

GNSS測位入門からRTKLIBの活用まで

 東京海洋大学 高須知二

2016-07-07@東京海洋大学 越中島

時間割

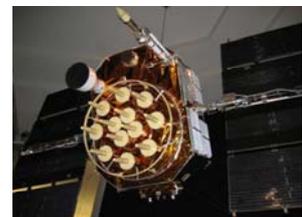
(1) GNSS測位入門	7/7 (木)	9:30-10:15
(2) RTKLIBの基本操作 (実習)		10:15-11:00
(3) GNSS測位の基礎		11:10-11:55
(4) RTKPOSTによる単独測位 (実習)		11:55-12:40
(5) 基線解析とRTKの基礎		13:40-14:25
(6) RTKPOSTによる基線解析 (実習)		14:25-15:10
(7) RTKNAVIによるRTK (実習)		15:20-16:05
(8) RTKLIBの活用		16:05-16:30

(1) GNSS測位入門

3

GNSS

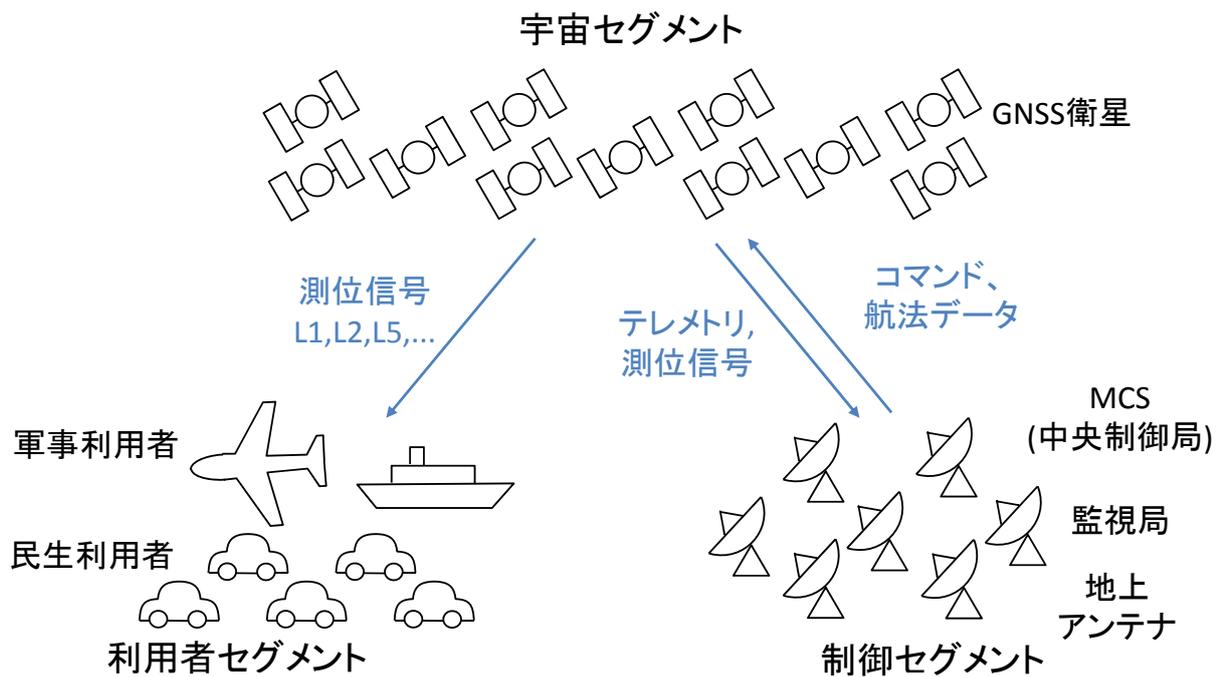
- GNSS (全地球航法衛星システム)
 - GPS (米国)
 - GLONASS (ロシア)
 - Galileo (欧州)
 - BeiDou (中国)
- RNSS (地域航法衛星システム)
 - QZSS (日本)
 - IRNSS (インド)
- SBAS (静止衛星型衛星航法補強システム)
 - WAAS, EGNOS, MSAS, SDCM, GAGAN



(<http://www.ion.org/museum>)

4

GNSSシステム



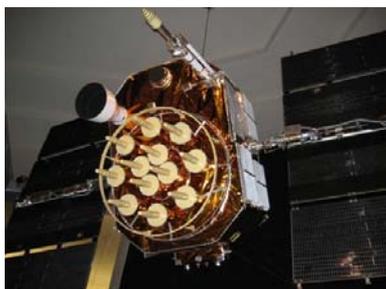
5

GPS宇宙セグメント

- 衛星コンステレーション
 - 6 軌道面 x 4 = 24 衛星 (ノミナル)
 - 高度: 20,100km
 - 軌道傾斜角: 55°
 - 周期: 1/2 恒星日 (11h 58' 2")

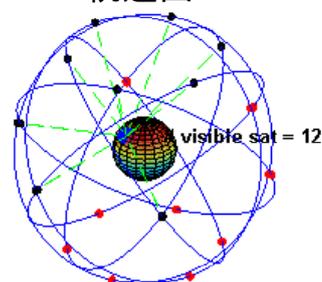


GPS Block II



(<http://www.ion.org/museum>)

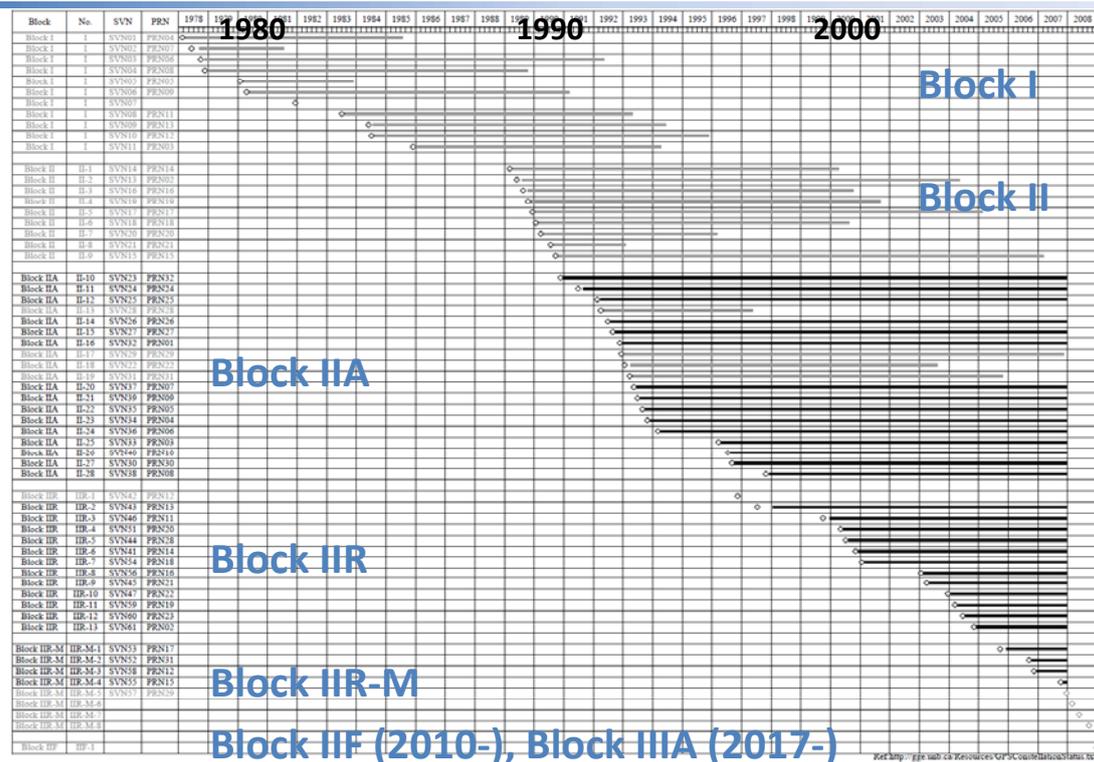
軌道面



(<http://en.wikipedia.org/wiki>)

6

GPS衛星



GPS信号

- 測位信号
 - L1C/A : Block IIA, IIR
 - L1C : Block IIIA -
 - L1P(Y), L2P(Y) (軍用) : Block IIA, IIR, (-2020)
 - L2C : Block IIR-M -
 - L1M, L2M (軍用) : Block IIR-M -
 - L5 : Block IIF -
- 衛星多重化
 - CDMA (符号分割多重アクセス)

GLONASS (グロナス)

- 開発
 - 旧ソ連、及びロシア
- 衛星コンステレーション
 - 3 軌道面 x 8 = 24 衛星 + 3 予備 (FOC)
 - 高度: 19,100 km, 軌道傾斜角: 64.5°
 - GLONASS, GLONASS-M (2003-), GLONASS-K (2011-)
- 信号
 - L1C/A, L1P (FDMA: 1602+n x 0.5625 MHz)
 - L2C/A, L2P (FDMA: 1246+n x 0.4375 MHz)
 - L3 CDMA (GLONASS-K1-)



9

Galileo (ガリレオ)

- 開発
 - 欧州連合 及び欧州宇宙機関
- 衛星コンステレーション
 - 3 軌道面 x 9 = 27 衛星 + 3 予備 (FOC)
 - 高度: 23,200km, 軌道傾斜角: 56°
 - 試験衛星: GIOVE-A (2005), GIOVE-B (2007)
 - 2012 4 衛星 (IOV), 2014/15 18 Sats, 2016/17 FOC
- 信号
 - E5a (OS,CS), E5b (OS, SoL, CS)
 - E6a (PRS), E6b/c (CS), E1a (PRS), E1b/c (OS, SoL, CS)



10

BeiDou (北斗)

- 開発
 - 中国
- 衛星コンステレーション
 - フェーズI (-2012): 3 衛星 (GEO)
 - フェーズII (-2017): 14 衛星 (5 GEO, 5 IGSO, 4 MEO)
 - フェーズIII (2017-): 35 衛星 (5 GEO, 3 IGSO, 27 MEO)
 - 2016/3: II: 5 GEO, 8 IGSO, 4 MEO, III: 2 IGSO, 3 MEO 計22
- 信号
 - Phase II: B1, B2, B3
 - Phase III: B1, B2, B3 (L1C, L5 GPS互換?)



<http://www.beidou.gov.cn>

11

QZSS (準天頂衛星)

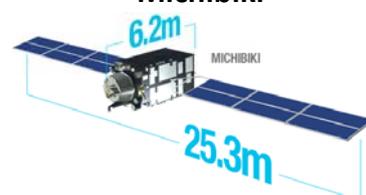
- 開発
 - 日本 (JAXA→内閣府, 内閣府)
- 衛星コンステレーション
 - 1 衛星, 4衛星 (3QZO+1GEO), 7衛星
 - 高度: ~36,000km
 - 軌道傾斜角: 43度, 離心率: 0.075 (QZO)
 - 2010/9/11「みちびき」打上
- 信号 (「みちびき」)
 - L1C/A, L1C, L2C, L5: GPS互換
 - L1-SAIF/L1S, LEX/L6: 補強

QZSS衛星地上軌跡



(IS-QZSS 1.2)

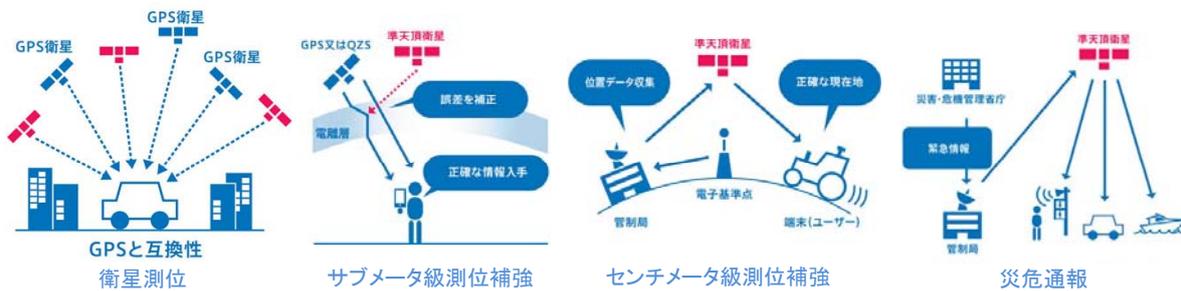
“Michibiki”



(<http://qz-vision.jaxa.jp>)

12

QZSS (準天頂衛星)



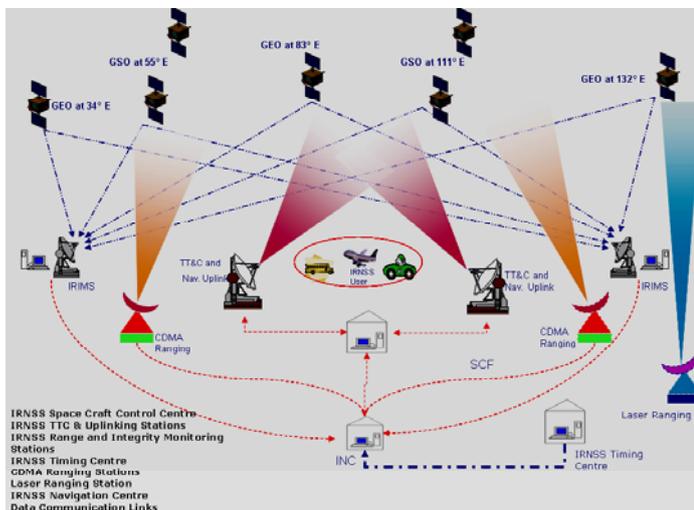
	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度
衛星 打上げ	① 初号機打上げ (準天頂軌道)						2号機打上げ ②	3号機打上げ ③	4号機打上げ ④	
システム 構築・整備				1機体制 基本/詳細設計		システム整備			4機体制 オープンサービス 運用	
			技術実証・利用実証・運用							

(<http://qzss.go.jp>)

13

IRNSS/NAVIC

- 開発
 - インド
- 衛星コンステレーション
 - 2 x 2 IGSO + 3 GEO
 - 2016/3 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F 計5
 - 2016/4/28: 1G打上
- 信号
 - L5, S: OS + PRS



14

SBAS(静止衛星型衛星航法補強システム)

システム	開発	運用	静止衛星		
			PRN	衛星	静止位置
WAAS	US, DOT, FAA	2003/7-	138	Telesat Anik F1R CRE	133W
			135	Galaxy 15 CRW	133W
			133	Inmarsat 4F3 AMR	98W
EGNOS	ESA, EC, Eurocontrol	2009/10,- 2011/3- (SoL)	120	Inmarat-3 AOR-E	15.5W
			124	ESA Artemis	21.5E
			126	Inmarsat-3 IOR-W	25E
			136	SES-5	5E
MSAS	日本、 国土交通省	2007/9-	129	MTSAT-IR	140E
			137	MTSAT-II	145E
SDCM	ロシア	2014-	140	Luch-5A	167E
			125	Luch-5B	16E
			141	Luch-5V	95E
GAGAN	インド, AAI, ISRO	2011-	127	GSAT-8	?
			128	GSAT-10	?
			139	GSAT-15	?

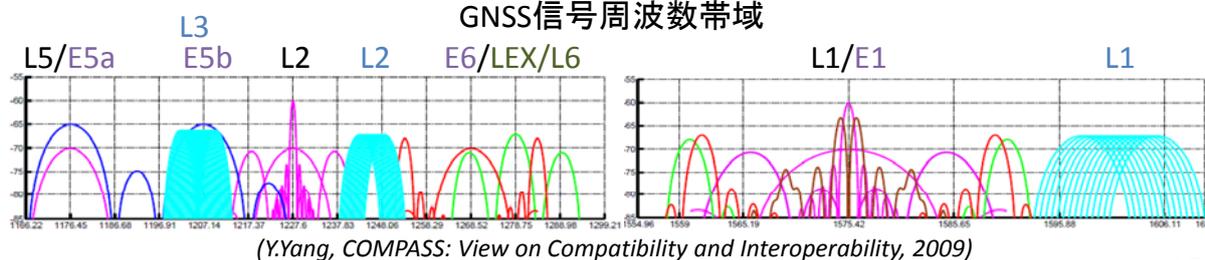
15

GNSS衛星及び信号帯域

GNSS衛星の数

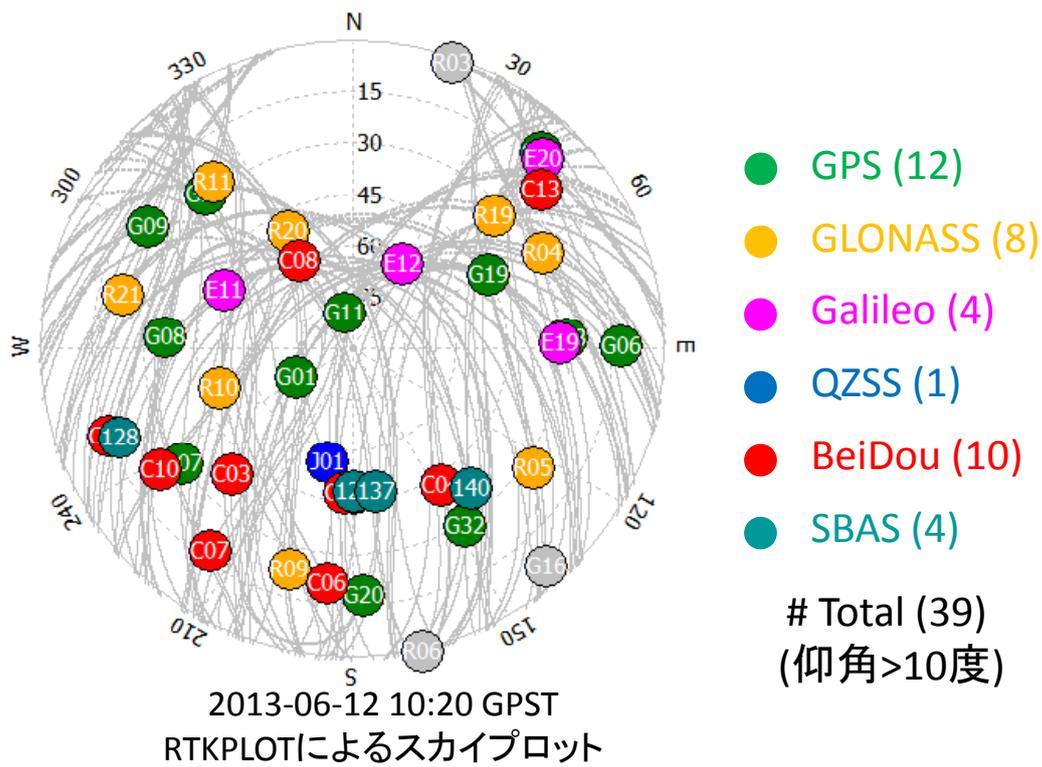
システム	2010	2014	2017	2020
GPS	31	31	32	32
GLONASS	23 (+2)	24 (+3)	24 (+3)	24 (+3)
Galileo	0	4	18	27 (+3)
BeiDou	6	16	35	35
QZSS	1	1	4	7
IRNSS	0	1	7	7
SBAS	7	8	11	11
合計	68	86	134	149

GNSS信号周波数帯域



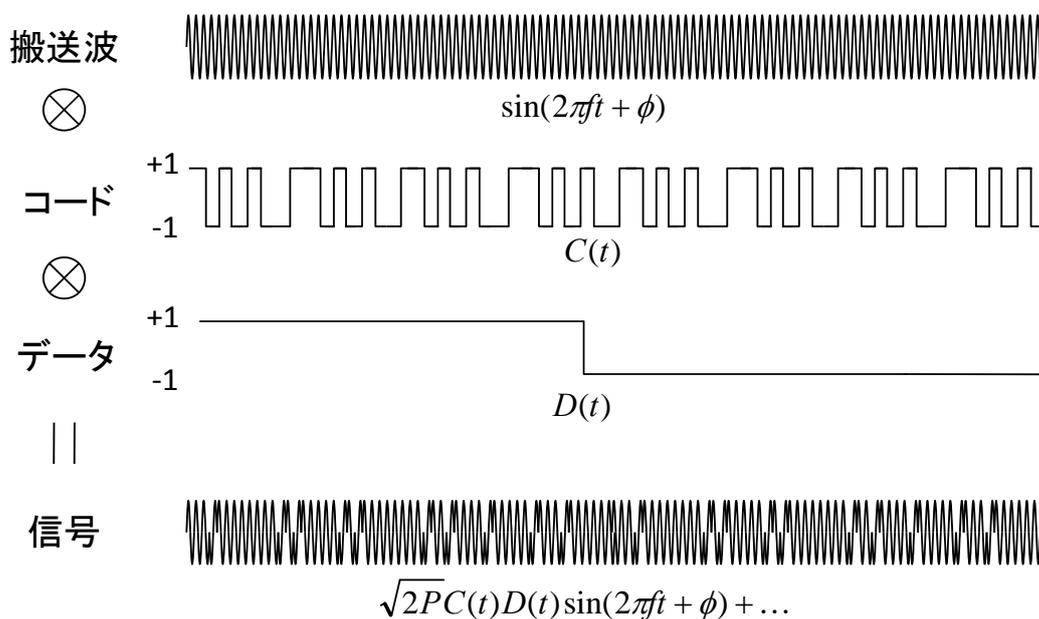
16

東京上空のGNSS衛星配置



17

GNSS測位信号の構造



18

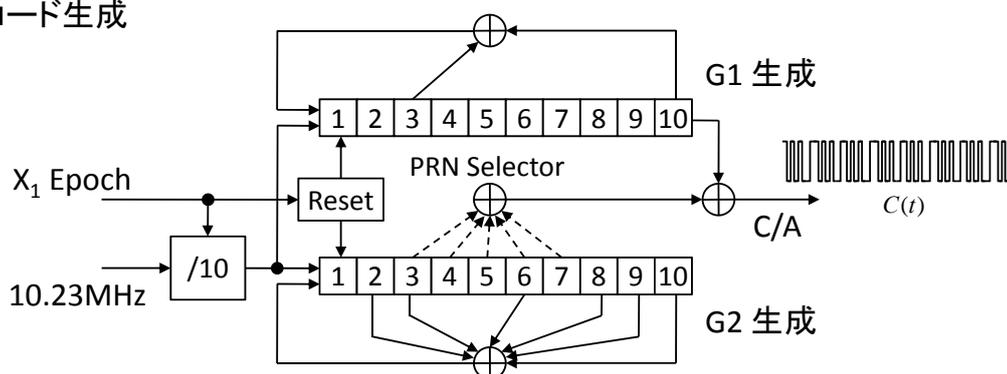
GNSS測位信号の仕様

周波数(MHz)		コード	変調	データレート	GNSS
L1/E1	1575.42	C/A	BPSK (1)	50 bps	GPS, QZSS
				250 bps	QZSS (L1-SAIF), SBAS
		P(Y)	BPSK (10)	50 bps	GPS
		L1C-d/p	MBOC (6,1,1/11)	-/100 bps	GPS (IIIA-), Galileo
		L1C-d/p	BOC (1,1)	-/100 bps	QZSS
L1	1602+0.5625K	C/A	BPSK	50 bps	GLONASS
L2	1227.60	P(Y)	BPSK (10)	50 bps	GPS
		L2C	BPSK (1)	25 bps	GPS (IIRM-), QZSS
L2	1246+0.4375K	C/A	BPSK	50 bps	GLONASS
L5/E5a	1176.45	L5-I/Q	BPSK (10)	-/100 bps	GPS (IIF-), QZSS
		E5a-I/Q	BPSK (10)	-/50 bps	Galileo
E5b	1207.14	E5b-I/Q	BPSK (10)	-/250 bps	Galileo
E6/LEX	1278.75	E6-I/Q	BPSK (5)	-/1000 bps	Galileo
		LEX	BPSK (5)	2000 bps	QZSS

