

8. おわりに

アメリカの氾濫原管理について調査するきっかけは、「アメリカでは氾濫原の土地利用規制をするだけでなく、浸水の危険性がある場所の建物の買い上げを大々的に進めている」という話を聞いたことである。狭い氾濫原にひしめき合っている日本からみると、考えられないような洪水対策に思えた。

日本では、総合治水対策によって、浸水に対して強いまちづくりを推進するという政策目標が掲げられ、流域全体での水害対策が進められてきた。しかし、総合治水対策の導入から相当な時が流れたものの、浸水に対して強い土地利用といった面からは、なかなか実効性のある対策を打ち出せないでいるのが現状でないだろうか。氾濫原の利用を制限するというのは、氾濫原の利用可能性を最大限に高めるという治水事業の目的と矛盾しているように見える。土地利用のコントロールには、このようなジレンマが本質的に存在し、それが実施を困難にしていると考えられる。

一方で、アメリカの氾濫原管理施策を調査してみると、施策に実効性を持たせるために非常に巧妙な仕組みを作り上げていることに気づいた。洪水保険とリンクすることで、安全な氾濫原利用のための対策を後押ししようという仕組みである。

そのような仕組みによって、アメリカが洪水被害の軽減に成功したかということ、未だにその目的を達成したとはいえない。また、アメリカの制度が日本にも適用可能かということ、断じてそうではないだろう。「アメリカでは・・・、でも日本では・・・」というような論じかたは絶対にすべきではないが、アメリカの制度について知ることで、日本の氾濫原管理を考えるうえでヒントとなるようなアイデアが得られることは確かであろう。本報告書は、アメリカの氾濫原管理を紹介することで、日本の氾濫原管理のあり方を考えるきっかけとなることを願って執筆したものである。

筆者の私見ながら、日本における氾濫原管理（特に、土地利用施策）の今後を議論するにあたり、検討が必要と考えられる事項について記しておく。

・水害対策の現状と収支の把握

バイアウトを含め、アメリカの土地利用施策の主目的は、被災者への災害援助、洪水保険の支払いによる費用を抑制することにある。氾濫原の利用形態を変えることが、経済的にみて効率的との判断に基づいている。

では、日本の場合はどうだろうか。まず、日本の水害対策の収支（洪水被害額、復旧にかかる費用、治水事業費、その他）について、受益と負担も含めて明らかにする必要があると考えられる。例えば、水害の被害者がどれだけの被害を受け、復旧の資金としてどれだけ受けとっているのか（保険や見舞金等）などが定量的に示された例は、筆者の知る限

りではない。そのようなデータは、水害対策の達成度を測るうえで最も基礎的なデータである。誰が、どこに、どのように、どれだけの投資をしていて、その結果、水害の被害はどうなっているのか、そのような情報を定量的に明らかにすることは、望ましい氾濫原管理施策についての科学的議論の前提となる。

・日本の社会に合った氾濫原利用施策の検討

例えば、氾濫原の建物のパイアウト（買い上げ、移築）は、国土が広く、土地に固執しないアメリカだからできる施策だといえなくもない。アメリカでも、既に開発が行われてしまい、建物が密集している場所では、このような手法の適用は経済的にみても非効率であろう。

危険な場所の開発が既に行われてしまった場合については、その場所をもとの氾濫原に戻すことはできないだろう。しかし、開発による被害の発生が予測される場所や、遊水機能を保全することに正当性が見いだせる場所については、将来的な開発の抑制策が必要とされる場合もあると考えられる。その場合、どのような実効的な対策がとりうるのか、整理しておく必要がある。何らかの対策をとる場合には、流域全体での合意が得られるような措置が講じられなければならない。例えば、氾濫原の賢明な利用をすることで得るようにするように仕向けたり、氾濫原の利用に何らかの制限が生じる人には、それを補償する仕組みを作ったりするなどである。

・氾濫原管理に必要な技術開発

洪水地図は、氾濫原管理の基礎となる情報である。科学的知見に基づいて浸水の危険度を定量的に明らかにすることで、施策の公正な実施が可能となる。

日本でも、洪水ハザードマップの作成が進められているが、中小河川も含めてくまなく地図化するためには、地図作成に要する費用の削減が課題である。また、洪水ハザードマップでは、治水事業の計画対象の洪水（計画高水）による浸水を示しているが、被害軽減という面からみて、望ましいリスク区分、表示となっているのかどうかについても検証が必要であろう。これらの点についての解決策を技術的に検討することで、より高度な水害対策の推進が可能となるものと考えられる。

筆者は、平成14年度後半、人事院行政官短期在外研究員制度により米国地質調査所（USGS）に滞在した。研究テーマ名は、「米国における非構造物による水防災対策」である。この報告書の主要な部分は、その際に調査した内容をもとに作成した。アメリカでの滞在ならびに関連する調査にあたり様々な便宜を図っていただいた方々、ヒアリング調査、資料提供に協力していただいたアメリカ政府諸機関の方々には、この場を借りて謝意を表す。とりわけ、米国地質調査所（USGS）のRalph Cheng博士には、米国滞在中に公私にわたってお世話していただいた。深く謝意を表す次第である。

付録1 Galloway 報告の概要 (訳)

1993年、中西部ミシシッピ川を中心とした大洪水の後、アメリカ政府は多省庁氾濫原管理調査委員会 (Interagency Floodplain Management Review Committee) を組織し、洪水被害の要因分析を実施した。翌1994年、この分析にもとづき「共に挑む：21世紀に向けた氾濫原管理」(“Sharing the Challenge : Floodplain Management into the 21st Century”) ⁸⁾がとりまとめられた。Galloway 報告と略称されるこの報告には、以降に実施された施策の提言も含まれており、アメリカの氾濫原管理の方向性を決定づけたともいえる。

そこで、本報告書の付録として、Galloway 報告の概要 (Executive Summary) 部分の翻訳を掲載する。

多省庁氾濫原管理調査委員会より 政府氾濫原管理専門委員会への報告

概要

我が国がもはや自然災害の高い費用を払うことができないという事実を直視するときが来た。アメリカの納税者への経済的費用をまかなえないだけでなく、共同体や個人への社会的費用もまかなうことができない。

1993年10月27日 連邦危機管理庁長官 James L. Witt の議会での証言

氾濫原と我が国

ミシシッピ川とミズーリ川の上流域とその支川は、我が国の歴史上大きな役割を果たしてきた。その存在は、合衆国の中西部の北部の成長に不可欠だったし、この地域を世界の他の地域と結ぶ交通網であった。これらの川の氾濫原は、最も生産力の高い農業地帯である。それらは、様々なレクリエーション機会を提供し、重要な生態系を有している。この地域の開発は多くの利益をもたらしたが、それが常に賢明な方法によるものであったとはいえない。結果として今日、我が国は3つの大きな問題に直面している。

第一に、1993年の中西部の洪水は、ミシシッピ川上流部だけでなく全国に渡って人々

と資産が危険にさらされていることを示した。危険な場所にいる人々の多くは、その危険性の特性とそれがもたらす結果について知らないばかりでなく、その財政的負担も十分にしていない。

第二に、我が国がミズーリ川上流の脆弱な生態系の重要性を十分に認識したのはつい最近のことである。過去二世紀に渡るハビタットの喪失により、我が国は深刻な生態系破壊の危機に直面している。

第三に、連邦、州、部族及び地方自治体の氾濫原管理責任は明確に区分されなければならない。現在のところ、氾濫原管理に対する姿勢は連邦、州、部族、地方自治体によって大きく異なっている。

多省庁氾濫原管理調査委員会は、我が国の氾濫原をより良く管理する方法を提案する。この報告書は1993年の洪水の特性と影響範囲、政府の対処について記述するとともに、変革への青写真を示している。この青写真はミシシッピ川上流部及び我が国全体を対象としている。その基本は、政府、企業、一般市民の全レベルで責任と説明責任を共有するというものである。これは、河川と氾濫原の競争的な使用のバランスを求めるものであるが、一方では、不適切だからといって氾濫原での活動を全てやめることができないことも認識している。委員会は、このようなアプローチが、低頻度の洪水及びより高頻度の小洪水の双方への脆弱性を軽減するために必要な変革をもたらすと信じている。このアプローチをとることで、現状が公共、民間の両部門に与えている環境的、社会的、経済的負担が軽減される。

共に挑む ー連邦、州、部族、地方自治体、企業、市民

1936年の洪水防御法の可決より、連邦政府は我が国の洪水被害軽減の努力を一手に引き受け、その結果として、氾濫原管理活動も一手に行ってきた。増加する洪水被害に対抗するためには、構造物によるプログラムが重要と考えられ、また主要な予算配分先であった。近年、連邦政府は非構造物によるアプローチを支持し始めている。多くの州、部族、地方自治体が洪水被害を軽減し、氾濫原の自然機能を向上させるための氾濫原管理の努力を行っている。しかしながら、これらのプログラムの実施には調整がなく、両立しないような連邦のプログラム、政策、規制や指針があり、効率的な氾濫原管理を妨げていた。いくつかの州や自治体は氾濫原管理に積極的ではなかった。連邦政府が支配的な役割を果たし、生態系保全、氾濫被害軽減、洪水復旧活動への予算配分を行ってきたことが、多くの州、部族及び自治体、企業、市民が氾濫原管理に関する賢明な決断を行うインセンティブ

をそいできた。今、まさに以下のことがらを実施すべき時である。

- ・ 氾濫原管理の達成のための責任と説明責任を、我が国の全レベルの政府、市民が共有する。連邦政府のみでは達成不可能であるとともに、支配的な役割を果たすべきでもない。
- ・ 将来目標として、洪水の危険性と被害への国家の脆弱性を軽減し、氾濫原の自然資源及び機能を保護、向上することを同時にかつ統合的に行う。このアプローチは、氾濫原の無分別な使用を避け、氾濫原が使用される場合は脆弱性を最小化し、使用されている場合は被害を軽減する。
- ・ 全レベルの政府が効果的な氾濫原管理を実施したり、参加したりするのに必要な支援と道具を提供する連邦のプログラムを構築する。

