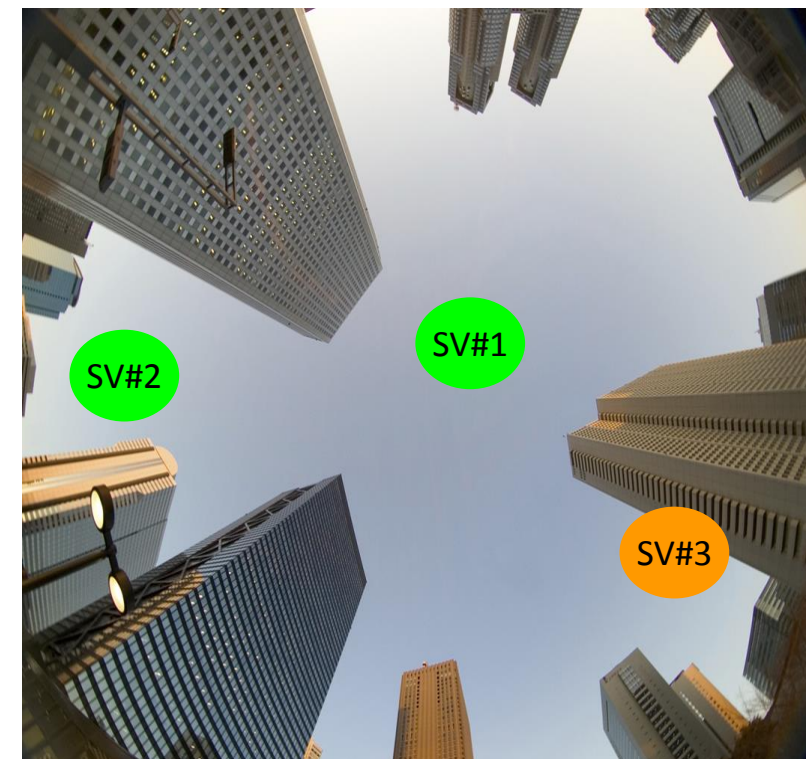


# ソフトウェア受信機を利用した GPS/QZS/BeiDou/Galileo複合測位について

東京海洋大学大学院  
海運ロジスティクス専攻  
松永武士(1255022)

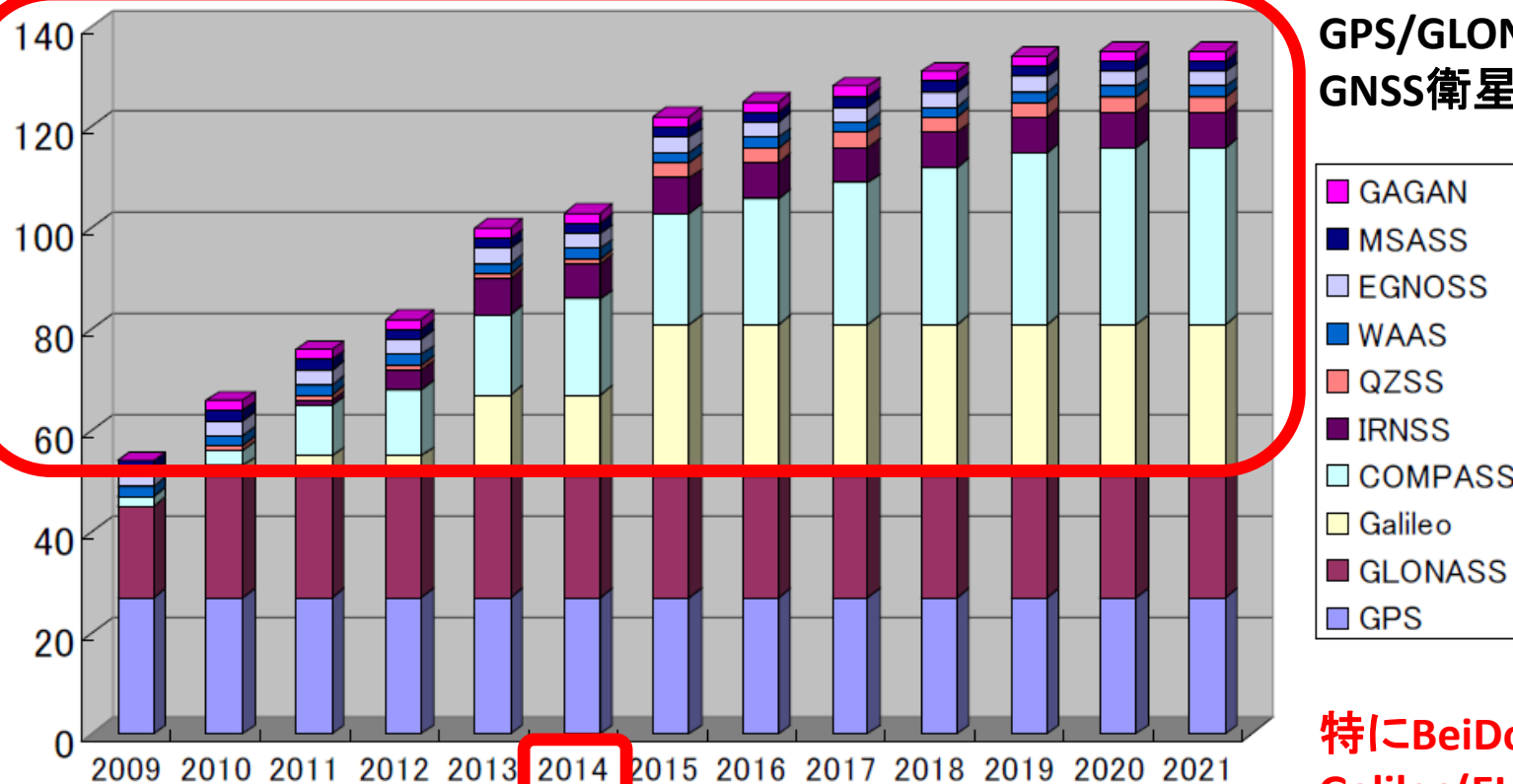
# そもそも何故、マルチGNSS測位を行うのか？



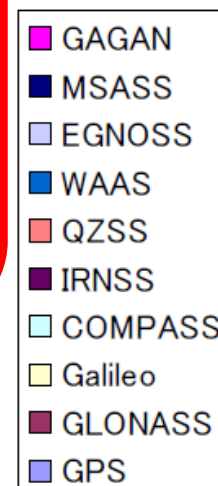
- 近年GPS以外にも、各国でGNSS(衛星測位システム)の運用が開始
- 都市部では回折波、干渉波等の影響で良い測位結果が得られないことが多々ある。(マルチパス誤差)
- マルチパス解析では衛星選択、信号処理等を工夫することで測位誤差を軽減させている。
- →測位に利用できる衛星数は多い方が良く、特に都市部では高仰角にあるとなお良い。

# 測位に利用可能な衛星数の増加

The number of SVs in multi GNSS systems



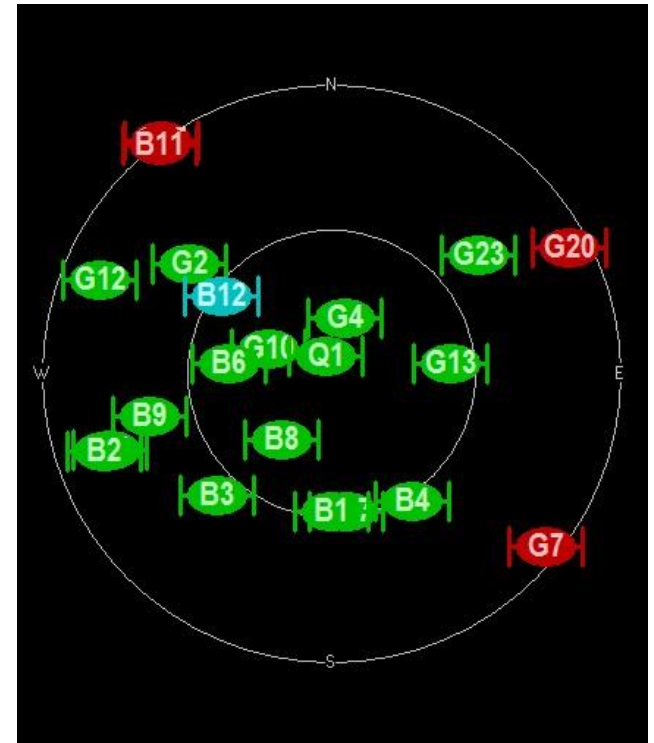
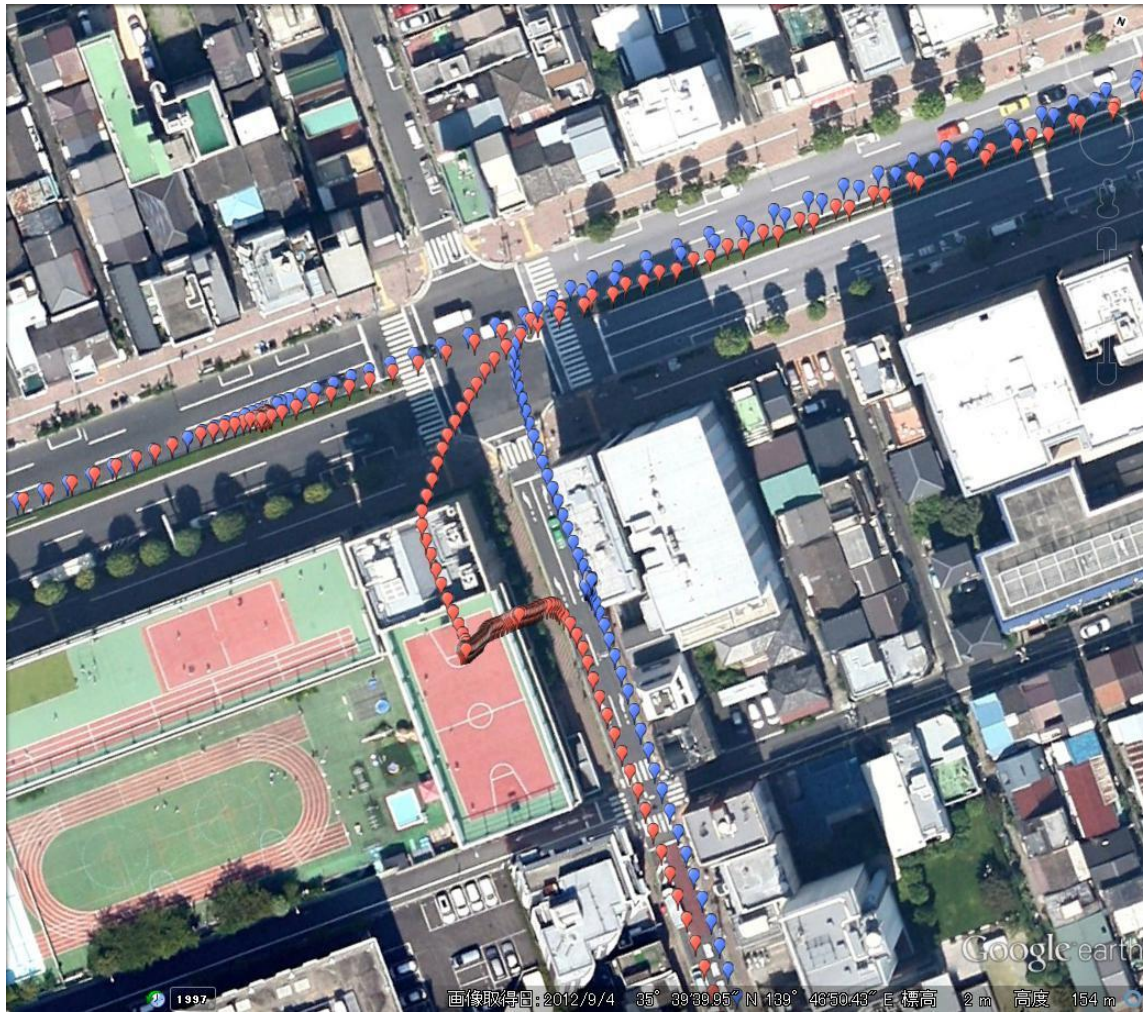
GPS/GLONASS以外のGNSS衛星が増加



特にBeiDou(中国)  
Galileo(EU)の衛星数は  
今後も増加する予定

引用:QZSS第5回ユーザーミーティング(2010年)、  
「アジア・オセアニア地域におけるマルチGNSSの状況」資料(JAXA 小暮氏)

# マルチGNSSのメリット(+QZS/BeiDou:u-blox8)



赤:GPS 青:multi

	GPS	multi
HDOP (平均)	1.17	0.93
機数	6	16

## ソフトウェア受信機とは

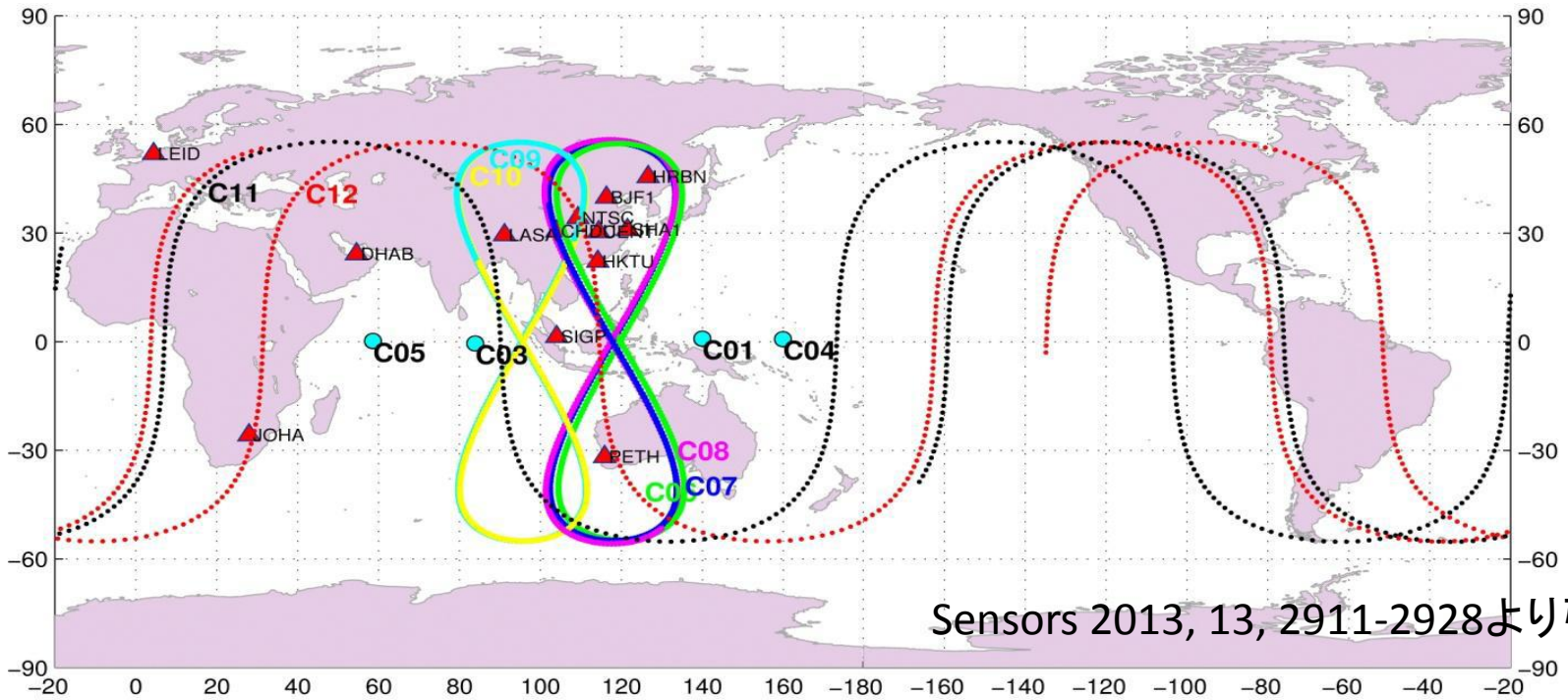
- BeiDouの擬似距離等を出してくれる市販の受信機は実はまだ高精度受信機(100万円と高価)に限られている。前スライドで紹介したu-bloxもまだ出してくれない。
- 市販の受信機を使用する場合、得られた擬似距離から解析を始めることになる。しかし、衛星から送信されるGNSS信号が受信機内でどのように処理されているのか、ユーザはまったく分からない。
- ソフトウェア受信機では、**従来ハードウェアで行っていた信号処理をソフトウェア上で行う**。近年PCの性能が格段に向上したこともあり、教育用、研究用として普及している。マルチパス解析やコリレータの研究など、用途多数。

## 研究目的

- 都市部等のマルチパス誤差が入りやすい環境では、どうしても信号処理部を見なければ分からないことがある。専門的にGNSSの研究を行うのであれば、**PC上でGNSS信号を処理できるソフトウェア受信機の開発は必須。**
- BeiDou、Galileoの信号処理部を開発し、単独測位を行う。次にGPS/QZSを加えた**複合測位**を行う。
- 内容としてはベーシック。測距コード生成から測位までの一連の流れを扱う。しかし静止データでマルチGNSS測位ができることを示せば、今後都市部でのマルチパス解析等でも役立つ。
- 当研究室では2004年にプロトタイプのソフトウェアGPS受信機を開発、2010年にGPS/QZSの静止データ解析、2013年に移動体データを使用したマルチパス解析を行っている。本研究は、当研究室としては初の**ソフトウェア受信機によるマルチGNSS測位**ということになる。

# BeiDou衛星軌道

衛星軌道	衛星数	航法メッセージ	高度
Medium Earth Orbit (MEO)	5機	D1 NAV	21,528km
Inclined Geosynchronous Satellite Orbit (IGSO)	5機	D1 NAV	35,786km
Geostationary Earth Orbit (GEO)	5機	D2 NAV	35,786km

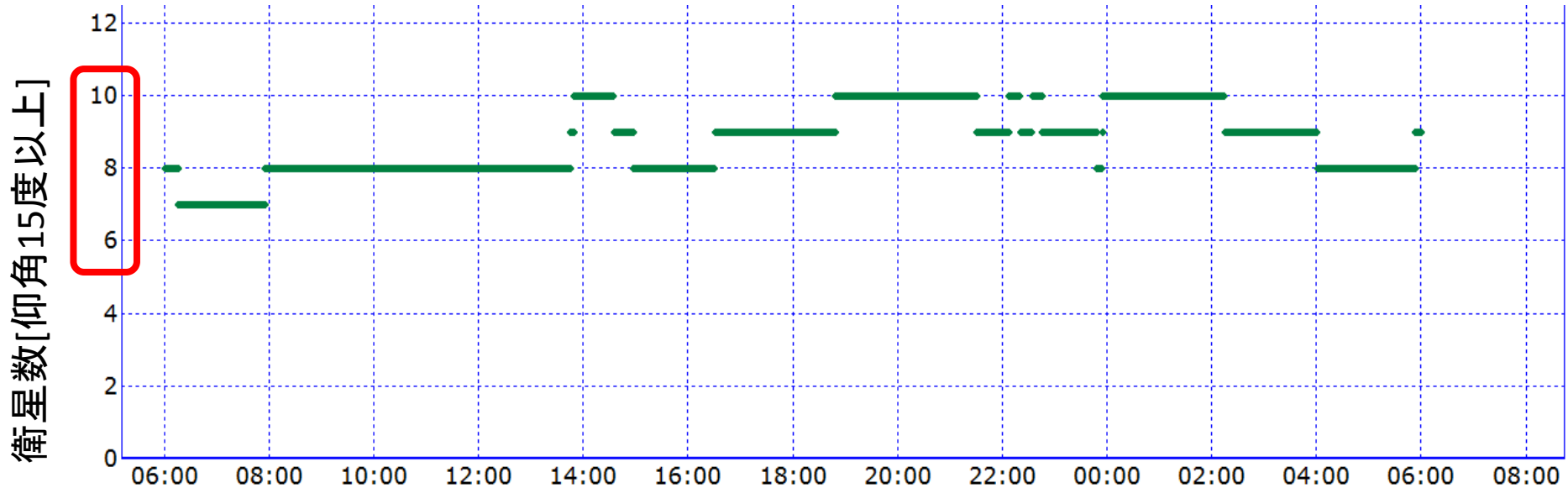


Sensors 2013, 13, 2911-2928より引用

## BeiDouの概要

- 2012年12月にInterface Control Document(ICD)が公開された。以後、多数の研究結果が発表されている。
- 日本でも測位に利用できる衛星数が多い。

