

# ソフトウェアGNSS受信機 の基礎研究

令和5年度卒論審査会(2023.12.12)

東京海洋大学 越中島会館講堂

情報通信工学研究室 後藤 啓輔

指導教員 久保信明教授

# 目次

- 研究背景
- GNSS-SDR(Software Defined Radio)について
- 信号捕捉・追尾
- ドップラ周波数, 速度推定
- 移動体実験結果
- まとめ

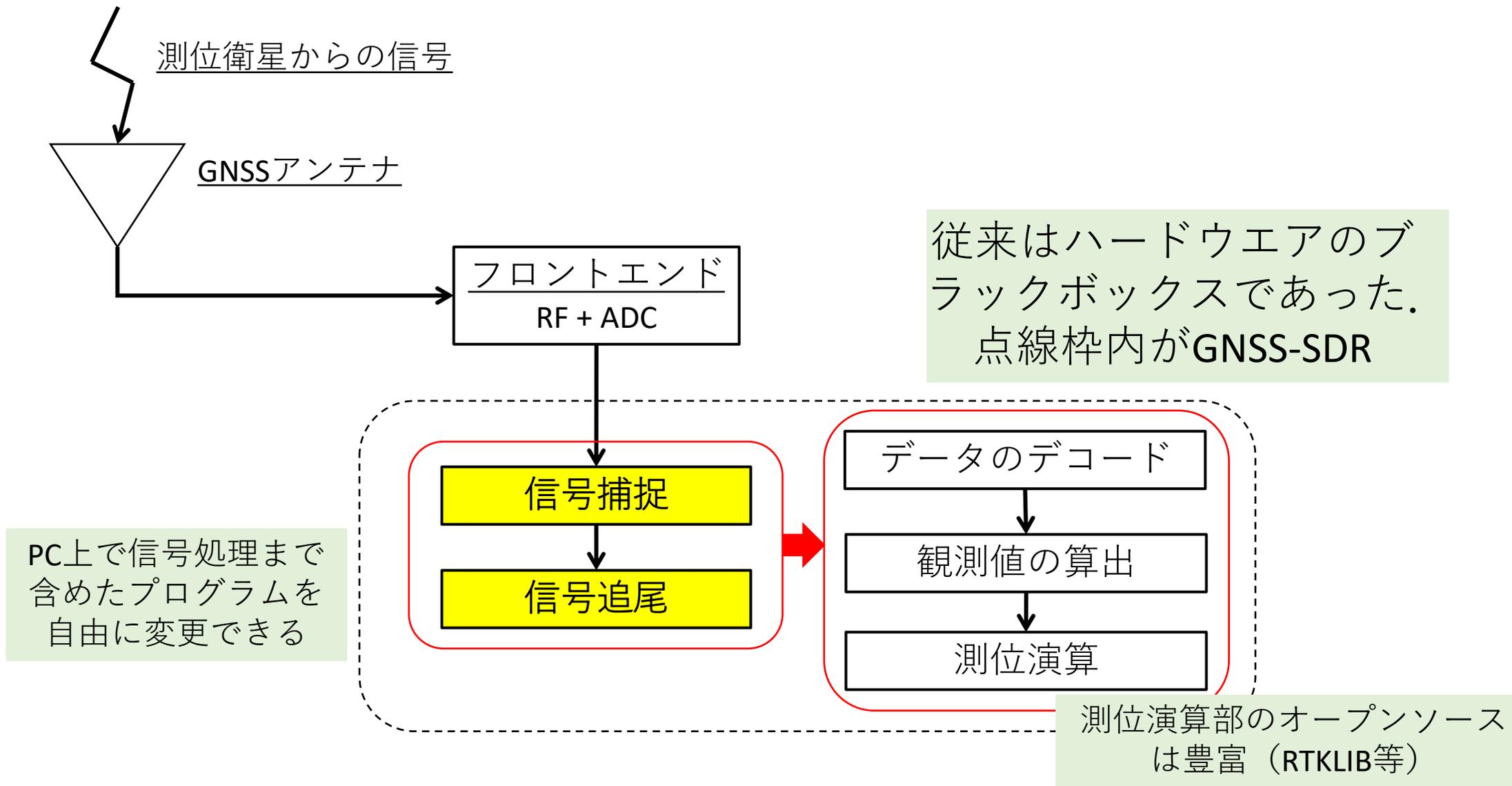
# 研究背景

- 移動体の自動化・無人化の流れにより衛星測位の精度には今後さらに高い信頼が要求される
  - 低軌道衛星（LEO）を測位衛星として利用する場合や月面探査にGNSSを利用したい場合、新たな受信機の開発が必要となる
  - 高精度測位が身近となり低コストの国産受信機の開発も極めて重要
  - これらを実現するためにはGNSS受信機の中身を正しく理解する必要がある
- =>ソフトウェア受信機を利用する

# GNSS-SDRを学ぶ意義

- **受信機の中身を理解して自分で改良できるようになる**
- LEOなどのGNSSとは異なる仕様の衛星信号にも対応できる
- IMUなどの他のセンサとの深いレベルの統合も可能になる
- 欺瞞信号や干渉波に対する理解も深まる
  
