

平成27年度測位航法学会全国大会セミナー

GNSS測位入門からRTKLIBの活用まで (その2)



東京海洋大学 高須知二

2015-04-22 ~ 2015-04-23@東京海洋大学 越中島

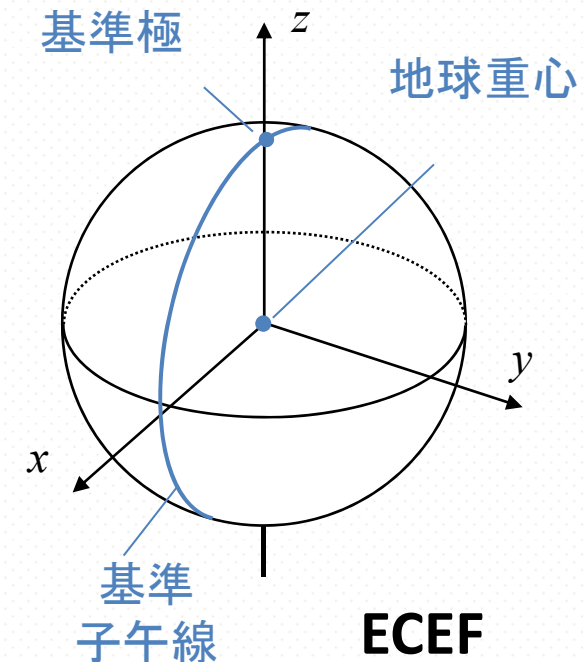
時間割

(1)	GNSS測位入門	4/22 (水)	9:30-10:20
(2)	RTKLIBの概要と導入 (実習)		10:30-11:20
(3)	RTKLIBの基本操作 (実習)		11:30-12:20
(4)	GNSS測位の基礎		13:30-14:20
(5)	RTKPLOTの基本操作 (実習)		14:30-15:20
(6)	RTKPOSTによる単独測位 (実習)		15:30-16:20
(7)	基線解析とRTKの基礎	4/23 (木)	9:30-10:20
(8)	RTKPOSTによる基線解析 (実習)		10:30-11:20
(9)	RTKNAVIによるRTK (実習)		11:30-12:30
(10)	RTKの応用		13:30-14:20
(11)	RTKLIBによる複合解析 (実習)		14:30-15:20
(12)	RTKLIBの活用		15:30-16:20

(7)
基線解析とRTKの基礎

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



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
 - ITRF2005, ITRF2000, ITRF97, ITRF96, ...

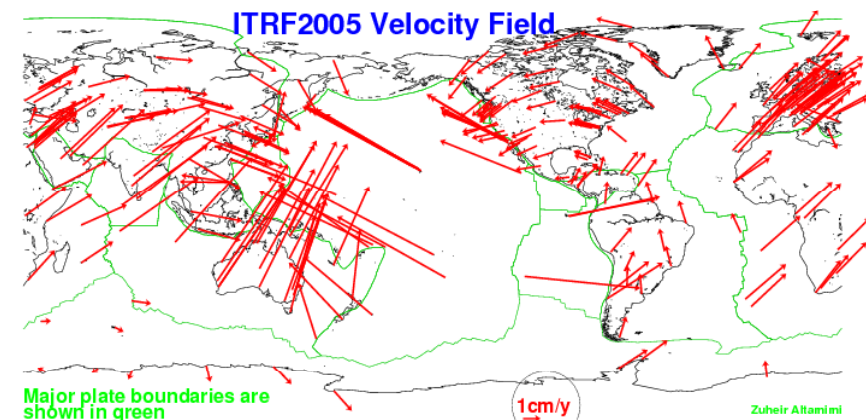
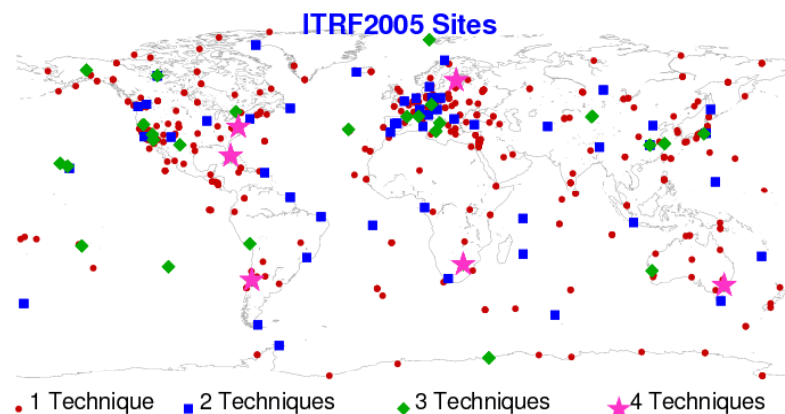
VLBI: Very Long Baseline Interferometry

SLR: Satellite Laser Ranging

DORIS: Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite

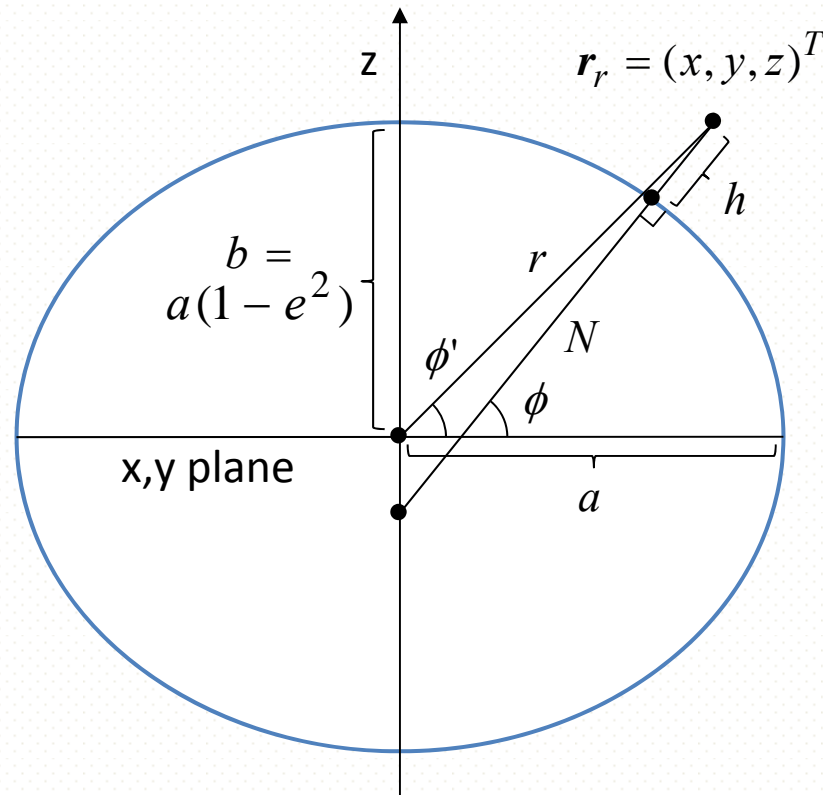
ITRS: International Terrestrial Reference System

IERS: International Earth Rotation Service



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:

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

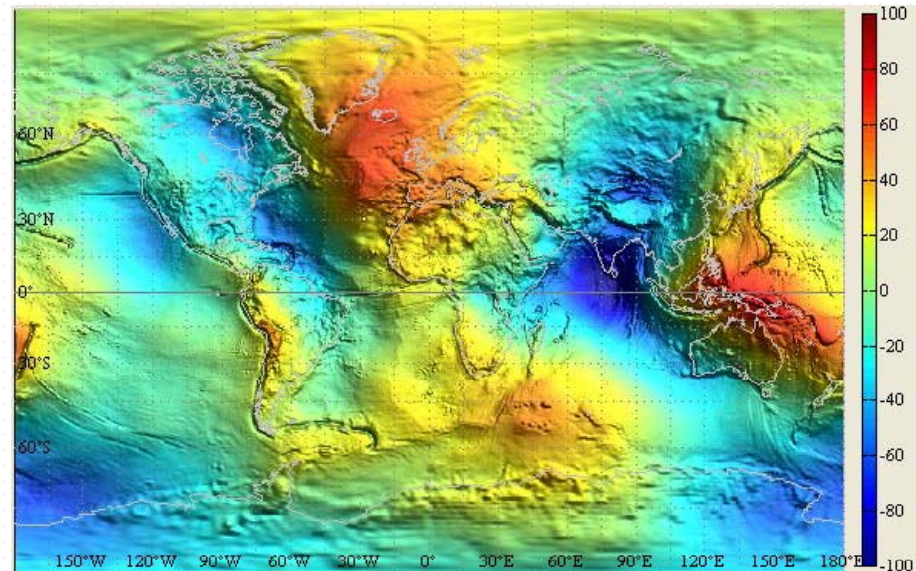
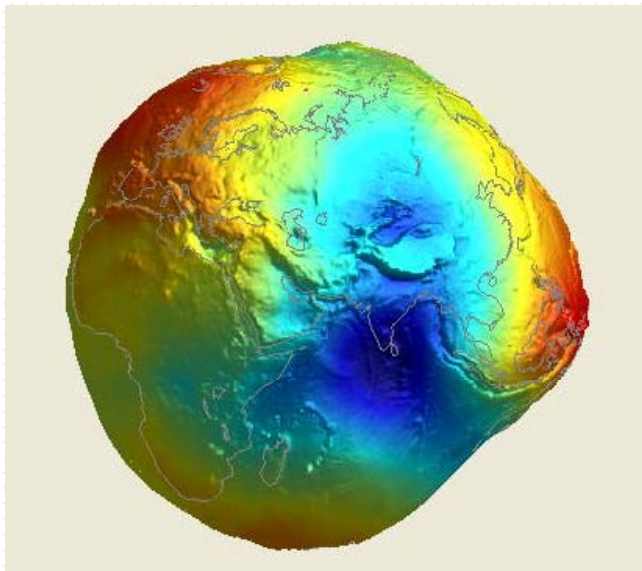
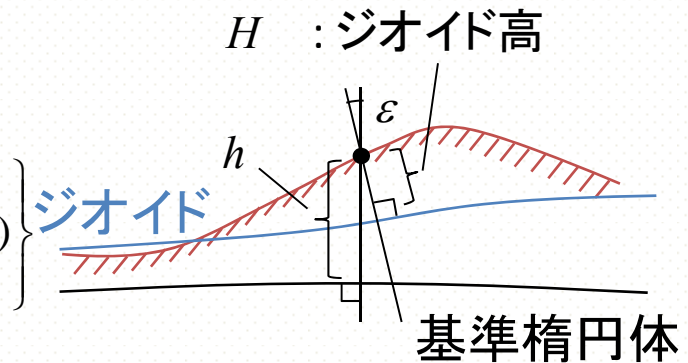
$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}}$$

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

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

球面調和関数

球面調和関数:

$$Y_{n0} = Y_{n0c}$$

$$Y_{nmc} = \bar{P}_{nm}(\sin \phi') \cos m\lambda$$

$$Y_{nms} = \bar{P}_{nm}(\sin \phi') \sin m\lambda$$

ルジャンドル多項式:

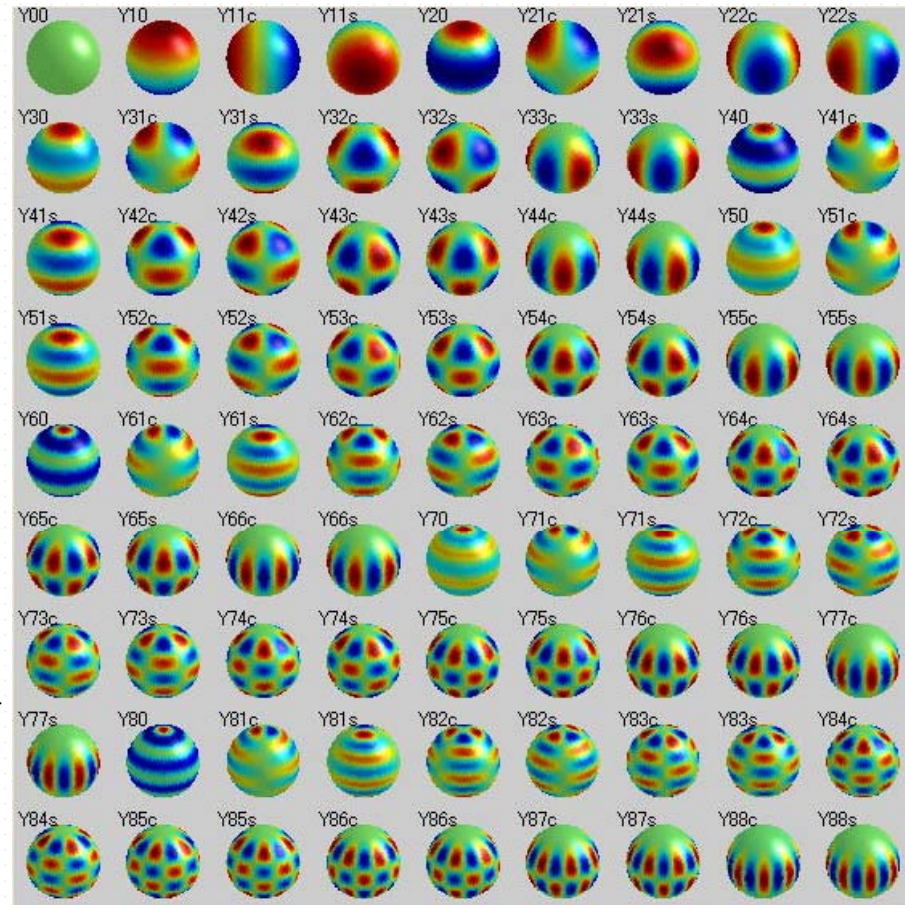
$$\bar{P}_{nm} = N_{nm}P_{nm}, P_{00}(x) = 1, P_{10}(x) = x$$

$$P_{n-1,n}(x) = 0,$$

$$P_{nn}(x) = (2n-1)(1-x^2)^{1/2}P_{n-1,n-1}(x)$$

$$P_{nm}(x) = \frac{(2n-1)xP_{n-1,m}(x) - (n+m-1)P_{n-2,m}(x)}{n-m}$$

$$N_{nm} = \begin{cases} \sqrt{2n+1} & (m=0) \\ \sqrt{\frac{2(2n+1)(n-m)!}{(n+m)!}} & (m>0) \end{cases}$$



座標変換

ヘルマート変換 (A to B):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_B = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} + (1 + D) \begin{pmatrix} 1 & -R_3 & R_2 \\ R_3 & 1 & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_A$$

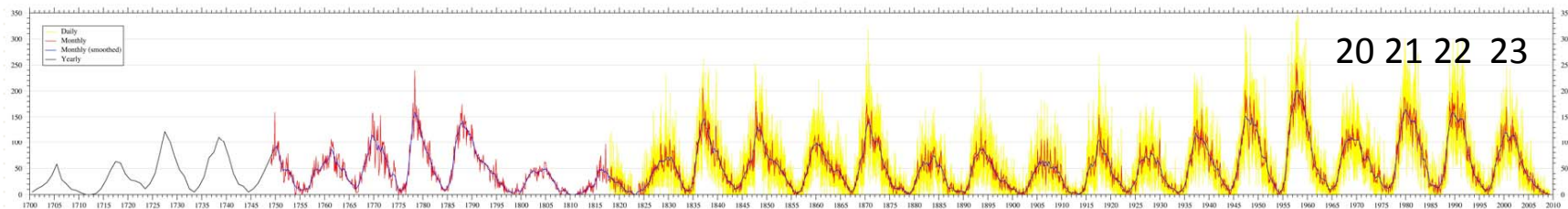
- T1, T2, T3 : 平行移動
- D : 拡大・縮小
- R1, R2, R3 : 回転

座標系		T1	T2	T3	D	R1	R2	R3
A	B	(mm)	(mm)	(mm)	(10 ⁻⁹)	(mas)	(mas)	(mas)
ITRF2005	ITRF2000	0.1	-0.8	-5.8	0.40	0.00	0.00	0.00
		-0.2/y	0.1/y	-1.8/y	0.08/y	0.00/y	0.00/y	0.00/y

(Epoch 2000.0)

