

平成 21 年 5 月 13 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007-2008

課題番号：19840006

研究課題名（和文） 広帯域 GPS 地震計の開発

研究課題名（英文） Development of broadband GPS seismometer

研究代表者 太田 雄策 (OHTA YUSAKU)

東北大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：50451513

研究成果の概要：

研究目標とする「GPSデータの広帯域地震計としての利用」の実現のために地震時の実データに対して解析を行い、その精度評価、利用を行った。第一に、本年度発生した2008年岩手・宮城内陸地震の際の地震時変動をキネマティックGPS解析によって精密に検出した。第二に、キネマティックGPSデータに含まれるノイズ源の解明のために推定パラメータ間の相関関数解析を行い、ノイズ源を精査し、パラメータ間の相関が衛星配置によって変化する事を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,350,000 | 0       | 1,350,000 |
| 2008年度 | 1,350,000 | 405,000 | 1,705,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 2,700,000 | 405,000 | 3,105,000 |

研究分野：地震測地学

科研費の分科・細目：固体地球惑星物理学

キーワード：GPS, キネマティックGPS

## 1. 研究開始当初の背景

研究開発当初は、GPS データを地震計として用いるためには多くのノイズ源が存在し、その解析や解釈に多くの困難が生じていた。特にそれらノイズの特性が明らかでないために対策が立てにくい状況にあった。特にキネマティック GPS では観測量と未知数の量においてパラメータ分離性の困難が予想されていたが、それらを定量的に評価した研究は非常に少なかった。しかしその反面、地震や火山噴火などの突発的なイベントが持つ変動の時間スケールはそれよりも短い場合が多く、GPS 日座標値を用いるだけではそうした変動の詳細を知ることは難しかった。こうした背景から近年、日座標値以下の変動、特に地震時のダイナミックな地動を GPS データから捉えた研究事例がいくつか報告されていた。例えば Larson et al., Science, (2003) では 2002 年アラスカ デナリ地震で発生した表面波を 1Hz サンプリングの GPS データのキネマティック解析 (以下、GPS 地震計と表記) から検出した。また Miyazaki et al., GRL, (2004) では 2003 年北海道十勝沖地震の際の震源過程を 1HzGPS データに基づいて推定している。彼らは GPS データを用いる事で、大振幅の地震波動から永久変位までを統一的に扱う事ができる事を示している。ここまで述べた 2 例はキネマティック GPS 解析によって得られた時系列のうち、比較的「短周期」の地震計として利用する応用例を示している。しかし、より広帯域の地動を考えた場合、こうした「短周期」変動だけではなく、より「長周期」側における GPS 地震計の応用が必要な状況にあり、それらの周波数帯域におけるノイズレベルの評価が急務な状況であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、キネマティック GPS データを広帯域地震計として利用するための研究開発を行う。上で述べたように、キネマティック GPS 解析による長周期地動の検出に対してはまだまだ多くの誤差要因がある。そこで、第一にそうした各誤差要因が座標時系列にどの程度寄与しているのかを長期間にわたり定量的に見積もる事を目標とする。本研究の特徴的な点としては、キネマティック GPS 時系列の長期間に渡る誤差評価を厳密に行う点にある。上で述べたように、PPP キネマティック時系列には長い期間において衛星軌道の不安定性に伴う座標値の擾乱がある事が明らかになり、長期間の解析によってノイズ源の同定が進んでいる段階である。従って本研究ではその方針を踏襲し、長期間の時系列から誤差要因を明確にする。特に GPS

衛星のプロダクトに起因するような人工的なノイズの同定は早急に行うべき対象である。第二に、数時間の時間スケールにおいて最も大きなノイズ源と考えられる対流圏伝搬遅延の時空間的不均質性を明らかにすることを目標とする。対流圏伝搬遅延 (主に水蒸気に起因) ノイズは空間スケールで数 km 程度、時間スケールで数時間程度である事がこれまでに分かっている。しかし、特に空間スケールでどの様な不均質性があるのかを詳細に知るためには現状の GEONET 観測点の密度では不十分である。従って本研究では申請者の所属する東北大学地震噴火予知研究観測センターが東北地方に保持する GPS 連続観測網 52 点と GEONET 観測点の併合処理によって観測点密度を倍増させることにより、対流圏伝搬遅延の時空間的な不均質性を明らかにする。このように本研究ではキネマティック GPS データを地震計として利用するための研究開発を最大の目標とし、それらの達成のために上に述べた点を小目標とする。これらの系統的な研究によって研究目標を達成できると考える。

