

## 6.4 都市部移動体における GNSS 技術の測位精度と課題について

久保信明 (東京海洋大学)

nkubo@kaiyodai.ac.jp

### 6.4.1 はじめに

GPS/GNSS 技術は、長い年月をかけて社会に浸透してきた。現在では、自動車や船舶の絶対位置決めに大きな役割を果たすようになってきた。衛星測位技術が利用されるまでは、絶対的な位置決めを容易に行うことができなかった。また、航空機に関しては、MSAS の運用が正式に開始したことにより、これまでの飛行ルートを変更して、より経済的なルートを選択できると聞いている。

このような背景の中、自動車では、より積極的に GPS/GNSS の技術を利用しようとする動きも見られる。特に安全面で、自車の位置をリアルタイムに数 10cm 程度の高精度で決定できれば、交差点等での衝突を防ぐことができる可能性を秘めている。このとき、自動車同士の通信が確立していることが重要であるが、すでにその見込みはあると聞いている。また、衛星測位技術ではなく、その他の技術で交差点での事故を防ぐ安全運転支援システムも見られる。最新のカーナビゲーションでは、事故の起こりやすい交差点やカーブのきつい場所の案内も行われていると聞いている。また、携帯電話での精度が高まれば、緊急通報の際の位置精度を高めることができる。さらに、携帯電話を所有する人間と自動車で通信ができるようになれば、自動車と人間との衝突を防ぐために、位置情報を利用できるかもしれない。

上記のようなシステムを実現させるためには、GPS/GNSS 技術による精度や利便性を高めておく必要がある。しかしながら、実際には、最も人間が活動する領域である都市部において、そのサービスは低下することがよく知られている。それは、GPS/GNSS の技術は、衛星からの電波を利用するものであり、途中で障害物があると、衛星配置の悪さやマルチパスの影響により、所定の精度を出すことが非常に困難になるためである。

本稿では、都市部移動体に焦点をあてて、GPS/GNSS 技術がどの程度使えるものなのかを簡単に評価することにした。大きくは、高感度受信機を利用した場合と、比較用に高精度受信機を

利用した場合に分けて示した。高感度受信機は、ここ数年飛躍的に利用されるようになってきたタイプの受信機であり、高層ビルに囲まれた場所でも、以前の標準的な受信機より 2、3 機多く受信することが可能である。ただし、誤差が増大することも避けられないため、その部分についても示した。

### 6.4.2 都市部における可視衛星数

移動体の都市部での精度を評価する前に、都市部における GPS 衛星の可視状態を把握するために、2005 年に車で東京 23 区内(主に渋谷区、港区、中央区、千代田区、江東区)を走行した時の生データより、捕捉衛星とその信号強度を取り出した。30 分程度の走行を様々な場所で繰り返し行ったため、それらのデータを全てつなぎ合わせ、12 時間分の生データを抽出した。使用受信機は 2 周波で高精度測位用の NovAtel 社製 OEM4 受信機で、使用アンテナは NovAtel 社製 GPS702 であった。この 12 時間での可視衛星数の割合を図 1 に示した。なお、走行した道路は、2 または 3 車線以上の比較的広い道路であった。

図からわかるように、都市部では、可視衛星数が 4 個未満の測位不能の時間帯が約 20% 存在している。信頼性の高い RTK 測位に必要な可視衛星数は、7 個から 8 個程度以上であることから、都市部では、可視衛星数だけの観点からみても、数 cm の高精度測位には厳しい状況であることがわかる。この結果は、高精度用受信機であるため、品質の高い信号を受信するように設計されていることから、信号強度が 30dB-Hz 以上必要である。高感度受信機を用いた場合の可視衛星数の割合は、図 1 の結果よりも、全体的に 2 機から 3 機増加することが見込まれる。ただし、高感度受信機でも、信号強度を 30dB-Hz 以上で制限した場合、図 1 よりもやや改善する程度と予想される。