- 将来的には本質的な理解ができる人間を増やし、衛星測位分野での競争力を高めることに繋がる

# GNSS-SDRについて



# フロントエンドについて

フロントエンドの役割は信号の強度を増幅し周波数を下げ、デジタル信号へ変換すること

- Pocket SDR (2周波,-12MHz)  
200\$程度



- RTL-SDR (1周波,-2MHz)  
20\$程度



本研究はFraunhofer (右図) を使用しているが上記のフロントエンドも問題なく利用できる



# 信号捕捉・追尾 (受信信号)

$$r(t) = \sqrt{2P_{rcv}}D(t - \tau)x(t - \tau) \cos(2\pi(f_L + f_D)t + \theta_{rcv}) + n(t)$$

$\tau$  : 伝搬時間

$f_D$  : ドップラ周波数

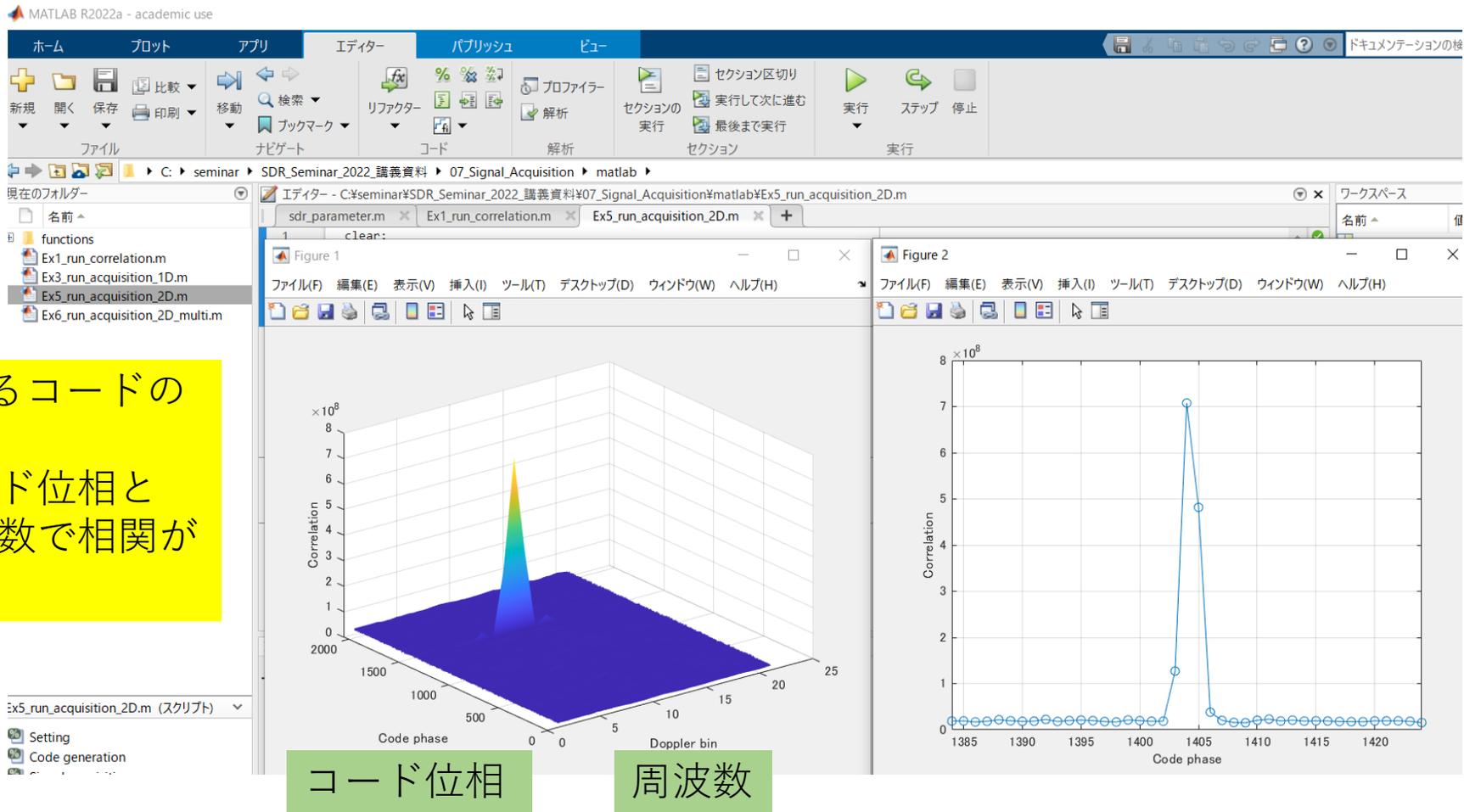
$\theta_{rcv}$  : 搬送波位相

- 衛星と受信機のタイミングを一致させるために上記の三要素を求める
- 受信信号は赤枠内の式で表現でき、レプリカ信号との相関を取り伝搬時間とドップラ周波数の概略推定値を決める (信号捕捉)
- 衛星との相対距離は変化するので信号捕捉で推定したレプリカ時計との差をさらに細かく求め続ける (信号追尾)

