

論 文

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 -

太田琢磨*・牧原康隆**

An advanced inundation risk index using a tank model
and its possibility for applying to heavy rain warning

Takuma OOTA and Yasutaka MAKIHARA

要 旨

内水氾濫による浸水被害の危険度を表す指標として、タンクモデルをベースに降水量と地理情報から算出する「浸水雨量指数」を考案した。東京都の浸水被害データを用いた検証から、1時間雨量、3時間雨量、24時間雨量に比べ、浸水雨量指数の方が内水浸水との関連性が高いことを明らかにした。また、浸水雨量指数をもとに作成した内水浸水危険度を表すための基準は、現在の大雨警報・注意報基準に比べ、対象災害の捕捉状況を改善するとともに、空振り回数を大幅に減らすことができることがわかった。これら検証結果をもとに、大雨警報における浸水雨量指数の適用可能性を論じた。

1. はじめに

時間雨量 50mm を上回る豪雨が全国的に増加しているなど、近年、雨の降り方が局地化、集中化、激甚化しており（国土交通省，2015）、河川改修や警戒避難体制の整備といった防災・減災対策にも関わらず、毎年のように、集中豪雨や局地的大雨に

よる甚大な被害が発生している。人命に関わる土砂災害や広域な浸水害をもたらす河川の外水氾濫のほか、近年では内水氾濫による浸水被害（以下、内水浸水と呼ぶ）の甚大さ・深刻さも顕在化している。例えば、平成 26 年（2014 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

* 気象庁予報部，** 気象業務支援センター

（2015 年 7 月 17 日受領，2015 年 8 月 31 日受理）

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た（2014年10月14日現在福知山市調べ）。浸水家屋数4,425棟というのは，平成25年（2013年）台風第18号において由良川が氾濫した時の浸水家屋数779棟（福知山市，2014）の5倍を超える数である。このように，市街化の進んだ地域において発生する内水浸水は外水氾濫に匹敵する甚大な被害をもたらすことがある。

内水浸水に対する具体的な対策としては下水道や排水ポンプ等の施設整備が有効であるが，それら整備には莫大な費用と年月を要する。さらには，施設整備の際の想定を越えるような大雨の発生が近年増加しているとも言われている。そこで，施設によって防衛することのみに頼るのではなく，地域の災害特性や降雨状況に応じた適切な避難・減災行動が重要となる。その状況判断や意思決定を支援する上で気象庁が発表する各種防災気象情報の果たす役割は大きい。

大雨警報をはじめとする防災気象情報はこれまでも，災害との対応の良い指標（土壌雨量指数，流域雨量指数）の導入や発表区域の細分化などの改善が進められてきたが（気象庁，2010），市町村や都道府県からはさらなる情報の改善が求められている。防災気象情報の利活用状況等に関する調査（気象庁，2011）によると，避難勧告等の発令にあたり，市町村は，現象の予想に基づく「大雨，洪水等の気象警報」以上に「雨量や水位の実況情報」を重視していることが明らかとなった。このことから，避難勧告等の発令判断はできるだけ確度の高い情報に基づいて行いたいとの考えが市町村にあるものと推測される。また，防災気象情報の改善への期待として，正確な雨量予測の要望とともに，避難勧告等の対象地域を特定するためのきめ細かい情報を求める意見が多かった。

これらのニーズに応えるために雨量予測技術の向上が重要な課題であることはいうまでもない。一方で，大雨警報等の発表基準と災害との関連性を高め，災害発生に対して，より高い確度の防災気象情

報を提供できるようにすることも有効な対応策になると考える。

現在，内水浸水を対象とした大雨警報・注意報の基準指標には1時間雨量又は3時間雨量を用いているが，大雨警報基準と内水浸水との関連性に関する現状の課題として，災害の素因（地形，地質など，その土地が持っている災害に関わる性質）が適切に反映されていないという点があげられる。内水浸水についていえば，その発生状況は，地形や土地利用などの自然的素因，下水道や排水ポンプなどの社会的素因に左右されるが，現在は降雨量を平坦地と平坦地以外のごく簡単な地形により分類しただけで，ほとんど「誘因」のみから基準を設定している。大雨警報基準と内水浸水との関連性をより一層高めるためには，その基準指標として，誘因のみならず，素因の寄与を踏まえた浸水危険度に対する尺度を与える必要があると考えられる。

内水浸水に寄与する要因の分析は以前より数多く行われている。例えば松下ほか（2013）は，東京都の内水被害を対象に，降雨，平均勾配，宅地率，窪地率について数量化理論第Ⅱ類による判別分析を行い，内水被害における各要因の寄与を定量的に評価した。しかし，こうした分析の多くは内水被害と各要因の関連性を指摘するにとどまっており，実際の降雨データと組み合わせた内水浸水に対する危険度指標の提案はほとんどなされていない。また最近では，道路・下水道ネットワークによる水の流れ等を考慮した精緻な氾濫解析モデルに関する研究事例も多い（例えば，関根，2011）。ただし，このような精緻な氾濫解析モデルをリアルタイム予測の目的で適用する際にはモデルを大幅に簡略化した上で実用的な精度を確保する必要があり，実用段階に至るまでにはまだ課題も多い。

大雨警報への適用を見据えた場合の，当面，実用的な内水浸水の指標としての要件は，①道路・下水道網などの排水施設に関する詳細な入力情報を用いない手法で，②全国どの地域においても適用でき，③実用的な精度を有することである。このような要件のもとで手法を検討するにあたっては，降雨から浸水発生に至るまでの複雑なプロセスを，水野

(1986) に示されるシンプルな関数 (第 1 図) に置き換えて捉えると分かりやすい. すなわち, ある流域に対する入力降雨 (誘因) が, 地質, 地形等の流域特性 (素因) による変換を受けてどのような流出として出力されるかを記述し, 流出量と内水浸水との対応性を考えるのである. ここでは雨量から流量への変換系 (関数) として流出モデルが介在することになるが, 本論文では流出モデルとしてタンクモデルに着目した. タンクモデルは, 複数のタンクを鉛直方向へ直列に並べ, タンクの側面や底面に開けた孔を介した水の挙動により, 河川流出や地下浸透の様子を模した流出モデルである. すでに, 土砂災害の危険性を表す土壌雨量指数 (岡田, 2002) や分布定数系の流出解析モデルである流域雨量指数 (田中ほか, 2008) として実用化されており, 内水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可能性がある.

本論文では, 内水浸水に対する危険度として, タンクモデルをベースに降水量と地理情報から算出する指標 (本論文では浸水雨量指数と称す) を提案する. その精度を明らかにするため, 東京都の内水浸水被害データを用いて, 現在の大雨警報・注意報の基準指標である 1 時間雨量, 3 時間雨量, 及び, 平成 20 年 5 月まで基準指標に用いていた 24 時間雨

量との比較検証を行う. また, 浸水雨量指数を用いて, 内水浸水危険度を表すための段階的な基準を試作し, 現在の大雨警報・注意報基準との対比から浸水雨量指数の統計的精度を示す. これらの検証結果から浸水雨量指数の特徴をまとめ, 大雨警報における浸水雨量指数の適用可能性について論じる.

2. 浸水雨量指数

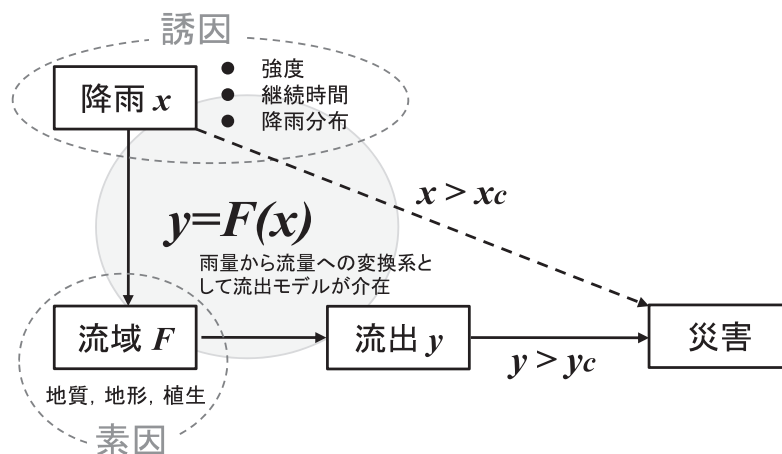
2.1 概要

浸水雨量指数は, 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ある.

$$IRI=q \times C_l \tag{1}$$

ここで, IRI は浸水雨量指数, q はタンクモデルで算出した流出量, C_l は補正係数である.

浸水雨量指数が主に対象とする現象は, 下水道や側溝などの排水能力を超えた多量の降雨により, 雨水の排水が追いつかずに氾濫するという種の内水氾濫である. 雨水の排水には地形も大きく影響することから, この種の内水氾濫は低平地やくぼ地で発生することが多く, また, 河川から離れた地域でも発生する. この現象の発生過程においては, 上流降



第 1 図 降雨, 流出, 災害の関係

添字 c は災害発生の臨界値を表す. 点線の矢印は, 現在の大雨警報の関係を表しており, x_c は大雨警報基準を意味する. 本図は, 水野 (1986) をもとに一部加筆修正して作成した.

雨に伴う河川水位の上昇というよりは、河川に至る前の地表面付近の水の流れ—すなわち表面流出の寄与が本質的な役割を果たすと考えられる。そこで、タンクモデルから算出した流出量を、その対象領域内の表面流出の強さを表すものとみなし、流出量の大小から内水浸水の危険性を評価しようというのが浸水雨量指数の着想である。

一方、内水浸水に寄与する要因としては地形勾配も重要である。具体的には、勾配が急であることは内水浸水に対して次の2つの効果をもたらす。1つは、流速の増加に伴うピーク流量の増大であり、これは浸水発生に対して正の寄与をする。もう1つは、勾配が急であるほど降雨を速やかに下流へ排出し、その場所では水がたまりにくくなるという効果である。これは浸水発生に対して負の因子として寄与する。浸水雨量指数では後者の寄与を反映させるため、勾配を変数とした補正係数により流出量を補正したものを最終的な内水浸水の危険度を表す指標とした。なお、地形勾配に関する前者の効果については、タンクモデルのパラメータに反映されている。

浸水雨量指数の入力データには、降雨データとして解析雨量（永田・辻村，2006）を、地理データとして地質、土地利用、標高、勾配を用いる（第1表）。出力単位は基準地域メッシュ（約1km四方

格子に相当、以下1kmメッシュと呼ぶ）であるが、計算処理は4分の1地域メッシュ（基準地域メッシュをさらに4×4に細分したもので約250m四方格子に相当、以下250mメッシュと呼ぶ）で行い、1kmメッシュ内の250mメッシュ最大値を最終的な出力値とする。250mメッシュで処理するのは、できるだけ小さなスケールの地形の凹凸や土地利用状況を反映するためである。

なお、下水道や排水ポンプ等の排水施設は内水被害の防御・軽減に重要な役割を果たすが、下水道の整備状況や排水ポンプの能力といった要素を全国的にモデル化あるいはパラメータ化して指標に取り込むのは困難であることから、浸水雨量指数ではこれら要素を考慮していない。

