

I-1 レーザー計測データを用いた有限要素法による洪水氾濫解析

Flood Analysis by Finite Elemental Method using Laser Measurement Data

上野幹夫¹・小林一郎²・山本一浩³・安重晃⁴・橋本淳也⁵

Ueno Mikio, Kobayashi Ichiro, Yamamoto Kazuhiro, Anju Akira and Hashimoto Junya

抄録:本研究では、レーザー計測データと建物形状データを自動加工し、都市部の洪水氾濫解析モデルを作成した。この手法で解析モデル作成がどの程度軽減されるかを検討した。解析モデルは建物平面形状を表現できる三角形メッシュとし、解析計算は有限要素法を採用した。さらに2004年7月に起きた福井県足羽川の洪水氾濫の実測値と解析結果の比較を行うことで解析および解析モデルの有効性を考察した。

Abstract:The laser measurement data and building form data are processed automatically, and the flood overflow analytic model of the city part is made. An analytic model is made the triangle mesh which can express a building plane form, and an analytic calculation adopts finite elemental method. It considers how much analytic model preparation is reduced with this technique. And, the effectiveness of an analysis and an analytical model is considered by comparing a measurement value and an analytical result of the flood flood of the Fukui Prefecture Asuwa river that occurred in July, 2004.

キーワード: レーザー計測データ, 洪水氾濫解析, 有限要素法, 自動属性判別法

Keywords : Laser measurement data, Flood analysis, Finite Elemental Method, Automatic attribute distinction

1. 序論

近年多発する大規模な災害に対し、国や地方自治体はハザードマップの整備や防災対策関連の施策を盛んに進めている。河川においては氾濫状況や浸水規模を示す河川ハザードマップが行政機関から出されており、今後、その整備対象は中小河川まで広げられる方針である。国交省においても「豪雨災害緊急対策アクションプラン」に沿った施策を進めており、これに対してより精度の高い災害関連情報の数値を早急にまとめる必要があると考えられ、今後ますます洪水氾濫解析は重要になると予測される。

従来の洪水氾濫解析においては、格子状に要素を分割し、建物等の分布状況から粗度係数を要素に割り当てて計算していたため、建物形状を正確に考慮できなかった。しかしながら、氾濫解析の対象となる都市部の多くは、平地であり、建物などの地物が多いため、氾濫流に大きく影響する。そのため近年では、三角形要素(非構造格子モデル)で氾濫解析を行った研究もされており、建物形状を考慮したモデルで洪水氾濫解析を行うことも可能となってきた¹⁾⁻³⁾。しかし、平面図(紙・図面データ)から解析用の三角形要素を作成するには手間が掛かることと、それを作成するための測量結果の収集も容易ではないこと、三角形要素が作成されても三角形の形状によっては解析結

果が安定せず、良好な結果が得られないことが問題視されてきた⁴⁾⁻⁵⁾。

そこで、本研究では、航空レーザー計測の計測密度や計測精度が向上したことに着目した。レーザー計測によって得られる3次元座標データを用い、氾濫解析で使用されるモデル(地形・地物データ)を作成することで、上述の問題を解決できるのではないかと考えた。高密度・広範囲の計測ポイントから容易に三角形要素を作成し、安定した解析結果を得ることが可能であると考えた。

本稿では、レーザー計測データの自動加工により氾濫解析モデルを作成する方法について述べる。さらに、この解析モデルを用いて、2004年7月に起きた福井県足羽川の洪水氾濫災害を対象に実測値と解析結果の比較を行い、レーザー計測データから得られた洪水氾濫解析モデルの有用性について検討した。

2. レーザー計測データ

航空レーザー計測は、航空機に搭載したレーザースキャナによって位置情報を取得するもので、広範囲にわたって、緯度、経度、標高をデジタルデータとして取得することが可能である。

このレーザー計測データは計測点数が多く、そのまま

-
- 1 : 正会員 (株) 構造計画研究所 建設ソリューション営業部
(〒164-0011 東京都中野区中央4丁目5番3号, Tel :03-5342-1123, E-mail : ueno@kke. co. jp)
- 2 : 正会員 工博 熊本大学 教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39番1号)
- 3 : 正会員 博(工) 国土交通省 福井河川国道事務所 (〒918-8015 福井市花堂南2丁目14番7号)
- 4 : 正会員 博(工) (株) 構造計画研究所 防災環境部 (〒164-0011 東京都中野区中央4丁目5番3号)
- 5 : 正会員 博(工) 八代工業高等専門学校 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)

