

解 説

流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善*

田中 信行**・太田 琢磨**・牧原 康隆***

目 次

1. はじめに	35
2. 流域雨量指数の開発に至る経緯	37
2.1 従来の洪水警報・注意報における課題	37
2.2 流域雨量指数の開発の経緯	38
3. 流域雨量指数	40
3.1 定義	40
3.2 利用するデータ	40
3.3 処理の手順	42
3.4 流域雨量指数の精度	51
3.5 降水予測を用いた流域雨量指数の予想	53
4. 流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善	54
4.1 水害の発生形態	54
4.2 対象災害の捕そくの考え方	55
4.3 基準値の算出方法	57
4.4 警報基準値の評価	60
5. 流域雨量指数の利用上の留意点・今後の課題	62
6. おわりに	63
付 録 規格化版流域雨量指数	64
参考文献	69

1. はじめに

近年，大雨の発生頻度が増加傾向にあるとの報告（気象庁，2005）に呼応するかのように河川のはん濫（河川の水が堤防等を超えてあふれ出すこと）等の洪水による水害（洪水害）が河川の規模

（河川の長さ又は流域面積の広さ）によらず毎年のように発生している．例えば，流域面積が1,000 km²以上の河川では，平成16年（2004年）の台風第23号に伴う大雨による兵庫県円山川，京都府由良川（原田・阿部，2006），平成17年（2005

* Flood Warning/Advisory Improvement based on JMA Runoff Index

** Nobuyuki Tanaka, Takuma Ohta

Forecast Division, Forecast Department（予報部予報課）

*** Yasutaka Makihara

Nagoya Local Meteorological Observatory（名古屋地方気象台）

年) 台風第 14 号の大雨による宮崎県五ヶ瀬川(牛山・吉田, 2006), 平成 18 年 7 月豪雨による鹿児島県川内川(気象庁, 2006), 平成 19 年(2007 年)の秋田県米代川等の事例が挙げられる。

一方, 流域面積が数百 km^2 程度の河川では, はん濫による死者も発生している。近年では, 平成 16 年 7 月新潟・福島豪雨における新潟県刈谷田川, 五十嵐川, 平成 16 年 7 月福井豪雨における足羽川の事例では, はん濫により多数の水死者が出た。さらに, 局地的な大雨により, 流域面積が 100 km^2 未満の河川のはん濫や周辺の低地での浸水も頻発している。例えば平成 11 年(1999 年)6 月の福岡市御笠川(井上ほか, 2000), 平成 17 年(2005 年)9 月の東京都妙正寺川, 善福寺川(芳村ほか, 2006) 等である。統計的にも, 中小河川の破堤(堤防が決壊してはん濫すること)等の被害は後を絶たず(水防法令研究会, 2001), 都市整備の進展や人口の集中等により, 単位面積あたりの被害額は増大している(末次, 2004b)。

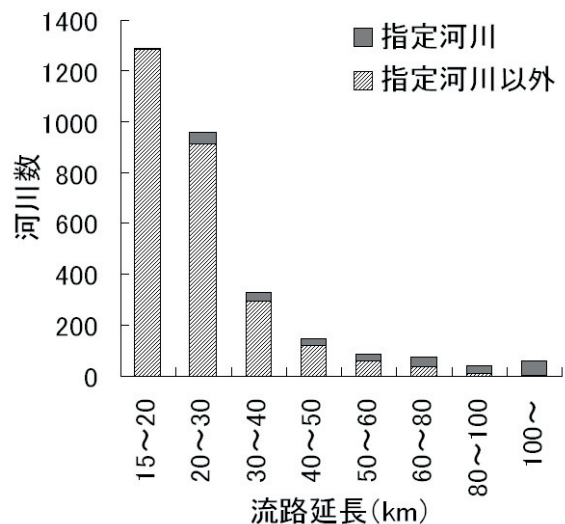
また, 沖積平野に位置していることの多い我が国の都市では, 堤防整備等により周辺の地盤高が洪水時の河川水位より低い地域が珍しくなく, その地域では潜在的に水害の危険性が高い。そこでは, 単なる河川のはん濫ではない洪水害が多発している。例えば平成 17 年(2005 年)の台風第 14 号による大雨では, 宮崎市を流れる大淀川水系の幹川である大淀川の水位が地盤高より高くなったために, 大淀川に合流する河川(支川)の水が大淀川に流れ込まず大規模な内水はん濫(周辺地域の大規模な浸水)が発生した(損害保険料率算出機構, 2006)。すなわち, 河川(幹川)がはん濫しなくてもその周辺で洪水害が発生しているのが実情である。

人間活動に起因する地球温暖化に伴う気候変化の影響により, 大雨の頻度増加や台風の激化などによる水害の頻発・激甚化が懸念されることから, 平成 20 年 1 月には, 社会資本整備審議会河川分科会の気候変動に適應した治水対策検討小委員会による「水関連災害分野における地球温暖化に伴う気候変動への適應策のあり方について」の中間取りまとめが行われた。この中では, ①治水施設の整備率は当面の目標の 6 割程度であり, 気候変

動に伴うリスク増大への対応策の取組が急務であること, ②気候変動に伴う外力の増加により, これまでの考え方に基づく治水対策のみでは対応することは困難であること, ③河川内で安全を確保するという治水対策から, これに加えはん濫を流域に分担させる方策を含んだ治水政策への転換が必要であること, が述べられている。

このような対策の転換においては, 今後河川のはん濫の予測や洪水に関する情報の持つ役割が大きくなることが想定される。

気象庁は, 河川管理者(国土交通省, 都道府県)と共同して, 豪雨が発生した際などに, 洪水の発生を予測し, はん濫のおそれがあるときは水位や流量など河川の状況を発表し, 一般に周知する役割を担っている(いわゆる指定河川洪水予報)。しかし, 国土数値情報に登録されている河川(約 2 万)のうち, 指定河川洪水予報を実施している河川数の割合はわずか 2% 未満であり(第 1 図), 多くの河川の洪水害に対しては, 降雨予測に基づき気象庁が発表する「洪水警報・注意報」により警戒又は注意が呼びかけられている。



第 1 図 流路の長さごとの河川数と洪水予報指定河川数

国土数値情報(河川台帳)に登録されている 21,408 河川のうち, 流路の長さ(流路延長)が 15km 以上の, 指定河川洪水予報を行っている河川(約 350 河川)とそれ以外の河川を, 長さごとに区分した。

中小河川の洪水害に対する、気象庁の発表する情報の改善は、都市化が目撃された20年以上前から課題とされており、気象庁は当時からの対策として、洪水警報・注意報の改善に取り組んできた。昭和63年（1988年）4月のレーダー・アメダス合成図、降水短時間予報の実用化を受け、予報課（1988）は、中小河川の洪水警報・注意報の改善には、レーダー・アメダス合成図や降水短時間予報を活用した定量的かつ詳細な降水量の把握とその予報が必要であることを指摘し、平成3年（1991年）から降水短時間予報の全国での利用を、平成6年（1994年）からレーダー・アメダス解析雨量の警報・注意報への利用を開始した。

その後、平成12年（2000年）に発生した愛知県を中心とした集中豪雨（以降は平成12年（2000年）東海地方の豪雨と呼ぶ）を契機に、極めて甚大な洪水害に対する予測精度を向上させるため、流域内の降雨の集中や流下時間を考慮できる新たな指標「流域雨量指数」の開発を進めてきた。これは、5kmメッシュごとに配置したタンクモデルによって降水量から求めた河川流出量を、全国約4,000河川の流路に沿って流下算定する方式によって、雨量情報から任意地点に集約される水量を推計するもので、洪水の危険性に対し定量的な判定尺度を提供する画期的なシステムである（田中ほか、2005；牧原・太田、2006）。

平成17年から平成19年にかけて、流域雨量指数と洪水害との関係を全国的に調査して、流域雨量指数を用いた市町村ごとの洪水警報・注意報基準を作成した。この中では、単に基準指標として流域雨量指数を導入するにとどまらず、災害との対応付けの工夫による基準の最適化を図った。その結果、気象庁が単独で行う洪水警報・注意報の基準として流域雨量指数を使用することで、洪水警報・注意報の精度改善が期待されることが明らかとなり、平成20年5月28日の流域雨量指数を使用した洪水警報・注意報の運用開始に至った。

流域雨量指数は、過去15年以上の洪水危険度についての履歴情報を得ることができることから、洪水警報・注意報の改善のほかにも過去の洪水との比較等のメリットを活用するための検討が進められている。また、融雪等に関する高度化も

検討されている。

本稿では、詳細な雨量情報と国土数値情報を融合させることにより実現した、世界でも類を見ない洪水警報・注意報の基幹技術である、流域雨量指数の開発の経緯、技術について概説した後、洪水警報・注意報への適用に至った技術的検討内容、精度について報告し、最後に今後の発展への課題について報告する。

2. 流域雨量指数の開発に至る経緯

2.1 従来の洪水警報・注意報における課題

平成11年（1999年）福岡市の御笠川流域の洪水では、博多駅周辺で大規模な浸水が発生し、水死者が出た（井上ほか、2000）。さらに、平成12年（2000年）の東海地方の豪雨では、名古屋市内を流れる新川、天白川といった中小河川のはん濫により、都市地域に甚大な浸水被害をもたらした（牛山ほか、2000）。この洪水害において、当時の気象庁の洪水警報では、多数の床上浸水や堤防から水があふれ出す等、避難勧告が必要な大規模な洪水害に対し、発生地域や危険な時間帯を絞り込んで発表することができなかった。また、洪水警報の中で切迫した危険度を伝えることは困難であった。これを改善するためには、警報を発表するための予測技術自体の精度を高める必要があった。

また、平成17年3月の国土交通省政策レビュー「台風・豪雨等に関する気象情報の充実 ―災害による被害軽減に向けて―」（以下、プログラム評価と呼ぶ）では、豪雨に関する気象情報体系の課題として、防災活動と警報等の対応が必ずしも明確であるとは言えないことが改めて指摘され、また平成16年に発生した度重なる洪水害において、市町村長の避難勧告等や住民の避難行動等の防災判断を一層支援するためには、豪雨に関する気象情報の体系、発表タイミング等の改善が必要であるとされた。

当時の改善の方向性として、大雨、洪水に対しては、災害とより密接に結びついた指標の技術開発により、できるだけ地域を絞り込んだ警報等をめざすこと、警報・注意報の対象地域をさらに限定し、防災活動の基本単位である市町村とするこ

とが、プログラム評価において明記された。

洪水警報・注意報の運用では、発表基準として1時間、3時間、24時間雨量が長く用いられてきた。これらを使った運用では、上記の改善を行うために以下のような技術的課題がある。

- ・領域内の雨量予測によって洪水危険度を把握しようとする、発表対象の領域（細分区域）より上流域の降雨の効果が考慮されないため、複数の細分区域の領域をまたがって流れる河川の洪水現象を正しく予想できない場合がある。この問題は、発表単位を市町村ごとに行うなど対象区域を細かくするほど顕著となる。このため、洪水のおそれの高い地域を市町村程度で特定するためには、領域内の雨量による監視のみでは不十分である。
- ・発表基準として使われている雨量と洪水との対応について見ると、雨量の積算時間である1時間、3時間、24時間は洪水害を予想するために常に最適な積算時間ではない。洪水現象に関連の深い雨量の積算時間は河川流域の規模によって様々であり、実際、水防活動や河川計画においては、2時間雨量や48時間雨量の記録や統計値を使用することが少なくない。
- ・流域の極端に小さい、長さ数 km 以下の河川については、対象域内の降水により、対象域が浸水に至る過程をある程度推測することができる。しかし、流域面積が広い河川（長い河川）は、降雨が河川に流れ込み（以降流出と呼ぶ）、流下する時間（洪水到達時間と呼ぶ）や積算雨量に対する流出特性が流域面積の狭い河川（短い河川）と大きく異なるため、洪水害の発生形態や発生時間帯も異なる。領域内のいずれかの地域に災害のおそれが判断されれば、洪水警報・注意報を発表するため、従来の細分区域単位では、区域内のある領域に対して時間的・量的に適切な警報・注意報であっても、他の多くの地域で空振りや過大な警戒を要請せざるを得ないことが大きな課題であった。
- ・平成17年（2005年）台風第14号による宮崎市付近で発生した内水はん濫では、はん濫が発生した支川流域の雨量や支川の水位だけでなく、幹川である大淀川の水位が高かったという別の

要素が影響している。もし大淀川の水位が低ければ、支川流域で大雨が降っても、水は大淀川に流れ込み洪水害が発生しないからである。このような洪水害に対応するためには、幹川と支川の両者の水位を同時に着目しなければならず、雨量基準のみでは対応が困難である。

以上に挙げた技術的課題の解決のためには、対象区域の上流域の降雨の効果を適切に反映する指標が必要である。それは、河川の規模や地質・傾斜などによって変わる個々の河川の洪水到達時間を加味できること、また、発表対象区域内で河川が合流する場合は、上流の流域の降雨時系列や地域特性によって2つの河川の洪水到達時間が変化するために複雑に変わる下流の洪水の危険度を考慮できることが求められる。

さらに、これまで対象区域内の降水のみに着目していたが、的確に洪水害をとらえるには、前述のような指標により、対象区域外から流れ込んでくる河川の流量や水位の規模の把握が必要であり、加えて内水はん濫の発生過程にも対応するよう2つの指標を同時に考慮することも必要である。

2.2 流域雨量指数の開発の経緯

気象庁では、大雨による自然災害軽減に資するため、詳細かつ定量的な降水量の実況解析と短時間予報の提供を昭和63年（1988年）4月に開始した。予報課（1988）では、洪水警報・注意報の改善に向け、流域の降水量の予測だけではなく水位予測が必要との観点で、当時の水位予測モデルの特徴を調査した。その調査を受け、予報課（1990）は、中小河川の水位観測地点ごとに洪水予測を行うタンクモデルについて、その可能性や精度について議論した。この方法は、従来の流域内の雨量基準より精度の高い洪水予測ができることが示されたが、大きな課題があった。パラメータの設定に長期間の水位観測を要すること、タンクモデルが非線形であり、しかもパラメータの設定を河川ごとに行うことから、過去の実績データのない高水位の領域への外挿に対する精度が明確でないこと、河川の流域等の詳細情報を全国規模で取得す

ることが容易でなかったこと、パラメータを予測地点ごとに独立して設定するため作業量が非常に多くなること、等である。

他方、降雨予測とタンクモデルを組み合わせることにより、災害との対応の良い指標を導入する改善が、死者の多い土砂災害で開始された。平成11年（1999年）に広島県で発生した大規模な土砂災害を契機に、土砂災害に密接な関係のある土壌中の水分量に対してタンクモデルを適用し、解析雨量を入力とする5km格子のタンク総貯留高を、土壌雨量指数として実用化する（牧原・平沢，1993；岡田，2002）とともに、過去10年間算出した指数値を実況と比較して最大となった場合に「過去数年間で最も土砂災害の危険性が高まっている」と呼びかける、土砂災害に関する大雨警報の切り替えの運用を平成12年（2000年）に開始した。しかし、洪水については、前述のとおり技術的課題の解決が容易でなかったこともあり、開発は必ずしも順調ではなかった。

そこで、気象庁予報課は、当時洪水予報としては日本での運用実績のない分布定数系の水位予測モデル（加藤ほか，1999）に着目した。分布定数系モデルでは、地質、都市化の割合、傾斜等の地域特性に対応する数値をパラメータ化することで、過去の水位観測値とは関係なく、格子ごとにアприオリにパラメータが確定し、河川への降水の流出、河川の水の流下を演繹的に算出することが可能となる。

予報課では、分布定数系モデルに土壌雨量指数で使用している流出モデル（Ishihara and Kobatake, 1979）を使った、河川流量解析予測システムの開発を始めた。国土数値情報の地形、地質、土地利用データ、河川情報を活用して、全国の河川を統一的に処理するとともに、都市域での流出を表すためのタンクモデルの設定を行い、河川の断面構造のパラメータ化、マニング係数に基づく粗度パラメータの決定を経て、流量解析プロトタイプを「洪水指数」という名称として平成13年に完成させた（田中ほか，2005）。このモデル構築に大きく寄与したのが、全国2万を超える河川の長さや流域情報を始めとする流域に関する詳細情報が国土数値情報として登録されたことで

ある。

その後、平成16年には、平成16年7月新潟・福島豪雨を始めとして豪雨災害が多発した（原田・阿部，2006）。この豪雨では、避難勧告等が適切なタイミングで対象地域に発令されていないこと、避難勧告等が住民に迅速確実に伝えることが難しいこと等が課題として指摘され、内閣府を事務局とする「集中豪雨時等における情報伝達及び高齢者等の避難支援に関する検討会」を設置して検討を行い、平成17年3月に中央防災会議で「避難勧告等の判断伝達マニュアル作成ガイドライン」を策定した。この検討会の報告では関係省庁に対しては、避難勧告等の発令の判断に資するための情報の高度化を求めている。

避難勧告の判断に資する防災気象情報は少なくとも市町村程度の分解能で発表する必要があること、当時、洪水指数から改名した「流出雨量指数」が、平成16年7月新潟・福島豪雨の際には氾濫した中小河川の流量や水位に的確に対応していたこと（牧原・太田，2006）から、気象庁では、前述のガイドラインを踏まえ、より自治体の避難勧告等の判断に有効な資料となるよう流出雨量指数を利用して洪水警報・注意報を改善するための作業に着手した。

平成17年からは、流出雨量指数を気象情報の一部に導入し、警報発表時に今後河川の洪水の危険度がどのように推移するかについて記述することとした。これにより、予警報現業作業における指数の特性の習熟も図った。その後、流出雨量指数を用いた市町村ごとの洪水警報基準の作成及び精度検証により、従来の洪水警報の基準の精度を改善することを確認した。

一方、流出雨量指数を洪水警報・注意報に導入するための作業は単に技術開発、基準作成及び検証にとどまらない。

警報・注意報を自動的・客観的に作成する予報作業支援システムに流出雨量指数の情報を取り込むことが必要であり、併せて的確な監視を行うための環境の整備が必要である。さらには、基準がこれまでの概念と大きく変わることから利用者への説明・周知も重要である。

