



この資料は測地学研究室HPに掲載します
<http://goo.gl/Ly5m40>

観測地球物理学A

2015年9月6-7日

測地学

～GPS測量とデータ解析～

京都大学 理学研究科

地球惑星科学専攻 地球物理学教室

准教授 宮崎 真一

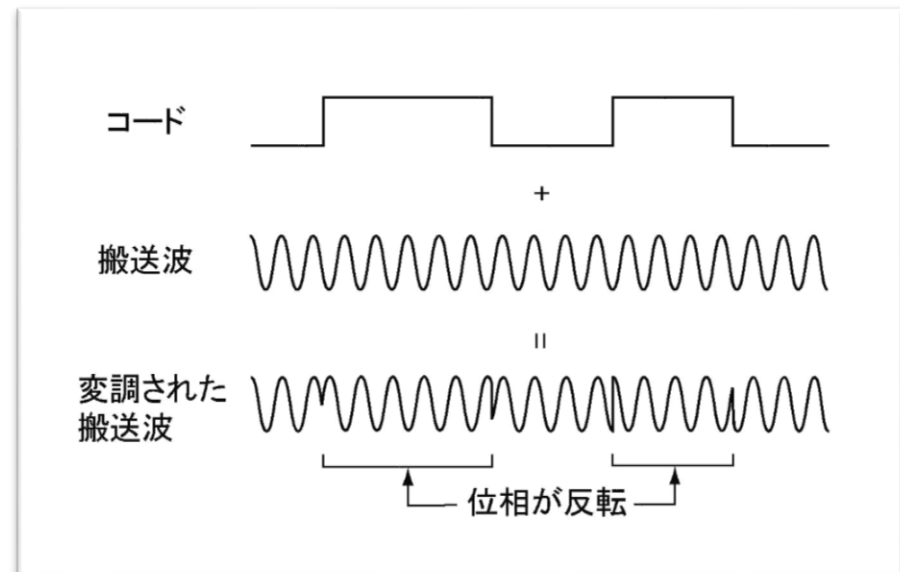
助教 風間 卓仁

今日の内容

- 導入: GPSとは?
- 実習: GPS測量 (固定点 & 移動点)
- 見学: 国土地理院連続GNSS観測点
- 解析: RTKLIBによる座標値の決定
- 発展: GPSを用いた最新の研究

GPSとは？

- Global Positioning Systemの略：アメリカによって打ち上げられた測位用人工衛星
 - GLONASS (ロシア), Galileo (EU) → 総称：GNSS
- 原子時計を搭載、2種類のマイクロ波を発射



図：homel.vsb.cz, 日本測地学会

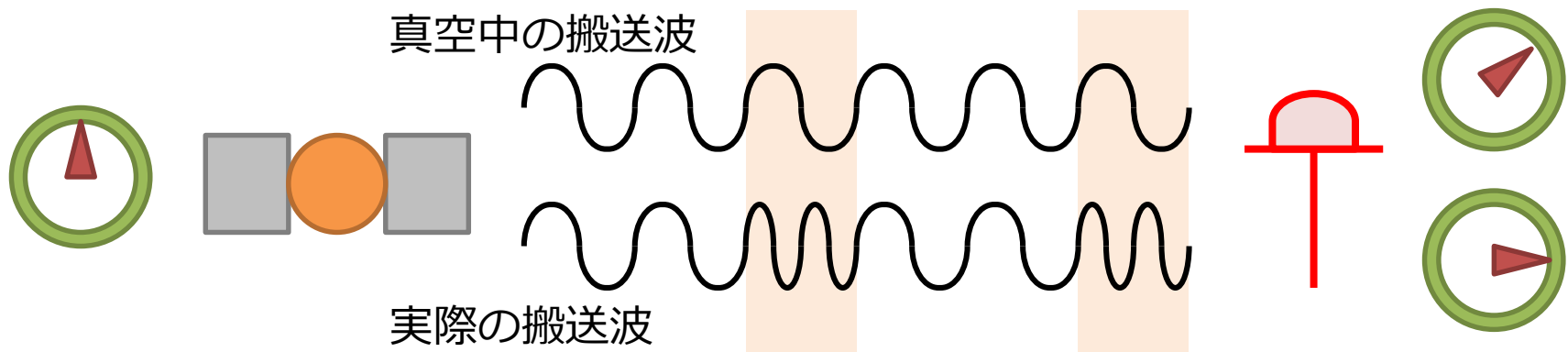
受信側のしくみ

- 地上のGPSアンテナ・受信機でマイクロ波を受信 → 送信～受信にかかった時間を測定
- ()個のGPS衛星からの情報を使って、受信側の()を決定
- 類似例：地震震源位置の決定
 - ()個の地震計で得られた初期微動継続時間の情報を使って、震源の()を決定



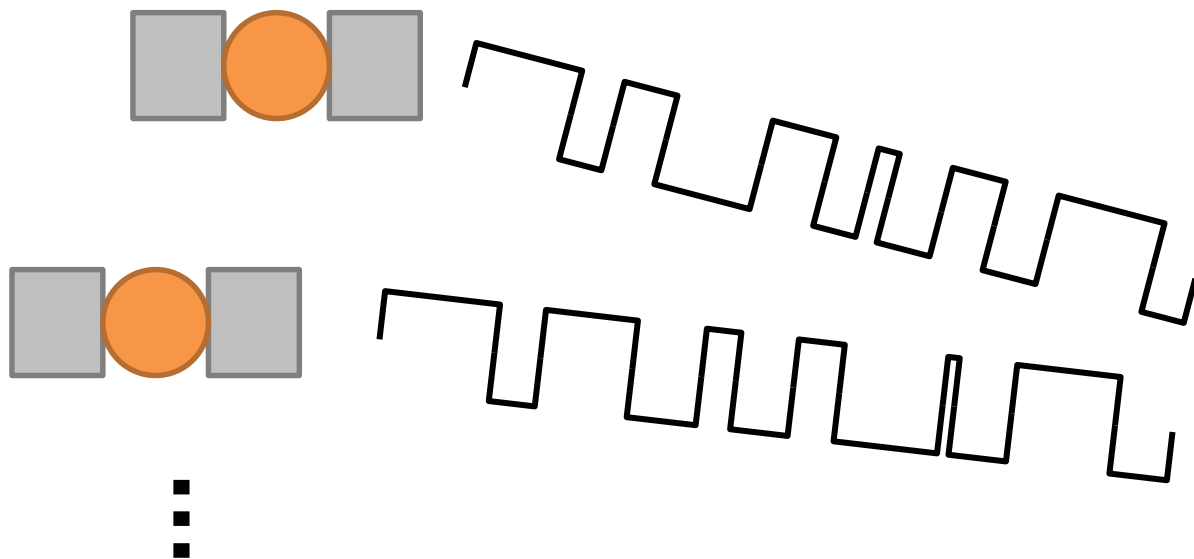
マイクロ波の伝播速度

- 299 792 458 m/s (ただし真空中)
- 電離層(60-800 km) : 電子による電波の遅延
 - 遅延量は電子密度や電波の波長に依存する
 - 2つの波長の搬送波を発射することで遅延量を補正
- 対流圏(0-11 km) : 空気・水蒸気による遅延
 - 大気構造のモデルや事後解析によって補正