## 3. 研究の方法

研究目標とする「GPS データの広帯域地震計としての利用」の実現のために、本研究では既存の GPS データの検討を前半部で行う。まず一点目は、太田 他,(2006)で明らかになった GPS 衛星軌道の不安定性に起因すると考えられる PPP キネマティック GPS 時系列の系統的なオフセットの原因究明とその評価である。具体的には太田 他(2006)で明らかされた衛星の周回軌道が通常と比較して「異常」な衛星を除外し、解析期間全体に渡って衛星軌道・時計補正情報の再推定を行い、それらの各プロダクトを独自に生成する。その際には全世界に GPS 観測点を保持する IGS (International GNSS Service) の観測点データを利用する。このように独自生成したプロダクトによって PPP キネマティック GPS 時系列の系統的なオフセットが軽減できるかを検証する。仮にこうした試行によってもオフセット軽減ができない場合、衛星軌道・時計情報以外に系統的なオフセットを生み出す誤差要因が存在する事になる。こうした誤差要因の同定は、特にキネマティック GPS 時系列の「絶対値」の安定性に大きく寄与する。すなわち、誤差によるドリフトを抑制し、時系列が示す座標値が常に「絶対値」として信頼できるものであることを保障するために必要な誤差評価である。

二点目は、対流圏伝搬遅延の時空間分布の詳細な検討についてである。GPS からの電波に遅延をもたらす対流圏伝搬遅延の最大の

原因は、水蒸気の時空間的な不均質性である。水蒸気の空間的な分布は数 km から十数 km 程度と考えられている。それに対して国土地理院が展開する GPS 連続観測網(GEONET)の観測点間隔は平均 20km であり、水蒸気の空間的不均質性に対しその空間密度が十分とは言えない。そこで本研究では東北大学理学研究科地震噴火予知研究観測センターが東北地方に展開する独自の GPS 連続観測網 52 点と周辺の GEONET 観測点網(右上図参照)を併合処理する。その際に、天頂大気遅延量・大気遅延勾配量をそれぞれの観測点において PPP 解析によって高時間分解能で推定する。天頂大気遅延量は水蒸気量(可降水量)に変換をする事が可能である。本研究では各観測点で推定された天頂大気遅延量・大気遅延勾配量を 2 次元平面上にマッピングする事によって、水蒸気量の空間分布がどの程度空間的な相関を持つのかを定量的に検討する。この際に空間方向だけではなく、時間方向の変化も同時に検討する。通常キネマティック解析を行う際には大気遅延量や大気遅延勾配の値はプロセスノイズを非常に小さくしたランダムウォークの確率過程を与えて座標値との同時推定を行うのが一般的である。

(例えば Bar-Server et al., 1998, Ohta et al., 2006, 太田 他., 2006) しかし、こうした解析で使われるプロセスノイズの値は比較的乾燥した地域で推定されたものであり、日本列島のように水蒸気の分布が時空間的に急激に変わる地域においてはそれらの値が適当であるという保証が無い。対流圏遅延や大気遅延勾配は GPS 観測点の上下、水平成分にそれぞれ強い相関を持つ事が知られている。そのため不適当なプロセスノイズを与えるとそれらが座標変動とのトレードオフパラメータとなり、安定した座標値の推定を難しくする。こうした点を考慮し、上記の PPP スタティック解析によって求められた大気遅延量・大気遅延勾配量の時間変化を考慮する。またそれら未知パラメータ間の相関についても詳細な解析を行い、各パラメータの分離困難性について議論を行う。

#### 4. 研究成果

本研究で得られた成果の内、主要な部分を以下に示す。

2008 年岩手・宮城内陸地震の際に、純粋な地震時変動をキネマティック GPS データに基づいて抽出する事に成功した。例えば東北大学の GPS 観測点一関(ICNS 観測点)ではキネマティック GPS 解析によって地震時に 1m を超える巨大変位を観測した(図 1)。この巨大変位はごく近傍にあった防災科学技術研究所の加速度記録を数値積分した結

