

15. 情報化施工における準天頂衛星（みちびき）を用いた RTK 測位の精度検証について

（株）間組 技術研究所

○ 黒台 昌弘

1. はじめに

平成 19 年に施行された「地理空間情報活用推進基本法」に基づき平成 20 年に閣議決定された「地理空間情報活用推進基本計画」は、地理空間情報の総合的かつ計画的な施策の推進のための政府の基本的な計画である。

衛星測位の利用が国民生活の中に幅広く浸透している状況に鑑み、本計画の第一段として、我が国で初めて衛星測位を目的とする準天頂衛星「みちびき」が平成 22 年 9 月 11 日に(独)宇宙航空研究開発機構(以下、JAXA)により打ち上げられた。

準天頂衛星は日本のほぼ天頂を通る軌道を持つ衛星を複数機組み合わせた衛星で、常に 1 機の衛星を日本上空に配置することができる。衛星がほぼ真上に位置することで、山間部や都心部の高層ビル街など、測位を行うために必要な GNSS 衛星数が確保できない場所や時間帯においても、準天頂衛星の信号を加えることで高精度な測位を可能にするもので、米国が運用管理する GNSS 衛星の 1 つとして機能する「補完機能」と測位精度の向上を図る「補強機能」を具備している。

「みちびき」の打ち上げ成功を受けて、平成 23 年 1 月から(財)衛星測位利用推進センター(以下、SPAC)がとりまとめ機関となって、「みちびき」から送信される信号を用いた利用実証実験がスタートした。

この実験では、GNSS 補強信号と称される L1-SAIF 信号及び LEX 信号を用いた測位実験が実施される。L1-SAIF 信号は高速移動体向け信号であり、サブメーター級の測位精度が実現可能とされている。一方、LEX 信号はセンチメートル級の測位演算が可能で、測量等高精度測位が必要な分野への展開が期待されている。

利用実証実験では、JAXA/SPAC 間の協定の下で、SPAC が補強情報を生成し、JAXA がみちびきから L1-SAIF 信号及び LEX 信号を送信してユーザーが専用の受信機で受信し、測位補強の効果を利用面から確認することとなっている。

以上を踏まえ、日本建設機械施工協会（以下、JCMA)においても、LEX 信号を利用したセンチメートル級測位補強信号の情報化施工への活用可能性

を検証するため、JCMA 情報化施工委員会の下に、「みちびき利用実証ワーキンググループ」を設置して実証実験に参画したので、ワーキンググループを代表して筆者が本稿にて紹介する^{1) 2) 3)}。

なお、本稿に記載の内容（精度評価など）については、実証実験（平成 23 年 2 月）の結果を基にしたものであることを注記しておく。

また、本実験後の準天頂衛星に関する主な動きは次のようなものである。

宇宙基本法（平成 20 年）に基づき設置された宇宙開発戦略本部において議論された「実用準天頂衛星システム事業の推進の基本的な考え方」（平成 23 年 9 月 30 日閣議決定）においては、

- ①実用準天頂衛星システムの整備に可及的速やかに取り組む
- ②2010 年代後半を目途にまず 4 機体制を整備し、将来的には持続測位が可能となる 7 機体制を目指す
- ③実用準天頂衛星システムの開発・整備・運用は、準天頂衛星初号機みちびきの成果を活用するといったことが示されている。

さらには、先頃公表された「日本再生戦略」（平成 24 年 7 月 31 日閣議決定）においても、上記の考え方が明記されており、準天頂衛星「みちびき」を取り巻く環境は、これを活用する方向に変革がなされ、今後さらなる技術開発への期待が高まっている。

2. 実証実験の概要

2.1 みちびきを用いた RTK 測位について

情報化施工では、センチメートル級の高精度な位置情報に基づく RTK（リアルタイムキネマテック）測位が導入されている。この RTK 測位には、施工ヤード近傍にユーザーが独自に RTK 基準局を設置して地上系無線により位置補正データを配信するローカルな RTK 測位（以下、ローカル RTK）や、携帯電話網を活用して位置情報を配信するネットワーク型 RTK 測位がある。