東京上空でのBeiDou可視衛星数[常時4機以上ある]





## Galileoの概要

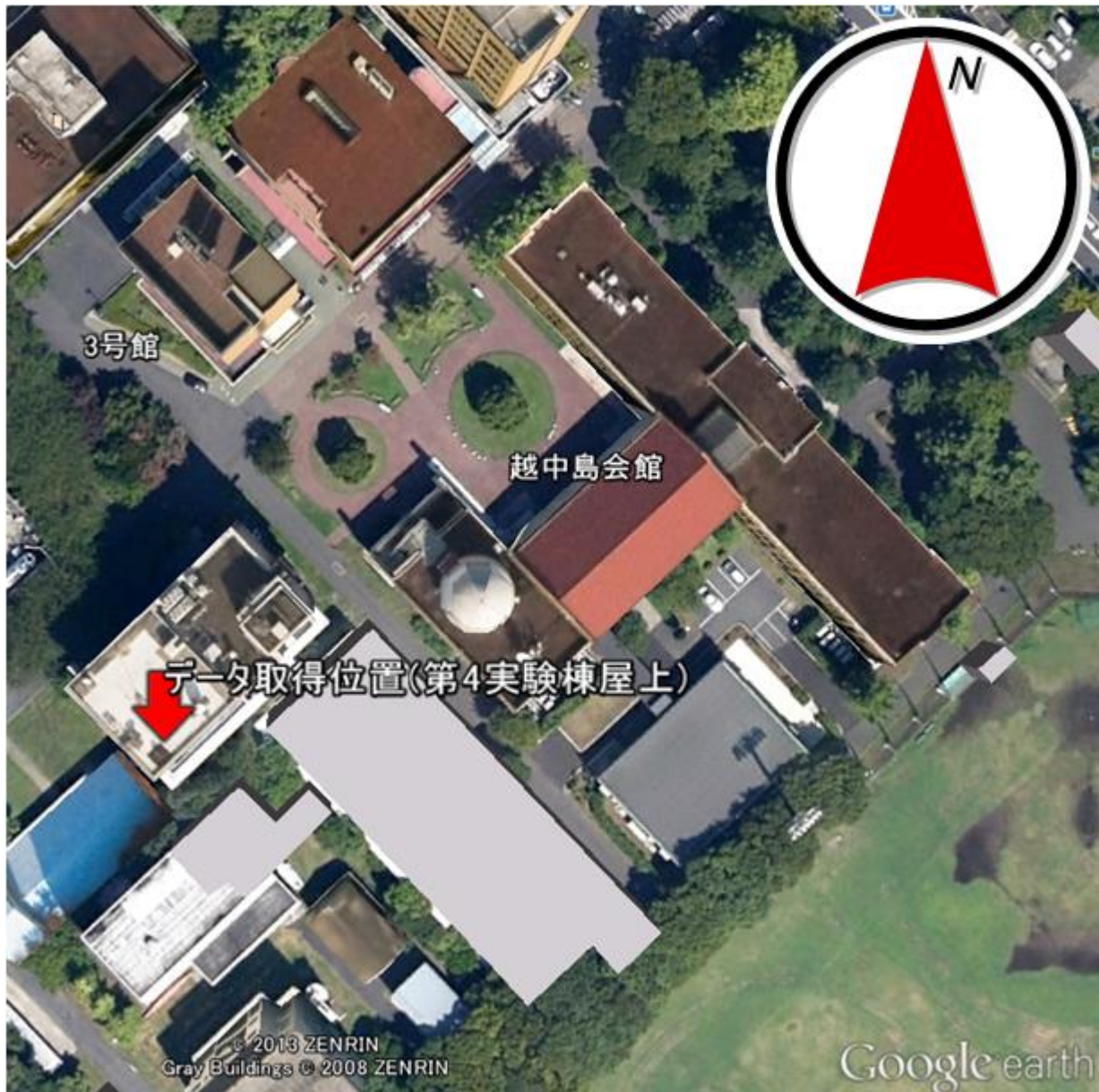
- 2010年9月にICDが公開された。
- 3機の試験衛星を経て、2011年より実証衛星IOVを打ち上げた。単独測位に必要な4機が打ち上がったのは、2012年10月。
- 日本では3日に1度、2時間くらいGalileo衛星4機が同時に見える。
- 本研究ではGalileoの単独測位結果を得るために、**この時間帯を選んでデータを取得した。**

# 使用するGNSS信号一覧

GNSS	GPS/QZS	BeiDou	Galileo
信号の名称	L1C/A	B1I	E1B
中心周波数	1575.42MHz	1561.098MHz	1575.42MHz
変調方式	BPSK	QPSK	BOC
コード周波数	1.023MHz	2.046MHz	1.023MHz
コードチップ数	1023	2046	4092
コード長	1ms	1ms	4ms
航法メッセージ	NAV	D1NAV(MEO,IGSO) D2 NAV(GEO)	I/NAV

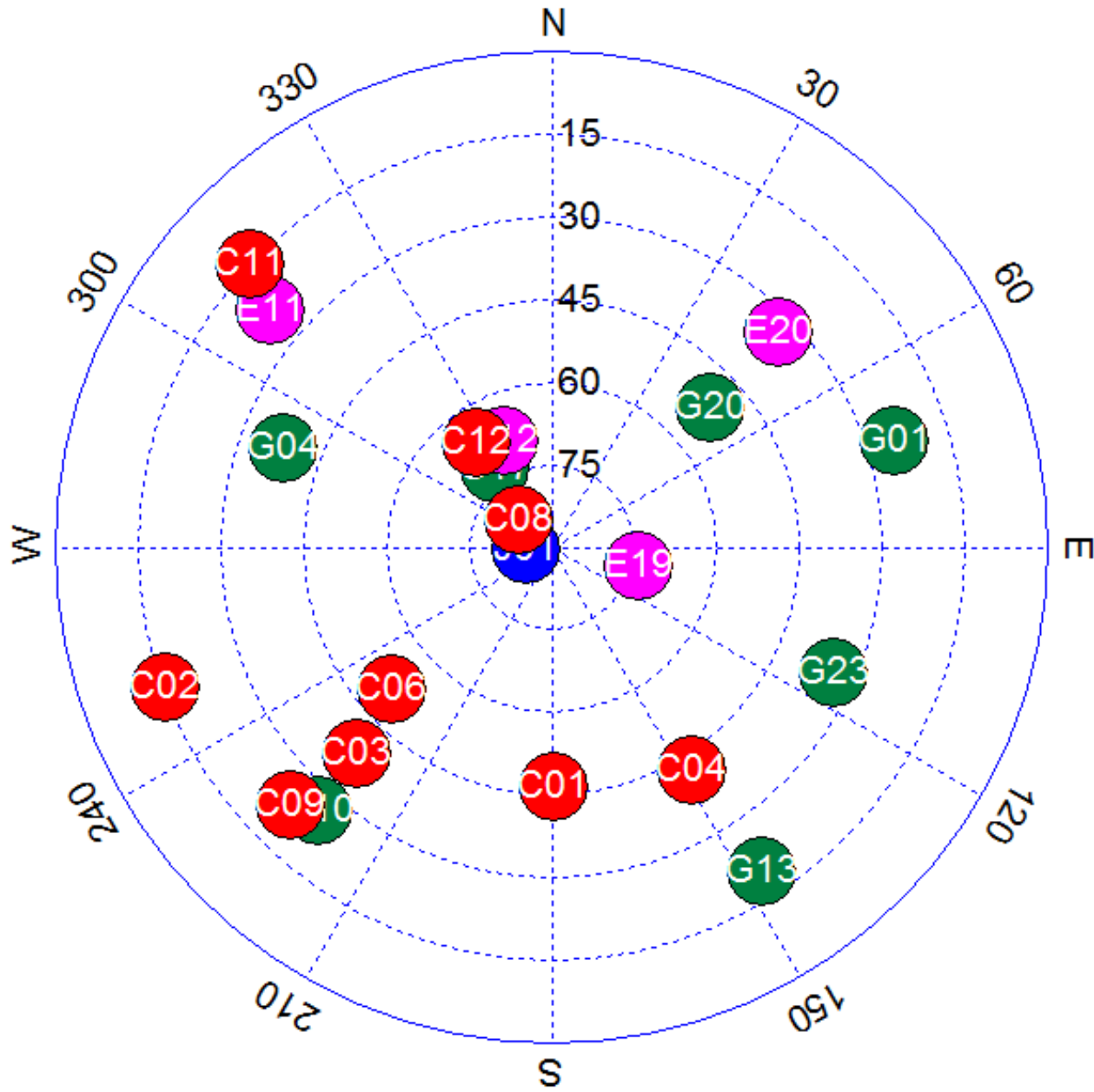
特に、中心周波数が違うということは、BeiDou用のアンテナ、ファームウェアが必要である。

# 実験データ取得



場所: 第4実験棟屋上  
日時: 2013年12月23日  
静止データ(15分7秒)

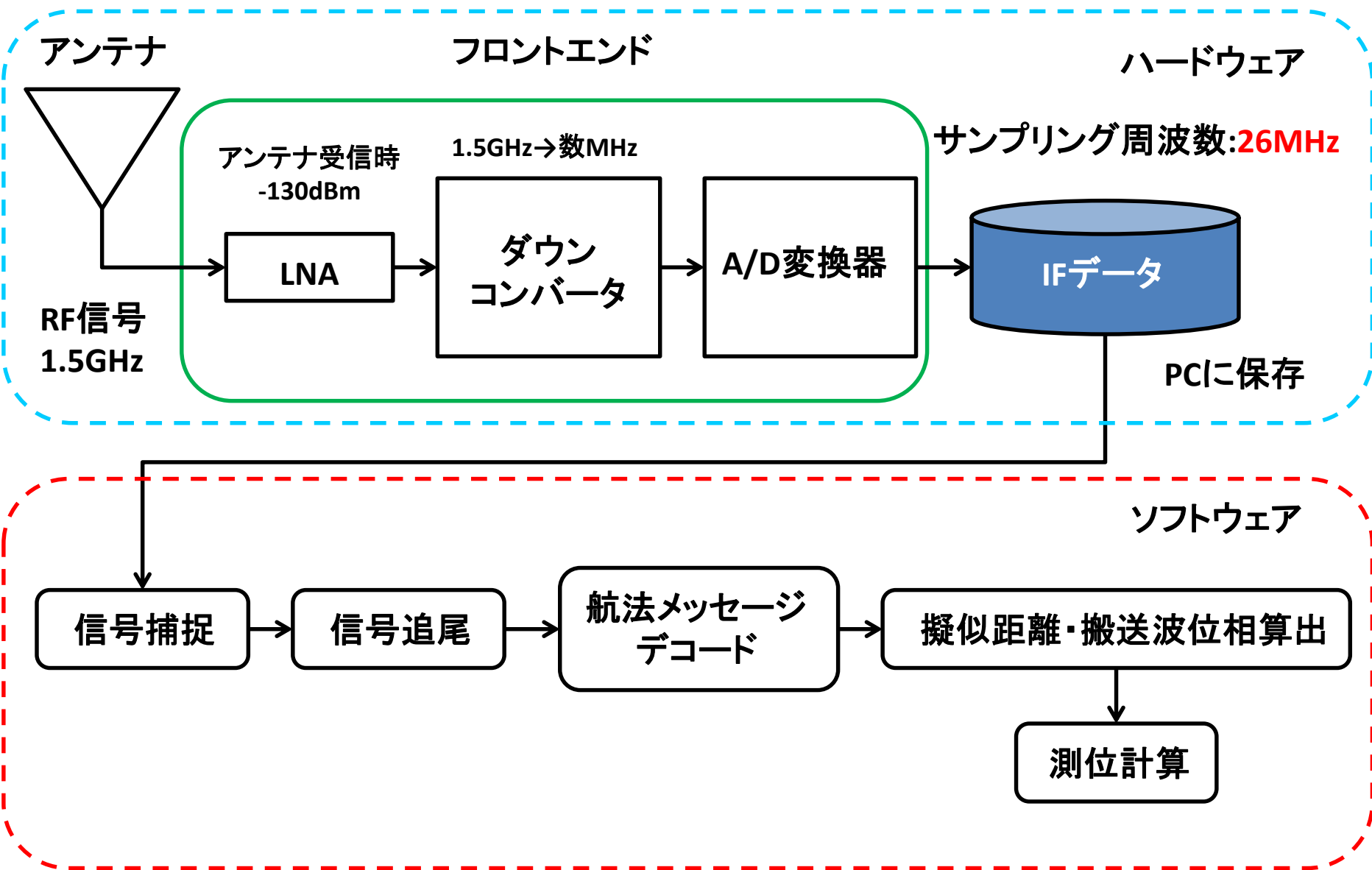
# データ取得時の衛星配置



衛星数 :21機

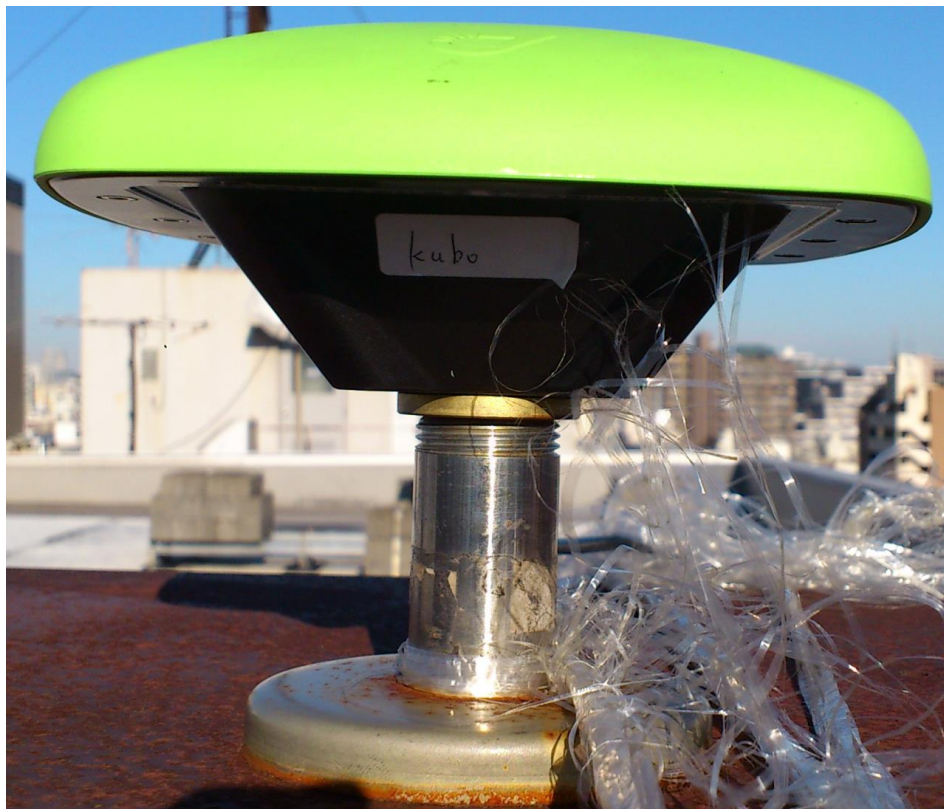
- 桃:Galileo(4機)
- 緑:GPS(7機)
- 青:QZS(1機)
- 赤:BeiDou(9機)

# データ取得から測位までの流れ



# 使用機材

アンテナ:JAVAD社 GrAnt-G3T

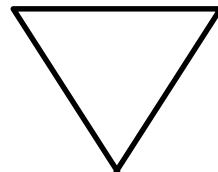


フロントエンド:NSL社 Stereo(下:拡大図)



# 実験構成図

アクティブアンテナ  
JAVAD GrAnt G3T



アンテナ給電用  
受信機  
(NovAtel OEM6)

アンプ付き  
分配器

フロントエンド  
NSL Stereo

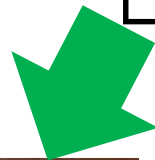
MAX 2112

MAX 2769

USB接続

PC

IFデータ



## フロントエンドの設定

入力端子	L1	L-Band
RFチップセット	MAX2769	MAX2112
サンプリング	2ビットIサンプリング 26MHz	4ビットIQサンプリング 26MHz
中間周波数	6.5MHz	ダイレクトコンバージョン
バンド幅	4.2MHz	6.61MHz
データ取得	BeiDou 中心周波数:1561.098MHz	GPS/QZS/Galileo 中心周波数:1575.42MHz

