

第4章 土壌雨量指数と流域雨量指数の改善

4 土壌雨量指数・流域雨量指数の30分毎の上下変動解消*

土壌雨量指数・流域雨量指数は30分毎に計算している。改善前の指数計算では、正時の計算と30分の計算で別々のタンクを用いていたため、両タンク値（各タンクの総和）に系統的な差が生じることがあった。結果として30分毎に指数が上下に変動し、この上下変動が警報基準や注意報基準を跨る場合には発表・解除の判断に苦慮することがあった。そこで、タンクへ入力する雨量と指数計算のしくみを一部変更することで、この上下変動を解消した（平成24年5月17日13時（日本時間）より実施）。

ここでは、指数の上下変動の原因と計算の変更点について概説するとともに、改善前後の指数の出現傾向の変化と基準への影響及び警報・注意報作業上の留意点について述べる（改善前後の要点を第4.1表にまとめた）。

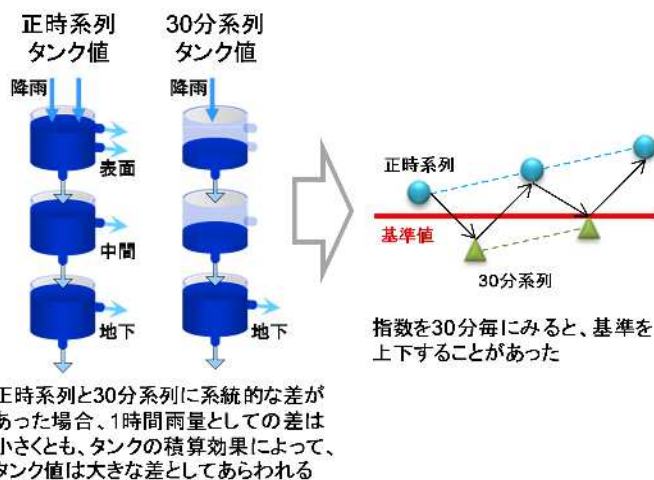
第4.1表 改善前後の土壌雨量指数・流域雨量指数のまとめ

	改善前 (正時系列と30分系列に系統的な差があった場合、30分毎に指数が上下変動することがあった)	改善後 (正時と30分で使用するタンクが独立していたことに起因する上下変動が解消)
適用日時	平成24年5月17日13時（日本時間）に改善実施	
使用するタンク [4.1節、4.2.1節]	正時系列と30分系列の計算で独立した（別々の）タンクを使用	正時の計算・30分の計算ともに、正時のタンクを使用（タンクの一本化）
タンクモデルへの入力雨量 [4.1節、4.2節]	正時：解析雨量（実況）、降水短時間予報（予想） 30分：解析雨量（実況）、降水短時間予報（予想）	正時：解析雨量（実況）、降水短時間予報（予想） 30分：前30分間の雨量解析値（実況）、降水短時間予報（予想）
指数計算のタイムステップ [4.2.2節]	t = 20分	t = 10分
流域雨量指数のタンクモデル [4.6節]	非都市域の直列三段タンク：Ishihara & Kobatake (1979) 都市域の一段タンク：田中・他(2008)	非都市域の直列三段タンク：Ishihara & Kobatake(1979)を基本に、パラメータの一部変更、新たな流出孔の導入を実施 都市域の一段タンク：田中・他(2008)を基本に、パラメータを変更
指数の出現傾向の変化[4.4節]	(改善前と比較して)	土壌雨量指数：指数値が若干大きくなる傾向 流域雨量指数：指数値が若干大きくなる傾向・流出が若干早くなる傾向
大雨・洪水警報・注意報の指数基準[4.4節]	(改善前と比較して)	指数の出現傾向の変化による基準への影響はほとんどないことから、引き続き改善前の指数基準により警報・注意報を実施（今回の指数改善により、基準変更は行わなかった）
指数（警戒度レベル）を用いた大雨・洪水警報・注意報の解除時の留意点[4.5節]	30分毎の指数の上下変動を考慮し、警報・注意報の解除の判断にあたり、30分毎の指数（警戒度レベル）を「2回確認」する。	30分毎の指数の上下変動が解消したため、警報・注意報の解除の判断にあたり、30分毎の指数（警戒度レベル）を2回確認する必要がなくなった。

土壌雨量指数と流域雨量指数で共通。

4.1 上下変動の原因

土壌雨量指数・流域雨量指数の計算には、解析雨量及び降水短時間予報の1時間雨量を用いている。指数計算は30分毎である一方、1時間雨量をタンクモデルに入力するため、改善前には、正時系列と30分系列の指数計算でそれぞれ独立したタンクを使用していた。そのため、正時系列と30分系列の解析雨量の精度に違いがあると、タンクの積算効果により正時系列と30分系列で指数に系統的な差が生じることがあ



