

都市河川流域が対象とする降雨現象

CHARACTERISTICS OF RAINFALL IN A SCALE OF URBAN RIVER BASIN

中北英一

Eiichi NAKAKITA

正会員 工博 京都大学助教授 都市環境工学専攻 (〒606-8509 京都市左京区吉田本町)

This paper reviews part of related researches on characteristics of rainfall in a scale of urban river basin including radar hydrology, frequency analysis. Also a research that investigates effectiveness of distributed rainfall information by weather radar in the scale is reviewed. The research was based on runoff analyses with a distributed runoff model and radar information.

Key Words : Radar hydrology, Abnormal rainfall, Rainfall distribution, Distributed runoff model, Up-scaling of rainfall distribution, Urban hydrology

1. はじめに

ここ数年、都市水害が以前に比べて一見頻発しているような印象が強い。平成10年の高知市、新潟市の都市水害、平成11年の福岡市、東京都の都市水害、そして平成12年の名古屋市周辺、平成15年福岡市の都市水害である。しかし、昭和57年の長崎大水害、平成5年の鹿児島豪雨災害(8・6水害)、平成10年の那須豪雨による水戸市水害も都市水害である。ただこれらの中で、最近特にクローズアップされているのが地下街や地下鉄等の地下空間の浸水であるが、地下鉄の浸水は最近だけのことではないのも確かである。

ところで、都市水害と一言にいても、河川の水が溢れて生じる外水氾濫と雨水を下水道等によって排除できずに生じる内水氾濫とに分けられる。もちろん、両者が複合する場合も多々ある。どちらの形で氾濫が生じるかは、河道や下水道の硫化能力、排水先河川の水位を通して、雨の降り方に依存する。梅雨前線や熱雷等によって都市部やその周辺に豪雨が集中してもたらされる場合は、内水氾濫や都市部周辺の中小河川の外水氾濫をもたらすし、梅雨前線や台風により上流の山間部で継続して豪雨がもたらされる場合はわが国で言う大河川による外水氾濫が生じる。平成11年の福岡、東京、平成12年の名古屋市の都市水害は前者による典型であり、平成10年の水戸市の水害は後者による典型である。

さて、最近多くなったのではといわれているのは前者による水害、すなわち平成11年の福岡・東京の水害のように内水氾濫や都市部周辺の中小河川の外水氾濫である。そして、その原因となる都市型豪雨が多くなってきてい

るからではないかともよくいわれる。確かに、時間雨量や日雨量の記録が更新されるという事実もあるし、都市化や温暖化が原因となる定性的な理屈はあるが、本当に頻発化しているのか、また、そうであっても、都市化や温暖化によるものなのかはまだ客観的には断定できないというのが現状である。

2. 都市水害をもたらす豪雨

集中豪雨は大気の大規模な現象である。一般的に降水現象はその空間・時間スケールによって階層的な構造をなしており、メソ α スケールという200km~2000kmの規模をもつ大気環境場(たとえば日本列島を横断する梅雨前線)の中で生起するにしても、直接的にはより小スケールのメソ β スケールという20km~200km程度の規模をもつ降雨現象(梅雨前線内に発達するメソ低気圧)によってもたらされ、さらにそれは内在するメソ γ スケール(2km~20km)の現象(雷雲・雷雨といった積雲対流)によって構成されている。すなわち、メソ α スケールの場の中で、ある特定の山岳域(海洋上の島も含む)が直接、あるいはそれが作り出す下層風の収束場が誘因となって持続的に同一場所で繰り返す積雲対流が生起し、生起後に独自に成長した気流により順次発生する幾つかの積雲対流が自己組織化しながら、寿命が1時間以下の単独の積雲対流より長い安定した組織としての寿命を保持し、発達しながら一定地域上空に繰り返し到来することにより局地的な降雨をもたらすという様相である。以上述べたことは、「大スケールでの大気環境に内在する擾乱」と「山岳地形や都市によって作り出される下層風の小ス

