

地盤情報システム (JISLaD) と四次元ダイナミック座標

The Japanese Land Deformation System (JISLaD) And Four-Dimensional Dynamic Coordinates

里村 幹夫*・植田 伸一*・伊藤 広和*・末野 幹雄*.*.*・
島田 誠一*.*.*.*・小林 敬幸*・多田 吉成*・中尾 茂*.*.*.*
By Mikio Satomura*, Shinichi Ueda*, Hirokazu Itoh*, Mikio Sueno*.*.*,
Seiichi Shimada*.*.*.*, Takayuki Kobayashi*, Yoshinari Tada* and Shigeru Nakao*.*.*.*

Abstract: We have analyzed the data of the GNSS Earth Observation Network System (GEONET) managed by the Geospatial information Authority of Japan and calculated the ground movements from the results. The figures of the movements are released as JISLaD, and we are also preparing the release of their numerical data as a paid release. On the other hand, we will undertake precise surveying at some airports in Japan. To maintain the coordinate values of the airport runway with the accuracy required by ICAO, we think that it is necessary to consider not only the current values but also crustal movements in the future. We are proposing four-dimensional dynamic coordinate management using JISLaD. Besides, we are now promoting to introduce this method in the Philippines, discussing with the local Civil Aviation Bureau (CAAP) and Geography Bureau (NAMRIA).

Keywords: the Japanese Land Deformation System (JISLaD), GEONET, four-dimensional dynamic coordinate management, time variation, ground fluctuation, airport surveying

キーワード：地盤情報システム，GEONET，四次元ダイナミック座標管理，時間変動，地盤変動，空港測量

1. はじめに

国土交通省国土地理院は日本全国に約 1300 点の GNSS 連続観測点からなる電子基準点網 (GEONET) を設置し、観測を実施している¹⁾。この観測データは公開されていて、計算機とインターネット環境さえ整えば、だれでもそのデータをダウンロードし、利用することができる。我々は、電子基準点の RINEX データを毎日自動的にダウンロードするプログラムを組み、2008 年からデータを取得している。そして、そのデータ解析を行って、座標データの日値と週値を蓄積している。

この解析を始めた当初の目的は、自治体や土地の管理業務を行っている企業などに、各地の地盤変動のデ

* 株式会社日豊 Nippo Co., Ltd.

** 株式会社カルシステム Calsystem Co., Ltd.

*** 東京大学大学院新領域創成科学研究科 Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

**** 鹿児島大学大学院理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University

ータの需要があると考えたからであった。そこで、これらの解析結果データを地盤変動情報システム (The Japanese Land Deformation System) (略称 JISLaD) と名付け、その一部をネットで公開してきた。

今回、飛行中の航空機の WGS-84 座標の位置決定精度の向上に伴い、GNSS データを使った空港離発着システムの導入を考えている航空業界が空港の滑走路の精密測量を行うことになり、我々がそれに協力することになった。この滑走路の精密測量に JISLaD データを活用しているので、JISLaD の説明とともに、それを利用した空港の座標についての我々の考え方を紹介する。

2. 地盤変動情報システム (JISLaD)

「1. はじめに」に書いたように、我々は、国土地理院から電子基準点の RINEX データを 2008 年から毎日自動的に取得している。そして、そのデータをプログラムソースが公開されている GAMIT/GLOBK ソフトウェア²⁾と Bernese ソフトウェア³⁾を使って独自に自動解析を行って、日値と週値の座標データを蓄積している。

その解析にあたっては、国内のすべての観測点のデータと、ITRF 座標値が与えられている海外の多くの IGS (International GNSS service) のグローバル観測点(以下、IGS 点という)のデータとを直接結びつけて一度に解くことができればいいのだが、実際問題としては計算機の性能の問題があり、それは難しい。そこで、我々は図 1 に示すように日本全国の地域を GEONET 点の数が重なるように 39 ブロックに分け、図 2 に示す 30 点の IGS 観測点の最新の ITRF 座標(ITRF2014)を強く拘束して、ブロック内の GEONET 点データについて GAMIT ソフトウェアを使って同時に解くという方法を採用している。つまり、解析に伴う誤差の累積を避けるために、すべての GEONET 点データを海外の IGS 点データと直接結びつけて解析を行っている。この方法は、39 ブロックの計算を独立に行っているので、計算の並列化が可能であり、計算時間の節約にもつながっている。最後にそのようにして求められたすべての点の座標値を、GLOBK ソフトウェアを用いて各観測点の最適値を求めるといふ計算を行っている。Bernese ソフトウェアでも、使っているソフトウェアは異なるものの、同じ考えのもとに解析を行っている。