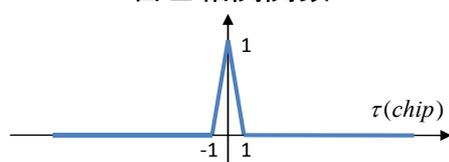
19

PRN(疑似雑音)コード

C/Aコード生成

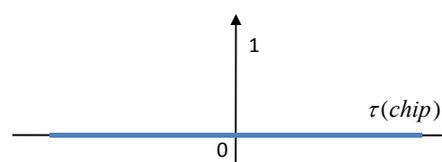


自己相関関数



$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T C^i(t) C^i(t-\tau) dt$$

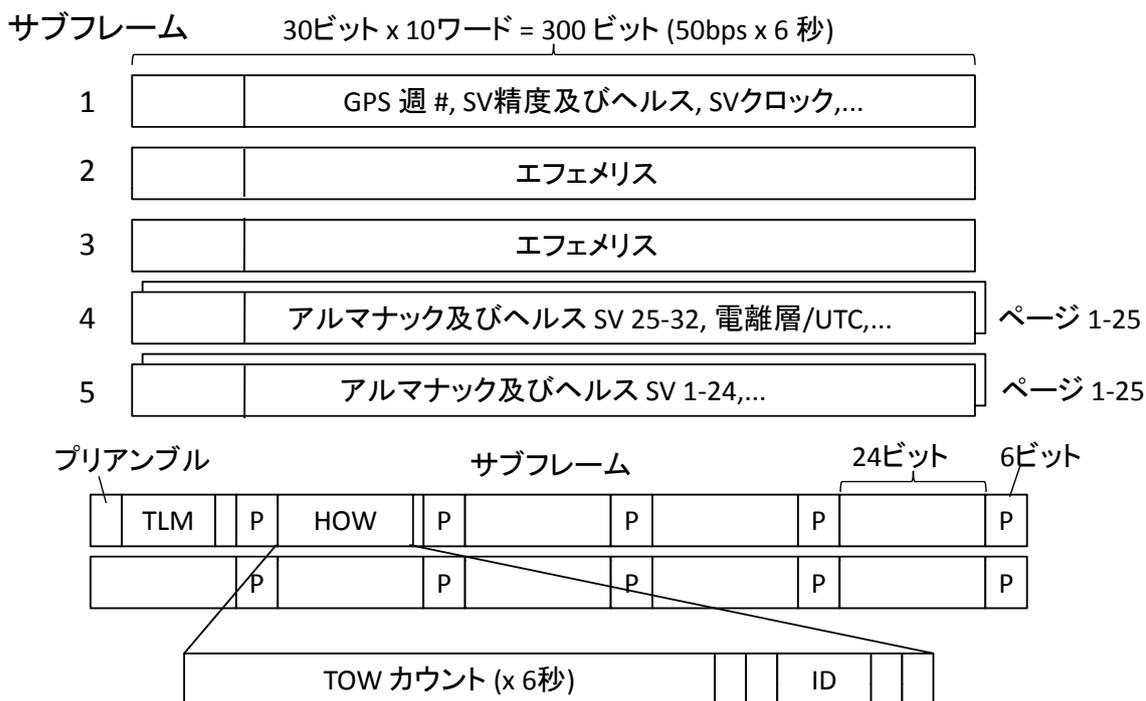
相互相関関数



$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T C^i(t) C^j(t-\tau) dt \quad (i \neq j)$$

20

GPS航法データ



GNSS測位の原理

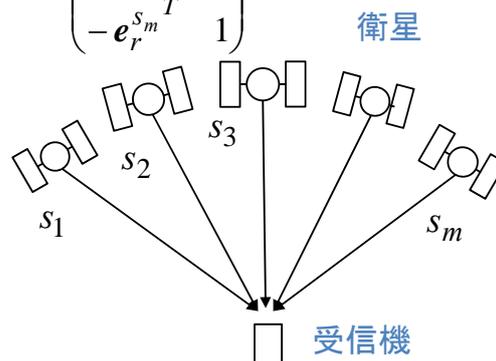
$\mathbf{x} = (\mathbf{r}_r^T, cdt)^T$, $\mathbf{y} = (P_r^{s_1}, P_r^{s_2}, P_r^{s_3}, \dots, P_r^{s_m})^T$ 疑似距離

$$\mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{pmatrix} \rho_r^{s_1} + \hat{c}dt - cdT^{s_1} + I_r^{s_1} + T_r^{s_1} \\ \rho_r^{s_2} + \hat{c}dt - cdT^{s_2} + I_r^{s_2} + T_r^{s_2} \\ \rho_r^{s_3} + \hat{c}dt - cdT^{s_3} + I_r^{s_3} + T_r^{s_3} \\ \vdots \\ \rho_r^{s_m} + \hat{c}dt - cdT^{s_m} + I_r^{s_m} + T_r^{s_m} \end{pmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} -\mathbf{e}_r^{s_1 T} & 1 \\ -\mathbf{e}_r^{s_2 T} & 1 \\ -\mathbf{e}_r^{s_3 T} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\mathbf{e}_r^{s_m T} & 1 \end{pmatrix}$$

距離 受信機 衛星
クロッククロック

$\hat{\mathbf{x}} = (\hat{\mathbf{r}}_r^T, \hat{c}dt)^T$ 受信機位置 + 受信機クロック

$$= \hat{\mathbf{x}}_0 + (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T (\mathbf{y} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_0))$$



GNSS受信機

市販受信機: \$20 - \$30,000



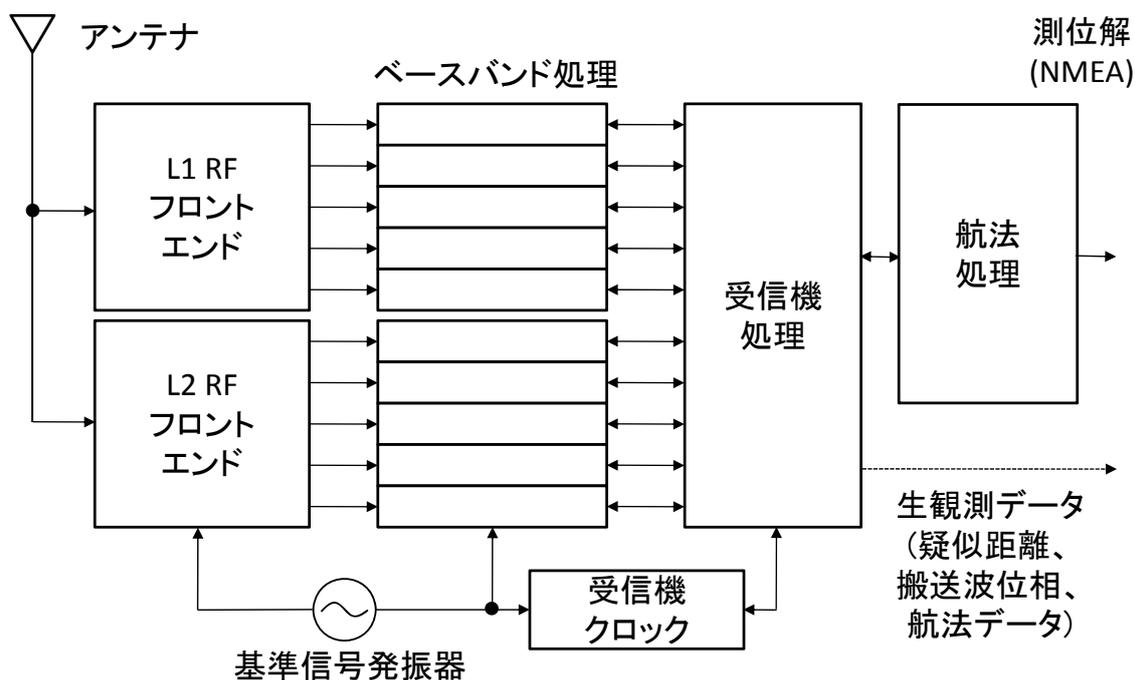
SiRF, u-blox, Garmin, Hemisphere, Trimble, Leica, Topcon, NovAtel, JAVAD, Magellan, ...

自作GPS受信機: \$400



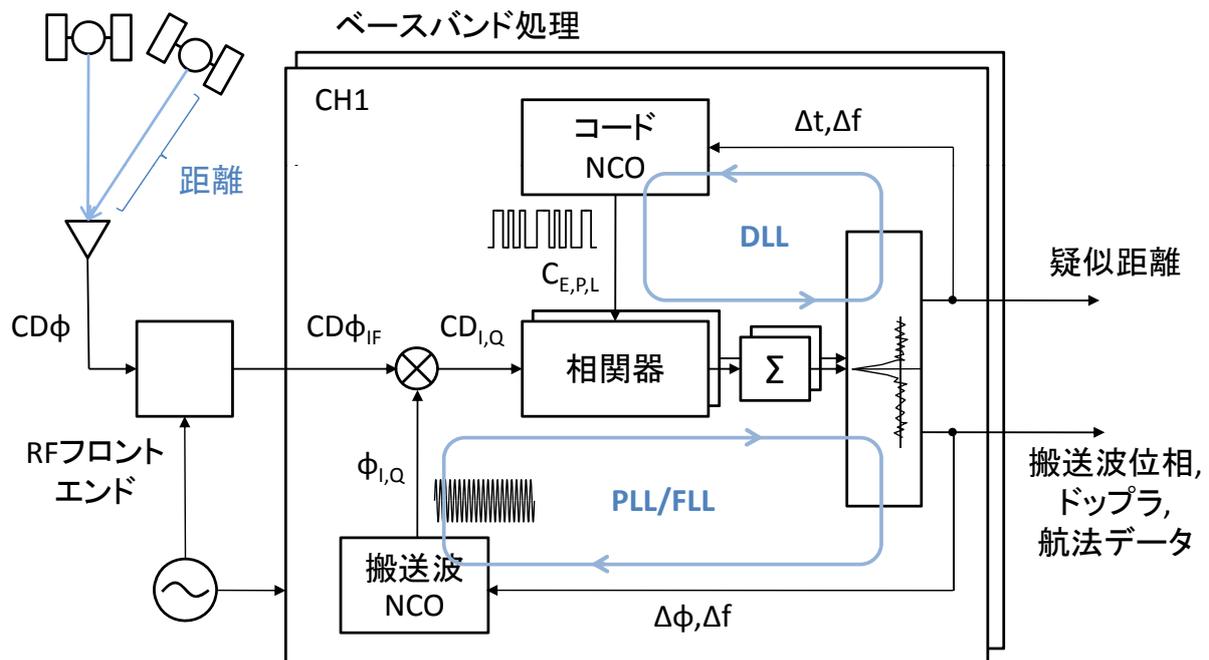
23

GNSS受信機の構造



24

コード/搬送波追尾



25

受信機/航法処理

- 受信機処理
 - 信号捕捉 : ドップラ/コード位相探索
 - コード追尾 : DLL (Delay Lock Loop)
 - 搬送波追尾 : PLL/FLL (Phase/Freq Lock Loop)
 - 航法データ再生 (エフェメリス,...)
 - 疑似距離、搬送波位相生成
- 航法処理
 - 測位アルゴリズム (単独, DGPS, SBAS, RTK, ...)
 - 座標変換
 - 入出力メッセージ処理 (NMEA, RTCM, ...)

26

(2) RTKLIBの基本操作

27

実習用プログラムのインストール

- USBメモリの以下ディレクトリをディレクトリごと自分のノートPCの適当な場所にコピー。

seminar_2016b

¥rtklib_2.4.2p11

¥rtklib_2.4.3b13

¥sample1

...

¥googleearth

- USBメモリが使えない場合以下からダウンロード。
http://www.rtklib.com/data/seminar_2016b.zip

28

RTKLIBの位置付け

- GNSS受信機「航法処理」を外部計算機上で実装
 - 複数GNSS、複数信号のサポート
 - 各種測位アルゴリズムのサポート
 - リアルタイム及び後処理
 - 各種入出力メッセージ/ファイルのサポート
 - 可搬性: PCまたは組込計算機
- GNSS受信機「受信機処理」は含まれていない
 - 別途GNSS受信機が必要
 - 処理には「生観測データ」を出力する受信機または出力された「生観測データ」が必要

29

RTKLIB

- OSS GNSS測位解析パッケージ
 - 開発開始 : 2006年
 - 現行バージョン : ver. 2.4.2 p11
 - ライセンス : BSD 2-clause
- API + AP
 - オールインワンパッケージ
 - Windows : GUI AP
 - その他 : CUI (CLI) AP



ダウンロード

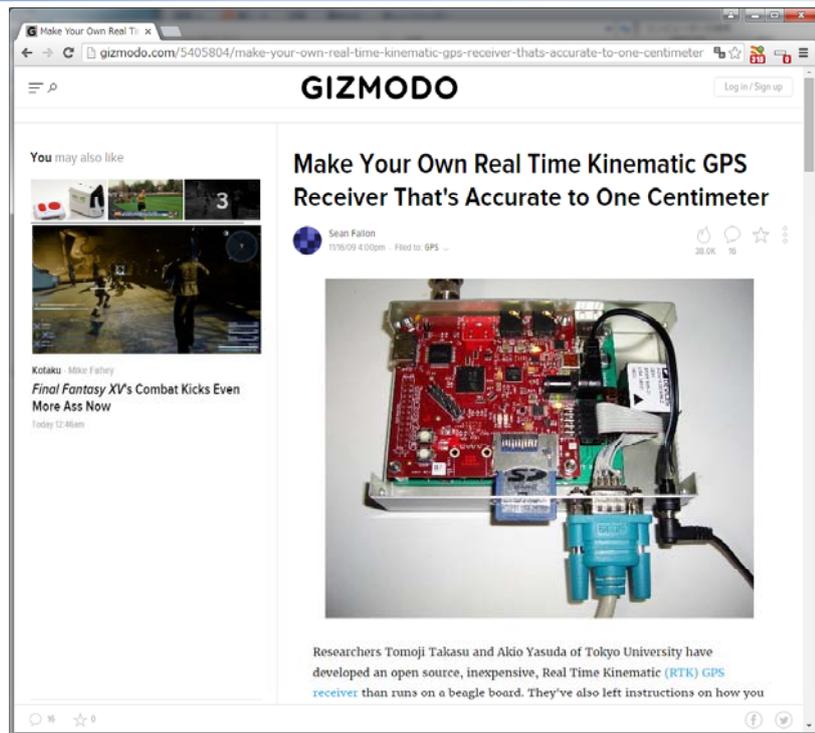
<http://www.rtklib.com> or
<https://github.com/tomojitakasu/RTKLIB>

30

RTKLIB応用例 (1)

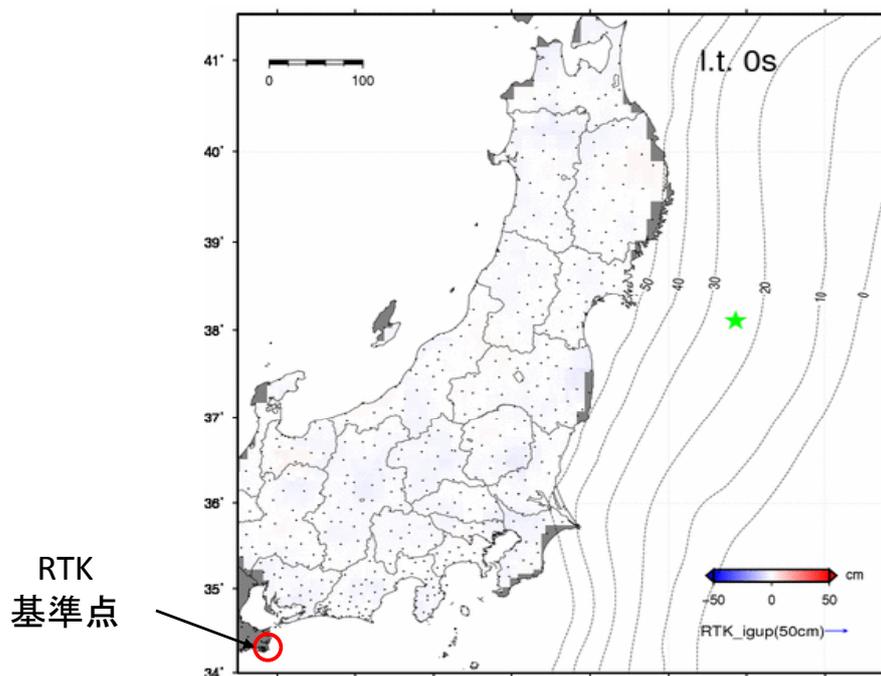
GIZMODO
2009/11/16

(Beagle Board
+ u-blox LEA-4T
+ ADI MEMS-IMU)



31

RTKLIB: 応用例 (2)



Y. Ohta et al., Quasi real-time fault model estimation for near-field tsunami forecasting base on RTK-GPS analysis: Application to the 2011 Tohoku-Oki earthquake (Mw 9.0), JGR-solid earth, 2012

RTKLIB: 履歴

- 2006/4 v.0.0.0 初期バージョン (RTK+C 講義用)
- 2007/1 v.1.0.0 単機能後処理基線解析AP
- 2008/7 v.2.1.0 後処理AP追加
- 2009/1 v.2.2.0 リアルタイムAP追加、NTRIPサポート
OSS配布開始
- 2009/5 v.2.2.1 RTCM, NRTKサポート, 受信機追加
- 2009/12 v.2.3.0 GLONASSサポート, 受信機追加
- 2010/8 v.2.4.0 PPP、長基線RTKサポート, 受信機追加
- 2011/6 v.2.4.1 QZSSサポート, 受信機追加
- 2013/4 v.2.4.2 Galileo, BeiDouサポート追加
- 2015/4 v.2.4.2 p11 (各種バグ修正)

33

RTKLIB: 特徴

- GNSS衛星による標準及び高精度測位:
 - GPS, GLONASS, QZSS, Galileo, BeiDou and SBAS
- リアルタイム及び後処理測位モード:
 - Single, SBAS, DGPS, RTK, Static, Moving-base and PPP
- 標準フォーマット/プロトコル及び受信機サポート:
 - RINEX 2/3, RTCM 2/3, BINEX, NTRIP 1.0, NMEA0183, SP3, RINEX CLK, ANTEX, NGS PCV, IONEX, RTCA-DO-229, EMS,
 - NovAtel, JAVAD, Hemisphere, u-blox, SkyTraq, NVS, ...
- リアルタイム通信:
 - シリアル, TCP/IP, NTRIP 及びファイル

34

RTKLIB: パッケージ構造

RTKLIB	
¥src	: RTKLIBライブラリソースプログラム
¥rcv	: GNSS受信機依存ソースプログラム
¥bin	: Windows用実行形式バイナリおよびDLL
¥data	: サンプルデータ
¥app	: APビルド環境
¥rtknavi	: RTKNAVI (GUI)
¥rtknavi_mkl	: RTKNAVI_MKL (GUI)
¥strsvr	: STRSVR (GUI)
¥rtkpost	: RTKPOST (GUI)
¥rtkpost_mkl	: RTKPOST_MKL (GUI)
¥rtkplot	: RTKPLOT (GUI)
¥rtkconv	: RTKCONV (GUI)
¥srctblbrows	: NTRIP source table browser (GUI)
¥rtkrcv	: RTKRVC (CLI)
¥rnx2rtkp	: RNX2RTKP (CLI)
¥pos2kml	: POS2KML (CLI)
¥convbin	: CONVBIN (CLI)
¥str2str	: STR2STR (CLI)
¥appcmn	: GUI AP共通ルーチン
¥icon	: アイコンデータ
¥mkl	: Intel MKLライブラリ (C++ Builder用)
¥test	: テストプログラムおよびデータ
¥util	: ユーティリティ
¥doc	: 文書ファイル

35

RTKLAUNCH (APランチャ)

- 以下ファイルダブルクリック
...¥seminar_2016¥rtklib_2.4.2b9¥bin¥rtklaunch.exe



RTKPLOT STRSVR NTRIPBR RTKGET
RTKCONV RTKPOST RTKNAVI

- デスクトップにショートカット作成

36

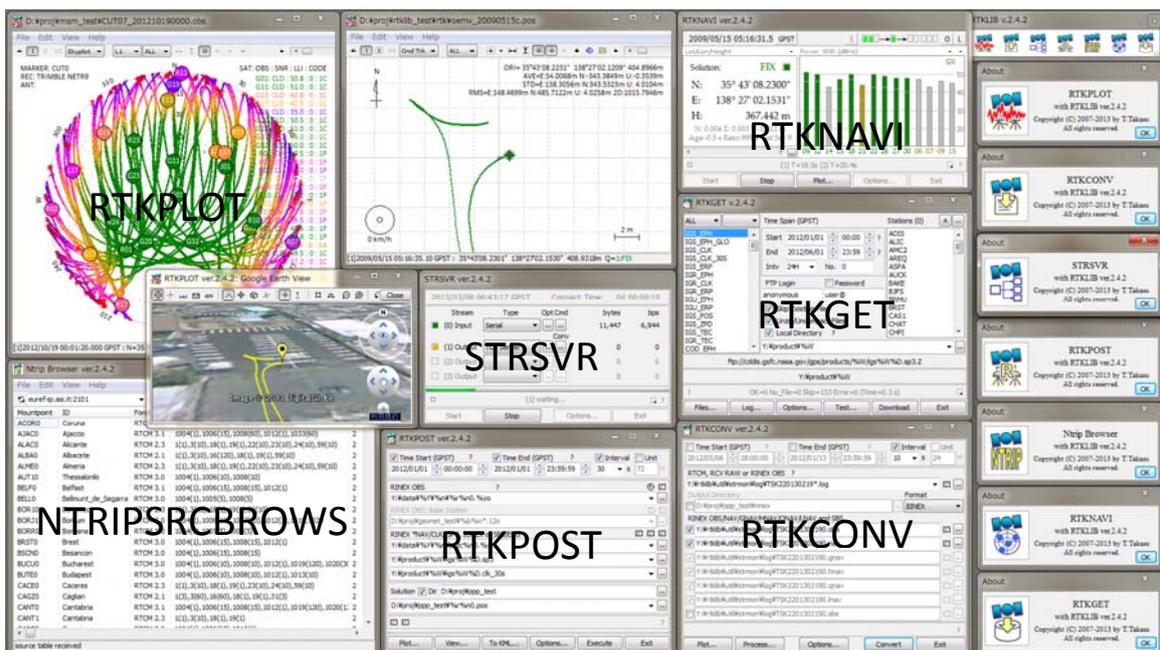
RTKLIB AP

	機能	GUI AP (Windows)	CUI AP
(1)	APランチャ	RTKLAUNCH (3.1)	-
(2)	リアルタイム測位	RTKNAVI (3.2, 3.3, 3.5)	RTKRCV (3.11, A.1)
(3)	通信サーバ	STRSVR, (3.3)	STR2STR (3.11, A.5)
(4)	後処理測位	RTKPOST (3.4, 3.5)	RNX2RTKP (3.11, A.2)
(5)	RINEX変換	RTKCONV (3.6)	CONVBIN (3.11, A.4)
(6)	GNSSデータ・測位解プロット	RTKPLOT (3.7, 3.8)	-
(7)	GNSSデータダウンローダ	RTKGET (3.9)	-
(8)	NTRIPブラウザ	NTRIPBROWS (3.10)	-

