

GPSによる洋上波浪計測（第2報）

—基線長の影響とハイブリッド法による低周波成分の取り扱い—

正員 一色 浩*

Ocean Wave Measurements by GPS (The 2nd Report)

—Effects of Baseline Length And Treatment of Low Frequency Components by Hybrid Method —

by Hiroshi Isshiki, Member

Summary

In GPS kinematics measurements, the baseline length has significant effect especially on the determination of the initial phase ambiguities. In VD (Variance Detection) method, the ambiguities are not required. In the present paper, the Effects of baseline length in VD method is discussed. The effects seem to be small.

RTK (Real Time Kinematics) and VD (Variation Detection) methods are combined, and measurements in very wide frequency range from the direct component to very high frequency component become possible. RTK and VD are used at long and short epoch, and they measure low and high frequency components respectively. The results by RTK and VD are then synthesized. This method has been applied to analyze motions of a buoy installing a GPS antenna and floating on sea surface. The results obtained in this way seem to give quite reasonable ones.

1. 緒言

観測点座標の時間変動成分のみを計測する VD (Variance Detection) 法¹⁻⁵⁾には、完全実時間化と長周期成分の取り扱いという二つの問題があったが、前者に付いては既に第1報で論じた。本報では、主として後者について論ずる。

GPS キネマチック法においては、基線長 (baseline length: 基準点受信機と観測点受信機との間の距離) は、初期位相のアンビギュイティ (initial phase ambiguity) を決定する上で重要な影響を有する。これは、衛星と受信機を結ぶ電波伝播路が電波に及ぼす電離層や大気の影響が、基準点と観測点で大きく異なるためである。観測点座標の時間変動成分のみを計測する VD 法では、アンビギュイティを解く必要がないので、基線

長の影響は少ない。そればかりでなく、変動成分の計測精度にもその影響は小さいようで、L1 波のみの計測でも通常の場合は十分なようである。

RTK (Real Time Kinematics) 法は、地震振動のように高速に変動する変動成分の計測には必ずしも有効でない。RTK 法は複雑な計算と大量のデータ伝送を必要とするためである。一方、KVD (Kinematics for precise Variance Detection: VD の一種で相対計測を行うもの) 法は簡単な計算と少量のデータ伝送でよいので、高速に変動する成分の計測に適している。しかしながら、VD 法は変動成分しか計れず、直流成分を含む潮汐のような超低周波成分の計測が実際上できない。もしも RTK 法と VD 法を結びつけることができれば、直流成分から高周波数成分までの広い周波数成分にわたっての計測が可能になる。

本論文では、そのような技術が開発されている。RTK 法と VD 法はそれぞれ長および短エポック (計測時間間隔) で適用され、低および高周波数成分を計測し、それらの結果を合成する。本方法は GPS アンテナを搭載したブイの運動の計測に適用されている。このようにして求められた結果は、合理的なものが得られたようである。

* 数理解析研究所

原稿受理 平成 13 年 7 月 10 日

秋季講演会において講演 平成 13 年 11 月 15, 16 日

2. 観測方程式とノイズ

衛星、基準点および観測点の幾何学的関係を Fig. 1 に示す。地表座標 (x, y, z) を Fig. 2 に示すが、 x 軸および y 軸は東および北に向いているものとし、 z 軸を鉛直上方に取る

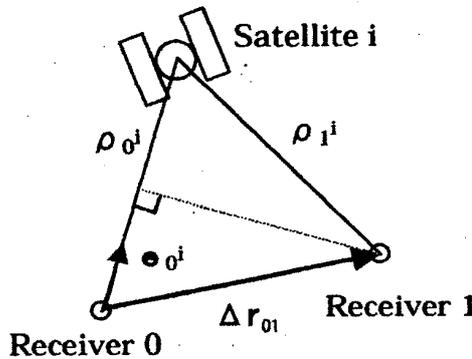


Fig. 1 Arrangement of a satellite and receivers

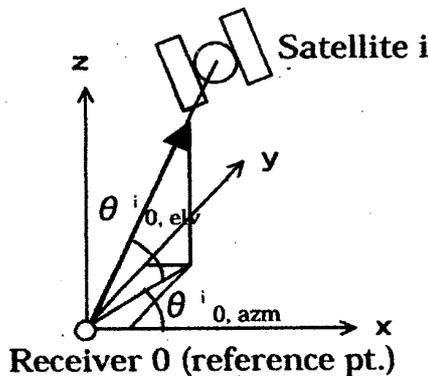


Fig. 2 Definition of elevation and azimuth.

