

三次元地図を用いた 高速水害シミュレーションシステム

Fast Flood Disaster Simulation System Using Three-Dimensional Map

山口 悟史 Satoshi Yamaguchi 岩村 一昭 Kazuaki Iwamura 直野 健 Ken Naono 高山 恒一 Koichi Takayama

日立製作所は、三次元地図を用いた水害シミュレーションシステムを実現する技術を開発した。水害シミュレーションシステムは、GIS（地理情報システム）と氾濫シミュレータから構成される。このシステムは、立体情報や時間情報を管理できるGISを利用し、高速にシミュレーションを行う手法Dynamic DDMなどの技術により、水没した市街地の景観表示ができ、氾濫流の高速かつ高精度なシミュレーションが可能であることから、自治体における緊急時の防災業務、企業の水害リスク診断、災害報道など幅広い分野への活用が期待できる。

1 はじめに

近年、集中豪雨や台風などによる水害が世界各地で増加している。堤防やダムなど高度な土木設備が整備された日本においても、かつてない降雨によって甚大な水害が発生しており、多くの人命も失われている^{1),2)}。

人的被害を軽減するためには、緊急時に適切に判断を行い、適切に行動することが重要である。例えば、避難のためには、現在地が、いつ、どの程度危険になるかを判断し、現在地にとどまるべきでないと判断した場合は、

より安全な地点とその地点までの経路を判断する必要がある。いつ、どこが、どの高さまで浸水するかが記載された地図があれば、これらの判断を適切に行えると考えられる。

緊急時の適切な判断・行動を支援することを目指し、降水量や堤防の決壊場所など想定される条件を入力すると、浸水状態を推定して地図を作成する水害シミュレーションシステムが開発されている^{3),4)}。水害を引き起こす水の流れは、流体方程式を用いて推定される。水害シミュレーションシステムでは、流体方程式によって得られた計算結果から、浸水域や浸水深を推定し、地図に出力する。

すでに、大規模河川の管理業務を行う行政機関、および中小河川の管理や住民への避難勧告を行う自治体から、このようなシステムへのニーズが高まりつつある。さらに、水害による一般企業の事業リスクが高まっていることから、リスクコンサルティングにシミュレーションを活用する試みもなされている⁵⁾。

ここでは、日立製作所の水害シミュレーションシステムの構成と新開発したDynamic DDM技術、システムの利用方法、および今後の展望について述べる。



山口 悟史
2003年日立製作所入社、中央研究所 知能システム研究部 所属
現在、水害シミュレーションシステムの開発に従事
土木学会会員
ysatoshi@crl.hitachi.co.jp



岩村 一昭
1983年日立製作所入社、中央研究所 知能システム研究部 所属
現在、ジオマティクスの開発に従事
電子情報通信学会会員、日本シミュレーション学会会員
iwamura@crl.hitachi.co.jp



直野 健
1994年日立製作所入社、中央研究所 プラットフォームシステム研究部 所属
現在、アプリケーションアーキテクチャの開発に従事
情報処理学会会員、日本応用数理学会会員
naono@crl.hitachi.co.jp



高山 恒一
1995年日立製作所入社、中央研究所 プラットフォームシステム研究部 所属
現在、並列計算機用シミュレーションソフトの開発に従事
日本物理学会会員
ktakayam@crl.hitachi.co.jp

2 水害シミュレーションシステム

2.1 システム構成

水害シミュレーションシステムのシステム構成を図1に示す。このシステムは、堤防決壊個所など想定される条件をユーザーが入力すると、その後の浸水域や浸水深など緊急時の判断材料となる情報をユーザーに提供する。システムはGIS (Geographic Information System: 地理情報システム) と汎(はん)濫シミュレータから構成する。GISは地図など位置や空間に関する情報を管理し、汎濫シミュレータは、流体方程式を解くことにより時々刻々の水の流れを算出する。GISは汎濫シミュレータとユーザーとの間で、データをやりとりする役割を果たし、ユーザーが入力した条件や、地形および降雨量などのデータを汎濫シミュレータで用いる計算条件に変換する。また、汎濫シミュレータの計算結果が判断材料となるように、浸水域や浸水深を地図の上に重ねて表示する。このシステムにより、ユーザーはシミュレータの仕組みを意識することなく判断材料を得ることができる。

