

# 衛星測位の建設機械等への応用

藤本 幸司\*  
松下 博俊\*\*

現在、我が国においてはGPS（Global Positioning System[全地球測位システム]）による測位利用が拡大し、カーナビゲーションをはじめ、交通分野、測量、防災、国土管理など、幅広い分野で利用されており、今後の社会・経済活動における不可欠なサービスとして、さらなる利用と需要の拡大が見込まれる。しかし、このGPS技術を山間部などで稼働する建設機械に適用すると、地形・樹木・他の重機などによる電波遮断が発生し、作業効率を下げてしまう。

本稿では、作業車両などの中低速の移動体において、GPSや準天頂衛星を用いて、山間部でも連続した高精度測位を可能とする要素技術の研究開発について中間報告を行うものである。

## 1. はじめに

### (1) 背景と開発目的

GPS衛星と互換性のある準天頂衛星が常に天頂付近に1機常駐することで、1日を通じて測位の利用率と精度が向上するとともに、上空から補強情報が確実に得られることから高精度測位の信頼性も改善されることが期待されている。

このような利便を与える準天頂衛星システムではあるが、山間部等衛星電波の受信しにくい地域においては、依然として同時に4機以上の衛星（位置特定を行うために最低限必要な衛星数）から電波を常時受信し続けることが難しく、測位できない地帯や時間帯が存在することや、外的な要因で安定的に測位ができないこともある。

例えば、山間部の土木工事現場では、図-1に示すように、他の重機からの反射波（マルチパス）により数m～数十mの測位誤差、また樹木や他の重機による電波の瞬断により測位が頻繁に中断するという可能性があることや、搬送波位相を用いるRTK-GPS測位では、測位復帰時に整数値バイアス（アンビグエィティ）を求める初期化に数十秒～数分かかってしまう現状がある。

本稿では、平成15年度～平成19年度の5カ年において、総合技術開発プロジェクト（総プロ）研究「準天頂衛星による高精度測位補正に関する技術開発」として、作業車両などの中低速の移動体において、都市部、山間部でも連続した高精度測位を可能とする要素技術を研究して

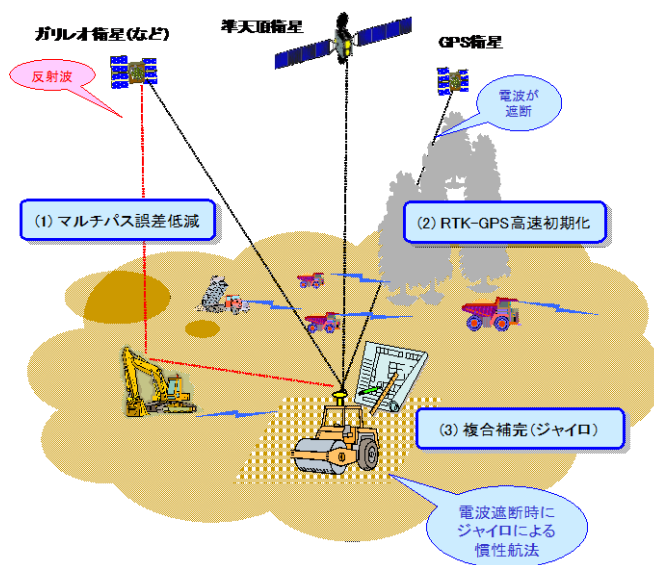


図-1 山間部工事現場

おり、中間報告を行うものである。

### (2) 山間部工事現場での課題

衛星測位を使った情報化施工については、GPSを用いて実施されてはいるが、現状では空港等の衛星電波の受信環境が比較的良好な場所に限定されている。

一方、ダムや砂防等の工事現場は、山間部での施工が多く、衛星測位を使った建設機械等への応用（情報化施工等）については、以下のような課題があるとされている。

\* 国土交通省国土技術政策総合研究所高度情報化研究センター情報基盤研究室主任研究員  
\*\* " " " " " 交流研究員

- ① 継続性 (Continuity)
  - ・ 構造物、樹木による頻繁な電波中断が発生し、安定した高精度測位ができない。
  - ・ RTK-GPS測位の場合、初期化に数十秒～数分かかる。
- ② 利用率 (Availability)
  - ・ 原理的に4衛星からの電波を同時に受信する必要があるため、山間部では常時測位できるとは限らない。
- ③ 測位精度 (Accuracy)
  - ・ 構造物からの反射波 (マルチパス) で精度が大幅 (~数十m) に劣化する。