() マニュアル章番号

37

RTKLIB: GUI AP (Windows)



38

RTKLIB: 受信機サポート

形式	データメッセージ							
	GPS 生観測データ	GLONASS 生観測データ	GPS エフェメリス	GLONASS エフェメリス	ION/UTC パラメータ	アンテナ 情報	SBAS メッセージ	その他
RTCM v.2.3	Type 18, 19	Type 18, 19	Type 17	-	-	Type 3, 22	-	Type 1, 9, 14, 16
NovAtel OEM4/V/6, OEMStar	RANGEB, RANGECMPB	RANGEB, RANGECMPB	RAWEPHEMB	GLO- EPHEMERISB	IONUTC	-	RAWWAAS- FRAMEB	QZSS, Galileo, BeiDou
NovAtel OEM3	RGEB, RGED	-	REPB	-	IONB, UTCB	-	FRMB	-
NovAtel Superstar II	ID#23	-	ID#22	-	-	-	ID#67	ID#20, #21
u-blox 4T, 5T, 6T, 6P, 7P, M8T	UBX RXM-RAW RXM-RAWX	UBX RXM-RAWX	UBX RXM-SFRB RXM-SFRBX	UBX RXM-SFRB RXM-SFRBX	UBX RXM-SFRB RXM-SFRBX	-	UBX RXM-SFRB	QZSS, Galileo, BeiDou (M8T)
Hemisphere Crescent, Eclipse	bin 96, bin76	bin66	bin 95	bin65	bin 94	-	bin 80	-
SkyTraq S1315F	msg 0xDD (221)	-	msg 0xE0 (224)	-	msg 0xE0 (224)	-	-	msg 0xDC (220)
JAVAD (GRIL/GREIS)	[R*],[r*],[*R], [*r],[P*],[p*], [*p],[D*],[*d], [E*],[*E],[F*]	[R*],[r*],[*R], [*r],[P*],[p*], [*p],[D*],[*d], [E*],[*E],[F*]	[GE],[GD], [gd]	[NE],[LD]	[IO],[UO], [GD]	-	[WD]	[~~],[::],[RD], [SI],[NN],[TC], QZSS, Galileo
Furuno GW10 II	msg 0x08	-	msg 0x24	-	msg 0x26	-	msg 0x03	msg 0x20
BINEX	0x7F-05	0x7F-05	0x01-02	0x01-03	-	-	-	QZSS, Galileo, BeiDou

Others: NVS NVC08C-CSM, Trimble RT17, Septentrio SBF

39

RTCM 3 サポート

Message	GPS	GLOASS	Galileo	QZSS	BeiDou	SBAS
OBS Compact L1	1001~	1009~	-	-	-	-
Full L1	1002	1010	-	-	-	-
Compact L1/2	1003~	1011~	-	-	-	-
Full L1/2	1004	1012	-	-	-	-
Ephemeris	1019	1020	1045/6*	1044	1047/63*	-
MSM 1	1071~	1081~	1091~	1111~	1121*~	1101*~
2	1072~	1082~	1092~	1112~	1122*~	1102*~
3	1073~	1083~	1093~	1113~	1123*~	1103*~
4	1074	1084	1094	1114	1124*	1104*
5	1075	1085	1095	1115	1125*	1105*
6	1076	1086	1096	1116	1126*	1106*
7	1077	1087	1097	1117	1127*	1107*
SSR Orbit Corr.	1057	1063	1240*	1246*	1258*	1252*
Clock Corr.	1058	1064	1241*	1247*	1259*	1253*
Code Bias	1059	1065	1242*	1248*	1260*	1254*
Combined	1060	1066	1243*	1249*	1261*	1255*
URA	1061	1067	1244*	1250*	1262*	1256*
HR-Clock	1062	1068	1245*	1251*	1263*	1257*
FCB	2065+	2066+	2067+	2068+	2069+	-
Antenna Info	1005 1006	1007 1008	1033			

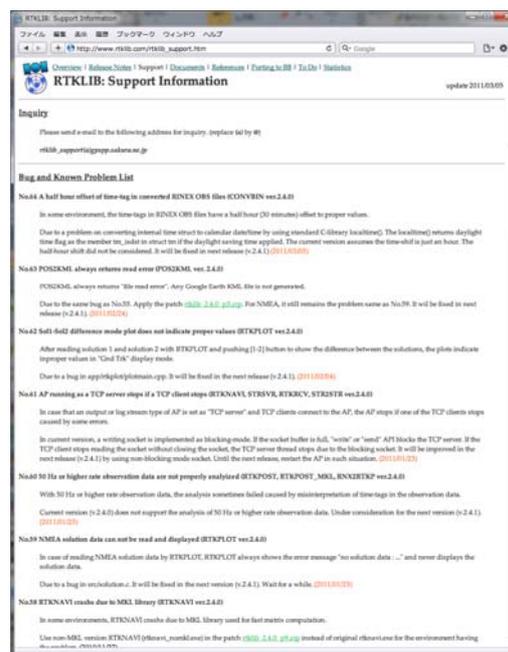
* based on draft, ~ only encode, + RTKLIB extention

40

RTKLIB: 参照文書



rtklib_2.4.2/doc/manual_2.4.2.pdf



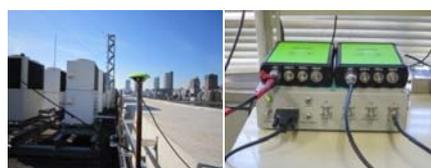
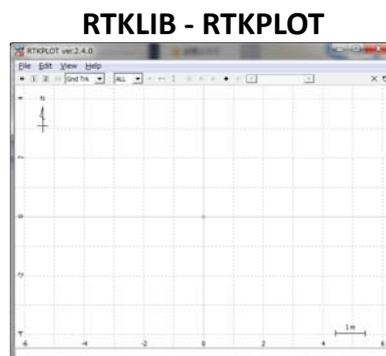
http://www.rtklib.com

RTKLIBの基本操作

- RTKPLOT 
- RTKCONV 
- STRSVR 
- RTKPOST 
- NTRIPBROWS 
- RTKNAVI 
- RTKGET 

RTKLIB例題 (1)

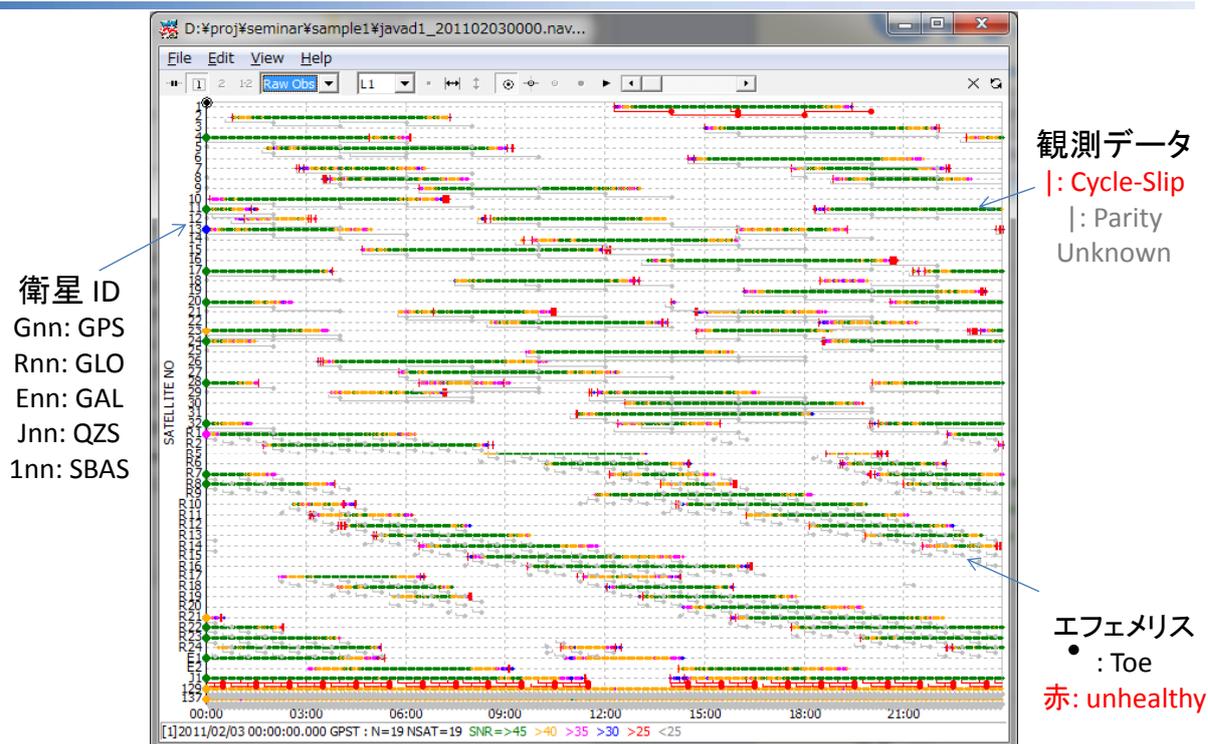
- RTKPLOT 起動
- 以下メニュー実行:
File - Open Obs Data...
seminar_2016¥sample1¥
javad1_201102030000.obs



JAVAD DELTA受信機

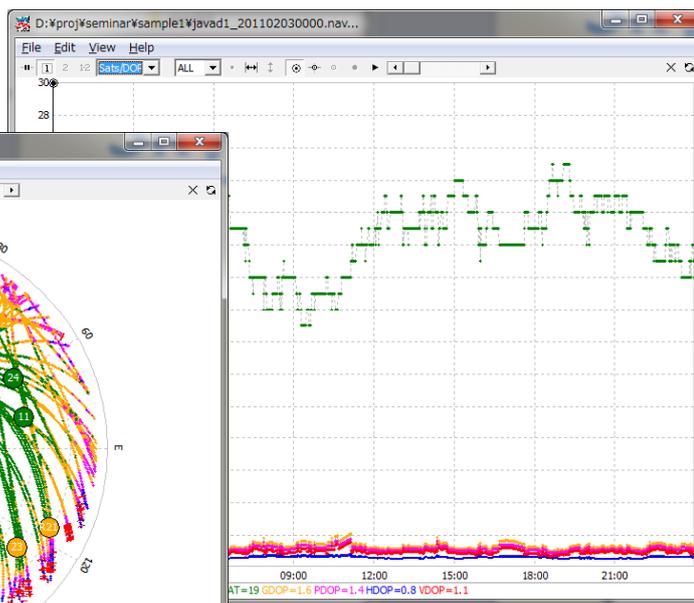
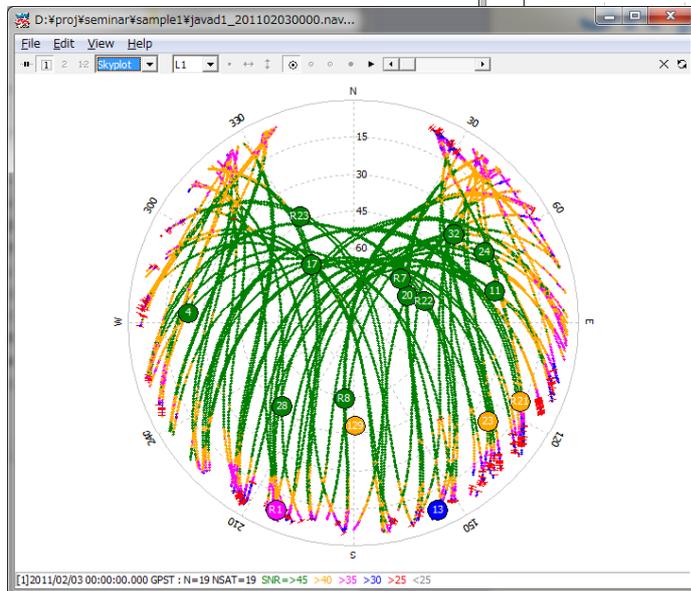
Acknowledgment:
Sample data were captured by JAVAD DELTA receiver provided by JAXA

RTKLIB例題 (2)



RTKLIB例題 (3)

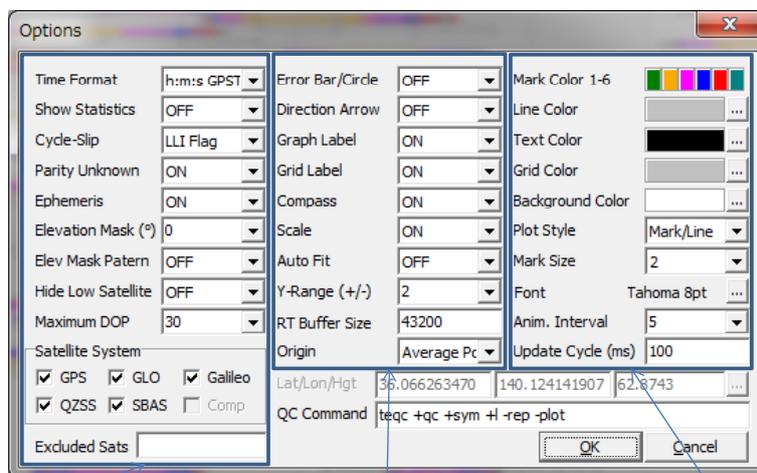
スカイプロット



可視衛星数及びDOP

RTKLIB例題 (4)

RTKPLOT - Options



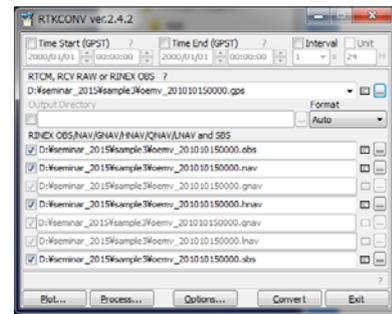
観測データ設定

測位解オプション

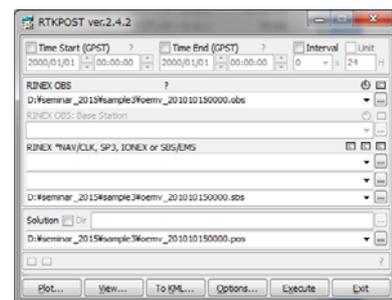
共通オプション

RTKLIB例題 (5)

- RTKCONV実行
- 入力データの設定
seminar_2016¥sample3¥
oemv_201010150000.gps
- "Convert..."ボタン押下
- RINEXデータ確認
- "Process..."ボタン押下
- RTKPOST起動
- "Options..."ボタン押下



RTKCONV



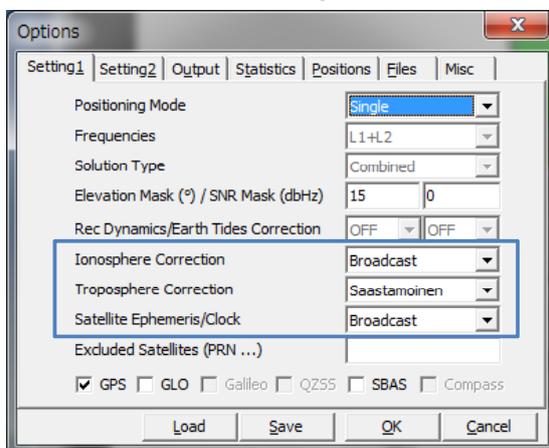
RTKPOST

47

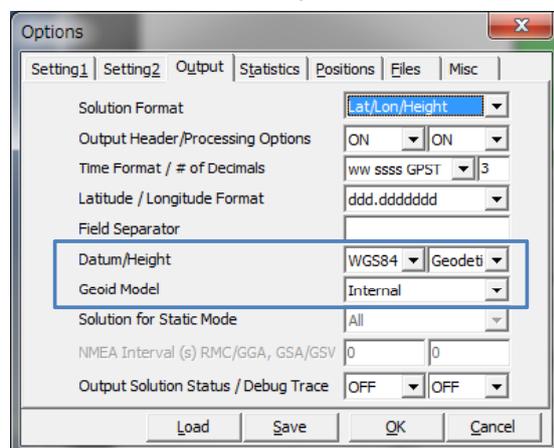
RTKLIB例題 (6)

RTKPOST - Options

Setting1



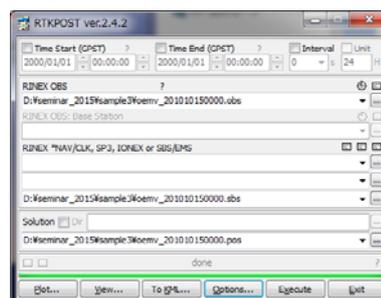
Output



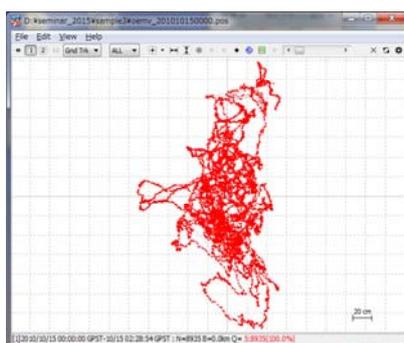
48

RTKLIB例題 (7)

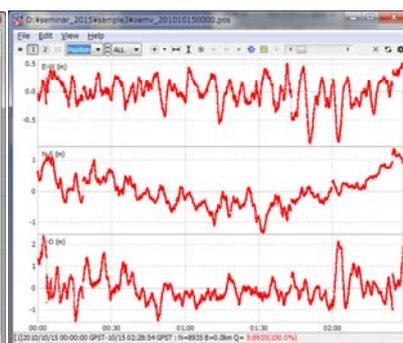
- "Execute"ボタン押下
- "Plot..."ボタン押下
- RTKPLOT起動
- "Position" or "NSat"選択



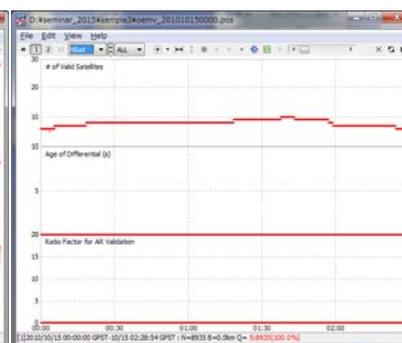
RTKPOST



RTKPLOT (Gnd Trk)



RTKPLOT (Position)



RTKPLOT (NSat)

49

(3) GNSS測位の基礎

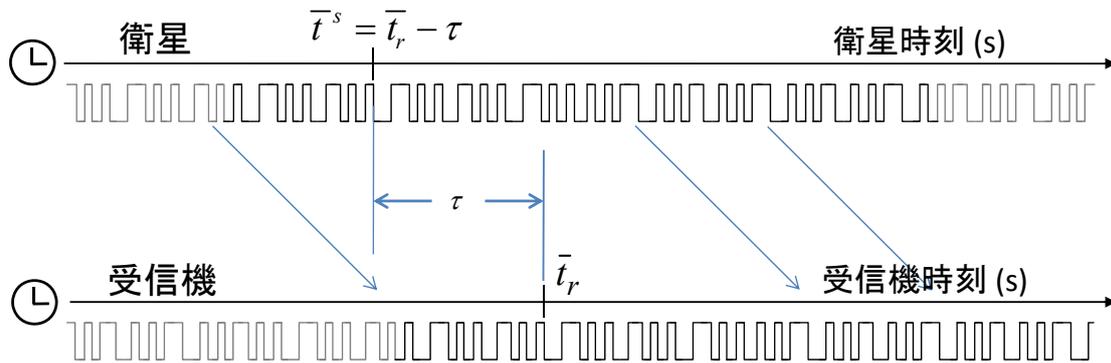
疑似距離

定義:

$$P_r^s \equiv c\tau = c(\bar{t}_r - \bar{t}^s)$$

(m)

The pseudo-range (PR) is the distance from the receiver antenna to the satellite antenna including receiver and satellite clock offsets (and other biases, such as atmospheric delays) (*RINEX 2.10*)



51

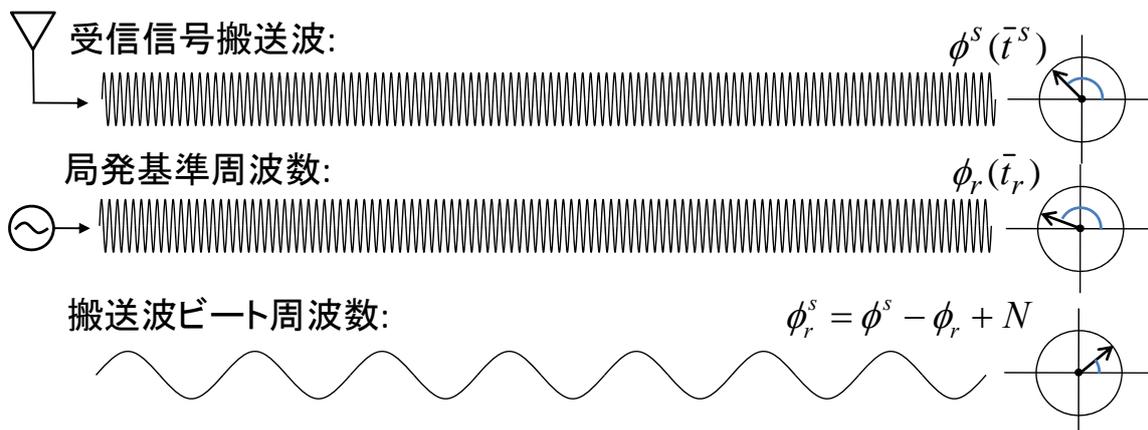
搬送波位相

定義:

$$\phi_r^s = \phi^s - \phi_r + N$$

(cycle)

... actually being a measurement on the beat frequency between the received carrier of the satellite signal and a receiver-generated reference frequency. (*RINEX 2.10*)



52

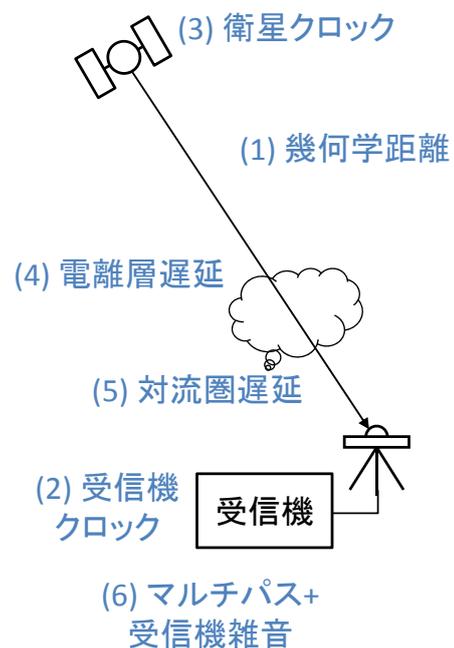
コード測位 vs 搬送波測位

	標準測位(コード測位)	高精度測位(搬送波測位)
観測量	疑似距離 (コード)	搬送波位相 + 疑似距離
受信機ノイズ	30 cm	3 mm
マルチパス	30 cm - 30 m	1 - 3 cm
感度	高感度 (C/N0<15dBHz)	低感度 (C/N0>35dBHz)
連続性	-	サイクルスリップ
アンビギュイティ	-	推定/AR
受信機価格	安価 (~\$100)	高価 (~\$20,000)
精度 (RMS)	3 m (H), 5 m (V) (単独) 1 m (H), 2 m (V) (DGPS)	5 mm (H), 1 cm (V) (静止) 1 cm (H), 2 cm (V) (RTK)
応用	航法, 時刻, ...	測量, 地図, ...

