

低仰角衛星伝搬路における 対流圏シンチレーション特性とその推定法

唐 沢 好 男* 安 川 交 二**

Analysis and Prediction of Tropospheric Scintillation
on Low-elevation Earth-space paths

By

Yoshio KARASAWA: Radio Transmission Laboratory
KDD Meguro R&D Laboratories

Koji YASUKAWA: Administration Department Osaka Regional Office
(Now transferred to ATR Optical and Radio
Communications Research Laboratories)

Radio waves with frequencies above 10 GHz on low-elevation earth-space paths are significantly affected not only by rain but also by atmospheric irregularities in the troposphere. In this paper, the characteristics of tropospheric scintillation due to irregularities of radio-refractivity in the troposphere is analyzed based on propagation data obtained in the 14/11GHz low-elevation measurements at the Yamaguchi Satellite Communication Center. Moreover, a new prediction method of scintillation fading on earth-space path, which has been developed based on the results of measurements, is proposed. This model includes parameters representing meteorological conditions and can therefore be expected to be applied to various regions with different climates. Although data used for evaluation of the prediction method are limited, the proposed model is proved to have good prediction accuracy at least for frequencies from 7 to 14 GHz and elevation angles from 4° to 30°.

1. ま え が き

インテルサットシステムでは、需要の増大に対処するため、従来の6/4GHz帯電波を用いた通信に加え、新たにKu帯(14/11GHz帯)の電波の利用が図られつつある。このような10GHz以上

の電波が用いられる通信では、降雨による電波の減衰とともに、対流圏の屈折率のゆらぎによって生ずる対流圏シンチレーション(通常、電離圏シンチレーションと区別するためにこう呼ばれている)が、電波伝搬上の問題となる。特に、低仰角伝搬路で発生するシンチレーションでは、時として10dBを超えるような大きな信号強度の変動も見られ、現象の定量的把握と推定法の確立が回線設計上からも重要となっている。このためシンチ

* 目黒研究所 無線伝送研究室担当主任研究員

** 大阪支社総務部 調査役
(ATR 光電波通信研究所出向)

レーションに関する研究が各機関で進められているが^{(1)~(7)}、現段階では、実測データの不足もあって衛星通信の回線設計に供し得る実用的なシンチレーション推定法は確立されていない。

KDD 研究所では、1982年から約4年間、14/11GHz帯各種伝搬現象の解明とサイトダイバーシティによる降雨減衰の軽減効果の把握を目的として、山口、浜田、大分、那覇の4地点に実験局を設け、インド洋上のINTELSAT-V号衛星利用による14/11GHz帯低仰角電波伝搬実験を実施してきた⁽⁸⁾。本稿では、上記実験によって取得した各種伝搬データのうち、対流圏シンチレーションについて山口実験局で得たデータの解析を行い、低仰角伝搬路で発生するシンチレーションの諸特性を明らかにする。また、この結果及び山口の気象データとシンチレーションの関係を考察した結果に基づき、世界的に適用が期待できる新しいシンチレーションの推定法を提案する。更に、KDD研究所が西日本各地で取得したシンチレーションデータ及びこれまでに報告されている各種データにより提案する推定法を検証し、推定精度の評価を行う。

2. 対流圏シンチレーションの諸特性⁽⁹⁾

2.1 実験の概要とデータ解析の方法

山口衛星通信所内に設けられた実験局では、インド洋上のINTELSAT-V号衛星からの11GHz帯ビーコン波(11.452GHz: 右旋円偏波)を受信するとともに、山口から送出する14GHz帯電波(14.226GHz: 直線偏波)の衛星折返し波(11.176GHz: 直線偏波)を受信した。したがって、ビーコン波の受信によって11GHz帯電波(down-link)の信号強度変動が、また衛星折返し波とビーコン波の差(dB値)を求めることにより14GHz帯電波(up-link)の信号強度の変動を知ることができる。本解析に用いる大部分のデータは、インド洋上60°Eに位置する衛星を利用したときのものであり、その際の山口における衛星仰角は6.5°である。なお、実験系の構成については参考文献⁽⁸⁾

に詳しく述べられているので、ここでは割愛する。

一般に、シンチレーションは程度の差はあれ、晴天、雨天にかかわらず常時発生している。しかしながら、降雨時のシンチレーションは、降雨による減衰に重畳して現われるので、データ解析は慎重に行う必要がある。本稿では、基本的には、無降雨時のデータを取り扱う。その際、通常シンチレーションの周期より十分長い5分間のデータの平均をとり、この平均値がClear sky level(晴天時の信号強度の中央値)より2dB以上低下する部分を降雨時のデータとみなして、統計から除いた。また、2dB以内のわずかな減衰の影響を除くため、5分間の平均値(データを順次移動して平均する移動平均値)を基準に、これと実測値との差をシンチレーションとした。