**(3) 有識者へのヒアリング結果**

情報化施工に適用するに当たって、RTK-GPS利用上の課題やニーズを把握するため、この分野における専門家及び有識者に対してヒアリングし、実態を整理した。その結果を表-1に示す。

表-1 有識者ヒアリング結果

項目	ヒアリング内容	
効率化	稼働率	・ 測位率が高くなれば利用シーンは広がる
	継続性	・ 衛星電波の遮断で測位できないか精度が低下する ・ 電波の遮断後、復帰に時間がかかる (数10秒)
	コスト	・ TS 施工と比べ、位置出：1/3、平面測量：1/5、地形測量：1/5
	工事規模	・ 大規模工事 (6ヶ月間の工期、100万m <sup>3</sup> 以上) で使用
品質向上	精度	・ RTK-GPS を利用すれば水平面測位精度は十分である
	マルチパス	・ 建機による反射、現場の鉄板からのマルチパスが多い
通信手段	補正情報	・ 携帯電話はコスト高となり山間部では利用できない場所も多い
高度化への要求	情報化施工	・ 自動制御をしたいが現状では技術的な課題がある
		・ 油圧ショベルは姿勢情報 (ロール角、ピッチ角) が必要
その他	制度等	・ GPS 施工の完成検査 (出来形測量) を省略又は簡略化すべき ・ 設計・施工・維持・管理を通じた標準化が必要

主な意見は以下の通りである。

- ① 位置精度の向上よりも、GPS測位の安定性・継続性を期待。
  - ・ GPSが使えない時間帯があれば、他の安価な測位手段を使う。
- ② 準天頂衛星から放送される補正データのニーズあり。
  - ・ 携帯電話サービスエリア外での利用、通信コスト削減に寄与。
- ③ 自動化施工・災害復興では通信手段がネックとなる。
- ④ 建設現場では、建設機械自身や作業用の鉄板によりマルチパスが発生。
- ⑤ GPSを利用した情報化施工は、現状の施工方法の代替ではなく、全く新しい施工方法と考えるべき。3DCADデータを中心に設計・施工・検査までを含めて、トータルで効率化を考えるべき。

**(4) 開発項目の設定**

研究課題・ヒアリング結果をふまえ、今回の研究開発の重点化する部分を、「利用シーンの拡大」や「システムの安定化」といったところにおき、本年度の開発項目を以下の通り設定した。

- ① 測位精度の改善：マルチパス誤差低減技術の開発
  - ・ 構造物からの反射波の影響による測位精度の低下を防ぐため、マルチパスの影響を低減する技術を開発
- ② 継続性の改善：RTK-GPS高速初期化技術の開発
  - ・ 移動体における継続した高精度位置特定を実現するため、搬送波位相測位固有のアンビギュイティを高速決定する技術を開発
- ③ 利用率と継続性の改善：慣性航法複合技術の開発
  - ・ 衛星測位とジャイロなどの補完技術を組み合わせ、GPS不感地帯においても連続して測位できる技術を開発

**2. マルチパス誤差低減技術の開発**

**(1) マルチパス誤差低減技術の必要性**

GPS受信機が反射波や回折波を受信処理した場合、図-2に示すように、擬似距離誤差となり測位処理や測位精度に悪影響を与える。カーナビや携帯電話では、安価なコレリータが用いられているため、大きな測位誤差が生じることが問題となっている。

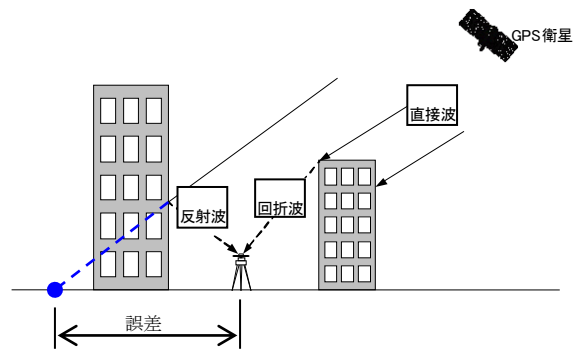


図-2 マルチパス

RTK-GPSにおいても、アンビギュイティ決定前に解の探索範囲を絞り込む必要があり (図-3)、マルチパス誤差の低減がRTK-GPSの高速初期化を左右することになる。

