

XバンドMPレーダ情報に基づく 局地的短時間豪雨の雨域性状の確率論的評価

STOCHASTIC EVALUATION OF RAINFALL DISTRIBUTION OF LOCAL HEAVY STORMS BASED ON X-BAND MP RADAR INFORMATION

原田守博¹・羽澄貴史²
Morihiro HARADA and Takafumi HAZUMI

¹正会員 工博 名城大学教授 理工学部社会基盤デザイン工学科 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)
²学生会員 名城大学大学院生 理工学研究科建設システム工学専攻 (〒468-8502 同上)

In recent years, the local heavy storms rise frequently and have caused flood disasters in urban areas in Japan. Due to unexpected and disorderly behavior of the local storms, their actual conditions are unknown from observation by rain-gauge networks on the ground. This research aims to verify the rainfall information by the X-band Multi-Parameter radar, and to clarify the temporal and spatial characteristics of the local storms based on the radar information for consideration of influence on the flood runoff of urban streams. After the accuracy verification of the radar rainfall data by comparing the radar and the ground rain-gauges, efficiency of the average rainfall over watershed based on the rain-gauges are inspected by the radar data in the watershed. From the viewpoint of the random field, the stochastic properties of the heavy storm distributions are evaluated with the variogram of radar data.

Key Words : local heavy storm, X-band multi-parameter radar, average rainfall over watershed, Thiessen Polygon method, random field, variogram, urban stream

1. はじめに

近年, 都市域ではヒートアイランド現象の深刻化ならびに高層建築物等による気流の変化に伴い, 局所的な積乱雲の発達に起因する局地的短時間豪雨, いわゆる“ゲリラ豪雨”が頻発し, 各地で浸水被害が発生している。とりわけ2013年は, 太平洋高気圧の勢力が弱まり, 上空に湿った空気が入り込み大気が不安定化したことにより, 豪雨の発生回数が全国平均で前年比2.7倍に達した¹⁾。

集中豪雨には前線への暖湿気流の流入に起因した停滞性の線状降水帯²⁾によるものが知られているが, 孤立した対流セルに起因するものも含め, 局地的短時間豪雨はその突発的な挙動のために, 従来の地上雨量計網では捕捉しきれない。したがって, 豪雨域が時間的空間的どのような性状であるか不明なだけでなく, 地上雨量計に基づく流域平均雨量にも大きな誤差が含まれている可能性がある。また, そうした豪雨を受け止める河川流域における流出現象への影響も定かではない。すなわち, 局地的豪雨の時空間特性や流域のスケール等の諸特性と洪水流出過程との係わりを評価することも求められている。

国土交通省では, 従来からのCバンドレーダに加え, こうした局地的豪雨を捉えるために2010年から都市域を中心に高精度なXバンドMPレーダを配備し, 降雨強度の画像データを1分毎に配信している。さらに, レーダ降雨情報に基づく豪雨の発生予報や河川の出水予測に向けて, 活用のための研究も鋭意進められている³⁾。

本論文は, 局地的豪雨による都市河川の洪水流出への影響を評価する第一歩として, XバンドMPレーダによる降雨情報を検証するとともに, それを活用して局地的豪雨の時空間特性を考察するものである。具体的には, まず, XバンドMPレーダによる地上降雨の捕捉精度について, 名古屋市域に高い空間密度で配置された地上雨量計の観測データとの比較を通じて確認するとともに, 河川計画等で用いられる地上雨量計に基づくティーセン法による流域平均降雨の有効性についても検証を試みる。

つぎに, XバンドMPレーダ情報に基づき, 局地型豪雨の空間特性とその時間的发展について考察する。特に, 降雨強度の空間分布にはランダムな成分が含まれることから, ここでは確率場の概念に基づいた統計的な手法によって検討を進める。さらに, 都市の河川流域に目を移せば, 中小河川は流域面積が小さいゆえに, 局地的豪雨

