

# 音を利用した雨量計の試作とテスト

Trial Production of new type rain gauge  
by using the correlation between raindrop and rain sound

\* \*\* \*\*\*

林 尚志 鶴田泰士 石川忠晴

By Hisashi HAYASHI, Yasushi TSURUTA and Tadaharu ISHIKAWA

We produced a new type rain gauge for trial, which can measure the rainfall intensity with fine time resolution by analysing the sound of rainfall emitted from a tinplate can. Digital high pass filter was designed and inserted into the data processing in order to eliminate the noise. Experimental visualization of rain drop was carried out indoors and outdoors to relate the volume of rain drop to the intensity of rain sound. The time series of rainfall intensity agreed very well with data of normal raingauge with a water collector.

**Keywords:** new type rain gauge, sound analysis, High Pass Filter

## 1. はじめに

都市域での排水路網の整備に伴い洪水到達時間が短縮し、従来よりも時間分解能の高い降雨観測の必要性が高まってきている。レーダー雨量計の実用化はこの期待に応えるものであるが、その利用を高度化するには、定量精度を向上させるための支援データとして、地上での短時間降雨情報及び雨滴径に関する情報が必要とされる。このため、次節に述べるように種々の新しい降雨観測機器が開発されてきている。

筆者らは、金属面上で雨滴が発する音の時系列から雨滴径と降雨強度を算出することを考え、ミニディスクレコーダで録音した雨音と転倒升式雨量計による降雨強度との間の関係を解析し、雨音から推定される“一粒雨量”を累積する方法により、極めて短時間の降雨強度を算定できる可能性を示した。<sup>1)</sup>その後、雨音収録から降雨量算定までをオンラインで処理する観測機器を試作したので報告する。

## 2. 音響雨量計の特徴

短時間降雨強度及び雨滴径を測定する装置が、近年いくつか開発されている。まず短時間降雨強度を測定する機器として降雨強度計(横河ウェザック(株)製)がある。この装置は、水が灯油中のノズルを通過する際にほぼ一定の球形粒子に分割されることを利用し、分割された水滴の個数を光電管で計測することにより降雨強度を推定する装置であり、通常の雨量計よりかなり時間分解能が高い。しかし弱い降雨では水滴の落下間隔が不均一になるため強度分解能には限界がある。また雨滴径に関する情報は得られない。一方、

\* 学生会員 工修 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)

\*\* 学生会員 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)

\*\*\* 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 (〒226横浜市緑区長津田町4259)

雨滴径計測機器としてはディストロメータがある。この装置は雨滴が叩く振動面の変位を電氣的に計測して落下運動量を算定する精密な装置であり、雨滴体積の積分から降雨強度を算定することもできる。しかし装置の構造上極めて高価であるために雨量計としては利用しにくい。また最近、山田、日比野ら<sup>23)</sup>によって、レーザー雨量計が開発されている。この装置はレーザー光線の雨滴による遮光量が雨滴径と相関が高いことを利用し、個々の雨滴径及び落下速度を精度良く算定する装置である。

筆者らが開発しようとする音響雨量計は、ディストロメータ(電気音響法)と多少類似しているが、ディストロメータが振動板の変異を直接計測するのに対し、音響雨量計では、金属面で発した「雨音」をマイクロフォンで”間接的”に収録した後に雨滴径と降雨強度を解析するところに特徴があり、市販の部品を用いて安価に構成できる。

3. 雑音の除去方法の検討

音響雨量計は金属面が発する雨音を解析するものであるから、雨音以外の雑音を除去する必要がある。本節では、まず雨音と一般雑音の特性の違いを述べた後に、雑音除去フィルタの検討結果を説明する。

3-1 金属缶の密閉効果

音響雨量計は、マイクロフォンを金属缶の中に設置して、雨粒が金属缶面を叩く音を録音する。(写真-1参照：缶は大阪製缶(株)製) したがって雨粒音は缶内に直に伝わるが、缶外で発生した雑音は缶面である程度遮蔽されると考えられる。そこでまず、雑音の代表として電車と自動車の通過音を、缶の蓋を開けた場合と閉じた場合について録音し、スペクトル解析した。その結果を各々図-1～図-4に示す。なお雑音源からの距離はいずれも5mである。比較のために雨音のスペクトル解析結果の例を図-5に示す。金属面上の雨音の周波数は2～6 kHzに集中している。



