

# 精緻な都市浸水予測手法 S-uiPS による リアルタイム浸水予測の社会実装

早稲田大学理工学術院 教授 せきね まさと 関根 正人

## 1. はじめに

地球規模で進む気候変動の影響で、気象が大きく変わってきている。その表れの一つとして、近年、日本近海の海水温がかつてに比べて高い状態にある。海水温が高いと海面から大気へ供給される水蒸気の量が大きくなる。このようにして生まれる湿った空気が、大気の流れにより前線へと運び込まれると、その直下では記録的な豪雨が発生することになる。最近、「線状降水帯」という言葉をよく耳にするようになったが、近年の水災害のほとんどがこのような豪雨により引き起こされたといってもよい。

一方、2019年9月の台風15号は、豪雨よりも風による甚大な被害を千葉県に及ぼすことになった。この台風は、日本列島に近づいても台風がその勢力を落とすことなく、むしろ発達して上陸した。これもまた、海水温が高いことに起因している。今後は、台風が日本列島からあまり離れていない海上で発生して、短時間のうちに日本列島を直撃することもあり得るであろう。自然災害に関して、かつての経験が頼りにならない時代に入ったことは間違いなさそうである。最新の科学技術を駆使して、十分な備えを進めていくことが求められている。

このような状況にある中で、2020年夏の東京オリンピック・パラリンピックを迎える。欧米先進国と比べて我が国が様々な自然災害に遭う可能性は、残念ながら最も高い。特に、夏季は、雷を伴う局地的集中豪雨の発生や台風の直撃すらあり得るし、異常高温も大いに懸念される。屋外スポーツの祭典をこうした気象条件下で実施することが、世界中から集う競技者や観戦者にとってベストな選択とは言えないのではないかと考えてきた。

今となっては、できるだけ知恵を働かせて実施するほかないわけであるが、やはり自然を甘く見てはいけないうし、自然としっかりと対峙しなければならない。そのためには、科学的根拠に裏打ちされた対処を考えるべきであろう。自然を変えることは難しいが、予見して被害をできるだけ小さくすることはできるはずである。

次章で説明する精緻な都市浸水予測システム S-uiPS (Sekine's urban inundation Prediction System, スイプス) は、東京などの都市が豪雨に襲われたときに発生する「都市浸水」を現実的に即して丁寧に予測する仕組みのことを指す。この予測の結果を社会全体でできるだけ効果的に活用することにより、浸水に伴う人的・物的被害を最小化することが可能である。

## 2. 精緻な都市浸水予測システム S-uiPS (スイプス) とは

東京などの都市は、我々（あるいは先人たち）が計画・設計し、我々の有する建設技術を駆使して創り上げてきた空間である。東京には、たとえば皇居や明治神宮・新宿御苑、さらには日比谷公園などの自然豊かな空間があるが、これらを除くとほぼすべてが人工的な空間ということが出来る。

東京を例に、その空間構造と雨水の流れを模式的にまとめた概念図を図-1に示した。地上部は、道路・街区・都市河川ならびに東京湾からなり、地表面下には、地上に降った雨水を東京湾にまで運ぶことにより陸域から排除する「雨水排除システム」ができあがっている。その中核をなすのが下水道ネットワークと都市河川である。また、都市内の移動性や利便性を高めている地下鉄や地下街といった地下空間が開発されている。

図中の街区とは道路に取り囲まれたエリアのことを指し、建ぺい率や容積率などの土地利用情報に基づき、その地表面がどれほどの建物で覆われているのかを知ることができる。街区の中の建物以外の地面についても、実はコンクリートやアスファルトで被覆されており、降雨期間中に水が地中へ浸透したり、水が蒸発して大気に戻ったりする水の体積は無視し得るほど小さい。1時間当たり・単位面積あたりに降る雨水の体積（これを「時間雨量」あるいは1時間当たりの「降雨強度」と

