

# 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推定・補償技術に関する基礎検討

---

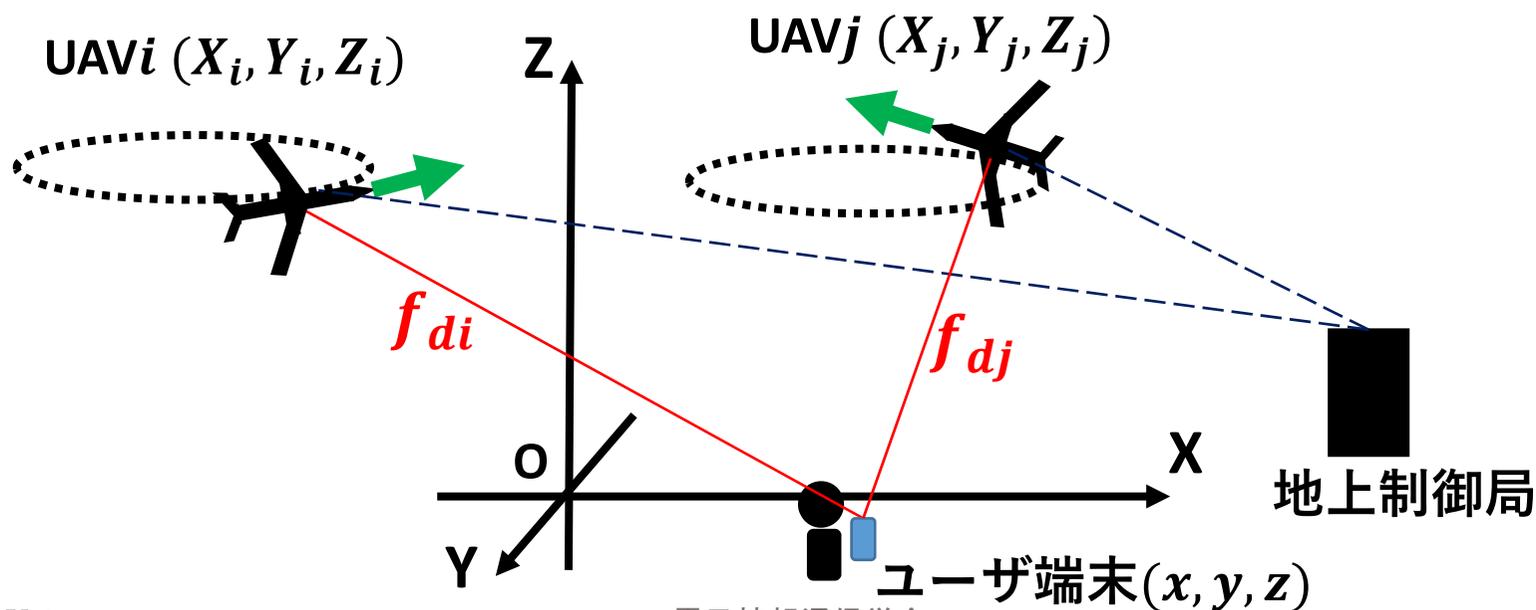
日本大学

○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
- 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
- **1機及び2機**のUAVを用いた位置検出精度の特性評価
- 様々な飛行モデルでの位置検出精度の特性評価  
⇒ユーザ端末内の**周波数発振器による誤差**（**周波数オフセット**）を考慮していないモデル

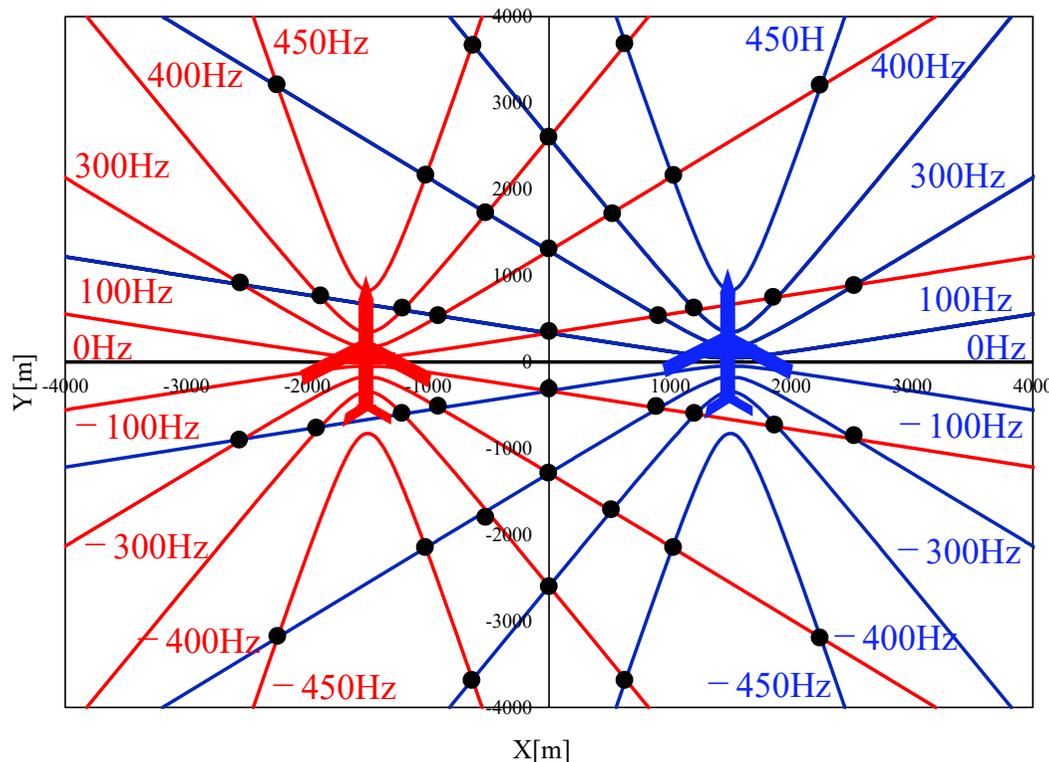
## ●本研究

- **3機**のUAVが円旋回する飛行モデル
- ユーザ位置を測位すると同時に**周波数オフセット**を推定・補償した**最小二乗法**による位置検出システムの提案
- 理想的に周波数オフセットを除去していた従来モデルとの特性比較