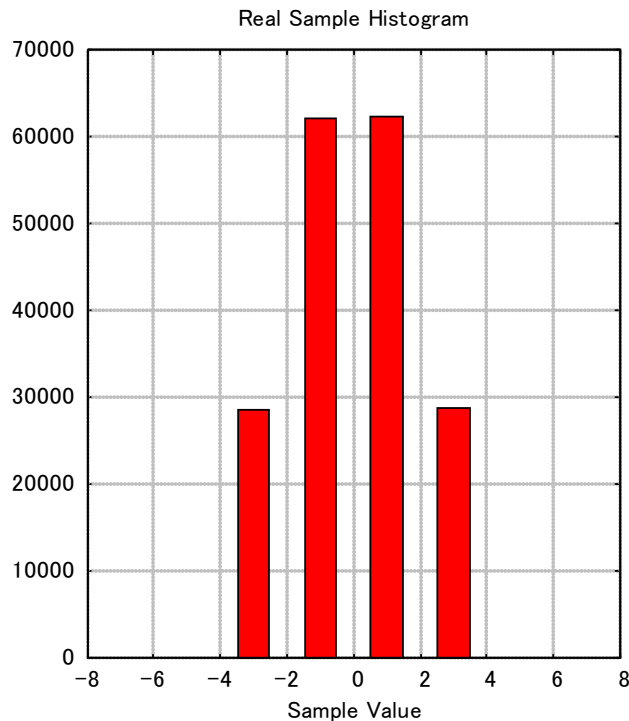


ファイル容量は、  
リアルタイムでない場合は大きくなる。  
Iサンプリングでは15分で22GB程度。  
IQサンプリングでは44GB程度。

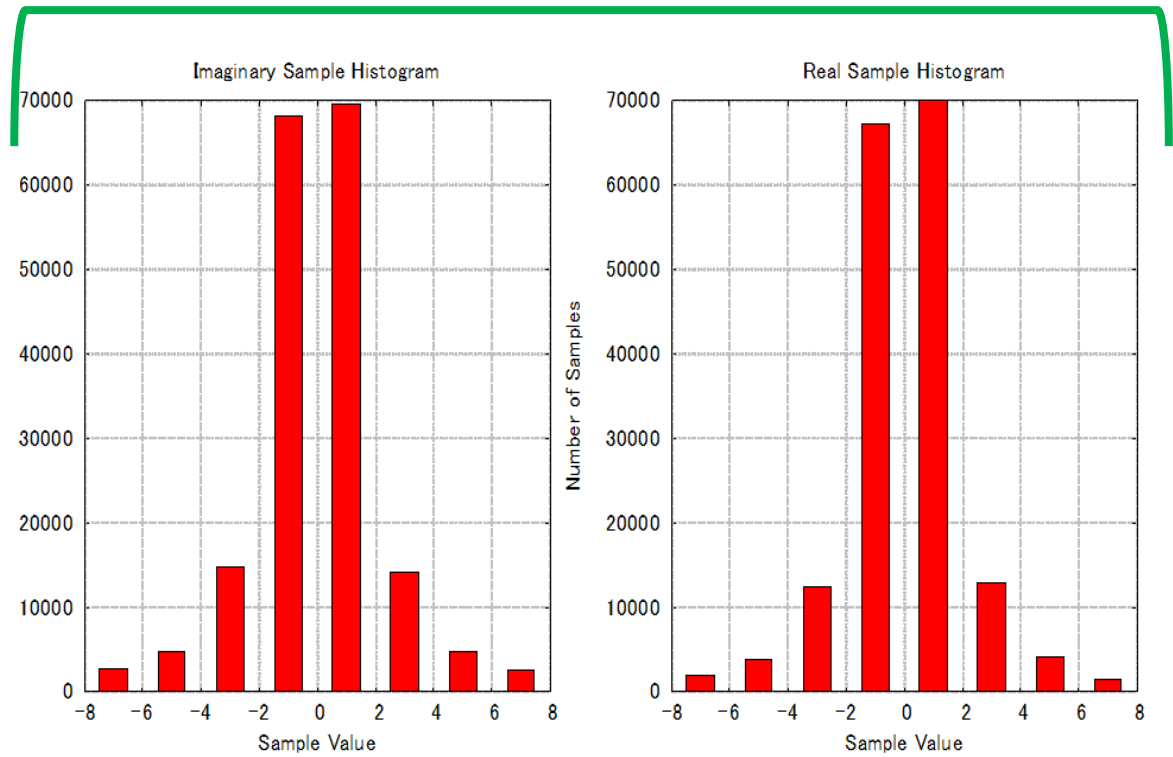


# 取得したIFデータのヒストグラム

## MAX2769:Iサンプリング



## MAX2112:IQサンプリング(左:Q信号 右:I信号)



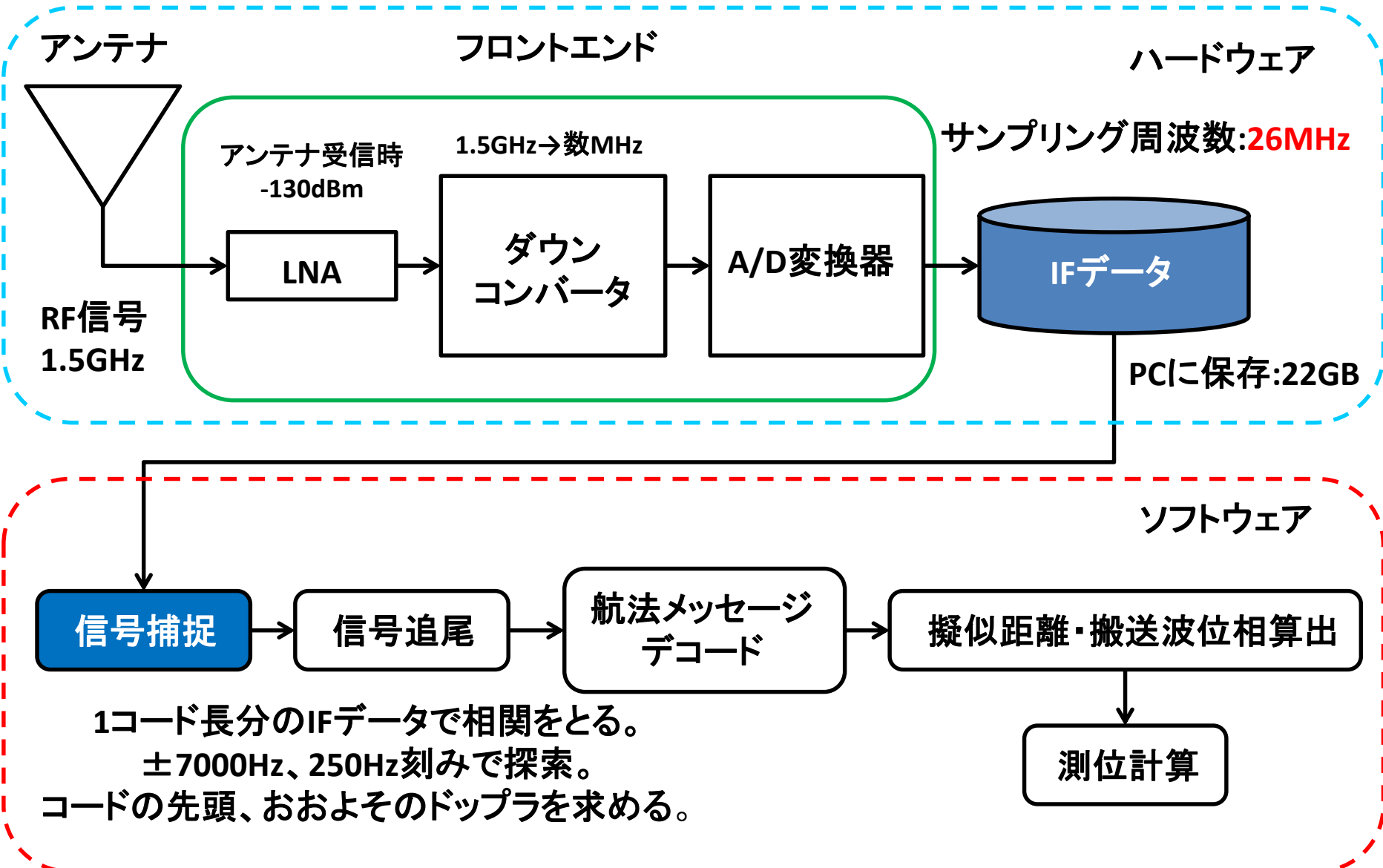
サンプリング周波数:26MHzより

1msで26000サンプル、1サンプルで11.5m

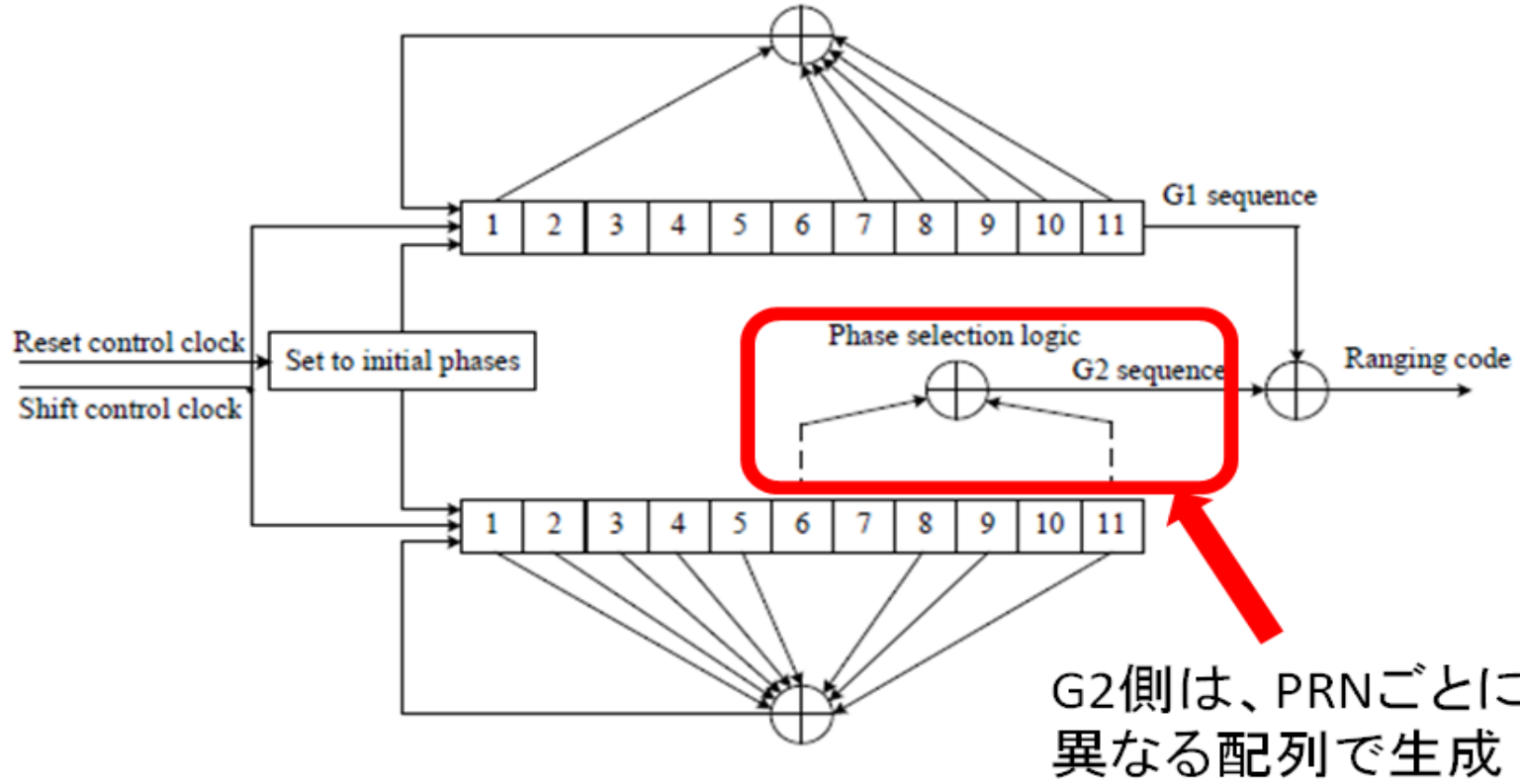
ファイル容量2倍

Iサンプリングの場合、cosをかけてQ信号を作る

# データ取得から測位までの流れ



# BeiDou測距コード生成(B1I/B2I共通)



G2側は、PRNごとに異なる配列で生成

$$G1(X) = 1 + X + X^7 + X^8 + X^9 + X^{10} + X^{11}$$

$$G2(X) = 1 + X + X^2 + X^3 + X^4 + X^5 + X^8 + X^9 + X^{11}$$

G1: 0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0  
 G2: 0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0

2つのシフトレジスタ  
 生成多項式、初期値が与えられている

G1/G2で出力される  
 コードを掛け合わせ生成  
 コードチップ数:2046

# Galileo測距コード生成(E1Bプライマリコード)

16進数の  
Primary Code  
1023\*50



2進数に変換  
1023→4092

```
E1B.txt - メモ帳
ファイル(F) 編集(E) 書式(O) 表示(V) ヘルプ(H)
F5D710130573541B9DBD4FD9E9B20A0D59D144C54BC7935539D2E75810FB51E494093A0A19DD79C70C5
A98E5657AA57809777E86BCC4651CC72F2F974DC766E07AEA3D0B557EF42FF57E6A58E805358CE9257
669133B18F80FDBDFB38C5524C7FB1DE079842482990DF58F72321D9201F8979EAB159B2679C9E95AA6
D53456C0DF75C2B4316D1E2309216882854253A1FA60CA2C9ACE013E2A8C943341E7D9E5A8464B3AD4
07E0AE465C3E3DD1BE60A8C3D50F831536401E776BE02A6042FC4A27AF653F0CFC4D4D013F115310788
D68CAEAD3ECC5330587EB3C22A1459FC8E6FCE9CDE849A5205E70C6D66D125814D698DD0EEBF5AE5
2CC65C5C84EEDF207379000E169D318426516AC5D1C31F2E18A65E07AE6E33FDD724B13098B3A444688
389EFBB5EEAB588742BB083B679D42FE26FF77919EAB21DE0389D9997498F967AE05AF0F4C7E177416
E18C4D5E6987ED3590690AD127D872F14A8F4903A12329732A9768F82F295BEE391879293E3A97D5143
5A7F03ED7FBE275F102A83202DC3DE944FC712E9D006D182693E9632933E6EB773880CF147B922E745
39E4582F79E39723B4C80E42EDCE4C08A8D02221BAE6D17734817D5B531C0D3C1AE723911F3FFF6AAC0
2E97FEA69E376AF4761E6451CA61FDB2F9187642EFC63A09AAB680770C1593EEDD4FF4293BFFD6DD2C
3367E85B14A654C834B6699421A
96B856A629F581D1344FEF597835FE60434625D077ECF0D95FBE1155EA0431979E5AFF544AF591A332F
DAEF98AB1EDD847A73F3AF15AAEE7E9A05C9D82C59EC325EF4CF264B8ADF2A8E8BA459354CB4B415CC5
0BF239ADB31B3A9C87B0843CF3B9E6D646BA43F866276B053826F3A2334CC5E2EFB9F8F195B382E75E
EA63F58A06B3F82A3B5C77C1800FD9498F803E524435B321210BB84690BED0BBBE16D363B3A90656A73
720E27008852FB7DACC8284411B177728D9527C560859084A395A6F11A96AD9DB6B43E00642B000ED12
BFD967868EAB1108552CD4FC89FBC408ACE7678C381EC91DD000319124EB5D5EF52C4CAC9AADEE2FA04
5C16CE492D7F43743CA77924C78696FCBF2F9F7F36D8E623752200C6FCBBD71ABBB6877F3C5D6E6740A
B0389458A6B66440858B2D383244E853646FE2714211DEA9E6196252815BB704A20BFE556AC474F8998
944E0CABB2E1A6400B87BDFCF937D12B2821D59298AF4AD378F0F42BD8C41693B8D993CF37C8B478F3
BB5D33AD2A9FA24AD7B8FA895FDB0C4964192F7BA3FF74E0E3A435B5DFE042E3115CACF29624C0645E9
C917534A2EBC1F5665E4E1B1BC56208DBCD8A27CCB6474D5D0E20CA4072C960E5ACE41BDA3770DF3B68
1F2B318F8E1CB17C2857350FB6009AED665E13B2780D79217F73FAC7A8A48048DB0FB8A8A5007CDDC
9A792DA8257C99F1CR605A18204
```

ICDに記載されている  
PRNごとに割り当てられた  
1023の16進数を2進数に

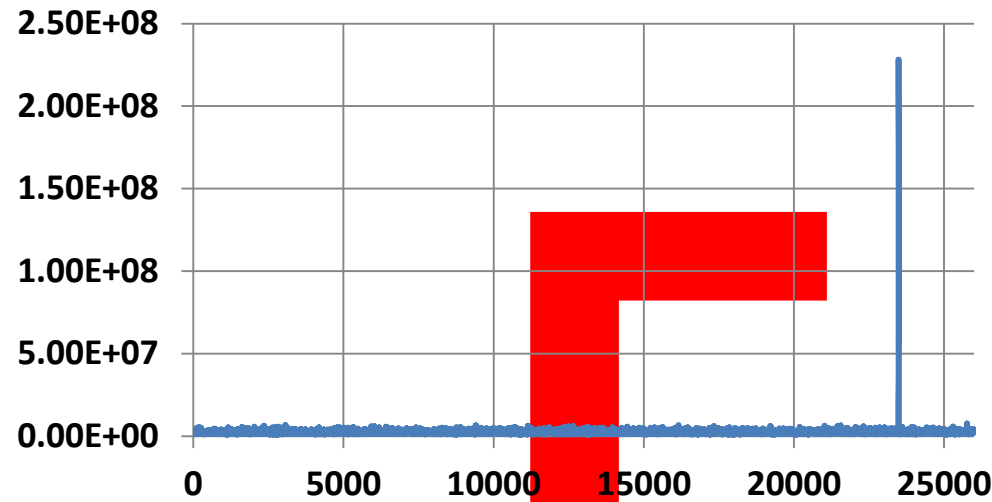
コードチップ数:4092

26MHzサンプリングよりレプリカコード生成は、

BeiDou:コード長1ms/コードチップ数2046より1チップ26000/2046≒12サンプル

Galileo:コード長4ms/コードチップ数4092より1チップ104000/4092≒25サンプル

# BeiDou/B1I 信号捕捉結果(prn12) (横軸:コード位相 縦軸:相関電力)



受信信号と、受信機で生成した  
レプリカコードで相関をとる。

サンプリング周波数:26MHz

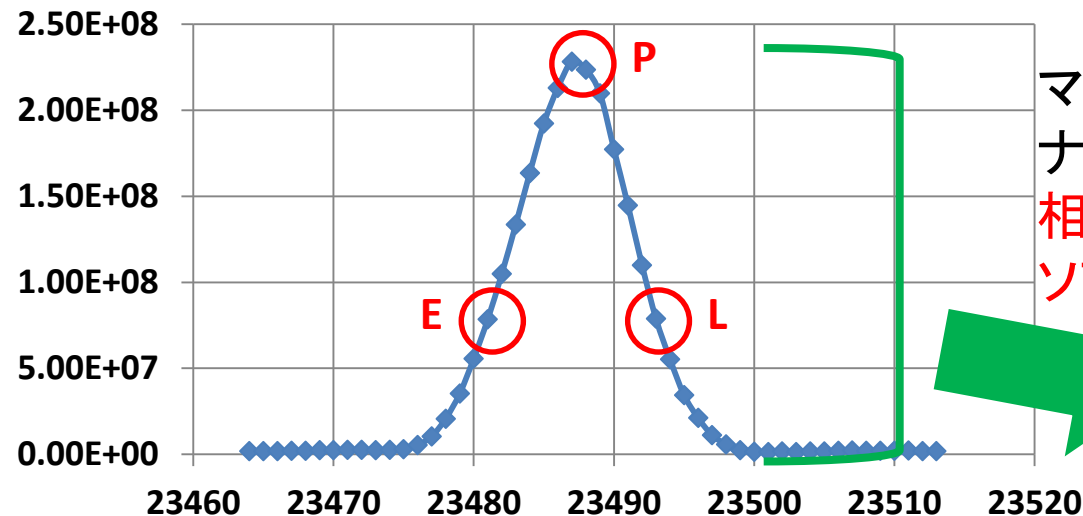
コードチップ数:2046

コード長:1ms

1ms=26000サンプルで相関をとる。

1チップ=26000/2046 $\div$ 12サンプル

0.5チップ(6サンプル)でE,Lコード生成

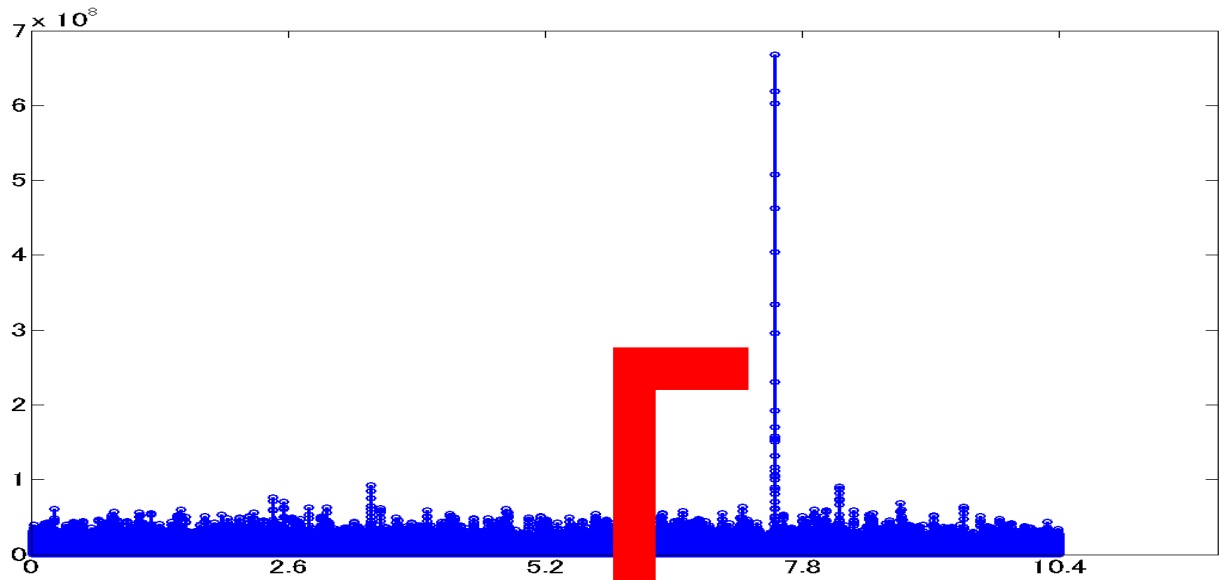


マルチパス対策の例として、  
ナローコリレータ、ストロボコリレータ等  
相関器幅を自由に設定できるのが、  
ソフトウェア受信機のメリット

1チップで、相関はほぼ0に

# Galileo/E1B 信号捕捉結果(prn12)

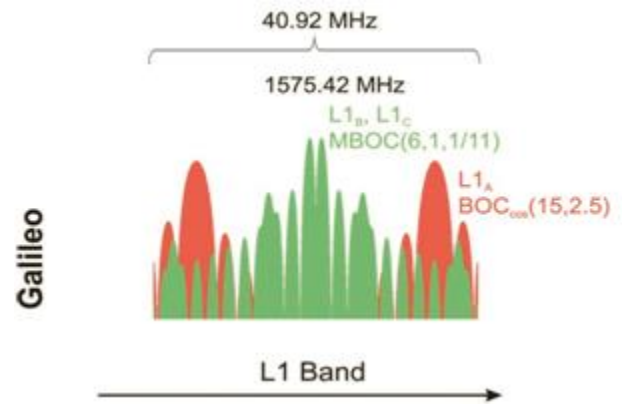
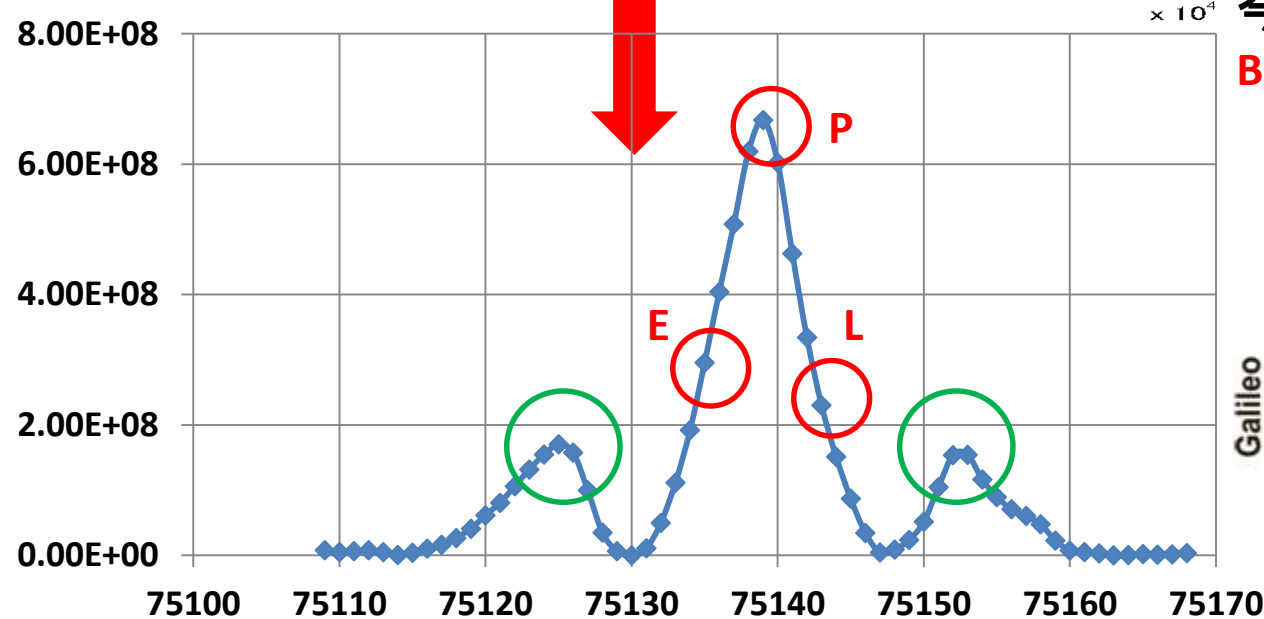
(横軸:コード位相 縦軸:相関電力)