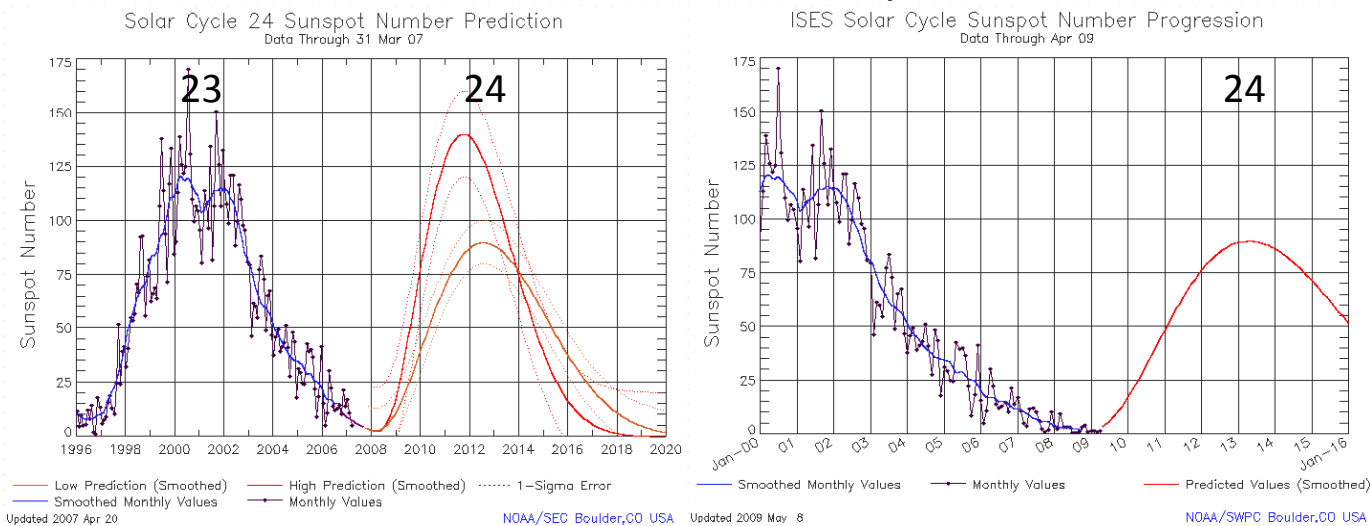
ソーラーサイクル

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

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

電離層薄膜球殻モデル

電離層モデル:

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

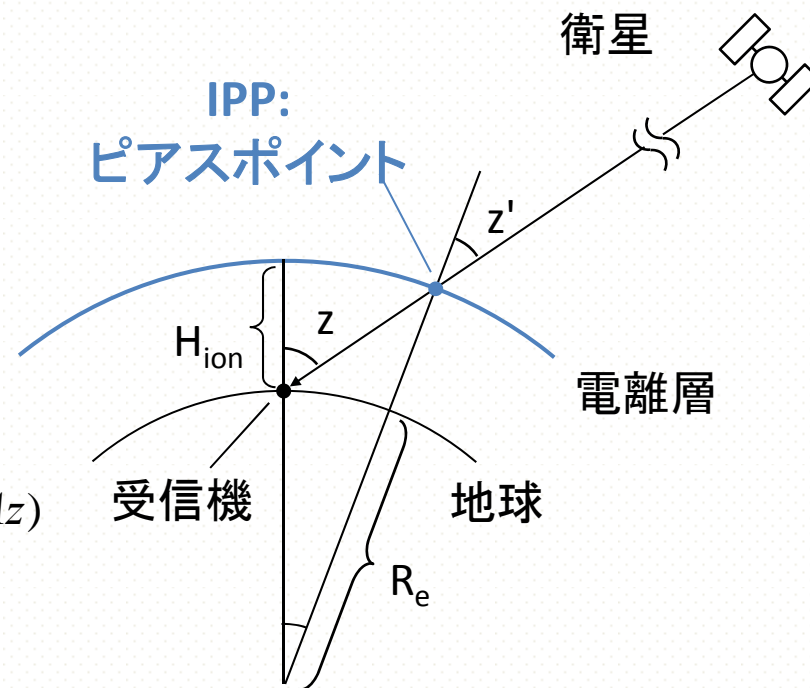
ピアスポイント位置:

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

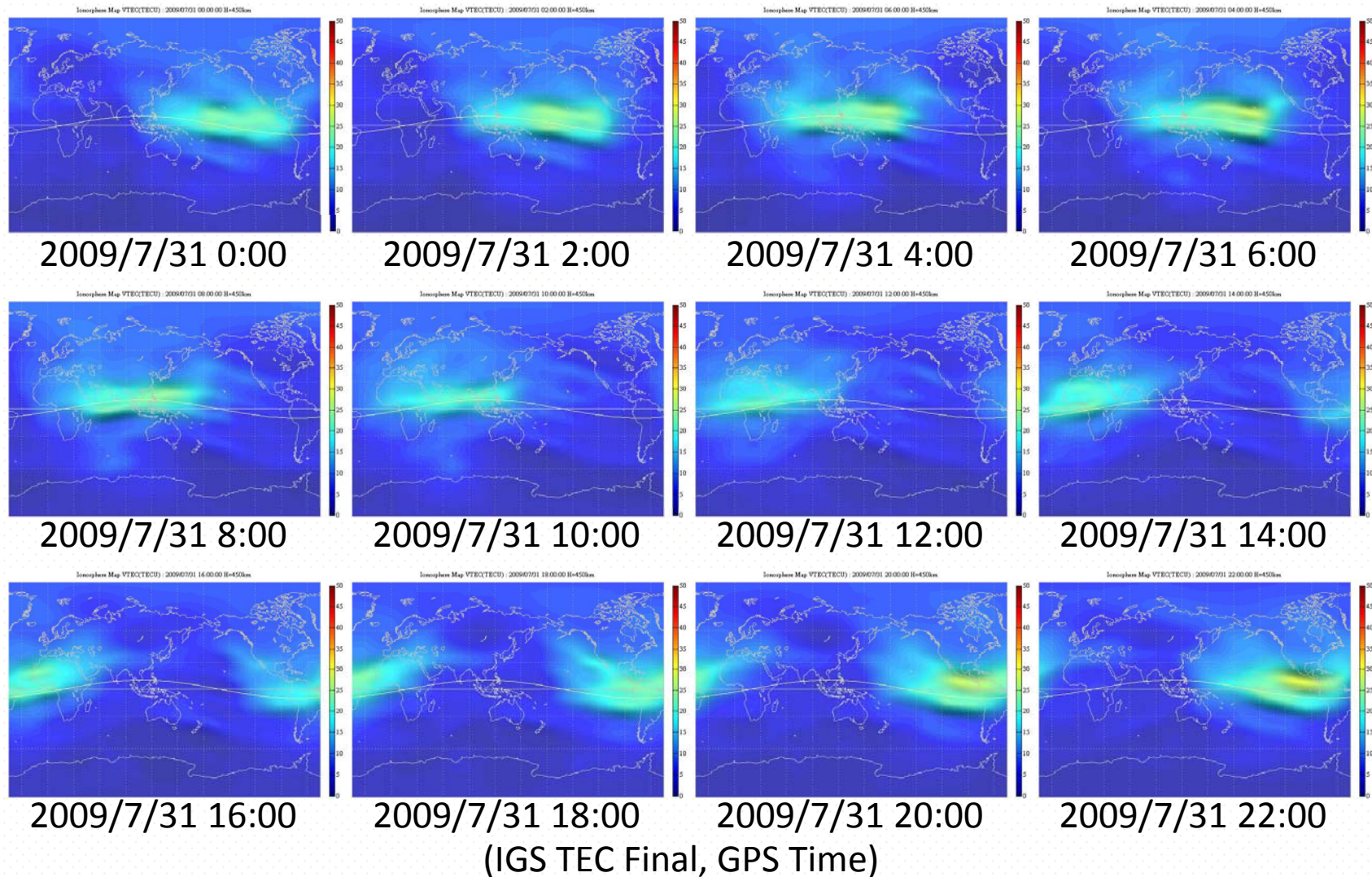
$$z' = \arcsin \frac{R_e \sin z}{R_e + H_{ion}}, \alpha = z - z'$$

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

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



TECグリッド



対流圏モデル

対流圏遅延:

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

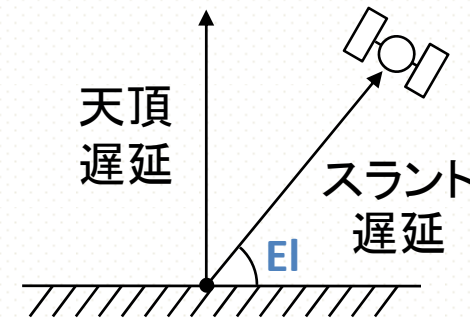
$$ZHD = \frac{0.0022768 p}{1 - 0.00266 \cos 2\phi - 2.8 \times 10^{-7} H}$$

: 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):

$$T_m = 70.2 + 0.72T$$

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

$$R_v = 461, k_1 = 77.6,$$

$$k_2 = 71.98, k_3 = 3.754 \times 10^5$$

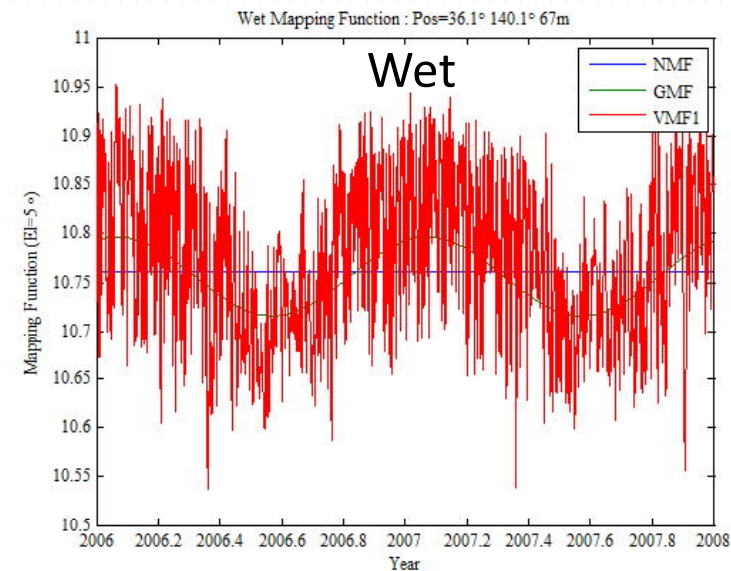
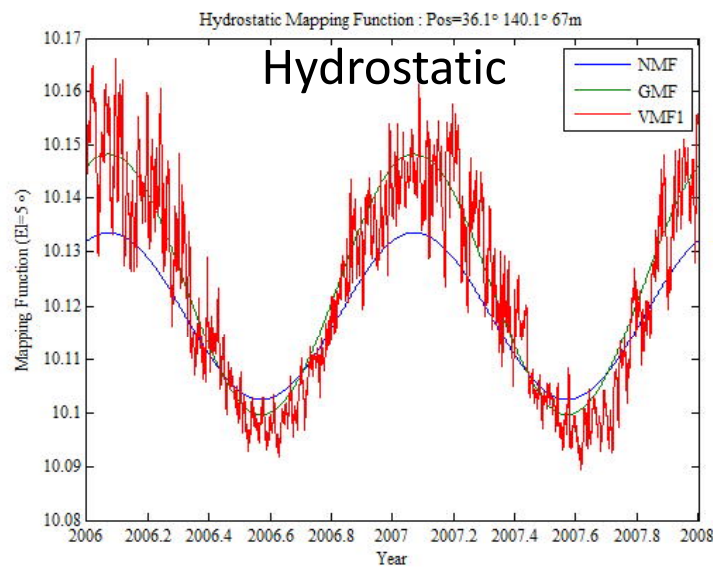
$$m_v = 18.0152, m_d = 28.9644$$

マッピング関数

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

a, b, c : マッピング関数係数

NMF, GMF, VMF1



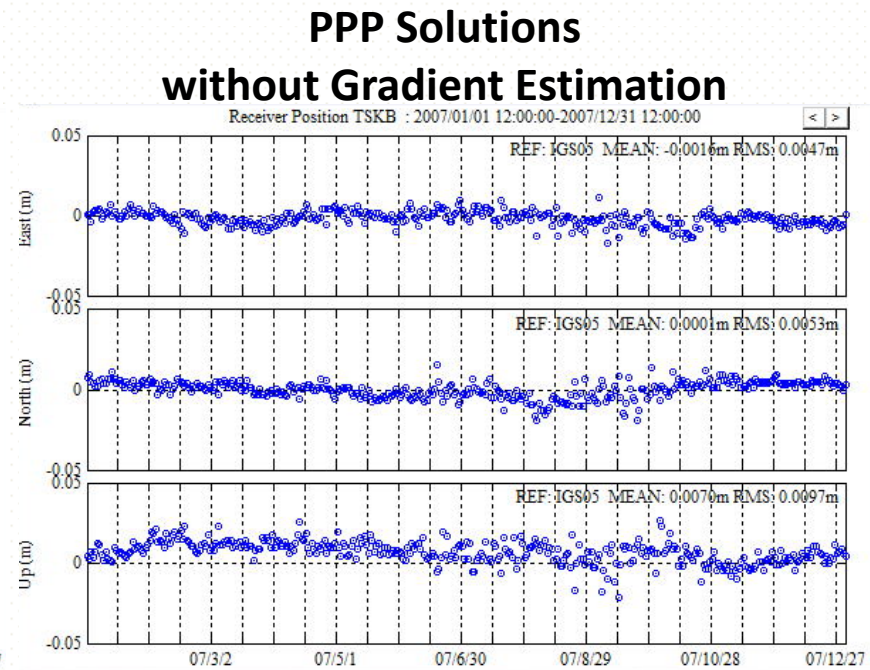
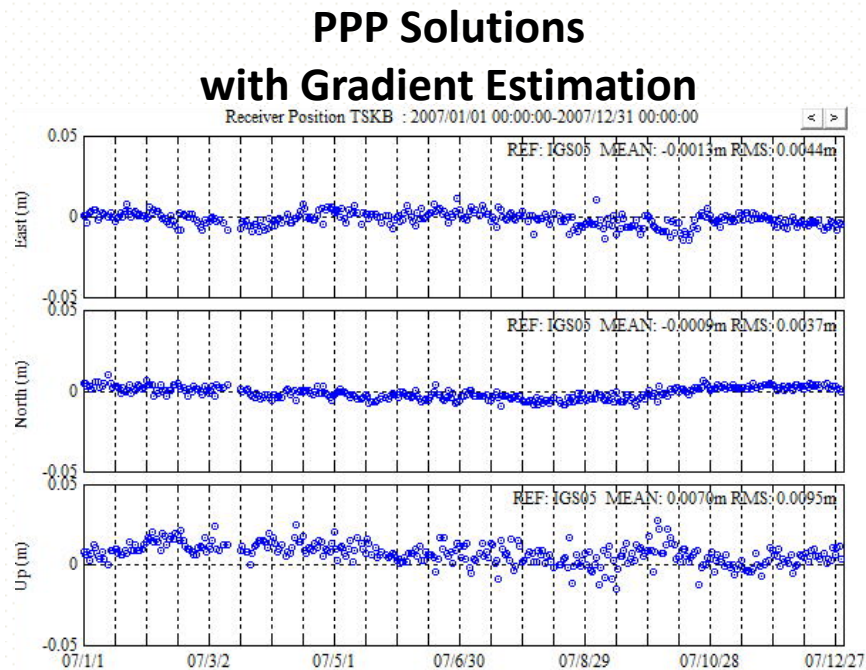
(2006/1/1-2007/12/31, TSKB, El=5deg)

対流圏勾配

対流圏勾配を含めたマッピング関数:

$$m(El, Az) = m_0(El) + m_0(El) \cot(El) (G_N \cos(Az) + G_E \sin(Az))$$

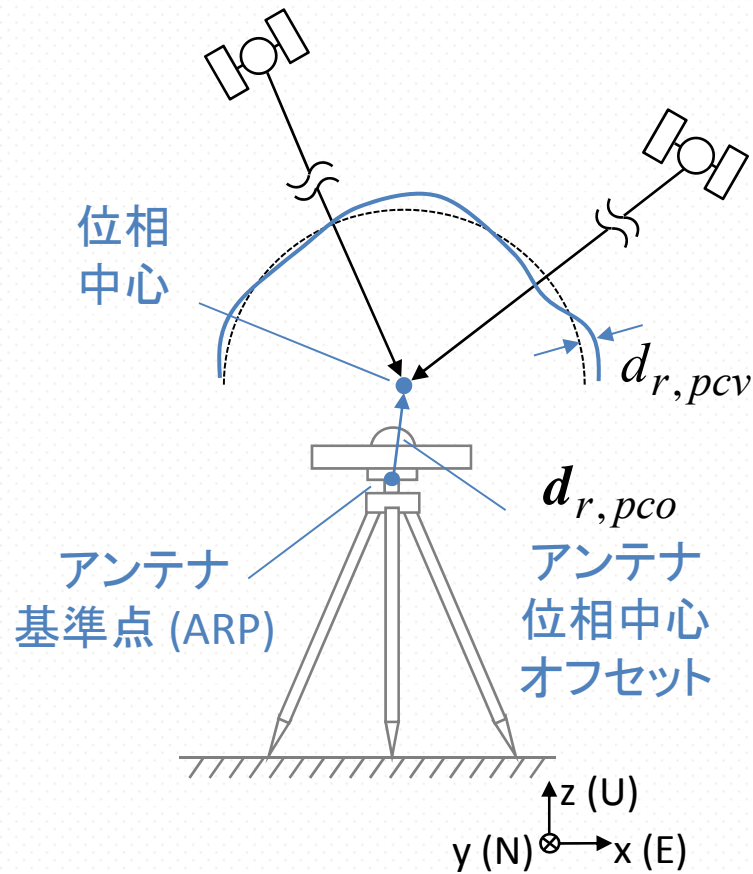
G_N, G_E : North/East Gradient Parameters



