

# 光を用いた雨滴計\*

後 町 幸 雄\*\*

## 要 旨

光の雨滴による遮蔽量をフォト・トランジスタで測定する雨滴計について述べる。同じ降雨について、この雨滴計とろ紙法によって求めた雨滴の粒度分布を比較すると、かなりよく一致しているが、この雨滴計の方が高感度である。またこの雨滴計を使って、その信号を磁気テープに記録することができる。

## 1. は し が き

レーダによる雨量測定や雨滴生成機構の研究において、あるいは土壌侵食の問題において、雨滴の粒度分布を知ることは極めて重要で、ここでそれに触れる必要はないと思う。

雨滴の粒度分布を測定する方法として、今でも最も広く用いられているのに、水溶性の染料をまぶしたろ紙を一定時間雨にさらす、いわゆるろ紙法があり、簡単で、しかも確実な方法である。しかし染料が溶けてできた斑点の大きさを測定する手数が大変である。その他麦粉を雨にさらして小さなだんごをつくって、それをふるいわけする方法、雨滴のレプリカをつくる方法、雨滴をアルミ箔に当ててその痕跡をとる方法、および落下中の雨滴を写真撮影する方法などがあるが、ろ紙法と同様にかなりの手数がかかる。

近年エレクトロニクスの進歩とともに、雨滴の大きさを電気信号としてとり出す試みがいくつか行なわれるようになった。その第1は落下する雨滴をマイクロフォンの振動板に受けて、その音の大きさから雨滴の大きさを測定する方法であるが、直径1 mm 以下の雨滴の測定はむずかしい(安斎, 1969)。特にこの装置ではレーダ反射因子Zと降雨強度Rを直ちに求められるように工夫されている。第2は雨滴に光を当ててその散乱光の強さを測定する方法であるが(Mason 等, 1953), (Dingle 等, 1962), かなり強い光源と高感度の光検出装置が必要である。これと同様な方法はダスト・カウンタにも用いられている(金川等, 1970)。第3は、ある一定の大きさの穴を通過した雨滴が2段になった、細い金属線を狭い間隔で平行に張ってつくったグリッドを貫通するようにした

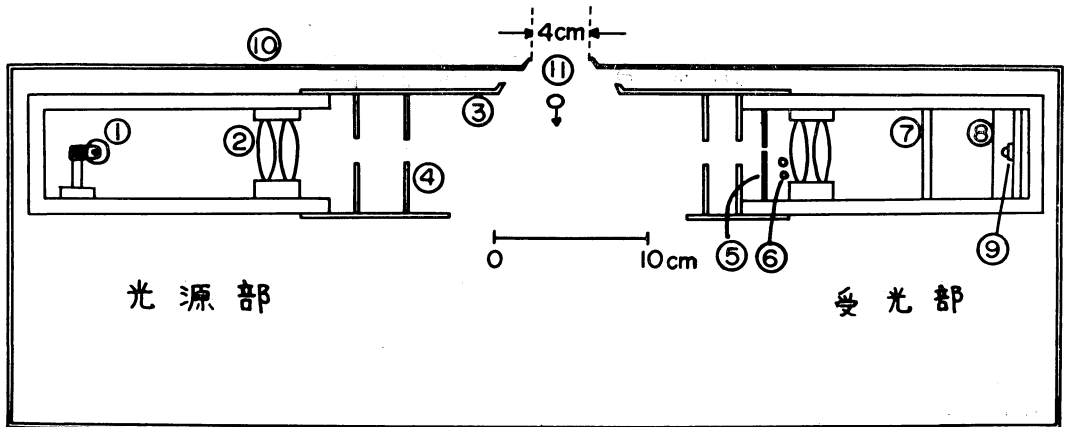
装置である(Lammers, 1969)。その上段のグリッドには300Vの電圧を与えているので、そこを貫通した雨滴は、雨滴の大きさで決まる荷電を得る。次に下段のグリッドを貫通することにより、その荷電量を測定するという方法である。第4は2,000Vの電圧をかけた電線を空中に水平に張り、これとアース間の電圧を測定する方法で(Winn, 1969)、実際には不要な信号を打ち消すために電線を二本平行に張る。雨滴が電線に触れるとアースとの間の電気容量が急激に変化するために、その間の電圧の変化が信号として得られるわけである。以上の4つの方法とも雨滴の大きさは、電気信号としてのパルスの波高によって示されるので、適当なパルス波高分析装置があれば、雨滴の粒度分布を迅速に知ることができる。われわれの雨滴計も同様な資料処理法を目指している。

