

# VLBI アンテナの熱変形補正に関する研究

実施期間	平成 17 年度
測地部宇宙測地課	町田 守人 高島 和宏 石本 正芳 藤咲 淳一 小門 研亮

## 1. はじめに

数千 km に及ぶ基線ベクトルをミリメートル精度で決定できる高精度測位技術というイメージは、原理的な側面から VLBI (超長基線電波干渉法) に対して抱く認識の典型であろう。VLBI では、深宇宙から伝播する微弱な電波という素材から超精密計測という結果を引き出すために、集光・増幅・記録・相関処理・解析という諸過程に、さまざまな科学技術の粋が結集されている。とりわけ、集光装置である VLBI アンテナは、これらの諸過程の最上流に位置するハードウェアである。電波望遠鏡として発揮できるシステム上の主要な性能がここで決まるため、高精度の設計・施行がおこなわれる。

現実には、VLBI アンテナは年間を通じて $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 程度の寒暖の変化を被る温度環境下で運用される。ミリメートルのオーダーで決定される基線ベクトル成分に対して、物理現象としての熱変形の影響も数ミリメートル程度と推察される。先行する調査研究によって、VLBI アンテナのマウント (アンテナの支持構造部) 部材における熱変形の関与が指摘された (小林ほか, 1999)。これ以来、VLBI アンテナの熱変形が及ぼす影響の重要性が、機会ある毎に繰り返し指摘されてきた。しかし、VLBI アンテナの構造系における熱変形状況を十分な精度で把握するための解析環境は、まだ整備されていなかった。アンテナ熱変形と季節的変化の関係が分析可能な段階までには到達していなかった。当研究では、アンテナ熱変形の解析を通じて、VLBI 観測結果に見られる季節的変動の解明に向けて、新たな端緒に就こうと試みる。アンテナ構造系の熱変形状況を解析によって定量的に把握して、次いで、それを VLBI 観測結果への補正に利用することで、VLBI 観測結果に関する信頼性の向上を図ることが意図されている。今次の研究では、つくば 32m VLBI アンテナにおけるマウント部材の熱変形に関して、有限要素法 (Finite Element Method: FEM) を本格的に適用した解析を試みる。

## 2. 研究の背景

定常的に実施してきた測地 VLBI 観測の結果が蓄積するにつれて、測定基線長の経年的な変化は、一見奇妙な挙動を明らかにしつつある。これらのデータは、観測結果に季節的変化が含まれることを示唆している。数年前におこなわれた調査研究 (小林, 2001) では、アンテナの副反射鏡に取り付けた GPS による観測結果と、気温の日変化の相関性が認められた。その再現性についても確認された。熱変形を見逃すわけにはいかないものの、十分に解析できる資源・環境を確保することができず、熱変形に起因する影響に対する精度良い補正の取り扱いを確立できなかった、というのがこれまでの状況だった。

その一方で、近年、VLBI による高精度測位技術において、観測の“量”に対する需要が増加している。つくば 32m VLBI 観測局は 1998 年の完成以来、世界でも屈指の性能を持つ測地 VLBI 向けの電波望遠鏡として稼動してきた。測地分野にとどまらず、地球回転パラメータの精密計測、各種衛星ミッションにおける飛翔体の位置決定において、観測面から堅実な貢献を果たしている。これらの観測の成果は、測位・航法・位置天文学・宇宙開発分野を支える基礎的データとして、国内だけでなく、海外のプロジェクトでも活用されている。

観測量の増加に伴って、観測の“質”に関して、従来までは拱手傍観してきた局所的な影響要因に対して取り組み、本格的な解決策を図るべき段階に入った。例として、アンテナ熱変形や地下水水位の影響が挙げられる。当研究では、VLBI アンテナの熱変形に関する先行的な調査研究と計測システムを引き継ぎ、構造力学に基づいた計算的手法により定量的な解析を試みる。

## 3. 研究内容

従来のアプローチでは、VLBI アンテナの副反射鏡に取り付けられた GPS の測位結果によって、VLBI

アンテナの熱変形が推定されてきた。アンテナ熱変形の解析において、最終的に知りたいのは VLBI アンテナ参照点 (Az-EI 駆動軸交点) の変位 3 成分 (水平方向・鉛直方向) である。GPS による観測値では、ミリメートルの精度を有する VLBI 観測結果に対する補正として適用できるほど十分な精度を備えていない。また、GPS 観測の位置 (副反射鏡先端部) における測位結果をもって、アンテナ参照点の変位として見なすことはできない。

