

レイトレーシング法に基づく 無線システムの実特性評価例

日本大学工学部 電気電子工学科
石川 博康



講演内容

1. 都市環境下における衛星測位システムの特性評価
 1. レイトレーシングによるマルチパス環境モデル
 2. シミュレーション評価と屋外実験
 3. GPS-Studioを用いた3D都市環境下における評価
2. ストリートセルを対象とする直交偏波MIMO伝搬特性評価(KDDI総合研究所との共同研究)
 1. レイトレーシングに基づくストリートセルモデルとシミュレーション評価結果
 2. 大学構内における直交直線偏波・円偏波アンテナ伝搬実験
3. 無人航空機を用いたユーザ位置検出手法
 1. ドップラーシフトを用いた位置検出手法
 2. RapLabを用いたドップラーシフト分布特性の評価

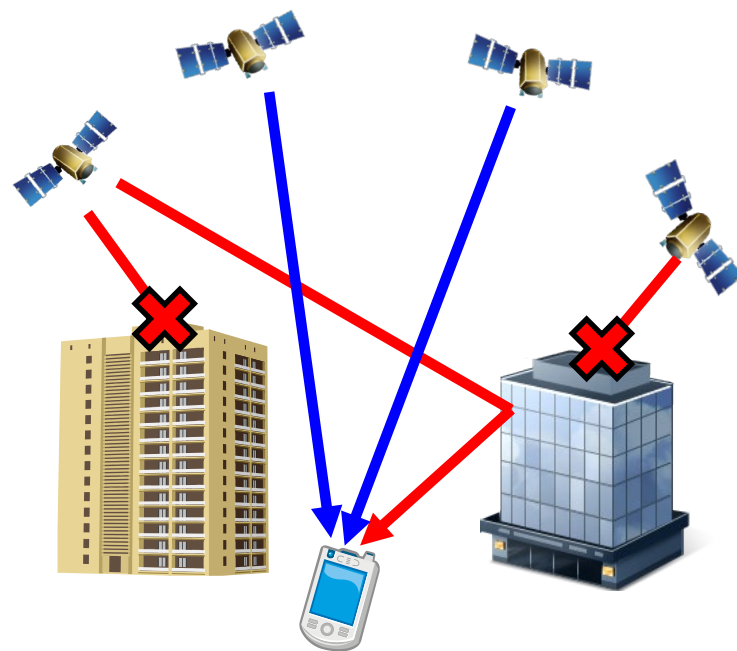
1. 都市環境下における 衛星測位システムの 特性評価

2012年～現在継続中

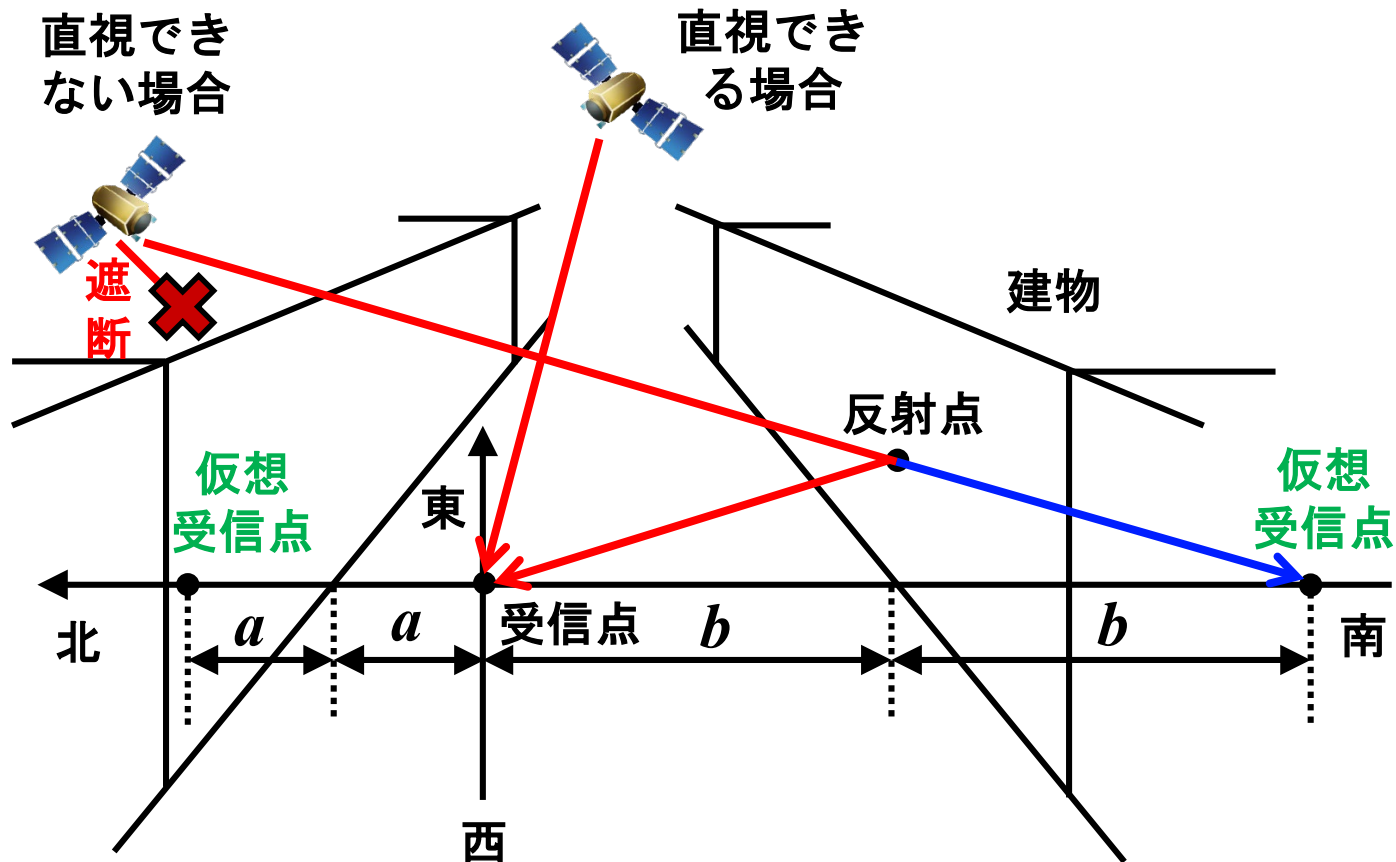


都市環境における衛星測位

- 都市環境では、GPS衛星からの信号が高層建築物等により遮断、または反射して受信される信号(マルチパス信号)となり、衛星信号が受信不可または反射による遅延
- 受信可能衛星数が減少→**衛星配置が悪化**
- 送受信時間の遅延
- GPS衛星から受信機までの距離誤差**
- 簡易な都市環境モデルにおいて、**レイトレーシングのミラーリング法**によりマルチパス経路を模擬
 - ① ビル等の建物に対する受信機位置の違いによる誤差傾向の検証
 - ② 市販のGPS受信機(EVK-6PPP)で実測した衛星の軌道情報と測距データを基にシミュレーション評価

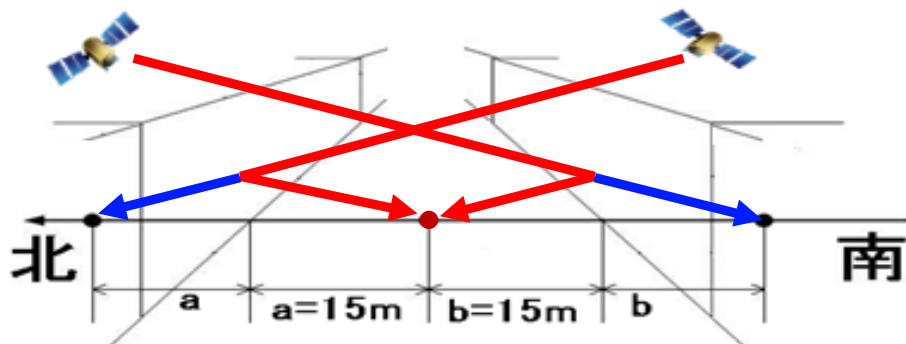


マルチパス環境評価モデル

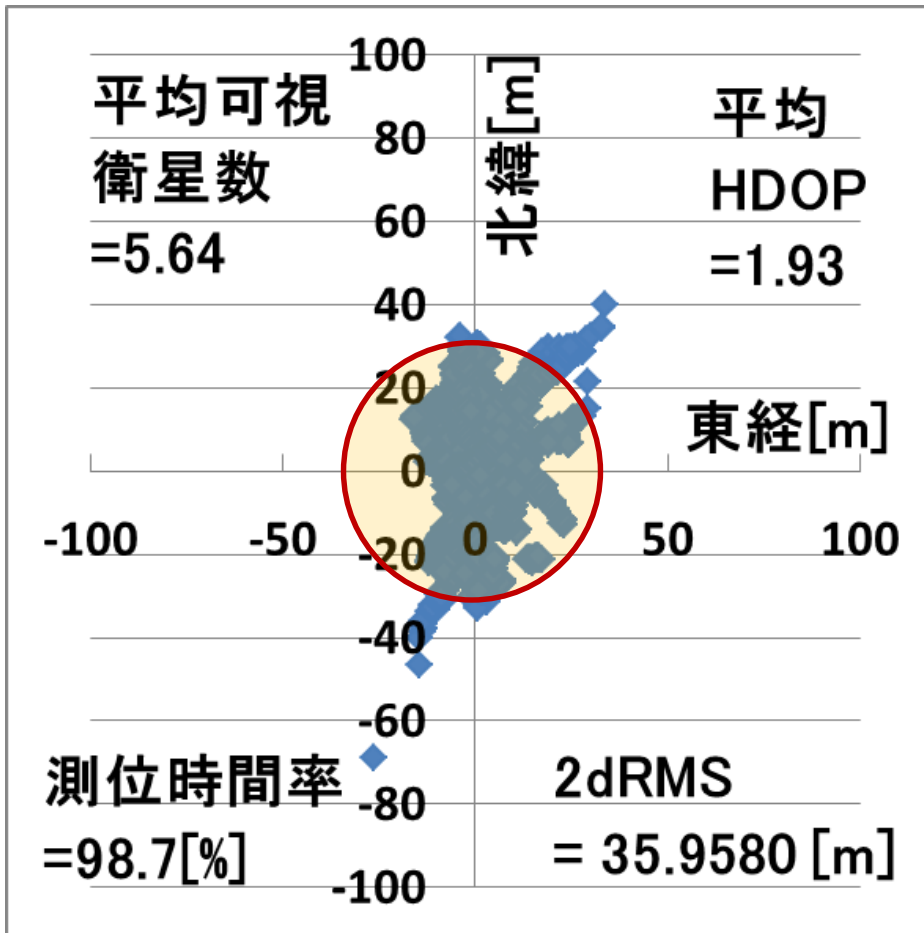


- ・周回衛星数: 29機、測位時間: 24時間
- ・南北方向に建物(高さ30m)、東西方向に無限に道路が広がるモデルを想定
- ・北側建物-受信機間: $a[\text{m}]$ 、南側建物-受信機間: $b[\text{m}]$
(道路幅全長: $a + b = 30\text{m}$)
- ・反射や伝搬による減衰を含まない。水平精度劣化指数(HDOP) < 10のみ

測位結果(道路中央時)

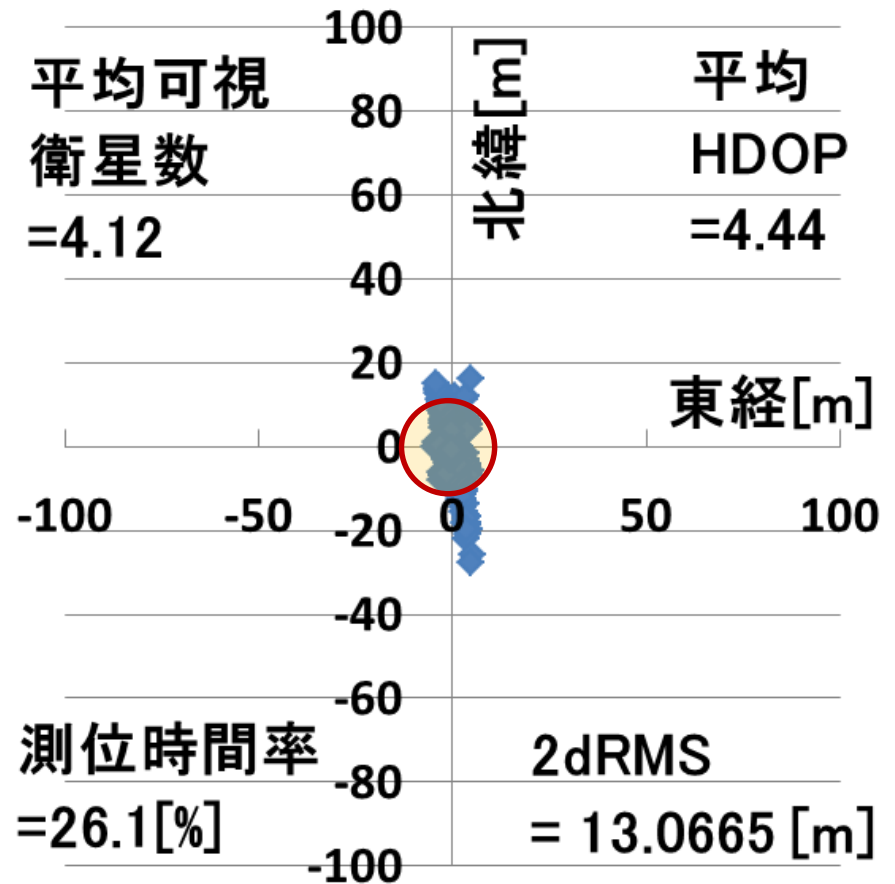
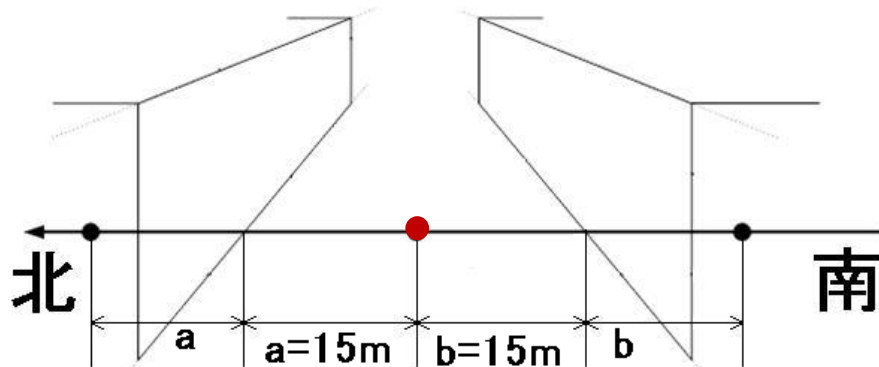


- 測位時間率
→ 周囲にビルがない時の測位回数を100%とした場合の割合



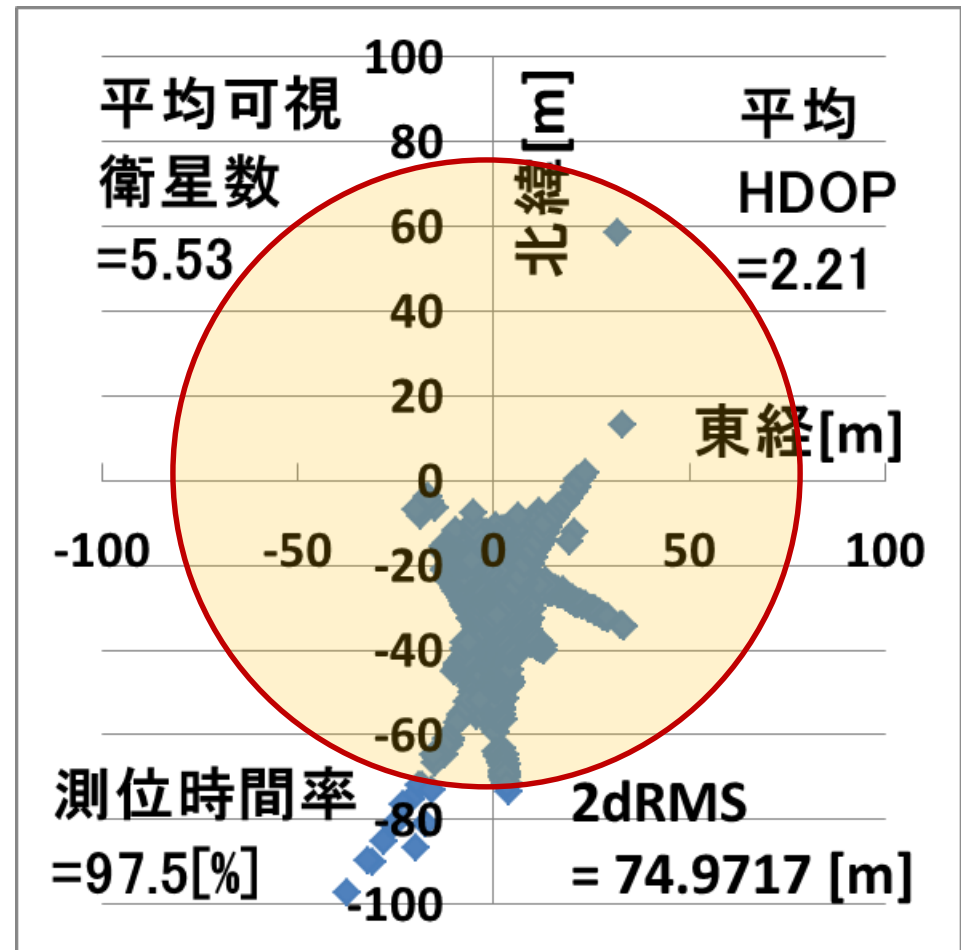
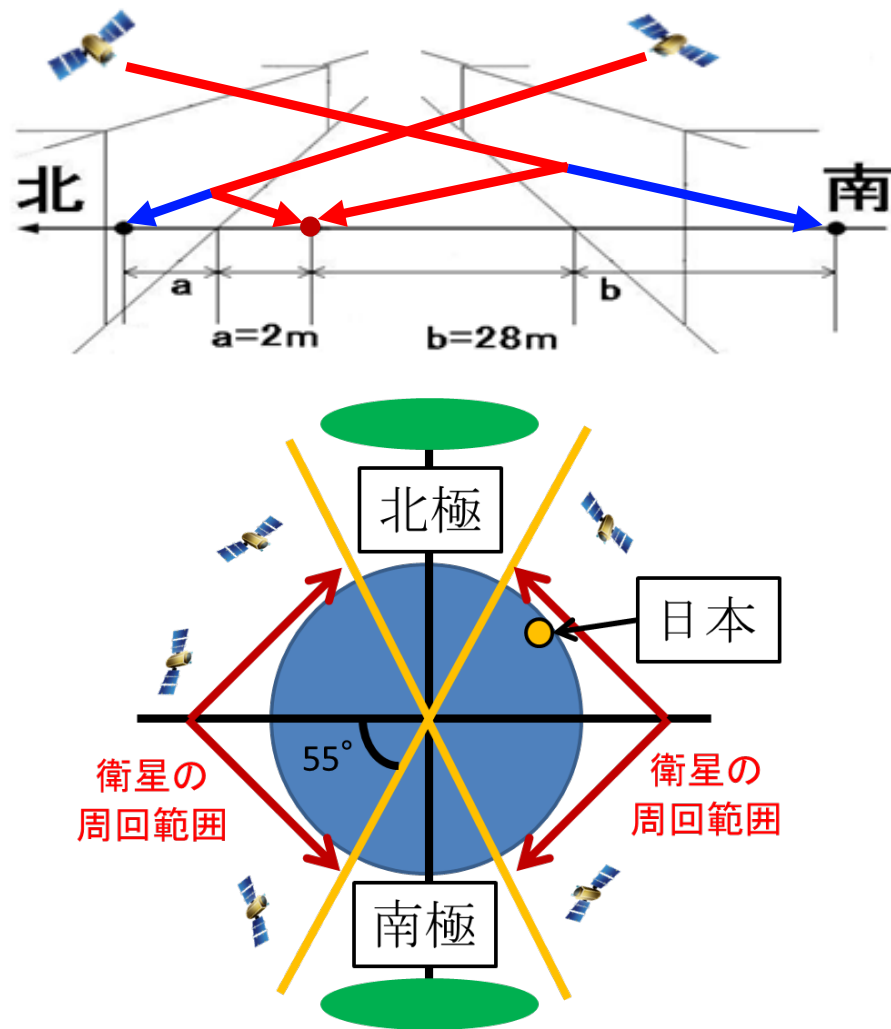
北側道路幅 $a:15\text{m}$ 南側道路幅 $b:15\text{m}$

測位結果(道路中心時)



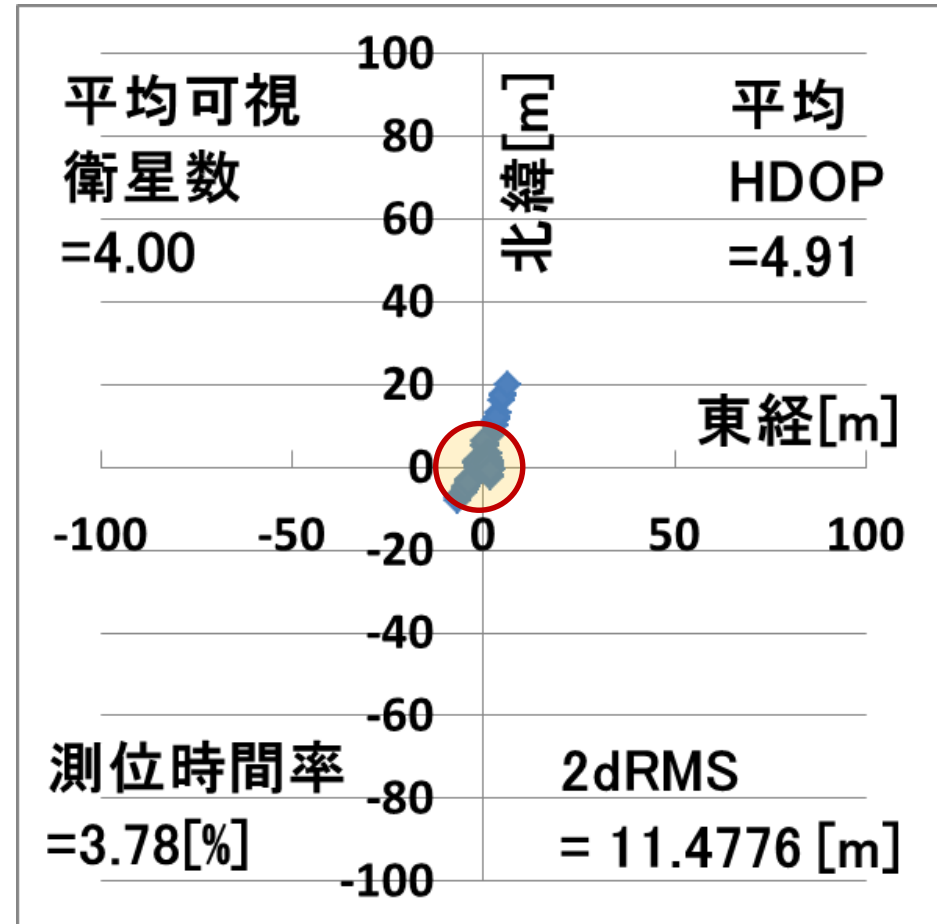
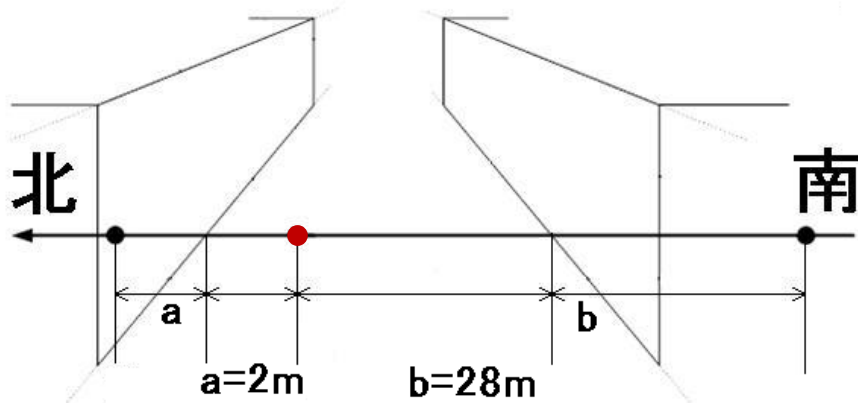
マルチパス信号を故意に除外した場合
北側 $a:15\text{m}$ 南側 $b:15\text{m}$

測位結果(北側歩道上)



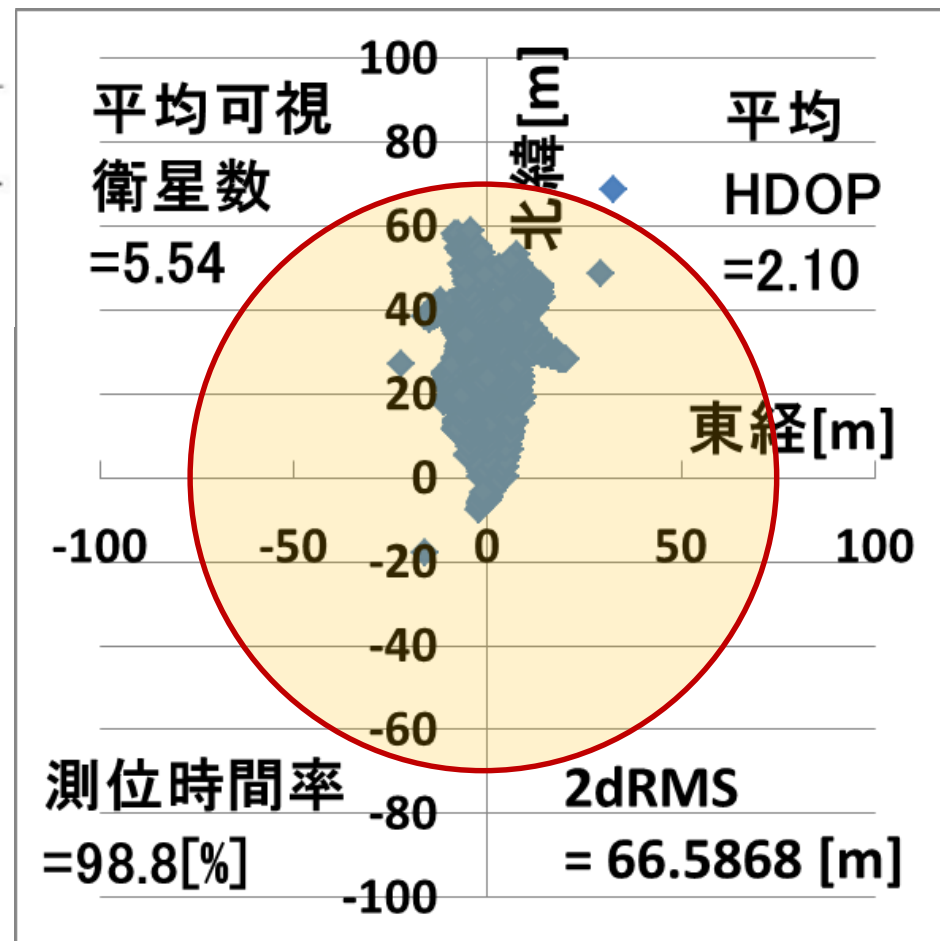
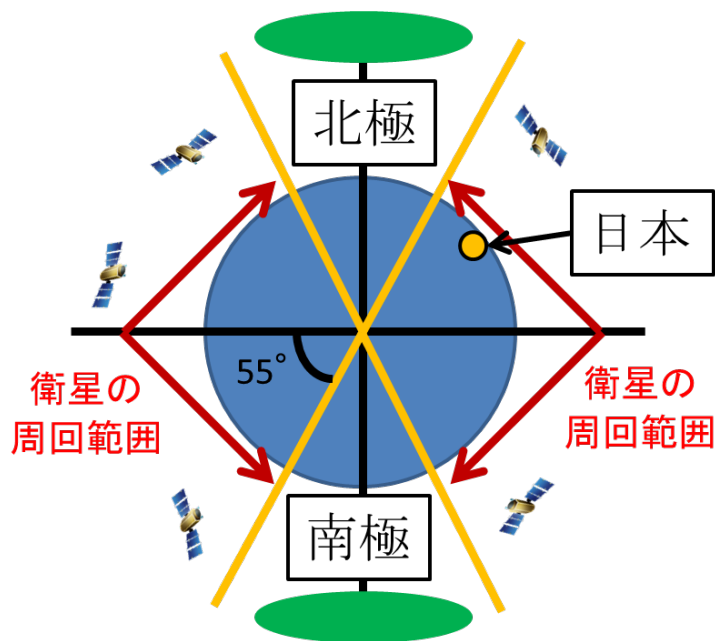
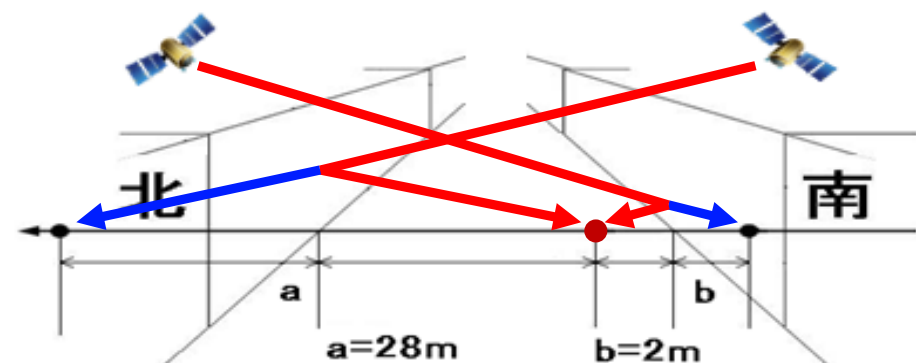
北側道路幅 a : 2m 南側道路幅 b : 28m