最後の1つは平行光線を雨滴が横切つてつくる影の量を測定する方法で、ここで述べる雨滴計も原理的にはこの種のものに属する。Knollenberg (1970)の考案したものは飛行機にも搭載できるが、受光部は光学繊維を多数横に並べ、その1つ1つを光電子増倍管に連ねて、光の強さがある程度以下になったか否かだけを検出する。光学繊維の1つが単位になっているので、影を検出したその数が雨滴あるいは小水滴の直径になる。この場合光の回折も考慮してあり、直径5 $\mu$ 位までの小さな水滴が検出できる。

一方河川における浮遊砂の濃度を光学的に測定する方法にも同様なものがある(道上等, 1971)。道上等は光源に発光ダイオード、受光器にフォト・トランジスタを使用した濃度計をつくり、砂粒の大きさが均一で分っており、かつそれが光の波長に比べて充分大きく、また砂粒が互いに重なり合わない程度の低濃度の場合に、浮遊砂中の光の強さの減少量は、充分な精度で砂粒の総面積に

\* An Optical Raindrop Spectrometer

\*\* Y. Gocho 京都大学防災研究所



第1図 雨滴計の感部。

- ①豆電球 ②レンズ ③フード ④遮蔽板 ⑤スリット ⑥ヒータ ⑦フィルタ  
⑧乳白色の板 ⑨フォト・トランジスタ ⑩カバー ⑪すき間。

よる遮蔽によって決まることを確かめた。ここに述べる雨滴計はこの濃度計に示唆されて試作し、更に何回もの改良を重ねたものであるが、上記の種々のものに比べ簡単に安価にできる長所も持っている。特にわれわれは現在山岳地の降雨の研究を手がけており、商用電源のない多地点での雨滴測定を目的としているが、以下にその雨滴計について述べる。

## 2. 雨滴計の感部

第1図に雨滴計の感部の構造を示したが、カバーの中の左側が光源部で、右側が受光部である。光源は8V、12Wのタングステン白熱豆電球であるが、光の強さの安定性を高めるためと、電球の寿命を長くするために、これを6Vで用いている。電球を固定するのにソケットは使わずに、直接固定してから電線をハンダ付する方が、光源の明るさの安定性はよい。この豆電球のフィラメントは長さ5mm程のコイルになっているが、固定するときフィラメントを鉛直にした方がよい。そうすると、光の左右の縁が鋭いビームが得られる。電球からの光は2枚の凸レンズによって平行光線にされる。焦点距離を短かくするために、レンズを2枚重ねた。

平行光線はスリットによって一定断面積のビームにされるが、後の調整を容易にするためにスリットは受光部のレンズの前に置いた。スリットの型は第2図に示したように幅4cm、厚さ3mmの平たい短形である。受光部ではビームが再度凸レンズによって絞られ、フォト・トランジスタによって光の強さが測定される。フォト・

トランジスタは現在光の波長の800m $\mu$ に最大感度のあるシャープのシリコン・フォト・トランジスタPT500を用いているが、出力、応答性およびノイズの低さとも充分な特性を持っている。雨滴が落下しながらビームを横切ると、受ける光の強さが低下して負のパルスが生ずる。しかし装置がこのままであれば、ビームの中の場所によって、同じ大きさの雨滴でもパルスの波高、すなわち出力が違ってくる。そこでビームの中の感度を一様にするために、フォト・トランジスタの直ぐ前に乳白色の板を入れた。この板は、現在トレーシング・フィルムのトレースターを用いているが、場合によっては何枚か重ねる必要がある。またフォト・トランジスタからの距離も様々で、実際にはそれらは個々に調整しなければならない。更に乳白色の板とレンズとの間に濃い赤色フィルターを入れてあるが、これは透過率50%の波長が690m $\mu$ のもので、特に昼間外部からの可視光線の影響を少なくするためのものである。

光源部および受光部ともレンズに水滴がついたり、また外部から光が入らないように第1図に示したような遮蔽板をつけたフードをつけてある。光源部および受光部は、アングルで作った同じ台の上に固定し、その上に同図のようなカバーをとりつける。カバーを除いた雨滴計を写真1に示す。そしてカバーをつけた雨滴計は写真2に示す。このようにカバーをつけて保護しないと、激しい降雨のときには、雨滴のはね返り防止を施しても、フードや台に雨滴が衝突するだけで、その振動が出力に

