



# 搬送波位相を用いた高精度速度計測の地震波・揺れ検知への応用

GPS/GNSSシンポジウム2021

発表日 10月29日

東京海洋大学 情報通信工学研究室  
小森健史(B4) 指導教員:久保信明 教授



# 概要

- この研究では2021年2月13日に福島県沖で発生した地震による揺れを大学実験棟屋上に設置されているGNSS基準アンテナの速度を使って捉えることを目的とする。
- 搬送波位相の時間差分(TDCP)を速度計算に用いる。



地震の被害

引用: 右上:朝日新聞

下:JR東日本報告書

大学実験棟



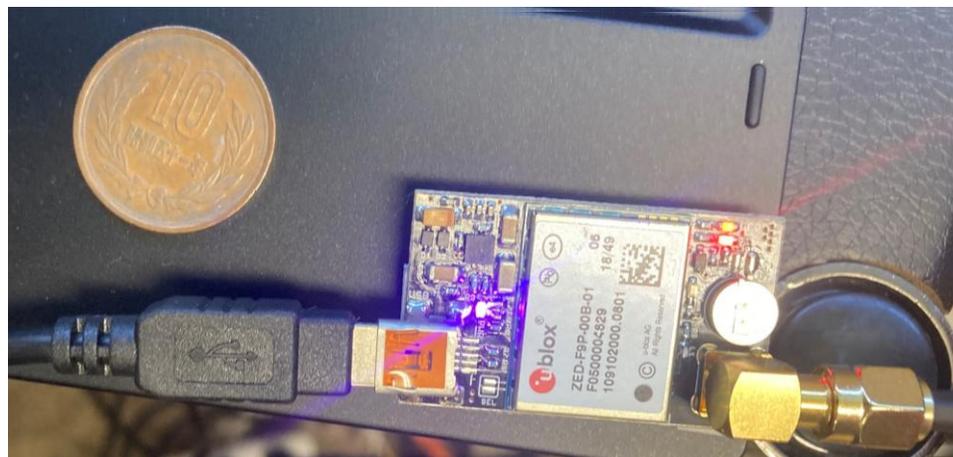


# GNSS基準アンテナについて

- この実験では東京海洋大学越中島キャンパス実験棟屋上に設置されているGNSS基準局アンテナ(所在地:東京都江東区)で取得した観測データを用いる。
- 基準アンテナでは常時1Hzで測位が行われている。
- 今回使用したアンテナはTrimble製TRM57971.00、受信機はu-blox社製ZED-F9Pである。

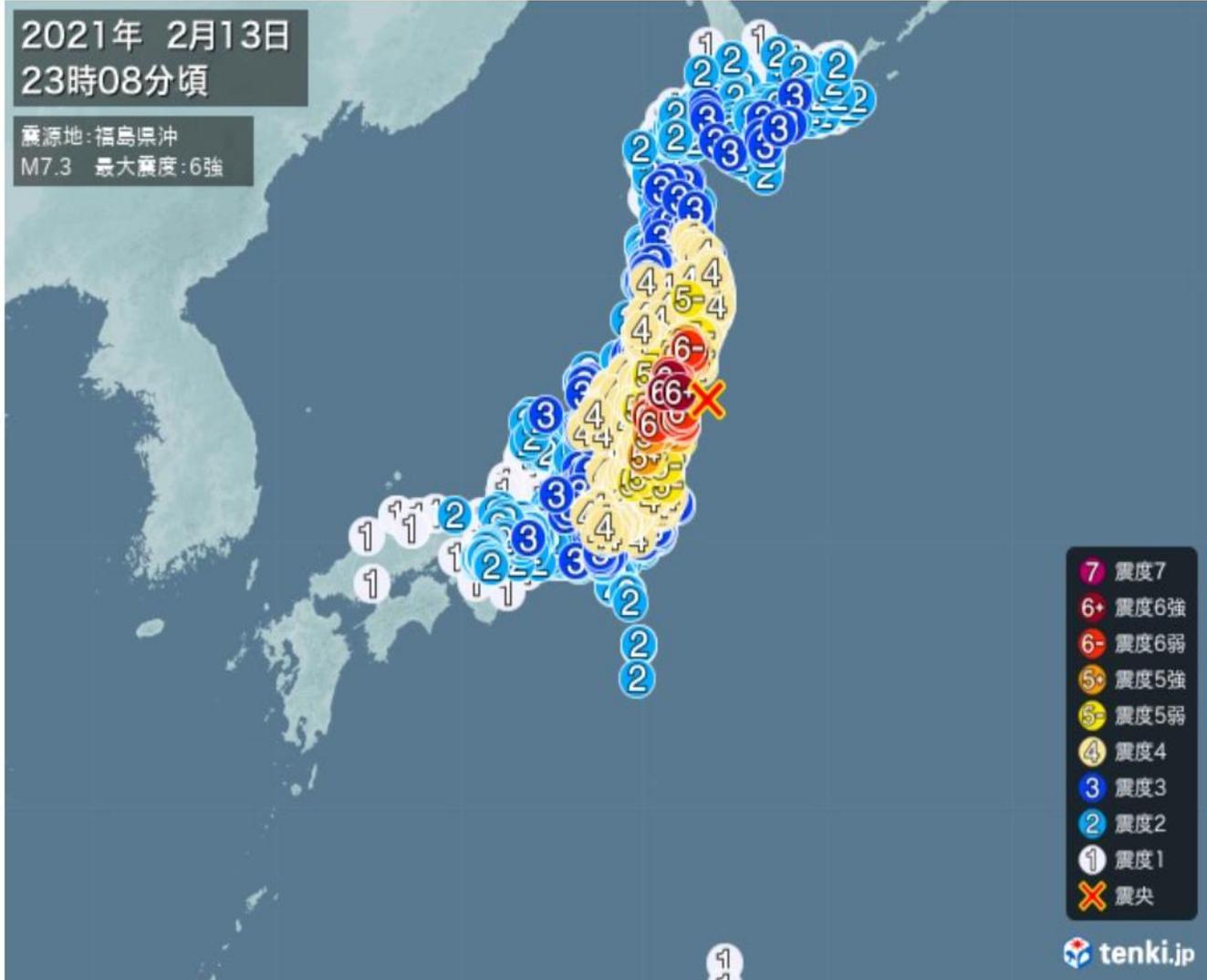
右:TRM57971.00

左下:u-blox ZED-F9P





# 2月13日の地震について



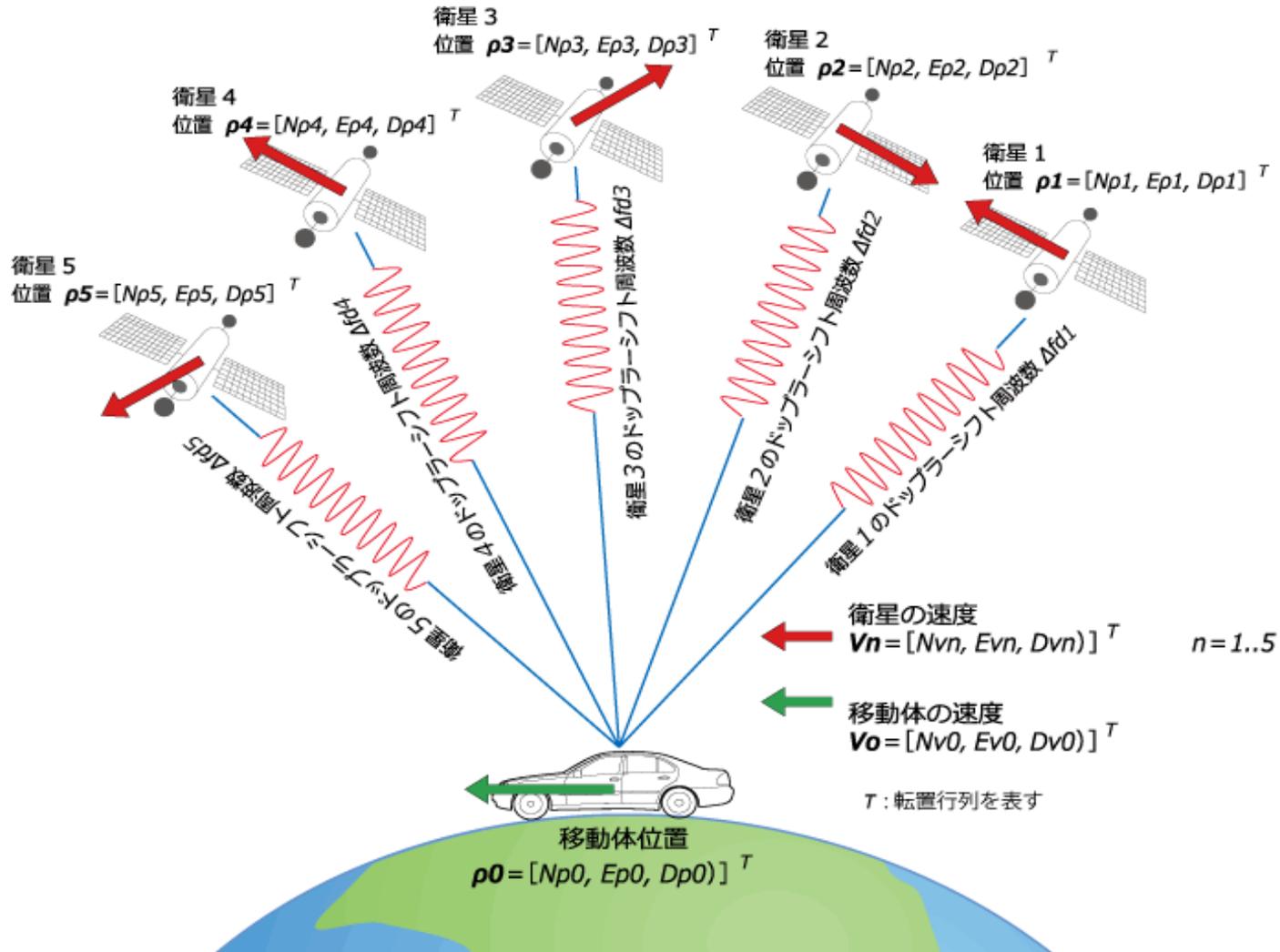
- 地震発生時刻は23時07分51秒
- 最大震度は6強、マグニチュードは7.3
- 震源地は  
37° 43.7' N, 141° 41.9' E、  
深さ55km
- 江東区は震度4  
(気象庁発表・日本気象協会地震情報)

