

衛星SARを活用した羽田空港路面測量のDX化と実装可能性に関する一提案

山田 悠斗¹・有路 隆一

¹ 関東地方整備局 東京空港整備事務所 第五建設管理官室 (〒140-0041 東京都大田区羽田空港3-3-1)

羽田空港では空港機能の維持管理のため、滑走路・誘導路の路面測量を毎年実施しているが、作業は深夜帯に限定されることによる作業員負担や、制限区域内で日々作業箇所が異なることによる関係者調整の労力が大きく、DX化が喫緊の課題となっている。本提案では、この課題解決に向けて衛星SARの適用可能性を検討した。Xバンド衛星を用いた検討では、誤差約10 mmという再現性を確認し、さらに、路面測量が担う二つの目的に対して精度要件・実施頻度に応じた段階的適用とする提案によりDX化と実装可能性を示した。

キーワード DX, 業務効率化, 水準測量, 衛星SAR, 動態観測, 東京国際空港, 維持管理

1. 背景と目的

東京国際空港（以下、羽田空港という。）は、旅客数・発着回数ともに国内最大の拠点空港であり、滑走路・誘導路・エプロン等の舗装施設の健全性確保は空港運用の円滑化のための最も重要な基盤である。羽田空港では、動態観測と呼ばれる滑走路・誘導路の舗装の変状を把握するための路面測量（水準測量）が毎年実施されており、縦横断勾配の管理と、地盤沈下の管理の2つを目的としている。この路面測量は、測量延長が約 50 km に及び、半年程度（約 5 か月）を費やして実施され、精度は 4 級水準測量（ $20 \text{ mm} \times \sqrt{S}$, S : 片道観測距離(km)) 相当が求められる（図-1）。また、航空機の安全および保安を確保するため、関係者以外の立ち入りが制限される制限区域内での作業となり、航空機の運航が終了後から翌朝の運航開始までの約 5~6 時間と限られた深夜帯に実施される（図-2）。そのため、制限時間内に確実に作業を完了させる必要があり、作業員の心理的負担が大きい。さらに、航空会社、航空管制官、他工事との輻輳を考慮した関係者調整や、制限区域内の作業のため煩雑な事前手続きが必要であり、測量実施にあたっては多大な労力を要している。これらの課題を踏まえると、路面測量の DX 化が喫緊の課題である。

本提案は、このような背景を基に、羽田空港における路面測量のDX化による効率化を目的とし、衛星SARと実測値の比較により精度を評価、衛星SAR技術の今後の空港維持管理における適用可能性や方策について示したものである。



図-1 東京国際空港舗装動態観測における観測点



図-2 東京国際空港における夜間測量の作業状況

2. 衛星SARについて

SAR（合成開口レーダー）は、センサからマイクロ波を照射し、地表からの反射波をとらえることで観測を行う技術である。光学衛星が太陽光の反射を撮影するのにに対し、SARは昼夜・天候に左右されず安定取得が可能で、地表の「見た目」を撮る光学とは異なり、地盤沈下などの「変動」を捉える点に特徴がある。地表変位を測る干渉SARでは、同一地点を異な

る時期に観測し、その位相差（波のずれ）から変動量を算出する（図-3）。SARは波長の異なるX・C・Lバンドが利用され、それぞれの散乱特性に応じて得意とする対象が異なる。短波長のXバンドは高い空間分解能を持ち、人工構造物や舗装面の微細変動を捉えるのに適する。Cバンドは波長が中庸で、安定した広域観測が可能である。Lバンドは長波長のため植生を透過しやすく、地盤変動のような長期的・面的解析に適した特性を示す。

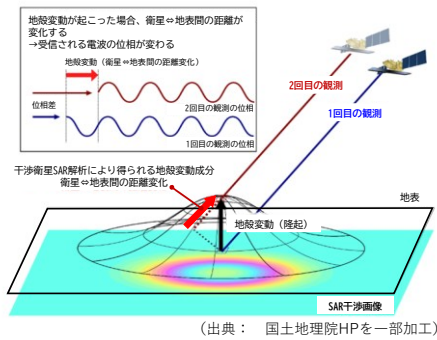


図-3 干渉衛星SAR解析の概念図

3. 衛星SARの活用の現状

近年、衛星SARは高分解能化と観測頻度の向上により、災害対応やインフラ維持管理の分野で活用が拡大している。SARは昼夜・天候に左右されず広域を面的に観測できるため、河川の浸水域把握、山間部の土砂災害による地表変動検出など、従来の地上調査を補完する有効な手段となっている²⁾。一方、これら多くの分野では地形の複雑さや植生・構造物形状の影響により、SAR特有のノイズや位相乱れが発生し、現況把握や変位の定量評価には一定の制約があることが指摘されている³⁾。これに対し、空港分野は滑走路・誘導路などが広く平坦な舗装面で構成され、植生や地形起伏の影響を受けにくい。また、把握すべき主要現象が地盤沈下に絞られ、評価対象が単純である。このため、空港は衛星SARとの親和性が高く、維持管理への導入が特に進めやすい分野である。