2007/1/1-12/31, 24H-Static PPP, TSKB

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

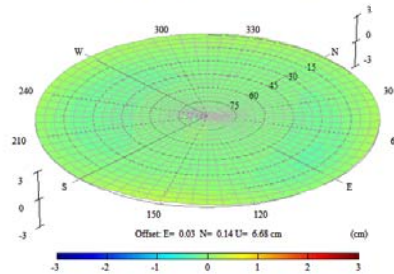
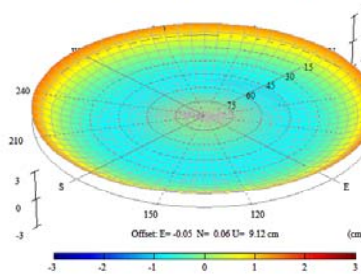
ゼロオフセット



Antenna Phase Center Offset Variation : AOADM_T (L1)

Antenna Phase Center Offset Variation : NOV7020G (L1)

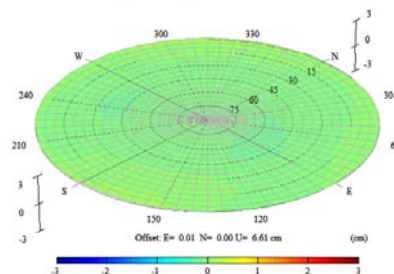
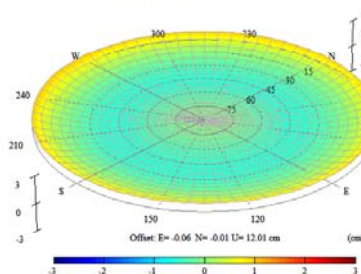
L1



L2

Antenna Phase Center Offset Variation : AOADM_T (L2)

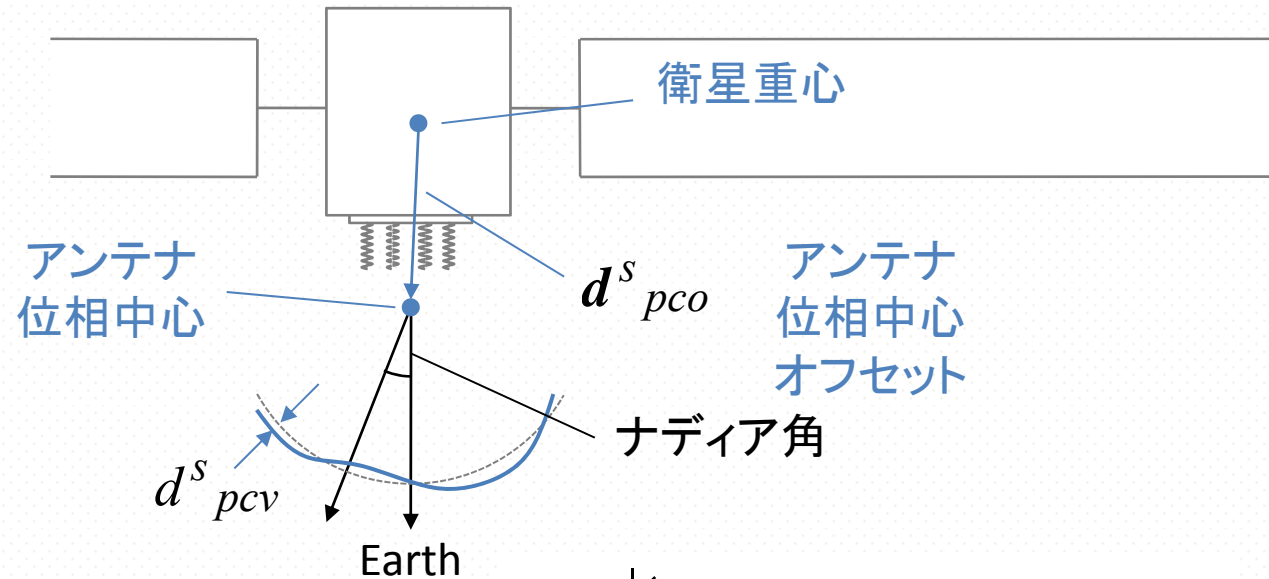
Antenna Phase Center Offset Variation : NOV7020G (L2)



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:

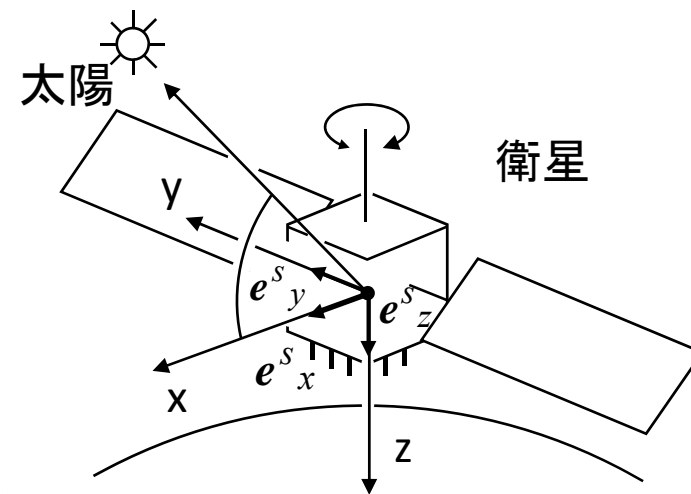


衛星機体座標→ECEF:

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

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

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



基線解析/RTKの技術要素

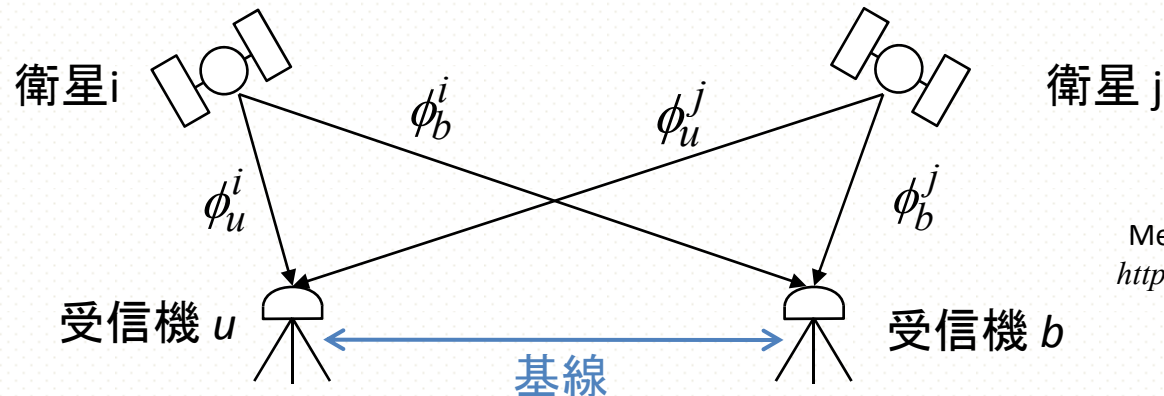
- 二重位相差観測方程式
 - 搬送波位相による高精度観測値
 - 衛星・受信機時計誤差消去
 - 暦誤差+電離層+対流圏遅延消去(短基線)
- 整数バイアス決定
 - 高速な高精度解
 - 高速初期化(瞬時～数分)
 - 高速再初期化(移動体・スリップ対応)

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)

$$\begin{aligned}
 \Phi_{ub}^{ij} &\approx \rho_{ub}^{ij} + \lambda N_{ub}^{ij} + \varepsilon_{\Phi} \\
 I_{ub}^{ij} &= I_{ub}^i - I_{ub}^j \approx 0, T_{ub}^{ij} = T_{ub}^i - T_{ub}^j \approx 0, d_{ub}^{ij} = d_{ub}^i - d_{ub}^j \approx 0
 \end{aligned}$$



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

基線解析

非線形最小二乗:

未知パラメータ:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{r}_u^T, N_{ub}^{s_2s_1}, N_{ub}^{s_3s_1}, \dots, N_{ub}^{s_ms_1})^T$$

観測ベクタ:

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

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:

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

$$\mathbf{y}_{t_k} = (\Phi_{ub,t_k}^{s_2s_1}, \Phi_{ub,t_k}^{s_3s_1}, \dots, \Phi_{ub,t_k}^{s_ms_1})^T$$

$$\mathbf{h}_{t_k}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} \rho_{u,t_k}^{s_2s_1} - \rho_{b,t_k}^{s_2s_1} + \lambda N_{ub}^{s_2s_1} \\ \rho_{u,t_k}^{s_3s_1} - \rho_{b,t_k}^{s_3s_1} + \lambda N_{ub}^{s_3s_1} \\ \vdots \\ \rho_{u,t_k}^{s_ms_1} - \rho_{b,t_k}^{s_ms_1} + \lambda N_{ub}^{s_ms_1} \end{pmatrix}$$

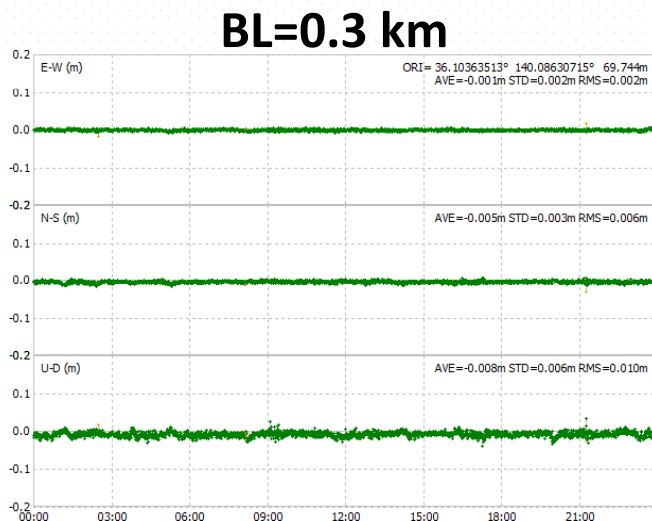
$$\mathbf{H}_{t_k} = \begin{pmatrix} -\mathbf{e}_{u,t_k}^{s_2s_1 T} & \lambda & 0 & \dots & 0 \\ -\mathbf{e}_{u,t_k}^{s_3s_1 T} & 0 & \lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{e}_{u,t_k}^{s_ms_1 T} & 0 & 0 & \dots & \lambda \end{pmatrix}$$

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

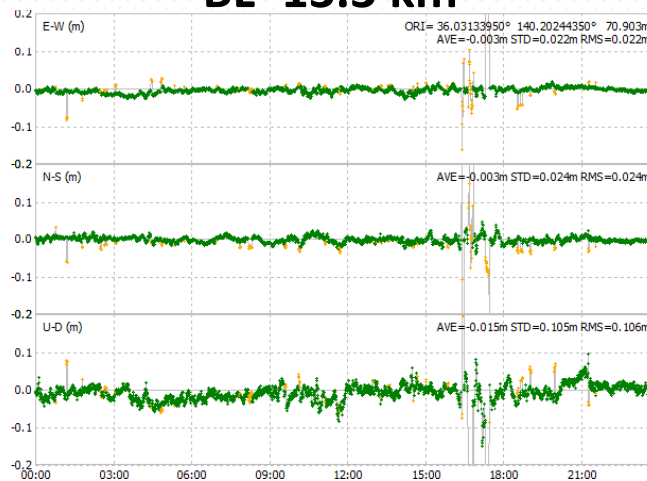
\mathbf{r}_b : 基準局座標

基線長の影響

RMS Error:
 E: 0.2cm
 N: 0.6cm
 U: 1.0cm
 Fix Ratio:
 99.9%

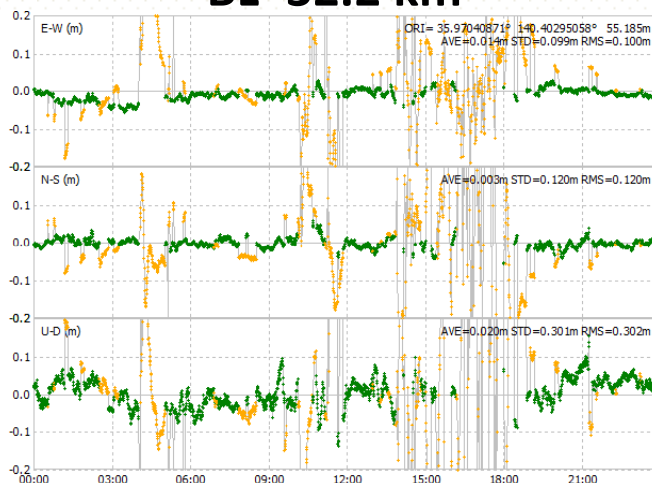


BL=13.3 km



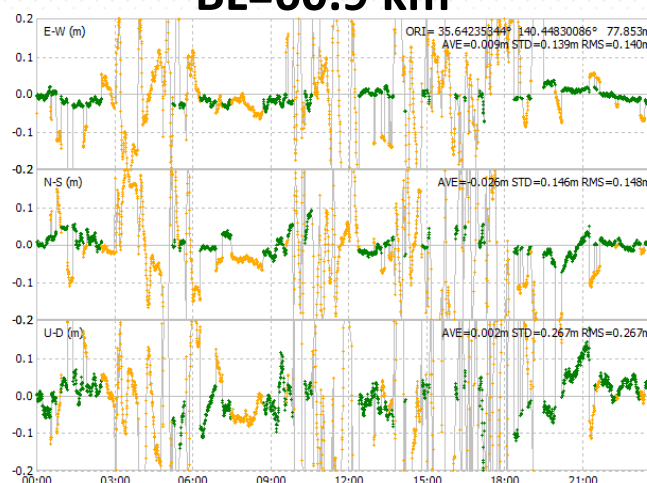
RMS Error:
 E: 2.2cm
 N: 2.4cm
 U: 10.6cm
 Fix Ratio:
 94.2%

BL=32.2 km



RMS Error:
 E: 10.0cm
 N: 12.0cm
 U: 30.2cm
 Fix Ratio:
 64.3%

BL=60.9 km



RMS Error:
 E: 14.0cm
 N: 14.8cm
 U: 26.7cm
 Fix Ratio:
 44.4%

(24 hr Kinematic ●: Fixed Solution ●: Float Solution)

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, ...

ILS (整数最小二乗)

問題:

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

解法:

(1) 最小二乗 (フロート解)

$$\hat{x} = \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{pmatrix} = Q_x H^T Q_y^{-1} y, Q_x = \begin{pmatrix} Q_a & Q_{ab} \\ Q_{ba} & Q_b \end{pmatrix} = (H^T Q_y H)^{-1}$$

(2) 残差を最小化する整数ベクタ探索

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

(3) フロート解改良

$$\tilde{b} = \hat{b} - Q_{ba} Q_a^{-1} (\hat{a} - \tilde{a})$$

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:**

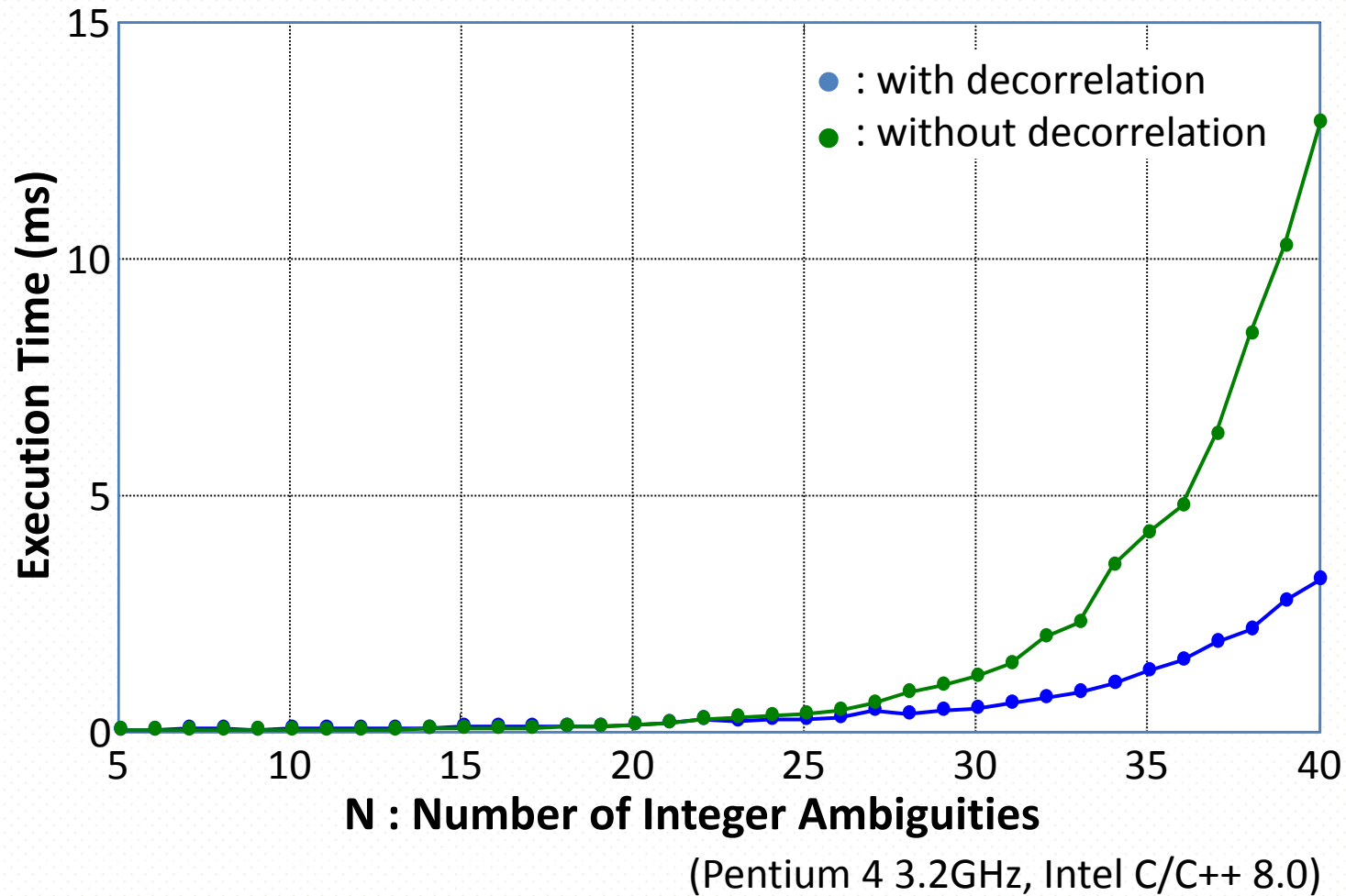
- Shrink Integer Search Space with "Decorrelation"
- Efficient Tree Search Strategy
- Similar to *Closest Point Search with LLL Lattice Basis Reduction* Algorithm