準天頂衛星「みちびき」から送信される LEX 信号を用いたセンチメートル級の RTK 測位（以下、みちびき RTK）は、簡潔に言えば、ローカル RTK

における地上系無線やネットワーク型 RTK の携帯電話網に対して、位置補正データの通信手段を衛星放送とした測位手法であるということが出来る。

みちびき RTK のシステム構成を図-1 に示す⁴⁾。電子基準点観測データ収集ネットワーク、補強情報を生成するセンタシステム、準天頂衛星システム及び RTK 演算を行うユーザーシステムで構成される。なお、LEX 信号は、GNSS 測位信号と同じ周波数 (L 帯) であることから、信号受信アンテナを一体化できるというメリットがある。測位に必要な装置数が減じられることは作業の機動性において有利といえる。

また、前出の「考え方」に示されている準天頂衛星の複数機体制により、

- ・ 高精度測位値の安定的な取得
- ・ 測位結果の信頼性向上
- ・ 高精度測位が可能となる範囲の拡大

などが実現できるものと考えられる。

2.2 実証実験の目的

みちびき RTK の出現により、ユーザー側では、情報化施工における MC (マシンコントロール) や出来形測量などにおいて、RTK 測位手法の選択肢が増えることとなる。

ローカル RTK のような独自基準局の設置が不要となり、システムの簡素化に伴うコストダウンの可能性が考えられるとともにより高い精度が確保されれば、出来形管理への活用などにより建設工事での利用範囲が広がっていくものと予想される。

そこで、本ワーキンググループは、SPAC が主催する利用実証実験に参加し、国土交通省が進めている情報化施工への、みちびき RTK の適用可能性を実証確認することとした。具体的には次の 2 点である。

- ①みちびき RTK とローカル RTK との比較検証
定点において、みちびき RTK とローカル

RTK によるデータを取得し、そのデータ (X,Y,Z) の分布傾向を把握する。

- ②情報化施工機器 (建設機械) による精度検証と GNSS 出来形管理における管理精度の検証
ローカル RTK とみちびき RTK の各々を用いてブルドーザによる盛土の敷均しを行い、施工中の両者の RTK 測位データを比較するとともにトータルステーションによる敷均し出来形データと対比して、みちびき RTK の精度を確認する。

なお、RTK 処理においては、位置補正データと建設機械側で受信した GNSS データ間の、時刻同期やデータ出力周波数の問題を明確にしておく必要がある。

2.3 実験の諸元

(1) 日時

平成 23 年 2 月 7 日 (月) ~ 10 日 (木)

準備実測 : 7 日 13:00 ~ 9 日 12:00

実証試験 : 9 日 13:00 ~ 15:00

24 時間観測 : 9 日 16:00 ~ 10 日 16:00

(2) 場所

日本建設機械施工協会施工技術総合研究所 (静岡県富士市)

(3) 基準点等配置図 (図-2、写真-1、-2、-3 参照)

施工技術総合研究所内の実験ヤードのうち、図下方のコース 2 と 3 つの基準点を用いた。

(4) システム構成

- ①LEX 信号受信アンテナ及び受信機 (写真-4)

みちびきからの補強信号を受信する。

(SPAC から貸与)

- ②低速移動体端末 (写真-5)

LEX-R と操作用 (処理用) PC からなり、みちびき補強信号と GNSS 測位信号から位置データを算出し、モニター表示等を行うものである。

(SPAC から貸与)