地球表面は常にプレート運動を行っているので、地球上の位置は何をもって絶対位置であるとするかの判断は難しく、どこかを基準とした相対座標で示すことも多い。今回求めた座標値は、地球全体の平均のプ

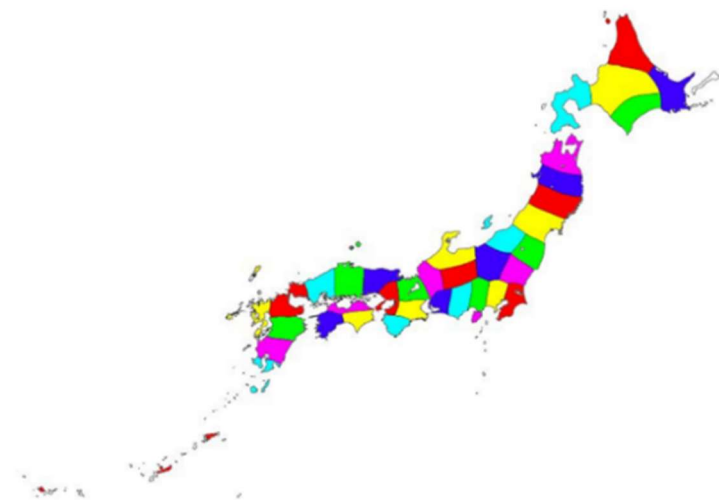


図 1. JISLaD (左) 解析時の 39 ブロック。このブロック内の GEONET 点データを一度に解析し、その後網平均的操作を行って最終的な解を求めている。

