

1-12 中小河川向け洪水予測手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 11～平 14

担当チーム：水理水文チーム

研究担当者：吉谷 純一、深見 和彦

【要旨】

流域は土壌・植生・河道といった空間的のみならず時間的にも変化する多要素から構成されており、洪水流出現象は、降雨特性とそれらとの様々な複雑に変化し、洪水予測システムの誤差要因となる。本研究では、特に中小河川に特有な条件下で重要となる、降雨現象の把握と降雨予測、及び、洪水予測システムの安定性評価に焦点をあて、降雨の DAD 特性の把握を基礎とした降雨解析手法の提案、中小河川向け降雨予測モデルの開発、流出解析モデルの適合度評価手法の開発、及び、中小河川洪水予測システムが現実におかれている条件を前提とした効率的な予測精度改善方策の提案を行った。

キーワード：中小河川、洪水予測、DAD 解析、降雨予測、フィードバックシス

1. はじめに

流域は土壌・植生・河道といった空間的のみならず時間的にも変化する多要素から構成されており、洪水流出現象は、降雨特性（例えば Depth-Area-Duration: DAD 特性）とそれらの様々な流域特性の組み合わせによって複雑に変化する。洪水流出現象を把握しモデル化する場合、こうした複雑なプロセスのいくつかは簡略化もしくは無視される。このことが、洪水流出解析の再現性・信頼性に一定の限界をもたらす要因になっていると考えられる。このことは、長期的視点に立った極値的な洪水規模の予測といえる河川計画にも影響を与える。したがって、それらの諸要素の複雑な組み合わせがもたらす洪水予測・解析システムの信頼性の限界を客観的に評価するとともに、その誤差をもたらす様々な降雨条件・流域条件の不確実性があることを前提にして洪水予測・解析システムトータルとしての再現性・信頼性を高めていくことが重要である。特に近年洪水災害が頻発している中小河川においては、流域スケールが小さいがために洪水到達時間が短いため、より小さなスケールにおける降雨現象の理解と降雨予測が特に重要である。従来の記録にない未曾有の豪雨をも考慮した降雨・洪水規模（可能最大降雨・洪水）の評価手法を構築するとともに、中小河川スケールに適した降雨予測モデルと組み合わせた洪水予測システムを構築する必要がある。

本研究では、特に中小河川に特有な条件下で重要となる、降雨現象の把握と降雨予測、及び、洪水予

測システムの安定性評価に焦点をあてる。すなわち、降雨の DAD 特性の把握を基礎とした可能最大規模の降雨・洪水解析手法を検討するとともに、流出解析モデルの安定性評価手法を検討し、最終的に、現場の中小河川洪水予測システムが現実におかれている条件を前提として予測精度改善を効率的に図るための方策を明らかにすることを目的として実施した。

なお、本研究では、現況の中小河川洪水予測システム・洪水解析手法とそれにおかれている条件を前提として精度改善方策の研究を実施することとしたため、特に研究進展が遅れている降雨予測の分野を除いて、流出解析モデルそのものの開発研究は実施していない。次世代洪水用流出解析モデルの開発研究については、別課題（GIS を活用した河川流況予測システムの研究開発）において実施している。

2. 研究方法

2.1 降雨 DAD 関係を基礎とした豪雨特性抽出手法と他流域への適用手法の検討

ある地域に集中豪雨が発生した際、それと同規模の豪雨が他流域で発生するとどの程度の洪水規模が想定されるか、という点がしばしば社会問題となる。流域地形特性や降雨分布特性が異なるため、単純な降雨分布のあてはめは困難である。ここでは、降雨の強度(Depth)－面積(Area)－継続時間(Duration)の3者の関係(DAD 関係)によって豪雨の時空間規模に関する特徴抽出手法を検討するとともに、その DAD 関係を介した他流域への同規模豪雨の当てはめ手法