第4.1図 指数の30分毎の上下変動とその原因（模式図）

* 齋藤 公一滝・太田 琢磨（気象庁予報部予報課気象防災推進室）

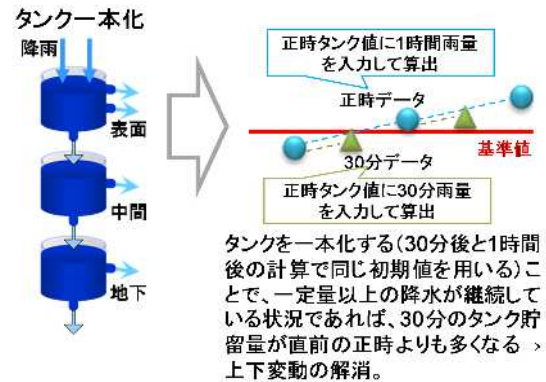
った。これは解析雨量の算出に使用する地上の雨量計の数の違いなどに起因し、一般に 30 分系列の指数が正時系列の指数に比べ小さい傾向であった。このような原因により、指数が 30 分毎に警報等の基準を上下する場合があった（第 4.1 図）。

4.2 指数計算の変更点

4.2.1 タンクの一本化

指数の 30 分毎の上下変動を解消するため、上下変動の原因である正時系列と 30 分系列の 2 系統あるタンクの本化を図った。タンクの本化とは、正時系列のタンクのみを使用するということであり、30 分のデータは正時系列のタンク値から 30 分雨量（前 30 分間の雨量解析値）を入力して計算する。このタンクの本化により、30 分毎の指数の系統的な差が解消する（第 4.2 図）。

このことを実現するために、指数計算用に新たに前 30 分間の雨量解析値の利用を開始した。前 30 分間の雨量解析値は、レーダーエコー-30 分積算と雨量計の 30 分雨量を利用して、通常の解析雨量と同じ手法で作成されている。なお、前 30 分間の雨量解析値は指数計算用に作成されているものであり、前 30 分間の雨量解析値単独での配信・利用は行っていない。

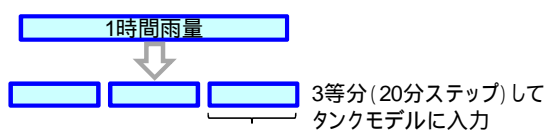


第 4.2 図 指数の 30 分毎の上下変動を解消する方法（模式図）

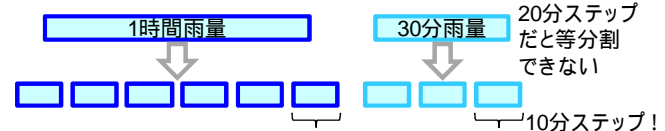
4.2.2 タイムステップの変更

改善前のタンクモデルはタイムステップ（ t ）を 20 分として 3 回積分計算していたため、解析雨量及び降水短時間予報（いずれも 1 時間雨量）を 3 等分してタンクに入力していた（第 4.3 図 a）。タンクの本化により 30 分の指数計算には前 30 分間の雨量解析値を用いることになるが、30 分間は $t=20$ 分で等分割できない。そこで、1 時間及び 30 分間のいずれも等分割できるように $t=10$ 分に変更した。改善後の指数計算では、前 30 分間の雨量解析値は 3 等分してタンクモデルに入力し、30 分間あたり 3 回積分している。また、解析雨量及び降水短時間予報は 6 等分してタンクモデルに入力し、1 時間あたり 6 回積分している（第 4.3 図 b）。

(a)改善前の方法



(b)改善後の方法



第 4.3 図 タンクモデルの積分回数（タイムステップ）の変更

今回の改善では、上記の変更（タンクの本化及び 30 分雨量を用いるための t の変更）と合わせて、流域雨量指数のタンクモデルの一部変更も実施した。これは、 t の変更により生ずる流域雨量指数の変化をできるだけ抑え、かつ実際の河川での流出特性を再現しようとした Ishihara & Kobatake(1979)のパラメ

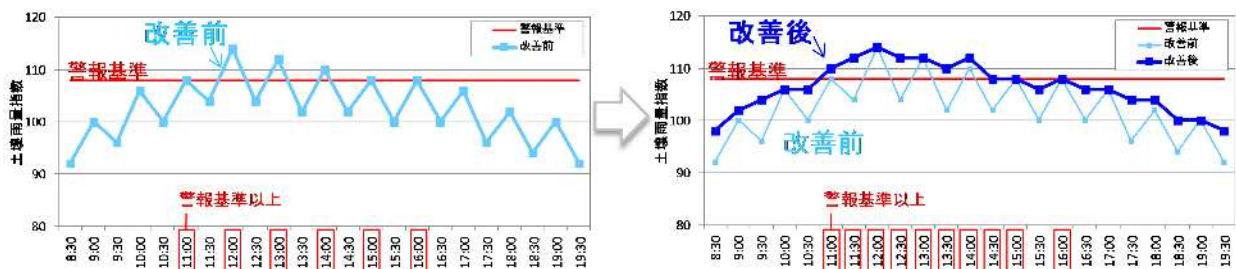
ータに極力近づけるための措置である。流域雨量指数のタンクモデルの一部変更の詳細については、4.6 節に参考としてまとめた。4.3 節以降、上下変動の改善例や計算方法の変更に伴う指数値の変化傾向について述べるが、流域雨量指数に関しては、タンクの一本化及び t の変更に加えて、流域雨量指数のタンクモデルの一部変更の結果も含んでいることに留意されたい。

なお、土壌雨量指数については、 t の変更による指数値の変化が小さく（詳しくは 4.4 節で解説）、流域雨量指数のような措置は実施しなかった（現在用いているタンクパラメータを修正する必要はなかった）。

