

# 周波数オフセット補償機能を有する無人 航空機を用いた位置検出手法の特性評価

---

ワイヤレス通信研究室

2020410 山中英

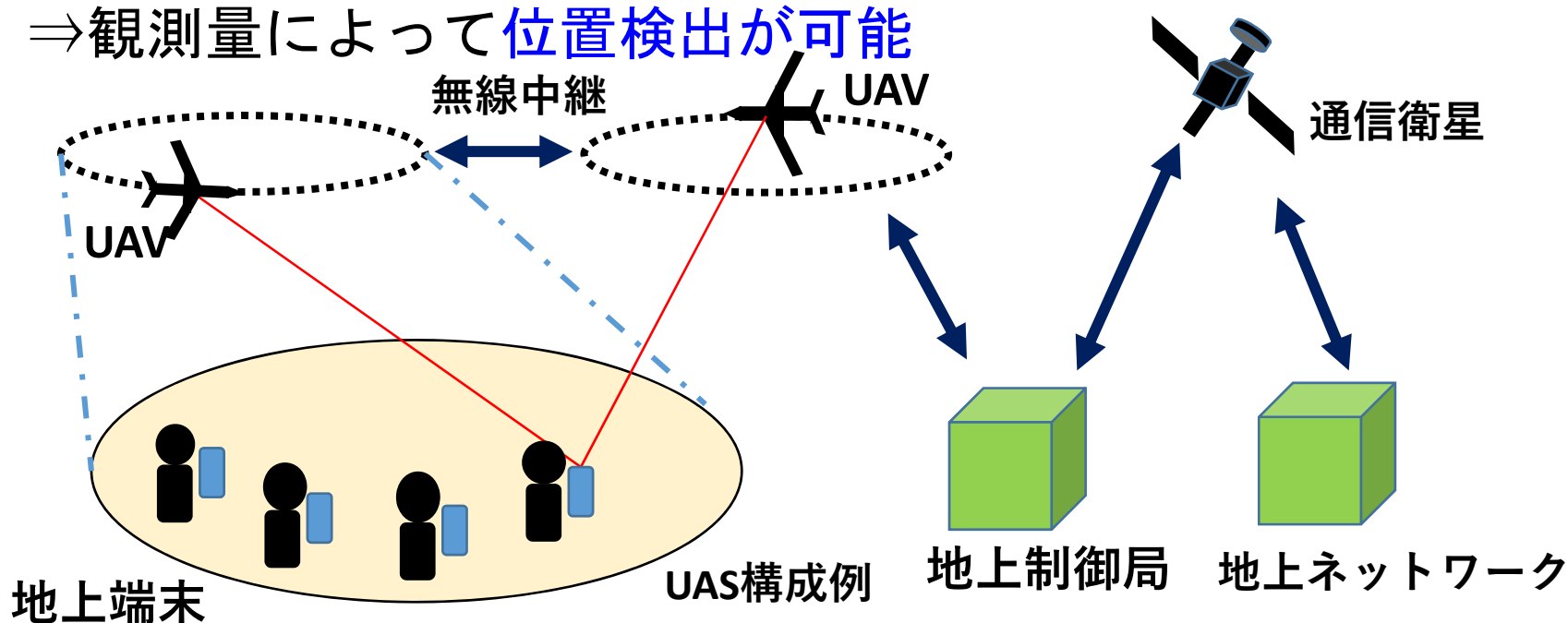


主指導教員 石川博康 教授  
副指導教員 道山哲幸 専任講師

# 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  
⇒ 観測量によって位置検出が可能



# 研究目的

## ➤ 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
- 様々な飛行モデルにおける特性評価・最適な飛行モデルの検討



- **周波数オフセット**を考慮していない理想的なシミュレーションモデル

# 研究目的

## ➤ 中間発表・学術研究報告会

- 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及び検証
- ドップラーシフトを2回測定した場合の特性評価  
⇒位置検出誤差のみ定量的に特性評価

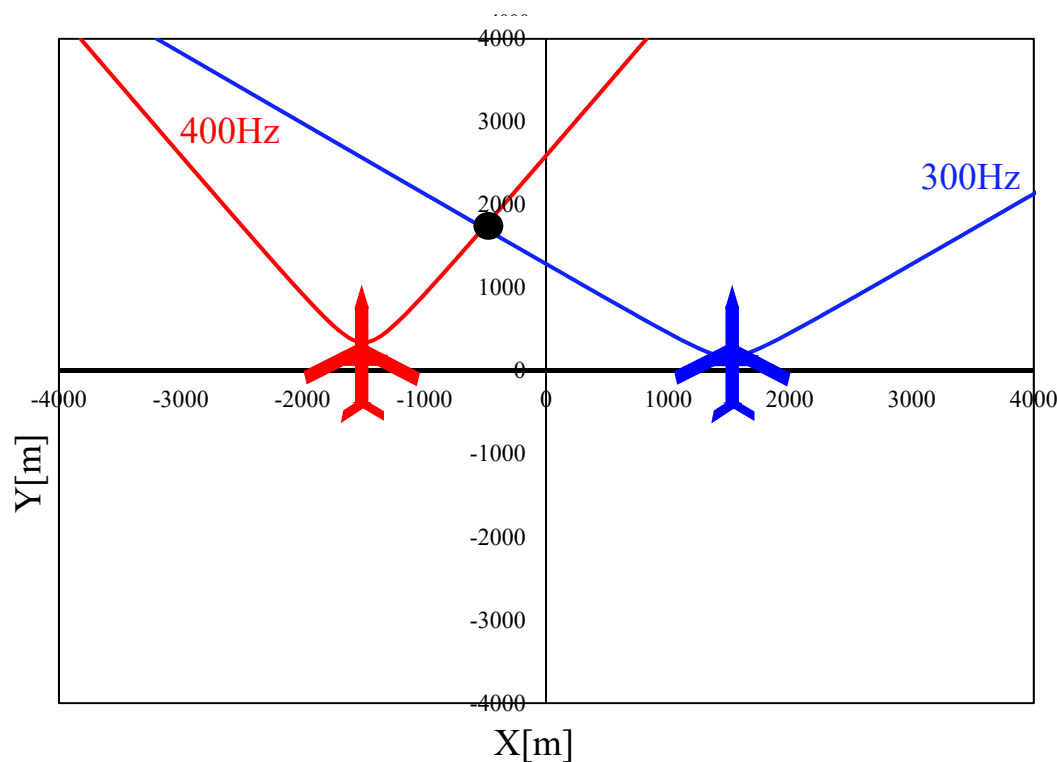
## ➤ 本研究

- 3機のUAVがドップラーシフトを2回測定した場合の位置検出システム
  - 周波数オフセット推定精度を定量的に評価・比較
- ↓
- 2回測定における最短の測定時間間隔の検討

# 測位原理

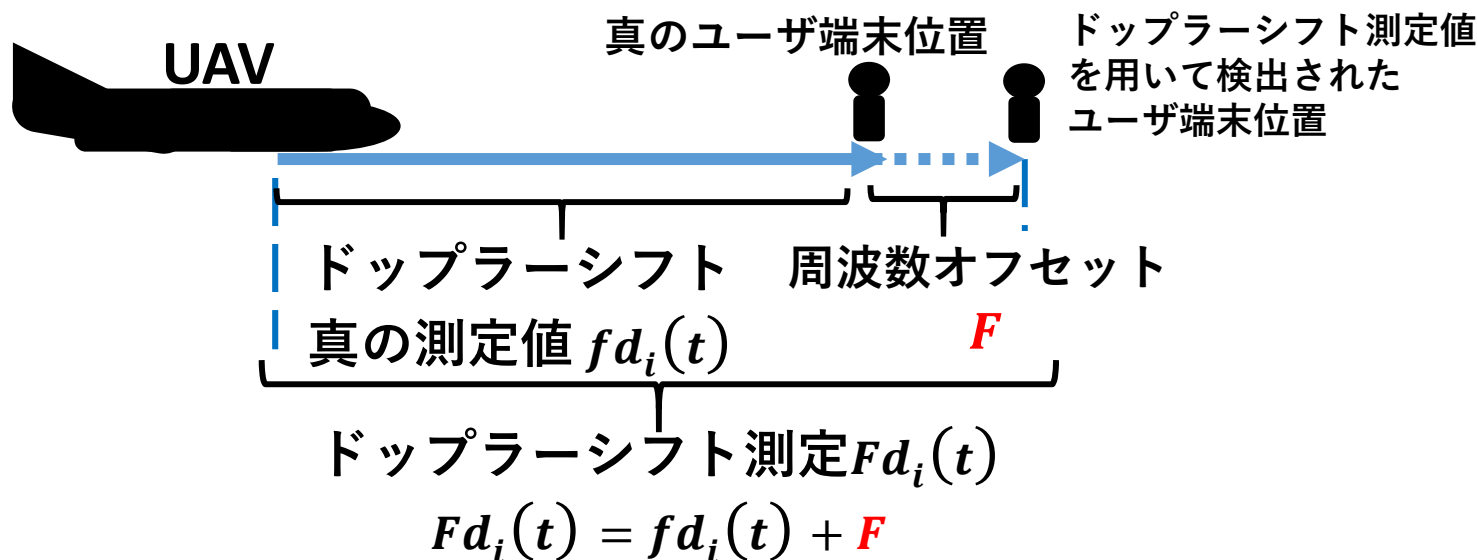
# ドップラーシフト分布

- 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、又は1機のUAVで複数回観測し、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





# 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

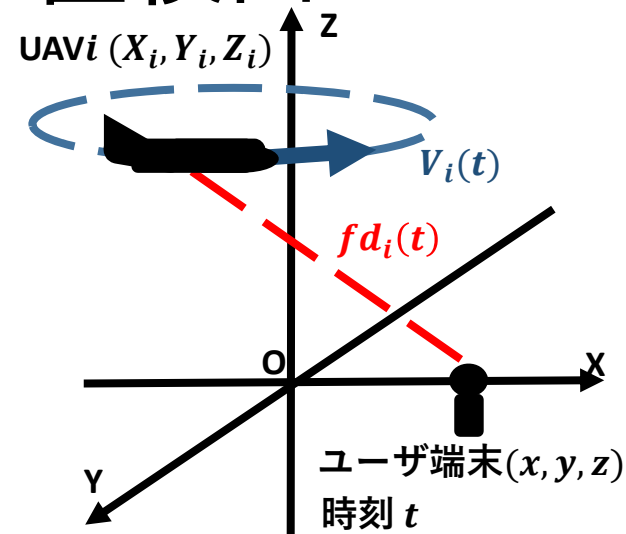
$$fd_i^0(t) = -\frac{V_{xi}(t)(X_i(t) - x^0) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y^0) + V_{zi}(t)(Z_i - z)}{\lambda\sqrt{(X_i(t) - x^0)^2 + (Y_i(t) - y^0)^2 + (Z_i - z)^2}} + F^0 \quad \dots (2)$$

- 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

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



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

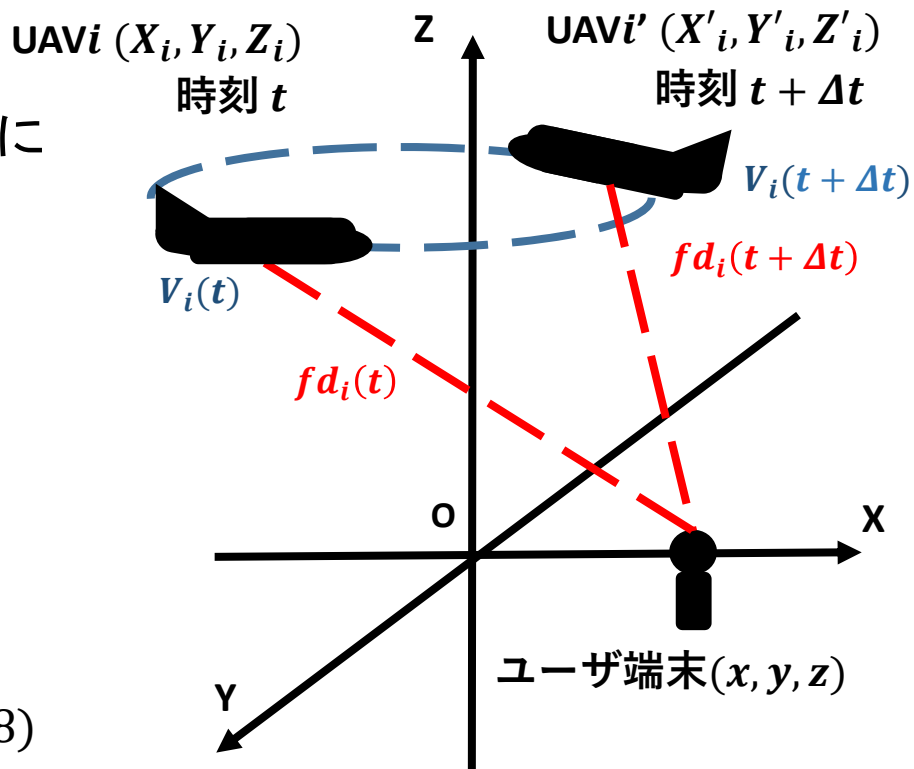
$$U = [\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta F]^T \quad \dots (6)$$

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

# 最小二乗法を用いた位置検出 (2回測定)

前述した最小二乗法における計算処理に  
2回目の測定  $t' = (t + \Delta t)$  を追加  
⇒ 2回測定に応じた  $6 \times 3$  行列に拡張

$$G' = \begin{bmatrix} \frac{\partial fd_1(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_2(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_3(t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_3(t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_1(t + \Delta t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_1(t + \Delta t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_2(t + \Delta t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_2(t + \Delta t)}{\partial y} & 1 \\ \frac{\partial fd_3(t + \Delta t)}{\partial x} & \frac{\partial fd_3(t + \Delta t)}{\partial y} & 1 \end{bmatrix} \dots (8)$$