サンプリング周波数:26MHz  
IFデータは1msで26000サンプル

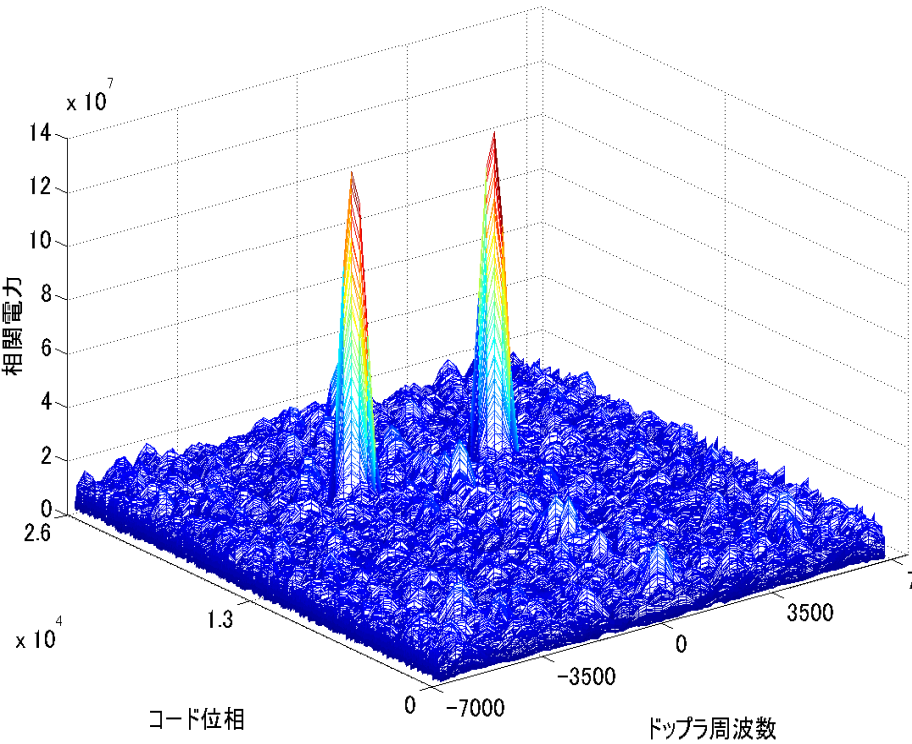
E1Bの1コード長4msなので、  
104000サンプルで相関をとる

通常 $\pm 0.5(12)$ 、 $\pm 0.25(6)$ で  
E,Lコードを生成しているが、  
今回は $\pm 0.16$ チップ(4サンプル)  
**BOCよりサイドピークが存在**

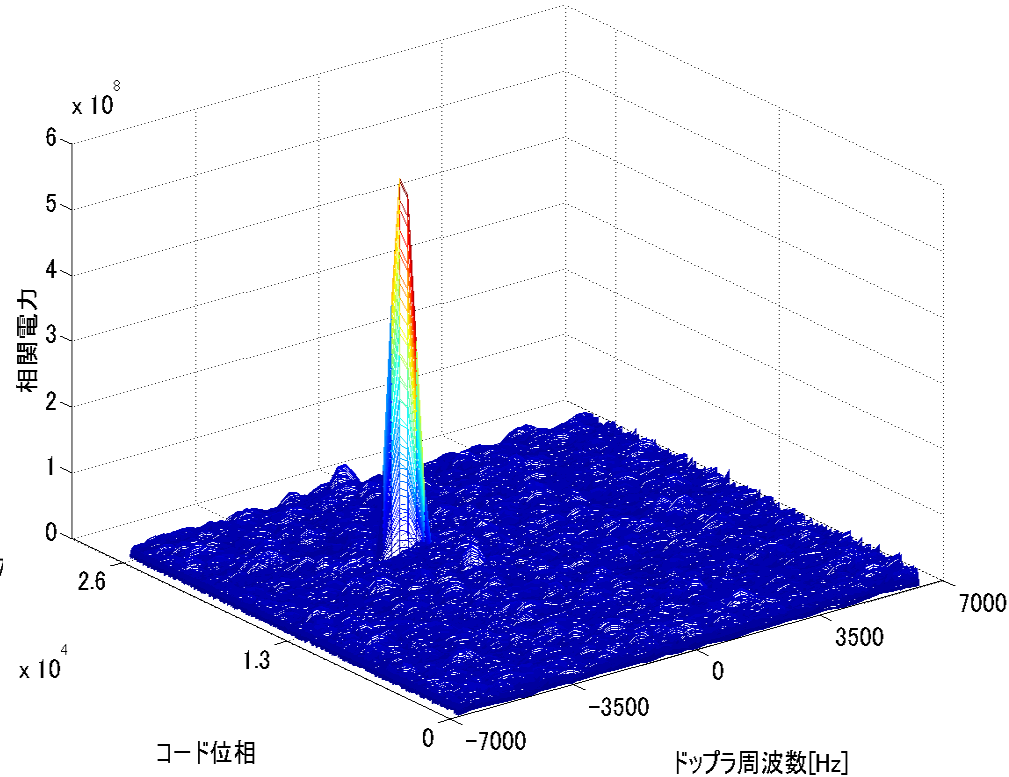


# I/Q信号の信号捕捉結果(QZS-1)

## I信号のみ



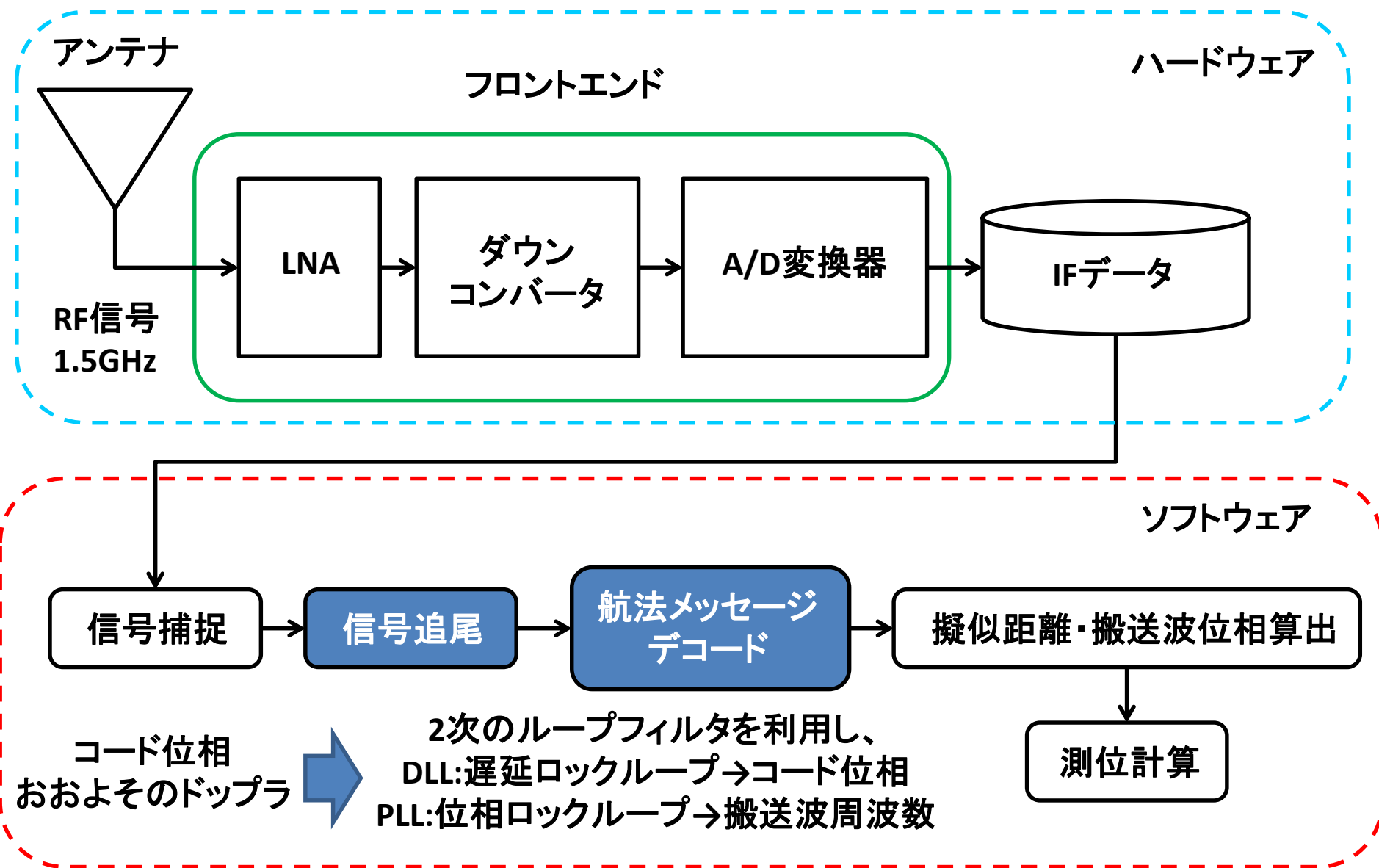
## Q信号も使用



I信号のみの場合、  
ピークが2つ出てしまう。  
ドップラの正負がわからない。

正しいドップラ周波数:-3250[Hz]  
を求めることができる。

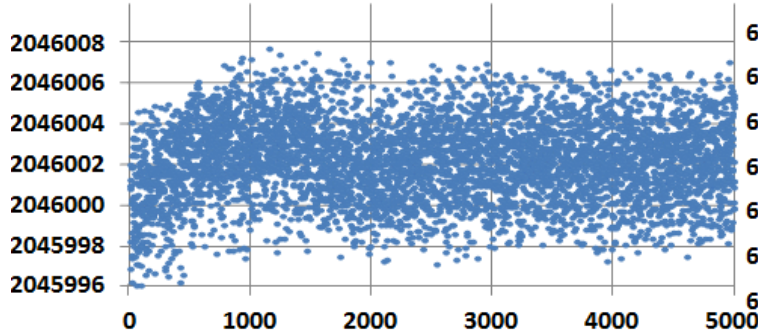
# データ取得から測位までの流れ



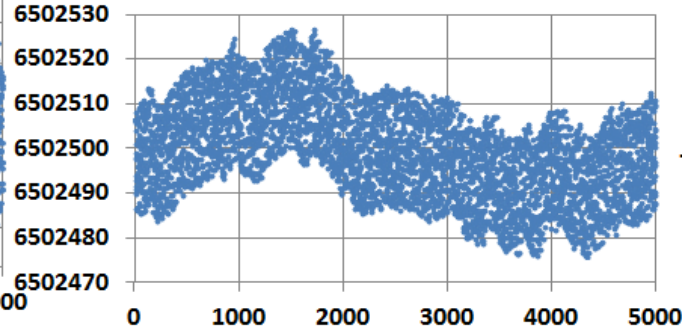


# DLL,PLLによる信号追尾(BeiDou\_prn6、最初の5s)

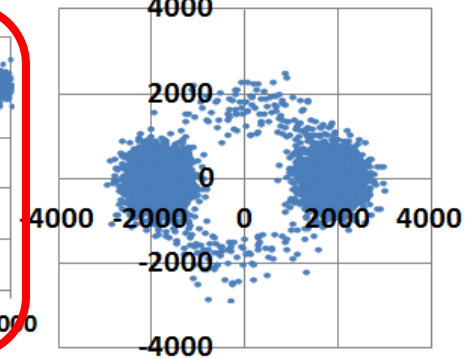
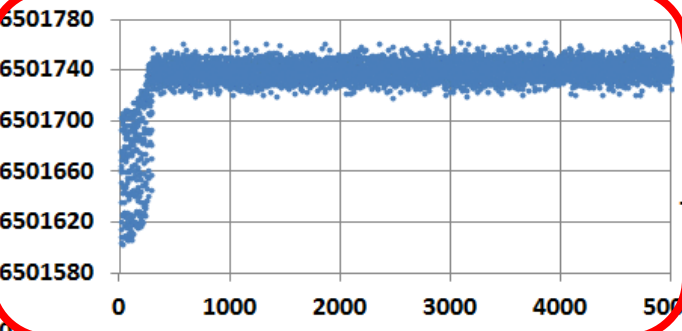
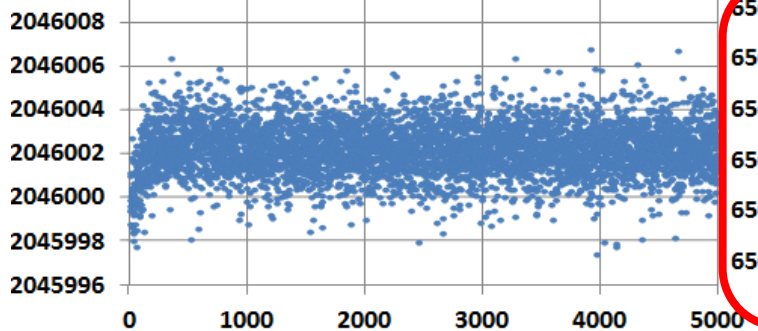
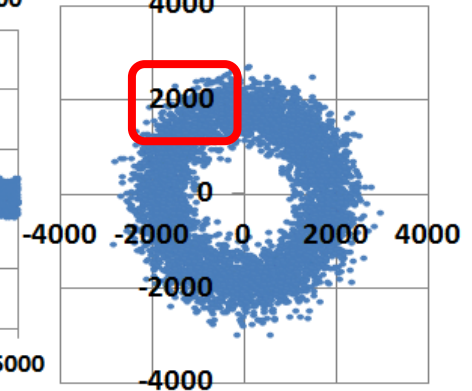
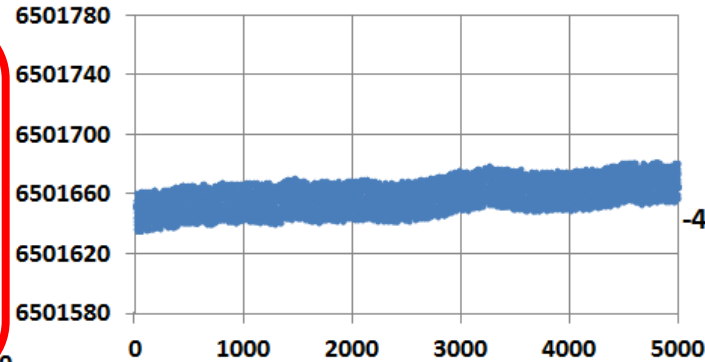
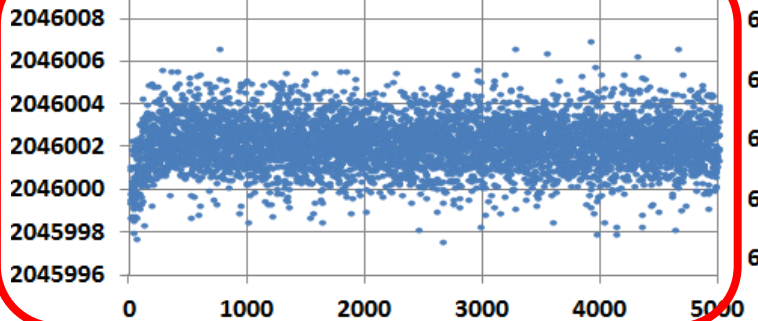
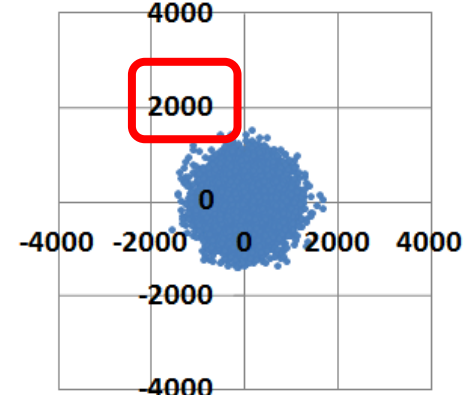
縦軸:コード周波数[Hz]  
横軸:時刻[ms]



縦軸:キャリア周波数[Hz]  
横軸:時刻[ms]



横軸:同位相  
縦軸:直交位相



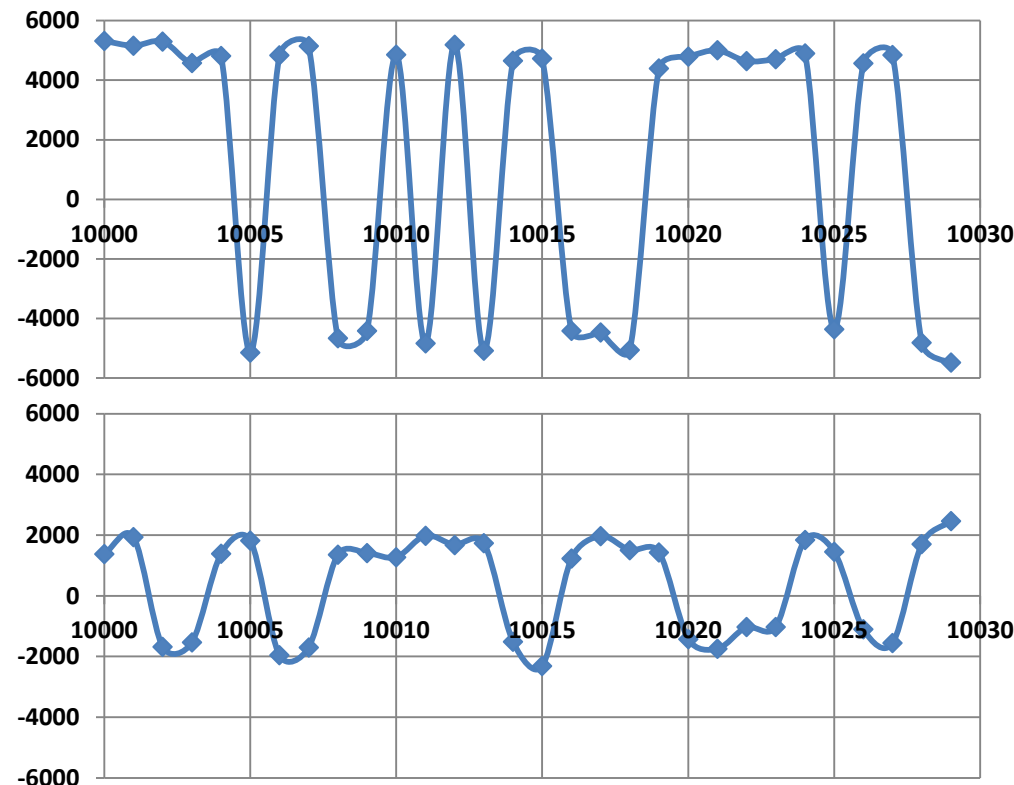
# BeiDou/B1I 信号追尾結果(prn12,prn2)