測位結果(道路北側寄り)



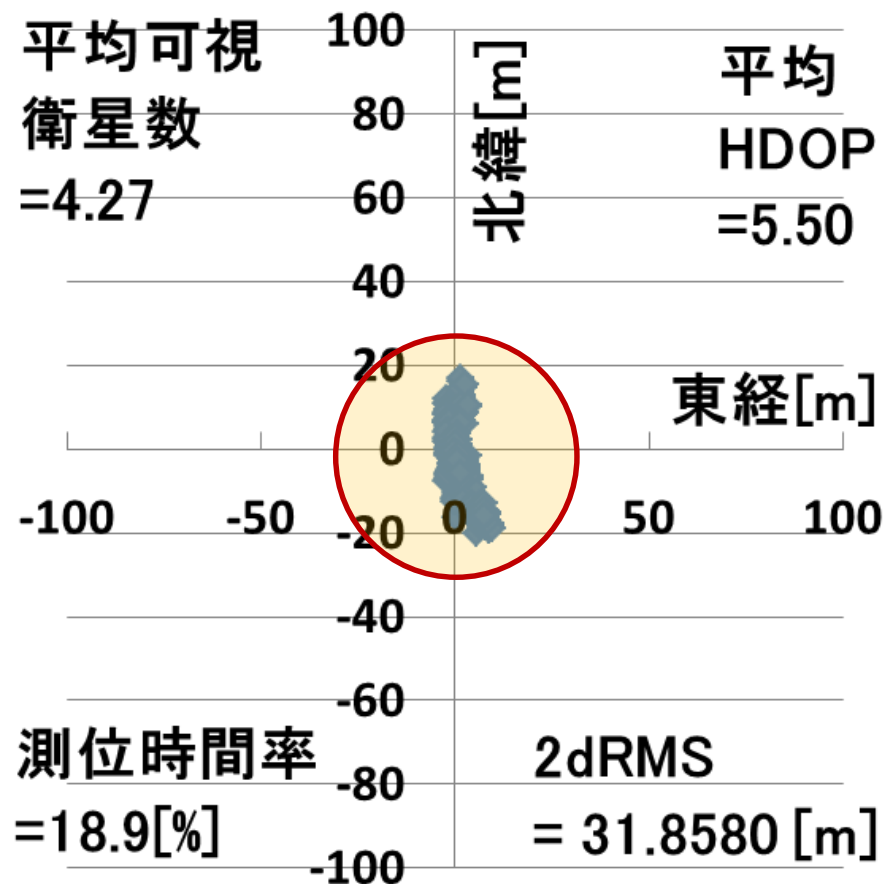
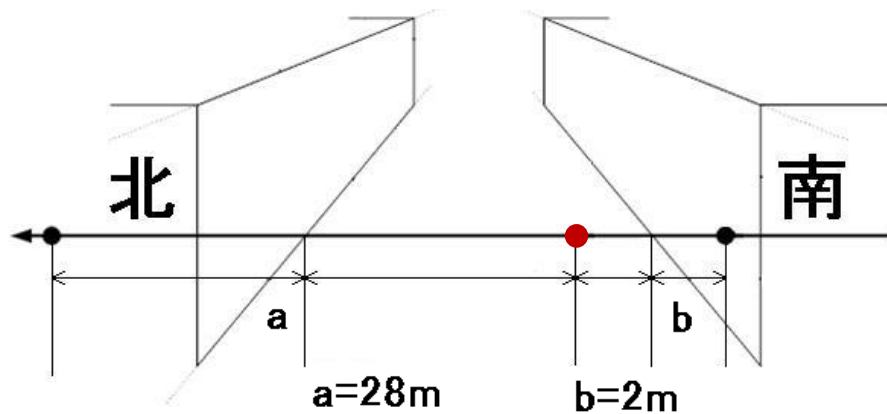
マルチパス信号を故意に除外した場合
北側 a : 2m 南側 b : 28m

測位結果(南側歩道上)



北側道路幅 a : 28m 南側道路幅 b : 2m

測位結果(道路南側寄り)



マルチパス信号を故意に除外した場合
北側 a : 28m 南側 b : 2m

市販のGPS受信機で実測した衛星の軌道情報と測距データを基にシミュレーション評価



屋外実験(1): 屋上と校舎壁際

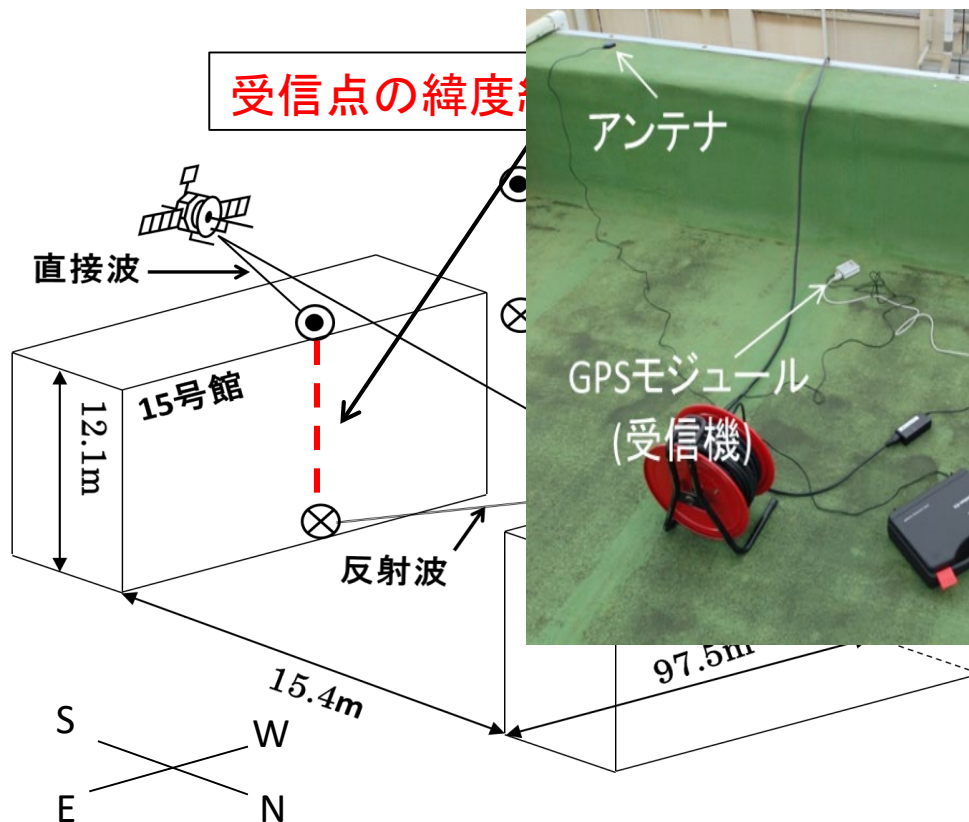
- 3階建ての校舎(15号館)屋上にて、12時間の実測データを取得(シミュレーションにも適用)
- 比較のため校舎壁際の地上(ほぼ同じ緯度経度の位置)において実測を取得

GPS受信機(EVK-6PPP)の仕様

チャンネル	50チャンネル
精度	2.5m以下
形式	NMEA
速度	9600bps
地系	WGS-84
電源	USB給電式

ASCIIコードとシリアル通信
ルを用いて、データを出力
するための書式

- WGS-84: 世界測地系と呼ばれ、GPS
による地図上への位置表示をする基
準として使用



測位結果

測位結果が北方向に
広がることを確認



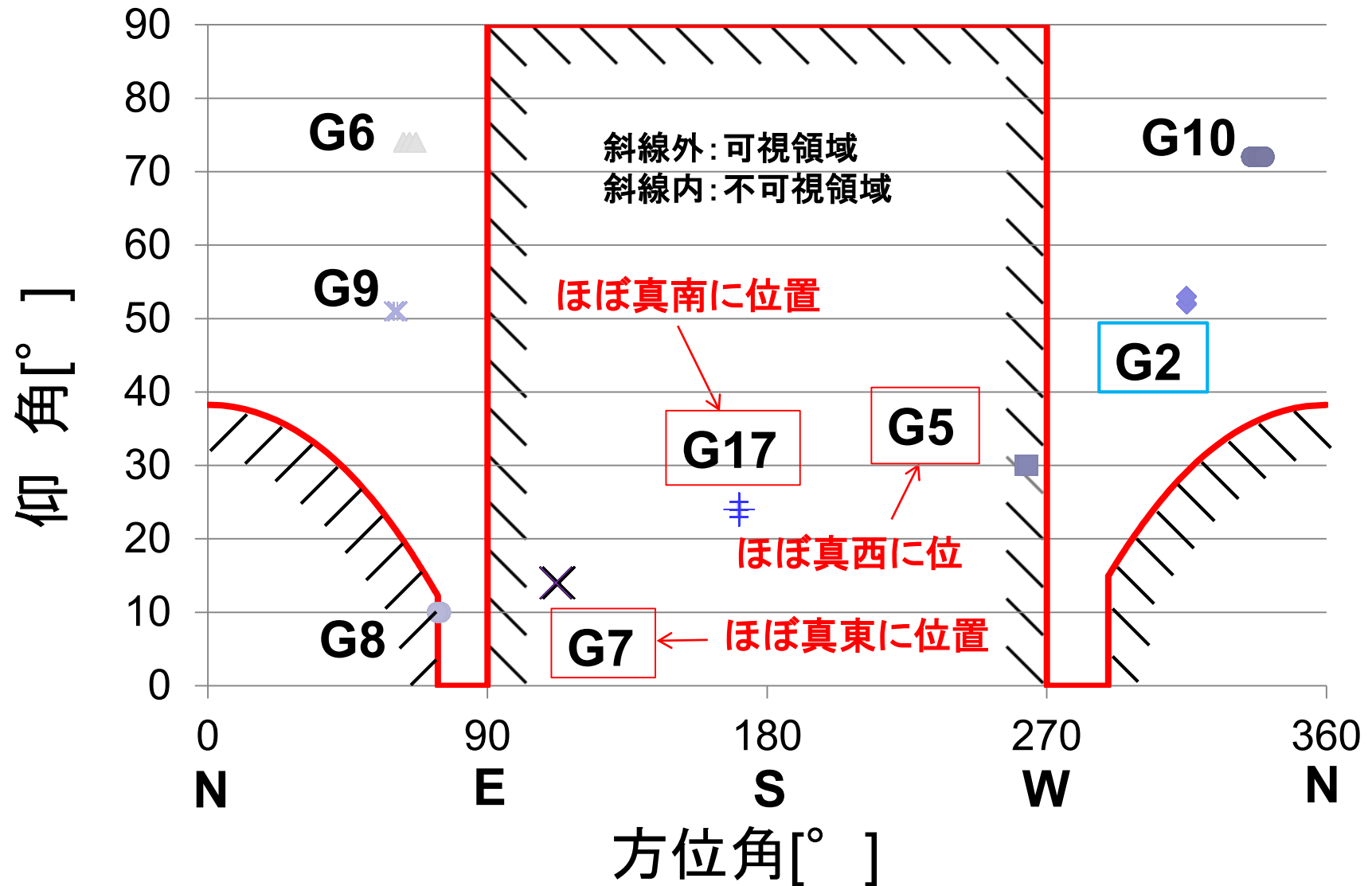
ほぼ一点に集中した
高精度な測位結果を
確認



地上での測位結果

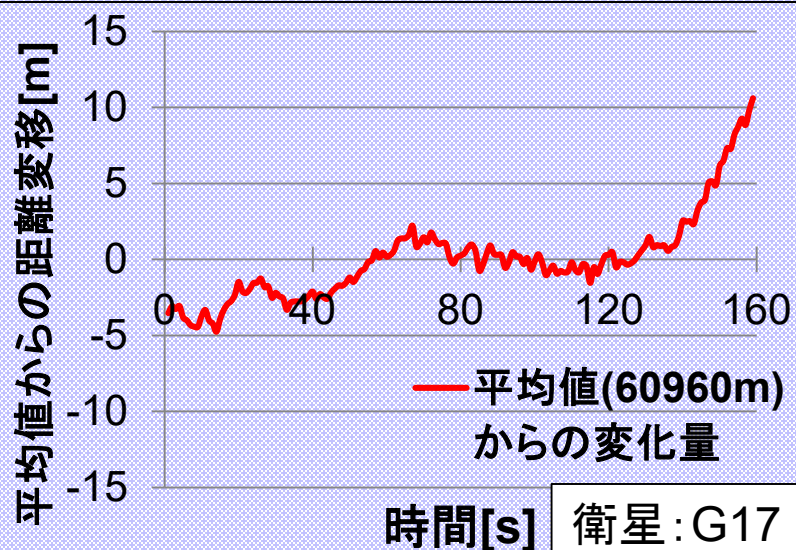
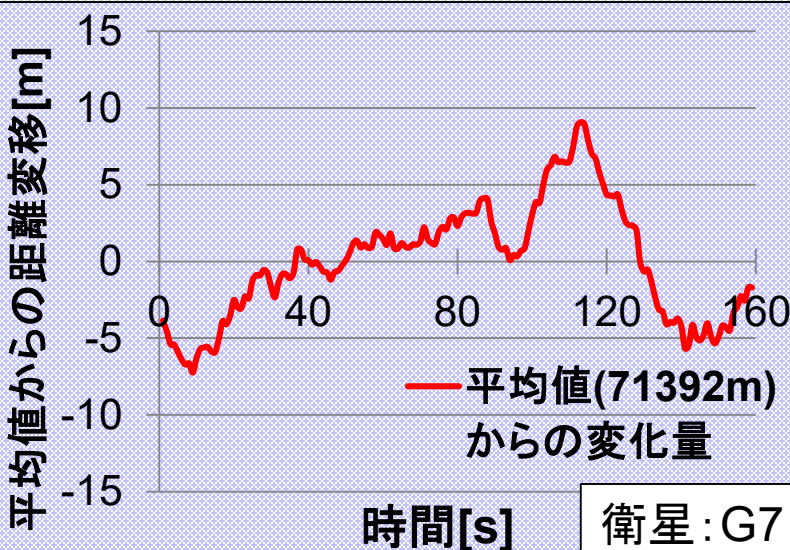
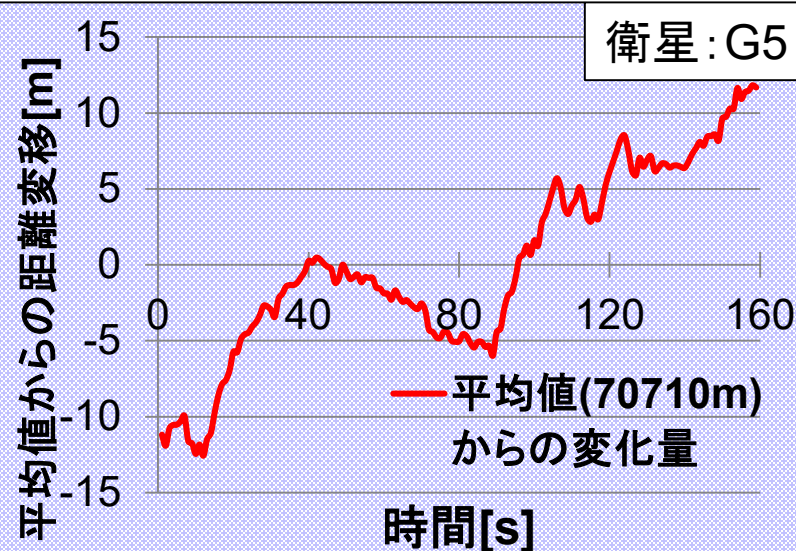
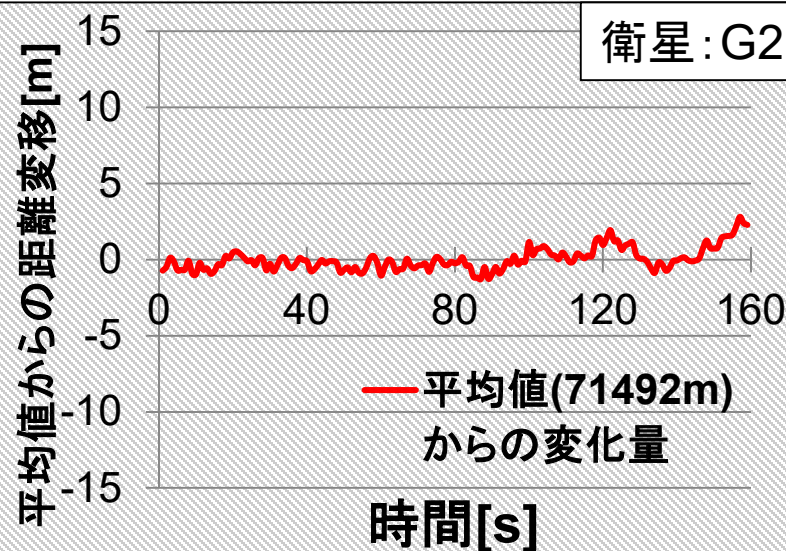
屋上での測位結果

衛星配置図



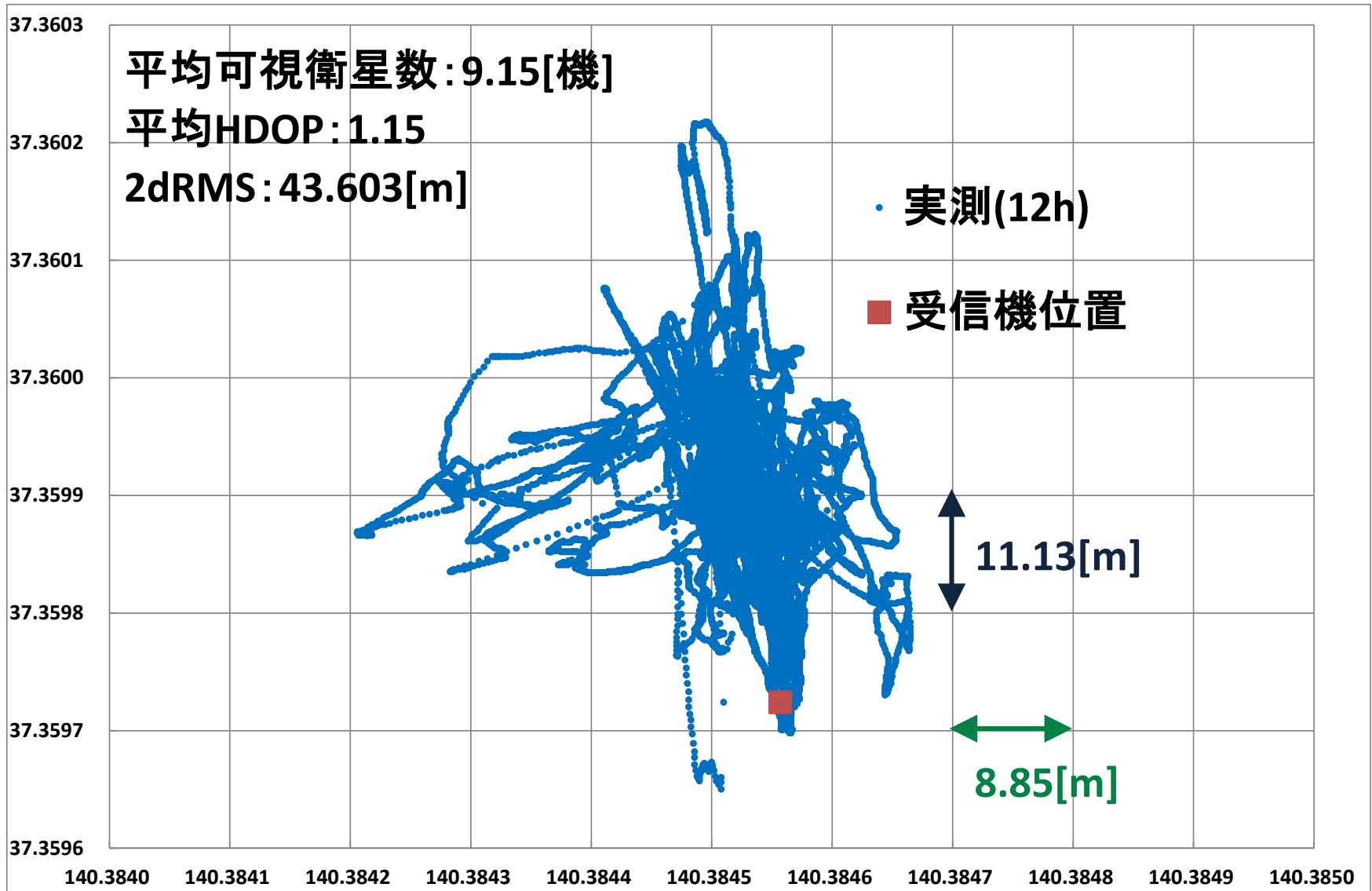
衛星-受信機間の疑似距離の時間変動

可視領域の衛星

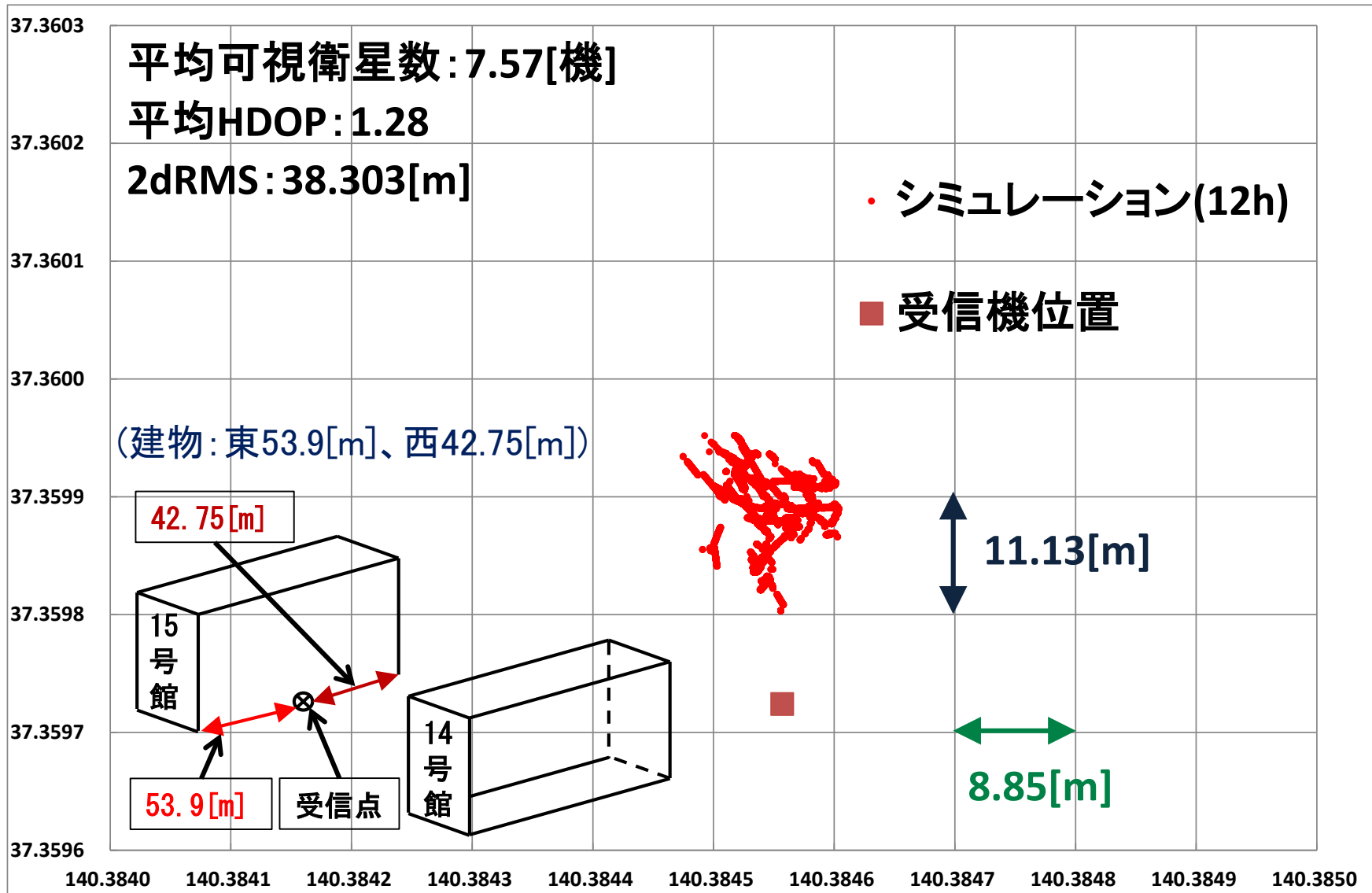


不可視領域の衛星

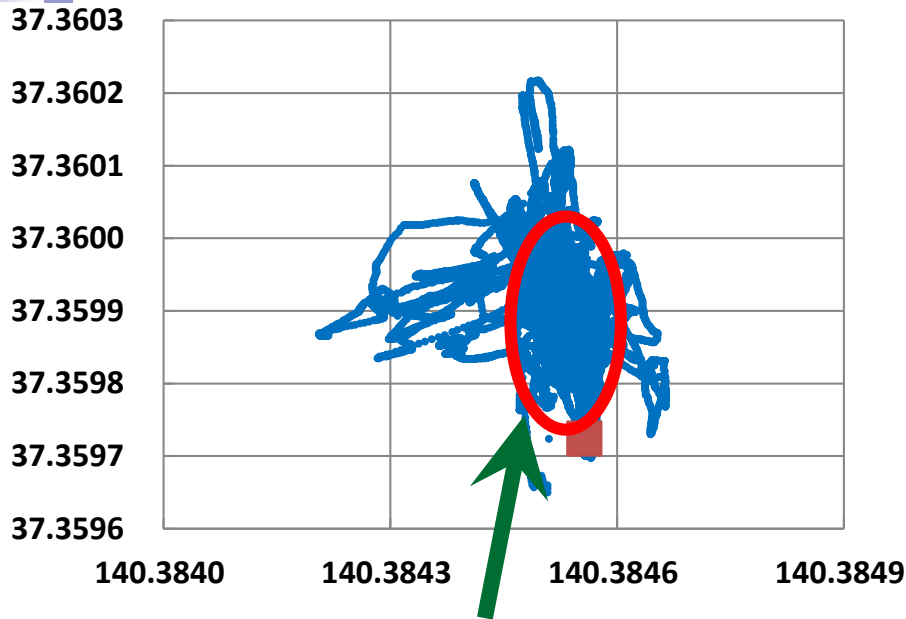
実験による測位結果(地上の校舎壁際)



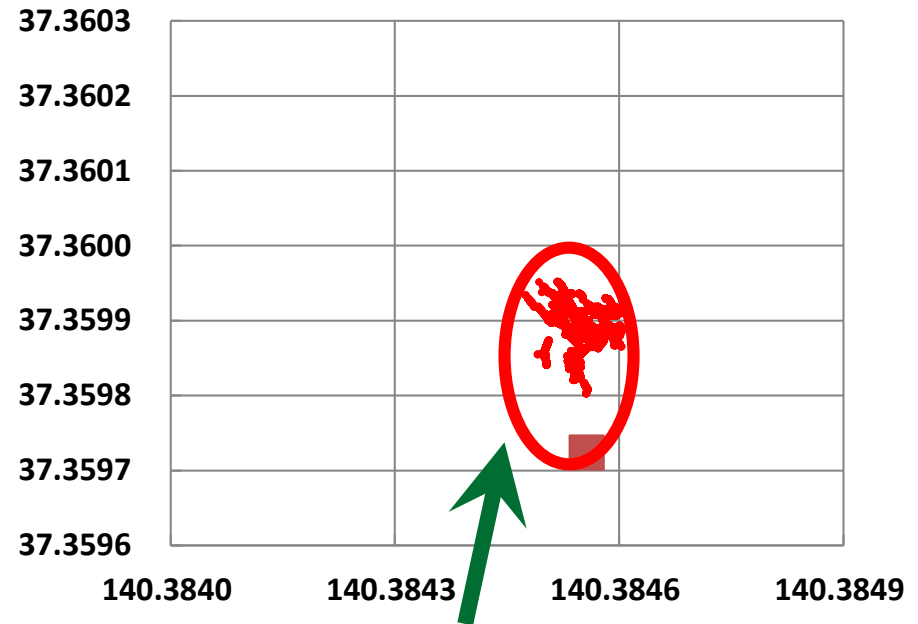
シミュレーション結果



実測とシミュレーションの比較



この範囲内の結果が
全体の93%存在

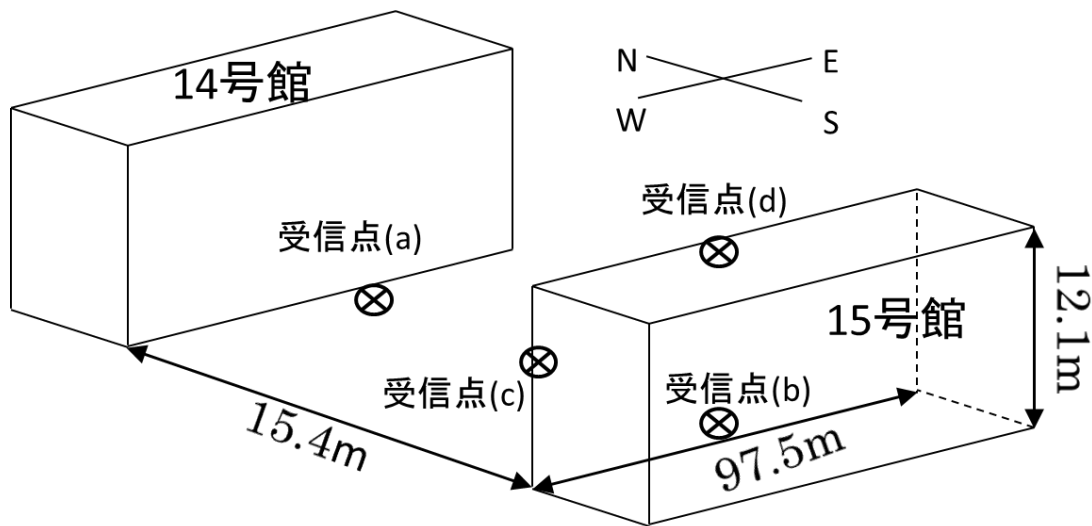


実測と同様に測位
結果が北側にシフト

2回以上の反射を考慮していないため、実測
データの方が誤差の分布範囲が広い

屋外実験(2): 受信機位置を変えた場合

- 屋上と地上の2箇所に受信機を設置し、2時間の測位を実施
- マルチパスの影響を抽出するため、地上の受信点を変えて衛星毎の軌道データ、衛星配置、擬似距離を取得し、データ処理を実施

