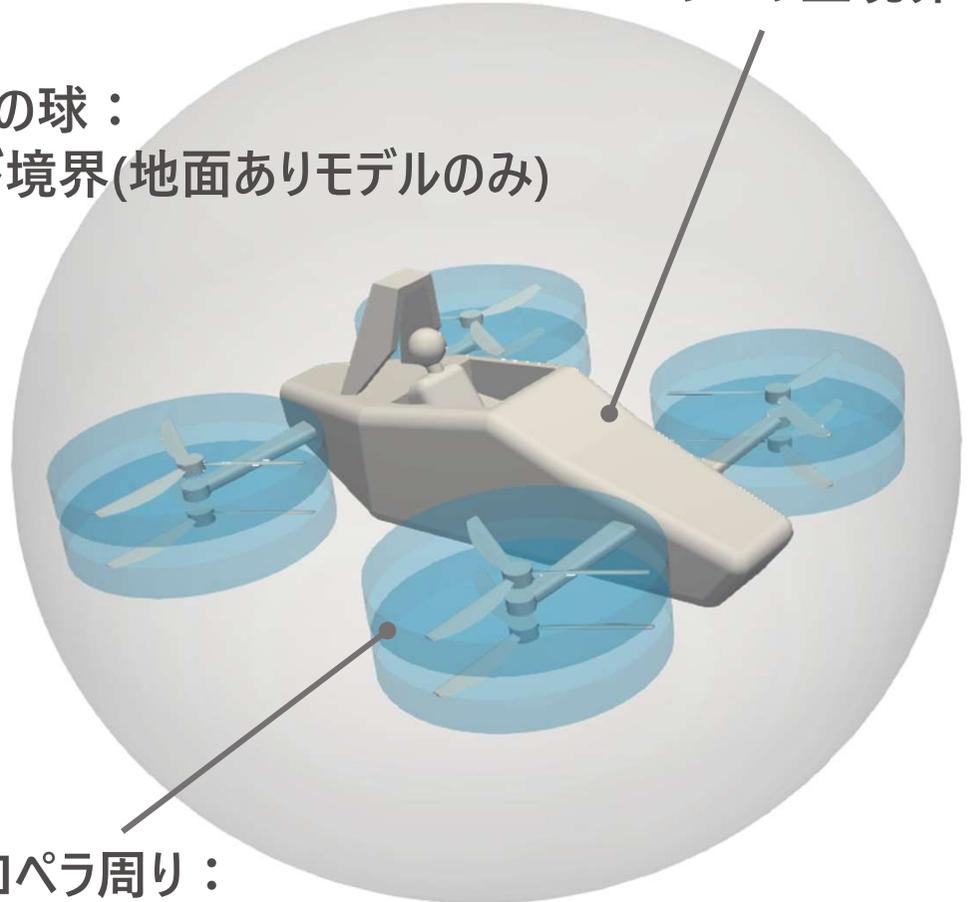
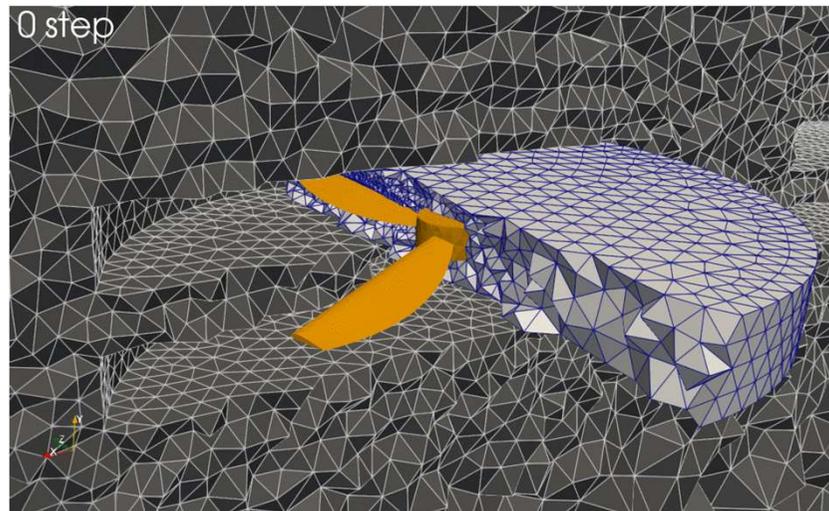
## 境界条件

機体周りの球：  
スライド境界(地面ありモデルのみ)

