

軌陸車誤載線 警報装置の開発



黒崎 倫之*



石瀬 裕之*



佐々木 敦*

軌陸車の運用は線路閉鎖取扱い手続きで行っており、安全の確保は人間の注意力に頼っている。保守用車と違い、軌陸車は軌道短絡器を搭載していない。一方、GPSの整備やD-GPS技術が進んで精度が向上しており、今後も更なる進展が見込める。運用コストが安価で精度も見込めるD-GPSの測位と鉄道GISとを組み合わせることで上下線誤載線や線閉区間外誤進出に対して警報を行う「軌陸車誤載線警報装置」を開発した。本警報装置はATOS区間では線路閉鎖情報を取り込んで自位置と照合するよう開発しており、安全性向上に資するものと考えている。

●キーワード：軌陸車、D-GPS、鉄道GIS、上下線判定、線路閉鎖

1. はじめに

鉄道工事では、線路上のみで使用する保守用車に加えて、道路と軌道の両方を走行できる軌道陸上兼用車（以下「軌陸車」）を使用する機会が増えている（図1）。

軌陸車を使用する時は、線路閉鎖工事（以下「線閉」）の手続きを行う。しかし、作業責任者の失念・勘違いなどにより上下線を誤って軌陸車を載線させたり線閉区間外に誤って進出させた場合には、軌陸車の在線している区間に列車が進入する危険がある。



図1 軌陸車（左）と保守用車

そのため、東日本旅客鉄道株式会社（以下「当社」）は、大形保守用車に短絡走行させて信号機に停止信号を現示して防護する方式を一部区間で実施している。しかし、保守用車より小型で道路も走行する軌陸車はスペースや重量の制約から短絡器を搭載することができない。そこで、線閉や軌陸車の取扱いを誤ったときに軌陸車操作者や線閉責任者に警告する軌陸車誤載線警報装置（以下「警報装置」）を開発したので報告する。

2. 軌陸車の概要と作業方法

軌陸車は、運用や構造に特色がある。軌陸車には線路での作業に特化した多様な車種があり、それぞれの車種で機装が異なっている。道路走行時に床下機器が破損しないよう

考慮する必要もある。軌陸車は道路も走行するため、搭載する装置は小型・軽量なものが望まれる。

軌陸車が道路から線路へ載線される箇所は限られている。具体的には、工事用通路、保守基地、交通量が少なくかつ幅員の広い踏切、などである（図2）。



図2 軌陸車の載線箇所

3. 警報装置に求められる基本機能

軌陸車の運用や構造の特色を考慮して本警報装置の開発にあたり次の機能を基本とした。また線路内には機器を設置しないで済むように考慮した。

- (a) 現在位置を検出し、キロ程に換算する
- (b) 在線している区間の線路閉鎖着手状態を取得する
- (c) 在線している区間に線路閉鎖が取られていない場合には警報する
- (d) 現在位置（キロ程）と線路閉鎖区間とを表示して、取扱いを誤った時の警報機能に加えて作業の利便性向上にも役立てる

3.1 軌陸車に搭載するために考慮した条件

これらの基本機能を持つ警報装置を軌陸車に搭載するため、以下の条件をさらに考慮した。

- (a) GPS測位不能時に軌陸車が運用不能とならないようにブレーキとは連動させない

- (b) 車両改造工事はなるべく少なくする
- (c) 小型軽量化してさまざまな車種に搭載可能とする
- (d) 軌道走行時のみ動作する。軌陸車が軌道走行している時はPTO (Power Take Off; 動力取出し) 信号を投入しているので、この信号を取込んで軌道走行の条件に使用する
- (e) 軌陸車載線時は隣接線防護の線閉をとっていることから、即座に判定できなくても、載線が終了して軌陸車が線路上を動き出す前に警報させる。軌陸車の載線作業から考えて、判定にかけてよい時間は当初120秒とした。