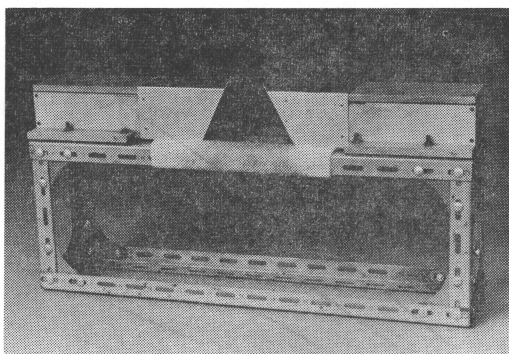


写真1 カバーを除いた雨滴計。

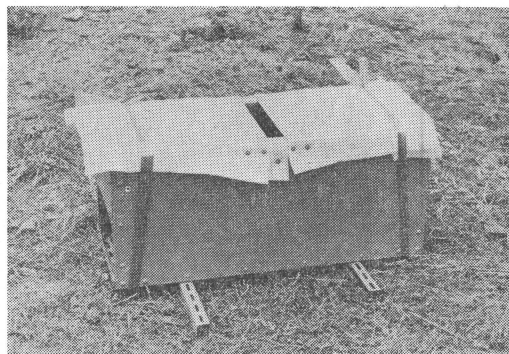


写真2 カバーをつけた雨滴計。

ノイズとして入ってくる。カバーの上部の真中には第1図に示したようにエッジの間隔が4cmのすき間を作っており、ここから測定される雨滴が落下する。写真2に示したようにすき間以外のカバーの上部は、雨滴のはね返り防止のために厚い多孔質の繊維製品で被ってある。

先に述べたようにスリットの横幅が4cm、また雨滴部のカバーのすき間の間隔が4cmでビームはそのすき間に直交しているから、実際に測定される雨が通過する部分は、面積が $16\text{cm}^2$ の正方形である。それから風のある時に雨滴計を設置する場合には、カバーのすき間の方向を風向と一致するようにすることが望ましい。

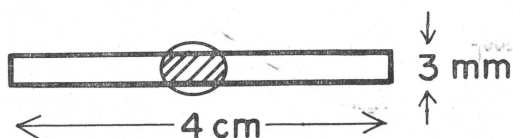
霧がある場合にも観測は大抵可能であるが、そのことについては後で触れることにして、ここではそのような場合に起りやすいレンズの結露について述べる。光源部では電球が点灯しているためにかかなり暖かくなっているから、レンズが結露のためにくもることはまずないだろうが、受光部のレンズはくもることがある。そのような場合には、電球は点灯しているのに、結露とともにフォト・トランジスタは直ちに、ほとんど光を感じなくなってしまうことで判明する。そこで第1図に示したように受光部のレンズの直前で、スリットとレンズでできた狭い空間に電熱のヒーターを入れ、光源への電源で点滅できるようにしている。これまでの経験では、実際にレンズに結露した場合でも、ヒーターを入れてくもりを取ること的成功している。

さて信号としての出力はオシロスコープで簡単に見ることができるが、フォト・トランジスタのコレクタ・エミッタ間電圧約10V、負荷抵抗約10K $\Omega$ で、感度を最大の状態に調整すると、およそ5mVから約1V位の高出力が得られる。ノイズはほぼ $\pm 1\sim 2\text{mV}$ におさえられた。しかもこの雨滴計で極めて有利な点は、出力を交流