委員会の調査結果：

委員会の調査結果は二つの部分に分けてられている。1993年の中西部の水害と、連邦、州、部族、地方の氾濫原管理である。

1993年の中西部の洪水

1993年の中西部の洪水を調査した結果、委員会は以下のような結論に達した。

- ・ 1993年の中西部の洪水は、水文気象学的に未曾有の事象であった。この洪水は、ミズーリ川上流域大部分への超過的な降雨により引き起こされた。この降雨と流出ともなう被害は高台及び氾濫原で生じた。洪水前の降雨が地面を飽和させ、支川の流れを増加させた。つづく降雨は地表面に溢れ、低地に流出して洪水となった。再現期間は幅広く、多くの場所で100年以下であり、ミシシッピ川のイリノイ州 Keithsburg からミズーリ州セントルイスへの区間、ネブラスカ州 Rulo からミズーリ州 Hermann までのミズーリ川の区間では500年近くであった。45箇所のUSGSの観測所では、洪水位は100年確率を超した。洪水の継続期間も特筆すべきものであった。多くの地域が何ヶ月も水に浸かった。
- ・ 1993年のような降雨、洪水は今後も引き続き発生する。洪水は反復的な自現象だからである。長期的気象パターンに関する限られた知見及び国家の水文データ記録の短い歴史を考えると、洪水の再現期間は予測困難である。氾濫原の活動、堤防の防御でさえ、危険な状態にあり続ける。
- ・ 1世紀半にわたる全流域の湿地と高台の被覆の喪失、風景の改変は流出量を大きく増加させた。多くの損失は1930年以前に生じたが、これらは、近年の排水、洪水被害軽減、舟運のための開発に関係するものもある。高台の流域対策と高台、低地の湿地の回復は、より高頻度な（25年以下）の洪水位を下げることはできるが、それが1993年の状況を大きく変えることができたかは疑問である。

- ・ 流域全体の人間活動はハビタットと生態系の多様性を大きく損なった。洪水被害軽減と舟運事業、土地利用形態が低地のハビタットを悪い方向に変えた。
- ・ 洪水による国家への費用は幅広い。38人の死者は洪水に起因するし、財政的被害の推定は129億ドルから160億ドルである。農業被害が被害の半分以上を占める。農業生産物災害援助の支払いの70%以上は、地盤の飽和により植え付けができなかったり、作物が死んでしまったりした高台域で生じた。100,000軒の被害家屋の50%近くは、河川の洪水による地下水位上昇や下水の逆流により生じた。さらに、多くの被害はまだ定量化されていない。流域内外の企業活動への影響は計算されていない。政府の税収減は不明である。人々の肉体的、精神的な影響は調査中であり、懸念されているところである。
- ・ 洪水被害軽減プロジェクト、氾濫原管理プログラムが実施されているところでは、人口集中部、農業、工業への被害を計画どおり顕著に軽減していた。陸軍工兵隊（USACE）により作られた遊水池や堤防は190億ドル以上の潜在的被害を防いだと推定される。カンサスシティとセントルイスの大部分の地域は、郊外域が大被害を被ったのに対し、洪水による破壊を免れた。土壌保全局による流域プロジェクトはさらに4億ドルを防いだと推定される。洪水保険（NFIP）と州の氾濫原管理プログラムによる土地利用規制は流域全土で危険にさらされた建物数を減らした。
- ・ 地域によって造られた堤防は破堤したり越水したりした。これらは、洗掘、堆積によって堤防内の土地へかなりの被害を与えた。
- ・ 堤防の有無に関わらず、1993年の洪水はミズーリ川の本川下流部及びミシシッピ川の上流部の氾濫原の多くを浸水させたと考えられる。堤防が水を堰きあげ、他の堤防や低地の水位を上げて危機的状況としたこともあった。閘門やダムやその他の舟運施設は洪水位をあげなかった。より頻度の高い洪水—流量が少ないもの—に対しては、舟運用の堤防は微少な水位上昇を起こすかもしれない。

連邦、州、部族、地方の氾濫原管理

委員会は現在の連邦プログラムの構成、連邦、州、部族、地方自治体の関係、洪水中、洪水後の様々なプログラムのパフォーマンス、これらの活動から出された活動報告を調査した。その結果、委員会は以下の結論に達した。

- ・ 連邦、州、部族、地方自治体による氾濫原管理活動の責任区分は、明確に定義されなければならない。連邦のシステム内では、水資源に関する活動一般と、特に氾濫原管理とをよりよく調整すべきである。州と地方自治体は氾濫原管理に財政的権限を持つべきである。それなくして、氾濫原管理に全面的に関わっていくインセンティブが生じない。連邦プログラムにおいて、州政府は地方自治体を支援しなければならない。連邦政府は、氾濫原管理活動の事例を示す必要がある。

- ・ 国家洪水保険プログラム（NFIP）には改良が必要である。対象とする市場－氾濫原占有者－への保険の浸透は低く、20～30％である。NFIPに参加しないと決めた自治体も実質的な災害支援を受けている。保険に加入していない者への連邦の災害支援の供給は、多くの氾濫原住民に洪水保険の購入は無意味な投資であるという考えをもたらす。地図作成プロジェクトは予算不足で、より高い精度とカバー率が必要である。災害毎に異なるプログラムの要求事項には均一化が必要である。
- ・ 連邦の主要な水資源計画書である「原則と指針」（Principles and Guidelines）は古く、国家の経済、社会、環境の目的間のバランスを反映していない。環境的、社会的インパクトを貨幣価値で定量化することができないことが、バランス不足を悪化させている。結果として、これらの影響はしばしば低く見積もられたり省かれたりしている。「原則と指針」の批判者の多くは、これを非構造的アプローチに対して偏向しているとみている。
- ・ 氾濫原と流域の環境を守り向上させるための現在の連邦のプログラムは、その要求にみあうほど効果的ではない。支援、柔軟性、予算措置に欠けており、うまく調整されていない。結果的に、ハビタットの改善の進展は遅い。
- ・ 連邦の災害前、対応、復旧、将来の被害軽減プログラムは一連化されるべきだが、進展がみられる。我が国は、政府による積極的で思いやりのある被害者への対応の必要性を認識しているが、調整のための対処が必要である。浸水頻度が高い家や被害をうけた土地のバイアウトは、将来の洪水被害の軽減にかなりの効果をあげるだろう。
- ・ 我が国は、効果的なミズーリ川上流域の水資源管理のため、調整された戦略を必要としている。統合的な舟運、洪水被害軽減、生態系管理の責任は、いくつかの連邦プログラムに分断されている。
- ・ 現在のミシシッピ川上流域の洪水被害軽減システムは、連邦、地方、個人の堤防と遊水池の緩やかな集合をなしている。この集合は氾濫原活動の脆弱性の軽減を保証しない。多くの堤防の位置は好ましくなく、将来壊れる可能性がある。現在の連邦のプログラムを変えなければ、これらの堤防のいくつかは災害後の復旧対象として残り続けるであろう。堤防の修復プログラムには、同時に進められている環境保全に配慮できるよう柔軟性が必要である。
- ・ 我が国は、死活的な水資源管理情報の収集に提供に科学と技術を十分活用していない。氾濫原の使用計画及び危機的状況での運用に必要な情報提供に改良の余地がある。

委員会の提言

提示された目標にむけて、委員会は提言を作成した。

- ・ 氾濫原管理の努力が成功に向けて組織化されるため、大統領は以下を行うべきである。
氾濫原管理の国家的モデルを構築し、連邦、州、部族、地方の責任を明確化し、州、

地方自治体の氾濫原管理活動に財政的支援を与え、州を国家の第一の氾濫原管理者と規定するための氾濫原管理法の法制化を提言する。

大統領令の修正を出す。それは、氾濫原活動への健全な判断を下すという連邦機関の責任を明確化するためである。

さらに、水資源委員会による連邦及び連邦一州一部族の水資源に関する調整を活性化させ、必要に応じ、地域的な問題について連邦一州一部族の調整のための場を提供するための流域委員会を再構築する。

- ・ 連邦の水関連プロジェクトとその効果の総合的評価を進めるため、大統領は、即刻、「原則と指針」のもとで行われる計画において、環境の質と国家の経済開発を同等な目的とすべきである。「原則と指針」に新しい目的を与え、非構造物による代替案を全面的に考慮すべく改訂すべきである。
- ・ プロジェクト開発の調整をすすめる、複数の目的を有する計画に対処し、顧客サービスを向上させるため、政府は連邦政府間及び州、部族、地方政府の間の協調を支援すべきである。
- ・ 州、部族、地方が、今後も引き続き氾濫原管理の成功に力を入れるため、政府は連邦、州、部族及び／または地方による、災害前、復旧、対応、将来被害軽減活動の費用分担を進めるべきである。
- ・ 流域管理を扱う複数の連邦プログラムを調整するため、政府は、これらの活動の調整戦略を策定する多省庁専門委員会を設ける必要がある。
- ・ 氾濫原の環境を向上させ、低地及び高台の自然の貯留効果を高めるための現在の連邦プログラムを十分活用するため、政府は以下のことを行うべきである。

災害後の土地取得プログラムの柔軟性を高めるため、その実施のための法的権限について検討する。

連邦の事業実施と維持管理、災害復旧活動において、環境への配慮を増やす。

連邦政府による環境関連の土地取得活動を、よりうまく調整する。

既存の機関を通じ、土地の売却を望む人からの計画的な取得への予算措置を講じる。

- ・ 洪水保険プログラムの効率性、効果を向上させるため、政府は以下のことを行うべきである。

洪水保険のマーケティングの改良のため積極的な施策を進め、貸し手が従うべきルールを強化し、保険市場への州の援助を模索する。

災害直後の健康、安全、福祉に必要なレベルの保険を買うことができる住民への災害後支援を減らす。保険を買えない低所得の洪水被害者にはセーフティネットを準備する。

保険金請求ごとに保険金額を増やし、将来被害の軽減活動を行う保険契約者に回し、その他の被害軽減事業を支援することで、繰り返し被害への支出を減らす。

基準となる計画洪水流量以下の堤防の後ろに住む人に、保険数理的に決められる保

険購入を求める。

洪水保険証券の有効化までの期間を5日から15日に増やし、洪水が差し迫っているときの保険購入を防止する。

洪水保険地図の適時性、カバー範囲、精度を向上するための技術を向上する。地図作成を保険料及びその他の適切な資金から援助する。なぜなら一般的納税者はこのプログラムより利益を得るからである。

実質的に被害を受けた建物の嵩上げ、破壊、移転をカバーする将来被害軽減のための保険を用意する。

- ・ 氾濫原にいる人の洪水被害への脆弱性を減らすため、政府は下記を行う必要がある。

脆弱性の軽減のために可能な代替案の全てを検討する。氾濫原からの永久避難、洪水警報、氾濫原に残る建物の耐水化、自然及び人工の貯水池の追加的な創出、適切な規模で維持管理された堤防などの構造物などである。