引用: 日本気象協防災・地震情報

<https://earthquake.tenki.jp/bousai/earthquake/detail/2021/02/13/2021-02-13-23-08-00.html>

# GNSS速度計について

- 一般的なGNSS速度計は受信電波のドップラー測定値から速度を算出している。



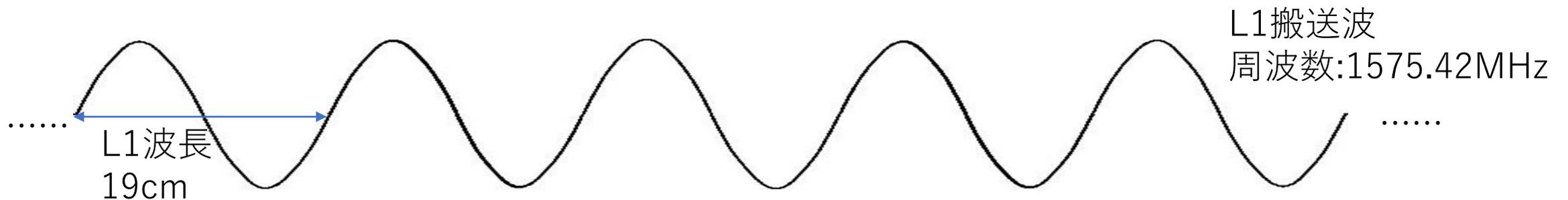
引用:小野測器

GPSによる速度測定の原理

URL:[https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/keisoku/vehicle/lc8\\_principle.htm](https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/products/keisoku/vehicle/lc8_principle.htm)

# 搬送波位相の時間差分を用いた速度の解析について

- GNSS測位において、ある衛星に対しての搬送波位相の時間差分(Time Difference of Carrier Phase)は一定時間内に受信機から衛星までの波数がどれだけ変化したかをあらわす。波数の変化量はドップラー周波数[Hz]に相当する。
- ドップラー周波数による速度推定はcm/sの精度だが、TDCPを用いればmm/sの精度で速度を算出できることが先行研究「搬送波位相を用いた速度推定」で示されている。



- 搬送波位相の時間差分を、ドップラー周波数の代わりに最小二乗法の計算に利用して速度を算出する。

GPSTIME	ドップラー値	搬送波位相差分
457588	-1819.703	-1819.631976
457589	-1820.183	-1820.040477
457590	-1820.286	-1820.341476
457591	-1820.562	-1820.693476
457592	-1821.012	-1821.174476
457593	-1821.803	-1821.732476
457594	-1822.496	-1822.437476
457595	-1823.014	-1823.117476
457596	-1823.794	-1823.602477
457597	-1823.921	-1823.936977
457598	-1824.364	-1824.317476
457599	-1824.532	-1824.799477
457600	-1825.659	-1825.443977
457601	-1826.322	-1826.142977

その時刻と1秒前の搬送波を利用

ドップラー観測値は受信機出力

TDCPの算出方法

$$TDCP_{0.5} = \frac{C_{p0} - C_{p1}}{T_{obs}}$$

$C_{pn}$ :  $n$  epoch前の搬送波位相

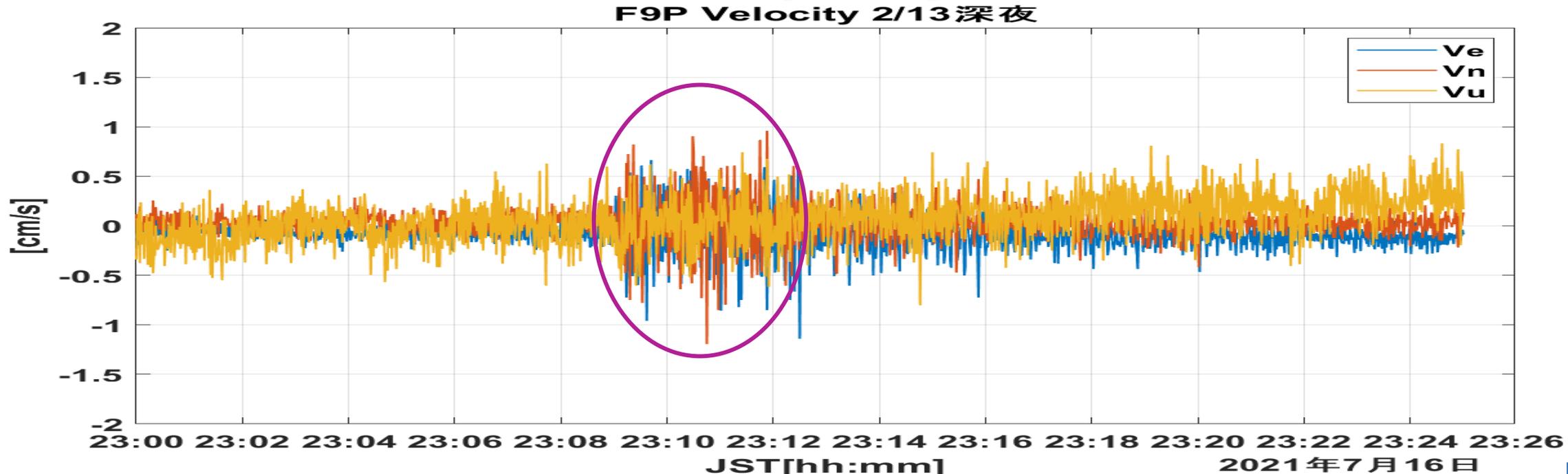
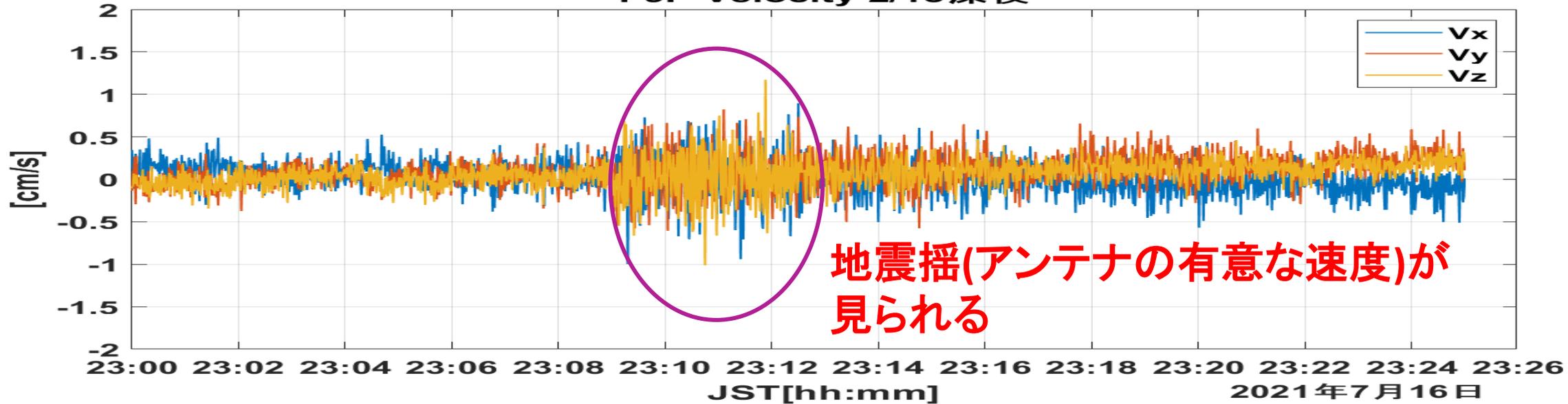
$T_{obs}$ : 観測/測位周期[s]