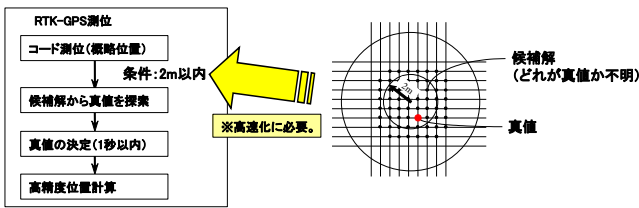


図-3 探索範囲の絞り込み

## (2) 対応策

一般に障害物によって反射・回折されたGPS信号は、直接波と比較して信号強度が低くなる傾向を持つ。この特徴を利用して反射・回折信号を特定し除去する手法を開発した。

図-4に示すように、直接波の信号強度は衛星仰角の関数として表すことができる。この関係はアンテナ、ケーブル及び受信機の構成で決まる。これらの関係を利用し、閾値より低いものを劣化信号と判断して除去する。

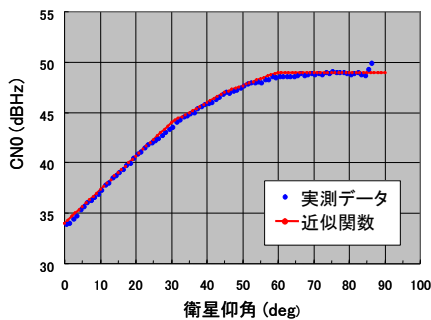


図-4 信号強度閾値

## (3) 実験結果と評価

### ① 静止系実験

開発した手法を使って、実際の観測データを元に実験を行った。その結果は、図-5の通りである。

この実験は、実際にマルチパスが発生していると考えられる箇所で、GPS電波を受信し、その電波をそのまま使って測位を行ったものと、劣化信号を除去するアルゴリズムを用いて測位したものを比較したものである。

この結果を見ると、測位誤差（水平距離）が2m以内

改善前： 944点 (78.7%)

改善後： 1,164点 (97.0%)

