

システム技術開発調査研究

15-R-3

移動体用高精度位置標定システム に関する調査研究報告書 (要旨)

平成16年3月

財団法人 機械システム振興協会
委託先 (財) 日本自動車研究所



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、防災、都市、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには、技術開発力の強化に加えて、ますます多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢に対応し、各方面の要請に応えるため、財団法人 機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとに、機械システムの開発等に関する補助事業、新機械システム普及促進補助事業等を実施しております。

特に、システム開発に関する事業を効果的に推進するためには、国内外における先端技術、あるいはシステム統合化技術に関する調査研究を先行して実施する必要がありますので、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長 放送大学 教授 中島尚正 氏）を設置し、同委員会のご指導のもとにシステム技術開発に関する調査研究事業を民間の調査機関等の協力を得て実施しております。

この「移動体用高精度位置標定システムに関する調査研究報告書」は、上記事業の一環として、当協会が 財団法人日本自動車研究所 に委託して実施した調査研究の成果であります。

今後、機械情報産業に関する諸施策が展開されていくうえで、本調査研究の成果が一つの礎石として役立てば幸いです。

平成16年3月

財団法人 機械システム振興協会

はじめに

ネットワーク社会は、生活や産業活動を情報豊かなものにするとともに、今後もさらにその多様さと情報量を増やしていくことになるだろう。自動車もこうした流れを避けて通るわけにはいかない。この流れの一つが自動車における位置標定の高精度化である。

もちろん、準天頂衛星と電子基準点の二つのインフラがこの導火線になったことは間違いない。

準天頂衛星は、日本で打上げる GPS 衛星のうちの 1 機が必ず仰角 70° ～ 90° の天頂近くに来るような軌道にのせ、アメリカの GPS を補間する形で高精度化に貢献しようと考えている国産衛星の一つである。2008 年から打上げ予定であり、将来的に期待できるインフラである。

既に高精度位置標定に応用、利用されているのが電子基準点である。電子基準点は地殻変動監視のため、国土地理院が 1993 年度に南関東・東海地域に 110 点設置して以来、2002 年度中に 1200 箇所の設置が完了した。さらに 2002 年 5 月から 200 箇所の電子基準点のリアルタイムデータ提供が開始され、今年度中に 1200 箇所全ての電子基準点のリアルタイムデータ提供も開始される。

こうしたインフラの進歩は、ネットワーク社会の発展とインテグレートして、測量（固定点の位置標定）の世界に革命的発展をもたらし、数 cm の精度で測量ができるようになった。

本年度から始まった本調査研究では、移動体用高精度位置標定システムへのリクワイアメント作成を目標に GPS による測位データ及びインターネット・電子基準点を利用した補正情報で補正した測位データから移動体（自動車）の位置精度の実力値を明確にし、その高精度化の課題を明らかにするものである。

本調査研究にあたっては、移動体用高精度位置標定システム委員会（委員長：森川 博之 東京大学 助教授）を設置し、学識経験者、自動車・車両部品メーカー、情報通信機器メーカー及びコンサルティング会社等の委員との議論をもとに検討を行った。この場を借りて、多数の関係者のご指導とご協力に心より感謝を申し上げる次第である。

平成 16 年 3 月

財団法人 日本自動車研究所

目 次

1. 調査研究の目的	1
2. 実施体制	2
3. 調査研究成果の要約	7
第1章 調査の方法	9
1.1 使用した測位システム.....	9
1.1.1 iiGPS	9
1.1.2 RTK-GPS	9
1.1.3 各方式の比較.....	9
第2章 位置精度の目標値の設定.....	11
2.1 有望な新規サービスの想定.....	11
2.2 各想定サービスのリクワイアメント.....	11
2.3 位置精度の目標値.....	12
第3章 実験内容と評価	13
3.1 開放地での実験.....	13
3.1.1 実験概要.....	13
3.1.2 測定系の構成.....	13
3.1.3 実験使用機材.....	14
3.1.4 実験コース風景.....	16
3.1.5 位置基準データ取得.....	17
3.1.6 走行測定結果.....	20
3.2 一般道路での実験.....	27
3.2.1 実験概要.....	27
3.2.2 走行コース.....	28
3.2.3 測定系の構成.....	30
3.2.4 機器の設定パラメータ.....	32
3.2.5 市街地A(羽田周辺)での測定結果	33
3.2.6 市街地B(品川～蒲田)での測定結果	36
3.2.7 高層ビル街での測定結果.....	39
3.3 実験結果の地図上への表示.....	42
3.3.1 市街地A	42
3.3.2 市街地B	43
3.3.3 高層ビル街.....	44
第4章 考察とまとめ	45
4.1 位置精度測定結果.....	45
4.2 捕捉衛星数とDOP.....	46
4.3 捕捉衛星数と測位品質.....	49
4.4 FIX状態での誤差.....	51
4.5 位置精度劣化の主要原因1 (捕捉衛星数の減少)	52

4.6 位置精度劣化の主要原因2 (マルチパスの影響)	53
4.7 今後の課題.....	54
4. 調査研究の今後の課題及び展開.....	55

1. 調査研究の目的

GPSによる高精度位置標定技術は多くの分野で利用される可能性がある。中でも移動体（自動車）への利用は、その中核を成すものであり、運転支援システム等多くのITSサービスへの利用が想定されている。

移動体における位置精度が現在の10～20メートルから数10センチメートルまで改善されると、現在のナビゲーションシステムで必須のマップマッチングが不要になり、GPSで得られる位置データをそのまま使う新しい発想のITSサービスを実現する契機になる。

また、位置データの高精度化は自動車走行の縦制御（前後方向）と横制御（左右方向）を可能とし、運転支援システムを実用化開発ステージに押し上げ、安全で快適な交通社会の実現にも寄与できる。

現在のD-GPS補正方式では、基準局における位置補正情報をFM多重放送等で広域の車両に送信し、各車両が同一の位置補正を行っている。この位置補正情報では時間的に変動し、かつ、基準局と車両との距離が大きくなるほど誤差が増加するため、移動体にとっては高精度な位置標定を必要とするITSサービスを実現できないと考えられる。

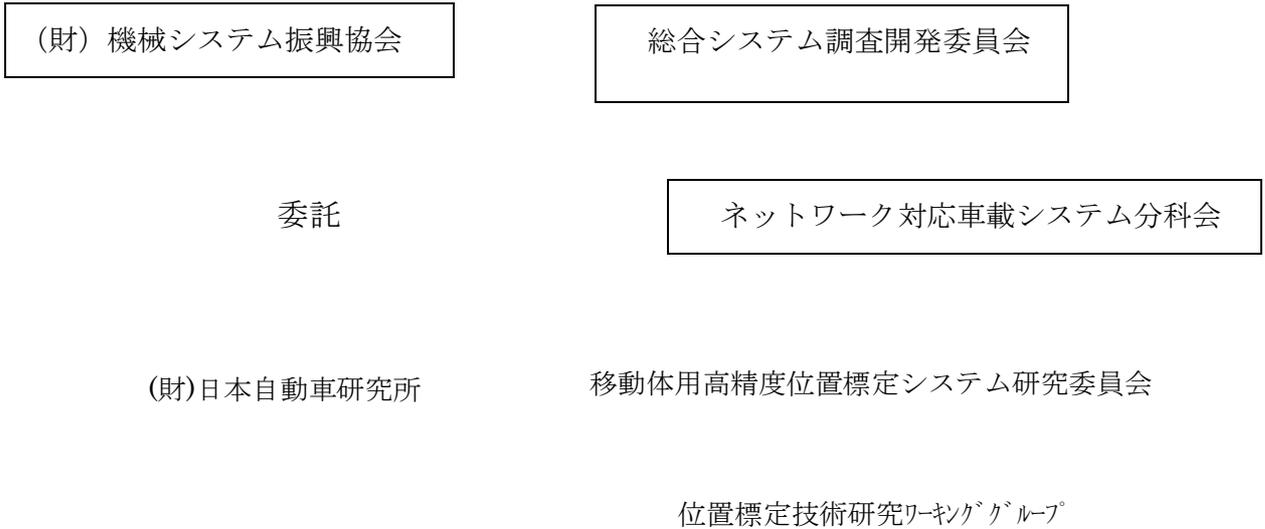
移動体用位置標定の高精度化は、当該地点、当該時刻での車両固有の補正情報を最寄3ヶ所の電子基準点の補正情報から算出し、個々の車両へ通信する補正方式へ移行させることで実現される。

この新たな位置補正情報システムにおける位置精度の検証により位置標定高精度化技術開発の方向性を明らかにし、位置標定技術応用商品の開発促進に資することを本調査研究の目的とする。

2. 実施体制

(財) 機械システム振興協会から委託を受けた調査研究をすすめるにあたって、以下に示す実施体制で推進した。

(財) 日本自動車研究所に、「移動体用高精度位置標定システム研究委員会」を設置した。さらに左記委員会の作業班として「位置標定技術研究ワーキンググループ」を設置し実施した。



総合システム調査開発委員会委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	放送大学 教授 東京多摩学習センター所長	中 島 尚 正
委員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤 正 巖
委員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣 田 薫
委員	東京大学 大学院工学系研究科 助教授	藤 岡 健 彦
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 つくば中央第2事業所 管理監	太 田 公 廣
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 シニアリサーチャー	志 村 洋 文

ネットワーク対応車載システム分科会 委 員 名 簿

(順不同・敬称略)

委員長	吉 本 堅 一	防衛大学校 システム工学群機械工学科 教授
委 員	相 田 仁	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授
委 員	赤 松 幹 之	独立行政法人産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門 行動モデリンググループ 研究グループ長
委 員	板 橋 秀 一	筑波大学 電子情報工学系 教授
委 員	佐 藤 春 樹	慶応義塾大学 理工学部 システム工学科 教授
委 員	津 川 定 之	名城大学理工学部情報科学科 教授
委 員	寺 田 一 薫	東京海洋大学海洋工学部 流通情報工学科 教授

移動体用高精度位置標定システム研究委員会 委員名簿

(順不同・敬称略)

委員長	森川 博之	東京大学 新領域創成科学研究所 助教授
委員	荒井 修	古野電気株式会社 技術研究所 研究部 第三研究室
委員	池田 朋広	株式会社三菱総合研究所 ITS事業部
委員	石垣 敏弘	松下電器産業株式会社 パナソニックオートモティブシステムズ社 技術グループ 第一設計チーム 主任技師
委員	宇佐美 浩志	株式会社サイバー創研 シニアコンサルタント
委員	柏原 正信	三菱電機株式会社 自動車機器開発センター センター長室 主席技師
委員	川添 利洋	日本無線株式会社 通信機器事業部 企画管理グループ
委員	木暮 吉行	パイオニア株式会社 MEC事業企画部 渉外担当部長
委員	坂本 規博	社団法人日本航空宇宙工業会 技術部部長
委員	佐藤 英夫	株式会社野村総合研究所 社会情報コンサルティング部 主席コンサルタント
委員	清水 真	株式会社アクアキャスト 代表取締役社長
委員	菅原 敏	株式会社日立製作所 放送・通信システム推進事業部 IT宇宙インフラ推進本部 企画部 主任技師
委員	鈴木 尋善	三菱電機株式会社 自動車機器事業本部 自動車機器業務部技術グループ 担当部長
委員	中野 信一	川崎重工業株式会社 システム技術開発センター
委員	中村 一雄	株式会社デンソー ITS開発部 開発2室 主任部員
委員	安井 利夫	株式会社アクアキャスト ビジネスソリューション部 部長
委員	吉川 憲昭	株式会社サイバー創研 第一技術部 部長
委員	鷺頭 浩一	日本無線株式会社 研究開発部 電波研究グループ
事務局	高橋 寿平	財団法人 日本自動車研究所 ITSセンター 企画グループ 主席研究員
事務局	醍醐 英治	財団法人 日本自動車研究所 ITSセンター 企画グループ 主任研究員

位置標定技術研究WG 委員名簿

(順不同・敬称略)

主査	石垣 敏弘	松下電器産業株式会社 パナソニックオートモティブシステムズ社 技術グループ 第一設計チーム 主任技師
委員	荒井 修	古野電気株式会社 技術研究所 研究部 第三研究室
委員	池田 朋広	株式会社三菱総合研究所 ITS事業部
委員	宇佐美 浩志	株式会社サイバー創研 シニアコンサルタント
委員	柏原 正信	三菱電機株式会社 自動車機器開発センター センター長室 主席技師
委員	川添 利洋	日本無線株式会社 通信機器事業部 企画管理グループ
委員	木暮 吉行	パイオニア株式会社 MEC事業企画部 渉外担当部長
委員	坂本 規博	社団法人日本航空宇宙工業会 技術部部長
委員	佐藤 英夫	株式会社野村総合研究所 社会情報コンサルティング部 主席コンサルタント
委員	清水 真	株式会社アクアキャスト 代表取締役社長
委員	菅原 敏	株式会社日立製作所 放送・通信システム推進事業部 IT宇宙インフラ推進本部 企画部 主任技師
委員	鈴木 尋善	三菱電機株式会社 自動車機器事業本部 自動車機器業務部技術グループ 担当部長
委員	中野 信一	川崎重工業株式会社 システム技術開発センター
委員	中村 一雄	株式会社デンソー ITS開発部 開発2室 主任部員
委員	安井 利夫	株式会社アクアキャスト ビジネスソリューション部 部長
委員	吉川 憲昭	株式会社サイバー創研 第一技術部 部長
委員	鷺頭 浩一	日本無線株式会社 研究開発部 電波研究グループ
事務局	高橋 寿平	財団法人 日本自動車研究所 ITSセンター 企画グループ 主席研究員
事務局	醍醐 英治	財団法人 日本自動車研究所 ITSセンター 企画グループ 主任研究員

3. 調査研究成果の要約

ITSの重要な技術である位置標定技術に関して、現状実力値を測定するとともに、技術的課題を抽出し、今後の位置標定技術開発の方向性を明らかにする。

(1) 移動体における位置精度の目標値検討

ここでは、移動体として必要とされる位置精度を明らかにするため、下記について検討する。

- ① 高精度な位置情報を必要とする移動体の ITS サービスを実現するために、必要となる位置精度、カバレッジ等の検討を行う。
- ② 検証すべき、位置精度の目標値設定を行う。

(2) 位置精度の評価および課題抽出

ここでは、GPS 利用における位置精度の現状レベル（GPS 単独測位、および補正を加えた GPS 測位）を把握し、移動体用高精度位置標定システムに対するリクワイアメントを明らかにするため、下記を実施する。

- ① 目標の位置精度、カバレッジ等を評価できる手法、方法を検討し、位置精度基礎評価システムを設計／試作／構築する。
- ② GPS 方式による測位について、移動体での位置精度を評価し、現状の位置精度レベルを把握する。
 - ・ GPS 単独測位、補正を加えた GPS 測位のそれぞれに対して測定し、現状の位置精度におけるレベルを把握する。
 - ・ 補正情報については、地上における最寄の基準局を基準点とする補正方式（D-GPS : Differential-GPS）、車両個別位置を仮想基準点として最寄の電子基準点から計算する補正方式（VRS : Virtual Reference Station）の 2 種類について評価する。
 - ・ GPS のカバレッジに関して評価法を検討する。
- ③ ②で測定した結果をもとに、様々な環境下における位置精度を想定し、移動体用高精度位置標定システムとしての課題抽出等を行い、位置標定技術開発のための技術的リクワイアメントを作成する。

第1章 調査の方法

1.1 使用した測位システム

1.1.1 iiGPS

iiGPS の GPS 受信モジュールは、図 1.1 に示すトリンブル社の LassenSQ GPS を用いている。LassenSQ GPS は携帯端末やページャ、デジタルカメラ、PDA 用に設計された小型で低消費電力の GPS モジュールである。

GPS 測位精度は、カタログ値で単独測位時 7 m である。

この GPS 受信モジュールは、RTCM SC104 (Radio Technical Commission for Maritime Service 米国海上無線技術委員会第 104 特別委員会) 準拠の信号を出力している。



図 1.1 LassenSQ モジュールの外観

1.1.2 RTK-GPS

RTK-GPS としてトリンブル社の RTK5700 を使用した。

GPS 測位精度 (FIX 状態) は、カタログ値で水平面精度 10mm(rms)、垂直面精度 20mm(rms)となっている。(rms : Route Mean Square の略、誤差の二乗和の平方根)

1.1.3 各方式の比較

実験に使用した GPS の比較を表 1.1 に示す。

表 1.1 GPS 方式の比較

GPS	処理	補正
iiGPS	L1 波を利用	なし
RTK-GPS	L1、L2 波 (2 周波数) を利用	VRS 補正 : トリンブル基地局からのディファレンシャル補正

GPS 衛星は測位のために L1 帯 (1575.42MHz) と L2 帯 (1227.6MHz) の 2 つの電波を連続的に送信している。L1 の C/A コードは一般の単独測定用に用いられる。RTK-GPS では L1、L2 の 2 周波数を用いて高精度の測定を行う。

第2章 位置精度の目標値の設定

位置情報の高精度化研究を行う上で、目標となる位置精度の設定を行う必要がある。このため有望な新規サービスの想定を行い、そのサービスを実現させるためのリクワイアメントを作成し、目標値を設定する。

2.1 有望な新規サービスの想定

洗い出された新規サービスについて、BtoC についてはエンドユーザーによるアンケート結果を基に「是非利用する」が多いものを抽出する。また BtoB については委員による評価の結果から上位サービスを抽出する。その結果、以下の 5 サービスを設定する。

