



エアポートシュードライト

須賀 秀一（(株) 東芝 社会インフラシステム社）

shuichi.suga@toshiba.co.jp

角田 寛人（(株) 東芝 社会インフラシステム社）

hiroto.tsunoda@toshiba.co.jp

藤井 直樹（独立行政法人電子航法研究所）

fujii@enri.go.jp

福島荘之介（独立行政法人電子航法研究所）

fks442@enri.go.jp

齊藤 眞二（独立行政法人電子航法研究所）

saitoh@enri.go.jp

航空機が計器を使用して空港に着陸する次世代の航空航法として、航空機の着陸にGPS（Global Positioning System）衛星を使用した方式をICAO（International Civil Aviation Organization）で検討している。この方式の1つに、狭い地域を対象としたGBAS（Ground Based Augmentation System）がある。エアポートシュードライト（APL：Airport Pseudolite）は、GBASの要素として検討されている。エアポートシュードライトは、地上に設置したアンテナから、GPS衛星と同様な信号を放送するものであり、GPS衛星のみによるディファレンシャル測位では達成が難しいより精度の高い精密進入を補強することを目的としている。エアポートシュードライトの開発は、現在も諸外国で行われている。日本では航空振興財団が中心となって開発を行い、2001年度に航空振興財団と電子航法研究所が共同でフライト試験を仙台空港で行った。本稿では、シュードライト一般の技術的解説、エアポートシュードライトの構成、フライト試験結果について説明を行う。

シュードライト開発の背景

シュードライト（PL：Pseudolite）は、GPS衛星と同様な信号を地上から放送する装置のことである。このシュードライトという言葉は、擬似を表すPseudoと衛星を表すSatelliteとの合成語で、1984年スタンフォード大学のDale KleinとBrad Parkinsonにより初めて使われた。

地上に、GPS衛星と同様な機能を持つ擬似衛星を置くことにより、ある状況で利用できるGPS衛星の配置により生じる精度の劣化、高層ビルなどの障害物により可視GPS衛星数の減少に伴う精度の劣化を少なくし、安定的な位置サービスを提供することが可能となる。

民間航空用に使用されるシュードライトは、エアポートシュードライト（APL：Airport Pseudolite）と呼ばれている。航空機がより精度よく着陸するためには、地上・海上で必要とされるよりもさらに安定した精度が要求され

る。シュードライトはこの要求に寄与できるものと考えられている。

シュードライトは、1970年に実験で使用され、当初はGT（Ground Transmitter）と呼ばれGPS衛星を補強するために使われた。信号強度を調整するため4つのGTから適当な距離にユーザ装置を置き、それぞれ異なる擬似雑音符号（PRN：Pseudo Random Noise code）を使用して実験を行った¹⁾。各GPS衛星信号およびGT信号は、それぞれ異なる擬似雑音符号により2相変調され、ユーザ装置は、送信された信号と同じ符号を持つ信号のみを選択的に受信することができる。

1984年に初めてシュードライトを民間航空へ使用しようという提案がなされた。その際、“ニアファー（Near Far）”問題が注目された。ニアファー問題とは、シュードライト送信アンテナに近づくにつれ、シュードライト信号強度が強くなることによりGPS信号を受信できなくなることである。このニアファー問題を解決する方法と

