水害予測システムDioVISTAに見る降雨データの利活用

山口　悟史

大雨の発生頻度が増加傾向にあり，水害の危険性が高まっている．本稿では，水害対策にとって重要な情報である水害予測情報を生成するための，水害予測システムについて紹介する．水害予測システムは予測降雨に基づき河川水位と浸水域を算出する．著者らが開発したDioVISTAを具体例として示し，システムが出力する情報が防災担当職員などの判断支援に活用されることを述べる．予測に使用される数理モデルを紹介し，数理モデルとGISとの統合の利点について論じる．今後の課題として，避難に関する判断のより強力な支援，および内水氾濫の予測を挙げ，予測システムの今後について展望する．

キーワード：水害予測，水理水文モデル，GIS，DioVISTA

1. はじめに

「ゲリラ豪雨」という言葉に代表されるように，最近大雨が増えている，と感じている読者は多いと思う．実際に，1日中続くような大雨も，短時間でザッと降るような大雨も増えている．文部科学省ら[1]によれば，日本で1年間に観測される大雨の日数（日降雨量100 mm以上の日数）が増加傾向にある．最近30年間と20世紀初頭の30年間を比較すると日降雨量100 mm以上の日数は約1.2倍に増加した．また，短時間に強い雨が降る現象も増加傾向にある．全国のアメダスで観測された50 mm/h以上の降雨の回数は，1976～1986年の10年間平均が1,000地点あたり160回であったのに対し，1987～1997年の平均は177回，1998～2008年の平均は239回であった．

これら大雨の増加には地球温暖化が関連しており，大きな不確実性を伴うものの，水害は今後増えると考えられている．服部ら[2]は，近未来（2015～2039年）から将来（2075～2099年）にかけて日本で水害が増えることを示した．同様にHirabayashi et al.[3]は，今世紀末までの洪水の発生頻度を世界規模で調査し，多くの地域で洪水の発生頻度が増加することを示した．

しかし，大雨がいつ，どこで降るという気象情報がわかったとしても，それだけでは水害対策には不十分である[4]．水害対策には，時間ごと，地域ごとの水害情報が書かれた地図が求められる．例えば安全に避難をするためには，避難経路と避難場所の位置はもちろんのこと，浸水する時刻と水深分布の情報を素早く，わかりやすく伝える地図が必要であろう．このような地図を短時間で生成するシステムが，水害予測システムである．

図1　DioVISTA/Flood Simulatorの画面

図1に，日立パワーソリューションズが開発した水害予測システムである，DioVISTA/Flood Simulatorの画面を示す．この図では，3次元表示された地図上に浸水深が重ねて表示されている．カラーで表示した場合，堤防決壊箇所からの水の流れが赤い矢印で，浸水域が青色から黄色で示される．このシステムに降水量や堤防の決壊場所などを入力すると，物理法則に基づいて水の流れをシミュレートし，水害情報地図が作成される．さらにこのシステムをオンライン気象情報提供システムと接続すれば，予想降水量を取得し，今後数時間先に予想される水害情報地図が作成される．

