

# 衛星伝搬の壺

## 第3講

### シンチレーション：ある日突然やってくる

電気通信大学名誉教授  
唐沢 好男

本シリーズでは衛星回線の電波伝搬に焦点を絞り、種々の伝搬現象のメカニズムやモデリングの壺を解説する。第3講では、電波の揺らぎ、シンチレーションを取り上げる。前講で取り上げた降雨減衰に比べると通信に与える影響はたいしたことは無いのだろうと思いがち。でも油断大敵、とんでもないことも起きる。電離圏と対流圏のそれぞれに発生原因を持ち、前者は電離圏シンチレーション、後者は対流圏シンチレーションと呼ばれ、両者には大きな性質の違いがある。このシンチレーションの特性について述べる。



#### シンチレーションとは

台風など、近く暴風雨や豪雨になりそうと分かれば、気を引き締めてしっかり備えることができる。しかし、大地震のように、いきなり襲われるとパニックになって膨大な被害を受けることになる。今回のテーマ：シンチレーションのうち、電離圏の擾乱（磁気嵐）に原因を持つ電離圏シンチレーションはそれに近い。1980年前後、衛星通信も軌道に乗って安定したサービスが行われていたとき、突然それが起こった。図1はそのときの衛星受信強度の記録である [1]。

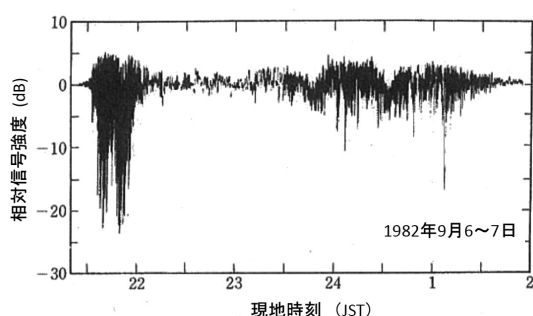


図1 磁気嵐に伴って発生した電離圏シンチレーションの一例  
(インマルサットインド洋衛星電波、周波数 1.5GHz, 1982年  
9月6～7日、KDD 山口衛星通信所)

それまで静かだった衛星信号の強度が突然ゆれ始めた。このとき、通信所の担当者は、「すわ、装置がおかしい、一大事」と大慌てしたそうである。今でこそ、予測はできなくても、起き易い時期に対する心構えはできるようになったのであるが、当時はまだそうでは無かった。11年周期と言われる太陽活動がピークの

ころの出来事である。今回取り上げるシンチレーションはこのような受信強度の変動現象である。シンチレーションには電離圏プラズマの擾乱によって起きる電離圏シンチレーションと地表大気の屈折率ゆらぎによる対流圏シンチレーションがある。シンチレーションという言葉は、星の瞬きとしてお馴染みであるが、これは、対流圏シンチレーションの方である。

両シンチレーションの特徴は次項以降で説明するが、その周波数特性だけを述べると、dB値変動の大きさ（peak-to-peakの目安値）が、電離圏シンチレーションでは周波数 $f$ に対して大凡 $f^{-1.7}$ に、対流圏シンチレーションでは $f^{7/12}$ に比例する。すなわち周波数が2倍になると、電離圏シンチレーションではその大きさは約1/3に、対流圏シンチレーションでは1.5倍になる。それゆえ、電離圏シンチレーションは、GHz帯電波に対して低い方の周波数で、対流圏シンチレーションでは高い方の周波数で影響が顕著になる。

#### 電離圏シンチレーション

地球の上空、高度60km～800km辺りの領域は電離したプラズマ大気で構成され、電離圏と呼ばれる。電離圏シンチレーションは、この電離圏において、プラズマ密度に擾乱が起きて屈折率が不規則に変動するとき、信号強度の変動として現れる。電離圏の中でも、地上350～450kmあたりのF領域と100km付近のE領域が多く、中でも、大きなシンチレーションはF領域で起きる。

