

有限要素法による小水路を考慮した農地氾濫モデル

Finite Element Model for Flooding on Agricultural Field Considering Small Channel

桐 博英*・久保田富次郎**・登坂宣好***・丹治 肇****・中矢哲郎*****

Hirohide KIRI, Tomijiro KUBOTA, Nobuyoshi TOSAKA, Hajime TANJI and Tetsuo NAKAYA

*正会員 独立行政法人農業工学研究所 水工部河海工水理研究室 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6)
 **農修 独立行政法人農業工学研究所 地域資源部水文水資源研究室 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6)
 ***工博 日本大学教授 生産工学部 数理情報工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)
 ****正会員 農博 独立行政法人農業工学研究所 水工部河海工水理研究室 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6)
 *****正会員 農修 独立行政法人農業工学研究所 水工部河海工水理研究室 (〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6)

Drainage improvement projects in agricultural fields such as improvement of drainage channel and pump station have been carried out to prevent the influence of inundation for yield amount. In this research, finite element model in consideration of drainage channel and road was constructed, and the movement of the farmland drainage was analyzed. In this model, farmland which is delimited by drainage channel and road was assumed as a block. Then, flow in drainage channel and each block was modeled by one-dimensional unsteady flow model and two-dimensional shallow flow model, respectively. The introduction of present model makes it possible to forecast the inundation of the agricultural fields without dividing into small finite elements for the reproduction of drainage channel and road.

Key Words : finite element method, low-land area, unsteady flow model, shallow water flow, moving boundary problem

1. はじめに

地盤標高が低い農地では古くから排水改良が行われ、数値解析に基づき排水計画が立案されてきた。しかし、近年、農地の宅地転用などにより洪水の特性が変化している。このため、現在の排水施設では洪水を排除できず、湛水被害を生じる農地が見られるようになっており、今後、現状に即したものに排水計画を見直す必要がある。

洪水時の農地をはじめとする水路を有する氾濫域では、水路と氾濫域の間で流入出が繰り返される複雑な流れが生じており¹⁾、用・排水路が浸水、排水に大きな役割を果たしていると考えられる。このため、排水計画の見直しにあたっては、水路を適切に組み込んだ解析モデルが求められる。

水路を含む氾濫域の解析は、主に洪水の都市氾濫解析への適用を目的として、差分法による様々なモデルが提案されてきた。都市氾濫解析では、氾濫域を2次元平面流モデル、水路を1次元不定流モデルで解く手法が一般に用いられ、成果をあげてきた^{2),3)}など。近年では、ハザードマップの重要性から、街路ネットワークモデル⁴⁾に下水道や水路網モデルを組み込み⁵⁾、市街地の詳細な氾濫モデル化も行われている。

都市域に限らず水路を含む氾濫域の流れでは、微細格子⁶⁾やネスティング⁷⁾を導入して地形特性を詳細に再現したモデルや、有限体積法による非構造格子を用いたモデル^{8),9),10),11),12)}など、水路、氾濫域とも2次元で

モデル化した解析が行われている。

一方、有限要素法による解析では、解析例の多くが河川を対象としたものであり、氾濫域、河川とも2次元平面流モデルでモデル化されてきた^{13),14),15)}など。

農地の洪水氾濫解析では、複雑な地形形状を再現する必要があり、また、幅の狭い用・排水路がネットワークを形成しているなどの特徴がある。このため、有限要素法の適用が効果的であると考えられるが、氾濫域となる農地と排水路をともに2次元でモデル化するには限界がある。そこで、本報では、有限要素法による水路を1次元、氾濫域を2次元でモデル化する農地氾濫モデルを構築し、1999年台風18号による八代海沿岸農地における高潮の再現を試みた。

2. 農地氾濫モデル

2.1 モデルの概要

本報で提案する農地氾濫モデルでは、水路を1次元不定流モデル(以下、「1次元モデル」と呼ぶ)、氾濫域を2次元平面流モデル(以下、「2次元モデル」と呼ぶ)でモデル化する。これは、

- 農地における用排水路は水路幅が狭く、水路内の横断方向の流れが氾濫域の流れを支配しない
- 氾濫域の評価およびゲート管理の支援のため、解析結果の地理情報システム(GIS)での処理を念頭におく
- 計算負荷およびデータ作成作業の軽減

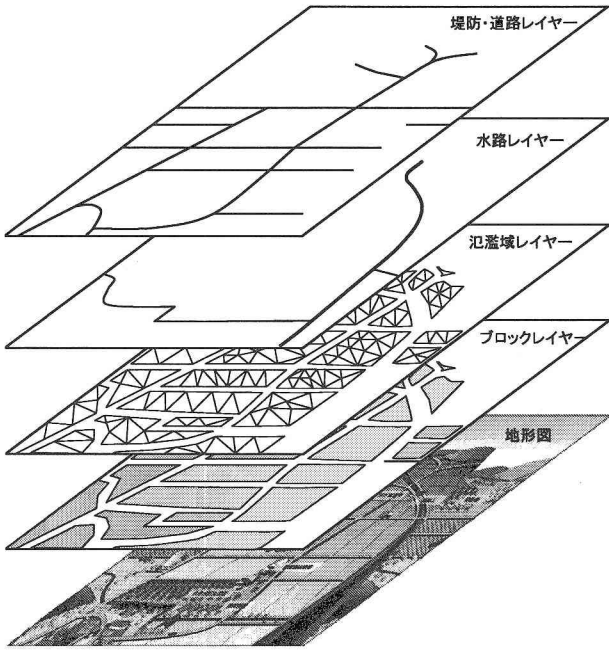


図-1 農地氾濫モデルの概念

のためである。

本モデルの概念を図-1に示す。本モデルでは、洪水などにより浸水が予想される領域を解析領域として、4つのレイヤー（ブロック、氾濫域、水路、堤防・道路）に分類する。このうち、ブロックレイヤーは道路または水路で囲まれた領域で分けたものであり、氾濫域の計算はブロック毎に行われる。また、道路や堤防高が十分に高く、越水しないことが明らかであれば、ブロック毎に計算を行うことで、道路に沿う流れが容易に計算できる。

