電子基準点のアンテナ絶対位相特性モデルの構築と評価
Development and Evaluation of the Antenna Phase Center Models for GPS-Based Control Stations

測地観測センター　豊福隆史・岩下知真子
Geodetic Observation Center　Takashi TOYOFUKU and Chimako IWASHITA
地理地殻活動研究センター　畑中雄樹
Geography and Crustal Dynamics Research Center　Yuki HATANAKA
国土交通省大臣官房　湯通堂　亨
Minister's Secretariat, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism
Toru YUTSUDO

要　旨

2006 年 11 月５日の IGS 精密軌道暦の座標系変更と同時に，暦算出に使用されるアンテナ位相特性モデルが相対モデルから絶対モデルに変更された．また,国土地理院では同年８月より新しい GEONET 定常解析戦略（第４版）の構築作業を開始した．この２つの大きな情勢を受け, GEONET で採用しているアンテナと架台の組み合わせに対する絶対位相特性モデルの構築およびその評価を行ったので報告する．

１．はじめに

GEONET 観測局において受信される GPS の信号は，観測局のレドームやアンテナ架台からのマルチパスが大きく影響しており，解の系統誤差を避けるためには，これらの効果を含めて位相特性を補正する必要がある(Hatanaka et al., 2001).そのため,GEONET の定常解析戦略の第２版以降では，GPS アンテナ機種およびアンテナ架台のタイプの組み合わせごとに検定された位相特性モデルを適用している．

2004 年より運用している GEONET の定常解析戦略（第３版）（以下，F2 解析）までに用いられてきた位相特性モデルは，標準アンテナである Dorne & Margolin T Choke Ring Antenna を基準アンテナとし，その位相特性変動（Phase Center Variation；電波入射仰角に対する電気的な位相中心の変化，以下，PCV と略す）がないものと仮定し，各アンテナの位相特性を相対的に求めた「相対位相特性モデル」と呼ばれるものである．一方，この仮定を廃し，アンテナ間の相対値だけではなく絶対値においても正しい「絶対位相特性モデル」と呼ばれるものも作成されていたが，単純にこの受信アンテナに対してこれを適用すると，網のスケールに無視できない系統差が生じるため（Rothacher, 2001），IGS においても近年まで相対位相特性モデルが適用されてきた．

こうした中,2006 年 11 月５日(GPS1400 週)より，IGS において精密軌道暦で採用される座標系が IGb00 から IGS05 に変更された.この変更とともに，IGS の精密軌道暦算出において用いられる位相特性モデルが相対位相特性モデルから絶対位相特性モデルに変更された．このとき，衛星の送信アンテナの位相特性についても，地上観測網のスケールに合わせて推定されたモデル（Schmid et al., 2007）を地上観測局用の絶対位相特性と対にして適用することにより，前述のスケールの問題が回避された.（本稿では以後，このとき採用された衛星送信アンテナの位相特性モデルを IGS_05 モデル,それ以前に用いられていたモデルを IGS_01 モデルと記載する.）

また，国土地理院では，新しい GEONET の定常解析戦略（第４版）（以下，F3 解析）の構築作業を 2006 年８月より進めてきた（畑中ほか, 2007;畑中ほか, 2008).最新の IGS 衛星軌道暦のモデルとの一貫性を確保することにより，より高精度な解を得られることが期待されることから，新しい定常解析戦略においては,絶対位相特性モデルを採用することとした．そこで,過去から現在にいたるまで GEONET で使用してきたアンテナと架台の組み合わせの位相特性の検定データについて，新たに絶対位相特性モデルを推定し，その評価を行った．

２．アンテナ絶対位相特性モデルの構築

現在使用されていないものも含め, GEONET で採用されてきたアンテナと架台の組み合わせは, 39 種類にのぼる．このうち，国土地理院が独自に検定のための観測を実施し，アンテナ相対位相特性モデルを求めたものは 26 種類である.検定観測を実施していない組み合わせについては，IGS や NGS が公開している，レドームやアンテナ架台の影響を考慮しないアンテナの相対位相特性モデルを使用している．また，各観測局において適用する位相特性モデルは，アンテナやレドームの交換，架台の改造等による変化を，解析するデータの日付に併せて適切に反映させるために，履歴情報を含めたリストとして管理している．