2.2 タンクモデルによる流出量の算出

流出量の算出においては、地面の被覆状態を適切に取り扱うことが重要となる。地表面がアスファルトに覆われていると、降った雨は地中に浸透せず急速に河川や下水道へ流れ込むため流出が速くピーク流量も大きくなる。一方で、自然の土の状態のような浸透能力の高い地表面においては、地中への雨水の浸透が多くなるため流出が遅くピーク流量も小さくなる。浸水雨量指数では、地面の被覆状態に応

第1表 浸水雨量指数で使用する地理情報

要素	メッシュサイズ	用途	元データ（国土数値情報）と作成方法
地質	1km	非都市用タンクパラメータ選択	自然地形メッシュを使用
土地利用	100m	集水域における都市メッシュ・非都市メッシュの定義	土地利用細分メッシュ（1/100細分区画）を使用。都市メッシュは建物用地・幹線交通用地、非都市メッシュは田・その他農用地・森林・荒地・ゴルフ場・その他用地が該当。
標高	100m	集水域の定義	50mメッシュ標高を100mメッシュに変換して使用。周辺格子との標高差が0m以上の周辺格子を上流メッシュとして繰り返し追跡探索して集水域を定義する。
勾配①	1km	都市用タンクパラメータの変数	50mメッシュ標高を250mメッシュに変換したデータから、東西・南北・北東-南西・北西-南東の4方向の勾配を算出し、その最大値を250mメッシュの勾配とする。1kmメッシュに含まれる250mメッシュ勾配を平均する。
勾配②	250m	補正係数の変数	50mメッシュ標高を250mメッシュに変換した標高データを用いて、周辺格子との標高差から下流メッシュを繰り返し追跡探索し、下流メッシュの勾配を平均して算出。

じたこのような流出特性の違いを反映させるため、都市用と非都市用の性質が異なる二種類のタンクモデルを使い分ける。また、河川に至る前の地表面付近の水の流れといった時空間スケールの小さな流出現象を取り扱うため、流域を対象とした一般的な流出モデルよりも精緻な流出解析処理を行っている。

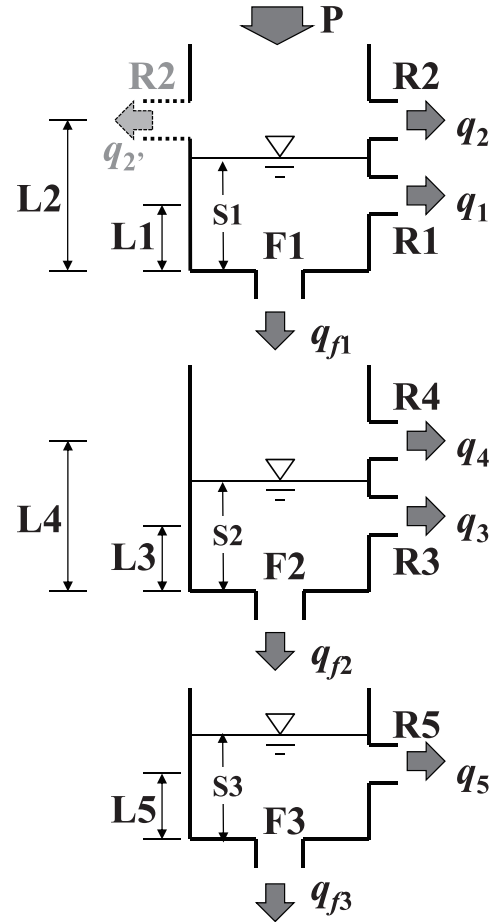
流出量の算出は、該当 250m メッシュ地点における集水域を対象領域とするが、2種類のタンクモデルは 250m メッシュではなく 1km メッシュで区切った領域ごとに計算する。

以下に、非都市用タンクモデル、都市用タンクモデル、流出量の算出手順のそれぞれについて説明する。

(1) 非都市用タンクモデル

第2図、第2表に非都市用タンクモデルとそのパラメータを示す。これは、Ishihara and Kobatake (1979) の直列三段タンクモデルを 1km 四方程度の小流域にも適用できるようにタンクの構造やパラメータを修正したものである。具体的には、Ishihara and Kobatake (1979) のモデルに対して、①第一タンクの L2 の高さに 2 つ目の流出孔を新設、②第二タンクの L4 の高さに流出孔を新設、③タンク水位 S1, S2 に応じて浸透係数 F1, F2 を変化させる、の 3 点を修正した (詳細は付録 A を参照)。

第2表に示した 5 種類のパラメータは、国土数



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, qr: 浸透量, S: タンク水位, P: 入力降雨. パラメータ L, F, R の値は第2表を参照.

第2表 非都市用タンクモデルのパラメータ

No.	河川名 (地域)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	F1 (10min ⁻¹)	F2 (10min ⁻¹)	F3 (10min ⁻¹)	R1 (10min ⁻¹)	R2 (10min ⁻¹)	R3 (10min ⁻¹)	R4 (10min ⁻¹)	R5 (10min ⁻¹)
1	筑後川 (小平)	40	75	15	75	15	0.20	0.08	0.01	0.30	0.30	0.12	0.06	0.01
2	馬洗川 (南島敷)	30	60	10	60	15	0.20	0.08	0.01	0.30	0.40	0.15	0.06	0.01
3	木津川 (月ヶ瀬)	15	60	10	60	15	0.20	0.03	0.01	0.30	0.40	0.15	0.06	0.01
4	長良川 (美濃)	30	75	5	75	15	0.16	0.02	0.01	0.30	0.40	0.10	0.06	0.01
5	夕張川 (清幌橋)	15	40	5	40	15	0.16	0.01	0.01	0.30	0.40	0.18	0.06	0.01

注) 1. パラメータ番号及び河川名は Ishihara and Kobatake(1979) による.
 2. F, R の単位時間は 10 分である.
 3. F1, F2 はそれぞれ第一タンク, 第二タンクの水位に応じて変化する.

値情報の地質データに対応させて使い分ける。これにより、地質によって異なる地下浸透の状況を踏まえた流出量の算出が可能となる。

(2) 都市用タンクモデル

都市用タンクモデルとして、最下層のタンクにのみ流出孔を設けた直列五段タンクモデルを用いる(第3図)。4つの浸透係数 $F1 \sim F4$ と流出係数 $R5$ は全て同じ値を設定しており、勾配 I (第1表の勾配①) に応じて下式により与えられる。

$$\begin{aligned} R5 &= 0.6910 \cdot \ln(I) + 8.1234 && \text{for } I < 1\% \\ R5 &= 0.9879 \cdot \ln(I) + 8.1234 && \text{for } I \geq 1\% \end{aligned} \quad (2)$$

(ただし, $R5 = F1 = F2 = F3 = F4$)

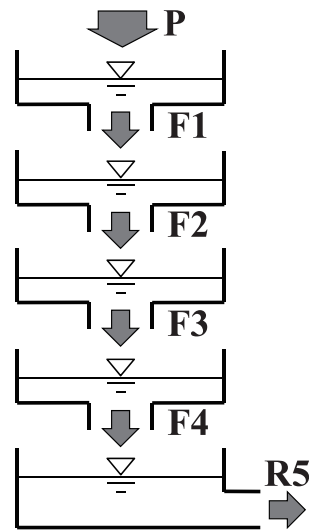
都市の流出現象の特徴は、地表面がアスファルトに覆われているため雨水の浸透が少なく、排水の多くが人工的な排水路や小河川により行われて急速に河川へ流れこむことである。したがって、ここでは地形勾配が流出における支配的要因になると考えられる。そこで、都市用タンクモデルの構築にあたっては、さまざまな勾配を与えた場合のマニングの平均流速公式によるシミュレーションを行い、それを再現するようなパラメータを同定した。第2式はその結果をもとに導出した関係式である。都市用タンクモデルのパラメータ設定に関する技術的な検討経緯については付録Bに詳述した。

(3) 流出量の算出手順

非都市用タンクモデル及び都市用タンクモデルは1kmメッシュごとに計算するが、実際の流出量は一定範囲の集水域(第4図)を対象として250mメッシュごとに算出する。集水域は以下のように定義される。

- 対象領域は半径1kmの円の範囲内で定義する。

半径1kmとしたのは、上流に降った雨が1時間のうちに該当250mメッシュまで流下してくる距離として最大でも1km程度を想定したからである。これよりも上流の降雨の寄与をその時間差も含めて定量的に評価するためには、排水路や小河川等の流路に沿った水の流れを直接的に計算する必要があると思われる。



第3図 都市用タンクモデル

F : 浸透係数, R : 流出係数, P : 入力降雨。

- 100mメッシュ標高を用いて、該当メッシュの集水域を定義する。具体的には、該当メッシュと周辺メッシュの標高差から上流メッシュを特定し、特定した上流メッシュについて周辺メッシュとの標高差からさらにその上流を特定する。これを繰り返すことで上流メッシュを追跡探索し、最終的に半径1kmの円の範囲内にある上流メッシュを集水域と定義する。
 - 集水域と定義されたメッシュについて、100mメッシュ土地利用データから都市メッシュ(建物用地, 道路, 鉄道)と非都市メッシュ(田, その他農用地, 森林, 荒地, ゴルフ場, その他用地)のいずれかに分類する。
 - 該当250mメッシュを含む1kmメッシュ及びその1kmメッシュに隣接する8つの1kmメッシュのそれぞれに対し、集水域の都市メッシュ数と非都市メッシュ数を算出する。例えば、第4図の左上の1kmメッシュは都市メッシュ数3, 非都市メッシュ数17である。
- 以上のように定義した集水域を対象として、下式により流出量(実際には流出高) q を算出する。

$$q = \frac{\sum_{n=1}^9 \left[Q_s(n) \cdot \frac{m_s(n)}{100} + \left(Q_c(n) \cdot \frac{m_c(n)}{100} \cdot 0.7 + Q_s(n) \cdot \frac{m_s(n)}{100} \cdot 0.3 \right) \right]}{\sum_{n=1}^9 (m_s(n) + m_c(n)) \cdot 100^2} \times 3600 \times 1000 \quad (3)$$

n : 該当 250m メッシュを含む 1km メッシュ及びその周辺 1km メッシュの番号 (1 ~ 9)

$Q_s(n)$: 非都市用タンクモデル流出量 (1km メッシュ) (m^3/s)

$Q_c(n)$: 都市用タンクモデル流出量 (1km メッシュ) (m^3/s)