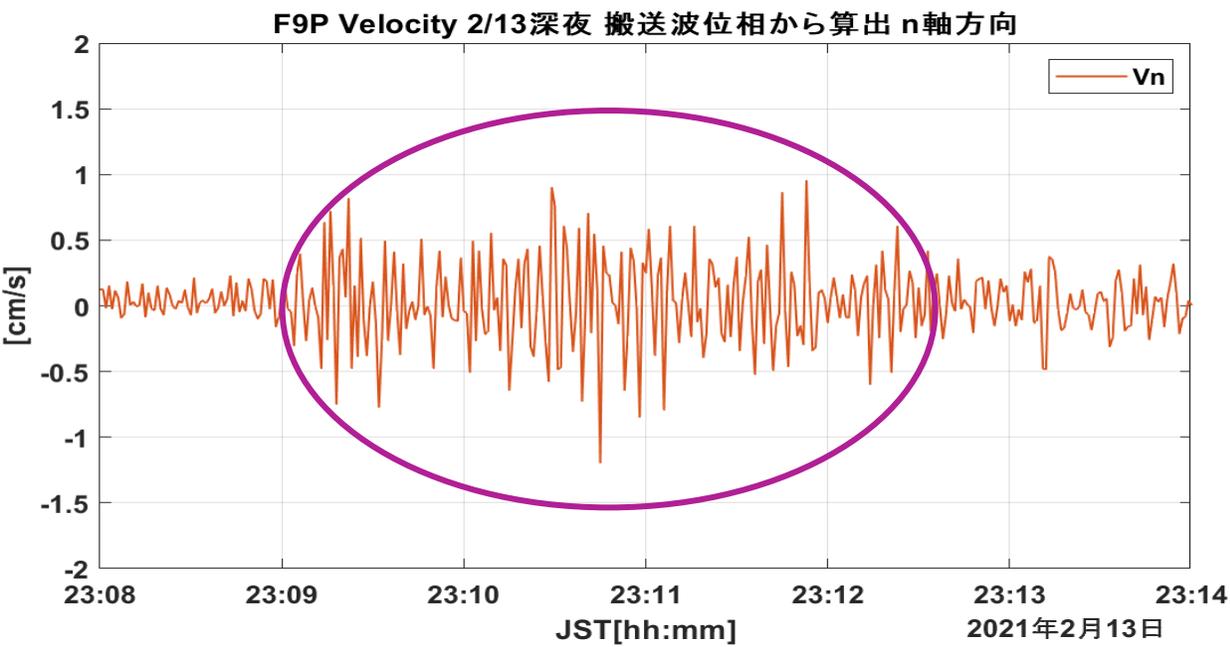
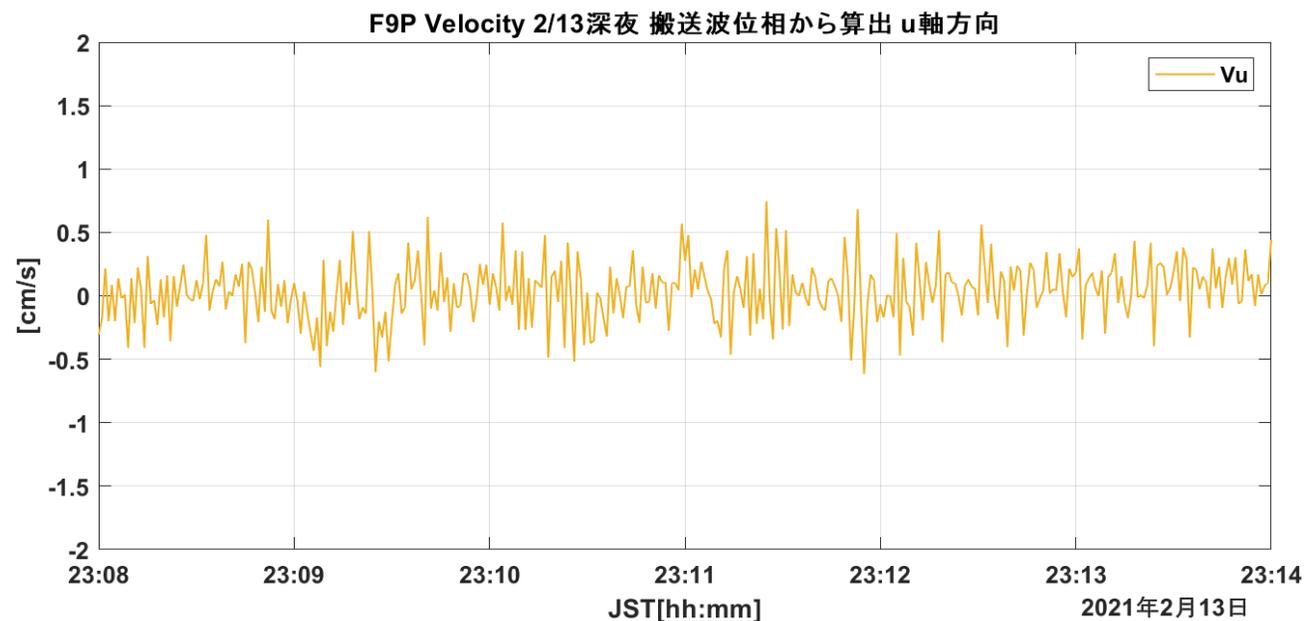
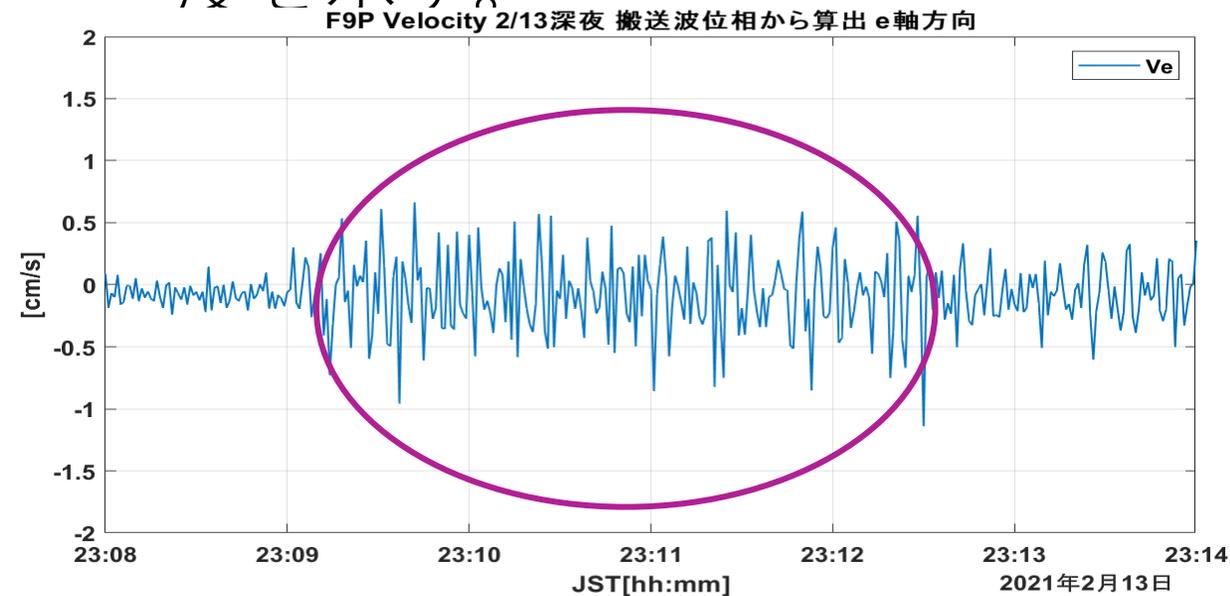
# 結果(実験2)