ケールの収束場」によってそのきっかけがもたらされ、それが大気固有の条件により自己組織化されるという、生物の内部組織（内蔵）の自己組織化に類似した様相を呈するということにつづる。これは、1982年の長崎豪雨、1983年の山陰豪雨、1986年の京都府南部豪雨や、最近での1993年の鹿児島県豪雨、1998年の那須豪雨、2000年の名古屋の豪雨などのような集中豪雨に共通の様相である。

さて、雷雲・雷雨には、強い日射による熱的不安定で同一気団内で発生する「熱雷」、寒冷前線など異なった気団の境界で発生する「界雷」、発達した低気圧や台風の周りの上昇流で発生する「渦雷」に大まかに分けられる。局所的な集中豪雨は梅雨前線に伴う界雷によってもたらされることが多いが、夏型気圧配置のなかで生起する熱雷も都市水害をもたらす。大気上層に寒気が進入してきている状況下で、大気下層が日射によって暖められた時に発生する。一般的には、山越えをする上昇気流と相俟って午後の早い時期から山岳部一体でまず発生する。ピークは15時頃である。発生した熱雷は風速の高度分布に応じて伝播し、下層から上層に至る風の状況が条件を満たせば上記したような自己組織化をして数時間の寿命を得ながら都市域にも移動してくる。もし、都市域でも日射に伴う都市の熱環境により大気下層が暖められていたり海陸風等により下層の気流に収束があれば、自己組織化された雷雨はそのまま維持されたり強化されたりもする。また、同じ条件が整っていれば都市域でも15時を中心に熱雷が発生するが、山岳起源のものに比べれば発生頻度はかなり少ない。以上を、まとめると、夏期に都市域で豪雨をもたらす熱雷のほとんどは山岳起源のものであり、都市域に移動してきたものが都市の熱・風環境により、強化・維持されて夕方以降局地的な豪雨をもたらす。

3. 豪雨予測の現状

メソ β スケールの現象の環境の場となるような大きなスケールであるメソ α スケールや総観スケール（2000km以上）に関する大気現象の予測は、気象庁の数値予測によって実現しており、日々の天気予報ですばらしい情報を提供してくれている。ただし、水蒸気量（湿度）や降雨に関しては気温・気圧の予測に比して若干精度が落ちるのも確かであり、大気中水象の予測の難しさを物語っている。一方、まだ解明すべきところは存在するものの、メソ α スケールの現象はその本質がかなり理解され、予測ではないものの、現象の再現がコンピュータによる数値実験によって実現している。しかし、その中間のスケールに属するメソ β スケールの現象の力学的理解並びに予測手法の開発は遅れている。これらが実現されれば6時間程度先の、しかも数値予測より空間的に詳細な降雨予測が実現する。もちろん、定性的な状況は前記した

ようにある程度把握されているが、それがどの程度の降水量をもたらしかつどういうメカニズムで生起するのかは未知な部分が多い。その実時間での実用的な予測を実現するのは、気象学の役目であり、洪水の予測や土砂災害の予知に責任を負っている土木工学の役目である。このような意味からメソ β スケール以下の規模の現象を扱う必要のある集中豪雨の実態解明並びに予測は、気象学と土木工学間の重なり合う境界領域をなしている。

さて、数時間先の降雨分布を数kmの分解能で予測する手法は「短時間降雨予測手法」と呼ばれ、「運動学的手法」、「降雨の概念モデルによる手法」、「メソスケールモデルによる手法」に大きく分類される。最後の二つは、準気象学的手法、気象学的手法ともそれぞれ呼ばれる。

実用化されている予測手法は、メソ β ～ α スケールの観測分解能を持つレーダー情報や気象衛星情報で監視している降雨分布の移動パターンを捉えて予測するという「運動学的手法」が主力である。最近ではカオスやニューラルネットワークを用いたものまで様々なバリエーションがあるが、気象庁や国土交通省によって実践的な手法として日々利用され我々に有効な情報を提供してくれている。また、幾つかの政令指定都市では、より