社会的、経済的、環境的価値を十分尊重し、全ての脆弱性軽減の代替案が平等に考慮されるよう改訂された「原則と指針」に基づく洪水被害軽減指針を適用する。

適切な場所であれば、氾濫原管理活動やプログラムによって、プロジェクトの基準となる洪水流量に対して、人口集中地区や重要なインフラ施設の脆弱性を減らす。

- ・ 連邦により建設された水資源プロジェクトが当初目的にあうよう保証し、さらに現在の国家の社会的、環境的目的を反映するよう、政府は完成後のプロジェクトを定期的に見直す。
- ・ 効率的な運用と基準の統一性を保証するため、政府は連邦のプログラムでの堤防の修理、建設を陸軍工兵隊に行わせる。
- ・ 堤防、氾濫原の環境、水理的な効率性を統一的に確保するため、州と部族は非連邦堤防の適切な配置、建設、維持管理を確実に行う。
- ・ 1993年洪水での連邦、州、部族、地方の災害前、緊急対応、復旧、被害軽減事業、それに引き続く将来の努力を活用するため、政府は下記を行う。

洪水保険プログラムの自治体格付けシステムを通じて、州と自治体の氾濫原管理と将来の被害軽減計画の開発と実施を支援する。

氾濫原で危険にさらされている建物を、プログラムに従ってバイアウトするための資金供与を行う。

補助金としてセクション404被害軽減事業補助を州がうける選択肢を与える。

連邦危機管理庁の長官に統合的な連邦災害対応、復旧活動の責任を与える。

連邦機関が、災害関連以外の資金を被害軽減事業の支援に用いることを支援する。

- ・ ミシシッピ川上流域での統合的、水文的、水理的、生態系管理を行うため、政府は下記を行う。

ミシシッピ川上流域及びミズーリ川流域委員会を設立し、流域レベルでのプログラ

ム調整を行う。

議会への諮問に基づき、ミシシッピ川上流での洪水被害軽減、生態系管理、舟運の統合管理の責任をミシシッピ川委員会（MRC）に与える。MRCのメンバーに内務省の代表を加える。MRCにミシシッピ本川及びミズーリ川の連邦が建設、もしくは連邦が支援した健全な堤防の長期的管理と維持の責任を与える。この支援は適切な工学的、環境的、社会的基準への適合を前提としている。

ミシシッピ上流域での連邦の洪水被害軽減と舟運の管理のため、ミシシッピ川上流と支流プロジェクトの設立への議会の認可を求める。

ミシシッピ川上流域を省庁横断的生態系管理デモンストレーションプロジェクトに追加的する。

ミシシッピ川上流域での生態系の必要性に関する分析を行うよう内務省に求める。

- ・ 氾濫原管理と災害運用のために死活的な水資源情報の適時収集、提供のため、政府は以下を行う必要がある。

1993年の洪水期間中及びその後集められた情報を連邦機関、州、地方の活動に提供するクリアリングハウスを米国地質調査所（USGS）に設立し、このような事業の先駆的事例とする。

科学と技術を駆使し、観測、分析、モデル化、氾濫原活動のための意思決定支援システムと地理情報システムの開発を支援する。

調査報告の構成

1993年の春、夏、秋を通じて、合衆国の人々は1993年大洪水によって荒廃した合衆国中西部の様子を毎晩目にした。60年近くにわたり、我が国は洪水の影響を軽減するための努力をしてきた。しかし、失われた人命、被害を受けた家屋、破壊された資産は計り知れない。何故このようなことが起こったのか。何がこの洪水を起こしたのか。人間の干渉が状況を悪化させたのか。繰り返しを防ぐために国がすべきことは何か。これらの質問に答えるために、農業省長官 Mike Espy の指揮による政府の洪水復旧専門委員会の一部である氾濫原管理専門委員会は、多省庁氾濫原管理調査委員会、水資源に関係する連邦の省庁に配置された31人の専門家集団を組織した。

調査委員会は1994年の1月から6月までワシントンと中西部で活動した。洪水被害をうけた9州の知事の事務所での調査では、州及び地方の政府職員に会い、60カ所以上を訪れた。調査委員会は連邦の省庁、利害関係者、議員及びスタッフ、洪水に関心を持つ数多くの民間人と幅広く接触した。調査委員会の一部、1993年11月にホワイトハウスに認可された科学的評価及び戦略チームは、洪水と流域情報のデータベースが開発されたサウスダコタ Sioux Falls の EROS データセンターで活動した。

調査委員会の報告は、提言の実施の責任分担とスケジュールの提案を示した活動計画、財政評価の文書、科学的評価及び戦略チームの事前報告を含んでいる。

付録2 非構造格子モデルによる氾濫解析

米国地質調査所 (U.S. Geological Survey) では、リアルタイムで河川の氾濫を予測し、インターネットを通じて情報提供するシステムを開発中である。浸水の予測には、非構造格子を用いた水理解析モデル (UnTRIM モデル⁴³⁾ の適用が進められている。UnTRIM モデルには、高速かつ安定した計算が可能という特長があるとともに、非構造格子で離散化することから、場所毎に必要なとされる精度に応じた効率的な氾濫原の格子分割が可能となっている。

ここでは、UnTRIM モデルの概要を紹介するとともに、非構造格子モデルの氾濫解析への適用性に関する検討結果を紹介する。

UnTRIM モデルの概要

(1) TRIM モデル

UnTRIM (Unstructured Grid TRIM) モデルは、半陰形式の有限差分法による浅水流解析モデル TRIM (Tidal, Residual, Inter-tidal Mudflat) モデル⁴²⁾ の改良版である。TRIM モデルは計算領域をデカルト座標系の直交格子で離散化しているが、UnTRIM モデルそれを非構造格子に拡張している。

TRIM モデルの基礎方程式 (二次元浅水流の場合) は、連続式及び x 、 y 方向の運動方程式である。

連続式:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta)U]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta)V]}{\partial y} = 0$$

x 方向の運動方程式:

$$\frac{DU}{Dt} - fV = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 (h + \zeta)} (\tau_x^w - \tau_x^b) + A_h \nabla^2 U - \frac{g}{2\rho_0} (h + \zeta) \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

y 方向の運動方程式:

$$\frac{DV}{Dt} + fU = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 (h + \zeta)} (\tau_y^w - \tau_y^b) + A_h \nabla^2 V - \frac{g}{2\rho_0} (h + \zeta) \frac{\partial \rho}{\partial y}$$

ここに、 U 、 V は水深平均流速、 ζ は基準となる水表面高さ、 h は基準となる水表面高さからの水深の変位、 f はコリオリのパラメータ、 g は重力の加速度、 ρ は水深平均の密度、 ρ_0 は基準となる密度、 τ_x^w 及び τ_y^w は風による水表面のせん断力、 τ_x^b 及び τ_y^b は底面のせん断力、 A_h は水平方向の渦動粘性係数である。

運動方程式の重力項及び連続式の流速項が数値解析の安定性を支配しているという分析

結果に基づき、TRIM モデルではそれらの項を陰形式、それ以外の項を陽形式で扱っている。このような扱いをすることで、高速かつ安定した解析が可能となっている点が特徴である。TRIM モデルは、まず、二次元浅水流モデルとして開発され、非静水圧近似の三次元モデルへ (TRIM3D)、さらに、非構造格子へと改良を経てきた。UnTRIM モデルでは、従前からの TRIM モデルの基本的なアルゴリズムを変えず、離散化方法のみを非構造格子に拡張している。したがって、高速かつ安定な計算の実行という TRIM モデルの特長が受け継がれている。

TRIM モデルでは、水位は計算格子の中央、流速は計算格子周囲の格子境界線上で定義されている。そして、地面 (海底) の高さが計算格子周囲の格子境界線上で定義されている点も TRIM の特徴である。計算格子間の水の移動の有無は、格子境界線上の水深の正負で自動的に決まる。計算格子への水の出入り (Wetting 及び Drying) が簡易に取り扱えることから、潮位変動の影響がある干潟や河川の氾濫の解析に適したモデルだといえる。

米国地質調査所 (U.S. Geological Survey) では、サンフランシスコ湾の流れの解析に TRIM モデルを利用しており、モデルの有効性が証明されている⁴⁸⁾。

モデルの高速性を生かした応用事例には、サンフランシスコ湾のリアルタイム予測システム PORTS (Physical oceanographic Real-Time System) がある。これは、TRIM2D モデルによるサンフランシスコ湾の流れの解析結果を、インターネットを通じてリアルタイムで提供するシステムである。このシステムでは、リアルタイムで計測された現地データ (水位、流速、流向等) を取り込み、解析結果のキャリブレーションを行っている。1 時間毎に、過去 24 時間の計測データをもとにモデルが修正され、将来 24 時間の予測計算が行われる。解析結果はインターネット (<http://sfports.wr.usgs.gov/sfports.html>) で配信されている。

(2) TRIM モデルの非構造格子化⁴⁹⁾

UnTRIM モデルでは、非構造格子を用いて計算領域が離散化される。デカルト座標系の直交格子では、 x 方向、 y 方向の流速が定義されて運動方程式が解かれるが、非構造格子では、格子を囲む境界線上に直角な方向に流速が定義され、運動方程式の有限差分が行われる。また、自由表面の式から格子の水位が求められる。計算領域全体及び格子内それぞれの体積は保存される。

解析領域の離散化に非構造格子を用いることの長所は、解析領域の地形形状や領域内の地物 (堤防や道路など、流れに影響を与えるもの) に応じた格子分割が可能となる点である。また、細かい精度が必要な場所では格子を細かく、粗い精度で十分な場所では粗い格子で分割できるので、効率的な計算が可能となる。同じような長所をもつ離散化手法には一般座標系による不定形格子があるが、この方法では座標変換が必要となる点が非構造格子と異なっている。

非構造格子は、通常凸状の三角形、四角形から構成される。各格子は次に述べる条件を満たす「中心点」を有していなければならない。隣り合う格子の中心点を結ぶ線は、そ

これらの格子が共有する辺と交差し、しかも直交しているという条件である。そのような格子分割を手作業で行うのは困難だが、USGSでは、市販の格子生成ソフト ArgusONE を用いることで、この作業を自動化している。ArgusONE では、領域境界を示すポリゴンと地盤高データがあれば自動的に格子分割が行われる。