2.2 基礎方程式

水路と氾濫域の解析において、基礎方程式はそれぞれ、式(1)、(2)で表される1次元不定流の式、および式(3)、(4)、(5)で表される2次元浅水流方程式を用いる。

水路

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

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (2)$$

氾濫域

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) = \\ -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) =$$

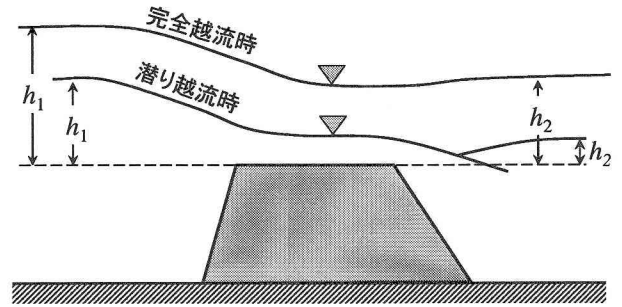


図-2 越流形態

$$-gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

ここで、 M 、 N はそれぞれ x 、 y 方向の流量フラックス、 η は静水面からの水位偏差(m)、 D は水深(m)、 g は重力加速度(m/s^2)、 n はマンニングの粗度係数、 ρ は水の密度、である。また、 τ_{bx} 、 τ_{by} は底面摩擦応力であり、式(6)、(7)で表される。

$$\tau_{bx} = \frac{gn^2 |M| M}{D^{7/3}} \quad (6)$$

$$\tau_{by} = \frac{gn^2 |N| N}{D^{7/3}} \quad (7)$$

A_h は水平滑動粘性係数であり、要素面積 S_e を基にRichardsonの4/3乗則により式(8)で与えた。

$$A_h = 0.01 \times (2S_e)^{4/3} \quad (8)$$

なお、1次元である式(1)、(2)において、 x 方向は水路流下方向とする。

道路または堤防からの越流量 q ($m^3/s/m$)は、図-2のように越流の上、下流側の水位 h_1 、 h_2 を取り、水路内の水位と氾濫域の水位または地盤標高の関係から、台形ゼキの越流公式により式(9)、(10)で与えた。

完全越流時 ($h_2/h_1 \leq 2/3$)

$$q = \mu h_1 \sqrt{2gh_1} \quad (9)$$

潜り越流時 ($h_2/h_1 > 2/3$)

$$q = \mu h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (10)$$

ここで、 μ は流量係数であり、完全越流時は $\mu = 0.35$ 、潜り越流時は $\mu = 0.91$ とした。

1次元モデルと2次元モデルの組み合わせによる洪水氾濫解析では、1次元の水路流れを特性曲線法により解析するものもあるが、本報では、水路、氾濫域ともに有限要素法を用い、式(1)~(5)で表される基礎方程式を空間方向にはGalerkin法、時間方向には予測子修正子法で離散化した。解析は、水路、氾濫域とも陽解法により行い、質量行列に混合質量行列を用いることで計算の安定化を図った。なお、氾濫域の変化に伴う水域、陸域の判定に必要な移動境界の処理は、Kawahara and Umetsu¹⁶⁾に倣った。

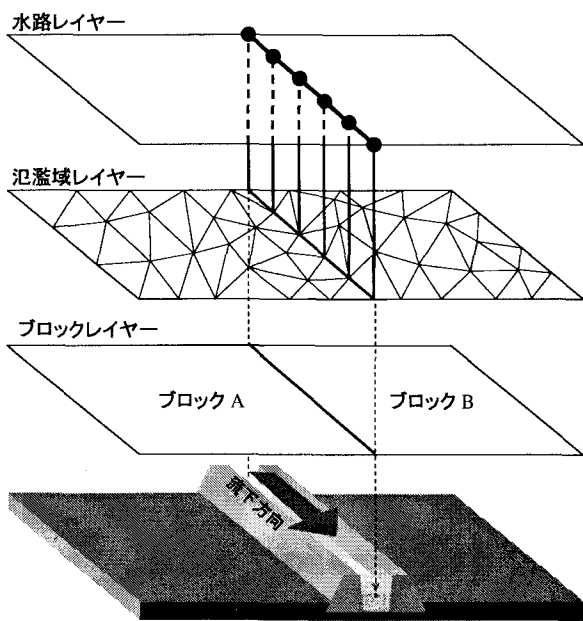


図-3 水路要素と氾濫域要素の関係

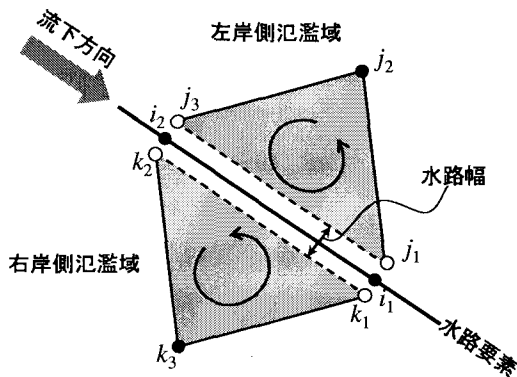


図-4 水路要素と氾濫域要素の接続の詳細

2.3 水路と氾濫域の接続

本報では、簡単のため、水路に相当する要素を「水路要素」、氾濫域に相当する要素を「氾濫域要素」といい、水路要素を構成する節点を「水路節点」、氾濫域要素を構成する節点を「氾濫域節点」と呼ぶ。