# 測位原理

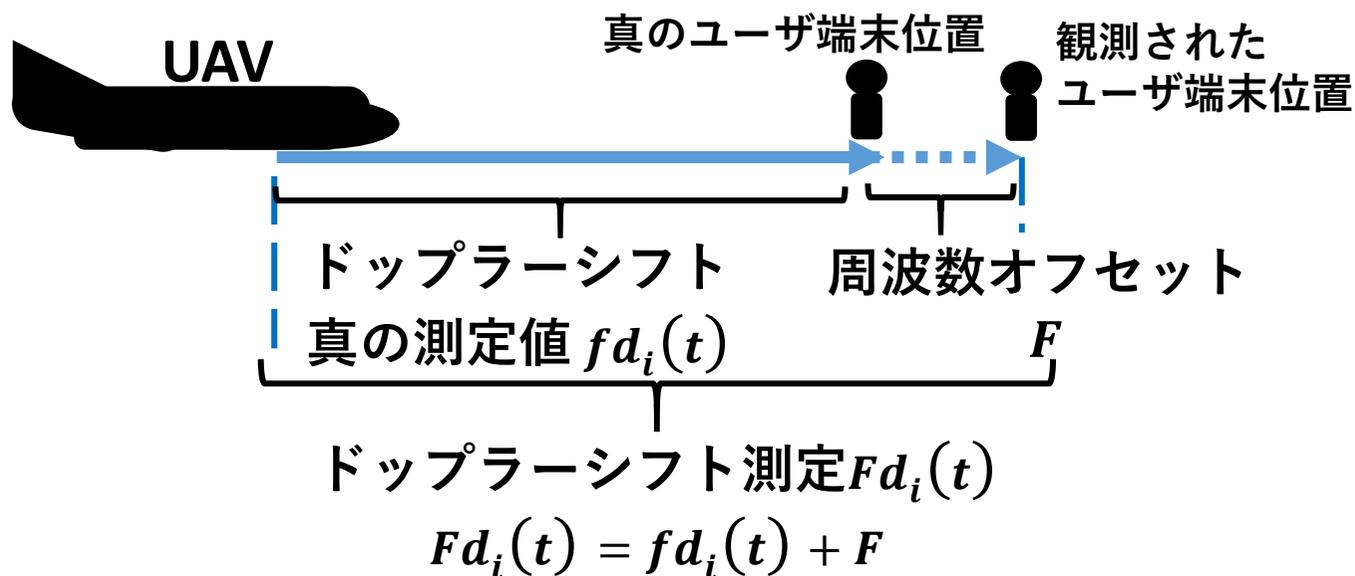
# ドップラーシフト分布

- 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
- 複数のUAVで観測し、ユーザ位置を双曲線上の交点として検出可能



# 周波数オフセット推定・補償

- 本研究では**周波数発振器**はユーザ端末に対し**独立している**と仮定
- ユーザ端末内の**周波数発振器**のクロック周波数のずれ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



# 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

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

- 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

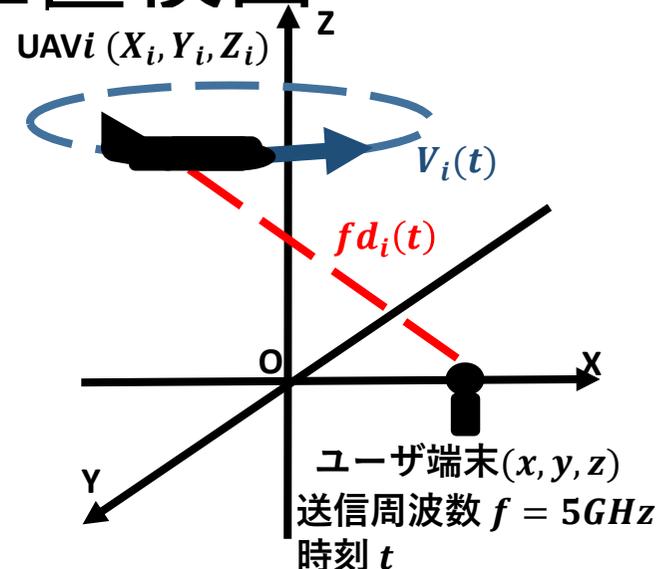
$$fd_i^0(t) = -\frac{V_{xi}(t)(X_i(t) - x^0) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y^0) + V_{zi}(t)(Z_i - z)}{\lambda\sqrt{(X_i(t) - x^0)^2 + (Y_i(t) - y^0)^2 + (Z_i - z)^2}} + F^0 \dots (2)$$

- 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

$$\Delta fd_i(t) = fd_{mi}(t) - \Delta fd_i^0(t) \dots (3)$$

- 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

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



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

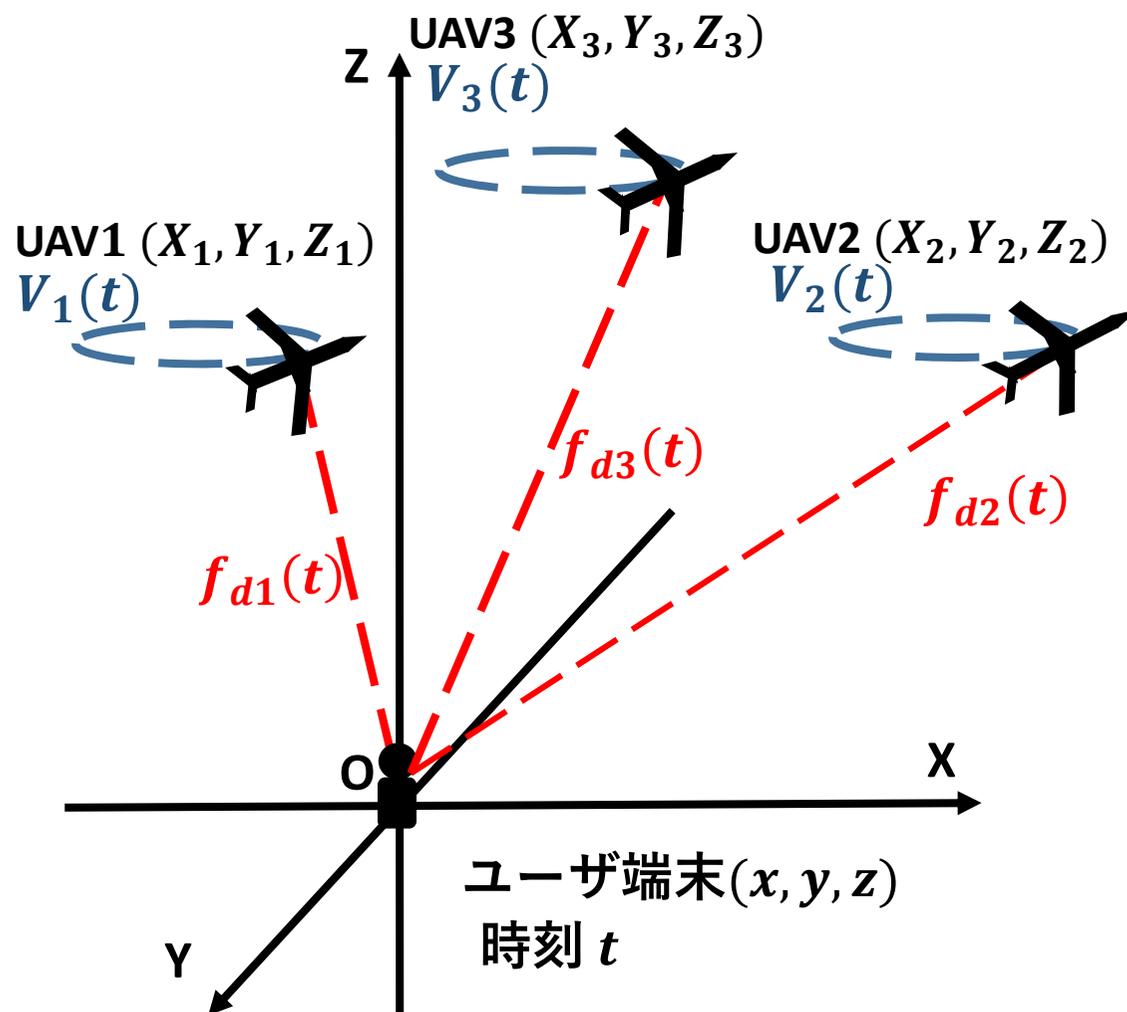
$$U = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta F]^T \dots (6)$$

