

浸水害及び洪水害の軽減に向けた技術開発と 危険度分布情報の社会への提供

—2018年度岸保・立平賞受賞記念講演—

太田琢磨*・牧原康隆**

1. はじめに

このたび、「浸水害及び洪水害の軽減に向けた技術開発と危険度分布情報の社会への提供」の業績により岸保・立平賞を授与いただき、大変光栄に感じております。これらの業績は、筆者だけでできるものではなく、気象庁及び国土交通省水管理・国土保全局をはじめとする関連府省庁や自治体、報道機関の皆様の理解と協力があったはじめて実現できたものです。筆者は、関係した皆様を代表して、賞をいただいたものと認識しております。あらためて御礼申し上げます。

日本では、毎年のように、台風に伴う大雨や集中豪雨等のため災害が繰り返されてきました。最近でも、平成26年8月豪雨による広島県広島市の土砂災害、平成27年9月関東・東北豪雨による鬼怒川の氾濫、2016年台風第10号による岩手県岩泉町の洪水災害、平成29年7月九州北部豪雨による福岡県朝倉市の土砂災害・河川の氾濫、平成30年7月豪雨による西日本の土砂災害・河川の氾濫、と枚挙にいとまがなく、そのたびに多くの方が犠牲になっています。しかも、地球温暖化に伴い、堤防等のハードウェアの想定を超えるような大雨の発生は増加傾向にあります。このような災害の軽減のために、ソフトウェアとしての防災気象情報の果たす役割と期待はますます大きくなっています。

このような中で、筆者は、気象警報・注意報をはじめ

めとする各種防災気象情報の発表の中核であり、関連プロダクトの作成を担っている気象庁予報課に勤務する機会を得て、これらに関わるプロダクトの開発に携わってまいりました。レーダー・アメダス解析雨量、降水短時間予報などの実用化を受け、次なる改善として、諸先輩、同僚の皆さんのご指導とご協力のもと、大雨や洪水に関する警報・注意報の改善を目指してまいりました。まず、土砂災害のポテンシャルを的確に表す指標として「土壌雨量指数」の開発を進め、その成果は国土交通省砂防部の協力を得て「土砂災害警戒情報」の都道府県との共同運用という形で実用化されました。

一方、大雨による主要な災害は、土砂災害の他に、浸水害と洪水害があります。ただ、この2つの災害に対応する防災気象情報の改善には、次のような技術的課題がありました。

①1メッシュの降水量に着目するだけでは正確に把握できない浸水、洪水の発生ポテンシャルを、解析雨量と同程度の解像度で、全国規模で推定すること。

②水位計などの観測機器のないところであっても、災害発生ポテンシャルの精度を維持できること。

これらの課題を、気象業務への適用の観点から解決したのが「流域雨量指数」と「表面雨量指数」です。これらの指数を使用することで、洪水警報、浸水害を対象とした大雨警報の精度は大きく向上しました。

筆者二人は、共同で流域雨量指数の開発にあたった時期もありましたが、牧原は、主として土壌雨量指数および5kmメッシュの流域雨量指数の開発を担当し、太田はその後の流域雨量指数の1kmメッシュ化と表面雨量指数の開発を担当しました。また、太田は

* (連絡責任著者) 気象庁予報部予報課。

takuma.ohta@met.kishou.go.jp

** 気象業務支援センター。

makiyara@jmbc.or.jp

—2019年6月11日受領—

—2019年8月7日受理—

指数に基づく災害危険度を地図上に視認性高く可視化した「危険度分布」の開発も担当しております。

流域雨量指数の開発は2001年にはじまり、2008年の5 km メッシュの流域雨量指数による洪水警報の改善を経て、2017年に流域雨量指数の精緻化（1 km メッシュ化、対象河川の大幅拡大）へと至りました。また表面雨量指数についても、2017年に大雨警報の発表基準に導入され、実用化に至りました。表面雨量指数は、発想としては、流域雨量指数のプロトタイプができた2004年頃にはありましたが、本格的な開発は2010年以降に着手しています。

第1表に大雨に関する指数の実用化の歴史を示しました。これらの指数を単に開発するだけではなく業務として実用化するまでには、次のようなステップを経る必要があります。①発想、②モデル化、③基準設定のための過去20年分以上の指数計算、④全国の災害データの収集と指数との比較・統計処理、⑤警報・注意報の新基準の決定、⑥都道府県・市町村等の防災関係機関への新基準の説明・周知、⑦予報作業システムへの組み込みと運用開始。

3つの指数いずれも開発から実用化までに8年程度かかっていますが、実用化までのステップを一つ一つ実現しているうちに、それらの期間があつという間に過ぎてしまったように思います。

本稿では、流域雨量指数、表面雨量指数の開発の経緯や計算の概要とともに、これらの指数から想定される災害の危険度をより多くの人に分かりやすく伝えることを目指して作成した危険度分布の概要についてご紹介いたします。

ところで、牧原は、立平先生の名を冠した賞の推薦を受けたことをお聞きしたとき、感無量の気持ちでした。それは、1980年に気象庁予報課に配属されたときに、当時予報課長だった立平先生にご指導を受けたことが、自身がこれまで開発を進められてこられた原点とと思っているからです。牧原は、予報課に配属されてすぐに、デジタル化が開始された気象レーダーのプロダクト開発を担当しました。技術的な面はどちらかというと既に先生が執筆されていた気象研究ノートを参考にすることが多く、直接にコメントをいただくことはそれほど多くはありませんでした。ただ、先生が進めてこられた先進的な技術（レーダー、確率予報、MOS (model output statistics) : 数値予報モデルの出力を統計的に処理した精度のより高い予想手法で現在のガイダンスとほぼ同義)の導入と業務への反映は、いずれも、一般市民にも気象庁の予報官をはじめとする専門家にも、これまでの常識を変える仕事であり、様々なご苦勞をされていたことが記憶に残っています。そのような中で、先生は、現状の限界と利用者

第1表 大雨に関する指数の実用化の歴史

	土砂災害	浸水害	洪水害
1983	(土壌雨量指数の開発に着手)		
2000	土壌雨量指数による大雨警報の切替運用「過去数年間で最も土砂災害の危険性が高まっている」		
2001			(流域雨量指数の開発に着手)
2005	土砂災害警戒情報の運用開始(鹿児島県より順次)		
2008	大雨警報・注意報の発表基準に土壌雨量指数を導入		洪水警報・注意報の発表基準に流域雨量指数(5 km メッシュ)を導入
	(土壌雨量指数、流域雨量指数の導入に伴い、大雨・洪水警報の24時間雨量基準を廃止)		
2010		(表面雨量指数の開発に着手)	
2013	土砂災害警戒判定メッシュ情報の提供開始		
2017		大雨警報(浸水害)の危険度分布の提供開始	洪水警報の危険度分布の提供開始
		大雨警報・注意報の発表基準として表面雨量指数を導入	洪水警報・注意報の発表基準に流域雨量指数(1 km メッシュ)を導入
	(表面雨量指数の導入、流域雨量指数の精緻化に伴い、大雨・洪水警報の1時間雨量基準・3時間雨量基準を廃止)		

の利益を、技術的な根拠で示し、理解を得て進められていたように思いました。そして、それらの業務の改善が着実に進んでいるところを目の当たりにしました。これらのことが、その後の自分にとって貴重なお手本になったと思っています。

そして、2004年の度重なる豪雨災害を受け、市町村長の避難勧告等の判断に資する防災気象情報の提供に向けた検討に着手し始めた2005年に、太田は気象庁予報課に配属されましたが、そのときの予報課長が牧原でした。当時、牧原の手により流域雨量指数（5 km メッシュ）のプロトタイプが完成し、これをどのように活用していくかが喫緊の課題でありました。そのような中、太田に最初に与えられた仕事が、流域雨量指数の精度評価と洪水警報基準への導入でした。牧原の指導の下、2008年には警報基準への導入が実現しました。さらに、それ以降も二人三脚で、表面雨量指数等の開発に取り組んできました。そして、全国の気象台職員による基準設定作業と関係府省庁との調整を経て、2017年7月、精緻化した流域雨量指数と表面雨量指数の警報基準への導入と危険度分布の提供開始に至ったわけです。

こうして振り返ってみますと、今回の業績は、立平先生によるレーダー技術の導入を皮切りに、牧原によるタンクモデルをベースとした災害との相関の高い指数の開発、さらには太田による基準設定手法の高度化や危険度分布への応用と、気象庁予報課において世代を超えて取り組んできた大雨災害軽減のための技術開発の集大成ともいえるのではないかと思います。

本稿で、防災気象情報に関する最新の技術と、関連した業務の改善について理解を深めていただければと思います。また、気象学の進歩とともに、気象学以外の分野を含むさまざまな技術を取り込みながら、大雨警報・洪水警報をはじめとする防災気象情報の改善に携わる人々への激励と今後の道しるべとなれば幸いです。

なお、1章は主に牧原が、2～4章は太田が担当し、5章はそれぞれで執筆しています。

2. 流域雨量指数（5 km メッシュ）の開発と実用化 [～2009年]

2.1 流域雨量指数の開発

気象庁では、大雨による自然災害軽減に資するため、1988年4月に、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開始しました（立平 1988）。

しかし、当時予報課では、洪水警報・注意報の精度向上には単に流域に降る雨を予測するだけでなく水位予測そのものを行う必要があると考え、水位予測モデルとしての「タンクモデル」について、その精度と活用可能性について検討しました（予報部予報課 1990）。タンクモデルにより精度の高い水位予測ができること、それを活用することで従来のやり方である雨量基準よりも的確に洪水のおそれを判断できることが見込まれましたが、ここで求めるパラメータは、流域雨量指数におけるタンクモデルと異なり、上流域の広さや地質・土地利用等から直接設定することができず、予測地点ごとに長期間の水位観測データを収集して設定しなければならないため、全国の河川が対象となると、データ取得の困難性と膨大な作業量になるといった理由から、当時はその実用化には至りませんでした。