アンテナ絶対位相特性モデルの推定には，過去の

検定データを再解析する方法を用いる．ただし，検定観測を実施していないアンテナと架台の組み合わせについては，相対位相特性モデルの場合と同様にIGS 等が公開している絶対位相特性モデルを使用する．この絶対位相特性モデルには，相対位相特性モデルを式により変換する方法で求められたものを含んでいる．この変換式による推定方法の妥当性を確認するため，過去に検定観測が実施されたアンテナと架台の組み合わせについても，変換式による絶対位相特性モデルを算出した．この２通りの推定方法について解説した後，両者の結果の違いについての評価結果を示す．

２．１　アンテナ相対位相特性モデルの検定

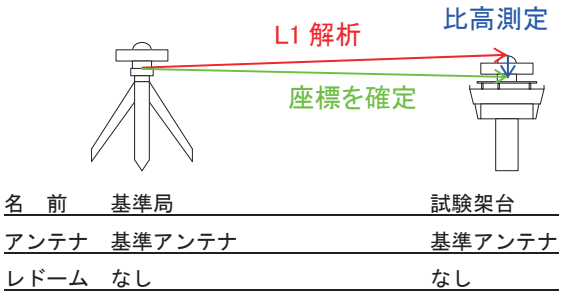
新しいアンテナや架台，レドームが採用された場合には，フィールドでの相対検定法によって位相特性の検定を実施している．この位相特性モデルの検定法は，10m程度の至近距離に設置された基準アンテナと検定対象のアンテナ（架台を含む）で同時観測を行い，二重位相差データを基に，基線ベクトルを既知として，位相中心およびPCV を推定するものである．その手順は，基線ベクトルの算出と位相特性の検定の２つのステップからなる（図－１，２）．

＜基線ベクトルの算出＞

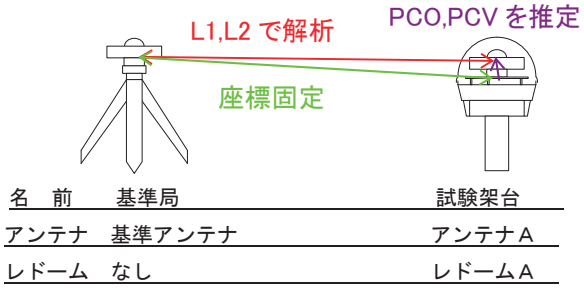
位相特性の算出の際に既知とする基線ベクトルを求めるための観測を行う．基準アンテナ及び試験アンテナにおいてGPS 観測を行い，基線解析の結果得られたベクトルの水平成分と，水準測量によって得られた比高を基に，基線ベクトルを決定する．GPS 基線の観測精度を確保するため，マルチパスに強い同じタイプのチョークリングアンテナを基線両端点で使用し，試験アンテナ側はレドームを設置せず，場合によっては，電波吸収材を敷くなどして，マルチパスの影響を極力抑える．また，GPS データの解析においては，短基線について最も精度の高い解析戦略（L1 一周波のみを観測量として用い，位相アンビギュイティーを整数化し，大気遅延の推定は行わない等）を用いる．観測セッションは24 時間を標準とする．

＜位相特性の検定＞

位相特性の推定を行うために，試験架台側の観測条件（使用アンテナ，レドームの装着等）を実運用状態と同じにして，基準アンテナと同時観測を行う．上で求められた基線ベクトル値および基準アンテナの位相特性を既知として，試験アンテナの位相特性を推定する．推定手順は，まず，試験アンテナのPCV をないものと仮定して位相中心オフセット（PCO）を推定し，次にPCO を推定された値に固定してPCV を推定する．なお，これらの解析において基準アンテナの位相特性として相対または絶対位相特性モデルを適用することにより，推定結果得られる試験アンテナの位相特性は，それぞれ相対または絶対位相特性モデルとなる．