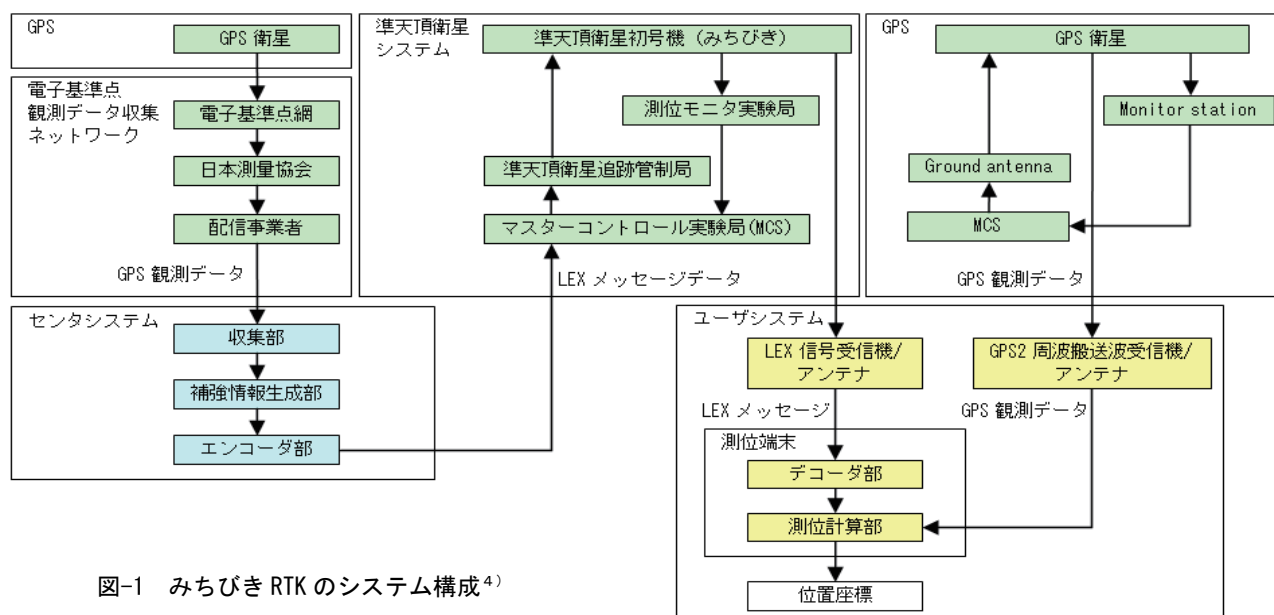


図-1 みちびき RTK のシステム構成⁴⁾

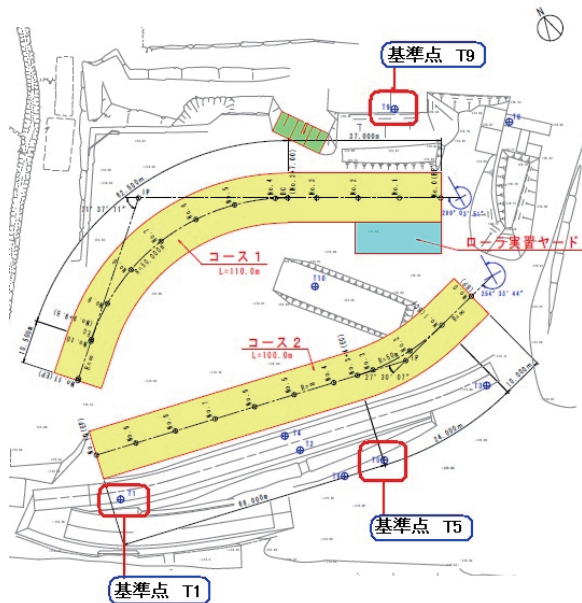


図-2 実験ヤード（基準点配置）



写真-1 実験ヤード（T5 から T9 方向を望む）

③制御データ変換システム（写真-6）

算出された位置データを、建設機械のコントロールボックスに入力可能なデータに変換するためのシステムである。

（実証実験用として開発）

3. 実証実験の結果

3.1 みちびき RTK とローカル RTK との比較検証

みちびき RTK について、RTK 演算の同期モード（1Hz）と非同期モード（5Hz）における位置データの傾向を確認した。

座標既知点である T1 と T9 におけるデータを図-3、図-4 に示す（図は FIX 解のみを表示）。非同期モードとした T1 では、X,Y 座標の標準偏差は 10mm を超える数値を示している。同期モードとした T9 では、Y 座標の標準偏差が 5mm と良好で