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



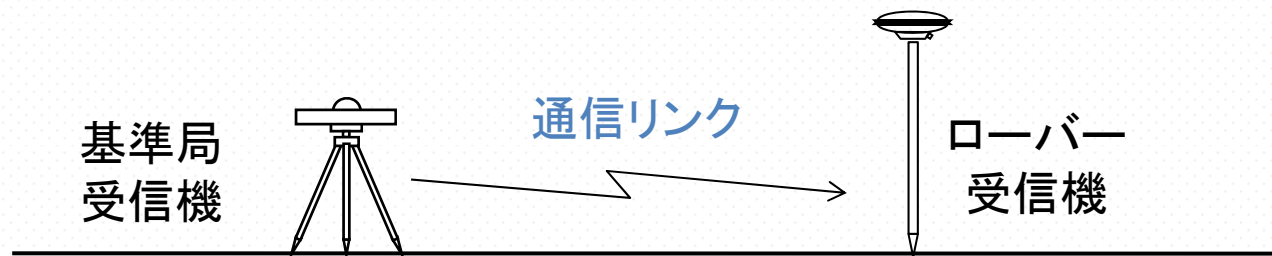
$$\begin{aligned} \hat{z} &= \mathbf{Z}^T \hat{a}, \mathbf{Q}_z = \mathbf{Z}^T \mathbf{Q}_a \mathbf{Z} \\ \check{z} &= \arg \min_{z \in \mathbf{Z}^n} (\hat{z} - z)^T \mathbf{Q}_z^{-1} (\hat{z} - z) \\ \check{a} &= \mathbf{Z}^{-T} \check{z} \end{aligned}$$

LAMBDA実行時間



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



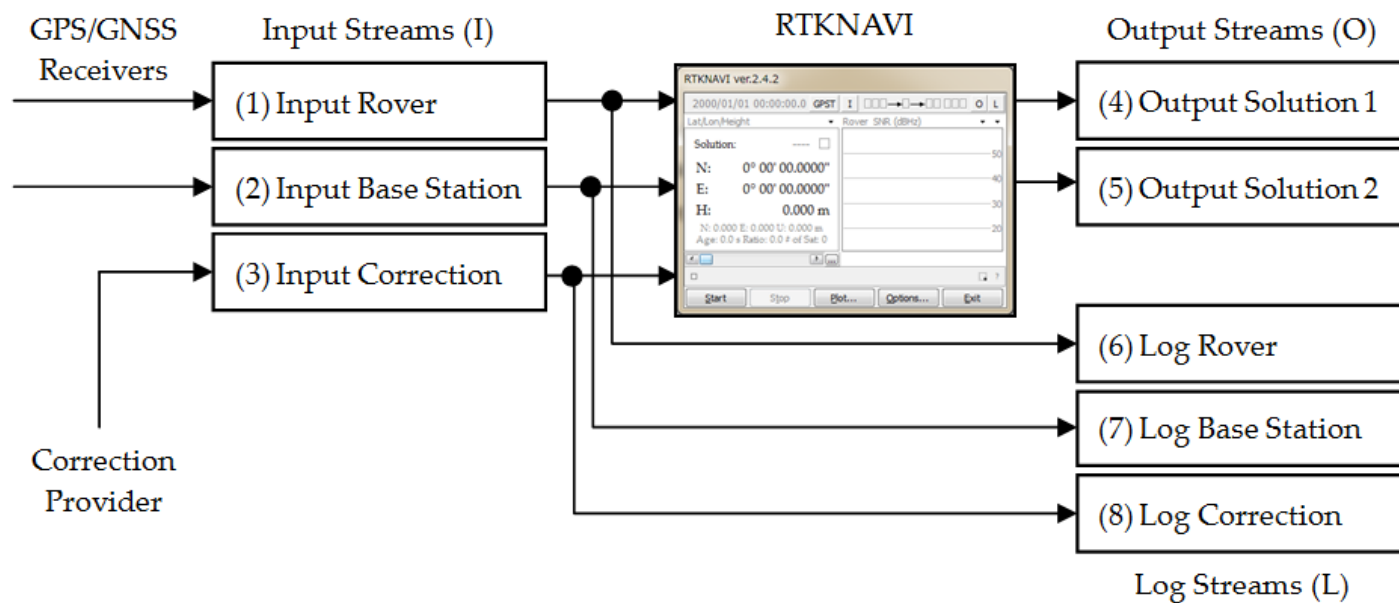
(8)
RTKPOSTによる基線解析

RTKPOSTによる基線解析

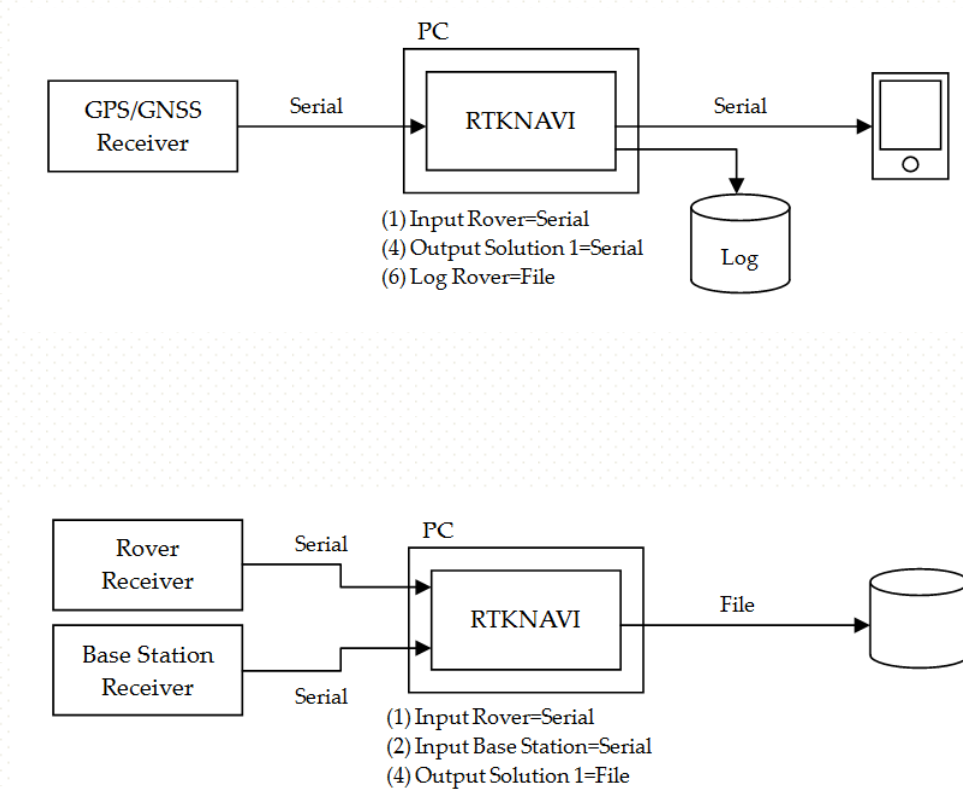
- RTKCONVによる受信機ログのRINEX変換
- RTKPLOTによる観測データ解析
- RTKPOSTによる基線測位
- RTKPLOTによる測位解プロット
- Google Earthによる測位解表示
- RTKPOSTオプション
- RTKPLOTオプション

(9)
RTKNAVIによるRTK

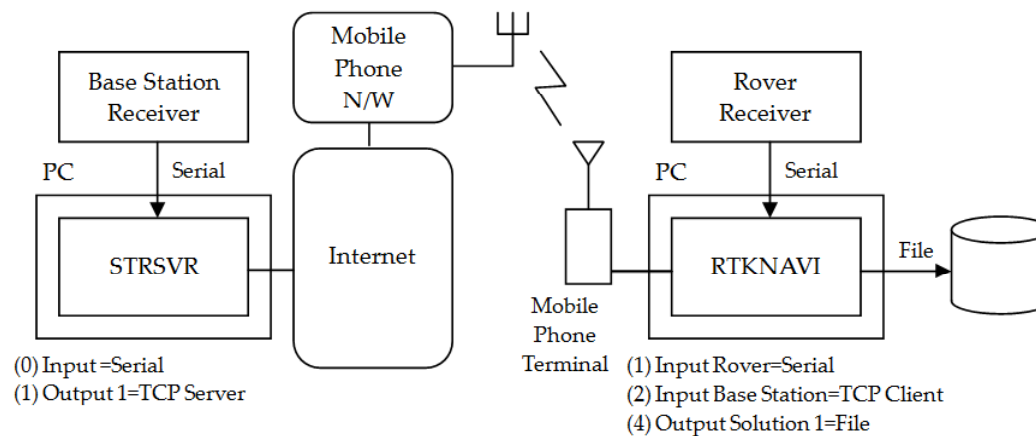
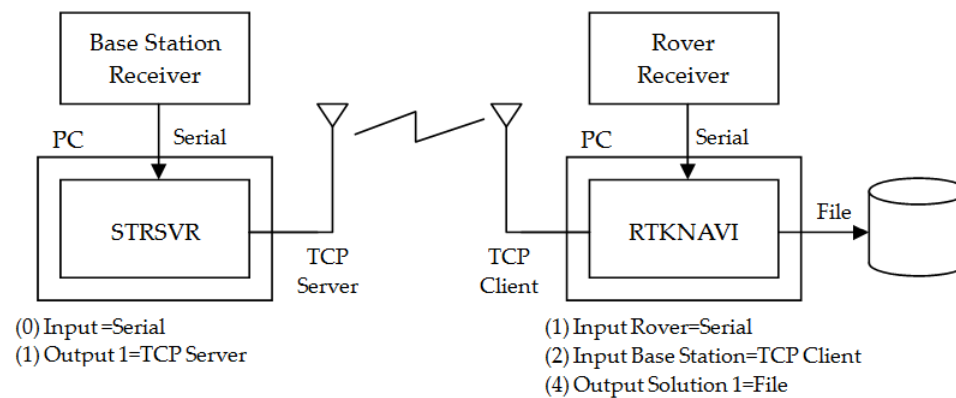
RTKNAVI 入出力



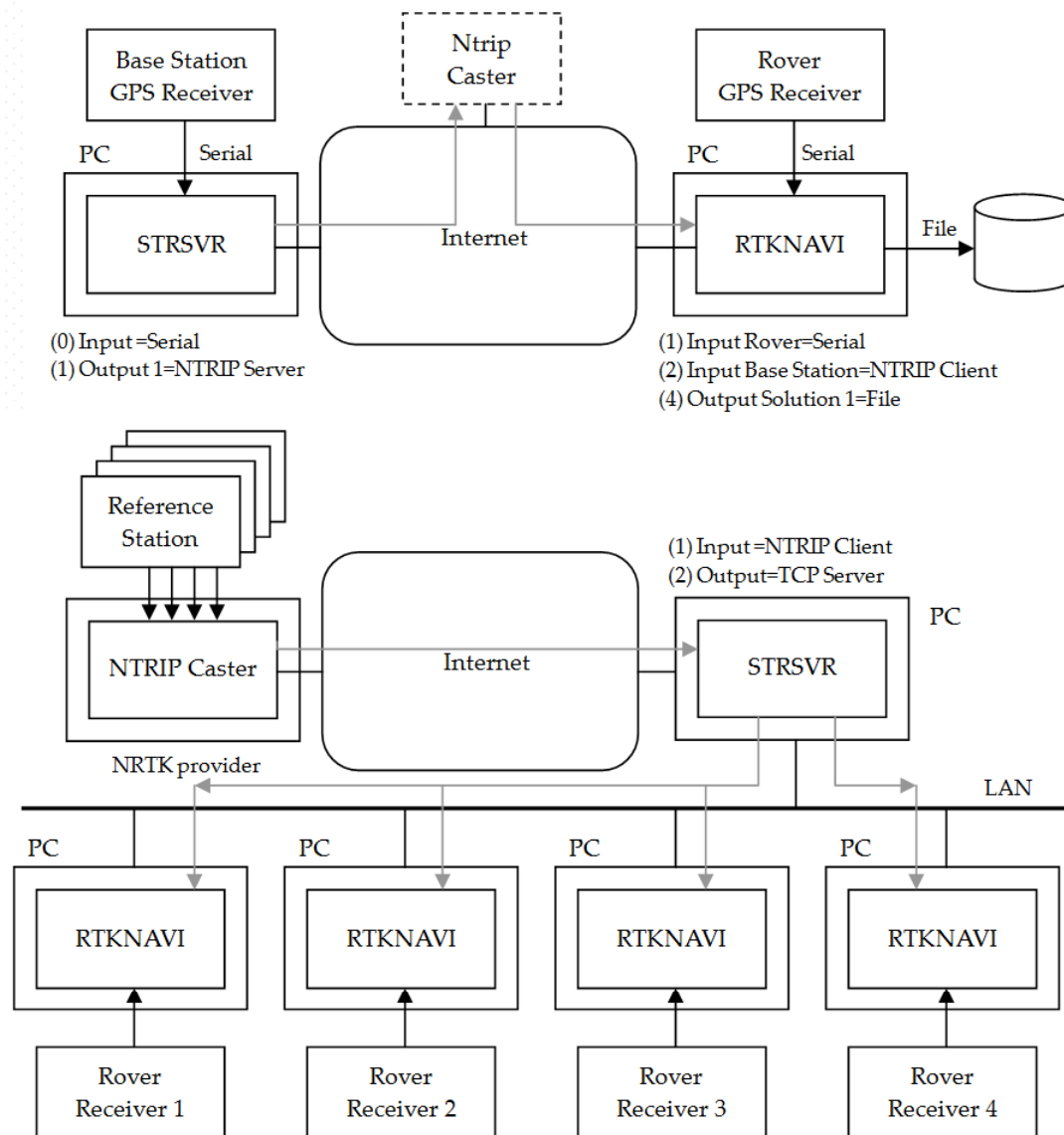
RTKLIBによるRTシステム構成例1



RTKLIBによるRTシステム構成例2



RTKLIBによるRTシステム構成例3



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

プレイバックデータによるRTK

- **Objective**

RTK of by Playback Data

- **Program**

rtklib_2.4.2p9¥bin¥rtknavi.exe

- **Data**

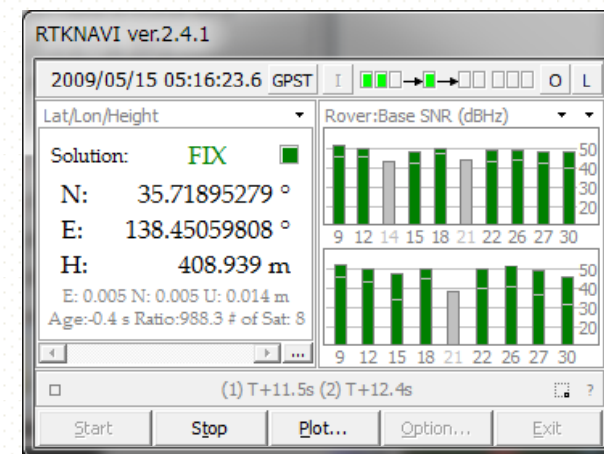
sample2¥

oemv_2009515c.gps (NovAtel)