に関する一つの試案についての検討を行った。ここでは、2000年9月11日から12日にかけて中部地方を襲ったいわゆる東海豪雨を対象としたケーススタディを実施した。

2. 2 気象力学降雨予測モデルの開発

豪雨発生時に、将来時刻における降雨予測を用いて迅速に洪水予測を行い、的確なダム操作や水防体制の確立を行うことは、特にダム上流域を含む中小河川においては洪水災害を防止・軽減するために極めて重要である。現在、気象庁は、領域数値モデル(RSM)の計算により、半日毎に1時間間隔で51時間先までの予測値(RSM-GPV)を配信しているが、出力が約20kmメッシュであるため中小流域における洪水予測にそのまま用いることは困難である。そこで、RMS領域内により細かいメッシュでのメソスケール気象予測モデル(メソモデル)をネスティング(入れ子構造)し、GPVを初期・境界条件として気象予測計算を行うことによって洪水予測の予測先行時間の拡大と精度向上を図る手法の開発を行う。メソモデルとしては、米国大気気象海洋庁大気研究センターと米国ペンシルバニア州立大学が開発し公開しているMM5と呼ばれる気象力学数値モデル(非静水力学モデル)を用い、これを、気象庁RSMの20kmメッシュに2段階にネスティングすることにより、3kmメッシュ分解能での予測値に翻訳することを試みた。ケーススタディの対象は、1998年夏の那珂川・阿武隈川災害をもたらした豪雨とし、水文資料の存在状況を考慮し、那珂川上流部の余笹川に近接した箒川上流塩原ダム流域周辺において降雨予測の妥当性の検証を行った。

なお、本研究は、米国カリフォルニア大学デーヴィス校土木環境工学科 M.L.Kavvas 教授らのグループとの共同研究による成果である。

2. 3 流出解析モデルの適合度評価ツールの開発

洪水予測を行う上で、必要十分な水文観測体制を確保し、精度の良い降雨予測を行うとともに重要な事項は、信頼性の高い流出解析モデルを構築することである。そこで、洪水流出解析の精度を評価するための指標に基づき、流出解析モデルの適合度を評価するためのツールを開発した。国内9つのダム上流域を対象としてケーススタディを実施している。

2. 4 現状の中小河川洪水予測システムの精度改善手法の検討

既述の3つの研究項目は、新しいツールの導入(流出解析モデルは除く)による精度改善手法の研究で

あり、ここでは、現在すでに存在する中小河川洪水予測におけるシステム整備・環境条件を出発点として、精度改善を効果的に図るための具体的な手法メニューを検討した。具体的に2つの地方自治体管理の中小河川流域を対象としてケーススタディを行った。

3. 研究結果

3. 1 降雨 DAD 関係を基礎とした可能最大降雨・洪水の評価手法の検討

3. 1. 1 東海豪雨 DAD 関係の分析

2000年9月11日から12日にかけて発生した東海豪雨を対象として、降雨の強度(Depth)一面積(Area)一継続時間(Duration)の3者の関係(DAD 関係)に着目し、豪雨規模に関する特徴抽出手法の検討を行った。使用した雨量データは、建設省(当時)の時間雨量資料(124カ所)、ならびに、気象庁アメダス及び愛知県による10分間雨量資料(それぞれ106、49カ所)である。

DD(降雨強度一継続時間)関係については、過去の数多くの記録的大雨を対象として地点雨量に関する既往最大DD式(包絡線)を作成すると、降雨強度Rと継続時間tの両者の対数をとったときに直線に近づくことが経験的に知られている。桑原(1988)¹⁾は、日本全域における最大DD式を同定するとともに、日本を、九州・沖縄、四国南部、紀伊半島南部からなるI地域と、北海道の大部分を占めるII地域、および、それ以外の日本の大部分を占めるIII地域の3地域に区分し、それぞれの気候区分における最大DD式についても提案している。また、宝(1999)²⁾も本邦最大DD式を提案しているが、べき数が桑原と異なっている。そこで、それぞれ桑原および宝の式形により東海豪雨のDD関係を包絡する東海豪雨単独での最大DD式の同定を試みた。図-1に気象