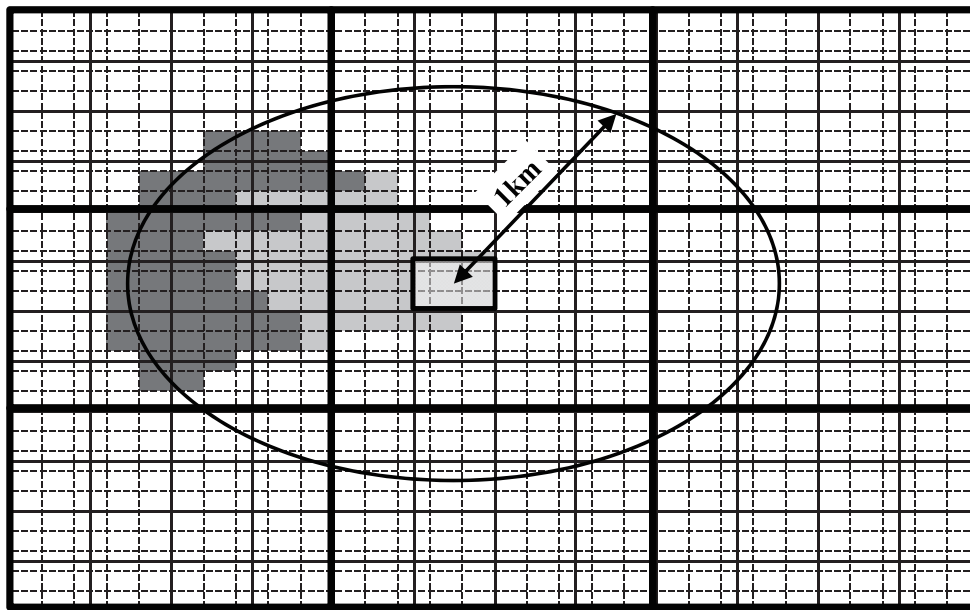
$m_s(n)$: 非都市用メッシュ数

$m_c(n)$: 都市用メッシュ数

第 3 式右辺の分子は、土地利用状況 (都市メッシュ数, 非都市メッシュ数) の重みに応じて算出される集水域からの流出量である。ただし都市メシ

ュに関しては Q_c と Q_s を 7:3 の割合で按分する。これは、完全に市街化した地域であっても緑地等は存在しており、全ての降雨が短時間のうちに流出するわけではない、という都市の流出の実態をふまえたものである (田中ほか, 2008)。第 3 式右辺の分母は集水域面積 (m^2) を表しており、最終的に q は流出高 (mm/h) として算出される。

ここでは、1km 上流までの集水域を考慮して流出量を求めているが、より精緻な流出解析を行うのであれば、本来、個々の 250m メッシュの流出量を求め、それが当該 250m メッシュまで流下するまでを計算する必要がある。本手法は、このような 250m メッシュ単位の流出・流下過程を、1km 四方を対象としたタンクモデルで近似することで計算の簡略化を図るもので、いわば 1km メッシュ流出量を介した 250m メッシュの「簡易型流出計算」といえる。



■ 都市メッシュ (建物用地、道路、鉄道)

■ 非都市メッシュ (田、その他農用地、森林、荒地、ゴルフ場、その他用地)

第 4 図 集水域のイメージ

太実線は 1km メッシュ, 実線は 250m メッシュ, 破線は 100m メッシュを表す。中央付近にあるハッチのかかった 250m メッシュに対して、着色した 100m メッシュ (都市メッシュ + 非都市メッシュ) が集水域であることを表す。

2.3 地形勾配に基づく流出量の補正

タンクモデルによる流出量には、対象地点における地形的な寄与—雨水滞留や下流への排水の程度を踏まえた内水浸水の危険度の評価が含まれていない。そこで、タンクモデルによる流出量を、地形勾配を変数とした補正係数により補正して、最終的な内水浸水の危険度を表す指標とした。

補正係数 C_I は、勾配 1‰ の径深 $R(1)$ に対する勾配 I の径深 $R(I)$ の比として定義される。

$$\begin{aligned} C_I &= 1 && (\text{for } I < 1) \\ C_I &= R(I)/R(1) && (\text{for } I \geq 1) \end{aligned} \quad (4)$$

径深 R はマンニングの平均流速公式により以下のとおり与えられる。

$$R = \left\{ \frac{Q}{(1/n)mI^{1/2}} \right\}^{3/8} \quad (5)$$

ここで、 Q は流量、 n はマンニングの粗度係数、 m は水深に対する堤防幅の比で、河道断面形状に依存する値である。勾配が 1‰ 以上のとき、第 5 式を第 4 式に代入すれば、 C_I と I の関係式が得られる。

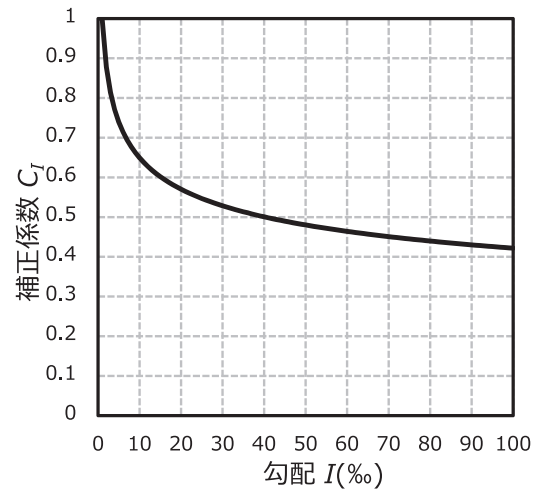
$$C_I = \left(\frac{1}{I} \right)^{3/16} \quad (4)'$$

第 5 図に C_I と I の関係を図示した。急な勾配ほど係数は小さな値となり、補正の効果が大きくなることわかる（したがって浸水雨量指数は小さく算出される）。

なお、この補正係数は 250m メッシュごとに与えられるが、第 4' 式の勾配 I には、単純に東西・南北の周辺メッシュから算出した平均勾配を用いるのではなく、該当メッシュの下流メッシュのみを対象にした平均勾配（以下、下流平均勾配という）を用いている（第 1 表の勾配②）。下流平均勾配の効果については第 5 章であらためて議論する。

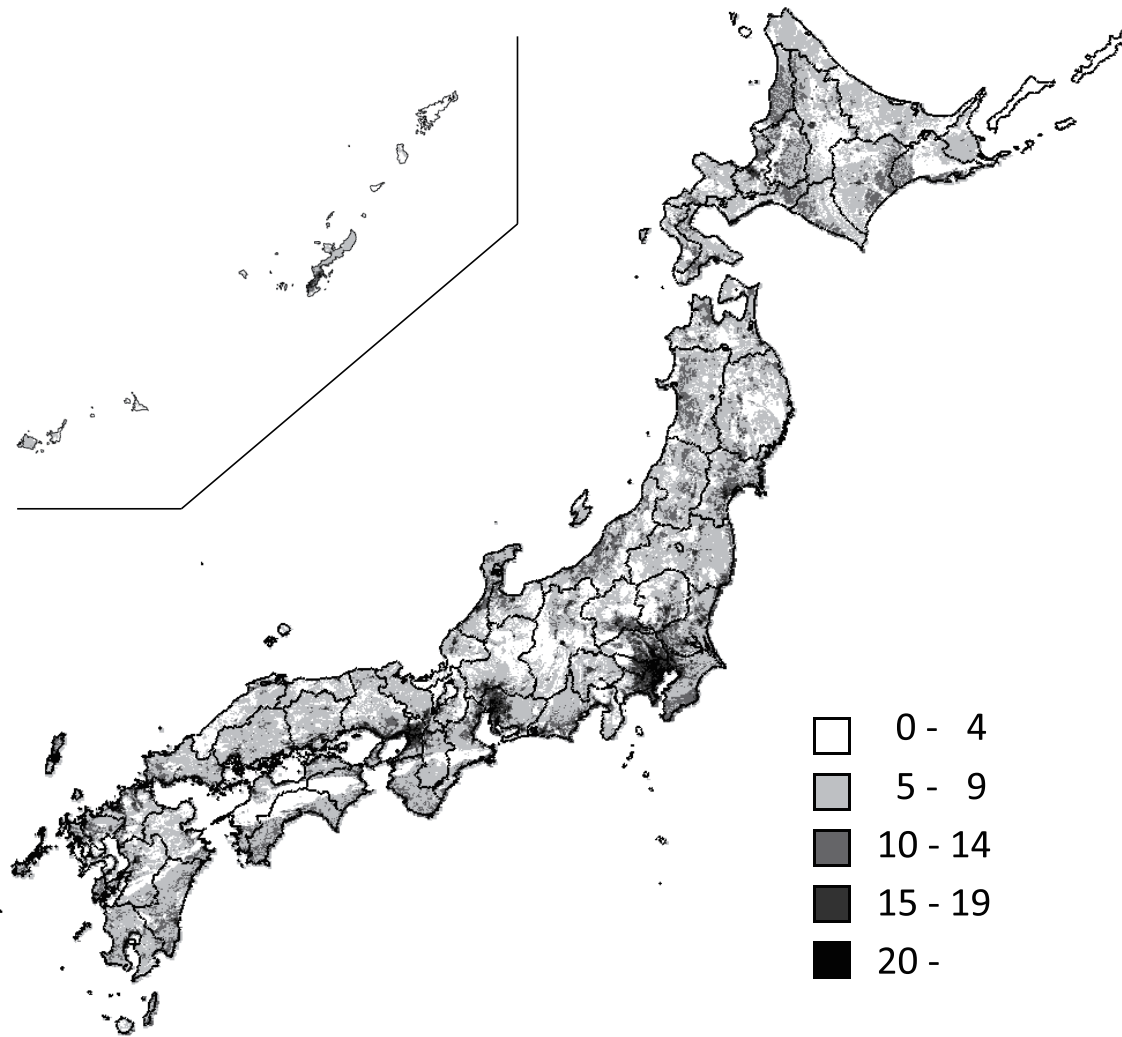
2.4 浸水雨量指数の地理的傾向

与えられた入力雨量に対して浸水雨量指数がどのような値を示すか、特にその地理的傾向をイメー



第 5 図 勾配と補正係数の関係

ジするため、第 6 図に 1 時間 80 ミリの降雨を面的に一律に与えた場合の浸水雨量指数の分布を示した。東京都区部や名古屋市、大阪市といった三大都市圏を中心に、市街化の進んだ平野部などで大きな値を示している。第 7 図は、これを土地利用状況及び地形勾配との関係で図示したものである。ここでは比較のため、補正係数をかける前のタンクモデルによる流出量（以下、タンク流出量）もあわせて示した。タンク流出量の傾向として、都市メッシュ割合が高いほど（すなわち市街化された地域ほど）タンク流出量が大きくなる様子がみとれる。これは、都市域の速くて大きな流出を表現する都市タンクモデルの使用割合が高くなるためである。また、同じ都市メッシュ割合でみた場合には急な勾配ほどタンク流出量が大きく算出される傾向にあった。これは、都市用タンクモデルの流出係数が勾配に応じて大きくなるためである（第 2 式）。一方、浸水雨量指数については、都市メッシュ割合が高いほど浸水雨量指数が大きいという傾向はタンク流出量と同様であったが、同じ都市メッシュ割合でみた場合には急な勾配ほど浸水雨量指数の値は小さい傾向にあった。また、浸水雨量指数とタンク流出量の値そのものを比較すると、緩い勾配では両者の値に大きな違いはないが、勾配が急になるほどその差は大きくなった。これは注目すべき違いである。すなわち、1 時間に 80mm の大雨が降った場合、タンク流出量では勾配



第6図 1時間80ミリの雨を面的に一様に与えた場合の浸水雨量指数

が大きくなるほど浸水の危険度が増すことを示しているのに対し、浸水雨量指数ではタンク流出量が増加するにもかかわらず浸水の危険度が低くなることを示している。浸水雨量指数とタンク流出量との間にみられるこれらの差異は、補正係数の効果として理解できる。

