

降雨予測誤差を定量的に考慮した都市河川 内水域における浸水予測手法の構築と検証

DEVELOPMENT OF REAL-TIME FLOOD FORECASTING METHOD IN
URBANIZED INNER BASIN CONSIDERING PREDICTION RAINFALL ERROR

木村誠¹・城戸由能²・中北英一³

Makoto KIMURA, Yoshinobu KIDO, Eiichi NAKAKITA

¹正会員 工博 株式会社日水コン 中央研究所 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)

²正会員 工博 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

Recently, locally heavy rainfall occurs frequently at highly urbanized area, and causes serious personal accidents. Now, storm warnings/advisories are applied to evacuation and rescue, but they don't have good much precision. So importance of flood forecasting system is growing in order to reduce damage of inundation. However, flood forecasting that secured lead-time for evacuation is extremely difficult, because the rainfall flows out immediately.

This study aims to develop real-time flood forecasting method using ensemble rainfall forecasting that considers prediction rainfall error, and evaluates usefulness of the method through case study in urban drainage areas.

Key Words : *real-time flood forecasting, ensemble flood forecasting, locally heavy rainfall, prediction rainfall error, urban area*

1. はじめに

近年、局地的な集中豪雨が多発し、甚大な浸水被害や人身事故が生じるなど、その対応が課題となっている。また、都市域では地下空間が高度に利用されており、人命防護の観点からリアルタイムの浸水予測情報の提供による減災支援の必要性が高まっている。これに対して現状は、気象庁が発信する大雨洪水警報や注意報が、水防活動等を行うきっかけとなる減災情報として広く用いられている。しかし、これらはその発令実績(表-1)に示されるように、減災情報が発令されずに所定の降雨が生じる「見逃し」を回避する観点から安全側で発令される傾向にあり、情報が発令されても所定の降雨が生じない「空振り」の回数が極めて多くなっている。これは現状の降雨観測や予測の限界が市単位(20km格子)程度であることにも起因しており、局地的豪雨や下水道の排水区スケールでみると、空振りが多くなる傾向はより顕著となる。このように予警報の空振り回数が極めて多い状況は、水防活動回数の増大に直結するとともに、いわゆる「オオカミ少年効果」によって情報の信頼性低下を招く要因となることから、現在、空間的な精細化や精度向上

等による浸水予測情報の高度化が切に求められている。

水防活動や避難等の減災行動に必要な浸水予測情報は、確実な対応に必要な十分なリードタイムと精度を確保して発令することが求められる。しかし、局地的な集中豪雨はその時間的・空間的な集中性より、早期に捕捉することが難しく、捕捉できたとしても都市では極めて短時間に雨水が流出する。それ故、都市域において減災行動に必要なリードタイムを確保した浸水予測情報の発令を行うためには、より短時間に面的な浸水状況が評価できる手法を開発・適用するとともに、その入力とする降雨を予測し、予測雨量情報を用いることで所定のリードタイムを確保することが不可欠となる。

このような観点から、筆者らはこれまでに浸水再現精度を維持しつつ、より短時間に浸水状況を評価する手法として、物理的手法^{1,2)}と統計的手法³⁾を構築してきた。ただし、都市の浸水予測に必要な降雨予測情報には誤差が含まれることから「見逃し」が生じないように浸水予測情報を発信するためには、その予測誤差を定量的に扱うことが求められる。これをふまえ、本研究では構築した浸水評価手法を用いて、入力とする降雨予測の誤差を定量的に考慮した浸水リスク情報の発令方法を提案するとともに、実流域においてその効果を検証した。

2. 浸水予測情報の発令方法

(1) 基本的な考え方

本研究では気象庁の防災気象情報（注意報・警報）の課題をふまえ、精細な空間解像度の浸水予測情報をリアルタイムで提供することを想定する。具体的には、水防活動や避難行動等の減災行動に必要なリードタイムを確保するために降雨予測情報を用いる。これを面的な浸水状況が評価可能な浸水評価モデルの入力として将来の浸水状況を予測し、この浸水予測値がある閾値を超過した時点で浸水リスク情報を発令することを想定する。

