

衛星を用いた列車制御・保安システムの開発

水間 毅* 吉永 純* 工藤 希*

Development of new traffic control and signalling system with using GPS

by

Takeshi MIZUMA* Jun YOSHINAGA* Nozomi KUDO*

Abstract

Recently, position detection systems with using GPS and all-purpose wireless system are developing in several industrial fields. In railway system, rough positioning of trains by GPS is used for information measures. Moreover, if more accurate position detection and high reliability are realized on GPS and all-purpose wireless technologies, we can use these positioning data and communication tool for railway signalling systems or advanced train control systems. Especially, for rural railway systems, low cost and maintenance free train control and signalling system are required because of keeping train operation. Therefore, we are developing new train control system and signalling system with using GPS and all-purpose wireless. This system detects train position with GPS and transmits information with all-purpose wireless by mobile phone. Moreover, the control center detects the positions and present situations of all trains. We have tested this system on an actual railway line. We verified the basic function of train control and signalling and showed the possibility of this system.

原稿受付：平成 20 年 3 月 29 日 再受付：平成 20 年 4 月 30 日

*交通システム研究領域

1. はじめに

衛星技術の進展を受けて、様々な産業分野でGPS(Global Positioning System)を利用したシステムが開発、実用化されている。鉄道分野においても、GPSの位置検知情報を利用した列車接近案内情報等サービス分野での活用が始まっている。

従来の鉄道では、地上の軌道回路等により列車の位置を検知してきたが、GPS等の衛星を用いることにより、地上側の設備に依らない位置検知が実現できる。従って、この位置情報を利用した、列車制御システム、保安システムが構築されれば、地上側設備の少ない、低コスト、省保守なシステムが実現でき、コスト的に課題の多い地方鉄道に有益となりうる。また、平成20年度には、日本の上空付近のみを航行し、測位可能な準天頂衛星が打ち上げられる予定であり、位置検知精度、信頼性も大幅に向上されることが期待されている。

従って、我々は、GPS等の衛星を利用した列車制御システム、保安システムの構築を目指して、システム開発、基礎機能の検証を行っている。本稿では、その概要と、今後のシステム実用化における課題を、走行実験により得られたデータを基に述べることにする。

2. 衛星を用いた列車制御システム構成

GPS等の衛星を用いた列車検知は、列車単独で自位置を連続的に検出できるため、運転状況記録装置等と組み合わせることにより、地上側の設備によらない走行の管理、安全の確保が可能である。本章ではGPSを用いた列車制御システムの概要、構成を説明する。

2.1 制御システム

列車制御システムを検討する場合、単独の列車走行制御を考える場合と複数の列車制御を考える場合があるが、単独の列車制御として、図1のような制御構成が考えられる。

GPSによる自列車位置と速度情報をリアルタイムに取得して、運転状況記録装置等で予め記録されている位置-制限速度情報と比較して、速度が制限速度を超えていればブレーキ制御を行うというATC(Automatic Train Control)機能の一つである速度制限機能を実現できる。GPSによる位置検知精度が十分でない場合には、ブレーキ制御ではなく、警報に留めることも可能であるが、いずれにしても、地上設備なく列車の速度超過を監視可能となる。

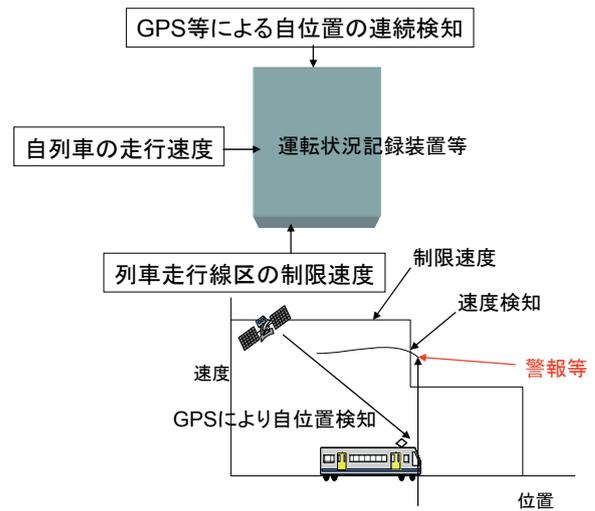


図1 簡易 ATC(列車制御機能)機能構成例

複数列車の走行を制御する場合は、列車単独の機能の他に、運行管理センターのような場所で、各列車がどの位置に存在するかを確認する機能が新たに必要となる。

2.2 基本構成

こうした、衛星を用いた列車制御システムを構成するためには、(1)自列車の位置検知、(2)自列車の走行速度、(3)各位置における制限速度、(4)複数列車制御のためには、これらの情報を集約管理する運行管理センター、(5)情報を送受信する通信システムで構成される必要がある。