写真-1：音響雨量計本体

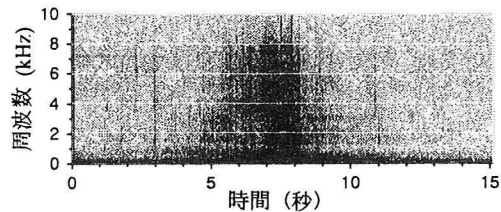


図-1：蓋を開けた状態での電車音のスペクトル

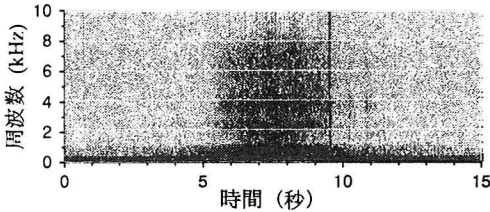


図-2：蓋を開けた状態での自動車音のスペクトル

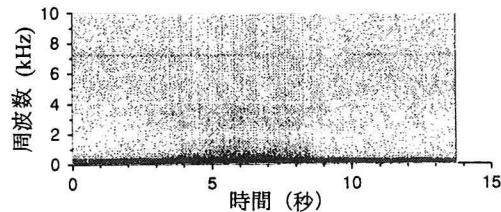


図-3：蓋を閉めた状態での電車音のスペクトル

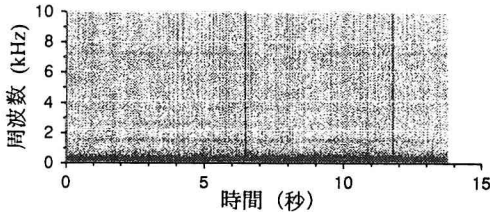


図-4：蓋を閉めた状態での自動車音のスペクトル

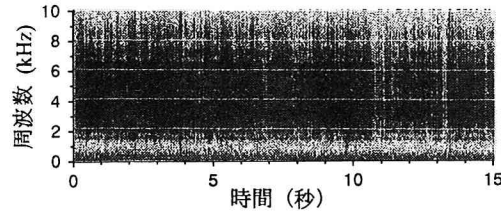


図-5：雨音のスペクトル

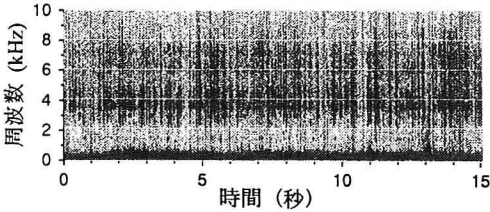


図-6：雷雨のスペクトル

さて、図-1, 2によれば、雑音のパワーは低周波(1kHz以下)に集中しているが、雨音と同じ高周波成分も若干含まれることがわかる。しかし図-3, 4によれば蓋を閉じた状態では低周波成分のみが観測され、高周波成分はほとんどカットされる。図-6, 7は、雷と飛行機の雑音(蓋を閉めた状態)のスペクトル解析結果であるが、缶の密閉効果のために高周波成分は感知されなくなっている。ただし、図-6は雨が降っているので、高周波成分もある。したがって、缶を密閉した場合にマイクロフォンに届く雑音の周波数は、雨音のそれよりかなり低周波であることが期待され、ハイパスフィルタによって除去できるものと考えられる。もちろん人為的に巨大な高周波音を缶の近傍で発生させれば雑音障害が生じることになる。しかし、一般に1kHzという周波数はソプラノ歌手の最高音の波長であるから、それに相当する雑音が密閉缶内にも有意な大きさに伝わるような環境は極めて希であると考えられる。

### 3-2 ハイパスフィルタ

前述のように、金属面上の雨音の周波数は数kHzであるので、その強度を解析するには数十kHzの周波数でAD変換することになる。そのため信号処理とAD変換の間でトラブルが起きないようにフィルタを作成する必要がある。しかしアナログ回路によるフィルタでは、部品精度や温度変化の影響を受けやすい。したがって信号処理とAD変換に支障のないように、高速で簡易なデジタルハイパスフィルタを作成することとした。