図－１　基線ベクトル算出セッション



図－２　位相特性算出セッション

国土地理院が過去に実施した検定データを使用し，基準局の基準アンテナの位相特性モデルを相対モデルから絶対モデルへ変更し再解析することにより絶対位相特性モデルを求めた．解析に使用したソフトウェア，入力ファイルを表－１に示す．解析にはBernese ソフトウェアの位相特性推定機能を用い，水平方向には０位，鉛直方向に18 次の球面調和関数としてモデル化する．なお，Bernese の Ver. 4. 2 と Ver. 5. 0 で鉛直角に関する球面調和関数展開の方法の違いがあり，Ver. 4. 2 においては，仰角 0° 以上のPCV に仰角±90° の範囲の球面調和関数を対応させていたのに対し，Ver. 5. 0 では，半球を仰角 0° 以上の球面調和関数を対応させており，その代わりに偶数次のみが推定されている点を付記する．

表－１　位相特性算出で使用する設定ファイル

	相対モデル	絶対モデル
ソフトウェア	Bernese V4. 2	Bernese V5. 0
アンテナ位相特性	PHAS_COD. I01	PHAS_COD. I05
衛星情報ファイル	SATELLIT. TTT	SATELLIT. I05

２．２　変換式を用いた方法

Bernese の Ver.5.0 の変換ツール（PHCCNV）を利用して，現在の相対位相特性モデルの PCO, PCV を変換し，絶対位相特性モデルを求めた．この変換ツールは以下の変換式で相対位相特性モデルから絶対位相特性モデルを算出している．

位相中心：

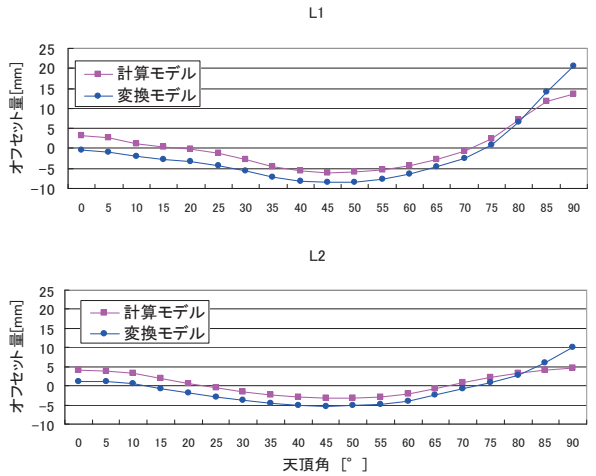
$$PCO_{絶対（アンテナA）} = PCO_{相対（アンテナA）} + PCO_{絶対（標準アンテナ）} - PCO_{相対（標準アンテナ）}$$

位相特性：

$$PCV_{絶対（アンテナA）} = PCV_{相対（アンテナA）} + PCV_{絶対（標準アンテナ）}$$

３．計算絶対モデルと変換絶対モデルの比較

図－３に，検定データの再解析によって求めた絶対位相特性モデル（以下，計算絶対モデル）と Bernese の変換ツールにより変換によって求めた絶対位相特性モデル（以下，変換絶対モデル）の PCV の例を示す．アンテナ TRM29659.00 と 02 年型電子基準点架台の組み合わせの位相特性である．



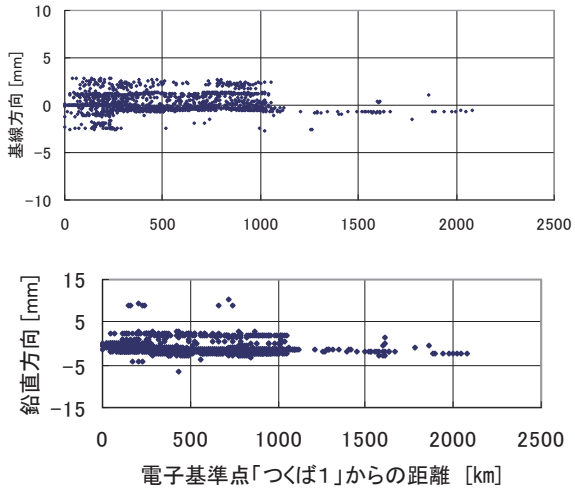
図－３　計算絶対モデルと変換絶対モデルの PCV の比較例（アンテナ TRM29659.00 と 02 年型電子基準点架台の組み合わせ．上段：L1，下段：L2）