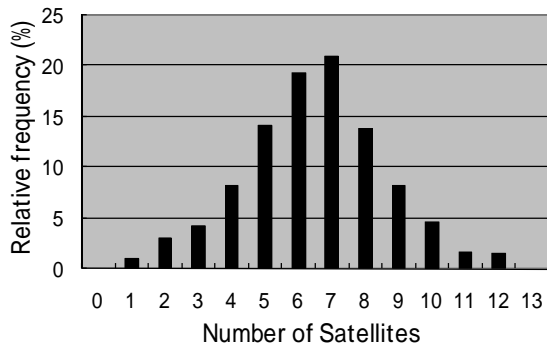


図1 東京都都内における可視衛星数の割合

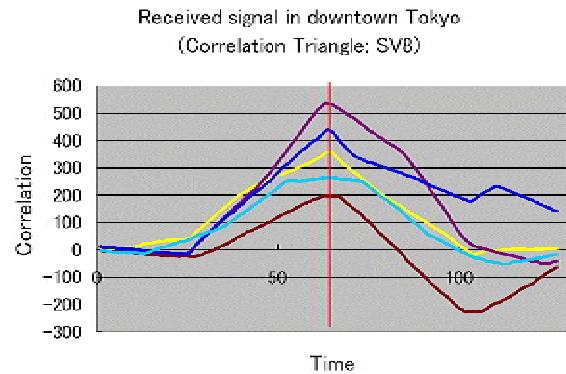


図3 強い反射波を受信した時の相関波形

### 6.4.3 都市部におけるマルチパス環境

都市部におけるマルチパス環境は、決して良いとはいえない状況である。特にGPS/GNSSでは、見通しの良い経路が確保されていることが、重要であるため、高層ビル街や狭い路地では、反射や回折といった、様々な影響を受けることになる。図2に、高層ビル街で受けやすい、反射波が支配的な状況の概観を示した。実際の直接波は45dB-Hz程度の信号強度であるが、ビルによる回折の影響を受け、10dB-hz以上減衰している。ここで、比較的強い鏡面反射による信号が混入すると、反射波が支配的な状況になることがわかる。図3に、強い反射波が混入しているいくつかのケースの相関波形を示した。場所は、東京丸の内のおフィス街で、取得受信機は、SQM 受信機（ENRI、古野電気）である。この受信機は、0.025チップごとの相関値を5Hzで出力することができる。帯域は20MHz、サンプリング周波数は40MHzである。

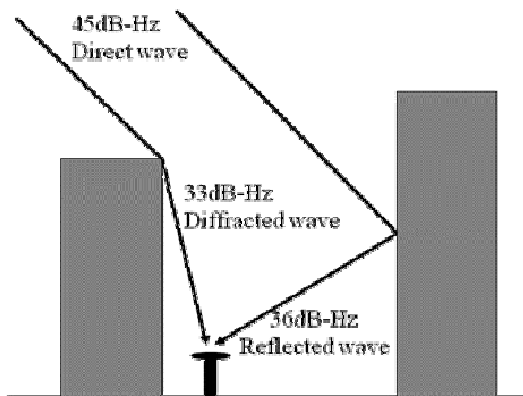


図2 反射波が支配的な状況

図3を見るとわかるように、通常の標準的なコリレータでは、マルチパスにより大きな誤差が生み出されることが想像できる。特に、最大相関値で上から3番目のケースは、直接波ではなく、マルチパスを追尾していることがわかる。これは、図2で紹介した反射波が支配的なケースであり、図より、直接波は反射波よりも150m程度前に存在することがわかる。また、最大相関値で上から4番目のケースは、直接波と反射波のレベルが同程度であり、標準的なコリレータでは、大きな誤差を生じることになる。

### 6.4.4 都市部における実際の測位精度

ここでは、実際に都内を車で走行し取得したデータの結果を示した。使用受信機は、高精度用がノバテル社製 OEM4 または OEMV 受信機、GPS702 アンテナ、高感度用が、u-blox 製 AEK-4T または TSI 製のものである。簡単のため、以下では受信機の呼び名を OEM4、u-blox、TSI とした。

#### 6.4.4.1 開けた場所での測位精度

比較的周囲の開けた晴海埠頭で2007年10月25日に取得したデータの結果を示す。約500m程度の直線区間を15分ほど往復したデータである。可視衛星数は、少ない時間帯であった。基準局はノバテル社製 OEM4 受信機 + GPS702 アンテナであった。移動局は、OEM4 受信機と u-blox であった。アンテナは双方ともに GPS702 を使用し分岐した。解析を行う前に、L1 及び L2 のデータを利用し、搬送波位相のアンビギュイティ決定を行い、FIX 解を求めた。周囲が開けている