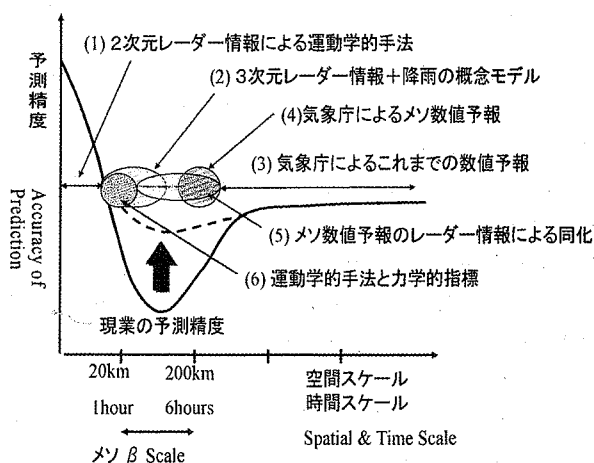


図-1 降雨予測精度の模式図

きめ細かな独自のレーダー観測情報を用いて予測システムを構築し、下水道システムの流量予測についてはポンプの実時間制御に結びつける努力がなされている。ところが、運動学的手法で実用上予測が可能なのは、我が国の大河川流域での洪水予測・貯水池制御に必要な情報としては1時間から精々2時間程度先まで、中小河川や都市域での雨水排除のために必要なより空間的に細かな情報としては30分程度先までである。

一方では、物理的、気象学的な知識を取り入れた短時間降雨予測手法の開発が進められてきている。その一環として、現在種々の気象学的、準気象学的手法がある。気象学的手法とは予測領域を空間分割して、その一単位

ごとに、大気の支配方程式を数値積分し、計算単位ごとの物理量を算定する手法(数値予報)である。気象庁では10km程度の分解能を有する数値予報(メソ数値予報)を現業化しており、さらにレーダーその他の観測情報による同化システムの深化、局地的な現象により即した物理過程の導入を図っている。

また、準気象学的法は大気の支配方程式を厳密には追いかけていないが、「降雨の概念モデル」を導入することで、大気中の水・熱収支を考慮するだけでなく立体的かつ高分解能なレーダー情報を物理情報として実時間で利用できるようにして、可能な限り気象学的に降雨予測を行う手法である。現在、山岳域での大雨の予測を主眼として、国土交通省近畿地方整備局で運用されている¹⁾。すべての降雨現象に有効と言うわけでないが、大雨、特にそれが地形の影響を強く受けている時に効果を発揮する。

4. 地球温暖化と降水^{2), 3)}

4.1 気候モデルによる結果

地球規模の降水量は、温暖化によって空気中に含むことのできる水蒸気量が増加し、凝結によってできる雲が増加するということが、地球全体の降水量が増加すると考えられている。実際に、様々な大気・海洋大循環モデル(気候モデル)による数値計算結果では、値にばらつきがあるものの、温暖化により地球全体の降水量が4~15%増加するという結果を得ている。しかし、特定の地域での降水量の変化についての確信ある予測は、大気・海洋大循環モデル(気候モデル)による現在の数値計算では、今のところ困難である。ましてや、集中豪雨が温暖化で頻発化するかどうかを気候モデルで予測することは今のところ困難である。

4.2 温暖化と台風・集中豪雨

4.2.1 熱帯性低気圧(台風、ハリケーン、サイクロン)と温暖化

水蒸気が雲に凝結するときに放出される熱(潜熱)が熱帯性低気圧のエネルギー源となるため、発生は海面水温が27度以上の海域に限られている。海面水温の高い海域では蒸発が盛んなので空気中に含まれる水蒸気量が多いからである。したがって、温暖化により台風の勢力が増すはずであるが、果たしてどうであろうか。