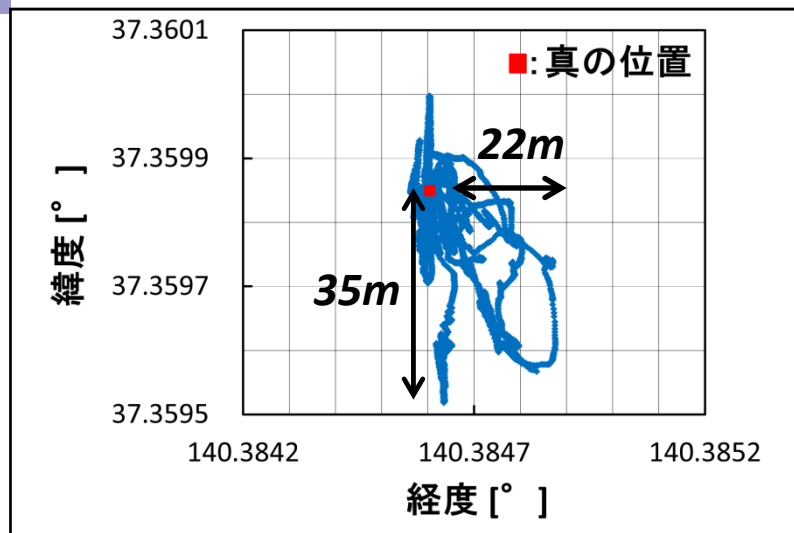


測定環境

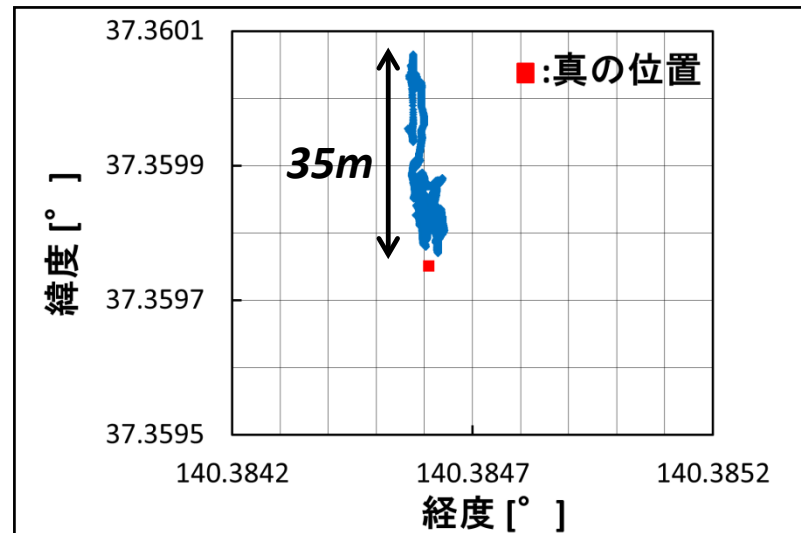


使用機器

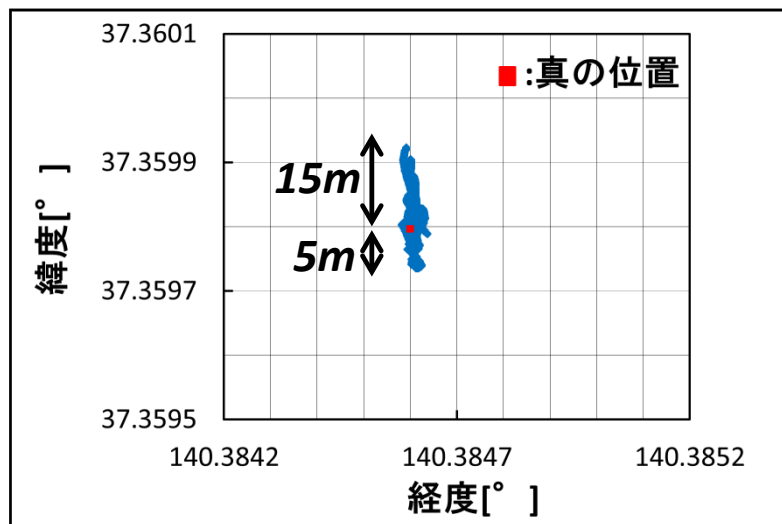
実験結果



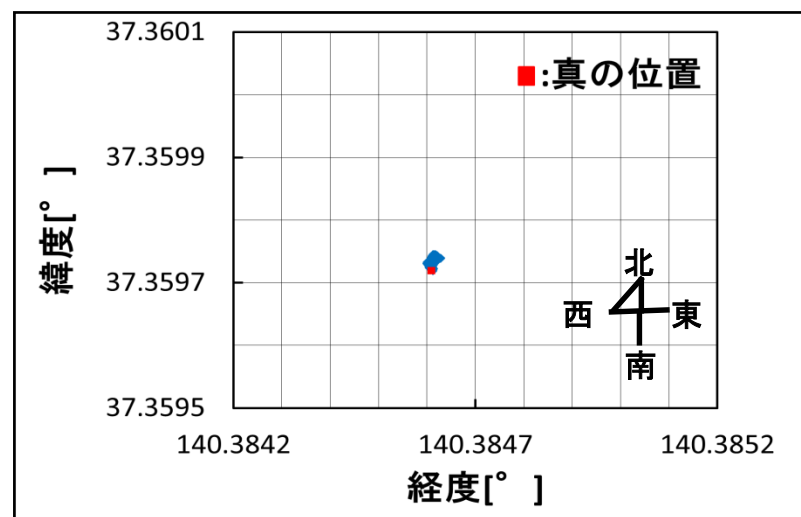
(a)14号館壁際(校舎の南側)



(b)15号館壁際(校舎の北側)

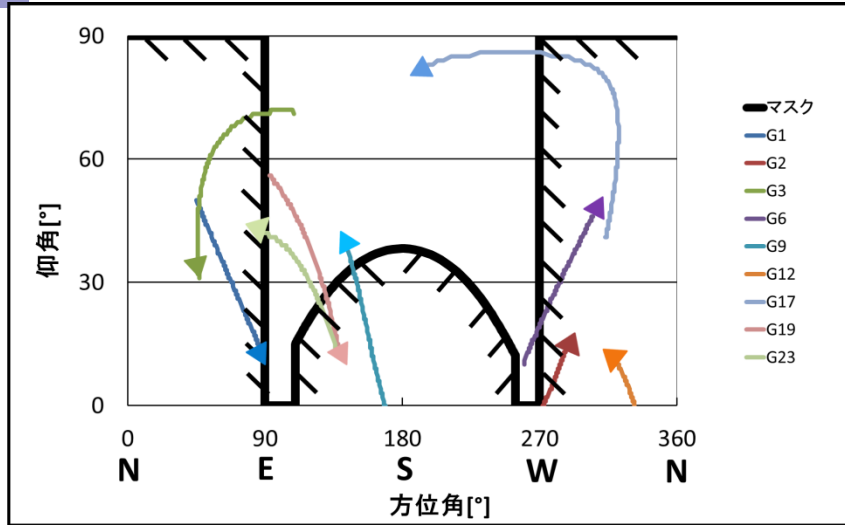


(c)中間地点

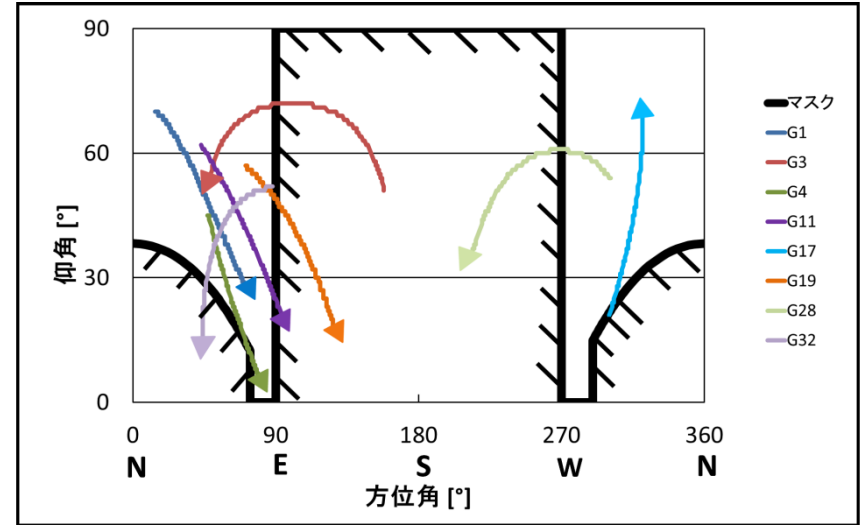


屋上

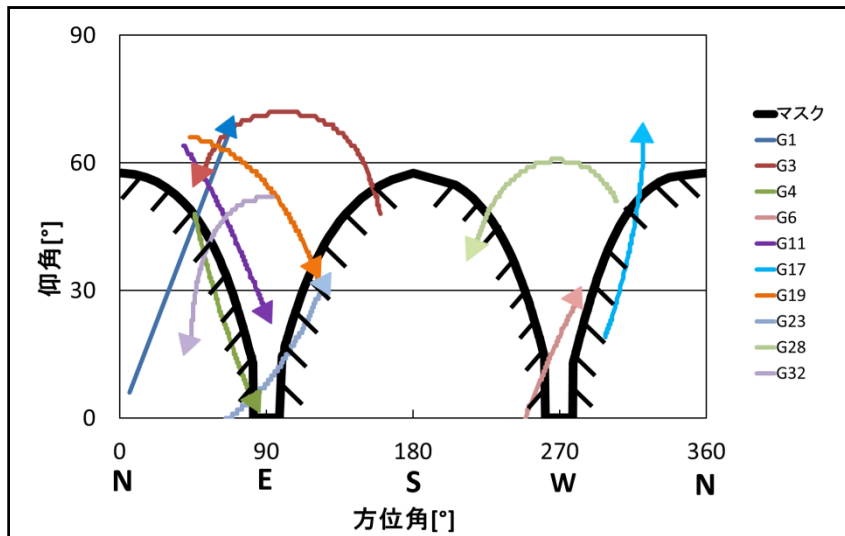
衛星の移動経路とマスク



(a)14号館壁際(校舎の南側)



(b)15号館壁際(校舎の北側)

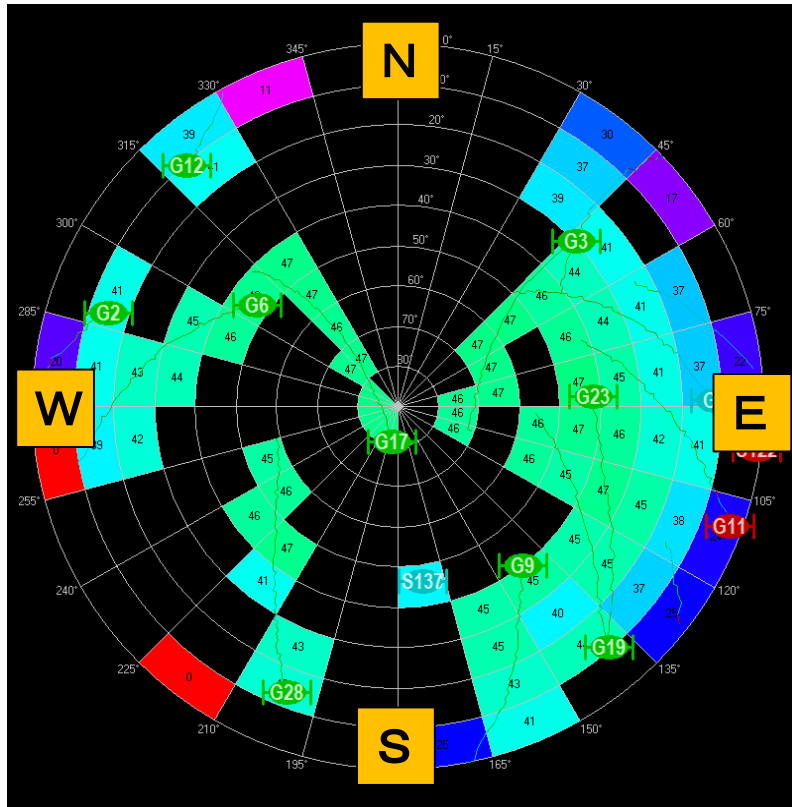


(c)中間地点

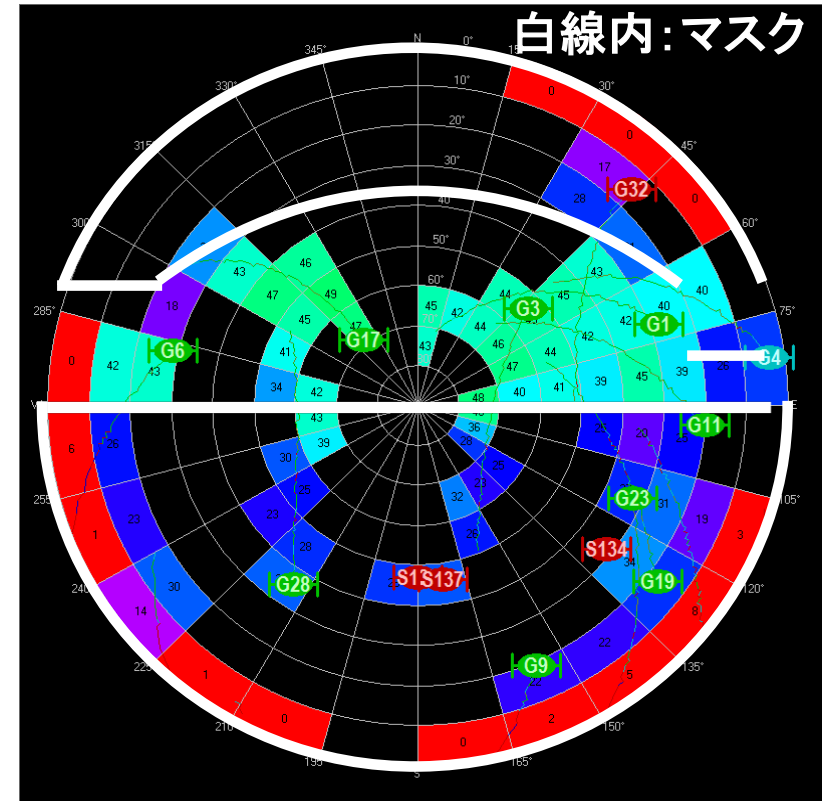
マスク

建物により、受信機が衛星を直視できない範囲

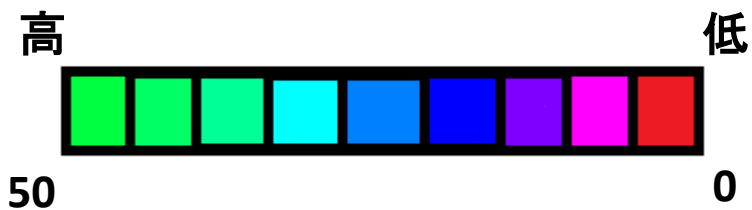
マスク内に衛星があると測位結果にずれを生じさせる誤差の要因となっている



屋上



(a)15号館壁際

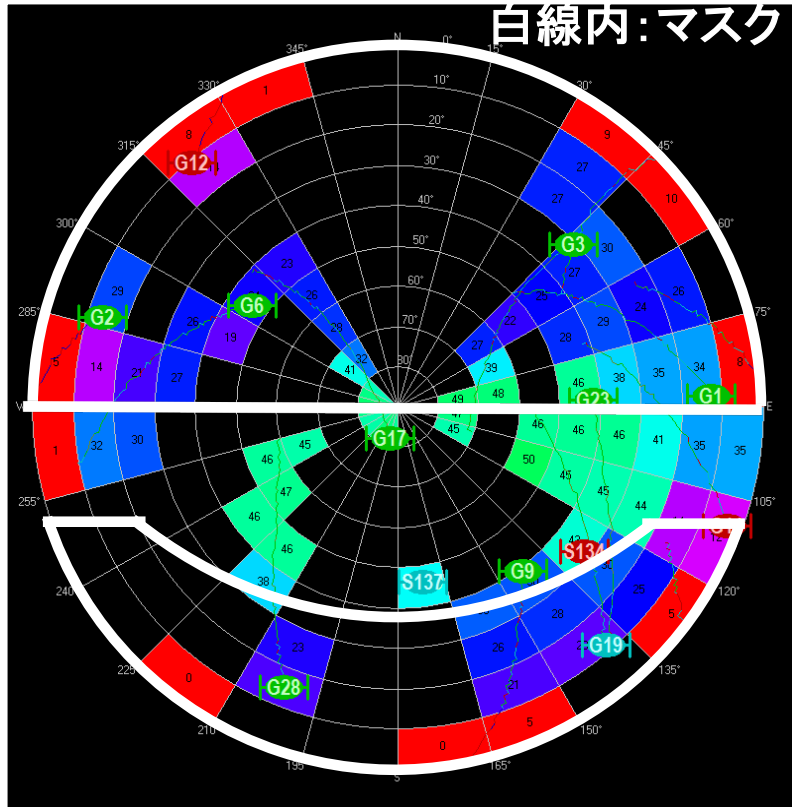


高 : 測位に使用される衛星 **低**

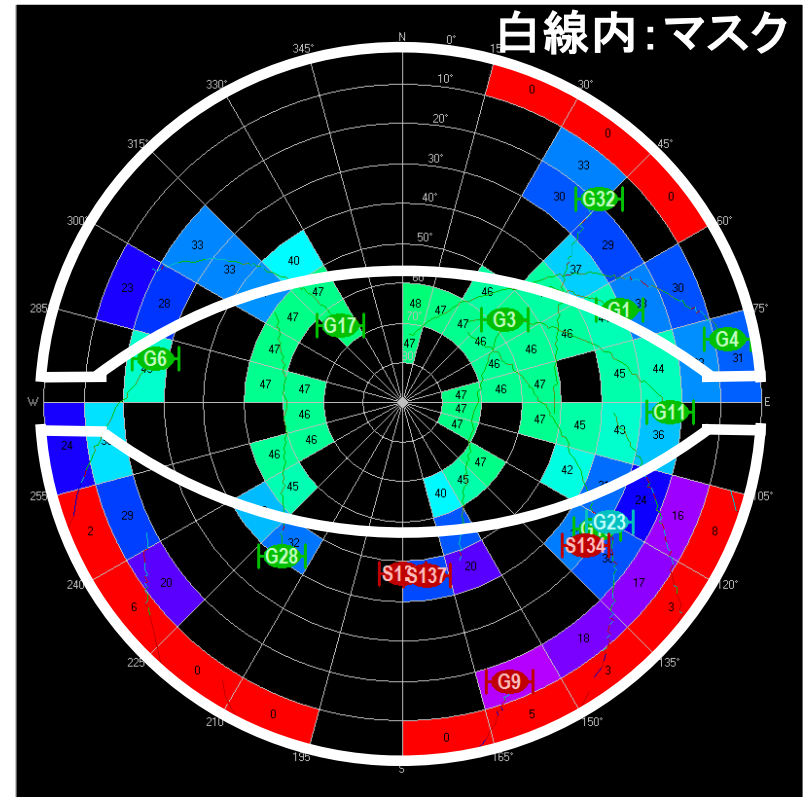
:測位に使用可能な衛星(予備)

: 測位に使用されない衛星

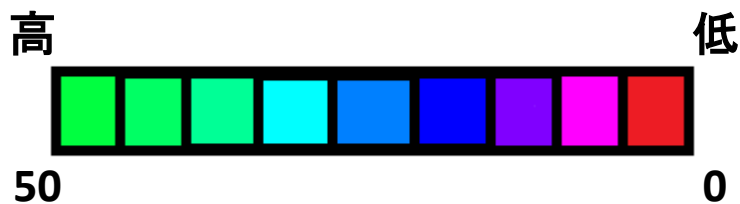
衛星配置と電波強度(2)



(b)14号館壁際

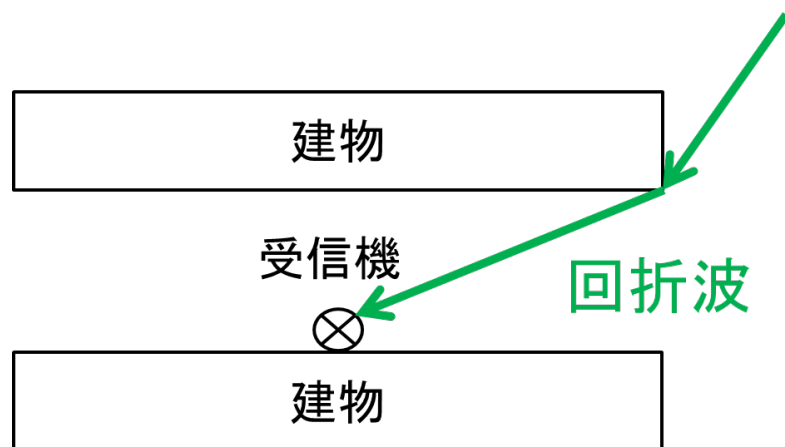
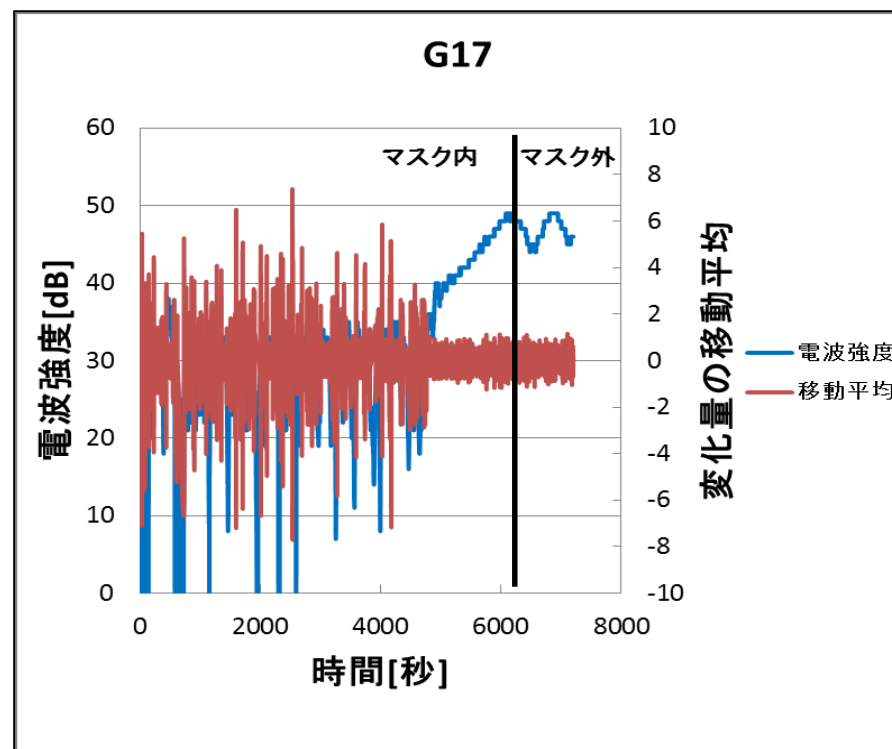
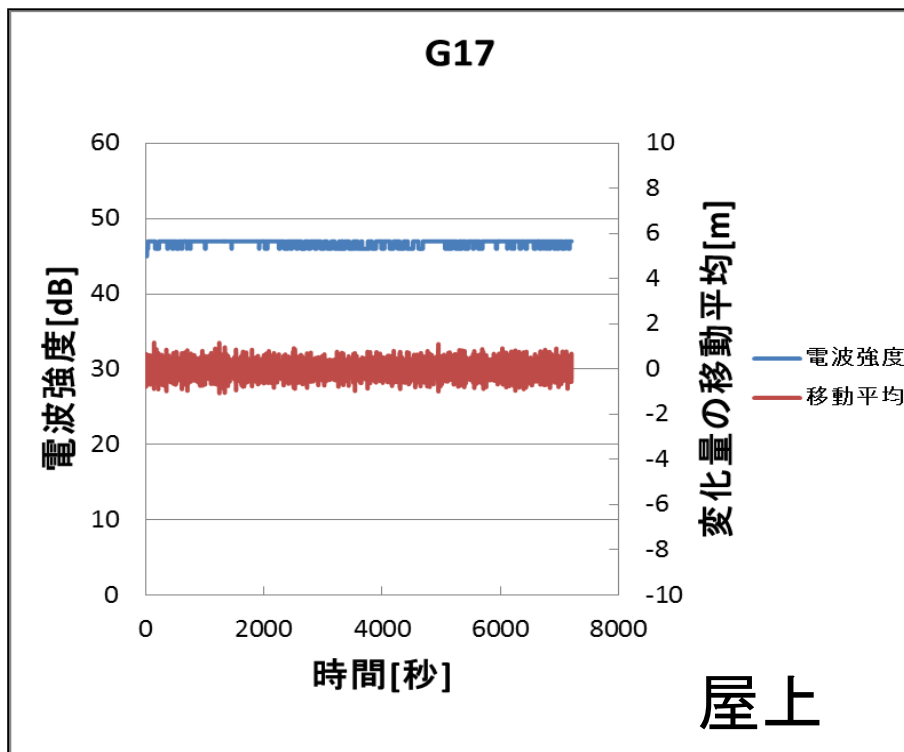


(c)中間地点



- |●|: 測位に使用される衛星
- |●|: 測位に使用可能な衛星(予備)
- |●|: 測位に使用されない衛星

電波強度と移動平均



電波強度と擬似距離の関係性から、測位に使用される衛星がマスク内外か判断できることを確認

GPS-Studioを用いた 3D都市環境下における シミュレーション評価



研究の目的

- 3D都市環境モデルにおける衛星測位システムの複合利用による測位精度改善効果の評価・解析
- レイトレーシング法に基づくシミュレーションツール (GPS-Studio及びRapLab)を用いた都市環境モデルの作成 (郡山駅周辺を想定)
- GPS単体、GPS+QZSS、GPS+GALILEO、GLONASS・BeiDouを含めた全複合における測位精度特性の改善効果の評価・解析

シミュレーションの流れ

国土地理院ホームページで地図情報入手し、シミュレーションに利用可能なファイル形式に変更

↓

QGIS(建物編集ソフト)で建物を編集

↓

受信位置作成ツールで受信機位置を設定

↓

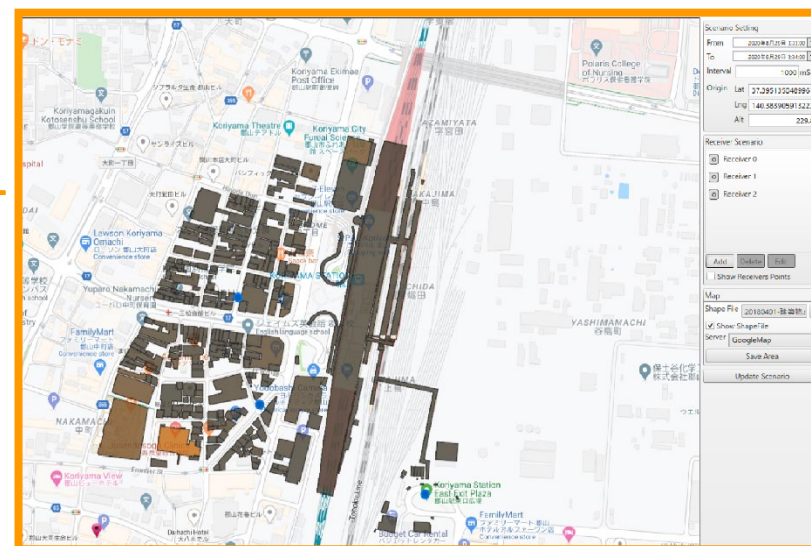
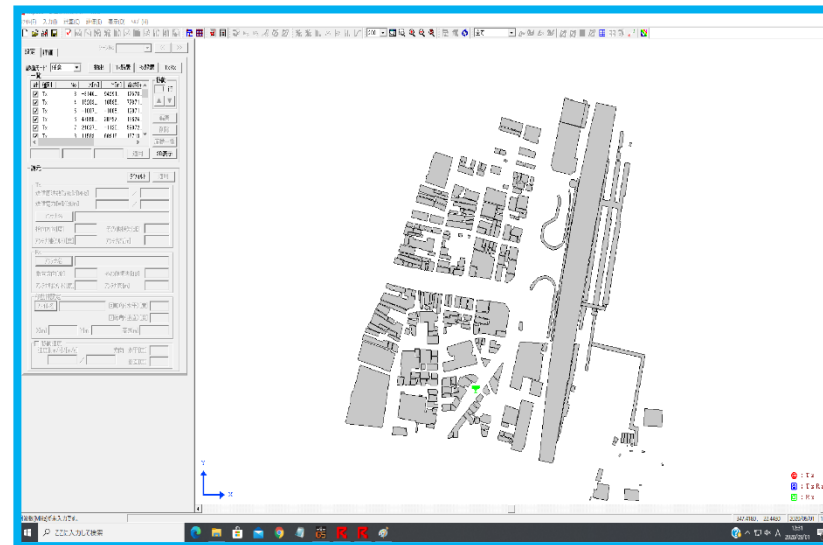
GPS-Studioで衛星情報、受信機情報を設定