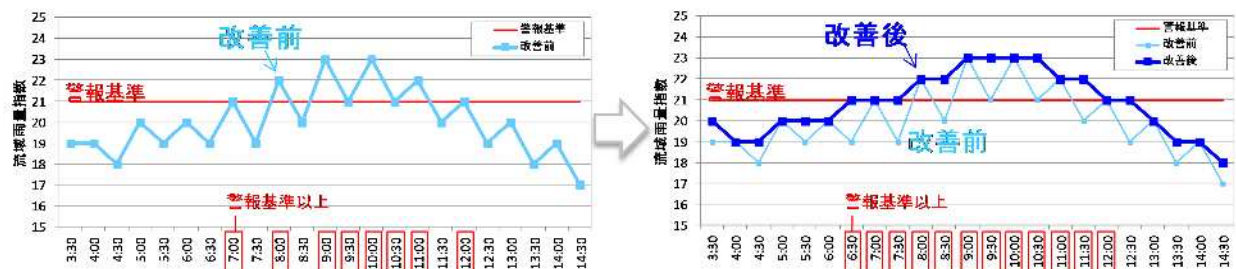
4.3 改善例

タンクを一本化し、30 分の指数計算においては前 30 分間の雨量解析値を用いる等の変更により、指数の上下変動が解消することを、2010 年出水期のデータにより確認した。土壌雨量指数・流域雨量指数それぞれについて、30 分毎の指数の上下が顕著で、警報基準付近の指数値であった事例を第 4.4 図に示す。いずれも、改善前には指数計算のしくみにより生じていた 30 分毎の指数の上下変動が解消し、30 分毎の指数の警報基準以上 / 未満の繰り返しが改善している。

(a) 土壌雨量指数（函館市岩戸町付近 2010 年 8 月 12 日の事例）



(b) 流域雨量指数（八雲町八雲の遊楽部川 2010 年 8 月 12 日の事例）



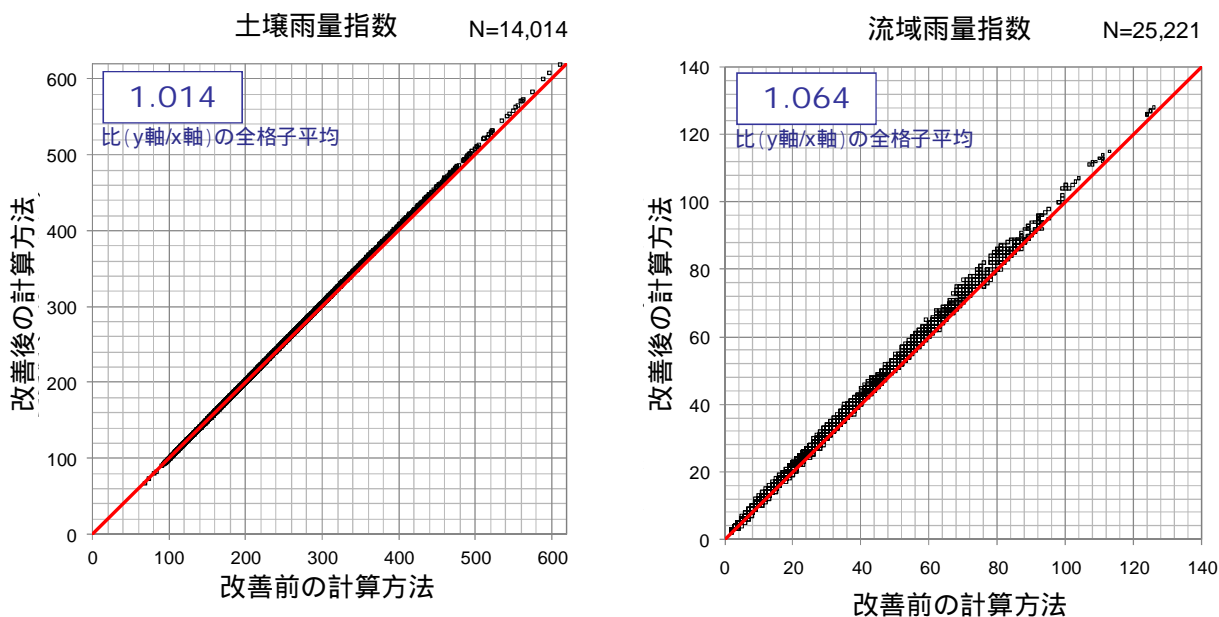
第 4.4 図 改善例

第 4.2 図に示したように、タンクの本化により 30 分後（30 分の計算）と 1 時間後（正時の計算）で同じ初期値を用いているため、改善後の指数は、改善前の指数の正時の値に近い分布となっている。なお、(a) の例では、14:00 や 16:00 の指数がそれぞれ 30 分前の指数よりも大きい値となっているが、これらは実際の降雨を反映した変化である。

4.4 土壌雨量指数・流域雨量指数の出現傾向の変化と基準への影響

タンクの本化に伴うタイムステップ（ t ）の変更等により、指数の計算結果が改善前と比較してわずかながら変化する場合がある。これは、タンクの本化により 30 分系列の指数が適正に表現されるようになったこととは別の数値計算上の話であり、正時の指数にも表れる変化である。

そこで、1991～2010 年の 20 年間の毎正時データを用いて、指数計算の内部処理の一部変更に伴う土壌雨量指数・流域雨量指数の出現傾向の変化及び警報基準に対する影響の度合いを確認した。



