

# 低軌道衛星の測位への応用に関する研究

金森 寛巖

指導教員: 久保信明

東京海洋大学 情報通信工学研究室



# 発表概要

- 研究背景
- 低軌道衛星の潜在力
- ドップラ周波数の特徴
- フィンガープリント的測位手法
- 評価実験と結果
- まとめと結論

# 研究背景

GNSSの脆弱性対策のひとつとして、非GNSSによるバックアップ手段確保  
すなわち“**Alternative PNT(A-PNT:代替測位手法)**”の利用・構想が推進され始めた  
GNSSが利用不可となった場合の、代替測位手段を確保することは非常に重要である

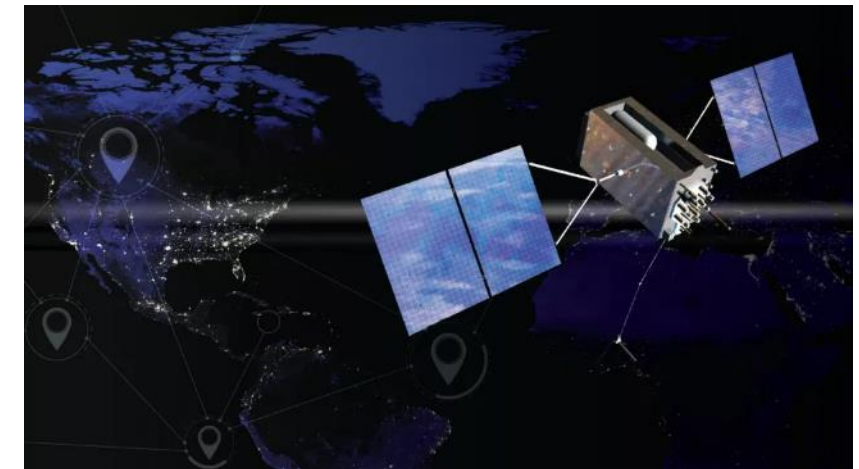
→ 全球で利用可能であり、ロバストな測位手段はないか？

低軌道衛星を利用できないだろうか？



船舶での、GNSSジャミング(妨害)・スプーフィング(なりすまし)のリスク

<https://hexagon.com/ja/solutions/gnss-anti-jam-anti-spoof-defence>



A-PNT政策指令の米国ニュース記事

<https://www.space.com/trump-space-policy-directive-7-gps-cybersecurity>

# 低軌道衛星の潜在力

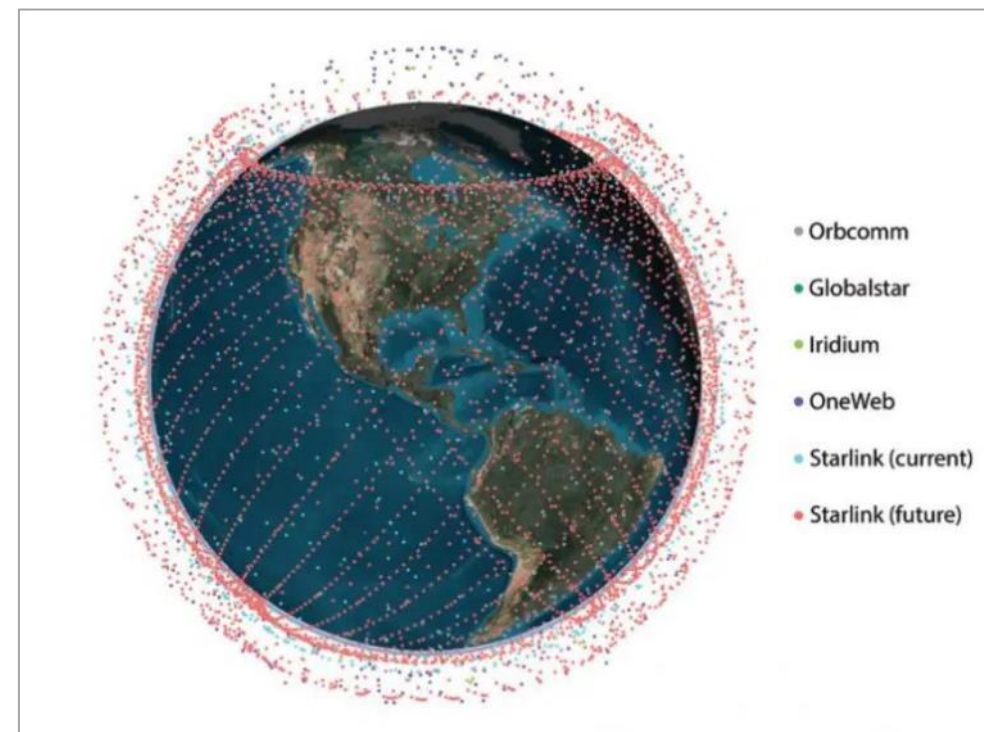


多様な信号  
高度なセキュリティ保護

強力かつ  
回復力のある信号

迅速な収束と  
マルチパスの軽減

低軌道(LEO)と従来の中軌道(MEO)GNSSの比較 (\*1)



現在・将来における低軌道衛星コンステレーション (\*2)

(\*1) <https://gogeomatics.ca/leo-pnt-xona/>

(\*2) <https://insidegnss.com/new-age-satellite-based-navigation-stand-simultaneous-tracking-and-navigation-with-leo-satellite-signals/>

# 低軌道衛星の潜在力

低軌道衛星の利点が多数ある  
→測位への効用は発展段階

高い信号強度



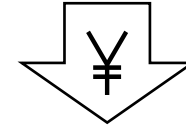
柔軟性とフォーカス性



低遅延



低コスト



グローバルな接続可用性



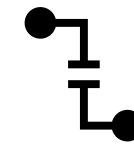
柔軟な端末設計



セキュリティと回復力

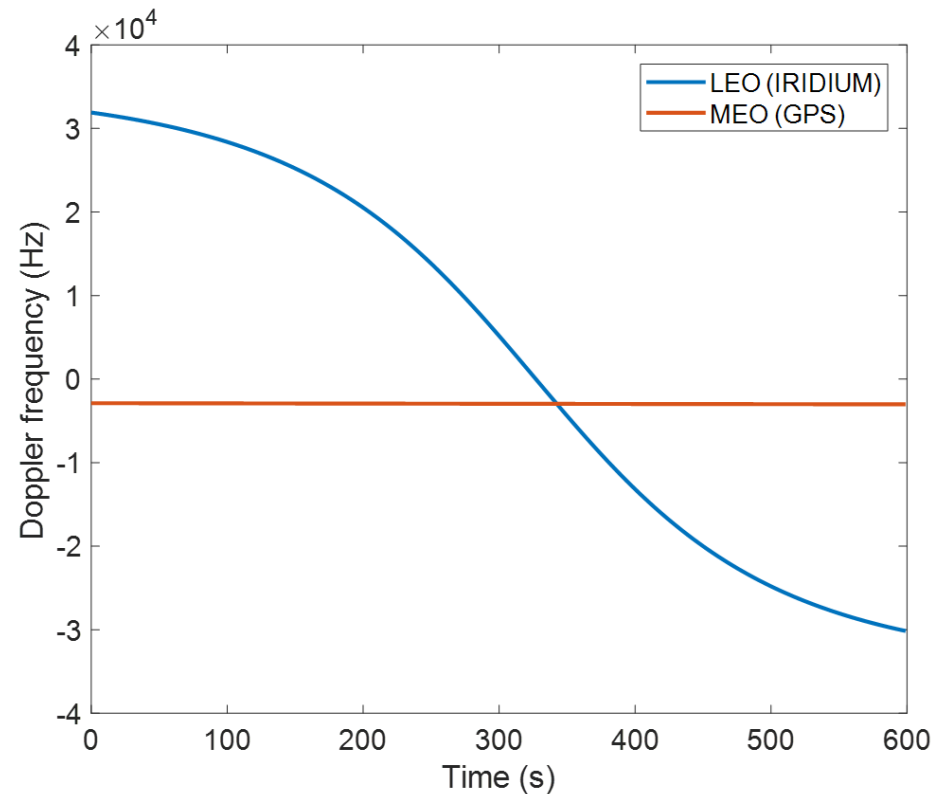


接続と制御



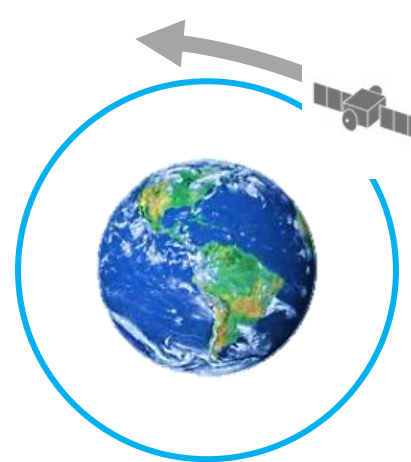
# 低軌道衛星の潜在力

視線方向の変化が大きくなり、ドップラー周波数が大きくなる



LEO衛星とMEO衛星のドップラ周波数比較

低軌道: LEO  
中軌道: MEO (GNSS)