洪水氾濫解析モデルに適用することは計算負荷の増大の原因となる。そのため、計測点を選別する必要がある。また、洪水氾濫解析では、建物の平面形状の把握と建物の内側点を除去する必要があるため、計測点が地面か建物か区別しなければならない。

計測点を地面と地物を分離する方法には、著者らが考案した自動属性判別法を用いた⁶⁾。これにより地面標高を記したXYZの点群データ(csv形式)と地面と建物の境界を記した建物平面形状線データ(dxf形式)を作成した。点群データは、各メッシュに含まれる計測点の平均座標で表し、これを加工点群データという。メッシュ間隔によって計算負荷を変更できる。建物形状データは、閉領域のポリゴンデータになっている。

メッシュ間隔5mの時の加工点群データと建物形状データを表示したものを図-1に示す。

3. 解析モデル作成

ここでは構造物を考慮した有限要素法による洪水氾濫解析を行うため、加工点群データと建物形状データから三角形要素を作成する。

三角形要素を作成する前処理として、点群データの加除、建物形状点の高さ設定を自動処理できるプログラムを開発した。三角形要素作成は市販ソフトのLandDesktop3(autodesk社、以下LDT3)を活用することで解析モデルの作成時間短縮を図った。採用の理由を以下に示す。

- ・点群データから自動で三角形を作成する機能がある
- ・dxfファイルの読み込みが可能である
- ・境界線内部に三角形を作成しない機能がある
- ・LandXML出力が可能である
(LandXMLのフォーマット形式が、解析モデルの節点・要素のフォーマットと同一)
- ・プログラム開発環境が充実し、開発実績がある

(1) 点群データの加除

一般に有限要素解析では正方形や正三角形など要素辺の長さが均等であるほど、精度・安定性ともに優れた計算結果が得られるが、極端に扁平率の高い(細長い)要素

が存在すると、解析の不安定性や精度の悪化を招く。そのため、細長い要素を作成しないよう、以下a)~c)の処理を施した。

a) 建物形状の微小距離点削除

図-2に示すような微小距離点が存在すると細長い三角形が作成される。この場合、設定値距離以下の微小点を削除することで辺長が均等な三角形が作成される。設定値は、メッシュ間隔の10%で行った(5mモデル=0.5m, 10mモデル=1.0m)。

b) 建物形状線に点追加

図-3に示すような建物形状の構成点間隔が長い場合も細長い三角形が作成される。この場合、建物形状線上に等間隔の点を追加することにより辺長が均等な三角形が作成される。点追加の計算方法は、等間隔設定値Dを設定し、建物形状線の2点間距離Lを除算し切り上げた整数を分割数とし、2点間を等分割した。等間隔設定値は、メッシュ間隔の150%以下になるように等分割した。(5mモデル=7.5m, 10mモデル=15.0m)。

