

降雨強度の空間相関特性と次世代衛星通信システムへの応用

郵政省通信総合研究所関西支所
福地 一

1 はじめに ーなぜ、通信屋が雨に興味をもつのか？ー

I T 革命と喧伝されているように、人間・社会の情報通信能力増大への要望はとどまるどころがなく、インターネットや携帯通信端末の高速化など、有線系・無線系での通信容量の増大が急務となっている。そのために無線系では従来十分に使用されていない周波数の高い電磁波（30 GHz 以上。ミリ波とも言う）の地上通信、衛星通信での利用が不可欠となっている。また、将来の有人宇宙時代には地球ー宇宙間にミリ波・光を用いた大容量無線通信が不可欠である。

ただし、無線通信に使用する電波は、電波の周波数が高いほどそれに乗せられる情報が増大するといった利点がある反面、電波を伝える大気との相互作用によって通信品質が劣化しやすくなる。その典型的な例が、大気中の水滴、すなわち降雨による電波の減衰である。要するに、電波のエネルギーが途中の雨粒によって吸収されたり目的外の方向に反射されたりして受信点での電力が減少してしまうのである。静止衛星による通信・放送を例にとると、伝搬長さのせいぜい 0.03% の部分の気象現象が通信品質に大きな影響を与える。

従って、将来の衛星通信・放送システムの設計には降雨強度の統計的な知見が不可欠である。これまでは、降雨強度の累積分布の地域依存性に関する検討が主であったが、今後は降雨強度に応じた適応的送信電力制御などの高度な降雨減衰対策技術の評価のために降雨強度の空間相関特性など新たな降雨強度の統計的知見が必要となっている。

2 降雨減衰の対策技術

通信システムではサービス内容によって一定の通信品質を維持するようにシステム設計（送信電力やアンテナの大きさなどを決める）を行う必要がある。これまでは、降雨減衰といってもそれほど影響の大きい電波を使用していた。たとえば家庭におなじみの衛星通信システムでは、BS やスカパーが使用している 12 GHz 帯電波は降雨減衰対策も容易で、伝搬路のある場所の降雨強度の累積分布といった降雨の静的な統計特性を利用してあらかじめ降雨減衰の発生予測をし、それを考慮して送信電力を増やしておく（降雨減衰マージンを付加）といった手法を用いていた。しかし、ミリ波帯などさらに高い周波数になるとそのような手法ではシステムコストの増大や他システムへの干渉といった悪影響が顕著になり実用に難がある。そこで、降雨強度の動的な性質を把握して、降雨の被害がある場所のみを個別に対策するといった動的降雨減衰対策技術や、相関の少ない複数の伝送手段を複数用意しその中から条件のよい伝送状況を選択するといったダイバーシチ技術が不可欠になってきている。このような降雨減衰対策技術の性能をあらかじめ評価するためには、降雨強度の時空間相関特性が非常に有益である。

このような降雨減衰対策技術を分類すると別表のようになる。以下で検討する降雨強度の統計的な性質の検討は、主に動的な対策技術及びダイバーシチ技術の評価及び回線設計に役立てようとするものである。

3 雨のどんな性質が知りたいのか？何がまだ未解決なのか？

前述の降雨減衰対策毎に有益な降雨強度の統計的な性質は以下になる。

(1) 古典的な降雨対策技術に役立つ知見 (1 地点統計所見)

- ① 地域 (例えば日本国内) 毎の降雨強度累積分布
- ② 降雨強度統計にトレンドがあるかないか？
- ③ 長期統計平均値を使用したときのリスクは？統計の stability。変動係数。
- ④ 静的な統計分布の降雨強度測定積分時間依存性 (降雨減衰などの伝搬特性の検討には 1 分程度の積分時間の降雨強度データが必要といわれているが理論的根拠は希薄。他方、入手可能な広域長期降雨強度データは 1 時間、10 分程度の積分時間である。)

(2) Adaptive 及びダイバーシチ降雨対策技術に役立つ知見 (多次元統計所見)

- ① 降雨強度の n 地点結合確率密度分布の定式化及びそのパラメータの地域依存性
→ n 地点サイトダイバーシチ、送信局の適応電力制御
- ② 降雨強度の時間相関特性の定式化及びそのパラメータの地域依存性
→ タイムダイバーシチ
- ③ 上記特性を総合した、降雨強度の m 次元時空間確率密度分布の定式化及びそのパラメータの地域依存性と降雨強度測定積分時間依存性
→ 汎用的な降雨減衰対策効果の推定法の確立

上記のうち、(2) についての検討はまだ不十分であり、統計学の知見を活用して検討を進めるべき課題である。

4 AMeDAS データ等によるデータ処理の例 — どんなことをやっているのか？ —

(OHP で以下のデータ処理例について紹介する。)

(1) 1 地点統計所見 ([Fukuchi;1998])

- ・ 日本国内の降雨強度長期累積分布
- ・ 降雨強度の長期変動の傾向
- ・ 年間累積分布の変動係数
- ・ 太陽活動に起因すると思われる周期的変動の存在

(2) 多次元統計所見

- ・ 英国降雨強度データによる降雨強度空間相関処理例 ([Fukuchi; 1988])
- ・ 3 地点降雨強度確率密度関数を用いた 3 地点サイトダイバーシチ効果の検証 ([中山、他; 1997])
- ・ AMeDAS データによる 2 地点降雨強度相関係数の距離・地域依存性
- ・ AMeDAS データによる降雨強度の自己相関特性