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

$$U = (G^T G)^{-1} G^T \Delta Fd^T \dots (8)$$

# シミュレーションモデル

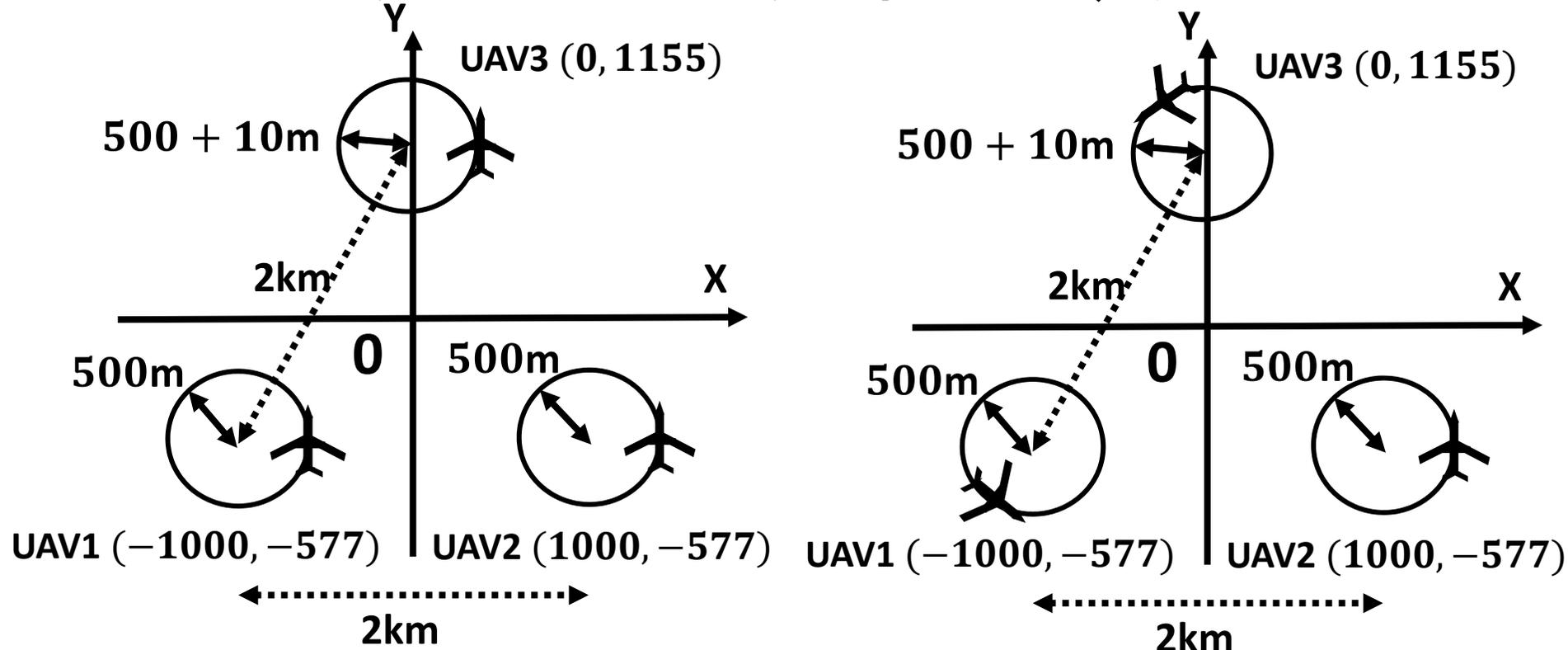
# シミュレーションモデル



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
速度	100km/h
UAV高度	200m
ユーザ高度	0m
測位対象エリア	8km四方

# シミュレーションモデル



・ **モデル1**及び**モデル2**

・ 各UAVの初期位相  $\Delta\theta=0^\circ$

・ **モデル3**及び**モデル4**

・ UAV1: $\Delta\theta=240^\circ$  UAV2: $\Delta\theta=0^\circ$  UAV3: $\Delta\theta=120^\circ$

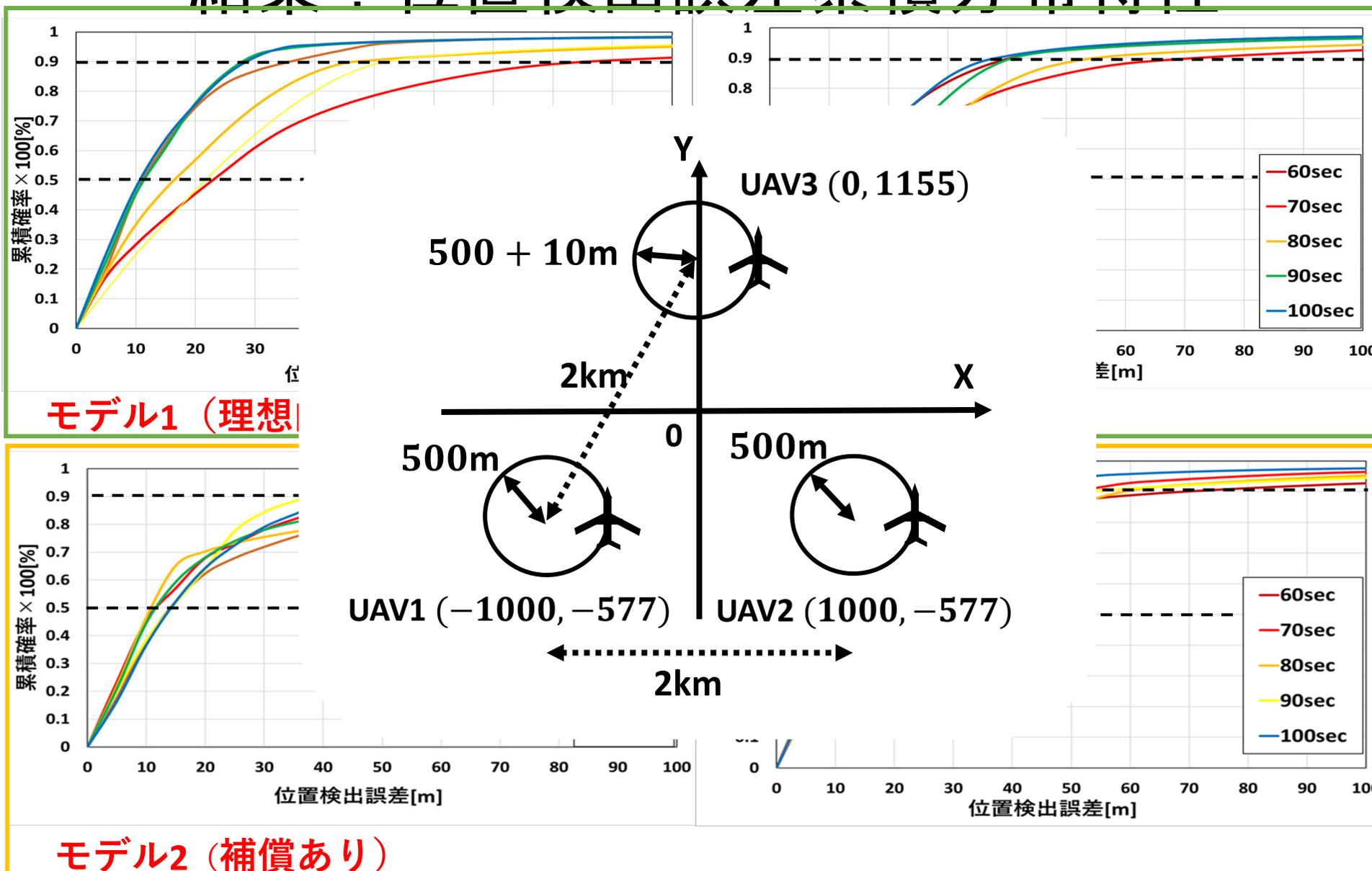
・ **モデル1**、**モデル3** : UAV3機に対しユーザ位置  $(x, y)$  を推定