# 信号捕捉

コードの位相（ $1\text{ms}/12000$ の細かさ：20m程度の粗さ）とおおまかな受信周波数（数10Hz程度の粗さ）を推定する

1msごとにくるコードの先頭を探す  
その時のコード位相とドップラ周波数で相関がピークになる



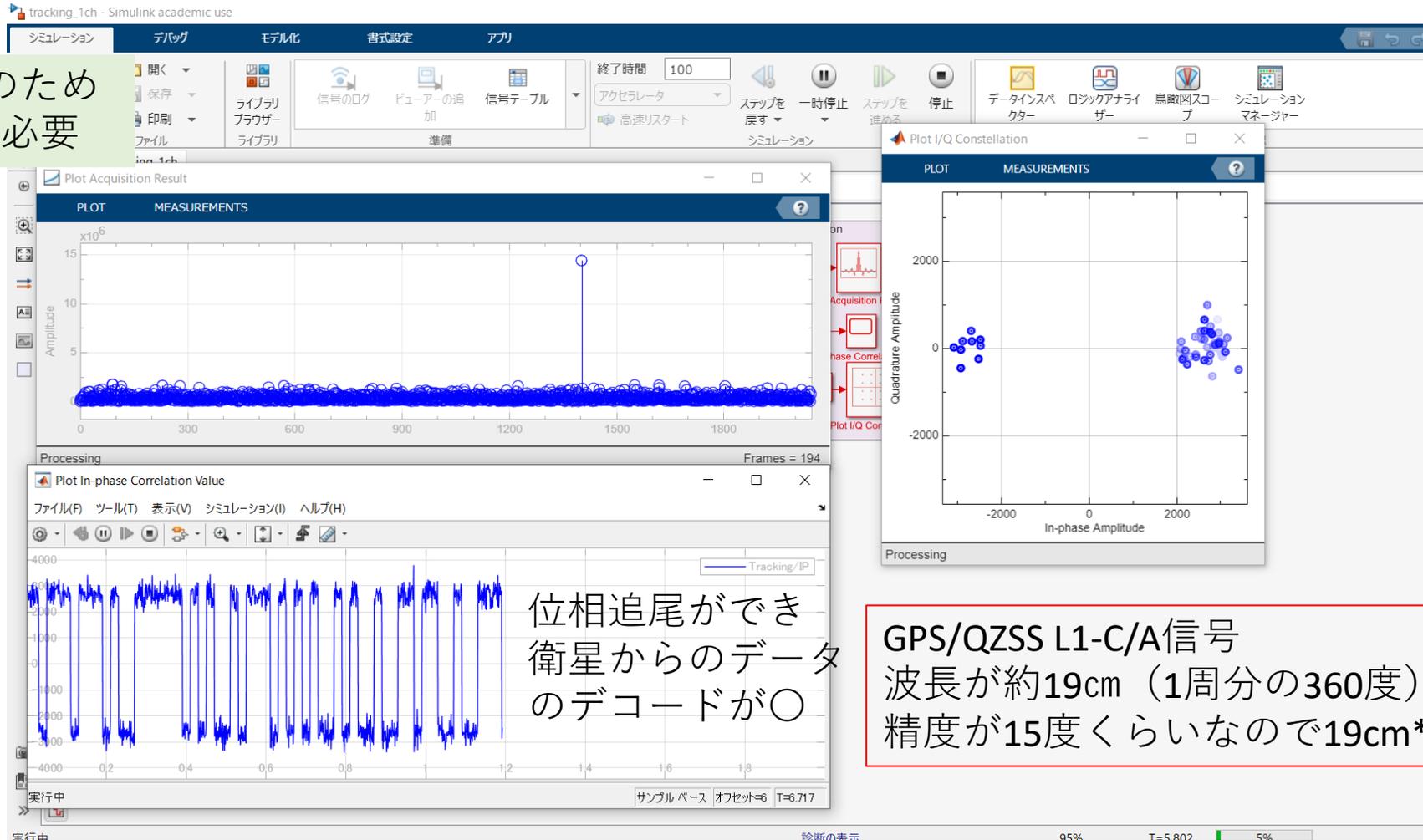
コード位相

周波数

# 信号追尾

コードの位相（数m程度の粗さ）と周波数だけでなく  
搬送波位相（波長の100分の1程度：数mm）を推定する

安定した追尾のために  
信号捕捉は必要



位相追尾ができ  
衛星からのデータ  
のデコードが○

GPS/QZSS L1-C/A信号  
波長が約19cm（1周分の360度）  
精度が15度くらいなので $19\text{cm} \times (15/360) = 8\text{mm}$

# 観測値（擬似距離，ドップラ周波数，搬送波位相）の算出

衛星番号	擬似距離[m]	搬送波位相	ドップラ周波数[Hz]	信号強度
------	---------	-------	-------------	------

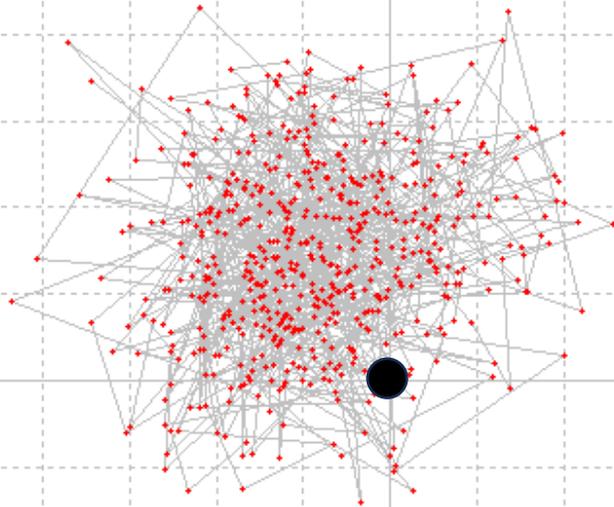
```
> 2023 12 6 6 55 26.8478891 0 9
G31 20351693.764 -14331.690 -1828.552 45.048
J 2 38685684.956 -8822.105 -1127.227 44.380
G26 20479910.123 -16828.612 -2147.359 44.113
G16 21532398.678 -26923.039 -3435.926 41.958
G28 20643748.094 -4928.451 -628.182 42.883
G29 22666541.772 7461.154 953.062 37.169
J 3 37163806.220 -16003.750 -2043.206 37.501
J 7 37296164.010 -12746.352 -1626.522 35.325
J 4 37167410.218 -11451.891 -1461.757 37.519
> 2023 12 6 6 55 27.0478893 0 9
G31 20351685.331 -14697.264 -1827.417 44.796
J 2 38685701.616 -9047.425 -1125.677 44.523
G26 20479888.599 -17258.022 -2146.821 43.716
G16 21532328.034 -27610.092 -3434.703 41.803
G28 20643784.365 -5053.976 -626.912 42.691
G29 22666640.213 7651.871 954.727 37.336
J 3 37163788.589 -16412.274 -2043.722 36.885
```