(1)カーナビのサービス

- ①車両を店の前まで案内
- ②走行レーン単位での情報提供
- ③前方道路情報提供

(2)携帯端末向けのサービス

- ④探したい人の位置把握

(3)事業者向けサービス

- ⑤除雪車支援システム

2.2 各想定サービスのリクワイアメント

リクワイアメントについては、精度とカバレッジを記載した。

1) 車両を店の前まで案内

【リクワイアメント】

リクワイアメント項目	内容
精度（静止時～40km/h 走行時）	1m DRMS / 2m 95%（精度表現は末尾を参照）
カバレッジ	都市部でも精度を保つこと

2) 走行レーン単位での情報提供

【リクワイアメント】

リクワイアメント項目	内容
精度（静止時～100km/h 走行時）	50cm DRMS / 1m 95%
カバレッジ	道路延長の 80%

3) 前方道路情報提供

【リクワイアメント】

リクワイアメント項目	内容
精度（静止時～100km/h 走行時）	3m DRMS / 6m 95%
カバレッジ	道路延長の 80%

4) 探したい人の位置把握

【リクワイアメント】

リクワイアメント項目	内容
精度（静止時～30km/h 走行時）	1m DRMS /2m 95%（屋外）
カバレッジ	都市部でも精度を保つこと

5) 除雪車支援システム

【リクワイアメント】

リクワイアメント項目	内容
精度（静止時～40km/h 走行時）	3cm DRMS /6cm 95%
カバレッジ	道路延長の 80%

（参考）精度の表現方法

GPS による測位精度は、統計的性格を持つ。被測位体を固定して、一定時間に測定された位置群の 95.45%が、その真の位置から半径 X メートルの円の中に収まっている場合、「2DRMS (Distance Root Mean Square) で X メートルの精度」という。一般に 10m 程度の精度と言う場合は、この 2DRMS のことである。本文では 95%と表現した。

2.3 位置精度の目標値

上記の検討を踏まえて、情報提供サービスのリクワイアメントを満たす位置精度として 50cm を目標値として設定する。

第3章 実験内容と評価

3.1 開放地での実験

3.1.1 実験概要

開放地での実験場所として、(財)日本自動車研究所のテストコース(筑波)を使用することとした。筑波での実験では、オープンスペース(理想的開放地)での位置精度の測定を目的とする。

走行コースを図3.1に示す。コースの全長は1kmであるが、50m幅(5車線)が500m、30m幅(3車線)が500mとなっている。走行では50m幅の5車線のうち中央の車線1~3を使用した。

位置の基準(絶対位置)はRTK-GPSで白線の起点と終点を測定して、測定した起点と終点を結んだ白線を基準線とし、白線上を走行して各GPSの測定位置と白線からのずれ(白線からの距離)を誤差として測定する。

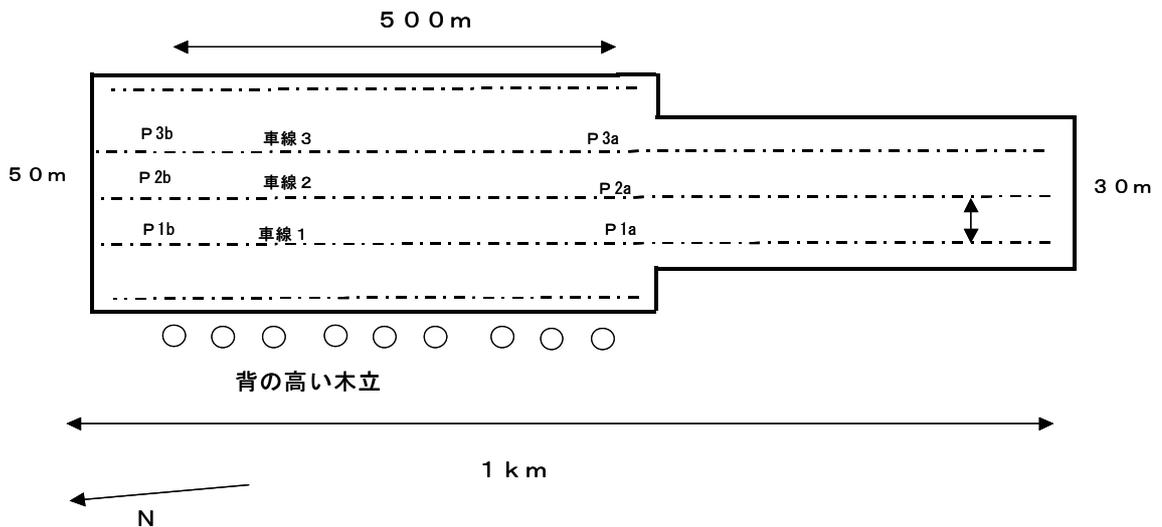


図 3.1 走行コース

3.1.2 測定系の構成

測定系の構成を図3.2に示す。

- (1) RTK-GPS と iiGPS の2種類のGPSに関して測定を行う。
- (2) RTK-GPSではジェノバ社が全国規模で提供しているVRS補正信号を携帯電話で受信し、その補正データで補正して位置を測位する。
- (3) iiGPSは補正を行わず、単独測位で測位する。
- (4) 白線モニタは白線の位置をカメラで撮影し、運転席でモニタして白線上を走行するために使用する。

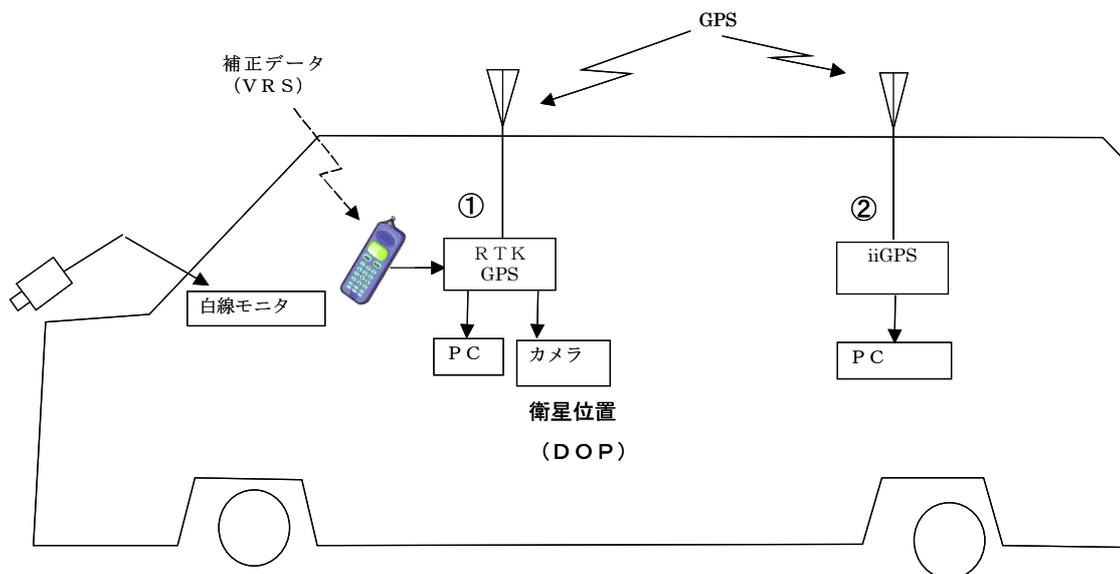


図 3.2 測定系の構成

3.1.3 実験使用機材

実験に使用した各機器の一覧を表 3.1 に、各 GPS 受信機の設定パラメータを表 3.2 に示す。

表 3.1 機器の一覧

用途	機器	社名	製品名	型番
基準の測定	RTK-GPS	Trimble	5700GPS	POS-LV
	アンテナ	Trimble	5700 アンテナ	39105-00
	アンテナ三脚	Trimble		
GPS	RTK-GPS	Trimble	5700GPS	40406-00
	iiGPS	Zcc	iiGPS (Trimble Lassen SQ)	P1.53
	GPS アンテナ	Trimble	GPS アンテナ	39265-50
	PC	IBM	Thinkpad	
	携帯電話	DoCoMo	ムーバ	

表 3.2 GPS の設定パラメータ

パラメータ	iiGPS	RTK-GPS	記 事
DOP マスク値	12	6	記載の DOP 値を超える衛星からの信号を測位計算に用いない
仰角マスク (度)	5	10	記載の仰角以下の衛星からの信号を測位計算に用いない
受信レベルマスク	3	なし	記載の信号対雑音値以下の信号を測位計算に用いない

(注) 上記の値はメーカーの出荷時に設定されたデフォルト値で、今回の実験ではデフォルト値に設定して行った。

(1) DOP マスク (閾値)

DOP(Dilution of Precision) : 位置精度劣化の程度, 衛星配置の適正さを表す。

1 : ベスト, ~4 : 配置適正, 5~8 : 許容範囲, 9~ : 配置適正でない

DOP マスク(閾値)は DOP の限度の設定を行うもので、この設定値より大きくなった場合は位置を計算しないため、測定精度を向上させるには DOP マスク(閾値)を小さくすることが必要となる。RTK-GPS の精度の要求条件が iiGPS より厳しいことから RTK-VRS の DOP マスク(閾値)を iiGPS より小さく設定している。

(2) 仰角マスク (閾値)

仰角マスクは、水平線上の高度角 (仰角)で設定された閾値より下の仰角にある GPS 衛星信号を使用せずに位置の計算をする方法である。仰角が小さい場合、地表近くで遠くの地物等からも GPS 衛星信号の反射波の影響が生じやすく、誤差の増大要因となるので、高精度位置標定のためには仰角マスク(閾値)を大きく設定する。しかしながら、余り大きいと捕捉衛星数が少なくなるため、適正な閾値を検討する必要がある。

(3) 受信レベルマスク (閾値)

GPS 衛星信号の信号対雑音レベル比を測定して設定値以下になれば、地物等からの反射波を受信している確率が大きくなって誤差が増大するのでその受信信号を使用しないこととしている。

3.1.4 実験コース風景

筑波の実験コース風景を図 3.3 に示す。走行中に白線を白線検出カメラで撮影して車内のモニタに白線映像を表示して、ドライバーがそのモニタを見ながら白線からずれないように走行した。

中央の大きいアンテナは RTK-GPS 用、左下の小型のフラットアンテナは iiGPS 用のアンテナとして車輻の中心線に沿って設置した。



1) 全景



2) アンテナの設置



3) 白線検出カメラ



4) 白線映像

図 3.3 筑波での実験風景

設置したアンテナの相互関係を図 3.4 に示す。アンテナの配置は、アンテナ間で相互に与える特性（指向性など）の変化を考慮して距離を離した。

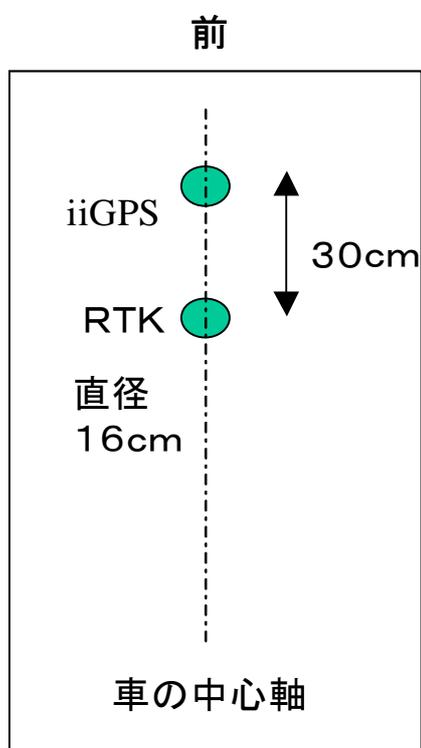


図 3.4 アンテナの設置位置

3.1.5 位置基準データ取得

(1) 測定方法

VRS 補正を行った RTK-GPS の受信を確認後、各車線(レーン)の白線上の起点、終点に三脚を設置して、以下の手順でその絶対座標を測定した。

- ・それぞれの位置で静止して 10 分間測定 (600 サンプル)
- ・並行して DOP 値データを取得
- ・データの分散値が一定値 (数 cm) 以下を確認し、データの分布の中心を走行する白線の起点、終点の絶対座標とする。

10 分間の定点観測の結果を図 3.5 に示す。

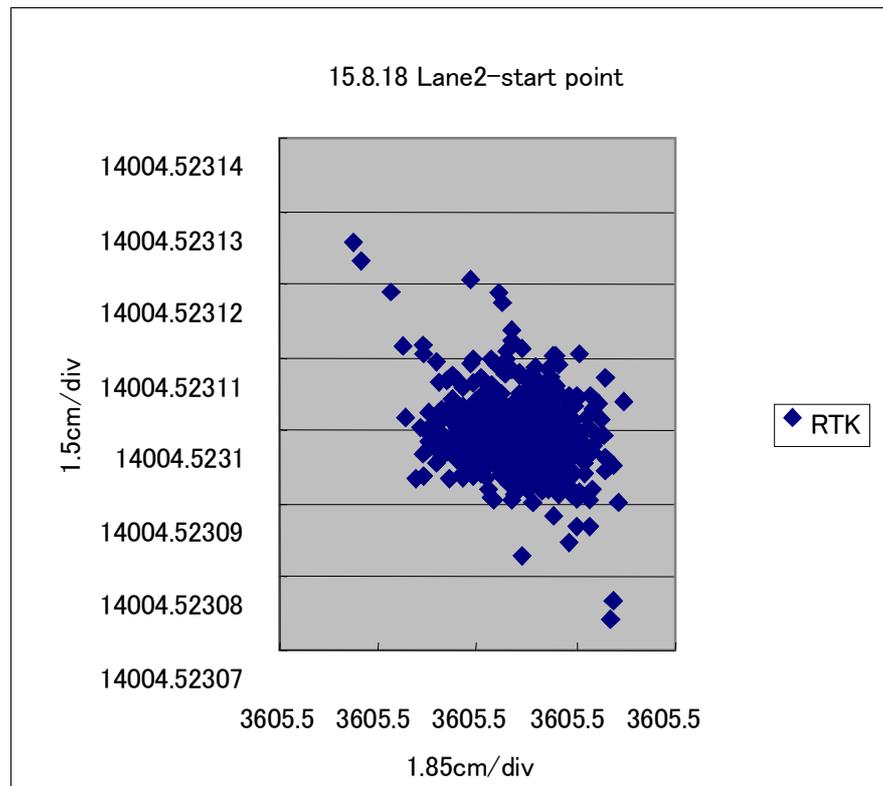


図 3.5 RTK-GPS での定点観測結果

(2) 誤差の算出

誤差の算出にあたって、VRS 補正を行った RTK-GPS の静止データ（起点と終点の絶対位置座標）から車線 1、2、3 の直線方程式を求め、iiGPS と RTK-GPS の走行データの各測位データから、車線 1、2、3 の直線までの距離を誤差とする。

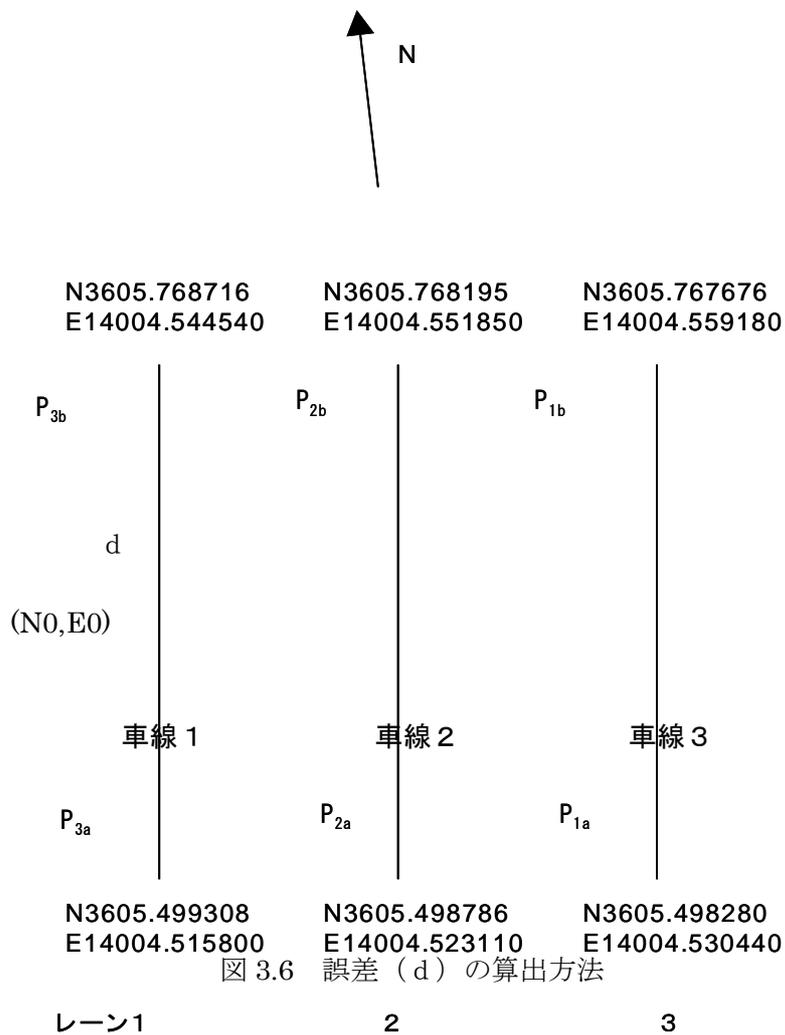


図 3.6 誤差 (d) の算出方法

車線 1 の基準位置座標の方程式 L1 は、P1a、P1b の座標を P1a (N1, E1)、P 1b (N2,E2) とすると、

$$L1 : y - E1 = (E2 - E1) / (N2 - N1) * (x - N1)$$

となり、GPS 測位された点 (N0, E0) から L1 までの距離 d が誤差になる。

$$\text{誤差 (d)} = \frac{|(E2 - E1)(N0 - N1) + (N2 - N1)(-E0 + E1)|}{\sqrt{(E2 - E1)^2 + (N2 - N1)^2}}$$