ある一方で、X 座標は 14mm となっている。また、図は割愛するが、T1、T9 とともに Z 座標は X,Y 座標よりも標準偏差は悪く、20～35mm を示している²⁾。

このことから、測位位置が変わっても、定点観測（静止観測）における精度に大差はないものと判断できる。

なお、図-3、図-4 において、各図基準点座標とみちびき RTK による座標値に差が認められるが、これは次の理由による。「みちびき」からの補強信号はネットワーク型 RTK のように電子基準点成果値やそのデータが基準となって生成されている（セミダブル差分補正等も関連する）。これに対して、実験ヤード内に配置された基準点は電子基準点に基づく測量がなされていないため、この相違が座標差として表れている。

図-5、図-6 には、建設機械を停止させた状態で、同時時間帯にみちびき RTK とローカル RTK を実施した際のデータ分布を示す（図は FIX 解のみを表示）。みちびき RTK では、X,Y 座標で 10mm 程度の標準偏差となっている。これに対して、ローカル RTK では、X,Y 座標で 5mm 以下の標準偏差となっている。



写真-2 基準点 T 9（左：LEX アンテナ、右：GNSS アンテナ）



写真-3 LEX 受信機等を搭載したブルドーザ（左：排土板上：GNSS アンテナ、右：キャビン上：LEX アンテナ）



写真-4 LEX 受信機



写真-5 低速移動体端末



写真-6 制御データ変換システム(右側の PC)

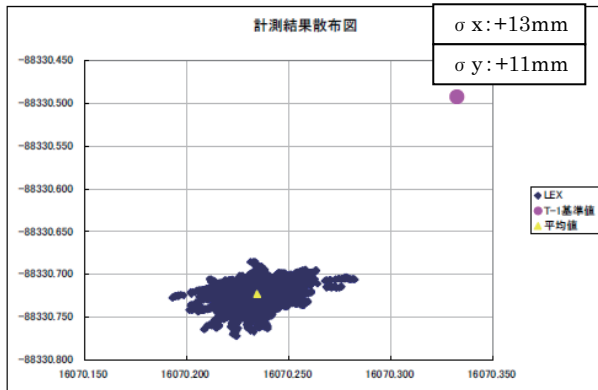


図-3 T1におけるみちびき RTK の結果(非同期、5Hz)

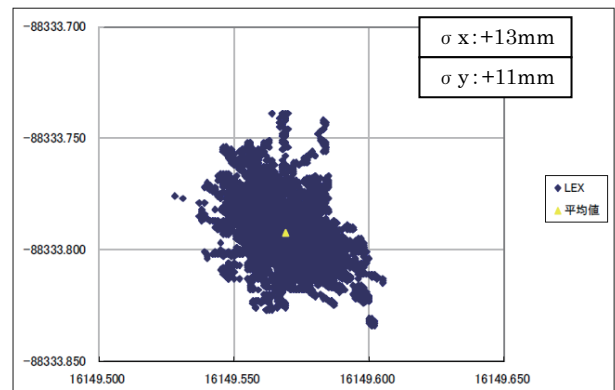


図-5 重機上でのみちびき RTK の結果(非同期、5Hz)

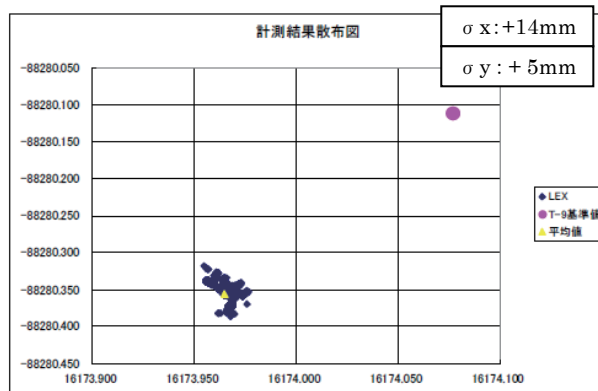


図-4 T9におけるみちびき RTK の結果(同期、1Hz)

