

雨音解析による短時間雨量強度の推定について

On the possibility of small time scale measurement of rainfall intensity by Sound Analysis

*

**

林 尚志 ジーナ・ナハリン 石川忠晴

By Hisashi HAYASHI, Zeenat NAHRIN and Tadaharu ISHIKAWA

An experiment is made for a small time scale measurement of rainfall intensity by spectrum analysis of a time series of rain sound. An basic idea for analysis is that the volume of each rain drop can be correlated to the intensity of sound component around a resonance frequency of a can which contains the recorder. The relation between one rain drop volume and sound intensity is assumed as a power function. The time series of rainfall intensity estimated by the analysis agreed very well with rain gauge data when the exponent of the power function is set as a proper value. This result indicates the possibility to develop an advanced device which can measure rainfall intensity with fine time resolution.

Keywords measurement of rainfall, small time scale, sound analysis

1. はじめに

到達時間の短い都市河川等の流出計算には、通常の雨量計で観測されるより短時間の雨量強度が問題とされることがある。近年、レーダー雨量計の発達に伴い、短時間の雨量強度の変化が把握できるようになりつつあるが、そのキャリブレーションにあたっては、地上で実測される短時間雨量の特性に関するデータが必要とされ¹⁾、新たな機器の開発も試みられている。^{2) 3)}

ところで、トタン屋根や窓ガラスに当たる雨の音が、雨量強度や雨粒の大きさによって微妙に変化することは、我々が日常経験するところである。そこで本研究では、物理的意味の明確な量を直接計測するのではなく、人間が聴くのと同一雨音をオーディオ解析することにより短時間雨量を推定することを考え、実験を行った。この実験は、本格的な計測装置を試作する前段階として、上記のアイディアの実現可能性を調べるために、手近の器具を用いて行ったものである。したがって、計測方法自体はまだ洗練されていないが、雨音と雨量強度との間にきわめて良い相関関係が見いだされたので、報告する。

* 学生員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境物理工学専攻
(〒226 横浜市緑区長津田町4259)

** 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境物理工学専攻研究生 (同上)

*** 正会員 工博 東京工業大学教授 総合理工学研究科 環境物理工学専攻 (同上)

2. 実験方法

ブリキ製の缶に小型のミニディスクレコーダーを入れて、野外に放置し、缶に雨粒が当たる音を録音した。(写真-1の手前にある缶) また同時に、転倒升式雨量計によって雨量を測定した。ただし、転倒升式雨量計では、雨量強度が小さい場合に短時間雨量を計測できないので、写真-1に示すように傘を付け、集雨面積を拡大して計測した。

この装置では、風の強い場合、雨粒は缶の上面だけでなく側面にも当たる。また、マイクロフォンに指向性があるため、雨粒の当たる場所によって音が多少変化する。したがって、計測器としてはかなりラフなものであるが、冒頭に述べたように、音響による降雨測定の可能性を調べるという目的に対しては、十分であると考え使用した。

観測及び解析は1995年10月8日の秋雨前線による降雨に対して行った。録音にはミニディスクレコーダー(KENWOOD社製DMC-E7R)を用いた。

3. 録音データの処理法

録音結果をサンプリング周波数22255Hzでコンピューター(Macintosh LCⅢ)に取り込み、サウンド編集ソフトウェア(マクロメディア社 SoundEdit16)を用いてスペクトル解析を行い、図-1に示すような、音圧レベル

(上段)と非定常スペクトル(下段)の時系列を求める。ただし、スペクトルの値は“濃淡”で表している。この図から、雨粒が缶上面を打って発生した音響が短時間(0.05秒程度)に減衰している様子や、またひとつひとつの雨粒が明確に分離されていることもわかる。特に、大きなパワー(図中で白くなっている部分)の集中している2000Hz~6000Hz付近のスペクトル強度が、雨粒ひとつひとつの打撃の様子を明確に表しているようである。(このことはカラー出力でより明確になる)そこで、このパワーを各時刻で積算した値の時系列を作成し、この時系列と転倒升式雨量計で得られた降雨強度時系列の関係を検討することとした。(このように周波数帯を限ることにより、風音などのノイズの除去も期待できる。)

$$J(t, \Delta t) = \sum_{f=2000}^{6000} \{ S(f, t, \Delta t) \} \quad (1)$$

ここに、 f は周波数、 t は時刻である。また、 Δt は非定常スペクトルを求める際の1データ時間長であり、このソフトウェアでは0.00045sec~0.36secの間で指定できる。非定常スペクトル S は f と t と Δt の関数であり、 $\Delta f = 22\text{Hz}$ ごとに得られる。上式で定義される量 J を、ここでは便宜的に、雨粒音響強度と呼ぶことにする。このソフトウェアから求められる J は、 Δt ごとの離散的時系列である。

