

都市中小河川流域規模を対象とした 短時間雨量の特性

谷岡 康¹・福岡捷二²・伊藤繁之³・小山幸也⁴・傅 雲飛¹

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ (株) 水工部 (〒163-07 新宿区西新宿 2-7-1)

²正会員 Ph.D 工博 広島大学教授 工学部第四類 建設系 (〒739 東広島市鏡山 1-4-1)

³正会員 (株) クリアス 設計課 (〒612 京都市伏見区竹田中島町 122-3)

⁴正会員 東京都 建設局 河川部 計画課長

都市域中小河川流域の、適正な治水計画や河川管理、水防活動を行うためには、狭域・短時間雨量の特性、つまり雨量の移動や消長等の変動傾向や時空間的な分布の特性を把握する必要がある。本研究では、東京都において得られた密な地上雨量観測所網のデータをもとに、都市中小河川で浸水被害を引き起こしている、局地的な集中度の高い雷雨と、比較的広域的な、継続時間の長い台風による豪雨について23km四方内の5分~30分程度の短時間雨量を対象に雨域の移動や消長、面積的な広がり等の特性を検討した。さらに、これらの特性から短時間雨量の予測の可能性と雨量観測方法について考察を加えた。

Key Words: spatial-temporal characteristics of rainfall, short-time rainfall in small catchment, small river basin in urban area, rainfall forecast

1. 序 論

都市中小河川流域では、市街化により地表面がコンクリートやアスファルト等による被覆が進み、その流出は速く、流出量は大きくなっている。また、下水道の雨水排水施設の整備により、雨水の集中が速くなってきたことや、河道自体も、沿川用地の高度利用により十分な河幅の確保が困難となり、狭く深いコンクリート等で護岸されることが多く、洪水の流下や集中の速さを助長している。このような都市中小河川¹⁾では、集中豪雨によるいわゆる「都市型水害」によって毎年のように浸水被害を被っている。現在、市街化の進んだ都市域の中小河川では、流出実態に即した治水計画、洪水調節施設等の適正な管理、迅速・確実な水防活動等が必要であり、このためには狭い範囲での短時間雨量の変動や分布の特性、それに伴う洪水流出特性の解明が望まれている。本研究は、東京都において時空間的に密に得られた地上雨量計による雨量データをもとに、都市中小河川の流出実態を解明することを念頭におき、まず狭域、短時間雨量の変動や分布の特性を明らかにすることを目的としている。

一般に、都市中小河川では、水文資料が密に得ら

れなかったこともあり、地域の代表とする地点雨量の統計処理に基づいた確率雨量を設定し、合理式を用いて治水計画がたてられる場合が多い^{1),2)}。この対象流域は、おおむね100~200km²、到達時間2時間程度までの河川とされており³⁾降雨の変動や分布の特性まで考慮されることは少ない。しかし、都市中小河川の流出実態は、極めて狭い範囲の短時間雨量の変動に影響されるところが大きい。

降雨の特性については、研究が数多くなされ、実績が積み重ねられている。建設省土木研究所⁴⁾では、関東南部を対象に1~48時間、1500km²を対象とした降雨分布の解析を行いそのDADについて明らかにしている。吉野ら^{5),6)}は、レーダ雨量計データを用いて雨量の時空間的な相関とDADについて検討している。これらは広域雨量の静的な分布特性、統計的特性を扱っており、狭域雨量の移動や消長の変動特性までは述べていない。渡邊ら⁷⁾は、広域的なレーダ雨量の特性に関してその空間的な雨量の極大点の追跡等を行い、移動の方向や速度についての統計的分布特性を調べるとともに、雨量の階層的構造について述べている。このようにレーダを用いた降雨特性の研究が進められる一方で、レーダ雨量に関しては、地上雨量を用いたキャリブレーション

表-1 研究対象とする短時間・狭域雨量の特性

対象の雨量特性	空間的	時間的
変動特性	雨域の移動や 変形	雨域の消長 (発達・減衰)
分布特性	空間的な集中度 と分布形状	時間的な集中度 と雨量波形

手法やその観測精度についての研究^{8)~11)}が進められている段階である。狭小域の短時間雨量については、河村ら¹²⁾がスウェーデンのルンド市について約25km²の範囲で1分雨量の移動方向や時空間的な雨量の統計的特性を扱っており、1分先の降雨予測について検討している。沖ら¹³⁾は、雨滴粒径分布観測を行い、観測地点での短時間雨量の時間的な変動特性、集中度や周期性について興味深い結論を得ている。友杉¹⁴⁾は長崎における集中豪雨の事例について雨量分布面の起伏形態の特性と面積雨量の推算値における可能誤差の特性について検討しており、より系統的かつ詳細な事例研究を進める必要があると述べている。近年では、中津川ら¹⁵⁾や山田ら^{16), 17)}が、地上雨量とレーダ雨量を合わせた解析および気象力学的解析による山地部の地形性降雨特性、特に標高による降雨強度の変化について検討している。これらの研究の目的は様々であるが概して短時間雨量の確率的・統計的特性や静的な降雨量の分布特性を扱っており、地上雨量をもとにした、都市中小河川流域規模での、短時間雨量のダイナミックな時空間変動特性や分布特性を明らかにする段階まで至っていない。

本研究では、都市中小河川の洪水流出現象に直接結びつくと考えられる、短時間(5分~30分程度)、狭域(10~100km²オーダ)の雨量について、表-1に示す空間的・時間的な変動や分布の特性を明らかにする。さらに、その変動特性から降雨の短時間予測の可能性につき検討を行い、都市中小河川流域における雨量観測方法と予測の可能性についての考察を加えている。検討は都市中小河川の浸水被害の主要因が、台風のみでなく雷雨であることも多いことを考慮し、これらの短時間雨量について比較した都市中小河川の流出は極めて小さい時空間スケールの雨量に起因すること、都市域は一般に、低平地に位置すること等から、ここでは、地形の影響に大きく支配される降雨特性や、大きい時空間スケールでの降雨特性は対象としていない。

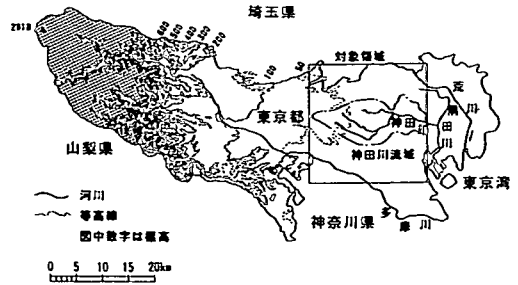


図-1 対象位置

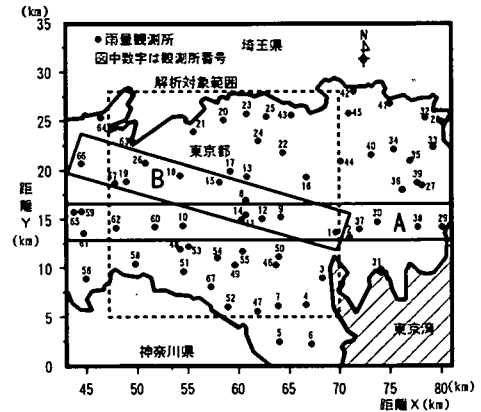


図-2 解析対象範囲と雨量観測所配置

2. 研究の対象

(1) 対象位置・範囲

研究の対象としたのは、図-1に示す東京都の東部低地である。地形はおよそ平坦で、雨量データが密に得られた、23km四方(約530km²)を解析の対象としている。雨量観測所は、平均的に3~5kmに1ヶ所程度で配置されている(図-2)。対象領域には東京都中心部を貫流する代表的な中小河川である神田川流域¹⁾(流域面積105km²)が含まれている。

(2) 対象降雨

対象とした降雨は、雨量データが密に得られている近年のデータで、対象領域に比較的規模の大きい雨量を記録した台風と雷雨である(表-2)。降雨規模は地域的には降雨強度50mm/hrを超え、本邦の中小河川の当面の整備目標である「時間50ミリ相当に対処出来る安全度:整備率38%(1993時点)」¹⁸⁾に比べて大きく、都市中小河川の洪水流出を対象

表-2 対象降雨

降雨要因		年.月.日	10分間平均雨量強度
台風	12号	1991. 8. 20	90mm/hr
	18号	1991. 9. 19	72mm/hr
	4号	1993. 7. 25	72mm/hr
	11号	1993. 8. 27	78mm/hr
雷雨		1994. 7. 7	120mm/hr
		1994. 7. 18	132mm/hr
		1994. 9. 2	102mm/hr

(ピーク雨量は領域内最大観測値)

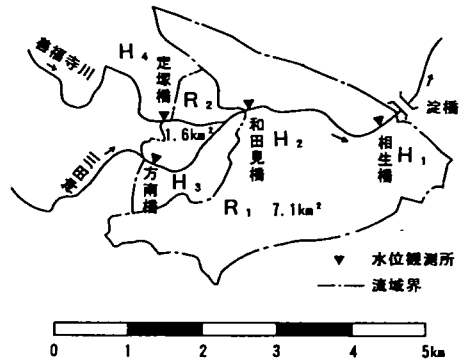


図-4 対象流域図

3. 短時間雨量の取り扱い

(1) 雨量と水位の直接的関係¹⁹⁾

本研究で降雨の特性を明らかにする目的は、最終的に、都市中小河川の流出現象に対応させることである。著者らは、都市中小河川の洪水時の河川水位が狭小域・短時間の流域平均雨量(30分平均雨量)と流量-水位の関係式を介さずとも、極めて直接的な関係であり単純な線型式で再現出来ることを示した。対象とした神田川は、東京都内の区部を流れる中小河川では最大の流域面積をもつ¹⁾代表的な都市中小河川である。沿川流域は市街化が進み、下水道施設もほぼ整備されており、流域の9割が市街化されている。

