

水文量の計測技術—その原理と計測誤差を中心にして—

Hydrological Observation — Measuring Principles and Their Observation Error

吉 野 文 雄

Fumio YOSHINO

1. まえがき

本稿では水文現象の観測技術の発展とその現状をレビューする。自然界における水の循環を対象にする水文学では、現象の観測が重要な役割を担っている。水文業務において重要な役割を果たす流出モデルの研究には良質の水文データは不可欠である。戦後、洪水災害が多発し、河川改修計画を合理的に策定する必要が生じた。このため竹内俊雄は土木研究所による神流川流出試験地を開設し、河川流出量や流域の降雨量の観測を実施した。この神流川試験地におけるデータがその後の降雨流出計算法の研究に活用されることとなった。このときに培われた観測技術やその後の機器開発が、国土交通省の水文観測技術の体系として採用されたことは周知の事実である。

神流川試験地における研究成果は主に土木研究所の研究報告として纏められているため、一般になじみがないことを考慮して、本稿ではこれらの研究成果を中心に、その後、土木研究所で進められた研究成果を取り入れて紹介することにした。情報化時代を迎えて活用されるようになったレーダによる降雨量の観測の原理と観測精度もレビューした。

2. 降雨量の観測

2-1 測定の単位と雨量計

降雨量は降水が平面にたまった場合の深さ (mm) で表し、1mm まで表記する。雨量は表-1 に示すような方法で測られる。

表-1 雨量の計測原理と雨量計

計 測 対 象		計 測 原 理		雨 量 計
直接測定	容器にためる	容量	メスシリンダーで測る	普通(指示)雨量計
		水深	物差しで計る	米国の普通雨量計
間接測定	容器にためる	水深	容器内の水面の高さをフロートで知る	貯水型自記雨量計
			硫酸を入れた容器に垂鉛引き鉄棒を入れる	化学雨量計
		容量	転倒マス回数	転倒マス雨量計
		重量	天秤	秤量式自記雨量計
	水滴		水滴の数	降雨強度計
			水滴からの電磁波の散乱	レーダ雨量計

普通雨量計の受水口の内径は 20cm で、縁はナイフエッジにしてその真上の雨滴を内側と外側に切り分けるようにしてある。貯水ビンの容積は雨量にして約 80mm、バケツの容積は約 250mm である。雨量マスは内径 3.5cm のガラス製で、容積雨量にして 10mm はかれるように、0.1mm までの目盛りがついている。この断面積比は約 30 倍程度で、0.1mm まで測れるようにしている。米国では受水口と測定筒の断面積比は 1 : 10 となっている。

2-2 雨量計の口径と計測誤差

受水口は円形であるが、その口径の大きさはわが国では 20cm に統一している。竹内・江川(1961)はこの受水口の大きさが測定に与える影響を調査した。同一の場所に口径 40cm から受水口の面積を約半分にしなから、口径 5cm まで 7 種類の雨量計をおおの 3 個ずつ設置して 227 回の雨について観測した結果を図-1 に示す。この結果、口径の小さいほど雨量のばらつきが大きく、少なくとも口径 10cm 以上でないと安定した測定が出来ないことを明らかにした。

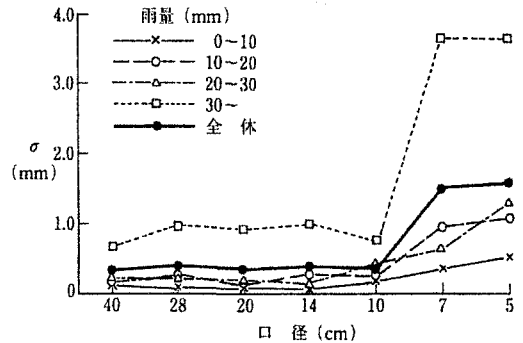


図-1 口径と誤差の標準偏差

2-3 雨量測定誤差

1) 雨量計の周りの風の影響 (ジェボンス効果)

風の影響を調べた結果は多数あるが、信頼度の高い Koschmieder の研究結果を図-2 に示す(川畑幸夫(1961)より引用)。Koschmieder は口径 16cm の雨量計を 2 台、1 台は地上 110cm に受水面をもち、他の 1 台は埋め込み式で円錐型に窪みをつけてその中にやはり地上 110cm に口金がかかるようにして 2 カ年間の観測を実施した。後者では雨量計と窪みの面の間にブラシをつけてはねこみを防いで地表面すれすれに設置されている。この図での風速は地上 1m のものである。風の影響はこのように大きいので、風除けをつけることが研究され、風除けによる雨量の補足率の向上が明らかにされてきた。

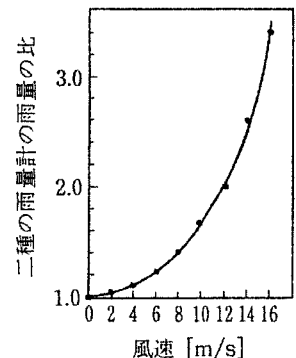


図-2 埋め込み式雨量計と普通雨量計との雨量比と風速の関係

2) 地物の影響

雨量計の周りに地物があると風の場が影響を受ける。直径 1~2mm の雨滴の落下速度は 4~6 m/s 程度であることから、20m/s 程度の風に対しても地物の高さから 4 倍程度以上離れていることが望ましい。

2-4 転倒マス雨量計の原理および計測誤差

受水口から入った雨量を 0.5mm または 1mm 単位で計測するもので、マスの転倒回数を数えて雨量を知る。転倒マスの転倒にはある程度の時間を要するので、この間に降った雨が計測できないという欠点がある。図-3 はその一例を示すもので、気象庁の検定規則では 80mm/hr 以下のときに ±3% 以内の誤差になるように定められている。

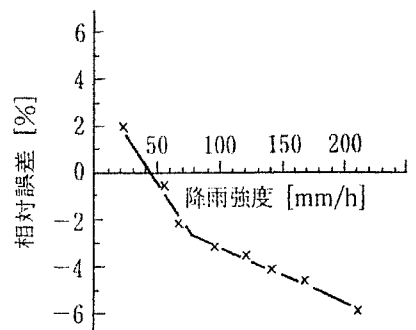


図-3 転倒枡雨量計の計測誤差

2-5 面積雨量の推定誤差

水文業務で雨量を観測するのは、ある一地点の雨量(地点雨量)を計測するというよりはある面積に降った雨量(面積雨量)を必要にする場合が多い。したがって地点観測雨量群からある面積の雨量を推定することが重要となる。面積雨量の推定手法には表-2 に示すように多数の方法が考案されている。よく用いられる方法は等雨量線法、ティーセン法である。

表－２ 面積雨量の推定法の比較

手 法	内 容	利 点	欠 点
代数平均法	観測値の総和を個数で割る	観測所のウェートを必要にしないので計算が簡単.	各観測所はその周囲の等しい面積を代表すると仮定している.
ティーセン法	各観測所がその隣接する区域をウェートとする.	観測所の分布を考慮している.	各観測所は流域の中の観測所の存在する部分を代表すると仮定している.
等雨量線法	等雨量線をマニュアルで描き、コンターの区域の面積を計測する.	作業者が降雨に影響する既知の要素を考慮に入れることができる.	主観的で作業が多量になる. 実時間処理が困難.
グリッド法	グリッドの代数平均を採る. 観測値をグリッド値に変換する方法にいくつかの手法がある. 観測値をグリッド値に変換するには影響関数が用いられる.	地形と観測所の位置を考慮に入れて、計算機を用いた等雨量線法である. 等雨量線は標準のルーチンで描くことができる.	モデルへの連続的な入力には実用的でない. 山岳地域の外挿に注意がある.
曲面当てはめ法	観測値をつなげた雨量分布を表現する曲面を作成する. この曲面作成には二次多項式, 三次多項式などのいくつかの方法がある.	観測所のウェートが多項式の定数のマトリックスから決められる. 高度や観測所の広さ, 地点雨量の観測誤差などを降雨の関数に含めることができる.	低次の多項式では曲面の当てはめが困難である. 高次の多項式では不安定である. 境界に観測所がないと外挿の問題が生じる.
相関解析法	等雨量線解析に基づく平均値に対する個々の観測所の値の回帰分析を行う. あるいは, 観測所間の相関を調べ相関式を作成しておく.	使用可能な全てのデータを最少の仮定で使用している. 地点雨量のウェートを決めるのに観測所間相関と多数の降雨事例を用いている.	当該流域において, かなりの数の事例を集める必要がある.

1) 間引き法による雨量計の密度と面積雨量

a. 気象庁による磯原地区での調査(経済安定本部(1952))

茨城県高萩沖 3km を中心とする半径 27km の区域(約 840km²)に 51ヶ所の雨量計を設置して 1950 年 9 月から 1 年間の観測を実施した. 一雨 30mm 以上の降雨例を等雨量線法による値を真値として, 観測所の間引き計算により, 誤差を計算した. 結果は表－3 に示すとおりである. この地域は最大標高 800m, 平均標高 300m くらいの比較的開けた地域であるが, 精度 10%にするには 1 雨量観測所の受け持ち面積は 70km²の結果である.

表－3 観測所数と雨量誤差

観測所数	3	6	9	12	15	18	21	24
同上密度 km ²	280	140	90	70	60	50	40	35
誤差(%)	25	18	13	10	8	6	5	3

b. 建設省土木研究所による調査(竹内・江川(1960))

神流川流出試験地において流域面積 374km²に雨量計を 31ヶ所設置し, 1952 年から 1957 年にかけて観測を実施した. 観測例から一雨 10mm 以上の降雨 102 例を採用して, 流域平均雨量の誤差の標準偏差を調べて表－4 の結果を得た.

