

レーダ雨量計データを用いた地上雨量観測点密度の決め方

Some Criteria on Density of Raingage Stations determined by Radar Observations

筑波大学研究生 正員 ○末 包 昭 彦
 国立防災科学技術センター 正員 木 下 武 雄
 建設省関東地方建設局 正員 矢 野 洋一郎

1 はじめに

水文観測において入力としての雨量を正確に測定することは、非常に重要な問題であると同時に大変難しい問題でもある。分布として降っている雨を測定するのは実質的に点とみなされる地上雨量計によるために、この観測点密度を如何に決めるかということがあり、これまでも多くの研究がなされている¹⁾。これらの研究の基になっている考えは、降雨の空間分布はわからないものであり、これを地上雨量計で離散的に測定するために統計的手法などによって資料の解析を行っている。しかし、ここに述べるようにレーダ雨量計を用いれば降雨の空間分布そのものを観測すること、例えば空間的孤立波としての特徴を十分に観測することが可能であり、その結果をもとに地上雨量計の観測点密度の評価を行うことは大変有意義であると考えられる。

このような背景を踏まえて、本研究ではレーダ雨量計のデータを用いて、一雨のある時刻における距離方向での雨域のスペクトル解析を行い、降雨種別毎にその現象を把握できるような地上雨量計の観測点密度を決定する方法を提案する。

2 レーダ雨量計の概要

レーダ雨量計は、目標体積中の降雨粒子からの受信電力を雨量に換算することによって、間接的に雨量を測定する装置であり、1966年に赤城山地蔵岳（標高1,674m）にレーダが設置され、当初建設省関東地方建設局と気象庁等との共同研究によって研究が始まった。以来10余年にわたって関東地方建設局を中心として研究が続けられて現在に至っており、そのシステムの維持・管理は利根川ダム統合管理事務所においてなされている。

レーダ雨量計では、Fig.1に示すように赤城山を中心として定量的には半径120kmの範囲内で、定性的には半径198kmの範囲内で各メッシュ毎に5

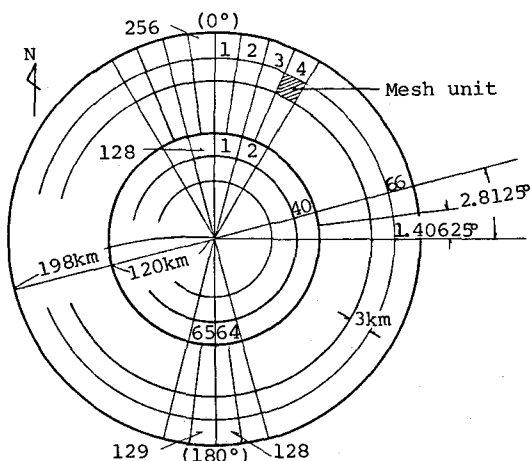


Fig.1 Observed Area and Mesh Units by the Radar

Table 1 Characteristics of the Radar

Beam width	1.43°	Quantitative observation range	120km range 360°
Antenna rotation rate	10rpm	Qualitative observation range	198km range 360°
Transmitting frequency	5,300MHZ	Mesh unit for observation	3km×2.8125° (within 120km)
Peak transmitting power	250kw		3km×1.40625° (beyond 120km)
Transmitting pulse width	2μs		
Pulse repetition frequency	Approx. 450PPS	Data renewal time	Every 5min.

分毎の雨量データが得られる。その特性をTable 1に、システムの概要をFig.2に示す。

理論的には次に示すレーダ方程式が基本になっている。

$$P_r = \frac{P_t G^2 h \theta^2 \pi^3}{2^{10} (\log_e 2) r^2 L^2} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \Sigma D^6 F 10^{-0.2 \int_0^r (K_a + k_R R^a + k_c M) dr} \quad (1)$$

ここで P_r : 受信電力, P_t : 送信電力, G : アンテナの最大利得, h : パルス長, θ : 電力半値幅, r : 目標体積までの距離, L : 波長, ϵ : 粒子の複素誘電率, D : 雨粒の直径, F : ビームが完全に雨域に覆われていないための誤差その他測定誤差以外に生ずる誤差を総合した係数, K_a : 大気による減衰定数, k_R : 雨による減衰係数, R : 降雨強度, k_c : 雲による減衰係数, M : 雲の含水量である。