3. 検証方法

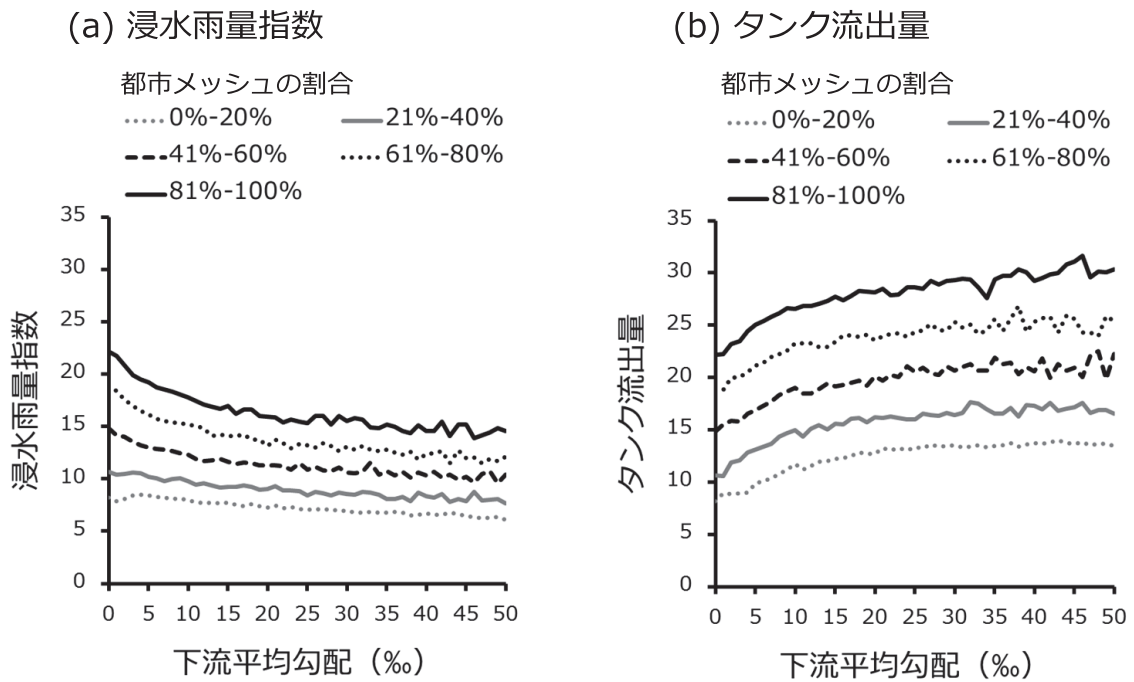
3.1 データ

①災害資料

A) 東京都浸水データ

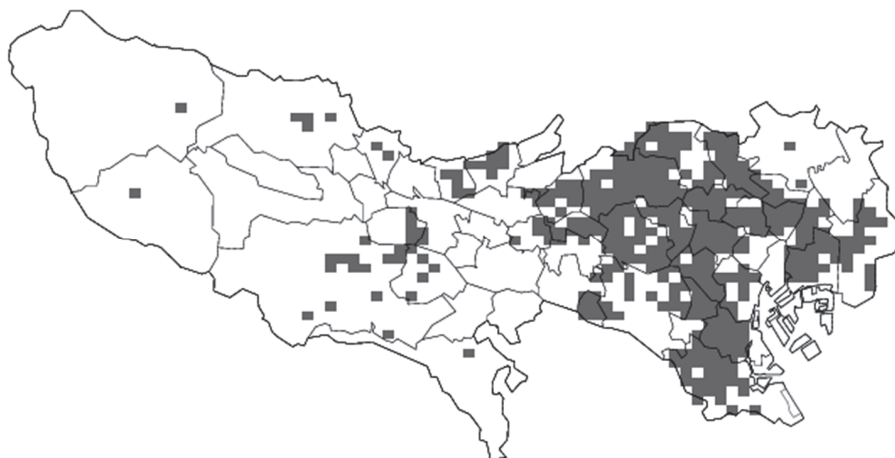
1999年から2007年に東京都で発生した、水害

区域面積が0.1ha以上若しくは浸水棟数が10棟以上となった浸水事例(41事例)における浸水区域データである。この浸水区域はもともと多角形で区域化(ポリゴン化)されたデータであるが、検証に用いる際には、あらかじめ外水氾濫に起因する浸水区域を除外し、ポリゴンデータを1kmメッシュに変換した上で使用した。ここでは、1kmメッシュに変換したデータを「浸水発生メッシュ」と呼ぶことにする。第8図に浸水発生メッシュの分布を示す。区部を中心に浸水発生メッシュが広がっており、対象41事例における浸水発生メッシュ数は、のべ749メッシュであった。



第7図 勾配, 土地利用, 浸水雨量指数の関係

1時間80ミリの降雨を面的に一樣に入力した場合の, (a) 浸水雨量指数と (b) タンク流出量. 横軸に該当メッシュの下流平均勾配をとり, 該当メッシュの集水域の都市メッシュの割合ごとの平均値をグラフで示した. 本図は, 250mメッシュごとのデータをもとに作成した. (a)と(b)とでは勾配の増加に対する増減が異なることに注意.



第8図 東京都の浸水発生メッシュ分布

1999年から2007年に東京都で発生した, 水害区域面積が0.1ha以上若しくは浸水棟数が10棟以上となった浸水事例における浸水発生分布.

B) 全国水害資料

1991年から2012年までに発生した水害事例について、全国の市町村ごとに整理された浸水害データである。浸水害の種類として、床上浸水、床下浸水、道路冠水、農地冠水がある。外水氾濫に起因する水害事例はあらかじめ除いてあるので、内水浸水に起因するものだけが抽出されている。これは、現在の大雨警報・注意報基準作成に用いている災害資料と同等の資料である。

②気象資料

検証には、1991年から2012年までの、1kmメッシュごとの1時間雨量、3時間雨量、24時間雨量、浸水雨量指数の毎正時データを用いた。1時間雨量、3時間雨量、24時間雨量を算出するための元となるデータには解析雨量を使用した。解析雨量とは、気象レーダーと地上の雨量計を用いて作成する1時間雨量の格子分布情報で、1kmメッシュ単位のデータである(永田・辻村, 2006)。3時間雨量、24時間雨量は、解析雨量のメッシュごとの値をそれぞれ前3時間、前24時間の期間積算した値である。

なお、浸水雨量指数の精度特性を計算原理の観点から明らかにするため、ROC曲線による検証においてはタンク流出量も検証対象の指標として取り上げた。

3.2 事例データ整理

1999年から2007年までを検証期間として、東京都浸水データを用いて、次のとおり事例データを整理した。まず、東京都に該当する1kmメッシュを対象に、各気象資料の日最大値が以下の条件(論理和)を満たすデータについてメッシュごとに抽出した。

- ・1時間雨量の日最大値が10ミリ以上
- ・3時間雨量の日最大値が15ミリ以上
- ・24時間雨量の日最大値が20ミリ以上
- ・浸水雨量指数の日最大値が4以上
- ・タンク流出量の日最大値が4以上

次に、抽出したデータについて、浸水発生メッシュと位置・事例日が一致した場合は「浸水あり」の情報を付加し、それ以外のデータには「浸水なし」

の情報を付加した。こうして抽出・整理した事例ごとのメッシュデータは、次節に述べるROC曲線による検証に用いた。

全国水害資料については、1991年から2012年までを対象に、次のとおり事例データとして整理した。まず、各気象資料が以下の条件(論理和)を満たすデータを全国の市町村ごとに抽出する。

- ・平坦地及び平坦地以外の1時間雨量の市町村内最大値の日最大値が20ミリ以上
- ・平坦地及び平坦地以外の3時間雨量の市町村内最大値の日最大値が40ミリ以上
- ・浸水雨量指数の市町村内最大値の日最大値が5以上

ここで、「平坦地」「平坦地以外」とは現在の大雨警報・注意報の基準設定領域に用いられている区分のことである。平坦地の定義は「概ね傾斜が30%以下で、都市化率((建物用地+幹線交通用地) / (すべて一河川・湖沼・海浜・海水)として算出)が25%以上の地域」とされている(田中ほか, 2008)。次に、抽出したデータに対して、市町村ごとに整理された災害資料と事例日が一致した場合にその災害データを対応付けた。こうして抽出・整理した市町村ごとの事例データは、第3.4節で述べる浸水雨量指数による基準作成とその検証に用いた。

3.3 ROC曲線による検証

内水浸水に対する予測指標としての浸水雨量指数の精度を明らかにするため、東京都の事例データを元に、1時間雨量、3時間雨量、24時間雨量、タンク流出量、浸水雨量指数それぞれのROC曲線(Receiver Operating Characteristics)を作成し、その精度を比較した。

ROC曲線とは、ノイズと信号を分離抽出する技術を評価するための手法の1つで、気象分野では降水予報(仲江川ほか, 2009)や米国のトルネード警報(Lindsey R. Barnes et al., 2007)への適用例がある。ROC曲線を描くには、まず、予測指標のしきい値を最小値から最大値まで変化させて、現象あり/なし、予報あり/なしの2×2分割表(第3表)を作成する。この分割表を元にHit Rate (HR: 捕

捉率) と False Alarm Rate (FAR : 空振り率又は誤検出率) を下式により算出する.

$$\text{Hit Rate} = H/(H+M) \quad (7)$$

$$\text{False Alarm Rate} = FA/(FA+CR) \quad (8)$$

横軸に FAR, 縦軸に HR をとって, 指標のしきい値を変化させた時のそれぞれの値を曲線として描いたものが ROC 曲線となる (第 9 図). FAR が 0 で HR が 1 (左上の頂点) であることが最も精度が高いことを意味するので, ROC 曲線は左上に向かって膨らむほど良い指標 (技術) であることを表す. 第 9 図のイメージにおいては, 指標 A は指標 B よりも優れた指標といえる. なお, 本検証では各指標の ROC 曲線を作成するとともに, ROC 曲線下の面積 (AUC : Area Under the Curve) を算出して, その予測能を定量的に比較した.

3.4 基準作成と統計検証

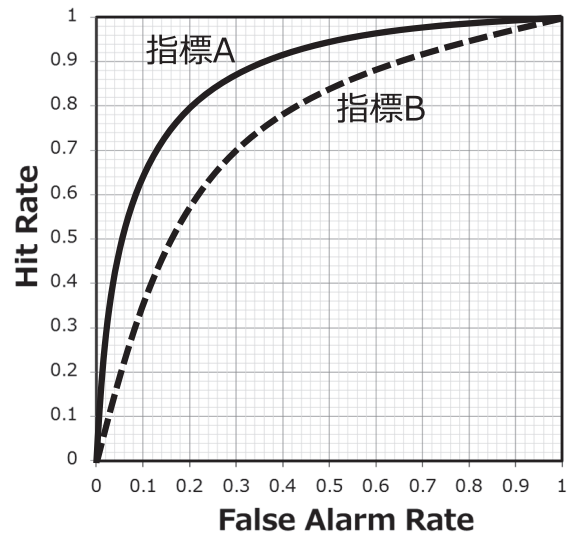
全国水害資料を元にした事例データを用いて, 段階的な浸水危険度を表す浸水雨量指数の基準を市町村ごとに作成し, その精度について大雨警報・注意報基準と統計的に比較した. 市町村ごとの基準は, 第 3.2 節で述べた, 浸水雨量指数の市町村内最大値と浸水害とを対応付けた事例データを分析して作成した. その具体的方法や設定条件を以下に述べる.