表－4 観測所数と雨量誤差の関係

観測所数	4	8	16	31
同上密度 km ²	93	47	23	12
誤差(%)	19	10	5	3

c. 米国オハイオ州での実験結果 (Linsley(1951))

リンスレーは $16.1\text{km} \times 35.4\text{km} = 570\text{km}^2$ の地域に 5 行 11 列に 55 箇所の雨量計を配置して観測した。その結果をわが国のものと比較図示すると、図-4 となる。

2) 標本論的方法による面積雨量の推定精度

流域に分布する降雨を母集団とし、観測所雨量はこの母集団からの標本(サンプル)とみなす。観測所雨量から面積雨量を推定する問題は、標本平均による母平均を推定する問題となる。標本平均は標本の抽出毎に変わる確率変量である。その分布は母集団の特性と標本数で決る。

米国気象庁は Muskingum 流域で精密な雨量観測網に基づき、標本論的な手法で面積雨量の誤差公式を研究した。この研究では全観測所雨量から求めた面積雨量から、各観測所の観測雨量の変動係数(地点雨量の面積雨量に対する標準偏差を面積雨量で割ったもの)を求め、全ての降雨の特性が、この C_v 値に集約されると仮定した。

橋本(1974)はこの前提から、「面積的な変動係数が C_v である降雨の面積雨量を、 n 個の観測所雨量で推定するとき、危険率 31.7% で相対誤差は $C_v/\sqrt{n}$ 以下となる。」という公式が統計学から導かれることを示した。この前提は降雨の面的な分布が正規分布であると仮定していることにある。降雨が流域全体にあり、降雨量も大きな場合にはこの前提が成立するが、流域の一部に降雨が分布する場合ではこの前提が成立しないと考えられる。この問題に橋本(1974)は中心極限定理を当てはめ、雨域面積率が 36% までは成立することを示した。

図-5 は流域面積と変動係数の間係を示す一例である(橋本, 1974)。 C_v は流域面積が大きくなると大きくなる傾向を持つ。雨量が小さいときは雨量に依存する傾向があるが、雨量がある程度以上になると雨量とは無関係になる傾向を持つ。橋本によれば、二日雨量が 50 mm 以上の場合について C_v が一定値を示す傾向があることが指摘されている。

橋本は図-5 の関係を用いて雨量観測所数と流域面積に対する誤差の関係を図-6 に示すように整理した。これによれば、 1000 km^2 に 10 台の雨量計で流域平均雨量を推定すると約 13% 程度の推定誤差を含む可能性があることを示している。

同様に米国の気象庁(1974)が提出している関係を図-7 に示す。これは、観測所数と誤差の関係を対象流域面積をパラメータとして表示したものである。この結果もほぼ

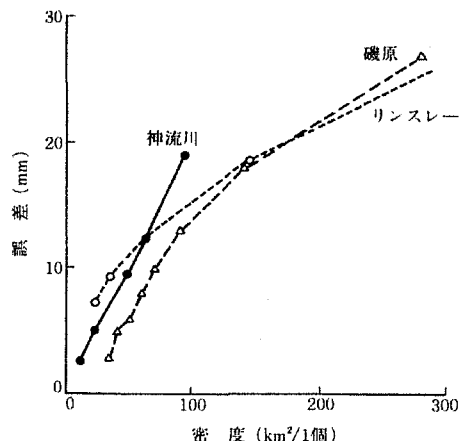


図-4 1 雨量観測所の受持面積と精度

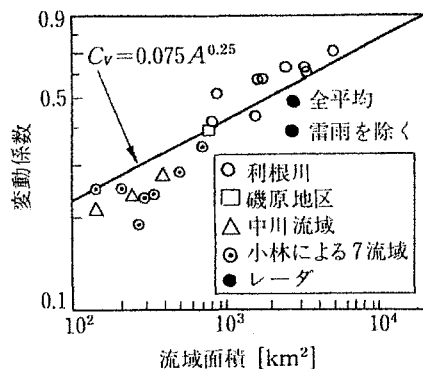


図-5 流域面積と変動係数の関係

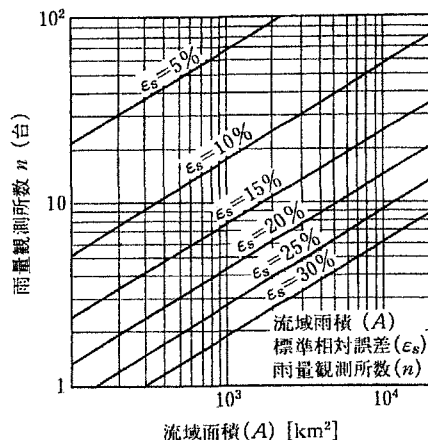


図-6 流域平均雨量の相対誤差と観測所数の関係

図-6の結果と同様な推定精度であることを示している。

3. レーダ雨量計

3-1 レーダによる降雨の定量観測史

レーダによる気象エコーの観測は米国で1943年に発表された論文によるものである。電磁波の散乱理論については既にレイリー(1871)やミー(1908)、ガン(1912)の散乱理論が発表されていた。この理論を基にライドは1941年から1946年にかけてcmの波長帯の電磁波による大気中の水滴や霧、雹等によるエコー強度と減衰の計算をおこなった。この研究がレーダによる降雨量の観測の基礎を築くこととなった。

1947年3月第1回レーダ気象学会議がMITでもたれた。マーシャルら(1947)はこの会議にZとRの関係について、有名な $Z=200R^{1.6}$ の関係式を示している。この研究は気象学界に強いインパクトを与えた。しかし、初期の研究者達は定量観測に懐疑的であった。というのは普遍的なZ-R関係の存在は疑わしいということによる。事実1960年代になるまでに数多くのZ-R関係が提案された。特に藤原(1960)等の論文でZ-R関係は降雨のタイプにより異なることが示されてきた。

3-2 レーダ雨量計とは？

レーダは物体の探査用に開発されたが、降雨強度を計測するには降雨エコーからの反射強度を取り扱う必要がある。物体の探査だけであればその位置と距離がわかればよいが、降雨量を計測するには、降雨からのエコーの位置のみならず、その反射強度を計測する必要がある。レーダの観測範囲は100-200kmにもおよび、このような遠距離からの微弱なエコーと、レーダ近くの強いエコーを同一の受信機で受信するため、受信機には60-80dBもの広いダイナミックレンジと受信強度のデジタル変換が必要である。1970年代になって、電子計算機の飛躍的な能力向上はA-D変換技術とともに、受信電力を積算したり、観測域を小区画に分解したりすることを可能にした。このような受信電力強度を降雨強度に変換するレーダシステムをデジタル気象レーダといい、平面的に数kmの小矩形領域のエコー強度を降雨強度にして表示するシステムを「レーダ雨量計」と呼んでいる。

通常の気象レーダは降雨を伴う気象現象の監視に用いられてきたが、近年ではもっぱら雨量を観測することを目的にするレーダ(レーダ雨量計)や、雷探知を第一目的とするレーダ(多機能気象レーダ、通称雷レーダと言われている)が開発されている。レーダ雨量計や雷レーダが通常の気象レーダと異なる点は主にレーダの運用方法とデータ処理にある。表-5に一般的な気象レーダ、レーダ雨量計、雷レーダ、の主要な仕様を対比して示す。

表からもわかるように、レーダ雨量計では全ての回転時における受信電力を平均する処理をしているが、気象レーダや雷レーダでは通常、1回転時のデータを用いる。この違いは、レーダ雨量計では降雨強度を精度良く算定することを主目的にしていること、気象レーダでは気象現象の全体像を把握するためにレーダを三次元的に運用しエコー頂高度を測定することや、一定高度面の状態を観測することが行われることから生じてくる。また、雷レーダでは対流性降雨の鉛直構造を精度良く観測することに主眼があるため、特定方向の鉛直断面を計測する運用が行われることに由来している。

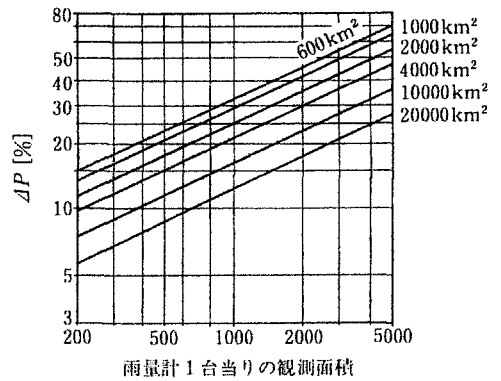


図-7 観測所密度と流域面積が日雨量の推定に与える影響

表－5 各種レーダの主要な使用の対比

項目	気象レーダ	レーダ雨量計	雷レーダ
周波数	5300MHz 帯	5300MHz 帯	5300MHz 帯
パルス幅	2.5 μ s	2 μ s	2 μ s
繰返し周波数	260 pps	260 pps	250/450 pps
送信尖頭出力	250 kW	250 kW	175/250 kW
アンテナ径	3 mf	4 mf	3 mf/4 mf
アンテナ回転数	4 rpm	5 rpm	6 rpm/10 rpm
信号処理			
A/D 変換	サンプリングレート： 1.67 μ s	サンプリングレート： 1.67 μ s/2.5 μ s	サンプリングレート： 1.67 μ s
メッシュ平均処理	量子化：10 bit 距離平均：1 km	量子化：10 bit 以上 距離平均：1.5 km/3 km	量子化：10 bit 以上 距離平均：1 km
スキャン平均	方位平均：16 sweep	方位平均：9/18 sweep	方位平均：8 sweep
MTI 処理	基本的に 1 スキャン ノンコヒーレント MTI	基本的に 25 スキャン ノンコヒーレント MTI	基本的に 1 スキャン ノンコヒーレント MTI