２通りの方法で得られた絶対位相特性モデルのそれぞれを適用して GEONET 観測データの解析を行い，両者の解析結果の違い，および衛星最低仰角による解析結果の安定性の違いを評価する．解析には F3 解析のプロトタイプを用い，衛星送信アンテナの位相特性モデルには，IGS_05 モデルを適用する．衛星最低仰角は 15°，20° および 25° に設定してそれぞれ解析を行う．なお，このプロトタイプによる解析は，解析の固定点である電子基準点「つくば１（92110）」の座標について nominal な変動を仮定していること，電離層遅延の２次項補正を行っていないなどの違いがあるものの，観測局のクラスタリング方法など主要な解析設定は，現在運用されている F3 解析の仕様とほぼ同等のものである．

３．１　計算絶対モデルと変換絶対モデルによる座標解の違い

計算絶対モデルと変換絶対モデルを用いた F3 プロトタイプ解析を実施し，座標解の比較を行った．解析の衛星の仰角マスクは 15°，解析した期間は 2007 年１月の１ヶ月間である．

図－４は解析結果座標を点毎に平均し，計算絶対モデルに対する変換絶対モデルの座標解の差を縦軸に，解析で固定点とする電子基準点「つくば 1」からの距離を横軸にプロットしている．上段は電子基準点「つくば１」から各観測点への基線ベクトルの基線方向の成分，下段は鉛直方向の成分である．２つのモデルによる解析結果は位相中心の差に起因する数ミリの系統的な差は見られるが，電子基準点「つくば１」からの距離によらず良く一致している．



図－４　計算絶対モデルと変換絶対モデルの座標解基線方向と鉛直成分の差

３．２　衛星最低仰角の変化に対する解の安定性の比較

計算絶対モデルと変換絶対モデルそれぞれについて，解析に用いる衛星最低仰角の違いによる座標解の差を評価した結果を，表－２に示す．2006 年 12 月中の 11 日間の観測データを用いて，仰角マスクを 15°，20°，25° の３通りに設定して解析を行い，15° の解析結果を基準として 20°，25° の解析結果を比較した．

その結果，水平成分では計算絶対モデルと変換絶対モデルの間に違いはないが，鉛直成分では，変換

絶対モデルの方が仰角マスク 15° の座標解に近い結果であった．

表－２　仰角マスク 15° 座標解との比較

単位[mm]	仰角マスク 20°		仰角マスク 25°	
	水平成分差	鉛直成分差	水平成分差	鉛直成分差
計算モデル	1.2	4.7	2.4	11.9
変換モデル	1.2	4.3	2.4	10.7

３．３　計算絶対モデルと変換絶対モデルの比較のまとめ

上述した比較により，変換式を用いて推定した絶対位相特性モデルは，過去の検定データを用いた再解析による方法と遜色がなく，また，それぞれのモデルを用いて計算した座標解には，解析の固定点からの距離によらず一貫性があることがわかった．以上の結果より，計算絶対モデルを絶対位相特性モデルの基本とし，検定が実施されていないアンテナと架台の組み合わせについては，従来どおり IGS 等が公開しているレドームと架台の影響を考慮しないアンテナの絶対位相特性モデルを用いる．以下では従来の相対位相特性モデルとの比較を行う．

４．絶対位相モデルと相対位相モデルの比較

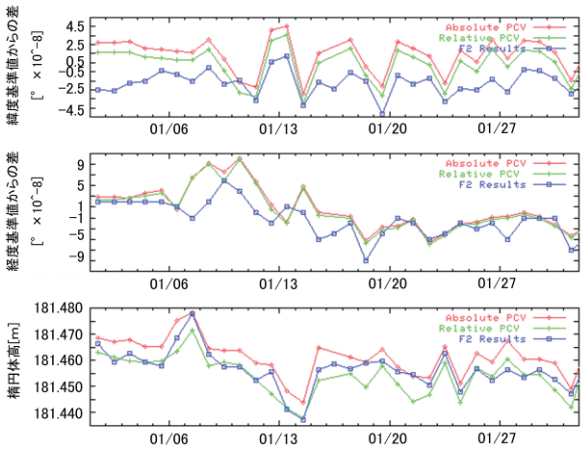
絶対位相特性モデルと相対位相特性モデルのそれぞれを適用して F3 定常解析システムのプロトタイプを用いて解析を行い，位相特性モデルの違いが座標解に与える影響を調査した．衛星送信アンテナの位相特性モデルには，絶対位相特性モデルを適用する場合には IGS_05 モデルを，相対位相特性モデルを適用する場合には IGS_01 モデルを適用する．また，衛星軌道情報には IGS 精密暦を用いる．