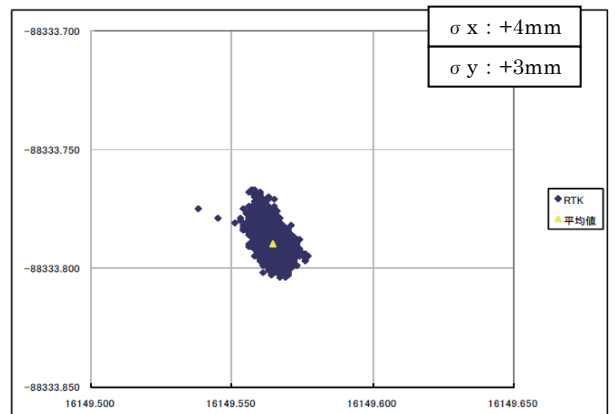


図-6 重機上でのローカル RTK の結果(非同期、10Hz)

ローカル RTK については、本実験では非常に良好な数値を示しており、みちびき RTK においても一般的な RTK 測位の精度であり、大きな問題点は見当たらない結果となっている。図は割愛したが、Z 座標についても同様な傾向であることを確認している²⁾。

図-7 に、連続約 24 時間、定点観測をした結果を示す。75%の割合で FIX 解が取得できていることが分かる。次に、データ推移の一部を図-8 に示す。

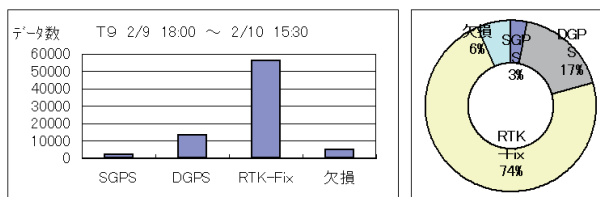


図-7 約 24 時間の観測におけるみちびき RTK の測位モードの割合

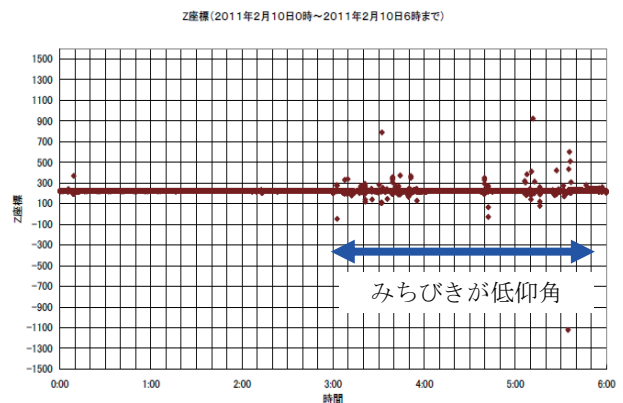


図-8 約 24 時間の観測のうち、早朝(みちびきが低高度)におけるみちびき RTK (Z 座標の推移)

みちびきの衛星高度(仰角)が低くなっても、LEX 信号を受信できている限りは、RTK 演算を実行していることが分かった。しかし、低仰角においてはデータのバラツキが顕著であり、正確な数値を示していないものと考えられる。一方で高仰角～天頂にかけては、低仰角である時間帯に比してデータのばらつきが少ないことが確認できたが、FIX 解が取得できない時間帯も存在している。

3.2 建設機械による精度検証と出来形管理精度の検証

本実験では、みちびき RTK とローカル RTK の各装置をブルドーザに搭載し、MC による道路盛土の敷均し作業を実際に行い、MC による作業後の盛土形状を TS 測量結果と比較する出来形精度検証を行った。MC に登録した 3 次元設計データでは、縦断勾配と横断勾配はともに 0 % と、平坦面での敷均し施工とした。

情報化施工に求められる施工精度や出来形管理精度については、国土交通省が取りまとめている「TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領(平成 24 年 3 月)」の記載が参考になる。ここにはセット間較差で、

