

鉄道の制御のための GNSSによる 信頼性向上について

独立行政法人交通安全環境研究所
交通システム研究領域
吉永 純

研究の背景

- 省メンテナンス化の必要性

- 鉄道旅客減少
 - ※中小民鉄96社の8割は赤字
- メンテナンス要員確保の困難さ
- 設備老朽化(30年以上使用)

- 固定設備を利用しないシステムへの期待

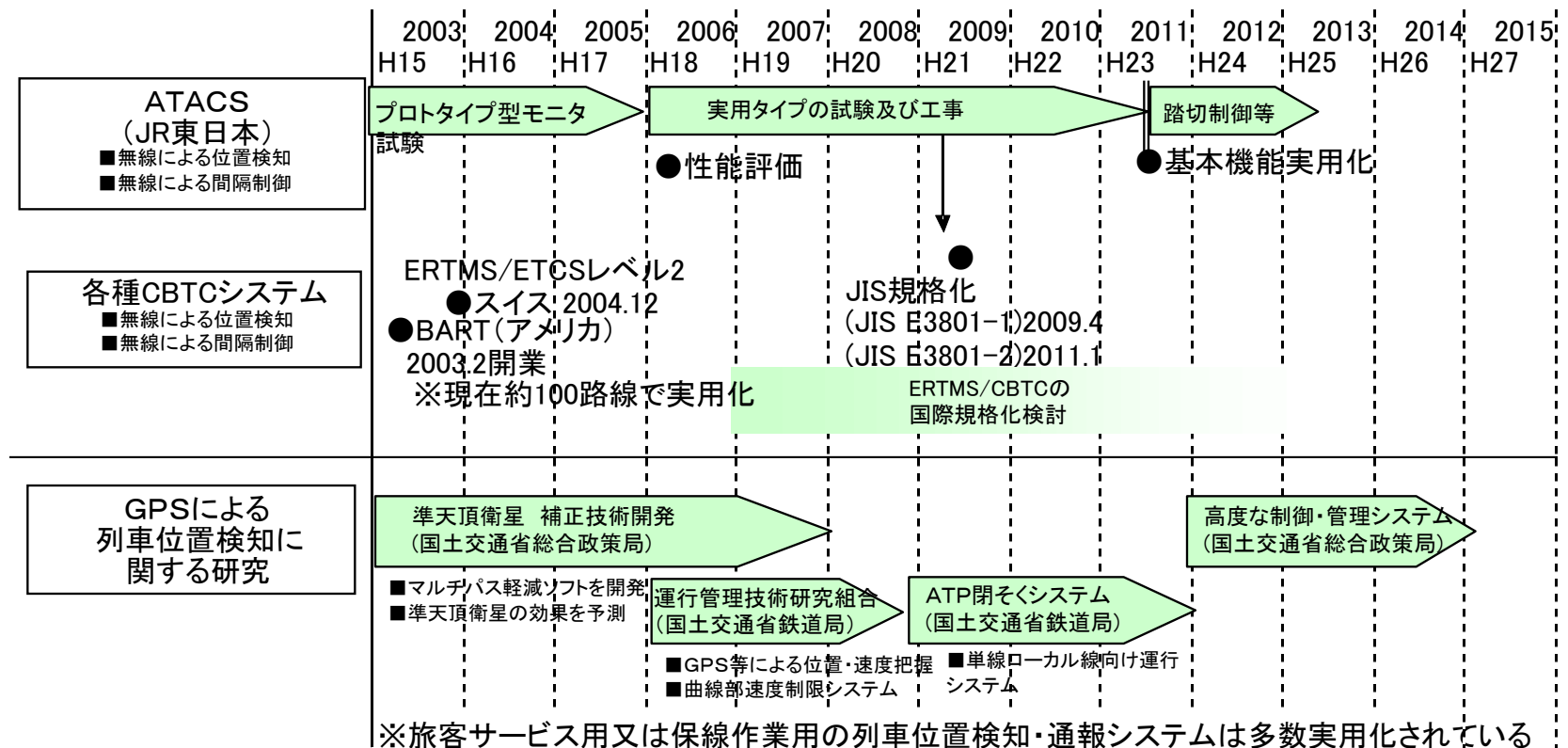
- 準天頂衛星による衛星測位の信頼性向上の期待
 - 測位率向上の期待
 - 測位精度などの安定性の向上の期待
- マルチGNSS測位端末の普及



導入・運営において低コストな信号システムが求められている

無線により列車上で位置検知するシステムの動向

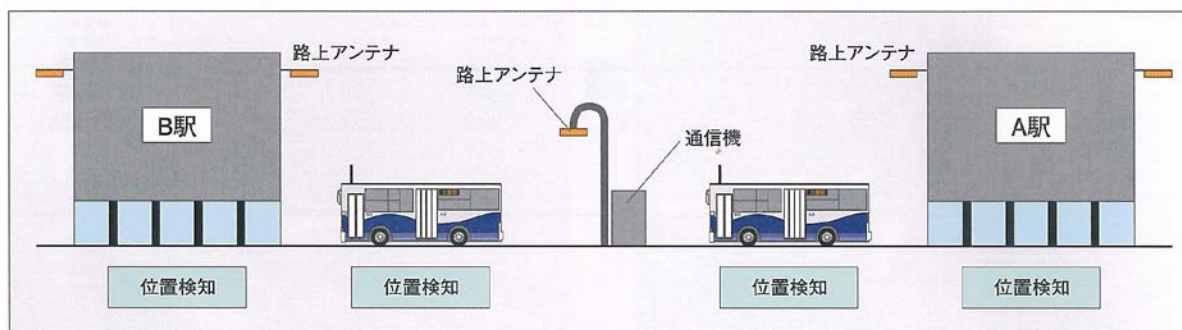
- CBTCは広汎かつ急速に技術開発及び普及が進んでいる。
 - 地上装置による制御 → 車上装置主体の制御へ
- ただし、沿線アンテナや高性能の車両が必要となり導入コストがかかる。CBTCは新規建設線に導入される事例が多くみられる。