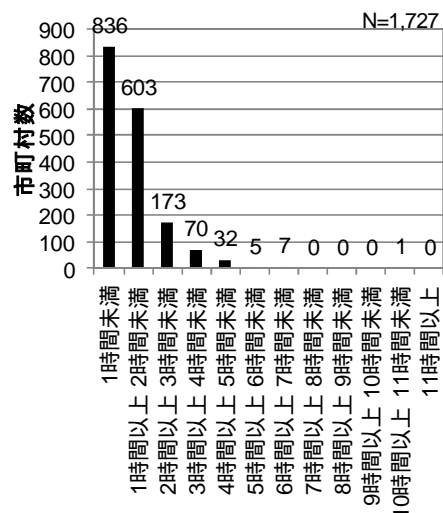
第 4.5 図 土壌雨量指数・流域雨量指数の傾向変化（履歴 1 位指数の改善前後の比較）

4.4.1 土壌雨量指数

まず、土壌雨量指数の出現傾向の変化を確認した。
t の変更により、土壌雨量指数の計算結果は、わずかに大きくなる傾向がみられた。指数値が大きいほどこの変化傾向も大きい。土壌雨量指数を計算している全国 14,014 格子の履歴 1 位の指数値でみても、今回の改善（t の変更）の前後で平均約 1.4% 指数が大きくなる程度であった（第 4.5 図左）。

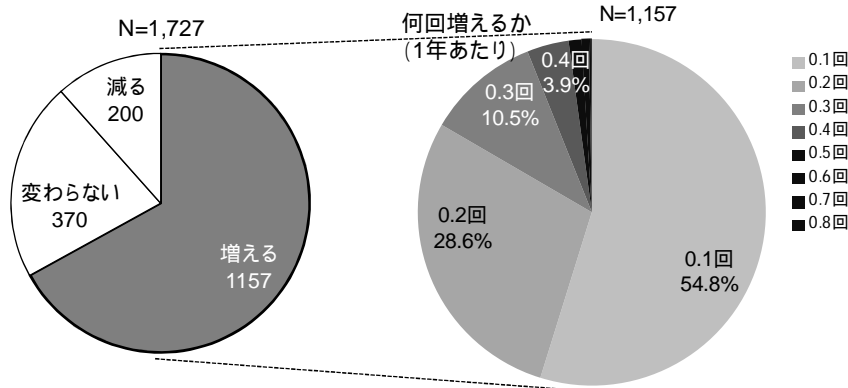
次に、土壌雨量指数の変化に伴う基準への影響を確認した。上述の土壌雨量指数の変化傾向を受け、全国 1,727 の市町村内の 5km 格子の少なくとも 1 格子以上が警報基準以上となる時間数の 20 年間（1991～2010 年）の合計は、今回の改善により増加する。この変化（増加時間数）を 1 年あたりの値に平均してみると、約半数の市町村で 1 時間未満、約 9 割の市町村で 3 時間未満である（第 4.6 図）。

また、1991～2010 年の 20 年間の警報基準到達回数を改善前後で比較すると、約 2 割の市町村では変わらない、約 7 割では増える、約 1 割では減る という結果であった（第 4.7 図左）。警報基準に到達する回数が増える市町村のうち、約 98% は 1 年あたりの増加回数が +0.4 回以下、最大でも +0.8 回であった（第 4.7 図右）。

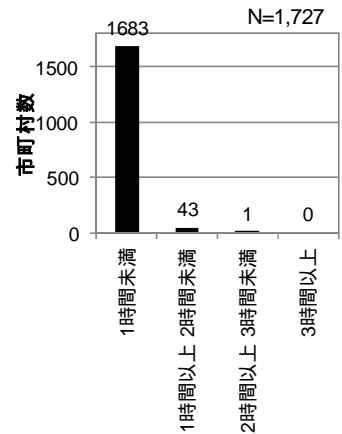


第 4.6 図 各市町村における警報基準到達時間数の変化（改善前後の警報基準到達時間数の 1 年あたりの増加時間）

改善後の土壌雨量指数が改善前に比べてわずかながら大きな値になるという傾向を示している（第 4.5 図左）にもかかわらず警報基準への到達回数が約 1 割の市町村で減るという結果となったのは、改善前の土壌雨量指数が警報基準未満になった後にそれほど間をおかず再び基準以上となって複数回カウントされた事例において、改善後の指数値では基準を超えた状況が継続して一連の事例として抽出されたことに起因する。



第 4.7 図 土壌雨量指数の大雨警報到達回数の変化（全国 1,727 市町村、1991～2010 年の 20 年間）
右の円グラフは、20 年間の増加回数を 1 年あたりに平均した値として表示。



第 4.8 図 各市町村における警報基準到達事例 1 回あたりの警報継続時間の増加

さらに、第 4.6 図に示した警報基準到達時間数の増加分を改善後の警報基準到達回数で割った値（1 回の警報発表における警報継続時間の平均的な増加分に相当）は、9 割以上の市町村で 1 時間未満であった（第 4.8 図）。