縦軸:同位相 横軸:時刻[ms]

prn12(MEO)は**D1NAV**  
 セカンダリーコード:**1周期20msのNHコード**  
 C/Aコードと同じ、50bpsで送信

prn2(GEO)は**D2NAV**  
 セカンダリーコードなし

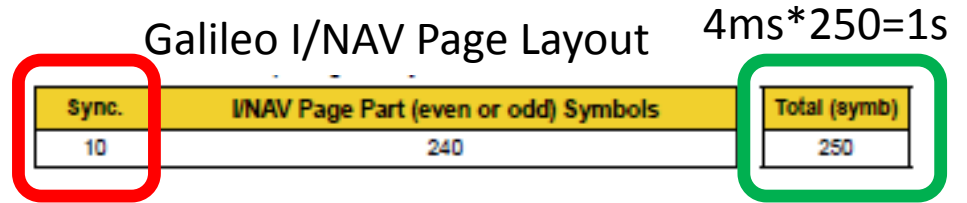
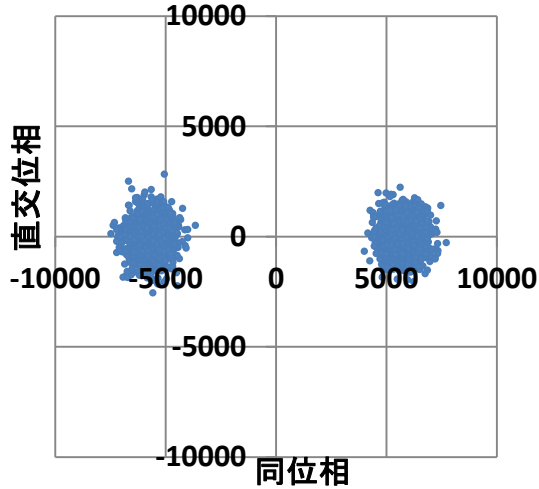
**500bps**で送信されているため、  
**2msごと**に航法メッセージが入っている。



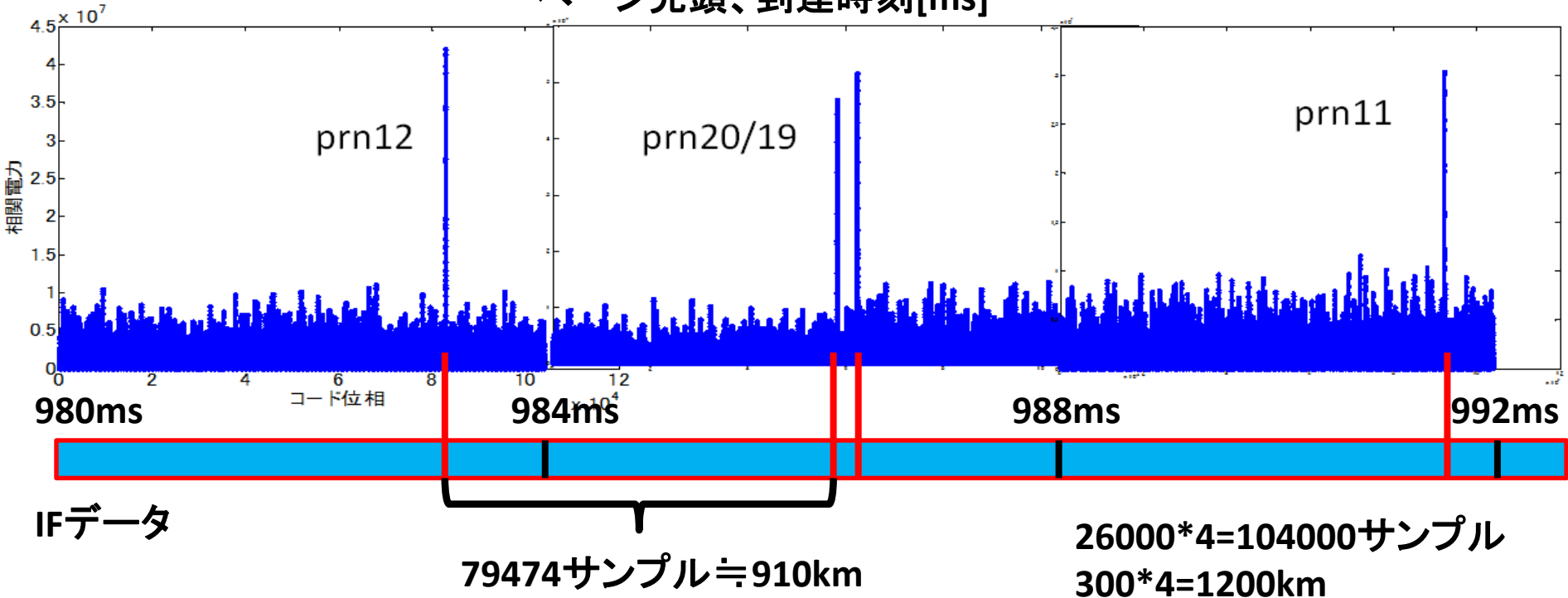
航法メッセージの種類	D1 NAV Message	D2 NAV Message
衛星の種類	MEO/IGSO	GEO
衛星の軌道情報 (エフェメリス)	サブフレーム1~3番	サブフレーム1番 (10ページに分割)
1サブフレーム	6s	0.6s

# Galileo/E1B 信号追尾結果

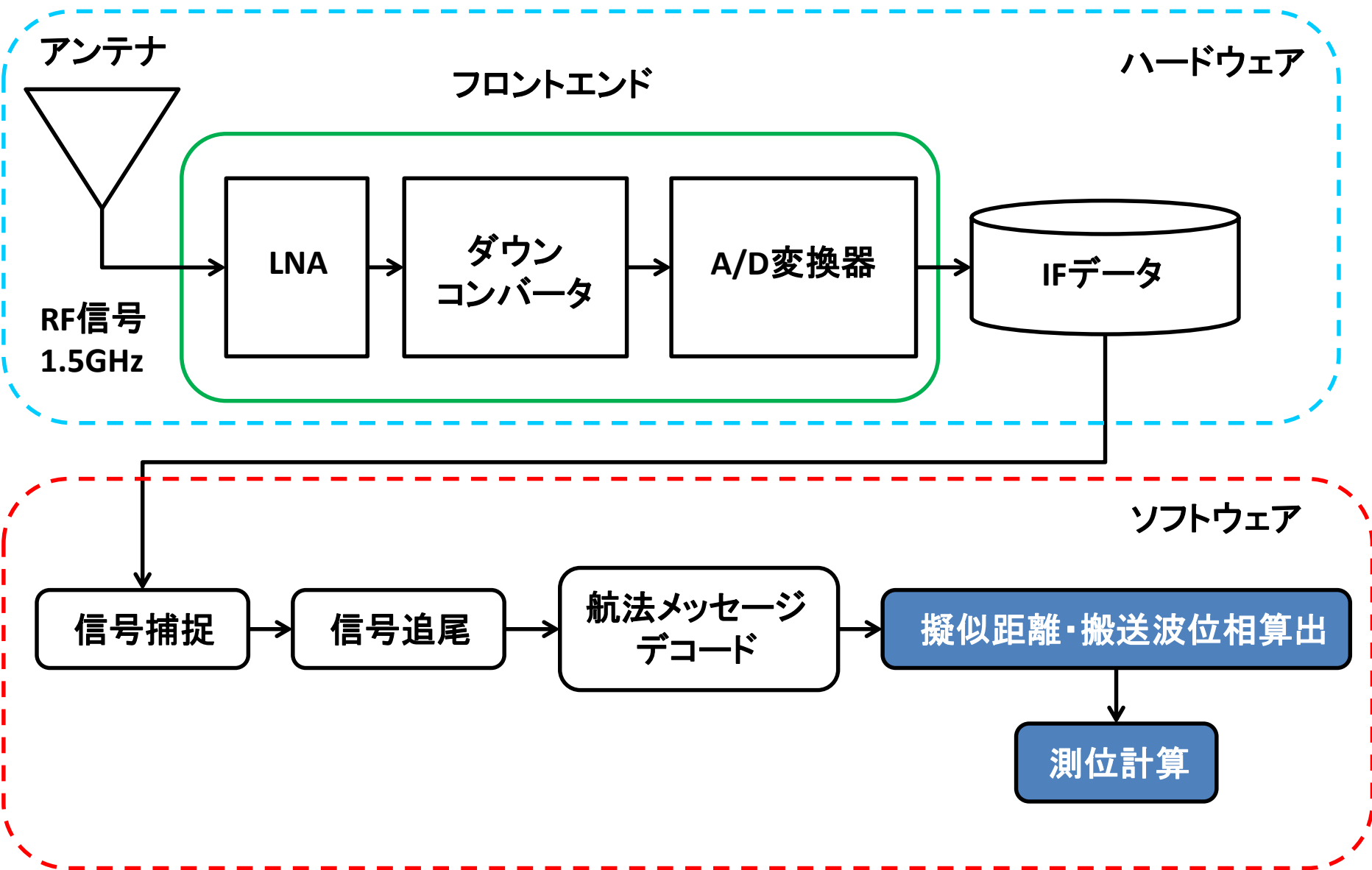
左図はprn12(データは11月26日取得)  
 コード長4msより、4msごとにプロット  
 10ビットのSynchronisation Patternを探す。



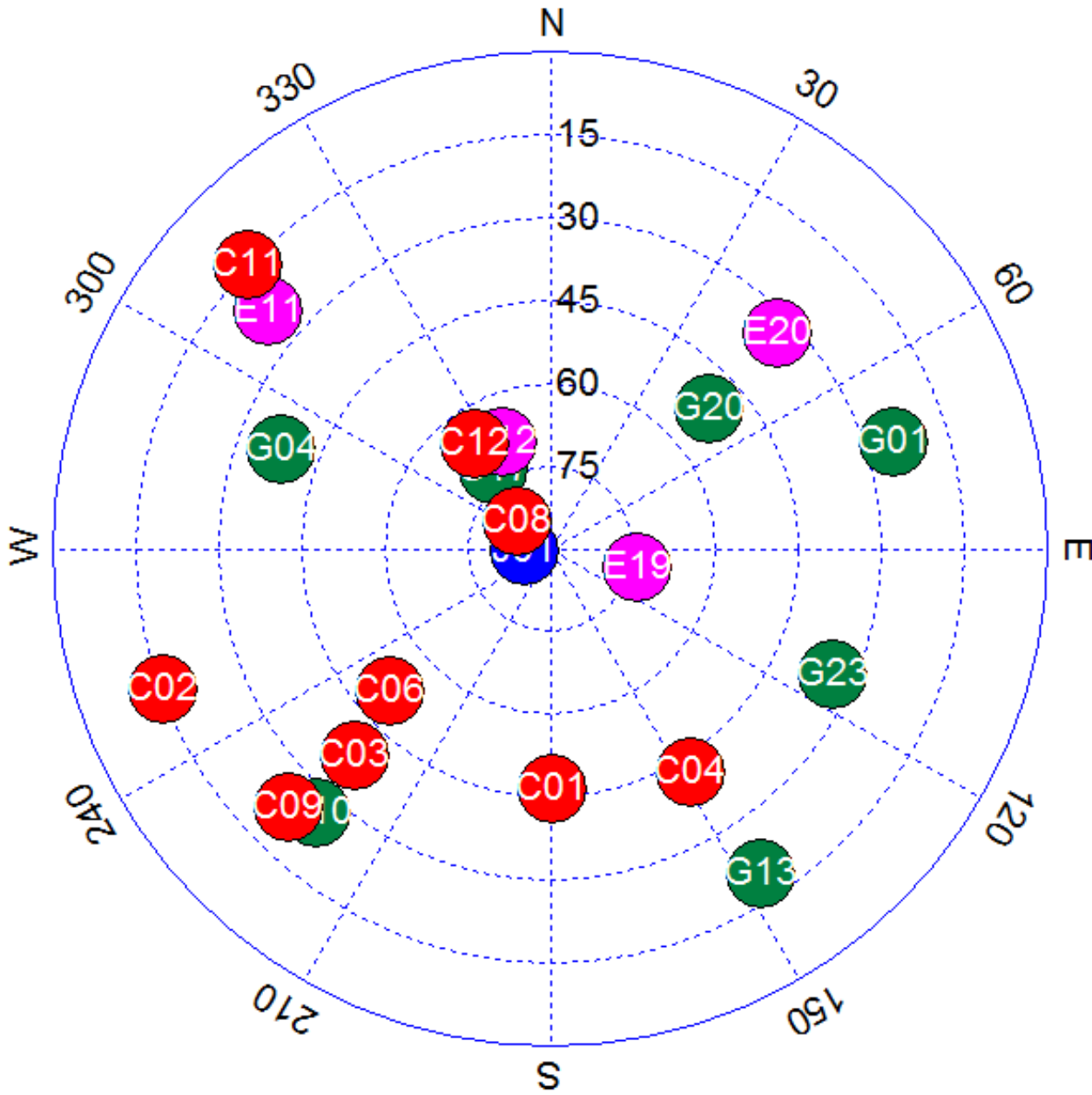
ページ先頭、到達時刻[ms]



# データ取得から測位までの流れ



# データ取得時の衛星配置



衛星数 :21機

桃:Galileo(4機)

緑:GPS(7機)

青:QZS(1機)

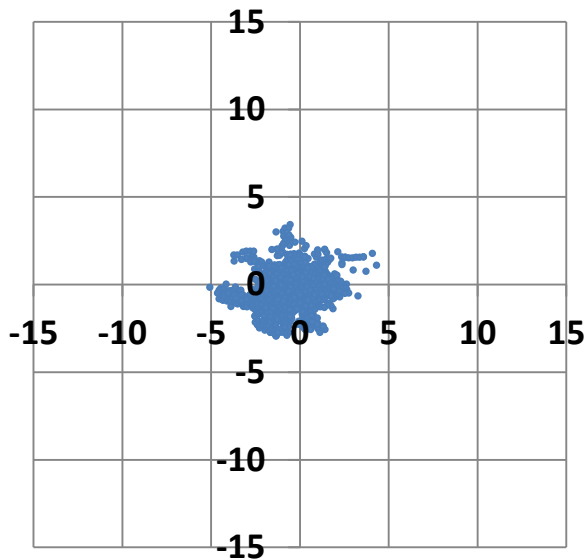
赤:BeiDou(9機)

# 単独測位結果

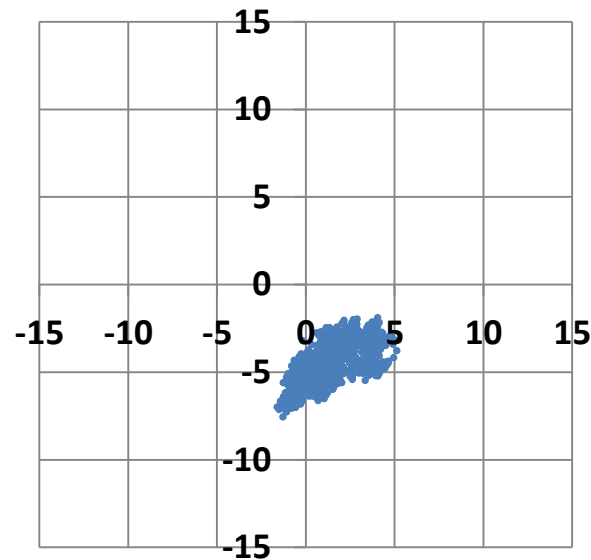
真値は原点、2Hzでプロット、20sキャリアスムージング

縦軸:経度方向誤差[m] 横軸:緯度方向誤差[m]

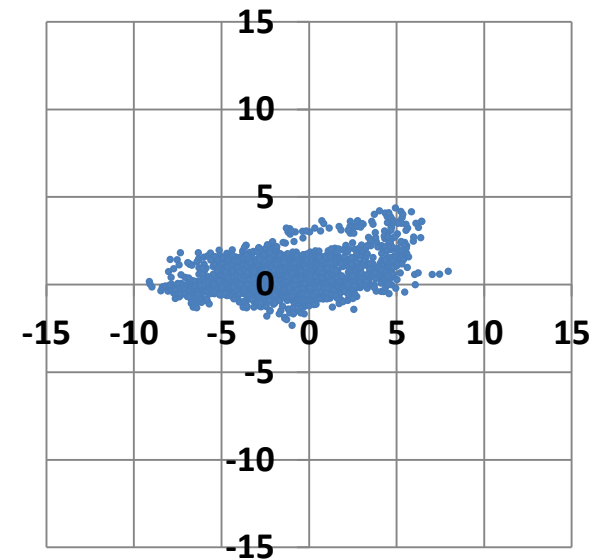
GPS/QZS



BeiDou



Galileo



GNSS	GPS/QZS	BeiDou	Galileo
衛星数	8機	9機	4機
標準偏差[m]	1.72	1.93	4.97
HDOP平均	1.19	1.45	3.34

## 複合測位の手法

単独測位:位置(x,y,z)と受信機の時計誤差

4つの未知数を解くために最低4機の衛星必要

複合測位:上述の4つの未知数に、

GPSとBeiDouとGalileoのシステム時刻差が加わる。

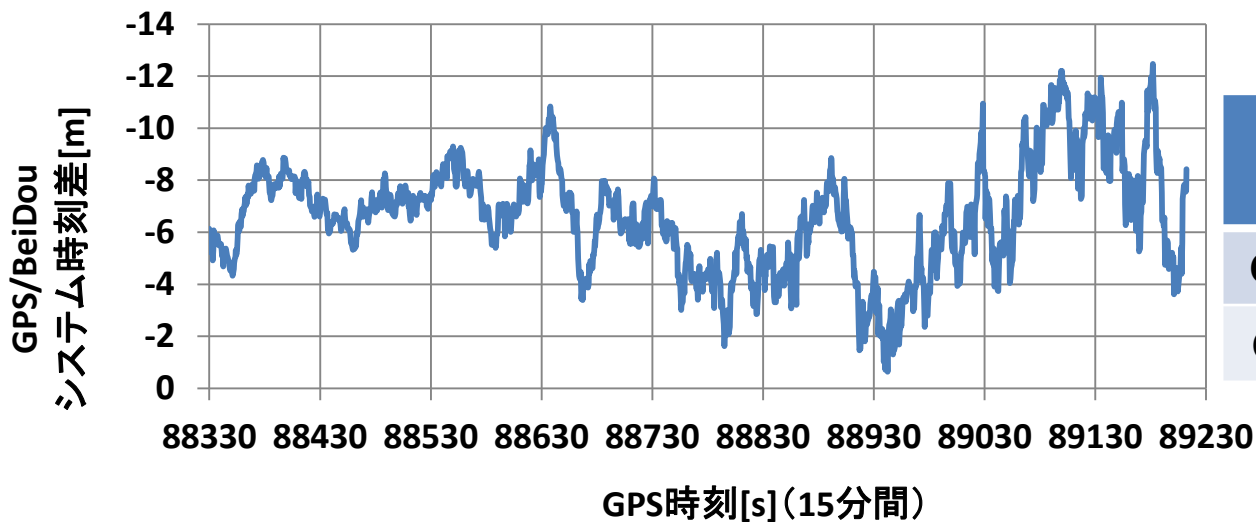
最低6機の衛星必要

GPS時刻=Galileo時刻=BeiDou時刻+14[s]

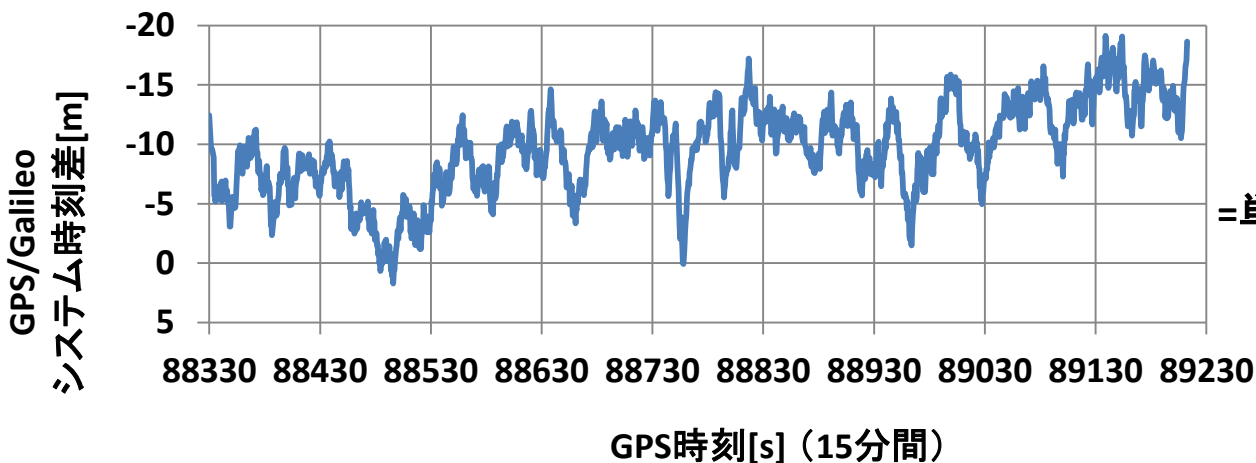
擬似距離のタイミングはGPS時刻に合わせる

# システム時刻差の推定

システム時刻差を加えた未知数5つの測位(最低5衛星必要)



