

令和5年3月15/16日開催  
ワイドバンドシステム研究会

# 無人航空機を用いたユーザ位置検出 システムにおけるドップラーシフト 多重観測手法の測位精度改善効果

---

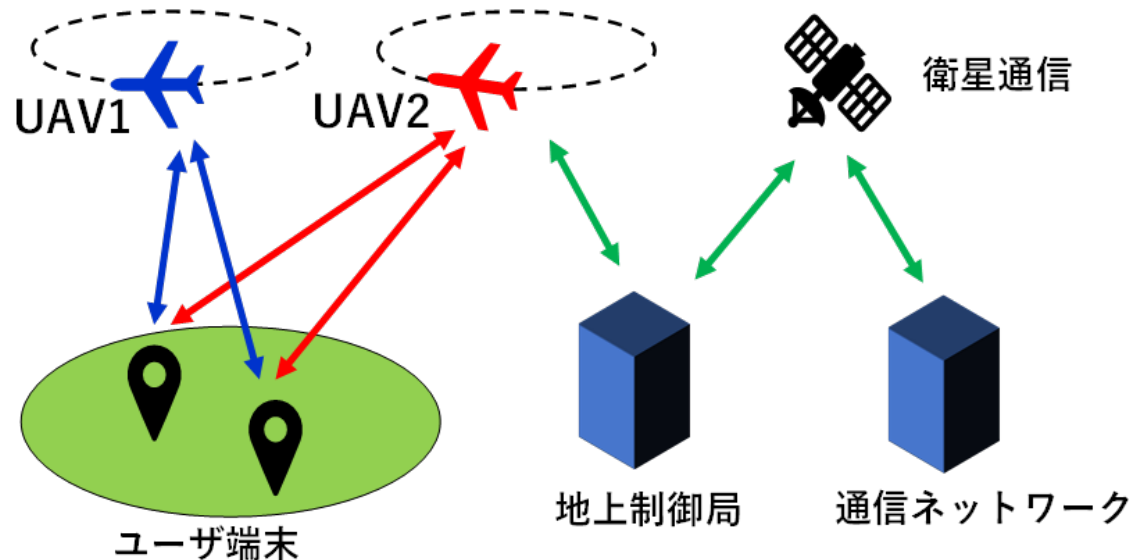
日本大学

出口 泰河 ○石川 博康

# 研究背景及び目的

# 研究背景

- 大規模災害発生時は、公共の無線通信ネットワークの提供が困難
- **無人航空機(UAV)**を用いた**無人航空機システム(UAS)**が一時的な通信ネットワークを提供する一手段として期待
- UASでは、ユーザ端末-UAV間の送受信信号の搬送波周波数に**ドップラーシフト**が発生
- UAVの飛行位置を用いた**ドップラーシフトの観測量**により**ユーザ位置**を検出可能



無人航空機システム (UAS) モデルの一例

# 研究目的

## ➤これまでの研究

- 1機のUAVを用いて異なる時刻に2回, もしくは, 複数機のUAVにより同一の時刻に1回で観測されるドップラーシフトを用いて最小二乗法に基づきユーザ位置検出を行う手法の提案・特性評価
- ⇒UAVとユーザ端末の位置関係によっては測位精度が劣化

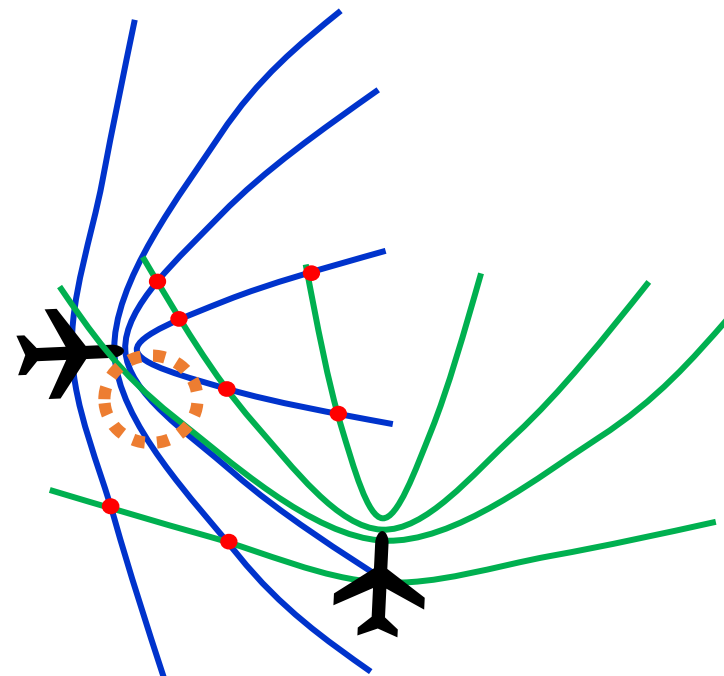
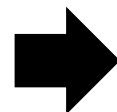
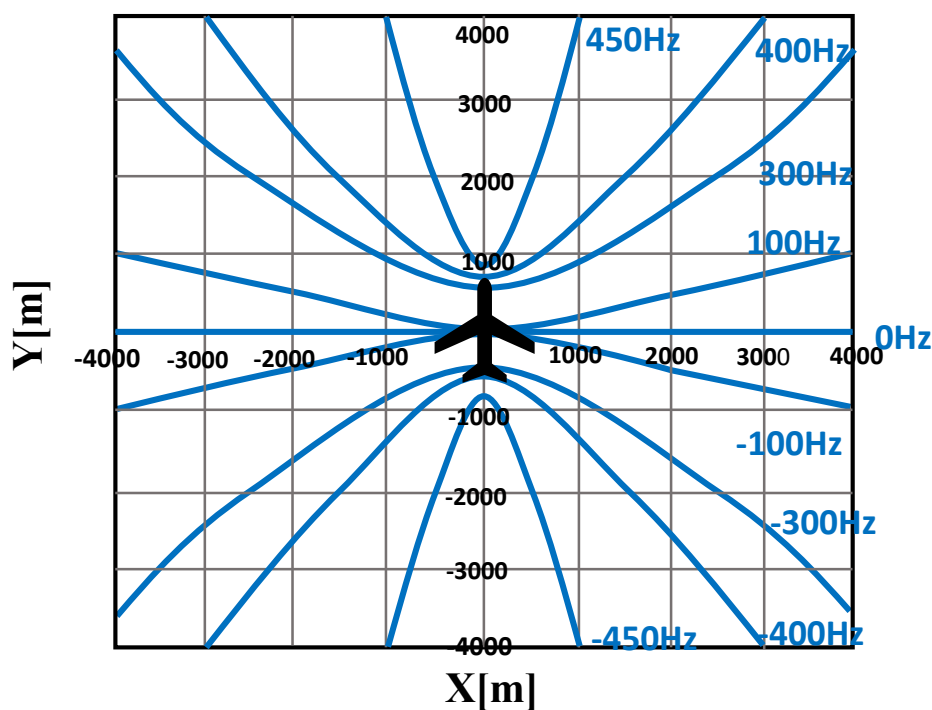
## ➤本研究

