

Dynamic DDMによる氾濫シミュレーションの高速化

山口 悟史[†] 岩村 一 昭[†]

氾濫シミュレーションにかかる処理量を低減する計算手法 Dynamic DDM を提案し、その有効性を検証した。Dynamic DDM は、シミュレーション実行中に計算する領域を水の流れに合わせて動的に拡大、縮小させる手法である。実利用を想定した実験では、従来手法の約 1/15 の処理量で水害をシミュレートできた。Dynamic DDM は処理量を低減することが明らかになった。提案手法を用い、さらに GIS を用いることで、地球の任意の地点で氾濫シミュレーションが可能なソフトウェアが実現できた。今後結果の検証結果が蓄積されることにより、このような広域を対象とするシミュレーションシステムが実用されていくと考えられる。

Fast Flood Simulation Method using Dynamic DDM

SATOSHI YAMAGUCHI [†] and KAZUAKI IWAMURA [†]

We propose Dynamic Domain Defining Method (Dynamic DDM) to simulate flood event caused by levee failure and evaluate its effect on calculation speed. The proposed calculation method iterate the flowing steps per time step: 1) discriminate regions which can be flooded at next time step, 2) solve shallow water equations at the regions. A flood simulation with the method takes 3 minutes for 10-hour flood event using 50 m square grids on a laptop personal computer. The calculation speed is 15 times faster than that without the method. Through the result, proposed method would enable us to apply flood simulation to activities which needs result in very limited time. Thus, flood simulation software using the method would enable us to forecast flooded area or water depth for flood disaster mitigation activities.

1. はじめに

近年、集中豪雨や台風などによる水害が頻発し、効果的な被害軽減策が求められている。被害軽減のために、起こりうる水害をあらかじめ把握するための「氾濫シミュレーションシステム」が提案されている^{1),2)}。このシステムに堤防が決壊する地点などを入力すると、氾濫流を高速にシミュレートし浸水領域や水深分布が出力される。実際に、このシステムを用いて水害による損害リスクを総合的に診断するサービスが開始されている³⁾。また、たとえば堤防がある地点で決壊しそうな時に、実際に決壊した場合に避難が必要な地域を推定するために活用できると考えられ、河川管理者や市町村から高い関心が寄せられている。

氾濫シミュレーションシステムは内部にシミュレータを持ち、これに堤防決壊の発生する地点やそこからの流入量を記載した決壊シナリオを与えて浸水域や水深を推定する。システムのユーザにとっては、任意

の決壊シナリオについて精度が高いシミュレーション結果が得られることが望ましい。そのためにはシミュレーションの対象とする領域を広くし、かつ格子サイズを細くすればよい。しかし現実に行うと処理量が莫大になる。

本発表では、氾濫シミュレーションシステムにおいて、広大な領域をシミュレーションの対象とし、かつ細かい格子サイズを用いた場合の処理量を低減することを課題とする。その解決策として、Dynamic Domain Defining Method (Dynamic DDM) と名付けた計算手法を提案する。この計算手法は、計算する領域を水の流れに合わせて動的に拡大、縮小させる。これにより処理量の削減が期待できる。

2. 氾濫シミュレータ

本発表ではシミュレータで高い精度を実現するため、浅水方程式を用い、かつ 50 m よりも細かい格子を用いる。この設定とにき期待できる精度の例として、2004 年 7 月に福井市で発生した水害における現地調査⁴⁾とシミュレーション結果との比較を図 1 に示す⁵⁾。両者は良好に一致しているといえる。

[†] 日立製作所 中央研究所
Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

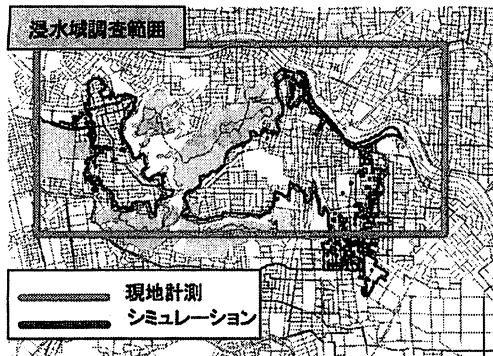


図1 水害の現地調査⁴⁾とシミュレーションとの比較

浅水方程式を以下に示す⁶⁾。

連続の式:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (1)$$

x 軸方向の運動方程式:

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

y 軸方向の運動方程式:

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

ただし、 h : 水深、 H : 水位 ($H = h + h_g$, h_g : 標高)、 M, N : それぞれ x, y 方向の単位幅あたりの流量、 u, v : それぞれ x, y 方向の流速 ($u = M/h, v = N/h$)、 g : 重力加速度、 n : マニングの粗度係数、 q : 単位時間・単位面積あたりの流入量である。

ある時刻の変数 h, u, v を入力すると Δt 後の変数を求められるよう浅水方程式を離散化する。この離散化式は陽解法であるので、時間 Δt 後の格子 (i, j) における変数は、現在の格子 (i, j) および隣接する有限個の格子における変数により決まる。この浅水方程式の場合、格子 (i, j) と隣接する格子に水がない ($h = 0, u = 0, v = 0$) 場合、時間 Δt 後にも格子 (i, j) には水がない、という特徴がある。したがってまずその格子と隣接する格子に水がある (浸水状態) か水がない (非浸水状態) かを判別し、浸水格子の場合のみ浅水方程式を解けばよい。

3. 高速計算手法

3.1 従来手法

シミュレーションでは、離散化した浅水方程式を解く、時間発展処理と呼ぶ処理を繰り返すことにより任意の時刻の水深や流速を得る。従来の時間発展処理を模式図 (図2) により説明する。シミュレーション開始

前にシミュレーション対象とする領域に格子を配置する。決壊シナリオが入力されると、システムはシミュレーションを開始する (図2(a))。開始後は、対象領域内のすべての格子について浸水・非浸水のどちらであるかを判別し、浸水状態の場合のみ浅水方程式を解く。時間進行処理を繰り返すことにより、任意の時刻における氾濫流の状態 (図2(b)-(c)) を算出する。

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とする領域を決定する必要がある。ところが一般に、シミュレートする前に、浸水する領域が把握できていることは少ない。そこで従来は、任意の決壊シナリオが与えられた場合でも浸水領域が確実に含まれるような広大な領域を計算していた。

3.2 提案手法

提案手法の処理の流れを模式図 (図3) により説明する。まず、シミュレーション対象領域をあらかじめいくつかの部分領域 (subdomain) に分割しておく。図4に示すように部分領域は複数の格子 (図4では東西 s_i 格子、南北 s_j 格子) からなる。決壊シナリオが入力される (図3(a)) と、その決壊地点を含む部分領域を計算対象とする。計算対象とされた部分領域に限定し流体方程式を従来手法と同様に解く。図3(b)に、計算開始から Δt 秒経過した状態を示す。しばらくすると部分領域の外側に水が流出する (図3(c))。この場合、新たに流入する部分領域も計算対象にする。逆に、部分領域内の全ての格子が非浸水状態になる可能性がある。この場合、その部分領域を計算対象でなくする。提案手法の特徴は、シミュレーション実行中に計算領域が部分領域単位で拡大、縮小することである。

計算領域の拡大、縮小を実現するために、ある部分領域から外側に水が流れ出る前に、最も外側にある格子が必ず浸水する性質を利用する。部分領域内の最も外側にある格子を検査対象 (図4) とし、これらの格子を時間発展処理ごとに検査する。部分領域のサイズが大きいつま、検査対象の格子数は相対的に減るため検査に伴う処理量の増加が抑制できる。一方で、計算領域を拡大、縮小する単位が粗くなるため無駄な処理が発生するおそれがある。部分領域のサイズは、Dynamic DDM の有効性に大きな影響を与えるといえる。

4. 検証実験

提案手法が処理量を低減する効果があることを検証するため、3種類の実験を行った。実験1で、氾濫シミュレーションシステムの実運用時の処理量を推定した。実験2および3で、提案手法が従来手法に比べ処理量を低減できる条件を推定した。実験では、計測用