	システム時刻差[m]
GPS/BeiDou	-6.7
GPS/Galileo	-9.7



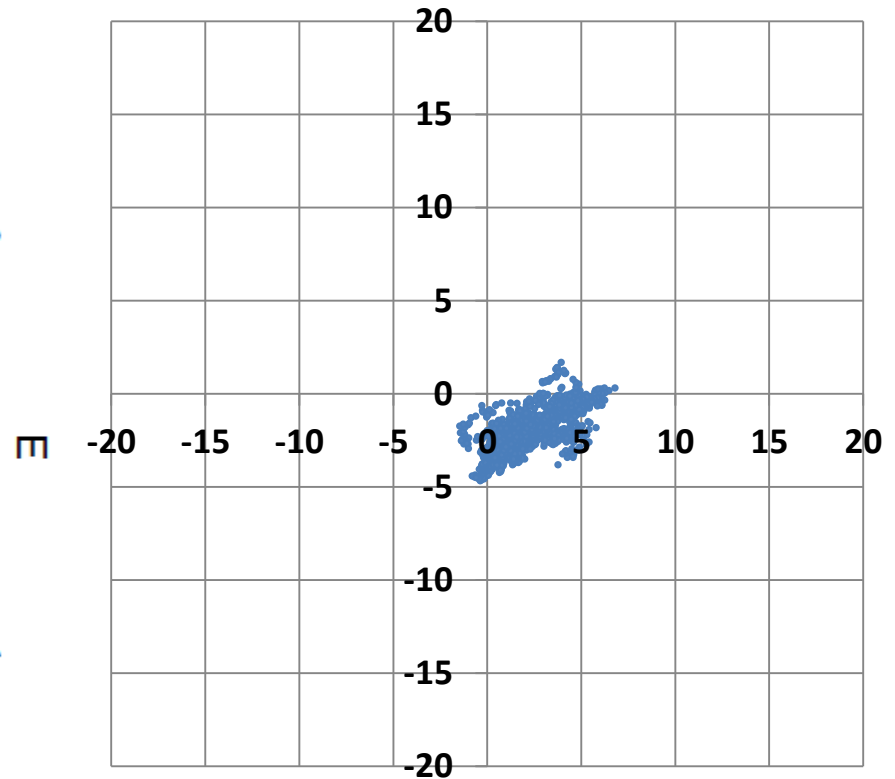
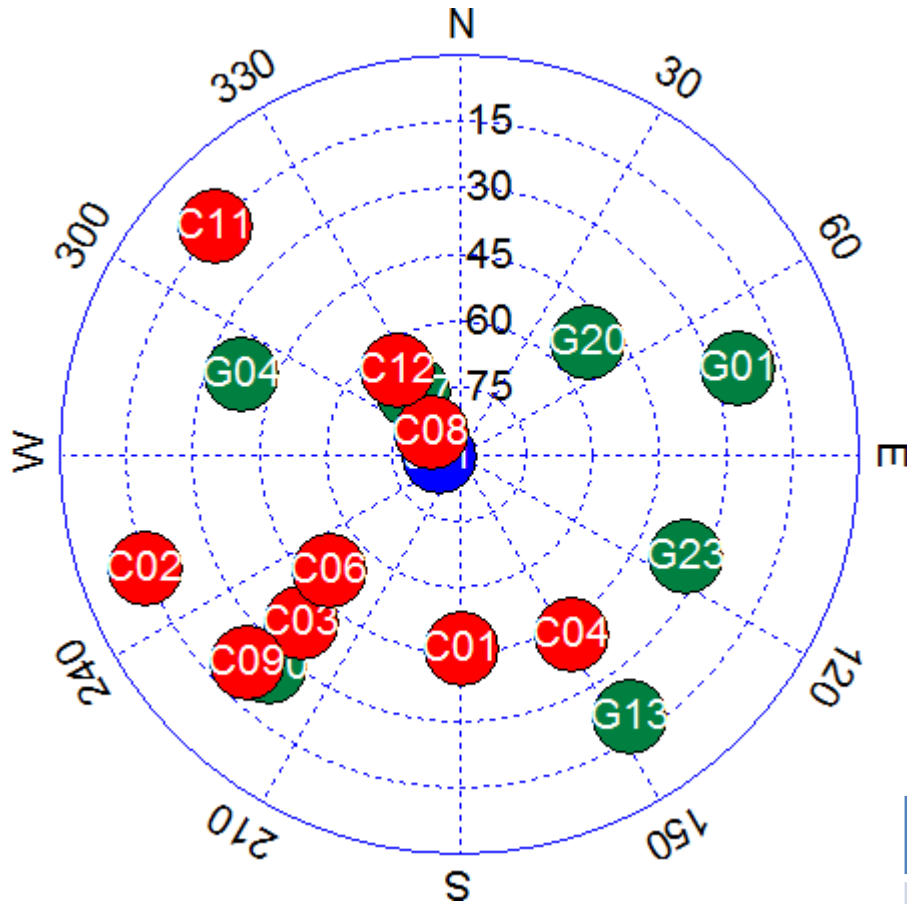
複合測位時の擬似距離[m]  
=単独測位時の擬似距離-SysTime[m]



# GPS/QZS/BeiDou複合測位結果

真値は原点、2Hzでプロット

縦軸:経度方向誤差[m] 横軸:緯度方向誤差[m]

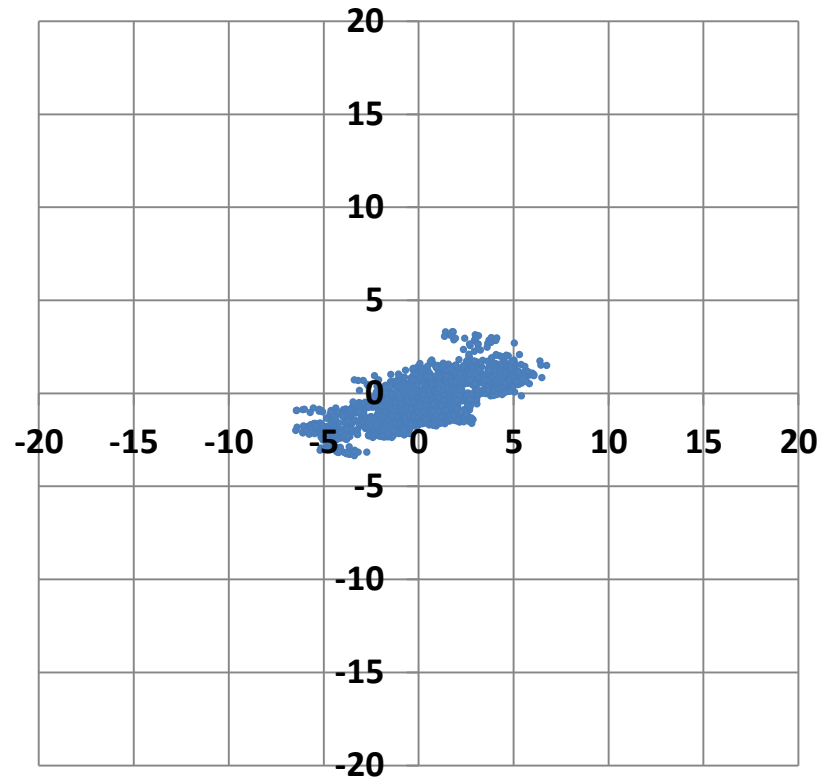
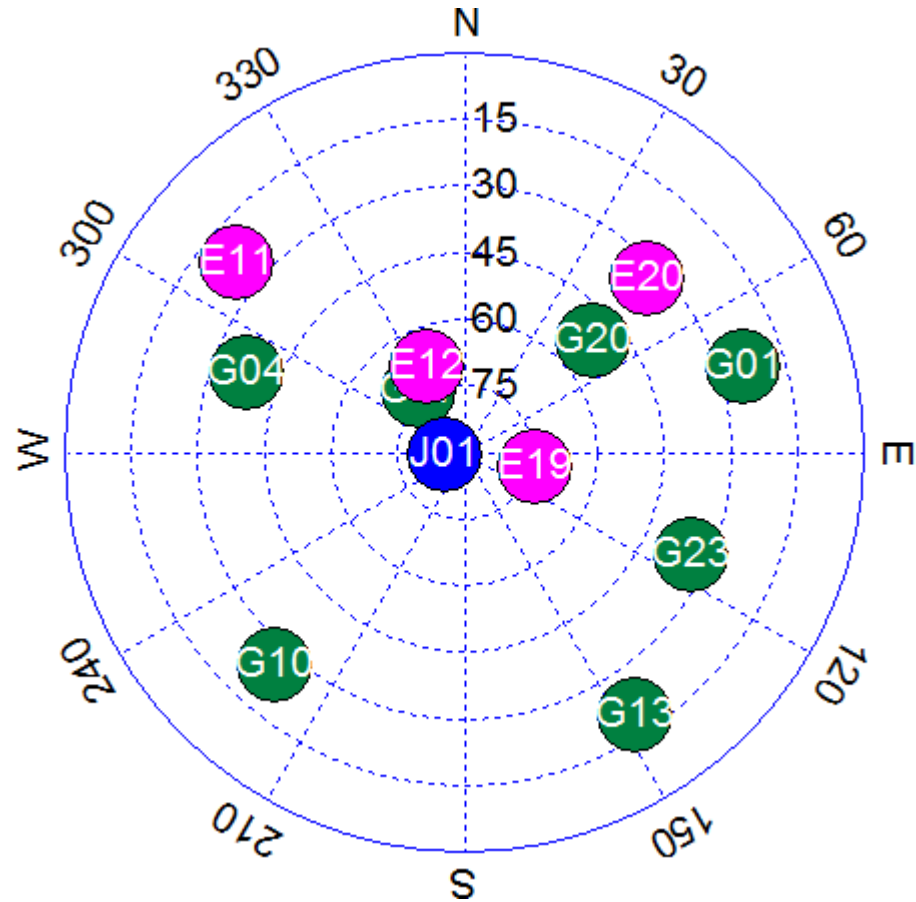


衛星数	17機
標準偏差[m]	1.96
HDOP平均	0.72

# GPS/QZS/Galileo複合測位結果

真値は原点、2Hzでプロット

縦軸:経度方向誤差[m] 横軸:緯度方向誤差[m]

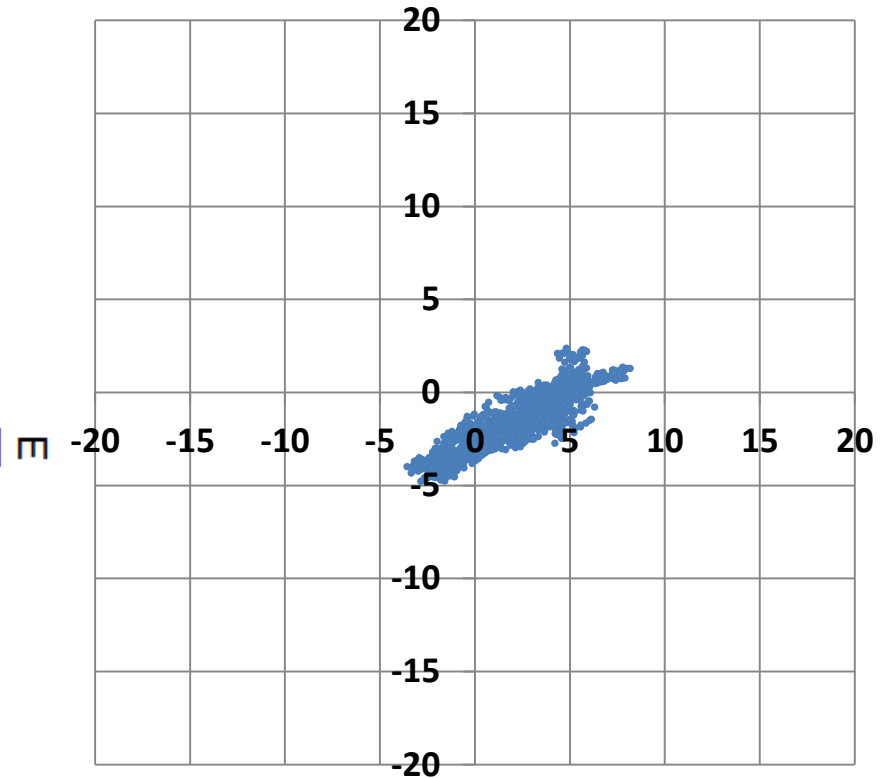
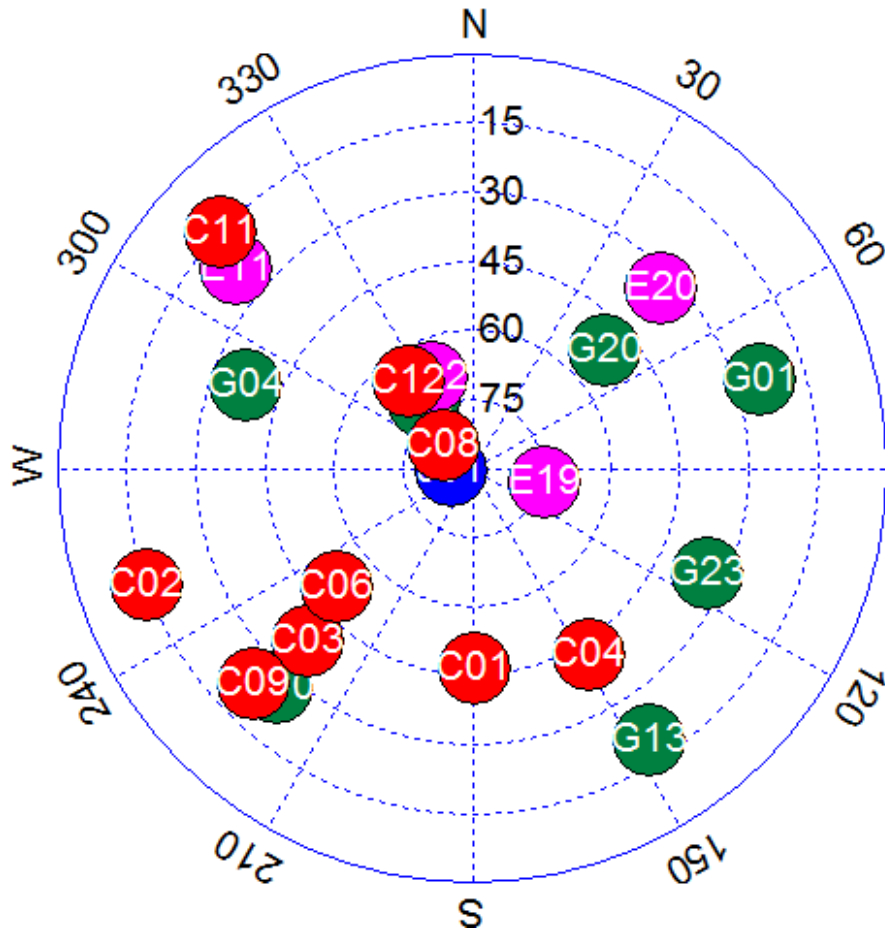


衛星数	12機
標準偏差[m]	2.85
HDOP平均	0.87

# GPS/QZS/BeiDou/Galileo複合測位結果

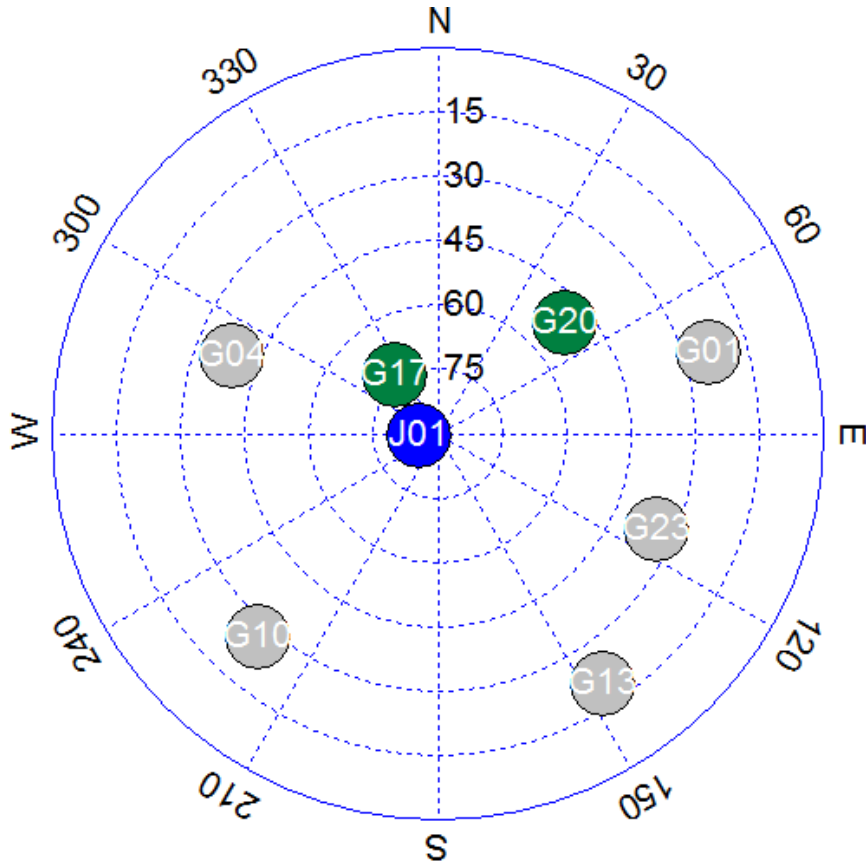
真値は原点、2Hzでプロット

縦軸:経度方向誤差[m] 横軸:緯度方向誤差[m]



衛星数	21機
標準偏差[m]	2.79
HDOP平均	0.63

# マルチGNSSのメリット(仰角マスク45度)

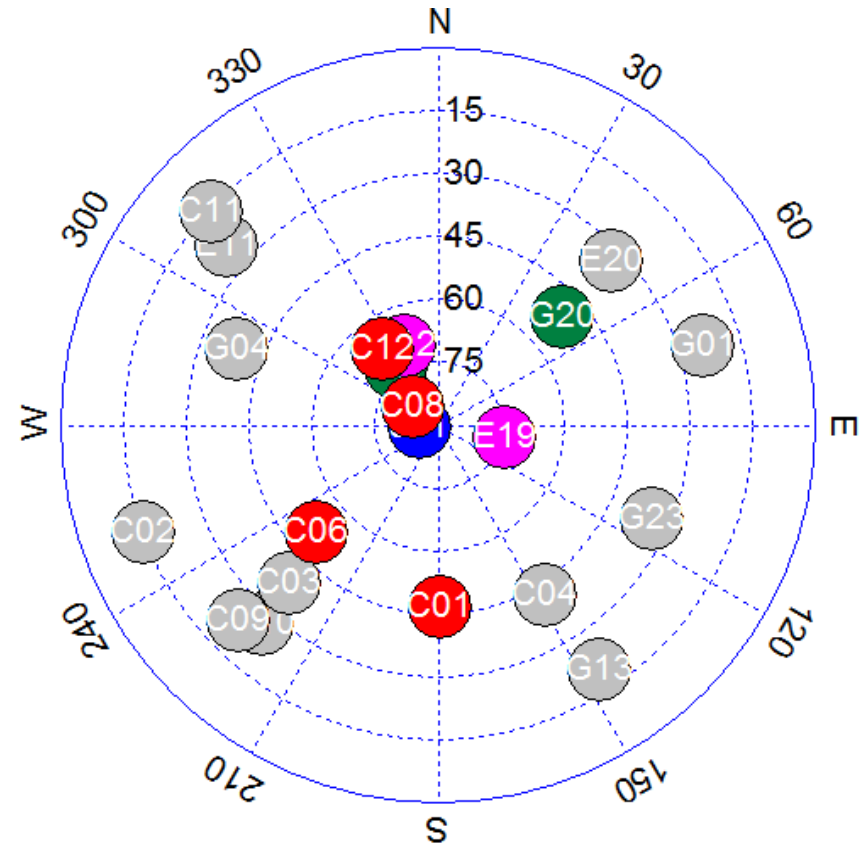


衛星数 :3機

緑: GPS(2機)