浸水雨量指数による基準として, ここでは大雨警報と大雨注意報のそれぞれに相当する 2 段階の基準 (以下, 基準 2, 基準 1) を作成した. 浸水雨量指数基準作成にあたり, 対象災害は, 現在の大雨警報・注意報が対象としている市町村ごとの被害と同じものとした. 例えば, 東京都千代田区の対象災害は「基準 2 (大雨警報相当) : 浸水棟数 50 棟以上, 「基準 1 (大雨注意報相当) : 浸水棟数 1 棟以上, 道路冠水 1 箇所以上」である.

具体的な基準設定は, 現行の大雨警報・注意報基準の作成方法と同様に, コスト・ロスモデルの考え方を用いて客観的な手続きにより行った. コスト・ロスモデルの設計及びそれを用いた基準設定の手順

第 3 表 ROC 曲線で用いる分割表

	現象あり	現象なし	合計
予報あり	Hit (H)	False Alarm (FA)	$H+FA$
予報なし	Miss (M)	Correct Rejection (CR)	$M+CR$
合計	$H+M$	$FA+CR$	1.0



第 9 図 ROC 曲線イメージ

ROC 曲線は左上に向かって膨らむほど良い指標 (技術) であることを意味するので, 指標 A は指標 B よりも優れた指標であることを表す.

は次のとおりである.

- ・内水浸水が発生した事例について, 浸水雨量指数基準に達していれば損失は 0, 達していなければ被害規模に応じた損失が生じる.
- ・浸水雨量指数基準に達した場合は情報を発表するとして, その費用が発生する.
- ・浸水雨量指数基準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求める.
- ・総和が最小になるものを, 最終的な浸水雨量指数基準とする.

こうして求められた浸水雨量指数基準は「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」ものと言える.

なお, 浸水雨量指数基準の作成に用いる資料期

間は、現在の大雨警報の基準作成における資料期間と合わせるため、1991年から2005年までの15年間の資料とした。作成した浸水雨量指数基準は、残りの7年間（2006年から2012年）の災害資料を用いて検証した。

4. 結果

4.1 ROC 曲線による検証

第10図に、東京都の浸水データに対する各指標のROC曲線を示した。ROC曲線の左上方への膨らみは、大きい方から順に、浸水雨量指数(0.91)、タンク流出量(0.89)、1時間雨量(0.83)、3時間雨量(0.79)、24時間雨量(0.72)となっており（カッコ内数値はAUC）、東京都で発生した内水浸水に対する予測指標として最も優れていたのは浸水雨量指数であった。

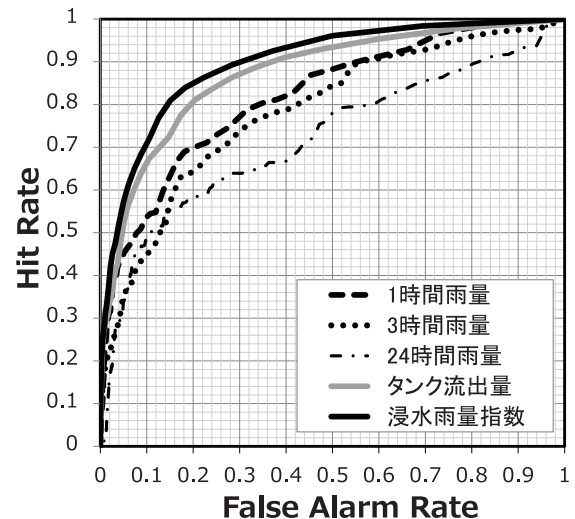
浸水雨量指数とタンク流出量のAUCは、1時間雨量に比べ、それぞれ0.08、0.06増加しており、このことは内水浸水予測において、土地利用状況や地形勾配等の素因の影響を考慮することの有効性を示している。特に、1時間雨量に対するタンク流出量のAUC増加が顕著であったことから、浸水雨量指数の予測精度にはタンクモデルを利用することによる貢献が大きいことがわかる。さらに、タンク流出量に対しても浸水雨量指数のAUCは0.02増加していることから、補正係数による精度向上の寄与も認められる。

なお、24時間雨量については、FARが0.1よりも小さい領域では他の指標に近い精度を有していたが、FARが0.1よりも大きい領域では他の指標に比べ精度は大きく劣っていた。

4.2 統計検証

1991年から2005年までの15年間の災害資料を用いて作成した全国市町村の浸水雨量指数基準について、2006年から2012年の7年間の災害資料を用いてその統計的精度を検証した。

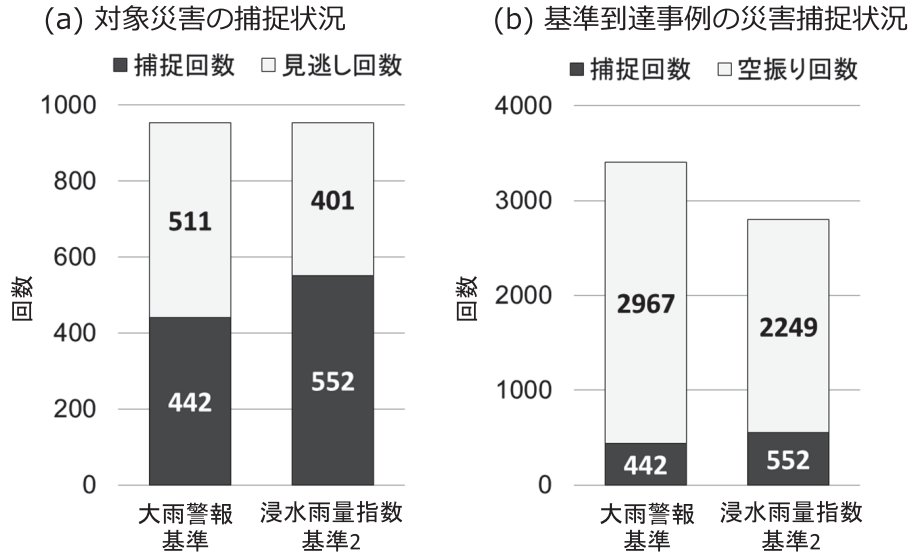
第11図は、大雨警報基準と浸水雨量指数基準2に関する、対象災害の捕捉状況及び基準到達事例の災害捕捉状況である。浸水雨量指数基準2は、大



第10図 東京都の浸水データに対する各指標のROC曲線

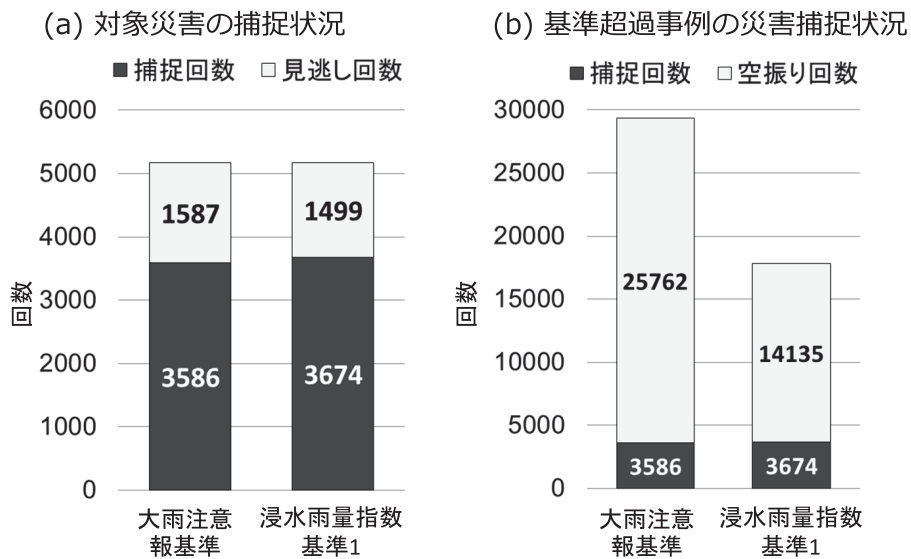
雨警報基準に比べ対象災害の捕捉回数が110回増加し（対象災害の捕捉率は46%から58%に上昇）、基準到達事例のうち対象災害が発生しなかった数—いわゆる空振り回数は718回減少した（空振り率は87%から80%に低下）。大雨注意報基準と浸水雨量指数基準1に関する同様の検証（第12図）においても、対象災害の捕捉回数は両指標でほぼ変わらないものの、浸水雨量指数基準1の空振り回数は大雨注意報基準に比べ大幅に減少した（空振り率は88%から79%にまで低下）。浸水雨量指数基準は、大雨警報・注意報基準に比べ、対象災害の捕捉状況を改善又は同等の捕捉状況を維持しつつ、空振りを大幅に減らすことができることが分かった。

次に、浸水雨量指数基準の精度に地域差があるかを調べるため、対象災害の捕捉率と基準超過事例に対する災害捕捉の空振り率に関して、浸水雨量指数基準と大雨警報・注意報基準との差を府県予報区ごとにプロットしたものを第13図に示した。第13図において、例えば第4象限（右下領域）に存在する府県予報区は、大雨警報・注意報基準よりも浸水雨量指数基準の方が捕捉率が高く、かつ、空振り率が低いことを表すので、浸水雨量指数基準の方が精度が高いことを意味している。大雨警報と浸水雨量指数基準2の関係（第13図a）をみると多くのデ



第 11 図 大雨警報基準と浸水雨量指数基準 2 の統計検証

2006 年から 2012 年の 7 年間の災害事例（独立資料）を用いた市町村単位の検証結果. (a) は対象災害総数 953 事例に対する捕捉状況, (b) は基準到達事例に対する対象災害の捕捉状況を表す.

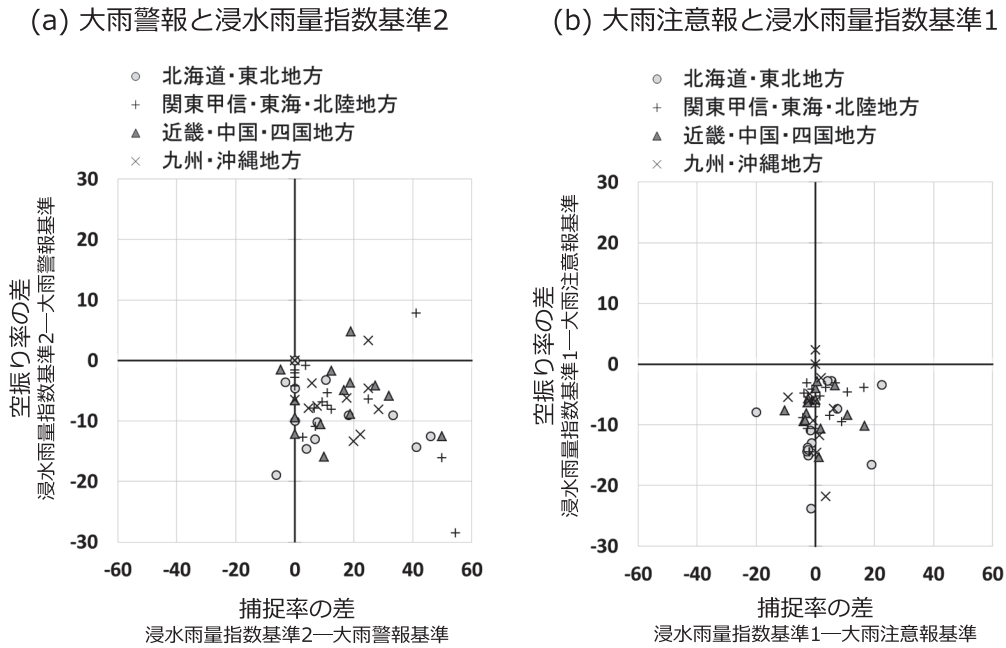


第 12 図 大雨注意報基準と浸水雨量指数基準 1 の統計検証

第 11 図と同じ. (a) の対象災害総数は 5173 事例である.