本研究では、図-4に示す神田川中流部の支川善福寺川合流前後の延長約3.8kmの区間とその間に流入する流域8.7km²を対象としている。ここで淀橋直上流相生橋(H₁)、神田川・善福寺川合流直後の和田見橋(H₂)、合流点上流の神田川方南橋(H₃)、善福寺川定塚橋(H₄)地点の水位及び、各水位計間の残流域雨量R₁(相生橋～和田見橋)、R₂(和田見橋～方南・定塚橋)を用い、洪水位と雨量の直接的関係を検討した。対象区間の上流には、29.0km²と残流域(約8.7km²)の約3倍の流域をもっている。

流域の平均雨量は、小流域の降雨分布を細かに反映するために、対象流域に500mの格子を作成し、雨量観測所の10分毎のデータに基づき、各格子点と観測所の距離による重みで荷重平均した値を、流域で平均することで求めた²⁰⁾。又、残流域の到達時間は下水道諸元等から約30分と推定されるため、10分雨量をもとに30分間の雨量の移動平均値を各時刻の流域平均雨量として扱った。

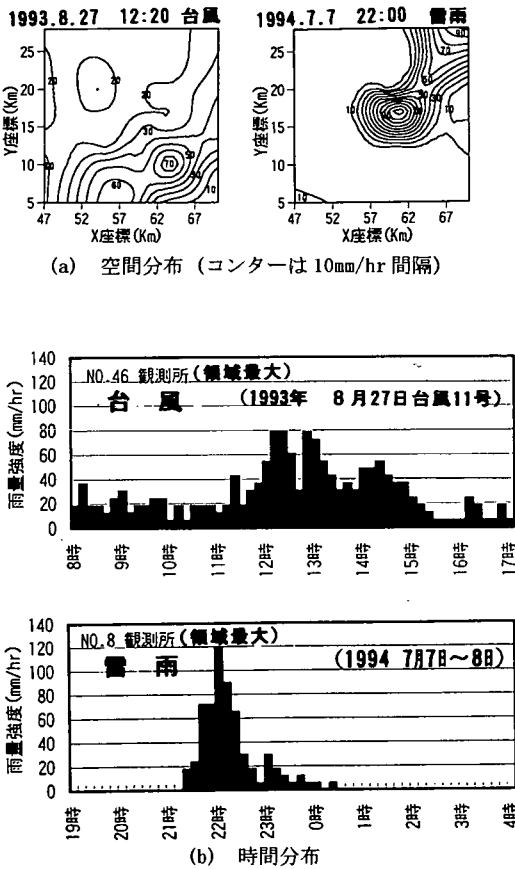


図-3 雷雨と台風の雨量分布(10分雨量)

とする場合には、遜色のない規模である。台風については10分、雷雨に関しては1分毎の地上雨量(1mm単位)が得られている。図-3に台風及び雷雨の分布を示す。台風に比べ、雷雨は空間的、時間的に集中度が極めて高いことがわかる。

上流 2 地点の水位 (H_3, H_4), 残流域雨量 (R_1, R_2) 及び下流の水位 (H_1) の実績値から, これらの線形関係を前提に求めることにより次式が導かれる¹⁹⁾.

$$H_1(20) = 0.532 H_3(0) + 0.639 H_4(0) + 0.135 R_1(20) + 0.046 R_2(10) - 35.956 \quad (1)$$

ここに () 内は, 0 を現時刻として, 10, 20 は 10 分後, 20 分後の値を示し, 河道の流下時間を考慮したものである. 図-5 にこの水位-雨量関係式 (1) により, 上流 2 地点水位 (H_3, H_4) と残流域雨量 (R_1, R_2) を用いて計算した下流点水位 H_1 と, その実績水位の比較を示す. 台風のみならず局地性の高い雷雨による洪水においても, 計算された水位の実績水位に対する標準偏差は, 水深約 4 m の 3% である 10cm 程度であり, 良好に再現出来ている.

図-5 の点線は式 (1) において残流域雨量 (R_1, R_2) を 0 とした場合の, 下流水位に対する上流水位の影響分を示す. 上流水位の影響分は, 下流水位のうち, ピーク時で約 40~80% であり, 特に図-5 (a) に示す雷雨時には約 40% と小さい. 逆にピーク時の下流水位は, 上流 29.0km² から流れてくる水位の影響より, 残流域 8.7km² (約 30% の面積) の流出分が水深の 60% 以上も支配する場合がある. これらから, 残流域の流出形態は降雨波形と強い線形的関係にあり, 流出波形は小流域の 30 分平均雨量に即応する速い流出に大きく影響されていることがわかる. 著者ら^{20), 21)} は, 都市中小河川流域規模における雨量観測所の密度と面積雨量精度について検討しているが, 対象としている東京都の雨量観測所密度での面積雨量の計算値は, この水位の良好な再現性からみても十分な精度であるといえる.

都市中小河川における流出は, 狭い範囲 (10km² 以下) での 30 分程度の平均雨量と直接的関係にあり, その影響が大きく, この時空間スケールでの降雨量を精度よく把握することと, その降雨特性を明らかにすることが重要であることがわかる.

(2) 対象雨量の時空間的なスケールと取り扱い

都市中小河川の降雨と流出との直接的関係から, その流出実態を解明するには, 流域規模 (1~10km² 単位) や流域の到達時間 (10~30 分程度) に対応するスケールの雨量特性を明らかにすることが必要で

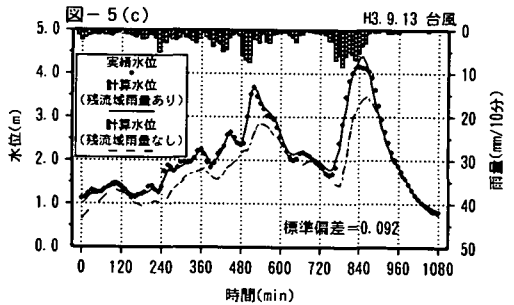
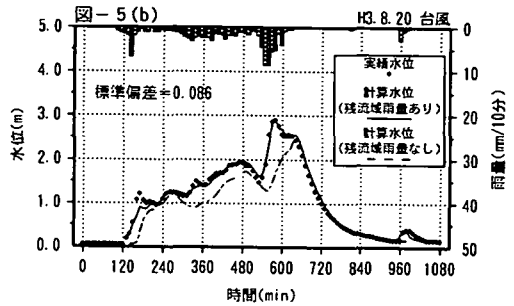
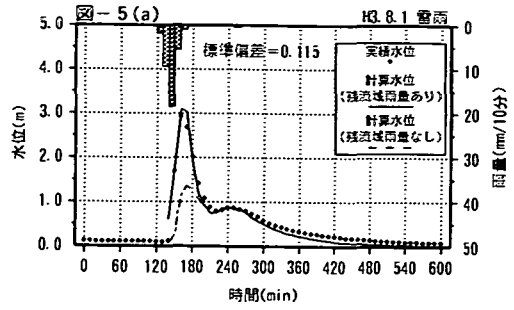


図-5 計算水位と実績水位の比較

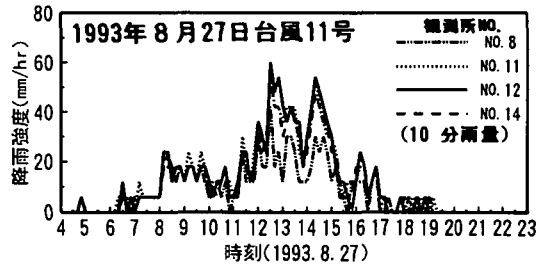


図-6 近傍観測所の雨量比較

ある. この時空間スケールは, いわゆる積雲対流規模の現象であり, メソγ (数 km~数十 km, 数分~数時間)²²⁾ といわれるスケールの気象現象と考えられる. 本研究で用いる雨量データは, 1 分あるいは 10 分毎の平均 3~5 km 間隔に配置された転倒ます (1mm 計) による地上雨量であり, 時間的には累積雨量 (5 分, 10 分) を扱う. このため, 対象とした地上雨量は, 瞬時瞬時のエコー強度を雨量に換算

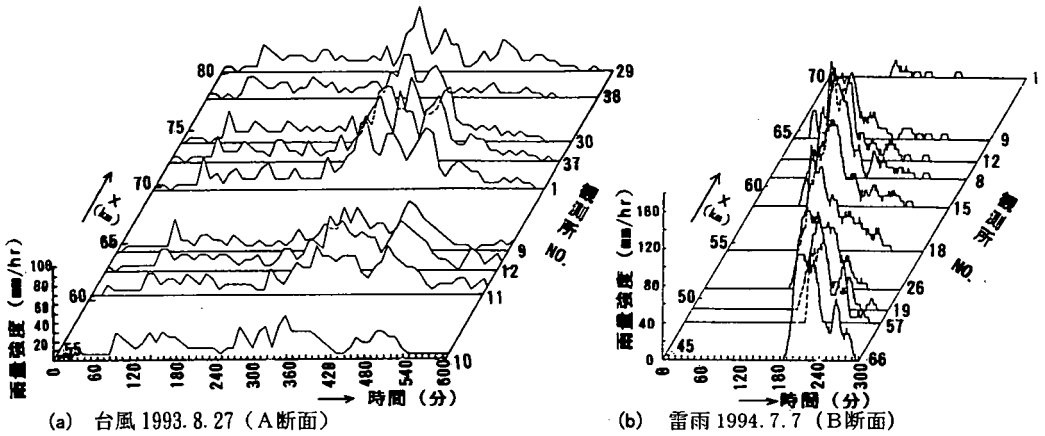


図-7 雨量の時空間的変動

するレーダ雨量とは、本質的に異なる。また、前述の様に都市中小河川の流出との直接的関係も極めて強い。図-6は近傍観測所の10分雨量値の連続性を調べたものである。約3kmの範囲に入る近傍の観測所4カ所の雨量は、時間的に細かい振動はしているものの同様の増減傾向を示し、空間的な相関は強く、観測点間でのランダムな変動は見られない。図-7は観測所の配置と強雨を記録した位置を参照し、図-2に示すA、Bの直線断面を設定して雨量の時空間的な変動を調べたものである。離れた観測所においては別の波形となるが、近い観測所では、各々関連した連続的な変動を示している。以上から雨量データの変動や分布は、本研究で対象としている現象のスケールでは、時空間的に連続していると考えられ、この前提のもとで、降雨特性を明らかにする。