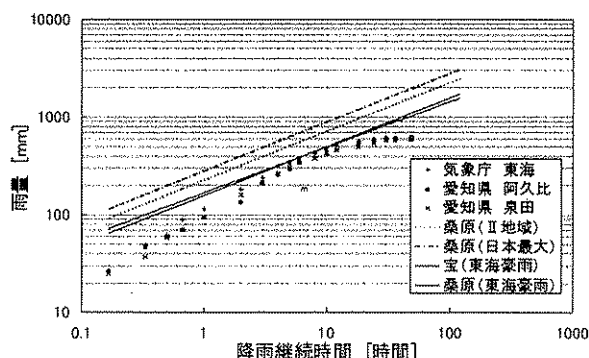


図-1 東海豪雨における実績DD関係及び最大DD式と、日本最大及びII地域最大のDD式との関係(10分雨量資料を利用)

庁・愛知県の10分雨量資料に基づく結果を示す。桑原および宝のそれぞれの式形に対応して、 $R=157t^{0.5}$ 及び $R=167t^{0.468}$ と求められた。長崎県西郷における13時間雨量1005mmによって決まった日本最大DD関係のみならず、岐阜県権現山における5時間雨量501mmによって決まったII地域最大DD関係に比べても、今回の東海豪雨のDD関係は一回り小さい。濃尾平野部としては過去の記録を見る限り豪雨ではあったが、周辺の山地も含めて考えると決して極値的なものとは言いきれない。今回の東海豪雨単独での最大DD包絡線を決めたのは、桑原、宝のいずれのべき乗式形においても愛知県阿久比の6時間雨量(378mm)であった。各継続時間における可能最大雨量強度の視点から見た場合、既往最大を記録した1時間といった短時間雨量のみならず6時間程度の継続時間における雨量の方も相当程度極値的であったことを図1は示唆している。なお、建設省データを加えた時間資料に基づく解析でも同様の結果を得ている。

次に、一つの一連降雨である東海豪雨の範囲内で任意の時間・エリアにおけるDA関係を調べ、その東海豪雨単独での最大DA包絡線を求めた。Aの取り方としては、ある雨量閾値を超える面積を求める雨量固定法と、ある形の面積領域内の最大雨量を求める面積固定法とに大別できるが、ここでは、不均質に分布した地上雨量を用いていることから、客観性と容易性を両立させる立場から正方形の面積固定法を採用した。図-2の各プロットが、1,3,6,12,24,48時間のそれぞれの継続時間に対応する今回の東海豪雨での最大DA関係を示している。日本最大DD式とHorton型最大DA式を組み合わせた桑原拡張Horton式による日本最大DAD式は実線で示す。ま

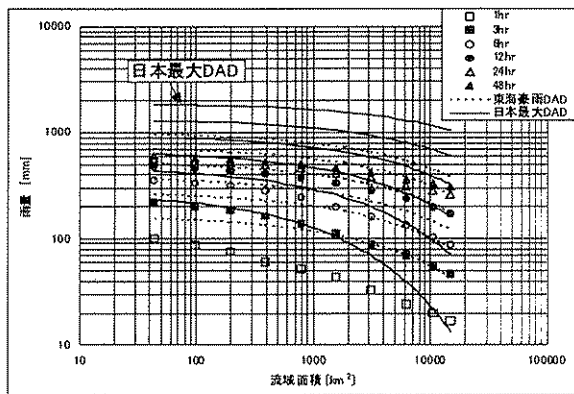


図-2 東海豪雨の実績及び最大包絡DAD関係と、桑原による日本最大包絡DAD関係式との関係

た、桑原DD式におけるべき数0.5を固定して東海豪雨のDAD関係(全ての継続時間に対するDA関係)に対して求めた最大包絡DAD式を点線で示す。日本最大DAD関係に比べて、東海豪雨単独での実績DAD関係は面積による雨量低減率が小さくなっている。面積の取り方が影響している可能性もあるが、大きな時空間スケールにおいてより極値的であったことが今回の東海豪雨のDAD特性の特徴であることが伺える。

次に、東海豪雨を対象とした「最大包絡」DAD式を求めた。しかし、本来数多くの最大級豪雨資料群に対して適用するべきDAD式を単独の降雨実績にあてはめているため、実態との乖離が大きい。ここでは、東海豪雨そのものの特性を示すDAD関係を定量化することを目的として、各継続時間毎に、別個に指数関数内の3つのパラメータ全てを変化させて最適なDA関係式を求めることを試みた(図-3)。