3.2 目標精度の設定

取扱い誤りを検知するために、軌陸車載線作業時（軌陸車載線作業中の上下線の誤載線判定）と軌道上作業時（線閉区間外への誤進出判定）のふたつを想定して線路垂直方向と線路水平方向それぞれの位置精度目標を定めた（図3）。

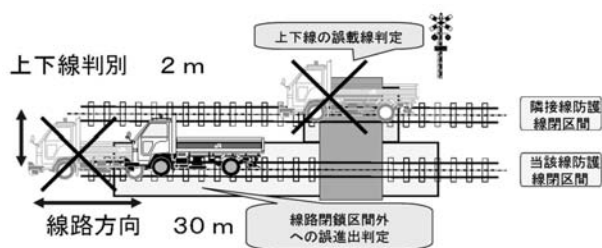


図3 設定する目標の精度

(a) 上下線判定に必要な精度

上下線などの隣接線の線路間隔は通常3.8m以上である。これらを識別するためには、半分の2m程度以下の精度は最低限必要であり線路垂直方向の目標とした。

(b) 線閉区間誤進出判定に必要な精度

線閉区間は作業範囲に若干の余裕を見て計画する。この余裕値をATOS（東京圏輸送管理システム）区間の実態から30mとして、線路方向の目標とした。

これらの当初目標値は、開発途中の知見により設定変更を可能として開発に取組んだ。

4. 警報装置の開発

以上の条件を考慮し、警報装置の開発を行った。

4.1 警報装置のハード構成

開発期間の短縮のため警報装置には既存のハードウェアを活用することとした（図4）。なお、試験システムでのPTO信号と線閉情報の取得は模擬とした。

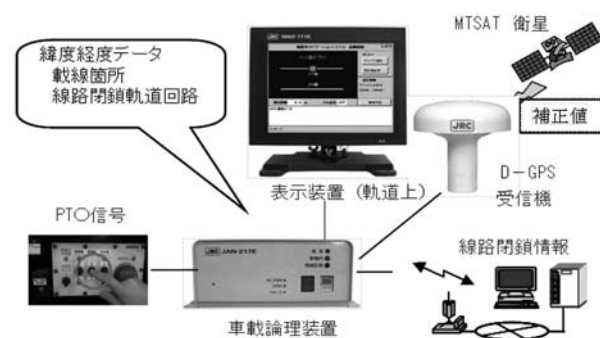


図4 警報装置の構築

4.2 警報装置のソフト開発

4.2.1 D-GPSの概要

軌陸車の位置を認識する方式としては、流通業界などで広く使われているRFIDや線路内に設置されているATS地上子の活用も検討したが、車上側のセンサの搭載方法や地上設備のメンテナンスなどの課題がある。

D-GPS（Differential GPS）は近年広く使われるようになってきたGPS精度を向上させる手法である。GPSの誤差要因は6つあることがわかっている（表1）が、そのうちの4つの誤差要因は付近の受信機で似た挙動を示す。位置が分かっている基準局に生じている誤差から自GPS受信機の誤差を補正することで単独測位よりも精度を向上させている（図5）。

D-GPSは軌陸車に搭載可能な大きさであり地上に機器を設置する必要がなく、補正情報が無償で入手できる有利さもある。

表1 GPSの誤差要因と一般に認知されている精度

No	誤差要因	測距誤差の1σ (m)	
		単独測位への影響	DGPSへの影響
1	軌道情報	2.1m	0m
2	衛星時計	2.1m	0.04m/s
3	電離層伝搬誤差	4.0m	2ppm × 局間距離
4	対流圏伝搬誤差	0.7m	
5	マルチパス	1.4m	1.4m
6	受信機	0.5m	0.7m
7	利用者等価測距誤差 (UERE : User Equivalent Range Error)	5.3m	1.5 ~ 2m
8	標準的 HDOP	2.0	2.0
9	水平方向測位誤差 (2drms)	21.2m	6 ~ 8m