となり、劣化信号除去する手法により、効果が上がる結果となった。

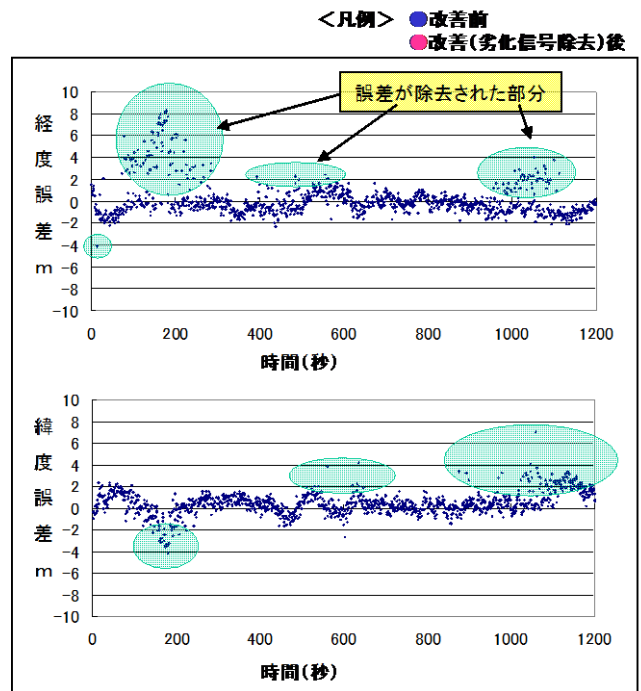


図-5 マルチパス誤差低減（静止実験）

### ② 低速移動系実験

図-6に、歩行実験の結果を示す。

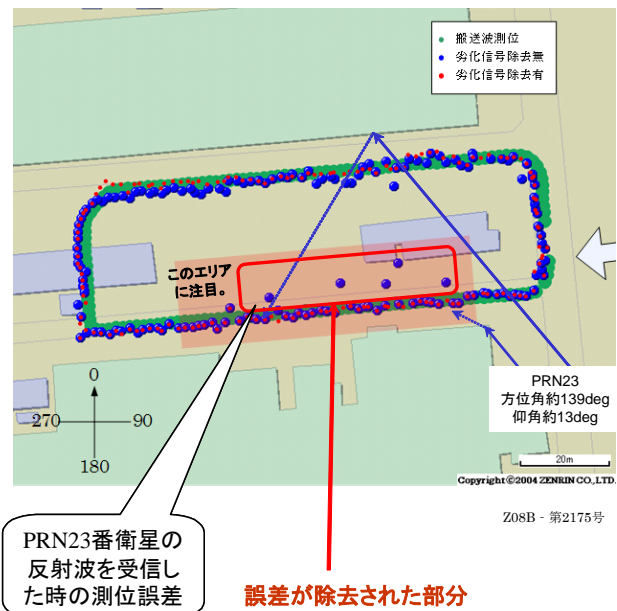


図-6 マルチパス誤差低減（歩行実験）

赤の矩形で囲まれている箇所は、事前の計算により衛星番号23番の電波は直接には受信できないということがわかっている。それにもかかわらず、23番の電波を受信しており、表示のような誤差を発生させている。この受

信結果に対して、今回開発した手法を提供した結果、誤差が著しく減少していることが確認された。

現状では測位に使用する衛星を減らすことは得策ではないが、GPS衛星に加えてGalileo衛星・準天頂衛星が打ち上げられ衛星数が60基以上になれば、衛星選択の幅が広がるために、この手法は非常に有効であるといえる。

### 3. RTK-GPS高速初期化技術の開発

#### (1) RTK-GPS を活用するに当たっての課題

測量に利用される精度の良いRTK-GPS方式を用いて位置特定を行うためには、衛星通信が安定して行われることが必要であるが、上空視界が悪い山間部などでは、頻繁に電波の瞬断が発生し、4衛星以下から5衛星に増加しても、アンビギュイティを決定するための初期化に数十秒～数分かかる現状がある。

このため、結果として、電波が遮断されるたびに、初期化の間、作業が中断することになり、場合によっては、受信状態がいいところまで場所を移動した上で、初期化を行わなければならない。

これらは、現場での作業効率を非常に低下させることになり、実運用上支障をきたすことになる。

#### (2) 方式の検討

移動体に適用するためには、RTK-GPS測位で問題となる初期化時間の高速化が必要である。本研究開発では、現在及び過去の観測データを用いる従来方式（On the Fly）ではなく、現在時刻の観測データのみを用いてアンビギュイティを決定するワンエポック決定方式を開発した。

また、衛星の仰角と配置を考慮した衛星選択と、速度、加速度による運動モデルを考慮した方式を開発した。図-7に処理フローを示す。

#### (3) 実験結果と考察

自動車で移動しながら収集した観測データを使用し、オフラインで可視衛星数を変化させて評価した。結果を図-8に示す。本結果より、5衛星以上の受信環境下でほぼワンエポックでアンビギュイティが決定できることを確認した。

これにより、コード測位によるアンビギュイティの初期探索範囲が2m以下で、5基以上の衛星を安定して可視できる場所においては、移動体の継続した高精度測位が可能となる。これにより従来適用が困難であった場所においてもRTK-GPS施工などに適用でき、稼働率が改善されることが期待される。