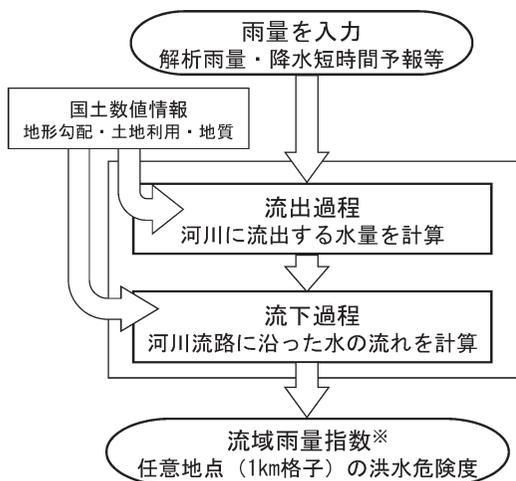
一方、大雨災害の危険度予測にタンクモデルを活用する取組は、死者の多い土砂災害で先行して行われました。まず、土砂災害に大きな影響を与える先行降雨と局地的な大雨に対応するため、解析雨量を用いたタンクモデルをSFIR（雨による斜面崩壊インデックス）として部内で試験運用を始めました。それまでの研究では、タンクモデルの総貯留高が特定の値を超えると土砂災害の危険が高い、との報告が多かったのですが、試験運用の結果、広い領域に対してタンクモデルの総貯留高の一つの値を基準として使用方法では精度が不十分で実用化は困難との結論に達しました。その後、牧原・平沢（1993）の調査等により、斜面崩壊の免疫性を活用することで、広い領域に対してもシンプルかつ有効な基準を設定できることがわかり、1999年に広島県で発生した大規模な土砂災害を契機として「土壌雨量指数」（岡田 2002）という名称で実用化され、2000年には、過去10年間にさかのぼって算出した土壌雨量指数の最大値を実況値が上回った場合に「過去数年間で最も土砂災害の危険性が高まっている」と警戒を呼びかける情報改善（土砂災害に関する大雨警報の切替の運用）が始まりました。

しかし洪水については、前述したような技術的課題がなかなか解決できず、開発は必ずしも順調ではありませんでした。そこで、当時、洪水予報としては日本での運用実績のなかった分布定数系の水位予測モデル（加藤ほか 1999）に着目し、2001年頃より新たな河川流量解析予測システムの開発に着手しました。この流量解析モデルは、開発時には「洪水指数」と呼んでお

り、完成後にいったん「流出雨量指数」と改名しましたが、最終的には「流域雨量指数」という名称に落ち着きました。なお、この「指数」の実用化に際しては、「土壌雨量指数」というこれまでなじみのなかった「指数」が実用化されていたことが追い風になったことは確かだと思います。

流域雨量指数は、河川の上流域に降った雨により、下流の対象地点の洪水危険度がどれだけ高まるかを把握するための指標です。開発当初は、河川長が15km以上の約4,000河川が流域雨量指数の計算対象でした。当時、気象庁（気象台）と河川管理者（国土交通省、都道府県）が共同で実施している指定河川洪水予報の対象河川が約350河川程度でしたから、流域雨量指数の対象河川がどれだけ多かったかが分かるかと思えます。第1図に流域雨量指数の計算処理の流れを示しました。解析雨量・降水短時間予報（永田・辻村 2006）を入力値とし、対象河川の流域を5 km四方の格子（メッシュ）に分けて、それぞれの格子ごとにタンクモデルを用いて降った雨水が地表面や地中を通して河川に流れ出る量を計算します（流出過程）。ここで使用されるタンクモデルは、流域面積が固定していること、地質、土地利用、地形勾配ごとに、パラメータが決まっていることが特徴です。つまりこれらの情報が与えられるだけで、5 km四方の流域から河川へ流出する量を、全国どの流域でも計算することができます。

次に、運動方程式等を用いて河川に流出した雨水が



第1図 流域雨量指数の計算処理の流れ

河川に沿って流下する量を計算します（流下過程）。こうした計算から河川の流量に相当する値が得られますが、最終的にはその平方根をとったものを流域雨量指数としました。平方根をとったのは、大河川から中小河川までを統一的に扱うにはデータを圧縮する必要があること、また、水位と流量の一般的な関係は二次式で表されることから（日本河川協会 1997）、流域雨量指数の変化傾向と水位の変化傾向が似通ったものになることが期待される、といった理由からです。なお、計算に必要な地理情報には、河川流路、標高、地質、土地利用といったさまざまな国土数値情報を用いています。

以下では、計算処理の中心となる「流出過程」と「流下過程」について、さらに詳しく解説したいと思います。

〔流出過程〕

地表面が自然の土の状態だと降った雨が地中に浸透する量が多くなり、河川への流出量は少なくなります（浸透は地質によっても異なります。）。一方、地表面がコンクリート等の人工物に覆われている場合には浸透が少なくなり、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て、降った雨は急速に河川に流出します。このように土地利用によって河川への流出量は大きく異なりますので、タンクモデルによる流出量の計算は非都市域と都市域とでそれぞれ分けて行うことにしました。

非都市用のタンクモデルには、次の4つの理由から、Ishihara and Kobatake (1979) の直列3段タンクモデルを採用しました（第2図）。

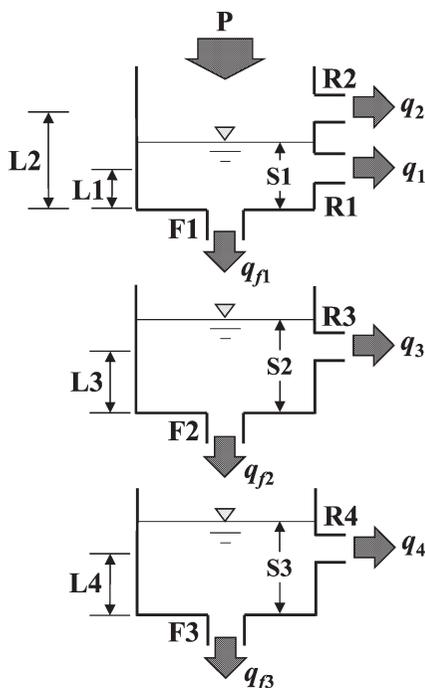
- ①地質ごとに異なるパラメータが提案されていた。
- ②地下への浸透を含めて計算可能だった。
- ③5 km メッシュ程度の小流域を対象にパラメータが設定されていた。
- ④実用的精度を持つ結果が示されていた。

Ishihara and Kobatake (1979) では5つの河川流域に対するパラメータが示されていますが、これを国土数値情報の地質データに対応させることによって全国の河川流域への拡張を試みました。タンクモデルのパラメータを過去の実績水位に基づいて同定するには長期間の水位データが必要で作業量も膨大となりますから、流域雨量指数のすべての対象河川にこれを行うことは現実的ではありません。しかし、すでに実績のあるパラメータを国土数値情報の地質データに応じて

割り当てるのであれば、全国領域が対象であっても容易に設定できますし、後に示すように、このような簡易な手法でも十分な精度を確保できることが分かりました。

都市用のタンクモデルについては、新たにシンプルな1段タンクモデルを構築することにしました。浸透の少ない都市域では、地形勾配が流出における支配的要因になりますので、さまざまな勾配を与えた場合のマニングの平均流速公式によるシミュレーションを行い、それを再現するようなタンクパラメータを同定しました。都市用タンクモデルの検討の詳細については田中ほか(2008)で詳しく解説しています。

これら2つのタンクモデルを用いて5 km 格子ごとに流出量をそれぞれ算出し、地表面における人工構造物の割合(国土数値情報の土地利用に基づき(建物用地+幹線交通用地)/(すべて-河川・湖沼・海浜・海水))として算出)に応じて平均化したものが最終的な流出量となります。



第2図 非都市用タンクモデル
 L: 流出孔までの高さ, F: 浸透係数, R: 流出係数, q: 流出量, q_i : 浸透量, S: タンク水位, P: 入力降雨。

[流下過程]

具体的には、マニングの平均流速公式と連続の式を解くことで、河道内の水の分布の時間的な変化を求めます。マニングの平均流速公式とは以下の式で表されるものです。

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \tag{1}$$

ここで、 v (m/s) は流速、 R (m) は径深(流れの断面積を A 、水に接している円形の壁面の長さを S として、 A/S のこと。ほぼ水深に対応し、水理学的平均水深ともいわれます)、 I は河川の縦断方向の勾配、 n はマニングの粗度係数を表しています。

一方、流量 Q (m³/s) と流水断面積 A (m²) には次の関係があります。

$$Q = vA \tag{2}$$

R と A は河川の断面形状により関係付けられますが、流域雨量指数では、以下の式のように、深さに比例して幅の広がる河道を仮定しています。

$$A = mR^2 \tag{3}$$

係数 m は河川断面の形状を表すパラメータです。式(1)~(3)から、河道内の流速 v が以下のように導かれます。

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

すなわち、河川の縦断方向の勾配 I 、河川断面の形状を表すパラメータ m 、マニングの粗度係数 n をあらかじめ設定しておけば、流量 Q から流速 v を求めることができます。

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、いわゆる連続の式は以下で表されます。

$$\begin{aligned} \frac{d \int A dx}{dt} &= \int (r - i) dS + Q_i - Q_o \\ &= \int e(r) dS + Q_i - Q_o = E(r) + Q_i - Q_o \end{aligned} \tag{5}$$

r : 降雨強度, i : 浸透量
 $E(r)$: タンクモデルによる流出量
 Q_i : 上流端からの流入量, Q_o : 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、単位流路内の水量の変化を表しています。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およ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しています。Qには支川からの流入量も含まれます。