↓

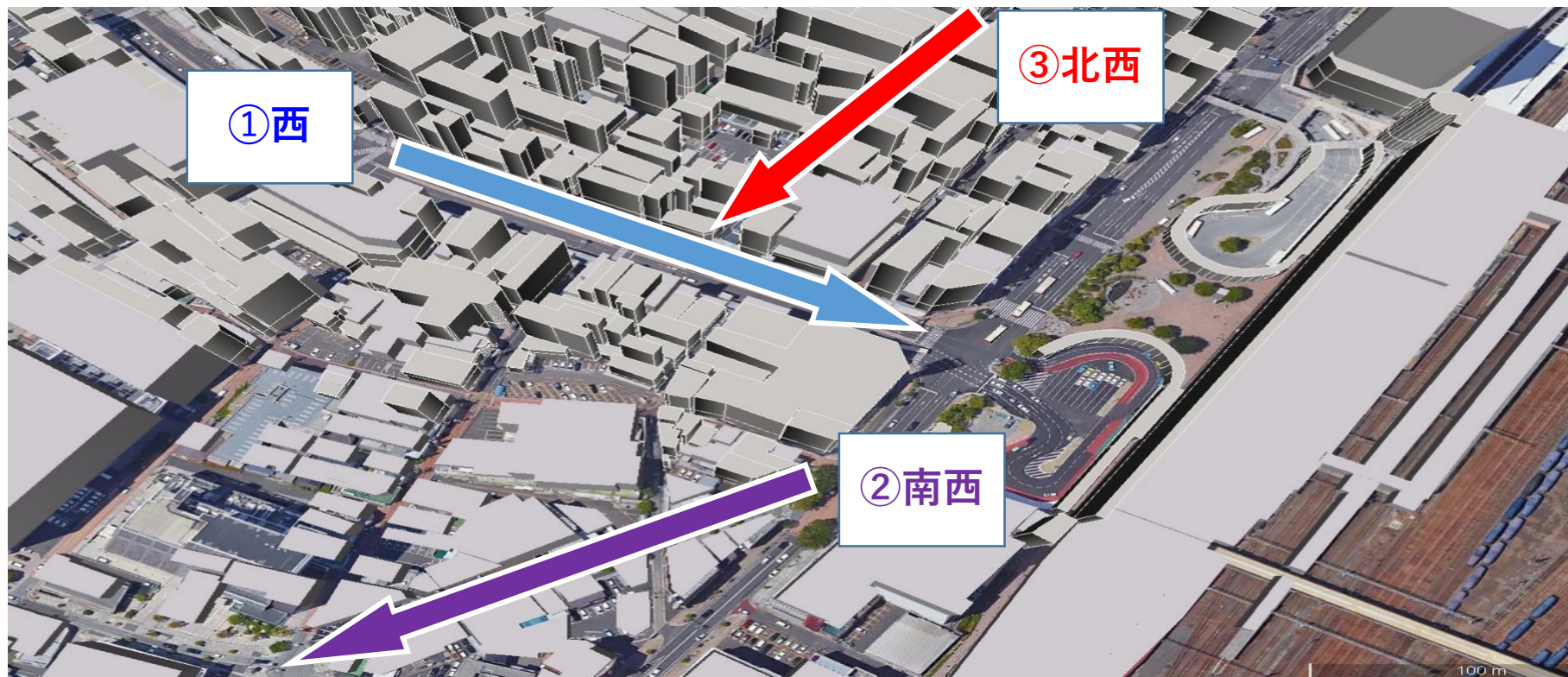
RapLabで電波伝搬を計算

↓

GPS-Studioで測位結果の取得、評価・解析



シミュレーション条件



- 受信機位置:地上から1.5mに設置
- 道路幅 : 「①西」:22m 「②南西」:12m 「③北西」:7m、として設定
- 評価対象日時:2020年6月15日 9:00~21:00 ※12時間はGPS衛星の1周期に相当

衛星軌道図（全衛星）

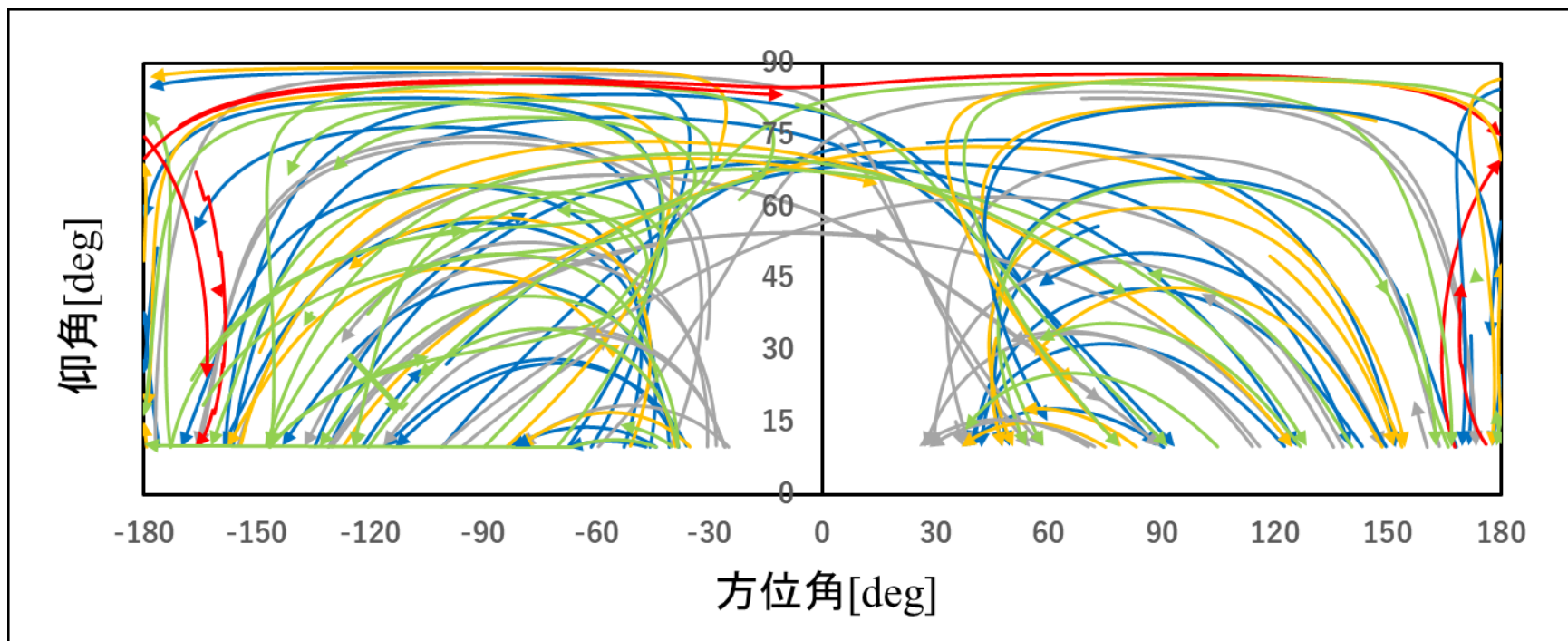


図7 GPS、QZSS、GALILEO、GLONASS及びBeiDou衛星軌道図
(2020年6月15日9:00～21:00)

- 北方向に衛星軌道が現れない範囲が存在
- 衛星が低仰角、高仰角に満遍なく分布
- 可視衛星数が増加することによる衛星配置の改善

測位結果①

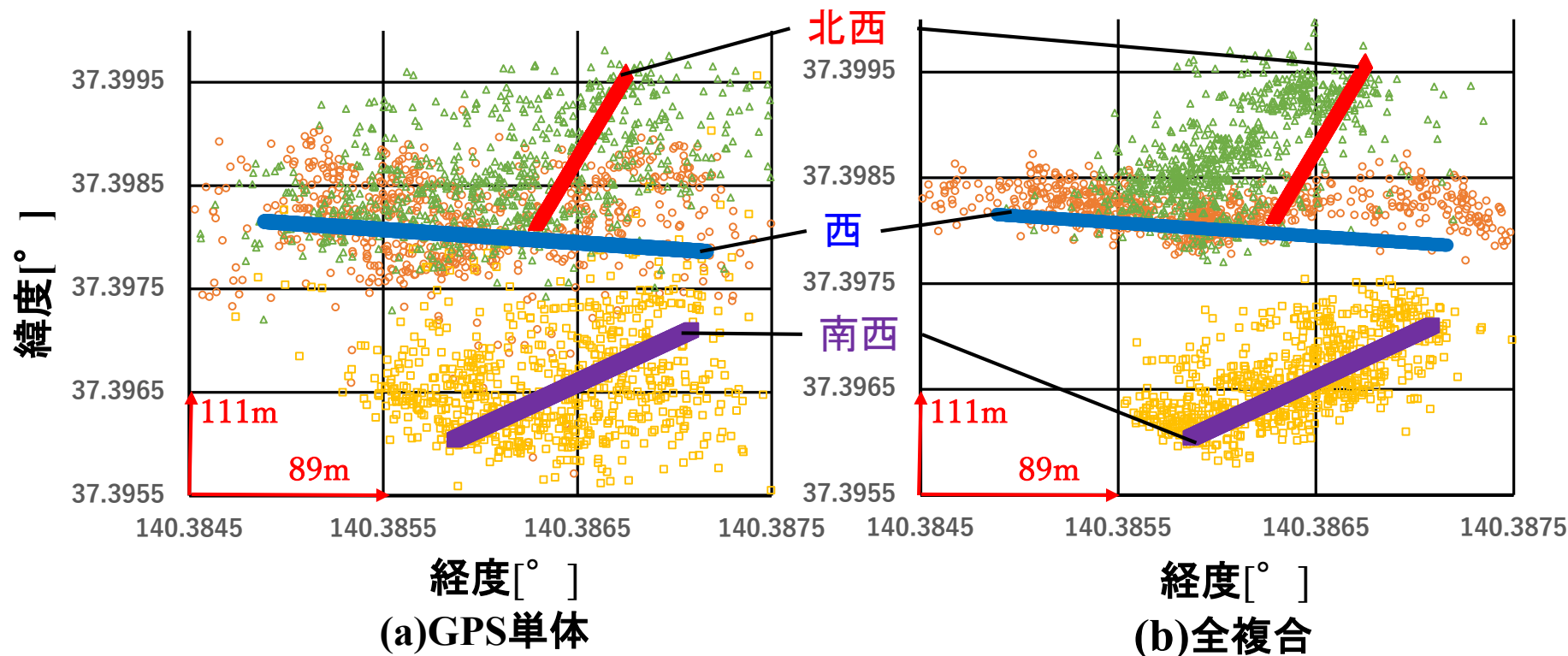


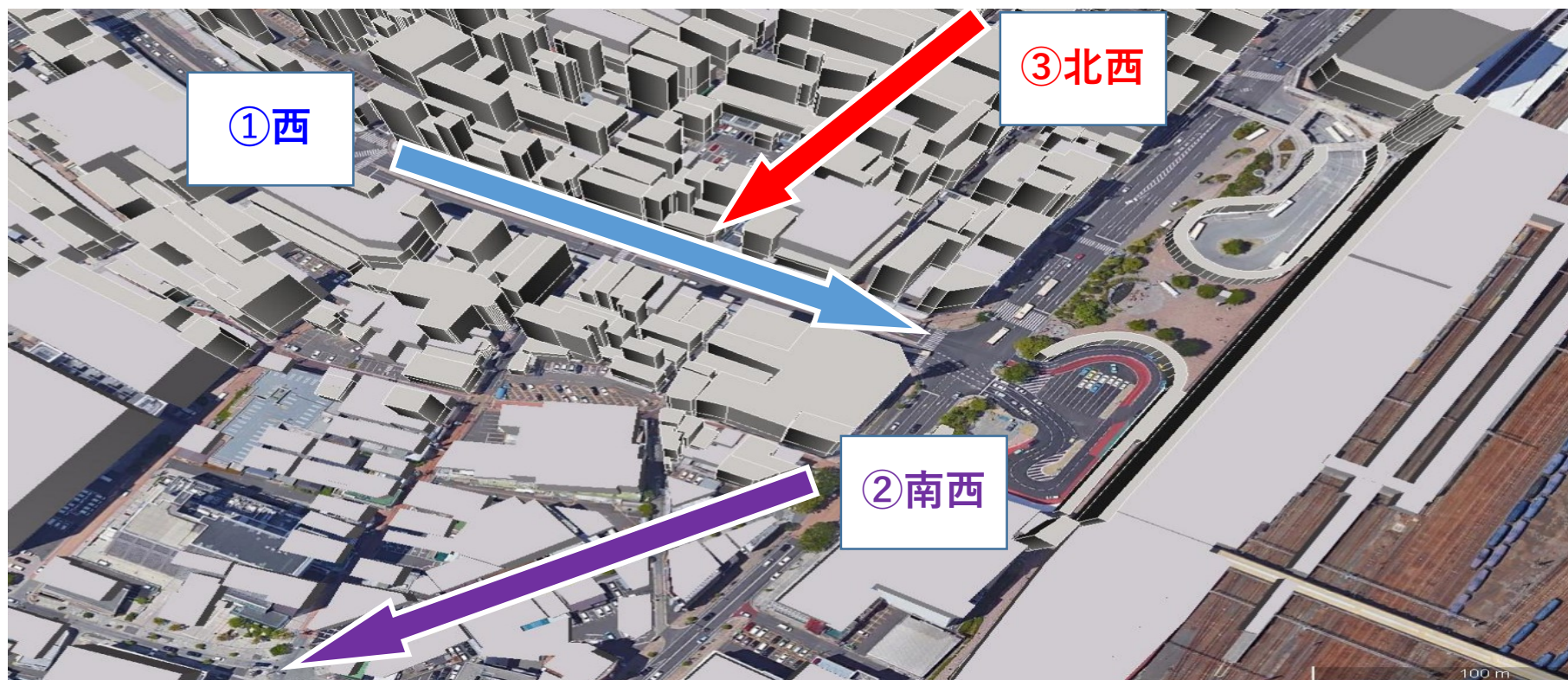
図1 測位精度特性 (真値:①西、②南西、③北西)

※横軸:緯度方向の測位誤差[m] 縦軸:経度方向の測位誤差[m]

測位精度の比較

- 衛星測位システムを複合利用することで測位点のバラつきが改善し、測位誤差が抑えられるため**測位精度が向上**
- ③北西の測位結果が西方向に偏っているが、道路に隣接する南東方向の建物により同方向の衛星信号が遮断され、衛星配置に偏りが生じたことに起因

シミュレーション条件



- 受信機位置:地上から1.5mに設置
- 道路幅:「①西」:22m 「②南西」:12m 「③北西」:7m、として設定
- 評価対象日時:2020年6月15日 9:00~21:00 ※12時間はGPS衛星の1周期に相当

2. ストリートセルを対象とする 直交偏波MIMO伝搬特性 評価

KDDI総合研究所との共同研究
2013年～2016年頃



◆ 5 G以降の移動通信システム

- 1Gbps以上の広帯域伝送

- 3.4~3.6GHz帯、**28GHz帯**の使用

- ✓ MIMO (Multiple Input Multiple Output)

- ✓ キャリアアグリゲーション (CA)

- 周波数が高くなると

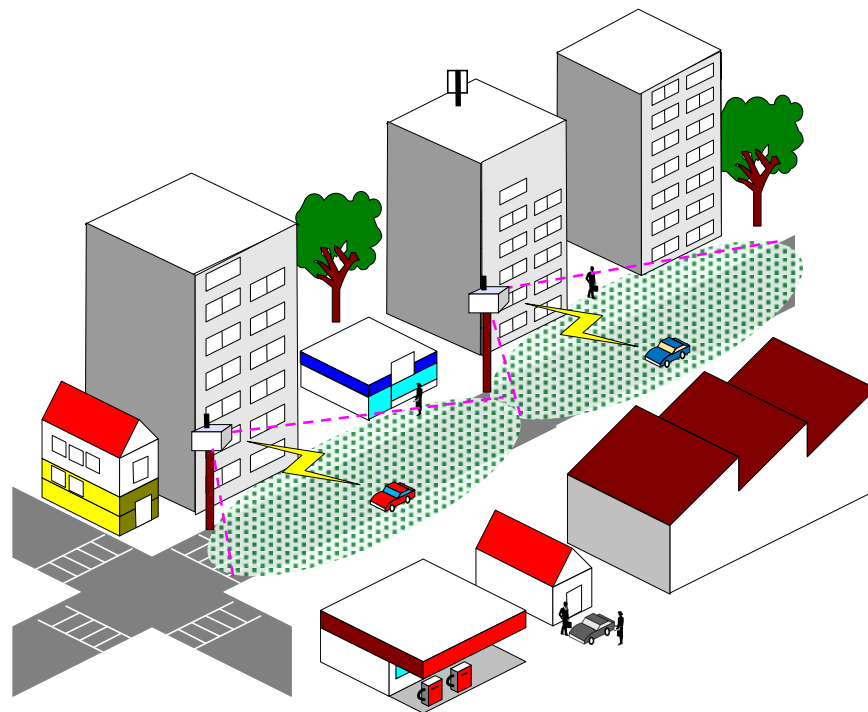
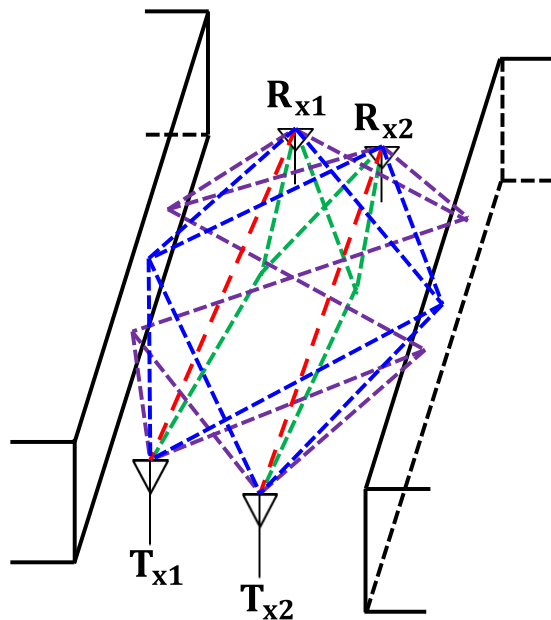
- 電波の**直進性**が強くなる

- 伝搬減衰が大きくなる

- 通信エリアが**限定的**

研究背景

セル構成法として...



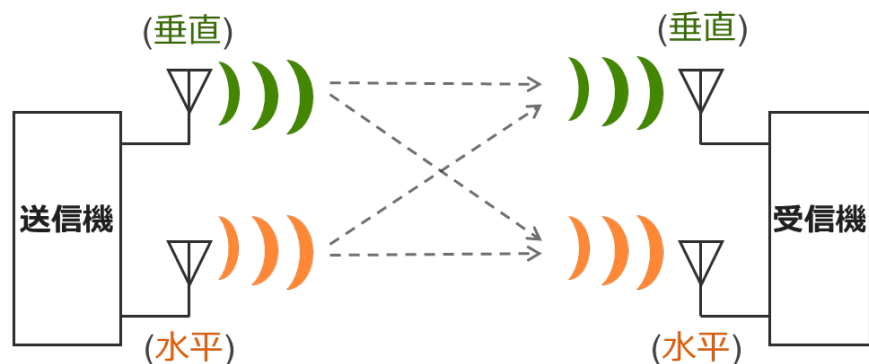
ストリートセルが有効

- 主要道路の形状に従った通信エリアを形成
- 小型、低出力な基地局
- 比較的低位置にアンテナを設置

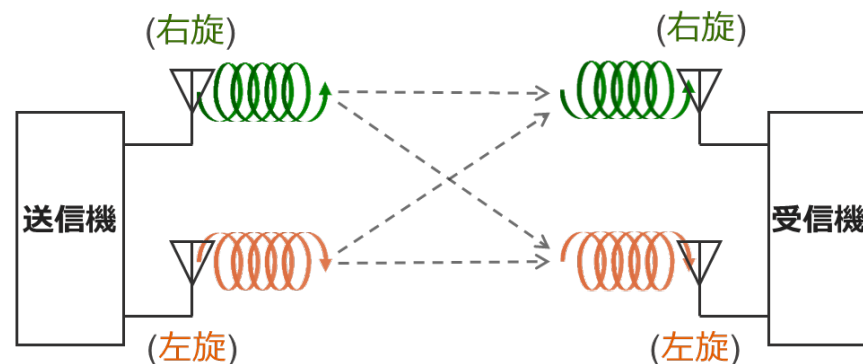
研究背景

偏波MIMO技術に関しては...

直交直線
偏波MIMO



直交円
偏波MIMO

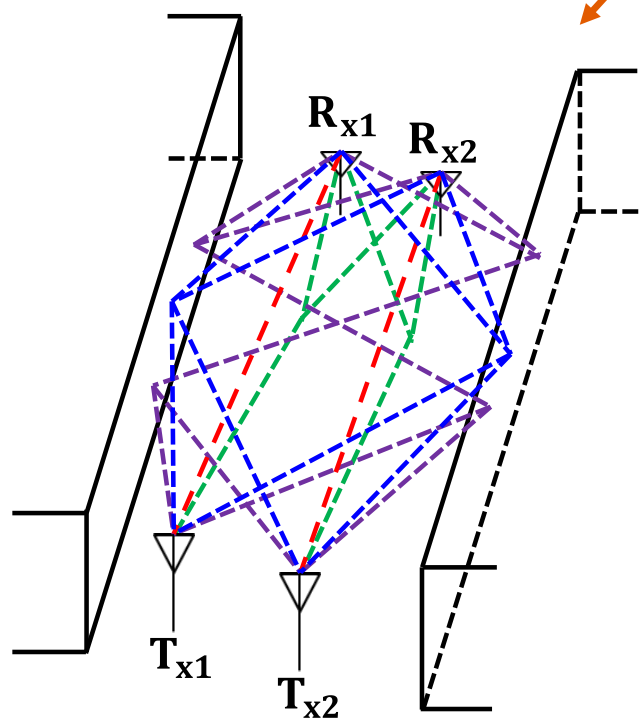


直交直線偏波MIMO方式：実用化

直交円偏波MIMO方式：適用検討は不十分

直交円偏波MIMO方式，屋内無線LANへの適用は検討されているものの，
屋外を対象とする移動通信システムへの適用検討は未だなされていない。

解析モデル（反射回数）



- **2回反射a**：（6パスモデル）
「直接波＋壁面(1回)反射＋壁面(2回)反射＋路面(1回)反射」
- **2回反射b**：（8パスモデル）
「2回反射a＋（壁面＋路面）反射」
- **3回反射a**：（10パスモデル）
「2回反射b＋壁面(3回)反射」
- **3回反射b**：（12パスモデル）
「3回反射a＋{壁面(2回)＋路面} 反射」
- **5回反射b**：（20パスモデル）
「3回反射b＋壁面(4回)反射＋{壁面(2回)＋路面＋壁面} 反射＋壁面(5回)反射＋{壁面(3回)＋路面＋壁面} 反射」

電波伝搬実験

解析モデル
の妥当性
確認のため



測定環境

道路の両側に3階建ての建物が100mに亘って連続する
ストリート環境

路面：アスファルト

建物：コンクリート

耐震補強用の鉄骨や
窓ガラスが存在

表面：フラットな形状でない

測定アンテナ

- ・送信アンテナは右旋円偏波と垂直偏波の無指向性アンテナ
- ・受信アンテナは無指向性の偏波共用アンテナ
- ・円偏波は位相差90度の方向性結合器を使用

測定偏波

主偏波（RR偏波，VV偏波）

交差偏波（RL偏波，VH偏波）

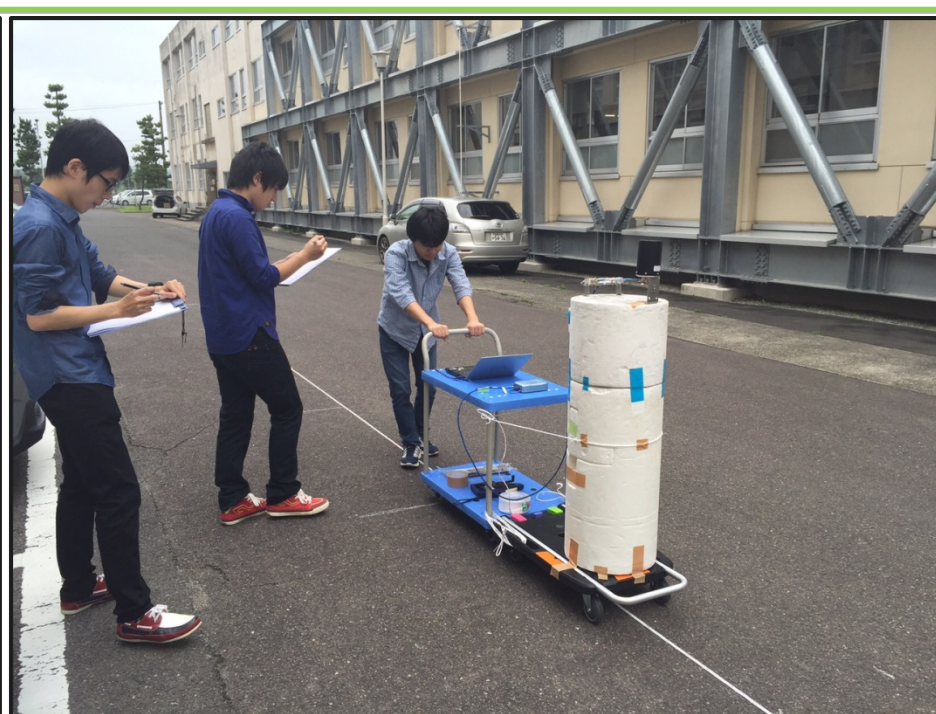
RR偏波：右旋円偏波送信→右旋円偏波受信

RL偏波：右旋円偏波送信→左旋円偏波受信

VV偏波：垂直偏波送信→垂直偏波受信

VH偏波：垂直偏波送信→水平偏波受信

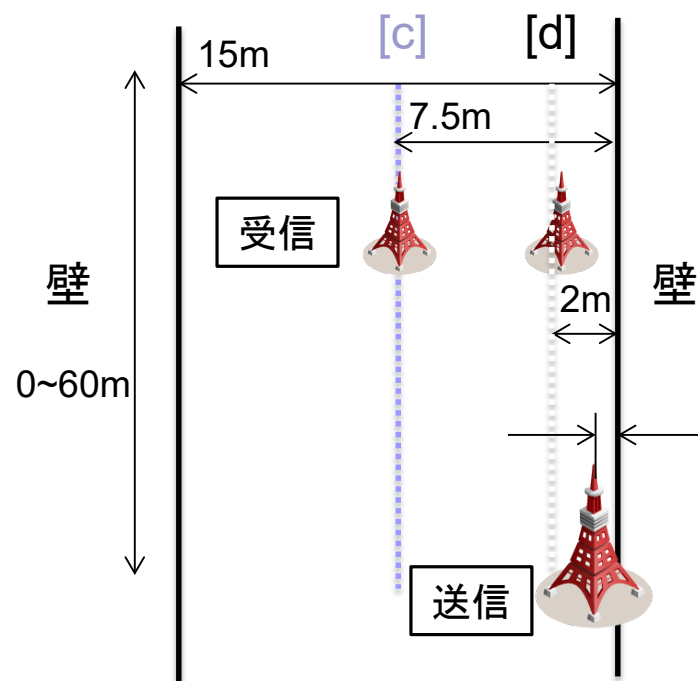
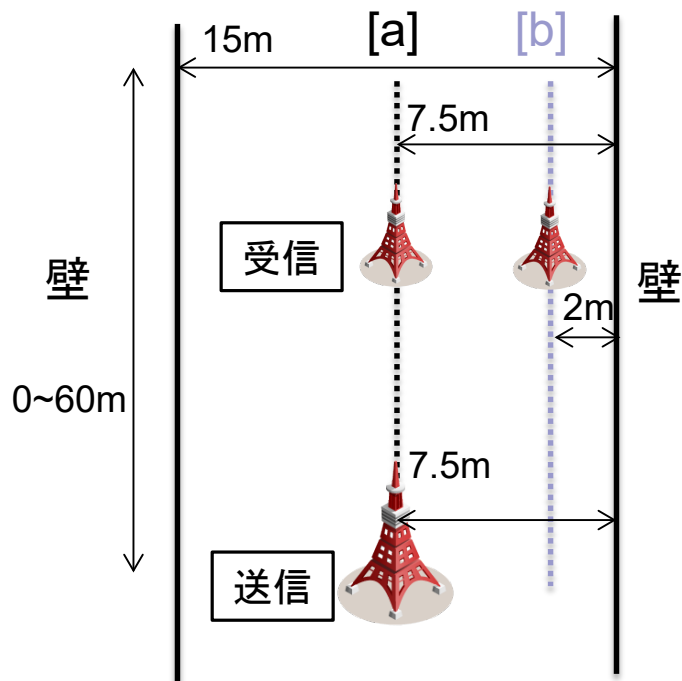