出展：安田明生 電子情報通信学会誌 Vol.82 No.12

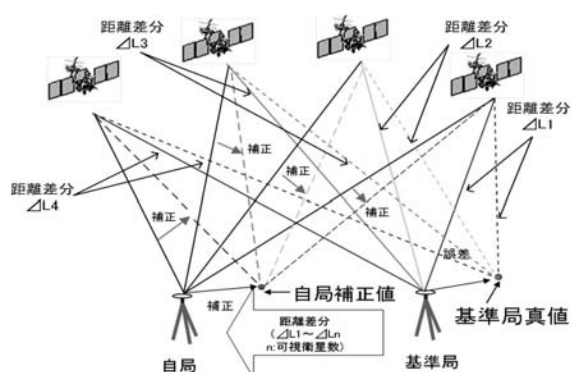


図5 D-GPSの原理

4.2.2 誤判定を回避する論理の構築

しかし、D-GPSの測位データは、一つ一つでは誤差が目標レベルの2mを超えることがある。先に表1で示したように、衛星のばらつきがいい状態でも、一般的には6~8m程度の精度とされている。本開発では、測位データから誤差の大きい値を除外する方法について研究した。

まず、捕捉衛星数や各種のDOP値（精度劣化指数）とをGPSの精度と関連できないかと考え、軌道中心からの離隔距離と比較してみた。しかし、明確な関連はなかった。

そこでD-GPSの定点データを平面プロットおよび時間経緯でならべてみた。図6、図7に10分間600個のD-GPSの測位例を示す。GPSの測位データはまったくランダムに飛び回るのはなく軌跡を描いて移動していることがわかる。

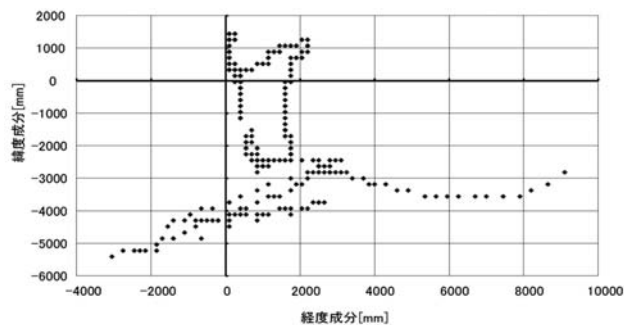


図6 D-GPSの測位データ平面プロット

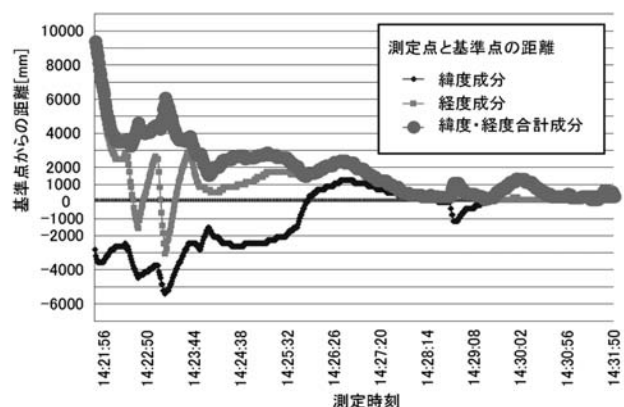


図7 D-GPSの測位データ時間経過

そこで次に、測位データの変化と精度に一定の関係があると考えて、毎秒の測位データの変化を二乗平均値により処理して測位データと比較した。5、15、30秒の二乗平均値を組み合わせて処理した例を示す（図8）。