3.1.6 走行測定結果

(1) iiGPS の走行結果

車速をパラメータ (10km/H、20km/H、30km/H、40km/H、60km/H、80km/H) として、車線 1 を 1 往復した際の誤差の測定結果を図 3.7 に示す。(1 秒毎のプロット)

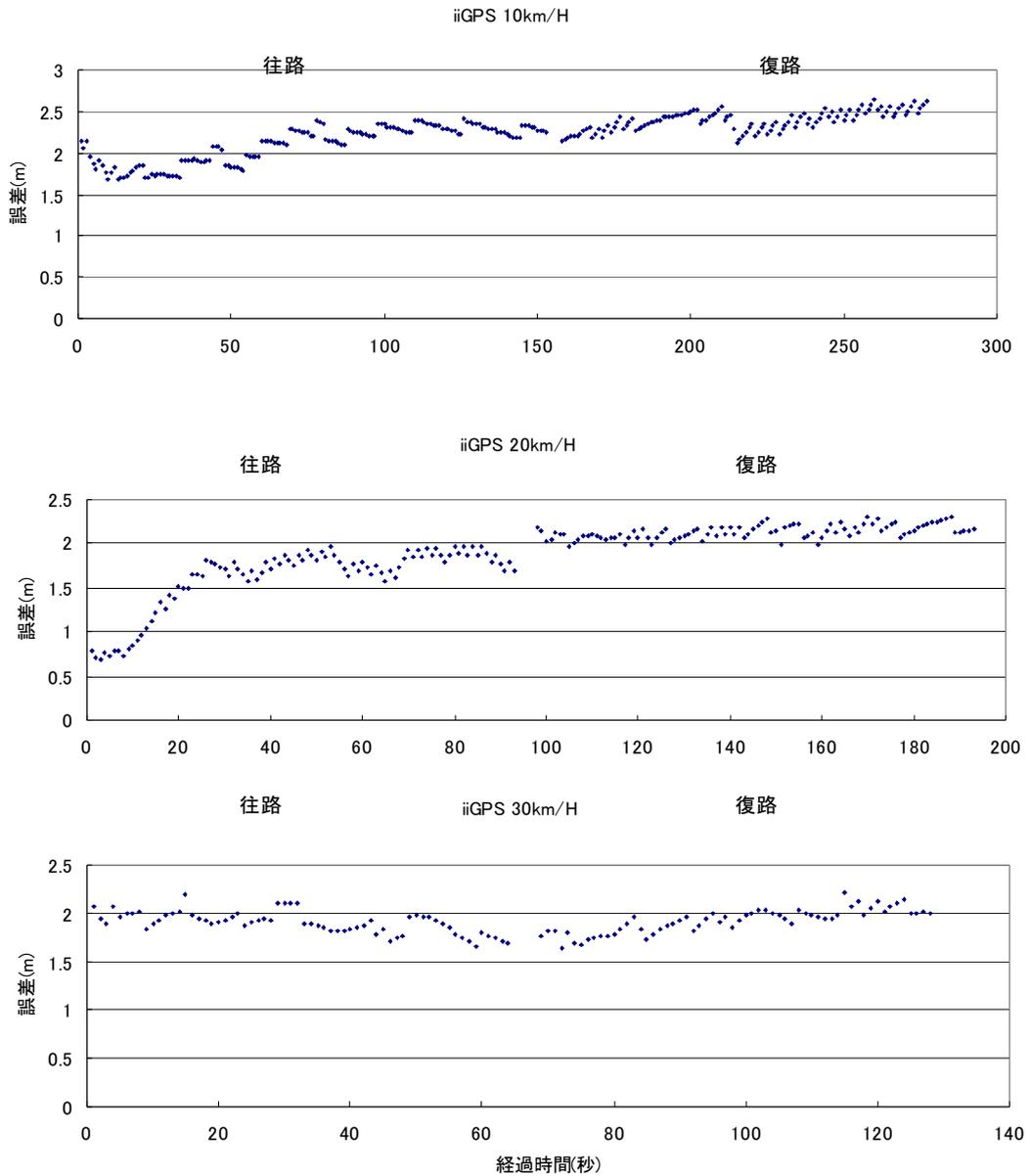


図 3.7 (1/2) iiGPS の測定結果

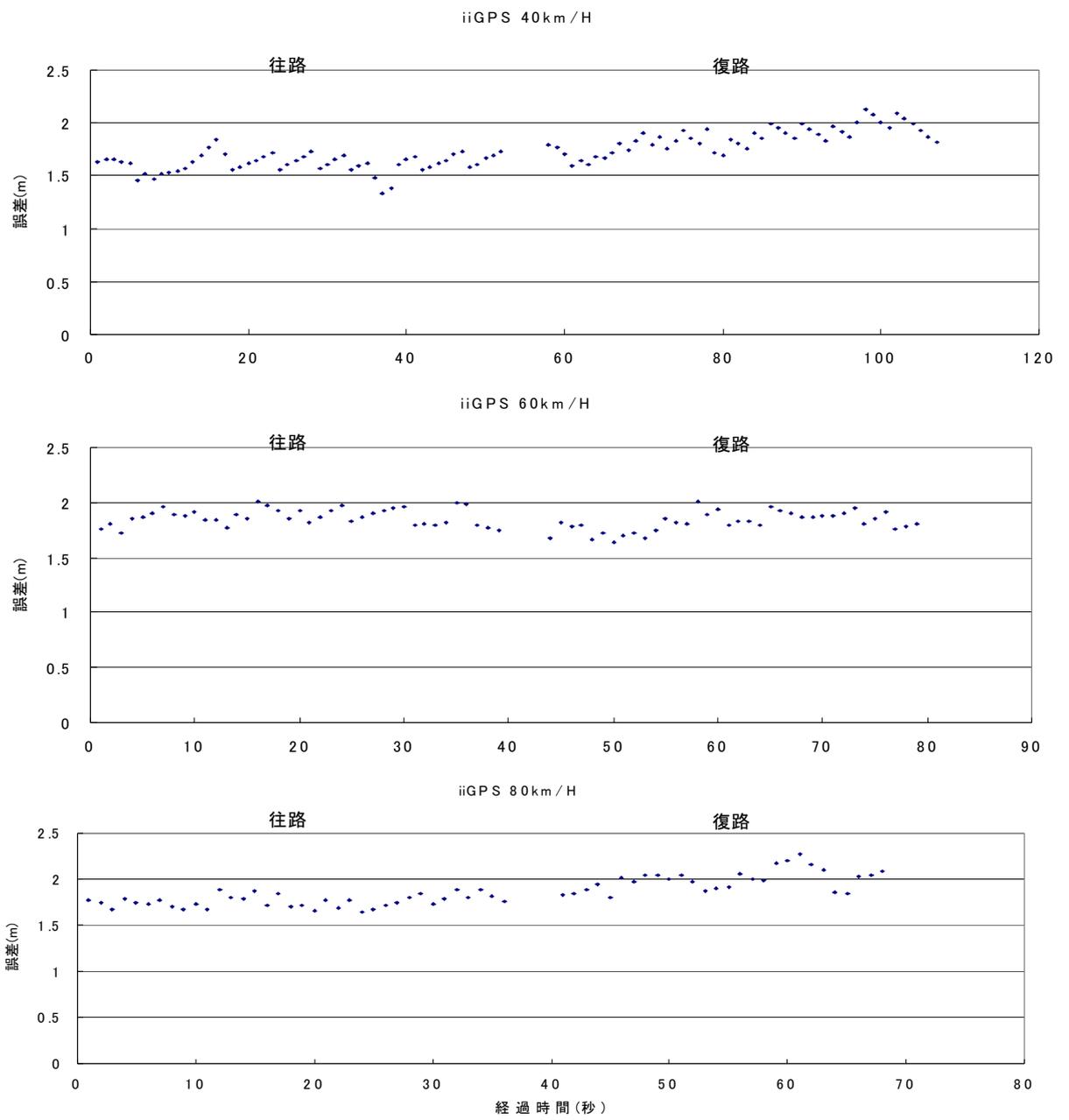


図 3.7 (2/2) iiGPS の測定結果

(2) iiGPS における車速と誤差の関係

iiGPS での白線を基準にした走行時の測位誤差の標準偏差 (σ) 値を図 3.8 に示す。

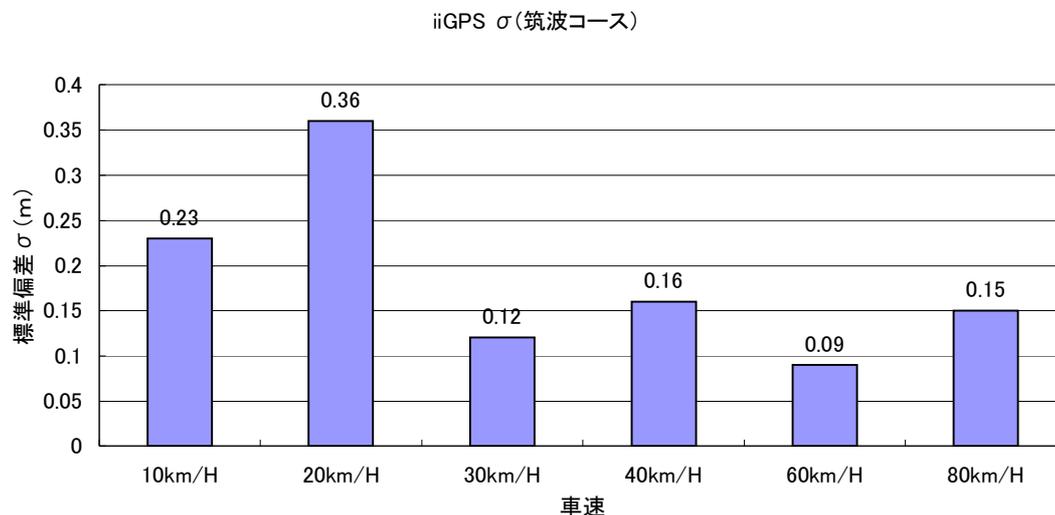


図 3.8 iiGPS の誤差の標準偏差 (σ)

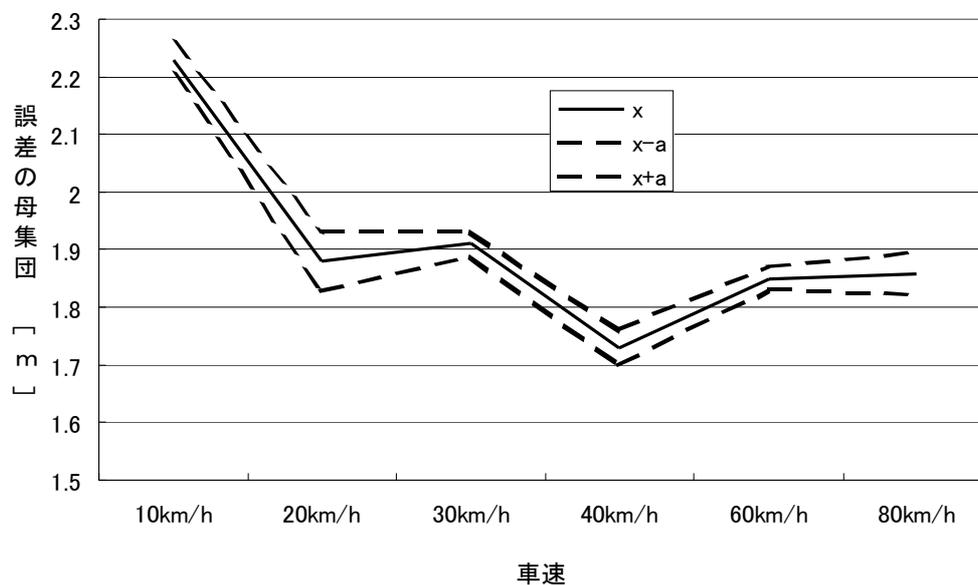


図 3.9 iiGPS における誤差の母集団平均値の推定(筑波地区)

(x は平均値。 a は 95% の確率で誤差の母集団の平均が収まる信頼区間。

n はサンプル数。 $a = 1.96 \sigma / (n)^{1/2}$)

(参考文献：リフレッシュ数学⑤統計と確率 矢野健太郎監修 黒田孝郎著 講談社 p211-p222)

図 3.9 より、全平均は 1.9m となる。また各車速に対する誤差の母集団がそれぞれ独立とみなして、標準偏差はそれぞれの標準偏差の rms を用いて計算すると 0.5m となる。

(3) RTK-GPS の走行結果

車速をパラメータ (10km/H、20km/H、30km/H、40km/H、60km/H、80km/H) として、車線 1 を 1 往復した際の誤差の測定結果を図 3.10 に示す。(1 秒毎のプロット)