最も基本的な観測方程式は

$$\Phi_{\alpha}^i = \rho_{\alpha}^i + d^i + d_{\alpha} + d_{\alpha}^i + \lambda N_{\alpha}^i + \epsilon_{\alpha}^i, \quad i = 0, 1, \dots; \alpha = 0, 1; \quad (1)$$

で与えられる。ここで

Φ_{α}^i : 受信機 α と衛星 i との間の位相距離

ρ_{α}^i : 受信機 α と衛星 i との間の距離 (レンジ) の真値

d^i : 衛星 i に起因するノイズ

d_{α} : 受信機 α に起因するノイズ

d_{α}^i : 受信機 α と衛星 i の間の電波伝播路に起因するノイズ

N_{α}^i : 位相距離の初期位相アンビギュイティ

λ : 電波の波長

ϵ_{α}^i : その他のノイズ, 例えば多重反射

とする。電波伝播路に起因するノイズ d_{α}^i は電離層と大気に起因するものである

(1)式より、衛星間の1重差は

$$(\nabla\Phi)_1^i = (\nabla\rho)_1^i + (\nabla d)^i + (\nabla d)_1^i + \lambda(\nabla N)_1^i + (\nabla\epsilon)_1^i, \quad i = 0, 1, \dots \quad (2)$$

で、受信機間の1重差は

$$(\Delta\Phi)_{01}^i = (\Delta\rho)_{01}^i + (\Delta d)_{01}^i + (\Delta d)_{01}^i + \lambda(\Delta N)_{01}^i + (\Delta\epsilon)_{01}^i, \quad i = 0, 1, \dots \quad (3)$$

で与えられる。(2) または (3) 式より、衛星間受信機間2重差は

$$(\nabla\Delta\Phi)_{01}^{ij} = (\nabla\Delta\rho)_{01}^{ij} + (\nabla\Delta d)_{01}^{ij} + \lambda(\nabla\Delta N)_{01}^{ij} + (\nabla\Delta\epsilon)_{01}^{ij} \quad (4)$$

と書ける。

衛星の高度は2万キロメートルと極めて大きいので、レンジの2重差 $(\nabla\Delta\rho)_{01}^{ij}$ は

$$\begin{aligned} (\nabla\Delta\rho)_{01}^{ij} &= \rho_0^i - \rho_1^i - \rho_0^j + \rho_1^j \\ &\approx (e_{0,x}^i - e_{0,x}^j)\Delta x_{01} + (e_{0,y}^i - e_{0,y}^j)\Delta y_{01} \\ &\quad + (e_{0,z}^i - e_{0,z}^j)\Delta z_{01} \\ &= (e_0^i - e_0^j) \cdot \Delta r_{01} = (\nabla e)_0^{ij} \cdot \Delta r_{01}, \end{aligned} \quad (5)$$

のように近似してよい。ここで

$$(e_{0,x}^i, e_{0,y}^i, e_{0,z}^i) = (\cos\theta_{0,elv}^i \cos\theta_{0,azm}^i, \cos\theta_{0,elv}^i \sin\theta_{0,azm}^i, \sin\theta_{0,elv}^i). \quad (6)$$

である。

GPS 衛星は L1 波および L2 波と呼ばれる2種類の電波を放射している。L1 波の周波数は約 1.58GHz で、その波長は約 19.0cm である。一方、L2 波の周波数は約 1.23GHz で、その波長は約 24.4cm である。これらの電波による観測の1次結合をとると、仮想的な波長の電波の観測量が求まる。なお、以下の議論においては d_{α}^i のうち大気に起因するものは無視して I_{α}^i と書くことにする。また、L1 波の周波数を f_1 、L2 波のそれを f_2 とすると

$$\begin{aligned} &L2 \text{ 波の電離層による遅延} \\ &= (f_1/f_2)^2 \times L1 \text{ 波の電離層による遅延} \end{aligned} \quad (7)$$