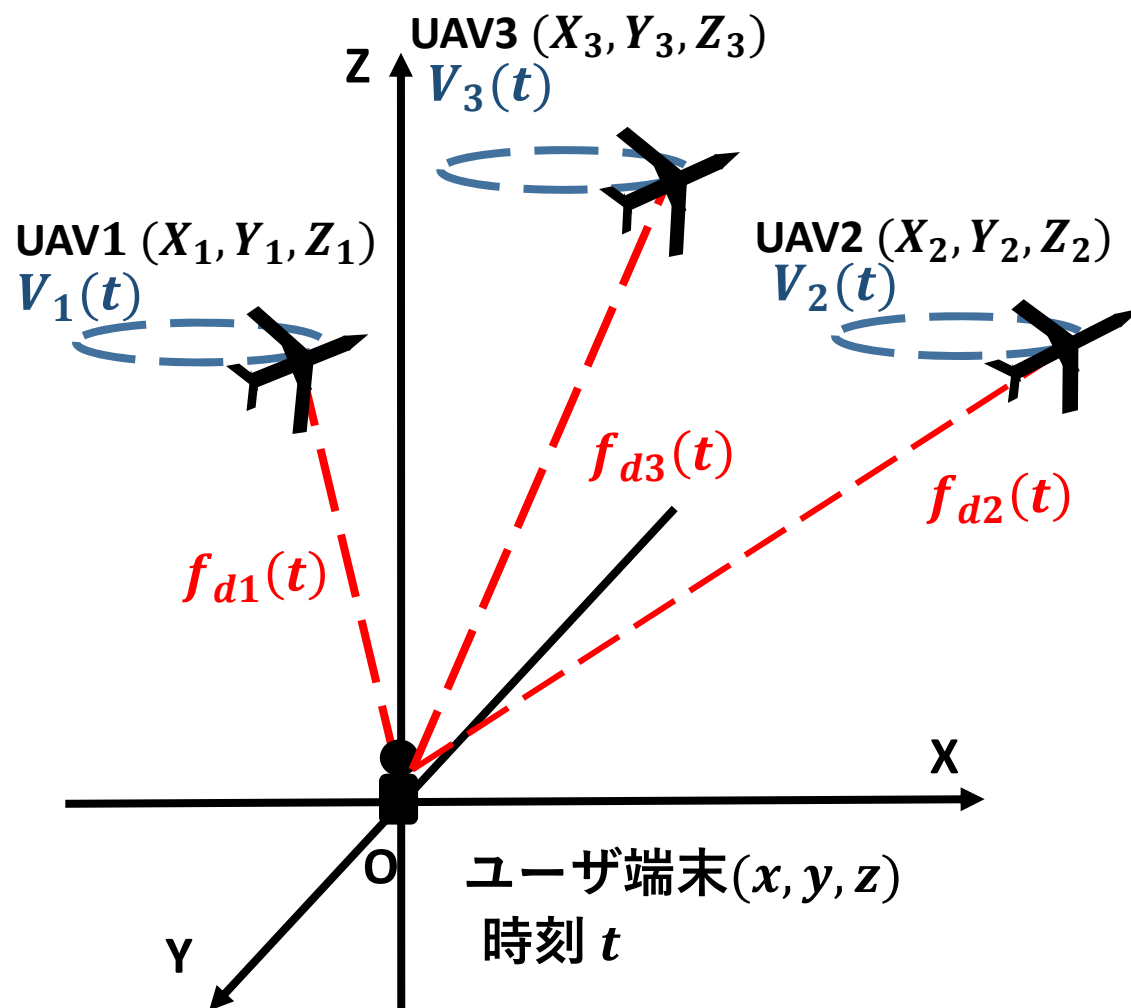


推定するパラメータより方程式が多いため  
(9)により解を求める

$$U = (G'^T G')^{-1} G'^T R^T \dots (9)$$

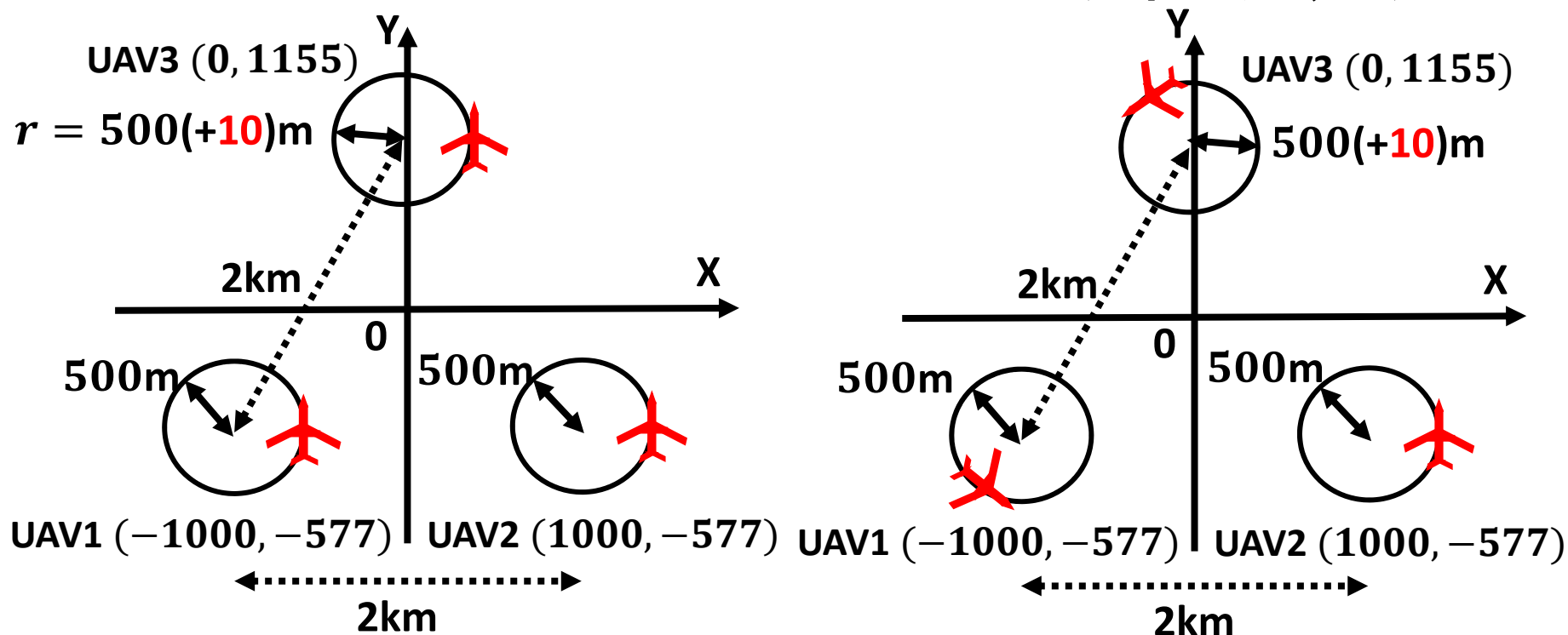
# シミュレーションモデル

# シミュレーションモデル（概略図）



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
評価対象地点	641,601点
周波数オフセット	1kHz

# シミュレーションモデル (1回測定)

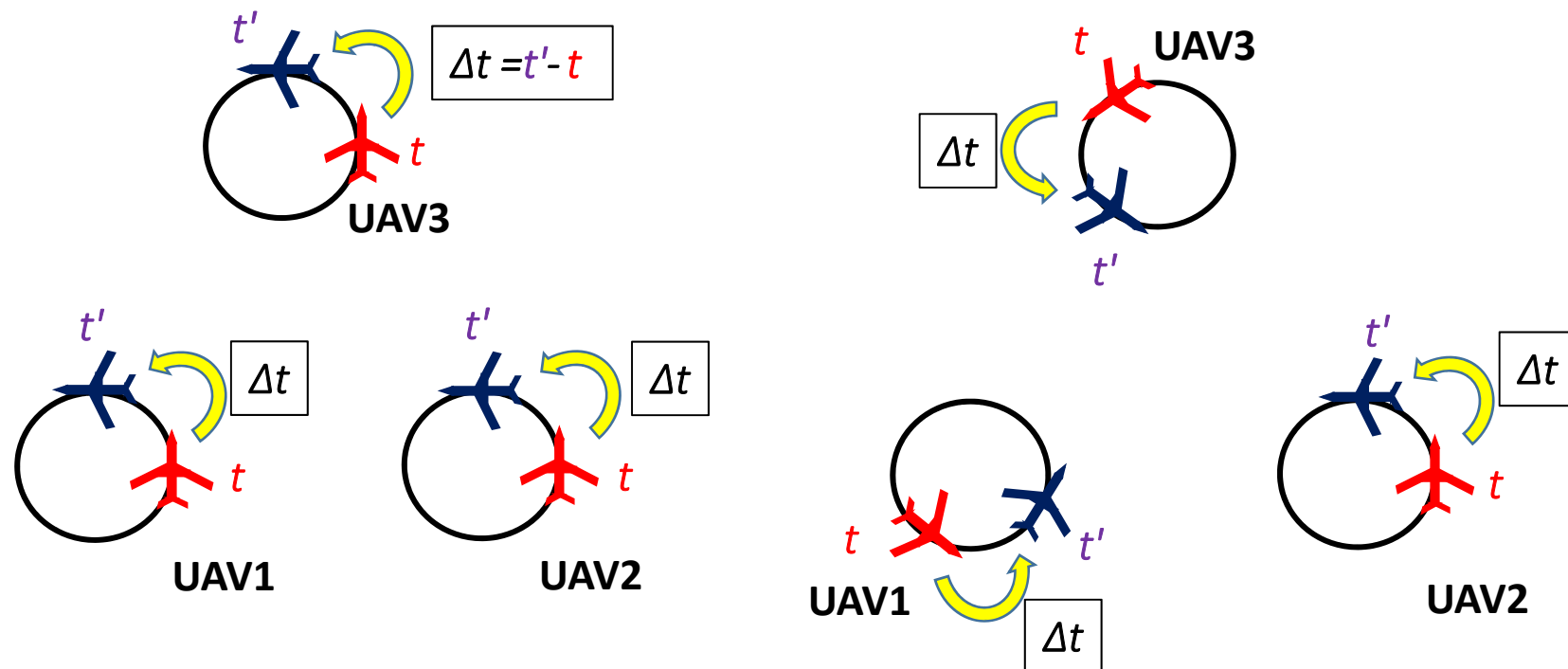


・ 各UAVの初期位相  $\Delta\theta = 0^\circ$

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

- ・ UAV3のみに( $r_e=$ )10mの誤差を人工的に付与
- ・ 各モデルを時刻  $t=0\sim 110s$ まで10秒毎のシミュレーション

# シミュレーションモデル（2回測定）



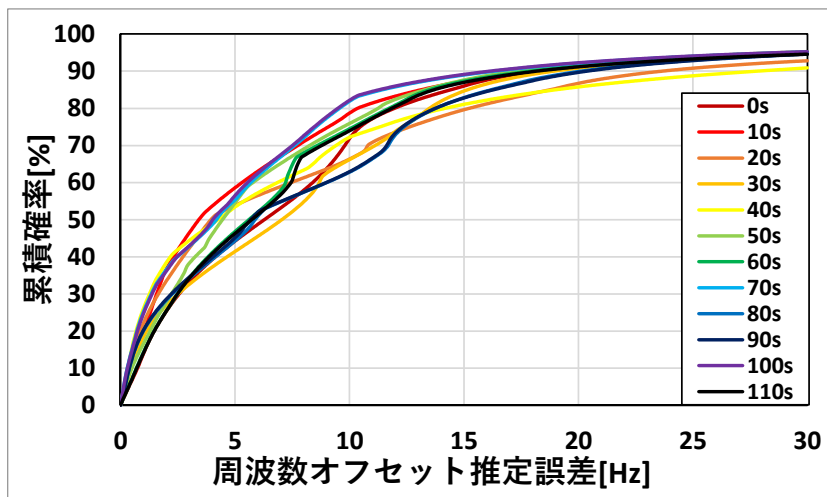
・ 各UAVの初期位相  $\Delta\theta = 0^\circ$

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

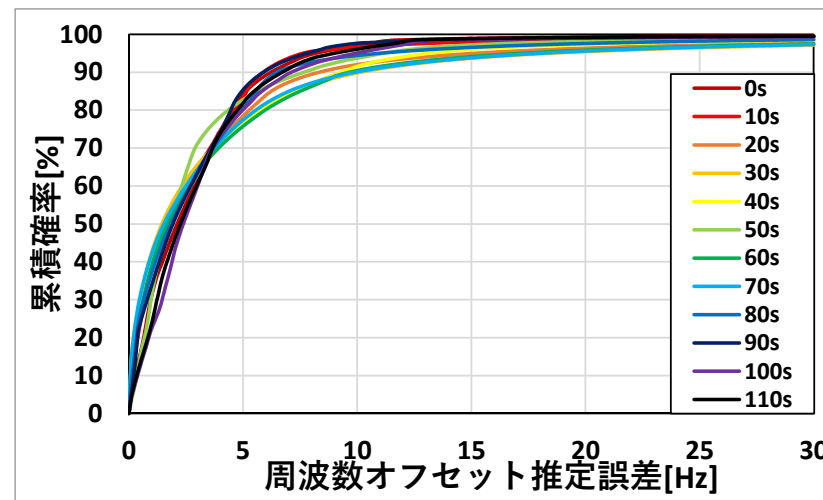
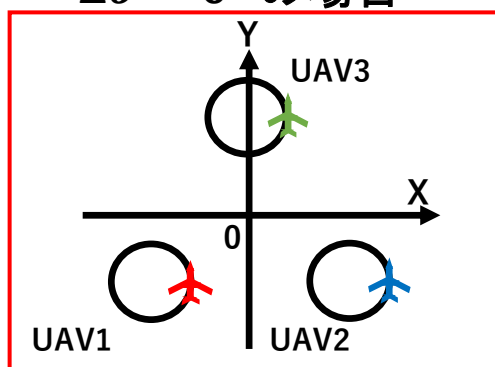
- ・ UAV3のみに( $r_e =$ )10mの誤差を付与
- ・ 時刻  $t = 0s$  で固定、測定時間間隔  $\Delta t = 7.1 \sim 113.6s$  を7.1秒間隔でシミュレーション

# シミュレーション結果

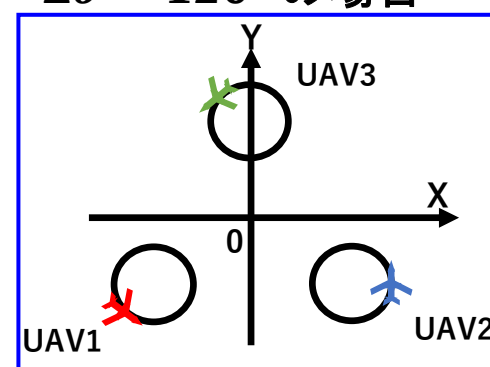
# 周波数オフセット推定誤差累積分布特性 (1回測定)



$\Delta\theta = 0^\circ$  の場合



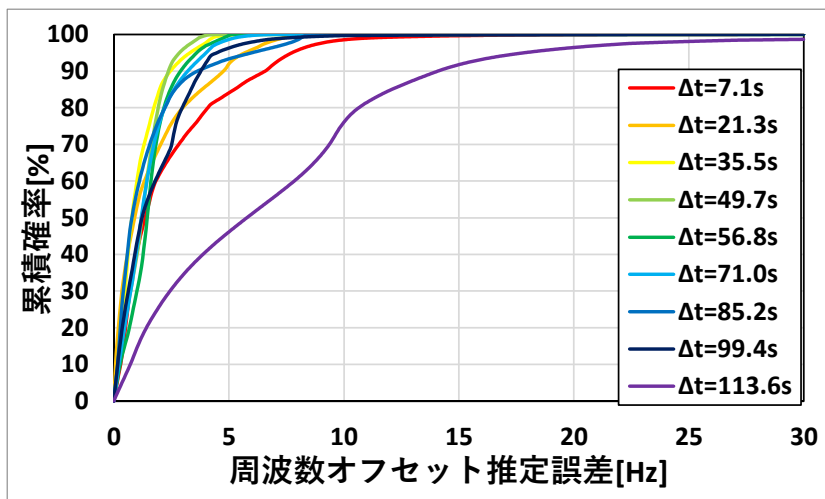
$\Delta\theta = 120^\circ$  の場合



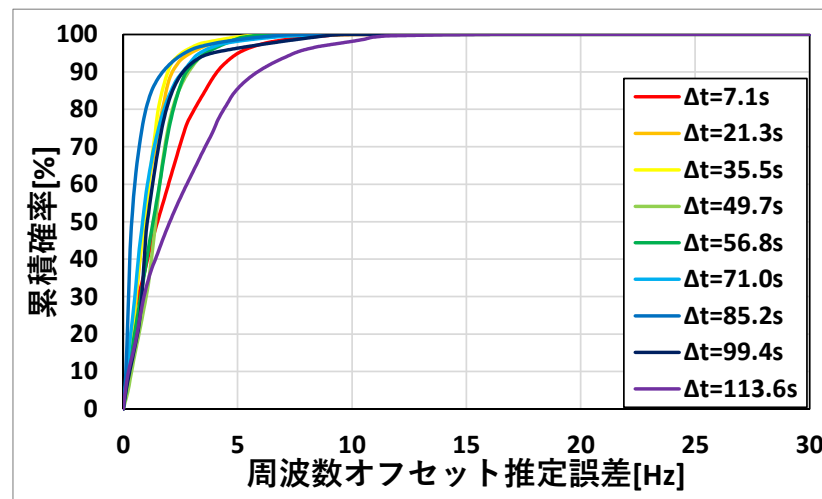
- $\Delta\theta = 0^\circ$  の場合は時刻に応じて精度の変動が激しい
- $\Delta\theta = 120^\circ$  の場合の方が全体的に精度が**良好**



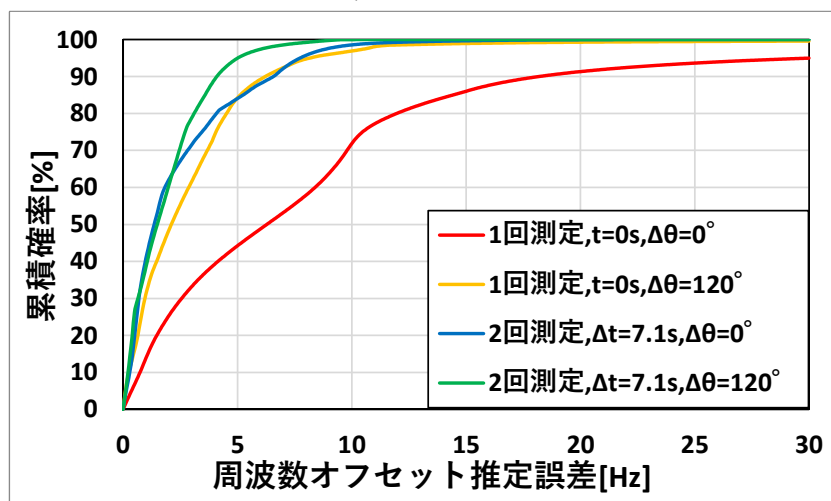
# 周波数オフセット推定誤差累積分布特性 (2回測定)



