

情報処理技術を活用した
流域管理システム構築に関する研究

2007年11月

圓佛伊智朗

内容梗概

■論文題目

「情報処理技術を活用した流域管理システム構築に関する研究」

■要 旨

本論文では、水源とその流域を取り扱う流域管理を対象に、今日的な課題である情報処理技術（Information Technology ; IT）の活用による管理業務の支援と合理化に向けた情報システムについて論ずる。

水源やその流域内の現象をモデル化する既往の研究成果により、水質や流域環境の評価、予測を行い、流域管理施策の効果を定量的に把握する取り組みがなされてきた。こうした手法の適用性を高め、更に実用性を向上する工学的アプローチとして、近年急速な進歩を遂げる IT を積極的に取り込んだ情報プラットフォームの構築が有効と考えた。

本研究では、特に流域の地理情報とその属性情報を取り扱うことができる地理情報システム（Geographic Information System ; GIS）に着目し、①流域管理システムへの適用性について評価した後、②システム開発の観点から流域管理システムのユーザモデルを類型化し、各ユーザモデルに対応するシステム機能の要件を明らかにする。また、③システム機能を実現する要素技術を開発し、実フィールドへの適用事例によって、その適用性を評価するアプローチとした。

要素技術としては、衛星リモートセンシングによる広域計測技術、及び地理情報モデリング技術を開発した。更に、これらの技術を実装した流域管理システムを構築し、水源保全事業評価、流域環境改善評価などのフィールドスタディを通して、ITを活用した流域管理システムの有効性と限界を明らかにする。加えて、流域管理システムの将来像を論じて、論文の総括とする。

■提出先

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻（2007年11月提出）

目次

第1章 緒言

1. 1	水源・流域管理に関連する規制動向	-----	1-1
1. 2	水源・流域管理に関連するIT技術の動向	-----	1-2
1. 3	流域管理に関連する新たな動き	-----	1-3
1. 3. 1	水安全計画の構成		
1. 3. 2	水安全計画の策定・運用の課題		
1. 4	流域管理に関連する既往の研究	-----	1-5
1. 4. 1	流域管理の定義		
1. 4. 2	流域管理システムに関する既往の研究成果		
1. 4. 3	流域管理に係る今日的な技術課題		
1. 5	本研究の目的	-----	1-9
1. 6	本論文の構成	-----	1-9
1. 7	参考文献	-----	1-11

第2章 流域管理システムの情報プラットフォーム

2. 1	流域管理システム検討のアプローチ	-----	2-1
2. 1. 1	流域管理と今日的な技術課題		
2. 1. 2	流域管理システム検討の手順		
2. 2	流域管理に係る情報と地理情報システム	-----	2-2
2. 2. 1	流域管理に係る情報の特徴分析		
2. 2. 2	水質リスクに係る情報		
2. 2. 3	地理情報システムの現状		
2. 3	地理情報システムの適用性と機能要件	-----	2-7
2. 3. 1	流域管理の情報化に求められる要件		
2. 3. 2	地理情報システムの適用性に関する考察		
2. 4	地理情報システムをベースとした流域管理システム	-----	2-9
2. 4. 1	流域管理システムのユーザモデル提案		
2. 4. 2	システム機能と対応技術		
2. 4. 3	流域管理に固有な地理情報システムに関する考察		
2. 5	まとめ	-----	2-14
2. 6	参考文献	-----	2-15

第3章 流域管理のためのリモートセンシング技術

3. 1	衛星リモートセンシング導入の狙い	-----	3-1
3. 2	衛星画像による水源水質評価方式と適用性評価	-----	3-2
	3. 2. 1 対象エリアと使用データ		
	3. 2. 2 アオコ分布推定		
	3. 2. 3 クロロフィル a 濃度推定		
3. 3	衛星画像の流域地覆分類への適用	-----	3-11
	3. 3. 1 地覆分類方式の検討		
	3. 3. 2 地覆分類への適用結果		
3. 4	衛星画像の高解像度化方式の開発	-----	3-17
	3. 4. 1 高解像度化手法の検討		
	3. 4. 2 高解像度化アルゴリズム		
	3. 4. 3 評価解析結果		
	3. 4. 4 流域監視における意義と適用上の制約について		
3. 5	まとめ	-----	3-35
3. 6	参考文献	-----	3-36

第4章 流域管理のための汚濁負荷シミュレーション

4. 1	地理情報モデリングの必要性和本研究のアプローチ	-----	4-1
	4. 1. 1 流域評価の項目		
	4. 1. 2 開発システムの概要		
4. 2	地理情報を用いた流域汚濁負荷モデリング	-----	4-4
	4. 2. 1 評価手順		
	4. 2. 2 対象水系とデータ取り扱い		
	4. 2. 3 流域汚濁負荷モデル		
	4. 2. 4 評価の条件		
4. 3	水源河川流域での汚濁負荷予測結果	-----	4-17
	4. 3. 1 工場系負荷での評価法比較		
	4. 3. 2 流域の汚濁負荷排出量		
4. 4	水源河川水質予測による高度処理導入の検討	-----	4-20
	4. 4. 1 朝霞浄水場付近での基本想定条件での水質		
	4. 4. 2 下水道整備による水質の推移		
	4. 4. 3 汚濁負荷シミュレーションの適用状況		
4. 5	河川流下シミュレーションによる水源水質事故対策	-----	4-23
	4. 5. 1 河川流下シミュレーションの意義		

4. 5. 2	河川流下シミュレーションシステムの概要	
4. 5. 3	汚染物質流下モデルの概要	
4. 5. 4	河川形状ラスタ化方式	
4. 5. 5	流速計算及び汚染物質濃度分布推定	
4. 5. 6	モデルの適用条件	
4. 5. 7	フィールドスタディ結果	
4. 5. 8	河川流下シミュレータの適用状況	
4. 6	まとめ	----- 4-43
4. 7	参考文献	----- 4-44

第5章 流域管理のためのGISデータモデリング

5. 1	地理情報を用いた流域管理のためのモデリング	----- 5-1
5. 1. 1	セルラオートマトンモデル	
5. 1. 2	流域環境モデリングへの適用上の課題	
5. 2	遷移ルール獲得方式の提案	----- 5-4
5. 2. 1	提案方式の手順	
5. 2. 2	ニューラルネットワークモデル	
5. 2. 3	ネットワークに獲得された学習内容評価	
5. 2. 4	ルール抽出向け学習アルゴリズムの提案	
5. 2. 5	因果性尺度によるルール抽出	
5. 3	ルール獲得評価シミュレーション	----- 5-10
5. 3. 1	評価ルール	
5. 3. 2	シミュレーション結果と考察	
5. 3. 3	流域管理への適用について	
5. 4	まとめ	----- 5-20
5. 5	参考文献	----- 5-21

第6章 地理情報を応用した流域管理システムの構築

6. 1	流域管理システムの構築	----- 6-1
6. 2	流域管理システムによる水安全計画への対応	----- 6-2
6. 3	水源河川における水質保全事業への適用	----- 6-4
6. 3. 1	水安全計画における水質保全事業の位置付け	
6. 3. 2	水質保全事業による水質改善効果の評価	
6. 3. 3	水質保全事業の費用対効果の試算	

6. 4	流域環境改善事業への適用	----- 6-24
6. 4. 1	流域環境改善に向けた評価解析	
6. 4. 2	都市ヒートアイランドの評価解析	
6. 4. 3	下水道を利用した緩和策の検討	
6. 4. 4	モデル都市における緩和策の評価結果	
6. 5	流域管理システム開発の工学的意義	----- 6-46
6. 6	まとめ	----- 6-47
6. 7	参考文献	----- 6-48

第7章 結 言

7. 1	本論文の結論	----- 7-1
7. 2	流域管理システムの将来	----- 7-3

第1章 緒言

概要

合理的な流域管理のためには、流域に係る定量的な評価が重要であり、水質などに係るリスクや経済性から見て効果的な施策（Best Management Practice）を決定する評価手法が求められている。このような手法の実用性を高め、その適用を下支えする工学的手段として、流域管理のIT（Information Technology）化が今日的な技術課題である。この課題に向けた具体的な取り組みの一つとして、水源や流域を監視、評価し、流域管理業務を支援する情報システムの開発が行われている。この過程は情報化の進展とも並行するもので、様々なIT技術の活用が検討されてきた。

本章では、普及期の緒を過ぎたとも云えるIT技術を概観し、本格的な普及に向けた新しい流域管理システム像と、これに求められる機能要件についてまとめる。

1.1 水源・流域管理に関連する規制動向

河川などの公共用水域から取水された原水は、水道施設によって浄水処理され、使用後の水道水は下水道を経て再び公共用水域に戻される。水道と下水道はこのような水循環の主要な構成要素と位置づけられており、安全で飲用に適した水を供給し続けるためには、流域全体に視点を置いた監視と管理が求められる。日本国内の水源水質は、事業場に対する排水規制や下水道整備の効果により、全般的には改善の傾向を示している¹⁾が、湖沼などの閉鎖性水域や都市部を貫流する河川では、改善が横ばいで推移しているところもあり、継続的な水源保全への取り組みが必要である。

このために、水源を効率的に監視し、水源保全の計画的な推進に活用することはもとより、これら情報の共有と公開が積極的に進められている。具体的な手段の一つとして、官学産による水源水質監視や管理向けのシステムの開発と導入が行われてきた。この過程は前例のない情報化時代の進展と並行するもので、様々な情報処理技術（Information Technology；IT技術と呼称）が検討されてきた。本報では、普及期の緒を過ぎたとも云えるIT技術を改めて概観し、本格的な普及に向けた課題と新しいシステム像について考えたい。

水源水質を監視したり、その情報を管理するシステムに求められる機能は、水質規制の動向や時代の要請によって、変遷し、拡大してきた。水質規制の変遷と各年代の代表的なトピックスを図1-1に示す。水質の法的な規制は1958年の水質保本法（旧水質2法）から始まった。1970年は公害対策基本法に基づいた水質汚濁防止法や環境

基準ができた重要な年と位置づけられる。全国一律の排水基準ができた点がポイントで、これに対応する水質測定ニーズとデータ量の増大が、計算機システムによる水質情報管理の契機とも云える。その後、総量規制制度、湖沼の規制、水道水のトリハロメタン対策としての水源2法などが段階的に実施されてきた。近年の

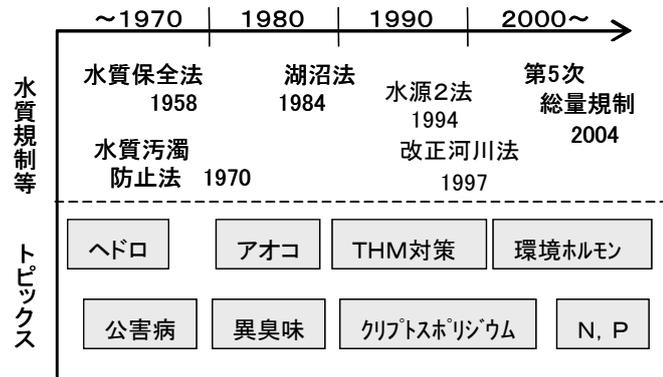


図1-1 水質規制の変遷

トピックスとしては、窒素とリンの規制が盛り込まれた第5次総量規制がある。

水質規制は強化される趨勢にあり、測定すべき水質項目または測定が義務付けられた水質項目（水質基準項目）も増加する傾向にある。他方、水質基準項目の検査方法（公定法）は水質検査員による採水と分析が原則であったが、水質自動測定器によるデータが公定法に準ずる値として認められるなど、水質検査の運用では効率化、自動化に向けた規制緩和が進みつつある。これらの効率化、自動化の手段として、計算機システムの活用は一層重要性を増している。

1. 2 水源・流域管理に関連するIT技術の動向

重要性を増す計算機システムの基盤となるIT技術の変遷と各年代の代表的な技術パラダイムを図1-2に示している。計算機本体はメインフレームからミニコン、ワークステーションを経て、現在はパーソナルコンピュータ（PC）への移行が進んでいる。また、情報ネットワークもインフラ整備が進んでおり、光ファイバーによるインフラネットワークのほか、インターネットの援用で通信上の制約は小さくなっている。情報端末としてのPDA（Personal Digital Assistance）やモバイル電話の利用により、情報入出力の場所的な制約も急速に小さくなっている。

ハードウェア耐久性や通信セキュリティの観点から、監視、管理に係わる情報処理業務の総てをPCとインターネットで行うには至っていないが、情報公開に関しては主要な実現手段となっており、この傾向は強まると考えられる。

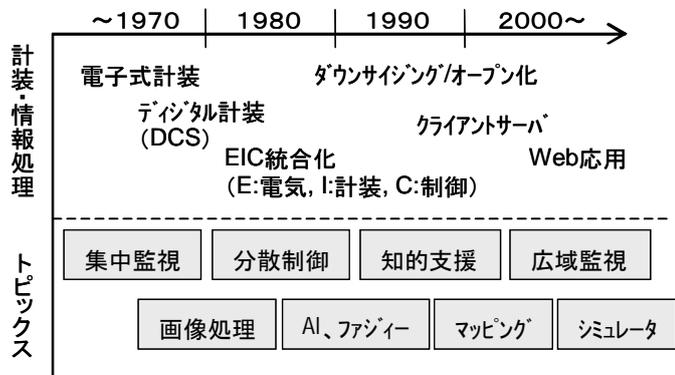


図1-2 水道分野でのIT技術の変遷

I T技術をベースとした情報処理技術、その応用手法やモデルパラダイムは、水環境分野の計測制御専門家会議である IWA-ICA (国際水協会・計測自動制御ワークショップ)や EICA (環境システム計測制御学会) での発表トピックスに、その変遷を見ることができる。80年代には画像処理技術やエキスパートシステム、90年代には CFD (Computational Fluid Dynamics)、管網計算技術やマッピングシステム、最近では衛星画像計測や横断的業務向けを指向した全庁型システムなどが新しい。今後、自治体合併に対応する水道事業の広域化、リモート化、統合化に対応する技術ニーズが高まるものと予想される。

1. 3 流域管理に関連する新たな動き

2004年9月に公開された世界保健機関 (World Health Organization ; WHO) の飲料水水質ガイドライン第3版には、新たに水安全計画 (Water Safety Plans ; WSPs) に関する内容が追加され、水質リスクに係る管理計画を策定することが推奨されている。特に、水道水質に影響する可能性のある危害を事前に分析した上で、合理的な監視体制を検討することが計画プロセスの中心であり、流域管理とも密接に連携するものとなっている。

1. 3. 1 水安全計画の構成

WHO 飲料水水質ガイドラインは、世界各国が水道整備を実施する上での参考とするために、1984年に設定されたものである。このガイドラインを参考にしてそれぞれの国で実行可能な水質基準を定めることを勧告している。その後も継続的な改訂作業 (Rolling Revision) が行われ、1993年には第2版、また1998年にはガイドライン補遺が刊行されている。

今般改定された最新の第3版²⁾では、ガイドライン値の見直し、及び水系感染症を意識した微生物問題を強調した改定となっている。改定作業には、我が国からも国立保健医療科学院水道工学部などが技術面を中心として、多くの面で協力している。第3版より新たに追加された WSPs (Chapter4) は、ガイドラインの中では、図1-3に示す位置付けである。水の安全性を確保するための計画策定を強く推奨しており、飲料水の水質検査に重点が置かれた対症療法的な措置から、より効果的な予防措置に重点をシフトしていこうというものである。この計画は水の安全性を確保するための施策全般を網羅するもので、水源監視に関連しては、表1-1に例示するような危害を広範に考慮することを求めている。

本計画における新しい考え方は、危害分析・重要管理点 (Hazard Analysis & Critical Control Point ; HACCP) による衛生管理手法がベースとなっている点である。この考え方に基づいて、各事業体が水源や流域の実情に合わせて目標を定め、目標を達成

するための計画を策定し、計画的に監視しようとするものである。この第3版改定で新たに持ち込まれた HACCP 的なアプローチは、厚生労働省による「水道ビジョン」でも言及されており、今後の水源監視体制を改めて検討する契機となるものである。

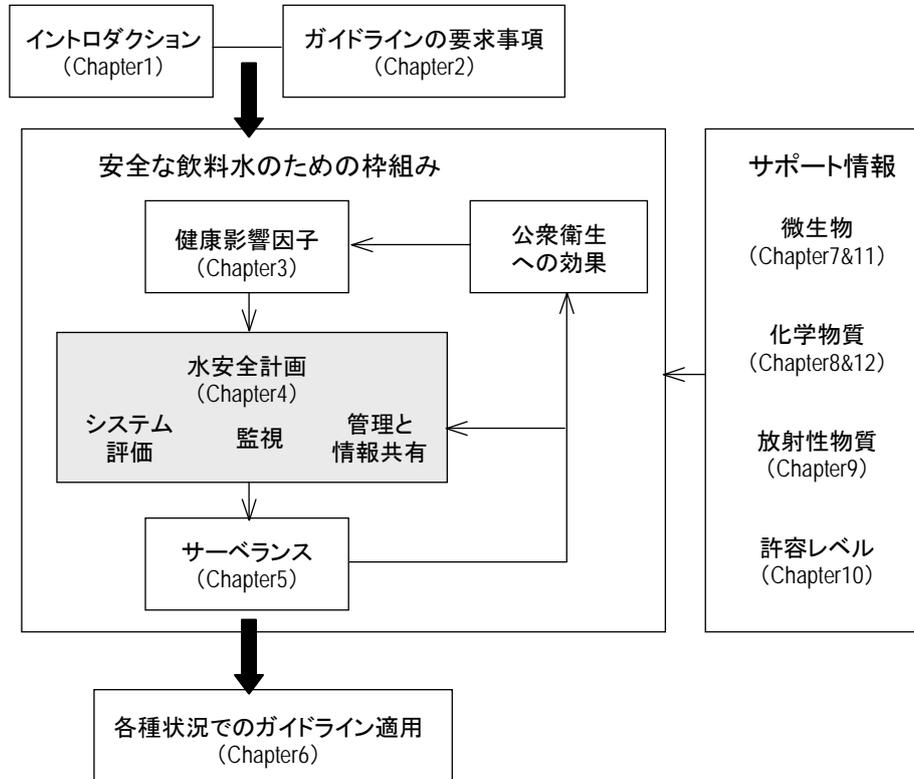


図1-3 水安全計画の位置付け

表1-1 WSPsに記載の危害と対策(水源)

危害 (hazardous events)	対策 (control measures): 順不同
<ul style="list-style-type: none"> ・地域性 ・急激な水質変化 ・下水や生活排水 ・工場排水 ・取水地域での化学薬品使用 ・野生生物 ・周囲の土地利用とその変化 ・雨水流入 ・廃棄物による汚染 ・不適当な水源保護 	<ul style="list-style-type: none"> ・使用される化学薬品の制限 ・人の活動の制限 ・排水の制限 ・土地使用計画 ・水源の定期検査 ・雨水流入の分離 ・水路の保全 ・水質汚染防止のための計画
…ほか	…ほか

ガイドラインで定義されている水安全計画の定義は、表1-2に掲げるように、①システム評価（水処理に関わる総ての工程に問題がないかの評価）、②効果的な運用監視（各工程の運用が適切に行われているかの監視）、③管理（管理業務の適切な遂行）の3つを必須の構成要件としている。

表1-2 水安全計画の概要(文献2からの抜粋に和訳追加)

<p>A WSP comprises, as a minimum, the three essential actions that are the responsibility of the drinking-water supplier in order to ensure that drinking-water is safe. These are:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ a system assessment; ■ effective operational monitoring; and ■ management. 	<p>水安全計画は、安全な飲料水供給を担保する効果的手段として、水道事業者が責任を持って遂行すべき、以下の3つの必須要件から構成される。</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ システム評価 ■ 効果的な運用監視 ■ 管理
--	---

1. 3. 2 水安全計画の策定・運用の課題

水安全計画は、表1-1にも前掲したように水源から給水栓までを網羅するもので、対象となる危害要因も多様である。計画の策定に当たっては、こうした広範な対象に対して、水源・流域評価、運用監視、および管理の内容を具体的に規定し、明確なドキュメント化を行う必要がある。また、運用フェーズでは、運用監視と管理を確実に遂行し、結果の記録と公開が必要であり、後述する流域管理の手法が求められることになる。

運用フェーズの前提として、監視基準と管理上の取るべき手段が事前に規定される必要があり、システム評価の結果が反映される。システム評価は、水質への危害要因を明確にすることである。流域や水源の特性、現況を踏まえて、管理されるべき危害要因を取捨選択する必要があるが、実務ベースでの適用が可能な手法が確立されているとはいえず、定量性を持った合理的な手順の構築が求められる。

1. 4 流域管理に関連する既往の研究

1. 4. 1 流域管理の定義

流域という用語は、一般的には、地形学的・水文学的には降水（雨、雪）に由来する表流水が河川・湖沼に流入する範囲という意味で用いられている。広義では、水の流れに沿った地域の広がりを目指すこともあり、生活・経済などの社会活動の単位という意味でも用いられている。本研究での流域は、後者の広義の意味も含めて取り扱っている。

流域管理とは「流域を単位とした水管理」を指す。水管理の主たる対象範囲は、①水害防止のための治水、②水道、農業用水や工業用水などの水利用のための利水である。治水・利水を第一の目的とした流域管理に加えて、国土交通省による1997年の河川法改正を契機として、③環境保全という新たな目的が明確に取り込まれることになった。このため、流域からの汚濁負荷低減に寄与する下水道整備も、流域管理の主

要施策として一層重要性が認識されることとなった。

治水は水量の観点からの水管理であり、利水と環境保全は主に水質の観点からの水管理が求められる。時には便益や利害が相反する水管理の課題をバランス良く解決、満足させることが流域管理手法に求められている。

1. 4. 2 流域管理システムに関連する既往の研究成果

流域管理の計画策定と実行を支援する流域管理システムに関する研究開発が広く行われてきており、実用に供するレベルの多くの成果が得られている。流域管理システムが取り扱う内容としては、主に流域計測、流域評価、及び流域管理運用があり、それぞれモニタリング技術、モデリング技術、システム技術が対応する。表1-3には、対応技術の開発例をまとめている。なお、「流域管理システム」との呼称は、広義には流域管理のための行政的な施策や管理体制も意味するが、本研究では流域管理業務を支援する情報管理システムという定義で用いている。

表1-3 流域管理システムの対応技術

	流域管理		
	I. 流域計測	II. 流域評価	III. 流域管理運用
実施内容	<p>■ 河川、湖沼を含む流域の基本データの取得(計測、分析など)</p> <p>i. 基本データは、以下の項目を含む ①水質、②水量、③水棲生物、④植生 ⑤土地被覆、⑥都市活動など</p> <p>ii. 必要に応じた頻度で計測 (連続、所定間隔で定期的、不定期)</p> <p>iii. 必要に応じた空間密度で計測 (面的、所定間隔でスポット的)</p>	<p>■ 流域の基本データに基づく、治水、利水、環境保全に関わる定量的情報の導出(評価、解析、予測など)</p> <p>i. 評価内容は、以下の項目を含む ①水害リスク、②利水性、③親水性 ④汚濁負荷量、⑤流域環境など</p> <p>ii. 上記 i での評価内容に関する施策の便益の定量化(効果、経済性)</p>	<p>■ 流域評価に基づく、流域の水管理の施策決定と実施</p> <p>i. 水管理の施策のPDCA(Plan-Do-Check-Action)サイクルの実行</p> <p>ii. PDCAサイクル実行に関する流域の基本データの管理、評価、共有、公開</p>
	計測技術 <モニタリング>	評価技術 <モデリング>	運用技術 <システム>
既往の対応技術開発例	<ul style="list-style-type: none"> ・リモートセンシングによる広域水質計測(文献4、5ほか) ・バイオアッセイによる有害物質検出(文献6、7ほか) ・画像処理による水棲生物計測(文献8) ・GC/MS、LC/MSの自動化による有機汚染モニター(文献9、10ほか) ・レーザープロファイラーによる河川流量計測(文献11) ・マイクロアクタ応用水質分析チップ(文献12、13ほか) ・環境ホルモンなどの微量物質検出(文献14、15ほか) 	<ul style="list-style-type: none"> ・原単位法に基づく汚濁負荷発生量評価(文献16、17ほか) ・河川水質評価モデル(文献18、19ほか) ・湖沼水質評価モデル(文献20、21ほか) ・洪水、浸水評価モデル(文献22、23ほか) ・水安全計画による利水評価フレームワーク(文献24) ・流域管理政策モデル(文献25) ・水質リスク評価、認知モデル(文献26、27ほか) 	<ul style="list-style-type: none"> ・水質監視システムの構築(文献28、29、30ほか) ・河川流域管理プロジェクトの推進(文献31、32、33ほか) ・流域管理への地理情報システム導入(文献34、35、36ほか) ・利水に関するPDCAサイクル実行(文献24)

(1) 流域計測技術

流域管理には的確なモニタリングが求められることから、流域計測に関して多くの取り組みがなされてきた。河川、湖沼とその流域を必要な解像度(時間的、空間的)で計測することが求められる。時間的にはより高い頻度で連続計測に近いものが、また、空間的には要所での定点計測から面的な分布計測が指向されている。

広域同時計測には、古くは 1970 年代より衛星リモートセンシングの導入が試みられている⁴⁾。かつての LandsatTM などの数十メートル解像度のものから、近年では IKONOS や Quick Bird2 などの数メートル解像度の画像が利用可能となっている。また、分光解像度も従来のマルチスペクトルだけでなく、200 バンド以上を有する Hyperion ではハイパースペクトル画像が取得されている。計測可能な項目としては、濁度、透視度などの水質項目のほか、流域の植生など事例が報告されている⁵⁾ ほか。

連続計測については、理化学センサとの相補的な位置付けで、バイオアッセイによる有害物質検知技術が多数開発されている⁶⁾ ほか。物質の特定はできないものの、個別の理化学センサではカバーできない広範な有害物質の有無を検知できることが利点である。また、所定物質の特定には、GC/MS や LC/MS などの分析装置に自動サンプリング機構を組み合わせたオートアナライザ化⁹⁾ ほかが実現されており、河川監視の現場で実用に供されるようになっている。

計測対象については、従来からの水質項目のほか、内分泌攪乱物質（環境ホルモン）など、環境中の微量成分に対応する研究開発¹⁴⁾ ほかが盛んに行われており、マイクロリアクタ（MEMS ; Micro Electro Mechanical System）を応用した短時間での検出技術¹²⁾ など が実用化されつつある。

上述した技術の中でも、特に衛星リモートセンシングは流域計測の有力な手段として期待は高い。試験研究的な目的での計測を除くと、実運用ベースで継続的に流域計測している事例は未だなく、衛星画像取得費用や定期的な画像取得機会の確保がネックとなり、本格的な普及はこれからである。

（2）流域評価技術

流域評価とは、流域管理の目的である治水、利水、及び環境保全に関わる定量的な情報を解析、予測することである。流域計測で得られたデータを用いて、流域内の現象を定式化することが必要である。治水向けには、洪水・浸水モデル²²⁾ ほかが多数提案されている。計測技術の進歩に伴って、より正確な境界条件での水理計算の実行が可能な精緻なモデルが開発されている。

利水や環境保全向けには、水質評価モデルが主たる研究開発の対象となってきた。河川水質評価モデル¹⁸⁾ ほかや湖沼水質評価モデル²⁰⁾ ほか、また、これらのモデルへの入力条件ともなる流域からの汚濁負荷発生量の評価モデル¹⁶⁾ ほかなどが開発され、流域管理計画の現場で適用されている事例（国土交通省「流域別下水道整備総合計画」）¹⁷⁾ もある。この他、こうした個別のモデルを援用しつつ、流域管理施策の経済性を評価するモデル²⁵⁾ ほかなども多数報告されている。

既往の研究成果により、網羅される流域評価の対象は広がりつつあり、また、各種知見の蓄積によりモデルの精緻化も進んでいる。これに伴ない、精緻化したモデルに見合った入力データを確保することが適用上の課題となっており、流域データベース

の効率的な構築と更新技術が合わせて求められる状況となっている。

(3) 流域管理運用技術

流域管理運用とは、流域評価の結果に基づいて水管理の施策を決定し、実施することである。実施に関わるデータの管理、評価、共有、情報公開を支援するために、流域管理システム構築の取り組みがなされてきた。

流域管理システムの代表的な開発事例としては、監視機能を強化した流域監視システムが多数報告されている。システム構築の主体は、河川流域管理プロジェクト（欧州、米国）³¹⁾ ほかや利水者である水道事業者²⁸⁾ ほかなどである。いずれも水質監視と情報公開の機能に特化しているが、実運用での適用がなされているフェーズにきている。

システム構築のための技術としては、流域の地理情報とその属性情報を統一したデータ形式で取り扱うことができる地理情報システム（Geographic Information System ; GIS）の応用研究³⁴⁾ ほかが増加している。今後、GIS の導入が更に進むものと予想され、流域管理システムの機能要件にマッチした GIS プラットフォームの検討がなされるべきである。

1. 4. 3 流域管理に望まれる今日的な技術課題

前項でも述べたように、流域管理には水量からの観点と水質からの観点があり、それぞれに対応する流域管理手法が開発されてきた。前者の観点では、水利調整に関わるステークホルダー間の合意形成が、より合理的なものとなることが今後も変わらぬ課題である。

また、水質に関する観点では、水質規制強化や水源水質の現況などを反映した流域管理施策への対応が求められる。例えば、BOD や COD に代表される有機物汚濁は事業場排水規制と下水道整備により、改善に進展があり、相対的に窒素やリンの栄養塩対策に重点が移行している。また、栄養塩に関しては、生活系や事業場系排水などの点源負荷の高度処理対策が進んでいることから、相対的に農地などの面源からの流出負荷が重要性を増している。さらに、こうした事例にとどまらず、前述の WSPs にも挙げられた水質リスク、流域環境などへの対応が今後強く求められると考える。