出力した  
RINEX Observationデータ

# 屋上での実験（約10分取得, GPS+QZSS） 単独測位とDGNSSの違い（測位結果）

単独測位

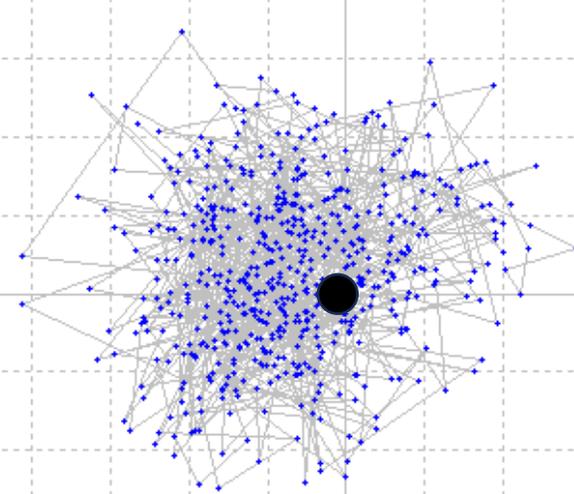
ORI= 35.666339930°N 139.792214370°E 59.9050m  
AVE=E:-1.7127m N: 2.8982m U: 1.2040m  
STD=E: 2.2537m N: 2.1286m U: 5.0001m  
RMS=E: 2.8291m N: 3.5949m U: 5.1389m 2D: 9.1492m



黒丸が真値

DGNSS

ORI= 35.666339930°N 139.792214370°E 59.9050m  
AVE=E:-1.4526m N: 0.6049m U: -0.9025m  
STD=E: 2.2667m N: 2.1236m U: 4.7615m  
RMS=E: 2.6906m N: 2.2064m U: 4.8423m 2D: 6.9592m



DGNSSの基準局は市販受信機

[1]2023/12/01 03:30:01-12/01 03:34:58 GPST : N=594 B=0.0km Q= 5:594(100.0%)

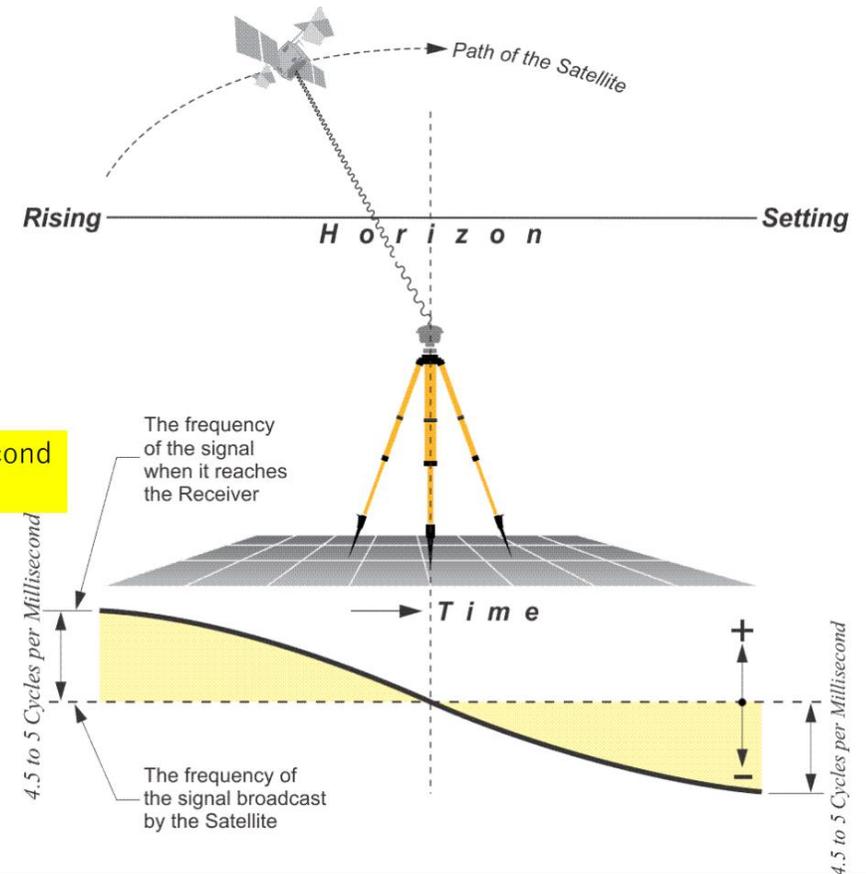
[1]2023/12/01 03:30:01-12/01 03:34:58 GPST : N=594 B=0.0km Q= 4:594(100.0%)