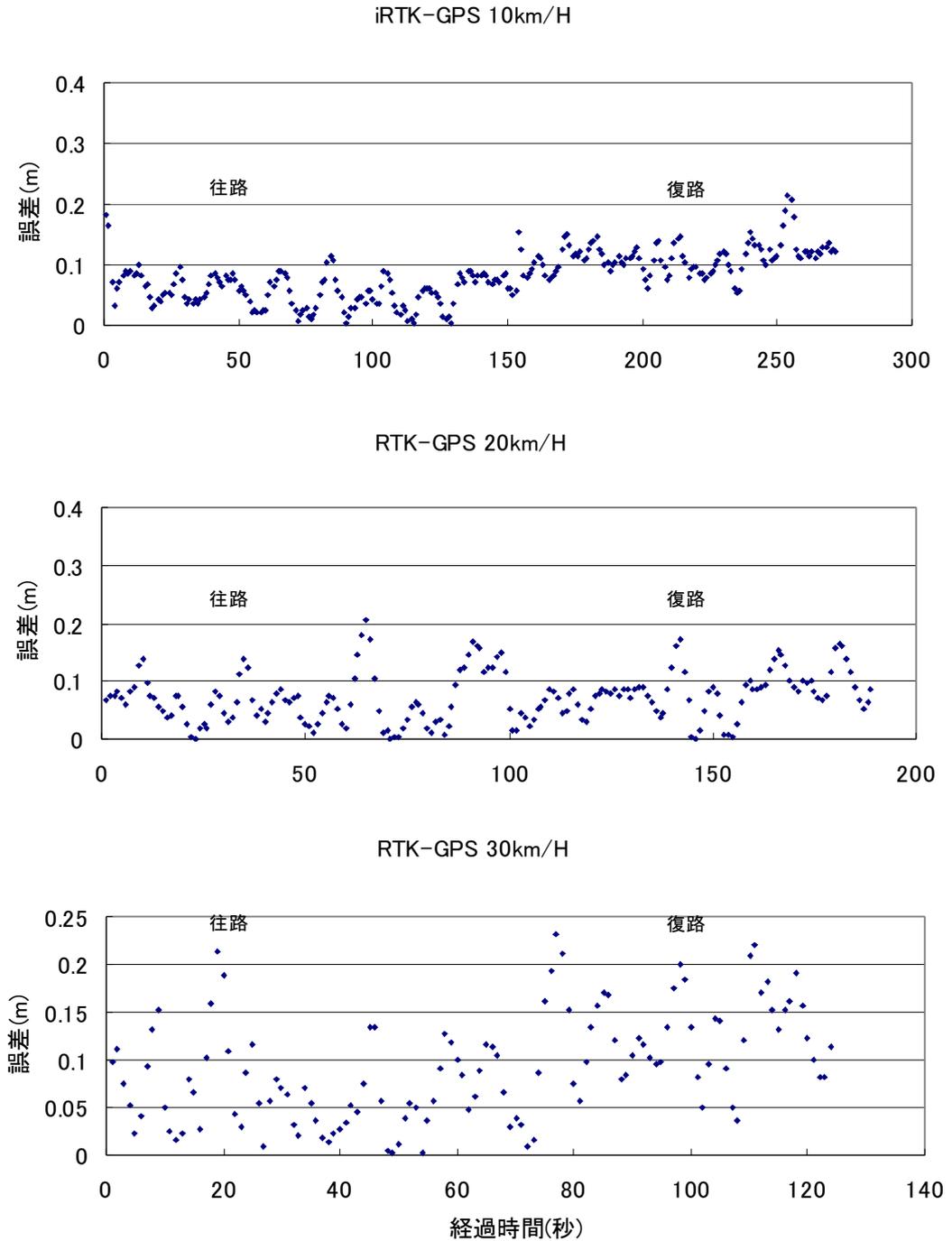


図 3.10 (1/2) RTK-GPS の測定結果

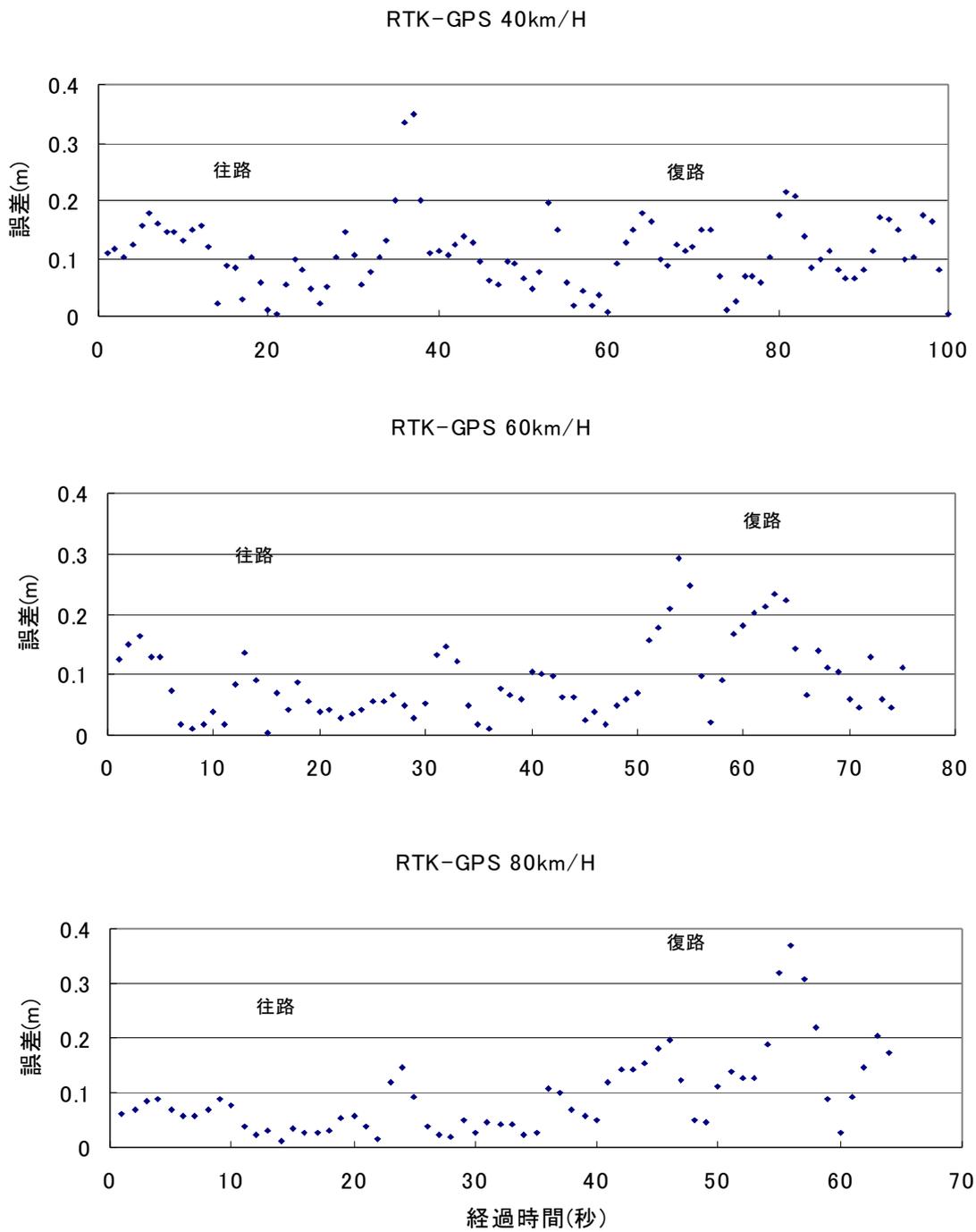


図 3.10 (2/2) RTK-GPS の測定結果

(4) RTK-GPS における車速と誤差の関係
 図 3.11 に車速と誤差の関係を示す。

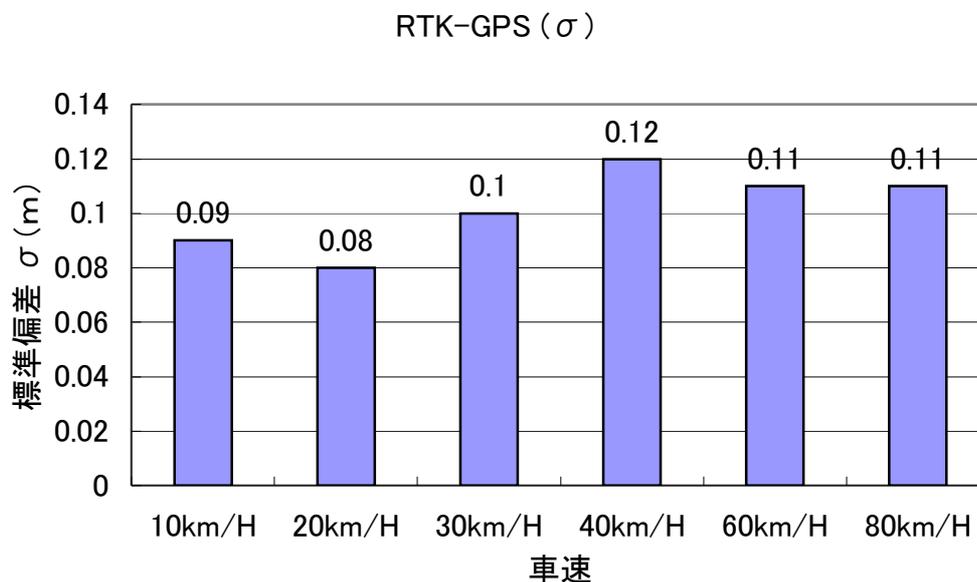


図 3.11 RTK-GPS の標準偏差 (σ)

iiGPS に比べて RTK-GPS の車速の変化に対する誤差は小さい。これは RTK-GPS が補正情報を利用している等により時刻の変化要因に対する誤差が相殺されているからと推定される。

図 3.12 に母集団平均の推定図を示す。

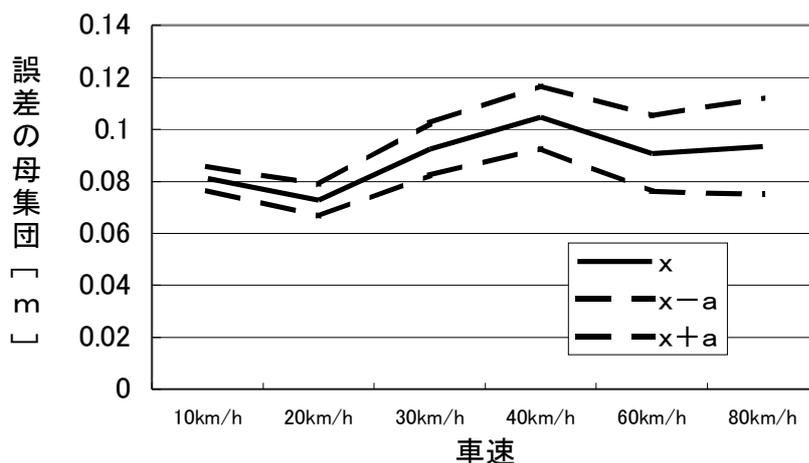


図 3.12 RTK-GPS における誤差の母集団平均値の推定 (筑波地区)

(x は平均値。 a は 95% の確率で誤差の母集団の平均が収まる信頼区間。

n はサンプル数。 $a = 1.96 \sigma / (n)^{1/2}$)

(参考文献：リフレッシュ数学⑤統計と確率 矢野健太郎監修 黒田孝郎著 講談社 p211-p222)

RTK-GPS における誤差は、車速が 10km/H~80km/H について同一の母集団とみなせることから、誤差の平均値は各車速の誤差の平均値をとって、0.09m、標準偏差 (σ) も各車速における標準偏差の平均値をとって、0.1m とする。

(5) 誤差の平均と標準偏差

筑波での誤差の平均と標準偏差を表 3.3 に示す。なお 4 章の考察とまとめでは、誤差としては平均に標準偏差を足した値 (平均値+ σ) を用いた。RTK-GPS の誤差は iiGPS の誤差より 1 桁以上小さい。

表 3.3 誤差の平均と σ (筑波地区)

	iiGPS	RTK-GPS
誤差の平均値	1.9m	0.09m
誤差の σ	0.5m	0.10m
誤差 (平均値+ σ)	2.4m	0.19m

(6) 捕捉衛星数と DOP

筑波での捕捉衛星数と DOP 値を表 3.4 に示す。捕捉衛星数は平均- σ 、DOP は平均+ σ として位置精度にとって厳しい側の値とした。

表 3.4 捕捉衛星数と DOP 値 (筑波地区)

iiGPS	衛星数	DOP	RTK-GPS	衛星数	DOP
平均	6.3	1.4	平均	6	3.3
σ	0.5	0.1	σ	0	0.4
平均 $\pm\sigma$	5.8	1.5	平均 $\pm\sigma$	6	3.7

(注) 衛星数は平均- σ 、DOP は平均+ σ とした。

(7) まとめ

以上から車速 (10~80km/h) と誤差の相関は少ない。また、理想環境に近い開放地区における誤差は平均+ σ と定義して、RTK-GPS の場合 19cm となり、高精度の測位が可能となることを明らかにした。

3.2 一般道路での実験

3.2.1 実験概要

一般道路の実験では、一般の道路を走行した際の位置精度の測定を目的とし、一般道路として市街地（二つの走行コース）と高層ビル街（一つの走行コース）の計三つの走行コースでの実験を実施した。

位置基準としては、FIX 状態で数 cm の精度が期待できる RTK-GPS を使用することとした。ただし RTK-GPS の FIX 状態は筑波地区では理想的な開放的環境なので、測定コース全体（直線コースの 500m）について可能であるが、一般道路ではビル影や高架下等で所要の捕捉衛星数が確保されず FIX 状態にならない場合があるので、RTK が FIX 状態にならない場合は自立航法で補間する自立航法併用 RTK-GPS を使用した。

自立航法併用 RTK-GPS は、携帯電話の回線を用いて蒲田のトリングル社(現ニコントリングル社)の屋上に設置されている基準局からディファレンシャル補正信号を受信した。

自立航法併用 RTK-GPS は、2つの GPS アンテナを車の屋根に設置して、両方のアンテナの中間位置を測定基準位置とするものである。自立航法併用 RTK-GPS の FIX 時の精度はカタログデータで 3.5cm であり、FIX 時以外は自立航法の精度となる。FIX がはずれたまま 120 秒経過した時点の誤差はカタログデータで 30cm である。

3.2.2 走行コース

市街地として羽田周辺と品川から蒲田までの道路および高層ビル地区での走行を行った。図 3.13 の黒丸が基準局（ニコントリプル社）のある地点を示す。

同図で市街地 A(4km)は羽田周辺、市街地 B(11km)は品川～蒲田の一般道路を示す。

左上の地図はソニー社のハンディ GPS でのデータを地図に表示したもので、矢印は1秒毎の軌跡で軌跡上のマークは測定時刻を表示している。この測定時刻を測定データの後処理における識別情報として使用するために測定結果を地図上に表示したものである。



図 3.13 品川～蒲田コース

図 3.14 に品川の高層ビル街走行ルート（周回 2.4km）を示す。

図の左はソニー社のハンディ GPS でのデータを地図に表示したもので、矢印のマークが走行コースを、また右の図は走行コース周辺のビルの様子を示したもので、黒丸で示した地点が走行開始地点である。



300m

図 3.14 品川高層地区

3.2.3 測定系の構成

測定車には①RTK-GPS、②自立航法併用 RTK-GPS、③iiGPS を搭載してそれぞれのデータを1秒間隔でPCに記憶させた。(図3.15)

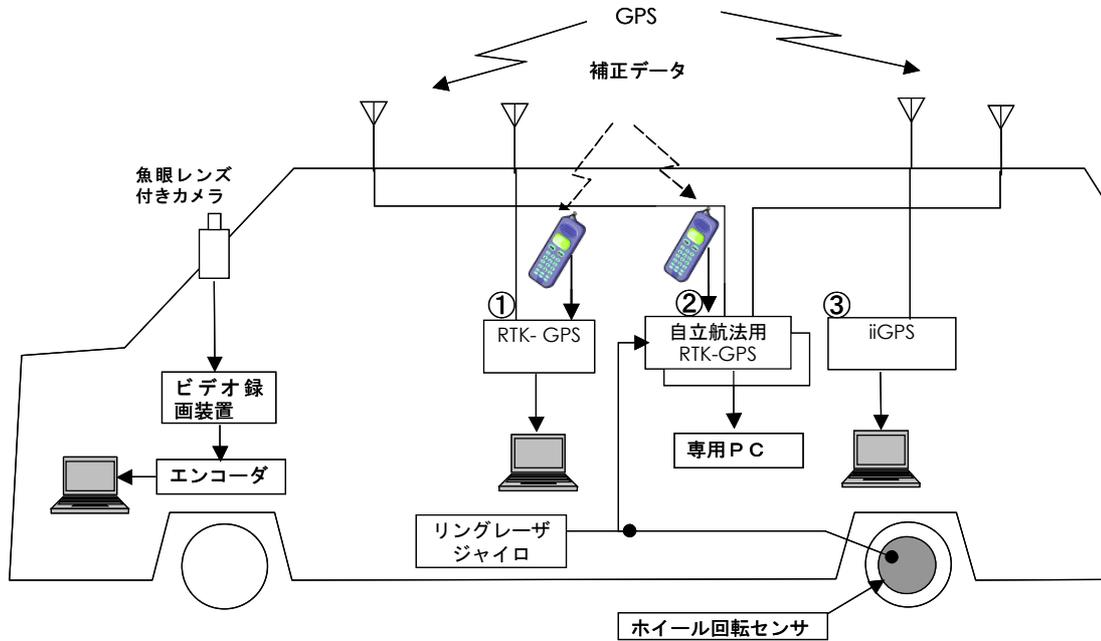


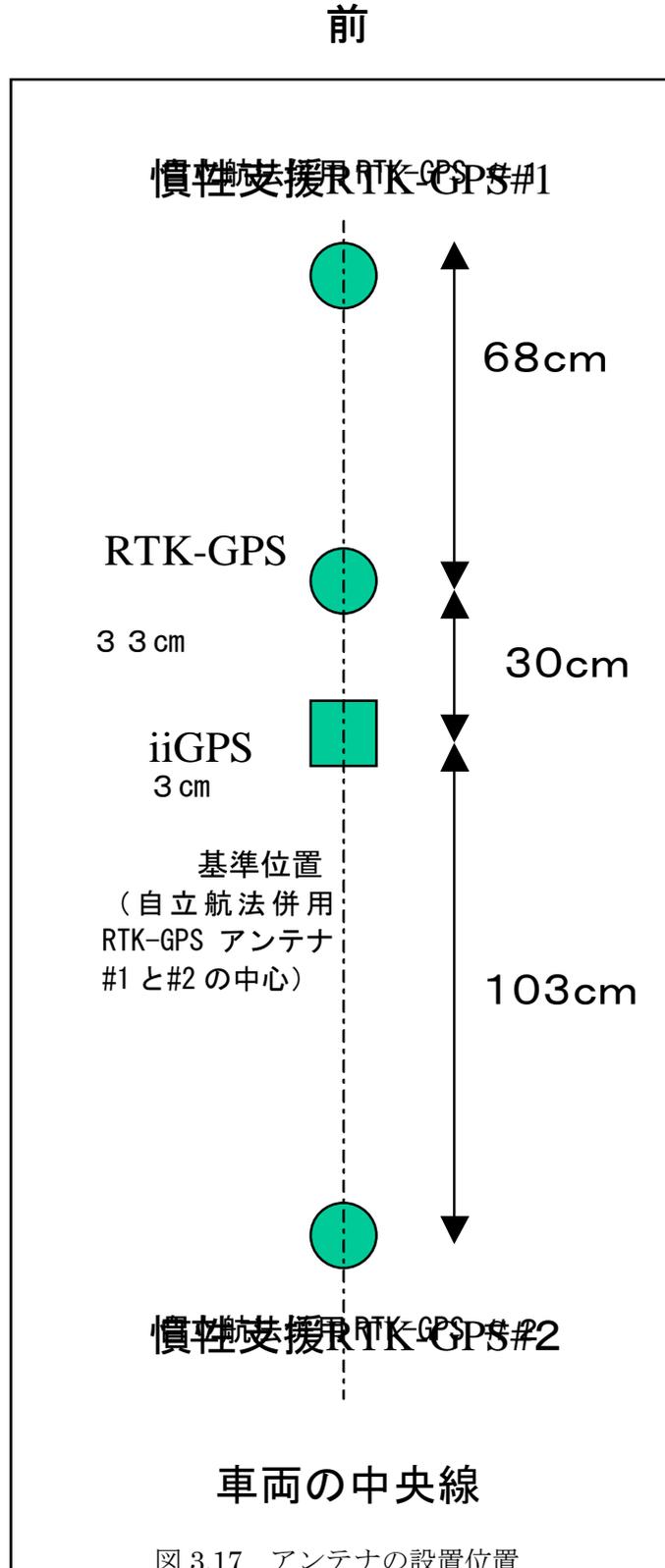
図 3.15 測定系の構成

図 3.16 に測定車の外観を示す。右図に示すように、アンテナは手前から、自立航法併用 RTK-GPS 用 # 1 (灰色)、RTK-GPS 用 (白色)、iiGPS 用(自立航法併用 RTK-GPS 用の白色のセンサボックスの上に配置)、自立航法併用 RTK-GPS 用 # 2 (灰色) の順に配置した。



図 3.16 測定車の外観

車両の屋上に設置したアンテナの位置関係を図 3.17 に示す。自立航法併用 RTK-GPS 用のアンテナは方位を正確にするために 2 本設置し、また、2 本のアンテナの中央の位置が位置基準点となる。



3.2.4 機器の設定パラメータ

各 GPS 受信機の設定パラメータを表 3.5 に示す。筑波での実験と同じパラメータを使用した。

表 3.5 GPS の設定パラメータ

パラメータ	iiGPS	RTK-GPS	記 事
DOP マスク値	12	6	記載の DOP 値を超える衛星からの信号を測位計算に用いない
仰角マスク (度)	5	10	記載の仰角以下の衛星からの信号を測位計算に用いない
受信レベルマスク	3	なし	記載の信号対雑音値以下の信号を測位計算に用いない