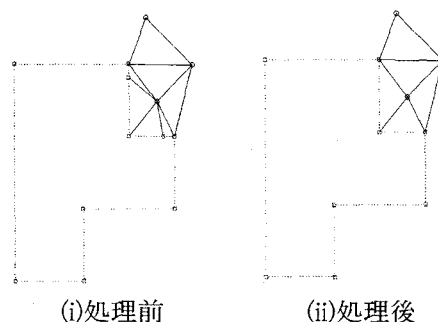


図-2 a)建物形状線の微小距離点削除

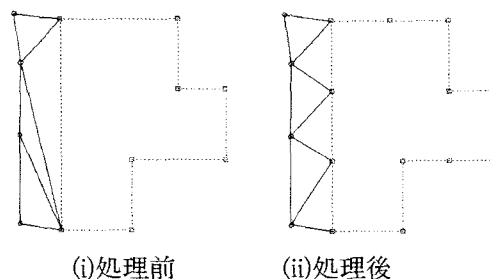


図-3 b)建物形状線に点追加

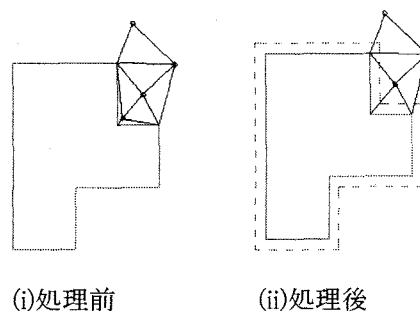


図-4 c)建物付近の点削除

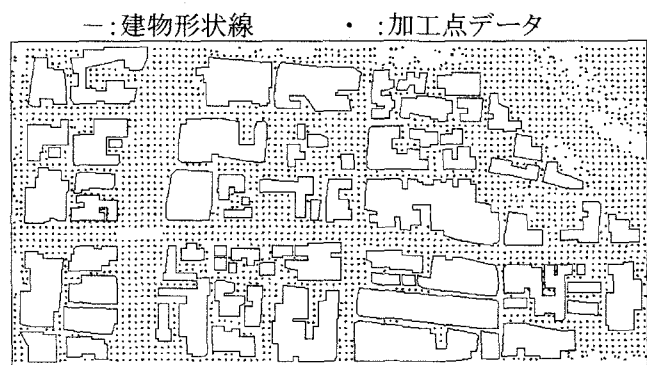


図-1 5m加工点群データと建物形状データ

c) 建物付近の点削除

図-4に示すような建物付近に点データが存在すると、細長い三角形が作成される。この場合は、建物形状線を外側にオフセットし、その内点を削除することで辺長が均等な三角形が作成される。オフセット値は、メッシュ間隔の50%で行った(5mモデル=2.5m, 10mモデル=5.0m)。

(2) 建物形状点の高さ設定

建物形状点とは建物形状線上にある点である。洪水氾濫解析で必要とする建物形状点の高さはレーザー計測データからは直接得ることは出来ない。なぜなら氾濫解析に必要な高さとは地面と地物の境界、すなわち地表面の高さであり、レーザー計測データから得られる高さは建物の屋上・屋根の高さだからである。したがって、三角形要素の作成に用いるための高さを設定する必要がある。

図-5を例に高さの設定方法を説明する。点 ABCD は加工された点群データで、これらの点から建物形状点 X の高さを求めるものとする。点 ABC は、ほぼ同一の地表点であり、点 D は建物の屋上点であり地表からかなり高い標高の点になる。

図-5の左図は、三角形 ADC で点 X の高さを計算することになるため、計算結果は点 D の影響を受け、地表より高い標高値となる。したがって、建物形状線内の加工点群は削除して、建物形状点の高さを設定した。右図のように建物形状内に点が無い場合は、三角形 ABC から点 X の高さを計算するため、計算結果は地表点と判断できる。

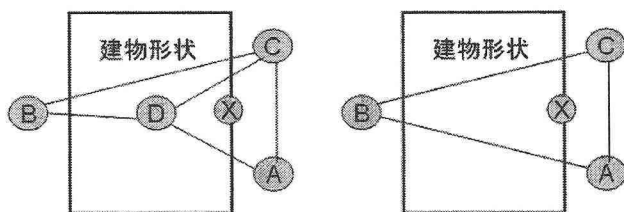
なお、TIN モデル(Triangle Information Network)から点 X の Z 標高値を算出する機能は、LDT3 に搭載されており、建物形状に標高値を与える作業の時間短縮にも貢献した。

(3) 三角形要素自動作成

(1), (2)の前処理を終えたところで、LDT3 の TIN モデル作成機能を使って三角形要素の自動作成を行う。

- ① 点群データと高さが定義された建物形状線の点情報(XYZ)を抽出
- ② 建物形状線を境界線とし、建物内部に作成される三角形要素を除去
- ③ 三角形要素自動作成
- ④ TIN 情報を LandXML 形式に出力し、解析用の節点・要素データにフォーマット変換

図-6に一連のデータ処理フローを示す。



建物形状内点がある場合 建物形状内点が無い場合
図-5 建物形状点の高さ計算

4. 氾濫解析

今回、2004年7月の福井県足羽川の氾濫を事例として解析モデルの作成と氾濫解析を行い、実測値との比較を行った。解析対象領域は破堤地点を含む横 500m×縦 260mとし、図-7に示す。

前章に述べた方法により解析モデルを作成した。自動属性判別法で加工された点群データは、メッシュ間隔 5m と 10m の 2 種類を作成し、モデル作成の手間や氾濫解析の精度を比較する。各モデルの節点数と要素数を表-1に示す。

また、10mの解析モデルを図-8に示す。図-8の丸部分は、鉄道をアンダーパスする標高の低い道路が存在している。このような箇所ではレーザー計測データは取得されないため、別途手動で道路の標高を与えた。図-9は図-8に示した三角形要素を三次元的に表したものである。アンダーパス部分が鉄道の標高ではなく、実際に水の流