４．１　短期的な座標変動の比較

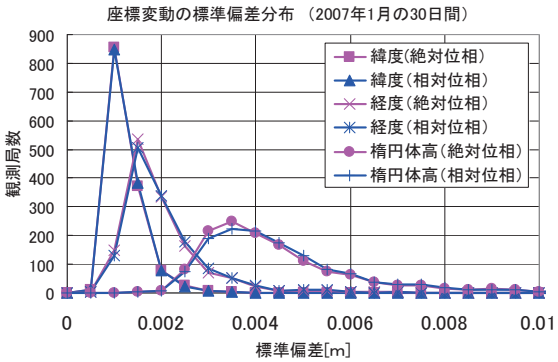
位相特性モデルの違いによる１ヶ月程度の短期的な解の変動の差を調べるため，2007 年１月の１ヶ月間について解析を行った．

座標時系列の例として，山形新庄（940033，TRM29659.00，94 型電子基準点架台）の１ヶ月間の座標時系列グラフを図－５に示す．図には，参考のために F2 解も表示されている．絶対位相特性モデルと相対位相特性モデルの違いによる解のばらつきに顕著な差は見られない．

図－６は，解析した全ての観測点について，１ヶ月間の座標解について緯度，経度及び楕円体高の成分ごとに標準偏差をもとめ，ヒストグラムを作成したものである．アンテナ絶対位相特性モデルとアンテナ相対位相特性モデルで差はほとんど見られない．このことから，アンテナ位相特性モデルの違いは，１ヶ月程度の短期的な期間では，座標解のばらつきに影響を与えていないことがわかった．



図－５　電子基準点「山形新庄(940033)」の１ヶ月の座標時系列グラフ　上から，緯度，経度，および楕円体高．赤：絶対モデルによる F3 解，緑：相対モデルによる F3 解，青：F2 解（相対モデル）

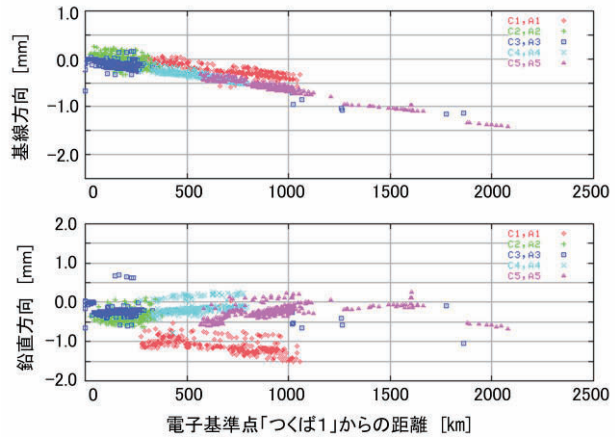


図－６　短期的（１ヶ月間）な解の安定性の比較

４．２　座標解の系統差

アンテナ絶対位相特性モデルとアンテナ相対位相特性モデルの違いによる，座標解の系統差を評価するため，2007 年１月の１ヶ月間の解析を行った．図－７は絶対位相特性モデルによる解と相対位相特性モデルによる解の差の水平成分の平均値を，電子基準点「つくば１」からの距離に対してプロットしたものである．上段は，電子基準点「つくば１」から各観測点への基線方向の成分，下段は鉛直な成分である．基線方向の差が電子基準点「つくば１」からの距離に比例して大きくなっており，両者の間にスケール差が存在していることがわかる．また，鉛直方向については，「つくば１」からの距離に比例する

成分は見られないため，両差の間の差には顕著な回転成分は無いものと思われる．ただし，特定の解析地域クラスタで顕著な差がみられたが，原因は不明である．



図－７　絶対モデル解と相対モデル解の差（赤：北海道，東北地域，緑：北関東，甲信越，北陸地域，青：南関東，東海地域，水色：近畿，四国地域，ピンク：中国，九州地域）

全国の観測局の座標解の差から，絶対位相特性モデルによる座標解と相対位相特性モデルによる座標解の間の Helmert 変換パラメータを求めた(表－３)．この結果,絶対位相特性モデルと IGS_05 モデルを対で用いた結果と相対位相特性モデルと IGS_01 モデルを対で用いた結果では，解析結果に約６ppb のスケールの差が生じることがわかった．なお，これは観測網の固定点を同一の座標値に，また衛星軌道を同一の IGS 精密暦に強く固定した場合の結果であり，通常，観測局の座標値および衛星軌道を弱く拘束する（または最小拘束条件を用いる）グローバル GPS 観測局のデータ解析とは，条件が異なる点を注意する．