日立製作所は、GISと汎濫シミュレータの両方に特徴的な技術を有しており、判断がしやすい情報提示が行え、かつ高速に浸水域や浸水深を算出する水害シミュレーションシステムを開発した⁶⁾。現在、リアルタイム観測情

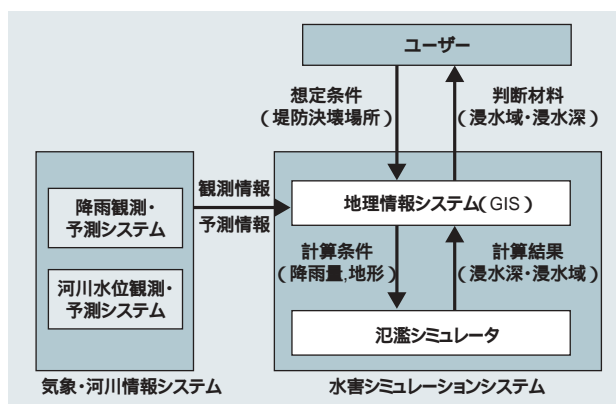


図1 水害シミュレーションシステムの構成例
ユーザーに正確な判断材料を提供することができる水害シミュレーションシステムの構成例を示す。

報や予測情報を活用して数時間後の浸水域を予測するシステムを目指し、水害シミュレーションシステムを気象・河川情報システムと接続する方法について、財団法人日本気象協会と共同研究を行っており、その成果は株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービスによって2006年度に製品化される予定である。

シミュレーションで高い精度を実現するためには、高精度な地形データが不可欠である。近年、新しい地形測量方法により、高精度な地形データが整備されつつあり、将来的には高精度な水害シミュレーションが全国主要都市で可能になると期待できる。

2.2 特長技術

(1) Dynamic DDM

緊急時の判断は、適切なタイミングで確かな情報が得られることが重要である。そのため、水害シミュレーションシステムではユーザーが条件を入力してから数分以内に高精度なシミュレーション結果が得られることが望ましい。過去の研究から、シミュレーションで利用する地形を50 m程度のメッシュで表現すると実用的な精度が出るということが知られている⁷⁾。ところが、一般的に、シミュレーションでは精度を向上させると計算量が増加する。水害シミュレーションシステムでは、数分で結果が出力されるよう地形が250 m程度のメッシュで表現されていることが多い。その場合、単純に地形を250 mから50 mのメッシュで表現するとシミュレーションに数時間を要するようになると思われる。

日立製作所は、50 m程度のメッシュであっても数分で計算を完了させる計算手法Dynamic DDMを開発した⁸⁾。Dynamic DDMは、汎濫シミュレータの計算対象とする地域を限定することにより、計算量を削減し、高速化を図る計算手法である。

従来の計算手法と、Dynamic DDMの計算ステップを示す模式図を図2、図3にそれぞれ示す。従来の計算手法では、まず計算開始前に計算対象とする領域を決定する

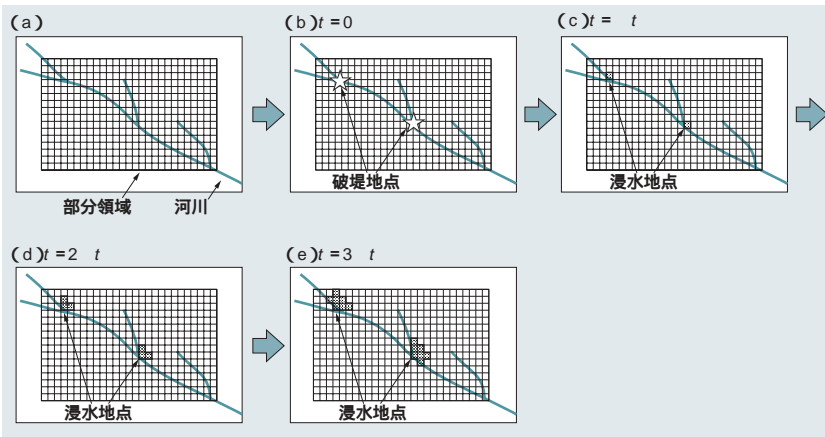


図2 従来手法の各ステップにおける状態
 (a)は対象領域へ計算メッシュを配置した状態、(b)は破堤条件を入力した状態、そして(c)(d)(e)はシミュレーション開始からの経過時刻がそれぞれ $t = \Delta t$, $t = 2\Delta t$, $t = 3\Delta t$ の状態を示す。

