

9. GPSにおける電離層シンチレーションの観測

衛星航法部 ※松永 圭左 星野尾 一明 伊藤 実 新井 直樹 関 司*
*大阪航空局神戸航空衛星センター：前衛星航法部

1. はじめに

GPS とその補強システムである静止衛星型衛星航法補強システム(SBAS)および地上型補強システム(GBAS)に影響を与えると考えられる電離層の活動は、2000-2002年に太陽活動の極大期となるため、活発化が予想されている。特に、電離層の局地的な不規則性によって引き起こされる、電離層シンチレーションと呼ばれる現象により GPS 信号の信号強度、位相が急激に変化し、受信機のロックはずれ、サイクルスリップを起こすことが知られており、GPS および補強システムの完全性(インテグリティ)、利用性(アベイラビリティ)、連続性(コンティニューイティ)に影響を与える可能性がある。本稿では、那覇および三鷹に設置した測定装置でのシンチレーションデータの測定結果を述べる。

2. 電離層シンチレーションとは⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

電離層は太陽からの紫外線等で大気の上層部が電離してできたものであるが、GPS の信号に対する電離層シンチレーションは、電離層の F 層(≧地上高 150km)の局地的な電子密度の不規則性によって起こるとされている。この電子密度の不規則な領域が電波の複数の通路となり、この不規則な領域と送信機および受信機の相対的な運動により、受信機において急激(≦1秒)な振幅および位相の変動をもたらすものと考えられる。

シンチレーションは赤道付近(磁気赤道±15度)の日没直後で大きく、極およびオーロラ領域で少しあり、中緯度では少ない。日没後の電子とイオンの速い再結合がシンチレーションの原因となる電離層の不規則性を引き起こすものと考えられる。また、太陽活動の極大期にシンチレーションが大きいことも示されている。

太陽活動の極大期は、およそ 11 年周期で発生すると考えられており、2000-2002 年頃が極大期と予想されている。

2.1 衛星航法補強システムへの影響

図 1 に当所で取得可能な電離層データの範囲と日本付近の地磁気緯度を示す。

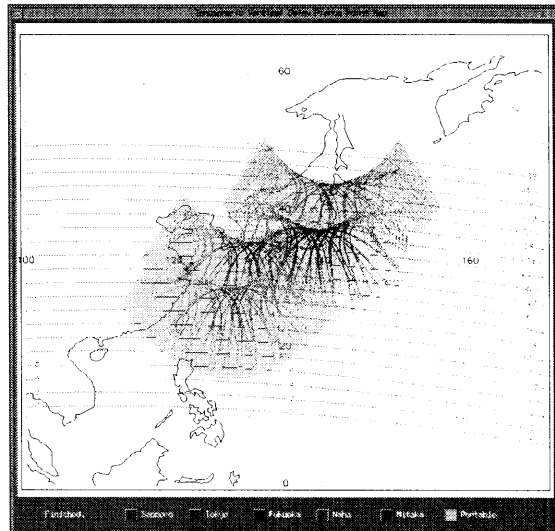


図 1 電離層データの範囲と地磁気緯度

SBAS の一つである MTSAT 型衛星航法補強システム(MSAS)においては、磁気緯度約 15 度の沖縄地方がサービス範囲の中にある。また、那覇から観測される GPS 衛星は、さらに低緯度の衛星が含まれ、GPS 信号はシンチレーションの影響を受ける確率が高く、受信機のサイクルスリップおよび信号ロック外れの原因となるものと考えられる。

3. シンチレーションの測定⁽¹⁾

当所では、1999 年 3 月末より那覇(磁気緯度約 15°)および三鷹(同約 28°)に Novatel 社の単一周波数の GPS カードを利用した、電離層シンチレーションモニター装置(ISM)GSV4000 を設置して、シンチレーションの観測を行っている。

現：神戸航空衛星センター

このモニター装置は、シンチレーションの変動を、50Hz でサンプリングされたデータをもとに受信信号の振幅および位相の変動の分散および変動のスペクトラムに関するパラメータを計算し、60 秒間隔で出力することができる。取得しているデータの内容を表1に示す。

表1 取得シンチレーションデータ

項目	単位
週番号、TOW	週番号、秒
PRN、衛星方位・仰角、C/N ₀	度、dBHz
S _{4T} 、S ₄ の補正值(S _{4,N0})	—
1, 3, 10, 60 秒間の位相分散 σ _φ	ラジアン
コード/キャリア ダイバージェンスの平均と分散	メートル
位相スペクトラム強度 T _{φ1} 、 位相スペクトラムスロープ p _φ	dB
振幅スペクトラム K ₀ , K ₁ , K ₂ , K ₃	dB
ロック時間	秒