$\Delta\theta = 0^\circ (t = 0s)$  の場合



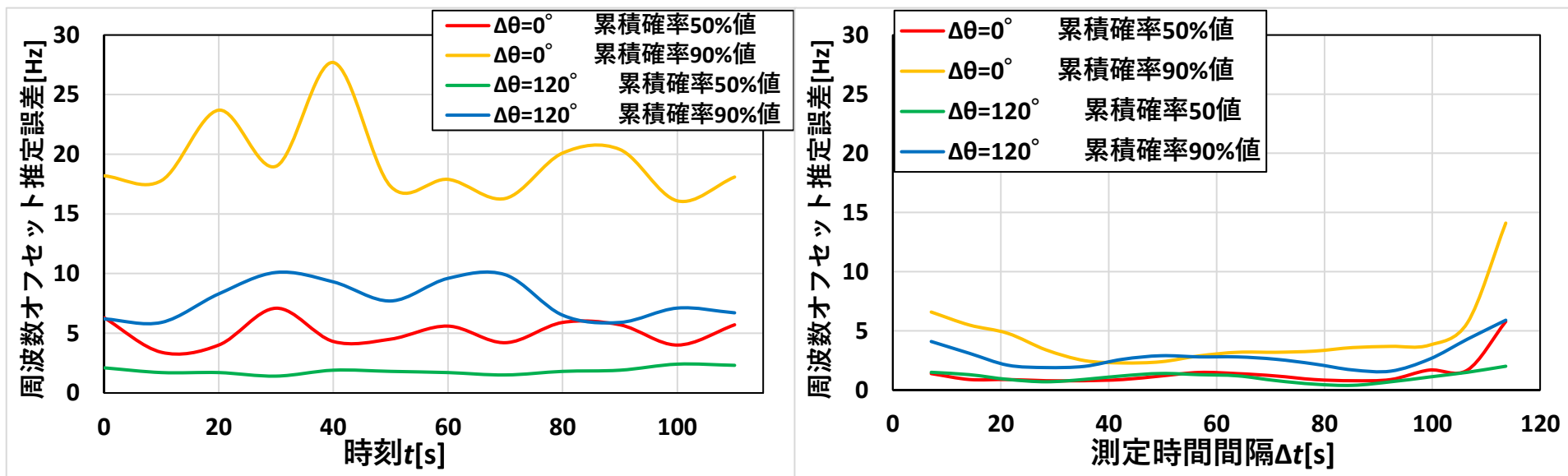
$\Delta\theta = 120^\circ (t = 0s)$  の場合



特性比較 (一例)

- 両初期配置とも2回測定の精度が**良好**
- 2回測定⇒ $\Delta\theta = 120^\circ$ の方が**良好な精度**

# 周波数オフセット推定誤差の時間変化特性比較



1回測定の場合

2回測定の場合

- 2回測定⇒測定時間間隔に依らず**全体的に10Hz以下の誤差を確認**
- 2回測定 $\Delta t = 113.6\text{s}$ において**精度の劣化**  
⇒UAVの測定位置が重なる瞬間

ドップラーシフトの測定回数を2回に拡張



位置検出精度・周波数オフセット推定精度の**改善**

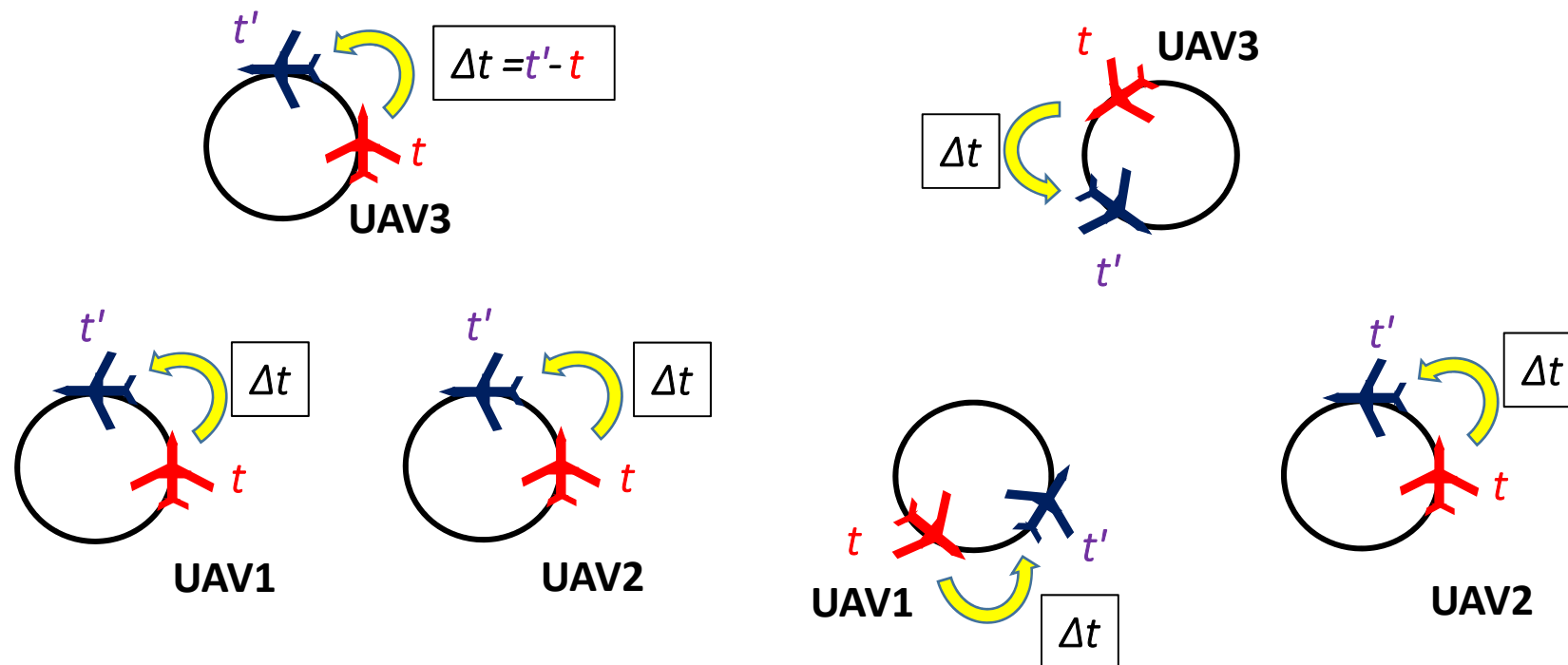


被災者の早期発見（**検出時間**）も考慮する必要



検出時間を考慮した場合の最短の測定時間間隔  
 **$\Delta t_{min}$ の検討**

# シミュレーションモデル（2回測定）

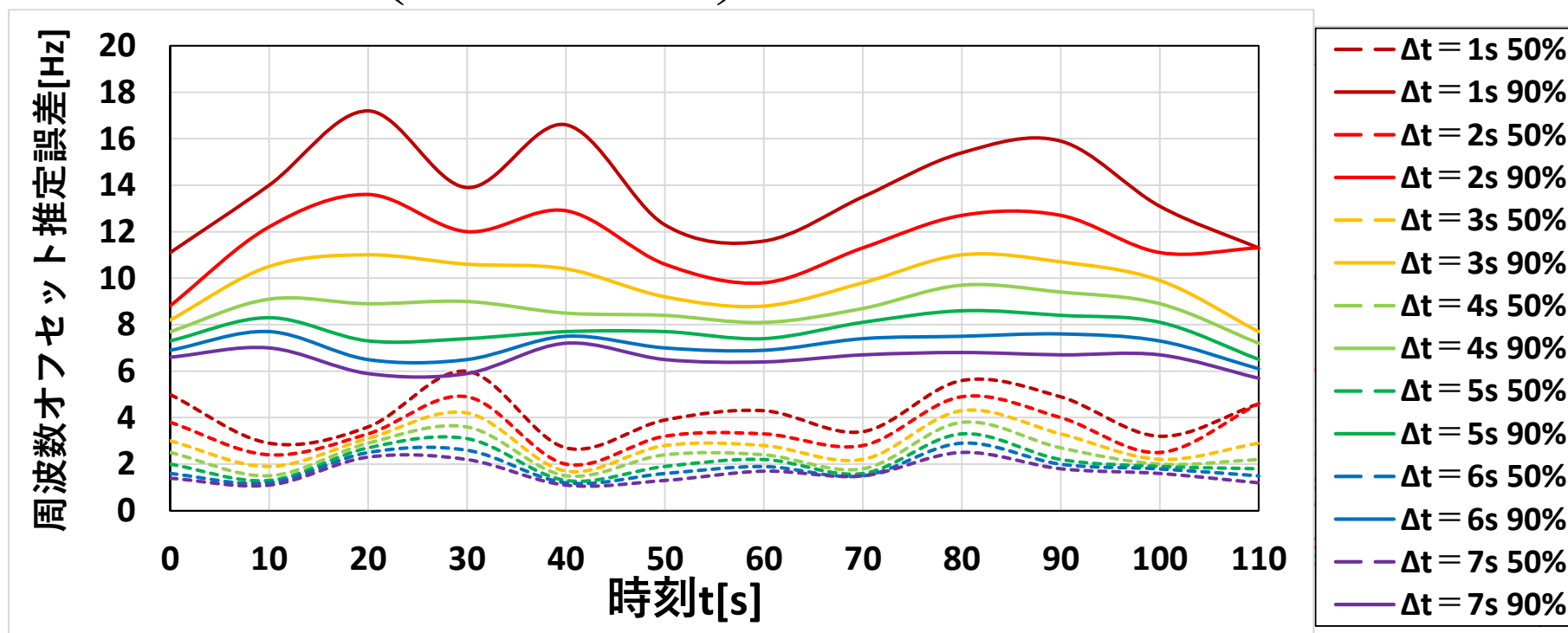


・ 各UAVの初期位相  $\Delta\theta = 0^\circ$

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

- ・ 測定時間間隔の分解能を1秒単位における2回測定
- ・ 両モデルとも時間間隔 $\Delta t = 1 \sim 7s$ まで1秒ずつ変化
- ・ 両モデルとも測定時刻  $t$  を0~110秒まで10秒毎にシミュレーションを実施

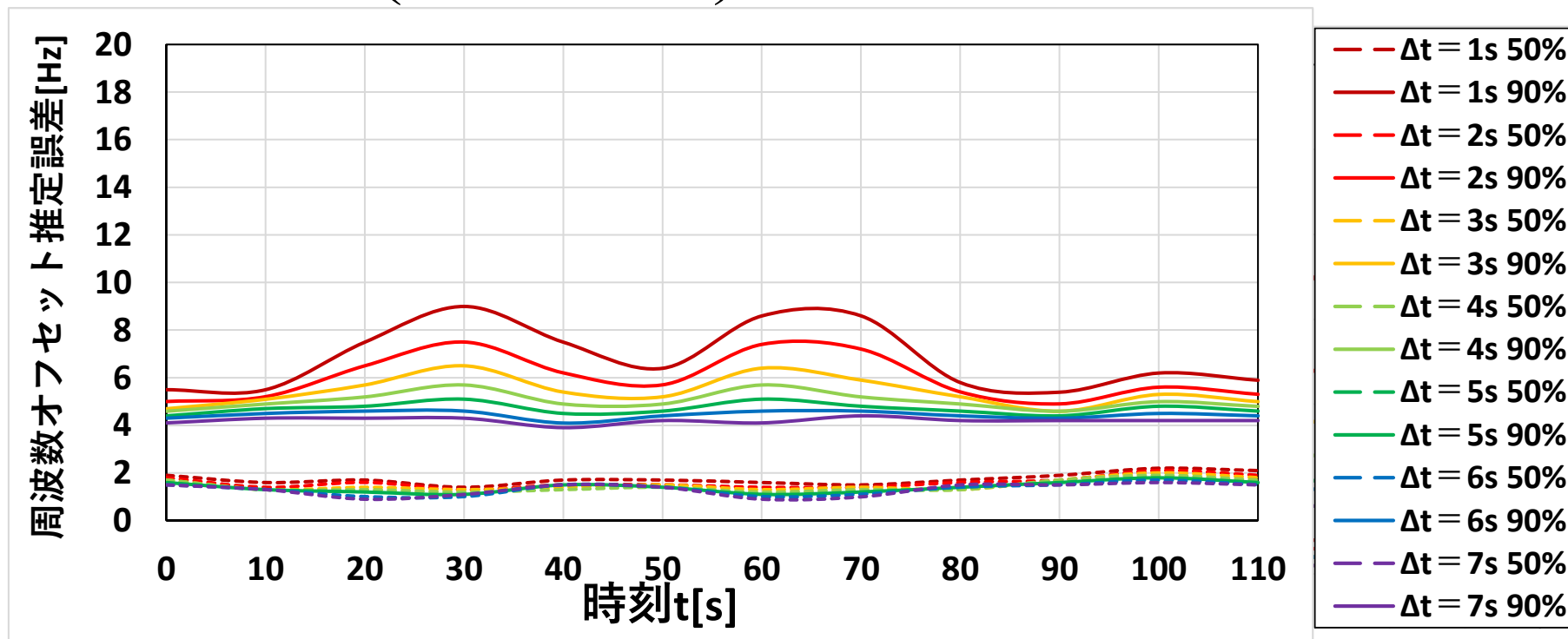
## 2回測定( $\Delta t = 1 \sim 7s$ )における時間特性①



$\Delta\theta = 0^\circ$ の場合

- $\Delta t$ の値が大きいくほど精度が良好になる傾向
- $\Delta t = 4s$ 以降  $\Rightarrow$  90%値で誤差が**10Hz以内**
- $\Delta t = 6, 7s$ 間  $\Rightarrow$  50%, 90%値で各々改善量が1Hz以下  
 $\Rightarrow$  累積確率50%, 90%値ともに **$\Delta t = 6s$** で十分な測位精度

## 2回測定( $\Delta t = 1 \sim 7s$ )における時間特性②



$\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

- $\Delta\theta = 0^\circ$ と比較して全体的に精度が良好
- 累積確率50%値  $\Rightarrow$  改善量が**1Hz以下**
- $\Delta t = 6s$ 以降  $\Rightarrow$  累積確率90%値で誤差**5Hz以内**
- 累積確率50%, 90%値ともに **$\Delta t = 6s$** で十分な測位精度

# 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
- 測定時間間隔 $\Delta t$ を用いた2回測定
  - 周波数オフセット推定精度を定量的に評価・比較
  - 十分な精度が得られる測定時間間隔 $\Delta t$ の検討
- 2回測定に拡張することで測定時間間隔に依らず安定した測位精度の改善が確認
- 十分な測位精度を得られる最短の測定時間間隔  
⇒  $\Delta\theta = 120^\circ$ かつ $\Delta t_{min} = 6s$ の場合



## 今後の課題

- **飛行半径**以外の飛行位置誤差を考慮した場合の特性評価
- **ユーザ端末毎**の周波数オフセットにおける同時推定、補償する手法の検討
- **移動体**における周波数オフセット補償を含んだ位置検出手法の検討