ただし、これまでも気象庁等の降雨予測結果を浸水評価モデルの入力としたリアルタイム浸水予測は行われている⁴⁾ものの、それらは全て降雨予測値を決定値として扱っている点に課題がある。自然現象を対象とする予測には誤差が生じるため、どれほど精度の良い予測でも空振り（過大評価）や見逃し（過小評価）が生じる。これに対して、従来用いてきた決定論的な予測手法ではこのような誤差が考慮されておらず、これが予測情報をあいまいで信頼できないものにして一因と考える。

減災情報の観点からは予報の「見逃し」が問題となる。したがって、見逃しが生じないように浸水リスク情報を発令するためには、浸水予測値の誤差（範囲）を定量的に評価し、適切に取り扱う必要がある。このような観点から、本研究ではリアルタイム浸水予測にアンサンブル浸水予測を適用する方針とする。アンサンブル浸水予測は、入力値の誤差範囲を考慮したアンサンブルメンバーを多数発生させて予測計算を行うことで、取りうる可能性のある予測値の範囲を求める手法であり、予測値の不確実性が確率分布として得られる点に特徴がある。また、アンサンブル浸水予測を行うことで浸水リスクを確率情報の形で提供することが可能になる。これによって、情報の利用者が浸水リスクの大きさを各々の利用用途から求められる安全度と比較したうえで、減災行動を実行するか否かの判断やリスクの大きさに応じた柔軟な対応をとることを可能とするといった効果も期待できる。

(2) アンサンブル浸水予測手法

一般に、アンサンブル浸水予測は、雲や大気の流れモデルを積分することで予測値を得る「物理的降雨予測手法」⁵⁾において、初期値や空間的離散化の影響を考慮したアンサンブル予測を行ない、その結果を浸水評価モデルの入力として与える方法が用いられている⁶⁾。ただし、本研究で対象とする数分から1時間先までの降雨予測には、現状「運動学的降雨予測手法」⁵⁾が広く用いられている。これは、気象庁が予測・配信している「降水ナウキャスト」でも採用されている手法であり、雨量レーダによって観測された過去から現在の降水域の移動傾向を基に将来時刻の雨域や雨量を外挿によって推定する手法である。したがって、本研究ではこの運動学的手法を用

表-1 大雨洪水注意報・警報の発表状況

注意報	発令基準20mm/hr			単位：降雨数		
	全市 186.5km ²			H処理区 5.4km ²		
	基準超過	非超過	計	基準超過	非超過	計
発表	42 (31%)	94 (69%)	136	25 (18%)	111 (82%)	136
未発表	1 (2%)			1 (4%)		

警報	発令基準40mm/hr			単位：降雨数		
	全市 186.5km ²			H処理区 5.4km ²		
	基準超過	非超過	計	基準超過	非超過	計
発表	8 (38%)	13 (62%)	21	1 (5%)	20 (95%)	21
未発表	6 (43%)			2 (67%)		

空振り 見逃し

※大阪市における2004～2008年（5ヵ年）の発令状況⁷⁾より整理
 ※全市：市内55箇所、H処理区：区内4箇所の雨量観測地点で判定
 ※発表の遅れは未考慮（実際には豪雨中の発令も多い）

いたアンサンブル浸水予測手法を検討の対象とする。

運動学的降雨予測手法のアンサンブル浸水予測への適用事例としてはKimら⁸⁾の研究がある。この研究では、過去の一定期間に運動学的手法で得られた予測雨量を観測雨量と比較することで予測雨量の時間的・空間的な誤差分布を面的なエラーフィールドとして求め、これを予測雨量に付加することで予測雨量を補正する。このとき、予測誤差の時空間構造に基づいてランダムに発生させた誤差を生成、付加することによって複数のアンサンブル予測雨量を生成し、これを分布型流出解析モデルの入力とすることでアンサンブル洪水予測を実現している。

この手法を参考に、本研究でも予測雨量の誤差構造を予め入力条件として整理しておき、それに基づいてランダムに誤差を生成・付加することでアンサンブル予測雨量を生成する。さらに、それを浸水評価モデルの入力とすることでアンサンブル浸水予測を行う方針とする。