LEO : ~7500m/s  
780 km



MEO : ~3000m/s  
(GNSS) 20000 km

# 2つのドップラ周波数

- 測定ドップラ周波数  
(受信機で測定された値)

$$D_{obs} = D_{dynamics} + D_{sv} + D_{off} + noise$$

- 理論推定ドップラ周波数  
(エフェメリスやTLEといった軌道要素より計算導出できる値)

$$D_{th} = D_{dynamics} + D_{sv}$$

$D_{dynamics}$  : the Doppler generated by the moving object

$D_{sv}$  : the Doppler generated by the motion of satellite

$D_{off}$  : clock offset  
( frequency offset )

$noise$  : receiver thermal noise, etc



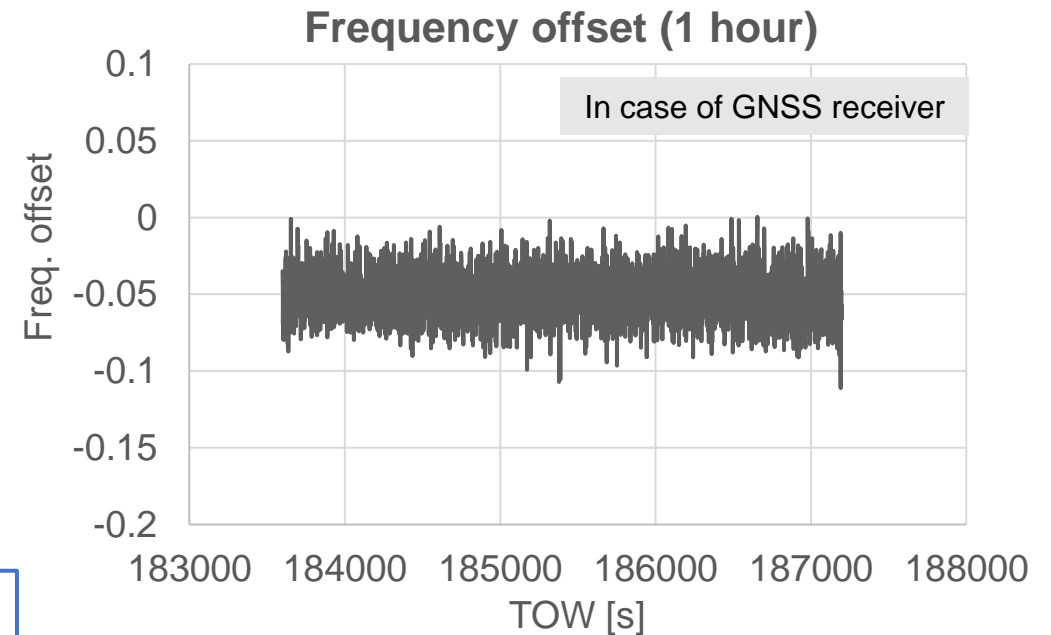
# 周波数オフセット

- 外部基準クロックの入力により、周波数オフセットを最小化することができる
- 理論的に計算されたドップラー周波数と観測されたドップラー周波数を容易に比較することができる

GNSS 受信機  
or  
ソフトウェア受信機



ルビジウム発振器  
(~\$2,000)



$$D_{obs} = D_{dynamics} + D_{sv} + \cancel{D_{off}} + noise$$



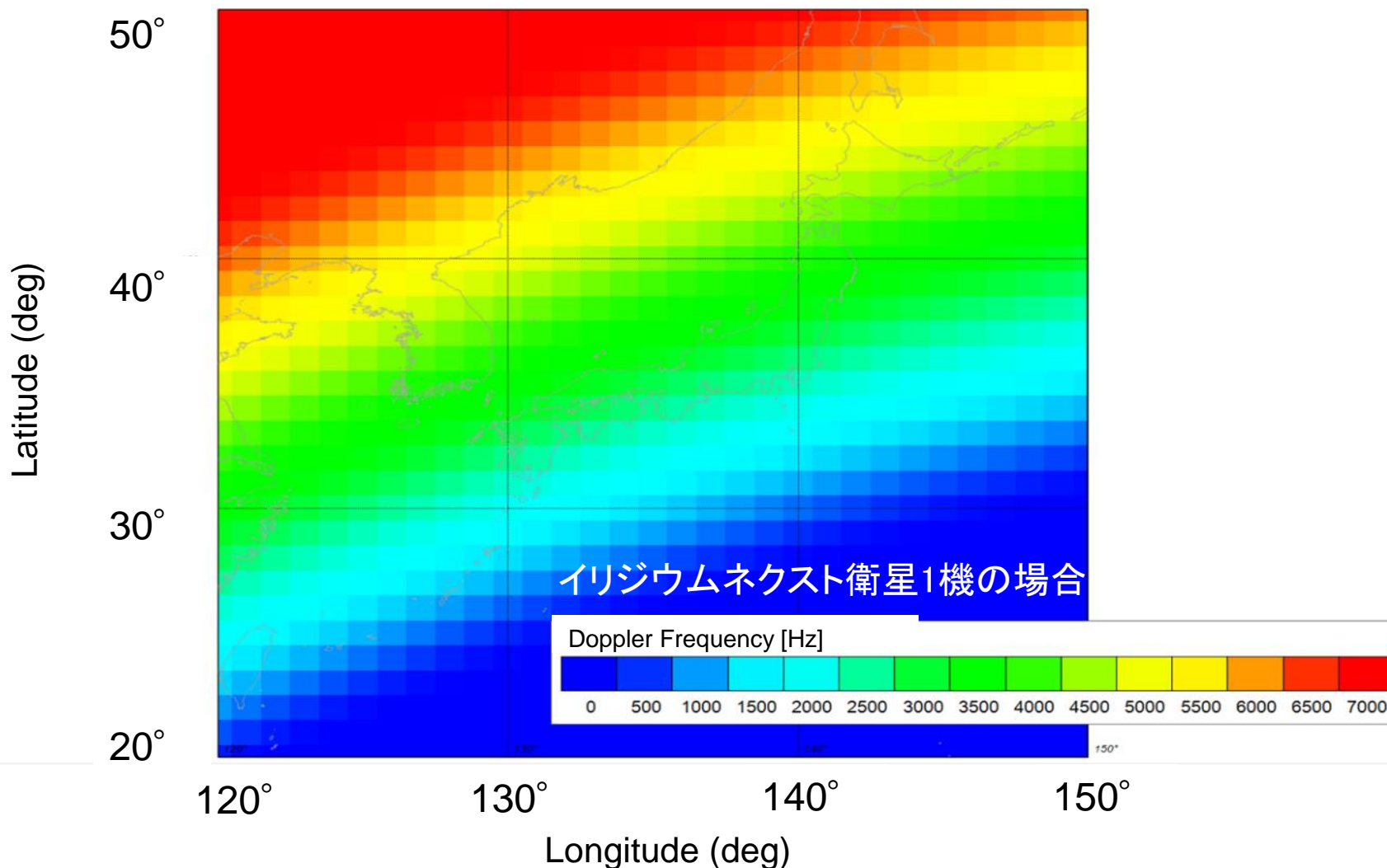
$$D_{th} \approx D_{obs}$$

OCXO も十分効果的である  
(\$100~1,000)



# ドップラ周波数分布特性

ほぼ同一(0.1 Hz未満で一致)のドップラー周波数値を結ぶと、  
特徴的なヒートマップと線が現れる



# アイデアの組み合わせ

- ✓ 正確なドップラ周波数の取得 (周波数オフセットはゼロ)



$$D_{obs} = D_{dynamics} + D_{sv} + \cancel{D_{off}} + noise$$

$$\rightarrow D_{th} \approx D_{obs}$$

- ✓ 各座標点におけるドップラー周波数分布の特徴  
(ドップラー周波数を固有の位置情報としてマッピングすることが可能)