氾濫解析への適用性検討

(1) 氾濫解析モデルの現状

現在、実務で一般に用いられている氾濫解析は、デカルト座標系による直交格子（一辺長さが一定の四角い格子）によるものがほとんどである。浸水想定区域図及び洪水ハザードマップの作成もこの方法によっている。この方法の長所は、データの作成が容易でモデルも簡便な点である。広範囲を対象とした解析を行って浸水域の概略を示す地図を作成する目的に対しては、直交格子でも十分に要求に応える結果を出すことができる。

一方、近年では、氾濫解析の利用目的も多様化してきており、現実の条件をより忠実に表現した解析の実施が望まれるようになってきている。特に、都市部の水害対策では、以下のような理由から氾濫解析の精緻化が必要とされている。

- ・ 浸水による被害予測、避難等の緊急対応計画などには、浸水域、浸水時間などの精緻な浸水予測情報が不可欠である。
- ・ 特に、地下施設の被害の有無は、数センチ規模の浸水深さの違いにより左右されるため、それに見合った精度が要求される。
- ・ 町丁目や個別建物などが特定できる位の分解能で浸水予測できれば、住民や建物の所有者が適切な浸水対策を実施することを支援することができる。

また、都市部の氾濫現象には以下のような特徴がある。

- ・ 建物、道路の存在により、氾濫流が道路に集中し、高速流が発生する可能性がある。
- ・ 下水道等の排水施設が氾濫水の伝播状況に与える影響が大きい。局所的な地形形状に応じた内水氾濫が発生したりする。

このような特徴を有する氾濫現象は、直交格子による粗い格子分割では再現が困難である。必要とされる解析結果を直交格子のモデルで求めるためには、格子の大きさを非常に小さくしなければならない。しかし、解析領域全体を一様に小さな格子で分割するのは合理的ではない。

一般座標系による不定形格子や非構造格子では、上記のような直交格子の短所を補うことができる。また、都市部の建物、道路の存在に対しては、道路網を水路のネットワークとしてモデル化する手法⁴⁹⁾も有効である。しかし、直交格子以外を用いたモデルには、入力するデータの作成に労力がかかる点が問題であった。また、高分解能、高精度な格子の作成に必要な高密度、高精度な標高データの取得も困難であった（現在では、都市計画図

の単点標高等が用いられることが多い)。このような理由から、今までこれらのモデルが実務で用いられることは稀であった。

近年、氾濫解析の周辺技術の進歩は著しく、デカルト座標系の直交格子以外を利用したモデルの導入を可能とする環境が整えられつつある。それらは、例えば以下のような技術である。

- ・ 標高データの取得基盤： LiDAR (Light Detection and Ranging) 等の技術により、高密度、高精度な地盤高データを安価に取得することが可能となっている。このような技術は、地形形状に応じた細かい格子分割や、数センチ規模の高精度な浸水予測に必要な標高データを提供してくれる。
- ・ 数値解析基盤： コンピュータの高速化、記憶容量の増大により、細かな格子分割による解析が可能となっている。
- ・ GIS 基盤： GIS 及び GIS とリンクしたソフトの一般化により、氾濫解析の入力データの作成、解析結果の分かりやすい表示が容易に行えるようになっている。

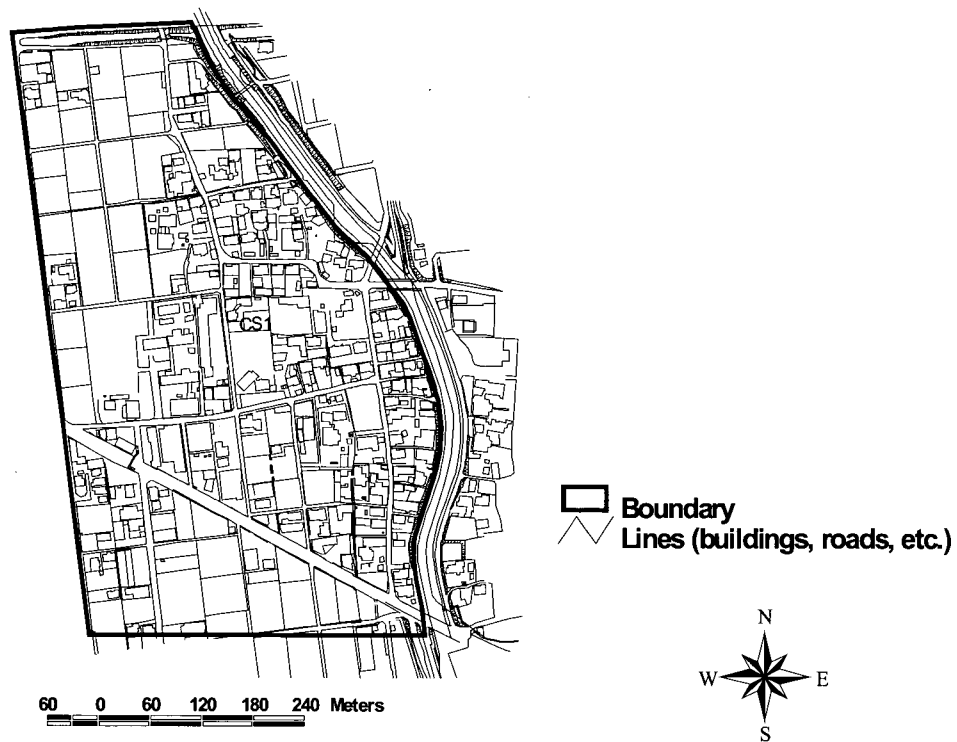
(2) UnTRIM モデルを用いた検討

前述のとおり、UnTRIM モデルでは非構造格子を用いて高速かつ安定な解析が可能である。また、USGS では市販の格子生成ソフト ArgusONE を用いることで、UnTRIM モデルへの入力データ作成の労力を小さくしている。そこで、家屋等が存在する場所での氾濫解析に UnTRIM モデル適用することを試みた。この作業を通じて、非構造格子モデルの氾濫解析への適用性を探ることが目的である。

- ・ 日本の一地域で氾濫解析を通じて、モデルの適用の容易さ（データ入手、入力データ作成、モデル運用）を把握する。
- ・ 格子分割方法の違いによる計算結果の差を比較する。現在の氾濫解析で一般に行われているような直交格子（50m×50m）による分割と、建物の存在を考慮した非構造格子による分割である。

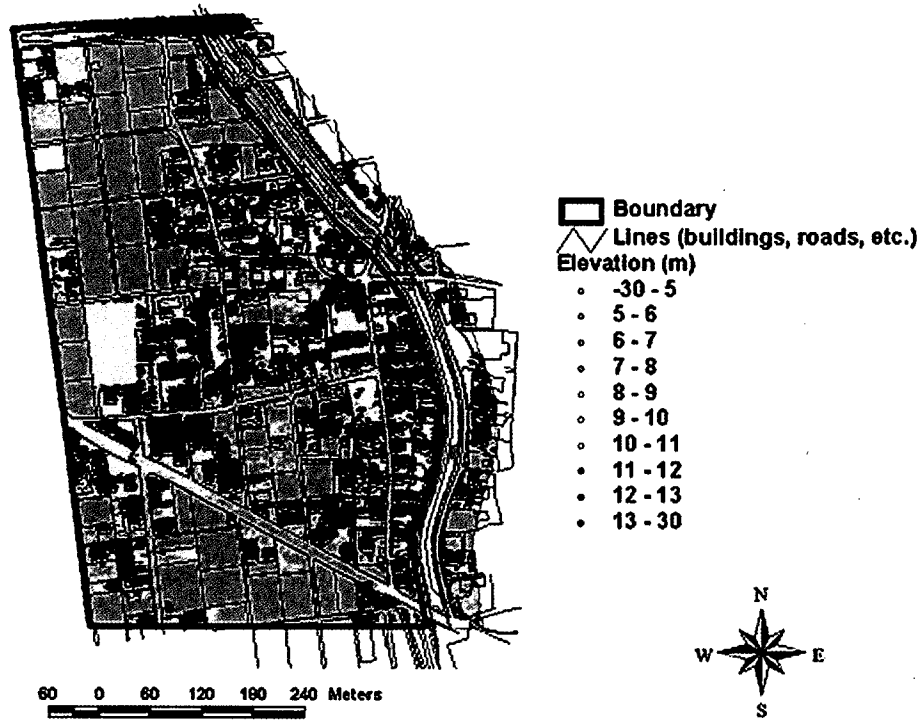
(3) 検討対象地域

日本のA地域（図 A-1）を対象として検討した。A 地域の北側は盛土された国道、東側は B 川の堤防で区切られている。解析範囲の西側、南側には遮るものがなく平地が広がっているが、今回の検討では、東西 400 強、南北 800m 強の範囲を切り出している。地域内の土地利用は水田及び住宅である。特に解析範囲の東側には住宅が密集している。