こうした現況の変化に対応する施策の検討と決定には、定量的な評価が重要であり、特に水質リスクや経済性を指標とした客観的な手法を拡充していくことが課題であると考えられる。本研究では、特に水質リスクの観点から見て最も効果的な施策（Best Management Practice）を決定する定量的な評価手法の重要性が、今後更に増すものと考えた。このような手法の実用性を高め、その適用を下支えするための工学的な手段の開発を技術課題として取り扱う。

1. 5 本研究の目的

本研究では、水道原水の取水源や下水処理水の放流先となる水源とその流域を取り扱う流域管理を対象に、効果的な施策を決定し、今日的な課題である合理的な合意形成に有用な情報を提示できる情報システム（流域管理システム）について論ずる。

1. 4節で述べたように、既往の研究成果により、水質や汚濁負荷量の評価、予測を行い、流域管理施策の効果を定量的に把握する取り組みがなされてきた。こうした手法の適用性を高め、更に実用性を向上するには、近年急速な進歩を遂げるIT技術を積極的に取り込んだ情報プラットフォームの構築が有効と考えた。

本研究のアイデアとして、流域管理にかかる施策の得失を評価するための指標として、主に水質リスクに着目し、定量的な監視、評価ができる技術の開発を試みる。このための情報処理技術として、流域の地理情報とその属性情報を取り扱うことができる地理情報システムを導入する。流域管理システム構築に当たって、そのユーザモデルを類型化して提案し、システム開発の観点から機能要件を整理する。また、主要な機能を実現する要素技術として、GISベースの情報プラットフォーム、衛星リモートセンシングによる広域計測技術、及び地理情報モデリング技術を開発する。

本研究の目的は、これらの技術を統合した流域管理システムを構築し、具体的な適用事例を通して、その有効性を示すことである。

1. 6 本論文の構成

本論文は図1-4に示すように、本章を含めて全7章構成とする。第2章以降の内容は、以下のような構成である。

第2章では、流域情報の集約と共有、公開にとって有効な情報プラットフォームとして、GISの適用性について評価する。また、システム開発の観点からGISをベースとした流域管理システムのユーザモデルを提案し、各ユーザモデルに対応するシステム構成と機能について整理する。第3章以降は、ここで抽出した技術課題に対して、具体的な要素技術に対応させ、開発を行う。

第3章では、流域管理に有用な広域性と周期性を有する計測手段として衛星リモートセンシングの適用を検討する。また、適用性を向上させる技術として、マルチスペクトル衛星画像の高解像度化手法を新たに開発し、その有効性を検証する。

第4章と第5章では、流域管理のためのモデリング技術について検討する。ここでモデリング技術は、流域管理システムの具体的なアプリケーションに対応するモデルと、GISの基本データ形式に対応する汎用的なモデルの2つを対象とする。

第4章では、利水事業者（水道事業者）や河川管理者の日常的な流域管理業務の一つである河川水質事故対策を対象とした、河川流下シミュレーション技術を検討する。実フィールドを対象とした適用事例により、河川水質事故対策への適用性を検証する。

さらに、流域管理に係る長期計画への適用を想定した、流域の汚濁負荷シミュレーション技術を検討する。水質リスクを説明できる地理情報付きの流域属性情報を活用した汚濁負荷モデルを構築し、実フィールドの長期水質予測へ適用した事例により、地理情報を用いることの有効性を確認する。

第5章では、GISの基本データ形式であるラスタ型データに適した汎用的なモデリング手法として、セルラオートマトンモデルについて検討する。本研究では、流域に関する過去の履歴データを用い、学習アルゴリズムにより遷移ルールを獲得する手法を開発し、GISに向けた新たなモデリング技術の提案を試みる。

第6章では、本研究で開発したサブシステムと要素技術を実装した流域管理システムの構築について述べる。「河川保全水路整備事業」と「流域熱環境改善計画」への適用事例において、水質や熱環境改善効果を予測し、事業への費用投資効果を定量的に示す。これら事例を通して、流域管理システムの実務への有用性を明らかにする。

第7章では、提案した流域管理システムの有効性と限界、更に適用の将来像についてまとめ、本論文の結論とする。

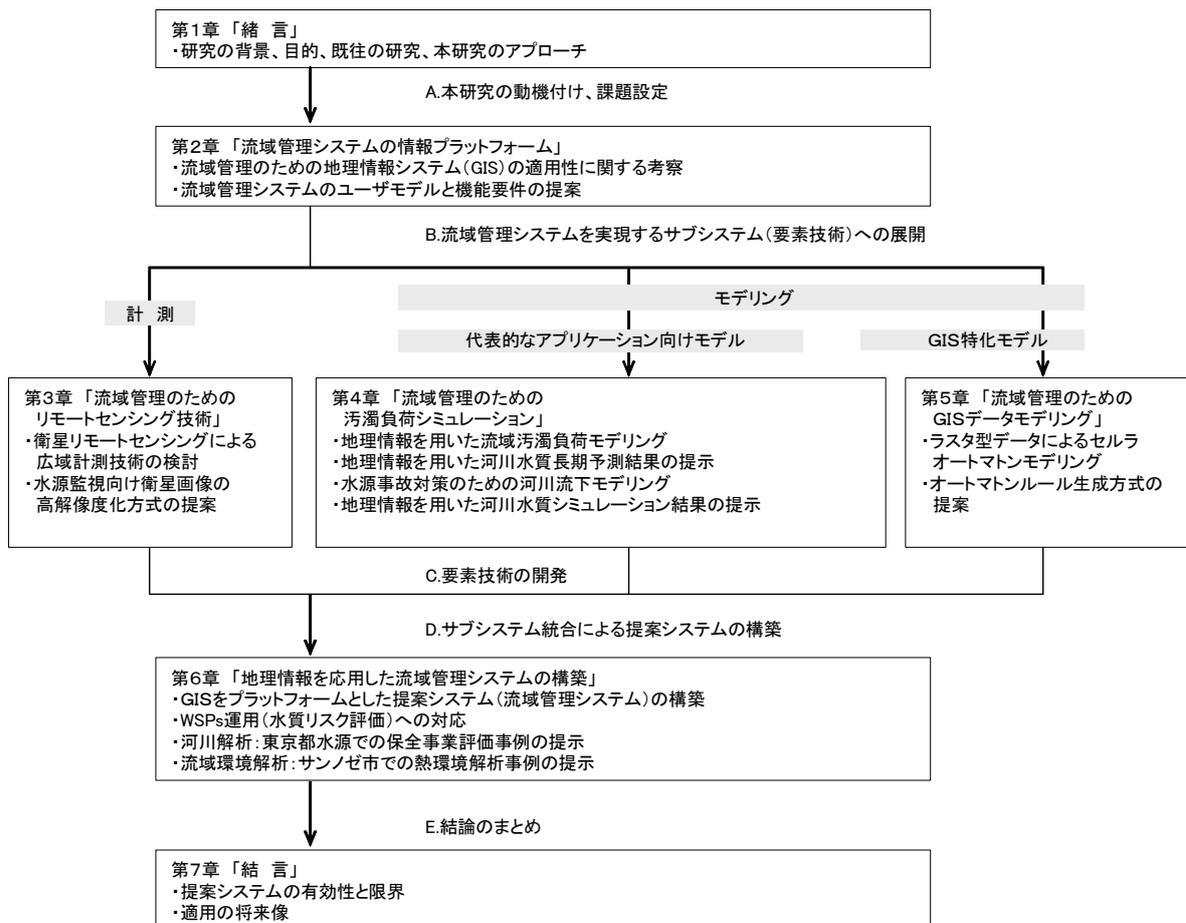


図1-4 本論文の構成

1. 7 参考文献

- 1) 国土交通省編 (2002) 日本の水資源 (平成14年度版)、財務省印刷局
- 2) World Health Organization (2003) Guidelines for Drinking Water Quality:3rd Edition
- 3) 圓佛伊智朗ほか (2003) IT技術を駆使した水源水質監視/管理システム開発の試み、第6回水道技術国際シンポジウム講演集、pp.113-120
- 4) United States Environmental Protection Agency (1979) Trophic Classification of Selected Illinois Water Bodies - Lake Classification Through Amalgamation of Landsat Multispectral Scanner and Contact-sensed Data、EPA-A-600/3-79-123
- 5) Richards J. (1993) Remote Sensing Digital Image Analysis - Second Edition : Springer-Verlag
- 6) 馬場研二ほか (1988) 魚類行動パターンを画像解析に基づく水質異常判定、水質汚濁研究、Vol. 11、No. 8、pp. 506-512
- 7) 田中良春ほか (1998) 硝化細菌を用いたバイオセンサによるバイオアッセイ技術の開発、用水と廃水、Vol. 40、No. 4、pp. 306-309
- 8) 榎英雄ほか (2000) フロー方式プランクトンモニタによる池水中プランクトンの連続計測、日本水環境学会誌、Vol. 23、No. 5、pp. 305-309
- 9) J. Slobodnik, et al (1993) Fully Automated Multi-residue Method for Trace Level Monitoring of Polar Pesticides by Liquid Chromatography、Journal of Chromatography、Vol. 642、pp. 359-370
- 10) 伊藤保 (2003) ゆうきセンサーによる水道原水の揮発性有機物のモニタリングと測定事例、環境システム計測制御学会誌、Vol. 8、No. 3、pp. 11-15
- 11) 高橋佳昭 (2000) 航空機レーザープロファイラーの地形測量への利用、測量とリモートセンシング、Vol. 39、No. 2、pp. 14-18
- 12) 三浦則雄ほか (2003) 免疫センサとマイクロチャンネルセルを用いた環境ホルモン類の多成分同時検出システムの開発、電気学会論文誌E、Vol. 123、No. 7、pp. 217-223
- 13) R. Miyake, et al. (1997) A Highly Sensitive and Small Flow Type Chemical Analysis System with Integrated Absorptiometric Micro Flow-cell、Proceedings of IEEE MEMS97、pp. 102-107
- 14) 田中宏明ほか (2002) 下水中の環境ホルモンの分析方法とエストロゲン様活性の総括指標化、用水と廃水、Vol. 44、No. 1、pp. 61-67
- 15) 大村直也 (2001) 生体機能を利用した微量物質のセンシングその3 - 複数の抗体を利用した検出濃度範囲と検出種の拡大 -、電力中央研究所報告 : U01011
- 16) 国松孝男 (1989) 河川汚濁のモデル解析、技報堂出版

- 17) (社)日本下水道協会編 (1993) 流域別下水道整備総合計画調査 -指針と解説、建設省
- 18) 村上健 (1969) 河川の自浄作用及び汚濁負荷の流出率について、第5回衛生工学研究討論会講演論文集、pp. 1-10
- 19) T. Barnwell, et al. (1987) The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual, EPA/600/3-87/007
- 20) 永禮英明 (2001) 琵琶湖北湖の水質形成過程に関する研究、京都大学大学院工学研究科博士論文 (環境工学)
- 21) United Nations Environmental Programme (1999) Planning and Management of Lakes and Reservoirs: An Integrated Approach to Eutrophication, UNEP-IETC; Tech Pub Series 11
- 22) 建設省土木研究所河川部都市河川研究室 (2000) 都市河川流域における水・熱循環の統合解析モデルの開発、土木研究所資料第 3713 号
- 23) 日高政隆ほか (2006) 流域管理システム向け河川水位・氾濫及び治水設備連成解析技術の開発、第 42 回下水道研究発表会講演集、pp. 357-359
- 24) World Health Organization (2003) Water Safety Plans, Chapter 4 of Guidelines for Drinking-Water Quality: Third Edition
- 25) 氷鮑揚四郎 (2003) 霞ヶ浦流域における統合的流域管理政策のシミュレーション分析、会計検査研究 No. 28、pp. 141-155
- 26) 圓佛伊智朗ほか (2004) 水源水質監視のための危害分析と水質リスク分類に関する検討、第 16 回環境システム計測制御学会研究発表会講演集、pp. 181-183
- 27) 平山修久ほか (2004) 共分散構造分析を用いた需要者の水道水質に対するリスク認知のモデル化、日本水道協会雑誌、Vol. 73、No. 12、pp. 12-21
- 28) (社)日本水道協会編 (2002) 突発水質汚染の監視対策指針
- 29) 今井麻都香 (2000) 札幌市における水質情報管理システムの構築、第 8 回衛生工学シンポジウム論文集、pp. 241-246
- 30) 国土交通省水質連絡会編 (2001) 水質事故対策技術 2001 年版、技報堂出版
- 31) Rhine Basin Program (1997) A European Program for Better Quality of Life
- 32) M. Purvis, et al. (1999) Determination and Monitoring of Polar Compounds and Acidic Herbicides Using a Modified SAMOS System, Journal of Environmental Analytical Chemistry, Vol. 74, No. 1, pp. 135-154
- 33) M. Grayman, et al. (2000) Early Warning System for Chemical spills on the Ohio River, Security of Public Water Supplies
- 34) 市川新 (2003) 流域水環境管理 - 流域水環境管理の展望と課題、日本水環境学会、Vol. 26、No. 3、pp. 2-6

- 35) 藤井滋穂 (2004) 流域管理のための最新技術、環境技術、Vol. 33、No. 5、pp. 60-64
- 36) National Center for Geographic Information and Analysis (1990) GIS Core Curriculum
- Application Issue

第2章 流域管理システムの情報プラットフォーム

概要

流域管理に係る水質リスク等を評価する上で、流域の地理的な情報とその属性情報は欠くことのできない基本情報となる。求められる情報の種類や情報源は多岐にわたるため、これを効率的に取り扱うための情報プラットフォームが必要である。

本章では、流域情報の集約と共有、公開にとって有効な情報プラットフォームとして、地理情報システム（GIS）に着目し、その適用性について評価する。また、システム開発の観点から、GISをベースとした流域管理システムのユーザモデルを類型化し、各ユーザモデルに対応できるシステム構成と機能要件について提案する。さらに、主要なシステム機能を実現するために必要な技術と解決されるべき技術課題についてまとめる。

2. 1 流域管理システム検討のアプローチ

流域レベルで水質リスクを監視、評価、管理するためには、流域の地理的な情報とその流域レベルで水質リスクを監視、評価、管理するためには、流域の地理的な情報とその属性情報が欠くことのできない基本情報となる。流域管理を定量性の高い、より精緻なものにしようとする、取り扱う情報は増加し、情報プラットフォームの導入が必要となる。流域管理に関わる当事者、例えば、水道事業者や河川管理者、自治体の環境部局などは、夫々が必要とする情報収集の手段とこれに対応する情報システム、いわゆる、流域管理システムを導入してきた¹⁻³⁾など。流域管理システムの必要性が認識され、着実な普及が期待されているが、各当事者の合意形成に役立つような共通のシステム像の検討は未だ緒についたばかりである。

本研究では、流域管理システムの本格的な普及に向けて、流域管理業務に適用する固有の情報システム像について論ずる。特に、流域管理への適用が進められている地理情報システム（GIS）について、その適用性について考察し、システム開発の観点から、流域管理システムに共通するユーザモデルと機能要件を提案するとともに、今後の技術課題についてまとめる。

2. 1. 1 流域管理と今日的な技術課題

流域は、地形学的・水文学的には降水（雨、雪）に由来する表流水が河川・湖沼に流入する範囲を指す。広義では、水の流れに沿った地域の広がりも指すこともあり、

生活・経済などの社会活動の単位という意味でも用いられている。流域管理とは「流域を単位とした水管理」を行うことである。

水管理の主たる対象は、①水害防止のための治水、②水道、農業用水や工業用水などの水利用のための利水である。治水・利水を第一の目的とした流域管理に加えて、1997年の河川法改正を契機として、③環境保全という新たな目的が取り込まれた。治水は水量の観点からの水管理であり、利水と環境保全は主に水質の観点からの水管理が求められる。時には便益や利害が相反する水管理の課題をバランス良く解決し、満足させることが流域管理に求められる。

流域状況の変化に対応する施策の検討と決定には、定量的な評価が重要であり、水質・水量リスクや経済性から見て効果的な施策（Best Management Practice）を決定する評価手法が、今後更に重要になると予想している。このような手法の実用性を高め、その適用を下支えする工学的手段として、流域管理のIT（Information Technology）化が今日的な技術課題である。

2. 1. 2 流域管理システム検討の手順

本研究では、流域管理のIT化に適した情報プラットフォームの要件を整理し、これに基づいて流域管理システムに具備されるべき機能を明らかにする。流域管理に固有のシステム像を明確にすることで、より実用的な機能の提供とシステム開発効率を向上させることが狙いである。

このための手順として、1) 流域管理に係る情報の特徴分析とGIS適用性評価、2) システムのユーザモデル構築、さらに、3) システム機能の考察と技術課題の抽出、というステップで検討した。

特に、2)のステップでは、流域管理システムの代表的な用途をユーザモデルによって類型化するという新しいアプローチを試みた。各ユーザモデルに対して、どんな機能が必須であり、どんな機能がオプションであるかを対応させることにより、用途別の流域管理システムに必要な十分な機能を見通しよく設計できる効果を期待した。

こうした機能要件の整理により、各ユーザモデルで共有できる基本機能と、個別に準備すべきカスタマイズ機能の明確化、さらに、機能実現のための技術課題を抽出した。検討の各ステップについては、次節以降で詳述する。

2. 2 流域管理に係る情報と地理情報システム

2. 2. 1 流域管理に係る情報の特徴分析

情報プラットフォーム検討の第一ステップとして、流域管理に係る情報の特徴を分析した。流域管理を目的として行われる監視、評価、管理に係る情報は、その実施内

表2-1 流域管理に係る情報の特徴

	特徴	対応する事項
1	データ項目が広範	<ul style="list-style-type: none"> ・水質、水量に影響する要因が多数(地理、流域の都市活動など) ・流域状況を記載するデータ指標が幾つもある
2	多岐にわたる情報源から収集	<ul style="list-style-type: none"> ・関係する当事者が夫々にデータを保有 ・所轄機関が分担(または縦割り)でデータを計測
3	頻度の高い更新が必要	<ul style="list-style-type: none"> ・流域の属性情報は経時変化するものが多い ・計測/調査手段の向上によりデータ精度が変化
4	情報公開の容易さが必要	<ul style="list-style-type: none"> ・当事者が多い ・行政からのリスクコミュニケーションの主要な対象である

容の固有性から表2-1に示す特徴を有するものと考えた。

(1) データ項目が広範

流域という実フィールドを取り扱う性格上、流域の地理的な条件や都市活動など、多くの要因が水系の水質や水量に影響する。流域を評価、解析するモデルは、簡便であるほど実務上の使い勝手が良いものの、リアリティを持った流域状況の取り扱いには、相応のデータ項目を準備する必要がある。また、流域状況の良否を表現するための指標(水質、水系微生物など)も多くあるため、データ項目が広範にわたる。

(2) 多岐にわたる情報源から収集

流域での定期的な水質監視は、主に環境行政部局や河川行政部局によって行われている。また、取水地点など利水上の要所では、水系協議会や水道事業者が独自に計測、水質分析しているものもある。これらの所轄機関が、それぞれの業務/事業の目的に合致する情報を取得している。この他、大学や研究機関が学術的な目的で取得している情報も含めて、流域に係る情報源は一本化されているとは云えず、多岐にわたる。

(3) 頻度の高い更新が必要

流域の属性情報は、河川流路や集水域など年オーダーで変化するものや、流域からの汚濁負荷発生量を説明するフレームデータ(人口や鉱工業生産量など)のように短いスパンで変化するものもある。現況を正確に反映するためには、頻度の高い更新が求められる。

(4) 情報公開の容易さが必要

流域管理に係る当事者は多く、便益や利害が相反することも多い。合理的な合意形成のためには、情報公開が必要である。分かり易く可視化し、時機を得た公開が求められる。

上述した4つ特徴を踏まえると、流域管理の情報プラットフォームにおいては、総てのデータを所定の規格化された形式で取り扱うことが望ましいことが分かる。

2. 2. 2 水質リスクに係る情報

前項で述べたように、流域管理に係る情報は広範で情報源も多岐にわたる。本研究が対象とする水質リスクに係る主な情報としては、表2-2にまとめたような項目が必要となる。

表2-2 水質リスクに係る主要な情報

	データ項目	データ内容	情報源
流域地報基盤データ	河川・湖沼	河川流路、湖沼位置・面積、水面標高、最大水深など	国土数値情報
	水系域流路延長	河口からの延長距離、河床標高値など	〃
	流域界・非集水域	流域境界線、サブ流域境界線、流域メッシュなど	〃
	標高	平均標高、傾斜度など	〃
	行政区域	行政境界線	〃
	航空/衛星/地図画像	航空/衛星/地図データ	航測会社など
流域インフラデータ	建物	建物、公共施設	国土数値情報
	道路・鉄道	道路中心線、鉄道路線、駅位置など	〃
	土地利用	土地利用区分、土地利用面積割合	〃
	地域分類	都市計画区域、環境保全区域など	都道府県など
	施設	水質観測所、水位観測所、排水機場、堰など	所管機関など
	下水道	下水処理区、放流箇所	企業局、下水道局
流域環境データ	水質	水質計測/分析データ、採水箇所	所管機関など
	水量	河川流量、河川水位、ダム諸量など	〃
	水系生物・植物	プランクトン量、水棲生物情報など	〃
	植生	植生分布、藻場分布、湿地分布など	〃
	地質	地質、土壌分布など	国土数値情報など
	気象	雨量、気温、風速、風向など	気象庁など
	大気	大気汚染物質濃度	〃
流域都市活動データ	人口・世帯	流域人口、世帯数	国勢調査
	特定事業場	業種、規模、位置、排水量・濃度など	所管機関など
	浄化槽・汲み取り	浄化槽人口、箇所など	都道府県など
	農業	田畑面積、農薬使用量など	農業統計など
	畜産	畜産事業者数、飼養数、排水処理状況など	〃
	事業所/企業統計	業種、従業員数、売上高など	工業統計など
	鉱工業生産	業種別鉱工業生産量、出荷額など	〃
	化学物質	生産量、出荷額、流通量など	PRTRなど

従来は、紙ベースの地図やデータ帳票として保存、管理されていたものが、計算機システムの普及によって電子化されるものが増加しており、高度な情報活用が期待できる環境が整いつつある。他方、表2-2に挙げたデータ項目のうち、一部の水質項目などを除くと、多くは連続自動計測が困難な情報が大半である。必要とされる空間的な密度と時間的な頻度でのデータを確保するためには、データ更新の労力と費用を軽減する方策が合わせて必要である。

2. 2. 3 地理情報システムの現状

(1) 地理情報システムの構成とデータ形式

地理情報システム (GIS) は、計算機システム上に地理情報の単位で様々な属性情報を持たせ、目的にあった主題図 (Thematic Map) を生成するためのシステムと定義される。土地管理向けに 1960 年代後半に構築されたシステムに端を発し、計算機システムの発達に合わせて 1980 年代より適用先が拡大し、普及も進んできた⁴⁾。

基本構成は、図 2-1 に示すようにハードウェアとしては、計算機システムのほか、データの入出力装置が必要である。また、ソフトウェアとしては基本的なデータ処理機能を実現する地理情報基本ソフトウェア、個別用途の解析機能などを実装したアプリケーションソフトウェア、および地理情報を管理するデータベースから構成される。地理情報基本ソフトウェアの主な機能は、地図表示、図形作成・編集、属性データ作成・編集、検索、空間解析、主題図作成などである。

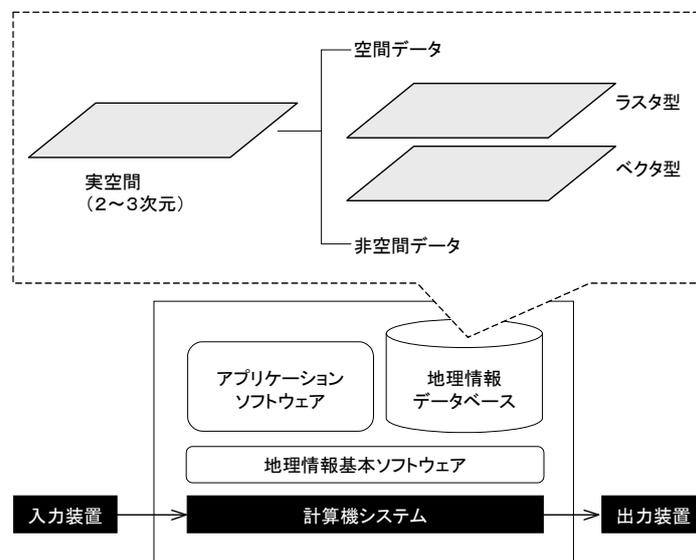


図2-1 地理情報システムの基本構成

地理情報のベースとなる図形情報は、図 2-2 に示すようなラスタ型とベクタ型の 2 つのデータ形式に大別される。ラスタ型は航空写真や衛星画像やスキャンした地図などに対応するデータ形式である。他方、ベクタ型は測量や地図のトレース、CAD データなどの変換で得られるデータで、ポリゴン、ライン、ポイントなどで表現する形式である。

(2) GIS 研究とソフトウェア

GIS に関する研究オリジンは、資源管理や都市計画などを取り扱う計量地理学からスタートしており、例えば、米国ではカリフォルニア大学サンタバーバラ校の地理学科に設置された NCGIA (National Center for Geographic Information & Analysis ; National Science Foundation のファンドで運営) や USGS (United States Geological Survey) などの機関が先導的な役割を果たした。国内においても、第 1 章で触れた流

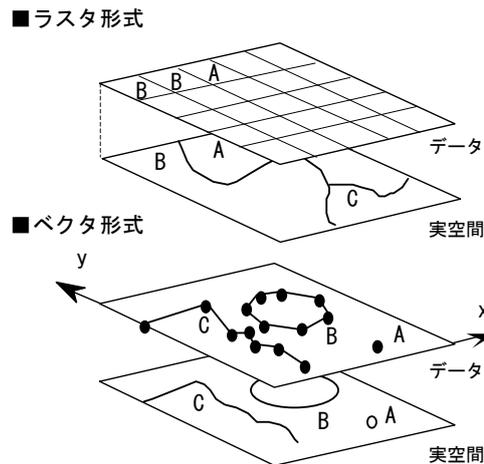


図2-2 地理情報の基本データ形式

域管理への適用検討だけでなく、都市計画や環境評価への応用方法を探る目的で、都市工学、環境工学や土木工学からの多くのアプローチがなされている^{5) 6)}。

GIS 基本ソフトウェアは、民間ベンダーによるパッケージソフトが多数リリースされているのに加えて、大学などの研究機関では、パブリックドメインソフトウェアである GRASS⁷⁾ (Geographic Resources Analysis Support System ; Construction Engineering Research Laboratory、 US Army Corps of Engineers が開発) などの利用が広がっている。このため、GIS ソフトウェアを一から開発するケースは殆どなく、それぞれの用途に応じたアプリケーションソフトウェアのみを製作すればよい環境が整っている。

(3) GIS を取り巻く状況

技術的には、ベースとなる技術の拡充と適用範囲の拡大が進んでいる。前者に対しては、例えば、取り扱うデータをより高次にしようという試みがされている。これまで主流の2次元平面データのレイヤーを組み合わせることで、高さ方向も含めて2.5次元や3次元の効率的な処理ができるようになってきている。また、時間の次元を取り入れることで、経時変化の解析を容易にする試みがされている⁸⁾。後者については、本研究のアプローチと同じように、特定の適用対象に対する GIS 適用のあり方についての研究が進められている⁹⁾。

普及・導入に向けた取り組みとしては、2002年に総務省 IT 戦略本部が作成した「e-Japan 重点計画」で、GIS の導入推進が織り込まれ、各省庁での施策に展開された。この一環として、国土地理院では地理情報クリアリングハウスの構築を進めている。クリアリングハウスとは、情報の流通機構を指すもので、各省庁が保有する情報を共有できるシステム構築と情報検索のためのメタデータ整備が進められている。ここで公開されている情報には、上述した流域管理に必要なデータ項目も含まれており、こうした情報の活用を前提に流域監視システムの構成と機能を考える必要がある。

2. 3 地理情報システムの適用性と機能要件

2. 3. 1 流域管理の情報化に求められる要件

流域管理システムの構築に適した情報プラットフォームを検討する前準備として、本項では流域管理の情報化に求められる要件をシステム開発の観点で検討し、整理した。表2-3に示すように、求められる要件は、2. 1. 1で述べた流域管理に係る情報の特徴に対応するものと、流域管理システムの運用において求められるものとに分けられる。表中の項目1～4が前者に、項目5～6が後者に相当する。

表2-3 流域管理の情報化に求められる要件

	情報化の条件	求められる要件
1	データ項目が広範	公開情報を有効に活用でき、かつ異なるデータ項目を共通のインデックスで整理できること
2	多岐にわたる情報源から収集	統一した形式で各種の情報源からの情報を集約して活用できるプラットフォームを有していること
3	頻度の高い更新が必要	主要なデータ項目の更新が必要な頻度で、かつ適正な費用レベルで取得・計測可能であること
4	情報公開の容易さが必要	合意形成に有用な情報を評価・解析でき、かつ結果を分かり易い形式で可視化できること
5	複数ユーザに跨るシステム運用	運用する組織の体制にマッチしたシステムカスタマイズが容易であり、かつ堅牢性に優れていること
6	システム運用の適正な費用対効果	システム運用に係る主要なコストであるデータ追加・更新が容易な構造であり、かつ適正な費用レベルであること