2.2 データ解析結果

2.2.1 大きいシンチレーションの観測例

図1はインド洋上60°Eに位置するINTELSAT-V号衛星(山口からの仰角6.5°)のビーコン波と衛星折返し波の変動を示したもので、比較的大きなシンチレーションが発生しているときの観測例である。図の例では、ビーコン波で10dB_{p-p}(p-p; peak-to-peak)、折返し波で20dB_{p-p}を超えるような大きなものとなっている。通常、10GHz

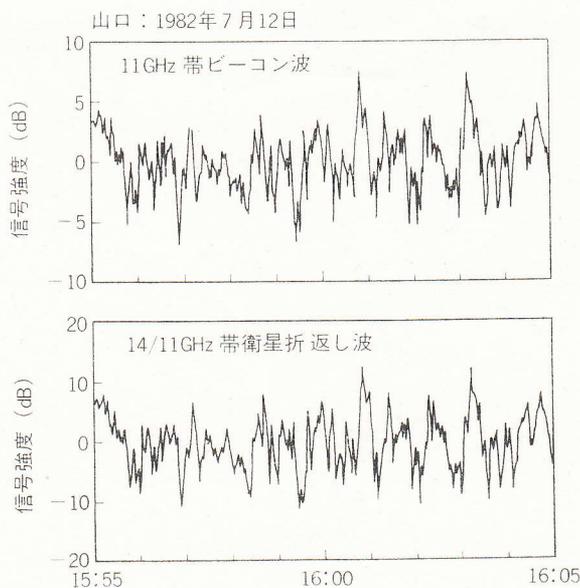


図1 対流圏シンチレーションの記録例

以上の電波の低仰角における電波伝搬の問題としては、降雨減衰が主要なものとして検討されることが多いが、シンチレーションもまた、回線設計上考慮すべき伝搬現象であることが認識されよう。

2.2.2 日変化・季節変化特性

図2は、1983年(1~12月)に発生したシンチレーションの大きさ(信号強度変動の標準偏差： σ_X)を各月及び時間ごとに平均して求めた日変化・季節変化特性を示したものである。図から夏期には、冬期に比較してdB値で約3倍大きいシンチレーションが発生すること、日変化特性に関しては、日中の午後に弱いピークがあるものの全体的には有意な差はないことが分かる。このような明確な季節依存性は、なんらかの気象要素と強い関係を有するものと予想されるが、これについては2.3節で詳しく述べる。

2.2.3 信号強度の確率分布特性

観測結果から、推定法確立に重要な以下の三つの性質が明らかになった。①1時間程度の比較的短時間で見た場合の振幅変動(dB値)の分布は、標準偏差値 σ_X が1.6dBといったかなり大きい変動(変動幅で約10dB)の場合も含めて、正規分布によく一致する。②1カ月程度の長期で見た場合、1時間ごとに求めた σ_X はガンマ分布でよく近似できる。また、年間ベースで見た場合でもガンマ分布からのずれは比較的小さい。③1時間単位で得た σ_X の1カ月統計における平均値 m と標

準偏差 σ_m には $m^2 \cong 10\sigma_m^2$ の関係がある。これにより、ガンマ分布を決定するのに必要な二つのパラメータのうち的一方は、他方のパラメータに從属していることが分かる。

①~③の性質を利用すると、 σ_X の平均値 m が求められれば、信号強度の分布形は一義的に決定できることになる。

2.2.4 周波数特性

図3(a)は14GHz帯と11GHz帯の二つの周波数帯の電波に対するシンチレーションの瞬時の対応(Scattergram)を見たものである。なお、14GHz帯と11GHz帯のシンチレーションの同時比較を行うために、図の例では14GHz帯のデータに対して衛星折返しに生ずる伝搬遅延約0.3秒を補正して比較している(ただし、この補正の有無