という関係がある。

(1)式の両辺を λ で割ったものを2周波数に対して考えて、それら2式の和を取ると、いわゆる Narrow-lane に対する仮想の観測方程式が以下のように求まる。

$$\begin{aligned} &\frac{\lambda_N}{\lambda_1} \Phi_{1\alpha}^i(t) + \frac{\lambda_N}{\lambda_2} \Phi_{2\alpha}^i(t) \\ &= \rho_{\alpha}^i - \left[\frac{\lambda_N}{\lambda_1} + \frac{\lambda_N}{\lambda_2} \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \right] I_{\alpha}^i \\ &\quad + \lambda_N (N_{1\alpha}^i + N_{2\alpha}^i) + \epsilon_{N\alpha}^i \end{aligned}$$

$$= \rho_{\alpha}^i - \frac{f_1}{f_2} I_{\alpha}^i + \lambda_N N_{N\alpha}^i + \varepsilon_{N\alpha}^i \quad (8)$$

ここで

$$\lambda_N = \frac{c}{f_1 + f_2} = 1 / \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (9a)$$

$$N_{N\alpha}^i = N_{1\alpha}^i + N_{2\alpha}^i \quad (9b)$$

とする。\$d^i\$, \$d_{\alpha}\$ は \$\varepsilon_{N\alpha}^i\$ に含めてある。

2式の差を取ると、いわゆる Wide-lane に対する仮定の観測方程式が以下のように求まる。

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda_W}{\lambda_1} \Phi_{1\alpha}^i(t) - \frac{\lambda_W}{\lambda_2} \Phi_{2\alpha}^i(t) \\ &= \rho_{\alpha}^i - \left[\frac{\lambda_W}{\lambda_1} - \frac{\lambda_W}{\lambda_2} \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2 \right] I_{\alpha}^i \\ & \quad + \lambda_W (N_{1\alpha}^i - N_{2\alpha}^i) + \varepsilon_{W\alpha}^i \\ &= \rho_{\alpha}^i + \frac{f_1}{f_2} I_{\alpha}^i + \lambda_W N_{W\alpha}^i + \varepsilon_{W\alpha}^i \end{aligned} \quad (10)$$

ここで

$$\lambda_W = \frac{c}{f_1 - f_2} = 1 / \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (11a)$$

$$N_{W\alpha}^i = N_{1\alpha}^i - N_{2\alpha}^i \quad (11b)$$

(8)式と(10)式には、電離層による遅延 \$I_{\alpha}^i\$ が含まれるが、(8)式と(10)式を加えると

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left[\frac{\lambda_N + \lambda_W}{\lambda_1} \Phi_{1\alpha}^i(t) + \frac{\lambda_N - \lambda_W}{\lambda_2} \Phi_{2\alpha}^i(t) \right] \\ &= \rho_{\alpha}^i + \frac{1}{2} (\lambda_N N_{N\alpha}^i + \lambda_W N_{W\alpha}^i) + \varepsilon_{I\alpha}^i \end{aligned} \quad (12)$$

という観測方程式が求まる。この式には電離層影響が含まれていないので Ion-free 結合と呼ばれる。

3. 加振機を用いた実験結果

3.1 長基線の影響を調べるための実験を行った。加振機で GPS アンテナを上下方向に正弦的および鋸歯状に加振する実験で、Table 1 に実験内容を示す。基線長の最大値は 420km である。

Table 1a List of reference points

	Notation	Baseline length
Osaka(1)	Lab	100m
Osaka(2)	Kdc	10km
Nagoya	Hna	140km
Tokyo(Kamata)	Hka	420km

Table 1b Characteristics of mechanical oscillator

	Nota-	Characteristic		
		amplitude	period	type of motion
Mechanical oscillator(1)	S2a	\$\pm 2.5\$cm	6sec	sinusoidal
Mechanical oscillator(2)	S1b	\$\pm 10\$cm	90sec	saw tooth