(3) 浸水リスク情報の提供方法

浸水リスク情報を発令するためには、発令するタイミング、すなわち現時刻を基準とした浸水予測のリードタイムを設定する必要があるのに加え、浸水リスクの許容レベル（閾値）を定める必要がある。この時、アンサンブル浸水予測が浸水予測値を確率分布として与えることから、浸水リスク情報を発令する確率（超過確率）の設定も必要となる。なお、これらの値は情報の各利用者が必要とする安全性を考慮して任意に設定すべきものではあるが、ここでは、一般住民を主とする広範囲の利用者に浸水リスク情報を提供する場合を想定して、発令に必要なとなる超過確率、閾値、発令のタイミングを設定する。

超過確率は浸水予測の不確実性をどの程度考慮するかを規定する値であり、これを大きくすると浸水発生リスクが高い場合のみを対象とできることから、予報の空振り回数を小さくできる半面、見逃しが生じる危険性が大きくなる。図-1にアンサンブル予測値と超過確率の関係についてそのイメージを示す。上図に示すように、例えば超過確率を50%とすると半分の確率で見逃しが生じる

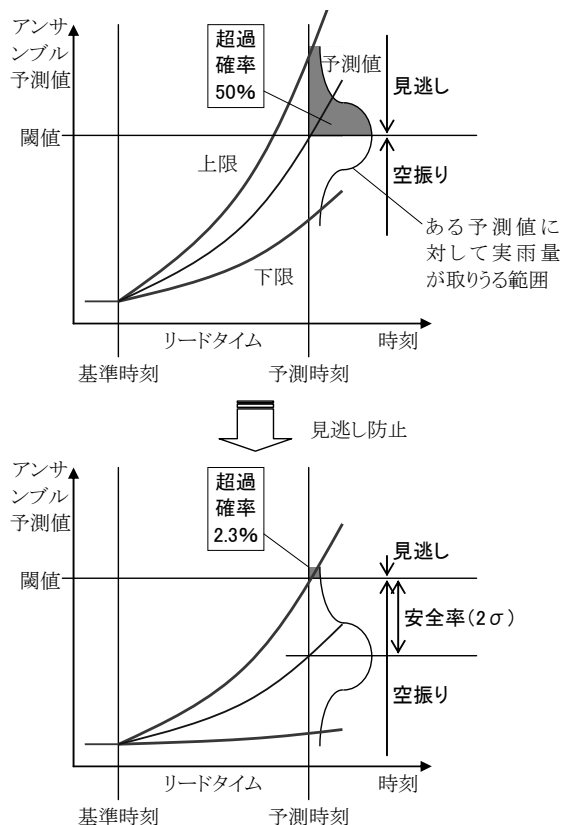


図-1 アンサンブル予測と超過確率の関係

こととなる。浸水リスク情報の発令に際しては見逃しが最も回避すべき課題となるため、ここでは見逃しを回避する観点からアンサンブル浸水予測値の分布を正規分布とみなした場合の 2σ (σ :標準偏差)に相当する超過確率2.3%を発令基準として採用する(図-1下)。このような安全率を考慮することによって、空振り回数は多くなるものの、見逃しが生じる可能性を十分に小さくすることが可能となる。なお、この 2σ という安全率は予測値の97.7%をカバーする値であるが、降雨期間の全てを対象とする一方、浸水リスクが発生する降雨の生起回数が小さいことを勘案すると、浸水リスクが発生する豪雨のピーク時に超過事象が生じる可能性は十分に小さく、実質的にはほぼ見逃しを回避できる値と考えられる。ただし、適切な安全率設定の考え方については、カバー率が99.9%となる 3σ の採用等、より高い信頼性確保の必要性も含めて今後、さらなる論議が必要である。

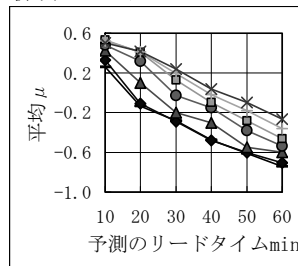
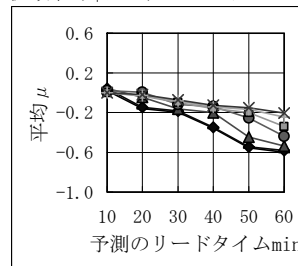
一方、閾値は想定する浸水の大きさを規定する値であるが、ここでは甚大な浸水被害が生じる恐れのある危険水位として、床下～床上浸水が発生する浸水深に相当する浸水深30cmを閾値として採用する。