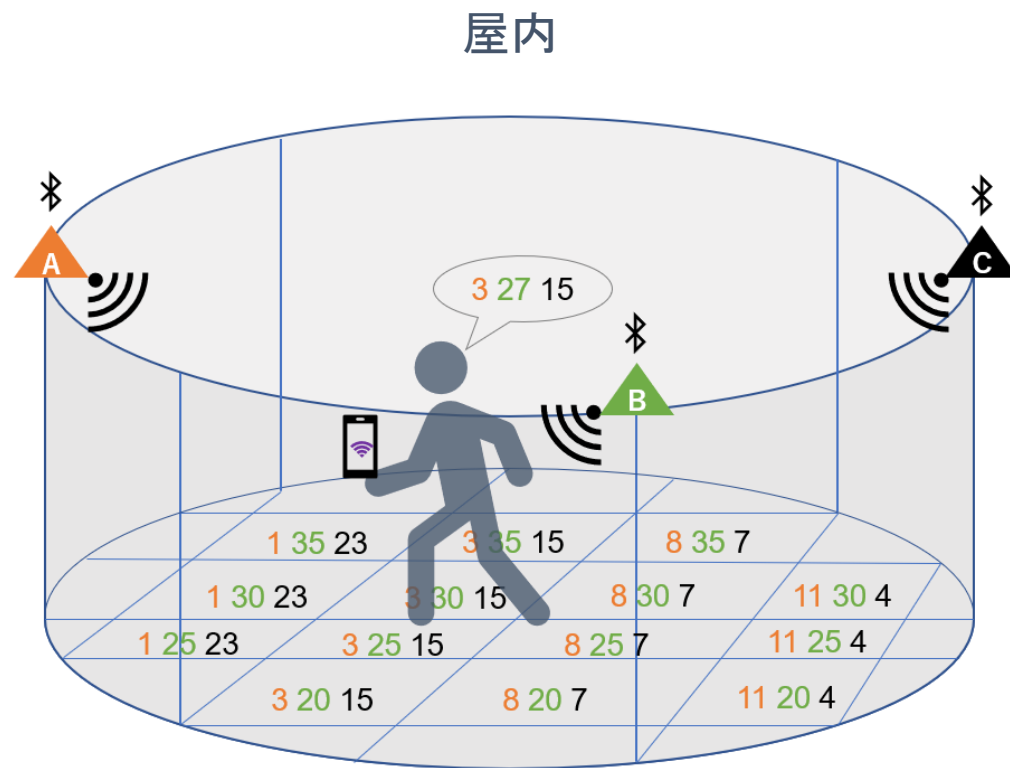


屋内位置推定手法のフィンガープリント測位を適用して、  
ドップラー周波数を主軸とした位置推定は可能ではないか？

※低軌道衛星では観測値は、ドップラー周波数のみ  
→ ドップラ周波数のみを利用した測位を考える

# フィンガープリント測位の適用

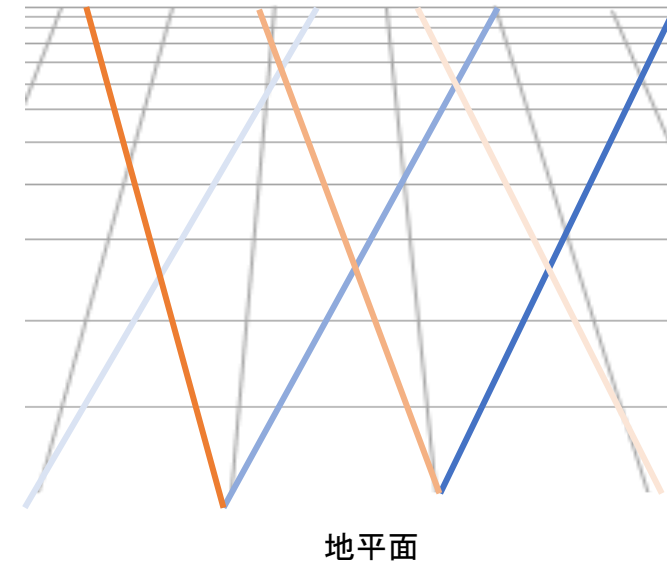
- ・Wi-FiやBluetoothの役割を衛星に置き換える
- ・電波情報マップの役割をドップラー周波数格子点に置き換える



Wi-Fi、Bluetoothなどを利用した  
屋内位置推定イメージ



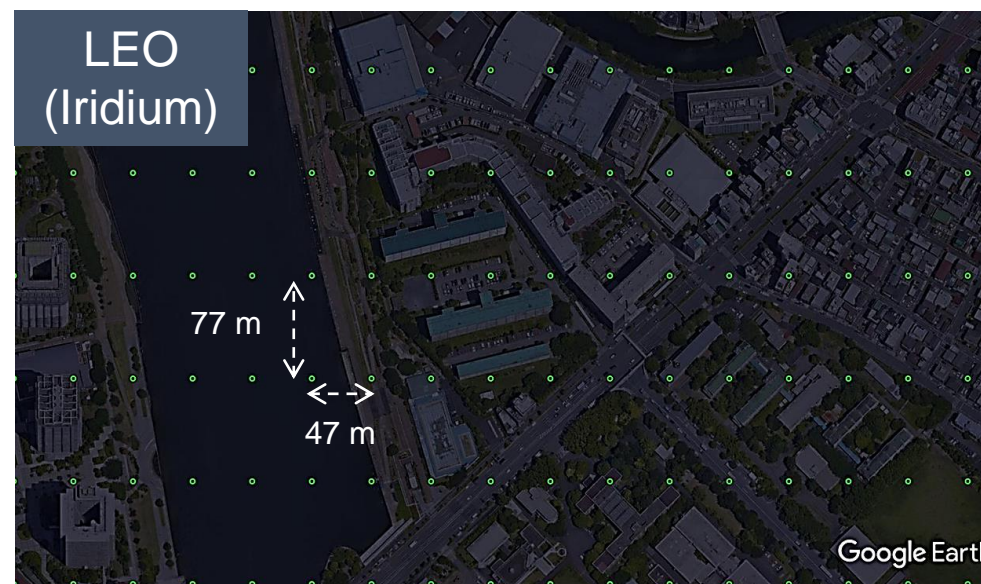
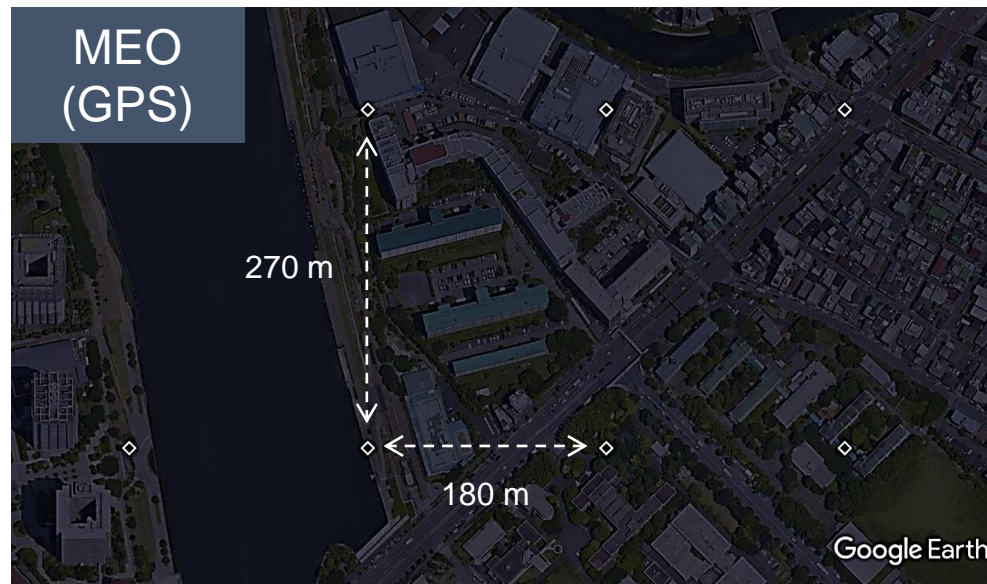
屋外