さて、ここで Δt の設定方法が問題となる。図-1には Δt を小さく設定した場合の図を示したが、ひとつの雨粒の影響が尾を引いた時系列となり、解析処理が難しくなる。一方 Δt を大きく取ると、時間的に接近して落下した複数の雨粒を分離できなくなる。そこで、図-1に見える残響の減衰時間を調べ、 Δt を0.046secに設定することとした。図-2はこの Δt で得られた雨粒音響強度の時系列の例であり、一粒の雨粒が概ねひとつのパルスになっていることがわかる。なお、以後は Δt を定数として扱い、 $J(t, \Delta t) \Rightarrow I(t)$ と書く。

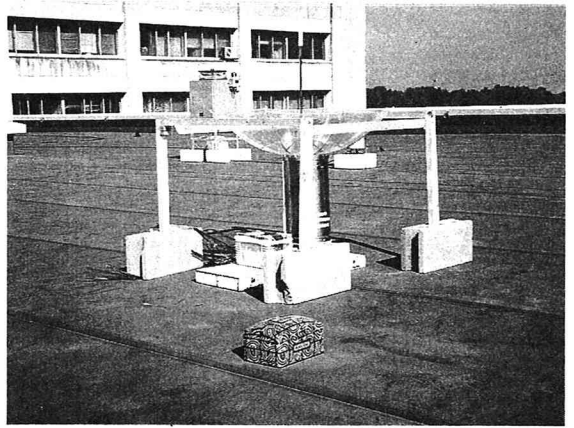


写真-1：ブリキ製缶、傘付き転倒升式雨量計

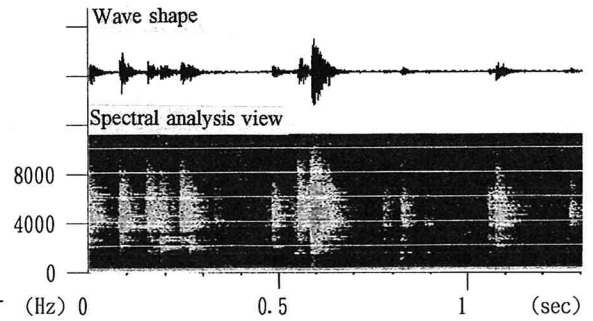


図-1：音圧レベル(上段)と非定常スペクトル(下段)の時系列変化

4. 解析方法及び結果

図-2に示した時系列の中のひとつのパルスが一粒の雨に対応するものとする。パルスの大きさは、雨滴径と落下速度に関係すると考えられるが、落下速度が雨滴径に対応した最終落下速度に達しているものとするれば、結局パルスの大きさは雨滴径の関数になるであろう。一方、一粒の雨滴がもたらす雨量は雨滴体積を受水面積で割った値に等しいが、装置の受水面積は一定であるから、これも雨滴径のみの関数となる。以上のことから、ここでは、ひとつのパルスの大きさが一粒の雨滴量と一価関係にあるものと仮定する。

$$I = g(r) \quad (2)$$

ここに、 r は一粒の雨がもたらす雨量、 I はそれに対応するパルスの大きさ（以下サウンドパルスと呼ぶ）、 $g(r)$ は関数である。

さて、無限小の雨滴については、雨量はゼロであり、またパルスの大きさもゼロである。そこで、上記の関数関係をベキ乗関数で表されるものと仮定する。

$$r = \alpha I^p \quad (3)$$

この関係を時間 τ の中で積算して平均を取れば次式を得る。

$$R(\tau) = \alpha \Sigma(I^p) / \tau \quad (4)$$

ここに、 τ は雨量強度を算出する時間(Δt を1とした時間長)であり、以後の解析では平均時間 τ を652 Δt (実時間で30秒)としている。 $R(\tau)$ は τ の間の平均雨量強度、 p はある定数、 Σ は時間 τ の間の積算値を表している。雨滴の落下速度は雨滴径とともに増加するので、 p は1より小さい値を取るものと考えられる。