本稿ではこのDioVISTAを具体例として示しつつ，水害予測を行うシステムについて述べる．2節では，水

やまぐち　さとし
（株）日立パワーソリューションズ
〒101–0046 東京都千代田区神田多町2–2

Copyright ⓒ by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

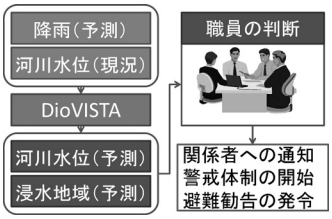

図 2　水害予測システムに関するワークフロー

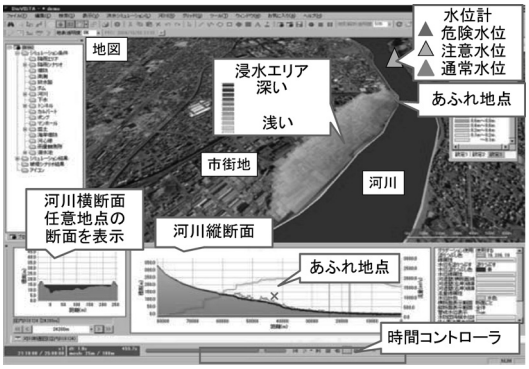

図 3　水害予測システムの動作画面例

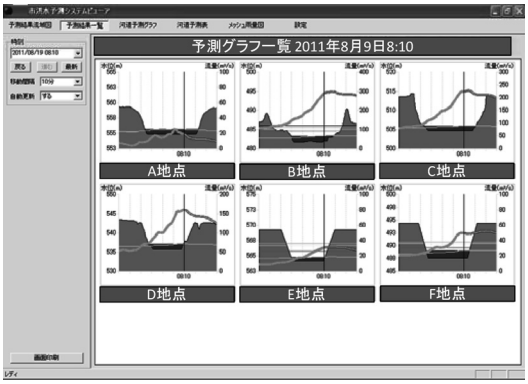

図 4　水位監視地点の予測水位一覧

害予測システムのしくみとの活用方法について画面イメージとともに紹介する．3 節では，水害予測システムの数理モデルを紹介する．4 節で数理モデルと GIS (Geographic Information System, 地理情報システム) との統合の利点について論じる．5 節で今後の課題を 2 つ挙げ，予測システムの今後について展望する．

2.　水害予測システムの構成と活用方法

大雨が降ると川が増水し，時として水害が起こる．この一連の現象をシミュレーションにより予測するのが水害予測システムである．なお，水害は大きく外水氾濫と内水氾濫の 2 つに分類できる．外水氾濫とは上流に降った雨が河川により運ばれ，その水が堤防を越えて（あるいは堤防が決壊して）下流の都市に流れ込むことにより引き起こされる．一方内水氾濫は都市に降った雨が下水や河川に排水できずにたまることにより引き起こされる．外水氾濫は古くから大規模で甚大な被害の原因となってきたため，水害予測システムは一般に外水氾濫を対象に構築されている．そこで本稿では外水氾濫を中心に述べ，内水氾濫については 5 節でふれることにする．

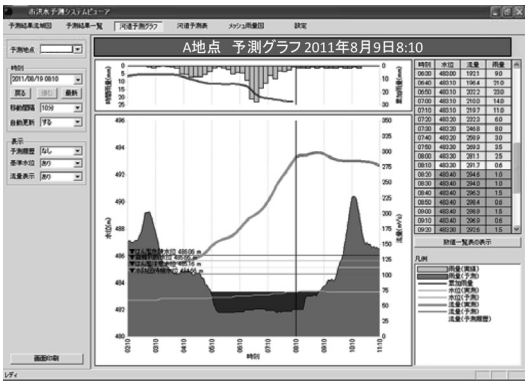

図 5　ある水位監視地点の予測水位

水害予測システムに関するワークフローを図 2 に示す．システムに数時間先までの降雨予測が入力され，河川水位や浸水域の予測値が出力される．さらに，リアルタイムの河川水位（観測値）により予測値を修正する．システムは 24 時間稼働し，ネットワークを通じ予測降雨量および現況河川水位を取得する．予測水位があらかじめ決めた高さを超えた場合，あるいは浸水が予測される場合，システムは職員の PC に通知する．職員の PC から参照できる主要な画面を図 3 に示す．カラーで表示した場合，河川が溢れる地点に地図上で赤い × 印がつく．また浸水域が地図上で青く塗られ，濃い青ほど浸水深が深いことを意味する．さらに，水位監視対象とした地点の予測水位を一覧表示すること（図 4），および特定の地点の情報を詳しく見ること（図 5）が可能である．

システムが出力した情報は，自治体の防災担当部署などの職員の判断支援に活用される．すなわち，関係者への通知，警戒体制の開始，避難勧告の発令など，いつ，どこに（だれに）何を伝えるかを判断する際の客観的指標となる．例えば，水があふれると考えられる地点に職員を配置し水防活動を展開するとともに，浸水が想定される地域には避難勧告を発令すべきと判断する．