電圧で測定できることで、このことによって光源の明るさに多少の長周期変動があっても、出力の零点のドリフトなしに測定を行なうことができる。

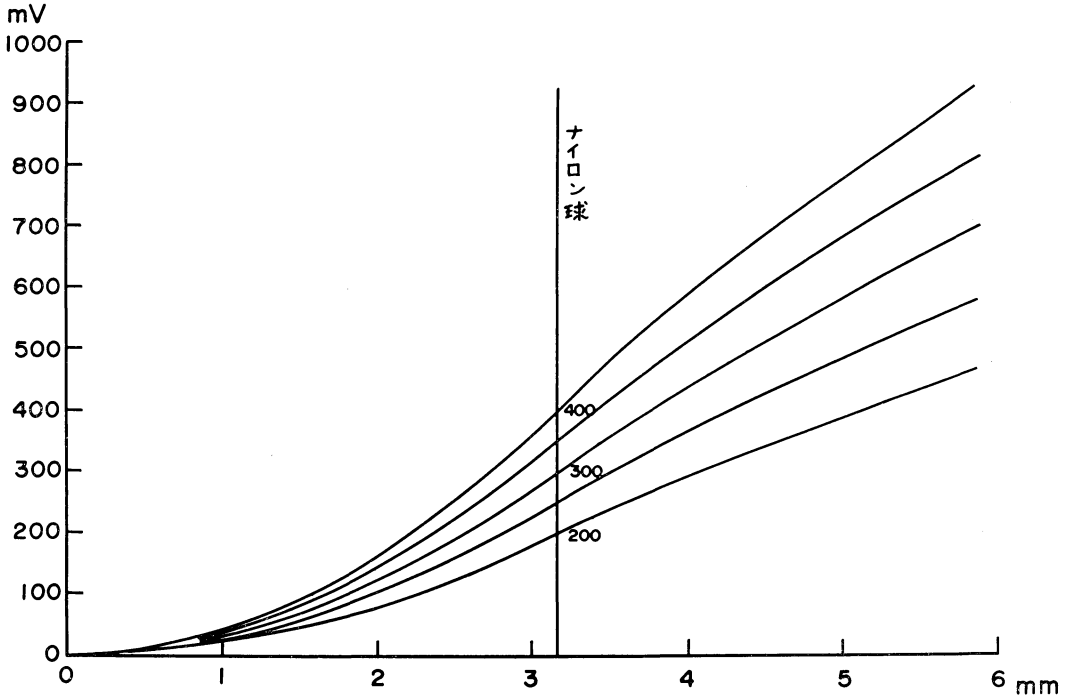
### 3. 雨滴計の検定

前節に述べたようにこの雨滴計は、雨滴がビームをさえぎってできる影の量を測定しているが、第2図に示すようにスリット(ビーム)の厚さは3mmであるから、大きな雨滴の断面はそれより大きくなって、実際に影をつくるのは斜線で示した部分になる。従って出力のパルス波高はその斜線で示した部分の面積が最大になる時の値で示される。面積のわかっているものを投入れたり、挿入したりして、面積と出力の関係を調べると、明確な線型関係となる。

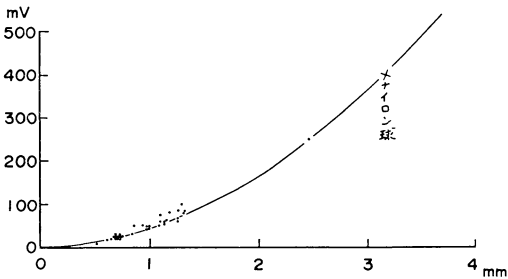


第2図 スリットと雨滴。

ところで落下中の雨滴の形は孫野(1954)によって写真撮影され、大きいもの程扁平になり、そなえ餅のような形をしていることはよく知られている。雨滴を球とした時の直径と実際の雨滴の最大直径との関係は熊井等(1954)によって測定されているが、これだけでその形を決めることはできないので、ここでは単純に雨滴は最大直径を長径とする回転楕円体であると仮定した。その楕円の短径が3mm以下であれば、その楕円の面積がそのまま雨滴の影の量になる。雨滴を球とした時の直径が3.4mmを越すと、楕円の短径も3mmを越すから影の量となる面積は第2図に示した斜線の部分になるが、



第3図 雨滴の直径と出力との関係を示す検定曲線。



第4図 注射器でつくった水滴の直径と出力との関係。

これは簡単に計算できる。

先に述べたように影をつくる面積と出力の間には線型関係があるから、その関係を、雨滴を球としたときの直径と出力の関係に変換することができる。両者の関係は曲線群として第3図のようになる。従って検定曲線としてこれらの曲線の中から1つを選択する必要がある。それには大きさのわかっている小球を雨滴計の感部に放り込んで、その出力を測定すればよい。第3図に示したのは、1/8 インチのナイロン球を基準にした検定曲線群である。例えばそのナイロン球によって300mV の出力が

得られたら、5本の曲線のうちの真中の曲線がその場合の検定曲線である。

雨滴計の感部の下に、染料をまぶしたろ紙をおき、数メートル上方から比較的小さい水滴を注射器でつくってろ紙を目掛けて落下させて求めた出力と粒径との関係を第4図に示すが、出力の読みとりがむずかしいので多少のばらつきはあるが、検定曲線によく乗っている。