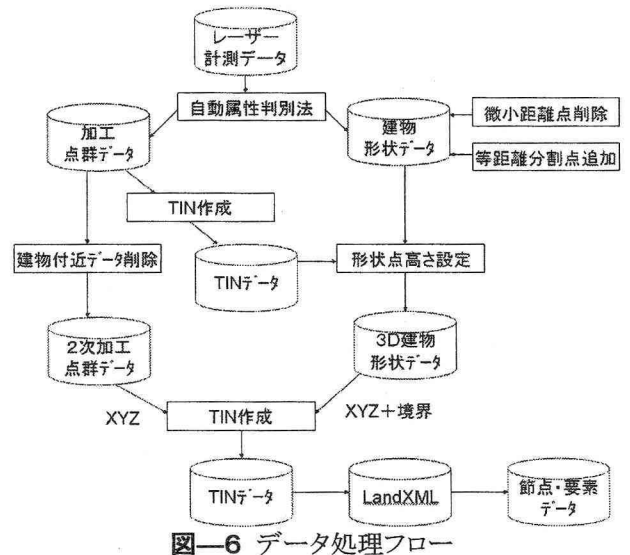


図-6 データ処理フロー

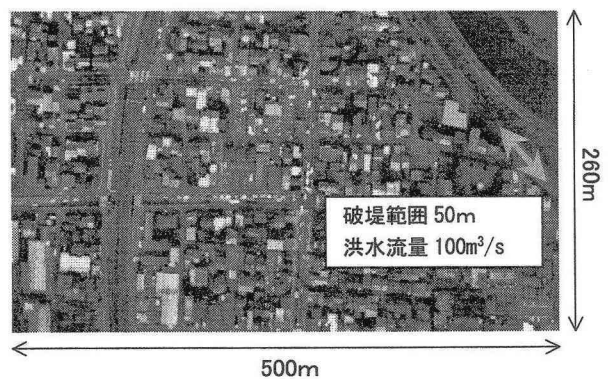


図-7 解析対象領域

表-1 節点・要素数と計算時間

モデル	節点数	要素数	計算時間
5m	4484	7014	31 min. 56 s.
10m	2316	3227	16 min. 10 s.

れる道路の標高に修正された様子がわかる。

本論文は解析データの作成の有用性について考察することを主旨としているため、氾濫解析手法の詳細説明は割愛する。なお、氾濫解析で用いた基礎方程式や有限要素法、氾濫解析手法については文献を参考にした⁷⁾¹⁰⁾。

氾濫解析に用いた洪水条件は、破堤範囲 50m、洪水流量 $100\text{m}^3/\text{s}$ とした。解析対象時間は破堤直後から 10 分間とする。また、外周境界条件については図-10に示される対象領域の標高から、図の矢印方向へ氾濫流が進んでいくと考え、解析モデルの上側および右側に流出無という条件を設定した。参考までに、本解析にかかった計算時間を表-1に示している。利用したパソコンの環境は、OS:Windows2000, CPU:Pentium 1GHz, メモリ:512MB である。

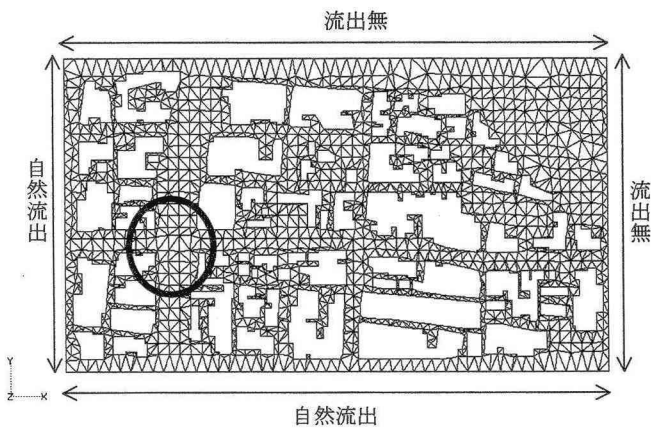


図-8 解析対象三角形要素(点群データ 10m)