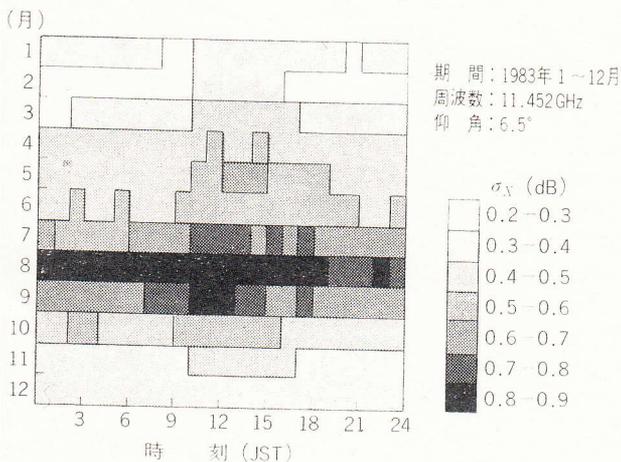
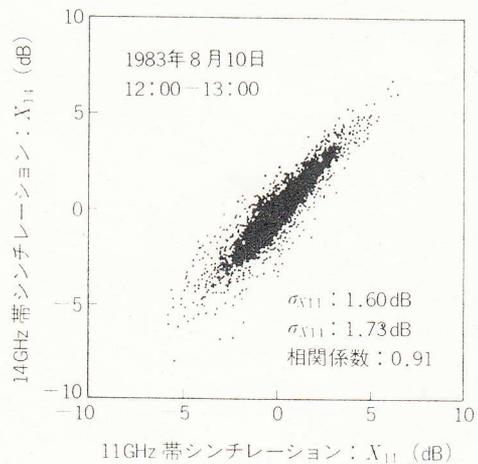
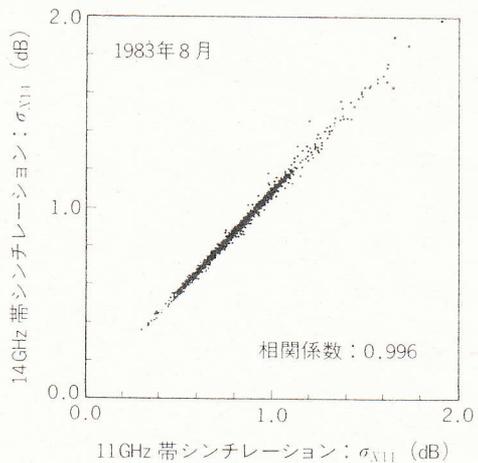


図2 山口におけるシンチレーションの日変化及び季節変化特性

(April 1988)



(a) 瞬時値の対応



(b) 標準偏差値の対応

図3 14GHz帯と11GHz帯でのシンチレーションの相関特性

による有意な差はない). 図の例は比較的大きなシンチレーションが発生しているときのものであり, この場合二つの周波数に対するシンチレーションの相関係数は0.91, 振幅比 (14/11 GHz) は1.08である. 一方, 図3(b)は11GHz帯シンチレーションと14GHz帯シンチレーションの標準偏差を1983年の8月の各1時間ごとの全データ(ただし, 無降雨時データのみ)について相関を示したものである. 両者の相関係数は0.996, 両周波数帯に対する標準偏差の比 (σ_{14}/σ_{11}) は, 図3(a)の場合と同様1.08である. これらから導かれる周波数特性は, 周波数比の0.35乗 ($f^{0.35}$) である.

アンテナ開口径が大きくなるとシンチレーションの大きさは波面のゆらぎの平滑効果によって小さくなる. この効果は同じ開口径のアンテナで2周波を測定する場合, 波長との関係で, 高い周波数の方が平滑効果が大きい. 伝搬に起因するシンチレーションの周波数特性を知るにはアンテナ開口径に起因する周波数特性を補正する必要があるが, 本測定の場合について, これを補正すると⁽¹⁾ $f^{0.45}$ となる. なお, この値は大気乱流に関するKolmogorov スペクトルから導かれる理論値⁽¹⁰⁾ $f^{7/12}$ よりは, やや周波数特性が小さい. 他の実測値では, $f^0 \sim f^{0.5}$ までの種々の報告がある⁽²⁾⁽⁷⁾.