3-3 レーダで雨量は測れるか。降雨量とは何か？

計測にはその計測の原理が適切であるという前提が不可欠である。大気中の微小な水滴からの電磁波の散乱を原理とするレーダについてもこのような原理から降雨量の観測が可能かどうかを確かめる必要があった。

雨量は単位時間に降る降雨の量を表し mm の単位で表現される。気象用語で雨量とは 20cm の円筒容器に単位時間に降った量である。一方、降雨現象から説明すると、降雨強度は雨滴の粒径分布とその落下速度の積で表現できる。

雨滴の大きさは 0.1mm 以下のものから大きなものでは 5mm 程度のものである。雨滴の粒径分布は一般に粒径の小さなものが多く大きなものは少ないことが知られていて、指数関数で近似できる。また、雨滴の落下速度は大きなものほど大きく、小さなものは落下速度が小さい。この関係は通常、粒径のべき乗（大略は直径の平方根に比例する）の関数で表現される。

一方、レーダによる降雨量の観測原理は電磁波による雨滴からの散乱波の強度を調べて雨量に換算するものである。雨滴に電磁波が照射されると、後述するように、その雨滴の大きさの 6 乗に比例した散乱波が反射される。これをレイリー散乱と呼ぶ。すなわち、対象空間にある雨滴の総量に近いものを量っていることになる。これでは雨量強度にならない。雨滴の落下速度の計測が行われていないからである。しかし、対象空間の雨滴総量の計測値はこれが大きければ大きな粒子が多いことを推察させるし、大きな粒子が多ければ落下速度も大きいのではないかという推定も成り立つ。

もし、ある空間の雨滴の粒径分布とその総量とそれがわかることで降雨強度が計測されたとすれば、電磁波を直接使用しなくても降雨強度が計測できるかどうかは調べられることになる。雨滴の粒径分布とその個数を計測することである。当初はこのように、雨滴の粒径分布を計測して、その SD^6 （すなわち、レーダ反射因子 Z ）と R （降雨強度）の関係を調べることからスタートした。この両者に比例関係があるかどうかは課題であった。そこで、雨滴の粒径分布の計測が行われ、かなり良好な比例関係が確かめられて、レーダによる降雨量観測の可能性が確認されたのである。

降雨強度を雨滴の粒径分布とその落下速度の積で表現すると

$$R = 3.6 \times 10^{-3} \left(\frac{4}{3} \right) \pi \int_0^{D_{max}} \left(\frac{D}{2} \right)^3 N(D) \cdot V(D) \cdot dD \quad (1)$$

ここに、 R ：降雨強度（mm/h）、 D ：雨滴の等価直径（mm）、 D_{max} ：雨滴の最大粒径（mm）、 $N(D)$ ：粒径分布（ $1/m^3 \cdot mm$ ）、 $V(D)$ ：落下速度（m/s）、である。この関係をもとにすると、降雨強度 R は

粒径の関数であることが判断される。

雨滴の粒径分布を表すものとして有名な Marshall Palmer 分布（以後、M-P 分布という）がある。

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (2)$$

$$\Lambda = 4.1 \times R^{-0.21} \quad (\text{mm}^{-1}) \quad (3)$$

$$N_0 = 8 \times 10^3 \quad (\text{mm}^{-1} \text{m}^{-3}) \quad (4)$$

ここに、 $N(D)$ は単位体積中の直径 D (mm)の雨滴数 ($\text{mm}^{-1}/\text{m}^3$)、 R は降雨強度 (mm/hr)、である。図-8はこの分布を示す一例であって、 Λ が降雨強度 R の関数であることを示している。その後この関数において、 N_0 が定数ではなく降雨強度の関数であるとする研究が多数報告されてきた。

多くの降雨の観測例はある程度の大きさ以上の雨滴にたいしては M-P 分布がよく適合することを示している。M-P 分布は、粒径が小さいものほど個数が多くなり、直径 $D=0$ mm のとき $N(D)=N_0$ となる。しかし、実際に観測された粒径分布の多くは粒径の小さいほうで個数が減少する傾向がある。

Ulbrich (1983) は次のガンマ分布を提案した。

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D) \quad (5)$$

ここに、 μ は-3~8の値を持つパラメータである。

図-9は九州北部で観測されたディスドロメーターによる梅雨前線の時の観測結果である。右の図は降雨強度が大きいときの5時から8時にかけての粒径分布を抽出して拡大表示したものである。図からわかるように最大粒径も3mmを越えており、かつ0.5mm以下で個数が減少している。この分布は(5)式で表現することが適当であることを示すものと言える。

一方、雨滴の落下速度は粒径の平方根に大略比例する。図-10に雨滴の落下速度の計測結果を示す。落下速度は雨滴径が大きくなるにつれ大きくなるが、増加する割合は次第に小さくなり、最大

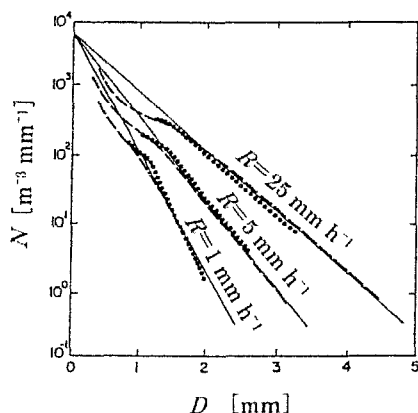


図-8 雨滴の粒径分布の例

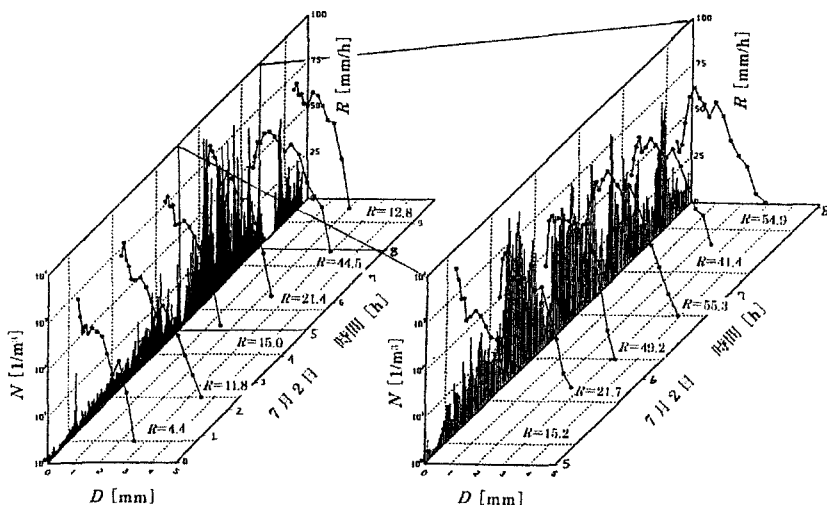


図-9 ディスドロメーターによる雨滴の粒径分布の観測例

の落下速度は、9～10m/secである。この図から水滴の直径が5mm以上になると落下速度が水滴の大きさには関係なくなることがわかる。これは、大きくなるに連れて水滴が扁平になり空気抵抗と平衡状態が生じて落下速度が決定されるからである。一例として、Atlas and Ulbrich (1977) の関係式を示すと、

$$v(D) = 386.6 D^{0.67} \quad (m/s) \quad (6)$$

ここに、 D は m 単位である。したがって、前述した雨滴の粒径の分布を調べれば、雨量強度が推定できることが判断され、このことからレーダによる降雨量の定量観測が期待されることを示している。

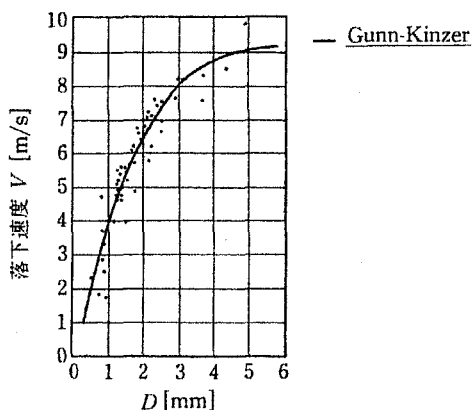


図-10 雨滴の落下速度の測定例

3-4 レーダ方程式

等方的に電波を発射しているアンテナを考える。電波は全ての方向に等しく広がり、距離 r では半径 r の球の単位面積当たりのパワーは、 $P_t/4\pi r^2$ となる。ここに P_t は送信中の電力である。実際のレーダでは、電力を狭いビームに集中させるために、指向性を持ったアンテナが使われる。レーダビームの軸に沿う単位面積当たりのパワーと全方向へのパワーの比はアンテナのゲイン G である。距離 r にある断面積 A_t の物体に電波があたると、 $P_t G A_t / (4\pi r^2)$ で与えられるパワー、 P_o が遮断される。目標物体が全く電力を吸収しないと、あらゆる方向に等方的に再び電力を放射するとすると、レーダアンテナで受信される電力 P_r は $P_t G A_t A_e / ((4\pi)^2 r^4)$ で与えられる。ここに A_e はアンテナの有効断面積である。アンテナ理論によるとアンテナの有効断面積とゲインの間には、 $G = 4\pi A_e / \lambda^2$ の関係が成り立つ。 λ は波長である。したがって、受信される電力は、 $P_r = P_t G^2 \lambda^2 A_t / ((4\pi)^3 r^4)$ となる。