4. 東京国際空港における検証・検討

(1) 対象地区と解析データ

検討に際しては、C滑走路およびエプロン（スポット1～5）周辺を対象地区とし、舗装構造の異なるAs舗装のC滑走路とCo舗装のエプロンを比較検討することを目的とした。試験観測に使用する衛星の選定にあたっては、①バンド特性（人工構造物への感度）、②解像度、③利用可能なデータ枚数（アーカ

イブ数）、④費用を整理項目とした。Lバンドは平滑面である空港舗装に対し感度が低く、さらにデータ枚数が少ないことから精度面での懸念があった。Cバンドは費用面で有利（無償）であるものの、解像度が十分でなく面的傾向の把握に限界がある。一方、Xバンドは調達費用を要するものの、バンド特性・解像度の点で最も高精度が期待できると評価された。これらを踏まえ、本解析にはXバンド（PAZ：9.65 GHz、波長約3.1 cm）⁴⁾を用いることとした。

(2) 解析手法

a) 時系列干渉SAR解析

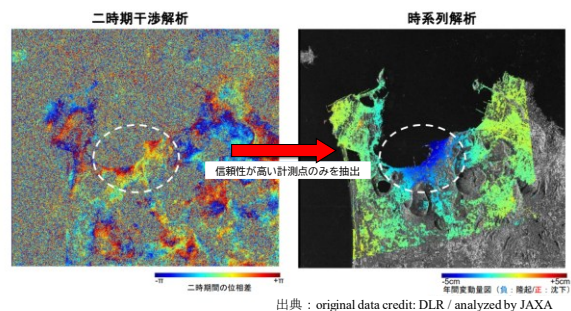


図-4 二時期干渉SAR解析と時系列干渉SAR解析の比較

干渉SAR解析には、二時期の衛星画像を利用する「二時期干渉解析」と、多数の衛星画像を利用する「時系列解析」がある。図-4の左図で示されるように、実際に地盤変動（隆起:青）が起きている白い点線範囲に対して、二時期干渉解析は、ノイズが大きく、時系列解析でなければ判断が難しい。時系列解析は信頼性が高い計測点のみを取り出して解析を行うことで、ノイズを低減できるという利点があるため、本検討では時系列解析を採用した。

b) メッシュ処理と変動量補正

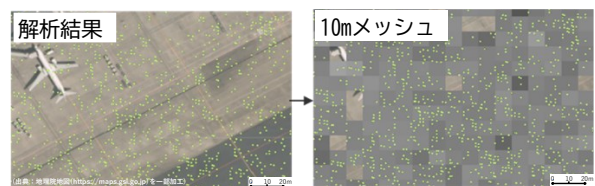


図-5 解析結果のメッシュ化

衛星干渉SAR解析結果は動態観測の測量点と全く同じ位置に存在する訳ではないために、個々の点の誤差に左右されないように処理を行う必要がある。このため、1ピクセルが10mのメッシュになるように処理を施した（図-5）。また、SAR衛星は斜め方向にマイクロ波を照射して反射波の距離変化を観測しており、その衛星視線方向の変動量を鉛直方向へ換算する補正処理を施した。