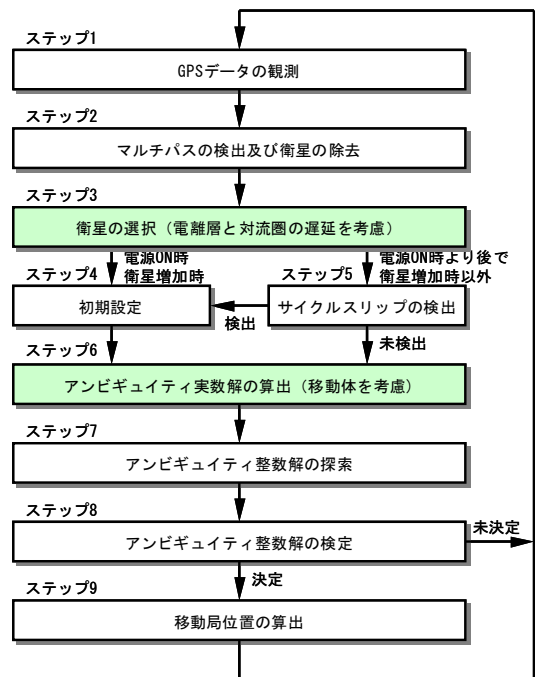


図-7 ワンエポック決定結果

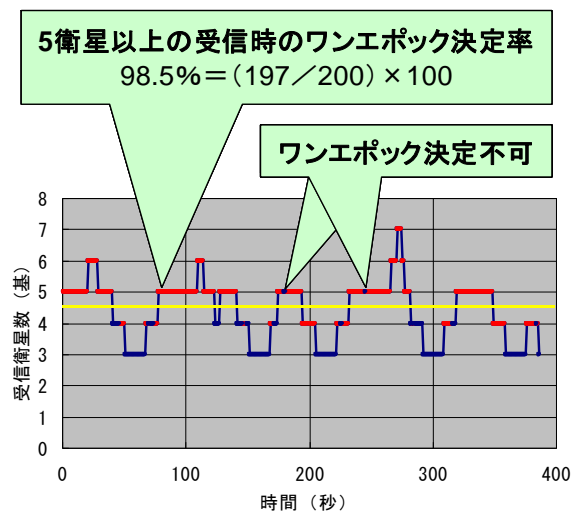
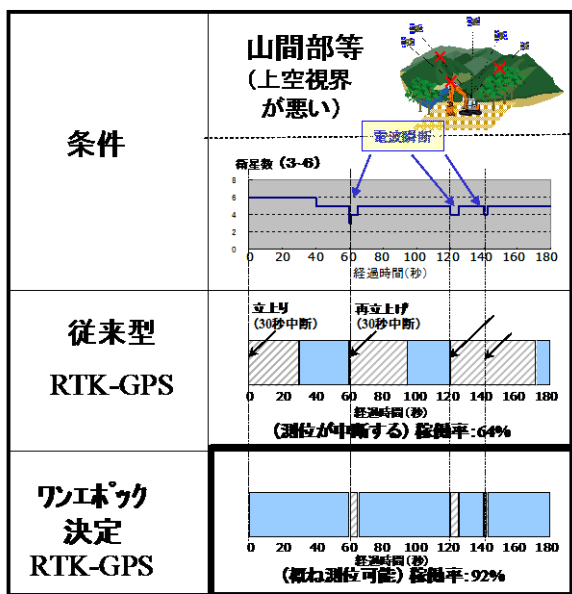


図-8 ワンエポック決定結果

本方法が実現したと仮定し、山間部を模した模擬観測データを用いて、作業効率の向上について検討した結果を図-9に示す。

この例によると、従来方法では稼働率が約60%であり、ワンエポック決定RTK-GPS実現後は、90%以上にも上がることが解る。これにより、作業効率の向上に大きく寄与することが期待できる。





凡例: ■ 測位可能 □ 測位不可  
 図-9 ワンエポック決定による効率向上

#### 4. 慣性航法複合技術の開発

##### (1) 慣性航法複合技術の検討

RTK-GPS測位は、GPS衛星が5基以上（安定化のためには4機より5機以上が望ましい）利用できる場所で使用することが前提となる。このため、山間部の建設現場での適用は難しかった。

本研究開発では、建設機械への搭載を考慮し、中精度で安価な慣性航法装置 (INS :Inertial Navigation System)

の活用を前提に、RTK-GPS測位技術を組み合わせ、衛星電波が遮蔽されRTK-GPS測位が一時的に中断した場合においても継続して高精度測位が可能な技術を開発した。

図-10に従来の複合方式と今回開発した複合方式の違いを示す。

複合航法においては、RTK-GPS測位演算結果の位置、速度を用いる既存複合航法方式 (Loosely Coupled方式) ではなく、GPS受信機の観測データである擬似距離、搬送波位相データ等を直接使用する方式 (Tightly Coupled方式) とした。

##### (2) 実験結果と考察

シミュレーションソフトにてINS及びGPSデータを作成し、可視衛星数を変化させて評価した。結果を図-11、12に示す。本結果より、衛星電波が遮断され、可視衛星数が4基以下となるような山間部においても、建設機械に搭載可能な低価格INSとRTK-GPSによる複合補完により位置誤差の増大を抑制し、測位を継続できることを確認した。