測定方法

送信アンテナを固定し，受信アンテナを台車に乗せて送受信間距離0m～60mの区間を移動させながら一秒間隔で瞬時受信電力値をノートPCに保存する形態を採用

送受信アンテナ配置場所



- [a] 中央—中央 (中-中)
- [b] 中央—壁際 (中-壁)
- [c] 壁際—中央 (壁-中)
- [d] 壁際—壁際 (壁-壁)

シミュレーションと実測
同じ条件にて評価

解析パラメータ

実測+
シミュレーション

送受信間距離	0～60m
搬送波周波数	1.4389GHz
送信信号	無変調連続波(CW)
送信アンテナ高	4m
受信アンテナ高	1.35m
道路幅	30m
送信電力 P_t	200mW
送信アンテナ利得 G_t	2.14dBi
受信アンテナ利得 G_r	2.14dBi

反射係数

フレネル反射係数

TE波反射係数

$$\Gamma_{TE} = \frac{\mu_2 \cos \theta - \mu_1 \sqrt{n_{12}^2 - \sin^2 \theta}}{\mu_2 \cos \theta + \mu_1 \sqrt{n_{12}^2 - \sin^2 \theta}}$$

TM波反射係数

$$\Gamma_{TM} = \frac{\mu_1 n_{12}^2 \cos \theta - \mu_2 \sqrt{n_{12}^2 - \sin^2 \theta}}{\mu_1 n_{12}^2 \cos \theta + \mu_2 \sqrt{n_{12}^2 - \sin^2 \theta}}$$

円偏波反射係数

同相成分反射係数

$$\Gamma_e = \frac{\Gamma_{TE} + \Gamma_{TM}}{2}$$

逆相成分反射係数

$$\Gamma_o = \frac{\Gamma_{TE} - \Gamma_{TM}}{2}$$

反射面に対して入射面が垂直な場合

複素屈折率

$$n_{12} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\mu_1}} \sqrt{\frac{\varepsilon_2 - j\sigma_2/\omega}{\varepsilon_1 - j\sigma_1/\omega}}$$

n_{12}^2 : 複素誘電率

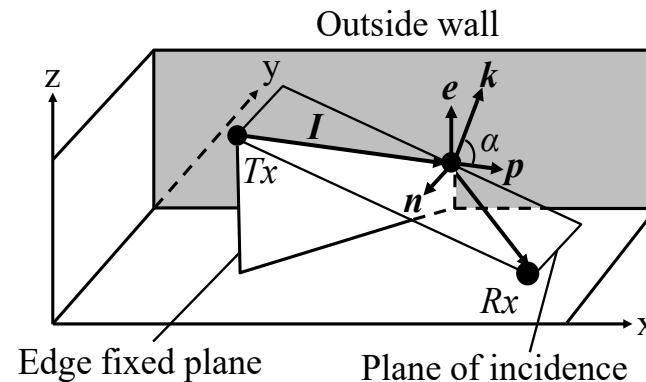
入射角

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{I}}{|\mathbf{n}| |\mathbf{I}|} \right)$$

コンクリートの媒質定数

比誘電率 $\varepsilon_r = 6.76$, 導電率 $\sigma = 0.0023$

比透磁率 $\mu_r = 1$



k : 入射面の法線ベクトル

p : 入射ベクトル $\mathbf{I}$ と z 軸の負方向ベクトルを含む面の法線ベクトル

α : 入射面の傾き角(ベクトル k とベクトル p とのなす角)

反射係数（偏波変換時）

直線偏波反射係数

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma_{TM} & 0 \\ 0 & \Gamma_{TE} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$
$$= \begin{pmatrix} \Gamma_{VV} & \Gamma_{VH} \\ \Gamma_{HV} & \Gamma_{HH} \end{pmatrix}$$

$$\Gamma_{VV} = \Gamma_{TM} \cos^2 \alpha - \Gamma_{TE} \sin^2 \alpha$$

$$\Gamma_{HH} = \Gamma_{TM} \sin^2 \alpha + \Gamma_{TE} \cos^2 \alpha$$

$$\Gamma_{VH} = (\Gamma_{TM} + \Gamma_{TE}) \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\Gamma_{HV} = -(\Gamma_{TM} + \Gamma_{TE}) \sin \alpha \cos \alpha$$

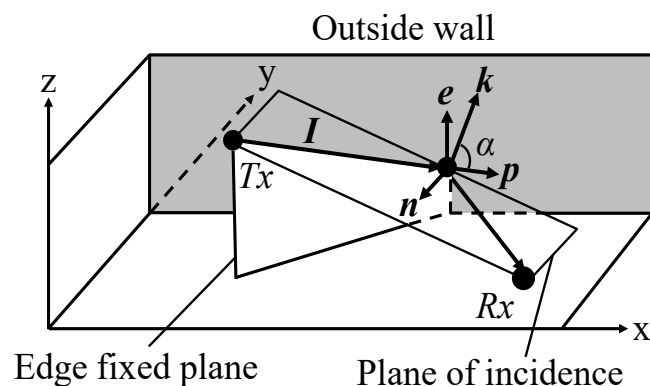
円偏波反射係数

$$\Gamma_{RR} = \frac{\{(\Gamma_{VV} + \Gamma_{HH}) - j(\Gamma_{VH} - \Gamma_{HV})\}}{2}$$

$$\Gamma_{RL} = \frac{\{(\Gamma_{VV} - \Gamma_{HH}) - j(\Gamma_{VH} + \Gamma_{HV})\}}{2}$$

$$\Gamma_{LR} = \frac{\{(\Gamma_{VV} - \Gamma_{HH}) + j(\Gamma_{VH} + \Gamma_{HV})\}}{2}$$

$$\Gamma_{LL} = \frac{\{(\Gamma_{VV} + \Gamma_{HH}) + j(\Gamma_{VH} - \Gamma_{HV})\}}{2}$$



送受信アンテナ高が異なる場合など、
電波が反射面に対して斜めに入射する際

主偏波が交差偏波成分に変換される

受信電力

受信電界強度

$$E_r = \sum_i E_i$$

$$= \sum_i \left\{ \frac{\sqrt{30G_t P_t}}{r_i} \prod_{j=1}^N \Gamma_{i,j} \exp(-j\omega(t_i - \tau_0)) \right\} \quad [\text{V/m}]$$

受信電力（瞬時値）

$$P_r = \left(\frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \right) \left(\frac{|E_r|^2}{120\pi} \right) \quad [\text{W}]$$

各々の経路の減衰量と反射に伴う振幅位相変動を考慮した各パスを合成

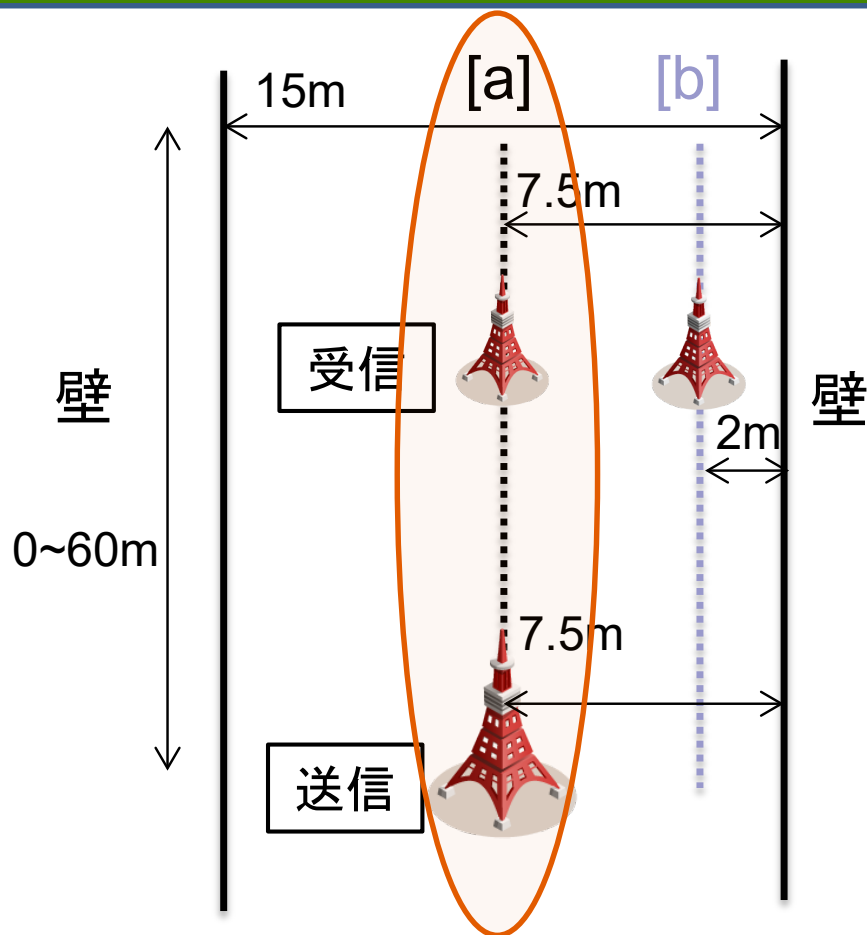
総和 i ：送信アンテナから受信アンテナにとどくすべてのパスを対象

t_i ：パスの到来時間

t_0 ：基本パスの到来時間

λ ：波長

アンテナ配置「中央—中央」

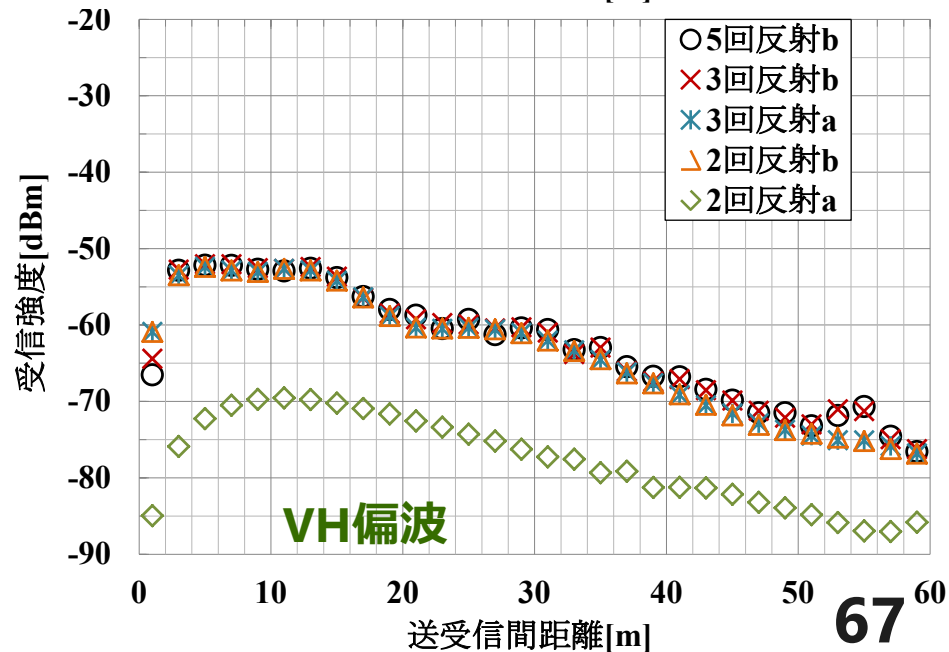
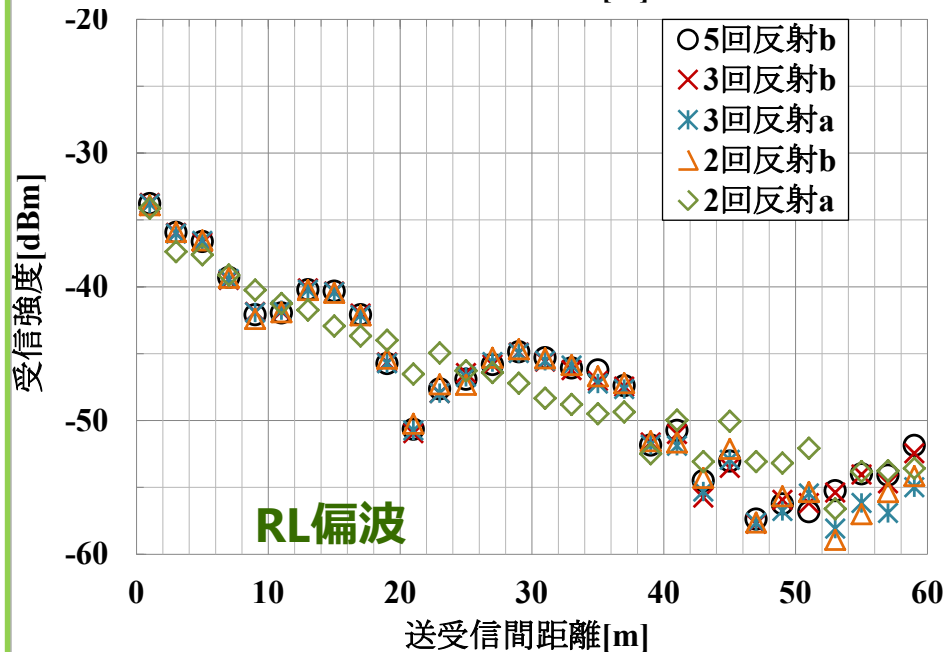
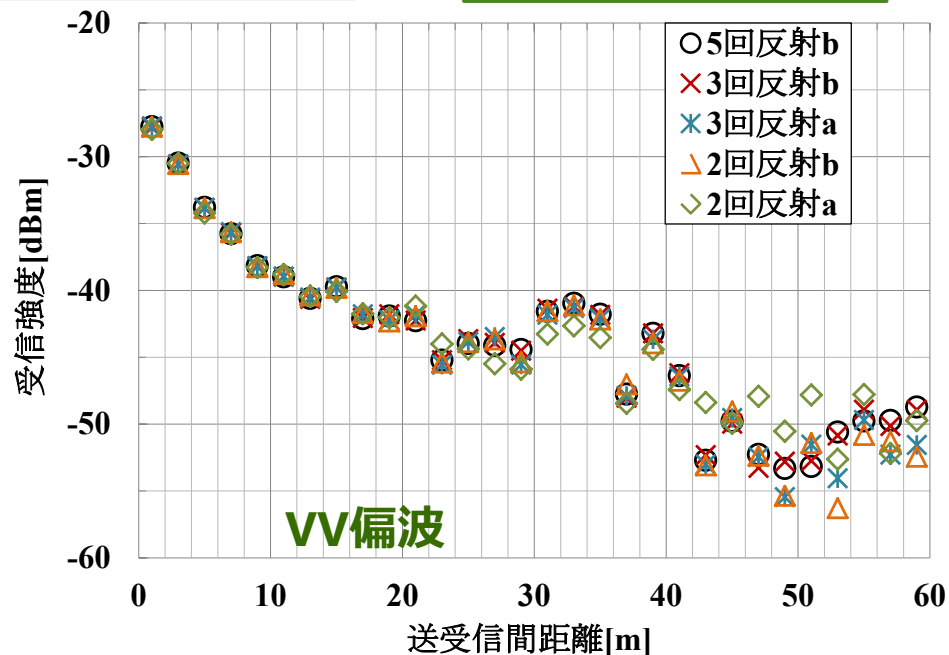
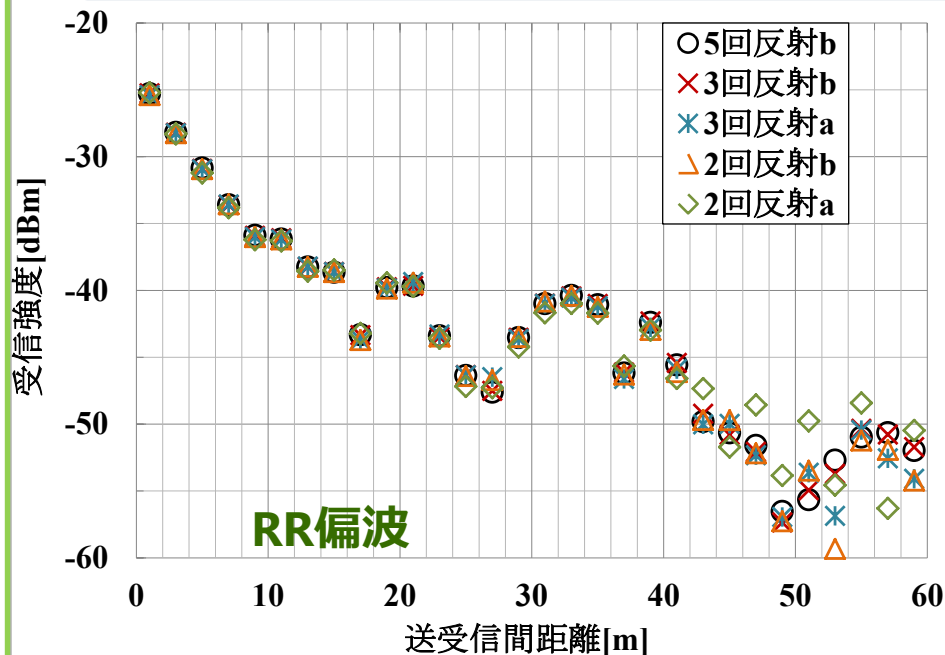


➤ 反射回数を変化
受信電力の変動

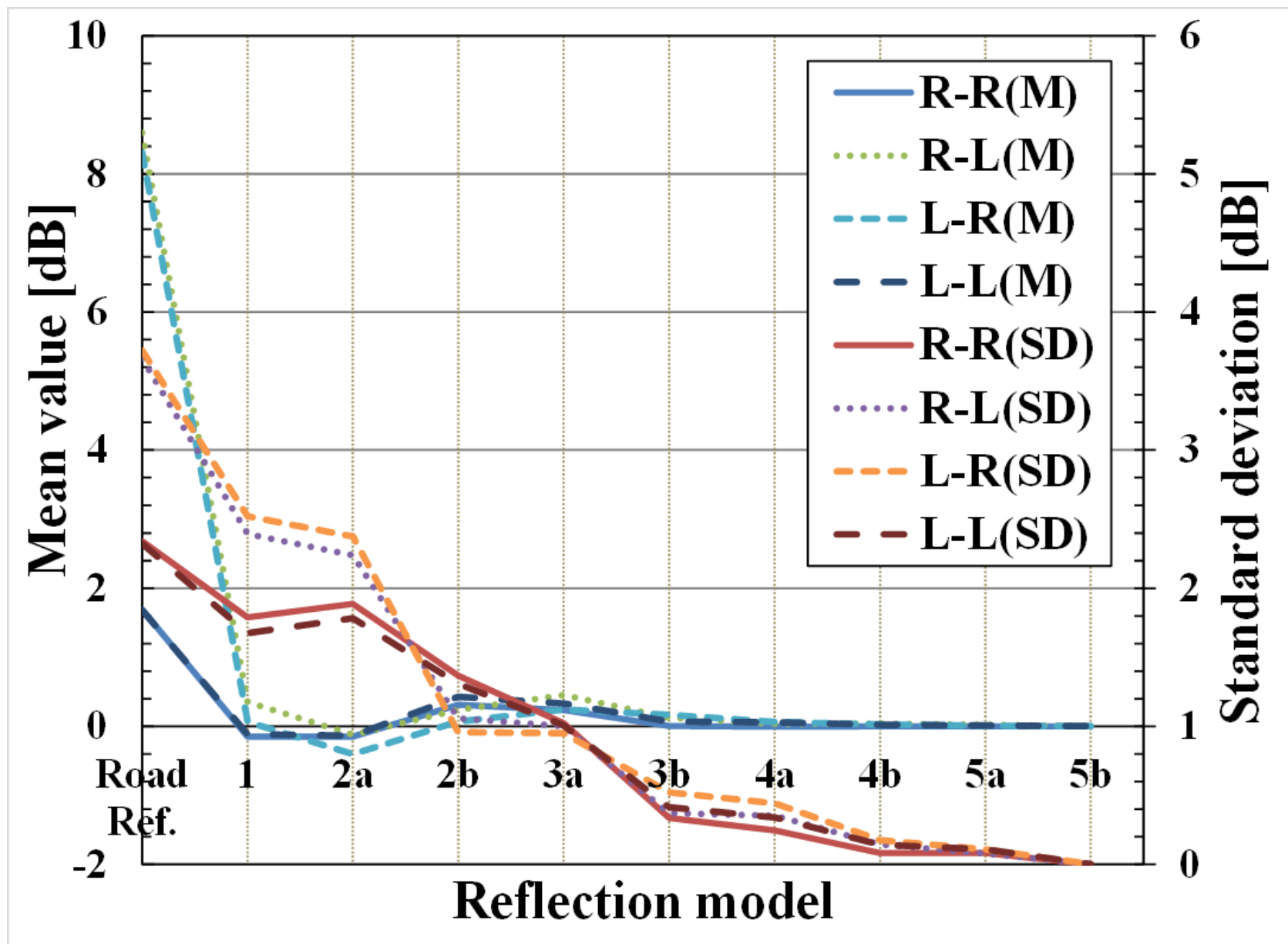
アンテナ配置
送受信アンテナともに道路中央
「中央—中央」

受信電力の距離特性 2m中央値

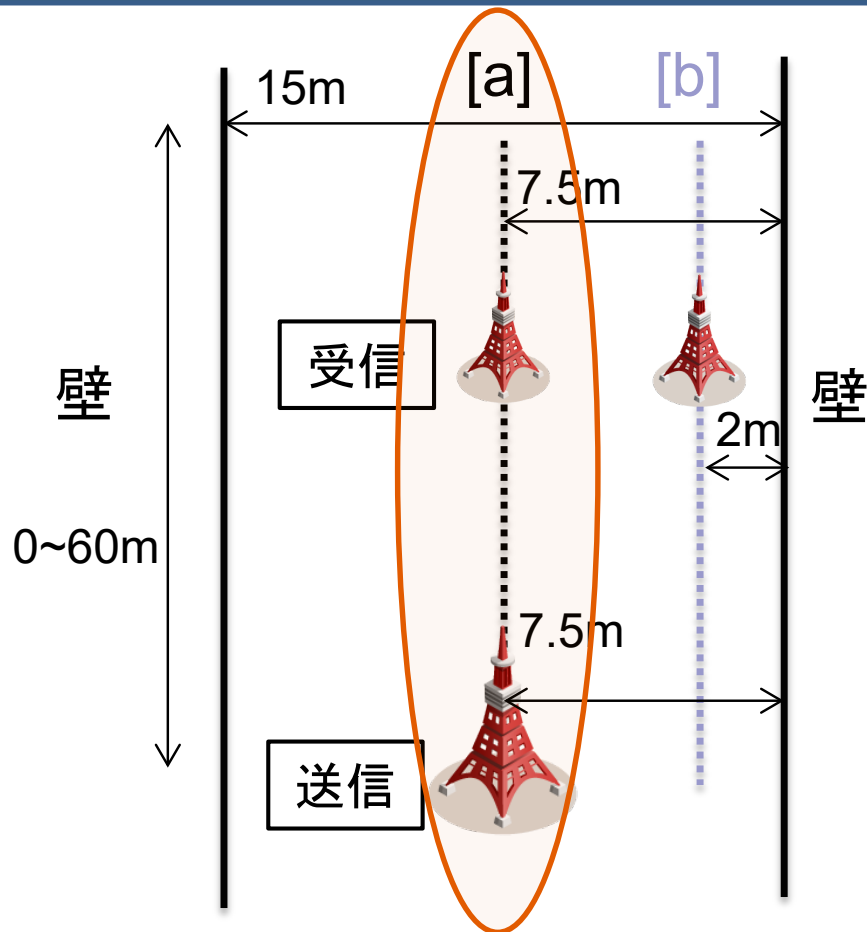
中央—中央



反射モデルの収束特性(直交円偏波)



アンテナ配置「中央—中央」



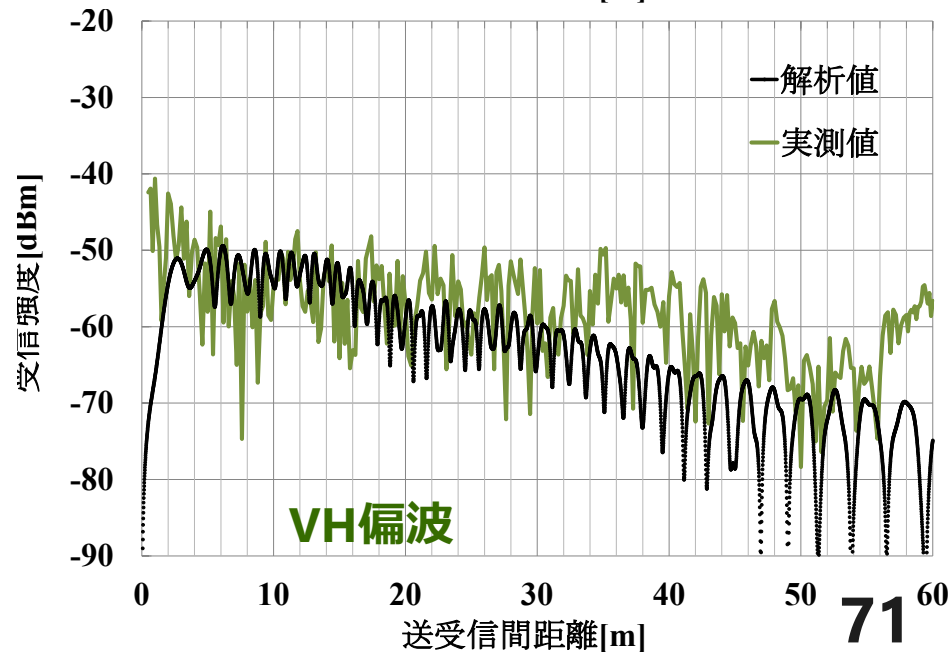
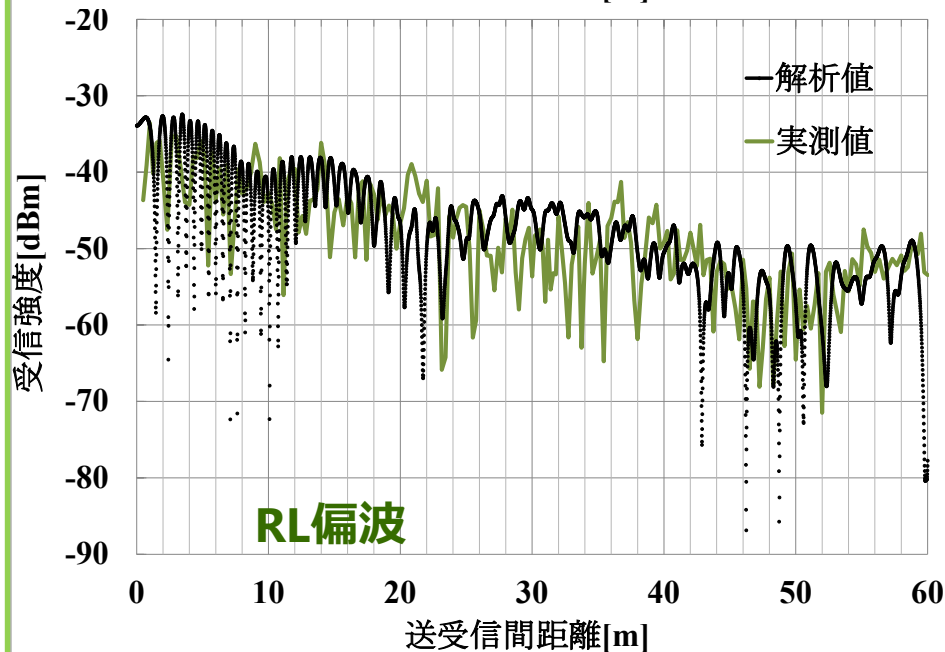
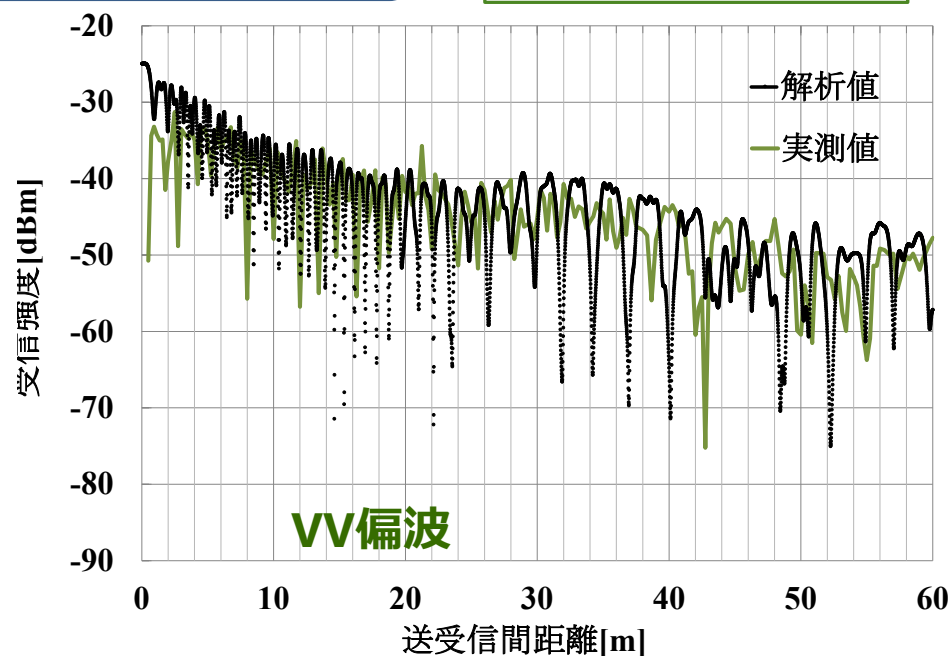
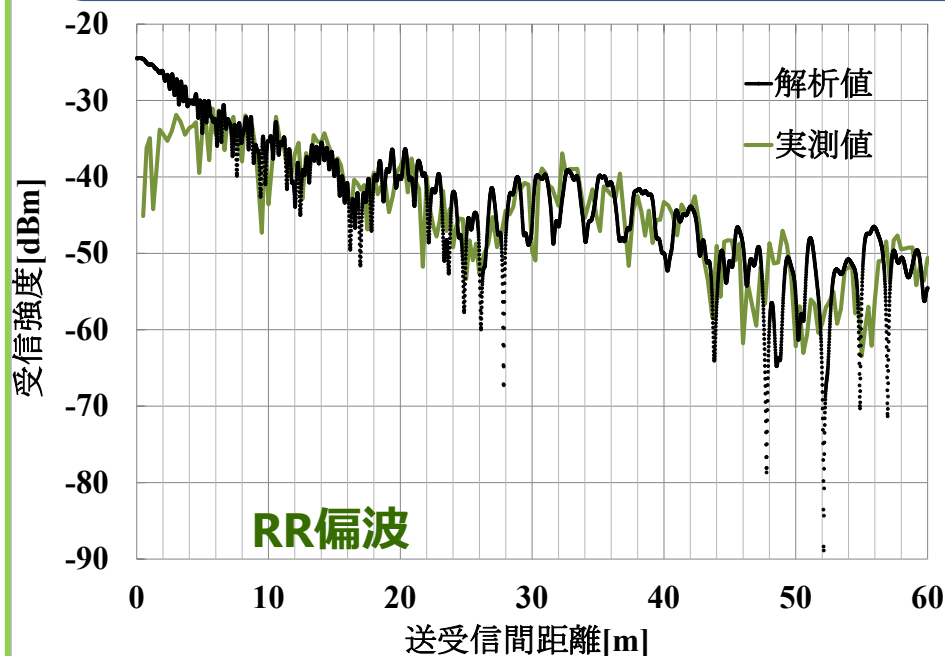
➤ 解析値と
実測値の比較