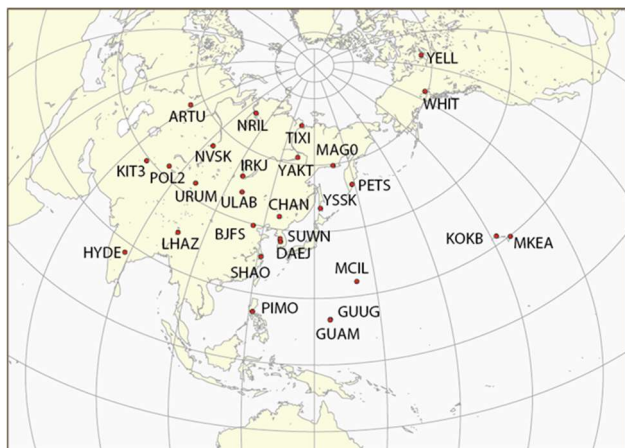


図2 JISLaD の解析で、座標の基準として採用している IGS 観測点

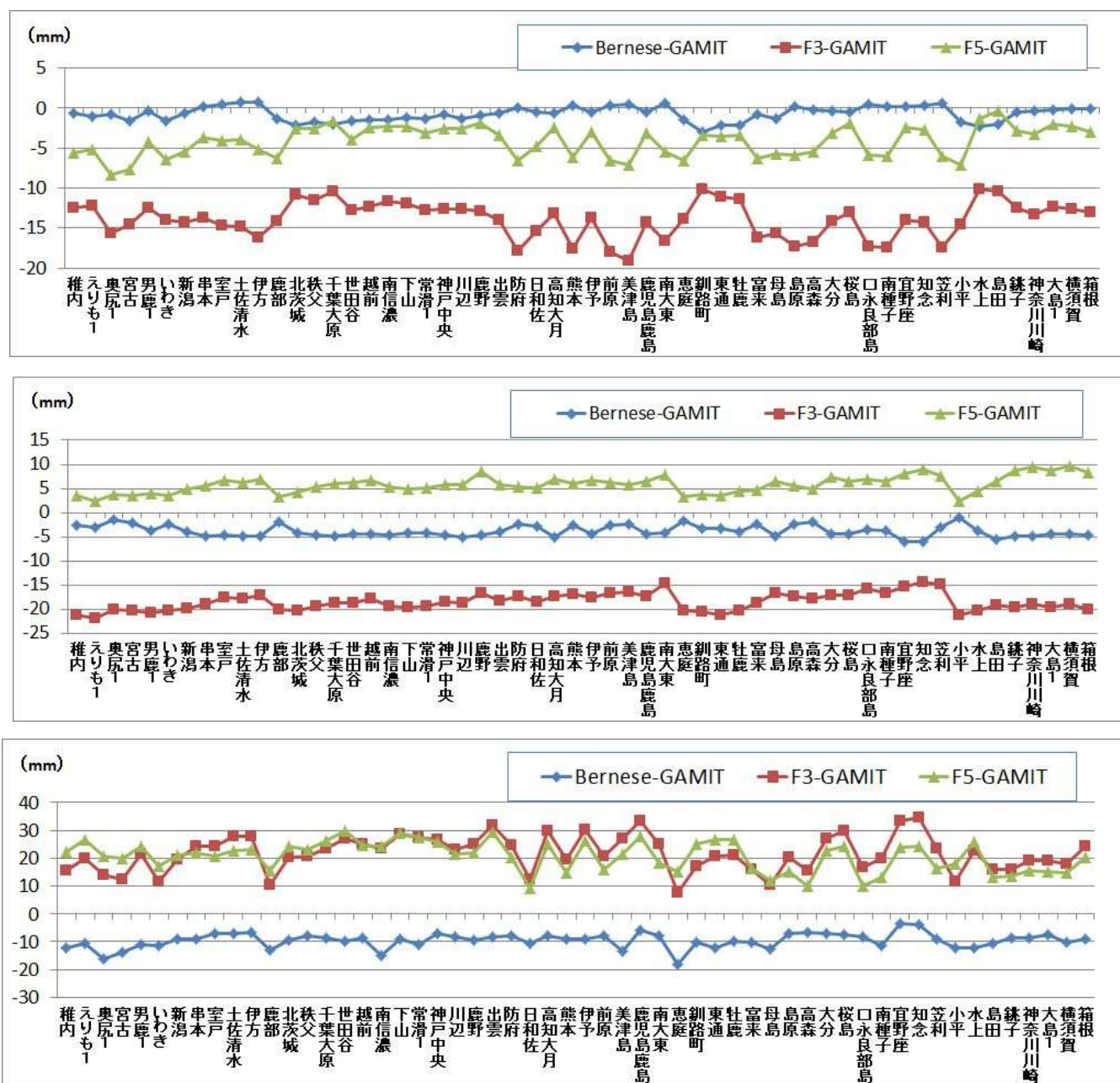


図3. JISLaD の GAMIT 解を基準とした解析結果の平均値の差。上から南北成分，東西成分，上下成分。

レート運動を 0 とした No Net Rotation の ITRF2014 に準拠した IGS 点の座標値に準拠している。我々は、地球上の座標値を絶対座標で表すとすれば、この ITRF2014 に準拠した座標が最も適切であると考えている。また航空機に関係する座標は、GNSS の基準になっている WGS-84 座標と称されることが多いが、これは ITRF2014 座標と実質的に同じとしていいであろう⁴⁾。

国土地理院は、従来から ITRF2005 座標系に準拠して Bernese ソフトウェアを用いて解析した座標値を F3 解として研究用に公表していた^{1),5)}。2020 年からは、基準座標系を最新の ITRF2014 に変え、さらに GPS だけではなく GLONASS のデータも加えて解析した結果を F5 解として公開している^{6),7)}。そこで、JISLaD 解の精度のチェックのために、空港の近くの電子基準点 56 点について、JISLaD の GAMIT 解、Bernese 解と国土地理院の F3 解、F5 解の座標値を比べてみた。なお、F3 解、F5 解ともに、解析ソフトウェアは Bernese が使われている。JISLaD の GAMIT 解を基準としたときの 2020 年 1 月 22 日から 3 月 22 日の 2 か月間の解析結果の平均値の差を、南北成分、東西成分、上下成分に分けて図 3 に示す。