# 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。

ご清聴ありがとうございました。

# 発表リスト

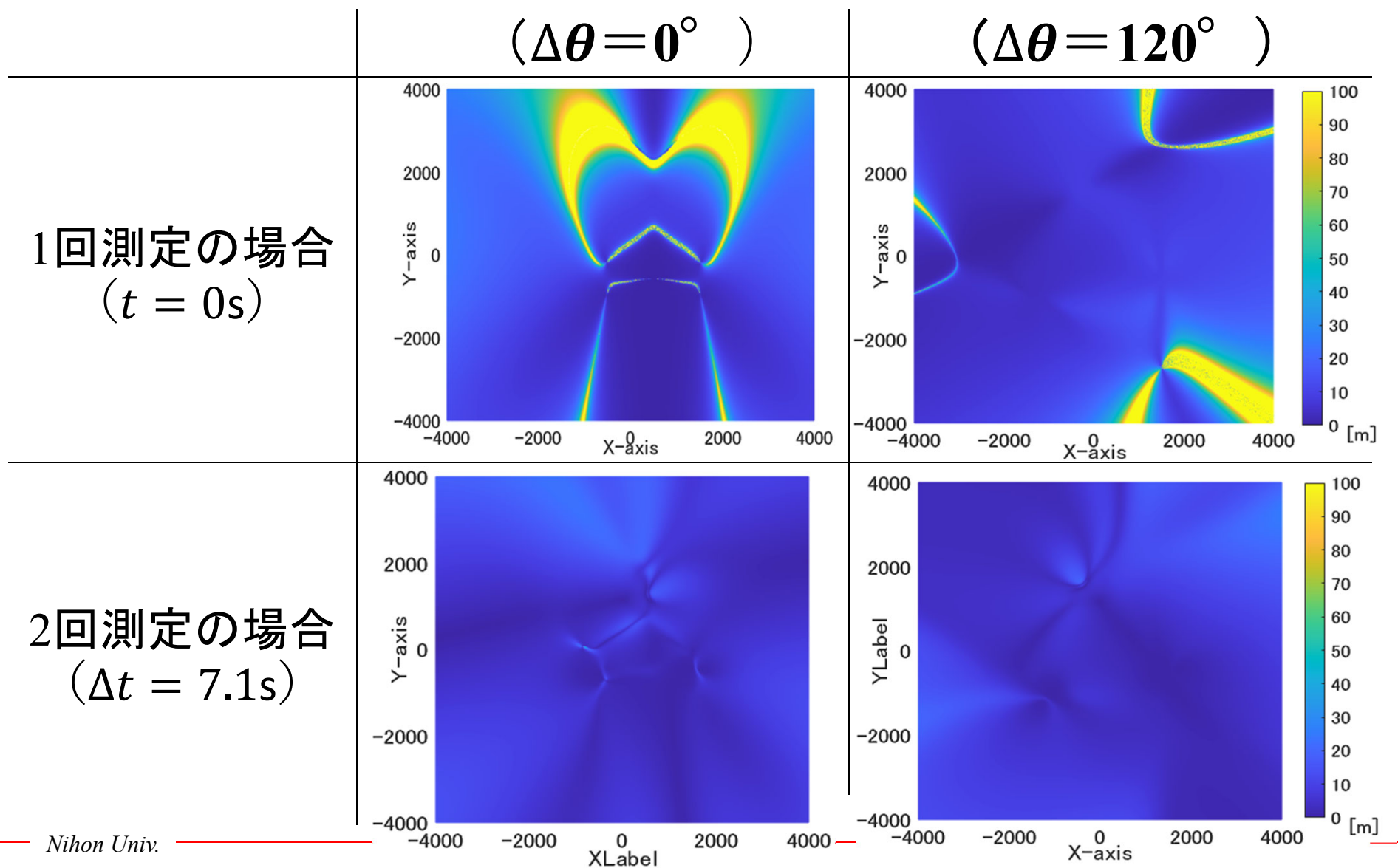
## ◆学内発表

- ① 山中, 石川, “無人航空機を用いたユーザ位置検出手法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”, 第63回日本大学工学部学術研究報告会
- ② 山中, 石川, “無人航空機を用いたユーザ位置検出手法における周波数オフセット補償手法の改善効果”, 第64回日本大学工学部学術研究報告会

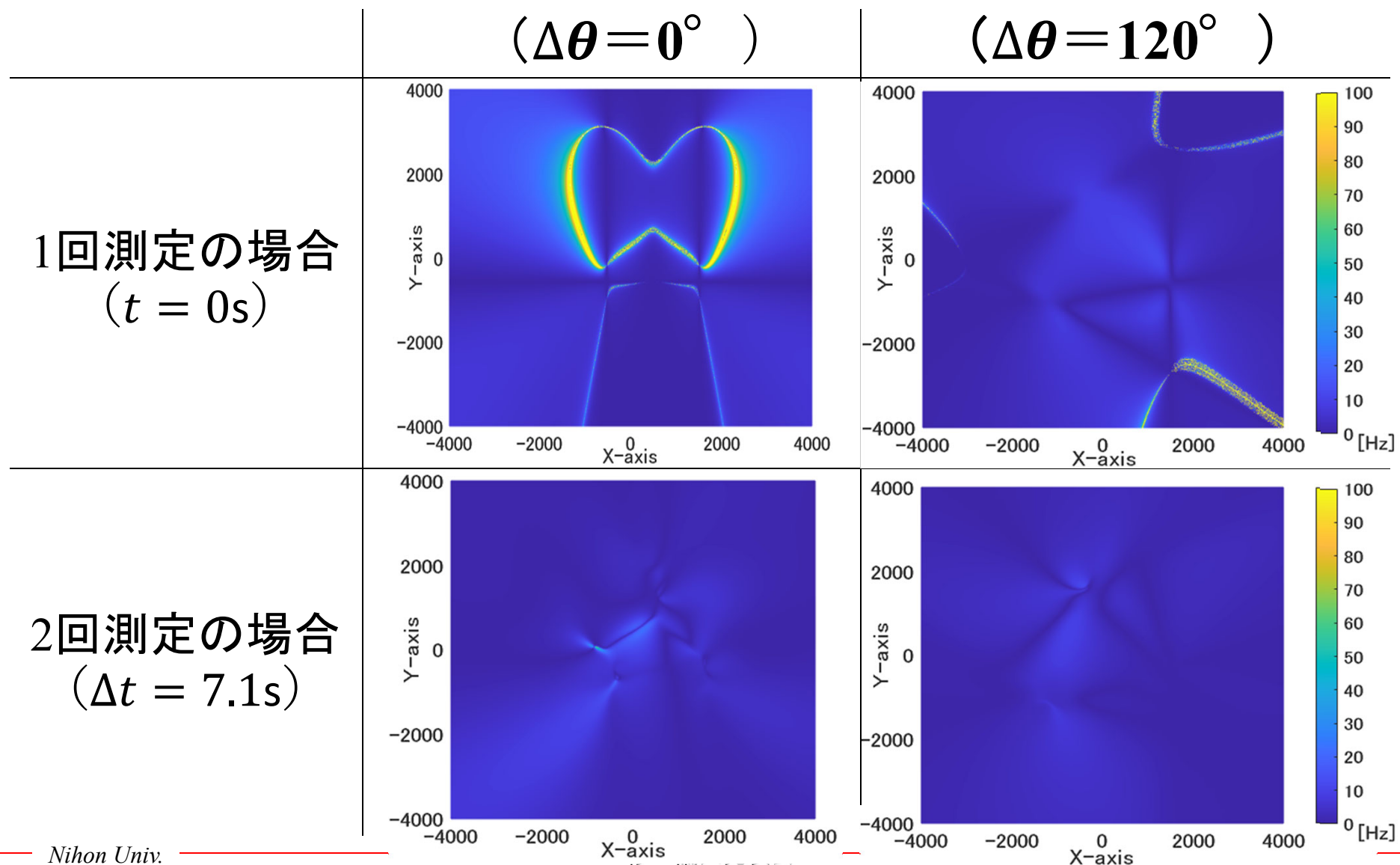
## ◆学外発表

- ① 山中, 石川, “ストリートセル型十字路モデルにおける直交偏波MIMOシステムの特性評価”, 電気関係学会東北支部連合大会, 2020-08
- ② 山中, 石川, “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”, 信学総大, 2021-03
- ③ 山中, 石川, “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応時の特性評価”, 信学技報, 2021-08
- ④ 山中, 石川, “周波数オフセット補償機能を有する無人航空機を用いたユーザ位置検出システムにおける測位精度の改善効果”, 信学ソ大, 2021-09
- ⑤ 山中, 石川, “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シフト多重観測を行う周波数オフセット補償手法の特性評価測位精度の改善効果”, 信学技報, 2022-02 (予定)