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

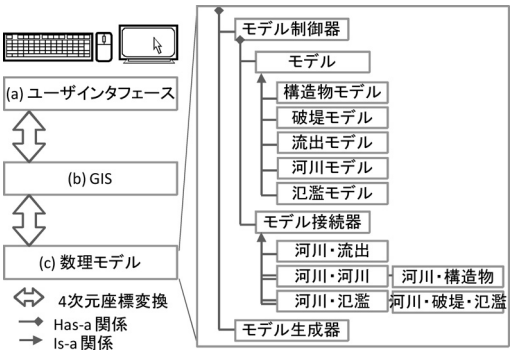

図 6　DioVISTA のソフトウェアアーキテクチャ

システムの内部構成を図 6 に示す．大きくユーザインタフェース，GIS，および数理モデルの 3 つの部品から構成される．このように，数理モデルと GIS とが統合されているため，ユーザは地図を扱う感覚で予測やシミュレーションを操作できる．次の章で数理モデルについて紹介し，4 節で数理モデルと GIS との統合について論じる．

3.　数理モデル

水害は，数多くの要素現象と，それらの相互作用からなる複雑な現象である．河川は数多くの河川と合流し，しばしば分流する．河川の流れはダム，遊水地，堰（せき）など洪水制御のための設備により人工的に制御される．したがって，洪水をシミュレートするためには，数多くの要素現象を数値モデルにより表現する必要がある．さらに，要素現象間の相互作用を表現するため，複数の数値モデルを結合させる必要がある．

水害を構成する代表的な要素現象と，それらの数理モデルとを図 7 に示す．主な数理モデルに，流出モデル，河川モデル，氾濫モデルがある．これらは現実を精緻に表現できるよう，空間を小さなセルに分割し，セルごとに流れを算出するモデルを採用した．また，計算負荷を抑えるため，次章に示す実装上の工夫を加えている．

流出モデルは降雨が河川まで流出する過程を表現する．流出モデルでは，水の流れる方向は斜面の勾配方向と一致すると仮定する．この水の流れる方向を連ねた線を落水線（らくすいせん）と呼ぶ．図 8 に，DioVISTA により求めた落水線を示す．多くの場合，50 m から 250 m 四方に 1 本，落水線を作成する必要がある．したがって，河川の上流域に膨大な数の落水線が作成される．この 1 本ごとにセルを作り，それぞれのセルについて傾斜と植生状態を考慮し，土壌中の飽和水分

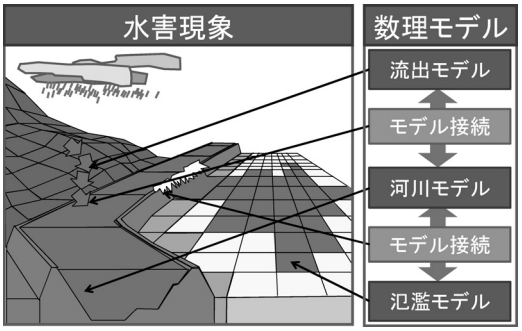

図 7　水害を構成する要素現象と数理モデル

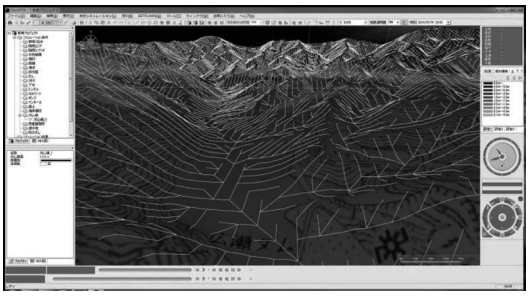

図 8　流出現象の数理モデル化の例（落水線）

量を算出する．流出モデルの方程式 [5] を次に示す．単位幅流量 q と水深 h との関係は，

$$q(h) = \begin{cases} v_m d_m \left(\dfrac{h}{d_m}\right)^{\beta}, & 0 \le h \le d_m \\ v_m d_m + v_a (h - d_m), & d_m \le h \le d_a \\ v_m d_m + v_a (h - d_m) + a(h - d_a)^m, & d_a \le h \end{cases} \quad (1)$$