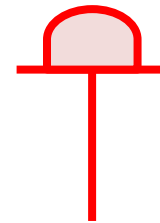


位置決定方法(1)：単独測位

- 最低()個のGPS衛星のコード(GPS衛星の位置や時刻に関する情報)を受信し、受信側の位置等を決定する
- 利点：地上観測点は1個だけでOK → カーナビ



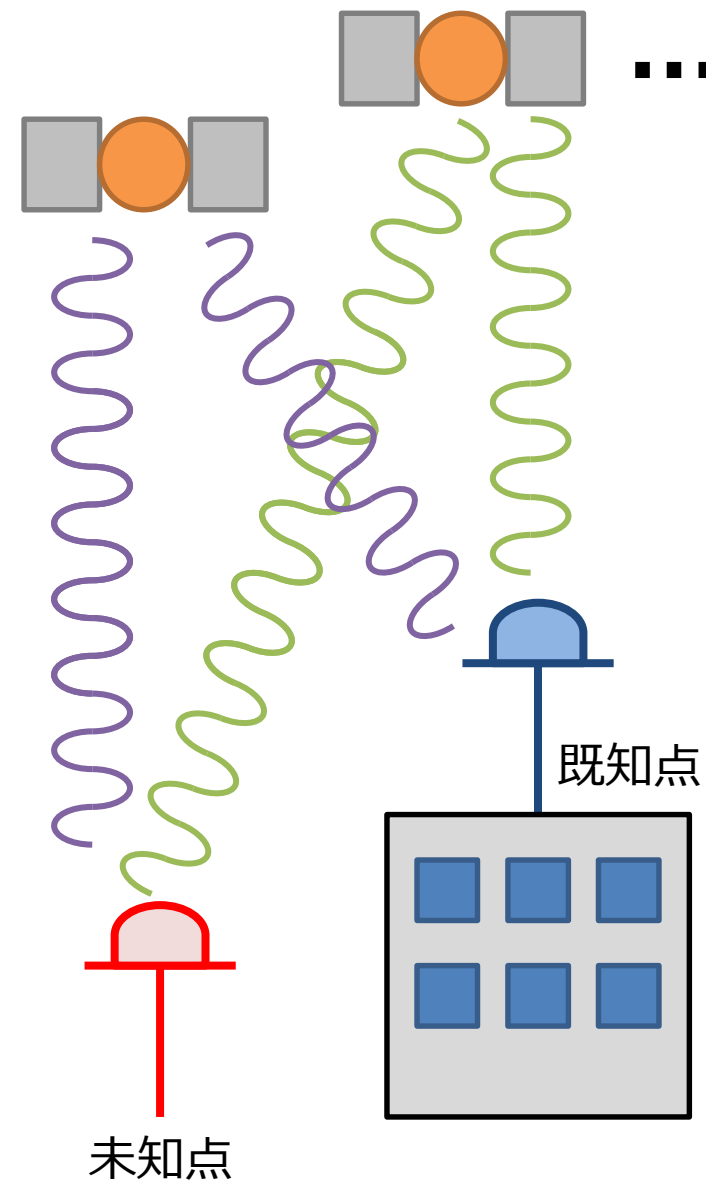
写真：Pioneer



※地図情報はGPS衛星から送信されていないことに注意！

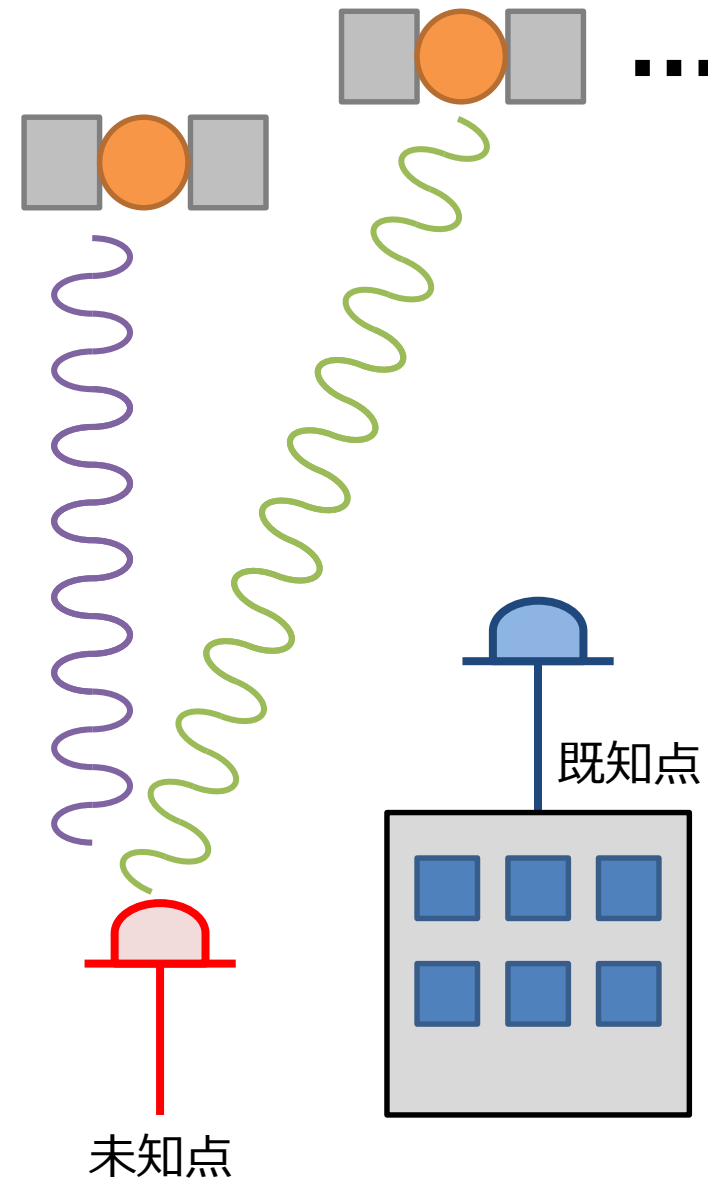
位置決定方法(2)：相対測位

- 最低()個のGPS衛星の搬送波を2観測点で受信：
片方の観測点の座標は既知
- 両観測点で得られた波の差を取ることで、既知点に対する相対的な座標を決める
- 利点：電離層・対流圏の遅延効果が出にくい、単独測位より位置決定精度が高い



位置決定方法(3)：精密単独測位

- 未知点で得られた搬送波の位相情報と、衛星の位置情報（暦）を用いて、未知点の座標を決定する
- 利点：既知点の情報なしに精密な座標値を得られる
- 欠点：精密な暦はIGSサイト等からDLが必要、最終解の発表まで半月程度かかる



今回実施するGPS測量

固定観測（, アンテナ高: cm)



移動観測（）



解析の流れ

- GPS受信機で観測データを取得
- 解析に必要なデータをIGSサイトよりDL
- 観測データ等を各PCに取り込む
- RTKLIBを用いたGPSデータ解析
 - <http://www.rtklib.com/> から誰でもDL可
 - 移動観測点の単独測位 (Sampling rate: 1 s)
 - 固定観測点の精密単独測位 (Sampling rate: 30 s)
- 得られた結果の考察

準備 (1)

- GPS生データをRINEX形式に変換する
 - ASOL2490.15o および ASOL2490.15n
 - ASOL: 観測点名
 - 249: Day of year (2015年の場合9月6日)
 - 0: 1日でいくつもファイルが作成される場合には0以外の文字が入ることがある
 - 15: 年の下2桁
 - o: 受信機で記録されたGPS電波の位相情報
 - n: GPS衛星から送られた衛星位置情報 (放送暦)

準備 (2)

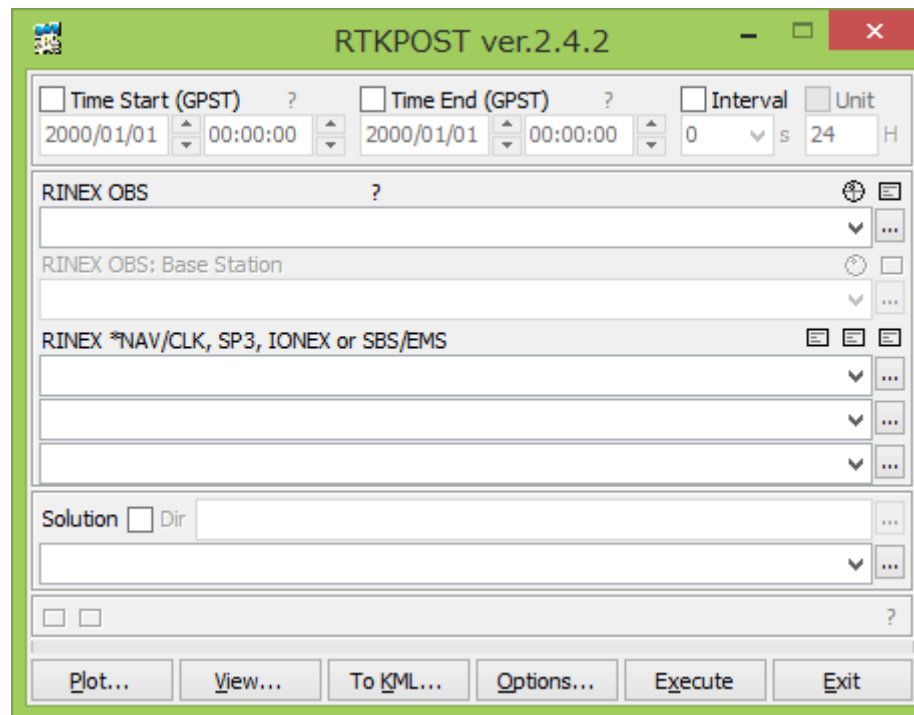
- IGSサイトから各種データをダウンロード
 - <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/product/1861/>
 - igu18610_00.sp3.Z および igu18610_00.erp.Z
 - igu: 超速報解 (igr: 速報解, igs: 最終解)
 - 1861: GPS week (2015年9月6日から始まる週)
 - 0: 日曜日は0, 月曜日は1, ..., 土曜日は6
 - _00: 超速報解の更新時 (UTC, 6時間毎)
 - .sp3: 精密暦 / .erp: 地球回転軸の情報 (最終解では1週間分が1個のファイルになっている)
 - .Z: 圧縮形式を示す拡張子

準備 (3)

- IGSからDLしたデータを解凍する
 - `> uncompress igu18610_00.sp3.Z`
 - `igu18610_00.sp3`ができる
- ここまでの作業はこちらで行います
- デスクトップ上に YYMMDD フォルダを作り、観測データ (固定点/移動点の15o, 15nファイル) とIGSデータ (精密暦, 地球回転軸の情報) をそこに入れてください

解析ソフトRTKLIBの起動

- デスクトップの  をダブルクリック
 - 実際には以下のファイルを使用している
 - C:¥Users¥ASO¥Downloads¥rtkilb_2.4.2¥rtklib_2.4.2¥bin¥rtkpost.exe



単独測位：設定 (1)

- 移動観測データ *.15o を読み込む
- 出力結果 *.pos のファイル名が自動的に設定

The screenshot shows the RTKPOST ver.2.4.2 software interface. The 'RINEX OBS' field is highlighted with a red box and contains the path: C:\Users\takujin\Desktop\Work\2015\AsoEnshu\150902\GEMA2450.15o. The 'Solution' field is highlighted with a red dashed box and contains the path: C:\Users\takujin\Desktop\Work\2015\AsoEnshu\150902\GEMA2450-single.pos. The 'Execute' button is visible at the bottom.

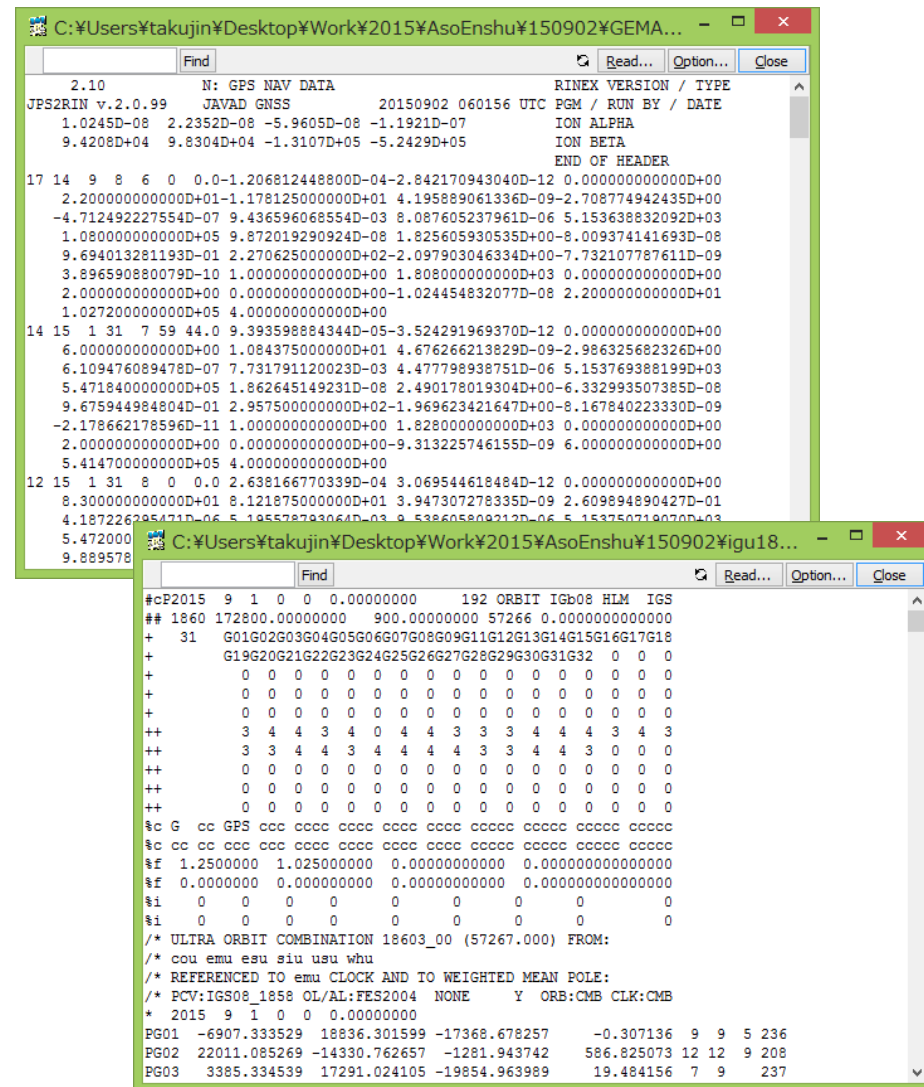
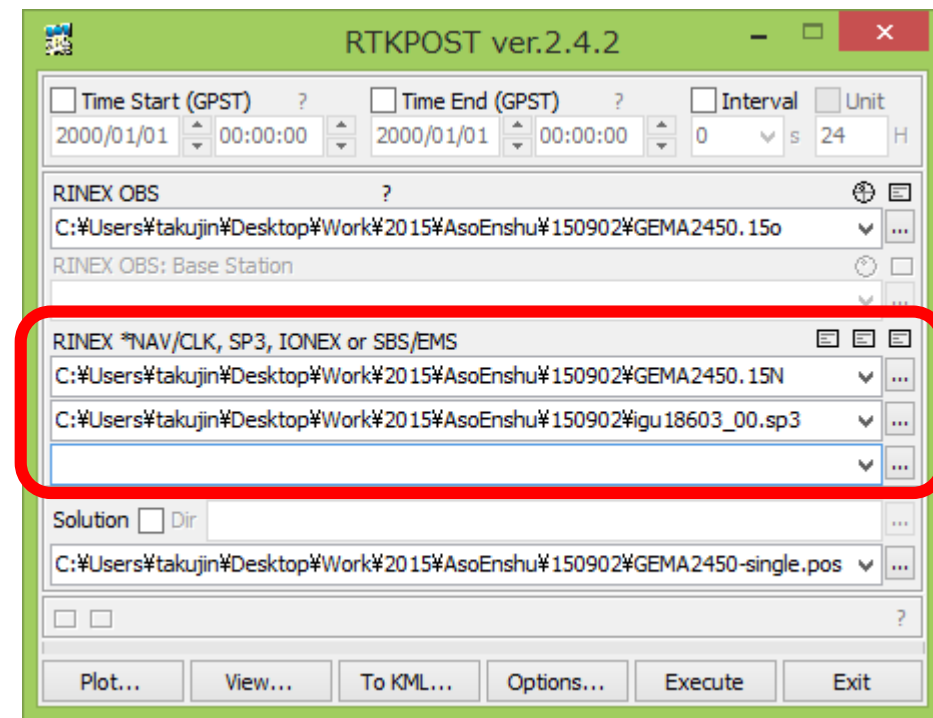
The screenshot shows a text file containing RINEX observation data. The data is organized into several sections: RINEX VERSION / TYPE, OBSERVER / AGENCY, MARKER NAME, ANTENNA, WAVELENGTH FACT, INTERVAL, TIME OF FIRST OBS, TIME OF LAST OBS, # OF SATELLITES, and PRN / # OF OBS. The data is as follows:

PRN	TYPE	ANTENNA	WAVELENGTH FACT	INTERVAL	TIME OF FIRST OBS	TIME OF LAST OBS	# OF SATELLITES	PRN	# OF OBS
2.11	M (MIXED)								
20150902	060154	UTC							
1	1								
14	C1	P1	L1	D1	S1	C2	P2	L2	D2
	S2	C5	L5	D5	S5				
1,000									
2015	9	2	2	55	48.00000000	GPS			
2015	9	2	5	15	21.00000000	GPS			
15									
G 1	7887	7792	7887	7887	7887	7847	7792	7792	7792
	7791	1445	7356	7356	1445				
G 3	7666	7522	7666	7666					
	7521	7419	7598	7598					
G 4	6694	6328	6694	6694					
	6326	0	0	0					
G 6	2185	2034	2185	2185					
	2034	2140	2140	2140					
G 7	3815	3554	3815	3815					
	3552	0	0	0					
G 8	6381	5988	6381	6381					

The screenshot shows a Skyplot window displaying satellite tracks. The plot is a circular representation of the sky with a grid of azimuth and elevation. The tracks are labeled with satellite IDs: G17, G30, G07, G06, G04, G01, G03, G28, G19, G08, G27, G32, G23. The plot shows the movement of these satellites over time, with tracks starting from the horizon and moving towards the zenith.

単独測位：設定 (2)

■ 暦データ *.15n, *.sp3 を読み込む



単独測位：設定 (3)

■ Optionsの設定：まずはデフォルトのままです

Options

Setting1 Setting2 Output Stats Positions Files Misc

Positioning Mode: Single

Frequencies / Filter Type: L1+2 Forward

Elevation Mask (°) / SNR Mask (dBHz): 15 ...

Rec Dynamics / Earth Tides Correction: OFF OFF

Ionosphere Correction: Broadcast

Troposphere Correction: Saastamoinen

Satellite Ephemeris/Clock: Broadcast

Sat PCV Rec PCV PhWindup Reject Ed RAIM FDE

Excluded Satellites (+PRN: Included):

GPS GLO Galileo QZSS SBAS BeiDou

Load... Save... OK Cancel

Options

Setting1 Setting2 Output Stats Positions Files Misc

Integer Ambiguity Res (GPS/GLO): Continuo ON

Min Ratio to Fix Ambiguity: 3

Min Confidence / Max FCB to Fix Amb: 0.9999 0.25

Min Lock / Elevation (°) to Fix Amb: 0 0

Min Fix / Elevation (°) to Hold Amb: 10 0

Outage to Reset Amb/Slip Thres (m): 5 0.050

Max Age of Diff (s) / Sync Solution: 30.0 ON

Reject Threshold of GDOP/Innov (m): 30.0 30.0

Number of Filter Iteration: 1

Baseline Length Constraint (m): 0.000 0.000

Load... Save... OK Cancel

単独測位：設定 (4)

■ Optionsの設定：まずはデフォルトのままです

Options

Setting1 Setting2 Output Stats Positions Files Misc

Solution Format: Lat/Lon/Height

Output Header/Processing Options: ON ON

Time Format / # of Decimals: hh:mm:ss GPST 3

Latitude / Longitude Format: ddd.dddddd

Field Separator:

Datum/Height: WGS84 Ellipsoidal

Geoid Model: Internal

Solution for Static Mode: All

NMEA Interval (s) RMC/GGA, GSA/GSV: 0 0

Output Solution Status / Debug Trace: OFF OFF

Load... Save... OK Cancel

Options

Setting1 Setting2 Output Stats Positions Files Misc

Measurement Errors (1-sigma)

Code/Carrier-Phase Error Ratio L1/L2	100.0	100.0
Carrier-Phase Error a+b/sinE1 (m)	0.003	0.003
Carrier-Phase Error/Baseline (m/10km)	0.000	
Doppler Frequency (Hz)	10.000	

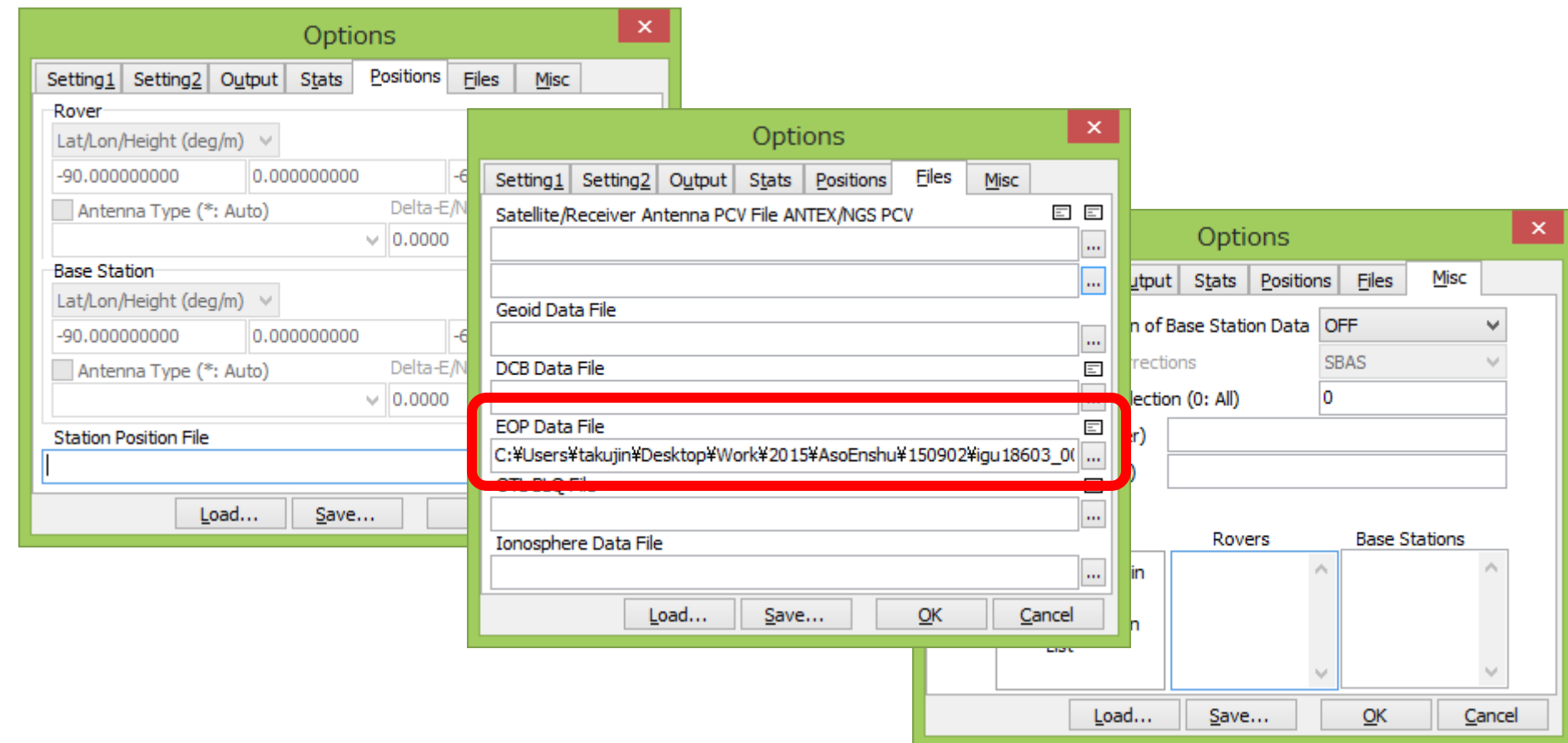
Process Noises (1-sigma/sqrt(s))

Receiver Accel Horiz/Vertical (m/s ²)	1.00E+01	1.00E+01
Carrier-Phase Bias (cycle)	1.00E-04	
Vertical Ionospheric Delay (m/10km)	1.00E-03	
Zenith Tropospheric Delay (m)	1.00E-04	
Satellite Clock Stability (s/s)	5.00E-12	