また、浸水リスク情報を発令するタイミングは、利用用途に応じて減災行動の実行に必要な時間を確保するように設定する必要がある。ここで、本研究の対象とする都市内水氾濫の場合には、外水氾濫のように家屋が倒壊するような被害が生じないことから、避難所への避難等の空間的移動を伴う減災行動の必要性が小さく、地

a) 相対誤差の平均 μ

流域平均 | 処理区10km²スケール

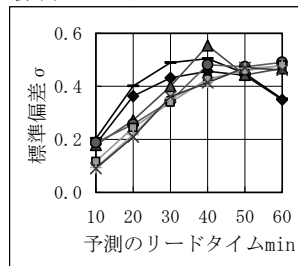
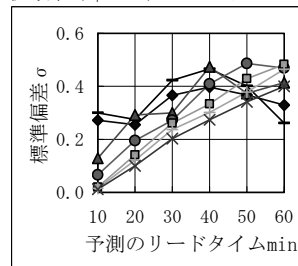
排水区5km²スケール



b) 相対誤差の標準偏差 σ

流域平均 | 処理区10km²スケール

排水区5km²スケール



平均時間 | — 5 —●— 10 —▲— 20 —●— 30 —■— 40 —+— 50 —×— 60

図-2 降雨予測精度の整理結果

表-2 降雨予測精度の整理結果 (10km², 60分平均雨量の例)

予測の リードタイム min	相対誤差		雨量の取りうる範囲 1/(1+μ+A)	
	平均 μ	標準偏差 σ	A=2σ	A=-2σ
10	0.00	0.01	0.98	1.02
20	-0.02	0.10	0.85	1.28
30	-0.07	0.20	0.75	1.89
40	-0.13	0.27	0.71	3.03
50	-0.15	0.34	0.65	5.88
60	-0.20	0.40	0.63	無限大

下から1階、1階から高層階への避難や家屋・家財の保全行動、角落しや土のう等の設置による浸入水の防止行動等の比較的短時間で対応できる行動に限られる。これをふまえ、ここでは浸水リスク情報を発令するリードタイムは浸水深が30cmを超過する30分前と想定する。

(4) 降雨予測誤差の設定

降雨予測の精度は地域特性、降雨観測手法、降雨予測手法に大きく依存するため、実運用に際しては当該地区で利用可能な降雨予測情報の精度を検証する必要がある。本研究では国土交通省が局地的豪雨の観測・予測精度向上を目指して整備を進めており、今後積極的な利用が期待されているXバンドMPレーダ情報の適用を想定するが、同レーダは2010年7月から試験供用している段階であり、未だ豪雨観測事例が少ない状況である。このため、本研究では降雨予測精度の取り扱いに主点を置き、XバンドMPレーダ情報による1降雨事例を用いた予測精度の整理結果を適用する。なお、ここでは1降雨事例による予測雨量を入力条件として用いるものの、このようなアプローチによって、今後、実流域へ適用するに際して、対象流域で利用可能な降雨予測情報を用いて、その誤差構造を整理することで、それを入力条件とした一連の評価