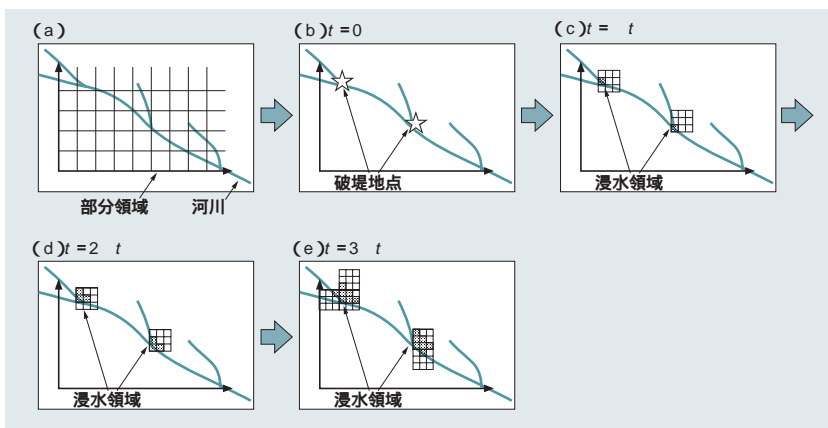


図3 Dynamic DDMの各ステップにおける状態
 (a)~(e)は、図2の(a)~(e)とそれぞれ同じ状態を表している。

調整する必要がある。Dynamic DDMではこの制約を逆に利用し、現在の氾濫流の先端部の1メッシュ外側までに計算を限定することにより、浸水領域に合わせて計算領域が動的に拡大・縮小し、計算量を削減して高速化を図った。

Dynamic DDMの計算ステップを図3に示す。Dynamic DDMでは、計算開始前に氾濫シミュレータの計算領域を決定しない〔図3(a)参照〕。想定される堤防決壊地点を入力する〔図3(b)参照〕と、その領域に限定して流体方程式を解く。計算開始から Δt 秒経過した状態を図3(c)に示す。時々刻々の水の状態を算出する処理を繰り返すうちに、計算領域から外側に水が流出する〔図3(d)参照〕可能性がある。この場合、流出する方向を予測し、その方向に新しく計算領域を追加する〔図3(e)参照〕。逆に、水がない領域が現在の計算領域内に生じた場合、その領域を計算領域から削除する。実験では、Dynamic DDMを利用することで従来比12~17倍の高速化が図れ

〔図2(a)参照〕。次に、想定される堤防決壊地点を入力し〔図2(b)参照〕、流体方程式を解き、計算領域における時々刻々の水の状態を算出する。計算開始から Δt 秒経過した状態を図2(c)に示す。この状態を流体方程式に再度入力すると、入力した状態よりもわずかに時間が経過した状態が得られる〔図2(d)参照〕。このような計算を繰り返すことで、時間の経過とともに、浸水領域が周囲に拡大する様子が再現できる〔図2(e)参照〕。

シミュレーションでは、一回の繰り返し計算で氾濫流の先端部が2メッシュ以上進まないように時間の間隔を

ることが確認された。例えば、計算格子サイズが50 m、最終的な浸水域の面積17.7 km²の場合、10時間分のシミュレーションを通常のPCを用いて53秒で計算を完了することができた。

(2) 四次元GIS

GISは紙の地図を電子的に表現することを目標に発展してきたシステムであるため、データが平面(二次元)であることを前提にしている。これに対し、日立製作所は、実世界を電子的に表現することを目標に、立体(三

次元)や時間(四次元)の空間データを扱う技術を開発してきた⁹⁾。四次元GISは表現次元を拡張し、図面や図形を变化の差分で管理する。これによって時系列データをコンパクトに管理できる。さらに、空間データを位置と時間という四次元座標で統合管理することにより、時間変化するシミュレーション結果や、家屋の立体形状などの多種類のデータを統合した表示や解析ができる。

四次元GISの表示例を図4、図5に示す。市街地の景観に近い表示を行った例が図4である。家屋の形状データ、現地で撮影したスナップ写真、氾濫シミュレータの計算結果を重ね合わせて表示している。氾濫シミュレータで計算された時々刻々の水面の高さがアニメーション表示される。推定される浸水被害を家屋ごとに表示した例が図5である。氾濫シミュレータで計算された水面の高さを建物の床の高さと比較することで、床上、床下、無被害の3段階で被害を推定した。