# GNSS速度 F9P

F9P Velocity 2/13 深夜



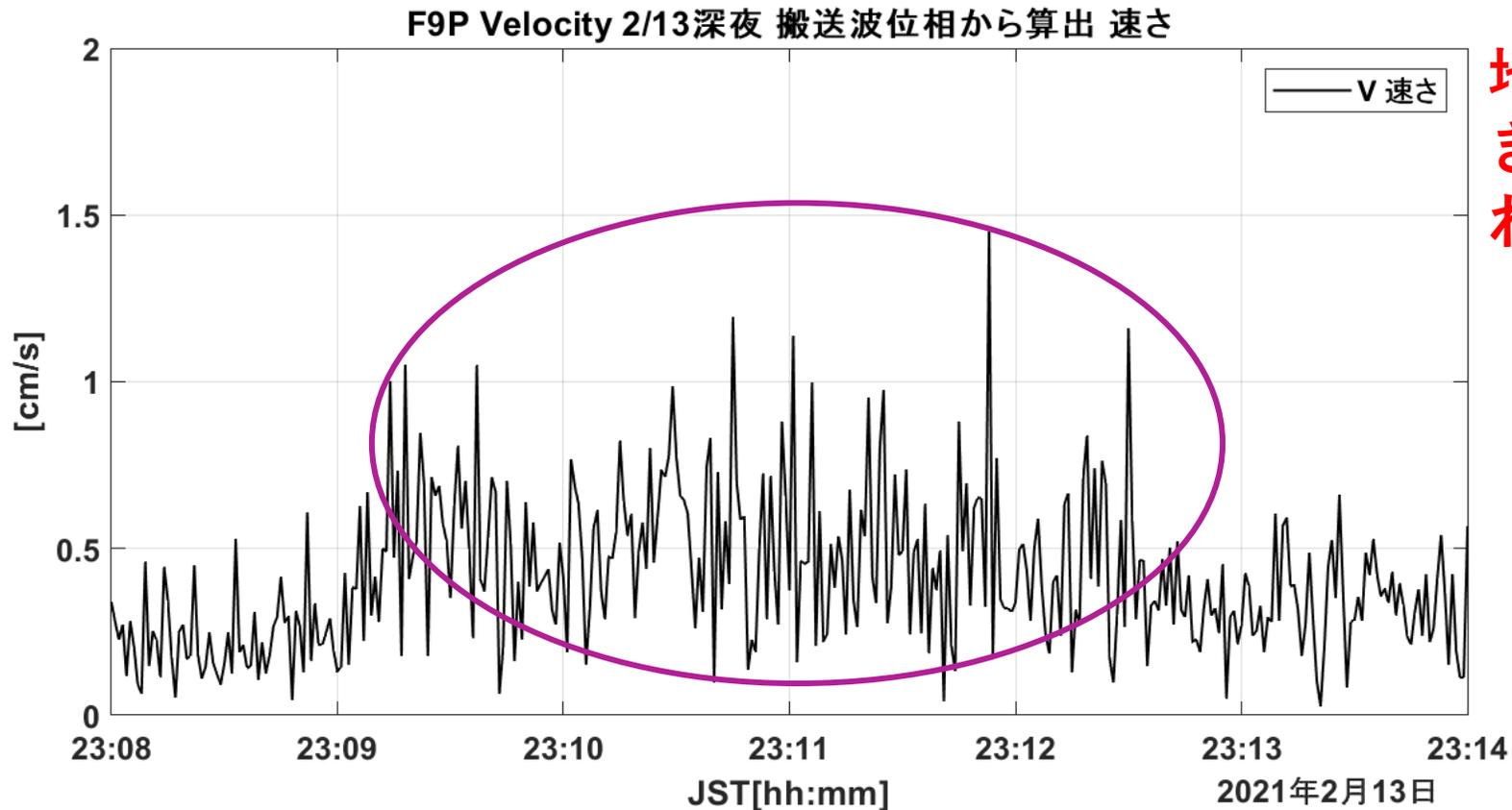
- 地震発生時刻近辺の23:08~23:14におけるENU系の各軸方向の速度を示す。



**E,N軸(水平)方向で地震による揺れがみられる。U軸(鉛直)方向では地震による揺れが判別できなかった。**

• 各軸方向の速度を合成して地震により生じた速度の大きさを求める。

• 地震の速さ:  $v = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$



地震揺によりアンテナ速度の大きさが大きくなっていることがわかる。

表1に地震が発生しているであろう時刻とそれ以外の時刻の各軸方向の速度の大きさ(速さ)と標準偏差を示す。

表1:地震発生時刻付近での速度結果

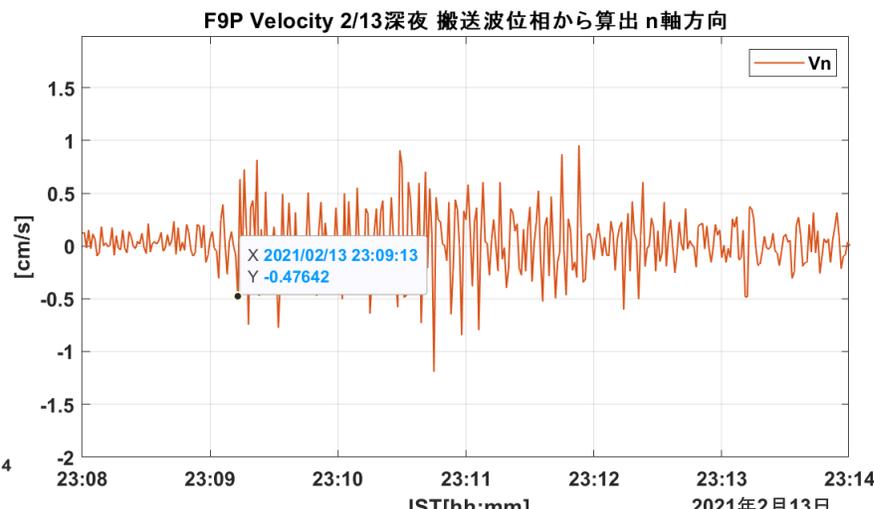
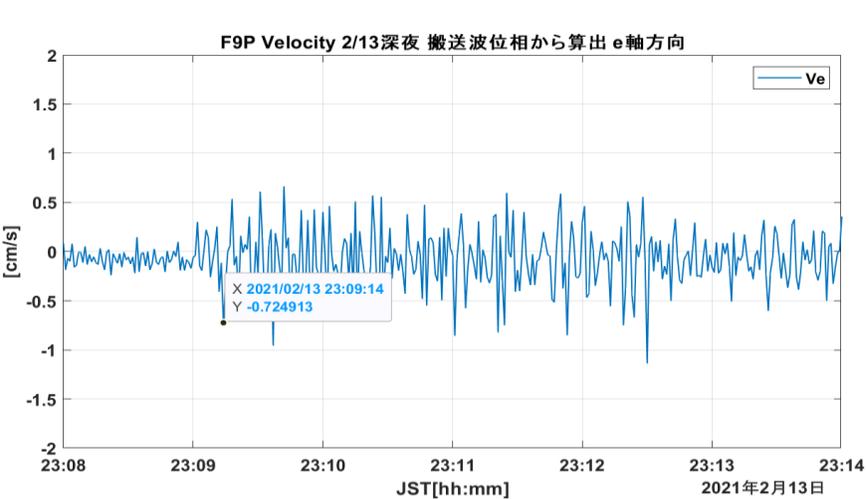
		Vx	Vy	Vz	Ve	Vn	Vu	V(速さ)
地震が発生していない時刻 (~23:09:09,23:13:00~)	速さ(速度絶対値)平均[cm/s]	0.138	0.155	0.126	0.110	0.090	0.197	0.2724
	標準偏差	0.175	0.172	0.139	0.110	0.115	0.232	0.1416
地震が発生しているであろう時刻 (23:09:10~23:12:59)	速さ平均	0.265	0.229	0.243	0.256	0.262	0.196	0.4831
	標準偏差	0.327	0.279	0.307	0.318	0.341	0.249	0.2340
	各軸正の方向の 最大値	0.896	0.819	1.173	0.661	0.957	0.742	1.450
	各軸負の方向の 最大値	-0.993	-0.601	-1.010	-1.139	-1.191	-0.615	---