5. 解析結果

(1) 定性評価

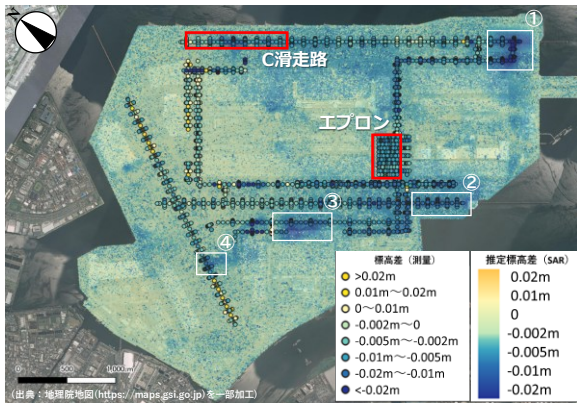


図-6 C滑走路とエプロンを含む全体的な変動傾向

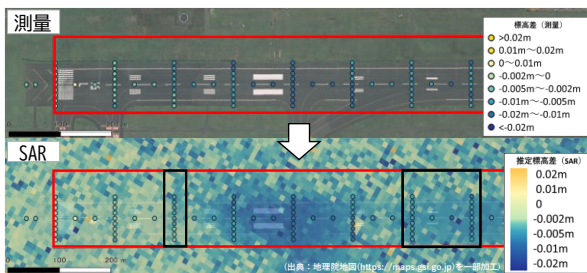


図-7 C滑走路の舗装面高さ（推定標高）による定性評価

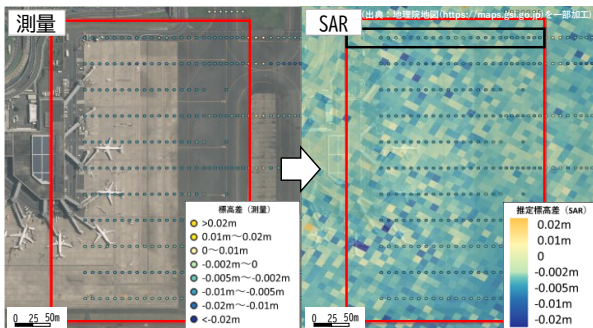


図-8 エプロンの舗装面高さ（推定標高）による定性評価

羽田空港全域に対して、実測の測量点を、メッシュ化したSAR解析結果に重ね、面的な変動傾向を確認した（図-6）。寒色は沈下を、暖色は隆起を示している。白枠①～④は、実測・SARともに沈下が目立ち、同様の変動傾向を確認した。また、C滑走路とエプロンを詳細比較した結果（図7, 8）、黒枠で示す範囲においては実測量とSAR解析の高さ（点とメッシュの色）に一部差異が見られた。C滑走路においては実測で1cm程度の沈下に対しSARは数mm程度の沈下、エプロンでは、実測が数mm程度の隆起を示すのに対しSARは数mm程度の沈下を示すなど、数mm～1cm程度の範囲で概ね同じ傾向を示した。

(2) 定量評価

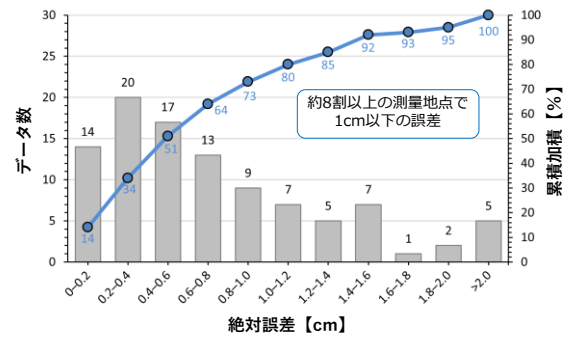


図-9 C滑走路における誤差の分布

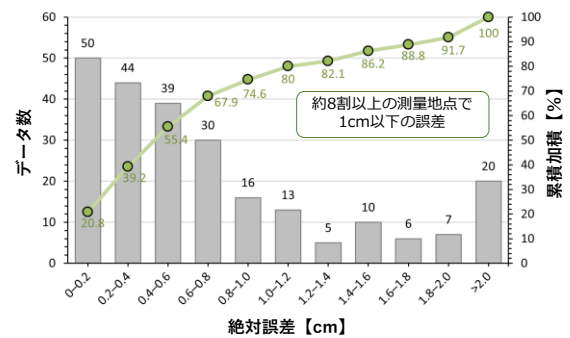


図-10 エプロンにおける誤差の分布

SAR データは、地上で反射され衛星に帰ってきたデータが現場のどのポイントを指しているかを厳密に特定できない。そのため、測量と全く同一地点での観測結果を得るのは困難である。このことを踏まえ、測量結果と最近傍の解析結果の誤差を比較することで、定量的な精度検証を行った（図-9, 10）。

実測の測量結果と干渉SAR解析による結果値の数値誤差をRMSEを用いて比較する。RMSEとは、二乗平均平方根誤差であり、測量値と解析値の差の大きさを、平均的な誤差量として表す指標であり、干渉SAR解析の計測値(y_i)と実測量値(x_i)から式(1a)で算出される。RMSEが小さいほど、誤差が小さくなる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (1a)$$

図9, 10に示す棒グラフは、左縦軸のデータ数を示し、折れ線グラフは右縦軸の累計加積率を示す。C滑走路における誤差の分布は0.2cm～0.4cmの誤差分布が最頻値となり、全体の2割を占める（図-9）。また、約8割以上の測量地点は1cm以下の誤差範囲内に含まれた。エプロンにおける誤差の分布は0cm～0.2cmの誤差分布が最頻値となり、全体の約2割を占める（図-10）。また、約8割以上の測量地点は1cm以下の誤差範囲内に含まれた。C滑走路・エプロンともに、絶対誤差が