4. 台風の時空間変動特性

(1) 台風による雨量の変動状況²³⁾

対象とした台風のうち最も規模の大きかった1993年8月27日台風11号を対象に、雨量の変動状況を調べた。短時間雨量の、空間的な関連性を調べるために、図-2に示すA断面を用いて時間的な雨量分布と、観測所の位置の関係を調べ、横軸に時間、縦軸に雨量、斜軸に距離として図化したのが図-8である。ここで降雨量は10分雨量記録をもとに10分毎に30分間で移動平均した量を対象としている。30分平均雨量を用いたのは、前述の様に対

象とした都市中小河川での水位の応答性が良好であったことによる。各観測所の雨量は、雨雲ひとつひとつの発生減衰サイクルに対応しているものと考えられる40¹³⁾~60分程度の振動がみられる。図より明らかなように、20km程度の範囲では降雨の山・谷の位置的な変動や時間的な移相を連続的に読みとることが可能である。ここで各地点での雨量の時間的な山や谷の発生時刻とその雨量を抽出し、位置的・時間的な変動を調べた。図-10、図-11は領域のほぼ中心に位置するNo.11観測所の雨量波形から、近傍観測所と関連が見られる降雨波形の山や谷の変曲点a~jを設定し(図-9)、A断面内の各観測所でそれに相当する山・谷の発生時刻とそのときの雨量強度を抽出し示したものである。図-10では、横軸に観測所の位置による距離、縦軸に雨量強度を示す。パラツキがあるものの、発生時刻の異なる山々が70km(東)付近で最大となり45km(西)に向かってゆるやかに減衰していく傾向がある。20mm/hr程度の小さい雨量の場合は、位置的に変動が小さい。対象とした台風では、A断面の方向と雨域の実際の移動方向とは、必ずしも一致はしないが、降雨波形の山の消長は位置的にゆるやかであると考えられる。71km、78km等の地点で他地点に比べ一様に小さい値を示す傾向が見られるのは、近傍のビル等障害物の影響や局所的な風による地上雨量計の捕捉量に対する影響、地形的な影響、観測機器の性能及び故障等が考えられる。一方、図-11に示す降雨量の山と谷の位置的な発生時刻をみると、西へいく程遅い傾向にあり、およそ一定にゆる

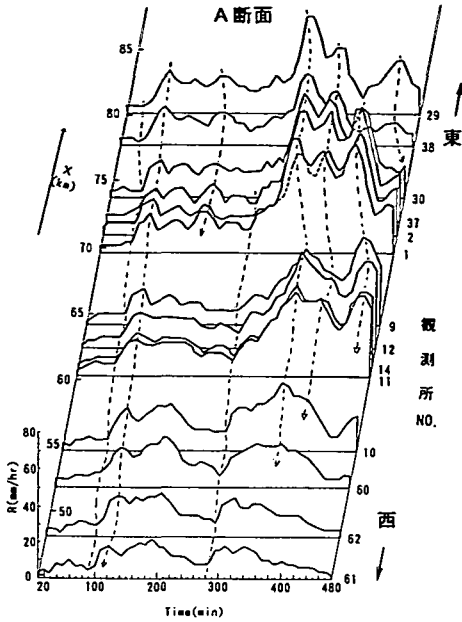


図-8 雨量波形の変動

るやかに傾いている。

降雨波形が近隣観測所同士では類似しており、位置的にも時間的にも連続的に変形していることから、各観測所間の降雨波形の時間的なずれが雨域の移動によるものと考えることができる。雨域の移動特性を調べるために、解析対象範囲のほぼ中央に位置する、No. 11の観測所を中心として、周辺観測所との間で10分単位(観測値が10分単位で得られているため)で波形をずらしたときの雨量波形の相関をとり、最も相関係数の高い移相時間を調べた。このようにして得られた値の面的な分布を示したものが図-12である。対象領域内では、移相時間の分布はほぼ南東方向へ平面的に傾いていることがわかる。このことより、対象範囲内では、比較的一様な移動をしていると考えられる。さらに相関係数は、移相時間0分～+40分までの雨量の大きい範囲で0.9以上と高い。雨域は中心へ向かって北西方向へ移動しており、中心付近を過ぎると、減衰してゆくとともに雨量が小さくなり、明確な相関関係が薄れてゆくと推定出来る。中心点より10km程度離れた南東部の観測点でも20～40分の移相時間で相関が高く、降雨波形の強い関連性とその移動による時間のずれが空間的に一様に傾斜している様子がわかる。

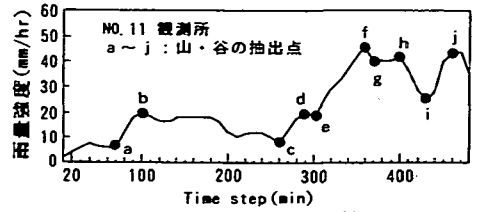


図-9 雨量の山・谷の抽出

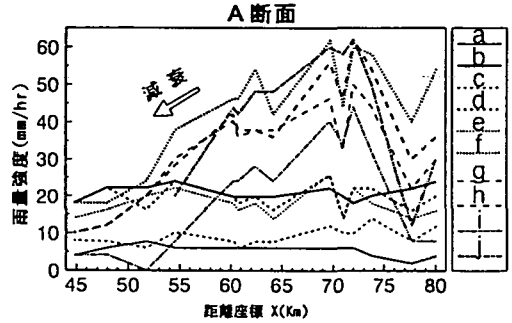


図-10 降雨波形の山・谷の位置と大きさ

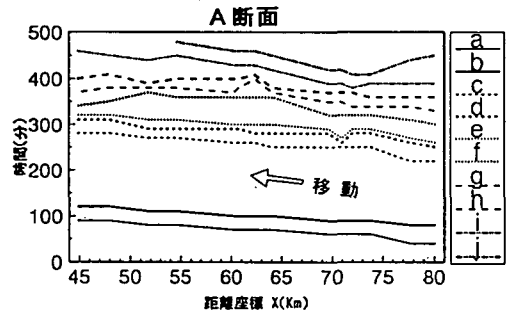


図-11 降雨波形の山・谷の位置と発生時刻

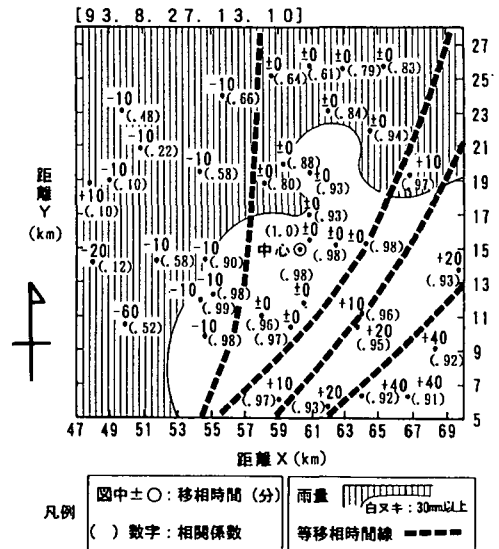


図-12 降雨波形の移相時間と相関係数の平面分布

(2) 雨域の移動と消長の計算方法²³⁾⁻²⁵⁾

雨量分布の10分毎の経時変化を調べ、その移動方向の断面について雨量の時間的な変動を示したものを図-13に示す。雨量分布を10分毎でみると、その前後で関連して移動、消長している様子がみれる。ただし、対象とした23km四方の中では雨域の一部が観測されるのみで、その全容は把握出来ない。つまり、対象領域内に雨域のピークを含む時間帯においては、およその移動が観れても、ピークを含まない時刻においては、移動による変動か、消長によるものを識別出来ない。雨域の移動や消長量を求める方法は、降雨の運動学的予測手法である雨域追跡法²⁶⁾や移流モデル²⁷⁾等に見られる時刻の違う2つの雨域の空間分布の相関関係から求める方法がある。本研究での対象範囲が台風のひとつの雨域を抱絡する広さでないため、この方法によることは困難である。このため、対象領域内の雨量観測値の移相時間毎の波形相関をとり、その相関の高い移相時間の空間分布を作成し、移動の方向と速さを求めることとした。

雨域の移動と消長を求める方法²³⁾⁻²⁵⁾の概略を図-14の(a)~(d)に示す。

(a) 中心とする観測所Aとその周辺観測所Bの降雨波形について移相時間 Δt による相関をとり、最も相関の高い Δt を観測所毎に求める。(b) この Δt の空間分布からAを中心として平面回帰を行う。この平面回帰面の傾きの方向と角度($\Delta t / \Delta L$)から速度ベクトルを求め、Aにおける移動ベクトルとする。(c) 同様に領域内の全ての観測所を中心として、その中心観測所における移動ベクトルを求める。このベクトルの u, v を変分法により空間内挿し、移動ベクトルの平面分布を作成する。この移動ベクトルの方向は、降雨分布の経時変化と良く一致するが、移動量は、移相時間が10分単位と粗いために、実際と合わない場合がある。このため移動量の精度を向上させるために、求めた移動方向を固定し、移動量を一律10%ずつ変化させ、このときの移動後の分布と、雨量の実測値との空間相関が最も高い移動量を求める。(d) 消長量は前時刻ステップからの移動のみの雨量分布と、実測値による雨量分布との差として計算する。消長量は、対象領域内で一律でなく空間分布を与えるものとし、各観測点の消長量を変分法により空間内挿する。観測点間の雨量波形の相関は、短時間雨量の周期性(60~120分程度)とデ