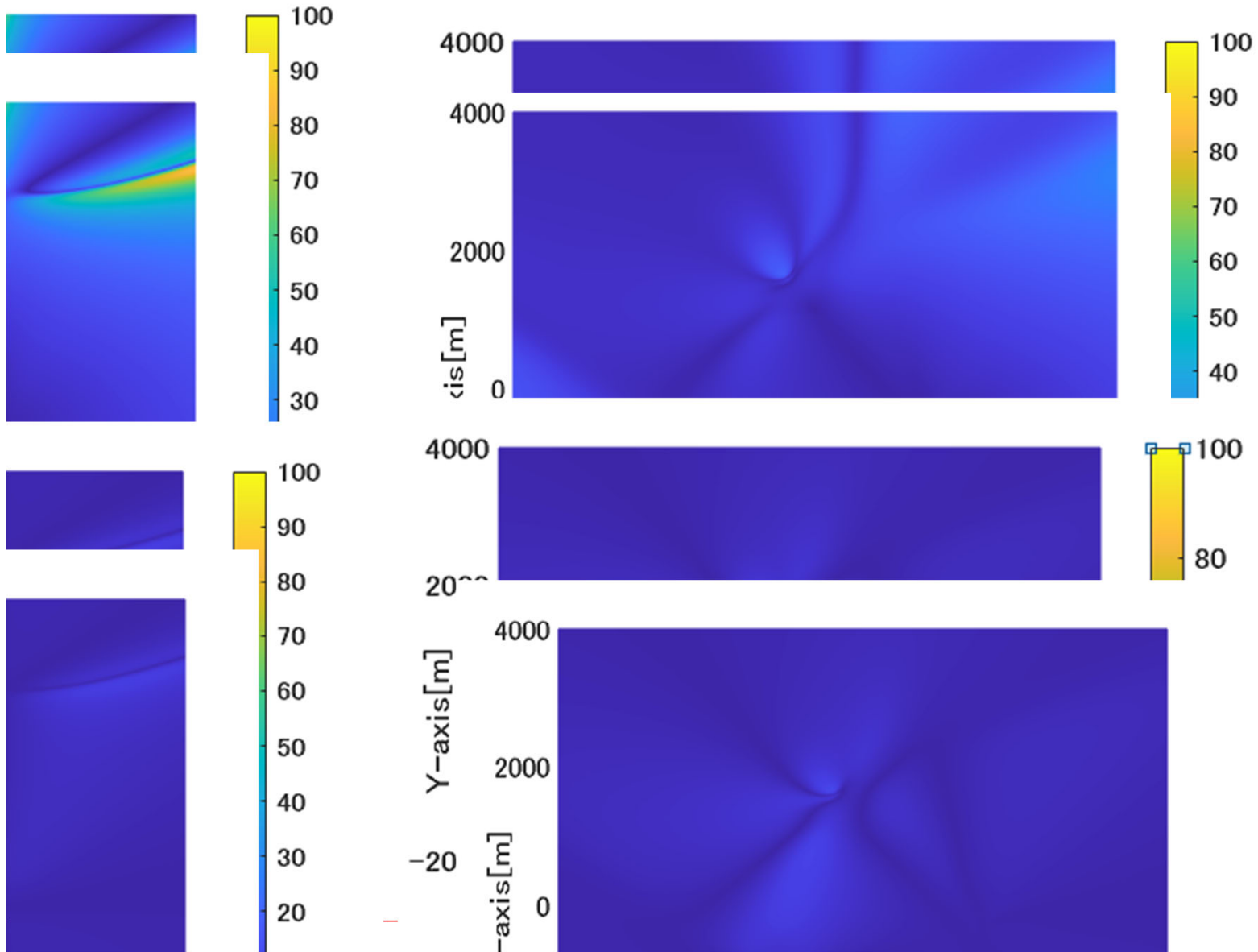
# 位置検出誤差面の分布特性比較



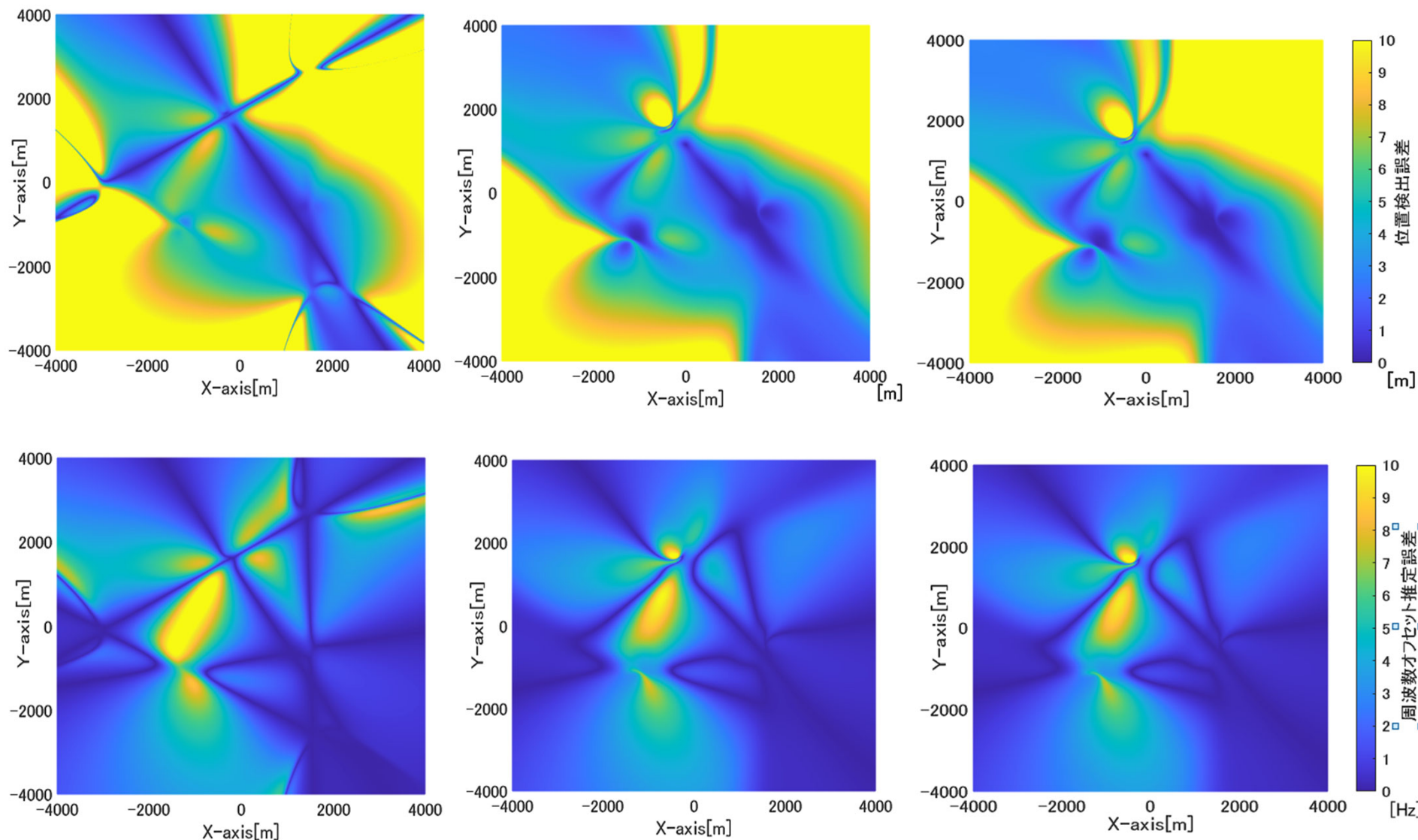
# 周波数オフセット推定誤差面的分布比較



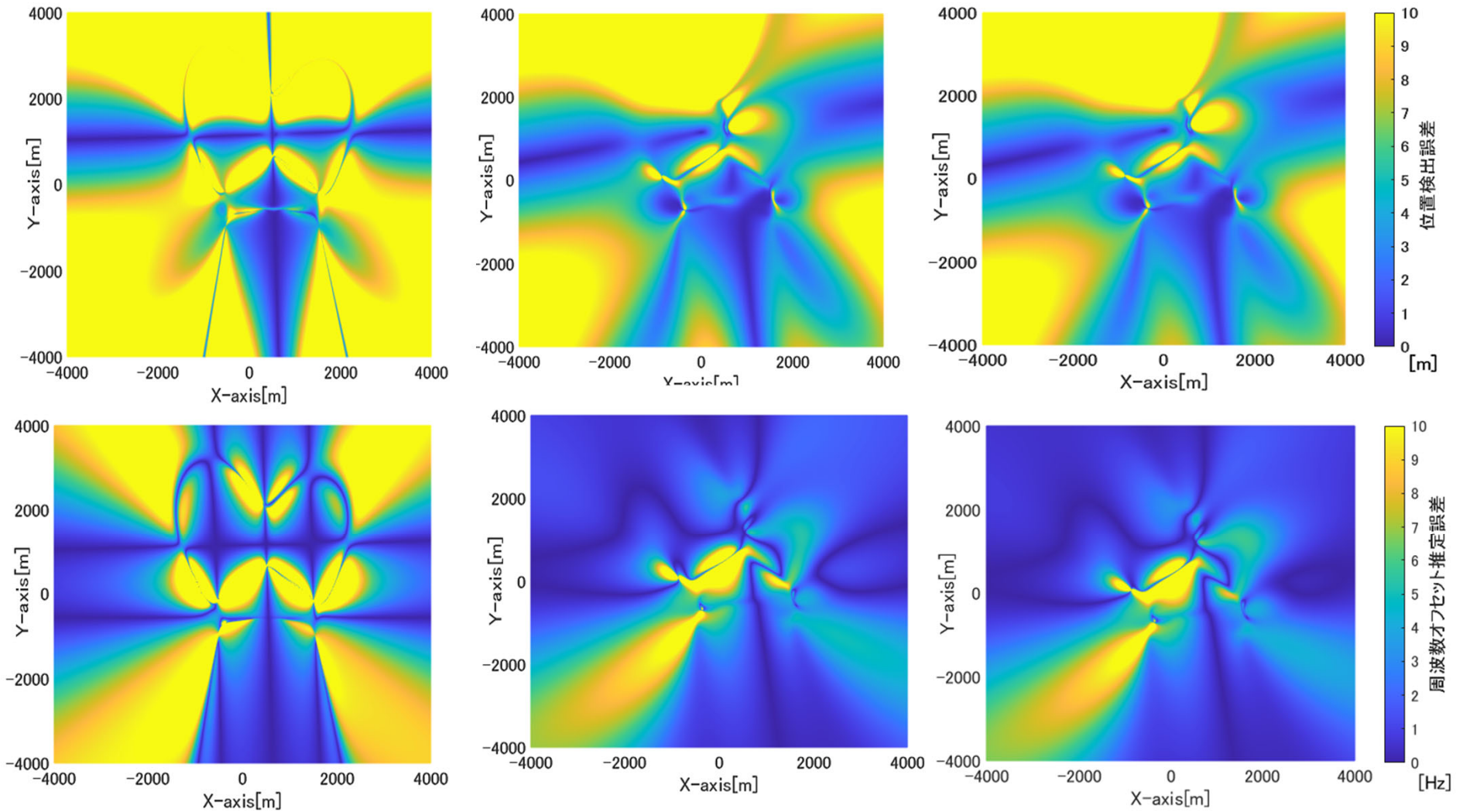
# 120°



# 120°



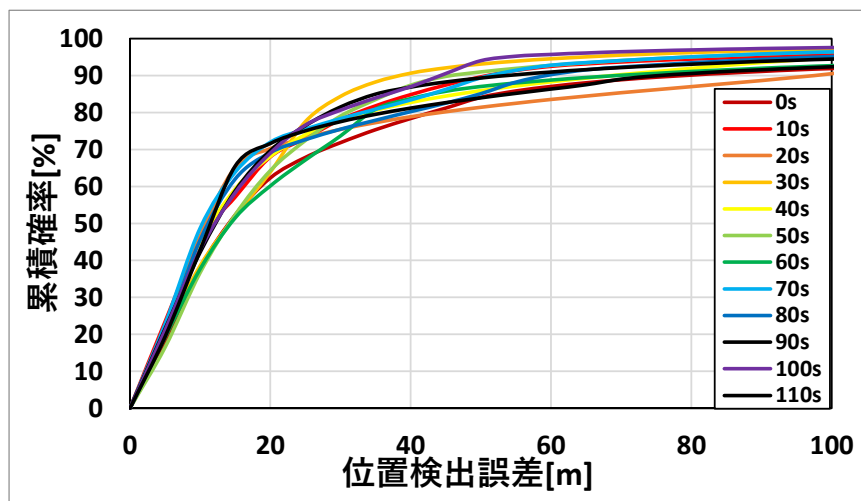
0°



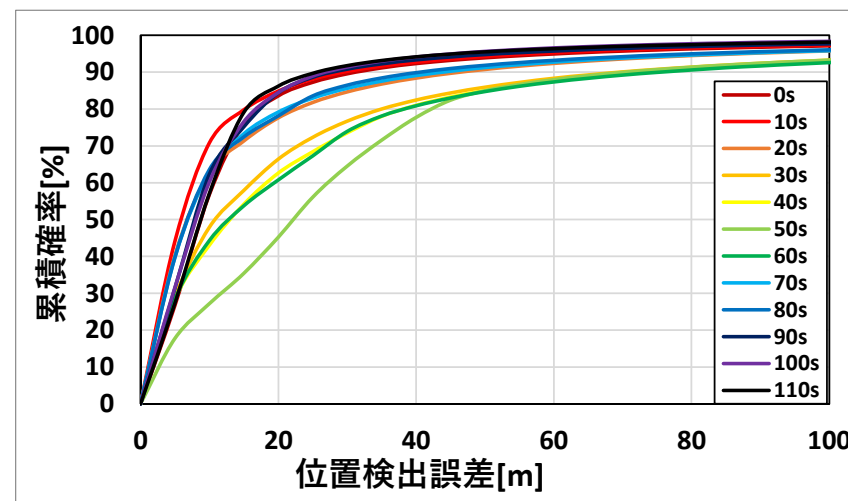


0°

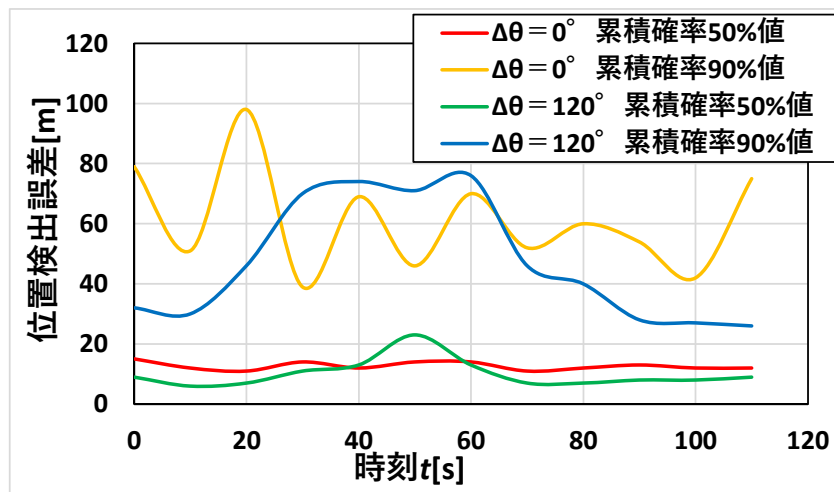
# 補足 位置検出誤差特性（1回測定）



$\Delta\theta = 0^\circ$  の場合



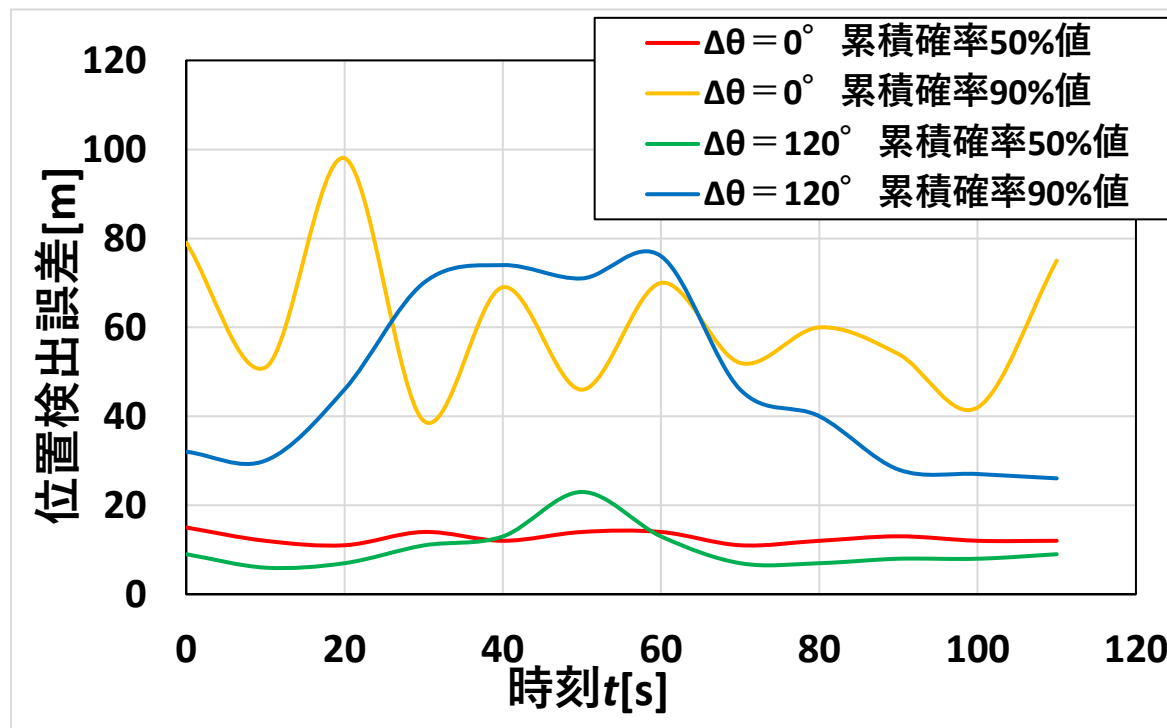
$\Delta\theta = 120^\circ$  の場合



位置検出誤差時間変化特性

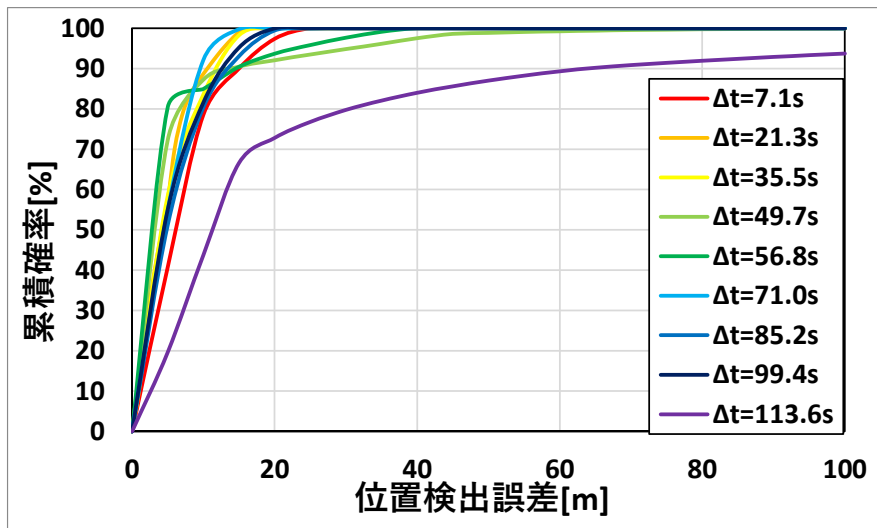
- $\Delta\theta = 120^\circ$  の場合の方が全体的に精度が**良好**
- 特定の時刻で特性が類似

## 補足 位置検出誤差時間変化特性

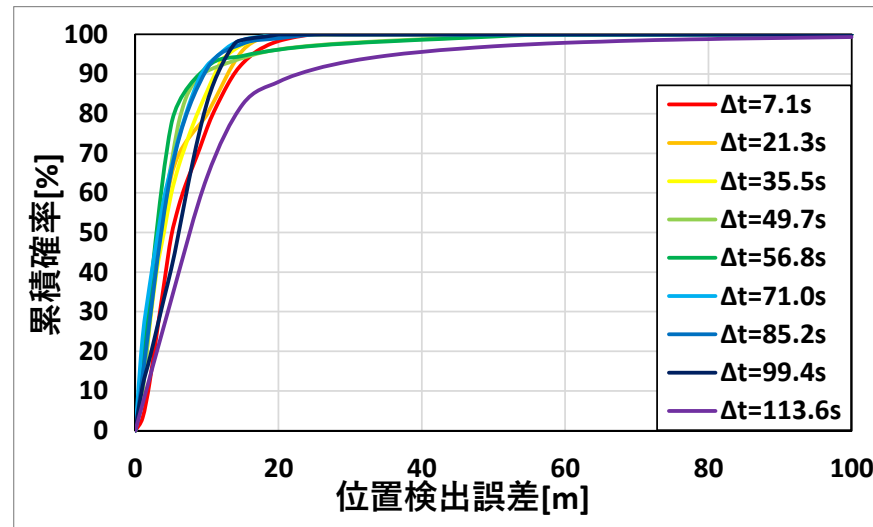


- 位置検出誤差と同様測定時刻に応じて精度が変動
- $\Delta\theta = 120^\circ$ の方が良好な精度 (90%値でほぼ10Hz以下)

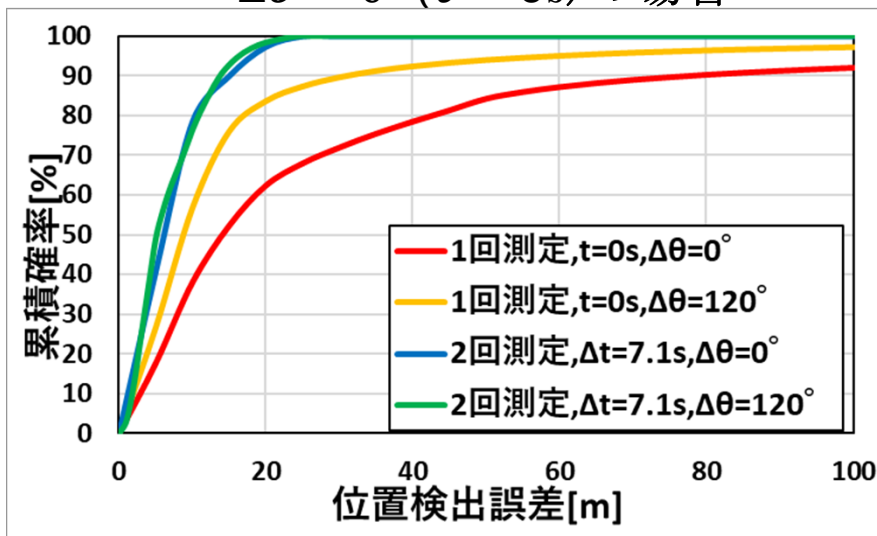
# 補足 位置検出誤差累積分布特性 (2回測定)



$\Delta\theta = 0^\circ (t = 0s)$  の場合



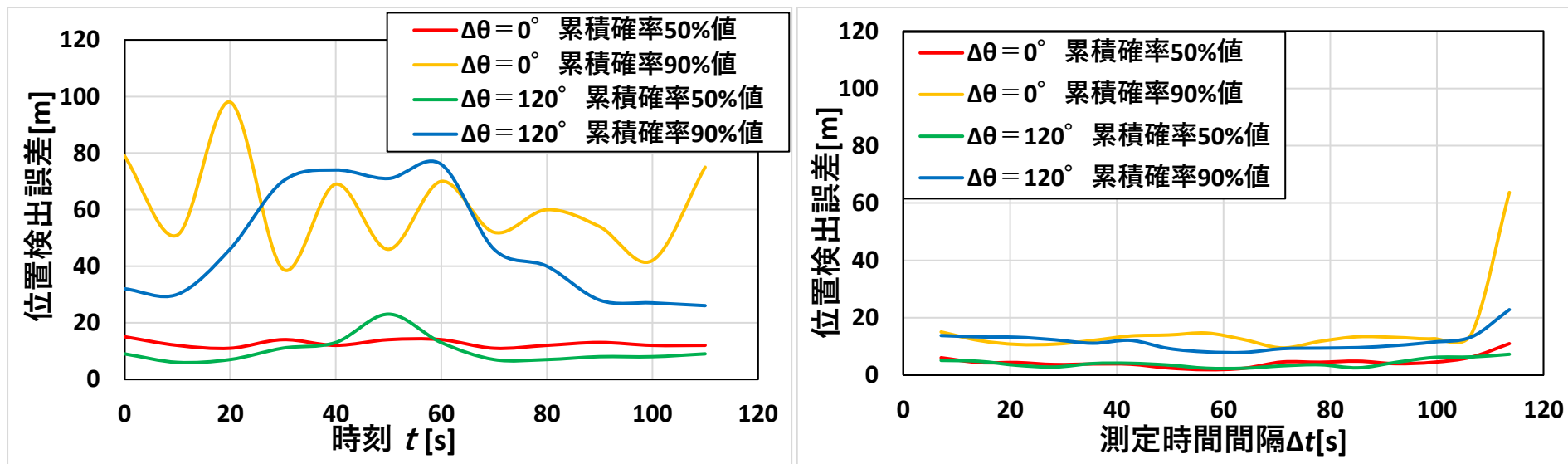
$\Delta\theta = 120^\circ (t = 0s)$  の場合