✓ グリッド上で計算されたドップラー周波数ポイントは非常に便利である

# グリッド上でのドップラー周波数点マップの密度

地図上にグリッドを生成し、各座標点でドップラ周波数を算出



LEO衛星の場合、マップの密度は4~40倍になる  
また、キャリア中心周波数の値にも影響される

Iridium NEXT衛星の中心周波数: 1626 MHz  
Orbcomm衛星の中心周波数: 137 MHz

→ 周波数が高いほど、  
より詳細な地図が表示される

# フィンガープリント的測位手法

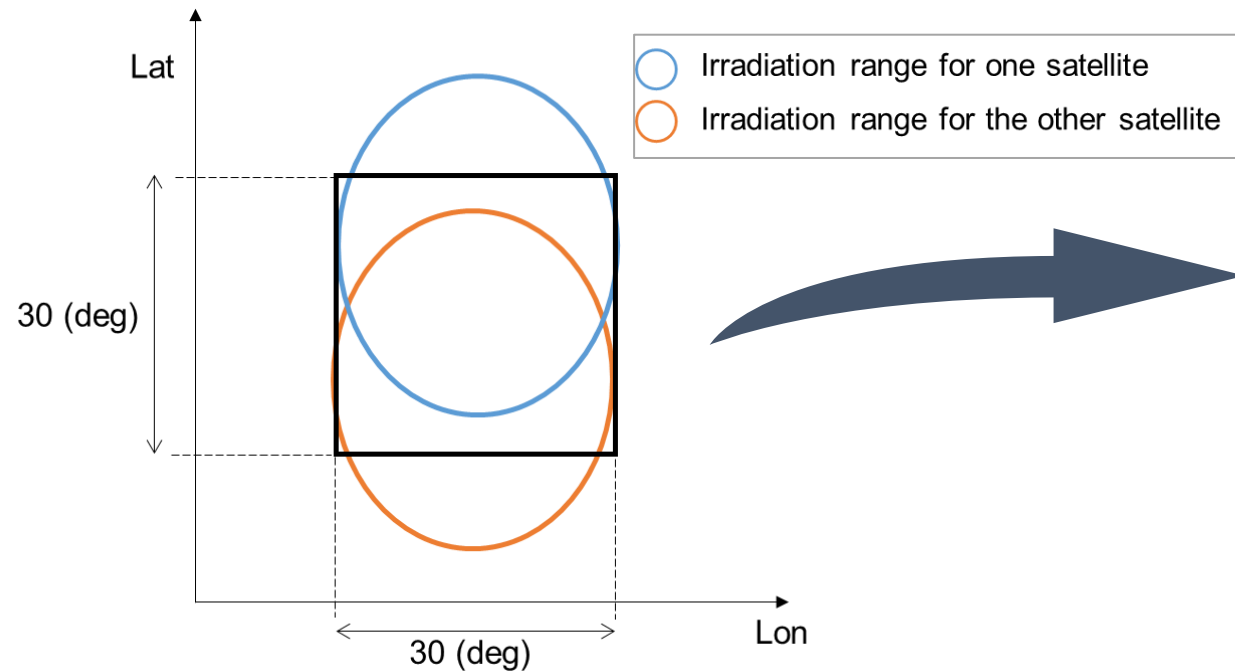
LEO衛星2機から同時に信号を受信した場合

初期探索領域は、照射範囲が重なる 3000 km 四方となる

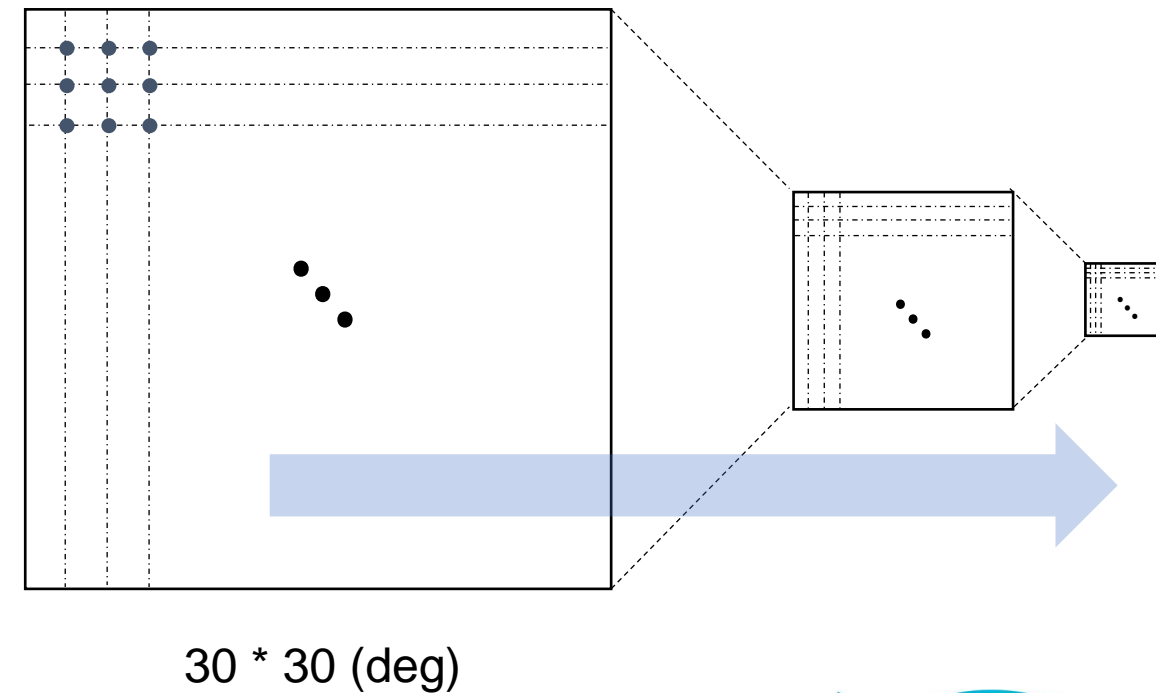
このとき、ユーザーは2つの衛星の照射範囲が重なるどこかに必ずいることになる

静止している物体を想定すると、地図の生成や探索範囲の縮小が可能(右下図参照)

## LEO衛星の狭い照射範囲の有効利用



## 探索範囲の縮小イメージ



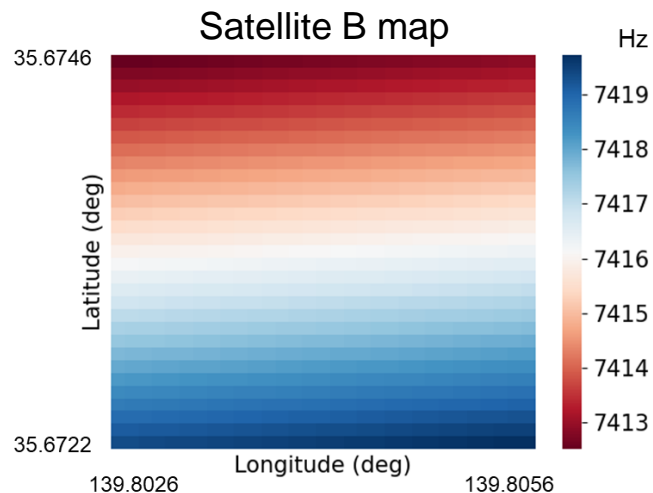
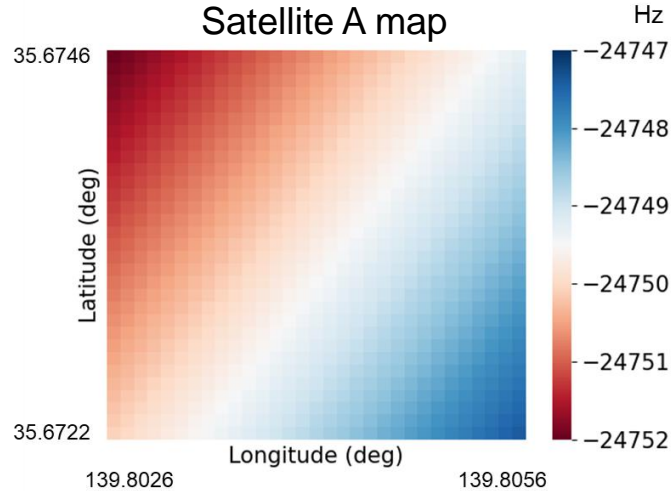


# フィンガープリント的測位手法

例: 2機の衛星による測位 (ヒートマップによる表示)

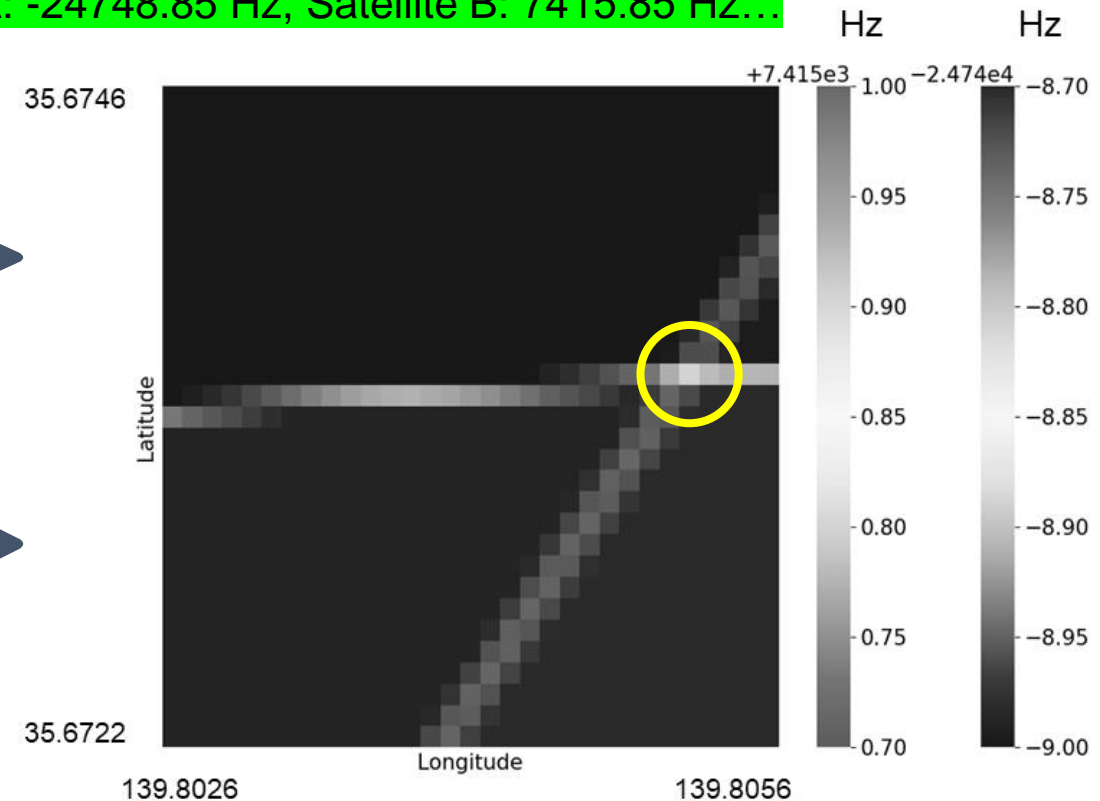
例: 観測ドップラ周波数が以下の場合

Satellite A: -24748.85 Hz, Satellite B: 7415.85 Hz...



