



Title	防災科学技術研究所大型降雨実験施設の雨滴粒径分布
Author(s)	真木, 雅之; MAKI, Masayuki; 森脇, 寛 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 68, 31-50
Issue Date	2005-03-15
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.68.31">https://doi.org/10.14943/gbhu.68.31</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/14359">https://hdl.handle.net/2115/14359</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	68_p31-50.pdf



## 防災科学技術研究所大型降雨実験施設の雨滴粒径分布

真木 雅之・森脇 寛・佐藤 照子

防災科学技術研究所

V.N. BRINGI

コロラド州立大学, 米国

Michael SCHÖNHUBER

ヨニアム研究所, オーストリア

播磨屋 敏生

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

(2004年12月13日受理)

## Raindrop Size Distributions in NIED Rain Simulator

Masayuki MAKI, Hiromu MORIWAKI, Teruko SATO

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention

V.N. BRINGI

Colorado State University, U.S.A.

Michael SCHÖNHUBER

Joanneum Research, Austria

and

Toshio HARIMAYA

Division of Earth Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received December 13, 2004)

The National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED) large rainfall simulator, which was completed in 1974, was designed to study landslides caused by heavy rainfall, using test models that are as large as possible. The four types of nozzle below the ceiling of the facility can produce rainfall and control the rainfall rate from  $15 \text{ mmh}^{-1}$  to  $200 \text{ mmh}^{-1}$ . Since 1974, measurements of raindrop size distribution (DSD) have been carried out using different methods. The first measurement, using the filter paper method, was attempted in 1977. This was followed in 1996 by measurements using an impact type disdrometer. The most recent measurement was in 2003, when a 2D-Video-Disdrometer was used. The present paper outlines these three methods and the results

obtained.

Of the three methods, only the 2D-Video-Disdrometer succeeded in measuring the DSD quantitatively in a rainfall rate range of  $15 \text{ mmh}^{-1}$  to  $120 \text{ mmh}^{-1}$ . The 2D-Video-Disdrometer did not measure the number of raindrops correctly at a rainfall rate of  $200 \text{ mmh}^{-1}$ , when 'data overflow' messages were seen in the LOG file. The DSD obtained at a rainfall rate below  $120 \text{ mmh}^{-1}$  can be expressed by an exponential distribution. However, the DSDs were considerably different from those observed in natural rainfall: The slope parameter  $N_0$  of exponential DSD was about three orders higher than that of the Marshall-Palmer DSD observed in natural rainfalls. The median volume diameter  $D_0$  was only from  $1/30$  to  $1/40$  of that of Marshall-Palmer DSD.

Exact measurements of rainfall rate and DSD were not possible using the filter paper method because it was difficult to control the exposure time during which raindrops were received on the filter paper. The DSD was estimated assuming that the rainfall rate indicated by the rain simulator was correct. The DSD was expressed by exponentially. The estimated  $N_0$  was about one order smaller than that of the 2D-Video-Disdrometer estimation at a rainfall rate of  $15 \text{ mmh}^{-1}$ , and  $D_0$  was almost the same as that of the 2D-Video-Disdrometer measurements. At rainfall rates larger than  $15 \text{ mmh}^{-1}$ , estimated  $N_0$  and  $D_0$  are smaller than those of the 2D-Video-Disdrometer measurements.

The rainfall rate measured with a JW disdrometer was  $10 \text{ mmh}^{-1}$  when the set rainfall rate in the rain simulator was  $15 \text{ mmh}^{-1}$ . When the rainfall rate was larger than  $15 \text{ mmh}^{-1}$ , the measured rainfall rate was considerably lower than the set values. The JW disdrometer could not count small drops under such situations, and estimated DSDs differed greatly from the 2D-Video-Disdrometer measurements.

The 2D-Video-Disdrometer measurements made it clear that the DSD in the NIED rainfall simulator is characterized by an extremely large number of small drops, which characteristic is not observed in natural rainfall. This characteristic of DSD has been not clarified quantitatively since completion of the rain simulator, even though measurements with different methods were attempted. It will be necessary to improve nozzles for the rain simulator in order to conduct experiments which require more realistic DSD, for example, measurements of rainfall attenuation of electromagnetic waves, experiments of soil erosion by rainfall, etc.

## I. は じ め に

防災科学技術研究所の大型降雨実験施設は、国内外の研究機関との共同利用施設として1974年に国立防災科学技術センター（現防災科学技術研究所）の構内に建設された。施設の目的は、豪雨により発生する土砂災害を、できるだけ現実に近い規模の模型実験により再現し、その発生機構の解明や予測についての研究をおこなうことである。近年では、この目的のほかに、大学や民間との共同研究、委託研究を通じて、森林内の土壌の雨滴浸食メカニズムの解明や急傾斜面の緑化工法に関連した耐浸食性能試験、通信に関連して、マイクロ波、赤外線、レーザー光の降雨による減衰特性に関する研究などが実施されている。これらの研究では、降雨強度のみならず、実験施設内の“雨滴”の粒径分布についての正確な情報が要求される。定性的には、降雨実験施設内の雨滴粒径分布は天然の雨と比べて圧倒的に小さな雨滴が多いことが目視観察からわかってい

た。すなわち、天然の雨では降雨強度が大きくなると、大きな雨滴が数多く観測されるのが普通であるが、実験施設内のノズルで作られられる豪雨はほとんどが小さな雨滴から成り、“霧雨状の豪雨”と表現できる雨である。それでは、実験室内の雨滴粒径分布は天然の雨の粒径分布と定量的にどのように異なるのであろうか？この問いに対して、施設完成後から現在までの約30年間、いろいろな方法で実験施設内の雨滴粒径分布の測定が試みられてきた。最初の測定がおこなわれたのは1977年で、現在では古典的な手法となつたろ紙法が用いられた。次いで、1996年に衝撃力を測定するタイプのディストロメータを用いた方法が試みられた。2003年には光学式の測器である2Dビデオディストロメータによる測定がおこなわれた。本報では、これら3種類の方法について概説し、その測定結果について述べる。

## II. 防災科学技術研究所大型降雨実験施設

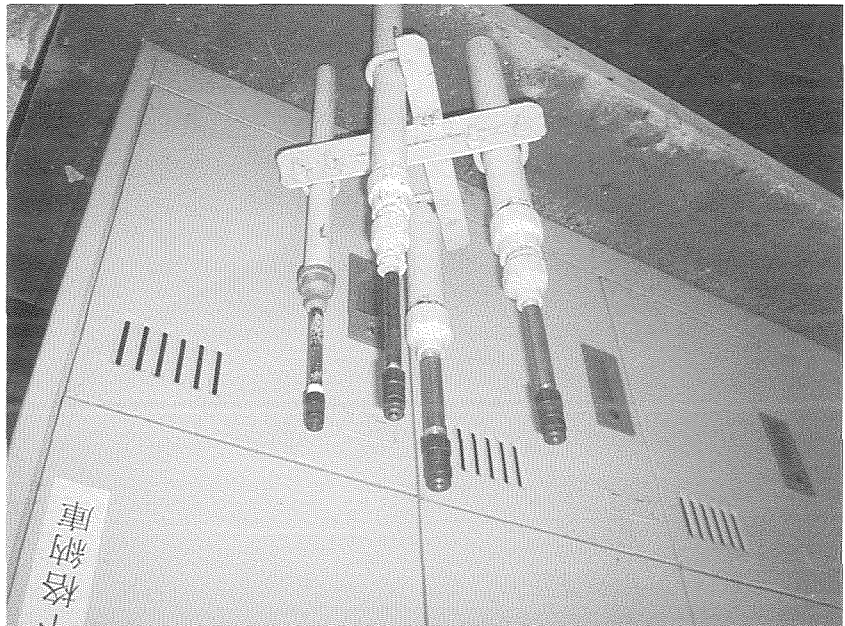
大型降雨実験施設の外観と実験中の内部の様子をそれぞれ Photo 1 と Photo 2 に示す。又、施設の主な仕様を Table 1 に示す。降雨実験施設は幅約48 m、長さ約73 m、高さ20 mの鉄パイプトラス構造で、天井下に取り付けられた4タイプのノズル (Photo 3) により降雨強度  $15 \text{ mmh}^{-1}$  から  $200 \text{ mmh}^{-1}$  の“雨”を降らすことができる。ノズルの取り付け位置は地上から16 mの高さで、水滴の落下速度が終端速度に達するように設計されている。施設全体はレール上に載っており移動することが可能であるため、ある試験体について降雨実験をおこなっている時に、別の試験区画で次の試験体の製作を並行しておこなうことができる。これにより、年間を通して効率良い運転が可能となっている。



Photo 1. General view of the NIED rain simulator.



