９．ＧＰＳを利用した超高層タワー鉛直精度管理技術の開発

—世界最高高さの自立式電波塔建設工事に国内初適用—

株式会社大林組　技術研究所　○ 池田　雄一
株式会社大林組　東京本店　　田辺　　潔
株式会社大林組　本社　　原田　恒則

１．はじめに

世界最高高さの自立式電波塔（以下，超高層タワー）は，地上約 500m までの塔体と塔体最頂部から突き出した地上 634m までのゲイン塔で構成される。

塔体の鉄骨工事では，在来手法で上層部に盛替えた基準墨の累積誤差を担保することが最重要課題であった。そこで，ＧＰＳ鉛直精度管理システムを開発し，基準墨の精度を確認した。一方，ゲイン塔工事では，地上付近で組立てられたゲイン塔鉄骨を塔体の狭いシャフト内で傾斜を緻密に管理しながらリフトアップさせることが最重要課題であった。そこで，上記のシステムを利用し，リフトアップ時の動的な挙動管理，および最終位置決めにおける静的な位置決め作業に適用し効果を確認した。

本報では，ＧＰＳ鉛直精度管理技術の開発および超高層タワーの塔体鉄骨工事とゲイン塔リフトアップ工事への適用内容および得られた知見についてまとめた。

２．超高層タワー建設工事の概要

2.1　塔体鉄骨工事

塔体鉄骨工事の概要を表-1 に示す。積層工法による鉄骨工事は，タワークレーンを利用して図-1 のように地上約 500m まで行われた[1)]。鉄骨工事中の作業床はすべて仮設で，常に風やタワークレーンの動きなどによる大きな変位を伴う作業環境であった。鉛直精度を確認できるのは，エレベータシャフト周りの空間に限られる制約があった。

図-1　鉄骨工事の状況

2.2　ゲイン塔リフトアップ工事

ゲイン塔（着色部分）の施工ステップを図-2 に示す。同図左から，STEP 1：ゲイン塔鉄骨の地上付近での組立，STEP 2：塔体シャフト内におけるリフトアップ，STEP 3：塔体最上部 H495

表-1　塔体鉄骨工事の概要

タワー最高高さ	634m
塔体高さ	497m
鉄骨節数	48節（0～47節、展望台別途）
外周鉄骨	丸形鋼管柱
シャフト鉄骨	角形鋼管柱
工事期間	2009/02～2010/11（22ヵ月）

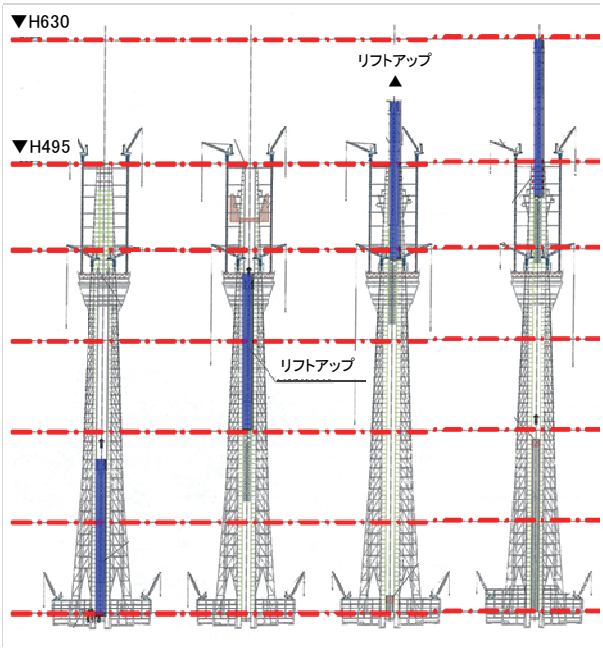

図-2　ゲイン塔の施工ステップ

表-2　ゲイン塔工事の概要

ゲイン塔高さ	約164m（制振装置室，塔体内固定部を含む）
鉄骨節数	17節
構　　造	鉄骨造
リフトアップ回数	14回
リフトアップ高さ	5～15.5m（計約123m）
工事期間	2010/12～2011/03（塔体から突出後）