S₄ は平均信号強度で正規化した信号強度変化の分散であり、SI を信号強度とすると S₄ は次式で示される。

$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle SI^2 \rangle - \langle SI \rangle^2}{\langle SI \rangle^2}}$$

<>は期待値を示す。

S_{4T} は生の信号強度の正規化された分散で、S_{4,N0} は分散に関する雑音の影響を補正するものである。S_{4T} と S_{4,N0} から S₄ を求める式を以下に示す。

$$S_4 = \begin{cases} \sqrt{S_{4T}^2 - S_{4,N0}^2}, & \text{if } S_{4T} \geq S_{4,N0} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases}$$

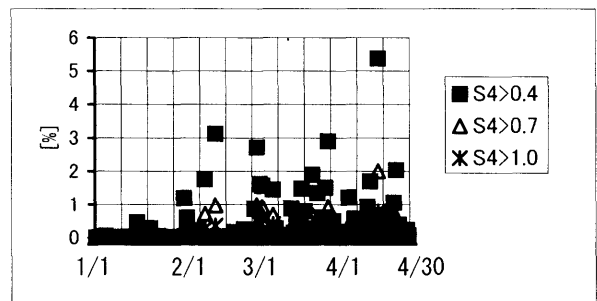
表2 シンチレーションパラメータのクラス分け

シンチレーション クラス	S4 at L1	σ _φ (rad) at L1
強	≥ 1.0	≥ 0.8
中	0.7-0.75	0.4
弱	0.4-0.5	0.15
微弱 (中緯度)	≤ 0.1	≤ 0.05

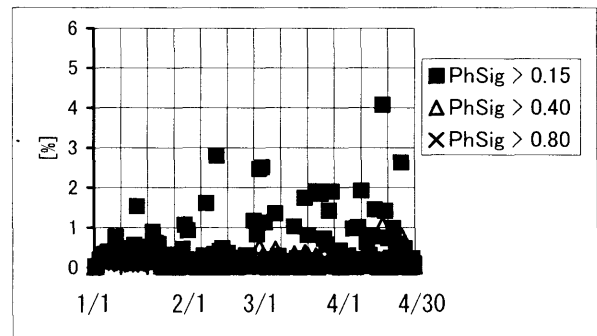
シンチレーションパラメータ S₄ および σ_φ の値により、シンチレーションの強度は表2のようにクラス分けされる。

4. 観測結果

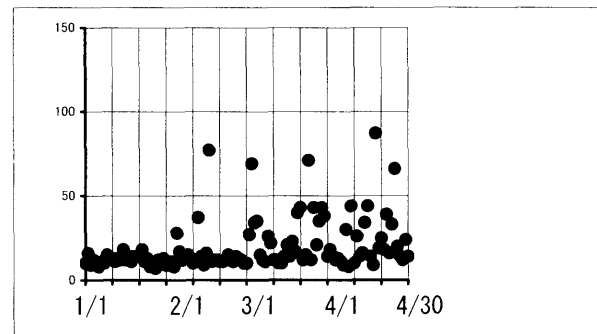
図2に2000年1月から4月までの1日毎の、那覇で観測された全衛星の S₄、σ_φ、がある閾値を超えた（強・中・弱）割合、及びロックはずれの回数を示す。これから、1月に比べて2月から4月にかけてシンチレーションと思われる挙動の回数が多かったことがわかる。



(a) S₄ 強・中・弱の割合



(b) σ_φ 強・中・弱の割合



(c) ロックアウトの回数

図2 那覇 1日毎のデータ（全衛星分）
(2000/1/1-4/30)

また、図3に2000年1月と3月との S_4 の平均値を、衛星の仰角・方位角による分布として示す。これによると、3月には高い仰角でも S_4 の値が高く出ており、方位的には主に南東・南西方向でシンチレーションが起こっていると思われる。

日本付近で大きなシンチレーションが発生したと考えられる、2000年3月30日11:00-16:00(GPS時刻)付近の那覇でのPRN6衛星の S_4 、 σ_ϕ 、 C/N_0 、ロック継続時間、衛星仰角・方位角を図5に示す。図4は同日14:00頃に那覇及び三鷹においてシンチレーションが観測されたとされる衛星からの信号の貫通点（地上高350kmと仮定）である。

S_4 の値は1.0を超えており、強い振幅シンチレーションに相当する値である。 σ_ϕ は0.2程度であり、位相の変動は小さく、弱い位相シンチレーションと考えられる。また、この時刻にロックはずれが頻繁に起こっているのがわかる。