**Photo 2.** View of an experiment in the NIED rain simulator.



**Photo 3.** Four types of rain simulator nozzle.

**Table 1.** Main specifications of the NIED rain simulator.

Structure	
Main building	Steel pipe trusses 3,492m <sup>2</sup> (48m×72.75m×H19.5m)
Control rooms	Height 7.5m above the ground, Main and sub rooms (each: 65.4m <sup>2</sup> )
Rain sprinkling system	
Raindrop sizes	0.1mm~2.2mm in diameter
Rainfall rate	15mm/h~200mm/h
Sprinkling area	44m×72m (minimum being 1/4 of this)
Nozzles	The first system 15mm/h~ 40mm/h 0.7kg/cm <sup>2</sup> ~5.0kg/cm <sup>2</sup>
	The second system 30mm/h~ 75mm/h 0.7kg/cm <sup>2</sup> ~5.0kg/cm <sup>2</sup>
	The third system 60mm/h~130mm/h 0.7kg/cm <sup>2</sup> ~5.0kg/cm <sup>2</sup>
	The fourth system 100mm/h~200mm/h 0.7kg/cm <sup>2</sup> ~5.0kg/cm <sup>2</sup>
Nozzle height	16m above the ground
Control system	Remote control. Flow discharge is controlled by pressure.
Water supply pumps	Two pumps of each 3.3kW, 11.5kg/cm <sup>2</sup> .
	Maximum volume: 5.5 kl/min
Experimental block	
Area	Total: 5 areas (each: 44m×72m)
Water treatment facility	
Rain water treatment	Cycling and reproducing system
Coagulant mixing tank	3.0m×3.0m×3.0m
Water storage pool	22.4m×22.4m×1.6m
Water supply well pipe	of 250mm diameter, 150m long in depth
	Pump: 7.5kW 0.9kl/min

### III. 雨滴粒径分布の3種類の測定方法

#### 1. ろ紙法による測定

ろ紙法(あるいは吸収法)は Defant (1905)により考案された。その原理は、水溶性の染料をしみこませたろ紙上に雨滴を受け取り、その痕跡の大きさから雨滴の大きさを求めるというものである。その後、特に日本人研究者を中心にして、使用するろ紙や染料の選定、染料を固着させる方法などに様々な改良がおこなわれた。例えば、Defant (1905)は雨滴の痕跡を残すための染料としてエオジン色素(アニリン染料)を使用した。高橋 (1934)はより鮮明な痕跡を残すためにエオジン粉末と滑石(ろう石)粉末の混合粉末を用いた。丸山・浜 (1954)はアニリンブルー(あるいはウォーターブルー)の粉末を石油に溶かしてろ紙に固着する方法をとった。これにより、ろ紙に染料を一様に固着することが容易になった。また、これまで、ろ紙上の雨滴の痕跡が乾燥により剥離され易かった点も改良された。

痕跡の大きさを計測して雨滴の直径を求めるためには、あらかじめ雨滴の大きさ $D$ とろ紙上の痕跡の大きさ $d$ の関係式を求めておく必要がある。例えば播磨屋 (2004, personal communication) はコンデンサー用のろ紙(東洋ろ紙株式会社, No.2)に対して、次の関係式を求め、降雪粒子の粒径分布を測る際に用いている (Harimaya 1978)。

$$D = 0.1812d^{2/3}(1 + 0.1605d - 0.0243d^2) \tag{1}$$

ここで、 $D$ 、 $d$ の単位は cm である。Fig. 1 に (1) 式と、防災科学技術研究所が 1977 年に大型降雨実験施設内での雨滴の粒径分布の測定の際に用いた痕跡と水滴直径の関係式を示す。二本の曲線が異なるのは、用いるろ紙の種類や研究者による検定曲線の作成方法に違いがあるためである。防災科学技術研究所が用いたろ紙は播磨屋が用いたろ紙に比べて薄いろ紙である。経験的に、薄いろ紙は小さい雨滴を測るのに適しているとされている。

ろ紙上の痕跡の大きさ  $d$  の読みとりについてはいくつかの方法が提案されている。例えば、Niederdorfer (1925) はガラス板に鋭角をなす二直線を書いたスケールを用意し、痕跡を読みとっている。この方法では直径 1 mm 以下の痕跡を読みとることができないので、高橋 (1943) は痕跡を写真複写で 5 倍に拡大し、1/10 mm まで読みとっている。このほか、痕跡は完全な円ではないので、透明のスケールにあらかじめ描かれた二つの同心円の間に痕跡の外周が入るようにして  $d$  を推定する同心円法などが提案されている。こういった方法は非常に手間がかかるので、長時間の観測結果の処理には向かない。佐粧ほか (1990) は画像解析器を用いて長時間のデータの処理を可能にしている。Sasyo et al. (1991) は雪片の含水率測定方法 (Nakamura, 1960) を自動化した含水率計を試作し、その測定精度について調べている。

ろ紙法による雨滴の粒径分布  $N(D_i)$  は次のようにして求められる。今、直径  $D_i$  の雨滴に対応するろ紙上の痕跡の個数を  $n_i$  とすると、

$$n_i = N(D_i) \cdot \delta D_i \cdot \delta S \cdot w(D_i) \cdot \delta t \tag{2}$$

の関係がある。ここで、 $\delta D_i$  は求める粒径分布の雨滴直径の刻み幅 (mm)、 $\delta S$  はろ紙上のサンプリングエリアの面積 ( $m^2$ )、 $w(D_i)$  は直径  $D_i$  の雨滴の落下速度 ( $ms^{-1}$ )、 $\delta t$  はサンプリング時間あるいは露出時間 (sec) である。Altas et al. (1973) によれば  $w(D_i)$  は

$$w(D_i) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6D_i) \tag{3}$$

で表すことができる。この経験式は Gun-Kinzer (1949) の実測値と良くあう。(2) 式と (3) 式から

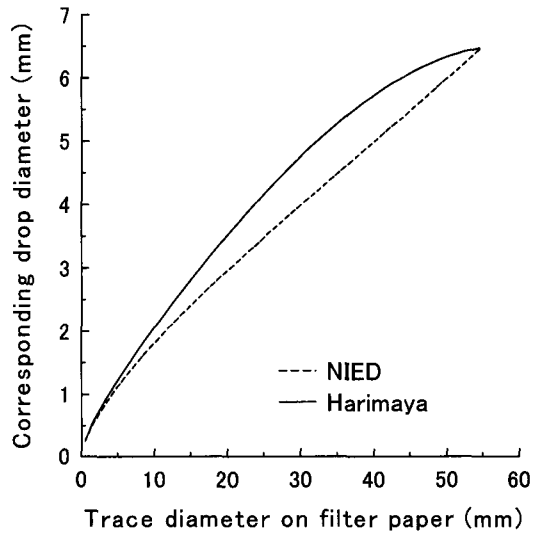


Fig. 1. Relationship between trace diameter on filter paper and the corresponding drop diameter.

$N(D_i)$ は次式のように表される。

$$N(D_i) = \frac{n_i}{\delta D_i \cdot \delta S \cdot w(D_i) \cdot \delta t} = \frac{n_i}{\delta D_i \cdot \delta S \cdot (9.65 - 10.3 \exp(-0.6 D_i)) \cdot \delta t} \quad (4)$$

$N(D_i)$ が求まると降雨強度は次式で計算できる。

$$R = 3.6 \times 10^{-3} \left( \frac{4}{3} \right) \pi \int_0^{D_{\max}} \left( \frac{D}{2} \right)^3 N(D) w(D) dD \quad (5)$$

ここで、(5)式の各変数の単位は $R$ [mmh<sup>-1</sup>],  $D$ [mm],  $N$ [mm<sup>-1</sup>m<sup>-3</sup>],  $w$ [ms<sup>-1</sup>]である。

ろ紙法は費用のかからない方法で、簡単に測定できる方法ではあるが、痕跡の計測に手間がかかること、長期間の観測には不向きなことから、現在ではほとんど使われていない。

## 2. 衝撃力測定タイプのディストロメータによる測定

このタイプのディストロメータで良く知られているのは Joss and Waldvogel 型ディストロメータ(以降, JW ディストロメータと呼ぶ)である。JW ディストロメータは、レーダ気象学の重要なパラメータの一つである反射因子を計算するために、Joss and Waldvogel (1967)により開発された。Photo 4にその外観を示す。JW ディストロメータは雨滴を受ける面積 50 cm<sup>2</sup>のスタイロフォームコーン(センサー部分)と信号処理をおこなう電子機器部(RD-69)およびADコンバータ(AD-90)からなる。測定原理は、落下する雨滴がセンサー表面に衝突する際の運動量を電気信号に変換し、雨滴の大きさを推定するというもので、具体的には次の通りである。センサー表面に衝突する雨滴によってセンサーヘッド部分は下方に変位する。この変位はセンシング