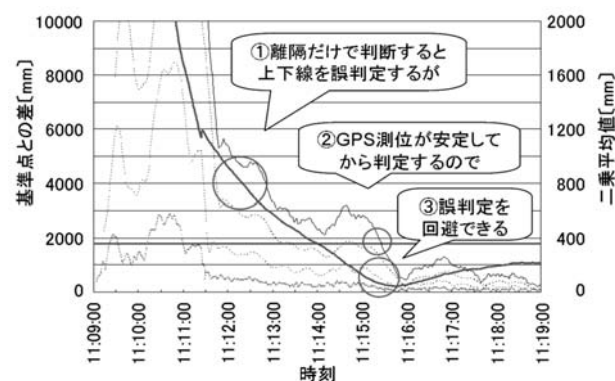


図8 誤判定を回避する判定論理

この例では誤差が大きい時間帯がある。離隔だけで判断すると下り線にいるにもかかわらず上り線と判定することがある。二乗平均値を判定に組み合わせると、誤差の大きい測定値を排除できるので、本開発で採用した。

4.2.3 鉄道GISとGPS測位とによるキロ程の算出

鉄道GIS（Geographic Information System）は本線のキロ程を20mおきに緯度経度とリンクさせたデータである。GPSにより測位した緯度経度から、直近の2点を基準点として、GISのデータベースから選ぶ。測位点から基準となる2点を結ぶ直線に垂線を下ろし、その点を測位キロ程とし、垂線の長さを離隔距離とする（図9）。

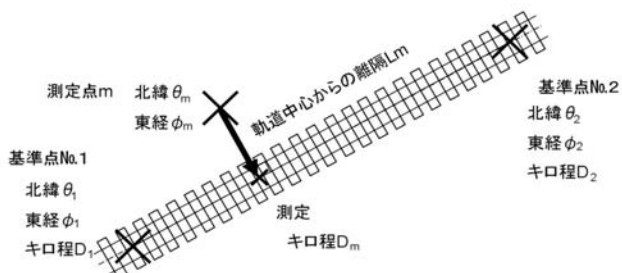


図9 鉄道GISとGPS測位によるキロ程の算出

4.2.4 ATOS 線閉状態の取得と計画作業との照合

ATOS中央装置には保守作業を管理する機能がある。この中央装置には当夜の線閉の計画が事前に登録されており、線閉の着手や解除の手続きを行うと実績時間が履歴として記録される。

本開発においては、中央装置に登録されている作業計画を作業番号ごとに取得する。警報装置に登録されている計画作業と取得情報とを照合し、①計画作業が未着手のまま、②計画作業が着手された、③計画作業が着手されたあとに解除された、のいずれの状態にあるかを判断する。

5. 工場内試験の概要と結果

構築した論理を、線路に見たてた平面上で警報装置を動かして検証した。検証はGPS環境のよい工場の屋上で行った。検証ののち、鉄道付近の構造物やビルを想定した遮蔽物の影響を評価した。

警報装置を載線して、120秒後の警報装置の判定表示を示す(図10)。正常な場合は警報せず、誤載線の場合は警報した。



図10 載線判定時の画面表示

警報装置はGPS測位とGISデータからキロ程を毎秒算出している。線閉範囲の中で警報装置を動かしたり、わざと外にはみださせたが、キロ程の表示は警報装置の動きに追従した。線閉区間を誤進出した時の表示を図11に示す。