・ **モデル2**、**モデル4** : UAV3機に対し  $(x, y)$  と**周波数オフセット  $F$**  を推定

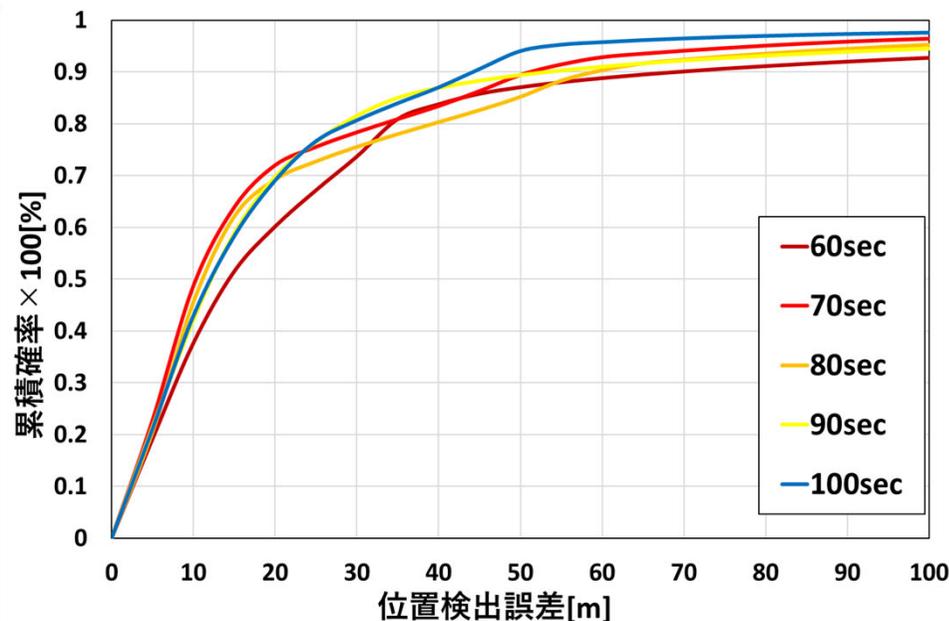
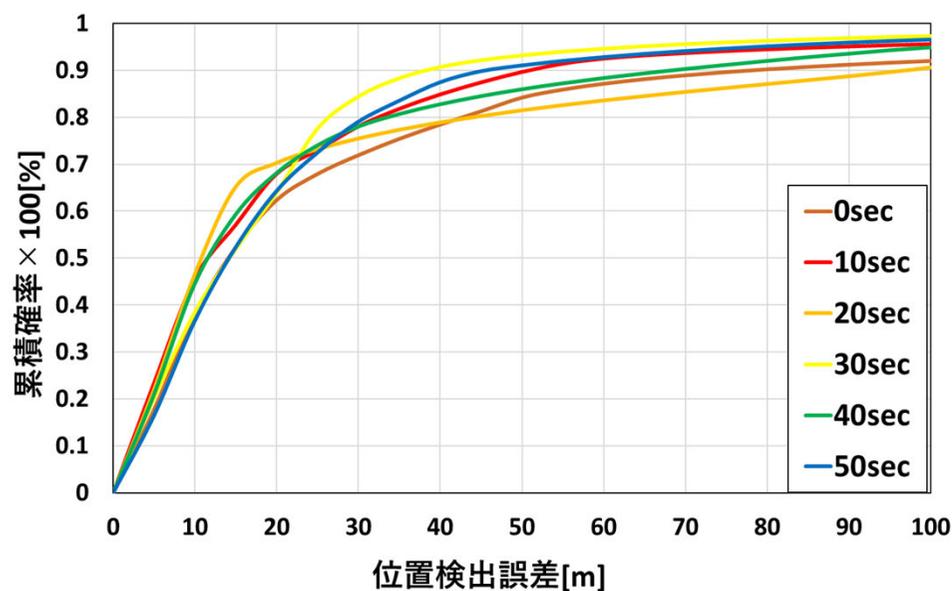
・ 各モデルを時刻  $t=0\sim 100s$ まで10秒毎にシミュレーションを実施