ここまでは物体が断面積 A_t で等方的に散乱すると仮定してきた。実際には等方的に散乱する物体はない。ここで、「後方散乱断面積」という「等方的に散乱されると受信機に実際に受信されるのに等しいパワーを反射する面積」で定義される関数 σ を導入する。

散乱体が一つの場合は

$$P_r = P_t G^2 \lambda^2 \sigma / ((4\pi)^3 r^4) \quad (7)$$

となる。この式は一般式であって、目標が航空機であろうが雨滴であろうが成立する。気象学の問題は、探査したい気象要素の σ_i の形を決定することである。ここでは σ_i は単一の散乱体の後方散乱断面積である。実際には、レーダビームは雨滴群を照射するので、その数はレーダ装置のビーム幅とパルスの長さで決まる体積内の数となる。この場合、多数の雨滴からの反射電力を考える必要がある。ランダムに分布している散乱体からの後方散乱信号電力は、各信号の位相を考慮すると、各散乱体からの散乱信号の和で表される。お互いに相対的に運動している粒子群のために、この信号はパルス毎に変動することが知られている。受信電力を多数の独立な配列について平均すると

$$\overline{P_r} = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \sum_{i=1}^n \sigma \quad (8)$$

と表される。ここに、総和は任意の瞬間に受信機に散乱された全体積について実施される。

ここで、単位体積当たりの散乱の断面積を次式で定義する。

$$\eta = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \sigma \quad (9)$$

η は全目標体積中の粒子の後方散乱断面積の和を全目標体積で割ったもので、単位体積当りの反射

量を示す。単位は通常、 cm^2/m^3 ，あるいは $1/\text{cm}$ ，である。散乱粒子の空間分布を問題とするときには、この η を位置の関数とすればよい。さらに、アンテナの指向特性を考慮に入れるために、ゲインを位置の関数とすると、上式の和は次の積分に変換できる。

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2}{64\pi^3} \int_{V_0} \frac{G(r)^2 \eta(r)}{|r|^4} dr \quad (10)$$

ここに、 V_0 は積分される空間の目標体積である。散乱粒子の空間分布を一様とみなせば η は積分の外に出る。

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2}{64\pi^3} \int_{V_0} \frac{G(r)^2}{|r|^4} dr \times \eta \quad (11)$$

通常のパルスレーダでは、目標体積はアンテナのビーム幅とパルス幅で決まる。またパルス幅は msec 程度だから充分遠方の目標体積内の距離の差は無視できる。更にアンテナ利得は角度のみの関数だから体積積分は次のようになる。

$$P_r = \frac{P_t \lambda^2 \eta}{64\pi^3 r^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi G(\theta, \varphi)^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (12)$$

この式で r^4 の項が体積積分の結果 r^2 となる事に注意しよう。アンテナから輻射された電磁波のエネルギーは距離の 2 乗に反比例して減少する。残った積分はアンテナの指向特性のみで決まる量で、ガウスビームなどを仮定した値が使われたりする。

もし粒子がビーム体積 V_0 にわたって一様に分布しているとする、全後方散乱断面積は単位体積当たりの後方散乱に V_0 をかけたもので表される。 V_0 は近似的に、 $p(r/2)(rf/2)(h/2)$ と表される。ここに、 r, f は水平、垂直ビーム幅である。照射される体積を計算するには、 h ではなく $h/2$ の長さを用いることに注意しなければならない。したがって、

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \theta \varphi h}{512 \pi^2 r^2} \sum_{\omega} \sigma_i \quad (13)$$

が得られる。

(13)式の誘導には、半値幅の間のレーダビームにわたって、単位面積当たりの送信電力が同じ値を持っていることが仮定されている。実際には、送信電力はビーム軸上で最大で、ビーム幅の半分に相当する角度で最大値の半分に減少するので、この仮定は成立しない。

1962 年、Probert Jones は円形断面のパラボラアンテナで、主ローブ内の単位面積の電力がガウス関数で表されると仮定した。ビーム中心から角度 θ だけ離れた点でのアンテナゲインを G_θ とすると、 G_θ はビーム中心方向のゲイン G_0 に対して指数関数 f_θ を用いて近似的に、 $G_\theta = f_\theta G_0$ と表せる。ここで、 $f_\theta = \exp(-(\theta/\theta_h)^2 \ln 2)$ ，である。 θ_h はゲインが $G_0/2$ となる角で半値幅と呼ばれ、ビーム幅は通常 $2\theta_h = \theta_0$ で定義する。

受信電力をビーム幅と送信パルス幅の空間長 h の $1/2$ で囲まれる体積について積分すると、平均受信電力が求まる。全ビームが目標で遮断されるとき、ビームパターンを考慮すると、円形パラボラに対して $\theta = f$ であることから

$$\overline{P_r} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \theta_0^2 h}{512 (2 \ln 2) \pi^2 r^2} \sum_{\omega} \sigma_i \quad (14)$$

となる。

3-5 散乱断面積

気象レーダにとって重要な反射因子は Rayleigh 散乱によって得られる散乱断面積をもとに導か

れている。散乱の断面積は、単位面積当たりの入射エネルギーと散乱されるエネルギーの比で定義される。レーダには後方散乱が用いられ、粒子の直径と波長との間に $a(=pD/\lambda) \ll 1$ の関係が成立するとき、誘電体の球に発生する双極子モーメントの分極率を用いて次式で表現される。

$$\sigma_b = 4\pi \left\{ \frac{\mu_0 \omega}{4\pi} \right\}^2 |\alpha_s|^2 = 4\pi a^6 \varepsilon_0^2 \mu_0^2 \omega^4 \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{2\varepsilon_0 + \varepsilon_1} \right|^2$$

$$e_0 \mu_0 \omega^2 = k^2 = (2\pi/\lambda)^2 \quad \text{だから}$$

$$\sigma_b = \frac{64\pi^5 a^6}{\lambda^4} \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{2\varepsilon_0 + \varepsilon_1} \right|^2 = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^4} \left| \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{2\varepsilon_0 + \varepsilon_1} \right|^2 \quad (15)$$

但し、 D は球の直径である。

これが Rayleigh 散乱によって得られる後方散乱の断面積である。 $1/\lambda^4$ に比例しているのが逆 4 乗則を表している。また直径の 6 乗に比例しているが、これは散乱の断面積が幾何学的面積の 3 乗に比例することを意味している。Rayleigh 散乱は、空間的に一様な一次電界中の散乱体に発生する双極子の大きさをもとに散乱波を求める。このため散乱体の大きさが一次電界の波長程度になったときには、この一様な一次電界の仮定が成立せず、実際の散乱波との差が大きくなる。散乱体の大きさが一次電界の波長程度の場合まで散乱の断面積を求めるためには、Mie 散乱による計算を行う必要がある。

3-6 反射因子

目標空間内にはいろいろな直径の粒子が存在するから、単位体積当たりの散乱の断面積 σ_b は、(9) 式を単位空間当りの粒径分布関数 $N(D)$ を用いて次の積分に変換する。

$$\eta = \int_0^\infty \sigma_b(D) \cdot N(D) dD \quad (16)$$

散乱断面積 σ_b に (15) 式を代入すると次の式となる。

$$\eta = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right|^2 \int_0^\infty D^6 \cdot N(D) dD \quad (17)$$

ここに、 $n^2 = \varepsilon_1/\varepsilon_0$ で、複素屈折率を表す。この積分の部分は目標体積内の含水量と密接に関係する。降雨強度を求めるためにはこの η よりも積分の項の方が重要である。この積分値が反射因子と呼ばれる量である。

(14) 式において、散乱断面積が (15) 式による場合 (Rayleigh 散乱)、受信電力と反射因子の関係は次のようになる。

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{C |K|^2 Z}{r^2} \quad (18)$$

ここに、

$$C = \frac{\pi^3 P_t G^2 h \theta_0^2}{512 (2 \ln 2) \lambda^2} \quad (19)$$

$$|K|^2 = \left| \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right|^2 \quad (20)$$

C はレーダ定数である。散乱体が波長 λ に比べ小さな雨滴であれば、 P_t と r の測定値から Z が求められる。したがって、単位体積中の SD_p^6 がわかる。

3-7 レーダ受信信号の統計的性質とデータ処理

1) 降雨エコーの統計的性質

レーダによるエコーの観測値はパルス毎に非常な変動（毎秒 280 パルスのデータでは反射因子で 6-10 dB 程度の変動をもつ）を示すので、データ処理の研究が必要となる。このことは計測値の持つ意味を理解する上で非常に重要であり、新しい計測技術に付随する基本的な課題であった。

レーダによるパルス毎の信号を周波数変換、中間周波増幅、直線検波した後の出力信号が取る値の確率密度分布は、レイリー分布によって表される（図-11 参照）。一方、空間に分布する雨滴の位置は時間とともに変化するため、レーダパルス毎に見た雨滴の空間分布は、相互に相関がなく独立したものであると見なすことが出来る。従って、パルス毎に得られるレーダ受信信号もそれぞれ独立した不規則に変化する値となる。図に示すようなパルス毎の変動を周波数解析した結果、降雨強度信号と雑音信号を周波数 0.05Hz で切り分ければよいとの結果が得られ、時間軸方向に 256 個以上の平均で雑音成分を除去する方式を取った。