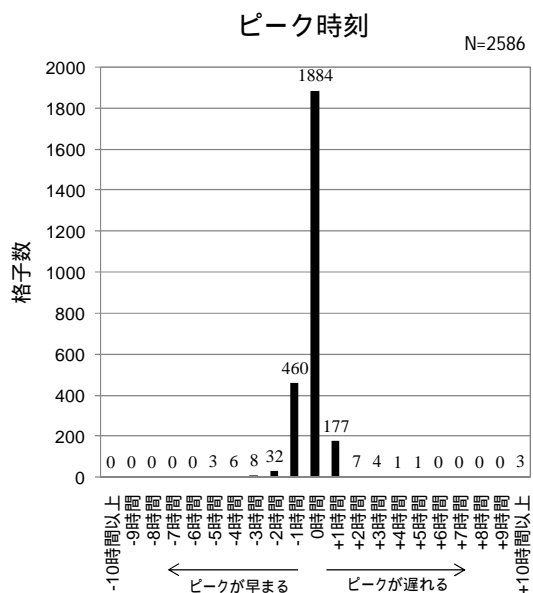
以上のことから、土壌雨量指数基準に対する今回の指数の変化の影響はほとんどないと判断し、従来の土壌雨量指数基準を引き続き大雨警報・注意報に用いることとした。

4.4.2 流域雨量指数

まず、流域雨量指数の出現傾向の変化を確認した。流域雨量指数を計算している全国 25,221 地点について、今回の改善による履歴 1 位指数値の変化を確認すると、平均で約 6.4% 指数が大きくなり算出される傾向であった（第 4.5 図右）。土壌雨量指数に比べて変化傾向が大きいのは、流域雨量指数ではタンクパラメータの変更等を併せて実施したためである（詳細は 4.6 節に掲載）。また、履歴 1 位事例の流域雨量指数のピーク時刻は、一部の河川においてわずかながら早くなる傾向となった（第 4.9 図）。

次に、流域雨量指数の変化に伴う基準への影響を確認した。対象は、洪水警報・注意報基準が設定されている全国 2,988 格子である。洪水警報の基準に到達する回数（今回の調査では履歴指数値から求めた）は、約 1/3 の格子では変わらない、残りの約 2/3 の格子では増えるという結果となった（第 4.10 図左）。警報基準への到達回数が増える格子については、約 98% の格子では 1 年あたりの増加回数は 0.2 回以下であった（第 4.10 図右）。

なお、基準到達回数が増える格子のうち、1 年あたりの増加回数が 0.2 回を超えるもの（20 年間の

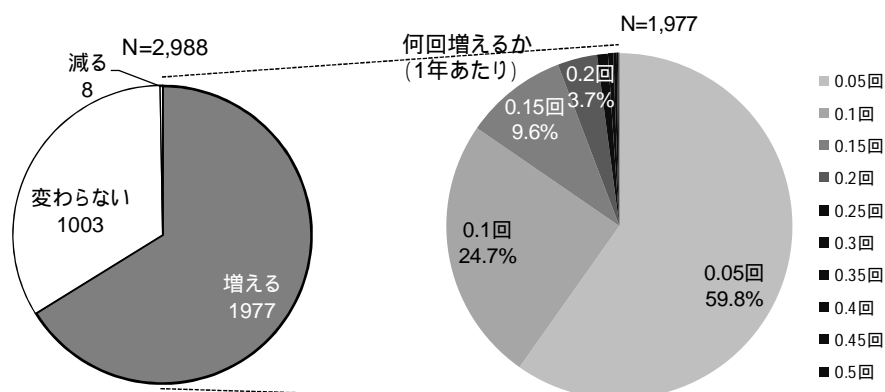


第 4.9 図 流域雨量指数の傾向変化（履歴 1 位事例のピーク時刻の変化）

基準を設定している全国 2,988 格子のうち、履歴 1 位事例が改善の前後で変化しない（同一であった）2,586 格子について、ピーク時刻の変化を確認したところ、約 7 割の格子ではピーク時刻に変化なし、約 2 割の格子ではピーク時刻が早くなるとの結果であった。

増加回数が5回以上のもの)について、警報対象災害事例の指数計算結果がどのように変化したのかを個別に確認したが、これまで捕捉されていた警報対象災害を見逃すようになる事例はなかった。

このように、警報基準に到達する回数の増加は最大で1年に0.5回程度であることから、流域雨量指数基準に対する指数計算の内部処理変更により生じる指数の変化の影響は小さいと判断し、従来の流域雨量指数基準を引き続き洪水警報・注意報に用いることとした。



第4.10図 流域雨量指数の洪水警報到達回数の変化(基準を設定している2,988格子、1991~2010年の20年間)
右の円グラフは、20年間の増加回数を1年あたりに平均した値として表示。

4.5 大雨及び洪水警報・注意報の解除における留意点

大雨及び洪水警報・注意報の解除における留意点については、平成21年度予報技術研修テキストの1.2.5節(指数(警戒度レベル)による作業)の中で解説しており(中村, 2010; 横田, 2010)、該当箇所を抜粋すると次のとおりである。

土砂災害を対象とした大雨警報解除のタイミング:

土砂警戒度のレベル値が「1」以下となり、今後6時間以内に警報基準の超過がないと判断されるときとする。ただし、当該市町村に土砂災害警戒情報を発表中の場合は解除せず、また解除するかしないかについては30分毎の警戒度判定を2回確認した上で判断する。

土砂警戒度のレベル値が「2」の場合でも、降水量の目安などから、今後6時間以内に土壌雨量指数の上昇傾向がないと判断できれば、大雨警報は解除してもよい。この場合でも、当該市町村に土砂災害警戒情報を発表中の場合は解除しない。