こともあり、ほぼ 100%の解を求めることが可能であった。FIX 解の精度は 1cm 程度なので、この解を位置の基準にして評価した。u-blox 及び OEM4 による L1 の DGPS の水平方向の時系列誤差を図 4 と図 5 に示した。薄いねずみ色が緯度方向、濃いねずみ色が経度方向の誤差である。どちらも、キャリアスムージングを 100 秒かけた結果であり、それほど大きな差は見られなかった。このことより、周囲が開けてマルチパスの少ない環境では、同じアンテナを使用すると、その精度は同程度であることがわかった。水平の 1 値は、u-blox が 66cm、OEM4 が 57cm であり、衛星配置や衛星数もそれほど良好な時間帯ではなかったため、常に開けた場所で、この程度の精度を維持することは困難ではないと思われる。

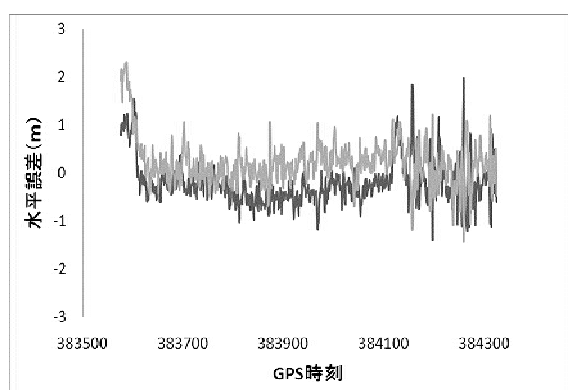


図 4 u-blox の時系列水平誤差

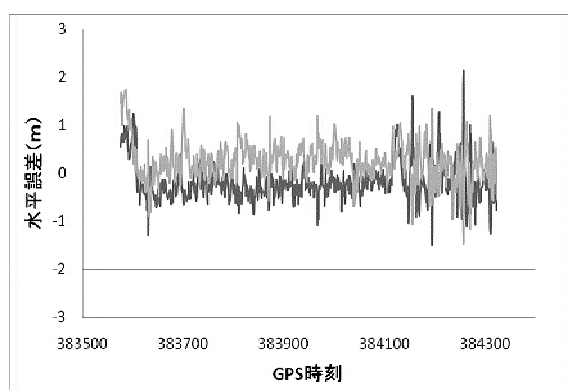


図 5 OEM4 の時系列水平誤差

#### 6.4.4.2 中層ビル街での測位精度

ここでは、東京都中央区の月島周辺を 2007 年 11 月 6 日に 30 分弱走行したときの結果を示した。可視衛星数は、やや多い時間帯であった。3km

弱程度の周回コースで、基本的に中層及び高層ビルが並び、晴海の交差点付近にはトリトンスクエアという超高層ビルが存在する。車線は 2 または 3 あり、比較的広い方である。このときの OEM4 受信機の平均可視衛星数は 5 個未満であり、精密位置を 100%求めることは非常に困難であったため、詳細な精度は評価せず、おおまかな水平のプロット図で比較した。図 6 に u-blox の生データを用いて計算した 3 周分の DGPS 測位の水平プロットを、図 7 に u-blox の受信機内部で計算された単独測位の水平プロットを示した。DGPS の基準局は海洋大越中島キャンパス屋上である。いずれの図も原点中心を同じとしている。このときの、測位に使用可能な衛星が 4 個以上の割合は、ほぼ 100%であった。取得間隔は 2Hz である。