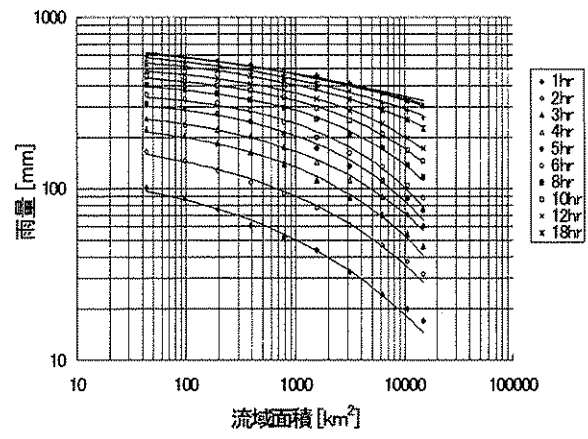


図-3 東海豪雨単独降雨に対する実績DA関係の個別最適化

いずれも指数関数内時間項のべき数が桑原拡張Horton式における0.5よりも小さいのが特徴である。このようなDAD特性分析結果は、例えば東海豪雨級の降雨が、別地域のある河川流域に降ったと仮定したとき、それがどの程度当地域にとって特異的なものであるか、また、どのような規模の洪水が発生するのか、といった問題を検討する際の基準となるものと考えられる。

3. 1. 2 豪雨特性の他流域へのあてはめ手法の検討

ある河川流域で発生した豪雨について、そのままの降雨時空間分布のまま他の河川流域にあてはめることは、後者の流域の降雨分布特性を大きくゆがめることになるためほとんど意味がないと推測される。そこで、ここでは、後者(あてはめられる側)

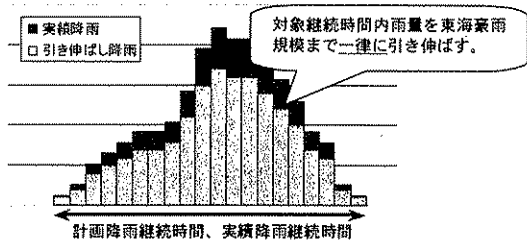


図-4 ある豪雨規模への他流域降雨引き伸ばし手法(シナリオ1)

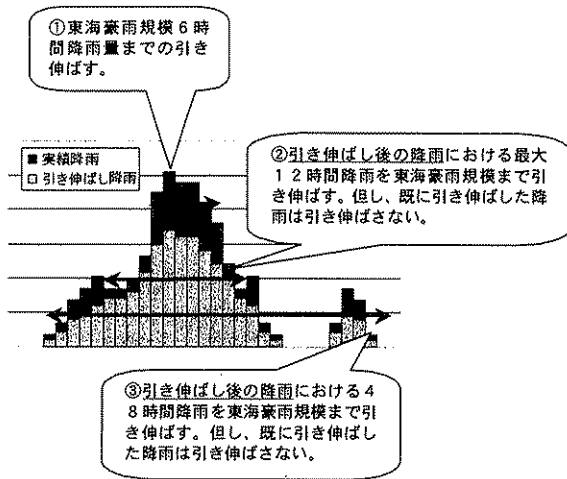


図-5 東海豪雨規模への他流域降雨の引き伸ばし手法(シナリオ2)

の流域における実績の降雨の時空間分布をベースとして、前者(当てはめる側)の豪雨のDAD関係をもとに「同規模」の降雨量を算定して、後者の降雨を引き伸ばす手法の試行を行った。但し、引き伸ばす対象とする降雨の継続時間について、通常の河川計画相当の48時間(シナリオ1:図-4)のほかに、中小河川に対する短時間豪雨特性に対する応答の重要性を考慮し、6時間もしくは12時間雨量に対して先取りして引き伸ばすシナリオ(シナリオ2:図-5)についても検討を行った。いずれのシナリオについても、引き伸ばし後の6,12,48時間雨量について、東海豪雨のDD関係(安全側となるシャーマン型を採用)を上限とした引き伸ばしのチェック(棄却)を行っている。対象流域は、国内のA川流域(B基準点上流域:約980km²)である。引き伸ばしの対象とした降雨事例は、A川基本高水検討に用いられた1949年から1999年に至る18ケースである。

