

# 無人航空機を用いたユーザ位置検出システムにおける周波数オフセット補償技術適用時の特性評価

---

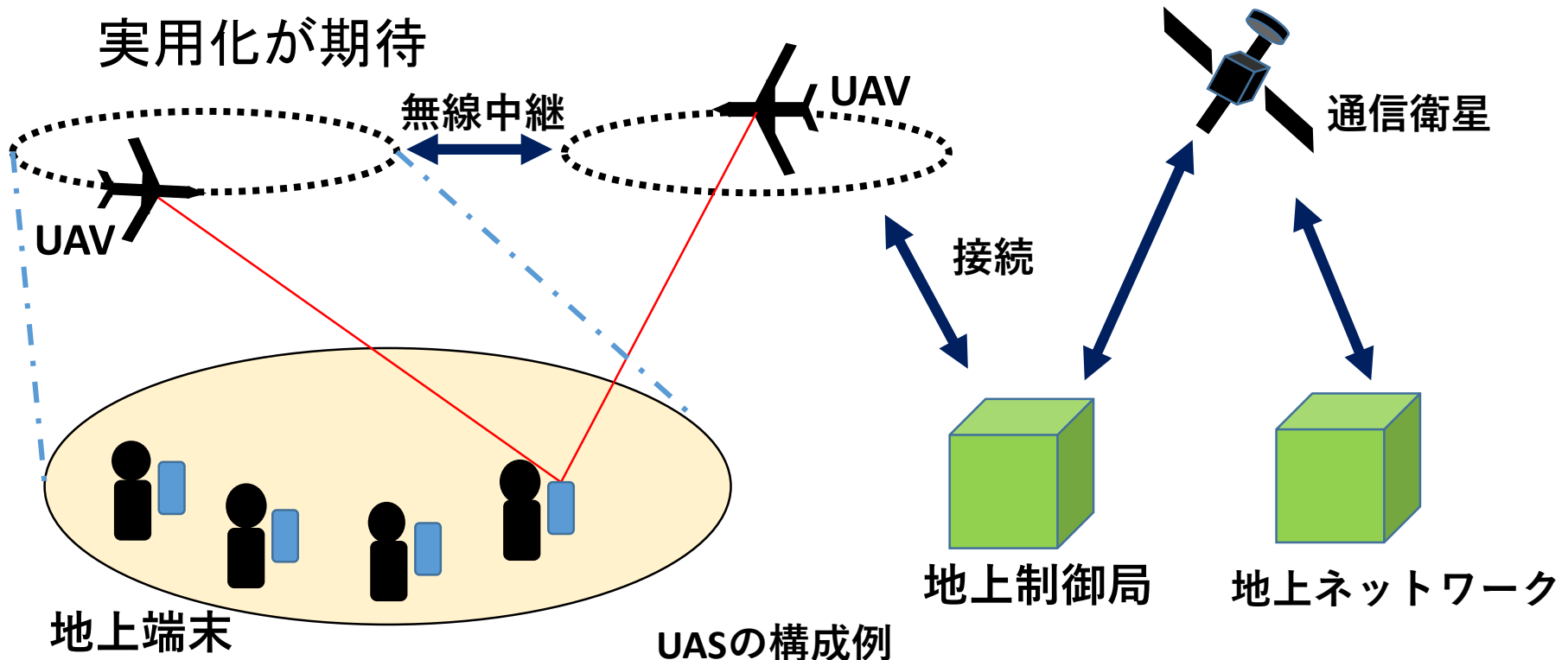
日本大学

○山中英 石川博康

# 研究背景及び目的

# 研究の背景

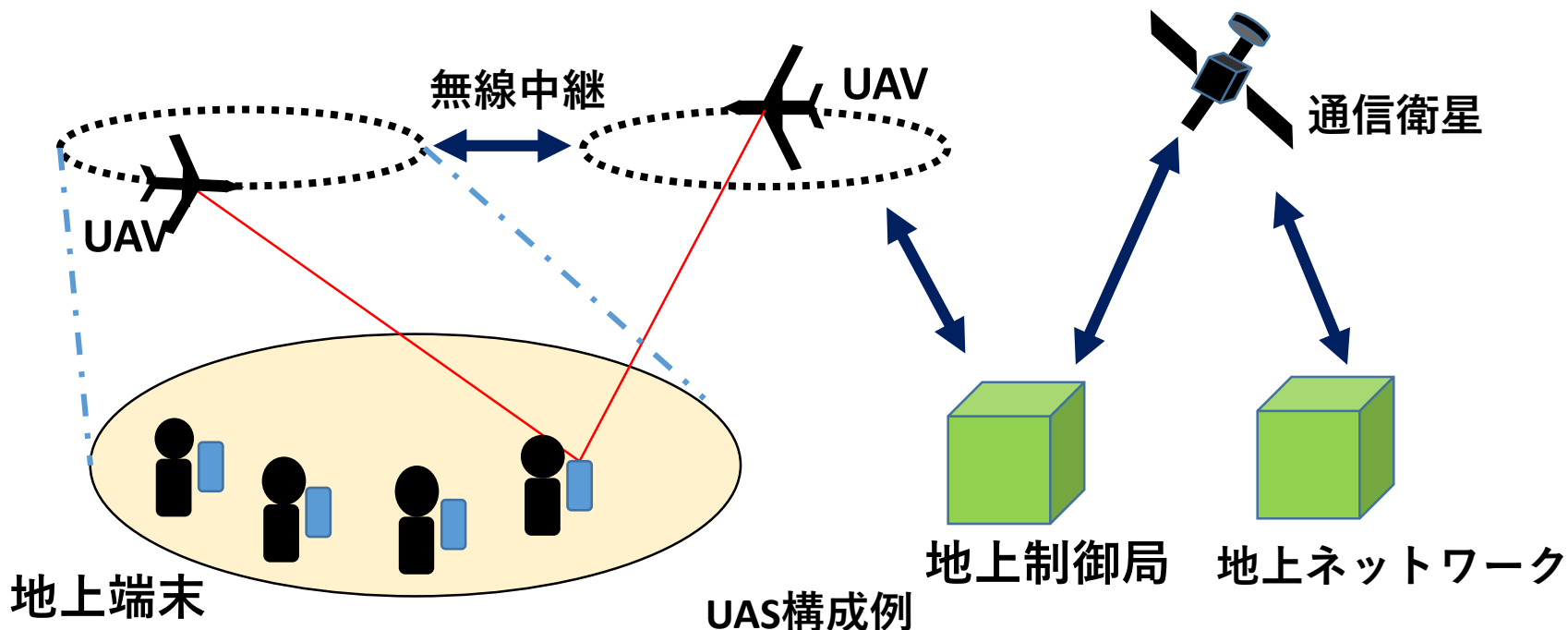
- ・ 大規模災害時に無線通信基地局が機能停止する恐れ  
⇒ 一時的に無線ネットワークを提供する必要
- ・ **無人航空機(UAV)**を用いた**無人航空機システム(UAS)**の  
実用化が期待



UASの構成例

# 研究の背景

- UAVが高度150～1000mの上空を時速40～100kmで旋回飛行を想定するUASモデル
- UAV—ユーザ端末間の周波数にドップラーシフトが発生  
⇒ドップラーシフト量の観測によって位置検出が可能



# 研究の目的

## ●従来研究

- ドップラーシフトを観測値とした**最小二乗法**による位置検出システムの提案及び特性評価
- 最小二乗法によりユーザ位置検出と**周波数オフセット**の推定・補償を同時に行う位置検出システムの提案  
(2021信学総大, B-3-34)