53

疑似距離モデル

$$\begin{aligned}
 P_r^s &\equiv c\tau \\
 &= c(\bar{t}_r - \bar{t}^s) \\
 &= c((t_r + dt) - (t^s + dT^s)) + \varepsilon_p \\
 &= c(t_r - t^s) + c(dt_r - dT^s) + \varepsilon_p \\
 &= (\underbrace{\rho_r^s}_{(1)} + \underbrace{I_r^s}_{(2)} + \underbrace{T_r^s}_{(3)}) + c(\underbrace{dt_r}_{(4)} - \underbrace{dT^s}_{(5)}) + \underbrace{\varepsilon_p}_{(6)} \\
 &= \underbrace{\rho_r^s}_{(1)} + \underbrace{c(dt_r - dT^s)}_{(2)} + \underbrace{I_r^s}_{(3)} + \underbrace{T_r^s}_{(4)} + \underbrace{\varepsilon_p}_{(5)}
 \end{aligned}$$



54

搬送波位相モデル (1)

搬送波位相:

$$\begin{aligned}
 \phi_r^s &= \phi_r(t_r) - \phi^s(t^s) + N_r^s + \varepsilon_\phi && (\phi_{r,0} = \phi_r(t_0), \phi_0^s = \phi^s(t_0)) \\
 &= (f(t_r + dt_r - t_0) + \phi_{r,0}) - (f(t^s + dT^s - t_0) + \phi_0^s) + N_r^s + \varepsilon_\phi \\
 &= \frac{c}{\lambda}(t_r - t^s) + \frac{c}{\lambda}(dt_r - dT^s) + (\phi_{r,0} - \phi_0^s + N_r^s) + \varepsilon_\phi && \text{(cycle)} \\
 \Phi_r^s &\equiv \lambda\phi_r^s = c(t_r - t^s) + c(dt_r - dT^s) + \lambda(\phi_{r,0} - \phi_0^s + N_r^s) + \lambda\varepsilon_\phi \\
 &= \underbrace{\rho_r^s + c(dt_r - dT^s) - I_r^s + T_r^s + \lambda B_r^s}_{\text{搬送波位相バイアス}} + \underbrace{d_r^s}_{\text{補正項}} + \varepsilon_\phi && \text{(m)}
 \end{aligned}$$

疑似距離:

$$P_r^s = \rho_r^s + c(dt_r - dT^s) + I_r^s + T_r^s + \varepsilon_p$$

搬送波位相モデル(2)

搬送波位相バイアス:

$$\begin{aligned}
 B_r^s &= \phi_{r,0} - \phi_0^s + N_r^s && \text{(cycle)} \\
 N_r^s &: \text{整数アンビギュイティ} \\
 \phi_{r,0} &: \text{受信機初期位相} \\
 \phi_0^s &: \text{衛星初期位相}
 \end{aligned}$$

補正項:

$$\begin{aligned}
 d_r^s &= -\mathbf{d}_{r,pcv}^T \mathbf{e}_{r,enu}^s + \left(\mathbf{E}_{sat \rightarrow ecef} \mathbf{d}_{pco}^s \right)^T \mathbf{e}_r^s + d_{r,pcv} + d_{pcv}^s - \mathbf{d}_{disp}^T \mathbf{e}_{r,enu}^s \\
 &\quad + d_{pw} + d_{rel} && \text{(m)}
 \end{aligned}$$

- $\mathbf{d}_{r,pcv}$: Receiver Antenna Phase Center Offset
- $d_{r,pcv}$: Receiver Antenna Phase Center Variation
- \mathbf{d}_{pco}^s : Satellite Antenna Phase Center Offset
- d_{pcv}^s : Satellite Antenna Phase Center Variation
- \mathbf{d}_{disp} : Site Displacement
- d_{pw} : Phase Wind-up Effect
- d_{rel} : Relativistic Effect

幾何学距離

信号伝搬時間

$$t^S = \bar{t}_r - P_r^S / c - dT(t^S)$$

(1)

$$\rho_r^S = \|U(t_r)\mathbf{r}_r(t_r) - U(t^S)\mathbf{r}^S(t^S)\|$$

(2)

$$\rho_r^S \approx \|\mathbf{r}_r(t_r) - \mathbf{R}_z(\omega_e(t_r - t^S))\mathbf{r}^S(t^S)\|$$

(3)

$$\rho_r^S \approx \|\mathbf{r}_r(t_r) - \mathbf{R}_z(\omega_e \rho_r^S / c)\mathbf{r}^S(t^S)\|$$

(4)

$$\rho_r^S \approx \|\mathbf{r}_r(t_r) - \mathbf{r}^S(t^S)\| + \frac{\omega_e(x^S y_r - y^S x_r)}{c}$$

サニヤック効果補正

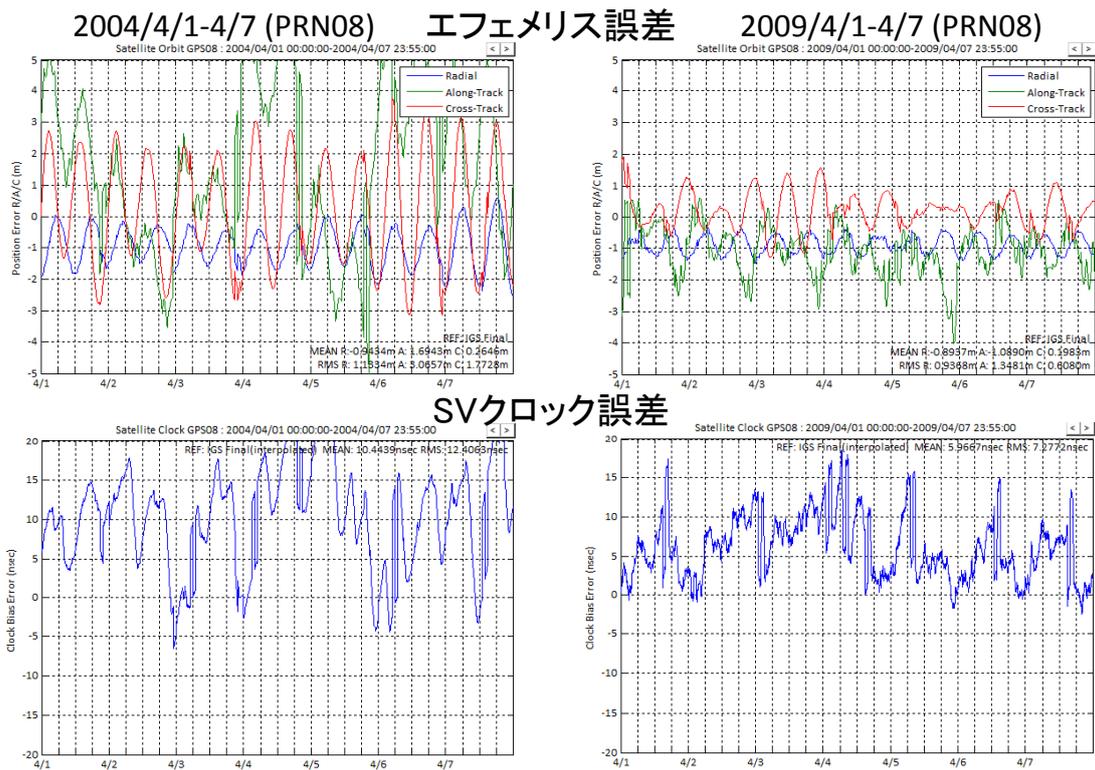
57

誤差源及びDOP

- 誤差源
 - エフェメリス/SVクロック誤差
 - 電離層モデル誤差
 - 対流圏モデル誤差
 - マルチパス
 - 受信機雑音
 - その他誤差
 - S/A (Selective Availability)
- 衛星-受信機幾何学配置
 - DOP (Dilution of Precision)

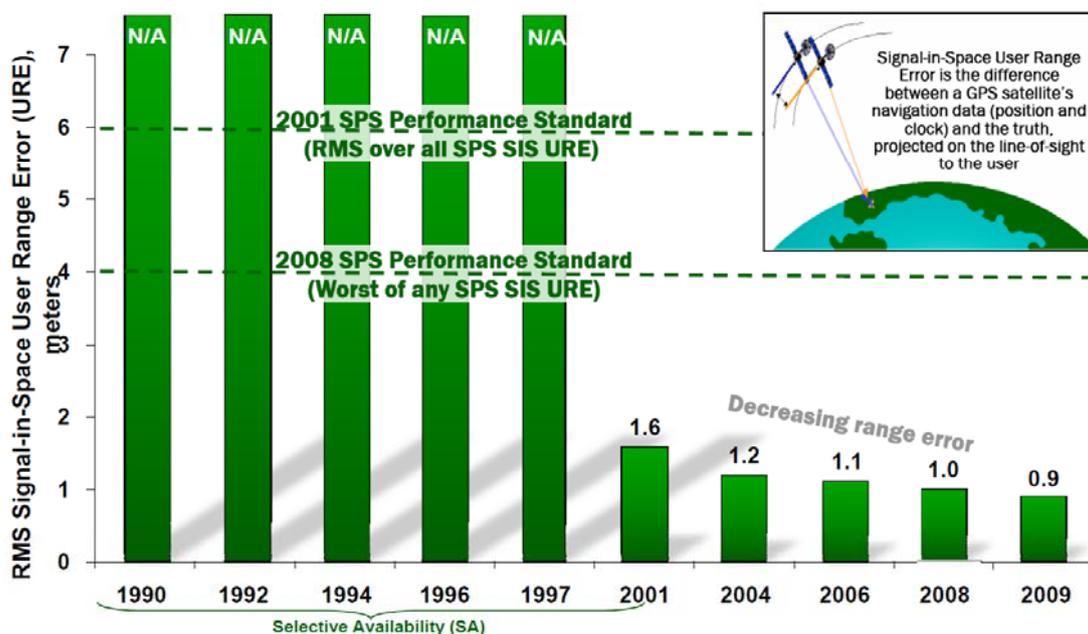
58

エフェメリス/SVクロック誤差



59

GPS SIS-URE



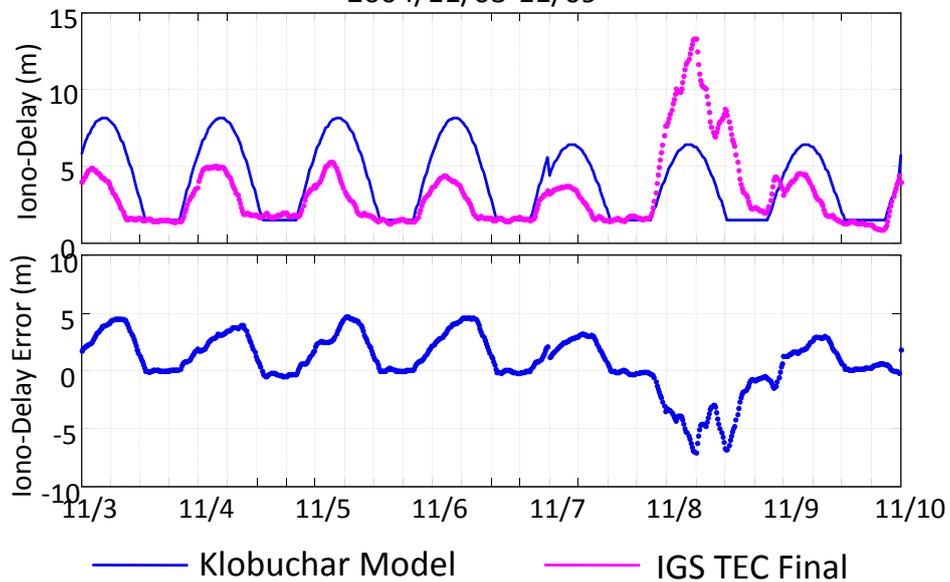
L.S.Steiner, GPS Program Update to CGSIC 2010, Sep 21, 2010

60

電離層モデル誤差

Zenith Ionospheric Delay (L1) at TSKB

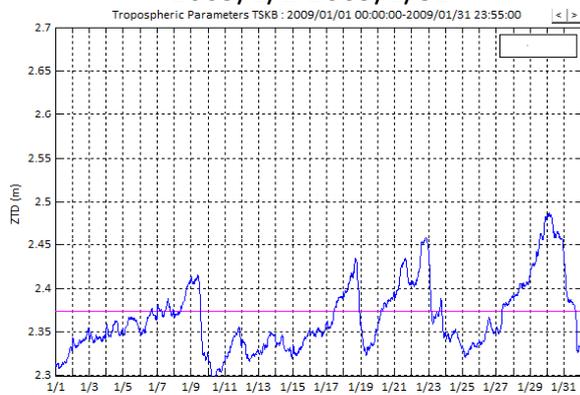
2004/11/03-11/09



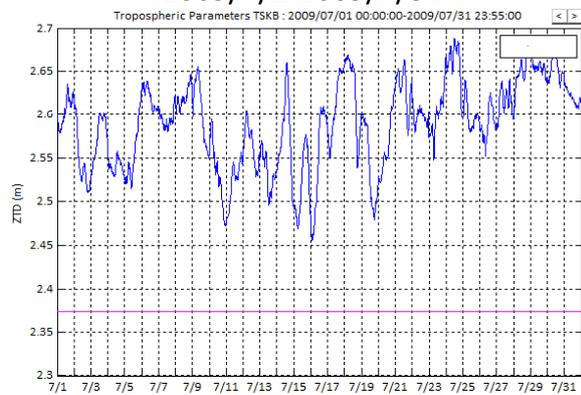
対流圏モデル誤差

ZTD (Zenith Total Delay) at TSKB

2009/1/1-2009/1/31



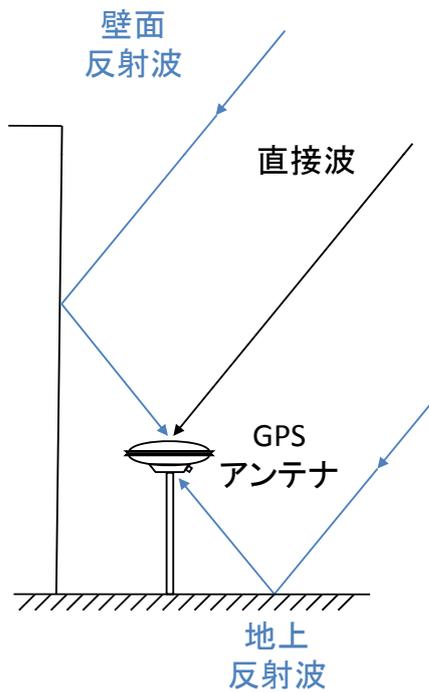
2009/7/1-2009/7/31



— Saastamoinen Model

— Estimated by PPP

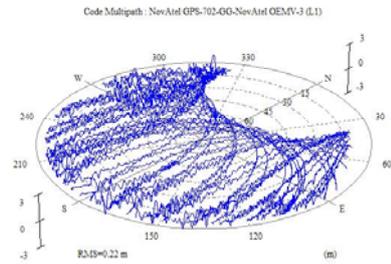
マルチパス



測量用アンテナ



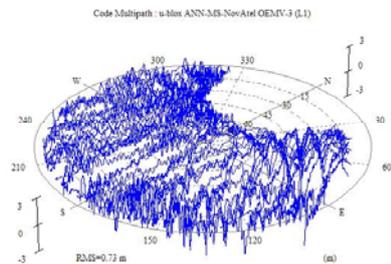
NovAtel
GPS-702-GG



一般アンテナ



u-blox ANN-MS



63

DOP

GDOP, PDOP, HDOP, VDOP

$$GDOP = \sqrt{q_{ee} + q_{nn} + q_{uu} + q_{tt}}$$

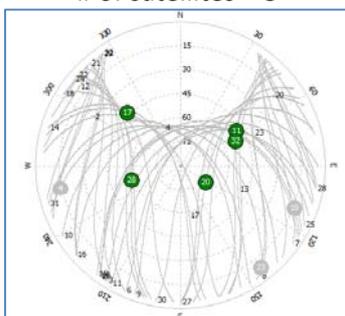
$$PDOP = \sqrt{q_{ee} + q_{nn} + q_{uu}}$$

$$HDOP = \sqrt{q_{ee} + q_{nn}}$$

$$VDOP = \sqrt{q_{uu}}$$

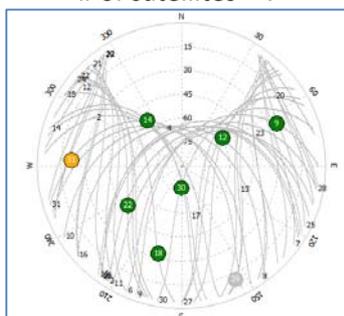
$$Q = (H^T H)^{-1} = \begin{pmatrix} q_{ee} & q_{en} & q_{eu} & q_{et} \\ q_{ne} & q_{nn} & q_{nu} & q_{nt} \\ q_{ue} & q_{un} & q_{uu} & q_{ut} \\ q_{te} & q_{tn} & q_{tu} & q_{tt} \end{pmatrix} \quad H = \begin{pmatrix} -e_{r,enu}^T & 1 \\ -e_{r,emu}^T & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -e_{r,emu}^T & 1 \end{pmatrix}$$

of satellites = 5



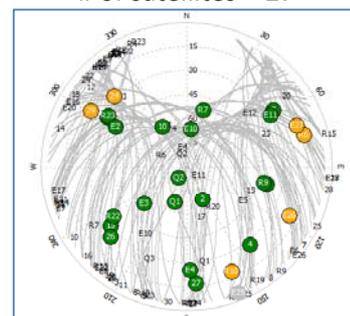
GDOP=33.4 PDOP=25.9
HDOP=8.1 VDOP=24.7

of satellites = 7



GDOP=2.5 PDOP=2.1
HDOP=1.2 VDOP=1.8

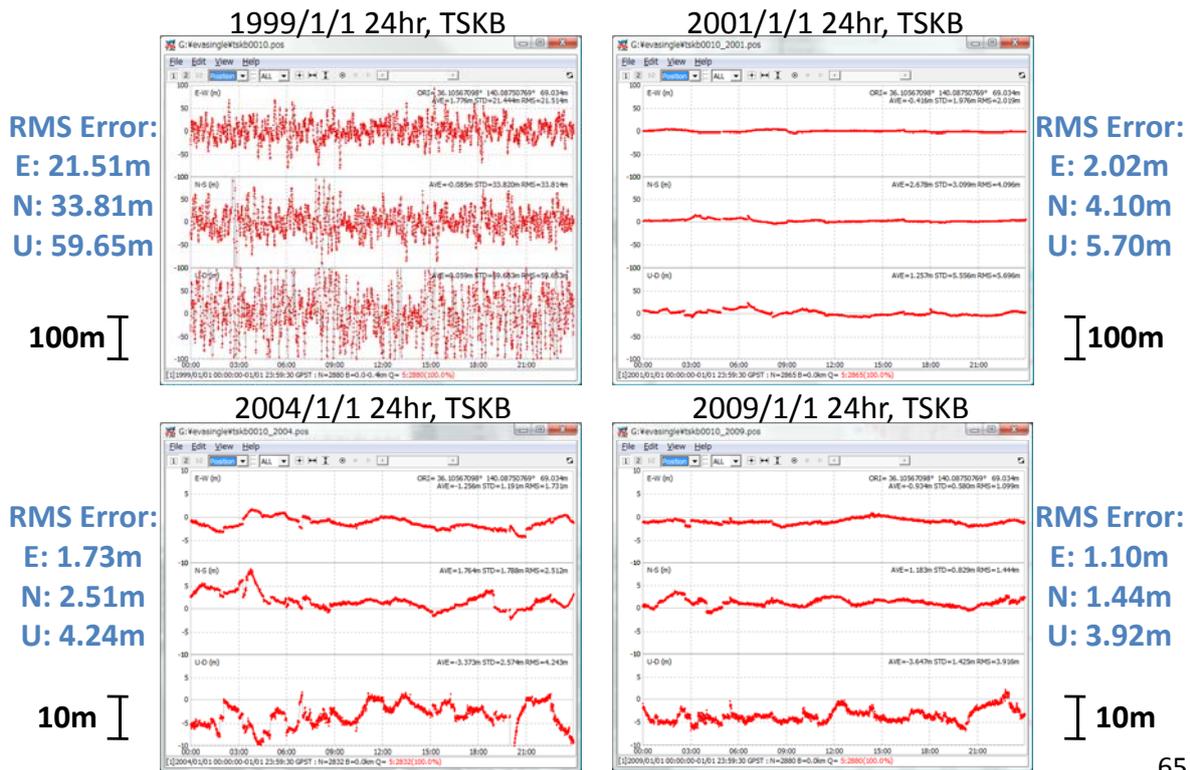
of satellites = 27



GDOP=1.2 PDOP=1.0
HDOP=0.5 VDOP=0.9

64

単独測位誤差



65

DGPS (ディファレンシャルGPS)

- ディファレンシャルGPS/GNSS
 - 座標が既知の固定基準局
 - 衛星毎疑似距離補正量(PRC)
 - 補正情報のユーザへの放送
 - 受信機依存以外の誤差項の消去
- DGPSサービス
 - 衛星経由DGPS: OmniSTAR, SkyFix, StarFix
 - 海上DGPS: 海上保安庁 (中波ビーコン)
 - 国内DGPS: VHF/FM, 携帯網, インターネット

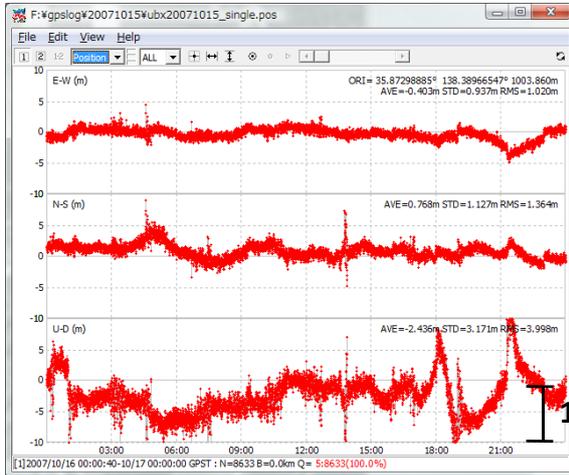
66

DGPS (SBAS)

単独測位

RMS Error:

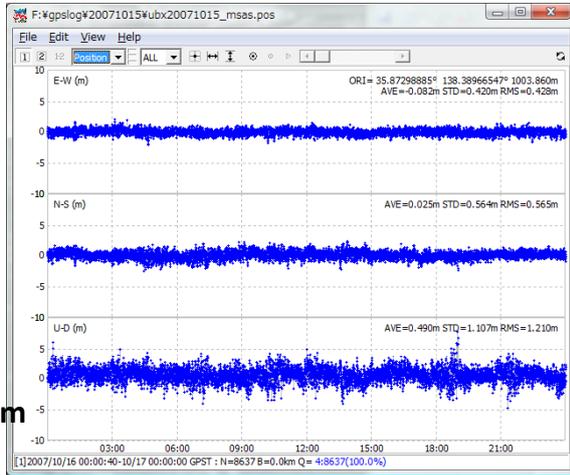
E: 1.02m N: 1.36m U: 4.00m



SBAS DGPS (MSAS)

RMS Error:

E: 0.43m N: 0.57m U: 1.21m



(2007/10/16 24hr, Antenna: NovAtel GPS-702-GG, Receiver: u-blox AEK-4T (raw),
Processing S/W: RTKLIB 2.1.0, All Corrections=ON, Ranging=ON)