本研究では、次式に示すように“連続する2値の差”を新たな信号値とする簡易なハイパスフィルタを用いる。

$$x'(t) = x(t+dt) - x(t) \quad (1)$$

ここに、 $x(t)$ ,  $x(t+dt)$ は、AD変換された音響信号の連続するふたつの値である。すなわち、音響雨量計では“音響強度”のみを必要とするので“原波形”を保存する必要がない。式(1)では周波数ごとに異なる位相差が発生するから原波形は消失するが、新信号 $x'(t)$ においても大きな雨粒の信号強度は当然大きいことが期待されるので、適当なキャリブレーションを行っておくことにより、測定器として十分機能するものと考えられる。なお(1)式の伝達関数を図-8に示す。

後に述べるように、音響雨量計では20kHzで取り込んだ音響信号にハイパスフィルタを作用させた後に絶対値を取り、1/200秒ごとのプラス信号のみの時系列に直して雨量強度を求める。したがって、1/200秒時系列の段階で雑音が除去されるかどうかが重要である。そこで、上記の処理過程でハイパスフィルタを作用させた場合と作用させなかった場合について比較を行った。

図-9は雷雨における雷音と雨音を同時に録音した場合の処理結果で、上段がハイパスフィルタを作用させ

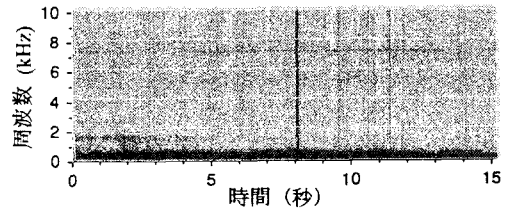


図-7：蓋を閉めた状態の飛行機のスペクトル

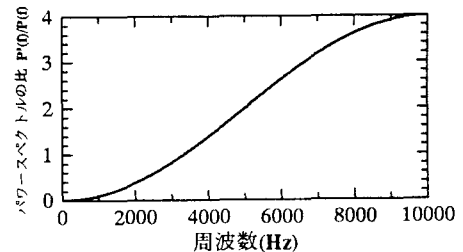


図-8：ハイパスフィルタの周波数特性

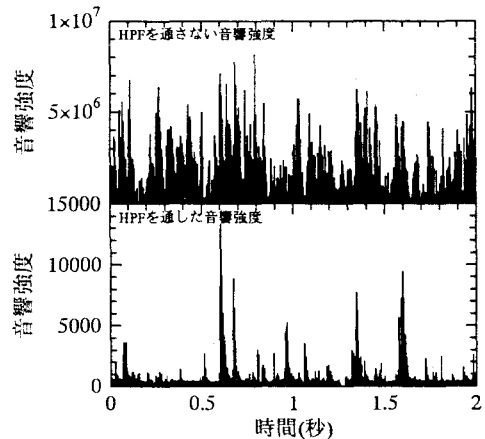


図-9：雷雨時の1/200秒音響強度時系列

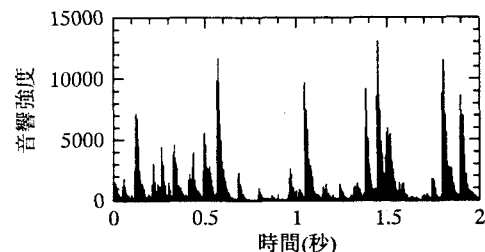


図-10：雨音の1/200秒音響強度時系列

なかった場合、下段がハイパスフィルタを作用させた場合である。フィルタなしの場合は雑音にほとんど埋もれていた雨音信号が、フィルタを作用させると浮き上がってくるのがわかる。なお、参考までに、雷鳴がしていない時点(図-9とは別の時間帯)の雨音信号を図-10に示す。