図 3 を見ると、水平成分については、JISLaD の GAMIT 解、Bernese 解、国土地理院の F5 解の間にはほとんど差はないが、F3 解だけ若干の差がある。これは基準座標系が ITRF2014 か ITRF2005 かの違いが原因であると考えられる。上下成分については、JISLaD の解どうしの差、国土地理院の解どうしの差は小さいが、JISLaD の解と国土地理院の解の間に若干の差がみられる。これは、基準としている場所から電子基準点のアンテナ位相中心までの高さをどのように処理しているかの差であると考えられ、今後の検討課題である。

さらに日本各地の地殻変動のモニタリングのために、日本全域を 1174 の四角形の網と 197 の三角形の網に分け、得られた日々の座標値を使ってそれぞれの基線長、面積ひずみを計算している。これらのシステムについては、「災害緊急地盤変動解析システム及び災害緊急地盤変動解析方法」(特開 2010-139335)、「地盤情報システム、地盤解析装置、地盤情報処理システム、プログラム」(特許 60827595) などの特許を取り、それに基づいた計算を行っている。また、以上のデータを用いて、地盤変動情報システムとして、電子基準点の位置や基線長の変動を公開している。現在はこのような図の公開だけであるが、近い将来、数値データを含めた有償公開を予定している。(図 4)

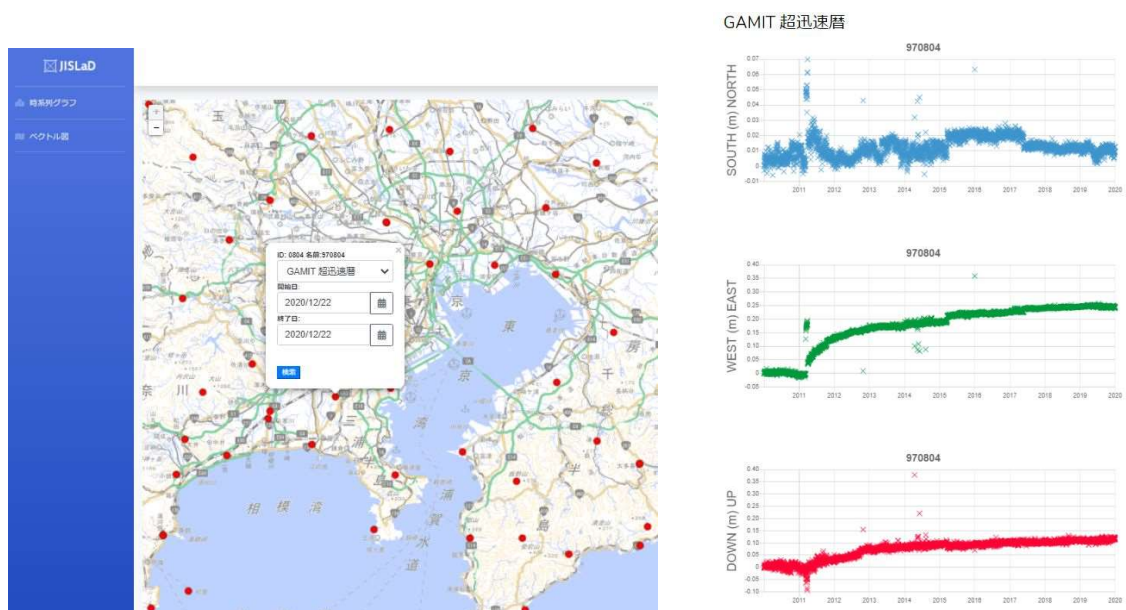


図 4. 公開予定の地盤情報システムの例。CSV 形式で任意の点の座標値をダウンロードできる。

なお、2011 年 3 月 11 日の変動は大きく跳んでいるのでそのままでは普段の変動が見えないため、この図ではその跳びをつないでいる。

これは、任意点の地盤変動の情報が瞬時に得られるので、防災関係者をはじめ、デベロッパーや個人土地所有者等にも、該当する土地の変動情報が必要な関係者には有用なデータになると考えている。また、次章に示す GNSS データでの離発着の導入を検討している航空業界には、重要なデータとなるであろう。