2) レーダデータの時・空間平均

以上の検討では強度値を算出するためのパルスヒット数を問題にしているが、空間を分割して降雨量を表示するにはどのような空間分割と時間分割が適切かという課題が発生してくる。

まず、空間の分解にはレーダパルスの長さの単位を決める必要があり、これは送信管の特性から $2\mu\text{s}$ とすること、受信したデータを 250m ごとにサンプリングすることに決定した。そして、分解の単位を 1.5km（6 レンジ）あるいは 3km（12 レンジ）にすることとした。このように距離平均された信号を方位方向に更に平均するのであるが、360 度を 256 等分したメッシュを構成する。

アンテナの回転数を 5rpm として、260pps のパルス繰り返し周波数では 12 パルスのヒット（このうち 9 個を用いる）がこの小領域で行われることになる。現在のシステムでは、各小領域では $6 \times 9 \times 5 \times 5 = 1350$ 個のデータ平均を行っている。前述したように 256 個以上の平均が行われていることになる。

3) 降雨現象の時間変動とデータ平均についての考察

レーダは時間的に毎分 5 回転しながら対象空間を走査してデータを取得する。このときに降雨現象の変動性からみて時間的な平均をどのようにして決定するかという課題がある。このために降雨現象の時間変動を調査し、かつレーダの特性を失わないものとして時間的な最小単位を 5 分とすることに決定した。降雨の時間的な変動は非常に激しく、数分で相関が見られなくなることもまれではないが、通常は 5 分程度の持続性があることが判断されたことによる。

一方、レーダの運用方法による強度算出上の誤差を論ずる必要も生じてくる。レーダは方位角方向に回転しているため、ある 1 地点の降雨強度は回転毎の離散値である。降雨現象は非常に周期の短い変動成分を含むため 5 分間雨量や 1 時間雨量を算出するとき、全 5 分間あるいは全 1 時間の積分が行えれば問題はないが、スキャン法によってはその内の数分の値で代用させることが必要になる。このため長時間固定して観測されたデータ系列から、データを間引くことによる影響を調べて、最終的な結論を受信電力値の相対誤差を 10% 以内にするという条件で決定した。5 分のうち 1 分の

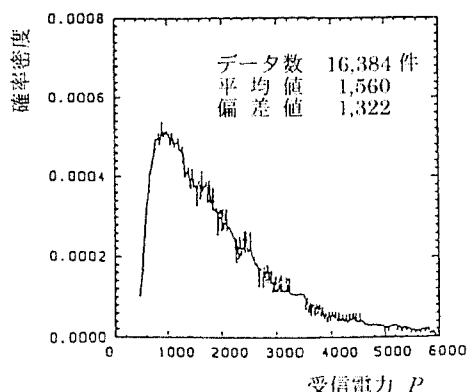


図-11 降雨エコーの受信電力の確率密度分布の例

観測値を用いて 60 分雨量を算出する（すなわち 60 分中の等間隔で 12 分間の観測値による）場合、約 10% 程度の相対誤差が受信電力に含まれる。そこで、5 分の内最低 1 分は強度場の観測を行うという条件で運用されている。

3-8 MTI による大地反射の除去

降雨エコーはレーダ目標体積中の多数の降雨粒子からの反射波の合成でランダムに変動する。一方、大地反射は周波数の低い成分が中心で一定振幅とみなせる。このような信号の相違をフィルターを用いて除去する方法が 1980 年代半ばに実用化された。この方法で大地反射を除去する場合、降雨強度が小さな様な降雨の場合に大地反射と降雨エコーの反射を区別することが困難で、過大な消去を行ってしまうという課題がある。

3-9 受信電力の降雨強度への変換と降雨量の推定誤差

Z-R 関係は一般に降雨現象の成因に依存することが藤原（1965）により指摘され、広い範囲（ $Z = BR^\beta$ ）の関係式で $B=80 \sim 1000$, $\beta=1 \sim 2$ ）に分布する関係であることが知られている。Z-R 関係を表す B , β を決める方法は大きく 2 種類に分類される。一つは雨滴の粒径分布とその落下速度を与えて同定する気象学的方法であり、他はレーダ反射因子 Z と地上観測雨量（以下ゲージ雨量という）の複数組のデータにより最適パラメータを同定する統計学的方法である。

レーダは広域的な反射因子を計測するが、対比すべき地上での雨量は一般に地点雨量である。したがって地点雨量とレーダによる解像空間内の反射因子とを直接比較して Z-R 関係を定めることは問題があるので、ある空間領域の面積雨量とその空間の反射因子を用いて、Z-R 関係を求める方法が研究された。その結果では地上雨量とレーダ雨量の相関は 0.8 前後、自乗平均誤差は 0.5~1.3 mm/hr、といった良好な関係が得られた。

Z-R 関係式における B , β の同定には、現在「層別平均値法」が用いられている。これは、レーダの反射因子をいくつかの強度範囲（通常は 1dB 間隔）に分割し、分割した Z の平均強度とそれに対応する地上雨量の平均値から求まる点にたいして直線を当てはめ、 B , β を決定するものである。この方法はデータの偏りの影響を受けにくく、そのため降雨の特性の把握や異常値の発見もしやすい特徴を持っている。

この方法では、Z-R 関係は、ビーム高度 3000m 以下で、観測範囲 120km 以内、山岳等によるビームの遮蔽がないこと、地上雨量との相関係数が 0.6 以上、MTI 方式では 30km 以遠、といった条件を満たす地上雨量計のある地点について、地上雨量とレーダの Z 値を対比する。このようなデータの選別方法についての結論は後述するレーダ雨量計の観測特性から導かれたものである。このようにしてもなお、降雨換算定数 B , β は降雨の成因等により降雨例毎に異なること、実用レーダの観測値が 5 分から 10 分雨量であるのに対し、地上雨量計の観測値は通常 1 時間積算値であること等の問題がある。

図-12 はこのようにして作成された Z-R 関係によるレーダ雨量の精度を示したものである。横軸はレーダ雨量である。誤差指標として二乗平均誤差 (M_{eo})、対数二乗平均誤差 (σ_0)、相対二乗平均誤差/雨量強度 (M_{eo}/R_r) を取り上げている。これらの各指標は以下の式で表されるものである。

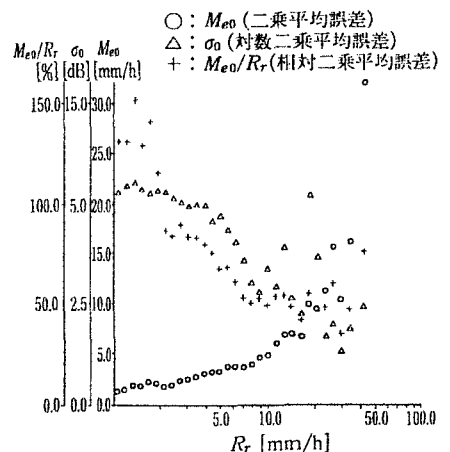


図-12 レーダ雨量の誤差評価

$$M_{eo} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_g - R_r)_i^2} \quad (21)$$

$$\sigma_o = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log R_g - \log R_r)_i^2} \quad (22)$$

ここに、 R_g は地上のゲージ雨量、 R_r は対応する上空のレーダ雨量である。この図から、雨量強度が大きくなるほどゲージ雨量との差は小さくなる傾向があること、レーダ雨量が 7mm/hr 以上でその誤差量は平均値に対して相対自乗平均誤差で 50% 程度とほぼ一定になること、が判断される。

3-10 レーダ雨量計の降雨観測特性

1) 観測精度と影響因子

レーダによる観測はビーム内の大気中に含まれている雨滴の総量を観測しているわけであるが、水文学上からは地表に降る雨量を求めることが重要である。ここでは地上におかれた雨量計によるゲージ雨量と比較したときのレーダ雨量の誤差の構造を検討してみる。

図-13 はレーダ雨量とゲージ雨量の比較のときの誤差の考え方をまとめたものである(吉野等, 1989)。このように関連する因子は多数あるが、因子を個々に評価することは不可能なため、一般にゲージ雨量とレーダ雨量の対比による評価が行われることが多い。

レーダ雨量とゲージ雨量の違いは更に、

- ・ 水平風による雨滴の移流（観測している空間の相違）
- ・ 大気的气体や降雨、レドームの水膜、等による減衰
- ・ 融解層での反射因子の増大
- ・ 不十分なビーム充填率
- ・ 落下中の雨滴の蒸発
- ・ ビームの山岳等による遮蔽
- ・ 降雨強度の鉛直勾配
- ・ 偏波効果
- ・ 垂直な大気運動

などに起因して生じる。

2) レーダビーム高度と観測精度

レーダ雨量には、レーダからの距離（通常は観測高度と関係する）や、山岳による遮蔽の影響、積分時間の影響、クラッターの影響、等の精度に影響する因子がある。図-14 は河川情報センターが調査したレーダからの距離（観測高度）に対する降雨量の依存性を示す一例である（山口等, 1993）。