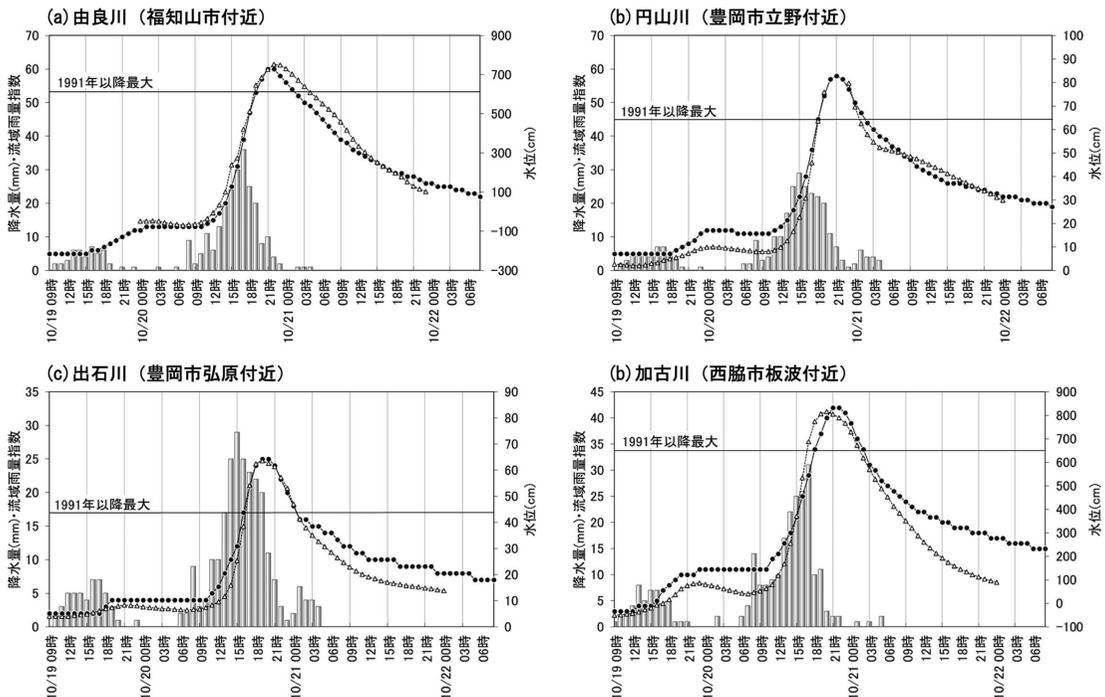
なお、流下計算に用いるパラメータであるマンニングの粗度係数 n については、開発当時、個々の河川の情報を入手・整理することが困難であったことから、全地点で一定値 (0.040) を設定しました。河川断面の形状も含め、今後は河川管理者と連携し、これら河川に関するパラメータも実態に即したものにしていく必要があると考えています。

以上にもてきましたように、流域雨量指数の計算には水文学や水理学の知見をふんだんに取り込んでいます。流域雨量指数は流出・流下プロセスに基づいて流量として算出していますので、流量の二次関数で近似されることの多い河川水位と高い相関があり、かつ、

水位のピーク時刻を的確に推定できるのではないかといったことが期待されました。第3図は2004年台風第23号で甚大な被害が発生した河川の流域雨量指数と水位の関係を比較したものです。いずれの河川も流域雨量指数と水位は上昇・下降の時間的変化傾向が良く似ており、ピーク時刻についても1時間程度以内の誤差の範囲で一致する結果となっていました。このような河川水位との対応は、従来までの積算雨量 (1時間雨量, 3時間雨量, 24時間雨量) や流域平均雨量では得られなかったものです。その後の精度検証でも、さまざまな河川・事例で水位との良好な対応がみられたことから、流域雨量指数が洪水危険度を的確に表す指標になりうるとの確信に至りました。こうしていよいよ流域雨量指数を洪水警報・注意報の発表基準に導入するための基準設定作業に着手することになったわけです。

本節の最後に、流域雨量指数の計算上の留意点について、いくつか触れておきたいと思います。

- ・流域雨量指数の計算には、ダムや堰、水門等の人為的な流水の制御は考慮していません。



第3図 平成16年台風第23号上陸時の流域雨量指数と河川水位
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を棒グラフで示す。なお、円山川の水位は10月20日20時から23時にかけて欠測となっている。

- ・海岸付近の河川では潮位の影響によって水位が変動することがありますが、流域雨量指数の計算には、潮位の影響は考慮していません。
- ・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はできません。
- ・水位や流量による実況補正の処理は行っていません。
- ・本川と支川の合流点付近では、本川の水位が高い時には支川からの水が流れ込みにくくなりますが、流域雨量指数は地形勾配に応じて上流から下流に水を流すモデルであり、下流水位によって水の流れが阻害されるような効果は表現されません。

以上のような計算上の留意点を踏まえると、流域雨量指数とは厳密に流量を求めようとするものではなく、上流降雨が河道に沿って下流の地域への程度影響するのかを、相対的な危険度として指標化したものであると理解することができます。流域雨量指数の計算で考慮していないこれらの要素は、過去の災害実績に基づいて設定した「基準」において間接的に考慮されています。すなわち、洪水害発生のおそれは、流域雨量指数の大きさだけをもって判断するのではなく、「基準」との比較によって判断する必要があります。

2.2 洪水警報・注意報への導入

流域雨量指数のプロトタイプが完成し、今後の実用化に向けた検討を進めていた2004年は、平成16年7月新潟・福島豪雨をはじめ10個の台風が日本に上陸するなど、多くの豪雨災害が発生した年でした（原田・阿部 2006）。これら豪雨災害を受けて、内閣府では「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、2005年3月に中央防災会議において「避難勧告等の判断伝達マニュアル作成ガイドライン」が策定されました。この検討会の報告では、関係省庁に対して、避難勧告等の発令の判断に資するための情報の高度化が求められました。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、当時の検証において多くの河川で新たに開発した流域雨量指数が的確に水位と対応していたことなどから、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、流域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ました。

2005年当時、全国の地方気象台において最初に取り

掛かったのは流域雨量指数を用いた市町村ごとの洪水警報・注意報基準の作成作業です。まず、過去約20年分の国土交通省「水害統計」や地方公共団体の保有する災害資料を用いて大規模な水害データベースを構築しました。その上で、市町村ごと、河川ごとに最適な基準値（案）を算出し、個々の市町村と協議して必要な修正を加えて基準値として決定するという綿密な準備と調整を繰り返し、作業開始から3年の歳月を経て、2007年に全国約1800の全ての市町村の理解と合意に至りました。

また、流域雨量指数を洪水警報・注意報に導入するための準備は、新たな基準値の作成のほかにも、気象台の予報担当者が適切に警報・注意報を発表できる作業環境を整備する必要がありました。そこで、警報・注意報を自動的・客観的に作成できる予報作業支援システムへの流域雨量指数データ処理の組み込みや、的確な実況監視を行うための監視画面・報知システムの整備を基準調査と並行して進めました。そして、防災関係機関・一般住民への周知を経て、2008年5月28日、洪水警報・注意報の発表基準の1つとして流域雨量指数を正式に導入しました。

なお、流域雨量指数の導入にあたっては、単に洪水警報・注意報の基準として新たな要素を1つ追加するというだけでなく、災害との対応付けの工夫による基準値の最適化を進めることで、従来よりも災害を絞り込み、市町村長の避難勧告等や一般住民の自主的な避難行動の判断への支援に資する警報・注意報となることを目指しました。ここでは、基準設定のポイントとなる考え方や作業にあたり工夫した点などについて、いくつか紹介したいと思います。

[基本的考え方]

前節で述べた通り、流域雨量指数とは洪水危険度を表す相対的な指標であり、洪水害発生のおそれはあらかじめ設定した基準値との比較により判断する必要があります。基準値は、過去20年分以上の災害発生／非発生時の雨量と流域雨量指数を統計的に調査して設定します。ここでポイントとなるのが下水道や堤防整備といったインフラ整備の基準値への反映です。これらインフラの整備状況は災害頻度や被害規模として現れるので、災害実績に基づき設定する基準値にその効果が間接的に反映されることになります。例えば、インフラ整備が進んでいて統計期間内に災害が発生していない地域では、期間内の最大指数値付近の、非常に高

い基準値が設定されることとなります。下水道や河川堤防の整備状況は地域によってさまざまであるため、同じ雨が降り、指数もほぼ同じだったときでも災害の起こりやすさには地域差があります。基準値はいわばその地域差を表現しているものといえるでしょう。

このような観点から、基準値については、最新のインフラ整備状況が反映されるよう、常に適切なものに保っておく必要があります。このため、定期的に基準値の妥当性を確認・評価（1年に1回、最新の災害資料等を追加して災害との関係を精査）するとともに、必要に応じ、適切な基準値への見直しを行うことが重要となります。

[水害と基準要素の対応]

気象庁の洪水警報・注意報の運用では、長らく、発表基準として、雨量の基準－1時間雨量，3時間雨量，24時間雨量を用いてきました。流域雨量指数の導入にあたり，24時間雨量は廃止しましたが，1時間雨量，3時間雨量といった短時間雨量の基準は，流域雨量指数の対象とならない小河川（長さ15km未満の河川）の洪水害に対応した指標として，引き続き用いることにしました。また，第4図に示すように，水害を3種類に分類し，それぞれに対応した基準を設定し，