そのうち、自列車の位置検知にはGPSによる測位を基本として構成可能で、自列車の走行速度は、速度発電機情報を利用することで構成可能である。また、各位置における制限速度は、運転状況記録装置内のメモリに記憶可能であり、このデータと自位置における速度とを比較する機能は、ソフトウェアで構成可能である。さらに、運行管理センターは、これらの情報を受けて、モニターするもので、パソコンで構成可能であり、通信は、汎用の公衆回線が利用可能である。

2.3 機能

(1) 自列車位置検知

GPSを利用すれば、自列車の位置は、車上において連続的に検知可能であるが、トンネル内、高架下通過時には、位置不定となる。従って、GPS単独での位置検知以外の検知系を用意する必要がある。我々は、速度発電機による速度データの積分値による位置検知を別系とした。

(2) 自列車の走行速度

これは、基本的には、速度発電機による速度データとした。

(3) 各位置における制限速度

これは、予め、位置一制限速度情報を車上の処理装置内の CPU に記憶させておくこととして、臨時に速度制限等がある場合は、中央の運行管理センタから、通信により、車上の処理装置にそのデータを送信させることで与えることとした。この処理装置としては、交通研で開発した「運転状況記録装置」を利用することとした（機能概要を表1に、装置外観を写真1に示す。）。

表1 運転状況記録装置の機能概要
記録項目(車両情報)

時間	電波時計等による時刻補正
位置	トラボン、地上子等による位置補正
速度	
常用ブレーキ装置の操作状況	ノッチ毎、非常ブレーキについては、手動、車掌弁、自動の別
制御装置の操作状況	ノッチ毎の操作状況
ATSの動作	ATSによる信号種別、動作状況(警報、確認動作等)
ATCの動作	ATC信号種別、動作状況
保安ブレーキの動作	○
BC圧	○
等価ブレーキ力信号	電気車
主回路電流	電気車
ドア開閉情報	ドア開閉指令、ランプの点灯状況

記録項目(車両情報以外)+性能項目

前方映像(記録)	想定外の列車挙動にも対応
記録時間	1日以上
停電時動作	列車分離、停電時でも一定時間以上の動作続行
メモリ保持時間	記録用電源が断となっても5日以上保持
最小記録時間	可能な限り短縮(0.2秒以下)
耐振動性能	通常走行時の振動において動作保証
耐衝撃性能(記録媒体)	容易に破壊されない構造
耐水性能(記録媒体)	容易に浸水されない構造
耐火性能(記録媒体)	燃焼しにくい構造
設置位置	脱線、衝突時にも容易に記録媒体が破壊されない位置に設置



写真1 運転状況記録装置外観

(4) 運行管理センタ

自車両で検知した位置、速度と、制限速度との関係(制限内か、制限速度を超えているか等)の情報は、運行管理センタへ送信し、現状の各車両の状況を把握可能とする。また、運転管理センタから、各車両に対して、臨時制限速度情報、運転士への警報等を出力可能とする。

(5) 通信

車両内の運転状況記録装置と運行管理センタとの通信には、汎用通信を利用することとする。汎用通信としては、無線LAN、パケット通信等を使うこととしている。

(6) 総合機能

列車制御として、自車両で検知した位置、速度をその場所における制限速度と比較して、超えていれば警報(またはブレーキ出力)を出す機能(簡易ATC機能)を基本とするが、車両内で連続的に速度一位置情報を取得していることから、標準的な運転パターンを記憶させておいて、その運転パターンと実運転状況が大きくずれた場合に警報を出す機能(図2参照)も付加した。

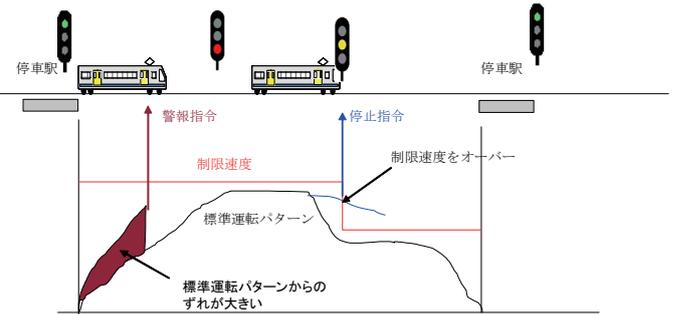


図2 標準運転からのずれを検出して警報を出す機能

2.4 システム構成例

2.3の機能を満足する構成を検討し、(6)の機能について、実車両を用いて確認することとして、図3のような構成とした。

ここで、カメラは、運転士の運転操作状況や計器類の動作状況を記録するためのもので、この情報も、予め記憶しておいた標準運転操作と比較することにより、標準操作とのずれが大きければ、警報を出すことも可能である。通信制御装置については、今回はDoPaを利用することとして、模擬的に構成した運行管理センタに通信を行う機能を持たせた。