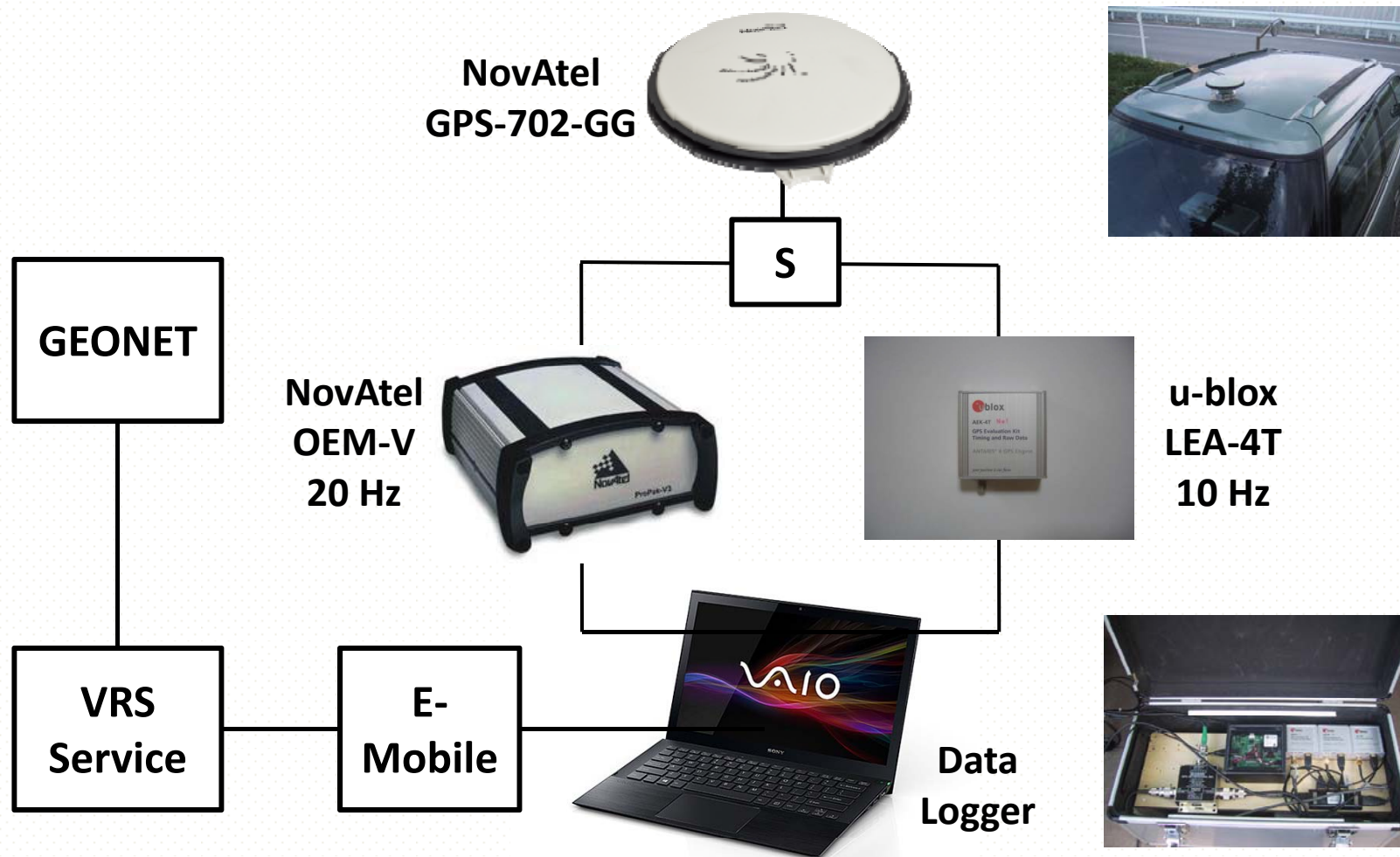
ubx_20090515c.ubx (u-blox)

0263_20090515c.rtc3 (VRS)

RTKNAVI



プレイバックデータ



RTKNAVI - オプション

Setting1

Options

Setting1 | Setting2 | Output | Statistics | Positions | Files | Misc

Positioning Mode	Kinematic
Frequencies	L1+L2
Solution Type	Forward
Elevation Mask (°) / SNR Mask (dbHz)	15 0
Rec Dynamics/Earth Tides Correction	OFF OFF
Ionosphere Correction	Broadcast
Troposphere Correction	Saastamoinen
Satellite Ephemeris/Clock	Broadcast
Excluded Satellites (+PRN: Included)	

GPS GLO Galileo QZSS SBAS Compass

Load Save OK Cancel

Setting2

Options

Setting1 | Setting2 | Output | Statistics | Positions | Files | Misc

Integer Ambiguity Resolution	Fix and Hold
GLONASS Ambiguity Resolution	ON
Validation Threshold to Fix Ambiguity	3.0
Min Lock / Elevation (°) to Fix Ambiguity	0 0
Min Fix / Elevation (°) to Hold Ambiguity	10 0
Outage to Reset / Slip Thres LG (m)	5 0.050
Max Age of Differential (s)	30.0
Reject Threshold of GDOP/Innov (m)	30.0 30.0
Number of Filter Iteration	1
<input type="checkbox"/> Baseline Length Constraint (m)	0.000 0.000

Load Save OK Cancel

(10)
RTKの応用

RTKの応用



Geodetic Survey



Construction
Machine Control



Precision Agriculture



ITS (Intelligent
Transport System)



Mobile Mapping
System



Sports

RTKの制約・問題点

- 基準点設置・運用コスト
 - 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

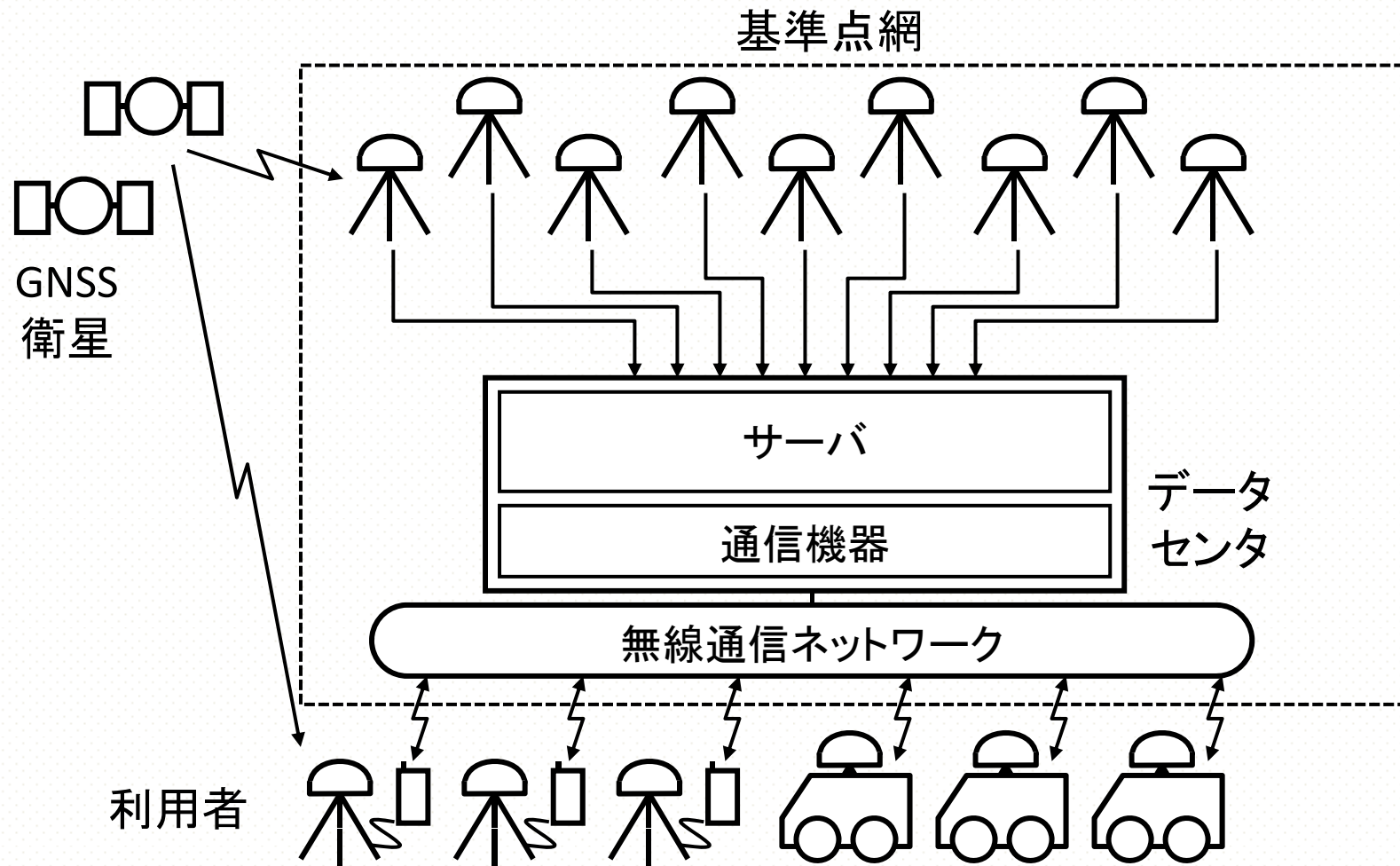
ネットワークRTK (NRTK)

- 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

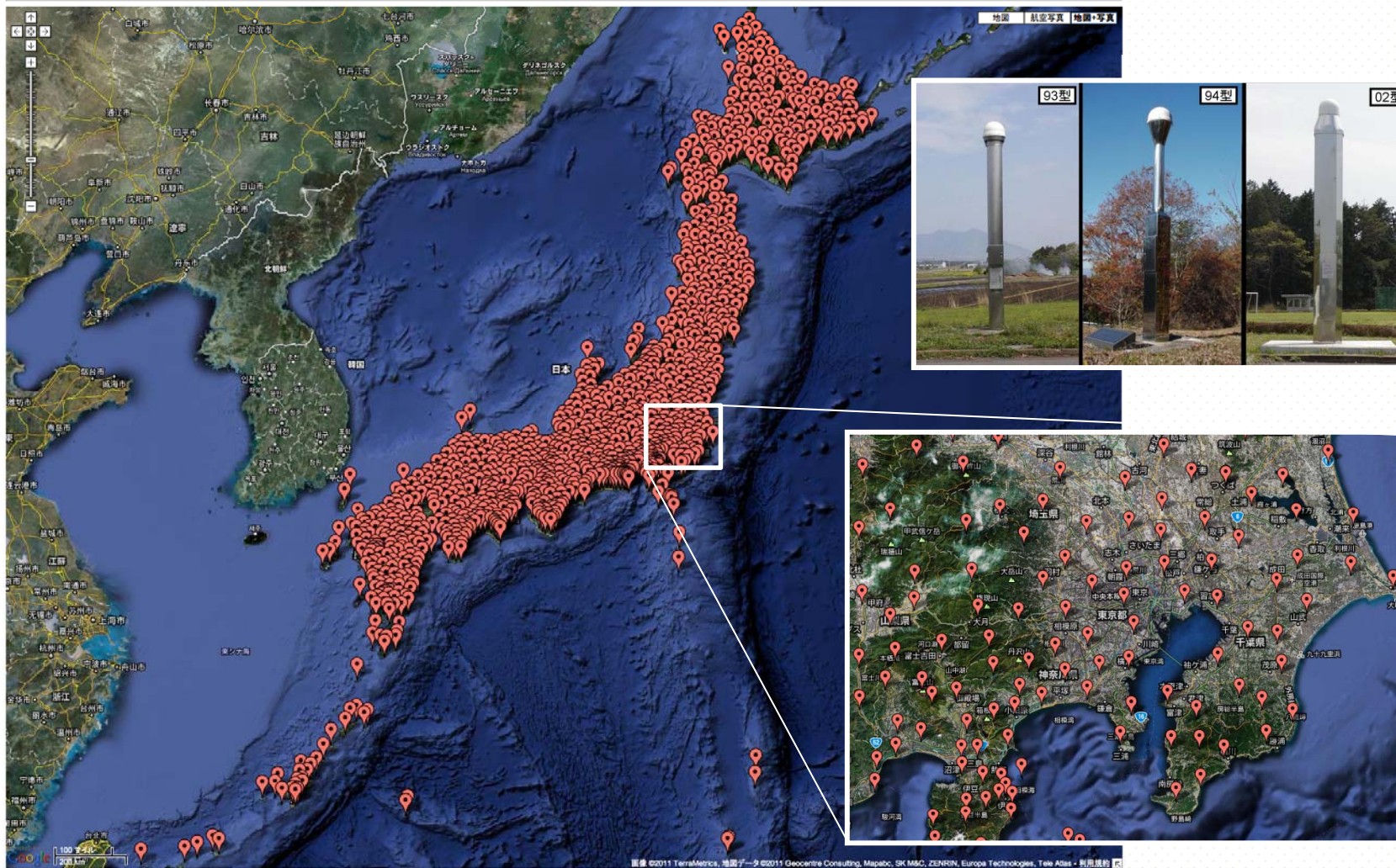
NRTKシステム構成



GEONET

GEONET STATIONS MAP by Google Map : [GEONET Stations](#)

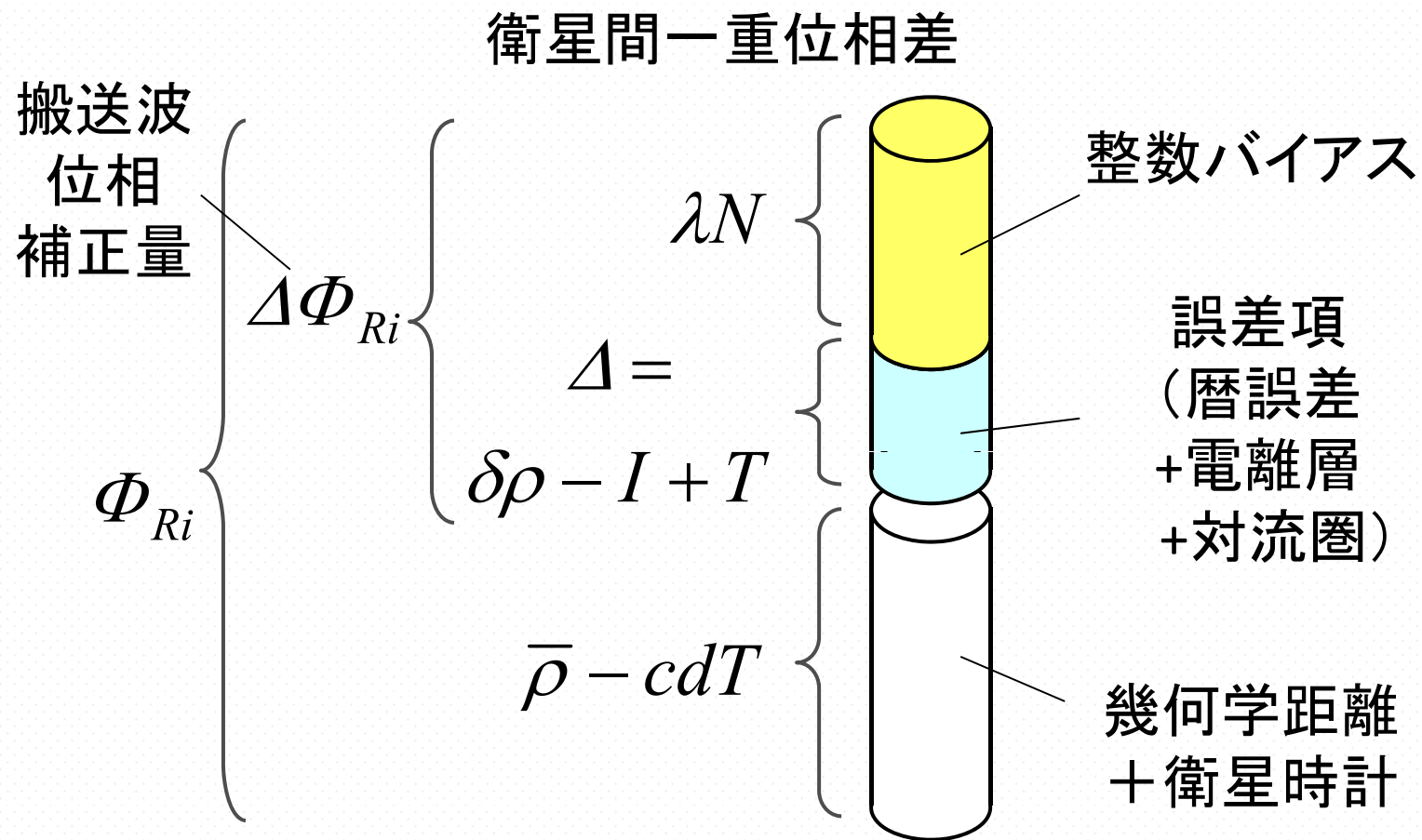
[IGS Map | Home](#)