大雨警報（浸水害）・洪水警報の発表基準としました。

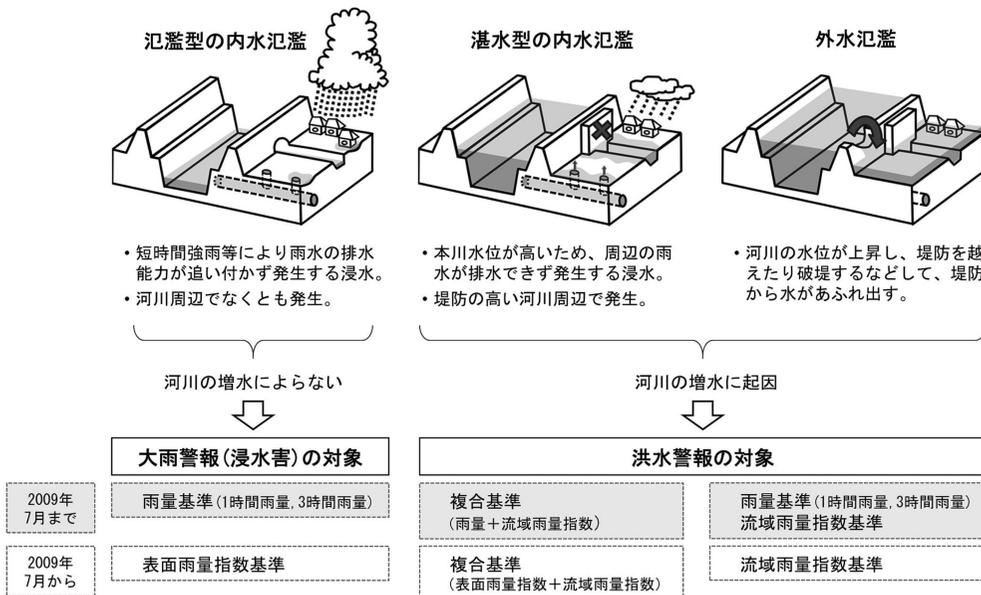
[対象災害]

基準の設定にあたっては，過去に発生した災害事例のそれぞれについて，警報あるいは注意報を発表すべき状況に相当するか否かをあらかじめ選別しておく必要があります。警報については，その目安として「浸水家屋」の規模（棟数）を用いています。例えば東京都23区の場合ですと，1つの区で「浸水50棟以上」の浸水害が発生するような災害事例を大雨警報（浸水害）・洪水警報の発表対象事例として位置付けています。このような対象災害の目安は防災関係機関との間で共有の認識を持つておく必要があり，あらかじめ市町村と協議のうえ設定しています。

なお，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します。このため，道路冠水や農地冠水等，警報の対象としない幅広い災害も対象としています。

[コストロスモデル]

基準値の設定にあたっては，過去の災害資料を用いて指標との関係を統計的に分析し，想定される警報の発表回数や災害の捕捉率，空振り回数等を考慮しま



第4図 3種類の水害と大雨・洪水警報，発表基準との対応
発表基準については，2009年7月までと2009年7月以降をそれぞれ示した。

す。一般に、警報の対象となる災害規模に対して、災害捕捉率が高くかつ空振り回数が少なくなるような基準が最適な基準値となります。当時は、全国約1800市町村の基準値を一齐に求める必要があり、その膨大な作業量もさることながら、複数の基準要素の組み合わせを考慮した複雑な作業によって客観性も失われてしまうという懸念もありました。

そこで、これらの課題を解決するため、基準値の設定作業に、コストモデルの概念に基づく新たな客観的手法を導入しました。これにより、警報の発表回数や災害事例の被害規模等を考慮しながら客観的かつ効率的に設定作業を進めることができるようになり、作業者の大幅な負担軽減にもつながりました。

設定したコストモデルの条件は次のようなものです。

- ・災害事例について、基準値に達していれば損失（ロス）は0、達していなければ被害規模に応じた損失が生じるものとする。
- ・基準値に達した場合は情報を発表するとして、その費用（コスト）が発生する。
- ・基準値をさまざまな値に変化させて、資料期間における各事例の費用と損失の総和をそれぞれの基準値に対して求める。

・総和が最小になるものを最終的な基準値とする。

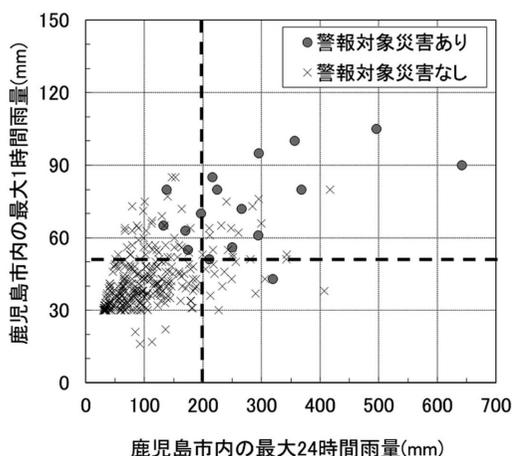
こうして求められた基準値は「できるだけ少ない発表回数で、可能な限り被害規模の大きい災害事例を捕捉する」ものといえます。

第5図に、2006年当時検討していた鹿児島県鹿児島市の警報基準の設定例を示しました。短時間の指標と長時間の指標を組みあわせて災害事例をうまく捕捉するように警報基準を設定するのですが、長時間の指標として24時間雨量に代えて流域雨量指数を用いることで、災害捕捉率を下げることなく、大幅に空振り率の低減を図ることができるようになりました。もともと洪水現象に密接に関連した流域雨量指数を導入したことに加え、水害を3分類し、市町村単位で基準値の最適化を図ったことで、このような改善につながったのだと考えられます。

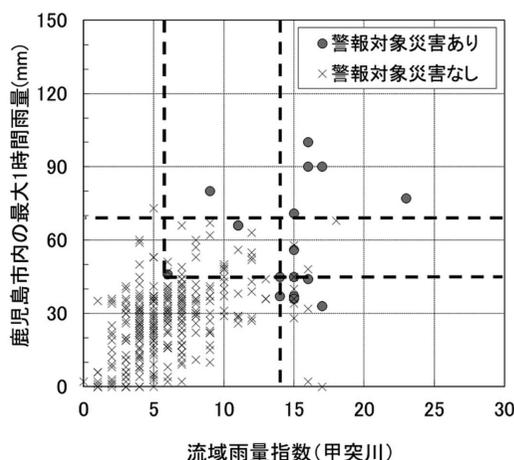
こうして全国市町村の新たな基準値が定められ、2008年5月に、従来までの24時間雨量にかわり新たに土壌雨量指数・流域雨量指数が導入され、2010年5月には、個別の市町村を対象として警報を発表する改善を実施しました。

ここまでが、警報基準の精度向上を柱とする防災気象情報の改善の第一段階ともいべき取組です。特に洪水に関する情報の改善が大きく進展し、市町村単位

(a) 1時間雨量と24時間雨量の場合



(b) 1時間雨量と流域雨量指数の場合



第5図 鹿児島県鹿児島市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（×）、雨量または流域雨量指数の散布図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、破線は警報基準を表す。(b)は1時間雨量と甲突川の流域雨量指数を用いた場合。対象災害事例数は17事例であり、災害捕捉率は(a)(b)ともに100%、空振り率は(a)が84%で(b)が66%となっている。

の警報の発表も実現しましたが、この改善以降も幾度となく甚大な災害が発生し、市町村長の避難勧告や住民の主体的避難の判断を支援するための改善取組はまだまだ続くことになります。

3. 流域雨量指数の精緻化と表面雨量指数の開発 [～2017年]

3.1 背景

ここまで述べてきたように、市町村長の避難勧告や住民の自主避難の判断を支援するための警報の改善は、2010年の市町村警報の運用開始により一定の目途がついたといえます。しかし、その後も、平成26年8月豪雨における広島県での土砂災害、平成27年9月関東・東北豪雨での鬼怒川決壊をはじめとする多くの河川氾濫等、度重なる大雨災害が発生し、多くの尊い命が犠牲となりました。また、2016年台風第10号の岩手県岩泉町小本川や平成29年7月九州北部豪雨の福岡県朝倉市赤谷川等、近年では特に山間部の中小河川における洪水災害が頻繁に発生しています。これら山間部の中小河川は、勾配が急で川幅が狭いため、流れる水の力が強くなりやすいという特徴があり、時として河川沿いの家屋を押し流してしまうこともあります。このような山地河川洪水から確実に身を守るためには、河川の現況把握（水位観測・水位カメラ）に加え、今後の水位上昇の見込みに関する予測情報を活用し適切な避難行動をとることが重要となります。現状では、中小河川の予測情報に関しては流域雨量指数が唯一の情報となりますので、流域雨量指数の予測精度向上とともに計算対象河川を拡大させることが喫緊の課題でした。

加えて、内水氾濫による浸水被害の甚大さ・深刻さも顕在化してきています。平成26年8月豪雨では、京都府福知山市を流れる中小河川の集水域に降った雨水が排水しきれなかったことで内水浸水が発生し（国土技術研究センター 2014）、死者1名、浸水家屋4,425棟の甚大な被害をもたらしました。浸水家屋数4,425棟というのは、2013年台風第18号による大雨のため一級河川の由良川が氾濫した時の浸水家屋数779棟（福知山市 2014）の5倍を超える数であり、市街化が進んだ地域で発生する浸水被害は外水氾濫にも匹敵します。このような内水浸水に対して的確に大雨警報を発表するためには、雨量予測技術の向上が重要な課題であることは言うまでもありませんが、それとは別に、ここでもわれわれは、災害との相関の高い指数を警報

基準に導入することで、より確度の高い防災気象情報を提供するというアプローチを模索しました。

こうして、市町村警報の運用開始以降、課題として浮かび上がってきた山地河川洪水や都市部の浸水災害に対する具体的対応として、①タンクモデルを従来の5 km メッシュから1 km メッシュに高解像度化し、②流域雨量指数の計算対象を従来の流路長15km以上の河川からさらに増やし、③雨量基準よりも精度の高い浸水危険度の新たな指標を開発し、警報基準に導入すること、が次の開発課題となりました。これらは、いわば防災気象情報の改善の第2段階の取組といえるでしょう。