- 従来システムの位置検出精度の改善を目的とし, 2機のUAVを用いてドップラーシフトの観測回数を複数回に拡張
  - 8の字周回飛行するモデルを対象
  - 観測時間と位置検出精度の関係から, 適切な観測回数
  - ある一定の回数から測位精度の改善効果が得られにくくなることが想定
- ⇒2機のUAVの初期配置を変化させた場合の改善効果についての評価を実施

# 測位原理

# ドップラーシフト分布

- 地上端末-UAV間には，視線速度の変化によるドップラーシフト発生
- 地上端末の位置は，UAVの飛行方向に対してXY平面上で双曲線状に分布
- 各UAVで独立にドップラーシフトを観測することで，ユーザ位置は**双曲線の交点**として検出可能



# 最小二乗法による位置検出手法

- 地上端末-UAV間に生じるドップラーシフト

$$fd_i(t_j) = -\frac{V_{xi}(t_j)(X_i(t_j) - x) + V_{yi}(t_j)(Y_i(t_j) - y)}{\lambda\sqrt{(X_i(t_j) - x)^2 + (Y_i(t_j) - y)^2 + (Z_i)^2}}$$

- 地上端末の初期値 $(x^0, y^0, 0)$ から導出したドップラーシフト量との残差成分

$$\Delta fd_i(t_j) = fd_i(t_j) - fd_i^0(t_j)$$

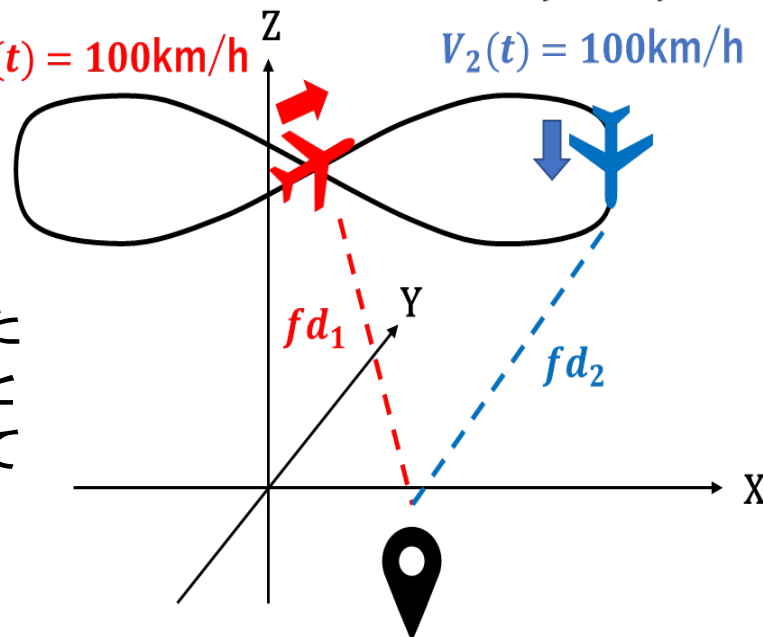
- ドップラーシフトの残差を解消するため 初期値からの変化量を $(\Delta x, \Delta y)$ と仮定各UAVに対して次の関係式として表現可能

$$\Delta fd_i(t_j) = \frac{\partial fd_i(t_j)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial fd_i(t_j)}{\partial y} \Delta y$$

UAV1 $(X_1(t_j), Y_1(t_j), Z_1(t_j))$  UAV2 $(X_2(t_j), Y_2(t_j), Z_2(t_j))$

$V_1(t) = 100\text{km/h}$

$V_2(t) = 100\text{km/h}$



ユーザ位置 $(x, y, 0)$

# N回観測への拡張

- 連立方程式を解くため、各UAVにおけるドップラーシフトに関する偏微分方程式を行列式 $G$ 、ユーザ位置の変化量 $(\Delta x, \Delta y)$ を転置行列 $U$ として整理
- 任意の観測回数で扱うことから、観測回数  $N$ 回目の時刻 $t_N$ までの偏微分方程式に応じて2機のUAVごとの行列式に拡張
- $U = (G^T G)^{-1} G^T F^T$  で与えられる行列演算により $U$ が十分に小さくなるまで繰り返し計算を更新することでユーザ位置を精度良く推定可能

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial fd_1(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t_1)}{\partial y} \\ \frac{\partial fd_2(t_1)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t_1)}{\partial y} \\ \hline \frac{\partial fd_1(t_2)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t_2)}{\partial y} \\ \frac{\partial fd_2(t_2)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t_2)}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial fd_1(t_j)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t_j)}{\partial y} \\ \frac{\partial fd_2(t_j)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t_j)}{\partial y} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial fd_1(t_N)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t_N)}{\partial y} \\ \frac{\partial fd_2(t_N)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t_N)}{\partial y} \end{bmatrix}$$