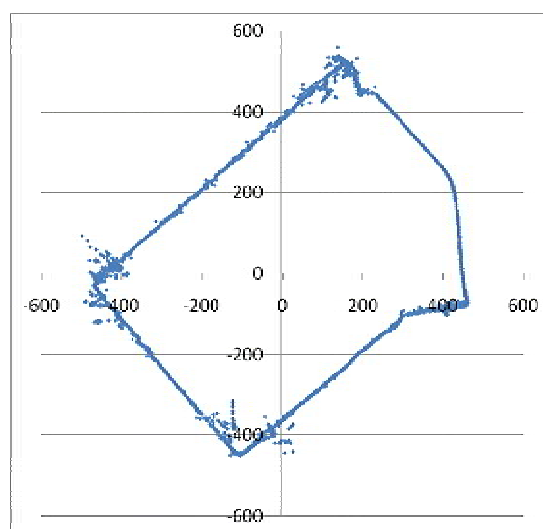


図 6 u-blox の DGPS 測位結果

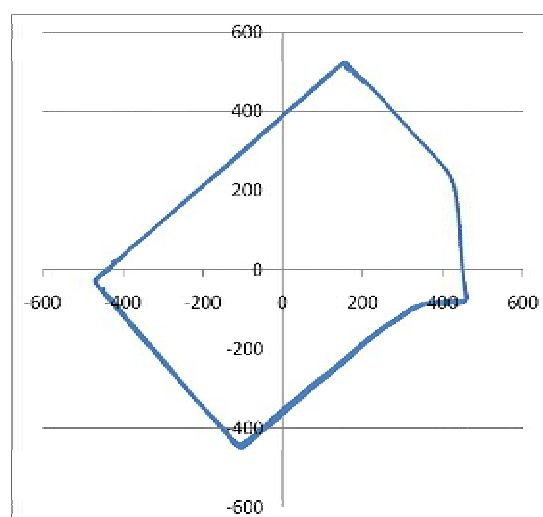


図 7 u-blox 出力の単独測位結果

図 6 及び 7 の結果より、u-blox の出力する単独測位結果は、非常になめらかであることがわかる。実際のアンテナ精密位置を求めていないため、1m 程度の正確な誤差評価を行うことが不可能であるが、明らかになんらかのフィルターの効果が見られる。これは、後で示すが、ドップラー周波数を用いた速度と測位結果をカップリングした結果であると思われる。図 6 に見られるように、実際には、4 つの角の交差点は、ビルに囲まれた状況であり、さらに高架下付近である場所も存在しているため、マルチパス等の影響を非常に受けており、10m 以上の誤差が多数見受けられた。この結果は、HDOP が 10 未満のみを示しているため、衛星配置はそれほど悪くない状況である。

図 8 に u-blox の生のドップラー周波数より速度を算出し、その速度を積分することによって得た水平位置を示した。この結果は 1Hz である。多少のずれは見られるが、水平の測位結果とカップリングすることにより、なめらかさを向上させ、精度を向上させることができる可能性があるといえる。厳しい電波環境である、4 つの角の交差点において、比較的正確な軌跡を示していた。なお、u-blox の屋上静止点でのデータでは、ドップラー周波数より計算した速度の精度は、 $1\sigma$  の水平成分で 10cm 程度であった。