土砂災害を対象とした大雨注意報解除のタイミング:

土砂のレベル値が6時間継続して「0」となる場合は解除してよい。ただし、30分毎の警戒度判定を2回確認した上で判断することとする。

また、土砂のレベル値が「0」と「1」が交互に予想されるような場合でも、降水量の目安などから、今後6時間の土壌雨量指数の上昇傾向がないと予想される場合は解除してよい。

洪水警報の流域雨量指数基準による解除のタイミング:

流域雨量指数基準を上回っているために洪水警報を継続している場合の解除は、洪水警戒度が「1」以下となり、今後6時間以内に警報基準の超過がないと判断されるときに行う。解析雨量・降短から計算した流域雨量指数は正時系列と30分系列で振動する場合があるため、30分前実況、最新実況、FT=1予測のいずれも基準を下回ったときにレベルを下げる判定を行う。

洪水注意報の流域雨量指数基準による解除のタイミング:

流域雨量指数基準を上回っているために洪水注意報が継続されている場合の解除は、次の 場合に行う。

洪水警戒度が「0」となり、今後 6 時間以内に注意報基準の超過がないと判断されるとき。これは警報の解除と同様の考え方である。

流域雨量指数が注意報基準を上回る状態が長引く傾向がある河川においては、流域雨量指数が注意報基準を若干上回っていても、洪水災害の危険性がないと判断される場合には解除する。その目安は、次のア)、イ)、ウ)のいずれもが満たされた場合とする。

ア) 当該河川の流域で降雨が終息して概ね 3 時間経過

イ) 指数が下降傾向 (指数値が小さい小河川においては、同じ値が長時間持続する場合も含む)

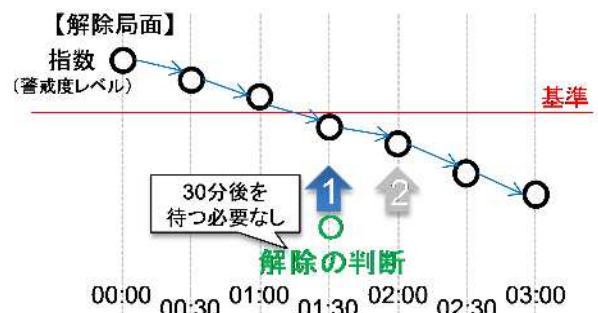
ウ) 今後 6 時間以内に指数の上昇が見込まれない

上記下線部のとおり、改善前、指数 (警戒度レベル) を用いた警報・注意報の解除にあたっては 30 分毎に計算されている指数 (警戒度レベル) を “2 回確認” して判断していた。これは、指数値が 30 分毎に上下変動する場合を考慮しての対応であった。

今回の改善により、指数値の 30 分毎の上下変動は解消したので、降雨が終息した場合は、指数 (警戒度レベル) が基準未満となった時の警報・

注意報の解除の判断において、30 分後の指数 (警戒度レベル) も基準未満であることを確認する必要がなくなった (第 4.11 図)。すなわち、上記下線部の対応は解消した。

なお、第 4.4 図 a の事例において、15:30 の指数実況値が警報基準未満となりその後 6 時間以内に基準に到達する予想がないことから大雨警報を解除したと仮定すると、30 分後の 16:00 に再び基準以上となったものの、これは一時的な降雨によるものと判断され、16:00 時点で指数の予想値が 6 時間以内に基準に到達していなければ、16:00 の時点で警報を再発表する必要はない。



第 4.11 図 警報・注意報解除における留意点 (模式図)

4.6 参考：流域雨量指数のタンクモデルの一部変更

指数の計算には Ishihara & Kobatake(1979)のタンクモデルを用いているが、今回の改善のために実施したタイムステップ (t) の変更により、特に短時間強雨の後の流出が流域雨量指数によりうまく表現されないことが予備的な調査で判明した。そこで、そうした場合にも、タンクモデルにより実際の河川での流出特性を再現しようとした Ishihara & Kobatake(1979)のオリジナルの計算結果に流域雨量指数の計算結果が極力近づくよう、流域雨量指数のタンクモデルの一部変更を行った。具体的には、タンクパラメータの変更及び直列三段タンクの第 1 タンクへの新たな流出孔の導入であり、4.2 節で述べた指数計算の変更点と合わせて流域雨量指数の計算に取り込んでいる。

4.6.1 タンクパラメータの変更

短時間の流出現象の再現性を高めるため、非都市域の直列三段タンクモデルの第 1 タンク及び都市域の一段タンクのパラメータを最適化した。ここで最適化とは、 t = 60 分としている Ishihara & Kobatake(1979)の結果に、改善後の t = 10 分の計算結果を合わせるようパラメータを調整する (第 1 タンク

クに関わる L1、L2、F1、R1、R2 を変数として回帰計算する) ことを指す。最適化したパラメータを第 4.2 表に示す (赤字部分が変更点)。

第 4.2 表 改善後の流域雨量指数計算に用いているタンクパラメータ

赤字の数値が改善後のパラメータ (赤字の数値の下の括弧書きは改善前のパラメータ) である。直列三段タンクの No. と河川名 (流域) については、Ishihara & Kobatake(1979) が示した地質毎の代表的な流域に対応する。