1 cm以下の割合は約8割以上であった。

これらの絶対誤差を式(1a)に基づき二乗平均平方根として算出した結果、両者のRMSEはC滑走路でRMSE 0.944 cm, エプロンでRMSE 1.037 cmとなり、RMSEはC滑走路のほうが若干良い結果となった。このことから、1 cm程度の精度を有すると判断できる。

6. 空港維持管理への適用に向けて

(1) 実測量との比較

表-1 東京空港整備事務所で実施している動態観測の主目的

目的	頻度	内容	要求精度
勾配の管理	1回/3年	・ 規定勾配の逸脱の有無の確認	4級水準測量 (RMSE 4mm以下)
地盤沈下の管理	1回/1年	・ 沈下解析の入力値 ・ 基礎データの蓄積、傾向把握	特になし

動態観測は、滑走路・誘導路の舗装状態を把握するために実施され、路面勾配の変化を管理する「勾配の管理」と、将来沈下予測に用いる基礎データを蓄積する「地盤沈下の管理」に大別される(表-1)。このうち「勾配の管理」は4級水準測量に分類され、要求精度はRMSE 4 mm以内と報告されており、本検討で得られたC滑走路およびエプロンのRMSEは約1 cmであるため、この精度を満足しなかった。しかしながら、「地盤沈下の管理」には明確な精度規定は設けられていない。RMSE 1 cm程度の精度であれば、将来沈下予測の基礎データとしては十分活用できるものである。この特性を踏まえると、面的傾向の把握に優れる衛星SARを地盤沈下管理へ適用することは、単なる路面測量の代替にとどまらず、時空間データとして処理できることにより、DX化の観点から空港維持管理に有意義である。そのうえで、まずは精度要件の厳しくない目的に対して、衛星SARによる部分的な代替を段階的に進めることが有効である。

(2) 維持管理への活用方針 (実装シナリオ)



図-11 衛星SAR活用の実装シナリオ

衛星SARを空港路面測量へ活用する案として、地盤沈下の管理を目的とする部分代替を提案する。具体的には、精度が求められる「勾配の管理」においては1回/3年の実測量を従来通り実施する。しかし、その間の2年間は「地盤沈下の管理」をSAR解析に置き換えることは可能である(図-11)。このような運用

とすることで、測量に伴う人員配置、機材準備、夜間作業に係る諸経費を抑制でき、測量コストの大幅な縮減が期待できる。さらに、制限区域内での作業回数が減少することにより、作業員の負担軽減、航空機運航への影響リスクの低減といった安全面での効果も大きい。加えて、従来は測点に限られていた情報を、空港全域を対象とした広域の時空間データとして取得できるようになり、舗装状態を面的に把握できるようになる。現地作業に依存しないデータ取得への転換は、空港維持管理のDXを推進する要素である。

7. おわりに

本提案では、衛星SARを空港路面測量へ活用する方策として、地盤沈下の管理を目的とした測量の部分代替案を示した。空港のような広範かつ平滑な舗装面を対象に、衛星SAR解析を実務レベルで適用する取り組みはこれまで例が少ないことから、求められる誤差精度を管理目的ごとに整理し実装可能性を具体的に検証した。なお、この活用方策は平面空間が支配的である他空港への展開可能性も期待できる。一方、衛星SAR技術は日々進展しているため、観測頻度や分解能の向上を継続的に注視し、将来的な高度化を取り込む柔軟な運用方針を構築する必要がある。

新技術を検討・導入するにあたっては、既存データの連続性を確保しながらも、求められる精度を損なってはならない。本検討によって、従来測量をSARに代替するにあたり、どの程度までの誤差を許容できるかなど、両者の関係性を十分に整理した上で、新技術がもたらす有効性を慎重に判断する姿勢が重要であることを学んだ。

参考文献

- 1) 山田凱登ら：空港舗装動態観測への干渉SAR解析等の新技術導入の可能性及び具体的方策の検討，インフラメンテナンス実践研究論文集，vol. 4, No.1, pp. 69-78, 2025
- 2) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 衛星利用運用センター，国土交通省：災害時の人工衛星活用ガイドブック 水害版・浸水編，令和5年9月
- 3) 梅原剛ら：SAR 衛星画像を活用した道路被災 状況把握の適用性に関する研究 ～令和6年能登半島地震における検証～，国総研レポート2025, pp. 65-66
- 4) 一般財団法人リモート・センシング技術センター：PAZ, <https://www.restec.or.jp/satellite/paz>