2.2.5 仰角特性

信頼できる仰角特性を求めるためには, 同一気象条件, すなわち同じ季節に得たデータを比較する必要がある. 山口におけるKu帯実験においては表1のものについてこの条件が満たされている. 図4は上記測定による仰角特性である. 大気の屈折率の不規則性が地上から一定の高さまで均一に存在すると仮定すると, 乱れが存在している区間を通過する電波の通路長は $\text{cosec } \theta$ (θ : 仰角) に比例する. このとき, シンチレーションの大き

表1 山口における仰角特性データの測定諸元

| 期 間 | 衛星位置 | 仰 角 |
|------------|-------|------|
| 1982年9~10月 | 63° E | 9.0° |
| 1983年9~10月 | 60° E | 6.5° |
| 1983年9~10月 | 57° E | 4.0° |

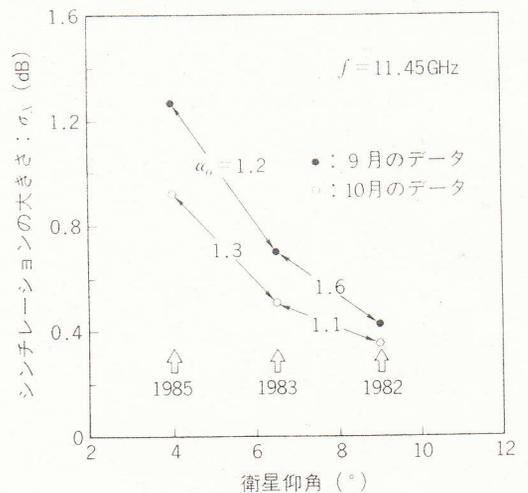


図4 シンチレーションの実測仰角特性 (α_θ は $\text{cosec } \theta$ の指数)

さ (σ_x) が $\text{cosec } \alpha_\theta \theta$ に比例するとした場合の α_θ の値を図4中に示している. 図では若干のばらつきがあるが, α_θ は1.3程度の値を有することが分かり, Kolmogorov スペクトルから導かれる理論値 $\alpha_\theta = 11/12$ よりはかなり大きい.

2.3 考 察

シンチレーションは大気屈折率の乱れによって発生すると考えられているので, 本節では, 屈折率とシンチレーションの関係に着目した検討を行う.

一般に, 大気屈折率の値 n は真空中の値1に対して 10^{-4} 程度しか変化しないため, 対流圏伝搬においては $N = (n-1) \times 10^6$ で与えられる等価的な屈折率 N (単位: N unit) が用いられる. この N は気象パラメータである気圧 P (mb), 気温 T (°K), 水蒸気圧 e (mb) を用いて

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (\text{NU}) \dots (1)$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{N_{dry}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{N_{wet}}$

で与えられる. 水蒸気圧 e は湿度 U (%) と飽和水蒸気圧 e_s の間に $e = U \cdot e_s / 100$ の関係を有し, e_s は気温 T の関数として Goff-Gratch の式で与えられる. また, 屈折率の物理的な意味合いから式(1)右辺第1項は乾燥大気成分 (dry term: N_{dry}), 第2項は水蒸気成分 (wet term: N_{wet}) と区別し

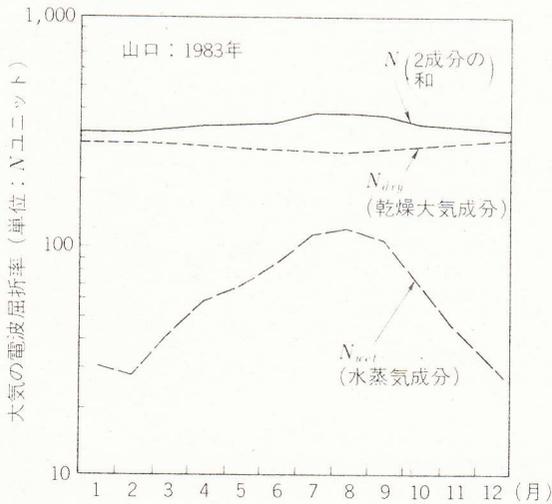


図5 1983年山口の地表屈折率特性

て呼ばれることがある。

図5は山口測候所が1日4回(03:00, 09:00, 15:00, 21:00)観測する気温・気圧・湿度より N , N_{dry} , N_{wet} の各値を式(1)により求め、1983年の各月ごとにその平均値を示したものである。図から、 N_{dry} は N_{wet} より値が1桁近く大きく、 N_{dry} では2月に最大、8月に最小値を有するものの季節変化特性は極めて小さいこと、逆に N_{wet} は、値は小さいものの夏には冬の4倍にもなる大きな季節依存性があることが分かる。図2のシンチレーションの発生量と図5の屈折率の季節変化特性を比較して考えると、シンチレーションの発生量 σ_x は N_{wet} の傾向とかなりよい一致が見られ、その関係は

$$\sigma_x = 0.15 + 5.2 \times 10^{-3} N_{wet} \dots\dots\dots(2)$$

でよく近似できる。

図5の結果から、大気屈折率 N そのものは N_{dry} が支配的であるが、 N_{dry} は安定であるため、シンチレーションのような不規則性に起因する現象の原因とはならず、シンチレーションは気象依存性の強い N_{wet} によるものと結論付けることができる。また、 N_{wet} の日変化特性に関しては、8月の場合 118.2 (03:00), 120.8 (09:00), 118.0 (15:00), 119.8 (21:00) となり、特に有意な傾向は見られず、図2で示した σ_x の日変化特性が小さいこととも符合する。