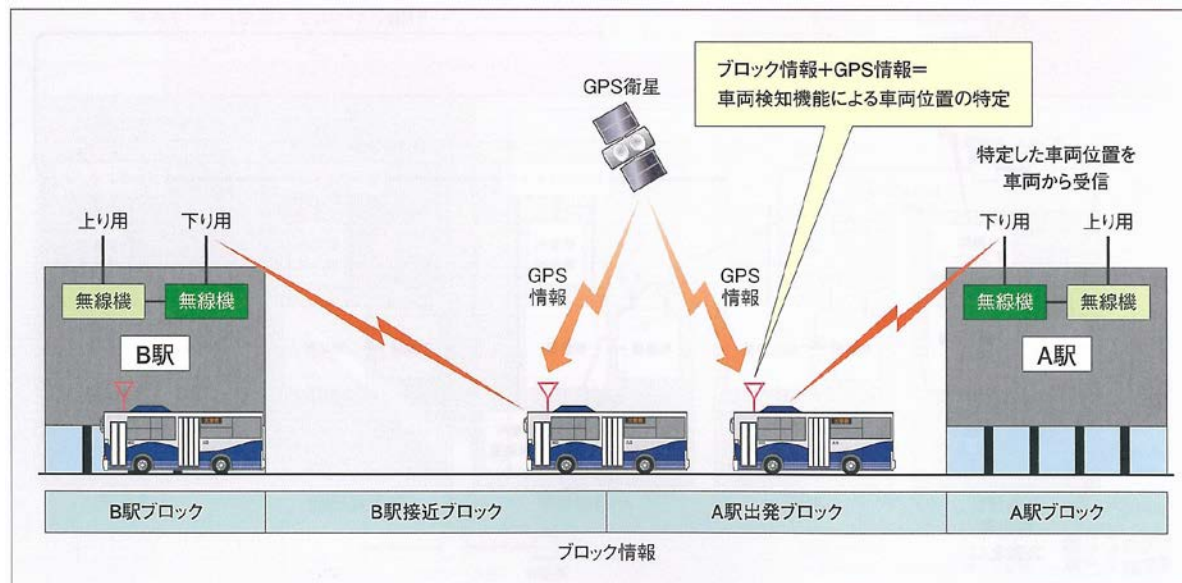
無線アンテナを省略した運行監視システム

名古屋ガイドウェイバスでの新しい運行監視システム(2014年導入)
従来の固定の路上アンテナを、GPSと車輪回転検知によって代替する。

従来の構成



新システム
構成



出典:「京三サーキュラー」
Vol.65 No5 (2014)
(株)京三製作所発行

鉄道で実用化するために証明が必要な項目

- 実用済の装置や考え方を併用している
 - － 安全性が変わらない配慮がされているか
- 実用済のものと、同等の信頼性がある
 - － 同じ試験手順を実施している
 - － FTA、FMEAによる解析による分析
- 真値を把握し、システムの誤差量が明らかになっている
 - － 走行中の列車の移動を正確に測定する
 - － 固定設備を併用する(ATS地上子、踏切地上子、駅間距離)

 衛星配置による影響や、GPS衛星へのなりすまし等の影響を受ける懸念に対する対策が必要。

鉄道で列車位置を利用する機能に必要な精度

	信頼性高 ←	→ 信頼性低
測位精度	データ欠落等は許容できない	データ欠落等に対して対策ができる
高精度 ↑	・閉そくの設定・解除 - 踏切鳴動・終止 - 信号制御 - 信号付帯ATS	- 曲線速度チェック - 誤出発防止
↓ 低精度	・在線する軌道回路の把握	- 運転支援 - 走行履歴管理 - 旅客サービス用途

端的に表現したもので、さまざまな前提条件がある。

■ 保安に用いるもの → 技術基準適合性

→ 高度な信頼性及びフェールセーフ性

※実運用の例: $10^{-8} \sim 10^{-9} / h$ (SIL4相当)

■ 保安に用いないもの ・・ 支援システムなど

→ 動作しない場合にも安全性に影響が無い

現状における列車位置検知方法

列車位置検知方法

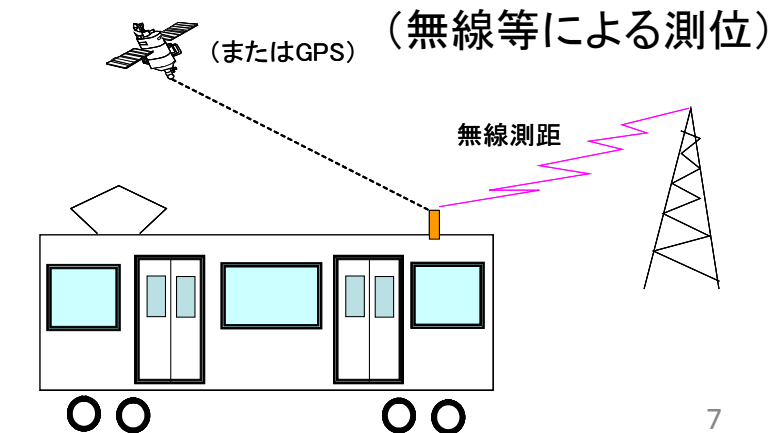
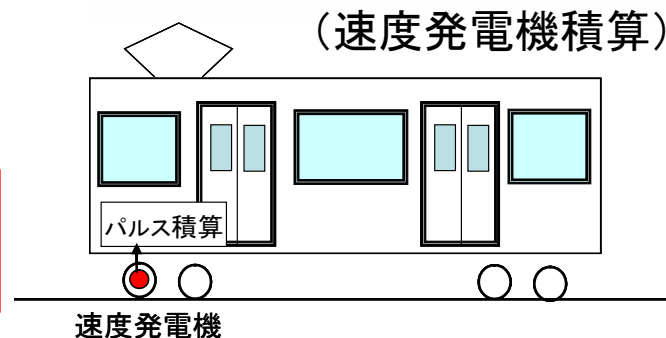
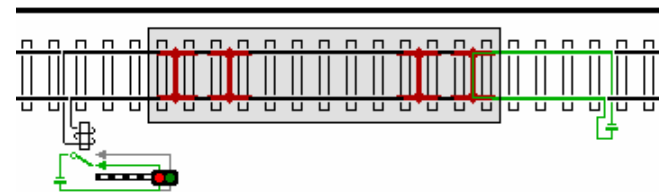
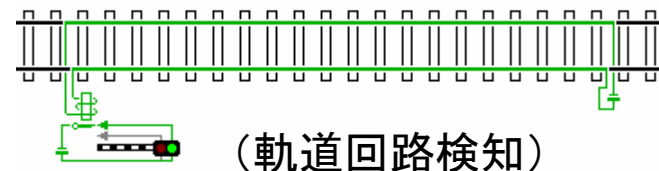
軌道回路検知
(軌道短絡による一般的な方法)

ループコイル検知
(APM、モノレール、新交通)

車上の速度発電機パルス
積算による相対的測位

車上-地上間の無線通信測距
による位置検知(CBTC)

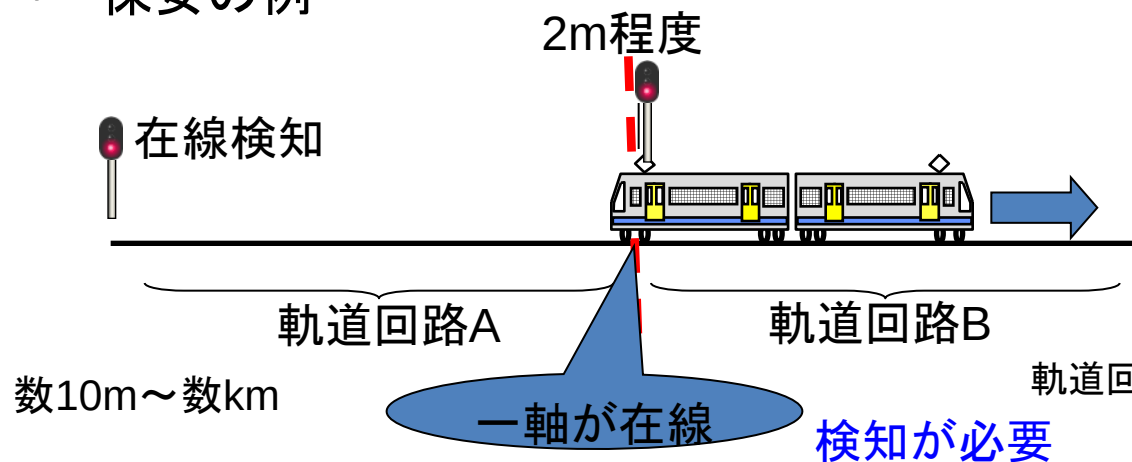
GPSを利用した列車位置計測
(中国・青蔵鉄道の駅間部分)



