# ２．鉄道におけるマルチ GNSS 測位の利活用技術

交通システム研究領域　　※吉永　純　　廣瀬　道雄　　林田　守正　　日岐　喜治

## １．はじめに

鉄道分野において衛星測位の利用は、旅客サービス用途、運転補助用途、保守・保線用途等で実用化されており、列車制御に用いる研究も進められている。

海外では、省メンテナンス化を狙って駅間の部分には軌道回路を設置せず、無線通信と GPS(Global Positioning System)で列車位置を取得する方式が実用化されており、さまざまな衛星測位の利用法が拡がっていくと考えられる。

衛星測位は、GPS 以外にもさまざまシステムがある。日本では GPS 衛星と互換性があり、日本上空の高仰角に配置される軌道を持つ「準天頂衛星」（以下「QZS」(Quasi-Zenith Satellites System)という。）を平成 22 年に打ち上げており、平成 30 年度には 4 機、将来は 7 機体制となる予定である。また、ガリレオ(欧州)、北斗（中国)、GLONASS（ロシア）等の衛星測位システム（マルチ GNSS（Global Navigation Satellite System)）が構築されつつある。

GPS とは信号の搬送方法や、時間の定義に差異があるが、１台の衛星測位受信機（以下「受信機」という）により複数のシステムを統合的に利用できる、マルチ GNSS 受信機では、短時間で高精度の位置情報を取得できる等の利点があり、現状ではスマートフォンへの組み込みや、測量での利用等が進められており、受信機のマルチ GNSS 化は急激に進むと思われる。

本稿では、鉄道における衛星測位をマルチ GNSS で利活用する効果に関する試験等の結果を報告する。

## ２．マルチＧＮＳＳによる効果

衛星測位は、基本的には人工衛星（位置は既知）からの信号を受信した際に、その衛星との距離を把握し、自位置の座標（X,Y,Z)及び時計の誤差(t)を特定する技術である。この４つの変数を算出するために、最低４機の人工衛星から信号を受信する必要がある。

一般的に、地上には遮蔽物が多いため、地平線に近い低仰角の衛星の信号は遮蔽や、回折波による劣化（マルチパスと呼ぶ）の影響を受ける。利用できる人工衛星の母数が多く、かつ、天球上で衛星が偏在しない場合(偏在の度合いは HDOP(Horizontal Dilution of Precision)という指標値で示される）の方が位置検知精度が高くなる。そのため、利用可能な衛星が多くなるマルチ GNSS では、GPS のみより位置検知精度等が向上すると考えられる。

鉄道での衛星測位の利用形態は、静止中と移動中の状態の２つが考えられるが、それぞれの利用例として以下のものが考えられる。

(1)静止中に測位を行う用途

車庫内における列車起動時の位置測定、停車駅での番線検知、線路位置・設備の位置測定など

(2)移動中に測位を行う用途

走行中の自列車位置把握、曲線等の速度チェック、閉そく境界検知など

### ２．１．静止中の測位に対する効果

高精度の受信機には、設定した仰角以下の衛星を使わない機能があり、高度角マスクと呼ばれている。

図１は、高度角マスクの設定値別に D-GPS 方式で測位できた時間割合（FIX 率）を示したデータである。

駅部や、線路近くに３階建以上の建物がある場合、45 度程度の遮蔽物となるが、45 度では GPS 衛星のみ（青色）は FIX 率が大幅に低下するが、マルチ GNSS 測位（赤、緑、紫色）では 80%以上である。QZS は今後運用数が増えるため、さらに測位率（測位演算結果が得られた時間割合）が高まり、現在測位が難しい環境でも今後は衛星測位が利用できる可能性がある。