STDに変化はほとんどないがRMSが向上  
->単独測位より真値に近づいた

# ドップラ周波数

- 衛星が送信する周波数と受信機が受信する周波数とのずれ
- ドップラ周波数[Hz]  
= (衛星相対速度[m/s] / 波長[m])
- 衛星が天頂方向の場合は 0
- 概ね ±5000Hz程度以内になる
- ドップラ周波数から移動局の速度を推定することで測位精度の向上につながる

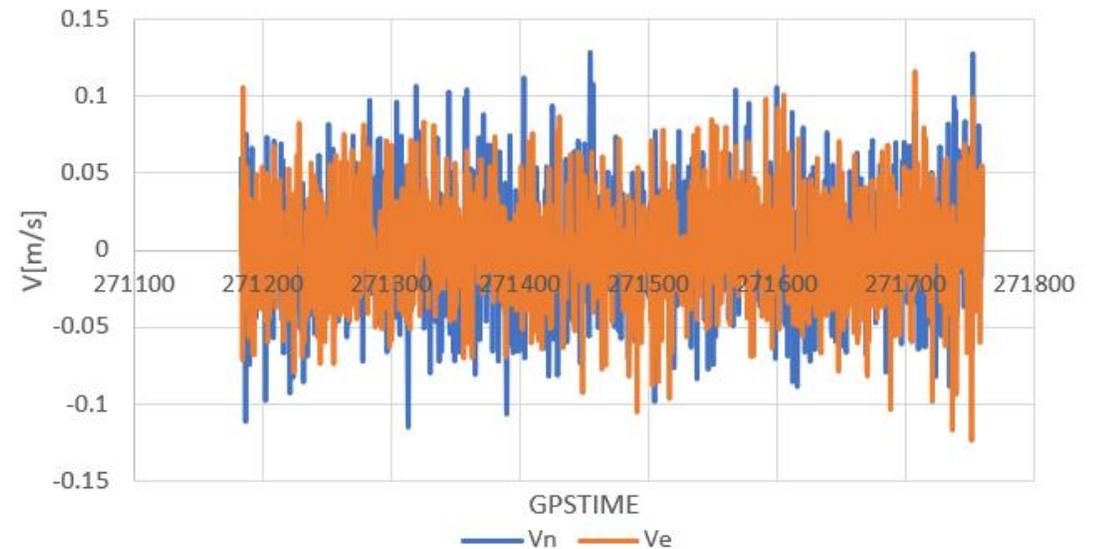
4,500-5,000 Hz per second in maximum



# 速度推定

- ドップラ周波数により測位計算と共に受信機の移動速度を推定する（数cm精度の推定が可能 右図）
- 擬似距離と統合して測位精度を向上させられる
- その場合、電波の数秒の瞬断であればマルチパス環境等でも精度の良い測位を継続できる

静止時の受信機  
の移動速度を計算



緯度経度方向の速度

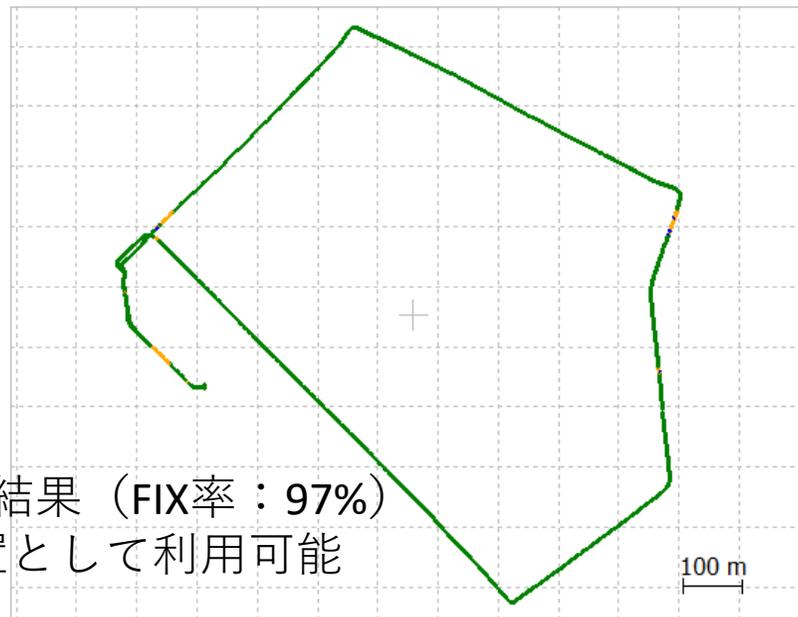
# 移動体での検証結果（海洋大付近）

- フロントエンドで生の中間周波数データを収集し，開発したSDRを利用してGPS/QZSSの信号捕捉・追尾・測位を実施
- 同時に市販受信機でRTK測位を実施し，そのFIX解を精密位置として性能を評価



