

那覇空港滑走路増設における車載式レーザースキャナ測量を使用した埋立沈下管理手法について

前里 尚¹・田中 貴之¹⁺

¹那覇港湾・空港整備事務所 那覇空港新滑走路整備推進室 (〒901-0142 沖縄県那覇市鏡水344)

那覇空港増設滑走路は海上埋立空港であり、供用後に残留・不等沈下が予測される。従来の管理においては一般的な水準測量、沈下板計測および、巡回点検により実施されているが、供用中の空港は計測作業に時間的制約を受け、非効率ばかりか局所的な沈下等の発見が困難であるなど課題を抱えている。

そこで MMS (Mobile Mapping System; 車載式レーザースキャナ) を用いて広大な新滑走路用地の短時間・高精度の 3 次元情報取得を試み、空港沈下管理計測への適用性を検討した。

本論文では、MMS の精度検証ならびに MMS を検討する中で取得した計測データの特性を活かした**空港 MMS** の利活用事例を示す。

キーワード 那覇空港滑走路増設, 埋立沈下管理, MMS, 空港維持管理システム, 空港空間3次元計測

1. 概要

那覇空港においては、将来の航空需要に適切に対応するとともに沖縄県の持続的振興発展に寄与するため将来にわたり国内外航空ネットワークにおける拠点性が発揮できるよう、現滑走路から1310m沖合に2本目の新滑走路(滑走路長2700m)の整備を行っている。

図-1に位置図を示す。

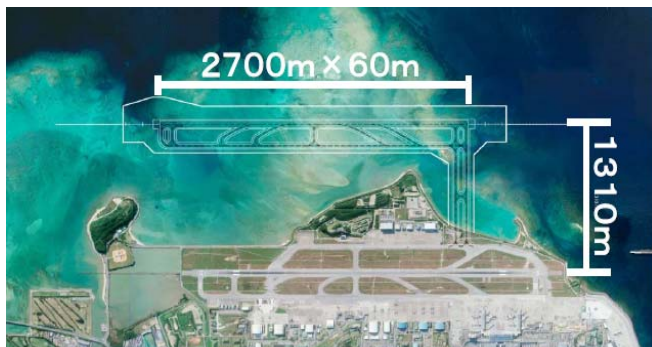


図-1 現滑走路と増設滑走路の位置図

那覇空港増設滑走路は海上埋立であり、供用後に残留・不等沈下が予測される。そのため沈下に起因する空港舗装(滑走路、誘導路、エプロン)空港用地、航空保安施設用地、付帯施設に対する要求性能への影響を適切に管理する必要がある。

新技術として MMS が開発されている。MMS とは、レーザースキャナ・GNSS/IMU(位置姿勢計測装置)・デジタルカメラを車両に搭載し、走行しながら周辺 3 次元情報(地形・地形形状・画像)を取得するシステムで、MMS を適用することで、広大な新滑走路用地の 3 次元情報(XYZ)を短時間かつ広範囲に取得することが可能となる。本試みで

は、那覇空港増設滑走路における沈下管理計測を効率的かつ効果的に実施するための適用性について、既存滑走路等の MMS による計測試験を実施し、取得したレーザ点群データと既往の定期点検測量との誤差等について精度検証を実施した。また MMS 技術を検証する中で、取得した計測データの特性により、今後の空港の維持管理等に新たに適用可能と思われる**空港 MMS** の利活用事例案を示す。

2. MMS の概要

MMS(モバイルマッピングシステム)とは、GPS(全球測位システム)により正確に自車両の位置を求めるとともに、IMU(慣性計測装置)を利用した姿勢計算と車両などに搭載したセンサーで計測したレーザデータ/カメラ画像から、車体の揺れや路面の傾斜に関わらず取得したレーザ点群データに高精度の 3 次元公共座標を与えるシステムである。そして 3 次元レーザ点群データと画像データの正確な融合を実現し、空港空間情報を的確に把握するものである(図-2、図-3)。



図-2 計測車両(三菱製 MMS-X500ZL)