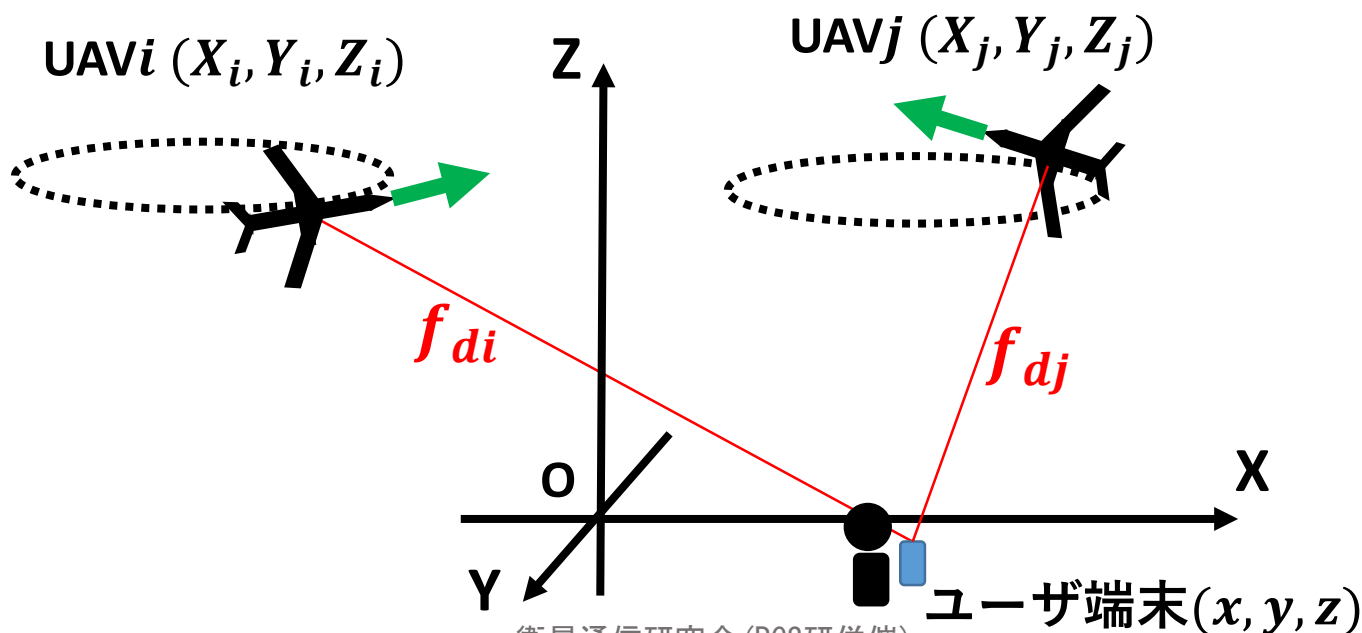
## ●本研究

- 3機のUAVを用いた位置検出システム
- ユーザ位置と**周波数オフセット**を同時に推定する位置検出システム
- 測位精度と周波数オフセット推定値の関係性を評価

# 測位原理

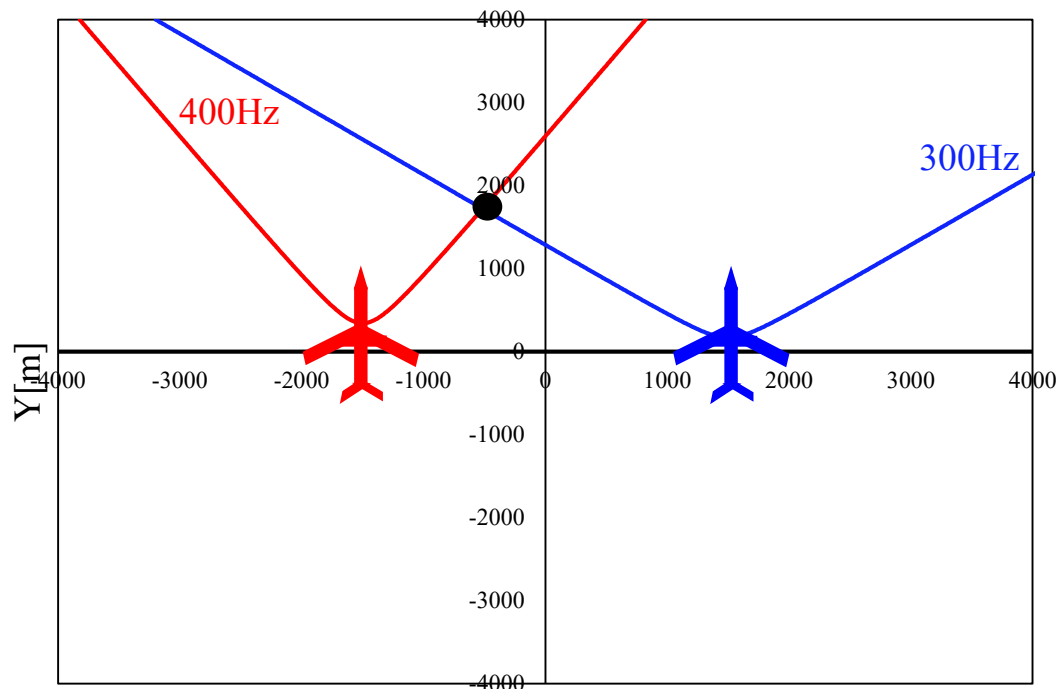
# ユーザ位置検出手法

- 地上のユーザ端末からトーン信号 (CW波) を送信
- 複数のUAVを中継して地上制御局で受信
- UAV-ユーザ端末間に生じるドップラーシフトを観測
- ドップラーシフト量から最小二乗法を用いて位置検出



# ドップラーシフト分布

- UAV—ユーザ端末間に生じるドップラーシフトを観測
- 観測値によって得られるユーザ位置は双曲線上に分布
- 1機のUAVで複数回観測、または複数のUAVで1回観測し、ユーザ位置を双曲線上の交点として検出可能

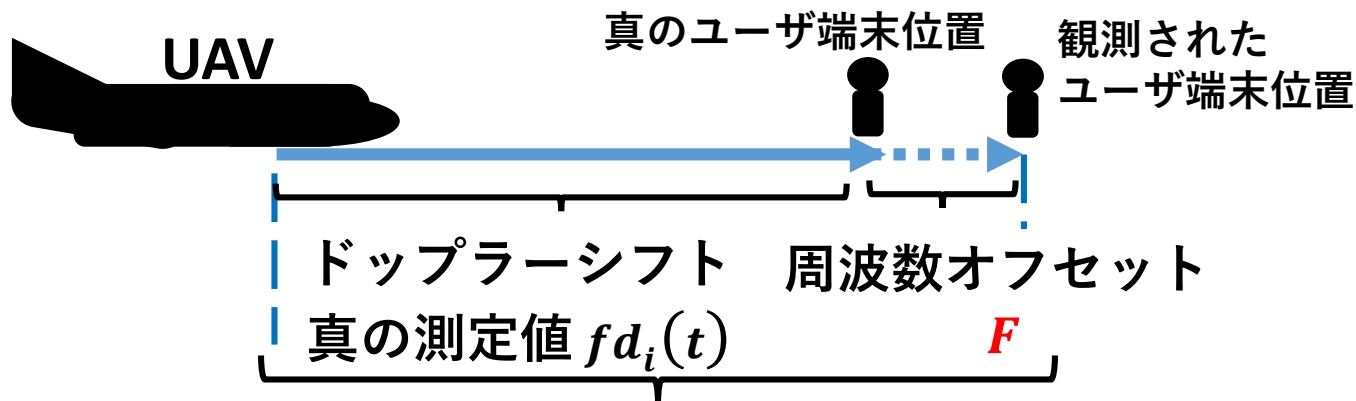


$X$  [m]  
 $Y$  [m] 複数のUAVで1回観測の一例



# 周波数オフセット推定・補償

- 本研究ではUAVとユーザ端末内に内蔵する周波数発振器は**独立の関係**と仮定
- ユーザ端末内の**周波数発振器**の精度の安定性によって誤差が生じる（**周波数オフセット**）
- 周波数オフセットとしてドップラーシフト量に**加算または減算**され**位置検出に影響**
- 最小二乗法**を利用してユーザ位置及び周波数オフセットを推定・補償