図-3は、水路要素と氾濫域要素の関係を示したものである。水路レイヤー、氾濫域レイヤーおよびブロックレイヤーは同一平面上に位置するが、ここでは、理解を助けるため、各々のレイヤーを離して描いている。図-3では、中央の水路を挟んでAとBの2つのブロックが接している。これらのブロックを三角形一次要素で分割したものを氾濫域要素、ブロックの境界線上に当たる節点を線要素で結んだものを水路要素とした。すなわち、本モデルでは、氾濫域要素の一部が水路要素と接続している。

図-4に水路要素と氾濫域要素の接続の詳細を示した。ここで、図-4中の、 i_n ($n=1\sim 2$) は水路節点の番号を、 j_m, k_m ($m=1\sim 3$) はそれぞれ、左岸側と右岸側

の氾濫域節点の番号を示す。また、●は節点を、○は氾濫域節点のうち、水路節点と共有しているものを示す。本モデルでは、氾濫域要素と水路要素で節点を共有すると考えるので、図-4において、節点 i_1 は節点 j_1, k_1 と同一で、節点 i_2 は節点 j_3, k_2 に等しい。これは、本モデルでは、水路または道路で囲まれた領域を一つのブロックとして取り扱うため、領域の周囲の節点が水路または道路に相当し、同一の節点を用いることで水路要素のデータ作成を容易にすることができるためである。なお、ブロックの境界にある節点を共有していても、図-4に示すとおり、水路幅の分だけ氾濫域節点の座標をシフトさせた。

2.4 水路の左右岸の判定

水路の左右岸で地盤標高や堤防高が異なることから、氾濫域要素が水路の左右岸いずれにあるかを判定し、各データを与える必要がある。本報では、水路要素の向きを統一し、水路流下方向に向かって左側を左岸側氾濫域、同右側を右岸側氾濫域とする。そこで、水路要素の向きを統一するため、要素～節点関係では下流から順に各要素の節点をとることとした。氾濫域の要素が水路の左右岸いずれに位置するかは、図-4に示すように接続する水路要素と共有する節点の番号により以下のように判定した。

- 水路要素の第1節点 (i_1) と氾濫域要素の第1節点 (j_1 または k_1) が等しいと仮定する
- 左岸側：水路要素の第2節点 (i_2) と氾濫域要素の第3節点 (j_3) が等しい
- 右岸側：水路要素の第2節点 (i_2) と氾濫域要素の第2節点 (k_2) が等しい

2.5 モデルの検証

本モデルの検証のため、図-5に示すモデル圃場を想定し、洪水時の農地の氾濫過程を解析した。モデル圃場では中央に直線水路を有し、幅1000 m、長さ2000 mの圃場が2つ並んでいる。水路は、勾配は低平農地の排水路の代表的な値を参考に1/1000とし、水路幅は10 m、堤防高は圃場の標高+0.3 mとした。圃場の勾配は、水路縦断方向には水路勾配と同じ1/1000、水路