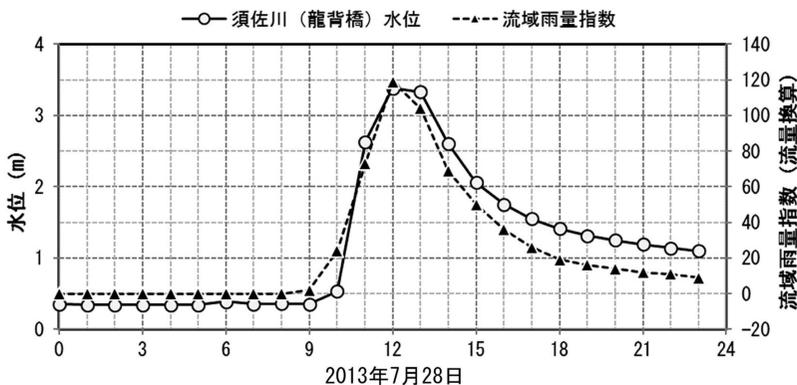
3.2 流域雨量指数の精緻化

流域雨量指数の精度向上や山地河川の急激な水位上昇への対応として、流域雨量指数の計算方法に関して主に次の3つの変更を実施しました。

- ①国土数値情報（河川流路データ）に登録されている河川のうち、従来までは長さが15km以上の河川（約4,000河川）を計算対象としてきましたが、精緻化にあたり全ての河川（約21,000河川）を計算対象にしました。
- ②流路長が15km未満の小河川も計算対象とすることから、計算格子の解像度を5 km メッシュから1 km メッシュに高解像度化しました。
- ③中小河川の急激な水位上昇にも対応できるよう、計算頻度についても従来の毎30分から毎10分に高頻度化しました。

また、上記の変更以外にも、「タンクモデルの1 km化」、「地質に応じたタンクパラメータの割当方法」や「流下に関わる係数」の変更、「非都市用のタンクパラメータ」の調整等も実施しました。タンクモデルの1 km化については次節でも触れますが、これらの精緻化に係る対応については太田（2017）に詳しく述べています。

精緻化のメリットがよくわかる例として、2013年7月28日梅雨前線事例における山口県萩市須佐川の流域雨量指数の予測例を紹介します（第6図）。この事例では、須佐川で外水氾濫が発生し、全壊1棟、半壊2棟、床上浸水429棟、床下浸水148棟などの甚大な被害が生じました。須佐川は流路長6.3km程度の小河川で、5 km メッシュ時代の流域雨量指数では計算対象ではありませんでしたが、精緻化によって新たに計算対象となりました。第6図からは、須佐川の水位と流域雨量指数のピーク時刻が一致し、変化傾向もよく再



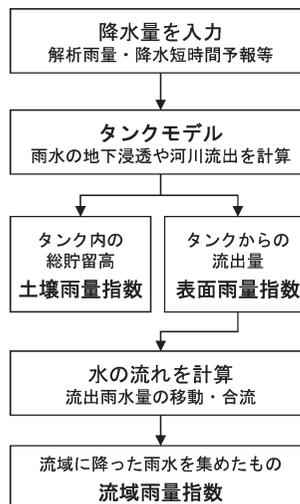
第6図 山口県萩市須佐川（龍背橋）の水位と流域雨量指数

現している様子がわかります。流路長6.3kmの須佐川に対して、5 kmメッシュで計算しようとする計算格子としては、1, 2格子程度となってしまいますが、1 kmメッシュ化により8格子を割り当てることができました。実際の流下計算では1 kmメッシュ内の流路をさらに6分割して処理していますので、実質的な計算間隔はおおよそ130m程度となります。精緻化によって計算量はだいぶ多くなりましたが、小河川の洪水に対しても実用的な精度で計算できるようになったと思います。

3.3 表面雨量指数の開発

2008年の流域雨量指数の実用化により、洪水に関する情報の改善には大きな進展が見られましたが、浸水に関する警戒呼びかけ、すなわち大雨警報（浸水害）の発表基準については依然として雨量基準を使い続けていました。実は浸水についても、流域雨量指数のプロトタイプ（洪水指数）ができた2004年頃には発想としてはありましたが（当時は洪水との並びで「浸水指数」と呼んでいました）、本格的な開発に着手したのは2010年以降になります。この浸水に関する新たな指標—表面雨量指数は大雨警報への導入を見据えていましたので、実用化に向けた当面の要件として、①道路・下水道などの排水施設に関する詳細な入力情報は用いない手法で、②全国どの地域でも適用でき、③実用的な精度を有すること、を開発コンセプトにしました。ここで着目したのはやはりタンクモデルです。すでに土壌雨量指数、流域雨量指数での実績がありましたので、浸水に対しても適切な尺度を与える手法として適用できるのではないかと考えました。

表面雨量指数の開発にあたっては、流域雨量指数の



第7図 タンクモデルと3つの指数の計算処理の流れ

精緻化と並行して開発を進めました。まず1 km四方領域を対象としたタンクモデルを構築し、それを表面雨量指数と流域雨量指数で共用させる形で、一体的に処理できるようプログラムをコーディングしました。土壌雨量指数は別処理としていますが、概念的にはタンクモデルを柱として、3つの指数—土壌雨量指数（タンク総貯留高）、表面雨量指数（タンク流出量）、流域雨量指数（タンク流出量の流下・合流・分流）を統一的に算出できるようになった、と整理することができます（第7図）。

第8図に表面雨量指数の計算イメージを示しました。表面雨量指数はタンクモデルで算出した流出量に地形勾配に応じた補正係数を乗じたもので、対象とし

ては、下水道や側溝などの排水能力を超えた多量の降雨によって雨水の排水が追いつかずに氾濫してしまう、といったタイプの浸水害を想定しています。

流出量の算出は、流域雨量指数と同様、都市用と非都市用の2種類のタンクモデルを都市化率に応じて使い分けています。非都市用のタンクモデルについては、Ishihara and Kobatake (1979)の直列3段タンクモデルをベースに、タンクの構造やパラメータを見直し、1 km 四方程度の小流域にも適用できるように拡張しました。一方、都市用のタンクモデルについても、田中ほか (2008) の手法に倣って、1 km 四方領域を対象とした流出シミュレーションをもとにタンクの構成やパラメータを再構築することとしました。試行錯誤の結果、都市部の速い流出現象の再現には5段タンクが必要との結論に至りました。なお、「非都市部は3段タンクなのに都市部では5段タンクなのは何故なのか」との質問をいただくことがありますが、この5段タンクモデルは、1 km メッシュに降った雨が地表面（道路や側溝など）を流れ下るのに要する時間（流出シミュレーションによると降雨ピークから20～30分後）を再現するモデルであって、直列3段タンクモデルと比較して、より深層への浸透を表しているということではありません。イメージ的には、都市用モデルは、流下の対象となる1 km メッシュの最上流から最下流まで雨水が流下していく過程で、流下に一番時間のかかる最上流（より上流から流れてくる雨水が少なく流速が遅いため流下に時間がかかる）から最下

流付近（流量が多く流下時間が早い）までの流出を、流出の速い5つのタンクに分けてモデル化したようなものと考えられます。

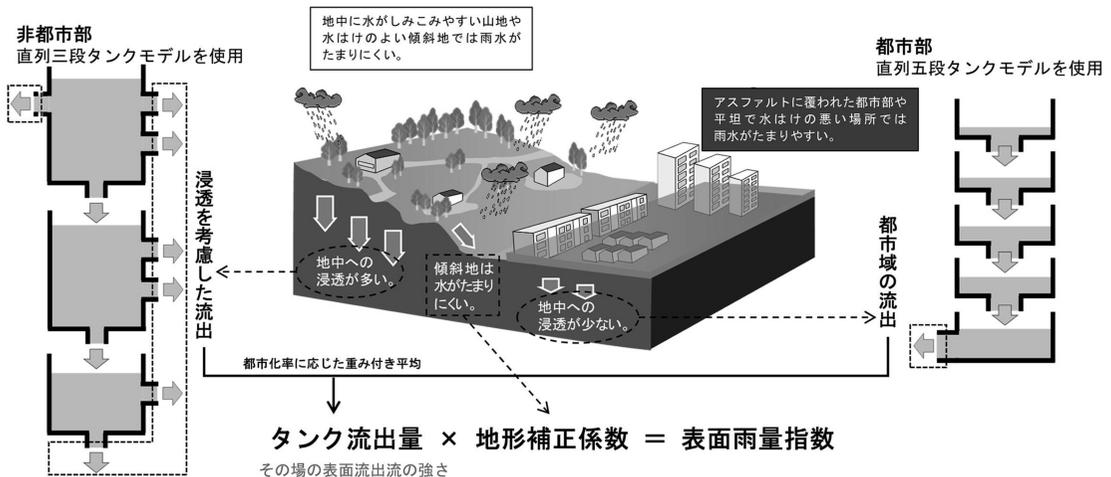
地形補正係数は、浸水害発生に対する地形勾配の負の寄与を表すために導入したパラメータです。ここでいう地形勾配の負の寄与とは、勾配が急な場所ほど降雨は速やかに下流へ排出されるため、その場所では水がたまりにくいということを意味しています。タンクモデルによる流出計算だけでは、このような地形勾配の寄与を表現することができないので、以下に示す地形勾配を変数とした補正係数 C_I を用いてタンクモデルの流出量を補正して、最終的な浸水害の危険度を表す指標としました。

$$\begin{aligned} C_I &= 1 && \text{(for } I < 1) \\ C_I &= R(I)/R(1) && \text{(for } I \geq 1) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $R(I)$ は勾配 I (%)の径深、径深 $R(1)$ は勾配1%の径深を表しており、径深はマンニングの平均流速公式 (1) と式 (2) (3) により以下の通り与えられることから、

