

雨滴粒径分布観測による短時間降雨強度の変動特性

Variation of the instantaneous rainfall intensity
estimated from the observation of raindrop size distribution

東京大学生産技術研究所 ○沖 大幹*、虫明 功臣**

by Taikan OKI and Katumi MUSIAKE

The raindrop size distribution(DSD) was observed with electro mechanical disdrometers. Instantaneous rainfall intensity of each 1 minute was estimated for 82 days measurement. The observational period contains severe rainfall by both typhoon and front with low depression. The dependence of the probability distribution of rainfall intensity and the fractional time of rainfall on accumulation time was presented. These results are considered to be helpful to understand the relationship between the spatial variability and spatial scale. The auto-correlation and power spectra was calculated using 1 minute sequential rainfall data. Result shows the characteristic time scale of 4-5 minutes, 10-15 minutes, 40 minutes and 300 minutes.

*Keywords: Instantaneous rainfall intensity, probability
Distribution of rainfall, time spectra of rainfall, rain-
drop size distribution,*

1. はじめに

降水のリモートセンシングでは広域の分布情報が瞬時に取得される。有意な予測時間を長くとれるという意味でこの点は実時間洪水予測などを行なう場合には大きな長所となっている。しかしながら降水リモートセンシングは時間的には極めて間欠的な観測であり連続的に降水を貯留して測定する地上観測とは性質が大きく異なると考えられる。地上に設置された降水レーダでも連続的に観測しているわけではないし、静止軌道以外の衛星搭載センサによる観測では特にこの間欠性が著しくなる。軌道要素によるサンプリングエラーの影響を調べるには通常利用可能な1時間程度の分解能を持ったデータを利用する方法もある^[1]けれども、瞬間的な状態量を測定しているリモートセンシングの観測シミュレーションに用いるためにはより短時間の瞬間的な降水強度の性質を調べておく必要があると考えられる。特に、平均化によって降水の統計的性質がどのように変化するかについて知っておくことが重要である。

以下では雨滴粒径分布観測に基づいて推定された1分間降雨強度データを用いてその時間的変動特性を調べ、日周期や平均降雨強度といった性質ならびにその時間持続性や時間スペクトル分布などを明らかにする。

2. 雨滴粒径分布観測

2.1 観測とデータ処理

東京大学生産技術研究所(35°40'N-139°44'E)屋上にJoss and Waldvogel^[2]のマイクロフォン型雨滴計、ディストロメータRD69を設置し継続的な観測を開始した。雨滴計は2m四方高さ1mの網戸状風防の中に設置し、風による観測誤差を軽減している。前報^[3]と同様に等価直径0.3-5.0mm以上までを20チャンネルで収録した。観測を55秒間行ない、残りの5秒間に測器特性の補正をして記録するように設定し、1分間ごとの集計値を収録した。観測された各粒径の雨滴個数から次のように1分間平均降雨強度を推定した。

単位時間 $T_{obs}(s)$ あたりに落下してくる i チャンネルの雨滴の個数 $n(i)$ の計測より、等価直径 $D(mm)$ の雨滴の密度は

$$N(D_i) = \frac{n(i)}{S \times T_{obs} \times V_i(D_i) \times \Delta D_i} \quad (1)$$

として求められる。ここに、 S はディストロメータ感知部の表面積($5 \times 10^{-3} m^2$)、 ΔD_i は i チャンネルの粒径の階級幅(mm)、 $V_i(D)$ は雨滴の終端落下速度($m s^{-1}$)である。この $N(D)$ から降雨強度 $R(mm h^{-1})$ は

$$R = 3.6 \times 10^{-3} \int_0^{\infty} \frac{4\pi}{3} \left(\frac{D}{2}\right)^3 N(D) V_i(D) dD \quad (2)$$

*正会員 博士(工学) 東京大学生産技術研究所助手 (〒106 港区六本木7-22-1)

**正会員 工学博士 東京大学生産技術研究所教授 (〒106 港区六本木7-22-1)

で表現される。ここで(1)式と(2)式の $V_t(D)$ はキャンセルされるので、地上雨滴粒径分布観測からの降雨量の推定は終端落下速度の与え方によらないことがわかる。降雨強度のSI単位は $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ とすべきところであるが慣用に従い、いずれの時間スケールでも mm h^{-1} に換算して統一した。