気候モデルによる数値シミュレーションは、台風の年間の発生個数等の現在の状態をうまく再現しているが、二酸化炭素を倍増させたシミュレーションでは答えがまちまちである。雲の取り扱いにより答えが非常に敏感になるからである。一方では、発生数に関する過去のデータからは温暖化による兆候は見られない。最大風速は、40年間の台風に関するデータではその値が増加傾向にあるとはいえないが、100年間のハリケーンに関するデータからは増加傾向にあると考えられている。

4.2.2 地雨性の降水、驟雨性の降水と温暖化

世界各国の洪水災害が立て続けに報告されている中、豪雨をもたらす驟雨性の降水は増える傾向にあるのだろうか?気候モデルによる温暖化の数値シミュレーション結果の共通点として、1)地球全体の降水量が4~15%増加する、2)降雨域の面積が減少する、3)熱帯以外の地域では「驟雨性の降水」が増加する、が予想されている。これは、温暖化により下層の大気の方が大きく昇温するので、大気が不安定化して対流現象が促進されるからである。こういった、不安定化傾向は我が国において統計的に有意に確認されている。

実際過去のデータから日雨量の最大値を調べてみると、世界最大や日本の最大や第二位の日雨量は今世紀後半に発生している。たとえば、マダガスカルで1870ミリ(1952年)、徳島木頭村で1114ミリ(1976年)、長崎県西郷で1109ミリ(1957年)である。また、過去の記録を破る最大日雨量の出現頻度が増加しているのも確かである。ただし、ある特定の場所であるという意味ではなく、日本のどこかで記録が破られるという意味においてである。

4.3 最近のわが国に関する解析事例⁴⁾

他の最近の解析事例によると日本全体の年降水量は減少傾向にあるが、数十年スケールの変動がある。1930年代頃に減少した後、1950年代にかけて増加し(戦後の洪水期)、1960年代以降は減少している。もちろん、地域や季節によってもトレンドの違いがある。

日本全体で平均した年降水量の標準偏差、正確には100年平均値からの偏差を標準偏差(100年)で正規化した値の分散は、100年を25年毎に分割した4期間で、観測地点ごとに異なるが、第4期(1976年~2000年)のみ他期間に比べて大きい方にずれている(K-S法による検定で、5%の危険率で有意)という報告事例がある。それによれば冬は、第1期(1900年~1925年)に比べると分散が有意に減少。春・夏・秋のそれぞれは、他の期間に比べて有意に増加し年降水量の分散の増加は、冬以外の降水量の分散の増加による。上記のことは、気温にも言える。また、1970年頃と1990年頃の20年平均の信頼区間を比較すると、前半20年間と後半20年間を比較すると、冬を除いた3季節で、気温減率の有意な長期的増加(大気的不安定化)が認められる。