して、①パルス化、②周波数オフセット、③ワイドバンド(高いチップレート)の使用などが考えられる。チップレートとは、1秒間のビット数を示し、擬似雑音符号を発生させる基準クロック周波数と同じである。①の方法は、シュードライト信号が出ている間のみGPS信号に影響が出る方法で、信号が出ている時間が少なければ少ないほどニアファア問題が改善される。②の方法には、GPS信号と同じバンド内(L1: 1565-1585MHz, L2: 1217-1237MHz)で周波数シフトする方法と、まったく別の周波数を選択する方法が考えられる。GPS衛星信号は、現在は2種類あり民間で一般に使用されている周波数はL1周波数である。GPS信号とまったく違うバンドを使用する方法は、ニアファア問題を完全になくすことができる。しかし、受信機に新しい受信回路を追加し、周波数間のバイアスを考慮する必要がある。③の方法は、民間で一般に使われているC/Aコードのチップレート(1.023MHz, 繰り返し周期1ms)よりも高いチップレート(Pコードの場合、10.23MHz, 繰り返し周期1週間)を使用することにより、信号がより広いバンドに拡散する。このことにより、C/Aコードで使用しているバンド内にあるシュードライト信号量が減少し、ニアファア問題が改善される。さらに、高いチップレートを使うことにより、C/Aコードの場合よりもマルチパスの影響を受けにくく、精度も良くなる。Pコードは、GPSの場合L1およびL2周波数に乗っている。

1986年には、RTCM(Radio Technical Commission for Maritime Services)が、シュードライトの信号構造を提案し、1990年には、これに対する修正がなされている²⁾。

我が国では、1996年7月から8月にかけて、GSP周波数バンド外(1624.61MHz)に周波数シフトし、RTCM方式に基づくシュードライトを用いた小型自動着陸実験(ALFLEX: Automatic Landing Flight Experiment)が行われた³⁾。

そのほかに、Stanford大学が行ったIntegrity Beacons方式⁴⁾がある。この方式は、2つのシュードライトを空港外に置き、2つのシュードライトの上空を航空機が通過した際に、搬送波位相のアンビギュイティを決定する方法である。

米国では、航空機が計器を使用して空港に着陸する次世代の航空航法として、狭い地域を対象とし、GPS単独で達成できない精密進入を補強するLAAS(Local Area Augmentation System)の開発を行っている。RTCA(Requirements and Technical Concepts for Aviation)で具体的な検討がなされている。ICAO(International Civil Aviation Organization)では、この方式をGBAS(Ground Based Augmentation System)と呼んでいる。RTCAおよびICAOにおいて、現在まとめられた規格よりもさらに精度の良い精密進入で、システムを補強するために、航空機用のシュ

ードライトの検討がなされている。ICAOよりも先行して、RTCAにてエアポートシュードライトについての具体的な信号構造が検討された^{5), 6)}。

エアポートシュードライトの開発は、日本、米国、ドイツで行われている。日本では航空振興財団によりRTCAの規格に基づき開発を行い、2001年度に航空振興財団と電子航法研究所との共同でフライト試験を仙台空港で行った。

● シュードライト(PL)の測位方式

測位方法

測位を行う場合、GPS衛星から出た時刻と地表で受信した時刻との差から求められる距離(擬似距離)を使う。この擬似距離には、受信機の時刻とGPSの時刻で時計の進み方の違い(時刻誤差)が含まれている。そのため、位置を決めるための変数は、時刻誤差を含めて4つある。GPS衛星のみを使って測位を行う場合、最低4つの衛星が観測されていなければならない。しかし、地上にシュードライトが1つある場合には、GPS衛星が3つあれば位置の計算を行うことができるはずである。この場合、地上にあるシュードライトとGPS衛星との時刻誤差がないことが必要である。

擬似距離には、時刻誤差の他に信号が受信機まで到達する間に被る誤差成分が含まれている。GPS衛星の場合は、電離層と大気による伝播遅延量、マルチパスによる効果がそうであり、シュードライトの場合は、大気による伝播遅延量、マルチパスによる効果が擬似距離に含まれる。これらの誤差成分を補正することにより、より良い精度で測位を行うことができる。

GPS衛星とシュードライトの擬似距離に対し、それぞれ誤差の補正を行った後に、最小二乗法を用いて測位計算を行うことができる⁷⁾。

シュードライトの有効範囲

シュードライトの有効範囲は、用途により異なる。有効範囲を10NM(1NM=1.852Km)とした場合、シュードライトから10NMでGPS衛星信号レベルと同レベルになるようシュードライトの送信出力を設定する。エアポートシュードライトの場合について、表-1に回線設計値を示す。この場合、尖頭電力として33dBm(2W)が必要となる。有効範囲が、エアポートシュードライトほど必要とされない場合には、送信出力を下げる事ができる。