固体表面：  
すべり壁境界

プロペラ周り：  
スライド境界

外部境界：リーマン境界



# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 飛行条件

### 離陸飛行

等速上昇 → 目標高度でホバリング

### ヨーイング飛行

ホバリング → 目標回転速度で等速回転

### 前進飛行

目標速度に達するまでピッチングによる加速

### 旋回飛行

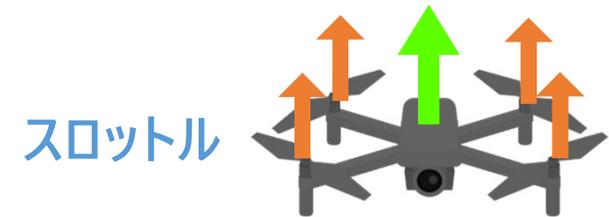
前進飛行 → 一定のロール角をつける  
進行方向に機首が向くようラダー操作

# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 飛行条件

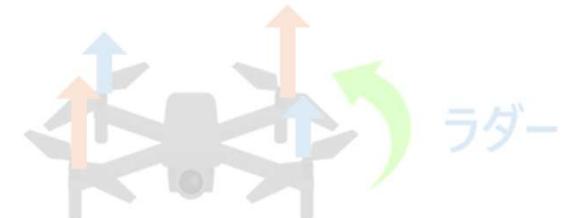
### 離陸飛行

等速上昇 → 目標高度でホバリング



### ヨーイング飛行

ホバリング → 目標回転速度で等速回転



### 前進飛行

目標速度に達するまでピッチングによる加速



### 旋回飛行

前進飛行 → 一定のロール角をつける  
進行方向に機首が向くようラダー操作

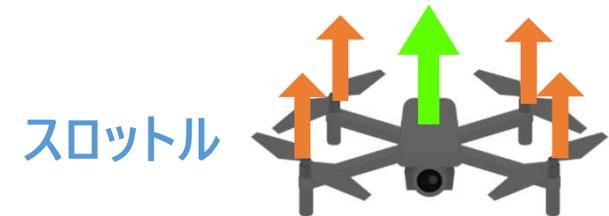


# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 飛行条件

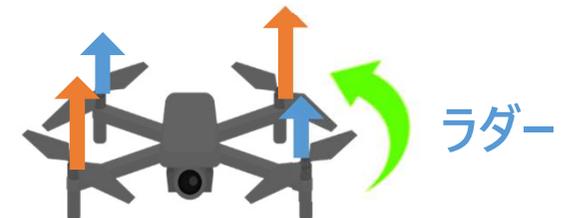
### 離陸飛行

等速上昇 → 目標高度でホバリング



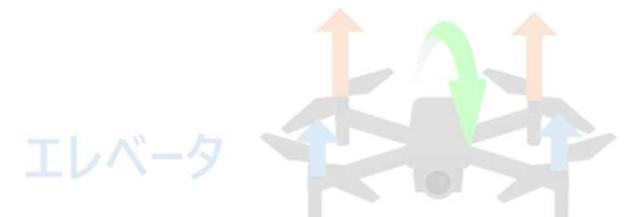
### ヨーイング飛行

ホバリング → 目標回転速度で等速回転



### 前進飛行

目標速度に達するまでピッチングによる加速



### 旋回飛行

前進飛行 → 一定のロール角をつける  
進行方向に機首が向くようラダー操作



# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 飛行条件

### 離陸飛行

等速上昇 → 目標高度でホバリング

### ヨーイング飛行

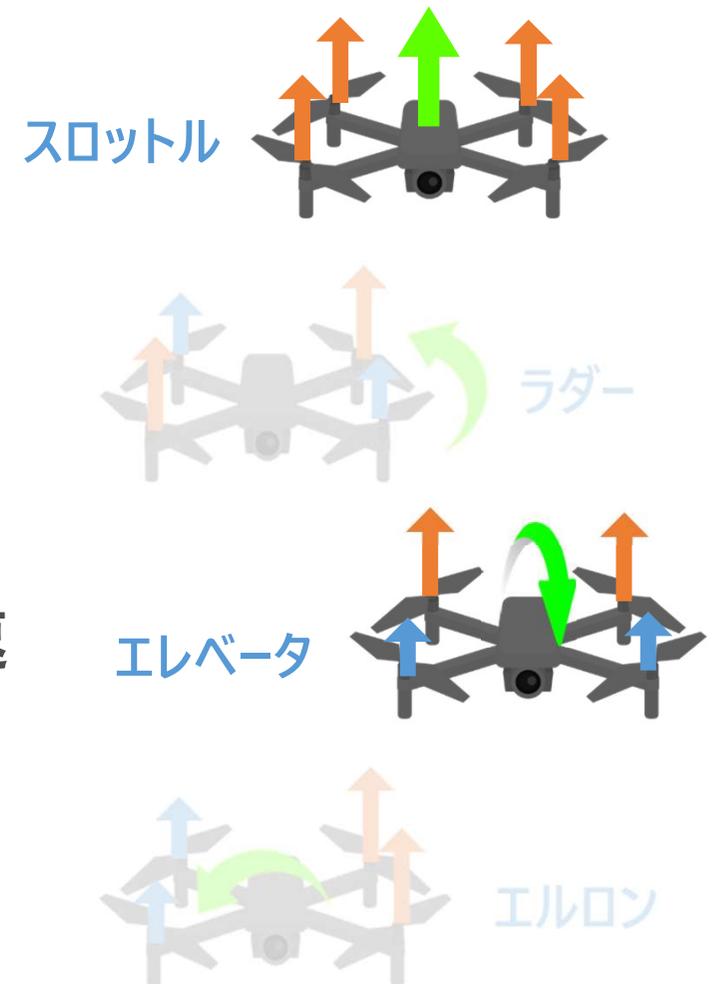
ホバリング → 目標回転速度で等速回転

### 前進飛行

目標速度に達するまでピッチングによる加速

### 旋回飛行

前進飛行 → 一定のロール角をつける  
進行方向に機首が向くようラダー操作



# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 飛行条件

### 離陸飛行

等速上昇 → 目標高度でホバリング

### ヨーイング飛行

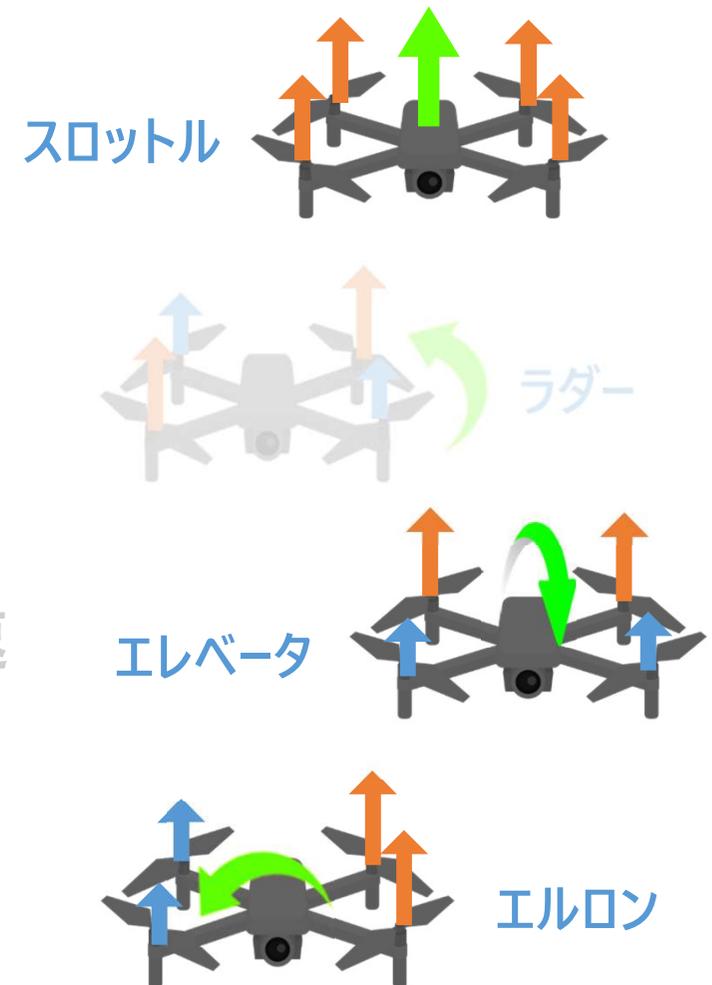
ホバリング → 目標回転速度で等速回転

### 前進飛行

目標速度に達するまでピッチングによる加速

### 旋回飛行

前進飛行 → 一定のロール角をつける  
進行方向に機首が向くようラダー操作

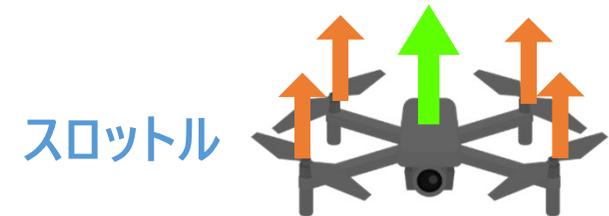


# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 飛行条件

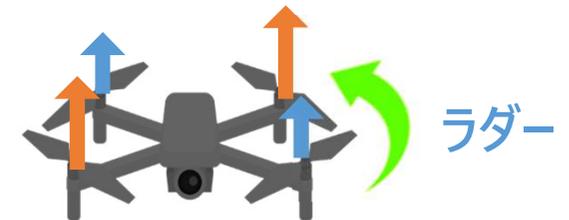
### 離陸飛行

等速上昇 → 目標高度でホバリング



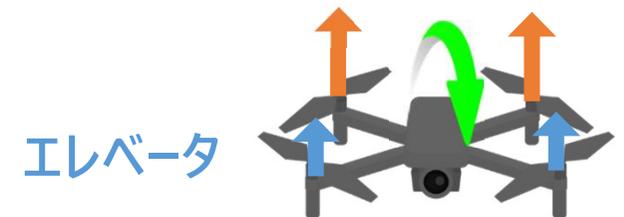
### ヨーイング飛行

ホバリング → 目標回転速度で等速回転



### 前進飛行

目標速度に達するまでピッチングによる加速



### 旋回飛行

前進飛行 → 一定のロール角をつける  
進行方向に機首が向くようラダー操作



# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 飛行条件

### 離陸飛行

等速上昇 → 目標高度でホバリング

### ヨーイング飛行

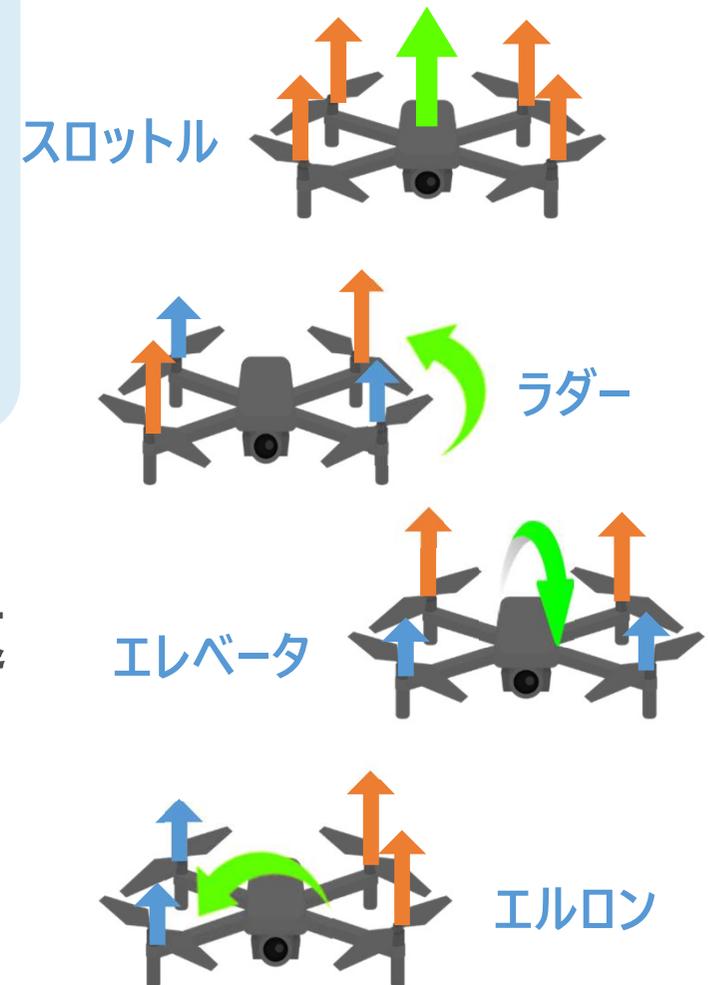
ホバリング → 目標回転速度で等速回転

### 前進飛行

目標速度に達するまでピッチングによる加速

### 旋回飛行

前進飛行 → 一定のロール角をつける  
進行方向に機首が向くようラダー操作

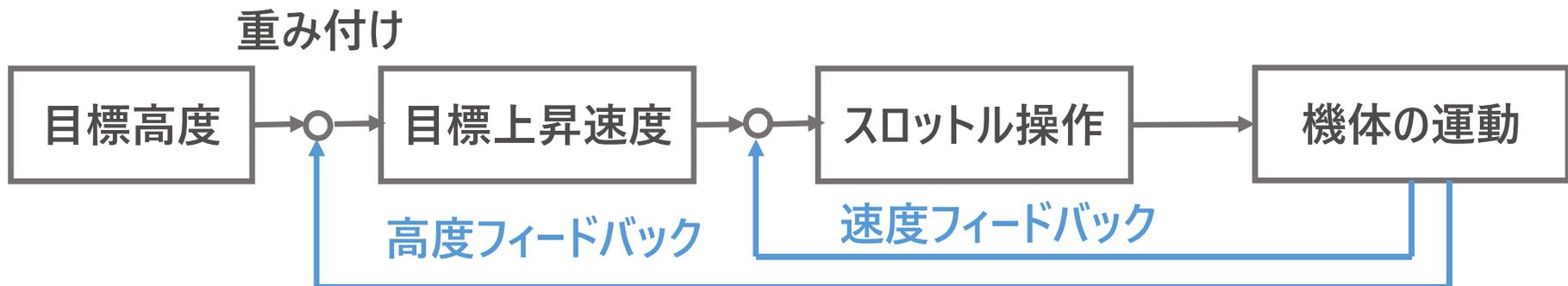


# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 離陸→ヨーイング飛行シミュレーションで用いる操作の詳細

### 離陸飛行

目標高度に近づいた段階でヨーイングに移行



### ヨーイング飛行

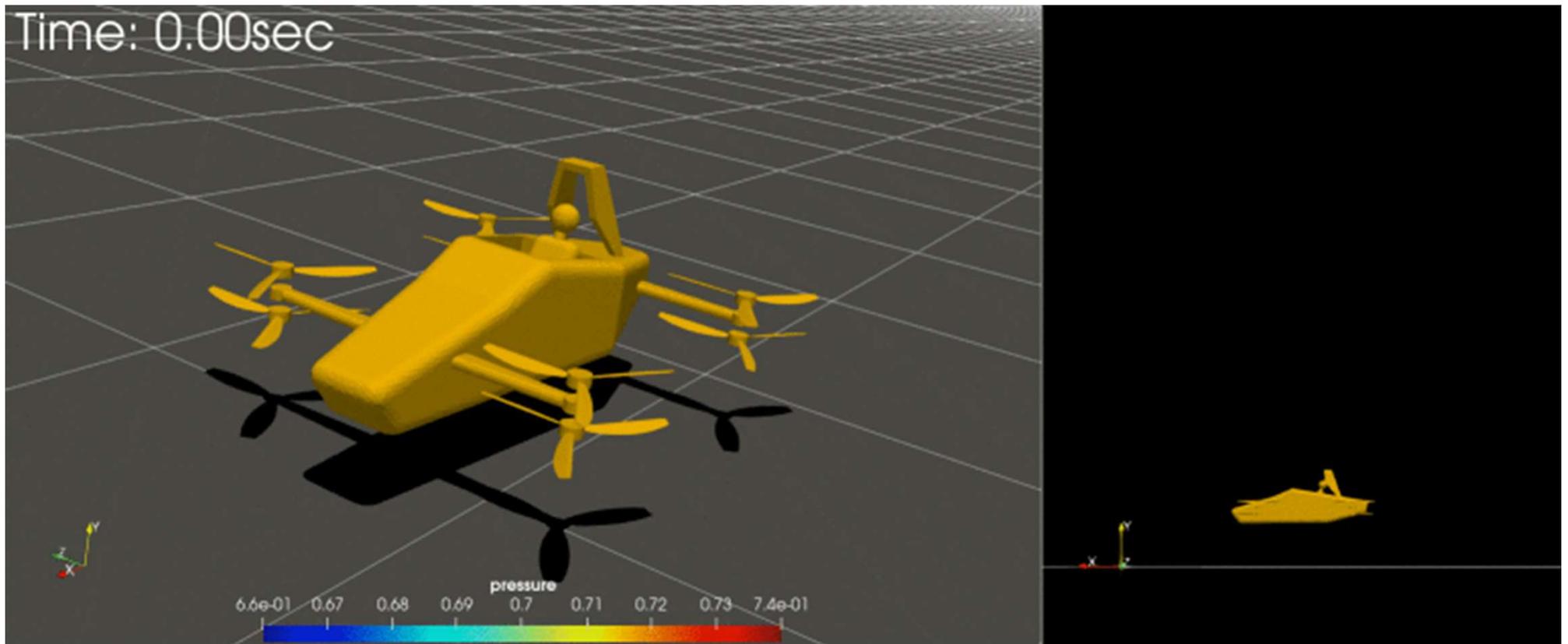


※高度制御はどの飛行形態でも行っている

※特記のない方向の姿勢は、水平を保つように制御を行っている

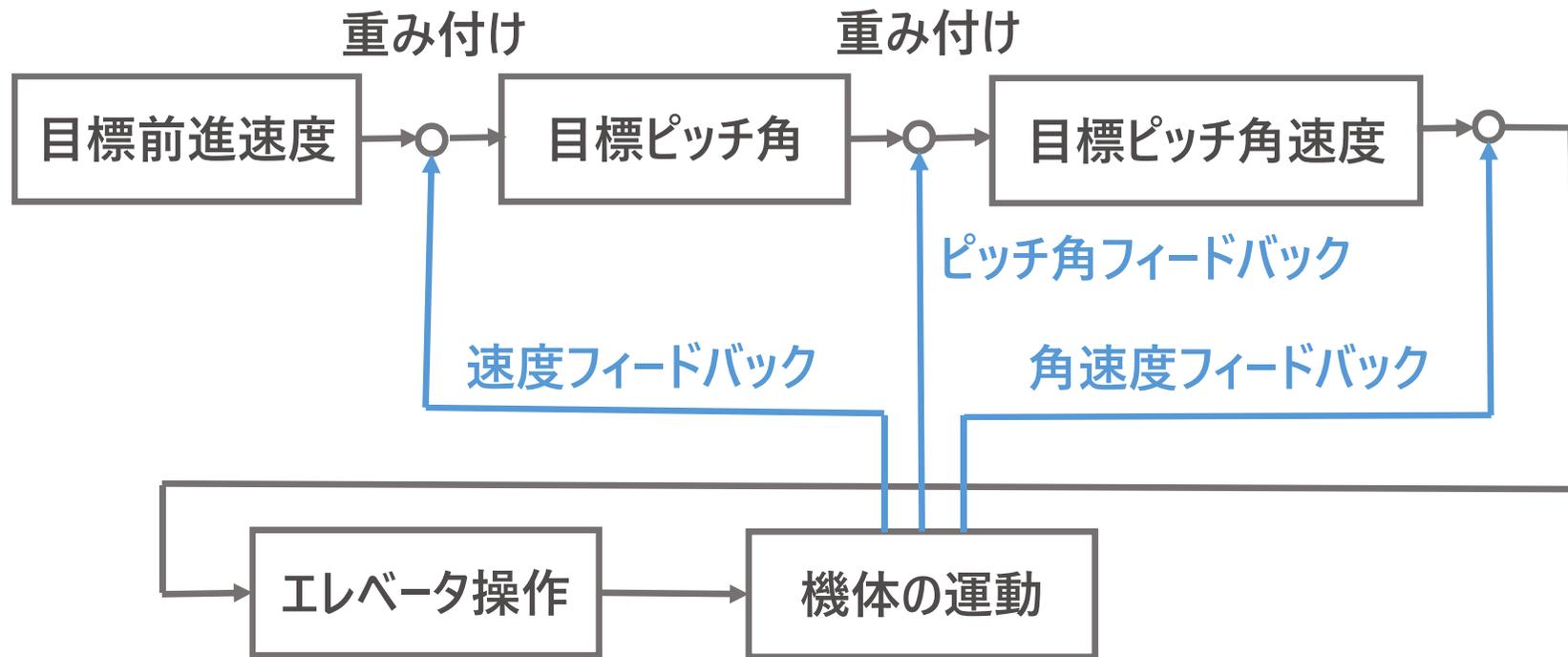
# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 離陸→ヨーイング飛行シミュレーション



# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 前進飛行シミュレーションで用いる操作の詳細

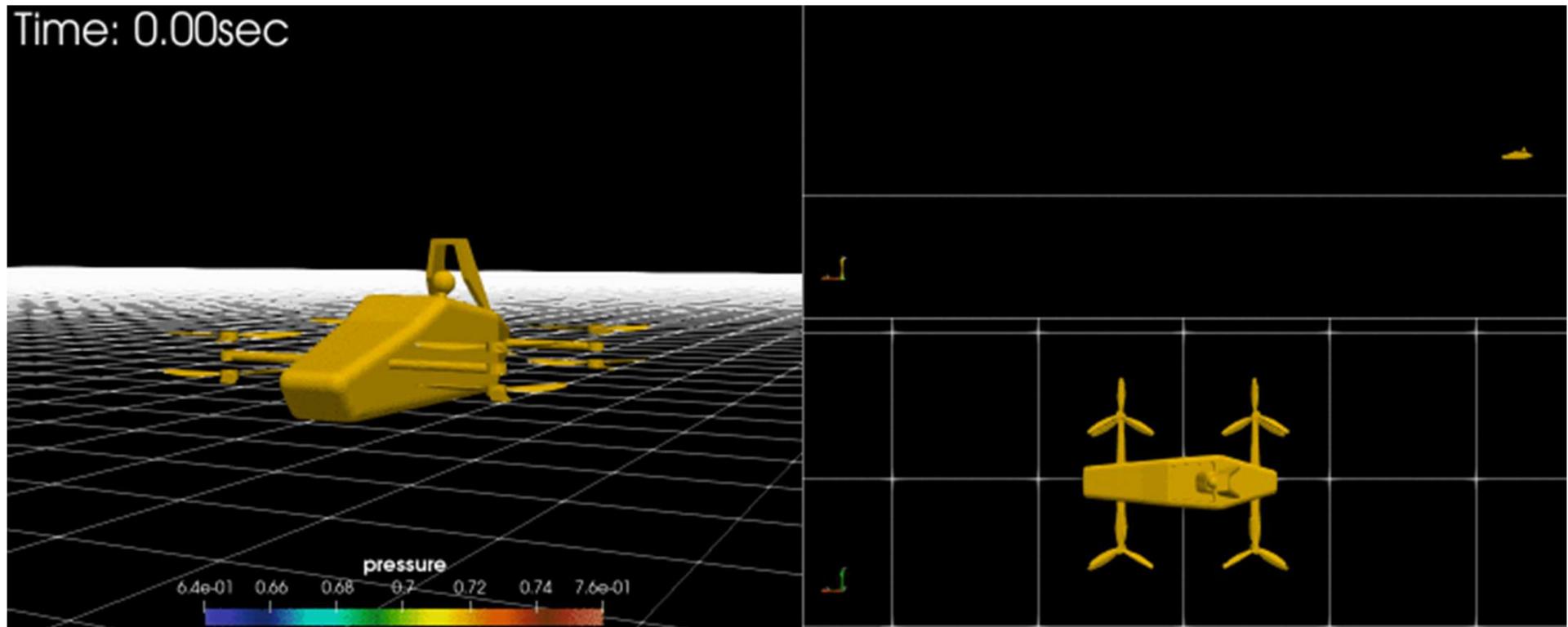


※高度制御はどの飛行形態でも行っている

※特記のない方向の姿勢は、水平を保つように制御を行っている

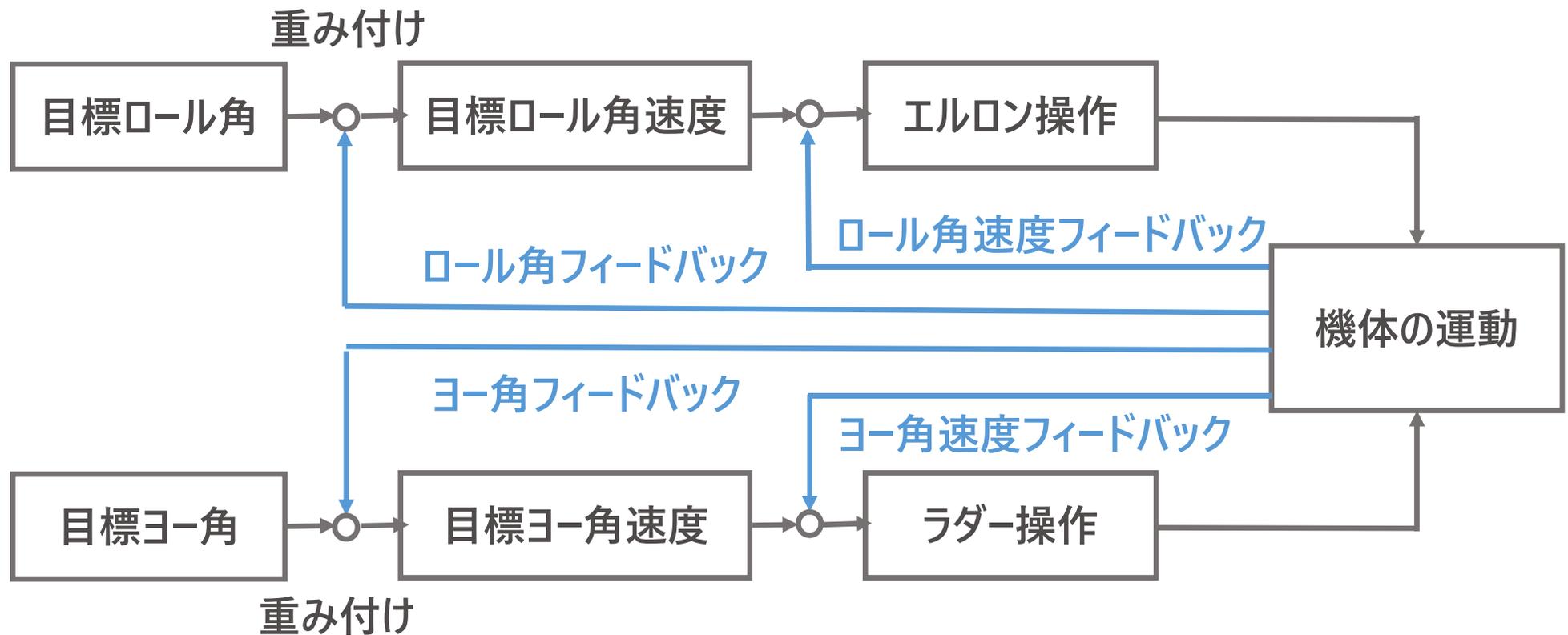
# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 前進飛行シミュレーション



# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

## 旋回飛行シミュレーションで用いる操作の詳細

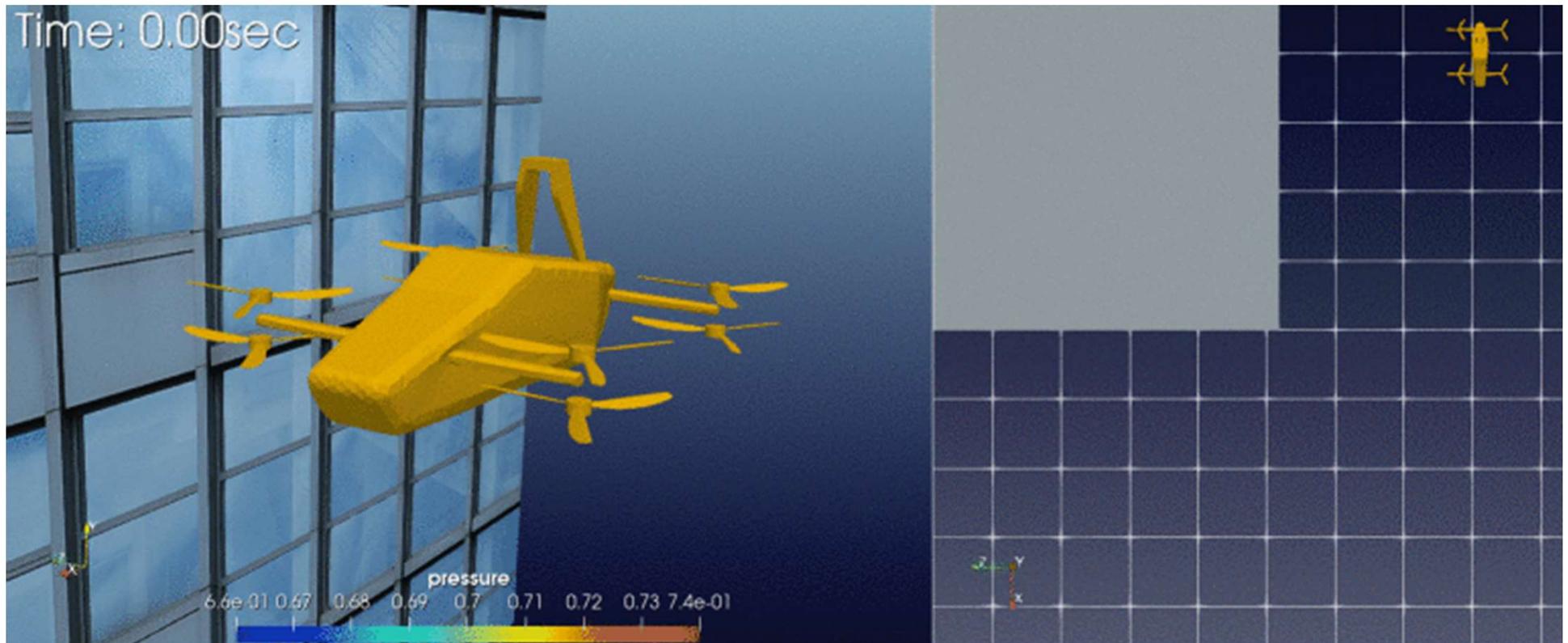


機首を進行方向に向けるため、  
目標ヨー角は水平面上の速度ベクトルの向きより与えている

※高度制御はどの飛行形態でも行っている  
※特記のない方向の姿勢は、水平を保つように制御を行っている

# 空飛ぶクルマの飛行シミュレーション

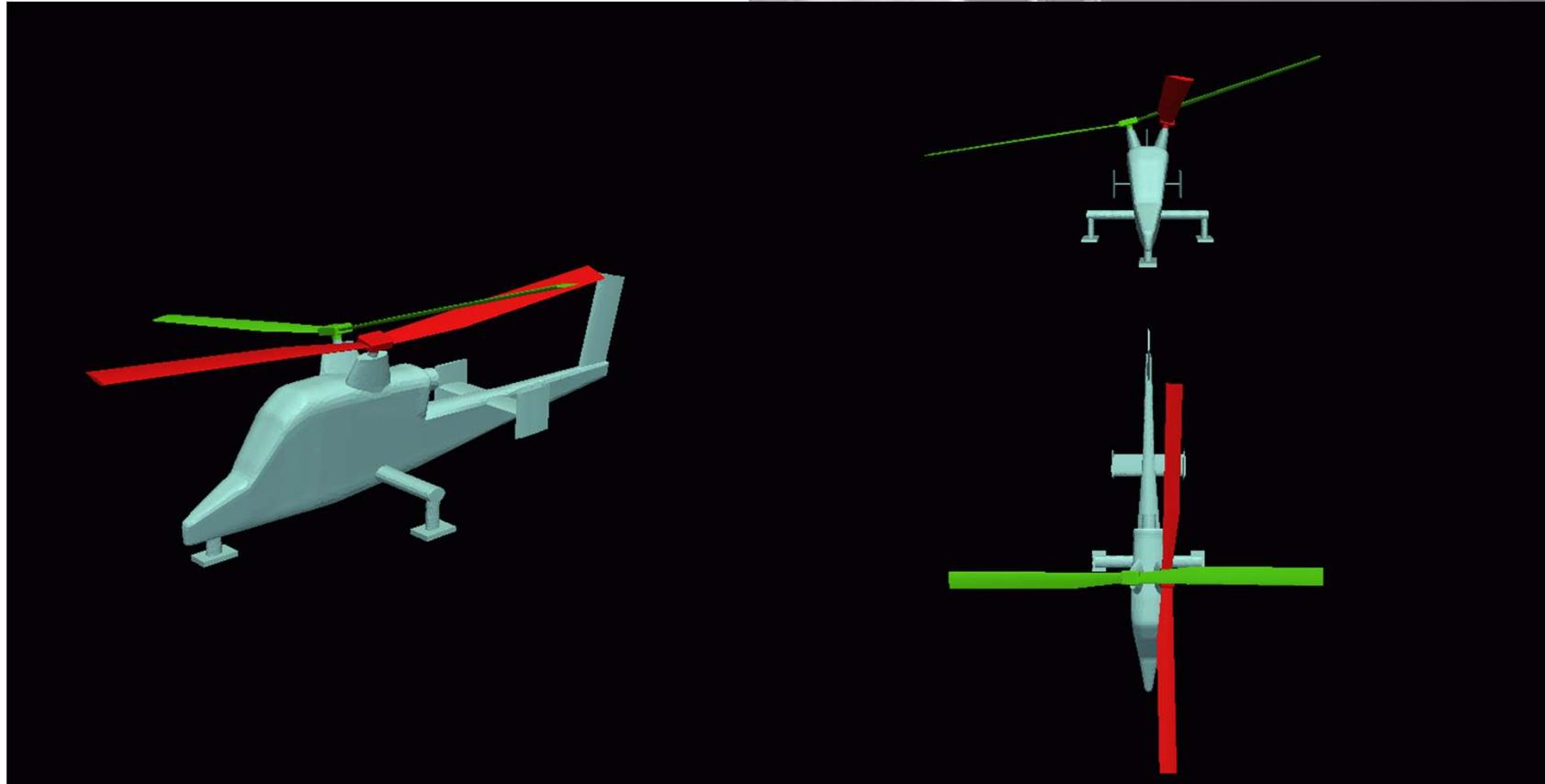
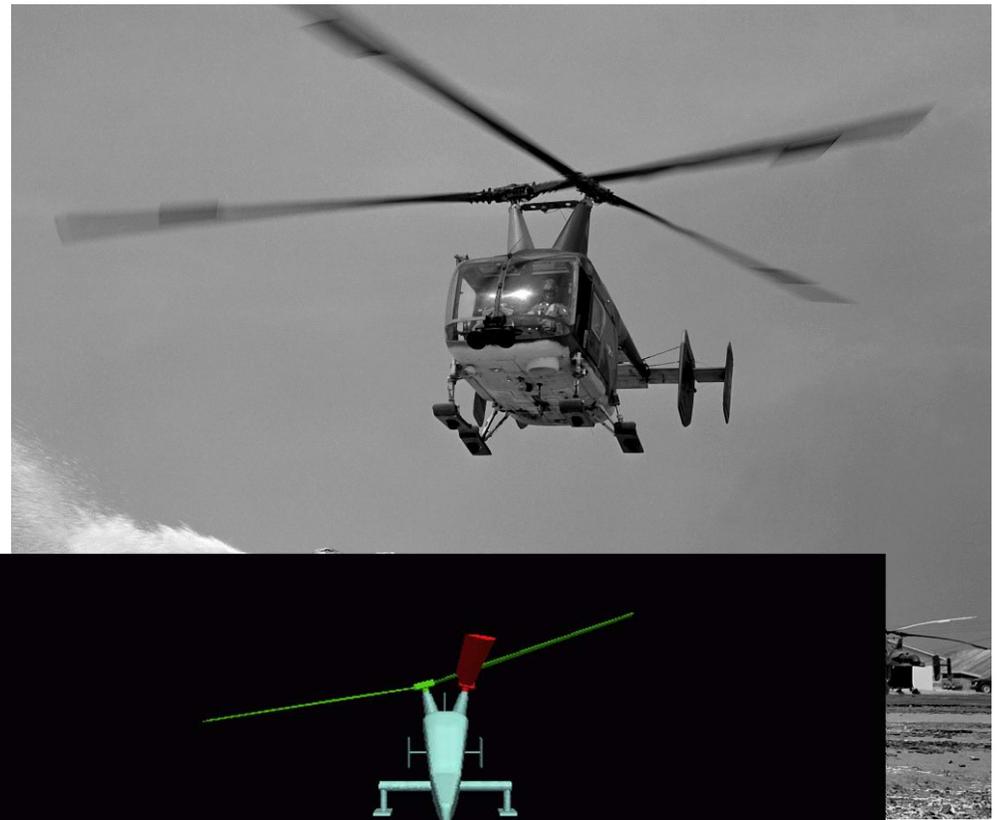
## 旋回飛行シミュレーション



※背景は合成

# 交差反転式ローター

Intermeshing rotors



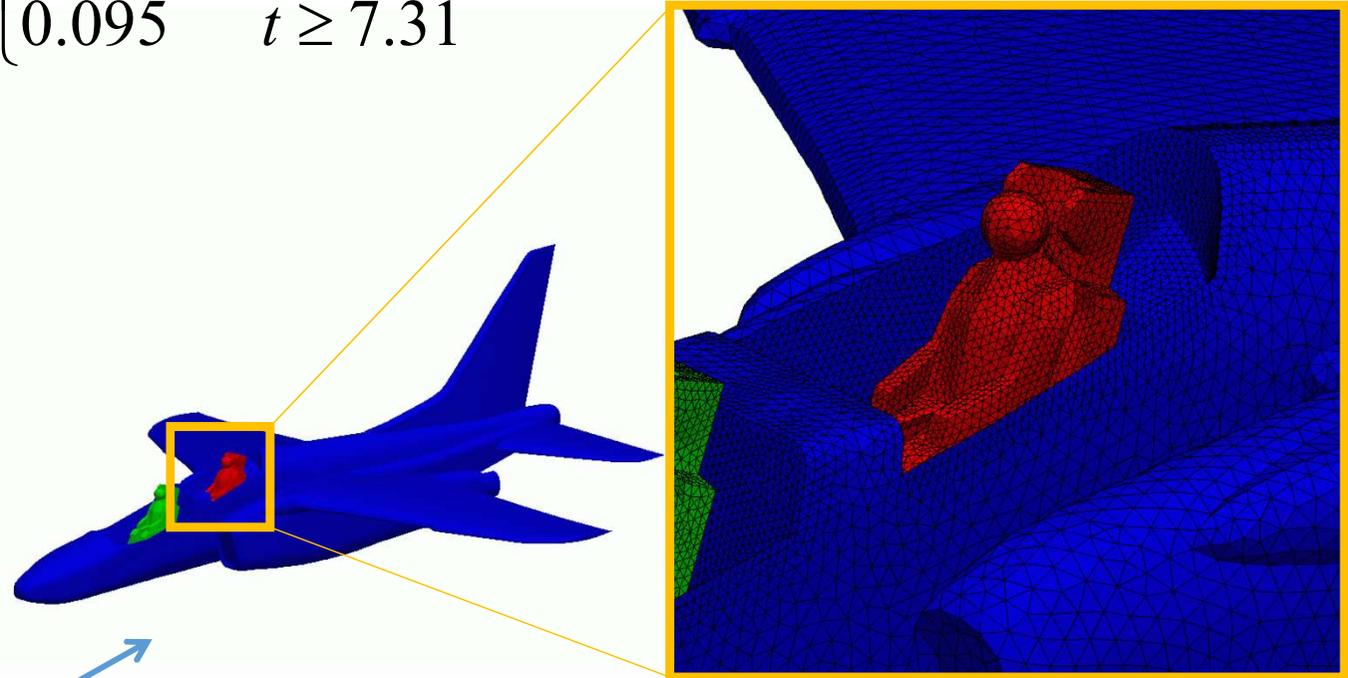
# 計算要素の発生消滅

## 緊急脱出

$$\text{Ejection speed } u_z = \begin{cases} 0.013t & t < 7.31 \\ 0.095 & t \geq 7.31 \end{cases}$$