特性比較 (一例)

- 両初期配置とも2回測定の精度が**良好**
- 1回測定 ⇒  $\Delta\theta = 120^\circ$ の方が精度が**良好**
- 2回測定 ⇒ 両モデルともほぼ同等の精度  
⇒ 初期配置による影響は小さい

## 補足 位置検出誤差の時間変化特性比較

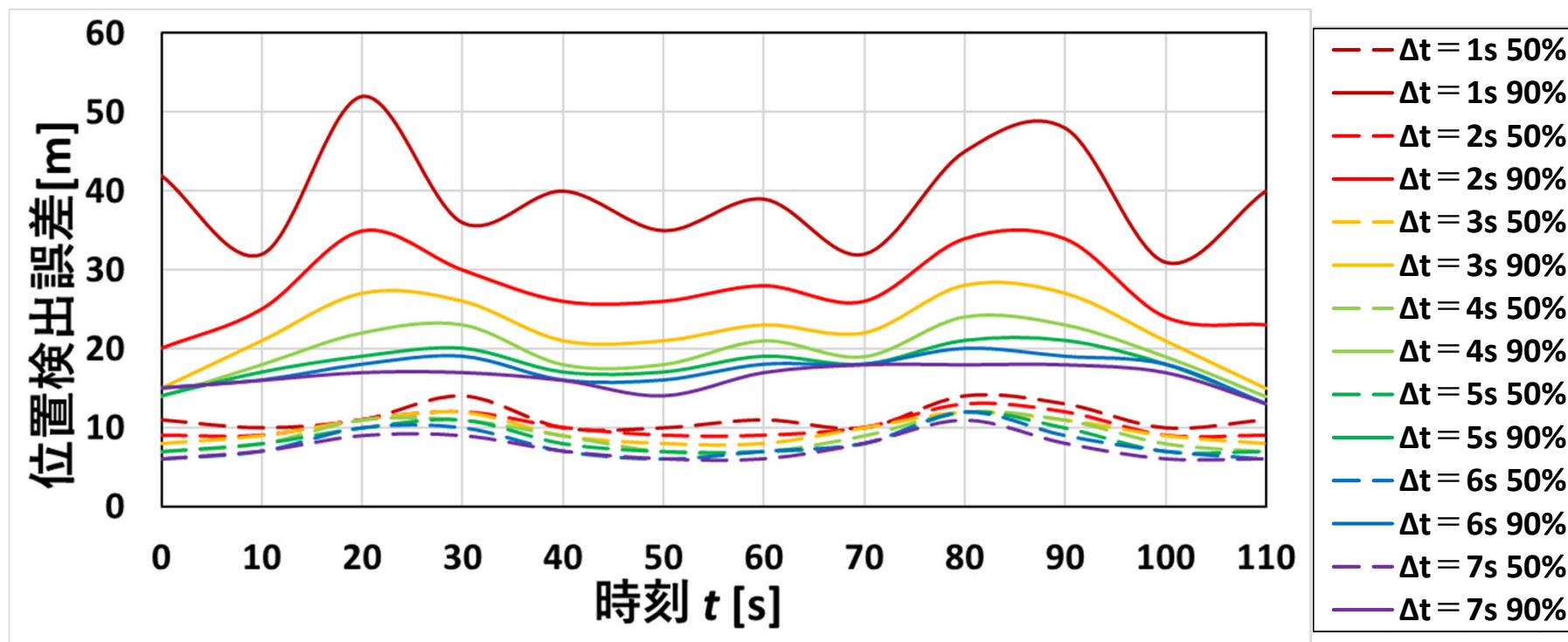


1回測定の場合

2回測定の場合

- 累積確率50%値、90%値ともに全体的に精度の改善を確認
- 2回測定 $\Rightarrow$ 時刻に依らず**全体的に20m以下**の誤差を確認
- 2回測定 $\Delta t = 113.6$ sにおいて**極端な精度の劣化**  
 $\Rightarrow$  UAVの測定位置が重なる瞬間

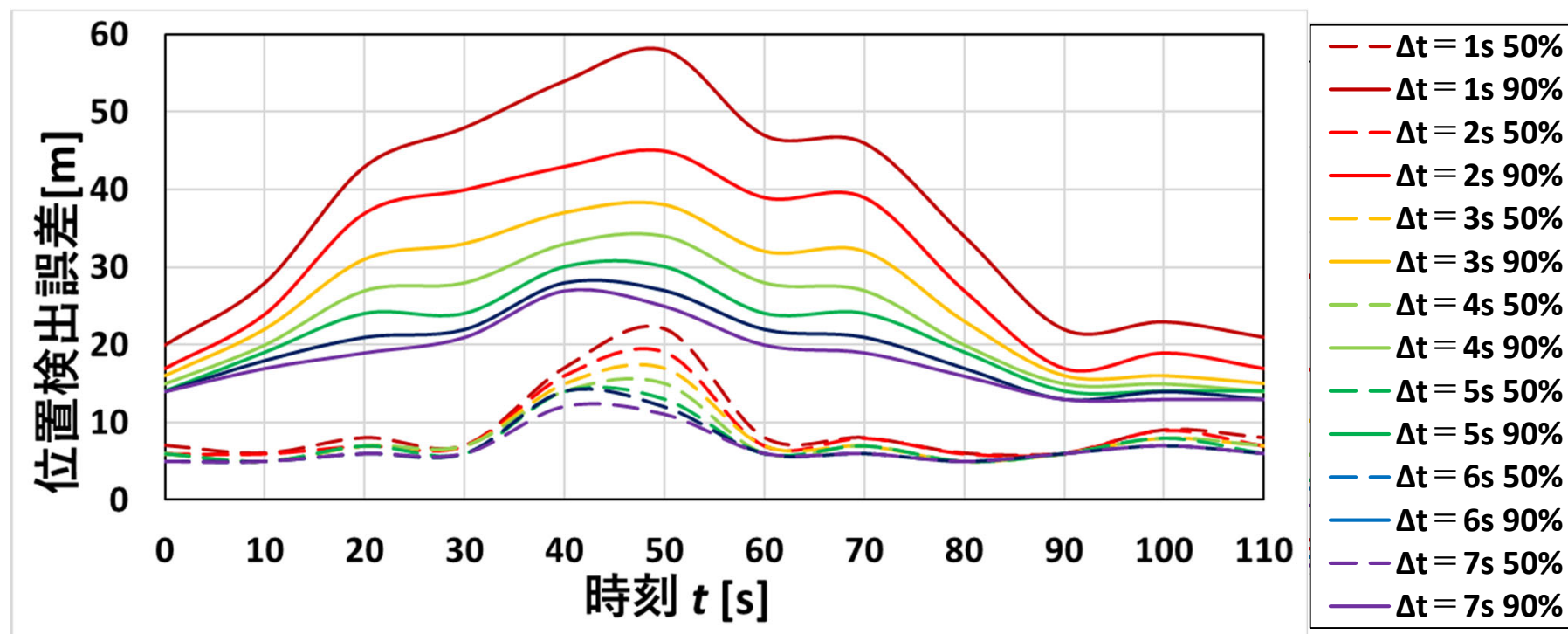
## 2回測定( $\Delta t = 1 \sim 7s$ )における時間特性 (位置検出誤差)



$\Delta\theta = 0^\circ$  の場合

- $\Delta t$ の値が大きいくほど精度が良好になる傾向
- $\Delta t = 6, 7s \Rightarrow$  50,90%値で誤差が各々10m, 20m以内
- 累積確率50%, 90%値ともに $\Delta t = 6s$ で十分な測位精度

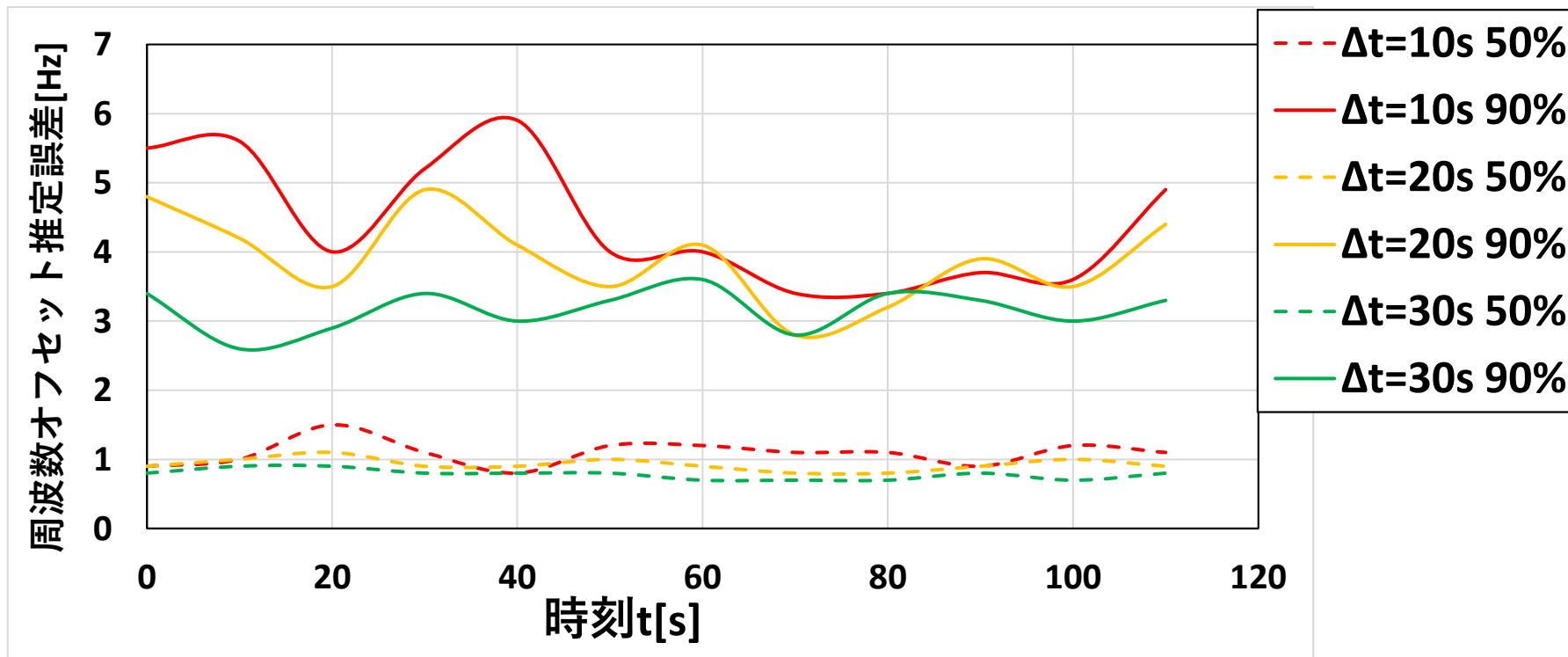
## 2回測定( $\Delta t = 1 \sim 7s$ )における時間特性 (位置検出誤差)



$\Delta\theta = 120^\circ$  の場合

- 精度が劣化する  $t = 50s$  付近  $\Rightarrow$  UAV同士が接近する瞬間
- 累積確率50%値  $\Rightarrow t = 40, 50s$  を除き  $10m$  以下の誤差を確認
- 90%値  $\Rightarrow t = 30 \sim 50s$  付近で  $20m$  以上の誤差を確認