- ・普通鉄道では軌道回路が最も普及している。
- ・CBTCはIEEE1474.1(2004)に定義されている。

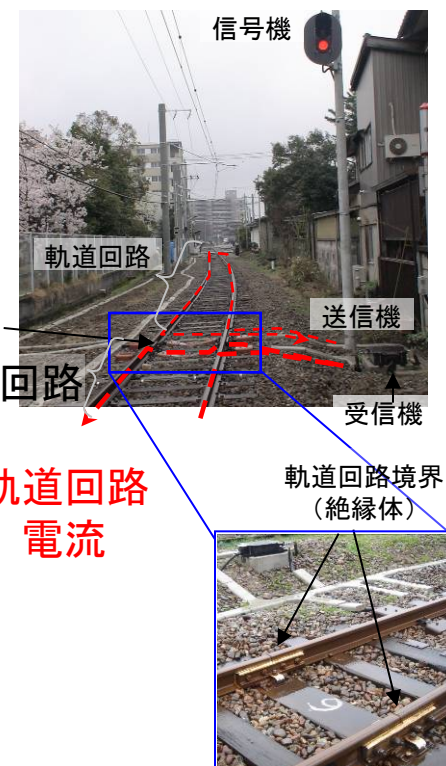
必要となる位置検知精度の例

- 保安の例



連動装置の設定、クリアランス明示、システム設計上の余裕等の安全対策により、以下のような境界ぼけのあるシステムも使われている。

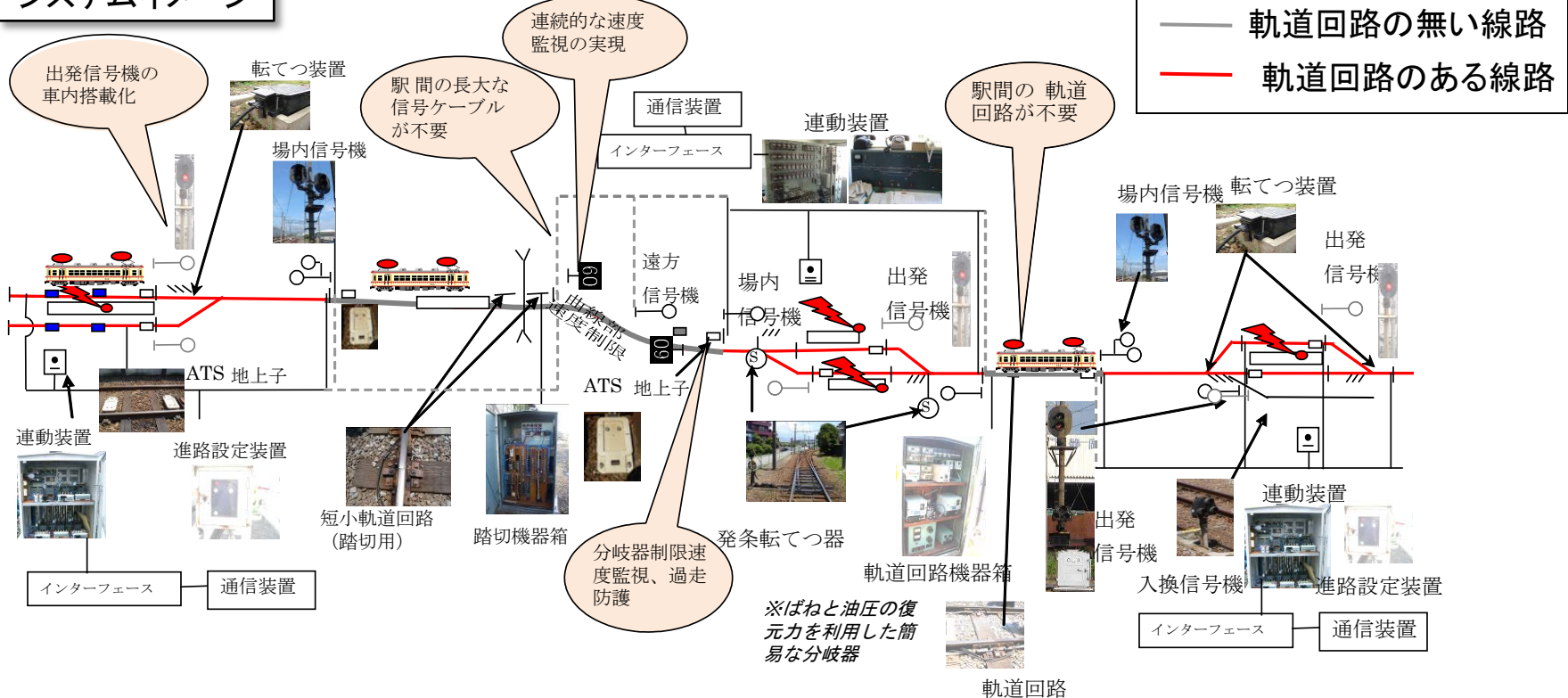
- 軌道回路境界が信号機とずれて設置される場合 2m程度
- 無絶縁軌道回路(地下鉄各線、フランスTGV) 10m程度



長期的な研究目標

- 衛星測位により、駅間の軌道回路及びケーブル、出発信号機を不要化し、メンテナンスコストを削減できる信号保安システムを実現する。

システムイメージ



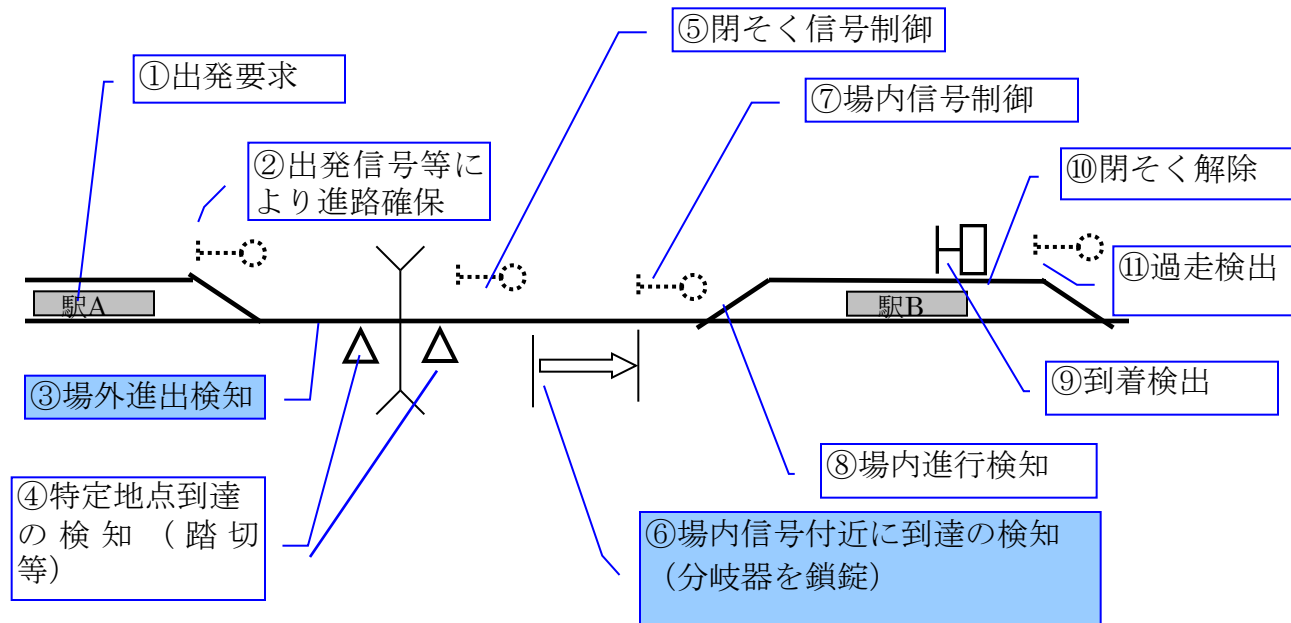
- ・中小民鉄線(単線想定)用のシステムを前提として構築する。
- ・既存の信号保安装置を一部活用することで実用化を早め、鉄道事業者が現行の信号保安設備の老朽更新する際に、選択肢となるものを目指す。