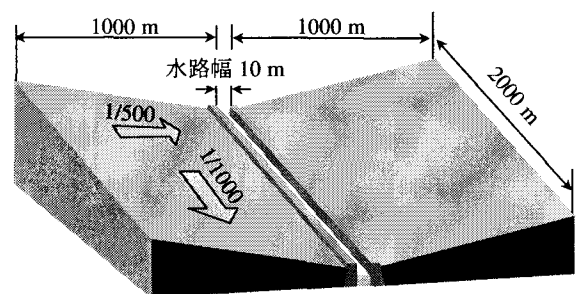


図-5 解析領域

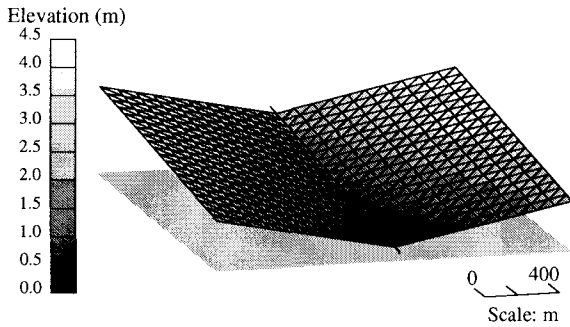


図-6 有限要素分割図

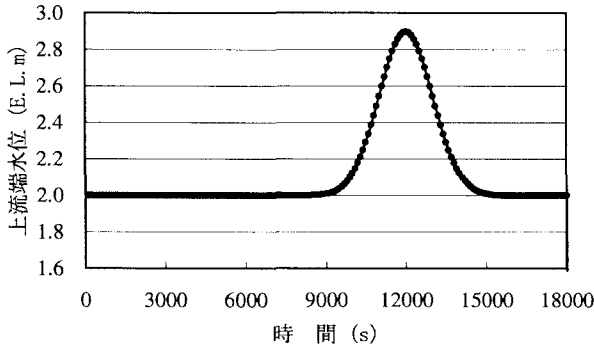


図-7 上流端の境界条件

表-1 モデル圃場の計算条件一覧

項目	値
時間の増分	0.02 s
ランピングパラメータ	0.95
水深下限値	0.001 m
マンニングの粗度係数	0.035

横断方向には1/500とした。なお、2つの圃場は水路を挟んで左右対称となるよう勾配を設定した。

図-6に解析領域の有限要素分割を示す。要素サイズは100 m、総節点数443、総要素数822（うち、水路要素22）である。水路内に水を流し、定常状態を確認した後、図-7に示す水位変化を水路の上流端の境界条件として与えた。他の計算条件は、表-2に示すとおりとした。

図-8に示すのは、水路上流端と下流端における流入量と流出量の時間変化である。流入量が上流端の水位変化に伴って増加した後、到達時間の分だけ遅れて下流端の流出量が増加する。流入量と流出量の最大値に差があるのは、水路内の水位が堤防高を超えて農地へと氾濫することで洪水がピークカットされているためである。また、水路内の水位が低下した後、農地に氾濫した水が徐々に水路に流入することにより流出量が流入量よりも緩やかに減少している。

水路内で定常状態が確認された6000 s以降の水路の流入量、流出量の積算値を圃場内に貯留している水

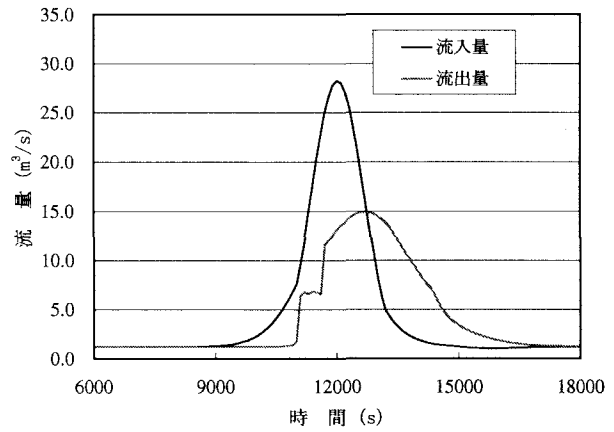


図-8 流出量と流入量の時間変化

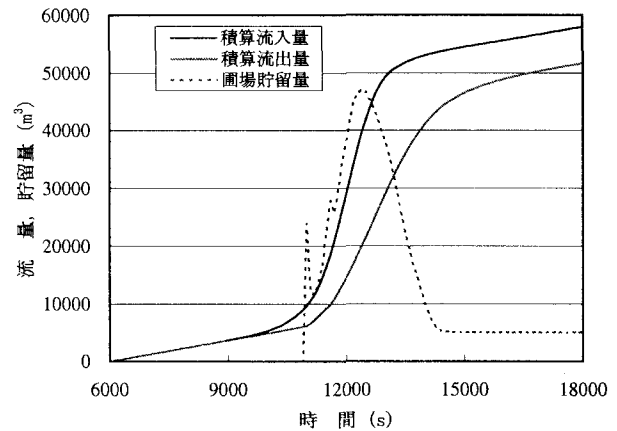


図-9 流出量と流入量の累計

量とともに示したのが図-9である。水路への流入量は9000 s後に変化が始まり、11200 s付近から下流端の流出量が多くなる。農地への氾濫に伴い、積算流出量は積算流入量よりも緩やかに増加するが、洪水が終了し、水路内が定常状態に戻った後も、流入量と流出量に6291 m³の差があった。これは、水路堤防と地盤標高の差により水路に戻れない水が湛水として残っているものと、移動境界の処理の際に生じた水量の欠損によるものと考えられる。圃場内には5000m³の水が排水しきれずに貯留されていることから、1291m³が移動境界処理の過程で失われたことになる。本解析では、移動境界処理で生じる水の欠損は、最大貯留量(47085m³)の2.7%であった。なお、図-9において、圃場内の貯留量が貯留開始時に増加した後減少するのは、水路の上流部分で溢れた水が圃場内を流下し、一部が水路下流側から水路内に戻るためである。図-10に代表的な時刻における氾濫域の変化を示す。本解析例では、圃場の標高が水路下流に向かうほど低くなるため、水路から溢れた水は次第に下流側へと向かって圃場内を流れる。また、水路の水位低下に伴って氾濫域も小さくなり、最終的に排水しきれない水は水路下流端付近に