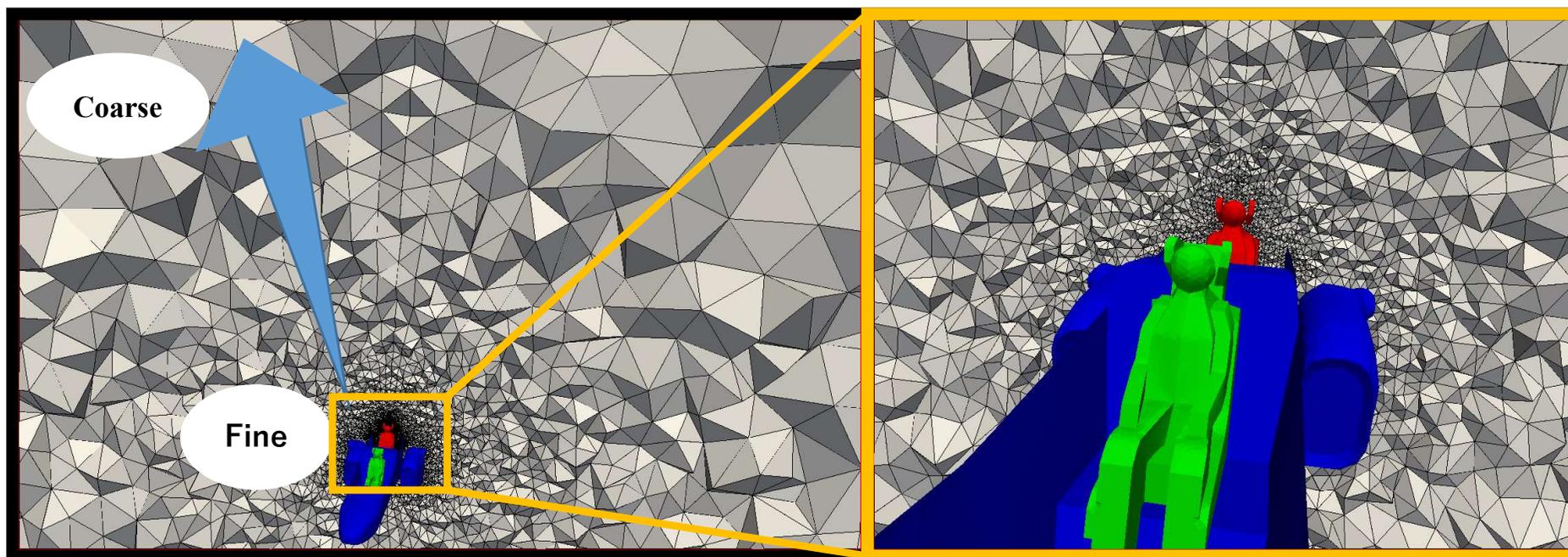


$$u_\infty = 0.5$$



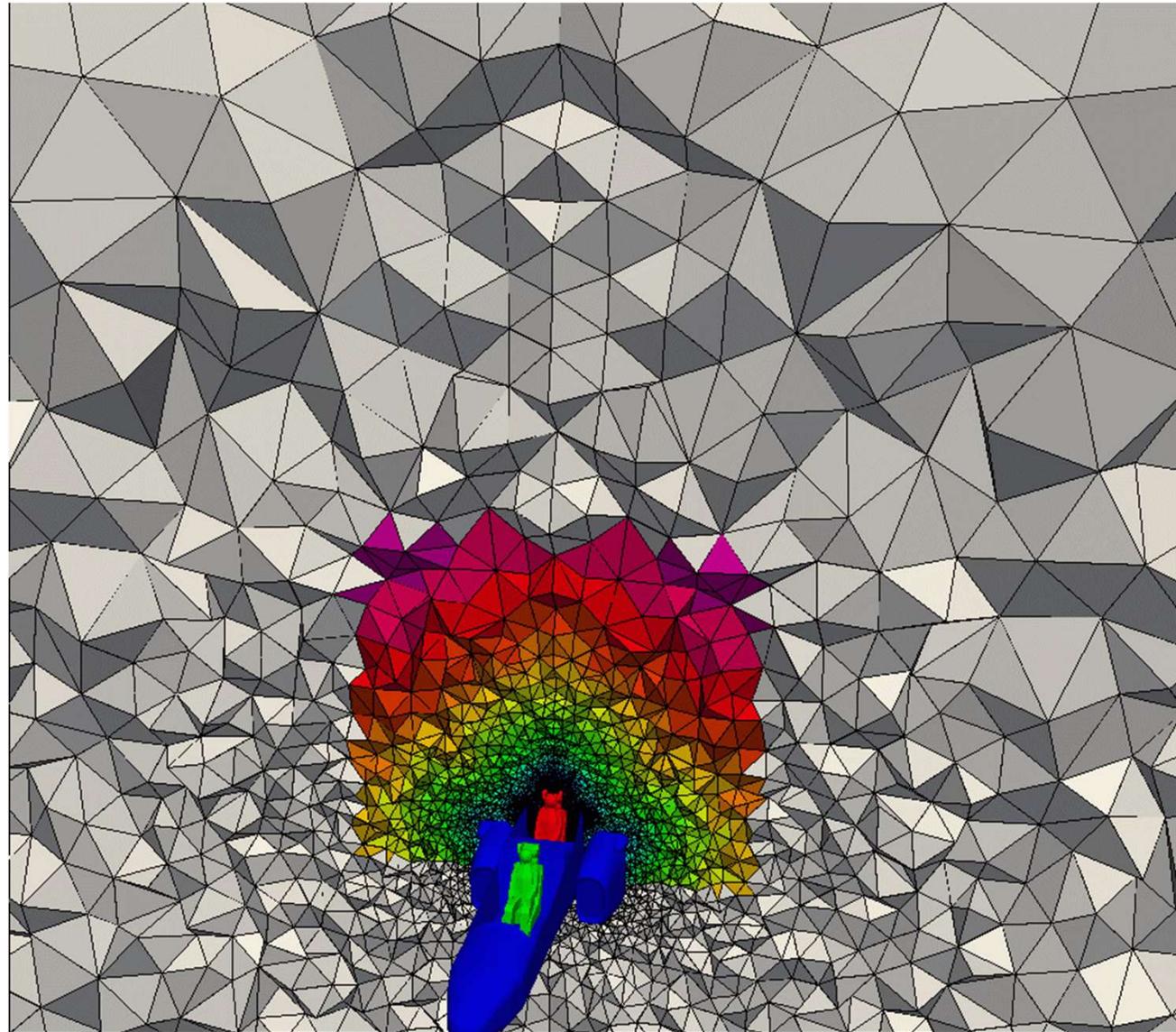
# 計算要素の発生消滅

## 緊急脱出



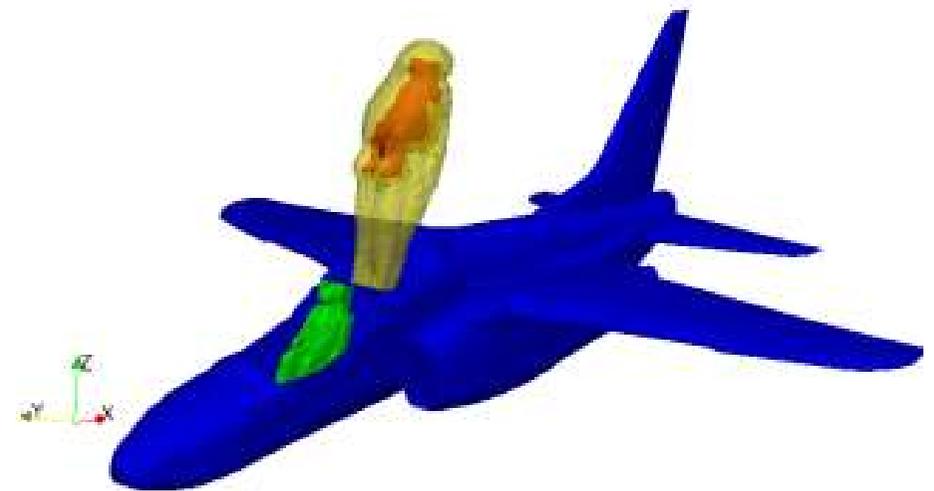
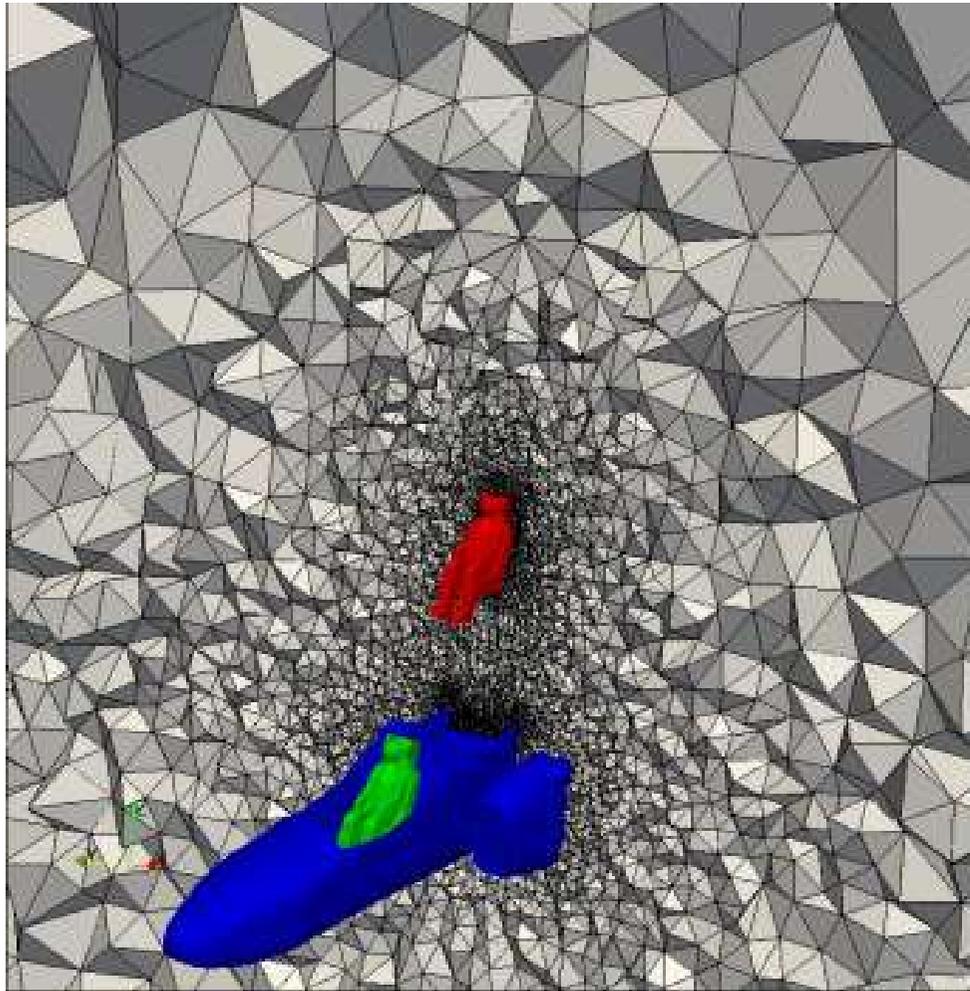
# 計算要素の発生消滅