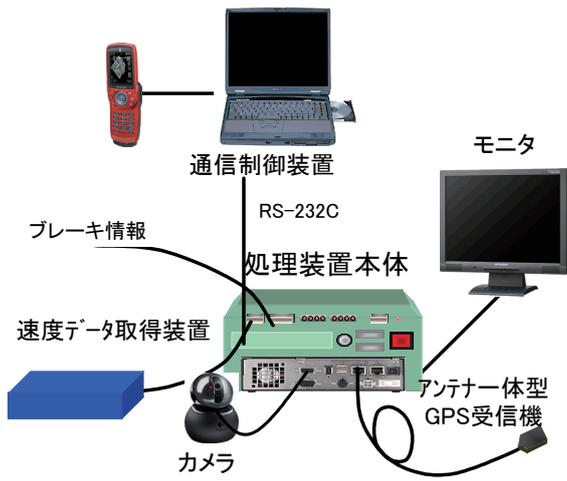


図3 列車制御システム構成例

3. 衛星を用いた列車保安システム構成

本章では衛星を利用した列車保安システムの概要、構成を説明する。

3.1 保安システム構成

一般に鉄道における保安システムは、(1)列車の位置を検知し、(2)その列車の進路を安全に確保し、(3)さらに列車相互間の安全を確保することで成立している。従来は、これらの機能を基本的には、軌道回路、リレー等により地上側の設備で行ってきた。

3.2 基本構成

ここでは、列車の位置はGPSにより連続的に検知し、進路構成、列車相互間の安全確保を汎用通信の指令により行う、極力、地上側設備を簡素化したシステムで構成することを考えた。以下に、その機能概要を示す。

3.3 機能

3.3.1 列車検知機能

GPSを列車検知に利用する最大のメリットは連続的に位置検知ができることであるが、トンネル内や高架下では位置不定になるため、保安システムとして利用するには、不十分である。従って、他の速度計あるいは位置検知系とのハイブリッド利用により、常に位置検知が可能なシステム構築が必要である。他の速度計、位置検知系についての特徴を整理すると表2のようになる。

また、これらの別系による位置検知とGPSによる位置検知に対して、自列車位置を確定させる方法として、まず、GPSによる列車検知位置を地図上の路線上に投影させるマップマッチング手法により求め、その位置から、他系で得られた速度の値を積分した

表2 GPSと併用利用可能な位置検出系の特徴

	速度発電機	光速度計	ドップラーレーダ	加速度計ジャイロ等
利点	車両に既設	正確な速度測定	簡易に設置	低速度の検出
欠点	低速度検知精度	高価設置性	低速度検知精度	中高速度検知精度

位置データとを比較して、前側にある位置を列車先頭位置とする論理を開発した(図4参照)。

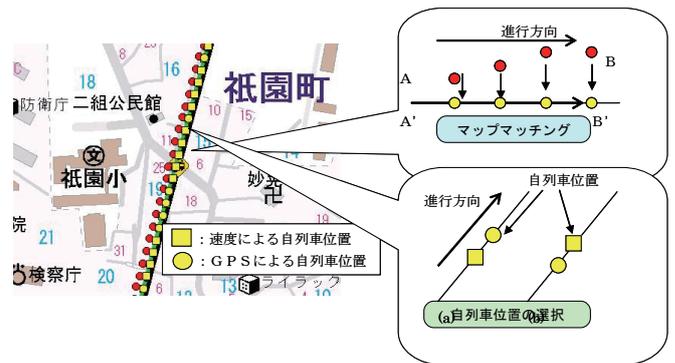


図4 GPSと他系速度による列車検知論理

(1) GPSと速度発電機による列車位置検知

GPSによる位置検知と車両に搭載している速度発電機の速度データを積分した位置とを比較して、図4の論理で列車位置検知が可能である。この方式は、元々車両に搭載している速度発電機のデータを利用するため、構成がそれほど複雑にならないという利点を有しているが、5km/h以下の低速度では、速度データが不正確となる欠点を有している。