に対して非常に脆弱であると考えられる。本研究の成果は、豪雨の時空間特性が都市河川の洪水流出過程に及ぼす影響について考察する基礎となるものである。

2. 対象とする降雨事象

本研究で対象とする降雨として、最近において名古屋市域で避難勧告が出された2つのケース（Case-AとCase-B）を選定した。Case-A（2011年9月20日、台風15号豪雨）は、図-1のように停滞した秋雨前線に台風が接近する状況での長時間にわたる豪雨で、細長い雨域が移動しつつも、その背後で次々と強雨域が発生していたことから、バックビルディング現象を伴う線状降水帯による豪雨と見られる。この日、名古屋地方気象台では24時間降水量が223.5mmに達した。CASE-B（2013年9月4日）は、図-2のように低気圧に伴う前線が日本列島を東西に移動する過程での短時間豪雨で、東海地方には太平洋の湿った暖気流が南方より流入する状況にあった。名古屋市中区・港区等で最大時間降雨110.0mm/hrを記録している。

3. レーダ雨量の地上雨量計との比較検証

(1) 高密度地上雨量計群によるレーダ雨量の精度検証

濃尾平野では名古屋都市圏を覆うように、一宮・安城・鈴鹿の3か所にXバンドMPレーダが配備されている。ここでは地上降雨に対するその有効性について、Case-Aの豪雨を対象に検証しておく。検証を行う地域は図-3に示す名古屋市域を含む東西約25km、南北約28kmの範囲とした。この範囲は上記3か所のレーダからそれぞれ半径60km以内に位置しており、約250m四方の地域メッシュ10710個において3基のレーダにより合成されたレーダ雨量が与えられている。なお、降雨減衰の影響による欠測については考慮していない。一方、対象範囲には図のように気象庁・国土交通省・愛知県・名古屋市所管の転倒マス型雨量計が合計46ヶ所設置されており、高密度の地上雨量計データを用いてレーダ雨量データと比較することにより精度検証を行うことができる。なお、レーダ雨量のデータは1分間隔の降雨強度であるため、地上雨量計の10分間雨量に単位を合わせて比較を行った。

図-4は Case-Aの期間：9月20日11:00～17:00において、図-3の地点(a)(b)(c)の地上雨量計と、対応するメッシュのレーダ雨量の10分間積算値の時間変化を比較したものである。地点によって雨の降り方に違いはあるが、レーダ雨量は地上雨量計に類似した変動を示している。

図-5は、上記6時間の46地点における地上雨量と対応するメッシュのレーダ雨量との相関を示したものである。これによると、両者の相関係数は0.98と高く、レーダ雨量は地上雨量をよく捕捉していると判断できる。しかし、