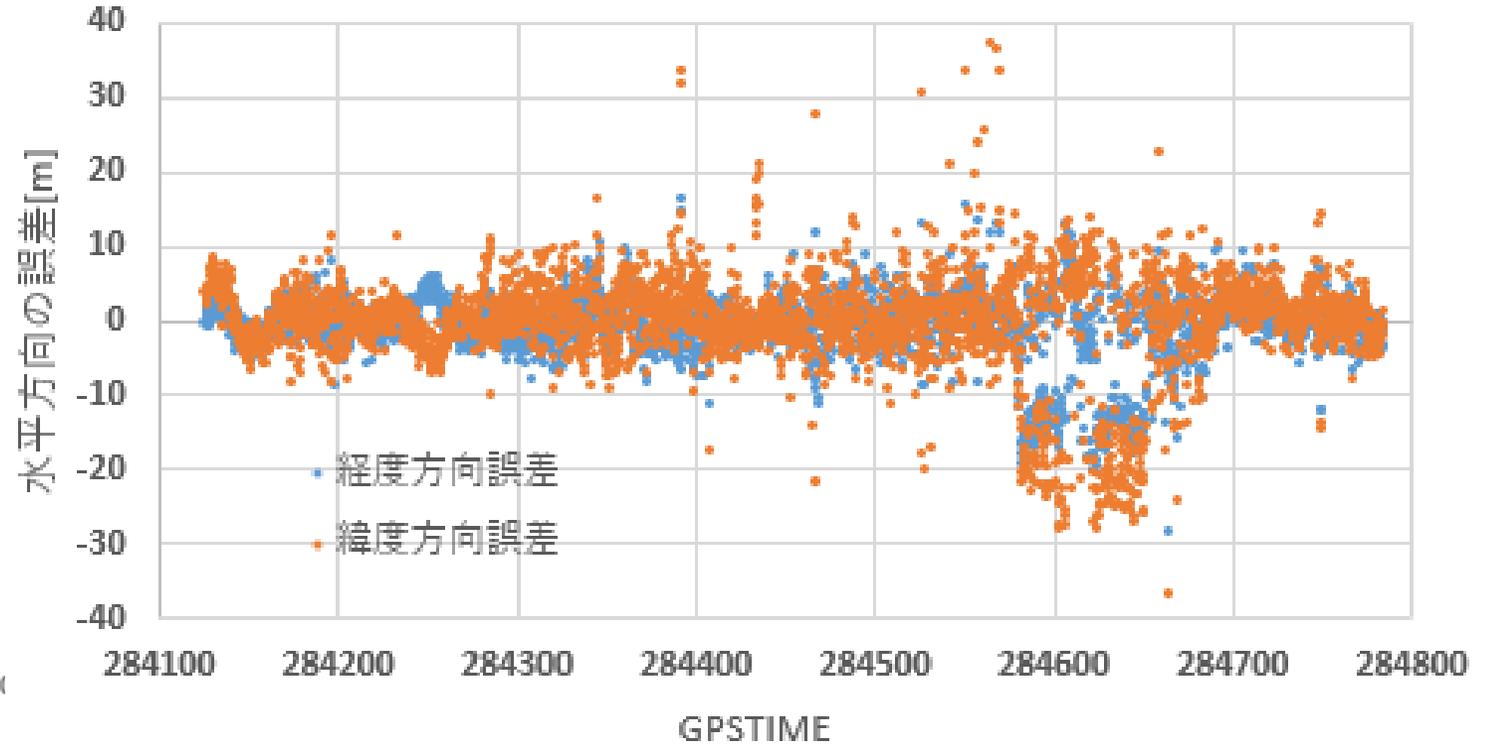
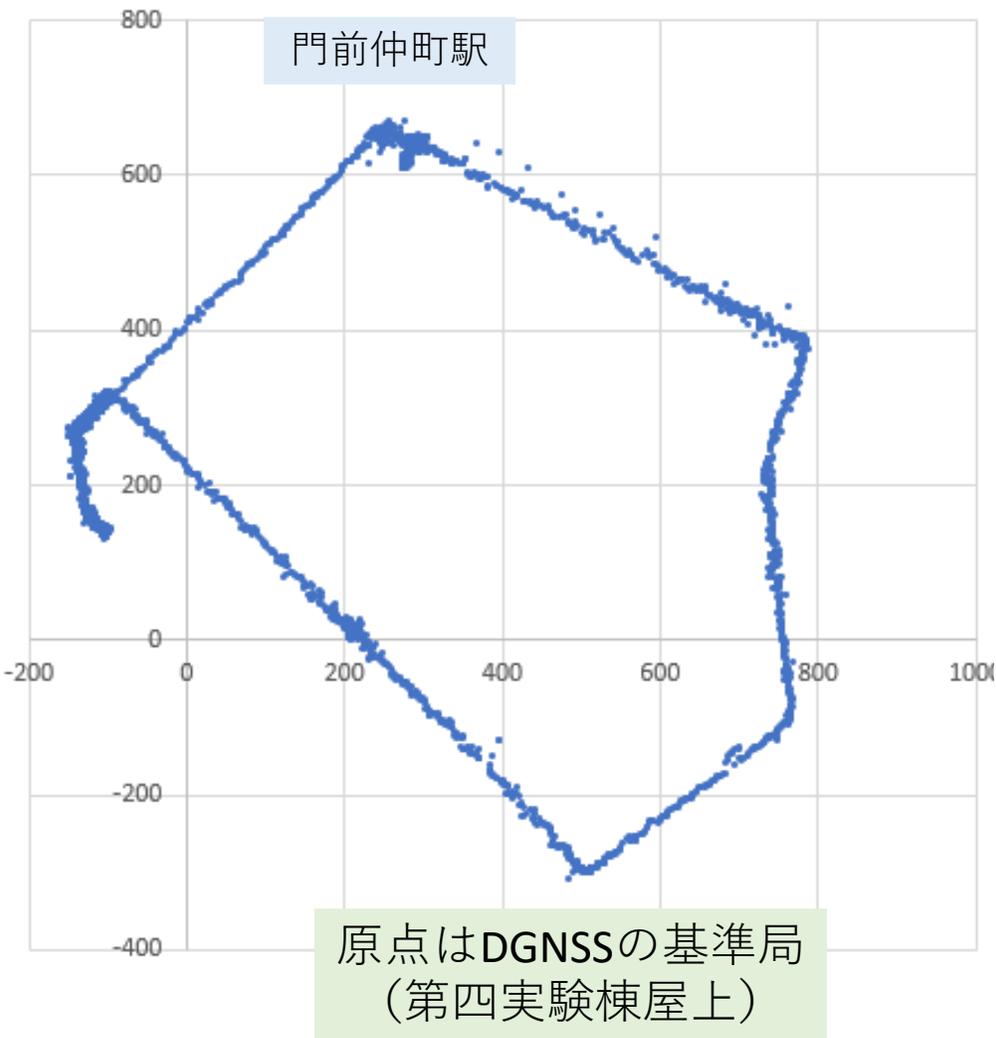
衛星番号 疑似距離 搬送波位相 ドップラ周波数 信号強度