3. 現状と課題

那覇空港増設滑走路の沈下検討の結果, 埋立に伴う沈

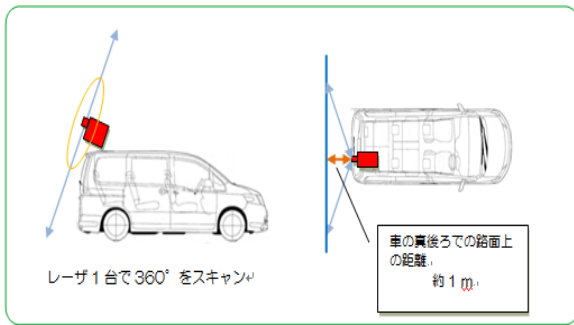


図-3 レーザ照射範囲

表-1 使用機材の諸元

名称	MMS-X500ZL
計測車両メーカー	三菱電機 (株)
レーザー機種	Z+F 社 Profiler9012
レーザー台数	1 台
レーザー搭載方法	鉛直 60°
レーザースキャン頻度	200Hz
レーザー発射頻度	1,016KHz
レーザー測定精度	±2mm
点群密度	2000 点/m ²
計測距離	118m (実効)

下量は 70cm 程度であり, そのうち最大 30cm 程度は供用後の残留沈下として見込まれている. 沈下に起因して起こる問題としては基本施設及び空港用地における縦横断勾配の変化, 舗装のひび割れ, わだち掘れ等が挙げられる. その結果, 規定勾配の逸脱が生じれば航空機の運用が不能となることから, 定期的に管理する必要がある. 従来これらの管理は一般的な水準測量による縦横断測量, 沈下板による沈下計測と巡回点検からなる目視点検の組み合わせで実施されている. これまでの測量方法についての課題を以下に挙げる.

課題① 水準測量による管理では規定測線上の縦横断による 2次元管理及び沈下板による点管理であり, 観測地点外の局所的な沈下等が発生した場合に発見が遅くなる可能性がある. また目視点検では僅少な勾配変化など定量的な判断が難しい.

課題② 那覇空港増設滑走路用地は約 153ha と広大であり, 制限が厳しい制限区域内において航空機の運用時間外で実施するため, 従来の測量作業では多くの計測日数と労力を要する.

4. MMS による沈下管理検討

供用開始以降の沈下管理に関して, MMS の活用の有効性とその適用性について現滑走路を対象として検討を実施した.

(1) 那覇空港 MMS データの取得

MMS 計測にて取得する 3次元データと既往の定期点検測量データの精度を比較するため, 那覇空港において MMS データを取得した(図-4). 取得した点群データを図-5に示す.

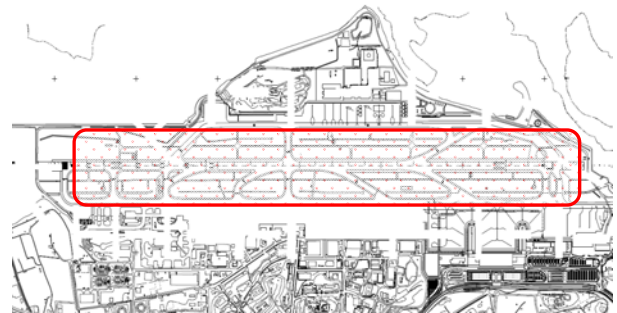


図-4 那覇空港 MMS データ取得範囲

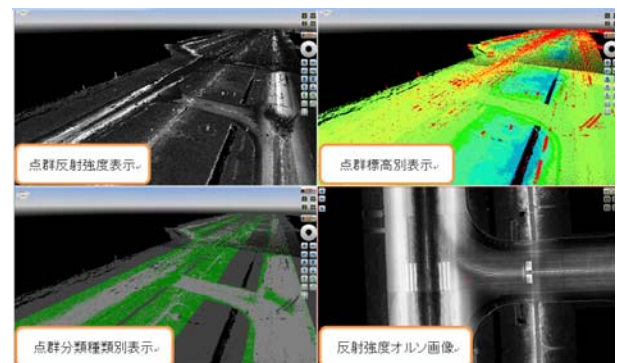


図-5 那覇空港 MMS 点群データ表示

(2) MMS による課題

那覇空港滑走路を対象に MMS 計測データと定期点検測量データを縦断図により比較した. その結果 MMS 単独による測量値が, 一般的に高さ方向の誤差が 5cm 程度となった(図-6). 供用後の残留沈下量 30cm に対してその割合は大きく, 3 級水準測量で設けた標定点を同時に計測・補正することで誤差消失を試みた.