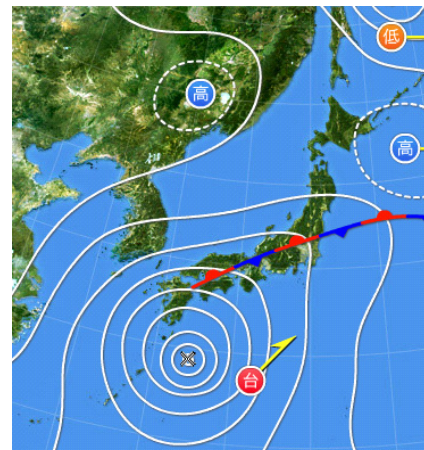


図-1 降雨 Case-Aの天気図（2011年9月20日15:00）



図-2 降雨 Case-Bの天気図（2013年9月4日18:00）

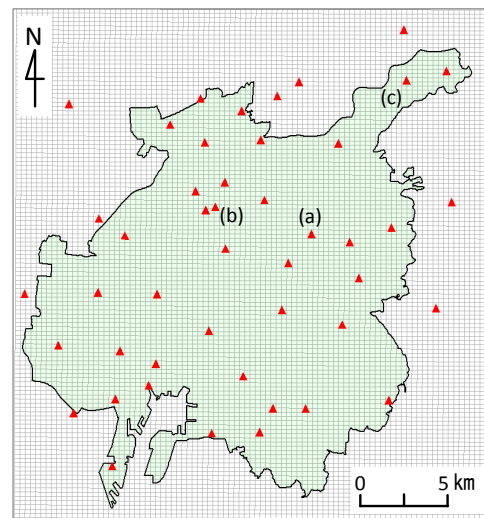
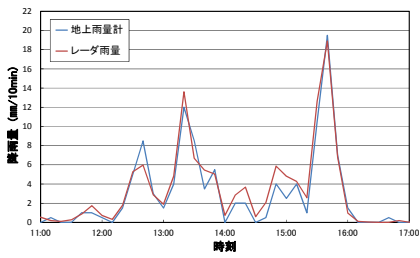
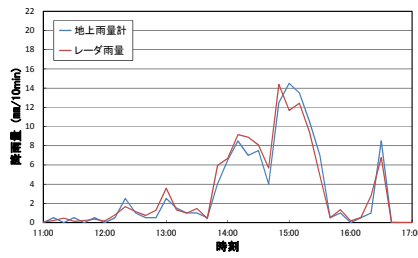


図-3 検証範囲と地上雨量計の配置

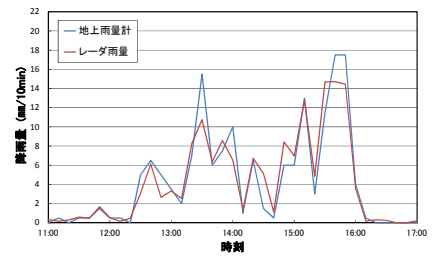
レーダ雨量の地上雨量に対する比を全プロットで平均すると1.09となり、全体としてはレーダ雨量の方が1割ほど大きな値となっている。さらに図を詳しく見ると、降雨強度が中程度までの範囲ではプロットは45度直線付近かやや上側に集まっているものの、降雨強度がさらに大きくなると、地上雨量計の方がレーダ雨量を上回っている。



(a) 名古屋地方気象台



(b) 名古屋市役所



(c) 名古屋市守山土木事務所

図-4 代表地点における10分間雨量の比較

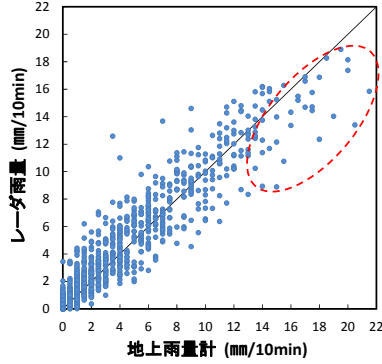


図-5 全データ (6時間46地点) の比較

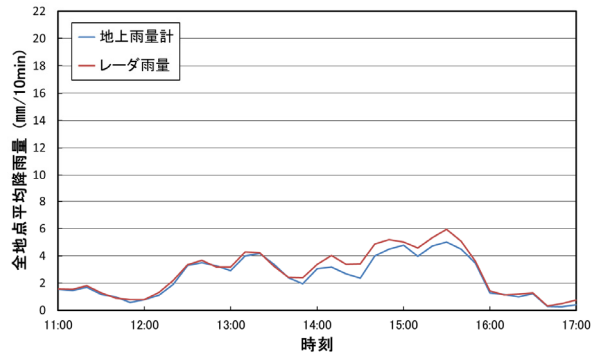


図-6 全46地点で平均した10分間雨量の比較

る。一般に転倒マス雨量計は、大きな降雨強度に対して過少な値を示すことが指摘されている⁴⁾ものの、レーダ雨量はさらに小さめの値を示していることになる。

図-6は図-4に示した地上雨量計とレーダ雨量の時系列データを各時刻で全地点について算術平均したものである。これによると、14:00～16:00の間でレーダ雨量が地上雨量計を上回っているほか、他の時間帯でもレーダ雨量の方がわずかに大きい結果となっている。これは、最強雨時を除いて、全体的にはレーダ雨量の方が1割ほど大きいという図-5の傾向と符合したものと考えられる。