Fig. 3 と Fig. 4 に狭帯域信号の場合の、Fig. 5 と Fig. 6 に広帯域信号の場合の KVD 法による結果を示す。Fig. 3 および Fig. 5 の基線長は 100m のオーダーであり、Fig. 4 および Fig. 6 の基線長は 420km である。GPS による計測値と加振機の変位計測値との差は 1cm 以内であり、十分な精度が得られているといえる。Fig. 4 および Fig. 6 の結果から判断すると、KVD 法の場合には基線長を極めて大きく取れると考えられよう。

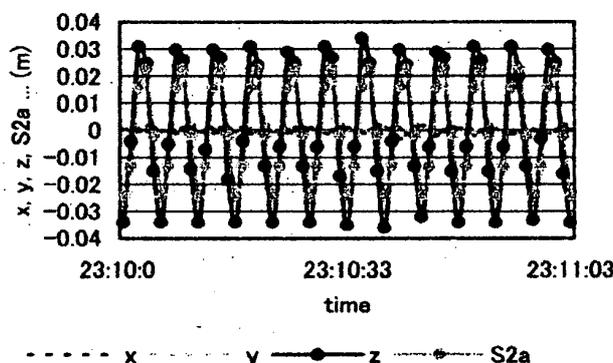


Fig. 3 Comparison between vertical displacement z obtained by KVD method with the reference point Lab and the oscillator S2a. The Data are processed by 7-point running average.

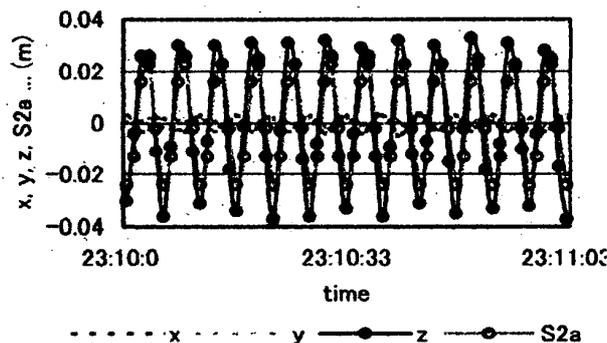


Fig. 4 Comparison between vertical displacement z obtained by KVD method with the reference point Hka and the oscillator S2a. The Data are processed by 7-point running average.

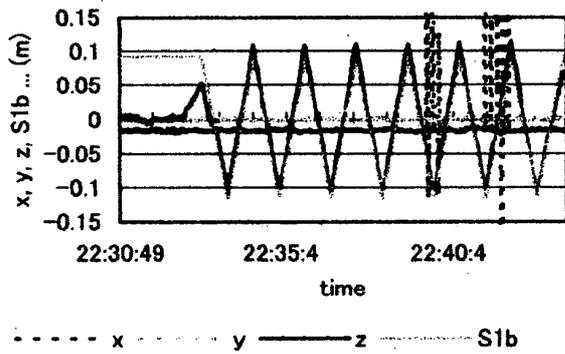


Fig. 5 Comparison between vertical displacement z obtained by KVD method with the reference point Lab and the oscillator S1b. The Data are processed by 99-point running average.

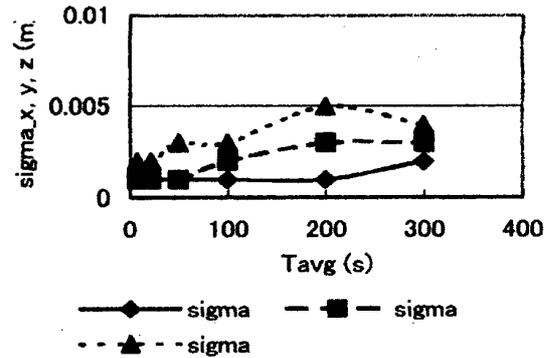
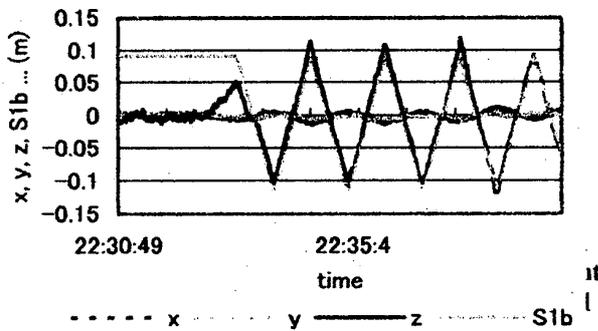


Fig. 7 Effects of running average length on errors σ_x , σ_y and σ_z in KVD measurements with Lab as the observation point and Hka as the reference point.