項目1「流域管理に係るデータ項目が広範」に対しては、公開情報が有効に活用できることが求められる。流域管理に係るデータを特定の目的のために総てを自前で取得、計測することは実務上困難であり、公開済み情報を容易に活用できるシステムが望ましい。その際には、様々な単位（エリア、頻度など）で取得されたデータを共通のインデックス（分類カテゴリ）で整理できれば、異なるデータ項目を組み合わせた活用が容易となる。項目2「多岐にわたる情報源から収集」は、統一した形式で各種の情報源からの情報を集約できるプラットフォームを有することを求めるもので、実質的に項目1と同じ要件で対応するものとなる。

項目3「頻度の高い更新が必要」という特徴に対しては、流域管理のための主要なデータ項目を更新するデータ取得・計測手段が必要である。水質や流域の状況を広域に、かつ周期的に計測できる技術が有効であり、こうした技術との連携が容易な情報プラットフォームであることが求められる。

項目4「情報公開の容易さが必要」に対しては、流域管理に係る施策などの合意形成のために分かり易い形式で、時機を得た、または即時性が必要なときは速やかに情

報公開ができる手段が必要である。分かり易さという点では、可視化 (Visualization) の機能に優れていることが必要である。また、即時性という点では、インターネットなど、情報ネットワークとの連携に優れた情報プラットフォームであることも必要である。

システム運用に関する項目 5 「複数ユーザに跨るシステム運用」は、流域管理に複数の組織が関与することが多いことによる。例えば、河川水質に関連する部署は、一つの自治体だけをみても、環境部局、河川部局、水道や下水道事業を運営する企業局などが関わっている。また、水系協議会のような団体でも、複数の水道事業体が構成員となっており、これらの体制にマッチしたカスタマイズが容易な情報プラットフォームである必要がある。

最後の項目 6 「システム運用の適正な費用対効果」は、流域管理だけに限らない一般的な要求条件である。システムそのものが一から構築が必要な特殊なソフトウェアで実現されるのではなく、汎用性の高いソフトウェアの導入で構築できることが望ましい。また、運用フェーズでの主要なコストであるデータ追加・更新が容易であること、例えば、モジュール性の高いデータベース構造であることや項目 3 でも述べた計測技術との連携が容易な情報プラットフォームであることが望ましい。

2. 3. 2 地理情報システムの適用性に関する考察

前項で述べた流域管理システムの情報プラットフォームの要件に対して、GIS はどのような適用性を有しているかを考察した。

流域管理の情報化に求められる要件は、表 2-4 に示すように、個別には 9 つの項目に分けることができる。各項目について、これに対応する機能や利用に係る環境が整備されているか否か、また、実用上問題となる課題がないかどうかの観点で、適用性が「特に優れる◎」から「不適×」までの 4 段階で評価した。評価の根拠となる情報も表 2-4 にまとめている。

要件 1 「公開情報の有効活用」については、地理情報をインデックスとしたデータクリアリングハウスが構築され、継続的な拡充が行われている。こうしたデータクリアリングハウスは、情報が公開され、共有して有効活用できる環境が整いつつある。また、地理情報の標準記述プロトコルとして、国内は JIS 化された G-XML (G-eXtensible Markup Language)、国際的には ISO 化された GML (Geography Markup Language) があり、データ形式が統一されているだけでなく、異なるシステム間でデータを自由にやり取りするプロトコルが整備されている状況である。これらを判断根拠として、要件 1 に対しては、GIS が特に優れた適用性を有すると判断した。

また、要件 2 「統一したデータ形式」についても、要件 1 で述べた状況を判断根拠

とすることができ、同様に、特に優れた適用性を有すると判断することができる。

各要件に対して、上記と同様な評価過程で判断した結果、「特に優れる◎」が3項目、「優れる○」が3項目、「普通△」が3項目となった。また、「不適×」となる項目は無いと判断された。全体評価として、GISは流域管理システムの適用に当たっての大きなボトルネックはなく、概ね優れた適用性を有すると判断した。

表2-4 地理情報システムの適用性評価

	流域管理からの要件	適用性	対応する機能/課題等
1	公開情報の有効活用	◎	・地理情報クリアリングハウスからの情報活用 ・地理情報プロトコルの標準化が進行中
2	統一したデータ形式	◎	・地形図をインデックスとしたデータ形式
3	データ計測手段との連携	△	・航空写真、衛星画像の導入は容易(ラスタ形式) ※水質などの自動計測技術は発展途上
4	優れたデータ可視化	◎	・異なるデータレイヤ間のオーバーレイ、鳥瞰図表示など 視認性に優れる機能を標準で実装
5	情報公開の即時性	△	・特に対応する機能なし(問題となるネックもなし)
6	情報ネットワークとの連携	△	・特に対応する機能なし(問題となるネックもなし) ※インターネットとの親和性の高いWeb-GISなどあり
7	容易な機能カスタマイズ	○	・商用GISパッケージにおいては、GUIビルダなどを 実装しているもの有り
8	基本ソフトウェア活用	○	・地理情報のハンドリングに必要な基本機能は標準 で実装
9	容易なデータ追加・更新	○	・データベースのモジュール性が確保されており、プロ グラムの改変なしにデータ追加・更新可能

適用性 ◎:特に優れる、○:優れる、△:普通(特に優位性なし)、×:不適

他方、適用性が「普通」と判断された項目からは、適用に当たって留意すべきことや、今後の開発課題を読み取ることができる。データ計測手段との連携については、航空写真や衛星画像などのリモートセンシングとの連携が容易であるが、これ以外の計測手段、例えば、広域の水質計測や流域の都市活動情報の取得手段などは技術自体が未だ発展途上であり、選択肢も少ないため、連携での特に大きな特長は見出せない状況である。流域管理に向けた新たな計測技術の開発と合わせて、連携が容易なりリモートセンシング技術の活用方法を更に拡大させていくことも必要である。

2. 4 地理情報システムをベースとした流域管理システム

流域管理への高い適用性を有する地理情報システムをベースとして流域管理システムを構築するにあたって、どんな機能を付与すべきかを検討した。どんなユーザがどんな用途でシステムを導入しようとするかにより、システムの性格や強化されるべき機能構成が異なる。本節では、ユーザモデルとそれにマッチした機能構成、更に各機能を実現するための技術課題について考察し、開発が必要となる要素技術についてまとめる。

2. 4. 1 流域管理システムのユーザモデル提案

システムの運営主体としては、流域管理に関わる国、都道府県、自治体や関連する団体、および研究機関が想定される。これらの運営主体の主たるシステム運用目的や用途によって、ユーザモデルを類型化した。本研究で提案する流域管理システムのユーザモデルを図2-3に示す。基本型となる業務強化型から情報公開型までの4つに類型化している。

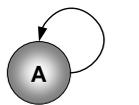
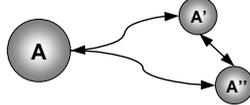
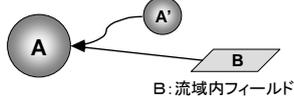
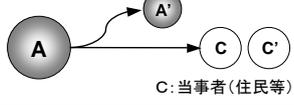
	ユーザモデル	システム用途等
I	 <p>A: 部署、研究機関</p>	流域管理に関わる部署、または研究機関が行う業務(流域情報管理、計画、評価・解析)を支援するためのシステム
II		流域管理に関わる複数の部署・機関が情報共有しながら、業務を分担、連携する機能を強化したシステム
III	 <p>B: 流域内フィールド</p>	流域管理に関わる情報を取得、計測してデータベースを更新する機能、流域・水源監視の機能を強化したシステム
IV	 <p>C: 当事者(住民等)</p>	流域管理に関わる当事者(ステークホルダ)に対して、積極的に情報公開(啓蒙)するための機能を強化したシステム

図2-3 流域管理システムのユーザモデル

業務強化型は、運営主体(図中Aと表記)が行う流域情報管理、計画策定やこれに関連する評価・解析などの業務を効率化、高度化することを主な用途とするものである。運営主体の内部でクローズして使用されることが前提となるため、システム単独で機能的に完結している必要がある。

表2-5には、各ユーザモデルに対してシステムが対応すべき機能・コンテンツをまとめた。業務強化型では、流域評価・解析機能や帳票類作成機能など、基本的な機能を網羅的に実装させる点が特徴となる。

業務協働型は、運営主体を含む複数の部署・機関が業務を分担、連携するためにシステムを活用する。複数のシステム間で機能分担を行えるため、業務強化型に比べると、実装する機能を絞り込むことができる。情報共有のための機能が強化される必要があり、表2-5に示すように外部システムオンライン連携機能や情報クリアリングハウス機能が実装されることが望ましい。

情報収集型のユーザモデルは、情報を取得、計測して流域を監視したり、流域情報データベースを更新することを主な用途とするものである。水系・流域監視機能や水質モニタリング機能のほか、フィールドに設置した計測器類からの情報をシステムへ

伝送するテレメータ機能などを実装することが特徴となる。監視システムとしての性格が強く、水源水質監視システムなどが、このユーザモデルに対応する。

4つめのユーザモデルである情報公開型は、流域管理に関わるステークホルダー、特に流域住民への情報公開を目的とした、いわば「見せるためのシステム」としての使い方である。流域に関する施策決定に、ステークホルダーである流域住民の意向をより反映させようという趨勢があり、例えば、1997年の河川法改正では流域委員会設置と流域住民参画の制度が創設されている。委員会に参画する代表住民の母集団となる流域住民に、正確で客観的な情報を提供することは一層重要性を増しており、今後、このタイプのシステムの導入が進むものと予想する。

表2-5 ユーザモデルと対応機能

		● 実装が必須となる機能 ○ 実装が望ましい機能	ユーザモデル			
			業務強化型	業務協働型	情報収集型	情報公開型
流域管理システム機能・コンテンツ	ミニマム	地理情報基本ソフトウェア	●	●	●	●
		地理情報データベース	●	●	●	●
		流域情報基本データ	●	●	●	●
		データ入出力機能(装置)	●	●	●	●
	オプション	流域評価・解析機能	●	○		
		流域モデルアーカイブス	○	○		
		帳票類作成機能	●	○		
		水系・流域監視機能	○		●	
		水質モニタリング機能	○		○	
		フィールド情報収集機能	○		○	
		外部システムオンライン連携機能		●	○	
		テレメータ機能			○	
		情報クレンジング機能		○		○
		Webベース公開機能				●
流域教育コンテンツ				○		

2. 4. 2 システム機能と対応技術

前項に示したシステム機能は、既存技術で実現されているものもあるが、さらに技術拡張が必要なものや開発中のものが含まれている。ここでは、各機能に対応する機能の現状を整理した。各システム機能を実現する対応技術を表2-6にまとめた。

流域監視システムにとってのミニマム機能であるGISの基本機能（地理情報基本ソフトウェア、地理情報データベース）は、継続的な技術拡張は現時点でも進行しているが、現状においても適用に当たってのボトルネックはなく、確立されていると考える。ミニマム機能の中では、データ入出力機能に機能拡張の余地が大きい。データソースとして、紙ベースの図面やドキュメントが占める割合は今だ大きく、こうしたレガシーデータをデジタル化し、地理情報データベースのコンテンツとする作業を効率化する意義は大きい。スキャン画像の解析により、特徴量を抽出してベクタ形式の

データを生成する技術^{1 0) 1 1)}の開発が進められている。図面の鮮明度などにもよるが、人手によるデータ校正が必要なレベルであり、特徴量抽出精度の向上が必要である。

表2-6 システム機能と対応技術

		対応技術	現状レベル	
流域管理システム機能	ミニマム	地理情報基本ソフトウェア	地理情報処理技術(保存、修正、表示、演算他)	◎
		地理情報データベース	データベース技術、データベース言語(SQL他)	◎
		データ入出力機能(装置)	スキャンニング技術、画像特徴量抽出技術など	○
	オプション	流域評価・解析機能	流域モデリング・シミュレーション技術 (汚濁物発生・排出、物質移動、水理、水質リスク他)	△
		流域モデルアーカイブス		
		帳票類作成機能	ドキュメント作成・編集技術、データベース技術など	◎
		水系・流域監視機能	リモートセンシング技術、理化学計測技術など	△
		水質モニタリング機能	理化学計測技術、バイオアッセイ技術、MEMS技術など	△
		フィールド情報収集機能	携帯情報端末(PDA)、PHS通信技術、GPS技術など	○
		外部システムオンライン連携機能	情報ネットワーク技術、情報セキュリティ技術など	○
		テレメータ機能	信号伝送技術	◎
		情報クリアリングハウス機能	メタデータ作成技術、情報検索技術など	○
Webベース公開機能	クライアント・サーバ技術、情報ネットワーク技術など	○		

現状レベル ◎: 確立済み、○: 対応技術あり、△: 一部対応or開発中、×: 対応技術なし

オプション機能の中では、確立済み(表中記号◎で記載)と対応技術あり(○)と判断したものがそれぞれ2機能と4機能であった。これらの6機能は、情報クリアリングハウス機能を除くと、GISに向けて特化した技術として開発されたものではなく、情報処理システム全般に適用可能な技術である。流域管理システムに向けた若干のカスタマイズで機能を実現できる状況にある。他方、情報クリアリングハウス機能は、分類・検索の効率を上げるためのメタデータ作成技術などで実現されるが、データコンテンツに依存する部分も多いため、流域情報に向けたカスタマイズの余地が他の機能に比べると大きくなっている。

表2-6に示した機能のうち、対応技術なし(表中記号×で記載)に該当するものはないと判断したが、一部対応 or 開発中(△)のものとして、流域評価・解析機能、水系・流域監視機能、および水質モニタリング機能の3つを挙げた。これらに対応する技術が、ユーザモデルの基本型である業務強化型の流域管理システムを構築する上でのボトルネックとなるもので、現時点での技術課題であると位置付けられる。

流域評価・解析機能は、治水、利水、および環境保全など、流域管理の目的となる事象について、合意形成や意思決定の定量的な判断材料となる情報を提示するものである。第1章述べたように、既往の研究により汚濁負荷発生・排出、物質移動、水理などのモデル開発が進んでいる。流域の評価・解析モデルの精緻化が進むに伴い、境界条件や入力として与えるデータも増加する傾向にある。これを下支えするだけのデータ計測技術や体制が追いついていないケースがあり、モデルとデータのミスマッチの解消に向けた取り組みが必要である。水系・流域監視機能と水質モニタリング機能に対応する計測技術の拡充は、こうしたミスマッチ解消の一端を担うことにもなる。

本研究では、上述した課題に対して、モデルとデータのミスマッチを解消するために、以下のアプローチを行った。

- (1) GIS との連携に優れ、計測手段として有望なリモートセンシング技術の拡張
- (2) 実務上取得可能なデータの範囲で実行可能で、かつ実用的な精度を有する簡便なモデルの構築
- (3) 具体的な流域を対象に、これらを適用した流域管理システムの構築、および適用性と有効性の提示

上記については、それぞれ第3～6章で詳述する。

2. 4. 3 流域管理に固有な地理情報システムに関する考察

前節で評価したように、現状でも GIS は流域管理システムの情報プラットフォームとして、優れた適用性を有している。今後、更に適用性を高めるために、流域管理の用途に特化した GIS の開発が望まれる。こうした domain-specific な GIS で強化されるべき特徴として、次の3つを考えた。

①オープンソース化

基本ソフトウェアのソースコードを利用・改善が自由な形式で公開することが必要である。こうしたオープンソース化を指向する流れは流域管理分野だけに限ったものではないが、流域管理ではシステムに実装する知的資産（知見、学術的成果、解析評価モデルほか）の大半が学術研究者をオリジンとする傾向が顕著であるため、広範に散在する知的資産を取り込んで、流域管理分野共有の資産としてシステムに反映できる仕掛けとして、オープンソース化は重要である。

②時系列情報管理の強化

流域状況は常に変化するため、基本データを適宜、更新することが必要である。時間軸をベースとして、過去の履歴情報から流域状況の変化の度合いを知ることは、流域管理における主要な関心事であり、時系列情報を効率よく取り扱うデータベースの機能、例えば、経時変化の差分情報を管理することでのデータ圧縮などの機能が強化されるべきである。

③流域リモートセンシング連携の強化

流域の広い領域を面的、かつ継続的に計測する手段としてリモートセンシングが有効であることは前述した。既往の研究^{1 2) 1 3)}などにより水圏水質評価や流域地覆分類、DEM (Digital Elevation Model ; 標高モデル) データなど、流域情報取得への適用が進められているが、更に実用性を向上させる機能として、例えば、必要な空間解像度のデータを必要な頻度で確保するために衛星画像処理技術などの開発と、システムへ

の実装が必要であると考える。

上述した domain-specific な GIS で強化されるべき 3 つの項目とは別に、システム構築の観点からは、「標準化」がソフトウェアの開発効率、保守性、堅牢性の点で効果が大きい。流域管理にも関連する河川 GIS の分野では、標準インタフェース仕様の検討が進められている¹⁴⁾。流域管理についても、同様な標準化が取り組むべき将来の課題である考える。

2. 5 まとめ

本章では、流域情報の集約と共有、公開にとって有効な情報プラットフォームとして、地理情報システム (GIS) に着目し、その適用性について検討した。

- ・流域管理に係る情報の特徴は、データ項目が広範で多岐にわたる情報源から収集する必要があるため、総ての情報を所定の規格化した形式で取り扱う必要性が高い。
- ・このための情報プラットフォームとして、GIS の適用性は高いと評価されるが、データ計測手段などとの連携は、一般的な情報システムと比べて大きな優位性は無く、強化が必要である。
- ・流域の評価・解析モデルの精緻化に対して、計測手段の進歩が追いつかないケースあり、モデルとデータ間のミスマッチを解消することが必要である。
- ・地理情報システムをベースとした流域管理システムのユーザモデルを提案し、各ユーザに対する機能要件をまとめることができた。システム開発の観点から、これらの結果は、見通しの良い機能設計と効率良いシステム開発に役立てることができる。

本研究では、本章で整理した流域管理システムの機能要件を満足するための要素技術と、これを実装したシステムを開発した。開発内容と結果の詳細を、次章以降で順に述べる。

2. 6 参考文献

- 1) 松田奉康ほか (1999) 地理情報利用による河川流域汚濁負荷量の予測、日本水道協会誌、第68巻第4号、pp. 11-21
- 2) 今井麻都香 (2000) 札幌市における水質情報管理システムの構築、第8回衛生工学シンポジウム論文集、pp. 241-246
- 3) 国土交通省水質連絡会編 (2001) 水質事故対策技術 2001年版、技法堂出版
- 4) National Center for Geographic Information & Analysis (1990) GIS Core Curriculum - Application Issue
- 5) 岡部篤行ほか (1995) 都市工学と地理情報科学、GIS-理論と応用、Vol. 3、No. 2、pp. 39-44
- 6) 市川新 (2003) 流域水環境管理－流域水環境管理の展望と課題、日本水環境学会誌、Vol. 26、No. 3、pp. 2-6
- 7) Construction Engineering Research Laboratory, US Army Corps of Engineers (1995) GRASS
- 8) 岩村一昭ほか (1999) 4次元 GIS を用いた公共施設・地域管理の新展開、電気学会公共施設研究会資料
- 9) 谷 謙二 (2002) 時空間管理機能を持つ地理教育用 GIS の開発とその応用、第11回地理情報システム学会講演論文集、pp. 215-220
- 10) 金田昌基ほか (2004) 水道配管データベース構築支援システムの検討、第55回全国水道研究発表会講演集、pp. 456-457
- 11) 金田昌基ほか (2005) 下水道設備データベース構築支援システムの開発、第42回全国下水道研究発表会講演集、pp. 145-147
- 12) 安岡善文 (2004) リモートセンシング技術の新たな展開、土木学会誌、Vol. 89、No. 1、pp. 6-7
- 13) 圓佛伊智朗 (2001) 衛星画像を用いた都市域における環境計測、計測と制御、Vol. 40、No. 4、pp. 298-302
- 14) (財) 河川情報センター水情報国土データ管理センター (2003) 河川 GIS・アプリケーション標準インタフェースについて
- 15) 藤井滋穂 (2004) 流域管理のための最新技術、環境技術、第33巻第5号、p. 60-64

第3章 流域管理のためのリモートセンシング技術

概要

流域管理において、そのフィールド情報を必要な空間分布と頻度で計測し、適時性を有する情報を確保することは、基本的な業務の一つである。フィールドにおける計測業務は、人的労力と費用を要するもので、効率化する要請は大きい。

本章では、流域管理システムの主要な機能要件である計測手段として、広域性と周期性を有する衛星リモートセンシングに着目し、フィールドスタディにより適用性を検証した。開発方式では、計測対象物の分光反射特性に基づき、マルチスペクトル画像から水源水質分布評価、流域の地覆分類を可能とした。Landsat TM 画像を用いた霞ヶ浦でのアオコ監視への適用事例では、85%以上の精度でアオコ発生箇所を検出できることを確認した。

また、流域監視への衛星リモートセンシングの適用性を高める手段として、衛星画像の高解像度化手法を検討した。パンクロマティック画像を用いてマルチスペクトル画像を高解像度化する手法を開発し、SPOT HVR 画像を用いた評価解析により、平均相対誤差約5%でマルチスペクトル画像を20mから10mに高解像度化できることを確認した。

3. 1 衛星リモートセンシング導入の狙い

霞ヶ浦や琵琶湖といった広域水圏は、水源として重要であり、従来から水質改善や保全への取り組みがなされてきた。水源保全のための計画策定や浄化システム運用のためには、水圏の基本データ、特に水質、微生物の面的な計測と監視が必要である。従来の水質監視は、自動観測所による連続計測に加え、観測船による代表箇所での採水・分析により行われている。しかし、費用と人的労力の制約から、少数箇所（例えば、霞ヶ浦では220km²の湖面積に対して8箇所）での計測に留まっており、水質分布を詳細に把握するには至っていないのが現状である。



図3-1 ケーススタディエリア(霞ヶ浦西浦)

これらを解決できる面的監視の方法として、1970年代よりリモートセンシング（非接触型センサによる遠隔計測技術の総称、以下「リモセン」と略す）による水圏監視技術が開発されてきており、適用検討の事例^{1) 15)}なども見られる。日本はリモセンによる水圏監視技術開発で後発となるが、1990年代後半からは国内の民間会社が海外資本と共同で高解像度衛星（例えば、Quick Bird 衛星；パナクロマティックセンサで0.61m、マルチスペクトルセンサで2.44m）を打ち上げ、衛星データ供給を開始するなど、リモセン適用の環境は整いつつある。

今後、流域管理への適用が進むと期待されるリモセンにおいて、適用拡大のためには、以下の課題に対する対策が必要と考えた。一つは、流域管理における代表的な適用用途に対しての適用性を評価し、適用の実績を蓄積していくことである。これにより、流域管理に対するフィージビリティをより一層明らかにすることが必要である。また、もう一つの課題は、流域管理の業務、特に水圏監視などへの適用に求められる監視の連続性、定期性を確保することである。日本を含む中緯度地域では、覆雲率の低いリモセン画像の得られる頻度は十分でなく、必要な空間解像度のリモセン画像をより高い頻度で取得するための手段が必要である。

本章の目的は、こうした課題に対応するために、流域管理システムの情報プラットフォームとなるGISとの連携性に優れる衛星リモートセンシングの広域水圏監視の適用フィージビリティを検討することにある。また、より適用性を高める手段として、必要な空間解像度の画像を必要な頻度で確保するための、衛星画像の高解像度化技術を提案し、フィールドスタディにおいて、その効果を検証する。

3. 2 衛星画像による水源水質評価方式と適用性評価

本節では、流域監視における代表的な適用用途と位置づける水源でのアオコ発生検知や水質分布評価でのフィージビリティを評価する。

3. 2. 1 対象エリアと使用データ

霞ヶ浦（図3-1）は、周辺に23市町村、集水流域内には45市町村が含まれ、流域面積は2160km²に及ぶ。この広範な流域からの汚濁負荷流入に加え、停滞水域であるため、富栄養化の影響が以前より問題となっている。特に昭和48年のアオコ大発生以降、毎年夏にはアオコの発生により水質が悪化しており、広域水質監視ニーズが高い湖沼の一つである。

ケーススタディ用のリモセンデータとしては、現在、一般に供給されているデータの中で代表的な衛星データであるLandsat TM（米国EOSAT社）を使用した。TMセンサ（Thematic Mapper）は、高度約700kmを周回する人工衛星に搭載されており、図3-2に示すように可視光と赤外線領域で7バンド（波長帯）を計測する。

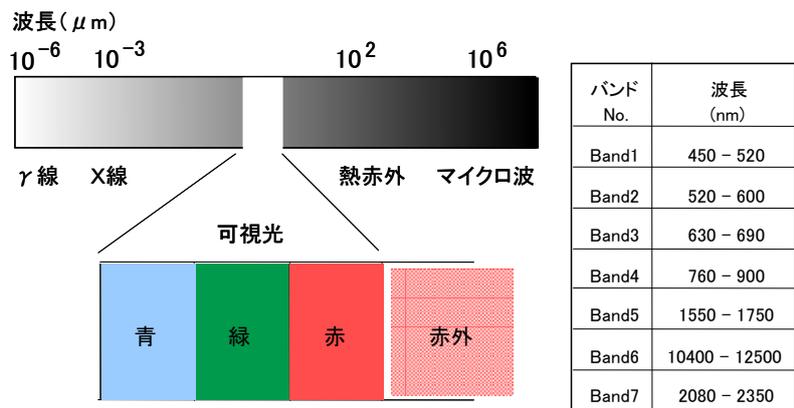


図3-2 LandsatTMセンサの計測バンド

データ値は、0 (反射率最小)~255 (反射率最大) の 256 段階の値を持つ。解像度は可視光と近・中赤外線で 30m、熱赤外線で 120mである。今回は、図3-3に示すような北関東エリアをカバーするもの入手し、霞ヶ浦西浦のエリア (東西 31.5km×南北 25.5km ; 1050×850 メッシュ) を抽出して解析した。水質推定式の作成のための水質データ実測値は、国土交通省関東地方整備局殿・霞ヶ浦工事事務所から、1994年の定期水質調査データ (月一回計測 ; 一般, 環境基準地点合わせて8計測点) を入手して使用した。

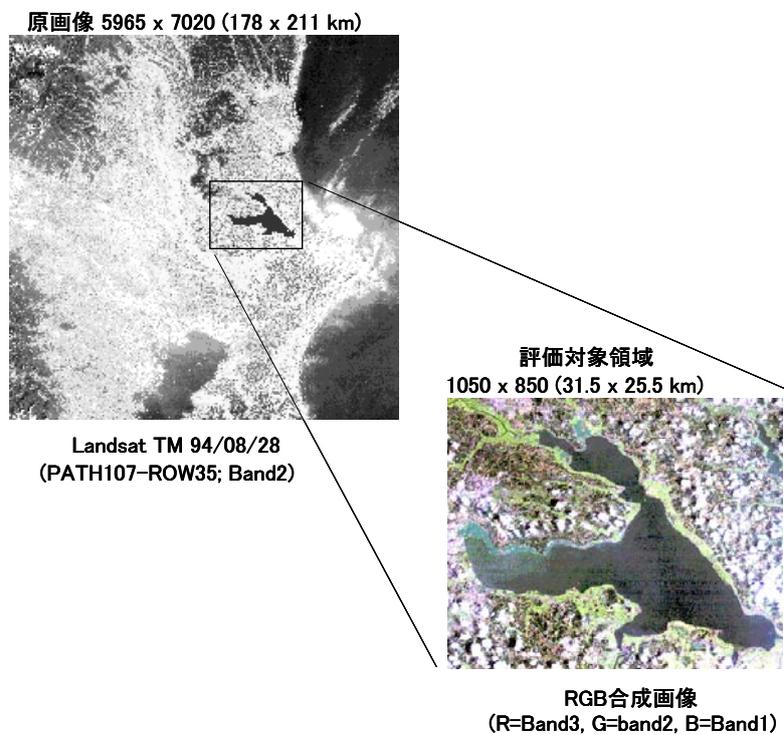


図3-3 入手衛星データ

3. 2. 2 アオコ分布推定

(1) アオコ識別方式の検討

アオコは、富栄養化によって植物プランクトンのマイクロキスティス (*Microcystis*; ラン藻類の一種) が異常増殖し、湖面が覆われてしまう現象である。腐敗による水質悪化、上水の異臭味などの深刻な水質障害を引き起こす。霞ヶ浦では、富栄養化防止条例や湖沼保全計画を策定するなど、流入負荷削減などの規制強化と合わせて、夏期を中心に広範囲に発生するアオコを回収するために、アオコ浚渫船を運行している。アオコの分布を正確に把握できれば、より効果的な回収にも役立つ。

本ケーススタディでは、図3-4に示す手順でアオコを識別した。この手順中で新たに検討したのは、アオコ識別に必要なバンドデータの選定(図3-4中のステップ3)とアオコ推定式の作成(ステップ5)である。

1) バンドデータの選定

バンドデータ選定のために、アオコ(すなわち、マイクロキスティス)の分光反射特性を調査した。図3-5には、可視光領域から赤外領域波長でのマイクロキスティスの反射率曲線図を示す。この図から分かるように、550nm付近の緑領域と700nm付近以上の近赤外領域での反射率が高くなっている。緑での高反射率は明らかにマイクロキスティスの個体色によるもので、他方、近赤外での高反射率は細胞内のクロロフィルaによることが知られている。前節の図3-2で示したLandsat TMの7つのバンドに対応させると、アオコ識別にはバンド2とバンド4を選定すべきことが分かった。

2) アオコ推定式の作成

上述のように、アオコが発生している場所では、緑と近赤外の反射率が高くなるが、これ以外にも、クロロフィルaを含んだ緑の個体色の植物プランクトン(つまり、多くのラン藻類)でも同様の反射傾向を示すことが推測される。このため、ラン藻類濃度が高い箇所からアオコだけを抽出するためには、アオコに固有な反射率のレベルを把握する必要がある。ここでは、式(1)の識別ルールに示すように、アオコ発生が明らかな箇所を教師値として、アオコ識別のしきい値を求めた。