図-7は、地上雨量計の観測値を真値とした場合のレーダ雨量の誤差の頻度分布を調べたものである。すなわち、図-5で示したデータにおいて、レーダ雨量から地上雨量計の値を差し引いた値のヒストグラムである。全体的に誤差は -1.0～1.5 mm/10minの間に集まっており、標準偏差は1.33 mm/10minであった。地上雨量計の観測単位が0.5mmであることを考慮すると、-0.5～0.5 mm/10minの区間の誤差はやむを得ない。以上のことから、都市域などの平坦な地形の流域においては、XバンドMPレーダの観測雨量は地上雨量計に対して誤差が極めて小さく、豪雨に対して十分な捕捉可能性をもつといえよう。

(2) 地上雨量計に基づく流域平均降雨の有効性評価

局地的短時間豪雨は時間的な変動が激しいだけでなく、空間的にも複雑な挙動することから、従来の空間的に疎らな地上雨量計網では捕捉しきれない。それゆえ流域面積の小さい中小河川の場合、数少ない地上雨量計に基づきティーセン法などによって算出される流域平均雨量には大きな誤差が含まれている可能性がある。ここでは名

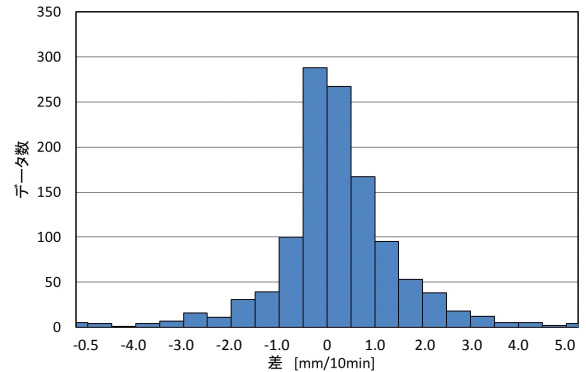


図-7 地上雨量とレーダ雨量の誤差分布



図-8 植田川流域の位置

古屋市を流れる都市河川・植田川を対象に、前項で精度が検証されたXバンドMPレーダ情報を用い、流域内のレーダ雨量の合計値とティーセン法による算出雨量を比較することによって流域平均降雨の妥当性を検討した。

植田川は、図-8に示すように名古屋市東部を流れる流路延長4.8km、流域面積21.0km²の二級河川である。流域には2本の地下鉄路線が通り、市街地が広がる典型的な都市河川である。流域とその周辺に地上雨量計はわずか4ヶ所で、ティーセン分割は図-9に示すような粗いものとなる。これに対して、XバンドMPレーダ雨量は図-10に示す377の地域メッシュで与えられる。流域境界のメッシュデータは面積按分にて補正する。対象降雨は前項と同じCase-Aとし、9:00~17:00の8時間を解析した。

図-11は、植田川の流域平均降雨について、地上雨量計によるティーセン雨量と流域内のレーダ雨量の合計値を比較したものである。図より、地上雨量計による流域平均降雨はレーダ雨量に基づく値に比べて時間的変動が激しく、ピーク値とボトム値がともに大きく振れている。すなわち、降雨強度の大きい時にはティーセン雨量がレーダ雨量を上回ることが多いが、逆に降雨強度の小さい時にはレーダ雨量を下回る値となっている。

これは、空間的に大きな変動性をもつ豪雨分布に対して、一部の地上雨量計が大きな雨量を観測すると、それがティーセン法による平均雨量を押し上げる結果となるためと考えられる。今回の場合、図-9右上の地上雨量計が他とは異なる大きな変化幅を示していた。言い換えれば、数少ない地上雨量計によって流域平均雨量を求める従来の手法では、地点データの変動が全体の値に大きな影響を与えている。一方、レーダ雨量に基づく流域平均降雨値は、たとえ中小河川であっても、流域を構成する微細なメッシュでの雨量を用いているため、一部の地点データによる値の偏りが出にくい。以上の結果は、空間的な変動が激しい局地的豪雨の場合、流域面積の小さい中小河川では、地上雨量計に依存した従来手法による流域平均降雨の評価には問題があることを示唆している。