表-3　基準墨計測手法の比較

	計測方法	制約事項	計測精度	運用のしやすさ	運用上の問題点	総合評価
①	地上に設置したレーザー鉛直器で計測	環境（温湿度、気圧）変化で計測精度が悪化	5mm／200m	計測専用のシャフトが必要	現状よりレーザー出力の高い機種はない	4ポイント 不採用
		1	1	1	1	
②	塔体外部からトータルステーションで計測	環境（温湿度、気圧）変化で計測精度が悪化	5mm／300m	現場外から長期計測が必要	仰角がきつい計測と足場やネット等と干渉	7ポイント 不採用
		1	2	2	2	
③	リアルタイムＧＰＳを利用した動的な計測	近隣に基準局を設置する必要有り	5～10mm／600m	各節ごとＧＰＳアンテナの盛替が必要	超高層領域で精度の確認が必要	13ポイント 条件付採用（要検証）
		3	4	3	3	

（地上 497m 地点のこと，以下，同様の表記）から突出した状態でのリフトアップ，STEP 4：リフトアップの完了・定着部の接合，を表している。以下では，STEP 3 のリフトアップ時における精度管理について述べる。ゲイン塔リフトアップ工事の概要を表-2 に示す。１回のリフトアップ平均高さは約 10m であり，各リフトアップ作業の後，新たに塔体から突き出した部分に放送用の大型アンテナを取り付けるという作業が繰り返された。

３．鉛直精度管理システムの開発

3.1　システム設計

(1) 座標系の選択

基準墨の管理は，塔体の変位を考慮する必要がない相対座標管理による計測手法をベースにシステム構築を行う設計とした。相対座標管理の場合，累積誤差を把握するため地上や塔体外部に基準を持つ絶対座標管理手法によって基準墨の精度を確認する手法を確立しなければならない。しかし，絶対座標管理では塔体の変位を差し引いて，考慮する必要がある。

(2) 絶対座標管理による計測手法

絶対座標管理で基準墨の精度を計測する３種類の方法を比較検証した。その結果を表-3 に示す。光学式の計測手法（①，②）の計測精度は，空気中の光の屈折率に大きく左右される。光の屈折率は，気温，湿度，気圧によって変化する。雨雲が出現することの多い地上 300m 付近を跨いで計測するような状況下では光の屈折率が大きく変化する。このため，測量器メーカーは同条件下での光学式測量機器の計測精度を保証していない。また，国内土木工事現場において，地下 400m に設置したレーザー鉛直器のレーザー光を地上で受光し，正確に計測できるか実験を行った。クラス２以下の安全なレーザー光では正確に計測できないことがわかり，そのため不採用とした。３次元光波測量器（以下，トータルステーション：ＴＳ）による測量は，塔体高さと同程度離れた現場外の市街地にＴＳを設置して，塔体最上部に設置したプリズムを長時間測量し続けなければならない。しかし，塔体の外周に設置された足場や垂直ネット，養生シートなどにより，外部からの視通を確保できないことを理由に不採用とした。塔体が風などの影響により常時何らかの変位をしていることから，動的な計測が可能なリアルタイムＧＰＳについて調査した。リアルタイムＧＰＳは，ＧＰＳの各種計測手法のうち，基準局を必要とする相対測位･干渉測位の一種で，計測精度が高い。最高 20Hz のサンプリング周波数でデータを取得でき，各データの信頼性が高いことから動的計測が可能である。実際，長時間計測を実施し，統計処理を行うと表-3 に記したような計測精度が得られた。リアルタイムＧＰＳは国内の研究実績 [2)]や海外での工事適用実績 [3)]などから計測手法としての有を把握していたが，さらに検証すべき以下の課題があった。

- 実運用上の計測精度（誤差の標準偏差：σ）
- 日射や風の影響による鋼構造物の変位量
- タワークレーンなど（マルチパス）によるＧＰＳデータ取得の低減率

(3) ＧＰＳ計測検証実験

上記の検証課題に対して，高さ 195m の鉄骨造タワーの 150m 地点，および超高層集合住宅建設現場の最上階で計測実験を行った結果，以下の事項が明らかになった。

- 計測精度は，水平方向約 5mm，高さ方向約 10mm
- 日射による変位は，風より１桁大きく，100mm 以上
- 昼間のデータ取得率はタワークレーンの稼働により低下し，その向きによって大きく変動する

