

列車保安制御システムへの全球測位衛星システム
(GNSS) 利用に関する研究

平成 30 年 9 月

浅野 晃

列車保安制御システムへの全球測位衛星システム (GNSS) 利用に関する研究

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	GNSS利用の現状	1
1.1.2	鉄道環境とGNSS利用への期待	2
1.2	本研究の目的	3
1.3	本研究の概要	3
第2章	列車保安制御と列車位置検知	5
2.1	はじめに	5
2.2	既存の列車制御システムと列車保安制御システム	5
2.2.1	閉そく装置	6
2.2.2	連動装置	7
2.2.3	踏切制御装置	7
2.2.4	軌道回路	7
2.3	無線式列車制御システムとGNSS	9
2.4	まとめ	10
第3章	鉄道におけるGNSS利用の現状と課題	11
3.1	はじめに	11
3.2	GNSSの動作原理から起因する誤差要因と対処方法	11
3.2.1	測位誤差要因	11
3.2.2	GPS衛星とGPS受信機の測定距離誤差要因	12
3.2.3	測位誤差の軽減	14
3.2.4	衛星配置による測位誤差	14
3.3	準天頂衛星の本格運用を迎えたGNSSの現状	15
3.4	鉄道におけるGNSS利用の事例	16
3.5	列車保安制御に利用する上での課題	17
3.5.1	GNSSは、恣意的な誤差付加、使用停止の懸念	18
3.5.2	測位情報は、連続受信できるわけではない	18
3.5.3	GNSS受信機の測位アルゴリズムがブラックボックス	18
3.5.4	測位情報は、確定値ではなく誤差を含む	18
3.6	まとめ	19
第4章	列車保安制御システムへのGNSS利用	20
4.1	はじめに	20
4.2	静的な検討	21
4.2.1	測位誤差の軽減	21
4.2.2	衛星配置による測位誤差	21
4.3	列車保安制御利用上の懸念に対する見解	21
4.3.1	GNSSは、恣意的な誤差付加、使用停止の懸念	22
4.3.2	測位情報は、連続受信できるわけではない	22
4.3.3	GNSS受信機の測位アルゴリズムがブラックボックス	22
4.3.4	測位情報は、確定値ではなく誤差を含む	23

4.4	GNSS の性能確認	24
4.4.1	静的環境での性能確認試験	24
4.4.2	動的環境での性能確認試験	29
4.5	測位誤差軽減のためのフィルタリング	38
4.5.1	GNSS 利用上の前提条件	39
4.5.2	2 受信機の照査による精度検定	39
4.5.3	カーブなど軌道特徴点を用いた検定	42
4.5.4	情報の連続性による検定	44
4.6	各種フィルタリングに対する試験結果	45
4.6.1	試験の条件	45
4.6.2	2 受信機の照査による精度検定試験結果	46
4.6.3	速度情報に対する評価試験結果	49
4.6.4	軌道のカーブを用いた補助手段の試験結果	50
4.7	ハイブリッド位置検知	53
4.8	GNSS の時刻情報の利用	56
4.8.1	各装置間の時刻同期	56
4.8.2	踏切制御	56
4.9	まとめ	59
第5章	GNSS 利用列車制御システムのケーススタディ	61
5.1	試験システム	61
5.1.1	試験システムの考え方	61
5.1.2	システムの構成	61
5.1.3	GNSS を利用するためのシステム設計	63
5.1.4	システムの動作概要	64
5.1.5	試験結果	66
5.2	既設システムとの比較	67
5.2.1	システムのスリム化	67
5.2.2	保守性の向上	68
5.2.3	機能向上	68
5.3	まとめ	69
第6章	結論	70
6.1	本研究の成果	70
6.2	今後の課題	71
	謝辞	73
	参考文献	75
	業績論文	77

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 GNSS 利用の現状

米国の GPS (Global Positioning System : 全地球測位システム), ロシアの GLONASS (GLOBAL NAVIGATION Satellite System), EU の Galileo, そして日本の準天頂衛星(QZSS : Quasi-Zenith Satellite System)などを総称して, 全球測位衛星システム (GNSS: Global Navigation Satellite System) と称する. GNSS は, 世界共通の社会インフラとして利用されている. この中で QZSS は, 2018 年度末に 4 機体制での本格稼働が始まり, その後の増強が計画されている. この状況を踏まえ, 産業界では準天頂衛星を含めた GNSS による衛星測位技術を利用した応用システムの研究開発が進んでいる.

たとえば, 内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) [1]では, 平成26~30年度において「農業機械の自動化・知能化」に取り組んでおり, 4台のロボットトラクタが安全に協調作業するマルチロボット作業システムを開発した. これにより, 一人で複数のロボットを管理することができ飛躍的に作業能率を向上させることができるが, この中で使われるロボットトラクタを支える基本技術にGNSS測位による位置情報把握がある.

また, 国土交通省は, 建設現場の安全性向上と経営改善を意図した構想を i-Construction [2]としてまとめているが, その中核にはGNSS測位機器を実装した建設機械が位置づけられており, それら製品はすでに競争段階にあるといわれている. このほか, カーナビゲーションに代表される自動車分野での利用や測量分野など, 産業分野の多くに応用事例が見られそれぞれ有効に機能している.

鉄道分野においてもGNSS利用の事例は多い. たとえば, 日本貨物鉄道株式会社の運転支援システムPRANETS(Positioning system for RAil NETwork and Safety operating) [3]では, GPSの位置情報から貨物列車の位置をリアルタイムに把握し, コンテナ位置情報や貨物列車の遅れ情報などを顧客に提供している. また, 近畿日本鉄道の運転士支援システムGPS Train Naviでは, 車載のGPSによる位置情報により, 運転士に制動などの操作が必要な場所で画面とLEDの光で注意喚起を行っている [4]. このほかの応用事例については, 第2章で詳述するが, 多くのサービス情報の提供や保全情報等に留まっており, 列車制御とりわけ列車保安制御への導入に対してはきわめて慎重な姿勢がとられていた.

1.1.2 鉄道の環境と GNSS 利用への期待

近年、過疎化・少子化やモータリゼーションなどの影響により、地方鉄道の利用者は減少の一途にあり経営状態は厳しい。たとえば、2000年から2013年までに673.7kmが廃線となっており、今後もこの状況が続いていくと考えられている。加えて地震や大雨などの自然災害によって大きな被害を受けることが多くなり、長期にわたる運行停止と多額の復旧費が発生している。このような外的環境だけでなく、鉄道事業者では、保守作業員の高齢化と人材不足が深刻な問題で、優秀な技術者の技術が継承されないなど、保守面での問題も顕在化しつつある。

このような状況を打破し、鉄道がおかれた課題を克服するには、国の施策を含めた多面的な取り組みが望まれるところである。この中で技術者に対しては、鉄道の運行をより柔軟で経済性の高いものに変革していく努力が求められており、いくつかのチャレンジもなされている。

今日の列車制御システムは、地上主体型と呼ばれ、地上の軌道沿線に列車位置を検知する軌道回路、地上から車上へ制御情報を伝達する地上子、踏切制御を行うための踏切制御子など多くの地上装置が点在している。これら地上装置と制御装置間は、多くのケーブルを用いた重厚なシステムとなっており、設備コストのみならず保守・運用などのコストも大きなものとなっている。これに対し、鉄道の運行をより柔軟で経済性の高いものに変革していく技術開発として、車上で位置検知を行いその情報を基に列車を制御する無線式の列車制御システム CARAT(Communication And Radio Aided Train control system) [5]の開発が1990年代に鉄道総合技術研究所において行われ、その成果を発展させた ATACS(Advanced Train Administration and Communications System) [6]が東日本旅客鉄道によって開発され、2011年10月に仙石線に導入された。無線式列車制御システムは、一般に CBTC(Communications Based Train Control)システムと呼ばれ列車と地上の拠点制御装置間を直接無線で接続し、列車が車上位置検知システムで得た列車位置情報を拠点制御装置に送信し、拠点制御装置は列車へ安全な走行が可能な限界地点情報を送信して列車制御を行うものであり、多くの地上設備と膨大なケーブルを削減することができる。これにより、導入コスト、保守コスト、運転コストの削減を行うと共に、列車運行形態も柔軟に変化できる。この成果は、都市近郊線のみならず、新幹線から地方交通線にまで導入できるものであり、鉄道の再生への有力な手段として期待されている。

一方、このシステムの成否は、車上での安定かつ正確な位置検知技術にかかってお

り、ATACS では、車上の速度発電機の出力パルスの積算と 1km 毎に地上に配置した絶対位置を与えるトランスポンダを用いている。速度発電機のパルス積算による方法は、車輪の滑走・空転による誤差に対応せねばならず、速度発電機を複数台設備するなどの対策が採られている。したがって、原理的には地方交通線に導入可能としても、1 両の車両しか走行しないような線区の場合には、よりシンプルで確実な車上位位置検知システムの確立が望まれている。この点で GNSS が提供する情報の利用は、魅力的ではあるものの、列車保安制御という安全に直結する分野への導入は安全性に対する懸念から先送りされてきた。

1.2 本研究の目的

既設の列車制御システムは、軌道回路によって列車位置検知を行い、その情報を基にした連動装置や閉そく装置、ATS/ATC によって列車の安全な運転を支えてきたために、多くの地上設備から成る重厚なシステムとなっている。CBTC では、車上に設備した位置検知システムの情報を基に列車制御を行うために、地上設備の大幅な削減をはかることができる。しかし、ここで大きな課題は、軌道回路と同等以上の信頼度を有する車上位位置検知システムをどのように構築するかということである。

本論文の対象となった研究（以下、本研究という）の目的は、信頼度の高い車上位位置検知システムを低コストで実現し、CBTC などの車上位位置検知システムに利用することを目的に、これまでタブーとされてきた GNSS を列車保安制御に利用する技術を確立することである。

1.3 本研究の概要

第 2 章では、「列車保安制御と列車位置検知」として、鉄道における列車保安制御の仕組みを概観し、列車保安制御装置の中で列車位置がどのように重要な情報であるかを説明する。この中で、既存の列車保安制御装置の中でも ATS-P 形やデジタル ATC など先端に位置する装置においては、軌道回路による位置情報のみでなく詳細な位置情報も保安制御に用いられている実態を説明する。さらに、今後導入が期待される車上位主体型の列車保安制御システムである無線式列車制御システムにおける列車位置検知システムをとりあげ、現状と課題について整理し、GNSS との関係性を説明する。

第 3 章では、「鉄道における GNSS 利用の現状と課題」として、GNSS に対する基本的な原理と誤差要因について触れ、本格運用を前にした準天頂衛星が稼動した際の精

度向上効果について紹介する。さらに、鉄道における GNSS 利用の現状について実例を挙げてサーベイする。この中で、情報提供サービスや安全性向上といった分野には幅広く導入されている一方、列車保安制御に関しては安全性に対する懸念から導入が進んでいない実態とその主たる要因について紹介している。

第 4 章は、本研究の詳細について述べる章であり、「列車保安制御システムへの GNSS 利用」として、GNSS の動作原理と誤差要因を整理する。さらに、列車保安制御に利用するために GNSS がもたらす位置情報の誤差をフィルタリングし、位置情報として利用できるか否かを判定する手法とその効果について、実車試験による豊富なデータを基に説明する。その結果、既存の車両の速度発電機パルスの積算による位置検知を主体としながらも、フィルタリング結果を踏まえた GNSS からの位置情報を利用することで、地方交通線などの列車に対しても車上主体型の列車保安制御システム導入が可能であることを説明する。

第 5 章では、**第 4 章**で明らかにした「速度発電機パルスの積算による位置検知を主体として GNSS で補完する」ハイブリッド手法のケーススタディとして、地方交通線の列車保安制御システムに組み込んだシステム事例を紹介し、その実車試験の結果について報告する。さらに、提案システムが既存のシステムと比較し、機能的にも経済的にも優れていることを主張する。

第 6 章では、「結論」として、本研究の成果をまとめるとともに、各章で得られた結論を整理する。併せて、今後の課題としてさらに多くの列車位置検知手段とのハイブリッドの可能性等について触れる。

第2章 列車保安制御と列車位置検知

2.1 はじめに

列車保安制御システムは、信号システムとも呼ばれ、今日の列車運転の安全を担っている。既存の列車保安制御システムの要素機能は、まず、列車の追突を防止する列車間隔制御と単線区間において列車同士の衝突を防止する運転方向の制御があり、閉そく装置と呼ばれる。さらに、駅構内では網状に接続された線路上を列車が目的とするところまで安全に運転できるように制御する連動装置がある。連動装置は、列車に対する進路上に他の列車が無いことを確認し、転てつ機を所定の位置に制御し、そして他の列車による側面衝突を防止するために他の列車進路を排他制御して該当する信号機に進行信号を点灯させる装置である。本章ではこれら既存の列車保安制御装置の要素技術について紹介するとともに、その中で、軌道回路による列車位置検知が重要な役割を果たしていることを明らかにする。さらに、今後導入が期待される車上主体型の列車保安制御システムである無線式列車制御システムにおける列車位置検知システムをとりあげ、現状と課題について整理して、GNSS との関係性を説明する。

2.2 既存の列車制御システムと列車保安制御システム

既存の列車制御システムは、現場に配置された連動装置や閉そく装置および運転士の誤りに対しても安全を守る ATS (Automatic Train Stop) や ATC (Automatic Train Control) システムがあり、連動装置は CTC (Centralized Traffic Control) 装置を介して、指令を司るセンターの運行管理システムに接続されている (図 2-1)。保安制御の基本は、全て現場に配置された装置によって行われ、現場の基本機能は、閉そくと連動である。両機能の使命は、車両相互の衝突や追突といった重大事故の回避であった。そしてその原理は、列車の在線する区間には入れないし、いったん設定された進路上には他の列車の進路を設定させないことで、列車を他の車両との接触をなくするという排他制御を基本に構築されてきた。連動装置や閉そく装置の仕組みの中には、有史以来の事故を経て学んだ苦い教訓の中で培われた技術が蓄積されている。信号保安が技術進歩の中で発展してきた過程が、信号システムの現状、すなわち、「閉そくや連動といった機能が、ボトムアップ的にレベルアップし、精緻で複雑なシステムへと発展してきた」ことを意味している。そして、これら排他制御の基本となるのが軌道回路によって検知された列車位置情報であった。

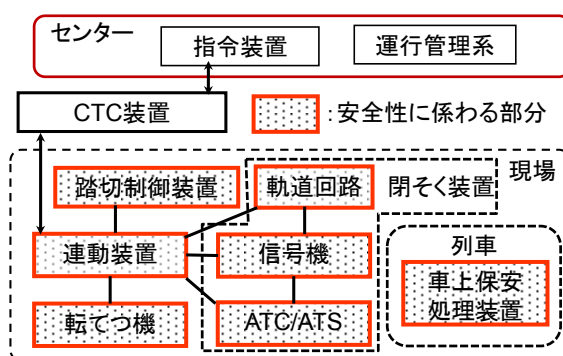


図 2-1 既存列車制御システムの構成例

2.2.1 閉そく装置

閉そくにおいては、軌道回路という車両センサ（列車位置検知装置）が 1 閉そく 1 列車という排他制御を実現する上で大きな役割を果たした。軌道回路を基に、自動信号という堅固な保安システムが構築され、色灯信号機により安全な運転を運転士に伝達していた。しかし、地上信号機による保安制御は、信号冒進というヒューマンエラーによる事故を防止できなかった。このため国鉄は、1966 年に ATS を全線区に整備した。国鉄が開発した ATS は、赤信号であることを運転士に伝え警報を与える車内警報装置を発展させたもので、警報後 5 秒経っても確認扱いをしなければ非常ブレーキを作動させる ATS-S 形であったため、確認扱い後の失念等ヒューマンエラーによる重大事故を引き起こした。経験する中で、人間を介さずに直接速度信号を与えブレーキ制御を行なう ATC を導入することにより人間の過誤による事故を封印した。一方、車種によるブレーキ性能の差が解消できる ATS-P 形の制御概念が考案された。また、ATC においても乗り心地の改善と効率の見地から一段ブレーキパターンが登場した。その ATC の究極の姿としてデジタル電文により、前方車両が在線する閉そくを伝達し、ブレーキ照査パターンを生成するデジタル ATC へと発展した。ここまでの技術進歩は、地上の軌道回路で車両位置を検出し、その位置関係から定まる制御情報を生成して車上に伝達するという共通の形態でまとめられる。これらを司る論理部は、沿線もしくは機器室に配置された。

強調したい点は、ATS-P 形やデジタル ATC といった先端に位置する装置においては、停止目標地点は、軌道回路を基にした地上装置によって付与されるものの、停止目標

地点までのブレーキ照査パターンが生成されると、車上の位置検知システムにより、走行地点に応じた許容限界速度が読み出され、走行速度との比較によってブレーキ作動の必要性を判断している点である。すなわち、より高度な制御のためには車上での位置検知システムが不可欠の存在となっている。

2.2.2 連動装置

連動装置は、連査と鎖錠という概念で駅構内の列車運転の保安を司ってきた。この連動装置における様々な鎖錠論理は、駅構内で展開される労働集約的作業（複数の作業員が取り扱う作業）の中で発生した不具合の対策として組込まれたものが多い。その結果、今日の連動装置は、信号扱い者がどのような操作をしても安全が守られるように構築されている。そして、この連動装置の根幹を支えているのが軌道回路による列車位置情報である。

2.2.3 踏切制御装置

閉そく装置と連動装置に並び在来線では、踏切制御装置も安全上重要な制御装置である。既存の踏切制御は、車両検知から踏切遮断までの処理は地上側で行ない、車両側は関与しなかった。遮断後に障害物が検知されるといった万一の事態には、特殊信号発光機等で危険を乗務員に知らせる等の方策が採られるが、間に合わず事故になったケースも多い。

また、地方鉄道の踏切には、踏みしめた落ち葉や雑草、あるいは錆による軌道短絡不良に起因する障害など厄介な問題がある。これらはいずれも制御の基本となる列車位置情報が正確に伝達されないことに起因しており、踏切制御においても列車位置が重要な役割を持っていることの証明でもある。同時に、地方鉄道では十分な保全要員を抱えられない問題がある。この解決のためには、既存の踏切制御とはまったく原理の異なる制御手法の確立が求められるが、この点については後章で述べる。

2.2.4 軌道回路

軌道（レール）を用いた列車位置検知装置が軌道回路である。列車を検知するための電流を軌道回路電流と呼び、直流電流や交流電流が用いられ、それぞれ、直流軌道回路、交流軌道回路と呼ばれる。交流軌道回路はさらに、周波数により商用周波軌道回路、分周軌道回路（商用周波数の半分の周波数）、さらに高周波軌道回路などに区分

される。高周波軌道回路とはいえ、鉄製のレールは、誘導成分(L成分)が大きいため、高周波電流を通しにくく数キロ Hz 程度であり AF(Audio Frequency)軌道回路とも呼ばれる。

軌道回路は常時通電しておき、列車が進入しレールが車輪で短絡されると受信部に流れる電流が減少し、軌道リレーが OFF(復旧)することで列車進入を検知する閉回路型軌道回路(図 2-2)がある。このほか、通常は閉回路が構成されず、列車進入によって左右のレールが車輪によって接続されたときに電流が流れ、軌道リレーが ON(動作)になることで列車進入を検知する開回路型軌道回路(図 2-3)がある。開回路型軌道回路は、電源断や配線断のときには列車が進入しても検知できない。一方、閉回路型軌道回路は、電源断や配線断のときには、軌道リレーへの電流が断たれ、列車ありと等価な動作をするためフェールセーフであるとして多用される。

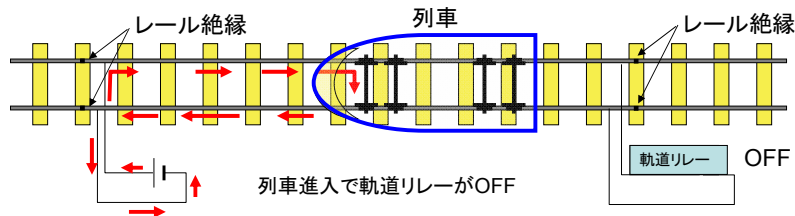


図 2-2 閉回路型軌道回路

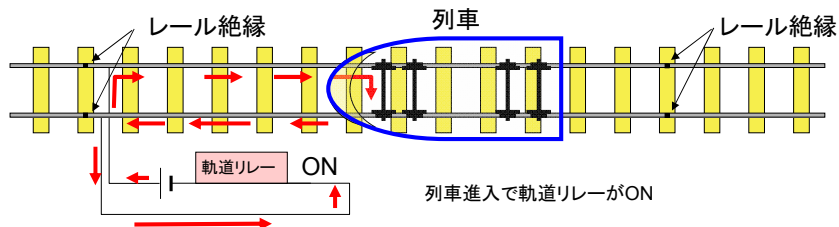


図 2-3 開回路型軌道回路

また、電化区間においてはモータを駆動した帰線電流がレールに流れる。帰線電流は軌道回路境界に挿入したレール絶縁を越えて変電所まで流れる必要がある。このため、電流と軌道回路電流を弁別するインピーダンスボンドが挿入される(図 2-4)。このほか、軌道回路には軌道リレーのほかに軌道信号灯トランスや軌道抵抗子などの機器も必要になる。このように、既存列車保安制御装置に用いられる軌道回路は重要な位置情報を提供するものの保守性の問題や離散的な位置情報でしかないなどの欠点を

有している。

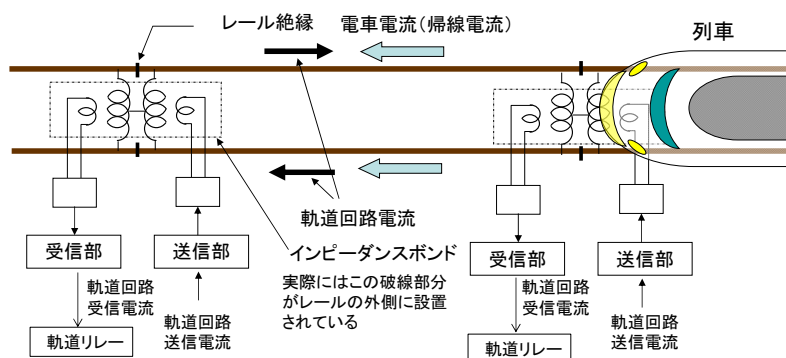


図 2-4 電化区間の軌道回路

2.3 無線式列車制御システムと GNSS

CARAT や ATACS の列車制御では、車上の位置検知システムで検出した位置情報が無線を介して地上の拠点制御装置に送信され、拠点制御装置からは安全に走行できる地点の限界が走行限界地点情報として車上装置に伝達される。車上装置は走行限界地点までのブレーキ照査パターンを生成し、車上の速度と比較することでブレーキ作動の必要性を判断する。ブレーキ照査パターン生成後の処理概念は、ATS-P 形やデジタル ATC と基本的に変わらない。なお、地上対車上の無線交信は、ほぼ 1 秒周期で行われている。

このため、車上の位置検知システムの精度が列車の安全走行にはきわめて重要な意味を持つ。車上の位置は、絶対位置に速度発電機のパルスの積算による相対位置を加算することによって算出している。絶対位置は、地上子（トランスポンダ）の電文を受信するなどの方法で取得する。問題は速度発電機を使用しているため、車輪の滑走や空転がそのまま誤差になることである。これらの誤差に対しては、列車長を誤差分だけ伸ばすことで安全性を確保しているが、滑走ができるかぎり発生しないようにブレーキ力を弱めた車輪につけたり、空転が発生しないよう動力軸についた車輪は使わないようにしたりするなどの工夫が払われている。また、同時に二つの車輪が空転や滑走を起こす確率は低いことを利用し、速度発電機を複数個装着し、相互比較する方法がとられる。

しかし、ディーゼル車両が 1 両で運転されるような地方鉄道においては、これら施策の採用には限界があり、より簡易で有効な補正手段の採用が望まれている。GNSS は、

受信機単体で位置，速度，時刻の3つの情報を0.1秒程度の周期で取得できる．また，速度発電機による位置検知のように車両に対して特別な改造を必要としないことから，速度発電機に代わる有効な位置検知センサである．

2.4 まとめ

本章では，既存の列車保安制御システムの要素としてまず，閉そく装置と連動装置という要素技術について紹介するとともに，その中で，軌道回路による列車位置検知が重要な役割を果たしていることを明らかにした．併せて，踏切制御についても紹介し，地方鉄道では，落ち葉などの踏みしめ等による列車検知の不備が問題となっている状況を説明した．さらに，今後導入が期待される無線式列車制御システムの位置検知システムが，車上の速度発電機のパルス数積算を利用している現状を説明した．この方式は，車両数の多い列車が走行する線区では有効であるが，編成車両数の少ない地方鉄道に導入するには，車輪の滑走空転などの誤差要因に対する効果的かつ低コストの対応策が求められることも示した．この点でGNSSの測位情報が列車保安制御に利用できるようになることの重要性を指摘した．

第3章 鉄道における GNSS 利用の現状と課題

3.1 はじめに

本章では、GNSS に対する基本的な原理と誤差要因について触れ、本格運用を前にした準天頂衛星が稼動した際の精度向上効果について紹介する。さらに、鉄道における GNSS 利用の現状について実例を挙げてサーベイする。この中で、情報提供サービスや安全性向上といった分野には幅広く導入されている一方、列車保安制御に関しては安全性に対する懸念から導入が進んでいない実態とその主たる要因についても紹介している。本章は本研究の中心をなす第4章の導入でもある。

3.2 GNSS の動作原理から起因する誤差要因と対処方法

GNSS は、米国の GPS (Global Positioning System : 全地球測位システム)、ロシアの GLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)、EU の Galileo、そして日本の準天頂衛星(QZSS : Quasi-Zenith Satellite System)など、各国が開発を進めており、世界共通の社会インフラとして期待されている。QZSS は、2018 年度末に 4 機体制での本格稼働が始まり、その後の増強が計画されている。各産業界では準天頂衛星を含めた GNSS による衛星測位技術を利用した応用システムの研究開発が進んでいる。

GNSS 測位技術を列車保安制御へ利用するには、列車保安制御に許容できる誤差を想定し、想定した測位誤差を超えた場合を測位異常と判定し、その際の測位情報を利用しないフィルタリング技術の導入が有効と考える。したがって、測位異常を確実に検出する技術の確立が必要不可欠である。そのためにまず GPS を例に測位誤差要因について検討する。

3.2.1 測位誤差要因

GPS 衛星は、高度約 2 万 km の 6 つの軌道に 4 機以上、計 24 機以上配置され、約 12 時間で地球を一周し、約 24 時間毎に同じ衛星配置になる (スペースセグメント)。この GPS 衛星は、地上の 5 つのモニター局により制御されている (コントロールセグメント)。GPS 受信機は、GPS 衛星からの電波を受信し、測位する (ユーザーセグメント)。GPS は、これら 3 つのセグメントで構成される (図 3-1)。