と表すことができる．ただし，

v_m，d_m：不飽和層流れの流速および層厚（マトリックス部最大水分量を水深で表したパラメータ）

v_a，d_a：飽和層流れの流速および層厚（土層厚に有効間隙率を乗じた実質の土層厚）

β：不飽和層の飽和透水係数に対する飽和層の飽和透水係数の比，$a = \sqrt{i}/n_{slope}$

i：地表面勾配

n_{slope}：地表面等価粗度

m：定数

である．この式と連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (2)$$

とを組み合わせて差分解法により雨水を追跡する．ただし，

γ：降雨強度

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

である．

河川モデルでは，河川内の流れを表現する．その際，河川の勾配，横断形状，材質および植生状態を考慮する．河道モデルとして 1 次元不定流により流れを表現するモデルを使用した．このモデルは上流から下流に向けて直列にセルを並べ，それぞれのセルにおける流れを水深と流速という 2 種類の物理量で表現する．1 次元不定流を表す式を以下に示す．

$$\frac{\partial A}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial t}=q \tag{3}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t}+\frac{\partial\left(\frac{Q}{A}\right)}{\partial x}=-gA\frac{\partial H}{\partial x}-g\frac{n^2\bar{Q}|\bar{Q}|}{R^{4/3}A} \tag{4}$$

ただし，

A：断面積

Q：流量

H：水位

g：重力加速度

n：マニングの粗度係数 (Manning's roughness coefficient)

R：径深

q：単位幅あたりの河岸からの流量（流入が正）

である．なお，マニングの粗度係数とは面の粗さを示す量であり，水路や河川，径の大きな鉄管やコンクリート管における流れに働く摩擦を算出するために広く用いられている．

氾濫モデルでは，河川からあふれた水を表現する．その際，土地の勾配および土地利用状態を考慮する．氾濫モデルとして 2 次元不定流により流れを表現するモデルを使用した．このモデルは空間に矩形のセルを敷き詰め，それぞれのセルにおける流れを水深と流速という 2 種類の物理量で表現する．2 次元不定流を表す式を以下に示す．

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial M}{\partial t}+\frac{\partial N}{\partial y}=q \tag{5}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t}=-gh\frac{\partial H}{\partial x}-\frac{gn^2}{h^{4/3}}M\sqrt{u^2+v^2} \tag{6}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t}=-gh\frac{\partial H}{\partial y}-\frac{gn^2}{h^{4/3}}N\sqrt{u^2+v^2} \tag{7}$$

ただし，

h：水深

H：水位

M, N：それぞれ x, y 方向の流量フラックス（鉛直断面積あたりの流量）

u, v：それぞれ x, y 方向の流速

g：重力加速度

n：マニングの粗度係数

q：単位幅あたりの河岸からの流量（流入が正）

である．

数理モデルにおいては，これらの方程式を離散化し，時間ステップ Δt ごとに解くことを繰り返すことで，各時刻における流れを定量的に算出する．

4. 数理モデルと GIS との統合

数理モデルと GIS とを統合するメリットのうち，ユーザの利便性向上は明らかであろう．すでに DioVISTA の動作画面として示したとおり，シミュレーション条件およびシミュレーション結果を地図の上で把握できる．この明らかなメリットに加え，ここでは計算高速化について述べたい．

水害予測システムは，限られた時間でシミュレーションを完了させる必要がある．水害予測システムの計算時間の多くは氾濫モデルで費やされるため，氾濫モデルの高速化が強く求められる．

DioVISTA は数理モデルと GIS とを統合させることで，氾濫モデルを当社比で約 12 から 17 倍高速化することに成功している．この手法を著者らは Dynamic Domain Defining Method (Dynamic DDM) と呼んでいる [6]．Dynamic DDM の着眼点は，浸水しない領域は計算する必要がない，というきわめてシンプルなものである．実際に Dynamic DDM では，計算する領域を水の流れに合わせて動的に拡大，縮小させている．また，計算する領域を拡大する際，必要なデータは GIS から動的にロードしている．

ただし，Dynamic DDM で新たに必要となる処理（計算する領域を拡大，縮小させる処理，およびデータを GIS からロードする処理）の計算負荷は無視できない．Dynamic DDM では，これらの処理の発生回数が少なくなり全体として処理が高速化するよう，いくつかのセルをまとめた「部分領域」単位に拡大，縮小をする．この部分領域をどの程度のサイズにするかが実装上の重要なカギとなる．Dynmic DDM による計算領域を図 9 に示す．実際に浸水した領域の周辺のみにセルが展開されていることがわかる．