$$R(I) = \left\{ \frac{Q}{(1/n) m I^{1/2}} \right\}^{3/8} \quad (7)$$

勾配が I (%)のとき、 C_I と I の関係として下式が得られます。



第8図 表面雨量指数の計算イメージ

$$C_I = \left(\frac{1}{I}\right)^{\frac{3}{16}} \quad (8)$$

急な勾配ほど C_I が小さくなりますので、流出量に対する補正効果が大きくなり、すなわち表面雨量指数は小さく算出されることとなります。

なお、浸水害の発生状況は細かな地形の凹凸や地表面の被覆状況に大きく左右されるので、表面雨量指数の計算処理では次のような工夫も行っています。

- できるだけ詳細な地理分布情報を反映できるように、計算処理は 1 km メッシュをさらに 4×4 に細分した 250m メッシュごとに行い、1 km メッシュ内の 250m メッシュ最大値を最終的な出力値としています。
- タンクモデルによる流出計算は、入力となる解析雨量と同じ矩形領域（1 km メッシュ単位）で計算しますが、流出量は当該 250m メッシュの集水域（上流域）を対象に 1 km メッシュごとのタンク流出量を案分して求めています。集水域や集水域内の地表面の被覆状況は、100m メッシュの標高・土地利用データをもとに割り出しています。
- 地形補正係数の変数には、当該メッシュの下流方向のメッシュのみを対象に算出した平均勾配（下流平均勾配）を用いています。これは、いろいろな条件で算出した地形勾配と浸水害との相関を調べた結果、下流平均勾配が最も相関が高かったためです。

このように、表面雨量指数の計算には、土地利用や地質、地形勾配といった浸水の素因に関わる地理情報がふんだんに取り込まれています。このため、表面雨量指数には「平坦な場所や都市域で大きな値を示す傾向がある」「短時間に降る局地的な大雨による浸水害発生との相関が高い」といった特徴があります。

ここで、表面雨量指数の数値をイメージしやすくするための一例を示します。地表面からの水の浸透がない、勾配が 1% の都市部の 1 km² の領域で、1 時間に 72mm の降水があったとします。先行降雨はないものとします。東京のような都市部では、このような降水による流出は 30 分程度で定常状態となります。この時 1 km² の最下流での流量は、雨量強度を秒単位に変換し、1 km² の面積をかけることで算出できます。この流量 20m³/s が表面雨量指数にほぼ等しくなります。つまり、このような理想的な条件の平坦な都市域においては、表面雨量指数の 3.6 倍が近似的に 1 時間降水量に相当し、勾配や土地利用、先行降雨等の違いによって変わる浸水しやすさが、表面雨量指数の違いと

して表現されていることとなります。

第 9 図は、そのような表面雨量指数の特徴がよく表れた事例です。2014 年 6 月 23 日、栃木県足利市、佐野市それぞれで 1 時間 100mm 前後の大雨が降り、佐野市で床上 2 件・床下 3 件の浸水被害が発生しました（足利市は被害報告なし）。第 9 図の (b) (c) をみると、同程度の雨量であっても、山間部で大雨となった足利市の表面雨量指数は小さく、市街地で大雨となった佐野市の表面雨量指数は大きく算出されていることが分かります。表面雨量指数は、都市化率や地形勾配といった地理情報をパラメータとして取り込んでいるため、同程度の雨が降っていても、地理的素因に応じた危険度の違いを表現できるのが大きな強みです。この事例の場合、100mm 超も降っていますので、雨量基準であれば足利市にも大雨警報を発表することになりますが、表面雨量指数であれば足利市に大雨警報を発表する必要がなくなるわけです。

本節の最後に、下水道や排水ポンプといった実際の排水施設と表面雨量指数の関係について触れておきたいと思います。表面雨量指数の計算には下水道の整備状況やポンプの排水能力といった要素は考慮していませんが、これら排水インフラの影響は結果的に浸水害の発生状況の変化として現れてきますので、表面雨量指数と災害実績との対応により基準値を作成することで、基準値にその効果を一定程度反映させることができます。このため、2.2 節で述べた通り、基準値の妥当性を定期的に確認・評価し、必要に応じて、適切な基準値への見直しを行う、といったメンテナンスが重要となってきます。

大雨警報における表面雨量指数の適用可能性については太田・牧原（2015）で議論しましたので、詳しくはそちらに譲りたいと思います。

3.4 基準値の設定

2014 年頃には、流域雨量指数の精緻化と表面雨量指数の技術開発の目途がつかまりましたので、次のステップとして、全国すべての市町村の大雨警報・洪水警報の基準作成作業に着手しました。基準設定の基本的な考え方は 2.2 節で述べた内容と大きくは変わりませんが、流域雨量指数の精緻化と表面雨量指数の導入により、第 4 図に示した基準要素は以下のように変更しました。

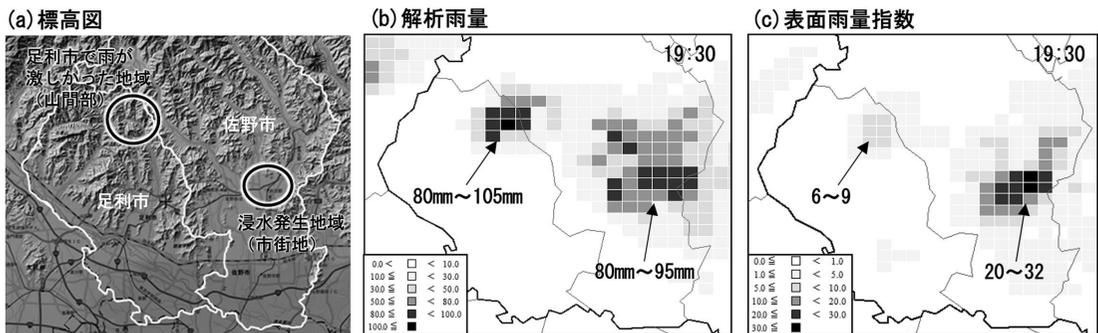
- 氾濫型の内水氾濫を対象に設定する大雨警報（浸水害）・大雨注意報の基準は、雨量（1 時間雨量、3 時間雨量）から表面雨量指数に変更。

- ・ 湛水型の内水氾濫を対象に設定する洪水警報の複合基準は、流域雨量指数と雨量（1時間雨量，3時間雨量）の組み合わせから流域雨量指数と表面雨量指数の組み合わせに変更。
- ・ 流路長15km未満の河川の外水氾濫については、これまで雨量基準（1時間雨量，3時間雨量）でカバーしてきたが、流域雨量指数の精緻化に伴い、多くの中小河川が指数計算対象となったことから、洪水警報の雨量基準は廃止。

上記変更によって大雨警報・洪水警報の発表基準は、土壌雨量指数，表面雨量指数，流域雨量指数という「災害との相関の高い指数」のみとなり、これまで長く用いてきた雨量基準をとうとう卒業することになったわけです。

なお、今回の流域雨量指数の精緻化や表面雨量指数の導入に伴う全国的な基準見直しを機に、新たに警報基準よりも一段高い基準を設けることとしました。これは毎年のように発生する記録的大雨に対し、警報が発表された後の更なる警戒呼びかけ等に活用することを想定して設定したものです。この新たな基準（基準III）も含め、第2表に大雨警報（浸水害）・大雨注意

報の基準設定方法を、第3表に洪水警報・注意報の基準設定方法を示しました。3段階の基準それぞれに対して、過去20年以上の災害データと各種指数の統計的関係をコストロスモデルで分析し、大雨については市町村ごと、洪水については河川ごとに基準値を設定します。なお、流域雨量指数は河川の水量を示しており、下流ほど大きくなる性質があるので、基準値は河川の一つではなく、河川ごとかつメッシュごとに基準値があることに留意ください。一方、大雨警報（浸水害）の表面雨量指数基準は市町村に一つの基準値が設定されますが、表面雨量指数は地形・土地利用、さらに先行降雨の影響を取り込んでいることから、市町村内のインフラが同様であれば、一つの基準でも適切に大雨災害の捕捉ができると考えています。ここで、コストロスモデルによる機械処理は気象庁本庁で実施しますが、その入力となる災害資料の収集やデータ整理、コストロスモデルで算出された基準値のチェック等、基準設定に係る様々な作業については全国の気象官署の職員が行いました。加えて、流域雨量指数の計算の基礎データである国土数値情報の河川流路データについても、河川改修等により現状と乖離が生じたも



第9図 2014年6月23日の大雨事例

- 標高図。地理院タイル（色別標高図）を加工して作成。
- 2014年6月23日19時30分の解析雨量。
- 同時刻の表面雨量指数。

第2表 大雨警報（浸水害）等の基準設定方法

基準	基準要素	基準設定手法
警報相当	III 表面雨量指数基準	重大な浸水害を高い確度で適中させるように設定。
	II 表面雨量指数基準	重大な浸水害を見逃さないように設定。
注意報相当	I 表面雨量指数基準	浸水害（警報まで至らない軽微なもの）を見逃さないように設定。

※ I は注意報基準，II は警報基準，III は警報基準よりも一段高い基準を表す

のについてはデータの修正を行ってくれました。いずれの作業も緻密で膨大な作業量が要求されるものですが、これによって流域雨量指数の精度や適切な基準設定が維持されている、ということにも触れておきたいと思います。

本節の最後に、雨量基準に代えて導入した指数基準の改善効果を紹介したいと思います。第10図は、基準設定時のデータによる指数基準と雨量基準の災害捕捉状況です。この図から、大雨警報（浸水害）の表面雨量指数基準は、従来の雨量基準に比べ、災害捕捉状況を改善したうえで、空振り回数を大幅に低減していることがわかります。また、洪水警報についても、災害の捕捉状況はほとんど維持したまま、空振り回数を大幅に低減することができています。このような空振りの減少は、警報に対する信頼感を高めるとともに、自治体的確な避難情報の発令や住民の主体的避難にも資するものとして、一連の防災気象情報の改善の中でも特に重要な成果であると捉えています。