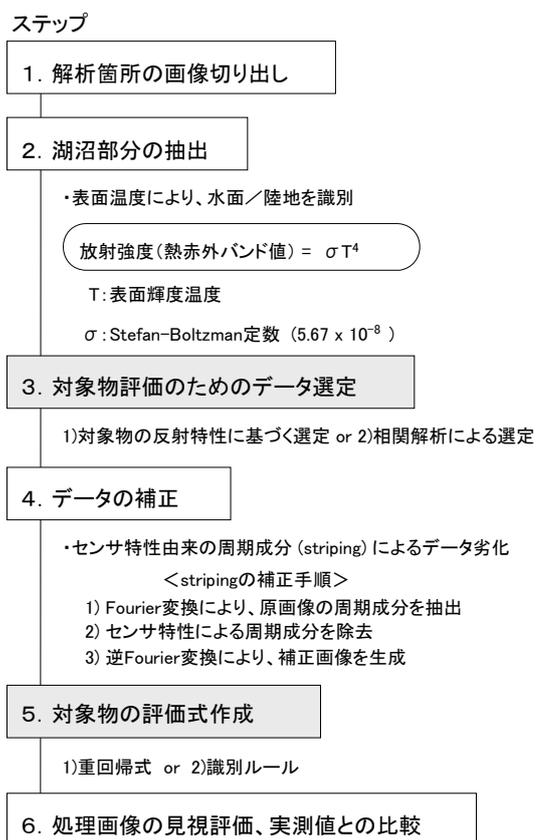


図3-4 衛星データによる対象物評価手順

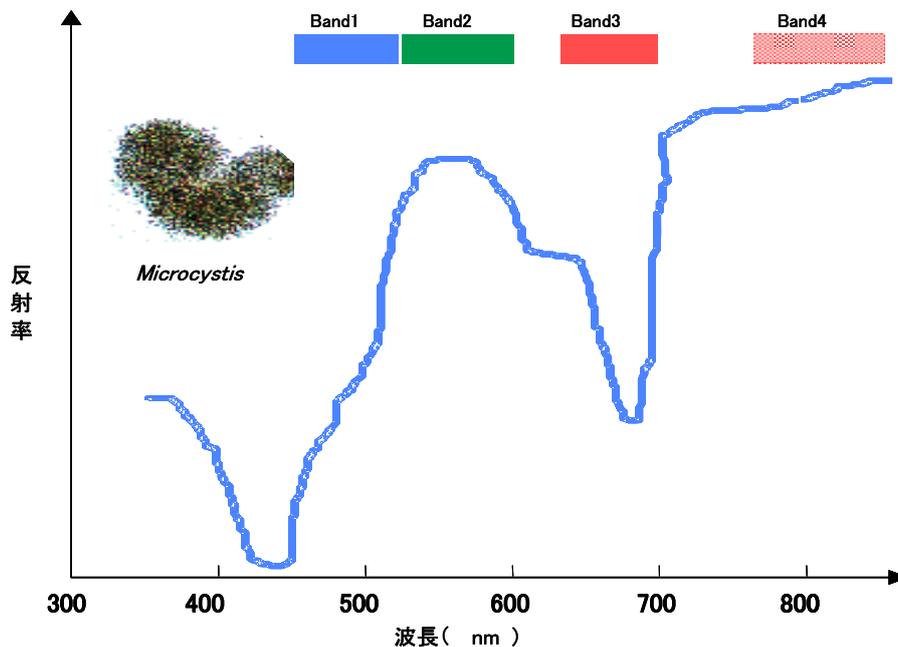


図3-5 ミクロキスティスの分光反射率特性

$$\begin{aligned}
 & \text{IF } (a_2 - m \cdot \sigma_2) \leq \text{Band2}(x, y) \leq (a_2 + m \cdot \sigma_2) \quad \text{AND} \\
 & (a_4 - n \cdot \sigma_4) \leq \text{Band4}(x, y) \leq (a_4 + n \cdot \sigma_4) \\
 & \text{THEN } \text{メッシュ}(x, y) \text{ にはアオコが発生} \quad \text{--- 式 (1)}
 \end{aligned}$$

但し、 a_i : 教師値で与えたアオコが発生しているメッシュ群のバンド i 平均値、
 σ_i : 教師値で与えたアオコが発生しているメッシュ群のバンド i 標準偏差、
 $\text{Band } i(x, y)$: メッシュ (x, y) のバンド i 値、 m, n : 定数、
 $(a_2 - m \cdot \sigma_2)$ 、 $(a_4 - n \cdot \sigma_4)$: 識別の下限しきい値、
 $(a_2 + m \cdot \sigma_2)$ 、 $(a_4 + n \cdot \sigma_4)$: 識別の上限しきい値、

教師値となる実測のアオコ分布データが入手できなかったので、図3-3に示す Landsat TM データの疑似ナチュラルカラー合成画像 (Band3, Band2, Band1 をそれぞれ R, G, B の3原色強度に対応させて合成し、計測対象の原色に近い画像を得る) から、視認によりアオコであることが明らかな箇所 (図3-3では西浦西部の緑色の特に濃い箇所) を与えた。

(2) アオコ識別結果

1) アオコ識別の精度

図3-6には、アオコ識別ルール作成のために教師値として与えた Band2, Band4 データの散布図を示す。アオコが存在するメッシュ (以下、アオコメッシュ群) とそれ以外のメッシュ (以下、非アオコメッシュ群) とを比較すると、図3-5で説明した

ように Band2, Band4 共にアオコメッシュ群の方が大きい値に分布している。これにより、Band2, Band4 を用いることで両者を識別できることが分かる。両メッシュ群が Band2, Band4 に関してそれぞれ正規分布をなすと仮定すると、式(1)のしきい値を変更したときのアオコ識別率（全アオコの内、アオコと識別されるものの割合）、及び誤識別率（非アオコの内、アオコと識別されてしまうものの割合）は表3-1に示すようになる。表3-1によれば、90%以上のアオコ識別率を得ようとする、しきい値を調整する定数 m, n をそれぞれ 2.0 以上にする必要がある。しかし、この場合、誤認識率は最低でも 20%を越えるものとなる。例えば、 $m=n=2.0$ のとき、アオコ識別率は 91.1%であるが、誤認識率が 20.6%である。アオコ識別結果の利用法（例えば、浚渫船の派遣スケジューリング）を考えると、非アオコをアオコと誤識別するデメリットの方が大きい（アオコの発生していない箇所に浚渫船を派遣してしまう）。そこで、低い誤認識率となるしきい値を与える条件として、式(2)に示す $m=1.5, n=4.0$ を用いた。この場合、アオコ識別率は 86.6%で、誤認識率は 0.7%である。

$$\begin{aligned}
 & \text{IF} \quad (35.6 - 1.5 \cdot 3.69) \leq \text{Band2}(x, y) \leq (35.6 + 1.5 \cdot 3.69) \quad \text{AND} \\
 & \quad (35.3 - 4.0 \cdot 19.2) \leq \text{Band4}(x, y) \leq (35.3 + 4.0 \cdot 19.2) \\
 & \text{THEN} \quad \text{メッシュ}(x, y) \text{にはアオコが発生} \quad \text{--- 式(2)}
 \end{aligned}$$

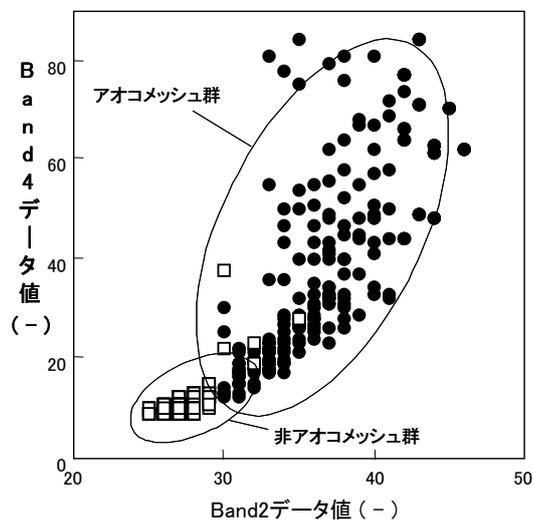


図3-6 アオコと非アオコとの反射特性分布
(各々200データ抜粋)

表3-1 しきい値によるアオコ識別率の変化

		Band4しきい値n							
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
B a n d 2 し き い 値 m	1.0	46.6 (0.0)	59.2 (0.0)	65.2 (0.0)	67.4 (0.0)	68.1 (0.0)	68.2 (0.0)	68.3 (0.0)	今回の 採用値
	1.5	59.2 (0.0)	75.1 (0.6)	82.7 (0.7)	85.6 (0.7)	86.4 (0.7)	86.6 (0.7)	86.6 (0.7)	
	2.0	65.2 (0.6)	82.7 (19.0)	91.1 (20.6)	94.3 (20.6)	95.2 (20.6)	95.4 (20.6)	95.4 (20.6)	アオコ識別率 ≥90%だが、 誤識別率 ≥20%の領域
	2.5	67.4 (2.2)	85.6 (73.5)	94.3 (80.0)	97.5 (80.0)	98.5 (80.0)	98.7 (80.0)	98.8 (80.0)	
	3.0	68.1 (2.8)	86.4 (91.7)	95.2 (99.3)	98.5 (99.3)	99.5 (99.3)	99.7 (99.3)	99.7 (99.3)	
	3.5	68.2 (2.8)	86.6 (92.3)	95.4 (100.0)	98.7 (100.0)	99.7 (100.0)	99.9 (100.0)	100.0 (100.0)	
	4.0	68.3 (2.8)	86.6 (92.3)	95.4 (100.0)	98.8 (100.0)	99.7 (100.0)	100.0 (100.0)	100.0 (100.0)	

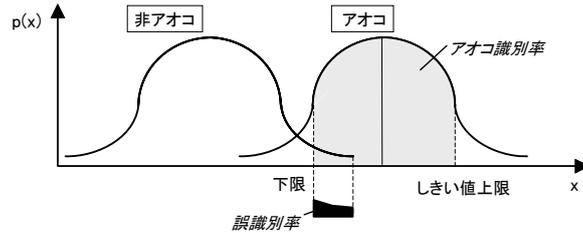
上段：アオコ識別率%、下段（）：誤識別率%

アオコ識別率の定義

	バンド	平均a	標準偏差σ
アオコメッシュ群	Band2	35.6	3.69
	Band4	35.3	19.2
非アオコメッシュ群	Band2	27.3	1.12
	Band4	10.6	2.87

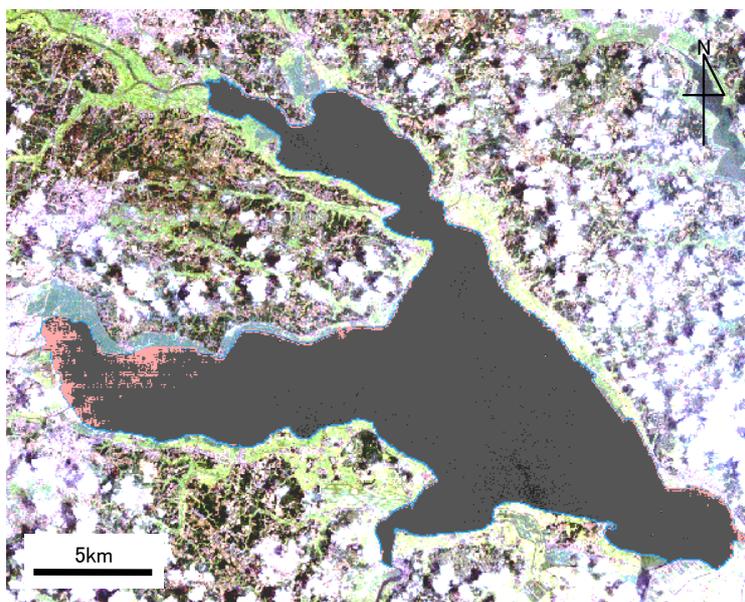
正規分布の確率密度関数

$$p(x) = (2\pi)^{-0.5} \sigma^{-1} \exp[-0.5((x-a)/\sigma)^2]$$



2) 霞ヶ浦のアオコ分布

図3-7に式(2)の識別ルールで推定した霞ヶ浦西浦のアオコ分布を示す。図中の赤色部はアオコを示すもので、西浦内の205818メッシュのうちの8615メッシュ(全体の4.2%, 7.75km²相当)でアオコが発生しているという結果となった。全般的な分布傾向として湖岸付近にアオコの発生が多く見られる。特に西岸にあたる土浦港付近が最もひどく、これまでに知られているアオコ発生の傾向と一致した。土浦港付近でのアオコ発生は、流域からの汚濁負荷が大きいのに加えて、風の吹き流しによる集積の影響によるものと推察される。



アオコ: 湖内赤色部(西浦内の4.2%相当)

図3-7 衛星データによるアオコ分布評価結果

3. 2. 3 クロロフィル a 濃度推定

(1) クロロフィル a 濃度推定方式の検討

クロロフィル a は、全ての植物に含まれる葉緑素の主成分で、湖沼中の植物プランクトンにも含まれている。湖沼中のクロロフィル a 濃度を知ることにより、植物プランクトン量(つまり、湖沼中のバイオマス生成能に大きな影響を持つ富栄養化のレベル)を間接的に推定できる。霞ヶ浦工事事務所でも主要な水質測定項目の一つとなっている。

推定方式は、前述のアオコ識別方式と同様に図3-4の手順とした。このうち、クロロフィル a 濃度推定に使うバンドデータの選定(図3-4中ステップ3)と実測値とのマッチングによる濃度推定式の作成(ステップ5)の検討が新たに必要となった。

1) バンドデータの選定

一般に衛星データはデータ量が多く、また、各バンド間に相関があるケースが多いため、目的に応じたデータ選択が必要である。ここでは、互いに独立な少数のデータに縮約する目的で主成分分析^{2)、3)}を導入した。この手法は、図3-8に示す手順でデータの変動成分を最も良く説明する独立変数を求めるものである。まず、各バンドの共分散行列を求め、これを対角化するための変換行列（固有ベクトル）と変換後の共分散行列（対角行列となり、対角成分が固有値）を求める。共分散行列の対角化により、元のバンドデータを独立変数群に変換できる。固有値は独立変数に変換後の共分散値（データ変動成分、つまり画像の濃淡に含まれる情報量）なので、式（3）から変換後の独立変数（固有値が大きい順に、第一、第二主成分と呼称する）の寄与率が求められる。

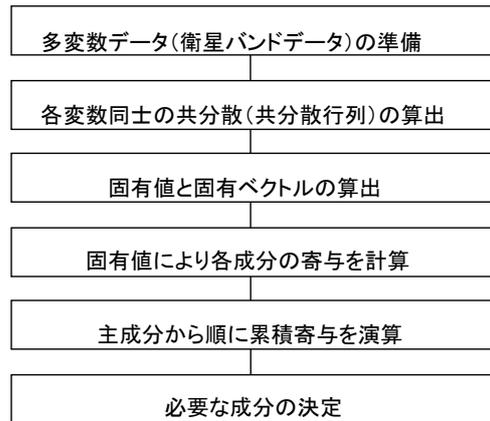


図3-8 主成分分析の手順

$$C_i = \{E_i / \sum E_j\} \times 100 \quad \text{--- 式 (3)}$$

但し、 C_i : 全情報量に対する第 i 主成分の寄与率 (%)、

E_j : 第 j 主成分の固有値

表3-2には、今回用いた Landsat TM データのバンド間の共分散行列の計算結果を示す。近赤外と中赤外波長に対応する Band4, Band5 が他のバンドデータと相関が高い。表3-3に固有値と固有ベクトルの計算結果を示す。固有ベクトルの値より、例えば、第一～第三主成分 (PC1～PC3) は式 (4) ～ (6) となった。

$$PC1 = -0.26B1 - 0.20B2 - 0.30B3 - 0.90B4 - 0.89B5 - 0.12B6 - 0.37B7 \quad \text{--- 式 (4)}$$

$$PC2 = 0.73B1 + 0.51B2 + 0.65B3 + 0.09B4 - 0.57B5 + 0.11B6 - 0.20B7 \quad \text{--- 式 (5)}$$

$$PC3 = 0.16B1 + 0.07B2 + 0.13B3 - 0.45B4 + 0.28B5 - 0.01B6 + 0.16B7 \quad \text{--- 式 (6)}$$

但し、 B_i : Band i のデータ値 ($i = 1 \sim 7$)

表3-2 LandsatTMバンド間の共分散行列計算結果

	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band6	Band7
Band1	10.19	5.57	7.69	10.73	8.41	1.75	3.77
Band2	5.57	5.84	5.96	8.58	6.57	1.89	2.89
Band3	7.69	5.96	10.12	12.70	10.57	2.41	4.71
Band4	10.73	8.58	12.70	43.97	36.26	5.17	14.79
Band5	8.41	6.57	10.57	36.26	43.81	4.41	17.67
Band6	1.75	1.89	2.41	5.17	4.41	2.76	1.88
Band7	3.77	2.89	4.71	14.79	17.67	1.88	8.82

第一主成分の寄与率が約 76%と大きく、第三主成分までの累積寄与率が 90%を越える。つまり、第三主成分までを用いれば、元の 7バンドが持つ情報量を 90%以上説明できることを意味する。なお、第一主成分の固有ベクトルでは、Band4 と Band5 に対応する成分の絶対値が他よりも大きく、表 3-3 の共分散行列の結果も合わせて考えると、今回使用したデータの情報は、Band4 と Band5 に大きく依存することが分かる。第四主成分以下は、寄与率が約 3%以下であり、これらの成分を削除しても、データの情報は殆ど下がらない。そこで、クロロフィル a 濃度推定式の作成には、第三主成分までを用いることにした。

表3-3 LandsatTMバンドの固有値と固有ベクトル計算結果

成分	固有値	寄与率 (%)	累積寄与 (%)
第一主成分	95.93	76.42	76.42
第二主成分	14.86	11.84	88.26
第三主成分	7.22	5.76	94.02
第四主成分	2.75	2.19	96.21
第五主成分	1.88	1.50	97.71
第六主成分	1.50	1.19	98.90
第七主成分	1.39	1.11	100.00
固有ベクトル			
(Band1, Band2, Band3, Band4, Band5, Band6, Band7)			
第一成分:(-0.26, -0.20, -0.30, -0.90, -0.89, -0.12, -0.37)			
第二成分:(0.73, 0.51, 0.65, 0.09, -0.57, 0.11, -0.20)			
第三成分:(0.16, 0.07, 0.13, -0.45, 0.28, -0.01, 0.16)			
第四成分以下は省略			

2) 濃度推定式の作成

推定式を重回帰分析で作成した。回帰係数をチューニングするための実測値として、前述の 8 点の定期水質調査データを使用した。今回使用した Landsat TM データの計測日 (1994/8/28) の実測値であることが望ましいが、定期水質調査データは月一回なため、H6/9/6 のデータを用いた。得られた推定式は、式 (7) である。

$$\text{クロロフィル a } (\mu\text{g/l}) = -60.7 - 1.66 \cdot \text{PC1} + 0.22 \cdot \text{PC2} + 1.62 \cdot \text{PC3} \quad \text{--- 式 (7)}$$

但し、PC1~PC3 は、式 (4) ~ (6)

式 (7) の誤差は、平均 $8.2 \mu\text{g/l}$ (相対誤差で 9.4%)、最大 $10.9 \mu\text{g/l}$ であり、定性的な傾向を知るには十分な精度である。

(2) クロロフィル a 濃度推定結果

式(7)を用いたクロロフィル a の計算結果を図3-9に示す。図では黄色→緑色→赤色の順に濃度が高くなるように表示している。計算結果では、湖内平均 $91 \mu\text{g/l}$ 、最小 $59 \mu\text{g/l}$ 、最大 $445 \mu\text{g/l}$ であった。全般的な傾向として、湖岸部（西部の土浦港付近など）で相対的に濃度が高いことが読み取れる。この傾向は、湖岸部付近の方が流域からの汚濁負荷（栄養塩）流入の影響を受けやすいことによるものと考えられ、図3-7のアオコ発生分布の傾向とも一致していることが確認できた。

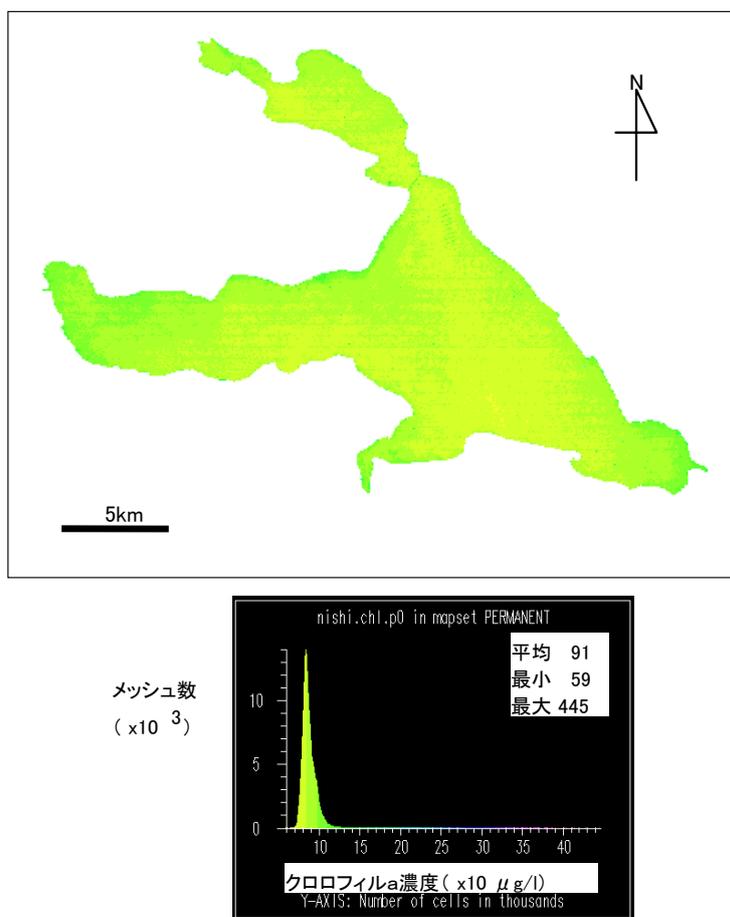


図3-9 衛星データによるクロロフィルa評価結果

3. 3 衛星画像の流域地覆分類への適用

水源水質は、その流域から排出される汚濁負荷量によって影響を受ける。水道事業者の施設計画などは、現在から将来にわたる水質変動の傾向を考慮して行われるため、汚濁負荷発生状況を正確に把握することが重要である。

図3-10には汚濁負荷評価の一般的な手法である原単位法の手順を示す。主たる発生源である1)生活系、2)事業場系、3)畜産系、4)面源系、5)下水処理場系

ごとに、単位人口当り、単位面積当たりなどの負荷排出量（原単位と呼称）を設定し、流域人口などのデータから間接的に負荷量を算定する。

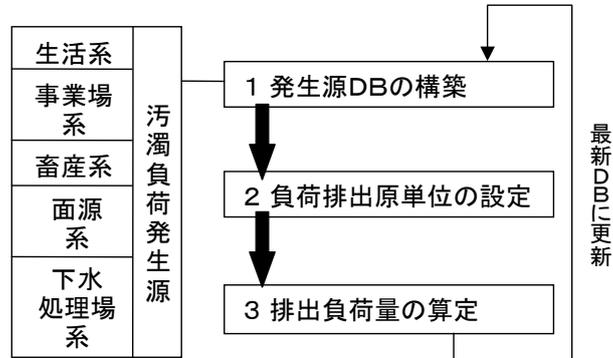


図3-10 流域汚濁負荷評価の手順

面源系の負荷発生源は、いわゆるノンポイントソースと呼ばれ、一般には流域総負荷量の2～5割以上を占めることが知られている。表3-4の原単位例¹⁾²⁾に示すように、単位面積当たりの負荷排出量が地覆ごとに大きく異なるため、汚濁負荷量評価には、詳細な地覆マップの作成と更新が必要となる。

表3-4 地覆分類ごとの汚濁負荷原単位例

原単位 (kg/km ² /年)		地 覆			
		水田	畑地	山林	市街地
負 荷 項 目	有機物 (COD)	13710	1030	2150	14100
	全窒素 (T-N)	1910	7600	360	1970
	全リン (T-P)	202	68	30	270

3. 3. 1 地覆分類方式の検討

衛星画像により地覆分類する場合、地覆の分光特性を利用する。従来方式の地覆分類は、人手による現地調査の情報を基にするもので、膨大な時間と費用が費やされている。また、航空写真を利用する場合でも大量の写真と熟練した写真判読者の手作業が必要であった。これに対し、本研究では一度に広域のマップが作成でき、作業負荷も大幅に軽減可能な衛星リモートセンシングに着目し、衛星画像の地覆分類により、地覆マップの作成を試みた。

衛星画像中の分類クラスを求める際に地図などの地上データを使用しない分類手法を教師無し分類という。分類の最初の手順としてクラスタを生成する処理は、後述するクラスタリング手法により人手の介入なく機械的に行うことができる。他方、次の手順である最尤法分類により求めた分類クラスから、地覆マップを作成するためには、地覆と分類クラスとを対応させる手法が必要である。ここでは、分光光度計で計測し

た各地覆の分光特性データを分類クラスと対応させる手法を提案した。以下、順に手順を説明する。

(1) 教師付き分類と教師無し分類

衛星画像を用いた分類の基準を設定するには、分類クラスの母集団の分光特性やテクスチャの特徴、または対象物の形や大きさといった幾何学的特徴を知る必要がある。テクスチャとは画像のある範囲の小さな形状の半周期的、規則的な配置のことである。分類対象物の分光特性は、地上で分光光度計などを用いて測定可能である。この地上データを衛星画像分類に用いる場合、画像データの方にのみ大気の影響が含まれるなど、計測条件の違いに留意する必要がある。

詳細な地図などにより、予め画像中の分類クラスに関する情報が分かっている場合には、分類クラスの明らかな領域を教師データとして与え、母集団の統計量を推定する。これを教師付き推定といい、この方法で得た統計量（分類基準）による分類を教師付き分類という。この方法で精度良く分類するためには、母集団の特性を片寄りなく代表する教師データを抽出する必要がある。

リモセン画像中の分類クラスが地上データなどから正確に分からない場合には、教師無し推定という方法が用いられる。この方法では、画像中から無作為にサンプリングされた画像データを後述するクラスタリングにより均質と考えられる画素群（クラスタ）に機械的に分類し、それぞれを一次クラスタとする。これらの一次クラスタを用いてクラス母集団の特徴を推定する。これを用いた分類手法を教師無し分類という。

(2) 最尤法分類

教師データやクラスタの母集団の統計量を用いて分類する方法として最も良く用いられるのが、最尤法（Maximum Likelihood Method）分類である。この方法は、それぞれの画素が各分類クラスに属する確からしさを示す尤度（Likelihood）を求め、尤度が最大となった分類クラスにその画素を分類する方法である。尤度の定義は、画素データ x が観測されたとき、それが分類クラス k から得られたものである確率のことである。尤度 $L_k(x)$ の計算式を式（8）に示す。

$$L_k(x) = P(k|x) = P(k) \cdot P(x|k) / \sum_i \{P(i) \cdot P(x|i)\} \quad \dots \text{式 (8)}$$

但し、 x : 画素データ（衛星センサのバンド数 n に対応する n 次元ベクトル）

$L_k(x)$: 画素データ x が分類クラス k に属する尤度

$P(x|k)$: 分類クラス k から x が観測される条件付き確率

$P(k)$: 分類クラス k の事前確率

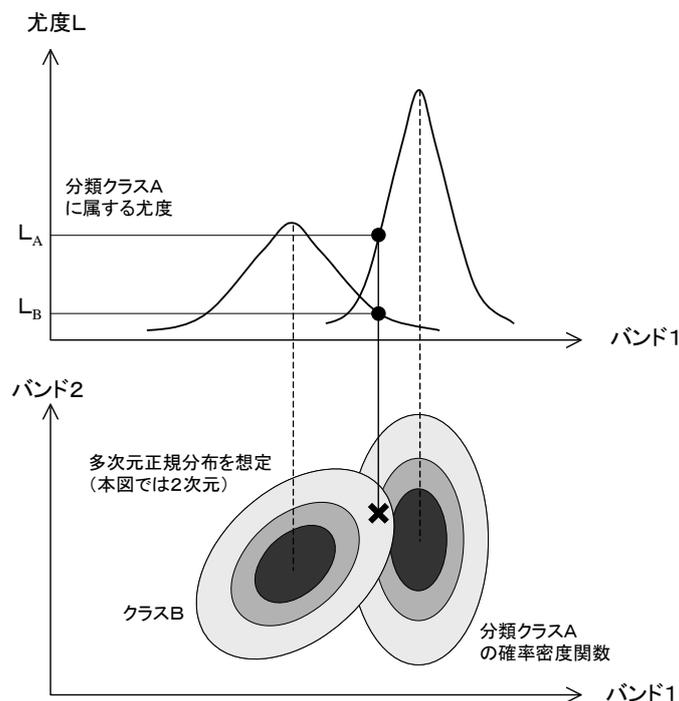


図3-11 最尤法の考え方

$P(k)$ は通常どの分類クラスでも等しい値を取ると仮定する。また分母はどの分類クラスについても共通の値であるため、クラス間で比較するときは無視できる。最尤法分類の考え方を図3-11に示す。最尤法によって分類するためには、式(8)から分かるように任意の画素データ x に対して $P(x|k)$ を計算できる確率密度関数を知る必要がある。一般に、確率密度関数としては、多次元正規分布を仮定し、教師データから推定した平均や分散・共分散により同定する。