(4)式はふたつの未定定数 α と p を含んでいる。これらを以下の方法で同定した。まず、 p の値を仮定して、転倒升式雨量計の観測値と(4)式の推定値の2乗誤差 Z が最小になるように α を求める。次に相対2乗誤差 E ($E = Z / \alpha^2$)を計算し、最初に仮定した p の値との関係を調べる。この結果を図-3に示す。この図から、 p が0.6の時に(4)式のプロportion関係が最もよく成立することがわかる。

図-4は10月8日09:30~10:10の40分間の降雨について、雨音の解析結果と転倒升式雨量計の計測結果を比較したものである。棒グラフは転倒升式雨量計の計測値から雨量強度を求めた結果、実線は $p=0.6$ として雨音を解析した結果である。両者はかなり良く一致していることがわかる。

5. 雨粒の特性とサウンドパルスの関係について

ところで、サウンドパルスは音響振動のパワーに相当する。そこで1粒の雨滴に対応するサウンドパルスが、雨滴が落下する運動エネルギーに比例するものであるとすると、次式が成立する。

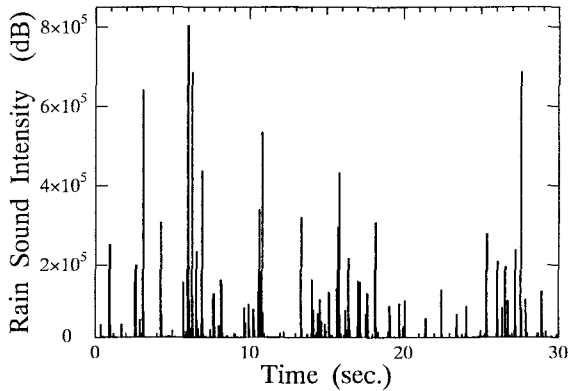


図-2：30秒間の雨粒音響強度の時系列変化

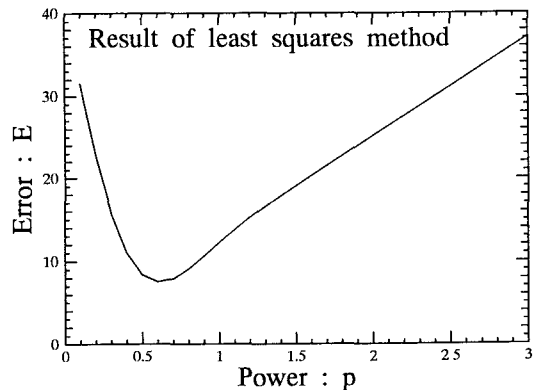


図-3：雨粒音響強度の指数 p と誤差 E の関係

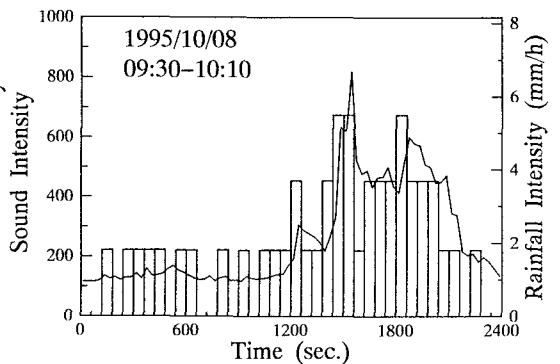


図-4：雨量強度と雨粒音響強度 $I^0.6$ の時系列変化

$$l \propto D^3 v^2 \quad (5)$$

ここに、 D は雨滴径、 v は雨滴落下速度である。

一方、「一粒の雨量」は、受水面積を一定とすると、

$$r \propto D^3 \quad (6)$$

(3), (5), (6)式から、雨滴落下速度に関して次式を得る。

$$v \propto D^{1/5 (1/p-1)} \quad (7)$$

上式で p に 0.6 を代入すると D の指数は 1 となる。

図-5 は Best⁴⁾ が示した雨滴落下速度の式であるが、広い範囲にわたって v は D の 1 乗に比例していることがわかる。そこで

$$v \propto D \quad (8)$$

と仮定し、以下の手順で雨滴径分布を求めた。

(3)式の左辺の r (一粒の雨がもたらす雨量) が粒径の 3 乗に比例するとすれば、個々のサウンドパルスの値から個々の雨滴径を算出できる。これから雨滴径の頻度分布を求め、さらに雨滴径ごとの落下速度 v で割れば空間の単位体積あたりに存在する雨滴径の頻度分布に比例する分布が得られることになる。したがって、上に述べたように v と D が概ね比例関係にあるとすれば次式が成立する。