## 緊急脱出

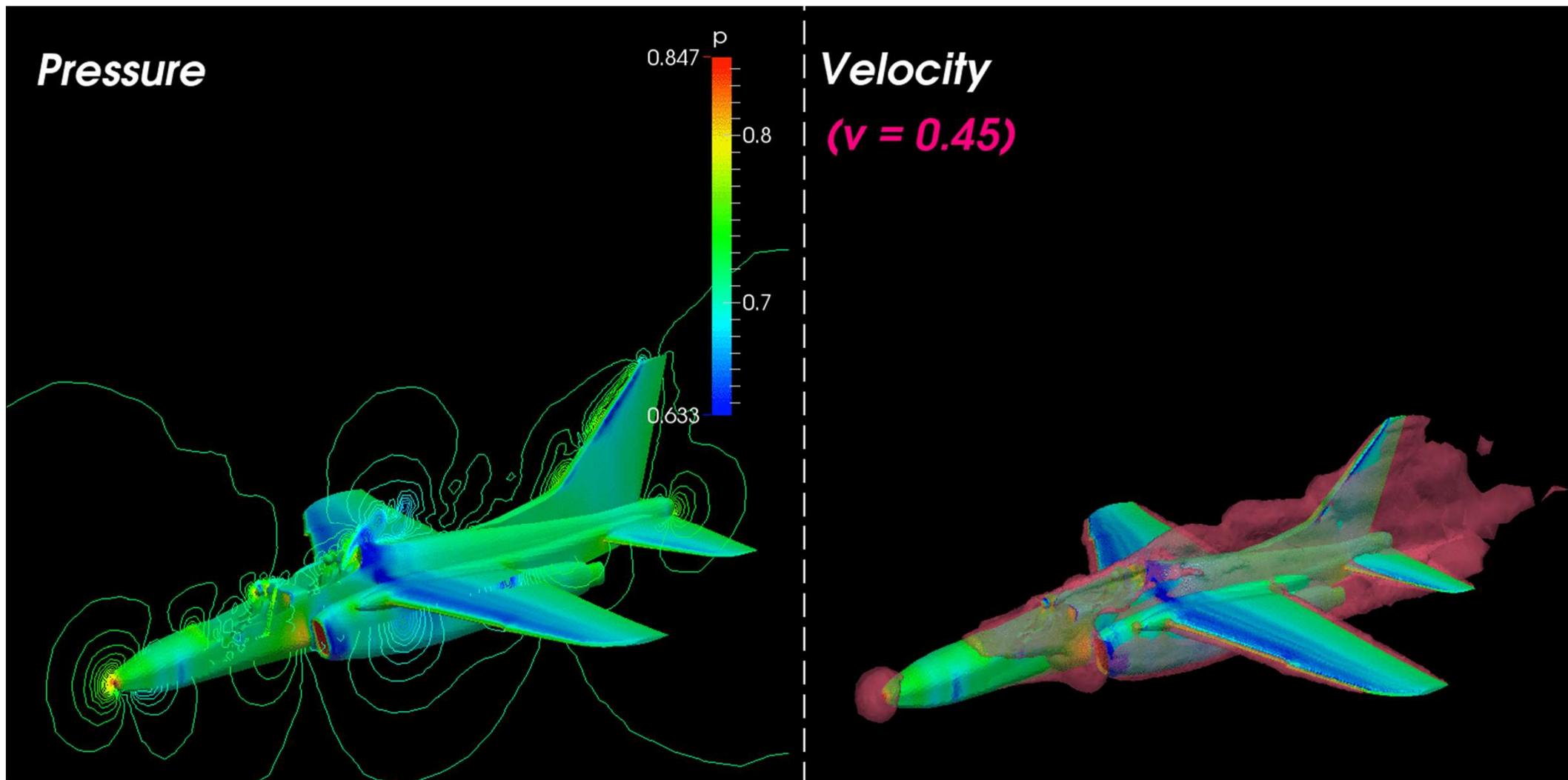


# 計算要素の発生消滅

## 緊急脱出



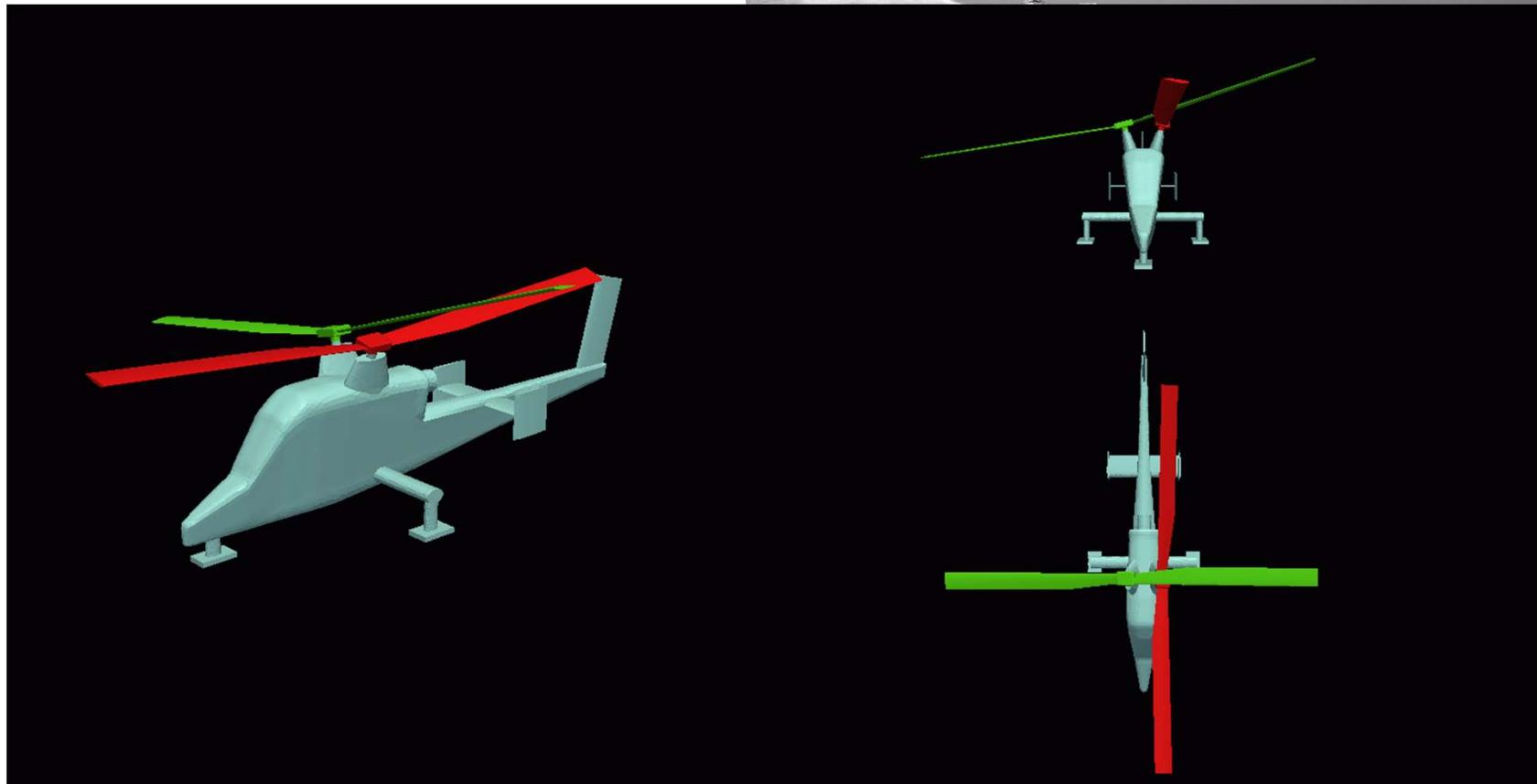
# 緊急脱出



# 交差反転式ローター

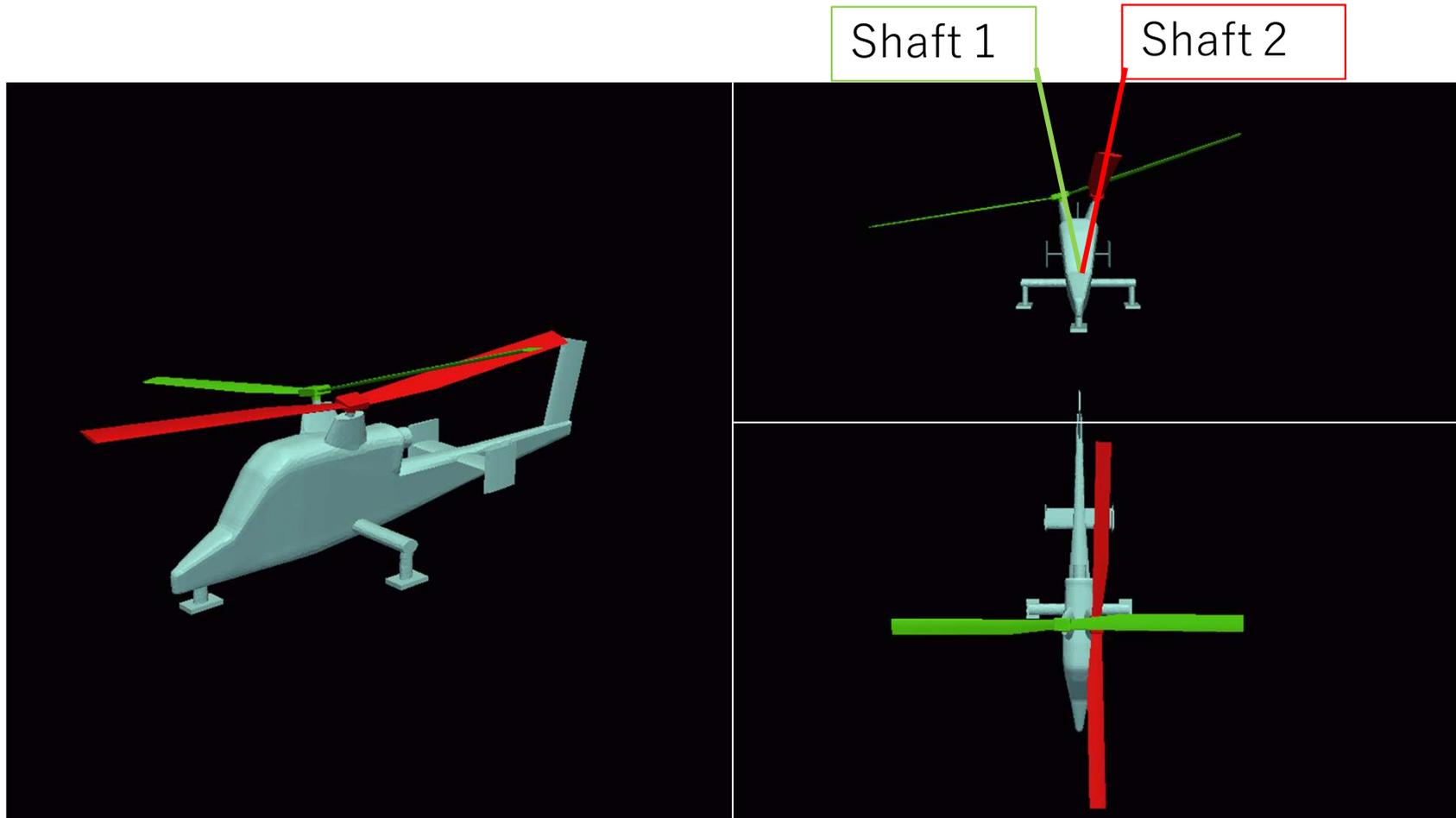
Intermeshing rotors

計算要素の発生消滅



# 交差反転式ローター

## 計算要素の発生消滅



Model : Kaman K-max

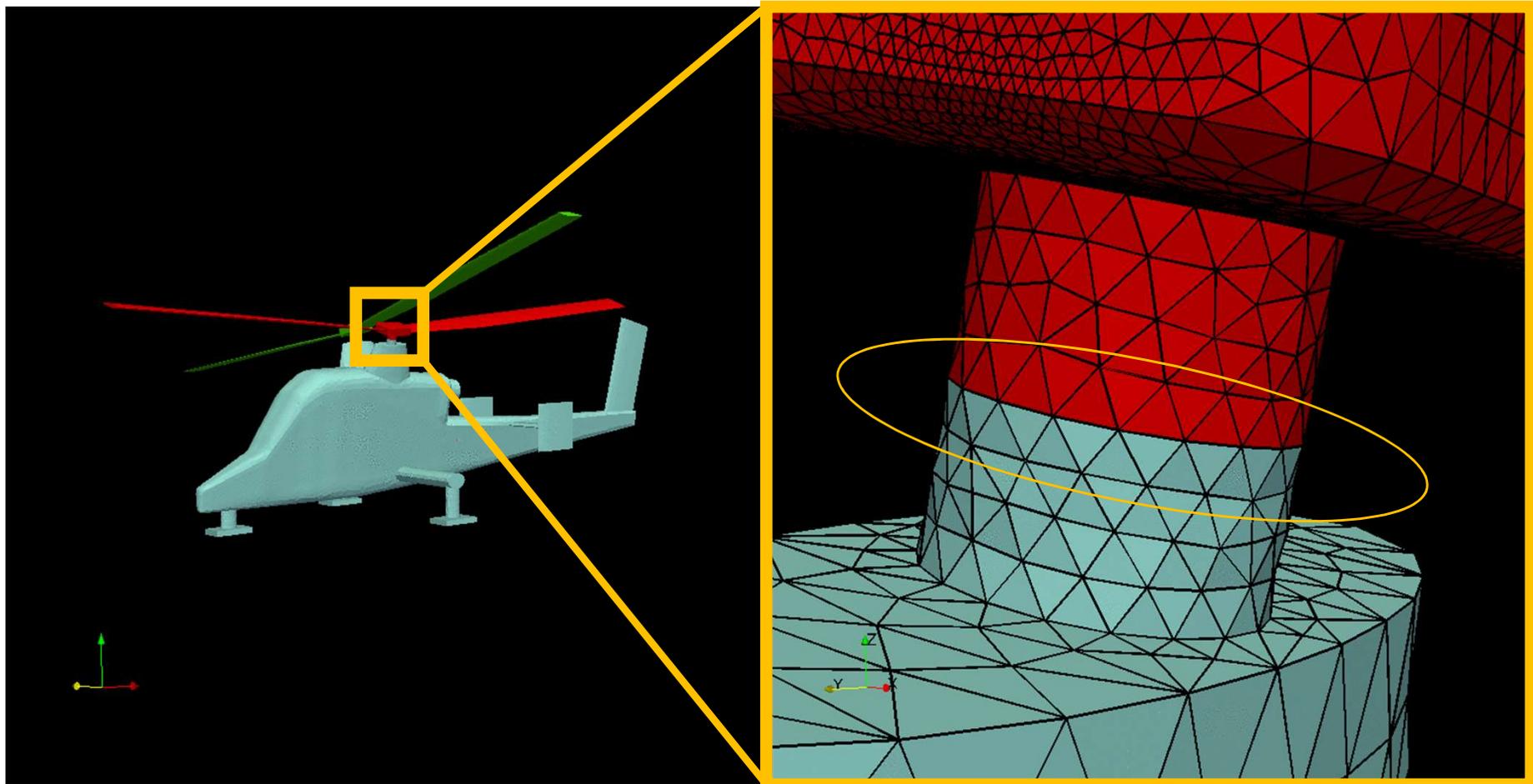
Airfoil : Naca23012

Shaft angle : 25°

Rotational speed : 270 rpm (Mach=0.61 on wing tip)