解析対象領域である VLBI アンテナのマウント部では、異なる断面形状 (H 鋼, 中空円筒) を持つ部材の組み合わせにより、複雑な立体構造が呈されている。このような対象の熱変形問題に対処するために、従来の実測だけに頼るアプローチではなく、当研究では有限要素法という計算的手法によるアプローチを採用する。熱変形には、1) 変形の担い手である部材 (断面形状・物性・連結状況), 2) 変形のきっかけを与える温度変化, 3) 変形を記述する支配法則の 3 つの側面が関連する。有限要素法では、これらの側面を網羅した取り扱いが可能である。解析対象の全体系をモデル化し、次いで、仮想的に有限の大きさの要素に分割して (メッシュ化), 個々の要素に対して要素特性を導き出し、これらの要素特性を足し込んで (アSEMBル), 元の解析対象全体の特性を構築する。つまり、解析対象を有限要素の集合として解析する。

### 3. 1 先行する研究

#### 1) 温度計測システムの設置 (平成 12~13 年度)

VLBI アンテナのマウント部材に温度センサー (熱電対) を取り付け (図-1), 1 分おきにデータを自動取得して、データサーバにファイルを保存する (図-2)。温度センサーは 13 箇所に取り付けられ、部材温度と気温が取得される。

#### 2) 簡易モデルによる熱変形解析 (平成 13 年度)

温度計測システムによるデータを用いて、ビームモデルによる熱変形解析をおこなう。

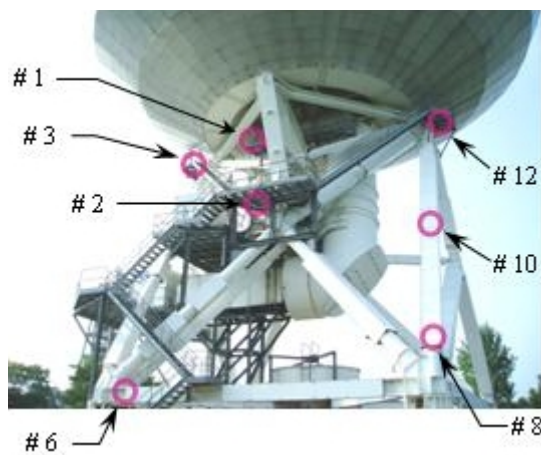


図-1

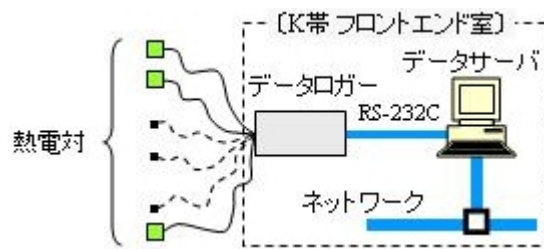


図-2

### 3. 2 当研究

- ・ 解析対象のモデル化
- ・ 要素分割 (メッシュ化)
- ・ 構造系の特性の表現
- ・ 基準温度の設定
- ・ 各種条件の設定
- ・ 熱伝導解析 (解析対象全体の温度場を決定)
- ・ 熱変形による変位ベクトルの計算
- ・ VLBI アンテナ参照点における変位ベクトルの計算
- ・ 補正ベクトルの座標変換
- ・ 一次解析への補正ベクトル組み込み

## 4. 得られた内容

### 4. 1 解析システムの導入

熱変形解析向けに、ソフトウェア NX Nastran for Femap (米国 UGS PLM Solutions 社製造) を導入した。当該ソフトウェアには、汎用構造解析コードである NX Nastran と、有限要素法ポスト／プリプロセッサである Femap が結合されている。構造解析モデルの作成、解析条件設定から解析実行に至るまでの一連の過程を共通の GUI を通じて操作できる。当該ソフトウェアの動作環境は Windows XP である。

Femap 上では解析対象のモデル化(要素作成)・材質指定・荷重条件設定・拘束条件設定をおこない、ソルバーである NX Nastran 上へ引き渡し、解析が実行される。

### 4. 2 解析対象のモデル化

つくば 32m-父島-始良-新十津川から成る VLBI ネットワークでは、毎月 1 回、24 時間の測地 VLBI 観測 (JADE 観測) を実施している。つくば 32m VLBI アンテナは、この VLBI ネットワークの基準局となる。当研究では、まず、つくば 32m VLBI アンテナのマウント部の熱変形解析を試みる。マウント部を構成する各フレームを、約 1 m の間隔で等分割したモデルを構築した (図-3)。マウント部の温度計測点数が少ないため、このメッシュ化の精度は妥当と考えられる。解析対象が準拠する全体座標系は、マウント部材のうちの 1 辺を X 軸と一致させている。