# シミュレーション結果

# 結果：位置検出誤差累積分布特性

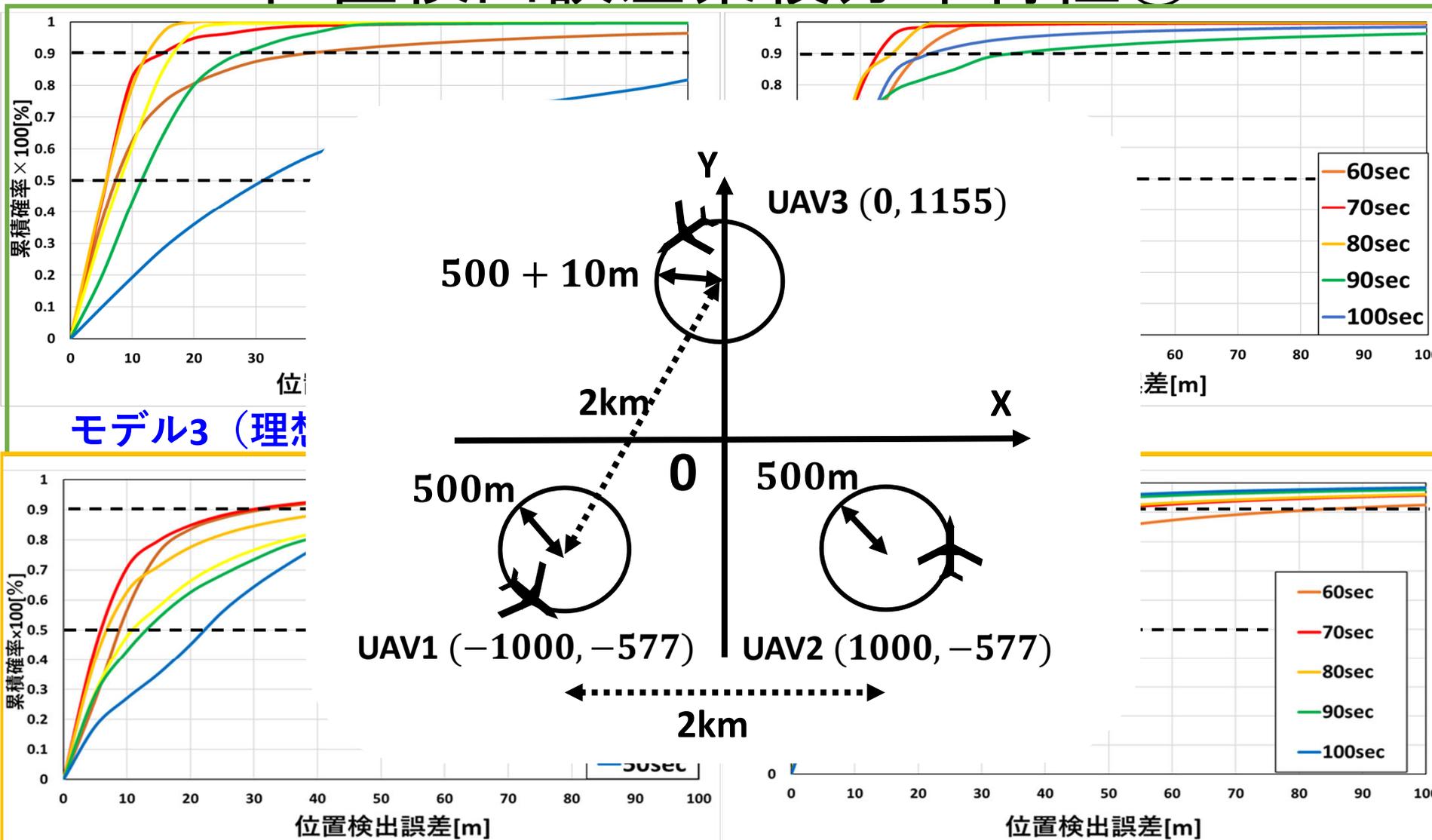


# 結果：位置検出誤差累積分布特性 モデル2



- 累積確率50%値
  - 20s及び70sで**最小値11m**
  - 0sで**最大値15m**
- 累積確率90%値
  - 100sで**最小値42m**
  - 40sで**最大値98m**

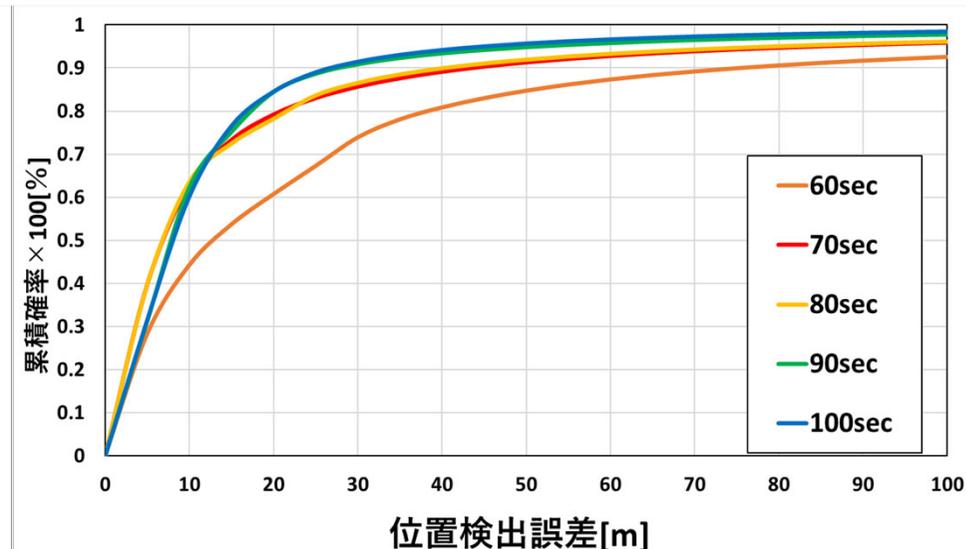
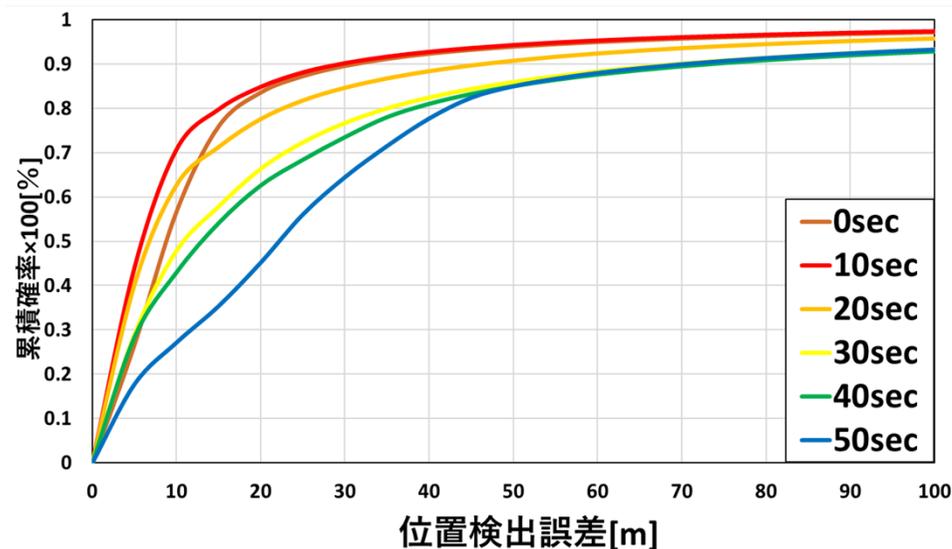
# 位置検出誤差累積分布特性②



モデル3 (理想)

モデル4 (補償あり)