## 補足 $\Delta t=10\text{s}$ 以上の時間変化特性 (周波数オフセット推定精度)

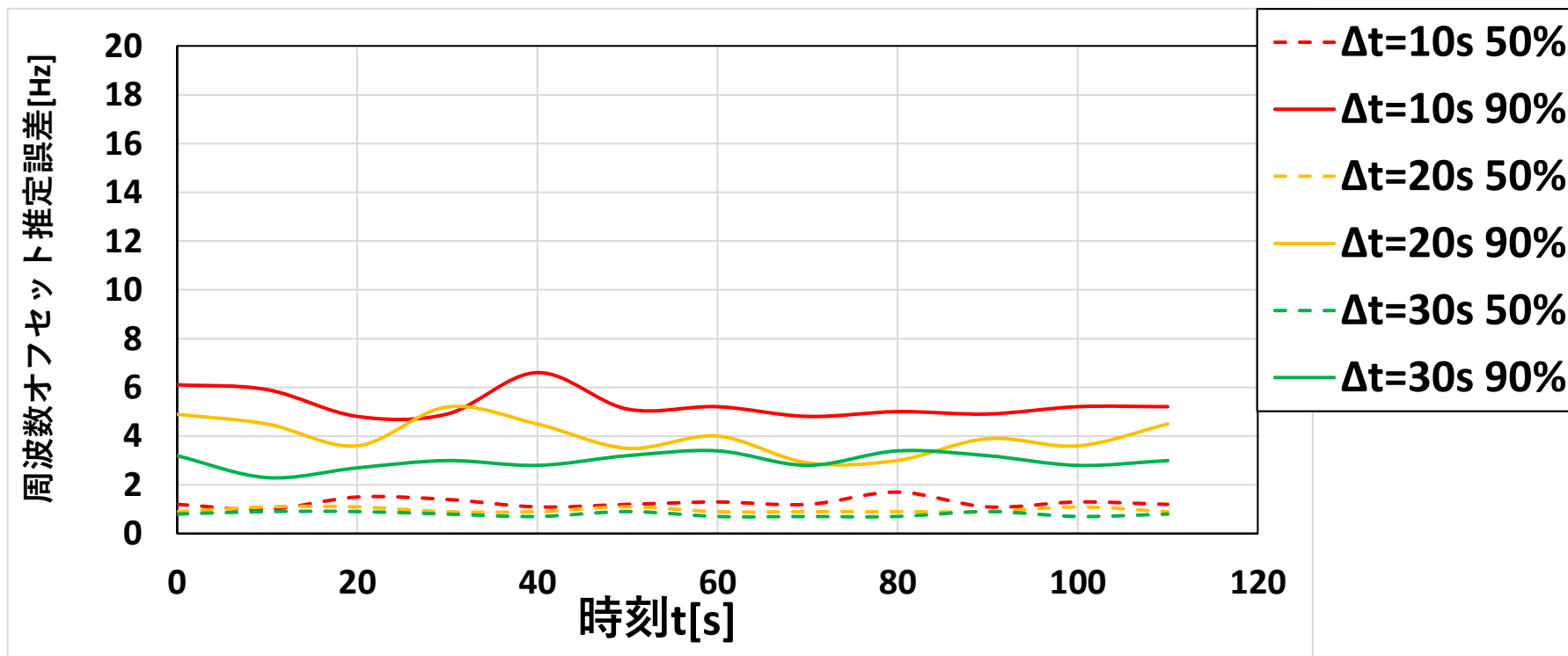


$\Delta\theta = 0^\circ$ の場合

- $\Delta t$ の値が大きいかほど精度は良好
- $t = 50\text{s}$

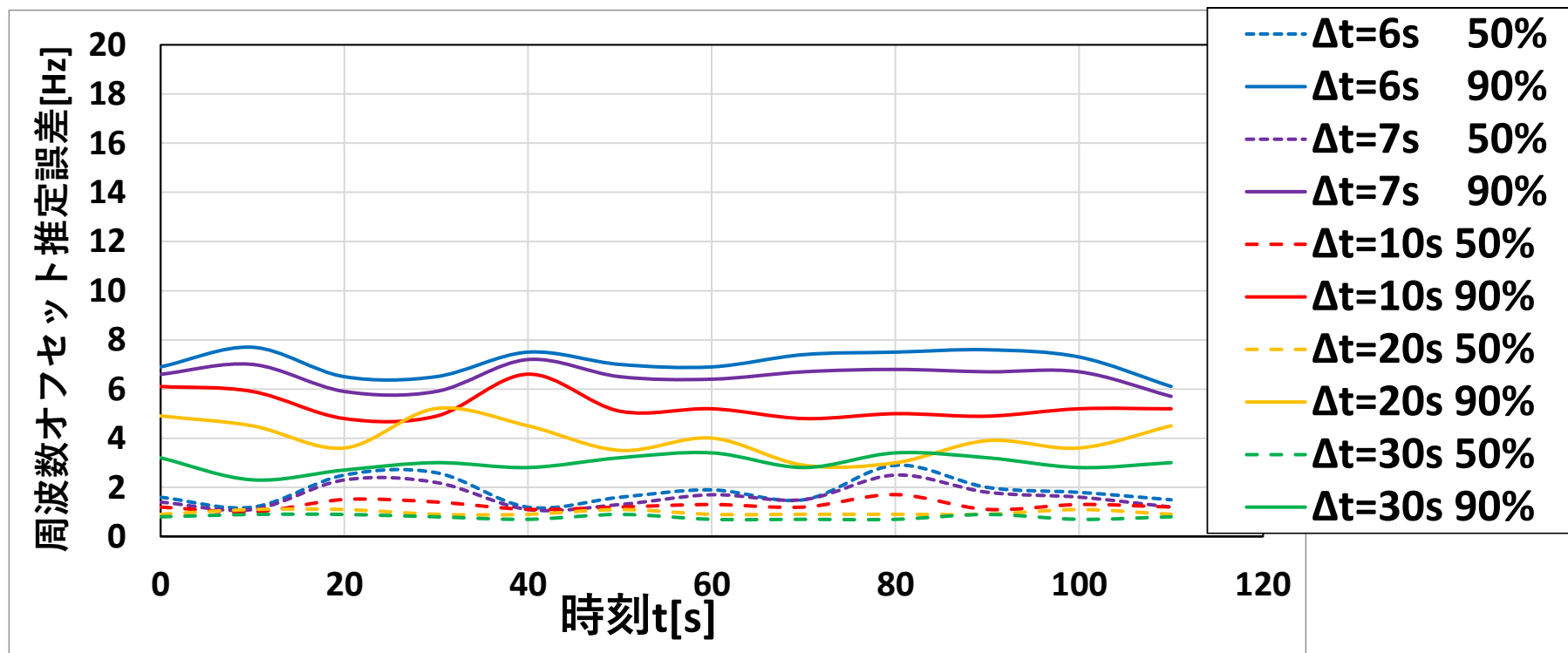


## 補足 $\Delta t=10\text{s}$ 以上との時間変化特性 (周波数オフセット推定精度)



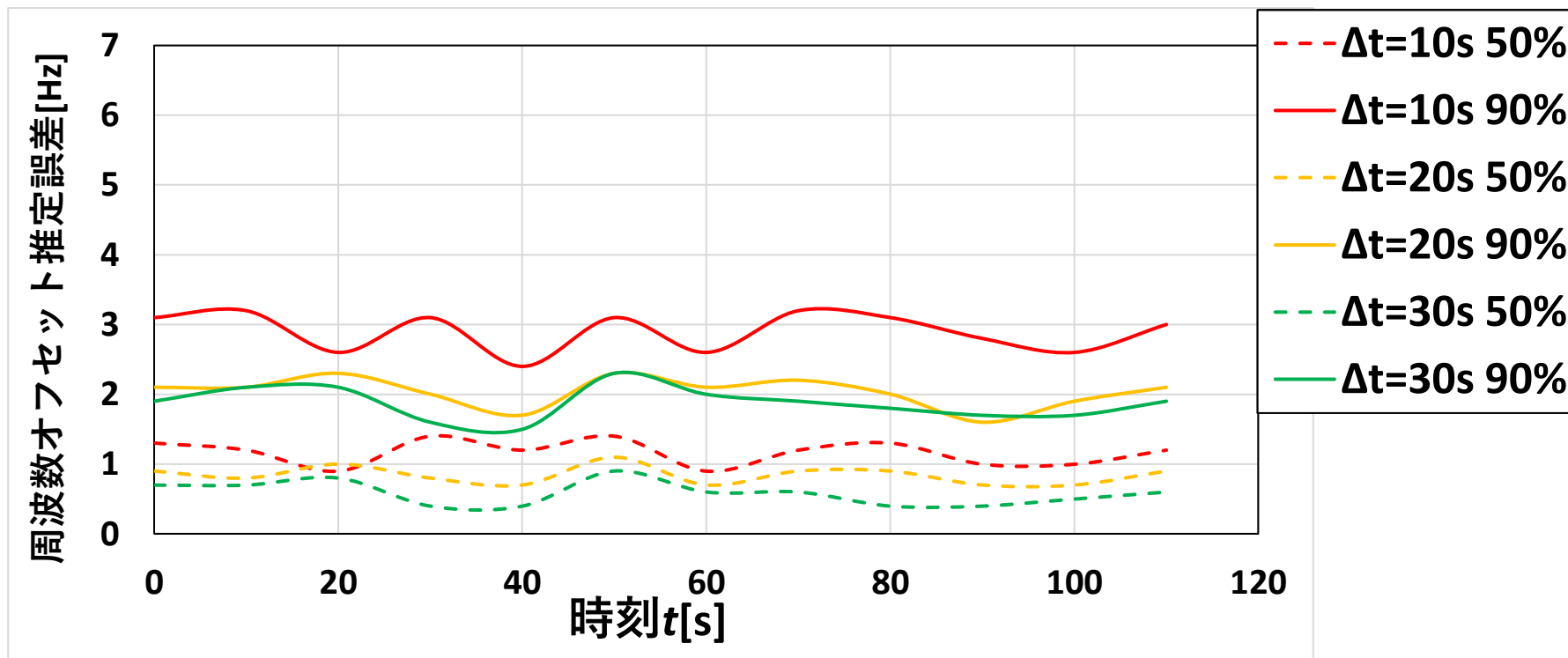
$\Delta\theta = 0^\circ$ の場合

## 補足 $\Delta t=10\text{s}$ 以上との時間変化特性比較 (周波数オフセット推定精度)



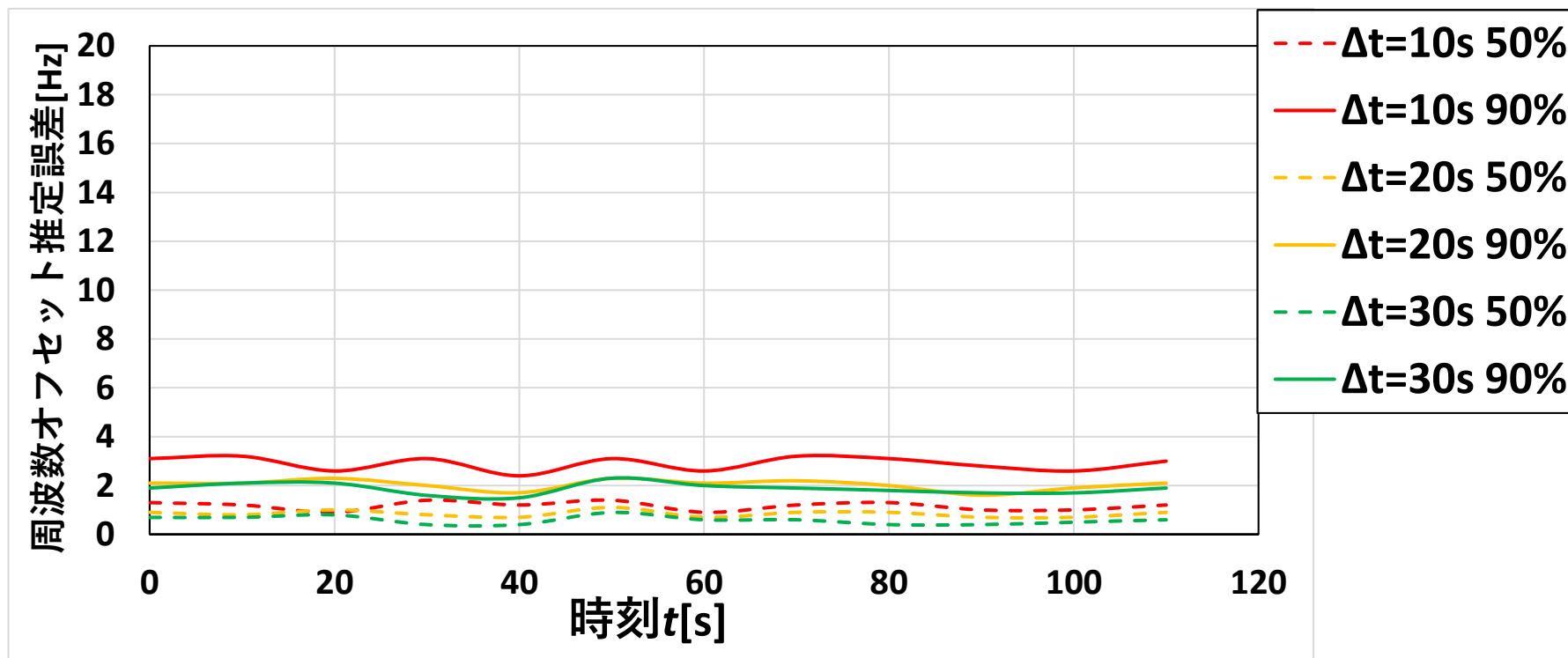
$\Delta\theta = 0^\circ$ の場合

## 補足 $\Delta t=10\text{s}$ 以上との時間変化特性 (周波数オフセット推定精度)



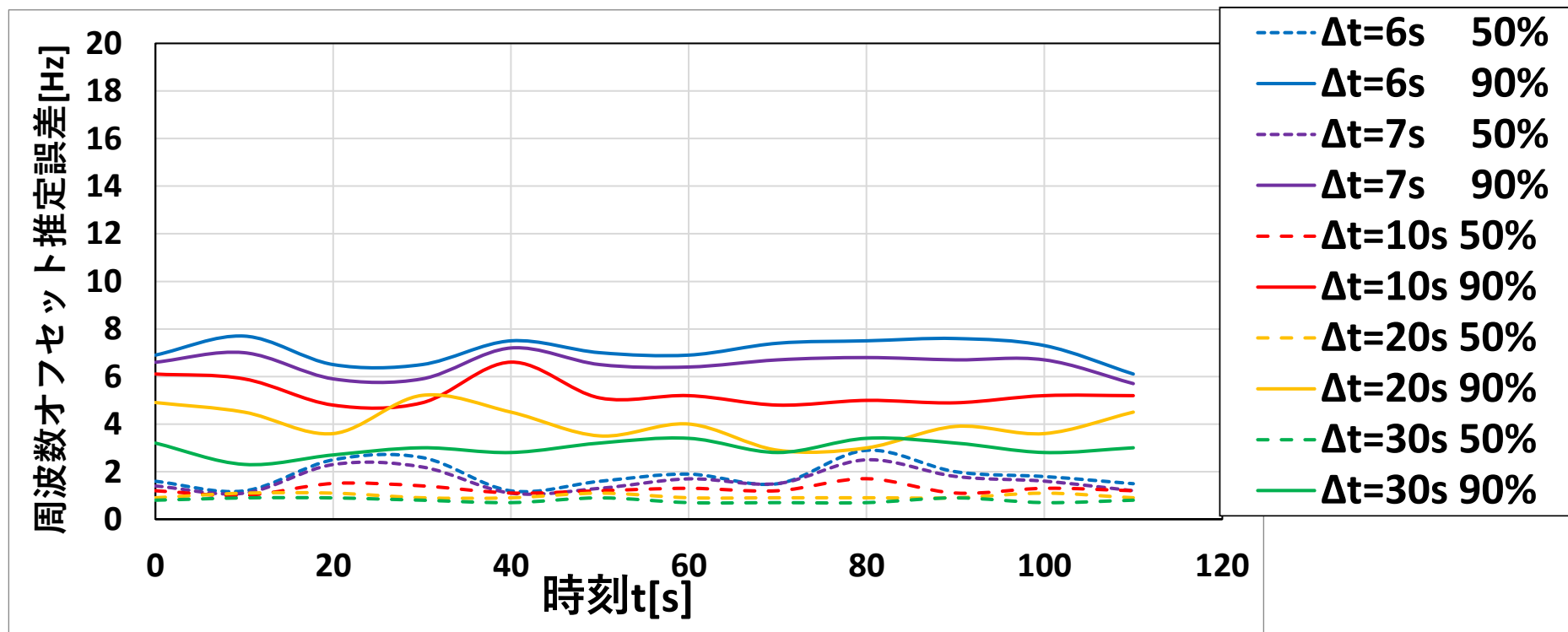
$\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

## 補足 $\Delta t=10\text{s}$ 以上との時間変化特性 (周波数オフセット推定精度)



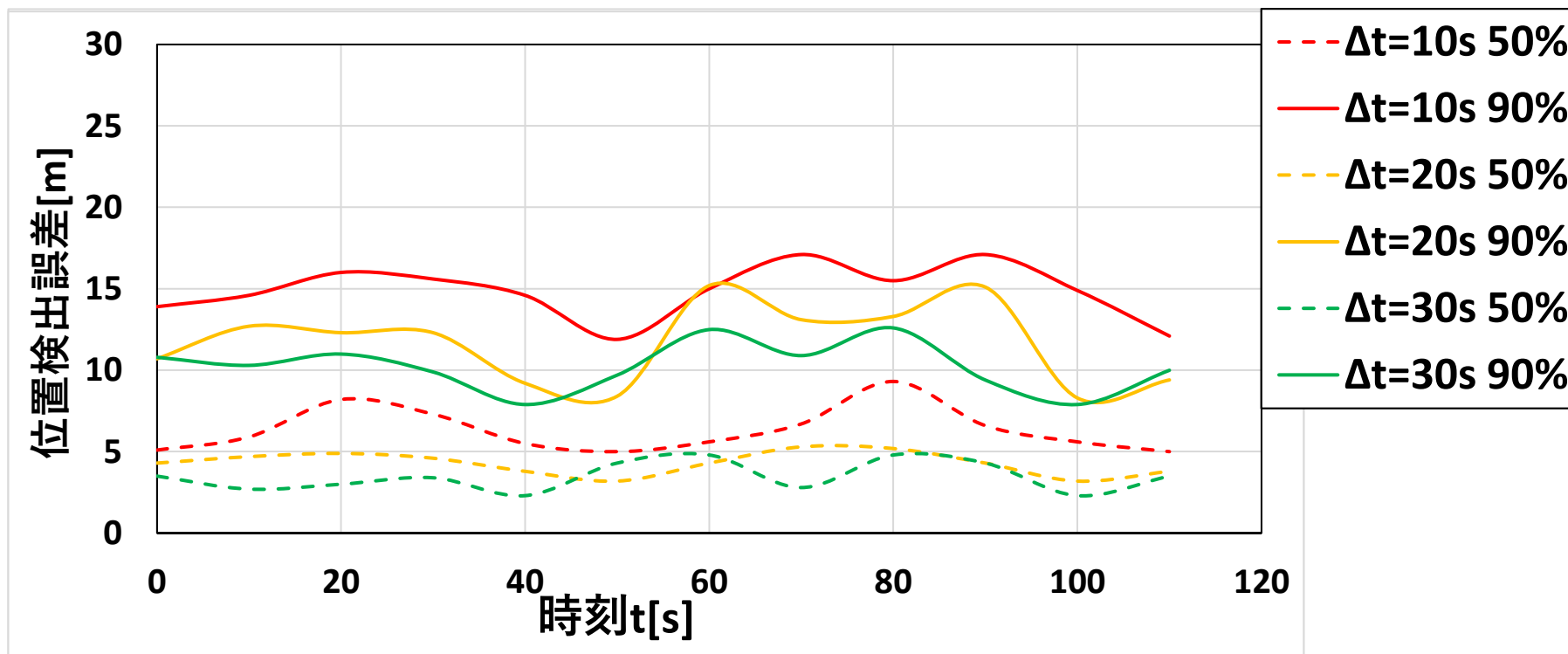
$\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