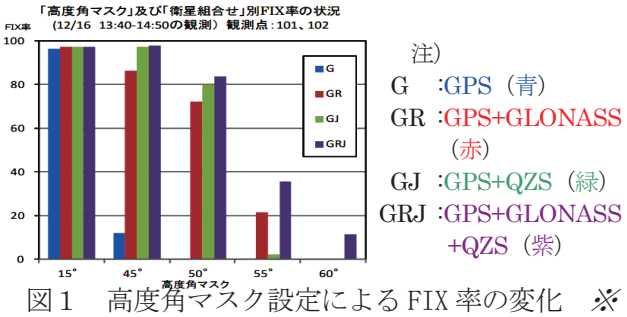


図１　高度角マスク設定による FIX 率の変化　※

※「準天頂衛星を利用する GNSS 実験観測及び技術指針の検討報告書」（平成 24 年 国土地理院）より抜粋

測位精度に関しても、QZS の L1-SAIF(補強信号)を利用する測位方式ではGPSの対流圏遅延誤差を軽減できるため、QZS の仕様上 2.60m（95%値）以内の測位精度が保障されており、一般的に 10m 程度とされている一般的な GPS と比べて、高い精度が期待できる。

### ２．２．移動中の測位に対する効果

鉄道の走行中には、周辺の建物や樹木等の影響により利用可能な衛星数が増減する。図２は、３．２に後述する車庫線内の走行試験（10 回）時の、GPS（青）、QZS（桃色）の可視衛星数を重ね合わせたものであるが、300m 付近で最小の場合には１機まで減っている様子がみられる。この周辺は、建物により仰角が 40 度程度まで絞られる環境である。

可視衛星数の増減時には、測位誤差の増大、測位不能が生じるため、マルチ GNSS により仰角の高い衛星が確保されることにより、測位精度の改善や、測位率が高まることが期待できる。

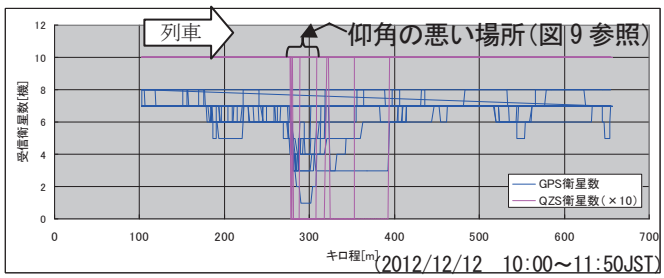


図２　走行中の GPS・QZS 可視衛星数の推移

また、QZS の後継機では、短いメッセージの放送機能（災害・危機管理通報）が搭載される予定であり、この利用による防災機能の向上等が考えられる。

## ３．衛星測位試験

当研究所では、鉄道分野への衛星測位技術の適用を念頭に、営業路線を用いた衛星測位精度等について検証試験を実施してきている。ここでは、その試験手法及び結果の概要について述べることとしたい。

### ３．１．試験装置

衛星測位精度を検証するシステムの基本構成を図３に示す。走行中の列車の位置をレーザドップラ車速計により正確に把握し、その位置と、衛星測位位置を比較することで誤差量を把握する仕組みとしている。

列車の位置は、精度の高いレーザドップラ方式の車速計（主な仕様は表１）を試験用に設置し、これを真値として走行開始地点（座標は既知）からの進行距離[m]を求める。進行距離は緯度・経度で示される座標系と相互に変換する必要があるため、線路の位置の衛星測量結果を信号機器メーカから提供頂き、この線形データを参照して変換することとした。

誤差は、線路方向成分、枕木方向成分に分けて解析を行う。受信機はアンテナ（前後２組）を分配し、複数の機種により測位を行うこととし、L1 信号（GPS のうち最も早く民間用に公開された信号。図５参照）により 5Hz 又は 10Hz で測位を行う。