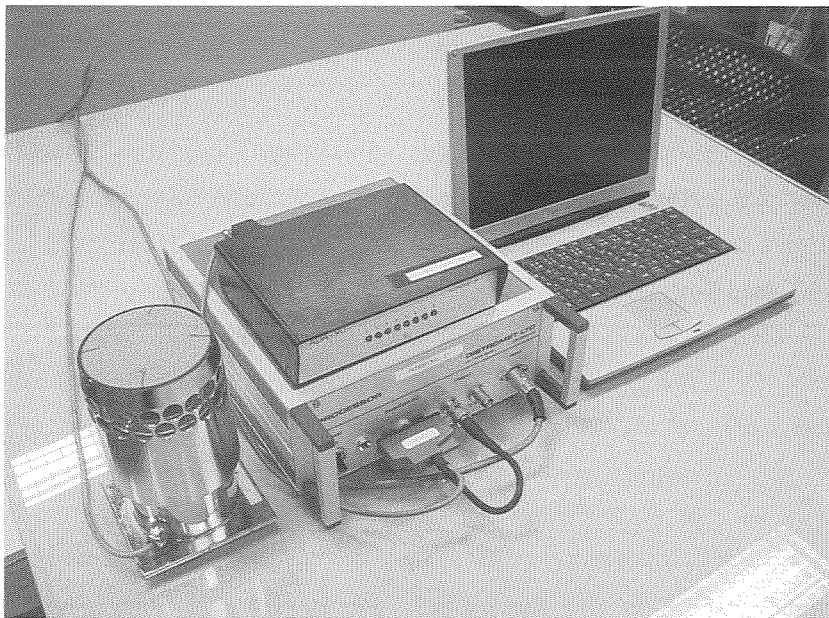


Photo 4. Joss-Waldvogel type disdrometer.

コイルを通してRD-69で幅 $0.5\ \mu\text{s}$ のパルス状の信号電圧 $U$ に変換される。信号電圧 $U$ はセンサーヘッド部分で増幅され、センサーヘッド部分を元の位置にもどす電磁力としても使われる。この機構はサンプリング時間を短くするためのもので、これにより、次々と衝突する雨滴の衝撃力を測定することが可能となっている。一方、変換された信号電圧は $U=kD^n$ により雨滴の直径 $D$ と関係づけられる。ここで雨滴は終端速度で落下するとし、 $k$ と $n$ は測定器を較正するときに決定される定数である。信号パルス電圧 $U$ はADコンバーター(AD-90)により127種類の雨滴サイズに識別され、更にソフトウェアにより20クラスの粒径にふり分けられる。測定可能な雨滴粒径の直径範囲は $0.3\ \text{mm}$ から $5\ \text{mm}$ である。雨滴の粒径分布 $N(D)$ はろ紙法で用いた(4)式から計算される。ただし、JWディストロメータの場合、 $\delta S=0.005\ \text{m}^2$ 、 $\delta t=60\ \text{秒}$ (可変)、 $\delta D_i$ は各チャンネルであらかじめ決められた値である。

これまでJWディストロメータは、微物理過程の研究、降雨観測のための気象レーダのキャリブレーション、マイクロ波の降雨による減衰特性の研究などに広く用いられてきた。その特性については、様々な研究により明らかにされている。例えば、Sheppard and Joe (1994)はJWディストロメータ、光学的に雨滴を検出するスペクトロメータ、ドップラー速度スペクトルを利用する降水検出センサーシステム(POSS: Precipitation Occurrence Sensor System)の3種類の測器の比較をおこなっている。一般的に3種類の測器から求めた粒径分布はよくあったが、JWディストロメータのサンプリングボリュームが小さいために、1分間隔のサンプリング時間ではPOSSに比べて大きな雨滴を見逃す場合があったことを報告している。Tokay et al. (2001)は、後述する2Dビデオディストロメータとの比較観測をおこない、JWディストロメータは $0.5\ \text{mm}$ 以下の雨滴の個数を非常に過少評価すること、強い雨や極端に強い雨の場合に観測される大きな雨滴はJWディストロメータの測定可能な直径を超えるために、検出できないことを示した。

JWタイプのディストロメータの欠点として良く知られている点として、大きな雨滴がセンサー表面にあたった後の小さな雨滴を検出出来ないという問題(“dead time”の問題)がある。センサー表面に大きな直径の雨滴が衝突するとセンサー表面は振動する。この振動がおさまらないうちに次の小さな雨滴がセンサー表面に衝突してもそれを測定することはできない。この測定不能な時間を“dead time”と呼びJoss-Waldvogelタイプのディストロメータによる小さな雨滴を測定する際の限界となっている。これを補正するためにJossとWaldvogelによって提案された次の実験式が用いられることがある(例えばSheppard and Joe, 1994; Sauvageot and Lacaux, 1995; Maki et al., 2001)。

$$N_i^* = N_i \exp \left[ \frac{0.035}{T} \frac{D_{20}=5.25\text{mm}}{\sum_{D_k=0.85D_i} N_k} \times \log \frac{0.85D_i}{0.85D_i - 0.25} \right] \quad (6)$$

ここで $N_i$ はチャンネル $i$ で観測された個数、 $N_i^*$ は補正された値、 $T$ はサンプリング時間である。“dead time”の補正結果の例をFig. 2に示す。Fig. 2(a)は降雨強度が約 $50\ \text{mmh}^{-1}$ の対流性の雨で観測された1分間の雨滴の個数 $N_i$ の分布である。Fig. 2(b)は“dead time”を補正する前

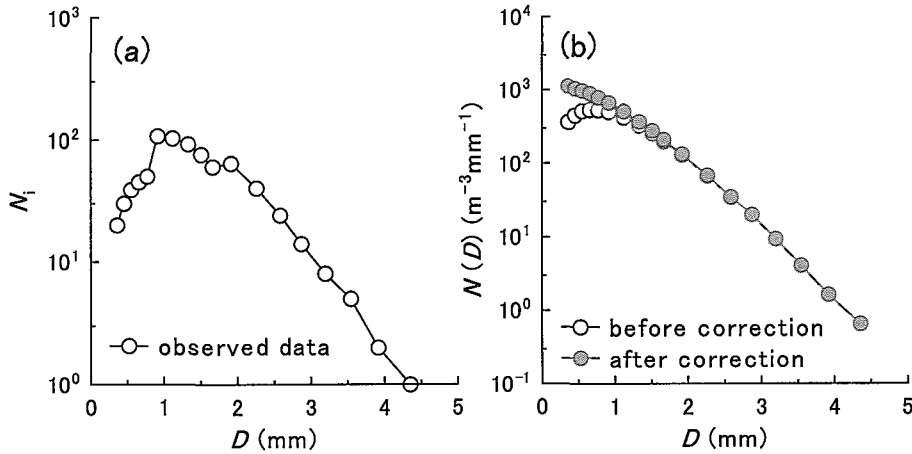


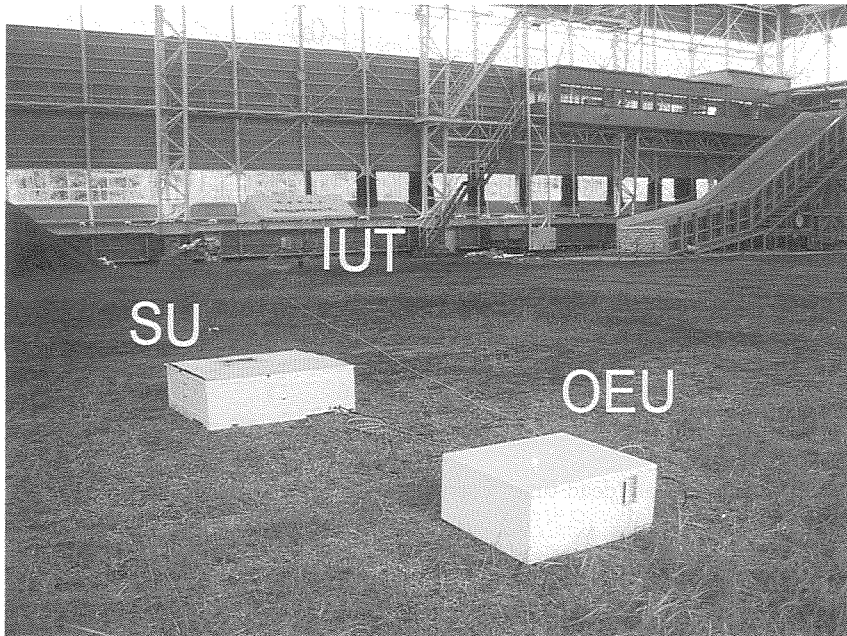
Fig. 2. Example of “dead time” correction in JW disdrometer measurements.