ドップラーシフト測定値  $Fd_i(t)$

$$Fd_i(t) = fd_i(t) + F$$

# 最小二乗法を用いた位置検出

- UAV-地上端末間で得られるドップラーシフトの式

$$fd_i(t) = -\frac{V_{xi}(t)(X_i(t) - x) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y) + V_{zi}(t)(Z_i - z)}{\lambda\sqrt{(X_i(t) - x)^2 + (Y_i(t) - y)^2 + (Z_i - z)^2}} + F \quad \dots (1)$$

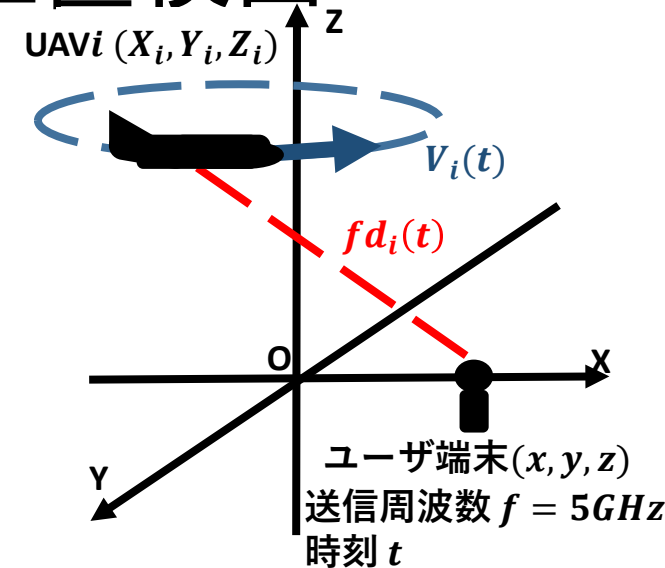
- ユーザ端末z座標を固定した場合の初期値 $(x^0, y^0, F^0)$ を想定した場合のドップラーシフトの式

$$fd_i^0(t) = -\frac{V_{xi}(t)(X_i(t) - x^0) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y^0) + V_{zi}(t)(Z_i - z)}{\lambda\sqrt{(X_i(t) - x^0)^2 + (Y_i(t) - y^0)^2 + (Z_i - z)^2}} + F^0 \quad \dots (2)$$

- 観測されるドップラーシフトの真の値  $fd_{mi}(t)$  に対して  $fd_i(t)$  との差である測定残差成分  $\Delta fd_i^0(t)$  との関係 
$$\Delta fd_i(t) = fd_{mi}(t) - \Delta fd_i^0(t) \quad \dots (3)$$

- 初期値からの変化量 $(\Delta x, \Delta y, \Delta F)$ とし、以下の方程式を得る

$$\Delta fd_i(t) = \frac{\partial fd_i(t)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial fd_i(t)}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial fd_i(t)}{\partial F} \Delta F \quad \dots (4)$$



$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial fd_1(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_2(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_3(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_3(t)}{\partial y} & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

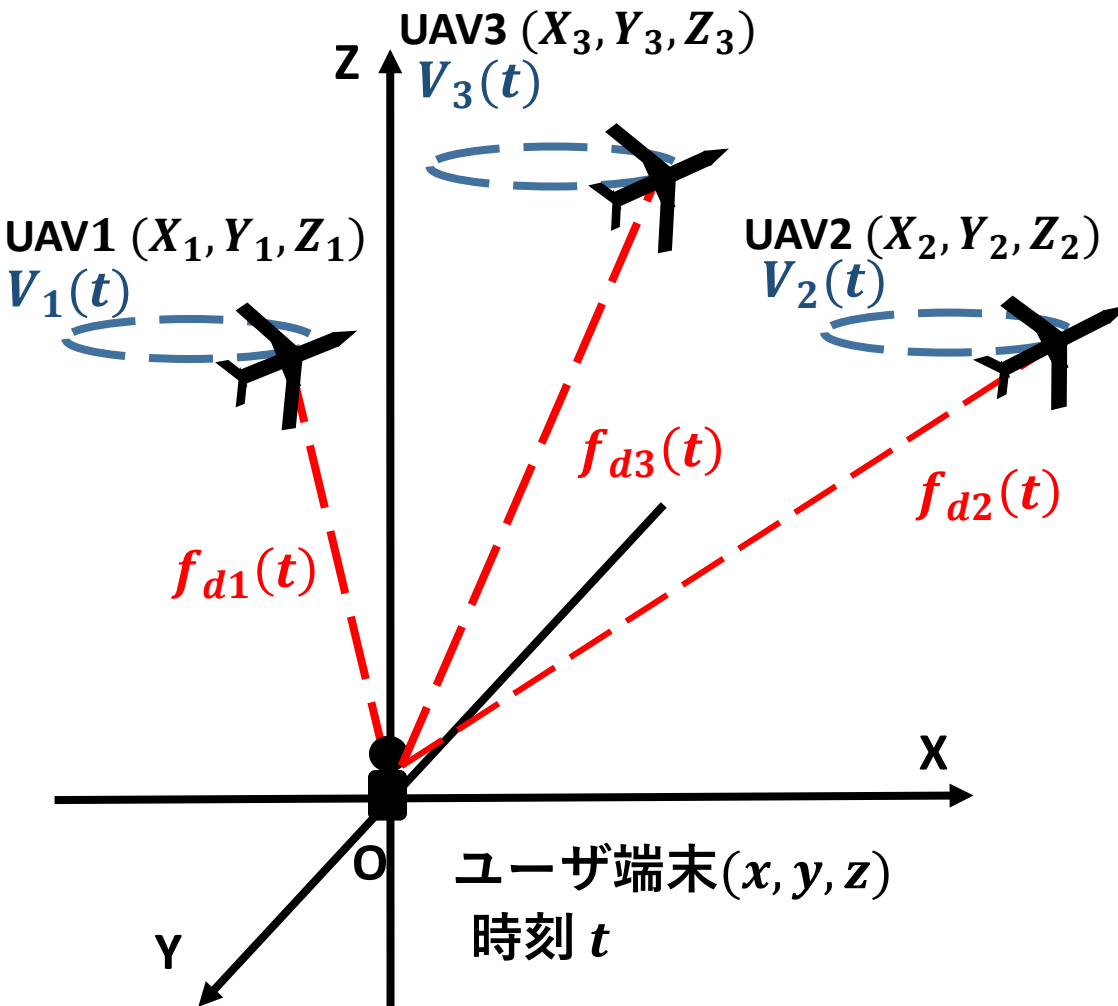
$$U = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta F]^T \quad \dots (6)$$

$$[\Delta fd_1(t) \quad \Delta fd_2(t) \quad \Delta fd_3(t)]^T = R^T \quad \dots (7)$$