いう）の予報値において現れる誤差の範囲よりも遥かに小さいと考えてよい。

図-1中に示された矢印は水の流れを表しており、下水道の設計降雨強度の範囲内の強さの雨であれば黒色の矢印のような向きに流動し、最終的には東京湾に到達することになる。この設計降雨強度は、東京都23区では時間雨量50mmすなわち50mm/hである。ところが、この強さを越えた雨が降ると、雨水の流れが反転し、都市河川の水が下水道へ、下水道の水が地上へ逆流するようになる。

この状態を表したのが図-1の青色の矢印ということになる。このように雨水が設計どおりに流れない状態になると、地上が水に浸かることになってしまう。しかし、地上に降った雨水のその後の流れを丁寧に計算していくと、いつどこで浸水が発生するかがわかるのである。

流れの計算は、道路と下水道のネットワーク・街区・都市河川ならびにそれぞれの付帯施設に関する膨大な情報を、すべて現実どおりに入力して作成したデータベースを基に行われる。計算には仮定やチューニングを必要とするパラメータなどは持ち込まれておらず、運動方程式と連続式などの水理学上の原理に基づいて忠実に解くことにより、時々刻々の各地点の浸水を予測することができる。これがS-uiPSである。

東京都23区には、路地まで含めた道路が約40万本、枝管路まで含めた下水道が約60万本あるが、これらをすべて考慮している。また、都道環状七号線（環七）の下に整備された地下調節池や、ポンプ場や下水道の貯留管・雨水貯留施設などの機能もすべて現実どおりに反映されている。コンピュータ空間上に東京という都市を再現した上で、浸水予測計算を行っていることになる。

ここでは、都市域が浸水するプロセスと都市河川で洪水が発生するプロセスを同時に解いていることから、「都市浸水」と「河川洪水」との相互関係、河川からの外水氾濫、高潮が都市浸水に及ぼす影響についても一連の計算の中で評価することができる。

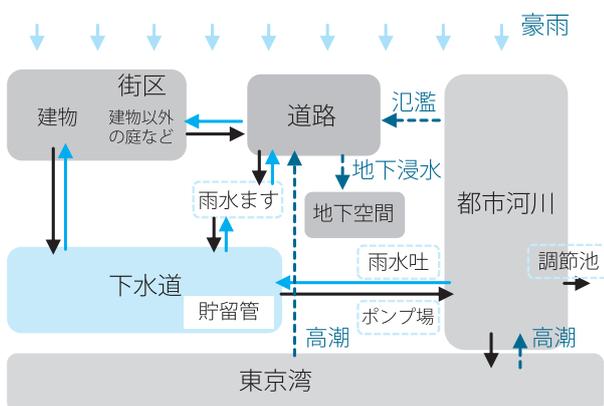


図-1 都市構造と都市浸水に到る雨水の流れの概念図

計算の予測精度については、既往の豪雨時の浸水の再現計算を通じて検討してきており、今後も検証を継続していく。ただし、現時点でもこれ以上期待できないほどの高精度であることはすでに確認されている。

### 3. リアルタイム浸水予測システム

精緻な都市浸水予測システム S-uiPS は、「2.」で説明したとおり 2017 年度には完成したが、当時、膨大な時間を要することから、リアルタイム予測を実現するには、さらにもうひとつの壁を越える必要があった。これが計算の高速化である。

ところが、この段階で文部科学省が運営するデータ統合・解析システム DIAS (Data Integration and Analysis System) のプロジェクトに採択され、東京大学教授・国立情報学研究所長の喜連川優教授のご指導と支援を受けて、リアルタイム版 S-uiPS の開発が一気に動き出すことになった。

このシステムで唯一の不確定要因は降雨データであり、国土交通省の高性能レーダ雨量計ネットワーク XRAIN (eXtended RAdar Information Network, エックスレイン) による降雨の現況値と、気象庁の高解像度降水ナウキャストによる降雨の予報データを入力値とする。このリアルタイム計算を可能とするためには、大容量のデータを高速で処理すること、浸水計算そのものを並列化し高速化すること、の二つが不可欠である。