>	2023	12	6	6	55	26.8478891	0	9			
G31	20351693.764					-14331.690			-1828.552		45.048
J 2	38685684.956					-8822.105			-1127.227		44.380
G26	20479910.123					-16828.612			-2147.359		44.113
G16	21532398.678					-26923.039			-3435.926		41.958
G28	20643748.094					-4928.451			-628.182		42.883
G29	22666541.772					7461.154			953.062		37.169
J 3	37163806.220					-16003.750			-2043.206		37.501
J 7	37296164.010					-12746.352			-1626.522		35.325
J 4	37167410.218					-11451.891			-1461.757		37.519
>	2023	12	6	6	55	27.0478893	0	9			
G31	20351685.331					-14697.264			-1827.417		44.796
J 2	38685701.616					-9047.425			-1125.677		44.523
G26	20479888.599					-17258.022			-2146.821		43.716
G16	21532328.034					-27610.092			-3434.703		41.803
G28	20643784.365					-5053.976			-626.912		42.691
G29	22666640.213					7651.871			954.727		37.336
J 3	37163788.582					-16412.374			-2042.722		36.885
J 7	37296169.785					-13071.711			-1626.052		34.479
J 4	37167415.620					-11744.279			-1461.758		36.964
>	2023	12	6	6	55	27.2478895	0	9			
G31	20351678.393					-15062.806			-1827.882		45.254
J 2	38685721.149					-9272.708			-1126.451		44.588
G26	20479869.273					-17687.408			-2147.210		44.073
G16	21532257.731					-28297.122			-3435.835		41.340
G28	20643821.301					-5179.456			-627.486		42.877
G29	22666739.319					7842.675			953.485		37.695
J 3	37163774.156					-16820.890			-2042.607		37.978
J 7	37296171.549					-13397.177			-1625.358		35.969
J 4	37167421.467					-12036.636			-1462.725		38.062
>	2023	12	6	6	55	27.4478897	0	9			
G31	20351669.247					-15428.391			-1827.697		45.139
J 2	38685738.140					-9498.070			-1126.780		44.554
G26	20479849.094					-18116.831			-2146.546		44.199
G16	21532185.752					-28984.195			-3435.728		40.967
G28	20643858.547					-5304.888			-627.740		42.883