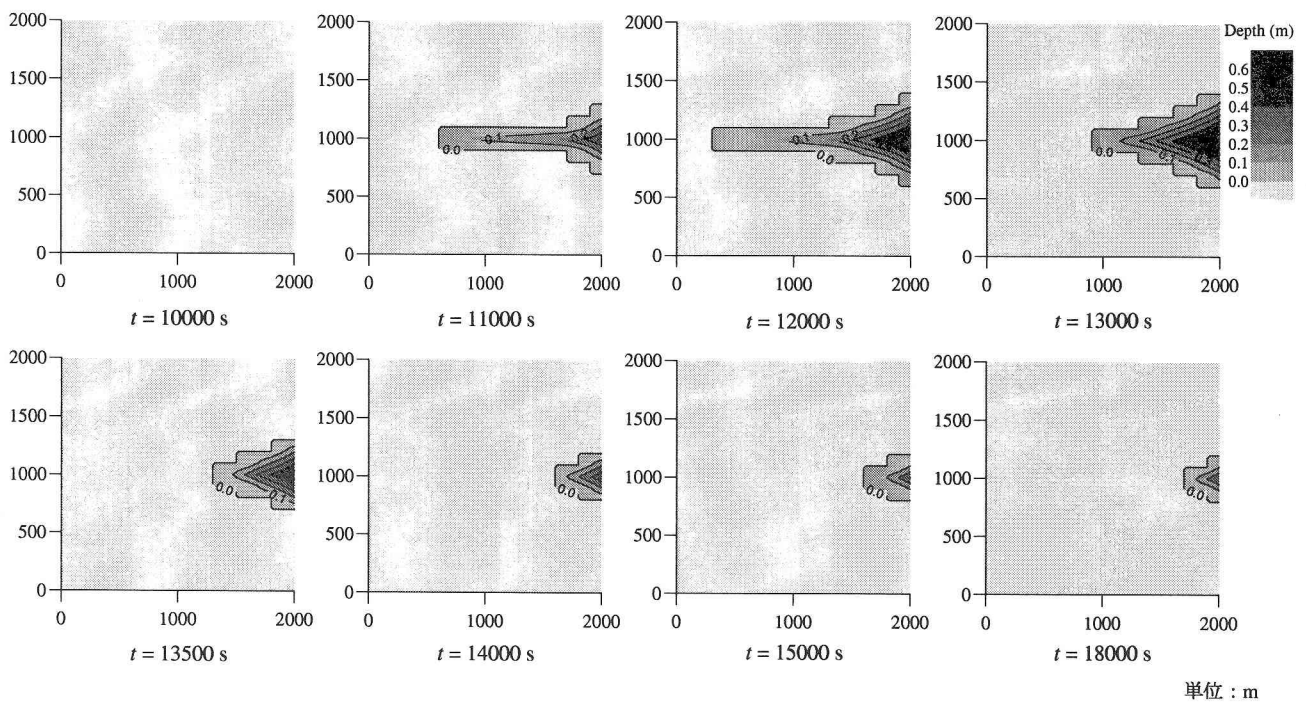


図-10 氾濫域の時間変化



図-11 台風 9918 号に伴う高潮による農業排水路の破損状況

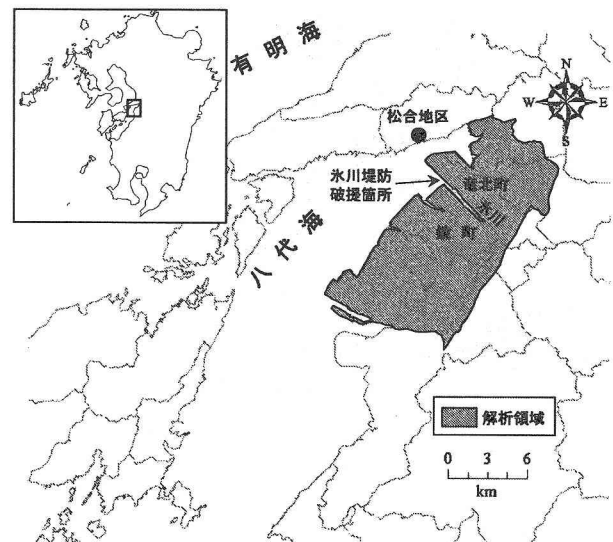


図-12 解析領域位置図

集まり、氾濫域が残る状況を確認できる。

3. 数値解析例

3.1 解析対象

数値計算例として、1999年に九州を襲った台風18号（以下、台風9918号）で生じた高潮の農地への浸水過程を再現した。台風9918号による高潮では、八代海湾奥部の松合地区で12の方が亡くなられた一方で、松合地区の対岸の農地においても高潮による浸水で排水路の損壊（図-11）や海水の浸入による塩害やガタ土の堆積などの被害が報告されている¹⁷⁾。解析領域は、有

明海に隣接する八代海の湾奥部に位置する松合地区の対岸側に当たる旧不知火干拓の農地とした（図-12）。

3.2 解析条件

解析領域をブロックに分割した結果を図-13に、有限要素分割を図-14に示す。本解析では、解析領域を幹線水路を含む小河川と主要な道路で囲まれた23個のブロックに分割した。また、本解析では堤防を越水することが確認されているので、道路も線要素として取り扱い有限要素分割を行った結果、総節点数3414、総要素数6906（うち、水路要素数162、堤防要素数299）で