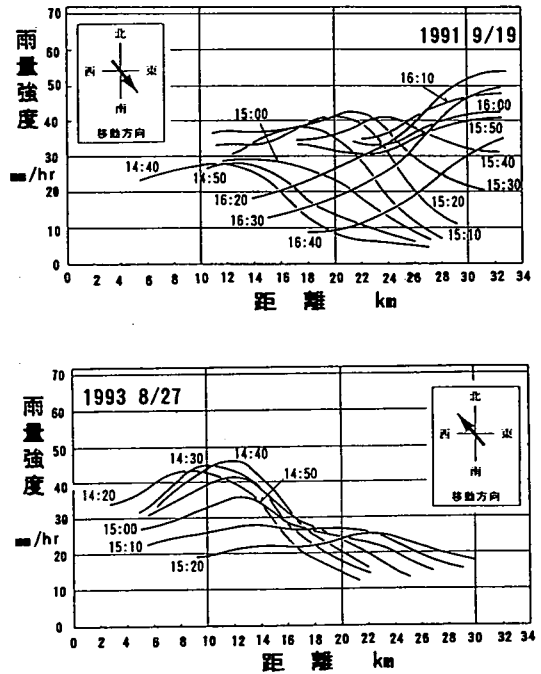


図-13 台風による雨量断面の経時変化

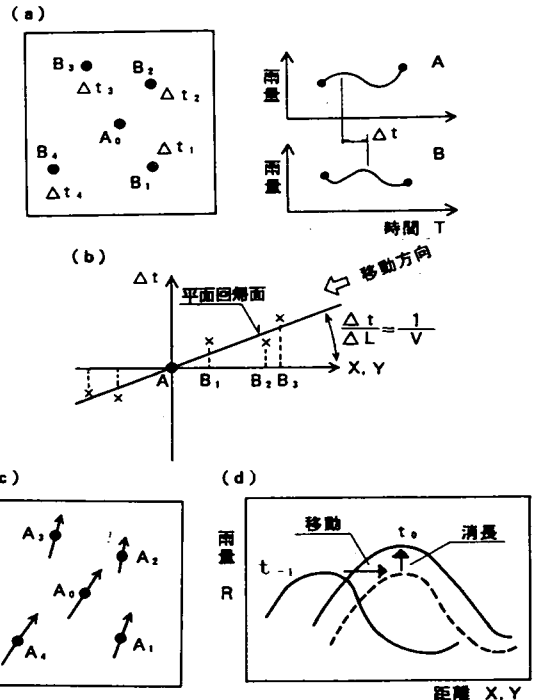


図-14 雨域の移動と消長の計算方法の概念図

ータ数(10分毎)を考慮し、対象時刻の前後60分の範囲の雨量波形を対象とし、時々刻々(10分毎)に計算している。

本研究においては、ランダムに配置されている観測所の雨量値や移動速度等をもとに対象領域内に設定した 1km の格子点に空間的な内挿を行っている。内挿の方法は、検討事例^{28), 29)}のある変分法を用いた。この方法は実測値を $f(x, y)$ 、内挿値を $f_c(x, y)$ としたとき、次式(2)を最小にする $f_c(x, y)$ を求めるものである。

$$\iint \left[\alpha (f_c - f)^2 + \beta \left[\left(\frac{\partial f_c}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_c}{\partial y} \right)^2 \right] \right] dx dy \quad (2)$$

ここで α 、 β は、観測値との整合性と観測所間における雨量の分布が不自然な値とならないことを確認し、 $\alpha : \beta = 32 : 1$ を用いている。

(3) 台風による雨量の時空間的変動特性

対象とした図-15 に示す4つの台風の中で図中に示す強雨を記録した時間帯を3時間毎に6波形抽出し、各々の雨域の移動と消長等の変動特性について調べた。(表-3 参照)

6波形の雨量分布の10分毎の経時変化と計算された移動ベクトルの分布を図-16 に示す。図中の移動ベクトルは、10分間での移動距離を示している。30mm/hr以上の強雨域をハッチで示すが、強雨域の10分間における移動方向・距離と各時刻の移動ベクトルはほぼ一致しており、雨域の移動の方向、速度をよく説明出来ている。雨域の移動は、大きい雨量の範囲ではほぼ一様であり、時間的にも安定している。またその大きさは、遅い場合と早い場合があり、およそ5~20km/hr程度であり、ひとつの雨域内での時空間的な変動は殆どみられない。移動の方向は様々であり、台風の中心の移動方向や地上風の方角とは必ずしも一致していない。また、抽出した降雨では、西方向(海から山中部の方角)へ移動するものは見られなかったものの、特に地形や海陸の位置関係による地域的な雨域の移動の方向の特性はみられないようである。1991.9.19のように同じ台風の中で2波形抽出した場合に、時刻によって雨域の移動の方向が大きく変化する場合もある。同じ雨域での変形は殆どみられず30分程度の範囲ではほぼ同様な分布形状で移動していると考えられる。

表-3 対象降雨の抽出範囲

対象降雨	抽出時間 (3時間)
1991. 8. 20	15:00~18:00
1991. 9. 19	A. 9:00~12:00
	B. 14:00~17:00
1993. 7. 25	5:00~ 8:00
1993. 8. 27	A. 11:00~14:00
	B. 14:00~17:00