このように多様なデータを利用することで、判断に適した情報を提示することが可能と考えられる。この効果の検証について次に述べる。

2.3 判断材料としての評価

被害軽減の判断のためには、想定される被害の具体的なイメージを持つことが重要である。まず、「実世界に近い景観表示は被害を具体的に想像させる効果を持つ」との仮説を立て、ユーザーテストにより、その仮説を検証した¹⁰⁾。20歳代から40歳代の社会人21名に、図4および図5に示した景観表示と、自治体が実際に作成した洪水ハザードマップとを提示し、「被害状況が具体的に想像できた」という項目について「スコア1：まったくそう思わない」、「スコア2：そう思わない」、「スコア3：どちらともいえない」、「スコア4：そう思う」、「スコア5：強くそう思う」の5段階で評価させた。なお、テストで用いた洪水ハザードマップは、想定される水害の情報をまとめた紙の地図であり、地域が想定浸水深別に色分け表示されている。

この評価の結果を図6に示す。従来方式はスコア5の回答が0名であるのに対し、景観表示方式はスコア5の回答が過半数の11名であった。この結果から、景観表示は被害を具体的に想像させる効果が高いことが示唆される。景観表示は、被害軽減のための方法を検討する有効な判断材料となると考えられる。



図4 四次元GISによる景観表示の例

景観表示は、実世界に近い被害を具体的に想像させる効果を持っていると考えられる。

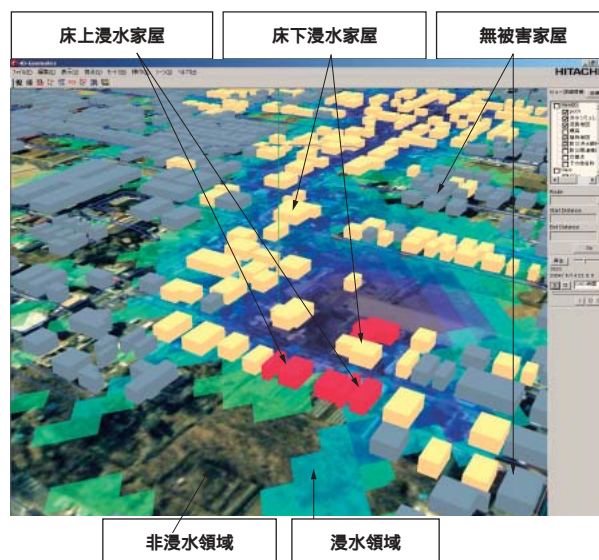
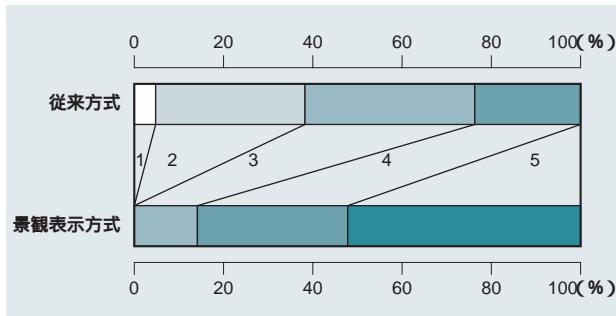


図5 家屋ごとに浸水被害を推定した例

赤色は床上浸水している家屋、黄色は床下浸水している家屋、灰色は被害がない家屋を表している。



注：1まったくそう思わない 2そう思わない 3どちらともいえない
4そう思う 5強く思う

図6 従来の方式と景観表示方式との評価結果
「被害状況が具体的に想像できた」について、五つの選択肢で評価を行った結果を示す。

3 システムの利用方法

水害シミュレーションシステムの主な利用方法は以下のとおりである。

3.1 自治体の緊急時の防災業務支援

自治体は住民へ避難勧告を行う役割を負うため、緊急時にはその時点で最適と考えられる判断を迅速に行うことが重要である。このシステムは、ある時点で想定される浸水域を地図に重ねて表示する。例えば、ある個所において堤防が決壊する危険が高まった場合、想定される決壊地点と決壊規模をシステムに入力すると、想定される浸水域が数分後に地図に表示されることから、この情報があれば、避難勧告発令の対象とする地域を迅速に判断できると考えられる。

