

Study on Optimal Analysis Strategy of Dense GPS Networks

(高密度 GPS 連続観測網の最適解析手法の研究)

学位論文内容の要旨

概要

本研究では、GPS の解析手法、特に大規模ネットワークの解析における問題点や誤差要因を、国土地理院の GPS 連続観測網(GEONET)に基づいて明らかにし、誤差要因のキャリブレーションや解析手法の改良を行って精度の向上を実現した。現段階での最適な解析仕様に基づいて GEONET のデータを再解析し、日本列島の地殻変動を精密に議論をするための基盤的データセットを構築した。

GEONET の観測において、観測点のアンテナ架台のタイプに固有の位相特性が解析結果に 10cm を超える大きな系統的誤差をもたらしていることが明らかになった。この系統的誤差は一定ではなく、大気遅延推定の有無や仰角マスクなどの解析条件に大きく依存することを示した。野外で試験観測を行い、基準アンテナに対する相対キャリブレーション法によって、架台の影響を含んだ位相特性モデルを GEONET の代表的観測点タイプに対して求めた。短基線のキネマティック解析に対し新しい位相特性モデルを適用した結果、これまでの位相特性モデルを適用した場合に見られた見かけのドリフトが改善されることを示した。(Chapter 2)

新たな位相特性モデルを GEONET 全体の解析に適用し、ネットワーク解析におけるインパクトを評価した。モデルの変更に伴う座標解の変化は観測点のタイプによって異なり、大きいものでは 10cm を超える鉛直座標の変化、20ppb のスケール変化が生じることがわかった。新しい位相特性モデルの適用により、位相残差の減少や整数値バイアスの整数化率の向上、衛星最低仰角の変更に対する解の安定性の向上が確認された。また、300m 以内の距離にある 5 つの観測点での大気遅延推定値に見られた 46mm に及ぶ食い違いが、12mm 以内にまで改善した。新旧の解析結果を 1 年分比較したところ、新モデルによる結果では座標時系列に見られる年周変化の振幅に減少が見られた。このことは、GPS の基線解に見られる年周変化の一部には、位相特性のモデル誤差が関与していることを示している。また、そのメカニズムは位相特性のみの効果では説明することができず、年周成分を持つ他の要因が位相特性のモデルとカップリングしていることが推測される。(Chapter 3)

GEONET の試験解析結果に見いだされた矛盾の吟味により、ルーチン解析におけるネットワーク結合に問題があることが明らかになった。ネットワーク結合の際にバックボーンとなる広域クラスターを拘束なしで解いた解（ここでは弱拘束解と呼ぶ）のばらつきと 1 点で拘束した解のばらつきの相似性により、固定点がネットワーク全体を十分に拘束していないことが確認された。このことは、広域クラスターの弱拘束解が絶対座標に感度を持つこと、クラスター結合様式による多重結合のためその感度が増幅されること、網結合のデザインに弱点がありバックボーンクラスターが固定点により間接的にしか拘束を受けな

いこと、そのため弱拘束解に含まれるノイズの影響を十分に押さえることができないことにより説明される。広域クラスターを直接拘束するようネットワーク結合のデザインを改良した。これにより、座標鉛直成分解の再現性に 30%の改善が見られた。また広域クラスターの弱拘束解は座標拘束の影響を受けないため、弱拘束解に含まれる季節変動は、地殻変動よりも軌道情報や大気などのモデル誤差に起因することが推論される。(Chapter 4)

GEONET データを 2 時間毎に解析して調和解析を行うことにより、観測データに基づいて日本列島の潮汐変位を面的に捉えた。その大部分は海洋潮汐荷重変形で説明され、これまで GPS 解析ソフトでは必ずしも考慮されていなかった海洋潮汐荷重変形が無視できないことを示した。海洋潮汐荷重による観測点の変位を考慮せずに、24 時間セッションで GPS 観測網を解析すると、潮汐変位のモデル誤差が大気遅延量のパラメータに押しつけられ、その振幅が 12mm に達することがわかった。新旧 2 種類の海洋潮汐荷重変形モデルで補正した結果を比較し、瀬戸内海から九州にかけての地域で、補正結果に差がみられ、Matsumoto et al. (2000)による最新のモデルが GPS の観測結果をよりよく説明することを示した。海洋潮汐荷重変位を補正した後の座標値には、空間的にコヒーレントな潮汐変位成分が残っており、モデル化されていない潮汐誤差が残存する。(Chapter 5)

ここまでで得られた知見や最新のモデルを取り入れて、GEONET の解析手法を更新し、1996 年 3 月以降の約 5 年半のデータを再解析した。解析結果（新解析結果）を、これまでのルーチン解析による結果（旧解析結果）と比較し、その精度を評価した。これまでの解析にみられた解析戦略の変更などに伴う座標や変動速度の不連続、サブネットワークによる誤差の傾向の違いが解消されるなど、解の品質が均一化された。座標値からトレンドと年周および半年周成分を取り除いたあとの残差の RMS にして 2.7mm（水平成分）および 10.1mm（鉛直成分）の精度を達成した。均一で高い精度の解が得られることにより、長期の GEONET データに基づいて日本列島の変動速度をより精密に議論するための基盤データが構築された。特に、これまで解釈が難しかった鉛直成分の変動速度分布を、高い精度で求めることが可能になった。御前崎・室戸岬・道東の太平洋岸の沈降や、中部-紀伊半島-四国にかけての内陸側の相対的な隆起などを面的に捉えることができた。(Chapter 6)