このとき、画素データ x の分類クラス k への尤度 $L_k(x)$ は式(9)のように表される。なお、式(8)における分母と事前確率の項は、ここでは省略する。

$$L_k(x) = \frac{1}{\{2\pi^{n/2} \cdot \sqrt{\det \Sigma_k}\}} \cdot \exp\left\{-\frac{(x - u_k)' \Sigma_k^{-1} (x - u_k)}{2}\right\} \quad \dots \text{式(9)}$$

但し、 u_k : 分類クラス k の平均ベクトル (n 次元の列ベクトル)

Σ_k : 分類クラス k の分散・共分散行列 ($n \times n$ 行列)

$\det \Sigma_k$: 分類クラス k の分散・共分散行列の行列式

(3) クラスタリングによる地覆分類

図3-12に今回用いた衛星画像分類手順を示す。まず、衛星画像から地覆マップを

作成するための解析地域を切り出し、後に述べるクラスタリング、最尤法分類という手法により分類クラスを求める。この衛星画像から求めた分類クラスと図3-13に例示した各地覆の分光特性データを照合して地覆分類する。衛星データを各地覆の分光特性データと照合するところに本手順の特徴がある。

処理手順の最初に用いられるクラスタリングとは、特徴の類似したデータをグループ化する手法である。以下に図3-14に示したクラスタリング⁶⁾の手順を説明する。工程1では、想定する地覆数と同数以上の初期クラスターの重心をデータ値域内にランダムに設定する。工程2では、重心と各画素との距離を計算し、最小距離のクラスターに各画素を分類する。この処理は、計算量低減のため、一般には衛星画像の全画素ではなく、サンプリング間隔を設定して、一部の画素に対して行う。工程3では、分類後のクラスターで重心を再計算して更新する。工程4では、工程2と同じく各画素と重心の距離を計算しクラスターを再生成する。以後、重心の移動量が終了条件で設定した所定値以下になるまで工程3、4を繰り返す。

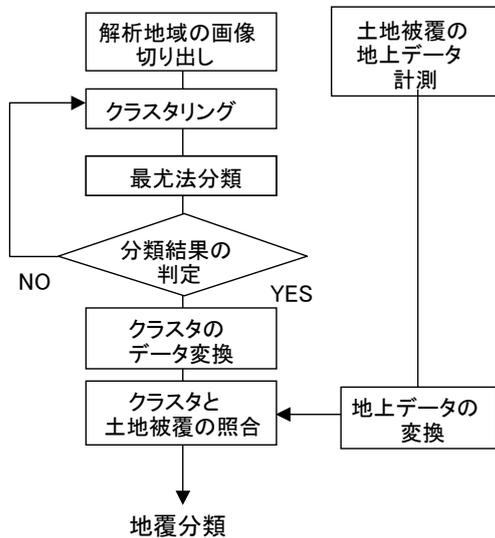


図3-12 衛星画像による地覆分類手順

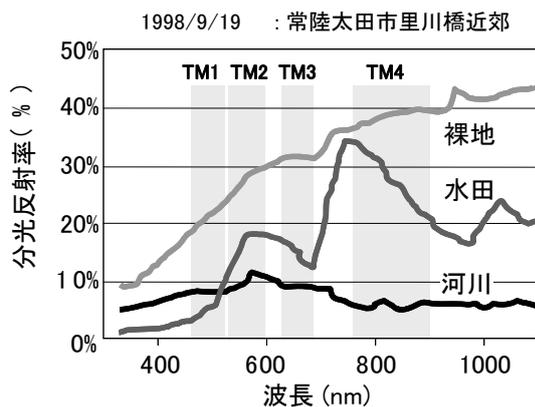


図3-13 地覆分類の分光特性例

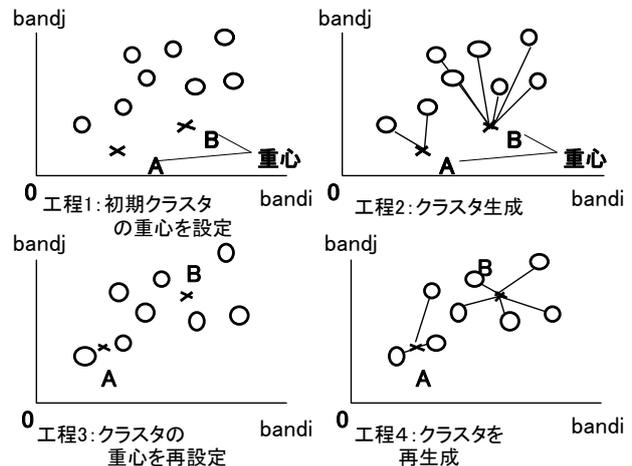


図3-14 クラスタリングによる分類

次に、上記手順で生成したクラスターの統計量（平均値、分散）を用いて、最尤法分類する。最尤法分類により得られた分類クラスを各地覆の地上データと照合する。但し、人工衛星の光学センサが計測する放射輝度 ($W/m^2/\mu m$) と分光光度計で地上計測する放射照度 (W/m^2) は、物理量が異なっている。また、一般に衛星画像は各バンド

で計測した放射輝度を DN 値という 0~255 の整数値に離散化したデータで配信される。このため、両者を照合するためには、異なるデータの単位を統一する必要がある。最終的にそれぞれのデータを基準バンドに設定したバンド値（ここではバンド 1）の放射輝度、照度で標準化し、無次元化した値を、式（10）に示す判別関数で照合した。

$$d1 = \sum n | (R2_{norm}(i) - R1_{norm}(i)) | \quad \text{--- 式 (10)}$$

但し、d1：判別関数値、

R1_{norm}(i)：衛星データの放射輝度を標準化した相対放射強度

R2_{norm}(i)：地上分光計測データの放射照度を標準化した相対放射強度

3. 3. 2 地覆分類への適用結果

(1) 対象地域と分類条件

衛星画像は、1994年8月28日に観測した LandsatTM データを使用した。解析地域は、久慈川流域となる茨城県常陸太田市を含む東西約 14.6km、南北約 14.6km の範囲（512×512 画素；30m 解像度）である。また、地上分光特性データは 1998年9月～11月にかけて計測した。

クラスタリングの条件は、初期クラスタ数を 10、サンプリング間隔を行、列とも 2 画素、終了条件はクラスタの重心の収束率を 96%とした。

(2) 分類結果

上に述べた条件でクラスタリングにより生成したクラスタを最尤法分類した結果を図 3-15 に示す。また、衛星画像の視認性向上の手段として用いられるフォールスカラー画像を、河川が濃紺、植生が緑ないし黄色、市街地は紫で示されるように作成した（図示せず）。フォールスカラー画像から植生、河川、市街地を目視判別できたので、目視により最尤法分類結果と対応させ、分類クラスを森林、水田、河川、市街地などの地覆に分類できた。

これにより、教師無し分類により得た分類クラスとフォールスカラー画像を対応させることにより植生、河川、市街地の分類が可能であることが確認できた。フォールスカラー画像により分類した分類クラスから各地覆の面積を計算し、表 3-4 の原単位を用いて久慈川流域の汚濁負荷量を求めた。計算結果を表 3-5 に示す。

この結果から、久慈川流域では水田と市街地が主要な汚濁負荷源であることが分かった。水田は生育フェーズごとの原単位も知られているため、季節別の汚濁負荷量も把握できることになり、全体として正確な汚濁負荷予測が可能になる。

分類結果を精査すると、水田が市街地に誤分類されるケースなどが含まれることが分かった。この原因として、衛星画像と地上データの計測時期の違い、地上データ数

の不足、データの照合方法などが考えられる。結果的に、今回提案した照合方式の精度を確認するまでには至らなかった。今後、フィールド調査の継続により地上分光計測データを蓄積し、精度の検証を図ることが課題である。

1994 /8/28 : 常陸太田市近郊 (512×512画素)

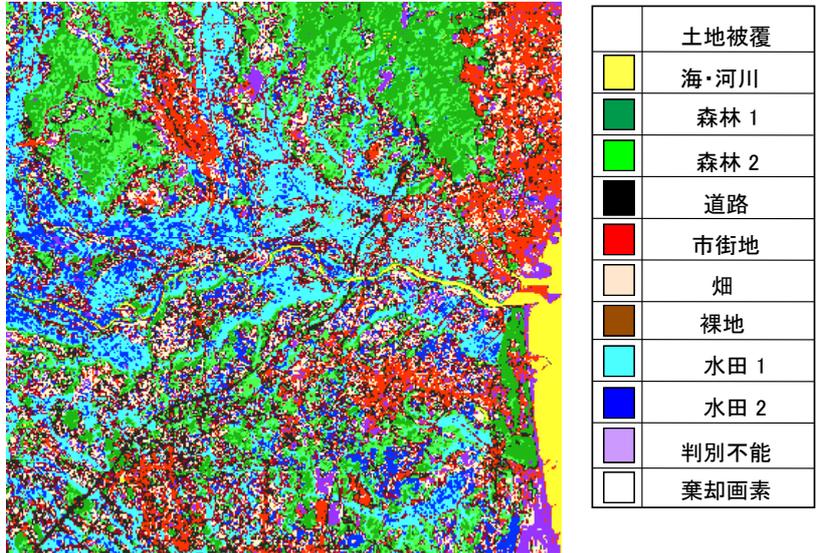


図3-15 地覆分類結果

表3-5 地覆分類ごとの面積と汚濁負荷量算定結果

	地 覆				総汚濁負荷量 (kg/km ² /年)	
	水田	畑地	山林	市街地		
面積 (km ²)	54.75	48.71	50.18	45.99	——	
負 荷 項 目	有機物 (COD)	750622	26687	107887	648459	1533655
	全窒素 (T-N)	104573	370196	18064	90600	583433
	全リン (T-P)	11059	3312	1505	12417	28293

1画素: $8.12 \times 10^{-4} \text{ km}^2$

3. 4 衛星画像の高解像度化方式の開発

衛星画像の計測機会に対して、覆雲率が 25%程度以下の実用上支障のない画像を得られる確率は、日本を含む中緯度地域で 1 / 3 ~ 1 / 4 程度と報告⁷⁾ されている。継続的で定期的な監視が用途である場合、必要な空間解像度の画像をより多く確保する手段が必要となる。高解像度化の手法を確立することは、必要な空間解像度の衛星画像を確保できる頻度を増やすことと合わせて、流域監視という用途に対して、より詳細な監視情報の獲得、より小さな水圏への適用を可能にするもので、リモートセンシングの適用拡大にとって必要性が高いものと考えた。

3. 4. 1 高解像度化手法の検討

(1) 高解像度化の考え方

1) 衛星画像の種類

水圏監視には、可視～赤外波長域を複数の波長帯（バンド）に分割して計測したマルチスペクトル画像（以下、マルチ画像と略称）が用いられる。これは、水面や地表面の性状に対応する特徴的な反射・吸収の分光特性を利用するためである。図3-16には、SPOTのパンクロマティック画像（以下、パンクロ画像と略称）とマルチ画像の一例を示す。また、図3-17には代表的な衛星のセンサと計測波長帯をまとめた。SPOT HRV センサでは、パンクロ画像の空間解像度が10mでマルチ画像の2倍である。マルチセンサ HRV-XS に比べて、パンクロセンサ HRV-Pの方が幅広い波長帯を計測しており、より高い放射光がセンサに入力される。このため、HRV-Pの方がセンサ走査時間が短く、より高い空間解像度を得る。

同様の理由により、SPOT以外の ADEOS や Quick Bird などもパンクロ画像の方が

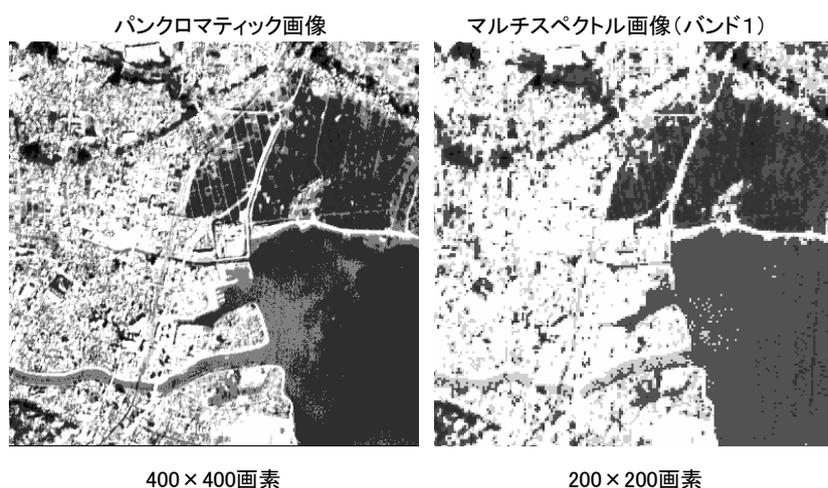


図3-16 SPOT衛星の画像例

衛星	センサ		計測波長帯 (μm)						解像度 (m)
			0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
SPOT	P	HRV-P	[0.5 to 0.7]						10
	M	HRV-XS	[0.5 to 0.6] Band1		[0.65 to 0.75] Band2		[0.8 to 0.9] Band3		20
ADEOS	P	AVNIR-Pa	[0.5 to 0.8]						8
	M	AVNIR-Mu	[0.4 to 0.5] Band1	[0.55 to 0.65] Band2	[0.65 to 0.8] Band3	[0.8 to 0.9] Band4			16
Quick Bird	P	Panchromatic	[0.4 to 0.9]						0.61
	M	Multispectral	[0.4 to 0.5] Band1	[0.55 to 0.65] Band2	[0.65 to 0.8] Band3	[0.8 to 0.9] Band4			2.44

P:パンクロ M:マルチ

図3-17 代表的な衛星の計測波長帯

マルチ画像の2倍以上の空間解像度を持つ。パンクロセンサは、可視～近赤外波長域を単バンドで計測しているため、マルチセンサと重複する計測波長域を持つ。本研究で開発したマルチ画像の高解像度化手法はこの点に着目した。すなわち、パンクロ画像はマルチ画像と重複する情報を含んでいるため、パンクロ画像からマルチ画像の補正情報を得られると考えた。

2) 従来の高解像度化手法

種類の異なる画像の組合せで空間解像度を向上させる考え方は、既往の研究にも示される。例えば、航空写真と衛星画像を組み合わせる GE 社方式⁹⁾では、フーリエ変換により空間的な周波数成分を抽出して合成する。ここでいう空間的な周波数成分とは、例えば、土地区画などの地理的な繰り返し構造の大きさを意味する。高周波成分は市街地などの局所的に複雑な情報を含み、低周波成分は緩やかな地質変化などの大局的な情報に対応する。空間解像度が高い航空写真の高周波成分と、衛星画像の低周波成分とを合成し、より解像度の高い画像を生成する。この手法は空間的な周波数成分の合成によるものなので、適用がパンクロ画像どうしの組合せに限られる。

また、パンクロ画像とマルチ画像とを組み合わせる考え方も試みられている。既往の手法としては、IHS (Intensity-Hue-Saturation ; 明度-色相-彩度) 変換^{1 2)}、主成分分析変換^{1 3)}、Brovey 変換^{1 4)}などが代表的であり、RGB (Red-Green-Blue) 画像を作成する際の視認性 向上に有効である。これら手法の特徴は、高解像度画像の採用で明度情報を変換または重畳し、色調 (色相、彩度) をなるべく保持したまま、視認性を向上できる点である。しかしながら、色調を保持することは、スペクトル情報が低解像度のままで、高解像化されない課題ともなる。また、逆変換で得られる DN 値 (Digital Number ; 各画素の数値) は、元の画像のヒストグラムとは異なる分布となるため、マルチスペクトル画像の情報として有用な放射輝度の物理量情報が失われるという課題も有している。本研究では、1)明度だけでなくスペクトル情報についても高解像度化できる、2)高解像度化した後の DN 値でも放射輝度を算出できるような手法を提案するものである。

本手法の概略を図 3-18 にまとめた。この図ではパンクロ画像とマルチ画像の空間解像度の比を 2 とした例で説明する。解像度 P のパンクロ画像は、これよりも粗い解像度 M の平滑化画像に、解像度 P の偏差成分が重畳されたものと見なせる。これと同様に考えると、解像度 M のマルチ画像に対して解像度 P の偏差成分画像を重畳すれば、解像度 P のマルチ画像が生成できる。このための手法として、パンクロ画像の偏差成分 Δp_i からマルチ画像の偏差成分 Δm_i を計算する関数 f を求める方式を新たに開発した。

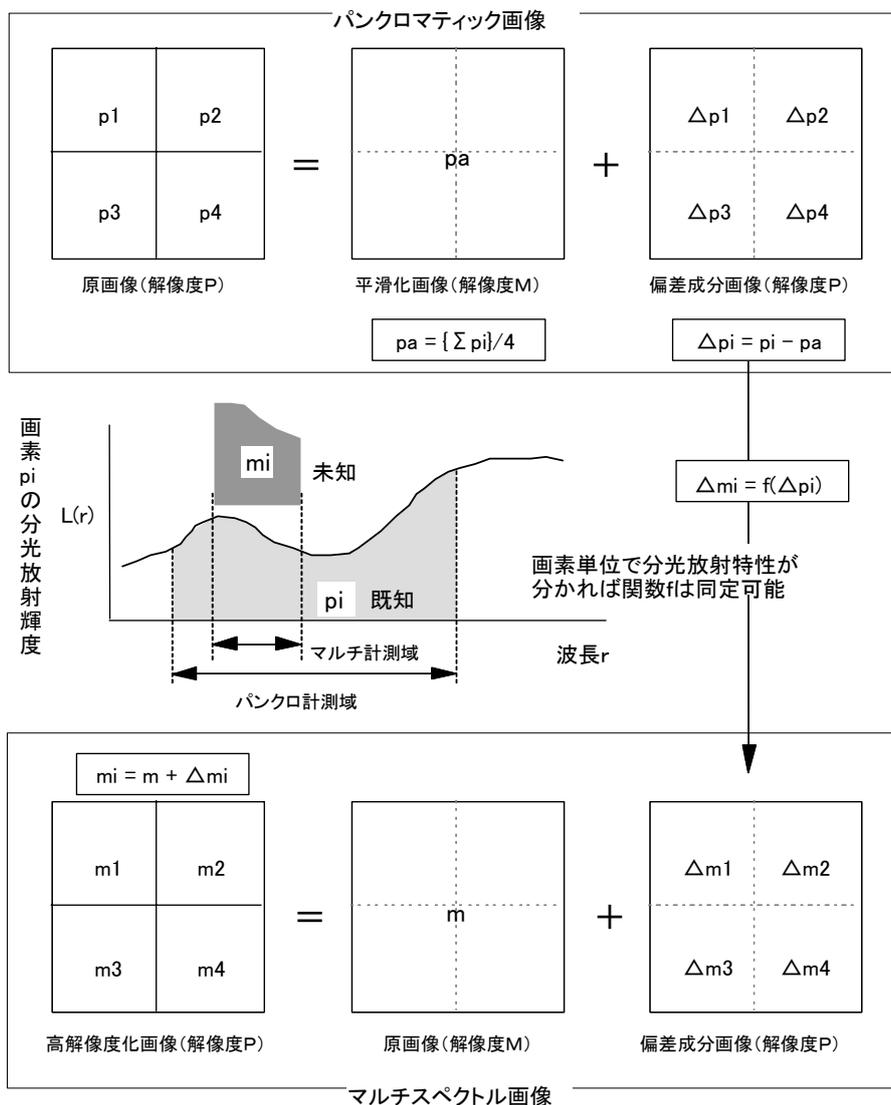


図3-18 マルチスペクトル画像高解像度化の考え方

(2) 高解像度化の手順

前述した考え方による高解像度化の手順を図3-19に示す。大別すると4つの工程に分けられる。大まかな処理は以下の通りである。

- ・工程1：パンクロ画像平滑化

パンクロ画像の平滑化処理と差分処理により、偏差成分を算定する。

- ・工程2：カテゴリ展開

各画素の分光放射輝度推定の前処理として、各画素の地覆(カテゴリと呼称)の組合せ割合を計算する。水面や植生など、代表カテゴリのパンクロ画像、マルチ画像のDN値の組合せに基づいて、各画素のDN値を代表カテゴリの線形和に展開する。

・工程3：分光放射輝度推定

本工程では、各画素の分光放射輝度を推定する。具体的には、前工程で求めた展開係数 EX と予め準備した代表カテゴリの分光放射を用いて、線形和の演算を行う。

・工程4：マルチ画像補正

工程1で求めたパンクロ画像の偏差成分と各画素の分光放射輝度を用いて、マルチ画像の偏差成分を算定する。

以上が提案アルゴリズムの概要である。前節で述べたように、各画素の分光放射輝度特性を考慮する点（工程2～工程3）と、パンクロ画像の変換でなく、マルチ画像を補正する点（工程4）に特徴がある。各工程の計算手順の詳細については、次項で述べる。

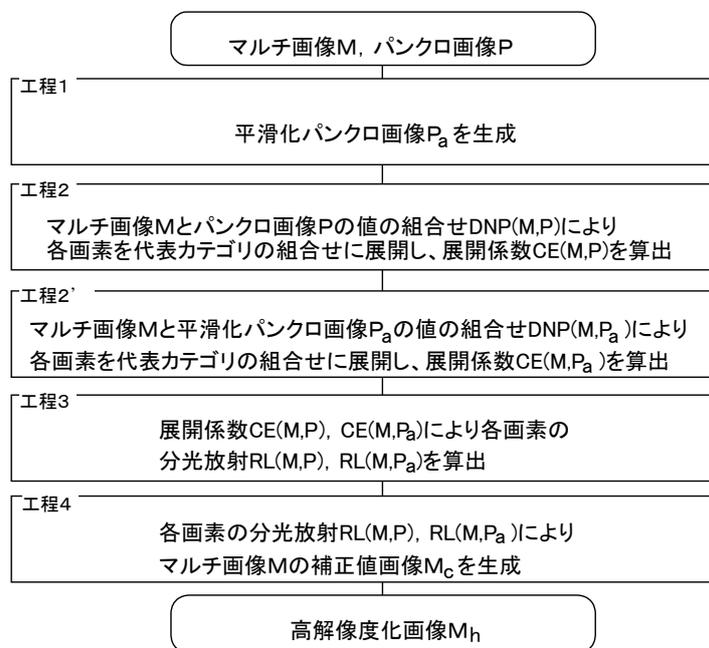


図3-19 マルチスペクトル画像高解像度化の手順概略

3. 4. 2 高解像度化アルゴリズム

(1) 計算アルゴリズム

1) 画像平滑化処理

マルチ画像の高解像度化には、パンクロ画像の偏差成分が必要である。偏差成分は、パンクロ原画像をマルチ画像の空間解像度で平滑化した画像と、パンクロ原画像との差分で求める。平滑化処理は、算術平均フィルタにより行う。図3-20に示すように、両画像の解像度の比を n とするとき、 $n \times n$ 画素のフィルタをパンクロ原画像に適用する。式(11)に示すように、 $n \times n$ 画素の平均値が平滑化画像の画素成分となる。

$$x' = \left\{ \sum_{i=1}^{n^2} (a_i \cdot x_i) \right\} / n^2 \quad \dots \text{式 (11)}$$

但し、 x' : 平滑化画像の値
 a_i : フィルタの i 番目の係数
 x_i : 原画像の i 番目の DN 値
 n : フィルタサイズ

算術平均フィルタを $n \times n$ 画素単位で逐次的にパンクロ原画像に適用し、解像度を n 倍に平滑化する。

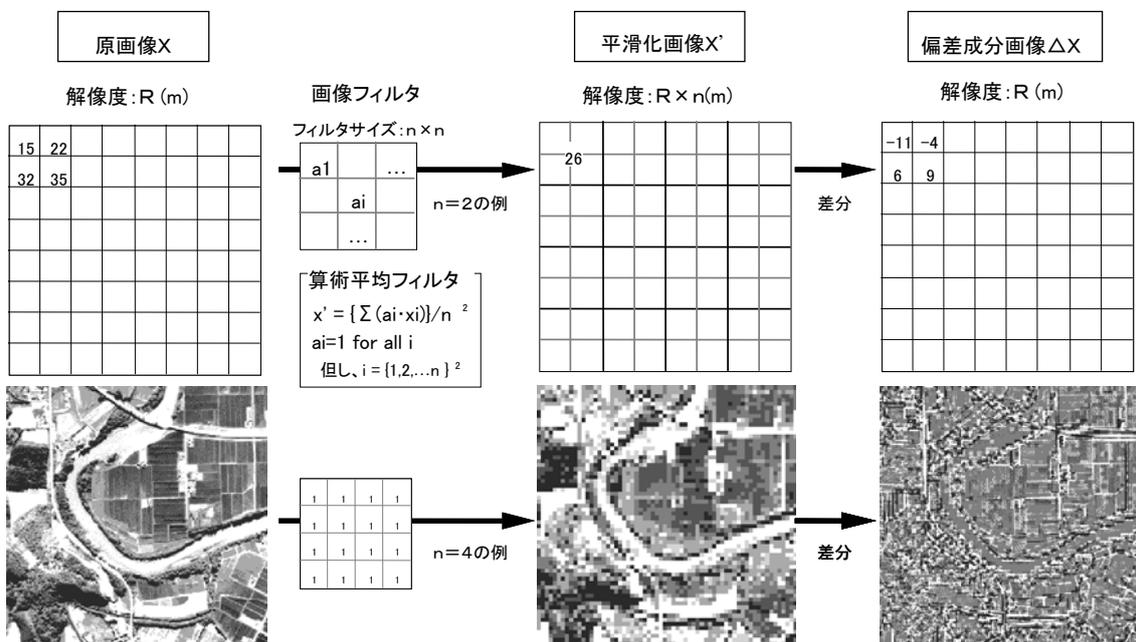


図3-20 平滑化処理の手順

2) カテゴリ展開

衛星画像中の各画素がそれぞれ唯一つのカテゴリで覆われることは少なく、図3-21に示すように、1画素内に複数のカテゴリが存在する。その画素の分光反射輝度は、各カテゴリの面積に応じた分光放射輝度の総和として算出できる。ここでのカテゴリ展開では、式(12)のように、各画素のDN値を代表カテゴリのDN値の線形和で表わす。具体的には、展開係数CEを求める処理である。

$$x = \sum_c CE_c \cdot CV_c \quad \dots \text{式 (12)}$$

但し、 x : 対象画素の DN 値
 CE_c : カテゴリ c への展開係数

CV_c : カテゴリ c の代表 DN 値

c : カテゴリを示す添字

展開係数 CEC は、対象画素の面積に占めるカテゴリ c の割合である。例えば、一画素中の 50% の面積を占める場合には CEC=0.5 である。カテゴリ c は解析対象となる地域特性に応じて設定する。各カテゴリの代表的な DN 値は、対象とする衛星画像から事前に設定する。図 3-21 には、パンクロ画像と 2 バンドのマルチ画像の DN 値で、水面、植生、裸地の 3 カテゴリに展開する例を示している。この場合の線形和展開式は、式 (13) のような行列式で表わされる。

$$G = YZ \quad \dots \text{式 (13)}$$

但し、G : DN 値行列 = (x₁, x₂, x_p)^t

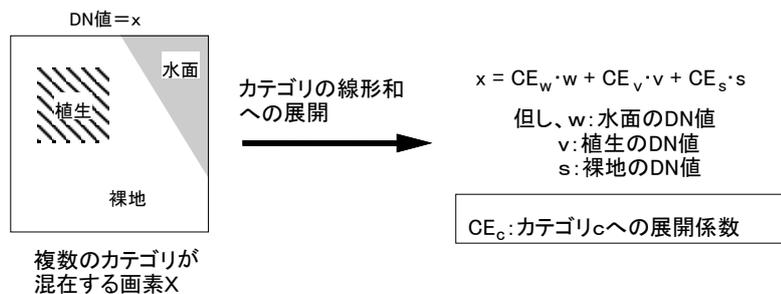
Y : カテゴリの代表 DN 値行列

Z : 展開係数行列 = (CE_w, CE_v, CE_s)^t

W, V, S : カテゴリの水面、植生、裸地を表わす添字

$$Z = Y^{-1}G \quad \dots \text{式 (14)}$$

カテゴリの代表 DN 値行列 Y の逆行列 Y⁻¹ を求められれば、式 (14) のように画素の DN 値行列 G を用いて、その画素の展開係数行列 Z を算出できる。逆行列の解法に



対象とするマルチバンド数が2、カテゴリが水面(W)、植生(V)、裸地(S)の3つの場合

■画素XのDN値パターン

$$DNP(X) = (x_1, x_2, x_p)$$

x_i: マルチバンドiのDN値

x_p: パンクロバンドのDN値

■カテゴリの代表DN値パターン

$$DNP(W) = (w_1, w_2, w_p)$$

$$DNP(V) = (v_1, v_2, v_p)$$

$$DNP(S) = (s_1, s_2, s_p)$$

$$x_1 = CE_w \cdot w_1 + CE_v \cdot v_1 + CE_s \cdot s_1$$

$$x_2 = CE_w \cdot w_2 + CE_v \cdot v_2 + CE_s \cdot s_2$$

$$x_p = CE_w \cdot w_p + CE_v \cdot v_p + CE_s \cdot s_p$$



カテゴリDN値行列の逆行列
により展開係数を決定可能

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 & v_1 & s_1 \\ w_2 & v_2 & s_2 \\ w_p & v_p & s_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} CE_w \\ CE_v \\ CE_s \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} CE_w \\ CE_v \\ CE_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 & v_1 & s_1 \\ w_2 & v_2 & s_2 \\ w_p & v_p & s_p \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_p \end{pmatrix}$$

図3-21 カテゴリ展開の手順

は、広く用いられている Gauss-Jordan 法を用いた。行列 Y が正方行列でない場合、一般には逆行列が存在しない。このため、カテゴリ数はバンド数と同一にする必要がある。