アンテナ配置
送受信アンテナともに道路中央
「中央—中央」

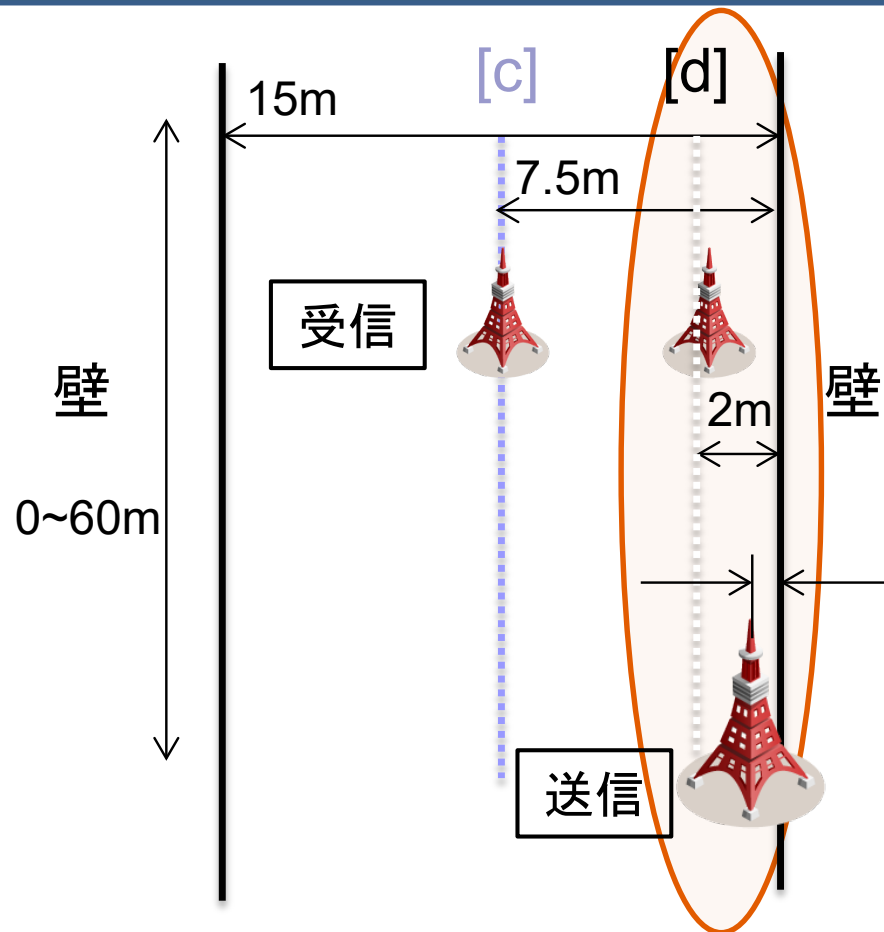
受信電力の距離特性

5回反射b

中央—中央



アンテナ配置「壁際一壁際」

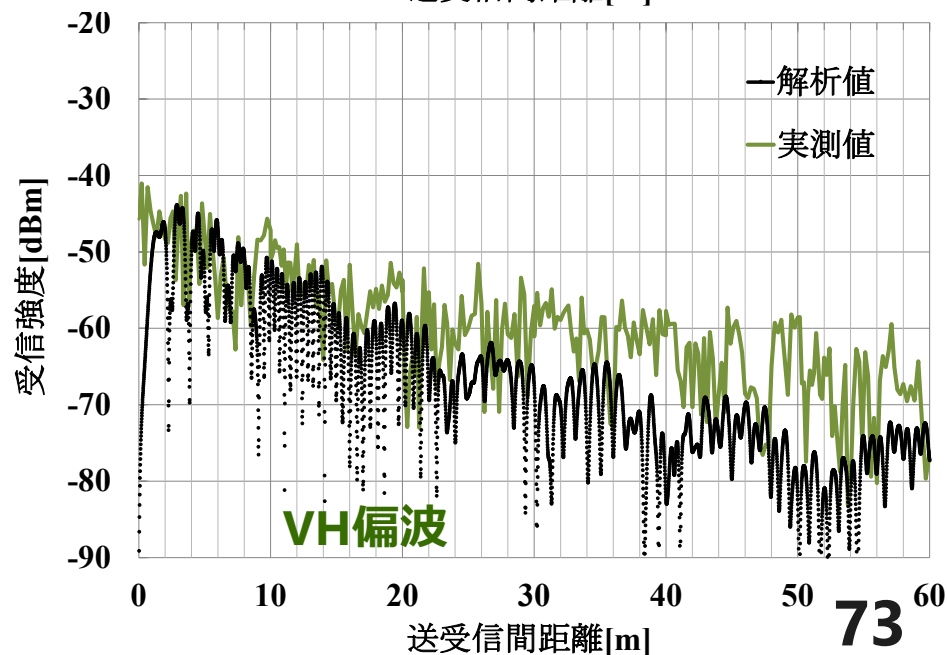
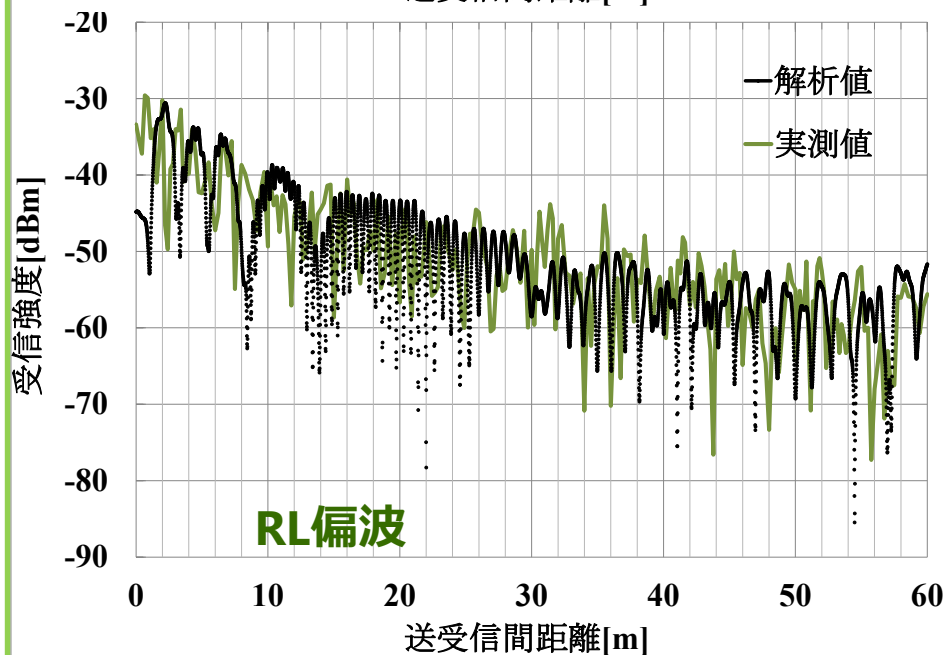
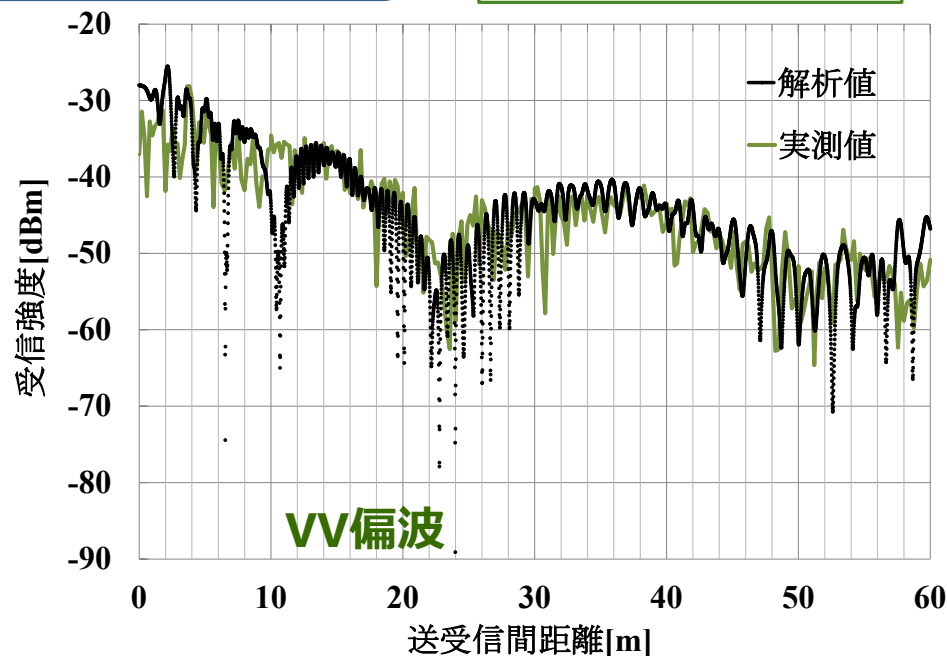
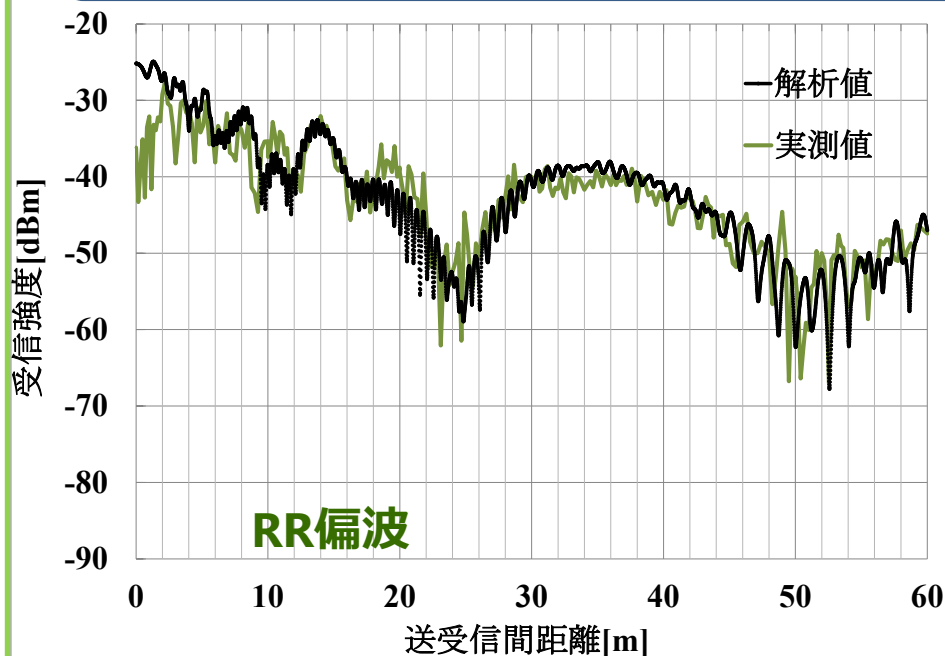


アンテナ配置
送受信アンテナともに道路壁際
「壁際一壁際」

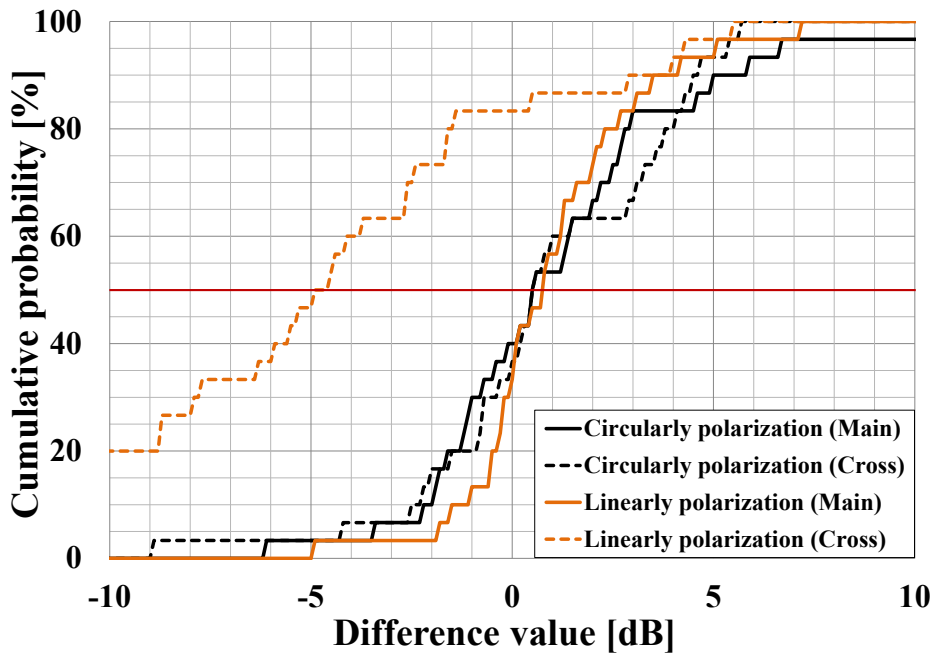
受信電力の距離特性

5回反射b

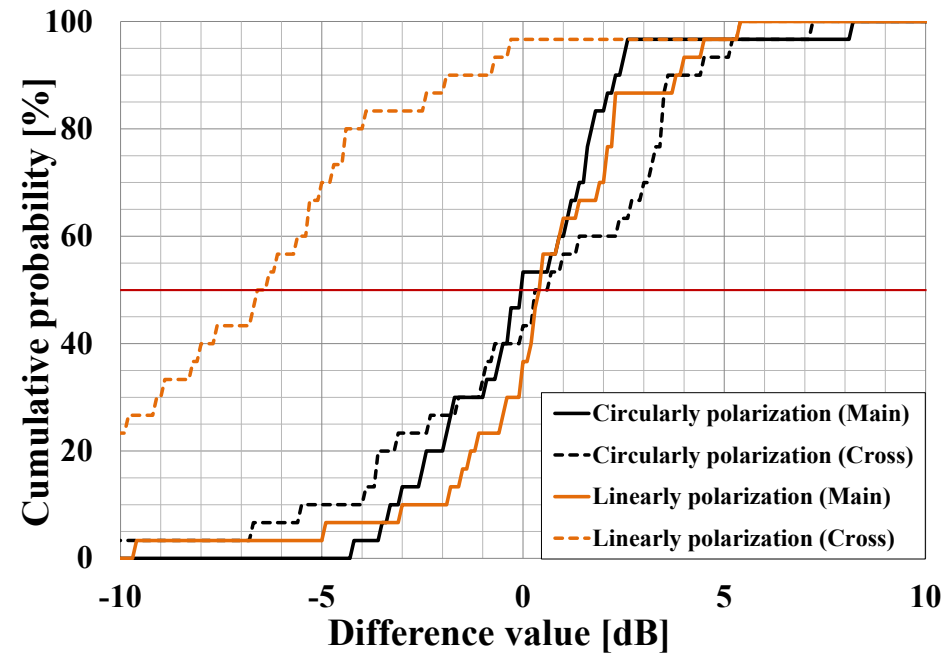
壁際一壁際



実験結果とシミュレーション結果の誤差特性



(Tx : 中央 - Rx : 中央)



(Tx : 壁際 - Rx : 壁際)

まとめ

- 「3回反射b」まで考慮すると, 「5回反射b」と2m間隔での中央値がほぼ一致
 - 壁面と路面を組み合わせた反射波の影響が大きい
 - シミュレーションモデルの妥当性を検証
(解析値と実測値の主偏波成分で高い類似性を確認)
 - 円偏波は交差偏波も理論解析と類似した特性を示す
-
- 直交偏波MIMOの特性解析に利用
 - 直交円偏波MIMOのストリートセルへの適用

3. 無人航空機を用いた ユーザ位置検出手法

2013年～現在進行中

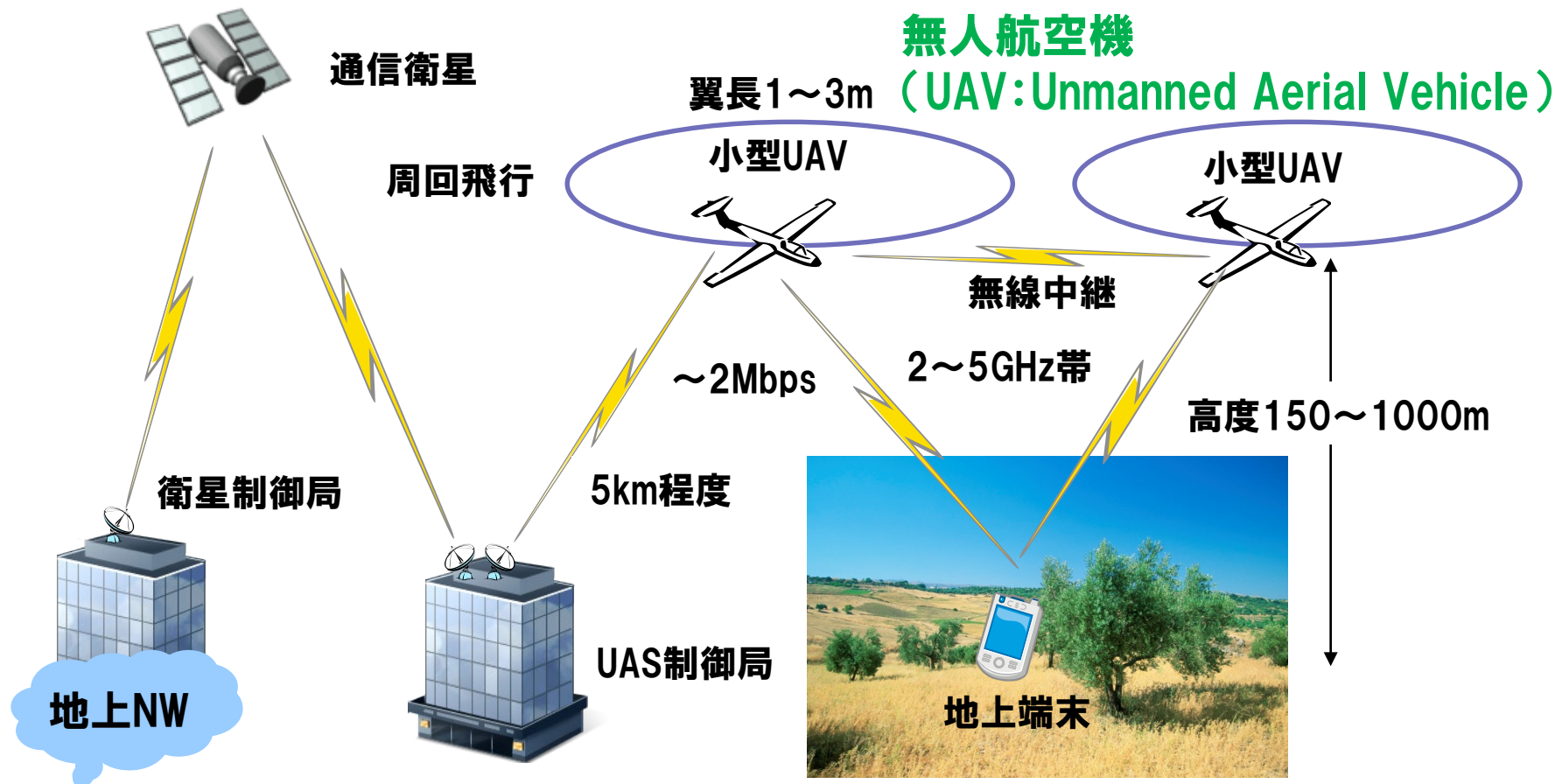
2015年度～2017年度 科研費①

2019年度～2021年度 科研費②

本研究はJSPS科研費15K06122 及び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



研究の背景・目的



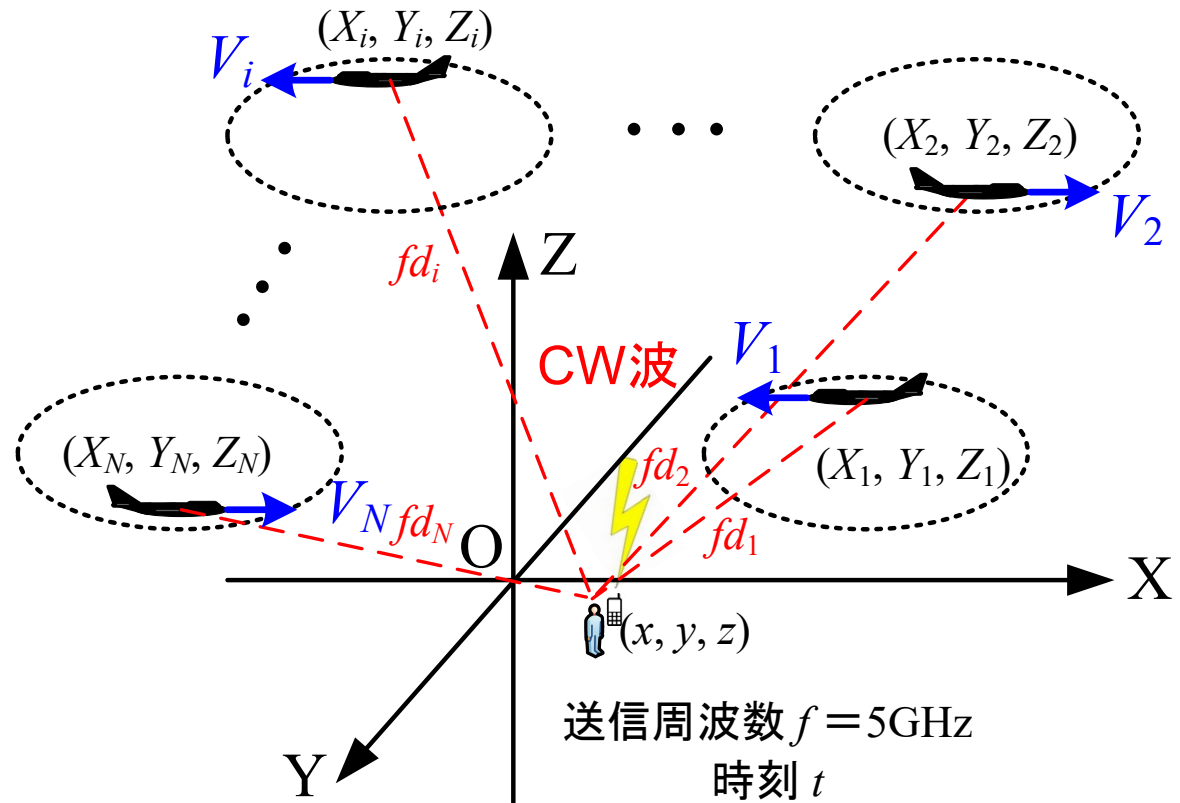
無人航空機システム (**UAS: Unmanned Aircraft System**) のネットワーク構成

- 災害時や緊急時、山岳地域などの**公共的な通信手段の利用が困難な場合**における人命救助を目的とし、UASを対象とした**ドップラーシフトを利用する位置検出システム**を検討

N機のUAVを用いた位置検出手法

$$fd_i(t) = -(\mathbf{V}_i \cdot \tilde{\mathbf{u}}_i)/\lambda = -\frac{V_{xi}(t)(X_i(t) - x) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y) + V_{zi}(t)(Z_i(t) - z)}{\lambda\sqrt{(X_i(t) - x)^2 + (Y_i(t) - y)^2 + (Z_i(t) - z)^2}}$$

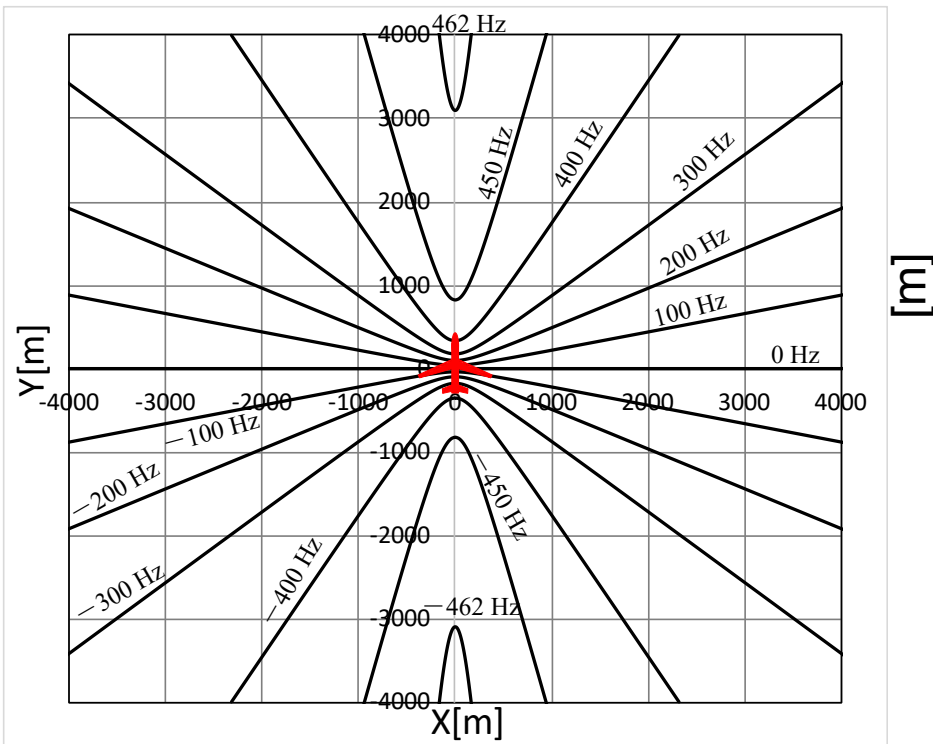
- ユーザ(受信点)の位置 $\mathbf{u} = (x, y, z)$ を未知、UAVの周回半径 R 、飛行速度 $\mathbf{V}_i = (V_{ix}, V_{iy}, V_{iz})$ 、時刻 t における飛行位置 $\mathbf{U}_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ を既知としてユーザー-UAV間に生じるドップラーシフト量の関係式を導出
- 得られた関係式から最小2乗法を用いてユーザー位置を検出
- UAVの高度は一定、ユーザー位置は固定(静止)



UAV—ユーザー間の視線速度に応じて
ドップラーシフトが変化

ドップラーシフトの分布

- UAVの飛行速度: 100km/h (27.7m/s)
- UAVの飛行位置: $(X_i, Y_i, Z_i) = (0, 0, 200)[\text{m}]$
- UAVの飛行方向: Y軸正の方向
- 搬送波周波数: $f_C = 5\text{GHz}$



ドップラーシフトによってXY平面
上に描かれる双曲線の分布



ドップラーシフトのXY平面上に
おける面的分布

ドップラーシフトを用いた位置検出計算方法(1)

- ユーザ位置(x, y, z)の初期値として(x^0, y^0, z^0)を想定した場合に、時刻 t における N 機のUAVとの通信回線で生じるドップラーシフト fd_i^0 を計算

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

- 誤差を含むUAV－ユーザ間のドップラーシフト(測定値と仮定)

$$f dm_i(t) = fd_i(t) + \Delta fdre_i(t)$$

に対して、ドップラーシフト量 fd_i^0 との差を測定残差成分 Δfd_i として

$$\Delta fd_i(t) = f dm_i(t) - fd_i^0(t)$$

を求める($\Delta fdre_i(t)$: UAVの飛行位置誤差により生じる周波数誤差)

- ドップラーシフトの残差を解消するため、初期値(x^0, y^0, z^0)の変化量を($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)として次式の連立方程式を得る

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

ドップラーシフトを用いた位置検出計算方法(2)

- ドップラーシフトに関する偏微分方程式を行列式 G で表し, ユーザ位置の変化量($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)を転置行列 U として導出