これらの準備を平成18年度から開始し、名称

も「流域雨量指数」に改名した。監視ソフトの整備、予報作業支援システムの改修、予報作業支援システムに流域雨量指数を取り込むための「大雨洪水警報対象市町村判定支援システム（KISS）」の導入、部外機関への周知を踏まえ、平成 20 年 5 月 28 日、洪水警報・注意報の発表基準値の 1 つとして流域雨量指数を正式に導入した。

3. 流域雨量指数

3.1 定義

流域雨量指数は、気象庁が発表する洪水警報・注意報を始めとする洪水に関する予測技術の改善を目的として開発した「降雨による洪水害の危険性を示す指標で、対象となる地域・時刻の地表面に存在する雨水のうち、河川にある量を示す指標」である（第 2 図）。具体的には、全国の河川の流路、流域情報、地理情報、土地利用情報に基づいて、降水が河川に入るまでの過程（流出過程）と河川に流れ込んだ水が下流に流れ下る過程（流下過程）を考慮して、5km 四方の解像度で任意の河川・地点における水量を求めたもの、すなわち、人工的な洪水流の制御を考慮しない、河川の流量に相当する値である。実際上は、データ圧縮などの関係から流量に相当する値の平方根を指数値としている。

指数値の算出において入力となる雨量には解析雨量を用いている。また、解析雨量に換えて降水短時間予報を入力雨量データにすることにより、6 時間先までの指数の予測値も計算されている。

出力対象は、国土数値情報に登録されているす

べての河川（21,408 河川）のうち、長さ 15km 以上を基本とした 3,986 の河川（平成 21 年 2 月時点）であり、全国をカバーする 5km 格子と河川流路が交わった下流側の地点ごとに値を出力している。また、同一格子に複数の対象河川が流れている場合には、それぞれの河川ごとに値を出力している。また、平成 3 年（1991 年）以降のすべての日時における指数値もデータベース化しており、現在の指数値と過去に発生した顕著な事例における指数値との比較も可能となっている。

流域雨量指数は、過去 15 年間にわたる洪水害事例を対象として、災害発生の有無について対応関係を求めることができること、降水短時間予報を用いて数時間先の予測ができること、水位や流量の観測をしていない河川を含む全国どの河川のどの地域にも適応できること等の理由から、気象庁の洪水警報・注意報としての利用目的に合致した技術といえる（牧原・太田，2006）。

3.2 利用するデータ

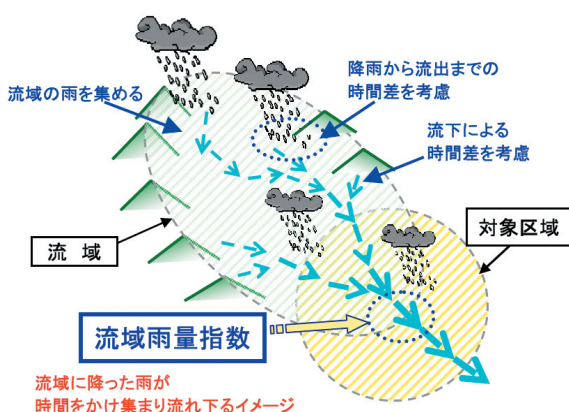
自然災害は、誘因と素因から成り立っている。誘因とは直接災害を引き起こす動的な発生要因、素因とは災害の発生・拡大に関する潜在的な環境要因、である。以下では、利用するデータのうち、まず、誘因として利用している降水量データ、素因として利用している地理や地質等の環境パラメータについて記述する。

3.2.1 降水量（雨量）データ

流域雨量指数の算出において入力資料となる降水については、解析雨量と降水短時間予報を用いている。また、平成 21 年 2 月現在、早春期の洪水の誘因のひとつである融雪水、積雪による降水の滞留等の効果は考慮していない。

平成 21 年 2 月現在、解析雨量や降水短時間予報は、基準地域メッシュ（JIS X 0410 で定義されている標準地域メッシュの第 3 次地域区画、以下 3 次メッシュと呼ぶ）に相当する約 1km 格子単位で計算が行われている（永田・辻村，2006）。

流域雨量指数では、過去の洪水事例における指数値との比較等により警報基準値等を作成する必要があることから、平成 3 年（1991 年）1 月 1 日



第 2 図 流域雨量指数の概念図

から算出結果を保存している。ただ、解析雨量・降水短時間予報は、計算機の能力向上や技術開発等により、以下のとおり解像度や計算頻度等が変更されている。

- ・平成3年(1991年)1月 解析雨量(5km)、降水短時間予報(5km, 3時間先)
- ・平成13年(2001年)3月 解析雨量(2.5km)、降水短時間予報(5km, 6時間先)
- ・平成15年(2003年)6月 解析雨量及び降水短時間予報の計算頻度を30分化
- ・平成18年(2006年)3月 解析雨量及び降水短時間予報の解像度を1km化

ここで、5km格子の解析雨量や降水短時間予報の算出方法は、現行の1kmの値を単純に平均化したものと統計的に同等ではないことから、過去の事例における流域雨量指数と比較を行うためには、できる限り異なる期間における指数値の性質が変わらないようにしている。

具体的には、流域雨量指数は5km格子単位であることから、5km格子に降水量をどのように割り当てるかということである。5km格子の解析雨量に使用されているレーダー積算降水強度は、5km格子に含まれる4個の2.5km格子で観測された10分ごとのレーダー反射強度から推定された降水量の最大値を6回分積算して1時間値としたものである。このため、2.5kmの4格子を5km格子に平均したものよりも統計的にやや大きくなる(Makihara *et al.*, 1996)。一方、2.5km格子及び1km格子の解析雨量に使用されているレーダー積算降水強度は、当該格子の10分間ごとのレーダー反射強度から推定される降水量の積算である。このため、1kmから2.5kmへの変換では平均値を用いており、2.5kmから5kmへの変換については2.5km格子の最大値を採用することとしている。降水短時間予報についても同様の変換を採用した。

3.2.2 地理・地質等環境パラメータ

洪水の素因に対応する資料としては、国土数値情報の以下のデータを利用している。

①国土数値情報の全国の河川の位置、流域情報(およそ100m単位)

河川の流路位置データ及び流域情報に基づき、5kmメッシュ単位での落水方向(周辺8方位)を作成している。

②全国の支流河川がどの地点でどの河川に合流するか、分流するかの情報

流下過程の計算処理で使用している。なお、流域雨量指数は、流路延長が原則15km以上の河川を計算対象とするが、計算対象河川が長さ15km未満の河川に合流する場合には、河川の合流・接続関係が途切れることのないように、下流側の15km未満の河川も指数計算の対象としている。

③国土数値情報の高度(3次メッシュ単位)

以下の2種類の傾斜データの作成に利用。

1. 河川の流路上の標高値を、上流及び下流からそれぞれ単調減少、単調増加するよう包絡線をプロットしてそれをもとに2つの傾斜情報を作成し、それらを平均して求めた傾斜データ。マニングの式(後述)の計算に用いる。

2. 3次メッシュ(約1km格子)の標高データを5km格子単位で平均し、対象格子と周辺格子との標高差を格子間距離で割って算出した傾斜データ。流域雨量指数の計算対象河川がない格子における、下流格子への水の引渡し及び都市用流出モデル(後述)のパラメータの1つとして用いている。

④地質情報(3次メッシュ単位)

流出過程の計算処理で使用。具体的には、三段タンクモデルにおけるIshihara and Kobatake(1979)のパラメータを、地質に応じて選択している。

⑤土地利用情報(3次メッシュ単位)

都市域の流出過程の計算で用いる都市化率の算出に利用。都市化率は、土地利用情報に基づき「(建物用地+幹線交通用地) / (すべて-河川・湖沼・海浜・海水)」として求めている。

このほか、流域雨量指数を構成するモデルのパラメータ設定のために、平成10年8月の大雨時の那珂川、阿武隈川、平成10年7月30日の大雨時の鶴見川の河川の水位データを利用した(牧原・太田, 2006)。

3.3 処理の手順

河川の流量解析手法は、パラメータの設定方法の違いによって、大きく分けて集中定数系モデル（集中型流出モデル）と分布定数系モデル（分布型流出モデル）に分けられる。集中定数系モデルは、流域全体あるいはいくつかに分割した流域を単位としてとらえ、入力と出力の関係を少ないパラメータで扱うもので、現在、河川管理において、大河川等の水位予測等に主に用いられた手法である。一方、分布定数系モデルは流域を格子で細分し、細分メッシュごとに物理的な流出現象を取り扱うものであり、流出量の実績データの無い地域にも適用でき、また土地利用の変化に対するパラメータの修正が可能などの利点がある（加藤ほか、1999）。

流域雨量指数はこの分布定数系モデルを採用しており、5km 格子単位で、流出過程と流下過程を2つのモデルによって表している。前述のとおり、流出及び流下に関する地質や傾斜等の環境パラメータは、5km 格子ごとに独立して設定している。以下に、流出過程と流下過程のそれぞれについて詳しく述べる。

3.3.1 流出過程

入力する降水量は、解析雨量及び降水短時間予報の1時間降水量を用い、格子内の降水量が河川へ流出する量の推定にはタンクモデルを使用している。なお、融雪水が河川に流れ出す効果及び積雪により流出が抑制される効果については現在のところ考慮していない。

降水に対しては、まず「地表面のくぼみ（以下、くぼ地と呼ぶ）」にたまり（即時に）流出しない初期損失を考慮している。これは、「初期損失用モデル」というタンクモデルにより求め、初期損失量を差し引いた後の降水量（以下、有効雨量と呼ぶ）を、河川への流出量を計算するタンクモデルへ入力している。

河川への流出量を計算するタンクモデルには「非都市用流出モデル」と「都市用流出モデル」という2つのタンクモデルを使用しており、有効雨量に都市化率による重みを乗じて各々に振り分けている。このため、都市化の進んでいない山地

等の地域では「非都市用流出モデル」の寄与が大きくなり、都市化の進んだ平地等の地域では「都市用流出モデル」の寄与が大きくなる。

以下に、それぞれのタンクモデルの詳細及びパラメータについて記述する。

(1) 降水の初期損失

降水の初期段階では、くぼ地での水たまりの発生や構造物・植物への水の付着等の理由から流出に寄与する水分量は減少する。これらはその後蒸発によりなくなり、地表面を流出することや地中への浸透後に河川に流出することはない。流域雨量指数ではこれを「くぼ地」に水がたまる効果として計算しているが、これは、雨水が短期間に河川に流出する場合「損失雨量は凹地貯留分・地中への浸透分が主部を占める」（高橋ほか、1978）との考えに基づいている。

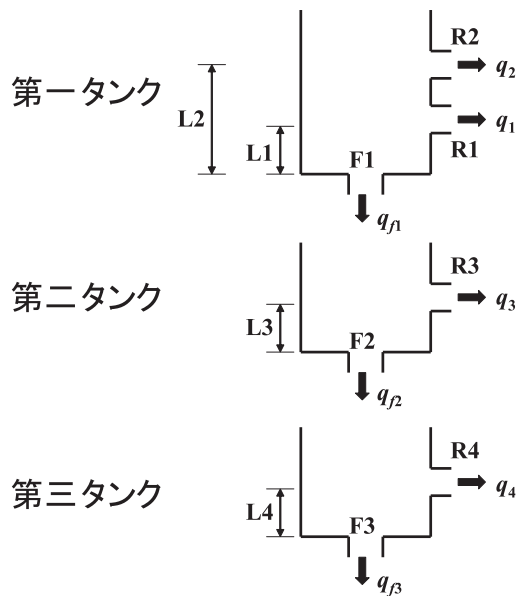
流域雨量指数の計算では初期損失用のタンクモデルを用いて、降水の初期損失量を評価している。実際には、高さ 8mm、浸透率 0.02 のタンクモデルにより表現し、タンクからあふれた量を、河川への流出量を計算する2つのタンクモデルに入力する有効雨量として取り扱っている。「浸透率」は本来タンクの水が地下へ浸透し流出しない割合を意味するが、ここでは、タンクにある水が1時間あたりに蒸発等により損失する割合をさす。

初期損失用のタンクが満水の場合にタンク高が半減するのはおよそ 36 時間後である（1日で約 3mm 減少）。すなわち、地面や樹木が乾いていると降り始めから 8mm までは流出に影響を与えないが、1日半経過するとくぼ地にたまった高さ 8mm の水が半分に減る、ということをあらわすモデルである。なお、高橋ほか（1978）によれば、日本における日蒸発散量は 2～6mm、平均的には 3mm 程度という試算が示されており、これと大きく矛盾するものではない。

(2) 非都市用流出モデル

非都市用流出モデルには、Ishihara and Kobatake (1979) の直列三段タンクモデル（第3図）とそのパラメータ（第1表）を用いている。実際には第1表のタンクパラメータのうち、No.2, No.3,

No.5 のいずれかの値を、水理地質図（第2表）の透水性の程度に応じて割り当てた。具体的には、花崗岩を中間の透水性に対応させることとし、第四紀火山岩流域、石灰岩流域を透水性大、第三紀及び中・古生堆積層を透水性小とした。未固結流域は地質的には透水性が大きい、平野部で、都市域が多いことを考慮して、中間の透水性に対応させた。



第3図 直列三段タンクモデル

Ishihara and Kobatake (1979) による。R, F, L は、流出率、浸透率、底面から孔までの高さを表す。実際に利用している値については、第1表を参照。

流域雨量指数の非都市用流出モデルに Ishihara and Kobatake (1979) を採用した理由は、以下の4つによる。

- ①全国に適用するために、地質ごとに異なるパラメータがあらかじめ提案されている。
- ②地下への浸透を含めて計算している。
- ③5km 格子とほぼ同じ流域面積でパラメータが設定されている。
- ④実用的精度を持つ結果が示されている。

山地等の都市化率の低い流域においては、地質により地下への降水の浸透や流出が異なるが、Ishihara and Kobatake (1979) は、第1表の5つの特定の地質の流域で得られたタンクモデルのパラメータを、別の独立した流域にそれぞれの地質に対応させて適用し、流量について実用的な精度を得たことを示している。これを、流域雨量指数における全国の流出過程に利用できるとするはん用性の根拠とした。

流域雨量指数の流出モデルで、No.2, No.3, No.5 のタンクパラメータを採用したのは、これらの透水性が明確に異なるからである。参考までに1時間に50mm 降った場合におけるそれぞれのタンク総貯留量と流出量（降水量に換算）の変化について第4図に示した。透水性の大きい馬洗川流域（No.2）では降雨直後の流出ピークは小さく、透水性の小さい夕張川流域（No.5）で流出ピークが最も大きくなっている。また、ある程度時間が経過した後は流出量の大きさがNo.2とNo.5で逆転している様子もうかがえる。

第1表 直列三段タンクモデルのタンクパラメータ

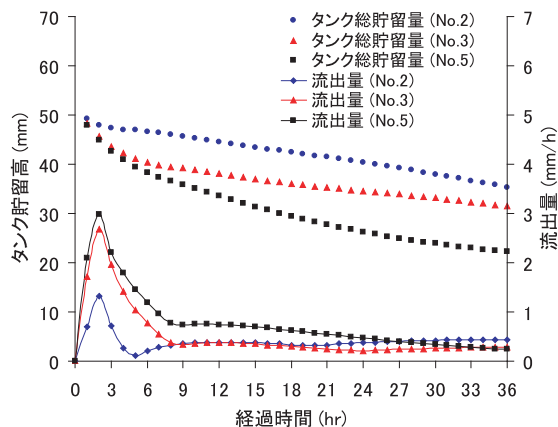
No.	河川名 (地域)	地質 (特性)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	F1 (hr ⁻¹)	F2 (hr ⁻¹)	F3 (hr ⁻¹)	R1 (hr ⁻¹)	R2 (hr ⁻¹)	R3 (hr ⁻¹)	R4 (hr ⁻¹)
1	筑後川 (小平)	安山岩・凝灰岩 (透水性大)	40	75	15	15	0.12	0.08	0.01	0.10	0.15	0.05	0.01
2	馬洗川 (南島敷)		30	60	15	15	0.12	0.08	0.01	0.10	0.15	0.05	0.01
3	木津川 (月ヶ瀬)	花崗岩	15	60	15	15	0.12	0.05	0.01	0.10	0.15	0.05	0.01
4	長良川 (美濃)		30	75	5	15	0.12	0.04	0.01	0.10	0.15	0.05	0.01
5	夕張川 (清幌橋)	第三紀層 (透水性小)	15	40	5	15	0.12	0.04	0.01	0.10	0.15	0.05	0.01