-24748.85 Hz  
matching point

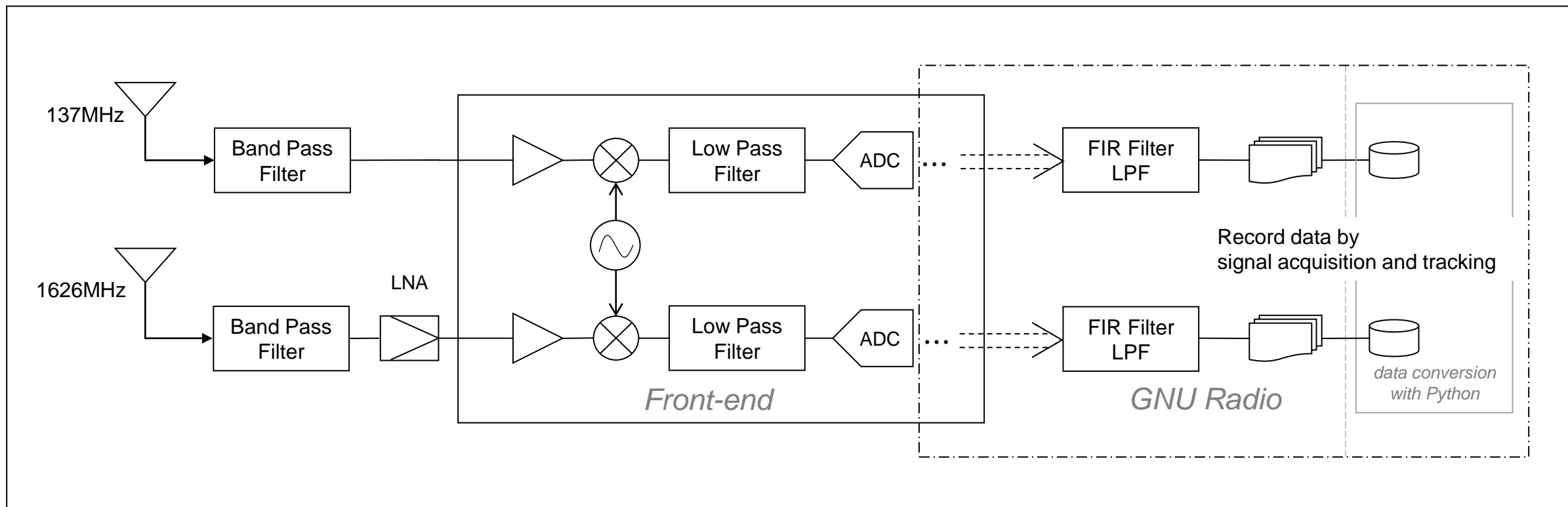
7415.85 Hz  
matching point



ユーザーの位置を求めるために、地図の平面の交点を求めている

# 低軌道衛星信号処理のブロック図

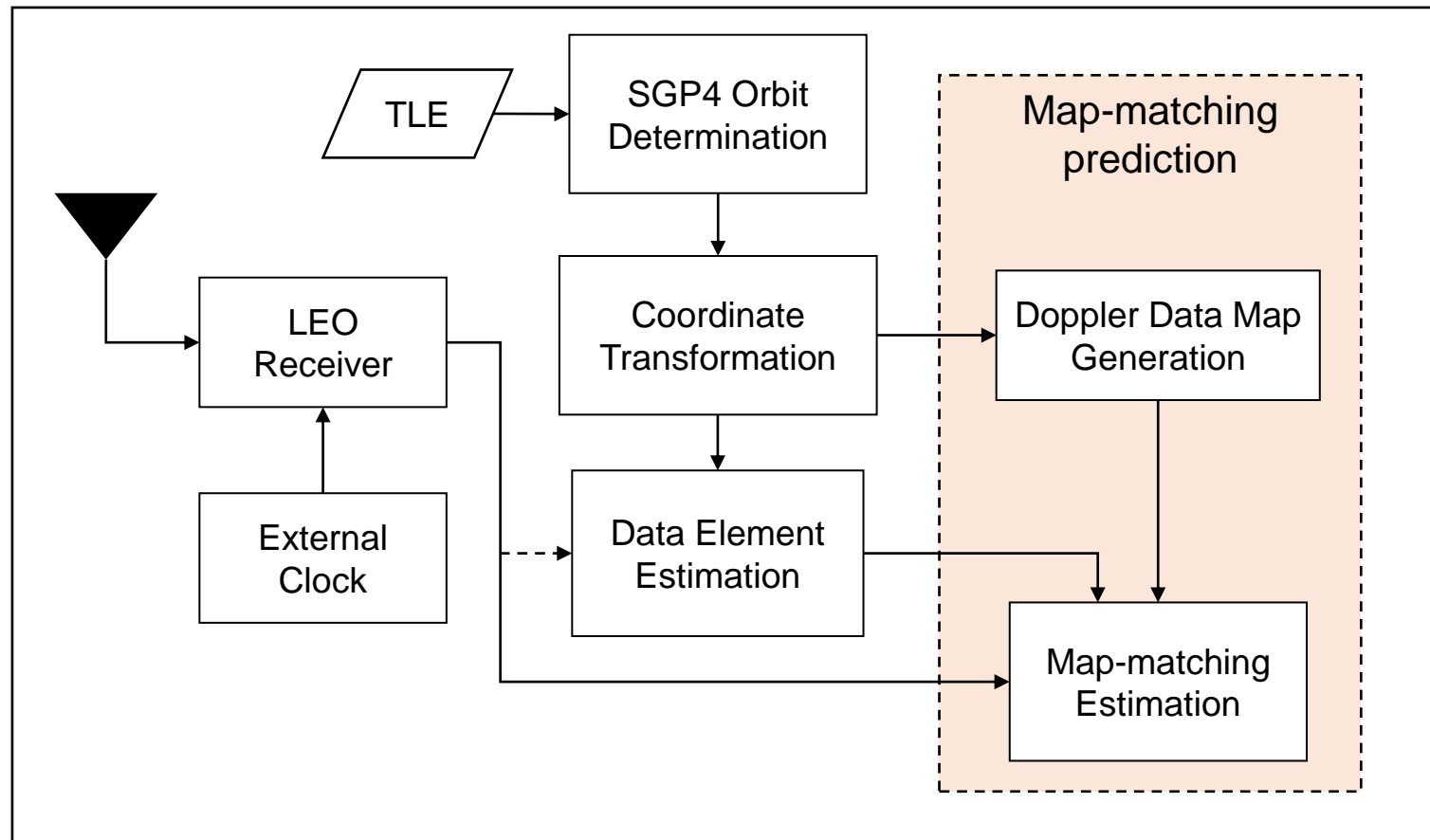
GNU Radioを搭載したLinux PCでのリアルタイム信号処理  
データ取得・保存後、位置推定は後処理で実行する





# フィンガープリント的測位手法のブロック図

1. まず、Iridium NEXT衛星の信号を受信し、フィンガープリント的測位を行う
2. 次に、1.で取得したおおよその位置をもとに、Orbcomm 衛星信号の受信とフィンガープリント的測位を行う