上記の結果から、シンチレーションは大気中の (April 1988)

水蒸気量が多いほど大きいものとなり、それがすなわち高温・多湿シーズンである8月付近に大きな発生を見ることになるといえる。また、 N_{dry} (乾燥大気) のスケールハイト(地上での値の $1/e$ になる高度)は約10km、 N_{wet} (水蒸気)では約2kmであることが知られており、 N_{wet} が支配的であるとする本解釈では、シンチレーションは極めて地表に近い部分で発生しているものと理解できる。

3. シンチレーションの推定法⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

3.1 従来のシンチレーション推定法と問題点

発生するシンチレーションの大きさ (σ_x) を理論的に求める方法に関してはTatarskiiの理論⁽¹⁰⁾がある。しかしながら、この計算のためには、不規則性の空間スケールの把握等、通常的气象要素以外の複雑なパラメータを含むので、実用的な推定法としては不適である。このため、CCIRでは、簡易推定法として仰角 1° 、周波数7.3GHzで得た実測値⁽³⁾を基本に、理論から導かれる周波数特性、仰角特性、アンテナ開口径特性を考慮した計算式を示している⁽¹⁾。これには気象に対するパラメータがないため、日本で見られるような大きな季節依存性や、予想される大きな地域依存性を導くことができない。更に、従来のシンチレーション推定法からは変動の標準偏差を求め得るのみであり、例えば、通信回線の設計に重要となる時間率0.01%値といった累積分布特性に言及したものはない。以下、2章で述べたデータを基に、上記問題点を解消した新しいシンチレーション推定法を提案する。

3.2 新しいシンチレーション推定法

3.2.1 推定法

基本的な考え方として、周波数 f (GHz)、仰角 θ 、アンテナ開口径 D_a (m)、及び気象条件(平均気温 t ($^\circ\text{C}$), 相対湿度 U (%))が山口実験系と全く同一の環境条件では山口実験局で得たデータに等しく、また、パラメータの値が異なる場合

については、2章で述べた実測値に基づく各種パラメータ依存性を考慮する。この場合 σ_X に対する推定式として次式で示す基本式が得られる。

$$\sigma_X = \sigma_{X,REF} \left(\frac{f}{11.5} \right)^{0.45} \left(\frac{\operatorname{cosec} \theta}{\operatorname{cosec} 6.5^\circ} \right)^{1.3} \left(\frac{G(D_a)}{G_{REF}} \right)^{1/2}$$

$$= 0.0228 \sigma_{X,REF} \cdot f^{0.45} \cdot \operatorname{cosec}^{1.3} \theta \cdot G(D_a)^{1/2} \dots\dots\dots(3)$$

式中の $\sigma_{X,REF}$ は式(2)から

$$\sigma_{X,REF} = 0.15 + 5.2 \times 10^{-3} N_{wet} \dots\dots\dots(4)$$

で与えられる。ここで

$$N_{wet} = 3730 U e_s / (t + 273)^2 \dots\dots\dots(5)$$

飽和水蒸気圧 e_s は気温 t の関数として次の近似式で与えられる。

$$e_s = 6.11 \exp\{19.7t / (t + 273)\} \dots\dots\dots(6)$$

また、式(3)中の $G(D_a)$ はアンテナ開口径ファクタで、アンテナ開口径 D_a と周波数 f に依存する。 G_{REF} は山口の測定系に対応する開口径ファクタで $D_a = 7.6(\text{m})$, $f = 11.45(\text{GHz})$ としたときの値である。アンテナ開口径ファクタの計算式は CCIR Rep. 718⁽¹⁾ に詳しく示されているので、ここでは割愛する。ただし、 $f \leq 14\text{GHz}$ かつアンテナ径 $D_a \leq 4\text{m}$ では $G = 1$ としても誤差は小さい。