3.2　専用基準局と座標変換

(1) 専用基準局の設置

干渉測位によるＧＰＳの計測精度は，基準点との間の距離に比例して低下する。計測精度が優先される場合，その距離は 5km 以内が望ましいが，近隣の電子基準点は足立:8km，市川:9km，練馬：16km であった。したがって，現場周辺に専用基準局を設置した。基準局の選定では，不動点であることと，ＧＰＳ受信環境が優れていることとが重要な条件となる。周辺に高いビルがない地域では，不動点であることを優先するため，振動の発生源である幹線道路や鉄道付近

は避ける必要がある。一方，周辺に高いビルが多い都心部では，ＧＰＳの受信環境を優先して低層ビルの屋上などに設置する方が望ましい。今回は，都心部であったため，ＧＰＳ受信環境を優先して近隣ビルの屋上に設置した。

(2) 現場ローカル座標への変換

ＧＰＳから得られた東経，北緯，楕円体高（＝標高＋ジオイド高）の位置座標（以下，ＧＰＳ座標）は WGS-84(World Geodetic System 1984) 楕円体上にある。ＧＰＳ座標から現場ローカル座標を得るには，複数のコントロールポイント（以下，ＣＰ）を設け，同ポイントにおける測量によりＧＰＳ座標とローカル座標を取得し，ヘルマート変換を行う。

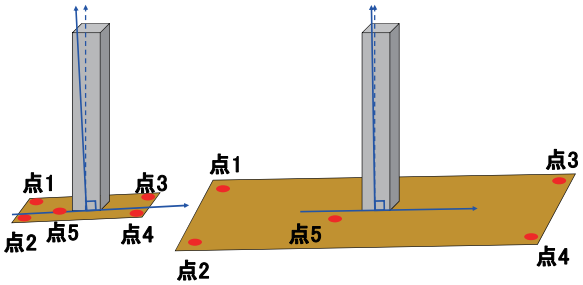

図-3　座標変換エリアの鉛直誤差への影響

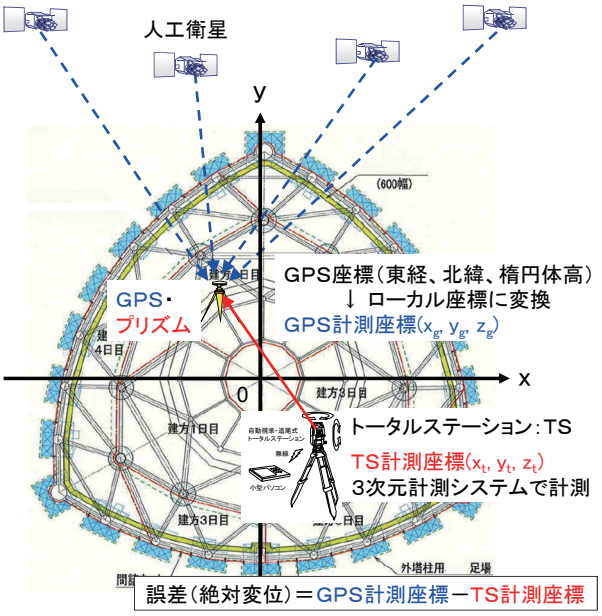

図-4　基準点の絶対変位の算出

図-5　ＧＰＳ設置計画（背景地図は建設時のもの）

(3) ジオイドと鉛直軸の誤差

数学モデルの WGS-84 楕円体に対し，平均的な海水面（重力の等しい面）をジオイドと呼ぶ。ジオイドは数学モデルでは定式化できない不規則な形状をした面である。ジオイド高は，国土地理院から 2km メッシュで提供されており，それ以外のポイントは内挿補間によって求められる。そのため，得られる標高は真値に対して多少の誤差を伴う。一方，各ＣＰでは水平より高さの方が測量誤差は大きい。その結果，両者から導出された座標変換式では，図-3 左のようにローカル座標系の鉛直軸に誤差が生じる。その誤差が 5 秒だと仮定すると，地上 600m では水平誤差が約 15mm となる。座標変換に起因する誤差が顕著になるため，図-3 右のようにできるだけ広域にＣＰを設けて座標変換を行うことで可能な限り鉛直軸の誤差の影響を小さくした。