同時期に、三鷹の測定値のうち他の衛星についてもロックはずれが測定されており、磁気中緯度地域においても電離層シンチレーションが発生していることがうかがわれる。

5. まとめ

那覇及び三鷹に設置したシンチレーションモニター装置によるシンチレーションの測定結果

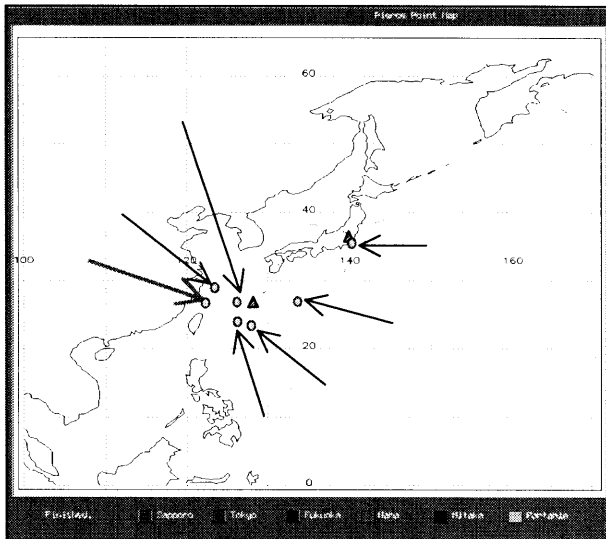
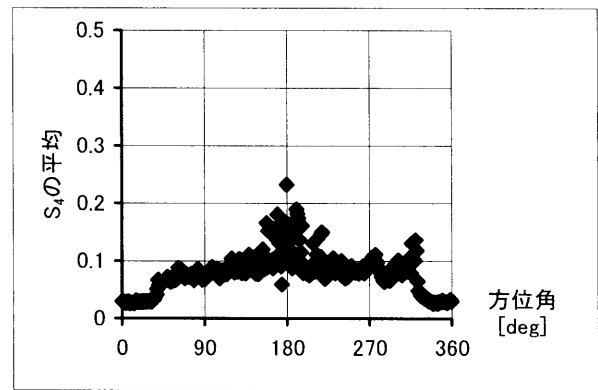
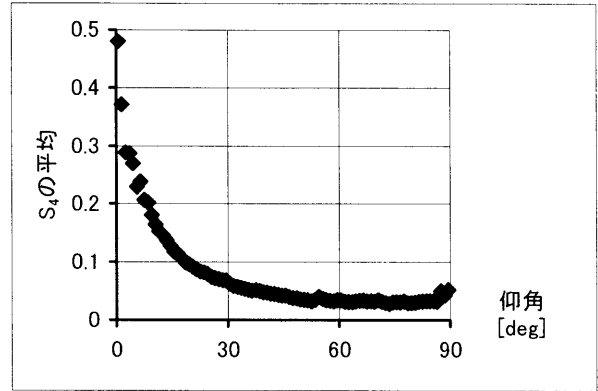
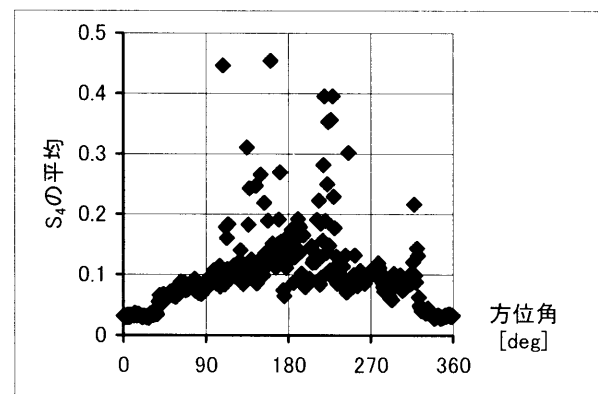
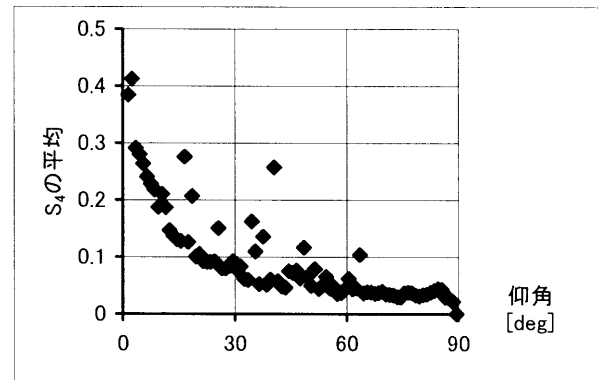


図4 電離層貫通点の地上への投影
 (那覇(Na) PRN6, 9, 17, 23, 26, 27
 三鷹(Mi) PRN24
 # △印はモニタ設置点)