※パラメータは Ishihara and Kobatake (1979) による。

第2表 地質による透水性の分類

記号	地質時代	岩相の特徴	固結度	地形	構成岩石・地層	透水性
Q-Hmsg	後期更新世～完新世	非海成～浅海成堆積物	未固結	沖積低地 砂丘 河成扇状地 崖錐	粘土・シルト・砂・礫 風成砂 礫・砂 礫・角礫・粘土	大 大 きわめて大 大
Qls	第四紀	礫成石灰岩	硬岩～軟岩	海岸段丘	石灰岩	きわめて大
Qv	第四紀	火山岩～火山性碎屑物	硬岩 未固結 未固結 硬岩	成層火山 成層火山 火山性山麓地	溶岩 凝灰角礫岩 角礫・礫・粘土	きわめて大
Qp	第四紀	火山碎屑物	未固結 未固結 未固結 硬岩	火山性台地	火山灰 降下軽石堆積物 軽石流堆積物 溶結凝灰岩	中程度 きわめて大 きわめて大 きわめて大
Qtg	第四紀	段丘堆積物	未固結	河岸段丘 海岸段丘	礫・砂・粘土 砂・シルト・粘土	きわめて大
Qmsg	第四紀	非海成～浅海成堆積物	未固結～半固結	台地 丘陵地	砂・シルト・粘土 礫・砂・粘土	大 中程度
N-Qvp	鮮新世～更新世	陸成火山岩	硬岩～未固結	溶岩台地	溶岩・凝灰角礫岩・ 凝灰岩・溶結凝灰岩	大
Nms	新第三紀	海性堆積物	固結～軟岩	丘陵地	礫岩・砂岩 シルト岩・泥岩・頁岩	小 ごく小さい
Nvp	新第三紀	主として海底火山噴出岩	硬岩	山地	溶岩・凝灰角礫岩	小さい
PG-Nmsg	古第三紀～中新世	非海成～浅海成堆積物	軟岩	丘陵地	砂岩泥岩 サイクロセム型互層	ごく小さい
K-PGvp	白亜紀～古第三紀	陸成火山岩	硬岩	山地	溶岩・凝灰角礫岩・ 凝灰岩	小さい
Kms	後期中生代～古第三紀 白亜紀	優地向斜相及び フリッシュ相堆積物 海成乱堆積相堆積物	硬岩	山地	砂岩・頁岩	小さい
P-Mmscvp	古生代～前期中生代	優地向斜相堆積物 (非～弱変成)	硬岩	山地	頁岩・粘板岩 砂岩 珪質岩(チャート) 火山性岩 石灰岩	中 小さい 中 ごく小さい 大きい
P-Mls	古生代～前期中生代	優地向斜相堆積物(変成)	硬岩	山地	結晶片岩	小さい
P-Msch	先第四紀	超苦鉄質・苦鉄質貫入岩	硬岩	山地	蛇紋岩・かんらん岩	ごく小さい
sp	先第四紀	酸性貫入岩・片麻岩	硬岩	山地	花崗岩・閃緑岩・ 片麻岩	中

※日本地質アトラス第2版水理地質図より作成



第4図 地質の違いが流出に与える影響

1時間に50mm降った後のタンク総貯留量と流出量(降水量に換算)の変化について、Ishihara and Kobatake (1979)のタンクパラメータのうち、流域雨量指数で使用しているNo.2, No.3, No.5について計算した結果を示す。

なお、ここで、参考のため、第3図及び第1表におけるパラメータと河川への流出量 q との関係について述べておく。

流出量 q は、タンクモデルのすべての流出用の孔 $R1$, $R2$, $R3$, $R4$ および浸透に対応する孔 $F3$ から流出する量の総和に等しい。ここで、流出量 q は単位面積あたりの流出量を意味しており、単位は降水量と同じmm/hである。また、対象領域からの総流出量を求めるため面積をかけて、単位時間を変えると、流量と同じ単位(m^3/s)となる。

第一タンクで河川への流出量に直接関係するのは $R1$ 及び $R2$ であるが、孔 $R1$ から流出する量 q_1 は、第一タンクの貯留高が h_1 の場合、以下のよう表すことができる。

$$q_1 = R_1 (h_1 - L_1) + R_2 (h_1 - L_2) \quad (1)$$

ここで、 R_1 は第一タンク底面からの水面の高さが h_1 の時に、単位時間に孔 $R1$ からどれだけの割合で水が流出するかを表し、「1時間あたりのタンク流出率」と呼ばれる。また、第一タンクの底

から孔 FI を通じて第二タンクに「浸透」する量 q_{fi} は、以下のように表される。

$$q_{fi} = F_i h_i \quad (2)$$

ここで、 F_i は孔 FI からの浸透率である。同様にこの関係を残りのタンクに適用する。それにより流出量 q は次のように表される。

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_{fi} \quad (3)$$

各々のタンクでは流出や浸透がある一方、降水や上位タンクからの浸透 r_i によりタンクの水の高さ h_i は増加する。その時間変化の関係は、以下のとおりである。

$$r_i(t) - q_i(t) - q_{fi}(t) = dh_i / dt \quad (4)$$

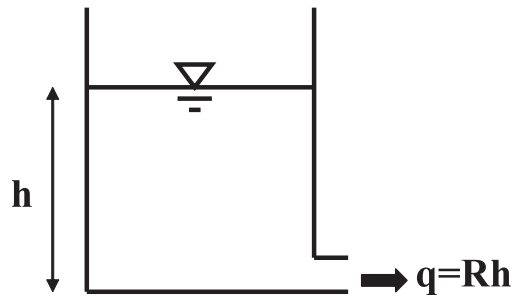
ここで、 r_i 、 q_i 、 q_{fi} 、 h_i はそれぞれ、第 i タンクへの降水量又は上位タンクからの浸透量、第 i タンクからの流出量、第 i タンクから下部タンクへの浸透量、タンクの水の高さである。

以上の式を参考に第 1 表及び第 4 図を見ると、タンクの底面からの高さ L が大きいほど降水量に対する流出量の割合が少なくなり、下位タンクへの浸透率 F が大きいほど長期間にわたり継続した流出（長時間経過後も流出量が多い）となることが分かる。

(3) 都市用流出モデル

都市域では一般的に地表面がコンクリート等の人工物に覆われていることから、地表面が自然の土の状態と比べて浸透が少ない。このため、表面流出が主体となるため、都市流出に特化した流出モデルを用いている。この都市用流出モデルには、側面に孔が 1 つある、単純な一段タンクモデルを採用した（第 5 図）。第 5 図で説明する R （都市用流出モデルとして使用する一段タンクモデルの 1 時間あたりのタンク流出率）は、河川の傾斜によって値を変えており、傾斜が 1%（パーミル、千分率）以上の場合 0.6、0.1% 以下の場合 0.4 とし、1% と 0.1% の中間の傾斜の場合は、比例的に案分した値を用いることとした。以下には、その特性を決定付ける 1 時間あたりの流出率 R のパラメータ設定について詳述する。

都市域は前述のとおり浸透が少なく、雨水の排水の多くが人工的な排水路や小河川により行われることから、短時間に降った雨の多くは急速に河



第 5 図 一段タンクモデル

都市域の流出を表現するためのタンクモデル。タンクの底の側面に孔が一つだけある。この流出率を R とした場合、タンクの貯留高を h とすれば、流出量 q は、 $q = Rh$ となる。

川へ流れ込むが、このとき流出特性は格子平均の傾斜が最も関係していると考えられる。そこでまず、特定の傾斜を持った仮想的な単位流域（5km 平方格子）に降水を与え、流域内に規則的に配置した側溝にその水を流し、マンニングの公式にしたがって単位流域外へ流出する流量をシミュレートした（以下、都市域流出シミュレーションと呼ぶ）。その結果をもとにして実際の都市域における流出特性（ハイドログラフ）を再現し、これを一段タンクモデルで近似するよう、タンクモデルのパラメータを設定した。

都市域流出シミュレーションは、計算時間間隔を 5 秒、マンニングの粗度係数を 0.033（1/30）、として計算開始直後の 1 時間のみ 50mm の平均的な降水量を入力値として与えた。ここで、側溝の形状は逆三角形とし、深さに対する側溝の幅は一定の割合 5 と仮定した（例えば、深さが 10cm の場合の幅が 50cm）。

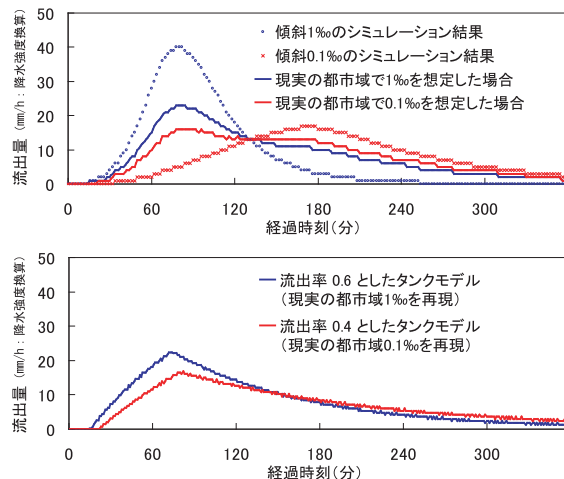
第 6 図上図に都市域流出シミュレーションの計算結果を示す。傾斜が 1% のハイドログラフを青点線、0.1% の場合を赤点線で示した。傾斜 1% では 3 ～ 4 時間（180 ～ 240 分）程度で完全に流出がなくなるが、実際の流出資料（土木研究所水文研究室、1988；平成 10 年 7 月 30 日の鶴見川洪水時の亀の子橋のハイドログラフ、図略；神田川南小滝橋におけるハイドログラフ、第 7 図参照）では、5 ～ 6 時間（300 ～ 360 分）程度まで流出が

継続している。これは平均傾斜が1‰の都市部の流出が、実際には、仮定した規則的に配置した側溝のように整然とした排水溝や河川のみではなく、場所により傾斜の緩いところがあること、また一部で排水のネックや表層の水たまりがちょうどタンクの役目をして流出を遅らせることがあるため、と考えられる。このため、前述の資料を参考に、1‰と0.1‰のシミュレーション結果を5:5の重みで平均したものを、「現実的な傾斜1‰のハイドログラフ」と仮定した（第6図の上図、青実線）。一方、0.1‰の傾斜に対応するハイドログラフについては、地域全体に厳密にこの傾斜が維持されるわけではなく、道路や建造物では強制的に傾きを作って排水する場所もあること、実際にも降雨終了時に流出量の大きい地域が見られること等から、1‰と0.1‰のシミュレーション結果を3:7に平均したものを「現実的な傾斜0.1‰のハイドログラフ」とした（第6図の上図、赤実線）。

次に、タンクモデルによって上記の「現実的なハイドログラフ」を近似するのであるが、タンク流出率 R を少しずつ変化させて評価した結果、傾斜が1‰の場合は流出率を0.6、傾斜が0.1‰の場合は0.4とすれば、おおむね現実的な都市域のハイドログラフをほぼ再現できることが分かった（第6図の下図）。第6図下図に示される都市域における流出率の値は、第1表の Ishihara and Kobatake (1979) の各タンクにおける流出率 (R_1, R_2, R_3, R_4) と比較して非常に大きく、都市部における流出量の大きさを表している。

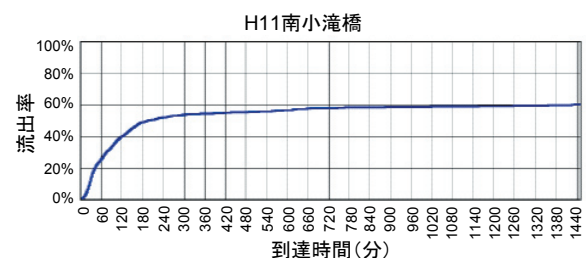
(4) 非都市用流出モデルと都市用流出モデルの組合せ

都市域における短時間強雨の6時間程度先までの流出の特性は都市用流出モデルでほぼ記述できるが、都市域における流出の実態から見ると、完全に都市化した地域でも緑地は存在しておりすべての降雨が地表面から浸透せずに流出するわけではない。そこで、流域雨量指数ではすべての地域について、都市用流出モデルと非都市用流出モデルの両方を使用し、地表面における人工構造物の割合を都市化率として、この都市化率に応じてそれぞれのモデルから得られた流出量を平均化し



第6図 都市域流出シミュレーションとタンクモデルによる流出の近似

最初の60分間に50mm/hの降水を、中央の谷線に流れるよう左右対象の矩形斜面（面積約 $S^2 = 25\text{km}^2$ ）を仮定して、マニング式に従って最下流に集まった流量（上図）と、それを近似するための一段タンクモデルの流量（下図）を示す。流量は面積で割ることで降水強度に換算している。



第7図 神田川南小滝橋における流出特性

都市中小河川の洪水流出に対する降雨特性の影響（高崎・増田，2004 から抜粋）

たものを最終的な流出量としている（なお、山岳など人工構造物がない、都市化率が0%の格子では、非都市化流出モデルのみを使用している）。具体的には、完全に市街地化した場合（都市化率100%）に対応する都市用タンクモデルの割合を70%としている。これは、降雨から6時間程度までに急速に流出する水の割合が、総水量の70%であることを意味する。

ところで、降雨による総水量のうち、半日程度にどれだけの水量が直接河川に流れたかの割合は、都市河川における「流出率」（例えば谷岡

ほか、1998) と呼ばれている (上述のタンクモデルにおける「1 時間あたりタンク流出率」と異なる定義であることに注意されたい。なお、実際には数日間の期間で考えれば、降水による総水量と河川に流れた総水量は一致するべきものである)。例えば高崎・増田 (2004) は、神田川の南小滝橋 (新宿四丁目) における流出特性を調査している。この地点は神田川の最上流から 10km 余り下ったところである。この調査では、流出率を 60% としている (第 7 図)。これは都市化率 100% の場合の都市用流出モデルを使用する割合 (70%) より 10% ほど少ないが、都市用流出モデルの入力降水量では初期損失分を考慮しているため、実際には (100 ミリ程度までの降水で、数日間降水がない場合)、入力降水量に対する流出量として両者の差は大きくはない。また第 7 図では 6 時間後の流出率も 55% であり、全体の 5% の流出が残っているが、第 6 図下図の都市用流出モデルでは 6 時間後には流出がほぼ終了している。都市用流出モデルと非都市用流出モデルを組み合わせることでこれらを表すことが可能と考えた。

なお、上記の神田川の流出特性との比較は一例であり、都市用タンクモデルのパラメータ設定は、この他の都市圏の都市河川の流出率も参考にした。

3.3.2 流下過程

各格子での河川内の水の流下過程は次のとおりである。

河道を通る水の速さは水文学から水道関連分野等で広く使われているマンニングの式という式によって求めることができる。マンニングの式に従うと水の速さ (流速) は次のようになる。

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 v (m/s) は流速、 R (m) は径深 (流れの断面積を A 、円形開放水路の場合に水に接している壁面の長さを S とすると、 $R = A/S$ のこと。ほぼ水深に対応する)、 I は傾斜、 n はマンニングの粗度係数である。

一方、流量 Q (m³/s) は、流速に流水断面積

A (m²) を乗じたものである。

$$Q = v A \quad (6)$$

ここで、 R と A は河川の断面形状により関係付けられるが、流域雨量指数では、深さに比例して幅の広がる (逆三角形の形状をした) 河道を仮定した。すなわち、

$$A = m R^2 \quad (7)$$

ここで、係数 m は堤防幅の深さに対する比で、河道断面形状に依存する値である。本稿では以降この係数を「堤防係数」と呼ぶことにする。具体的には、対象とする河川の流程 (河川上流端から海または幹川合流地点までの長さ) によって値を変えており、流程が 40km 未満の河川は 20、100km 以上は 40、その間は比例的に案分した値を用いている。

この結果、河道内の流速は以下のように記述できる。

$$v = \left(\frac{Q}{m} \right)^{1/4} \left(\frac{1}{n} I^{1/2} \right)^{3/4} \quad (8)$$

すなわち、傾斜 I 、堤防係数 m 、マンニングの粗度係数 n をあらかじめ設定しておけば、流量 Q から河道内の流速を求めることができる。

一方、特定の河川流路を流れる総水量の変化を流路に入出する流量で表す、いわゆる連続の方程式は、以下の式で示される。

$$\begin{aligned} \frac{d \int A dx}{dt} &= \int (r - i) dS + Q_{in} - Q_{out} \\ &= q(r) + Q_{in} - Q_{out} \end{aligned} \quad (9)$$

r : 降雨強度

i : 浸透量

$q(r)$: タンクモデルによる流出量

Q_{in} : 上流端からの流入量

Q_{out} : 下流端への流出量

$\int dx$: 流路に対する線積分

$\int dS$: 流域に対する面積分

左辺は、流れの断面積を流路に沿って積分して水の総量を求め、その時間変化を表すため微分したものである。これにより単位流路内の水量の変化を表している。右辺は、単位時間の流下により、単位流路の中に入出する流量及び降雨によって単

位時間に増加する水量を加えたものを表す。 $q(r)$ は、5km 格子内の流路の最下流で与える。また、支流からの流入、分流がある場合には、流量の加算・配分を行っている。

右辺のそれぞれの項は変数として与えられているので、式 (9) を微小時間積分することで、単位流路の総水量が求まる。具体的には積分の定数 C を使用せずに、初期時刻における総水量を 0 として積分していく。初期時刻は 1991 年 1 月 1 日 0 時（日本時間）、積分のタイムステップは 10 分である。単位流路 dx を小さく分割することで A (= 総水量 / dx) が求まると、式 (7) を式 (5) に当てはめることで流速 v が求まり、式 (8) に v を当てはめると Q が求まることから、次の時刻における式 (9) の右辺の変数 (Q_{in} , Q_{out}) が決まる。このようにして、河道内の水の分布の時間的変化を求めている。

流域雨量指数における流下過程の概要は上述のとおりであるが、流下計算におけるその他の特徴及び留意事項について挙げておく（第 8 図）。

- ①格子内で河川が合流する場合は、幹川の格子最上流部で合流するものとして取り扱う。

$$Q_{in} = Q_A + Q_C$$

- ②格子内における降雨の河川への流出は、格子の最下流で行われるものとして取り扱う。

$$Q_{out} = Q'_A + q_5$$

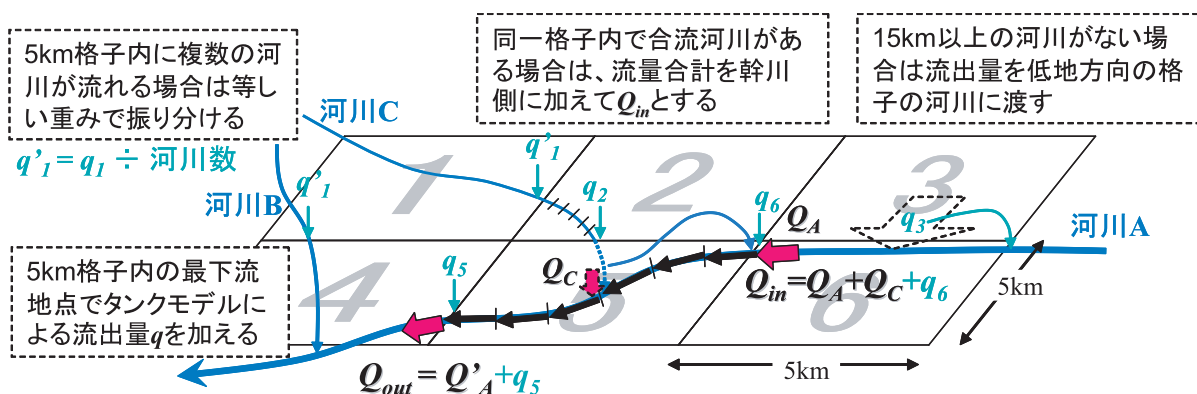
- ③なお、同一格子内に複数の河川がある場合は、河川数に応じてそれぞれ等しい割合で河川へ流出させる。

$$q'_i = q_i \div \text{河川数}$$

- ④分流のある格子では、2 つの河川への流量を一次関数で分配している。すなわち、定常的に流下する量と、流量に応じて分配する量に分けて計算している。具体的には、一定の流量に達するまでは本流のみに流し、それを超えた場合には単位距離あたりの流量に応じた一部を分流として派川に流すようにしている。ただし、平成 21 年 2 月現在、分流のすべてにおいて、実際の分流ルール（幹川と派川の分配率や、流量に応じた配分を開始する一定値）を詳細に調査して利用しているのではなく、河川の規模によって仮定した値を使用している。