# 実験機器・準備

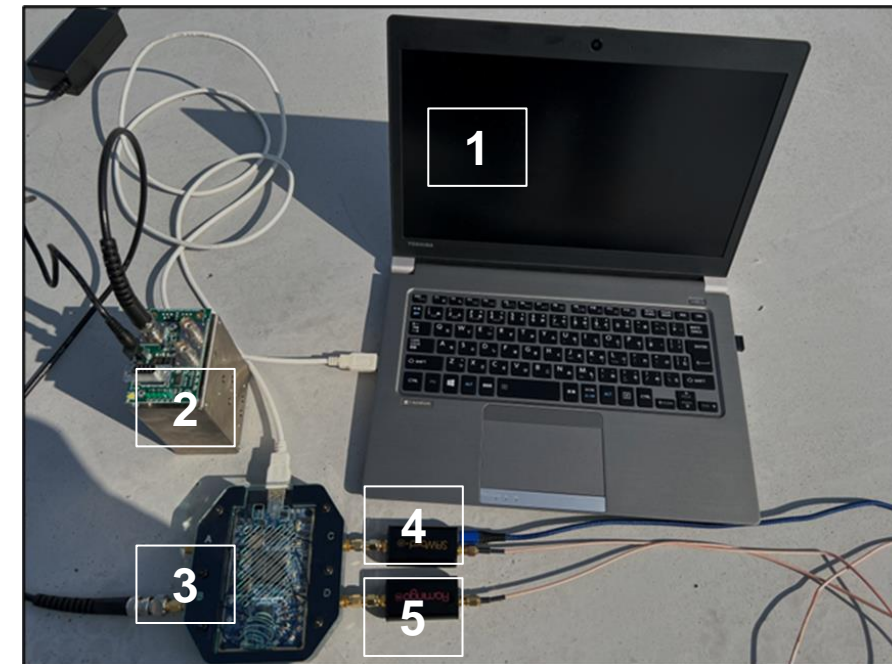
## 受信機と周辺機器

1. GNU Radio搭載 Linux PC
2. ルビジウム発振器
3. フロントエンド (LimeSDR or RTLSDR)
4. 低ノイズアンプ (Low-noise-amplifier)
5. バンドパスフィルタ

実験場所: 東京海洋大学第4実験棟屋上

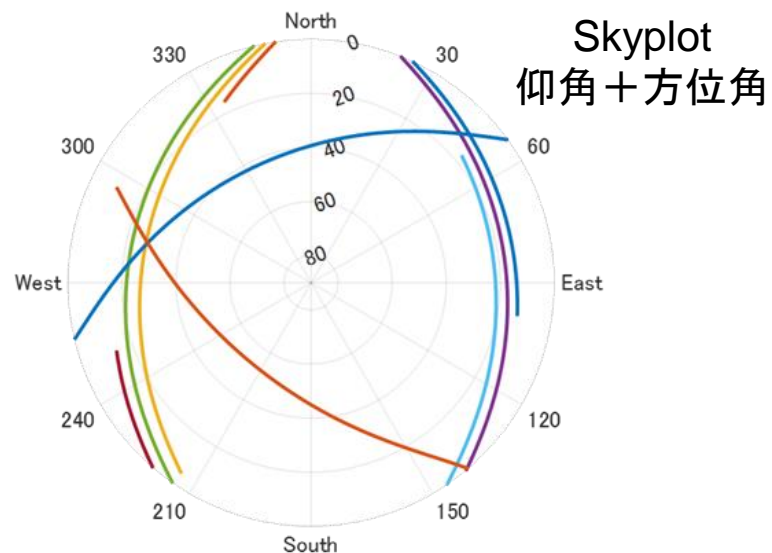


## アンテナ



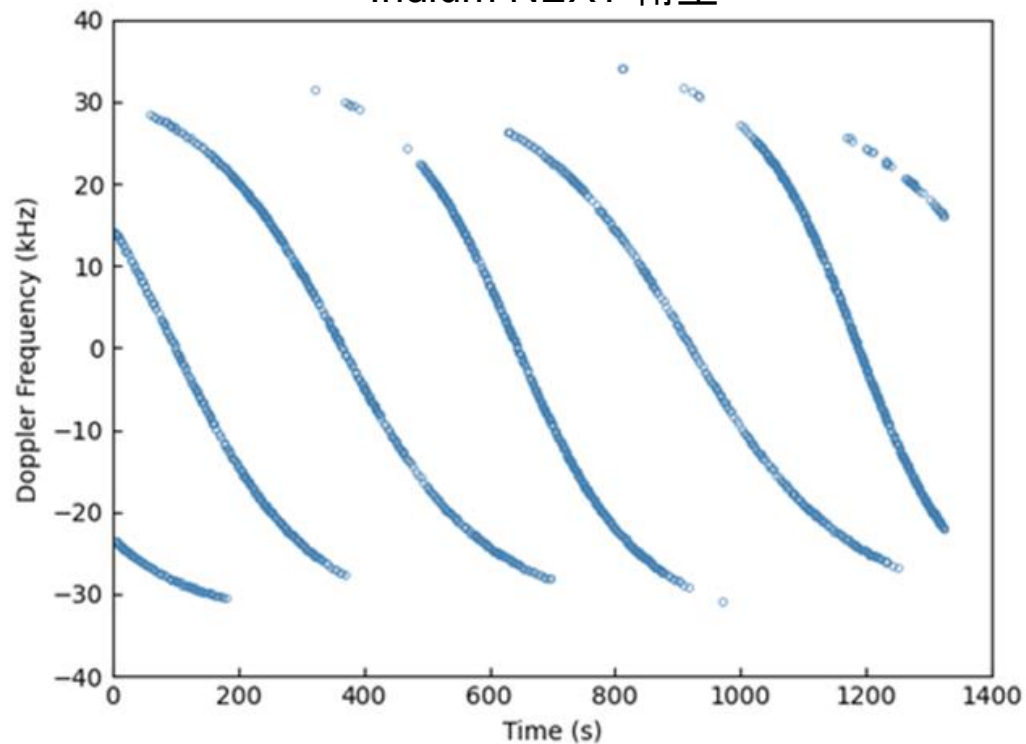
# 実験結果

- IRIDIUM 136
- IRIDIUM 156
- IRIDIUM 139
- IRIDIUM 158
- IRIDIUM 119
- IRIDIUM 160
- IRIDIUM 122
- ORBCOMM FM110
- ORBCOMM FM116

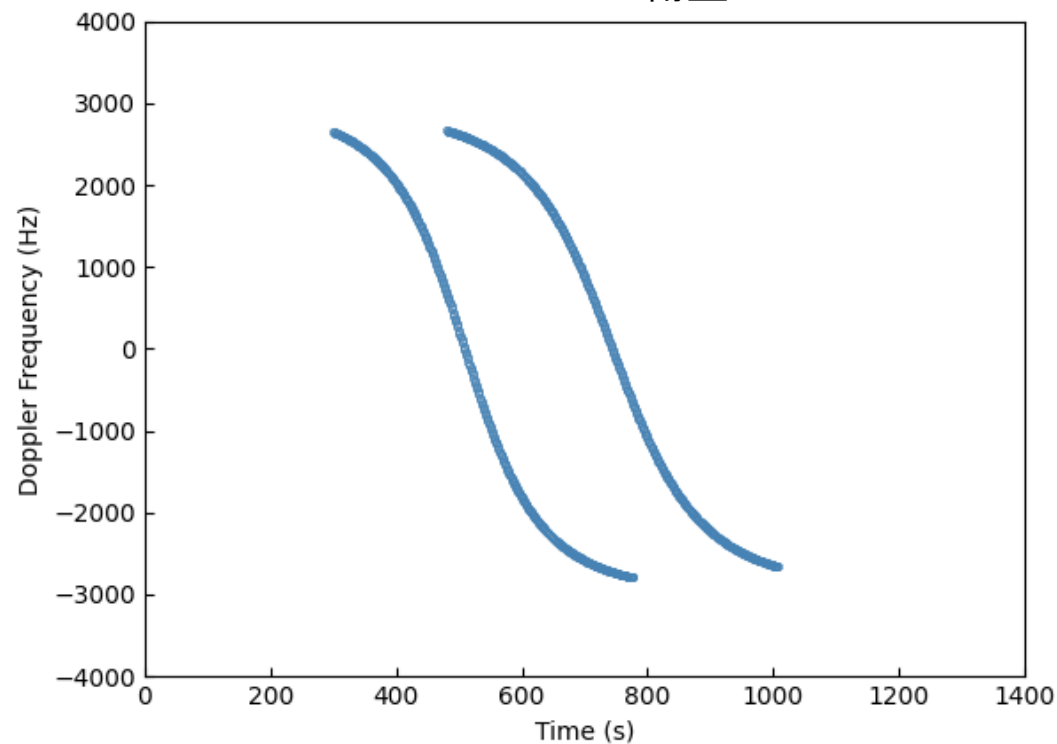


22分間のデータ取得を行い、  
その間、合計9機の衛星が上空を通過した  
( Iridium NEXT 7機、Orbcomm 2機 )