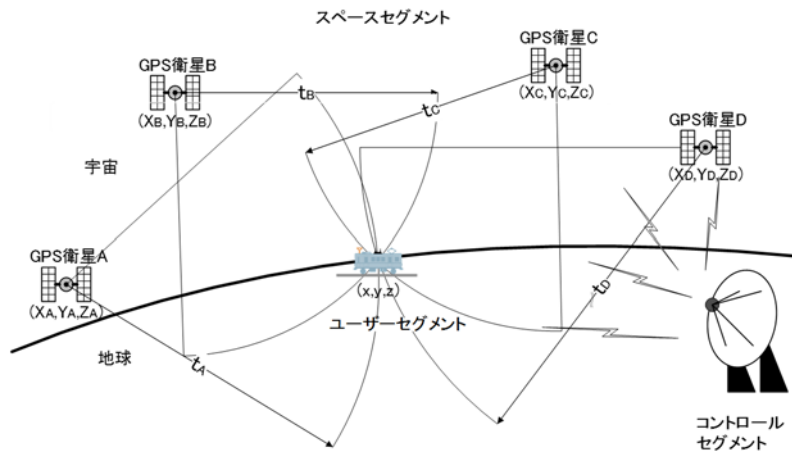


図 3-1 GPS の構成

GPS 衛星は、正確な原子時計を持ち、全衛星が同時刻に GPS 情報を送信する。この電波は、球面上に広がり 2 機の衛星からの電波の交錯は円になり、これに 3 機目の衛星からの球面上に広がった電波が交錯すると、円と球面は、2 点で交わる。この 2 点のうち 1 点は、地上から離れた位置にあるので、幾何学的には、位置が算出できる。しかし、GPS 衛星と GPS 受信機の時刻が同期していないので、4 機目の衛星が必要になる。GPS 受信機の位置 x, y, z を求めるには、GPS 受信機の時計誤差を δ 、GPS 衛星の位置を X_i, Y_i, Z_i 、電波の伝搬速度を c 、GPS 衛星から GPS 受信機までの電波到達時間 t_i とすると

$$(c(t_i - \delta))^2 = (X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2 + (Z_i - z)^2 \quad (3-1)$$

となる。この式を 4 機の GPS 衛星に適用すると 4 つの式ができ、この連立方程式を解けば GPS 受信機の位置 x, y, z を算出できる。4 機の GPS 衛星を使用して得られた GPS 受信機の位置は、GPS 衛星の位置が偏ると誤差が大きくなる。以上のことから、測位誤差の要因は、次に述べる GPS 衛星と GPS 受信機の測定距離誤差と GPS 衛星配置による誤差に大別される。

3.2.2 GPS 衛星と GPS 受信機の測定距離誤差要因

Global Positioning System Theory and Applications [7]からの誤差要因の一例を表 3-1 に示す。

表 3-1 GPS 衛星と GPS 受信機の測定距離誤差

番号	誤差要因	単独測位誤差の大きさ
		Global Positioning System: Theory and Applications
1	衛星時計誤差	2.1m
2	衛星軌道誤差	2.1m
3	受信機雑音	0.5m
4	電離層遅延	4.0m
5	大気圏遅延	0.7m
6	マルチパス	1.4m

(1) 衛星時計誤差

衛星の時計は、高精度なセシウム原子時計またはルビジウム原子時計を使用しているにもかかわらず、1日に数 m の測位誤差が発生することから、衛星の時計を補正するための情報が航法メッセージに含まれている。しかし、航法メッセージで補正しきれない誤差が発生し、これを衛星時計誤差という。

(2) 衛星軌道誤差

GPS 受信機は、GPS 衛星が送信する測距信号を用いて衛星との距離を測定するので、衛星の位置情報に誤差があると、測位誤差が発生することから、GPS 衛星の軌道を正確に予測した情報が航法メッセージに含まれている。しかし、航法メッセージで補正しきれない誤差が発生し、これを衛星軌道誤差という。

(3) 受信機雑音

受信機雑音は、GPS 受信機自体の測位誤差を示す。従来は、1チャンネルの受信機で順次衛星を切り替えて測定を行っていたために、衛星や受信機の移動などの測定条件の変動により誤差を発生していたが、現在は、多チャンネルの受信機で、1衛星からの電波を1受信機で受信し、デジタル処理でチャンネル間の誤差を低減している。このため、現在では、受信機内部のクロックジッタなどの熱雑音がほとんどである。

(4) 電離層遅延

GPS 衛星からの電波は、電離層の屈折率が電子密度と電波の周波数によって変化することにより、進行速度が遅くなる。電離層の状態は、太陽活動、季節、時刻、

場所によって変化するので、誤差が発生する。

(5) 大気圏遅延

大気の屈折率が 1 よりやや大きい値 (1.0003 程度) であるために生じる遅延で、大気密度が濃い地表付近で大きくなる。

(6) マルチパス

マルチパスとは、GPS 衛星からの直接波が反射もしくは回折した電波を受信する現象である。GPS 衛星からの電波が反射や回折すると、直接波よりも経路が長くなる。また、GPS 受信機の受信波形を歪ませることとなり、誤差が発生する。

3.2.3 測位誤差の軽減

現在、航空機が GPS の測位情報を利用して安全に航行できるように、静止衛星を利用して GPS の補正データを送信している。日本では、国土交通省航空局が運輸多目的衛星用航法補強システム MSAS(MTSAT-based satellite augmentation system)が、2007 年 9 月 27 日に運用開始され、衛星時計補正、衛星軌道補正、電離層遅延情報が常時送信されている。この情報を用いれば、衛星時計誤差、衛星軌道誤差、電離層遅延誤差を軽減することが可能である。

大気圏遅延は、あらかじめ使用すべき補正モデル式が定められており、緯度と高度の関数として補正量を算出して誤差を軽減することが可能である。

3.2.4 衛星配置による測位誤差

GPS 衛星は、上空に均等に分散するように配置されているが、時間帯によって偏った衛星配置や、低高度の衛星が障害物に隠れて偏った衛星配置となることがある。仰角 20 度で確認できる衛星数の例を図 3-2 に示す。1 日 24 時間の内、衛星数が 4 機しか確認できない時間帯があることが分かる。GPS 受信機の測位には、最低 4 機の GPS 衛星からの電波を受信している必要があり、確認できる衛星数が少なくなれば、周囲状況で遮断が起きたときに 4 機以上の衛星からの電波を受信できなくなってしまう。

GPS 衛星の配置は、23 時間 54 分が 1 周期なので、毎日同じ時刻に同じ衛星配置とならないことが不確実要素となる。

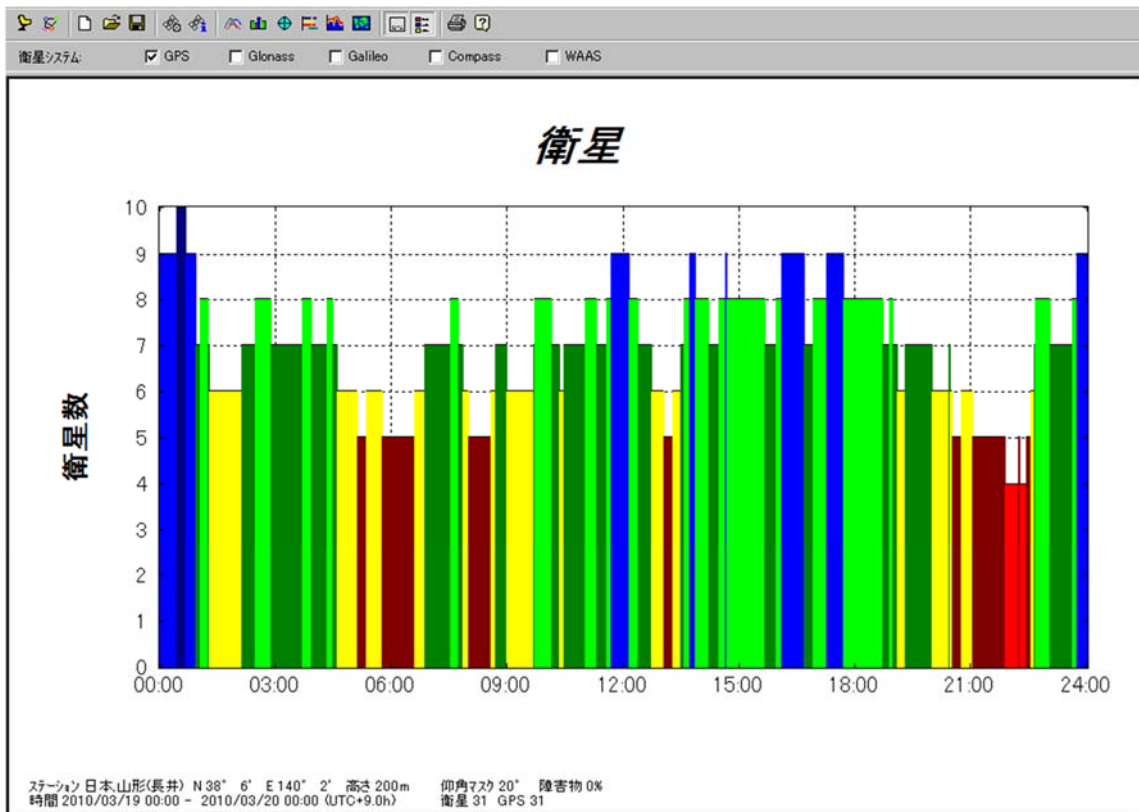


図 3-2 1日で確認できる GPS 衛星数（仰角マスク 20 度）

3.3 準天頂衛星の本格運用を迎えた GNSS の現状

2011 年 9 月の閣議において、2017 年度末までに準天頂衛星（QZSS）の 4 機体制を整備し、将来的には 7 機体制を目指すことを決定した（図 1）。その QZSS は、GPS を補完し、さらに性能向上を図ることを意図している。したがって、周波数をはじめ仕様の多くを GPS に準じて設計している。GPS は現在 31 機体制で運用しているが、全地球領域をカバーするため、我が国の上空にあるのはせいぜい 6 機程度である。しかもその多くが、低い仰角（水平線から衛星までの角度）を周回するため、ビルや林などの影になったり反射によるマルチパスが生じたりして精度が悪化する。GPS の測位精度向上には、さらにと数機欲しい。準天頂衛星 QZSS が 4 機体制になると常時仰角の高い天頂付近に 1 機は存在するようになるので、その効果は大きい。そればかりではない。わが国が独自に利用できるようになるため、測位精度の大幅向上が期待できる。

このような特長を持つ準天頂衛星時代を見越し、各産業界でその有効利用に向けた検

討が進んでいる。鉄道においても、これまで GPS を利用したシステムは数多く開発されてきたが、新たに、準天頂衛星時代に向けた応用検討に取り組むことが望まれている。

その際問題になるのが GNSS による位置情報が有する誤差である。GNSS の電波は、地球を取り巻く電離層を通過して届くが、電波は電離層の影響を受け到達時間が遅れることがあり、それが GNSS 衛星との距離誤差となる。一方、電離層通過時の遅延は周波数に依存することが知られている。QZSS では、周波数の異なる 2 つの電波を送信し、電離層遅延の度合いを計測して誤差をキャンセルする。

このような対策を施した QZSS の下での測位精度は、現状を大幅に上回る。まず DGPS(Differential GPS)方式により、「サブメートル級測位補強サービス」が得られる。DGPS 方式は、正確な位置座標をもつ基準点で観測した測位データから測位誤差を算出し、広域送信するもので、この情報を用いて水平方向誤差を 1 メートル（信頼限界 95%）程度にできる。さらに、それ以上の精度を誇る「センチメートル級測位補強サービス」も得られる。その仕組みは、電子基準点と呼ばれる箇所で把握した国土地理院のデータを利用する。そこで、現在位置をセンチメートル級（移動体においても水平誤差精度 12 センチメートル（信頼限界 95%）で正確に求めるための情報を準天頂衛星から送信するのである。その高い精度は、今日の GPS の概念を大きく打破し、GNSS の可能性を拡大する。このように準天頂衛星が本格運用される時代に突入する。GNSS の有効利用について真剣に検討する時期でもある。

3.4 鉄道における GNSS 利用の事例

鉄道における GNSS の利用は、東日本旅客鉄道株式会社の BRT（Bus Rapid Transit：バス高速輸送）ロケーションサービス [8]として、車載の GPS 受信機から得た車両の現在位置情報を地上データベース GIS(Geographic Information System)にマッチングし、ダイヤ情報と比較することで列車の位置や遅れ時間をリアルタイムに判定し、旅客サービス性能向上を意図したシステムを開発し、気仙沼線・大船渡線の BRT で利用している。また、名古屋鉄道株式会社では、司令所や駅係員が列車の在線情報を確認するために、列車の両運転台に設置された在線検知車載器が GPS から得た位置情報、列車番号、速発パルスから算出した積算走行距離、方位等を、携帯通信回線を通して地上設備に送信するシステムを「列車在線表示システム」 [9]として開発している。また、日本貨物鉄道株式会社では、GPS の位置情報から貨物列車の位置をリアルタイムで把

握することにより、運転情報伝達システム(ACTIS)と連携して運転上必要な情報を列車に送信し乗務員への注意を喚起するシステム PRANETS(Positioning system for RAIL NETwork and Safety operating) [10][11]を開発している。このほか、保全作業の安全性向上では、列車見張員を支援するための列車接近警報装置として、GPS による位置情報を用い、地上作業員が持つ作業員用端末に列車の接近を知らせる仕組みを東日本旅客鉄道株式会社 [12]、西日本旅客鉄道株式会社 [13]、等で実用化している。この中で、西日本旅客鉄道株式会社のシステムでは、GPS 受信機は作業員用端末のみが利用し、列車の位置情報は運行監理装置からの列車情報を用いている。これに対し東日本旅客鉄道株式会社のシステムでは、車両にも GPS 受信機を搭載し、GPS の位置情報と運行管理装置の列車情報を照合することで、車両の位置情報を得ている。

このほか、これまでも多くのシステムが開発され、鉄道の安定輸送や品質向上に寄与している。GNSS の持つ利点を利用し、低コストかつ高機能の列車制御システムを実現できないかという期待は大きい。これまでも、北海道旅客鉄道株式会社が開発を手掛けた DMV(Dual Mode Vehicle)でのチャレンジはなされた。しかし、GPS がもたらす測位情報は、確定値ではなく変動する誤差を含んだ値であるということや、米国で開発された GPS であり測位アルゴリズムがブラックボックスであるほか、恣意的な「誤差付加や使用停止が勝手に行われる」などの懸念があるといったことから、国内で鉄道の保安制御への導入実績はない。

一方海外においては、中国の青蔵鉄道で GPS と無線による列車の間隔制御を行っている。ただし、ここでは、海拔が高く保守が困難という事情に配慮して導入されたもので、GPS の誤差を大きく見込んでいるほか、列車の時間間隔を確保することで安全性に配慮しており、通常の線区に導入するには別途慎重な検討が必要である [14]。このほか、2017 年 3 月に開催された第 2 回日欧 GNSS 官民ラウンドテーブルにおいて、欧州でも GNSS に依拠した地方交通線対応のシステムが開発中であるとの報告 [15]がなされるなど列車の保安制御への GNSS 利用技術の関心は高まっており、検討が進んでいる。

3.5 列車保安制御に利用する上での課題

これまで、GNSS が列車保安制御に対し疑問視する立場からの理由は次のようなものであった。

- ① GNSS は、恣意的な誤差付加、使用停止の懸念

- ② 測位情報は、連続受信できるわけではない
- ③ GNSS 受信機の測位アルゴリズムがブラックボックス
- ④ 測位情報は、確定値ではなく誤差を含む

3.5.1 GNSS は、恣意的な誤差付加，使用停止の懸念

GPS は、GNSS の中で最も早く実用化された測位衛星で軍事と民間の共用システムである。しかし、民間用の信号には SA(Selective Availability)と呼ばれる操作によって測位誤差を調整できる機能を持ち、2000 年 5 月 1 日まではこれを使用していたために軍事用としてのイメージが強かった。また、当時 GNSS は、GPS が唯一の存在であった。ここから、GNSS に安全を委ねて問題が無いであろうかという疑問が生じた。

3.5.2 測位情報は、連続受信できるわけではない

GNSS での測位には、4 つ以上の GNSS 衛星から発射される電波を受信する必要がある。しかし、鉄道沿線全てにおいて電波状況が良いわけでは無い。GPS しかない時代には、4 機の衛星しか頭上に上がっていない時間帯が存在し、そのうち 1 つでも遮蔽されてしまえば測位できなくなった。測位に使用できる衛星の数と配置は、時々刻々と変化するので、連続受信できる保証が無い。この毎日同じ場所で同じ測位結果が得られないことが、確実な制御を求める列車保安制御にとっての懸念とされた。

3.5.3 GNSS 受信機の測位アルゴリズムがブラックボックス

GNSS 受信機メーカーは、測位性能向上のために基本アルゴリズムに加えて独自のアルゴリズムを加えている。例えば GNSS 衛星からの電波が途絶えたときに、GNSS 受信機内の処理で途絶えていないような出力を行うものがある。このように GNSS 受信機内部で測位情報を操作しえる状況である一方、そのアルゴリズムはブラックボックスであることが、列車保安制御にふさわしいであろうかという懸念がある。

3.5.4 測位情報は、確定値ではなく誤差を含む

GNSS 受信機の出力は誤差を含んでおり、その誤差がどの程度なのかを GNSS 受信機単体で知ることができない。GNSS 受信機のスペックに記載されている誤差の値は 95%の確率であり、残り 5%は規定できない。このことが列車保安制御にとって不安にならないかという懸念がある。

3.6 まとめ

本章では、「鉄道における GNSS 利用の現状と課題」と題して、はじめに GNSS に対する基本的な原理と誤差要因について触れ、本格運用を前にした準天頂衛星が稼動した際の精度向上効果について紹介した。

さらに、鉄道における GNSS 利用の現状について実例を挙げてサーベイした。この中で、情報提供サービスや安全性向上といった分野には幅広く導入されている実態がある一方、列車保安制御に関しては、安全性に対する懸念から導入が進んでいない実態とその主たる要因についても紹介した。結論として、**GNSS 測位技術を列車保安制御へ利用するには、列車保安制御に許容できる誤差を想定し、想定した測位誤差を超えた場合を測位異常と判定し、その際の測位情報を利用しないフィルタリング技術の導入が有効との考え方を示した。**本章は本研究の中心をなす第 4 章の導入でもある。

第4章 列車保安制御システムへの GNSS 利用

4.1 はじめに

第3章で導いた「GNSS 測位技術を列車保安制御へ利用するには、列車保安制御に許容できる誤差を想定し、想定した測位誤差を超えた場合を測位異常と判定し、その際の測位情報を利用しないフィルタリング技術の導入が有効」との考え方を推し進め、各種フィルタリング手法を提案し、その有効性を吟味する。たとえば、車上に間隔を隔てて配置した2つのアンテナによってもたらされた測位情報がアンテナ離隔内にあるかといった相互比較や、GNSS 測位情報を基にしたトラッキング軌跡と線路地図情報との合理性判定、それまでの情報シーケンス内容との連続性検定、他のセンサ情報との比較による合理性判定、GNSS 利用可能区間の定義といった各種フィルタリング機能について提案する。これらのフィルタリング手法については、長期にわたる実車試験によってその有効性についても評価しているので、その結果についても報告する。

さらに、GNSS から別途独立に得られる速度情報について他のセンサ系との比較により精度を評価した。GNSS の衛星数が少なく測距情報の精度が低下した場合でも速度情報は精度の高い値が得られることが確認できた。結論として、GNSS から得られる速度情報も重層的に利用することで、さらに安定した車上位位置検知が実現するという知見を述べる。長期にわたる実車試験を経て提案手法の動作状態を確認しており、GNSS から独立して得られる速度情報の列車保安制御への有効利用については、筆者が初めて明らかにした。

GNSS からは、位置情報と速度情報の他に高精度な時刻情報を得ることができる。この高精度な時刻情報を利用したシステムの時刻同期についても提案する。

なお、列車保安制御における測位の精度評価としては、2008年8月発行の *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard* [16] で規定された GPS 仕様を基に 13m 以内としている。列車保安制御としては、精度がデータとして与えられると、その値に応じ制御時における列車間の間隔的余裕等に反映し、システム的に確実な安全性を保障することになる。

第4章において、これらの成果について詳しく説明する。なお、本研究により得られた成果は、2017年4月末に制定された「鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン」(第1.0版) 検討時の貴重な資料として参照され、最も安全性が要求される利活用分野の水準(レベル4) に対する要求条件の中に反映された。研究の有効性と産業界への貢献を示すものでもある。

4.2 静的な検討

4.2.1 測位誤差の軽減

衛星時計補正，衛星軌道補正，電離層遅延の測位誤差は，MSAS を用いる．電離層遅延については，2 周波受信機を利用するの誤差軽減もできるが，コストを考慮し選定しなかった．

大気圏遅延は，あらかじめ使用すべき補正モデル式が定められているが GNSS 受信機の性能に頼ることとなる．また，GNSS 受信機の雑音も同様である．GNSS 受信機は，スペックにランクがあり，本研究で用いたサブメートル級であれば各メーカーで大きな差は無い．

マルチパスは，沿線の電波環境を考慮し，電波環境の良いところでのみ利用する．

4.2.2 衛星配置による測位誤差

GPS 衛星については，3.2.4 節で述べたが，現在では GPS 衛星の他にロシアの GLONASS，欧州の Galileo，日本の QZSS の衛星が配置されており，これらを含めて測位することで状況が良くなってきている．特に QZSS は，天頂付近に絶えず 1 機配置されることになるので，4 機以上の衛星からの電波を良い配置で受けられる確率が高くなってきた．Galileo と QZSS については，GNSS 受信機の対応が遅れているが，今後はこれら全てに対応するマルチ GNSS 受信機が主流になるであろう．これにより，低コストでも衛星配置の課題は改善されていくこととなる．

4.3 列車保安制御利用上の懸念に対する見解

これまで GNSS は，列車保安制御に利用できないとされてきた．第 3 章でそれらの論拠について紹介したが，ここではこれらの論拠に対する見解を述べる．

- ① GNSS は，恣意的な誤差付加，使用停止の懸念
- ② 測位情報は，連続受信できるわけではない
- ③ GNSS 受信機の測位アルゴリズムがブラックボックス
- ④ 測位情報は，確定値ではなく誤差を含む

4.3.1 GNSS は、恣意的な誤差付加、使用停止の懸念

米国は、湾岸戦争時に恣意的な操作を施したことが知られており、この恣意的操作が GLONASS や Galileo などの GNSS 開発の理由の一つともなったといわれる。しかし、GPS が単独であった当時と、多様な GNSS が利用できるようになった今日とでは、状況は大きく変わった。今日米国は、GPS の優位性を保つために、衛星から恣意的な誤差を付加できる機能そのものを外している。

4.3.2 測位情報は、連続受信できるわけではない

この問題は、衛星からの電波を利用する以上いたしかたない。しかし、カーナビゲーションなどではジャイロや車速パルス検出装置を用いた「推測航法」または「自律航法」でスムーズに対応している。一方、鉄道の世界では、ATS-P 形やデジタル ATC において、GNSS 情報を用いず、速度発電機出力をもとに走行位置を検知して保安制御を行っている事例がある。速度発電機を使う上で車輪の滑走や空転に伴う誤差の対策は必須であるが、すでに実績はある。これらの技術を選択して併用するなら、トンネルの中まで GNSS による測位を期待する必要はない。地方鉄道のような単編成車両では、滑走・空転対策は取りにくい。しかし、限定された区間内で GNSS 情報が途絶えることがあっても保安機能を維持する技術はそう困難なことではない。

4.3.3 GNSS 受信機の測位アルゴリズムがブラックボックス

「GNSS 受信機の測位アルゴリズムがブラックボックス」は、これまで、保安制御に GNSS を利用することを忌避してきた大きな根拠の一つである。この点について次に考察する。

GNSS はセンサである。むしろフェールセーフではない。しかしこれまでに、保安制御の分野とはいえフェールセーフではない素子やセンサを使った経験はある。たとえば、今日、信号制御にフェールセーフコンピュータを疑うことなしに使っている。しかし、その要素である MPU チップも勿論フェールセーフではない。故障を検知する巧みな診断機構を組み込み、故障時には安全側に遷移させているに過ぎない。

MPU というハードチップもその中身の回路はソフトウェアで作成されている。もちろん、ブラックボックスである。そのプログラムに潜んでいたバグに対しては、フェールセーフ化のために組み込んだ診断機構も無力だ。フェールセーフコンピュータを開発していた当時、Intel の高機能 MPU チップ Pentium が、特殊な除算をすると誤った

値を出すというバグ(Pentium FDIV バグ)が発表されたことがある。当時筆者らが取った方針は「広く普及し、産業界で実績のあるチップを使うことと、特殊な使い方はできるだけ回避する」ということであった。あまたの分野で使われ実績を積んだものは信じてもいいという判断である。

MPU以外にも保安制御に用いている様々なシステムにブラックボックスのエレメントは多く使われている。OSもそうであるし、機能素子の大半はブラックボックスである。GNSSのみにブラックボックスという烙印を押してその使用を否定することの妥当性は見出せない。

ホワイトボックス化して新たにソフトウェアを開発すべきという見解にも問題がある。開発したソフトウェアがバグ無く動くかどうかの検証にはコストを含め相当の労力が要る。ブラックボックスとはいえ市場に出回っているGNSS関連製品は、市場での実績により一定の品質が保証されている。しかも、異種冗長に依る照合という手もある。現実的な選択としてブラックボックスとはいえ実績のある市販製品と、仕組みはわかっているが実績のない製品とのいずれを保安制御システムに採用すべきかという問題に置換すれば、「アルゴリズムがブラックボックスであることの問題性」そのものが存在しないと考える。

4.3.4 測位情報は、確定値ではなく誤差を含む

誤差の要因には、衛星軌道誤差、衛星クロック誤差、電離層遅延による誤差、対流圏遅延による誤差、マルチパスによる誤差、受信機そのものの測定誤差が考えられ、時間や衛星の位置により値も変化する。準天頂衛星は、これらを克服するための技術として「サブメートル級測位補強サービス」や「センチメートル級測位補強サービス」を提供する。センチメートル級測位補強サービスの場合、移動体でも精度が12センチメートルという驚くべき精度である。しかし、問題は、この値が95%の確率でこの範囲に入るというだけで、残りの5%がどれほどであるか不定なことである。

安全上は残りの5%を重視すべきで、これに対応するのが完全性(インテグリティ)という性能指標である。航空航法用途では99.99999%の信頼限界を保護レベルとしている。この場合、測位誤差の99.99999%はこの範囲内に入るという数値で、実質的には誤差の上限とみなせる。ただ、航空航法用途では、過去に観測した異常値はすべて考慮しており、故障や伝搬異常により稀に生じた大きな誤差も含まれるので大きめの値となっている [17]。

3次元の移動自由度をもつ航空機は、この保護レベルを間隔制御のよりどころとしている。一方、列車制御の場合、駅間での移動は1次元に限定された中での間隔制御である。保護レベルの概念を、列車制御に应用する場合、航空機との相違に留意しつつ誤差をフィルタリングして、精度の高い測定値を提供する工夫が考えられる。たとえば、これまでの計測値情報の時系列的推移や、他のセンサ類によってもたらされる情報から大幅に乖離している場合、インテグリティが低下したとして情報を棄却してもそれまでの計測情報を利用することで保安制御機能は維持できる。このことを踏まえた上で、衛星からもたらされる保護情報を上手に利用する方法を検討する必要がある。この考え方に基づく具体的なフィルタリング方法については4.5章で詳述する。

4.4 GNSSの性能確認

GNSSの性能確認は、GPSを用いてビルの屋上に設置しての静的環境と、列車に設置しての動的環境で行った。GPSの測位誤差は、2001年10月に米軍が発表したGlobal Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard [18]で13m(95%：全世界平均)と規定されている。この規定が発表されてから10年が経過し、GPS衛星、モニター局、GPS受信機それぞれが進歩してきた。本試験で使用したGPS受信機は、測位誤差0.6m：95%MSAS(MTSAT Satellite-based Augmentation System)使用時の仕様のものであった。

4.4.1 静的環境での性能確認試験

(1) 静的環境での試験条件

静的環境での性能確認試験は、以下の条件で2010年6月1日～2011年3月10日までの9ヶ月間行った。試験場所は、GPSの測位精度が落ちる高緯度(北緯43度)で、降雪のある札幌市のビルの屋上とした。GPSアンテナ周囲には、ビルや高圧線などがあり、マルチパスが適度に発生する。また、アンテナ近傍に障害物があり電波遮断が起きるようにして、実運用に近い環境とした。

使用した GPS 受信機 (Hemisphere 社 Crescent OEM Board) は, MSAS 使用, マスク角 5 度, 測位周期 50 秒に設定したもの 2 台を使用し, アンテナ間を 7.2m 離して固定設置した. この試験環境では, 平均衛星取得数 6, 平均水平精度低下率 HDOP(Horizontal Dilution of Precision)1.2 が得られている (図 4-1 から図 4-5).