表－３　相特性モデルによる座標解の間の Helmert 変換パラメータ

平行移動の成分［m］			スケール[ppb]
Tx	Ty	Tz	S
-0.045	0.038	-0.021	-6.12
回転の成分［ppb］			
Rx	Ry	Rz	
5.80	6.01	-0.36	

４．３　仰角マスクに対する解の安定性の比較

絶対位相特性モデルと相対位相特性モデルによる解析結果の衛星最低仰角の設定に対する安定性を比較するため，それぞれのモデルを適用して，仰角マスク 15°，20°，25° について，2006 年 12 月中の 11 日間のデータを解析した．衛星送信アンテナの位相特性モデルには，絶対位相特性モデルを適用する場合には IGS_05 モデルを,相対位相特性モデルを適用する場合には IGS_01 モデルを適用する.図－８は,電子基準点「つくば１」からの距離を横軸に，仰角マスク 15° の解に対する 20°,25° の解の水平成分の差を縦軸にしてプロットしたグラフである．上段は絶対位相特性モデルを用いた場合，下段は相対位相特性モデルを用いた場合である．また，仰角マスク 15° の解との差を全点について水平，鉛直成分別に平均をとり，表－４に示す．水平成分について絶対位相特性モデルと相対位相特性モデルの解を比較すると，相対位相特性モデルでは仰角マスク 25° の結果の差は電子基準点「つくば１」から離れるほど差が大きくなり，傾きが約５ppb となっている一方で，絶対位相特性モデルでは約１ppb 程度であり，概ね差が５mm 以内の範囲に収まっている．また，鉛直成分についても，水平成分ほど差が顕著ではないものの，やはり絶対位相特性モデルの 20°，25° の座標解の方が相対位相特性モデルのものよりも 15° の解に近い結果であることがわかった．

表－４　仰角マスク 15° 解析との比較

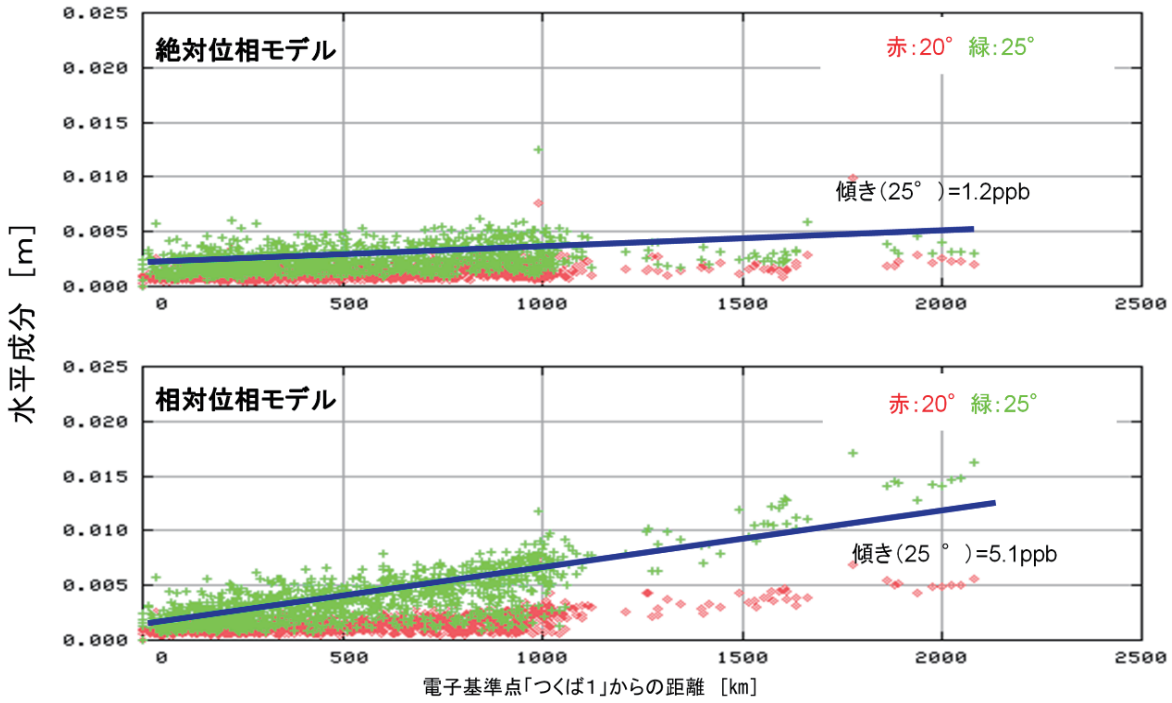
単位[mm]	仰角マスク 20°		仰角マスク 25°	
	水平成分差	鉛直成分差	水平成分差	鉛直成分差
絶対モデル	1.2	4.7	2.4	11.9
相対モデル	1.4	5.0	3.7	13.6