ニアファア(Near Far)問題

シュードライトを考える場合に最も重要な問題の1つである。この問題を回避するため、周波数のシフト、パ

| 項目 | 値 | 備考 |
|-------------|---------------------|------------------|
| 送信機出力電力(尖頭) | Pp 33 dBm | |
| 送信給電損失 | Pl 3 dB | RG-9B/U 10m相当 |
| 送信アンテナ利得 | Gt 6 dBi | |
| 送信尖頭電力 | Pt 36.0 dBm | |
| 自由空間損失 | Γ_p 121.7 dB | 10nm:1575.42 MHz |
| 受信アンテナ利得 | Gr -10 dB | 偏波ロスを含む |
| パルスデューティ損失 | ζ 31.3 dB | D = 2.73% |
| 受信電力(平均) | Pr -127 dBm | |
| 必要受信電力 | Smin -133 dBm | |
| 回線マージン | M 6 dB | |

表-1 シュードライト回線設計

| | |
|----------------|--|
| キャリア周波数 | 1575.42MHz (GPS L1) |
| スプリアス放射 | 40dB以下 (全周波数バンド, 無変調キャリア電力にて) |
| 変調 | 2相変調 (BPSK) . データ送信レート:50bps チップレート:10.23Mチップ/秒 |
| 信号スペクトラム | 中心周波数:1575.42MHz 帯域: 41MHz |
| キャリア周波数安定度 | キャリア周波数の短期安定度: $\leq 5 \times 10^{-11}$ (ドップラー効果を除く, 1~10秒間にて) |
| 偏波面 | 垂直偏波 |
| パルスシーケンスの長さ | 1sec |
| パルスシーケンスクロック | 140 APLコードチップ (1パルス内) |
| パルス幅 | 140APLコードチップ (約 13.685 μ sec) |
| 1秒間のパルス数 | 1997 |
| 平均パルスデューティサイクル | (1997 \times 140)/10,230,000=0.02733 |

表-2 エアポートシュードライト信号特性⁵⁾

ルス化, ワイドバンド信号などを考慮する必要がある。RTCMでは, C/Aコードを使用し, 1/11のデューティサイクルによるパルス化の方法が採用されている。一方, RTCAでは, Pコードを使用し, ランダムパルス周期によるデューティサイクル2.73%としている。この低デューティサイクルとPコードによりニアファア問題に対処している。

複数シュードライト

複数のシュードライトを使うために考慮しなければならないことは, ①GPSへの干渉, ②シュードライト同士の干渉, ③シュードライトに割り当てるコードなどである。さらに, ディファレンシャル補正を作成するため, 補正情報を作る基準局は, すべてのシュードライト信号を受信できなければならない。

①, ②の条件を満足させるため, エアポートシュードライトの場合は, ランダムなパルス化およびPコードを使用している。エアポートシュードライトが4つある場合について, パルス同士の干渉によるC/N₀劣化は, 0.085dBと許容できるものである。

シュードライトに割り当てられるPRNコードに関し, C/Aコードの場合PRN34, 35, 36, 37(34と37は同一コード)を使用することができる⁷⁾。一方, Pコードを使用する場合には, 同じPRNコードでPコードの始まりの時刻を1分単位で遅らせることにより72のコードを割り当てることが可能である。

シュードライト設置

シュードライトの設置を行う場合, 特に考慮しなければならないことは, 障害物とマルチパスである。シュードライト信号が障害物により遮蔽されず, 信号がユーザ

に到達し, マルチパスの影響を軽減するように配置することである。

マルチパスの影響を軽減するため, エアポートシュードライトでは, 地上からの反射率が小さい垂直偏波を使用し, 低仰角でシャープカットなアンテナパターンを採用している。

エアポートシュードライト (APL)