### 4. 3 解析

当研究では、まず、定常熱伝導として部材の温度分布決定を試みた。温度計測箇所に対応する節点 (要素分割点) に実測値を付与して、熱変形を求めた解析例を図-4 に示す。熱変形による部材の長さ変化を基準化する温度 (基準温度) を 0 [°C] にとった場合、気温が 25°C 程度のときに VLBI アンテナ参照点において Z 方向に +4 mm 程度の変位を生じることがわかった。

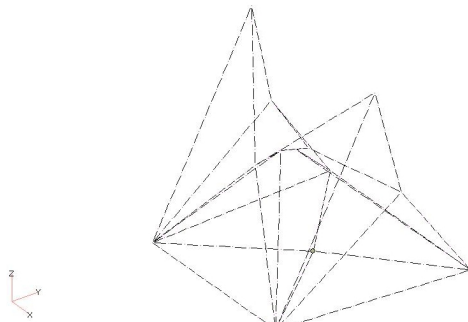


図-3

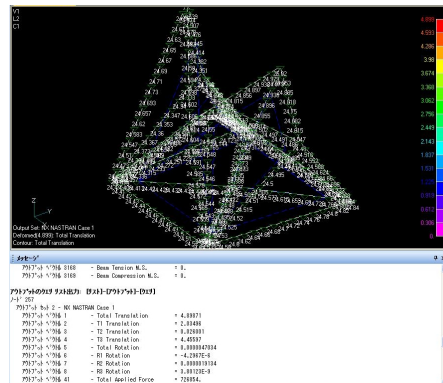


図-4

## 5. 結論

アンテナ熱変形を調べるための解析環境が整った。有限要素法による解析では、熱変形による変位を解析対象が準拠する全体座標系上の 3 成分で得ることができる。解析システム上で計算を担当するソルバー部分はブラックボックス化されている。いったん解析対象のモデル化と拘束条件等の設定が済んだのちは、計測された温度データを取り替えるだけで、熱変形による変位ベクトルが得られる。従来までは実測によるアプローチに頼ってきた熱変形の問題の取り扱いに関して、計算的手法により、ミリメートルのレベルで三次元の変形状況把握が可能になった。

## 6. 今後の取り組み

### 6. 1 運用の定常化に向けた補正手順の確立

熱変形補正の計算手順を確立するため、解析ソフトのユーザーマニュアル等を整備する。温度場が時間経過につれて変化する非定常熱伝導として解析する。一次解析の手順に、熱変形による補正を組み込めるように、必要なプログラム等を作成する。熱変形による変位ベクトルはマウント部に固定し

た座標系上の値なので、アンテナのアジマス方向の配置を元に、個々の scan ごとに VLBI 観測データが準拠する ITRF 系上の値へ変換する必要がある。

#### 6. 2 過去のセッション向けの解析

過去に実施した JADE 観測について熱変形ベクトルを算出して、測定基線長の季節的变化との関係进行分析する。

#### 6. 3 他種類の荷重による変形の計算

当該解析システムでは、解析対象にかかる荷重に関して、その実体を問わない。このことは、風荷重や積雪による荷重であっても、変形を計算できることを意味する。

#### 6. 4 つくば 32m VLBI アンテナ以外のアンテナの変形解析

当研究では、まず基準局であるつくば 32m VLBI アンテナについて熱変形解析を実施する。将来は、父島局・始良局・新十津川局のアンテナについてもモデル化して、解析を試みる。

#### 6. 5 パラボラ部の自重による変形の解析

当研究では、マウント部だけの熱変形を最初に取り上げ、パラボラ部（集光面）をモデルに含めていない。パラボラ面をモデルに含めることで、より構造的近似の精度が高まると考えられる。また、パラボラ面によるマウント部の重力変形や、パラボラ面自体の重力変形、風荷重によるパラボラ面の変形等の計算が期待できる。

#### 参考文献

- 小林京子，松坂茂，石原操，根本恵造，岩田昭雄，芝公成，小野垣亨子，高島和宏，栗原忍（1999）：  
GPS がとらえた温度変化による VLBI アンテナの変形，日本測地学会第 92 回講演会要旨，59-60 .
- 小林京子（2001）：温度変化による VLBI アンテナの変形に関する研究，平成 12 年度 調査研究年報（国土地理院技術資料 A・1-No. 245），21-24.
- 小林京子（2002）：温度変化による VLBI アンテナの変形に関する研究，平成 13 年度 調査研究年報（国土地理院技術資料 A・1-No. 268），19-20.
- 松坂茂，畑中雄樹，黒石裕樹，飛田幹男，中川弘之（2001）：宇宙測地技術を用いた標高決定及びその変動検出手法の高度化に関する研究，平成 12 年度 調査研究年報（国土地理院技術資料 A・1-No. 245），145-146.