1回観測

2回観測

N回目

$$U = [\Delta x \quad \Delta y]^T$$



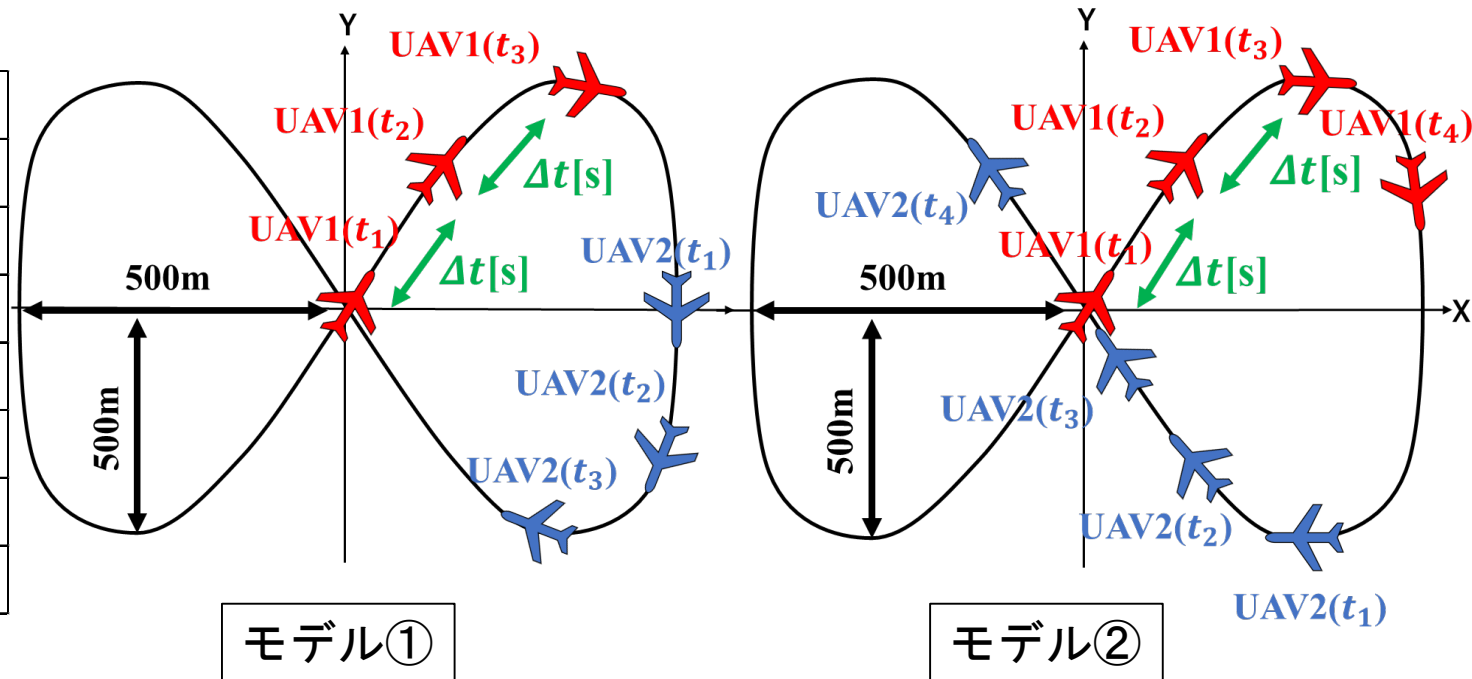
# シミュレーションによる 特性比較

# シミュレーションモデル

- 2機のUAVが8の字飛行するモデル

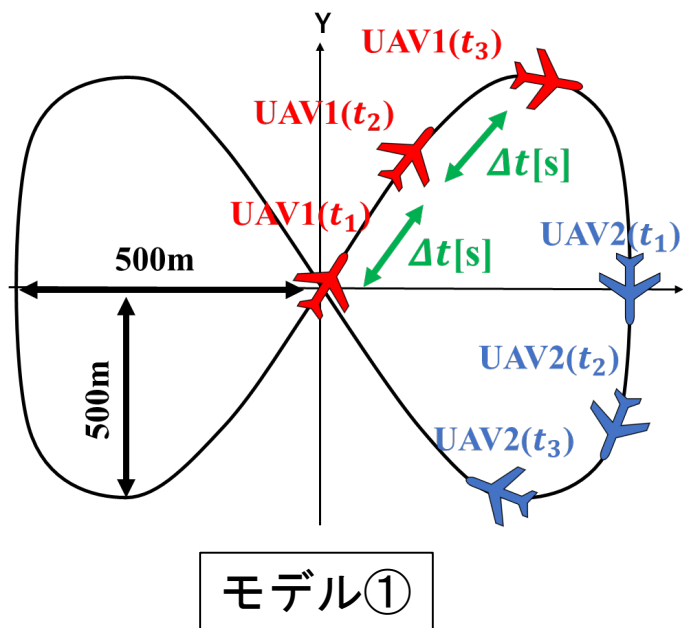
## 条件

飛行速度	100km/h
搬送波周波数	5GHz
UAV高度	200m
回転半径	500m
飛行位置誤差	10m
評価対象エリア	8km四方
初期配置	①1/4周分
	②3/8周分

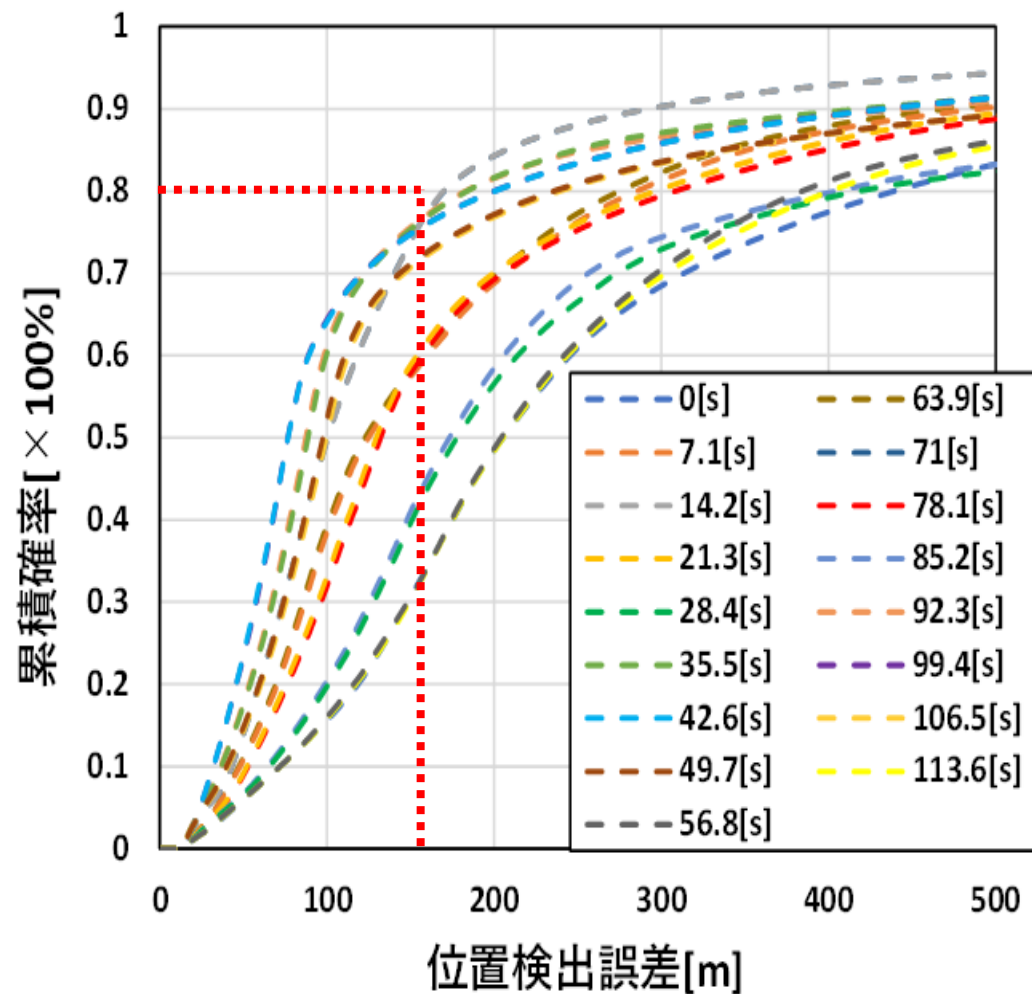


- 観測時刻を, 8の字周回軌道の1周分に相当する時間 ( $t=0s \sim 113.6s$ )を16分割し, **7.1s毎**に観測
- 複数回観測のため, **観測時間間隔** $\Delta t$ を**1s~15s**では**1s間隔**で, **15s~30s**では**5s間隔**で変化させてシミュレーションを実施