67

誤差バジェット

誤差源	単独測位		DGPS (BL=100km)		SBAS DGPS	
エフェメリス誤差	1.0 m		0.1 m		0.1 m	
SVクロック誤差			0.0 m			
電離層モデル誤差	1.5 m		0.2 m		0.2 m	
対流圏モデル誤差	0.3 m		0.1 m		0.3 m	
マルチパス	1.0 m		1.2 m		1.0 m	
S/A	0.0 m		0.0 m		0.0 m	
受信機雑音	0.3 m		0.3 m		0.3 m	
UERE	2.1 m		1.3 m		1.1 m	
HDOP/VDOP	1.5	2.5	1.5	2.5	1.5	2.5
水平/垂直 誤差 (RMS)	3.2 m	5.3 m	2.0 m	3.3 m	1.7 m	2.8 m

68

標準データフォーマット

- RINEX (Receiver Independent Exchange)
 - テキストベース標準GNSSデータファイル形式
 - 後処理解析用
- RINEXタイプ
 - OBS: 観測データ
 - NAV: 航法データ, (GNAV: GLONASS, HNAV: SBAS)
 - MET: 気象データ
 - CLK: クロックプロダクト
- RINEXバージョン
 - ver. 2 (2.10, 2.11, 2.12), ver. 3 (3.00, 3.01, 3.02)

69

RINEX OBS

2.10 RTKCONV 2.4.0		OBSERVATION DATA				M (MIXED)		RINEX VERSION / TYPE			
						20110423 090647 UTC PGM / RUN BY / DATE					
						MARKER NAME					
						MARKER NUMBER					
						OBSERVER / AGENCY					
						REC # / TYPE / VERS					
						ANT # / TYPE					
						APPROX POSITION XYZ					
						ANTENNA: DELTA H/E/N					
						WAVELENGTH FACT L1/2					
						# / TYPES OF OBSERV					
						TIME OF FIRST OBS					
						TIME OF LAST OBS					
						END OF HEADER					
1	1	0.0000	0.0000	0.0000							
8	1	0.0000	0.0000	0.0000							
2010	10	15	0	0	0.0000000	GPS					
2010	10	15	2	28	54.0000000	GPS					
10	10	15	0	0	0.0000000	0 10G 6G23G16G19G21G13G 3G31S29S37					
20849928.484		109567124.316			1939.684		45.000		20849930.125		
85377001.480		1511.441			41.000						
22450960.859		117980618.953			1062.035		42.000		22450959.898		
91932917.910		827.555			38.000						
20790247.117		109253470.496			334.336		45.000		20790246.844		
85132587.789		260.520			41.000						
24794846.031		130297776.969			3763.289		38.000		24794848.422		
101530723.414		2932.430			32.000						
23378478.469		122854746.020			860.133		40.000		23378477.977		
95730986.191		670.234			34.000						
24155219.492		126936537.238			2611.234		35.000		24155223.109		
98911564.082		2034.727			33.000						
21765068.656		114376223.133			3035.375		42.000		21765071.242		
89124339.934		2365.223			38.000						
21044041.703		110587188.461			-1456.918		45.000		21044041.797		
86171830.961		-1135.266			42.000						
37172827.633		195344531.559			2.965		38.000				
37203973.328		195508183.188			-0.992		39.000				
10	10	15	0	0	1.0000000	0 10G 6G23G16G19G21G13G 3G31S29S37					
20849559.430		109565184.891			1939.090		45.000		20849561.062		

Receiver Time Tag

Types of OBS

C, P*: Pseudorange
L*: Carrier-phase
D*: Doppler Freq
S*: CNO (dBHz)

Satellite List

nn, Gnn: GPS
Rnn: GLONASS
Jnn: QZSS
Enn: Galileo
Snn: SBAS

70

RINEX NAV

2.10	N: GPS NAV DATA				RINEX VERSION / TYPE			
RTKCONV 2.4.0				20110423 090647 UTC	PGM / RUN BY / DATE			
1.1176E-08	0.0000E+00	-5.9605E-08	0.0000E+00		ION ALPHA			
9.0112E+04	0.0000E+00	-1.9661E+05	0.0000E+00		ION BETA			
-0.838190317154E-08	-0.310862446895E-13	61440	1606	DELTA-UTC: A0,A1,T,W				
15					LEAP SECONDS			
				END OF HEADER				
31 10 10 15 2 0 0.0	-.724568963051E-06	.352429196937E-11	.000000000000E+00					
.810000000000E+02	.105937500000E+02	.427089218552E-08	-.148856857180E+01					
.571832060814E-06	.746127020102E-02	.472925603390E-05	.515378055573E+04					
.439200000000E+06	-0.176951289177E-06	.679765366385E-02	.540167093277E-07					
.978380240916E+00	.300062500000E+03	-0.105249752834E+01	-.819426989566E-08					
.142863093678E-10	.100000000000E+01	.160500000000E+04	.000000000000E+00					
.240000000000E+01	.000000000000E+00	-0.130385160446E-07	.810000000000E+02					
.432006000000E+06	.000000000000E+00							
6 10 10 15 2 0 0.0	.455596484244E-03	-.140971678775E-10	.000000000000E+00					
.230000000000E+02	-0.352500000000E+02	.500699427569E-08	.227090783348E+01					
-.185333192348E-05	.616293260828E-02	.853091478348E-05	.515365624428E+04					
.439200000000E+06	.104308128357E-06	.204411629865E+01	.353902578354E-07					
.934819176502E+00	.200625000000E+03	-0.936257940341E+00	-.811783814054E-08					
.169649923743E-09	.100000000000E+01	.160500000000E+04	.000000000000E+00					
.240000000000E+01	.000000000000E+00	-0.512227416039E-08	.230000000000E+02					
.432006000000E+06	.000000000000E+00							
...								

PRN	Toc	SV_clock_bias	SV_clock_drift	SV_clock_drift_rate
	IODE	Crs	Delta_n	M0
	Cuc	e	Cus	sqrt(A)
	Toe	Cic	OMEGA	Cis
	i0	Crc	omega	OMEGA_DOT
	IDOT	Codes_on_L2_ch	GPS_Week_#	L2_P_data_flag
	SV_accuracy	SV_health	TGD	IODC
	Trans_Time	Fit_interval	spare	spare

(4) RTKPOSTによる単独測位

RTKPOSTによる単独測位(1)

- RTKCONVによる受信機ログのRINEX変換
- RTKPLOTによる観測データ解析
- RTKPOSTによる単独測位
- RTKPLOTによる測位解プロット
- Google Earthによる測位解表示
- RTKCONVオプション
- RTKPOSTオプション
- RTKPLOTオプション

73

RTKPOSTによる単独測位(2)

- RTKGETによる精密暦ダウンロード
- RTKPLOTによる観測データ解析
- RTKPOSTによる精密単独測位
- RTKPLOTによる測位解プロット
- RTKGETオプション
- RTKPOSTオプション

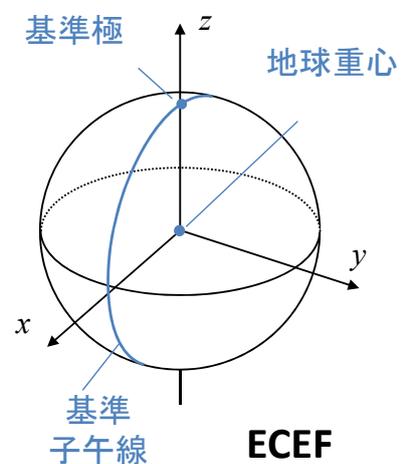
74

(5) 基線解析とRTKの基礎

75

座標系

- ECEF: 地球固定座標系
 - ITRF: 国際地球基準座標系
 - WGS 84: 米国 (GPS)
 - PZ90: ロシア (GLONASS), ...
- ECI: 慣性座標系
 - ICRF: 国際天文基準座標系
- ECI-ECEF 変換
 - 歳差/章動モデル
 - EOP: 地球回転パラメータ

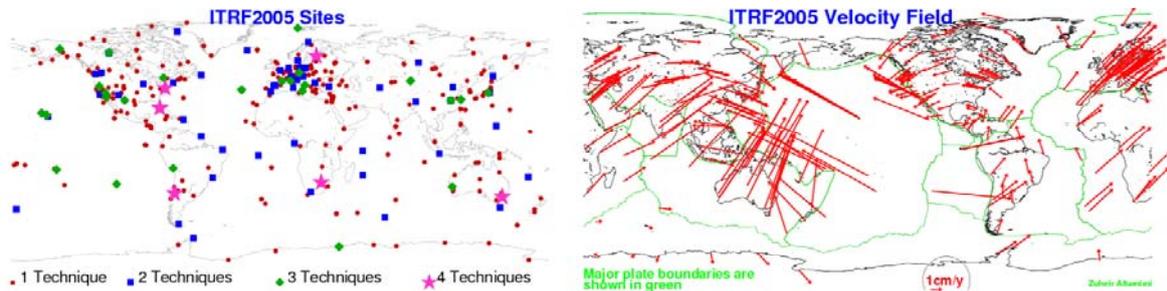


76

ITRF

- 国際地球基準座標系
 - IERSにより維持される基準座標系
 - GPS, VLBI, SLR, DORIS局の位置及び速度として実現

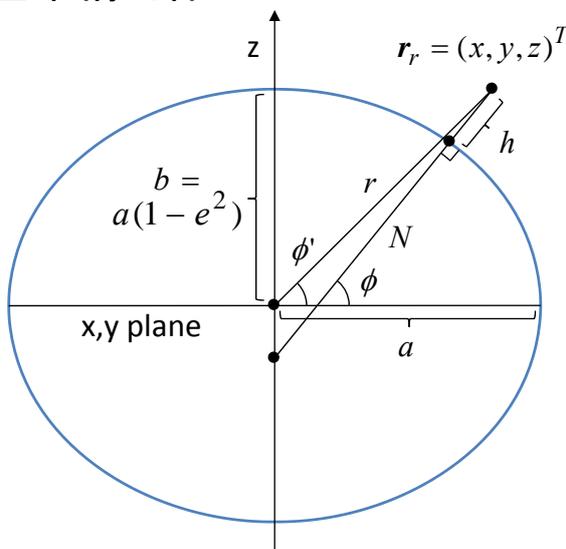
VLBI: Very Long Baseline Interferometry
 SLR: Satellite Laser Ranging
 DORIS: Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite
 ITRS: International Terrestrial Reference System
 IERS: International Earth Rotation Service



http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005.php

基準楕円及び座標系

基準楕円体:



ϕ' : 地心緯度
 ϕ : 測地緯度
 λ : 経度
 h : 楕円体高

	GRS 80	WGS 84
a (m)	6378137	6378137
f	1/298.257222 101	1/298.257223 563
GM (m ³ /s ²)	3986005.000 x 10 ⁸	3986004.418 x 10 ⁸

緯度/経度/高度 → X/Y/Z:

$$e^2 = f(2 - f)$$

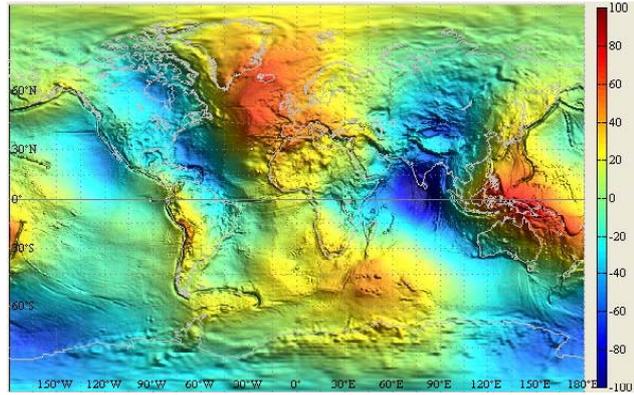
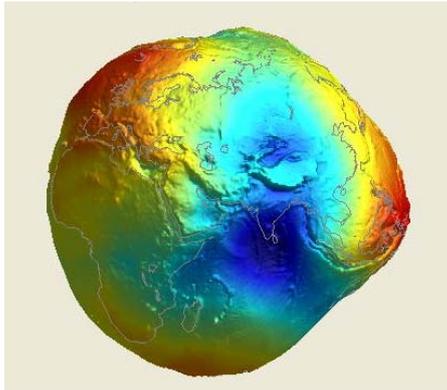
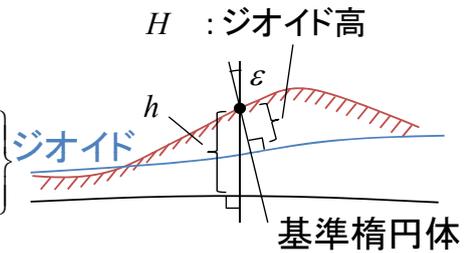
$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

$$\mathbf{r}_r = \begin{pmatrix} (N + h) \cos \phi \cos \lambda \\ (N + h) \cos \phi \sin \lambda \\ (N(1 + e^2) + h) \sin \phi \end{pmatrix}$$

ジオイド

地球重力:

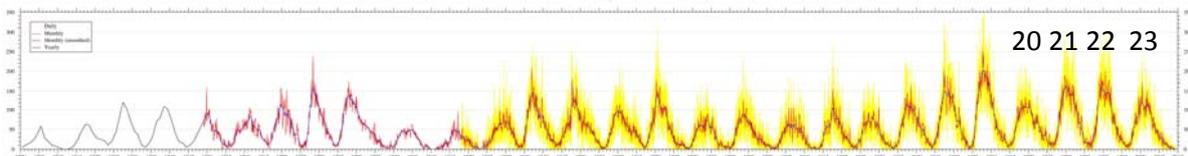
$$V(r, \phi', \lambda) = \frac{GM}{r} \left\{ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n (\bar{C}_{nm} Y_{nmc} + \bar{S}_{nm} Y_{nms}) \right\}$$



EGM96 ジオイドモデル

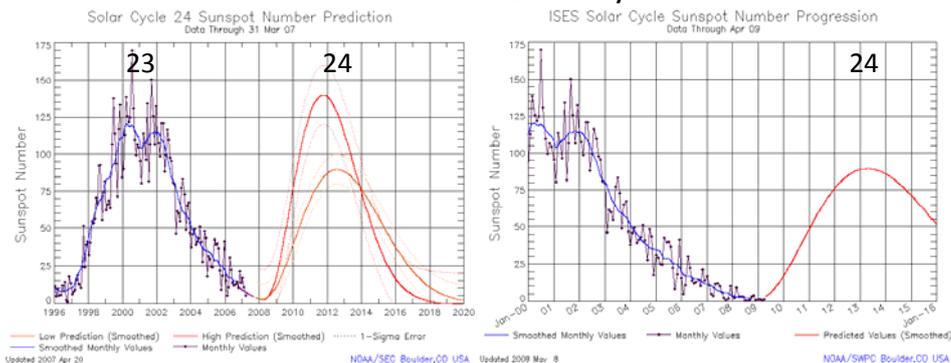
ソーラーサイクル

太陽黒点数: 1700-2009



by SIDC (Solar Influences Data Analysis Center) in Belgium (<http://sidc.oma.be>)

ソーラーサイクル予測: Cycle 24



by NOAA SWPC (Space Weather Prediction Center) (<http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle>)

LC: 線形結合

$$C = a\Phi_1 + b\Phi_2 + cP_1 + dP_2 (\Phi_1 = \lambda_1\phi_1, \Phi_2 = \lambda_2\phi_2)$$

	線形結合	係数				波長 (cm)	電離層 L1 ×	雑音 (cm)
		a	b	c	d			
L1	L1 Carrier-Phase	1	0	0	0	19.0	1.0	0.3
L2	L2 Carrier-Phase	0	1	0	0	24.4	1.6	0.3
LC/L3	Iono-Free Phase	C_1	C_2	0	0	-	0.0	0.9
LG/L4	Geometry-Free Phase	1	-1	0	0	-	0.6	0.4
WL	Wide-Lane Phase	λ_W / λ_1	$-\lambda_W / \lambda_2$	0	0	86.2	1.3	1.7
NL	Narrow-Lane Phase	λ_N / λ_1	λ_N / λ_2	0	0	10.7	1.3	1.7
MW	Melbourne-Wübbena	λ_W / λ_1	$-\lambda_W / \lambda_2$	λ_N / λ_1	λ_N / λ_2	86.2	0.0	21
MP1	L1-Multipath	$2C_2 - 1$	$-2C_2$	1	0	-	0.0	30
MP2	L2-Multipath	$-2C_1$	$2C_1 - 1$	0	1	-	0.0	30

$$C_1 = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2), C_2 = -f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2), \lambda_W = 1 / (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2), \lambda_N = 1 / (1/\lambda_1 + 1/\lambda_2)$$

81

電離層薄膜球殻モデル

電離層モデル:

$$I = \frac{40.30 \times 10^{16}}{f^2} TEC \approx \frac{1}{\cos z'} \frac{40.30 \times 10^{16}}{f^2} \times VTEC(t, \phi_{pp}, \lambda_{pp})$$

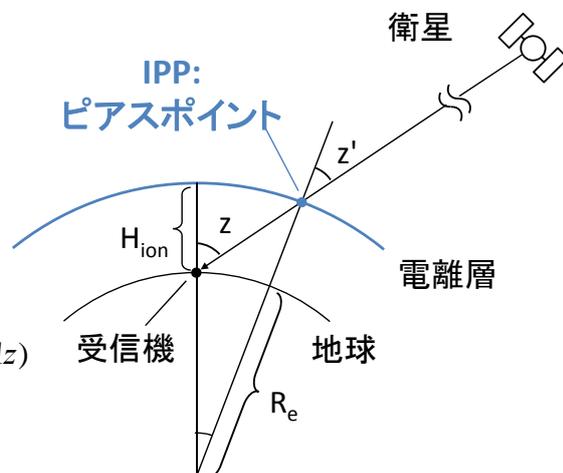
ピアスポイント位置:

$$z = \pi/2 - El$$

$$z' = \arcsin \frac{R_e \sin z}{R_e + H_{ion}}, \alpha = z - z'$$

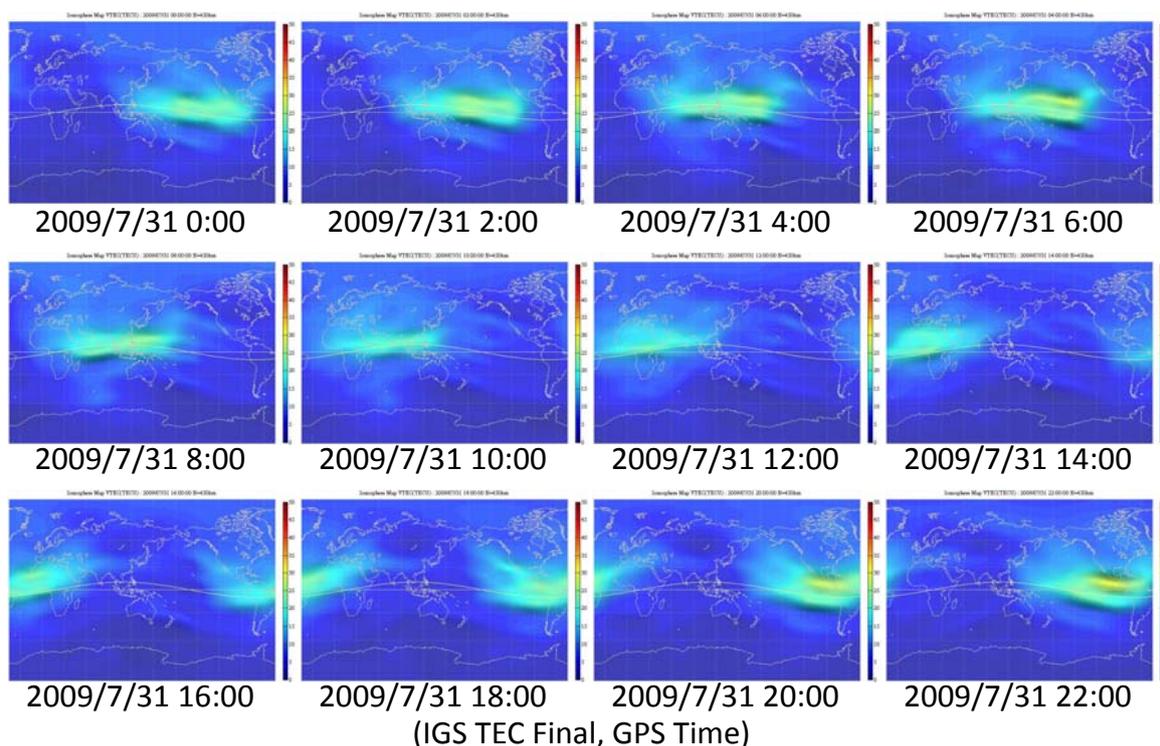
$$\phi_{pp} = \arcsin(\cos \alpha \sin \phi + \sin \alpha \cos \phi \cos Az)$$

$$\lambda_{pp} = \lambda + \arcsin \frac{\sin \alpha \sin Az}{\phi_{pp}}$$



82

TECグリッド



83

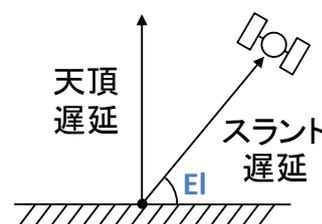
対流圏モデル

対流圏遅延:

$$T = m_h(El)ZHD + m_w(El)ZWD$$

$$ZHD = \frac{0.0022768 p}{1 - 0.00266 \cos 2\phi - 2.8 \times 10^{-7} H}$$

ZHD : 天頂乾燥遅延 (m)
 ZWD : 天頂湿潤遅延 (m)
 $m_h(El)$: 乾燥マッピング関数
 $m_w(El)$: 湿潤マッピング関数



ZWD → PWV (可降水量):

$$T_m = 70.2 + 0.72T$$

$$PWV = \frac{1 \times 10^5}{R_v \left(k_2 - k_1 \frac{m_v}{m_d} + \frac{k_3}{T_m} \right)} ZWD$$

$R_v = 461, k_1 = 77.6,$
 $k_2 = 71.98, k_3 = 3.754 \times 10^5$
 $m_v = 18.0152, m_d = 28.9644$

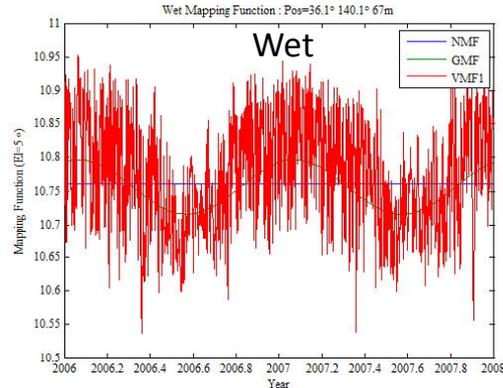
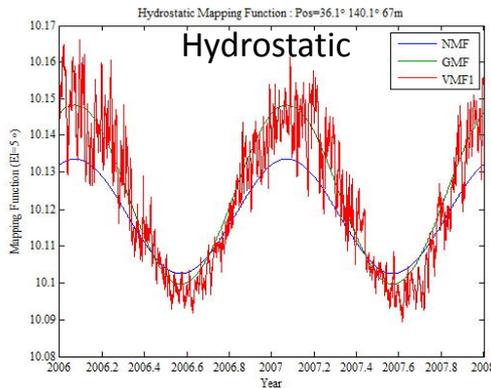
84