**Vx,Vy,Vz:**ECEF座標系の速度    **Ve,Vn,Vu:**ENU座標系の速度

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

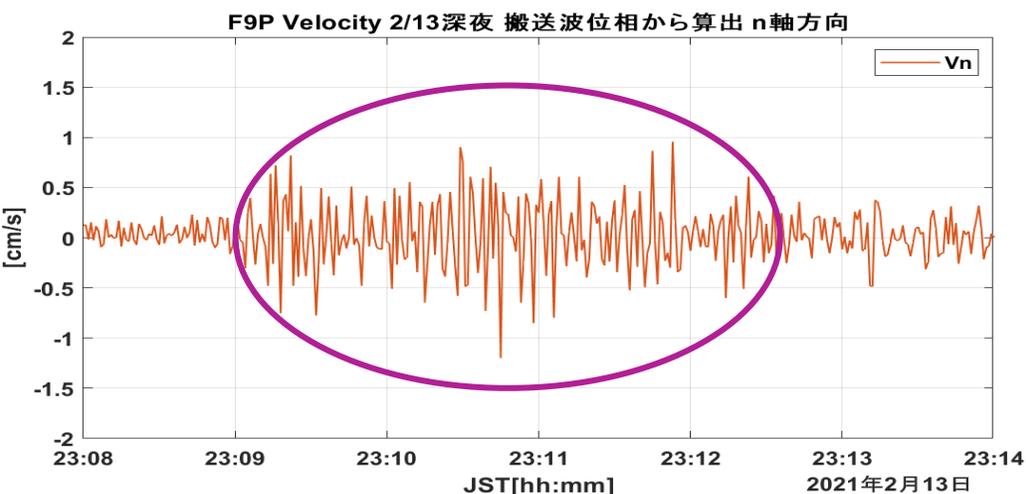
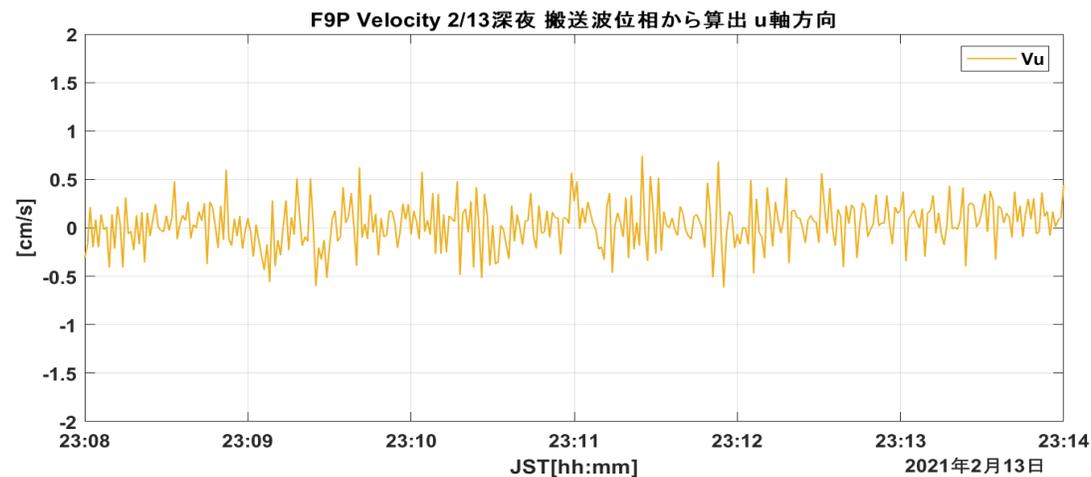
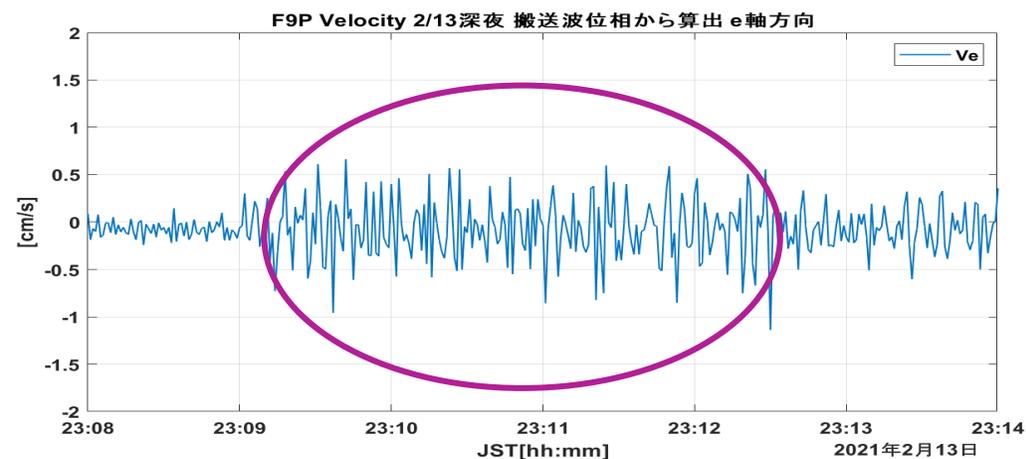
# 考察1 捉えた揺れについて

- 福島県沖の震源地(37° 43.7' N, 141° 41.9' E)からアンテナ所在地までの直線距離は約293.3km。地震発生時刻の23時07分51秒から、
  - S波(速度約2~4km/h)が到着するまで約72~147秒かかる。
  - P波(速度約5~7km/h)が到着するまで約42~59秒かかる。
- 結果では
  - 地震発生から約80s後の午後23時9分10秒頃(JST)から揺れ始めている
  - 揺れ初めから速度が大きい
- 観測できたのは主要動のみと考えられる。



# 考察2 速度精度との関係

- 地震揺によって各軸方向に生じる速度の大きさは平均2.5mm/s程度であるが、約1mm/sよりも良い精度で速度が求まる**水平方向では地震揺れの検出ができた。**



		Ve	Vn	Vu
地震が発生していない時刻 (~23:09:09, 23:13:00~)	標準偏差 [cm/s]	0.110	0.115	0.232

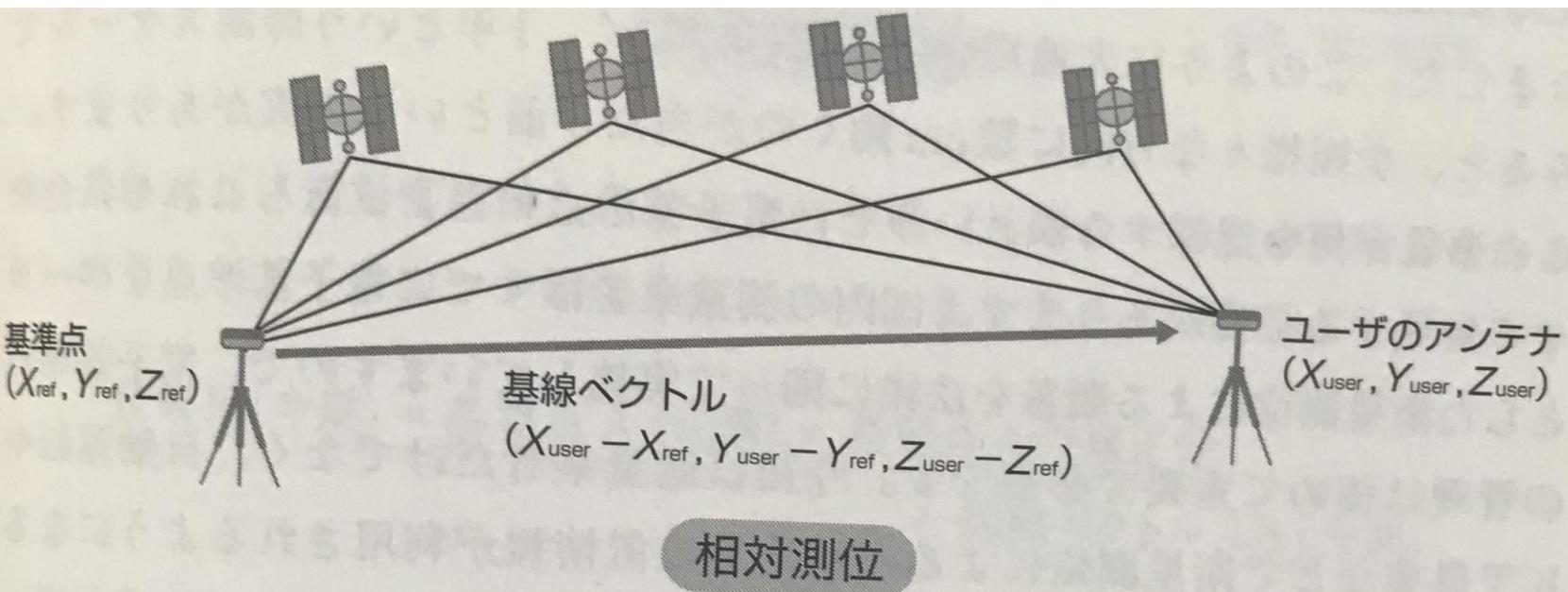
- 青木京平：“搬送波位相を用いた速度推定”，測位航法学会2020年度全国大会,2020.7
- Prataap Misra and Per Enge著,日本航海学会GPS研究会 訳:  
• ” 精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機”,  
pp159~186,2004.12
- 気象庁,地震データベース,2021