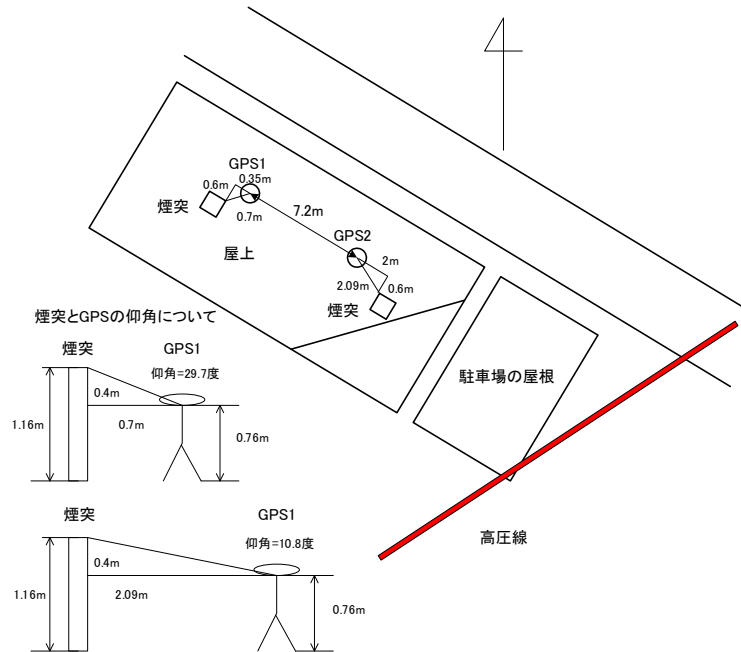


図 4-1 GPS 受信機の配置



図 4-2 北から東



図 4-3 東から南



図 4-4 南から西



図 4-5 西から北

(2) 静的環境での試験結果

固定点での測位結果を図 4-6 から図 4-9 に示す．図 4-6 は、x 軸に東西、y 軸に南北、z 軸に度数を取ったもので、円錐状に分布していることがわかる．図 4-7 は、x 軸に東西、y 軸に南北をとり、1 点以上の測位誤差を表したものである．東西方向より南北方向の測位誤差が大きくなっているのは、札幌市が高緯度に位置しているためと考えられる．サンプル数は、977,967 点で最大誤差は、ほぼ真南に 8.9m であった．最大誤差が発生したのは、GPS 衛星が少なくなった時に低高度の GPS 衛星からの電波が近傍の煙突により遮断されたと考えられる．

列車の位置は、軌道の距離情報を記述した車上データベース（車上 DB）上の移動距離により検知する．この移動距離は、1 次元の情報であるため、GPS 受信機から得られる座標値である 2 次元情報を 1 次元情報に変換して使用する．このため、図 4-6 のデータを使用して東西方向、南北方向に分析すると図 4-8、図 4-9 となる．固定状態の GPS 受信機の測位誤差は、南北方向で最大 8.90m、東西方向で最大 5.79m であったが、測位結果の分布から標準偏差 $\sigma=0.246\text{m}$ 、平均値 $\mu=-0.03\text{m}$ （東西方向 図 4-8）、標準偏差 $\sigma=0.335\text{m}$ 、平均値 $\mu=-0.0005\text{m}$ （南北方向 図 4-9）の正規分布に従うデータが得られた． 2σ は、それぞれ 0.492m、0.670m であり、GPS 受信機のカタログ値 0.6m : 95% にほぼ等しい値となった．

以上の試験結果から安定した測位が期待できることがわかった．

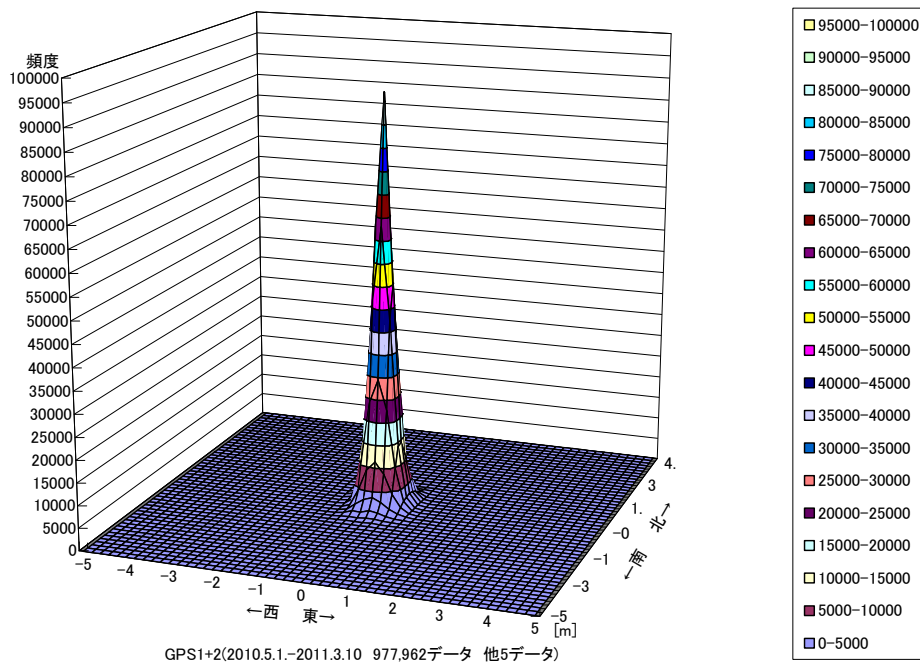


図 4-6 静的環境での測位誤差 (3D)

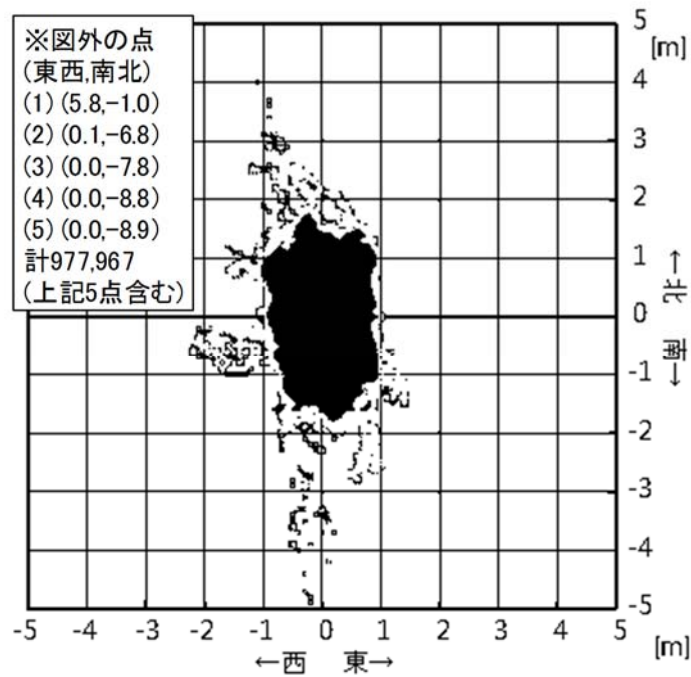


図 4-7 静的環境での測位誤差 (2D)

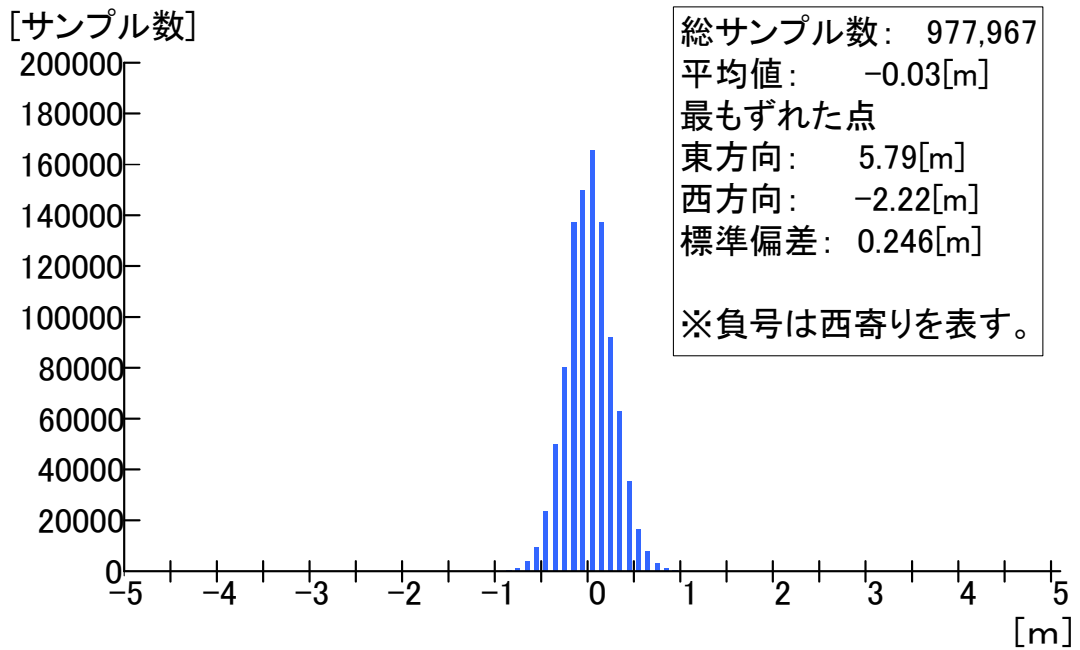


図 4-8 東西方向測位誤差

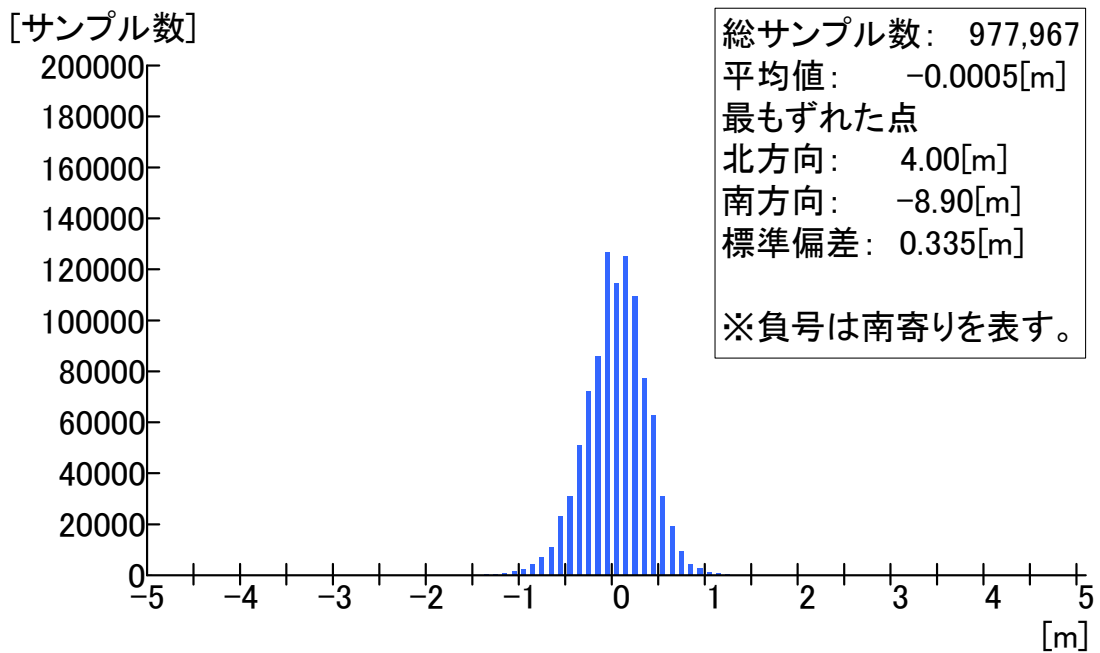


図 4-9 南北方向測位誤差

4.4.2 動的環境での性能確認試験

静的環境での性能確認試験は、山形鉄道フラワー長井線の赤湯駅－荒砥駅間 30.5kmで行った（図 4-10）. 試験に使用した車両は、全長 18m の気動車 YR-888 を使用した（図 4-11）.



図 4-10 山形鉄道フラワー長井線



図 4-11 試験に使用した YR-888

(1) 貸し切り列車による位置、方位、速度の試験

位置、方位、速度の試験は、2008年2月15日と3月12日に行った。2台のGPS受信機（Hemisphere社 Crescent OEM Board）のアンテナは、車両の屋根に15.8mの離隔で設置し、測位周期0.1秒で測定した。

①位置

GPS受信機から得られる位置情報を結んでできるトレースが、実際の軌道上でどの程度のばらつきが発生するのかを調査した。ばらつきの基準点は、定点計測用のGPSを用いて約5cmの精度で、全駅及び主要踏切の計56カ所を測定し（図中の黒色点）、この点とトレースデータとの比較を行った。

基準点とトレースの誤差は、0.18mから7.31mであった。最大誤差となった西大塚駅付近（図4-12）は、上り列車の場合、国道113号線の立体交差下を通過時に電波が遮断された後、測位精度を回復させながら駅に入ってくる。図4-12では、電波遮断後に2台のGPS受信機のうち1台が測位精度回復に時間を要し、7.31mとなった。

GPS衛星は、CDMA(Code Division Multiple Access)方式で、1023チップのC/Aコードを用いて変調波を生成して送信する。コード測位は、この信号を復調して1チップの長さ約300mの中心部を判別して約10mの精度で衛星との距離を測定する。搬送波測位は、コード測位で約10mの精度を得た後、搬送波を計測して精度向上を行う（図4-13）。この時、受信できる衛星数や衛星配置によって、精度向上を行う時間が増える。図4-12では、搬送波測位を行うのに時間がかかっていると考えられる。この搬送波測位に要する時間は、規定できないことから、列車制御に利用する場合は、稼働率の低下を招くため、本研究では、コード測位の精度で使用する事とした。

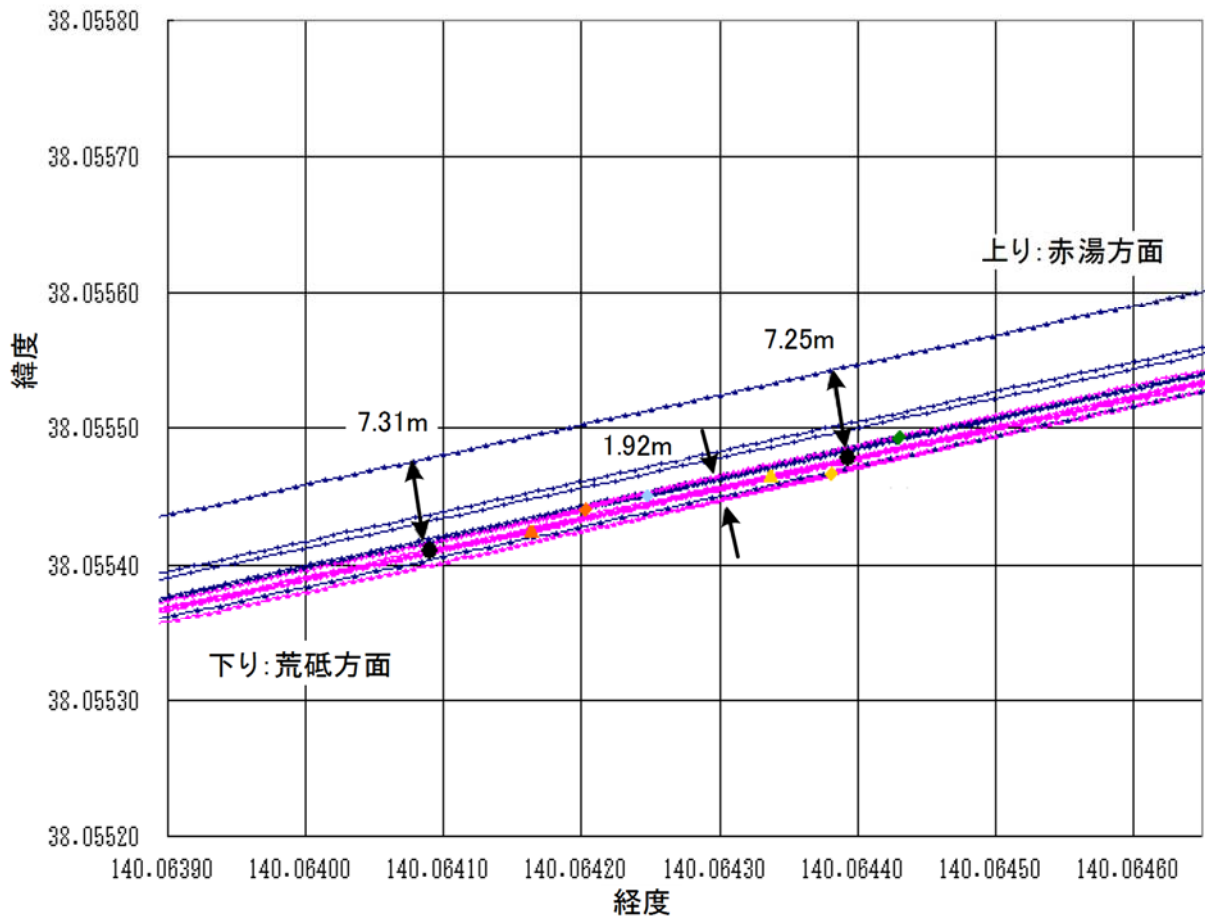


図 4-12 西大塚駅

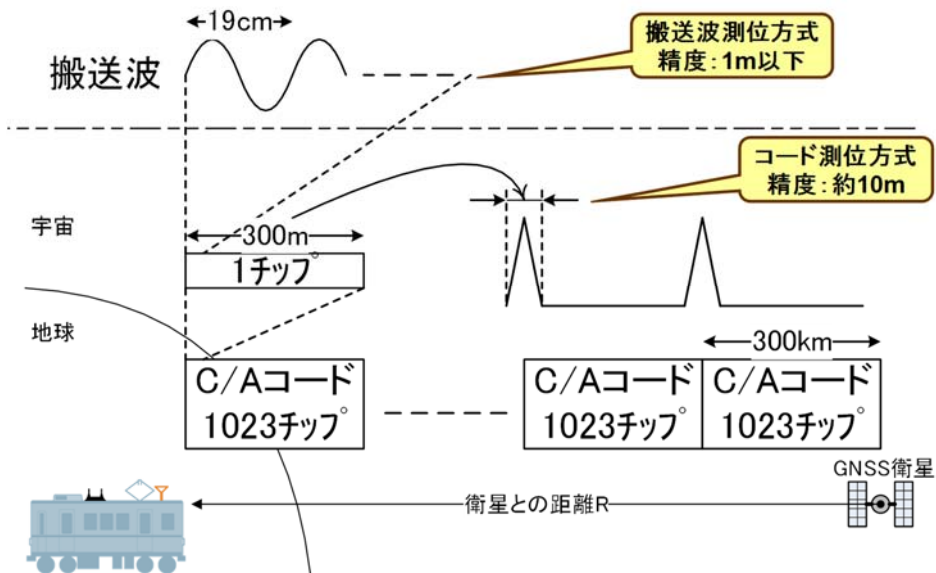


図 4-13 GPS の測位方式

受信状態の良い場所では，GPS 受信機の性能である 1m 前後の誤差となっている．
1 例として，すれ違い駅である今泉駅を図 4-14 に示す．

以上の結果から，2 台の GPS 位置チェックは，GPS 受信機の健全動作の確認に用いる手段としての実現性を確認できた．

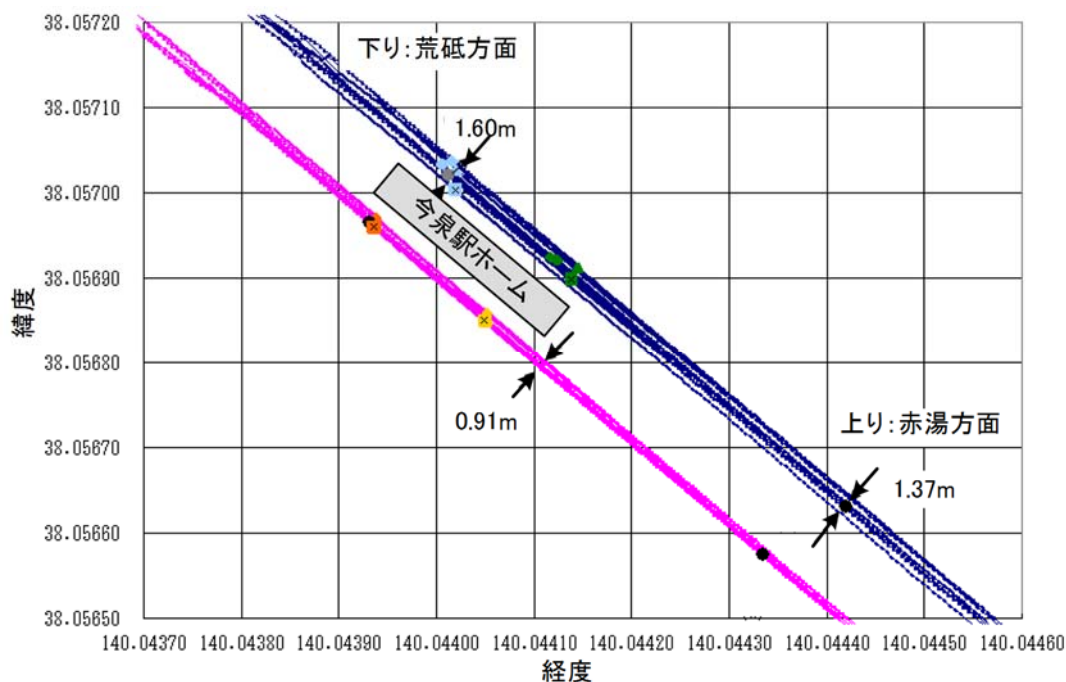


図 4-14 今泉駅

②位置：離隔

2 台の GPS 受信機を 1 車両の前方と後方に設置し，それぞれの位置情報から離隔値を算出する．算出離隔値と実際の GPS 受信機の設置離隔間で，大きく差がある場合は，緯度・経度データに異常があると判断できる．計算上の誤差は，GPS 受信機単体の位置誤差が $\pm 1\text{m}$ であり，2 台で $\pm 2\text{m}$ となる．2 台の GPS 受信機は，0.1 秒ごとに測位を行いその値を非同期で処理部へ出力している．処理部では，0.1 秒ごとに現在位置を算出する処理を行っているために，位置情報が 100ms ずれる場合がある．この場合列車速度を約 70km/h とすると $\pm 2\text{m}$ の誤差となり GPS 受信機単体の誤差とあわせると $\pm 4\text{m}$ の誤差となる．

2 台の GPS 受信機の離隔誤差について，試験結果の一例を図 4-15 に示す．2 台の

GPS 受信機が、衛星を補足できている時は、予定した離隔誤差である $\pm 4\text{m}$ 以内に収まっている。図中で、離隔値が大きく広がっているところは、立体交差の道路など、あらかじめ衛星からの電波が途切れることがわかっている場所であり、それ以外で大きく外れることはなかった。衛星からの電波が遮られた後の復帰に、時間がかかる場合もあるが、この時に GPS 受信機設置の前後が、入れ替わるようなことはなかった。