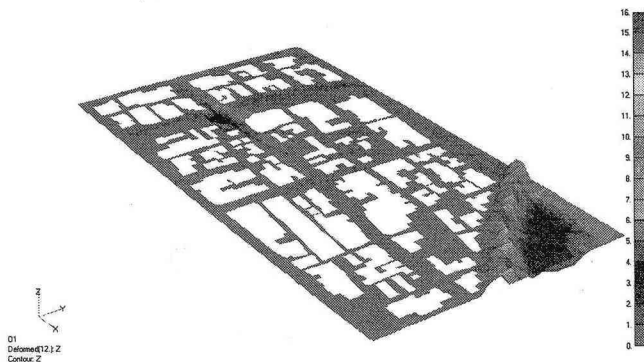


図-9 解析モデルの標高形状図

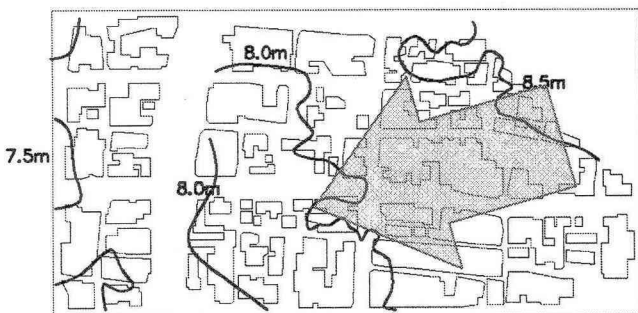


図-10 解析モデルの標高コンター図

5. 考察

(1) 解析モデル作成

表-2に手修正時間を含んだモデル作成時間を示す。【】内は図-8中の丸部分で示されるアンダーパスを手修正した時間であり、節点数・要素数を参考として記載した。

今回の解析モデルの作成作業を自動プログラムなしで行うと 50 時間かかった。10m モデル作成時間の6時間と、三角形要素作成のための前処理プログラム作成時間の8時間を含めても、モデル作成時間は 14 時間で済んだ。つまり、モデル作成に要する 50 時間の作業が $6+8=14$ 時間となり、作業時間を約 1/3 に抑えることができた。

今回、10m モデルは微小点削除および建物形状線に点を追加する設定値を試行錯誤しながら決定した。しかし、5m モデルの作成は、設定値を試行錯誤することなくモデル作成ができ、10m モデル作成よりもさらに短時間で行うことができた。

(2) 氾濫解析結果

a) 氾濫シミュレーション

図-11に、破堤から2分ごとの流速ベクトル図を示す。これより建物形状を考慮した有限要素解析を実施することにより、破堤箇所から洪水流量が流れ込み、建物や道路の配置に沿って氾濫が進んでいく過程を時系列に確認することができた。また、図-10の標高図から予想されたとおり、矢印方向へと流れていることが確認された。

実際の現象では、洪水が鉄道を越えて西側まで達していたので、その現象が解析で再現できたかが重要なポイントとなる。解析結果では、破堤直後に大きな流速が発生し、解析領域の中心を東西に走る道路にいち早く流れ込み、西に向かって流れていることが確認できた。

また、破堤後6分で鉄道に到達し、その後アンダーパス部を通って西側まで流れていく現象も再現できた。

b) 実測値との比較

今回は解析領域内にある4点について氾濫解析より得られた計算値と実測値とを比較し、作成モデルの有用性について検証を行った。ここでの実測値とは、災害直後に福井大学教育地域科学部山本博文助教授の研究室メンバーが氾濫痕跡を基に近辺の道路等の標高から求めた浸水の達した標高である。計算値との比較に当たっては、この標高を災害時の洪水水位として扱うこととする。