これを可能としたのが、喜連川研究室の生駒栄司特任准教授と山本昭夫特任助教の二人であり、文部科学省が運用する DIAS のコンピュータ上で予測計算を実現することとした。気象庁によると、最新の降雨予報でも 30 分より先の予測を正確に行うには未だ課題が残されているようである。

このため、現時点では 30 分先までの降雨予報値を入力することにした。一方、現在のシステムで 30 分先までの浸水予測計算をした上でその結果を画像化するのに 10 分程の時間を要する。このことは約 20 分先までの予測結果を動画にして

お知らせできることを意味する。リードタイムとして約 20 分間の時間が確保できることになる。

### 4. リアルタイム版 S-uiPS の社会実装とその活用

リアルタイム計算は文部科学省の DIAS のコンピュータ上で行われる。また、その結果の動画は、専用のサイトにアクセスすることにより、スマートフォンやタブレットでも見ることができるようになる。公開する画像のサンプルを図-2に示した。

この画像の背景は Google map の画像であり、これと重ねるように各時刻の場所毎の浸水深がわかるように道路線分を異なる色で描き分けてある。たとえば、ある交差点における浸水深が 1 cm 以上 10 cm 未満である場合には、その交差点につながる道路を水色の帯で示してある。

さらに、浸水がより深刻な状態になるに従って、この色が水色→緑→黄→オレンジ→赤と変わっていくようにした。赤色は 0.80 m 以上の浸水となることを意味する。路地に到るまでのすべての道路を計算対象としているため、図を拡大すると交差点毎の浸水深の違いを見て取ることができる。また、視野を動かすことも容易であるため、さまざまな用途に活用することが可能である。

今後は、2020 年春まで試験運用を行い、都市インフラ施設に関するデータベースが膨大であるため、数値の誤りが紛れ込んでないことを確認する必要があるほか、予測精度のさらなる検証を行っていく予定である。その後、2020 年 7 月下旬からの東京オリンピック・パラリンピックに先立って本運用へと移行する計画である。

このシステムの開発と社会実装は、筆者を代表者とする早稲田大学・東京大学の研究グループにより進められた。具体的な取り組みには、喜連川研究室の平川晶子特任研究員と関根研究室の中山裕貴君（当時、早稲田大学大学院学生）の二人も参画し、コードの並列化や計算結果の画像化のコード開発を担当した。また、リモート・センシ



図-2 S-uiPSによる浸水情報の表示画面のサンプル

グ技術センターの関係各位の支援の下で進められた。

さて、リアルタイム浸水予測により得られた情報の活用方法について見ていくことにする。都市で最も浸水リスクが高い弱点箇所のひとつが「道路アンダーパス」であり、近年、その冠水がたびたび報じられている。アンダーパスにはその最深部にポンプが設置されているが、水の排出先が周辺に位置する下水道であることから、降雨停止後に下水道がその能力を回復するまでは、ポンプが有効に機能することはない。

なぜならば、アンダーパスの冠水は、周辺の下水道が満管状態となり本来の輸送能力を発揮できない状態に到ってから発生し、この時間帯にポンプ排出を行っても水が再びアンダーパスの入口から戻ってくることになるからである。このポンプ排水は冠水の抑止あるいは軽減には無力であり、降雨停止後に冠水を長期化させないためにこそ有効なのである。

このため、被害抑止あるいは軽減を実現する唯一の有効な方策は「事前の通行止め・迂回誘導」しかない。この判断を下す上で重要となるのは通行止めにするタイミングである。これを判断する上での科学的根拠となり得るのが、S-uiPSによるリアルタイム浸水予測による情報である。通行