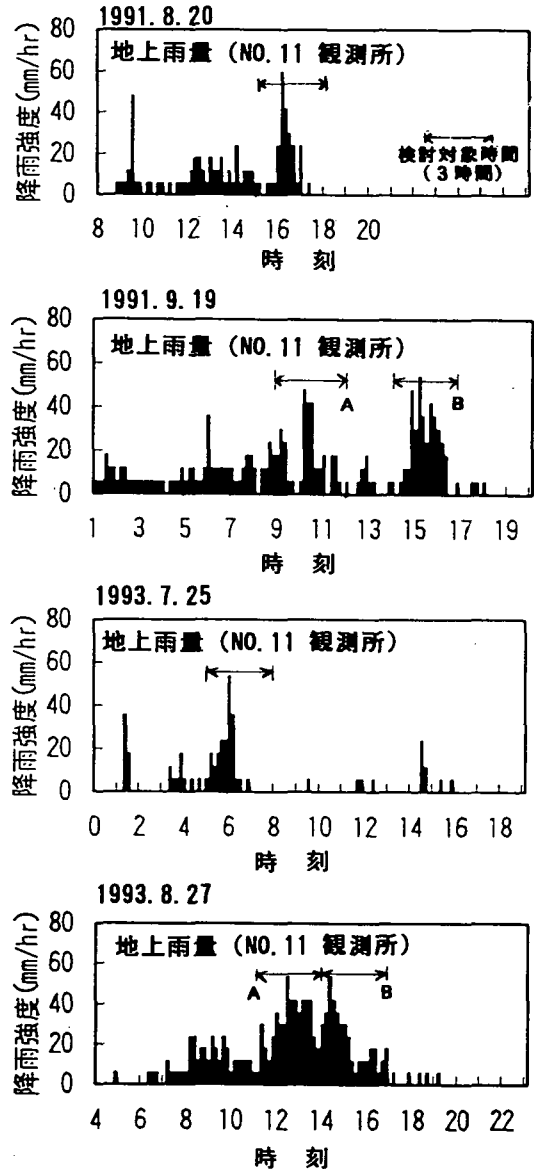


図-15 対象とした4つの台風の降雨波形

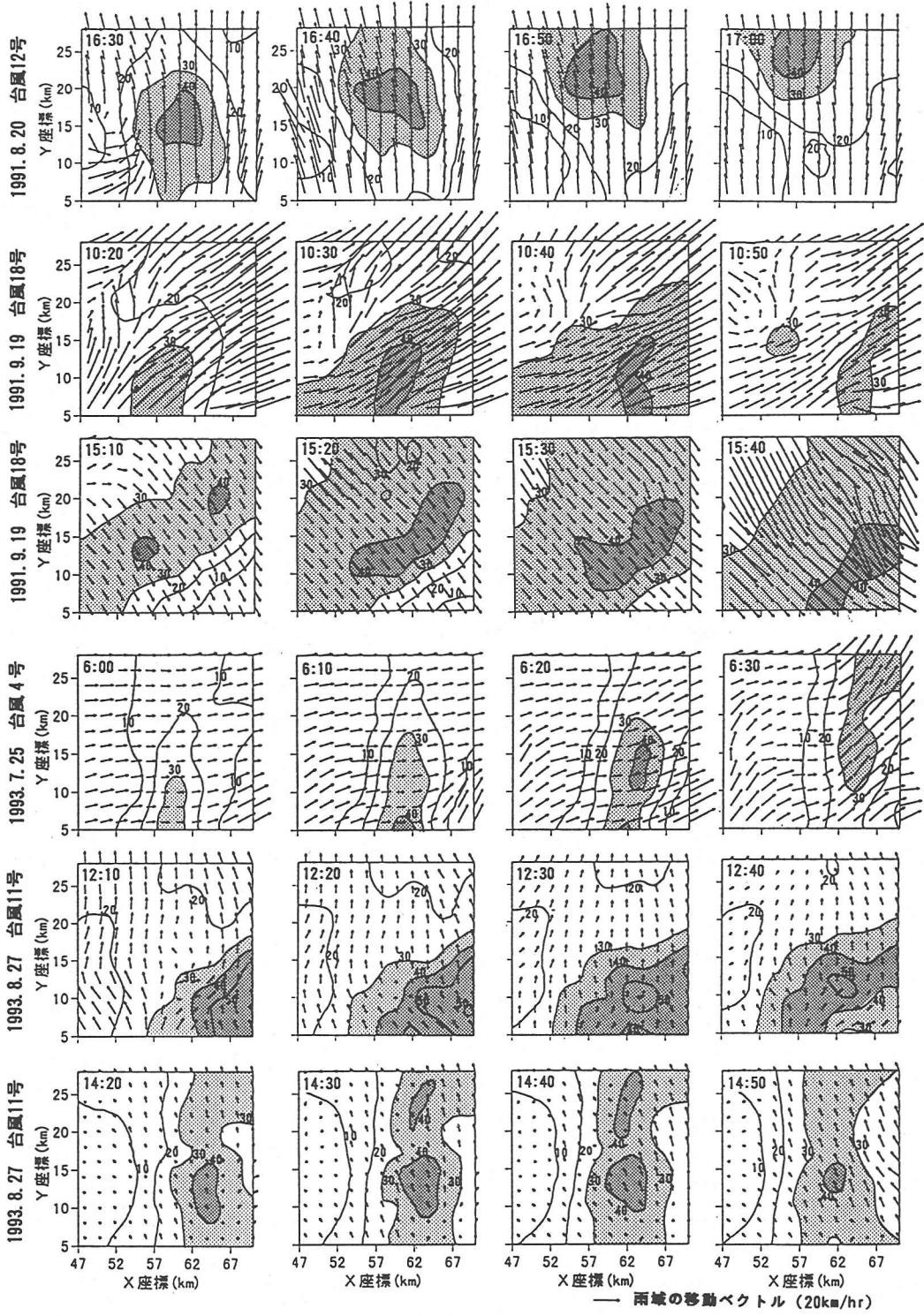
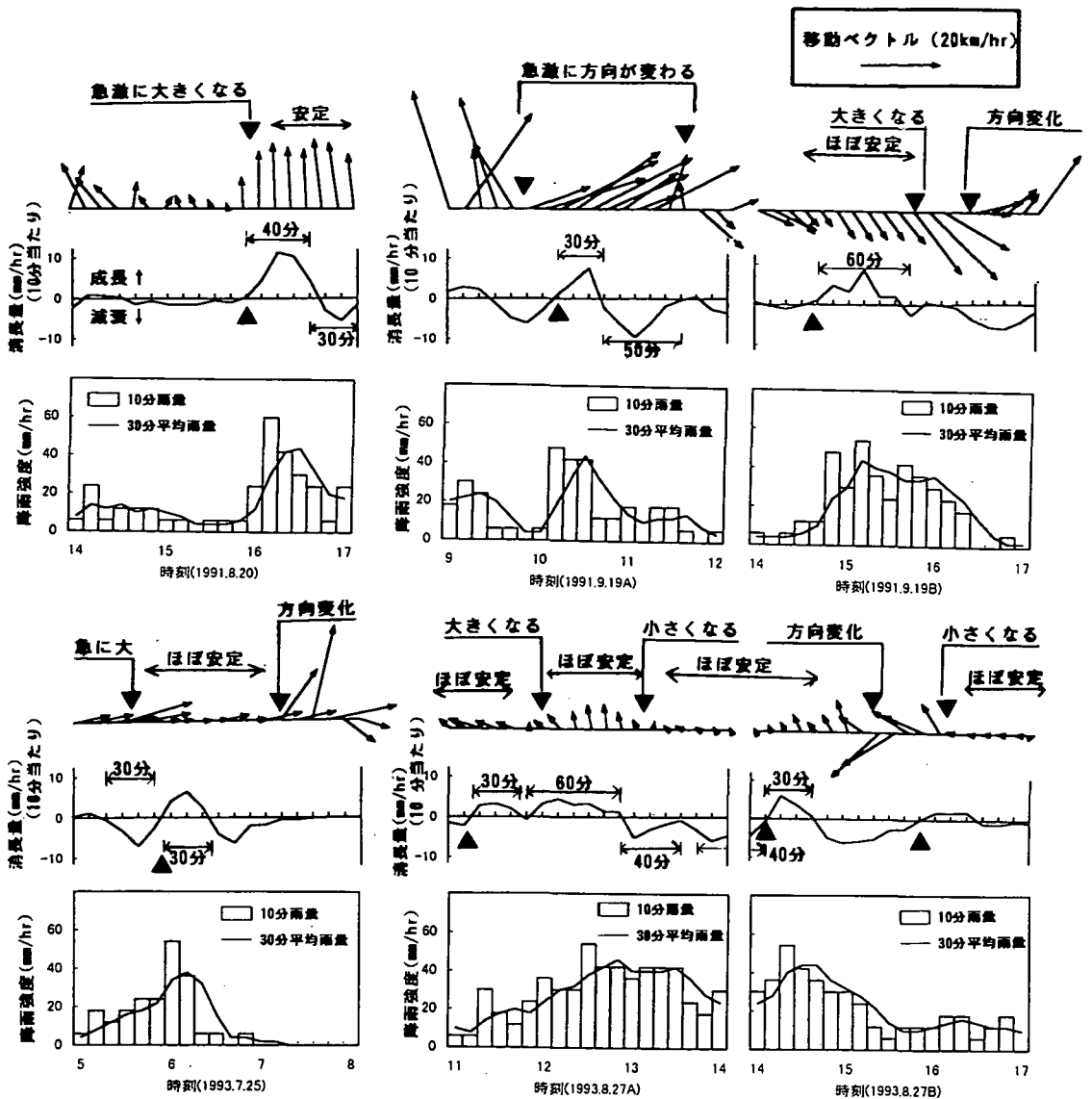


図-16 台風の雨量分布の経時変化と計算移動ベクトル (コンターは10mm/hr おき)



図一七 雨域の移動と消長量

図一七に領域中央付近 (NO. 11 観測所) における雨域の移動ベクトル、消長量、降雨量の経時変化を示す。雨域の移動がほぼ安定し雨量が大きい時間帯での成長や減衰の各々の継続時間は消長量の図中に示すように 30分～60分程度である。成長・減衰による 10 分当たりの消長量は、ピーク 50mm/hr 程度の降雨に対して 5～10mm/hr であり、10～20% の変動を示している。降雨予測を行う場合、この消長量を正確に見積もらなければ 10 分後でもピークの 20% 程度の誤差は避けられないと考えられる。雨域の移動ベクトルの経時的な変化をみると、図中

に移動ベクトルの大きさや方向が急激に変化する時刻に▼印を付しているが、その間の雨量の大きい範囲ではほぼ安定しており、雨量の立ち上がり部で大きく変化する場合が多い。また、消長量は立ち上がり部で減衰から成長へ逆転する (図中▲印) 場合が多い。これらは雨域の対象領域内への来襲・通過、と個々の雨域の発達・減衰の組合せによる変動と考えられる。これはこれらの移動、消長の変動傾向をいかに事前に把握出来るかが、降雨予測を行う場合には重要であることを示すものである。

5. 雷雨の時空間変動特性

雷雨は時間的な変動が激しいことから、極めて短い時間間隔（10分以内）での雨量データが重要である。このため1994年に1分雨量データの収集が行われた。この年には、大きな台風の来襲がなく、雷雨による雨量データのみが得られている。これを用いて、雷雨による雨量の変動特性について検討した。

(1) 雷雨の発生状況

得られた雨量データは、1mm計の為、1分毎では0から3mm（降雨強度に換算すると180mm/hr）までの数値が記録されている。これを1分毎に5分の移動平均を行い、短時間雨量強度の変動として扱った。図-18は、1分毎の空間的な雨量分布の経時変化から各々の雨量ピークの時刻を抽出し、50mm/hr以上の強雨を示した範囲の経時変化を調べたものである。局所的に集中した雨量は発生、発達、減衰を繰り返し、その雨域も徐々に移動していく様子³⁰⁾がみられる。どの雷雨も初期に発達・減衰した位置の近傍に15~30分程度後に連続して発生している。

(c)1994.9.2雷雨では、西から東へほぼ一樣な方向へ連続して発生しているようにみてとれるが、(a)1994.7.7雷雨のように、ひとつの雨域から2方向に分裂して発生する、あるいは(b)1994.7.18の様にも迷走しながら全体として一定方向（北方向）に移動することもある。これは、二宮³¹⁾の述べている「積雲の近くに次つぎに発生する積雲対流は降水に伴う下降流（ダウン・ドラフト）と下層風との収束による」とことに関連していると考えられる。雷雨による地上雨量は3例ではあるが、狭い範囲でみれば、1ヶ所で発生した位置から次々に連なって発生している様である。

(2) 雷雨の時空間変動特性

雷雨の移動方向をもとに図-18(a),(c)に示すC,Dの断面を設定し、その雨量分布の経時変化を示したものが図-19,20である。断面図は変分法による格子点の内挿値をもとに図化している。図では、個々の雨量の分布の山に着目し、その成長期を実線、減衰期を点線で区別し、その周期別に期間を区切って、1分毎の雨量断面図を示している。図-20の1994.9.2の雷雨では、水平方向に約10kmの広がりをもつ雨量が発達・減衰をくりかえし、その発生位

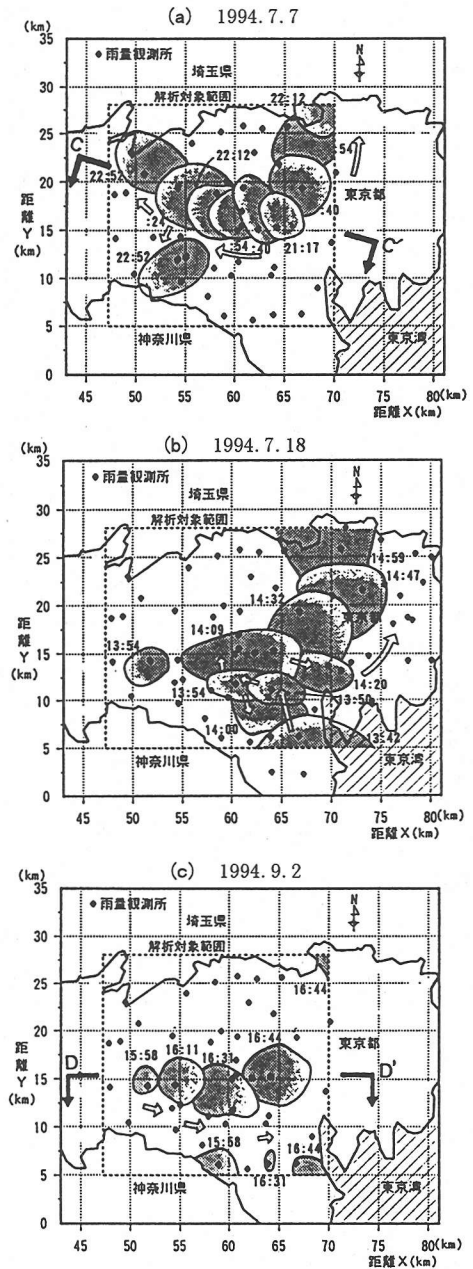


図-18 雷雨の発生状況

置が移動していくことで全体の雨域が動いていることが明確にみられる。このひとつの雷雨による雨量の発達、減衰のサイクルは12分~17分と平均的に15分間であり、3~5kmの間隔で連続して発生している。図-19に示される1994.7.7雷雨では、図-20のような個々の雷雨の発達・減衰を明確に分離出来ない。これは、観測所がうまく雷雨分布を把握できていないためと考えられる。