図-12に破堤から2分ごとの洪水水位を示す。

図-13に比較地点、表-3に実測値と計算値(10 分後の洪水水位)の比較を示す。図-13の○印で示される4点について計算値と比較した。

表-2 解析モデル作成時間

モデル	作成時間(hour)	節点数	要素数
5m	3.0【1.0】	4484	7014
10m	6.0【1.0】	2316	3227

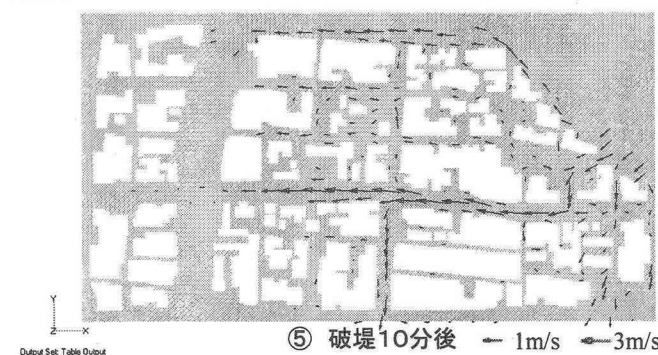
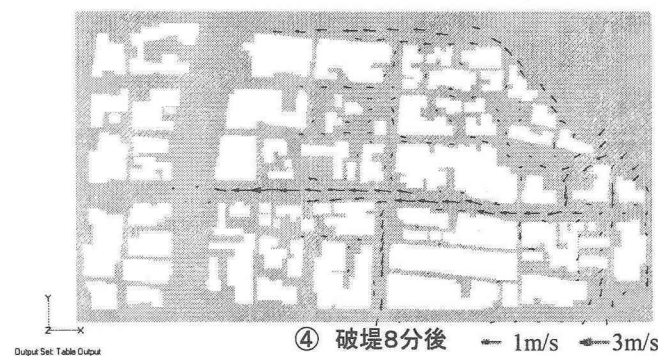
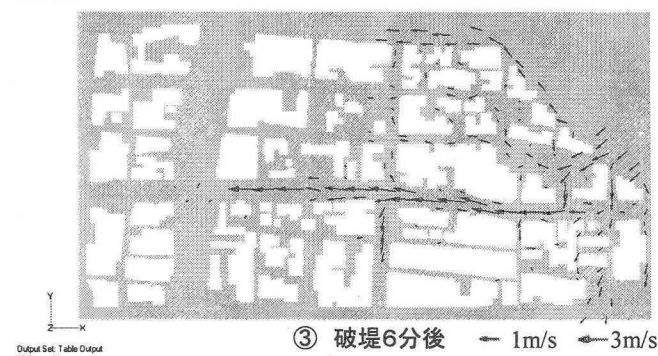
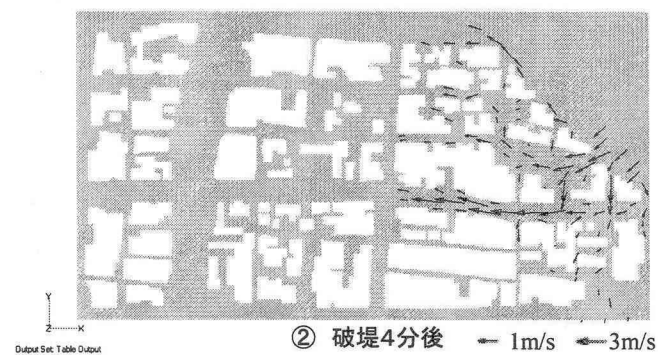
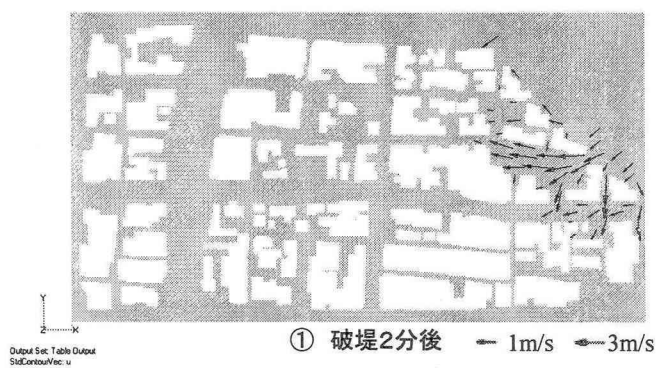


図-11 流速ベクトル図
(上から破堤後2, 4, 6, 8, 10分後)