(2) GPSとドップラーレーダによる列車位置検知

ドップラーレーダは非接触で速度検知可能で、簡易に設置できるため、構成が単純(速度発電機は構成には、配線等の変更が場合によっては必要である。)となるという利点は有しているものの、10km/h以下の低速度域あるいは停止時に0と判定しにくいという欠点を有している。

(4) 光速度計

光速度計は、低速から高速まで正確に速度を測定可能であり、自動車の走行試験等に、標準の速度計として用いられている。従って、これを併用すれば正確な速度検知が可能であるが、価格が高いことや、列車のように振動が大きいものに取り付ける場合に、耐久性(位置のずれ等)が課題となる。

(5) 加速時計あるいはジャイロ

加速度計のデータを積分すれば、速度となり、低速度域での正確な速度検出が期待されるが、車両の

3.4 通信系

本節では、GPS 等で検知した列車位置情報、運行管理センタで計算した列車の進路許可情報等を送・受信する通信系について検討することとする。従来は、こうした情報は、全て地上側に敷設されたケーブル等を介して伝送されていたが、本システムは、極力省インフラを目指しているため、情報の伝送も汎用通信を利用することとした。

3.4.1 特定小電力無線

429MHz 帯を利用して送信出力を 10mW 以下で行う通信であり、簡易に使用可能で低コストという利点があるが、伝送速度が遅い、送信時間制限等の規則があり、通信到達距離が最大でも 200m 程度という欠点も有している。従って、少量のデータ通信や無線を使用しての制御に適している（図 9 参照）。

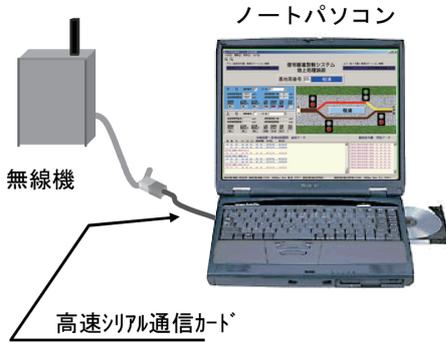


図9 特定小電力無線構成例

3.4.2 パケット通信

800MHz 帯を利用するデータ通信で、DoPA, FOMA 等があるが、複数の端末で伝送路や交換設備の共有が可能で、障害に強く、データを一度蓄積するため、誤り検出等によりデータ誤りの少ない通信が可能という利点を有している。ただし、パケットによる通信を行っているので、直接のデータ通信ができない、輻輳等により伝送遅延時間が変動する、ランニングコストがかかるという欠点を有している（図 10 参照）。



図 10 パケット通信構成例

3.4.3 無線 LAN

近年は、無線 LAN を使用して、車両内で、乗客の通信サービスを始めている事業者（つくばエクスプレス、山形鉄道等）があるが、これには 2 つのタイプがある（図 11,12 参照）。

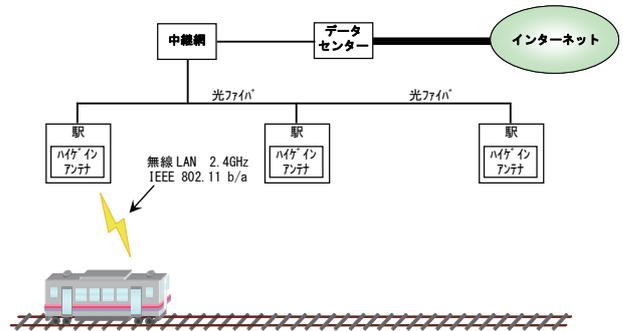


図 11 つくばエクスプレスの形態

図 11 では、地上側に中継局を設けて、光ファイバ網を介して無線 LAN によるインターネット接続を

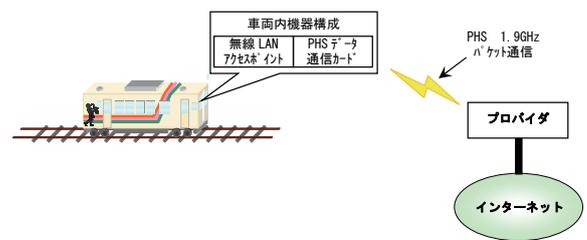


図 12 山形鉄道の形態

可能としている。一方、山形鉄道の場合は、車内に無線 LAN のアクセスポイントと PHS のデータ通信カードを有していて、それを利用して、パケット通信により車外のプロバイダと接続して、インターネットサービスを得る方法である。