エアポートシュードライトの信号規格は, RTCA SC-159 委員会で議論され, LAAS ICD⁵⁾のAppendix DおよびEに記載されている。エアポートシュードライトを使用することにより, GPS衛星の配置による測位精度の劣化を抑えることができ, システムの稼働率が向上するものと考えられている。

信号特性・データフォーマット

エアポートシュードライトの信号は, GPSと同じL1周波数のPコードを使用している。エアポートシュードライト信号特性を表-2に示す。

エアポートシュードライトから放送されるデータは, 50bpsのレートで放送される25ビットからなる構造をしている。図-1に示すように, 14ビットのコードディレイと11個の1からなっている。コードディレイは, エアポートシュードライトコードの遅延量を示している。

エアポートシュードライトの問題と解決策

エアポートシュードライトの場合は, ニアファア問題, マルチパスなどの問題に加え, バイアス問題がある。これは, 送信電力が比較的大きいことから受信機入力信号が飽和してしまうため, 擬似距離にバイアスが生じる現

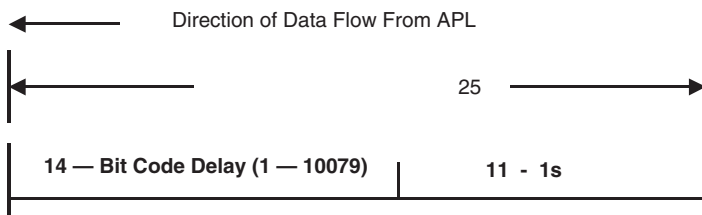


図-1 エアポートシュードライトコードデータフォーマット

| 項目 | 標準偏差 [m] | 備考 |
|-------------------------|----------|---------------|
| 総合 GPS 擬似距離誤差 | 0.539 | |
| エアポートシュードライト 擬似距離誤差 | 0.590 | |
| 補正後のエアポートシュードライト 擬似距離誤差 | 0.244 | |
| PRN 22 擬似距離誤差 | 0.173 | EL=70 degrees |
| PRN 13 擬似距離誤差 | 0.743 | EL=20 degrees |

表-3 擬似距離残留誤差

象と推測され、受信機のダイナミックレンジを大きくするなどの方法により対処できるものと考えられている。

ニアファー問題およびマルチパスに関する対処策はすでに述べた通りである。

実験用エアポートシュードライト特性

エアポートシュードライトは、C/Aコードも生成することができる。このC/Aコードは、Pコード信号にロックするためのハンドオーバーワード (HOW) を含んでいる。

GPS受信機は、GPS信号とエアポートシュードライト信号を受信できるよう、NovAtel社製MillenniumおよびBeeline受信機のファームウェアを改造し、C/AコードからPコードへ乗り移る (C/Aハンドオーバ) 機能および直接Pコードにロックする (ダイレクトP) 機能を持っている。

エアポートシュードライト用アンテナは、水平面から仰角3度方向で6dBi (dBiとは、等方性アンテナ基準の利得を表す単位) の利得を持つ垂直偏波のアレイアンテナである。

フライト試験結果

飛行試験は第1回目を2001年12月に第2回目を2002年1月の2回に分けて行った。第1回目と2回目は、エアポートシュードライト空中線を異なる場所に設置した。

精度を評価するための基準として、航空機 (ビーチクラフト 99) に搭載した基準GPS受信機によるKinematic測位結果を使用した。また、航空機に搭載したGPS/APL受信機の基準クロックとしてルビジウム基準クロックを使用した。これは、クロックによるドリフトを抑え擬似距離の評価を容易にするためのものである。ディファレンシャル基準局も、解析を容易にするため、基準クロック

としてセシウム基準クロックを使用した。解析はすべてオフラインで行った。

2002年1月24日に行ったフライト試験結果をもとに説明を行う。

ディファレンシャルGPS擬似距離残留誤差

擬似距離に対するディファレンシャル補正後の残留誤差を表-3に示す。

図-2に残留誤差を滑走路末端からの距離に対してプロットしてある。図中の点は、GPSに対応し、○はエアポートシュードライトに対応している。ひし形は、各時間のGPS残留誤差の平均を示している。