マッピング関数

$$m(EI) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{\sin(EI) + c}}}{\sin(EI) + \frac{b}{\sin(EI) + c}}$$

a, b, c : マッピング関数係数

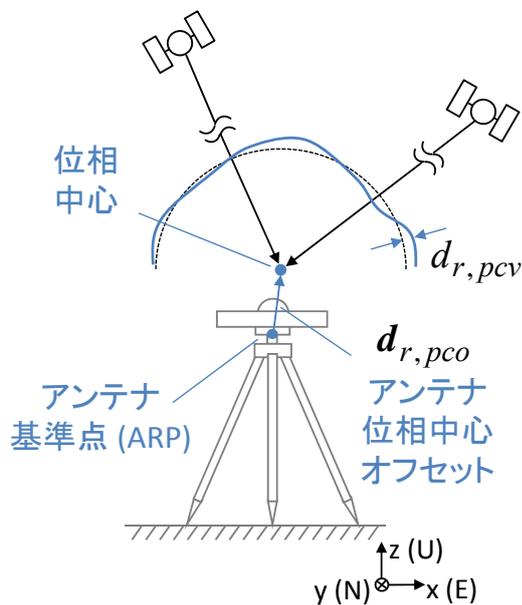
NMF, GMF, VMF1



(2006/1/1-2007/12/31, TSKB, EI=5deg)

アンテナ位相中心1

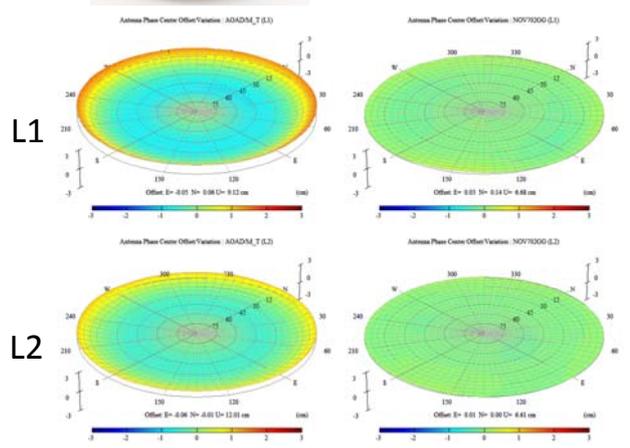
受信機アンテナ位相中心



アンテナ位相中心変動 (PCV)

チョークリング

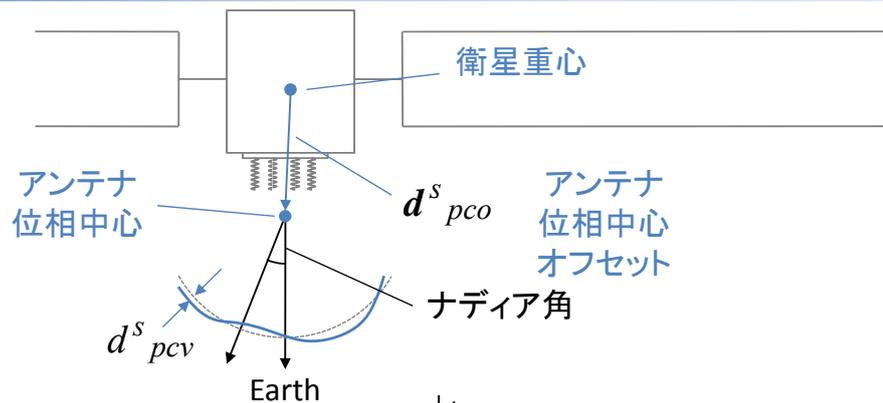
ゼロオフセット



IGS Absolute Antenna Model (IGS05.PCV)

アンテナ位相中心2

衛星アンテナ
位相中心:

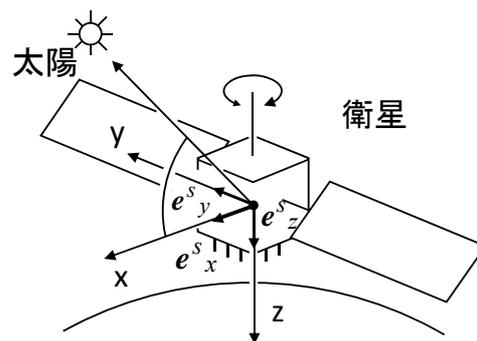


衛星機体座標→ECEF:

$$E_{sat \rightarrow ecef} = (e^s_x, e^s_y, e^s_z)$$

$$e^s_z = -\frac{r^s}{\|r^s\|}, e^s_s = \frac{r_{sun} - r^s}{\|r_{sun} - r^s\|}$$

$$e^s_y = \frac{e^s_z \times e^s_s}{\|e^s_z \times e^s_s\|}, e^s_x = e^s_y \times e^s_z$$



87

基線解析/RTKの技術要素

- 二重位相差観測方程式
 - 搬送波位相による高精度観測値
 - 衛星・受信機時計誤差消去
 - 暦誤差+電離層+対流圏遅延消去(短基線)
- 整数バイアス決定
 - 高速な高精度解
 - 高速初期化(瞬時～数分)
 - 高速再初期化(移動体・スリップ対応)

88

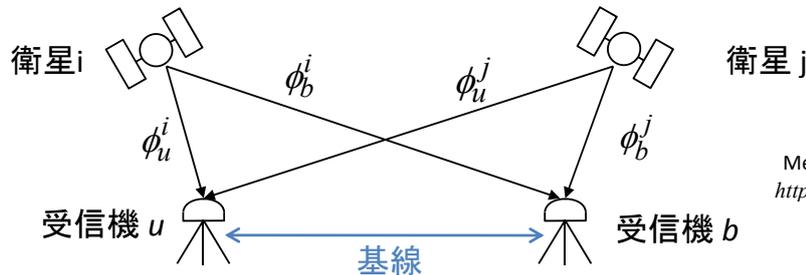
二重差

$$\begin{aligned}\Phi_{ub}^{ij} &\equiv \lambda((\phi_u^i - \phi_b^i) - (\phi_u^j - \phi_b^j)) \\ &= \rho_{ub}^{ij} + c(dt_{ub}^{ij} - dT_{ub}^{ij}) - I_{ub}^{ij} + T_{ub}^{ij} + \lambda B_{ub}^{ij} + d_{ub}^{ij} + \varepsilon_\Phi \\ &= \rho_{ub}^{ij} - I_{ub}^{ij} + T_{ub}^{ij} + \lambda N_{ub}^{ij} + d_{ub}^{ij} + \varepsilon_\Phi \\ dt_{ub}^{ij} &= dt_u^{ij} - dt_b^{ij} = 0, dT_{ub}^{ij} = dT_{ub}^i - dT_{ub}^j \approx 0 \\ B_{ub}^{ij} &= (\phi_{u,0} - \phi_0^i + N_u^i) - (\phi_{b,0} - \phi_0^i + N_b^i) - (\phi_{u,0} - \phi_0^j + N_u^j) + (\phi_{b,0} - \phi_0^j + N_b^j) = N_{ub}^{ij}\end{aligned}$$

(短基線+同一アンテナ)

$$\Phi_{ub}^{ij} \approx \rho_{ub}^{ij} + \lambda N_{ub}^{ij} + \varepsilon_\Phi$$

$$I_{ub}^{ij} = I_{ub}^i - I_{ub}^j \approx 0, T_{ub}^{ij} = T_{ub}^i - T_{ub}^j \approx 0, d_{ub}^{ij} = d_{ub}^i - d_{ub}^j \approx 0$$



Memo for Misra & Enge:
<http://gpspp.sakura.ne.jp/diary200608.htm>

89

基線解析

非線形最小二乗:

未知パラメータ:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{r}_u^T, N_{ub}^{s_2 s_1}, N_{ub}^{s_3 s_1}, \dots, N_{ub}^{s_m s_1})^T$$

観測ベクタ:

$$\mathbf{y} = (y_{t_1}^T, y_{t_1}^T, \dots, y_{t_n}^T)^T$$

観測モデル:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = (\mathbf{h}_{t_1}(\mathbf{x})^T, \mathbf{h}_{t_2}(\mathbf{x})^T, \dots, \mathbf{h}_{t_n}(\mathbf{x})^T)^T$$

$$\mathbf{H} = (\mathbf{H}_{t_1}^T, \mathbf{H}_{t_2}^T, \dots, \mathbf{H}_{t_n}^T)^T$$

観測誤差共分散:

$$\mathbf{R} = \text{blkdiag}(\mathbf{R}_{t_1}, \mathbf{R}_{t_2}, \dots, \mathbf{R}_{t_n})$$

解法:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + (\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_0))$$

$$\mathbf{y}_{t_k} = (\Phi_{ub,t_k}^{s_2 s_1}, \Phi_{ub,t_k}^{s_3 s_1}, \dots, \Phi_{ub,t_k}^{s_m s_1})^T$$

$$\mathbf{h}_{t_k}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \rho_{u,t_k}^{s_2 s_1} - \rho_{b,t_k}^{s_2 s_1} + \lambda N_{ub}^{s_2 s_1} \\ \rho_{u,t_k}^{s_3 s_1} - \rho_{b,t_k}^{s_3 s_1} + \lambda N_{ub}^{s_3 s_1} \\ \vdots \\ \rho_{u,t_k}^{s_m s_1} - \rho_{b,t_k}^{s_m s_1} + \lambda N_{ub}^{s_m s_1} \end{pmatrix}$$

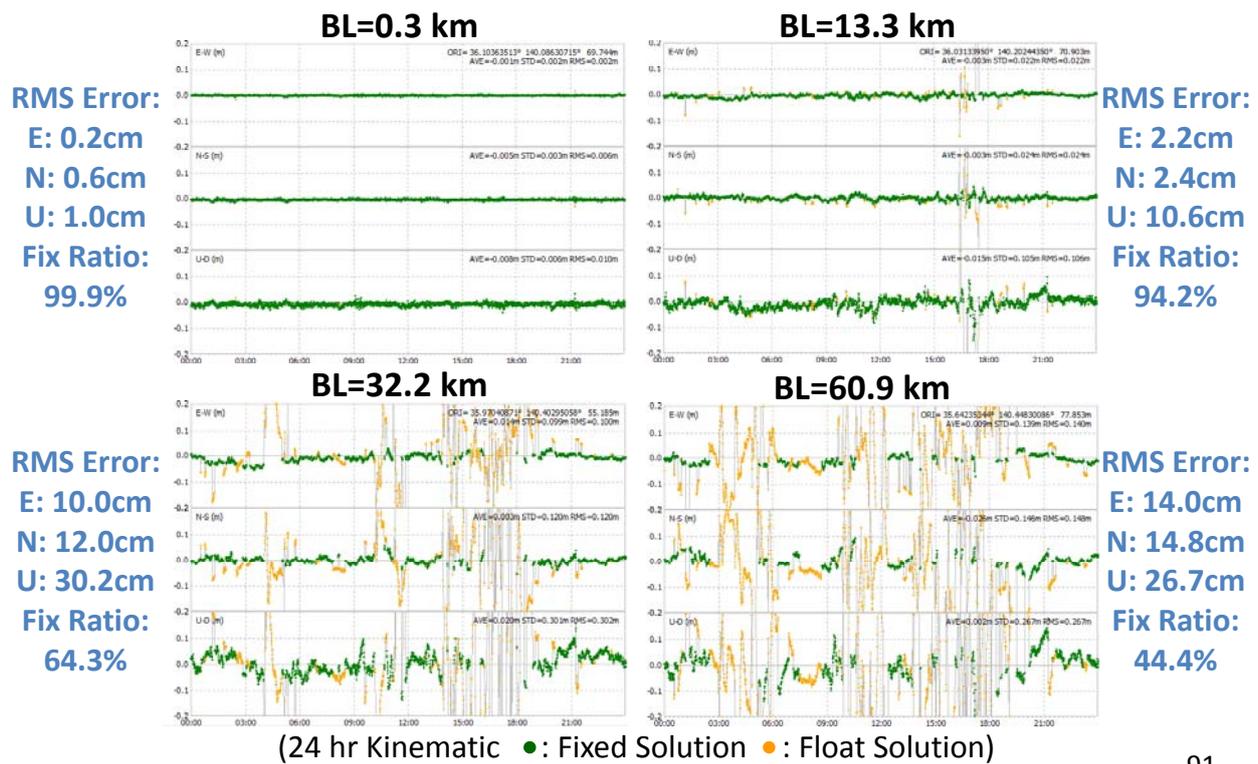
$$\mathbf{H}_{t_k} = \begin{pmatrix} -\mathbf{e}_{u,t_k}^{s_2 s_1 T} & \lambda & 0 & \dots & 0 \\ -\mathbf{e}_{u,t_k}^{s_3 s_1 T} & 0 & \lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{e}_{u,t_k}^{s_m s_1 T} & 0 & 0 & \dots & \lambda \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{t_k} = \begin{pmatrix} 4\sigma_\phi^2 & 2\sigma_\phi^2 & \dots & 2\sigma_\phi^2 \\ 2\sigma_\phi^2 & 4\sigma_\phi^2 & \dots & 2\sigma_\phi^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 2\sigma_\phi^2 & 2\sigma_\phi^2 & \dots & 4\sigma_\phi^2 \end{pmatrix}$$

\mathbf{r}_b : 基準局座標

90

基線長の影響



91

整数アンビギュイティ決定

- 目的
 - 精度改善
 - 収束時間高速化
- 多数の過去研究
 - 単純四捨五入
 - WL/NL手法
 - 受信機座標空間探索
 - アンビギュイティ空間探索
 - AFM, FARA, LSAST, LAMBDA, ARCE, HB-L³, Modified Cholesy Decomposition, Null Space, FAST, OMEGA, ...

92

ILS (整数最小二乗)

問題:

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= (\mathbf{a}^T, \mathbf{b}^T)^T, \mathbf{H} = (\mathbf{A}, \mathbf{B}) \\ \mathbf{y} &= \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{a} + \mathbf{B}\mathbf{b} + \mathbf{v} \\ \tilde{\mathbf{x}} &= \arg \min_{\mathbf{a} \in \mathbf{Z}^n, \mathbf{b} \in \mathbf{R}^m} (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x})^T \mathbf{Q}_y^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}) \end{aligned}$$

解法:

(1) 最小二乗 (フロート解)

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{a}} \\ \hat{\mathbf{b}} \end{pmatrix} = \mathbf{Q}_x \mathbf{H}^T \mathbf{Q}_y^{-1} \mathbf{y}, \mathbf{Q}_x = \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_a & \mathbf{Q}_{ab} \\ \mathbf{Q}_{ba} & \mathbf{Q}_b \end{pmatrix} = (\mathbf{H}^T \mathbf{Q}_y \mathbf{H})^{-1}$$

(2) 残差を最小化する整数ベクタ探索

$$\tilde{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a} \in \mathbf{Z}^n} (\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{a})^T \mathbf{Q}_a^{-1} (\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{a})$$

(3) フロート解改良

$$\tilde{\mathbf{b}} = \hat{\mathbf{b}} - \mathbf{Q}_{ba} \mathbf{Q}_a^{-1} (\hat{\mathbf{a}} - \tilde{\mathbf{a}})$$

93

LAMBDA

Teunissen, P.J.G. (1995)

The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: a method for fast GPS integer ambiguity estimation. *Journal of Geodesy*, Vol. 70, No. 1-2, pp. 65-82.

• ILS Estimation with:

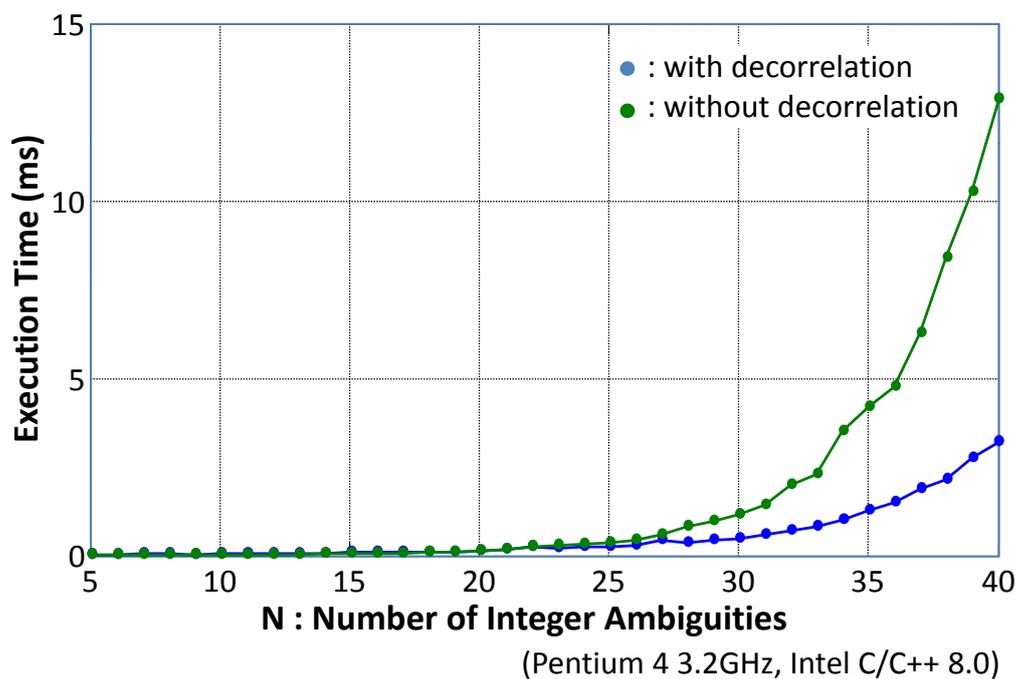
- Shrink Integer Search Space with "Decorrelation"
- Efficient Tree Search Strategy
- Similar to *Closest Point Search with LLL Lattice Basis Reduction* Algorithm

$$\tilde{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a} \in \mathbf{Z}^n} (\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{a})^T \mathbf{Q}_a^{-1} (\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{a})$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{z}} &= \mathbf{Z}^T \hat{\mathbf{a}}, \mathbf{Q}_z = \mathbf{Z}^T \mathbf{Q}_a \mathbf{Z} \\ \tilde{\mathbf{z}} &= \arg \min_{\mathbf{z} \in \mathbf{Z}^n} (\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z})^T \mathbf{Q}_z^{-1} (\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z}) \\ \tilde{\mathbf{a}} &= \mathbf{Z}^{-T} \tilde{\mathbf{z}} \end{aligned}$$

94

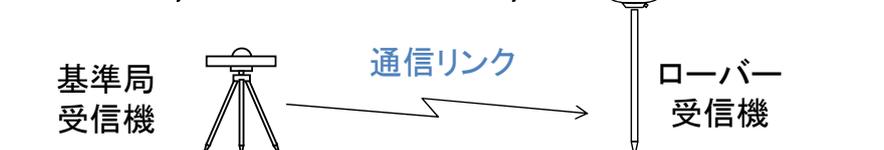
LAMBDA実行時間



95

RTK (リアルタイムキネマティック)

- 基線解析による精密測位技術
 - ローバアンテナ位置のリアルタイム算出
 - 通信リンク
 - OTF (オンザフライ) 整数アンビギュイティ決定
 - 精度: $1 \text{ cm} + 1 \text{ ppm} \times \text{基線長 (水平RMS)}$
 - 応用:
測地測量, 建設機械制御, 精密農業等



96

ネットワークRTK (NRTK)

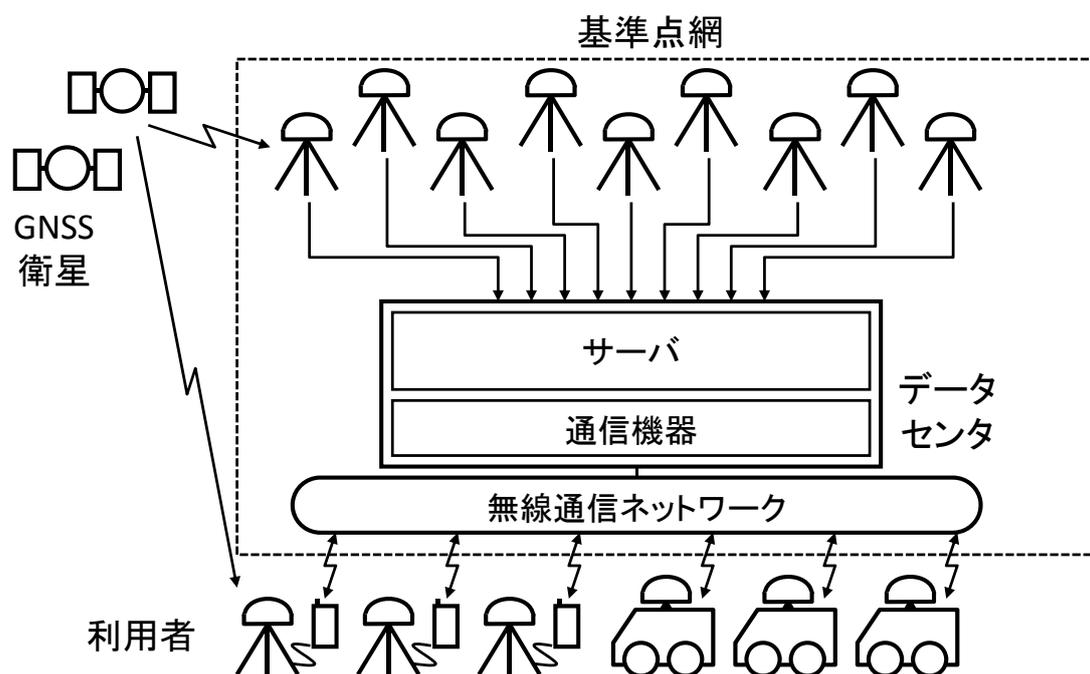
- 基準点の共同利用
 - 基準点ネットワークの利用
 - 利用者→単独受信機のみ
- 利用可能エリアの拡大
 - 観測値補間→基線長制限緩和、基準点削減
 - 広範囲なRTK-GPS利用可能エリア