水平 (x, y) ±20mm
垂直 (z) ±30mm

と記されている。

写真-7 にみちびき RTK による敷均し状況を示す。定性的な評価となるが、特段凸凹になっている場所もなく、これまで同様の性能で敷均しができていることがわかる。

表-1 と表-2 には、TS 出来形測量結果との Z 座標の対比を示す。0.072m や 0.316m といった特異値を除けば出来形の較差は 15～25mm となり、上記要領に記載の規定値を満足していることが分かる。このことから、出来形管理の実用上、問題のない数値が得られているものと判断できる。

図-9 には、ブルドーザ走行中のみちびき RTK で取得できた出来形データのうち、30 分間の Z 座標と測位フラグの推移を示している。図-9 の上段が Z 座標の推移、下段が測位フラグの変化である。ローカル RTK の FIX 率が 100%であった²⁾こと(図は割愛)に対して、みちびき RTK は 64%に留まっている。みちびき RTK では FIX であるにも関わらず、設計高を満足できない時間帯(10:25 付近)もあり、RTK 解の信頼性についての検証はさらに必要であると思われる。

4. 実証実験結果のまとめと課題

4.1 まとめ

本実証実験の結果は以下のとおりである。

- ①みちびき RTK での定点観測は、FIX 解が得られている場合、(X,Y,Z)の標準偏差はローカル RTK と比較しても遜色のない精度が得られた。

また、「TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領(平成 24 年 3 月)」に示された水平精度を満足している。

- ②同期モード (1 Hz) と非同期モード (5 Hz) に大きな差は認められず、優劣の評価は難しい。
- ③みちびき RTK では、安定して FIX 解が得られない状況が散見された。LEX 信号の品質の劣化、電波受信障害、RTK 演算ミスなど想定されるが、この原因は実験期間中には特定できなかった。
- ④24 時間定点観測では FIX 解データが 75% 占めているが、ノイズが少ないと思われる天頂付近からの補強信号を受信した場合においても RTK データのばらつきがみられる時間帯が存在している。逆に、準天頂衛星が比較的低仰角に位置する場合でも、FIX 解データが得られる場合がある。
- ⑤GNSS による出来形管理においては、ブルドーザ走行時の RTK データと TS 成果の比較から、みちびき RTK を導入しても、補強信号を受信できていれば精度上の問題はないと考えられる。また、「TS・GNSS を用いた盛土の締固め管理要領(平成 24 年 3 月)」に示された垂直精度を満足している。

表-1 ブレードオフセット - 5mm における MC (みちびき RTK) と TS 出来形比較

設計高 (m)	オフセット (m)	測定 ポイント	設計-オフセット 高さ A(m)	TS-Z (m)	差 A-Z(m)
175.000	-0.005	1	174.995	175.012	-0.017
		2	174.995	175.008	-0.013
		3	174.995	174.998	-0.003
		4	174.995	175.008	-0.013
		5	174.995	174.991	0.004
		6	174.995	174.679	0.316

表-2 ブレードオフセット - 25mm における MC (みちびき RTK) と TS 出来形比較

設計高 (m)	オフセット (m)	測定 ポイント	設計-オフセット 高さ A(m)	TS-Z (m)	差 A-Z(m)
175.000	-0.025	1	174.975	174.997	-0.022
		2	174.975	175.000	-0.025
		3	174.975	175.047	-0.072
		4	174.975	174.998	-0.023



写真-7 みちびき RTK による敷均し状況

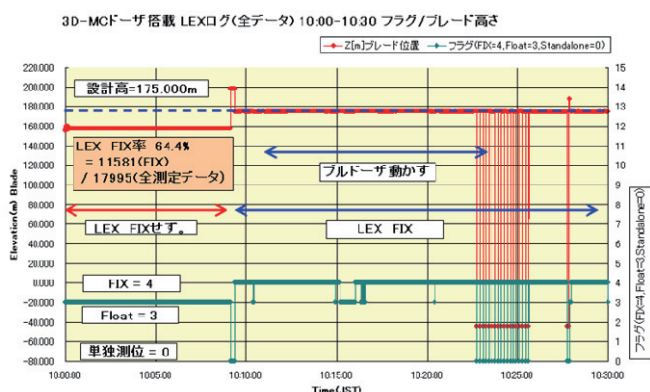


図-9 ブルドーザ走行時のZ座標と測位フラグの推移
(みちびき RTK)