- ⑤河道の水位が高くなり本川が天井川になる（本川の水位が合流地点の支川の水位より高くなる）と支川の水は本川に流れにくくなるが、流域雨量指数では常に流入することとしている。

- ⑥計算は 1 格子内の河道を流れに沿って 6 領域に分割して行っている。同一河川であっても、対象とする格子に入ってから出るまでの流路の長さ（格子を横切っている長さ）は格子ごとに異なることから、6 分割した流路長も格子ごとの可変量である。格子内を 6 領域に分割したのは



第 8 図 流下過程の概念図

Q_A , Q_C はそれぞれ河川 A, C の流量, Q_{out} は河川が 5km 格子と交わる地点（下流側）の流量, Q_{in} は河川が 5km 格子と交わる地点（上流側）の流量, q_i は格子番号 (i) 内に降った雨による河川への流出量を表す。

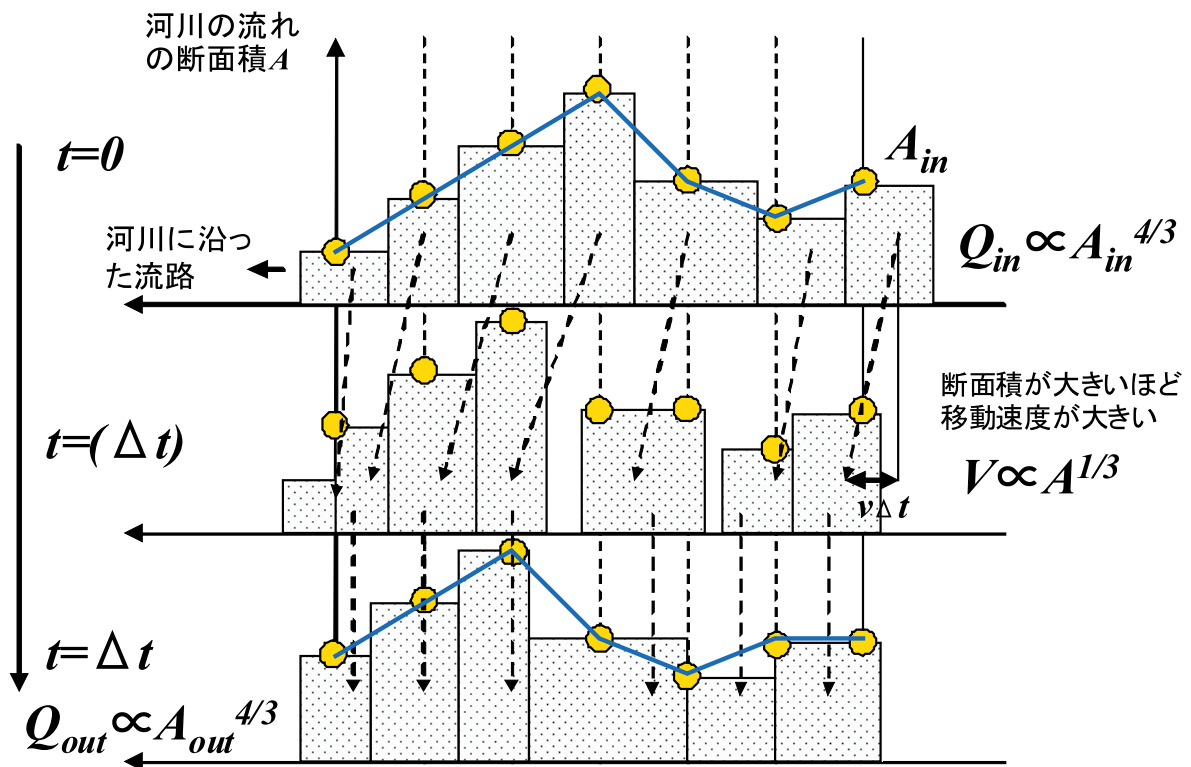
水の挙動を詳細に再現するためである。ただし、格子内に割り当てる河川の性質（長さ、傾斜、粗度係数等）は同一とした。流域雨量指数では、流下の性質を決定付ける上記の河川の性質を 5km 格子ごとに割り当てて計算しているが、格子内の流路の長さを考慮して計算しているため、格子ごとに流下に要する時間が異なることを反映できることが、このモデルの特徴の 1 つである（第 9 図参照）。

- ⑦ CFL 条件（例えば増田，1981）を満たさない場合（計算時間間隔 10 分間固定なので、この

時間内に格子を 6 分割した領域を大きく移動するような流速が速い場合）には、格子を 6 等分した分割単位ではなく格子単位で流下を再計算している。

3.3.3 流下過程におけるパラメータの設定

流下に関して、河川水位の実況と流域雨量指数のピーク及び時間的変化が一致するようにパラメータとして設定した項目は、マンニングの粗度係数及び堤防係数である。これらのパラメータは、平成 10 年 8 月末豪雨における那珂川、阿武隈川、



第 9 図 5km 格子内の流下計算過程（概要）

縦軸は河川を流れる水の断面積，横軸は流路を表す。7つの長方形（短冊）は、計算上、格子内に、一定の断面積を持つ区間が7つあることを示す。両端の格子点に囲まれた短冊の面積の和は格子内の総水量に等しい。 $t=0$ の状態：5km 格子内の河川流路を 6 等分した格子点の断面積 A ，および格子点をまたぐ短冊の下流先端位置が格子点からどれだけ離れているかの情報を持っている。最上流の格子点の A_{in} は、 Q_{in} 、堤防係数、傾斜、マンニング粗度係数から求まる。

$t=(\Delta t)$ の処理：格子点をまたぐ短冊について、移動速度 V により（格子点の A と堤防係数、傾斜、マンニング粗度係数から求まる）、短冊単位で移動予測する。

$t=\Delta t$ の処理：上記の処理では、速度が断面積の $1/3$ 乗に比例するため、断面積 A が大きいほど速度が大きく、短冊に重なりや空きができる。このため、総水量が保存し短冊が連続してつながるよう、短冊の下流先端の格子点からの距離を調整する。流出する量 Q_{out} は、 A から求まる。

平成10年7月30日の鶴見川洪水時の亀の子橋の、それぞれのハイドログラフと比較して、非都市部、都市部に適合できるように設定した。この設定は他のすべての河川、すべての格子に適用されている。

①マンニングの粗度係数 n は、土木学会(1989)では、自然河川で水深が深い直線路で 0.025 ~ 0.033、蛇行していて、水深が浅い場合に 0.040 ~ 0.055 などが示されている(第3表)。現在入手しているデータをもとに表に示された分類を行うことが容易でないことから、全地点を同一値とすることとした。具体的には 0.040 を使用している。

②堤防係数

マンニングの式に基づき流速を求める式(8)では、流速を精度良く求めるためには、できるだけ正確な堤防係数を割り当てるのが望ましい。流域雨量指数では、特に洪水時の流速を正確に求めることが重要であり、それには平水位から高水位への変化における断面形状をいかに正確に求めるかがポイントとなる。実際の計算における堤防係数は、様々な洪水事例における流速を調査した結果、深さに従って線形に河川幅が広がる断面形状とした。また、一般的に、同一河川であっても山間部を流れる上流部と、平野部を流れる下流部では河川断面形状や流速が異なる。実際、多くの河川の下流(平野部)では、傾斜が少なく、深さに対する堤防幅が広くなっている。これらの実情を考慮して、流程が 40km 未満の河川は 20, 100km 以上は 40, その間は比例配分することとした。

第3表 マンニングの粗度係数(土木学会, 1989)

Manningの粗度係数	n	$1/n$
人工水路		
岩盤に開削した水路、滑らか	0.025 ~ 0.04	40 ~ 25
岩盤に開削した水路、粗い	0.035 ~ 0.05	29 ~ 20
自然河川		
線形、断面とも規則正しい、水深大	0.025 ~ 0.033	40 ~ 30
同上、河床が礫、草岸	0.03 ~ 0.04	33 ~ 25
蛇行していて、淵瀬あり	0.033 ~ 0.045	30 ~ 22
蛇行していて、水深が小さい	0.04 ~ 0.055	25 ~ 18
水草が多いもの	0.05 ~ 0.08	20 ~ 13

3.3.4 計算対象としていない長さの短い河川の取扱い

国土数値情報に登録されている全国の河川(21,408 河川)について、特に計算対象として別途指定していない河川のうち、長さ 15km 未満の河川では、河川ごとには、これまでに示した流出・流下過程の計算は行っていない。しかし、それらの河川からの水は、多数が 15km 以上の河川に流れ込むことから、それを再現する必要がある。この処理は、15km 以上の河川がある格子とそうでない格子で異なる。前者では、15km 未満の河川における流下は存在しないものと仮定し、流出・流下はすべて 15km 以上の河川で処理を行う。

一方、5km 格子内に、流域雨量指数の計算対象河川が全くない(15km 以上の河川がない)場合については、格子ごと水系ごとに 1 本の仮想的な河川を設け、同じ水系の別格子の河川に対して流下させる計算を行っている。具体的には以下の手順で仮想的な河川(以下、モデル河川と呼ぶ)を作成し、流出・流下を計算している。この取扱いにより、全陸上格子の降水が、結果的にすべて河川に流出することになる(大東島地方、小笠原地方等、一部の離島で気象レーダーの探知範囲外を除く)。

①国土数値情報に登録されている全国の河川(21,408 河川)を対象に流路データを格子上にプロットする。ここで河川のない格子は全国の陸上格子で 10 数格子程度である。

② 15km 以上の河川のない格子に 15km 未満の河川が複数存在する場合は、水系が同じ河川であれば河川番号の最も小さい河川の流路をモデル河川の流路とする。また、その格子に流れる河川はモデル河川の 1 河川とする。水系が異なる河川の場合は、それぞれの水系ごとにモデル河川を作成する。

③モデル河川は同一水系の他の河川に合流させる。下流の河川が 15km 以上の計算対象河川であればそこで合流させ、流路を確定する。モデル河川の下流格子が再びモデル河川しか存在しない場合は、モデル河川の流路はその下流格子で別のモデル河川に合流することとする。モデル河川がモデル河川に合流する場合において

も、そもそも河川延長が 15km 未満であるため、対象となるのは最大 3 格子程度なので、周囲格子の流域において極端な精度低下とはならない。

- ④国土数値情報に登録されている河川が 1 つもない格子については、周辺 8 格子に対する最低傾斜方向を下流格子として、その格子に流量を加えている。この場合の河川長は 5km として流下に係る時間を考慮している。

なお、現在の流域雨量指数では、5km 格子単位に流出過程・流下過程にかかる計算を行っているため、精度的な観点から計算対象河川の長さを 15km 以上とした。今後、15km より規模の小さい河川を取り扱うには、5km 平方より小さい単位(格子)ごとに流出量を求め、流下計算することによって 15km 以上の河川と同等の精度が得られると考えられるが、今後の課題である。

3.4 流域雨量指数の精度

3.4.1 流域雨量指数と水位との関係

流域雨量指数は、これまでに述べたとおり、ダム、調節池等による洪水流の制御のほか、水稻生長期の水路変更等に伴う流量増減などの効果は取り込んでいないものの、降水から河川への流出、河川での流下をモデル化し、河川の流量に相当する物理量を算出している。

このため、河川流量に比例して増加する河川の水位及びその上昇・下降の変化傾向と高い相関関係があり、水位のピーク時刻を少ない誤差で推定することが期待される。

以下には、流域雨量指数の開発及びパラメータ設定等の調査に利用していない「独立事例」における流域雨量指数と水位との比較・検証結果を示す。顕著な洪水害の予測につなげる観点から、検証では顕著な洪水害があった河川・水位観測所を対象とした。

第 10 図は、平成 16 年(2004 年)に台風第 23 号が接近・通過した際の、京都府を流れる由良川、兵庫県を流れる円山川・出石川・加古川における流域雨量指数・河川水位・降水量の時系列を示したものである。いずれの河川においても流域雨量

指数と水位は上昇・下降の時間的な変化傾向がよく似ていることが分かる。また、流域雨量指数と水位は 1～2 時間程度の誤差でピーク時刻が一致する結果となっている。

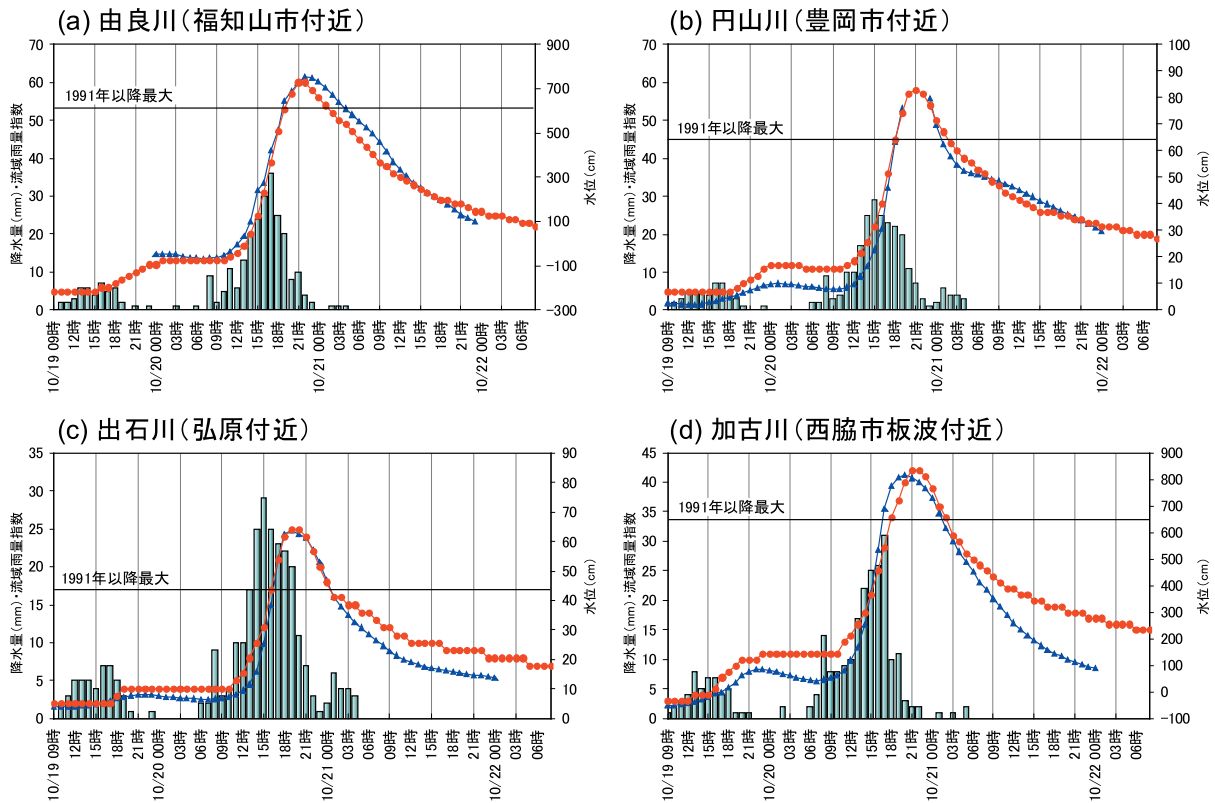
次に、開発が進んだ都市域を流れる河川の洪水時の水位との比較として、第 11 図に、平成 12 年(2000 年)東海地方の豪雨における名古屋市内を流れる天白川の水位と流域雨量指数との関係を示す。都市域を流れる河川では、降雨が急速に流出するため流出特性が山間部を流れる河川とは大きく異なるが、流域雨量指数では、両者に対応する処理が組み込まれており、都市化率の高い天白川においても水位と高い相関が得られている。このように、都市部、郊外のいずれの河川についても水位との高い相関が得られている(田中ほか、2005)。

なお、流量は水位と単調増加関係にあるが、流量から水位への変換は線形でなく河川の断面の形状により決まる。したがって、両者の上昇率は流量・水位の大きさによって異なる。また、水位と流量の関係を(近似的に)表す H-Q 曲線等は、一般的には二次関数ではないため、水位と流量の平方根(大雑把には流域雨量指数の数値と同等)は、一次関数による変換で一致させることはできない。

3.4.2 水位等で評価することができない地点における精度

水位観測所のない地点における流域雨量指数の精度については、観測値が存在しないため、具体的な評価はできない。

しかし、流域雨量指数は、いわゆる「分布定数系モデル」(分布型流出モデル)であり、個々の河川の水位観測に合致するようにパラメータを個別に設定するのではなく、個々の格子ごとに地質や都市化率等の素因に従ったパラメータを設定して、河川の流れるすべての格子ごとに流量を推定している。したがって、水位観測の有無によって精度に差が出ることはない。例えば、任意地点のうち、たまたま存在する水位観測所において精度が判明し、それらの精度を同様の素因(地質や都市化率)を持つ格子において平均したものは、水



