

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560406

研究課題名（和文） 衛星観測データを用いた地上降雨の空間相関特性の研究とその通信回線設計への応用

研究課題名（英文） Study on Spatial Correlation Characteristics of Ground Rainfall by Using Satellite Data and Its Application to Design of Communication Links

研究代表者

真鍋 武嗣 (MANABE TAKESHI)

大阪府立大学・工学研究科・教授

研究者番号：50358991

研究成果の概要（和文）：衛星搭載降雨レーダによって観測された地表面降雨強度累積分布と地上設置雨量計によって観測された降雨強度累積分布から降雨強度の空間相関係数を推定する新しい手法を提案し、熱帯降雨観測衛星搭載降雨レーダのデータに適用し、日本全国 52 カ所の気象観測官署における降雨強度空間相関係数を推定した。その結果、降雨強度空間特性の地域依存性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：A new method to predict spatial correlation characteristics of rainfall intensity from cumulative distributions of rainfall intensity measured by satellite-borne rain radar and those measured by ground-based rain gauge. By applying this method to the data obtained by the Precipitation Radar aboard the Tropical Rainfall Measuring Mission Satellite, the spatial correlation characteristics are estimated for the areas around 52 meteorological stations all over Japan. As a result, the spatial correlation characteristics are found to show clear regional dependence in central and western Japan that are consistent with our empirical knowledge about rain climatology.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：通信方式(無線, 有線, 衛星, 光, 移動), 電波伝搬

## 1. 研究開始当初の背景

マイクロ波帯以上の周波数帯の地上回線や衛星通信回線は降雨によって減衰を受け、回線品質が劣化する、従って通信回線設計の際には、降雨減衰マージンを設ける必要があるため、回線の降雨減衰量の分布を統計的にできるだけ正確に予測することが不可欠である。このような地上回線や衛星回線の降雨減衰量の統計分布を推定するために、国際電気通信連合(ITU)では地上の降雨観測データ

に基づく降雨強度累積分布から地上回線や衛星回線の降雨減衰累積分布を統計的に推定する方法が勧告されており、広く回線設計に利用されている。

この ITU により勧告されている推定法においては、回線設計を行おうとする地点の地上降雨強度累積分布データが利用できない場合には、ヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF)の 15 年間にわたる 6 時間予報値データおよび全球降水機構計画(GCPC)による

10年間の月間降水量データから緯度1.5度×経度1.5度で全球にわたって導出された降雨強度累積分布を用いることとなっている。しかしながら、これらの降雨強度累積分布の全球分布の基礎となっている地上降雨データはヨーロッパ地域をはじめとする地上降雨データの蓄積の豊富な地域においては良い精度の統計量を与えるが、海洋上や熱帯地域や開発途上国においては数値モデルによる推測部分が多く含まれ統計的な信頼性が低く、降雨減衰統計推定の精度良く推定できないことが問題となっている。

一方、1997年に打ち上げられた熱帯降雨観測衛星(TRMM)は、これまでの観測手段では得られなかった熱帯・亜熱帯地域の降雨について詳細なデータを得ることを目的とするミッションであり、これまで、エルニーニョ現象をはじめとする地球規模での気候変動や気象現象の解明に大きな貢献をしてきた。また、TRMM搭載降雨レーダのデータは特に高い空間的分解能を有しているため、当初よりこのような気象学ばかりではなく、上記の様な通信回線設計のための降雨強度統計データへの利用も期待されていたが、これまで通信分野への利用の研究は殆どなされていなかった。その理由の一つとして、TRMM降雨レーダで観測される地上降雨強度は、衛星搭載レーダのビーム幅の広がりにより地上での水平分解能が約4km程度であるため、TRMM搭載降雨レーダの観測データから直接得られる地上での降雨強度累積分布を、通信回線設計のための瞬時地点降雨強度の累積分布として直接用いた場合、空間的に局在する強い降雨の降雨強度を大幅に過小評価することになり、通信回線の設計で問題となる大きな減衰に対応する時間率を大幅に過小評価することになることがあげられる。従って、衛星搭載降雨レーダによって観測された降雨強度累積分布データから通信回線の設計に必要とされる1分間程度の積分時間の瞬時地点降雨強度累積分布に変換するためには、降雨の空間相関特性を考慮した新しい推定法の開発が必要とされていた。