3. 四次元ダイナミック座標管理

日本の地理座標はセミダイミク補正を行った元期の値で管理されている。これは、地図に示されている座標値は、現在の値ではないということである。地殻変動がないのであれば、いつの座標値であっても問題はない。しかし、現実の土地は時々刻々変動しており、また GNSS 技術の向上に伴い、現在（今期）の正確な座標値が瞬時に得られるようになってきている。そのような最新技術で得られた今期の座標値と地図に表されている元期の座標を比較していたのでは、日本のような地殻変動の激しいところでは、時々刻々 GNSS を用いてその精密位置を求めながら高速で移動している航空機の離発着に用いるには、問題が生じる恐れがある。

近年、航空業界では、飛行中の航空機の位置を WGS-84 座標で正確に決めるための技術開発が進んでいる。例えば衛星航法も、単に GNSS 衛星からの信号を利用するだけではなく、SBAS (Satellite-Based Augmentation System：静止衛星型航法補強システム) や GBAS (Ground-Based Augmentation System：地上型衛星航法補強システム) といった、位置決めのための信号の補強システムが実用化されつつあり、衛星航法を航空機の離発着に活用できるめどが立ってきた。その使用のために、国際民間航空機構 (ICAO) は、各空港の離発着のポイントとなるところで、航空機の位置を WGS84 座標で水平 30cm、上下 25cm の確度と、水平 1.5mm、上下 10cm の分解能で得ることを求めており⁸⁾、当然のことながら空港の滑走路の座標値はそれと同等以上の正確さでわかっている必要がある。

この ICAO が求める精度で現在の空港の滑走路の WGS-84 座標を測量で得るのは、それほど難しいことではない。問題はその後の地殻変動である。日本列島のように、普段から年間数 cm の地殻変動があるようなところでは、滑走路の座標で 30cm の確度を保とうとすれば、測量を数年ごとに繰り返さないといけないことになる。我々は、過去にも日本の空港の精密座標を得る測量を実施してきたが、現状の方式のままでは、測量実施時から数年たてば ICAO の勧告の精度の範囲内には入らなくなる可能性が高く、今後は空港の座標を時間変化も含めた四次元で管理することを提案している。

その時に有用になってくるのが JISLaD である。電子基準点データから独自に解析した 2008 年以降の各日の電子基準点の ITRF 座標を使って、各電子基準点の変動速度を求め、さらにそれを空間的に内挿すれば日本国内各地の変動速度を求めることができる。実際の空港の座標の変動は、その変動速度から求めた変動と一致するとは限らないが、滑走路の WGS-84 座標を 30cm 以内の確度に保つための再測量実施の時期の推定には、大きな地震等が発生しない限りは十分利用できると考えている。

地殻変動の実測ができれば、より正確な地殻変動が求められる。日本では民間のシンスpekティブなどが小型 SAR 衛星を開発しており、その衛星はスペースワンなどの民間の小型ロケット企業により打ち上げる計画が進んでいる。そこで、我々は、従来から我々と宇宙測地分野で特許の共同出願をしており、これらの宇宙技術関係の会社へ出資し事業開発を進めている清水建設と共同で、地殻変動を実測するために空間的に連続な地殻変動データを得るのに有効な干渉 SAR による解析も計画しており、GNSS 観測と SAR 観測を統合して解析することで、空港の変動把握の精度を向上させる準備も進めている。

この計画が進めば、空港の座標の変動は、周辺の電子基準点の位置の変動の内挿から求めるだけでなく、

空間的に連続した干渉 SAR データで得られる地殻変動データが加わり、空港内の局所的な変動も考慮した四次元ダイナミック管理が実施できることになる。

4. フィリピン・ジェネラルサントス空港での測量と地殻変動

日本での空港測量の実施に先立ち、我々は従来の業務を通じて信頼関係が構築されている現地の民間航空局 CAAP (Civil Aviation Authority of the Philippines) の協力を得て、フィリピンの空港で同様の測量を始めている。