レーダ反射因子 $Z (= \Sigma D^6)$ と R との関係は雨粒の空間における粒度分布により決るが、多くの観測結果から実用的に次式で近似してよいことが知られている。

$$Z = BR^b \quad (2)$$

それ故、(1)式においてレーダ装置によって決まる諸定数を C として(2)式を代入すると、

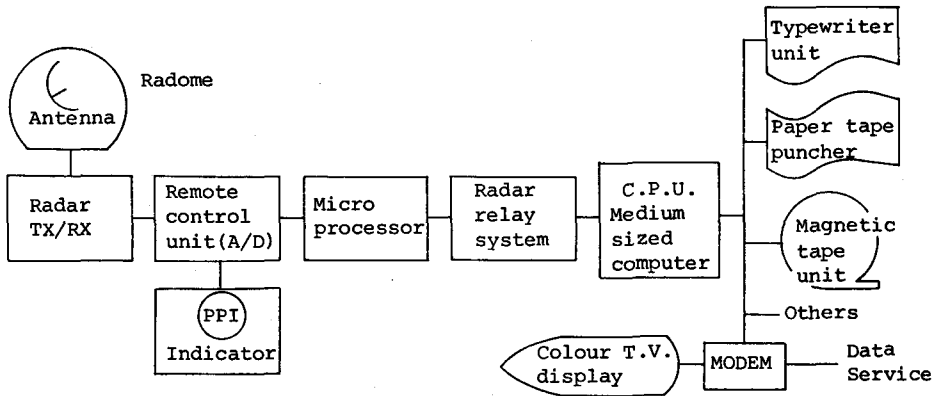


Fig.2 The Radar Rainfall Measurement System

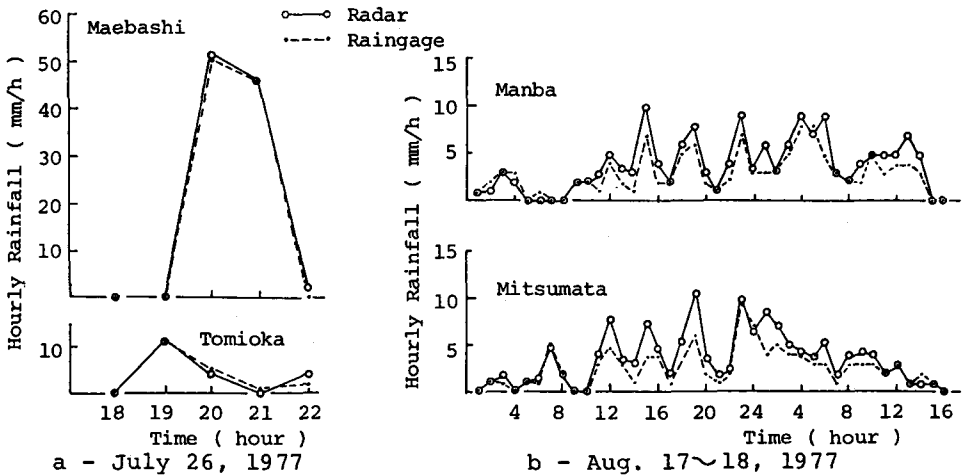


Fig.3 Comparison of Hourly Rainfalls by the Radar and the Raingages

$$P_r = FC \frac{BR^3}{r^2} 10^{-0.2 \int_0^r (K_a + k_R R^a + k_M M) dr} \quad (3)$$

となり、 P_r の実測によって R が求められる。

このようにして求められた(3)式には、レーレー近似などの近似や仮定が入っているほか、装置そのものの精度などによってレーダ特有の誤差が生じる可能性がある。しかし10余年にわたる研究と最近の科学技術の進歩によって実用性の高いデータが得られている。Fig.3は本研究で解析を行った雨の一部について、レーダ雨量計の時間雨量のデータと地上雨量計のそれとを比較したものである（場所についてはFig.4を参照）。aにおいては非常に良い対応を示しており、bにおいても山岳があってレーダ雨量計の精度が比較的悪い地域であるにもかかわらず、かなり良い対応を示している。解析に用いたこの他のレーダ雨量計のデータもFig.3と同様に両者は良い対応を示している。