果を整合的であり、キネマティック GPS が巨大変位を含めた地殻変動検出に有用である事を示す結果となった。

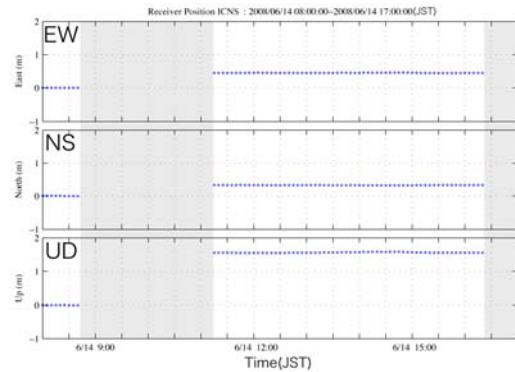


図 1. 一関 GPS 観測点における 2008 年岩手・宮城内陸地震の際の地震時変動。横軸に時間、縦軸に変位量を m で示す。上から南北、東西、上下各成分を示す。大変位が観測されている事が明瞭である。灰色で示した部分は地震後に停電となった時間を示す。

これは短期的な余効滑りやその他の擾乱を避け、地震時変動のみを高精度に捉えたという意味で重要な成果である。これらのデータを用い、2008 年岩手・宮城内陸地震の震源断層モデルを暫定解ながら作成した。推定した断層モデルを図 2 に示す。

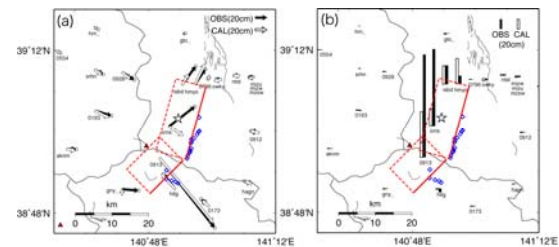


図 2. キネマティック GPS データに基づき推定された 2008 年岩手・宮城内陸地震の震源断層モデル。赤色で示した矩形が推定された震源断層モデル。黒いベクトル、棒が観測値、白抜きベクトル及び棒が計算値である。左側が水平成分、右側が上成分を示す。これらは全て余効変動等を含まない純粋な地震時変動である。

本震の影響のみを精密に抽出し、余効変動等を含まない変動として議論ができる事は、地震後に発生する余効変動等の変動の議論をする上で非常に重要であり、地震の発生サイクルを考える上でも特色のある結果である。本研究の成果は EPS 誌に査読付き英語論文として出版済である。

更に測位解精度の向上を図る上で重要な各未知パラメータ間の分離に関しては、共分

散に着目する形でその分離精度を検証し、その結果キネマティック GPS の座標時系列擾乱時に特定の成分間で顕著に相関が高い事が明らかになった。図3に日平均座標値における各未知パラメータの相関係数を示す。

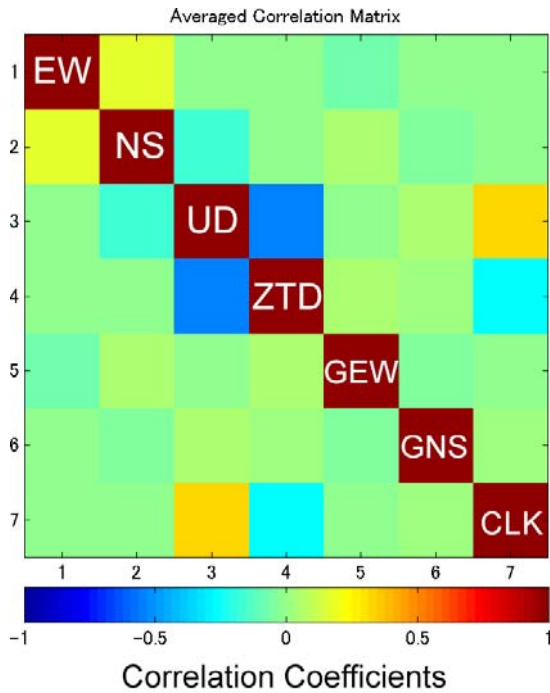


図3. 2006年1月1日における東北大学青葉山GPS観測点における相関係数行列。対角成分に各未知パラメータを示し、非対角成分にそれらの共分散から計算された偏相関係数を示す。偏相関係数をカラーで示し、青が負の相関、赤が正の相関を示す。

図3より明らかな様に、各成分間の相関は特定の成分間で強く、それらが例えば座標値の精度を低下させる。すなわち各成分間の分離困難性を示している事が分かった。特に上下成分と天頂大気遅延量(ZTD)には強い負の相関が、上下成分と受信機時計誤差には正の相関がある事が明らかであり、それらは他の成分とは強い相関を持っていない事も同時に判明した。これは各未知パラメータは特定の成分間「のみ」で相関が強いことを示し、これらの分離精度の向上がGPS測位解の精度向上に直接繋がることを示す結果となった。