3) 分光放射輝度推定

各画素での分光放射輝度は、画素ごとのカテゴリ展開で求めた展開係数により推定する。各カテゴリからの寄与分の総和が、その画素の分光放射輝度となる。これより、図 3-22 に示すように、予め準備した代表カテゴリの分光放射輝度と展開係数との積和演算で、当該画素の分光放射輝度が計算できる。計算式は式 (15) で表わせる。

$$L(X, r) = \sum_C CE_C \cdot L(C, r) \quad \dots \text{式 (15)}$$

但し、 $L(X, r)$: 画素 X の波長 r での分光放射輝度 ($\text{W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$)

$L(C, r)$: カテゴリ C の波長 r での代表分光放射輝度 ($\text{W/m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$)

分光放射輝度は、波長に対する連続量であるが、計算量の低減などを目的に、代表波長における分光放射輝度で区分線形近似したものを用いる。

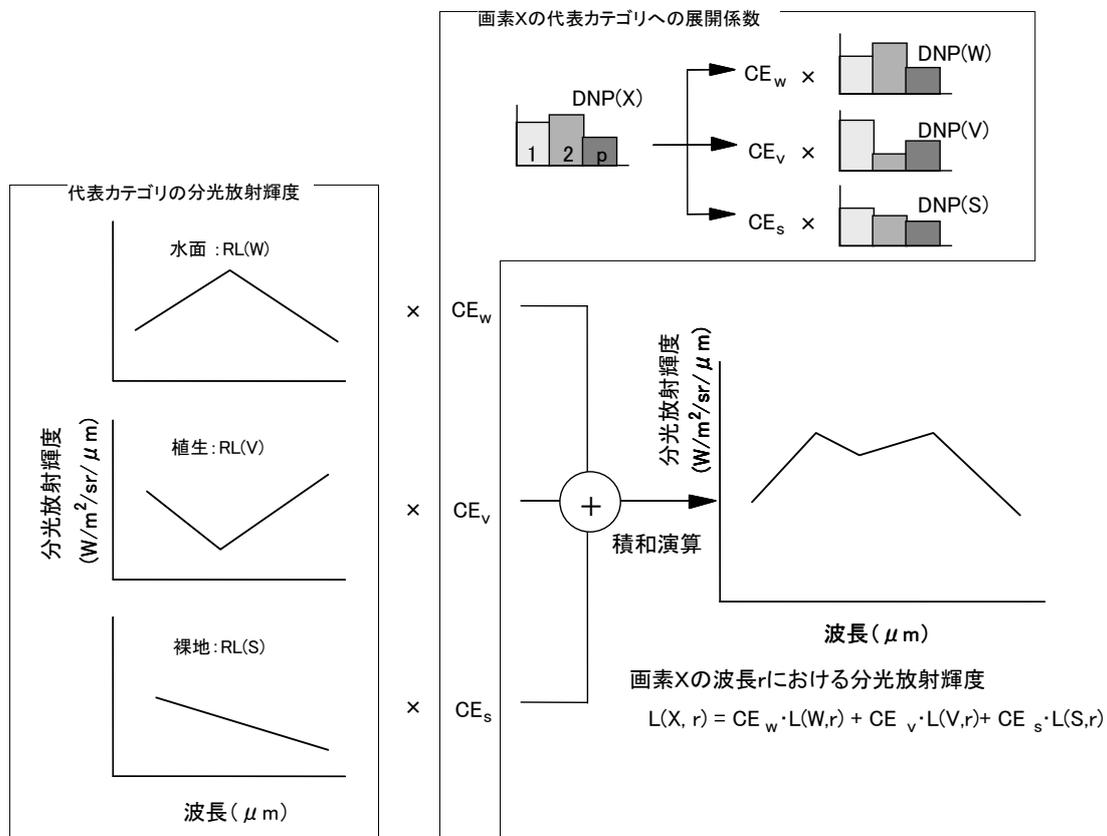


図3-22 分光放射輝度推定の手順

4) マルチ画像補正

高解像度化の最終工程では、各画素で推定した分光放射輝度 L のパターンを用いて、マルチ画像の偏差成分 ΔDN_m を算定する。このために、 $\Delta DN_m = f(\Delta DN_p)$ となる関数 f を同定する。図3-23 により、SPOT HRV の例で関数 f の同定を説明する。分光放射輝度 L のパターンは、各バンドの計測波長帯の両端点を用いて区分線形近似している。各画像の放射輝度 R は、この分光放射輝度 L を計測波長幅で積分した値として算定できる。

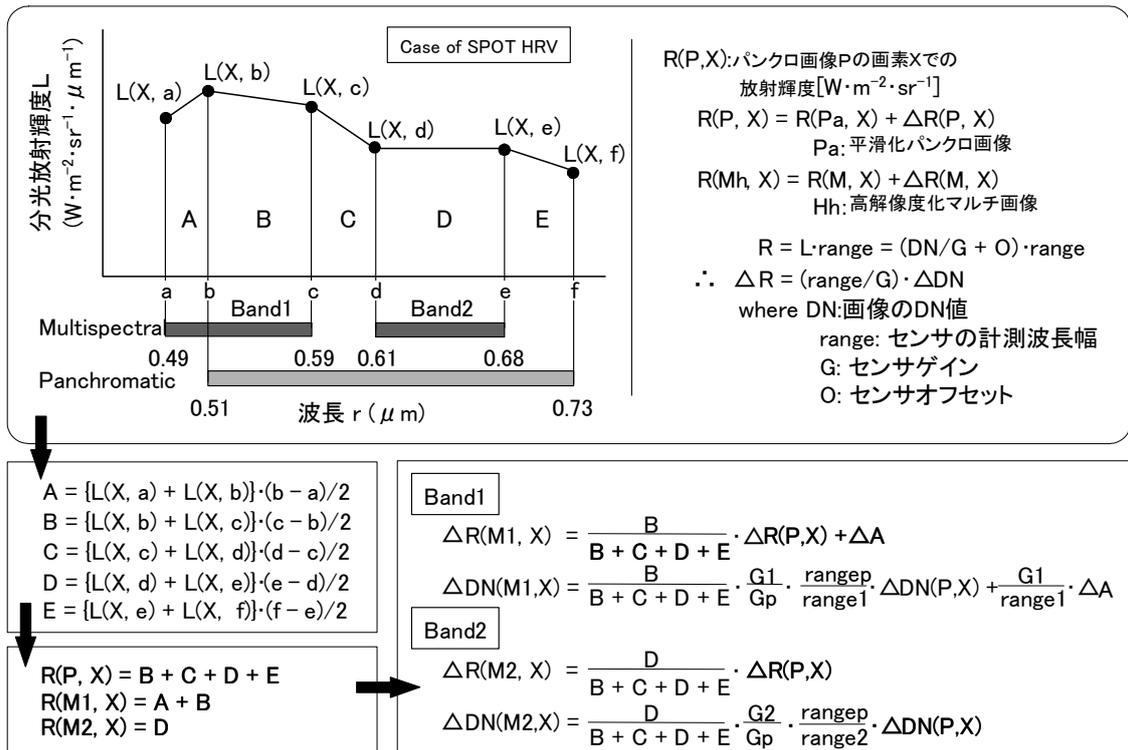


図3-23 マルチ画像補正処理の手順

例えば、パנקロ画像の場合、図3-23 中の面積 $(B+C+D+E)$ となる。同様に、マルチ画像についても、式 (16) ~ (18) のように表わせる。

$$R(P, X) = \int_{0.51}^{0.73} L(X, r) dr = B + C + D + E \quad \dots \text{式 (16)}$$

$$R(M1, X) = \int_{0.49}^{0.59} L(X, r) dr = A + B \quad \dots \text{式 (17)}$$

$$R(M2, X) = \int_{0.61}^{0.68} L(X, r) dr = D \quad \dots \text{式 (18)}$$

但し、 $R(\text{Band}, X)$: バンド Band の画像の画素 X での放射輝度 ($W/m^2/sr$)
 $\text{Band} = \{P \text{ (パנקロ)}, M1 \text{ (マルチバンド1)}, M2 \text{ (マルチバンド2)}\}$

$L(X, r)$: 画素 X の波長 r での分光放射輝度 ($W/m^2/sr/\mu m$)

A, B, C, D, E : 区分線形区間の面積 (放射輝度に相当 ; 図 3-23 参照)

パンクロ画像の放射輝度成分のうち、面積 B に相当する部分でバンド 1 の放射輝度を説明できる。同様に、面積 D に相当する部分はバンド 2 の放射輝度を説明できる。これより、関数 f は式 (19) と式 (20) のように表わされる。

$$\Delta R(M1, X) = f_1\{\Delta R(P, X)\} = \frac{B}{B+C+D+E} \Delta R(P, X) + \Delta A \quad \text{--- 式 (19)}$$

$$\Delta R(M2, X) = f_2\{\Delta R(P, X)\} = \frac{D}{B+C+D+E} \Delta R(P, X) \quad \text{--- 式 (20)}$$

但し、 $\Delta R(\text{Band}, X)$: バンド Band 画像の画素 X での放射輝度の偏差成分 ($W/m^2/sr$)

放射輝度 R と衛星画像の DN 値との関係は、衛星センサごとに異なる。SPOT HRV センサでは、式 (21) に示す線形関係で与えられる。

$$\begin{aligned} R(\text{Band}, X) &= L(\text{Band}, X) \cdot \text{range}_{\text{Band}} \\ &= \{DN(\text{Band}, X) / G_{\text{Band}} + O_{\text{Band}}\} \cdot \text{range}_{\text{Band}} \end{aligned} \quad \text{--- 式 (21)}$$

$$\therefore \Delta R(\text{Band}, X) = (\text{range}_{\text{Band}} / G_{\text{Band}}) \cdot \Delta DN(\text{Band}, X) \quad \text{--- 式 (21')}$$

但し、 $DN(\text{Band}, X)$: バンド Band 画像の画素 X での DN 値 (0~255 の 256 階調)

G_{Band} : バンド Band のセンサのキャリブレーションゲイン ($m^2 \cdot sr \cdot \mu m/W$)

O_{Band} : バンド Band のセンサのオフセット ($W/m^2/sr/\mu m$)

$\text{range}_{\text{Band}}$: バンド Band のセンサの計測波長幅 (μm)

$\Delta DN(\text{Band}, X)$: バンド Band 画像の画素 X での DN 値の偏差成分

式 (21') を用いて式 (19) と式 (20) を各々書き換えると、マルチ画像の偏差成分 ΔDN を計算する式 (22), 式 (23) を得る。

$$\begin{aligned} \Delta DN(M1, X) &= f_1'\{\Delta DN(P, X)\} \\ &= \frac{B}{B+C+D+E} \cdot \frac{G_1}{G_p} \cdot \frac{\text{range}_p}{\text{range}_1} \cdot \Delta DN(P, X) + \frac{G_1}{\text{range}_1} \cdot \Delta A \end{aligned} \quad \text{--- 式 (22)}$$

$$\begin{aligned} \Delta DN(M2, X) &= f_2'\{\Delta DN(P, X)\} \\ &= \frac{D}{B+C+D+E} \cdot \frac{G_2}{G_p} \cdot \frac{\text{range}_p}{\text{range}_2} \cdot \Delta DN(P, X) \end{aligned} \quad \text{--- 式 (23)}$$

センサのキャリブレーションゲイン G は、衛星画像の付帯情報として公開されており、既知の値である。また、 A, B, C, D, E の値は前述の図 3-23 に示したように、各画素の分光放射輝度 L を用いて画素ごとに算出できる。パンクロ画像の偏差成分 $\Delta DN(P, X)$ は、式 (24) で算出する。

$$\Delta DN(P, X) = DN(P, X) - DN(P_a, X) \quad \text{---式 (24)}$$

$$\Delta DN(Mh, X) = DN(M, X) + \Delta DN(M, X) \quad \text{---式 (25)}$$

但し、 $DN(P_a, X)$: 平滑化パンクロ画像の画素 X での DN 値

$DN(Mh, X)$: 高解像度化マルチ画像の画素 X での DN 値

式 (22), 式 (23) で算出した偏差成分 $\Delta DN(M1, X)$, $\Delta DN(M2, X)$ を式 (25) に代入し、高解像度化されたパンクロ画像の DN 値を得る。

5) 適用上の制約と限界

本節で提案した方式は、SPOT や Quick Bird など、パンクロセンサとマルチセンサを同時計測する衛星画像に適用できる。但し、アルゴリズムの計算手順上、適用において以下のような制約がある。前述したように、カテゴリ展開において、カテゴリの代表 DN 値行列 Y の逆行列を計算している。行列 Y が正方行列でないとき、一般には逆行列が存在せず、展開係数行列 Z を一意に求めることが困難となる。行列 Y を正方行列とするために、代表カテゴリ数をマルチバンド数 + 1 (1 はパンクロバンド分) に等しく設定するという制約を受ける。代表カテゴリ数をこれより大きく設定すると、展開係数行列 Z は逆行列 Y^{-1} からではなく、画素ごとに誤差の最小二乗法計算などで求める必要があるため、演算量が膨大となり、実用に適さなくなるケースがある。

このほか、本方式で導入した、高解像度化の精度に影響すると考えられる仮定は、以下のものである。すなわち、パンクロの平滑化画像に対する原画像の分光放射輝度の偏差分が、全計測波長域に対して単調 (同一符号でかつ一様) なことを仮定している。隣接する画素同士は一般に高い相関を有するので、多くの画像では本仮定から大きく外れることはない。しかしながら、DN 値がランダムパターンのような配置になっている箇所、例えば、土地利用が複雑に入り組んだ市街地などでは、本仮定から外れる度合いが高くなる。これが高解像度化の誤差要因となり、本方式のアルゴリズム上の限界と考えている。

(2) 必要データの準備

本研究で提案したアルゴリズムの精度を検証するために、実際の衛星画像を用いて評価解析した。ここでは、解析に必要なデータについて説明する。

1) 対象区域と代表カテゴリ設定

対象区域は、図3-24に示すように霞ヶ浦西浦を挟んで茨城県玉造町と出島村との間に架かる霞ヶ浦大橋付近とした。衛星画像として、SPOT HRV-P (パンクロ) と XS (マルチ) を用いた。マルチ画像の3つバンドのうち、パンクロ画像と重複する計測波長を持つバンド1とバンド2を対象とした。SPOT衛星画像の1シーンは60km四方である。シーンはパス(Path; 衛星の軌道。東西方向の位置)とロウ(Row; 南北方向の位置)を組合せたシーン番号で識別される。今回用いた画像は、北関東を計測したパス332, ロウ278のシーンである。計測年月日は平成8年12月29日である。

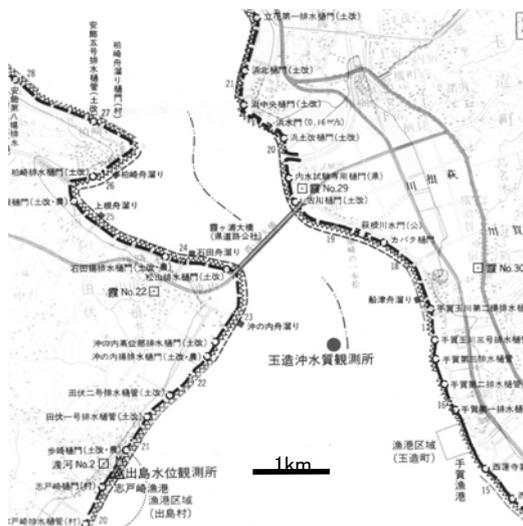


図3-24 解析対象区域(霞ヶ浦大橋付近)

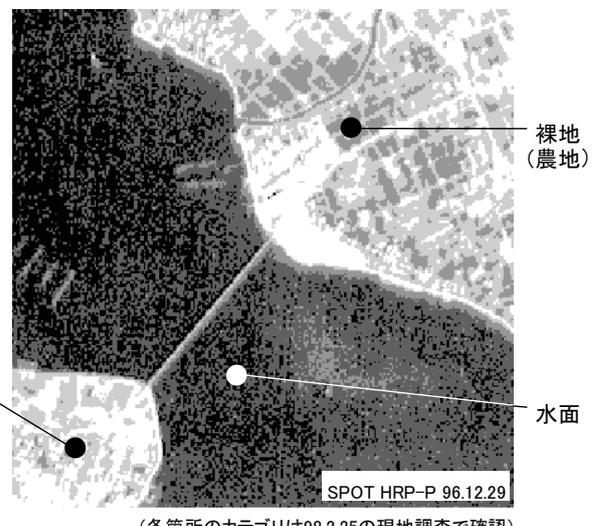


図3-25 各カテゴリの代表箇所

地覆のカテゴリとしては、水面、植生、裸地の3つを設定した。本対象区域では、これら3つのカテゴリが広範に分布している。各カテゴリの代表箇所は、現地調査(1998年2月25日実施)に基づき、図3-25内の丸印付近とした。植生は具体的には森林であり、裸地は作付け前の農地である。表3-6には、上記SPOT画像を用いて、各カテゴリの代表箇所のDN値を算出した結果を示す。この平均値はカテゴリ展開の計算に用いる。

表3-6 各カテゴリ代表箇所のDN値

カテゴリ	サンプル数(画素)	項目	マルチ		パンクロ
			バンド1	バンド2	
水面(W)	521	平均	26.53	15.41	22.27
		分散	0.3419	0.3698	0.4149
植生(V)	41	平均	41.66	34.54	46.71
		分散	4.9305	5.2549	9.9122
裸地(S)	165	平均	37.12	30.18	38.53
		分散	0.2367	0.2960	0.7382

SPOT HRV-P, XS 96.12.29

2) 分光特性データ

カテゴリ展開によって各画素の分光放射輝度を推定するには、カテゴリの代表的な分光放射輝度が既知でなければならない。衛星センサで計測する放射輝度は、入射光が地表面で反射された量であるので、地表面での太陽光分光放射照度($W/m^2/\mu m$)と

対象地表面の分光反射率 (%) との積に比例する。

図 3-26 には既往の研究^{1,7)} で知られている太陽光の分光放射照度を示す。太陽は 5900K の黒体とみなせることができ、Planck の放射法則から近似的に分光特性を計算できる。実際には地表面までの光路における大気やエアロゾルの影響で、5900K 黒体の分光放射照度とは異なった特性となる。ここでは、大気分子の吸収を考慮した図 3-26 中のグラフ B の値を用いた。

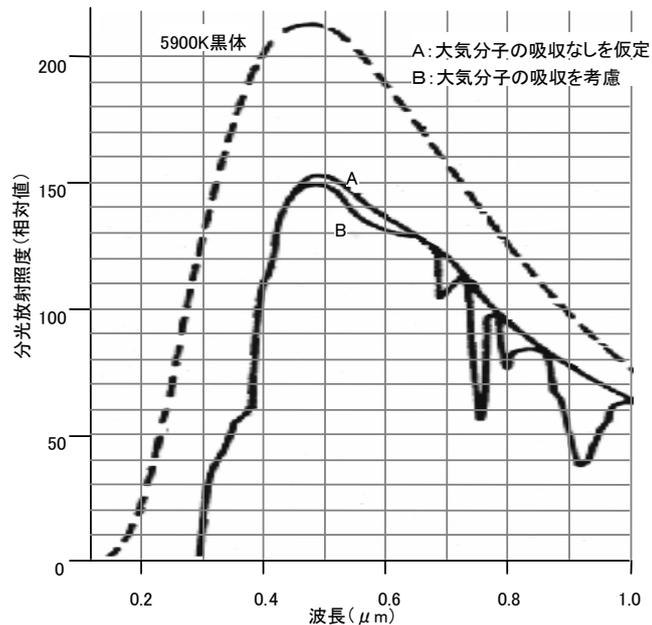


図3-26 地表における太陽光の分光放射照度 (文献17より引用)

各カテゴリの分光反射率は、例えば、同じ植生であっても区域や季節によって異なることが予想されるため、衛星飛来と同期させた実測データを用いるのが理想的である。今回の現地調査では、分光計測機器が準備できなかったこともあり、図 3-27 に示す既往文献²⁾ の値を用いた。

図 3-26 に示した太陽光の分光放射照度と図 3-27 の分光反射率とから計算した、衛星センサ地点での分光放射輝度は図 3-28 の通りである。ここで用いた分光放射照度は相対値であるため、分光放射輝度も各波長での相対値が得られる。さらに、衛星画像の DN 値を用いて式 (21) から分光放射輝度を計算し、絶対値に変換した。

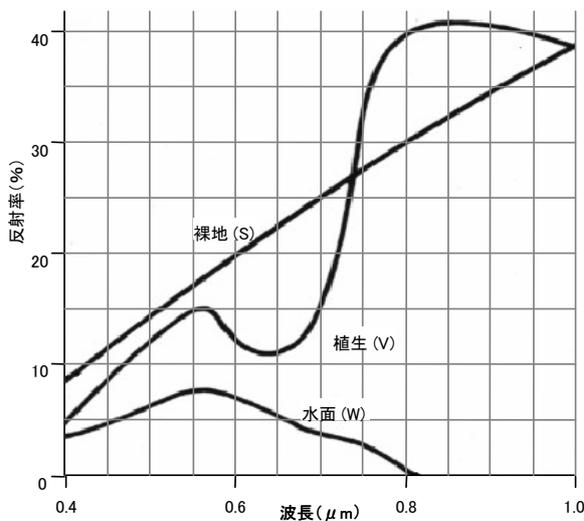


図3-27 各カテゴリの分光反射率 (文献2より引用)

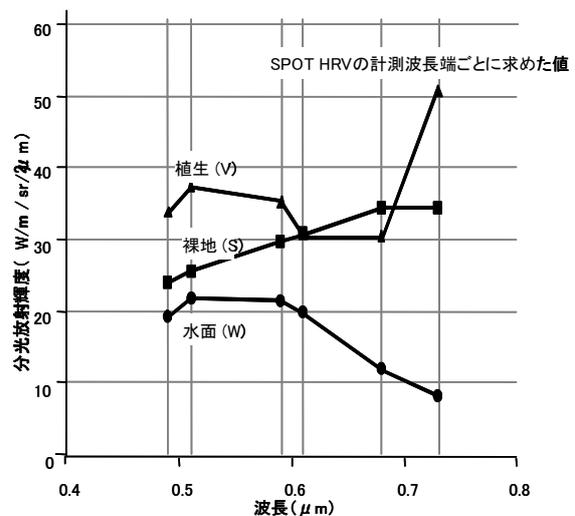


図3-28 各カテゴリの分光放射輝度

3. 4. 3 評価解析結果

(1) 視認性向上の評価

マルチ画像の高解像度化のために用いた、SPOT HRV-P のパンクロ画像を図3-29に示す。供試画像として60km四方の原画像から約2.5km四方相当を切り出した。空間解像度10mで256×256画素から構成される。目視では、画像中央部の霞ヶ浦大橋（全長約1km）がほぼ直線として認識できる。また、北東部の玉造町側にある梶無川や土地区画区分がほぼ認識できる程度の解像度である。

図3-30には上記のパンクロ画像を用いて、マルチ画像のバンド1を高解像度化した結果を示す。バンド1の原画像は空間解像度20mで128×128画素で構成される。原画像の解像度でも主たる土地区画区分は識別できるものの、霞ヶ浦大橋はいびつな直線となる。また、梶無川は識別が困難である。他方、提案アルゴリズムで生

成した偏差成分を重畳した高解像度化画像では、霞ヶ浦大橋がほぼ直線となっており、解像度向上の効果が確認できる。また、土地区画区分についても、パンクロ画像と同程度に識別することができる。定性的には視認性が向上していることが分かる。梶無川の河口付近の視認性は十分でないが、上流付近では視認性が向上している。

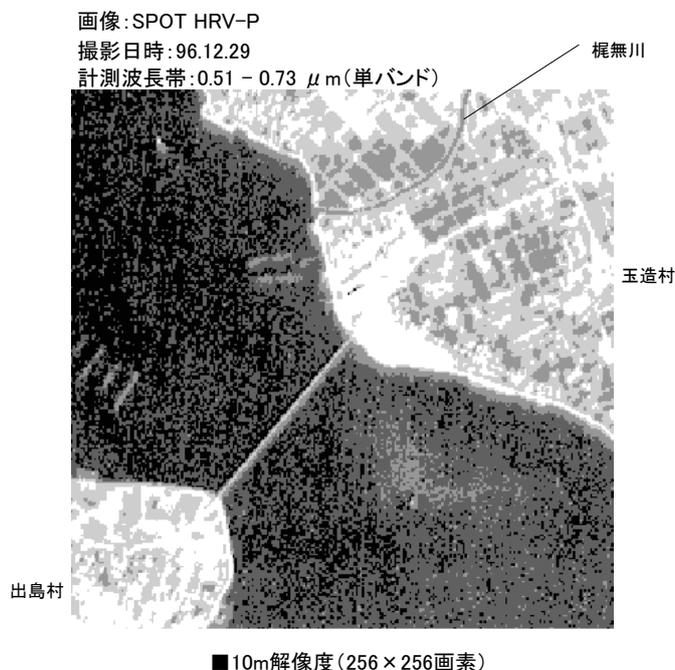


図3-29 マルチ画像高解像度化に参照したパンクロ画像

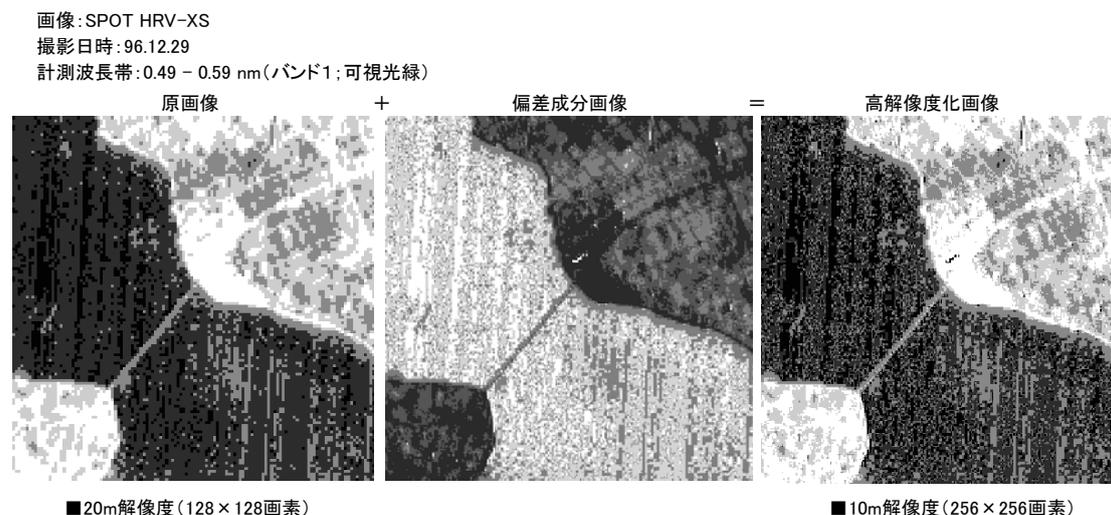


図3-30 マルチ画像バンド1の高解像度化処理結果

図3-31にはバンド2の高解像度化処理結果を示す。原画像では、バンド1と同様に視認性が低く、霞ヶ浦大橋や梶無川の識別が困難である。高解像度化画像では、霞ヶ浦大橋と梶無川ともに視認性が向上しており、パンクロ画像程度の解像度となっている。また、土地区画区分については、バンド1よりも視認性向上がより顕著である。

高解像度化の定量的な精度については次項で述べるが、定性的には提案アルゴリズムによって対象物の視認性を向上できることを確認した。バンド1とバンド2との比較では、後者の方がより高い効果が得られている。バンド2の計測波長帯は $0.61\sim 0.68\ \mu\text{m}$ であり、計測波長帯の総てがパンクロ画像の計測波長帯に含まれる。これに対して、バンド1の計測波長帯 $0.49\sim 0.59\ \mu\text{m}$ のうち、20%に相当する $0.49\sim 0.51\ \mu\text{m}$ の波長がパンクロ画像に含まれていない。このことが効果の違いの理由と推測される。

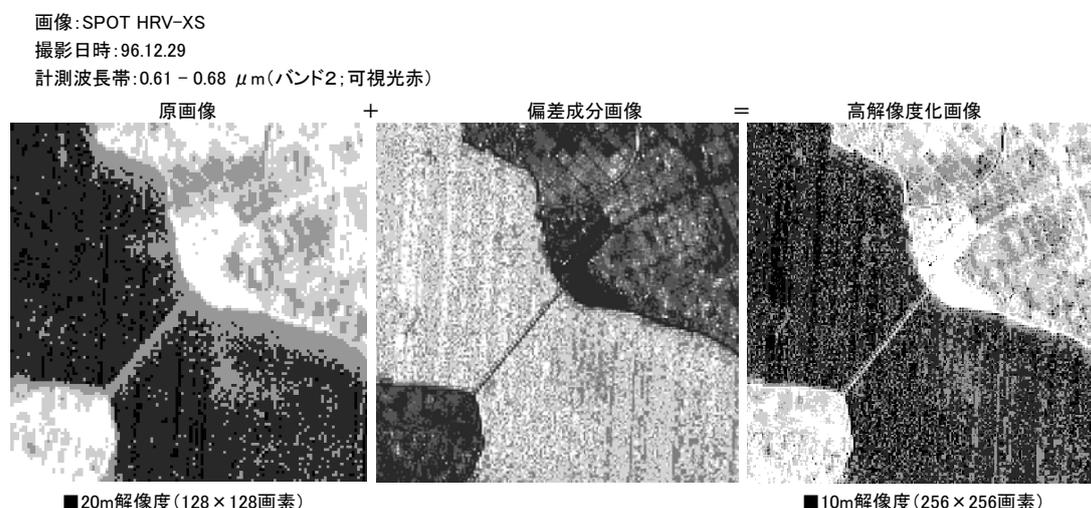


図3-31 マルチ画像バンド2の高解像度化処理結果

(2) 高解像度化の精度

提案アルゴリズムの精度を検証するため、高解像度化した解像度での真値が既知の画像を準備した。ここでは、図3-32に示すようにSPOT HRV-P, XSの解像度をそれぞれ20m, 40mに変換した画像を準備し、これらの画像に提案アルゴリズムを適用した。原画像は、高解像度化処理した画像の真値であるので、両者の比較により精度を検証できる。対象区域は、茨城県土浦港付近の約5km四方の区域である。