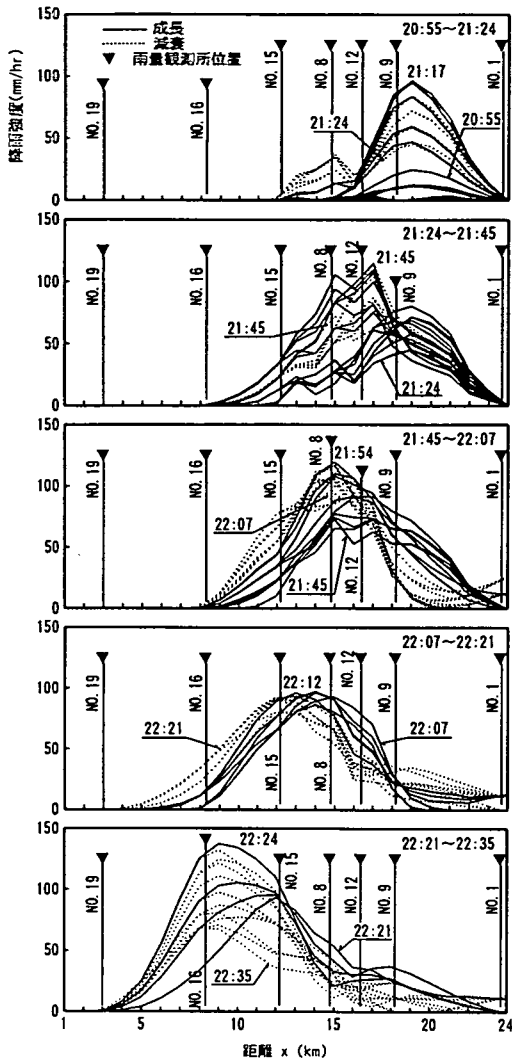


図-19 1994. 7. 7 雷雨のC断面雨量の経時変化

個々の雨量断面の成長と減衰をみると、それぞれ5～10分程度で変動している。これらの変動を精緻に把えるには、10分毎のデータでも粗く、困難であると考えられる。図-21は、No. 12観測所での観測値と、変分法を用いて計算した格子点値（観測所から400m）の比較を示す。No. 12観測所は、図-20において雨量の発達・減衰を分けるところに位置しており、小さい雨量のときに若干周辺の観測所の影響が現れているものの、ほぼ観測値と同様な値

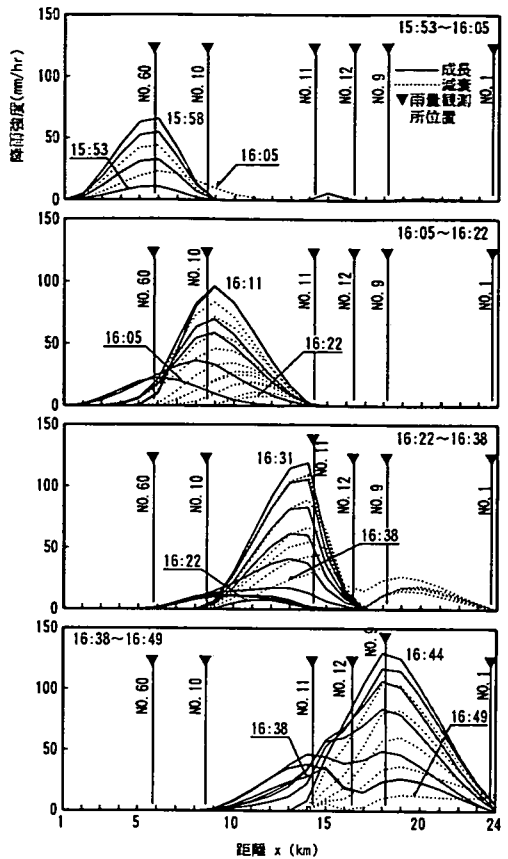


図-20 1994. 9. 2 雷雨のD断面雨量の経時変化

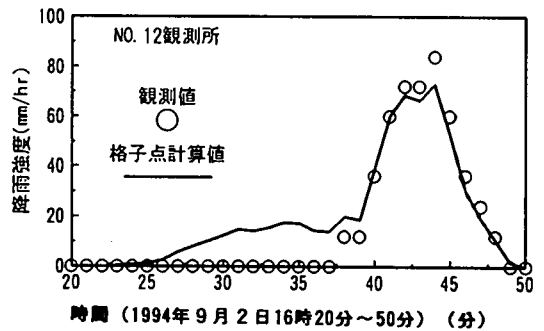


図-21 観測値と格子点内挿値

で計算されている。このことから、図-20に計算で示された、雷雨の時空間的な変動、つまり間欠的に連続して発達・減衰する様子は、各観測所の値をよく説明していると考えてよいであろう。

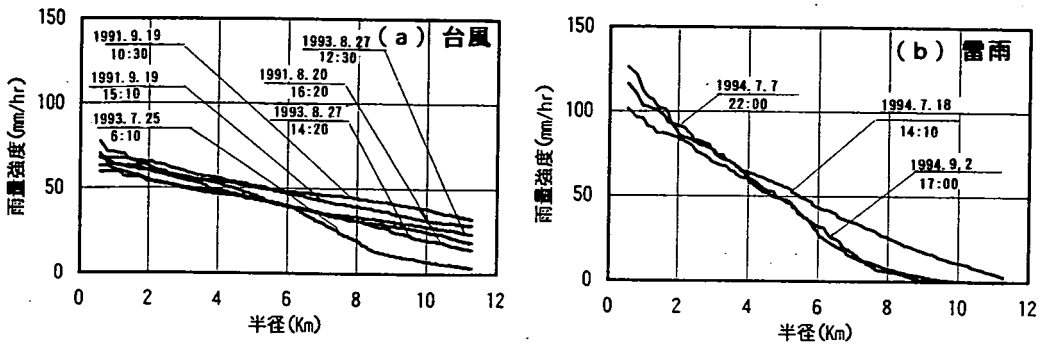


図-22 空間的雨量のひろがり (10分雨量分布)

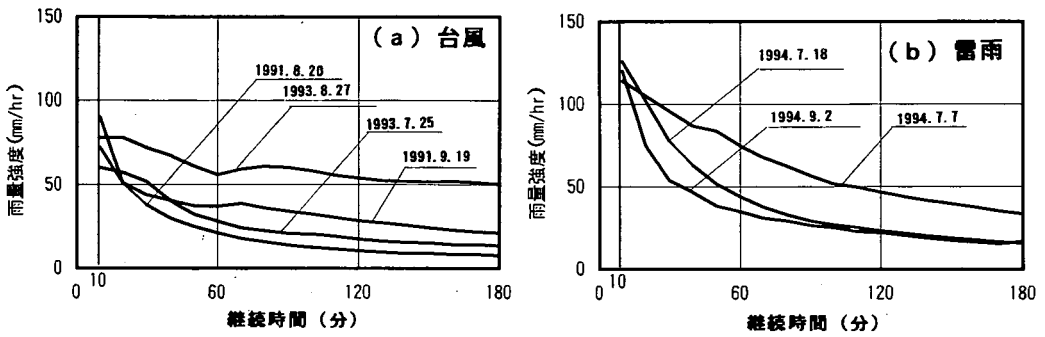


図-23 雨量の時間的集中度

6. 短時間雨量の時空間分布特性

(1) 雨量の空間的なひろがり

対象領域内の中央付近にピークを持つ雨量分布の時刻を抽出し、その降雨の空間的なひろがり調べた。雨量強度の面積的な低減を調べるため、降雨域の面積を円形の分布と仮定し、これを半径に換算し雨量強度との関係を示したのが図-22である。台風は60~80mm/hrのピークに対し、10km離れても20~40mm/hr程度の雨量をもっており、さらに広域に分布していると考えられる。一方、雷雨はピークで100~120mm/hrと大きい、中心から8~10km程度離れると雨域はなくなる。雨量強度のピークに対して50%まで低減するのは、雷雨で半径4~5km、また台風では半径6~8km程度の広がりをもつ。また、雨域の移動速度が20km/hr程度(30分で10kmの移動)とすれば、観測点雨量は移動のみでもピークから50%以下の雨量となる。このことから30分程度の予測を行うにも雨量の分布形とその移動を正確に捉えることが重要であることがわかる。対象領域が狭いため、台風の分布の形状は明確ではない

が、図-16の雨量分布図からみれば、円形に近い場合と帯状の分布をしている場合とがある様である。雷雨の場合は図-18にみられるようなほぼ円形の場合が多いが、時刻によっては近傍の2つの山の、発達と減衰が重なったと考えられる双子形や長円形の分布をしている。しかし、3~5km間隔の観測所の配置では、それ以上の細かさでの分布形状を把握することは困難である。

(2) 時間的な集中度

各降雨についてピークを示した降雨観測所の雨量波形を抽出し、継続時間と雨量強度の低減特性(図-23)を調べた。台風性の降雨の場合は、10分雨量のピークに比べ60分で50~80%程度の強度まで低減する。雷雨性の降雨では、30~60%程度まで低減する。(b)図に示す1994.7.7の雷雨はごく近傍に次々に連続して発生しているため、比較的時間的な集中度が小さい。台風の場合にはピークは小さいものの、1山の場合には雷雨と同様の時間的集中度をもっており、60~120分程度の複数の山が連続することで大きな総雨量を記録している。