#### 4. 記録および処理方法

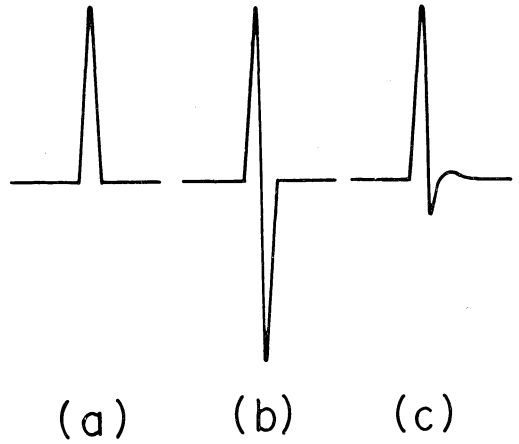
雨滴の大きさをパルスの波高であらわすこの種の雨滴計では、信号の記録および処理方法等共通した問題であるが、先に述べたようにいずれもパルス波高分析器で雨滴の粒度分布を求めることができる。従って記録方法にも信号を直接アナログ記録とするのと、波高分析器を通して処理されたものをデジタル記録にするものがある。パルス波高分析器は本来放射線計測におけるシンチレーション検出器等の出力を受けて、パルス信号の波高の値を自動的に読みとるために用いられているようであるが、測定可能なパルス波形に制限がある。しかし適当なパルス波形変換器があれば、大抵その制限を除くことが可能であろう。先にも触れたダスト・カウンタではそ

の方式がとられている。

パルス波高分析器は高価でもあり、われわれの場合のように野外の多地点での測定を目的としている場合には、むしろパルス信号を記録し、それを再生して波高分析する方が、パルス波高分析器も少数で済み好都合であると考えられる。しかしながらわれわれの雨滴計からの出力としてのパルスはパルス幅が  $10^{-4}$ — $10^{-3}$ sec のオーダのほぼ三角波で、このパルスを磁気テープで完全に記録するには周波数特性 DC-5 KHz 以上の FM 方式のレコーダが必要である。このためには高性能のデータ・レコーダでなくてはならないし、テープ速度もかなり大きくとらなければならないので、長いテープを使っても連続記録時間は精々1時間ぐらいである。そこでわれわれは DR 方式（信号を変調しないで直接にレコーダに入れること）で記録できないものかと考えた。上述のようなパルスを DR 方式で記録して、再生してみると、元の三角波のパルスは、それが微分された波形になってしまう。しかもレコーダの恐らく低周波特性の不充分さのために、備えられている出力の端子からの波形は大抵さらにくずれてしまうので、再生ヘッドに近いところに出力端子をつくらなくてはならない。そうして再生される波形はかなり正確な微分波形なので、われわれはそれを CR 回路で積分することにした。

第5図(a)は雨滴計からの直接のパルス波形で、同図(b)は磁気レコーダから再生された微分波形、そして同図(c)はさらにそれを CR 回路で積分した波形である。その最後の図からわかるように、積分された波形は最初の形に完全に復原されてはいないが、この程度の誤差は止むを得ない。雨滴計からのパルスのパルス幅は、雨滴が大きい程短かく、小さい程長いので、積分するとき問題になる時定数を一義的に決めることができないこと、また積分するために再生の出力を増幅器で大きくする必要があり、そのことでノイズがかなり大きくなってしまふことなどが完全な積分を困難にしている。このような過程を経て生ずる誤差等については後の実際の観測例で示す。

このような計測を目的としている場合にはもとより磁気テープ・レコーダにはデータ・レコーダを用いるべきであるが、前節に述べたような放球による検定を回数多く行なえば音響用のテープ・レコーダでも充分にその目的を達成することが可能だろうと考え、特にレコーダの電源には定電圧装置をおくなどして、携帯用のステレオ・テープ・レコーダを用いることにした。