図11 誤進出警報時の画面表示

次に遮蔽物を設置して同様に確認した(図12)。

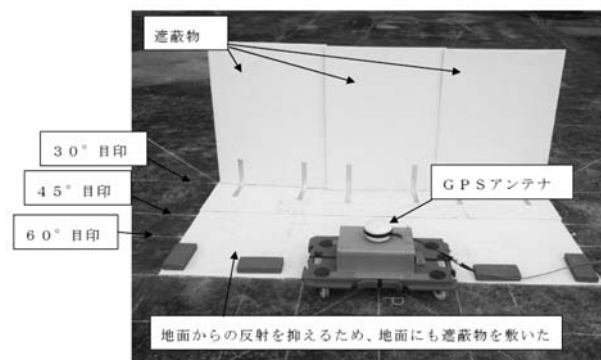


図12 線路近傍を意識した遮蔽影響の確認

遮蔽により測位データは悪化した。しかし常時判定不能に陥ってまったく使えない、ということにはなかった。このため、工場内での検証を現地試験で確認することとした。

6. 現地試験

工場内試験で検証したとおり正しく判定できるか確認するため、実際の軌陸車に警報装置を搭載して正常取扱いと取扱い誤りを想定して線路上で確認した。

線路上空が開けている箇所から2箇所、支障物がある箇所から1箇所を、山手線と東北本線から試験箇所として選定した(図13)。



図13 上空が開けている箇所(左)と支障のある箇所

6.1 正しい取扱いを行った場合の判定結果

はじめに、線閉手続きや軌陸車の運転を正常に行った場面を想定した試験を行った(図14)。

(a) 軌陸車載線時の判定

線閉計画は、あらかじめ警報装置に下り線に載線と入力しておく。現地の載線箇所脇に到着して、警報装置の電源を入れた後に線閉計画を選択して待機する。

線閉着手条件を設定した後に、軌陸車を待機箇所から載線箇所に移動してPTO信号を入力し、載線判定をする。計画どおりの下り線に載線された表示となった。

(b) 線閉区間内での移動

次に、入力した線閉区間内を移動した。警報表示はなく、移動に従ってキロ程が変化した。

(c) 軌陸車離線と線閉解除

最後に、軌陸車は離線箇所に移動する。PTO信号の入力を解除して、踏切から線路外に軌陸車は出る。その後に設定した線閉を解除する。線閉を解除しても警報はなかった。

6.2 誤った取扱いを行った場合の判定結果

次に、6.1と同じ手順で、線閉手続きや軌陸車の操作を誤った場面を想定して試験を行った。

(a) 誤載線

下り線への載線計画に対して、上り線に載線する。誤載線の表示と警報がなされた。

(b) 線閉区間外への誤進出

載線後に、線閉区間端に向かって軌陸車を移動する。線閉区間端に近づくと、「線閉区間端まで残り30m」を表示した。さらに移動させると、「線閉区間外進出」の警報表示が出た。軌陸車を線閉区間外から区間内に移動させると警報が消えた。

(c) 作業中の線閉誤解除

線閉着手の条件を解除すると、直ちに警報した。



図14 現地試験風景

6.3 現地試験結果

現地試験において、上下線の載線判定、線閉区間外進出判定が正しく行われることを確認した。線閉区間とキロ程は画面に表示されているが、移動時の表示も違和感はなかった。通常時にはナビゲーションに活用できるとともに、なぜ警報されたかが表示から即座にわかる。

また、工場内試験では120秒後に出力するよう固定していた載線判定を、現地試験では条件が整ったら出力するように変更して判定時間を短縮した。

7. 駅構内への線別判定論理の拡張

載線判定と線閉区間の把握に本警報装置が有効なことがわかった。わたり線の乗移り（下り線からわたり線を通して上り線にわたる、など）を認識できれば、軌陸車だけでなく大形保守用車の動きを追跡するなど、適用範囲が広がる。これまでの論理と鉄道GISを活用して、軌陸車が上下線をわたったかそのまま走行したかを判定する論理の検証をした。

7.1 わたり線走行の工場内での事前検証

わたり線をわたる時は、いままでの線路からの離隔が増大していく。一方で、GPS測位乱れが生じた場合も線路からの離隔が増えるので、両者を識別する必要がある。

以下の3つの方式を有力とみて、線路わたり時の挙動を現地で収集し検証することとした。

- 上り線、わたり線、下り線をそれぞれ走行する場合のそれぞれのGISデータと測位データを比較する。
- 本警報装置では自分の載線されている軌道中心からの自位置の離隔を算出することができる。「4.2.2誤判定を回避する論理」を応用して、基本となる線路からの離隔距離の二乗平均値を用いて、本線走行時と線路の乗移り時とを比較する。
- 上下線は基本的に平行している。一方、わたり線は分岐器の番数に応じて上下線を斜めに結んでいる。移動中の進行方向に対する角度を測定して判定に活かす。