一タが第 4 象限に分布しており, ほぼ全ての府県予報区で浸水雨量指数基準の方が精度が高くなることがわかった. 一方, 大雨注意報と浸水雨量指数基準 1 の関係 (第 13 図 b) をみると, 各データは第 3 象限 (左下領域) と第 4 象限にまたがって分布していた. すなわち, 捕捉率でみた基準の優劣は府県

予報区によって様々だが, 空振り率についてはほぼ全ての府県予報区において浸水雨量指数基準 1 の方が低くなることがわかった. なお, 第 13 図では地方ごとに区別してシンボルを示したが, その分布状況をみる限り, 前述した全国的な特徴の他に, 精度特性に関する地域的な偏りは認められなかった.



第 13 図 現行基準と浸水雨量指数基準の精度比較

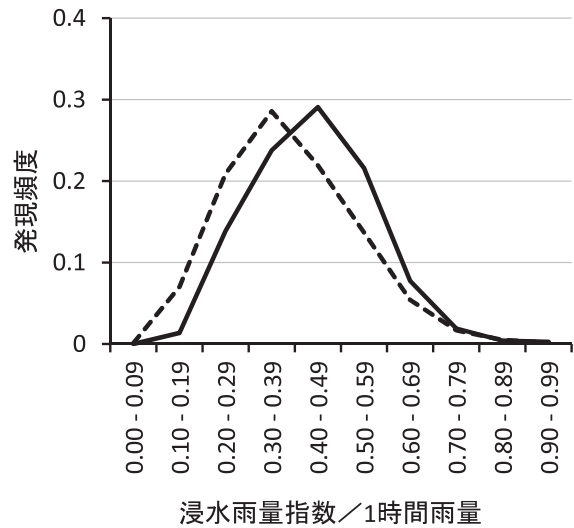
市町村単位の評価結果をもとに府県予報区ごとに平均値を求め、平均捕捉率の差、平均空振り率の差をプロットした。凡例は、○：北海道・東北地方，+：関東甲信・東海・北陸地方，△：近畿・中国・四国地方，×：九州・沖縄地方のそれぞれの地方に属する府県予報区であることを表す。

5. 議論

5.1 浸水雨量指数の特徴

ここでは、浸水雨量指数の計算原理も踏まえながら、その特徴について考察する。

浸水雨量指数は、入力雨量に対してタンクモデル（浸透・貯留分を差し引く）や補正係数（タンク流出量を割り引く）といった、いわば減算処理を施したものである。基本的に「1時間雨量 > 浸水雨量指数」という関係にある。そこで、浸水雨量指数の特徴を1時間雨量との対比から明らかにするため、第14図に、東京都の浸水発生メッシュとそれ以外のメッシュそれぞれに対して、浸水雨量指数と1時間雨量の比の発現頻度分布を示した。第14図から、浸水が発生していないメッシュの発現頻度分布が浸水発生メッシュの分布に比べ小さい階級側にずれていることがわかる。このことは、浸水が発生していないメッシュでは1時間雨量に対して相対的に小さな浸水雨量指数が算出される傾向にあることを示しており、前述の減算効果が大きいことを意味している。すなわち、浸水雨量指数の計算手法の特



第 14 図 浸水雨量指数と1時間雨量の比の発現頻度分布

東京都の浸水データと浸水雨量指数4以上かつ1時間雨量10ミリ以上のデータに基づいて作成した。実線は浸水発生メッシュ，点線はそれ以外のメッシュの発現頻度を表す。

徴として、「タンクモデルや補正係数に基づく入力雨量の減算処理により、浸水害発生の蓋然性の低い地域を排除すること」という見方もできる。

浸水雨量指数により災害発生の蓋然性の低い地域が排除されることの具体的な効果は、第 11 図、第 12 図の浸水雨量指数基準と大雨警報・注意報基準の統計検証にも表れている。ここでは、浸水雨量指数を使った基準による運用が、現在の雨量を指標とした大雨警報・注意報基準の運用に対して、空振り回数を大幅に減らせることが示された。これは、大雨警報や大雨注意報の基準を上回るような大雨が降っても、もともと浸水に脆弱でない場所では（その素因の影響により）浸水雨量指数が小さな値として算出されるので基準に到達しないためと推測される。加えて、空振りを減らす効果は、対象災害の被害規模が大きい浸水雨量指数基準 2 よりも軽微な災害も対象に含めた浸水雨量指数基準 1の方が大きかった。これには次の 2つの理由が考えられる。

- ①被害が大きい災害事例ほど降雨規模も大きくなることから、浸水害に寄与する要因として降雨量の占める割合が大きくなる。このため、素因の影響を取り込んだ浸水雨量指数基準 2 であっても空振り回数の低減の効果は限定的であった。
- ②これに対し、軽微な災害はそれほど降雨規模が大きい中で発生するものも多く、浸水害に寄与する要因として相対的に素因の影響が大きくなる。このため、素因の影響を取り込んだ浸水雨量指数基準 1 の空振り回数低減の効果が大きくなった。

以上の推考は、松下ほか（2012）の研究—東京都で発生した顕著な豪雨災害事例で最も寄与した要因が「最大 1 時間雨量」であったこととも矛盾しない。

次に、第 10 図にみられた浸水雨量指数とタンク流出量の AUC の差、すなわち補正係数の有効性に関して、ここでは特に補正係数の算出に用いる「下流平均勾配」に着目し、内水浸水と下流平均勾配との対応をみることにする。第 15 図に、下流平均勾配と周辺平均勾配のそれぞれについて、勾配 5% の階級幅ごとの、浸水発生メッシュ数及び浸水発生メ

ッシュ数の割合を示した。周辺平均勾配とは、東西・南北の周辺メッシュとの勾配の単純平均で算出した勾配のことであり、ここでは下流平均勾配との比較のために取り上げた。下流平均勾配、周辺平均勾配ともに勾配が緩くなるほど浸水発生メッシュ数が増加する傾向にあるが、浸水発生メッシュ数の割合に関しては、下流平均勾配には明確な負の相関が認められるものの、周辺平均勾配の 30%未満の区間にはそのような傾向はみられなかった。すなわち、仮に周辺平均勾配を用いて補正係数を算出すると、浸水発生地点であっても大きな勾配値が与えられて浸水雨量指数を小さく算出するケースがでてしまうことになる。したがって、補正係数の算出には浸水発生メッシュ割合と負の相関にある下流平均勾配を用いる方がより効果的である。

ここまで見えてきたのは、主に、内水浸水の発生有無と浸水雨量指数の大小との関係—いわば空間的、量的な対応であり、時間的な対応関係については検証できていない。これは、検証に利用できる災害資料として、内水浸水が始まった時刻や解消した時刻が報告・整理されたものがほとんどないためである。内水浸水と浸水雨量指数との時間的な対応に関する検証については今後の課題である。

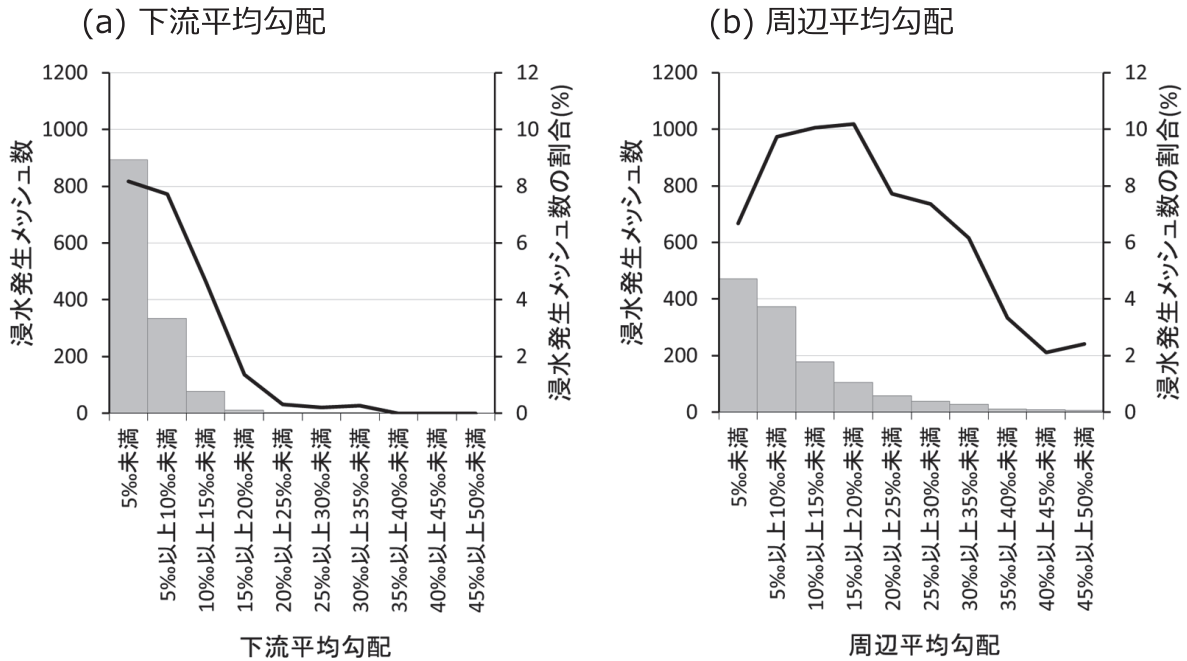
5.2 浸水雨量指数の物理的意味

次に、内水浸水危険度予測としての浸水雨量指数計算式の持つ物理的意味を考察する。

第 1 式のとおり、浸水雨量指数は「流量」と「径深（＝地形補正係数）」を掛けあわせたものである。したがって、定性的には、①流量が大きいほど浸水しやすい、②流出した水の相対的な「深さ」が深くなるほど浸水しやすい、という 2つのことを表す指標といえる。

ここで、第 1 式に第 4 式及び第 5 式を代入して式変形すると、浸水雨量指数は以下の「流速」と「径深」の関数となる。

$$\begin{aligned} IRI &= q \times C_l = \frac{1}{n} m l^{1/2} R_l^{8/3} \cdot \frac{R_l}{R_1} \\ &= \frac{m}{R_1} \cdot v \cdot R_l^3 \end{aligned} \quad (8)$$



第 15 図 東京都の浸水発生メッシュと勾配との関係

棒グラフは浸水発生メッシュ数，実線は勾配 5%の階級幅ごとのメッシュ総数に対する浸水発生メッシュ数の割合を表す。

ただし、 v はマンニングの平均流速公式による流速で、下式により与えられる。

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (9)$$

第 8 式は、流出した水が排水路を流れるときに、その「深さ（径深）」が同じ場合には流速が速いほど浸水雨量指数が大きくなることを表している。これは、実際の内水浸水との関係でいうと、流水が排水路からあふれた場合の浸水被害の程度を表しているものと推察される。つまり、「深さ（径深）」のみを浸水危険度の指標とした場合には、指標が同じ値だと浸水被害は地形勾配に関わらず同程度になるものと想定されるが、流速も含む指標であれば溢れる水の深さが同じであっても溢れた水の色速度がより速くなる（すなわち溢れる流量がより大きくなる）ことが表現でき、浸水害の被害規模も含め、その起こりやすさをより適確に表現することができるようになると考えられる。