7. 短時間雨量の予測の可能性

(1) 短時間雨量予測の方法

本研究では、まず台風を対象として運動学的手法による短時間雨量予測の可能性を検討する。ランダムに配置される雨量計のデータから雨域の移動方向を推定する方法として、現時刻までの雨量データを対象として、前述した方法で雨域の移動・消長を求め、現時刻の雨量分布を時間的に外挿することで10分～30分先までの雨量を予測するものとした。

(2) 台風の短時間雨量予測の結果

先述の対象とした4つの台風から抽出した6降雨波形を対象として検討した。図-24に、対象領域の中央付近に位置するN0.11観測所の雨量観測値と10～30分先の移動のみによる予測と消長を加えた場合の予測値を示す。6波形において、移動のみで良好に予測出来る場合、そうでない場合、消長項を加えた方が移動のみによる予測より改善される場合、逆の場合、が明確に分けられた。4降雨の6波形のうち3波形(図-24中(c)、(d)、(e))では、30分予測においても雨量の立ち上がりの部分が比較的良好に予測出来ている。10分後の予測においては全ての降雨で、消長を加える場合が良好に予測出来た。これは、雨域の移動や消長の継続性が、10分程度まではあるが30分までいくと、その継続性の仮定が破綻することによると考えられる。10分のリードタイムで、移動のみで大きい誤差をもつ降雨は移動のみの予測値が観測値を予測時間分遅らせたただけとなっており、消長の強い降雨、もしくは移動方向の変動が激しい降雨であったと考えられる。これらの波形は10分のリードタイムにおいては消長項を加えることで修正が効くが、30分のリードタイムとなると、さらに精度が劣ることになった。図-24中に図-17に対応する移動方向や大きさの急変する時刻(▼印)と消長が減衰から成長へ大きく変化する時刻(▲印)を記す。特に、雨量の立ち上がり時において、雨域の移動や消長が変化する場合においては、30分までの予測が極めて困難となっている。

(3) 雷雨の短時間予測に関して

雷雨の変動は、15分程度で成長・減衰を繰り返す、連続して発生している。このことから、30分

程度の予測はもとより、10分の予測でも、運動学的手法によることは極めて難しい。雨域が次々に連続し、一定方向に発生していく場合には、その発生位置はある程度推測出来る可能性はあるが、移動・消長の継続性が保たれると考えられる5～10分以上の、降雨強度の定量的な予測は困難であると考えられる。

(4) 予測精度向上の方策

以上の降雨特性や降雨予測に関する知見から、その短時間降雨予測の精度を向上するための実際的な方策を考察する。

a) 対象領域の拡大

本研究の23km四方の領域では、台風によるひとつの雨域の規模が20km程度と仮定すれば、雨域の発生からの消長・移動や分布形状の全容を把握し、予測を行うには、予測地点周りに20km以上、約50km四方程度の領域、雨量観測所のネットワークが必要であると考えられる。雨域の移動速度が20～30km/hrとしても、30分で10～15km移動するためこの程度の広さは必要である。

b) 細かな時間の雨量データ

本研究で台風は、10分単位のデータにより移動・消長を把握しようとしたが、雨域のライフタイムが60～120分とすれば、10分単位のデータでは降雨波形の相関をとるにしてもデータのサンプル数が少なく、移動・消長の変動傾向を把握するには粗いと考えられる。また、雷雨は10～15分毎の成長・減衰を繰り返すことも考慮すれば、さらに細かい時間間隔の雨量データを得ることで、消長の周期性等を考慮した精度良い予測を行える可能性はあると考えられる。

c) レーダ雨量の活用

広域的な空間的に連続した雨量を把握する方法としてレーダ雨量計がある。狭域・短時間の雨量予測に活用する場合には、対象とする降雨が時空間的な雨量の変動・分布のスケールが小さいことから、地上の短時間雨量(強度、10～30分雨量程度)との相関を明らかにすることはもとより、積雲スケールの時空間の解像度をもつ観測(例えば5分毎、500m～1kmメッシュ等)と、広域の平均的な移動傾向のみでなく個々の積雲スケールの雨域の移動・消長を考慮出来る予測手法の開発が必要と考えられる。さらに、レーダ雨量が5分程度の間隔の瞬時値

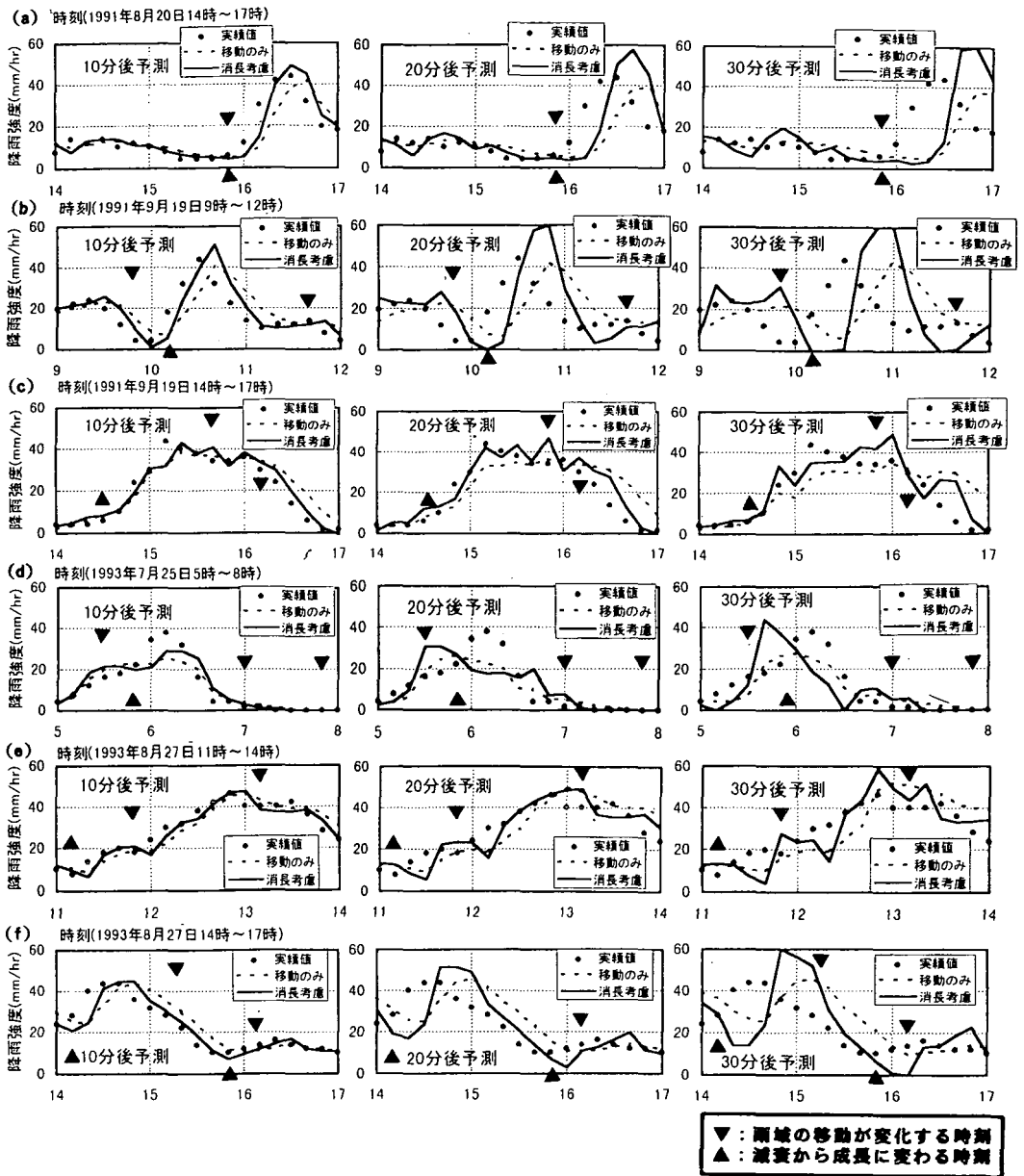


図-24 降雨予測結果

であることから、地上雨量や流出との対応を考えた平均化の方法と精度を考える必要がある。

d) 気象学的・統計的予測

気象学的な諸元（風、温度、湿度等）を観測し、降雨の発生・変動・分布との対応を明らかにすることで、さらに予測精度を向上させる方法が考えられる。特に雷雨等は、その発生からの予測が必要であり、3次元的な雨量や気象要素の細かな観測手法と、メソスケールの気象力学的解析手法の確立が、不可欠であると考えられる。一方、雷雨や台風等の降

雨要因毎の変動や分布の統計的な特性を把握することにより、その予測への適用や、都市域中小河川流域規模の計画、管理に反映することも必要であると考えている。

8. 結論

本研究では、密な地上雨量計データをもとにして、都市中小河川流域規模（10～100km²オーダ）の短時間雨量（5～30分程度）について、そのダイナミッ

クな変動と分布の特性を検討した。その主要な結論を以下に示す。

(1) 台風による短時間 (30分) 雨量は、雷雨と比較すれば平坦な分布をしているが、そのピークから6~8kmで50%程度にまで低減する。ひとつの雨域は、対象領域とした23km四方では捉えきれない広がりをもつ。狭い領域での雨域の移動や消長は、本研究の方法でほぼ推定出来る。その移動は雨量の大きい範囲で空間的・時間的にほぼ一様である。移動が卓越する場合と、移動が殆どなく、発達、減衰する場合がみられた。移動の速さは速い場合でも20km/hr程度のオーダーであると考えられ、運動学的方法で30分~60分の降雨予測を行うには、10km~20km雨域が移動するため、本研究の対象範囲よりさらに広い、降雨観測網が必要となる。また、変動の周期性が60~120分であることを考えれば、10分単位よりさらに細かい時間間隔のデータを得ることで予測精度の向上は図れると考えられる。今後は、広域のかつ空間的に連続したデータが得られるレーダ雨量と、中小河川の流出との応答が極めて高く、時間的に連続した地上雨量との連携を考えていく必要がある。