7.2 わたり線走行の現地試験

線路わたりの挙動は遮蔽物などの影響を受けにくい良好な受信環境で行った（図15）。GPSアンテナをトロ（軌道上で

使う台車）中央に設置して走行させ、データ収集した。アンテナのレール面からの高さは1.5mである。



図15 わたり線試験箇所

現地試験では3機種のGPSについて、直線側走行とわたり線走行をそれぞれ10回ずつ2日間かけて測定した。GPS測位環境の乱れは現地では設定しづらいので、測位データの中から本線走行測定途中に衛星切替わりがあった例とわたり線走行測定とを比較に用いた。

7.3 わたり線走行の試験結果

下り線を基本とした時の、本線側走行の平面プロット（図16）と時間経緯（図17）の例を示す。

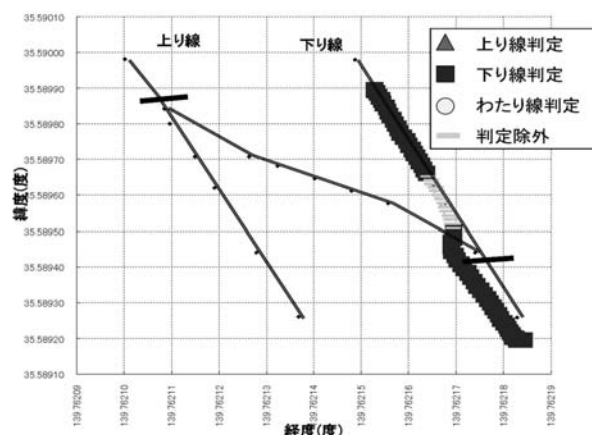


図16 衛星切替わり時の平面プロット

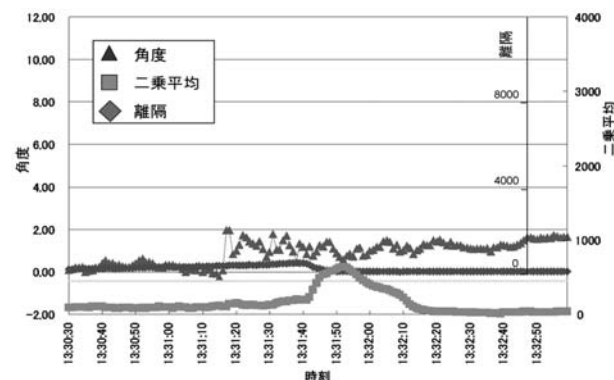


図17 衛星切替わり時の時間経緯

測定期間中は全般にGPSの測位精度が非常によかった。図16、図17の本線側走行は、測定途中に衛星切り替わりがあったケースで、測定期間中では本線走行とわたり線走行を判定するのに条件が悪い例を示している。