近年、様々な分野でドローンを使った新たな試みがなされている。ドローンは、直上から簡便な航空写真を撮るのにふさわしいものであるが、空港のように安全確保のためにドローンの飛行の規制が厳しいところではなかなかその実施が難しい。

フィリピンは、日本に比べ規制がゆるやかで、簡単な手続きをとればドローン撮影が可能である。そこで、空港の航空写真を撮るためのドローンの有効性と問題点を明らかにするために、2018 年 11 月にミンダナオ島南部のジェネラルサントス国際空港でドローンを使った航空写真撮影を行い、それをもとに空港のオルソ写真を作成した。また、航空写真の基準になる精密座標を求めるための GNSS 測量も実施した。ドローンを使った写真測量は、図 5 に示すルートに沿って行った。

ジェネラルサントス空港では、2002 年にアメリカの NIMA (National Imagery and Mapping Agency, アメリカ国家地理空間情報局) が GPS 測量を行い、当時の WGS-84 座標を求めている。そこで我々の測量では、その NIMA が設置したベンチマーク 2 点で GNSS 観測を行って、オルソ写真の座標の基準とした。この基準点での GNSS 測量は、2 点とも、電波のカットオフ角を 15 度とし、30 秒サンプリングの 24 時間観測を 3 日間実施した。

フィリピンを取り囲む、6 点の IGS 点 (韓国の DAEJ, ロシアの BADG, インドの IIDC, ココス島の COCO, オーストラリアの DARW, グアムの GUAM) の ITRF2014 座標を基準として、Bernese ソフトウェアを用いてその座標を求めた。2002 年の NIMA の結果と比較すると、新たに求めた座標は、図 6 に示すように西南西の方向に約 35cm ずれていた。この結果は、ミンダナオ島の地殻変動の研究論文⁹⁾の結果と調和的であり、このずれは 2002 年から 2018 年までの地殻変動を表していると考えられる。これは、いくら空港の精密座標を決めても 10 数年で ICAO が求める WGS-84 座標の確度を越えてしまうことを示している。



図 5. ジェネラルサントス空港のドローンを用いた航空測量の飛行経路



写真 1. ジェネラルサントス空港に
NIMA が作ったベンチマーク



写真 2 NIMA が作成したベンチマークの
の上で行った GNSS 測量風景



図 6. フィリピン・ジェネラルサントス空港の GNSS 測量点 2 点の 2002 年～2018 年の水平変動。

5. フィリピン・ダバオ国際空港での測量計画と NAMRIA の PAgNet との統合計画

2018 年のジェネラルサントス空港の成果をもとに、2020 年は同じミンダナオ島の北部にあるダバオ国際空港の測量を実施することになった。ジェネラルサントス空港でミンダナオ島の地殻変動が大きいことが分かったので、こちらは単に測量を行うだけではなく、地殻変動のモニタリングも行うことを計画した。

清水建設では、干渉 SAR の位置精度を上げるための GNSS アンテナ付きの SAR 反射鏡の開発が進んでいる。そこで我々は、清水建設と共同して、ダバオ国際空港では単に測量を実施するだけではなく GNSS アンテナ付きの SAR 反射鏡の設置も含めて測量を実施したいとフィリピン民間航空局に申し入れたところ、すぐに賛同が得られ、その方向で測量を実施することになった。そして、ダバオ空港の GNSS アンテナ付きの SAR 反射鏡の設置場所も図 7 に示すように決めた。



図7 ダバオ国際空港のGNSSアンテナ付きSAR反射鏡の設置予定場所(黄丸)。赤丸はNAMRIAのPAGeNetアンテナ設置場所。

一方、フィリピンの地殻変動の観測については、国家測量局に相当する NAMRIA (National Mapping and Resource Information Authority, 国立地図・資源情報局) が、図 8 に示すような PAGeNet (Philippine Active Geodetic Network) という GNSS 連続観測網をつくり、その観測が始まっている¹⁰⁾。