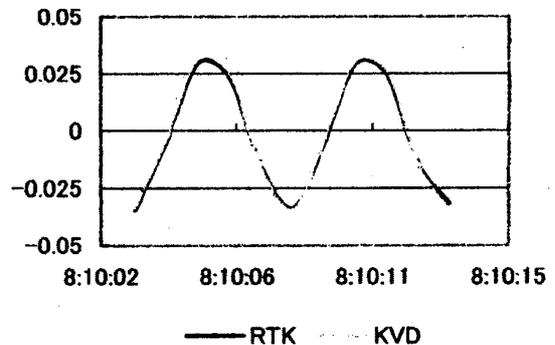


Fig. 8 Comparison of z -components obtained by RTK and KVD methods. RTK refers to high(RTK,7), the high component of the sequence obtained by RTK method by filtering with 7-point running average. The unit of the vertical axis is meter. The horizontal axis is time.

3. 2 誤差の評価

基準点は静止点であるので、基準点の座標を測ると誤差の評価が得られる。

基準点を Hka に取って観測点を Lab に取った場合の、KVD 法による計測で求められた誤差(標準偏差) σ_x , σ_y および σ_z に対する移動平均の長さの影響を、Fig. 7 に示す。鉛直方向の誤差が予測よりもはるかに小さいことが分かる。

Fig. 8 には、KVD 法の結果と RTK (Real Time Kinematics) 法の結果が比較されている。極めてよい一致が得られており、別の観点から KVD 法の精度の高さを裏付けている。

3. 3 電離層影響と 2 周波成分の線形結合

Fig. 9 においては、超長基線の場合について、L1 波の観測量を KVD 法で解析した結果を、L2, ion-free, narrow-lane および wide-lane 解と比較している。L1 解の誤差が最も小さく、wide-lane 解の誤差が最も大きい。L2 解の誤差が少し大きすぎるようであるが、理由は不明である。このことは、変動成分だけを対象とする KVD 法の場合には、通常は L1 解でほぼ十分であることを示している。

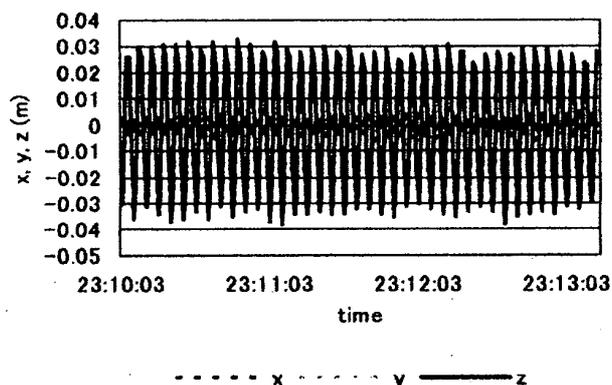


Fig. 9a KVD Solution using L1 in case of very long baseline.

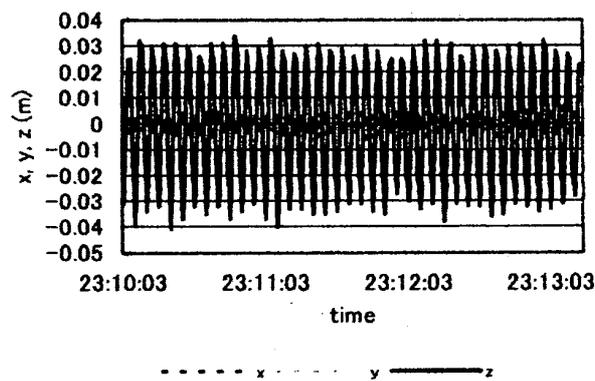


Fig. 9d KVD solution using narrow-lane combination LN in case of very long baseline.