2.2 節の信号強度の確率分布特性に関する①～③の性質を利用すると、信号強度の劣化量 $X(p)$ は、 σ_X と時間率ファクタ $\eta(p)$ の積で表わされる。すなわち、

$$X(p) = \eta(p) \cdot \sigma_X \dots\dots\dots(7)$$

ここで $\eta(p)$ は次式でよく近似できる⁽¹¹⁾。

$$\eta(p) = -0.061(\log p)^3 + 0.072(\log p)^2$$

$$- 1.71 \log p + 3.0 \dots\dots\dots(8)$$

(0.01% ≤ p ≤ 50%)

3.2.2 計算結果

ここでは、本推定法による幾つかの計算例を示す。

図6は仰角5°におけるシンチレーションの大きさ(標準偏差値: σ_X)と気象要素との関係を求めたもので、各パラメータの設定値は図中に示してある。参考までに、CCIRによる推定値も図中“CCIR”として示してある。図から気象条件によ

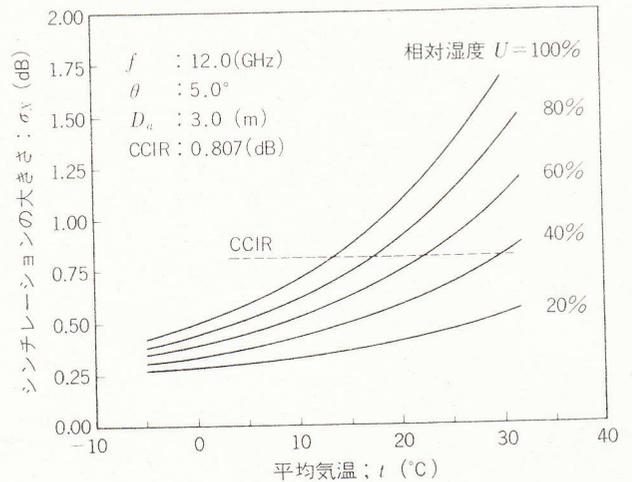


図6 仰角5°におけるシンチレーションの大きさ σ_X と気温・湿度との関係

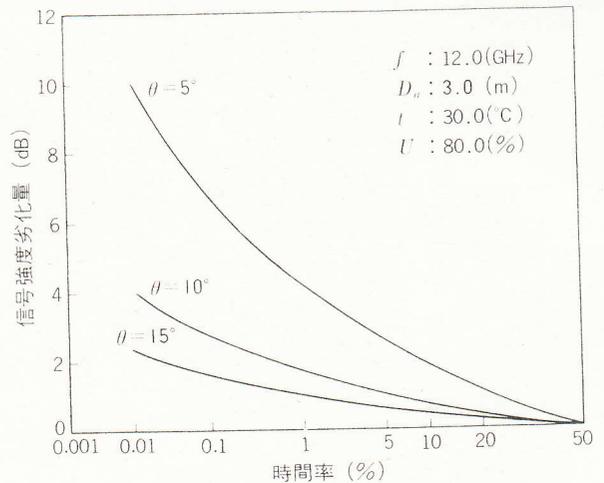


図7 熱帯地域 ($t = 30^\circ, U = 80\%$) を想定したシンチレーションによる信号強度低下量の累積分布特性

ってシンチレーションの発生にかなりの差が生ずることが分かる。

図7はシンチレーションによる信号強度の劣化量(50%値と p %値の差)を時間率に対して示したもので、熱帯地域を想定してパラメータを設定している。同図から、熱帯地域、あるいは日本の夏期のような高温多湿時には仰角が低くなると10 dB近い信号低下もあり得ることが分かる。また、1%、10%といった時間率でも数 dBの劣化量となっており、このような比較的大きい時間率での信号強度の劣化は降雨減衰より、むしろ、シンチレーションの方が卓越するものと予想される。

3.2.3 推定精度の検証

以下、筆者らが実施した西日本各地（山口，浜田，大分，那覇）における伝搬実験の実測データ及び今までに報告されているデータにより，本推定法の精度の検証を行う。

図8は大分及び那覇での11GHz帯ビーコン波受信実験により取得したデータに基づくシンチレーションの月別発生量と推定値の比較を行ったものである。大分における衛星仰角は 6.6° ，那覇では 11.3° であり，同図には両地点における測定期間に対応する温・湿度も示している。同図から，仰角，気候共にかなり異なる2地点の実測値に対して，それぞれよい推定値となっていることが分かる。

図9は，筆者らが西日本各地で取得したKu帯低仰角伝搬実験データ及び今までに報告されているデータと推定値を比較したもので，各データの諸元は参考文献(1)にまとめてある。同図から周波数7.3~14.2GHz，仰角 $4\sim 30^\circ$ ，測定地：日・米・英といった広範囲のパラメータに対してよい精度であることが分かる。