Iridium NEXT 衛星



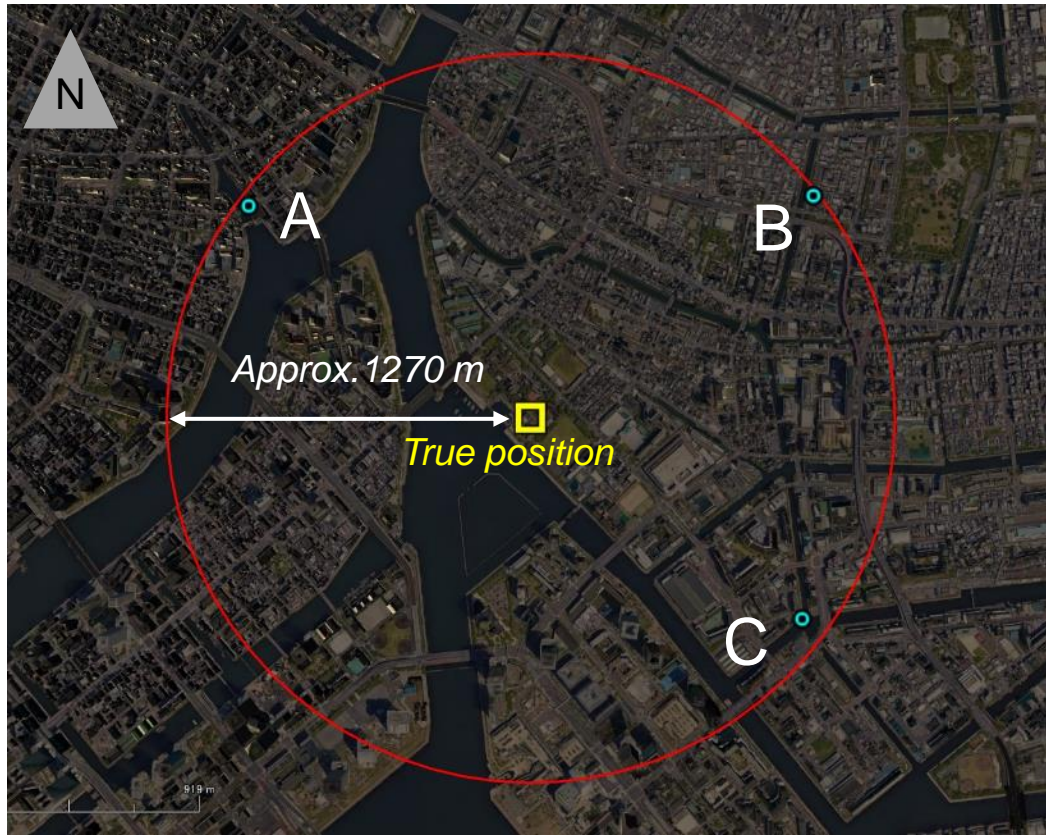
Orbcomm 衛星



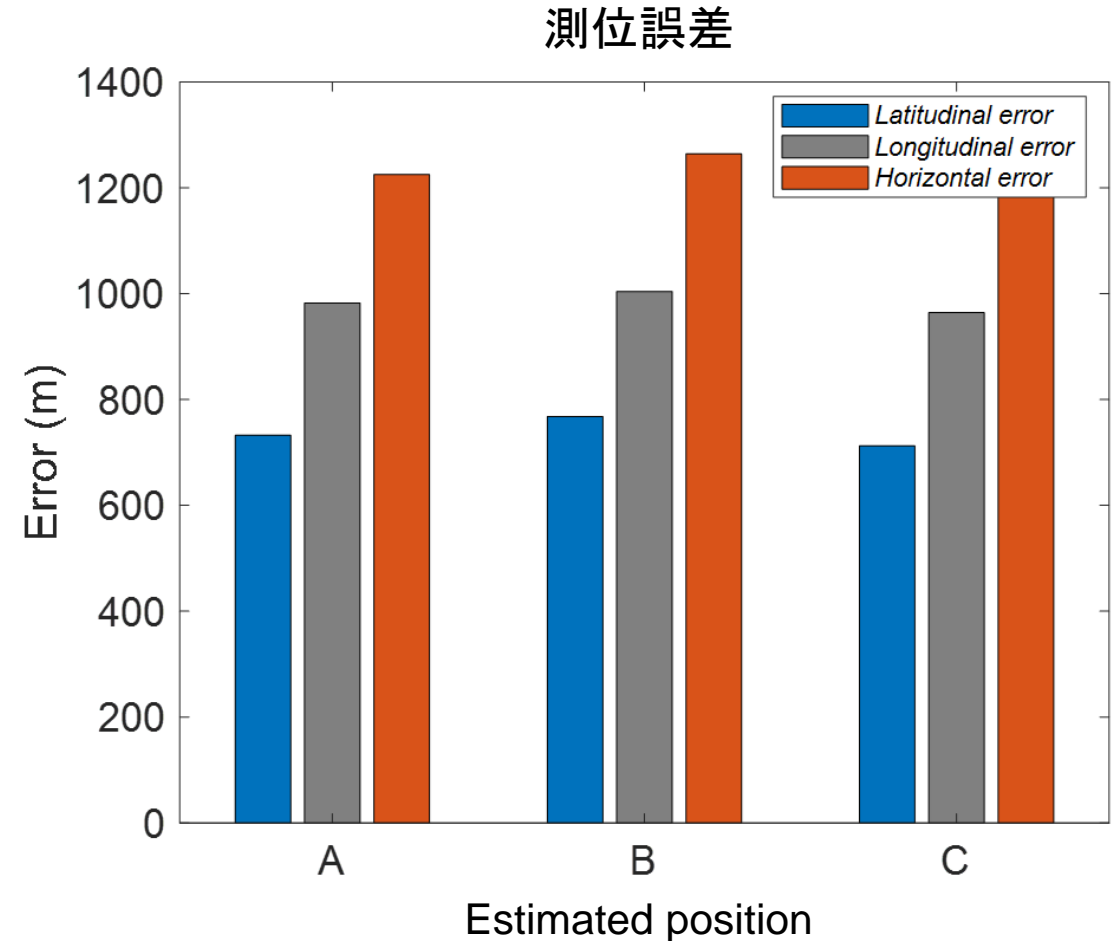


# 測位結果1 (シングルコンステレーション)

- ・組み合わせの異なる2機のIridium NEXT衛星を使用
- ・A、B、Cの3つのテストを異なる時刻で実施

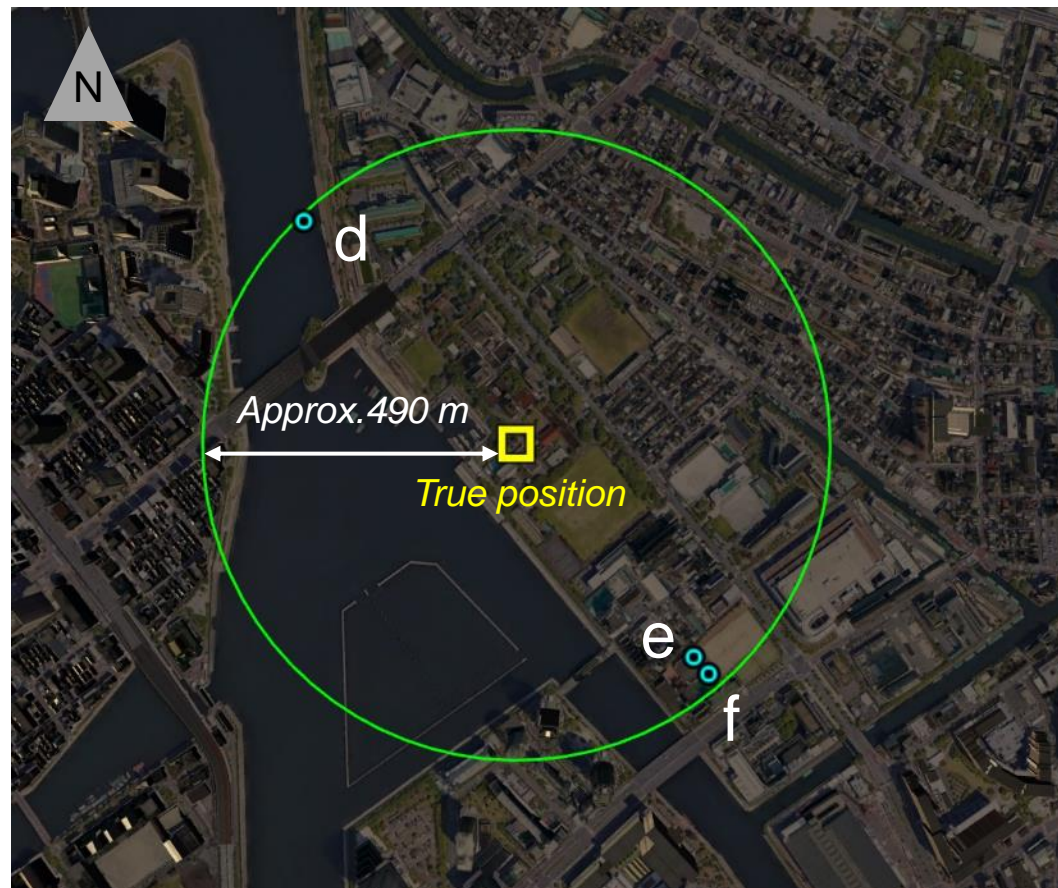


測位結果(水平プロット図)