更に、それらの相関係数の時空間分布を詳細に調べ、その特徴がほぼ衛星配置による物であることを明らかにした。図4に天頂大気遅延量と上下成分の偏相関係数の時空間変化を示した事例を示す。図より明らかな様に、両者が持つ負の相関は時空間的に大きく変化している。特に特定の時間に両者の相関係数が大きく変化する時間帯がある。これを詳細に調べると、この大きく総相関係数が変化する

時間帯は衛星配置が一巡する1日後に再び

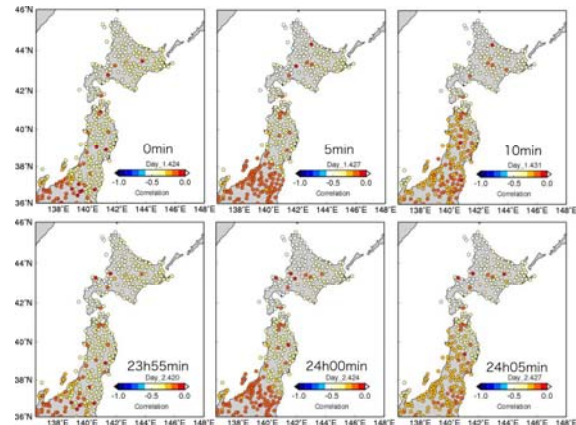


図4. 2005年1月1-2日における天頂大気遅延量と上下成分間の相関係数の時空間変化。上段が1月1日、下段が1月2日を示す。左から右に5分ずつ時間が変化する。上段の例を見ても明らかな様に、相関係数が徐々に向上し、0に近づいている事が分かる。

現れており、これは各未知パラメータの相関の時空間変化の多くの部分に衛星配置に起因する部分が含まれている事を示す結果となった。これは特定の成分間のみでの分離精度向上を目指すのではなく、衛星配置に起因する誤差要因を考慮しつつ、各未知パラメータの分離精度向上を目指す必要があることを示唆する結果である。これらはGPS測位解向上の基礎的な情報である。

この様にキネマティックGPSデータに含まれるノイズ源に考慮をしつつ、それらのノイズ解析を行った。これらの成果により、キネマティックGPSデータを広帯域地震計として用いるための基礎的なデータが収集できたと考えられる。しかし、大気起源誤差と上下変動の相関係数の時空間変化に見られるように、それらパラメータ間の分離を厳密に考えるためには衛星配置をも考慮する必要がある等、本研究で新たに判明した課題も多く、それらを継続して研究することによってより高精度な測位解が得られるものと考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. Ohta, Y., M. Ohzono, S. Miura, T. Iinuma, K. Tachibana, K. Takatsuka, K. Miyao, T. Sato, and N. Umino, Coseismic fault model of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake deduced by a dense GPS network.

[EarthPlanetsSpace,60(12),(2008),1197-1201]

(査読有)

2. Iinuma, T., Y. Ohta, S. Miura, K. Tachibana, and T. Matsushima, H. Takahashi, T. Sagiya, T. Ito, S. Miyazaki, R. Doke, A. Takeuchi, K. Miyao, A. Hirao, T. Maeda, T. Yamaguchi, M. Takada, M. Iwakuni, T. Ochi, I. Meilano, and A. Hasegawa, Postseismic Slip Associated with the Niigataken, Chuetsu-Okai Earthquake in 2007 (M6.8 on 16 July 2007) as Inferred from GPS data.[EarthPlanetsSpace,60,(2008),1087-1091]

(査読有)

3. Ohta, Y., S. Miura, T. Iinuma, K. Tachibana, T. Matsushima, H. Takahashi, T. Sagiya, T. Ito, S. Miyazaki, R. Doke, A. Takeuchi, K. Miyao, A. Hirao, T. Maeda, T. Yamaguchi, M. Takada, M. Iwakuni, T. Ochi, I. Meilano, and A. Hasegawa, Coseismic and postseismic deformation related to the 2007 Niigataken Chuetsu-Okai Earthquake.[Earth Planets Space,60(11),(2008),1081-1086] (査読有)

4. Sato T., S. Miura, Y. Ohta, H. Fujimoto, W. Sun, C.F. Larsen, M. Heavner, A.M. Kaufman and J.T. Freymueller, Earth tides observed by gravity and GPS in south eastern Alaska.[Journal of Geodynamics,46,(2008),78-89] (査読有)

5. Ohta, Y., K. Takatsuka, S. Miura and T. Sato, Seismic and Tsunami wave signal detection of the 2004 Sumatra- Andaman earthquake by high-rate kinematic GPS and broadband seismometer analysis.[Proceedings of Symposium on Giant Earthquakes and Tsunamis,1(1),(2008),135-140] (査読無)