Load... Save... OK Cancel

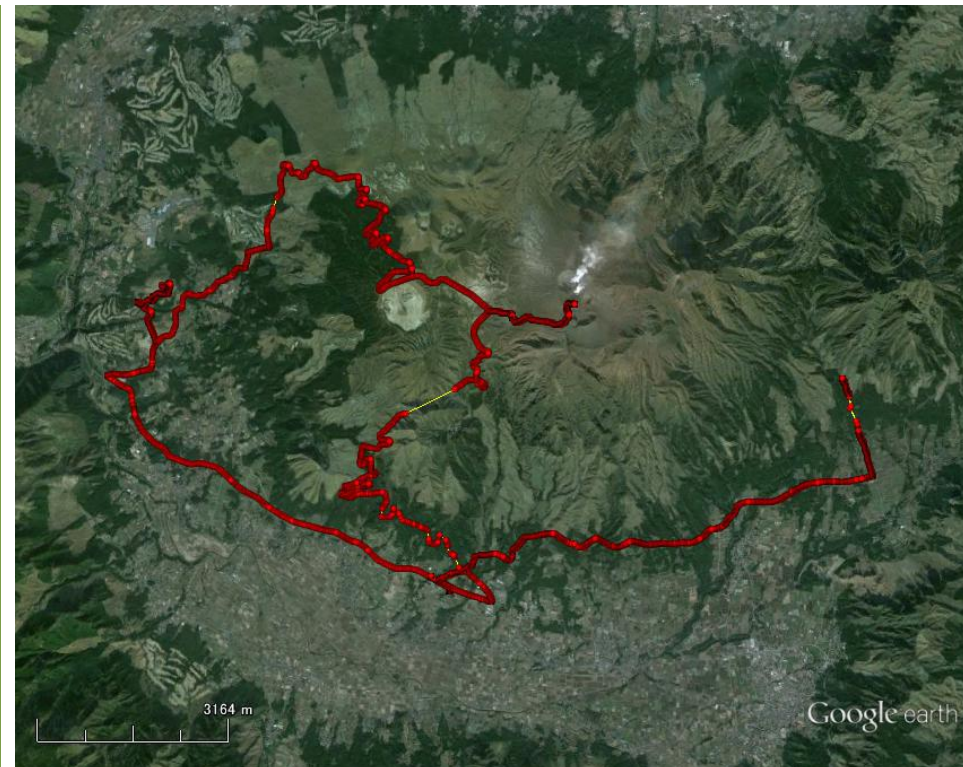
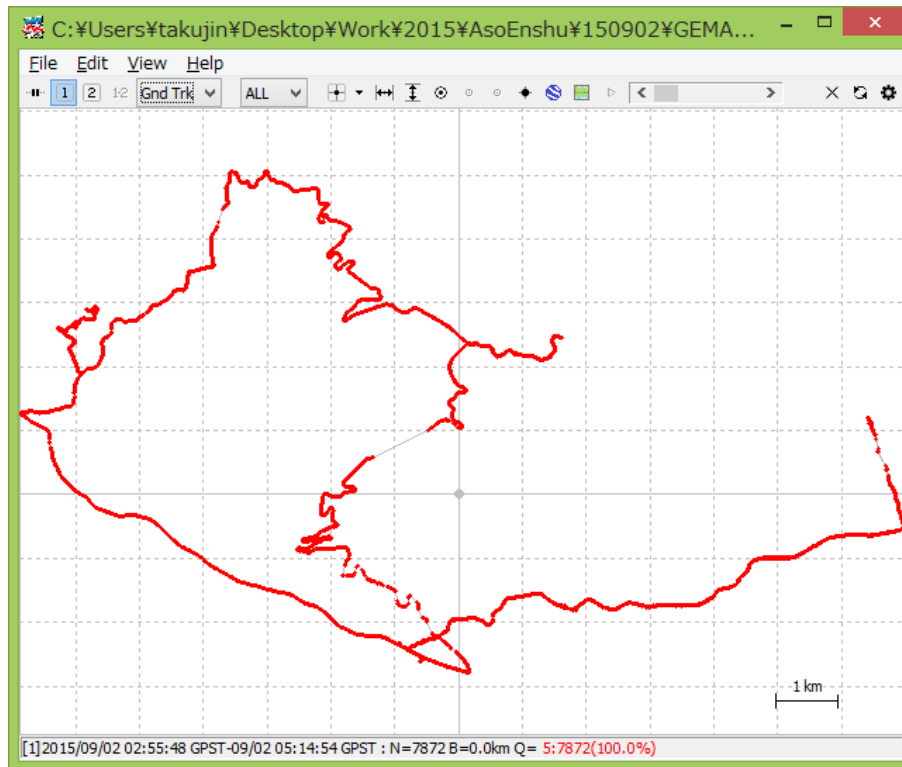
単独測位：設定 (5)

- Options: ほとんどはデフォルトのまま
- EOP data file: *.erp を読み込む



単独測位：実行

- Execute → *.pos が出力される
- View で *.pos を表示、Plot でグラフ表示
- To KML で Google Earth 互換出力

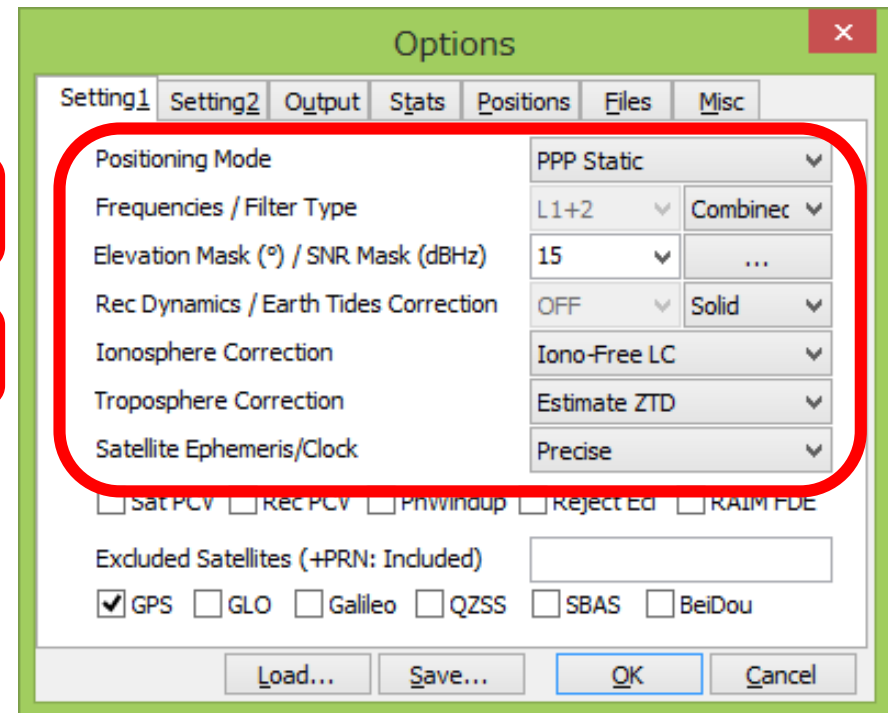
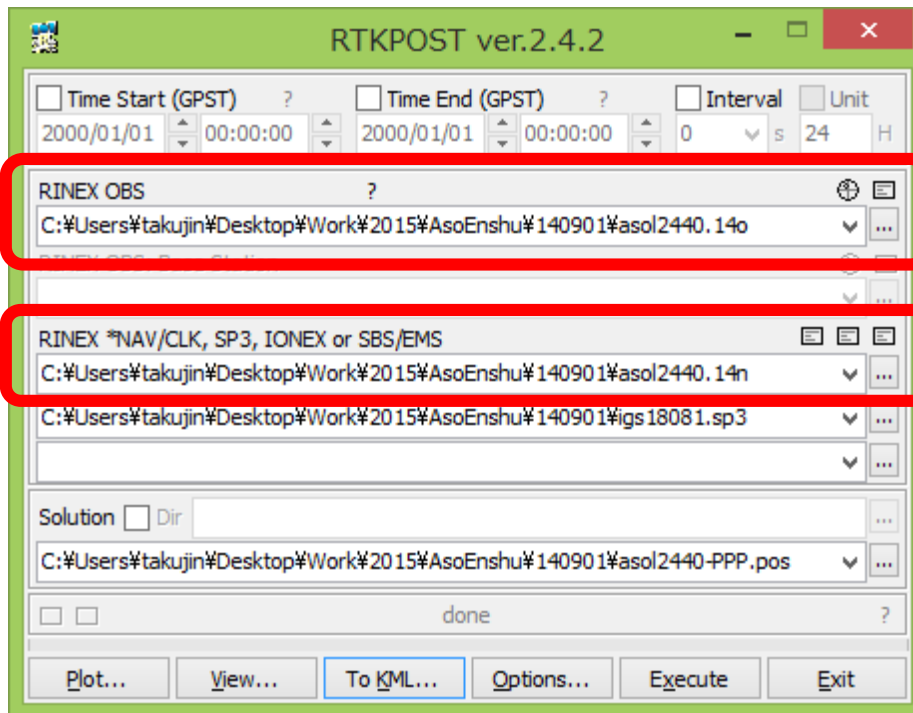


単独測位：質問

- Google Earth で単独測位の結果を表示させ、GPSの軌跡が道路と一致しているか確認する
→ 一致していない部分があれば、それはどんな理由によるものか？
- 軌跡がところどころ途切れている箇所があるが、それはどんな理由によるものか？

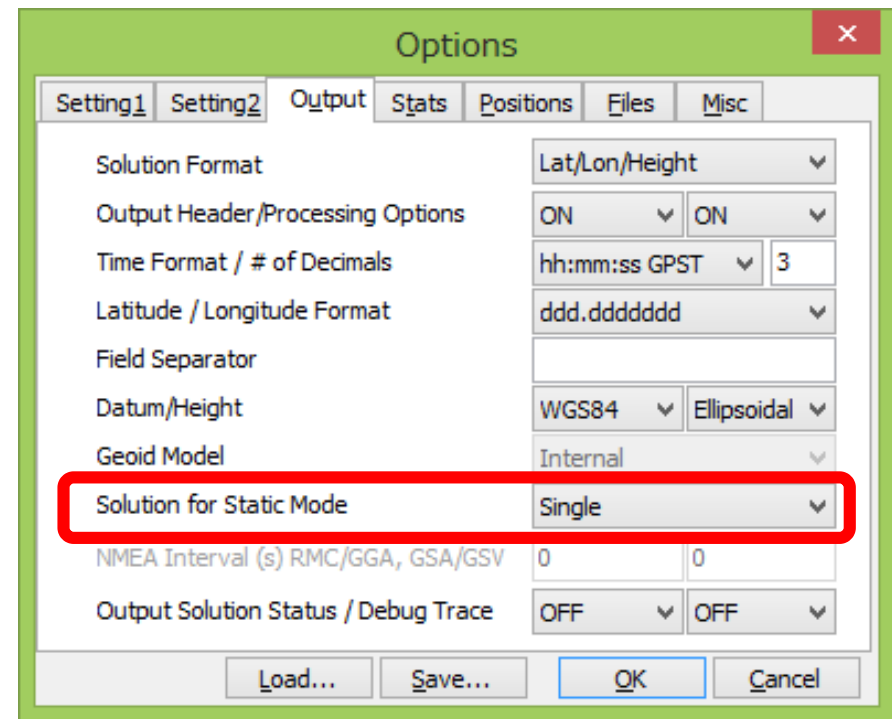
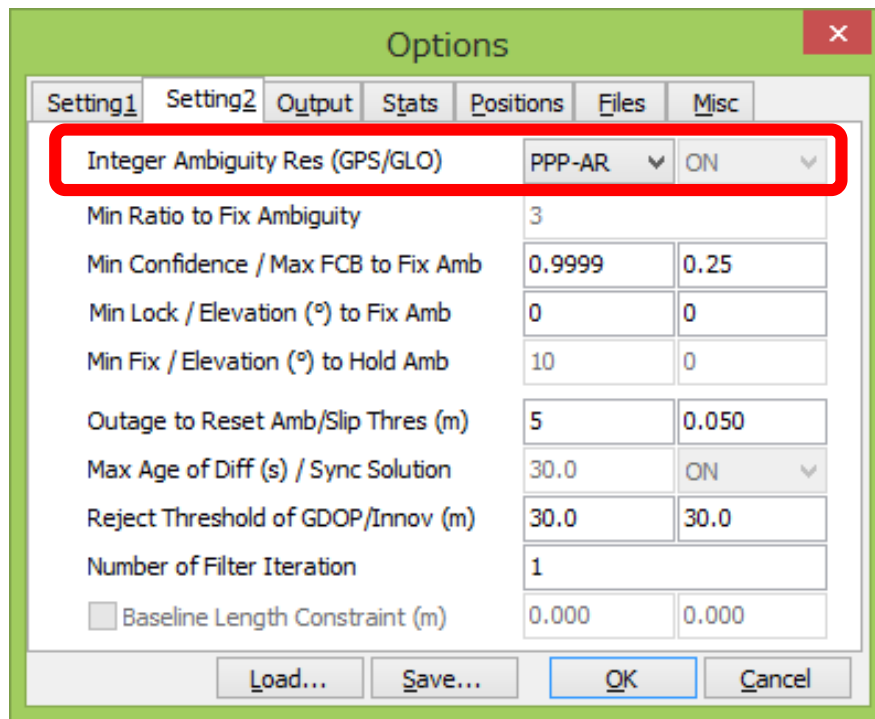
精密単独測位：設定 (1)

- 以下の項目を変更する
- *.sp3 は変更の必要なし
- *.pos のファイル名が自動変更されたのを確認



精密単独測位：設定 (2)

■以下の項目を変更する



精密単独測位：設定 (3)

■以下の項目を変更する

Options

Setting1 Setting2 Output Stats Positions Files Misc

Measurement Errors (1-sigma)

Code/Carrier-Phase Error Ratio L1/L2	100.0	100.0
Carrier-Phase Error a+b/sinE1 (m)	0.003	0.003
Carrier-Phase Error/Baseline (m/10km)	0.000	
Doppler Frequency (Hz)	10.000	

Process Noises (1-sigma/sqrt(s))

Receiver Accel Horiz/Vertical (m/s ²)	1.00E+01	1.00E+01
Carrier-Phase Bias (cycle)	1.00E-04	
Vertical Ionospheric Delay (m/10km)	1.00E-03	
Zenith Tropospheric Delay (m)	1.00E-04	
Satellite Clock Stability (s/s)	5.00E-12	

Load... Save... OK Cancel

Options

Setting1 Setting2 Output Stats Positions Files Misc

Rover

Lat/Lon/Height (deg/m) ...