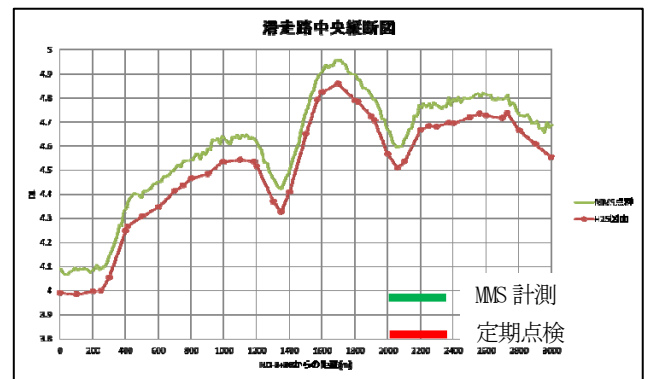


図-6 MMS 計測結果と定期点検測量の対比

(3) MMS の課題解決と精度確保の検討

MMS の精度を向上するための標定点の設置箇所数及び位置について検討した.

具体的検討内容は以下のとおりである.

① 標定点の数量による誤差の比較

標定点の使用点数による検証のため, 滑走路を対象に

H25 年定期点検測量成果と MMS の差分及び RMS 誤差の比較を行った。使用した点数及び点番号は図-8 の通りである。なお最大差分は絶対値で算出した。

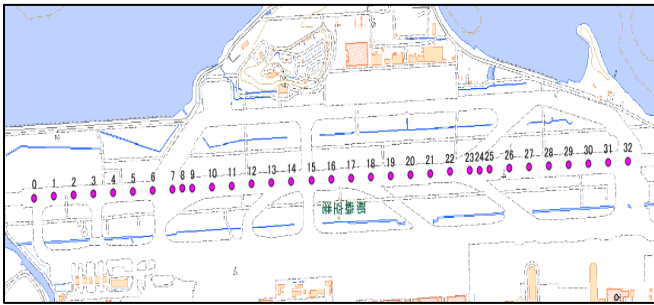


図-8 滑走路における標定点の位置

標定点数量検討の結果、図-9 に示すとおり 1 点使用することで RMS 誤差は大幅に小さくなるが、MMS と H25 年成果の差分の数値にばらつきがあるため、1 点のみの使用では誤差は押えられない。よって RMS 誤差が安定的に小さくなり、かつ可能な限り少ない点数という条件から、両端と中央の 3 点を使用すれば RMS 誤差を 1cm 程度に抑えることができ、適切と考えた。

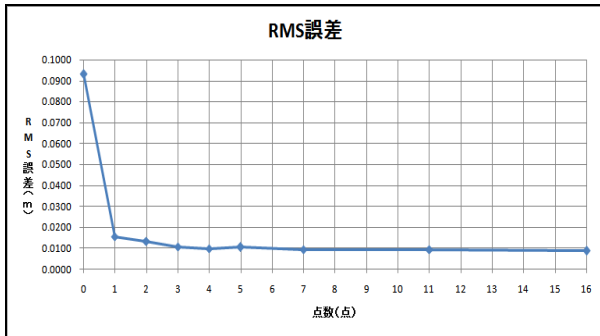


図-9 標定点数と RMS 誤差の関係

②滑走路縦断方向での MMS 補正

MMS データと定期点検測量を比較した結果、高さ方向の一定のズレが確認できたため、標定点の高さは同じと仮定して、MMS 計測データの補正を行った(図-10)。差分の最大値、最小値(ともに絶対値)及び、RMS 誤差は表-2 の通りとなった。RMS 誤差は H25 年成果を真値とする場合の誤差を示す。MMS-H25 年を δ 、比較箇所数を n とすると、RMS 誤差は以下の式となる。

$$RMS \text{ 誤差} = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{n}}$$

表-2 滑走路縦断 調整前後の比較

	最大値 (m)	最小値 (m)	RMS 誤差 (m)	高さ移動量 (m)
調整前	0.093	0.066	0.093	-0.080
調整後	0.016	0.000	0.010	