ご清聴ありがとうございました。



# GNSS速度を揺れ検出に用いる意義

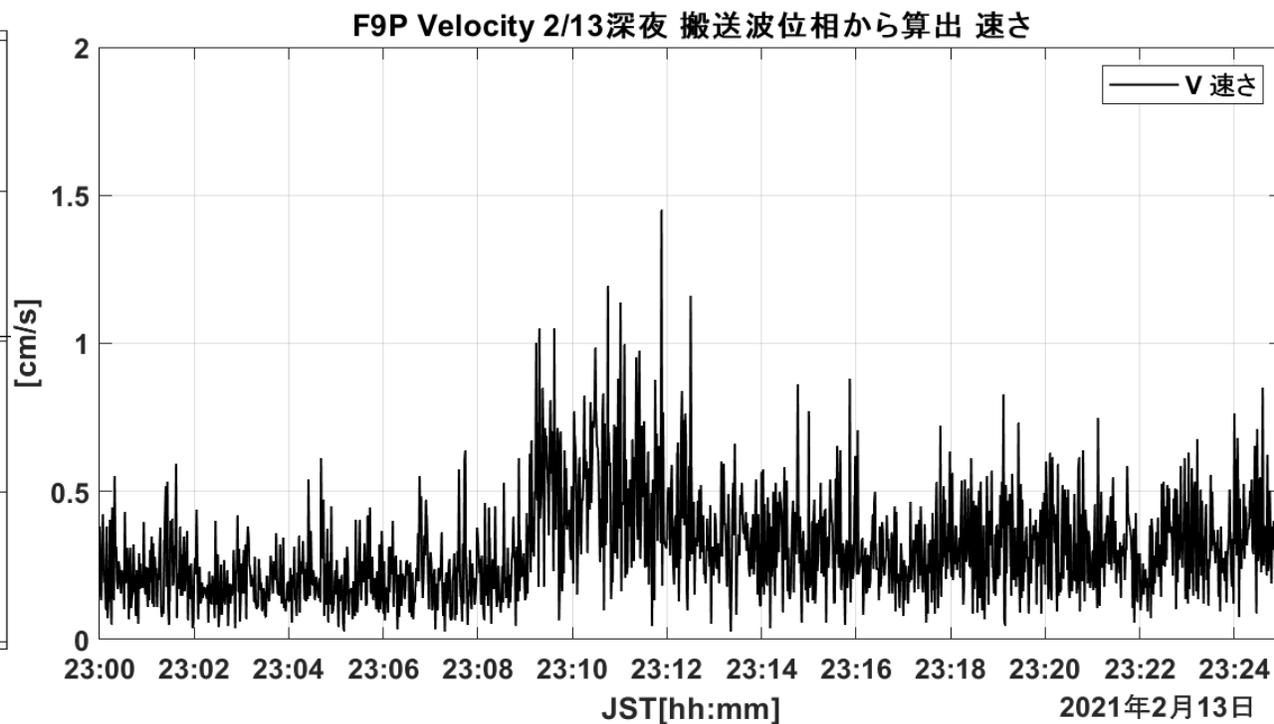
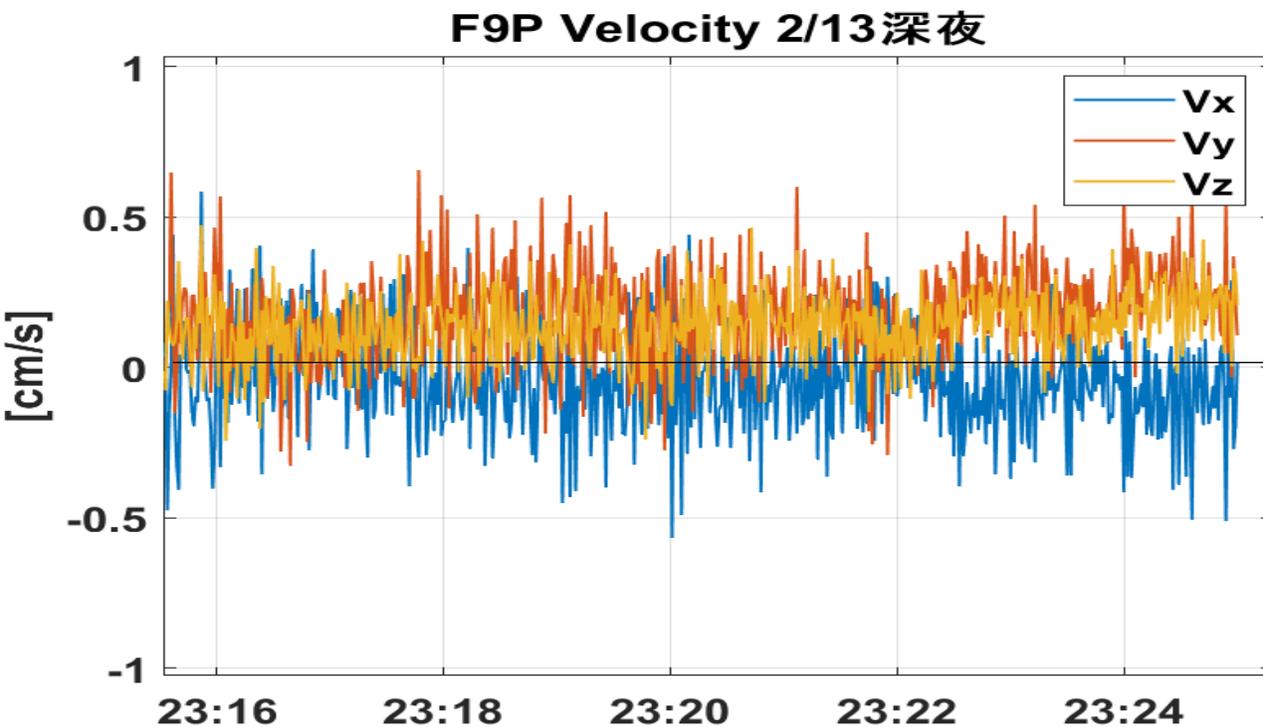
- RTK測位では1cm以内の測位精度を実現できる。
  - ただし、20km以内の距離にある基準局からの補正データが必要で、基準局も地震揺れで動いてしまう可能性がある。
  - この場合基線ベクトルが複雑に変化してしまい、1つのアンテナ(移動局側)の動きのみを捉えることは難しくなるのではないだろうか？
  - もしGNSS単独測位結果の速度から地震揺れを捉えることができれば、1つのアンテナのみの揺れを捉えることができる。



図引用: "図解 よくわかる 衛星測位と位置情報" 久保信明著 71P

# 課題点

- 搬送波位相で出した速度にはオフセットが生じるときがある。  
→速度の大きさではなく標準偏差/分散で揺れを検出した方がいいのかもしれない
- 定期的に オフセット=実測速度の平均値-真値(固定点では0) を取り除いてあげる必要があるかもしれない。