90.000000000 0.000000000 -6335367.6285

Antenna Type (*: Auto) Delta-E/N/U (m)

0.0000 0.0000 0.9950

Base Station

Lat/Lon/Height (deg/m) ...

90.000000000 0.000000000 -6335367.6285

Antenna Type (*: Auto) Delta-E/N/U (m)

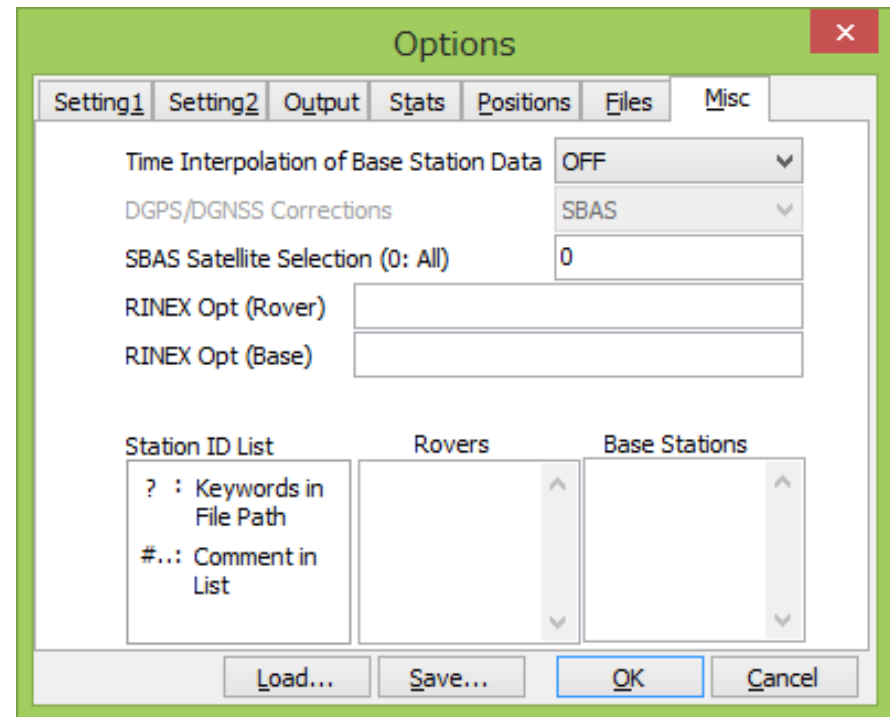
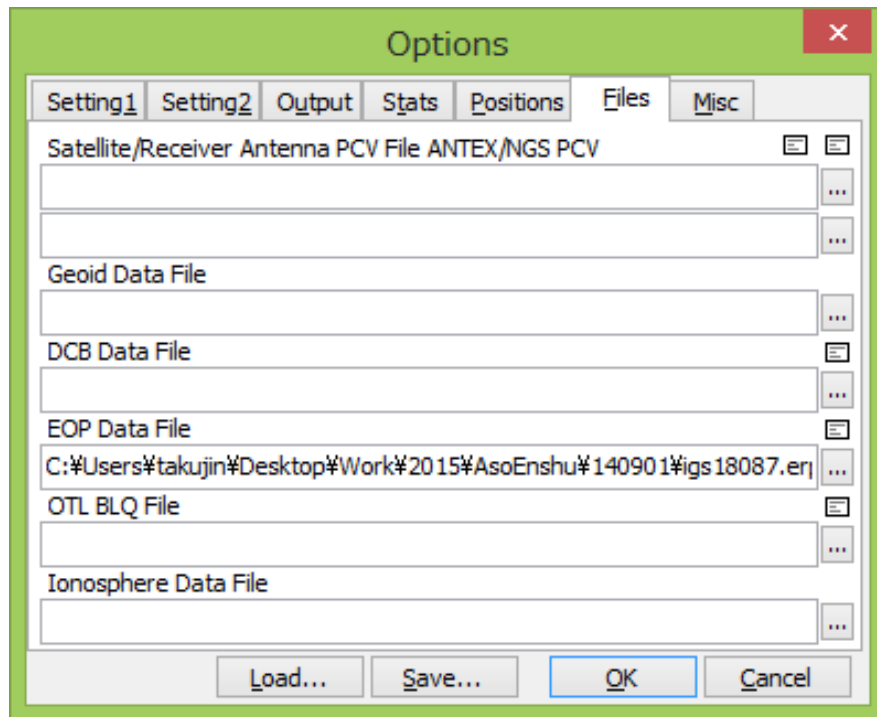
0.0000 0.0000 0.0000

Station Position File ...

Load... Save... OK Cancel

精密単独測位：設定 (4)

- ここは特に変更の必要なし
- *.erp も先ほど設定したファイルでOK



精密単独測位：実行

- Execute → *.pos が出力される
- View で *.pos を表示
- To KML で Google Earth 互換出力

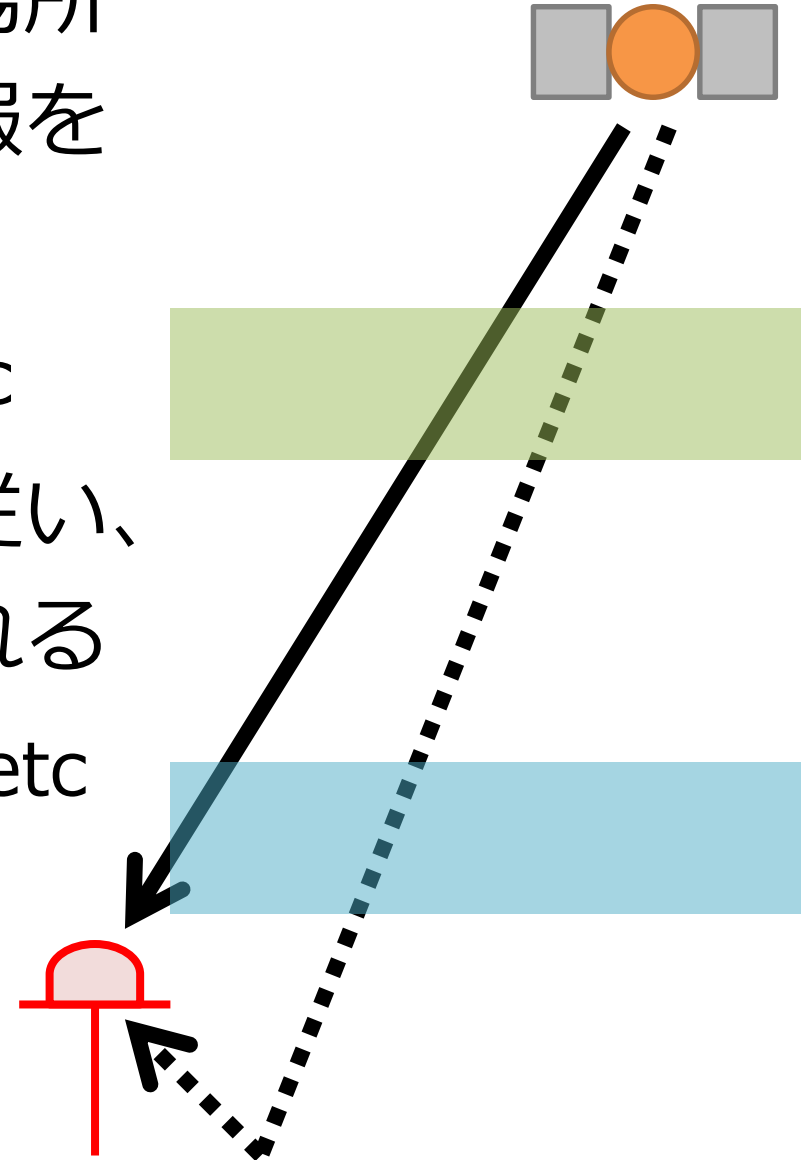


精密単独測位：質問

- Options > Output > Solution for Static Mode の設定を Single から All に変更し、30 s 毎の測位解を出力させる
- 測位解は時間的に安定しているか？安定していないのであれば、それはなぜか？
- 時間があれば設定値をいろいろ変更して測位を実行し、安定した解を見つける。その後、過去の座標値と比較し、地殻変動量を調べる。

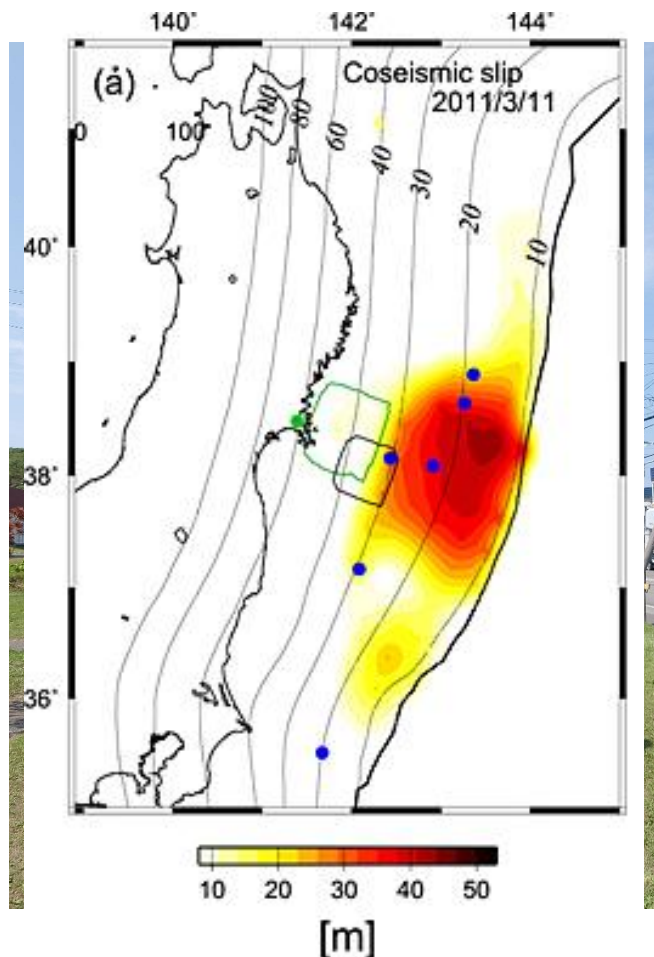
GPSを使うことのメリット

- アンテナ・受信機の設置場所に
従い、地球の様々な情報を
得られる
 - 大地の動き、海の流れ、 etc
- マイクロ波の伝搬経路に従い、
地球の様々な情報を得られる
 - 電離層、対流圏、地表面、 etc