3 スペクトル解析の方法

レーダ雨量計では、極座標的に降雨の空間分布を表現するため、極座標上で与えられた孤立波の波数成分を検出するのは複雑であるので、ここでは半径方向の一次元的な空間座標上の降雨波形の解析を行う。その手法としては、時系列解析を援用して通常に行われるスペクトル解析を空間座標 x によって行う。

スペクトルを求める一般的な方法としては、Blackman-Tukey法、Fast Fourier Transform法、Maximum Entropy Methodといった方法があるが、これらはすべてデータが定常不規則過程とみなせる場合に適用できる方法である。しかし、ある時刻における降雨の空間分布は孤立波と考えられることから、ここでは前述の方法を用いず直接数値積分を行うという初歩的な方法を用いる。

ある時刻におけるある地点の雨量を $r(x)$ とおくと、これのフーリエ変換 $S(f)$ は次式であらわされる。

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} r(x) e^{-i2\pi f x} dx \quad (f: \text{波数}) \quad (4)$$

(4)式は一般に複素数なので実数部を R 、虚数部を I とおくと、 $S(f)$ は

$$S(f) = R_{S(f)} + iI_{S(f)}$$

である。

振幅スペクトルを A 、位相スペクトルを P とおくと、

$$P_{S(f)} = \arctan [I_{S(f)} / R_{S(f)}] \quad (5)$$

$$A_{S(f)} = [R_{S(f)}^2 + I_{S(f)}^2]^{1/2} \quad (6)$$

となる。

直接数値積分を行うため、(4)式を和の形であらわすと、

$$\begin{aligned} S(f) &= R_{S(f)} + iI_{S(f)} = \sum_0^X r(x) \cos(2\pi f x) \Delta x - i \sum_0^X r(x) \sin(2\pi f x) \Delta x \\ &= \sum_{n=1}^N r(n\Delta x) \cos(2\pi f n\Delta x) \Delta x - i \sum_{n=1}^N r(n\Delta x) \sin(2\pi f n\Delta x) \Delta x \end{aligned} \quad (7)$$

となり、(7)式の $R_{S(f)}$ および $I_{S(f)}$ を(5)(6)式に代入することによって $A_{S(f)}$ 、 $P_{S(f)}$ が求められる。ここで $N = X/\Delta x$ である。

次に実際の計算に先だって、レーダ雨量計のメッシュが有限個であることに起因する誤差について考える。

Table 2 How long interval we can discuss within a certain amount of error. (after Kinoshita)

Error Wave form	1 %	10 %
Isoscale triangle	20times	5times
Exponential function	20times	4times

この誤差は数値計算の本質に関するものであり、特に高い波数領域において顕著にあらわれる。

データが定常不規則過程であれば議論できる最短波長は読取間隔の2倍であると言われているが、本研究で扱う雨量データは孤立波に近いと考えられるため、フーリエ変換によって生じる誤差について論じる必要がある。木下(1966)²⁾はこの問題について論じており、形状が単純な二等辺三角形と指数関数減少曲線について理論的なフーリエ変換と、10等分および100等分した場合の数値積分によるフーリエ変換とを比較し、Table 2の結果を示している。以下の議論ではこの結果を適用する。

4 解析結果と考察

対象とした降雨は、(1)雷雨—1977年7月26日、1978年7月4日、7日、8日、11日の5例—、(2)房総沖を通過した台風による雨—1977年9月19日—、(3)停滞前線による雨—1977年8月17日—の3種類である。

解析はFig.4に示す範囲において方位角を固定し、半径方向の各メッシュの時間雨量を用いて行った。したがって $N=28$, $\Delta x=3\text{ km}$, $X=84\text{ km}$ となり、 $r(x)$ は時間雨量(mm/h)である。ここでは孤立波のもつ振幅スペクトル $A_S(f)$ について述べることにし、またレーダ雨量計の半径方向の観測範囲よりも広範囲で降雨がある場合は、孤立派のスペクトル計算が不可能になるので対象から除外している。