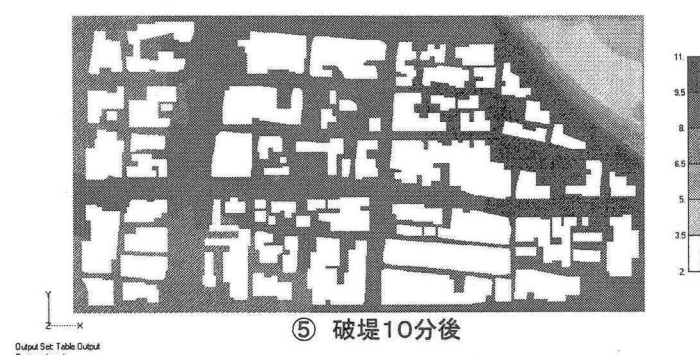
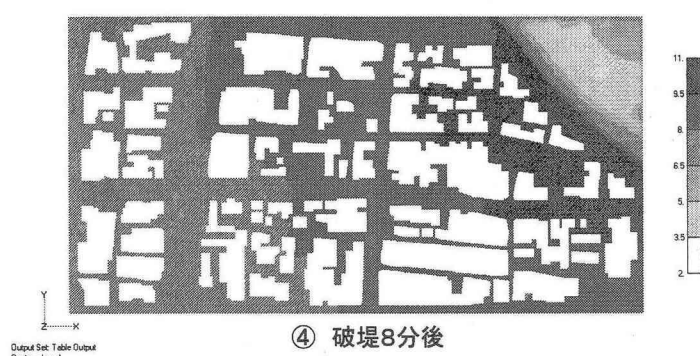
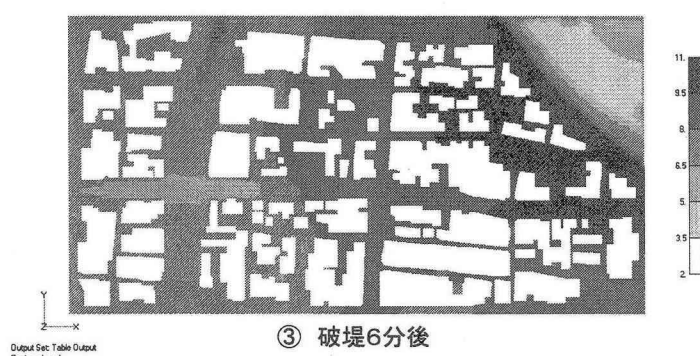
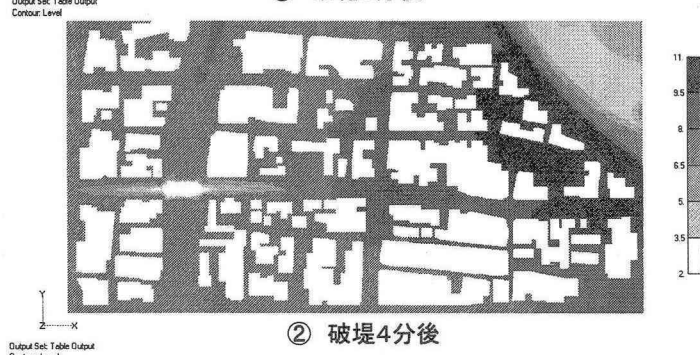
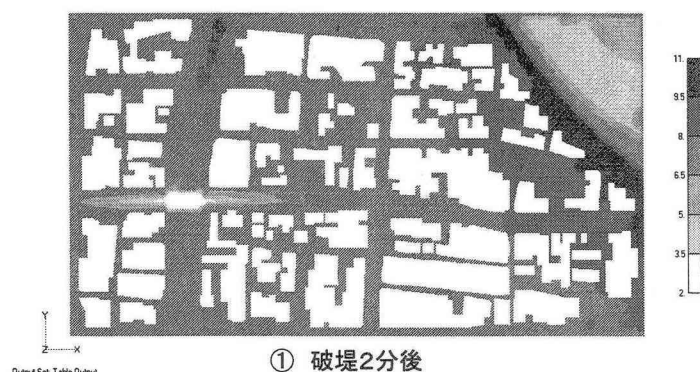


図-12 洪水水位図
(上から破堤後2, 4, 6, 8, 10分後)

10m モデル, 5m モデルともに誤差率は小さく良好な結果が得られた. 特に 5m モデルでは, 誤差率5%以下に収まっている. また, 10m モデルと 5m モデルを比較すると, 5m モデルの計算結果のほうが実測値に近い結果となった. これは, モデルをより細かくしたためモデルの精度が良くなったことが要因と考えられる. さらに細かなモデルを作成すれば, 精度も向上すると考えられる.

6. 結論

本研究で, レーザー計測データを自動加工することで解析モデル作成の大幅な省力化が確認できた. 都市部は建物などの人工構造物が多く, 形状はますます複雑化していくものと思われる. また, 構造物を新規に建設するなどの 3 次元空間変化も激しいことから, レーザー計測データを有効活用し, 精度の高いモデル作成は重要な技術になってくる. 今後は都市部以外の山岳部モデル作成にも取り組んでいきたい.

モデル作成の課題としては, レーザー計測で立体交差等の構造物が重なった場合, 標高の高い構造物が表現される. 今回, 鉄道部分は, 一部手作業で行った. 今後は, その部分を自動調整する機能が必要となる. また, 解析モデル扁平要素の自動検索と自動修正機能や, 建物形状の直線化精度向上も必要であることが判り, 今後その機能開発に取り組んでいくことを考えている.