4. 危険度分布の提供 [～2017年]

4.1 背景

雨の降り方が局地化・集中化・激甚化している（国土交通省 2015）といわれる中、交通政策審議会気象分科会において、防災・減災のためにソフト面から気象庁が取り組むべき課題が審議され、2015年7月「『新たなステージ』に対応した防災気象情報と観測・予測技術のあり方」として提言がとりまとめられました。この提言では、防災気象情報の改善に向けた課題・対応策の1つとして「危険度分布（警戒判定メッシュ情報）の充実、利活用促進」が示されました。具体的には、気象庁はこれまで、土砂災害の危険度分布

（土砂災害警戒判定メッシュ情報）を提供していましたが、こうした危険度分布の種類をさらに増やすこと、また、気象庁ホームページ上で表示する際に、道路、河川、鉄道などの情報を重ねてわかりやすくすることなどを求めています。

そこで、土砂災害に加え、浸水害や洪水害についても危険度を分かりやすく認識できるような情報を提供することを目的として、指数による基準超過状況を地図上で視認性高く表示したコンテンツ、いわゆる「危険度分布」の開発に着手しました。これは一連の防災気象情報に関する改善取組の最終段階ともいえますが、「3.4 基準値の設定」でも述べましたように、全国の気象庁職員が精力的に基準値の設定・検証作業を進めてくれたこともあり、2015年7月に交通政策審議会気象分科会の提言を受けてから、わずか2年の準備期間で危険度分布の提供までこぎつけることができました。

こうして2017年7月、気象庁は表面雨量指数と精緻化した流域雨量指数を大雨・洪水警報の基準指標に導入して大雨・洪水警報の精度向上を図るとともに、国民が水害危険度を一見して把握できる「大雨警報（浸水害）の危険度分布」及び「洪水警報の危険度分布」の一般提供を開始しました。この危険度分布は、水害の危険度を分かりやすく示す防災上の新技術として、多くの報道番組で扱われるなど社会の高い注目を集めるとともに、住民の主体的な避難促進や避難勧告等の適確な発令のための市町村長支援に資するものとして期待されています。

4.2 危険度分布の概要と特徴

危険度分布は、雨による災害危険度の高まりを表す「指数」を過去災害に基づき設定した「基準」で判定

第3表 洪水警報等の基準設定方法

基準	基準要素	基準設定手法
警報相当	III 流域雨量指数基準	河川流域で発生した外水氾濫に起因する重大な浸水害を高い確度で適中させるように設定。
	II 流域雨量指数基準 複合基準 表面雨量指数+流域雨量指数	河川流域で発生した外水氾濫に起因する重大な浸水害を見逃さないように設定。 河川流域で発生した内水氾濫に起因する重大な浸水害を見逃さないように設定。
注意報相当	I 流域雨量指数基準	河川流域で発生した外水氾濫に起因する浸水害（警報まで至らない軽微なもの）を見逃さないように設定。
	I 複合基準 表面雨量指数+流域雨量指数	河川流域で発生した内水氾濫に起因する浸水害（警報まで至らない軽微なもの）を見逃さないように設定。

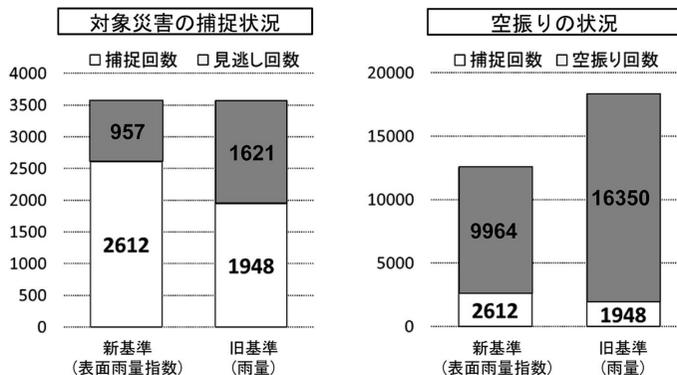
※ I は注意報基準、II は警報基準、III は警報基準よりも一段高い基準を表す

し、その判定結果を色分けして表示したものです。解析雨量や降水短時間予報といった雨に関する情報とともに気象庁ホームページでご覧いただくことができます (<https://www.jma.go.jp/jp/suigaimesh/flood.html>)。

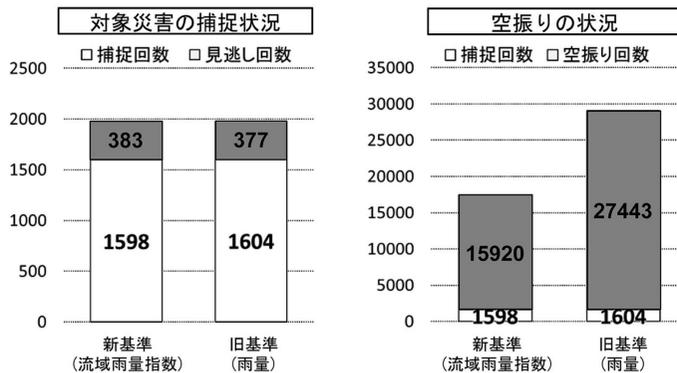
危険度分布の色の表す意味と表示条件について第4表に示しましたが、ここでは2つのポイントがあります。1つは、危険度の表示に解析値だけではなく予測値も用いている点です。例えば、浸水害を対象とした大雨警報の場合、解析値と1時間先までの予測値の最大危険度を表示するようにしています。これは、今後危険度が高まる地域をあらかじめ表示しておくこと

で、災害が発生する前に着実に避難行動をとっていたとすることを意図しています。2つめのポイントは、警報基準を大きく超過した基準である「基準Ⅲ」に実況（解析値）で到達した場合には、それを明示的に「濃い紫」として表示するようにしている点です。第2表、第3表のとおり、基準Ⅲは適中率を重視して設定した基準であり、濃い紫が出現した場合は、災害がすでに発生していてもおかしくないという状況を表しています。このため、「濃い紫」が出現してから避難行動をとったのでは”手遅れ”ということにもなりかねません。危険度分布の避難への活用にあたっては、「濃い紫」を待つことなく、「赤」や、遅くとも

(a) 大雨警報（浸水害）



(b) 洪水警報



第10図 警報基準の災害捕捉状況

1991年から2013年にかけて、全国市町村で発生した水害（対象災害は市町村との調整も踏まえ設定しており、市町村毎に異なる）に対して、2017年7月に導入した新基準（指数基準）とそれまで用いていた旧基準（雨量基準）の災害捕捉回数と空振り回数（基準を超えても災害が発生しなかった回数）を示す。(a)は大雨警報（浸水害）、(b)は洪水警報を表している。

「うす紫」が出現した時点で、河川の水位情報や自治体の避難情報も確認の上で、速やかに避難を開始することが重要となります。

ところで、洪水警報の危険度分布については、土砂災害や浸水害のような“メッシュ表示”ではなく、河川流路（線）に危険度の色を着色しています。当初は土砂災害や浸水害と同じ並びで洪水害についてもメッシュ表示とすることを検討していましたが、洪水害の危険度をメッシュで面的に塗りつぶしてしまうと、あたかも氾濫した水が周辺に広がっているように見え、利用者の誤解を招いてしまうのではないかと懸念があったため、流路に着色することとしました。この“流路表示”を採用したことによって、どの河川で危険度が高まっているかを視覚的にわかりやすく認識できるようになり、自分の身近な河川の危険度の高まりを我が事感を持って感じてもらえるようになったのではないかと思います。なお、洪水警報の危険度分布の表示方法の検討にあたっては、国土交通省水管理・国土保全局からも多くの助言をいただきました。

最後に、洪水警報の危険度分布の特徴がよく表れている事例を紹介します。

第11図は、2016年台風第10号における岩手県岩泉町周辺の洪水警報の危険度分布です。当時はまだ、危険度分布の開発は完了しておらず、ここでは事後の計算結果として示しています。この事例では、岩泉町を流れる二級河川の小本川の氾濫により、高齢者福祉施設の入所者9名全員が犠牲になるという大変痛ましい被害が発生しました。被害が発生したのはおよそ18時頃とされていますが、15時10分（第11図c）の時点では、小本川上流の広い範囲で、まもなく重大な災害となる可能性が高いことを示す「うす紫」が広がって

ました。その後、下流地域にもうす紫や濃い紫の表示が広がり（第11図d, e）、雨が止んだ20時10分（第11図f）には、小本川本川のみに残るような状況になっていることがわかります。このように、上流に降った雨が支川を流れ下って徐々に下流に集まり伝播する様子が可視化される、というのが洪水警報の危険度分布の大きな特徴です（10分ごとの動画で見ると、まるで危険度が流れているかのように見えます）。すなわち、上流の危険度が下流地域にとっての早期警報の役割を果たしているともいえ、そういった流域視点で洪水警報の危険度分布をみていただくと、より効果的に活用できるのではないかと思います。

5. 今後への課題と期待

5.1 危険度分布の活用に向けて（太田）

平成29年7月九州北部豪雨を受けて日本災害情報学会調査団が実施した自治体へのヒアリング調査では「洪水警報の危険度分布が（運用開始直後ということもあって）十分に活用されていなかった」ことが報告されています（日本災害情報学会平成29年7月九州北部豪雨調査団 2018）。この報告書によると『「水位計の設置していない河川の状況も分かれば、避難の呼びかけが早くできるのではないかと期待している。」』『水位計がないので今後有用な情報になる可能性がある。』『危険の判断や心構えには使えると思う。』など危険度分布に対する期待がある一方で、『初めて見たのでピンと来なかった。』『極めて危険（濃い紫）が出た河川でも実際にはそれほど水位は上がっていなかった。』『築堤河川と掘込河川では情報に対する対応が異なるのではないか。』など、情報の精度、活用法について課題があると考えている自治体も多くあった」と報告