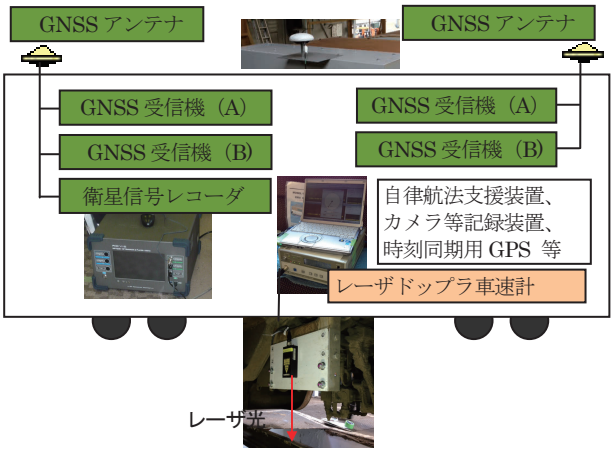


図３　試験装置の基本構成

表１　レーザドップラ車速計の主な仕様及び設定

| 項目 | 仕様 |
|---|---|
| 構成 | アクト電子製 1521T 及び 2521T |
| 測定方法 | レーザドップラ方式　後方散乱差動形 |
| 使用レーザ出力 | 20mW 最大　　780nm（クラス 3B） |
| 測定可能距離 | 700±100mm（路面電車用は 400±50mm） |
| 測定速度範囲 | −210～＋156km/h |
| 測定確度 | ±0.2%以内又は±0.1m/min 以内 |
| 最小分解能 | 0.001km/h |
| サンプリングレート | 2ms |
| 出力レート | 2ms～（今回は 10ms に設定） |
| データ補間機能 | 信号欠落時に、速度・距離を直前値で補間する（今回は 10 秒間に設定）。 |

試験装置の衛星信号レコーダは、列車上の試験環境を後日再現するために用いるものである。

受信機のログによっても測位結果の分析等は可能であるが、この試験方式では受信機の特性の影響を受けており、また、他の設定を行った場合や他の受信機機種の場合の測位結果を知ることはできない。

衛星信号レコーダは、図４のように生の電波を列車上で収録し、後日、再生装置としてマルチパス等のノイズ発生等を列車外で何度でも再現することにより、さまざまな解析を可能とする装置である。

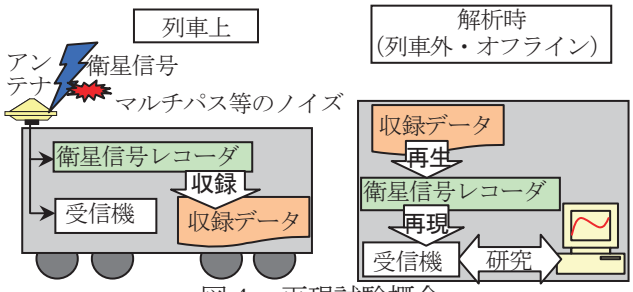


図４　再現試験概念

本試験では、日本上空での利用可能衛星数の多い点や受信機の入手のしやすさから、GPS、GLONASS、QZS の L1 信号を利用している。GPS と QZS は図５(緑色部)のように同一周波数であるので、中心周波数±5MHz 程度を収録すれば再現可能である。図６に、衛星信号レコーダで把握した、GPS の L1 信号付近から GLONASS の L1 信号付近の電波強度を示す。

しかし、GLONASS の L1 信号はやや周波数が高く、衛星毎に中心周波数が異なる方式（周波数分割方式）であることから、GPS と同時に収録するために、今回は 1.569～1.615GHz(46MHz 幅)の周波数範囲を記録する。