エアポートシュードライトの残留誤差の分布がGPS衛星の誤差分布の中にあることが分かり、距離に対して傾きがある。この傾きが、受信機入力信号強度の変化に伴うバイアスである。この状態の、エアポートシュードライト擬似距離の残留誤差の標準偏差は、0.59mであり、PRN13よりも良いことが分かる。PRN13は、比較的low仰角の衛星である。

エアポートシュードライトの位相は、信号強度が20dB変化した場合でも2cm程度しか変化しない⁸⁾。そこで、バイアス効果とバイアス補正後のエアポートシュードライト擬似距離残留誤差を推定するため、擬似距離から位相を引いた値に対して直線近似を行いバイアス効果を補正する。図-3に擬似距離一位相を示す。横軸は、滑走路末端からの距離を示し、上図が擬似距離一位相を示している。下図がそのときのC/N₀と高度プロファイルを示している。この図から、バイアスが-0.344m/NMの変化を示し、補正後のエアポートシュードライト擬似距離残留誤差の標準偏差が、0.244mであることが分かる。

ニアファー問題

エアポートシュードライト信号によるGPS衛星信号へ

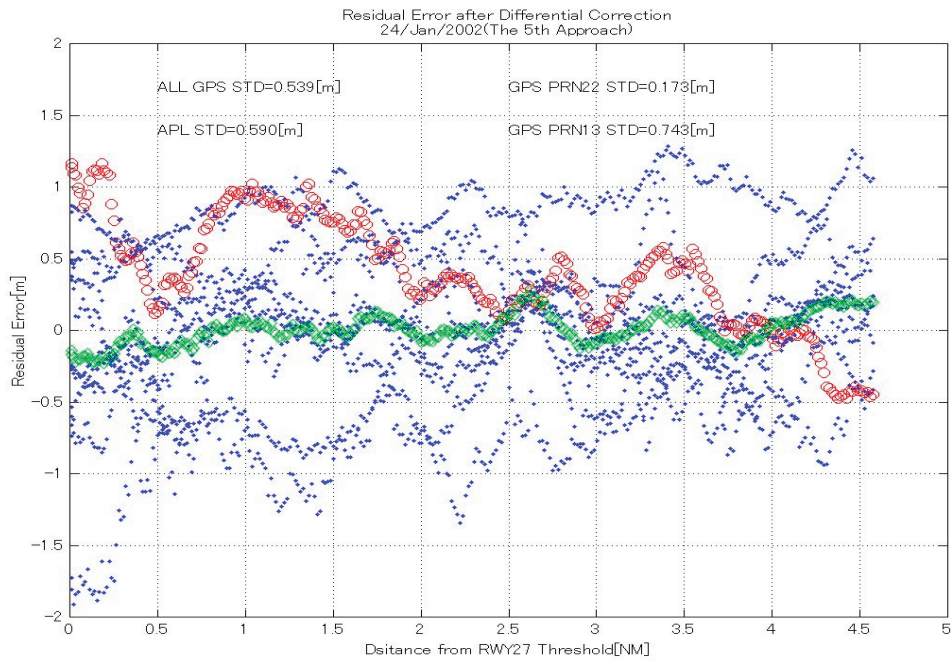


図-2 ディファレンシャル測位後の残留誤差

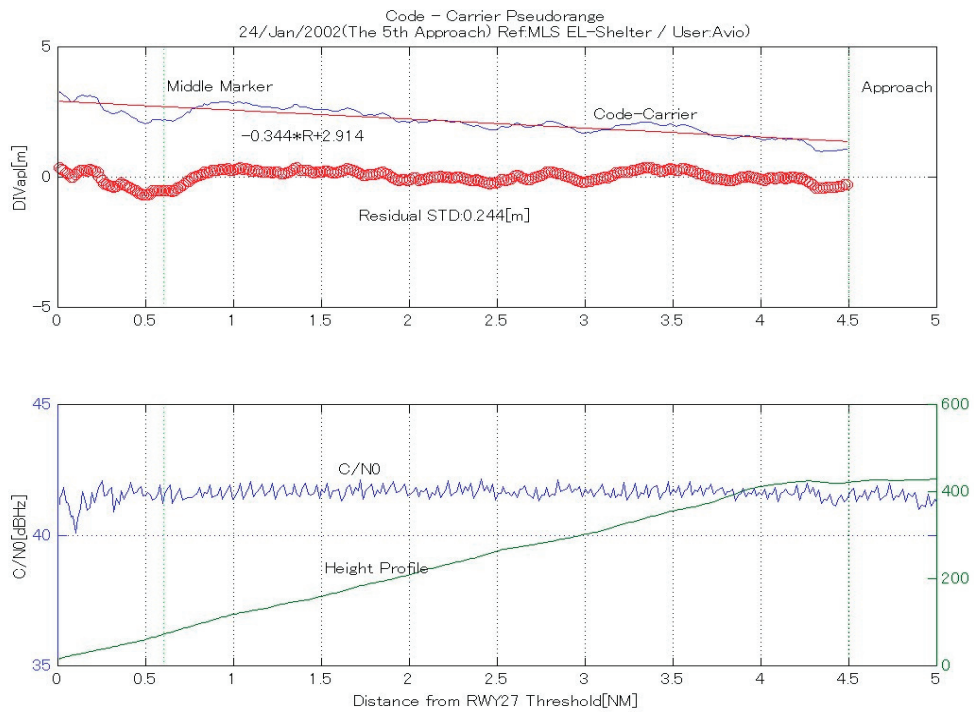


図-3 擬似距離一位相距離

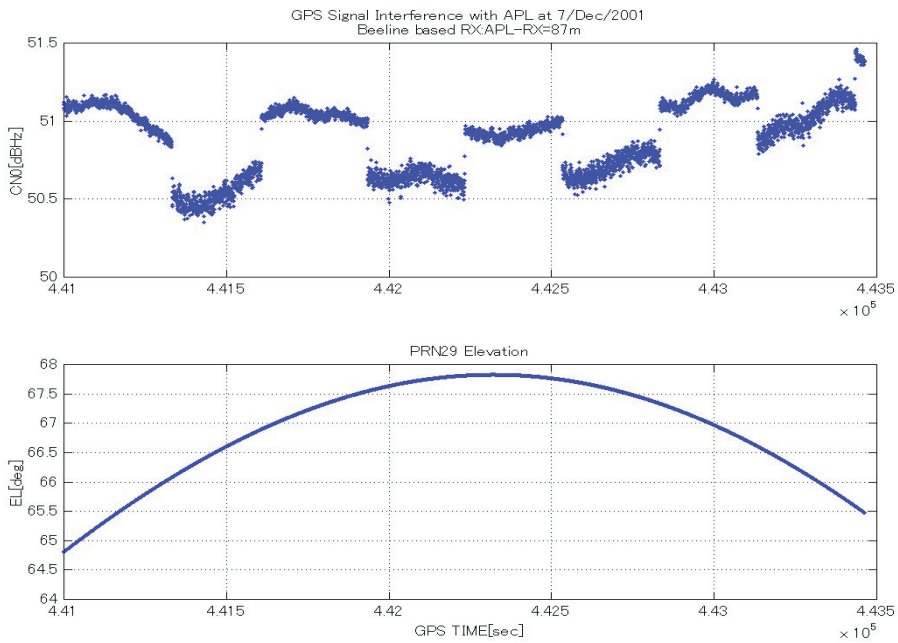


図-4 GPS衛星信号への干渉（ニアファー問題）

| | エアポートシュードライトなし | | 1エアポートシュードライト | |
|--------|----------------|----------|---------------|----------|
| | 平均 [m] | 標準偏差 [m] | 平均 [m] | 標準偏差 [m] |
| 滑走路方向 | -0.383 | 0.517 | -0.194 | 0.331 |
| 滑走路横方向 | 0.223 | 1.133 | 0.393 | 1.195 |
| 垂直方向 | -0.098 | 1.500 | 0.544 | 0.670 |