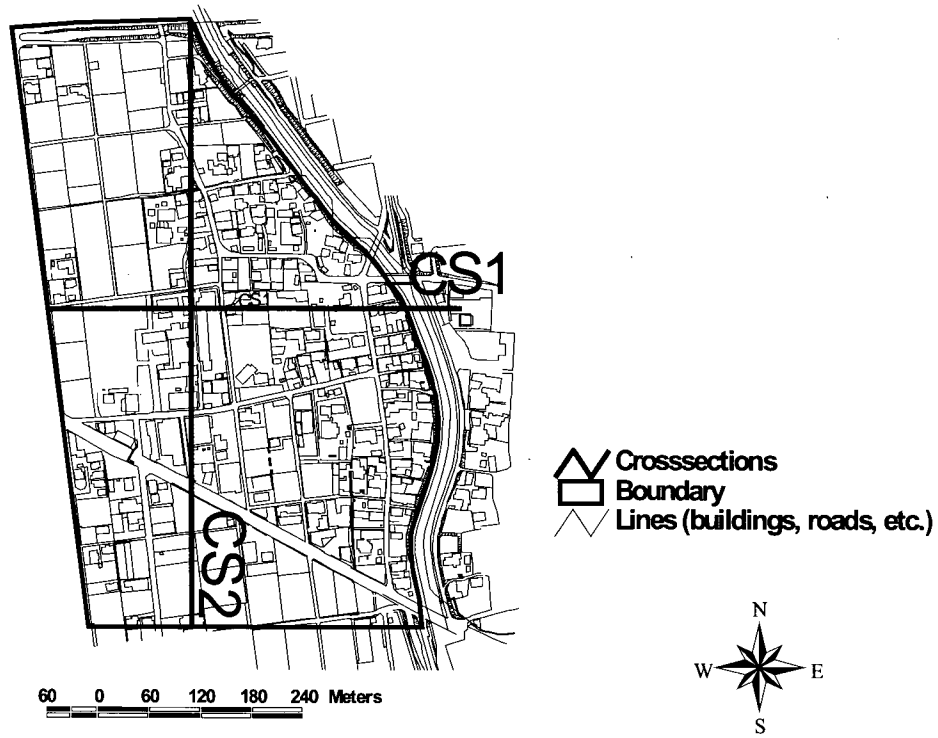


図A-1 解析範囲（A地域）

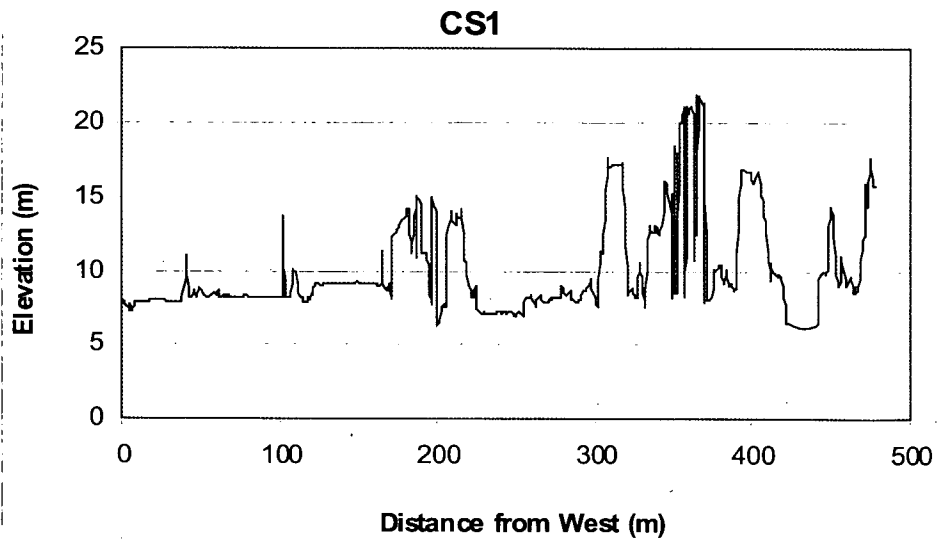
図A-2にA地域の標高分布を示す。LiDARで計測された標高点データをもとに作成されている。標高点は約2.5m間隔、ランダムに分布しており、家屋や樹木等除去されていないデータである。地形は平坦で、水田部分の標高が低く、盛土された家屋周辺の標高が高くなっている。図A-3に示す断面（CS1、CS2）の標高の断面図を図A-4、図A-5に示す。家屋や樹木が除去されていないため、それらは極端に高く示されているが、地盤の高さはほぼ平坦であることが分かる。



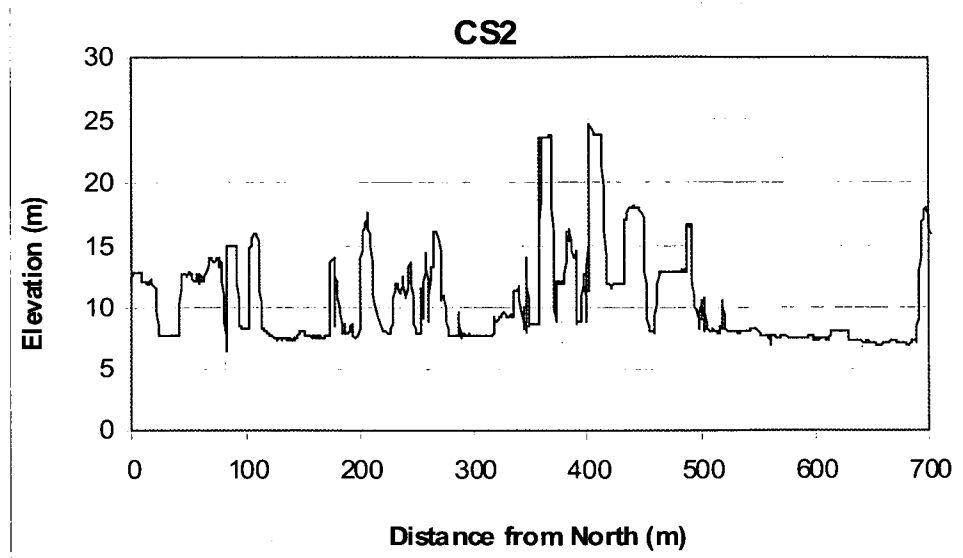
図A-2 A地域の標高 (LiDARにより計測された標高点)



図A-3 標高の断面図を作成した断面



図A-4 標高の断面図 (CS1)



図A-5 標高の断面図 (CS2)

(4) 格子データの作成

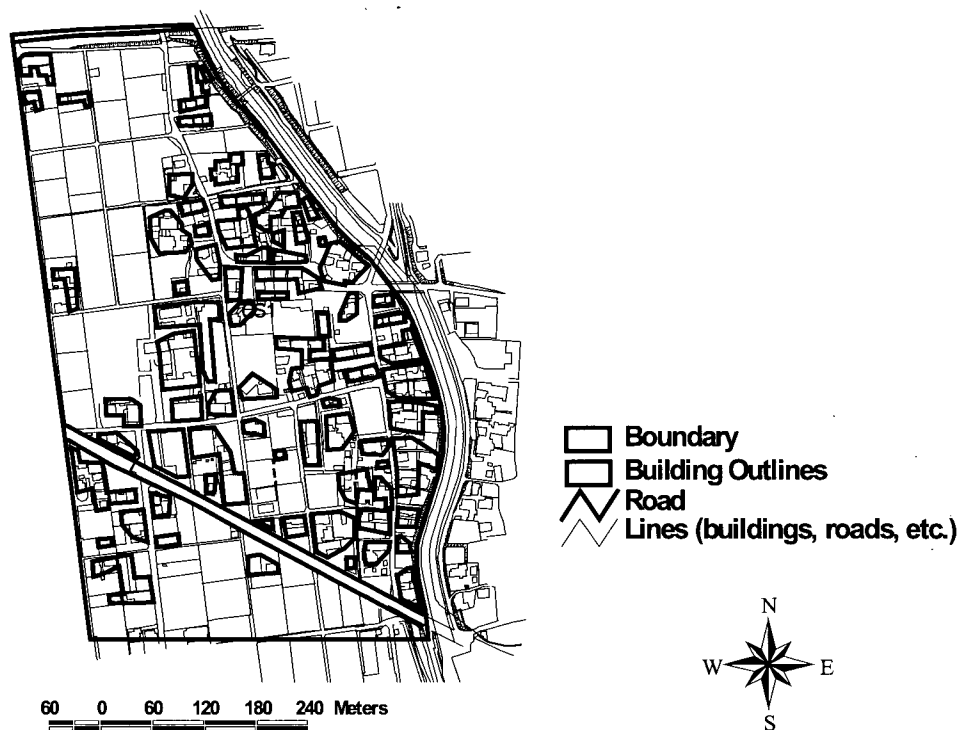
50m×50mの直交格子 (MESH-1) と、建物の存在を考慮した非構造格子 (MESH-2) を作成した。MESH-2の作成手順は次のとおりである。

①境界 (Outline) ポリゴン、補助線データの作成

格子生成ソフトArgusONEでは、格子分割する範囲を示すポリゴン、格子生成を補助するための線のデータが必要となる。ArgusONEはGISの形式 (Arc View Shapefile) に対応しているので、それらのデータは、まず、GISソフト (Arc View GIS 3.3 for Windows) で作成し、Shapefile形式で保存した。

作成したのは、解析範囲の外周を示すポリゴン、解析範囲内の建物の外周を示すポリゴン (これらのポリゴンの内部には格子は生成されない)、道路形状 (解析範囲北側の国道、解析範囲中央やや南を斜めに横切る道路) を示す線である。これらのデータの作成は、A地域を含む自治体が整備した都市計画GISデータ (道路や建物を示す線) を参考として作成した。建物の外周を示すポリゴンとして都市計画GISの建物ポリゴンデータを直接利用することを試みたが、ポリゴンを構成する線の分割が細かすぎて、ArgusONEで格子生成すると極端に細かくなってしまった。そこで、一体と見なせる家屋群を含むような新たな建物ポリゴンを手作業で作成した。

これらの作成データを図A-6に示す。



図A-6 境界 (Outline) ポリゴン、補助線データ

②標高点データの処理

LiDARで計測された標高点データには、樹木や建物部分も含まれている。これらを除去するため、簡易なフィルタリング処理を行った。A地域の標高分布の特性を調べたところ、標高分布は、低い順に道路面、家等の敷地（盛土）、樹木・建物の3グループに分けられることが分かった。そこで、直近の道路面から75cm以上高い標高点は樹木・建物とみなして除去したところ、道路面、家等の敷地の標高のみ取得することができた。

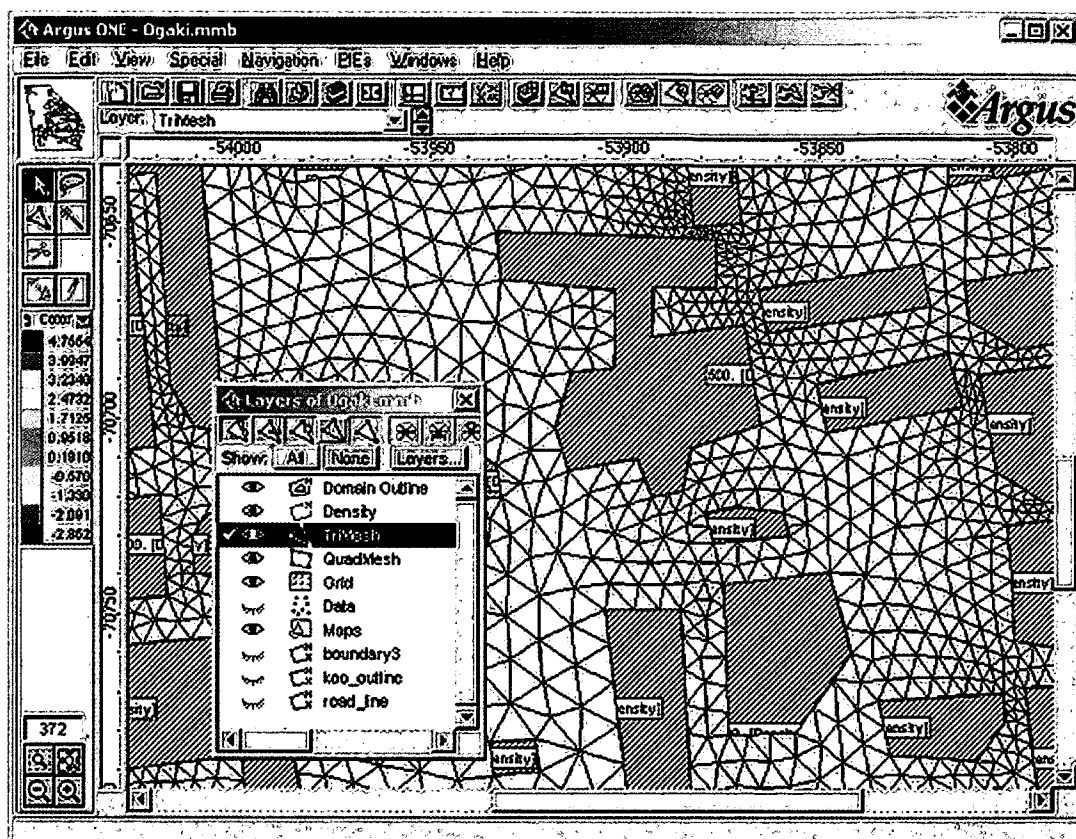
なお、樹木や建物等の除去作業には、そのためのプログラムが各種存在するので、それらを用いることも可能である。