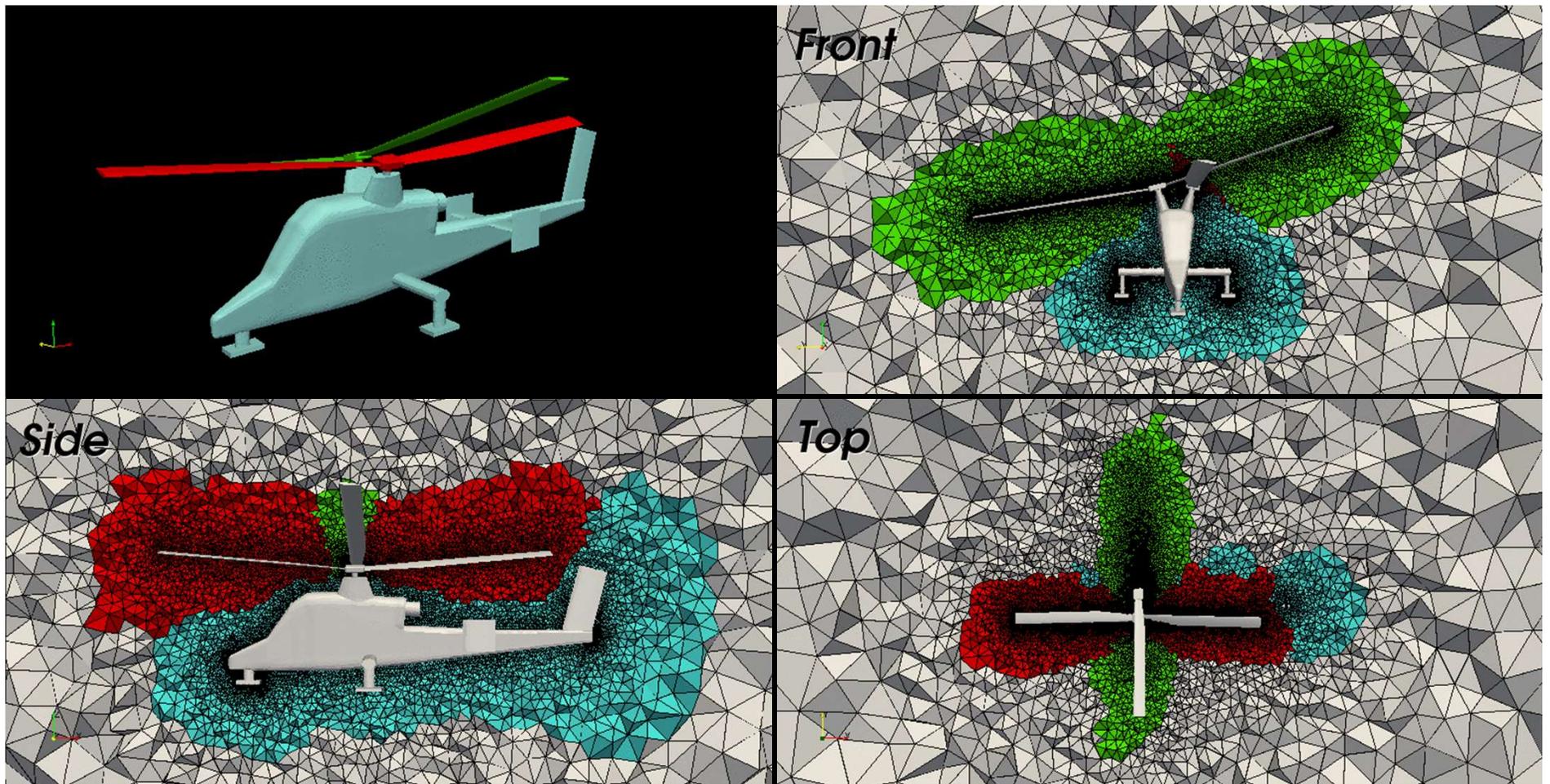
# 交差反転式ローター

計算要素の発生消滅



# 交差反転式ローター

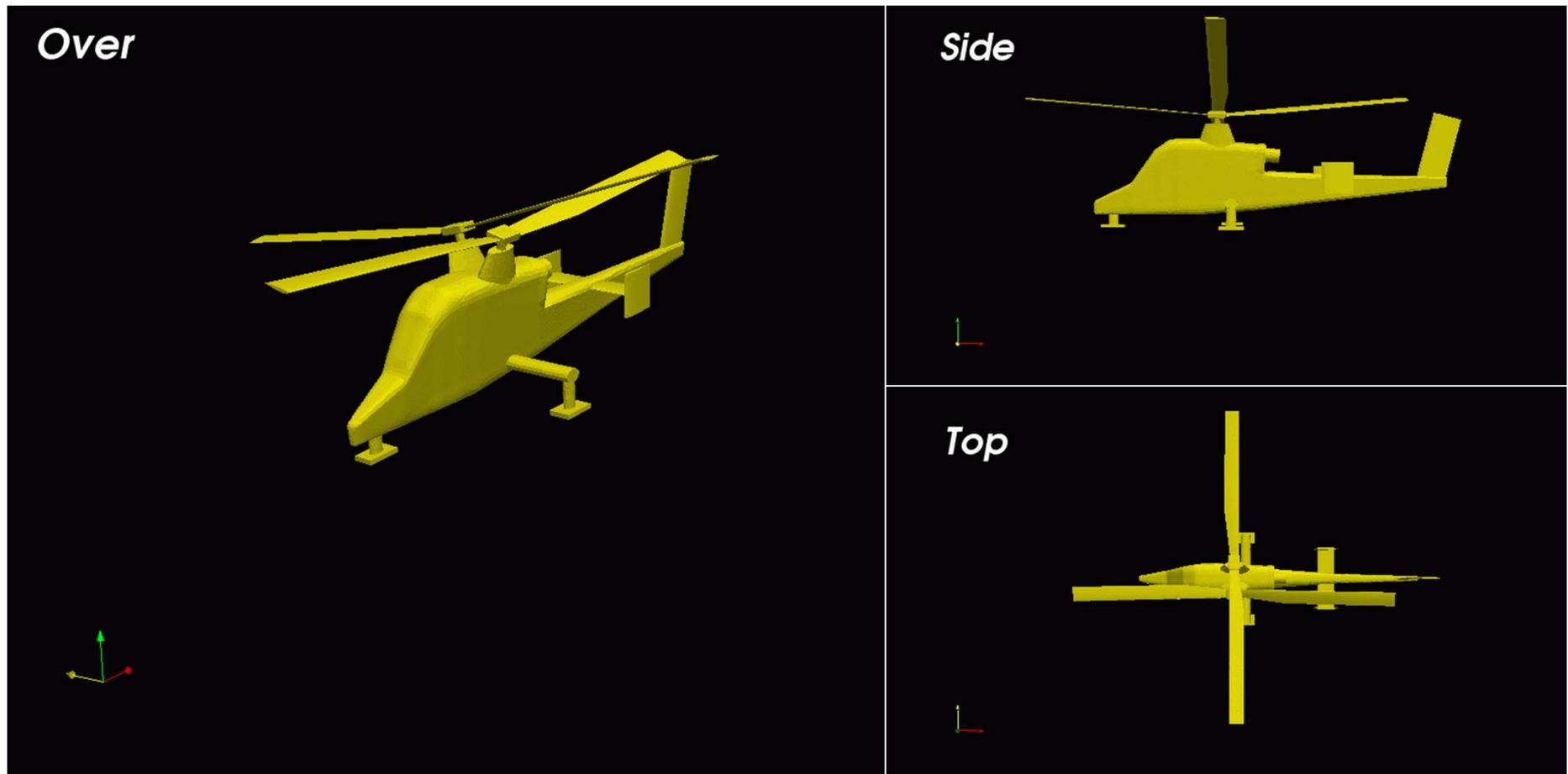
## 計算要素の発生消滅



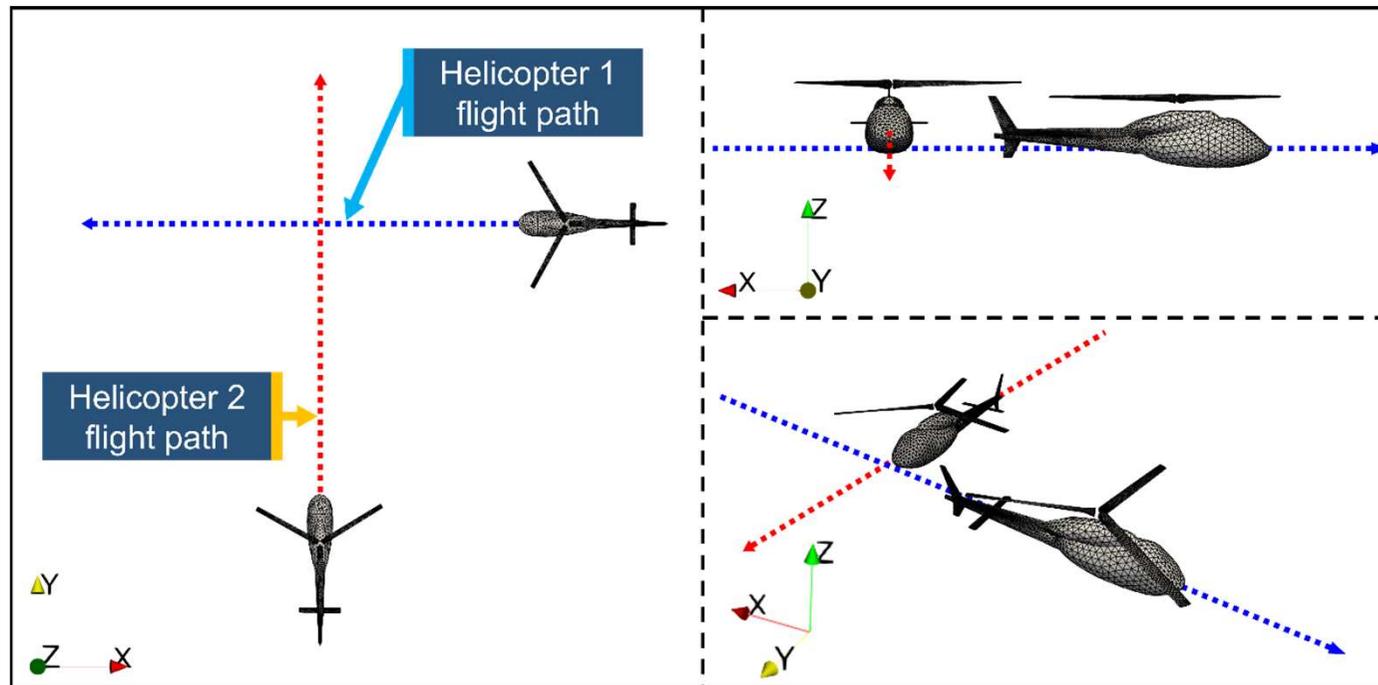
# 交差反転式ローター

## 計算要素の発生消滅

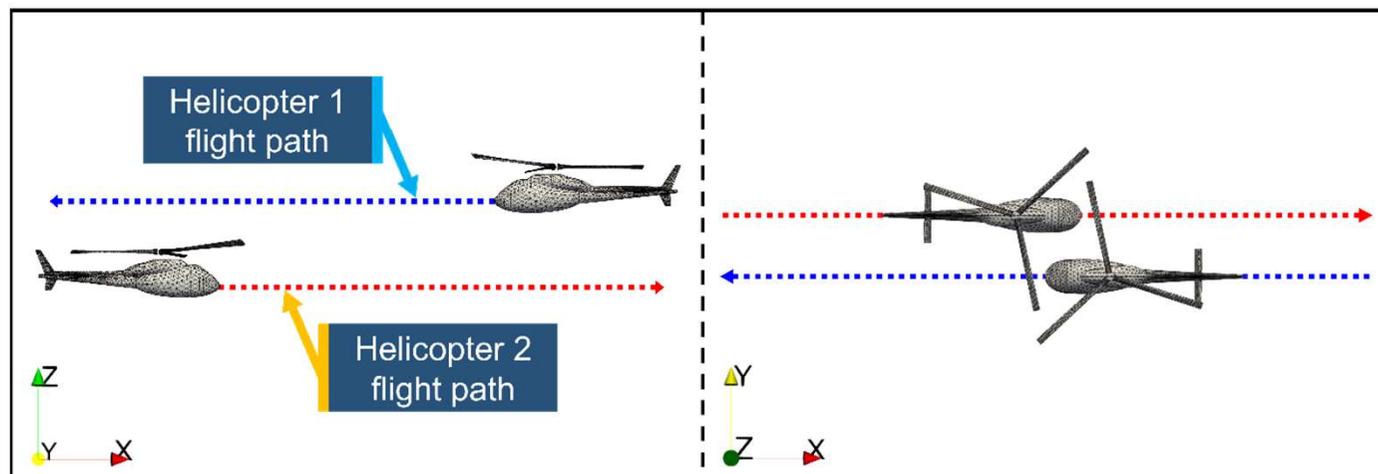
- Results ( Velocity isosurface)