青:QZS(1機)

GPS/QZSのみでは測位できない



衛星数 :9機

桃:Galileo(2機)

緑: GPS(2機)

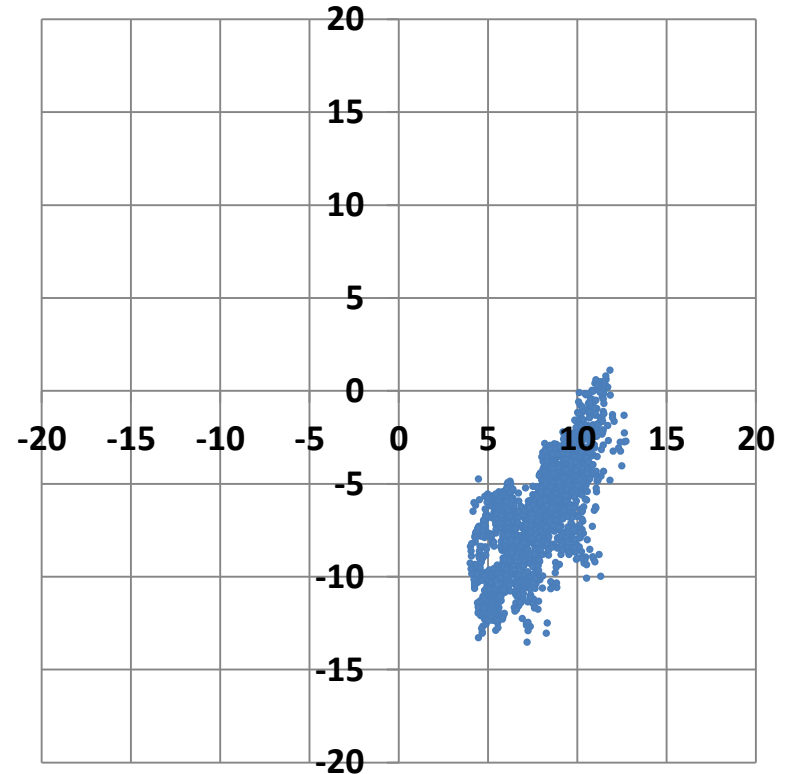
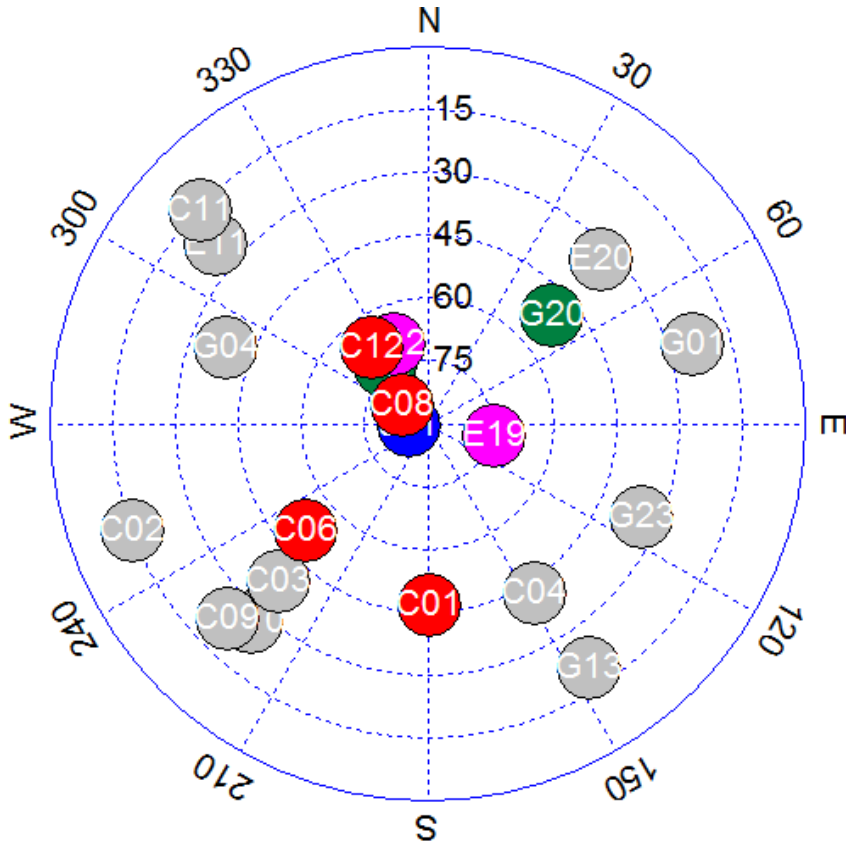
青:QZS(1機)

赤:BeiDou(4機)

# 仰角45度以上の衛星によるGPS/QZS/BeiDou/Galileo複合測位

真値は原点、2Hzでプロット

縦軸:経度方向誤差[m] 横軸:緯度方向誤差[m]



衛星数	9機
標準偏差[m]	3.51
HDOP平均	1.91

## まとめと、今後の課題

- 現在、GPS以外にも、多くのGNSS衛星が測位に利用可能である。本研究ではBeiDou/B1IおよびGalileo/E1Bをソフトウェア上で処理し、単独測位、複合測位を行った。
- ソフトウェア受信機は、対応するGNSSアンテナ、フロントエンドさえ用意できれば、様々なGNSS信号を処理することができる。
- 本研究では静止データを後処理で解析した。移動体データ解析、リアルタイム測位の実現などが、今後の課題である。

ご清聴ありがとうございました。

# DGNSS

IFデータを取得したアンテナから50cm程度離れた基準局より  
ディファレンシャル補正情報を生成、DGNSSを行う。

JAVAD社GrAnt-G3T

NSL社StereoよりIFデータ取得

Trimble社Zephyr Model 2

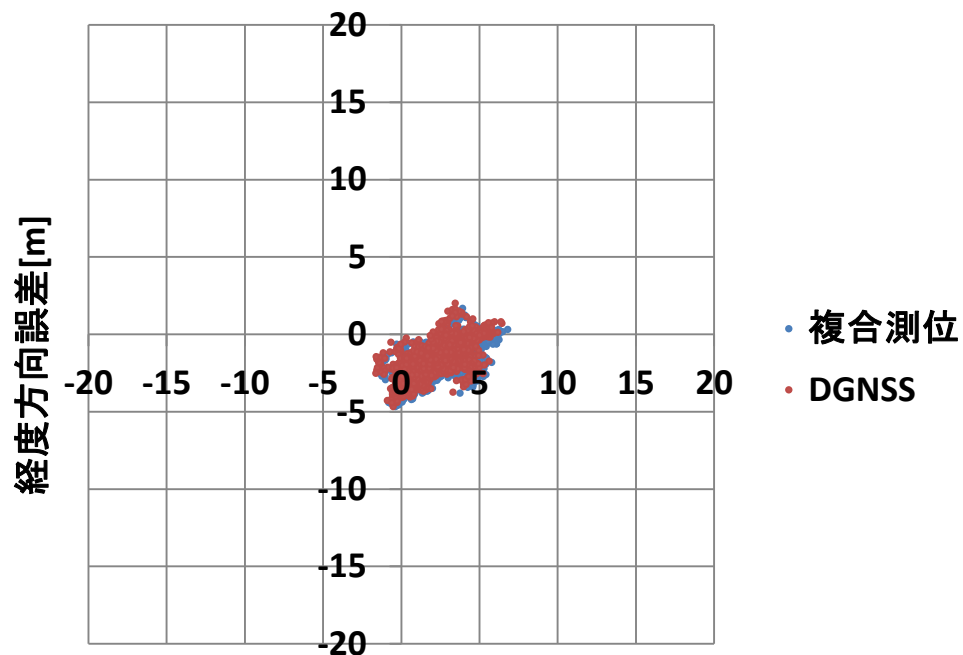
同社NetR9よりデータ取得(基準局)



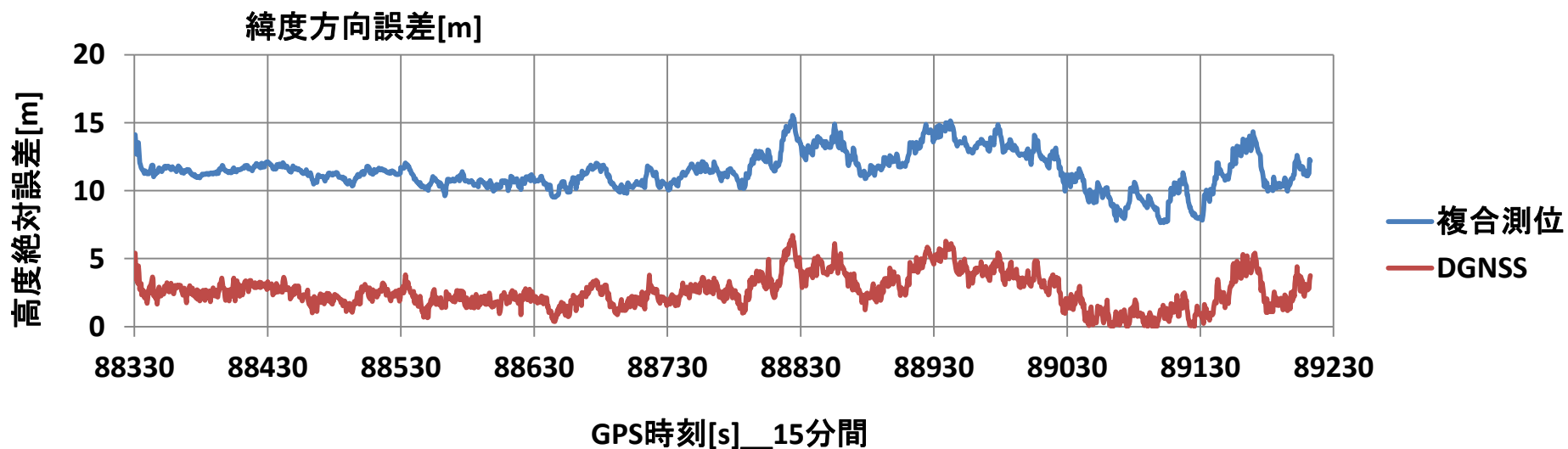
約50cm



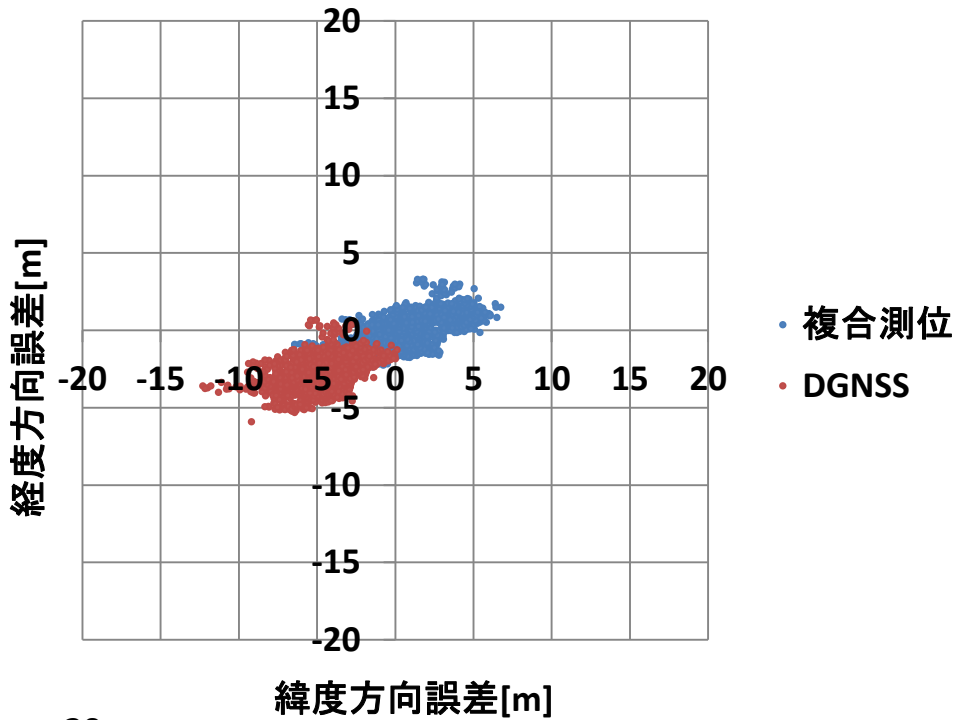
# GPS/QZS/BeiDou DGNSS測位結果



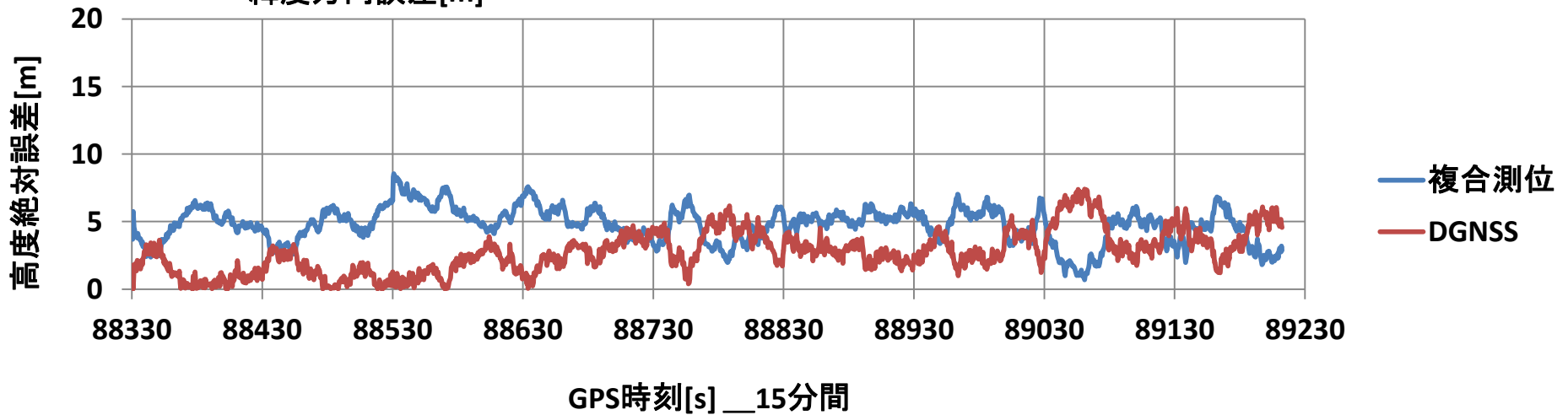
	標準偏差 [m]	高度絕對誤差 平均[m]
複合測位	1.96	11.44
DGNSS	1.89	2.59



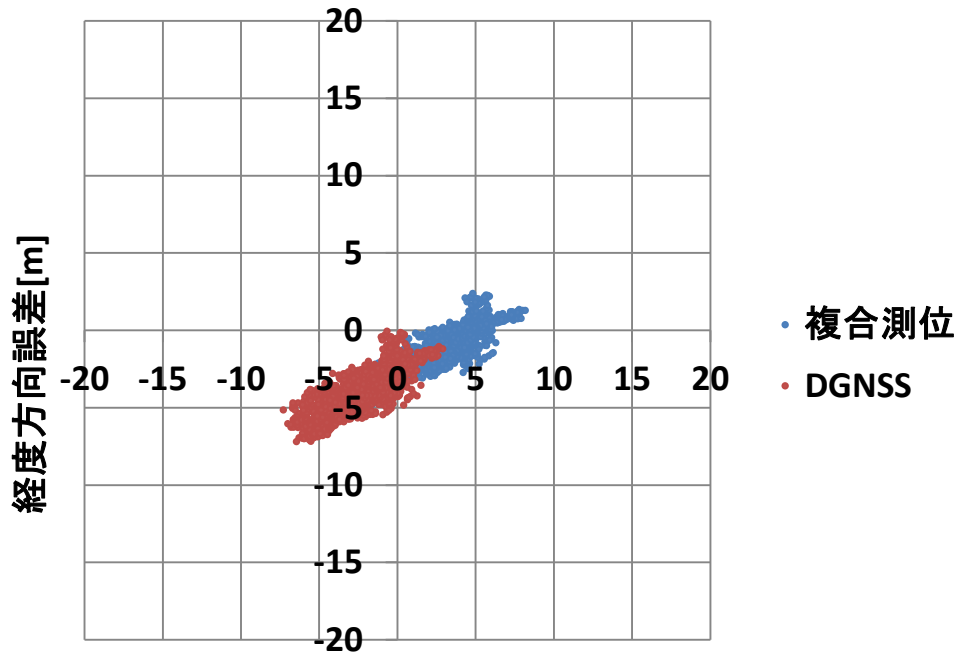
# GPS/QZS/Galileo DGNSS測位結果



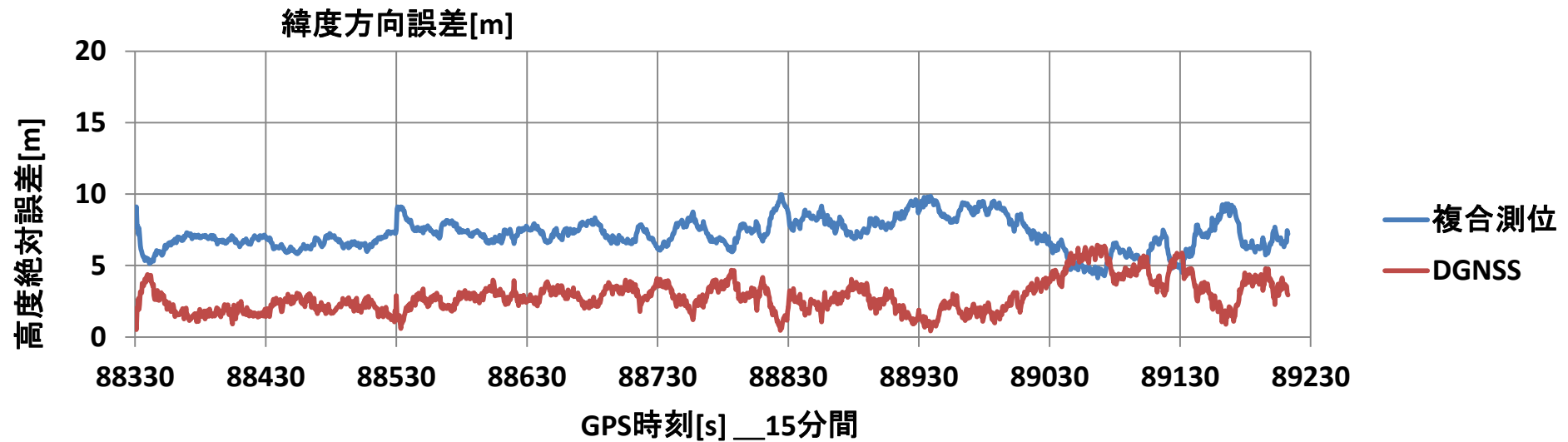
	標準偏差 [m]	高度絕對誤差 平均[m]
複合測位	2.85	4.75
DGNSS	2.12	2.74