これにより、今までできなかった山間部で利用が可能になり、利用シーンの拡大、さらに情報化施工への展開が可能となると思われる。

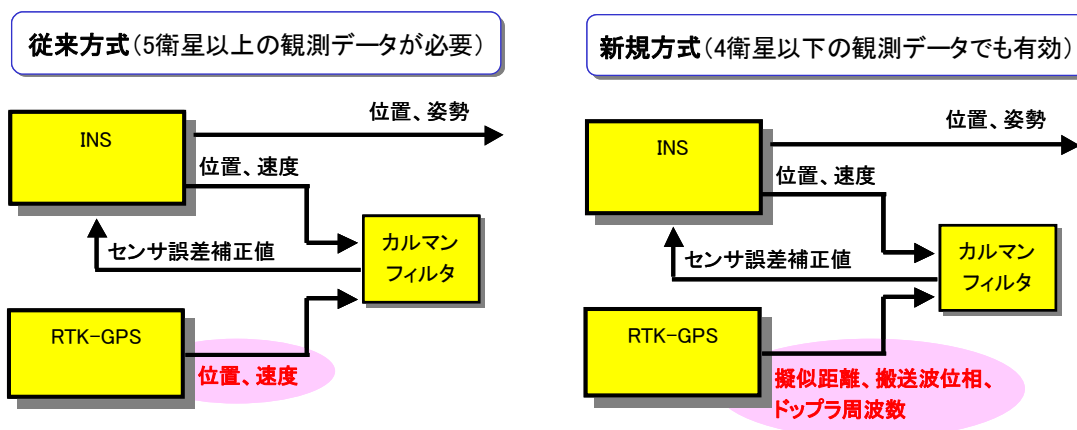


図-10 複合航法方式の違い

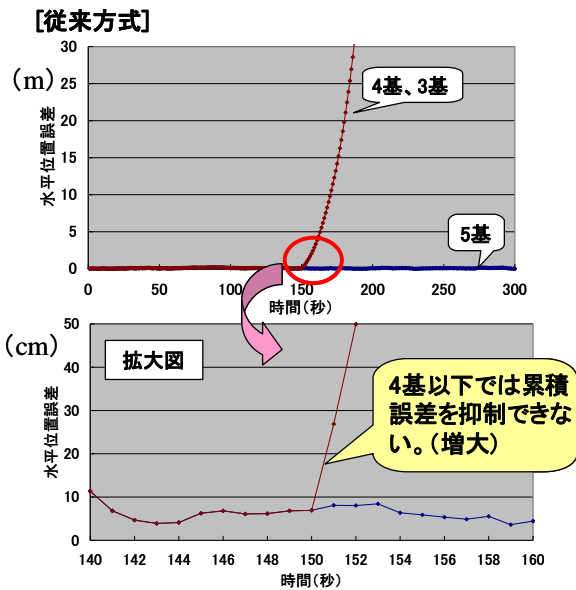


図-11 従来方法

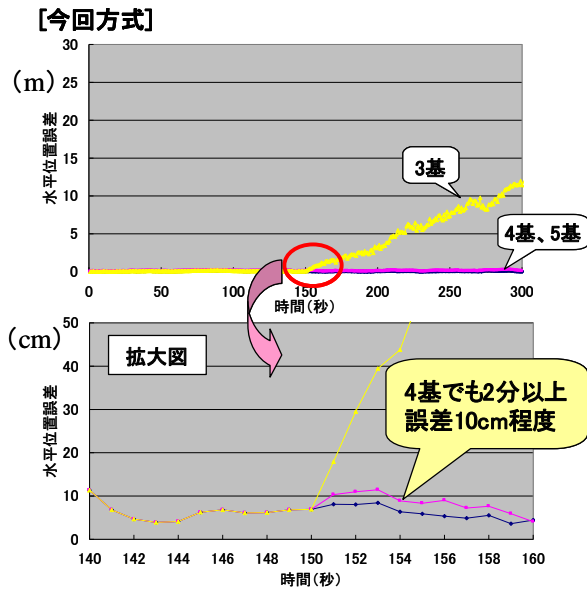


図-12 今回方法

5. まとめ

(1) 研究の成果

本研究の成果をまとめたものを、図-13に示す。  
 2012年から準天頂衛星や Galileo 衛星のサービスが開始され、地球を周回する測位衛星数が80基以上となり、我が国の都市部や山間部においても5衛星以上が常時可視できる場所が増えることになる。そのため、これまで2~3基のGPS衛星しか可視できなかった山間部にお