利用者により使い易い技術・広汎な応用

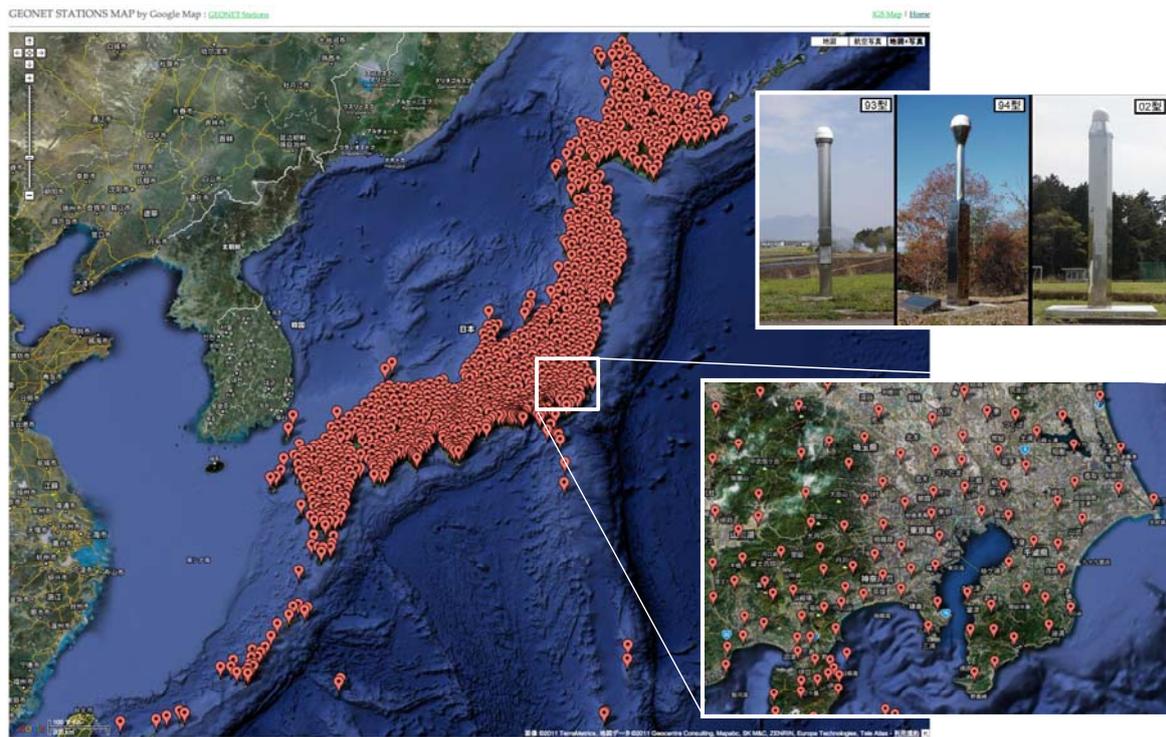
97

NRTKシステム構成



98

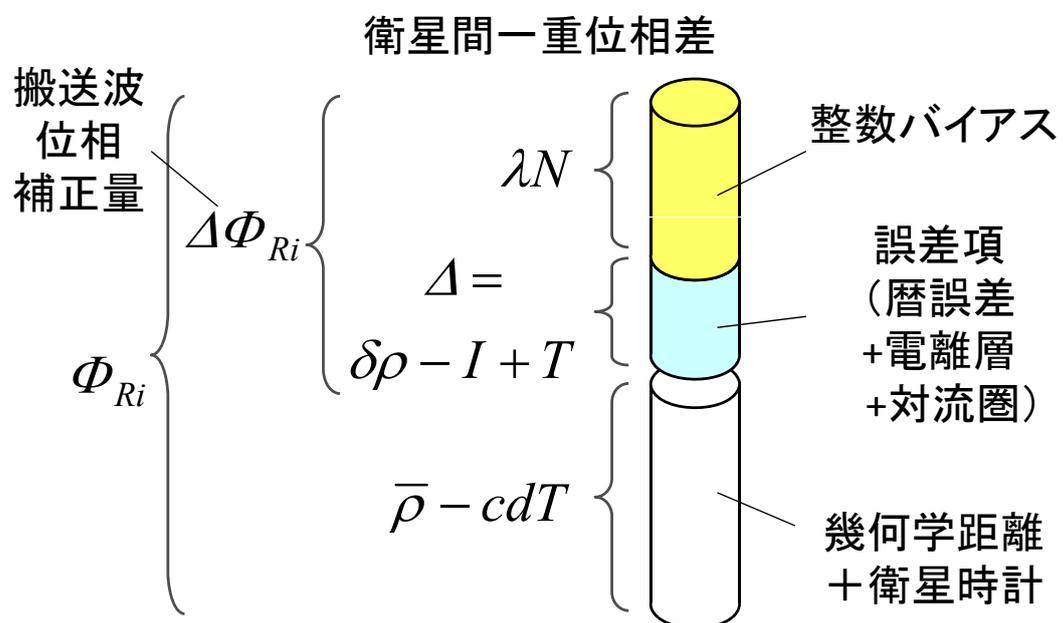
GEONET



(<http://terras.gsi.go.jp/ja/index.htm>)

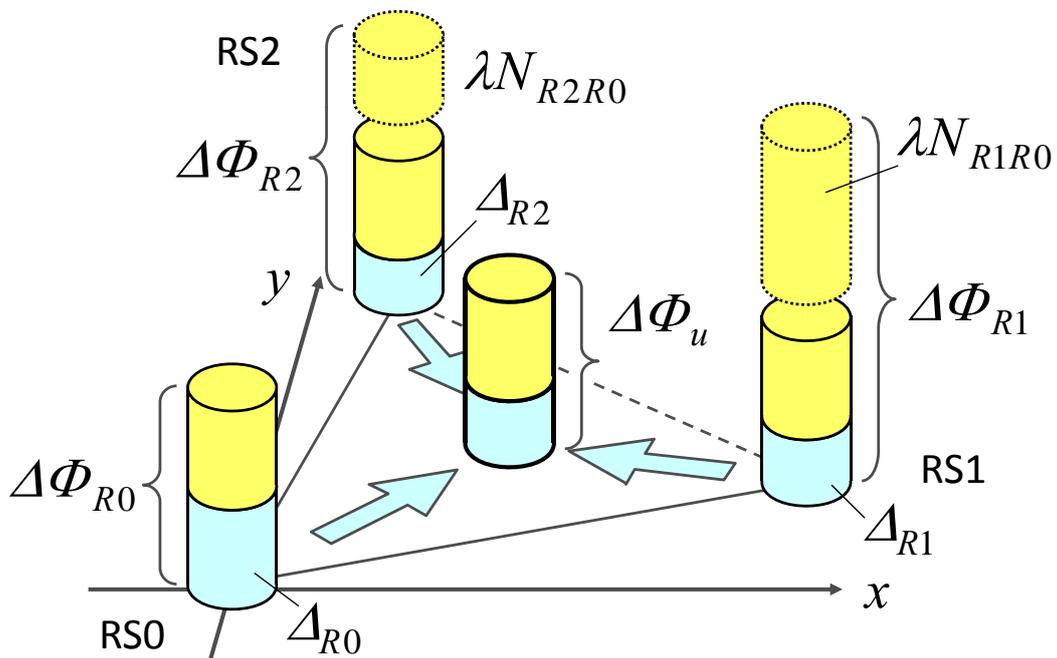
99

補正情報：基準点実観測値



100

補正情報: 補正量補間



101

補正情報: 仮想基準点観測値

- 衛星間一重補正量 → 衛星毎補正量

$$\begin{pmatrix} \Delta\Phi_u^1 \\ \Delta\Phi_u^2 \\ \Delta\Phi_u^3 \\ \vdots \\ \Delta\Phi_u^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta\Phi_u^{12} \\ \Delta\Phi_u^{13} \\ \vdots \\ \Delta\Phi_u^{1n} \\ 0 \end{pmatrix}$$

- 仮想基準点位相観測値

$$\Phi_u^s = \bar{\rho}_u^s - cdT^s + \Delta\Phi_u^s$$

102

NRTKサービス

- 国内NRTKサービスプロバイダ
 - ジェノバ (<http://www.jenoba.jp>)
 - 日本GPSデータサービス (<http://www.gpsdata.co.jp>)
 - 日本テラサット (<http://www.terasat.co.jp>)
 - (三菱電機)
- 主要サーバソフトウェア
 - Trimble GPSNet/RTKNet
 - GEO++ GNSSMART
 - Leica GNSS Spider

103

RTK用通信リンク

- ローカル (<300 m)
 - シリアル, USB, LAN, ... (有線)
 - 特小 (無線モデム), WiFi, ZigBee, DSRC, ... (無線)
- 地域 (<1,000 km)
 - アナログ回線, ISDN, 専用線, ... (有線)
 - 携帯回線 (2G, 3G, LTE, ...), ... (無線)
- グローバル (<10,000 km)
 - インターネット
 - 静止衛星 (Inmarsat, WideStar II, ...)
 - 低軌道衛星 (Iridium, Orbicom, ...)

104

(6) RTKPOSTによる基線解析

105

RTKPOSTによる基線解析

- RTKCONVによる受信機ログのRINEX変換
- RTKPLOTによる観測データ解析
- RTKPOSTによる基線測位
- RTKPLOTによる測位解プロット
- Google Earthによる測位解表示
- RTKPOSTオプション
- RTKPLOTオプション

106

(7) RTKNAVIによるRTK

107

RTK with RTKLIB 例 (1)

RTKNAVI RTKPLOT RTKPLOT (GE View)

Receiver:
CSG Shop
u-blox NEO-
M8T card

ONDA
V919 Air CH
9.7"
(2048x1536)
ATOM X5-8300,
RAM 4GB,
Flash 64GB

Com Link to base-station: Y-mobile WiFi Router

108

RTK with RTKLIB 例 (2)



Receiver:
CSG Shop
u-blox NEO-
M8T card

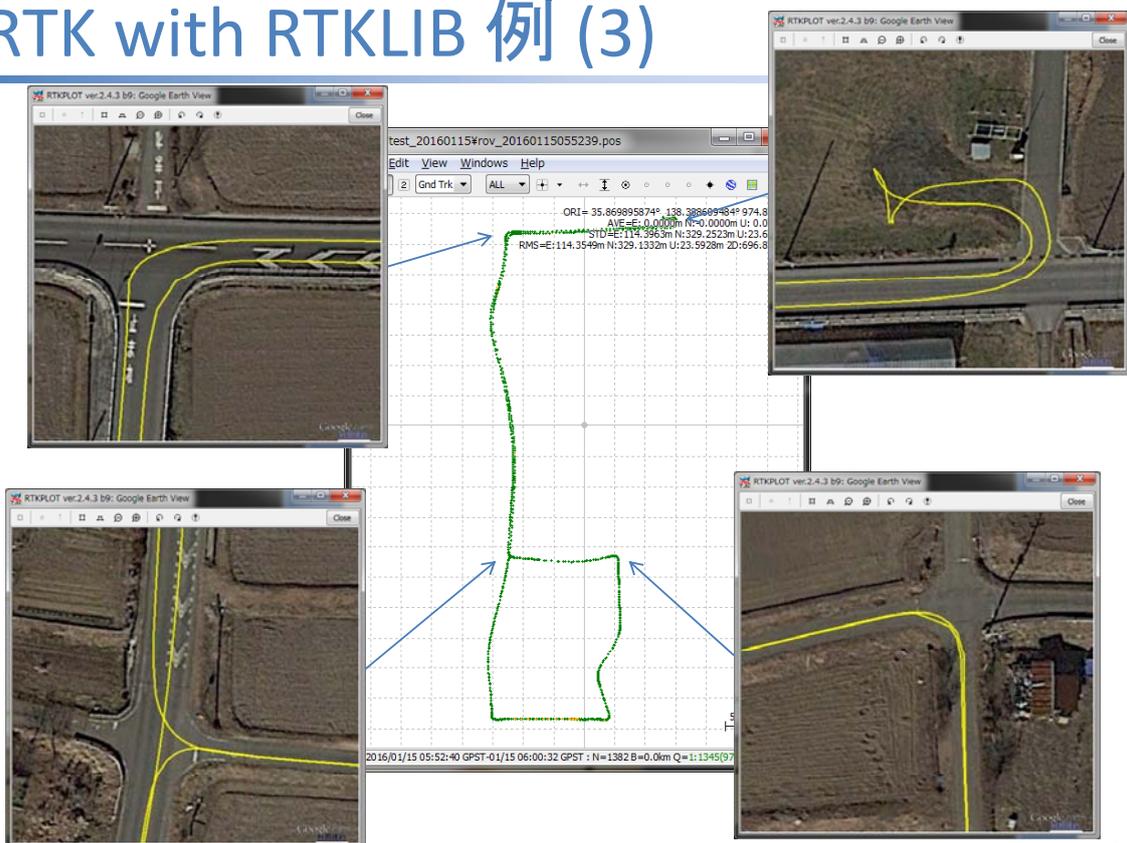
Tallysman
TW2400

Antenna:

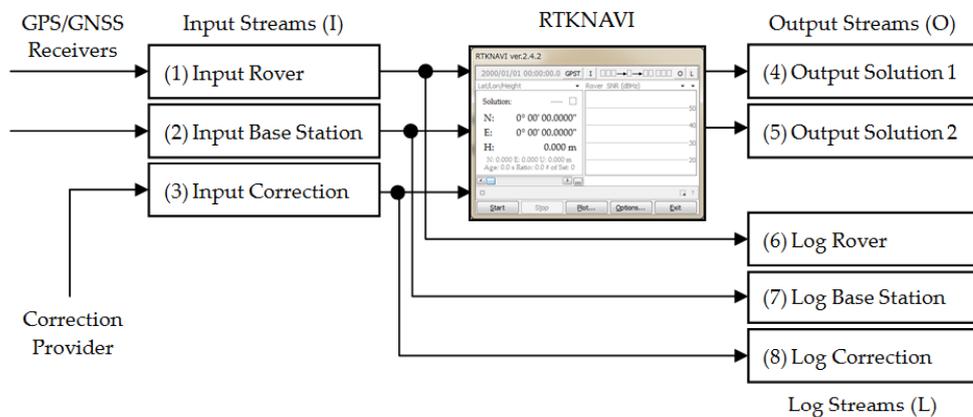
Tallysman
TW4721



RTK with RTKLIB 例 (3)

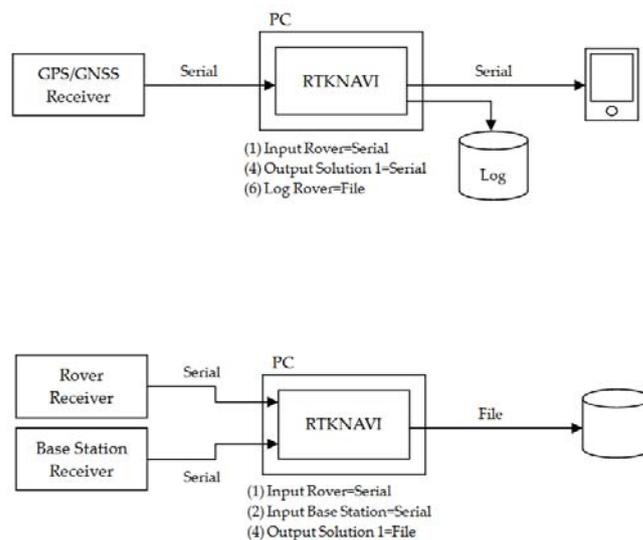


RTKNAVI入出力



111

RTKLIBによるRTシステム構成例1



112

RTKNAVIによるRTK

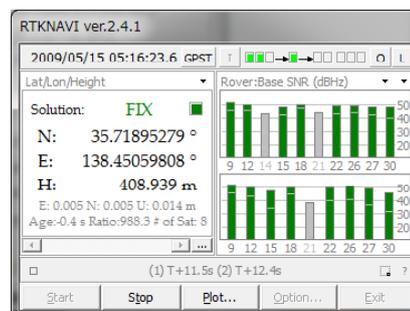
- RTKNAVIの入出力設定
- RTKNAVIによるリアルタイム測位
- RTKPLOTによるリアルタイム測位解プロット
- Google Earthによるリアルタイム測位解表示
- STRSVRによる通信データ中継・変換
- RTKNAVIオプション
- STRSVRオプション

115

プレイバックデータによるRTK

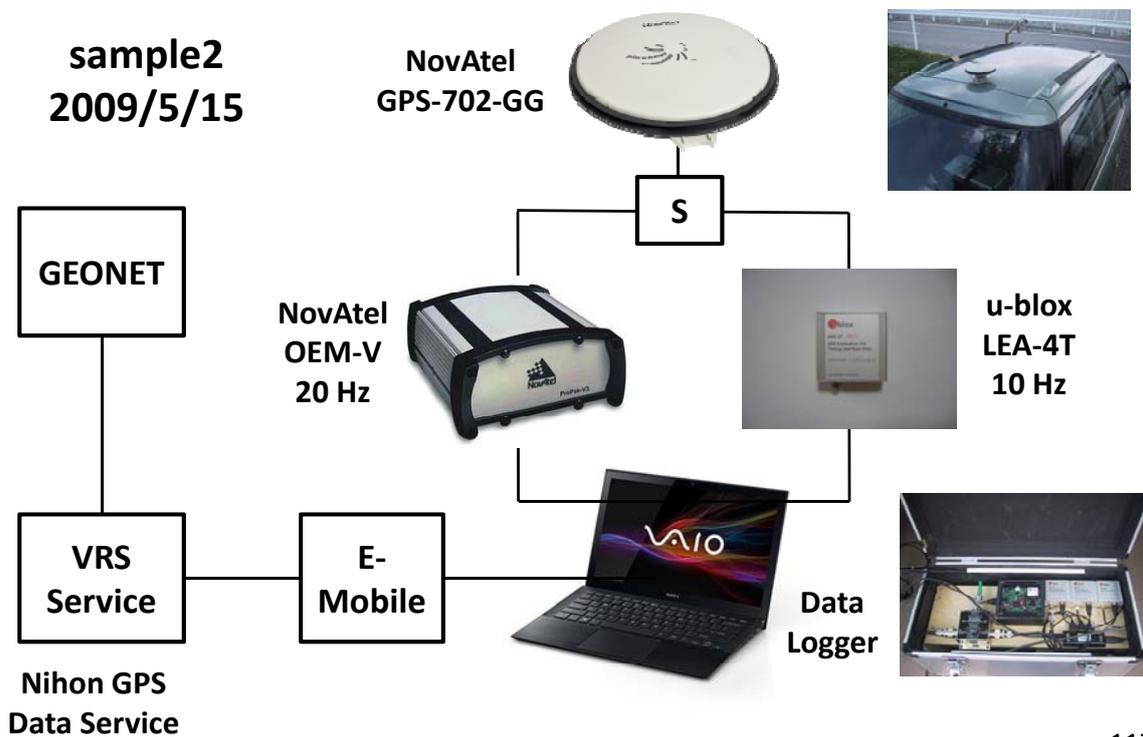
- **Program**
rtklib_2.4.3b9¥bin¥rtknavi.exe
- **Data 1**
sample2¥
oemv_2009515c.gps (NovAtel)
ubx_20090515c.ubx (u-blox)
0263_20090515c.rtc3 (VRS)
- **Data 2**
sample7¥
nov_201604250304.gps (NovAtel)
ubx_201604250304.ubx (u-blox)
ref_201604250304.gps (NovAtel)

RTKNAVI

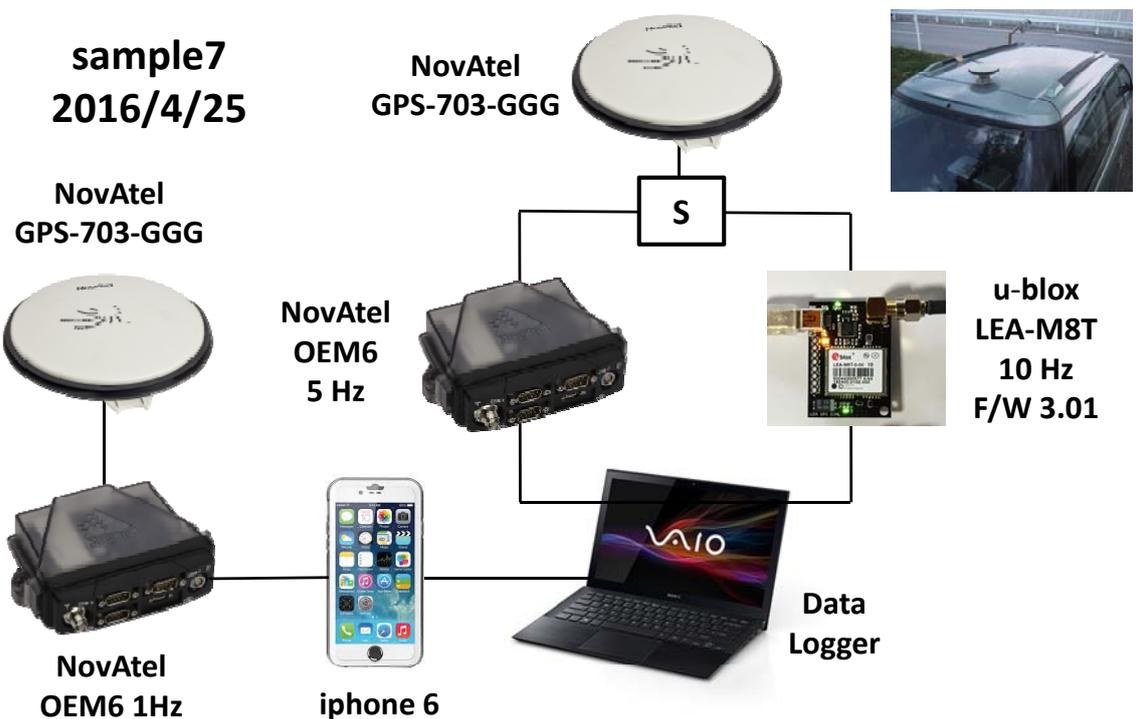


116

プレイバックデータ (1)

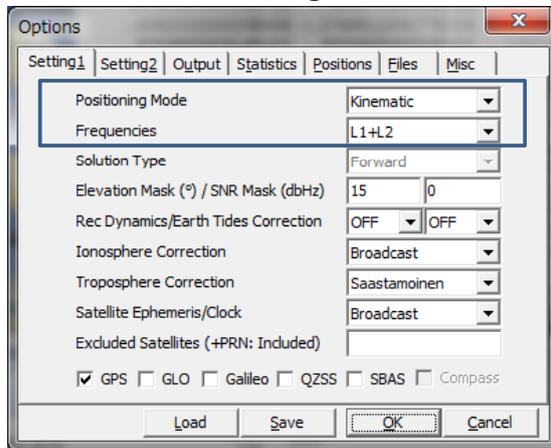


プレイバックデータ (2)

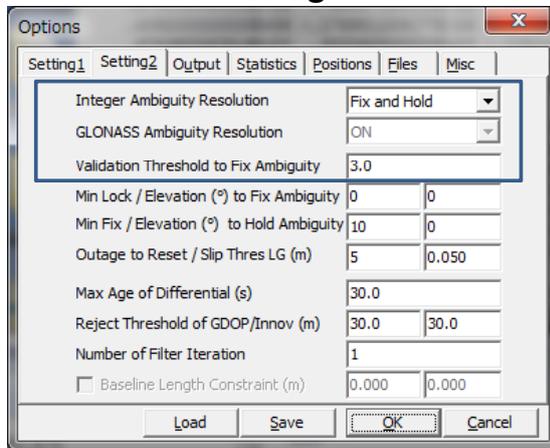


RTKNAVI - オプション

Setting1



Setting2



119

RTKLIBによる複合解析

NTRIP Caster

Rov
Novatel OEM6

Ref
Trimble NetR9

Ref Position

Lat : **35.6663346**

Lon : **139.7922008**

Height : **59.74**

153.121.59.53: 2101

Mountpoint:

Rov: ECJ12 (OEM6)

Ref: ECJ22 (BINEX)

User-ID: gspase

Password: gestiss

120

(8) RTKLIBの活用

121

RTKの応用 (1)



Geodetic Survey



Construction
Machine Control



Precision Agriculture



ITS (Intelligent
Transport System)

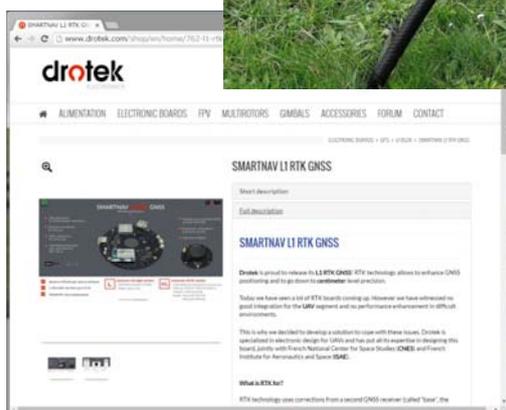


Mobile Mapping
System

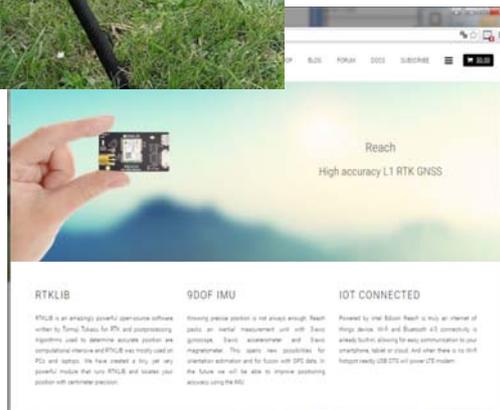


Sports

RTKの応用 (2)