③滑走路横断方向での MMS 補正

滑走路横断方向については、RWY36 から RWY18 に向かう方向で起点から 3 箇所を抽出し検証した。MMS データと定期点検測量を比較した結果、滑走路同様高さ方向への一定のズレ及び回転が確認されたため、中央の高さは同

じと仮定して、MMS データを高さ方向及び回転の調整を行った。それぞれの調整後の結果を表-3 に示す。

滑走路における横断図を補正した結果、1,500 m 地点の横断位置で最大 2.1cm の RMS 誤差が生じた結果となった(図-11)。

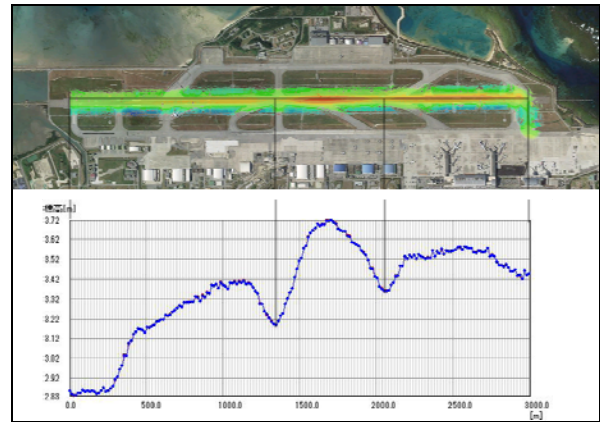


図-10 滑走路縦断補正後

表-3 滑走路横断 調整結果

箇所	調整前 RMS 誤差 (m)	調整後 RMS 誤差 (m)	高さ調整量 (m)	回転調整量
0m 地点	0.063	0.011	-0.031	0.190° 反時計まわり
1,500m 地点	0.116	0.021	-0.085	0.150° 反時計まわり
3,000m 地点	0.095	0.014	-0.064	0.204° 反時計まわり

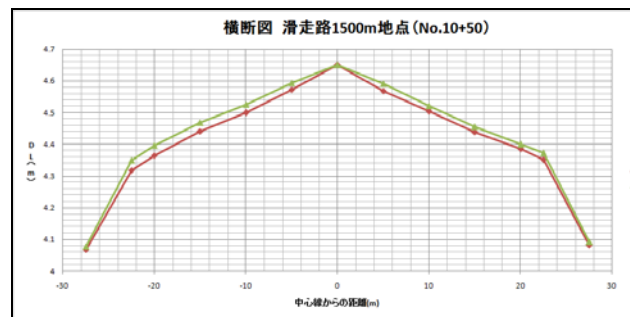


図-11 滑走路横断補正後

④MMS 精度検証結果

空港土木設計・測量・地質土質調査共通仕様書の「縦断測量の往復差及び閉合差」との比較を実施した。S を片道の観測距離(km)とすると、許容精度は以下の通りである。

表-4 横断測量の精度

	精度	S=3km の場合の許容精度 (cm)
3 級水準測量	16mm√S	1.73
4 級水準測量	26mm√S	3.46

滑走路長が 3km とすると、4 級水準測量の許容精度は 3.46cm となる。MMS 検証による定期点検測量結果との RMS 誤差が最大差分 2.3cm であり 4 級水準程度の精度が確保

できる結果となった。

(4) MMS の優位性について

MMS の検証結果により、MMS による有意性は以下のとおりである。

① 計測スピードの速さ

MMS は時速 40km で走行しながら半径約 150m の 3 次元計測が可能で、作業時間が限られる制限区域内で迅速かつ効率的に地形物の計測が可能である。

現空港での計測の実績より増設滑走路島全体 153ha の計測に要する時間は 2 時間程度である。

② 点群データの密度

MMS で計測した点群データは最大で 1m² 当り 2000 点の取得が可能で、その点群データには全て XYZ 値が与えられており、通常の水準測量で取得できる線的数据に比べてデータ量が膨大である。