#### 4. 雨音強度と雨粒体積の関係

雨音強度と雨粒体積の関係を調べるために、以下のような基礎実験を行った。実験方法を図-11に示す。音響雨量計の上方から注射針、スポイト等で作った水滴を落下させ、水滴が缶に当たる音をミニディスクレコーダで録音した。同時に落下軌道の両側からストロボを照射し(発光間隔1/300秒)、水滴が落下する様子をCCDカメラで撮影した。この画像を画像多重装置((株)菅原研究所製ストロボビジョンアナライザK-371)を用いて合成し、コンピュータに取り込んで、画像解析ソフトを用いて図-12に示すような画像データ(64階調)にした。この図において1dotは0.2mmであり、全体で縦58.4mm(292dot)、横50.2mm(251dot)の範囲が示されている。水滴の落下速度は縦方向の輝点間距離から算出できる。なお、ここでいう落下速度とは水滴が缶に当たる直前の速度である。また、各種のスポイトで造られる水滴の体積は、数十個の水滴を同じ形式でビーカー内に落下させ、その重量を計測することにより求めている。ところで、画像上には2列の輝点が映っている。水滴径に比べて装置の設置距離は十分大きいから、この水平輝点間距離は水滴の横径に比例する。この関係は後に述べる自然降雨実験で用いられる。

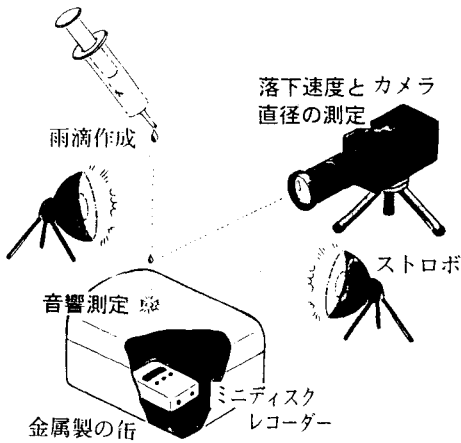


図-11：実験方法

ミニディスクレコーダで録音した音は、サンプリング周波数20kHzでAD変換しコンピュータに取り込む。その結果図-13上段に示すような信号波形が得られる。ハイパスフィルタを通し絶対値をとり、1/200秒ごとの和をとり、図-13下段のような音響強度時系列とした。この波形は水滴ごとに異なるが、高さを統一して重ね合わせると、図-14に示すように概ね一致する。すなわち、個々の水滴に対する音響強度の応答は線形システムのインパルス応答として取り扱えるものと考えられる。そこで、個々の水滴の1/200秒音響強度時系列のピーク値を雨音強度  $I$  と定義した。この雨音強度と水滴の体積、落下速度の回帰式を最小2乗法で求めたところ次式を得た。

$$I \propto V^{0.46} w^{1.88} \tag{2}$$

ここに、 $V$ は水滴の体積、 $w$ は落下速度である。回帰式の一致度を図-15に示す。

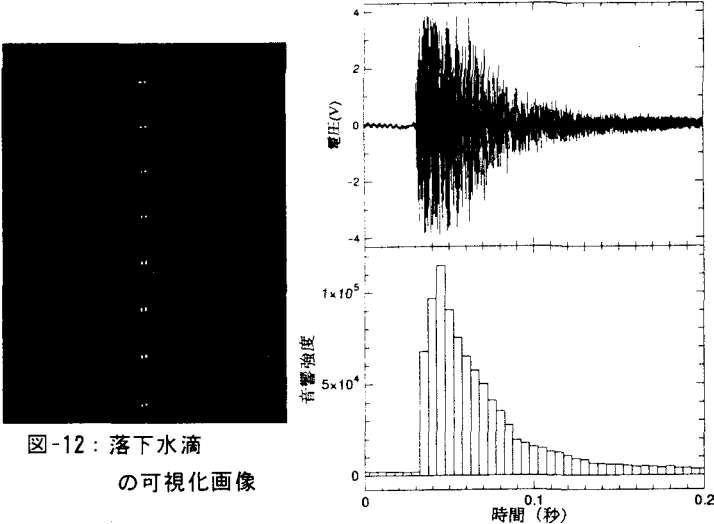


図-13：実験データの信号波形と1/200秒時系列

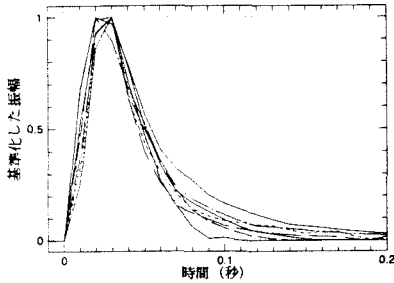


図-14：実験波形(1/200秒時系列)の重ね合わせ

さて、(2)式は雨滴体積と落下速度を変数に含んでいる。しかし雨滴の落下速度が終端速度に達しているとするば、落下速度 $w$ は雨滴体積の関数として表されるから、その関数形が定まれば(2)式と連立して落下速度を消去できる。