## 【スプレッドF型シンチレーション】

F 領域に起きるシンチレーションは、スプレッドF と呼ばれる電離大気の屈折率の擾乱による。電離圏擾乱の大規模なものは磁気嵐である。磁気嵐はシンチレーションばかりでなく、あらゆる地球電磁環境に大きな影響をもたらし、それが我々の日常生活にも被害として及ぶ可能性を持つ（例えば GPS の精度劣化）。それが起き易い状況は次の3点である。

- ① 11 年周期と言われる太陽活動の盛んな年（図 2）
- ② 赤道域の太陽高度が高い春分と秋分の頃
- ③ 赤道域を中心とする低緯度地域において、夜 8 時から真夜中にかけての時間帯

③に示した時間帯は電離圏における夕暮れ時であり、電離圏構造が昼の状態から夜の状態への過渡期に不安定状態が起き易いことを意味している。図 3 は、太陽活動最盛期における F 領域でのシンチレーションの起こりやすさを磁気緯度で表した地球の現地時間 (local time) で示している [2]。地球規模で見ると赤道地域と極地域に発生が集中している。我が国は中緯度地域にあり、赤道地域ほどの深刻さは無いが、それでも、図 1 のようなことはごく稀に起きる。改めて図 1 のケースを見ると、①太陽活動が盛んな年の、②起き易い時期（秋分のころ）の、③起き易い時間帯に起きており、条件がすべてそろっていたことになる。図 2 より、次の太陽活動極大期は 2024～2026 年ころと予想され、そのころ、特に注意（心構え）が必要である。これからの時代においては、本誌でも解説がなされていた宇宙天気予報によって、磁気嵐発生の短期予測が期待できる。なお、図 1 のケースとは別の例になるが、大規模な磁気嵐が起きた際の電離圏の諸特性とシンチレーションの関係をまとめた資料が [3] 等に報告されている。

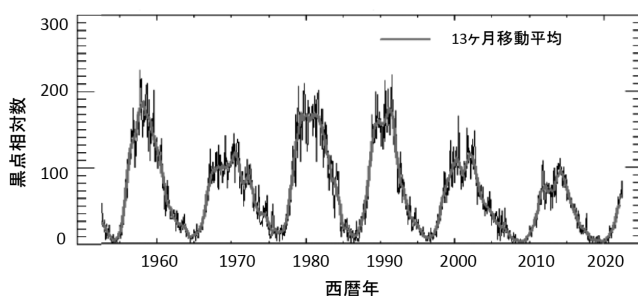


図 2 太陽活動（黒点数）の活動周期  
（国立天文台三鷹太陽地上観測データより）

電離圏シンチレーションによる信号劣化の確率は、衛星回線の設計（リンクバジェット計算）には組み込まれていない。これは、現象が、あまりにも不確定な磁気嵐依存であって、かつ、起きるのは稀で（台風のように毎年来るものでもない）、それを信号減衰統計に組み込むことが難しいためである。

## 【QP シンチレーション】

ここまで述べてきたように、電離圏シンチレーションと言えば、前触れも無く突然に始まりそれが 10 分から 1 時間近く続く形が一般的である。それに対して図 4 のようなスパイク状の変動が、主に、初夏から夏の夜間に時々見られる [1]。その拡大図からもわかるように、このタイプのシンチレーションは準周期型 (quasi-periodic: QP) と呼ばれている。QP シンチレーションは地球の磁力線にトラップされた長い柱状の不規則構造が電離圏 (E 領域か F 領域か) を吹く風に乗って衛星伝搬路を横切るときに起きると言われている。時間変動の中央部が弱くなっているということは凹レンズ的な働きであり、屈折率が周囲より低くなっている、すなわち、プラズマ密度が高くなっているのだろうというところまでは推測できる [4]。近年、電離圏の不規則構造研究も進み、中緯度では中規模伝搬性電離圏擾乱 (MSTID) への関心が高まっている [5]。図 4 の現象がそれに関連するのかどうかは筆者に知識が無いが、電離圏シンチレーションにはこのようなタイプもあると知っておいてほしい。ただ、通信への影響と言う意味では、かなり限定的である。