４．４　絶対位相特性モデルと相対位相特性モデルの比較のまとめ

１ヶ月程度の短期間の比較では，絶対位相特性モデルと相対位相特性モデルの間で解の安定性に違いは見られなかった.一方,仰角マスクを 15°,20°,25° に変更して F3 プロトタイプ解析を行った場合では，絶対位相特性モデルを用いた解析が，衛星の偏りに対して，より安定した座標解を得られることがわかった．

５．異なる位相特性モデルを用いて生成された精密軌道暦による比較

前章までの評価では，相対位相特性モデルと絶対位相特性モデルのどちらを用いる場合にも，衛星軌道を同一の IGS 精密軌道暦に強く拘束した解析結果を用いており，GPS1400 週を境に適用する位相特性



図－８　仰角マスクの違いによる座標解の差（絶対モデルと相対モデルの比較）

表－５　暦変更前後の仰角マスク 15°解析との比較

単位[mm]	仰角マスク 20°		仰角マスク 25°	
	水平成分差	鉛直成分差	水平成分差	鉛直成分差
変更前 (2006/10)	1.4	4.8	2.5	13.4
変更後 (2006/12)	1.2	4.7	2.4	11.9

モデルが変更されたことによる，IGS 精密暦自体の変化は考慮されていない．精密暦生成時に用いられた位相特性モデルの違いが，基線解析結果に与える影響を評価するためには，同じ期間について，相対位相特性モデルと絶対位相特性モデルのそれぞれを用いて解析された軌道情報が必要である．しかし，IGS 暦は，一つの期間についてはどちらか片方の位相特性モデルを用いて生成されたもののみが公表されているため，直接的な比較はできない．そこで，２種類の間接的なアプローチにより，評価を行う．

５．１　IGS 暦変更前後の期間による比較

暦の変更前および後の２期間（2006 年 10 月と同年 12 月の各 11 日間）について，絶対位相特性モデルおよび IGS_05 モデルを用いて，４．と同様に３種類の衛星最低仰角を適用した F3 解析を行い，衛星最低仰角の違いに対する解の安定性を比較した（表－５）．仰角マスク 15°の座標解との一致は，変更後の期間の方がわずかに良い結果となっている．しかし，一般に冬季に近づくほど座標解が安定する傾向があるため，この差を衛星軌道の精度の差に帰するのは困難であり，むしろ，顕著な差は見られないというべきであろう．

表－６　IGS 暦と PDR 暦をもちいた解析での仰角マスク 15°解析との比較

単位[mm]	仰角マスク 20°		仰角マスク 25°	
	水平成分差	鉛直成分差	水平成分差	鉛直成分差
IGS 暦 (相対)	1.3	5.2	2.8	12.1
PDR 暦 (絶対)	1.3	5.1	2.8	12.0

５．２　絶対モデルを用いて IGS とは独立に求められた精密暦を用いた解析による比較

いくつかの研究グループにおいて，IGS とは独立に，絶対位相特性を用いて過去の IGS 観測網のデータを再解析して生成した衛星軌道情報が存在する．そのような軌道情報を入手し，これを用いて GEONET のデータを解析し，GPS1400 週以前の同じ期間について，相対位相特性を用いて解析された IGS 暦によ