各通信系とも特徴があるが、汎用通信と言うことで、列車の制御に利用する場合には、通信品質、信頼度の確保が重要な課題である。本稿では、これらの通信システムを利用した列車制御実験を行うことにより、その使用の可能性を検討することとした。

4. 走行実験

以上、GPS を利用した列車制御の機能のうち、基本的な機能について、実車両を用いて検証することとした。

4.1 簡易 ATC 速度制限機能

図 3 のようなシステムを構築して、処理装置内に標準運転パターンを蓄積させ、実運転パターンがこ

の標準運転パターンを超過したり、著しくずれた場合に警報を発出する機能を、実路線における車両走行で確認した。

写真2に、試験車両と試験装置の概要を示す。



写真2 試験車両と試験装置

また、図13に、標準運転パターンと実運転パターンを比較した結果例を示す。

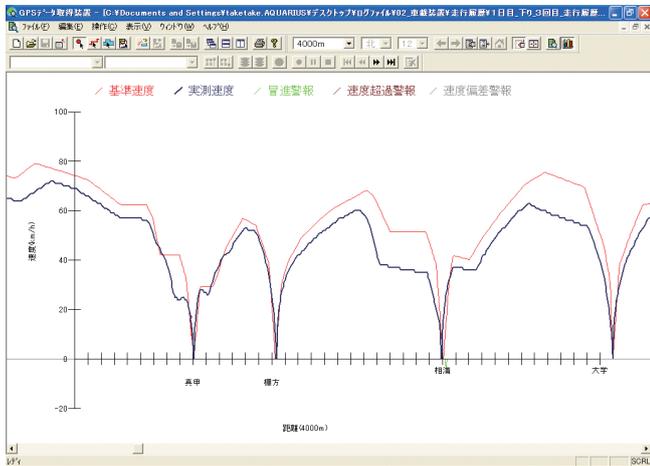


図13 標準運転パターンと実運転パターンの比較

この例では、標準運転パターン（赤）に対して、実運転は、よく追従して、かつ速度超過も見られていないことが確認される。

図14には、標準運転パターンと実運転パターンの差を蓄積して、ある値以上になった場合に警報を出す機能を確認した例である。

このシステムでは、単に制限速度を超過した時に警報（実際の場合はブレーキ機能）を発出するだけでなく、たとえ、制限速度内の運転であっても、異常な運転（極端な低速度運転や急な加減速）を検知して、警報を発出することも可能となり、簡易なATC機能を実現できることとなる。

4.2 列車検知機能

本システムでは、GPSによる列車位置検知を基本

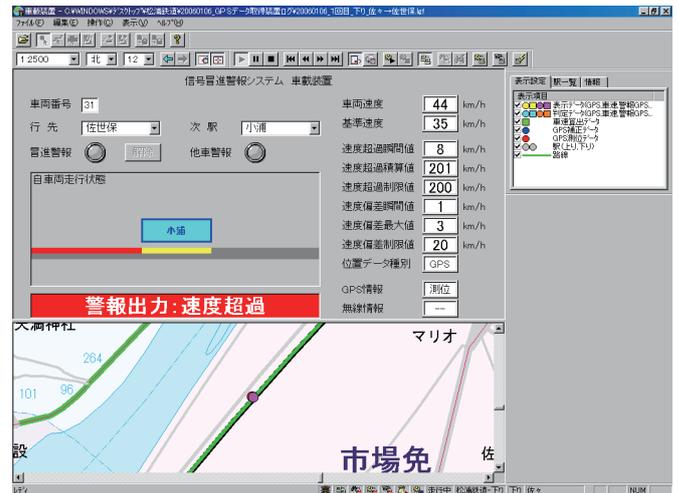


図14 標準運転からのずれを検知し、警報を発出した例

としているが、GPS単独では、トンネル内や橋梁下では測位ができず、位置不能となってしまうため、別系の検知システムも必要である。本項では、GPSと他系速度計による位置精度（速度検知精度）の現状を述べる。