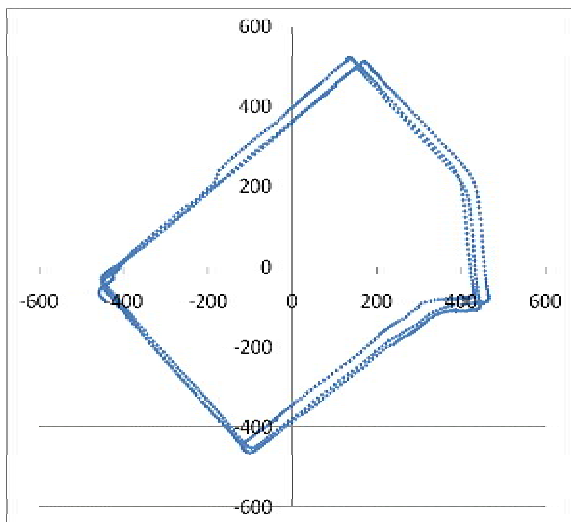


図 8 u-blox のドップラー周波数より計算した速度より算出した軌跡

図 9 に OEM4 の DGPS 測位結果を示した。図 6 の u-blox の生データより計算した DGPS 測位結果と比較すると、明らかに精度は良いことがわかる。しかしながら、交差点付近で停止している時に、最新のコリレータを用いても低減できないマルチパス誤差の影響を受けている。6.4.3 で述べたように、支配的な反射波が混入していた可能性も考えられる。また、利便性の観点より、OEM4 が HDOP10 未満で測位できた時間は、全体の 80%程度であったのに対して、u-blox は 99%程度であった。同じ条件で計算させたことから、u-blox 受信機より出力される疑似距離情報の衛星数が多かったことがわかる。OEM4 受信機の信号品質チェックが厳しいこともあるが、高感度受信機は、できるかぎり多くの衛星をトラッキングし、ドップラー等との複合測位により、測位解を出そうとしていることがわかる。また、OEM4 等の高精度受信機は、生データの精度で勝負する傾向があるが、高感度受信機は、デッドレコニング等も利用し、できるだけ測位結果を出力することで勝負している傾向がある。高精度受信機が精度を追及する一番の理由は、搬送波位相を利用した RTK 機能を有しているためである。RTK 測位を有効に行うには、疑似距離の精度は、数 m では厳しく、可能であれば 1m 程度以内が要求される。高感度受信機の結果は、なめらかに見えて精度も高いように見えるが、実際に詳細に調べていくと、数 m ずれている場所も見受けられる。

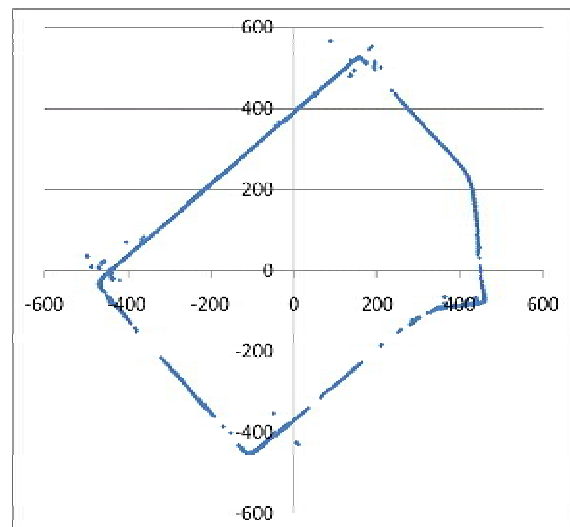


図 9 OEM4 の DGPS 測位結果

#### 6.4.4.3 高層ビル街での測位精度

ここでは、東京丸の内付近の周回コースを車で3周走行した結果を示す。車線は広いものの、周囲は超高層ビルで囲まれており、厳しい環境であるといえる。使用受信機は、OEM4、u-blox、TSI社の3つである。それぞれ、GPS702 アンテナ、付属のパッチアンテナを使用した。

OEM4 は DGPS 測位結果、u-blox は DGPS 測位結果と受信機の出力する NMEA からの単独測位結果、TSI は、受信機の出力する NMEA からの単独測位結果を、図 10 より図 13 にそれぞれ示した。なお、DGPS 測位の際の設定条件は、信号強度 30dB-Hz 以上、マスク角 10 度以上、HDOP10 未満とし、疑似距離情報のみを利用した。いずれも水平の測位結果である。それぞれ、DGPS 測位は 2Hz、単独測位は 1Hz の結果である。取得日時は 2007 年 11 月 7 日の午前 8 時頃の約 20 分である。この時間帯は、1 日の間で最も可視衛星数が多い時間帯であった。DGPS の基準局は海洋大越中島キャンパス屋上である。



図 10 OEM4 の DGPS 水平測位結果



図 11 u-blox の DGPS 測位結果



図 12 u-blox 出力の単独測位結果

図 10 の結果において、OEM4 の測位率は約 50%であった。可視衛星数最大の時間帯にも関わらず、丸の内の環境では、測位自体を行うことが困難な状況であることがわかる。ただし、この実験では、OEM4 受信機のコードループバンド幅を 0.01Hz に設定したため、もう少し広げると、トラッキング性能は改善される可能性があることに注意したい。測位プロットの結果より、マルチパス等の影響も大きく受けていることがわかる。丸の内周辺では、反射波が支配的になる状況がよく起こることを、これまでの実験より確認済みである。