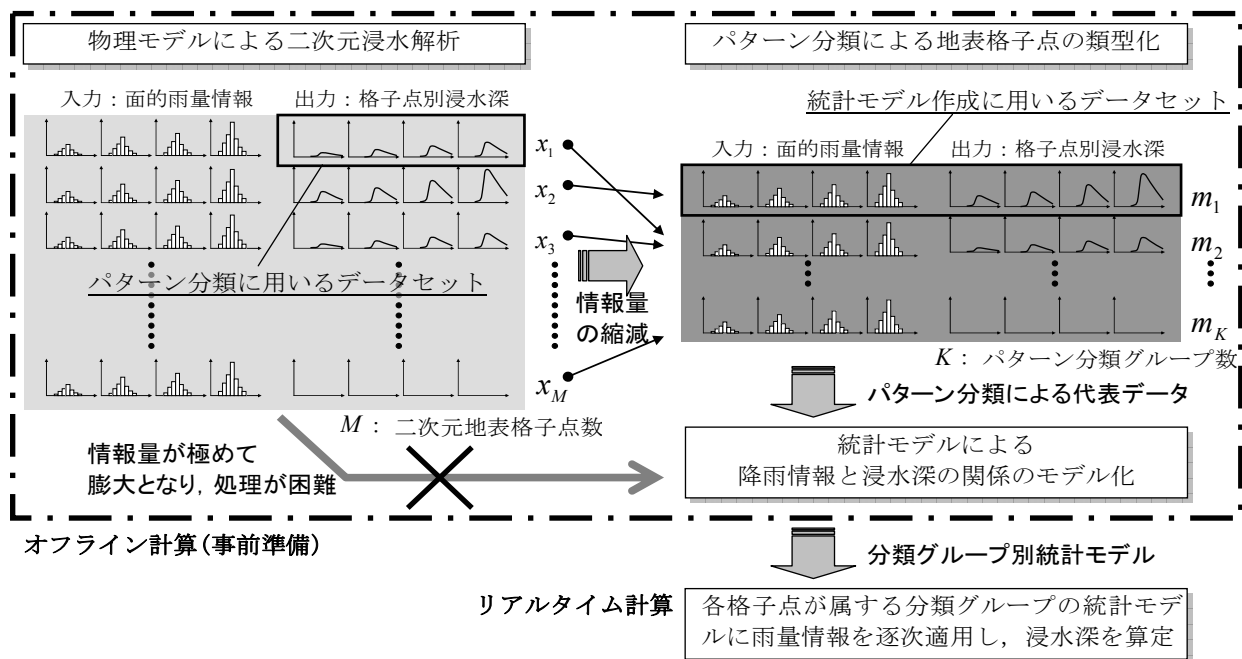


図-3 適用する浸水評価手法（瞬時浸水予測手法³）の概要

が可能となる。本研究は予測雨量情報の取り扱い方法や精度の評価手法の確立を目的としており、このような観点では十分な意義を有していると考ええる。

対象とする豪雨は、XバンドMPレーダによって2010年7月5日に板橋付近で観測された事例とし、運動学的手法の1種である相互相関法により5分間隔で60分先までの雨量を予測した。本研究では既往研究⁹⁾を参考に予測雨量の誤差を次式に示す相対誤差で定義し、観測雨量値に対する予測雨量値の乖離と予測雨量値のばらつきを各々、相対誤差の平均 μ と標準偏差 σ を指標として整理した。

$$E_r = \frac{R_p - R_o}{R_o} \quad (1)$$

ここに、 E_r ：相対誤差、 R_o ：観測雨量値、 R_p ：予測雨量値である。

先に述べた降雨事例の相対誤差を流域（空間）平均スケール別、時間平均スケール別に整理した結果を図-2、表-2に示す。これより、降雨予測の精度は予測のリードタイムが長くなるほど観測雨量からの乖離が大きくなり、この事例では観測雨量に対して小さく予測され、かつ、誤差のばらつきも大きくなることが確認できる。また、その誤差は流域（面積）スケール、時間（平均）スケールが小さくなるほど大きくなっており、下水道排水区のような流域面積が小さく、流下時間の短い流域ほど、その空間・時間スケールに応じた降雨予測が困難となることが伺える。

予測雨量の精度情報を用いたアンサンブル雨量の作成は、降雨予測によって得られる平均的な予測雨量を $\bar{R}_p$ とすると、それが得られた時に実際の雨量が取る範囲 $\tilde{R}_o$ は、式(1)より次式で表される（図-1、表-2）。この式を用いて予測雨量の誤差の構造、すなわち観測雨量