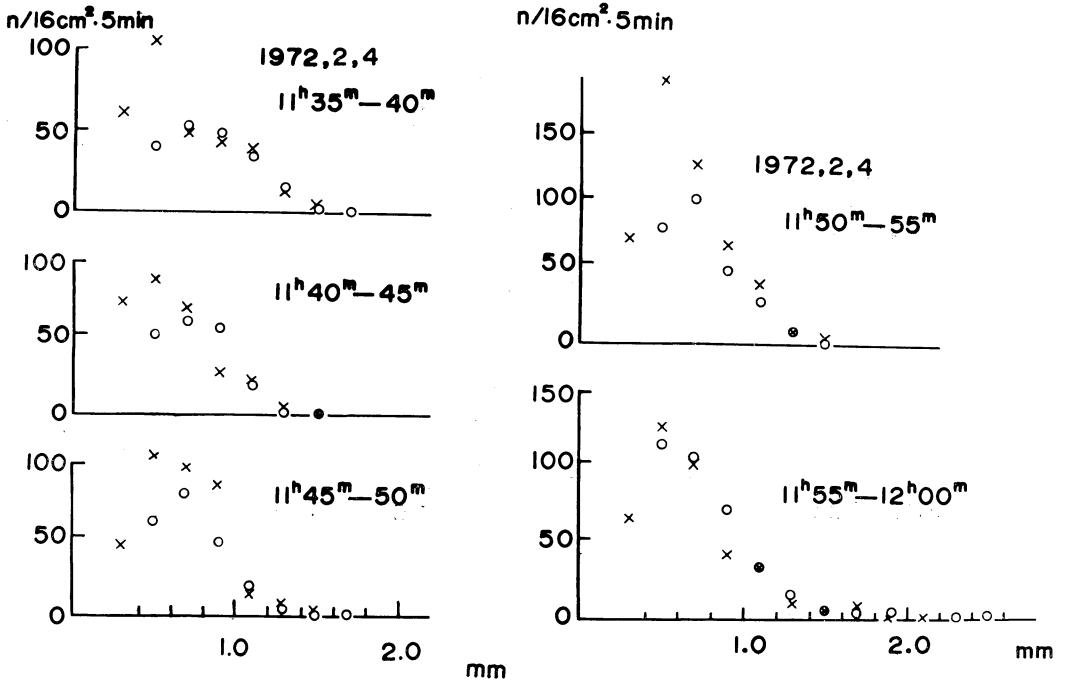
第5図 オシロ・スコープで見られる波形。

- (a) 雨滴計からの信号。
- (b) 磁気テープ・レコーダから直接再生された信号。
- (c) 積分器を通して再生された信号。

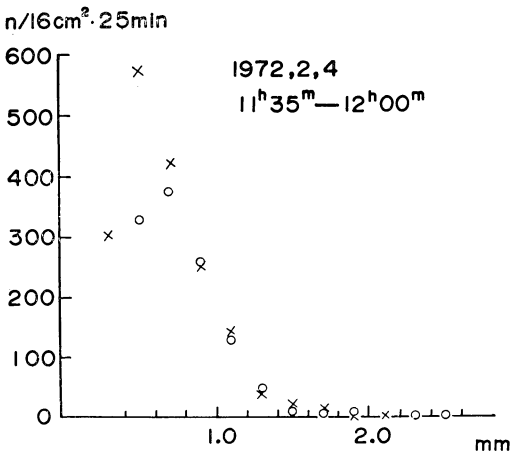
当初は2チャンネルのうちの一方に雨滴計からのパルス信号を入れ、もう一方にはラジオ放送などを入れてこれを時間軸に用いた。しかし数回のテストをした結果、1つのチャンネルに、弱い雨から強い雨までの信号を確実に記録するにはダイナミック・レンジが小さく、特にパルス波高分析器を使うのがむずかしいことが判明した。そこで時刻は別の方法で記入することにし、2チャンネルともパルス信号を記録することに改め、一方は利得を上げ、他の一方は利得を下げて用いることにした。しかしながら、小さな雨滴の信号を記録するために、高利得で記録しているチャンネルのなかに、大きな雨滴の高波高のパルスが入ってくると、単に飽和するだけでなく、再生波形のゆがみが著しく、積分した波形も大きくくずれ、実際に読みとるべき他の小さい信号の方までその影響がおよんでしまう。それを避けるために、高利得のチャンネルに入る大きなパルスは、一定波高以上になると、そのパルスの先をクリップしてしまふレベル・クリップを、雨滴計とテープ・レコーダの間に入れた。このようにしてわれわれはパルス信号を DR 方式でステレオ・テープ・レコーダに記録し、再生の際には積分を行なう。

### 5. 観測結果

レベルクリップができてまだ間もないので、パルス波高分析器まで用いた結果は別の機会に報告することにして、比較的弱い降雨の場合のこの雨滴計による測定結果



第6図 5分毎の、落下した雨滴の粒度分布。  
 ×：雨滴計による，○：ろ紙法による。



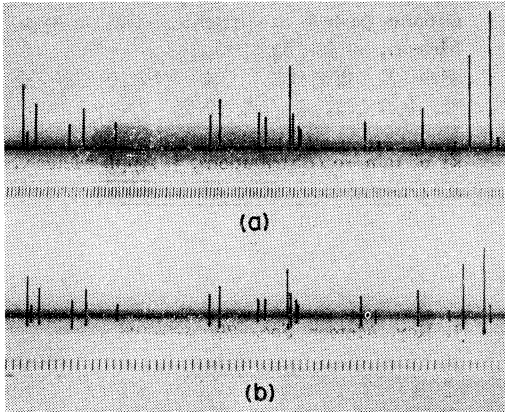
第7図 25分間に落下した雨滴の粒度分布（第6図に示したものの総量）。  
 ×：雨滴計による，○：ろ紙法による。