③ 任意点の縦横断計測が可能

MMS 3 次元データにより、任意の点の縦横断計測及び面積、体積の算出が容易である。

④ 計測環境が容易

MMS は雨天以外、昼夜間での計測が可能である。

⑤ 計測データによる舗装状況の評価が可能

MMS は取得した 3 次元データより、わだち掘れ、平坦性を解析が可能である。

⑥ 地表状況が即時確認可能

MMS データにより、空港における任意の必要点を机上で計測することが可能となり現場作業が不要となる。

⑦ 計測データのアウトプット

MMS データを CAD データとしてアウトプットすることができ発注図等への提供が可能である。

(5) MMS による沈下管理への適用性について

MMS データと既往測量データによる精度検証の結果、ほぼ全体が 4 級水準測量を満たすに十分な精度を有することが証明された。一部では許容精度を超える結果となったが、その対策は今後の課題である、しかし MMS は 3 次元の膨大な点群データにより、従来の測量技術では不可能であった空港全体の 3 次元管理による空間把握を可能とする。MMS を主とし、従来の測量を従とした手法で空間形状の変化を高精度に計測することが可能となり、那覇空港増設滑走路における沈下計測の精度向上、及び今後の効率的な維持管理に寄与できる、と考える。増設滑走路における計測結果イメージを図-12 に示す。



図-12 MMS 計測コンター図

5. MMS 計測結果の利活用について

空港 MMS の適用を検討する中で、得られた 3 次元データを SIM 環境に取り込むなどから、従来の測量結果との整合性を保つことが可能となり、MMS 計測データの長所を活かした多様な利活用への可能性が明らかになってきた。以下に MMS 計測データの利活用事例を示す。

① 空港 MMS を利用した空港安全管理

MMS の膨大な 3 次元データを SIM のデータベース化することで机上での任意の位置、任意の縦横断を計測することが可能になる。その結果空港制限区域内工事における工事車両等の制限表面への支障の有無、建築限界の支障の有無、見通し確認などが可能となり、航空機運航に関する安全性向上と省力化に期待できる。

② MMS データの災害時の活用について

大規模災害発生時には那覇空港は救急救命活動や緊急物資等輸送の拠点として役割を求められており、発生後は早期復旧のため空港機能を回復する必要がある。したがって、地震や津波の後に空港施設（滑走路等基本施設、着陸帯等空港用地、付帯施設等護岸）の性能を確認し、異常箇所を早期発見することが重要である。増設滑走路新設時の空港施設全体の初期値は定期 MMS で得た 3 次元データを用いる。災害時には被災後に得た航空レーザー測量結果と MMS 結果の融合による広域 3 次元データと MMS 初期値との比較の中で異常箇所を抽出し、早期復旧のツールとして期待できる。

③ 空港維持管理での活用

MMS 計測データの長所は空港維持管理において様々な利活用が可能と思われる、反射強度オルソ画像（図-13、14）による路面標識の劣化状況、滑走路におけるゴム付着範囲、点群データ解析によるわだち掘れや平坦性状況の把握、ダブルデッキ下面の点検などと巡回点検、PRI 調査、すべり摩擦抵抗調査と組み合わせることで効率的かつ効果的な点検に活用できると考える。

また、任意の点において縦横断計測や面積、体積の計測が容易であり、今まで事業毎に事業範囲のみ個別で発注していた計測作業など一元化ができ省力化に期待できる。

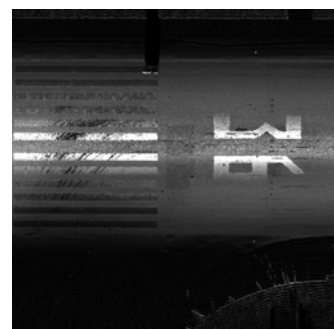


図-13 反射強度オルソ画像（滑走路）

6. おわりに

3 次元データを基図とした本システムを活用すること

で、従来は多大な労力を要し、煩雑になっていた写真管理、
変状・補修箇所の数把握が高度化されるとともに各種



(図-14) 反射強度オルソ画像 (滑走路)

情報の共有・一元管理が可能となり、沈下管理を含めた
予防保全管理に資する継続的な維持管理を実現できるようになる。各空港における維持管理職員が縮小されるなか、空港MMSによるICT技術の全面的な活用で、測量・設計・施工・検査・維持管理までのプロセスの最適化が進み、省力化、作業効率向上に帰する事を期待しております。