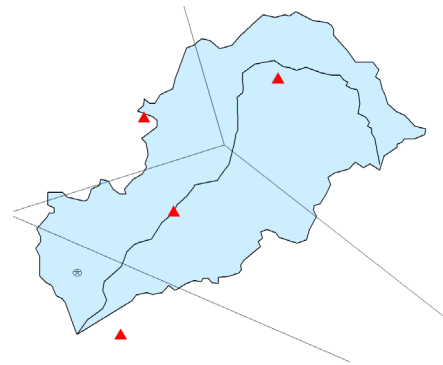


図-9 植田川流域におけるティーセン分割

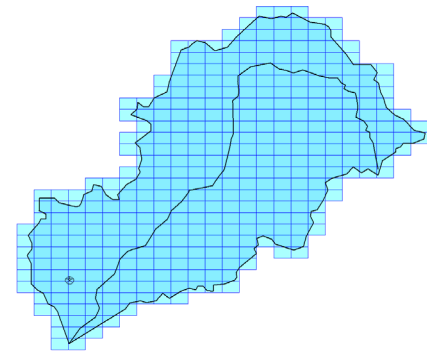


図-10 植田川流域における地域メッシュ網

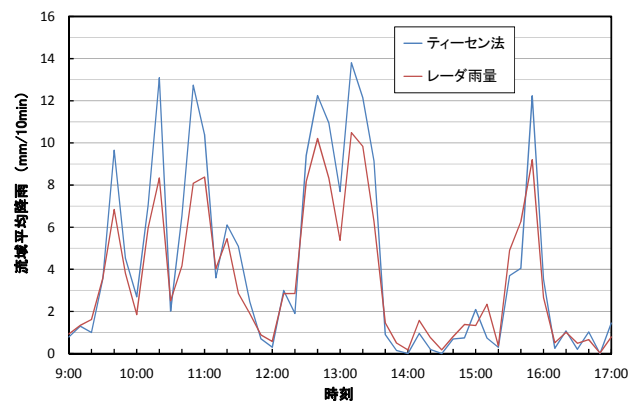


図-11 植田川流域における流域平均雨量の検証

4. 局地型豪雨の時空間挙動の確率論的解析

(1) 豪雨域の空間特性に関する統計的評価手法

前章の結果を受け、ここでは局地的短時間豪雨の時空間変動特性を確率論的な立場から検討することを試みる。すなわち、空間的に複雑に変動する現象の地点観測データを確率場の実現値と見なし、確率変数のバリオグラムを求めることによって、現象の空間的な変動特性を定量化する。バリオグラムとは、確率変量のランダム性と空間的な相関構造の両者を表わす関数であり、式(1)で定義される⁹⁾。ここに、 $Z(x)$ は地点 x における状態量であり、本研究では図-3に示した対象範囲内における各メッシュでの毎分のレーダ雨量 (単位: mm/hr) が該当する。

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= \frac{1}{2} E \left[\{Z(x) - Z(x+h)\}^2 \right] \\ &= \frac{1}{2N(hij)} \sum_{i,j}^{N(hij)} (Z_i - Z_j)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

バリオグラム $\gamma(h)$ は、距離 h はなれた 2 地点 ij が $N(hij)$ 組存在する時、両地点における降雨量 Z_i と Z_j の差の集合平均の 1/2 を表わしている。等方的な二次元定常確率場において、バリオグラム $\gamma(h)$ は $Z(x)$ の分散と共分散の差に相当する。その場合、通常、地点間距離 h の増加に対して増大したのち、一定の値で安定する形を取ることが多い。一定値に漸近するまでの距離 **range** は確率場の空間的相関性を表わす距離であり、一定値 **sill** は確率場のランダムな変動性を表現する。

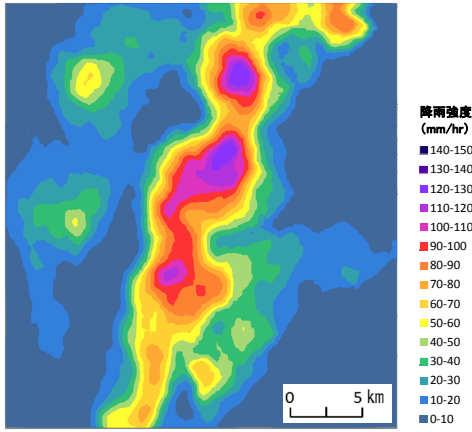


図-12 Case-Aにおけるレーダ雨量の空間分布
(2011年9月20日15:20)