## 2. 研究の目的

マイクロ波帯以上の周波数対の地上通信回線や衛星通信回線において、降雨による減衰は大きな問題となる。このような通信回線の降雨減衰を統計的に精度よく推定するために降雨の空間的な不均一性を表す空間相関特性を考慮した高精度な降雨減衰推定法の開発が求められている。本研究では、熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載の降雨レーダによる長年の降雨強度統計データと、地上設置の雨量計による降雨強度統計データから、世界各地における降雨強度の空間相関特性と

その地域依存性について明らかにし、それによって得られた降雨強度空間相関特性を考慮した降雨減衰推定法の開発を目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究では、衛星搭載降雨レーダデータによって得られた降雨強度累積分布データと地上観測の地点降雨強度累積分布データから降雨強度の空間相関特性を統計的に推定する手法を提案する。このために、(1)地上観測降雨強度データの解析とデータベースの構築、(2)衛星搭載降雨レーダデータの解析とデータベースの構築、(3)降雨強度空間相関特性の推定法の提案と検証、(4)複数の衛星放送回線を利用した降雨減衰データの取得、(5)降雨強度の空間相関特性を利用した複数の衛星を用いた衛星軌道ダイバーシティ法の有効性の実証を行うため、以下の方法で研究を進めた。

### (1)地上観測降雨強度の解析とデータベースの構築

地上観測降雨強度としては、気象庁気象観測官署52地点における1分間降雨強度観測データを元データとして用いた。但し、このデータは0.5mm転倒マス型雨量計の毎分の雨量観測値であるため、時間降雨強度換算の降雨強度分解能は30mm/hであり、TRMMレーダデータとの比較や降雨減衰推定のための1分間降雨強度累積分布を得るためには分解能が不十分である。本研究では、小野等の提案による乱数補正を加えた秒単位均し分配処理法(SRDP)に改良を加えた新しい改良型SRDP法を提案し、これを用いて、全国52気象観測官署における1分間降雨強度累積分布の精度の良いデータベースを構築する。

### (2)衛星搭載降雨レーダデータの解析とデータベースの構築

熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載降雨レーダの地上降雨強度(2A25)データの2001年～2009年の9年間のデータを用いて、上記の全国52地点の気象観測官署のそれぞれを中心とした半径150km範囲の降雨強度累積分布を算出したデータベースを構築する。

### (3)降雨強度空間相関特性の推定法の提案と検証

前項(2)で得られたTRMM搭載降雨レーダによって測定された降雨強度累積分布が、レーダフットプリントで空間的に平均化された降雨強度であることから、これを前項(1)で得られた地上の地点降雨強度の累積分布と比較することにより、降雨強度の空間相関特性を推定する手法を提案し、これを用いて、全国の52気象観測官署付近の降雨強度空間相関特性をすいてすることにより、降雨強度

空間相関特性の地域依存性を明らかにする。

(4)複数の衛星放送回線を利用した降雨減衰データの取得

降雨強度空間相関特性により強降雨が狭い範囲に局在する傾向があることを利用した衛星軌道ダイバーシティ法について実証するために、情報通信研究機構鹿島宇宙技術センターの協力を得て、方位角の異なった複数の静止放送衛星の降雨減衰測定データを約2年間に渡って取得する。

(5)衛星軌道ダイバーシティ法の有効性の実証

上記(4)で取得した複数の静止放送衛星電波の降雨減衰の長期間測定データを用いて、降雨減衰に対する衛星軌道ダイバーシティの効果の評価しその有効性について検討する。

4. 研究成果

(1)地上観測降雨強度の解析とデータベースの構築

衛星搭載降雨レーダデータとの比較のためには、降雨強度分解能の高い地上観測降雨強度データが必要である。現在、全国の気象官署で0.5mm転倒マス型雨量計1分値データが蓄積されているが積分時間1分間換算では30mm/hの降雨強度分解能しか得られない。このような転倒マス型雨量計データを高分解能の1分間降雨強度を推定する方法として、小野等により乱数補正を加えた秒単位均し分配処理(SRDP)が提案されているが、本研究