$$U = (G^T G)^{-1} G^T R^T \quad \dots (8)$$

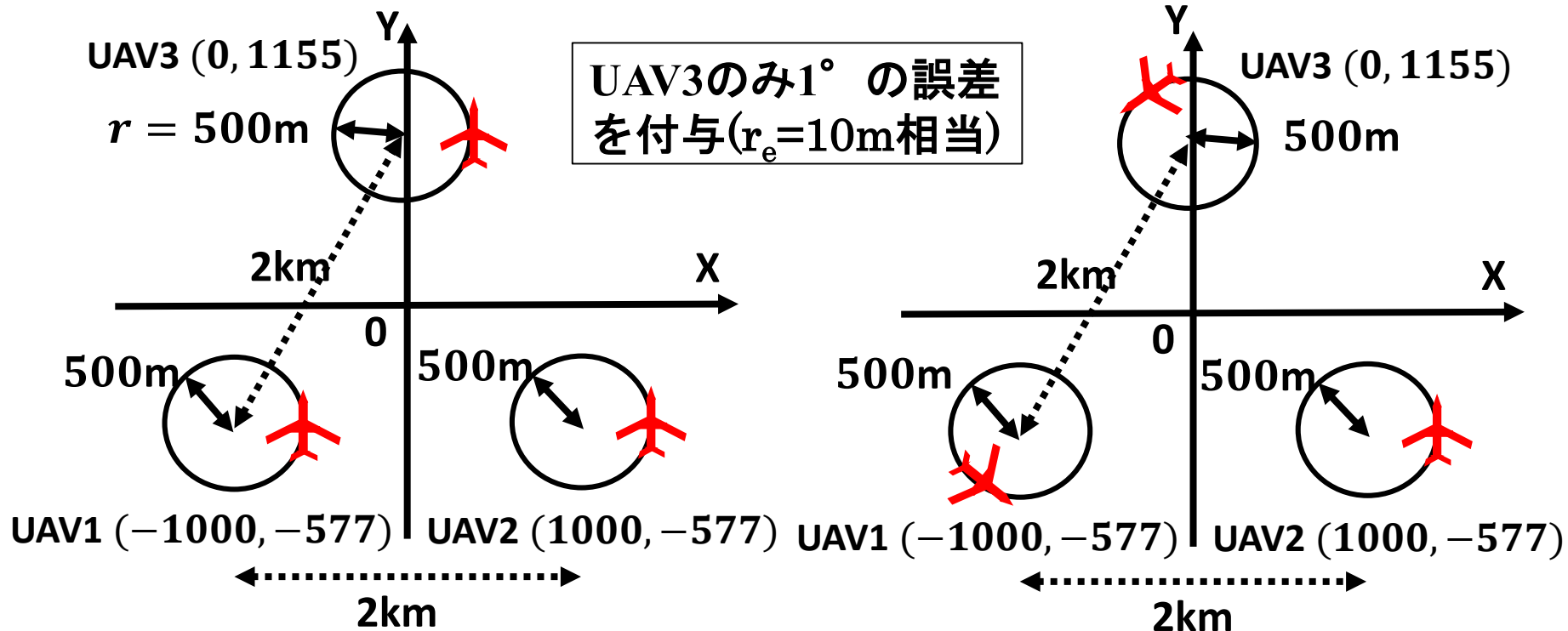
# シミュレーションモデル

# シミュレーションモデル



シミュレーション条件	
パラメータ	設定値
搬送波周波数	5GHz
飛行速度	100km/h
UAV高度	200m
ユーザ高度	0m
測位対象エリア	8km四方
周波数オフセット	1kHz

# シミュレーションモデル



- ・ **モデル1**及び**モデル3**
- ・ 各UAVの初期位相  $\theta=0^\circ$

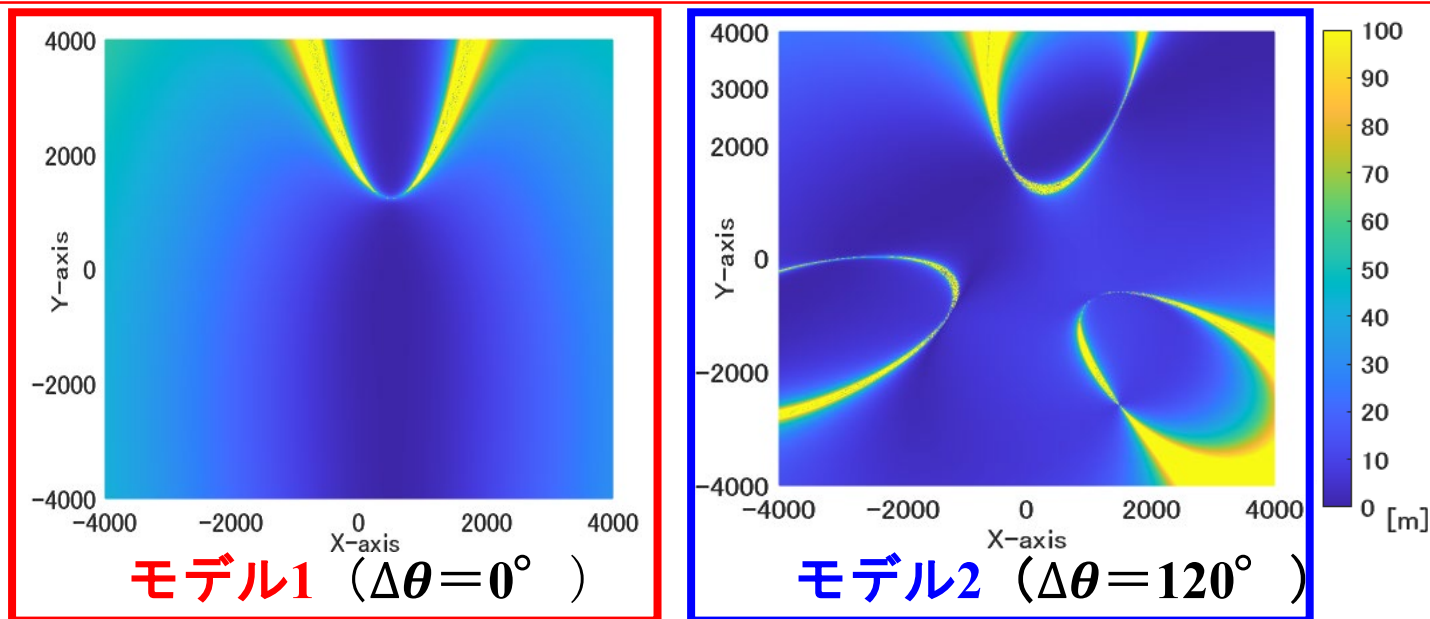
- ・ **モデル2**及び**モデル4**
- ・ UAV1: $\theta=240^\circ$  UAV2: $\theta=0^\circ$  UAV3: $\theta=120^\circ$

- ・ **モデル1**、**モデル2** : ユーザ位置  $(x,y)$  の2つのパラメータを推定
- ・ **モデル3**、**モデル4** :  $(x,y)$  と  $F$  の3変数を推定
- ・ 各モデルを時刻  $t=0\sim 110\text{s}$ まで10秒毎にシミュレーションを実施

# シミュレーション結果

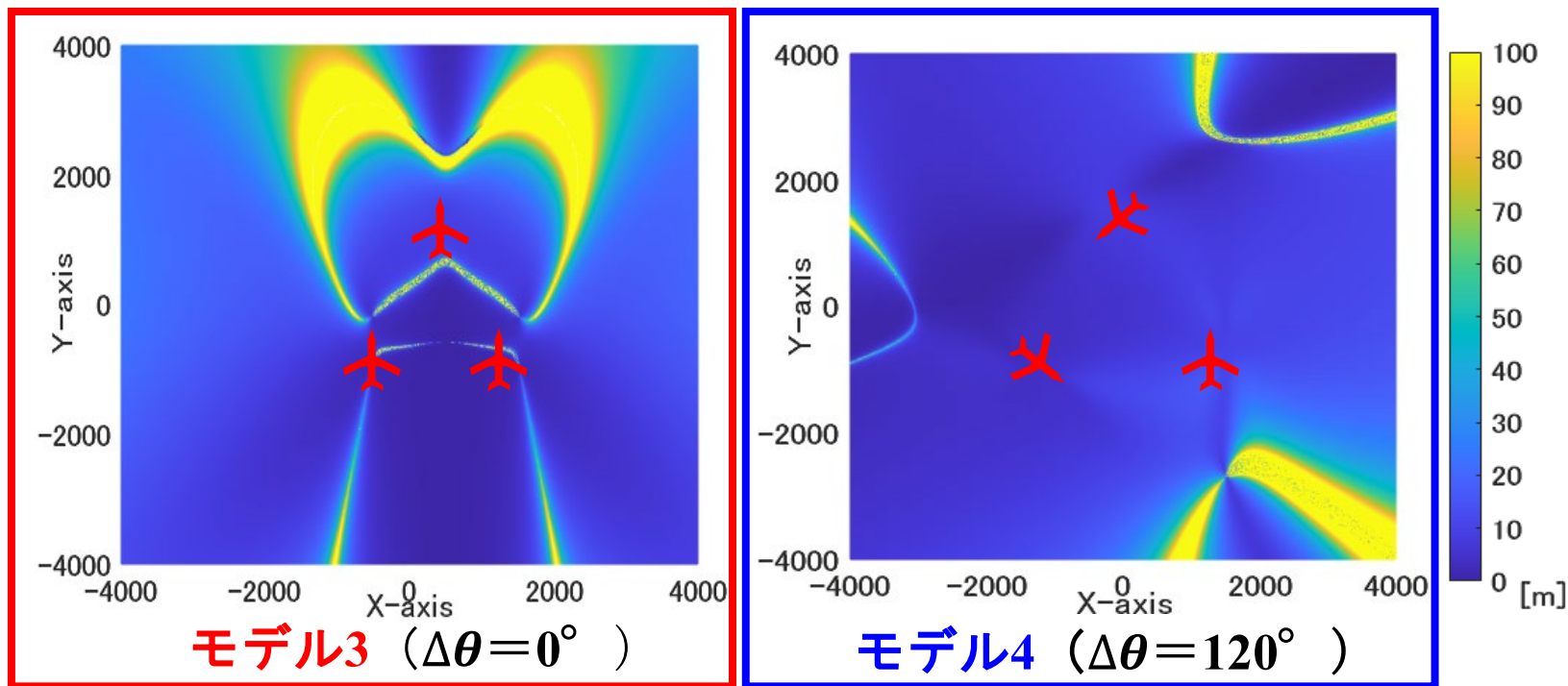
# 位置検出誤差面的分布図① ( $t = 0\text{s}$ )