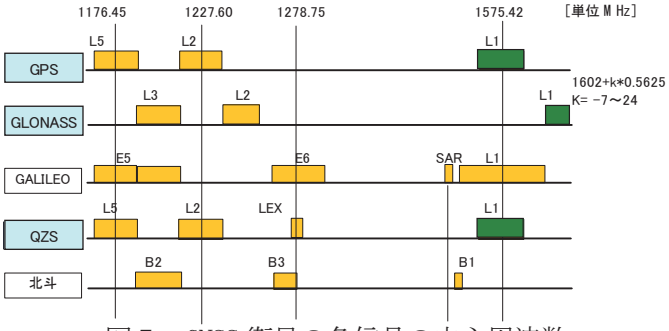


図５　GNSS 衛星の各信号の中心周波数

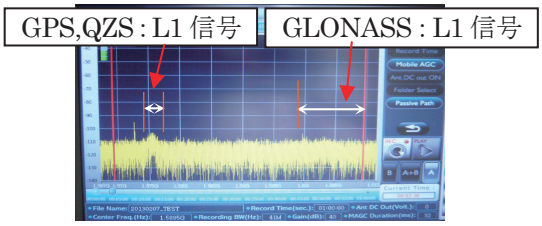


図６　周波数別の信号強度

### ３．２．静止中の測位試験

図７は、鉄道車庫内の建物周辺の線路上で、静止状態でのマルチ GNSS 測位の効果の比較のために列車屋根上アンテナで衛星測位を行った（1422 秒間＝7110 エポック）際の測位座標のプロット及び収録場所の周辺写真である。

図中、緑で示された GLONASS 及び GPS のハイブリット測位の結果が他の測位方式よりばらつきが小さく、位置精度が良い結果が得られた（表２参照）。準天頂衛星の補正情報を利用した測位結果は、GPS 単独の測位結果よりややよい測位精度といえる。

### ３．３．移動状態での測位試験

図８は、衛星配置シミュレーションによる GPS 及び QZS と、GLONASS のうち、仰角 30 度以上の衛星数の推移を作画したものである。

GPS 及び QZS と GLONASS の数が同数で、日中のうちで比較的 HDOP の悪い時間帯(GPS・QZS=2.46、GLONASS=2.5)に、極力定速で車庫内の線路（図２と同

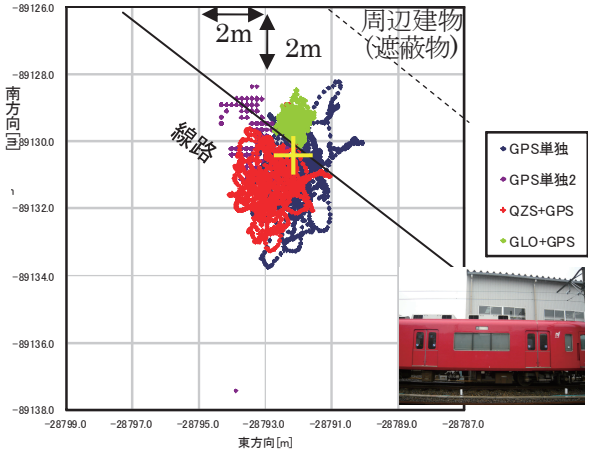


図７　測位プロット(2013/2/5　10:16:26～10:40:08)

表２　静止中の観測状況

| | GPS 単独 | QZS+GPS | GPS 単独 2 | GLO+GPS |
|---|---|---|---|---|
| 標準偏差[m]（東） | 1.01 | 0.78 | 0.70 | 0.25 |
| 標準偏差[m]（北） | 0.61 | 0.56 | 0.48 | 0.20 |
| 平均衛星数[機] | — | — | 12.1 | 17.9 |
| 平均 HDOP | 1.08 | 1.09 | 0.99 | 0.70 |

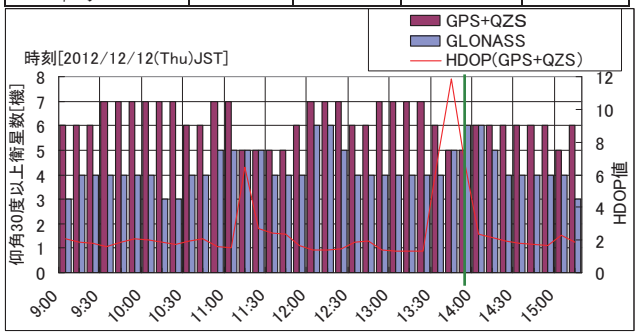


図８　衛星数の変動状況

一の線路）を移動しながらマルチ GNSS 測位を行う試験を行った。なお受信機は列車内では３機種を用いたが、今回のオフラインでの解析では、比較のため全て同じ機種（JAVAD ALPHA G3T）を使用した。