表-4 エアポートシュードライトあり／なしの場合のディファレンシャル測位結果

の干渉効果を調べるため、エアポートシュードライトアンテナから87m離れた場所で、エアポートシュードライト信号とGPS信号の受信を行った。エアポートシュードライト信号のオン・オフを繰り返しGPS衛星信号のC/N0の変化を測定した。図-4の上図はC/N0の様子を、下図はPRN29衛星の仰角を示している。

この結果から、87mしか離れていない場所であっても、GPS衛星のC/N0の劣化が0.5dB程度であることが分かる。

ディファレンシャル測位結果

オフラインで航空機に搭載した受信機データに対するディファレンシャル測位を行った結果を表-4に示す。

擬似距離に対するスムージングは、受信機内部の機能を使用している（時定数10秒）。垂直方向の測位精度が向上しており、エアポートシュードライトなしの場合 $|\mu| + 2\sigma = 3.098\text{m}$ であるのに対し、エアポートシュードライトがある場合 $|\mu| + 2\sigma = 1.884\text{m}$ になっている。図-5に結果を示す。

今後の予定

エアポートシュードライトを使用したフライト試験結果から、垂直方向の精度が向上することが分かった。また、デューティサイクル2.733%という低いレートなどによりニアファー問題が解決されている。しかしながら、エアポートシュードライト信号強度の変化に伴うバイアス問題、マルチパスの影響を小さくするための設置条件などさらに検討を行う必要がある。

バイアス問題に対処するため、受信機信号入力部の改造を行い評価することが今後の課題である。

謝辞 エアポートシュードライトは日本財団の助成により航空振興財団が開発を行った。フライト試験は航空振興財団および電子航法研究所との共同研究で実施され、この事業は空港整備環境協会の助成を受けて実施された。ご尽力いただいた航空振興財団足立彌八郎事業部長、適切なアドバイスをいただいた「地上擬似衛星を用