青色に近いエリア ⇒ 位置検出誤差が**0m**に近く精度が**良好**  
 黄色に近いエリア ⇒ 位置検出誤差が**100m**( $\geq 100\text{m}$ )に近く精度が**劣化**



- **モデル1** : 全体的に精度が50m前後劣化  
**100m**を超えるエリアが少ない
- **モデル2** : **黄色**のエリアが**モデル1**より多く分布  
**青色**(20m以下)のエリアも多く分布

## 位置検出誤差面的分布図② ( $t = 0\text{s}$ )



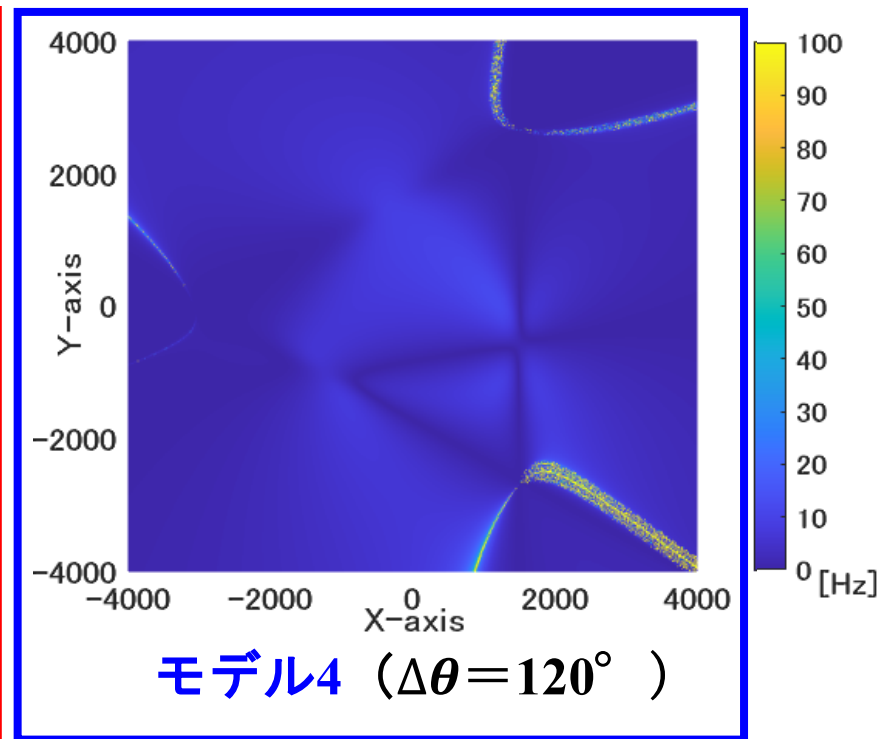
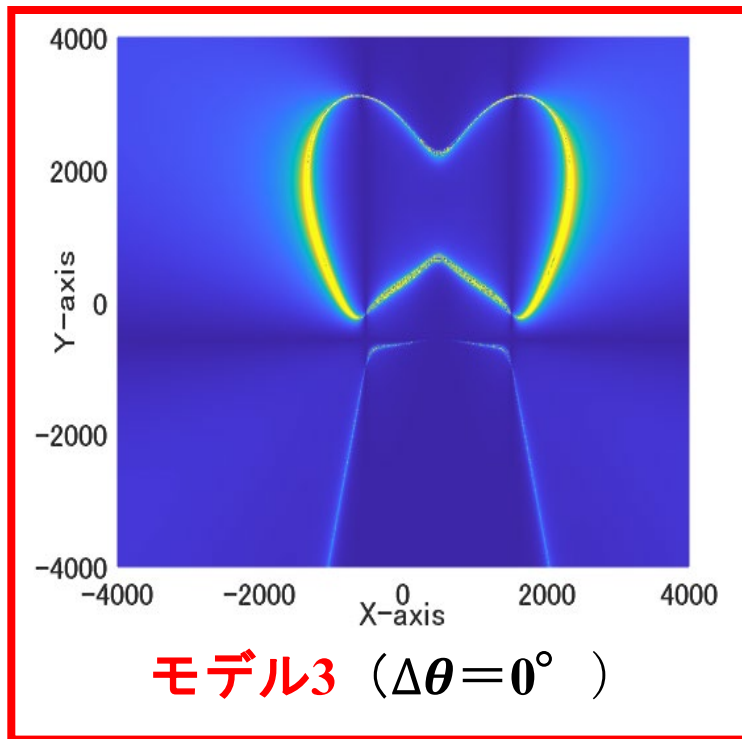
- モデル4の方が青色のエリアが多い
- 初期位相差 $\Delta\theta = 120^\circ$  を与えたモデル4の方が位置検出の精度が**良好**

⇒ドップラーシフトによる双曲線の交点が得られやすい



# 周波数オフセット推定誤差面的分布図

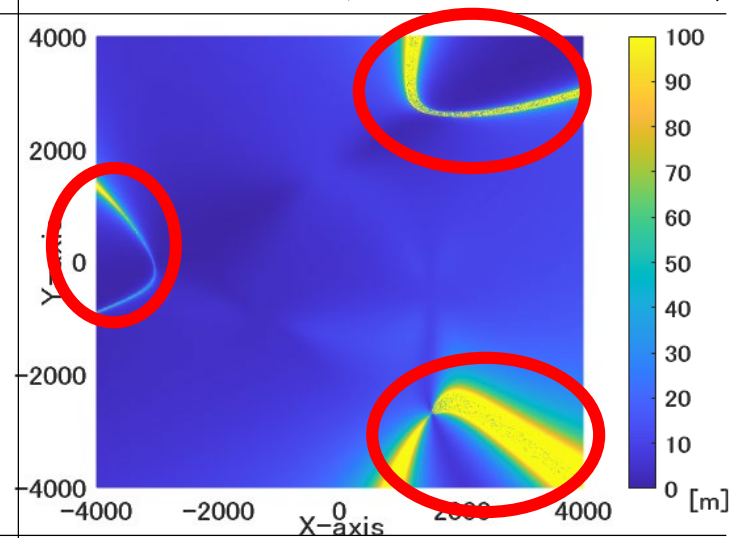
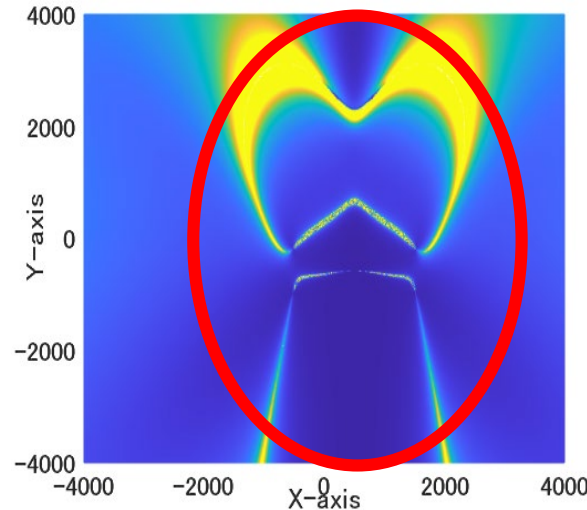
- 青色に近いエリア⇒周波数オフセット推定誤差が**0Hz**に近く精度が**良好**
- 黄色に近いエリア⇒推定誤差が**100Hz**に近く精度が**劣化**