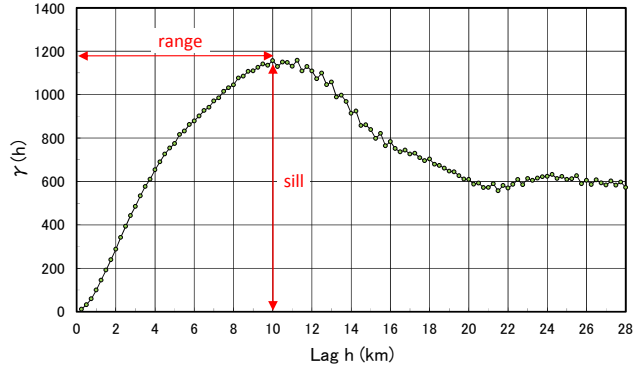


図-13 図-12の降雨分布のバリオグラム
(2011年9月20日15:20)

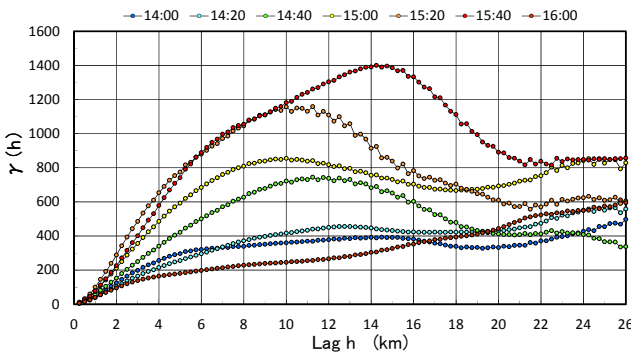


図-14 Case-Aにおけるバリオグラムの時間的发展

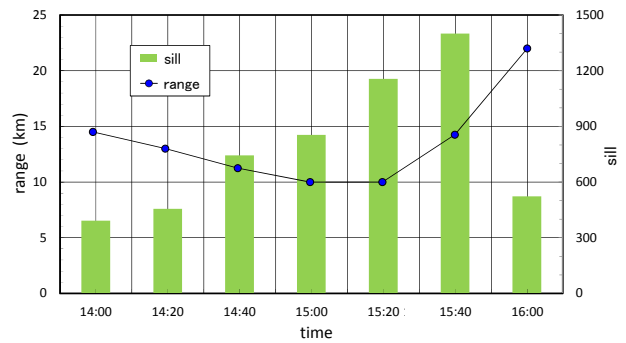


図-15 Case-Aにおけるrangeとsillの時間的变化

(2) 豪雨域の統計的空間構造とその時間的发展

豪雨の空間分布を確率場として捉えるとき、場の等方性と定常性が成り立つかどうかは重要な問題である。例えば山岳地域などにおける降雨分布には、地形の効果に伴う確定的なドリフト成分⁶⁾が含まれる可能性がある。しかし、一般的な流域において、前線の予想位置などの事前情報から雨域の形状や降雨強度分布を確定的に定めることは容易でない。以上の観点から本研究では、線状降水帯による降雨も、孤立した対流セルによる局地的豪雨も、共に定常確率場の実現値として捉えることにする。

Case-Aの一連の降雨において、最も雨の激しかった時刻のレーダ雨量の空間分布を図-12に示す。図から、降雨強度が130mm/hr近い地点を含んで50mm/hrの強雨域がほぼ南北方向に線状に連なっている様子が分かる。