図10は，イギリスにおいて夏期（7~9月）に観測された11GHz帯シンチレーションによる信

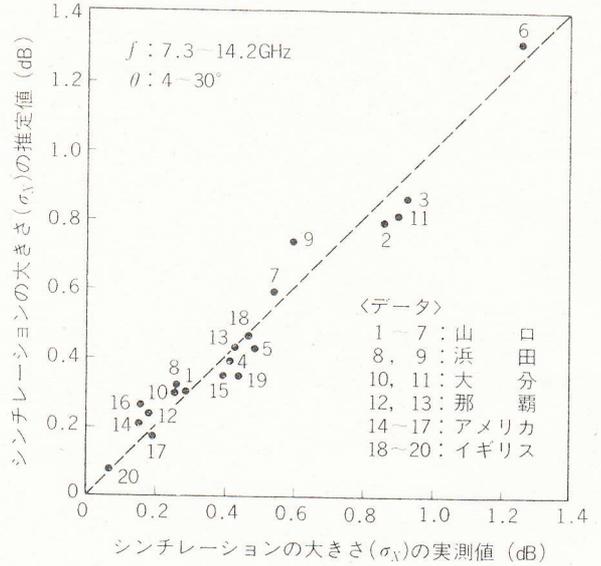


図9 各地における σ_X の実測値と推定値の比較
(各データの諸元は参考文献(1))

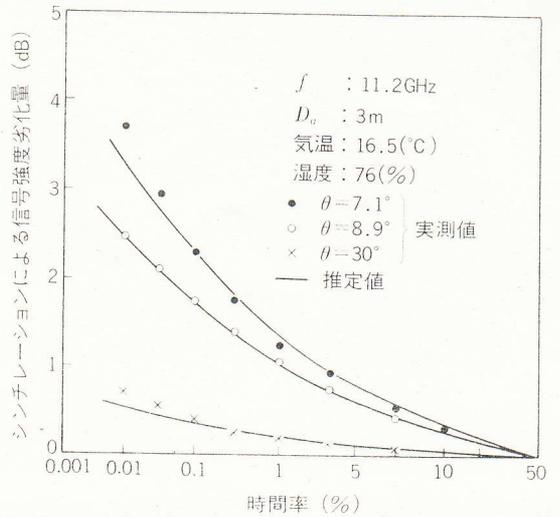


図10 イギリスにおける測定結果⁽⁵⁾⁽⁶⁾との比較
(50%値を0dBとしている)

| 大分 | |
|--------|-------------------------------------------------------------|
| 気温(°C) | 6.0 5.3 9.1 15.8 18.5 21.6 25.9 27.9 23.9 18.5 12.5 6.9 |
| 湿度(%) | 63 64 74 74 74 76 77 75 81 74 65 56 |
| 那覇 | |
| 気温(°C) | 17.1 15.9 18.4 23.0 24.3 26.3 28.7 28.7 28.7 26.2 21.0 17.0 |
| 湿度(%) | 73 75 75 83 84 88 83 80 80 75 61 61 |

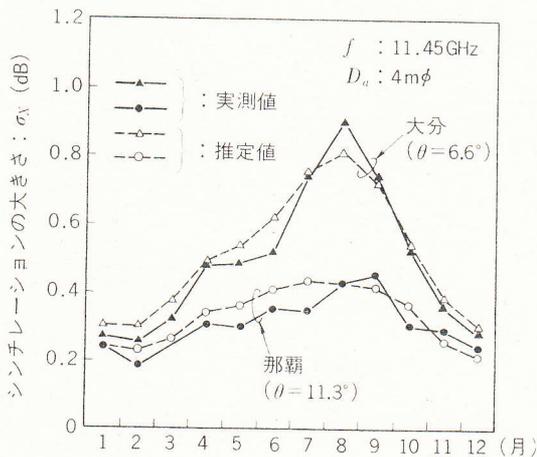


図8 大分及び那覇における実測値と推定値の比較
(April 1988)

号強度劣化の実測累積分布特性（50%値を0dBとして正規化している）^{(5),(6)}と本推定法による推定値を比較している。気象データは，観測地に比較的近いロンドンの値を用いた。図から仰角 7.1° ， 8.9° ， 30° の全データについてよい一致が見られる。