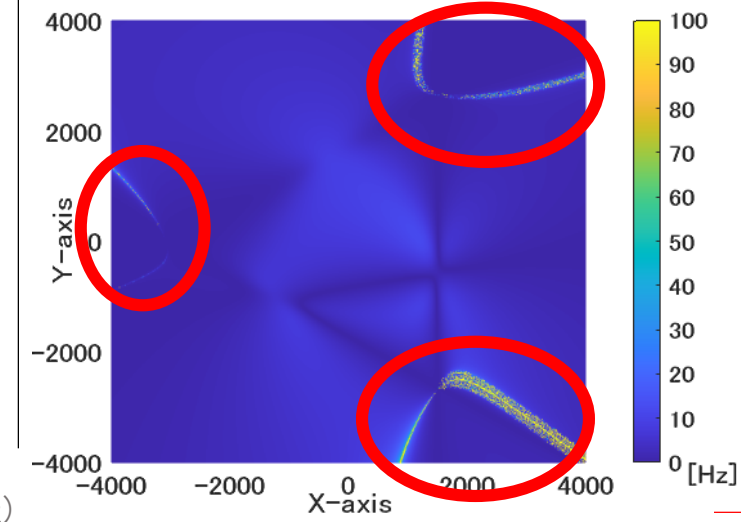
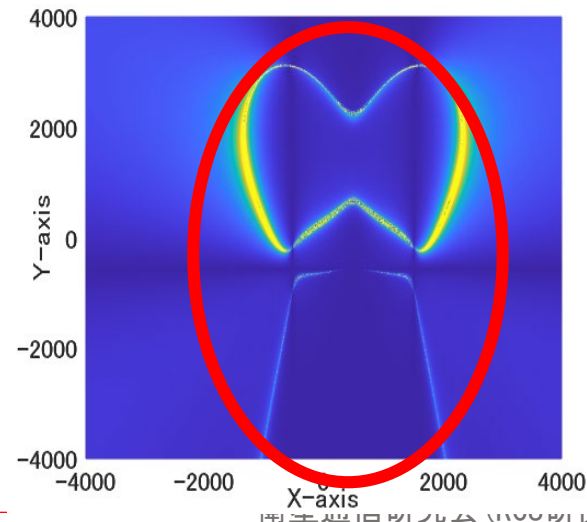
# 周波数オフセット補償時の面的分布② ( $t = 0\text{s}$ )