# 結果(実験2) NetR9

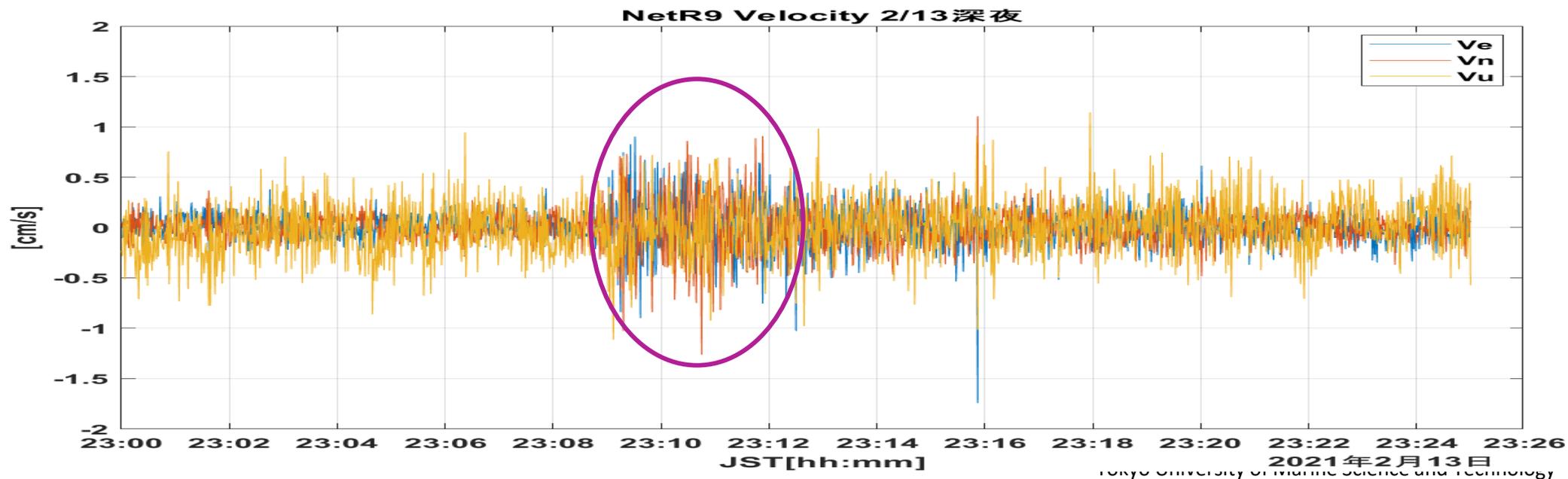
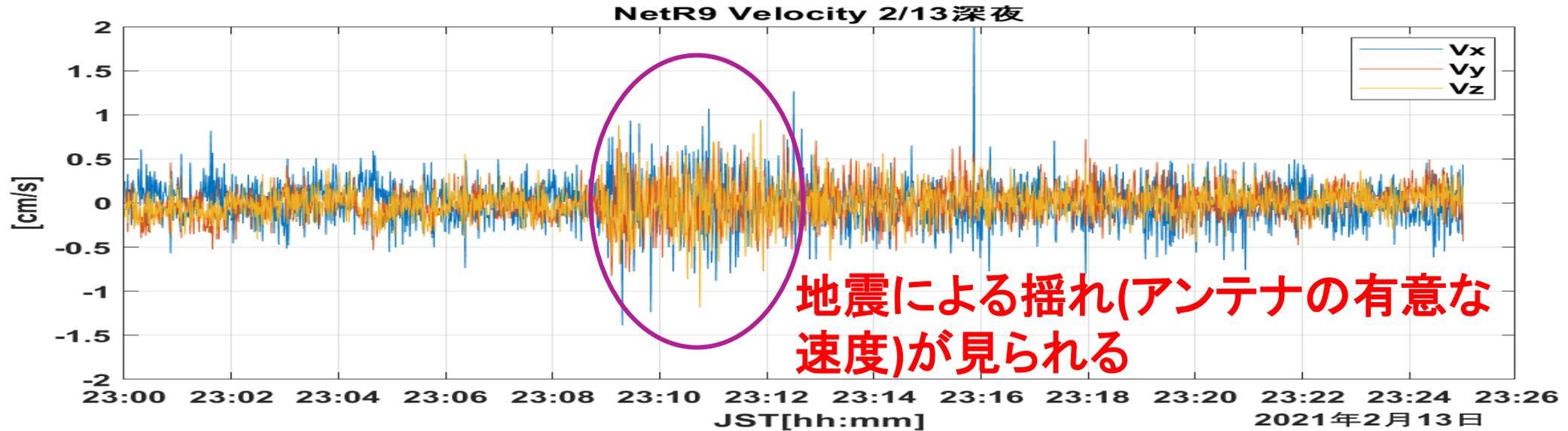


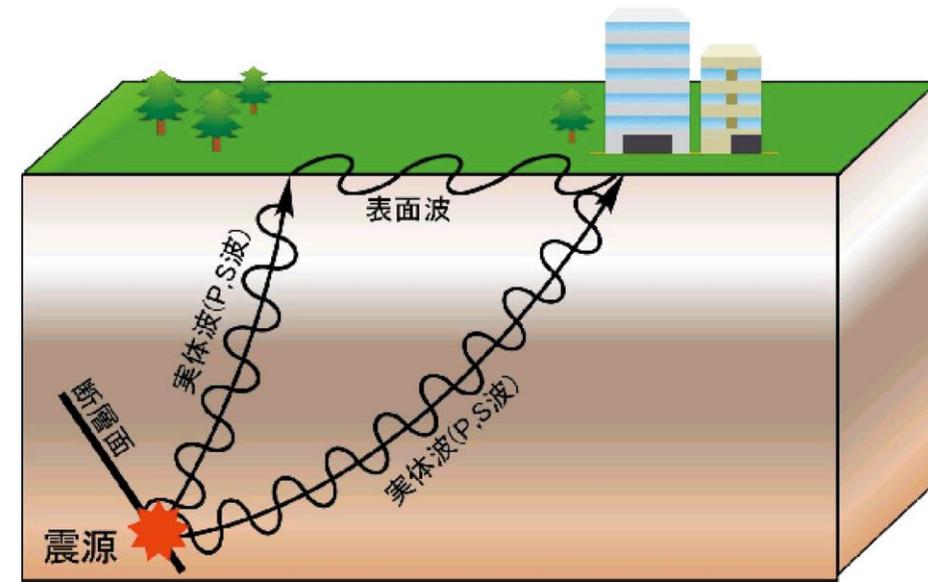


表2:地震発生時刻付近でのNetR9速度結果

		Vx オフセット 取り除き済み	Vy	Vz	Ve	Vn	Vu	V(速さ)
地震発生していない時刻 (~23:09:09, 23:13:00~)	速さ平均[cm/s]	0.193	0.144	0.131	0.114	0.111	0.221	0.5182
	速度標準偏差	0.247	0.184	0.165	0.154	0.145	0.279	0.2297
地震発生している時刻 (23:09:10~23:12:59)	速さ平均[cm/s]	0.304	0.250	0.260	0.275	0.290	0.255	0.6760
	速度標準偏差	0.392	0.305	0.333	0.342	0.366	0.326	0.2822

# 震源までの距離

- 地震波はそれぞれ右下の図に示す伝わり方をするが、震源からアンテナ位置までの大まかな直線距離を計算して地震波(P,S波)の到達時間を見積もる。
- 震源のECEF直交座標[m]は $(X, Y, Z) = (-3917238.841, 3093833.847, 3835769.569)$ 、アンテナ所在地の同座標は $(-3961929.842, 3349014.786, 3698235.140)$
- 三平方の定理より大まかな直線距離は293km



# GNSS基準点について

## 電子基準点

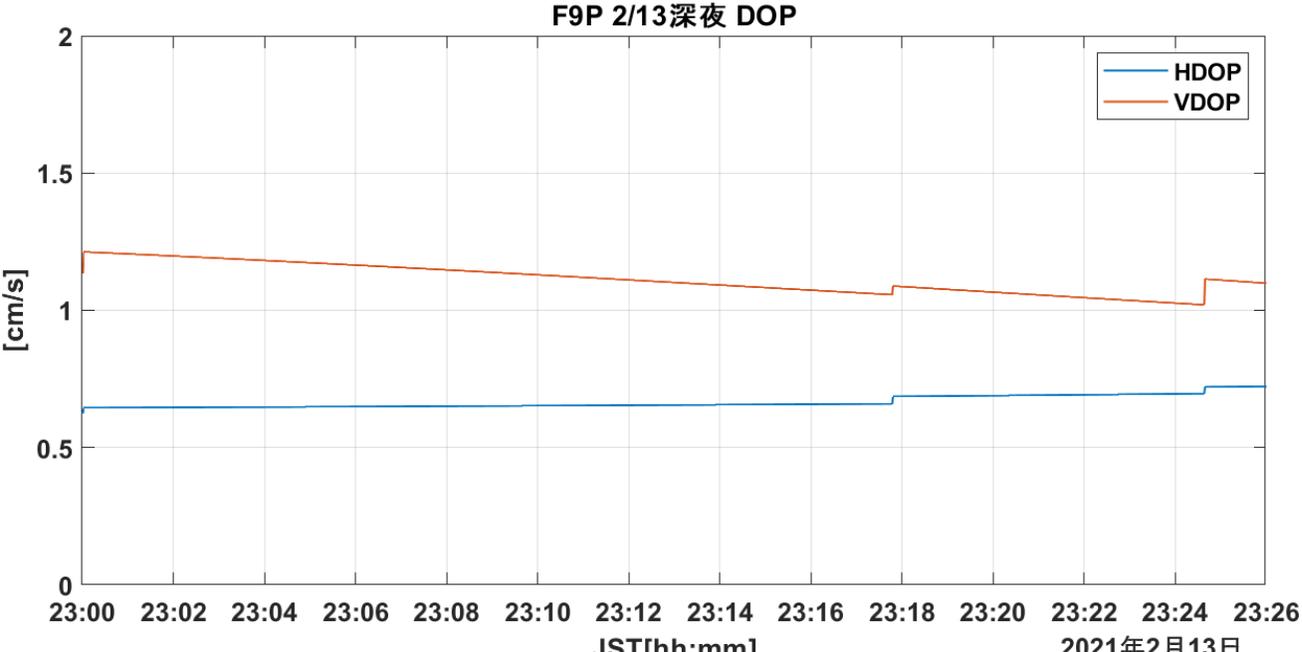
- 電子基準点とは日本国内に約1300点設置された、GNSS測位の基準点である。現在、国土地理院が運用しており、高密度・高精度な測量網の構築と広域の地殻変動の監視を目的としている。
- 電子基準点においては保守点検時を除いて連続的に測位が行われている。