(1) GPSと速度発電機による位置検知

図15～17に、GPSと速度発電機による位置検知精度測定例を示す。

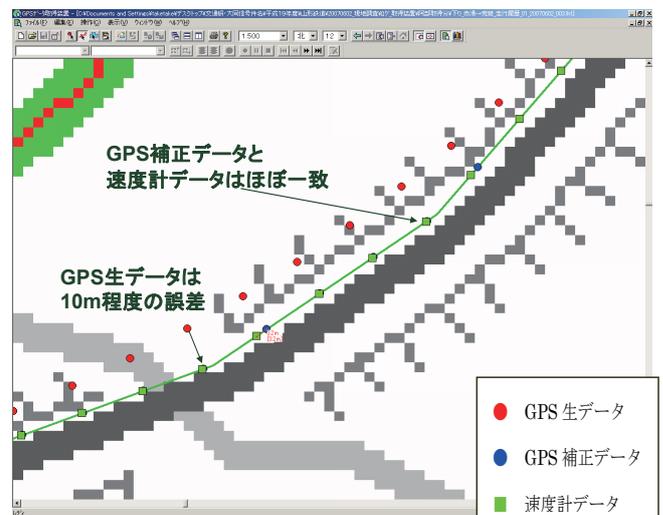


図15 中速(50~60km/h程度)における位置検知精度

中速においては、GPSの生データは路線上から10m程度の誤差を生じていたが、マップマッチング後の位置は、ほぼ速度発電機による位置データと同様の精度が得られていることを確認した。

また、高速域（70km/h程度ではあるが）では、若干GPSによる位置検知データの方が遅れる傾向が見られた。

一方、低速域においては、5km/h程度以下になる

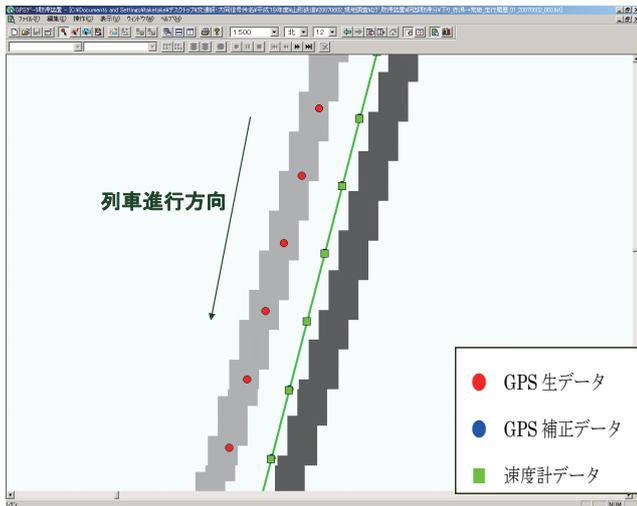


図 16 高速(70km/h程度)における位置検知精度



図 17 低速域における位置検知精度

と GPS のみによる検知となっていることが確認された。

以上、GPS と速度発電機による位置検知は、概ね一致することが確認された。

(2) GPS とドップラーレーダによる速度検知精度

写真 3 のような試験車両と機器により、ドップラーレーダによる速度と GPS による速度の比較を行った結果を図 18 に示す。

それによると、10km/h 以上では、値はよく一致するものの、10km/h 以下では、ドップラーレーダの誤差が大きく、ドップラーレーダは、実用上、移動体の速度計測には向いていないことが確認された。



写真 3 GPS とドップラーレーダによる速度検知

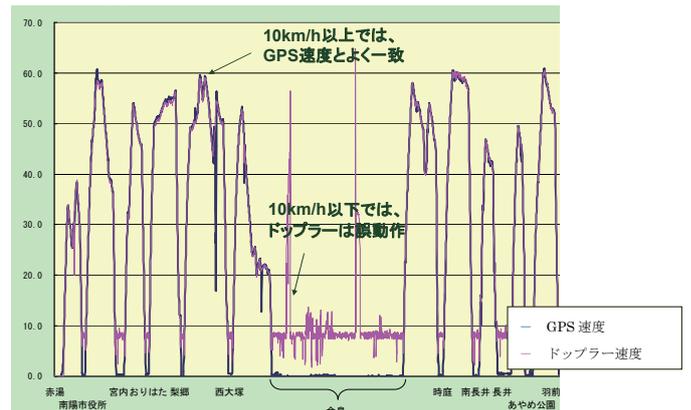


図 18 GPS 速度とドップラーレーダ速度との比較

4.3 進路確保機能

GPS による列車検知位置と信号現示との矛盾 (赤信号を列車が冒進) を検出して、汎用通信 (特定小電力無線) により、進路冒進列車に警報を発出するとともに対向列車にも警報を発出する実験を模擬的に実施した。その概要を図 19 に示し、測定結果例を図 20 に示す。