3.3　ＧＰＳ鉛直精度管理システムの開発

ＧＰＳ座標からローカル座標へ変換された座標値（ＧＰＳ計測座標）は，現場内基準点（鉛直視準器により盛替え）を利用してＴＳにより計測された座標値（ＴＳ計測座標）と比較して誤差（以下，絶対変位）を算出できる（図-4）。得られた絶対変位を詳細に分析するため，下記の機能をもつシステムを開発した。

①絶対変位と風向風速計の計測値をリアルタイム表示し，10 分間または 24 時間の履歴を時刻歴グラフで表示する機能（モニタリング機能）

②指定した時間内における指定した風速値以下に対応する絶対変位データを抽出し，出力する機能（基準墨管理機能）

③同上範囲に対応する絶対変位データを抽出し，出力する機能（風速変位後処理機能）

④各種設定を入力する機能（各種設定機能）

4．超高層タワー建設工事への適用

4.1　塔体鉄骨工事における基準墨の鉛直精度管理

(1) システム適用計画

通信インフラ整備を含むＧＰＳ設置計画を図-5 に示す。塔体芯から約 300m 離れたビルの屋上に基準局を，塔体鉄骨最上部に観測局をそれぞれ設置し，受信したＧＰＳデータを工事事務所に設置したＰＣに取り込み，リアルタイムＧＰＳ解析を行った。基準局の計測データを不動点としてリアルタイム解析を実施することで塔体の動的な計測が可能となった。ＧＰＳ鉛直精

度管理システムの適用計画を図-6に示す。リアルタイムＧＰＳ解析結果と風向風速計のデータを同システムへ取込み，計測データの表示，保存，分析を行った。風向風速計はH285の外周部の点検歩廊（工事用垂直ネットの外側）に３台設置し，風向が絶えず変化しても塔体の影響の少ない風速値を確実に取得できるようにした。塔体頂部のＧＰＳ観測局は，塔体芯の変位と塔体回転角を得るために２箇所に設置した。得られた長期間の計測データから，日射の影響がない深夜から早朝にかけての風速値の低い時間帯のみのデータを抽出し，それを統計処理することでＧＰＳ計測座標を取得した。鉄骨工事１節ごとに，これら２箇所で得られたＧＰＳ計測座標から塔体芯（ローカル座標原点）での誤差値と回転角を算出することによって，従来手法のような超高層タワー内のある一点ではなく，節全体としての誤差を把握できるようにした。具体的に誤差の把握は，在来手法で上げた基準墨をＧＰＳで数日間モニタリングし，得られたＧＰＳ計測座標との誤差値をチェックすることで行われた。なお，JASS6では，高さＨの建物の倒れに関する管理許容差は H/4000+7mm かつ30mm※以下，限界許容差は H/2500+10mm かつ50mm※以下と規定されている（※H≧100m では，下線部の値が支配的)。在来測量の累積誤差については最大±20mm と想定した。

(2) 適用結果

実施では，ＧＰＳから得られた基準墨の誤差値が，想定された累積誤差の最大値を超えたことは一度もなく，在来手法で上げた基準墨の正確さが確認できた。さらに，H150，H240，H375，H495において，ＧＰＳ計測精度の確認測量を実施した。塔体最上部にプリズムを設置し，その直上にＧＰＳアンテナを設置した。塔体外部から現場のローカル座標系でＴＳを利用して測量を行い，ＧＰＳ計測座標と比較したところ，両者の誤差はx，y座標でほぼ5mm以内であり，本システムのＧＰＳで得られた水平座標の正確さが確認できた[4)]。

4.2 ゲイン塔リフトアップ工事における鉛直精度管理

(1) リフトアップ工事の概要

ゲイン塔のリフトアップ用に油圧センターホールジャッキ（以下，リフトアップジャッキ）が塔体最上部に12台設置された。リフトアップの最終段階においては，ゲイン塔は塔体内部から大きく突き出し，工事の進捗とともにゲイン塔の重心位置が徐々に高くなるため，ゲイン塔の鉛直精度管理と転倒防止が重要であった。そのため，リフトアップジャッキの他，図-7に示すようにゲイン塔が塔体上部に突き出してから