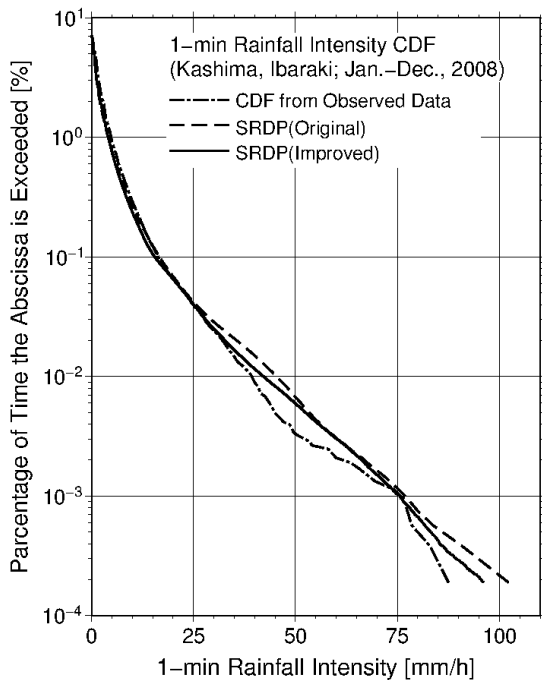


図1: 均し処理によって推定された1分間降雨強度の比較

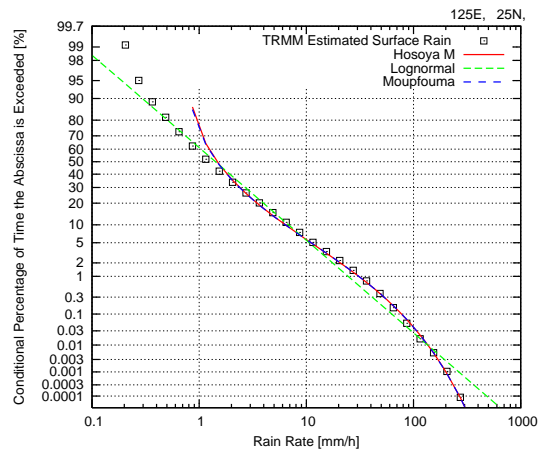


図2: TRMMによって測定された伊良子付近の降雨強度累積分布. 実測値, 細矢のM分布, Moupfouma分布の比較

では、小野等のSRDPについて転倒マス型雨量計の計測原理に即さない処理過程が存在することを明らかにし、これについて改良した手法を提案した。併せて統計処理の改良法についても提案した。これ等の改良により、転倒マス型雨量計1分値データから、特に時間率の小さな降雨強度域で1分間降雨強度累積分布を、従来より精度よく推定できることを示した。図1に、従来法による推定結果[SRDP(Original)]と改良法による推定結果[SRDP(improved)]を高分解能の水滴計数型降雨強度計による測定結果との比較の一例を示す。

(2)衛星搭載降雨レーダデータの解析とデータベースの構築

熱帯降雨観測衛星(TRMM)搭載降雨レーダデータの9年間分の降雨強度プロファイルデータの(2A25)を統計的に解析することにより、日本全国52の気象観測官署を中心とする半径150kmの範囲の地表面降雨強度の降雨強度累積分布の地表面降雨強度を算出しデータベースとした。その結果、降雨強度累積分布が1mm/h以上の領域でおおむね細矢のM分布で良く近似できることを明らかにした。

那覇付近でTRMMデータから得られた降雨強度累積分布を、対数正規分布、細矢のM分布、Moupfoumaの分布にフィットさせた結果の例を図2に示す。対数正規分布に比べて細矢のM分布は時間率の小さい強い降雨の領域でよい一致を示していることが分かる。また細矢のM分布は2パラメータの分布であるにも関わらず、パラメータ数の多いMoupfouma分布に遜色のない一致を示していることが分かる。