以上の結果から、2 台の GPS 離隔チェックは、GPS 受信機の健全動作の確認に用いる手段としての実現性を確認できた。

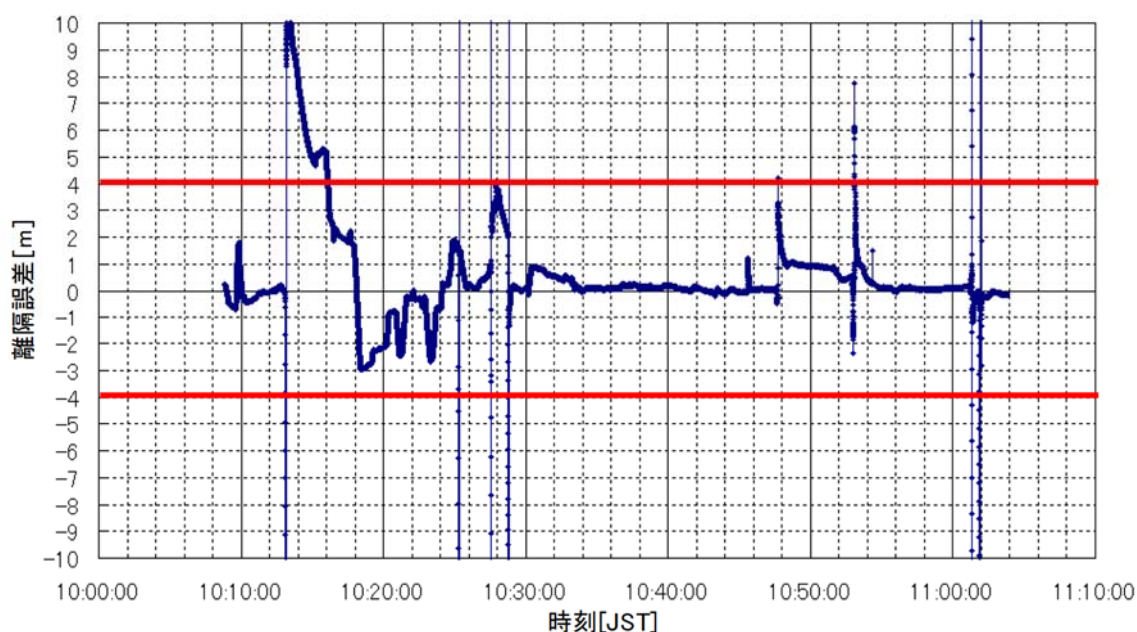


図 4-15 離隔誤差

③方位

2 台の GPS 受信機を 1 車両の前方と後方に設置し、それぞれの位置情報から方位値を算出する。列車は軌道上を走行するため、その地点における列車の進行方向は特定でき、これを基準方位とする。この基準方位と算出方位間で、大きく差がある場合は、緯度・経度データに異常があると判断できる。計算上の誤差は、GPS 受信機単体の位置誤差が $\pm 1\text{m}$ であり、前後 2 台の GPS 受信機が進行方向に対して左右逆方向にずれたとすると約 2m となる。試験では、2 台の GPS 受信機が 15.8m の離隔で設置してあり、離隔の場合と同様に位置情報が 100ms ずれる場合を考えると 2m

縮まって 13.8m になる場合が最も方位角に誤差が生じ、約 8.25 度となる。

試験での方位判定は、軌道の方位を正確に測定できないので、GPS 受信機が出力する方位と位置情報から算出する方位との比較を行った(図 4-16)。この図中で GPS 受信機が出力する方位が大きく動いているのは、列車が停車している時である。移動用の GPS 受信機は、停止中にこのような動作となり、故障ではない。方位の誤差は、路線データベースと比較して、概ね 5°以内であった。

以上の結果から、2 台の GPS 方位チェックは、GPS 受信機の健全動作の確認に用いる手段としての実現性を確認できた。

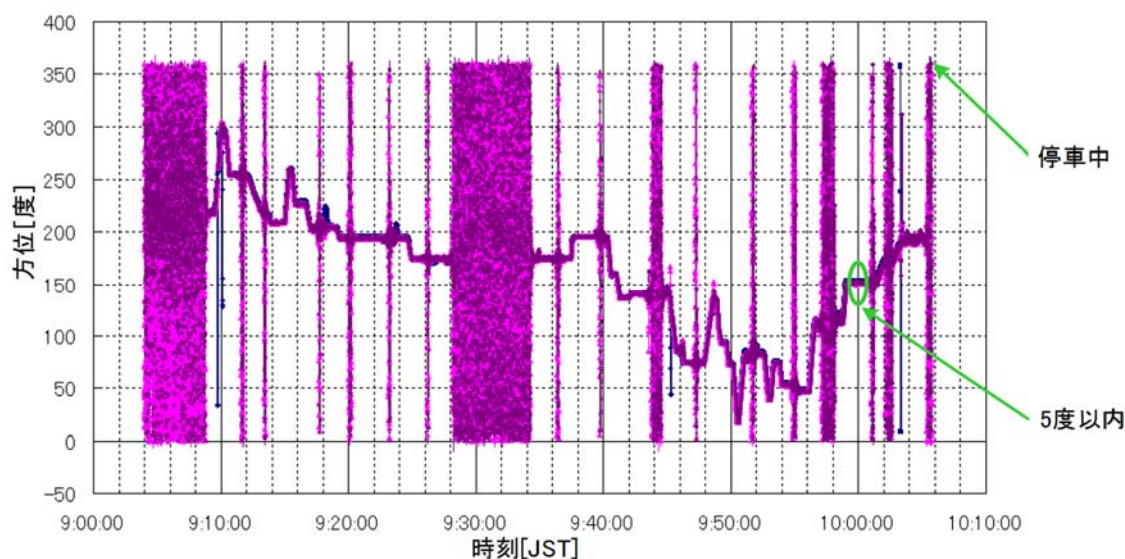


図 4-16 方位誤差

④速度

速度計の速度と GPS 受信機から得られる速度との比較は、自動車の評価に使用している光速度計を基準に行った。その結果、GPS 受信機から得られる速度は、一定速度において光速度計との差が 0.5km/h であることがわかった。加減速時は、光速度計の反応の遅れからくる誤差が発生するが、時間差は約 250ms と一定であり、速度差は、1km/h 以下であった。この加減速時の処理時間の差を考慮すると、一定速度時と同様に約 0.5km/h の差となる。速度計と光速度計の差は、加減速時に 1km/h 以下、一定速度時に 2km/h 以下となった。加減速時に誤差が小さく測定されるのは、光速度計の反応の遅れからである。以上の結果から、速度計と GPS 受信機から得られる速度の差は、2km/h 以下であり、速度比較は、GPS 受信機の健全動作の確認に

用いる手段として有効であることが確認できた。

(2) 営業列車による長期試験

営業列車による長期試験は、以下の条件で2009年10月～12月、2010年4月～11年3月に行った。2台のGPS受信機（Hemisphere社Crescent OEM Board）のアンテナは、車両の屋根に17.02mの離隔で設置し、測位周期0.1秒で測定した。

山形鉄道フラワー長井線を走行して、GPS衛星からの電波の受信状態が悪い場所を図4-17に示す。ここでは、電波遮断などにより、軌道と直角方向に3m以上の測位誤差が発生する場所を特定することができた。

この路線を走行した列車の車上DBに対して直角方向の測位誤差を、北に向かって左を正、右を負として図4-18に示す。また、2台のアンテナ間隔の誤差は、設置距離17.02mを基準に間隔が広がる方向を正、縮まる方向を負として図4-19に示す。営業列車を使用した試験では、軌道方向の誤差を測定することが難しいため、2台のGPS受信機が同時に軌道方向に同距離だけ誤差が発生することが無いと仮定すると、軌道方向誤差を推測することができる。

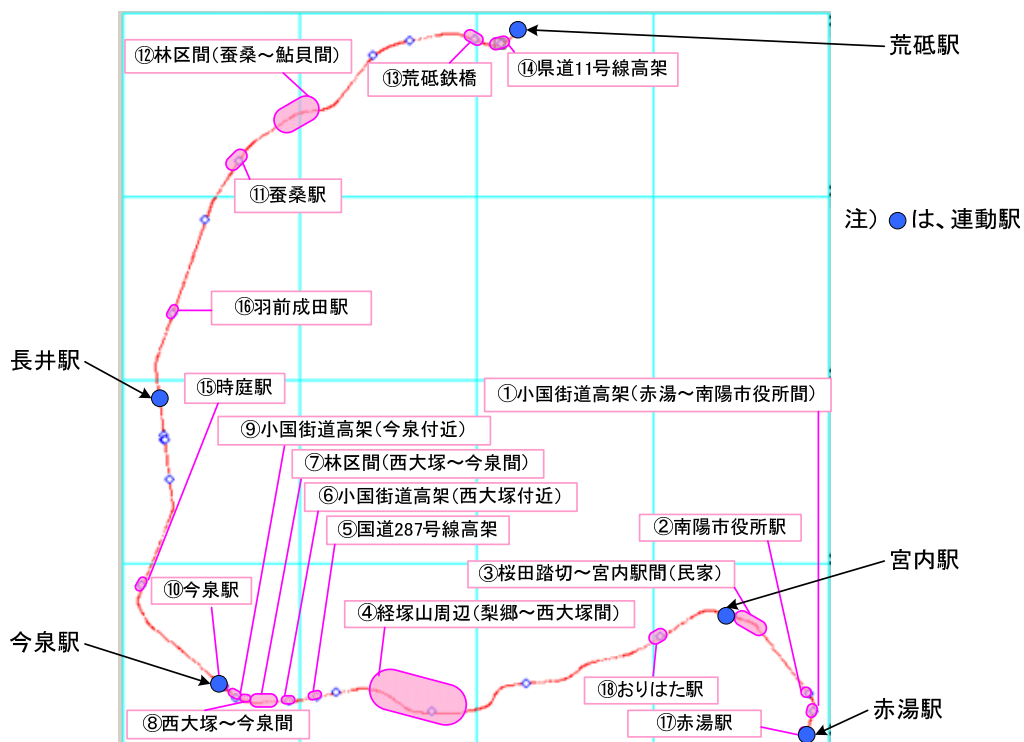


図 4-17 GPS衛星からの電波受信状態が悪い場所

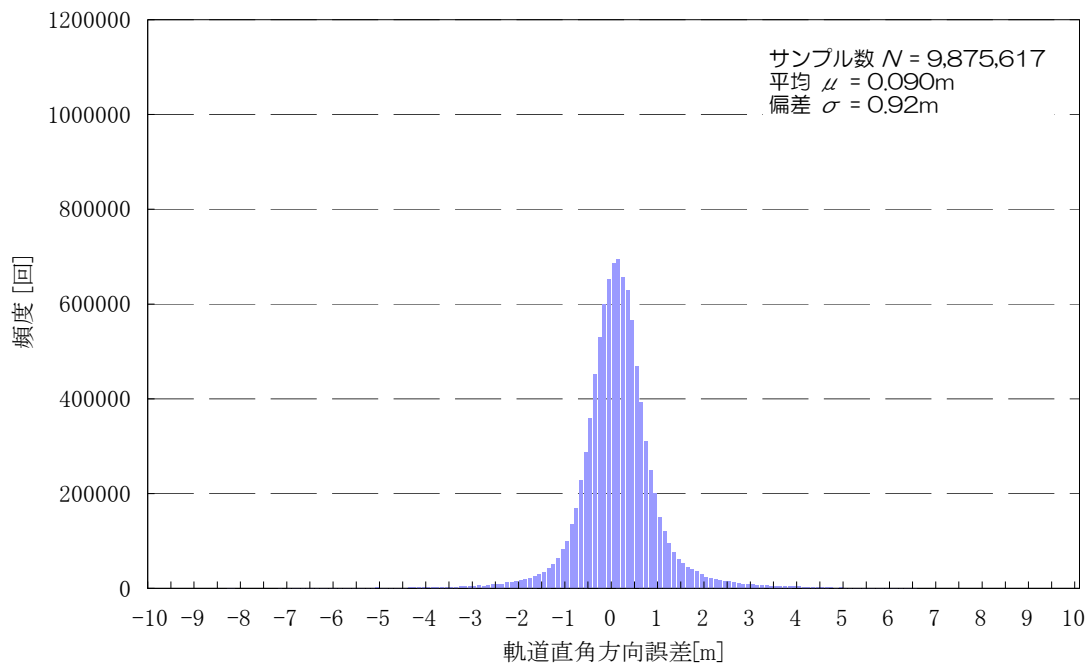


図 4-18 軌道に対して直角方向の測位誤差

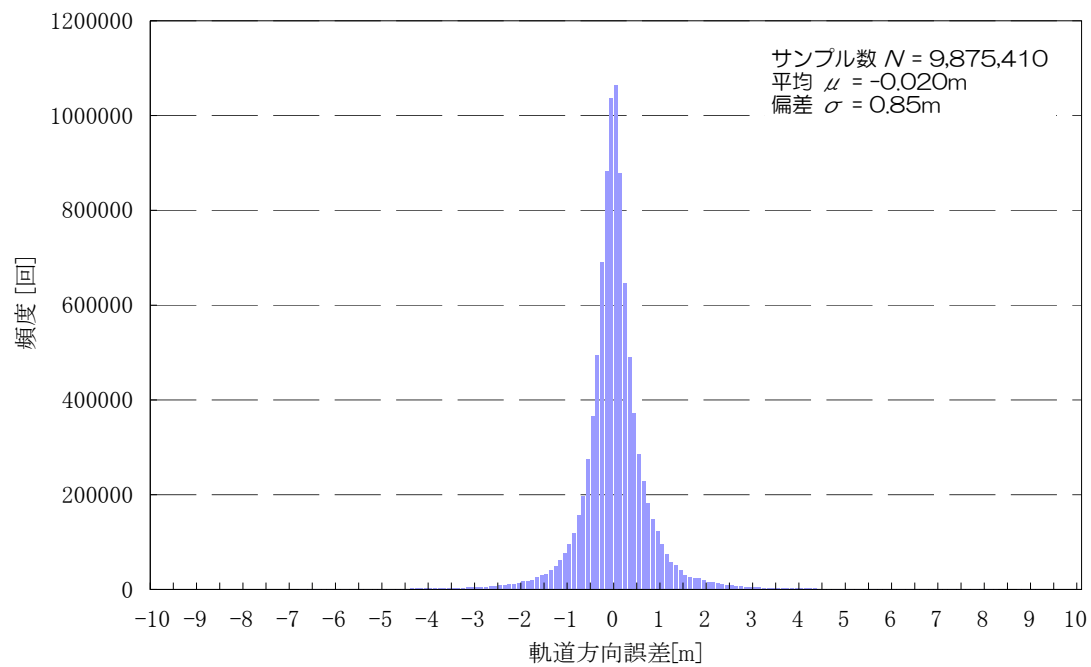


図 4-19 軌道方向誤差の推測値

(3) 貸し切り列車による軌道方向誤差試験

貸し切り列車による軌道方向誤差試験は、以下の条件で2010年12月16日、17日、2011年2月2日～4日、7月20日、21日に行った。2台のGPS受信機（Hemisphere社Crescent OEM Board）のアンテナは、車両の屋根に17.02mの離隔で設置し、測位周期0.1秒で測定した。地点検知は、RFIDを使用し、RFIDを駅近傍の上り16カ所、下り14カ所に設置した。

①GPS速度情報を積分して得られる走行距離計測誤差

山形鉄道フラワー長井線でのGPS速度情報を積分して得られる走行距離誤差の測定は、駅近傍にRFIDを設置し、RFID間の距離と、GPSの速度情報を積算した計測距離とを比較することで行った。GPS速度による走行距離計測誤差を図4-20に示す。ここで、GPS速度の使用条件は、1km/h以上でTGとの速度差2.4km/h（TG速度10km/h以上時）とし、GPSが受信不可時など、この条件を満足しない場合は、TGの値をそのまま使用した。図4-20の横破線は、地点検出に使用したRFIDの検知誤差の範囲を示す。

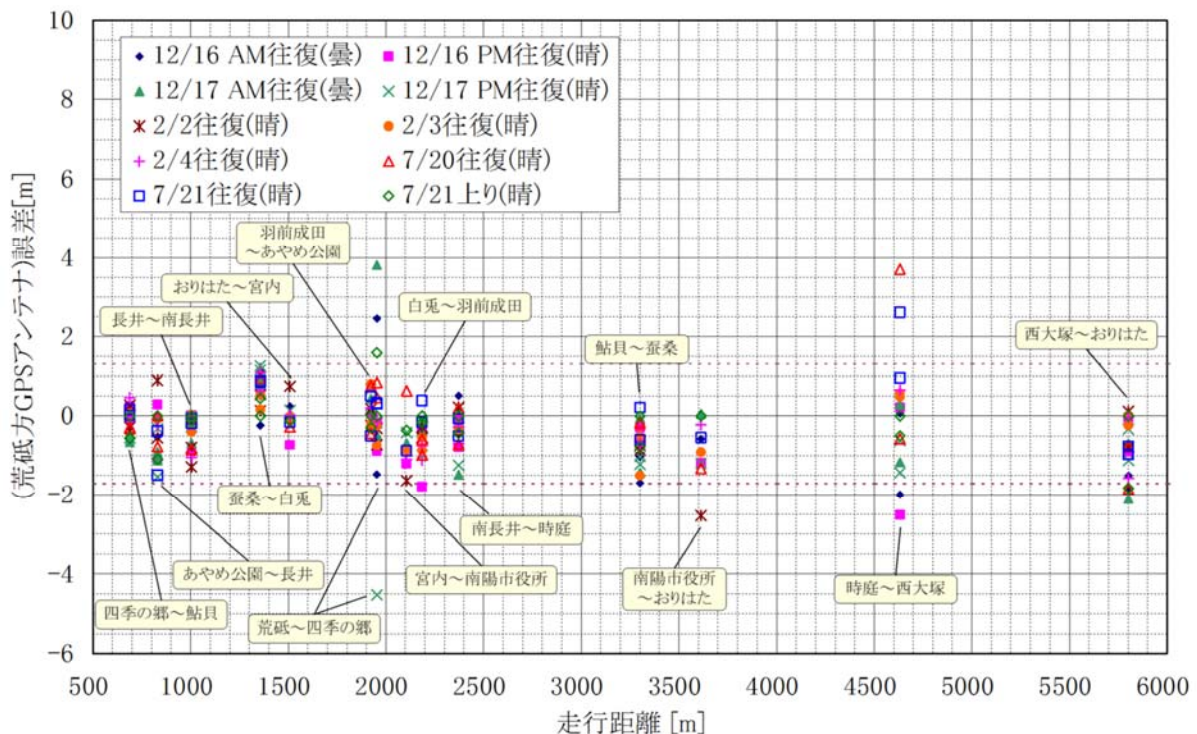


図 4-20 GPS速度による走行距離計測誤差

②軌道方向測位誤差

山形鉄道フラワー長井線での試験列車を用いた軌道方向測位誤差の測定は、駅近傍に RFID を設置し、RFID を検知した時の GPS 測位状態を測定した (図 4-21)。縦軸を軌道方向、横軸を軌道と直角方向として図示すると、全 286 サンプルが RFID の位置を中心に広がり、GPS 受信機を固定した場合と類似した測位分布となった。測位分布が軌道方向に縦長になっているのは、RFID の検知誤差が含まれるためと考えられる。このサンプルからは、軌道方向誤差が軌道と直角方向誤差より少ない結果となった。

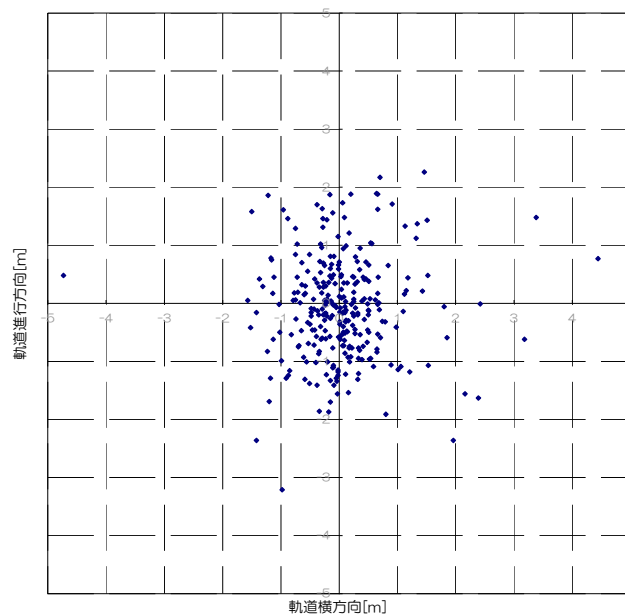


図 4-21 RFID 検知時の測位誤差

4.5 測位誤差軽減のためのフィルタリング

「測位情報は、確定値ではなく誤差を含む」という GNSS の本質的問題に対しては、自動車のカーナビゲーション等では解決済みとして実用上まったく問題ない状況にある。しかし、列車の保安制御への利用に対しては確固たる方針のもとで合意を形成する必要がある。

この問題に対しては、「測位情報を連続受信できるわけではない」という課題に対する対応策と併せて検討する。この課題への対応は、4.3.2 節で述べたように、他の測位技術との併用策を採用する。この方針は、カーナビゲーションや他の GNSS 利用分野での方針と同一である。鉄道においては、さらに、走行軌道が確定されているという特性を利用し、安定して GNSS からの情報が取得できる区間を定め、その区間内でのみ GNSS による測位を行うこととする。

これらに加えて、以下に述べる測位誤差軽減のためのフィルタリングを行う。

- ① 2 受信機の照査による精度検定
- ② カーブ等軌道特徴点を用いた検定
- ③ 情報の連続性による検定

なお、前述したが、検討に際して GNSS による測位精度に対する要求仕様を、13m 以下とした。この値は、フィルタリングの際の基準等に参考とするもので、この値に応じて列車保安制御システムの制御余裕等を考慮することになる。すなわち、値が大きくなれば、その最大誤差を加味して安全を確保するため列車の間隔を広げねばならず、その分在線できる列車本数は少なくなる。したがって、この値の大小は列車制御システムの能率には影響するものの、安全性の度合いに関係するものではない。

4.5.1 GNSS 利用上の前提条件

GNSS 受信機のスペックは、MSAS による誤差軽減、大気圏遅延誤差の補正、受信機雑音を含んだ値で規定されている。したがって、誤差の不確定要素は、衛星配置とマルチパスのみとなる。衛星配置が良好で、マルチパスの影響が小さいと判定できれば、GNSS 受信機から得られる情報は、GNSS 受信機のスペックに近い値になると考えられる。

GNSS 受信機は、衛星配置による測位精度の劣化係数として DOP (Dilution of Precision) 情報を出力する。この値から測位結果の誤差を知ることができる。

マルチパスの影響は、検出することが難しいので、あらかじめ電波環境の悪いところを調査し、その場所では使用しないなどの対策を行う必要がある。

4.5.2 2 受信機の照査による精度検定

GNSS の 2 受信機のアンテナは、1 車両の前後端に設置することを基本とする。この結果、フェージング等により生じる誤差の検定が可能になるほか、以下のようなフィ

ルタリングが実現できる。

図 4-22 は、山形鉄道フラワー長井線での試験に使用した 18m 車両における 2 つのアンテナの配置である。アンテナを前方・後方からそれぞれ前後 50cm に配置し、設置間隔 17m を基準として、以下のフィルタリングを 0.1 秒周期で行う。2 台の GPS 受信機は、MSAS による補正時に得られる水平精度 0.6m (95%) 以上の性能を有するものを用いる。なお、軌道方向と軌道に対する直角方向の離隔分布は、図 4-23 のようになる。

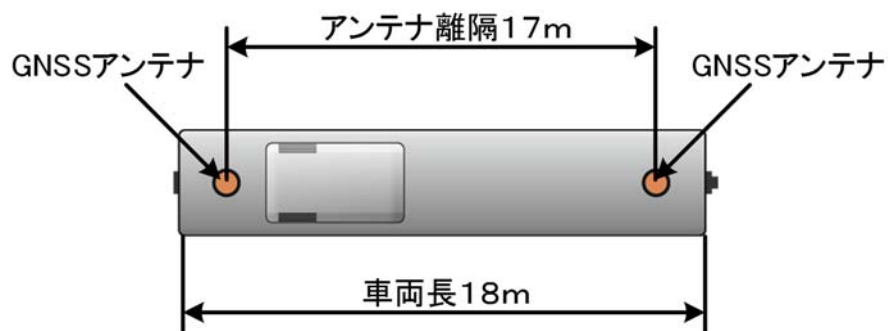


図 4-22 GNSS アンテナの配置

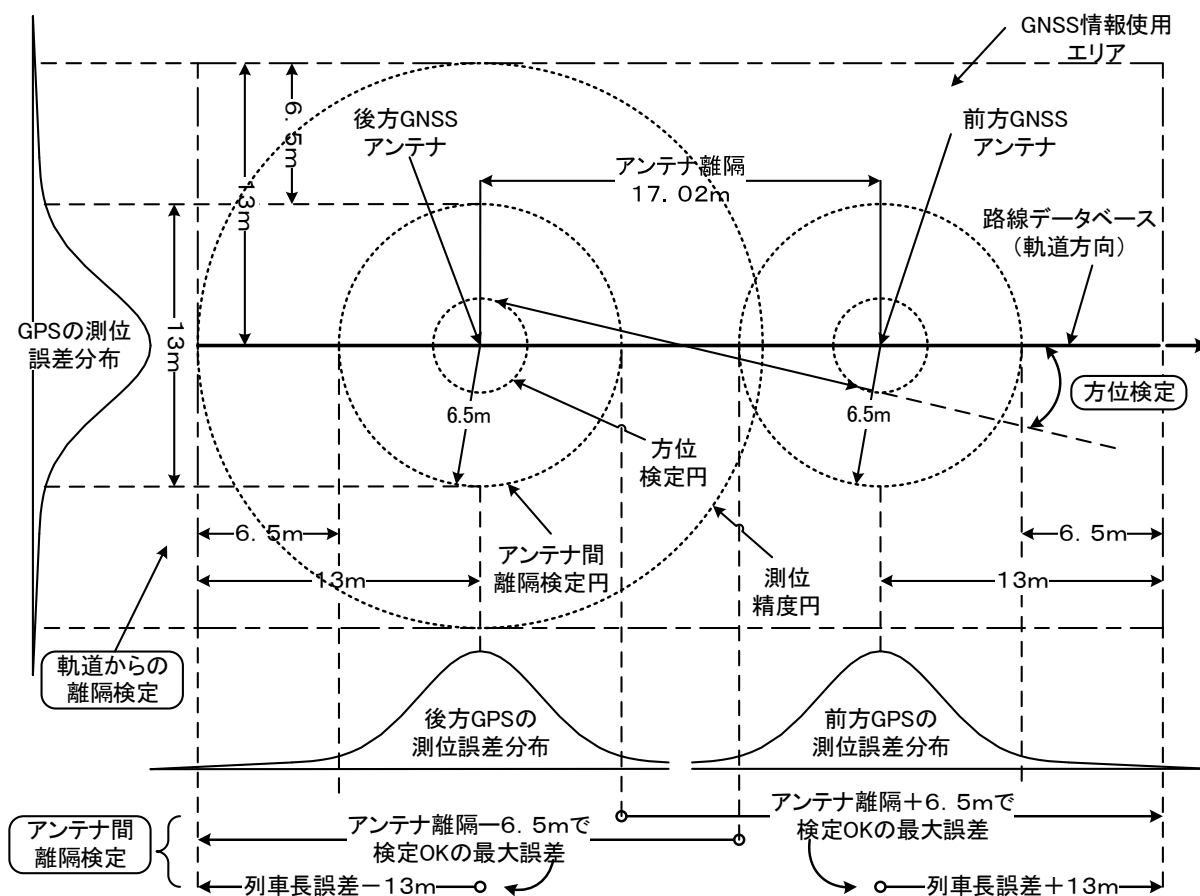


図 4-23 2つのアンテナの誤差分布

(1) 軌道からの離隔検定 (フィルタリング 1)