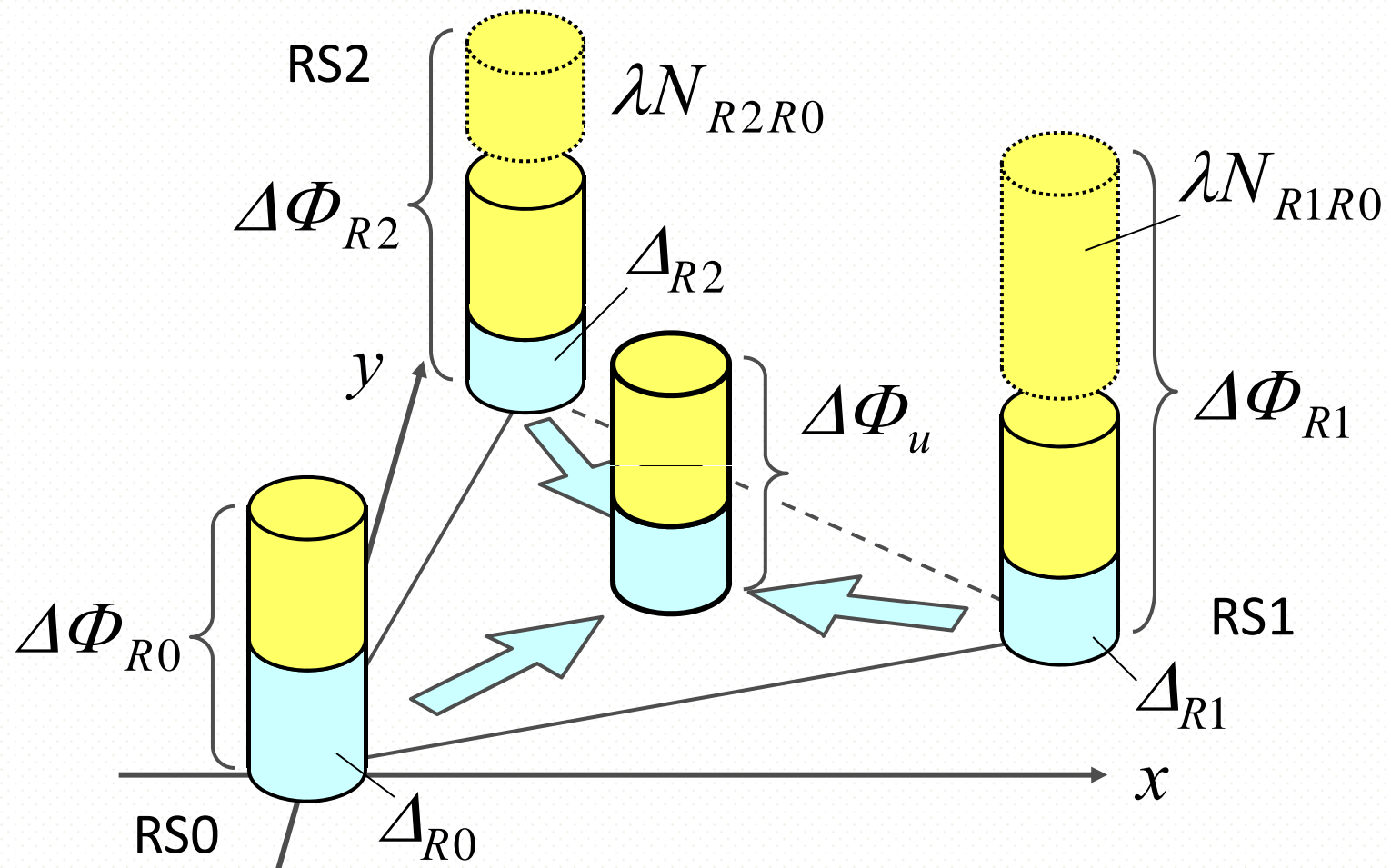
The station coordinates are based on the 2011 solutions on 2007/1/1 provided by CSR. Height: ellipsoidal height (WGS84)

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

補正情報：基準点実観測値



補正情報：補正量補間



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

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

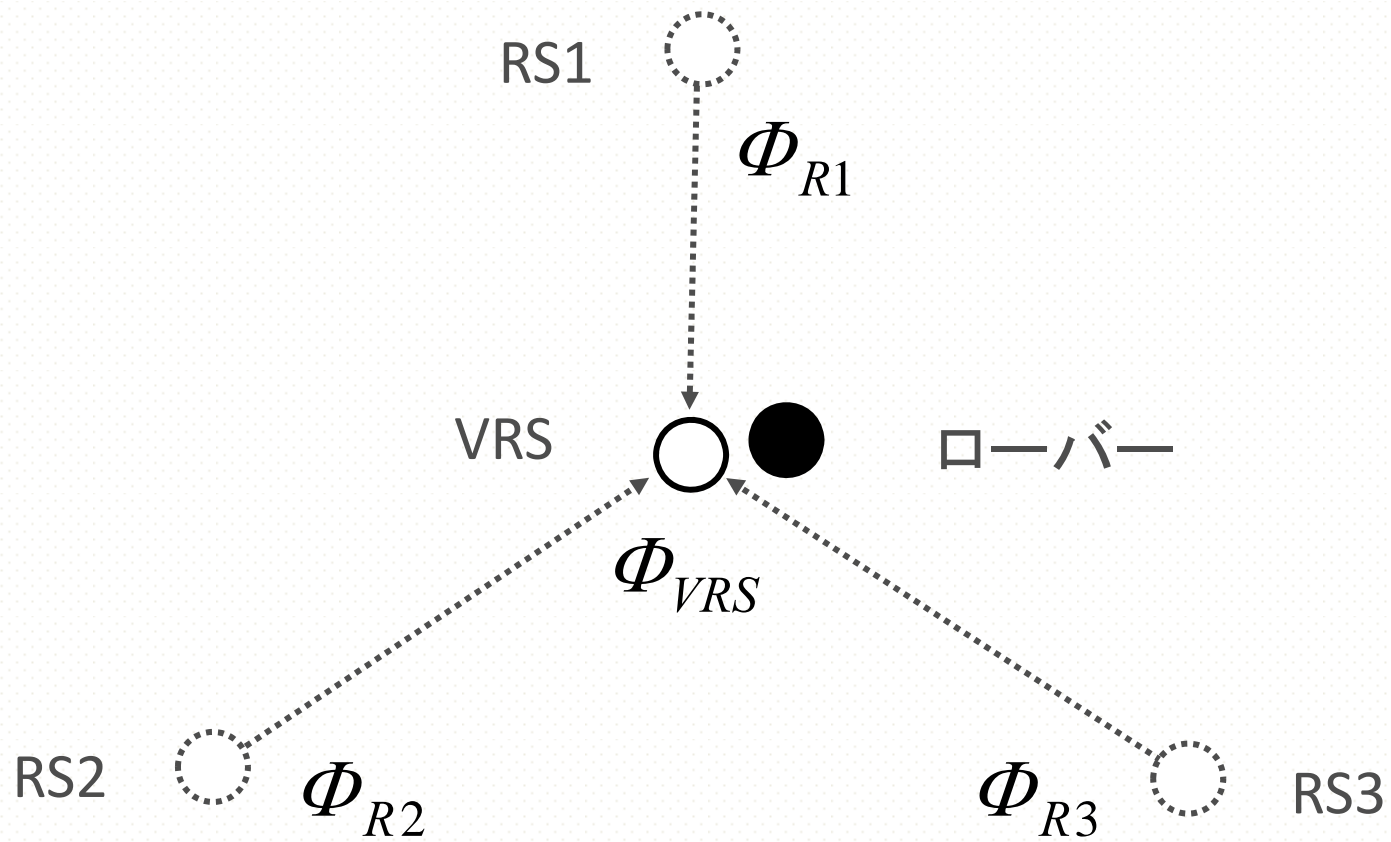
- 仮想基準点位相観測値

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

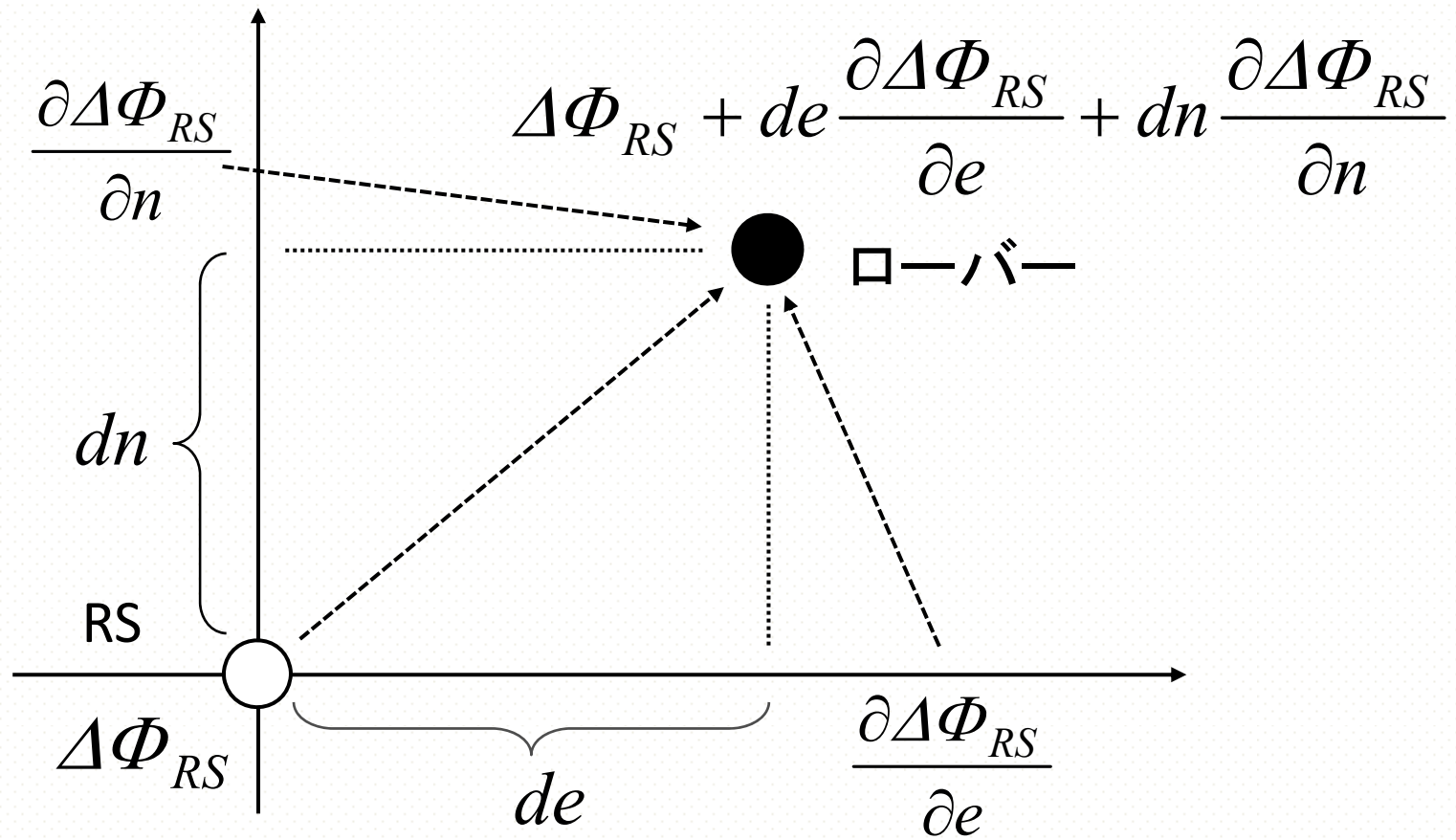
その他技術要素

- 誤差項補間
 - 約100km以下→線形、多次多項式 etc
 - 電離層擾乱時性能低下
- 基準点間基線整数バイアス決定
 - リアルタイム決定
 - 電離層・対流圏・暦誤差モデル化
 - 多数観測値→モデルパラメータ同時推定
- 補正情報形式

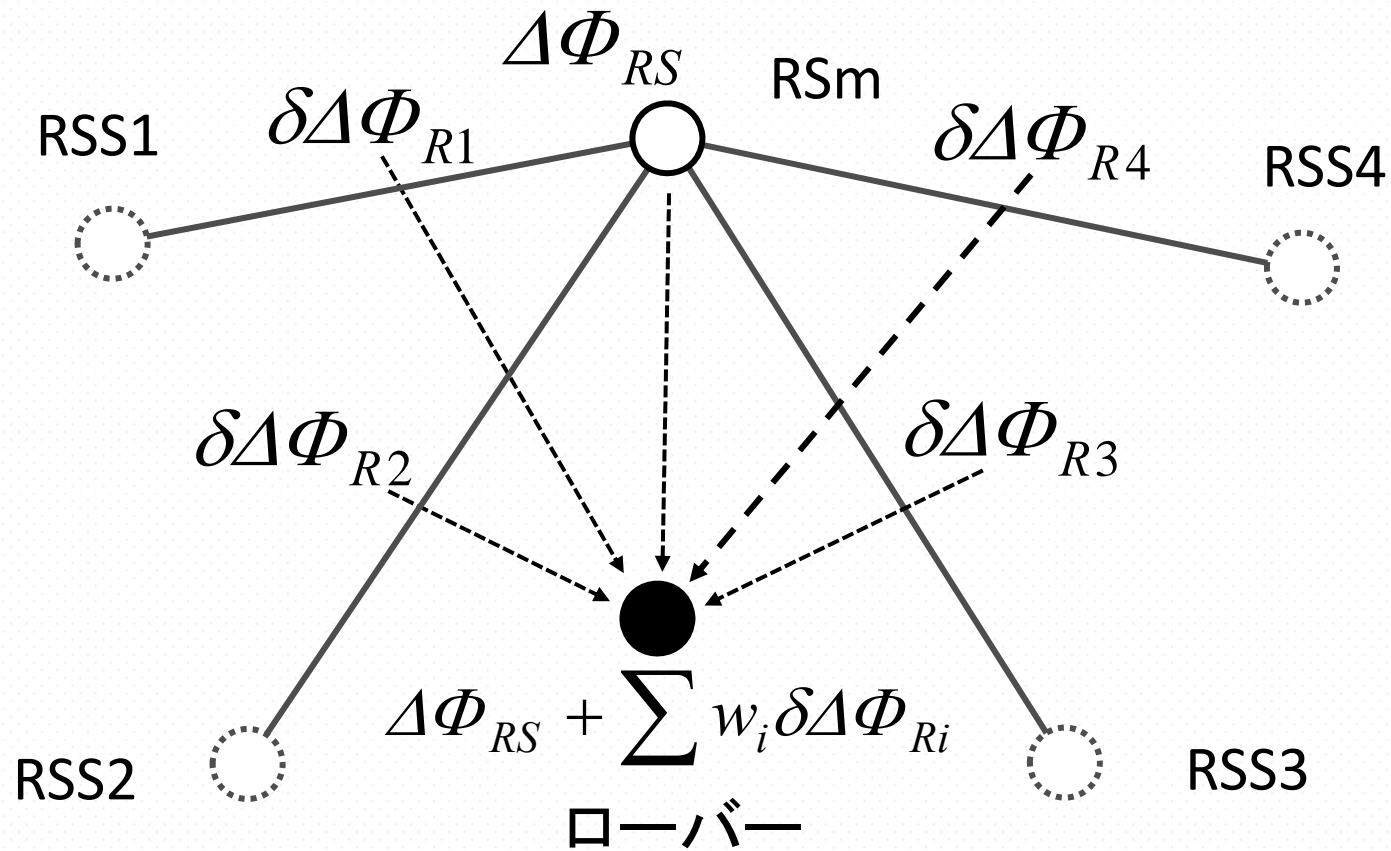
NRTK補正情報方式：VRS



補正情報方式 : FKP



補正情報方式 : MAC (MAX)



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

RTKシステム構築

- ローバー
 - 1周波 vs 2/3周波, 更新間隔, GNSS, 受信機コスト
 - GPU性能
 - INS統合
- 基準局
 - 基線長 vs. 性能
 - 自前基準局 vs. NRTKサービス
 - カバーエリア, 受信機コスト, 運用コスト, サービス費用
- 通信リンク
 - エリア, 帯域, レイテンシ, 通信コスト

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, ...)