# 位置検出誤差累積分布特性 モデル4



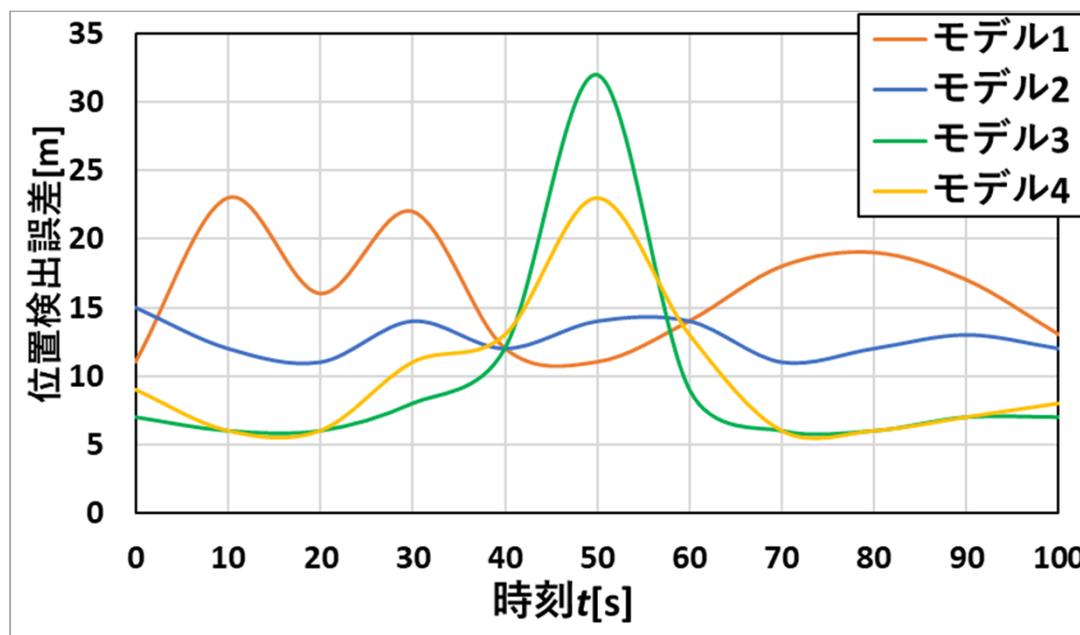
- 累積確率50%値
  - 10sで最小値6m
  - 50sで最大値23m
- 累積確率90%値
  - 100sで最小値27m
  - 60sで最大値76m

## 結果:位置検出誤差累積分布特性 (各モデル50%値、90%値)

時刻t[s]	位置検出誤差[m]							
	モデル1		モデル2		モデル3		モデル4	
	50%	90%	50%	90%	50%	90%	50%	90%
0	11	37	15	79	7	38	9	32
10	23	89	12	51	6	15	6	30
20	16	47	11	98	6	12	7	46
30	22	52	14	39	8	16	11	70
40	12	28	12	69	12	28	13	74
50	11	29	14	46	32	190	23	71
60	14	41	14	70	9	19	13	76
70	18	72	11	52	6	13	7	46
80	19	55	12	60	6	15	7	40
90	17	42	13	54	7	34	8	28
100	13	38	12	42	7	21	8	27

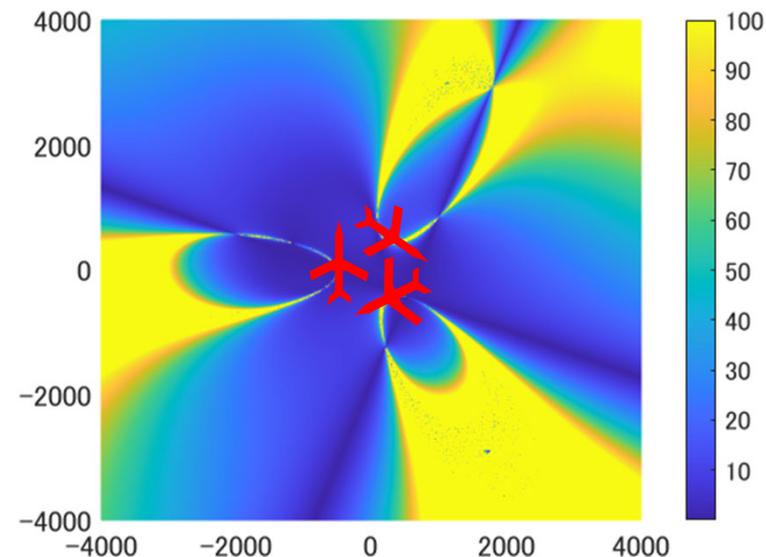
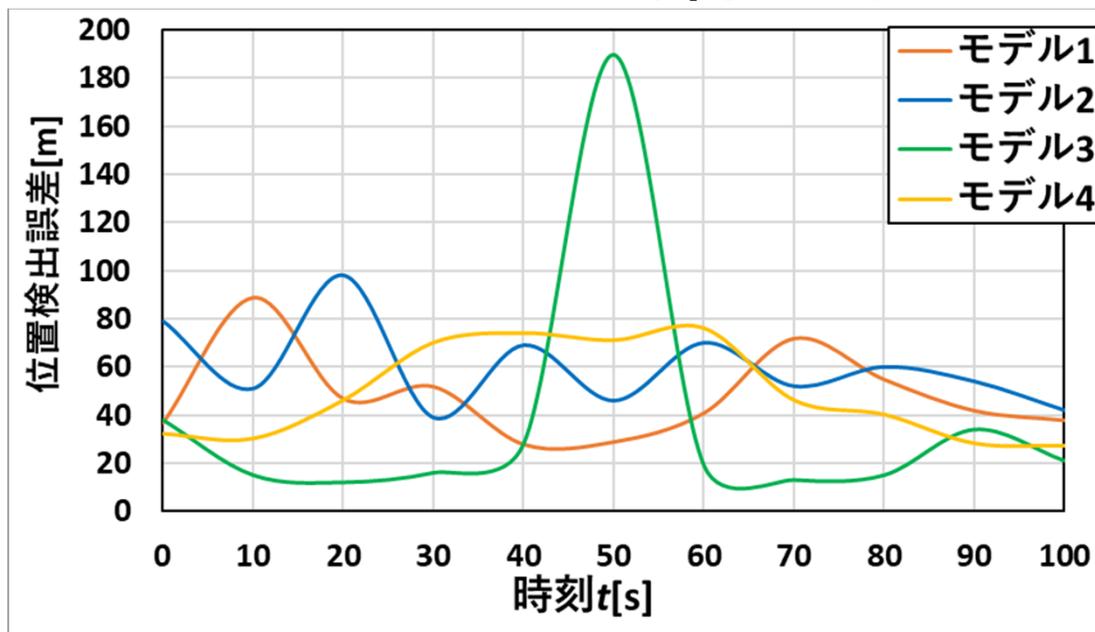
- 赤字：位置検出誤差最小値、青字：位置検出誤差最大値

## 結果：位置検出誤差の時間特性 (各モデル50%値)



- 各モデルとも時刻に応じて位置検出誤差が変動
- 両初期配置とも周波数オフセットを推定したモデル（モデル2、モデル4）の方が精度が**良好**
- 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**

## 結果：位置検出誤差の時間特性 (各モデル90%値)



モデル3における位置検出誤差分布 ( $t = 50s$ )