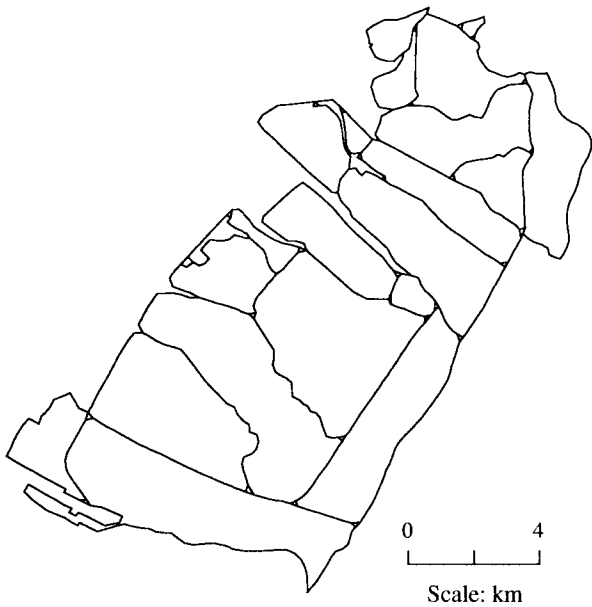


図-13 解析領域のブロック分割図

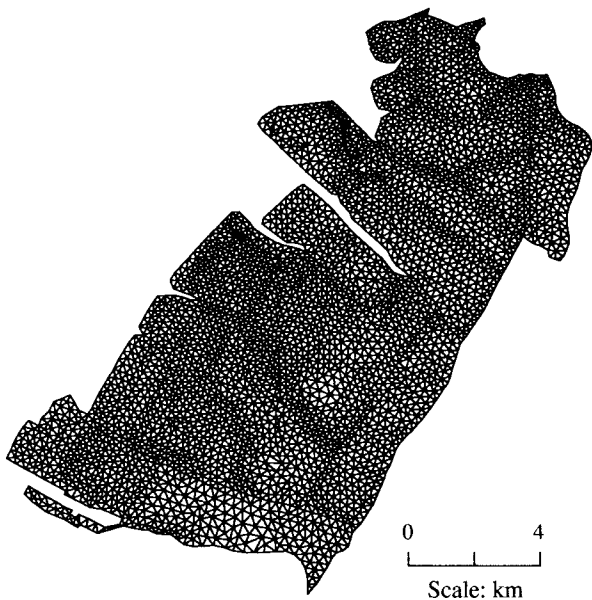


図-14 解析領域の有限要素分割図

あった。要素サイズは、最小，最大値がそれぞれ 96.6 m, 563.5 m であり，氾濫が予想される領域では概ね 120 m であった。

解析領域内の地盤標高は，国土地理院発行の数値地図から 50m メッシュの標高データと 1/25000 地形図から読み取り，各節点に補間して与えた。また，境界条件として，降雨に伴う河川流量は考慮せず，解析領域が面する海の潮位は，別途行った台風の気圧分布に Myers のモデル¹⁸⁾を用いた数値解析結果を境界条件として与えた。計算条件は，表-2 に示すとおりである。

表-2 高潮氾濫解析の計算条件一覧

項 目	値
時間の増分	1.5 s
ランピングパラメータ	0.85
水深下限値	0.05 m
マニングの粗度係数	0.035

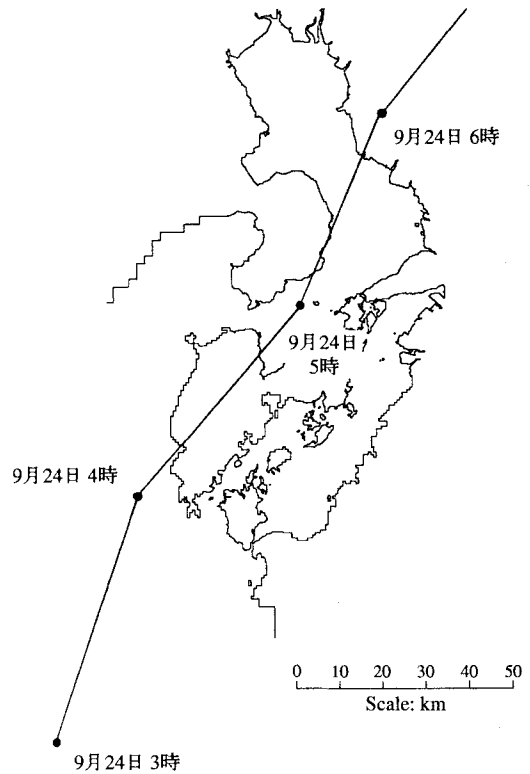


図-15 有明海付近の台風 9918 号の経路

3.3 計算結果

解析では，台風が九州を通過する 1999 年 9 月 23 日午前 0 時から 9 月 24 日正午までを再現した。有明海付近を通過したのは，9 月 24 日の 4 時から 6 時の間であり，この間の台風の経路は図-15 のとおりである。なお，解析領域内において最大潮位を記録したのは，9 月 24 日 6 時頃である。

台風が最も接近した時 9 月 24 日 6 時頃の氾濫域の状況を図-16 に示す。図-16 b) は氷川堤防破提前の状況である。氷川堤防は，図-12 に示す地点で 9 月 24 日 6 時頃に破提したことが分かっており¹⁹⁾，解析では，同時刻において堤防高を小さくすることで考慮した。図-16 b) では，高潮による海水の浸入は，海岸堤防ではなく小河川の堤防を越えて生じていると判断できる。実際の現地調査の結果でも，高潮の被害を大きくしたのは海岸堤防を越水した海水よりも，沿岸に流入する小河川を遡上した海水が河川堤防を越水したためであることが指摘されており¹⁹⁾，解析結果は，現象を定性的に再現していると判断できる。図-16 c)～図-16 f) は，