Best<sup>3)</sup>は、Daviesの実験結果をもとに、標準大気に対して以下の経験式を提案している。

$$w = 9.32 \{1 - \exp[-(D/1.77)^{1.147}]\} \quad (3)$$

ここに $D$ は、雨滴を球とした時の粒径である。また最近、山田らはレーザー雨滴計を用いた実験結果に基づき、新たな経験式<sup>2)</sup>を提案している。

$$w = 4.65 \log(D+1) \quad (4)$$

そこで、本研究では、先に述べた筆者らの実験方法を用いて両式の妥当性を調べた。紙面の関係で詳細は省略するが、実験は以下に行われた。まず9階建てビルの階段ホールを利用して、1階から5階の各階から落下させた水滴画像を前述の方法で収録し、落下速度を求めた。次に各階からの落下速度を比較して5階からの落下速度がほぼ終端速度に達していることを確認した。この実験結果は図-16に◇印で示している。

次に同装置を野外に設置し、実際の降雨の水滴画像を求めた。しかし降雨の水滴体積は未知である。そこで図-12に見られる水平輝点間距離( $d_1$ )と粒径( $D$ )に関する関係を建物5階からの実験結果から求めたところ、 $d_1/D \approx 0.93$ であった。そこで実際の降雨でも同様の関係が成立すると仮定し、観測された輝点間距離を0.93で割って雨滴径とした。この実験結果は図-16に○印で示している。

以上の実験結果はBestの式と概ね一致していることがわかる。そこで本研究では(3)式と(2)式を連立して雨滴音から雨滴体積を求めることとし、音響雨量計にプログラムした。

### 5. 試作したシステムと観測結果

図-17に音響雨量計のシステム図を示す。ブリキ製の缶の内部にマイクを設置し、缶に当たる雨音を収録する。風の影響で雨が缶の側面に当たるのを防ぐため、側面に防音壁を設けた。音響信号をサンプリング周波数20kHzでAD変換しパソコンに取り込む(図-18上段)。ハイパスフィルタを通した後、絶対値を1/200秒(データ数100個)ごとに積算し、音響強度時系列が得られる(図-18中段)。一つの山が一つの雨滴に対応する。そこで、信号のピーク値(雨音強度)(図-18下段)を抜き出し、この値から雨滴体積を算出する。雨滴体積は30秒間積算し、30秒雨量とした。ハードディスクには雨滴径の情報も保存するため、1/200秒音響強度時系列と30秒間雨量の両方を記録する。なお記録容量を節約するため、無降雨時には1/200秒時系列データを記録しないようにした。