図-13 成果のまとめ

いても5基の衛星が可視できることになる。

今回開発したワンエポック RTK-GPS 技術は、海上、平野部、都市部及び山間部を問わず5基以上の衛星電波が受信できる場所であれば、建設機械だけでなく、道路作業車、配送トレーラ及び農業機械などの移動体にも適用が可能になるとと思われる。

しかしながらこのような次世代衛星利用環境においても、山間部の峡谷地や山岳に隣接する道路沿い、さらには高い樹木に電波が頻りに遮られる場所においては、移動体では必ずしも5衛星以上の衛星電波を安定して受信できるとは限らない。

慣性航法複合技術は、継続性、信頼性、完全性を向上させることで、

- ・比較的可視衛星数が限られる場所
- ・データの品質やシステムの信頼性を求められる分野
- ・3次元位置だけでなく方向と傾きが必要な分野
- ・リアルタイム制御(数十Hz以上)を必要とする分野

で利用できるため、建設機械、作業車両、鉄道、農業機械、自動車等の陸上移動体及び次世代の基盤空間情報の整備に広く適用されていくと期待される(図-14参照)。

(2) 今後の開発計画

本研究は、平成15年度から同19年度までの5カ年であり、昨年度有識者による中間評価を受け、研究の継続性が認められたところである。

準天頂衛星の打ち上げ計画については平成20年度から平成21年度に変更されたところであるが、平成19年度の研究取りまとめにむけ、高精度測位ソフトウェアの開発・評価・検証を行っていきたい。

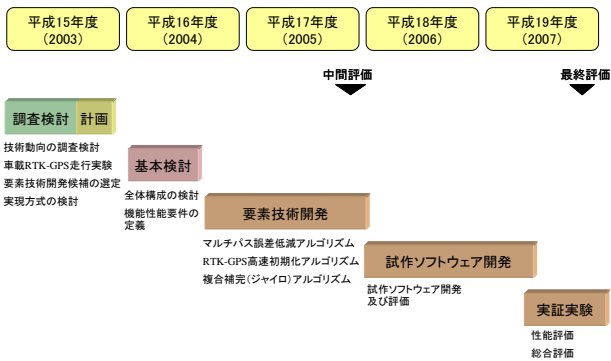
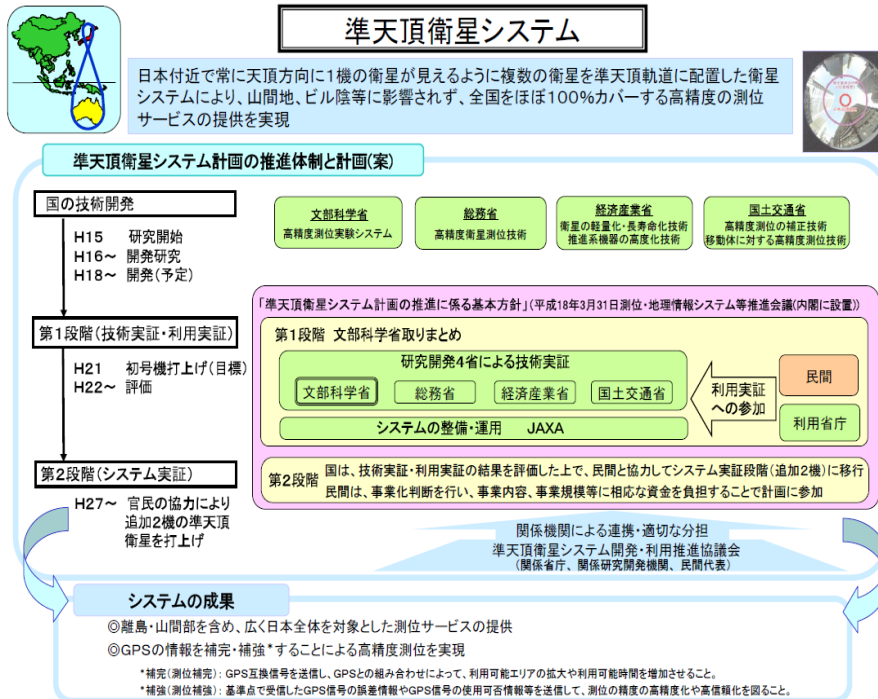


図-15 開発スケジュール

図-14 成果の活用イメージ

<参考>



2006年4月25日宇宙開発委員会資料より抜粋