4.2 課題

本実験で確認できた課題は以下のとおりである。

(1) 精度的な課題

① みちびき RTK データの周波数

ローカル RTK 方式の MC で使用している測位データの出力周波数は一般的には 10Hz である。みちびき RTK を利用する場合は本実験で利用した装置は 1Hz であり、高い周波数側に合わせる必要がある。準天頂衛星の補強信号の送信出力周波数にも関連するものであり、今後のシステム開発や装置改良に期待したい。

② みちびき RTK データの品質

情報化施工において建設機械の位置を連続的に計測する場合、安定した補強信号の受信とともに RTK 演算の正確性が重要である。そのためにも 4.1③項に示した補強信号の品質劣化を防止し、安定的に高品質な補強信号を衛星から送信できる仕組みへの改善を強く要望したい。

(2) コスト的な課題

① 装置構成

準天頂衛星からの補強信号と GNSS 衛星からの測位信号は同じ周波数帯での送信となっているので、受信アンテナの一体化が実現できる。また、本実験で利用した補強信号受信に関わる装置群は試験用ということもあり、サイズも大きく重いものであった。今後、これらのコンパクト化や軽量化さらには、GNSS 受信機との一体化といった装置改良にも期待したい。

② 通信料金体系

実用化段階における LEX 信号の利用料金体系が現時点では不確定であるが、ローカル RTK 方式においては、RTK 基準局と地上系無線の設置費用との対比が、ネットワーク型 RTK においては、配信事業者から課金される補正データサービス料と通信費用との対比が今後詳細に実施される必要がある。

5. おわりに

準天頂衛星「みちびき」の信号を受信して施工機械を実際に制御したのは、本実験がおそらく初めてではないだろうか。そのため、施工関係者の関心は高く、実験期間中に開催した見学会には多くの参加者が集合した。

「みちびき」の打ち上げから約2年が経過し、SPACホームページなどに公表されている様々な分野での利用実証実験の結果も良好なようである。将来の準天頂衛星の構想も明確な工程表として示されることとなり、みちびき RTK の実用化への期待は高まるどころである。

今回の実証実験により、いくつかの課題が浮き彫りになったがこれらの課題解決は十分可能であろう。エンドユーザーたる施工関係者からもきちんとニーズを声高に叫び、来るべき「みちびき」主導の測位の時代に向けて、情報化施工システムにも改良を重ねていきたいと考える。

最後に、衛星運用を担うJAXA殿や実験を統括するSPAC殿には実験実施の支援をいただいた。また、今回の実験にあたり、多くの関係者の皆様にもご協力をいただいた。この場をお借りして謝意を表します。

参考文献

- 1) 白鳥昭浩: 準天頂衛星初号機みちびきの情報化施工への活用可能性に関する実証実験報告, 建設の施工企画, No.737, pp.79-81, 2011
- 2) 実験報告書: J CMA公式サイトより
<http://www.jcmanet.or.jp/new/2011/20110610.pdf>
- 3) 黒台昌弘: 準天頂衛星 (みちびき) の民間利用実証実験報告 情報化施工機器による精度検証およびGNSS出来形管理精度検証について, JACIC 情報, Vol.27, No.2, pp.60-65, 2012
- 4) 齋藤ら: 「みちびき」を利用したセンチメートル級測位補強システムの開発, 第54回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2010

JCMAワーキンググループメンバー (順不同)

白鳥昭浩 (独)土木研究所 (元(社)日本建設機械化協会)
増田 稔 測位衛星技術(株) (元東亜建設工業(株))
神田俊彦 (株)小松製作所
村本英一 (株)小松製作所
馬込亨志 (株)小松製作所
神庭浩二 西尾レントオール(株)
小栗賢一 西尾レントオール(株)
竹内幸弘 (株)トプコン
神崎政之 日立造船(株)
神山浩司 (株)ジャストプランニングシステム
浅川健太郎 (有)キットコーポレーション
黒台昌弘 (株)間組技術研究所