図 11 の u-blox の生データより計算した DGPS 測位結果を見ると、非常に大きな誤差を発生して

いることがわかる。これは、疑似距離の雑音やマルチパスの影響を非常に大きく受けているためである。高層ビル街にはさまれている北側の道路は特にひどい結果であった。中層ビル街と比較して、精度が劣化する要因は、可視衛星数が少なくなことはもちろん、信号強度が回折で減衰すること、遅延距離の比較的長い(数10mから数100m)強い反射波が受信されることによるものである。現状の高感度受信機では、帯域を十分に確保していないため、数10mから数100m遅延して混入するマルチパスの影響を大きく受けると考えて良い。

次に図12のu-blox受信機で計算されたNMEAの結果を見ると、図11で想像できないほど改善されていることがわかる。これは、6.4.4.2でも述べたように、ドップラー周波数より算出した速度情報を利用しているためと考えられる。実験で3周する間、ほぼ同じ車線を走行していたことより、数mから10m程度ずれている場所も見受けられた。

最後に図13にTSI社の高感度受信機の結果を示した。この結果も、u-bloxと同様に測位結果と速度結果をカップリングしたものであると予想されるが、u-bloxよりもやや精度が良いことがわかる。毎周、ほぼ同じ車線を走行しており、u-bloxに見られた10m以上の大きなずれが、多くは見られなかった。



図13 TSI出力の単独測位結果

#### 6.4.5 今後の課題

図14に精度と利便性の関係をおおまかに示した。これまでの従来のGPS/GNSS受信機は、精度を要求すると、利便性を損なう結果となっていた。特に搬送波位相のアンビギュイティ決定を必要とする、RTK測位は、都市部での利便性は非常に悪いことが知られている。一方、精度を要求しないと、利便性はある程度確保できた。ここでの利便性とは、本題目にもあるように、主に移動体での測位を想定している。ただし、従来の受信機では、信号強度が30dB-Hz程度までの衛星しか利用していなかったため、実際に屋外にアンテナがある場合でも、測位できない場所が存在した。具体的には、狭い路地や高架下付近などである。

しかしながら、高感度受信機の出現によって、屋外で測位できない場所はほとんどなくなったといっても過言ではない。車で走行する場所に限定すると、屋内駐車場やトンネルを除いて、全ての場所で測位可能である。もちろん可視衛星数には時系列変化があるため、可視衛星数が最小のときと、最大のときでは、その結果が異なることは避けられない。次に、高感度受信機の精度に着目すると、数年前までは、利便性が良いかわりに、精度を犠牲にしていた傾向があったが、本稿でも示したように、移動体に適したフィルター等を開発することにより、飛びの減少、精度の向上が図られてきた。特に、ドップラー周波数を利用して算出した速度情報の利用により、大幅に測位精度が向上したと思われる。

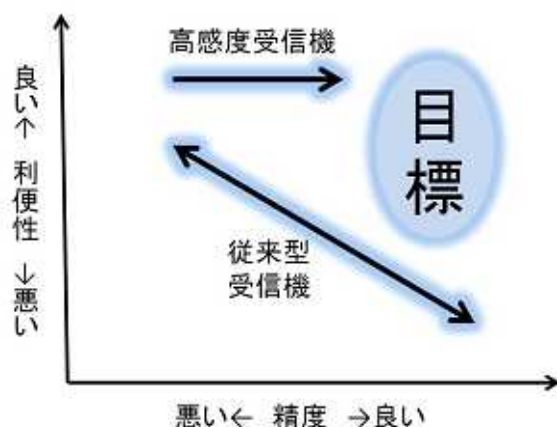


図14 精度と利便性の関係

以上の 2 つのタイプの受信機のこれまでの傾向を図 14 に示したが、これからターゲットとなる領域と、それを達成するための課題について簡単に述べたい。図 14 で「目標」と示した領域である。これからターゲットとなる領域は、精度も良く利便性も良い部分である。具体的な最初の目標としては、精度で 1m 以内、都市部の利便性で 90%以上（できれば 100%に近づきたい）程度になると思われる。さらなる目標としては、精度で 10cm 程度、都市部の利便性で 80~90%になると思われる。このような目標を達成するための課題とその内容を、以下に箇条書きで示した。