## 補足 $\Delta t=10\text{s}$ 以上との時間変化特性比較 (周波数オフセット推定精度)



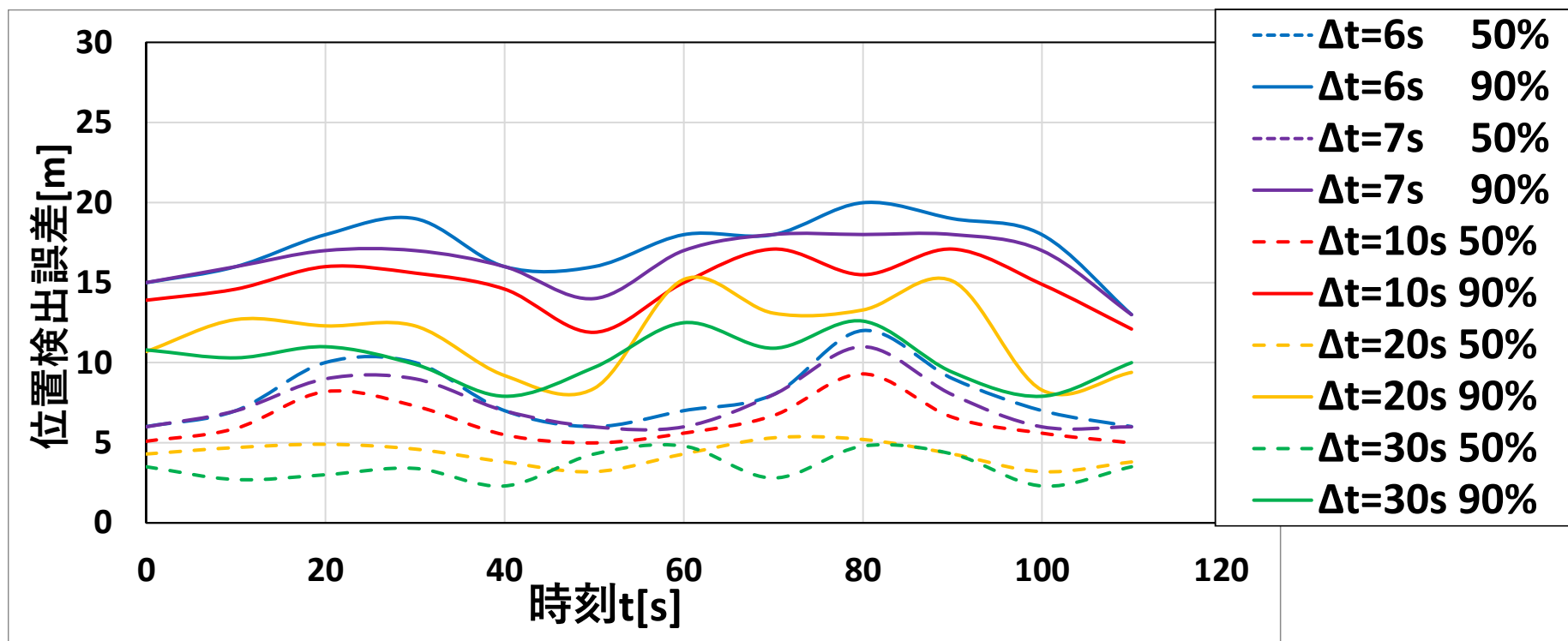
$\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

## 補足 $\Delta t=10\text{s}$ 以上の時間変化特性 (位置検出精度)



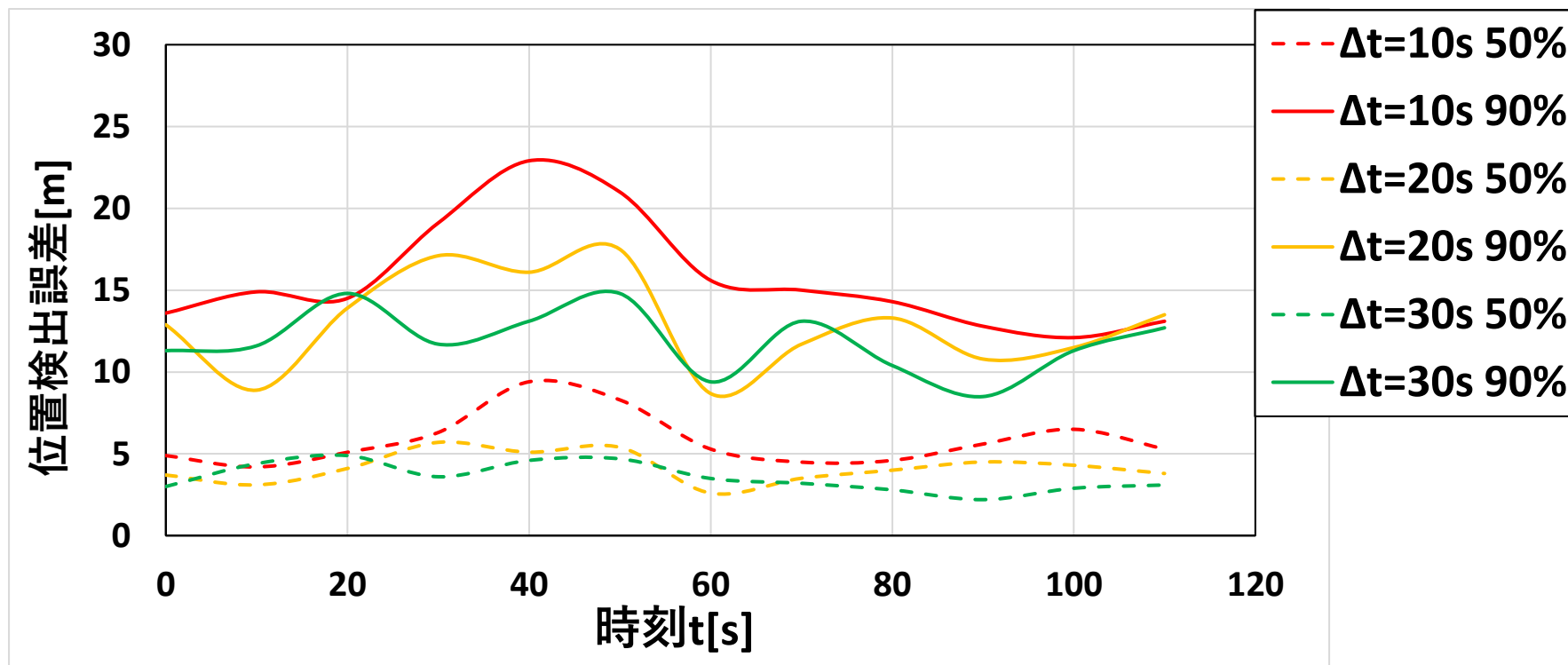
$\Delta\theta = 0^\circ$ の場合

## 補足 $\Delta t=10\text{s}$ 以上との時間変化特性比較 (位置検出精度)



$\Delta\theta = 0^\circ$ の場合

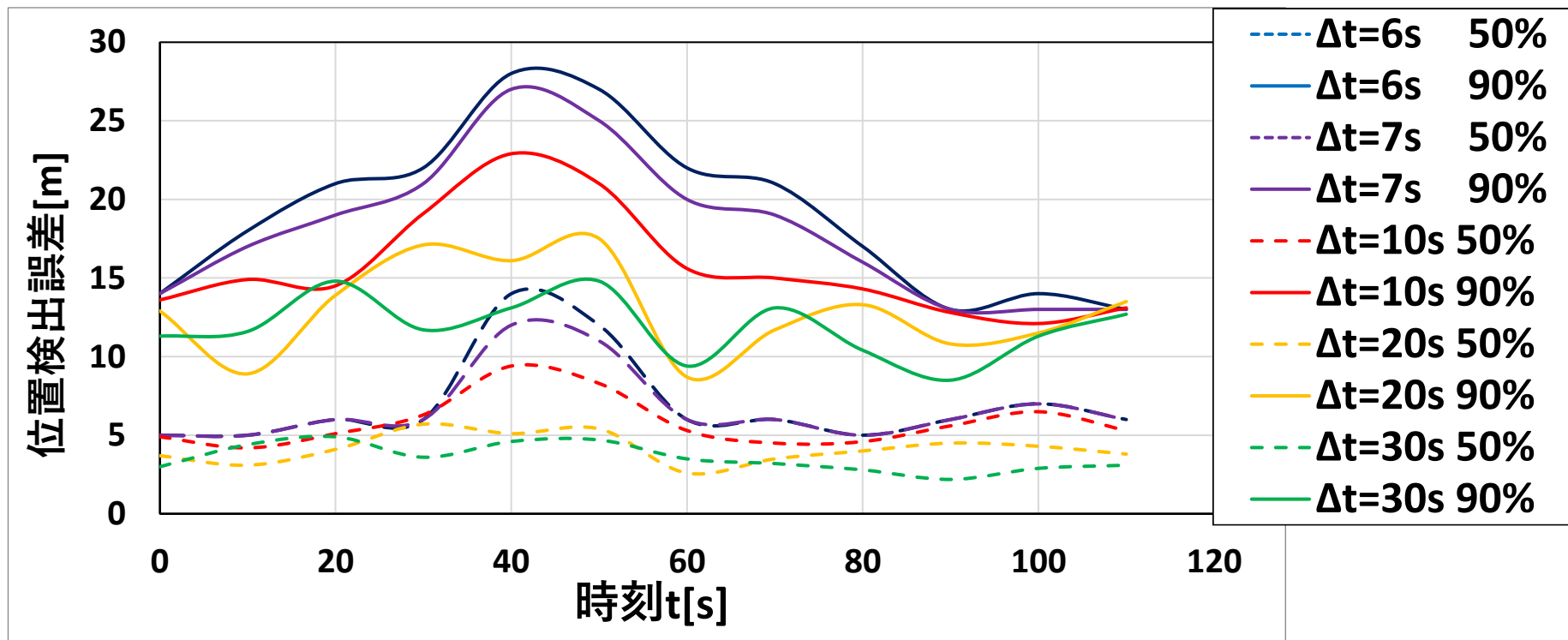
## 補足 $\Delta t=10\text{s}$ 以上との時間変化特性 (位置検出精度)



$\Delta\theta = 120^\circ$ の場合



## 補足 $\Delta t=10\text{s}$ 以上との時間変化特性 (位置検出精度)



$\Delta\theta = 120^\circ$ の場合

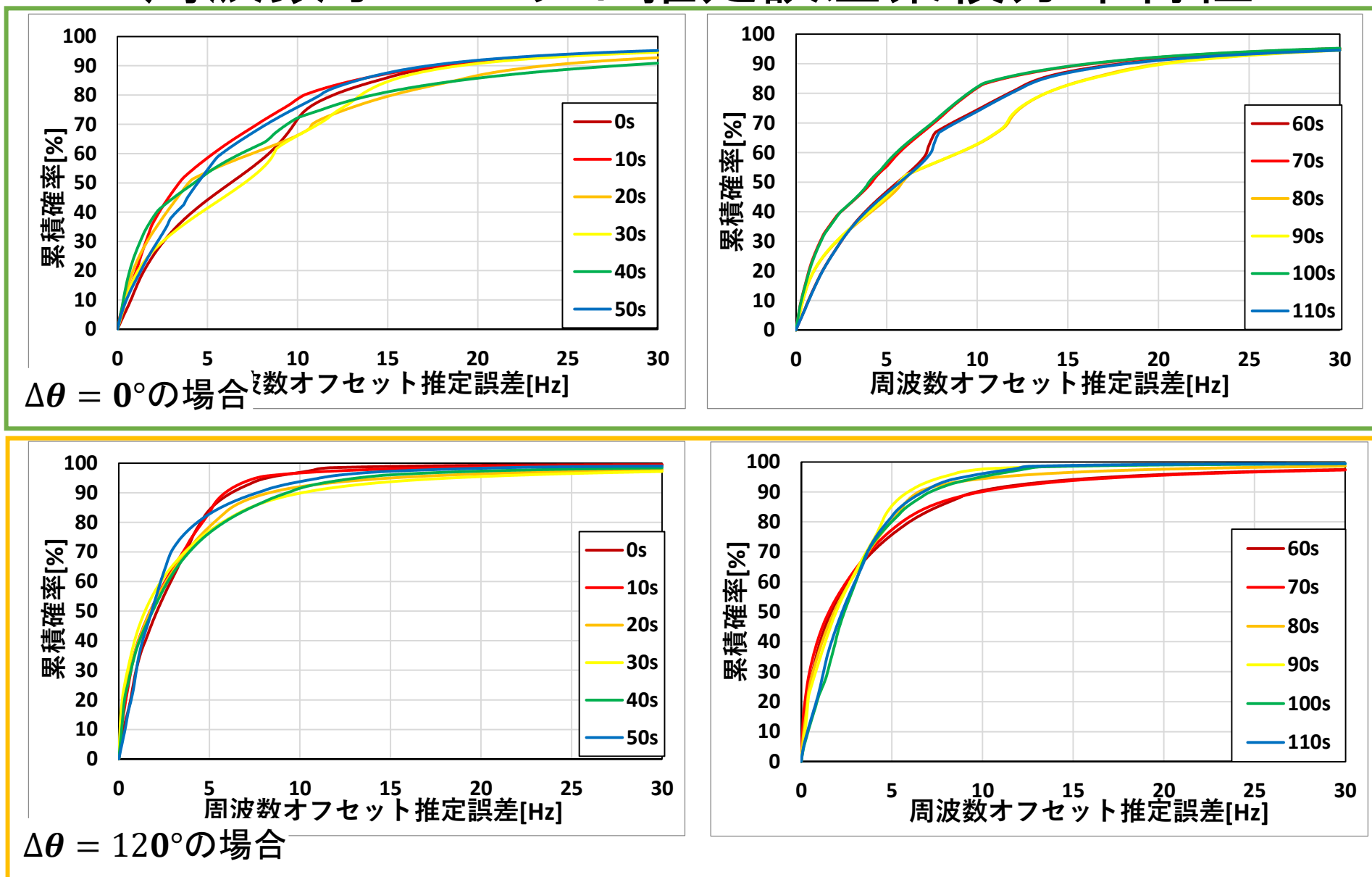
# 補足 被災者の早期発見 (72時間の壁) (rule of threes)

- 飲水をせずに生きられる時間 ⇒ 3日間 (=72時間)

国土交通省：阪神・淡路大震災の経験に学ぶ  
第1章 死者を減らすために  
早く助けるほど高い生存率

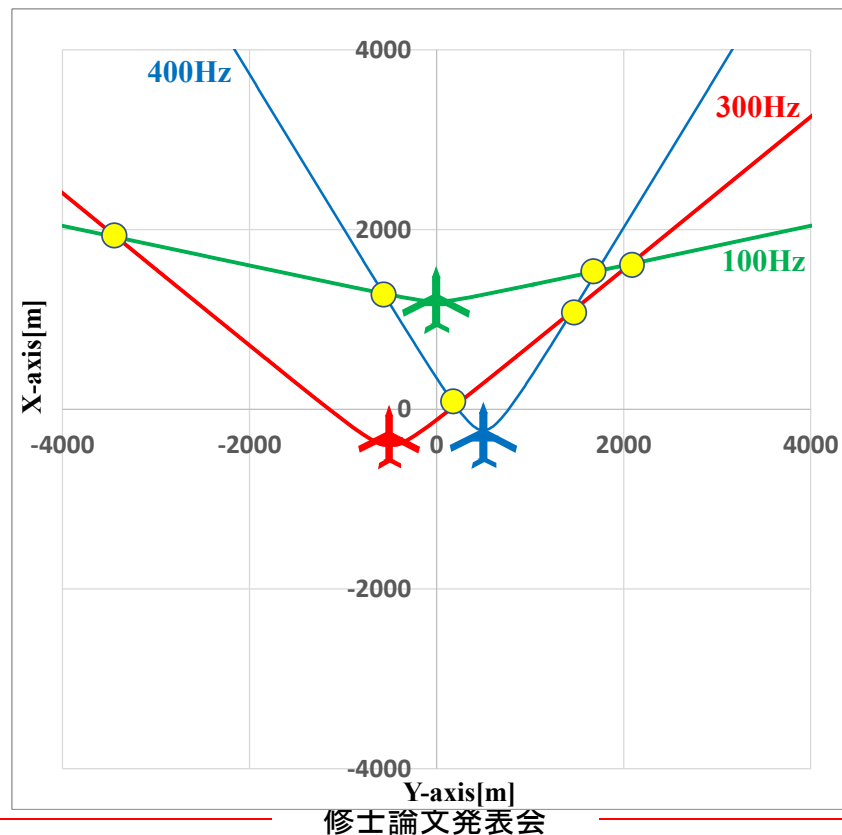
<https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/daishinsai/1.html>

# 周波数オフセット推定誤差累積分布特性



# ドップラーシフト分布（3機のUAV）

- 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、又は1機のUAVで複数回観測し、ユーザ位置を双曲線上の交点として検出可能



## 補足 実現に向けての過程

- 本提案手法によるシミュレーションを複数実施
- 提案手法に基づく実験及びシミュレーション結果との比較
- 学外発表
- 企業・研究機関との提携