2 受信機の測位情報は、路線データベース上の軌道に対する直角方向距離が要求仕様の 13m (測位精度円より)以内であること。

(2) アンテナ間離隔検討 (フィルタリング 2)

2 受信機の測位情報によって得られるアンテナ間の距離は、2 受信機のアンテナ間離隔検定円以内であること。

アンテナ間離隔検定円は、要求仕様の 1/2 (6.5m) とすることにより、最大誤差を ±13m 以内とする。

(3) 方向検定 (フィルタリング 3)

2 受信機の測位情報間を結んだ方位と、路線データベースの方位は、GNSS 受信機

の水平精度円にカーブ走行時の最大値を加えた方位検定円と、路線データベースとの方位差以内であることを検定する。

18m 車両においてアンテナを 17m 離れた場合の方位差は ± 4.0 度（20m 車両において 2 台の受信機を 19m 離れた場合は ± 3.6 度）となり、これに最小曲線半径 160R のカーブ走行時におけるアンテナ移動方位と列車方位の差 ± 3.0 度を加え、さらに余裕を見て ± 7.5 度以内とする。

4.5.3 カーブなど軌道特徴点を用いた検定

鉄道は走行路線が決定されており、路線データの特徴を計測の検定に利用することが精度向上に有効と考えられる。このため、GNSS による測位計測の精度向上補助手段としてカーブ等軌道の特徴点を用いた位置検知について以下の確認試験を実施した。

原理としては、カーブ区間では 2 受信機からの速度ベクトルの方向成分が刻々と変化することを利用する。なお、この速度ベクトルであるが、GNSS による単位時間の測位データ値の差分で求められる速度ではない。具体的には、移動体で生じる GNSS からの電波のドプラー効果から算出するものである。したがって、カーブでの速度ベクトル方向成分の変化は、GNSS のコード情報による測位データ、受信機の測位論理の不良、フェージングの影響等とは独立しているという有利な特徴がある（図 4-24）。

この処理のために、路線データベースには、設備データとしてカーブの始点、曲率半径、カーブ長、カーブの変化点、カーブの終点を登録しておく。なお、この軌道変化点（カーブ）に依拠したフィルタリングは、0.1 秒周期で行う 4.5.2 節で述べたフィルタリング 1 から 3 に合格していることを前提として、次の(1)~(3)の検定処理を考えた。

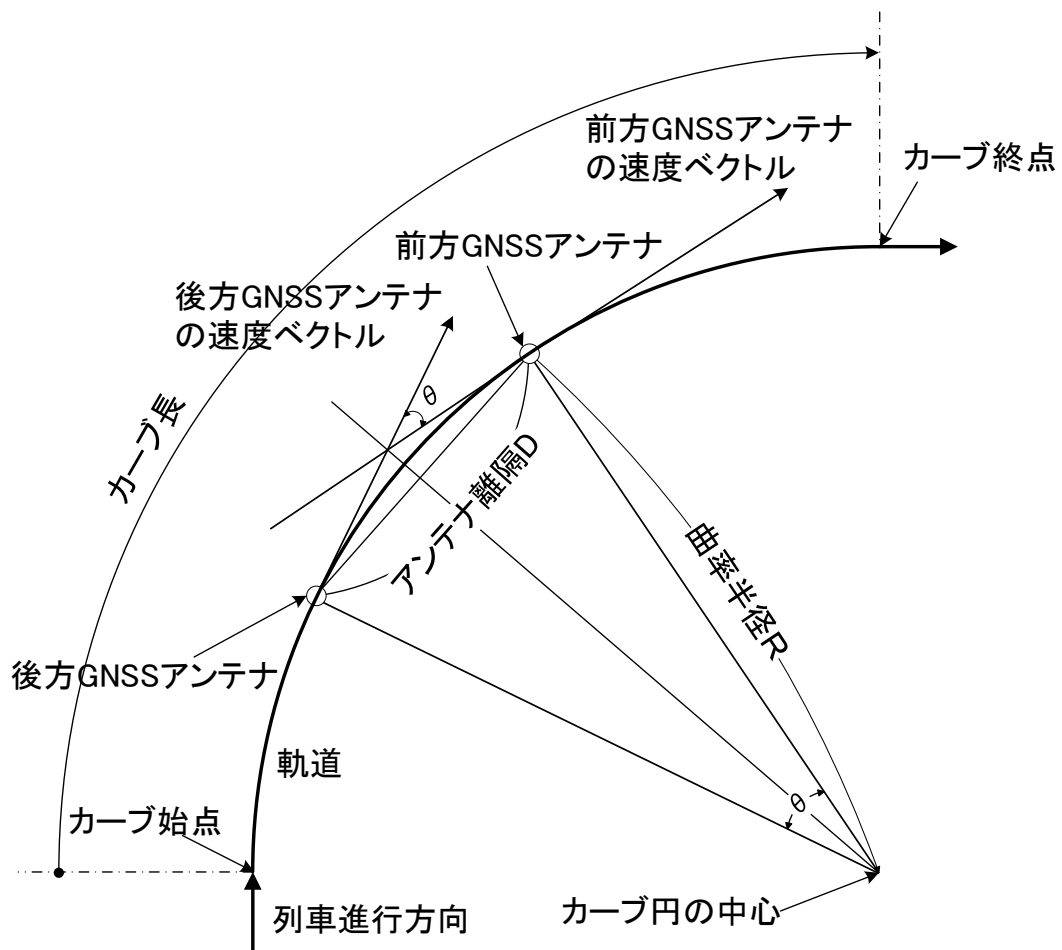


図 4-24 軌道（カーブ）変化点を利用した検定

(1) 軌道曲率半径による検定（フィルタリング 4）

2 受信機から得られる速度ベクトルの方向成分は、列車が直線からカーブに進入すると、軌道の曲率半径 R に応じて前方 GNSS アンテナの速度ベクトルと、後方 GNSS アンテナの速度ベクトルが θ だけ変化する。この θ から(1)式を用いて軌道の曲率半径 R を算出する。ここで、 D は、GNSS アンテナ離隔とする。この曲率半径 R と路線データベースに設備データとして登録された軌道の曲率半径とを 0.1 秒周期で比較してカーブ位置を特定し、 $\theta=0$ 度になった地点でカーブ区間終了と認識する。

$\sin(\theta/2) = (D/2)/R$ であるから

$$R = (D/2) / \sin(\theta/2) \tag{3.1}$$

(2) 軌道カーブ長による検定 (フィルタリング 5)

カーブの始点からカーブの終点までの走行距離を算出し、路線データベースに設備データとして登録されたカーブ長と比較する。カーブ始点からカーブ終点までの走行距離が設備データのカーブ長の 20%以内となることを確認する。

(3) S 字カーブ変化点による検定 (フィルタリング 6)

S 字カーブでは、2 受信機から得られる速度ベクトルの方向成分の差は、右カーブから左カーブ、左カーブから右カーブへと変化する地点で符号が逆転する。この軌道のカーブ変化点と路線データベースに設備データとして登録されたカーブの変化点を比較することにより、カーブ変化点を認識する。

4.5.4 情報の連続性による検定

上記で説明した各種フィルタリングは、空間上の情報を基にしたものであった。このほか、鉄道の車両には速度情報を得るため速度発電機 (TG) が設置されている。この情報との比較は独立したセンサ相互の比較となり、有効利用できる。

また、列車の移動という物理的情報を基にすると、過去の情報に対し単位時間内ではありえない移動や性能上考えられない加減速度といった時間的变化情報に依拠したフィルタリングが有効になる。

(1) TG 速度情報による検定 (フィルタリング 7)

GNSS から取得された速度情報を、速度発電機 (TG) から得られる速度情報と比較検定する。2 台の GNSS 受信機から得られる速度情報は、電波のドプラー効果を利用したもので、測位情報とは独立している。さらに、TG 速度 $\pm 2.4\text{km/h}$ 以内のものを有効とする。ここで、 $\pm 2.4\text{km/h}$ は、TG の仕様で定める最大誤差である。また、2 台の GNSS 受信機から得られる速度差は、TG 誤差の 1/2 の $\pm 1.2\text{km/h}$ とする。

(2) 加減速度を利用した検定 (フィルタリング 8)

GNSS から取得された速度情報を 0.1 秒前の速度情報値と差分を取ることで、加減速度が得られる。車両の加減速度は物理的な限界があるため、この範囲を超えている場合には、異常と判定できる。

4.6 各種フィルタリングに対する試験結果

4.6.1 試験の条件

実施線区は、山形鉄道フラワー長井線（赤湯－荒砥間、全長 30.5km）、実施期間は、2013 年 4 月から 12 月（上下 611 本）、2015 年 5 月から 12 月（上下 904 本）である。基準となる地上マーカは、受電器から得られる踏切制御子の情報（下り 25 地点、上り 20 地点）を用いた。

GNSS 受信機は、車両に同じ型式のものを 2 台設置し、2013 年（Hemisphere 社 Crescent OEM Board）と 2015 年（Novatel 社 OEM Star）で異なる受信機を用いた。使用した 2 種類の GNSS 受信機は、MSAS 使用時に測位誤差 0.6m : 95%のものを用い、マスク角 5 度で GPS と MSAS を使用する設定にした（図 4-25）。

GNSS を列車保安制御に利用するには、マルチパスの影響を防ぐために、電波環境の良いところでのみ使用すべきと提案した。しかし、本試験では、各種フィルタリングの効果を確認するために全線に渡り試験を実施した。



図 4-25 試験に使用した YR-888

4.6.2.2 受信機の照査による精度検定試験結果

2 受信機の照査によるフィルタリング 1 から 3 は、GNSS を列車保安制御に利用する上での基本と考えている。

(1) フィルタリングの効果

フィルタリングは、基準となる地上マーカを検出したときの測位結果を図示する。精度検定の試験結果は、フィルタリング OK 時の結果を軌道と平行方向の誤差（軌道前後方向の誤差）として算出する。図 4-26 に山形鉄道フラワー長井線において GPS 電波環境が最も悪い西大塚駅付近の結果を示す。図中の×は、フィルタリング NG を示す。

このフィルタリングにより、NG を取り除くと図 4-27 のようになる。フィルタリングによって誤差が大きい場合を削除できることが分かる。しかし、誤差が少ない場合も誤差が大きいと判定されてしまうことも確認できる。

次に、電波状態の良い場所の例とその場所で、NG 点を取り除いた場合を図 4-28 と図 4-29 に示す。ここでは、全ての測位結果が 10m 以内に入っているにもかかわらず、測位誤差が大きいと判断してしまうことがあることを確認できる。

以上のことから、フィルタリングは、誤差の大きい場合を確実に削除できるが、誤差が小さい場合も誤差が大きいと判定してしまうことが確認できる。この課題は、安全性の面では問題とならないがシステムの稼働率という視点では、課題となる。しかし、システムでは、連続的に NG 判断とならなければ良いことから、システム設計時にフィルタリングの特性を考慮しておけば良いことになる。

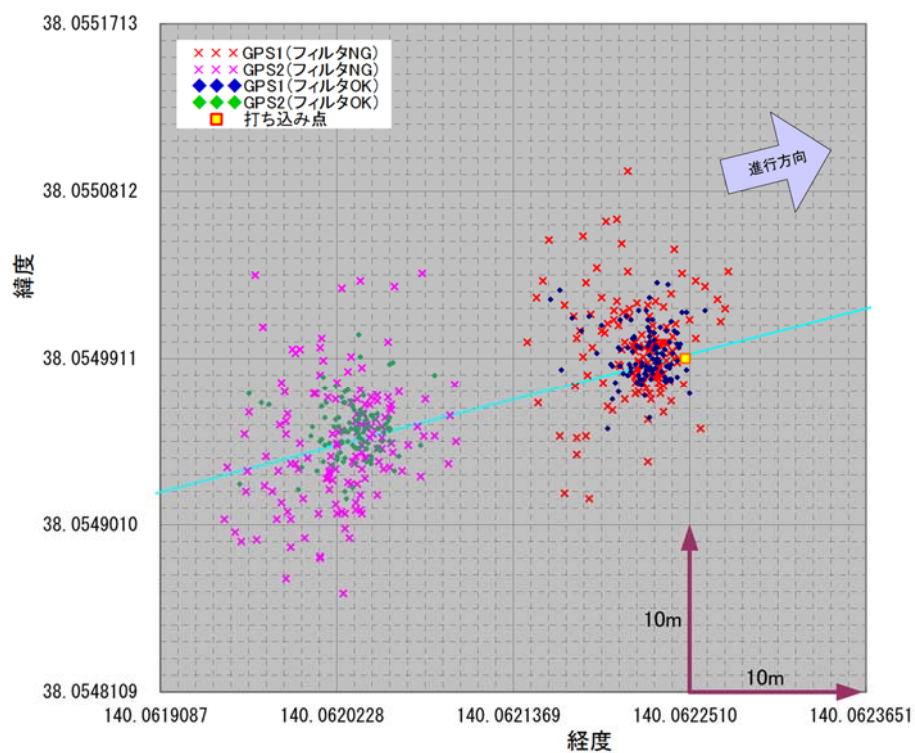


図 4-26 西大塚駅付近のフィルタリング効果 (NG 点あり)

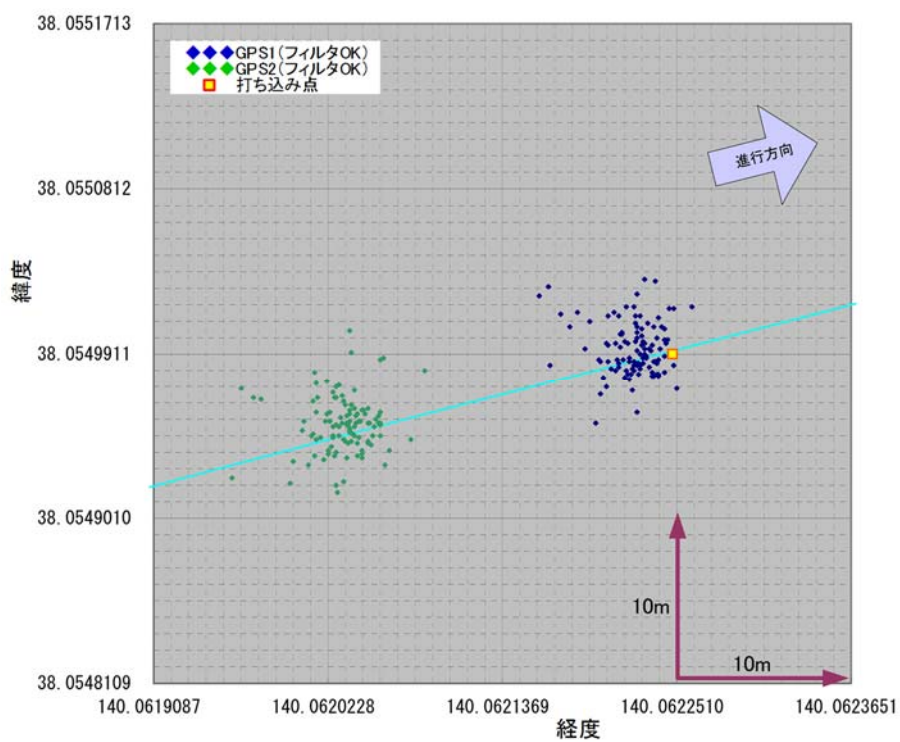


図 4-27 西大塚駅付近のフィルタリング効果 (NG 点なし)

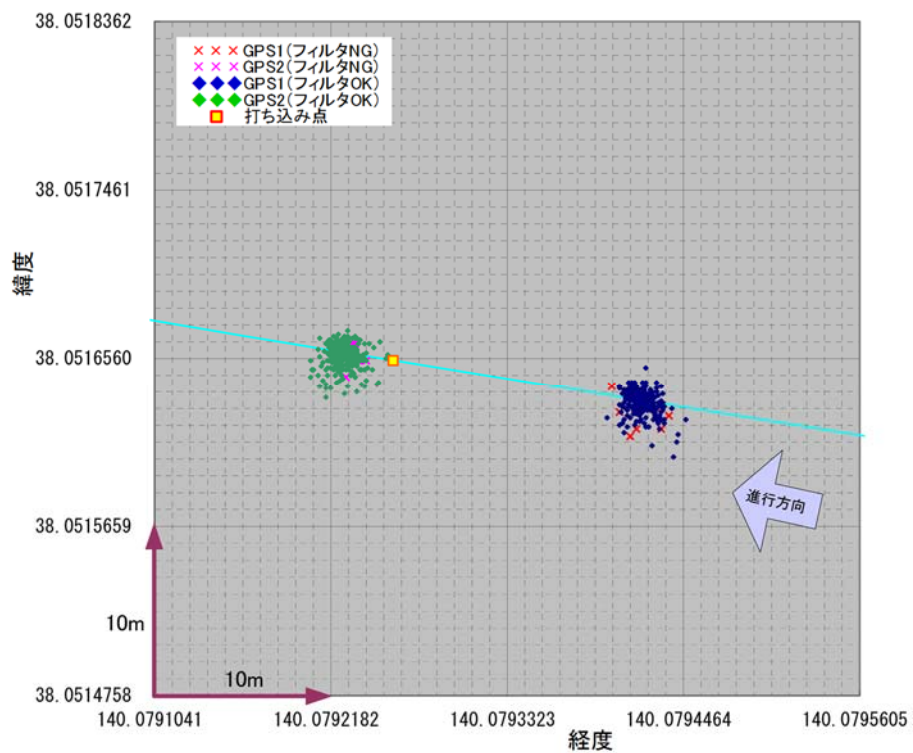


図 4-28 伊佐沢踏切付近のフィルタリング効果 (NG 点あり)

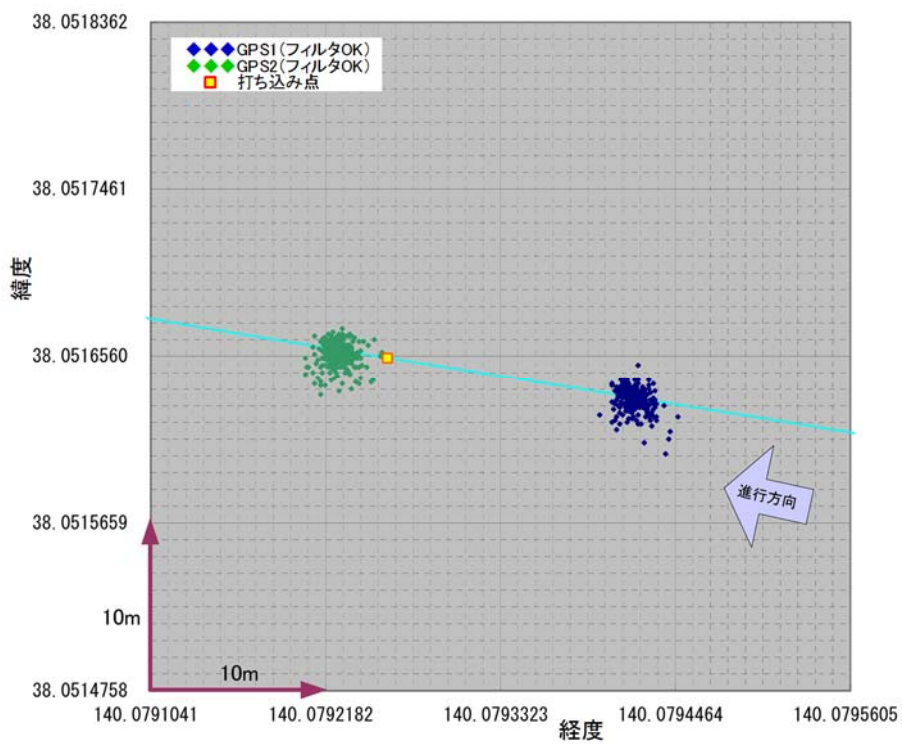


図 4-29 伊佐沢踏切付近のフィルタリング効果 (NG 点なし)

(2) 精度検定の試験結果

フィルタリング 1~3 に合格した測位情報に対し地上マーカー位置をもとに「軌道と平行方向の誤差（軌道前後方向の誤差）」を算出し、評価した。得られた結果を図 4-30 に示す。66,762 件のデータ中 66,620 件が 3m 未満の誤差範囲に入り、誤差レンジの大きい 8m から 10m に入る件数が 7 件と少なく、すべての誤差は±10m 未満となることを確認した。このことは、13m と設定した GNSS の測位精度に比べてはるかに良い値であり、フィルタリングが有効に作用していることがうかがえる。

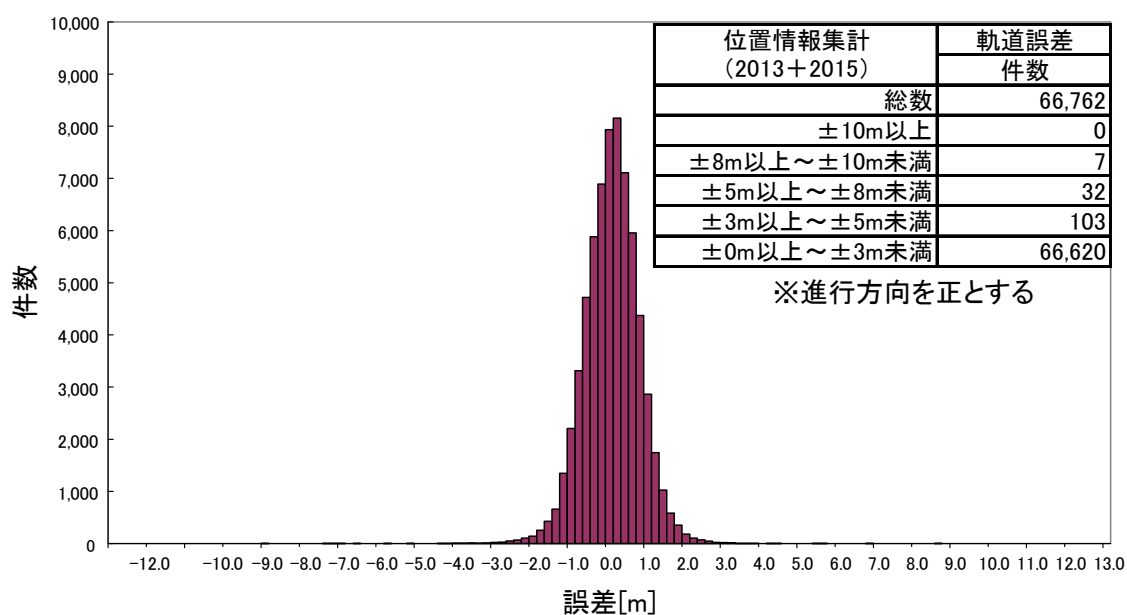


図 4-30 軌道方向の誤差分布

4.6.3 速度情報に対する評価試験結果

4.5.4 節で説明したように GNSS からは、電波のドプラー効果を利用することで、測位情報とは独立して速度情報も得られる。この精度を評価するために、区間ごとの速度情報の積分値を実距離と比較することにした。区間は、位置が確定している地上マーカー間とし、距離 1km から 8km の下り 11 区間、上り 7 区間とした。GNSS からの速度情報は、フィルタリング 1~3 の検定に合格したものを用いることにし、検定不合格時には速度発電機（TG）の速度を代用している。速度発電機の積分値と GNSS からの速度情報の積分値を比較した結果が図 4-31 である。

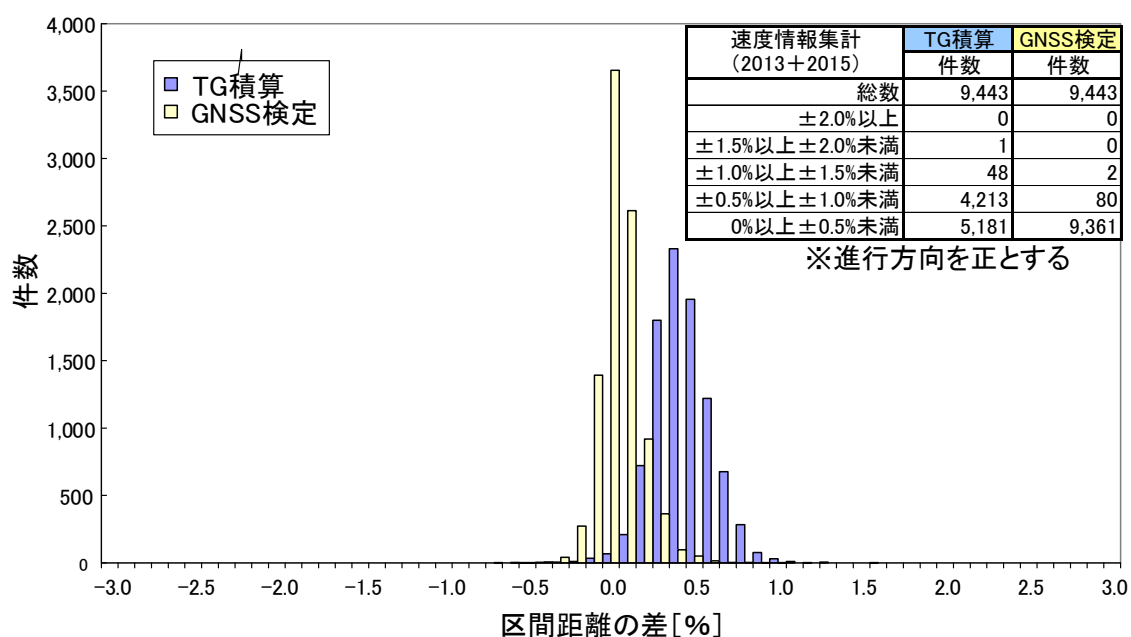


図 4-31 GNSS と TG での速度情報の誤差比較

図 4-31 の結果より，GNSS のドプラー効果を利用した速度情報は， $\pm 1.5\%$ 以下となることが確認された．なお，速度発電機の中央値は $+0.4\%$ にあり，速度が高め（安全側ではある）に出ていることがわかる．両者の比較により GNSS 情報は測位のみならず速度情報としても利用可能であることが確認できた．このことは，速度発電機が低速域（ 5km/h 以下）での計測が不能という原理的問題をカバーする上でも有効であるし，GNSS による測位情報検定不合格時に利用するセンサ（測位情報が検定範囲を超える誤りを持って，ドプラー効果を利用した速度情報は使用可能であることが明らかとなった．ただし，GNSS 衛星を 2 機以上捕捉できていることが条件）としても利用できると考えられる．

4.6.4 軌道のカーブを用いた補助手段の試験結果

鉄道の走行路線は固定であるという特長を生かし，軌道のカーブを用いた精度向上の補助手法であるフィルタリング 4 から 6 について評価を行った．

(1) 軌道曲率半径による位置検知試験結果

山形鉄道フラワー長井線のカーブのうち，10 カ所を軌道の曲率半径による位置検

知点として選定し(曲率半径 300~500m), 曲率半径による検定(フィルタリング4)の可能性を検証した. その結果, カーブ終端での位置検知誤差(軌道方向誤差)は, 全試験期間で軌道方向誤差が±13m 未満となることを確認した. 図 4-32 に計測結果を示す.