マイクロフォン型雨滴計では電源ノイズや測器部環境により実際の観測では晴天でもごく弱い信号(雨滴)が検出されてしまう。また、従来の雨量強度計では測定されない程の弱い降雨の場合にはサンプリングエラーも大きく、結果の考察が困難になると考えられるので1分間降雨強度が 0.1 mm h^{-1} 未満のデータは 0.0 mm h^{-1} とした。こうしたノイズは等価直径 $0.3\text{--}0.5 \text{ mm}$ に相当する下から2つまでのチャンネルに対して1分間に数個程度観測される程度なのでこの操作で消去できていると思われる。逆にこの操作によって 0.1 mm h^{-1} 未満の弱い降雨が連続していた場合には1日あたり 100 mm もの降雨量を消去してしまうおそれがあるが、実際には次章で述べる82日分の総降雨量はノイズ消去前で 587.4 mm 、消去後で 583.3 mm であったのでそうした影響は少ないものと判断される。以下ではこの操作をした降雨量時系列を用いて議論する。

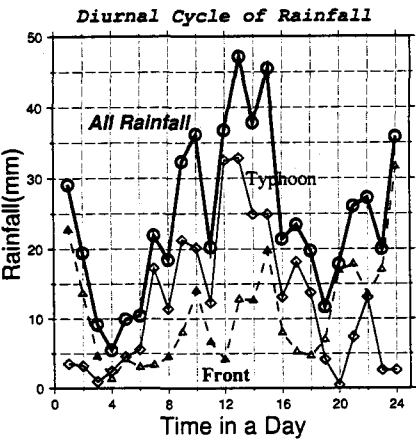


図 1: 全観測データに見られた降雨日周期。台風性降雨および前線性降雨のみの時刻別総降水量も合わせて示す。

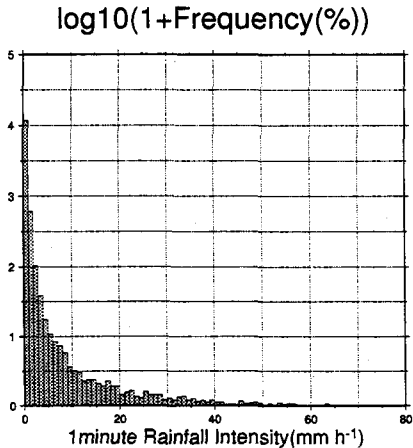


図 2: 1分間平均降水強度 (mm/h) の頻度分布。縦軸は正規化した頻度 (%) に 1(%) を加えて自然対数をとった値で表示している。

Period	連続観測期間	降雨イベント	主な要因	総降雨量 (mm)
1	7/31-8/9	7/31-8/3	低気圧および前線	35.3
		8/6	低気圧および前線	45.1
2	8/25-10/2	8/26-27	台風 11 号	208.2
		9/4	台風 13 号	27.2
		9/6-9	前線および台風 14 号	57.7
		9/21-23	秋雨前線	29.7
3	10/13-11/14	10/30	低気圧および前線	24.8
		11/11-14	低気圧および前線	122.3
合計		7/31-11/14		583.3

表 1: 1993 年に雨滴計で観測された主な降雨イベント

2.2 観測結果概要

1993 年 7 月 31 日からこれまでの間に欠測期間を除いて 82 日分のデータが収集された。観測された主な降雨イベントは表-1の通りである。欠測期間は測定システムの他地点での観測による中断や、出張中の停電に伴うものであり、特に降雨イベントのみを観測したものではない。ただし、ここでは日降雨量 1 mm 以上の連続した日をひとつの降雨イベントとし、その合計が 10 mm 以上のものを主なものと便宜的に定めた。表にあげた降雨イベント総計で 550 mm になり、観測期間中の降雨のほぼ全てがこれらの主な降雨イベント中にもたらされたことになる。

台風 11 号による豪雨は首都圏の都市河川に多くの被害を与えたものであり、台風 13 号は鹿児島上陸時には戦後最大級の勢力と呼ばれた台風である。14 号は弱かったものの、いずれのケースも台風を取り巻くレインバンドによる降雨が雨滴計で観測されている。また、梅雨明け宣言が見直されるなど 1993 年は 8 月になっても梅雨前線が日本列島南方に停滞し、それらが時おり北上することによってまとまった降雨をもたらし、引続き 9 月には秋雨前線としてふたたび活動を開始した。以下で特に台風時の降雨と前線時の降雨とを区分して取り扱う場合には表-1 で台風が関係している 3 ケースを台風性、それ以外を前線性とみなすことにする。この期間には夕刻の対流性雲によると思われる強い降雨は観測されなかった。