<http://www.drotek.com>



<http://www.emlid.com>

123

RTKの制約・問題点

- 受信機コスト
 - 2周波受信機は未だに高価 (¥100～300万/台)
- 基準点設置・運用
 - 単独受信機のみで測位できない
- 基線長制限
 - 10～20 kmを越える基線で性能悪化
- 利用可能エリア制限
 - 基準点近傍エリアのみ
 - 広域利用には非常に多数の基準点が必要

124

RTK (従来)

Antenna: ~¥400K

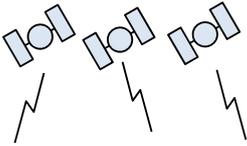


Receiver: ~¥2,000K

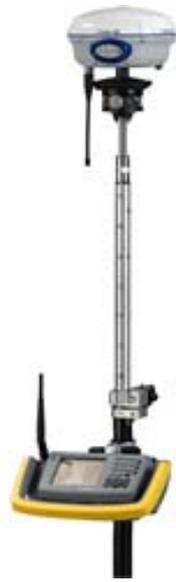


基準局

GPS



Antenna-Receiver: ~¥2,000K



Controller: ~¥500K

移動局

全部で
1式¥500万位

<http://www.trimble.com>

125

RTK with RTKLIB

Antenna: \$75.45

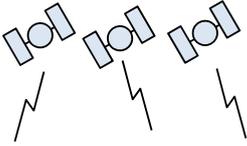


Receiver: \$74.99



基準局

GPS, GLONASS, QZSS, Galileo, BeiDou



Antenna: \$75.45



Receiver: \$74.99



移動局

全部で
1式¥6万位

PC (流用)



Windows Tablet \$179



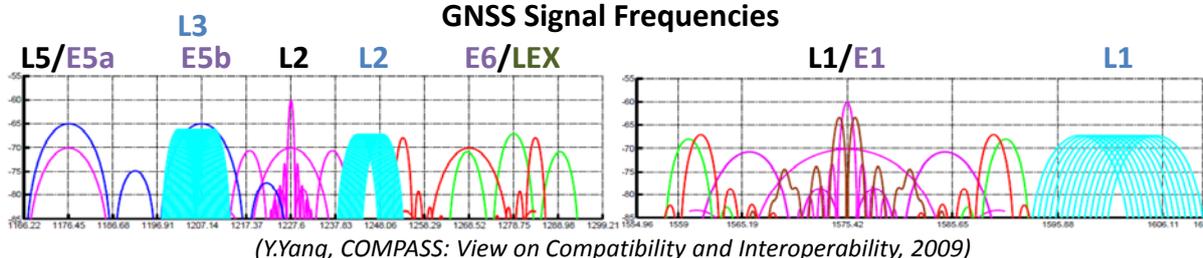
126

マルチGNSSの進展

Number of Planned GNSS Satellites

System	2010	2013	2016	2019
GPS	31	31	32	32
GLONASS	23 (+2)	24 (+3)	24 (+3)	24 (+3)
Galileo	0	4	18	27 (+3)
Compass	6	16	30	32 (+3)
QZSS	1	1	4	7
IRNSS	0	7	7	7
SBAS	7	8	11	11
Total	68	91	126	140

GNSS Signal Frequencies



(Y.Yang, COMPASS: View on Compatibility and Interoperability, 2009)

マルチGNSS RTK性能

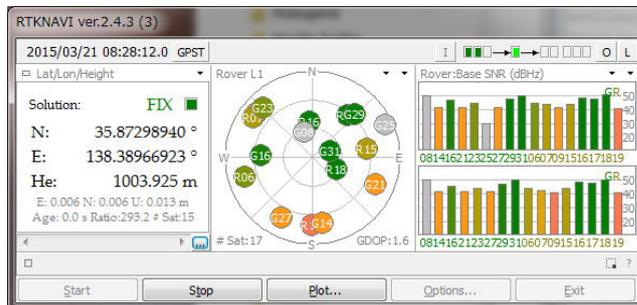
RTK Performance: Baseline 13.3 km, Instantaneous AR

		El Mask=15°				El Mask=30°			
GPS	Galileo	Fixing Ratio	RMS Error (cm)			Fixing Ratio	RMS Error (cm)		
			E-W	N-S	U-D		E-W	N-S	U-D
L1	-	49.7%	4.6	8.1	19.0	23.3%	71.4	115.0	289
L1,L2	-	99.0%	1.4	1.3	1.9	87.6%	3.4	10.5	15.5
L1,L2,L5	-	99.0%	1.4	1.3	1.9	87.3%	3.4	10.5	15.6
L1	E1	98.8%	1.3	1.2	1.9	90.1%	1.2	2.1	2.7
L1,L2	E1	98.9%	1.4	1.2	1.7	98.7%	1.2	1.0	1.6
L1,L2,L5	E1,E5a, E5b	98.9%	1.5	1.3	2.0	98.9%	1.3	1.1	1.8

u-blox LEA/NEO-M8T



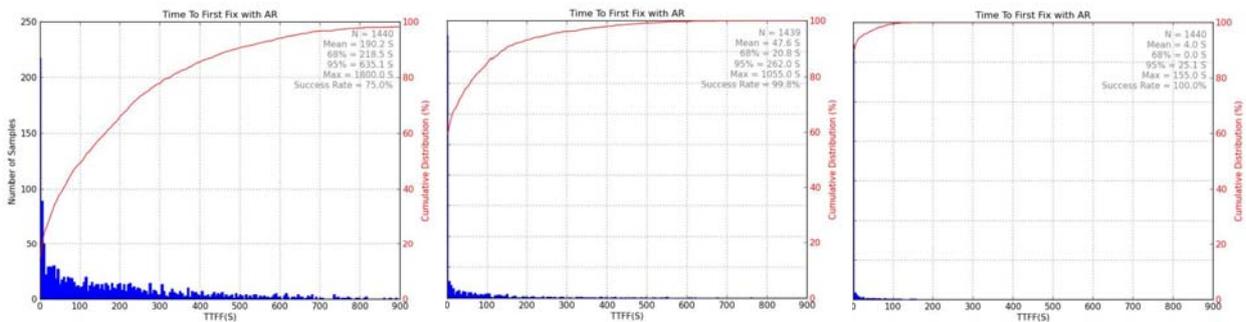
@\$179.9
(w/o antenna)
(<http://www.csgshop.com>)



RTKNAVI
2.4.2 p11

129

u-blox M8T AR性能



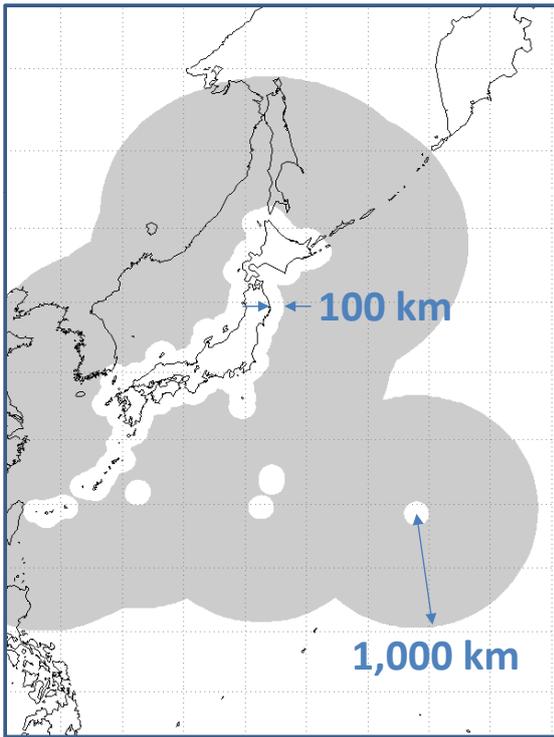
GPS only

GPS+GLO+QZS

GPS+BDS+QZS

130

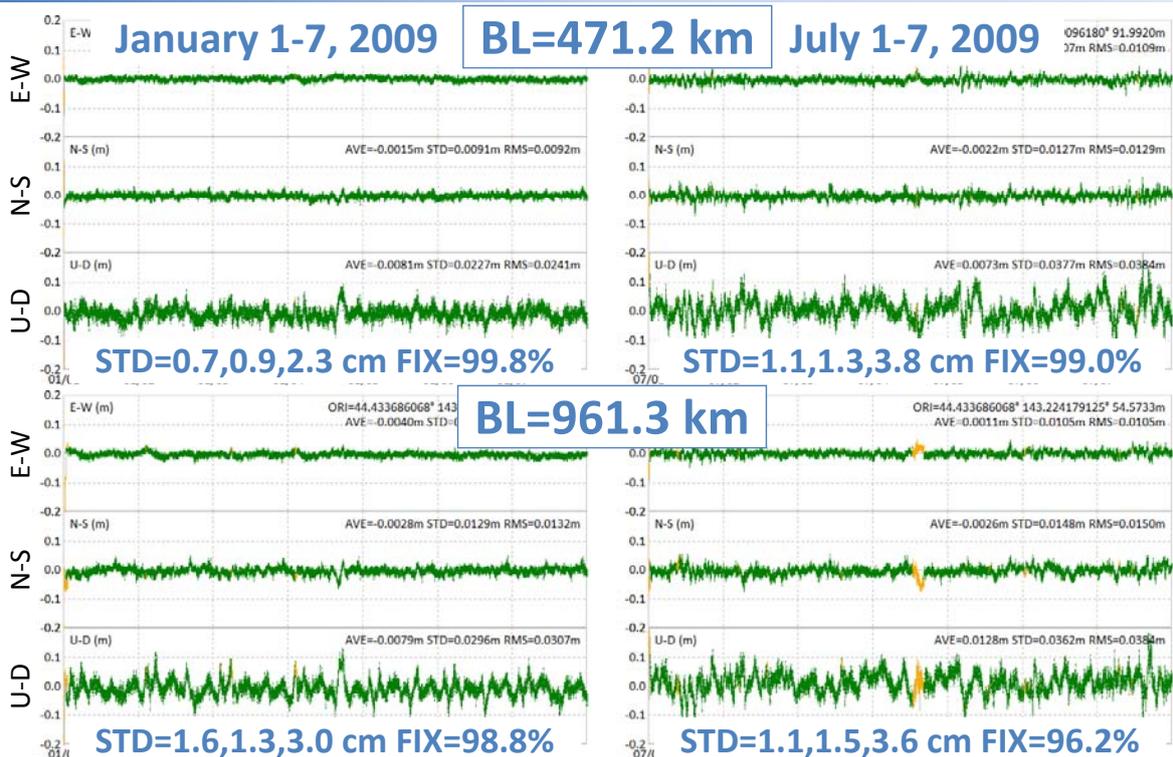
長基線RTK



**GPS Tsunami
Monitoring System
(Currently ~15 km off-shore)**

<http://www.tsunamigps.com>

RTKLIB長基線RTK性能



GPS活用震源・規模特定 来春から本格運用

地理院など

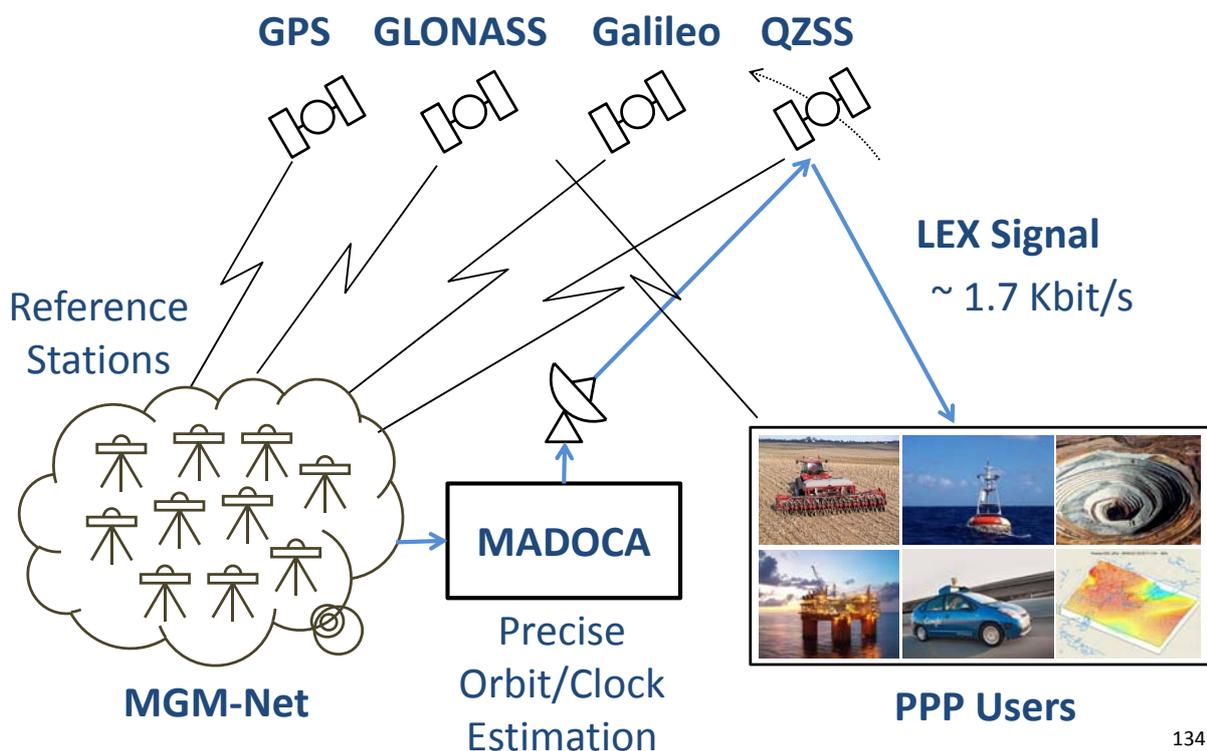
巨大地震が起きた際、GPSで正確な位置を計測している全国1300カ所の電子基準点のずれ方をもとに、震源や規模を数分で特定する技術を国土地理院などが開発、来春から本格運用を始めることがわかった。地理院は気象庁と共同で、電子基準点で地震をとりえるイメージ。

GPSと電子基準点
GPSは米国防務省が運用する人工衛星からの電波をもとに、地球上の位置を正確に計測するシステム。カーナビや携帯電話などで使われている。電子基準点は高さ約5mの柱で、内部にGPS衛星からの電波の受信機や通信機器などが収納されている。全国に平均して約20m間隔で設置されている。

気象庁の地震計では、規模を算出できなかった東北大の太田雄策准教授らは、電子基準点が地震で動いた向きや大きさを素早く分析し地震の規模や発生場所を自動的に割り出す技術を開発、来年4月から全国の電子基準点の動きをリアルタイムで監視する「REGARD」というシステムが稼働することになった。背景には、東日本大震災で地震計が振り切れ、規模の分析に時間がかかったことがある。気象庁は発生直後、マグニチュード(M)を実際より小さく発表し、M9.0と確定したのは2日後。宮川さんによると、REGARDを使うと3分ほどで計算できたという。ただREGARDはM8级以上の巨大地震が対象で、小さな地震では電子基準点が大きく動かないためとらえられないという。(福島県)

朝日新聞
2014/12/31

MADOCA-PPP



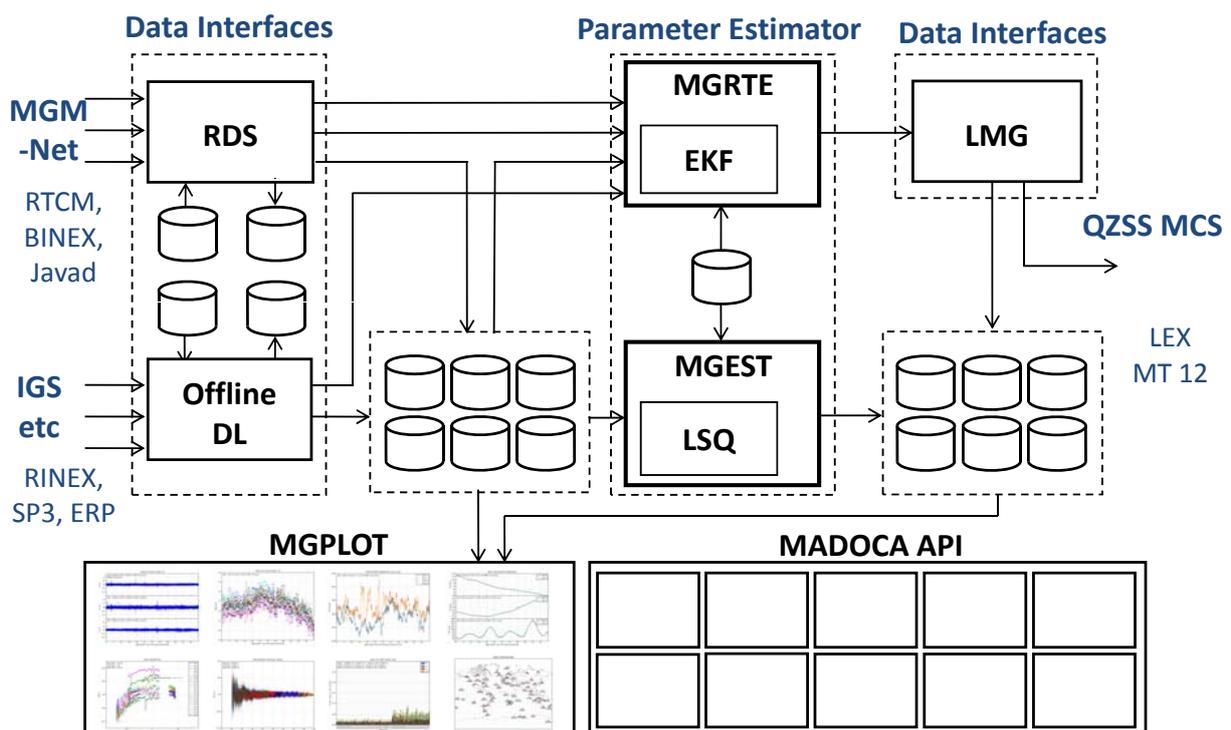
MADOCA (1)

Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis

- **For real-time PPP service via QZSS LEX**
 - Many (potential) applications over global area
- **Precise orbit/clock for multi-GNSS constellation**
 - Key-technology for future cm-class positioning
- **Brand-new codes developed from scratch**
 - Optimized multi-threading design for recent CPU
 - As basis of future model improvements

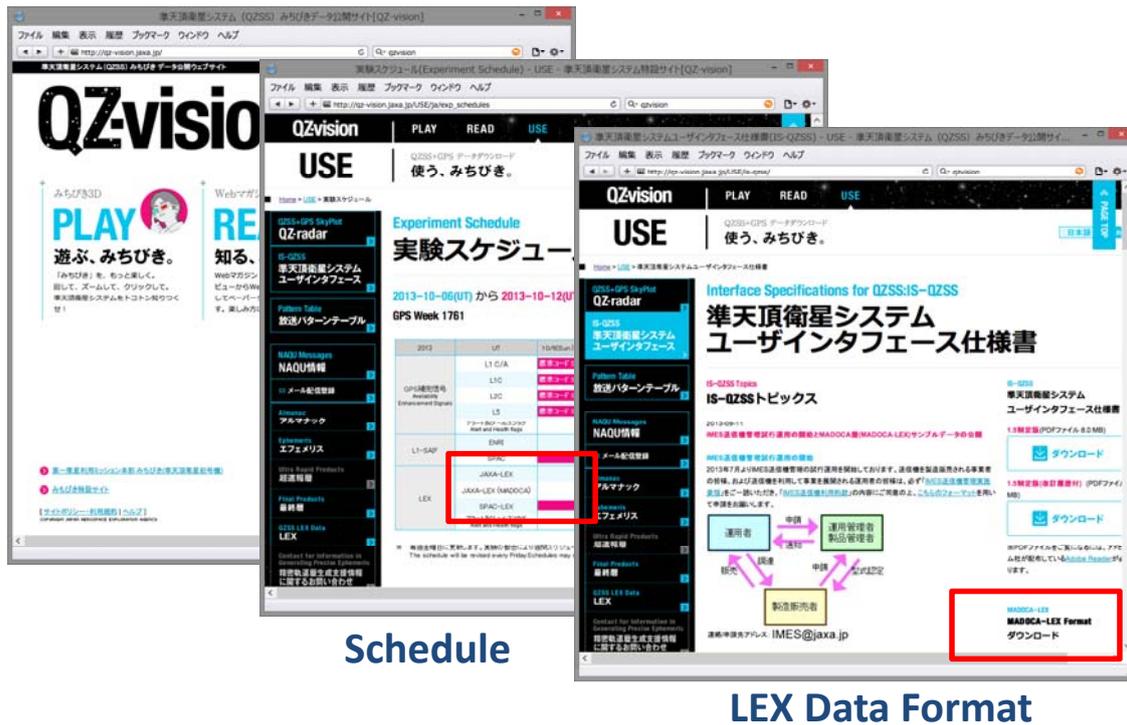
135

MADOCA (2)



136

MADOCA-PPP

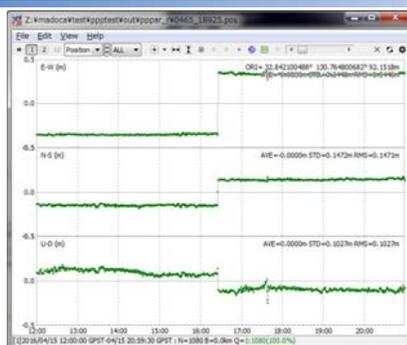


Schedule

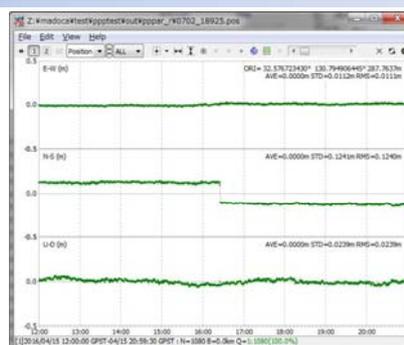
LEX Data Format

MADOCA PPP応用

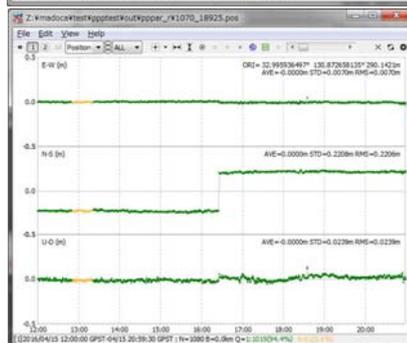
熊本 (0465)



泉 (0702)



菊池 (1070)



矢部A (1169)



2016/4/15 16:25 GPST 熊本地震 (本震) による電子基準点変位の後処理PPP解析 (RTKLIB 2.4.3 b9, Kinematic-PPP-AR, 暦/FCB: MADOCA最終暦)

RTKLIB: まとめ

- OSS (Open Source Software)
 - フリー (BSDライセンス、商用利用可)
 - ソースプログラム公開 (独自ブランチ作成可)
- GNSS解析パッケージ
 - 後処理解析
 - リアルタイム解析
- システム開発用プラットフォーム
 - 組込用CUI APの提供
 - 共通API提供