5. 都市化が降水に及ぼす影響

都市化が降水量に与える影響としては、主に降水量を増加させることが考えられ、その主な要因としては、以下の3つが考えられている。すなわち、

- (1) 都市による熱放出(顕熱と人工排熱)の増大(ヒートアイランド現象)が下層大気を不安定化させることにより上昇流が生起する(あるいは位置

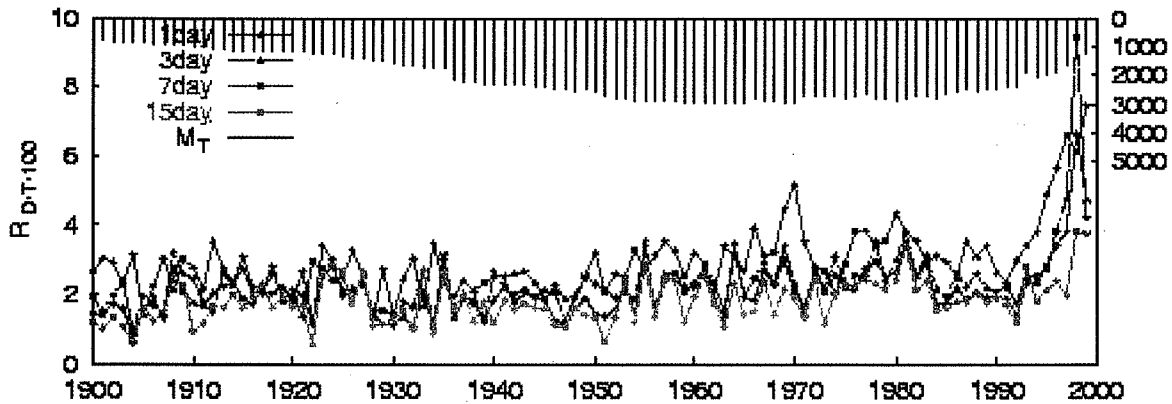


図-2 再現期間が100年以上の年最大D日雨量の世界での面積的生起割合の変遷⁹⁾

をシフトさせる)

- (2) 都市による空気力学的粗度（摩擦）の増大が水平風速が収束促すことにより上昇流が生起する
- (3) 工場、車などから排気される汚染物質（エアロゾル）が降水粒子の核として働く

が挙げられる⁹⁾。(1)は、都市化の影響としてもっとも直接的に思い付く要因であり、規模としてはメソ γ ~ β スケール(2~200km)の現象に直接影響する。(2)は(1)よりも規模が大きいメソ β スケール(20~200km)のより継続的な上昇流を生起させると考えられる。(3)はより多くの雲粒を生じさせ、また粒径分布を広げる要因となるので、降水粒子への成長および降水粒子そのものの成長を促進するものと考えられる。

都市が降水に及ぼす影響を明確にして行くためには、特にわが国のような地形の複雑な場に置いては、過去のデータだけでは十分とはいえず、詳細で厳密なしかも継続的な観測を行う必要があるとともに、様々な条件を取捨選択できるという意味では雲物理過程も含めたモデルを通した数値実験が必要となる。

6. 諸外国での都市水害と降雨現象

アジアを含め諸外国の大都市には大河川に隣接したものが多く、それらの都市水害は、日本のように都市域が属する河川流域も含んだ都市域周辺の局所的な異常降雨によるものばかりではない。したがって、局所的な大雨という異常さだけを考えていては不十分である。すなわち、広域に異常に長期間降る雨も、異常降雨になる。

たとえば、2002年のヨーロッパ洪水災害のうちエルベ川の異常降雨は、通常程度の強度の降雨が広域に長期間もたらされたところに異常さがあり、その結果大河川沿いの主要都市において異常洪水がもたらされている。こういった洪水は我が国の河川にはない特長であり、アジアではメコン河や揚子江といった大河川に沿って位置する都市で問題となる。しかし、メコンデルタではモンスーン期にメコン河が月単位で越水することは、いわば

例年の事象であり、越水したからといっても異常洪水ではなく、したがって異常降雨ではない。しかし、プノンペンのような都市部は氾濫原の中のお囲い堤によって守られており、そこに越水するような場合は異常洪水であり、それをもたらした降雨は異常降雨となる。一方、2002年のヨーロッパ洪水の中でも、フランスローヌ川下流で生じた異常降雨は我が国ではよく生起して大きな被害をもたらす集中豪雨である。こういった集中豪雨で死者が多くでるのはヨーロッパでは極めて異常に属する。

図-2は、再現期間が100年以上の年最大D日雨量が、各年で、世界の陸域(雨量計情報が存在する領域)の何%で生じているかを示したものである⁹⁾(図の左軸)。ここで、D日としては、1, 3, 7, 15日を用いている。また、領域の割合を計算するのに、緯度経度で1度四方を単位メッシュとして、各メッシュの中の最大の非超過確率を示した雨量計情報による値を代表値として用いている。また、図上部から下に向う棒グラフは、各年に雨量計情報が存在したメッシュ数である(図の右軸)。この図から、降雨の継続時間にかかわらず、ここ10年間は100年確率を超える年最大降雨量の出現する領域の相対的な割合が増加してきていることを示唆している。また、特に1, 3, 7日の増加は、1900年以前のそれぞれの分散を大きく超えており、統計的にも有意であることがわかる。図には示さないが、50年確率においても同様の結果を得ている。どこかで記録が破られつつあるのではないかという、4. で示した視点を肯定している。