レーダによる降雨観測の対象は降水粒子群である。レーダビームが降水粒子群で充填された状態で観測されることがレーダ方程式の仮定になっている。通常のレーダ雨量計では C バンドの波長帯でビーム幅 1.2 度が用いられる。また地形反射を避けるため 0.5~1.5 度程度上空を向けたビームでスキャンすることが多い。このため、120km の遠方ではビームの広がり約 2500m 程度で、かつビームの中心高度も 5~6km の上空を見ることになる。このため、レーダビームが雨雲より上空を捉えているような場合には、ビーム充填率の不足による精度の低下が考えられる。また反射因子は鉛直方向に一様ではなく、気温の影響もあって垂直構造を持つ。たとえば、気温 0℃ の高度付近では反射因子の大きな部分があること（ブライトバンドと呼ばれ、氷晶の融解による散乱断面積の増大

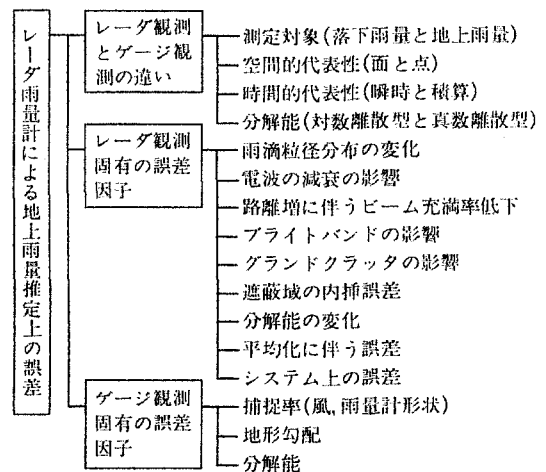


図-13 レーダ雨量とゲージ雨量を比較する場合の誤差の構造の誤差評価

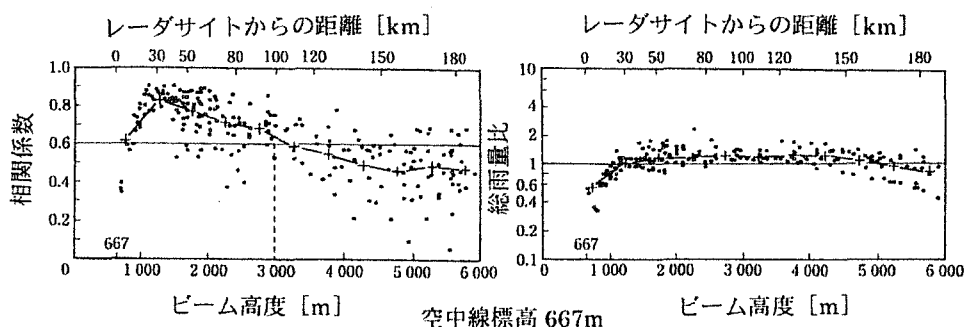


図-14 レーダサイトからの距離による観測精度

によるものである) が知られている。

これまでのレーダ雨量計による観測実績から、「ビーム中心高度が標高3000m以下であれば地上雨量とレーダ雨量の間に比較的良好な相関関係がある」ことが確認されている(山口等, 1993)。山口等(1993)は気象庁レーダによる九州地方の降水エコー項の月変化を調べ、降水エコーが存在する高度は最低で3000m程度で、夏期においては10000m以上になっていることを示した。この傾向は地域で若干異なるが、ビーム中心高度を3000m以下にすることが妥当であることを示す一例である。

3) ビームの遮蔽と観測精度

更に山岳等によるビームの遮蔽がその背後の領域の観測に影響を与える。ビームの体積の減少は見掛け上ビーム充満率の不足を示し結果的に雨量を少なく見積もることになる。この現象に対して遮蔽補正を施して観測精度を上げることが採られる(山口等, 1993)。

図-15は宝達山レーダの遮蔽率と観測精度の関係をゲージ雨量とレーダ雨量の総雨量比の関係で示したものである。これによれば遮蔽補正をしない場合の比は電力遮蔽率に比例して低下していること、遮蔽補正を行うと顕著な改善が期待されること、が判断される。

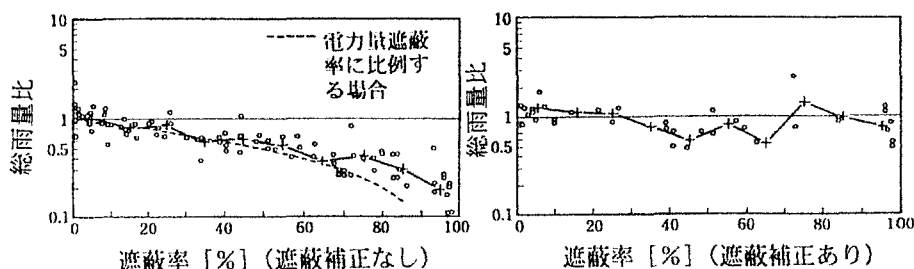


図-15 遮蔽率と総雨量比の関係

4) 風による影響

レーダ雨量は上空のある空間の反射因子から推定した雨量値をその直下の約 3×3 kmの小領域(これをメッシュという)における値として表現される。このとき雨滴が落下中に横風の影響を受け、直下の雨量と対応しなくなることが予想される。そこである決められた換算定数で求められるレーダ雨量の時間変化がその対応する地上雨量の時間変化とどのような相関を示すかによって、落下中の横風の影響を推定することが試みられた。その結果、一連の継続する降雨中においても風向と風速は気象擾乱の動きで変化していることが多く、風による移流の効果があることが判断されるが、その定量的な評価は今後の課題である。

4. 水位の観測

4-1 水位の計測単位と水位計

水面の高さを基準面から測ったものを水位という。河川の水位は流量の変化や河床の変動、潮汐の影響に伴って変化する。水位は雨量や流量と性格が異なる。雨量や流量には一般性があり、他流域との比較は意味があるが、水位は観測地点に特有の値である。測定単位はmとし、小数点以下2位（cm）まで表記する。表-6に水位の計測法とその原理および水位計の種類を示す。

表-6 水位の計測方法と水位計

計測対象		計測原理	水位計
直接測定	基準点から水面までの高さ	ゲージを目視で読み取る	量水標(水位標)
		ゲージの移動	ポイントゲージ
		フロートの昇降	フロート水位計
		フロート位置をスイッチのON, OFFで知る	リードスイッチ水位計
		超音波の伝播時間	超音波水位計
間接測定	受感部の水圧	気泡の放出時のガス圧	気泡式水位計
		ベローズの弾性ひずみ	水圧式水位計
		光ファイバーのひずみ	光ファイバー水位計
		水晶振動子の共振周波数の変化	水晶式水圧水位計
		半導体歪ゲージ	半導体式水圧水位計

4-2 フロート式水位計

フロートを水面に浮かべ、フロートとおもり（カウンタウェイト）とをワイヤで結び、そのワイヤをプーリに掛ける。水面の上下はフロートの上下となり、プーリの回転となる。この回転を水平軸の動きあるいは角度に変え、記録して水位を知る。この方式でもっとも広く用いられている水位計は1日巻きの水研61型自記水位計および3ヶ月巻の水研62型自記水位計である。

この方式では、水位が上昇から下降する際のフロート・ラグ、平衡錘やワイヤ部の水没によるフロート吃水深の変化、などが記録上の誤差となるが、1cm程度以下と考えられる。

4-3 リードスイッチ式水位計

観測地点の水中に設置した測定柱の気密室内には、リードスイッチを1cm間隔に配置した測定基板が収納され、一体として製作されている隣り合った測管部には永久磁石を内蔵したフロートが入っている。これが水位変化に追従して上下すると、水位に対応したリードスイッチが永久磁石の磁力により導通状態（ON）となる。そのリードスイッチのONの位置を検知して水位を測定する。

高流速（5m/s以上）の場所に設置・測定する場合はH形鋼の下流側に取付ける。支柱によるせき上げや水位低下の影響が見られることがある。測定柱の下部に円板（整流板）を取り付けると高流速によるせき上げや水位低下の影響を低減できる。

4-4 水圧式水位計

古いものでは受圧部内に充填した液体の移動をベローズ（蛇腹型の弾性素子で銅ニッケル合金等で作られている）の伸縮で受けてその変位を歯車などで拡大して、機械的にペンを動かして自記紙に記録していた。新しい形式では、水圧によるベローズの変位を差動変圧器（変位によりコイル内の磁性体のコアを動かしてコイルに誘起した起電力を検出するもの）により電圧信号に変換する差動トランス型と呼ばれるものや、水晶振動子に水圧（ベローズを介して）を印加すると共振周波数が変化することを利用した水晶（振動）式と呼ばれるものがある。これらの形式のものは水圧と同時に大気圧を別のベローズで機械的または電氣的に計測して差し引くので水圧変化のみの計測が可能である。このほかの型式として、ダイヤフラム（圧力や力を変位に変換する金属または非金属

の弾性薄板製の隔膜)に半導体ひずみゲージ(半導体結晶の固有抵抗は応力に比例して変化する)を形成したものにシリコンオイルを通じて圧力を伝え、その変位量(ひずみ)を利用して電気信号に変換する半導体式と呼ばれるものがある。ダイヤモンドの材質には耐腐食性を考慮して、非金属ではシリコン、セラミック、金属ではチタン、ニッケル合金などが用いられている。

4-5 超音波式水位計

超音波送受波器を水面の鉛直上方に取り付け、超音波が水面に当って戻ってくるまでの時間を測定することにより、水面と超音波送受波器との距離を計測するもので、水面とはまったく接触せずに測定できる特徴を持っている。送受波器から発射される超音波の速度が温度による影響を受けるので、その補正を行うために温度を計測するようになっている。