止めの判断を下して実際の措置を講じるのに、約20分というリードタイムは十分であると信じる。

もうひとつの弱点箇所である「地下空間」については、地上に開けられた連絡口からの水の流入を阻止できない限り、地下浸水は避けられない。そこで、たとえば東京メトロでは、この連絡口に止水板を設置して水の流入を阻止することにし、どの程度の高さの止水板を用意しておくべきかについての情報もすでに提供していることから、準備ができているはずである。この点は、大規模地下街である新宿サブナードについても同様である。なお、これ以外の地下空間については関知していない。ところが、問題はどのタイミングにどの連絡口から順に止水板を設置していくかという判断をどうするかという点にあった。止水板の早すぎる設置は利用者の利便性を損なうばかりか避難の妨げにもなる。しかし、設置が遅れると地下空間への浸水を招き、人命に関わる甚大な被害を生むことになる。適切なタイミングを見極めるには、しっかりした科学的根拠が必要であることから、この判断にもリアルタイム浸水予測による情報が有効に活用できる。

2015年に改正された水防法には、下水道の水位データを踏まえてこの判断を行うといった趣旨の方針が記されている。これを行うには、その前

にどのマンホールの水位に注目すべきかを、S-uiPSなどで丹念に突き止めておく必要があり、この方針どおりに実行に移すのはまだまだ先の話と言わざるを得ない。

このほか、豪雨が発生している最中であっても、急病人やけが人を病院まで運ぶ必要があることに変わりはないし、火災や交通事故は平時と同様に発生する。救急車や消防・警察の車両を速やかに目的地にたどり着くようにしなければならないが、豪雨時には道路の一部が冠水し通行不能となることもあり得る。このような緊急車両の経路選択に浸水予測の情報を活用すると有効であろう。

さらに、平常時の都市部は利便性に優れることから、都市の特徴として高齢者や車いすを使うハンディキャップを抱えた方々、乳幼児を連れた両親の姿を見かけることは稀ではない。彼らも同じように街中で豪雨に遭う可能性がある。たとえば10 cm程度の浸水であれば、靴は濡れるが歩けないわけではなく、命まで失うことはないから大したことはないと考えがちである。

しかし、これは身体に問題のない年齢層にとっての判断であって、上記の方々にとってはそれほど簡単な話ではないのである。流速が数十 cmを超えることもあり得るため、全員にとってとても安全とは言えないのである。

そこで、浸水予測の情報を受け取って20分以内に、浸水のリスクの小さい一つあるいは二つ隣の道路交差点まで移動することができれば、当面の危険を回避したことになる。もし、事態が差し迫っている場合には、目の前にある建物に入って二階部分まで移動するのがよいだろう。こうした判断を自らで下すことができるはずである。もし、目の前にこのような方がいる場合には、情報を確認した人が教えてあげて、手を貸しさえすれば行政に頼らなくても安全を確保することにつながるのである。

## 5. おわりに

本稿では、S-uiPS自体の概要からリアルタイム予測情報の今後の活用についてまで駆け足で説明してきた。世界に類のないシステムができあがり、2020年春には運用が始まっているはずである。

今後は、この予測による浸水情報の存在が行政・民間会社そして住民の間に浸透し、これが広く有効に活用されるようになることを願いつつ、更なる活動を展開していく。活用方法については、社会全体で考えていただくことを期待する。新たなビジネスに発展するかもしれない提案も届いており、こうしたこともまた楽しみである。

最後に、住民にとって望ましい浸水リスク情報について触れる。これまで自治体から浸水ハザードマップが公表されている。しかし、2019年6月の鹿児島豪雨災害の際に、避難指示の情報に従って実際に行動を起こした人の比率が驚くほど低かった。

これは、ハザードマップなど事前に周知されていたリスクに関わる情報が十分にわかりやすいものではなく、情報の出し手である自治体と受け手である住民との間に認識の隔たりがあり、行政からの避難指示よりも過去からの言い伝えの方を優先して行動を起こさなかったのではないかと考えている。

静止画でのリスク情報の伝達には限界があり、重要なことは住民の信頼を得ることと、視覚的に優れ、直感的に理解できるようなリスク情報の表示方法とすることの二つが重要である。S-uiPSによる取り組みで最も大事にしてきたポイントである。