の転倒を防ぎ，その鉛直精度を調整可能にするための転倒防止ジャッキを塔体最上部付近に設置した。リフトアップ作業では，すべてのリフトアップジャッキを同調動作させ，ゲイン塔の鉛直精度を保持しながら上昇させなくてはならない。さらに，転倒防止ジャッキに対してはゲイン塔の傾きや塔体との位置関係を常に監視し

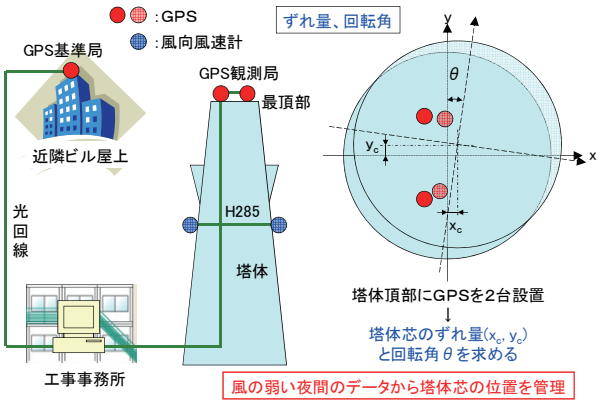

図-6　システム全体配置

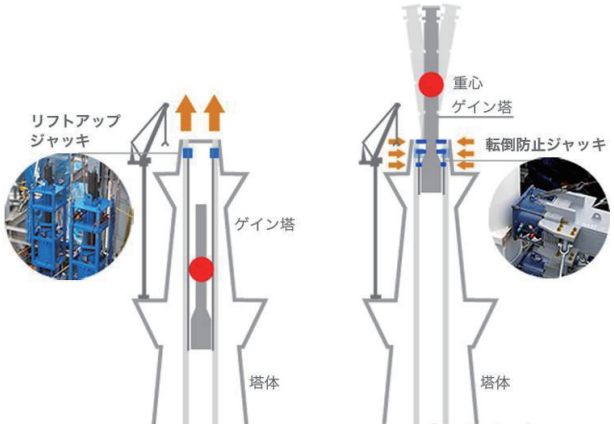

図-7　リフトアップ工事用ジャッキの配置

図-8　リフトアップ工事指令室の概要

ながらの微妙な押し引きの調整が必要となった。そのため，すべてのジャッキは図-8 のように第１展望台内に設置した指令室で集中制御した。指令室では，リフトアップ中のゲイン塔の様々な情報を各種計測管理システムの画面や現場の監視員から無線連絡で収集し，長大なゲイン塔を正確にコントロールした[5)]。

ゲイン塔の鉛直精度管理はゲイン塔の上部，中間部，下部および塔体最上部に設置した傾斜計の値を監視して行う計画であった。それに対して，ＧＰＳ鉛直精度管理システムを併用し，実工事において鉛直精度管理の有効性を確認した。本システムの概要を図-9 に示す。ＧＰＳ基準局は塔体鉄骨工事と同様に設置し，ＧＰＳ観測局はゲイン塔頂部に２台，塔体頂部（H495）に１台設置した。得られた計測値から，ゲイン塔頂部芯のずれと回転，ゲイン塔および塔体の傾斜角が計算処理により求められる。風向風速計は，塔体工事で設置した３台のうちの１台をゲイン塔頂部へ移設し，H285 に２台設置した。

(2) リフトアップ工事への適用

リフトアップ作業は昼間に行われたため，日射や強風の影響を受けてゲイン塔は大きく変位した。その変位はゲイン塔高さ方向に対して線形ではないため，ゲイン塔の上中下段に設置した傾斜計はそれぞれ異なる値を示した。一方，ＧＰＳ鉛直精度管理システムでは，ゲイン塔および塔体をそれぞれ一つの剛体と見なして傾斜を算出する仕組みになっている。ゲイン塔はリフトアップ中，その下部が塔体のシャフト内を通過するが，シャフト内は空間的な余裕がなく，傾斜角を精密に制御しないとゲイン塔とシャフトが接触してしまう。こうした制御を行う必要がある場合には，ゲイン塔全体の大局的な傾斜が把握できるＧＰＳ鉛直精度管理システムの方が，傾斜計による管理手法より管理しやすいことが確認された。