4-6 水位の計測誤差

水文業務における水位の測定単位はmとし、小数点以下2位(cm)まで表記することになっている。水位の計測誤差を表現することは容易でない。水面には常に波がある。高水時には一般に水面が波立つので、この変動をできるだけ抑えるために観測井を設けて、波を減衰させている。しかし完全には消去できないことから、ある時間の平均を読み取り、観測値とすることが多い。計測誤差は1cm以下にする事を目標にしている。

5. 流量観測

河川の流量観測は通常、流速面積法を用いて行われている。これは流水の断面積とその平均流速を計測して行うものである。このときに用いられている測器と方式を表-7に示す。

このような方法以外に堰やフリュームなどの水理構造物で支配断面を形成して流量を測る方法もある。

表-7 流量観測の方法と使用測器

水 位	方 法	観 測 施 設	使 用 測 器	
			流速計測	断面積測定
低い	徒渉法	川幅に張る目盛り付ワイヤ	流速計	測深棒
中程度	ボート法	ボート、川幅に張る目盛り付ワイヤ、 流速計用ブーム	流速計	重し、ウィンチ
高い	浮子法	橋、見通し杭	浮子	測量断面
		浮子投下機、見通し杭	浮子	測量断面
	ケーブルカー法	ケーブルカー、ウィンチ	流速計	重し

5-1 流速の計測原理

流量観測に使用されている主な計測器をその原理を表-8に示す。

5-2 流量観測値の精度

1) 精度に影響する要素

精度とは真値との大きさを比べて、その差で議論される。河川流量には多くの測定要素が関係するため、全体に対する真値を求めることは出来ない。ここでは流量の測定精度に影響すると考えられるいくつかの要素を取り出して議論する。

通常の流量観測の測定値に含まれる誤差の原因を分類すると、

- ・ 測器の測定誤差
- ・ 水深測線間隔
- ・ 流速測線間隔
- ・ 水深方向の流速測点間隔
- ・ 計算方法

表－8 流速計の種類と計測原理

流速計の計測位置	計 測 対 象	原 理	流 速 計
計測断面に流速計を入れて測る	流れとともに動く		浮子
	流れに抵抗する	回転体の回転数	横軸：オト流速計 縦軸：ブライス流速計
	起電力 水中の微粒子の移動 水圧	ファラデーの法則 ドップラー効果 動圧と静圧の差	可搬型電磁流速計 可搬型超音波流速計 水圧式水深流速計
	薬品の流下 薬品の濃度希釈 水中の錘からのピンポンボールの軌跡	流下時間の計測 拡散現象 浮き上がり時間	ピンポンボール流速計
水面から計測する	水中の微粒子の移動	ドップラー効果	流速プロファイラー(ADCP)
計測断面の外に置く	起電力	ファラデーの法則	開水路電磁流量計
	水面の微小波	ドップラー効果	電波流速計
	水中での音波の伝播	伝播時間を計測	超音波流速計
	水面上の斑紋や物体の移動	画像処理	PIV 流速計 オブティカルフロー流速計

・ 流速等の時間変動

に分けて考えることができる。流量精度を理論的に求めることは不可能であることから、現地実験で上記の諸要素のいくつかを検討した結果を、以下に記載する。

誤差の計算は最も確からしい値として、流速測点、水深測線、流速測線等の間隔をそれぞれできるだけ狭くして測定した値を用いている。一般の場合にはこれより広い間隔で観測が行われているので、このときの計算流量と上記の最も確からしい値との差を誤差とした。

2) 流速測線上の流速分布とその平均流速

流れに鉛直な測線上の流速分布を精密に計測せずにその測線上の2点あるいは1点で測定した値を用いて、測線上の流速を代表させる。代表させる測点は、2点法では水面から水深の2割、8割の点、1点法では6割の点である。この水深の位置は、水深方向の流速分布を水面よりある程度下のところで最大流速になる2次放物線で近似したときに得られる。

竹内・江川等(1959)は、現地の10流量観測所で精密測定をした流速測線276本のデータを用いて、2点法による平均流速、1点法流速を計算し、精密法との差の標準偏差を計算した。その結果によると、2点法で3.60%、1点法で5.77%となった。個々の流速測線についてみる限りでは、2点法が安全であることがわかる。

2点法、1点法により求めた流速を用いて計算した流量が、精密観測による平均流速を用いて計算した全流量とどのくらいの差を示すかについて、流速測線間隔を変えて比較した結果を、図-16に示す。流速測線間隔、水深測線間隔をともに10%にとると、誤差は2点法では1%、1点法では2%程度におさまることを示している。このような簡易な方法でも全流量には大した影響を及ぼさないことが判断される。

3) 流量計算法の精度

流れに直角な断面の流量をいくつかの測線とその間の平均流速で区分された区分流量の和で表

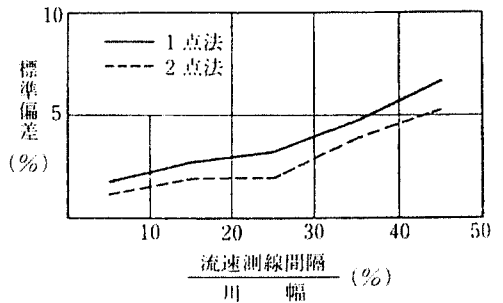


図-16 2点法、1点法の誤差の標準偏差

すことから、区分流量の求め方に3種類ほどの異なる考え方ができる。

A方式：流速測線は両隣の測線に対してそれぞれの区分幅の半分まで支配力があるとする。また、区分断面の水深は2測線間で直線変化をすると仮定する。

B方式：隣り合う流速測線間ではこれら2つの流速の平均流速がこの区分断面全体を支配するとする。また、区分断面の水深は2測線間で直線変化をすると仮定する。

C方式：流速測線はA方式と同じく両隣の測線に対してそれぞれ区分幅の半分までの支配力があるとする。ただし、この区分断面の水深はそれぞれ半分幅の間で両端（流速測線）での水深と同じ値をとるとする。

竹内・江川等(1959)は、この3種類の方式と全断面での流量の精度の関係を調べ、図-17の結果を得ている。この図から、いずれの方法をとっても測線が10~20%以内であれば誤差が10%程度になっていることがわかる。わが国では平均値の偏りも少なく誤差も比較的少ないA方式を採用している。

4) 流速測線間隔・水深測線間隔の精度への影響

竹内・江川等(1959)は、流速と水深の測線間隔が流量観測精度に与える影響を調べ、図-18と図-19の結果を示している。これらの図では流速測線間隔の河幅に対する比率と、水深測線間隔の河幅に対する比率をそれぞれ変えた場合の計算流量値の標準偏差の%が示されている。この場合、間隔を最も狭くして測った流量値を真値としている。図の結果によると河床の凹凸の程度がこの関係に大きな影響を与えていることが判断される。比較的フラットな河床の場合には図-18に示すように、水深測線間隔を流速測線間隔より狭めても効果のないことが判断される。一方、河床の凹凸が大きな場合には、図-19から判断されるように、流速測線間隔が水面幅の20%以上では水深測線間隔の影響が明らかに認められる。20%以内の場合には水深測線の間隔のみを小さくしても流量誤差への影響は小さいことがわかる。

5-3 水位流量曲線

低水流量の常時観測は、超音波流速計を用いた観測所や堰・落差工などの水理構造物で実施されているが、通常の水位流量観測所では河川流量

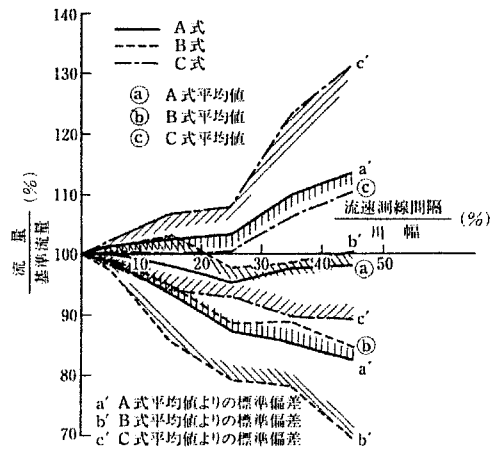


図-17 A, B, C方式の比較

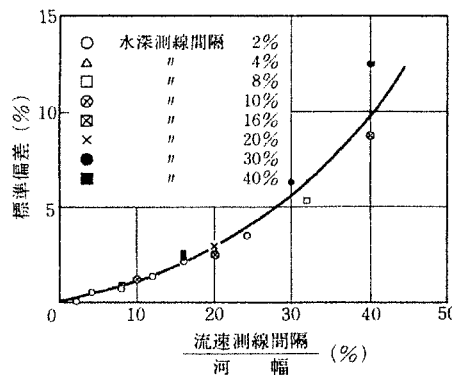


図-18 流速測線間隔、水深測線間隔と精度（河床断面での凹凸の小さい場合）

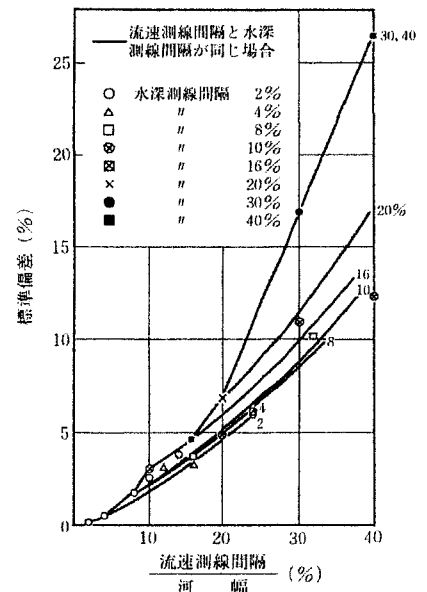


図-19 流速測線間隔、水深測線間隔と精度（河床断面での凹凸の大きい場合）

の常時観測は実施されていない。理由は、流量観測が、もっぱら流速面積法によっているため、流量観測に手間がかかることによる。したがって任意時刻の流量値は、水位から流量に変換する水位流量曲線によって求められている。この場合、水位と流量の関係を2次曲線であてはめる。わが国のような水位変化が激しい河川では、低水時の観測値と高水時の観測値を一本の曲線で近似できないことが多く、この関係を適切にあらわすことが、流量誤差を少なくするのに肝要である。