浸水雨量指数における流速と径深の寄与を第 8

式から見積もると、流速の寄与は径深の 1/3 乗でそれほど大きくない。また、第 9 式から分かるとおり、流速は勾配の 1/2 乗に比例する。これらのことから、流速は主に勾配が急な地域において寄与するものといえる。その他の地域では径深の寄与が相対的に大きくなるから、そこでは主に「流水の深さが深いところほど浸水しやすい」ことを表しているといえる。

5.3 浸水雨量指数による基準設定

本論文では、段階的な浸水危険度を表す浸水雨量指数基準（大雨警報相当と大雨注意報相当の 2 段階）を全国市町村ごとに試作した。ここでは特に、大雨警報・注意報の基準設定における領域設定と素因（排水能力）の扱いを議論する。

一般に、雨水を排水するための施設（河川、下水道、小規模な側溝等）は市町村内に数多く存在し、地形勾配による自然排水も含め、その排水能力もさまざまであることから、個々の排水路の能力を把握して基準値に反映させることは難しい。このため、現在の大雨警報は、「排水能力や浸水のしやすさは

市町村内で変わらない」との仮定に基づき、市町村内は同一の警報・注意報基準値を設定している。しかし、同一の基準を設定する場合には排水能力の低い地域の基準にあわせざるをえないから、地域により排水能力が大きく異なれば、結果的に空振りが多くなる（例えば、平地で浸水をもたらすような雨が排水能力の大きい傾斜地（山地）で降ったとしても浸水は起こらない）。また、市町村をさらに細分して例えば 1km メッシュごとに基準を設定しようとしても、基準設定に用いる災害資料は必ずしも浸水発生場所が特定できているわけではないし、作業量自体も膨大なものとなるため、細分するにしても限界がある。実際、現在の大雨警報・注意報では、市町村を平坦地と平坦地以外の 2 つの領域に分けて雨量基準を設定するに留まっている。

浸水雨量指数による基準設定はこれを打開するものである。浸水雨量指数は、地形勾配と排水能力に一定の傾向があると仮定して（地形補正係数）、指標自体にその傾向を考慮しているため、1km メッシュごとに地形に応じた排水能力の効果を反映させることができる。これにより、排水能力の低い地域の基準を市町村内の同一の基準としても、（同じ雨が降ったとき、地形的に排水能力の高い別の地域の浸水雨量指数は大きくならないことから）空振りを軽減できることになる（第 11 図、第 12 図）。いわば、浸水雨量指数における地形補正のアルゴリズムは、現在の平坦地、平坦地以外の区分をさらに細分して（1km メッシュ単位で）基準設定したと同等の効果をもたらすものといえる。

最後に、下水道や排水ポンプといった実際の排水施設と浸水雨量指数との関係について触れておく。浸水雨量指数の計算には下水道の整備状況や排水ポンプの能力といった要素は考慮していないが、それらインフラ施設の効果や整備状況は被害様態の変化として現れるので、災害実績との対応から作成する浸水雨量指数基準にはその効果が（市町村単位の災害資料で変化が見られる範囲で）間接的に反映されているといえる。このとき、インフラ整備の効果が明確にわかっている場合には整備後の災害資料を用いて基準値を設定すれば良い。また、実際の

運用では、「一定期間の災害資料が集まり、災害との対応性に変化がみられる場合には基準値を更新する」ことで、浸水雨量指数を効果的に活用することができるだろう。

5.4 大雨警報における適用可能性

大雨警報への適用を見据えた場合の、内水浸水に対する予測手法の要件として、①下水道網などの排水施設に関する詳細な入力情報を用いない手法で、②全国どの地域においても適用でき、③実用的な精度を有することの 3 つを第 1 章で挙げた。浸水雨量指数の計算に必要な入力データは、誘因である「降雨量（解析雨量）」と素因の影響を反映させるための「地理情報（第 1 表）」のみであり、これらは全国どの地域でも入手可能である。このように、誘因である降雨量のみならず詳細な地理情報を最大限活用した浸水雨量指数は、1 時間雨量、3 時間雨量、24 時間雨量といった雨量に基づく指標に比べ、内水浸水との対応が良いことが東京都の浸水データを用いた検証から明らかとなった。また、現在と同等の手法（市町村単位、コスト・ロスモデル）で作成した浸水雨量指数基準は、現在の大雨警報・注意報基準に比べ、対象災害の捕捉状況を改善又は同等の捕捉状況を維持しつつ、空振りを大幅に減らすことが可能である。これは、地形や土地利用といった素因を指標に反映したことにより得られた結果であるが、特に、地形補正係数の導入に伴い「地形による排水効果」を指標に内包したことで、1km メッシュ単位で基準設定したのと同等の効果を得ることが可能になった点は注目に値する。浸水雨量指数による精度向上は全国に共通するもので地域的な偏りはないことから、1 時間雨量や 3 時間雨量に対する浸水雨量指数の優位性は、地域の気候特性や災害特性とは関係なく、指標そのものの有効性によるものといつてよい。

以上の議論から、内水浸水を対象とした大雨警報・注意報の発表基準に浸水雨量指数を導入することで、より確度の高い大雨警報・注意報の発表が可能になるものと推察する。

謝辞

本論文に用いた東京都の浸水区域データは東京都建設局河川部より提供いただきました。また、浸水雨量指数基準の作成と検証には、全国の気象官署が収集整理した災害資料を使用させていただきました。ここに記して深く感謝申し上げます。

参考文献

- 福知山市 (2014) : 平成25年台風第18号 災害の記録. <http://www.city.fukuchiyama.kyoto.jp/life/entries/004421.html> (2015.3.31 閲覧)
- Ishihara, Y and S.Kobatake (1979) : Runoff Model for Flood Forecasting. Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, **29**, 27-43.
- 気象庁 (2010) : 気象災害から身を守るために. 気象業務はいま 2010, 6-31.
- 気象庁 (2011) : 「防災気象情報の利活用状況等に関する調査」の調査結果について. http://www.jma.go.jp/jma/kishou/hyouka/manzokudo/22manzokudo/22manzokudo_kekka.pdf (2015.3.31 閲覧)
- 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/bosai/pdf/2014fukuchiyama.pdf> (2015.3.31 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> (2015.3.31 閲覧)
- 小葉竹重機, 石原安雄 (1983) : タンクモデルおよび集中面積図を利用した洪水流出モデルの総合化. 土木学会論文報告集, **337**, 129-135.
- Lindsey.R.B, E.C.Gruntfest, M.H.Hayden, D.M.Schultz and C.Benight (2006) : False Alarms and Close Calls: A Conceptual Model of Warning Accuracy. Weather and Forecasting, **22**, 1140-1146.
- 松下くるみ, 三隅良平, 前坂剛, 岩波越 (2013) : 東京都における内水氾濫被害の要因分析. 防災科学技術研究所研究報告, **80**, 27-46.
- 水野量 (1986) : 1982年4月15～16日の東北地方の大雨による浸水家屋被害と短時間強雨との対応性. 研究時報, **38**, 129-139
- 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.
- 仲江川敏之, 安田珠幾, 高谷祐平 (2009) : 利根川上流域の渇水対策に対する力学的季節予測情報の経済価値評価. 水工学論文集, **53**, 547-552.
- 岡田憲治 (2002) : 土壌雨量指数. 測候時報, **69**, 67-100.
- 関根正人 (2011) : 住宅密集地域を抱える東京都心部を対象とした集中豪雨による内水氾濫に関する数値解析. 土木学会論文集, **67**, 70-85.
- 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.

付録 A 非都市用タンクモデルの構築

浸水雨量指数で用いる非都市用タンクモデル(第2図)とパラメータ(第2表)は, Ishihara and Kobatake (1979) の直列三段タンクモデル(以下, オリジナルタンクモデル)を1km四方メッシュの小流域にも適用できるよう, タンクの構造やパラメータを修正したものである。ここでは, その検討経緯について詳述する。

非都市用タンクモデルの構築にあたっては, 以下の手続きにしたがってモデルパラメータを同定した。

- ① オリジナルタンクモデルの対象流域を1km四方メッシュの小流域に分割する。
- ② 小流域ごとに, 今回新たに作成する非都市用タンクを配置し, 流出量を計算する。
- ③ ②の流出量とマンギングの平均流速公式に基づいて流下・合流の計算を行い, オリジナルタンクモデルの対象流域の最下流地点の流出量を算出する。
- ④ ③の流出量とオリジナルタンクモデルの流出計算結果との誤差を最小にするような, ②のタンクパラメータを探索する。
- ⑤ 入力降雨は「50mm/h×1時間」「80mm/h×1時間」「50mm/h×3時間」「30mm/h×12時間」「20mm/h×24時間」の5種類を与える。各入力降雨によるハイドログラフを再現できる最適なパラメータを導出する。

ただし, 検討を進める中で, オリジナルタンクモデルと同じタンクの構造のままでは適切なパラメータを導出することが困難であることが判明した。そこで, タンクの構造自体に以下の3つの改良を施した。

- I. 短時間強雨における初期ハイドログラフの再現性を向上させるため, 第一タンクのL2の高さに新たな流出孔(係数R2)を設けた(以下, 表面流出孔という)。表面流出孔は常に作用させるのではなく「タンクの水位がそれほど高くない状況で多量の降雨があった場合」という特定の条件を満たす時に作用させ, 下式により流出量 q_2 を計算する。

$$q_2 = R2 \times (P - L2)$$

ただし, $S1 < L2$ かつ $P \geq L2$

ここで, Pは入力降雨である(第2図参照)。

なお, 表面流出孔が作用する/しないに関わらず, 第一タンクの2つの流出孔 q_1, q_2 については常に作用させる。表面流出孔は, 自然の土の状態のような浸透能力の高い地表面であっても, 非常に強い雨が降った場合には, ある程度は河川に流出するという実態に即したものと解釈できる。

- II. 長期間降り続く降雨によるハイドログラフの再現性を向上させるため, 第二タンクのL4の高さに新たな流出孔(係数R4)を設けた。

$$q_4 = R4 \times (S2 - L4)$$

ただし, $S2 \geq L4$

ここで, S2は第二タンクの水位である。

- III. 顕著な大雨によるハイドログラフの再現性を向上させるため, 第一タンクの水位S1, 第二タンクの水位S2に応じて浸透係数F1, F2を変化させることにした。例えば, 第一タンクの浸透係数は, $S1 \leq L1$ の場合は第2表のF1の値をそのまま用いるが, $L1 < S1 \leq L2$ の場合は $F1 \times 2$, $L2 < S1$ の場合は $F1 \times 3$ と変化させる。第二タンクも同様に扱う。

第2表に示した5種類のパラメータは, 国土数値情報の地質データに対応させて使い分けている。第A-1図にタンクパラメータの地理的分布を示した。地質とパラメータとの対応は, 透水性に着目して以下のとおり関係付けた。