との相対的な差 μ と予測雨量のばらつき σ を基に誤差の分布として正規分布を仮定し、モンテカルロ法を用いて1,000ケースの雨量を生成する。

$$\tilde{R}_o = \frac{\bar{R}_p}{1 + E_r} \quad (2)$$

(5) 適用する浸水評価手法

アンサンブル予測雨量を入力として面的な浸水状況を評価する浸水評価モデルには、著者らが既往研究で開発した統計的瞬時浸水評価手法³⁾を用いる。

本手法は計算時間を縮減する視点から、都市内水域を対象として、逐次かつ瞬時に面的な浸水状況を評価することを目的として開発した手法であり、大きな計算負荷を要する雨水流出過程の物理的な逐次計算を行わず、統計的手法を用いて、雨量情報から浸水状況を直接的に求める。手法の概要を図-3に示す。本手法は空間的・経時的な雨量情報と地表面の各格子地点の浸水生起状況の関係をニューラルネットワークモデルによって表現する。ただし、統計モデルを作成するために必要となる多くの浸水実績データを十分な数や精度で得ることは一般的に困難である。また、地表面の2次元格子の各地点に統計モデルを適用する場合、流域の規模や格子の大きさに応じて数千～数十万に及ぶ膨大な地点のデータ処理が必要となる。これらの課題に対し、筆者らは物理モデルと同程度の精度確保を図る視点に立ち、物理モデルによって事前に種々の局所集中豪雨における浸水状況を解析した結果を統計モデル作成のための教師データとすることで対応した。また、浸水状況が相似した地点をパターン分類手法によって類型化することで、モデル適用及び作成作業の省力化を実現した。なお、パターン分類手法には種々の手法の適用性を比較し、K-平均法を用いている。

表-3 検討対象降雨

降雨規模 mm/hr	気象台55年間雨量1951-2005 20mm/hr以上				合流改善年間降雨 20mm/hr未満を対象	
	降雨回数 回/55年		回/年		降雨回数 回/年	
	区間	累計	区間	累計	区間	累計
0>					13	85
1>					22	72
2>					22	50
4>					9	28
6>					3	19
8>					6	16
10>					4	10
15>					2	6
20>	122	180	3.3	3	3	4
30>	41	58	1.1	0	0	1
40>	8	17	0.3	0	0	1
50>	6	9	0.2	0	0	1
60>	2	3	0.1	0	0	1
70>	1	1	0.0	0	0	1
80>	0	0	0.0	1	1	1

本モデルは既往研究³⁾において物理モデルと比較して十分な浸水再現精度を有することを確認していることから、ここでも浸水評価手法として用いるものとした。

3. 提案手法の適用（ケーススタディ）

(1) 対象流域及び降雨

浸水リスク情報の発令状況は、既往研究^{1,2,3)}でも対象とした、土地利用や下水整備等の都市化が高度に進展した大阪市のA処理区上流域 475haを対象として評価した。また、降雨は様々な降雨波形や強度の豪雨に対する発令状況を評価するため、大阪市気象台における55年間の観測雨量から抽出した豪雨を対象とした。ここで、豪雨の規模としては、時間雨量20mm以上の降雨を基準としたが、予測雨量の精度や想定する超過確率によっては20mm/hr未満の雨量でも浸水リスク情報が発令される可能性がある。したがって、中小降雨の平均的な発現特性を代表する降雨として、合流式下水道改善計画で用いている年間降雨データを20mm/hr未満の降雨として用いた。これより、浸水リスク情報の発令状況は、20mm/hr以上の降雨の55年間平均値と20mm/hr未満の降雨による評価結果の合計から年あたり発令回数として整理した（表-3）。

なお、ここで対象とする20mm/hr程度の豪雨には雷雨性豪雨の他にも、台風性豪雨や前線性豪雨など、降雨の空間スケールが大きく、空間的な集中性（偏在性）が小さい降雨も多く含まれる。よって、ここでは降雨の空間分布を考慮せず、すべての降雨が流域に一樣に降る場合を想定して一連の評価を行うものとした。

(2) 浸水予測による浸水リスク情報の発令状況

現在、水防活動や道路管理、地下街管理等の人命に係わる減災行動は、気象庁の防災気象情報である大雨洪水注意報や警報をきっかけとして行われている。したがって、ここでは、これらの情報を用いた場合の減災行動の実行回数に対して、リアルタイム浸水予測による浸水リスク情報の発令回数を比較し、その発令効果を評価する。