GPSで地震時の地殻変動を見る

- 2011年東北地震時に得られた地面の動き（宮崎准教授ほか） → 断層すべり分布の解明へ



GPSで地震後の余効変動を見る

- 東北地震後の海底の基準点の動き（海上保安庁） → 余効変動の原因として、地震後断層すべり(afterslip)・粘弾性変形の解明へ

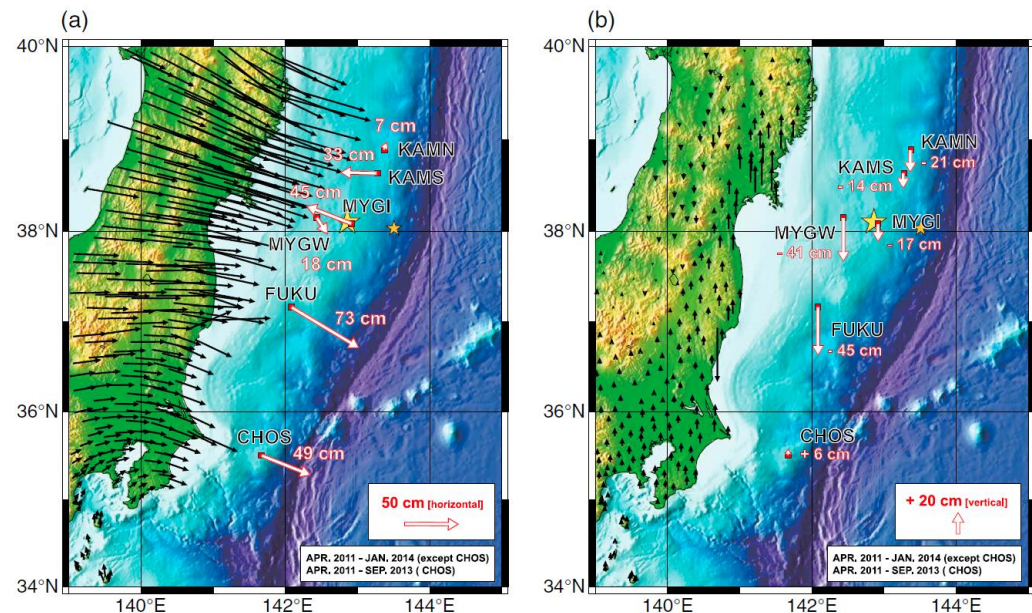
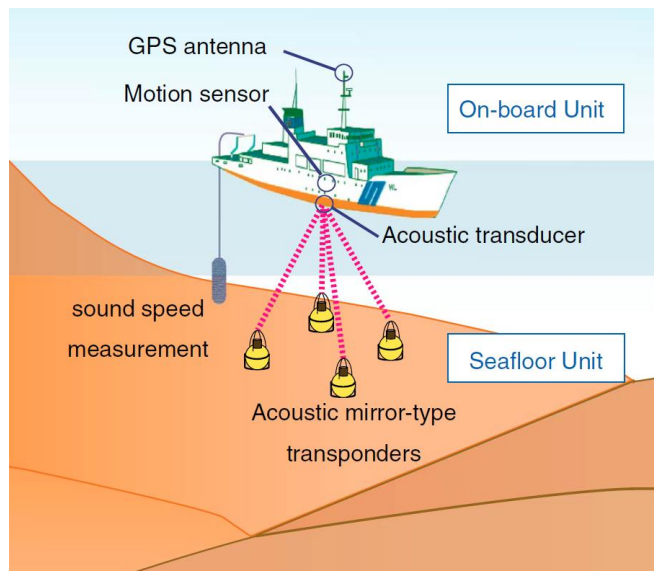
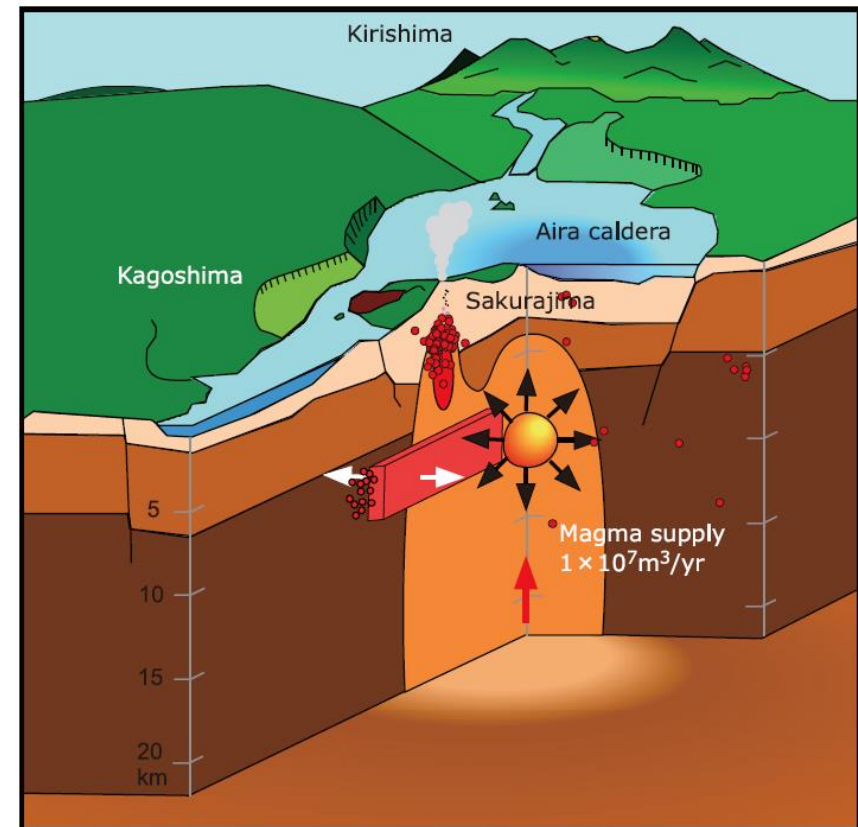
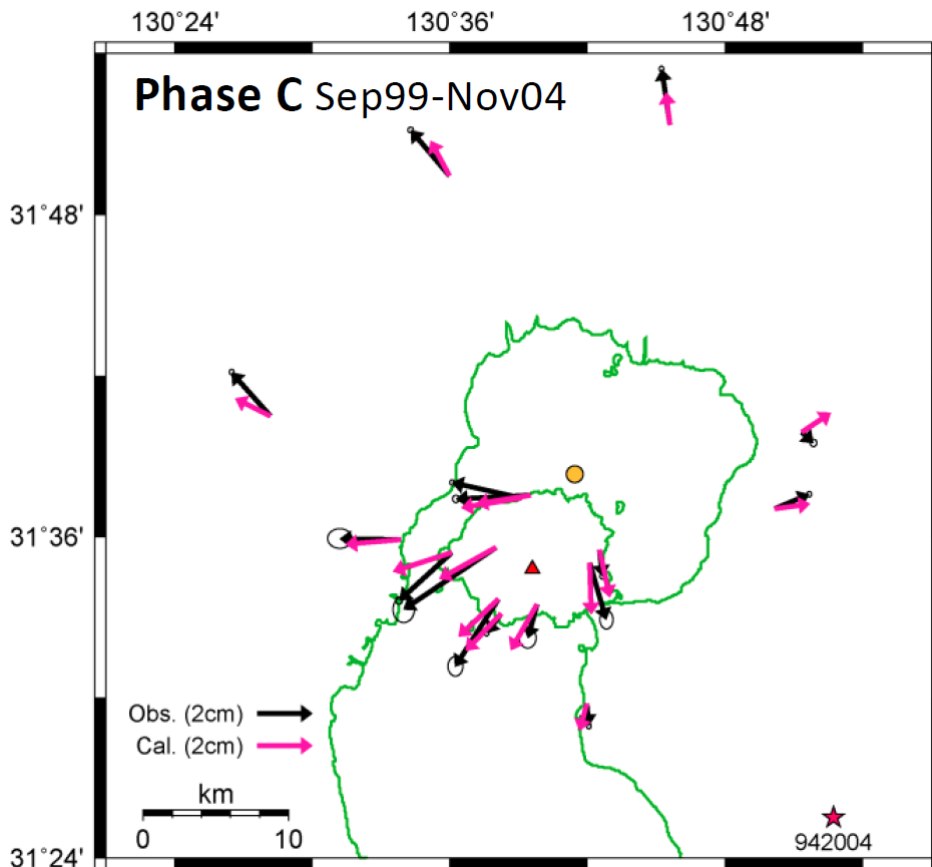


Figure 4. Cumulative displacements in the (a) horizontal and (b) vertical components after the 2011 Tohoku-Oki earthquake at the seafloor sites for the period from April 2011 to January 2014 (to September 2013 for CHOS) relative to the North American plate. The red arrows indicate the horizontal and vertical displacements at the seafloor sites. The black arrows indicate the cumulative displacements at the GEONET stations [Ozawa *et al.*, 2012]. The other symbols are the same as Figure 2.