3.2 企業のリスク軽減支援

企業が自社のリスク軽減策を検討するためには、自社に潜在するリスクを認識することが重要である。例えば、工場における水害リスク軽減策を検討する際に、リスクの明確なイメージが工場の従業員や管理者同士で共有できていれば、従業員自らの避難方法や資産の待避方法などを具体的に議論できると考えられ、最終的に企業の事業復旧までにかかる時間を短縮できることが期待できる。

このシステムは、工場など企業の施設が被り得る水害の時々刻々の景観をアニメーションで提示できるため、潜在リスクを認識するうえで効果があると考えられる。

日立製作所は、ニッセイ同和損害保険株式会社および同社の関連会社であるフェニックスリスク総合研究株式会社と共同で、このシステムを企業のリスク診断に適用する可能性を検討してきた。その成果により、2005年11月から「水災リスク診断サービス」がニッセイ同和損害保険株式会社で開始された。このサービスは、効果的な水害対策構築の支援、事業継続マネジメント（BCM：Business Continuity Management）のサポートを目指すものである。このサービスを試行的に提供した企業からは、高い評価を得ている。

3.3 災害報道

災害報道においては、災害の全体像を短時間でわかりやすく伝えることが重要である。このシステムは、過去のある時点で得られた情報から被災地の現状を推定することが可能であり、決壊後、時々刻々拡大する浸水域が表示できる。これによって被災地全体を俯瞰（ふかん）し、災害の開始から終息までを説明する動画も作成できる（図7参照）。

4 おわりに

ここでは、水害の被害軽減に活用できる情報システム「水害シミュレーションシステム」を実現する技術とその利用方法について述べた。

水害シミュレーションシステムのユーザーはシミュレータの仕組みを意識することなく、浸水域や浸水深の情報を得ることができる。このシミュレーションは、計算手法Dynamic DDMによって氾濫シミュレータを高速化したことにより、実用的な精度が出るとされる50 m程度のメッシュで地形を表現した場合でも数分で完了する。また、四次元GISによって多種類のデータを統合した表

参考文献など

- 1) 水害レポート2004, 社団法人日本河川協会 (2004)
- 2) 水害レポート2005, 社団法人日本河川協会 (2005)
- 3) 栗城, 外: ハザード・シミュレータの水防・避難活動への活用, 土木技術資料, Vol. 37, No. 11, pp. 26-31 (1995)
- 4) 金澤, 外: 動く洪水ハザードマップの操作と運用, 平成17年度河川情報シンポジウム講演集, 財団法人河川情報センター (2005)
- 5) ニッセイ同和損保: 「3D洪水シミュレーション技術」を活用した「水災リスク診断サービス」を開始, ニュースリリース, http://www.nissaydowa.co.jp/download/0511_05.pdf
- 6) 日立製作所中央研究所: 3次元の地図上で堤防の決壊や河川の氾濫による洪水の

- 様子を可視化, ニュースリリース, <http://www.hitachi.co.jp/media/New/news/month/2005/08/0822.html>
- 7) 山本一浩: レーザ計測データ利用による氾濫解析手法の提案, 平成17年度管内技術研究発表会, 国土交通省近畿地方整備局 (2005)
- 8) 山口, 外: Dynamic Domain Decomposition Methodによる氾濫シミュレーションの高速化, 土木学会論文集, 投稿中
- 9) 電気学会・空間情報統合化技術調査専門委員会編: GISの基礎と応用, 15章 4次元地理情報システム, オーム社 (2001)
- 10) 山口, 外: 水害危険情報のわかりやすい提示を目的とした浸水シミュレータの開発, 水工学論文集, Vol. 49, pp. 421-426 (2005)