- ・花崗岩を中間的な透水性を持つ地質として対応させて, 浸透係数Fが中間的な値として与えられているNo.3を割り当てる。
- ・第四紀層の未固結堆積物及び石灰岩は透水性が大きいのでNo.1を割り当てる。
- ・小葉竹・石原(1983)の分類を参考に, 第四紀火山岩はNo.2を, 古生層はNo.4を割り当てる。
- ・第三紀及び中世層は透水性が小さいのでNo.5を

割り当てる。

付録 B 都市用タンクモデルの構築

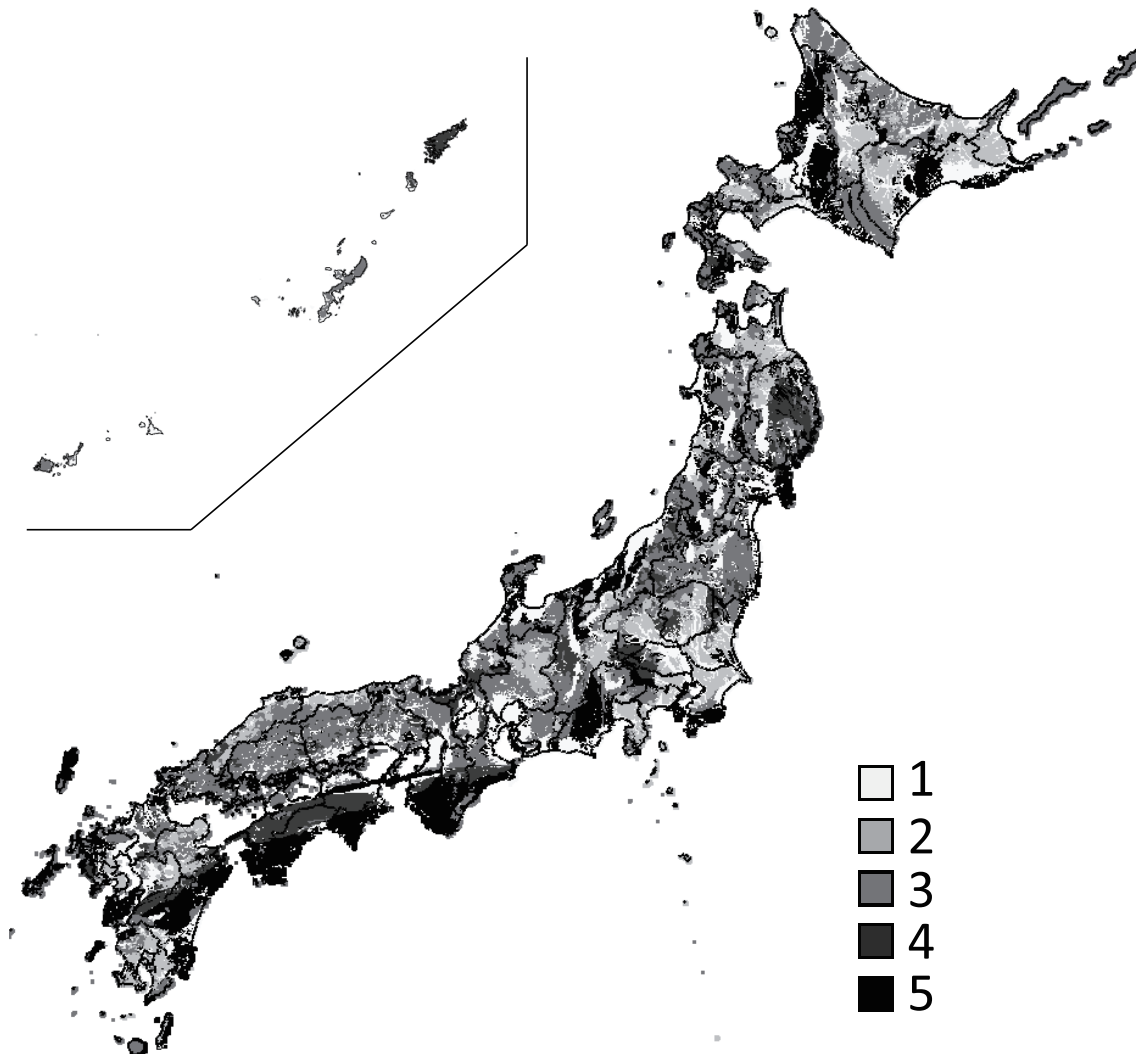
都市用タンクモデルの構築にあたっては田中ほか(2008)の手法にならい、まず1km四方領域を対象としたマンシングの平均流速公式による流出シミュレーション行って、そのハイドログラフを再現するようにタンクの構成やパラメータを設定することにした。シミュレーションの具体的な条件及びタンクパラメータの検討手順は次のとおりである。

①仮想的な単位流域(1km四方格子)に対して面的に一律な降水量を与え、流域内に規則的に配

置した側溝に瞬時にその水を流し、マンシングの平均流速公式にしたがって単位流域外へ流出する流量を計算する。

②4種類の降雨パターン(1時間50ミリ, 1時間80ミリ, 3時間150ミリ[50mm/h×3], 6時間120ミリ[20mm/h×6])に対し、勾配を変えて(0.1%, 0.2%, 0.5%, 1%, 2%, 5%, 10%の7種類), 計28通りの流出シミュレーションを行う。

③今回新たに構築する都市用タンクモデル(直列五段タンクモデル)によるハイドログラフが、流出シミュレーション結果を再現するように回帰計算(各入力降雨において、両者のハイドログラ



第 A-1 図 非都市用タンクモデルのパラメータ分布

凡例の数字1～5は、第2表のパラメータ番号に対応している。

フの誤差を最小にするパラメータの探索)を行って、最も再現性の高いパラメータを勾配ごとに同定する。

- ④得られたパラメータ値から、勾配とタンクパラメータの関係式を導出する。
- ⑤当初はF1, F2, F3, F4, R5の5つを説明変数としたが、ハイドログラフの再現には1つの説明変数で十分であったため(5つのパラメータ値はほぼ同じ値となった)、モデルの簡略化を考慮して説明変数は1つとした(すなわち、 $F1=F2=F3=F4=R5$ である)。

第B-1図に1時間50ミリの降雨を与えた場合の勾配0.2‰のシミュレーション結果と直列五段タンクモデルによる再現の様子を示す。流出シミュレーション結果(黒破線)は、降雨開始20分後あたりから徐々に流出量が大きくなり、80分後に流出のピークとなっている。黒実線に示す直列五段タンクモデルによる流出量は、シミュレーション結果を再現するようにパラメータを同定した結果である。各タンクの水位をみると、第一タンクの水位は60分後にピークに達しているが、下層のタンクになるほ

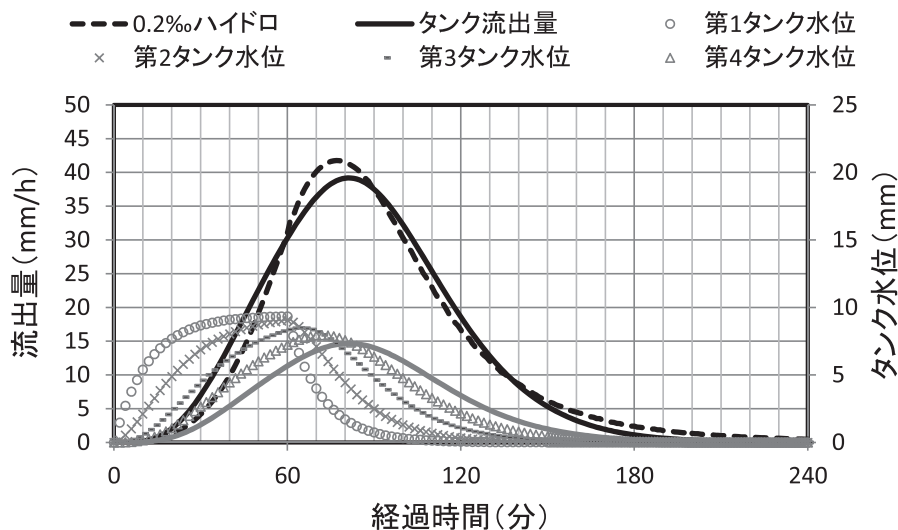
ど水位のピークが遅れ、第五タンクの水位は約80分後にピークとなり、流出シミュレーションのピークと一致した。そして、この第五タンクの水位に流出係数をかけることで流出シミュレーション結果を再現している。すなわち、対象領域に降った雨が最下流地点に流下してくるまでに要する時間を、第一タンクから第四タンクまでの貯留・浸透によって表現しているのである。

第B-2図は勾配とタンクパラメータの関係を表したグラフである。7種類の勾配ごとに同定したパラメータからは以下の近似式が得られた(第B-2図の破線)。

$$p = 1.9758 \cdot \ln(I) + 8.1234$$

ここで、 I は勾配、 p はタンクパラメータである。

しかし、タンクパラメータ同定の元となった流出シミュレーション(第B-2図の丸)は仮想的な条件に基づく結果なので、現実の都市域の流出に対してそのまま適用することはできない。例えば第B-2図では、急な勾配ほど大きなタンクパラメータ

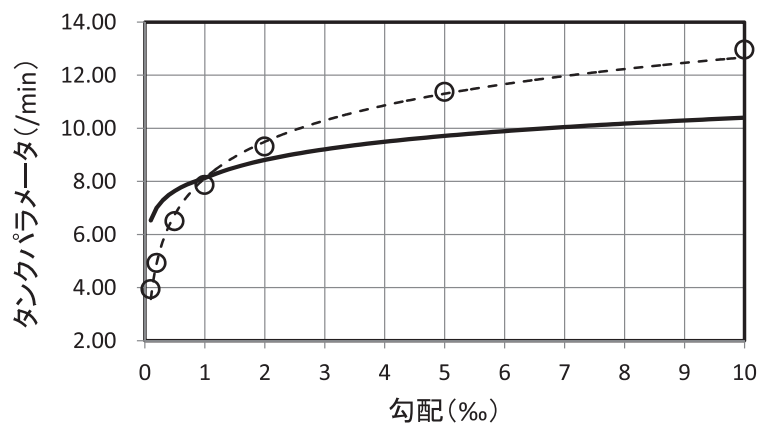


第B-1図 流出シミュレーションと直列五段タンクモデルによる流出計算

1km四方の矩形領域を対象に、勾配0.2‰、経過時間60分まで時間強度50ミリの降雨を与えた場合の再現計算例。マンニングの平均流速公式によるシミュレーションを黒破線で、タンクモデルによる流出量を黒実線で示す(左縦軸)。各タンクの水位は右縦軸で示した。

が与えられているが、現実には流出シミュレーションのように規則的に配置された排水溝や河川ばかりではないし、場所によっては勾配の緩いところもあることから、実際の流出はもっと遅くなると考えられる。一方、勾配が1‰よりも緩くなると極端に小さなタンクパラメータが与えられるが、これについても地域全体で厳密にこの緩い勾配が維持されるわ

けではなく、道路や構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から、実際の流出はもっと速くなると考えられる。そこで、いくつかの都市河川の水位・流量観測データを参考に、近似曲線カーブが傾斜1‰を中心に緩やかに変化するように補正して、第2式の関係（第B-2図の実線）を導出した。



第B-2図 勾配とタンクパラメータの関係

丸は7種類の勾配による流出シミュレーションから同定したタンクパラメータで、破線はその近似曲線である。実線は近似曲線を元にして作成した、勾配とタンクパラメータの関係である（第2式）。