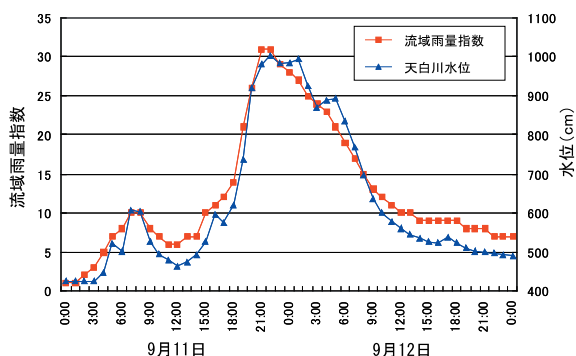
第 10 図 平成 16 年台風第 23 号上陸時の河川水位と流域雨量指数

2004 年台風第 23 号の (a) 京都府由良川 (福知山市付近), (b) 兵庫県円山川 (豊岡市付近), (c) 出石川 (弘原付近), (d) 加古川 (西脇市板波付近) における流域雨量指数・河川水位・降水量の時系列

流域雨量指数は●線, 水位は▲線, 水位観測所に最も近いアメダスの降水量 (mm) を棒グラフで示す。

左軸は流域雨量指数及び 1 時間降水量, 右軸は水位を表す。見やすくするため流域雨量指数と水位のピークの高さがあうように左右の軸のスケールを調整している。また, 図には 1991 年以降の流域雨量指数の最大値も示した。

円山川の水位は 10 月 2 日 11 時から 13 時にかけて欠測値となっている。



第 11 図 平成 12 年東海地方の豪雨における天白川の水位と流域雨量指数

位観測のない地点で同様の素因を持つ格子においても同等の精度を有すると考えて差し支えない。

流域雨量指数は, 特定の地点における水位観測結果との関係については, 既に, 流域面積の大きい河川, 流域面積の小さい河川, 都市域を流れる河川, 非都市域を流れる河川それぞれに洪水時の対応が良いことが示されており, 地域ごとのばらつきも少ない(第 10 図～第 11 図)。このことから, 水位観測のない多くの地点についても, その精度は水位観測のある地点とほぼ同等と推定しても差し支えないと考えられる。

なお, 同様の素因を持つ流域の河川で, 流域雨量指数の精度が同等と見なせるのは, 降水量の平

面分布解析の精度が地域によらず一様であることが前提である。過去においては、気象庁レーダーの探知能力の限界等により、北海道や東北地方の一部地域での精度の低下が懸念されたが、現在は国土交通省のレーダ雨量計や部外機関の雨量計の取り込み等により、それらの課題はほぼ解決されている（永田・辻村，2006）。

3.5 降水予測を用いた流域雨量指数の予想

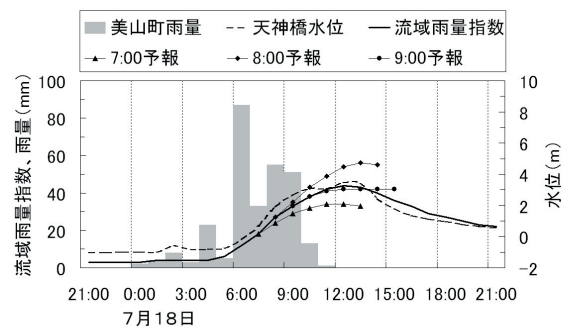
流域雨量指数は、もともと流下過程を考慮していることから降水の予測情報がなくても指数値をある程度予想できる場合もあるが、流域がそれほど広くない河川においては降水短時間予報を利用することによって数時間先の指数値を精度良く予測することが可能となる。降水短時間予報を利用した流域雨量指数の予測例を第12図に示す。これは、平成16年7月福井豪雨における福井市を流れる足羽川の例である。7月18日8時の降水短時間予報が入手できる時点で、流域雨量指数が急激に上昇すると予想され、この時点で最近経験していないような洪水に関する危険度と呼びかけることが可能であると考えられる。

流域雨量指数の予測資料の精度は、その入力となる降水短時間予報の精度に大きく依存する。降水短時間予報は実況補外型予測（EX6）とメソ数値予報モデル（MSM）降水量予測の結合予測により構成されるが、その精度は降水分布や予報時間により大きく異なり、一般的に、予報期間前半（1～3時間先の予報）は精度が高く、予報期間後半（4～6時間先の予報）になるほど精度は低い（永田・辻村，2006）。したがって、降水短時間予報を入力とする流域雨量指数の予測も同様の精度を示す傾向にある。

また、降水予測を用いた流域雨量指数の精度は、降水予測の精度とともに流域面積にも依存する。流域雨量指数の予測資料の精度は流域面積が大きい河川ほど高い（横田，2007）。これは、流域が大きいほど上流降雨が対象地点に流下するまでに時間がかかるため、入力雨量の寄与として過去の実況（解析雨量）にかかる比重が大きくなること、また流域が大きく対象格子が多数あることから個別の格子における雨量予想の時間の誤差や

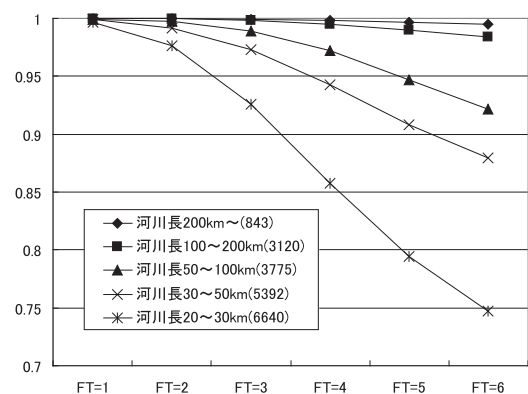
位置ずれによる誤差が打ち消される傾向が強くなること、の2つの理由による。このような降水の時間積算、面積積算の効果により、降水予測を用いた流域雨量指数は、降水予測そのものより、相対的に精度が高い。

第13図は、河川の長さ（上流端からの距離）ごと、流域雨量指数の予測時間ごとに、流域雨量指数の解析値と予測値との相関関係を求めたものである。この図から、河川の長さが長い（流域が広い）ほど、精度が高いことが分かる。



第12図 流域雨量指数の予測例（平成16年福井豪雨）

平成16年福井豪雨における福井県足羽川（福井市付近）の流域雨量指数と天神橋の水位および雨量（福井市に隣接する美山町）の時系列。見やすくするため流域雨量指数と水位のピークの高さがあうように左右の軸のスケールを調整している。



第13図 流域雨量指数の予測資料の精度評価

2006年7月～9月までに、全国で1991年以降の履歴順位が6位以上となった河川・格子を抽出し、河川の長さごとに流域雨量指数の解析値（実況値）との相関係数を求めたもの。

凡例中の（ ）中の数値は資料数を示す。

4. 流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善

ここでは、洪水警報・注意報に流域雨量指数を導入するにあたり、洪水害と流域雨量指数をいかに対応付けるか、具体的にどのような方法で基準値を設定するか等の技術的な考え方を整理し、流域雨量指数を基準値に用いた場合の評価についても併せて報告する。

4.1 水害の発生形態

4.1.1 水害の発生形態による分類

水害は、被害の発生形態から3種類に分類することができる（例えば高橋, 1978. 第14図参照）。

まず、河川の水位が異常に高くなり、堤防を越える等して、堤防から水があふれ出す現象すなわち「外水はん濫」である。「外水」の「外」は、堤防から川側の地域を「堤外地」と呼ぶところに由来している。流水が堤防を大きくえぐって壊し、そこから大規模に水が流れ出す「破堤」は、堤防を越えない水位でも発生するが、堤外地からの「外水」が住家側にはん濫したものであることから、「外水はん濫」として分類する。

次に、堤防に守られた通常住家などがある地域、いわゆる堤内地に降った雨などによる大量の水（堤内地の水、すなわち内水）の排水不良等によって住家などが浸水する現象が「内水はん濫」

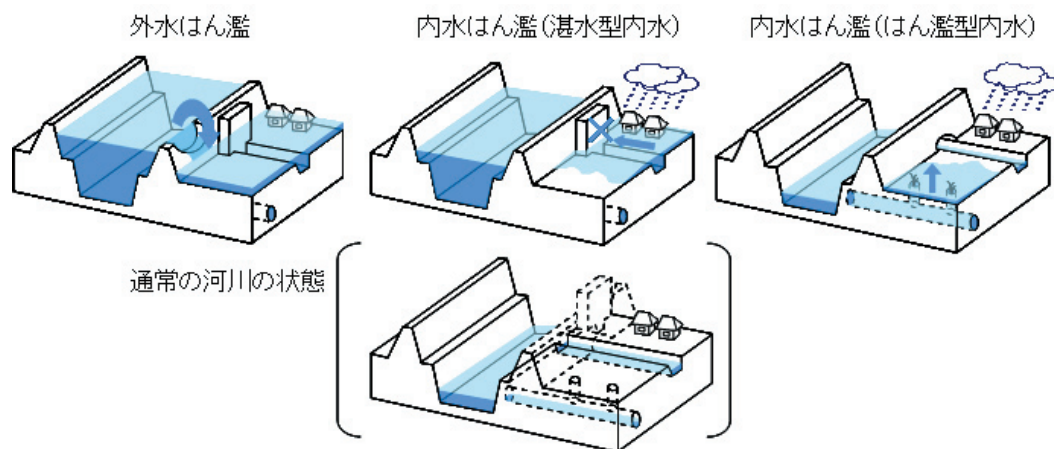
である。内水はん濫は発生要因から2種類に分類される。河川の周辺の地域の内水が、河川の水位が高くなったため排水できずに発生する現象を「湛水型内水」、短時間強雨等により雨水の排水能力が追いつかずくぼ地や低地などに水がたまる現象を「はん濫型内水」（又は単なる「内水」）と言う。湛水型内水は、発生地域に堤防の高い河川がある場合に限定されるが、はん濫型内水の場合は、河川が流れる地域と異なる場所でも発生することが特徴である。

なお、幹川に合流する支川の水が堤防を越えてあふれた場合、支川自体に上流から流れ込む水は堤防からあふれない流量でありながら、幹川の水位が高いことが原因であれば、厳密に見れば「湛水型内水」であるが、支川側から見ると、支川の外水がはん濫するため「外水はん濫」と呼ばれることがある。

この3種類の水害は発生形態が異なることから、これらを的確に予測するには、それぞれに対応した予測が必要である。

4.1.2 3形態の水害に対応する警報・注意報

気象庁では、水害のうち、河川の洪水（はん濫のほか高水位を含む）に起因する水害に対しては洪水警報・注意報を、大雨が原因であるが、河川の洪水によらない水害に対しては大雨警報・注意



第14図 水害の発生形態の3類型

報を発表している。これらを前述の3種類の発生形態に対応させると、外水はん濫は洪水警報・注意報、はん濫型内水は大雨警報・注意報、湛水型内水は、幹川の水位が高くなったことが主因であるため洪水警報・注意報の発表対象としている。湛水型内水を洪水警報・注意報の対象とすることは、高潮により河口付近の河川から水があふれた場合に、その主たる要因から、高潮警報として取り扱うことと同じ考え方である。

警報は、気象業務法で「重大な災害の発生するおそれがある場合にその旨を警告して行う予報」と定義されている。気象などを原因として発生する災害が重大かどうかを判断するものさしの1つは「被害」の大きさであるが、洪水警報基準の設定に際しては、前述の水害要因に起因する「浸水家屋」の規模(棟数)を使用している。「浸水家屋」の規模を用いるのは、他の種類の被害に比べ精度の高い数値情報として集計されること、警報を避難行動に結びけるために現在最も関連の深い資料であること、等の理由による。

一方、注意報については、軽微な災害も含めて災害の発生するおそれがある場合に発表するものであり、警報の対象としない幅広い災害も対象として同様の手順により作成すべきであるが、部外機関等からの幅広い水害資料の収集、対象とする様々な水害の整理、災害発生の直接の要因となった地域(例えば田畑の冠水における直接の要因)の特定の仕方の整理等に課題が残ったことから、平成20年5月28日の流域雨量指数の導入にあたっては、現在と発表頻度を同等となるような雨量及び流域雨量指数基準値を求める方法を採用した。これは、従来基準と比較して洪水の予測精度が高い指標を導入することにより、発表頻度が同じであれば、従来の基準で捕そくする水害は同様に捕そくできるであろうとの考えに基づいている。

4.2 対象災害の捕そくの方

洪水警報・注意報の基準は、過去の洪水害事例における指標(基準要素)と災害との関係を調査して求める。ここでは、水害の捕そくに関する新しい手法、洪水警報・注意報及び大雨警報・注意

報に対応して新しい基準を採用した根拠、災害誘因を参考に警報対象領域を細分することの技術的観点について述べる。

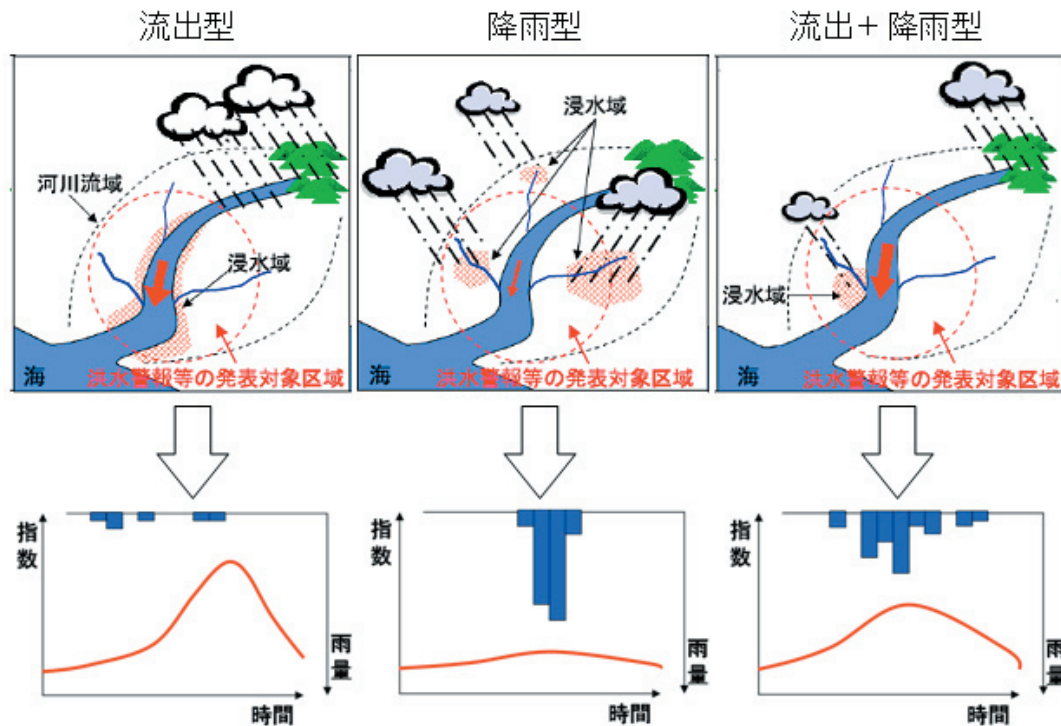
(1) 水害発生パターンによる災害との関連付け

従来、4.1で述べた発生の形態を考慮せずに、誘因である降水と水害全般とを直接結び付けていたため、捕捉率が低い場合があった。別の観点からは、洪水害を的確に表すための重要な指標となる、流量や水位に関する情報がなかったため、発生の形態を考慮できなかった面もある。また、実際の災害事例では、洪水警報・注意報の対象である湛水型内水と大雨警報・注意報の対象であるはん濫型内水を、災害報告からの的確に区別することは難しい場合が多く、また、排水施設(側溝、下水道)からの浸水ははん濫型内水であるが、小河川からのはん濫(洪水災害)と区別することが難しい場合が多い。このため、流域雨量指数導入前は、河川の状況を具体的に把握できないため、多くの細分区域において洪水警報・注意報と浸水に関する大雨警報・注意報の基準値を同じ値として水害を捕そくしていたが、空振りが多くなることは避けられなかった。

これらの課題に対して的確に対応し、水害の捕捉率を高めるとともに空振りを減少させるために、流域雨量指数及び短時間雨量を使用して、水害の発生形態に即した「基準要素から説明した水害発生パターン(以下、水害発生パターン)」を考え、警報・注意報基準を作成することとした(第15図)。

具体的には、水害発生パターンを①流出型：河川の水位上昇に起因する災害(外水はん濫)に対応、②降雨型：対象地域の短時間強雨が起因する災害(主としてはん濫型内水及び小河川の外水はん濫)が対応、③流出+降雨型：河川の水位が高い状況における短時間強雨による災害(主として湛水型内水)に対応、の3つとし、基準要素は、流出型では流域雨量指数、降雨型では短時間雨量、流出+降雨型では、流域雨量指数と短時間雨量の組合せとした。

また、流域雨量指数を計算していない短い河川において外水はん濫が発生する場合、流出型では



第 15 図 水害発生パターンによる水害の分類に関する概念図

グラフ中、赤線は流域雨量指数、棒グラフは雨量をあらわす。

流出型事例では、流域雨量指数の上昇幅が大きいこと、降雨型事例では、短時間に強雨が集中していること、流出+降雨型では、両者の大きい時間帯が一致していることが特徴となる。

なく降雨型として捕そくされることがあるため、②については、大雨警報・注意報及び洪水警報・注意報の両者の基準とした。

(2) 短時間雨量に関する考え方

例えば流域が 5km の 1 つの格子に含まれるような小河川の洪水とはん濫型内水を考えてみる。はん濫型内水は降水等により「地表面付近から流れ出す水量」が排水施設の能力を超えるため発生する。「地表面付近から流れ出す水量」は格子内の降水量との相関が高い。一方、流域雨量指数によると、この格子内の小河川の流量は、前章のタンクモデルで推定する流出量すなわち「地表面を伝って河川に流れ出す水量」そのものである。このことから、両者の相関が高いことは容易に想像できる。また、レーダーや雨量計による降水量は、流域雨量指数のように先行降雨の影響を考慮できないが、5km 格子より細かい分解能で観測ができ