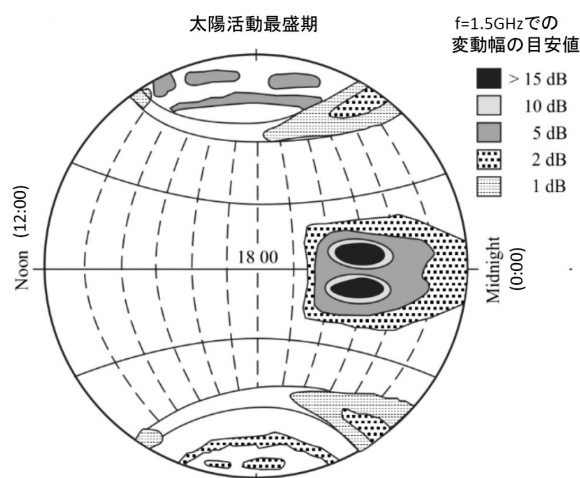


図 3 太陽活動最盛期における電離圏シンチレーション発生エリアと時間帯の目安 (ITU-R P.531 [2])

（注：この場合の緯度は地図上の緯度（地理緯度）ではなく地磁気緯度で、日本の付近は地理緯度より 10° 程度低く、低緯度地域に近い）

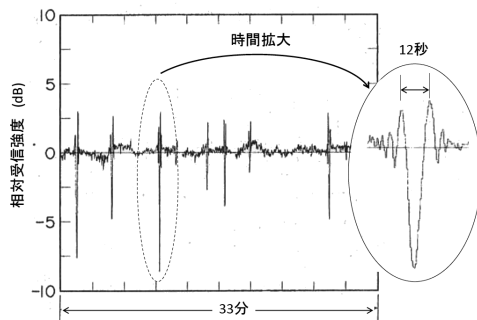


図4 QPシンチレーションの観測例  
(周波数: 1.5GHz, 1982年4月30日 23:20~23:53, KDD  
山口衛星通信所)



## 対流圏シンチレーション

シンチレーションは対流圏でも起きる。高度2km程度以下の大気屈折率の揺らぎによって発生する信号強度の変動現象である。これこそ、たいした問題ではないだろうと思いがちであるが、時と場合によっては、信号のレベル変動が強く、無視できない現象なのである。図5はその一例、仰角6.5°の11GHz帯衛星ビーコン波に対して、peak-to-peakで10dBの変動になっている。

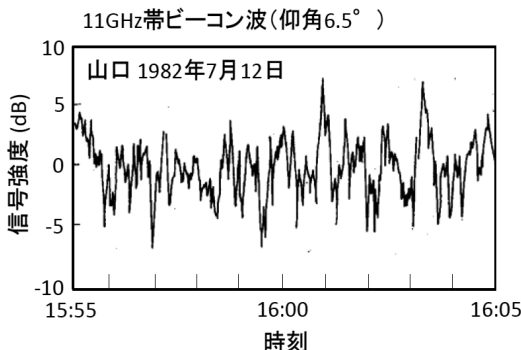


図5 低仰角衛星回線での対流圏シンチレーション

### 【発生メカニズム】

筆者らが、山口（KDD 山口衛星通信所）において、1983年の一年間観測し、シンチレーション変動の平均的大きさを季節と時刻の2次元マップにプロットしたのが図6である。対流圏シンチレーションは夏の暑い時期、特に日中に大きくなる。原因は屈折率の変動にあるのだから、変動の定量的な把握には、その屈折率の性質を調べればよいということになる。大気屈折率 $n$ は1よりほんのわずかに大きいだけのものなので、変化が拡大して見えるように $N \equiv (n-1) \times 10^6$ で定義される等価的な屈折率（単位：Nユニット）が用いられる。

この $N$ は、気象パラメータである気圧 $P$  [hPa (ヘクトパスカル)]、気温 $T$  [K (絶対温度)]、水蒸気圧 $e$  [hPa] を用いて、

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.75 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1)$$

$\underbrace{\hspace{1cm}}_{N_{\text{dry}}} \quad \underbrace{\hspace{1cm}}_{N_{\text{wet}}}$