この観測期間の時刻別総降雨量を示したのが図-1 である。全データについての結果に現われている深夜および正午付近の二つのピークはそれぞれ前線性ならびに台風性の降雨に対応していることがわかる。比較的長い期間のデータに基づく気候値的解析結果 [4] では梅雨時の明け方に降水量の多いことが知られており、今回のデータに現われた台風性降雨と前線性降雨の差が偶然であるか否かについてはそうした長期データで再検討する必要があるだろう。

log10(1+Frequency(%))

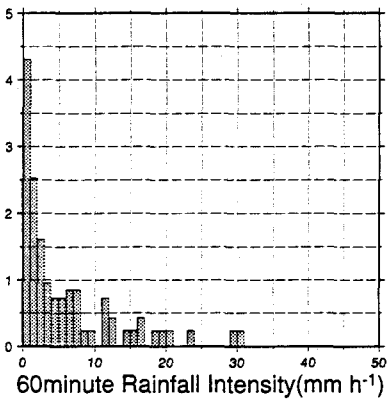


図 3: 60 分間平均降水強度 (mm h⁻¹) の頻度分布。

Time Scale and Rainfall

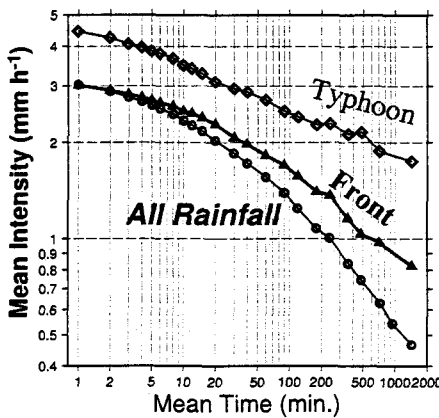


図 4: 平均化時間を変えた場合の平均的な降水強度 (mm h⁻¹)。全データ (All Rainfall)、台風性降雨 (Typhoon) および前線性降雨 (Front) に対する算定結果をそれぞれ示す。

3. 降雨強度と時間スケール

3.1 降水強度の頻度分布と平均化時間

観測された全データを元に集計した 1 分間降雨強度の頻度分布を図-2 に、1 時間降雨量の頻度分布を図-3 に示す。ここでは無降雨を省いた時系列に対して (正規化した頻度 (%) + 1) の自然対数で示している。平均化時間を長くすると強い降水の割合が減ることがわかる。図-4 に平均化時間を変えた場合の平均降水強度を示す。仮に降水強度の頻度分布が指数分布

$$f(x) = \frac{1}{\tau} e^{-(x/\tau)} \quad (0 \geq x) \quad (3)$$

で近似されるとすると、各時間スケールで平均された降水強度分布の平均値の期待値はこの母数 τ であるので、平均化時間を長くすることによる頻度分布の変化が図-4 によって表現されていることになる。

全データや前線性の降雨については 10-20 分付近と 200 分付近に変曲点が見られるが、台風性の降雨では平均時間を長くしてもあまり平均降水強度が減少しない点が特徴的である。これは後にも示すが台風による降雨が持続的であることを意味している。また、前線性の降雨としては表-1 に挙げた日のデータしか使用していないにも関わらず平均化時間 1-5 分では全データを利用した値とほぼ一致している点も興味深い。すなわち日降雨量 (Mean Time=1440 分) が大きなデータのみを集めても、それを構成している短い平均時間の降雨強度は通常の弱い日降雨を構成している降雨強度と変わらず、その生起回数が比較的多いだけであるということが推定される。

3.2 平均化時間と降雨時間の割合

図-4 の算定にあたっては 1 分間降水強度時系列に基づいて重複なしに長い集計時間の降水強度時系列を作成し、無降雨のデータを取り除いて平均値を作成している。従って平均化時間によらず時系列の総降水量は保存されるので、図-4 に示され

Time Scale and Rainfall

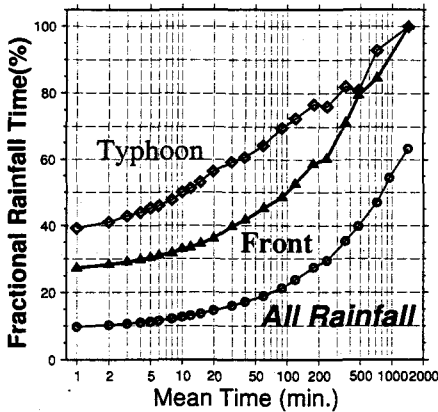


図5: 全観測時間に対して降雨が観測された時間の割合(%)。平均化時間を変えた場合の変化を全データ (All Rainfall)、台風性降雨 (Typhoon) および前線性降雨 (Front) に対して示す。