- 各モデルとも時刻に応じて位置検出誤差が変動
- 両初期配置とも理想的なモデル（モデル1, モデル3）の方が精度が良好
- モデル3（初期配置を互いに $120^\circ$  ずらした場合）
  - 時刻50秒の場合を除いて理想的なモデルの方が精度が良好
  - 時刻50秒の場合：UAV同士が近く、ドップラーシフト分布が互いに並行

# まとめ・今後の課題

# まとめ

- **3機のUAV**が円旋回する飛行モデル
- **周波数オフセット量**を推定した位置検出誤差の特性評価
  - 平均的な特性 ⇒ 理想的なモデルと同等の精度
  - 全体的な特性 ⇒ 理想的なモデルの方が精度が良好
- **周波数オフセット**を**推定・補償**することが可能
- UAVの初期配置が同じ場合
- UAVの初期配置が $120^\circ$  ずつずれている場合

## まとめ

- **3機**のUAVが円旋回する飛行モデル
- **周波数オフセット量**を推定した位置検出誤差の特性評価
- UAVの初期配置が同じ場合
  - 平均的な特性 ⇒ 周波数オフセットを推定・補償したモデルの方が**良好**
  - 全体的な特性 ⇒ 理想的なモデルが**良好**
- UAVの初期配置が互いに  $120^\circ$  ずらした場合
  - 平均的な特性 ⇒ ある時刻を除いて理想的なモデルと**同等の精度**
  - 全体的な特性 ⇒ 全体的に理想的なモデルの方が**良好**
- 提案手法では**周波数オフセット**を推定・補償と同時に**位置検出が可能**

## 今後の課題

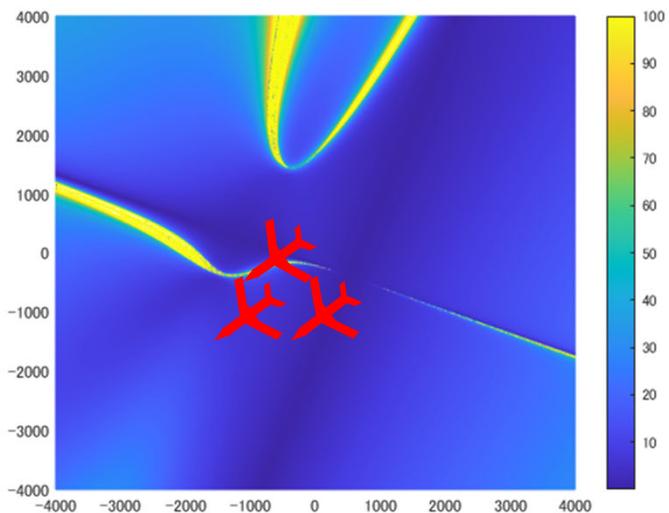
- 位置検出誤差が最小となる初期配置方法の検討
- 周波数オフセット量を初期値とした場合における推定・補償を行うアルゴリズムの提案及び有効性の評価

# 謝辞

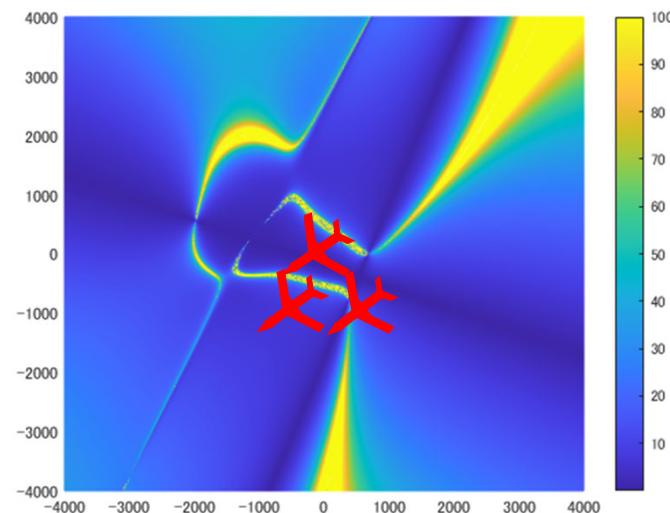
本研究はJSPS科研費  
19K04380の助成を受けたものであり、  
その支援に深く感謝いたします。