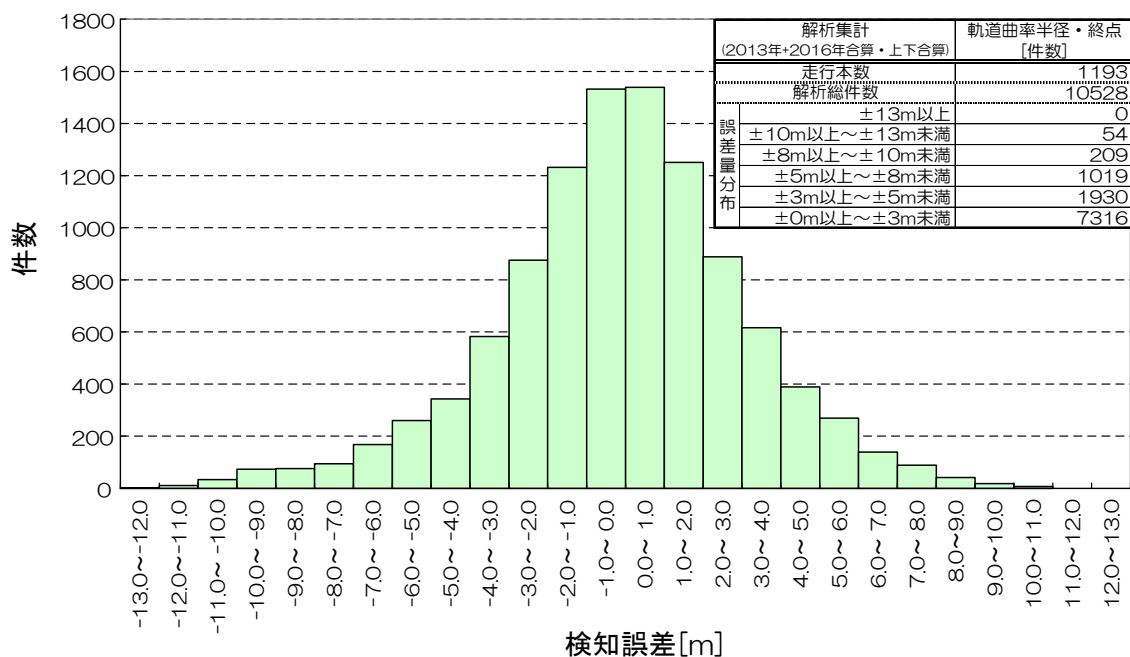


図 4-32 曲率によるカーブ終端検知の検定結果

(2) 軌道カーブ長による位置検知試験結果

山形鉄道フラワー長井線のカーブのうち, 曲率半径の大きい 2 カ所を軌道のカーブ走行距離による位置検知点として選定し(曲率半径 501~1000m)、軌道カーブ長による検定(フィルタリング5)の可能性を検証した. カーブ終端での位置検知誤差(軌道方向誤差)は, 全試験期間で軌道方向誤差が±13m 未満となることを確認した. 図 4-33 に計測結果を示す.

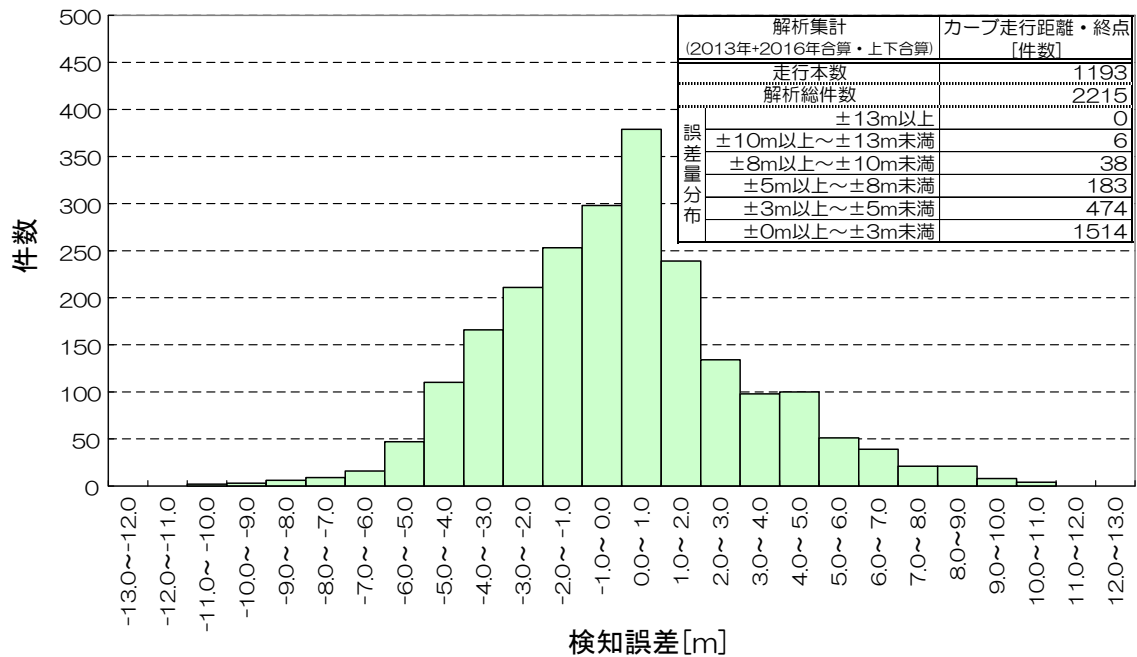


図 4-33 カーブ長による検定結果

(3) S字カーブ変化点による位置検知試験結果

山形鉄道フラワー長井線の S 字カーブ（右カーブから左カーブまたは左カーブから右カーブに連続的に変化するカーブ）のうち，7カ所を軌道のカーブ変化点による位置検知点として選定し，S 字カーブ変化点での検定（フィルタリング 6）の可能性を検証した．この結果，全試験期間で軌道方向誤差は±10m 未満となることを確認した．図 4-34 に計測結果を示す．

S 字カーブ変化点による検知は，(1)で示した軌道曲率半径による位置検知や(2)で示した軌道カーブ長による位置検知と比べ，誤差の分布が±10m 未満となっており，高い精度での検定を実現する可能性が確認できた．実際の軌道のカーブ区間には，直線から所定の曲率に至るまでにスムーズに移行するように緩和曲線と呼ばれる補助区間が設けられている．したがって，曲率半径 R が徐々に変化するため，始端位置や終端位置の特定が明確ではない．これに対し，S 字カーブ変化点による検知は，2 受信機から得られる速度ベクトルの方向成分の差が正から負もしくは，負から正という符号変化であるため明瞭に把握できたと考えられる．

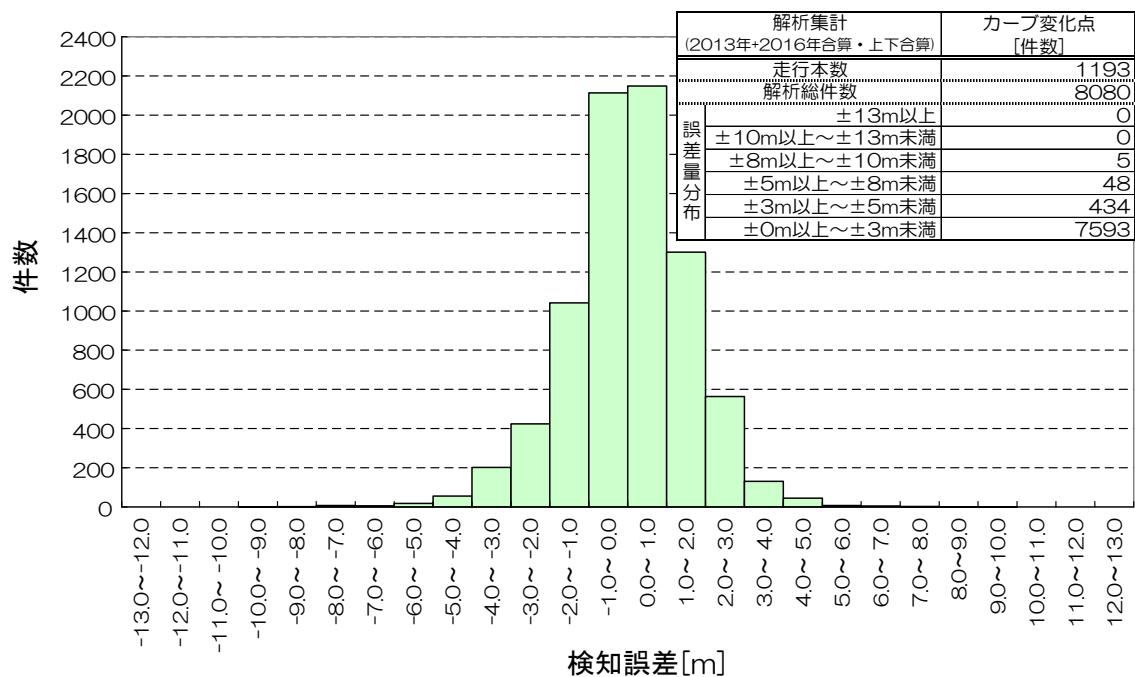


図 4-34 S 字カーブ曲率反転検知の検定結果

4.7 ハイブリッド位置検知

これまでの試験結果から、GNSS の測位情報にフィルタリング 1 から 3 を用いると信頼度の高い位置情報を取得できることが分かった。そこで、TG の速度情報と GNSS 受信機から得られる情報を組み合わせたハイブリッド位置検知を提案する。ハイブリッド位置検知では、0.1 秒ごとに、TG 出力の積分によって得られる位置情報を主体として GNSS 受信機からの情報を用いて補正して精度の高い列車位置検知を実現する。その方法を次に説明する。

列車は、フィルタリング 1 から 3 に合格した GNSS の測位情報を基点として基点からの移動距離で列車位置を定める。TG 出力の積分による移動距離は、常に TG の仕様で定まる速度誤差を加味して算出する。GNSS の測位情報は、フィルタリング 1 から 3 に一定時間合格し、その値が TG で算出した列車位置範囲である時に限り、新たな基点として採用する (図 4-35)。そして、このときには TG による積算誤差がキャンセルされる。

基点採用後から GNSS の測位情報が連続的にフィルタリングに合格していれば、GNSS の測位情報を基に列車長に対し前後に、GNSS の測位精度として設定した 13m 伸

ばした列車が移動していくこととなる（図 4-36）。しかし、GNSS の電波遮断が発生したり、GNSS の測位情報がフィルタリングに不合格になったりした場合には、TG 出力の積分のみによって列車位置が定まるため、このときの列車長は TG の誤差の累積分だけ前後に伸びることになる。列車長が伸びることは、他の列車に対する排他制御の区間が伸びることと等価で、安全側である。

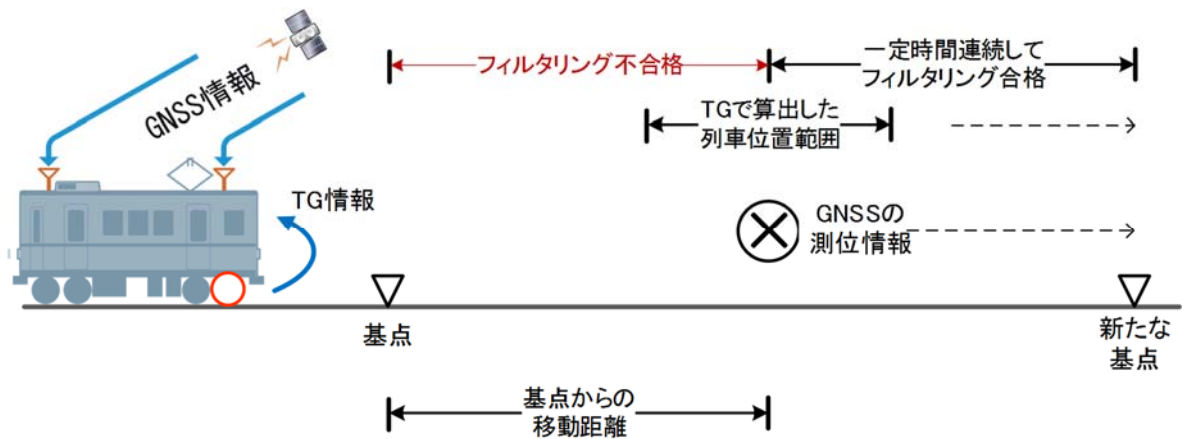


図 4-35 列車位置の算出

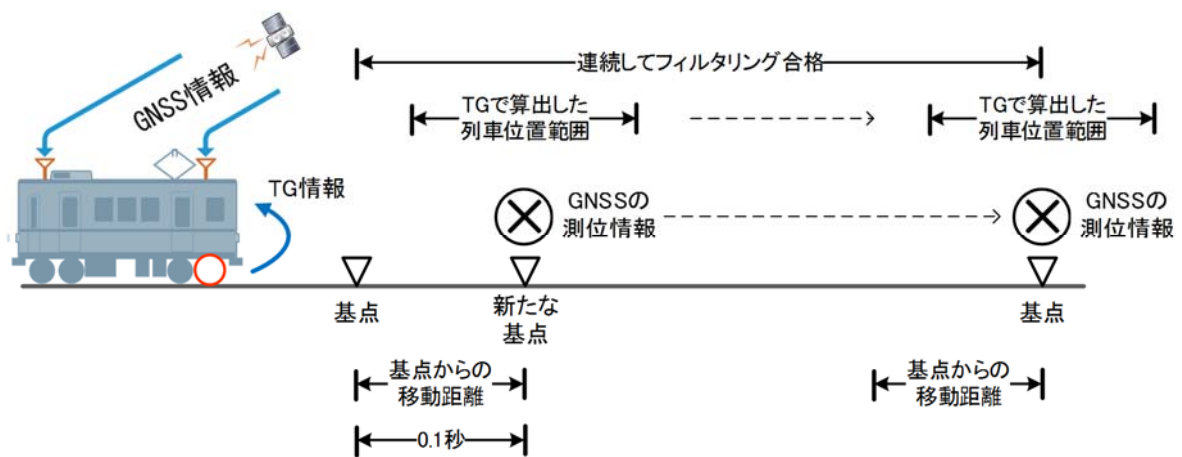


図 4-36 連続的にフィルタリング合格時

ハイブリッド位置検知を移動閉そくに用いる例を以下に説明する。移動閉そくでは、列車位置が重要であり、列車位置の誤差への対応が必要である。ここでは、実列車長の前後に誤差を加味した値を加えて仮想列車長とし、仮想列車長を基に移動閉そくを実現する。仮想列車長は、実列車長の前後に固定値としてGNSSの測位誤差 $\pm 13\text{m}$ を加え、列車が走行するとその前後に変値としてTGの速度誤差を加えていく(図 4-37)。仮想列車長は、フィルタリングに連続して合格すると、GNSSの測位情報を新たな基点に設定し、TGの速度誤差をクリアする(図 4-38)。

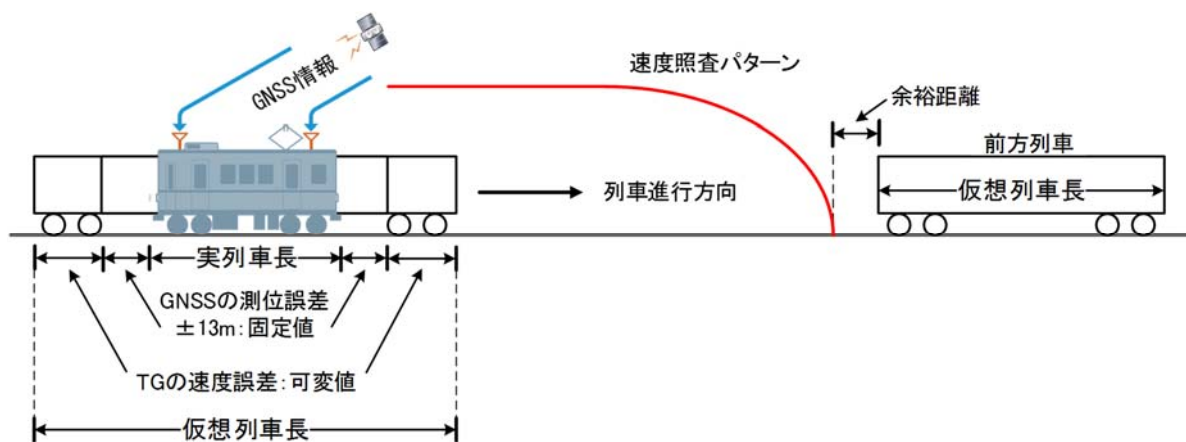


図 4-37 仮想列車長

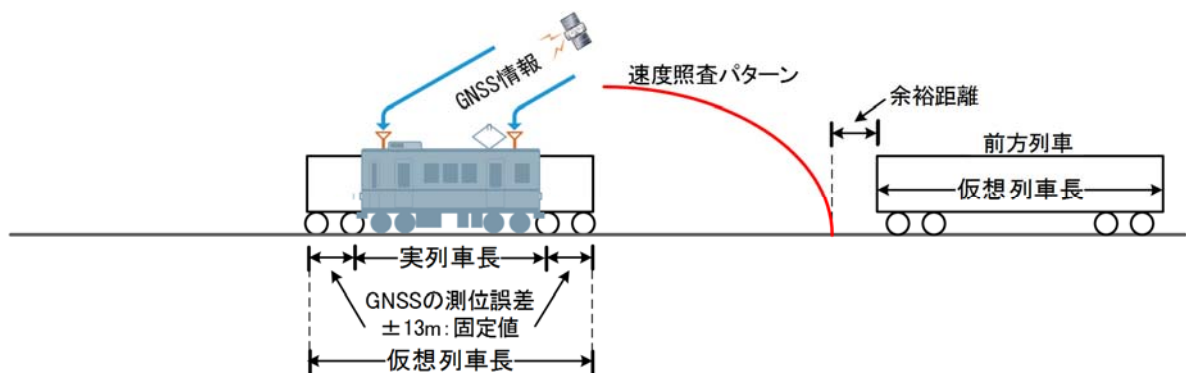


図 4-38 新たな起点設定時

4.8 GNSS の時刻情報の利用

GNSS 受信機から得られる情報は、位置、速度、時刻の 3 つがある。本章では、GNSS の高精度な時刻情報を利用したシステムの時刻同期とその応用として踏切制御を説明する。

4.8.1 各装置間の時刻同期

列車ダイヤに従って運行する鉄道においては、時刻は重要な情報であり、秒オーダーでの精度が求められる。これまでの列車制御システムは、各地上装置で時刻合わせを行っており、車上装置との同期は必ずしも行われてこなかった。無線式列車制御システムでは、車上主体であることから、各地上装置間だけでなく、車上装置を含めた時刻同期を行うことが望まれるが、この地上装置と車上装置間の時刻同期は、GNSS からの情報を利用することにより容易に実現できる。車上装置は、電波環境が悪い場所を走行することもあるが、秒オーダーの精度であれば車上装置内の発信器で補完できる。

4.8.2 踏切制御

踏切制御は、地上側の列車検知センサである踏切制御子の情報と時間をもとに行われてきた。近年、車上装置と踏切制御装置間で情報交換を行いながら制御を行う方式が登場し、警報時分の適正化や安全性向上の効果が認められている。一方、地方交通線における踏切制御には制御の性能向上や安全性のみならず、経済性への配慮も必要になる。この要件を満たすものとして、GNSS による時刻同期を前提に、必ずしもリアルタイム性が保証されない携帯電話回線による情報交換を利用した踏切制御を開発した。GNSS の時刻情報と携帯電話回線を利用することで、踏切制御子などの地上設備を軽減し、低コスト化と保守の軽減を実現するほか、踏切制御で最も大切な無遮断を防止でき、安全性も期待できる。以下にその概要を説明する。

GNSS の時計を用いた踏切制御システムを図 4-39 から図 4-42 に示す。以下に動作シーケンスを示す。この方式は、列車が出発する前に踏切制御装置へ鳴動開始時刻を伝える事により、鳴動開始時刻が来れば踏切制御装置が単独鳴動開始することにより無遮断を防ぐことが可能になる。以下にその手順を説明する。

- ① センター処理装置は、列車を A 駅から出発させるときに、次の停車駅である B 駅までの全踏切制御装置に対して、各踏切の鳴動点までに列車が最短で到達する鳴動開始時刻を伝える(図 4-39)。

- ② 各踏切制御装置は、鳴動開始時刻を設定した後、センター処理装置へ鳴動開始時刻設定完了を伝える(図 4-39).
- ③ センター処理装置は、全踏切制御装置からの鳴動開始時刻設定完了を受け取ると、信号機を進行現示に制御して列車を出発させる。(図 4-39).
- ④ 列車は、駅を出発するとセンター処理装置へ一定周期で現在の列車位置を伝える(図 4-40).
- ⑤ センター処理装置は、列車から送られてくる列車位置情報から各踏切の鳴動開始時刻を再計算し、各踏切制御装置へ伝える。また、センター処理装置は、列車位置の追跡により列車位置の合理性チェックを行う。踏切制御装置は、センター処理装置の新しい鳴動開始時刻を受け取ると、鳴動開始時刻を更新する(図 4-40).
- ⑥ 各踏切制御装置は、鳴動開始時刻が来ると鳴動を開始し踏切を遮断する(図 4-41).
- ⑦ 列車は、各踏切を通過すると、踏切通過情報をセンター処理装置へ伝える。また、④の情報からセンター処理装置は、踏切通過判断を行う(図 4-42).
- ⑧ センター処理装置は、列車からの踏切通過情報と列車位置追跡による列車位置情報から踏切通過を判断し、踏切制御装置へ鳴動停止情報を伝える。踏切制御装置は、鳴動停止情報を受け取ると鳴動を終了する(図 4-42).

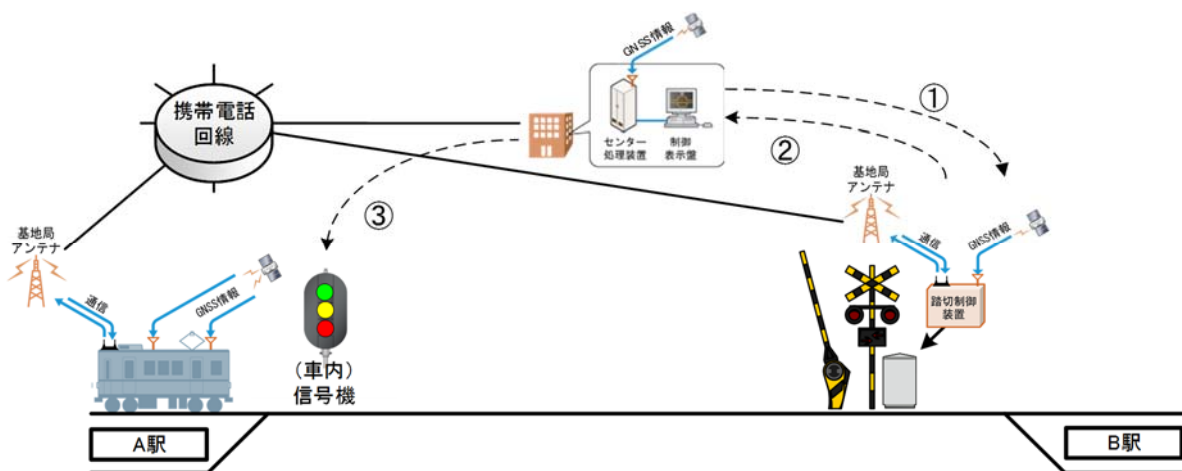


図 4-39 ①から③ 駅出発

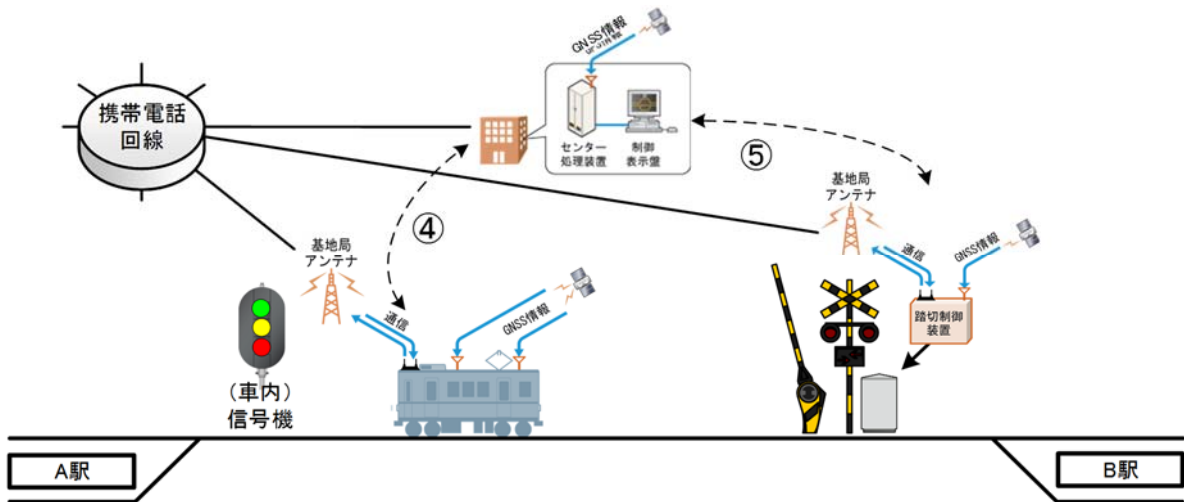


図 4-40 ④から⑤ 駅間走行

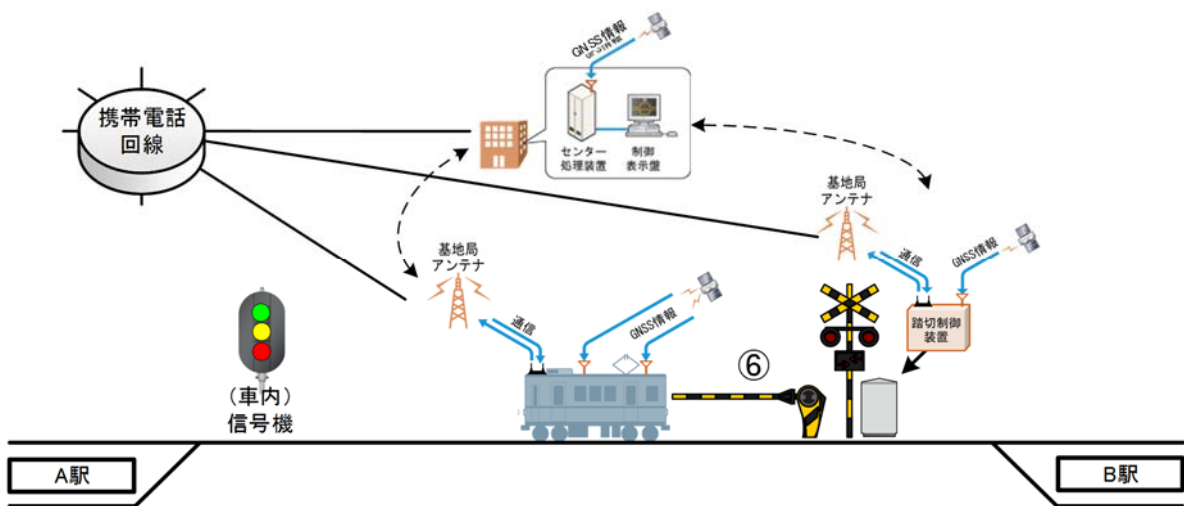


図 4-41 ⑥ 鳴動

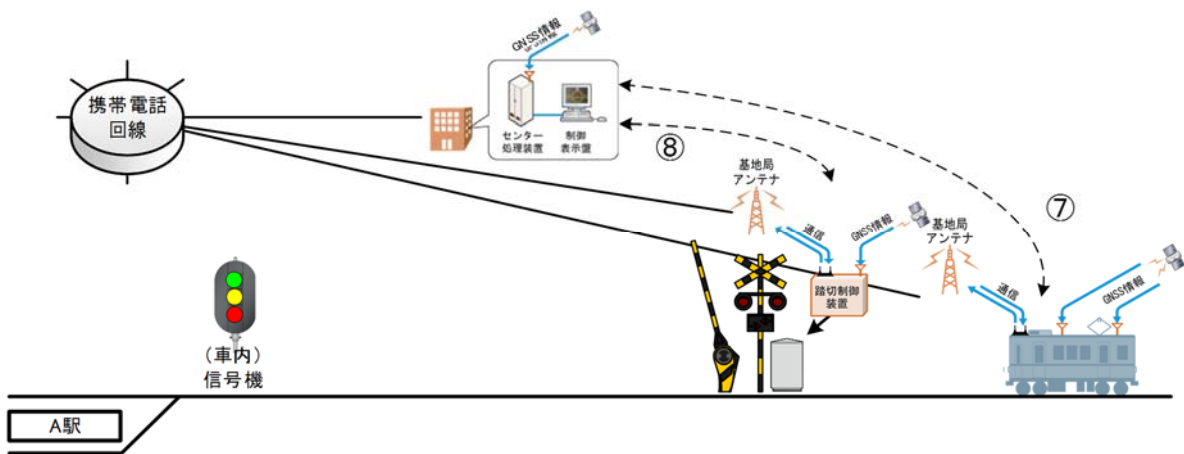


図 4-42 ⑦から⑧ 鳴動停止

4.9 まとめ

第3章で導いた「GNSS 測位技術を列車保安制御へ利用するには、列車保安制御に許容できる誤差を想定し、想定した測位誤差を超えた場合を測位異常と判定し、その際の測位情報を利用しないフィルタリング技術の導入が有効」との考え方を推し進め、GNSS 受信機の基礎試験を基に8手法のフィルタリング1から8を提案した。

- ① フィルタリング1：軌道からの離隔検定.
- ② フィルタリング2：アンテナ間離隔検定.
- ③ フィルタリング3：方向検定.
- ④ フィルタリング4：軌道曲率半径による検定.
- ⑤ フィルタリング5：軌道カーブ長による検定.
- ⑥ フィルタリング6：S字カーブ変化点による検定.
- ⑦ フィルタリング7：TG速度情報による検定.
- ⑧ フィルタリング8：加減速度を利用した検定.