と後の粒径分布を比較した図である。粒径が1 mm以下の分布で、補正したものとそうでないものとで大きな違いがでてきているのがわかる。(5)式は経験式ではあるが、“dead time”の問題をある程度解決するものと言える。しかしながら、降雨強度が大きいとき、小さい雨滴チャンネルでは $N_i=0$ となる場合があり、このような場合には補正式(5)は役にはたさない。

“dead time”以外の問題として、ディストロメータの設置場所のまわりの騒音がある。ディストロメータが測定する雨滴の信号電圧がこの騒音レベルよりも低いときにはその雨滴の数をカウントできなくなる。騒音の例としては地面や屋根をたたく雨音、近くを走る車の音、雷などがある。また、観測測器の電源としてしばしば使われる発動発電機の騒音もノイズの原因として注意する必要がある。これらのノイズは測器を注意深く設置することにより防ぐことは可能である。

### 3. 二次元ビデオディストロメータ (2D-Video Disdrometer)

二次元ビデオディストロメータ (2D-Video Disdrometer) はオーストリアの Institute for Applied Systems Technology の Joanneum Research により開発された (Schönhuber et al., 1994)。Photo 5 に測器の外観を示す。測器の詳細な記述は Kruger and Krajewski (2002)にあるので、ここでは基本的な測定原理について簡単に述べる。2Dビデオディストロメータは3つの主要な構成要素から成る。センサーユニット (Sensor Unit: SU)、室外電子ユニット (Outdoor Electronics unit: OEU)、室内ユーザー端末 (Indoor User Terminal: IUT) である。本研究で用いた2D-Video Disdrometer は低プロファイル型で、従来のディストロメータのSUが高さ約1.1 mの筐体であったのに対して、低い高さの筐体となっている。これは、従来型のは、強風時にできる筐体まわりの空気の流れにより、測定精度に影響がでる可能性があったためである。SU内には2台のラインスキャンカメラが直交するようにセットされている。それぞれのライン



**Photo 5.** 2-D-Video-Disdrometer. SU: sensor unit, OEU: outdoor electronic unit, IUT: indoor user terminal.

カメラの正面には雨滴を検出するための 10 cm の幅の線状の光源がセットされている。2 台の光源が作り出す 10 cm×10 cm のエリアを雨滴が落下する時、雨滴は光源を遮る。その影はカメラ内にライン状に配列された 1024 個の光検出素子で検出される。カメラの走査回数は 40 MHz である。2 台の光源の取り付け高さ(従ってそれぞれ対応するラインスキャンカメラの取り付け高さ)は 6.2 mm だけ鉛直方向に違っている。それぞれのカメラで検出した雨滴の影を対応付けることができれば、6.2 mm の距離を移動する時間を測定することにより、落下速度と水平方向の移動速度も計算することができる。

OEU の主要な機器は DOS-PC である。PC にインストールされた保守、較正用のソフトウェアにより、2 台のカメラのビデオ信号出力やカメラ本体の動作を確認することができる。また、既知の直径の検定球を用いた試験により、正確な測定にとって最も重要である、光源とカメラの取り付け位置についての確認をおこなうことができる。データ取得のためのプログラムはラインスキャンカメラからのデータを取得、前処理し、圧縮して一時的に RAM バッファへ記録する。OEU の PC と IUT の PC はネットワークで結ばれており、OEU-PC の RAM バッファに記録されたデータは、IUT-PC からの指令によりハードディスク等へ転送、コピーされる。OEU-PC と IUT-PC にはシステム監視プログラムがインストールされており、どちらか 1 台でも異常を検出すれば、自動的にリポートがかけられるようになっている。IUT-PC にはデータ解析用のプログラムもインストールされている。これにより、リアルタイムあるいはオフラインで降雨強度、雨滴

粒径分布，軸比，雨滴の形状などを可視化し，解析することができる。

2Dビデオディストロメータによる観測で注意を要する点として，カメラレンズの汚れ，光軸の変化などが挙げられる。信頼できるデータを得るためには検定球を使った定期的な保守点検が不可欠である。このほか，強風の影響などが指摘されているが，完全には理解されていない。

#### IV. 測定結果

##### 1. ろ紙法による測定結果

ろ紙法による降雨実験施設内での雨滴粒径分布の測定は1977年5月におこなわれた。ろ紙を入れた箱の蓋を手で開け閉めすることにより雨滴を捕捉し，乾燥後にろ紙上の痕跡の大きさと個数を数えた。個数は異なる3箇所でおこなった合計とした。Fig. 3にろ紙上に残された痕跡の例を示す。27年以上経つにもかかわらず，痕跡が明瞭に保存されている。図の大きさは1枚のろ紙のサンプリングエリア ( $0.01 \text{ m}^2$ ) に相当する。粒径分布  $N(D_i)$  はそれぞれのクラスでカウントされ

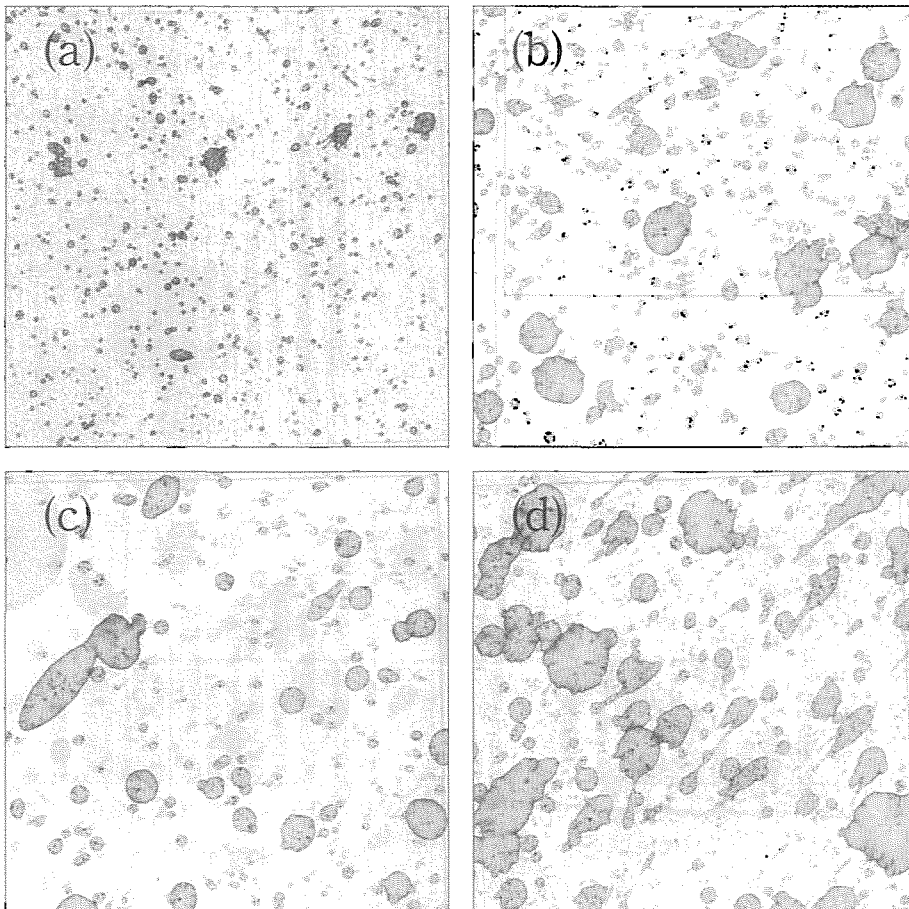


Fig. 3. Examples of traces of captured drops on filter paper. (a)  $R=15\text{mmh}^{-1}$ , (b)  $R=30\text{mmh}^{-1}$ , (c)  $R=60\text{mmh}^{-1}$ , (d)  $R=100\text{mmh}^{-1}$ .