(注) 上記の値はメーカーの出荷時に設定されたデフォルト値で、今回の実験ではデフォルト値に設定して行った。

また、誤差は自立航法併用 RTK と同期した同一時刻での測定データを基に、位置基準点との距離を算出することとして、以下の算出式を使用した。(なお自立航法併用 RTK-GPS、測定用 RTK-GPS,iiGPS のそれぞれが衛星の時計に同期していることを確認している。)

N = 緯度の誤差 (m)

= (慣性航法支援 RTK の緯度 - 測定 GPS の緯度) * (距離変換係数)

E = 経度の誤差 (m)

= (慣性航法支援 RTK の経度 - 測定 GPS の経度) * (距離変換係数)

誤差 = ((緯度の誤差)² + (経度の誤差)²)^{1/2}

= (N² + E²)^{1/2}

位置基準点から、iiGPS 用アンテナは進行方向に 3cm、RTK-GPS 用の各アンテナは進行方向に 33cm 前方に設置しているが、いずれのアンテナも車軸の中央線上に設置しており、この設置位置のオフセット補正は行っていないため、車輛前後方向の誤差が残存している。

3.2.5 市街地 A(羽田周辺)での測定結果

(1) iiGPS での測定結果

iiGPS の市街地 A での測定結果を図 3.18 に示す。捕捉衛星数は 6 機以上であり良好に捕捉出来ているが、東京モノレールの高架下での誤差が最大となっている。

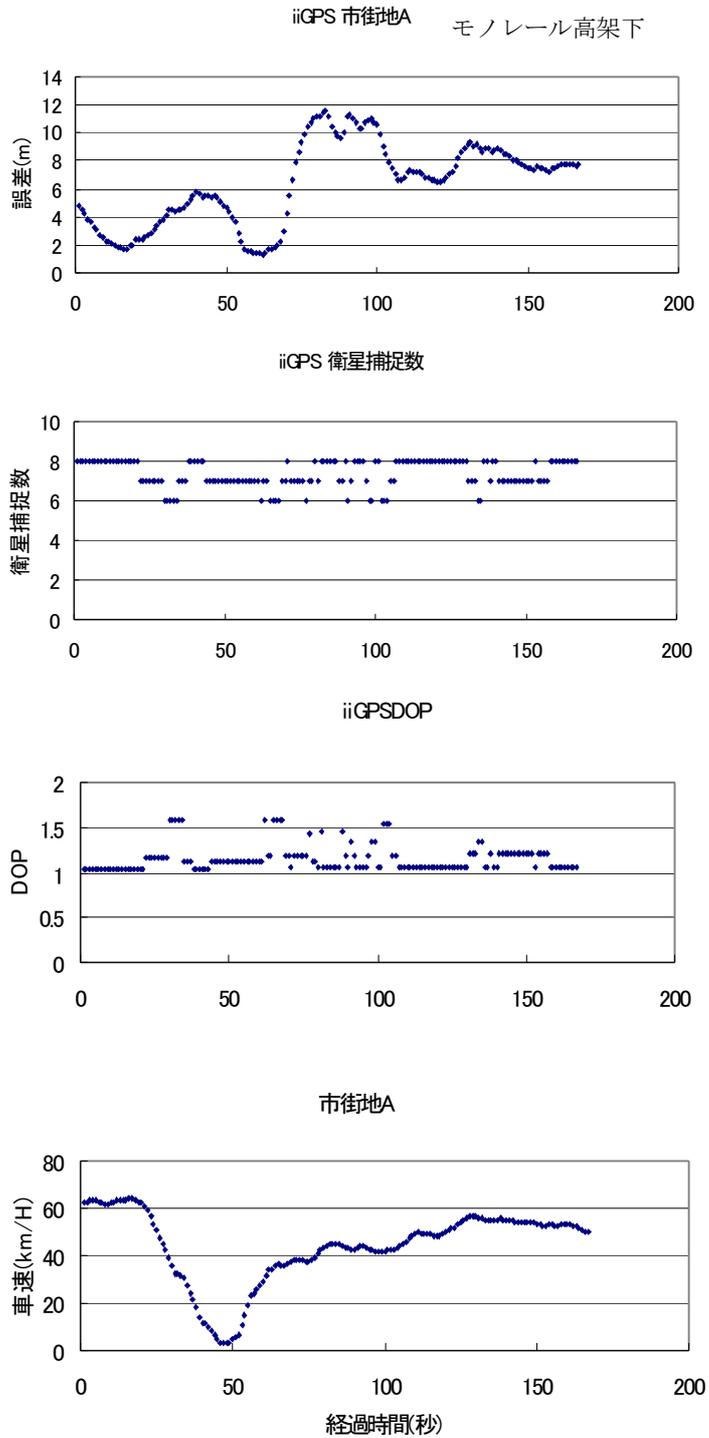


図 3.18 iiGPS の走行結果 (市街地 A)

(2) RTK-GPS での測定結果

RTK-GPS での市街地 A での測定結果を図 3.19 に示す。誤差の最大が発生した地点は iiGPS と同様にモノレール高架下である。

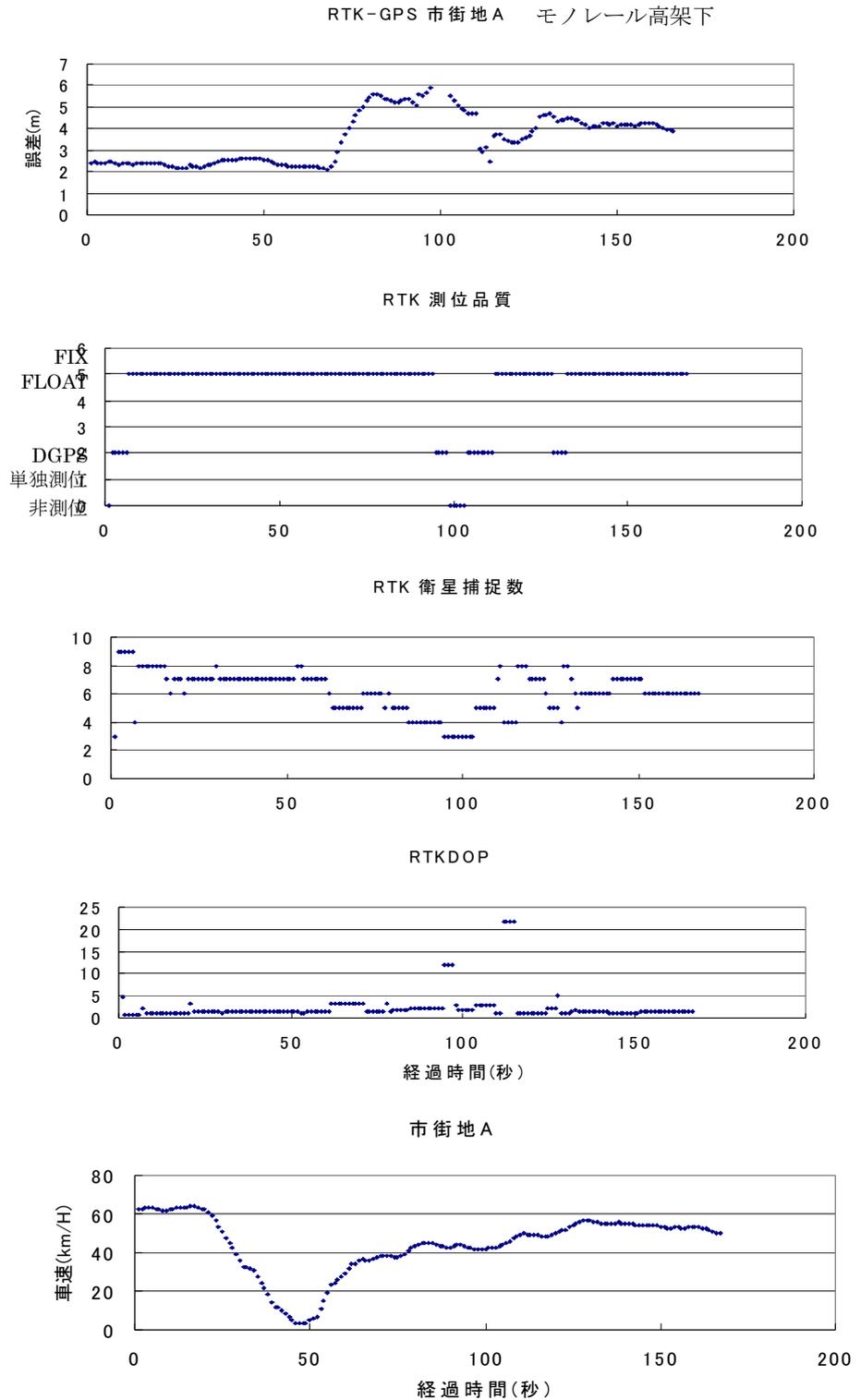


図 3.19 RTK-GPS での測定結果(羽田周辺)

(3) 誤差の平均と標準偏差

市街地 A (羽田周辺) での誤差の平均と σ を表 3.6 に示す。RTK-GPS の誤差は iiGPS の誤差の概略、半分となっている。

表 3.6 誤差の平均と σ (市街地 A : 羽田周辺)

	iiGPS	RTK-GPS
誤差の平均値	6.4m	3.5m
誤差の σ	3.0m	1.2m
誤差 (平均値+ σ)	9.4m	4.7m

(4) 捕捉衛星数と DOP

市街地 A での捕捉衛星数と DOP 値を表 3.7 に示す。

表 3.7 捕捉衛星数と DOP 値 (羽田周辺)

市街地 A

iiGPS	衛星数	DOP	RTK-GPS	衛星数	DOP
平均	7.4	1.2	平均	6.1	2.3
σ	0.7	0.2	σ	1.4	3.4
平均 $\pm\sigma$	6.7	1.4	平均 $\pm\sigma$	4.7	5.7

(注) 衛星数は平均 $-\sigma$ 、DOP は平均 $+\sigma$ とした。

(5) まとめ

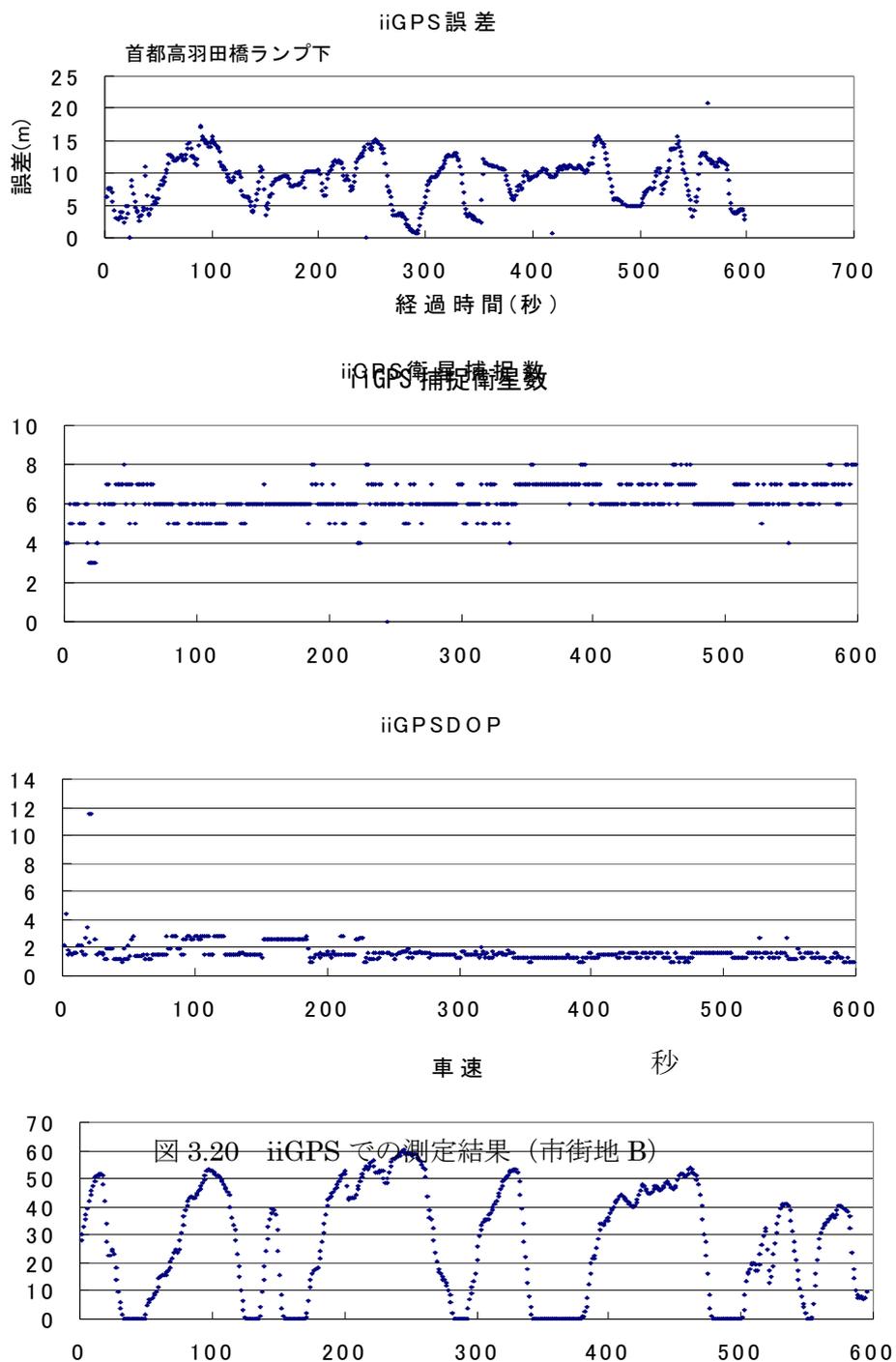
捕捉衛星数と DOP は iiGPS については、開放地に近い良好な結果を得ているが RTK-GPS については捕捉衛星数が減少して DOP が増大しており、衛星からの受信環境は劣化している。

誤差については、「モノレールの高架下」で iiGPS は最大 12m、RTK-GPS は最大 6m となっている。

3.2.6 市街地 B(品川～蒲田)での測定結果

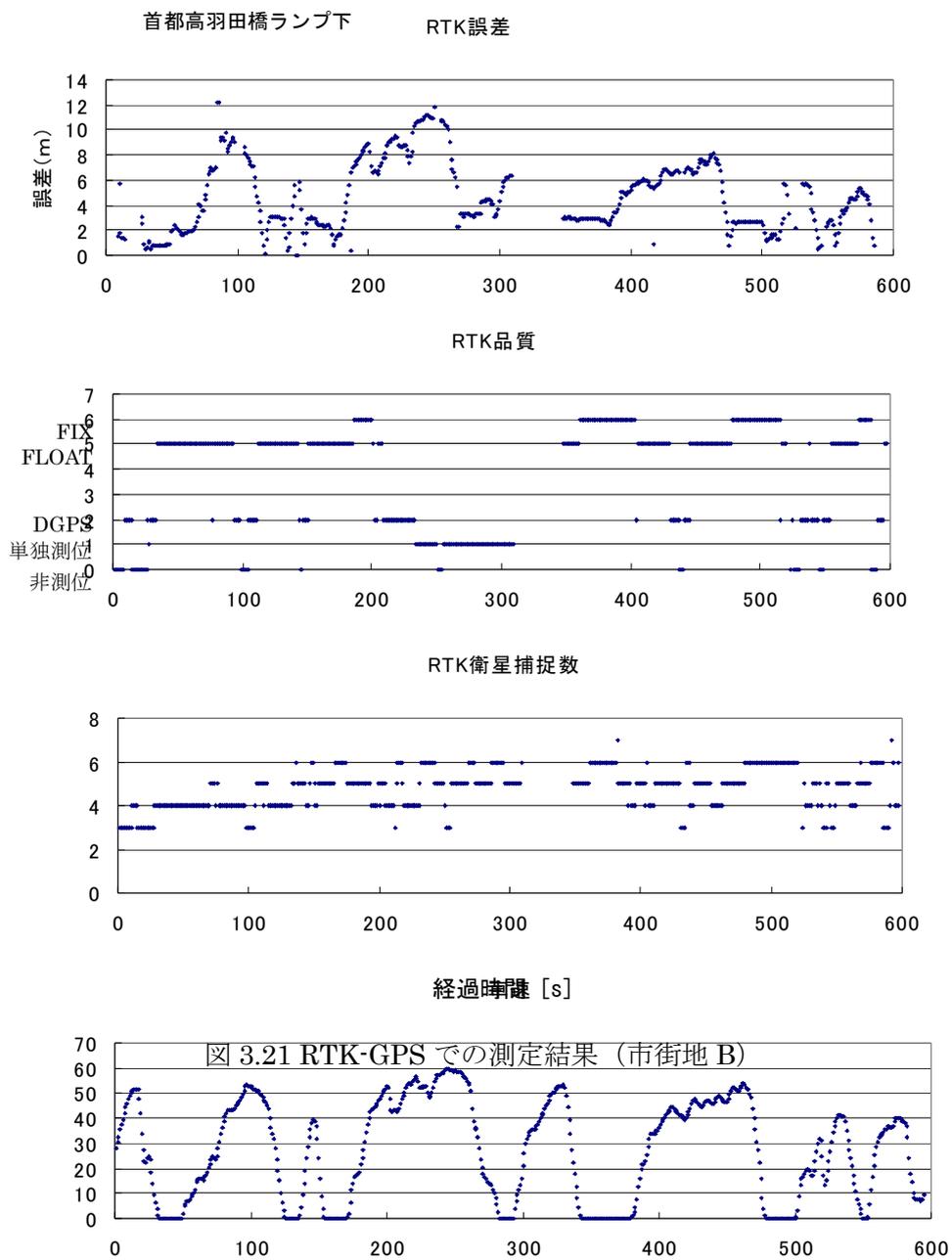
(1) iiGPS の測定結果

図 3.20 に市街地 B での測定結果を示す。



(2) RTK-GPS の誤差

図 3.21 に RTK-GPS での測定結果を示す。



(3) 誤差の平均と標準偏差

市街地 B (品川～蒲田) での誤差の平均と σ を表 3.8 に示す。RTK-GPS、iiGPS とも市街地 A より誤差が増大している。

表 3.8 誤差の平均と σ (市街地 B : 品川～蒲田)

	iiGPS	RTK-GPS
誤差の平均値	8.9m	4.7m
誤差の σ	3.5m	2.8m
誤差 (平均値+ σ)	12.4m	7.4m

(4) 捕捉衛星数と DOP

品川～蒲田での捕捉衛星数と DOP 値を表 3.9 に示す。

表 3.9 捕捉衛星数と DOP 値 (品川～蒲田)