準天頂衛星打ち上げ前の研究状況

	H 1 5	H 1 6	H 1 7	H 1 8	H 1 9
(1)測位精度・信頼性向上対策 ・実態把握 ・鉄道用マルチパス対策ソフトウェア (3D地図を判定に利用) (疑似距離を判定に利用) ・速度発電機(車輪回転数検知)とのハイブリッド化 ・QZSS精度/測位率向上効果検証	路面電車 誤差: 5m程度 1m以内を目 標と設定	JR 地方幹線 誤差: 平均1m以内と なる可能性	大手民鉄 (都市部) 実地データ 取得	大手民鉄 (都市部) アルゴリズム 検討 地方民鉄	走行試験 地方3セク
(2)衛星測位利用システム開発 ・信号冒進警報システム ・単線用衝突防止装置 ・速度超過監視装置 ・踏切内滞留自動車の検知	地方民鉄	地方民鉄	地方民鉄	地方民鉄	

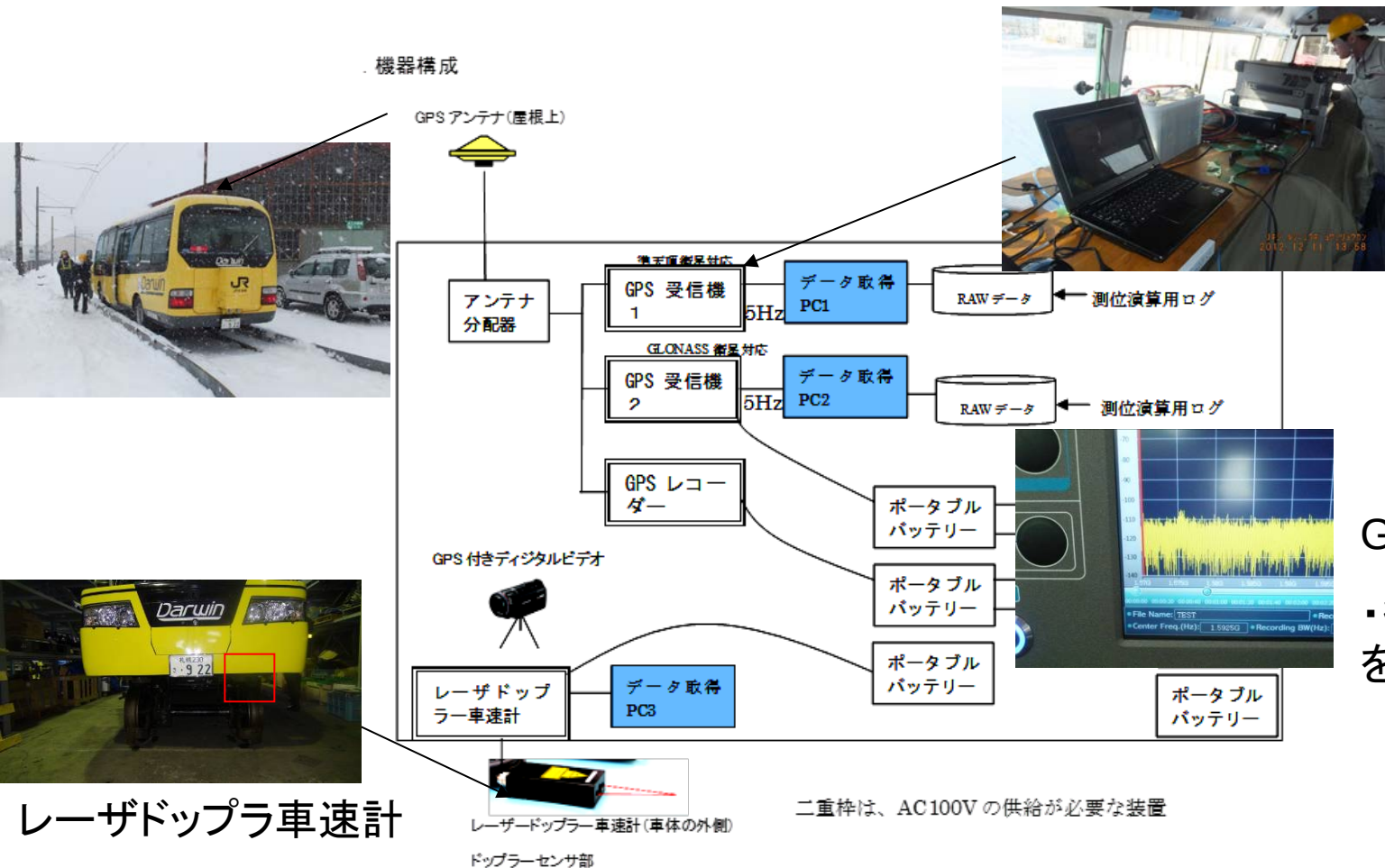
列車の制御のための手順

- 列車の運行制御には①～⑩の手順のための位置検知が必要。
- ③及び⑥の地点での、駅場内／駅場外を検知することを想定して試験を実施する。

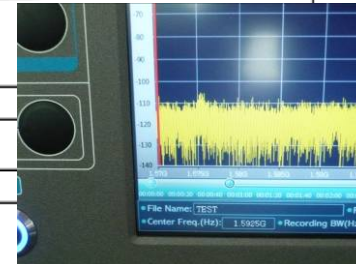


試験用機器

機器構成



GPSレコーダ
・衛星信号波形を収録



- ・GPS受信機1とGPS受信機2は異なる機種である。
- ・準天頂衛星による測位はL1-SAIFによる単独測位を行う。
- ・レーザードップラ車速計の誤差は0.01%程度だった。