GEONET の新解析結果に基づいて座標解の季節変動（年周および半年周成分）を評価し、ネットワーク全体が同期して系統的に変化する成分が卓越していることが見いだされた。Helmert 変換を用いたモデル化によって系統的成分の抽出を行った結果、6.5ppb のスケール変化（夏に膨張、冬に収縮）が最も顕著で、そのパワーが水平成分に含まれる季節変動の約 70%を占めることが判明した。GEONET で座標と同時推定された大気遅延推定値を気象庁の高層気象台におけるラジオゾンデ観測データを比較評価した結果、これらの差に振幅約 1cm 程度の年周変化を検出した。これを GPS 側の誤差であると仮定して理論的に予想されるネットワークのスケール変化のセンスと大きさが、GEONET 解から求められたものとオーダーが一致することから、大気遅延量の推定誤差がスケールの年周変化に寄与しているものと推測される。(Chapter 7)

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 笠 原 稔
副 査 教 授 小 山 順 二
副 査 教 授 蓬 田 清
副 査 教 授 西 田 泰 典

学 位 論 文 題 名

Study on Optimal Analysis Strategy of Dense GPS Networks

(高密度 GPS 連続観測網の最適解析手法の研究)

近年、GPS 技術による地球規模での地殻変動に関連して、革命的な知見がもたらされている。さらに、日本においては、世界に先駆けて非常に稠密な観測網が国土地理院により、日本列島の地球科学的基盤観測と位置づけて、1996 年以降展開されてきた (GEONET)。しかしながら、そのシステムの最大の精度を得るためには解決しなければいけない多くの問題があった。

本論文では、特に大規模 GPS ネットワークの解析手法における問題点や誤差要因を、国土地理院の GPS 連続観測網 (GEONET) に基づいて明らかし、誤差要因のキャリブレーションや解析手法の改良を行って精度の向上を実現した。

GEONET 観測点のアンテナ架台のタイプに固有の位相特性が解析結果に大きな系統的誤差をもたらしていることが明らかになった。キャリブレーション観測を行い、架台の影響を含んだ位相特性モデルを求めた。短基線のキネマティック解析に新しいモデルを適用した結果、架台タイプの違いを考慮せずに解析した場合に比べ、見かけのドリフトが改善された。

新たな位相特性モデルを GEONET 全体の解析に適用し、ネットワーク解析におけるインパクトを評価した。モデルの変更に伴い、架台のタイプによっては、鉛直座標に 10cm 以上、スケールに 20ppb 以上の違いが生じる。新しいモデルにより、位相残差の減少やバイアス整数化率が向上し、衛星最低仰角に対する解の安定性も向上した。また、大気遅延推定値に見られたバイアスも改善した。新モデルによって座標時系列に見られる年周変化の振幅が減少することから、GPS の基線解に見られる年周変化の一部には位相特性のモデル誤差が関与していること、また、そのメカニズムは位相特性単独ではなく、他の要因がカップリングしていることが推測される。

ネットワーク結合時にバックボーンとなる広域クラスターを拘束なしで解いた解 (準自由解と呼ぶ) と 1 点で拘束した解のばらつきの相似性により、GEONET のルーチン解析において固定点がネットワークを十分に拘束していないことが確認された。網の形態を改良して広域クラスターを直接拘束することにより、座標鉛直成分解の再現

性が 30%改善した。また、広域クラスターの準自由解は座標拘束の影響と無関係であるので、準自由解に見られた季節変動は、軌道情報や大気などのモデル誤差に起因すると推論される。

GEONET データを 2 時間毎に解析して調和解析を行い、日本列島の潮汐変位を面的に捉えた。その大部分は Matsumoto et al. (2001) による海洋潮汐荷重変形モデルで説明される。海洋潮汐荷重変形を考慮せずに 24 時間セッションで GPS 観測網を解析すると潮汐変位のモデル誤差が主に大気遅延推定値に押しつけられ、その振幅は M2 分潮において 12mm に達する。海洋潮汐荷重変位を補正した後の座標値には、空間的にコヒーレントな潮汐変位成分がわずかに残存する。

ここまでで得られた知見により GEONET の解析手法を更新し、1996 年 3 月以降の約 5 年半のデータを再解析した。解析結果（新解析結果）を、これまでのルーチン解析による結果（旧解析結果）と比較し、その精度を評価した。旧解析結果にみられた、解析戦略の変更などに伴う座標や変動速度の不連続、サブネットワークによる誤差の傾向の違いが解消されるなど、解の品質が均一化された。座標値からトレンドと年周および半年周成分を取り除いた後の残差の RMS にして 2.7mm（水平成分）および 10.1mm（鉛直成分）の精度を達成した。均一かつ高い精度の解が得られることにより、長期の GEONET データに基づいて日本列島の変動速度をより精密に議論するための基盤データが構築された。特に、これまで解釈が難しかった鉛直成分の変動速度分布を、高い精度で求めることが可能になった。御前崎・室戸岬・道東の太平洋岸の沈降や、中部一紀伊半島一四国にかけての内陸側の相対的な隆起などが面的に捉えられた。

GEONET の新解析結果に基づいて座標解の季節変動を評価した。網全体が同期して変動する成分が卓越し、Helmert 変換を用いたモデル化により系統的成分の抽出を行った結果、6.4ppb のスケール変化（夏に膨張）が最も顕著で、そのパワーが水平成分に含まれる季節変動の約 70%を占めることが判明した。座標と同時推定された大気遅延推定値を気象庁の高層気象台におけるラジオゾンデ観測データと比較し、これらの差に振幅 1cm 程度の年周変化を検出した。これを GPS 側の誤差として理論的に予想される網のスケール変化は、GEONET 解から抽出されたものとオーダーが一致する。

この成果は、固体地球物理のみならず、システムとしての水惑星の相互作用の解明に道を開くもので、地球惑星科学分野に大きな貢献をしたものと高く評価できる。

よって、著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。