**モデル3** ( $\Delta\theta = 0^\circ$ )   **モデル4** ( $\Delta\theta = 120^\circ$ )

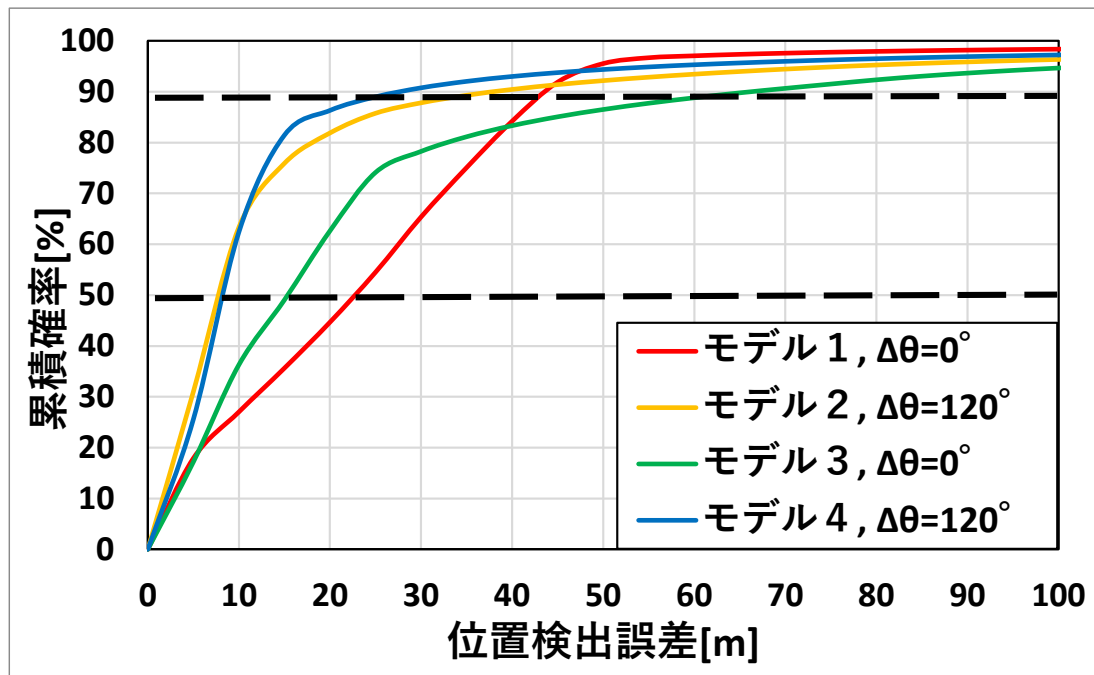
位置検出誤差  
面的分布



周波数オフセット  
面的分布

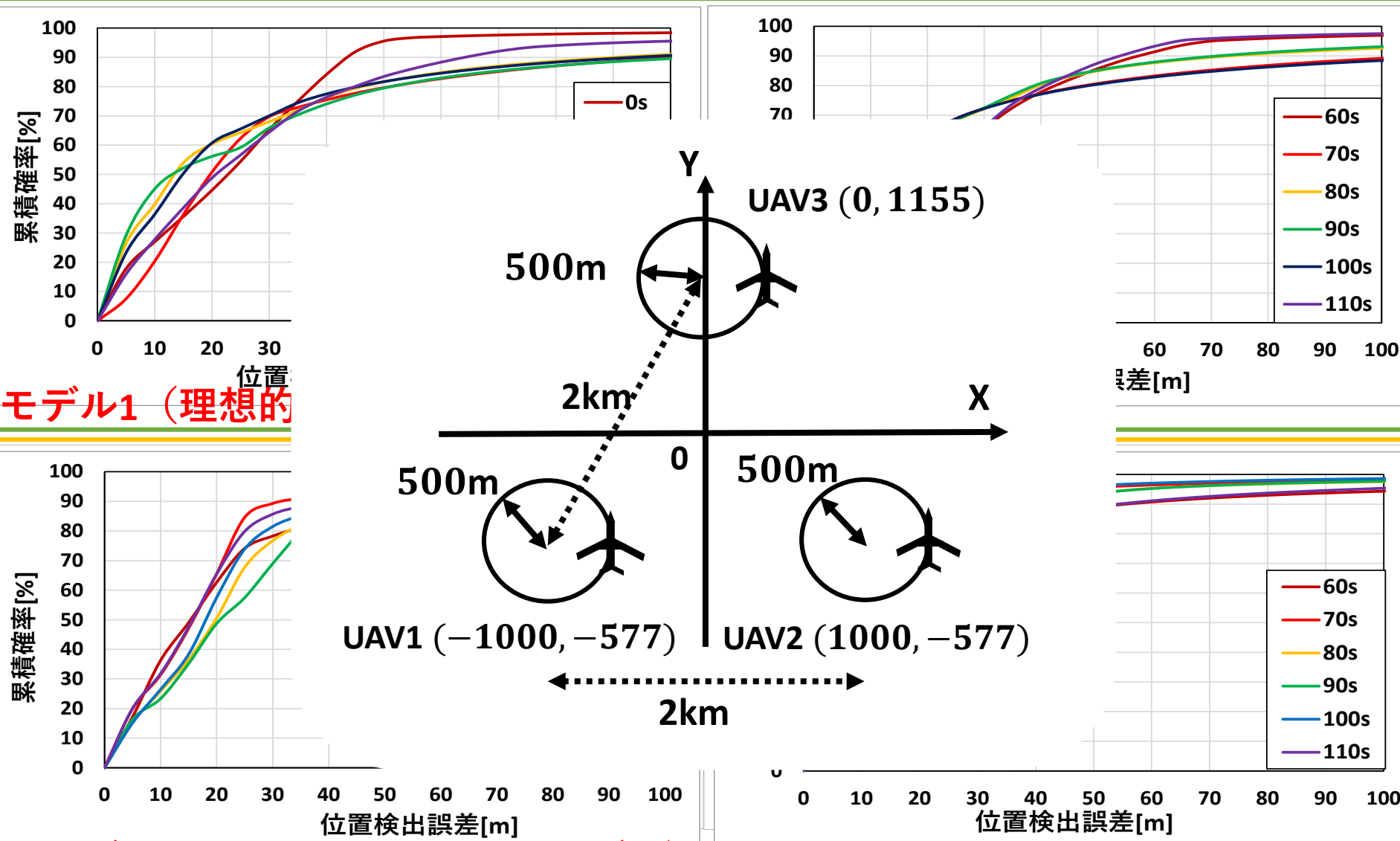


# 位置検出誤差の累積分布特性 ( $t = 0\text{s}$ )



- 累積確率50%値
  - モデル3の方がモデル1よりも精度が良好
  - モデル2とモデル4はほぼ同等な精度
- 累積確率90%値
  - モデル1の方がモデル3よりも精度が良好
  - モデル4の方がモデル2よりも精度が良好

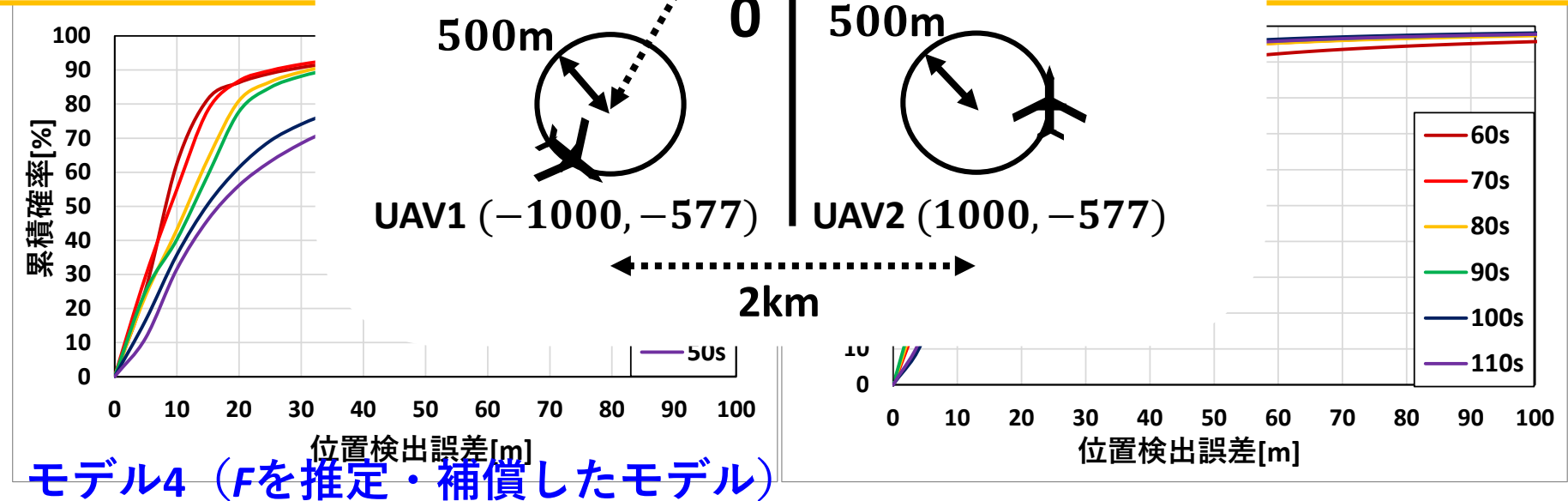
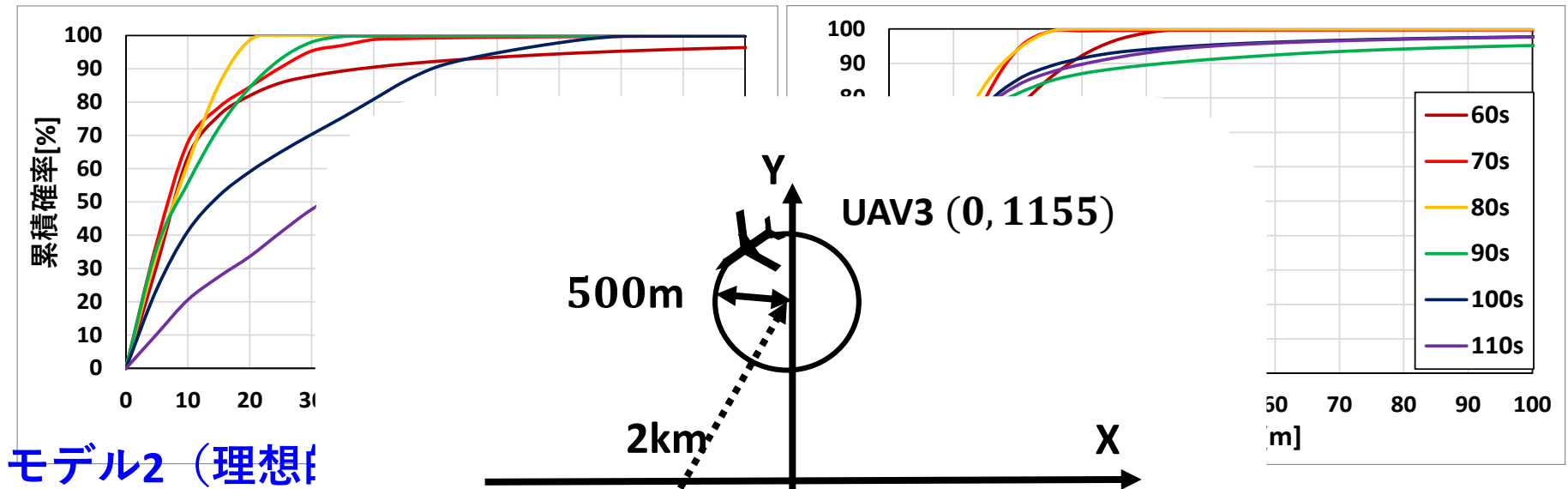
# 結果：位置検出誤差累積分布特性