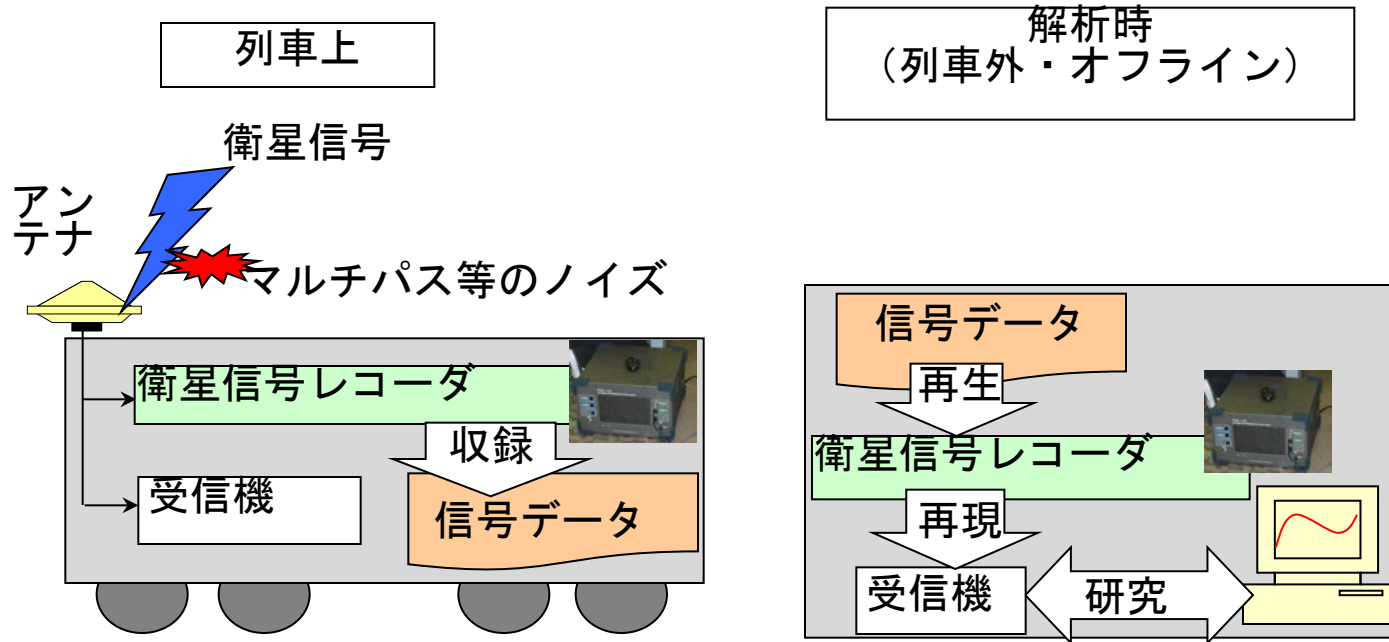
レーザドップラ車速計の諸元

項目	仕様
構成	アクト電子製1521S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	400±50mm（普通鉄道用は700±100mm）
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、5km/h〜30km/hで運行するため、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）。

- ・スタート地点にはマーカを置き、開始位置を明確にした。
- ・計測誤差は50cm以内(0.1%以内)であることを停車位置から確認した。

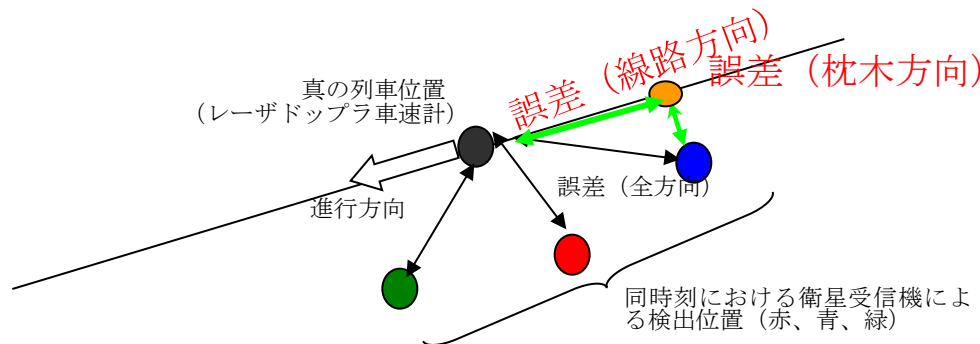
試験の方法

- 列車を利用した再現試験は困難（試験列車ダイヤの制約など）なため、列車上での取得データを利用して、オフラインで繰り返し試験できる方法が有効と考え、衛星信号レコーダ（RFレコーダ）装置への収録を行った。



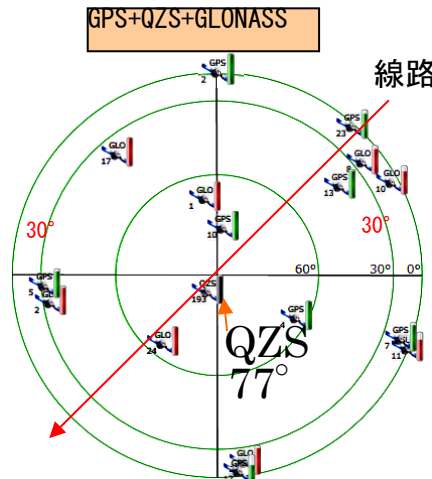
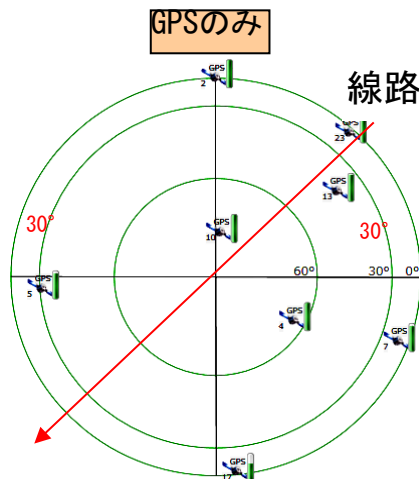
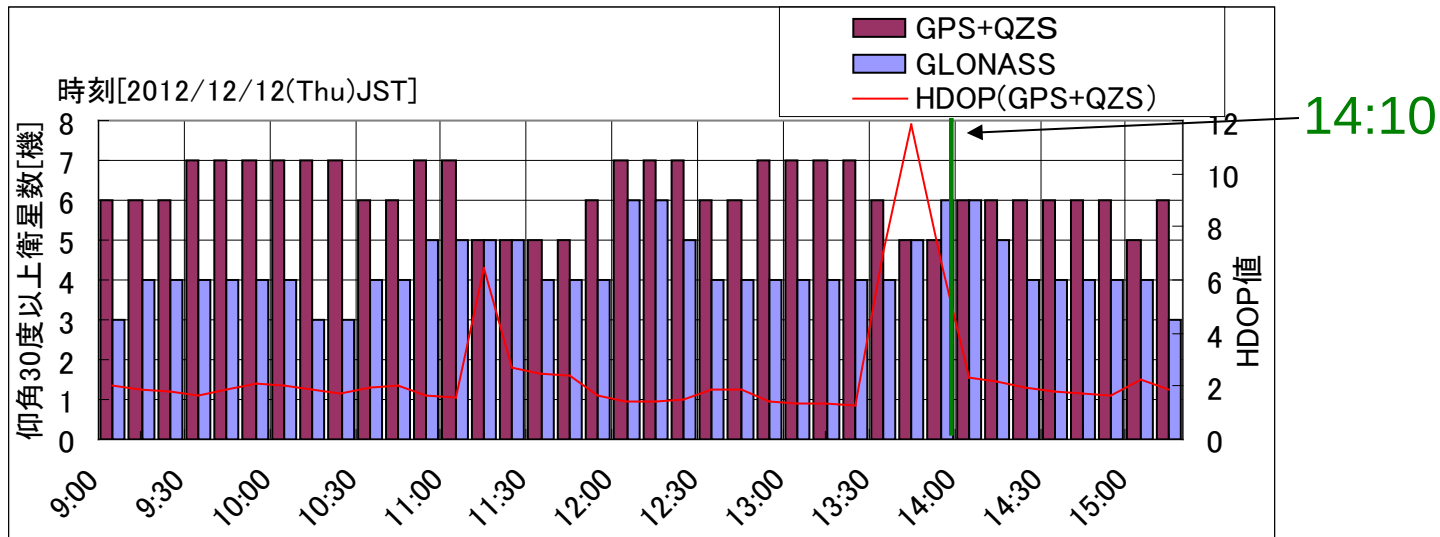
位置検知精度の評価方法