るため都市部のように極めて局地的な地域に短時間で降る大雨により発生する水害を捕そくできる特長がある。このため、小河川の洪水とはん濫型内水は対象地域の短時間雨量で対応させることが妥当である。

短時間雨量を指標として用いるにあたっては、対象領域内の水害に対するぜい弱性の違いを考慮して、水害との対応を向上させるため、基準設定領域として平坦地・平坦地以外という区分を新たに導入した。平坦地とは、おおむね傾斜が 30% 以下で都市化率が 25% 以上の地域を指す。前述した「地表面付近から流れ出す水量」は、誘因となる降雨の強度・時系列に加え、素因としての傾斜や地質、都市化の進行の度合い等も関連するので、あらかじめ浸水害の起こりやすさの違う地域を分けて雨量基準を設定することで、より災害との結びつきを強くするねらいがある。

また、どの程度の積算時間とするかについては、

流域雨量指数導入以前と同様に、1時間雨量（以下、R1と呼ぶ）と3時間雨量（以下、R3と呼ぶ）を用いている。ただし、両者を設定するのではなく、R1又はR3のうち過去に発生した災害との相関が強い方を採用することになっている。R1とR3のどちらが災害との対応が良いかは当該地域の地理条件や土地開発の程度と関係があると考えられる。一般に、短時間強雨事例においては、降り始めから降雨ピークにかけてのR1とR3の相関が強いので、どちらか一方の指標で大幅に値を下げることなく災害との対応付けが可能である。

(3) 対象災害捕そくの方針

警報の対象災害の捕そくについて、大雨警報と洪水警報の対象災害を区別することが困難であることは前述のとおりであるが、洪水警報における水害のものさしと大雨警報における水害のものさしを、同じ「浸水家屋」の数で評価することができる。すなわち、「重大な災害のものさし」という観点から、2つの警報の家屋数は同一であるべきであり、かつ「浸水家屋」の数だけからは洪水警報の対象災害なのか大雨警報の対象災害なのかは判断できない。また、「重大な災害のおそれ」を的確に予報することの方が、「浸水家屋」がどちらの対象災害なのかをはっきりさせることより優先することは言うまでもない。このため、洪水と大雨による災害をあらかじめ区別せずに、それらを流域雨量指数や対象領域内の短時間降水量という複数の説明変数を使用した3つの水害発生パターンのいずれかにより捕そくすることで、捕捉率を高めるとともにできるだけ空振りの少ない洪水及び大雨の警報・注意報基準を求めることにした。この方法については4.3で述べる。

以上により、水害の実態や発生過程を考慮した基準として、これまでよりの確に水害を捕そくすることができるようになった。新しい方法では、災害の捕捉率は上がる一方で、水害の内訳について浸水害と洪水害とを厳密に区別したり、それを捕そくするために最適な要素を事前に指摘できないことになる。しかし、現象面から両者の区別が困難であることは、(1)で指摘したとおりであり、

それぞれの要素で表される代表的な災害は明確に区別されているため、警報・注意報の運用面で困難を生じることはない。

平成20年5月の警報・注意報の改善では、水害を3種類の水害発生パターンに基づいて基準値を求めている。また、この節の記述に基づき、3種類のいずれかの基準を超えると予想した場合は洪水警報・注意報を発表し、短時間降雨の基準を超えると予想した場合は大雨警報・注意報を併せて発表することとした。

4.3 基準値の算出方法

(1) 災害資料の整理

基準値の算出のための市町村ごとの水害資料（事例日、被害規模）は1991年から2005年まで収集し、気象データは、浸水棟数などの災害資料が市町村単位より細かい発生場所の特定や正確な発災時刻の特定が困難なことも多いため、発生現地・発災時刻の値ではなく、各事例における市町村内の最大値（地域的な最大値であり時間的な最大値）を使用した。

地域的な最大値として市町村内最大値を用いることについては、市町村内の気象要素に対する水害の起こりやすさがほぼ一様という仮定に基づいている。すなわち、この仮定が成立すれば、市町村内の災害発生場所を特定しなくとも、気象要素が最も大きいところで最も水害が発生しやすいことになるからである。平坦地と平坦地以外に分けているのは、実際にはこの起こりやすさに大きな違いがあることから、対象地域内の水害の起こりやすさをできるだけ一様にするためである。1つの市町村における発生場所の不明確な災害のグループに対し、2つの分割した区域のそれぞれの最大値の気象要素がある場合、事例数がある程度あれば、原理的には災害発生現地を特定せずとも基準は作成できる。

また、時間的な最大値として、発災時刻が不明な場合にその事例期間の最大値が発現した時刻のデータを対応させているのは以下の理由である。まず降水量については、発災との関係が同時刻で相関関係があるとは限らない。すなわち、浸水の発生にはその前の時間の降水量が関係してい

るが、何時間前の降水量が関係しているのかは不明確であるので、発災時刻が分かっているにもかかわらず直接的にその時刻の降水量を対応させることができない。このことから、災害が発生した場合には、「少なくともこの期間の最大値を記録すれば災害が発生する」という関係付けをしている。

「実際には、ふた山の降水のピークがあり、第二のピークで最大値が出る前の第一のピークが出た後発災した」という場合、「少なくとも第二のピークの最大値を記録すれば災害が発生する」という意味でこの関係付けは正しい。なお、この事例の場合では、可能であれば、この期間を二事例とすることが望ましい。

さらに、このような発災事例と災害の発生していない降雨事例における地域的・時間的な最大値を多数収集し、基準となる気象要素の大きさごとにプロットすると、ある値以下では災害の非発生事例のみという点を導き出すことができる。その値に1を足した値が基準である。つまり、この基準は「この基準以上なら発災する可能性がある」ということを意味する。このため、先ほどのふた山の降水事例における最大値である第二のピークは、直接にはその値は基準となっておらず、これにより直ちに誤差が生じることはない。

(2) 災害と気象の関係の統計分析

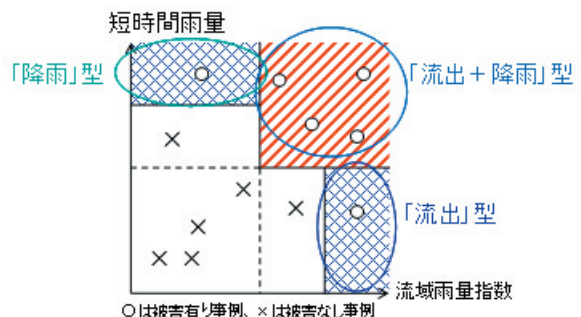
こうして収集整理した災害、気象資料をもとに、その関係を統計的に分析して基準値を算出するわけであるが、水害を市町村ごとに捕そくし、できるだけ空振りの少ない数値を求める方法は、基本的には従来の基準設定と同じである。ただ、今回は説明変数として、新しい指標である流域雨量指数を使用するとともに、市町村内に複数の流域がある場合は流域雨量指数を最初からいくつどれを使うかを定めるのではなく、回帰分析で行われるように、候補となる指標（河川）をすべて説明変数として登録し、分析の結果に基づいて最終的に多数の災害を良く表す河川の流域雨量指数を選択して基準として使用することとした。

流域雨量指数を1つだけ使用した基準計算では、横軸に流域雨量指数、縦軸に短時間雨量をとった2次元グラフ上で被害あり事例、被害なし事例

をプロットし（散布図）、水害発生パターンにより、被害あり事例をくまなく捕そくし空振りを最小限にとどめる基準値を求めることができる（第16図）。

一般的な基準計算では、対象域内を流れる複数河川の流域雨量指数、平坦地、平坦地以外領域の短時間雨量、流域雨量指数と雨量の組合せ等多くの説明変数から、対象災害をくまなく捕そくし空振りが最低になるように解を求めることになる。

これらの作業は、専用のプログラムを用い客観的に行うこととした。これによると、対象災害の捕そくを高め空振りを減らすだけではなく、対象災害に至らない被害事例における被害数も考慮した基準値を求める。例えば、警報対象災害を床上浸水50棟とした場合、対象災害の被害規模に至らないという点で同じ空振りであっても、0棟の「被害が全く発生していない事例」より49棟の「被害事例」を捕そくするような基準値の組合せを求める。これは、手法としては、いわゆる「コスト・ロスモデル」の応用である（例えば立平、1999）。すなわち、ある災害が生じたとき対策をとっていないと被害規模に応じた損失があり、対策をとっていれば損失はゼロという仮定をおき、「対策をとること」を「警報、注意報を発表すること」と置き換えた場合に、発表コストと損失の大きさの兼ね合いから、調査資料期間のトータルとして最適となる基準値を導くというものである。ここで言う最適な基準値というのは、「できるだけ発表回数が少なくなるように」かつ「少な



第16図 散布図による基準の求め方の概念図

領域を区切る実線の示す値を基準値として求める。なお、「流出+降雨」型の基準は同時性を考慮してプロットしている。

い発表回数で可能な限り被害規模の大きい災害事例を捕そくする」ことを意味しており、これは従来の考え方と全く変わらない。ただし、コストとロスの両者の比は、金額的な数値を採用しているわけではなく、行政的責任も考慮してコストに対するロスを極端に大きくとっている。また、複数の流域雨量指数の河川について、最も災害を捕そくするのに適した河川を選択するとともに、短時間雨量の基準指標について R1 と R3 のうちどちらの指標が災害との対応が良いか、についても選択の対象としている。

(3) 実際の警報基準値の作成例

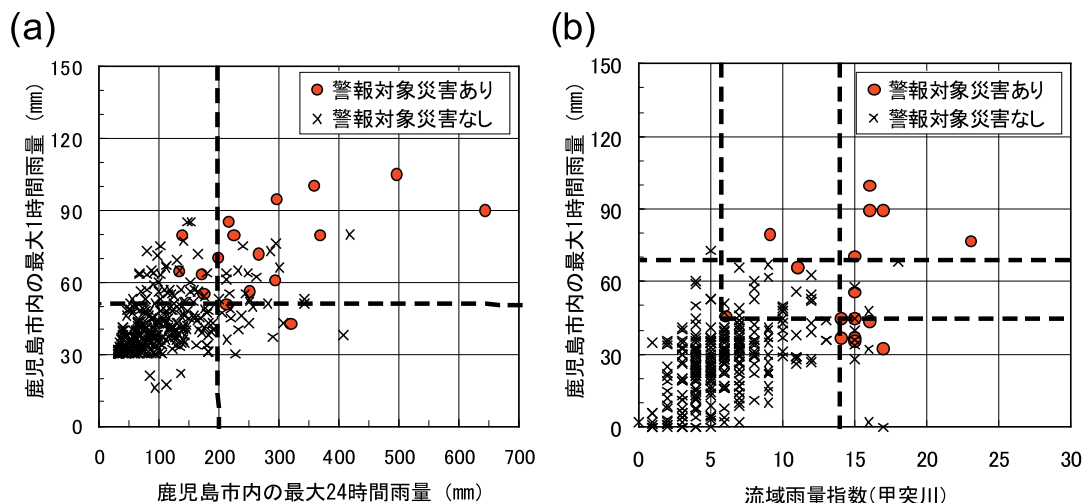
第 17 図に警報基準値を求めた具体例（鹿児島市の例）を示す。被害あり事例（グラフ上で●で示す）と被害なし事例（×で示す）を的確に分離する線が警報基準値となるが、24 時間雨量に変わって流域雨量指数を導入したことで●と×の分離がより明確となり、さらに 3 種類の水害発生パターンに対応する基準要素をうまく設定することで、捕捉率を下げることなく空振り率の低減を図っている（第 4 表）。なお、鹿児島市では 4 つの河川の流域雨量指数が洪水警報の基準として採

用されている。このため、散布図は厳密には、図 17 (b) のような 2 次元でなく、5 次元で構成されるべきものであるが、図 17 (b) では災害発生事例の多くを甲突川の流域雨量指数で捕そくしていることが分かる。

ここで注意しておきたいのは、基準の候補となる河川のうち一部の河川の指数が警報基準として出力されないことがあるが、基準が求まらなかった河川では災害が発生しないから基準値がない、ということではない。基準値が求められた河川が当該市町村の洪水害を捕そくするのに代表されている、という考えに基づいた作業としている。なお、基準値が求められなかった河川についても、1991 年以降の最大値を超える指数が出現した場

第 4 表 第 17 図のそれぞれの基準による災害捕そく事例数、空振り事例数の比較

	1時間、3時間、24時間雨量 に基づく基準評価	1時間雨量と流域雨量指数 に基づく基準評価
対象災害事例数	17	17
発表対象事例数	101	51
対象災害を捕そく できる事例数 (災害捕捉率)	17 (100%)	17 (100%)
空振り事例数 (空振り率)	84 (83%)	34 (66%)



第 17 図 鹿児島市内の警報基準設定のための散布図

1991～2005 年までの 15 年間に発生した大雨事例を対象に、警報対象災害（床上浸水 5 棟以上または床下浸水 20 棟以上）のあり（●）・なし（×）を、雨量または流域雨量指数のグラフ上にプロットしたもの。(a) は 1 時間雨量と 24 時間雨量によるもので、破線は従前の警報基準を示す。(b) は 1 時間雨量と甲突川の流域雨量指数を用いた場合。

合には、当該期間で経験したことのない洪水が発生するおそれがあり、それが重大な災害に結びつく可能性があるとして、「最大値+1」を警報基準値としている。

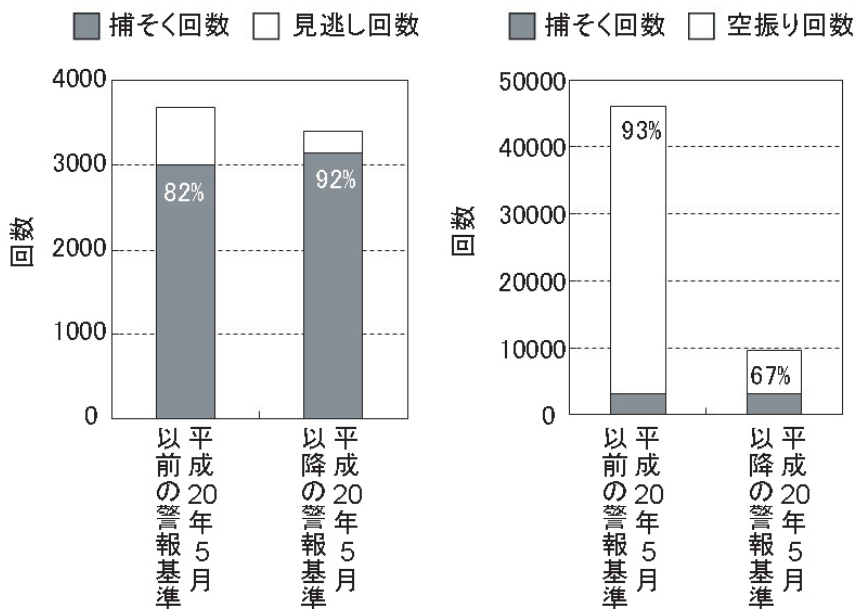
4.4 警報基準値の評価

これまで見てきたように、洪水害との関連が深い流域雨量指数を洪水警報基準に導入し、また災害との対応付けを工夫して基準値の最適化を図ることで、従来までの基準と比較して災害の捕捉率を下げずに、かつ空振りを減少させるという改善が期待される（横田，2007）。洪水警報基準値の作成に利用した従属資料により水害と警報との関係を検証した結果が第18図である。この検証では、実況値で警報を発表すると仮定したものであるが、警報基準値の性能・妥当性を評価することはできる。この図からは、流域雨量指数を使用した新しい基準は、従来の基準と比べ捕捉率が高く、空振りが大きく減ることが確認できる（第18図）。

また、平成22年度の市町村単位の警報・注意報では、よりきめ細かな発表・解除を行うことを

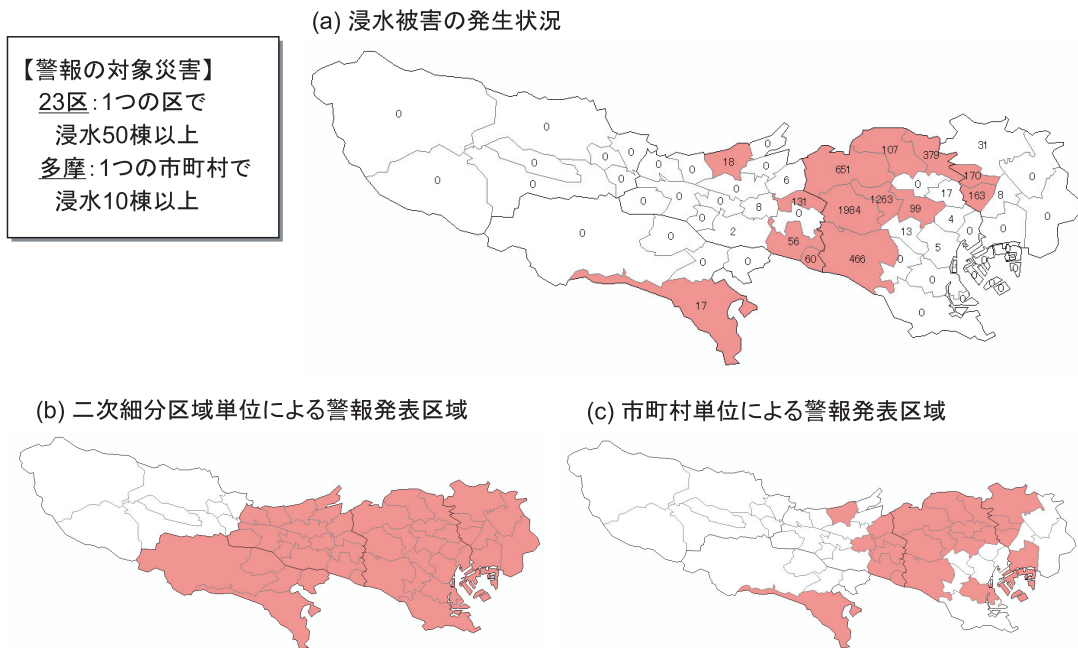
目標としているが、今回作成した、流域雨量指数を利用した洪水警報基準を用いて区市町村単位で洪水警報を発表した場合、平成17年（2005年）9月4日東京都の豪雨事例による試算では、警報の対象とする重大な災害が発生した区市町村を、相当絞り込んで、警戒を呼びかけることが可能になると見込まれる（第19図）。実際の警報・注意報の発表では、現在の予報技術の水準から、予報の誤差を考慮して、ある程度幅広い地域を警戒対象とすることになるが、それでも、これまで降雨がほとんどないのに警報の対象になっていた地域に発表しなくてもすむ場合や、降雨が終了し災害のおそれなくなった市町村から速やかに解除することができる、などの改善が見込まれる。