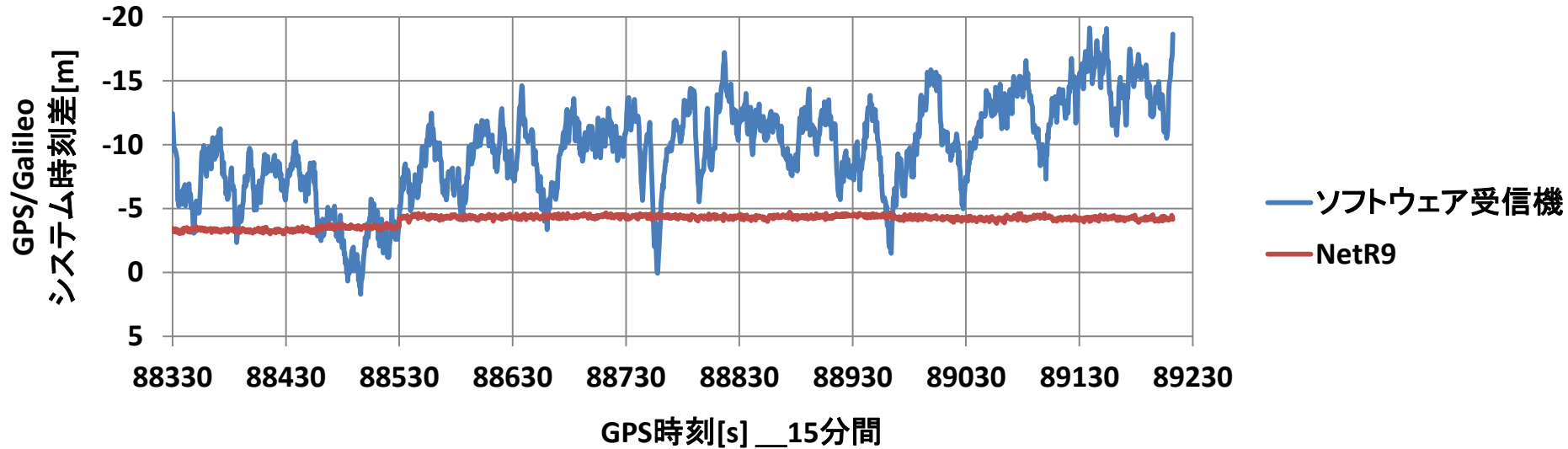
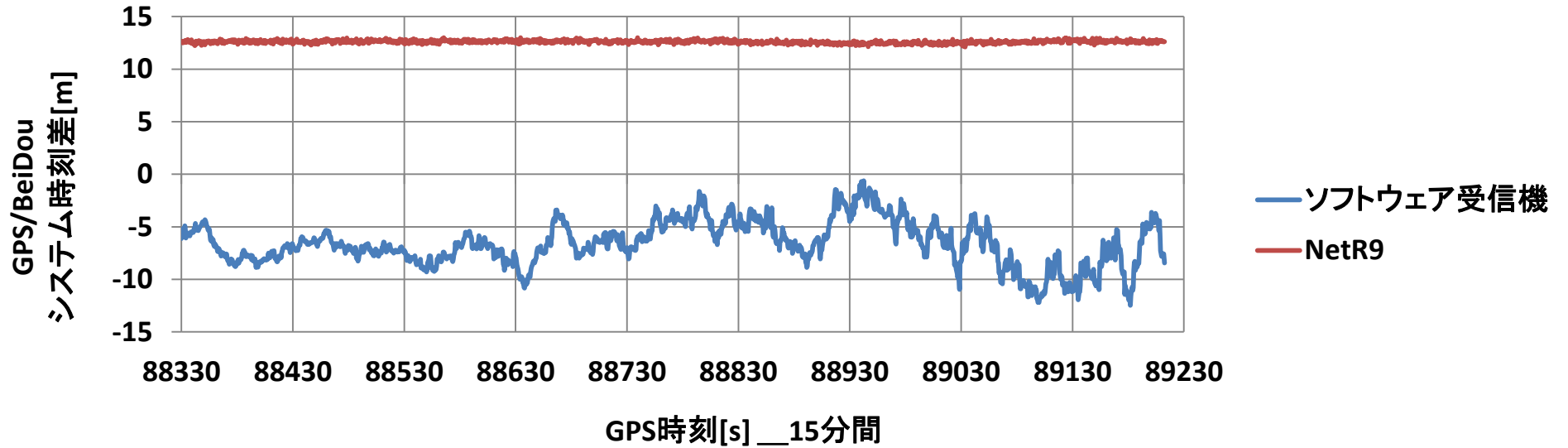
# GPS/QZS/BeiDou/Galileo DGNSS測位結果



	標準偏差 [m]	高度絕對誤差平均 [m]
複合測位	2.79	7.20
DGNSS	2.31	2.82

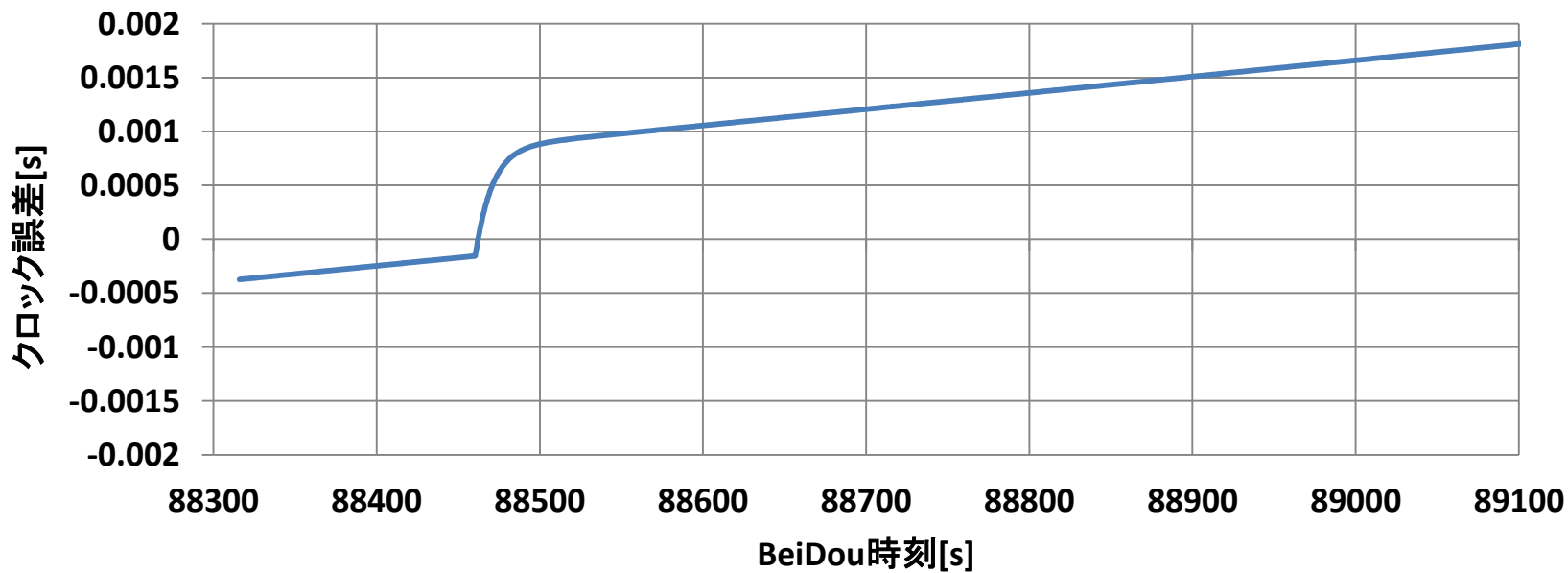
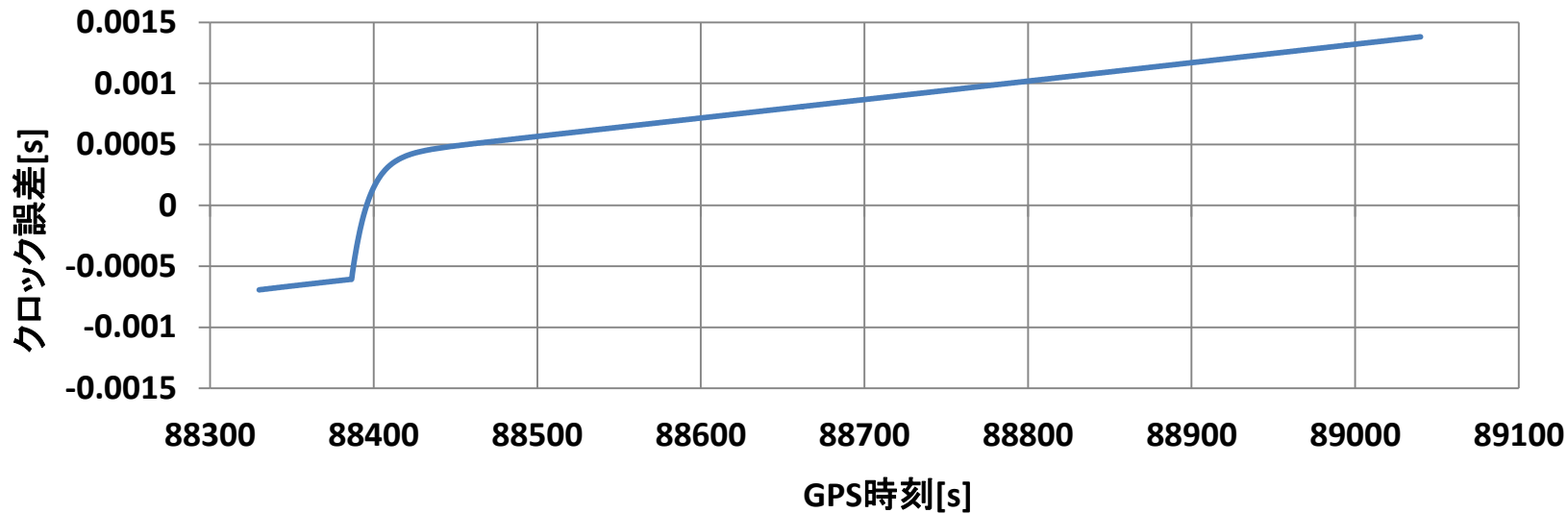


# システム時刻差の比較

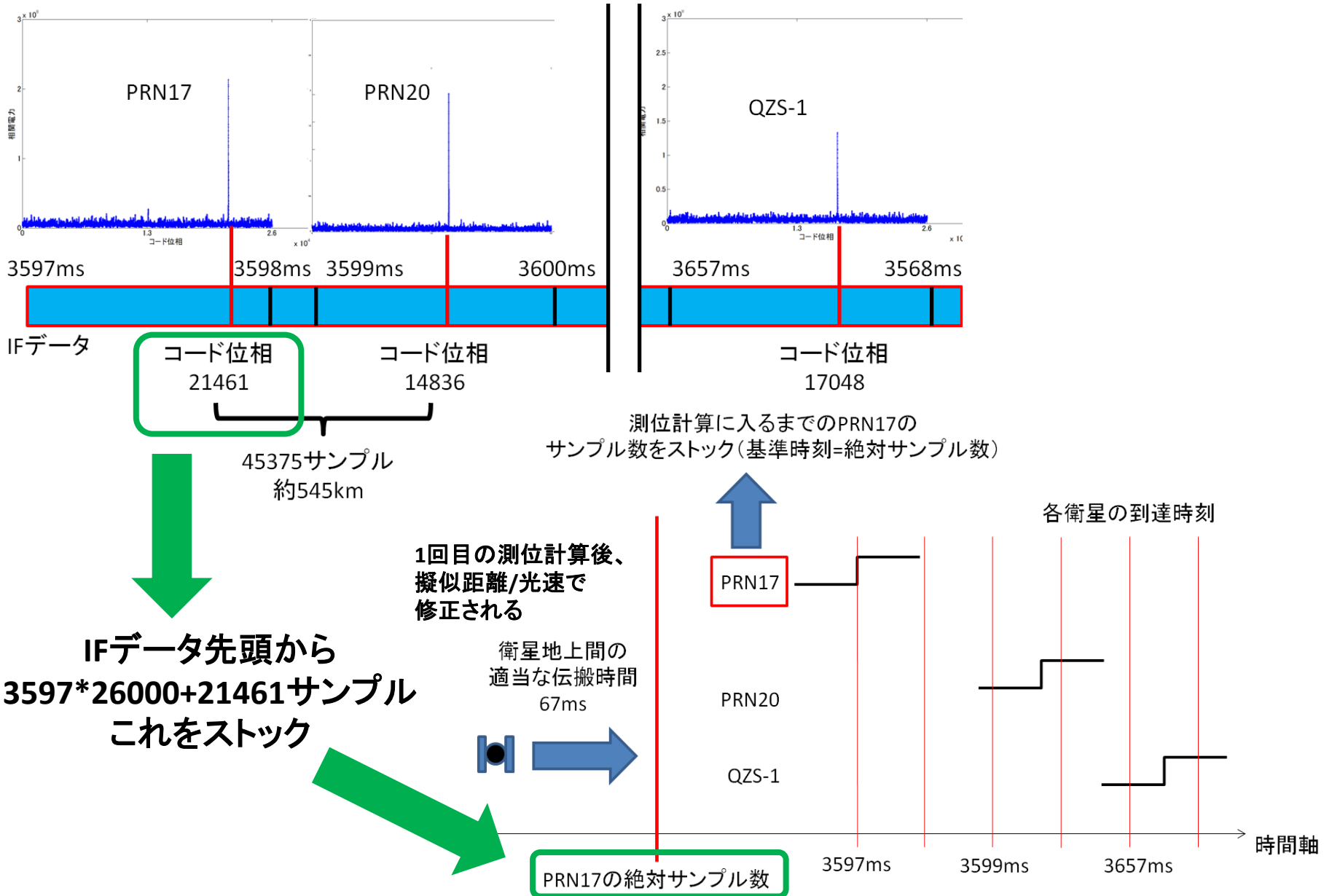


# NSLクロックの変動

上図:MAX2112 下図:MAX2769



# サンプル数で求める相対的擬似距離

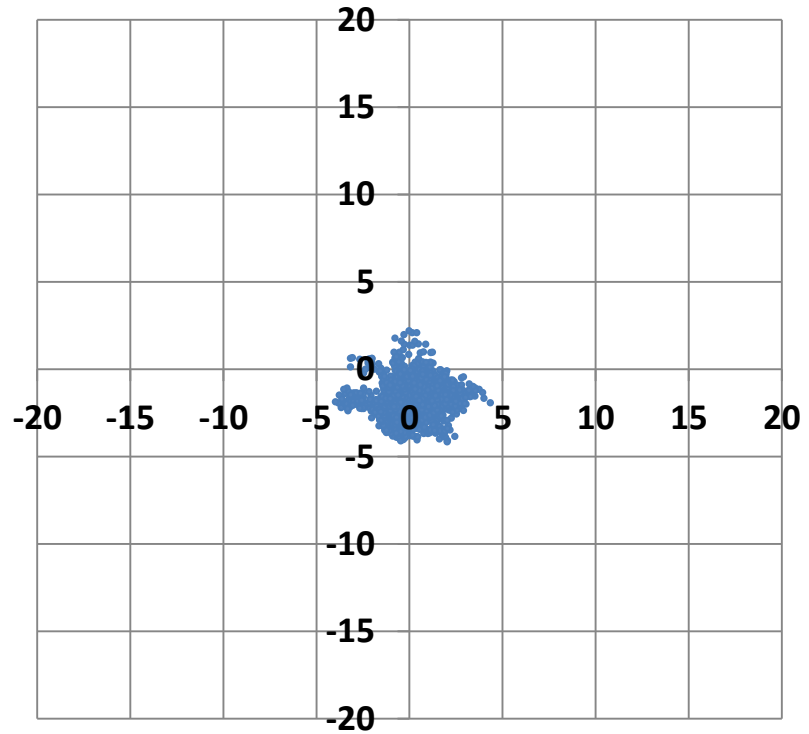
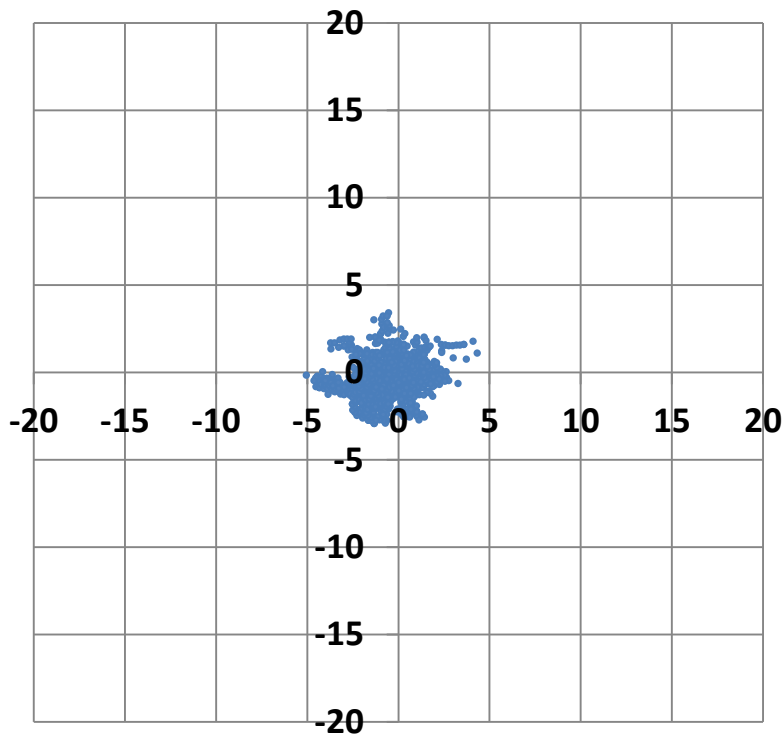


# DGPS測位結果

(左:GPS/QZS単独測位 右:DGPS)

真値は原点、2Hzでプロット、20sキャリアスムージング

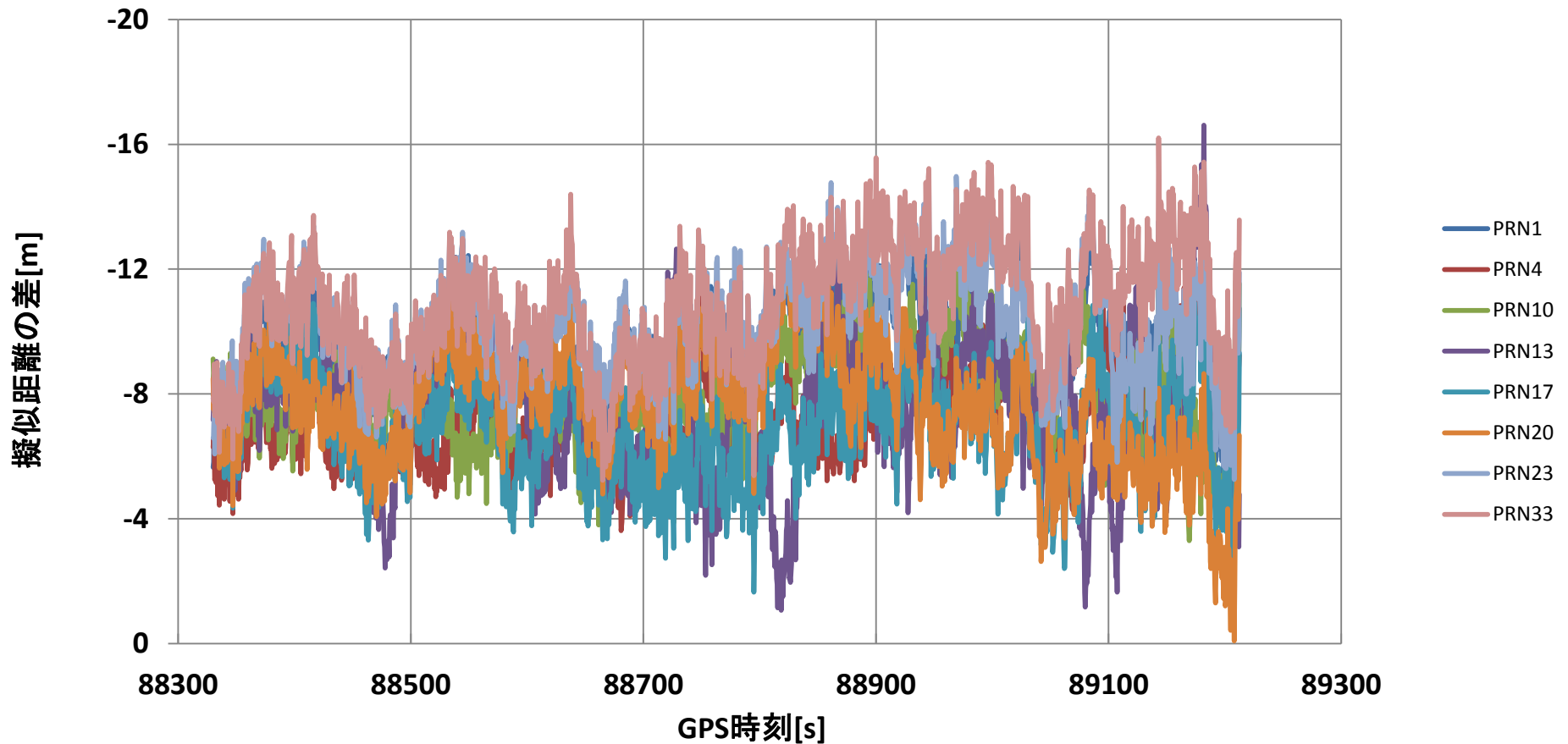
縦軸:経度方向誤差[m] 横軸:緯度方向誤差[m]



単独測位では真値に集まっていることから、NSLのクロック誤差は修正されている。

問題は、DGPS時に真値から少しずれてしまうこと。(擬似距離のタイミングがズれてないか?)

# NetR9とソフトウェア受信機の擬似距離の差(GPS/QZS)



オフセットだけでなく、衛星間で差にばらつきがある。  
DGPSで真値にこない原因と考えられる。