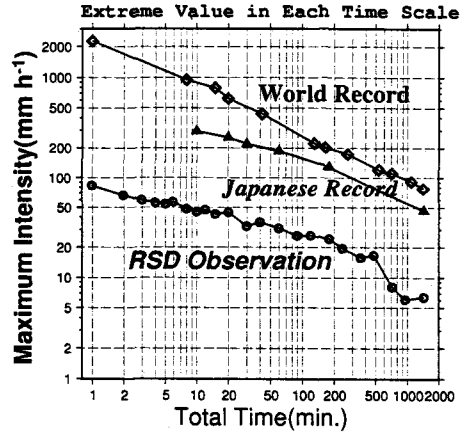


図6: 各時間スケールに対する降水強度の極値。mm h⁻¹ に換算されている。日本記録ならびに世界記録も参考に示す。

た平均降水強度は各時間スケールで見た‘降水が観測された時間の割合’と表裏一体の関係にある。この全観測時間に対する降雨時間の割合(%)が平均化時間によってどのように変化するかを同様に図-5に示す。

今回の観測期間全平均 (All Rainfall) でも日降雨量 (1440 分) で見た降雨時間の割合が 60%と大きい値になっているのは、日降雨量 0.1mm にも満たない弱いデータも含まれているためである。これらのうちあるものは 1 分間平均で 0.1 mm h⁻¹ を越えるノイズが集積したものであるが、このしきい値を 1.0mm h⁻¹ にしても依然としてこの弱い日降雨量は残る。そこで本研究では実際の現象としてもこうしたごく弱い降雨が地表に到達しているものと考えことにする。

確率予報の解釈に関して立平^[5]が述べているように降水強度の時間変動を確率的な空間変動に解釈することができるので、こうした降雨時間の割合は降雨面積比率に読み代えることができる。全球大循環モデルにおいてマクロスケールで与えられる気象条件からそのグリッドにおける地表面過程を算定する際にはサブグリッドスケールの物理量の変動が時として重要な役割を果たす^[6]が、この降雨面積比率は特に遮断蒸発量の推定に大きな影響を及ぼすことが Eltahir and Bras^[7]によって示されている。また、この降雨面積比率と広域平均降水量との相関が良いことが Doneaud^[8]以来多くの研究によって明らかにされており、それが一般化されたしきい値法^[9]はある降水強度以上の降雨面積比率との相関を用いる手法であり、リモートセンシングによる広域かつ瞬時の情報 (snap shot) から面積平均雨量を算定するアルゴリズムとして期待されている。

これらを念頭に置くと図-5は、次のように解釈できる。すなわち、ある時間スケール (例えば 1 分) に対応する空間スケール (例えば 500m) ごとに平均化された降水量の広域空間分布のヒストグラムをとった場合、台風域や前線域などに対応して平均的な降雨面積比率 (例えばそれぞれ 39%、27%) が与えられ、それは平均化空間スケールが大きくなるにつれて増大する。すなわち、しきい値法の最適しきい値の選択や傾きの決定に関して既存の降水量データを用いて検討が行なわれているが、そこで得られる結果は利用するデータの空間分解能や降水種別に大きく依存しているということになる。

3.3 極値と時間スケール

今回の観測結果から得られた各時間スケールでの極値を示したのが図-6である。気象年鑑^[10]に基づいて世界記録ならびに日本記録も示す。各時間内の総降水量ではなくて 1 時間降水強度に換算している。今回は 82 日間と極めて短い期間であったので世界記録に比べて 1 オーダー、日本記録に比べても 5 倍以上異なっている。一般的な雨量-継続時間関係を提出するには今後のデータの蓄積を待つ必要があるだろうが、通常観測されている 1 時間単位よりも細かい時間分解能に対しても両対数軸上でほぼ直線的に延長できそうである点は注目すべき結果である。6 時間よりも長い時間スケールについてはサンプル数が極めて少なくなるため直線から外れているものと考えられる。

3.4 短時間降水強度の自己相関時間とスペクトル解析

次に、短い降水強度の特徴的な変動周期を抽出するため 1 分間降水強度時系列について自己相関係数を求めた。表-1に示された 3 つの連続観測期間に対してそれぞれ 3000 分まで算定した結果が図-7である。台風による降雨が含まれる Period 2