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\partial f d_1(t)}{\partial x} & \frac{\partial f d_1(t)}{\partial y} & \frac{\partial f d_1(t)}{\partial z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f d_N(t)}{\partial x} & \frac{\partial f d_N(t)}{\partial y} & \frac{\partial f d_N(t)}{\partial z} \end{bmatrix} \quad U = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$$

$$\frac{\partial f d_i(t)}{\partial x} = - \frac{-V_{xi}(t)r_i(t) + V_{xi}(t)(X_i(t) - x)^2/r_i(t)}{\lambda\{r_i(t)\}^2}$$

$$\frac{\partial f d_i(t)}{\partial y} = - \frac{-V_{yi}(t)r_i(t) + V_{yi}(t)(Y_i(t) - y)^2/r_i(t)}{\lambda\{r_i(t)\}^2}$$

$$\frac{\partial f d_i(t)}{\partial z} = - \frac{-V_{zi}(t)r_i(t) + V_{zi}(t)(Z_i(t) - z)^2/r_i(t)}{\lambda\{r_i(t)\}^2}$$

ただし, $r_i(t) = \sqrt{(X_i(t) - x)^2 + (Y_i(t) - y)^2 + (Z_i(t) - z)^2}$

ドップラーシフトを用いた位置検出計算方法(3)

- ユーザ位置の変化量について整理すると、次式として表すことができる

$$[\Delta f d_1(t) \ \Delta f d_2(t) \ \dots \ \Delta f d_N(t)]^T = F^T = GU \text{より}$$

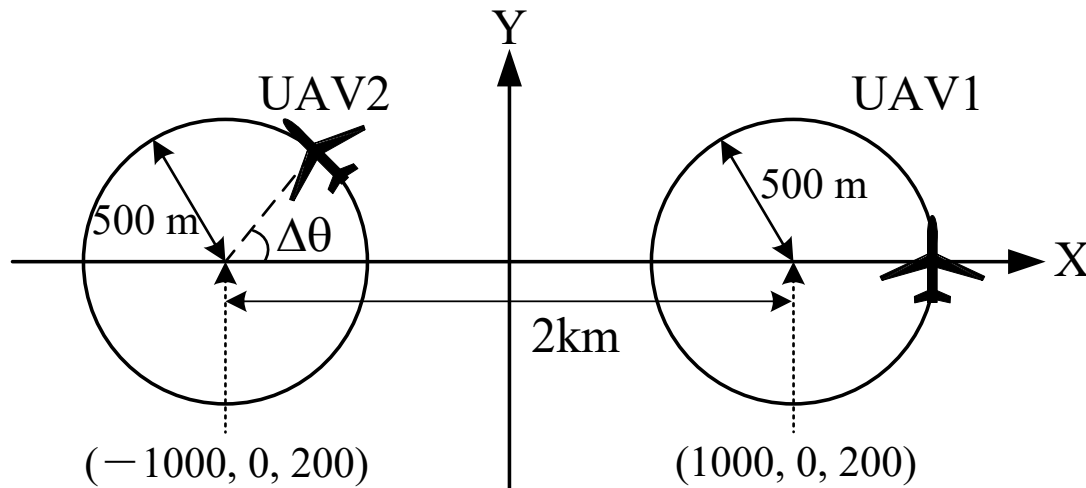
$$U = (G^T G)^{-1} G^T F^T$$

- ここで、変化量 Δx , Δy , Δz について解き、 Δx , Δy , Δz が十分に小さくなるまで式(10)のように繰り返し更新することにより、ユーザの位置を解として求めることができる.

$$\begin{cases} x^1 = x^0 + \Delta x \\ y^1 = y^0 + \Delta y \\ z^1 = z^0 + \Delta z \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x^2 = x^1 + \Delta x \\ y^2 = y^1 + \Delta y \\ z^2 = z^1 + \Delta z \end{cases} \dots \Rightarrow \begin{cases} x^n = x^{n-1} + \Delta x \\ y^n = y^{n-1} + \Delta y \\ z^n = z^{n-1} + \Delta z \end{cases}$$

- 初期値の設定によっては、最小2乗法の解が①収束、②誤収束、③発散、のいずれかに分かれる ⇒ 本発表では適切な初期値が与えられたと仮定

シミュレーションモデル及び条件



UAV1の初期位相角: 0°
UAV2の初期位相角: $\Delta\theta$

- ① $\Delta\theta = 0^\circ$
- ② $\Delta\theta = 90^\circ$

- UAVの飛行速度: $V = 100 \text{ km/h}$ ● 時刻: $t = 0 \text{ s}$
- UAV1の初期位置: $\theta_1 = 0^\circ$
- UAV2の初期位置: $\theta_2 = 0^\circ, 90^\circ$
- 評価対象エリア: 8km四方の範囲
- 評価ポイント: X軸, Y軸何れも10m間隔(約64万地点)
- UAVの飛行位置誤差(シミュレーション):
 $(dx_1(0), dy_1(0), dz_1(0)) = (0, +1, 0) [\text{m}]$
 $(dx_2(0), dy_2(0), dz_2(0)) = (0, -1, 0) [\text{m}]$
- UAVの飛行位置誤差(推定式): $d = 1 \text{ m}$

ドップラーシフト分布と測位精度の関係(1)

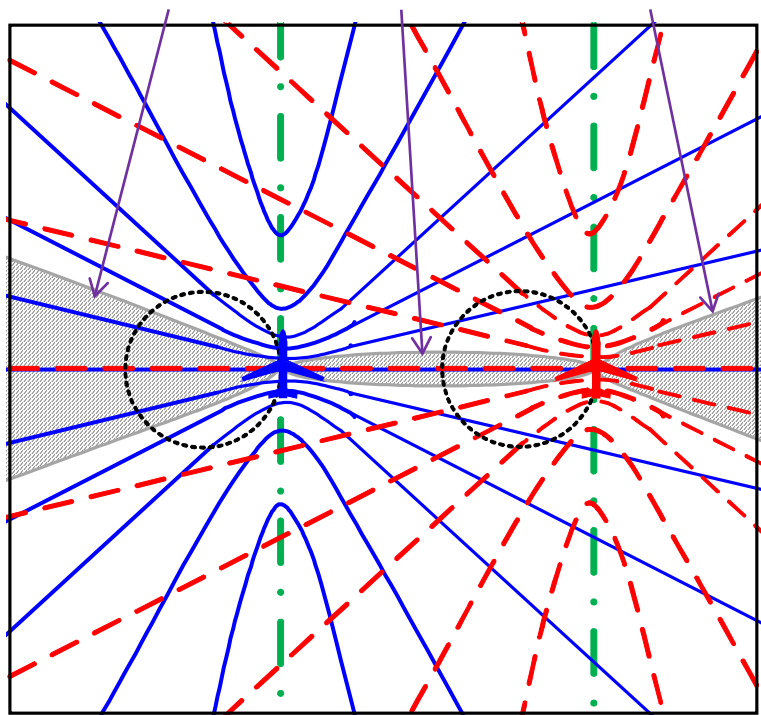
UAV1の周回経路の中心位置 : (1000, 0, 200)[m]

周回半径 : $R=500\text{m}$

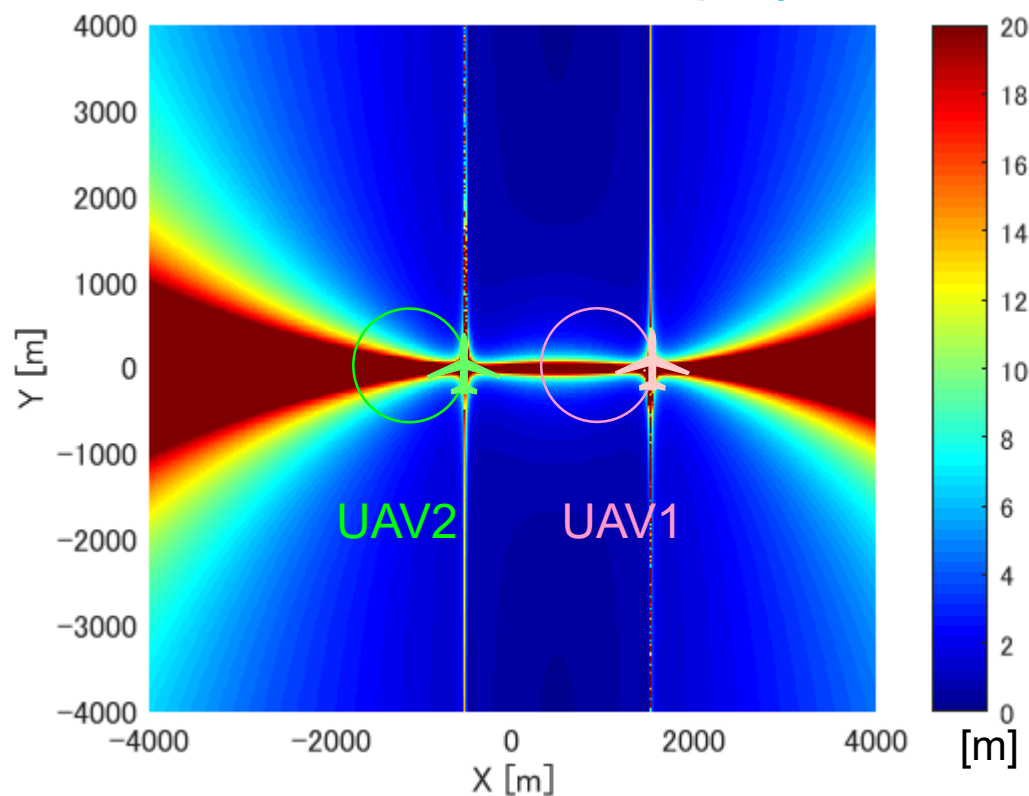
UAV2の周回経路の中心位置 : (-1000, 0, 200)[m]

UAV間距離 $r=2000\text{m}$

位置検出精度が劣化し易いエリア



シミュレーション結果



UAV2の初期位相角 $\Delta\theta=0^\circ$

時刻 : $t=0\text{s}$

ドップラーシフト分布と測位精度の関係(2)

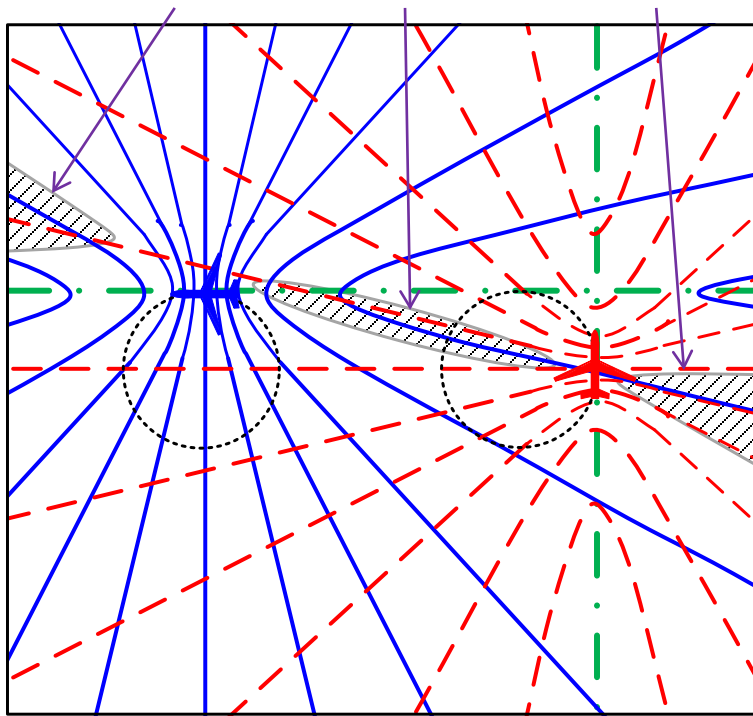
UAV1の周回経路の中心位置: $(1000, 0, 200)[\text{m}]$

周回半径: $R=500\text{m}$

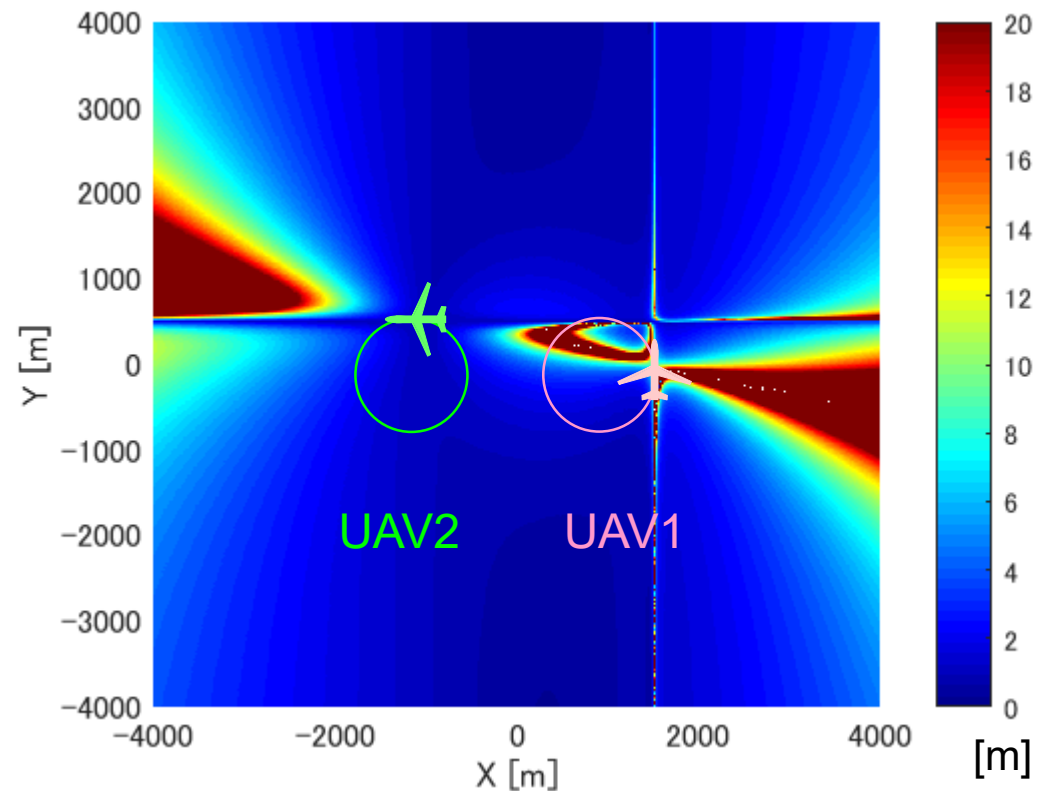
UAV2の周回経路の中心位置: $(-1000, 0, 200)[\text{m}]$

UAV間距離 $r=2000\text{m}$

位置検出精度が劣化し易いエリア



シミュレーション結果



UAV2の初期位相角 $\Delta\theta=90^\circ$

時刻: $t=0\text{s}$

マルチパス環境下における ドップラーシフト分布特性の 評価



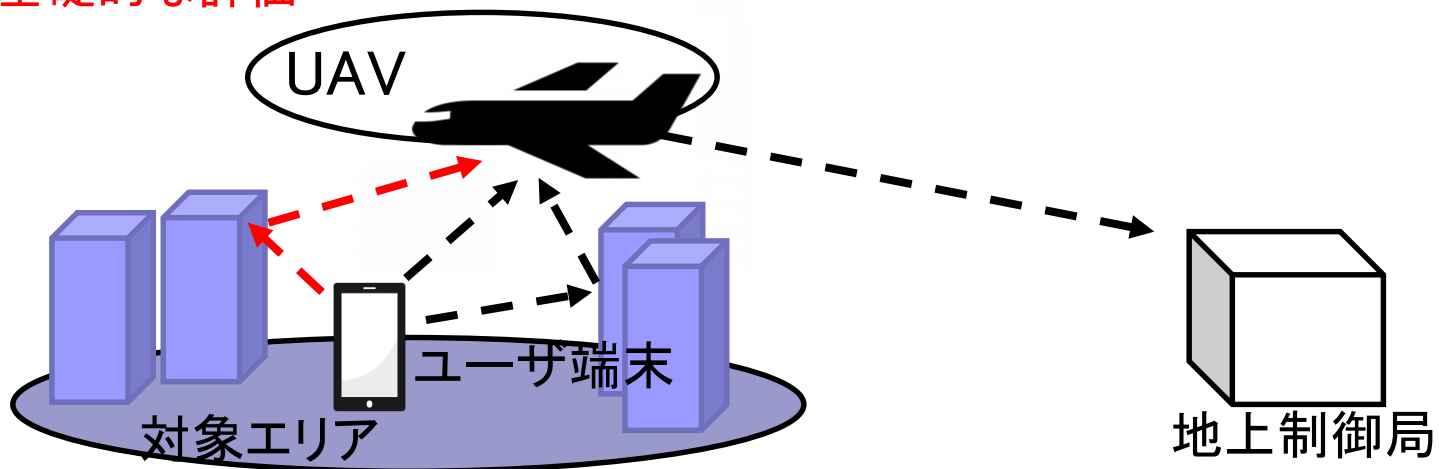
目的

➤ 従来研究

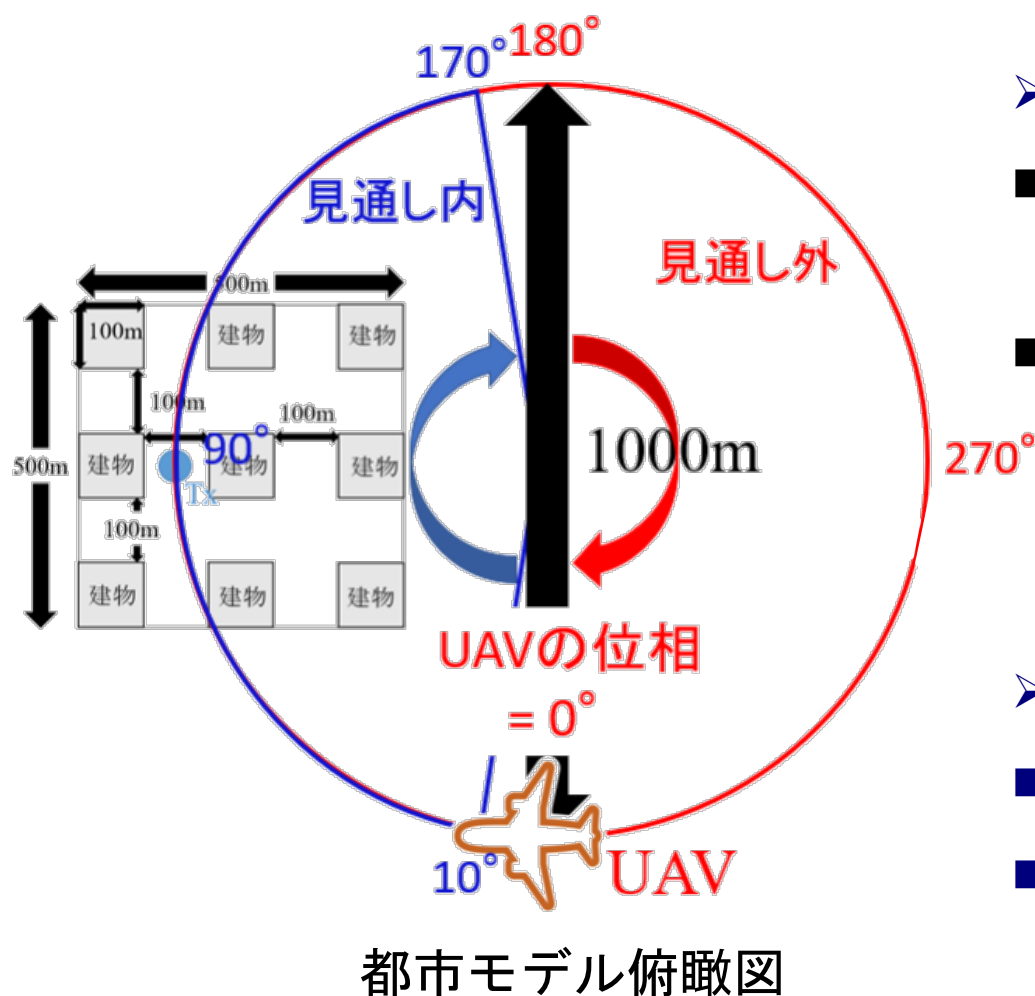
- 1機及び複数機のUAVによるドップラーシフトを用いた位置検出手法の提案
- 円旋回や8の字飛行モデルにおける特性評価やUAVの最適配置検討
⇒理想的な条件下でのシミュレーション評価

➤ 本研究

- 3Dモデルを電波伝搬シミュレーションツール（RapLab）上に作成し，1機のUAVが円旋回
飛行するケースを想定
- マルチパスを考慮したドップラーシフト分布特性と**その推定精度**及び位置検出性能の**基礎的な評価**

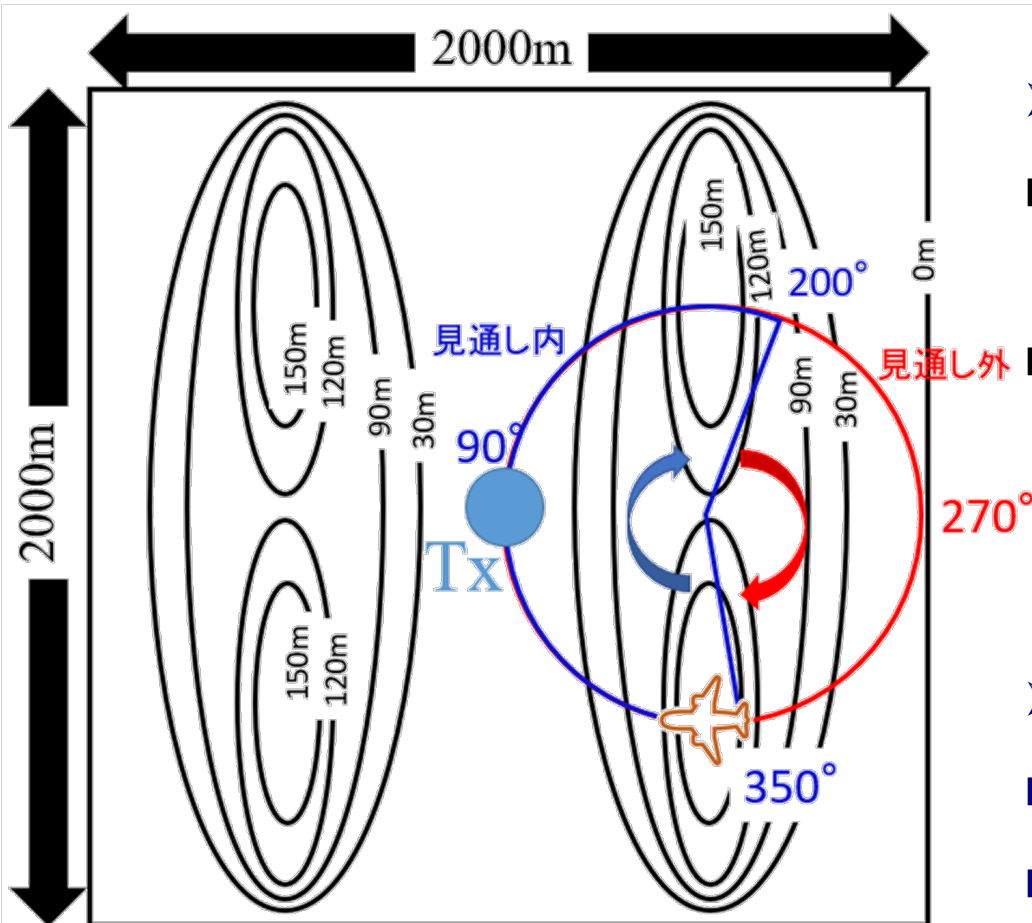


シミュレーションモデル図①



- 送受信点
 - 地上端末(Tx)をUAVの位相角 90° の直下に配置
 - UAV軌道上を 10° 間隔, 36カ所でドップラーシフト量の観測を想定
- 環境モデル
 - 対象エリア $500\text{m} \times 500\text{m}$
 - 底面 $100\text{m} \times 100\text{m}$ の四角柱型建物を前後左右 100m 間隔に9つ配置

シミュレーションモデル図②



山岳モデル俯瞰図

- 送受信点
 - 地上端末(Tx)をUAVの位相角 90° の直下に配置
 - UAV軌道上を 10° 間隔, 36地点でドップラーシフト量の観測を想定
- 環境モデル
 - 対象エリア $2000\text{m} \times 2000\text{m}$
 - 標高 150m の4つの山を2列に配置

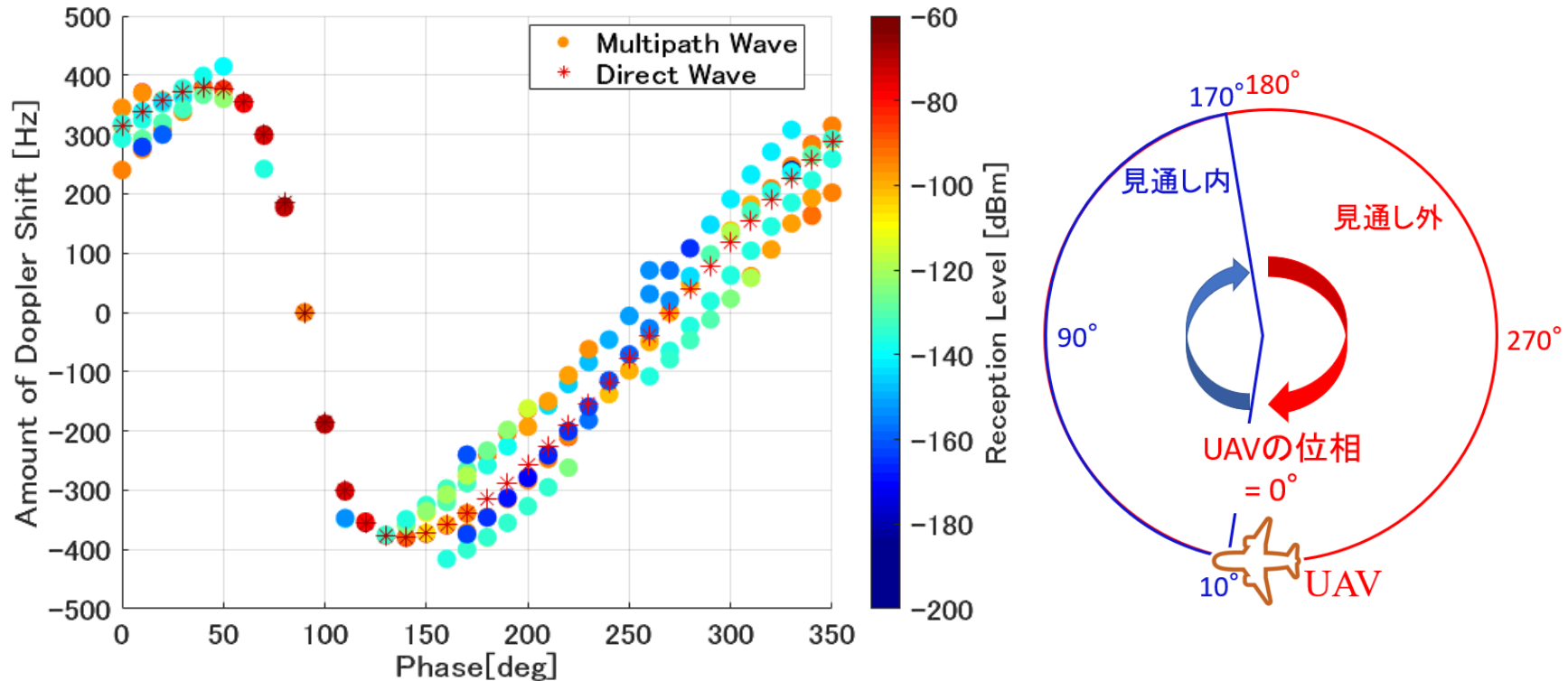


シミュレーション条件

パラメータ	設定値
地上端末(送信機)の地上高	1m
送信電力	1W
搬送波周波数	5GHz
UAV(受信機)の高度	200m
UAVの旋回半径	500m
UAVの速度	100km/h