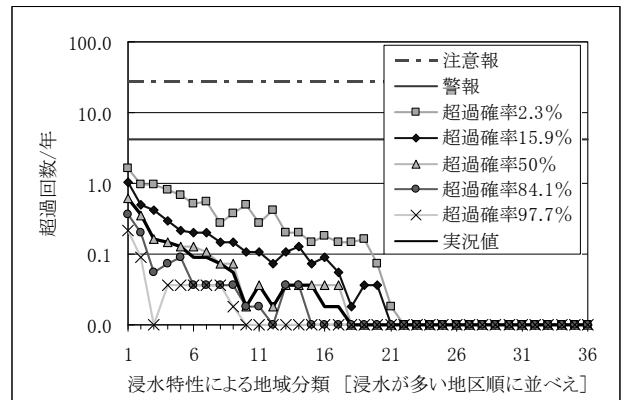


図-4 浸水リスク情報の発令状況（超過確率別）

表-4 面積あたり発令状況（超過確率別） 回/年/ha

実況値	気象庁		リアルタイム浸水予測（超過確率）				
	注意報	警報	2.3%	15.9%	50.0%	84.1%	97.7%
0.04	27.20	4.20	0.17	0.08	0.04	0.02	0.01

比較に用いる気象庁の注意報・警報の発令回数は表-1に示した大阪市の発令実績（注意報136回/5ヵ年、警報21回/5ヵ年）より、注意報27.2回/年、警報4.2回/年と想定した。なお、これらの注意報や警報はある程度のリードタイムを持って提供されているが、その時間にはばらつきがあり、特に警報には見逃しや豪雨中の発令も多く見られる。しかし、ここでは、リードタイムの不確実性を定量的に考慮しないものとして、これらの情報が減災行動に必要となるリードタイム（床下～床上浸水発生の30分前）を有して発令されると想定して比較する。

現在、減災行動等に利用している気象庁の注意報・警報とリアルタイム浸水予測による浸水リスク情報の発令状況を図-4に比較して示す。なお、横軸には統計的瞬時浸水評価手法において浸水特性の類似した地域をパターン分類手法により分類したグループ（36分類）をとっており、浸水特性が異なる地域別の発令回数を示している。また、比較のため、観測雨量を与えた場合に浸水深が30cmを超過する回数を実際に浸水リスクが生じる回数、すなわち「実況値」として図示している。

これより、リアルタイム浸水予測による浸水リスク情報は、見逃しを回避する観点から超過確率を2.3%と十分安全側にとっても、気象庁の注意報・警報と比較して発令回数を大きく低減できることが確認できる。特に、注意報・警報は、下水道の排水区スケール（数km²～数10km²）では一樣に発令されるのに対し、リアルタイム浸水予測では地域が有する浸水特性に応じた、めりはりの効いた浸水リスク情報が発令できており、浸水が生じにくい地域における減災情報の信頼性が相対的に大きく向上することが伺える。

また、図-4にはリスク情報発令の基準とした2.3%の他、アンサンブル浸水予測によって得られる15.9%（1σに相当）、50%、84.1%（非超過確率1σ）、97.7%（非超過確率2σ）の各超過回数も示している。このように、アンサンブル浸水予測を行うことによって、情報の利用者

が必要とする安全度に応じたリスク情報の発令が可能となる。さらに、ハザード情報（二値情報）とあわせて予報の信頼性（確率値）を提供することで、大きな浸水リスクが生じる場合に減災行動を促す効果等も期待される。

このような、浸水予測による地域特性に応じた浸水リスク情報の発令効果を定量的に評価するため、面積あたりに加重平均した発令回数を表-4に示す。これより、浸水予測による浸水リスク情報の発令によって発令回数は、注意報の1/160、警報の1/25に大きく減少することが確認できる。現在利用している気象庁の注意報・警報は、その発令時期にばらつきがあり、見逃しも多いことを考慮すれば、リアルタイム浸水予測によって見逃しが生じることなく、出勤回数の大幅な低減や限られた人的・物的資源の重点的な配備、減災情報の信頼性向上等が実現できる効果は極めて大きく、提案手法の有用性が伺える。

なお、このような発令回数の削減効果に各自治体が減災行動に要する費用を乗じれば、浸水予測による情報提供の費用効果を定量的に評価することも可能であり、今後、リアルタイム浸水予測の導入促進が期待される。

(3) 浸水リスク情報の提供に求められる降雨予測精度

予測雨量の精度がリアルタイム浸水予測による浸水リスク情報の発令状況に及ぼす影響を確認するため、予測雨量の精度（安全率 2σ を考慮した相対誤差 E_r の範囲）別に発令回数を整理した結果を図-5、表-5に示す。