(11)
RTKLIBによる複合解析

RTKLIBによる複合解析

**NTRIP
Caster**

153.*.***.***: 80**

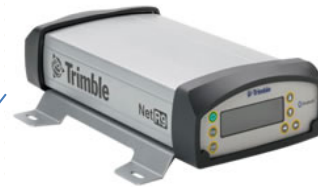
Usr-ID: *****

Password: *****

Mount point:

ROV: NovAtel OEM6

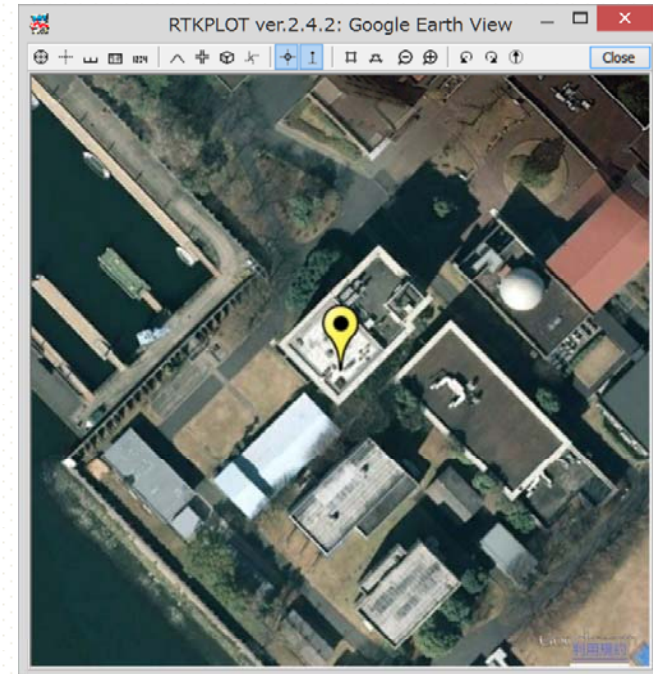
REF: NovAtel OEM6



**Rover
Receiver**



**Reference
Station**



REF Position:

Lat : 35.666497

Lon : 139.792372

Height : 59.4 m (ARP)

(12)
RTKLIBの活用

RTKLIBの活用

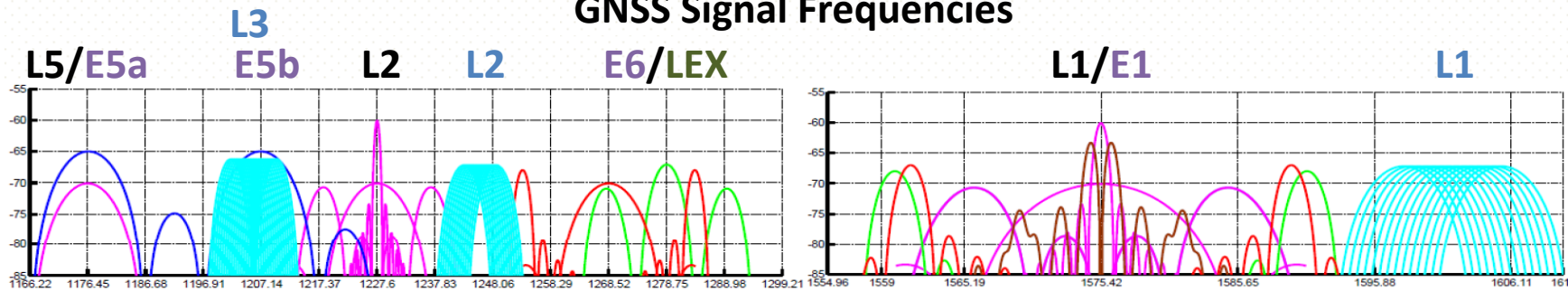
- 複数GNSS RTK
- 長基線 RTK
- MADOCA-PPP
- 組込システム応用

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

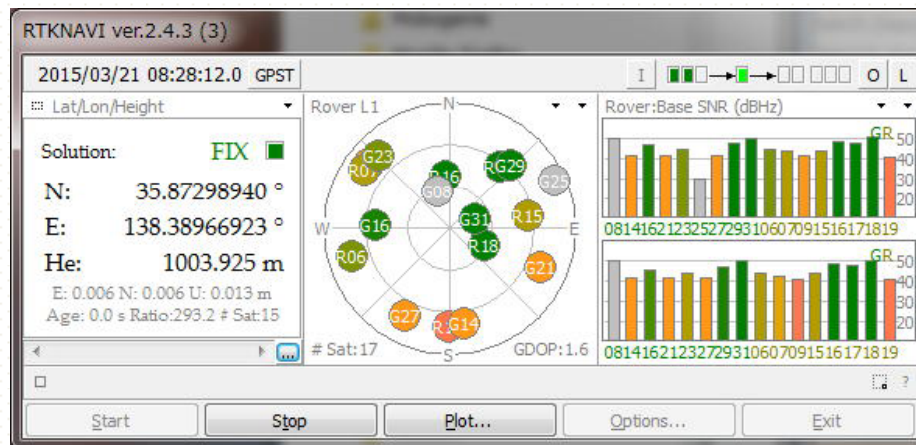
GPS L1+L2

GPS+GAL L1
L1,L2

u-blox LEA/NEO-M8T

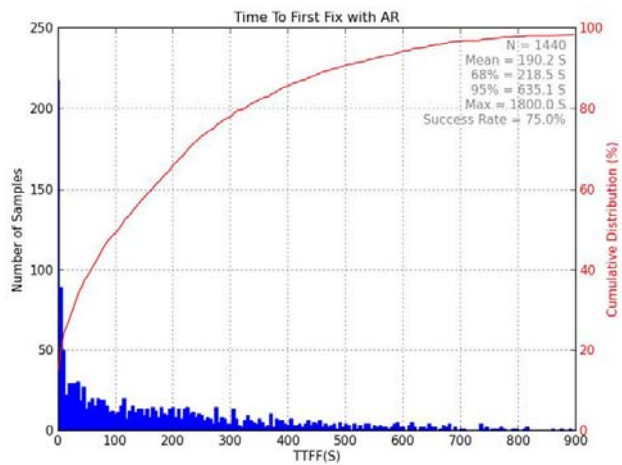


@\$179.9
(w/o antenna)
(<http://www.csgshop.com>)

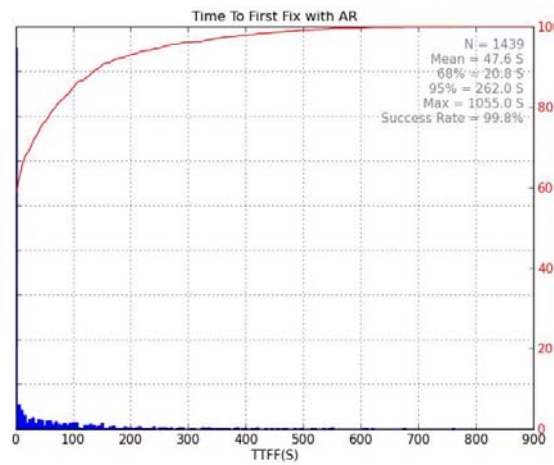


RTKNAVI
2.4.2 p11

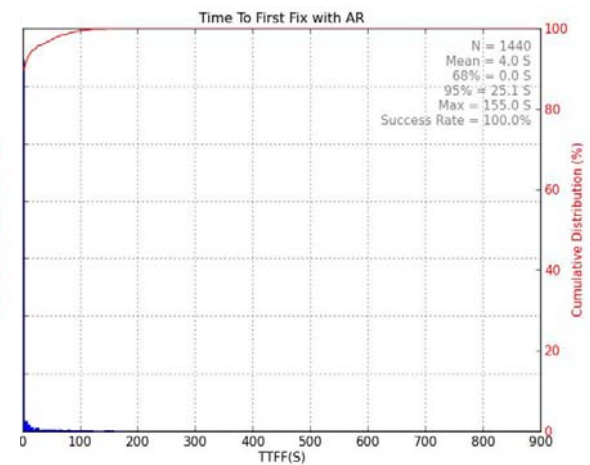
u-blox M8T AR性能



GPS only



GPS+GLO+QZS



GPS+BDS+QZS

マルチGNSS RTK技術課題

- 異なるシステム統合に伴う課題
 - 時刻系, 座標系
 - 受信機H/Wバイアス
- 複数コードに伴う課題
 - L1C/A-L1P(Y)-L1Cd-L1Cp, L2P(Y)-L2C, L5I-L5Q
 - 1/4サイクルシフト
- GLONASS FDMAに伴う課題
 - 受信機IFB問題 (異機種間基線AR)
 - 校正メッセージ標準化
 - アンテナ校正

マルチGNSS特プロ (23-26年度)

The screenshot shows a web browser window displaying the homepage of the Geospatial Information Authority of Japan (GSI). The page title is "高度な国土管理のための複数の衛星測位システム(マルチGNSS)による高精度測位技術の開発" (Development of High-Precision Positioning Technology Using Multiple Satellite Positioning Systems (Multi-GNSS) for Advanced Land Management). The page includes a navigation menu, a search bar, and a main content area with sections for project objectives, technical development content, and effects. The URL in the address bar is www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss_main.html.

国土交通省
国土地理院
Geospatial Information Authority of Japan

本文へ 文字サイズ変更 標準 拡大 English
Google™ カスタム検索 検索 サイトマップ

地理院ホーム 国土地理院の紹介 基準点・測地観測データ 地図・空中写真 防災関連 GIS・国土の情報 申請・承認

地理院ホーム > 研究開発 > 高度な国土管理のための複数の衛星測位システム(マルチGNSS)による高精度測位技術の開発 最終更新日: 2015年1月8日

高度な国土管理のための複数の衛星測位システム(マルチGNSS)による高精度測位技術の開発

[【GSILIB\(マルチGNSS解析ソフトウェア\)公開ページ】](#)

プロジェクトの目的と概要

技術開発の目的

これまでGPS測量が困難であったビル街等を含め、国土管理に必要な高精度測位の効率的な実施のため、GPS、QZSS、GLONASS、Galileoの衛星測位システム(マルチGNSS(Global Navigation Satellite System))を統合的に利用し、短時間に高精度の位置情報を取得し、測量等に適用するための技術開発及び標準化を行う。

技術開発の内容

- マルチGNSSの解析技術等の開発
複数の衛星測位システムのデータを組み合わせ、高精度で位置情報を短時間に取得可能とするためのマルチGNSS解析手法を開発
- 解析技術の検証
マルチGNSS解析のシミュレーション実験や現地実証実験の実施
上記の結果を定量的に分析し、現地条件に応じた最適な衛星の組み合わせやデータ補正といった観測・解析方法を検証の上、確立
- 高精度測位技術の標準化
「公共測量作業規程の準則改正案」
地震時等の地殻変動把握等への適用指針案の作成

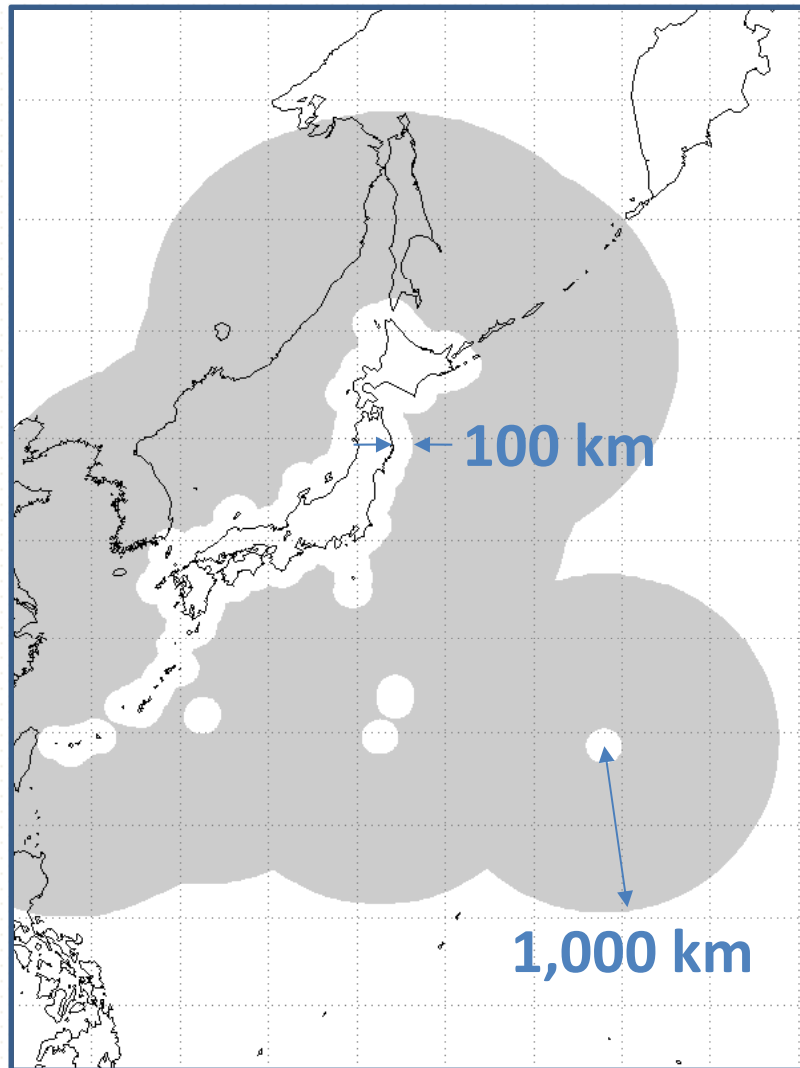
技術開発の効果

GPS以外の衛星も用いてビル街等での測量可能エリアを拡大(トータルステーションではなく、測位衛星を使うことによるコスト削減)
GPS測量に比べ現地での観測時間を短縮して測量が可能(観測時間短縮によるコスト削減)
地殻変動量の提供時間を約半分に短縮(災害時により効果的な応急対策が可能)
マルチGNSS解析・利用技術のアジア地域等への国際展開に寄与

マルチGNSSによる高精度測位技術の開発に関する委員会

http://www.gsi.go.jp/eiseisokuchi/gnss_main.html

長基線RTK



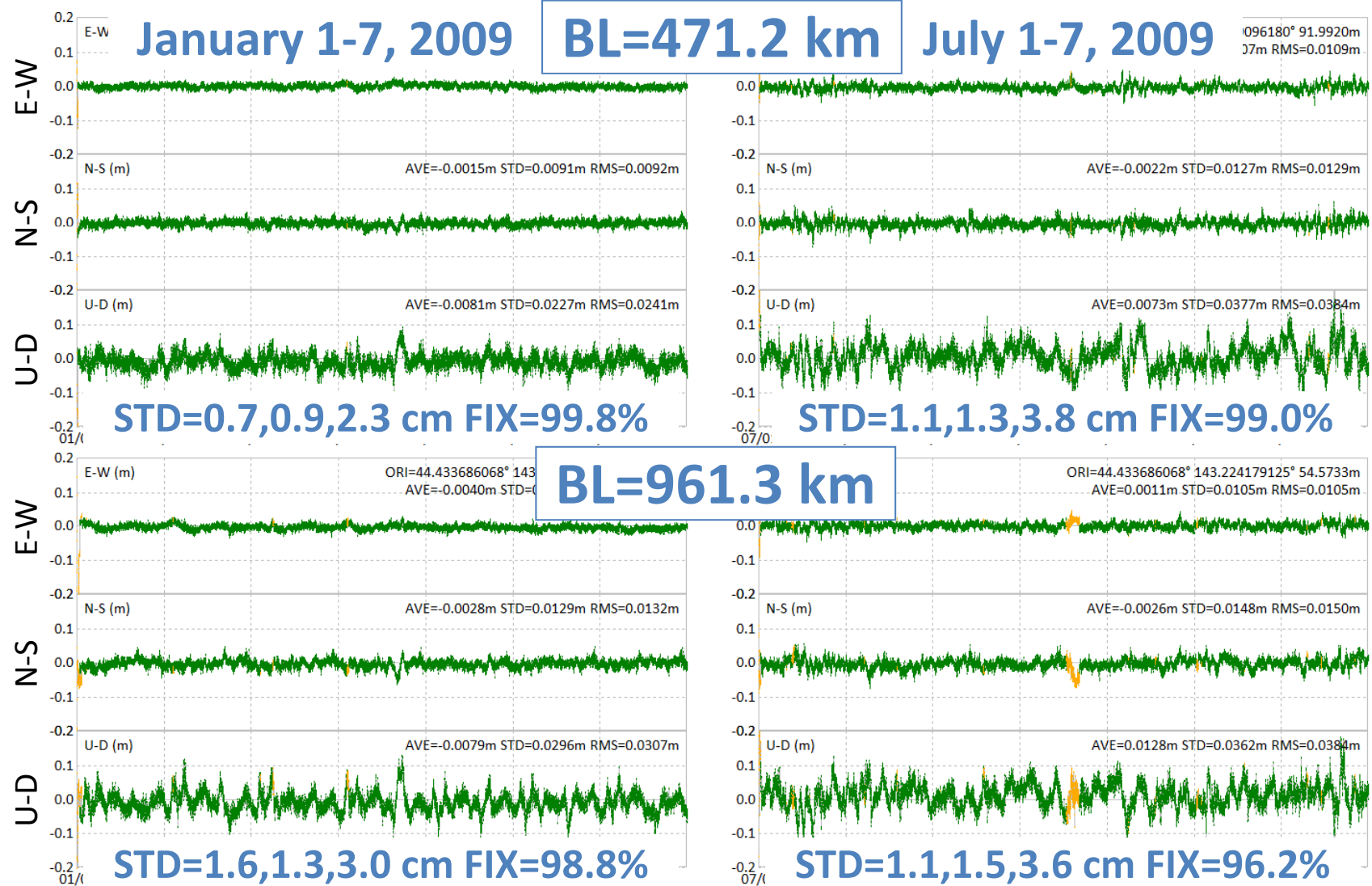
**GPS Tsunami
Monitoring System
(Currently ~15 km off-shore)**

<http://www.tsunamigps.com>

長基線RTK戰略

	BL (km)	Error Elimination				Strategy
		Ephem	Ionos	Tropos	Others	
S	0 – 10	Broadcast	-	-	-	Conventional RTK
M	10 – 100	Broadcast	Dual-Freq	-	-	
			Interpolation		-	Network RTK
L	100 – 1,000	Real-time Precise (IGU)	Dual-Freq	Estimate ZTD + MF	Earth Tides	Long-Baseline RTK
VL	>1,000	Non-RT Precise (IGR, IGS)	Dual-Freq	Estimate ZTD + MF	Earth Tides, Ph-WU	Post- Processing or PPP