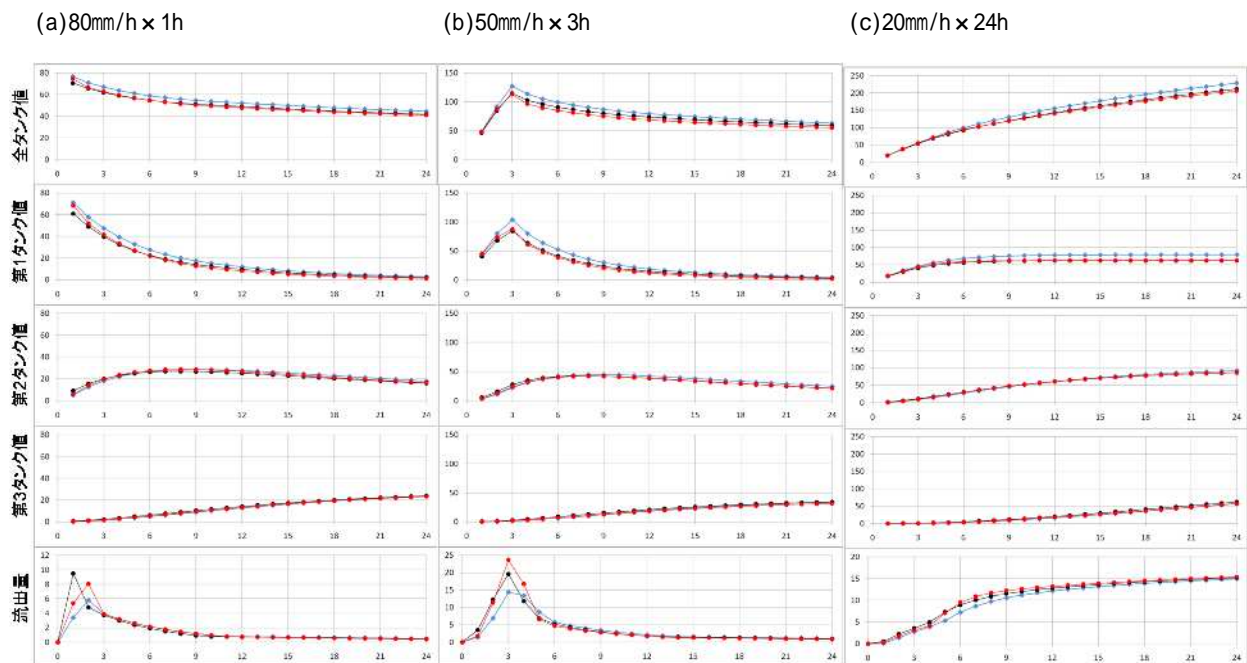
直列三段タンク (非都市用流出モデル)

No.	河川名 (流域)	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	L4 [mm]	F1 [/hr]	F2 [/hr]	F3 [/hr]	R1 [/hr]	R2 [/hr]	R3 [/hr]	R4 [/hr]
2	馬洗川 (南畠敷)	30	60	15	15	0.14 (0.12)	0.08	0.01	0.14 (0.10)	0.30 (0.15)	0.05	0.01
3	木津川 (月ヶ瀬)	15	60	15	15	0.14 (0.12)	0.05	0.01	0.14 (0.10)	0.30 (0.15)	0.05	0.01
5	夕張川 (清幌橋)	15	45 (40)	5	15	0.15 (0.12)	0.04	0.01	0.14 (0.10)	0.30 (0.15)	0.05	0.01

一段タンク (都市用流出モデル)

傾斜	0.1%以下	~	1%以上
流出率R [/hr]	0.43 (0.4)	(内挿)	0.68 (0.6)

改善例として、80mm/h×1h、50mm/h×3h、20mm/h×24h の継続降雨を入力した場合のタンク貯留量及び流出量の比較結果を第 4.12 図に示す。第 4.12 図では、青 (t = 10 分、改善前のパラメータ) よりも赤 (t = 10 分、最適化したパラメータ) の方が、黒 (Ishihara & Kobatake, 1979 のオリジナルの計算結果) に近い結果となっている。しかし、80mm/h×1h は、50mm/h×3h、20mm/h×24h に比べて降雨開始後 1~2 時間の再現性が悪い。このことは、タンクパラメータの調整だけでは、特に先行降雨が少ない状況での短時間強



第 4.12 図 タンクパラメータの変更による流域雨量指数の改善例

黒: t = 60 分・改善前のパラメータ (Ishihara & Kobatake, 1979 オリジナルの計算結果), 青: t = 10 分・改善前のパラメータ (パラメータを変更せずに t = 10 分とした場合), 赤: t = 10 分・改善後のパラメータ (最適化したパラメータを用いて t = 10 分とした場合) により計算した結果を示す。