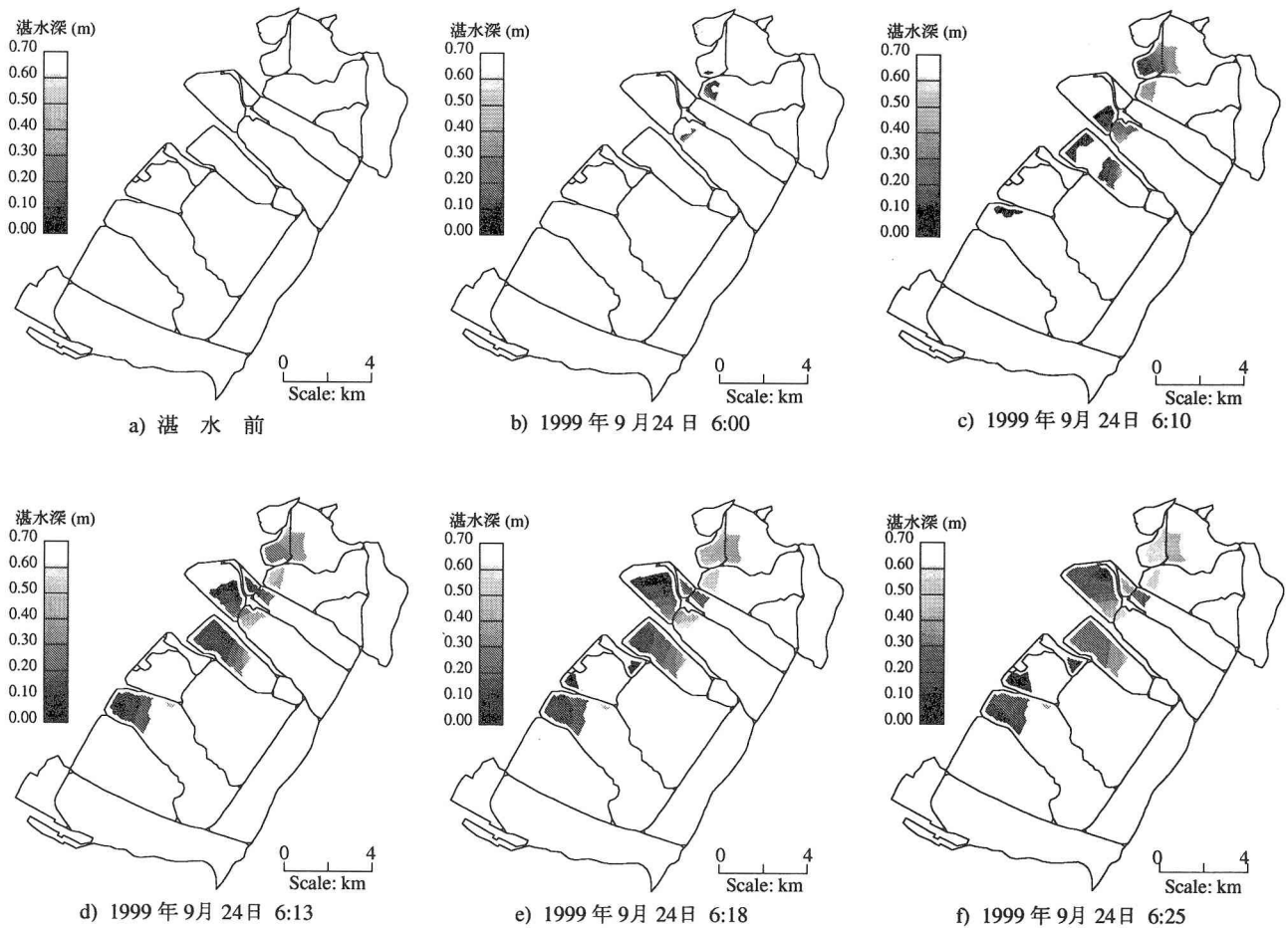


図-16 氾濫域分布の時間変化（解析結果）

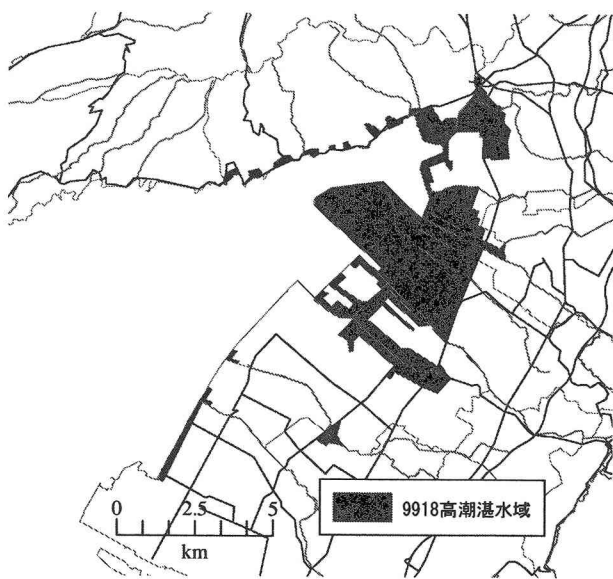


図-17 氾濫域の分布（現地調査結果）

氷川堤防破堤後の状況を示している。氷川堤防の破堤により、多くの海水が浸入し高潮による農地の被害を大きくしていることが分かる。また、鏡町の地区に流入した海水の多くは上流の水路堤防からの浸水である