[学会発表] (計 13 件)

1. Ohta, Y., M. Ohzono, S. Miura, T. Iinuma, K. Tachibana, K. Takatsuka, K. Miyao, T. Sato, and N. Umino, Coseismic fault model of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake deduced from a dense GPS network, AGU 2008 Fall meeting, San Fransisco, Moscone Center, December 15, 2008

2. Ohta, Y., M. Ohzono, S. Miura, T. Iinuma, K. Tachibana, K. Takatsuka, K. Miyao, T. Sato, and N. Umino, Coseismic fault model of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake deduced from a dense GPS network, The 7th General Assembly of Asian Seismological Commission, Tsukuba, Tsukuba international congress center, November 25, 2008

3. 太田雄策・大園真子・三浦哲・飯沼卓史・立花憲司・高塚晃多・宮尾佳世・佐藤俊也・海野徳仁, 稠密GPS観測網に基づく2008年岩手・宮城内陸地震の地震時断層モデル, 日本測地学会第110回講演会, 函館市, 函館市民会館, 2008年10月24日

4. 太田雄策・植木貞人・三浦哲・佐藤忠弘, キネマティックGPSによる火山体監視の可能性と問題点, 平成20年度京都大学防災研究所研究集会(20K09)「火山噴火機構の解明とモデル化—高度な噴火予知を目指して—」, 宇治, 京都大学防災研究所, 2008年9月11日

5. 太田雄策・三浦哲・佐藤忠弘, キネマティックGPS解析に基づく海洋潮汐加重変形検出の安定性評価, 日本地球惑星科学連合2008年大会, 千葉, 幕張メッセ, 2008年5月29日

6. Ohta Y., K. Takatsuka, S. Miura, and T. Sato, Seismic and Tsunami wave detection of the 2004 Sumatra Andaman earthquake by high-rate kinematic GPS analysis, International Symposium on the restoration program from giant earthquakes and tsunamis, Phuket, Royal Phuket City Hotel, Phuket, Thailand, January 22, 2008

7. Ohta, Y., J.T. Freymueller, and S. Miura, The time constant variations of slow slip events in the south Alaska subduction zone, AGU 2007 Fall Meeting, San Fransisco, Moscone South, December 11, 2007

8. 太田雄策・三浦哲・立花憲司・飯沼卓史・

松島健・高橋浩晃・宮崎真一・鷺谷威・伊藤武男・道家涼介・竹内章・宮尾佳世・平尾暁彦・前田宜浩・山口照寛・高田真秀・岩國真紀子・落唯史・イルワンメイラノ・，稠密GPS観測網による 2007 年中越沖地震の余効変動観測 その1 ―GPS臨時観測の概要―，日本測地学会第 108 回講演会，那智勝浦，ホテル浦島，2007 年 11 月 7 日

9. 太田雄策・三浦哲・立花憲司・飯沼卓史・松島健・高橋浩晃・宮崎真一・鷺谷威・伊藤武男・道家涼介・竹内章・宮尾佳世・平尾暁彦・前田宜浩・山口照寛・高田真秀・岩國真紀子・落唯史・イルワンメイラノ・，稠密GPS連続観測に基づく 2007 年新潟県中越沖地震の余効変動，日本地震学会 2007 年秋季大会，仙台，仙台国際センター，2007 年 10 月 24 日

10. Ohta Y., Application of real-time GPS for earthquake disaster mitigation in Japan, Real-Time GPS for scientific requirements, Wenatchee, Sleeping Lady Mountain Retreat, October 5, 2007

11. Ohta, Y., and J. T. Freymuller, Short-term slow slip event at the Alaska Subduction Zone, EASTEC symposium 2007 Dynamic Earth -its origin and future-, Sendai, Sendai City War Reconstruction Memorial Hall, September 19, 2007

12. 太田雄策，東北大からの次期計画にむけた提案その3 観測の高度化のための新規技術開発について，次期地震予知研究計画検討シンポジウム，東京，東京大学小柴ホール，2007 年 6 月 4 日

13. 太田雄策・鷺谷威・木股文昭，PPPキネマティックGPSの長期安定性とノイズ特性評価，日本地球惑星科学連合 2007 年大会，千葉，幕張メッセ，2007 年 5 月 22 日

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 雄策 (OHTA YUSAKU)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：50451513

(2) 研究分担者

( )  
研究者番号：

(3) 連携研究者

( )  
研究者番号：