- ①衛星測位された緯度・経度情報(赤・青、緑点)を、マップマッチングにより線路位置(橙色の点)を求め、キロ程(単位[m])に変換する。
- ②レーザドップラ車速計による進行距離(=真の列車位置)と比較することにより、線路方向の誤差量(単位[m])を算出する。



衛星測位環境

- 準天頂衛星の仰角が高い環境で、極力定速度で走行する試験を行った(38回)
- このうち、GPSとGLONASSの衛星数が同じ時間帯(14:10頃)における試験結果を示す。



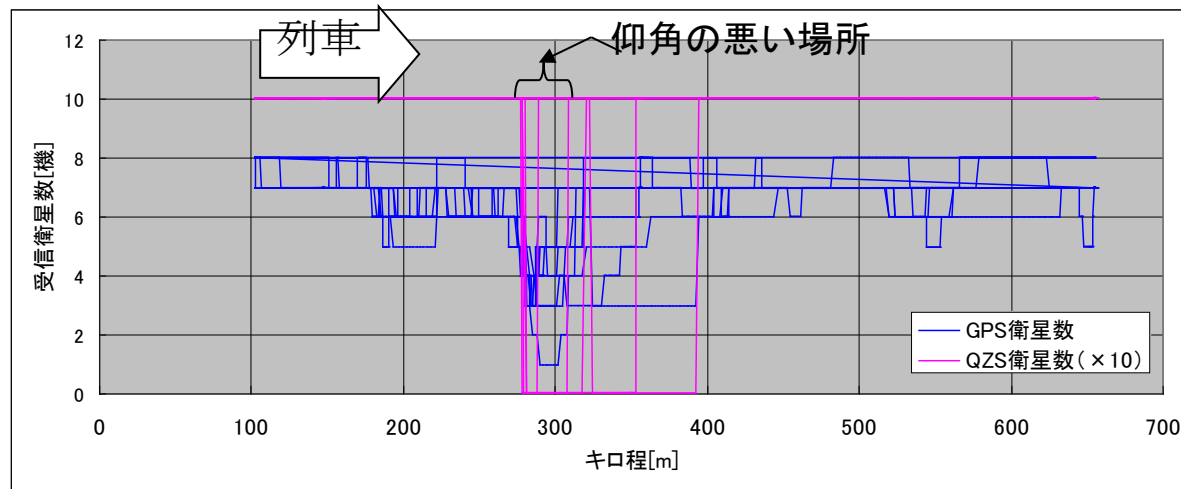
衛星測位環境

- 列車は極力定速度(5km/h、10km/h、30km/h、50km/h)で、基本的に東から西方向への走行を行う。左の表中の試験欄の数字は、運転速度を表している。
- 試験結果の図は、表中の水色のハッチングの際のものを使用している。

ID	試験	開始時刻	GLONASS	GPS のみ	GPS+QZSS	QZS 可視率[%]	データ数	QZS 仰角[度]
101	A-5	12/11 10:12	100.0%	98.0%	100.0%	100.00%	1,481	82
102	A-10	10:25	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%	1,044	83
103	A-30	10:35	100.0%	96.4%	100.0%	100.00%	446	84
104	A-50	10:48	100.0%	97.1%	100.0%	100.00%	412	84
105	B-5	10:57	99.4%	97.7%	100.0%	100.00%	1,902	84
106	B-30	11:08	88.7%	99.0%	100.0%	100.00%	896	84
107	戻り	11:11	77.8%	98.5%	100.0%	100.00%	864	84
108	C-5	11:15	47.1%	99.7%	100.0%	100.00%	1,995	84
109	C-30	11:26	55.1%	98.1%	100.0%	100.00%	839	84
110	B-30	11:38	36.0%	100.0%	100.0%	100.00%	934	84
111	B-10	14:09	100.0%	98.8%	100.0%	100.00%	1,259	78
112	B-30	14:18	100.0%	93.6%	98.7%	100.00%	825	77
113	B-10	14:32	100.0%	98.9%	100.0%	100.00%	1,235	76
114	B-30	14:40	100.0%	98.8%	100.0%	100.00%	756	75
115	C-10	14:49	99.8%	100.0%	100.0%	100.00%	1,267	74
116	C-30	14:59	99.7%	94.6%	100.0%	100.00%	774	73
117	戻り	15:03	87.8%	95.2%	97.1%	100.00%	997	72
118	A-30	15:07	100.0%	92.1%	97.4%	90.03%	582	72
119	A-50	15:13	100.0%	100.0%	100.0%	97.01%	502	72
120	A-10	15:19	99.2%	99.7%	100.0%	98.70%	1,304	71
121	A-5	15:28	99.7%	99.5%	100.0%	100.00%	2,016	70
122	B-30	15:40	99.7%	96.3%	100.0%	93.30%	791	69
201	A-5	12/12 11:12	100.0%	97.7%	100.0%	100.00%	1,114	84
202	A-10	11:20	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%	680	84
203	A-30	11:25	74.0%	100.0%	100.0%	100.00%	365	84
204	B-5	11:29	100.0%	98.9%	99.7%	100.00%	1,141	84
205	B-30	11:35	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%	482	84
206	戻り	11:37	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%	616	84
207	C-5	11:41	100.0%	100.0%	100.0%	100.00%	1,191	84
208	C-30	11:52	100.0%	97.9%	100.0%	100.00%	474	84
209	B-10	14:08	100.0%	92.7%	99.7%	100.00%	739	77
210	B-30	14:15	100.0%	90.8%	97.3%	100.00%	488	77
211	C-10	14:27	99.3%	98.2%	100.0%	100.00%	722	76
212	C-30	14:32	100.0%	95.9%	100.0%	96.44%	365	75
213	A-10	14:37	99.6%	96.8%	97.9%	87.98%	466	75
214	A-30	14:43	100.0%	91.2%	100.0%	100.00%	171	74
215	B-30	14:47	100.0%	80.0%	95.7%	100.00%	280	74
216	戻り	14:50	100.0%	80.8%	82.2%	100.00%	281	74
217	C-30	14:53	100.0%	93.7%	95.7%	95.67%	300	73
218	A-5	14:57	100.0%	97.0%	100.0%	100.00%	901	73
平均			94.07%	96.59%	99.04%	99.34%		