で与えられる。水蒸気圧 $e$ は気温と湿度の関数であるので、屈折率 $N$ は気圧、気温、湿度によって決定できる。式(1)の右辺第1項は窒素と酸素で構成される乾燥大気成分、第2項は大気に含まれる水蒸気成分で、それぞれ、 $N_{\text{dry}}$ 、 $N_{\text{wet}}$ と区別される。

図7は山口における1983年(図6のデータを得た年)の $N$ 、 $N_{\text{dry}}$ 、 $N_{\text{wet}}$ の各値を気象観測値より(1)式で計算して示している。図から、 $N_{\text{dry}}$ は $N_{\text{wet}}$ より値が1桁近く大きいものの、季節変化が小さく安定している。一方、 $N_{\text{wet}}$ は値は小さいけれども強い季節変化があること、その変化の傾向は図6のシンチレーションと強い相関をもつことが分かる。対流圏シンチレーションは大気屈折率の揺らぎによるものなので、値そのものではないのであるが、 $N_{\text{wet}}$ には値に比例するような揺らぎが起きていると理解できる。

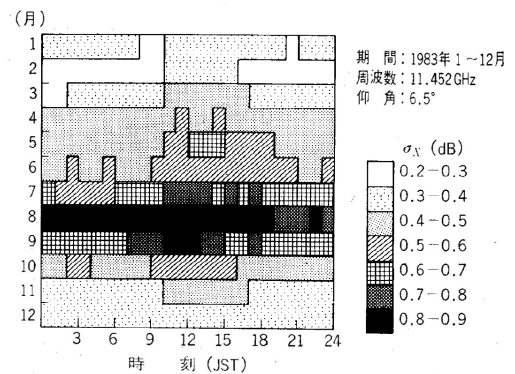


図6 対流圏シンチレーションの大きさ  
(dB値変動の標準偏差)の季節依存性

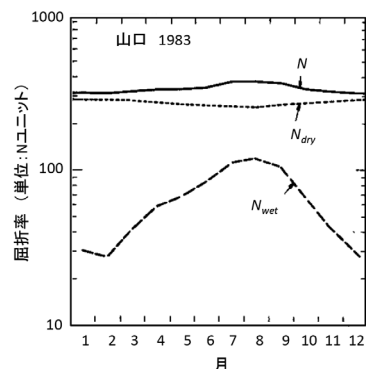


図7 地表屈折率特性 (1983年、山口)



## 【推定モデル】

現行の ITU-R 勧告手法は、筆者等のモデル（上述の  $N_{wet}$  を組み入れたモデル [6]）をベースにした次式である [7]。

$$\sigma = \sigma_{ref} g f^{7/12} \sin^{-1.2} \theta \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

$$\sigma_{ref} = 3.6 \times 10^{-3} + 10^{-4} N_{wet}$$

求める量  $\sigma$  はシンチレーションによる dB 値変動の標準偏差、 $g$  はアンテナ開口径  $D$  と周波数の関数で与えられるアンテナ平滑効果係数で、小型アンテナでは  $g=1$  である。この式は、世界各国のシンチレーション観測値に対して非常に精度がよいことが調べられている。標準偏差値  $\sigma$  から累積分布を求める式も [7] に与えられている。

図 8 は、ITU-R 勧告手法によるシンチレーション強度の累積分布で、 $f=20\text{GHz}$ 、仰角  $\theta = 5^\circ \sim 40^\circ$  について示している。気象パラメータは我が国の夏季を想定して気温  $30^\circ\text{C}$ 、湿度  $80\%$  に設定している。同図より、当然ながら、低仰角で大きな変動になっており、仰角  $10^\circ$  以下での運用を考える場合には、夏季において配慮が必要になる。