図3-33には高解像度化の処理結果を示す。図3-32で示した原画像との目視比較では、高解像度化処理により、真値である原画像とほぼ同様の画像が得られたことが分かる。定量的な評価として、高解像度化画像と原画像との相関係数 r 、及び平均相対誤差を算出した結果を表3-7に示す。この結果より、高解像度化により相関係数がバンド1では $0.83\rightarrow 0.94$ 、バンド2では $0.92\rightarrow 0.96$ に向上したことが分かる。

平均相対誤差は、バンド1で $8.17\rightarrow 5.33\%$ 、バンド2で $8.26\rightarrow 4.63\%$ に低減している。誤差低減の効果は、前節の視認性評価と同様に、バンド2の方が大きかった。当

初の精度目標は平均相対誤差 20%以下としたが、今回のテスト画像では未処理画像と原画像との誤差が既に 10%以下 (8.17%, 8.26%) であったため、厳密には目標達成の成否を判断できなかった。更に条件の厳しい、すなわち、未処理画像と原画像との誤差がもっと大きい画像での検証が必要である。

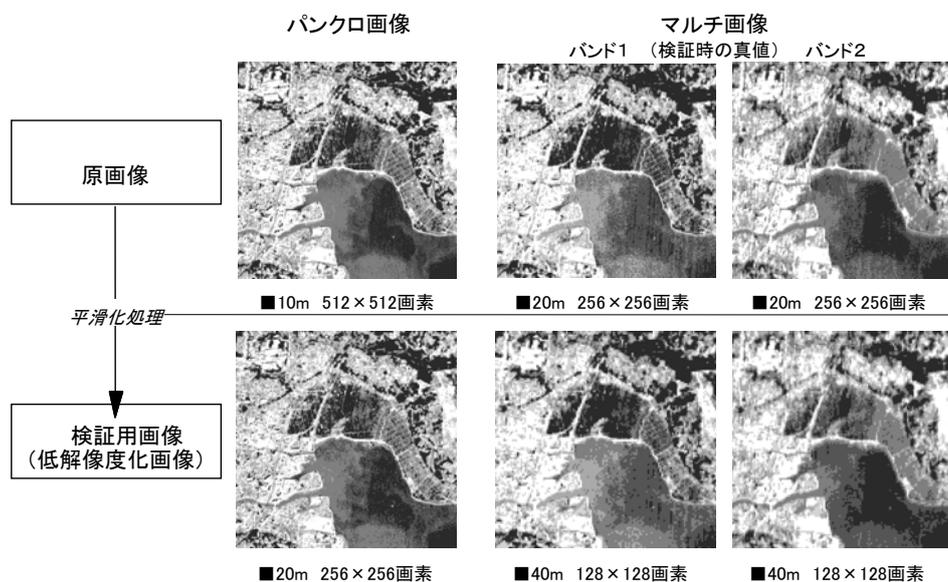


図3-32 精度検証用画像の作成

図3-33に示した誤差画像をみると、湖沼水面で誤差が小さく、道路などの土地被覆境界に相当する箇所の誤差が相対的に大きい。水面は地表面に比べると、平面的に一樣であることから誤差が小さいものと考えられる。逆に、各種のカテゴリが混在する箇所では誤差が大きい傾向にある。提案アルゴリズムによる誤差の要因としては、1) カテゴリ展開に用いるカテゴリの設定、2) 各カテゴリの代表的な分光放射輝度の設定などが考えられる。

表3-7 高解像度化処理の精度評価結果

		原画像(真値)との 相関係数 r	原画像(真値)との 平均相対誤差
バンド1	処理画像	0.94	5.33%
	未処理画像	0.83	8.17%
バンド2	処理画像	0.96	4.63%
	未処理画像	0.92	8.26%

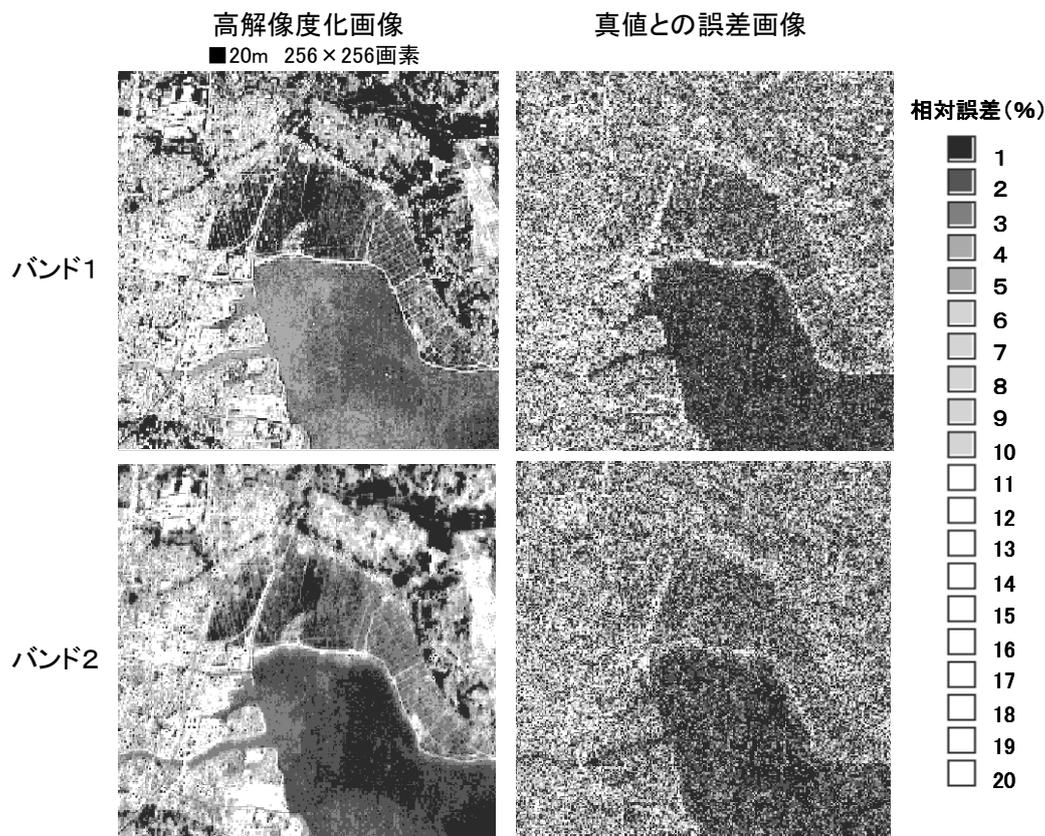


図3-33 精度検証用の高解像度化処理結果

3. 4. 4 流域監視における意義と適用上の制約について

提案した方式は、SPOT など、パングロマティックセンサとマルチスペクトルセンサを同時計測する衛星画像に適用できる。流域監視への適用上の意義は、高解像度化によって、より詳細な流域情報を得ることが可能となり、例えば、水圏浄化や流域汚濁負荷対策などを検討する上で、より有用な判断材料を提供可能となることである。また、より面積が小さな水圏や流域にも適用可能となることも、リモートセンシングの適用拡大に寄与できる。

前述したように、計算手順の中で逆行列計算をしており、求解を保障するため、代表カテゴリ数をマルチバンド数+1（1はパングロマティックバンド分）に等しく設定するという制約を受ける。代表カテゴリ数をこれより大きく設定する場合には、展開係数行列Zは逆行列 Y^{-1} からではなく、画素ごとに誤差の最小二乗法計算などで求めるなどの手順変更が必要である。

このほか、本方式で導入した、高解像度化の精度に影響すると考えられる仮定は、以下のものである。すなわち、パングロの平滑化画像に対する原画像の分光放射輝度

の偏差分が、全計測波長域に対して単調なことを仮定している。隣接する画素同士は一般に高い相関を有するので、多くの画像では本仮定から大きく外れることはない。しかしながら、例えば、土地利用が複雑に入り組んだ市街地などでは、本仮定から外れる度合いが高くなり、定性的には誤差が高くなる傾向を有する。表 3-7 に示したように、高解像度化をしない場合に比べると誤差は低減できており、高解像度化のメリットを損なうレベルではないが、適用上で留意すべき点である。

3. 5 まとめ

流域管理において、そのフィールド情報を必要な空間分布と頻度で計測し、適時性を有する情報を確保することは、基本的な業務の一つである。フィールドにおける計測業務は、人的労力と費用を要するもので、効率化する要請は大きい。

本章では、流域管理システムの主要な機能要件である計測手段として、広域性と周期性を有する衛星リモートセンシングに着目し、フィールドスタディにより適用性を検証した。

・衛星画像の水質評価への適用性を評価する目的で、霞ヶ浦を対象に Landsat TM (解像度 30m) を用いて、アオコ、クロロフィル a 濃度を推定した。フィールドスタディの結果では、

- 1) 誤識別率 0.7%の条件下で、全アオコの 86.6%を識別できる
- 2) 重回帰式によるクロロフィル a 推定式で誤差 9.4%を得る

ことが分かり、実用上に必要な精度を実現できる目途を得た。

・また、流域監視への衛星リモートセンシングの適用性を高める手段として、衛星画像の高解像度化手法を検討した。パンクロマティック画像を用いてマルチスペクトル画像を高解像度化する手法を開発した。SPOT HVR 画像を用いたフィールドスタディの結果では、

- 3) 平均相対誤差約 5%でマルチスペクトル画像を 20m から 10m に高解像度化できることを確認した。

これにより、より面積が小さな水圏や流域にも適用可能となることも、リモートセンシングの適用拡大に寄与できる。

3. 6 参考文献

- 1) United States Environmental Protection Agency (1979) Trophic Classification of Selected Illinois Water Bodies - Lake Classification Through Amalgamation of Landsat Multispectral Scanner and Contact-sensed Data, EPA-A-600/3-79-123
- 2) Richards J. (1993) Remote Sensing Digital Image Analysis - Second Edition : Springer-Verlag
- 3) Shapiro M. (1993) GRASS Reference Manual - m. eigensystem : U. S. Army Construction Engineering Research Laboratories
- 4) 圓佛伊智朗ほか (1996) 衛星データ利用による水圏監視技術の検討、第6回環境システム計測制御学会研究発表会講演集、pp. 194-197
- 5) 圓佛伊智朗ほか (1998) 湖沼監視のための衛星画像高解像度化手法の開発、第7回環境システム計測制御学会研究発表会講演集、pp. 157-160
- 6) 圓佛伊智朗ほか (1998) リモートセンシングによる水圏水質分布計測、可視化情報学会誌、Vol. 18、No. 71、pp. 267-272
- 7) 井上吉雄ほか (1997) 植物とその生育環境のリモートセンシング、日本リモートセンシング学会誌、Vol. 17 No. 4、pp. 57-67
- 8) 小熊宏之ほか (1997) AVNIR データの校正及び応用解析の現状、日本リモートセンシング学会誌、Vol. 17 No. 5、pp. 68-79
- 9) General Electric 社、複合像を発生する方法、日本国特許公開広報、特開平 5-143713
- 10) Aviation Week & Space Technology (1980)Landsat Returns Image of San Francisco
- 11) 松田奉康ほか (1999) 地理情報利用による河川流域汚濁負荷量の予測、日本水道協会雑誌、Vol. 68、No. 4、pp. 11-21
- 12) Carper, W. J., et al. (1990) The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 56 No. 4, pp. 459-467
- 13) Chavez, P. Jr., et al. (1991) Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 57 No. 3, pp. 295-303
- 14) Pohl, J. L., et al. (1998) Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and application, International Journal of Remote Sensing, Vol. 99 No. 5, pp. 823-854
- 15) 安岡善文 (1983) リモートセンシングの湖沼汚濁監視への応用、環境技術, Vol. 12, pp. 317-322
- 16) 藤原昇ほか (1996) 衛星データ解析のためのパターン展開法の開発、日本リモートセンシング学会誌, Vol. 16 No. 3, pp. 17-34

- 17) 日本リモートセンシング研究会 (1992) 図解リモートセンシング, 日本測量協会
- 18) 稲村實 (1987) カテゴリ分解に基づくリモートセンシング画像の解析, 電子情報通信学会誌, Vol. 70-C No. 2, pp. 241-250

第4章 流域管理のための汚濁負荷シミュレーション

概要

長期的な水源保全計画の策定や突発的な水源水質事故への対応は、河川管理者や利水者の主要な流域管理業務と位置づけられる。本研究では、こうした業務に適用が可能な汚濁負荷シミュレーション技術を検討した。

水源保全計画や浄水設備導入計画の策定には、水源河川の長期水質予測が必要となる。本研究では、具体例として、汚濁負荷の発生を説明できる流域人口や鉱工業出荷額などの情報に基づいて、流域から河川に流入する汚濁負荷量を算定し、河川水質の経年変化を予測するシミュレーション技術を構築した。これにより、流域の下水道普及率の推移など、様々な将来シナリオでの水質予測行い、設備導入計画に関わる選択肢を具体的に比較検討可能とした。

また、水源水質事故への対応として、河川水質事故の発生時または事前対策の判断材料を提供できる、河川流下シミュレーション技術を構築した。広域な水系を即時的、かつ詳細に解析する手段として、1次元と2次元河川モデルを組み合わせた河川流下シミュレーションモデルを構築し、汚染物質の流下とその拡がりを予測可能とした。

GISプラットフォーム上にモデルを実装したシミュレーションシステムを開発した。東京都を流域とする水系に適用し、実用に供するレベルのシミュレーション性能を実現できることを確認した。

4. 1 地理情報モデリングの必要性和本研究のアプローチ

多くの水道事業者では、その水源を河川に求めているため、高度浄水処理などの設備導入計画は、流域管理と密接な関連を有する。第1章で述べたWHOの水安全計画でも、水源や流域の地域性を考慮した水質確保の施策を推奨している。

水源河川の水質は、下水道整備などの水源保全事業により、一時期に比べて改善される傾向にある。しかし、現在でもなお水道水の異臭味や発がん性物質であるトリハロメタンの生成といった課題が残されている。こうした課題に対して、水道事業者はより安全でおいしい水を供給するために、オゾンなどを用いた浄水高度処理設備の導入を進めている。高度処理設備の導入は、一サイト当たり数億～数十億円程度の費用を要するため、水道事業の長期計画に基づく予算化措置が必要となる。このため、処理対象となる水源水中成分の量的変化の傾向を予測して計画を作成する必要がある。本研究の目的は、流域評価により水源河川の水質予測手法を開発することにある。

河川の長期水質予測技術に関する研究は、昭和30年代にさかのぼることができ、流域の汚濁負荷排出量の算定モデル^{3) 4)}ほかや自浄作用などを考慮した河川水質推定モデル^{5) 6)}ほか⁶⁾が各種提案されている。また、評価事例も霞ヶ浦流域河川⁷⁾や手賀沼流域河川⁸⁾などが報告されている。技術課題の第一は、汚濁負荷発生に関連した広範、かつ大量の情報を扱うことから、効率的な基礎データの構築である。また、汚濁負荷量算定や水質推定の厳密なモデルについては、既往のモデル^{10) 11)}ほかが存在するものの、東京都の水源河川を含む1都4県（群馬、埼玉、栃木、茨城）の広い対象範囲について、入手可能なデータの範囲で実行できるモデルは限られる。よって、より少ないデータで将来動向予測を行うことのできるモデルの選定・改良が第二の課題となる。

本研究では、これらの課題に対するアプローチとして、地理情報システム（GIS）をベースとした情報プラットフォームに実装可能なモデリングについて検討した。

4. 1. 1 流域評価の項目

本研究でのケーススタディでは、利根川・荒川水系のうち、秋が瀬取水堰上流域を対象とした。ここでの評価項目は下記のとおりである。

(1) 評価内容

- 1) 中長期（5～10年）における水源水質動向の予測
- 2) 短期（1～3年）における水源水質動向の予測
- 3) 想定する想定条件での各種水質保全事業の効果及び費用試算

(2) 対象水質項目

- | | | |
|-------------------------|---------------|-------------|
| 1) トリハロメタン生成能 | 2) アンモニア性窒素 | 3) 硝酸性窒素 |
| 4) 亜硝酸性窒素 | 5) 全窒素 | 6) 全燐 |
| 7) 陰イオン界面活性剤 | 8) 生物化学的酸素要求量 | 9) 化学的酸素要求量 |
| 10) 有機物等（過マンガン酸カリウム消費量） | 11) ジメチルソルボール | |
| 12) ジェオスミン | | |

このうち、浄水場への高度浄水処理設備の導入に関するもので、特に、今般問題となっている水道水中のトリハロメタン（Trihalomethane；以下 THM）の原因成分となる有機物質の量（トリハロメタン生成能と呼称される；以下 THMFP と略す）の経年変化を予測した結果について報告する。

4. 1. 2 開発システムの概要

上述の流域評価を実施するためのシステムとして、以下の構成と機能を有する水源水質動向予測システム（図4-1）を開発した。第2章で述べた流域管理システムの

ユーザモデルの中では、業務強化型のシステムに相当するもので、その必須機能を持たせている。また、各モジュールの機能は、表4-1にまとめたとおりである。

- (1) 汚濁負荷評価モジュール：対象水系の流域から排出される汚濁負荷量を年度単位で算定し、これに基づいて河川流路区間ごとの水質を予測する。
- (2) 河川シミュレータ：河川への汚濁物質、油流入などの突発的水質事故に対応して、事故地点からの流下・拡散現象を計算し、主要地点までの流下時間、流下濃度を推定する。
- (3) 流域環境図管理モジュール：東京都水道局殿の有する流域環境図を電子ファイル化して、表示、検索できる。流域環境図は、図面換算（A2変形版、5色刷り）で150枚相当。また、属性情報としては、河川流路距離、河川構造物、特定事業所情報などを含む。

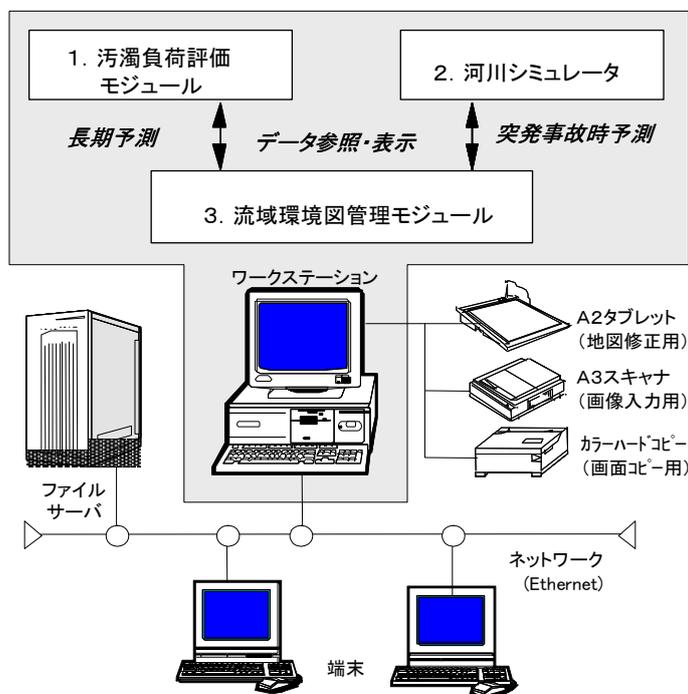


図4-1 水源水質動向予測システムの構成

表4-1 各モジュールの機能概要

モジュール名	モジュールの内容・機能
1. 汚濁負荷評価モジュール	<ul style="list-style-type: none"> ・発生源別の汚濁負荷発生量を年度別に計算する ・河川へ流下する流達モデルにより汚濁負荷量を計算する ・自浄作用を考慮した水質モデルで将来水質を計算する
2. 河川シミュレータ	<ul style="list-style-type: none"> ・基点流量から河川各点の流量を計算する ・事故地点から各点への流下時間、流下濃度を計算する（一次元） ・指定区間での川幅方向を考慮した流下・拡散を計算する（二次元）
3. 流域環境図管理モジュール	<ul style="list-style-type: none"> ・流域環境図データの管理、表示する（出力、編集） ・環境図の属性情報を検索、表示する（データベース） ・上記モジュールへのデータ入出力（マンマシン）

4. 2 地理情報を用いた流域汚濁負荷のモデリング

4. 2. 1 評価手順

本研究で用いた評価手順は、図4-2に示すように、三段階の工程とした。

第一工程では、入手可能なデータを調査し、これらのデータ範囲内で適用できる評価モデル（汚濁負荷量算定モデル、水質推定モデルなど）を選定した。主要なデータ提供元は、表4-2に示すように国土数値情報^{1,2)}、国勢調査^{1,3)}、事業所統計^{1,4)}などであり、所轄省庁の外郭団体が公開しているものを利用した。また、河川水質データは、建設省、都県が発行している水質年報^{1,5)}、^{1,6)}他を入手した。

第二工程では、選定した評価モデルに含まれる各種パラメータを対象水系に適用できるように調整した。この調整は、基準年度の水質実績値とモデルによる計算値とが一致するように行った。基準年度は、主要なデータ項目のほとんどが実績値として入手できる平成2年度とした。第三工程では、第二工程で調整した評価モデルを用いて、いくつかの想定条件のもとで将来の汚濁負荷量、河川水質を推定した。

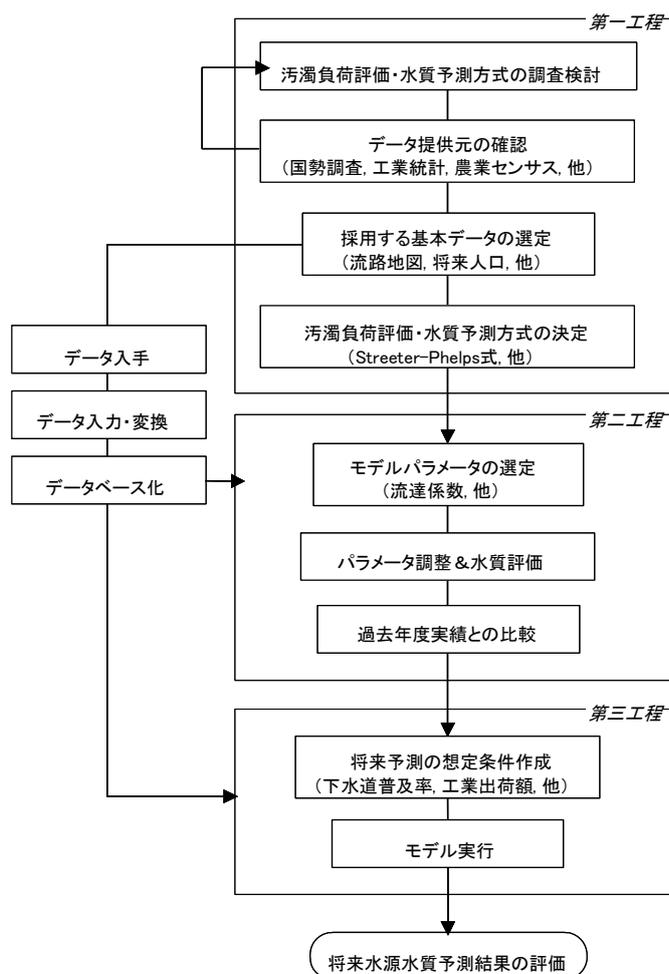


表4-2 主なデータ提供元一覧

- 人口(実績値)
(財)統計情報研究開発センター
「地域メッシュ統計(国勢調査)」
- 人口(予測値)
厚生省人口問題研究所編「都道府県別将来推計人口」
- 従業員数
(財)統計情報研究開発センター
「地域メッシュ統計(事業所統計)」
- 下水道普及率
(財)日本下水道協会「下水道統計」
- 浄化槽普及率(単独/合併)
群馬県「環境白書」、埼玉県「環境白書」
- 下水処理場放流水量/放流水質
(財)下水道協会「下水道統計」
- 産業別製造品出荷額(実績値)
(財)通商産業調査会「工業統計メッシュデータ(産業別)」
- 産業別製造品出荷額(予測値)
通産省「生産・出荷・在庫統計」
- 畜産飼育頭数(牛、馬、豚)
国土地理院「国土数値情報」
- 用途地域面積(田、畑、山林、市街地)
国土地理院「国土数値情報」
- 河川水質
東京都水質測定結果、群馬県「水質測定結果」
埼玉県「公共用水域及び地下水の水質測定結果」
- 河川流量
建設省「流量年報」、東京都水質測定結果、
群馬県「水質測定結果」
埼玉県「公共用水域及び地下水の水質測定結果」
- 河川流路位置、流路延長
国土地理院「国土数値情報」
- 流域界・非集水界位置
国土地理院「国土数値情報」
- 単位流域・非集水面積
国土地理院「国土数値情報」
- 貯水池位置、貯水池面積
国土地理院「国土数値情報」
- 濃度規制値
埼玉県公害防止条例、群馬県公害防止条例

図4-2 将来動向の評価手順

4. 2. 2 対象水系とデータ取り扱い

(1) 流路区間の定義

本報の対象は、利根川・荒川水系である。水質推定には、河川流路を適当な区間（以下、リーチと呼称）に分割し、各リーチでの汚濁負荷の物質収支に基づくモデルを用いる。このモデルのパラメータ調整には、リーチの上・下流端の水質データが必要であることから、水質と流量が定期観測される地点（環境基準点など。水質基点と呼称）を用いてリーチを定義した。データ入手可否の予備調査に基づき、東京都、埼玉県、群馬県、及び建設省の水質基点の中から表4-3に示す37区間のリーチを定義した。

さらに、定義したリーチに対して、汚濁負荷が流入する集水領域を設定した。集水領域はリーチ自身の流域界、及び当該リーチに合流する支川の流域界とを合わせた領域である。流域界は、国土数値情報（KS-273；流域界・非集水域界位置）で定義されたものを用いた。

表4-3 水質基点とリーチ定義

リーチ No.	水質基点		リーチ長 (km)	流量(m ³ /sec)			
	リーチ始点	リーチ終点		平均流量	平水流量	低水流量	濁水流量
1	刀水橋	利根大堰	10.60	195.00	154.05	70.20	11.70
2	上武大橋	刀水橋	10.46	204.67	161.69	124.85	96.19
3	坂東大橋	上武大橋	7.56	145.20	116.16	88.57	56.63
4	神流川橋	坂東大橋	7.05	145.20	116.16	88.57	56.63
5	藤武橋	神流川橋	4.55	7.48	5.98	4.56	2.92
6	岩倉橋	坂東大橋	7.36	145.20	116.16	88.57	56.63
7	柳瀬橋	岩倉橋	2.57	36.33	29.06	22.16	14.17
8	嬭川橋	柳瀬橋	4.76	20.76	10.38	6.02	2.70
9	高松	柳瀬橋	10.23	20.76	10.38	6.02	2.70
10	鼻高橋	高松	5.12	10.15	5.28	3.65	1.93
11	常慶橋	岩倉橋	6.47	36.33	29.06	22.16	14.17
12	福島橋	坂東大橋	8.78	145.20	116.16	88.57	56.63
13	群馬大橋	福島橋	11.89	131.83	118.65	73.82	48.78
14	坂東橋	群馬大橋	10.35	111.23	100.11	62.29	41.16
15	吾妻橋	坂東橋	12.78	41.17	37.05	23.06	15.23
16	栄橋	吾妻橋	51.55	20.02	8.61	3.60	1.80
17	岩本地先	坂東橋	21.57	41.17	37.05	23.06	15.23
18	小袖橋	岩本地先	13.19	93.67	78.68	54.33	36.53
19	月夜野橋	岩本地先	12.46	93.67	78.68	54.33	36.53
20	広瀬橋	月夜野橋	17.87	67.53	6.08	6.08	5.40
21	二恵橋	岩本地先	8.38	93.67	78.68	54.33	36.53
22	上江橋(入間川)	治水橋	3.55	70.31	18.98	13.36	9.84
23	治水橋	秋ヶ瀬取水堰	7.66	90.50	24.44	17.20	12.67
24	入間大橋	上江橋(入間川)	2.87	16.47	4.45	3.13	2.31
25	落合橋(入間川)	入間大橋	6.42	12.92	3.49	2.45	1.81
26	刺橋	入間大橋	8.69	12.92	3.49	2.45	1.81
27	落合橋(越辺川)	入間大橋	6.71	12.92	3.49	2.45	1.81
28	高麗川大橋	落合橋(越辺川)	13.24	6.44	1.74	1.22	0.90
29	東松山橋	落合橋(越辺川)	10.63	6.44	1.74	1.22	0.90
30	上江橋(荒川)	治水橋	3.56	70.31	18.98	13.36	9.84
31	開平	上江橋(荒川)	3.29	80.17	21.65	15.23	11.22
32	大福寺橋	開平	8.83	54.19	14.63	10.30	7.59
33	御成橋	開平	14.35	54.19	14.63	10.30	7.59
34	久下橋	御成橋	12.65	54.03	18.91	6.48	1.62
35	正喜橋	久下橋	21.57	21.42	7.50	2.57	0.64
36	親島橋	正喜橋	16.75	16.90	5.41	3.38	2.03
37	二瀬ダム	親島橋	39.20	10.86	3.48	2.17	1.30