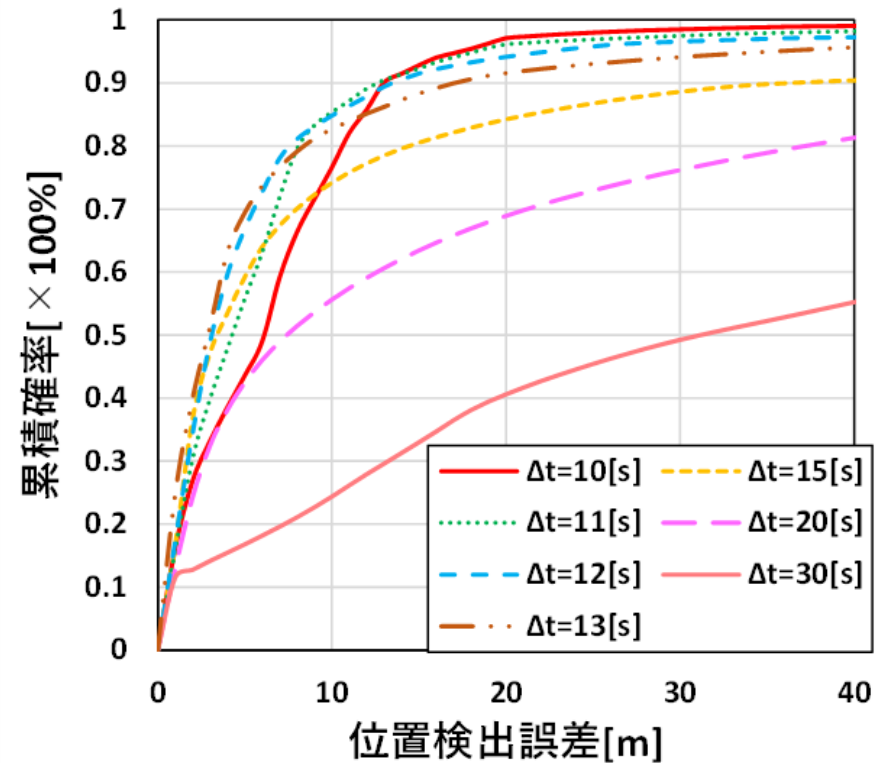
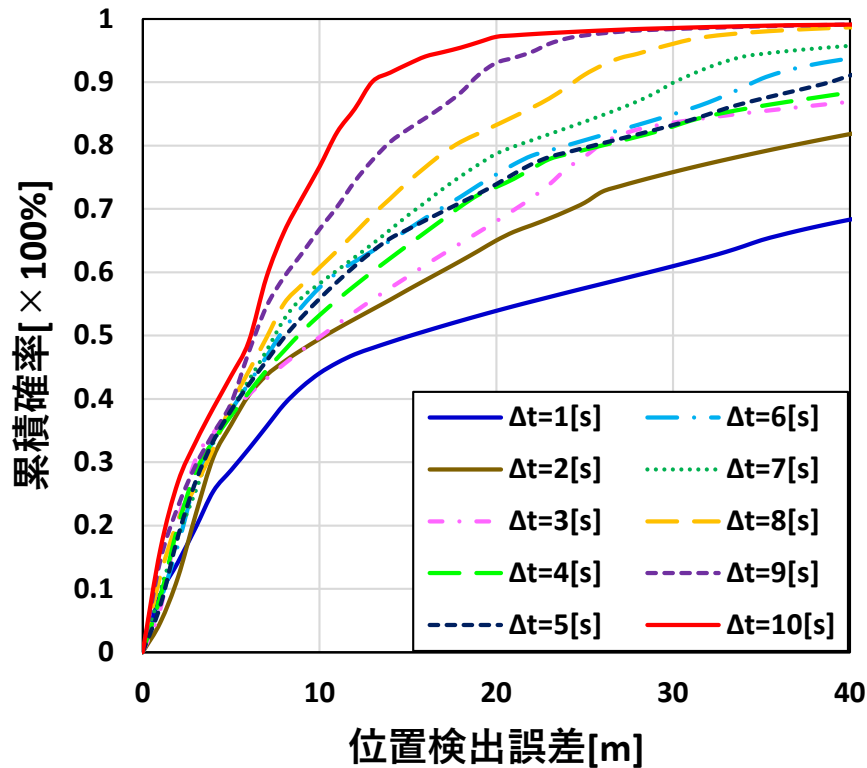
# モデル①による位置検出誤差の累積分布特性 (1回観測による改善効果 $t_1 = 0s$ の場合)



- 1回観測の場合，すべての時刻で位置検出誤差150m以内で累積確率80%に達することが無い



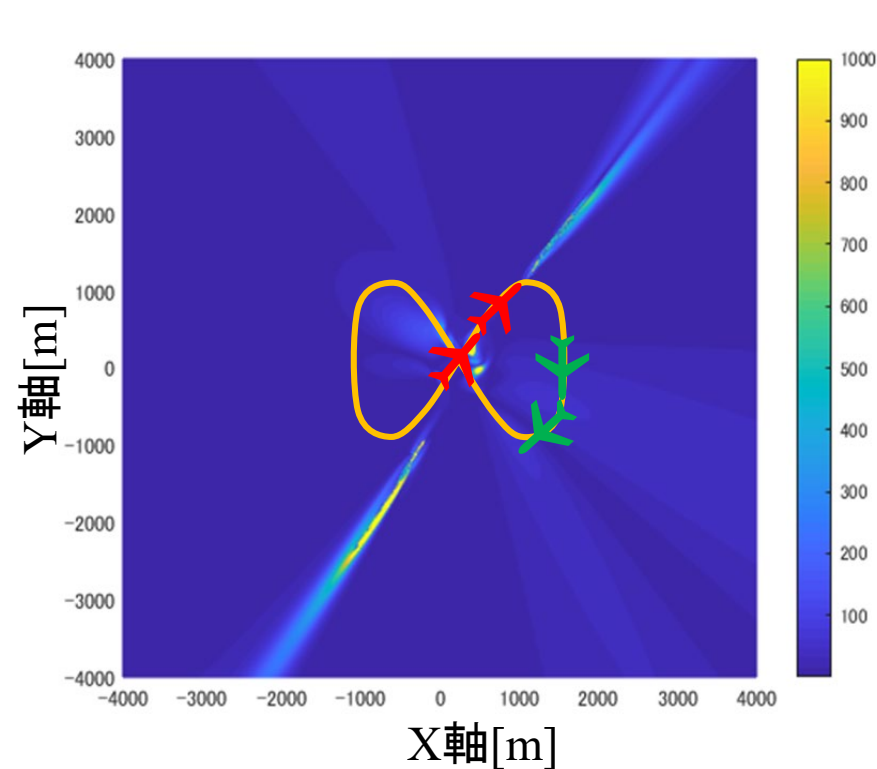
# モデル①における位置検出誤差の累積分布特性 (2回観測による改善効果, $t_1 = 0s$ の場合)