(a) 2000年1月



(b) 2000年3月

図3 那覇 2000年1月/3月の仰角・方位角毎の S_4 の平均値

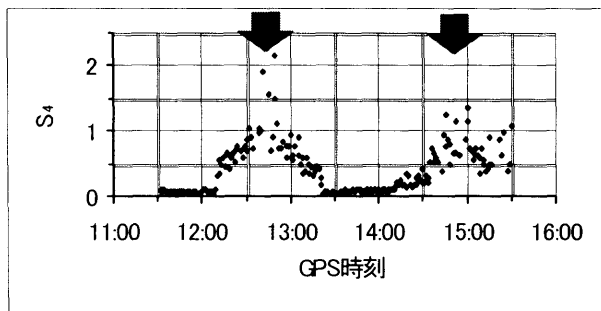
について述べた。本稿で示した期間以後もシンチレーションモニタおよび他の2周波のGPS受信機（三鷹及び札幌、東京、福岡、那覇の各管制部に設置）を用いてデータ収集を続けており、今回の太陽活動の活発期における年間を通じた解析を行う予定である。

参考文献

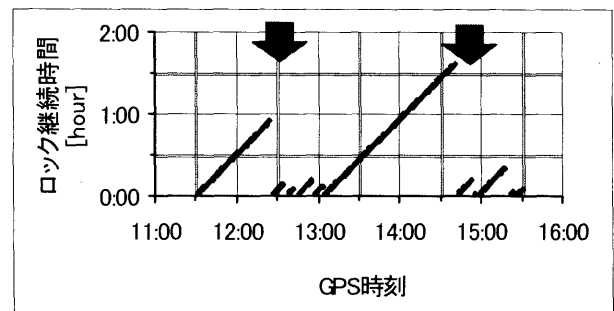
- (1) 星野尾, "GPS 信号による電離層シンチレーションの観測", 平成12年度(第32回)電子航法研究所発表会講演概要, pp19-22, 平成12年6月
- (2) S. Suga, "Ionospheric Scintillation Observation", International Symposium on GPS (GPS 99 in Tsukuba), October, 1999

- (3) M. B. El-Arini, R. Lejeune, R. S. Conker, "Ionospheric Research in Preparation for MSAS OT&E", MITRE Corporation MS-W307, December, 1999

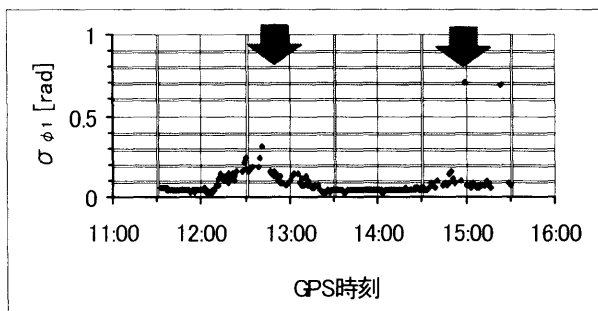
- (4) M. B. El-Arini, "Test Plan for Ionospheric Scintillation Measurements for JCAB", MITRE Corporation MS-W307, June, 1999



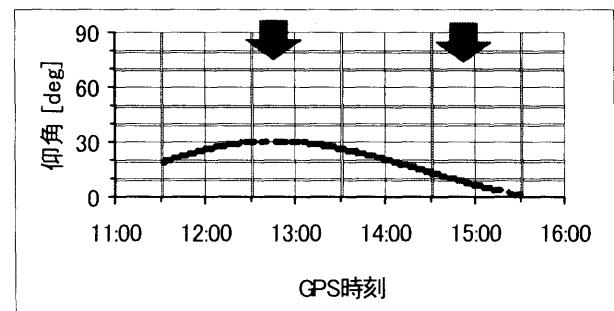
(a) S4 の時間変化



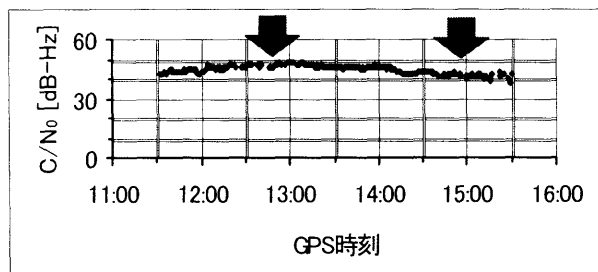
(d) 信号ロック継続時間



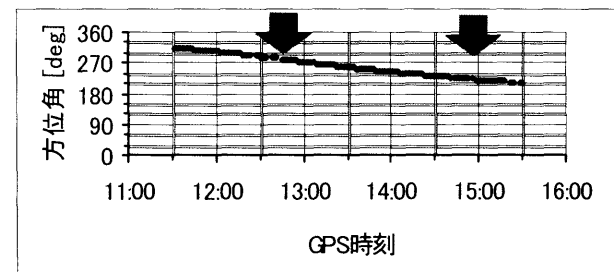
(b) σ_{ϕ_1} の時間変化



(e) 衛星仰角



(c) C/N₀ の時間変化



(f) 衛星方位角

図5 シンチレーション受信機測定結果（那覇, PRN6, GPS時刻 11:00-16:00）