る解と比較する．ここでは，ドイツ GFZ ポツダムとドレスデン大学の共同研究である，衛星軌道暦の再解析プロジェクト（Potzdam-Dresden Reperocessing Project；PDR）による精密暦（Steigenberger, et al., 2006，以下，PDR 暦）を用い，2006 年１月の５日間について，前節と同様に，仰角マスクを変更した解析を行い，IGS 暦による解析結果と比較する．

表－６に結果を示すとおり，相対位相特性モデルにより作成された IGS 暦と絶対位相特性モデルにより作成された PDR 暦の結果に差は見られなかった．このことから，暦作成時の採用位相特性モデルの違いが仰角安定性に与える影響は変わらないことがわかった．

６．まとめ

IGS 暦の採用モデルの変更，GEONET 解析戦略の更新という背景により GEONET 版アンテナ絶対位相特性モデルを構築した．

絶対位相特性モデルの構築には，過去に国土地理院が独自に実施した検定データを再解析することにより構築した．検定観測がされていないアンテナと架台の組み合わせのモデルについては，IGS 等が公開しているレドームの影響を考慮していないモデルを利用した．これらのモデルには，相対位相特性モデルを変換式により変換し求めた絶対位相特性モデルが含まれる．この方法の妥当性を評価するため，検定データが存在するアンテナと架台の組み合わせのモデルについても，変換式による方法で絶対位特性モデルを算出し，２種類の絶対位相特性モデルを用いて F3 プロトタイプ解析を行い，結果を比較した．その結果，２種類の絶対位相特性モデルに顕著な差はなく，相対位相特性モデルから変換式により算出した絶対位相特性モデルを用いても問題がないことがわかった．

また，固定観測点の座標値と衛星軌道情報を同一の情報に強く拘束して解析を行った場合，絶対位相特性モデルと相対位相特性モデルを適用した解析結果の間には，座標解のスケールに約６ppb の差が生じることが明らかになった．

一方で，精密軌道暦を作成する際に相対位相特性モデルを採用した場合と絶対位相特性モデルを採用した場合とで，仰角マスクの変更に対する解の安定性に差は見られなかった．

以上の結果のうち，特に衛星最低仰角の変化に関する安定性の結果は，相対位相特性モデルに対する絶対位相特性モデルの優位性を明らかに示していることから，F3 解析では，アンテナ絶対位相特性モデルを採用することとした．

参 考 文 献

Gendt, G. and R. Schmid (2005)：Planned changes to IGS antenna calibrations, IGSMAIL, 5189.

Hatanaka, Y., M. Sawada, A. Horita and M. Kusaka (2001)：Calibration of Antenna-Radome and Monument-Multipath Effect of GEONET--- Part 1：Measurement of Phase Characteristics, Earth Planet and Space, 53, 13-21.

畑中雄樹，宗包浩志，古屋智秋，豊福隆史，小谷京湖（2008）：GEONET の新しい解析戦略（第４版），日本測地学会第 110 回講演会予稿集，95.

畑中雄樹，宗包浩志，岩下知真子，湯通堂亨，小谷京湖，石本正芳，川元智司（2007）：GEONET ルーチン解析戦略第４版の構築に向けて，日本測地学会第 108 回講演会予稿集，17.

熊木洋太，大滝茂，山際敦史，畑中雄樹，宮崎清博，岩田昭雄，野神憩，仲井博之，重松宏実，相田清，田辺正，雨宮秀雄（2004）：小特集 電子基準点 1,200 点の全国整備について，国土地理院時報，103，7.

Rothacher M. (2001)：Comparison of absolute and relative antenna phase center variations, GPS Solutions, 4(4), 55-60.

Schmid, R., P. Steigenberger, G. Gendt, M. Ge and M. Rothacher (2007)：Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas., J. Geodesy, 81, 781-798.

Steigenberger, P., M. Rothacher, R. Dietrich, M. Fritsche, A. Rülke and S. Vey (2006)：Reprocessing of a global GPS network, Journal of Geophysical Research, 111 (B05402), doi:10.1029/2005JB003747.

湯通堂亨，岩田昭雄，雨貝知美，小島秀基，矢萩智裕，宮原伐折羅，畑中雄樹（2005）：電子基準点の高さについて，国土地理院時報，106，21.