と、ろ紙法による結果との比較、およびテープ・レコーダで記録、再生した結果について述べよう。

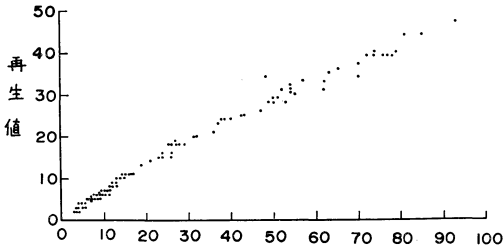
第6図は1972年2月4日の11時35分（JST）から12時00分までの5分間毎に示した、落下した雨滴の直径0.2

mm 毎の数の分布であるが、図中雨滴計によるものを×で表わし、ろ紙法によるものは○で表わしてある。第7図は同11時35分から12時00分までの25分間の合計の分布である。ろ紙による測定結果は、雨滴計からおよそ20m離れた場所で1分毎に10—20秒間、直径12.5cmの円形ろ紙を雨に露出したものを、比較のために同じ単位に換算して示してある。上の2つの図に、ろ紙法では0.6mm以下、雨滴計によるものでは0.4mm以下の雨滴は、その総量が示してあるが、この段階の雨滴計でも小さな雨滴の判別は直径0.4mmまでは容易にできる。第8図(a)に雨滴計からのパルスの記録の1例を示す。さて第6図では雨滴計とろ紙法との差が多少あるけれども、第7図ではよく一致している。両者の測定場所の相違、ろ紙法の測定時間の非連続性などから、その差が生じたものと思われる。第6図でも第7図でも雨滴の小さい方は、いずれもろ紙法によるものの方が数が少なくなる傾向がはっきり出ているが、これは雨滴計の方が感度が高いことを示している。なおこの場合には、降雨は激しくなかったから、雨滴のはね返り等による誤差は極めて小さかったものと考えられる。

第8図(b)はテープ・レコーダに記録したものを再生



第8図(a) 雨滴計からの信号(オシロ・スコープの連続撮影), 下の10目盛が1秒.  
(b) 磁気テープ・レコーダから積分器を通して再生した信号, 下の5目盛が1秒.



第9図 雨滴計からのパルスの波高と, 磁気テープ・レコーダから再生されたパルスの波高の関係.

した(a)に対応する部分である。但しこの場合、再生のときのテープ速度は記録したときの2倍にしてある。両者の出力を適当な同一単位のスケールで読取った対応関係を第9図に示す。両者の関係は必ずしも線型ではない。多少ばらつきもあるが、誤差は10%以下とみてよい。ある程度の時間の平均の粒度分布を求めないのであれば、その誤差はさらに小さくなるだろう。以上のことから、このようなDR方式で、われわれの要求する精度の充分な磁気記録が可能であることがわかる。

## 6. 検討

上に観測例によって、ほぼ満足すべき結果が得られたことを示したが、その例の場合の降雨は弱く、雨滴も最大直径は2.5mm程度で小さかった。落下中の雨滴の形は、大きくなる程扁平になることは前に述べたが、先に検定曲線を求めるために、それが回転楕円体であると仮

定した。その仮定が妥当であるかどうかは、大きな雨滴に対しては十分に確かめられていないから、大きな雨滴に対する検定曲線は今後少し変わるかも知れない。

先に述べたようにこの雨滴計の雨滴の受口面積は16cm<sup>2</sup>であるが、これはいうまでもなく2つ以上の雨滴を同時に測定する確率を小さくするために決めたものである。しかしその面積を小さくしすぎると、強い降雨で大きな雨滴の数が多いときには、雨滴が受口面積の部分とその外側との境界を通過する確率が増し、それによって生ずる誤差を無視できなくなる恐れがある。雨滴の落下がランダムだと仮定すれば、その誤差の評価は可能である。しかしながら、境界の2辺であるカバーの上部のすき間のエッジの部分に大きな雨滴が当たった場合には、はね返りのしづきが生じ、それが誤差となる場合がある。