上記の引き伸ばしのチェックを行った結果、シャーマン式及び寶式のいずれのDD関係式を用いたケースでも、シナリオ1では7降雨が棄却され、シナリオ2では12降雨が棄却される結果となった。短時間先取りの引き伸ばしでは、引き伸ばし率が大きく

なる傾向があるためと考えられる。また、いずれのシナリオについても48時間総雨量ではB地点見合いで470mmと算定され、A流域においては1/500相当の降雨に相当し、異常な豪雨と見なせることがわかった。計画流出モデルを用いた洪水流出計算も行ったが、ピーク流量について、シナリオ1では基本高水(1/100)の1.4倍、シナリオ2では2.2倍となった。したがって、A流域においては、東海豪雨級の豪雨が降る可能性は極めて小さいと推定される。

今回の検討により、引き伸ばしシナリオに関するいくつかの問題点が浮かび上がったが、今後の議論のたたき台となる事例を示すことができたと考える。

3.2 気象力学降雨予測モデルの開発

気象庁RSM格子に対し9km及び3kmメッシュの2段階にMM5をネスティングし、塩原ダム流域内の地上4地点における平均雨量実測値と、流域上空MM5雨量予測計算値との比較を行ったところ、前者では雨量ピーク値が52.0mm/hであるのに対し、後者では雨量ピーク値が20.5mm/hとなり、相当程度降雨を過小評価していることがわかった。しかし、降雨時系列(ハイトグラフ)パターンは極めて相似形であることから、その両者の比をMM5予測雨量に与えて補正し、地上流域平均雨量と比較したものを図-6に示す。さらに、塩原ダム上流側の夕の原観測所における実測流量ハイドログラフと地上雨量値を用いて流出計算したハイドログラフ、及び、MM5雨量値を用いて流出計算したハイドログラフを比較した者が図-7である。

これらの図から見る限り、今回MM5によって予測された雨量の絶対値には問題があったものの、その相対的な時系列パターンを良く再現していたものと評価することができる。絶対量の誤差は、今後、降水プロセスのパラメタリゼーションモデルにおける定数を日本の温暖湿潤気候の降雨特性に最適化させることにより、縮小できると考えられることから、

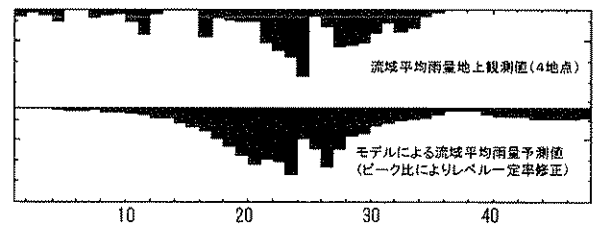


図6 今回開発の降雨予測モデルによる流域平均雨量ハイトグラフと地上観測値との比較(絶対レベルは一定率修正)

今回開発した降雨予測モデルの潜在能力は大きいと考えられる。

また、気象庁から12時間毎に公表されるGPVデータをもとに48時間先までの雨量を予測した計算結果であることから、塩原ダム流域のような中小河川流域スケールにおいても、12~48時間のリードタイムを有する意味のある降雨予測が100km²の中小河川スケールにおいても技術的に可能であることを示す結果と言える。

3.3 流出解析モデルの適合度評価ツールの開発

ここでは、多くの河川で洪水予測モデルとして最も広く使われてきている貯留関数法を対象とし、①モデル定数最適化、及び②モデルの適合度の評価を行うツールを開発した。モデル定数の最適化はPowell法により行っている。また、全ての定数の任意での最適化だけではなく、一部の定数を固定し他の定数を最適化するオプションにも対応できるプログラムとした。なお汎用性を考慮し、ソースコードはC言語で記述した。

国内9ダム流域における47洪水のデータ(時間雨量、時間流量)に対し、ここで作成したプログラムを適用して、モデル定数を最適化した上で、流出解析結果の評価を行った。流出解析結果の評価指標としては、以下の3つを採用した。