図９は、図２の仰角の悪い場所付近を 241m 地点の踏切から撮影した写真である。線路右側の 12m 高の建物により仰角が 35 度程度に遮られている。また上空に配管も存在している。

また図１０は、図１１に測位結果を示している走行試験時の衛星配置である。QZS は 77 度と高仰角であるが、GPS 衛星は 30 度以上の仰角には 4 機、GLONASS 衛星も同じく 4 機という比較的衛星数が少なく、測位上は不利な環境といえる。

図９　仰角の悪い箇所の状況

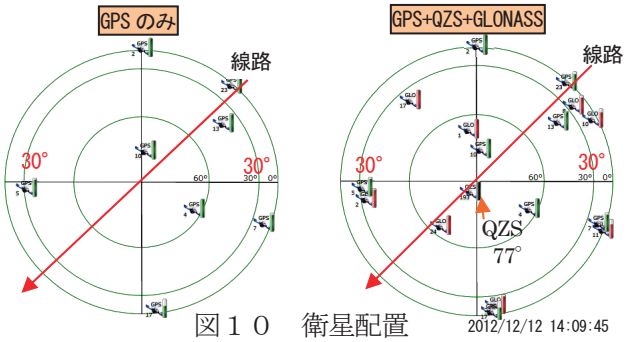


図１０　衛星配置

図１１は、同一の受信機を用いて、さまざまな測位方法で衛星測位演算を行い、その軌跡をプロットしたものである。特に、青、緑で表される GPS のみや、GLONASS のみの測位では、線路北側の建物等の影響を受け、左右に大きく動いている様子が読み取れる。

図１２は、レーザドップラ車速計の出力値と対比して線路方向の誤差状況を示したものである。進行方向に遅れる側（プラス値）に誤差が生じる傾向があり、表３にも示すように、GPS、QZS を組み合わせ、高度角マスクを30度に設定した場合に誤差が少なくなった。

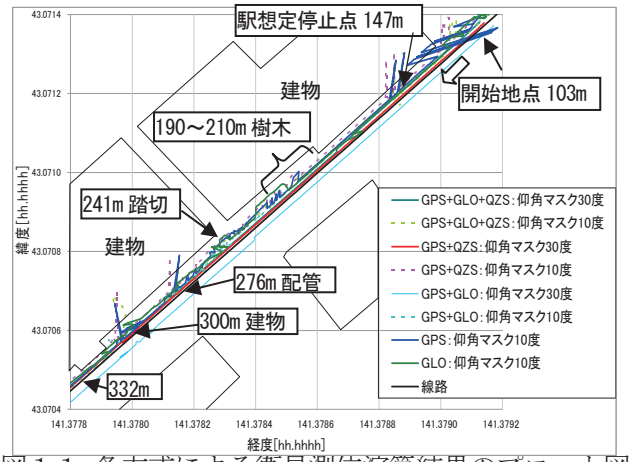


図１１　各方式による衛星測位演算結果のプロット図

図 12 中の HDOP 値（GPS＋QZS＋GLONASS）は、GPS の HDOP 値と比較してやや悪いが、遮蔽物のある場所でも安定しており、測位精度もよい。これは、大きな誤差は衛星数が何らかの理由で増減する際に瞬間的に発生する傾向があるため、多少 HDOP 値が悪くても HDOP や衛星数が安定した衛星の組み合わせとなる場合の方が測位精度が高いことを示している。そのため、衛星の母数が多く、かつ周辺の建物等の影響を受ける衛星が排除される、GPS と高仰角の QZS を使う設定の場合に精度が良くなったと考えられる。