上記3種類の降雨について行ったフーリエ解析の代表的な結果をFig.5~7に示す。

これらのスペクトルを比較すると、降雨のメカニズムに起因すると思われるスペクトル特性の相違がみられる。

この解析結果から波形全般についてみると、地上雨量計の観測点密度を決定するため、振幅スペクトルのもつ直流分($f=0$, すなわち $L=\infty$ におけるスペクトル)の $1/10$, 換言すれば孤立波面積の $1/10$ まであらわされる波長をカットオフ波長と仮定した。これは一般に直流分の $1/10$ をカットオフすることにより、その現象の90%を表現できると考えられるからである。

このようにして得られたカットオフ波長か

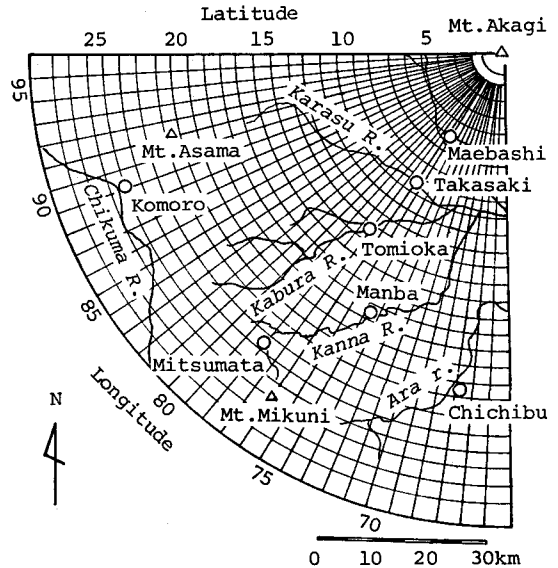


Fig.4 Study Area

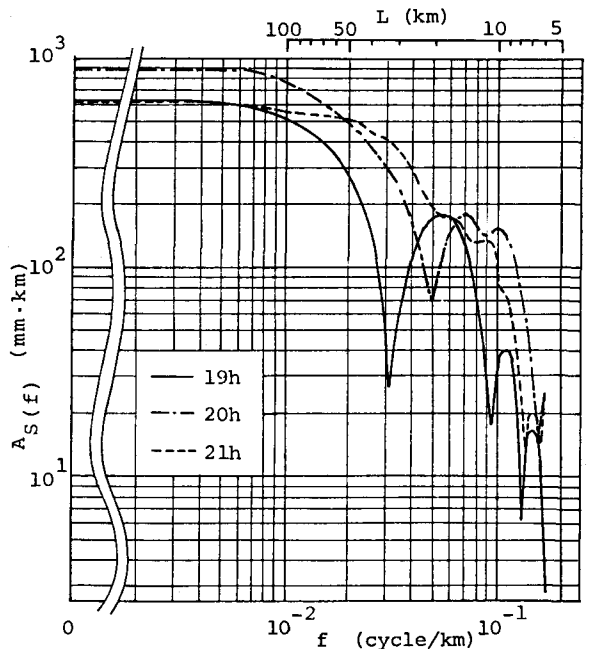


Fig.5 Raw Spectrum along the Longitude No.78 (July 26, 1977)

ら10%の誤差の範囲を考えると、すでに3章で記述したようにカットオフ波長の1/5の間隔で地上雨量計を設置すればよいことになる。密度は間隔の逆数で与えられる。このことを3種類の降雨別に、Fig.4に示す赤城山を中心としたNa65からNa96の各方向について、時間毎に地上雨量計の観測点密度を求め平均した結果をTable3に示す。Table3は一般に言われているように雷雨のように局地性の強い降雨については地上雨量計を高密度で、停滞前線性の雨のように一様性の強い降雨については低密度でそれを設置すればよいことをあらわしている。

Table3の結果のうち台風および停滞前線による雨では、降雨記録によるとXよりも広範囲で一様に降雨があることもあり、その場合この数字よりさらに低密度でもよいことがわかるが、解析に用いたレーダ雨量計の観測範囲からはここまでしか言えない。このことは雷雨のように局地性の強い降雨を除けば、建設省の50km²、すなわち約7kmに1観測点³やWMOの25km²、すなわち5kmに1観測点⁴という今までの地上雨量計の配置基準が妥当であったことを示している。

なお、 $\Delta x = 3$ kmであるにもかかわらず雷雨の場合、結果は2kmに1観測点となって矛盾しているが、これはレーダ雨量計の現在の性能からは仕方のないことである。しかし、結果としてこのことは相当程度の高密度に地上雨量計を配置しなければならないことを示唆しており、レーダ雨量計の性能を改善すればこの方面の評価基準もより一層明らかになるであろう。