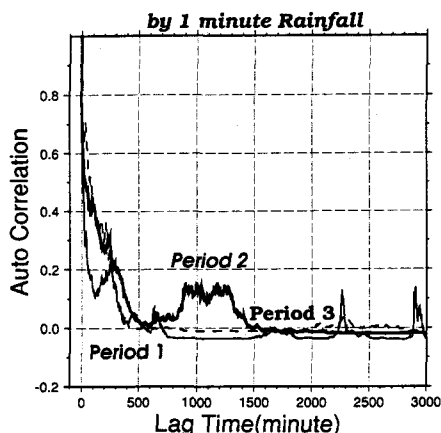


図 7: 雨滴計で観測された 1 分間平均降水強度の自己相関係数。3 つの連続観測期間それぞれに対する結果を示す。

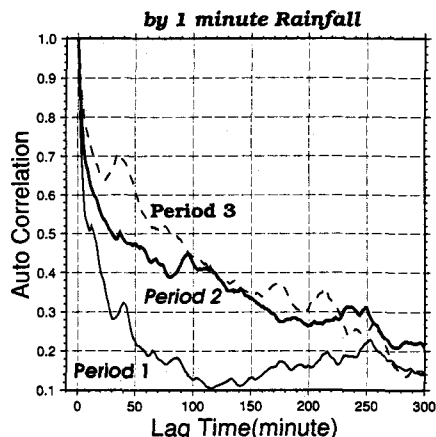


図 8: 図-7の短い時間部分の拡大図。

で lag time が 900 分 (15 時間) から 1300 分 (約 22 時間) にかけて自己相関係数が高くなっているのに対して、前線性の降雨データである Period 1 および 3 では 2250 分 (約 1 日半) および 2900 分 (約 2 日) においてスパイク状に自己相関係数が高くなっているのがわかる。図-7 の 300 分までの部分を拡大したのが図-8 である。

夏季である Period 1 では自己相関係数の低減が速く、24 分程度で $1/e$ 以下に落ちる。12 分のあたりと 40 分付近にピークがあり、この 40 分付近のピークは同じく前線性の降雨を含む Period 3 にも顕著に見られ、台風性降雨を多く含む Period 2 でも認められる。この 40 分という長さはおそらく降雨を構成する雲ひとつひとつの発生減衰サイクルに対応しているものと考えられる。Period 2 では 90-100 分のあたりにピークが見られ、自己相関係数が $1/e$ 以下になるのは 2 時間を過ぎてからである。また、Period 1 とともに 4 時間付近の係数がやや高いことが見てとれるが、この長さは集中した降雨をもたらし雲システムに対応しているものと推測される。これらに対して秋雨および低気圧性降雨が観測された Period 3 は他の Period に比べて相関係数が高く、先に述べた 40 分付近の他に 180 分、210 分付近にもピークがあって、自己相関係数が $1/e$ 以下になるには 2-3 時間を要している。

スペクトル解析は GMT [11] に含まれるプログラムを用いた。このプログラムはマルチ重複ウィンドウのアンサンブル平均を用いる Welch [12] の手法を利用しており、ここではウィンドウごとのサンプル個数を 128 とした。連続観測期間ごとに算定された結果を図-9 に示す。自己相関係数に見られた Period 1 の 12 分や Period 3 の 40 分に対応するピークがパワースペクトルにも現われている。また、自己相関解析でははっきりしなかったが、いずれの Period についても 4-5 分の周期が存在することが図-9 には示されている。

実際に観測されたデータの 1 例を図-10 に示す。12-15 分程度の周期で大きな雨滴まで観測されて全体の降雨強度が強くなっており、さらに 5 分程度のスパイク状の周期がその上に乗っている様子がわかる。こうした変動がしばしば観測されて上記のパワースペクトルとなって現われているものと考えられる。こうした極めて短時間の降水強度情報は通常のスキニングレーダでも取得しにくいものであり、こうした観測とデータの蓄積は非常に重要であると考えられる。

4. おわりに

連続的な雨滴粒径分布観測を行ない、測定値から算定される 1 分間降雨強度データを用いて、降雨の短時間変動特性を調べた。頻度分布や降雨時平均降雨強度が平均化時間スケールによってどのように変化するかを示され、降雨面積比率を用いた研究に対する影響が考察された。また、自己相関係数ならびに時間スペクトルを算定し 4-5 分、12-15 分ならびに 40 分といった通常の雨量計データでは得られない短い時間にも特徴的な周期があることが示された。