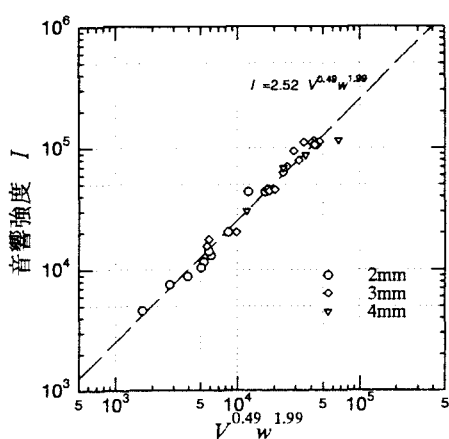


図-15: 音響強度と水滴体積及び落下速度の関係

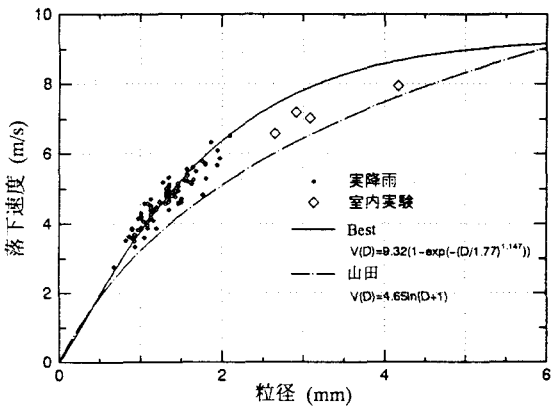


図-16: 雨滴粒径と落下速度の関係

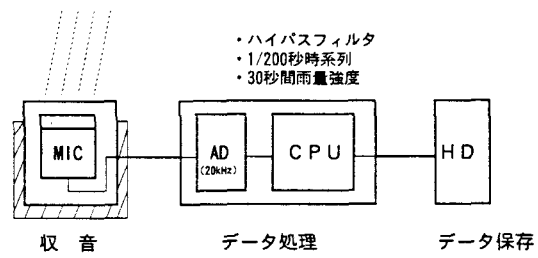


図-17: 音響雨量計のシステム

本装置を用いて観測した結果を図-19に示す。実線が音響雨量計から得られた降雨強度、棒グラフが転倒升式雨量計から得られた降雨強度である。なお、転倒升式雨量計は臨時に集雨面積を拡大するよう改造し、時間分解能を向上させている。両データの変動波形は良く一致しており、通常の転倒升式雨量計では捉えきれない細かな雨量変動を音響雨量計は記録していることがわかる。

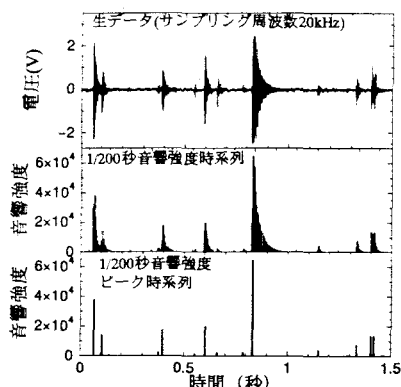


図-18：音響雨量計内部の信号処理

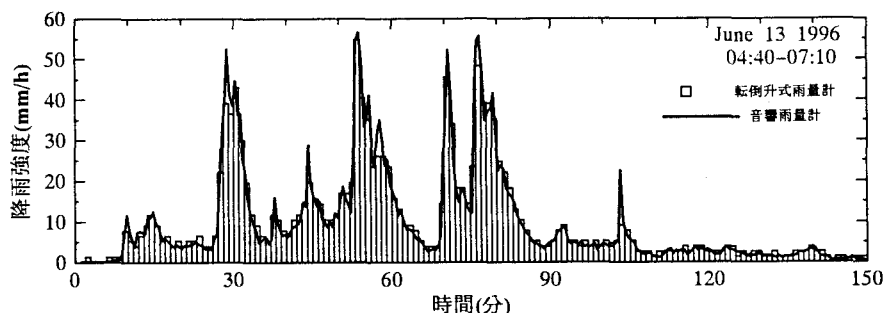


図-19：音響雨量計と転倒升式雨量計の観測結果

## 6. 終わりに

本研究では、雨音から降雨強度を求める装置(音響雨量計)の試作を行った。主な検討項目と結果は次の通りである。

- 1) 金属缶内に設置したマイクロフォンに到達する雑音は、雨音に比べてかなり低周波であり、簡易なデジタルハイパスフィルタで除去できることがわかった。
- 2) 雨音強度と雨滴体積及び落下速度の関係を室内実験で定式化した。また雨滴落下速度と雨滴体積の関係を実験的に調べたところ、Bestの式にほぼ一致した。この2つの実験結果から雨音強度と雨滴体積の関係を求めた。
- 3) マイクロフォンから送られる雨音をオンライン処理して降雨強度に換算しハードディスクに格納するシステムを試作した。この装置を用いて降雨観測を行ったところ、集雨面積を特別に拡大した転倒升式雨量計の計測結果と非常に一致をみた。

なお、今回試作した装置はパソコンとハードディスクを使用しているため、比較的大型で、AC電源を必要とする。今後はパソコンをDSPに替えて小型化をはかり、またDC電源で作動する野外観測用装置にしたいと考えている。

最後に、実験を手伝ってくれた繁昌洋君(東工大地球惑星科学科4年)に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 林尚志ほか：雨音解析による短時間雨量強度の推定について，水工学論文集，第40巻，pp1125-1128，1996.
- 2) 山田正ほか：新しいタイプのレーザー雨滴計の開発とこれを用いた降雨の雨滴粒径分布の観測，土木学会論文集，No. 539/II-35，pp15-30，1996-5.
- 3) A. C. Best: Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 76, pp302-311, 1950.