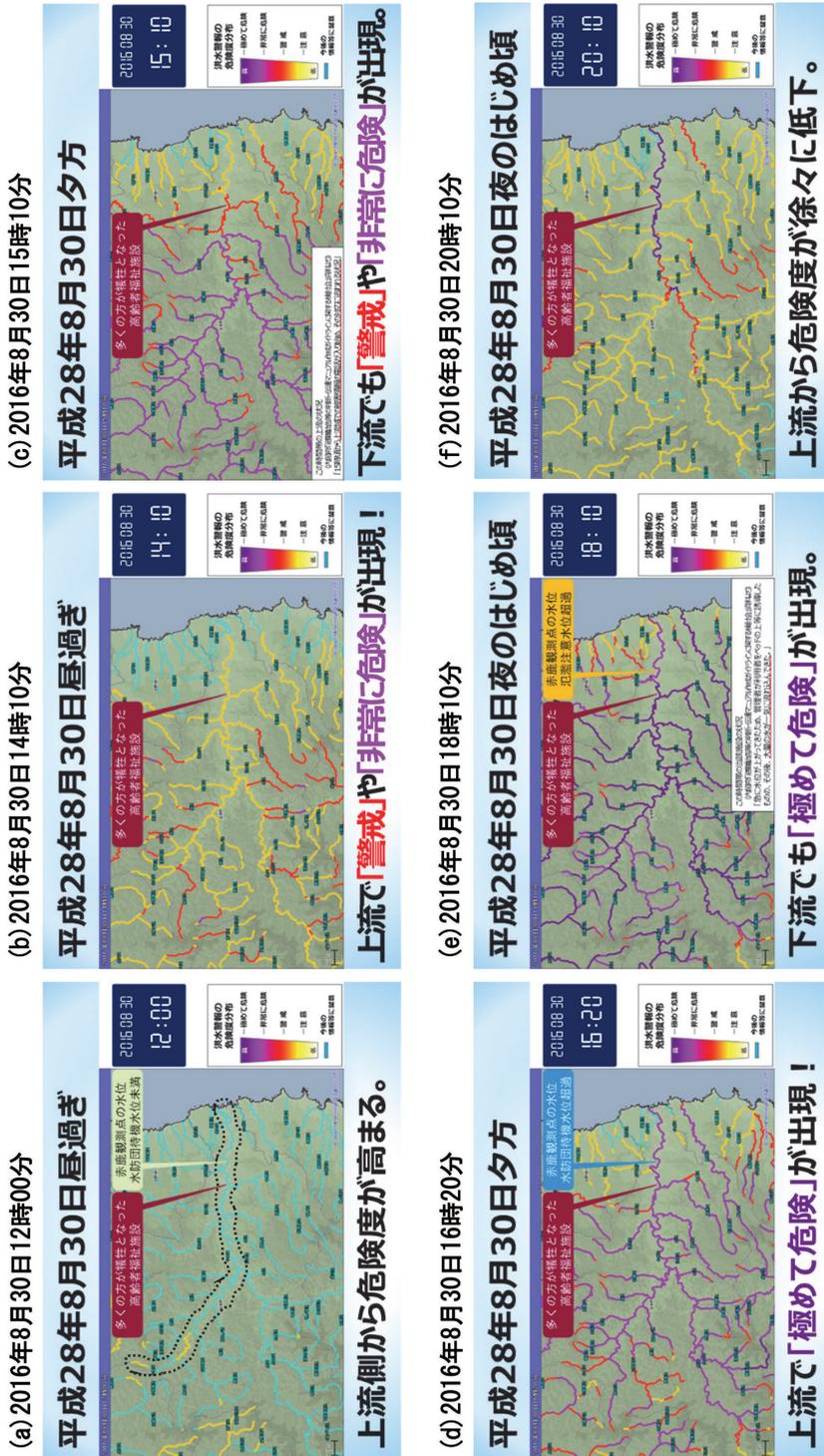
第4表 危険度分布の色の意味、表示条件

色	意味	表示条件
濃い紫	極めて危険	すでに基準Ⅲに到達した場合
うす紫	非常に危険	1時間先までに基準Ⅲに到達すると予測される場合
赤	警戒	1時間先までに基準Ⅱに到達すると予測される場合
黄	注意	1時間先までに基準Ⅰに到達すると予測される場合
—	今後の情報に留意	1時間先までに基準Ⅰに到達しないと予測される場合

※大雨警報（浸水害）の危険度分布の場合、色とその意味については、大雨警報（土砂災害）の危険度分布、洪水警報の危険度分布も同じ。

※表示条件については、予測精度や避難に要する時間等を考慮し、大雨警報（土砂災害）の危険度分布は2時間先まで、洪水警報の危険度分布は3時間先までの予測値をそれぞれ用いている。

※基準Ⅰは注意報基準、基準Ⅱは警報基準、基準Ⅲは警報基準よりも一段高い基準を表す。



第11図 岩手県岩泉町周辺の洪水警報の危険度分布
 2016年台風第10号の事例を事後に検証したもの（当時はまだ危険度分布の開発は完了していない）。図（a）に小本川の流路を黒点線で囲って示した。

されています。

危険度分布の色の意味を正しく理解し、市町村の避難勧告や住民避難に有効に活用していただくためにも、今後は、精度向上に加え、周知啓発や利活用促進の取組を着実に進めていかなければなりません。特に、避難への活用にあたっては、自治体・地元関係機関・気象台が一体となって検討し、納得の上で実施する、といった地域の連携が重要になるでしょう。

今回、危険度分布の提供開始という形で、大雨・洪水警報の精度向上を中心とした防災気象情報の改善取組としては1つの区切りがつかしましたが、防災・減災への取組という意味では、これでようやくスタートラインに立ったこととなります。「情報」というものは、実際に使ってもらえなければ何の価値もありません。今回の受賞を励みに、引き続き、危険度分布の精度向上や利活用促進にしっかり取り組んでいきたいと思えます。

5.2 指数のアーカイブの公開と活用についての期待 (牧原)

作成に携わった者という立場から一步下がって、客観的に見ても、流域雨量指数、表面雨量指数、土壌雨量指数及びこれらを用いた危険度分布は、防災・減災に非常に有効な情報になりうると考えています。そして、今後は周知啓発、利活用促進の取り組みが重要であることについて、太田とまったく同じ考えです。

その一つとして私が期待しているのは、丁寧に綿密に作成された基準の根拠と、それらが想定する災害について、できるだけ公開し、気象庁以外の、気象にある程度知識を有する人を含めて、例えば防災計画の策定、講習会等で、それらを活用してほしいということです。

具体的には、過去の指数値を公開することで、指数いくつでどのような災害が発生したかを、自分の住んでいる所について理解してほしい。「過去には雨がどれだけ降ったときに、このような災害が発生した」ことを多くの自治体等で記録していますが、それを指数に置き換えてほしいと思えます。災害との関係では、雨よりも指数のほうが、断然、精度が高いからです。そうすることで、今後の指数値の解析値、予測値、危険度の色が示す状況がどのような災害のおそれを示すかについて、より具体的な想定ができるようになり、理解が進むと思えます。そして、その理解を通じて、指数の活用がさらに進むものと期待します。

現在、私自身は、情報を提供する側ではありませんが、今後、危険度分布や指数の利活用に向けての普及啓発に、微力ですが、つとめていきたいと考えております。

参考文献

- 福知山市, 2014:平成25年台風第18号 災害の記録。
<https://www.city.fukuchiyama.lg.jp/uploaded/attachment/2216.pdf> (2019.5.8閲覧)。
- 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。
- Ishihara, Y. and S. Kobatake, 1979: Runoff model for flood forecasting. Bull. Disaster Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 29, 27-43.
- 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(4), 1-32。
- 国土技術研究センター, 2014: 京都府福知山市等浸水被害現地調査報告。http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/reports/disaster/06/2014fukuchiyama.pdf (2019.5.8閲覧)。
- 国土交通省, 2015: 新たなステージに対応した防災・減災のあり方。http://www.mlit.go.jp/common/001066501.pdf (2019.5.8閲覧)
- 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。気象庁研究時報, 45, 35-70。
- 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注意点。平成18年度量的予報研修テキスト, 9-24。
- 日本河川協会, 1997: 建設省河川砂防技術基準(案)同解説・調査編。技報堂出版, 52pp。
- 日本災害情報学会平成29年7月九州北部豪雨調査団, 2018: 平成29年7月九州北部豪雨に関する調査報告。日本災害情報学会, 41pp。
- 岡田憲治, 2002: 土壌雨量指数。測候時報, 69, 67-100。
- 太田琢磨, 2017: 大雨・洪水警報作業に用いる新しい指数。平成28年度予報技術研修テキスト, 30-41。
- 太田琢磨, 牧原康隆, 2015: 大雨警報における浸水雨量指数の適用可能性—タンクモデルを用いた内水浸水危険度指標—。気象庁研究時報, 65, 1-23。
- 立平良三, 1988: 「短時間予報」の業務化。気象, (369), 4-7。
- 田中信行, 太田琢磨, 牧原康隆, 2008: 流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善。測候時報, 75, 35-69。
- 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

Technical Developments for Mitigating Disasters from Inundation and Flood and Dissemination of their Results

Takuma OHTA* and Yasutaka MAKIHARA**

* (*Corresponding author*) *Forecast Department, Japan Meteorological Agency, 1-3-4 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8122, Japan*

** *Japan Meteorological Business Support Center*

(Received 11 June 2019; Accepted 7 August 2019)