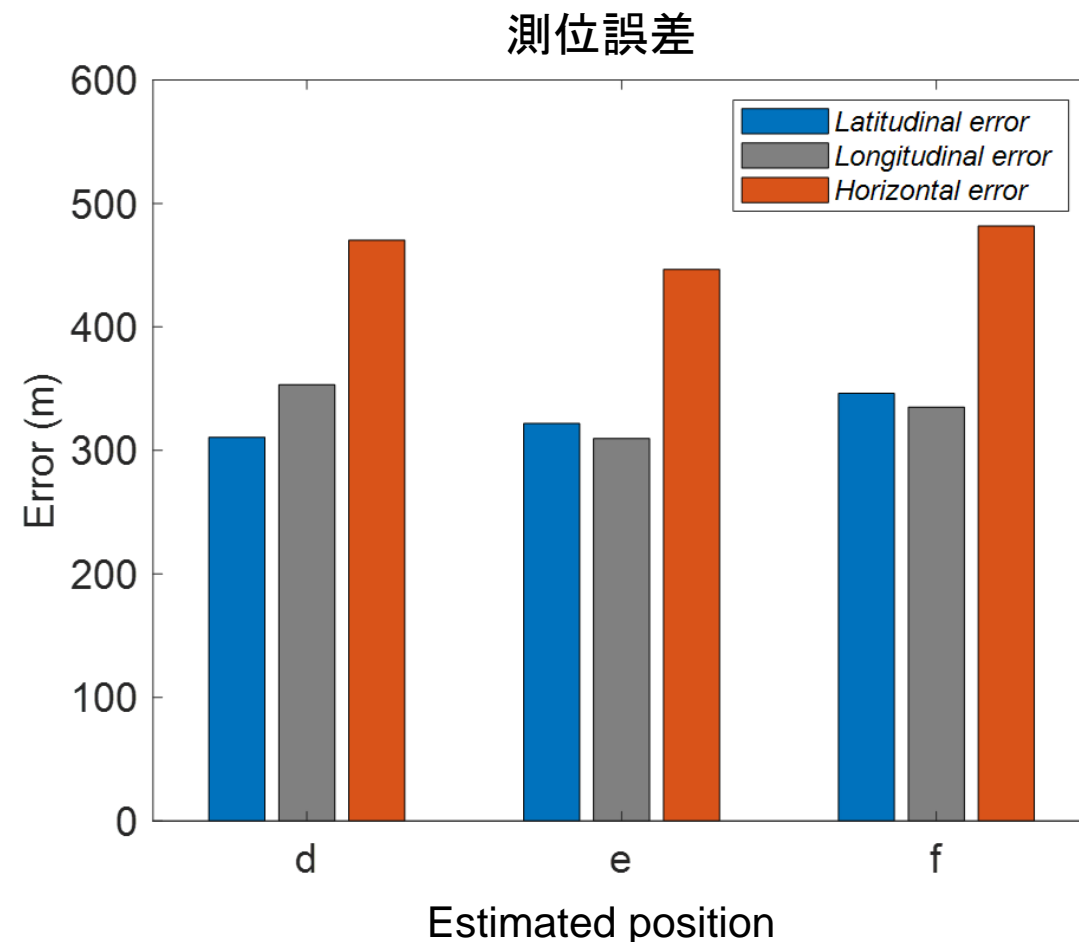


# 測位結果2 (マルチコンステレーション)

- ・2機のOrbcomm衛星を使用し、衛星に搭載された受信機の結果(正しい衛星位置)を使用
- ・d、e、fの3つのテストを異なる時刻で実施



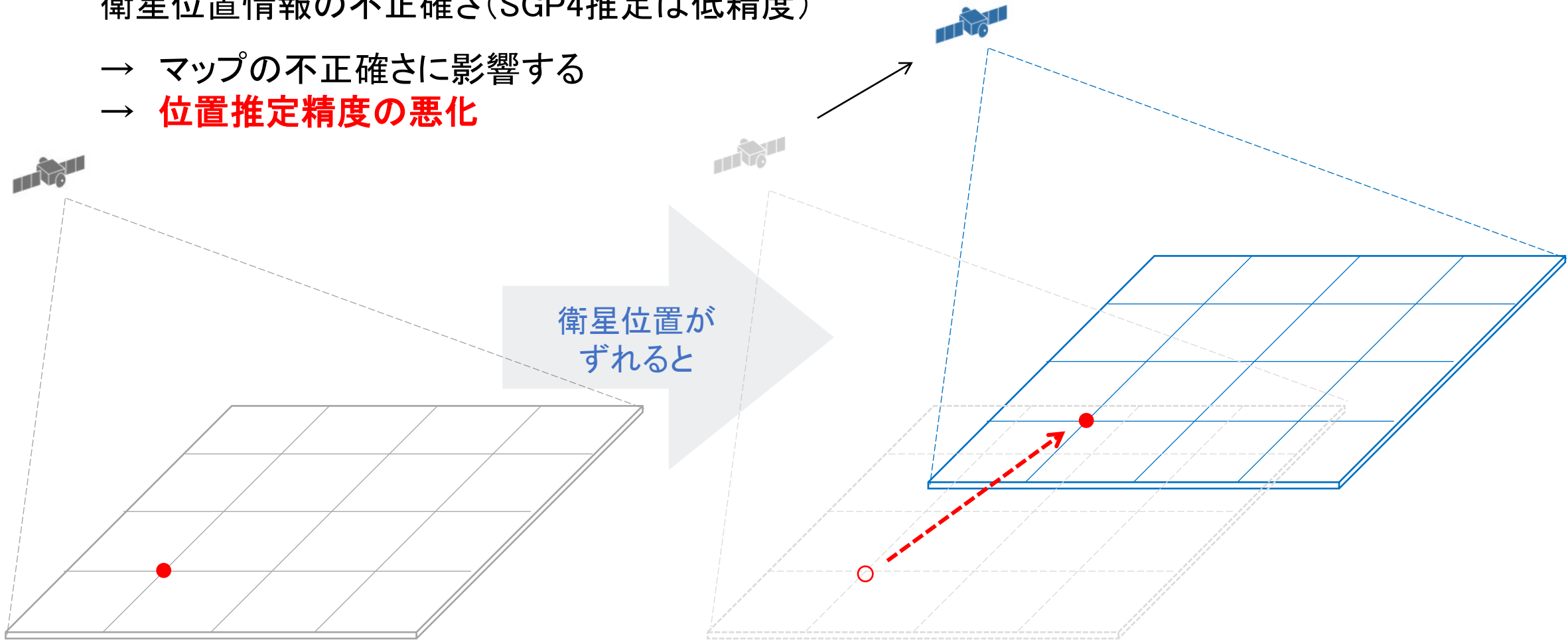
測位結果(水平プロット図)



# 測位精度への衛星位置の影響

衛星位置情報の不正確さ(SGP4推定は低精度)

- マップの不正確さに影響する
- **位置推定精度の悪化**



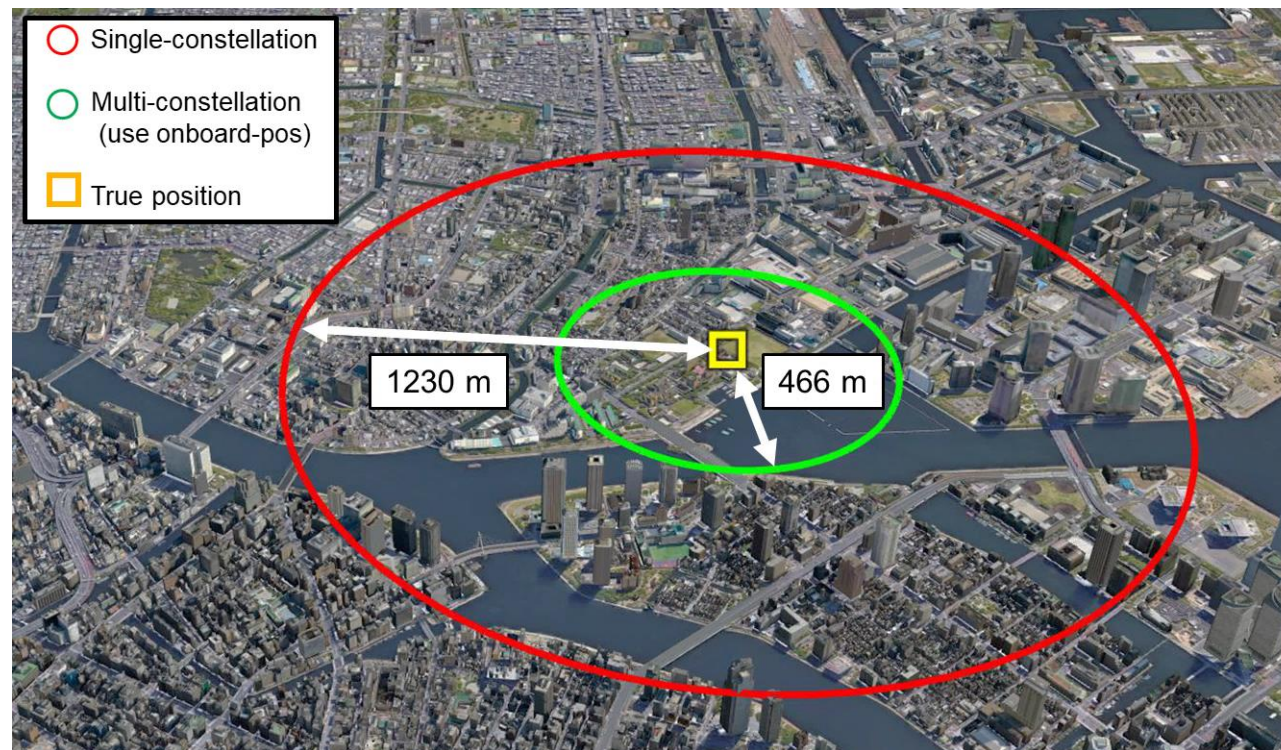


# まとめ

シングルコンステレーションの場合  
位置推定精度は 約700mから1300m  
RMS値は1230m

マルチコンステレーションの場合 (オンボード位置使用)  
位置推定精度は 約300mから500m  
RMS値は466m

位置推定精度の実効値の範囲



衛星に搭載された受信機からの測位結果を利用することで、衛星の位置情報の精度が向上  
そして、ドップラー周波数グリッドマップのズレが解消される  
→ 位置推定精度が向上する



低軌道衛星のドップラー周波数に着目したシンプルかつロバストな測位方法を提案した

- ドップラー周波数の分布の特徴を発見することに成功した
- マルチコンステレーション測位誤差がシングルコンステレーション結果と比較して、約62%改善した  
→ GNSS利用不可の場合の、代替測位方法として有効である可能性

今後の課題

移動体における誤差の影響を調査する予定