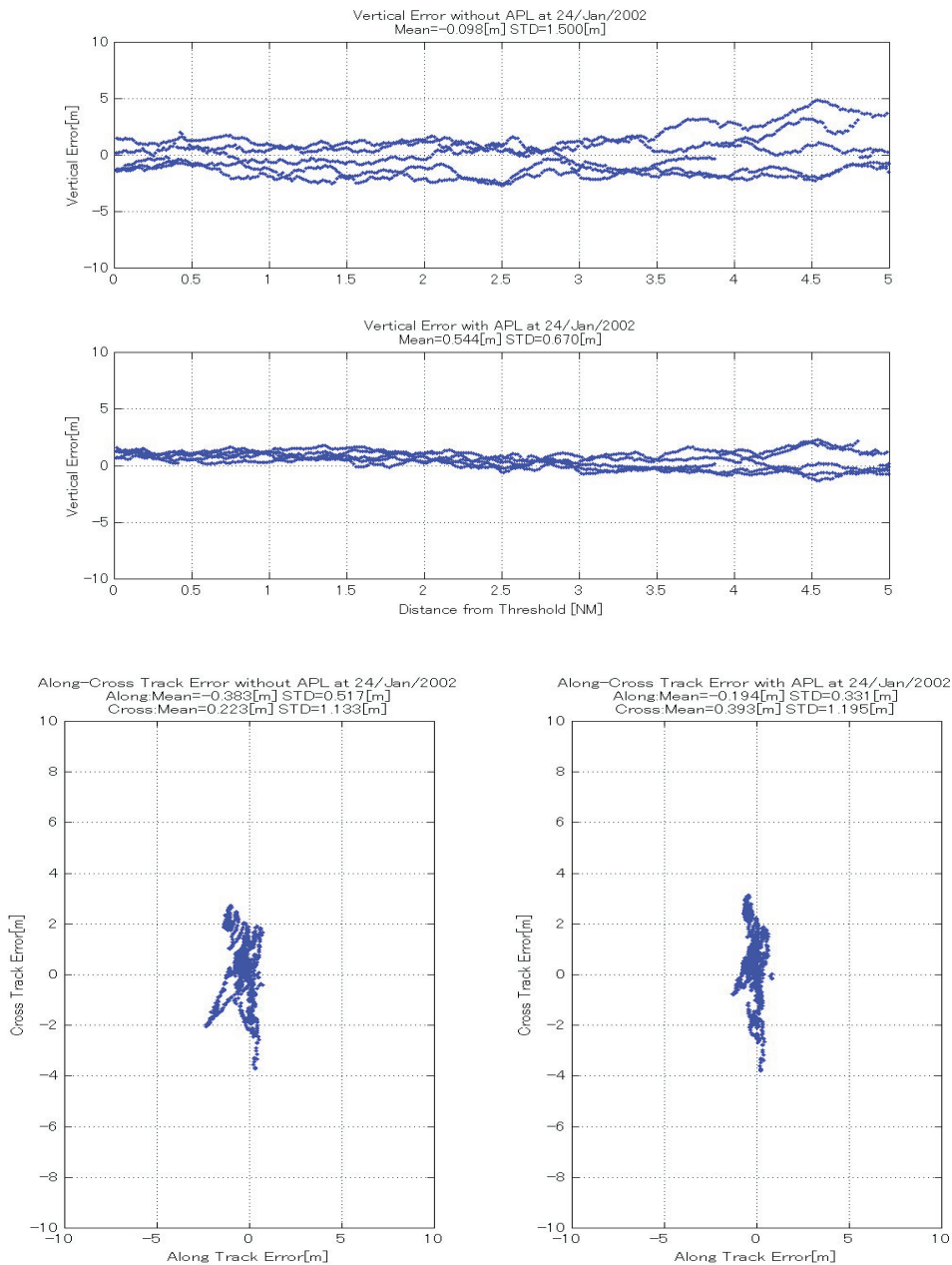


図-5 ディファレンシャル測位結果

いた精密進入援助システムの開発」委員長水町守志芝浦工大教授を初めとする委員各位メンバ、エアポートシュードライトアンテナの設置等に際しご協力いただいた、国土交通省東京航空局仙台空港事務所、電子航法研究所岩沼分室の関係者に感謝します。

参考文献

- 1) Elrod, B.D. and Van Dierendonck, A.J.: Pseudolites, Global Positioning System: Theory and Applications, Vol.II, pp.51-79, AIAA (1996).
- 2) Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM Recommended Standards for Differential Navstar GPS Services, Ver.2.0, RTCM Special Committee No.104 (1990).
- 3) 張替正敏, 松本秀一他: シュードライト方式 DGPS 着陸航法のシステム設計. 日本航空宇宙学会誌, Vol.47, No.542 (1999).
- 4) Cohen, C.E., Pervan, B.S. and Cobb, H.S.: Precision Landing of Aircraft Using Integrity

Beacons, Global Positioning System: Theory and Applications, Vol.II, pp.427-459, AIAA (1996).

- 5) RTCA SC-159, GNSS Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Signal-In-Space Interface Control Document (ICD), RTCA DO-246/246A (1998/2000).
- 6) Van Dierendonck, A.J., Fenton, P. and Hegarty, C.: Proposed Airport Pseudolite Signal Specification for GPS Precision Approach Local Area Augmentation Systems, ION GPS-97, pp.1603-1612 (1997).
- 7) Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, ICD-GPS-200, Rev.C, 25 (1997).
- 8) 平成 12 年度 地上疑似衛星を用いた精密進入援助システムの開発報告書, (財)航空振興財団 (2001).

(平成 14 年 7 月 11 日受付)