(注) 衛星数は平均 $-\sigma$ 、DOP は平均+ σ とした。

市街地 B

iiGPS	衛星数	DOP
平均	6.2	1.7
σ	0.9	0.7
平均 $\pm\sigma$ (注)	5.3	2.4

RTK-GPS	衛星数	DOP
平均	4.8	4.7
σ	0.9	8.7
平均 $\pm\sigma$ (注)	3.9	13.4

(5) まとめ

誤差の最大が発生する地点は iiGPS、RTK-GPS ともに「首都高羽田橋ランプ下」で iiGPS で 16m、RTK-GPS で 12m程度となっている。

3.2.7 高層ビル街での測定結果

(1) iiGPS

図 3.22 に iiGPS での測定結果を示す。

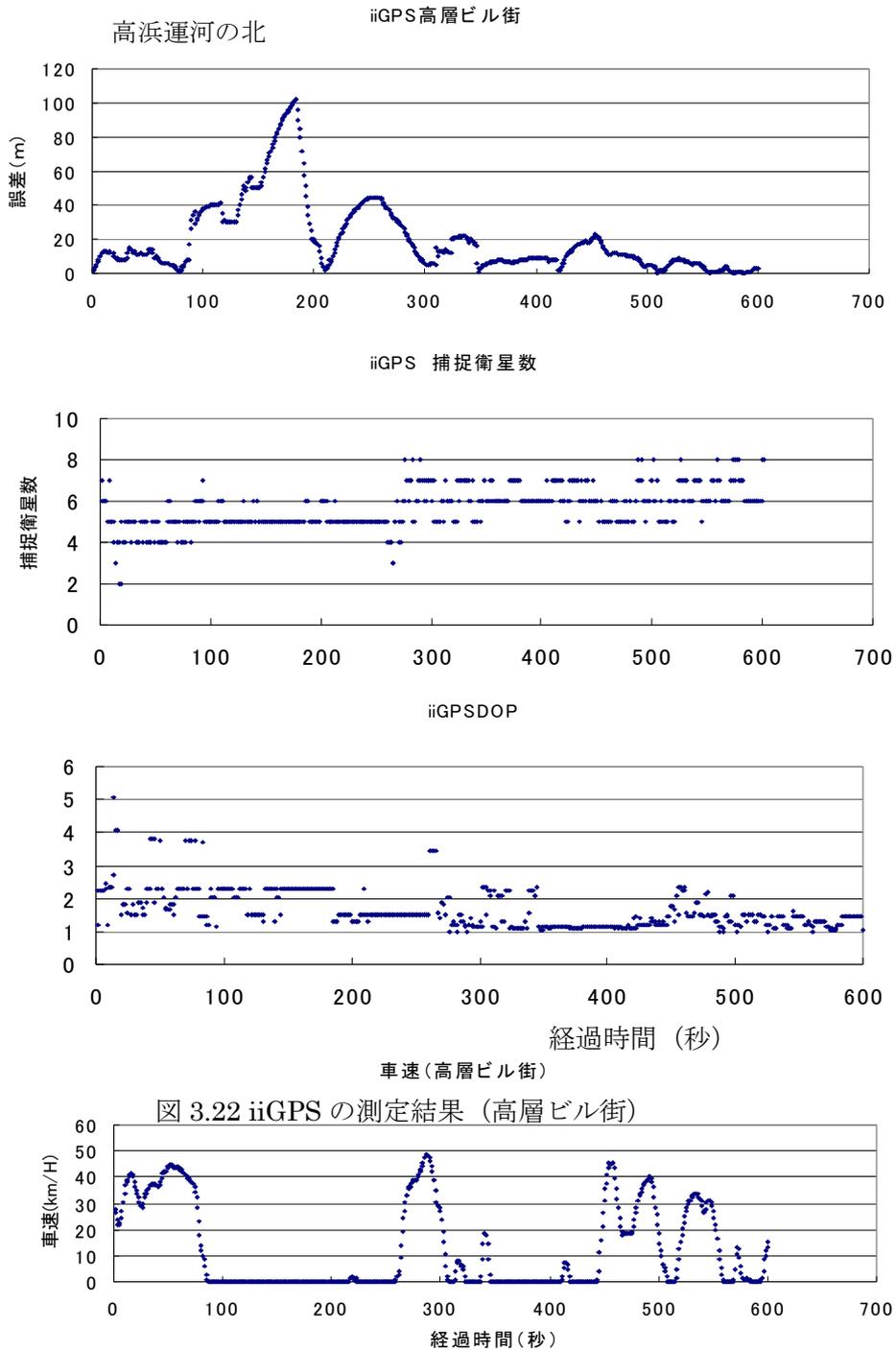
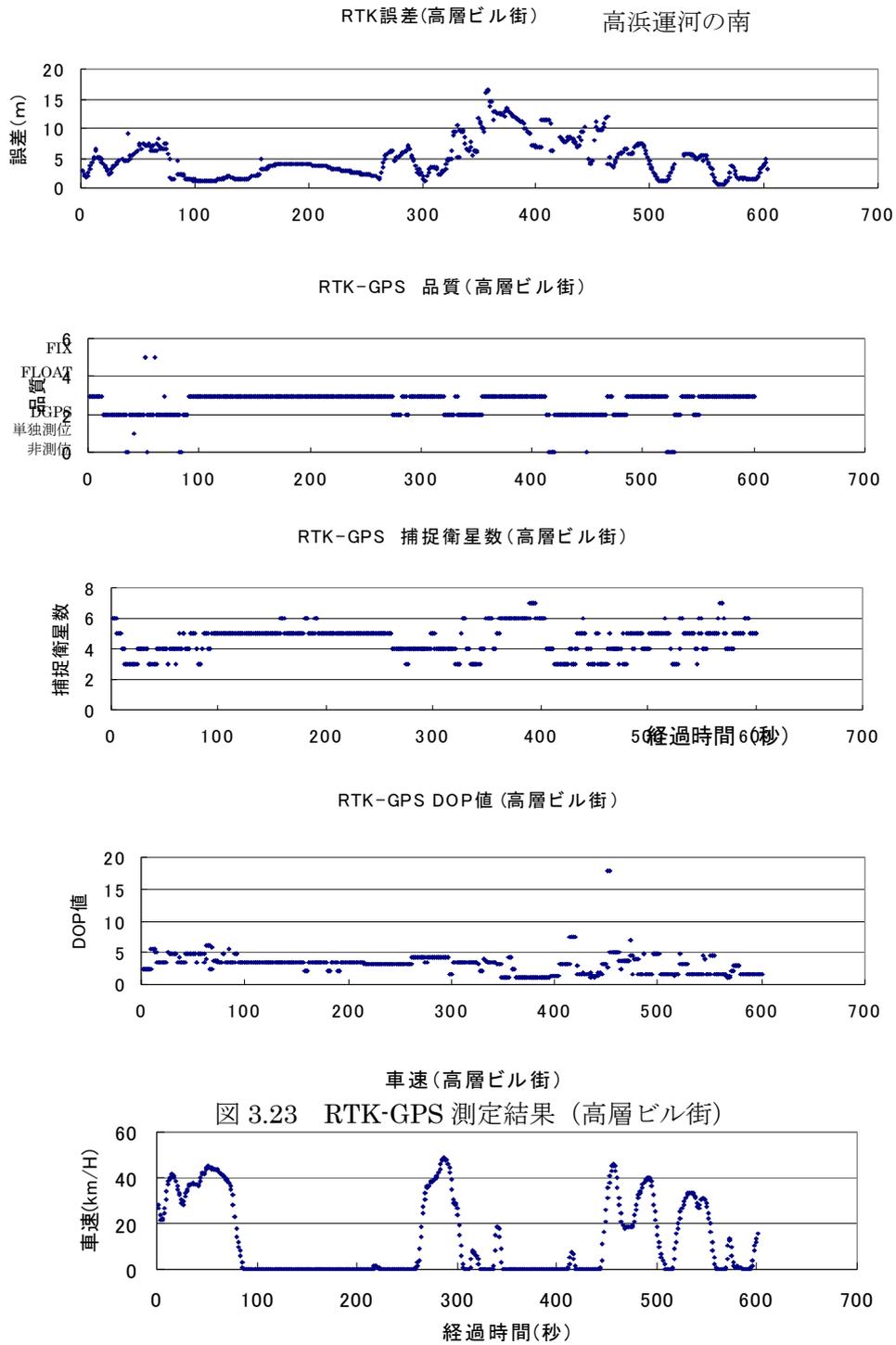


図 3.22 iiGPS の測定結果 (高層ビル街)

(2) RTK-GPS

図 3.23 に RTK-GPS の測位結果を示す。



(3) 誤差の平均と標準偏差

高層ビル街での誤差の平均と σ を表 3.10 に示す。RTK-GPS、iiGPS とも市街地 B よりさらに誤差が増大している。特に iiGPS の誤差の増大は著しい。

表 3.10 誤差の平均と σ (高層ビル街)

	iiGPS	RTK-GPS
誤差の平均値	22.2m	4.9m
誤差の σ	21.4m	3.2m
誤差 (平均値+ σ)	43.6m	8.1m

(4) 捕捉衛星数と DOP

高層ビル街での捕捉衛星数と DOP 値を表 3.11 に示す。

表 3.11 捕捉衛星数と DOP 値 (高層ビル街)

高層ビル街					
iiGPS	衛星数	DOP	RTK-GPS	衛星数	DOP
平均	5.6	1.7	平均	4.6	3.1
σ	0.9	0.6	σ	0.9	1.5
平均 $\pm\sigma$ (注)	4.7	2.3	平均 $\pm\sigma$ (注)	3.7	4.6

(注) 衛星数は平均 $-\sigma$ 、DOP は平均 $+\sigma$ とした。

(5) まとめ

iiGPS では、捕捉衛星数は市街地 B よりさらに劣化しているが、DOP についての劣化はない。誤差の最大は「高浜運河の北」で約 100m となっている。RTK-GPS では、捕捉衛星数は市街地 B とほぼ同様であるが DOP は向上している。誤差の最大は「高浜運河の南」で約 20m となっている。

3.3 実験結果の地図上への表示

3.3.1 市街地 A

図 3.24 に市街地 A（羽田周辺）における誤差と地物との対応関係を示す。

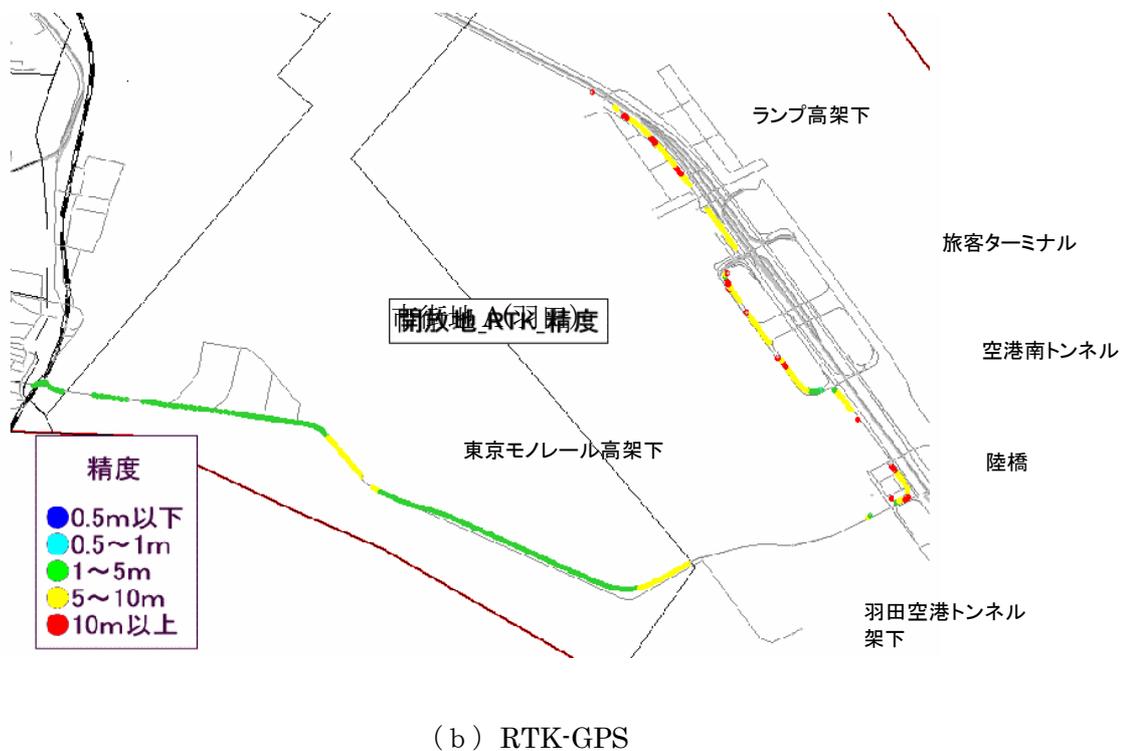
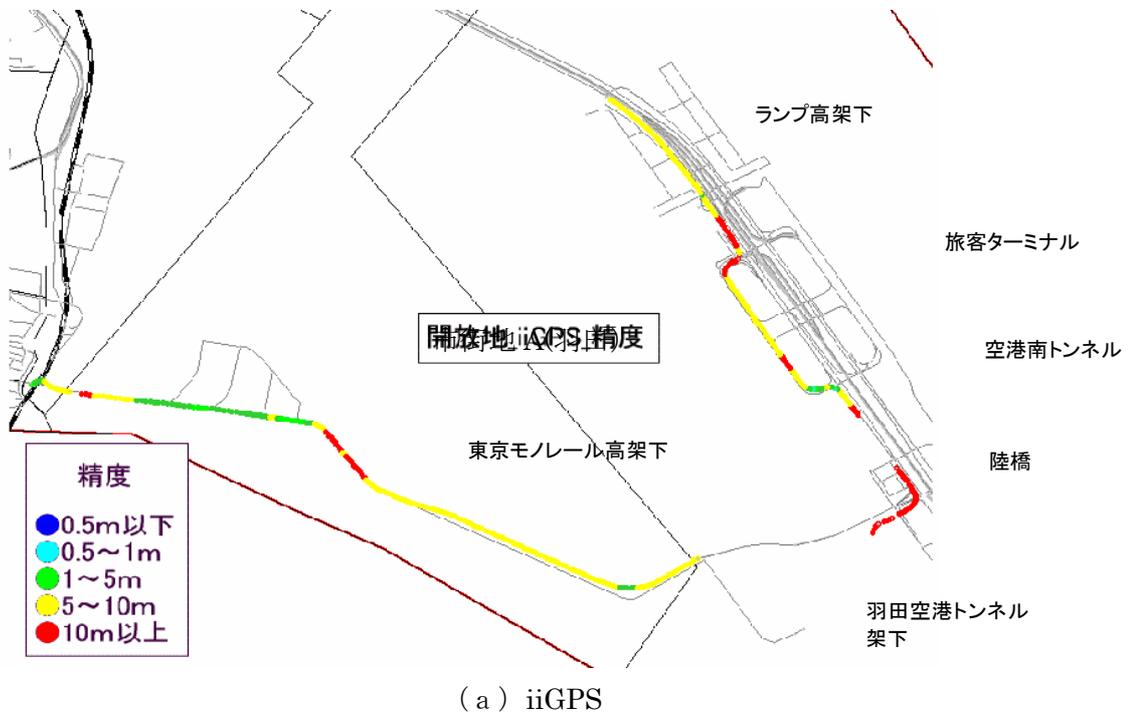
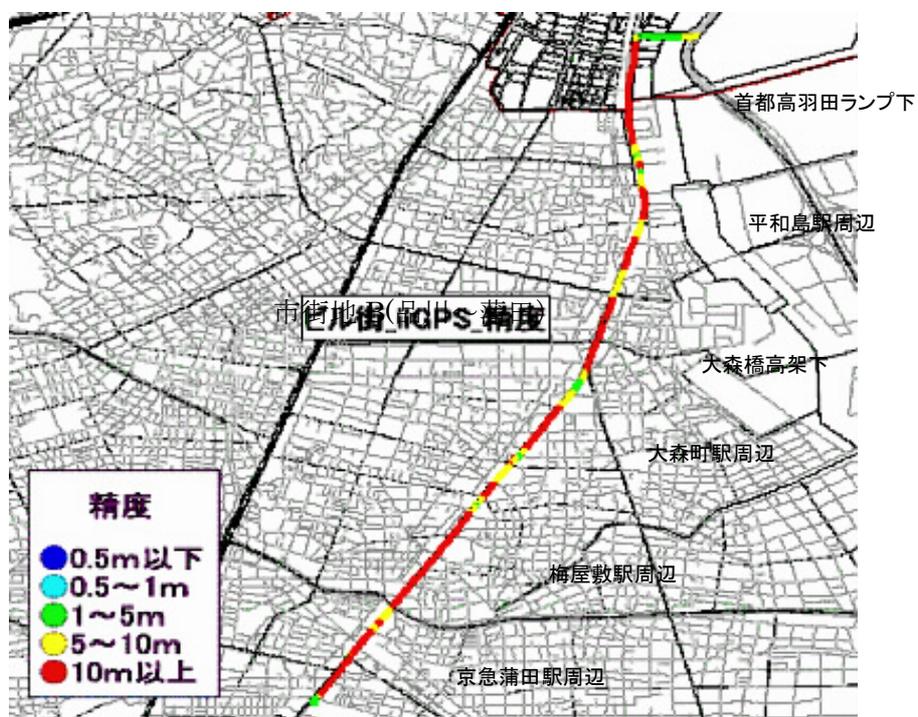