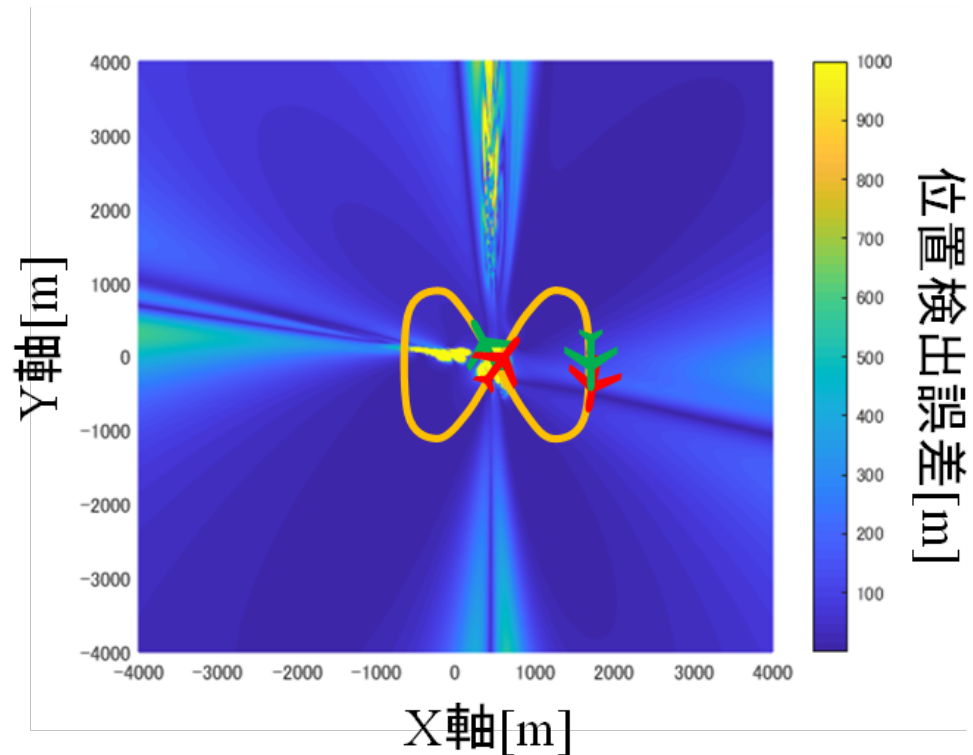
- 観測時間間隔 $\Delta t = 8s \sim 14s$ のとき位置検出誤差25m未満と良好
- $\Delta t = 30s$ のとき最悪値

⇒ UAV2の初期配置が28.4sに相当する距離だけ離れているため、UAV1の2回目の観測位置とUAV2の1回目の観測位置が接近

# ドップラーシフトの面的分布特性



2回測定( $\Delta t=5s$ )

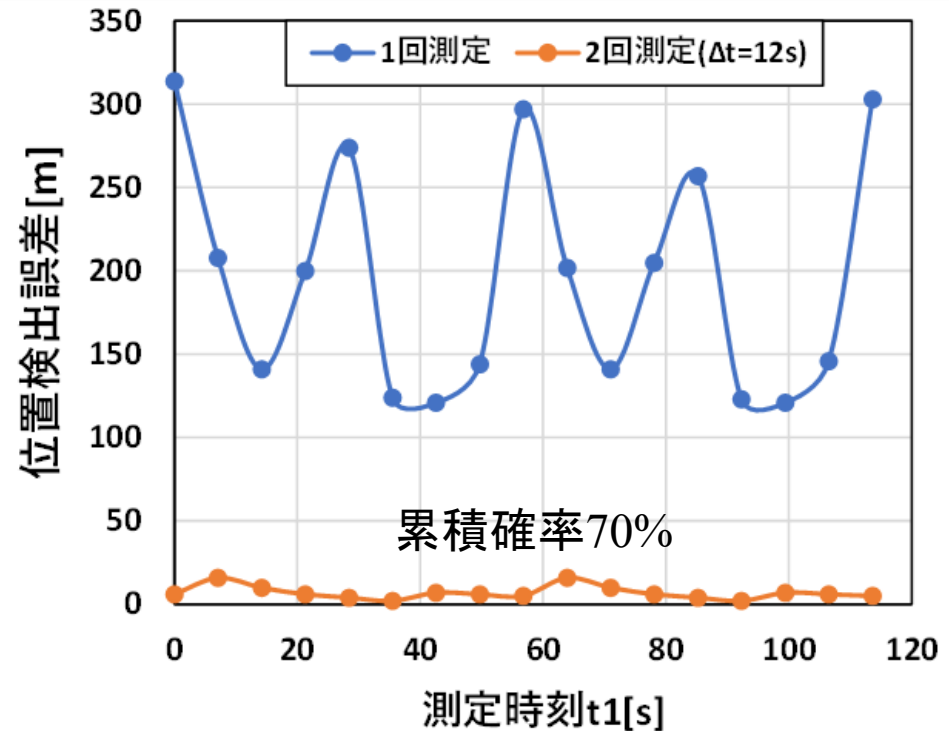


2回測定( $\Delta t=28.4s$ )

- 青色のエリア：測位精度良好
- 黄色のエリア：測位精度劣化
- 2回測定の $\Delta t=28.4s$ では測定位置が重なり，測位精度が劣化する

# モデル①における2回観測による改善効果

測定時間間隔 $\Delta t$ [s]	累積確率70%値
	位置検出誤差[m]
1	47.29
2	18.59
3	14.41
4	12.06
5	11.00
6	10.24
7	9.59
8	8.88
9	8.29
10	7.59
11	7.00
12	6.94
13	7.47
15	9.53
20	12.41
30	41.12