- ① ピーク流出高の相対誤差
- ② 総流出高の相対誤差
- ③ 流出高の相対誤差分散の平均値

また、③については全体的な波形の一致度以外に、波形の増水部分、減水部についても一致度を個別に評価している。プログラムはLINUX及びMS-DOS上で動作確認した。

本ツールでモデルを対象流域毎に最適化し、その

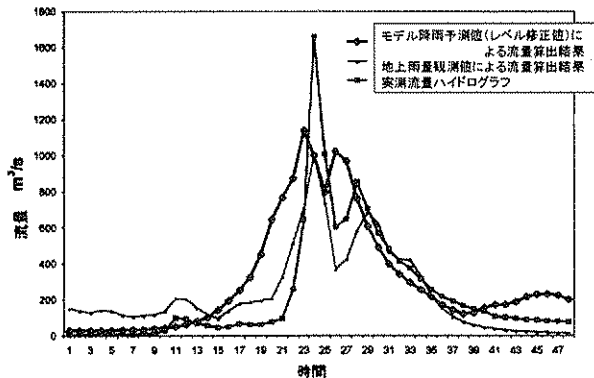


図-7 降雨予測値(レベル補正值)に基づく流量ハイドログラフ再現結果と実測流量との比較

結果について、上で述べた3つのモデル適合度評価指標(相対誤差)が5.0%以下である場合にそれぞれ1点ずつ与え、各洪水について最適化したモデルを5点満点で採点し、0点は不可、1~2点は可、3~4点は良、5点は優として評価した。全47洪水について評価結果を集計したところ、内訳は、優:8洪水、良:15洪水、可:23洪水、不可:1洪水であった。また、9流域中3流域では、洪水イベントによらず比較的安定して適合度が高い傾向が見られ、これらの流域では最適化されたモデルの安定性(信頼性)が高いと考えられる。

上記のケーススタディにより、今回開発した最適化ツールと適合度評価ツールが、客観的なパラメータ調整と評価に有効であることを確認することができた。

3.4 中小河川洪水予測システムの精度管理手法の検討

今回対象とした流域の諸元を表-1に示す。い

表-1 対象河川流域諸元

河川名	流域面積	河道延長	流域勾配
C川(関東)	120.0 km ²	29.9 km	1/40
D川(東北)	108.9 km ²	24.3 km	1/135

ずれも流域の約9割は山地域である点が共通しているが、D川流域の地質が新第三紀層(砂質凝灰岩等)となっているのに対し、C川流域は典型的な第四紀火山性地質となっている。C川では1999年度、D川では2002年度に洪水予測システムが整備された。いずれも、流出モデルとしては貯留関数法を採用している。本検討では、1)既存の洪水予測システムの精度・誤差要因の分析、2)予測精度改善のためのフィードバックシステムの検討、を実施した。

なお、雨量としては、両流域とも流域内1箇所及び近傍2箇所の計3箇所の地上時間雨量観測値を用いた。流量については、C川については、基準点において低水流量観測のみによって決定されたHQ(水位流量曲線)式に基づき、洪水位に対しても外挿適用して流量値に変換した。このため、流量値に大きな誤差が含まれている可能性がある。対象洪水は、2000~2001年の6洪水である。D川については、1993年~2000年の6洪水を対象としたが、1998~2000年は洪水流量観測が実施されていないため、1997年に決定されたHQ式により水位を流量に変換している。

図-8の例に示すように、全体としては、貯留関数法により、精度の良いハイドログラフの再現が可

能であった。但し、①洪水イベント毎に最適定数は大きく変化した（K値で約 18~53、C流域）ため、固定定数で洪水予測を行うと大きな誤差要因となる。また、図-9に示すように、頻繁な水位流量変化に追従できないケースが少なからず見受けられた。これらは、②HQ 関係の経年変化を適切に把握できていない、③流域内の雨量観測所が十分でないため、流域平均雨量を適切に評価できていない、④計算時間分解能が粗い、といった原因による可能性を指摘できる。上記の①~③の点について感度分析を行った結果、見かけ上は①が最も大きな誤差要因になり得ることを確認した。しかし、実際には大きな定数変化の要因として②~③の要因が重複して大きく作用していると推定される。