7. 中小河川における分布型降雨情報の有効性

7.1 基本的な考え

レーダー水文学としての取り組みの中、レーダーによる降雨観測、降雨予測はここ20年の進歩を経て、実用に供され、レーダー水文学の先進国ではそれらによって得られる分布型降雨情報を定量的な入力情報として流出計算を行い洪水予測や警報の発令に利用し始めている。しかし我が国では、レーダーによる地点降雨量推定精度が十分でないとの過剰反応から、レーダー情報が上記目的

に定量的に利用可能であるとの一般的認識に残念ながら達していない。果たして、レーダーによって地点降雨量が厳密に再現されない限り洪水流出計算へのレーダー情報の定量的な利用は不可能なのだろうか? そうではない。レーダーによる降雨情報は、空間的にも時間的にも高分解能に分布化された情報である。この分布化された降雨情報であるという利点が卓越する場合は、積極的にレーダー情報を利用してゆくべきである。このことは、すべてのリモートセンシングによる情報の利用における共通の視点である。その中、まずは流域スケールというパラメータを可変にした分布型流出モデルを作成し、流出解析を行った結果を簡単に示す⁷⁾。

7.2 解析方法

本研究でベースとして用いた流出モデルは市川⁸⁾によるものであり、OHYMOSと呼ばれる分布型流出モデルである。任意の領域ごとの地形モデルの分割や組み合わせが自由に可能である。また、流域流出系全体のモデルは、各部分流域に対する地形モデルに流れのモデルを適用し、それらの入出力関係に従って相互に接続することで成り立っている。

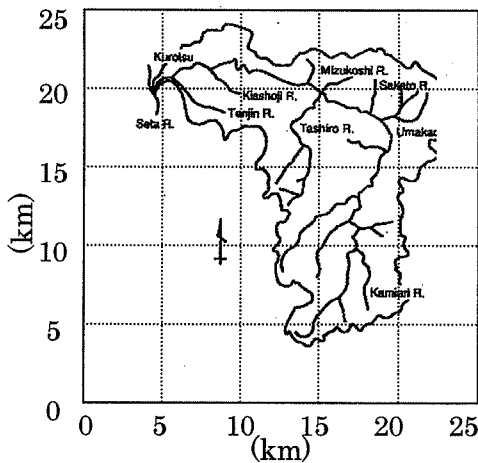


図-3 大戸川流域模式図

レーダー観測分解能による分布型降雨情報の有効性の感度を考慮して、仮想流域の作成に必要な基本流域には中小河川の大戸川流域を用い、拡大倍率は1倍と2倍とした。具体的には、実流域の標高データ、河道網流路位置データを高さ方向・水平方向ともに拡大した。ただし、1倍の場合は、流域の分割サイズは標高

データの分解能である50mとした。さらに、拡大した場合も分解サイズは50mで不変とした。

また、採用した大戸川流域は淀川水系瀬田川の支流で、流域面積は189.5km²、幹川長は38kmである。図-3を見てわかるように、流域は約25km四方に含まれるとともに、中・上流域が南北に長い流域形態をしており、雨域が東西方向を中心に移動することが多いことから、分布型情報の有効性が議論しやすい流域形態を持つ。