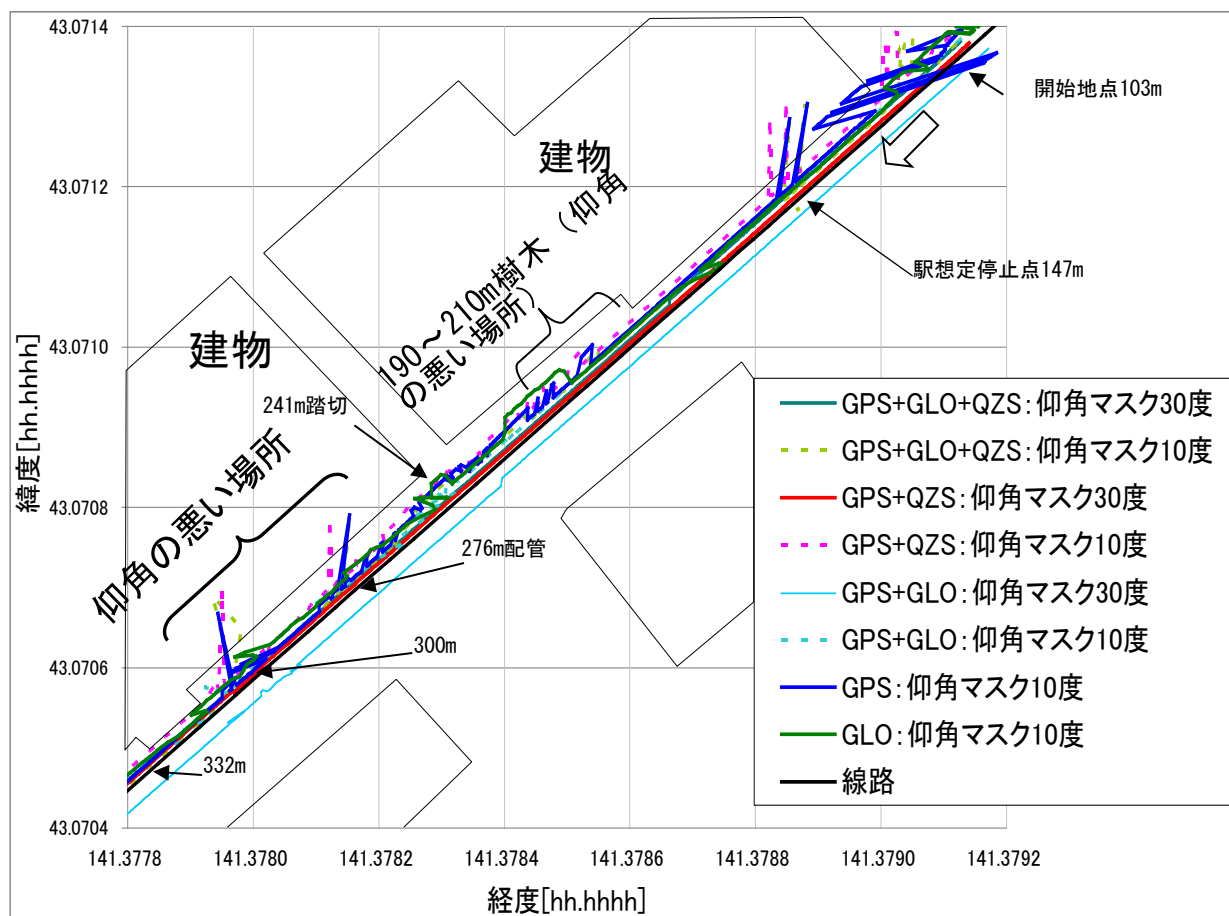
試験結果(可視衛星数の推移)

- 試験列車10走行分のGPS可視衛星数と、準天頂の可視(=10)、不可視(=0)の変動状況を、キロ程別に作画した。
- 特定の箇所(270m付近から320m付近)にかけて衛星数が減少する傾向が見られるがこの場所は北側に仰角40度ほどの建物がある場所で、その影響と考えられる。



試験結果(プロット図(103m~332m付近))

- 同一の受信機機種(JAVAD ALPHA)により、測位方法を変えてプロットしたもの
- 衛星数が増減する際、瞬間的に枕木方向に2m~10m程度変動している。

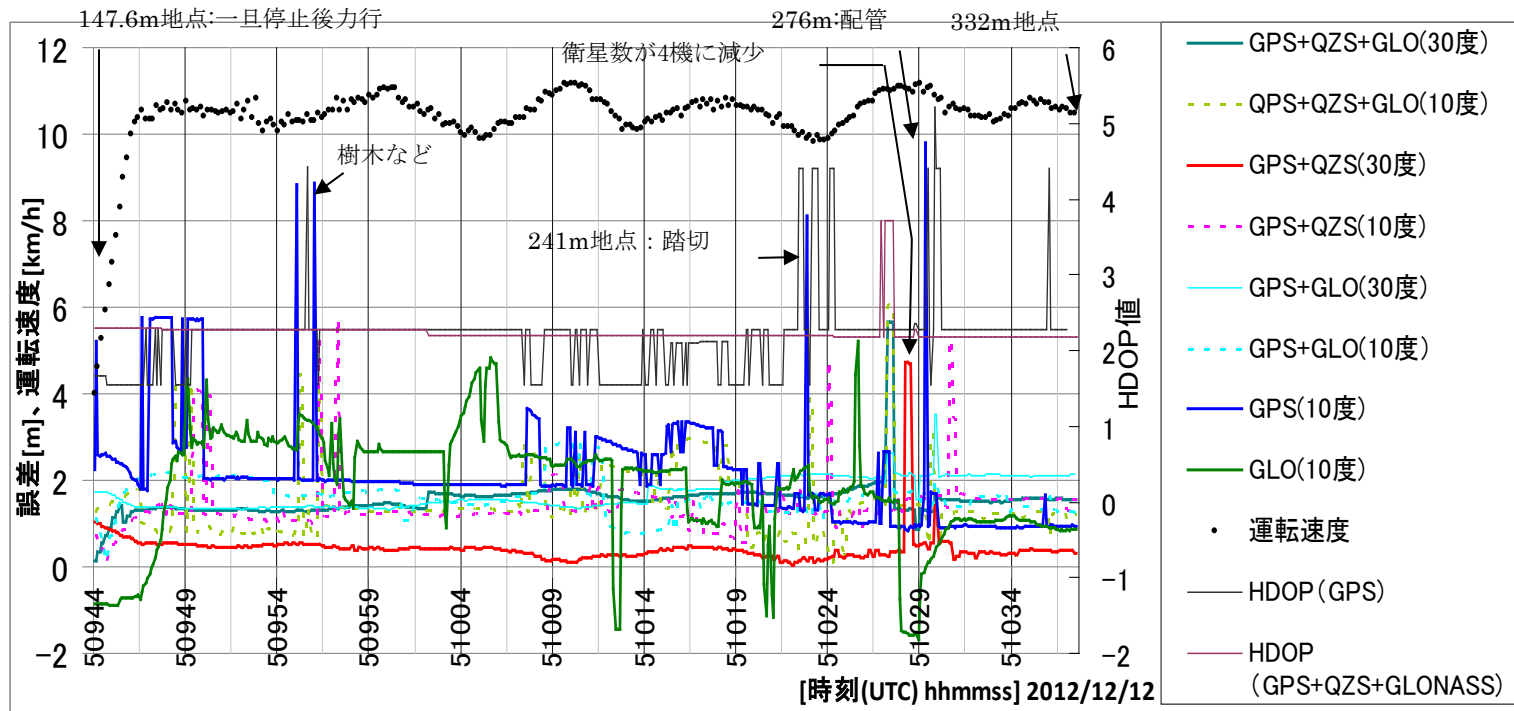


(上) 241m地点から終了地点側の状況

(下) 241mから開始地点側の状況



試験結果(線路方向の誤差推移)

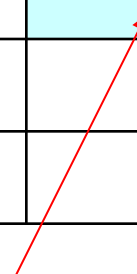


- ・衛星数が増減する際に、瞬間的な増減が見られる。
- ・高度角マスク(仰角マスク)が10度より、30度の方が精度がよい。
- ・最も衛星数が多い組み合わせ(GPS+QZS+GLONASS)より、GPS+QZSが最も安定している。利用可能衛星の切り替わりが少ないためと思われる。

試験結果(誤差量の平均)