た個数  $n_i$  を (4) 式へ代入することにより計算できる。ここで、サンプリングエリア  $\delta S = 0.03 \text{ m}^2$ 、粒径の分解能  $\delta D_i = 0.2 \text{ mm}$  である。  $\delta t$  は手動での測定のために正確に測定することは困難であった。そこで、(4) 式から  $N(D)\delta t$  の値を求め、(5) 式から  $\delta t$  を推定した。このとき、 $R$  は降雨実験施設の設定降雨強度を用いた。 $R$  の誤差は 10% 程度と考えられる。測定結果を Fig. 4 に示す。図には参考として、層状性の雨の雨滴粒径分布を表すのに良く用いられる Marshall-Palmer の分布 ( $N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D)$ ,  $\Lambda = 4.1R^{-0.21} \text{ mm}^{-1}$ ,  $N_0 = 8000 \text{ m}^{-3} \text{ mm}^{-1}$ ) を破線で示す。推定された雨滴粒径分布は指数分布で近似できるが、Marshall-Palmer 分布と比較して、切片パラメータ ( $N_0$ )、傾斜パラメータ ( $\Lambda$ ) の値が大きな分布となっている。すなわち、降雨実験施設内で作り出される雨滴の粒径分布は自然で観測される分布とは異なり、小さな直径の雨滴が非常に多い分布となっており、ほとんどの雨滴は直径が 2.5 mm 以下である。Fig. 4 に示した結果は  $\delta t$  の問題があるためにあくまでも推定結果である。この推定結果は、後で、2D ビデオディストロメータによる測定結果と比較される。

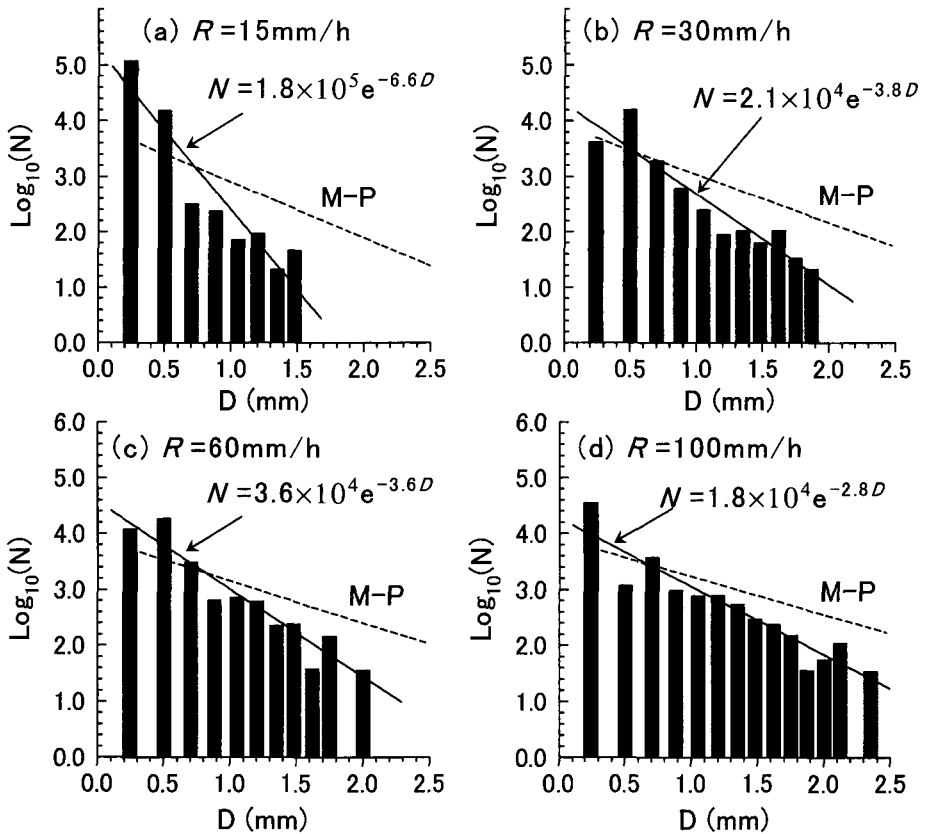


Fig. 4. Estimated drop size distributions with the filter paper method.

2. JW ディストロメータによる測定結果

JW ディストロメータによる測定は 1996 年におこなわれた。施設内の異なる 2 箇所にそれぞれ 1 台の JW ディストロメータを設置した。設定降雨強度は 15, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 mmh<sup>-1</sup> の 9 通りである (Table 2)。降雨強度が安定するのを待って、それぞれ約 5 分間ずつ計測をおこなった。測定が正常におこなわれたかどうかを評価する最も単純な方法は、設定降雨強度と測定された降雨強度を比較することである。降雨実験施設の設定降雨強度の誤差は ±10% 程度であるので、測定降雨強度がこの精度内にあれば、正常に測定できたと判定できる。Fig. 5 に設定降雨強度と JW ディストロメータによる降雨強度の測定結果を示す。横棒で示した時間が計測をおこなった期間で、図中の番号は用いたノズルシステムの番号である。ディストロメータのデータは 1 分間の平均降雨強度で、dead time correction をおこなっている。Fig. 5 からわかるよう

Table 2. Set rainfall rate and corresponding nozzle (measurements with a JW disdrometer).

Obs. time	Set rainfall rate	Nozzle type
14:15-14:25	15 mmh <sup>-1</sup>	No1
15:05-15:09	25 mmh <sup>-1</sup>	No1
15:35-15:39	50 mmh <sup>-1</sup>	No2
16:05-16:10	75 mmh <sup>-1</sup>	No3
16:13-16:17	100 mmh <sup>-1</sup>	No3
16:21-16:25	125 mmh <sup>-1</sup>	No3
16:31-16:35	150 mmh <sup>-1</sup>	No3
16:40-16:44	175 mmh <sup>-1</sup>	No3
16:47-16:51	200 mmh <sup>-1</sup>	No3

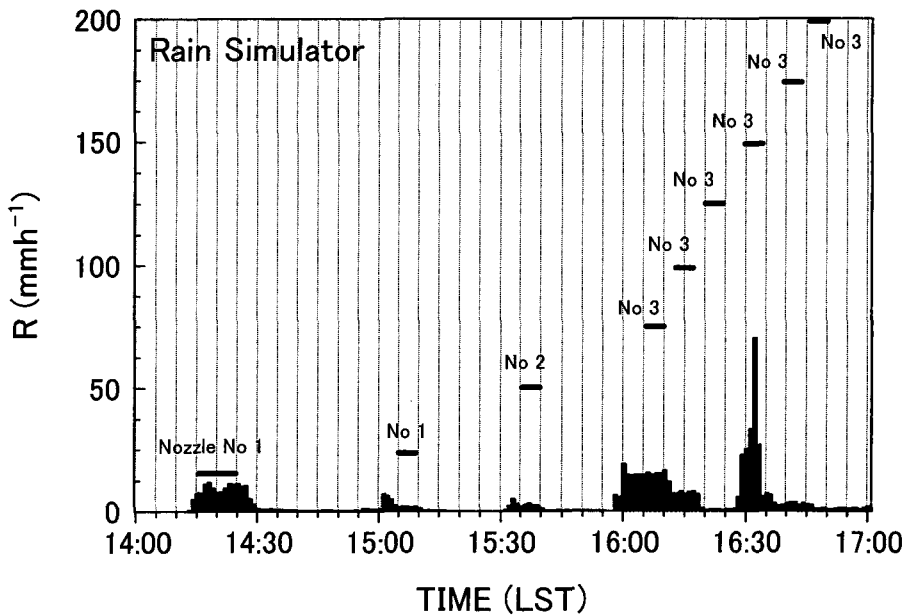


Fig. 5. Comparison of JW disdrometer rainfall rates and set rainfall rates.