# すれ違うヘリコプター周りの計算



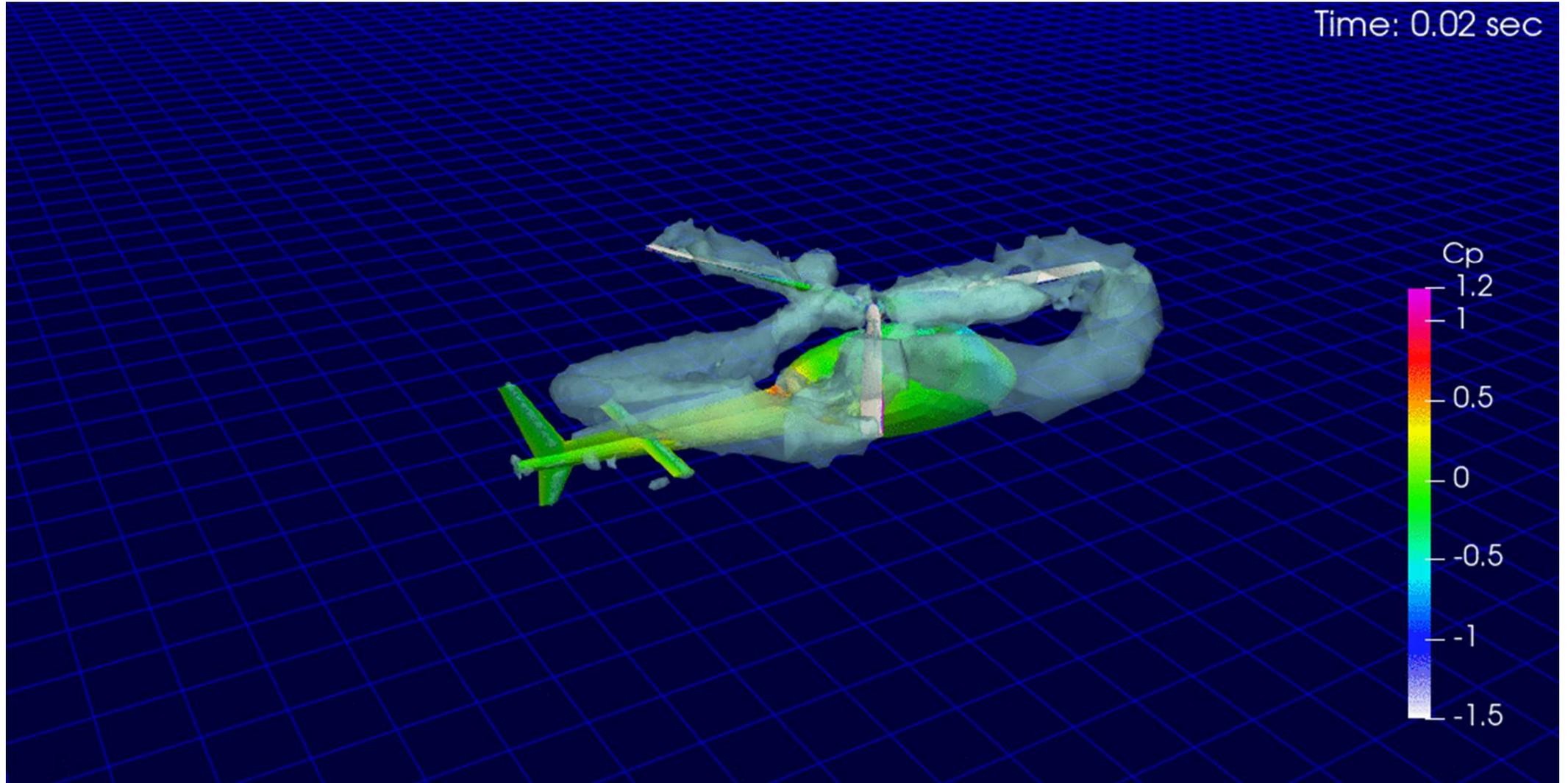
(a) Case 1



(b) Case 2

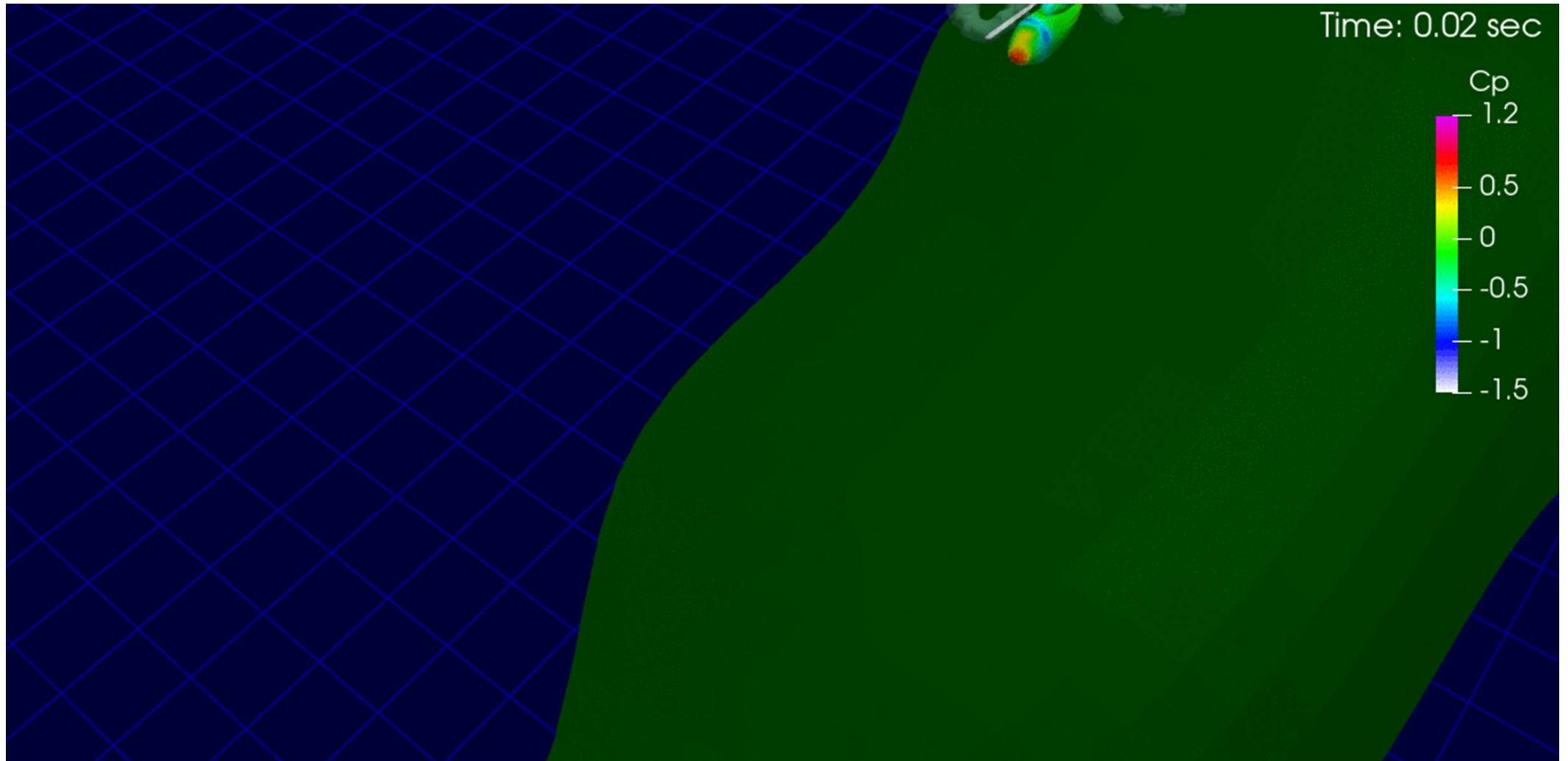
# すれ違うヘリコプター周りの計算

## Case 1



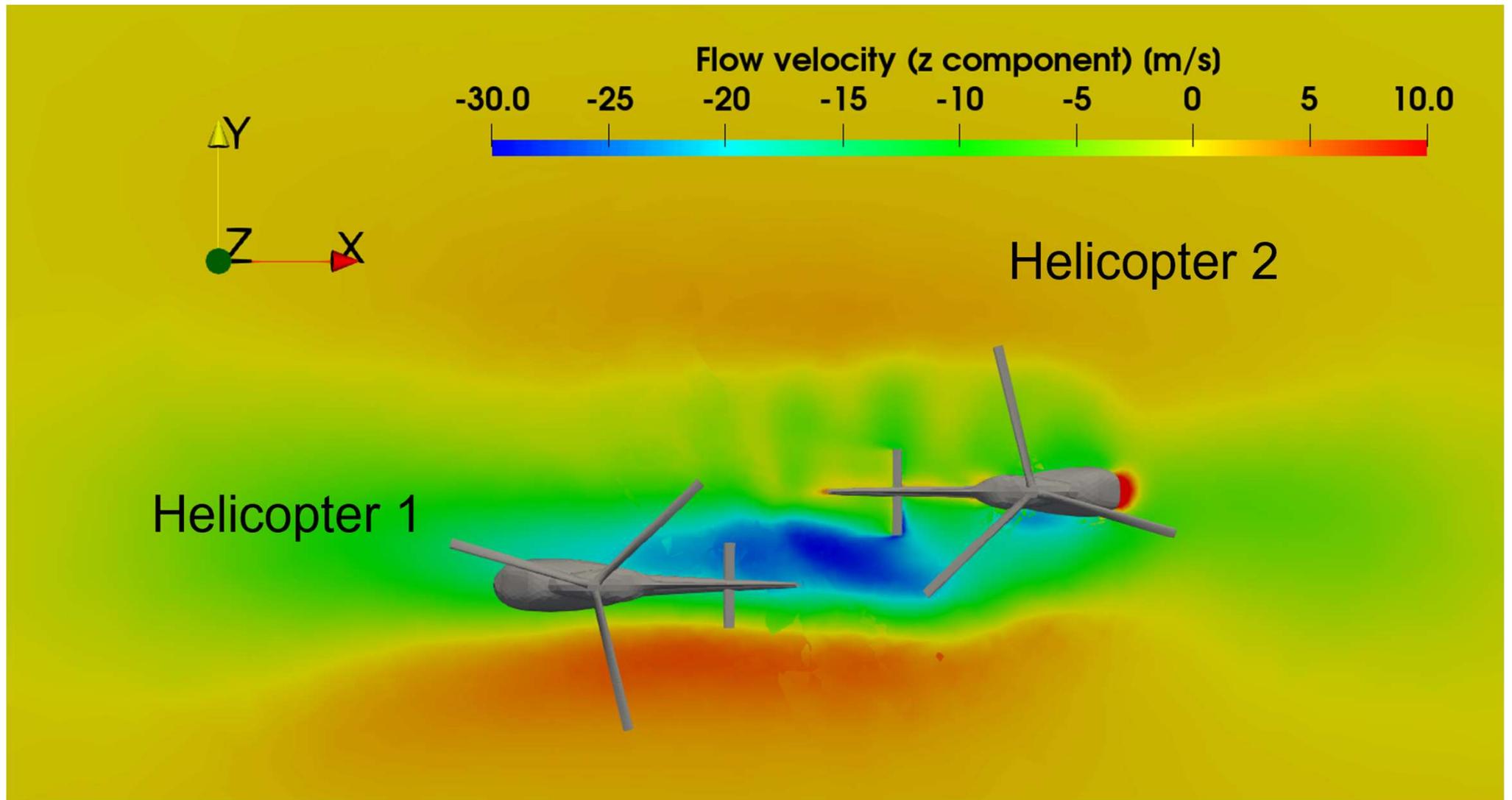
# すれ違うヘリコプター周りの計算

## Case 1



# すれ違うヘリコプター周りの計算

Case 2



# すれ違うヘリコプター周りの計算

## Case 2