現在もデータは継続して収集中であり、蓄積することによって極値などについても統計的な種々の解析が可能になるものと期待される。今後はより長期の連続的なデータの取得とともに、得られた結果の統計的なモデル化や経験式のあてはめなどが重要であろう。また鉛直レーダなどと組み合わせることで観測することによって、降雨をもたらし雲の構造やそのメカニズムの解明にも役立つものと考えられる。

謝辞：本研究の一部は平成 5 年度文部省科学研究費一般研究 (c) (代表: 松本淳) ならびに (財) 河川情報センター研究開発助成 (代表: 虫明功臣) の援助の下に行なわれました。ここに記して感謝の意を表します。

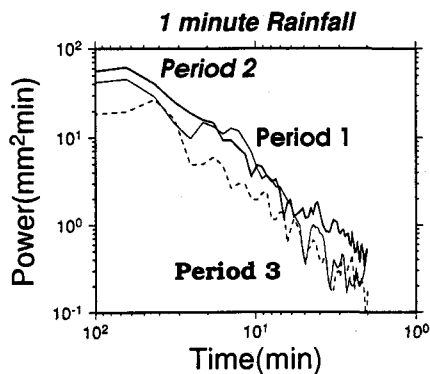


図 9: 雨滴計で観測された 1 分間降水量の時間スペクトル。3 つの連続した観測期間それぞれに対する結果を示す。

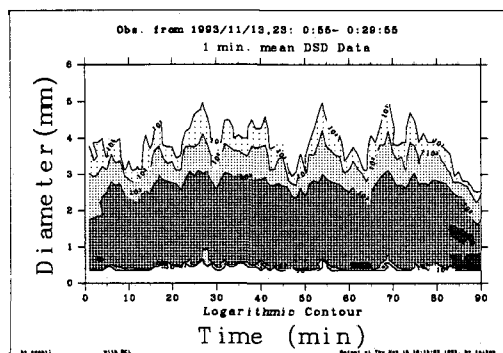


図 10: 1993 年 11 月 13 日 23 時から 14 日 1 時 30 分にかけて観測された雨滴粒径分布の時間変化。縦軸が雨滴の等価直径、横軸が時間であり濃淡で雨滴粒径密度を示す。

参考文献

- [1] R. Oki and A. Sumi. Sampling simulation of TRMM rainfall estimation using Radar-AMeDAS composite. *J. Appl. Meteor.*, 1994. submitted.
- [2] J. Joss and A. Waldvogel. Raindrop size distribution and sampling size errors. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 26, pp. 566-569, 1969.
- [3] 沖大幹, 虫明功臣. 雨滴粒径分布データを用いたレーダ換算定数の同定. *水工学論文集*, Vol. 37, pp. 9-14, 1993.
- [4] T. Oki and K. Musiake. Seasonal change of the diurnal cycle of precipitation over Japan and Malaysia. *J. Appl. Meteor.*, 1994. submitted.
- [5] 立平良三. 新しい天気予報. 第 II 期気象学のプロムナード, No. 2. 東京堂出版, 1986.
- [6] 仲江川敏之, 沖大幹, 虫明功臣. サブグリッドスケールの分布を考慮した蒸発量の算定について. *水工学論文集*, Vol. 38, , 1994. submitted.
- [7] E. A. B. Eltahir and R. L. Bras. A description of rainfall interception over large areas. *J. Climate*, Vol. 6, pp. 1002-1008, 1993.
- [8] A. A. Doneaud, P. L. Smith, and S. Sengupta. A simple method for estimating convective rain volume over an area. *Water Resour. Res.*, Vol. 17, No. 6, pp. 1676-1682, 1981.
- [9] B. Kedem, L. S. Chiu, and G. R. North. Estimation of mean rain rate: application to satellite observations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 95 D2, pp. 1965-1972, 1990.
- [10] 宮沢清司, 小山博. 日本のおもな気象要素別ランキング 20. 気象年鑑 1993 年版, pp. 224-230. 大蔵省印刷局, 1993.
- [11] P. Wessel and W. H. F. Smith. Free software helps map and display data. *EOS Trans. AGU*, Vol. 72, No. 441, pp. 445-446, 1991.
- [12] P. D. Welch. The use of fast fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Trans. Audio and Electroacoustics*, Vol. AU-15, No. 2, 1967.