1) 年間の水位流量曲線の分離

水位と流量の相関を見るときにのぼらつきの原因は主に洪水の発生による河床変動である。竹内(1959)は、流量観測を毎日朝夕の2回行ったデータに基づき、水位流量曲線の分離の影響を調べている。表-9は、718回の観測値を用いて、年間13回発生した洪水に着目して水位流量曲線を13本作成した場合、通常の10日に1回の観測での水位流量曲線を使用した場合、年間1本の曲線式で計算する場合、の3ケースについて、各観測値が曲線式に対して流量誤差 $\pm 10\%$ 以内に入る割合を示したものである。

この表から年間の流量観測値を1本の水位流量曲線で代表しようとする、これらの観測点が $\pm 10\%$ の幅に入る割合は69%と小さいこと、出水ごとに分割し、それぞれの区間を13本の曲線で表すと $\pm 10\%$ の幅に入る割合は93~100%、平均95%に達することがわかる。このことから河床変動の激しい河川では流量観測の回数を増やし、水位流量曲線をできるだけ増やすことが望ましい。

表-9 分離の数と精度

観測回数	10%の帯の中に入る割合															
月	1	5	5	6	7	7	7	8	9	9	10	10	11	12		
日	1	8	24	9	4	11	19	28	17	26	1	29	30	31		
718	96	93	94	96	100	100	98	98	100	91	89	98	97		95	
39	76					90		80		90						83
36															69	

2) 洪水中の河床変動

図-20は神流川における洪水中の河床洗掘を示す一例である。水位上昇とともに河床洗掘は進み、ピーク水位で最大に達し、水位の低下によって埋め戻され、ほぼある一定の形にまで回復している。洪水流量計算は洪水前後の横断面を用いて行われるが、洪水中の断面測量の実施が必要である。

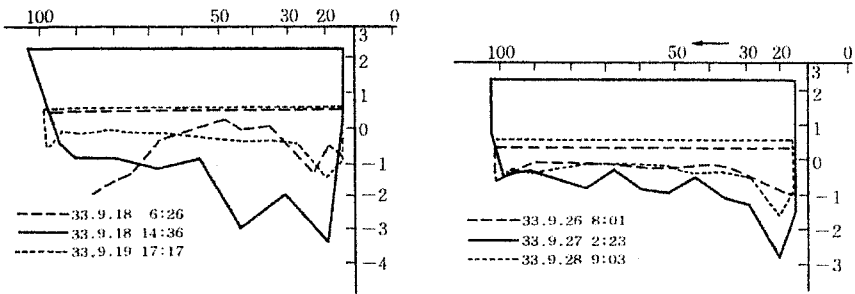


図-20 大洪水時中の河床洗掘（横断面）

3) 洪水の水面勾配

神流川流出試験地で200m離れた2点間の水面勾配を観測した結果を図-21に示す。この結果によると、洪水流ではピーク水位の表れる以前に水面勾配の最大が現れ、ピーク水位に達すると勾配は急に小さくなり、観測所固有の勾配に回復するように考えられる。

洪水の水位流量曲線は水位最大のところでループ状をなすことが多い。水位上昇期には水面勾配が今までより大きくなるので、流速も大きくなり、標準水位流量曲線で示される流量値より大きくなるからである。一般に最大流量の推定に観測地点での固有勾配を用いているが、観測結果からみて妥当な方法といえる。

5-4 新しい流量観測機器とその原理

最近、電子技術の急速な進歩に伴う測器の開発が進められ、流速の観測にもいろいろな方法が提案されている。

- 水面に非接触で水面流速を測るもの：ドップラー効果を利用した電波流速計，超音波流速計，
- 水面の斑紋や物体の移動を画像解析で追跡して流速にするもの：PIV（Particle Image Velocimetry）流速計，オプティカルフロー流速計
- 水中の動水圧と静水圧の差から流速を計測するもの：水圧式水深流速計
- 水面から鉛直の測線上の流速をドップラー効果で計測するもの：流速プロファイラー(ADCP)

これらの方法はその特性を検証中であるが、有望な方法のものもあり、将来の開発研究が望まれる。

6. あとがき

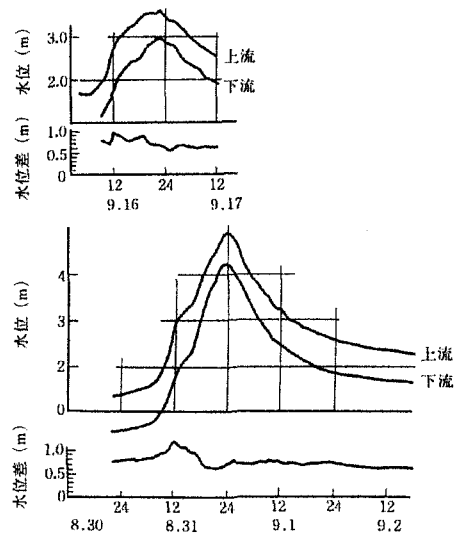
わが国の水文観測技術は国土交通省における水文業務とともに発展してきた。現在見る水文観測技術の体系は、戦後の約 10 年間、多大の労力を投下して実施された神流川流出試験地での観測研究がその基礎となっている。ここにその当時の観測研究の一端を取り上げ紹介した理由は、水文業務におけるこれらの研究成果が、多くの水文学研究者にあまり知られていないことを考えてのことである。水循環を対象にする水文学の研究では、自然界を観察して自然現象の変動性やそこに内在する原理を見極めるために、観測が重要である。

一方、最近の電子技術の進歩は計測分野を高度化し、専門性を高めてきたために、水文学の研究者が、計測データの品質を理解できなくなりつつある。このような状況の例として、レーダによる降雨観測の実際を取り上げて解説した。レーダによる降雨量の観測は対象空間にある雨滴の総量を計測しているもので、必ずしも降雨強度と対応する量を計測しているものではない。降雨強度は粒径分布と落下速度の積を積分して得られるので、レーダで雨滴の粒径分布を精度良く計測する方法が研究され始めてきた。この技術についての解説は紙面の都合によって省略した。また、水文量の計測には自記記録器が採用されてきたが、古いものはぜんまい時計であったため、時刻が正確でなかった。近年では水晶振動子による時計が採用され、この問題は解決した。このような機器開発に伴う技術発展についての詳細には触れていない。

参考文献

全般的な参考文献として、

- 竹内俊雄著「河川応用水文学序説」（河川情報センター発行，1996），
江川太郎著「河川工学入門」（河川情報センター発行，1997），
吉野文雄著「レーダ水文学」（森北出版，2002）



図－21 洪水時の水面勾配（水位差）と水位の時間的变化

がある。

- ・ 竹内俊雄，江川太郎：雨量計受水部の口径の大きさの雨量に及ぼす影響について，土木研究所報告 109 号，1961.
- ・ 川畑幸夫：水文気象学，地人書館，1961.
- ・ 経済安定本部総裁官房国土調査室：磯原地区雨量調査(国土調査)，1952.
- ・ 竹内俊雄，江川太郎：山地流域における一雨雨量の降雨分布について，建設省土木研究所報告，106 号，1960.
- ・ Linsley, R.K, and Kohler: Variation in storm rain over small areas, Trans. AGU, Vol.32, No.2, 1951.
- ・ 橋本健，佐藤一郎：面積雨量の精度と雨量観測所数，土木技術資料 16-12，1974.
- ・ U.S. Weather Bureau: The Reliability of Areal Rainfall Determination, Hydrometeorological Report, No.5, 1974.
- ・ Atlas, D : Radar in Meteorology, American Meteorological Society, Boston, 1990.
- ・ Ryde, J.W.: The attenuation and radar echoes produced at centimetre wavelengths by various meteorological phenomena. Meteorological Factors in Radio Wave Propagation, Physical Society, London, 169-188, 1946.
- ・ Ryde, J.W.: Attenuation of centimeter radio waves and the echo intensities resulting from atmospheric phenomena, IEEE, J., Pt.3A, 93, pp.101- 103., 1946.
- ・ Marshall, J.S. and W. McK. Palmer : The distribution of raindrops with size, J. Meteor., 5, 165－166, 1948.
- ・ Probert-Jones, J.R.: The radar equation in meteorology. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 88, 485-495, 1962.
- ・ 吉野文雄，水野雅光，阿部英史，玉本昌司：降雨減衰項導入に関する研究，土木研究所資料第 2756 号，1989.
- ・ 山口高志・北川明・小野寺直・高水克也・幸弘美：レーダ雨量計の精度向上について，河川情報研究 No. 1，河川情報センター，1993.
- ・ 土木研究所：DND レーダによる降水現象の観測に関する共同研究報告書（第 3 報），土木研究所共同研究報告書第 39 号，1990.
- ・ 竹内俊雄：水文観測（4），土木技術資料 1－7，1959.