に、降雨実験施設の設定値が  $15 \text{ mmh}^{-1}$  のときの測定降雨強度は  $10 \text{ mmh}^{-1}$  と比較的近い値となっているが、それ以外の全ての降雨強度で JW ディストロメータの値は設定降雨強度をはるかに下回った値となっており、計測が正常におこなわれていないことを示唆している。測定降雨強度の傾向を見てみると、 $50 \text{ mmh}^{-1}$  までは設定降水強度をあげていくと測定値は逆に小さくなっている。ノズルが No 3 に変わった  $75 \text{ mmh}^{-1}$  では、測定された降雨強度は一度大きくなったが、値は  $17 \text{ mmh}^{-1}$  と設定値に比べてかなり小さい。設定降雨強度が  $100 \text{ mmh}^{-1}$  となると、再び測定降雨強度は小さくなった。設定降雨強度が  $125 \text{ mmh}^{-1}$  では  $0.41 \text{ mmh}^{-1}$  でしかない。  $150 \text{ mmh}^{-1}$  となると測定値は再度大きくなり、瞬間的には  $80 \text{ mmh}^{-1}$  近くの降雨強度を記録している。  $175 \text{ mmh}^{-1}$ 、  $200 \text{ mmh}^{-1}$  ではそれぞれ  $2 \text{ mmh}^{-1}$ 、  $1 \text{ mmh}^{-1}$  でしかない。もう一台のディストロメータも Fig. 5 とほとんど同じ傾向を示した。

各降雨強度で求められた粒径分布を Fig. 6 に示す。ろ紙法の結果 (Fig. 4) と比べてかなり異なる結果となっている。数密度  $N(D)$  は  $R=15 \text{ mmh}^{-1}$  以外は非常に小さな値である。測定降雨強度が設定降雨強度に比較的近かった  $R=15 \text{ mmh}^{-1}$  のときの粒径分布を見ると、指数分布ではなく、 $D=0.7 \text{ mm}$  付近にピークを持つ分布である。  $D=0.3 \text{ mm}$  から  $D=0.4 \text{ mm}$  で  $N=0$  であることは注意すべきである。すなわち、設定降雨強度が  $15 \text{ mmh}^{-1}$  でも、JW ディストロメータでは小さい雨滴をカウントできなくなっており、それが降雨強度の過少評価の原因と考えられる。設定降雨強度が大きくなると、この傾向はより顕著になる。例えば、  $R=25 \text{ mmh}^{-1}$  の時には分布のピークは  $D=1 \text{ mm}$  付近にあるが、  $R=50 \text{ mmh}^{-1}$  では、ピークは若干  $D$  の大きな方へシフトしている。  $R=75 \text{ mmh}^{-1}$  以上ではピーク値はさらに大きな  $D$  の方へシフトしており、約  $1.7 \text{ mm}$  のところにある。降雨強度が正しく計測されていないので、粒径分布のこれらの変化がどの程度意味があるか不明である。

JW ディストロメータによる測定がうまくいかなかった原因として次のことが考えられる。

- ① 降雨実験施設の多くの雨粒がディストロメータの計測可能な粒径 ( $0.3 \text{ mm}$ ) よりも小さい。
- ② センサー表面が水膜で覆われて感度が減少し、雨滴の個数が多いためにカウントし損なう。
- ③ 比較的大きな粒がセンサー表面に当たった後には表面に振動が残る。この振動がおさまるまでの期間に小さな粒が当たってもカウントされない。この dead time は雨滴の衝撃力を利用したこのタイプのディストロメータの限界であろう。

### 3. 2Dビデオディストロメータによる測定結果

前節で示したように、JWディストロメータによる測定結果は満足のいくものではなかった。そこで、光学的に雨滴を計測する2Dビデオディストロメータを用いた測定が2003年6月におこなわれた。実験に用いた設定降雨強度はTable 3に示した通りである。

Fig. 7に降雨実験施設内で測定された雨滴粒子の形状の例を示す。形状は若干、球からずれており、扁平率は1.09である。長軸の方向は、白と黒の色分けをしている境界線の方向で示されている。同体積の球の直径(相当直径)は $0.92 \text{ mm}$ である。後で示すが、降雨実験施設内で最も頻

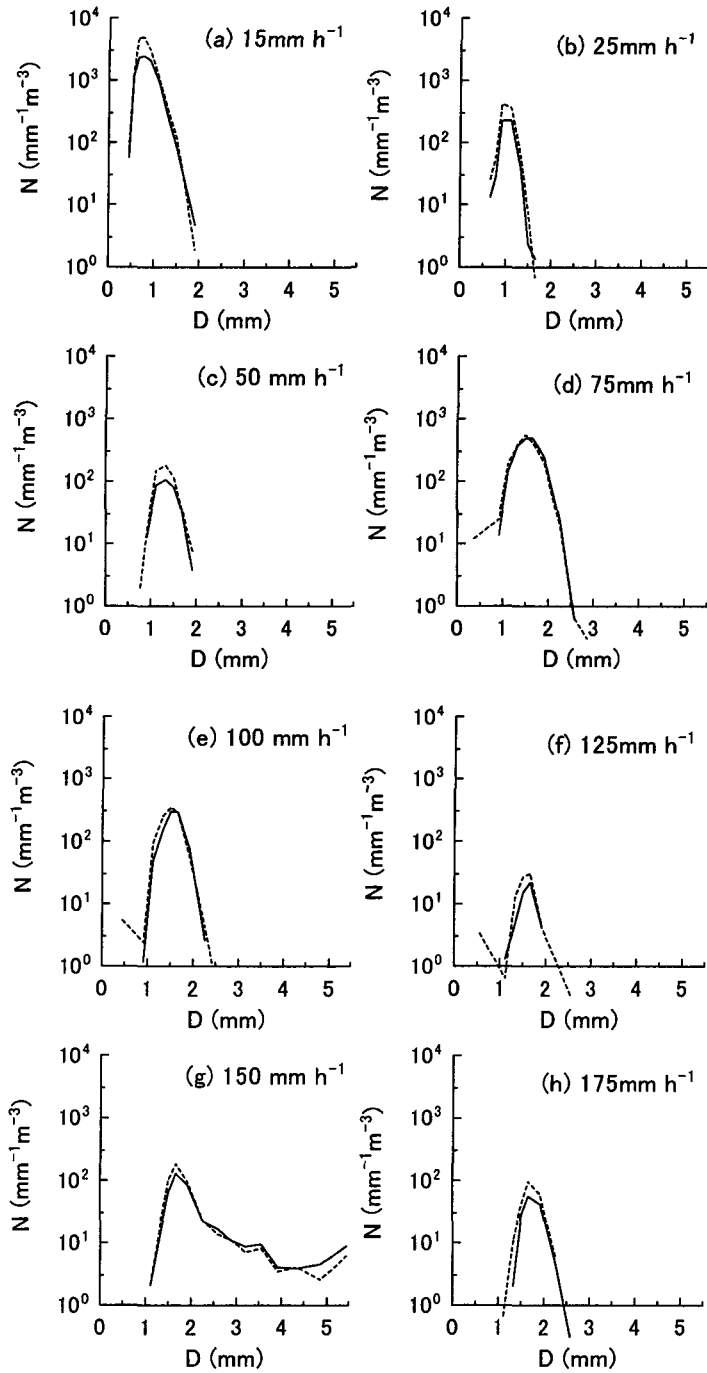


Fig. 6. Estimated drop size distributions with JW disdrometer measurements. Two disdrometers were set up at different place in the rain simulator. The solid and broken lines show the results of each disdrometer measurements, respectively.

**Table 3.** Set rainfall rate and corresponding nozzle (measurements with a 2D-Video-Disdrometer).

Obs. time	Set rainfall rate	Nozzle type
10:01-10:25	15 mmh <sup>-1</sup>	No1
10:29-10:43	30 mmh <sup>-1</sup>	No2
10:48-11:02	60 mmh <sup>-1</sup>	No3
11:06-11:21	120 mmh <sup>-1</sup>	No4
11:25-11:32	200 mmh <sup>-1</sup>	No4