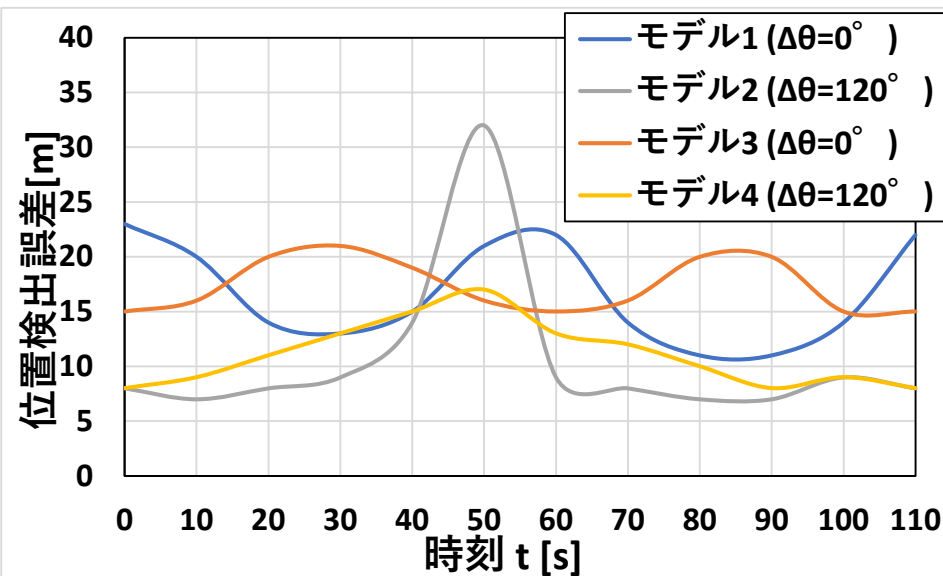
モデル1 (理想的)

モデル3 (Fを推定・補償したモデル)

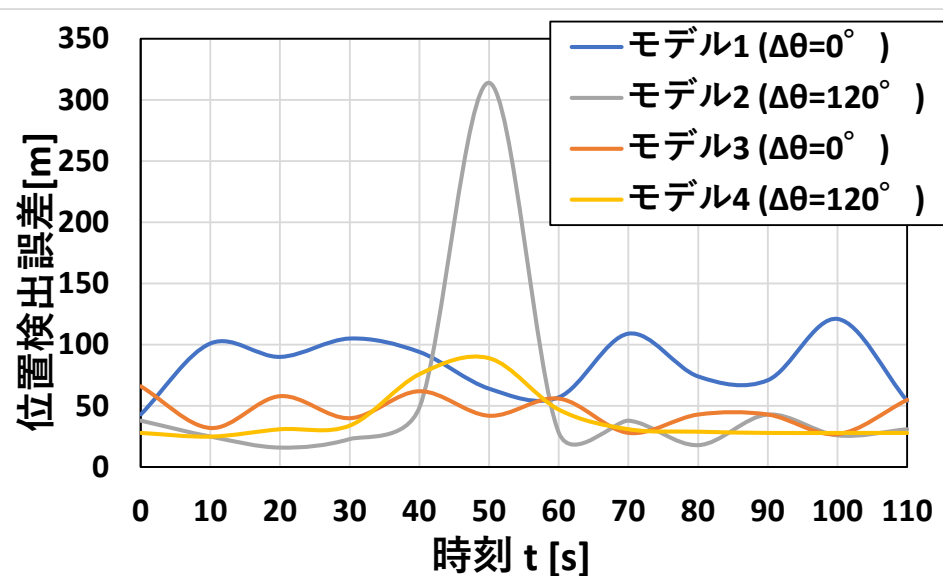
# 位置検出誤差累積分布特性②



# 結果：位置検出誤差の時間特性（50%値,90%値）



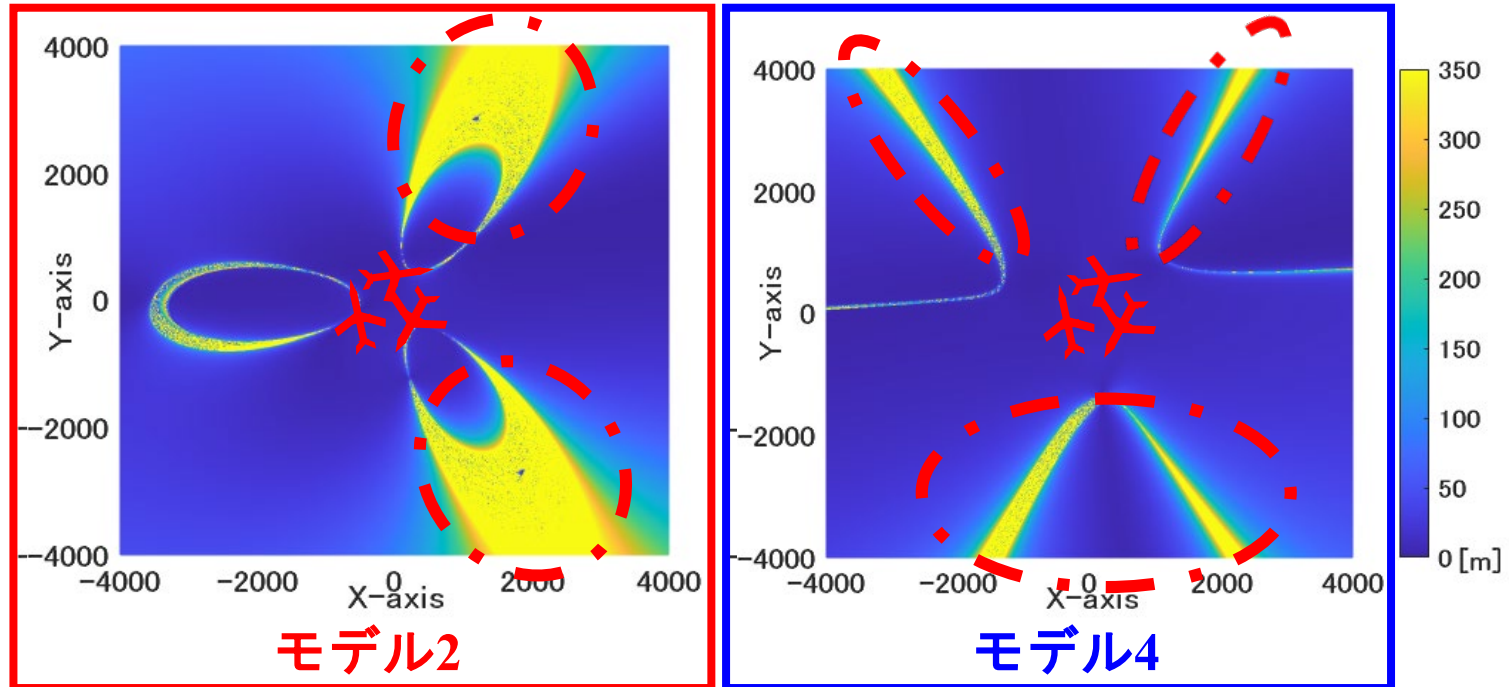
50%値



90%値

- 各モデルとも時刻に応じて位置検出誤差が変動
- 初期配置が同じモデルよりも互いに初期配置を $120^\circ$ ずらした配置の方が精度が**良好**
- モデル2**, **モデル4**では時間的に大きく精度が劣化するUAVの配置が確認 ⇒ UAV同士が**最接近**する瞬間

# 時刻50sにおける位置検出誤差分布比較



- $t = 50\text{s} \Rightarrow$  UAV同士が最接近する瞬間
- 両モデルとも交点が得られにくいエリアが確認

# まとめ・今後の課題



# まとめ

- 最小二乗法によりユーザ位置検出と周波数オフセットの推定・補償を同時に行う位置検出システム
  - 3機のUAVが円旋回する飛行モデル
  - 周波数オフセット量の推定精度と位置検出誤差の特性を評価
  - 周波数オフセット分布と位置検出誤差分布の関係性を評価
- 初期位相差を与えることで平均的に精度が良好
- 周波数オフセットの推定・補償を行う手法
  - 理想的なモデルよりも若干精度が劣化
  - ⇒ 時刻によらず良好な精度が得られることが可能
  - 推定精度が劣化するエリアで位置検出精度も同時に劣化

# 今後の課題

- ユーザ位置検出と周波数オフセット推定の関係性を詳細に検討
- 位置検出誤差が最良となる飛行モデルの提案
- 周波数オフセットの推定誤差が最良となる手法の検討

# 謝辞

本研究はJSPS科研費  
19K04380の助成を受けたものであり、  
その支援に深く感謝いたします。

御清聴ありがとうございました。