今回, プログラム開発では, 3 次元 CAD ソフトである LDT3 が持つ機能を活用した. 3 次元 CAD は 20 年前から大型汎用機・ワークステーションといった超高スペックでしか運用されなかったが, 最近ではノートパソコンでも十分

運用稼働できるものに進化した. しかしながら, その 3 次元 CAD を技術者が上手く使いこなせないために, まだ実務で普及しきれてないのが現状であり, 今後 3 次元 CAD を普及させていくことが課題となる. 3 次元 CAD は元来, 道路・造成の設計および施工で多く利用されてきたが, CAD の持つ機能が数値解析モデル作成でも十分に威力を発揮することがわかった.

洪水氾濫解析も良好な結果が確認できた. 解析シミュレーションもハードスペックの問題から, 2 次元モデルに置き換えて解析を行っていた. 自然現象は 3 次元の事象であり, 換算された 2 次元では正確に問題解決できない. 近年は世界的にみても自然災害が多く, 今後も異常気象が続く今まで想定していた規模を越える自然災害が発生する恐れがある. このため, 環境予測・防災・危機管理の分野が注目され, その問題を解決するために, 情報処理・計算力学の技術が果たす役割は大きいと思われる. 今後は氾濫解析以外の幅広い分野でレーザー計測データを利活用することを筆者らは考えている.

謝辞

研究の遂行において, 福井大学山本博文助教授には災害時の貴重な調査結果と現場での状況等, 災害現場でしかわからない情報の助言を賜った. ここに記して感謝の意を表します.

参考文献

- 1) 館健一郎: 非構造格子モデルによる氾濫解析, 土木学会第 58 回年次学術講演会, pp. 133-134, 2003 年 9 月.
- 2) 岡田岳ほか: 有限要素法による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp. 53-54, 2004 年 9 月.
- 3) 竹谷謙一: 洪水氾濫解析のための自動要素分割法, 第 22 回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会, pp. 124-125, 1995 年 3 月.
- 4) 川本一樹ほか: レーザースキャナーを活用した河道モデル作成手法に関する研究, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp. 393-394, 2002 年 9 月.
- 5) 谷口健男: FEM のための要素自動分割, 森北出版, 1992 年 9 月.
- 6) 山本一浩ほか: 自動属性判別法によるレーザ計測データの有効活用について. 第 30 回情報利用技術シンポジウム論文(投稿中)
- 7) 松本純一, 梅津剛, 川原陸人: 準陽的有限要素法による浅水長波流れと河床変動解析, 計算工学講演会論文集 Vol. 2, pp. 249-252, 1997 年 5 月.
- 8) Umetsu: A Boundary Condition of Moving Boundary Simulation for Broken Dam Problem by Three-Step Explicit Finite Element Method, Advances in Hydro-Science and Engineering, Vol II, China, pp394-399, 1995.
- 9) 松本, 梅津: 気泡関数を用いた陽的有限要素法解析の検討, 第 8 回数値流体力学シンポジウム, pp635-638, 1994.
- 10) Kawahara, Umetsu: Two Step Explicit Finite Element Method for Sediment Transport, 3rd Sympo. River Sedimentation, Jacson USA, pp1487-1495, 1986.

(2005.5.19 受付)

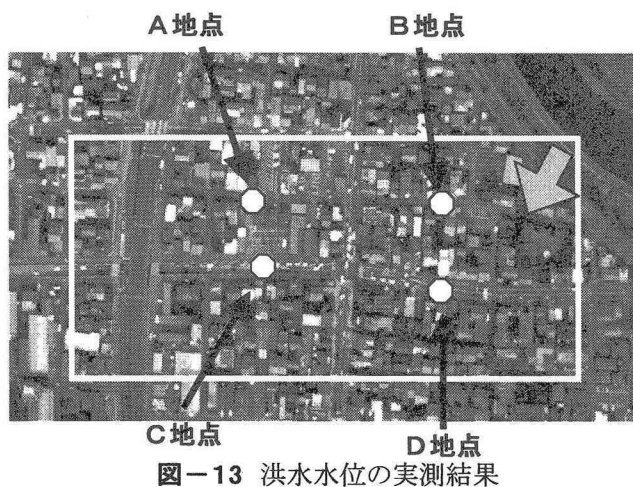


表-3 洪水水位の実測値と計算値の比較

観測地点	実測値 (m)	計算値 (m)		誤差率 (%)	
		5m モデル	10m モデル	5m モデル	10m モデル
A 地点	8.6	8.7	8.3	1.16	-3.4
B 地点	9.8	10.1	10.1	3.06	3.0
C 地点	9.5	9.7	9.6	2.11	1.0
D 地点	8.6	8.2	8.0	-4.65	-6.9