が、海に近い地区では海岸堤防から浸入してきたことが図-16 c) から判断できる。なお、水路堤防からの浸水は、海岸堤防からの浸水と比較して湛水深が深くなる結果となり、今回の高潮では、海岸堤防を大きく越流することはなかったと推測できる。

図-17 は、高潮災害後の現地での湛水被害域の調査結果から氾濫域の分布を描いたものである。図-16 f) に示す最も氾濫域が広がった時刻の解析結果と比較すると、解析結果は一部で氾濫域を広く見積もっている領域があった。これらの領域では、観測でも堤防からの越水が確認されており、地盤標高の再現に 50 m メッシュの標高データを使用したため、領域内の微地形を考慮できなかったことによると考えられる。

なお、本計算は、農林水産研究計算センターの Origin3800 において CPU を 8 台使用して行い、計算時間は 200 分であった。

4. まとめ

本報では、氾濫域を二次元、水路、堤防および道路を一次元でモデル化した有限要素モデルを検討し、台風 9918 号による高潮の際の農地の浸水過程を再現し

た。その結果、河川堤防からの越水による海水の浸入が高潮の被害を大きくしたという現象を定性的に捉えることができた。

今回提案したモデルの特徴は、水路を1次元、氾濫域を2次元で解析を行うことに加え、水路、道路および堤防で区切られた領域でブロック分割を行い、ブロック毎に計算を行うことにある。これにより、越水が生じないような地盤標高の高い道路などは、必ずしも線要素として与える必要は無くなり、取り扱いが容易なモデルであるといえる。

本モデルでは、氾濫域の移動境界の処理に既存の手法を用いたが、排水計画を策定するに当たっては、域内の水の流入出量の正確な把握が重要である。このため、さらに詳細なモデル化に当たっては、連続性が保持できる移動境界手法が必要である。また、農地は都市域と比べて規模が小さいことから様々なデータが整備されていない場合が多く、地盤標高や水路・道路の路線データの整備がモデルの開発とともに重要な課題である。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、文部科学省より科学研究費補助金若手研究B(課題番号:15780162)の助成を得た。ここに記し、深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 浅野敏之・瀬戸口喜祥:狭小水路と氾濫原で構成されるマングローブ感潮入り江の流動特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.401-405, 1995.
- 2) 岩佐義朗, 井上和也, 水鳥雅文:氾濫水の水利の数値解法, 京大防災研究所年報, 23 B-2, pp.305-317, 1970.
- 3) 高橋 保, 中川 一, 箕 崇弘:排水路網を考慮した洪水氾濫解析, 京都大学防災研究所年報, 第31号 B-2, pp.617-632, 1988.
- 4) 井上和也, 川池健司, 林 秀樹:都市域における氾濫解析モデルに関する研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.533-538, 1999.
- 5) 戸田圭一, 井上和也, 村瀬 賢, 市村 温, 横尾英男:豪雨による京都市域の氾濫解析, 水工学論文集, 第44巻, pp.479-484, 2000.
- 6) 細山田得三, 早川典生, 加納裕美, 酒井彩美:微細な地形標高を考慮した都市型中小河川の氾濫数値計算, 水工学論文集, 第46巻, pp.253-258, 2002.
- 7) 二瓶泰雄, 佐藤慶太, 青木康哲, 西村 司, 灘岡和夫:ネスティング計算法を用いた吹通川マングローブ水域における高解像度流動シミュレーション, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.416-420, 2002.
- 8) 井上和也, 川池健司, 戸田圭一:非構造格子による氾濫解析モデル, 京都大学防災研究所年報, 第42号 B-2, pp.339-353, 1999.
- 9) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一:非構造格子の都市氾濫解析への適用, 水工学論文集, 第44巻, pp.461-466, 2000.
- 10) 武田 誠, 松尾直規, 中嶋大次郎:非構造格子を用いた氾濫解析に関する一考察, 水工学論文集, 第47巻, pp.895-900, 2003.
- 11) 安田浩保, 白土正実, 後藤智明, 山田 正:高速演算性と精緻性を有する浸水域予測計算システムの開発, 水工学論文集, 第45巻, pp.889-894, 2001.
- 12) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 野口正人:寝屋川流域を対象とした氾濫解析モデルの高度化, 水工学論文集, 第47巻, pp.919-924, 2003.
- 13) 梅津 剛, 川原睦人:水域変化による干潟の形成を考慮したLagoon内流の数値シミュレーション, 第2回数値流体力学シンポジウム講演論文集, pp.195-198, 1988
- 14) Bates PD, Anderson MG:A 2-dimensional finite-element model for river flow inundation, Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 440(1909), pp.481-491, 1993.
- 15) Bates PD, Anderson MG, Hervouet JM: Initial comparison of 2-dimensional finite-element codes for river flood simulation, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy, 112(3), pp.238-248, 1995.
- 16) Kawahara, M. and Umetsu T.: Finite element method for moving boundary problems in river flow, Int. J. for Num. Method in Fluids, Vol 6, pp.365-386, 1986.
- 17) 久保田富次郎, 大場和彦, 山田正雄:台風9918号による干拓地の高潮災害と作付への影響, 農業土木学会誌, 70巻5号, pp.49-52, 2002
- 18) 土木学会:水理公式集 昭和60年版, pp.489-490
- 19) 滝川 清:台風9918号による不知火海岸高潮災害 その残したもの, 土木学会誌 85巻3号, pp.41-45, 2000

(2004年4月16日受付)