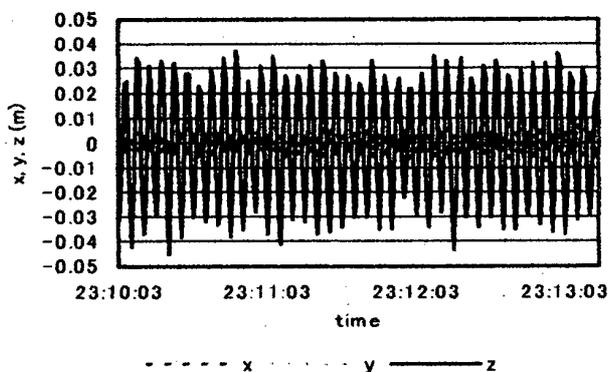


Fig. 9b KVD solution using L2 in case of very long baseline.

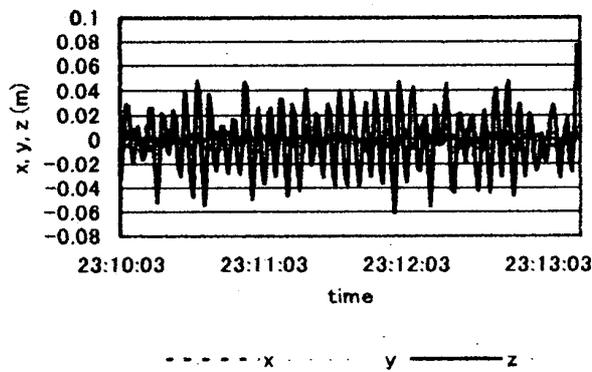


Fig. 9e KVD solution using wide-lane combination LW in case of very long baseline.

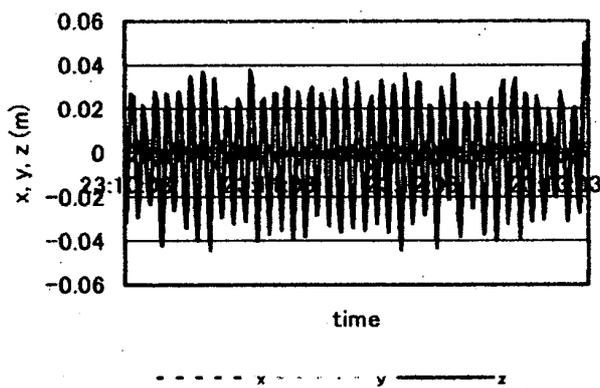


Fig. 9c KVD solution using ion-free combination LI in case of very long baseline.

4. ハイブリッド解法

地震振動のような高速に変動する振動の計測には、RTK (Real Time Kinematics) 法は必ずしも有効ではない。これは RTK 法の場合には、計算および通信の負荷が大きいためである。一方、著者等により開発された VD (Variation Detection) 法^{1)~5)}のアルゴリズムは非常に簡単であるので、高速の変動に追従できるが、変動成分しか測れないという短所がある。潮汐のような超低周波数成分 (直流成分を含む) の計測ができない。

もしも RTK 法と VD 法を結びつけることが可能ならば、直流成分を含む超低周波数成分から超高周波数成分までの非常に広い周波数範囲での計測が可能となる。以下では、そのような方法 (ハイブリッド法) について述べる。RTK 法と VD 法は、それぞれ長および短エポックで用いられ、低および高周波数成分を計測する。最後にそれらが合成される。この方法は GPS アンテナを搭載したブイの運動計測に適用された。その結果は、満足