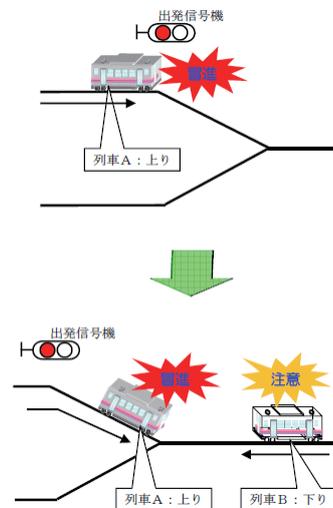


図 19 進路冒進時の警報機能の確認例

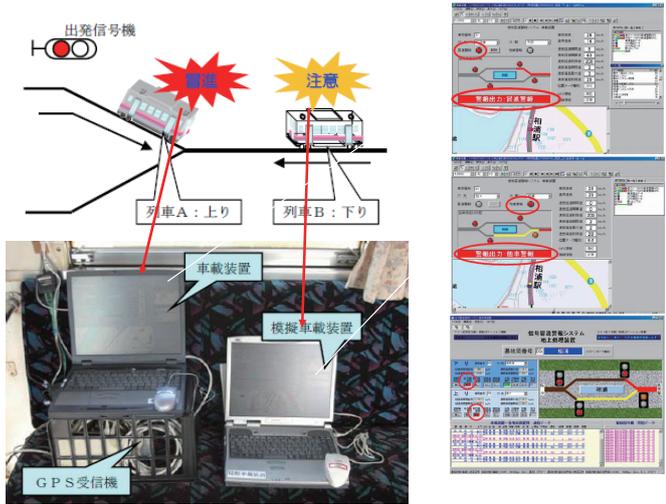


図 20 信号冒進機能確認試験結果例

その結果、信号を冒進した自車両と対向している車両に警報が出され、また、地上側にもそれらの情報が表示されることを確認した。従って、特定小電力無線を利用した進路確保については、可能性が示された。

4.4 通信機能

(1) 無線 LAN+PHS 受信状況

図 21 に、山形鉄道全線において、無線 LAN と PHS による受信電界強度について調査を行った結果を示す。

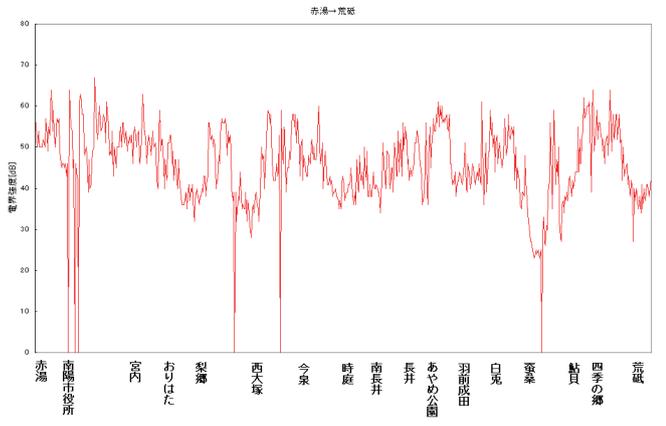


図 21 PHS の受信電界強度(全線)