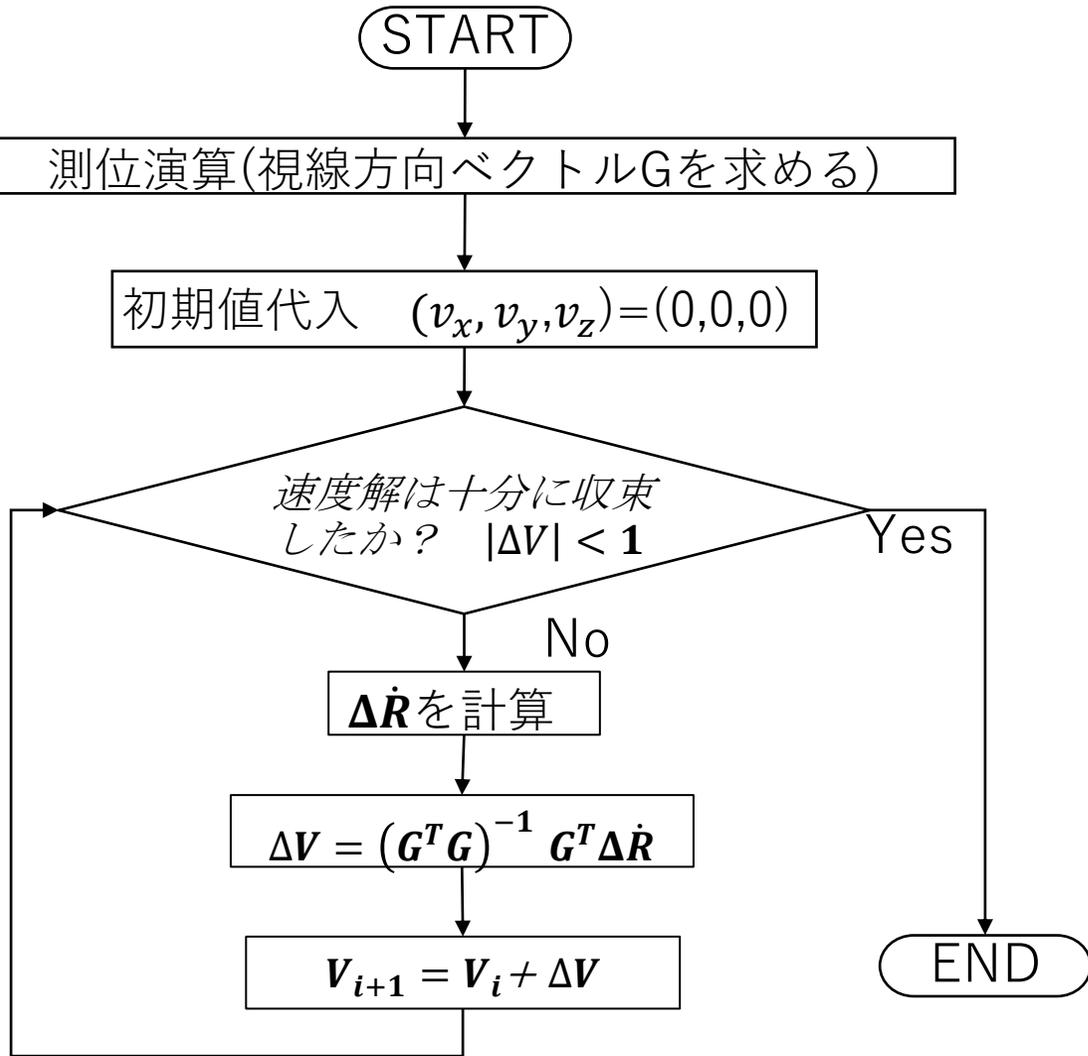
電子基準点配置

引用:国土地理院 GNSS連続観測システムGEONET 電子基準点とは  
[https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi\\_about\\_GEONET-CORS.html](https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_about_GEONET-CORS.html)

# 衛星数・DOP



# 速度推定演算(最小二乗法)のフローチャート



Cf.

$$\Delta \dot{\mathbf{R}} = \lambda \begin{pmatrix} Dpf_1 \\ Dpf_2 \\ \vdots \\ Dpf_3 \end{pmatrix}$$

$$\alpha_i = \frac{-(x_i - x_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}$$

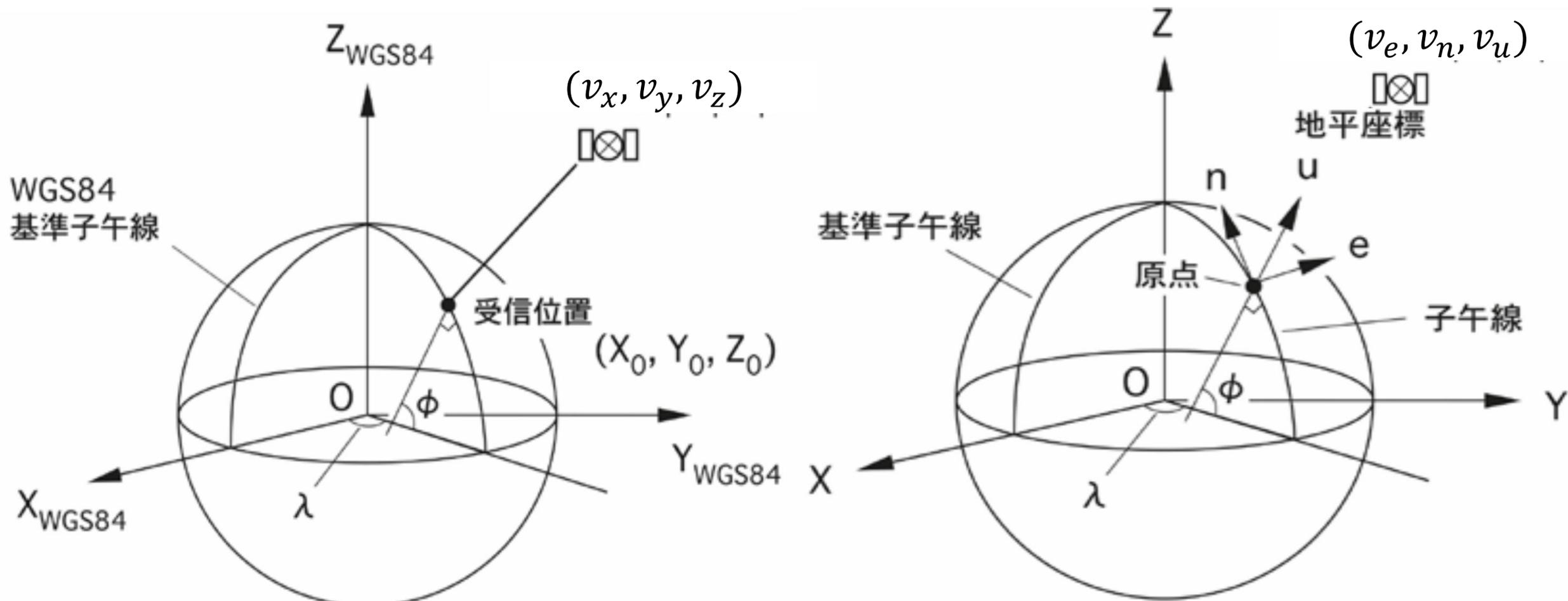
$$\beta_i = \frac{-(y_i - y_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}$$

$$\gamma_i = \frac{-(z_i - z_0)}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & \gamma_1 & 1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & \gamma_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_n & \beta_n & \gamma_n & 1 \end{pmatrix}$$

# 速度の座標系変換(ECEF系→ENU系)

- ECEF直交座標系での速度 $(v_x, v_y, v_z)$ を地平座標系での衛星位置 $(v_e, v_n, v_u)$ に座標変換をする。地平座標系は受信位置を原点とし、東方向にe,北方向にn、鉛直上方向にu軸を取る。



## 続き

- 座標変換はECEF系の速度ベクトルに回転行列をかけることで求めることができる。

$$\begin{aligned} & \bullet \begin{pmatrix} v_e \\ v_n \\ v_u \end{pmatrix} = \\ & \begin{pmatrix} \cos 90 & \sin 90 & 0 \\ -\sin 90 & \cos 90 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(90 - \varphi) & 0 & -\sin(90 - \varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90 - \varphi) & 0 & \cos(90 - \varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \\ & = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(90 - \varphi) & 0 & -\sin(90 - \varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90 - \varphi) & 0 & \cos(90 - \varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$\Phi$  (観測者の)緯度、 $\lambda$ :経度