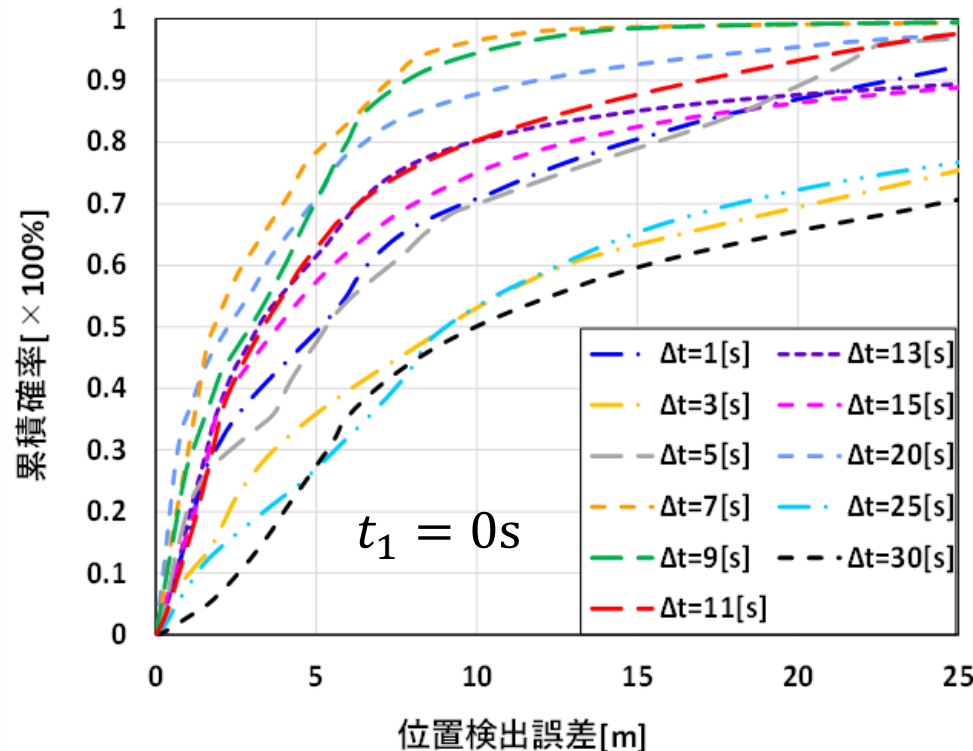


観測時間間隔 $\Delta t$ ごとの平均位置検出誤差

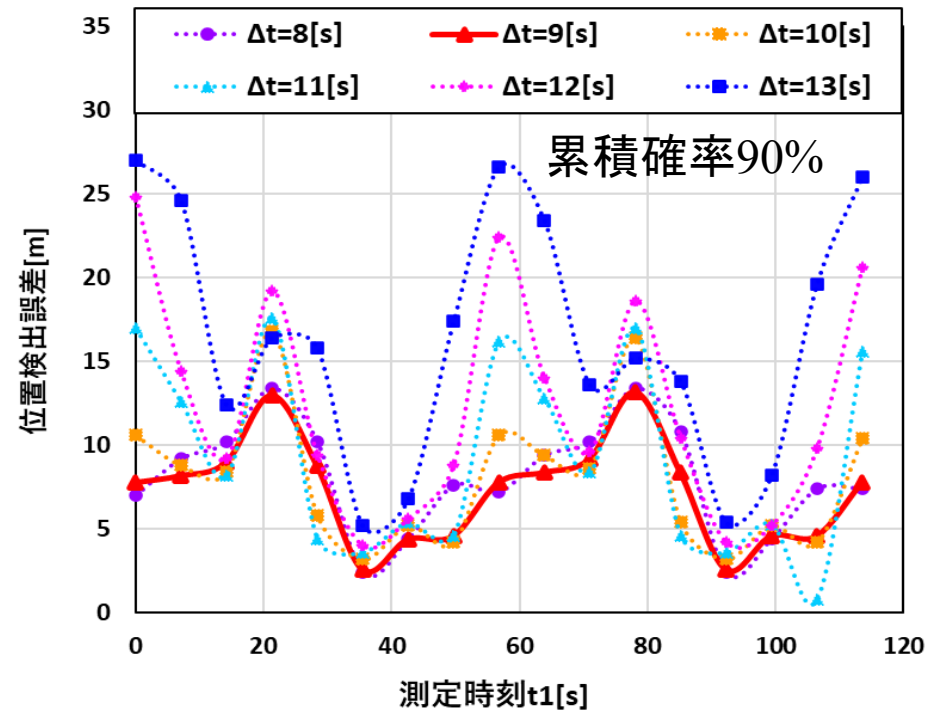
位置検出誤差の時間変化特性

- 観測時間間隔 $\Delta t$ の増加に伴い、異なる飛行位置・飛行方向でドップラーシフトを観測することになり、位置検出誤差が減少
  - 累積確率70%値では観測時間間隔 $\Delta t = 12s$ のときに6.94mと最良
  - 1回観測では位置検出誤差が100m~300mの範囲で時刻と共に精度が変化  
2回観測では20m以内で変化
- ⇒ ドップラーシフトの2回観測による測位精度の改善効果は顕著

# モデル①における3回観測による改善効果



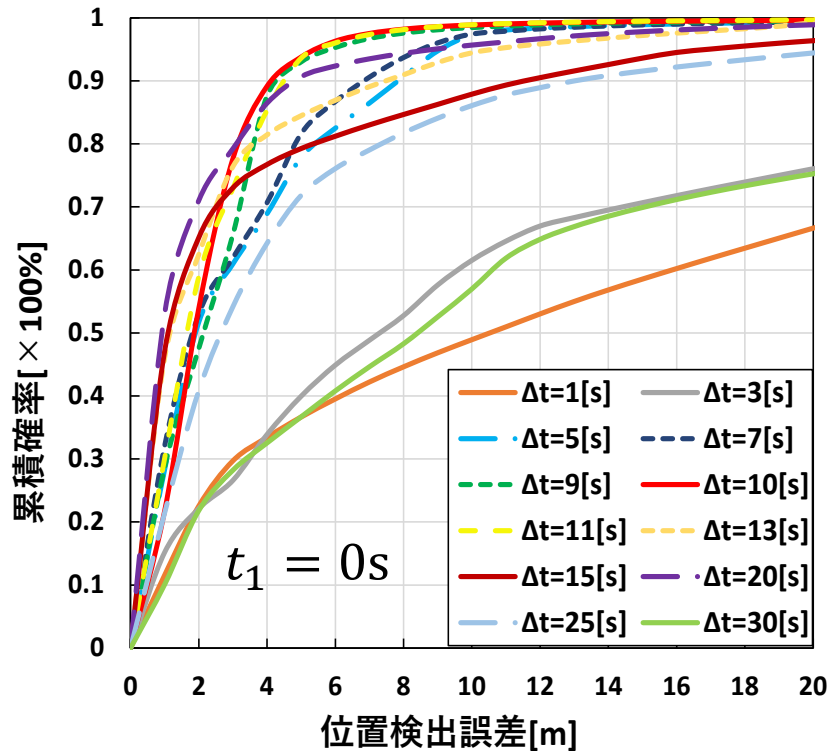
位置検出誤差の累積分布特性



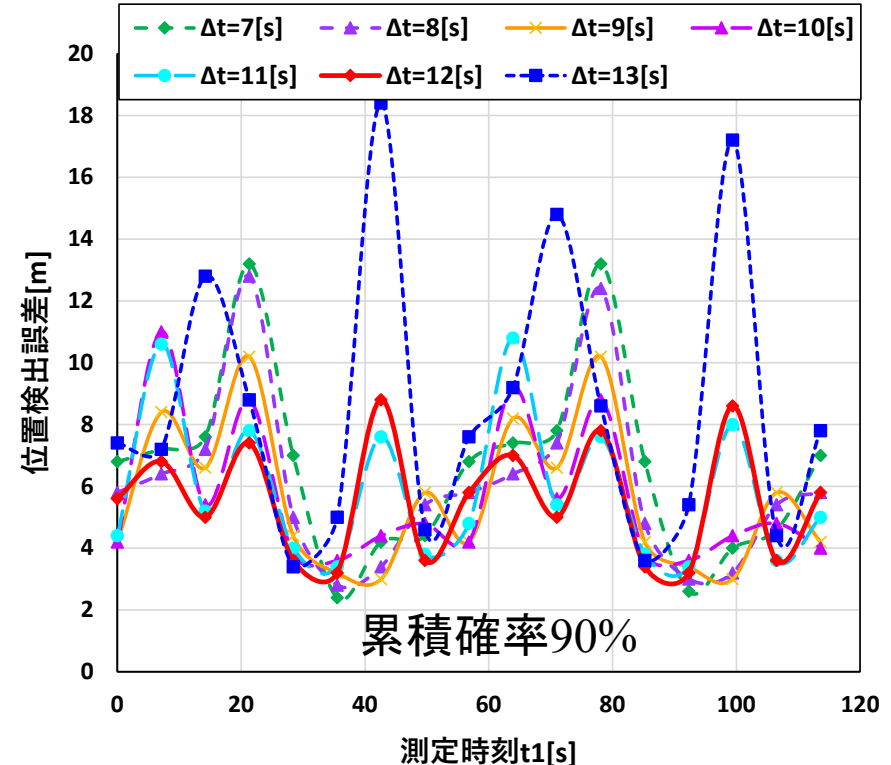
位置検出誤差の時間変化特性

- 観測時間間隔 $\Delta t = 1 \sim 3s, 25s, 30s$ の場合を除いて、おおよそ位置検出誤差 **25m以内**で累積確率90%値に達する
  - 2回観測時と同様に $\Delta t = 30s$ で**最悪値**を示し、 $\Delta t = 25s$ の場合も観測位置が接近しているため精度が劣化
  - 累積確率90%値では $\Delta t = 9s$ で平均位置検出誤差**7.35m**と最良
- ⇒ 2回観測と比較すると、**約12mの距離改善**