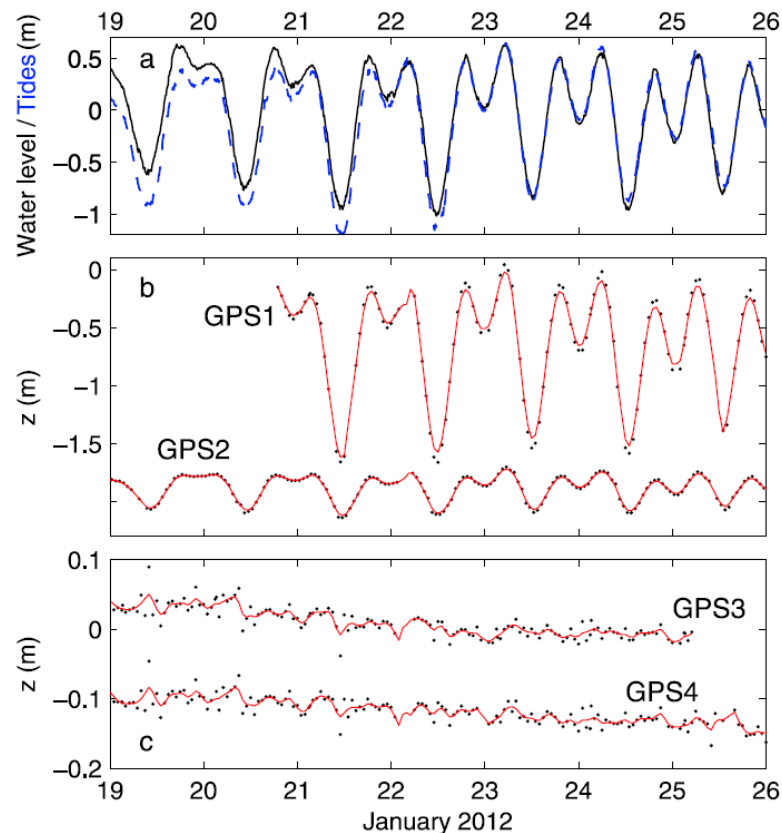
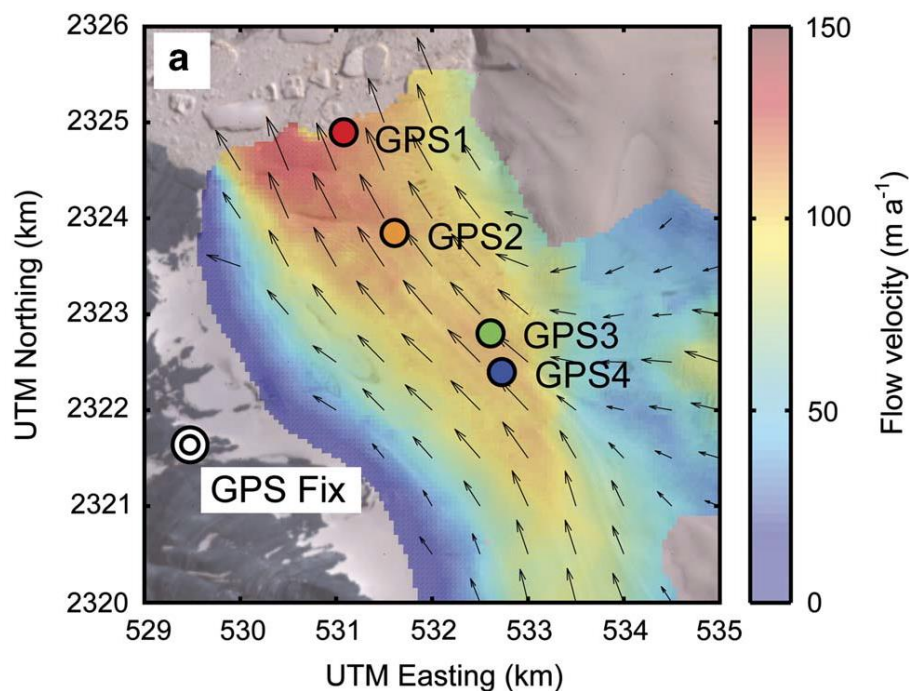
GPSで火山を見る

- 桜島周辺の長期的な地面の動き（京都大学桜島火山観測所） → 将来の火山活動予測



GPSで氷河を見る

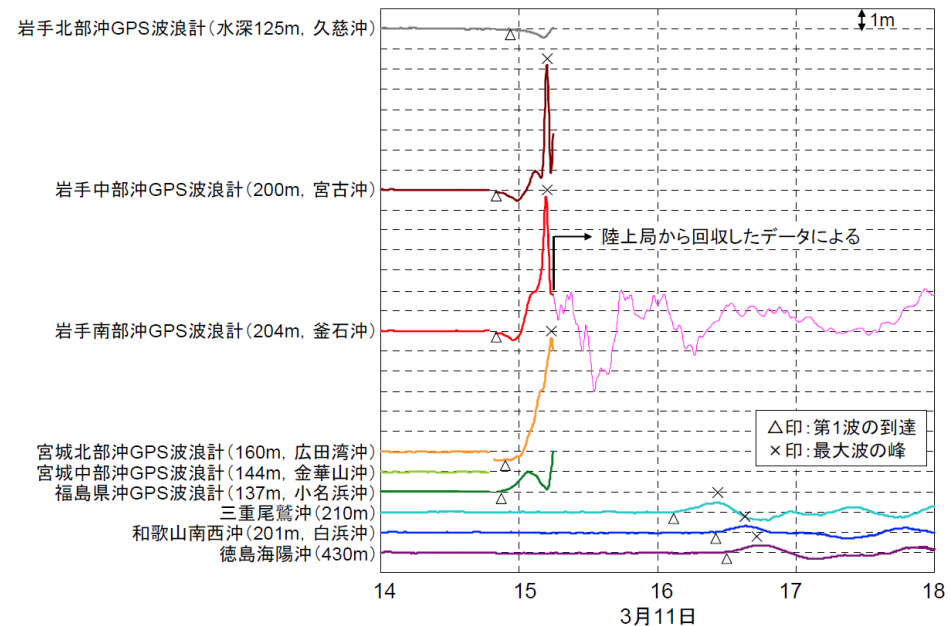
■ 東南極・ラングホブデ氷河の動き（日本南極地域観測隊）→ 氷河流動/融解プロセスの解明へ



GPSで海を見る

■ GPS波浪計という海洋ブイを設置（国土交通省） → 波浪や津波のリアルタイム監視

■ 2011年3月11日東北地震(14:46発生)の津波警報更新(15:14)に利用された



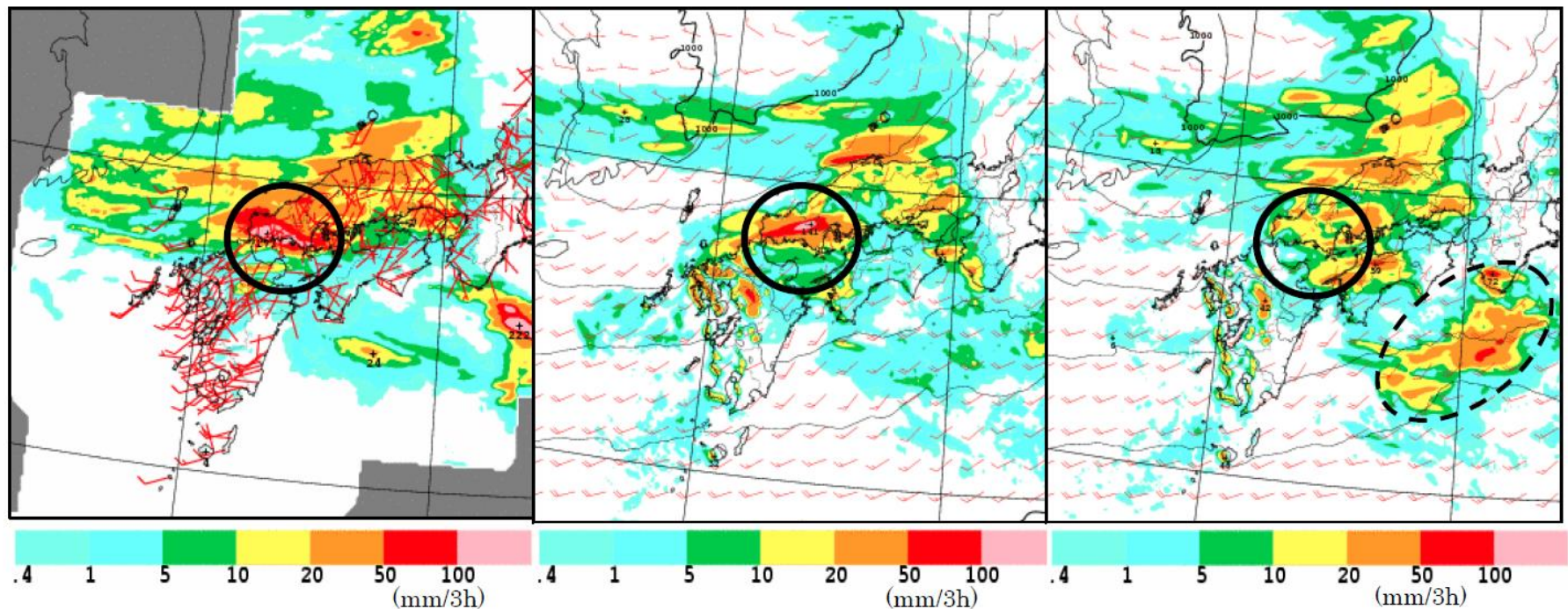
GPS電波で対流圏を見る

- 国土地理院の電子基準点のデータを使い、大気中の電波遅延量から水蒸気量(可降水量)を計算(気象庁) → 気象予報モデルの改善へ

(a) 観測された3時間降水量

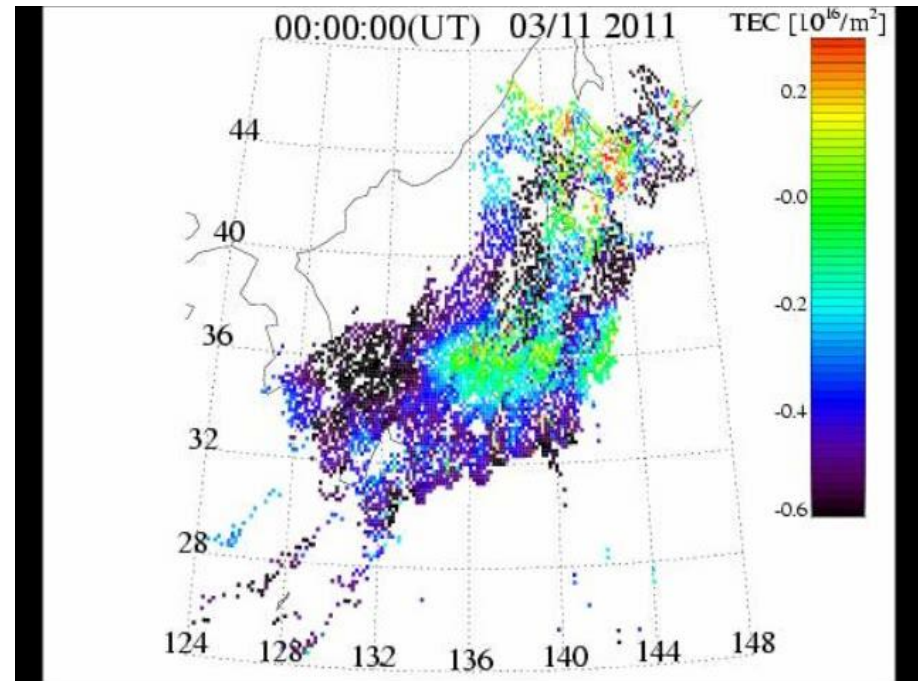
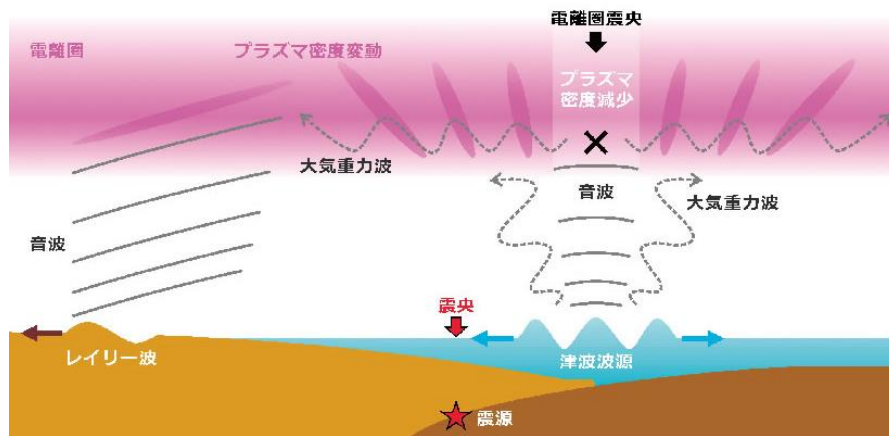
(b) GPSの水蒸気データを取入れた予報