③ArgusONEによる格子の作成と出力

上記の作業で作成した境界 (Outline) ポリゴン、補助線データ、標高点データ (テキスト形式) をArgusONEに取り込み、非構造格子を作成した。ArgusONEの作業画面の例を図A-7に示す。このソフトを使えば、格子の作成は極めて容易に行える。ArgusONE作成した格子データは、UnTRIMモデルへの入力形式に変換した。

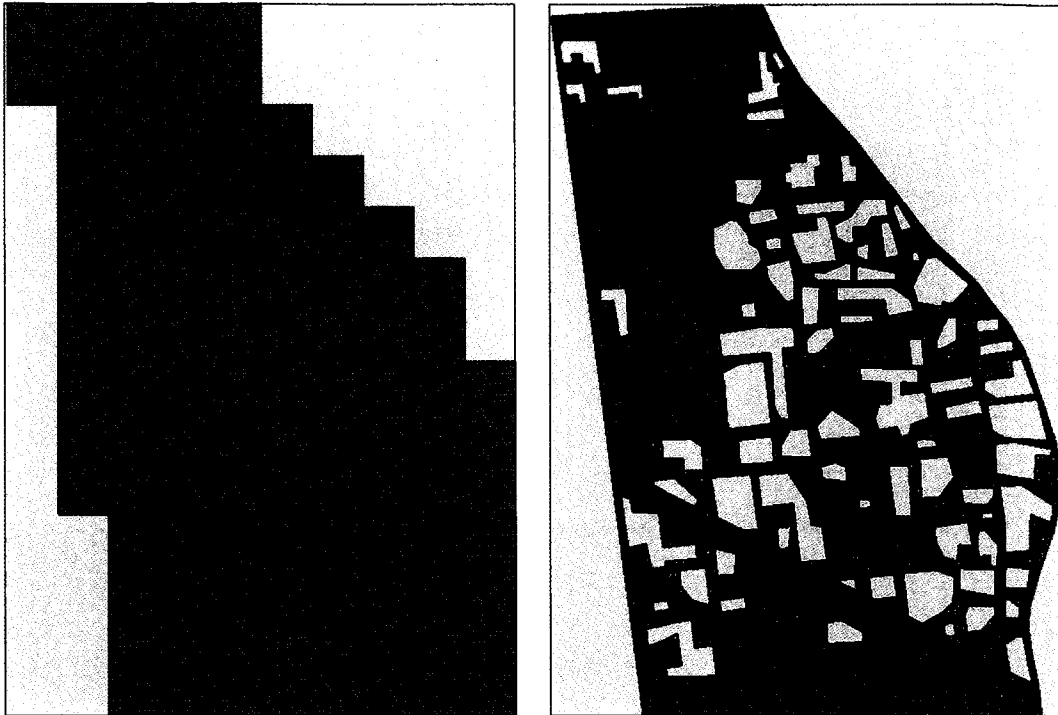
以上の手順を経て、非構造格子を作成したが、作業は極めて容易であった。現在、多くの自治体が都市計画GISを整備しており、その他様々なGIS地図データも入手可能となってきている。これらのデータを容易に活用するための環境が整備されれば、非構造格子の

作成作業の自動化も可能と考えられる。



図A-7 ArgusONEの作業画面

直交格子 (MESH-1) と非構造型格子 (MESH-2) を図A-8に、両者の比較表を表A-1に示す。ArgusONEでは、境界 (Outline) ポリゴン、補助線データを構成する線分の細かさに応じた格子分割が自動的に行われる。今回作成したデータでは、非常に細かい格子分割が行われた。建物や道路の存在を考慮する場合に、可能な限り格子分割数を少なくするための工夫が今後の課題である。



Left: MESH-1 Right: MESH-2

図A-8 直交格子 (MESH-1) と非構造格子 (MESH-2)

表A-1 直交格子 (MESH-1) と非構造格子 (MESH-2) の比較

	直交格子 (MESH-1)	非構造格子 (MESH-2)
格子数/格子境界線数	103/230	10,567/17,204
格子形状	正方形 (50m×50m)	三角形及び四角形
平均格子面積	2.500m ²	18.55m ² (一様な正三角形と仮定して算出)
平均格子中心間距離	50m	4.36m (一様な正三角形と仮定して算出)

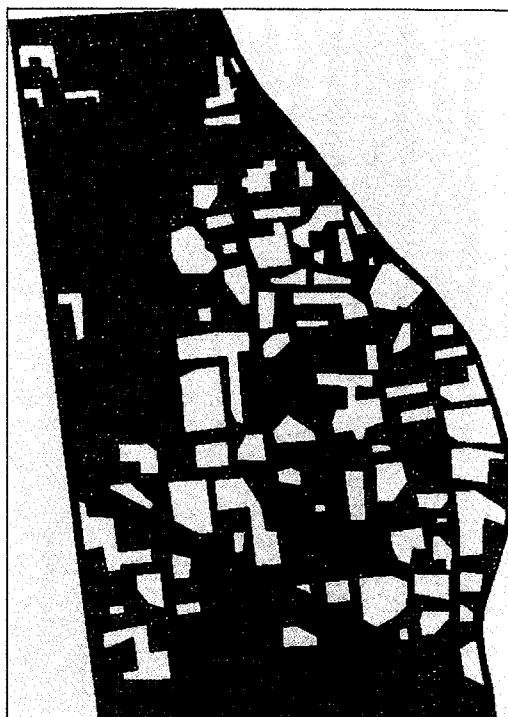
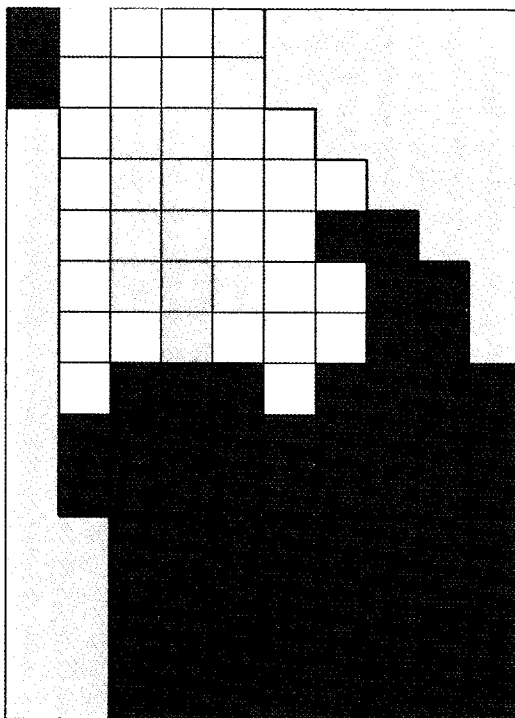
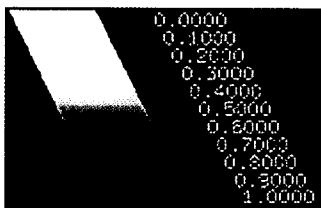
(4) 解析結果

解析範囲の北東の堤防50m区間から氾濫水が流入したと仮定し、30m³/sの流入量をその地点に与えた。そして、その後5時間の氾濫水の移動をUnTRIMモデルで計算した。計算時間ステップは、平均格子中心間距離を考慮して、直交格子（MESH-1）では30秒、非構造格子（MESH-2）では3秒とした。氾濫原の粗度係数nには0.05を一様に与えた。また、解析領域の周囲はすべて高い壁に囲まれているとしており、氾濫流の出入りはないものとした。

図A-9～図A-13に、氾濫開始後の浸水深分布（0.5時間後、1.0時間後、1.5時間後、2.0時間後、3.0時間後）を示している。直交格子（MESH-1）、非構造格子（MESH-2）のどちらの格子分割方法でも、浸水到達範囲、浸水深の分布の概略は同じである。標高分布に応じて、部分的に浸水深が深い場所、浅い場所が存在しているが、非構造格子（MESH-2）の格子分割は直交格子（MESH-1）より細かいため、より忠実に浸水深分布を再現しているものと考えられる。例えば、住宅が密集している部分（解析範囲の中央付近）では、宅地の盛土よりも道路の標高が低いため、道路上の浸水深が大きくなっている様子が再現されている。また、非構造格子（MESH-2）では建物の形状を考慮した格子分割をしているため、建物に障害され、建物の周囲を回り込むように流れが生じている様子が伺える。