現実に洪水予測が必要とされる場面においては、不適切なモデル定数設定による誤差を抑制するため

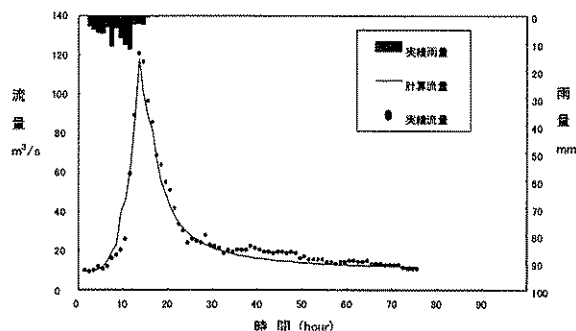


図-8 洪水再現例（C川、2000/7/8）

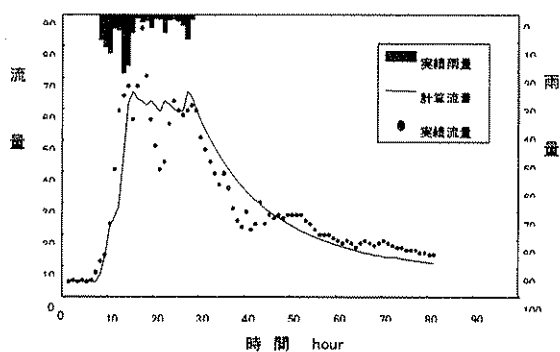


図-9 洪水再現例（C川、2000/7/26）

に、リアルタイムでのフィードバックシステムが用いられる。ここでは、1)定数固定現時刻合わせ方式、2)定数変動現時刻合わせ方式、及び、3)カルマンフィルター方式、の3つの手法の比較を行った。その結果、多くのケースで1)が最適となったが、平均定数での予測を行っている場合に2)の方が最適となる事例が一部見受けられた。

以上の結果から、適切な水文資料に基づく定数設

定の重要性と、定数設定の状況に応じてフィードバックシステムを選択することの必要性が明らかになったと考えられる。

4. まとめ

本研究では、特に中小河川に特有な条件下で重要となる、降雨現象の把握と降雨予測、及び、洪水予測システムの安定性評価に焦点をあて、降雨のDAD特性の把握を基礎とした可能最大規模の降雨・洪水分析手法を検討するとともに、流出解析モデルの安定性評価手法を検討し、最終的に、現場の中小河川洪水予測システムが現実におかれている条件を前提として予測精度改善を効率的に図るための方策の検討を実施した。その結果、以下のことがわかった。

1)2000年の東海豪雨の事例を通して、洪水災害をもたらす豪雨の時空間分布特性をDAD関係式を通じて客観的に抽出する手法を開発した。また、そこで得られた豪雨のDAD特性を用いて、その豪雨規模相当の降雨が他流域に降った場合に洪水規模を推定する手法に関する提案を行った。

2)気象庁から12時間毎に公表されるGPVデータをもとに12~48時間のリードタイムを有し、100km²の中小河川スケールにおいても定量的に意味のある降雨予測を行うための基盤技術を開発した。

3)現場の洪水予測において最も広く用いられている流出解析モデル：貯留関数法に対して、定数の自動最適化を行い、かつ、構築されたモデルの安定性の評価を行うためのツールを開発し、その有効性を明らかにした。

4)中小河川における現場の洪水予測システムに関して、大きな誤差要因として、不十分な水文観測資料と不適切な流出解析モデル定数設定を指摘し、フィードバックシステム導入にあたって、モデル定数の設定状況に応じたフィードバックシステム導入の必要性を明らかにした。

今後は、ここで得られた知見の一般性について、現場での実践も踏まえながらさらに追加して検証していくことが重要である。

参考文献

- 1) 桑原英夫：日本における最大級豪雨の時間的・空間的集中特性に関する実証的研究、東京大学博士論文、1988年。
- 2) 宝馨ら（1999）1998年那珂川流域における豪雨・洪水災害について、京都大学防災研究所年報 No.42, B-2, pp.235-253, 1999年。