Dynamic DDM ではない，従来の手法による計算領域を図 10 に示す．従来手法では，シミュレーション前にあらかじめシミュレーションの対象領域を決定する必要がある．この対象領域が浸水する領域に比べ広い場合，対象領域に浸水しない領域が多く含まれるため無駄な処理が多い．無駄を減らすためには，浸水領域

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

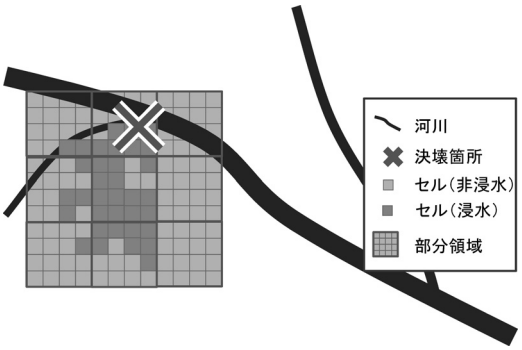

図 9　Dynamic DDM による計算領域

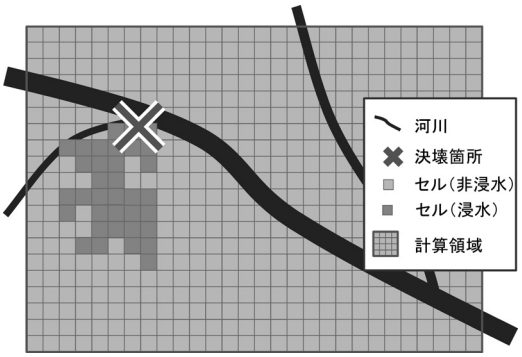

図 10　従来の計算手法による計算領域

をあらかじめ把握しておき，浸水領域と同じ領域を対象領域に設定すればよい．ただし一般に，シミュレートする前に浸水する領域がわかっているのであればシミュレートする必要がない．多様なシナリオに対応するために，従来手法では河川に沿った広大な領域を対象領域にせざるをえない．

数理モデルと地理情報システム (GIS) との統合により，新しい計算高速化手法 Dynamic DDM が導入でき，現実的な時間で予測を完了させることができるようになったといえる．

5.　まとめ

本稿では水害予測システムとして DioVISTA/Flood Simulator を例に挙げ，その概要を次の 4 つの観点から述べた．

1. 水害予測システムのしくみ: 水害予測システムは，河川水位と浸水域をシミュレーションにより予測する．システムに数時間先までの降雨予測が入力されると，河川水位や浸水域の予測値が出力される．
2. 水害予測システムの活用方法: システムが出力した情報は，防災担当職員などの判断支援に活用される．関係者への通知，警戒体制の開始，避難勧告の発令など，いつ，どこに（だれに）何を伝えるかを判断する際の客観的指標となる．
3. 水害予測システムの数理モデル: 水害予測システムは，流出モデル，河川モデル，氾濫モデルなどの複数の数理モデルを組み合わせた複雑な構成をとる．
4. 数理モデルと GIS との統合: 数理モデルと地理情報システム (GIS) とを統合することで，使いやすさが大幅に向上するだけでなく，計算高速化に寄与する．