雨において流出をうまく再現できないことを示しており、そのような場合でもタンクモデルから適正に流出するしくみを組み込む措置（4.6.2節）を行った。

4.6.2 新たな流出孔の導入

第4.12図の降雨開始後1～2時間の流出量の再現性を向上させるため、流域雨量指数の計算に用いている直列三段タンクの第1タンクについて、高さL2の位置に新たな流出孔（ここでは「表面流出孔」と呼ぶことにする）を設けることとした。表面流出孔は常に作用させるのではなく、

$$S < L2 \text{ かつ } R > L2$$

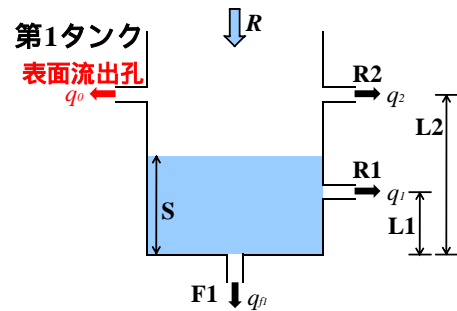
という特定の条件を満たすとき（すなわち、タンクの水位がそれほど高くない状況で多量の降雨があった場合）に、

$$q_0 = (R - L2) \cdot R2$$

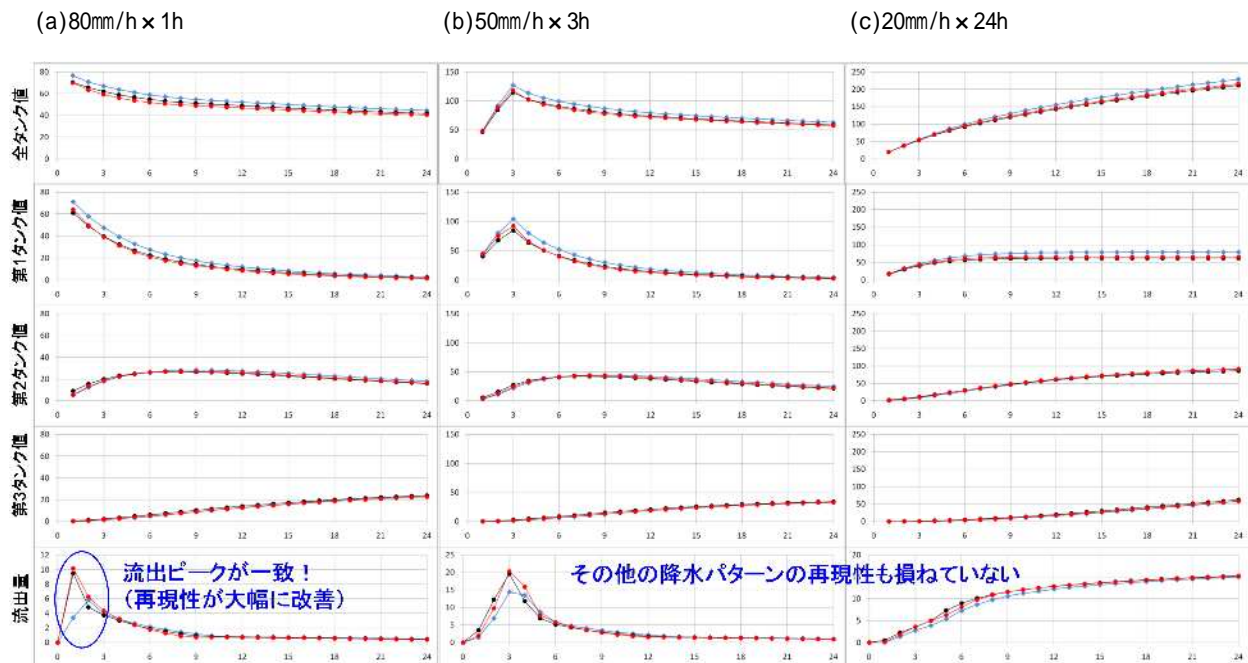
を表面流出孔から流出させるというものである。ここで、L2：第1タンクの表層流出孔の高さ、S：第1タンクの貯留高、R：入力雨量、 q_0 ：表面流出とする（第4.13図）。なお、表面流出孔が条件により作用する／しないに関わらず、第1タンクの2つの流出孔（R1、R2）についてはこれまで通り作用させる。

すなわち、第1タンクにおいて、通常はF1の浸透、R1及びR2の流出で対応するが、土壤水分が少ない状態での短時間強雨では別途「表面流出」として流出させる。これは、都市部に限らず非都市部であっても、非常に強い雨が降った場合には土壤水分が少なくてもある程度は河川に流出するという実態（Ishihara & Kobatake, 1979 オリジナルの計算結果）に対応させるものである。

最適化したパラメータ及び表面流出孔を用いて、80mm/h×1h、50mm/h×3h、20mm/h×24hを入力した場合のタンク貯留量及び流出量の比較結果を第4.14図に示す。第4.12図と比較して、80mm/h×1hの場合の再



第4.13図 表面流出孔を適用した直列三段タンクモデルの第1タンク（本図では、第2タンク、第3タンクを省略）



第4.14図 タンクパラメータ変更及び表面流出孔適用による流域雨量指数の改善例

各色の凡例は第4.12図と同じ。いずれも第4.12図の条件に加えて、表面流出孔を適用して計算をした結果である。

現性が大幅に改善している。また、50mm/h×3h、20mm/h×24h などのその他の降水パターンの再現性も損ねていない。

参考文献

Ishihara, Y. & Kobatake, S. (1979) : Runoff Model for Flood Forecasting. *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* , **29** , 27-43 .

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 .

中村直治 (2010) : 土砂警戒度による作業, 平成 21 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 14-16 .

横田茂樹 (2010) : 洪水警戒度による作業, 平成 21 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 16-18 .