この図によると、伝送が途絶する箇所もあり、連続的な情報伝送は不可能であるが、駅間等限定的な情報伝送ならば可能性があることが示された。

(2) 通信を利用した走行監視システム機能確認

車両に GPS を搭載し、その情報を元に各閉そく区間内の在線状況を、汎用通信 (DoPa) を利用してセ

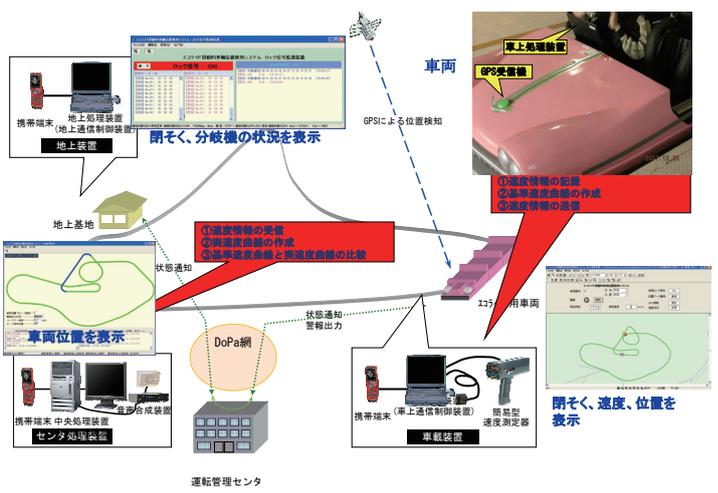


図 22 通信を利用した運行管理システム機能概要

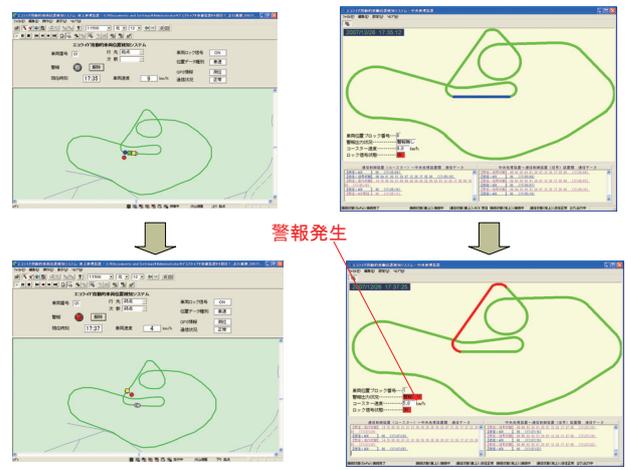


図 23 通信結果例(センター)

ンターにその情報を表示し、閉そく区間を越えて前方列車の在線区間に接近した場合に、警報を出すシステム構成例を図 22 に、通常の在線状態と警報発出例を図 23 に示す。

この結果より、汎用通信により、運行管理の機能を果たすことが可能であることが確認された。

5. 安全性確保方法

以上、述べたように、GPS を利用した位置検知を基本として、汎用無線を利用した通信により、列車制御システム、保安システムを構築することが可能であることが示された。

しかし、こうした列車制御、保安システムは、安全であることが大前提であり、従来の鉄道システム並みの安全性を確保する必要がある。従って、各機能に対する安全確保方法を確立させておく必要がある。表 3 に、保安の各機能に対する安全確保方法について示す。

表3 GPSと汎用無線を利用した保安システムの安全確保例

機能	安全性確保方法
GPSによる位置検知	他の位置検知とのハイブリッド位置検知(速発等)
転つ機、信号機動作	従来の連動論理(ソフト)
閉そく機能	従来の連動論理(ソフト)
通信機能(汎用)	照合論理 不一致停止論理
地上運行管理による指令	常時指令なし(走行中) 常時停止指令(駅部)

このような方法を採用することにより、在来鉄道並みの安全は確保されることが可能と考える。

ただし、本方式は、コスト低減のためにパソコンを利用することとしているので、ハードウェア故障に対するフェールセーフ性の確保は課題となる。

6. 結論

以上、GPSを利用した位置検知システムと汎用無線を利用した通信システムを組み合わせた、列車制御システム、列車保安システムの構成方法、安全確保方法等を述べ、簡易的な実験結果について述べた。その結果、基本的な列車制御機能、保安機能は、十分確保されることが確認された。また、安全性については、既存の安全論理(ソフトウェア等)を採用すれば、在来鉄道並みは確保可能であると考えられる。また、GPSという衛星を利用することによる位置の不確定さ、汎用無線を利用することによる通信の信頼性の低さについては、ハイブリッド化、多重化を図ることにより、ある程度の信頼性は確保されるものと考えられる。従って、GPSと汎用通信を利用した列車制御システム、保安システムについては、地方線区においては、十分、実用化の可能性があるとと言える。

ただし、今後、安全確保機能の検証、信頼性の検証等を実際の車両により行い、在来鉄道の列車制御、保安システムと同程度の安全性、信頼性が確保されることを長期的に検証していく必要がある。

7. おわりに

GPSを始めとする衛星による測位技術、汎用無線を中心とした通信技術は、今後も発展を続けていくものと思われる。従って、今回、提案したシステム

構成は今後、さらに変化していくことも十分考えられるが、地上設備を極力軽くした列車制御システム、保安システムのニーズが、地方鉄道を中心にますます高まってくると思われる現状において、こうした新しい技術を次々に採り入れて簡易で高機能なシステムを開発していくことは重要である。ただし、その場合も、現状のシステムの安全性、信頼性を損なうことがないことが開発の前提となることは言うまでもない。

従って、GPS、汎用無線技術の高機能化に伴って開発していく、こうした列車制御システム、保安システムについても、機能、コストだけを追求するのではなく、安全性、信頼性にも十分配慮したものとしなければならない。

参考文献

- (1)水間他「衛星を利用した鉄道用保安システムに関する研究」フォーラム2007 交通安全環境研究所研究発表会 講演8, 2007.11
- (2)水間他「衛星を利用した鉄道用保安システムの開発について(第1報)」J-RAIL2007 第14回鉄道技術連合シンポジウム(電気学会 交通・電気鉄道技術委員会) 講演論文集 S4-2,P111-114,2007.12