これらフィルタリングについては、17ヶ月にわたる長期試験によって動作状態を確認した。

フィルタリング1から3は、GNSSを列車保安制御に利用するための基本フィルタリングと位置付けた。実車試験は、位置精度の要求仕様を $\pm 13\text{m}$ と定めて実施した結果、66,762件のデータ全てが $\pm 10\text{m}$ 未満に収まった。GNSSの速度情報は、設定した区間を走行したときの区間距離の誤差として評価し、 $\pm 1.5\%$ 未満に収まり、既設のTGのみで列車位置検知するよりも0.5%改善できた。この試験には電波状態の悪い区間も含まれており、安定した列車位置検知が可能であることを示している。

フィルタリング4から6は、精度向上の補助手段と位置付けた。実車試験結果は、全てのデータが $\pm 13\text{m}$ 未満に収まった。

以上の結果から、フィルタリングによる測位異常の判定動作を確認した。

GNSSを列車保安制御システムに利用するために、上記フィルタリングの効果を基にGNSSとTGによるハイブリッド位置検知を提案した。ハイブリッド位置検知は、フィルタリングにより正常判定したGNSSの位置情報をTGと組み合わせることにより高精度の列車位置情報を取得でき、軌道回路に匹敵する信頼度を確保する。フィルタリングで想定した誤差は、制御時における列車間の間隔に加える余裕距離等に反映し、システムの的に確実な安全性を保障する。

GNSS の高精度な時刻情報を利用したシステムの時刻同期と，その応用として踏切制御を説明した．

第5章 GNSS 利用列車制御システムのケーススタディ

5.1 試験システム

5.1.1 試験システムの考え方

第4章の研究を基に、GNSS を利用した試作システムを構築した。試験は、山形鉄道フラワー長井線、西日本旅客鉄道岩徳線、江ノ島電鉄江ノ島線をお借りし、既設システムと同等の列車制御を行うために必要な機能を盛り込んだ。試験システムは、GNSS を最大限に利用して、設備を何処までスリム化できるかにチャレンジした。列車位置検知に GNSS と TG (速度計) を用い、通信回線に携帯電話回線を使用するために GNSS の時刻情報を用いた。試験システムと既設システムとの接続は、車両の速度計のみとし、既設システムとの比較で動作確認をした。

5.1.2 システムの構成

試験システムは、中央に設置するセンター処理装置、駅に設置する駅装置、列車に設置する車上装置によって構成する (図 5-1)。

(1) センター処理装置

センター処理装置は、自動進路制御装置、全線の閉そくと連動機能を集約した閉そく装置、携帯電話回線の通信制御を行う伝送中央装置で構成する。伝送中央装置には、GNSS 受信機を設置し、時刻情報を得ると共に GNSS の測位状態を監視する。

実車試験では、自動進路制御装置を使用せず、制御盤からの手動設定とした。

(2) 駅装置

駅装置は、転てつ機を制御する単機能のものであり、GNSS の時計に同期して携帯電話回線との通信を行う携帯電話 I/F と、転てつ機を制御する現場機器端末で構成する。試験システムの駅装置は、試験を行う線区に合わせて製作し、全線の制御状況を確認できるようにした。フラワー長井線の場合は、5 台の駅装置を使用した (図 5-2)。

(3) 車上装置

車上装置は、既設システムとして沿線に設置されている装置の機能を集約したものであり、車上装置単独で列車位置検知を行う GNSS と速度検知部および地点検知部、GNSS の時計に同期して携帯電話との通信を行う携帯電話 I/F、車内信号機、ブ

ブレーキ制御リレーで構成する。既設との接続は、速度検知部の速度計入力のみであり、地点検知の入力は手動入力、ブレーキ制御リレーは未接続とした。以上により、列車は単独でパターン式速度制御を行う。

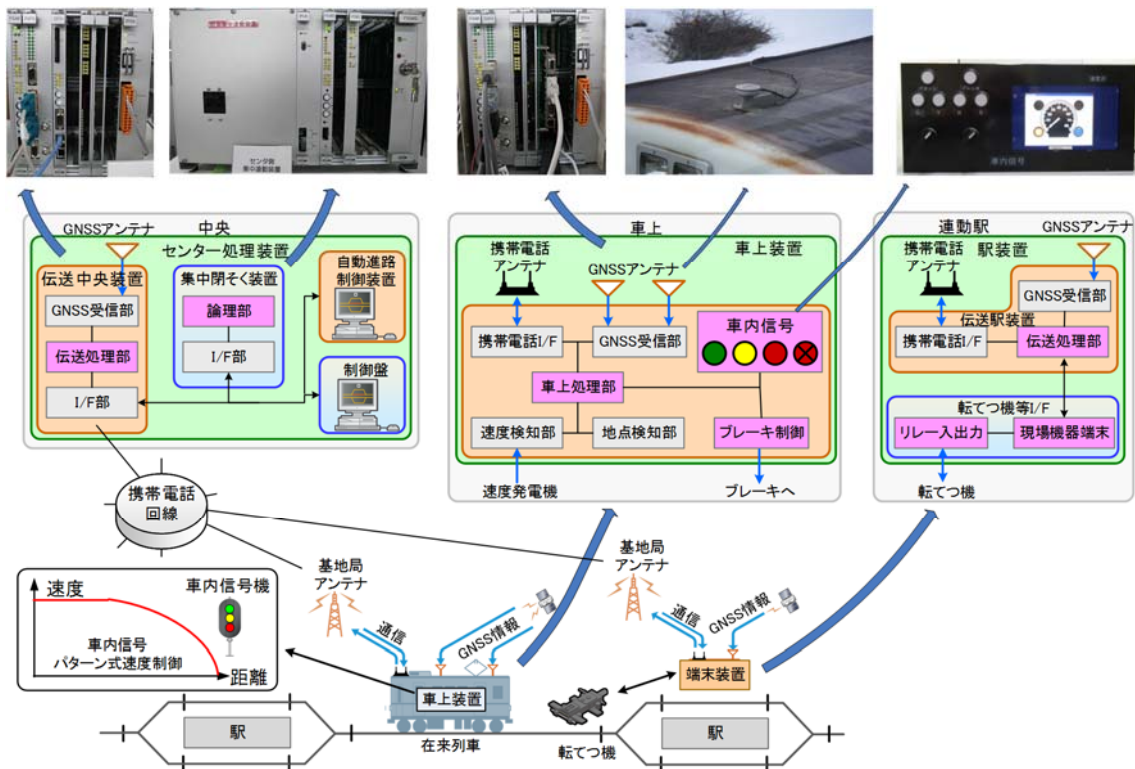


図 5-1 試験システムの構成

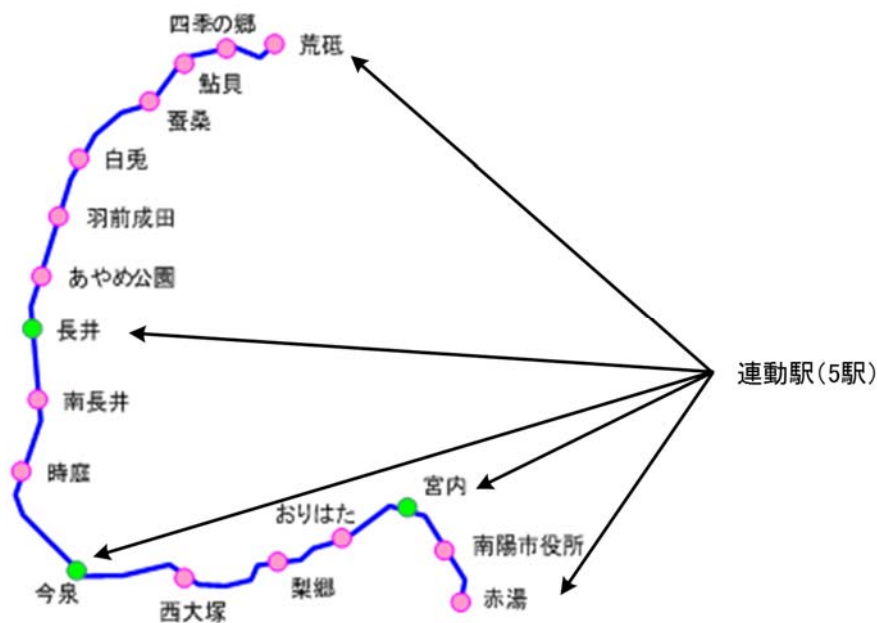


図 5-2 フラワー長井線の連動駅

5.1.3 GNSS を利用するためのシステム設計

GNSS は、GNSS 衛星からの電波状態によって使用できる場所と使用できない場所がある。このため、列車制御を行う上で高精度の位置情報が必要な場所を以下に示す①～④の4カ所選定した(図 5-3)。この4カ所以外では、測位不能やフィルタリングにより NG となっても列車運行に支障しないこととした。

- ① 駅進入検知点：駅進入時の速度照査の精度を確保。
- ② 駅構内距離補正点：駅停止速度照査の精度を確保。
- ③ 到着検知点：駅に列車が到着したことを検知。
- ④ 停止点：車内信号機が停止信号現示の場合は、過走防護、ご出発防止。

車内信号機が進行信号現示の場合は、列車位置の補正。

次に、携帯電話も電波状態によって通信できなくなることがあるため、携帯電話回線を使用するための確実に通信が必要な場所を以下に示す①～⑤の5カ所選定した(図 5-3)。この5カ所以外では、通信不能となっても列車運行に支障しないこととした。

- ① 停止点：列車が駅を出発したことをセンター処理装置へ通知。
- ② 駅進出検知点：列車が駅構内を進出したことをセンター処理装置へ通知。
- ③ 場内問合せ地点：列車が場内進路要求をセンター処理装置へ通知。

センター処理装置が信号情報を列車へ通知。

- ④ 駅場内検知点：列車が駅構内に侵入したことをセンター処理装置へ通知。
- ⑤ 到着検知点：列車が駅に到着したことをセンター処理装置へ通知。

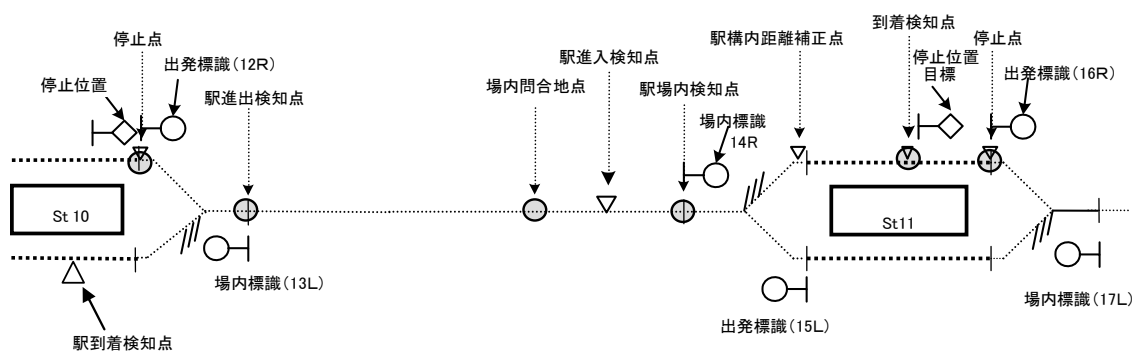


図 5-3 システム設計

5.1.4 システムの動作概要

システムの動作概要について以下に示す。

(1) 駅間走行

駅間走行の動作概要を以下に示す（図 5-4）。

① 車上装置は、センター処理装置から出発進路を携帯電話回線経由で受信すると、車内信号を現示し次駅場内手前までの速度照査パターンを発生する。出発後、センター処理装置に出発を送信する。

② 駅間において車上装置は、速度照査パターンに従って、連続的に速度照査を行う。

③ 車上装置は、次駅接近をセンター処理装置に携帯電話回線経由で送信する。車上装置は、センター処理装置から場内進路開通を携帯電話回線経由で受信すると、停車位置までの速度照査パターンを発生する。

④ 車上装置は、停止位置目標に停車後、センター処理装置に次駅到着を送信する。

⑤ 車上装置は、過走防護と誤出発防止を行う。

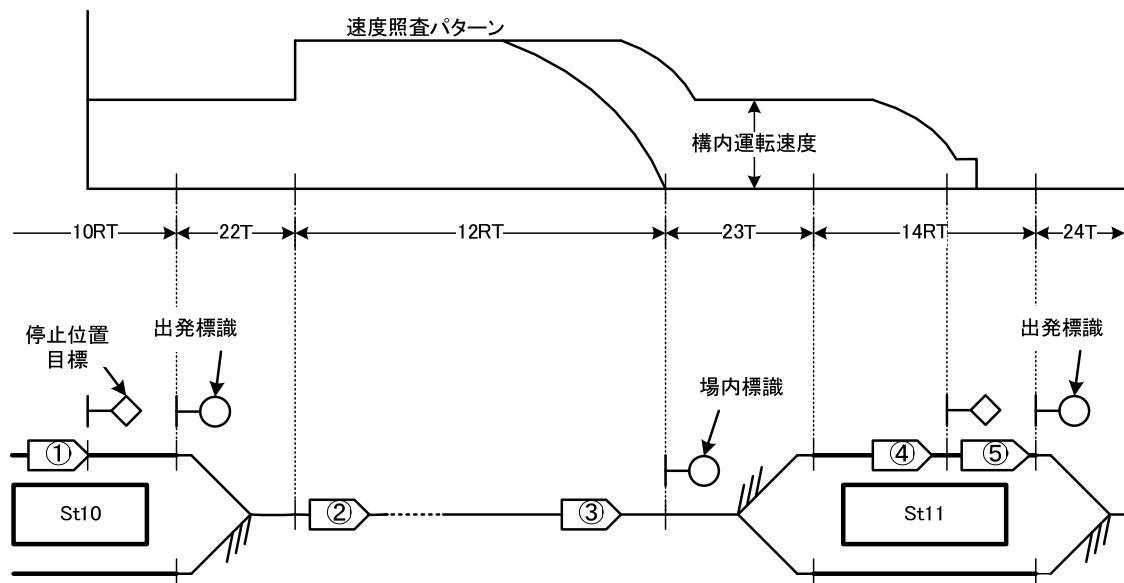


図 5-4 駅間走行

(2) 現示パターン

現示パターンは、G、Y、R、×の4現示を定義した。駅間走行の動作概要を以下に示す。

① 駅場内手前まで：車上装置は、センター処理装置から駅出発時にG現示情報を受け取ると、次駅場内手前までの速度照査パターンを発生し、車内信号機にG現示を出力する。その後も次駅の駅進入検知点までG現示情報を受け取り続け、車内信号機にG現示を出力する。駅進入検知点までにセンター処理装置から次駅場内の開通情報を受け取れない場合は、駅場内手前までの速度照査パターンに従って、車内信号機にY現示を出力する（図 5-5）。

② 次駅への進入：車上装置は、センター処理装置から駅進入検知点までに次駅場内の開通情報を受け取ると、次駅場内手前までの速度照査パターンを次駅停止点までの速度照査パターンへ切り替えて、車内信号機にG現示を出力し続ける。①の状態次駅場内の開通情報を受け取ると、次駅場内手前までの速度照査パターンを次駅停止点までの速度照査パターンへ切り替えて、車内信号機出力をY現示からG現示に切り替える。その後、車上装置は、場内標識通過を検知すると車内信号出力をG現示からY現示へと切り替える（図 5-6）。

③ 次駅到着：車上装置は、停止目標での停止を検知すると、車内信号出力をY現示からR現示に切り替える。オーバーランした場合は、非常ブレーキ出力を行い、車内信号出力をR現示から×現示に切り替える。

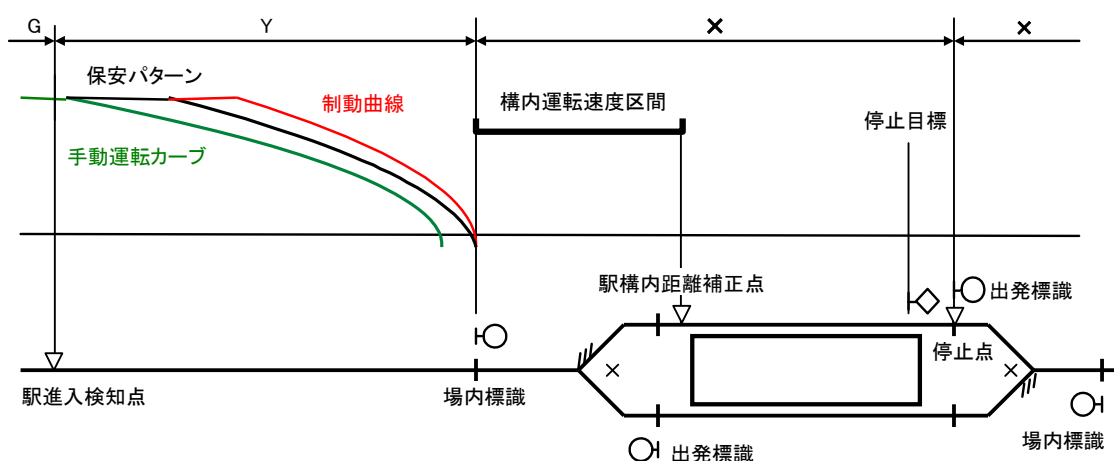


図 5-5 場内手前のパターン

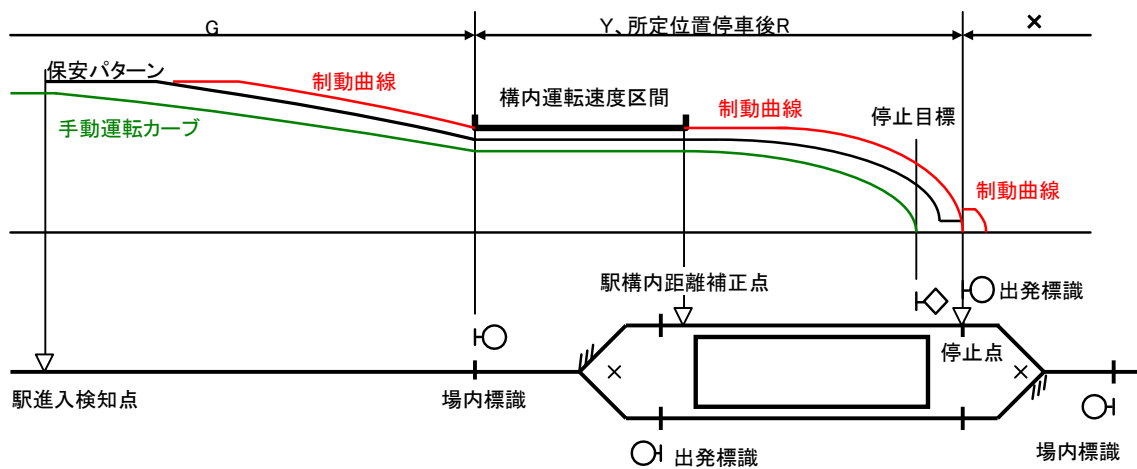


図 5-6 構内のパターン

5.1.5 試験結果

試験システムの試験は、2012年10月から2015年3月までの4回、実列車を用いて既設のシステムとの比較で評価した。システム設計で定義した「高精度の位置が必要な場所」と「確実に通信が必要な場所」は、目視で容易に確認できる踏切道や信号機などを利用した。

試験システムの評価は、有識者や鉄道事業者に立ち会いをお願いし、軌道回路と同等の列車位置検知能力のもと、既設と同等以上の性能が得られることを確認した。

① 2012年10月：駅間走行試験

山形鉄道フラワー長井線にて、駅間走行に必要な機能の確認を実施した。

② 2014年7月：運転取り扱い試験

西日本旅客鉄道岩徳線にて、出入庫、分割併合、入替など運転取り扱いに関する機能確認を実施した。

③ 2015年1月から3月：長期安定稼働試験

江ノ島電鉄江ノ島線にて、営業列車を利用した長期安定稼働試験を実施した。

④ 2015年3月：総合試験

山形鉄道フラワー長井線にて、列車の出庫から入庫までの全ての動作確認を行う総合試験を実施した。

5.2 既設システムとの比較

既設システムとの比較として山形鉄道フラワー長井線と試験システムの比較を以下に示す。

5.2.1 システムのスリム化

山形鉄道フラワー長井線のシステム構成は、CTC センターから CTC 回線を通じて CTC 駅装置へ接続し、全 5 駅の連動装置を遠隔制御する。各駅の連動装置は、地上信号機、列車位置検知を行う軌道回路、列車を制御する ATS 装置、進路を制御する転てつ機など沿線に配置した装置によって列車制御を行う、一般的な地域鉄道の地上主体型システムである（図 5-7）。

これに対し試験システムは、センターのセンター処理装置に連動装置の機能を集約し、沿線には転てつ機とそれを制御する端末装置のみを配置する。地上信号機、軌道回路、ATS 装置などの地上装置の機能は、車上装置の車内信号機、車上位置検知システム、パターン式速度制御の機能へと置き換える。そして、センター処理装置と各装置は、携帯電話回線で接続する（図 5-8）。