二乗平均値は測定中にいったん増加したあとに収束した。しかし、基準となる下り線からの離隔やその時の軌陸車の角度との間に明確な関連がつけられなかった。

次に下り線を基本とした時の、走ったり線走行の平面プロット(図18)と時間経緯(図19)の例を示す。

図18においては、トングレール先端箇所を縦線で記す。

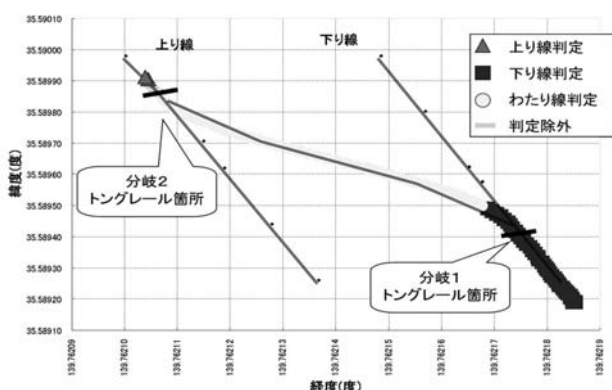


図18 わたり線走行時の平面プロット

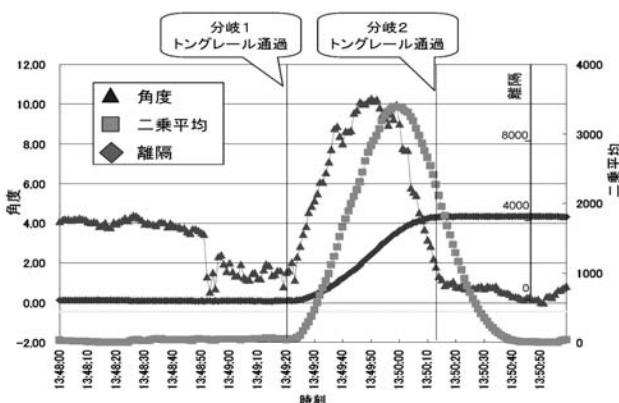


図19 わたり線走行時の時間経緯

わたり線の通過時に、下り線からの離隔の変化と連動して下り線からの離れの二乗平均値は変化しており、わたり線を移動していると判定できることがわかった。

また、同時に角度の測定も実施したが、こちらも下り線からの離隔の変化と連動しており、下り線からの離隔と合わせて判定できた。

7.1で検討した(a)(b)(c)いずれの方式でも、本線走行か、わたり線走行かを判定することが可能である。(a)の方式ではわたり線のGISデータを本線とは別に持つ必要があり、(c)の方式では高価なGPS受信機が必要になる。このため、(b)の「基本となる線路からの離隔距離の二乗平均値を用いて判断する方式」が有力と判断した。

試験中のGPSの測位精度は非常によく、GPS測位の安定具合から誤差の大きい測位値を排除して誤判定を回避する直接の効果は確認できなかった。しかし、図17のように測位データが変動したときには、一時的に判定を保留しており、正しく判定できることがわかった。

8. まとめ

軌陸車に搭載可能・地上への設備設置が不要で、線路への載線作業中の載線判定・本線走行中のキロ程算出・誤進出判定ができる警報装置を開発した。

線名・線別・キロ程は、D-GPSの測位データと警報装置に登録した鉄道GISデータから算出する。誤差の大きい測定値を排除する論理を採用したことにより、軌陸車載線の作業中に正規に載線されたか計画外の線路に載線されたかが正しく判定できた。所要時間は120秒未満である。キロ程の算出は軌陸車の移動に追従しており、線閉条件と照合して誤進出に対して警報できた。算出したキロ程は現場への移動など正常時の作業の利便性向上にも役立つ。

さらに、本警報装置には搭載していないが、隣接線への移動に伴うわたり線の走行判定に拡張できることも確認した。

9. 今後の予定

工場内試験と現地試験を行って良好な結果を得た。模擬の仕様やデータの絞込みを行った次の各項目について開発を行い、実作業において有効性・操作性を確認する。

(a) 上下線判定に使う、鉄道GISの効果的な確認方法

軌陸車の走行した軌跡から、鉄道GISデータの検証及び修正を行える手法を開発する。

(b) 線閉条件の取得と照合

ATOSの保守作業管理DBから線閉条件を取得し、照合するサーバーを開発する。

(c) わたり線の乗移りの判定論理の組込み

7で述べたわたり線の乗り移り論理を組み込んで駅構内に判定論理を拡張できるようにする。

参考文献

- 1) 黒崎倫之ら；保守用車用短絡走行の研究 JR East Technical Review No.21
- 2) 黒崎倫之ら；D-GPSによる軌道陸上兼用車の上下線認識の検証 J-Rail2009 第17回交通・物流部門大会
- 3) 安田明生；電子情報通信学会誌 Vol.82, No.12
- 4) 坂井丈泰；GPS技術入門 東京電機大学出版局 2003.9
- 5) 坂井丈泰；GPSのための実用プログラミング 東京電機大学出版局 2007.1
- 6) 海上保安庁DGPSセンターHP
<http://www.kaiho.mlit.go.jp/syoukai/soshiki/toudai/dgps/index.htm>