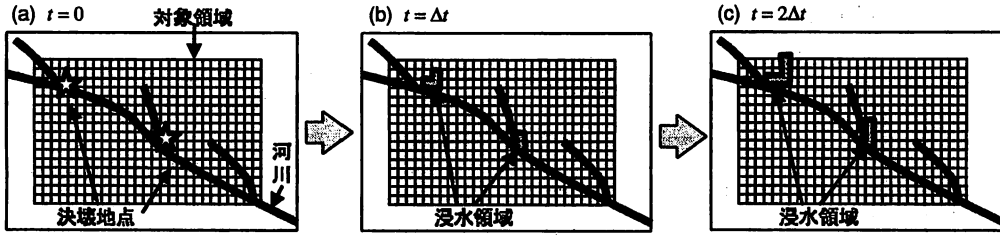


図 2 従来のシミュレーション手法の処理の流れ

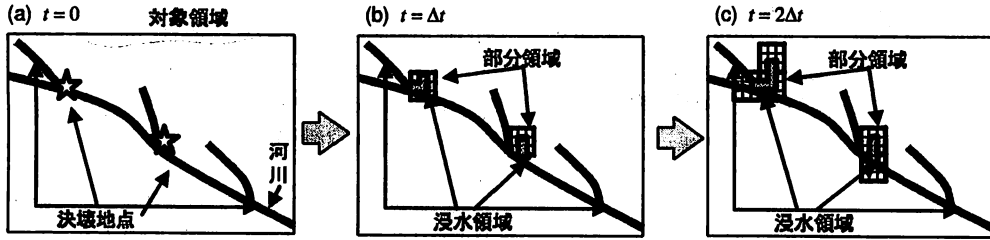


図 3 提案手法 Dynamic DDM の処理の流れ

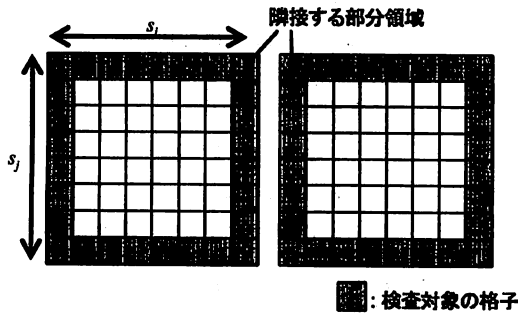


図 4 部分領域と格子の配置

の計算機においてシミュレーションにかかった計算時間を処理量とした。実利用を想定し、計測には市販されているノート PC を使用した。実験 1 では、3 つの異なる決壊シナリオについてシミュレーションを行った。すべての決壊シナリオで、過去に実際に決壊した 1 地点において堤防が幅 50 m にわたり決壊した場合を想定し、堤防決壊から 10 時間後までのシミュレーションにかかる時間を測定した。決壊シナリオ 1~3 で、それぞれ異なる河川水位を想定した。比較する従来手法は、シミュレーションの対象領域を 25 km 四方 (625 km^2 , 格子数 $N_{\text{total}} = 250,000$) とした。計算時間はシステムを実際に利用する環境設定で計測した；シミュレーション内の時間で 10 分ごとの途中結果を画面に 3 次元画像として出力し、結果データをハード

ディスクへと格納した。

実験 2 では、従来手法の格子数 N_{total} に対する処理量の変化を調査した。格子数 N_{total} を 40,000、90,000、160,000、250,000 の 4 種類に設定し 1 回の時間発展処理にかかる計算時間を計測した。実験 3 では、提案手法の部分領域の格子数 N_{in} に対する処理量の変化を調査した。部分領域の格子数 N_{in} を 256、1024、4096 に 4 種類に設定し 1 回の時間発展処理にかかる計算時間を計測した。

5. 結果と考察

実験 1 の結果を図 5 に示す。従来手法が $N_{\text{total}} = 250,000$ の場合、提案手法はその $1/12 \sim 1/17$ 、平均 $1/15$ の処理量になった。決壊シナリオ 1~3 では破堤 10 時間後の浸水面積がそれぞれ 17.7 km^2 、 28.7 km^2 、 42.4 km^2 になった。実験で推定したシナリオは日本国内における中程度の水害を想定したことになる。浸水面積が小さいほどコスト低減効果が高かったといえる。

実験 2 および実験 3 の計測結果から、浸水格子数 $400 \sim 40,000$ 程度の場合は、部分領域のサイズ N_{in} が 1024 とした Dynamic DDM が最小の処理量となった。これより、日本国内で多く発生する浸水面積が $1 \sim 100 \text{ km}^2$ の水害を格子サイズ 50 m でシミュレートする場合、部分領域サイズは 1024 程度にすべきと考えられる。