以上の検証例からも明らかなように，本モデルは少なくとも仰角 4° 以上におけるKu帯シンチレーションの推定に関しては，かなりよい精度を有しているといえよう。本稿では，主に無降雨時のシンチレーションを取り扱ったが，筆者らの最近

の検討によれば、降雨時にも無降雨時と同程度のシンチレーションが発生しており、本推定法は、降雨時を含めた全時間に対するシンチレーションを予測する場合にも有効であることが確かめられている⁽¹³⁾。

4. む す び

KDD 研究所が1982~86年の約4年間にわたって山口で実施したKu帯低仰角伝搬実験データを解析し、対流圏シンチレーションの諸特性を明らかにした。また、この実測データを基に新しいシンチレーションの推定法を提案した。この推定法は、従来の推定法では説明できなかったシンチレーションの気候依存性に対するパラメータも含んでおり、多くの地域での適用が期待できる。なお、この種の推定法は、本来、周波数、仰角等のパラメータに対し広い範囲での検証を必要とするが、現時点においては長期間にわたる統計データの報告は限られている。このように限られた範囲ではあるが、本推定法による推定値と実測値はよく一致しており、本推定法が高い精度を有するものと思われる。

一般に、10GHz以上の高い周波数に対する伝搬劣化量を推定する場合、シンチレーション単独で考えるというよりは、むしろ降雨減衰が主体となってこれにシンチレーションが重畳するという場合が現実的な問題となる。このような場合でも、ここで述べたシンチレーション推定法と降雨減衰の推定法を組み合わせる用いることにより、総合的な信号劣化量を精度よく推定することができるものと期待できる。

最後に、日ごろ御指導いただく目黒研究所村谷所長、山田次長、塩川無線伝送研究室長に深謝する。また、実験の実施に当たって多大なる御協力をいただいた馬場主任研究員をはじめとする無線伝送研究室の各位、山口衛星通信所、浜田国際中

継所の関係各位、並びに日本文理大学(大分)、琉球大学の関係各位に心から感謝する。

参 考 文 献

- (1) CCIR : Effects of tropospheric refraction on radio-wave propagation, CCIR SG-5, Rep. 718-2, ITU, Geneva (1986).
- (2) 横井, 山田, 佐藤 : 大気圏外から到来するマイクロ波の減衰とシンチレーション, 信学論(B), **53, B, 5** (1970).
- (3) R. K. Crane : Low elevation angle measurement limitations imposed by the troposphere—An analysis of scintillation observations made at Haystack and Millstone, MIT Lincoln Lab. Tech. Rep. 518, Lexington, Mass., USA (1976).
- (4) T. J. Mouldsley and E. Vilar : Experimental and theoretical statistics of microwave amplitude scintillations on satellite down-links, Trans. Antennas and Propagat., IEEE, **AP-30, 6**, 1099-1106 (1982).
- (5) P. Lo, O. P. Banjo and E. Vilar : Observation of amplitude scintillations on a low elevation earth-space path, Electron. Lett, **20, 7** (1984).
- (6) O. P. Banjo and E. Vilar : Measurement and modeling of amplitude scintillations on low-elevation earth-space paths and impact on communication systems, IEEE, Trans. Communications, **COM-34, 8** (1986).
- (7) M. C. Thompson, L. E. Wood, H. B. James and D. Smith : Phase and amplitude scintillation in the 10 to 40 GHz band, IEEE Trans. Antennas and Propagat., **AP-23, 6**, 792-797 (1975).
- (8) 山田, 馬場, 安川, 古田 : 14/11GHz帯サイトダイバシチ伝搬実験, 信学技報, **AP83-43** (1983).
- (9) Karasawa, Y., Yasukawa, K. and Yamada, M. : Tropospheric scintillation in the 14/11 GHz bands on earth-space paths with low elevation angles, IEEE Trans. Antennas and Propagat., **AP-36, 4** (1988)(in press).
- (10) V. I. Tatarskii : Wave propagation in a turbulent medium (translated by R. A. Silverman), McGraw-hill (1961).
- (11) 唐沢, 松戸, 山田 : 対流圏シンチレーション推定法とその検証, 信学技報, **AP86-114** (1986).
- (12) Karasawa, Y., Yamada, M. and J. E. Allnutt : A new prediction method for tropospheric scintillation on Earth-space paths, IEEE Trans. Antennas and Propagat. (in review).
- (13) 唐沢, 松戸 : 降雨減衰とシンチレーションが混在する低仰角衛星回線の伝搬劣化推定法, 信学技報, **AP87-95** (1987).