### **可視衛星数の増加**

可視衛星数の増加は、必駆である。現状の高感度受信機及び高精度受信機、双方にとって、サービス低下の原因になっているのは可視衛星数が十分にないことが大きい。例えば、可視衛星数が多い時間帯と少ない時間帯では、全く同じ場所を走行していても、その利便性の差と精度の差は明らかである。高感度受信機が、高精度受信機に比べて利便性が高い理由は、信号強度の低い衛星を利用しているからである。疑似距離の精度は、信号強度に比例するため、高感度受信機といえども、できれば信号強度の極端に低い衛星は使用しないほうが良いといえる。可視衛星数が増加すれば、このような状況に対応できる確率が高くなるといえる。さらに高精度受信機においても、アンビギュイティ決定性能は可視衛星数に比例している。安定して可視衛星数が 7~8 個以上存在すれば、2 周波であれば、1 エポックで数 cm の精度を達成することも、それほど困難ではない。幸運なことに、近未来、欧州のガリレオや GLONASS の近代化、日本の準天頂衛星等が利用できるようなれば、10 年後くらいには、可視衛星数がこれまでの 2 倍になることも予想される。

### **マルチパス誤差低減**

疑似距離のマルチパス誤差低減技術は、長年にわたって開発されてきた。基線長の短い DGPS 及び RTK サービスの場合、最終的に誤差要因として残るものは、このマルチパス誤差であると言われている。現在の高精度受信機には、最新のマルチパス低減技術が組み込まれており、約 30m 程度以上遅延するマ

ルチパスに関しては、ほぼ除去可能となっている。ただし、近接反射波や反射波が支配的な場合には、誤差を生み出す原因となっている。特に反射波が支配的な場合は、大きな誤差となる可能性が高い。高精度受信機に組み込まれているマルチパス対策技術は、帯域を十分に確保した RF を装備していることが前提となっている。高感度受信機で帯域を十分に確保した製品は、まだ見られないため、これからの課題であると思われる。ただし、信号強度が極端に低くなると、雑音が非常に大きくなるため、マルチパス対策を行っても意味がなくなることに注意しなければならない。

### **アンテナの改良**

現在の高感度受信機に使用されている標準的なパッチアンテナと高精度測量用のアンテナでは、そのパターンの安定性や、位相中心の安定性などに差があると言われている。実際に、全く同じ条件で比較しても、その精度に 2 倍以上の差が見られることがしばしばある。移動体に限らず、静止測量においても、RTK 測位や数 10cm の精度を確保するためには、高精度測量用アンテナを用いることが条件となっている。もし標準的なパッチアンテナで、同じ性能を出すことができれば、実用化に向けた好材料となるだろう。

### **他のセンサーとの融合**

すでに、高感度受信機で、ドップラー周波数を利用した速度情報とのカップリングが行われ、飛びの大幅な減少と精度の向上が図られてきた。これ以外にも、INS との融合は長年にわたって行われてきた。都市部で RTK 測位程度の精度を確保するには、高価格の INS との融合は必須であり、それでも 100%には遠い状況であると報告されている。今後も、他のセンサーとの融合も含め、更なる改良が期待される場所である。

## **6.4.6 おわりに**

本稿では、都市部移動体における GPS/GNSS 技術の測位精度と課題について述べてきた。GPS/GNSS 技術は、都市部ナビゲーションでの利用において、完璧なものではないが、今後も、

精度や利便性の観点で改良されていくと思われる。なにより、GPS 以外の衛星測位システムが実用化されようとしている過渡期であるため、それらの相互運用性や、対応受信機の開発が活発に行われていくと予想される。全ての測位システムを利用した評価やシミュレーションを今後も継続していく予定である。

本稿の内容では、予想で書いた部分もあり、全体として、大雑把な記述になっている。各技術の詳細については、別の文献や下記参考文献を参照されたい。また、本稿で不明な点については、久保まで直接質問して頂ければと思う。

### **参考文献**

/1/ Pratap Misra and Per Enge 原著、日本航海学会 GPS 研究会 訳、「精説 GPS」、2004 年 12 月発行

/2/ Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty、「UNDERSTANDING GPS PRINCIPLES AND APPLICATIONS」、2006 年改訂