(c) GPSの水蒸気データを取入れていない予報



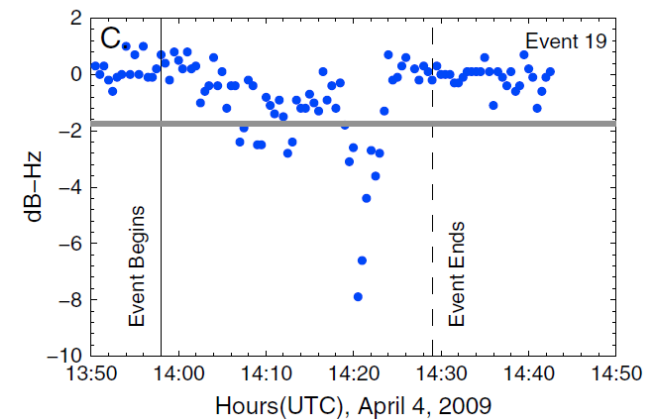
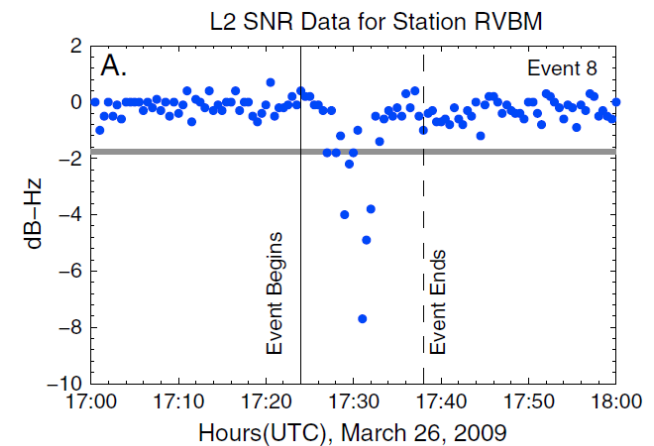
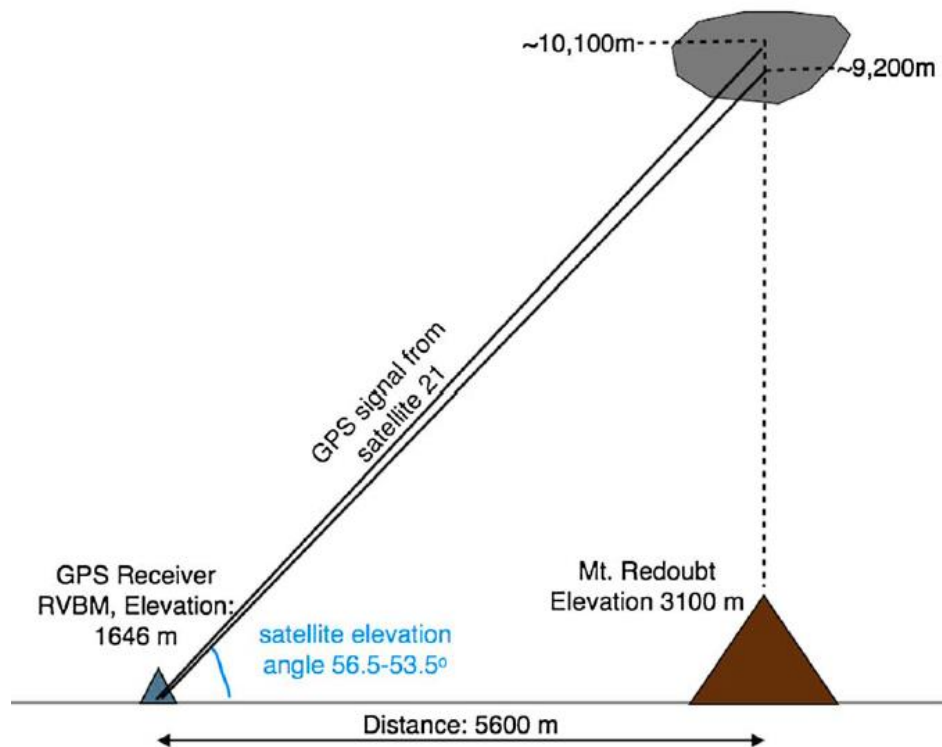
GPS電波で電離層を見る

- 国土地理院の電子基準点のデータを使い、電離層での電波遅延量から全電子数(TEC)を計算
(齊藤准教授ほか) → 固体地球—大気の相互作用の解明へ



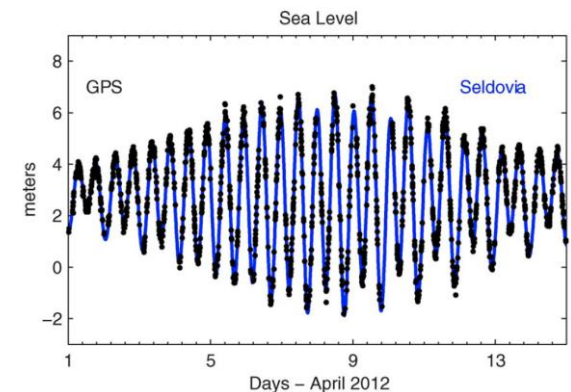
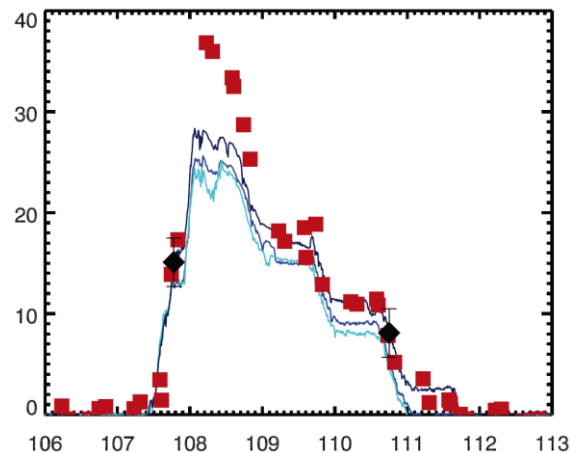
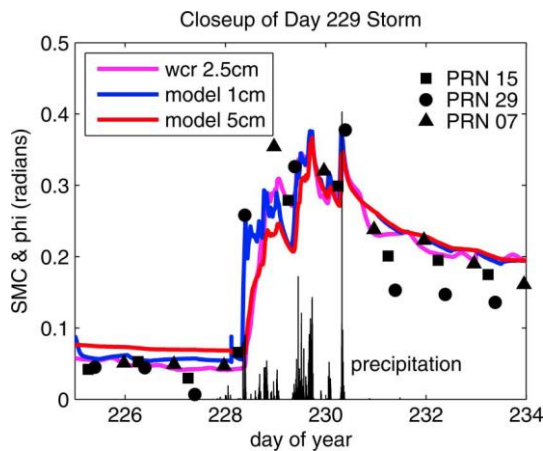
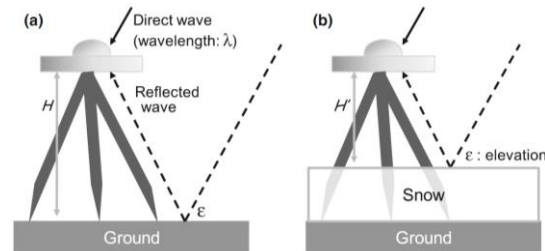
GPS電波で火山を見る

- GPS電波強度(SNR)の時間変化から火山噴煙位置を特定 (コロラド大・東北大) → 噴煙密度監視や降灰予測の高精度化へ



GPS多重反射を有効活用する

- 観測データ = 直達波 + 反射波
- 反射面の状態変化で反射強度等が変化 → 土壌水分・積雪・潮位を監視 (コロラド大・北大)



再解析時の参考資料

- 2014-15年のデータは測地学研究室HPに置く
 - <http://goo.gl/Ly5m40>
- ソフトウェアRTKLIBは以下からDLできる
 - <http://www.rtklib.com/>
- ZIPファイルを解凍し、以下のプログラムを使用：`rtklib_2.4.2¥bin¥rtkpost.exe`
- RTKLIBでエラーが出たら、以下のファイルを消してみる：`rtklib_2.4.2¥bin¥rtkpost.ini`

2014年以降の全データ

	14/09/01	14/09/02	15/09/06	15/09/07
Day of Year	244	245	249	250
GPS week	1808-1	1808-2	1861-0	1861-1
ASO1			○	○
ASO2	○	○	○	○
ASO3		○		○
ASOL	○	○	○	○
移動観測点			GEMB	GEMA

2014年9月1日の固定観測点

- ASO2 (1.489m), ASOL (1.355m)
 - 括弧内はアンテナ高を示している
- 精密暦 (最終解): igs18081.sp3
- 地球回転軸情報 (最終解): igs18087.erp
 - 回転軸情報の最終解は7日分がまとめられているため、GPS weekの日番号が「7」になっている。
- 測位モード: PPP static
 - RTKLIBの設定はスライド21-24頁に準ずる

2014年9月2日の固定観測点

- AS02 (1.486m), AS03 (1.558m), ASOL (1.355m)
- 精密暦 (最終解): igs18082.sp3
- 地球回転軸情報 (最終解): igs18087.erp
- 測位モード: PPP static
 - RTKLIBの設定はスライド21-24頁に準ずる

2015年9月6日の固定観測点

- ASO1 (1.484m), ASO2 (1.484m), ASOL (1.504m)
- 精密暦 (超速報解): igu18610_00.sp3
- 地球回転軸情報 (超速報解): igu18610_00.erp
 - 上記2つに関しては、2日程度で速報解 (igr*.Z) が、2週間程度で最終解 (igs*.Z) が以下にUPされる
 - <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/product/1861/>
 - .Zファイルの解凍は、Unixコマンド「uncompress」やWindowsソフト「解凍レンジ」などで行う (解凍レンジはVectorで入手できる)
- 測位モード (ASOL以外): PPP static
 - RTKLIBの設定はスライド21-24頁に準ずる
- 測位モード (ASOL): Single
 - 受信機不調により1個の周波数の搬送波しか受信できなかったため。設定はスライド14-18頁に準ずる。

2015年9月7日の固定観測点

- ASO1 (1.610m), ASO2 (1.474m), ASO3 (0.000m), ASOL (1.504m)
 - ASO3は他の観測点とアンテナ・整準台の規格が異なるため、アンテナ高を測定せず。RTKLIBで得られる緯度経度のみは正しい。
- 精密暦 (超速報解): igu18611_00.sp3
- 地球回転軸情報 (超速報解): igu18611_00.erp
 - 上記2つに関しては、2日程度で速報解 (igr*.Z) が、2週間程度で最終解 (igs*.Z) が以下にUPされる
 - <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/product/1861/>
- 測位モード (ASOL以外): PPP static
 - RTKLIBの設定はスライド21-24頁に準ずる
- 測位モード (ASOL): Single
 - 受信機不調により1個の周波数の搬送波しか受信できなかったため。設定はスライド14-18頁に準ずる。

2015年9月の移動観測点

- 9月6日: GEMB, 9月7日: GEMA
 - アンテナ高は簡単のため0.000mでよい
- 精密暦 (超速報解): igu1861i_00.sp3
- 地球回転軸情報 (超速報解): igu1861i_00.erp
 - 9月6日: i=0, 9月7日: i=1
 - 上記2つのファイルは2日程度で速報解 (igr*.Z) が、2週間程度で最終解 (igs*.Z) が以下にUPされる
 - <ftp://igscb.jpl.nasa.gov/pub/product/1861/>
- 測位モード: Single (or) PPP Kinematic
 - Singleの場合は14-18頁を、PPP Kinematicの場合は21-24頁を参考にすべし