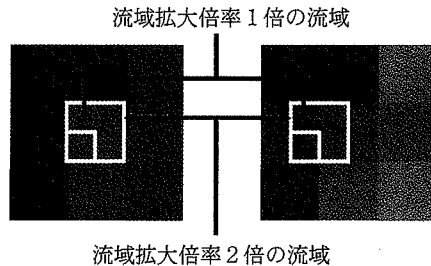


図-4 メッシュ位置差によるアップスケーリングの差異

7.3 分布型降雨情報のアップスケーリングの方法

用いた分布型降雨情報は、実際の降雨のレーダー情報である。空間分解能は1km、時間間隔は5分である。

一方、空間スケールについてはアップスケーリングの種類(メッシュ中心値か平均値)とメッシュサイズの大小で分類した(表-1)。メッシュ中心値、メッシュ平均値において50km、25km、13km、7kmの4つのメッシュサイズを選定したのは次の理由からである。仮想流域の基とした大戸川の流域が約25km四方の範囲に含まれる。仮想流域拡大倍率1倍、すなわち実流域の場合50kmメッシュではそのメッシュの4分割の一つが流域に対応し、一方では、25kmメッシュは流域の1分割、13kmメッシュは流域の4分割、7kmメッシュは流域の16分割に対応することになる。また、メッシュ代表値と平均値は表-1最右欄に記した意味を背景としている。ただし、メッシュ平均値は分布型降雨情報からでないと算出できない。

一方、メッシュサイズ50kmの場合には流域とメッシュとの位置関係によって、たとえば図-4のような違いが生じる。白色の四角は図-3に対応させた形で流域の位置を示しており、小さいほうがオリジナルサイズ、大きい方が2倍に拡大した流域を示している。

7.4 計算結果

降雨分布には、他の場所でのレーダー観測分布を利用

表-1 与えた分布型降雨情報の空間分解能による分類

| 元の分解能 | 1kmメッシュ | 基準となるパターン |
|---------|----------------------------|---|
| メッシュ中心値 | 50km, 25km, 13km, 7km メッシュ | 地上雨量計を代表値とし、ティーセン法等により流域の平均雨量を算定する場合に対応 |
| メッシュ平均値 | 50km, 25km, 13km, 7km メッシュ | 流域サイズより小さいメッシュサイズであればサイズによらず総流量が一定に保たれる理想的なパターン |