また，初期のリフトアップ作業時にゲイン塔が回転するという想定外の現象が起こった。ゲイン塔の鉄骨柱を押す転倒防止ジャッキの作用点が柱芯から大きくずれると柱のＲ形状に合せて回転力が発生するという仕組みであった。このため，リフトアップ中の転倒防止ジャッキは必要以上に押さない制御方式に修正された。このように，リフトアップ中の回転量が把握可能な点においてもＧＰＳ鉛直精度管理システムの有効性が改めて確認できた。リフトアップ中のシステム画面を図-10 に示す。画面左にＧＰＳ計測値，右に風向風速計の計測値をプロット表示し，傾斜角および回転角等は右端に数値で示した。この日は風が弱く晴天だったため，ゲイン塔および塔体が日射により大きく変位していたが，傾斜角を緻密に制御して鉛直精度を確保しながらリフトアップできた。

(3) ゲイン塔の最終位置決め

転倒防止ジャッキは，鉛直精度をきめ細かく調整するため，その押し出し量を0.1mm単位で制

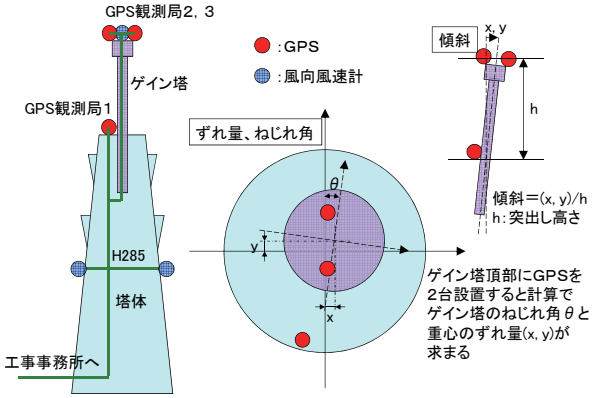

図-9　リフトアップ工事時のシステム適用計画

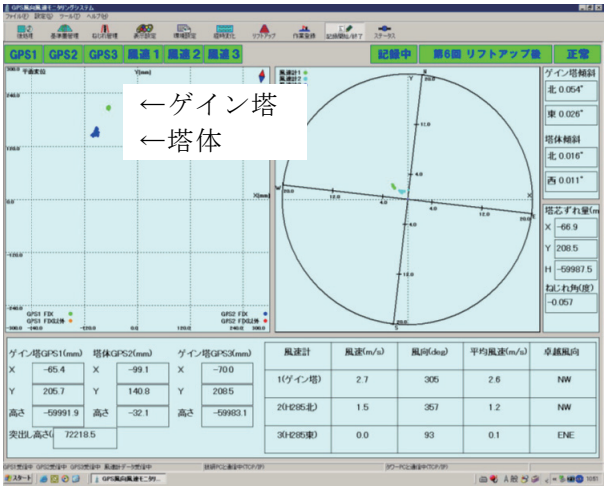

図-10　リフトアップ中のシステム画面

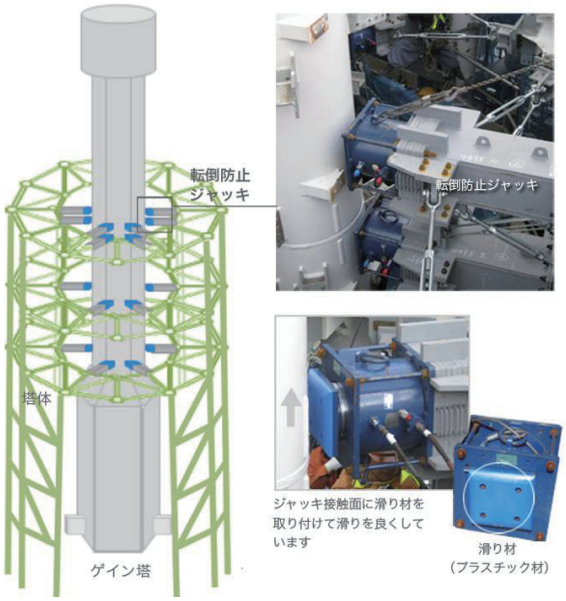

図-11　転倒防止ジャッキの配置

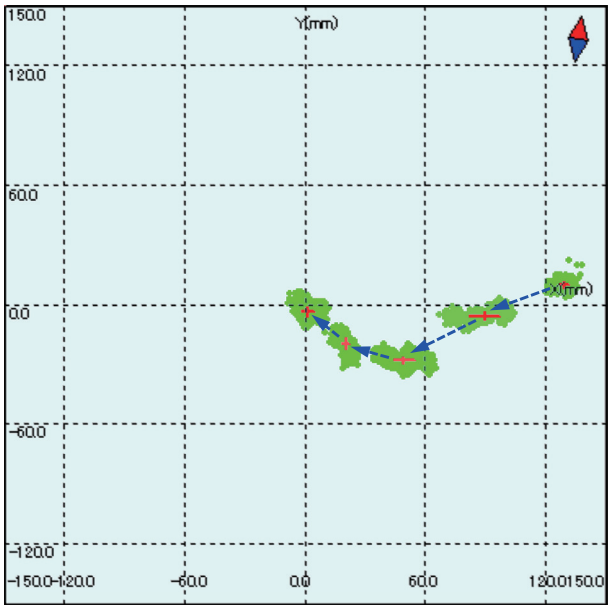

図-12　ゲイン塔頂部の最終位置決めの推移

御できる。転倒防止ジャッキを1mm押すとゲイン塔頂部を逆方向へ約7mm動かせる。リフトアップ中はゲイン塔の鉛直性を保持し，リフトアップ停止時はゲイン塔が転倒しないよう固定するため，図-11のようにジャッキを水平６方向，上下７段（同図には４段のみ表示）に設置し，地震荷重・風荷重に対抗させた。計14回のリフトアップによって，最頂部がH634に到達後，日射及び風の影響を考慮し，到達翌日の深夜から翌々日の早朝に掛け，転倒防止ジャッキを押し引きさせて，ゲイン塔頂部の水平位置および鉛直精度を調整した。作業時の風速は概ね5m/s以下であり，風による影響はほぼ無視できる状況であった。実際には，図-12のように100mm以上ずれた状態から作業を開始し，傾斜計の値を確認しながらゲイン塔の鉛直精度を調整した。ＧＰＳにより最頂部の位置を確認したところ，設計値に対して20mm以内という高い精度で最終位置決め作業を完了できた。