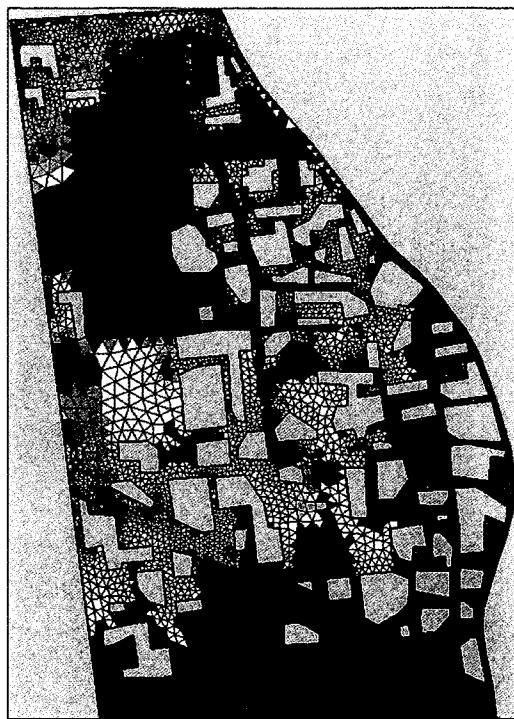
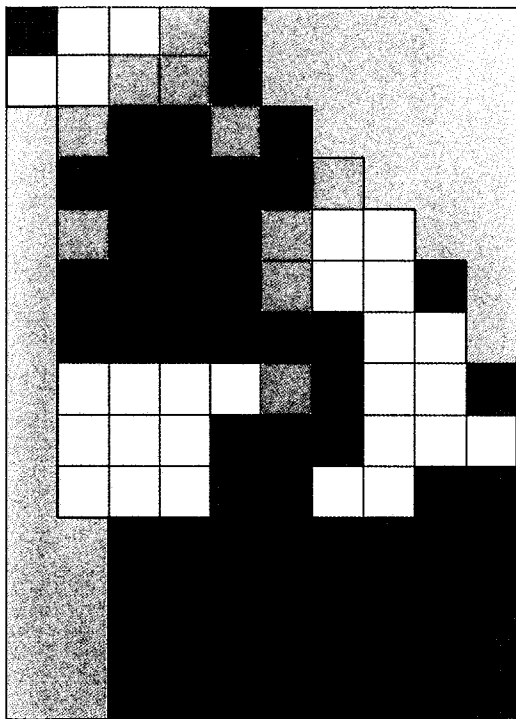
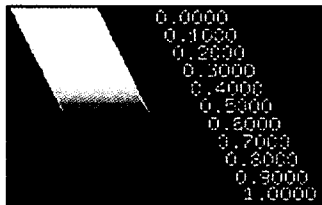
図A-14に氾濫開始1.5時間後の流速ベクトル分布（一部分を拡大）を示している。直交格子（MESH-1）では50m×50mの格子で平均された流速分布しか把握できていないのに対し、非構造格子（MESH-2）では、家屋に障害され、道路上に氾濫水が集中して流れている様子が再現されている。

直交格子による分割でも、非常に細かく格子分割すれば上述のような現象の再現は可能である。しかし、建物や土地区分の形状を忠実に反映させるのは難しい。建物が密集している様子を再現したり、道路や宅地の小さな盛土等の存在を考慮したりする場合には、非構造格子のような手法は有効であると考えられる。



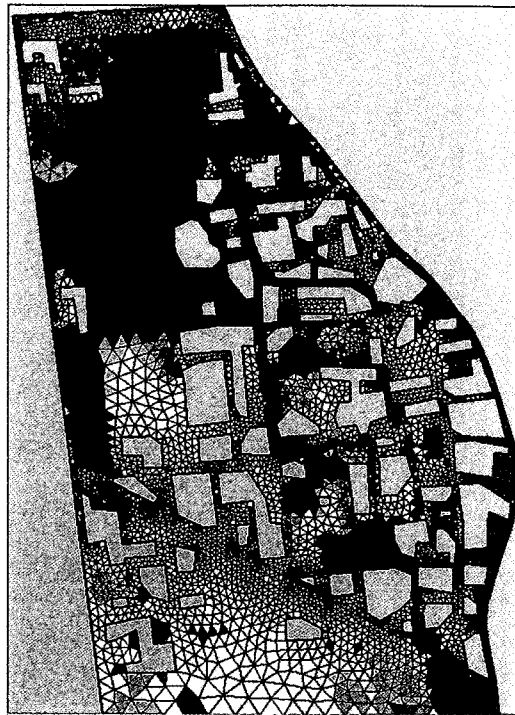
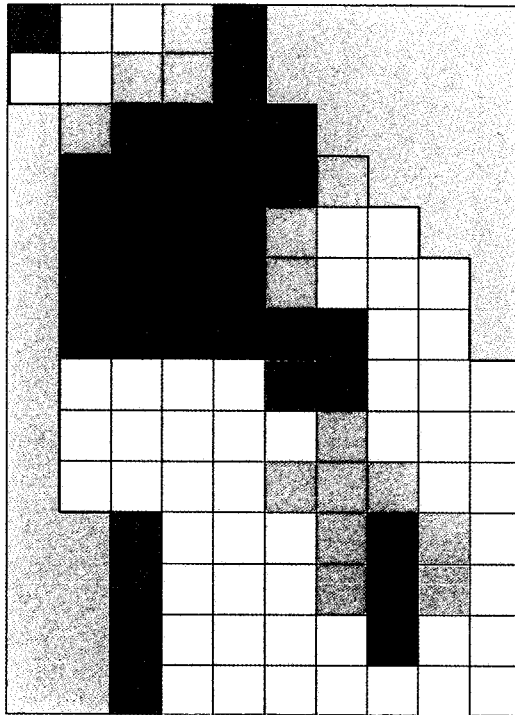
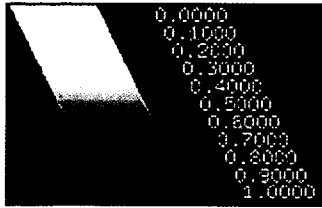
Left: MESH-1 Right: MESH-2

図A-9 氾濫開始0.5時間後の浸水深分布



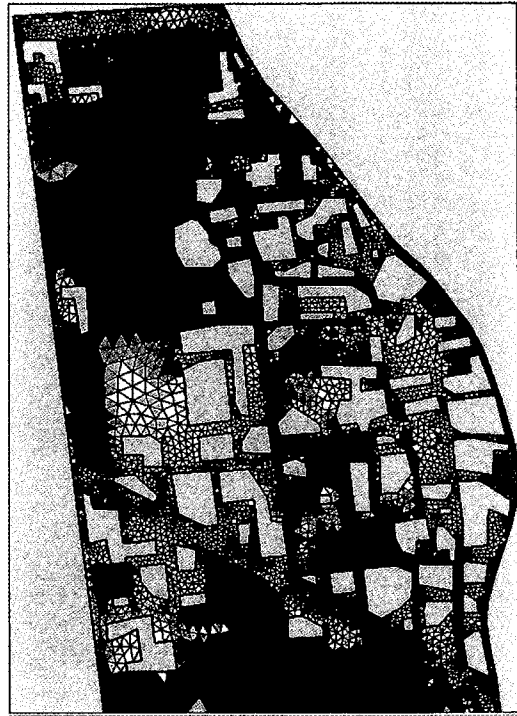
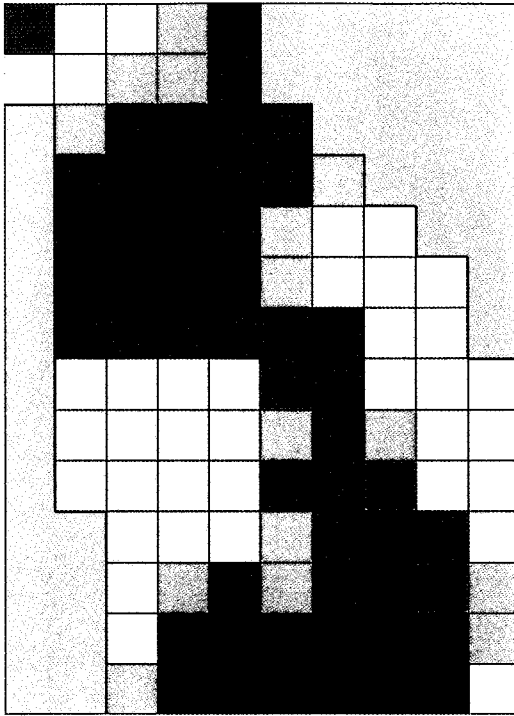
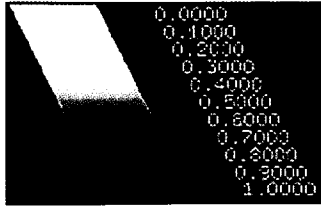
Left: MESH-1 Right: MESH-2

図A-10 氾濫開始1.0時間後の浸水深分布



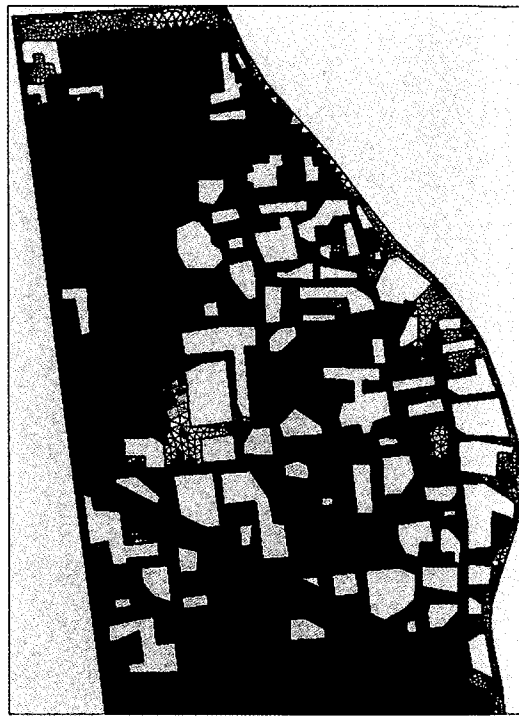
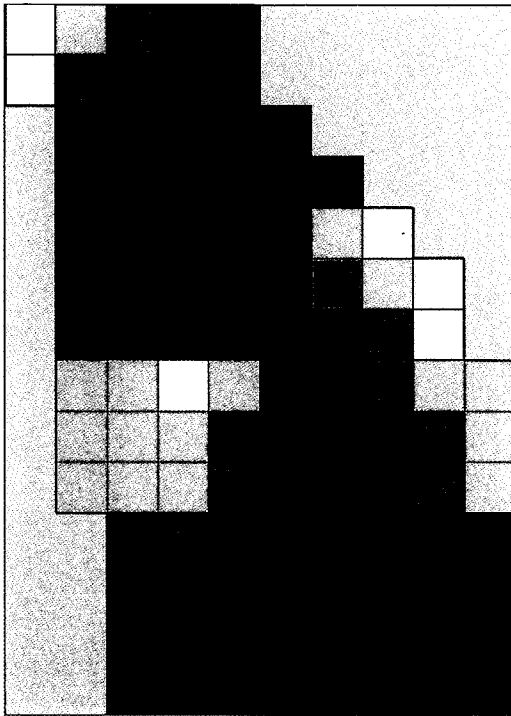
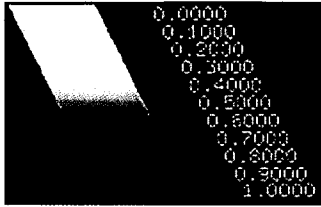
Left: MESH-1 Right: MESH-2