(3)降雨強度空間相関特性の推定

TRMM衛星搭載降雨レーダによって観測さ

れた地上降雨強度について、全国 52 カ所の気象観測官署それぞれの半径 150km の範囲内で降雨が統計的に一様であると仮定すると、TRMM で観測された空間平均の降雨強度  $R_s$  の降雨条件付き平均値  $m_{R_s}$  と分散  $\sigma_{R_s}^2$  と、降雨強度  $R$  の条件付き平均値  $m_R$  と分散  $\sigma_R^2$  の間には、 $m_R = m_{R_s}$ 、 $K\sigma_R^2 = \sigma_{R_s}^2$  の関係がある。ここで、分散の低減係数  $K$  は TRMM のアンテナビームフットプリントパターンを  $G(d)$  とすると次式であたえられる。

$$K = A^2 \iint G(d_1)^2 G(d_2)^2 \exp(-\alpha |d_1 - d_2|^{1/2}) dS$$

ここで  $A = \iint G(|r|)^2 dS$ 、 $\iint dS$  は地表面での面積分である。ここで、日本の降雨の空間相関関数として  $\rho(d) = \exp(-\alpha d^{1/2})$  型の関数を仮定することにより、TRMM によって観測された降雨強度累積分布と地上で観測された降雨強度累積分布から、降雨の空間相関関数のパラメータ  $\alpha$  を推定することが出来る。

図 3 に、このようにして得られた、全国 52 気象観測所周辺 150km データに基づく、降雨強度空間相関係数  $\alpha$  の分布を示す。この図より、瀬戸内海沿岸や内陸では  $\alpha$  が小さく、日本海・太平洋沿岸では  $\alpha$  が大きいという地域依存性があることが読みとれる。

#### (4) 複数の衛星放送回線を利用した降雨減衰データの取得

情報通信研究機構鹿島宇宙技術センターの協力を得て、方位角の異なった複数の静止衛星 4 機 (JCSAT-2A, JCSAT-3A, BSAT-2A, AsiaSat-3S9) のダウンリンク受信データを用いてそれぞれの衛星の降雨減衰特性を約 2 年間に渡って取得・解析した。

#### (5) 衛星軌道ダイバーシティ法の有効性の実証

約 2 年間にわたって蓄積された複数の静止衛星ダウンリンク受信データを解析することにより複数の衛星回線の降雨減衰累積特性とその間の衛星軌道ダイバーシティ特性を求めた、その結果、2 衛星間の軌道ダイバ