RTK測位結果（FIX率：97%）  
精密位置として利用可能

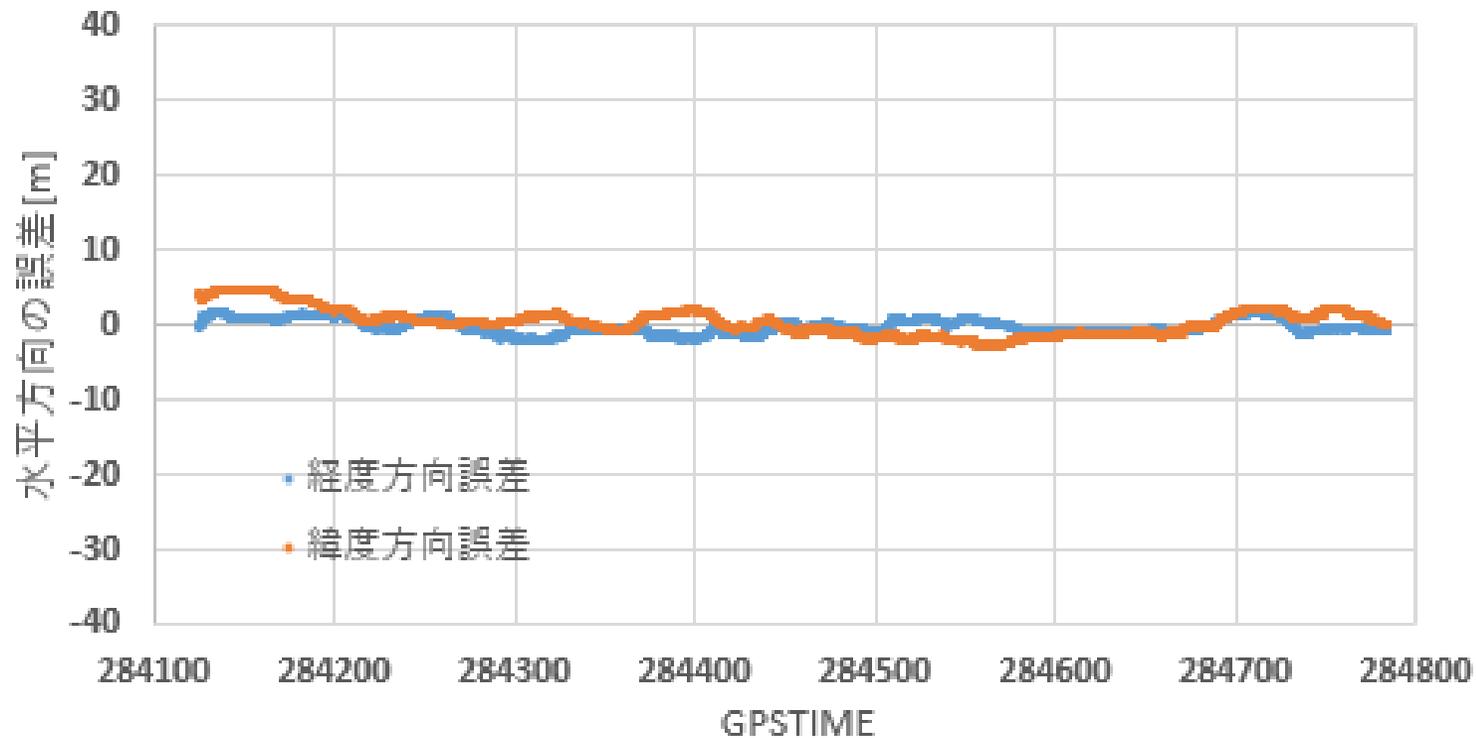
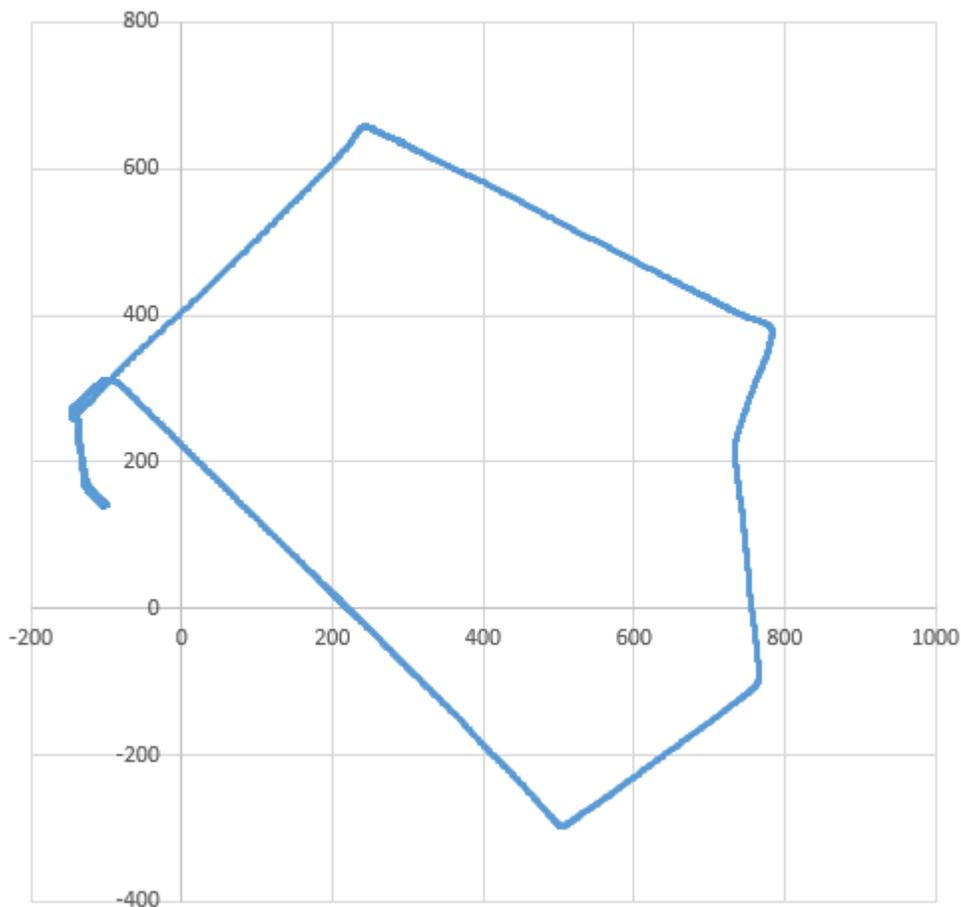
# 擬似距離のみのDGNSS測位結果



## 擬似距離のみのDGNSS測位結果

マルチパス等の影響を受けて誤差が大きい

# 前述のDGNSSとドップラ周波数由来の速度をカルマンフィルタで統合した測位結果



位置と速度と統合した測位結果

測位結果の飛びはない

# まとめ

- ソフトウェアGNSS受信機・フロントエンドを利用してデータを取得しDGNS測位まで行った
- ドップラ周波数より推定した速度を統合することで測位結果の大幅な改善につながった
- 本研究は受信機の内部で行われている処理に焦点を当てたものであり、新たに受信機を作成する必要がある際に役立つ

## 課題

- cm級のRTK測位ができる観測値の生成