５．まとめ

本報では，超高層タワーの塔体鉄骨工事とゲイン塔リフトアップ工事の２つの場面に対して，精度管理技術を開発し，それぞれ最適な組合せで在来手法に対する適用効果を検証した。これにより，以下に示す知見を得た。

- ＧＰＳの計測精度は計４回実施した精度確認測量結果から，十分に正確であった
- ＧＰＳの計測値からゲイン塔の傾斜角と回転角を算出して，監視することで緻密なリフトアップの制御を容易に行えた
- 風の弱い日の夜間にゲイン塔最頂部の最終位置決めを行った結果，設計値に対して20mm 以内の精度が確保されたことをＧＰＳの計測値で確認した

今回，開発したＧＰＳを利用した鉛直精度管理技術は，工事適用を重ねることで，さらなる改善が進むと考えられる。今後，一般的な超高層ビル建設工事への水平展開を図って行く予定である。

参考文献

1) 田辺潔：東京スカイツリー®の施工 -施工概要および工事工程-，基礎工，Vol.40，No.1，pp.30-32，2012
2) 田村幸雄・吉田昭仁：ＧＰＳ技術を用いた構造物の変位応答モニタリング，計測と制御，Vol.46，No.8，pp.623-627，2007
3) Joel van Cranenbroeck,et.al：Smallest GPS Network for Tallest Building -Core Wall Survey Control System for High Rise Buildings-，GIS DEVELOPMENT，pp.52-56，2007
4) 池田雄一・浜田耕史・田辺潔・原田恒則・田村達一:超高層タワー建設工事における精度管理技術の開発，第 13 回建設ロボットシンポジウム論文集，2012（投稿中）
5) 原田恒則：東京スカイツリー®の施工 -ゲイン塔工事（リフトアップ工法）-，基礎工，Vol.40，No.1，pp.44-47，2012