繁に観測される雨滴の直径は 0.3 mm から 0.5 mm であり、この例は比較的大きな雨滴の例である。2D ビデオディストロメータでは落下速度も求められる。この例の実測値は 3.67 ms<sup>-1</sup> で、(3) 式から計算される終端落下速度 3.7 ms<sup>-1</sup> に非常に近い値となっている。図には示さないが、計測された実験室内の雨滴の落下速度と雨滴直径の関係は(3)式でよく近似できた。Fig. 8 に 2D ビデオディストロメータで測定された降雨強度の時間変化を示す。設定降雨強度が 15 mmh<sup>-1</sup> と 30 mmh<sup>-1</sup> では測定値と設定降雨強度は良くあっている。設定降雨強度が 60 mmh<sup>-1</sup> では測定値が若干小さくなっている。設定値が 120 mmh<sup>-1</sup> の時には、測定値は 130 mmh<sup>-1</sup> から 100 mmh<sup>-1</sup> である。設定降雨強度が 200 mmh<sup>-1</sup> になると、測定値は最大でも 100 mmh<sup>-1</sup> でしかない。設定降雨強度の精度は±10%であることを考慮すれば、120 mmh<sup>-1</sup> までの雨について、2D ビデオディストロメータは正常に計測できたと考えられる。設定降雨強度が 200 mmh<sup>-1</sup> では、ログファイルにデータのオーバーフローのメッセージが繰り返し記録されていたことから、カウントできる雨滴の個数が 2D ビデオディストロメータの性能の限界を超えていたと考えられる。設定降雨強度が 120 mmh<sup>-1</sup> 以下の時の雨滴粒径分布の変化を Fig. 9 に示す。図には参考として、前述したろ紙法で推定された雨滴粒径分布と天然の雨でしばしば引用される Marshall-Palmer の分布も示した。測定された雨滴粒径分布は直径が 0.3 mm から 0.5 mm にピークがある分布であるが、指数分布で近似することができる。最小 2 乗法により指数分布を当てはめた結果を実線で、回帰直線の式を図中に示す。求められた雨滴粒径分布は天然の雨で観測される雨滴粒径分布とは大きく異なっている。降雨実験施設内の雨滴粒径分布の切片パラメータは  $N_0=1.5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}\text{mm}^{-1}$  (設定降雨強度が 15 mmh<sup>-1</sup>) から  $8 \times 10^6 \text{ m}^{-3}\text{mm}^{-1}$  (設定降雨強度が 120 mmh<sup>-1</sup>) であるが、この値は Marshall-Palmer 分布の場合の切片パラメータ ( $N_0=8000 \text{ m}^{-3}\text{mm}^{-1}$ ) に比べて、3 桁近く大きな値である。粒径分布の傾きを表すパラメータ  $A$  (あるいは体積メジアン直径  $D_0$ ) は降雨実験施設内の雨の場合、設定降雨強度が 15 mmh<sup>-1</sup>, 30 mmh<sup>-1</sup>, 60 mmh<sup>-1</sup>, 120 mmh<sup>-1</sup> の時、それぞれ、 $A=6.67 \text{ mm}^{-1}$  ( $D_0=0.55 \text{ mm}$ ),  $A=6.17 \text{ mm}^{-1}$  ( $D_0=0.59 \text{ mm}$ ),  $A=5.29 \text{ mm}^{-1}$  ( $D_0=0.69 \text{ mm}$ ),  $A=6.16 \text{ mm}^{-1}$  ( $D_0=0.60 \text{ mm}$ ) である。Marshall-Palmer の分布の場合、それぞれの降雨強度で、 $A=2.32 \text{ mm}^{-1}$  ( $D_0=1.58 \text{ mm}$ ),  $A=2.01 \text{ mm}^{-1}$  ( $D_0=1.83 \text{ mm}$ ),  $A=1.74 \text{ mm}^{-1}$  ( $D_0=2.11 \text{ mm}$ ),  $A=1.50 \text{ mm}^{-1}$  ( $D_0=2.45 \text{ mm}$ ) である。このように、降雨実験施設内の  $D_0$  は、天然の雨の 1/30 から 1/40 の大きさの値でしかない。言い換えれば、非常に小さな雨滴が多い分布となっている。

ろ紙法による結果は、設定降雨強度が 15 mmh<sup>-1</sup> のとき  $N_0=1.8 \times 10^5 \text{ m}^{-3}\text{mm}^{-1}$  で、2D ビデオ

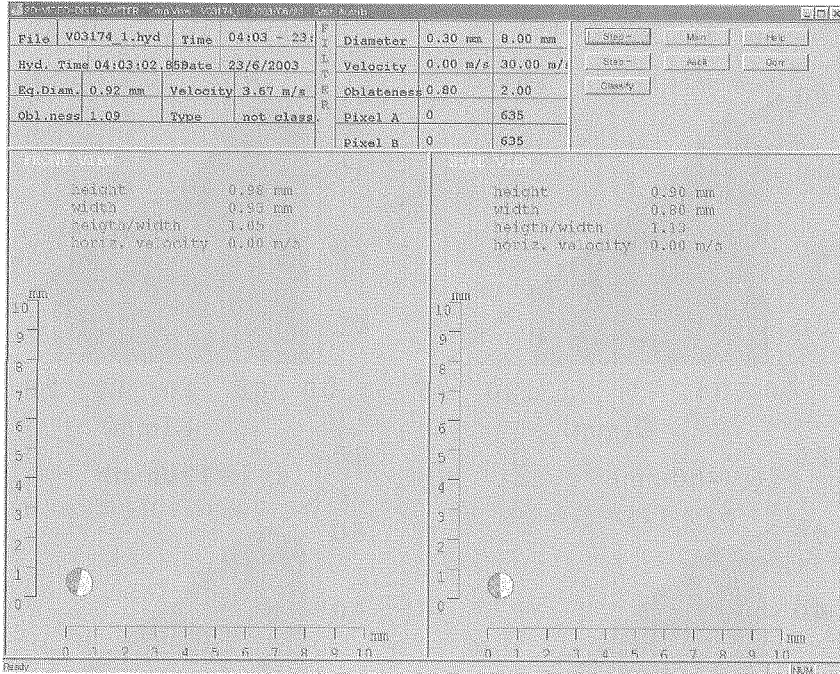


Fig.7. Example of images of rain drop detected by a 2D-Video-Disdrometer. Left: top view, right: side view.

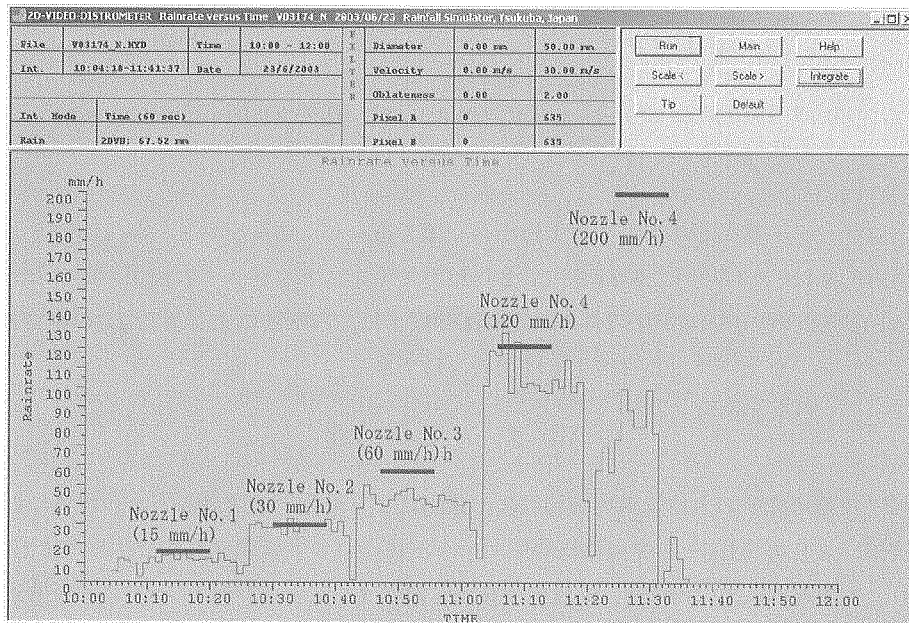


Fig. 8. Comparison of 2D-Video-Disdrometer rainfall rates and set rainfall rates.

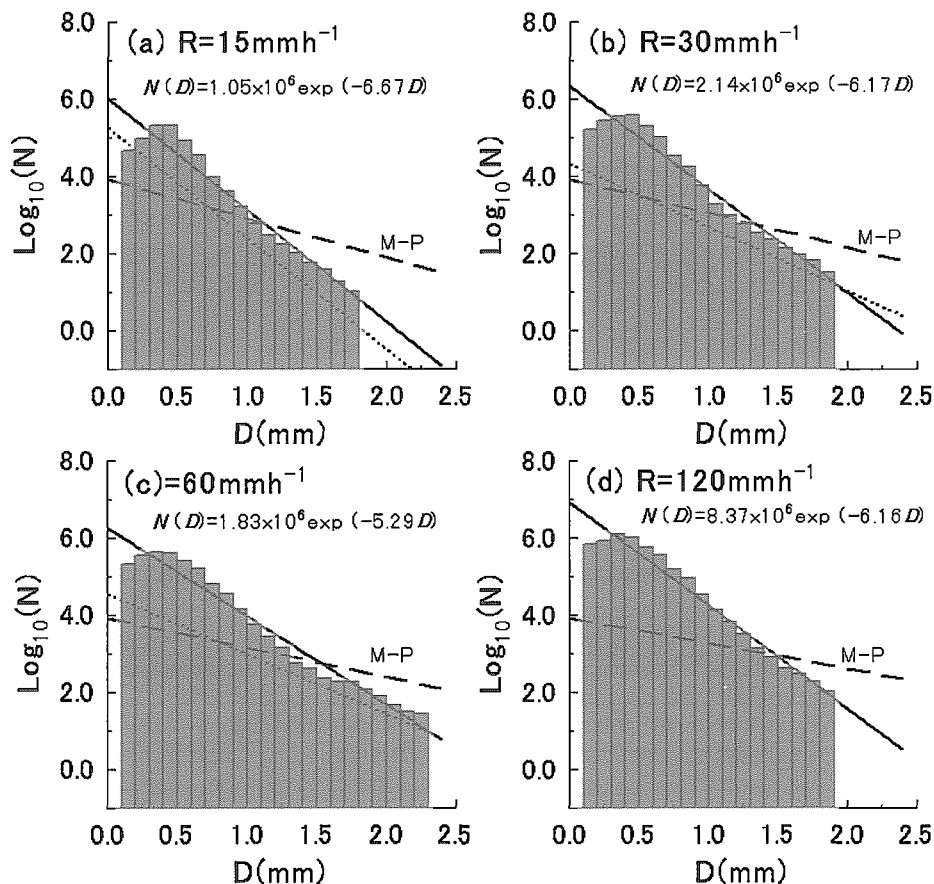


Fig. 9. Estimated drop size distributions with 2D-Video-Disdrometer measurements.