これより、予測雨量の精度向上に伴って浸水リスク情報の発令精度が向上し、その発令回数を低減できることが確認できる。今回の事例では相対誤差 E_r として40～60%程度の精度が得られれば、現在利用している注意報や警報に対して、十分に大きな発令回数の削減効果が期待できることが伺える。今後、このような検討の成果を現在、精度向上に関する検討が進められている降雨予測手法に関する研究の精度目標とし、降雨予測から減災情報の提供を通した一体的なリアルタイム浸水予測・情報提供システムの開発に資することが期待される。

4. おわりに

本研究では降雨予測と浸水評価によるリアルタイム浸水予測情報の提供を想定し、入力とする降雨予測の誤差を定量的に考慮した浸水リスク情報の発令方法を提案するとともに、実流域においてその効果検証を行った。

その結果、提案手法は浸水予測値がとりうる範囲をふまえて見逃しが生じないように安全率を見込んで発令するとした場合でも、現在、減災情報として用いている気象庁による警報や注意報と比較して、発令回数が1/25～1/160に大きく低減し、空振り回数の大幅な低減が図れることを確認した。これより、水防活動等の回数が大幅に削減できるとともに、情報の信頼性向上に伴って

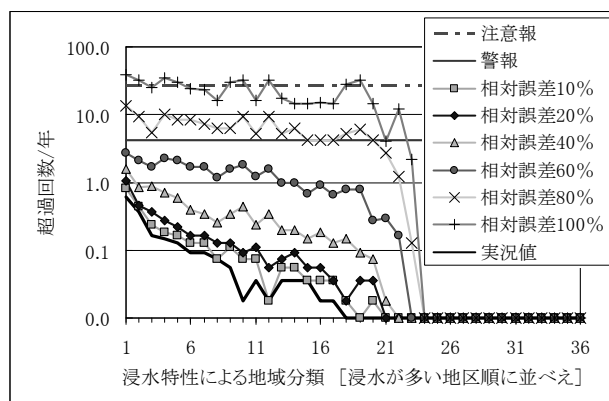


図-5 浸水リスク情報の発令状況（降雨予測精度別）

表-5 面積あたり発令状況（降雨予測精度別） 回/年/ha

実況値	気象庁		リアルタイム浸水予測（相対誤差）					
	注意報	警報	10%	20%	40%	60%	80%	100%
0.04	27.20	4.20	0.05	0.07	0.15	0.51	2.56	9.33

減災行動の実行率が向上する等の効果も期待されることから、提案手法の有用性が示唆された。

謝辞：本研究に際し、大阪市建設局下水道河川部より施設データの提供を頂いた。また、本研究は国土交通省河川技術研究開発制度（河川技術分野）の助成金を受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 木村誠，城戸由能，中北英一，都市内水域における局所集中豪雨に対応したリアルタイム浸水予測手法に関する基礎的検討，水工学論文集，第55巻，pp. 931-936，2011。
- 2) 木村誠，城戸由能，中北英一，都市内水域における局所集中豪雨に対応したリアルタイム浸水予測手法の簡素化，水工学論文集，第56巻，pp. 985-990，2012。
- 3) 木村誠，城戸由能，中北英一，都市河川内水域における短時間局地的豪雨に対応した瞬時浸水予測手法の開発，河川技術論文集，第17巻，pp. 455-460，2011。
- 4) 国土交通省河川局，リアルタイム浸水予測シミュレーションの手引き（案），2005。
- 5) 中北英一：水文観測におけるレーダー降水観測の最前線，水工学に関する夏期研修会資料，pp. A-1-1-A-1-9，2011。
- 6) Cloke, H. L., Pappenberger, F.: Ensemble flood forecasting: A review, J. of Hydrology, Vol.375, pp.613-626, 2009。
- 7) 大阪管区気象台：過去の警報・注意報，http://www.jma-net.go.jp/osaka/kikou/index_osaka.html
- 8) Kim, S., Tachikawa, Y., Sayama, T., Takara, K.: Ensemble Rainfall-runoff Prediction with Radar Image Extrapolation and Its Error Structure, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.50, pp.43-48, 2006。
- 9) 立川康人，小松良光，椎葉充晴，寶馨：移流モデルによる予測降雨場の誤差構造のモデル化と降雨場の模擬発生，土木学会論文集，No. 754/II-66，pp. 9-18，2004。

(2012. 4. 5受付)