このレーダ雨量の分布について、対象範囲のすべてのメッシュに対して求めたバリオグラムを図-13に示す。解析に用いたサンプル数は、地点間距離 $h=14.25\text{km}$ で最大の $N=780041$ 組、図中で最も離れた $h=26\text{km}$ でも $N=192220$ 組に達しており、本解析のバリオグラムは膨大なデータから得られた結果と言ってよい。図を見ると、この時刻のバリオグラムは一定値に漸近せず、距離 h に対し増加したのち低下する形状となっている。これは地球統計学において、例えば粘土地盤の中に線状に砂礫層が存在する地層の特性を解析した場合に現れるホール効

果 hole effect⁷⁾ と同様のものと見なすことができる。このバリオグラムの形状は、図-12で示したように雨域が線状に分布する場合の特有のものと考えられる。

次に、バリオグラムの形の時間的变化を見てみよう。図-14は、図-13の最強雨時刻15:20を含む時間帯のバリオグラムを20分おきに示したものである。降雨の比較的弱い初期時刻では緩やかな曲線となっているが、雨が強くなるにつれてホール効果が表れてきている。各曲線におけるrangeとsillを図-13のように読み取り、それらの時間变化を図-15に示す。この図より、時間とともにrangeは徐々に短縮、sillは逆に増大しており、強雨域が孤立し、空間的変動が激しくなっていることを表している。

Case-Bの豪雨についても同様に解析した。降雨分布の一例を図-16に示す。図中の北部と南部に見られる強雨域では145mm/hrの降雨強度となっている。この時刻を含む時間帯における全メッシュの降雨強度の平均と最大値および分散の変化を図-17に示す。時間とともに強雨域が広がり、空間的変動も増大していることが分かる。

図-18は、同じ時間帯のバリオグラムを10分おきに示したものである。各曲線から読み取ったrangeとsillの時間变化を図-19に示す。sillの値は、図-17の分散の変化に対応して、降雨が激しくなるとともに増大、rangeも短くなっている。sillの値はCase-Aよりも大きい、rangeの最小の値はCase-Aと同じく10km程度である。過去に

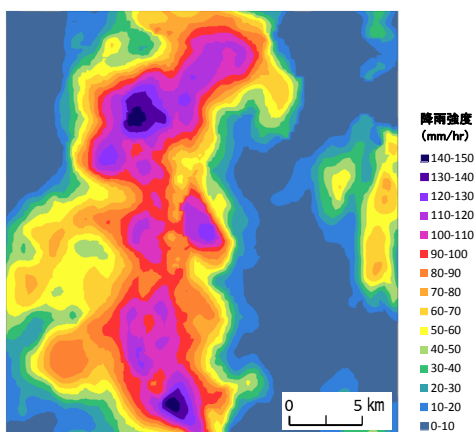


図-16 Case-Bにおけるレーダ雨量の空間分布
(2013年9月4日16:51)

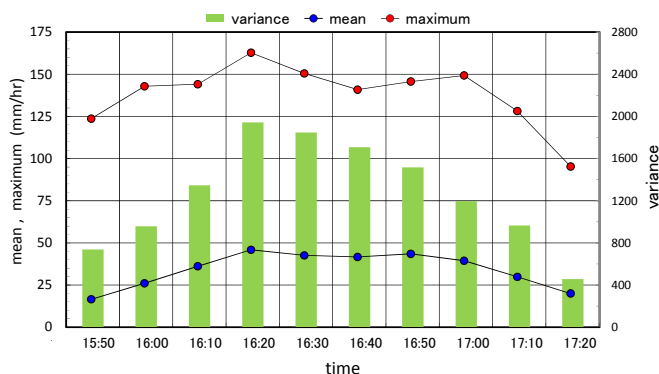


図-17 全メッシュでの降雨強度の平均・最大値・分散
(2013年9月4日15:50～17:20)