さらに、日本の空港測量のところでも書いた GNSS と SAR による統合解析をフィリピンの空港にも適用し、PAGeNet のデータと合わせて地殻変動のモニタリングをしようという計画を清水建設とともに進めており、フィリピンの NAMRIA とも情報交換の場を持っている。

6. 今後に向けて

以上に書いたように、我々は、国土地理院の電子基準点データを自動ダウンロードし、独自の方法でデー



図 8. フィリピン NAMRIA が運用する GNSS 連続観測網 (PAGeNet)¹⁰⁾

タ解析を行い、ITRF2014 座標系に基づく座標を求めてきた。そしてそれを JISLaD と名付け、変動図をホームページで公開してきた。

さらに、その JISLaD データに加えて、干渉 SAR を用いて得られた地殻変動データも統合し、四次元ダイナミック座標管理という考えのもと、航空機の衛星情報を利用した離発着の実用化に向け、空港の地理座標を四次元で管理することを提案している。さらに、これは日本国内にとどまらず、フィリピンにおいても民間航空局である CAAP や国家測量局にあたる NAMRIA と連携し、同様の管理ができるよう話し合いを進めている。

2020 年になり、COVID-19 禍のためにその進行が一時的に止まっているが、これらが予定通り進めば、単に空港の四次元ダイナミック座標管理が行えるだけではなく、様々な大型土木工事の座標管理にも利用できる。さらには、大地震の後の余効変動の激しい東北地方の高速道路での自動運転のための位置情報など、四次元ダイナミック座標管理の活用範囲はますます広がっていくものと考えている。

謝辞 SBAS や GBAS といった航空機の離着陸時の精密位置決定について懇切丁寧に教えてくださった一般財団法人航空保安無線システム協会の関係者の方々、また草稿を丁寧に読んで、重要な問題点をご指摘いただいた匿名の査読者の方々にお礼を申し上げる。ともに、本論文の内容の充実に、とても役立った。

参考文献

- 1) 辻宏道・畑中雄樹・檜山洋平・山口和典・古屋智秋・川元智司：GEONET 運用 20 年：課題と展望。国土地理院時報, No.129, pp.85-111, 2017.
- 2) T.A. Herring, R.W. King, M.A. Floyd, S.C. McClusky: Documentation for the GAMIT/GLOBK GPS analysis software. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Science, Massachusetts Institute of Technology, 2018.
- 3) R. Dach, S. Lutz, P. Walser, P. Fridez: Bernese GNSS software version 5.2, Astronomical Institute, University of Bern, 2015.
- 4) 国土地理院：日本の測地系。 <https://www.gsi.go.jp/sokuchikijun/datum-main.html>
- 5) 中川弘之・豊福隆史・小谷京湖・宮原伐折羅・岩下智真子・川本智司：GPS 連続観測システム(GEONET) の新しい解析戦略（第 4 版）によるルーチン解析システムの構築について。国土地理院時報, No.118, pp.1-8, 2009.
- 6) 国土地理院：電子基準点の新しい「日々の座標値」の試験公開。 https://www.gsi.go.jp/denshi/denshi_20200324.html
- 7) 国土地理院：「電子基準点日々の座標値(F5 解・R5 解)」の公開。 https://terras.gsi.go.jp/geo_info/information/information_F5_R5.html
- 8) International Civil Aviation Organization (ICAO): Procedures for Air Navigation Services - Aircraft Operations - Volume II Construction Of Visual & Instrument Flight Procedures (Doc 8168), 7th Edition, 2020.
- 9) T. Ohkura, T. Tabei, F. Kimata, T. C. Bacolcol, Y. Nakamura, A. C. Luis, Jr., A. Pelicano, R. Jorgio, M. Tabigue, M. Abrahan, E. Jorgio, E. Gunawan: Plate Convergence and Block Motions in Mindanao Island, Philippine as Derived from Campaign GPS Observations. Journal of Disaster Research Vol.10 No.1, pp.59-66, 2015, doi.org/10.20965/jdr.2015.p0059.
- 10) NAMRIA: <http://www.namria.gov.ph/list.php?id=1482&alias=namria-to-offer-pagenet-rinex-data-for-free-starting-2018&Archive=1>