以上の結果、システムの大幅なスリム化を実現した。これは、GNSS を有効利用した成果と言える。

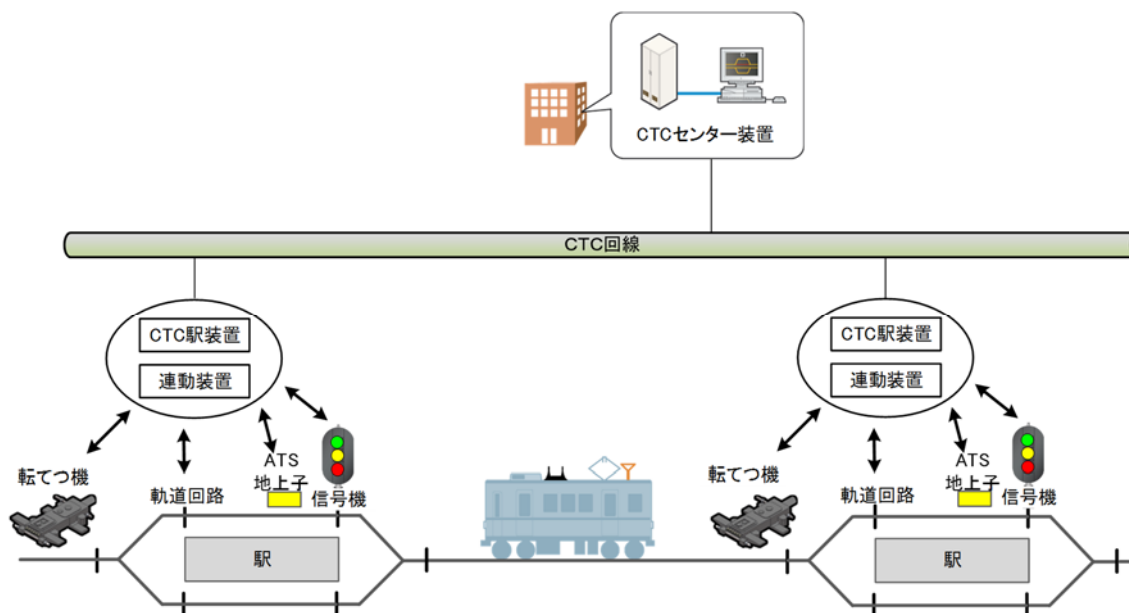


図 5-7 既設システムの構成

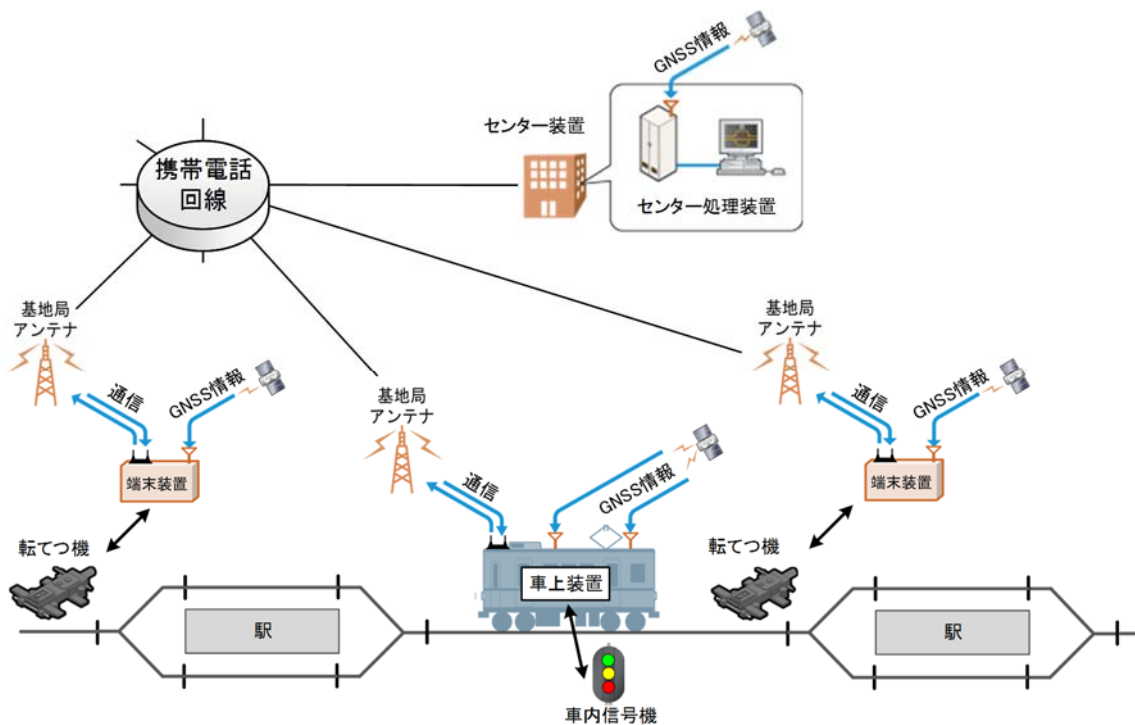


図 5-8 試験システムの構成

5.2.2 保守性の向上

試験システムは、沿線に点在する地上信号機、軌道回路、ATS 装置、CTC 装置およびこれらを接続するケーブルなどを削減したことにより、これらの保守が不用になる。装置が削減されれば、電源装置も小型で保守も簡単になる。また、沿線の装置が無くなれば、沿線への巡回保守回数も削減できる。車上主体型の場合は、車上装置が追加されることとなるが、車上装置の保守は、車両の保守と同時に行えば良い。

5.2.3 機能向上

既設システムから試験システムへ置き換えたときの機能向上について以下に述べる。

- ① 速度照査：既設は、点制御の ATS 装置だが、本試験システムは速度パターンを用いた連続式速度制御となり安全性が向上する。
- ② 駅構内への同時侵入：列車のホーム侵入時には、停止位置までの停車用速度照査パターンが設定され、オーバーランが防止されるので駅構内への上り列車と下り列車の同時進入が可能になる。

5.3 まとめ

GNSS から得られる情報は，位置，速度，時刻の 3 種である．本章では，この 3 つの情報を最大限に活用して試験システムを構築し，実線区での実車試験を実施し，既設との比較で評価した．この試験システムは，列車の出庫から入庫までの全ての機能を有しており，実用化レベルに達していると評価している．GNSS の利用は，既設の列車制御システムをスリム化し，既設のシステムと比較して機能的にも経済的にも優れていると考えられる．

第6章 結論

本研究では、列車保安制御システムへの全球測位衛星システム（GNSS）利用に関して検討を行った。主な成果および今後の課題を以下に述べる。

6.1 本研究の成果

(1) 列車保安制御と列車位置検知

第2章において、軌道回路による列車位置検知が重要な役割を果たしていることを明らかにした。併せて、地方鉄道の踏切では、落ち葉などの踏みしめ等による列車検知の不備が問題となっている状況を説明した。さらに、無線式列車制御システムの列車位置検知システムが、車上の速度発電機のパルス数積算を利用しており、編成車両数の少ない地方鉄道に導入するには、車輪の滑走空転などの誤差要因に対する効果的かつ低コストの対応策が求められ、GNSSの測位情報が列車保安制御に利用できるようになることの重要性を指摘した。

(2) 鉄道におけるGNSS利用の現状と課題

第3章において、GNSS測位技術を列車保安制御へ利用するには、列車保安制御に許容できる誤差を想定し、想定した測位誤差を超えた場合を測位異常と判定し、その際の測位情報を利用しないフィルタリング技術の導入が有効との考え方を示した。

(3) 列車保安制御システムへのGNSS利用

第4章において、第3章で導いた「GNSS測位技術を列車保安制御へ利用するには、列車保安制御に許容できる誤差を想定し、想定した測位誤差を超えた場合を測位異常と判定し、その際の測位情報を利用しないフィルタリング技術の導入が有効」との考え方を推し進め、GNSS受信機の基礎試験をもとに8手法のフィルタリング1から8を提案した。

これらフィルタリングについては、17ヶ月にわたる長期試験によって動作状態を確認した。

フィルタリング1から3は、GNSSを列車保安制御に利用するための基本フィルタリングと位置付けた。実車試験は、位置精度の要求仕様を $\pm 13\text{m}$ と定めて実施した結果、66,762件のデータ全てが $\pm 10\text{m}$ 未満に収まった。GNSSの速度情報は、設定した区間を走行したときの区間距離の誤差として評価し、 $\pm 1.5\%$ 未満に収まり、既設のTGのみで列車位置検知するよりも0.5%改善できた。この試験には電波状態の悪い区間も含まれており、安定した列車位置検知が可能であることを示している。

フィルタリング 4 から 6 は、精度向上の補助手段と位置付けた。実車試験結果は、全てのデータが $\pm 13\text{m}$ 未満に収まった。

以上の結果から、フィルタリングを用いれば測位異常を判定できることを確認した。

GNSS を列車保安制御システムに利用するために、上記フィルタリングの効果をもとに GNSS と TG によるハイブリッド位置検知を提案した。ハイブリッド位置検知によると、フィルタリングにより正常判定した GNSS の位置情報を TG と組み合わせることにより高精度の列車位置情報を取得できる。また、軌道回路に匹敵する信頼度を確保する。フィルタリングで想定した誤差は、制御時における列車間の間隔に加える余裕距離等に反映し、システムの的に確実な安全性を保障する。

GNSS の高精度な時刻情報を利用したシステムの時刻同期と、その応用として無遮断を防止できる踏切制御法を説明した。

(4) GNSS 利用列車制御システムのケーススタディ

第 5 章において、GNSS による位置、速度、時刻の情報を最大限に活用した試験システムは、列車の出庫から入庫までの全ての機能を確認し、実用化レベルに達していると評価した。また、既設の列車制御システムをスリム化し、既設のシステムと比較して機能的にも経済的にも優れていると考えられる。

6.2 今後の課題

(1) 実用化に向けて

本研究の実用化には、戦略が必要である。2017 年 4 月末「鉄道分野における GNSS 利活用ガイドライン」(第 1.0 版)が制定され、制御用途として具備する条件が定義された。これを足がかりに、ハイブリッド位置検知を TG の補助装置としての位置付けで実用化し、実績を積むことから始めたい。将来、この実績が評価されれば、主装置としての地位が確立されることとなる。

(2) ハイブリッド位置検知の可能性

本研究では、TG と GNSS のハイブリッド位置検知について提案した。GNSS は、衛星からの電波を受信する必要があるため、トンネルなど電波の届かないところでは、使用できない。ここでは、GNSS 以外のハイブリッド位置検知に利用できる速度測定センサとして、加速度センサとドップラレーダ速度計について取り上げ、ハイブリッド

位置検知の可能性を述べる。

加速度センサは、MEMS(Micro Electro Mechanical System)技術の進歩により、安価で高性能のものが入手できるようになった。この加速度センサを用いて列車速度を測定する手法を考える。列車の軌道は、勾配とカーブがあり列車の姿勢が変化する。このため、3次元の加速度センサと3次元の角速度センサを組み合わせたMEMSセンサを用いて列車の姿勢を考慮した速度測定を行う必要がある。しかし、MEMSセンサは、ノイズや特性の非直線性などにより、絶対値を正確に測定するには不向きである。駅での停車時に補正することも考えられるが、列車は乗客の乗降などで揺れが発生するために難しい。

以上より、絶対速度ではなく相対速度で考えてみる。例えばTGと組合せて車輪の滑走と空転が発生したときにMEMSセンサへ切り替えて速度の補正を行う。また、GNSSと組み合わせて4.5.3節で述べたフィルタリング4から6によって検知したカーブの特徴点と、MEMSセンサで検知したカーブの特徴点を比較することにより、列車位置を検知するなどが考えられる。

ドップラレーダ速度計は、①鉄道環境に合わせた設計、②電波環境の確保、③軌道の状況の3つが課題である。①は、降雪による電波反射点の変化をどのように克服するかである。②は、設置位置を適切に選択すると共に①との関係もある。③は、軌道がバラストなど単一であれば良いが、スラブや鉄橋など電波の反射状況が変化すると速度誤差が大きくなってしまう。この3つの課題を解決すれば列車速度計として利用できる。③は、MEMSセンサと同様に相対速度を利用することが考えられる。また、軌道の変化点を検出できることから、GNSSの測位情報と比較することにより、列車位置を検知することなどが考えられる。

以上より、MEMSセンサとドップラレーダ速度計は、ハイブリッド位置検知のセンサとして有望である。

謝辞

本研究は、2009年から3年間行った国土交通省補助事業「地方・ローカル線・路面電車が有効な地上システムが省力化可能な列車制御装置」が基点となっています。本研究のきっかけを作って頂きご指導を頂いた国土交通省鉄道局の方々に感謝いたします。

この補助事業を始めるに当たり、「本試験システムシステム」に関する調査検討会を発足することとなり、日本大学の中村英夫名誉教授（現東京大学）に委員長を快諾して頂き、今日まで大変熱心なご指導を賜り深く感謝いたします。同時に日本大学の高橋聖教授は、長期にわたる勉強会においてご指導を賜り深く感謝いたします。同じく日本大学の、木原雅巳教授、泉隆特任教授も本研究を論文としてまとめるにあたりご指導賜り深く感謝いたします。

補助事業及びGNSSの研究において、交通安全環境研究所の水間毅交通システム研究領域長（現東京大学特任教授）、後任の廣瀬道雄交通システム研究領域長（現運輸安全委員会首席鉄道事故調査官）をはじめ交通安全環境研究所の方々のご指導に感謝いたします。また、「鉄道分野におけるGNSS利活用に関するガイドライン」の発行に参加させていただいたことに感謝いたします。

本研究を進めるには、実車試験が必要不可欠でした。

長年にわたる実車試験を快く受け入れて頂いた山形鉄道株式会社の押切栄代表取締役専務をはじめ、ご協力頂いた社員の方々に感謝いたします。

国土交通省補助事業での路面電車を用いた試験においてご協力頂いた広島電鉄株式会社の藤元秀樹取締役をはじめ社員の方々に感謝いたします。

試験システムの運転取り扱い試験においてご協力頂いた西日本旅客鉄道株式会社の方々に感謝いたします。

試験システムの長期稼働試験においてご協力頂いた江ノ島電鉄株式会社の方々に感謝いたします。

本研究を進めるに当たり、適切な研究環境を整えて頂きご指導を頂いた、株式会社京三製作所の役員の方々に深く感謝いたします。

最後に、本研究の試作、試験、データ解析などの実務を共に行った、原陽一郎エキスパート、神宮雅昭サブマネジャー、記虎正幸主任、大和田厚祐主任、山田麻香主任、京三システム株式会社の黄怡杰氏に深く感謝いたします。

参照文献

- [1] 内閣府, “戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) ,”
<http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/index.html>. [2018.9].
- [2] 国土交通省, “i-Construction,”
http://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000028.html. [2018.9].
- [3] 日本貨物鉄道株式会社, “「運転支援システム (PRANETS)」の更新完了について,”
<https://www.jrfreight.co.jp/storage/upload/1c475d540ceb2950fc9ac7e21f50bb04.pdf>.
[2018.9].
- [4] 近鉄車両エンジニアリング株式会社, “運転支援システム GPS Train Navi,”
<https://www.kre-net.co.jp/product/drivingsupportgps/>. [2018.9].
- [5] 公益財団法人鉄道総合技術研究所, “CARAT,”
<https://www.rtri.or.jp/rd/division/rd47/rd4730/rd47300101.html>. [2018.9].
- [6] 馬場裕一, 立石幸也, 森健司, 青柳繁晴, 武子淳, 齋藤信哉, 鈴木康明, 渡邊貴志, “無線による列車制御システム (ATACS) ,”
JR EAST Technical Review, 第 No.5, pp. 31-38.
- [7] B. W. P. a. J. J. Spilker, Global Positioning System: Theory and Applications, AIAA, 1996,
Amer Inst of Aeronautics, 1996 年.
- [8] JR 東日本コンサルタンツ株式会社, “ポジショニングソリューション,”
<https://www.jrc.jregroup.ne.jp/gyomu/ictbiz/posisol/index.html>.
- [9] 城田 他, “GPS 応用列車在線表示システムの開発,”
第 51 回鉄道サイバネ・シンポジウム論文集, 2014 年.
- [10] 日本貨物鉄道株式会社, “「PRANETS」の列車位置情報把握機能の使用開始について,” 2008 年
<http://www.jrfreight.co.jp/common/pdf/news/200811-02.pdf>.
- [11] 日本貨物鉄道株式会社, “運転支援システム「PLANETS」,” 2016 年
<http://www.jrfreight.co.jp/common/pdf/news/2016-07-12-03.pdf>.
- [12] 東日本旅客鉄道株式会社, “地方交通線を主な対象とした列車接近警報装置の開発導入について,” 2015 年
<https://www.jreast.co.jp/press/2015/20150902.pdf>.
- [13] 西日本旅客鉄道株式会社, “作業員の安全性向上,”
<https://www.westjr.co.jp/company/action/technology/technology/04/>.
- [14] 小堀雄三, 天空列車チベット鉄道を支える技術, 成山堂書店, 2009 年.
- [15] みちびき (準天頂衛星システム), “第 2 回日欧 GNSS 官民ラウンドテーブル,” 3 月 2017 年
http://qzss.go.jp/news/archive/eu-japan-02_170504.html. [2018.9]
- [16] 米国政府, “Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard 4th Edition,” 米国政府, 2008 年.
- [17] 坂井丈泰, “SBAS の概要と最近の研究動向 電子航法研究所出前講座,” 2007 年
www.enri.go.jp/~sakai/pub/demae_070719_sbass.ppt.
- [18] 米国政府, “Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard,” 米国政府, 2001 年 10 月.
- [19] 中村英夫, “地方鉄道線区の経営改善スキーム,”

電気学会全国大会 S22-5, 2008 年 3 月.

- [20] 中村英夫, “プローブ車両用信号設備計測技術の開発,”
JREA, Vol150, 9 月号, 2007 年 9 月.
- [21] H. NAKAMURA, “Advances in Signalling Systems and the Outlook for Next-
Generation Train Control Systems in Japan,” 3rd Asia-Pacific Control Command and
Signalling (CCS) Workshop, 2014 年 10 月.
- [22] 杉本末雄、柴崎亮介, GPS ハンドブック, 朝倉書店, 2010 年.
- [23] 坂井丈泰, GPS 技術入門, 東京電機大学出版局, 2003 年.
- [24] 進士昌明, 無線通信の電波伝搬, 電子情報通信学会, 1992 年.
- [25] 安田明生, “GPS の現状と展望,”
電子情報通信学会誌, Vol82, 第 No12, pp. 1207-1215.
- [26] P. M. a. P. Enge, Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance
Second Edition, Ganga-Jamuna Press, 2010 年.
- [27] 水間毅、吉永純、工藤希, “衛星を用いた列車制御・保安システムの開発,”
交通安全環境研究所報告, 第 11 号, pp. 13-22, 2008 年.
- [28] 田村俊徳、山下遼、秋田学、稲葉敬之、坪田光、浅野晃, “2 周波 CW レーダを用
いた列車速度計の開発,” 電子情報通信学会総合大会 2014 B-2-32, 2014 年.

業績論文

A 審査付き論文

1. 浅野晃, 中村英夫:「列車保安制御への GNSS 利用に関する一検討」, 信頼性学会誌 (論文)「信頼性」, Vol.40, No.3, (通巻 241 号) 2018.5
2. Akira ASANO, Tetsuya TAKATA, Hideo NAKAMURA : Integrated train control system : The new direction of train control system, The International Symposium on Speed-up and Sustainable Technology for Railway and Maglev Systems, 10-12, Chiba, JAPAN, 2015.12
3. 齊藤 嘉久, 浅野 晃, 中村 英夫, 望月 寛, 高橋 聖, "階層化による列車制御システムの再構築", 電気学会論文誌 C (電子・情報・システム部門誌) ,Vol. 136, No. 7 , pp.923-928, 2016.7
4. Yoshihisa SAITOH, Akira ASANO, Hideo NAKAMURA, Sei TAKAHASHI : A Proposal for the Design of Integrated Train Control System Capable of Improving Reliability and Safety」, The Third International Conference on Railway Technology : Research, Development and Maintenance, Civil-Comp Press, pp. 5-8, 2016.4
5. 岩田浩司, 山道孝, 杉山陽一, 北野隆康, 浅野晃, 平尾裕司:「無線を用いた列車制御システムにおける速度発電機と慣性センサを併用した距離算出法」, 電気学会論文誌 D 136 卷 12 号 p.915-924, 2016.12
6. Manabu Akita, Toshinori Tamura, Ryo Yamashita, Masato Watanabe, Takayuki Inaba, Hikaru Tsubota, Akira Asano : Estimations for train speed based on twofrequency CW and initial experiments on railway environments, IEICE Communications Express, Vol.4, No.6, pp.192-197, 2015.6
7. 荻野誠之, 綱島均, 柳澤一機, 森裕貴, 浅野晃, 若井翔平:「小型レール診断装置を用いた軌道状態診断システムの開発」, 電気学会論文誌 D Vol.135, No.4, pp.395-402, 2015.4
8. Guo Xie, Xinhong Hei, Akira Asano, Hiroshi Mochizuki, Sei Takahashi, Hideo Nakamura, Formal verification of Communication based Train Control system, The Proceedings of 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering, pp.394-399, 2011.6
9. Guo Xie, Akira Asano, Sei Takahashi, Hideo Nakamura, Study on Formal Specification of Automatic Train Protection and Block System for Local Line, Proceedings of 2011 Fifth International Conference on Secure Software Integration and Reliability Improvement(SSIRI 2011), pp.35-40, 2011.6
10. Hiroshi MOCHIZUKI, Sei TAKAHASHI, Hideo NAKAMURA, Satoshi NISHIDA, Hiroyuki NAGAKUBO, Minoru SANO, Akira ASANO, Application of Rail Transmission Technology to Railway Signals Using Spread Spectrum Communication Technology, Proceedings of International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems STECH'03,B301, pp.256-263, 2003.8

11. 氏家健, 渡辺剛志, 藺田昇, 浅野晃, 見目光正, 牧野純男 : 「ミリ波を使用した次世代型踏切障害物検知装置の開発」, 電気学会論文誌 D, Vol.127, No.8, pp.906-911, 2007.8
12. 望月寛, 浅野晃, 佐野実, 高橋聖, 中村英夫 ; 軌道回路を用いたスペクトラム拡散通信方式多情報伝送システムの開発, 電気学会論文誌 D, Vol.D126, No.3, pp.345-351, 2006.03
13. 望月寛, 浅野晃, 佐野実, 高橋聖, 中村英夫 ; CDMA-QAM 方式の鉄道信号システムへの適用に関する一考察, 電気学会論文誌 D, Vol.D126, No.3, pp.337-344, 2006.03.01
14. * Akira ASANO, Hideo NAKAMURA : A Consideration on a Practical Use of GNSS for a Train Protection System, The Forth International Conference on Railway Technology : Research, Development and Maintenance, the International Journal of Railway Technology, 2018 (掲載決定)

B その他論文

- (1) 齋木翔太, 岩田浩司, 太田佑貴, 記虎正幸, 浅野晃:「慣性センサと速度発電機を組み合わせた地点検知による車輪径診断の基礎検討」, 電気学会 産業応用部門 リニアドライブ研究会, (2017-07-06), LD17049
- (2) 齋木翔太, 岩田浩司, 太田佑貴, 記虎正幸, 浅野晃:「慣性センサと速度発電機を組み合わせた地点検知による車輪径診断の基礎検討」, 電気学会 産業応用部門 交通・電気鉄道研究会, (2017-07-06), TER17040
- (3) 岩田浩司, 齋木翔太, 太田佑貴, 記虎正幸, 浅野晃:「慣性センサと速度発電機を併用した線路特徴点検出による列車長算出手法」, 電子情報通信学会技術報告, DC, ディペンダブルコンピューティング, 116(373), pp31-36, 2016.12
- (4) 齋藤嘉久, 浅野晃, 中村英夫, 望月寛, 高橋聖:「階層化による列車制御システムの再構築」, 平成 27 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, p.261-264 (2015-08-27), TC9-6
- (5) 岩田浩司, 山道孝, 杉山陽一, 北野隆康, 浅野晃:「車輪の滑走・空転補正に慣性センサと速度発電機を用いた距離算出方式の適用検討」, 電気学会 センサ・マイクロマシン部門 フィジカルセンサ研究会, (2015-03-18), PHS15013
- (6) 岩田浩司, 山道孝, 杉山陽一, 北野隆康, 浅野晃:「車輪の滑走・空転補正に慣性センサと速度発電機を用いた距離算出方式の適用検討」, 電気学会 産業応用部門 交通・電気鉄道研究会, (2015-03-18), TER15013
- (7) 秋田学, 山下遼, 稲葉敬之, 坪田光, 浅野晃:「2 周波 CW 方式に基づく列車速度推定法と鉄道環境における基礎実験」, 電子情報通信学会 宇宙・航行エレクトロニクス研究会, (2015-01-22), SANE2014-109
- (8) 岩田浩司, 山道孝, 杉山陽一, 北野隆康, 浅野晃:「車輪の滑走・空転補正に慣性センサを用いた距離算出方式の適用検討」, 電子情報通信学会技術研究報告, DC, ディペンダブルコンピューティング, 114(384), pp45-50, 2014.12
- (9) 山道孝, 北野隆康, 岩田浩司, 浅野晃:「滑走・空転時の慣性センサを用いた補正開始点の検討」, 平成 26 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, p.205-208 (2014-08-26), 5-21
- (10) 田村俊徳, 山下遼, 秋田学, 稲葉敬之, 坪田光, 浅野晃:「2 周波 CW レーダを用いた列車速度計の開発」, 2014 年電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-2-32

- (11) 浅野晃, 森裕貴, 綱島均, 中村英夫, 鈴木博:「安価で保守性に優れた列車制御システム」, 平成 25 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, p.847-852 (2013-09-04), OS6-6
- (12) 浅野晃, 石川了, 孫佳, 中村英夫:「列車制御への利用に対する GPS 精度の評価研究」, 電気学会 産業応用部門 交通・電気鉄道研究会, (2012-01-25), TER12004
- (13) 浅野晃, 石川了, 孫佳, 中村英夫:「列車制御への利用に対する GPS 精度の評価研究」, 電気学会 センサ・マイクロマシン部門 フィジカルセンサ研究会, (2012-01-25), PHS12004
- (14) 浅野晃, 押切栄:「GPS を用いた運転管理システムの基礎技術開発」, 電気学会 産業応用部門 交通・電気鉄道研究会, (2009-10-16), TER09062
- (15) 史福明, 浅野晃, 佐野実, 望月寛, 高橋聖, 中村英夫:「DSP による鉄道信号用 CDMA-QAM 伝送装置の開発」, 平成 19 年電気学会全国大会論文集, p.273 (2007-03-15), 5-178
- (16) 西田賢史, 佐野実, 浅野晃, 望月寛, 高橋聖, 中村英夫:「スペクトラム拡散レール伝送による列車制御システム」, 平成 19 年電気学会全国大会論文集, p.269-270 (2007-03-15), 5-176
- (17) 氏家健, 渡辺剛志, 藪田昇, 見目光正, 牧野純男, 浅野晃:「次世代ミリ波踏切障害物検知装置の開発」, 平成 18 年電気学会産業応用部門大会講演論文集, p.III 295-300 (2006-08-21), 3-45
- (18) 渡辺剛志, 藪田昇, 見目光正, 牧野純男, 浅野晃, 氏家健:「次世代ミリ波踏切障害物検知装置の開発」, 電気学会 産業応用部門 交通・電気鉄道研究会, (2006-07-27), TER-06058
- (19) 渡辺剛志, 藪田昇, 見目光正, 牧野純男, 浅野晃, 氏家健:「次世代ミリ波踏切障害物検知装置の開発」, 電気学会 産業応用部門 リニアドライブ研究会, (2006-07-27), LD-06036
- (20) 所沢鉄正, 竹内寛人, 浅野晃, 長澤弘之:「ミリ波式踏切障害物検知装置の開発」, 平成 18 年電気学会全国大会論文集, p.257 (2006-03-15), 5-174
- (21) 望月寛, 浅野晃, 佐野実, 高橋聖, 中村英夫:「軌道回路を用いたスペクトラム拡散通信式多情報伝送システムの開発」, 電気学会 産業応用部門 交通・電気鉄道研究会, (2005-01-13), TER05007

- (22) 望月寛, 浅野晃, 佐野実, 高橋聖, 中村英夫:「軌道回路を用いたスペクトラム拡散通信式多情報伝送システムの開発」, 電気学会 産業応用部門 ITS 研究会, (2005-01-13), ITS05007
- (23) 浅野晃:「EDA ツールを用いた高速デジタル回路の高信頼設計」, 回路実装学会 電磁特性研究会, (1997-10-28)
- (24) 浅野晃:「EDA ツールを用いた高速デジタル回路の高信頼設計」, 電気学会 電子・情報・システム部門大会, A-14-2, (1997-08-29)
- (25) 浅野晃:「高性能フェールセーフ CPU」, 電気学会 産業応用部門 交通・電気鉄道研究会, TER-92-35, (1992-09-16)

C 表彰

- (1) 電気学会 第74回電気学術振興賞 論文賞 受賞