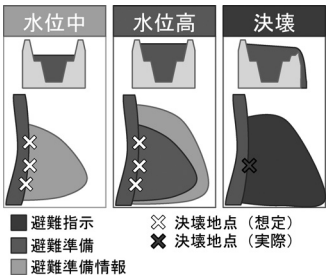

図 11　避難判断支援の強化の概念

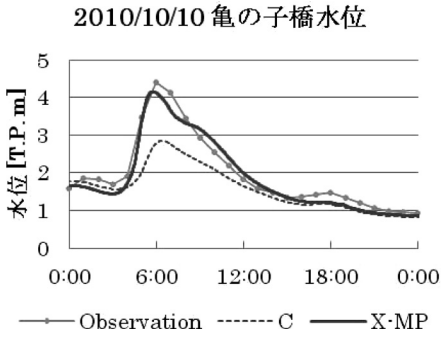

図 12　亀の子橋における水位時系列
（C: C バンドレーダ降雨データによる計算水位，X-MP: XRAIN 降雨データによる計算水位）

水害予測システムの今後の課題として，2 つの点を挙げたい．

1. 避難に関する判断のより強力な支援: 自治体から発令される避難勧告の対象地域が広すぎると，本当に危険が切迫している地域に避難の必要性が伝わりにくくなる．危険が高まっていることをわかりやすく伝えるために，よりきめ細やかな情報が求められていると著者らは考えている．図 11 にその概念を示す．避難対象の地域が河川から市街地に向かって，河川水位に応じて段階的に広がっていくイメージである．この実現のためには，もっ

Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.

とも起りそうなシナリオに基づく浸水域の予測に加え，確率は低いものの深刻な被害を起こすシナリオまで考慮することが必要である．

2. 内水氾濫の予測：「ゲリラ豪雨」による内水氾濫を予測し被害軽減に活用することが求められている．内水氾濫の再現には，水害を細かい空間スケールで再現できる降雨データおよび数理モデルが必要である．降雨データについては，新しい高精度降雨観測システムの登場により大きく進歩することが期待できる．国土交通省は新型のレーダ雨量計 XRAIN を 2010 年 7 月より試験運用中である．このレーダは既存の C バンドレーダに比べ時空間解像度が高く，局地的大雨をより詳細にとらえることが可能である．この降雨データにより水害シミュレーションの精度が向上する事例が確認されている [7]（図 12）．今後，水路や下水など，網目状に張り巡らされた多数の人工排水施設を適切に評価する手法の開発により，内水氾濫の予測が可能になると期待される．

水害は今後，地球温暖化により深刻化すると言われている．水害は社会の多くの分野に関連し，また解決までに多くの資金と長い年月がかかる課題である．解決に向けた対策を推進するためには，幅広い分野の方々が水害への対策を理解し行動するための，わかりやすく正確な水害情報が求められている．著者らは水害シミュレーションソフトウェア DioVISTA の開発を通じ，水害の解決に貢献したいと考えている．著者らは今後も，幅広い分野の方々の協力をいただきながら研究開発を進めていく所存である．

謝辞　図 1 および図 7 の作成にあたっては，国土地理院長の承認を得て，同院発行の数値地図 25000（地図画像），数値地図 2500（空間データ基盤），数値地図 50 m メッシュ（標高）および数値地図 5 m メッシュ（標高）を使用した（承認番号平 17 総使，第 635 号）．図 11 に示す X バンド MP レーダの観測データは，国土交通省により設立された「X バンド MP レーダに関する技術開発コンソーシアム」よりご提供いただいた．

参考文献

[1] 文部科学省，気象庁，環境省，温暖化の観測・予測及び影響評価統合レポート「日本の気候変動とその影響」，2009.
[2] 服部敦，板垣修，土屋修一，加藤拓磨，藤田光一，「気候変化の治水施策への影響に関する全国マクロ評価」，河川技術論文集，**18**, 481–486, 2012.
[3] Y. Hirabayashi, R. Mahendran, S. Koirala, L. Konoshima, D. Yamazaki, S. Watanabe, H. Kim and S. Kanae, Global flood risk under climate change, Nature Climate Change, doi:10.1038/NCLIMATE1911, 2013.
[4] 冨山芳幸，「気象リスクの定量的マネジメント」，オペレーションズ・リサーチ，**49**, 282–287, 2004.
[5] 立川康人，永谷言，寶馨，「飽和不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発」，水工学論文集，**48**, 7–12, 2004.
[6] 山口悟史，岩村 一昭，「Dynamic DDM による氾濫シミュレーションの高速化」，数理モデル化と応用，**48** (SIG 6 (TOM 17)), 92–103, 2007.
[7] 山口悟史，菅恒，蛇島伸吾，池田務，後藤祐輔，櫻井康博，「X バンド MP レーダによる洪水再現精度向上効果」，第 66 回年次学術講演会概要集，土木学会，**66** (II-180), 359–360, 2011.

 Copyright © by ORSJ. Unauthorized reproduction of this article is prohibited.