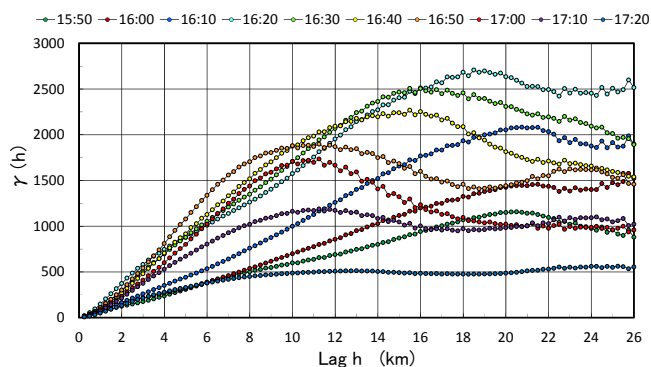


図-18 Case-Bにおけるバリオグラムの時間的发展

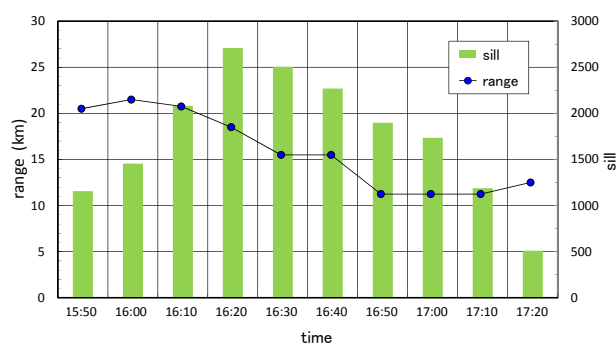


図-19 Case-Bにおけるrangeとsillの時間的变化

降雨の成因別に降雨の空間相関を求めた例⁸⁾があるが、上記の値はそれを大きく下回っている。実際の最強雨域のスケールは図-12や図-16から読み取ると2～4kmであるが、雨域全体が細長く連なっているため、対象範囲全体としては平均されて大きめの値となる。雨域の形状に関する事前情報がない状況下では、10kmという値は局部的豪雨における相関距離の一つの目安と考えられる。

5. おわりに

局所的短時間豪雨が都市河川の洪水流出に及ぼす影響を評価する第一歩として、名古屋市域で避難勧告が出た豪雨を対象に、レーダ降雨情報を用いて豪雨域に関する種々の検討を行った。得られた知見は以下の通りである。

- (1) XバンドMPレーダによる地上降雨の捕捉精度について、高密度の地上雨量計データと比較した結果、レーダ雨量は十分な精度を持つことを確認した。
- (2) 地上雨量計に基づく流域平均降雨の有効性について、都市河川を対象にレーダ雨量を用いて検証した結果、ティーセン法による流域平均降雨は一部の雨量観測値に過剰に影響を受けることが示唆された。
- (3) 豪雨域の時空間特性について、レーダ雨量を用いて確率論的な立場から検討した結果、得られたバリオ

グラムはホール効果を備えたもので、雨量の増加につれてsillが増大、rangeは短縮する様子が示された。

謝辞：本研究の遂行に当たり、貴重な観測データを提供いただいた行政関係部局に感謝申し上げます。また、卒業研究の一環としてデータ整理に協力いただいた名城大学理工学部建設システム工学科の学生諸君に謝意を表す。

参考文献

- 1) (株)ウェザーニュース：2013年の夏の“ゲリラ雷雨”傾向の中間まとめ、朝日新聞デジタル、2013年8月21日。
- 2) 藤部文昭：「都市の気候変動と異常気象 一猛暑と大雨をめぐって」、pp.118-121、朝倉書店、2012。
- 3) 国土交通省・国土技術政策総合研究所：XバンドMPレーダに関する技術研究開発成果発表会 資料-2、2013。
- 4) 高橋博(編)：「豪雨・洪水防災」、407p.、白亜書房、1987。
- 5) 青木謙治(監訳)：「地球統計学」、pp.40-44.、森北出版、2003。
- 6) Brass, R.L. and Rodriguez-Iturbe, I. : Random Functions and Hydrology, pp.412-424, Addison-Wesley Pub., 1985.
- 7) Journel, A.G. and Huijbregts, Ch.J. : variogram with hole effect, *Mining Geostatistics*, pp.168-171, Academic Press, 1978.
- 8) 吉野文雄：「レーダ水文学」、pp.78-79、森北出版、2002。

(2013. 9. 30受付)