さらに、平成20年5月28日～10月31日までに発生した事例（基準値作成事例とは独立資料）について、第18図と同様の評価を行ったものが第20図である。短期間の検証ではあるが、平成20年5月以前の基準と比較して、第18図と同様に、見逃しを増やすことなく空振りを減らす結果が得られた。



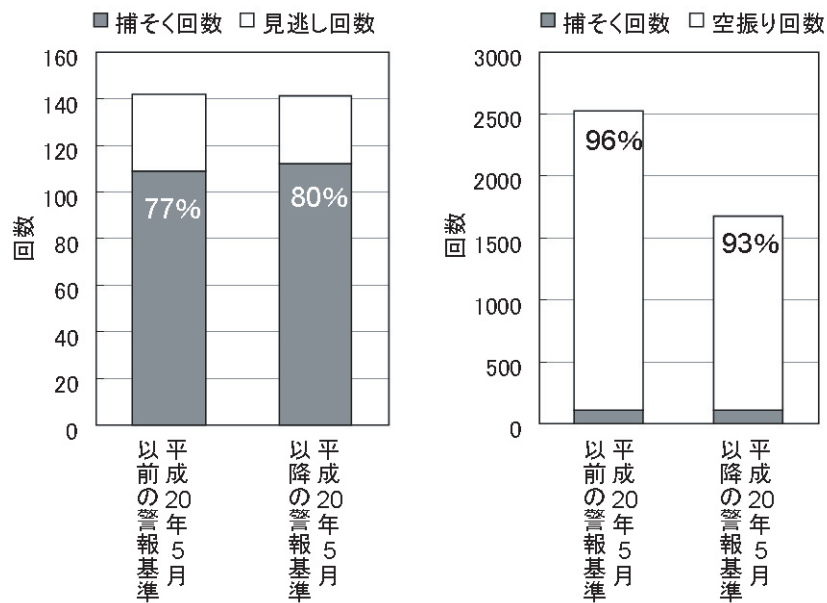
第18図 新旧の警報基準の水害事例（従属資料）に基づく検証（横田，2007）

1991～2005年の15年間の全国の基準調査資料（従属資料）に基づき、市町村単位で災害捕捉率・空振り率を検証した結果。左図は災害発生回数に対する捕そく回数、右図は発表回数に対する空振り回数を、グラフ中の数字はそれぞれ災害捕捉率と空振り率を示す。



第 19 図 2005 年 9 月 4 日東京都の豪雨事例による警報発表区域の比較

(a) 浸水被害の発生状況. 数字は浸水家屋数を表し, 対象災害を超える被害のあった区市町村を着色した. (b) と (c) 1991 年から 2005 年までの災害資料をもとに作成した, 流域雨量指数を用いた区市町村ごとの警報基準に基づいて判定した警報発表区域. ただし, (b) は二次細分区域単位で発表した場合で, (c) は市町村単位で発表した場合をそれぞれ表す. ここでの警報発表の判定は, 雨量予測が 100%的中した場合を仮定している.



第 20 図 新旧の警報基準の水害事例に基づく検証

第 18 図と同様で, 平成 20 年 5 月 28 日から 10 月 31 日の期間 (独立資料) で検証した結果.

5. 流域雨量指数の利用上の留意点・今後の課題

流域雨量指数は、河川の洪水に深い関係がある指標であるが、利用にあたって注意すべき事項があり、以下に主なものを記載する。

5.1 利用上の留意点

(1) ダム等の人工的な水量調節

流域雨量指数では、ダムや調節池等河川管理者による洪水調節、水稻生長期における人工的な水量調整の効果が考慮されていない。ダムによる洪水調節は、一般的に、極端に多い流量の一部を貯留することでピークを下げ、その後、災害のない程度の流量を一定期間継続して放流することにより下流の洪水を緩和する役割を果たしている。すなわち、洪水のピーク時間は変えずに、洪水時の流量を一定の割合で低減していることから、ダムの上流流域の面積がそれほど大きくないかダム自体の規模があまり大きくない場合には、降水による洪水の規模と災害との対応という点では、厳密に流量や水位を求める場合に比べ、あまり大きな問題にはならない。

現在、洪水警報・注意報の基準作成にあたっては、災害を的確に把握する指標を選択することとしているため、ある特定の河川の流域雨量指数がダム等の影響により洪水害との対応が悪い場合は、当該河川の指数は指標として採用されないことになる。このため、同じ市町村の別河川の指数により災害が捕そくされる基準となっていることから、洪水警報・注意報の基準の精度が直ちに低下することにはつながらない。

さらに、広い流域と多数のダムを持つ河川もあるが、それらの多くは指定河川洪水予報の対象となっており、指定河川洪水予報を流域雨量指数に優先して洪水警報と整合させる運用を実施している。このことから、ダム等人工的な調節効果により指数の精度が悪く、被害との対応が悪く運用に困難があるとの報告は現在のところ見られない。将来的な技術的検討課題ではあるが、今後の水防活動に資する情報のあり方の検討とともに改善を進めるべき事項である。

(2) 湖沼の貯留効果

流域雨量指数では、国土数値情報に基づいて河川の流路に沿って水を移動させている。琵琶湖や霞ヶ浦など大規模な湖沼については、実際には水が貯留される効果があるが、国土数値情報では湖沼も一般的な線状の河川とデータが登録されている。このため流域雨量指数では湖沼では単一の流路と見なして水を移動させてしまう。湖沼から外に水が流下する地点では、流量の調整が行われるのが一般的だが、流入量が大きくなれば流入量と同じだけを流下させることから、流路の設定との違いは時間的な差となる。また、流入量が極端に大きい場合は、ダムと同様の措置が行われているため、(1)と同様の課題ととらえることができる。

(3) 潮位の影響

海岸付近の河川では潮位の影響により水位が変動しているが、このとき上流からの洪水と時期が一致すると水位が大きく上昇することがある。このような災害に対応するためには、流域雨量指数と潮位との組合せ基準が有効であるが、平成20年5月28日に開始した新しい洪水警報基準では流域雨量指数と潮位による複合型の基準を求めている。

今後、洪水警報・注意報の基準を設定する場合には、流域雨量指数や降水量に潮位を加えて考慮することが望ましく、洪水警報・注意報における洪水害の捕そくの課題と考えられる。

5.2 今後の改善事項

以下の事項については、今後の改善項目として検討する予定である。

(1) 融雪量の取り込み

流域雨量指数では、入力値に降水量を用いていることから、多雪地域における大規模な融雪に伴う洪水を表現することができない。平成18年(2006年)には全国的に多雪の冬となり、同年5月に北海道の石狩川水系雨竜川では、大規模な融雪により指定河川洪水警報が発表されたが、流域雨量指数では水位上昇に相当する指数の上昇は計算されなかった。

気象研究所では全球数値予報モデルにも用いられている陸面過程の改善に従前から取り組んでいる（佐藤，1989；大泉，2000）．気象庁と気象研究所は，平成 17 年～19 年にかけて，数値予報モデルから推算される融雪情報の，流域雨量指数への導入に向けた研究開発を共同で進めてきた．前述の雨竜川に推算した融雪量を適用した結果，ピーク出現時刻や時間変化がほぼ観測と一致する結果が得られた（大泉ほか，2007）．この成果を受け，平成 22 年の融雪期から，流域雨量指数への融雪量の利用を試験的に開始する予定である．

(2) 流域雨量指数の高度化

都市地域では，長さ 10km 以下の河川でも外水はん濫がたびたび発生している（例えば，芳村ほか，2006）．3.3.1 で述べた都市域流出シミュレーションを 2.5km 格子に適用すると，このような地域では，1‰程度の傾斜があれば，1 時間に 50mm の雨が 1 つの 2.5km 格子だけに局地的に降った場合でも，1 時間後には，そこを流れる河川の下流域で，流域雨量指数による洪水警報の基準に相当する流量に達することがある．一方で，大雨による水が河川に大部分流れ込むまでには 6 時間程度までかかる場合が多い．これらの地表面の水量の変化は，3.3.1 の手法に従って先行降雨の影響を含め流域雨量指数におけるタンクモデルの流出量で的確に対応することが可能である．今後，洪水害が頻発する都市部に対する洪水や浸水に関する精度改善を行う際には，流域雨量指数において現在の格子間隔を小さくし，数値計算の時間ステップを短くするとともに，特に都市部においては対象河川を増やす必要がある．また，河川に流れ込む前のすべての格子におけるタンクモデルの流出量は，「表面を流れる流出量」を表していることから，これを浸水害に対応する指標として使用することも検討する必要があるだろう．なお，その際には Ishihara and Kobatake (1979) を用いたタンクモデルのパラメータについても対象領域の面積の変更に伴う再設定が必要となる．

(3) 流域雨量指数のわかりやすい表示方法

防災機関を主とした部外機関に有効に流域雨量

指数を活用してもらうためには，流域雨量指数を用いて，洪水発生の危険性をわかりやすく地図表示する等の工夫も必要である．これについては，防災情報提供システムを通じた「規格化版流域雨量指数」の提供という形で，一部その取組を開始している．規格化版流域雨量指数については，付録に開発経緯等の詳細を記載した．

6. おわりに

本稿では，気象庁が単独で発表する洪水警報・注意報の改善を目的に導入された流域雨量指数開発の経緯，技術と，警報・注意報の改善までの手順について報告した．

近年の都市地域への人口・資産の集中により，河川がはん濫した場合に被害が甚大となるとともに，地下空間への開発が進むことによる地下街や地下施設の被害といった新しい災害様態の発生も社会的に指摘されている．今後，河川に対する洪水についての情報については，ますますその重要度が増すものと考えられる．

この報告により，洪水警報・注意報の改善の目的で開発され実用化された流域雨量指数について，正しい理解に基づく適切な利用，部外機関への正確な解説，さらには，今後の技術の進展につながれば幸いである．

なお，本報告の著者は，流域雨量指数本体及び支援資料，警報・注意報基準作成資料等の企画，開発に主として携わった 3 名としたが，本業務には予報部予報課を始め，予報部各課，気象研究所，さらには全国の気象官署の多くの方が携わられ，各方面から業務達成に強力なご支援をいただいたことを記させていただく．

付録 規格化版流域雨量指数

気象庁では、流域雨量指数に基づく地域の洪水危険度の高まりを地図上で分かりやすく表示するために、平成 20 年 5 月 28 日、新しい大雨及び洪水の警報・注意報の開始とタイミングを合わせ、流域雨量指数を規格化しメッシュ単位で表したものを「規格化版流域雨量指数」として、防災機関向けに防災情報提供システムを通じて提供を開始した。規格化版流域雨量指数は、洪水危険度の面的な相対分布を発現頻度として表すもので、流域雨量指数と同じく 5km メッシュ単位で算出している。わかりやすく地図表示することで、流域雨量指数の活用の利便性の向上を図り、さらに今後、防災機関等において、警報・注意報とは違った防災活動への使い方なども期待するものである。ここでは、その検討経緯、特徴及び利用上の留意点等について述べる。

流域雨量指数はそもそも流量規模を示すもので河川・地点ごとの指数値の違いに大きな意味を持つがその意味を直感的に理解することは難しい。

まず、一般的に河川規模によって平常時及び洪水時の流量は異なるため、指数値だけで洪水危険度を推定することはできない。例えば、東京都を流れる荒川（流域面積約 3,000km²）と神田川（流域面積約 100 km²）の流域雨量指数の値が同じ「20」であっても危険度の意味が全く異なる。「20」という値は、荒川にとってみれば平常時の値であるが、神田川においては数年に 1 度の発現頻度で起こりうる値である。このことは、同じ河川であっても、どの地点の数値であるかによっても意味するところは異なる。

したがって、流域雨量指数を洪水危険度として分かりやすく地図表示するためには、統一的な危険度を表す何らかの規格化が必要となる。

規格化の方法の 1 つとして、「洪水警報基準による規格化」が考えられる。しかし、「警報基準に対して現在何 % である」という情報はユーザにとって利用しやすいが、洪水警報基準は降雨型・複合型・流出型（複数河川）の多次元で設定されるもので、それら一次元の尺度に置き換えることは困難である。また、洪水警報における流域雨量指数基準はすべての河川のすべての格子に設定さ

れているわけではないので、洪水警報の基準を設定していない格子について規格化値を求められないといった問題もあり、地図表示として適さない。

規格化の別の手法として、「履歴順位による地図表示」が考えられる。これは、洪水の危険度を発現頻度として表現するものであり、すべての河川・格子で表示が可能である。しかし、現在、履歴順位の算出は上位 20 位までを対象としているため、降雨立ち上がり時など履歴 20 位に達しない洪水ポテンシャルは表示できない。また、仮に履歴順位算出の統計期間を 15 年とするならば、履歴 20 位とは 1 年に 1.3 回程度の頻度で発現する事象である。すなわち、履歴順位による表示の場合、1 年に 1 回程度以上の高いレベルを細かく分類したもので、1 年に十数回程度といった低いレベルを表示することができない。さらに、履歴 1 位（「十数年に 1 回」程度以上の危険度）を超える危険度は同じ値となり区別ができない、といった課題がある。

そこで、流域雨量指数の、河川のすべての流域をカバーし面的な分布として利用できる利点を生かしながら、段階的に洪水の危険度を表すことができるよう、過去 15 年間（1991 年～2005 年）の流域雨量指数の最大値を 1 とした場合の流域雨量指数の比率をメッシュ単位（5km 格子）で算出したものを規格化版流域雨量指数として提供することとした。ここで、流域雨量指数は河川ごとに異なる値を持つので、同一メッシュ内に複数の計算対象河川が存在する場合、個々の河川で規格化した値の中で最大値をそのメッシュの値として採用するようにしている。また、流域雨量指数の計算対象河川がない格子についても、3.3.4 で述べた仮想的な河川（モデル河川）の流量を利用することで、全国すべての陸上格子（ただし、大東島地方と小笠原地方を除く）で規格化値を求めている。このような規格化手法により、履歴順位で 20 位以下の危険度レベルの降雨事例についても洪水の危険度として地図表示することが可能になるとともに、地域の相対的な洪水危険度の高まりを平面的かつ直感的に把握することが容易になる。

このような規格化は、履歴順位と同様に、洪水

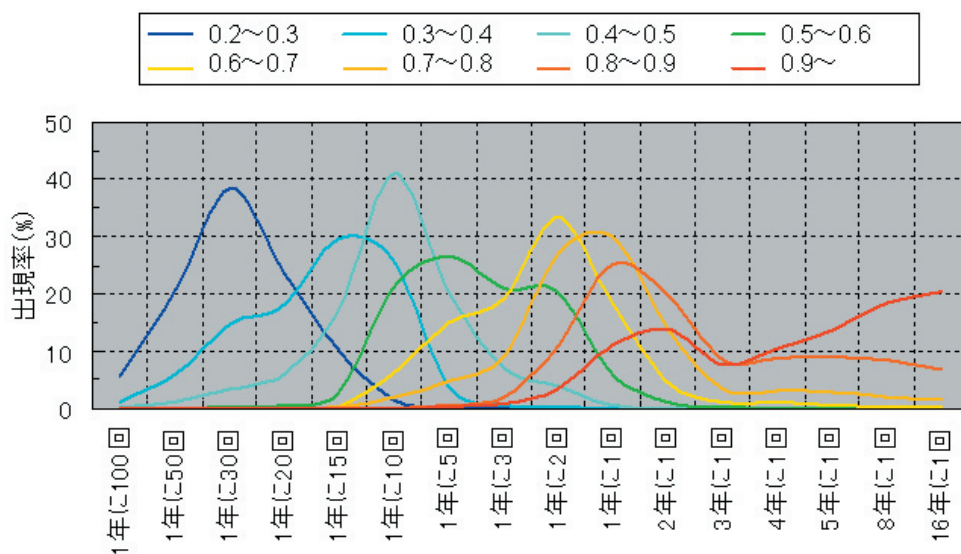
の危険度を発現頻度として表現するという考え方であり、これは、すべての河川・格子が同じ再現確率に基づいて履歴1位値出現していると仮定に基づいている。規格化値が大きくなること（履歴順位が高くなること）は、それだけ発現頻度の少ないまれな現象であることを意味する（第A-1図）。例えば、規格化値0.4～0.5とは、おおむね1年に10回程度の発現頻度であり、これは従来の洪水注意報の発表頻度と同等である。また、規格化値0.7～0.8は1年に1回程度の発現頻度であり、洪水警報の発表頻度（1年に1回あるかないか）の目安に相当する。規格化版流域雨量指数の地図表示における凡例はこれを参考にしている。

また、平成12年（2000年）の東海地方の豪雨など過去に顕著な洪水害事例があり、当時の指数が15年間の最大値である場合には、規格化版流域雨量指数はその事例と比較して現在の洪水の危険度を推し量ることができる。規格化版流域雨量指数が1となれば、その河川・地域では、履歴1位が発生した顕著な洪水事例と同程度の洪水の危険性が高まっていると判断できる。一方、過去15年間に顕著な洪水被害を経験していない河川・地域も多く存在するが、このような地域で規格化版流域雨量指数が1を超えた場合には、過去15