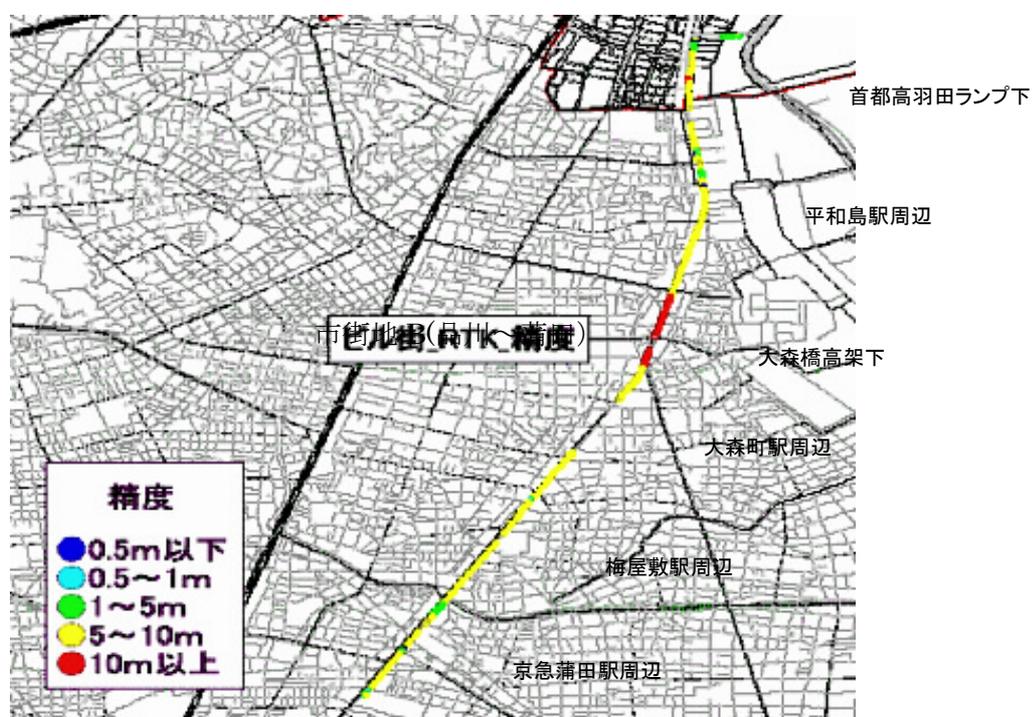
図 3.24 市街地 A での誤差と地物との対応

3.3.2 市街地 B

図 3.25 に市街地 B（品川～蒲田）における誤差と地物との対応関係を示す。



(a) iiGPS



(b) RTK-GPS

図 3.25 市街地 B での誤差と地物との対応

3.3.3 高層ビル街

図 3.26 に高層ビル街における誤差と地物との対応関係を示す。



(a) iiGPS



(b) RTK-GPS

図 3.26 高層ビル街での誤差と地物との対応

第4章 考察とまとめ

4.1 位置精度測定結果

開放地（筑波）、市街地 A（羽田周辺）、市街地 B（品川～蒲田）および高層ビル街での測定結果を表 4.1 に示す。

表 4.1 位置精度測定結果

測定エリア		項目	iiGPS	RTK-GPS
開放地	筑波 JARI テストコース 直線 500m	誤差の平均値	1.9m	0.09m
		誤差の σ	0.5m	0.10m
		誤差（平均値+ α ）	2.4m	0.19m
市街地 A	羽田周辺 約 4km	誤差の平均値	6.4m	3.5m
		誤差の σ	3.0m	1.2m
		誤差（平均値+ α ）	9.4m	4.7m
市街地 B	品川～蒲田 約 11km	誤差の平均値	8.9m	4.7m
		誤差の σ	3.5m	2.8m
		誤差（平均値+ α ）	12.4m	7.4m
高層ビル街	品川 約 2.5km	誤差の平均値	22.2m	4.9m
		誤差の σ	21.4m	3.2m
		誤差（平均値+ α ）	43.6m	8.1m

表 4.1 より、

- (1) 開放地では RTK-GPS で目標精度 0.5m 以下の精度を実現できる。
- (2) 市街地 A では開放地に比べて位置精度が劣化している。
- (3) 市街地 B では市街地 A に比べて位置精度が劣化している。
- (4) 高層ビル街では市街地 B に比べて位置精度がさらに劣化している。
- (5) 補正を行っている RTK-GPS の誤差は、単独測位の iiGPS の誤差より小さい。

4.2 捕捉衛星数と DOP

表 4.1 から開放地での誤差の比べて、市街地 A、市街地 B、高層ビル街でそれぞれ大きく劣化している。この劣化要因として、捕捉衛星数の減少と DOP の増大が考えられる。

表 4.2 に各測定エリアでの捕捉衛星数と DOP 値を誤差と合わせて示す。

表 4.2 捕捉衛星数、DOP と誤差

測定エリア		項目	iiGPS	RTK-GPS
開放地	筑波 JARI テ ストコース 直線 500m	捕捉衛星数 (平均値 - σ)	6.8	6.0
		DOP(平均値 + σ)	1.4	3.7
		誤差 (平均値 + α)	2.4m	0.19m
市街地 A	羽田周辺 約 4km	捕捉衛星数 (平均値 - σ)	6.7	4.7
		DOP(平均値 + σ)	1.4	5.7
		誤差 (平均値 + α)	9.4m	4.7m
市街地 B	品川 ~ 蒲田 約 11km	捕捉衛星数 (平均値 - σ)	5.3	3.9
		DOP(平均値 + σ)	2.4	13.4
		誤差 (平均値 + α)	12.4m	7.4m
高層ビ ル街	品川 約 2.5km	捕捉衛星数 (平均値 - σ)	4.7	3.7
		DOP(平均値 + σ)	2.3	4.6
		誤差 (平均値 + α)	43.6m	8.1m

図 4.1 に、iiGPS の誤差と衛星捕捉数、DOP の関連を示す。

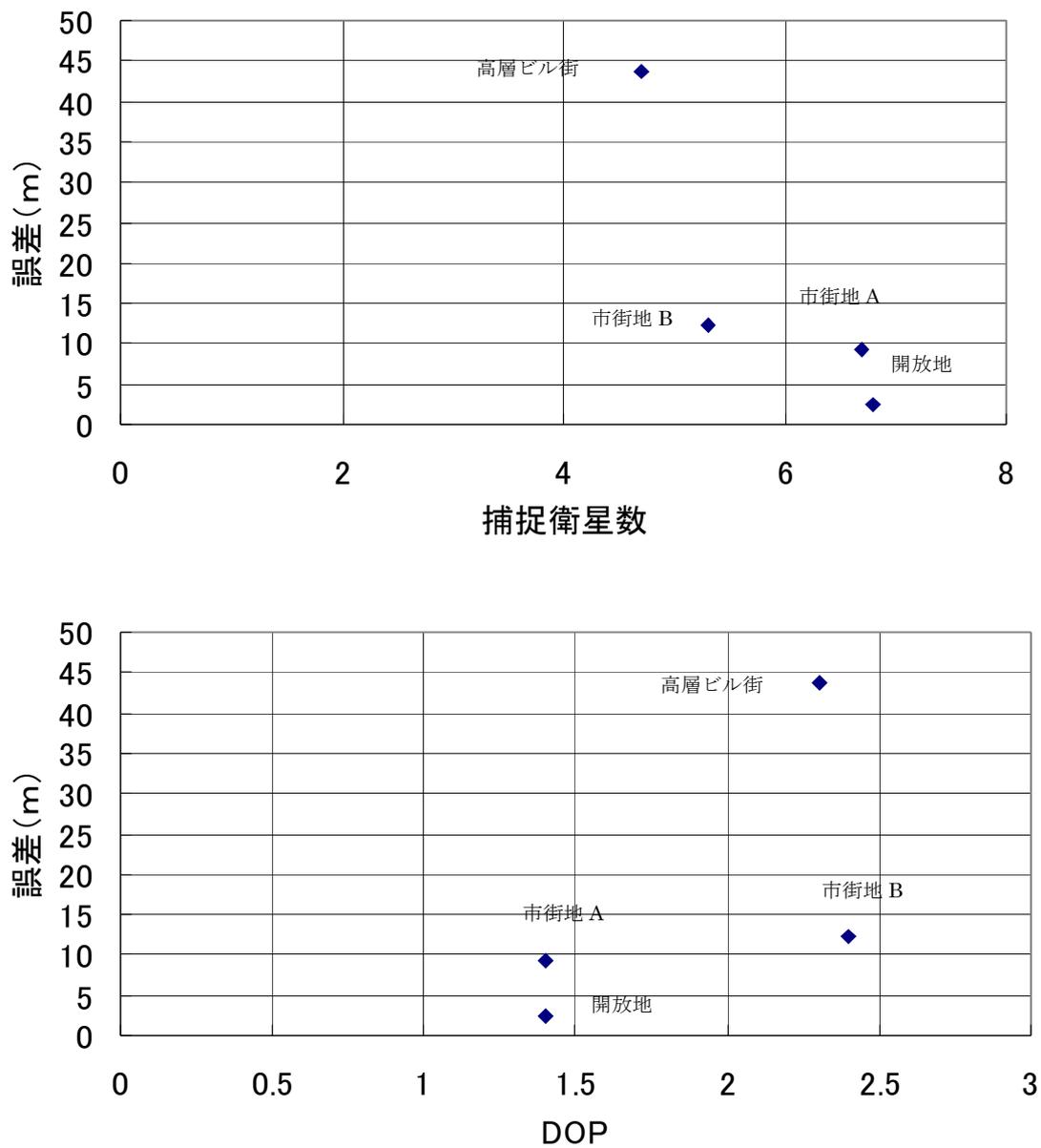


図 4.1 iiGPS における誤差と捕捉衛星数、DOP の関係

捕捉衛星数の減少により誤差は増大する傾向にあるが、市街地 B (品川～蒲田) と高層ビル街での捕捉衛星数の変化は少ないが誤差は大きく増大している。また、誤差と DOP の相関は少ない。

図 4.2 に、RTK-GPS の誤差と捕捉衛星数および DOP の関係を示す。

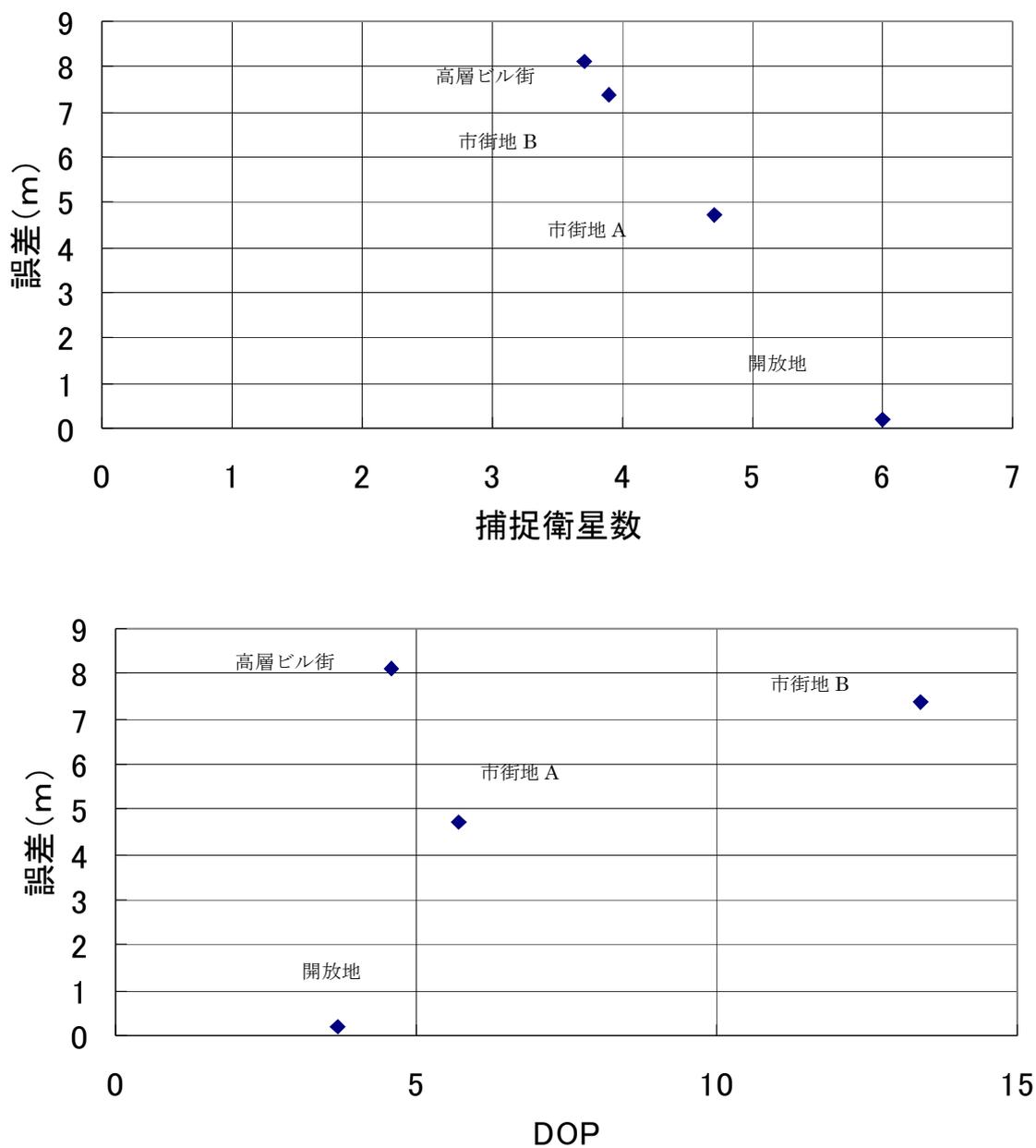


図 4.2 RTK-GPS の誤差と捕捉衛星数および DOP の関係

捕捉衛星数の減少により誤差は増大する傾向にあるが、誤差と DOP の相関は少ない。

4.3 捕捉衛星数と測位品質

前項で述べた DOP, 捕捉衛星数以外で誤差に影響を与える要因として, 衛星の測位品質が考えられる。図 4.3 に一般道路における捕捉衛星数と RTK-GPS の測位品質の割合を示す。同図より、測位品質の良好な FIX の状態の確率が最も多いのは市街地 B(品川～蒲田)である。