# モデル①における4回観測による改善効果



位置検出誤差の累積分布特性



位置検出誤差の時間変化特性

- 累積確率90%値では  $\Delta t = 5s \sim 20s$  の場合  $15s$  を除いて位置検出誤差が  $8m$  以内
- $\Delta t = 9s \sim 11s$  の場合、位置検出誤差が約  $4m$  と最良の配置関係
- $\Delta t = 1s, 3s, 30s$  で精度が大きく劣化
- ✓  $\Delta t = 1 \sim 3s$  : 測定時間間隔が短く、双曲線の交点を得ることが困難
- ✓  $\Delta t = 30s$  : 2機のUAVの初期配置が1/4周分( $28.4s$ )離れており、UAV1の2回目とUAV2の1回目の測定位置が重なり複数回測定の効果を得られない状態



# モデル①における4回～6回観測の平均位置検出誤差

測定時間間隔 $\Delta t$ [s]	累積確率50%値	累積確率90%値
	位置検出誤差[m]	
8	1.61	6.06
9	1.59	5.62
10	1.47	5.55
11	1.39	5.84
12	1.35	5.54
13	1.61	8.60
14	1.71	12.95
15	1.35	10.40

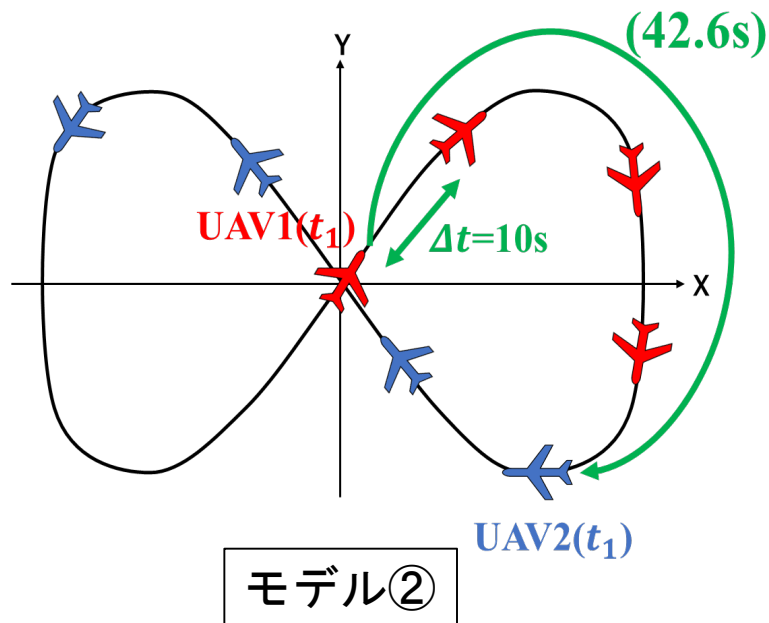
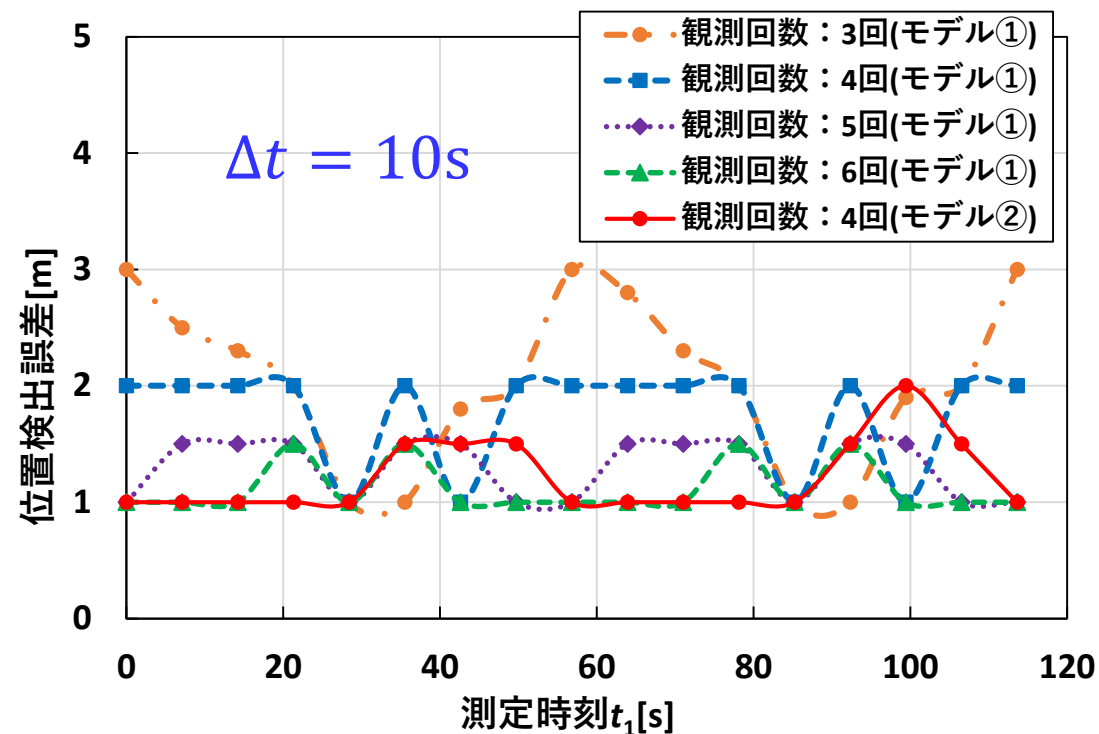
4回観測

	測定時間間隔 $\Delta t$ [s]	累積確率50%値	累積確率90%値
		位置検出誤差[m]	
5回測定	9	1.42	4.58
	10	1.47	4.15
	11	1.21	3.54
6回測定	9	1.27	3.46
	10	1.11	3.11
	11	1.11	3.29