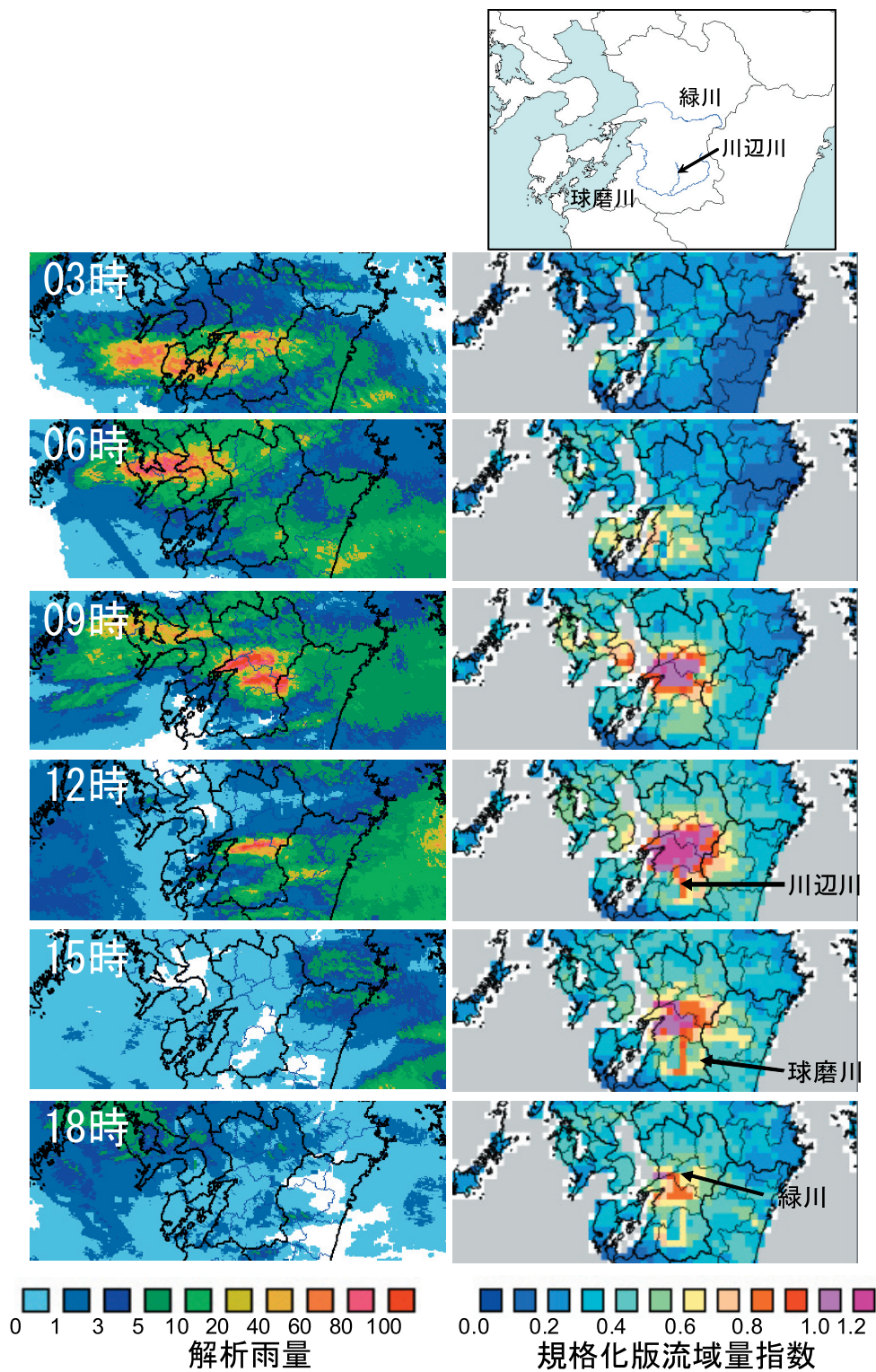
年間に経験のないほど洪水危険度が高まっており、洪水害に一層の警戒が必要な状況であることを知ることができる。特に、値が1を大きく超えるといった状況、例えば規格化版流域雨量指数が1.2というのは、流量比で1.44倍に相当するので、過去15年間の経験を大きく超えることを示す目安となる。

規格化のための統計期間（履歴期間）は、平成21年2月現在、15年間に設定している。当面、統計期間を一定にして年による値と危険度の差をなくすために15年間に固定するが、これ以外にも、長い期間を設定した場合、土地利用等や河川環境が変わり、水害へのぜい弱性（素因）が変化する可能性があるほか、過去の災害と比較をする場合当該災害について記憶から忘れられる（風化）等のおそれがあることも理由として挙げられる。ただし、河川整備計画は、今後20～30年先を目標とした治水安全度を目安としている（末次、2004b）等の事情もあることから、延長するかどうかは今後の検討課題である。

規格化版流域雨量指数の特徴がよく表れている例として、平成19年（2007年）7月6日梅雨前線による熊本県の大雨の様子を第A-2図に示す。この時、八代市、宇城市、甲佐町、城南町、美里町を中心に熊本県内で床上浸水72棟、床下浸水



第A-1図 規格化値ごとの発現頻度分布



第 A-2 図 2007 年 7 月 6 日熊本県の洪水時における解析雨量と規格化版流域雨量指数
2007 年 7 月 6 日、熊本県を中心に大雨により大規模な洪水災害が発生した時の、3 時から 18 時までの 3 時間ごとの解析雨量（左）と規格化版流域雨量指数（右）を示す。右上には河川地図を示した。

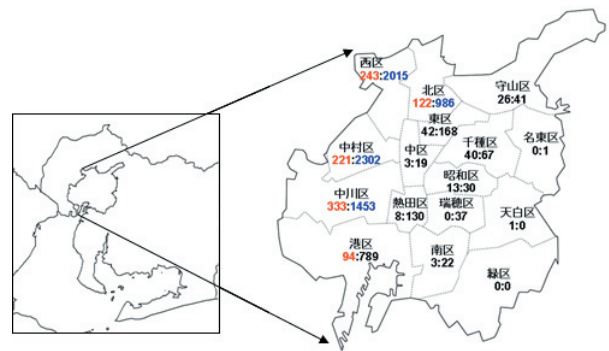
606 棟の大きな被害が発生した（被害数は 7 月 6 日から 11 日までの集計で熊本県調べ）。また、緑川でははん濫危険水位を、緑川水系御船川や白川水系白川で避難判断水位を超えるなど国土交通大臣直轄管理河川でも大きな出水となった。本事例は、梅雨前線の北上に伴って、熊本県では 6 日 09 時ごろに大雨のピークを迎え、八代市で 09 時までの 1 時間に、観測史上 1 位となる 85 mm の猛烈な雨を観測した。同時刻の規格化版流域雨量指数では、宇城八代・上益城地域を中心に 1.2 を超える地域が広がっており、洪水の危険性が過去 15 年間に大きく超えるレベルに高まっている様子が分かる。5km メッシュ単位なので広域市町村の場合には市町村内で相対的に危険な地域を特定することも可能である。その後、降雨は終息に向かうが、引き続き規格化版流域雨量指数の高い状態が続き、次第に規格化版流域雨量指数が高い地域は徐々に大河川の流域（球磨川水系の川辺川、緑川など）に推移していく様子がうかがえる。一連の規格化版流域雨量指数の推移は、雨が降るとまずその周辺で高い値が広がり、雨が降り止んだ後は大河川周辺に高い値が集中・継続するという、実際の降雨から洪水に至るまでのイメージと一致する。このように、規格化版流域雨量指数は降雨 - 洪水の時間差が流域雨量指数と同様に表現される。

次に平成 20 年 8 月末豪雨における名古屋市の例を示す。この大雨で、名古屋市では 7,000 世帯を超える浸水が発生し、床上浸水も 1,000 世帯を超えた（第 A-3 図。各区の左に床上浸水、右に床下浸水の世帯数を記している）。平成 20 年 8 月末豪雨で洪水害に関して避難勧告が発令されたのは、天白川やその他の水位周知河川（山崎川、香流川）が避難判断水位に達した名東、天白、緑、瑞穂、南の各区、及び名古屋市西部の新川のはん濫警戒情報の発表により、新川のはん濫のおそれのある地域であった。しかし新川、天白川の最高水位は、はん濫危険水位より低く、外水はん濫は発生していない。図のように、名古屋市東部の被害は非常に少なく、西部においても、新聞報道等によると避難勧告が発令された地域は実際の浸水地域とずれがあるばかりでなく、浸水発生より遅

れた 1 時 55 分に発表されている。

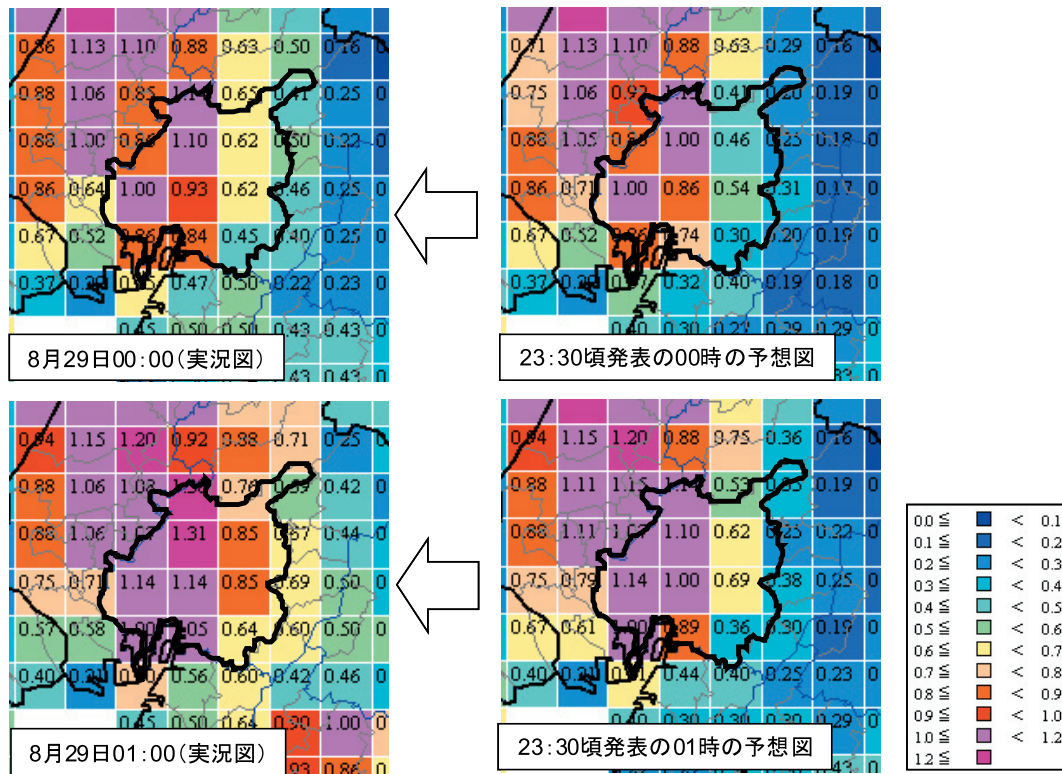
一方、規格化版流域雨量指数では、名古屋市の中部から西部にかけて、1991 年以降 15 年間の最大値、すなわち平成 12 年（2000 年）の東海地方の豪雨時における指数を超える値を示していることが分かる（第 A-4 図）。また、別の資料で河川ごとに詳細を見ると、新川、天白川等では 1 に達していなかった。さらに、1 を超える数値は、浸水が発生する 1～2 時間前の初期値で予測されており、小河川において「平成 12 年東海地方の豪雨に匹敵する」おそれが高いことの判断が可能である。「平成 12 年東海地方の豪雨に匹敵する」おそれは、名古屋市の一般住民にとって、避難の必要性を端的に連想させることのできる表現であり、規格化版流域雨量指数はそれをわかりやすく表現している。

規格化版流域雨量指数は過去の最大値で規格化するというフィルタを加えたことによって、流域雨量指数に比べ、より利用しやすい（利便性の高い）防災気象情報であるといえる。今後、洪水の危険性を予測する情報の中の基幹プロダクトの 1 つとなることが期待される。



第 A-3 図 平成 20 年 8 月末豪雨における名古屋市内の浸水被害状況

名古屋市消防局資料より作成（平成 20 年 9 月 2 日 16 時現在）。各区下段の数字は左が床上浸水、右が床下浸水の世帯数を表す。



第 A-4 図 平成 20 年 8 月末豪雨時の名古屋市付近の規格化版流域雨量指数とその予測

図中のメッシュは 5km 格子の規格化版流域雨量指数で、大きさ毎に 12 階級に色分けしている。各メッシュ内の数値が指数値で、ピンクは、1991 年から 2005 年までの最大の指数値以上であることを示す。左が指数の実況、右が予想。予想は初期時刻から約 30 分後に発表される。

参 考 文 献

- Ishihara Y and S. Kobatake (1979) : Runoff Model for Flood Forecasting. Bull. D.P.R.I., Kyoto univ. 29, 27-43.
- 井上和也・戸田圭一・市川温・多田彰秀 (2000) : 1999 年福岡市における都市型水害について. 京都大学防災研究所年報, 43, B-2, 307-323.
- 牛山素行・石垣泰輔・戸田圭一・千木良雅弘 (2000) : 2000 年 9 月 11 日～12 日に東海地方で発生した豪雨災害の特徴, 自然災害科学, 19-3, 359-373.
- 牛山素行・吉田淳美 (2006) : 2005 年 9 月の台風 14 号および前線による豪雨災害の特徴, 自然災害科学, 24, 487-497.
- 大泉三津夫 (2000) : 陸面過程. 数値予報課報告・別冊第 46 号, 48-66.
- 大泉三津夫・太田琢磨・原旅人 (2007) : MRI/JMA-SiB による積雪・融雪情報の利用. 2007 年度日本気象学会春季大会講演予稿集, A307.
- 岡田憲治 (2002) : 土壌雨量指数. 測候時報, 69, 67-100.
- 加藤敏治・鈴木知・山下祥弘・小牧健二 (1999) : 流域水循環モデル化に関する一考察, 水利科学, 43, 第 4 巻, 1-32.
- 気象庁 (2005) : 日本の異常気象の長期変動. 異常気象レポート 2005, 55-66.
- 気象庁 (2006) : 平成 18 年 7 月豪雨. 災害時気象速報, 43pp.
- 佐藤信夫 (1989) : 生物圏と大気圏の相互作用. 数値予報課報告・別冊第 35 号, 4-73.
- 社会資本整備審議会河川分科会気候変動に適應した治水対策検討小委員会, 2007 : 水関連災害分野における地球温暖化に伴う気候変動への対応策のあり方について (中間とりまとめ).
- http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha07/05/051129_2/03.pdf (2009.1.23 閲覧)
- 水防法令研究会 (2001) : 改正水防法の解説. ぎょうせい, p88.
- 末次忠司 (2004a) : 氾濫被害軽減のための氾濫原管理. 水利科学, 275, 59pp.
- 末次忠司 (2004b) : 河川の減災マニュアル. 山海堂, 226pp.
- 損害保険料率算出機構 (2006) : 台風 0514 号における宮崎県の災害調査報告. 34pp.
- 高崎忠勝・増田信也 (2004) : 都市中小河川の洪水流出に対する降雨特性の影響. 東京都土木技術研究所年報, 平成 16 年度, 161.
- 高橋裕 (1978) : 河川水文学. 共立出版, 218pp.
- 谷岡康・福岡捷二・谷口将俊・小山幸也 (1998) : 都市中小河川の洪水流出特性, 土木学会論文集, 586, II -42, 1-12.
- 立平良三 (1999) : 気象予報による意思決定, 東京堂出版, p142.
- 田中信行・西垣語人・牧原康隆・峯宏太郎 (2005) : 流出雨量指数の概要, 気象学会 2005 年春季大会講演予稿集, 209.
- 通商産業省工業技術院地質調査所 (1992) : 日本地質アトラス第 2 版, 朝倉書店.
- 土木学会 (1989) : 開水路流. 土木工学ハンドブック, 技報堂出版, 492-496.
- 土木研究所水文研究室 (1988) : 水文研究室の研究概要. 土木研究所パンフレット, 22pp.
- 永田和彦・辻村豊 (2006) : 解析雨量及び降水短時間予報の特性と利用上の留意点. 平成 18 年度量的予報研修テキスト, 9-24.
- 原田育郎・阿部世史之 (2006) : 平成 16 年の顕著現象と災害の概要. 気象庁技術報告「平成 16 年 (2004 年) 梅雨期豪雨と顕著台風」, 129, 5-28.
- Makihara, Y., N. Uekiyo, A. Tabata and Y. Abe (1996) : Accuracy of Radar-AMeDAS precipitation, IEICE Trans. Commun., e79-b, 751-762.
- 牧原康隆・太田琢磨 (2006) : 流域雨量指数. 気象庁技術報告「平成 16 年 (2004 年) 梅雨期豪雨と顕著台風」, 第 129 号, 237-247.
- 牧原康隆・平沢正信 (1993) : 斜面崩壊危険度予測におけるタンクモデルの精度. 研究時報, 45, 35-70.
- 増田善信 (1981) : 数値計算上の諸問題. 数値予報, 気象学のプロムナード, 東京堂出版, 113-145.
- 横田茂樹 (2007) : 流域雨量指数を用いた洪水注意報・警報, 平成 19 年度量的予報研修テキスト, 17-22.
- 芳村圭・咲村隆人・沖大幹 (2006) : 2005 年 9 月 4 日東京市街地浸水災害における気象水分状況分析, 生産研究 58, p319-322.
- 予報部予報課 (1988) : 洪水・土砂災害の予測技術, 測候時報, 55, 201-217.
- 予報部予報課 (1990) : 水位予想モデル開発の現状と今後の課題, 測候時報, 57, 95-105.
- 予報部予報課 (2005) : 予報作業支援システムと新しい予報作業形態について, 測候時報, 72, 53-63.