Dynamic DDM を利用すると、水害を手軽にシミュ

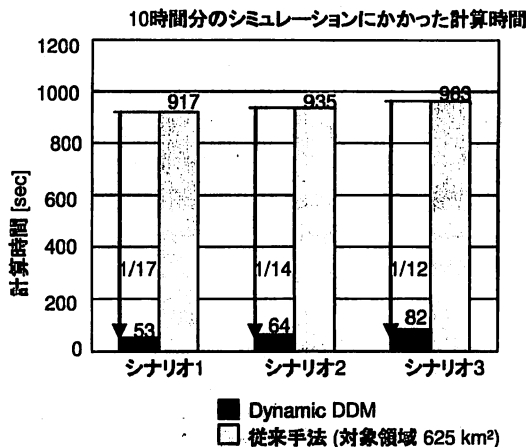


図5 シナリオごとの計算時間
Fig.5 Calculation time of each scenario.

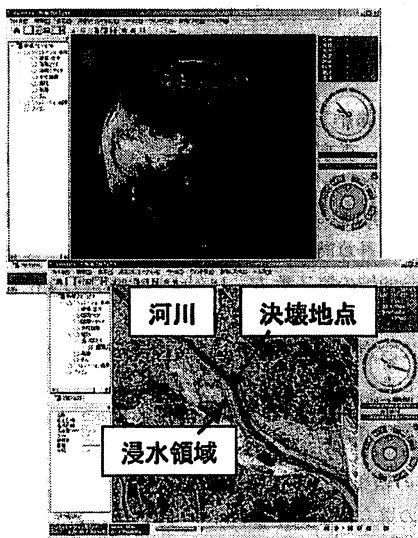


図6 地球上の任意の場所でシミュレーション可能なシステムの動作画面

レートできるシステムが作成できる。Dynamic DDMを利用して作製したシステムの動作画面を図6に示す。このシステムは、決壊シナリオを入力するだけで地球上の任意の地点における水害をシミュレートできる。また、1つの決壊シナリオのシミュレーションに要する時間は数分である。今後シミュレーション結果の検証データを蓄積することで、このような広域を対象とするシミュレーションシステムが実用されていくと考えられる。

6. 結 論

本発表では、氾濫シミュレーションシステムの処理量を低減する計算手法 Dynamic DDM を提案し、その有効性を検証した。

Dynamic DDM は、計算する領域を水の流れに合わせて部分領域単位で動的に拡大、縮小させる手法である。途中結果を画面に3次元画像として出力する等実利用を想定した実験では、従来手法の約1/15の処理量で水害をシミュレートできた。Dynamic DDM は処理量を低減することが明らかになった。Dynamic DDM の処理量低減効果は部分領域の決め方に依存する。日本国内で多く発生する浸水面積が1~100 km² (浸水格子数400~40,000)程度の水害をシミュレートする場合、最適な部分領域のサイズ N_{in} は1024程度であった。

Dynamic DDM を利用すれば、地球上の任意の地点における水害を数分でシミュレートするシステムを作成できることがわかった。

謝辞 図6は、本論文の技術を応用した(株)日立エンジニアリング・アンド・サービスのソフトウェア DioVista[®]/FloodSimulator により作製し、NASA's Earth Observatory, Global Land Cover Facility のデータセットを利用した。

参 考 文 献

- 1) 横塚尚志: 動く洪水ハザードマップについて, 平成15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, pp.5.1-5.11 (2003).
- 2) 山口悟史, 室 啓朗, 岩村一昭: 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).
- 3) ニッセイ同和損害保険株式会社: 「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 (2006). ニュースリリース.
- 4) 山本博文: 福井市街足羽川左岸および鯖江市河和田地区における浸水被害について, 平成16年7月新潟・福島・福井豪雨災害に関する調査研究, 平成16年度科学研究費補助金(特別研究促進費(1))研究成果報告書, pp.121-136 (2005).
- 5) 山口悟史, 岩村一昭: 2004年足羽川洪水事例による氾濫シミュレーションの精度検証, 平成18年度全国大会第61回年次学術講演会, 土木学会 (2006).
- 6) 栗城 稔, 末次忠司, 海野 仁, 田中義人, 小林裕明: 氾濫シミュレーション・マニュアル(案), 土木研究所資料第3400号, 土木研究所 (1996).