(2) 雷雨は、約10kmのひろがりをもつ、集中度の高い雨量が、15分程度で発達・減衰し、その近傍3~5km間隔でほぼ一方向に次々に連続して発生する。現在の3~5km間隔の観測所配置・密度でも細かに雷雨の分布を捉えきれないためと考えられるが、個々の雷雨の発達、減衰を明確に分離・把握出来ない場合もある。雨域は全体として一様な方向に連続して発生する傾向があるが、2方向に分かれて発生する場合や迷走する場合もみられる。雷雨の時空間的な変動を精緻に捉えるにはさらに時空間的に細密な情報が必要であり、その発生や変動を予測するには、1~5分オーダー、500m~1kmスケールの雨量観測、地上雨量とレーダ雨量の各々の特徴をあわせた観測方法や気象的な観測、解析が必要と考えられる。狭小域では、雷雨は約1時間で発生消滅するため、1~3時間先の予測を行うには、気象学的な要素を取り込んだ解析が不可欠であると考えられる。

(3) 雨量の短時間予測についてその可能性を検討した。台風の、10分先の予測については、移動や消長の継続性が保たれるため、運動学的方法である程度良好に予測の行えることを示した。30分まで

のリードタイムとなると、移動や消長の変動が安定している場合には、予測が良好に行えるが、降雨量の立ち上がり部で、移動もしくは消長が急変する場合もあり、予測は極めて困難となる。メソ α スケールの現象といわれる台風²²⁾では、その進路等の予測はかなりの精度で行われるようになってきているが、中小河川流域規模では、台風といえどもその内部のさらに小さい個々の積雲スケールでの雨域の移動・消長が重要となるため、1~3時間先の定量的な雨量予測は困難である。また、雷雨については、極めて地域的な集中度と時間的な変動が激しいため、台風に比して、運動学的方法では、30分先の定量的な雨量予測は困難であることが明らかであり、予測精度向上の方策を考察した。

本研究では、都市中小河川の流出と関連の高い密な地上雨量を対象としてその特性を明らかにした。対象とした時空間スケールでの降雨量は、特に雷雨で極めて集中度の高く変動の激しい特性を示した。狭小流域、特に都市中小河川での流出現象はこれらの短時間降雨の特性と密接に関連しているため、密な精度よい雨量観測を行い解析していくことが重要である。今後、降雨観測、予測を行っていく上で短時間雨量の変動、分布特性を考慮し、地上雨量とレーダ雨量との各々のメリットを生かした連携方法を考えていくことが重要と考える。また、都市中小河川の管理や水防活動を適切に行うための降雨の観測、予測や流出計算を行うには、これらの短時間雨量の変動・分布特性を反映した方法とその精度の限界、流出との対応を見極めていくことが重要である。

参考文献

- 1) 東京都建設局河川部計画課：'85 東京の中小河川，p. 5，pp. 22-24，p. 26，1985。
- 2) 西澤賢二：都市河川の技術，大村書店，pp. 123-125，1976。
- 3) 建設省河川局監修，社団法人日本河川協会編：改訂建設省砂防技術基準（案）計画編，pp. 19-20，同調査編，pp. 149-150，山海堂，1985。
- 4) 建設省土木技術研究所水文研究室：関東南部DAD調査報告，土木研究所資料，第1187号，1977。
- 5) 吉野文雄，水野雅光，井川貴史：レーダ雨量計から見た降雨の時空間特性について，土木学会第32回水理講演会論文集，pp. 1-6，1988。
- 6) 建設省土木研究所河川部水文研究室：レーダ雨量計から見た降雨の時空間特性に関する調査報告書，土木研究所資料

- 第2604号, 1988.
- 7) 渡邊茂, 高掉琢馬, 椎葉充晴, 及川隆仁, 小寺寿充: レーダ雨量計データを用いた降雨場の時間的・空間的特性の解析, 土木学会第46回年次学術講演会概要集(II), pp. 42-43, 1991.
 - 8) 小林明, 小笠原智宏, 松崎実, 山口高志, 大塚俊匡: レーダ雨量の時間外挿キャリブレーション手法の検討, 第33回水理講演会論文集, pp. 97-102, 1989.
 - 9) 中村興一, 堀田哲夫, 山下芳治, 星清: レーダ雨量計精度向上へのKriging法の活用, 水工学論文集, 第36巻, pp. 489-494, 1992.
 - 10) 竹村公太郎, 西原巧, 三日市吉郎, 石原篤, 村尾浩太, 小島富士夫, 吉元隆明: レーダデータの実時間補正法に関する研究, 第4回河川情報センター研究発表会講演集, 財団法人河川情報センター, pp. 31-37, 1995.
 - 11) 神野健二, 河村明, 西山浩司, 脇水健次, 古川節: レーダ定数の特性および地上雨量のオンライン予測に関する研究, 平成6年度河川情報センター助成研究成果報告集, 財団法人河川情報センター, pp. 27-35, 1995.
 - 12) 河村明, 神野健二, Janusz Niemczynowicz, Ronny Berndtsson, Magnus Larson: 短時間都市規模地上降雨の時空間特性と実時間予測について, 水工学論文集, 第35巻, pp. 63-68, 1991.
 - 13) 沖大幹, 虫明功臣: 雨滴粒径分布観測による短時間降雨強度の変動特性, 水工学論文集, 第38巻, pp. 33-38, 1994.
 - 14) 友杉邦雄: 面積雨量の推算値の信頼性に関する研究—長崎豪雨における雨量の空間的変動性と可能誤差の特性—, 京都大学防災研究所年報, 第27号 B-2, pp. 221-232, 1984.
 - 15) 中津川誠: 流域スケールの降雨特性の研究, 北海道開発局開発土木研究所環境研究室報文, pp. 209-218, 1990.
 - 16) 山田正, 藤田睦博, 茂木正, 中津川誠: 山地流域における降雨観測と降雨の特性について, 水工学論文集, 第34巻, pp. 85-90, 1990.
 - 17) 山田正, 茂木正, 亀田祐二: 山地流域における降雨の分布特性と降雨の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第35巻, pp. 243-250, 1991.
 - 18) 建設省編: 建設白書(平成7年版), 大蔵省印刷局, p. 361, p. 資32, 1995.
 - 19) 谷岡康, 福岡捷二, 岩永勉, 北川明: 都市域中小河川における洪水位と雨量の直接的関係を用いた洪水解析, 水工学論文集, 第38巻, pp. 69-74, 1994.
 - 20) 福岡捷二, 谷岡康, 高本正彦: 都市中小河川流域における雨量観測所密度が面積雨量精度に与える影響, 水工学論文集, 第37巻, pp. 27-32, 1993.
 - 21) 谷岡康, 伊藤重文, 渡辺毅, 福岡捷二, 高本正彦: 神田川流域における面積雨量精度, 第48回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 144-145, 1993.
 - 22) 朝倉正, 関口理郎, 新田尚: 気象ハンドブック, 朝倉書店, pp. 133-134, 1995.
 - 23) 谷岡康, 福岡捷二, 岩永勉, 傅雲飛: 都市中小河川流域規模を対象とした短時間雨量の変動特性と短時間降雨予測の試み, 水工学論文集, 第39巻, pp. 55-60, 1995.
 - 24) 谷岡康, 福岡捷二, 傅雲飛, 岩永勉: 都市中小河川流域規模を対象とした短時間降雨予測の試み, 土木学会第50回年次学術講演会概要集第2部(A), pp. 34-35, 1995.
 - 25) 谷岡康, 福岡捷二, 傅雲飛: 都市中小河川流域規模を対象とした地上雨量計による短時間雨量の変動予測, 水工学論文集, 第40巻, pp. 273-278, 1996.
 - 26) 大倉博, 石崎勝義, 中尾宏臣, 森本陸世: レーダ雨量計を用いた短時間降雨予測, 第27回水理講演会論文集, pp. 349-354, 1983.
 - 27) 椎葉充晴, 高掉琢馬, 中北英一: 移流モデルによる短時間降雨予測手法の検討, 第28回水理講演会論文集, pp. 423-428, 1984.
 - 28) 財団法人日本気象協会: 防災システム(主に集中豪雨等)の開発—集中豪雨の実況監視, 予測および各種災害予知の表示システムの開発—, pp. 4-10, 1987.
 - 29) 山崎真一, 増田懋隆, 新庄興: 石狩川の降雨特性に関する研究, 第33回北海道開発局技術研究発表会, pp. 227-232, 1989.
 - 30) 伊藤繁之, 福岡捷二, 谷岡康: 都市中小河川流域における雷雨性降雨の時空間変動特性, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集第2部, pp. 168-169, 1996.
 - 31) 二宮洗三: 雨とメソ・システム, 気象学のプロムナード2, p. 189, 東京堂出版, 1989.

(1996. 12. 17 受付)

A STUDY OF CHARACTERISTICS OF SHORT-TERM RAINFALLS IN SMALL URBAN RIVER BASINS

Yasushi TANIOKA, Shoji FUKUOKA, Shigeyuki ITO, Yukiya KOYAMA
and Yunfei FU

For adequate river management, flood fighting and flood control in urban small river basins, it is important to understand the characteristics of short time rainfalls in small catchments, including rainfall's migration, their rise and decline, as well as the time-space distribution. Concentrated shorttime thunderstorms and widespread longtime rainfalls of typhoons are the main cause of flooding in urban small river basins. In this study, the characteristics of short time, 5-30 minutes rainfalls within 23 square km area of thunderstorms and typhoons are studied based on the densely-observed data from the gauging station network in Tokyo. The possibility of short-term rainfall prediction is considered from the analysis of these characteristics.