した。ただし流域位置は、後述の台風性降雨への適用事例と同様、1倍流域上を強雨域が通過するように仮想的な配置をさせている。

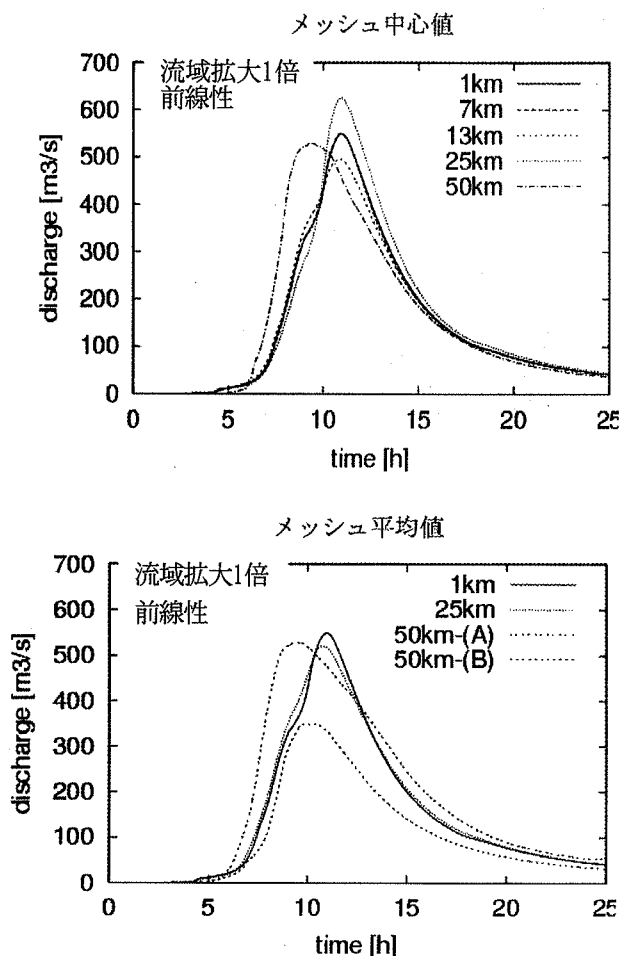


図-5 流域拡大率が1倍の場合の流出計算結果

図-5には流域拡大率一倍についての算定ハイドログラフを示す。5分雨量計1kmメッシュの場合の結果を真値と考える。また地上雨量を用いる場合を想定したメッシュ中心値を用いる場合13km以上のアップスケールの場合ピーク流量、総流出量に大きな差をもたらしている。一方、理想的なアップスケールであるメッシュ平均値を用いた場合、アップスケールが流域サイズを超えなければ大きな差は生じないことを示している。すなわち、アップスケールにおける平均値の重要性を物語っている。しかし、平均値算出には、より高分解能の情報を必要とする。さて、図には50kmサイズでの算定ハイドログラフをA、Bの二種類描いてある。Aは図-4左、Bは右のメッシュ位置に対応した結果であり、Bのように総流出量が保存されない場合もあることがわかる。

次に、図には示さないが、流域拡大率が2倍の場合は、最大のアップスケール50kmは流域サイズに相当するので、基本的にはピーク流量、総流量のアップスケールの程度による差異が小さくなった。それでも、メッシュ中心地を用いた場合の方がメッシュ平均値を用いる

より差異が大きいのは、流域拡大率一倍の場合と同様に見られる。一方、台風性降雨への適用事例では、メッシュ平均値においてすら、前線性降雨に比べてアップスケールの程度による差異が大きい。メッシュ中心値ではもっと差がある。

以上、100km²程度の流域の場合でも、降雨の分布を考慮しない危険性、すなわち地点情報である地上雨量計を用いた流出計算の危険性、特にピーク流量や総流出量の算定に誤差をもたらすことの一側面を明らかにした。

8. 温暖化、都市化の影響に対する対策の考え方

気候システムに外力が加わっても、現在の気候に存在しないような変動(氷河期になるなど)が起きるとは考えにくく、むしろ、現存する異常気象の頻度が増えると考えるのが自然である、というのが気候学の専門家の意見である。これは、これまでの気候モデルによる解析の結果でもあるし、その兆候が見え隠れしている。すなわち、気候変動の振幅が増大し、“今で言う”異常気象が多発すると考えられている。ただ、気候モデルの精度向上には限界がある(気候学の専門家)し、過去のデータを用いた統計的な解析でも、必ずしも高い有意性で異常気象の生起確率の増加度合いを客観的に示しきることはできない状態にある(出現しきっていない)。しかし、これまでの異常イベントを事例として社会への影響を考えることは極めて重要である。都市化の影響も同様である。また、都市河川のスケールでは、降雨の空間分布を無視することは危険であることも示した。そして、増大するかもしれない異常降雨はもともと局地的な分布であるから、この危険性は一層増すものと考えている。

参考文献

- 1) Nakakita, E. et al.: Short-term rainfall prediction method using a volume scanning radar and GPV data from numerical weather prediction, Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No. D21, pp.26181-26197, 1996.
- 2) 山元龍三郎：地球異常。集英社、1993.
- 3) 山元龍三郎：21世紀の課題、第10回京大防災研究所公開講座テキスト、pp. 3-14, 1999.
- 4) 山元龍三郎他、第6回水資源に関する論文集、2002.
- 5) 原田 朗：大気汚染と気候の変化、気象学のプロムナード11、東京堂出版、1982.
- 6) 中北英一・花房大輔：様々な時間・空間スケールと流域特性を考慮した異常降雨のグローバル解析、第11回地球環境シンポジウム講演論文集、2004.
- 7) 中北英一・前田妙子：流域スケールに依存した分布型降雨情報の有効性に関する基礎的検討、土木学会水工学論文集、第48巻pp. 307-312, 2004.
- 8) 市川 温：京都大学博士論文、2001.

(2004. 4. 7受付)