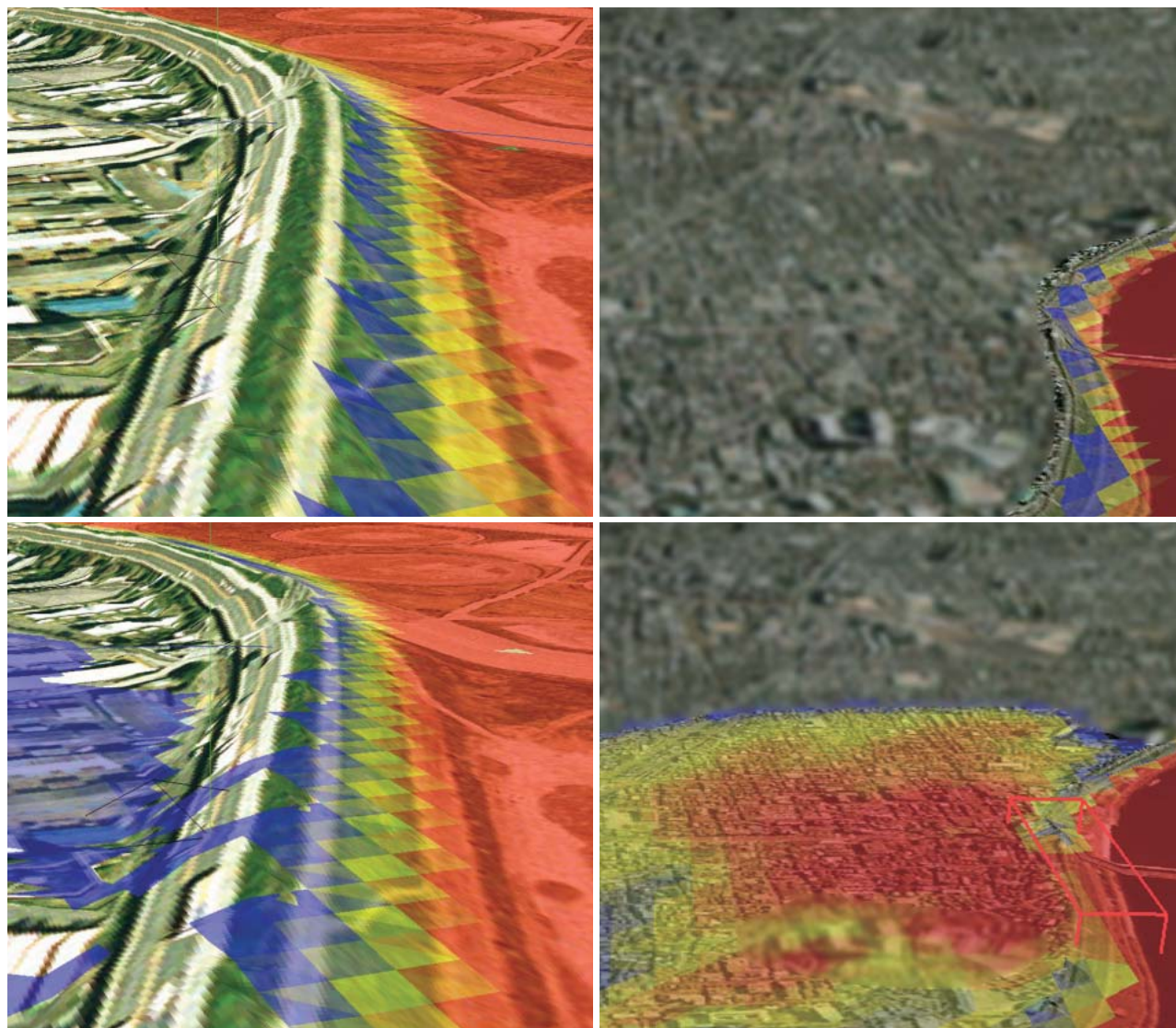


図7 被災地全体を表示する画像の例

河川水位が堤防の高さを超え、河川から水があふれる過程（左上、左下）、および堤防決壊後に市街地が浸水していく過程（右上、右下）を可視化した画像を示す。この画像は、三次元地形モデルに、浸水深に応じた色（青色：15 cm, 黄色：1 m, 赤色：2 m以上）を合成して作成している。

示や解析ができることで、判断に適した情報提示方法と考えられる景観表示が可能であることから、自治体における緊急時の防災業務や、企業の水害リスク診断、災害報道など幅広い分野への活用が期待できる。

水害シミュレーションシステムを確かな判断支援システムとして活用するためには、出力の精度検証が必要で

ある。現在、実際の水害事例と氾濫シミュレーションの精度検証は、研究によってそれぞれ評価方法が異なることが多いが、今後は精度の評価方法の基準を作成することが必要になると考えられる。日立製作所は、さらに人工構造物が複雑に入り組んだ都市域における水害の研究を継続していく所存である。