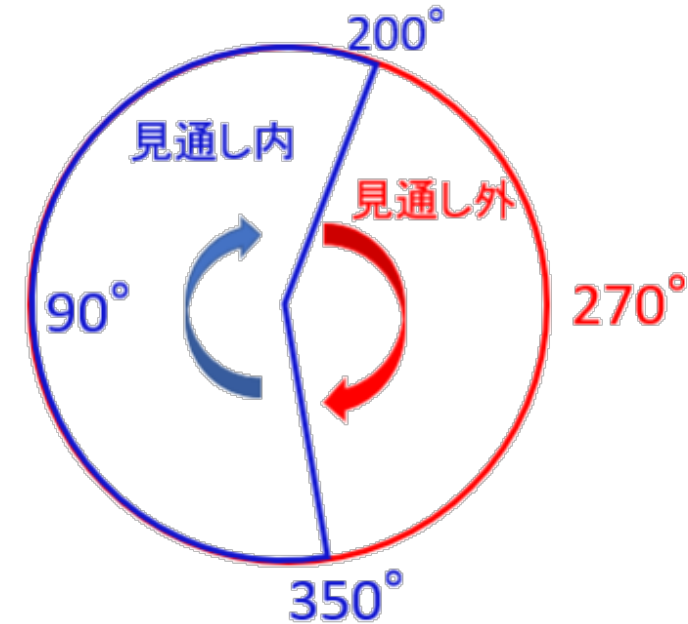
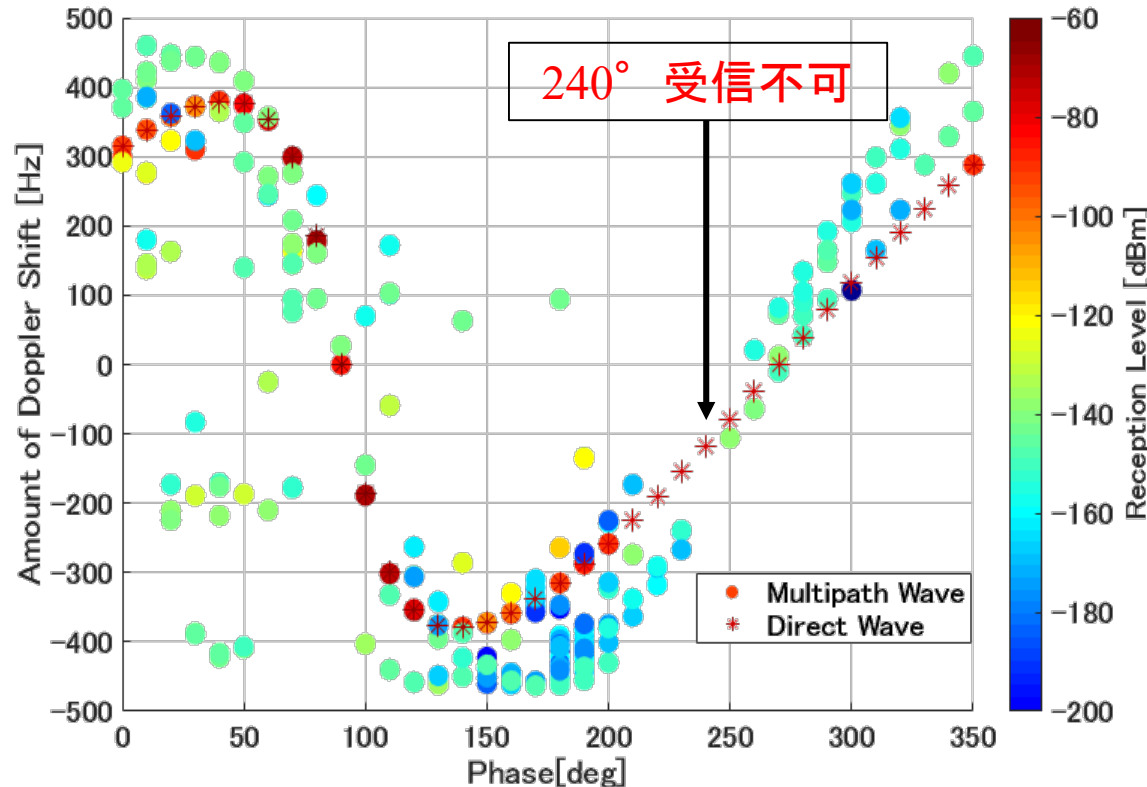
マルチパス波の条件	都市モデル	山岳モデル
反射回数	0～3回	0～2回
回折回数	0～1回	0～1回
透過回数	0回	0回

都市モデルのドップラーシフト分布



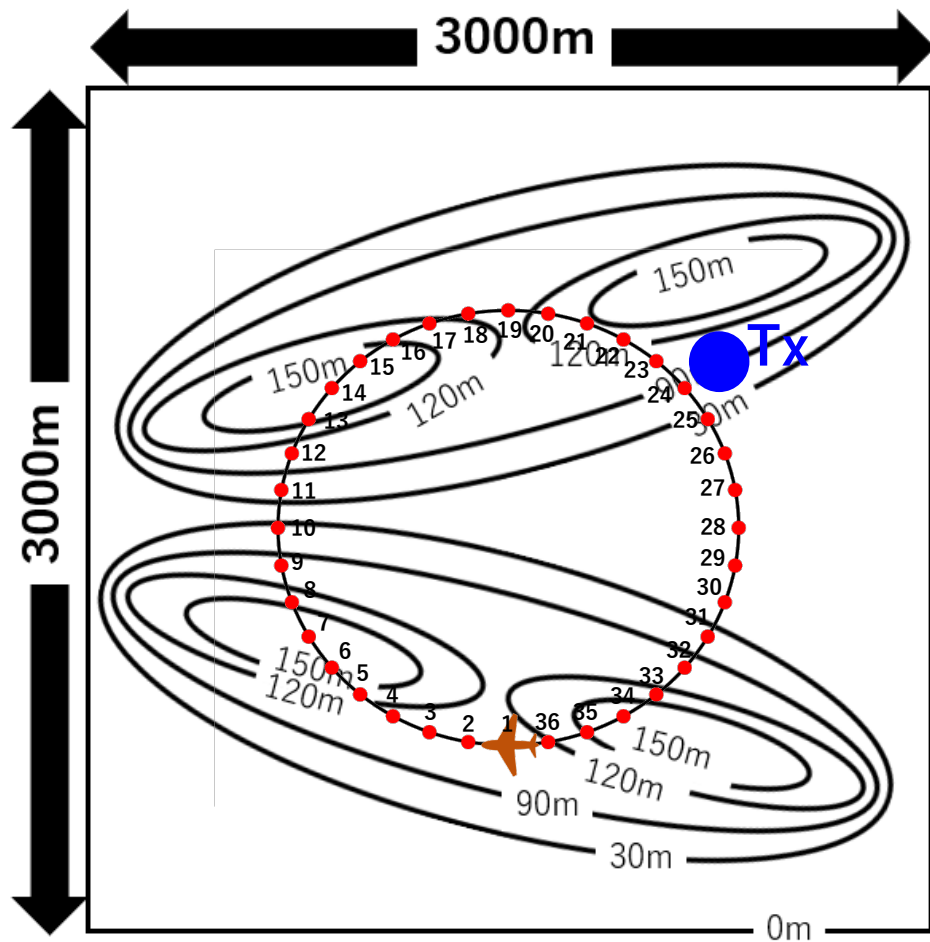
- 直接波受信可能な区間($10^{\circ} \sim 170^{\circ}$):
 - ドップラーシフト量のずれを含む信号の受信レベルは低い(-100dBm 以下)傾向
- 見通し外受信点 (0° 及び $180^{\circ} \sim 350^{\circ}$):
 - 高受信レベル(-100dBm 以上)のずれを含む信号が存在

山岳モデルのドップラーシフト分布



- 直接波を受信可能な区間($0^\circ \sim 200^\circ$ 及び 350°)
 - 障害物の間隔が200m以上のため、**ドップラーシフト観測誤差の大きな信号は受信レベルが低い傾向**
- 見通し外受信点($210^\circ \sim 340^\circ$)
 - 受信レベルのばらつきが小さい

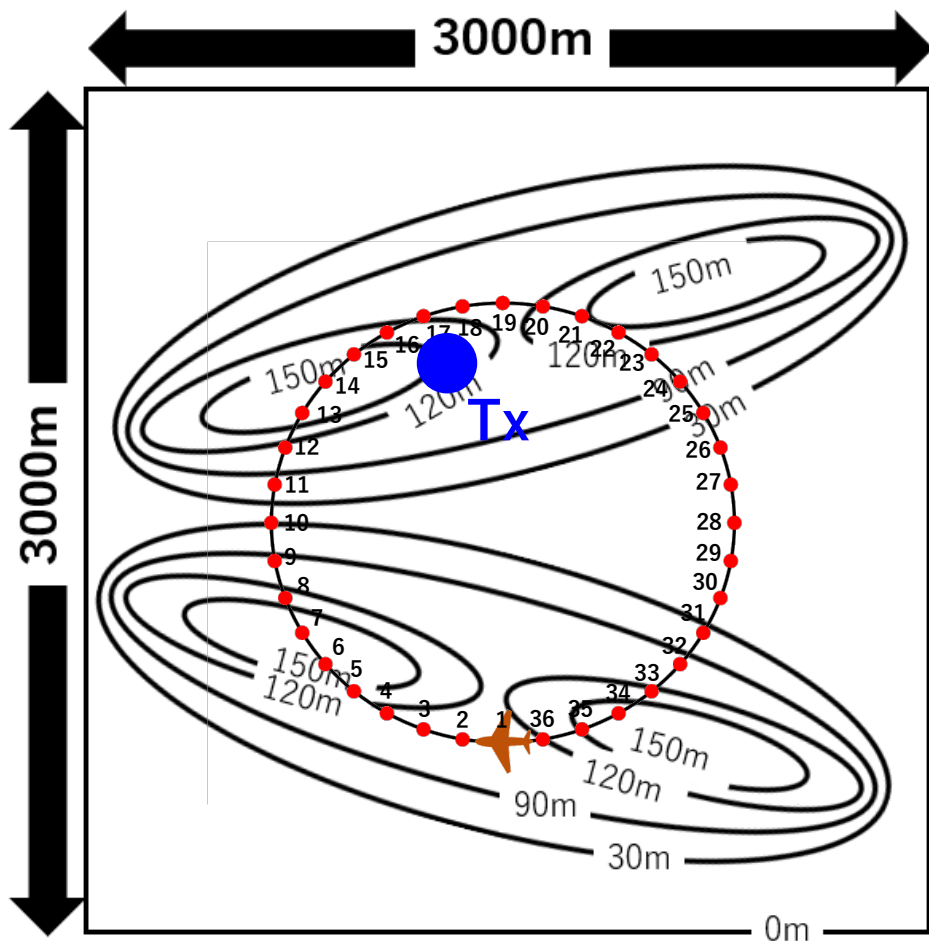
シミュレーションモデル (a)



モデル(a)俯瞰図

- 送受信点
 - 地上端末(Tx)を山の**中腹**付近に配置(標高100m)
 - **UAV**軌道上を 10° 間隔, 36カ所でドップラーシフト量の観測を想定
- 環境モデル
 - 対象エリア $3\text{km} \times 3\text{km}$
 - 標高150mの山をハの字型2列に配置

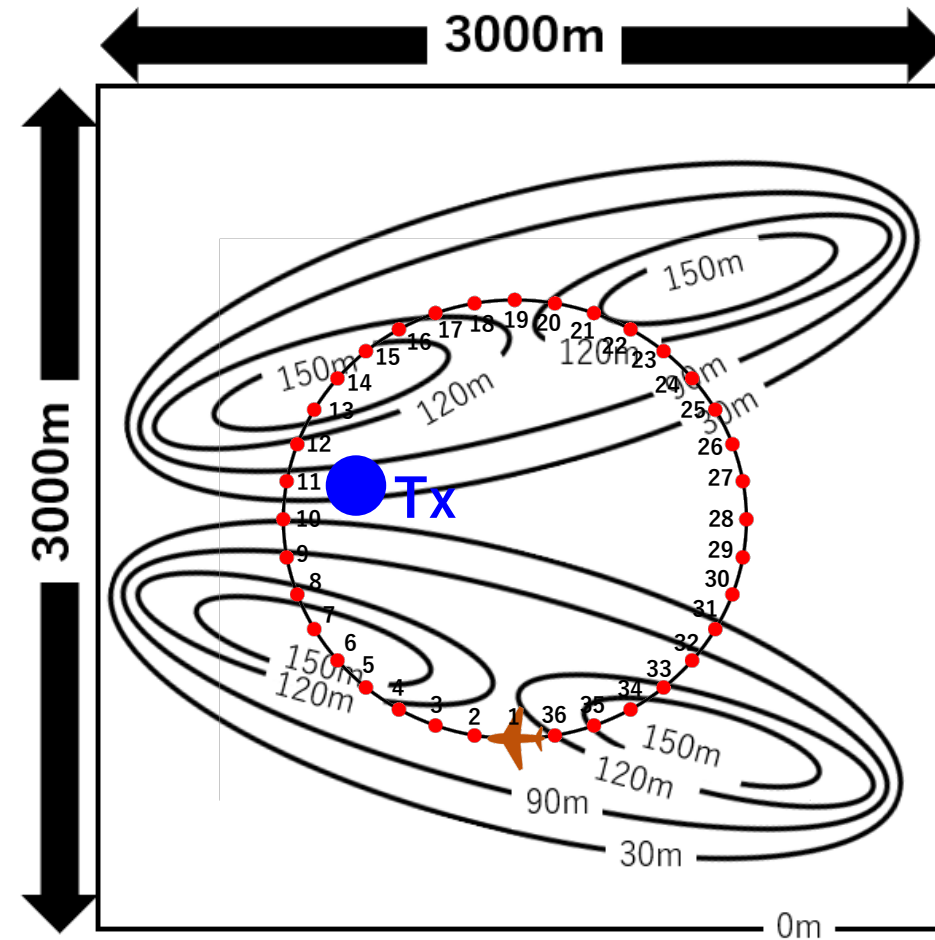
シミュレーションモデル (b)



モデル(b)俯瞰図

- 送受信点
 - 地上端末(Tx)を山頂付近に配置(標高120m)
 - UAV軌道上を 10° 間隔, 36地点でドップラーシフト量の観測を想定
- 環境モデル
 - 対象エリア $3\text{km} \times 3\text{km}$
 - 標高150mの山をハの字型2列に配置

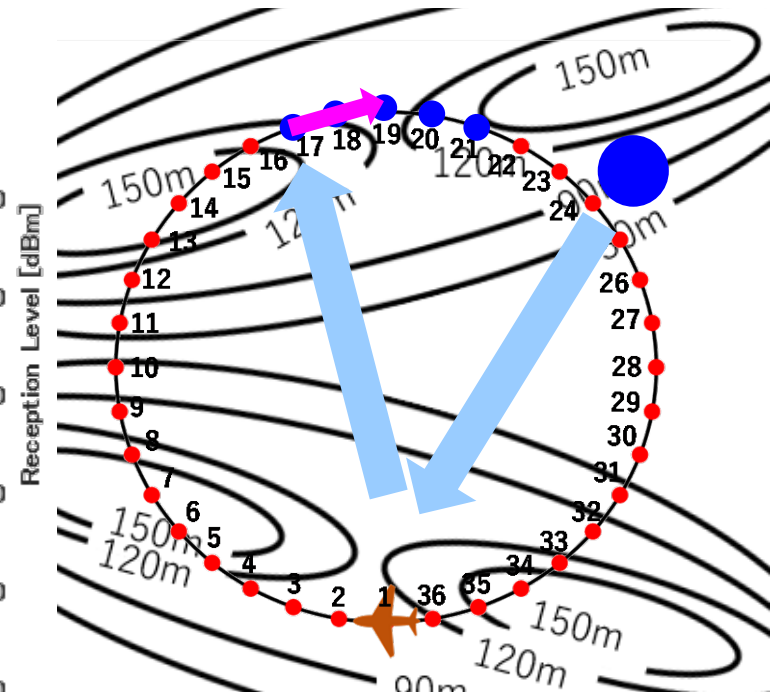
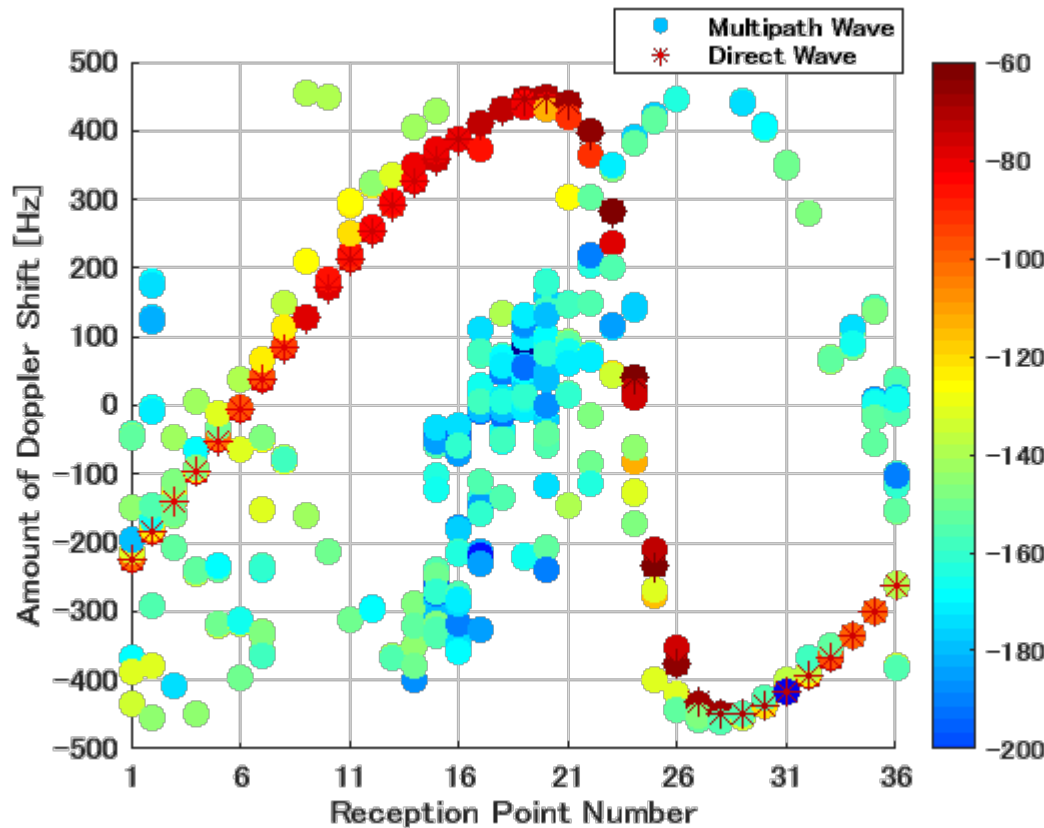
シミュレーションモデル (c)



モデル(c)俯瞰図

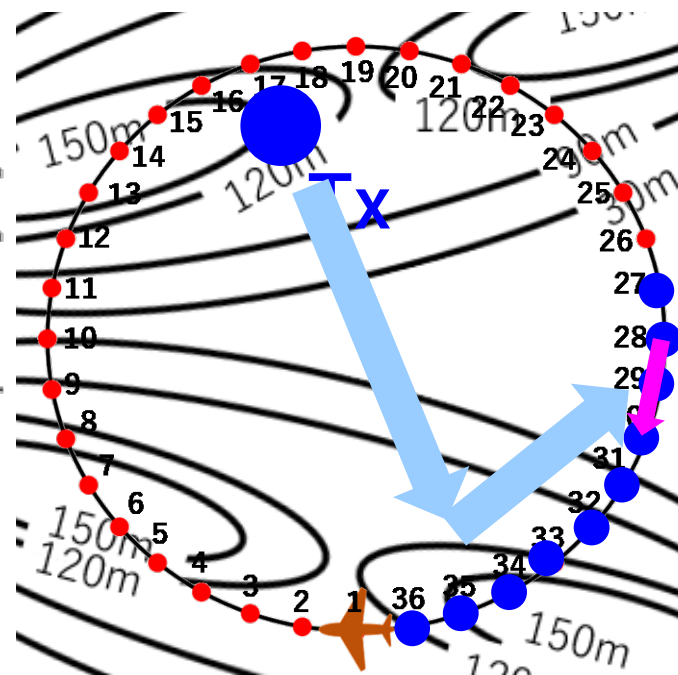
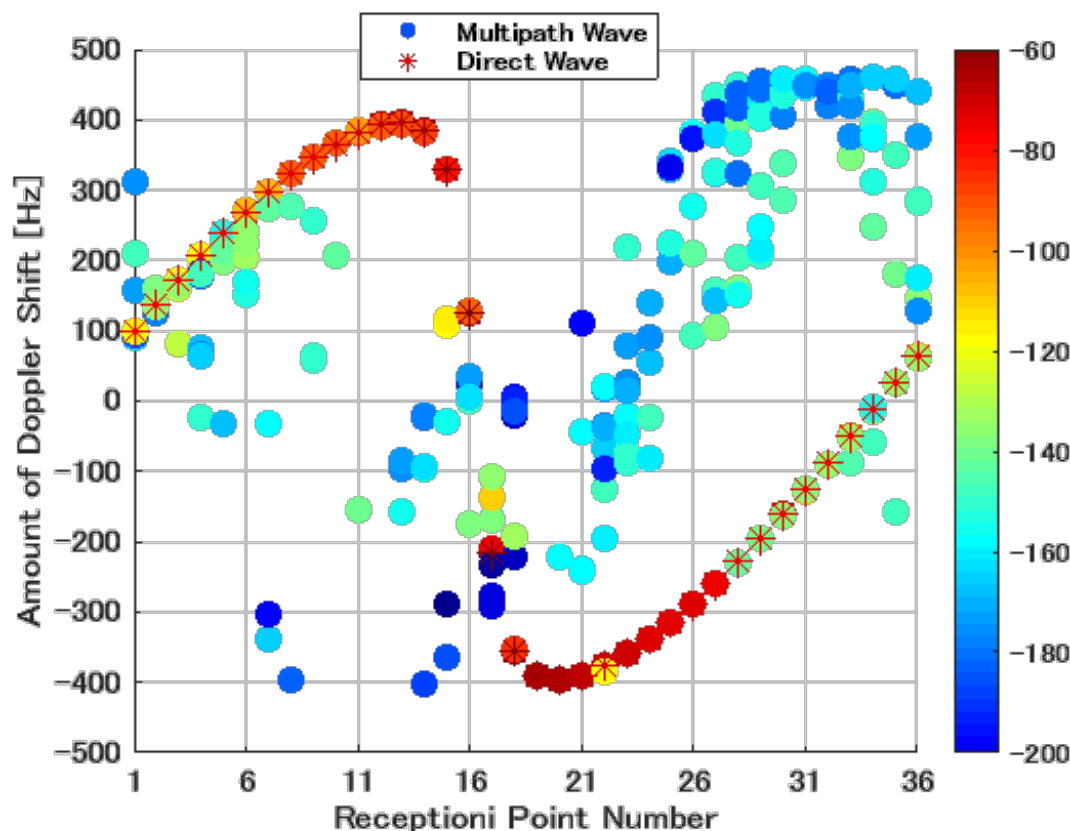
- 送受信点
 - 地上端末(Tx)を谷間付近に配置(標高50m)
 - UAV軌道上を10° 間隔, 36地点でドップラーシフト量の観測を想定
- 環境モデル
 - 対象エリア3km × 3km
 - 標高150mの山をハの字型2列に配置

モデル(a)のドップラーシフト分布



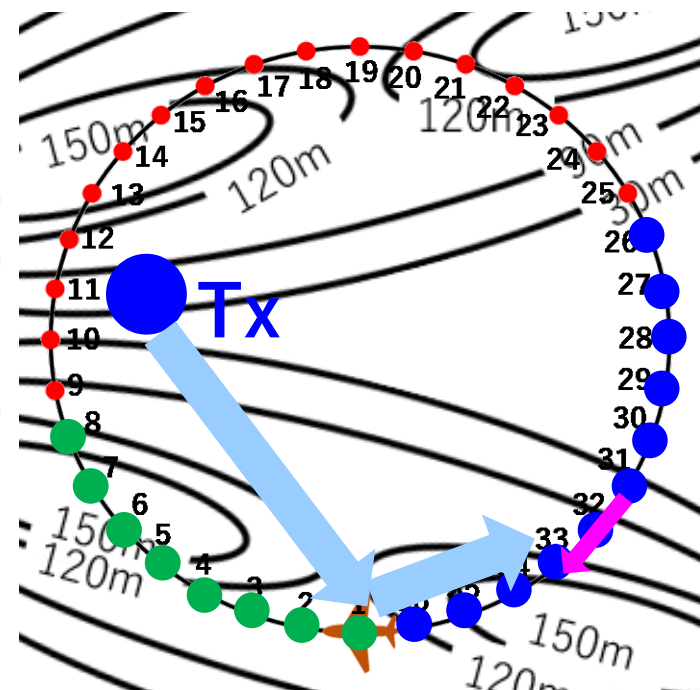
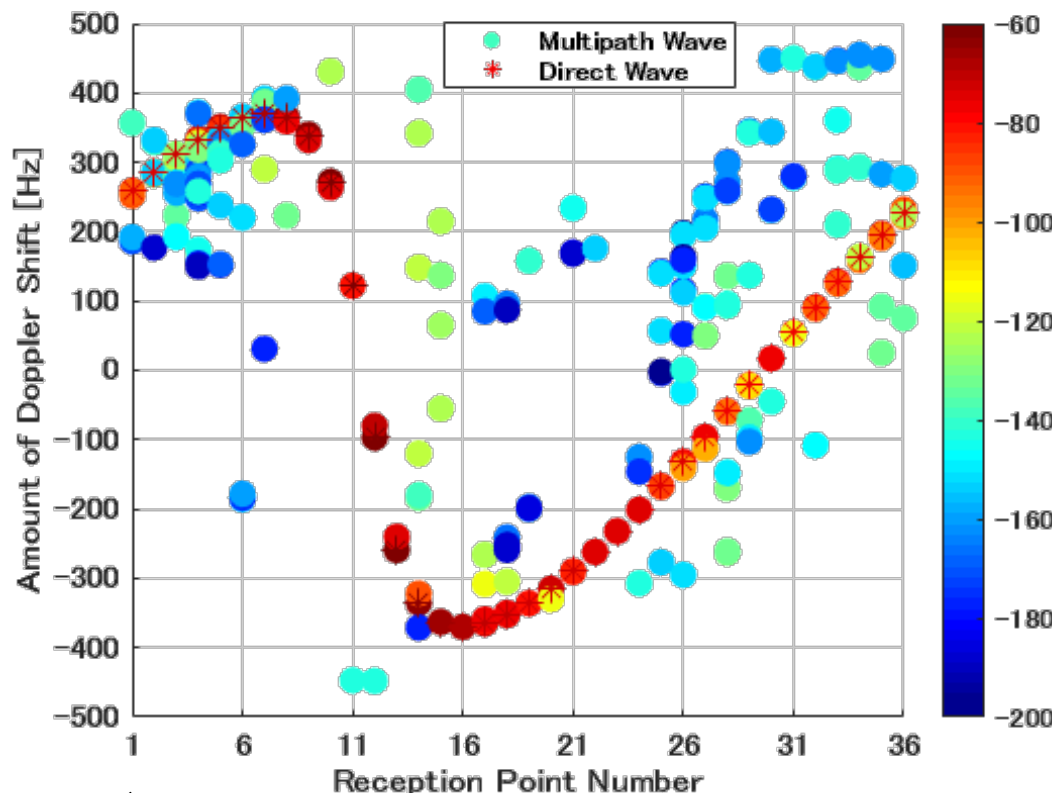
- 直接波受信可能な区間(受信点1~36):
 - ドップラーシフト量のずれを含む信号の受信レベルは低い(-100dBm以下)傾向
- 受信点17~21 :
 - 山の斜面に反射→UAV進行方向に対して横方向からの到来する伝搬経路が増加

モデル(b)のドップラーシフト分布



- モデル(a)よりも直接波の**最大ドップラーシフト**が50Hz程度**小**
 - **地上端末**がUAV旋回円の**内側**に存在→必ずUAV速度方向と視線方向が重ならない
- 受信点**27~36**
 - Tx下側の山の斜面に反射→**UAVの前方**からマルチパス波が到来

モデル(c)のドップラーシフト分布



- モデル(b)よりもUAV軌道の中心に近い
→ 直接波の最大ドップラーシフトが小
- 受信点26~36
 - Tx下側の斜面に反射し, UAVの前方からマルチパス波が到来
- 受信点1~8→Tx上側の斜面に反射し, 視線方向よりUAVの横方向から到来

まとめ

- レイトレーシング法に基づく無線システムの実特性評価例を紹介
 - 1. 衛星測位システムを対象として、都市環境で発生するマルチパスによる衛星ー受信機間距離(疑似距離)の延長効果をレイトレーシングのイメージング法を用いてモデル化
 - ✓ シミュレーション、屋外実験結果で類似した特性が得られることを確認
 - ✓ GPS-Studioを用いたシミュレーション評価結果でも同様の特性
 - 2. ストリートセルを対象とする直交偏波MIMO伝搬特性のシミュレーション評価結果をレイトレーシングにより実施
 - ✓ 円偏波アンテナによる伝搬実験結果と最大5回反射まで考慮したシミュレーション結果が類似した特性を示すことを確認
 - 3. 無人航空機(UAV)を用いたユーザ位置検出手法において、都市環境モデルや山岳モデルを想定したマルチパスによるドップラースhiftの広がり分布特性をRapLabにより評価
 - ✓ UAVが高速飛行を行うことによりドップラースhiftが発生
 - ✓ ドップラースhiftの影響を軽減する手法の提案と検討が必要

参考文献

- 小松 卓也, 石川 博康, “GPS測位システムを対象としたマルチパス環境評価モデルの検討”, J97-B/ No.11, 1061-1065, 2014.
- 齋藤 寛史, 大場 郁弥, 石川 博康, 北藪 透, 中野 雅之, “ストリートセルにおける直交直線偏波MIMOの伝搬特性解析”, 信学論B, J98-B/ No.7, 737-741, 2015.
- 松岡 大智, 石川 博康, 北藪 透, 中野 雅之, “ストリートセルモデルにおける直線偏波及び円偏波の受信電力特性比較”, 信学論B, Vol. J100-B/ No.2, 67-76, 2017.
- Hiroyasu Ishikawa, Hiroki Onuki, Hideyuki Shinonaga, “Method for Detecting User Positions with Unmanned Aerial Vehicles Based on Doppler Shifts”, IEICE Trans. on Fundamentals., Vol.E102-A/ No.1, 195-204, 2019.
- 齊藤 祐貴, 石川 博康, “無人航空機を用いた逐次計算に基づくユーザ位置検出手法の初期値選択アルゴリズム”, 信学論B, Vol. J103-B/ No.2, 119-129, 2020.
- Hiroyasu ISHIKAWA, Yuki Horikawa and Hideyuki SHINONAGA, “Maximum Positioning Error Estimation Method for Detecting User Positions with Unmanned Aerial Vehicle based on Doppler Shifts”, IEICE Trans. on Commu., Vol.E103-B/ No.10, 1069-1077, 2020.

ご清聴ありがとうございました