表３　測位状況の集計結果

| GNSS測位方式 | 高度角マスク[度] | 可視衛星数[機] | 線路方向誤差平均[m] | 枕木方向誤差平均[m] |
|---|---|---|---|---|
| GPS+QZS+GLONASS | 10 | 5～8 | 1.83 | 1.97 |
| GPS+QZS+GLONASS | 30 | 4～6 | 1.40 | −0.99 |
| GPS+GLONASS | 10 | 6～8 | 1.58 | 1.57 |
| GPS+GLONASS | 30 | 5～8 | 1.83 | 7.06 |
| GPS+QZS | 10 | 3～8 | 1.40 | −1.77 |
| GPS+QZS | 30 | 4～5 | 0.42 | −0.63 |
| GPS | 10 | 3～8 | 2.45 | 1.82 |
| GLONASS | 10 | 5～8 | 1.84 | −2.04 |

## ４．まとめ

再現実験が難しい、鉄道での衛星測位試験を短時間に容易に再現可能な試験装置を作成し、これによって列車の真の位置を計測しながら、GPS、QZS 等を組み合わせたさまざまな衛星測位方法の比較を行った。

その結果、マルチ GNSS 測位により利用可能な衛星数を増やし、かつ低い仰角の衛星は除外する場合に精度が高いことが分かった。

今回紹介したものは短時間での事例だが、同様の傾向は他の路線でも得られている。そのため、今後は移動体における QZS の効果等について一般的な傾向を掴むための試験を行っていきたい。

最後に、本研究についてご支援・ご協力頂きました国土交通省総合政策局をはじめとする関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

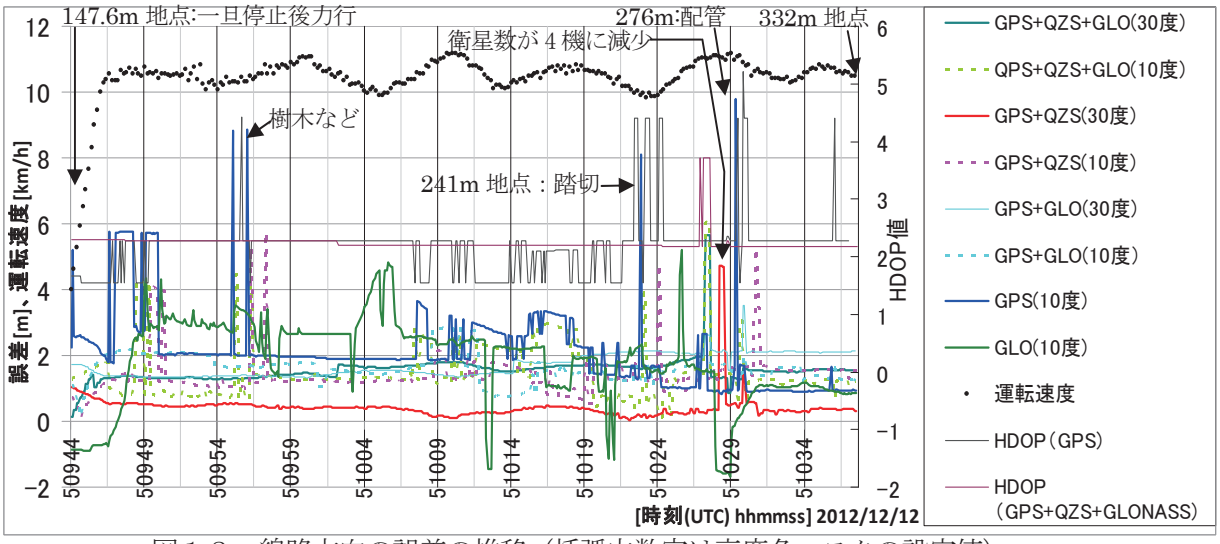


図１２　線路方向の誤差の推移（括弧内数字は高度角マスクの設定値）