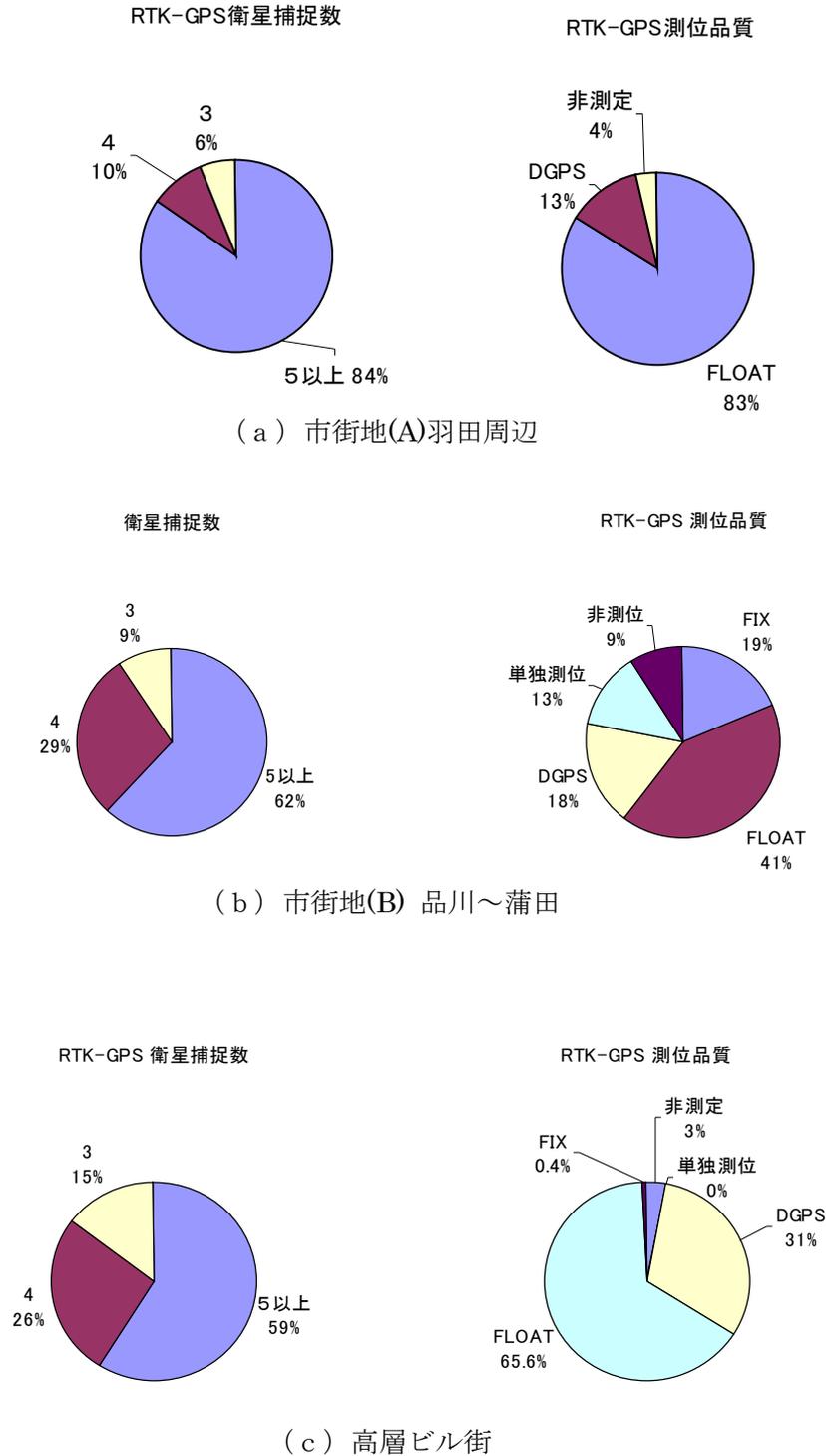


図 4.3 市街地 B(品川～蒲田)捕捉衛星数と RTK-GPS の測位品質の割合

FIX 状態の最も多い市街地 B について捕捉衛星数と RTK-GPS の測位品質の関係を図 4.4 に示す。

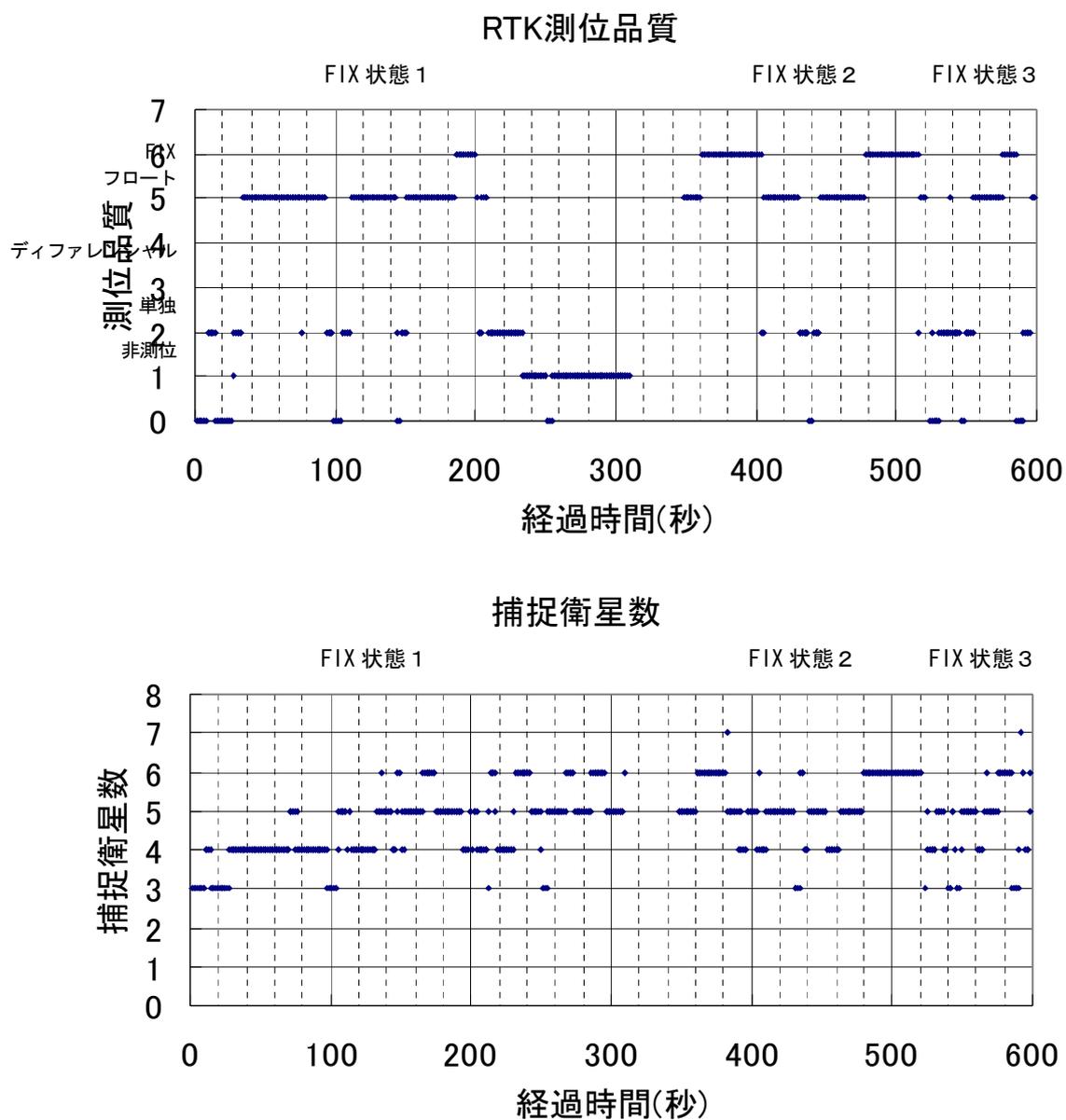


図 4.4 市街地 B(品川～蒲田)捕捉衛星数と RTK-GPS

FIX 状態 1 では約 10 秒, FIX2 状態と FIX3 状態では約 40 秒程度の時間 FIX が継続している。

4.4 FIX 状態での誤差

図 4.5 に市街地 B において捕捉衛星数が 6 機以上でかつ FIX 状態が 40 秒程度継続している場合 (FIX2, FIX3) の誤差を示す。

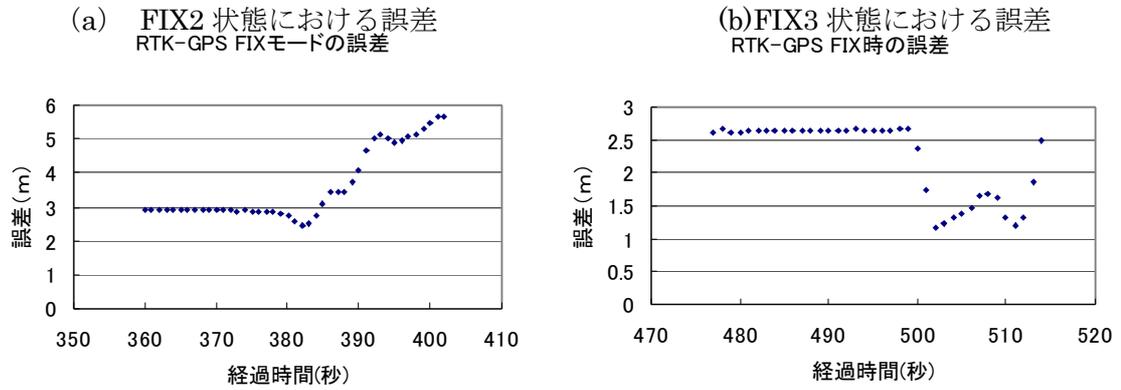


図 4.5 市街地 B での FIX 状態が 40 秒程度継続している場合の誤差

表 4.3 に FIX2 と FIX3 状態における誤差と全体の誤差との関係を示す。

表 4.3 FIX(2)および FIX(3)の誤差と全体の誤差

	市街地 (B) 全体 品川～蒲田 約 11km	市街地 (B) のなかで FIX 状態にお ける誤差 品川～蒲田 約 11km の 一部
誤差の平均値	4.6m	2.9m
誤差の σ	2.8m	1.1m
誤差 (平均値+ σ)	7.4m	4.0m

表 4.3 より RTK-GPS を FIX 状態に保つことは、位置精度の向上に寄与する。

4.5 位置精度劣化的主要原因1（捕捉衛星数の減少）

図 4.1 および図 4.2 から誤差は捕捉衛星数に対して概略反比例の関係にあり，捕捉衛星数が多くなるほど誤差原因として捕捉衛星数を考えることができる。捕捉衛星数 (N) と N 以上の衛星が捕捉できる確率（累積確率）を図 4.6 に示す。

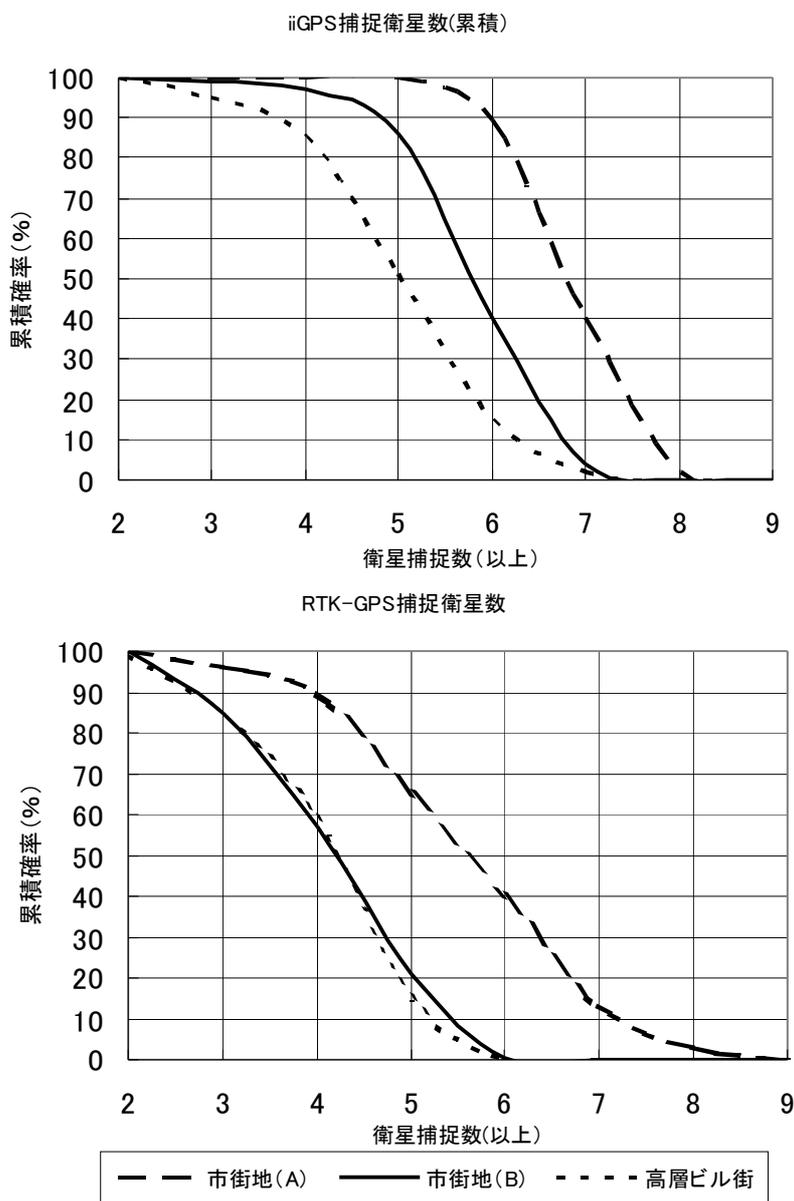


図 4.6 衛星捕捉の累積確率

縦軸の累積確率 (%) は横軸に示す数以上の衛星が捕捉できている測定時間の割合をあらわす。

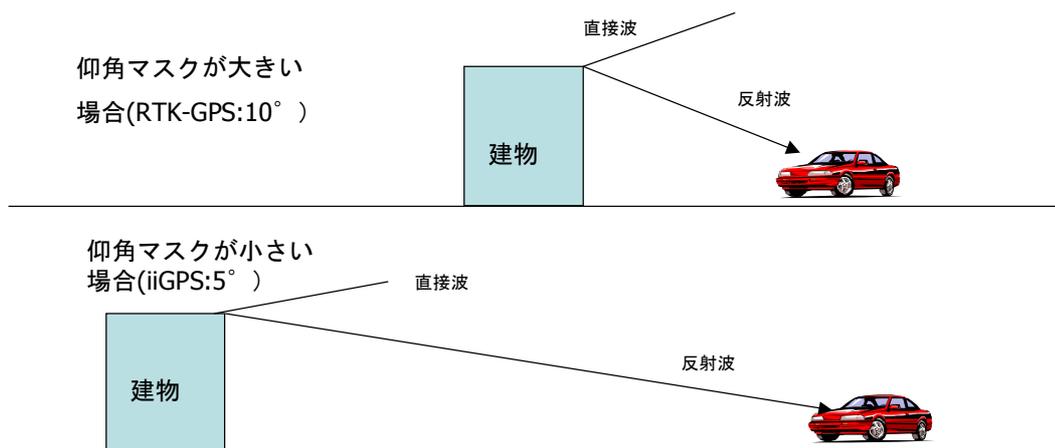
測位品質を安定した FIX 状態に保つには実験結果から RTK-GPS で 6 機以上の衛星を捕捉する必要があるが、6 機以上の衛星を捕捉する累積確率は市街地 A では 40% 率となる。

4.6 位置精度劣化の主要原因2 (マルチパスの影響)

すでに述べたように高層ビル街での最大誤差は iiGPS では 100m、RTK-GPS では 20m となっている。この原因は捕捉衛星数、DOP および FIX 状態では十分説明できない。

図 4.7 に建物からの反射波と仰角マスクとの関係を示す。

GPS受信機には仰角マスク(閾値)が設定されており、この閾値より大きい仰角にあるGPS信号のみ受信するよう設定されている。そのため、建物による反射波が誤差に影響を与える。



GPS受信機の仰角マスクが小さいほど遠くの建物からのマルチパスによる影響が現れ、測定車と建物との距離の約2倍の誤差を生ずると考えられる。

図 4.7 建物からの反射波と仰角マスクの関係

上記のことから、高層ビル街の位置精度測定データ (iiGPS, RTK-GPS) での最大誤差 100m, 20m) は反射波 (マルチパス) の影響と考えられる。

4.7 今後の課題

- (1) 今回の実験では、位置基準として、開放地（筑波）では白線からの距離を、一般道路では自立航法併用 **RTK-GPS** を使用したが、開放地でも市街地でも適用しうる高精度の位置基準とその検証が必要である。
- (2) 位置精度の向上策として、
 - ① 捕捉衛星数を増大させること
 - ② **DOP** を小さくすること、
 - ③ マルチパスの影響を除去すること、
 - ④ 補正を行なうこと、等が考えられる。

これらの向上策を **GPS** 受信機を搭載した車両が、どこでも、いつでもできるだけ多く満足させるための検討が必要である。

4. 調査研究の今後の課題及び展開

本調査研究では、移動体用高精度位置標定システムへのリクワイアメントに関して、有益な知見が得られた。それを再掲すると、

- ・できるだけ多くの衛星で DOP が適正な値になるようインフラを整備すること
- ・できるだけ多くの衛星をできるだけ長く継続して捕捉できるようインフラを整備すること
- ・マルチパスの影響を除去できるよう車載システムを改良すること

ということになるが、これらを実現する具体的手法の検討と検証が今後必要になる。これらの検討は以下の二つの検討に大別できる。

- ・インフラ側で上記の対応の不可能なエリア、つまり、十分な GPS 衛星信号を捕捉できないエリア、例えば高層ビル街、トンネル、地下街等に対する高精度化の検討
- ・インフラ側で上記の対応の可能なエリア、つまり、十分な GPS 衛星信号を捕捉できるエリアに対する高精度化の検討

前者は、GPS 補完方式の検討であり、その候補として

- ・車載システムのみ（自立航法）：方位センサ+車速センサ、白線検知（車載カメラ等）
- ・インフラ協調システム（電波航法）：擬似衛星（スードライト）、路側器（DSRC 等）、レーンマーカ（R-F タグ等）が挙げられ、移動体用高精度位置標定システムとして GPS 補完システムとしてどの方式が最適化を検討、検証することが目標となる。

後者については、マルチパスに対する車載システムの改良検討とすることができる。これは、受信した GPS 衛星信号が直接波か、反射波かを予測/推定し、反射波であれば、そのデータを無視する手法を見出すことが目標となる。

いずれにせよ、上記に示す今後の課題と展開は、移動体用高精度位置標定システムにとっても、2008 年打ち上げ予定の準天頂衛星にとっても、さらに車社会にとっても、早急に明確にしておくべき課題と展開である。

— 禁無断転載 —

システム技術開発調査研究

15-R-3

移動体用高精度位置標定システムに関する調査研究報告書
(要旨)

平成16年3月

作成 財団法人 機械システム振興協会
東京都港区三田一丁目4番28号
TEL 03-3454-1311

委託先 財団法人 日本自動車研究所
東京都港区芝大門一丁目1番30号
TEL 03-5733-7924