$$N_d(D) \propto N(D)/D \quad (9)$$

ここに $N_d(D)$ は単位体積中の径 D の雨滴の個数、 $N(D)$ はサウンドパルスで得られた単位時間当たりの径 D の雨滴落下個数である。ただし、上式は装置に固有の比例関係であり、両辺の次元は異なっている。

(9)式から得られた $N_d(D)$ と Marshall-Palmer⁵⁾ の式を図-6 に比較するが、両者の傾きはほぼ一致しており、(9)式の比例関係が成立していることがわかる。したがって、前節においてサウンドパルスの解析から得られた $p=0.6$ という結果は、雨滴径分布から考えても矛盾ない値と言える。

6 おわりに

本研究では、録音された雨音のオーディオ解析から、短時間雨量や雨粒特性を推定する方法を検討した。その結果、適切にキャリブレーションを行うことにより、短時間雨量強度をかなり精度良く推定できる可能性が示された。また雨滴径分布についても従来の知見と矛盾のない結果が得られた。このことから、両者の解析から短時間降雨特性を求められる可能性があると考えられる。

7 参考文献

- 1) 竹村公太郎: 10 分間レザ-雨量によるレザ-の実時間補正法の研究, 測候研究 No. 3, pp1-6 1995.
- 2) 山田正樹: レザ-光を用いた雨滴計の試作とそれを用いた雨滴粒径分布の観測, 校・積研学会誌 pp212-213, 1993.
- 3) 鈴木敦樹: 新しい雨滴粒径計測装置の測定精度に関する研究, 校・積研学会誌 pp218-219, 1994.
- 4) A C Best Empirical formula for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere, Quart. J. Roy Meteor Soc. 76, pp 302-311, 1950
- 5) Marshall, J S, Palmer, W M. The distribution of raindrops with size, J of Met., 5, No 8, pp165-166, Aug 1948

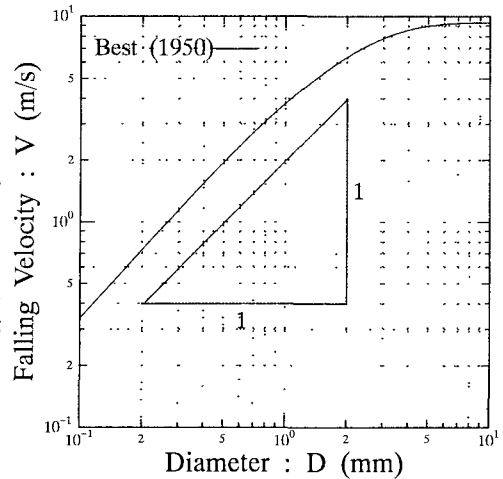


図-5: 雨滴粒子の直径と雨滴落下速度の関係

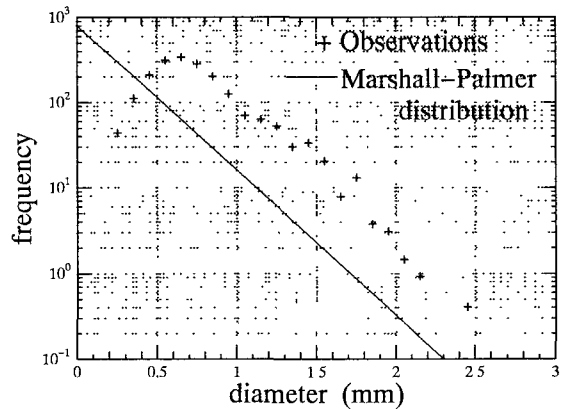


図-6: 雨滴粒子直径と空間分布の関係