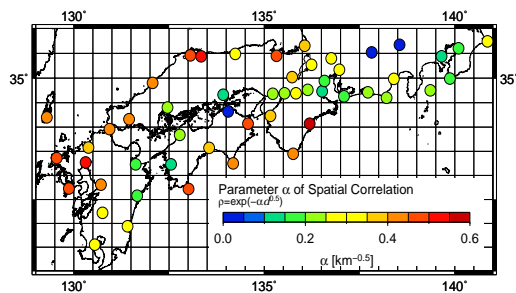


図 3: 提案手法で推定した全国 52 気象観測官署付近の降雨強度相関特性のパラメータ  $\alpha$

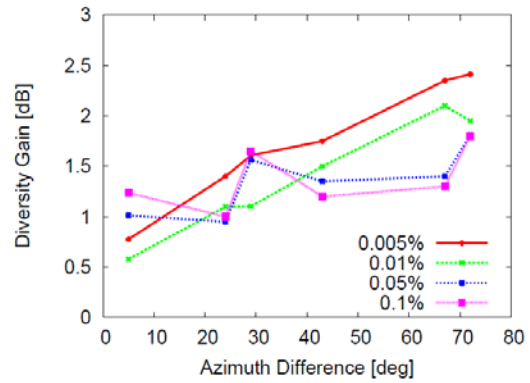


図 4: 2 衛星を用いた衛星軌道ダイバーシティにおけるダイバーシティ利得の方位差依存性

ーシティ利得は、強降雨に対応する時間率 0.01% 以下については衛星間の方位角差に対してほぼ線形に増大するのに対して、0.05% 以上の時間率に対しては衛星方位角差にダイバーシティ利得は顕著に依存しないことを明らかにした。図 4 に、本研究で得られた、2 衛星間の軌道ダイバーシティ利得と 2 衛星の方位角差の関係を、種々の累積時間率の場合について求めた結果を示す。このことは、強降雨は空間的に局在する傾向があるのに対して弱い降雨は空間的に広がった構造を持っていることに対応していると考えられる。さらに、軌道ダイバーシティの効果については降雨の空間相関特性のみならず、地球局周辺における雨域移動の方向特性にも大きく依存することを、気象庁 1km メッシュ全国合成レーダデータとの比較より有からにした。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 10 件)

- ① 岩佐亜有美, 真鍋武嗣, 中條渉, 山本伸一, 方位角差を持つ Ku 帯静止衛星の受信レベル変動遅れと雨域移動速度に関する考察, 2012 年電子情報通信学会総合大会, 2012 年 3 月 23 日, 岡山大学(岡山市).
- ② 岩佐亜有美, 真鍋武嗣, 中條渉, 山本伸一, 複数の Ku 帯衛星を利用した軌道ダイバーシティ効果の測定, 平成 23 年電気関係学会関西連合大会, 2011 年 10 月 30 日, 兵庫県立大学(姫路市).
- ③ 岩佐亜有美, 真鍋武嗣, 中條渉, 山本伸一, 複数の衛星を利用した衛星軌道ダイバーシティの方位角差依存性, 2011 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2011 年 9 月 14 日, 北海道大学(札幌市).

- ④ T. Manabe and R. Jozaki, Interference of spatial correlation characteristics of rainfall intensity from the data of satellite-borne precipitation radar and rain gauges, XXXth URSI General Assembly and Scientific Symposium, 2011年8月17日, Istanbul, Turkey.
- ⑤ 上崎亮平, 真鍋武嗣, 衛星搭載降雨レーダおよび地上雨量計による観測データを用いた地上空強度空間相関特性の推定とその地域依存性, 2011年電子情報通信学会総合大会, 2011年3月15日, 東京都市大学(東京都).
- ⑥ 上崎亮平, 真鍋武嗣, TRMM 搭載降雨レーダ及び気象庁転倒マス型雨量計の観測データを用いた地上降雨強度空間相関特性の推定, 2010年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会, 2010年9月17日, 大阪府立大(大阪府).
- ⑦ 上崎亮平, 真鍋武嗣, 山本伸一, 中條渉, 気象庁1分間降水データからの1分間降雨強度累積分布の高精度推定法の改良, 電子情報通信学会アンテナ伝播研究会, 2010年7月22日, 北見工業大学(北海道).
- ⑧ 千原昇悟, 寺本卓也, 中條渉, 真鍋武嗣, 山本伸一, 都竹愛一郎, 状態遷移マトリクスを用いた降雨時の衛星稼働率評価と周波数ダイバーシティへの応用, 2010年電子情報通信学会総合大会, 2010年3月18日, 東北大学(宮城県).
- ⑨ 上崎亮平, 真鍋武嗣, 衛星搭載降雨レーダおよび地上降雨量観測データから得られた地上降雨空間相関特性の地域依存性, 平成22年電気関係学会関西連合大会, 2010年11月14日, 立命館大学(滋賀県).
- ⑩ 加藤智也, 真鍋武嗣, 中條渉, 山本伸一, Ku 帯衛星回線降雨減衰における衛星軌道ダイバーシティ特性の方位差依存性, 2010年電子情報通信学会総合大会, 2010年3月18日, 東北大学(宮城県).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

真鍋 武嗣 (MANABE TAKESHI)  
大阪府立大学・工学研究科・教授  
研究者番号：50358991

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号

### (4) 研究協力者

中條 渉 (CHUJO WATARU)  
名城大学・電気電子工学科・教授  
研究者番号：40292289

山本 伸一 (YAMAMOTO SHINICHI)  
情報通信研究機構・研究員  
研究者番号：50348933