5 まとめ

レーダ雨量計のデータを用いて3種類の降雨について、ある時刻における距離方向での一次元のスペクトル解析を行いTable3に示す結果が得られた。このような観測点密度の決定法は従来の方法とは全く異なるものであり、レーダ雨量計の出現によって初めて可能になったものである。

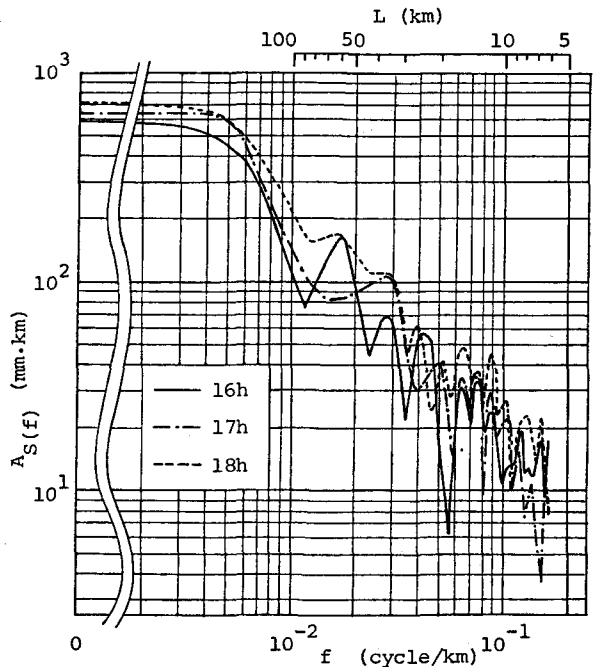


Fig.6 Raw Spectrum along the Longitude No.78 (Sep. 19, 1977)

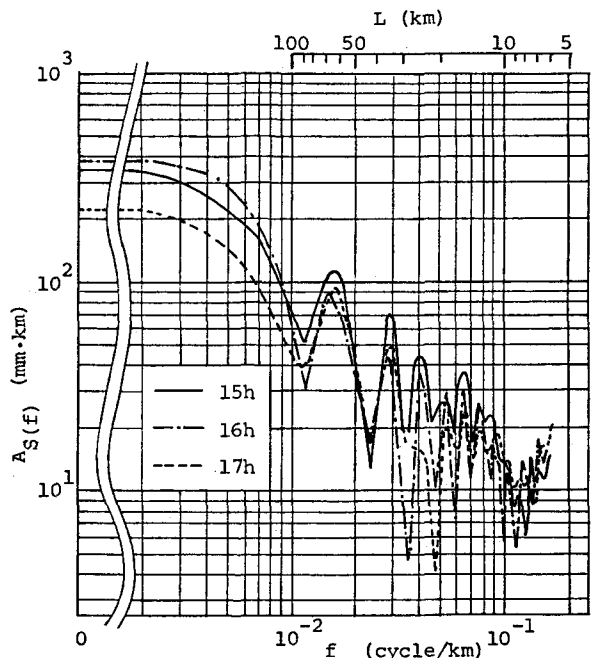


Fig.7 Raw Spectrum along the Longitude No.82 (Aug. 17, 1977)

本研究では方法を提案するという
ことから解析例も少なく、解析も距
離方向の一次元に留めたが、今後さ
らに多くの降雨例について一次元だ
けでなく二次元での解析を行うこと
により、より一層適切な地上雨量計
の観測点密度が決定できると考えら
れる。

Table 3 Density of Raingage Stations

	Cut-off wavelength (km)	Density (1/km)
Thunderstorm	10	1/2
Typhoon	30	1/6
Stationary front	40	1/8

研究の実施にあたり、筑波大学地球科学系市川正巳教授に御教示を頂いた。記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 例えば橋本健（1977）：標本計画法による面積雨量の精度および信頼度の評価に関する研究，土木研究
所報告，第 149 号.
- 2) 木下武雄（1966）：雨量・水位などの測定時間間隔のきめ方，土木研究所報告，第 130 号の 3.
- 3) 建設省（1976）：建設省河川砂防技術基準（案）.
- 4) WMO（1974）：Guide to Hydrological Practices.