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

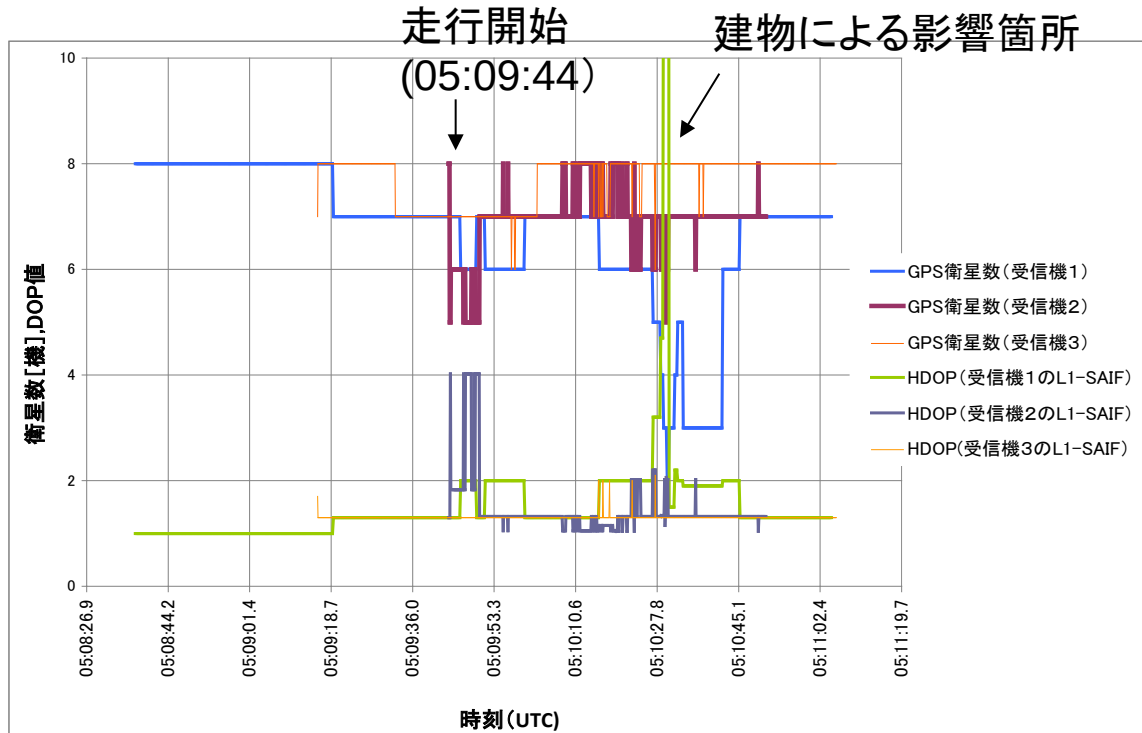
最良



試験結果(受信機機種の違い)

前ページのGPS+QZS(仰角マスク10度設定)の組み合わせについて、他の衛星受信機機種(1及び3)による比較を行った。

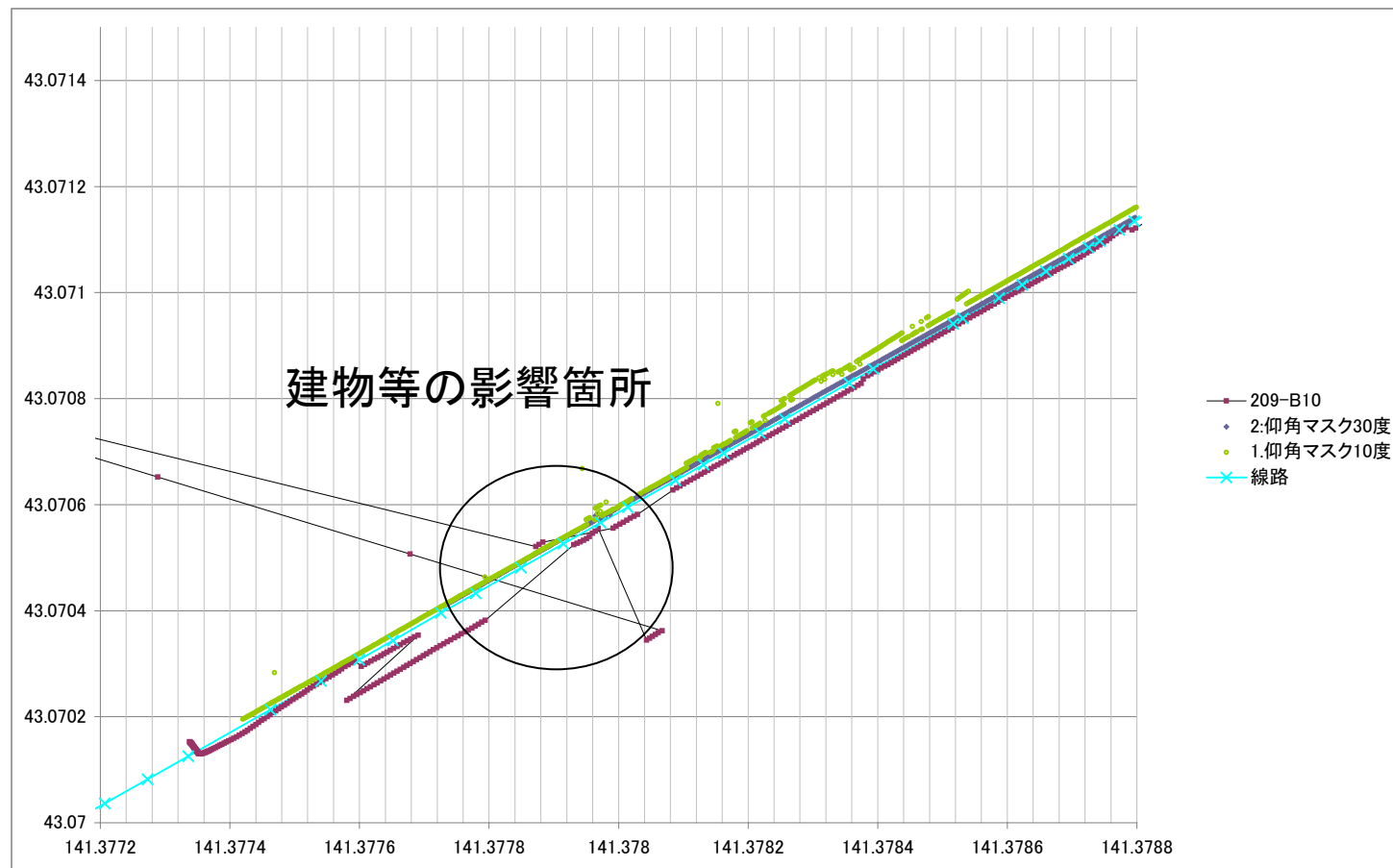
下図は、各受信機の捕捉衛星数、HDOPの推移を示している。



- 捕捉衛星数の相違は、一旦欠落した衛星信号を再検出する時間の差が主因と考えられる。受信機1は微弱な信号の衛星の検出性が低く、**信号の再検出に時間を要しているため**補足衛星数が減少しやすい。
- そのため、測位率や精度も受信機2及び3より悪化している。

試験結果(仰角マスクの設定変更)

- 前ページの受信機1について仰角マスクを30度とした場合、衛星数の増減が減り、測位精度が向上する効果がみられた。



まとめ

- 鉄道での衛星測位試験について、後日再現可能な試験装置を作成し、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、低仰角の衛星は演算から除外した場合に精度が高くなる傾向が見られた。
- 今回紹介したものは短時間での試験事例だが、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。