すべきものと思われる。

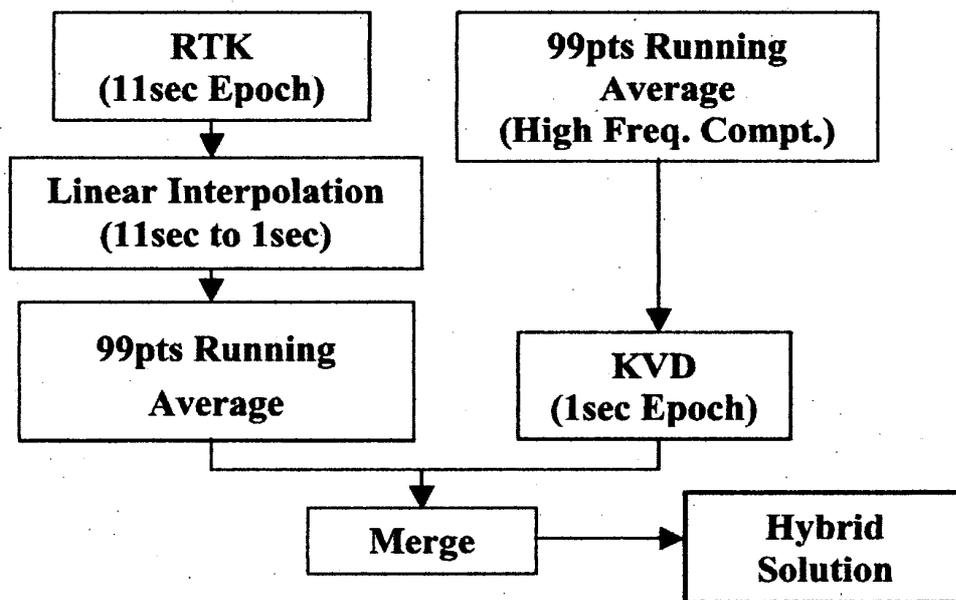


Fig. 10 Flow of hybrid solution

Fig. 10 にハイブリッド法のアルゴリズムを示す。本論文で取り上げている例では、RTK 法のエポックは 11 秒である。本論文の目的は、ハイブリッド法の妥当性を検証するためであるので、この目的のために新たな実験を行ったわけではなくて、以前に行った実験のデータを用いている。11 秒エポックのデータは、1 秒エポックのデータを間引いたものである。このデータを補間して仮想的な 1 秒間隔のデータを発生させた後に、99 点の移動平均を掛けて低周波数成分を抽出する。一方、もともと 1 秒エポックで取られている生データに 99 点の移動平均を掛けて生データの中の高周波数成分を取り出す。移動平均は低周波フィルターであるが、元のデータから移動平均を引けば高周波数成分が求まる。このようにして求められた高周波数成分を KVD 法で処理して、座標の変動成分を求める。最後に、これらの低周波数成分と高周波数成分を足し合わせる。

Fig. 11 に、1 秒エポックの RTK 解の高周波数成分と KVD 解の比較を示すが、両者は非常によく一致しているので、前者を後者で置きかえることが可能である。これが、ハイブリッド法の基本的アイデアである。

RTK 解とハイブリッド解の鉛直座標 z に関する比較を Fig. 12 に示す。1 秒エポックの RTK 解とハイブリッド解が極めてよい一致を示している。

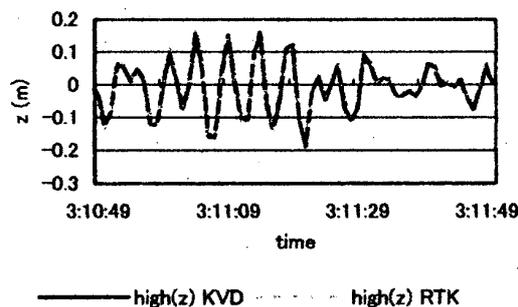


Fig. 11 High frequency components of KVD and RTK (1sec epoch) solutions.

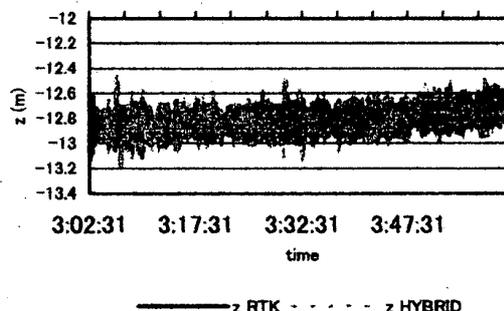


Fig. 12a Comparison between Hybrid and RTK solutions.

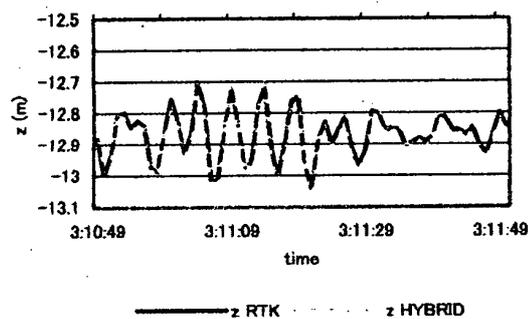


Fig. 12b Comparison between hybrid and RTK solutions with time scale enlarged.