図A-11 氾濫開始1.5時間後の浸水深分布



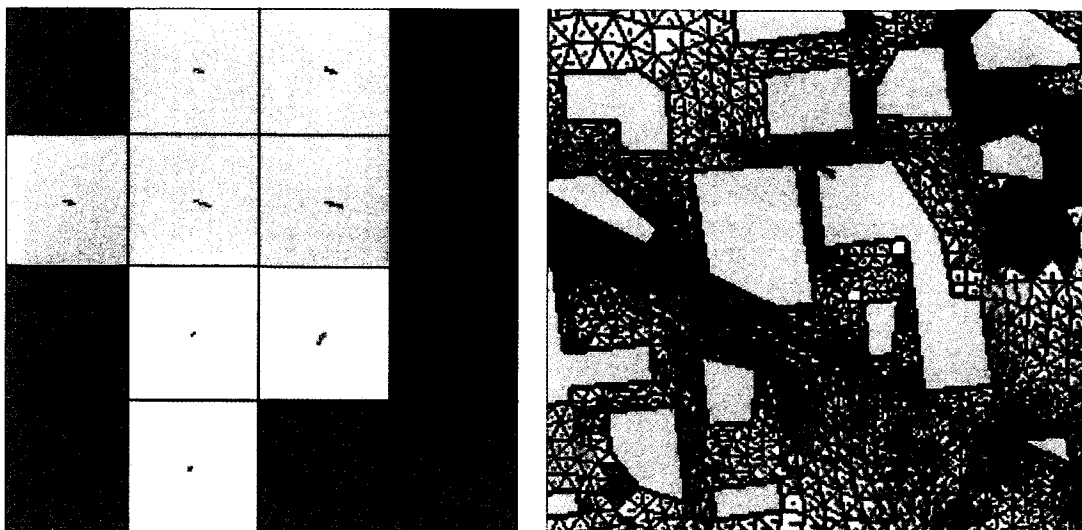
Left: MESH-1 Right: MESH-2

図A-12 氾濫開始2.0時間後の浸水深分布



Left: MESH-1 Right: MESH-2

図A-13 氾濫開始3.0時間後の浸水深分布



Left: MESH-1 Right: MESH-2

図A-14 氾濫開始1.5時間後の流速ベクトル分布（一部分を拡大）

(5) 氾濫解析への適用性のまとめ

A流域を対象として、地盤高データ（LiDARにより計測）、GISの地図データを用いて非構造格子を作成した。さらに、50m×50mの直交格子及び非構造格子による氾濫解析を行って、解析結果を比較した。この作業から導かれた結論は、以下のとおりである。

- ・ 市販のGISソフト、格子生成ソフトを活用することで、極めて容易に非構造格子を作成することができる。
- ・ 非構造格子を用いることで、建物の存在や地形などを考慮した格子分割が可能となる。
- ・ 氾濫解析の結果、非構造格子を用いることで、浸水深、流速の局所的变化を忠実に再現することが可能である。

参考文献

- 1) 栗城稔, 末次忠司, アメリカの治水戦略—日米の治水対策の比較を通じて—, 土木研究所資料, 第 3279 号, 1994.5.
- 2) 米国河川研究会, 洪水とアメリカ ミシシッピ川の氾濫原管理 1993 年ミシシッピ川大洪水を考える, 山海堂, 1994.12.
- 3) Gilbert F. White, Human Adjustment to Floods – A Geographical Approach to the Flood Problem in the United States, University of Chicago, 1945.
- 4) Keith Smith and Roy Ward, Floods Physical Processes and Human Impacts, John Wiley & Sons, pp.54-57, 1998.
- 5) The Federal Interagency Floodplain Management Task Force, A Unified National Program for Floodplain Management, p.3, 1994.
- 6) The Federal Interagency Floodplain Management Task Force, Floodplain Management in the United States: An Assessment Report Volume 1 Summary Report, The National Hazard Research and Application Information Center, 1992.
- 7) Dennis S. Mileti, Disaster by Design, A Reassessment of Natural Hazards in the United States, Joseph Henry Press, pp.71-73, 1999.
- 8) Sharing the Challenge: Floodplain Management into the 21st Century, The Report of the Interagency Floodplain Management Review Committee to the Administration Floodplain Management Task Force, 1994.
- 9) Raymond J. Burby, Cooperating with Nature, Confronting Natural hazards with Land-Use Planning for Sustainable Communities, Joseph Henry Press, pp.37-40, 1998.
- 10) Raymond J. Burby, Cooperating with Nature, Confronting Natural hazards with Land-Use Planning for Sustainable Communities, Joseph Henry Press, pp.14-16, 1998.
- 11) The Federal Interagency Floodplain Management Task Force, Floodplain Management in the United States: An Assessment Report Volume 1 Summary Report, The National Hazard Research and Application Information Center, 1992.
- 12) The Federal Interagency Floodplain Management Task Force, A Unified National Program for Floodplain Management, 1994.
- 13) Federal Emergency Management Agency, Homeowner's Guide to Retrofitting, Six Ways to Protect Your House from Flooding, 1998.6.
- 14) Federal Emergency Management Agency, Answers to Questions about the National Flood Insurance Program, 2001.

- 15) FEMA のホームページ(<http://www.fema.gov>).
- 16) Krimm, R. W., Reducing Flood Losses in the United States, Floodplain Risk Management, Proceedings of an International Workshop on Floodplain Risk Management / Hiroshima / 11-13 November 1996, pp.3-11, 1998.
- 17) Federal Emergency Management Agency, Protecting Building Utilities from Flood Damage, 1999.11.
- 18) Federal Emergency Management Agency, Flood Insurance Program Community Rating System Biennial Report to Congress, 2000.10.
- 19) Keith Smith and Roy Ward, Floods Physical Processes and Human Impacts, John Wiley & Sons, pp.305-308, 1998.
- 20) Dennis S. Mileti, Disaster by Design, A Reassessment of Natural Hazards in the United States, Joseph Henry Press, pp.168-169, 1999.
- 21) Raymond J. Burby, Cooperating with Nature, Confronting Natural hazards with Land-Use Planning for Sustainable Communities, Joseph Henry Press, p.47-49, 1998.
- 22) Keith Smith and Roy Ward, Floods Physical Processes and Human Impacts, John Wiley & Sons, p.296, 1998.
- 23) Federal Emergency Management Agency, Disaster Assistance: A Guide to Recovery Program, 2000.
- 24) Stemming the Tide of Flood Losses, Stories of Success from The History of Missouri's Flood Mitigation Program, Missouri State Emergency Management Agency.
- 25) U.S. Army Corps of Engineers, Flood Proofing, Techniques, Programs, and References, 1996.1
- 26) 陸軍工兵隊の耐水化事業に関するプレゼンテーション資料.
- 27) U.S. Army Corps of Engineers, Flood Proofing Regulations, 1995.12.
- 28) Federal Emergency Management Agency, Benefit-cost Analysis (BCA) of Hazard Mitigation Projects Appendix 1 to the Riverine Flood – Full Data Module User's Guide for Software Version 5.2.3.
- 29) Federal Emergency Management Agency, How to Use a Flood map to Determine Flood Risk for a Property, 1995.5.
- 30) Federal Emergency Management Agency, Guidelines and Specifications for Study Contractor, 1993.3.
- 31) Ries, K.G. and Crouse, M.Y., U.S. Geological Survey, The National Flood Frequency Program, Version 3: A Computer Program for Estimating Magnitude and Frequency of Floods for Ungaged Sites, Water Resources Investigation Report 02-4168, 2002.

- 32) Federal Emergency Management Agency, Managing Floodplain Development in Approximate Zone A Areas – A Guide for Obtaining and Developing Base (100-year) Flood Elevations, 1995.
- 33) Federal Emergency Management Agency, Guidelines and Specifications for Flood Map Production Coordination Contractors, 1999.2.
- 34) U.S. Army Corps of Engineers, Sacramento and San Joaquin River Basins Comprehensive Study Technical Studies Documentation, 2002.12.
- 35) U.S. Army Corps of Engineers, Benefit Determination Involving Existing Levees. Policy Guidance Letter No.26, 1991.
- 36) U.S. Army Corps of Engineers, Risk-based analysis in geotechnical engineering for support of planning studies. ETL 1110-2-556, 1999.5.
- 37) Federal Emergency Management Agency, Modernizing FEMA's Flood Hazard Mapping Program, A Progress Report, 1997.11.
- 38) Federal Emergency Management Agency, Modernizing FEMA's Flood Hazard Mapping Program, A Progress Report, 2001.5.
- 39) Federal Emergency Management Agency, Enhancing the Nation's Risk Assessment Capabilities THE HAZUS STRATEGIC PLAN 2001 TO 2005, 2001.1.
- 40) National Weather Service, Concept of Service & Operations Advanced Hydrologic Prediction Services, 2002.4.
- 41) Jones, J.L., Fulford, J.M. and Voss, F.D., Near-real-time simulation and internet-based delivery of forecast-flood inundation maps using two-dimensional hydraulic modeling: A pilot study of the Snoqualmie river, Washington, Water-Resources Investigation Report 02-4251, U.S. Geological Survey, 2002.
- 42) Casulli, V., Semi-implicit finite difference method for the two-dimensional shallow water equations, Journal of computational physics, v.86, pp.56-74, 1990.
- 43) Casulli, V. and Walters, R.A., An unstructured grid, three dimensional model based on the shallow water equation, International Journal for Numerical Method in Fluids, Vol. 32, pp.331-348, 2000.
- 44) Harris County Flood Control District, Riding the waves of change, 60 years of service.
- 45) Federal Emergency Management Agency and Harris County Flood Control District, Off the Chart, Tropical Storm Allison Public Report, 2002.6.
- 46) Tropical Storm Allison Recovery Project, Quarterly Report (Vol.2-4).
- 47) カリフォルニア州水資源部のホームページ
(<http://www.fpm.water.ca.gov/mapping.html>).
- 48) Cheng, R.T., Casulli, V. and Gartner, J.W., Tidal, Residual, Intertidal Mudflat

(TRIM) Model and its Applications to San Francisco Bay, California Estuarine,
Coastal and Shelf Science, Vol.36, pp.235-280, 1993.

- 49) 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.