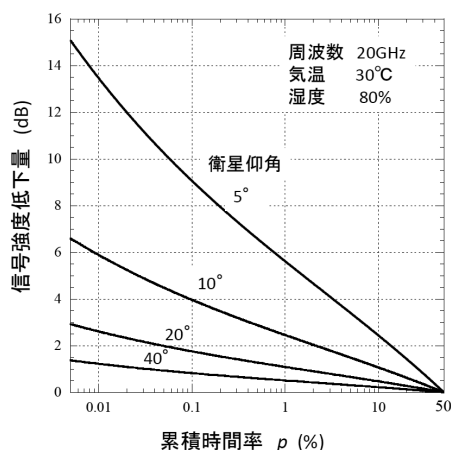



図 8 対流圏シンチレーションによる信号レベル低下の累積分布（夏季を想定）

## 【降雨減衰との相乗効果】

前講で述べた降雨減衰と対流圏シンチレーションは共に高い周波数で問題になる現象で、両方が同時に起きる時が心配になる。影響の大きさという意味では、例えば周波数が  $20\text{GHz}$  以上のとき、降雨減衰  $A_{rain}$  では  $20 \sim 30\text{dB}$  の減衰に対して、対流圏シンチレーション  $A_{scint}$  では高々  $5 \sim 10\text{dB}$  である。両者の変動が独立に起きるとき、それが重なって起きた場合

でも統計的には  $A = (A_{rain}^2 + A_{scint}^2)^{1/2}$  と算定される [7]。  $A_{rain}=30[\text{dB}]$ 、 $A_{scint}=10[\text{dB}]$  では  $A=31.6[\text{dB}]$  となり、降雨減衰を超える部分はわずかでしかない。一方に大きな劣化がある場合には、その方を重点的に考えればよいということである。

逆に言えば、対流圏シンチレーションが問題になるのは、比較的大きな劣化になる低仰角運用であって、i) 降雨減衰が弱い  $10\text{GHz}$  以下の回線や、ii) 無降雨時のみでの運用を想定した低マージンシステムにおいてである。

ティータイム 

### 滅多に起きないことを予知する難しさ

大きな電離圏シンチレーションは地震と同じで稀にしか起きない。こういう稀にしか起きないことを予知するのは難しい、と言うことが体感できる確率の問題を。

ある（悪い）出来事が起きる日の確率は 1 万分の 1 としよう。当たる確率 99% で知られる占い師に明日起きるかどうかを聞いたところ「起きる」と言った。それは、大変。本当に起きるのだろうか？

えっ、99% じゃないの？ 違います。起きる確率はたった 1%。「あれっ」と思うでしょう。では、種明かしを。その占い師は「起きる」ことを 99% 当てて一方、起きないのに「起きる」と言って間違える確率も 1% ある。同じ「起きる」でも後者の方が 100 倍回数が多いのだから、今回の「起きる」も後者だろうと思うのは納得できるであろう。それじゃご託宣も意味無いじゃん、いやそうでもない。占い師のお告げによって起きる確率が 100 倍上がったことは確かであり、警告としては価値があるのである。

この確率の話は、健康診断の例によく使われる（占い師の予言的中率 → 検診の信頼度）。「異常有り」の通知をもらっても過度に落ち込まない。「精密検査の薦め」と受け止めるのが良い。結論を出すには、念には念を入れて慎重に慎重に、である。

## <参考文献>

- [1] Y. Karasawa, K. Yasukawa, and Y. Yamada, "Ionospheric scintillation measurements at 1.5 GHz in mid-latitude region," Radio Sci., vol. 20, no. 3, pp. 643-651, 1985.
- [2] ITU-R, "Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems," Rec. ITU-R P.531-12, 2013.
- [3] 新野他, "静止衛星電波に及ぼす電離圏効果," 電波季, vol. 27, no. 142, pp. 1-15, 1985.
- [4] Y. Karasawa, "Interpretation on quasi-periodic scintillation at frequencies above 1GHz," IEICE Trans. Commun., vol. E70, no. 8, pp. 768-774, 1987.
- [5] 地球電磁気・地球惑星圏学会, 地球電磁気学・地球惑星圏科学の現状と将来, 2019年度版  
[https://www.sgepss.org/sgepss/shorai/sgepss\\_future\\_2019\\_all.pdf](https://www.sgepss.org/sgepss/shorai/sgepss_future_2019_all.pdf)
- [6] Y. Karasawa, M. Yamada, and J. Allnutt, "A new prediction method for tropospheric scintillation on earth-space paths," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 36, no. 11, pp. 1608-1614, 1988.
- [7] ITU-R, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems," Rec. ITU-R P. 618-13, 2017.