5. 結論

- (1) GPS キネマチック法においては、基線長は、初期位相のアンビギュイティを決定する上で重要な影響を有する。観測点座標の時間変動成分のみを計測するVD法では、アンビギュイティを解く必要がないので、基線長の影響は少ない。そればかりでなく、変動成分の計測精度にもその影響は小さく、L1波のみの計測でも通常の場合には十分であることが確認された。
- (2) RTK法により低周波数成分を、VD法により高周波数成分の計測し、これらを合成するハイブリッド法が可能であり、本論で具体的な方法が示された。
- (3) 本論で述べたハイブリッド法は、新たにハードウェアを必要とせず、そのアルゴリズムは極めて簡単であるばかりでなく、基準点と観測点間のデータ伝送の負荷も小さい。したがって、本方法は極めて低コストで機能の改善が計れる方法である。
- (4) 本方法をGPSアンテナを搭載したブイの運動解析に適用したところ、極めて合理的な結果が得られた。

謝辞

本研究にあたり、種種有益なご協力を頂いた(社)日本測量協会・土屋 淳 博士、東京大学地震研究所・加藤照之教授外の皆様に深謝します。また、有益な討論と励ましを頂いた(株)日本海洋科学・小山健夫博士(東京大学名誉教授)にお礼申し上げます。

電離層の影響が述べられているが、これは、ION (Institute of Navigation)のNTM(National Technical Meeting)における著者の発表に対して寄せられたMITのC. Counselman教授のご指摘に基づいたものである。同教授に深謝します。

参考文献

- 1) Isshiki, H., GPSによる洋上波浪計測 (第1報) - トレンド予測フィルター-TPF (実時間フィルター)

- の開発一、日本造船学会論文集, Vol. 189., (2001)
- 2) Isshiki, H., Kato, T., Terada, Y. and Tsuchiya, A., Measurements in Very Wide Frequency Range by Hybrid Combination of RTK (Real Time Kinematics) and VD (Variation Detection), KIS2001, ION, held at Banff, Canada, (2001).
- 3) Isshiki, H., Terada, Y., Ito, K., Tsuchiya, A. and Kato, T., Variation Measurements by VD/GPS Method Over Very Long Baseline, ION NTM 2001 held at Long Beach, (2001).
- 4) Isshiki, H., Tsuchiya, A., Kato, T., Terada, Y., Kakimoto, H., Kinoshita, M., Kanzaki, M. and Tanno, T., (2000a), Precise Variance Detection by a Single GPS-Receiver --- PVD (Point precise Variance Detection) Method, 46, 4, J. Geod. Soc. Japan, (2000).
- 5) Isshiki, H., Tsuchiya, A., Kato, T., Terada, Y., Kakimoto, H., Kinoshita, M., Kanzaki, M. and Tanno, T., Precise Variance Detection by Simplified Kinematic GPS Measurements --- KVD (Kinematics for precise Variance Detection) Method, 46, 4, J. Geod. Soc. Japan, (2000).
- 6) Kato, T., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Isshiki, H., Matsuishi, M., Yokoyama, A. and Tanno, T., Realtime Observation of Tsunami by RTK-GPS, Earth Planets Space, 52, 841-845, (2000).
- 7) Tsuchiya, A., Isshiki, H., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Kanzaki, M., Tanno, T. and Kato, T., Precise Variance Detection by a Single GPS-Receiver - PVD, (Abstr. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting), 89 p, (2000).
- 8) Tsuchiya, A., Isshiki, H., Terada, Y., Kinoshita, M., Kakimoto, H., Kanzaki, M., Tanno, T. and Kato, T., Precise Variance Detection by Simplified Kinematic GPS Measurements - KVD, (Abstr. 2000 Western Pacific Geophysics Meeting), 89 p, (2000).
- 9) Tsujii, T., Murata, M., Harigae, M., Ono, T. and Inagaki, T., Development of Kinematic GPS Software, KINGS, and Flight Test Evaluation, National Aerospace Laboratory, TR-1357T, (1998).