この雨滴計と同様な原理でKnollenbergは5μ程度の小水滴まで測定することに成功したが、われわれの雨滴計でどの程度まで小さな水滴を測定できるかということも興味ある問題である。この雨滴計でスリットを小さくし、それと同時に光源の光も強くすれば、感度が高くなることはすでに確かめてあるが、その限界がどこにあるかは今後の研究題目の1つである。

2節で触れた、霧のある場合であるが、霧が雨滴計の感部を横切ると、当然受ける光の強さは減少し、出力も変化する。そのような場合には第8図の原点のレベルが激しく変動し、雨滴の信号はその上に重なって現われる。しかしながら出力電圧を交流として測定しているために、原点のレベル変動をかなりおさえることができるので、多くの場合霧があっても測定は可能と思われる。また雨滴計のカバーも霧の侵入をかなり少なくしているように思われる。

## 7. 結論

光の雨滴による遮蔽量をフォト・トランジスタで測定する雨滴計について述べた。弱い降雨についてこの雨滴計とろ紙法によって求めた雨滴の粒度分布を比較したが、結果はかなりよく一致していた。感度はこの雨滴計の方がよかった。またこの雨滴計を使って、その信号を野外で磁気テープに記録することが実際に可能である。

残された問題としては、6節の検討で初めに述べた3点がある。

## 謝辞

最後にこの雨滴計の製作に際し、多くの助言と励ましを頂いた、京都大学防災研究所石原安雄教授、ならびにその試験に協力して頂いた同中島暢太郎教授をはじめ、

両教授の研究室の方々に対し謝意を表します。また電子工学の多くの問題に対し貴重な助言を頂き、レベルクリップをつくって頂いた森技術研究所の森淳彦氏に感謝します。

### 文 献

- 1) 安齋正直, 1967: マイクロホン型雨滴計, 日本気象学会1969年度春季大会講演予稿集, 15, 68.
- 2) Dingle, A.N., and H.F. Schulte, Jr., 1962: A research instrument for the study of rain-drop-size spectra, J. Appl. Meteor., 1, 48-59.
- 3) 金川 昭, 横地 明, 筒井天尊, 1970: 光散乱粒子カウンターについて, 京都大学原子炉実験所, 第4回学術講演会講演予稿集, 19-30.
- 4) Knollenberg, R.G., 1970: The optical array: an alternative to scattering or extinction for

airborne particle size determination, J. Appl. Meteor., 9, 86-103.

- 5) 熊井 基, 板垣和彦, 1954: 雨滴の形と落下速度, 気象集誌, II, 32, 69-76.
- 6) Lammers, U.H.W., 1969: Electrostatic analysis of raindrop distributions, J. Appl. Meteor., 8, 330-334.
- 7) 孫野長治, 1954: 静止空气中を落下する水滴の形について, 気象集誌, II, 32, 59-68.
- 8) Mason, B. J., and R. Ramanadham, 1953: A photoelectric raindrop spectrometer, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 79, 490-495.
- 9) 道上正規, 白川 清, 1971: 浮遊砂に関する研究(2)—濃度の光学的測定法—, 京都大学防災研究所年報, 第14号B, 251-258.
- 10) Winn, W.P., 1969: A device for measuring the radii of raindrops, J. Appl. Meteor., 8, 335-339.

(以下546ページの続き)

- |  |  |
|--|--|
| <p>川口彰久 ( // )</p> <p>(17) 14:50—15:05 平面形を異にする高層建築物の風力に関する風洞実験について<br/>亀井 勇 (日大生産)<br/>新堀喜則 ( // )</p> <p>(18) 15:05—15:20 長大橋の設計風速の評価<br/>○伊藤 学 (東大工)<br/>大久保忠良 (土木研)<br/>宮田利雄 (東大工)</p> <p>(19) 15:20—15:35 角柱表面に作用する風圧力について<br/>石崎潑雄 (京大防災研)<br/>○河井宏允 ( // )</p> <p>(20) 15:35—15:50 一様流中における四角柱の共振</p> | <p>石崎潑雄 (京大防災研)<br/>○森 武雄 (金沢工大)</p> <p>(21) 15:50—16:05 自然風中での窓ガラスの振動について<br/>石崎潑雄 (京大防災研)<br/>○吉川祐三 ( // )</p> <p>16:05—16:15 休憩</p> <p>(22) 16:15—17:00 乱流境界層の底層の構造 (特別講演)<br/>佐藤 浩 (東大宇航研)</p> <p>終了後気象庁一階食堂にて懇親会<br/>会費500円 (定員20名)<br/>出席ご希望の方は当日会場受付へお申込み下さい。</p> |
|--|--|