RTKLIB長基線RTK性能

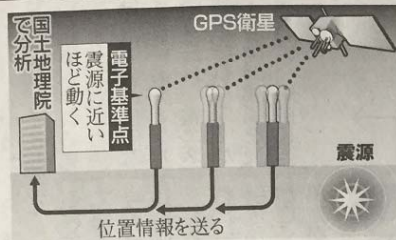


地理院REGARD

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。地理院は気象庁などへのデータ提供も検討中だ。



GPSと電子基準点
GPSは米国防総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

気象庁の地震計ではすぐに規模を算出できなかった東日本大震災級の地震にも対応できるという。地震の規模や震源の素早い特定は津波の予測にも生かせる。地理院によると、電子基準点は地球の上空を回るGPS衛星の電波を受信し、1秒ごとに正確な位置を測定している。高精度な位置情報は、電子基準点がある場所で起こった地殻変動をとらえるのにも役立つ。そのため、地理院は1995年の阪神大震災後から各地で設置を進めてきた。

東日本大震災後、地理院

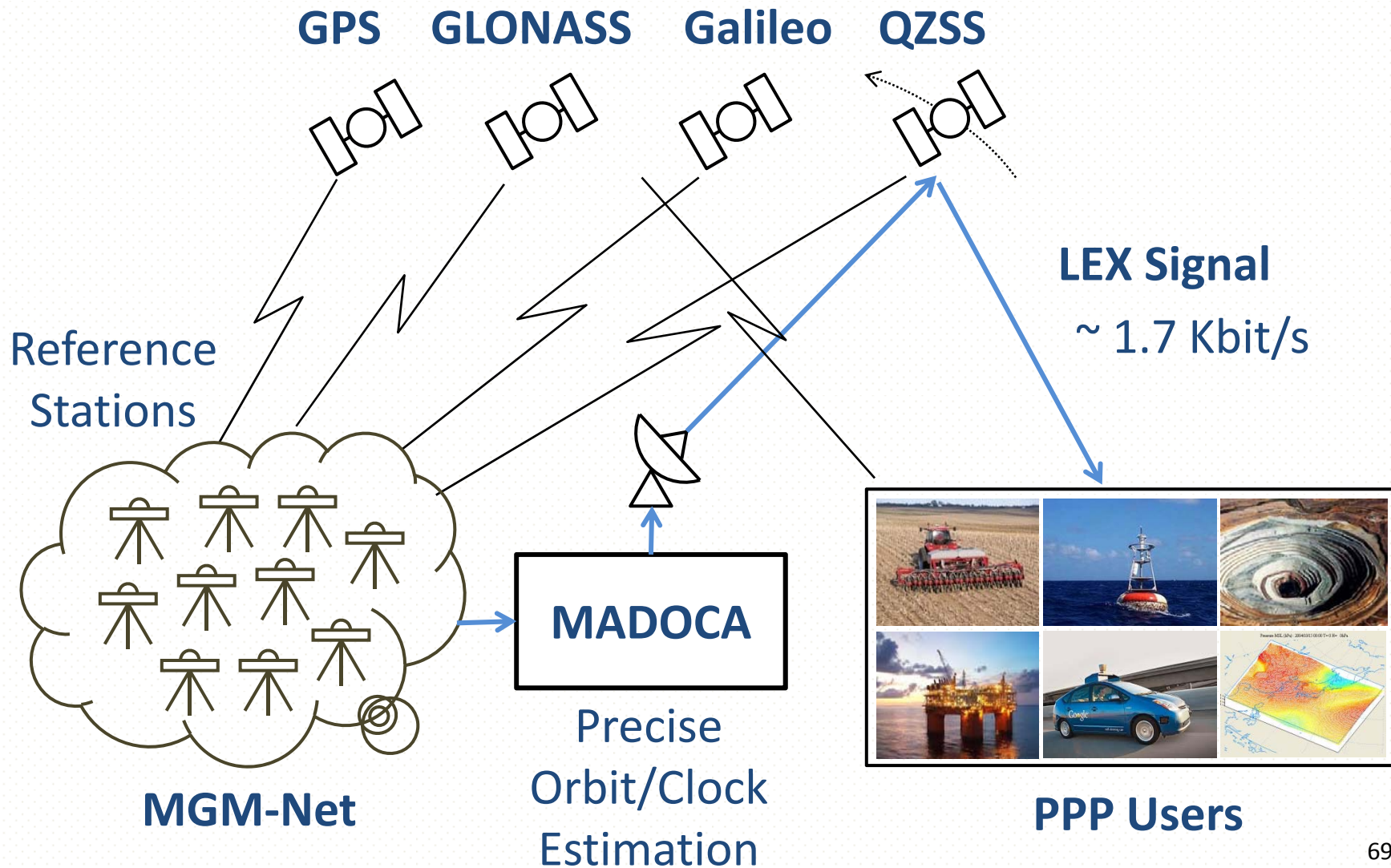
使われている。電子基準点は高さ約5メートルの柱で、内部にGPS衛星からの電波の受信機や通信機器などが収納されている。全国に平均して約20キロ間隔で設置されている。

の宮川康平・地震調査官や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級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にとらえられないという。(福島慎吾)

朝日新聞
2014/12/31

MADOCA-PPP

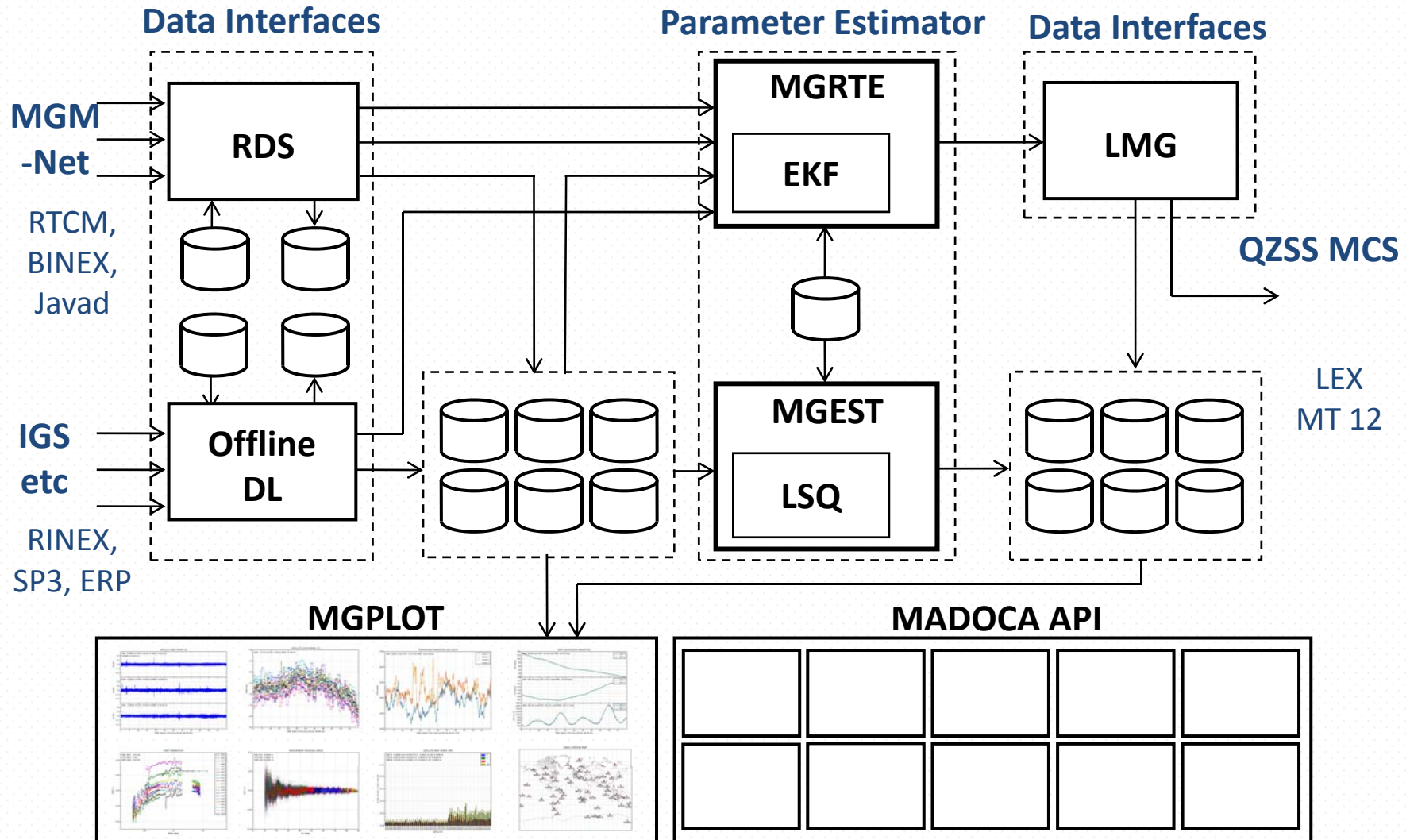


MADOCA (1)

Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Aalysis

- **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

MADOCA (2)



MADDOCA-PPP

The image displays three overlapping browser windows from the QZ-vision website. The leftmost window shows the main homepage with the 'PLAY' and 'RE' buttons. The middle window shows the 'USE' page, featuring an 'Experiment Schedule' table for GPS Week 1761. The rightmost window shows the 'Interface Specifications for QZSS:IS-QZSS' page, which includes a flowchart of the data flow and a download link for 'MADDOCA-LEX Format'.

2013	UT	10/6(Sun.)
	L1 C/A	標準コード
	L1C	標準コード
	L5	標準コード
	ENR	
	GPAC	
	JAXA-LEX	
	JAXA-LEX (MADDOCA)	
	SPAC-LEX	
	LEX	

Flowchart showing the data flow: 運用者 (Operator) sends 申請 (Application) to 運用管理者 (Operator Manager) and 製品管理者 (Product Manager). 運用管理者 sends 通知 (Notification) to 運用者. 製品管理者 sends 申請 (Application) to 製品販売者 (Product Seller). 製品販売者 sends 販売 (Sales) to 運用者. 製品販売者 sends 承認 (Approval) to 製品管理者. 製品販売者 sends 型式認定 (Type Approval) to 製品管理者.

Download link: MADDOCA-LEX Format ダウンロード

Schedule

LEX Data Format

LEX MT12 Format

- **メッセージタイプ** : JAXA実験用信号としてメッセージタイプ 12 で放送予定
- **メッセージフォーマット** : PPPユーザ向けのRTCM^(*1) SSR(State Space Representation)フォーマットに基づき、MADOCAにより生成したプロダクトを格納する。
LEXメッセージのデータ部には、RTCMメッセージの“Variable Length Data Message”のみを先頭から詰めて格納する。
LEXメッセージとRTCMメッセージの関係は、下記のとおり。
(*1)RTCM (Radio Technical Commission for Maritime services)

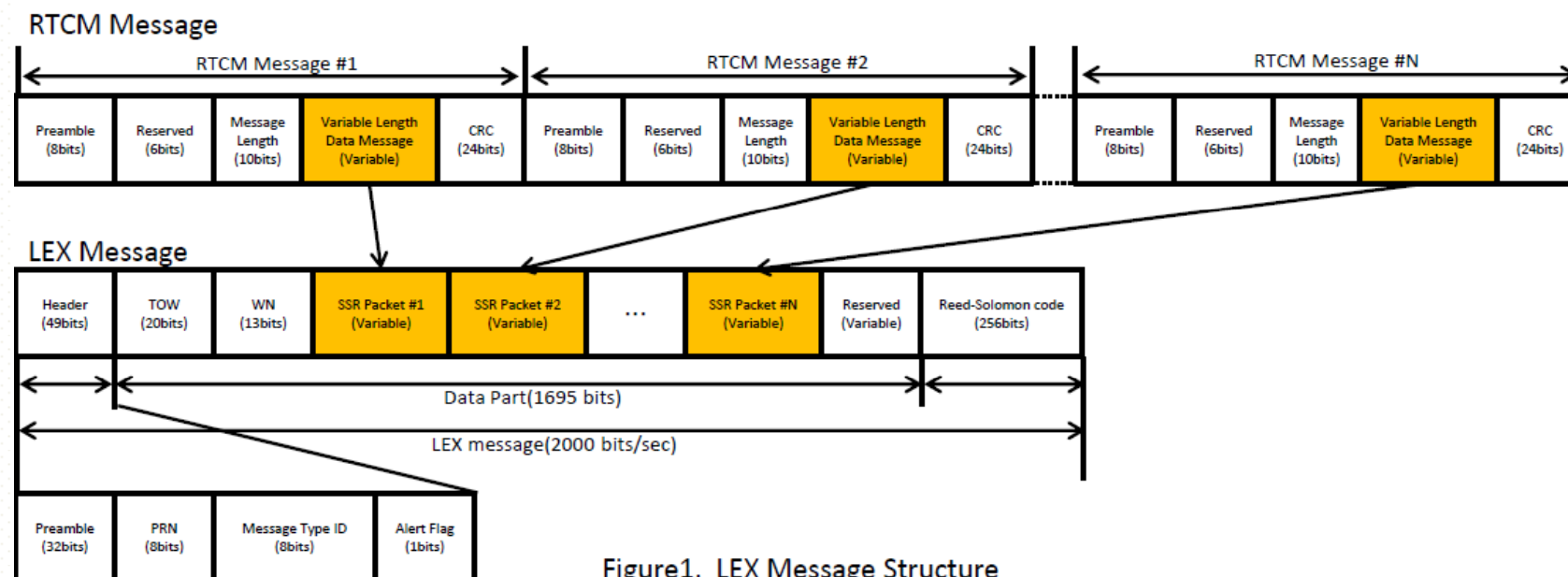


Figure1. LEX Message Structure

組み込みシステム応用

- **Low-Cost/Compact Multi-GNSS-RTK/INS Receiver**
 - Price Range: \$200 - \$500
 - Float RTK with many satellites integrated to MEMS-IMU
 - 10 cm-class accuracy expected in severe environment



NAVIO: Autopilot Shield for Raspberry Pi
(\$195 + \$40)
<http://www.emlid.com/>



(35.5 x
25.0 x
3.9 mm)

Intel Edison
(\$50)
<http://www.intel.com/>

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

RTKLIB: 可搬性

- プログラム言語
 - API, CUI AP : ANSI C (C89)
 - GUI AP : C++
- 使用ライブラリ
 - TCP/IP スタック : 標準ソケットまたは WINSOCK
 - スレッド : POSIX (pthread) または WIN32 スレッド
 - GUI 部品 : Borland VCL on Windows
- ビルド環境
 - CLI AP : GCC, MS VS, Borland C, ...
 - GUI AP : Borland Turbo C++ on Windows

RTKLIB: API

```
/* matrix and vector functions */
mat(),imat(),zeros(),eye(),dot(),norm(),matcpy(),matmul(),matinv(),solve(),lsq(),filter(),smoother(),matprint(),matfprint()
/* time and string functions */
str2num(),str2time(),time2str(),epoch2time(),time2epoch(),gpst2time(),time2gpst(),timeadd(),timediff(),gpst2utc(),utc2gpst(),
timeget(),time2doy(),adjgpsweek(),tickget(),sleepms()
/* coordinates functions */
ecef2pos(),pos2ecef(),ecef2enu(),enu2ecef(),covenu(),covecef(),xyz2enu(),geoidh(),loadatump(),tokyo2jgd(),jgd2tokyo()
/* input/output functions */
readpcv(),readpos(),sortobs(),uniqeph(),screent()
/* positioning models */
eph2pos(),geph2pos(),satpos(),satposv(),satposiode(),satazel(),geodist(),dops(),ionmodel(),ionmapf(),tropmodel(),tropmapf(),
antmodel(),csmooth()
/* single-point positioning */
pntpos(),pntvel()
/* rinex functions */
readrnx(),readrnxt(),outrnxobsh(),outrnxnavh(),outrnxnavb(),uncompress(),convrnx()
/* precise ephemeris functions */
readsp3(),readsap(),eph2posp(),satposp()
/* receiver raw data functions */
getbitu(),getbits(),crc32(),crc24q(),decode_word(),decode_frame(),init_raw(),free_raw(),input_raw(),input_rawf(),input_oem4(),
input_oem3(),input_ubx(),input_ss2(),input_cres(),input_oem4f(),input_oem3f(),input_ubxf(),input_ss2f(),input_cresf()
/* rtcm functions */
init_rtcm(),free_rtcm(),input_rtcm2(),input_rtcm3(),input_rtcm2f(),input_rtcm3f()
/* solution functions */
readsol(),readsolt(),outsolheads(),outsols(),outsolsexs(),outsolhead(),outsol(),outsolsex(),setsolopt(),setsolformat(),
outnmea_rmc(),outnmea_gga(),outnmea_gsa(),outnmea_gsv(),
/* SBAS functions */
sbsreadmsg(),sbsreadmsgt(),sbsoutmsg(),sbsupdatestat(),sbsdecodemsg(),sbssatpos(),sbspntpos()
/* integer least-square estimation */
lambda()
/* realtime kinematic positioning */
rtkinit(),rtkfree(),rtkpos()
/* post-processing positioning */
postpos(),postposopt(),readopts(),writeopts()
/* stream data input/output */
strinitcom(),strinit(),strlock(),strunlock(),stropen(),strclose(),strread(),strwrite(),strsync(),strstat(),strsum(),strsetopt(),
strgettime()
/* stream server functions */
strsvrinit(),strsvrstart(),strsvrstop(),strsvrstat()
/* rtk server functions */
rtksvrinit(),rtksvrstart(),rtksvrstop(),rtksvrlock(),rtksvrunlock(),rtksvrstat(),rtksvrsstat() ...
```

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