5 清水モデル[清水、寒河江;1990]による2地点降雨強度確率密度分布の定式化

(1) 2変量デルタ対数正規分布(清水モデル)

前述のように、汎用的な降雨減衰対策評価を行うために、清水モデルによる国内2地点降雨強度確率密度分布の定式化を試みる。本モデルは別図に示すように、2地点降雨強度確率密度関数を4つの領域に分類し、それぞれに1次元あるいは2次元対数正規分布を当てはめるものである。

(2) モデルの検証とパラメータの地域依存性

工学的な応用を念頭におくと、以下の点に興味がある。

- ・日本全国を対象とした場合、このモデルのあてはめ精度はどの程度か？
- ・あてはめが妥当としてモデルのパラメータに地域的規則性がないか？(例：地域によらず一定とみなせる、など)

(3) 現在のデータ処理例

(AMeDASデータを用いた以下の処理例をOHPで示す。データの処理はまだ初期段階である。また、モデルの検証及びパラメータの算出については清水先生にお願いしている。)

- ・九州地域を例にとったパラメータ δ の特性
- ・九州地域を例にとった領域1, 2の対数正規分布によるあてはめ
- ・九州地域を例にとった領域3の確率密度等高線(センサードデータによるパラメータの導出が必要)

(4) 今後の課題

日本全国の降雨強度について2変量デルタ対数正規分布(清水モデル)による定式化が可能であれば工学的価値が非常に高い。ただし、パラメータの導出法やパラメータの規則性に複雑さがあれば、統計学的厳密さと工学的利用の容易さのトレードオフを図り、近似による誤差評価を考慮してモデルを利用する必要があるかもしれない。乱暴な言い方かもしれないが、簡便な活用が期待できれば、降雨強度分布モデルの工学的に有益な部分(降雨強度が大きい部分)の精度さえ確保できれば、それ以外の部分(たとえば0mm/h近傍の降雨減衰が十分小さい領域)の確率密度分布については実測と誤差があっても構わない場合もあり得る。当面、AMeDASデータを利用したモデルのあてはめと検証、そのモデルの工学的利用の検証を図っていきたい。

6 今後の課題 —統計の専門家から教えていただきたいこと—

(1) 降雨強度統計パラメータの積分時間依存性の理論的導出とその検証

長期間で広域の降雨強度データは気象庁の提供しているAMeDASから得られるが、その測定積分時間が10分、60分であり、降雨減衰の検討といった工学的応用を考慮すると長い。降雨減衰も伝搬路上の降雨強度の積分に対応する量であるため、必ずしも降雨強度の瞬時値まで積分時間を小さくする必要はなく、国際的には1分程度の積分時間で検討すべきとされているが、その理論的根拠は希薄である。これまでも、実験的な降雨強度統計の積分時間依存性が研究されてきているが、理論的な検討が必要である。特に、前述の関連特性は積分時間に大きく依存することが知られており[Fukuchi;1988]、ある積分時間の結果を他の積分時間の結果に変換できる手法が確立できればその工学的価値は非常に高いと

思う。

(2) その他

- ①分布形の goodness-of-fit 評価:清水モデルの領域 3 が工学的な興味のある領域である。そのような 2 次元領域 (しかもセンサードデータ) を対象として、1 次元での正規確率紙のような直感的な分布形へのあてはめを評価する手法はないだろうか? また、国内外のデータを考慮して簡潔さを失わない範囲での汎用的な分布形の候補は他にないだろうか?
- ②時間相関と空間相関の関連:降雨の物理的なイメージを考慮すると、雨域の形状とその移動が降雨強度の空間相関、時間相関と関連している。雨域の移動速度などを仮定することによって空間相関、時間相関の相互変換や時空間相関総合した定式化ができないか?
- ③多次元分布への拡張:時空間相関の定式化もその一部であるが、n 地点ダイバーシチなどの検討には 2 次元以上の分布形を検討する必要がある。パラメータの算出などの複雑さが急増すると思われるが、工学的な応用を考慮して簡易的あるいは近似的な多次元降雨強度分布の定式化とパラメータの算出ができないだろうか?

7 参考文献

- [Fukuchi;1988] H.Fukuchi, "Correlation properties of rainfall rates in the United Kingdom", IEE Proc. vol.135, Pt.H, No.2(1988), pp.83-88.
- [Fukuchi;1998] H.Fukuchi, "A study on statistical stability of rainfall rates in Japan," Proc. 8th URSI Com-F Open Symposium(22-25 Sept. 1998), Aveiro.
- [清水、寒河江;1990] 清水邦夫、寒河江雅彦, 「ゼロを含む 2 変量データのモデル化と日降水量データの解析」、応用統計学, vol.19, No.1 (1990) pp.19-31.
- [中山、他;1997] 中山哲也、都竹愛一郎、黒木聖司、福地一, 「3 変数対数正規モデルによるサイトダイバーシチの定量的評価」電子情報通信学会論文誌 B-II, vol.J80-B-II, No.11(1997), pp.1009-1010.