ご清聴ありがとうございました。

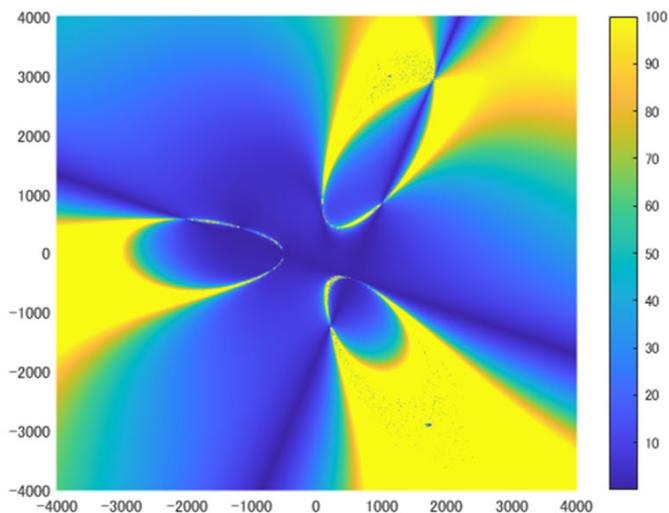
# 補足：t = 50秒の時の位置検出誤差特性分布図



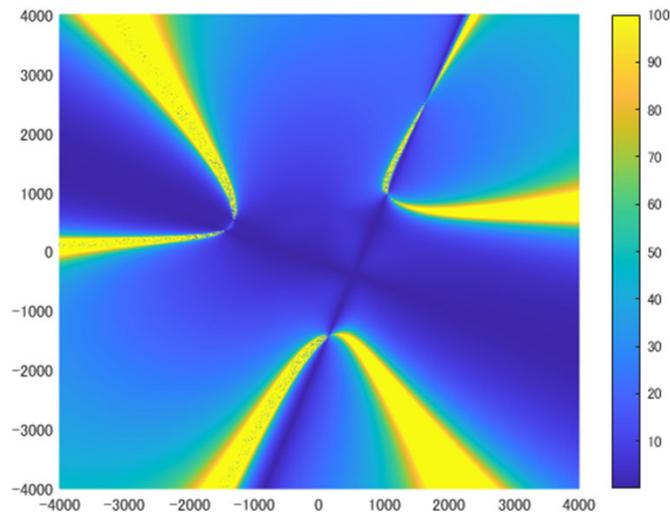
モデル1



モデル2

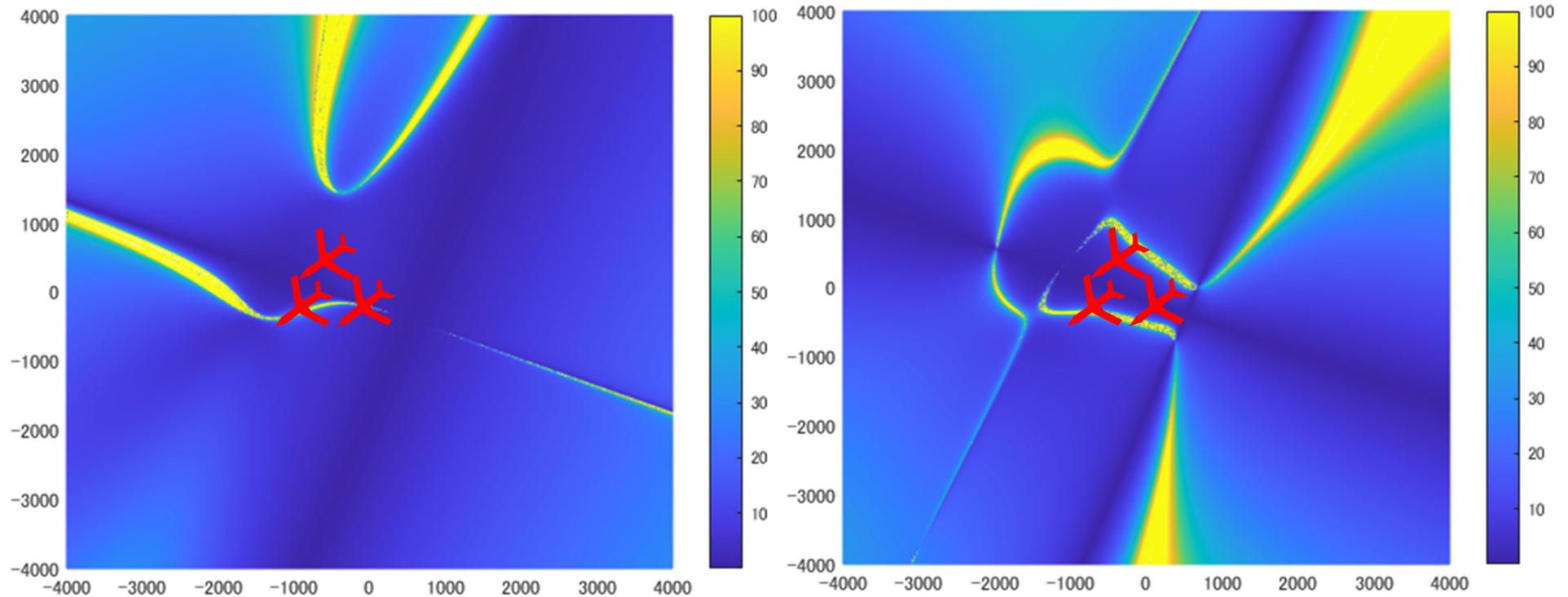


モデル3



モデル4

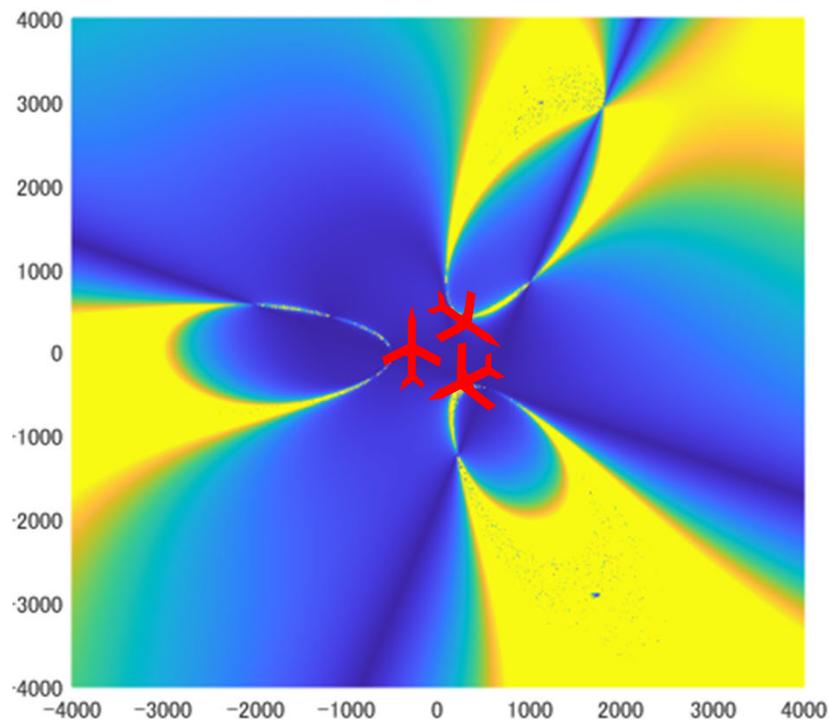
# 補足： $t = 50$ 秒での位置検出誤差特性分布図①



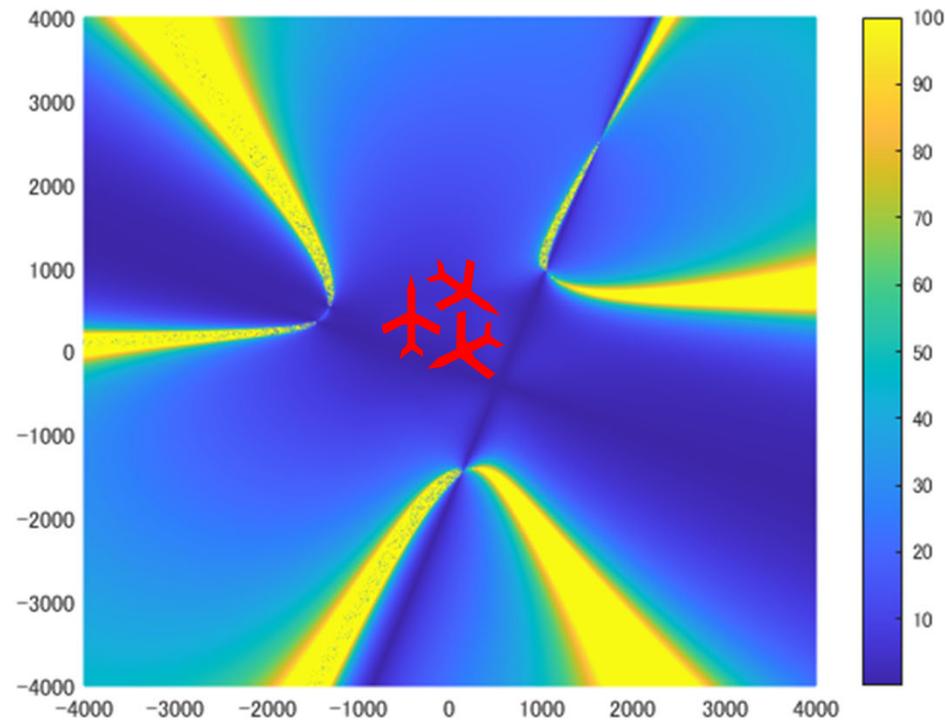
モデル1

モデル2

## 補足：t = 50秒での位置検出誤差特性分布図②



モデル3



モデル4