ディストロメータの結果と比較して約1桁小さな値であるが、切片パラメータ（体積メジアン直径）は $\Lambda=6.6\text{ mm}^{-1}$  ( $D_0=0.56\text{ mm}$ )で、2Dビデオディストロメータの値 $\Lambda=6.67\text{ mm}^{-1}$  ( $D_0=0.55\text{ mm}$ )と近い。15 $\text{ mmh}^{-1}$ 以外の設定降雨強度では、ろ紙法による $N_0$ 、 $D_0$ の推定結果は2Dビデオディストロメータに比べてともに小さな値である。

## V. ま と め

防災科学技術研究所の大型降雨実験施設は、豪雨により発生する土砂災害を、現実に近い規模の模型実験により再現し、その発生機構の解明や予測についての研究をおこなうために1974年に建設された。降雨実験施設内では、施設完成後から現在までの約30年間、いろいろな方法で実験施設内の雨滴粒径分布の測定が試みられてきた。本報では、ろ紙法、JWディストロメータによる方法、2Dビデオディストロメータによる方法の3種類の方法の概要とその結果について述べた。

ろ紙法、JWディストロメータ、2Dビデオディストロメータの3種類の方法のうち、2Dビデオ

オディドロメータのみが、設定降雨強度  $15 \text{ mmh}^{-1}$ ,  $30 \text{ mmh}^{-1}$ ,  $60 \text{ mmh}^{-1}$ ,  $120 \text{ mmh}^{-1}$  で正しく降雨強度を測定できた。ただし、設定降雨強度が  $120 \text{ mmh}^{-1}$  では、測定された降雨強度は  $130 \text{ mmh}^{-1}$  から  $100 \text{ mmh}^{-1}$  の間を変動した。設定降雨強度が  $200 \text{ mmh}^{-1}$  では、データオーバーフローのメッセージがログファイル上に見られるようになり、正常な計測はできなかった。設定降雨強度が  $120 \text{ mmh}^{-1}$  以下の場合の雨滴粒径分布は指数分布で近似できた。しかしながら、求められた雨滴粒径分布は天然の雨で観測される雨滴粒径分布と大きく異なっていた。降雨実験施設内の雨滴粒径分布の切片パラメータの値は天然の雨でしばしば引用される Marshall-Palmer の分布の切片パラメータに比べて、3 桁近く大きな値である。粒径分布の傾きを表すパラメータ  $D_0$  (体積メジアン直径) は Marshall-Palmer の分布の  $1/30$  から  $1/40$  の大きさの値でしかない。

ろ紙法による観測では、露出時間を正確に制御することが困難であったため、厳密な降雨強度や雨滴粒径分布の算出はできなかった。そこで、降雨施設の設定降雨強度が正しいと仮定して、計測された雨滴の個数から露出時間を推定し、雨滴粒径分布を推定した。推定した雨滴粒径分布は指数分布で近似できた。設定降雨強度が  $15 \text{ mmh}^{-1}$  のときの  $N_0$  は、2D ビデオオディドロメータの結果と比較して約 1 桁小さな値であったが、 $D_0$  は 2D ビデオオディドロメータの値と近かった。 $15 \text{ mmh}^{-1}$  以外の設定降雨強度では、ろ紙法により推定された  $N_0$ ,  $D_0$  は 2D ビデオオディドロメータの推定値に比べて小さな値であった。

JW デイスドロメータによる測定では、設定降雨強度が  $15 \text{ mmh}^{-1}$  のとき、測定された降雨強度は  $10 \text{ mmh}^{-1}$  と過少評価された。設定降雨強度が  $15 \text{ mmh}^{-1}$  よりも大きくなると、計測不能となり、測定値は設定値をはるかに下回った値となった。JW デイスドロメータでは小さい雨滴をカウントできなくなっており、求められた粒径分布は 2D ビデオオディドロメータから求められた分布と大きく異なっていた。

2D ビデオオディドロメータによる測定から、これまで不明であった降雨実験施設内のノズルで作り出される雨の粒径分布が明らかとなった。すなわち、降雨実験施設内の雨滴粒径分布は小さな雨滴が非常に多い分布であり、天然の雨で観測される粒径分布とは大きく異なっている。従って、今後、電波や光の降雨による減衰の実験や土壌の浸食などの実験を降雨実験施設内でおこなう際には、雨滴の粒径分布をできるだけ天然に近いものにすることが必要である。

## 文 献

- Atlas, D., R.C. Srivastava and R.S. Sekhon, 1973. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **II**, 1–35.
- Defant, A, 1905. Gesetzmässigkeiten in der verteilung der verschiedenen tropfengrössen bei regenfällen, *Wiener Ber. Abt. IIA*, **114**, 585–646.
- Gunn, R. and G.D. Kinzer, 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air, *J. Meteor.*, **6**, 243–248.
- Harimaya, T., 1978. Observation of size distribution of graupel and snow flake, *J. Faculty of Science, Hokkaido Univ., Series VII(Geophysics)*, **5**, 67–77.

- Joss, J. and A. Waldvogel, 1967. Ein spectrograph für Niederschlagstropfen mit automatischer auswertung (A spectrograph for automatic measurement of raindrops), *Gefis. Pura Appl.*, **68**, 240–246.
- Kruger, A. and W.F. Krajewski, 2001. Two-dimensional video disdrometer: A description, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 602–617.
- Maki, M., T. Keenan, Y. Sasaki and K. Nakamura, 2001. Characteristics of the raindrop size distribution in tropical continental squall Lines observed in Darwin, Australia, *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 1393–1412.
- 丸山晴久・浜一, 1954. 雨滴や雪片の連続観測, *天気*, **1**, 50–52.
- Nakamura, T., 1960. On the method of measuring the liquid water content of falling snowflakes (in Japanese), *Seppyo*, **22**, 145–146.
- Niederdorfer, E., 1925. Messungen der Grösse der regentropfen, *Meteorol. Zeitschr.*, **42**, 463–467.
- Sasyo, Y., T. Mori, O. Onozaki and T. Saito, 1991. Observation of liquid water content of melting snowflakes with a new instrument, *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 83–90.
- 佐粒純男・森太郎・小野崎統・斎藤貴志・筒井憲司, 1990. ろ紙による降水粒子の質量測定の精度について, *天気*, **37**, 61–66.
- Souvageot, H. and J.P. Lacaux, 1995. The shape of averaged drop size distributions, *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1070–1083.
- Schönhuber, M., H.E. Urban, J.P.V. Poiars Baptista, W.L. Randeu and W. Riedler, 1994. Measurements of precipitation characteristics by a new disdrometer”, *Proc. "Atmospheric Physics and Dynamics in the Analysis and Prognosis of Precipitation Fields"*, Rome, Italy, November 15–18, 1994.
- Sheppard, B.E. and P.I. Joe, 1994. Comparison of rain drop size distribution measurements by a Joss-Waldvogel disdrometer, a PMS 2DG spectrometer, and a POSS Doppler radar, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 874–887.
- 高橋喜彦, 1934. 雨滴の大きさ測定法, *天気と気候*, **1**, 63–65.
- 高橋喜彦, 1943. 細雨の雨滴の大きさ測定に就いて, *気象集誌*, **21**, 111–129.
- Tokay A., A. Kruger and W.F. Krajewski, 2001. Comparison of drop size distribution measurements by impact and optical disdrometers, *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 2083–2097.