5回, 6回観測

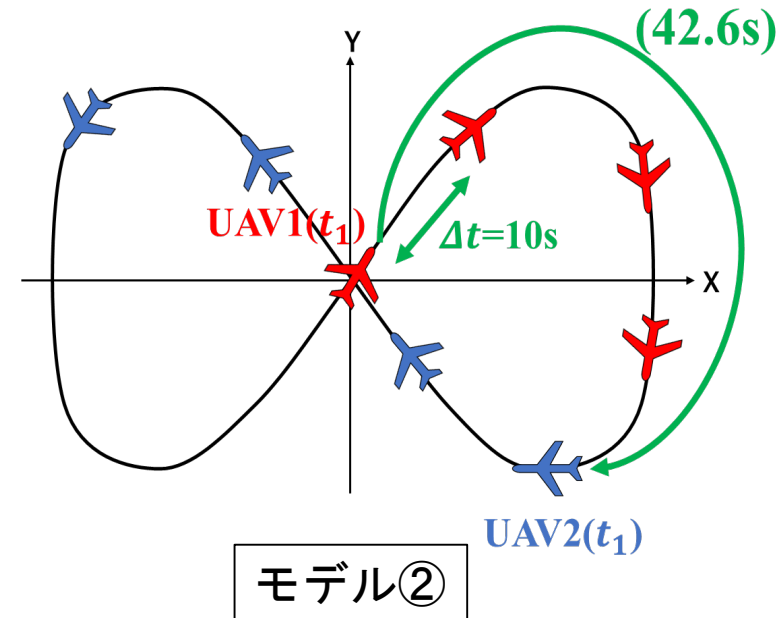
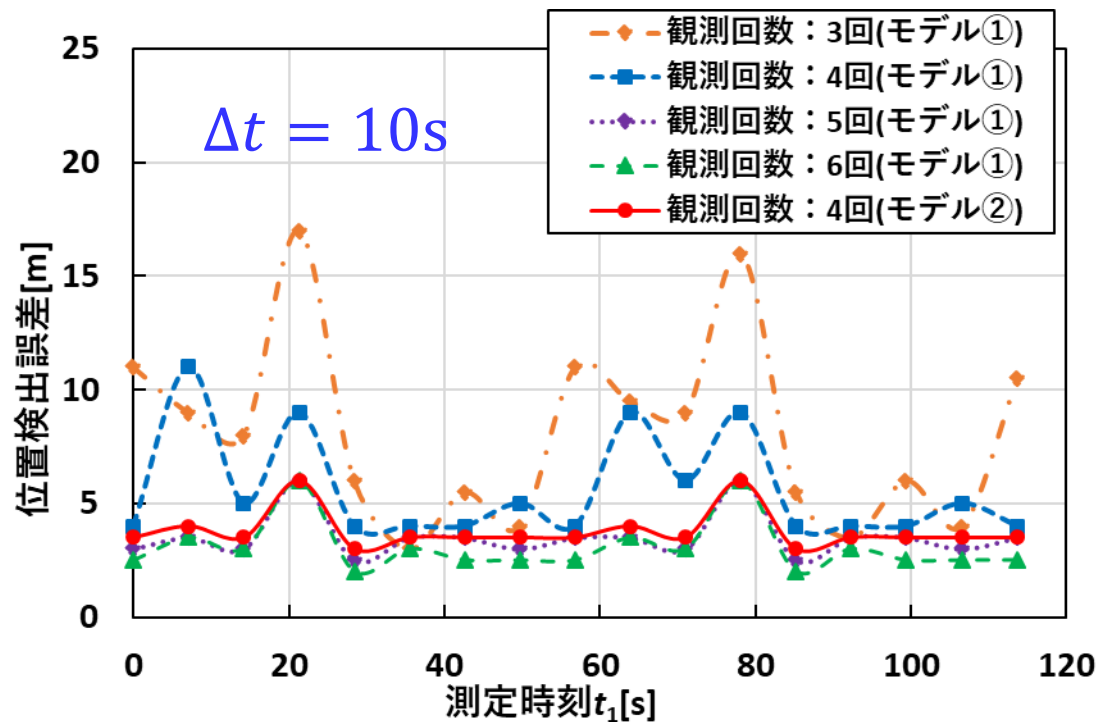
- 累積確率90%値における観測回数増加に伴う平均位置検出誤差の改善量
  - 3回観測(@ $\Delta t = 9s$ ): 2回観測から比較して7.35mと約12mの改善
  - 4回観測(@ $\Delta t = 12s$ ): 3回観測から比較して5.54mと1.79mの改善
  - 5回観測(@ $\Delta t = 11s$ ): 4回観測から比較して3.54mと2.00mの改善
  - 6回観測(@ $\Delta t = 10s$ ): 5回観測から比較して3.11mと0.43mの改善
- ⇒観測回数増加に応じて平均位置検出誤差の改善量は低減
- 2機のUAVの飛行モデルの場合, ドップラーシフトの観測回数を6回以上に増やすことによる改善効果は相対的に縮小

# 累積確率50%値における位置検出誤差の時間変化特性



- 観測時間間隔は何れの観測回数でもほぼ最良値であった $\Delta t = 10s$ を選定
- モデル②に示す初期配置3/8周分差との特性比較
- 観測回数の増加により位置検出誤差が減少
- 3回観測と比較して、位置検出誤差の改善量は1~3mと少量
- モデル②の4回観測の場合、モデル①の5回・6回観測と同等の改善量

# 累積確率90%値における位置検出誤差の時間変化特性



- 累積確率50%値と同様に観測回数に応じて位置検出精度が改善
- 5回測定, 6回測定では改善量が小さく, 観測回数を増やす効果は減少
- モデル②の4回観測の場合、モデル①の5回・6回観測と同等の改善量  
 ⇒2機のUAVが42.6sに相当する距離だけ離れていることから、  
 $\Delta t = 10s$ の場合にすべてのUAVがほぼ均等な配置関係となることに起因

# 各観測回数における位置検出誤差 (累積確率50%/90%値, $\Delta t = 10s$ )

初期配置		モデル①						モデル②
観測回数		1回	2回	3回	4回	5回	6回	4回
平均誤差 [m]	50%値	129.7	4.2	2.0	1.8	1.3	1.1	1.2
	90%値	548.7	19.4	8.1	5.6	3.5	3.1	3.8

- モデル①：UAV2の初期配置が1/4周分の場合
  - ✓ 2回観測：位置検出精度が顕著に改善
  - ✓ 3回観測～5回観測：改善するが改善量は徐々に減少
  - ✓ 5回⇒6回観測では、改善量が極めて少ない  
⇒更なる観測回数の増加による改善効果の獲得は困難
- モデル②：UAV2の初期配置が3/8周分の場合
  - ✓ 4回観測において、平均誤差は3.8mを達成しており、モデル①の5回観測とほぼ同等の測位精度を達成  
⇒UAVの初期配置の変更により測位精度が改善

# まとめと今後の課題

## ➤ 本研究

- 2機のUAVが8の字飛行するモデルにおける位置検出精度の改善を目的とし、ドップラーシフトの観測回数を2回以上に拡張
- 観測時間間隔 $\Delta t$ を変化させ、累積分布特性に基づく特性比較
- 2機のUAVの初期配置を変化させた場合の改善効果についての評価を実施

## ➤ 結果

- 2回観測で顕著に改善し、3回観測～5回観測では改善量は徐々に減少
- 5回⇒6回観測では改善量はほぼ得られない
- 4回観測において初期配置を変化させた場合、5回観測と同等の改善効果が得られることを確認

⇒実用的には2回観測で十分であり、さらに高精度の位置検出精度が必要な場合でも3～4回の観測回数で十分

## ➤ 今後の課題

- 高さ方向の位置検出誤差を考慮した三次元測位手法での測位精度の解析
- ユーザが時間経過とともに移動する場合の影響やその対策に対する検討

ご清聴ありがとうございました

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。