(2) 基礎データの扱い

任意の指定箇所での負荷評価を可能とするためには、行政区分（市区町村境界）単位よりも対象領域を矩形に等分割したメッシュ単位の方が好適である。主な基礎データである国勢調査や工業統計はメッシュ単位データで入手できたが、行政区分単位データしかない項目については、図4-3に示すようにメッシュ変換して用いた。メッシュ位置と実際の地理的位置との対応は、各種地図の位置基準である「国土数値情報3次メッシュ」（建設省国土地理院が制定）に準拠させた。メッシュ寸法も3次メッシュに合わせて、1kmとした。基礎データは、前記のようなメッシュ単位に統一し、一都四県を含む240×240メッシュ（240km四方相当）を準備した。

経時変化は年度単位で計算したが、河川での自浄作用など、季節的な変化が大きいと考えられるものについては、季節別に評価した。

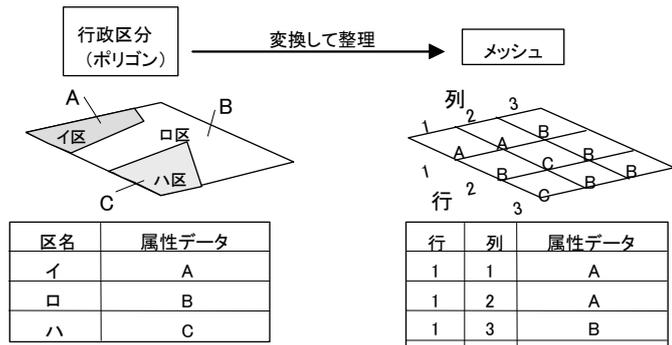


図4-3 行政区分データのメッシュ変換

4. 2. 3 流域汚濁負荷モデル

河川水質は、流域内の発生源から排出され河川に流入する汚濁負荷量によって決定される。今回の負荷量算定には、従来提案されている三種類のモデル（発生源モデル、流達モデル、水質モデル）を図4-4のように組合せた方式を用いた。以下に、各々のモデルを説明する。

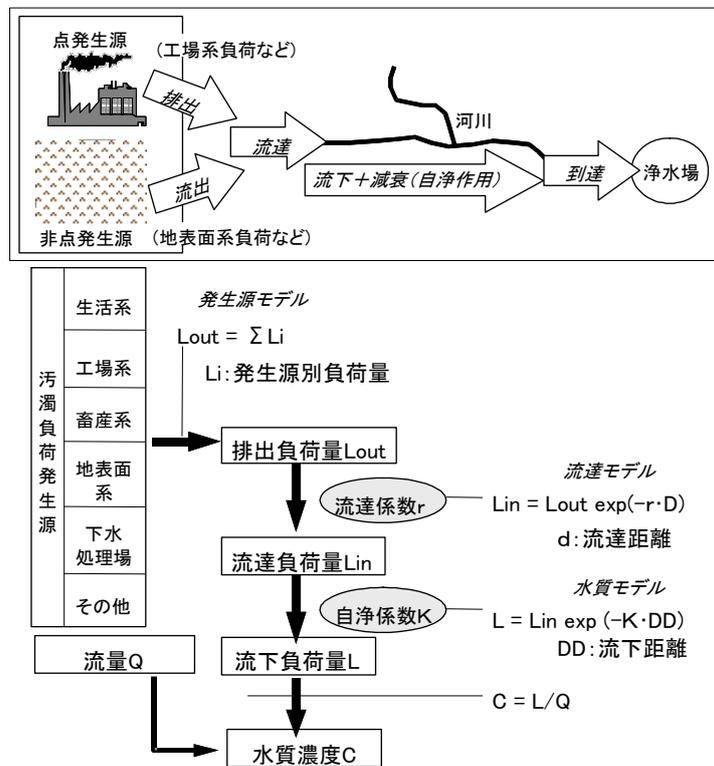


図4-4 評価用モデルの概要

(1) 発生源モデル

1) 汚濁負荷発生源

河川に流入する可能性のある汚濁負荷発生源を表4-4に示す。汚濁負荷量を厳密に算定するには、総ての発生源を考慮すべきであるが、総負荷量への寄与の度合い、及びデータ入手の可否という二つの観点から、発生源を選定した。ここで選定した発生源は、以下に分類される。

表4-4 汚濁負荷発生源の検討

汚濁負荷発生源		総負荷 への寄与	データ 入手可否	本解析 での利用	データ の内容
分類	発生源構成				
生活系	未処理排水	大	可	○	処理人口
	合併浄化槽排水	中	可	○	
	単独浄化槽排水	大	可	○	
	し尿排水	大	可	○	
工場系	工場排水 (業種別22分類)	大	可	○	出荷額
畜産系	牛	小	可	○	養飼数
	馬	小	否	×	
	豚	中	可	○	
	鶏	極小	可	×	
地表面系	水田	大	可	○	面積
	畑	大	可	○	
	山林	中	可	○	
	市街地	大	可	○	
下水道	下水処理場放流水	大	可	○	処理人口
	し尿処理場放流水	中	可	○	
大気系	雨水中負荷	極小	否	×	——
	大気中降下	不明	否	×	——
地下水系	湧水中負荷	極小	可	×	——

大：数%オーダー以上 中：数%未満程度 小：1%未満程度 極小：無視可能

- ①生活系負荷：雑排水とし尿とから構成される。単独浄化槽処理（し尿のみ）、合併浄化槽処理、下水処理、未処理のどれに該当するかにより、排出負荷量と排出位置が異なる。
- ②工場系負荷：業種によって排出負荷量が大きく異なるため、業種別の負荷量算定とした。今回の評価では、事業所統計¹⁴⁾での分類に対応させ、表4-5に示す「日本産業分類・製造業中分類」の22業種分類とした。
- ③畜産系負荷：国内で広く養飼されており、養飼数が入手可能な畜産種は、牛、馬、豚、及び鶏である。今回の対象流域となる一都四県では、馬の養飼実績が小さく数値も入手できなかったため、考慮しなかった。また、鶏については鶏糞としての回収利用率がほぼ100%で、外部への排出がないため、評価対象から除外した。

④地表面系負荷：既往の論文^{3),4)}他にならって、水田、畑、山林、及び市街地の四種類について考慮した。負荷量は、入手した土地用途別面積から算定した。

⑤下水処理場負荷：下水放流水が河川流量の大部分を占める河川では、主要な汚濁負荷発生源となる。排出負荷として、生活系、工場系の下水流入分が処理された後の放流水に残留した汚濁負荷を考慮した。

表4-5 工場系負荷の分類
(日本産業分類・中分類)

	製造業中分類コード		製造業中分類コード
1	12 食料品	12	23 ゴム製品
2	13 飲料、飼料等	13	24 なめし革等
3	14 繊維工業	14	25 窯業等
4	15 衣服等	15	26 鉄鋼業
5	16 木材、木製品	16	27 非鉄金属
6	17 家具等	17	28 金属製品
7	18 パルプ、紙	18	29 一般機械
8	19 出版、印刷	19	30 電気機械
9	20 化学工業	20	31 輸送機械
10	21 石油化学	21	32 精密機械
11	22 プラスチック	22	34 その他

以上、表4-4に示す13項目の発生源を考慮すれば、流域から排出される汚濁負荷量を算定できる。

2) 負荷評価法

河川へ流入する汚濁負荷量は、短期的には一日の中でも時間帯や降雨などで変動する。降雨時に適用できる汚濁負荷評価法も提案されている⁵⁾が、今回の評価では経年的な変動傾向を知ることが目的なので、晴天時と降雨時を区別せずに評価した。また、対象とする負荷量は、発生負荷量と排出負荷量（発生した負荷量の内、外部排出量。100%内部処理されれば、排出負荷量は0となる）とがあるが、後者で評価した。

評価法は、各種変法を含めて多数^{3),5),8)}他あるが、原単位法と発生源基数積算法の二つに大別される。前者の原単位法は、人口や出荷額当りの排出負荷量（原単位と呼称される）により算定する簡易法で、他方、後者は発生源ごとの実績値を積み上げる厳密法である。ここでは、データ入手の可否により両者を使い分けることとした。各発生源に適用した評価法の一覧を表4-6に示す。

排出負荷量の算定式は、表4-7に示すとおりである。これらの算定式は、流域人口や鉱工業生産額などの基礎データを用いて、前述したメッシュ単位データで計算した。また、算定式で用いた各種原単位を表4-8にまとめた。表4-8(1)は厚生省が水道水源保全対策計画用に提示した THMFP の原単位で、考慮した負荷発生源を網羅している。今回はこの原単位での評価を中心とした。

表4-8(2)~(4)は工場系負荷の評価に適用できる原単位や濃度規制値である。表8(2)は、環境庁が特定事業所（排水量や排水成分濃度を届ける義務のある事業所）負荷の削減を目的に告示した THMFP 濃度基準である。また、表4-8(3)は埼玉県と群馬県が制定した公害防止条例で、BODによる上乘せ規制値である。さらに、表4-8(4)は建設省が下水道整備計画用に提示した COD の原単位である。これら数値は各々異なる目的で設定された値であり、表4-8(1)による評価結果を比較するのに用いた。

表4-6 各発生源に適用した評価法

汚濁負荷発生源	評価法	評価成分	内 容	備 考
生活系	原単位法	THMFP原単位	・原単位は厚生省ガイドライン値を採用 ・処理方式別の人口当りの排水量、及び排出濃度で評価	・表4-8(1)
工場系	原単位法	THMFP原単位	・原単位は厚生省ガイドライン値を採用 ・業種別出荷額当りの排水量、及び排水濃度で評価	・表4-8(1)
		COD原単位	・原単位は建設省流域総合計画値を採用 ・業種別出荷額当り排出負荷量で評価	・表4-8(4)
	発生源基数積算法	THMFP濃度	・環境庁告示第二十九条によるTHMFP濃度排水基準による ・排水量は特定事業所の届け出排水量による	・表4-8(2) ・環境省告示
		BOD濃度	・埼玉県、群馬県公害防止条例によるBOD濃度排水基準による ・排水量は特定事業所の届け出排水量による	・表4-8(3) ・県公害防止条例
畜産系	原単位法	THMFP原単位	・原単位は厚生省ガイドライン値を採用 ・種類別養飼数当りの排水量、及び排出濃度で評価	・表4-8(1)
地表面系	原単位法	THMFP原単位	・原単位は厚生省ガイドライン値を採用 ・種類別面積当りの排出負荷量で評価 ・水田については生育段階ごとに原単位を変更	・表4-8(1)
下水処理場	原単位法	THMFP原単位	・原単位は厚生省ガイドライン値を採用 ・処理人口当りの排水量、及び排水濃度で評価	・表4-8(1)

表4-7 排出負荷量の算定式

発生源	算定式(原則として1kmメッシュ単位で計算; 下水処理場への排出分を除く)
生活系	<p>生活系排出負荷 = 未処理排水負荷 + 合併浄化槽負荷 + 単独浄化槽負荷 + 屎尿処理負荷</p> <p>・未処理排水負荷 (kg/年) = 排水量原単位 (L/人・日) × 人口(人) × (人口指数/100) × (未処理率/100) × 未処理排水濃度 (μg/L) × 365 × 10⁹ 未処理率 = 100 - 下水道普及率 - 合併浄化槽率 ; 単独浄化槽、屎尿処理分の雑排水はこれに含む。</p> <p>・合併浄化槽排水負荷 (kg/年) = 排水量原単位 (L/人・日) × 人口(人) × (人口指数/100) × (合併浄化槽率/100) × 合併浄化槽排水濃度 (μg/L) × 365 × 10⁹</p> <p>・単独浄化槽排水負荷 (kg/年) = 排水量原単位 (L/人・日) × 人口(人) × (人口指数/100) × (単独浄化槽率/100) × 単独浄化槽排水濃度 (μg/L) × 365 × 10⁹</p> <p>・屎尿排水負荷 (kg/年) = 排水量原単位 (L/人・日) × 人口(人) × (人口指数/100) × (屎尿処理率/100) × 屎尿処理排水濃度 (μg/L) × 365 × 10⁹</p> <p>・人口指数: 平成2年度を100とした県別将来値(厚生省人口問題研究所推計)</p>
工場系	<p>工場系排出負荷 = Σ 業種別排出負荷</p> <p>・業種別排出負荷量 (kg/年) = 排水量原単位 (m³/日・M[¥]) × 出荷額 (M[¥]) × (鉱工業生産指数/100) × 排水濃度 (μg/L) × 365 × 10⁻⁸ × ((100 - 下水道普及率)/100)</p> <p>・業種: 製造業中分類(22業種) ・鉱工業生産指数: 平成2年度を100とした将来値(通産省推計)</p>
畜産系	<p>畜産系排出負荷 = 牛排出負荷 + 豚排出負荷</p> <p>・牛排出負荷 (kg/年) = 排水量原単位 (L/頭・日) × 牛養飼数 (頭) × 牛排出濃度 (μg/L) × 365 × 10⁹</p> <p>・豚排出負荷 (kg/年) = 排水量原単位 (L/頭・日) × 豚養飼数 (頭) × 豚排出濃度 (μg/L) × 365 × 10⁹</p>
地表面系	<p>地表面系排出負荷 = 水田排出負荷 + 畑排出負荷 + 山林排出負荷 + 市街地排出負荷</p> <p>・水田排出負荷 (kg/年) = 水田面積 (km²) × 水田排出原単位 (kg/km²/日) × 365</p> <p>・畑排出負荷 (kg/年) = 畑面積 (km²) × 畑排出原単位 (kg/km²/日) × 365</p> <p>・山林排出負荷 (kg/年) = 山林面積 (km²) × 山林排出原単位 (kg/km²/日) × 365</p> <p>・市街地排出負荷 (kg/年) = 市街地面積 (km²) × 市街地排出原単位 (kg/km²/日) × 365</p>
下水処理場	<p>・下水処理場排出負荷 (kg/年) = {生活排水流入量 (L/日) + 工場排水流入量 (L/日)} × 下水道排水濃度 (μg/L) × 365 × 10⁹</p> <p>生活排水流入量 (L/日) = 下水道排水量原単位 (L/人・日) × 人口 (人) × (人口指数/100) × (下水道普及率/100)</p> <p>工場排水流入量 (L/日) = 排水量原単位 (m³/日・M[¥]) × 出荷額 (M[¥]) × (鉱工業生産指数/100) × (下水道普及率/100) × 10³</p>

表4-8(1) 負荷算定用原単位等

— 厚生省「水道水質保全対策ガイドライン」—

負荷源		排水量原単位		THMFP排水濃度原単位	
		*1		無印は厚生省集計資料より引用	
生活系	下水道	300	L/人・日		94 ㎎/L
	浄化槽 単独	50	L/人・日		1760 ㎎/L
	合併	300	L/人・日		94 *2 ㎎/L
	し尿処理	80	L/人・日		965 ㎎/L
	自家処理	50	L/人・日		0
	未処理雑排水	250	L/人・日		198 ㎎/L
畜産	牛頭数	90	L/頭・日		628 ㎎/L
	豚頭数	14	L/頭・日		628 ㎎/L
事業場系	製造品 食品	0.21	m ³ /日・百万円		185 ㎎/L
	出荷額 繊維	0.34	m ³ /日・百万円		457 ㎎/L
	衣服	0.02	m ³ /日・百万円		145 *3 ㎎/L
	木材	0.01	m ³ /日・百万円		145 *3 ㎎/L
	家具	0.02	m ³ /日・百万円		145 *3 ㎎/L
	パルプ	1.42	m ³ /日・百万円		587 ㎎/L
	出版	0.02	m ³ /日・百万円		145 *3 ㎎/L
	化学	0.26	m ³ /日・百万円		95 ㎎/L
	石油	0.03	m ³ /日・百万円		102 ㎎/L
	ゴム	0.03	m ³ /日・百万円		145 *3 ㎎/L
	皮革	0.47	m ³ /日・百万円		85 ㎎/L
	窯業	0.10	m ³ /日・百万円		61 ㎎/L
	鉄鋼	0.11	m ³ /日・百万円		51 ㎎/L
	非鉄	0.12	m ³ /日・百万円		51 ㎎/L
	金属	0.12	m ³ /日・百万円		51 ㎎/L
	一般機械	0.05	m ³ /日・百万円		53 ㎎/L
	電機	0.02	m ³ /日・百万円		145 *3 ㎎/L
	輸送機械	0.02	m ³ /日・百万円		53 ㎎/L
	精密機器	0.02	m ³ /日・百万円		53 ㎎/L
	その他	0.04	m ³ /日・百万円		145 ㎎/L
面源系	田面積			*5 通常期 0.24kg/km ² ・日	200日/年
				代力半期 3.80kg/km ² ・日	15日/年
				生育期 0.30kg/km ² ・日	150日/年
	畑面積				0.02kg/km ² ・日
	山林			10mm以上の日50日	0.02kg/km ² ・日
市街地等			10mm以上の日50日	0.08kg/km ² ・日	
その他				*4 0.02kg/km ² ・日	
*1 建設省「流域別下水道整備総合計画調査・指針と解説」より引用加工した。					
*2 合併処理浄化槽の処理水は下水道処理程度とした。					
*3 文献値の単純平均値を採用した。					
*4 山林と同値を設定した。					
*5 合田 健等「低沸点有機塩素系化合物の生成要因物質の制御に関する研究」					

表4-8(2) 負荷算定用原単位等

— 環境庁告示THMFP特定排水基準 —

産業分類 コード番号	業種及びその他の区分	下限値	上限値
012	畜産産業	1.3	5.2
121	畜産食品製造業	0.4	0.6
122	水産食品製造業	0.4	3.6
123	野菜缶詰・果実缶詰 ・農産保存食品製造業	0.8	1.1
129	その他の食品製造業	0.3	0.8
131	清涼飲料製造業	0.6	1.4
132	酒類製造業	0.4	0.5
14	繊維工業 (衣服、その他の繊維製品を除く)	0.6	1.7
181	パルプ製造業	1.0	1.7
182	紙製造業	0.4	0.8
202	無機化学工業製品製造業	1.0	4.3
203	有機化学工業製品製造業	1.0	4.5
206	医薬品製造業	0.4	0.6
286	金属被覆・彫刻業・熱処理業 (ほうろく鉄器を除く)	0.4	1.0
30	電気機械器具製造業	0.2	0.4
383	下水道業	0.2	0.3
721	洗濯業	0.2	0.3
8712	し尿処分量(し尿浄化槽を除く)	0.4	0.8
9521	と畜業	0.4	0.6
浄化槽	農業集落排水施設を除く施設	0.2	0.6
	農業集落排水施設	0.2	0.3
その他		0.2	—

THMFP (mg/L)

表4-8(3) 負荷算定用原単位等

一県公害防止条例-

○埼玉県公害防止条例(第16条) 生物化学的酸素要求量:25mg/L(日平均20mg/L)
○群馬県公害防止条例(第28条) 生物化学的酸素要求量:40mg/L(日平均30mg/L)

表4-8(4) 負荷算定用原単位等

発生源	原単位(kg/Yr/Mt)
食料品製造業	52.04
飲料・飼料・たばこ製造業	12.19
繊維工業	41.72
衣服・その他の繊維製品製造業	1.29
木材・木製品製造業	10.34
家具・装備品製造業	0.42
パルプ・紙・紙加工品製造業	313.63
出版・印刷・同関連製品	0.92
化学工業	114.10
石油製品・石炭製品製造業	3.21
プラスチック製品製造業	3.87
ゴム製品製造業	2.07
なめし革・同製品・毛皮製造業	136.18
窯業・土石製品製造業	5.04
鉄鋼業	161.80
非鉄金属製造業	1.43
金属製品製造業	3.13
一般機械器具製造業	0.87
電気機械器具製造業	0.88
輸送用機械器具製造業	0.97
精密機械器具製造業	2.31
その他の製造業	4.19

(2) 流達モデル

流達モデルは、発生源から排出された汚濁負荷が河川に流入する過程（流達）を表すモデルである。一般的には、集水領域全体の総排出負荷量のうち、実際に河川に流入する割合を示す「流達率」で算定する簡便法が主流であるが、今回の評価では、発生源から流入地点までの距離（流達距離）による流達量の違いを考慮できる指数減衰モデル（式（1））を用いた。このモデルは、流達距離を必要とするため、マッピングシステムの導入によって実用的になった。

$$L_{in}(x, y; i) = L_{out}(x, y) \exp\{-r(i) \cdot d(x, y; i)\} \quad \dots (1)$$

但し、 $L_{in}(x, y; i)$: メッシュ (x,y) からリーチ i への流達負荷量 (kg/年)

$L_{out}(x, y)$: メッシュ (x,y) からの排出負荷量 (kg/年)

$r(i)$: リーチ i の集水領域の流達係数 (1/km)

$d(x, y; i)$: メッシュ (x,y) からリーチ i への流達距離 (km)

集水領域内の汚濁負荷移動は、図4-5に模式的に示すように発生源が存在するメッシュから最近傍の河川流路に流入するものと仮定して、流達距離 d を計算した。流達係数 r は負荷の減衰度合いを示し、集水領域の流況（土壌、地表面勾配など）によって異なるので、後述のように各リーチの集水領域ごとに設定する。

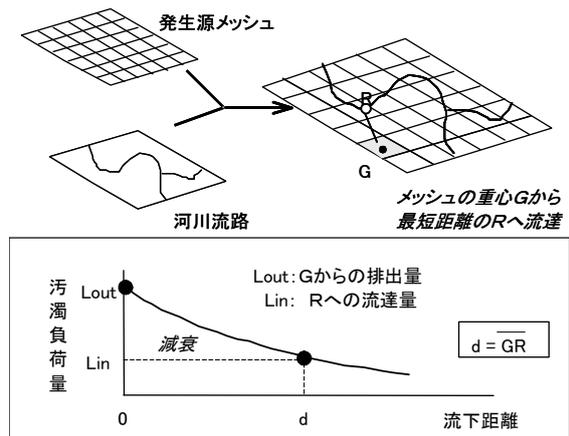


図4-5 排出負荷の流達移動の扱い

(3) 水質モデル（自浄・希釈モデル）

河川水質濃度の基礎式は式(2)に示すように、自浄作用による濃度減衰速度が濃度の一次式で表わされるとするが Streeter-Phelps 式⁵⁾が知られている。これを積分して濃度推定式の式(3)を得る。

$$\frac{dC}{dt} = -(k_1 + k_2)C \quad \dots (2)$$

但し、 C : 水質濃度 (mg/L)、 k_1 : 自己分解係数 (1/日)、
 k_2 : 沈殿・吸着除去係数 (1/日)

$$C = C_0 \exp\{-(k_1 + k_2)t\} \quad \dots (3)$$

但し、 C_0 : 初期水質濃度 (mg/L)、 t : 流下時間 (日)

式(3)により上流端から下流端まで順次下流へ水質濃度の変化を計算できるが、実際には河川上流からの流下だけでなく、集水領域から流入する汚濁負荷も存在し、また支川が多数合流するような利根川・荒川水系では、流量も流下方向に一定ではないため適用が難しい。また、式(3)で用いられている流下時間に関する情報は定期的に観測されておらず、流量から流下時間を推定する場合でも河床形状が必要となるなど、今回のような広範囲な水系での適用には実用的でない。そこで、本解析では、以下の3つの仮定を入れた式(4)を用いることとした。

- ・汚濁負荷量：流下過程での汚濁負荷量が、式(3)と同様に指数的に減少する
- ・流下距離：流下時間の代替変数として、負荷の減衰を流下距離で定式化できる
- ・自浄係数：自己分解と沈殿・吸着による除去速度係数を自浄係数という一つの係数で扱える

$$L(n) = \sum_{i=0}^n [L_{in}(i) \exp\{-K(i) \cdot DD(i, n)\}] \quad \dots (4)$$

$$DD(i, n) = \sum_{i=i}^n D(i) \quad \dots (5)$$

但し、L(n)：リーチ n への流下負荷量 (kg/年)

L_{in}(n)：リーチ i への流達負荷量 (kg/年)

K(i)：自浄係数 (1/km)

D(i)：リーチ i の流路距離 (km)

DD(i,n)：リーチ i からリーチ n までの総流路距離 (km)

汚濁負荷量からの水質濃度の算定には、河川水による汚濁負荷の希釈を表す式 (6) を用いた。右辺分母の定数 31536 は、次元を合わせるための数値である。

$$C(n) = L(n) / 31536Q(n) \quad \dots (6)$$

但し、C(n)：リーチ n の水質濃度 (mg/L)

Q(n)：リーチ n の下流端流量 (m³/sec)

(mg/L) = [(kg/年)/(m³/sec)] ÷ 31536

(4) モデルパラメータ調整

上述した流達モデル、水質モデルは、実績値によって調整すべきパラメータを含んでいる。リーチへの流下負荷量 L は、水質濃度 C と流量 Q の実績値から計算した実績流下負荷量 L とが一致するように r, K を調整することになる。2つのパラメータを同時に調整した場合、無数の準最適解が多数得られることが予想されたため、一方のみを調整対象とした。表 4-9 にまとめた両パラメータの意味する内容の比較から、集水領域ごとの差異が大きい流達係数 r を調整対象とし、自浄係数 K は、式 (7) に示す汚濁負荷収支式で設定した。

表4-9 モデルパラメータ比較

項目	内容・特徴
1) 流達係数 r [1/km]	<ul style="list-style-type: none"> ・排出負荷のうち、河川に流入する負荷の割合。厳密には地表面の性状や地面勾配などの関数となる。 ・年単位では1.0と設定しても大きな誤差がない(つまり、1年で見ると排出されたものは、総て河川に流入する)という報告があるものの地域差が大きい項目でもある。
2) 自浄係数 K [1/km]	<ul style="list-style-type: none"> ・河川に流下した負荷のうち、流下過程での分解、沈殿/吸着などによって減衰する負荷の速度係数 ・厳密には、水温、流速、DOなどの関数となるが、一般には水温のみを考慮する場合が多い。 ・河川の種類にもよるが、比較的定式化し易い。

$$K(n) = [\ln\{(L_s(n) + L_{in}(n)) / L_e(n)\}] / D(n) \quad \dots (7)$$

$$= [\ln\{Q_s(n) \cdot C_s(n) + L_{in}(n) / (Q_e(n) \cdot C_e(n))\}] / D(n)$$

但し、 $L_s(n)$ ：リーチ n の上流端への流入負荷 (kg/年)

$L_e(n)$ ：リーチ n の下流端への流入負荷 (kg/年)

$Q_s(n), Q_e(n)$ ：リーチ n の上流端, 下流端の流量 (m³/sec)

$C_s(n), C_e(n)$ ：リーチ n の上流端, 下流端の水質濃度 (mg/L)

基準年度である平成2年度の実績値を用いて設定した自浄係数K、及び流達係数 r の調整結果を表4-10にまとめた。これらパラメータは、経年変化がないものと仮定して用いた。

表4-10 各リーチの流達係数と自浄係数

リーチ No.	水質基点		リーチ長 (km)	流達係数(1/km)				自浄係数(1/km)			
	リーチ始点	リーチ終点		春期	夏期	秋期	冬期	春期	夏期	秋期	冬期
1	刀水橋	利根大堰	10.60	0.02	0.06	0.04	0.04	0.03	0.06	0.25	0.02
2	上武大橋	刀水橋	10.46	0.04	0.06	0.04	0.05	0.01	0.08	0.23	0.09
3	坂東大橋	上武大橋	7.56	0.05	0.02	0.08	0.04	0.03	0.10	0.44	0.02
4	神流川橋	坂東大橋	7.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.24	0.52	0.14
5	藤武橋	神流川橋	4.55	2.70	1.90	3.71	1.30	0.23	0.87	0.21	0.44
6	岩倉橋	坂東大橋	7.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.14	0.27	0.10
7	柳瀬橋	岩倉橋	2.57	1.80	1.90	1.76	1.37	0.21	0.41	1.24	0.15
8	窟川橋	柳瀬橋	4.76	2.61	2.95	5.66	2.02	0.39	0.04	0.29	0.08
9	高松	柳瀬橋	10.23	2.70	2.95	5.85	1.95	0.04	0.06	0.17	0.04
10	鼻高橋	高松	5.12	2.79	2.76	6.24	1.89	0.44	0.39	0.26	0.12
11	常慶橋	岩倉橋	6.47	2.70	2.85	3.71	1.95	0.01	0.13	0.54	0.10
12	福島橋	坂東大橋	8.78	0.02	0.10	0.04	0.04	0.11	0.08	0.13	0.02
13	群馬大橋	福島橋	11.89	0.05	0.21	0.04	0.13	0.07	0.05	0.12	0.01
14	坂東橋	群馬大橋	10.35	0.02	0.19	0.04	0.08	0.08	0.12	0.31	0.01
15	吾妻橋	坂東橋	12.78	0.07	0.21	0.43	0.09	0.12	0.05	0.10	0.07
16	栄橋	吾妻橋	51.55	0.00	0.01	0.00	0.01	0.20	0.11	0.31	0.06
17	岩本地先	坂東橋	21.57	0.23	0.38	0.74	0.25	0.07	0.23	0.38	0.01
18	小袖橋	岩本地先	13.19	0.02	0.13	0.16	0.14	0.07	0.10	0.22	0.01
19	月夜野橋	岩本地先	12.46	0.02	0.13	0.16	0.14	0.07	0.09	0.21	0.00
20	広瀬橋	月夜野橋	17.87	0.23	0.38	0.78	0.20	0.05	0.06	0.08	0.04
21	二恵橋	岩本地先	8.38	0.02	0.10	0.08	0.07	0.19	0.20	0.45	0.11
22	上江橋(入間川)	治水橋	3.55	0.07	0.06	0.16	0.01	0.41	0.33	0.86	0.25
23	治水橋	秋ヶ瀬取水堰	7.66	0.09	0.13	0.16	0.05	0.13	0.11	0.08	0.09
24	入間大橋	上江橋(入間川)	2.87	1.89	1.81	4.10	1.37	0.27	0.43	0.31	0.01
25	落合橋(入間川)	入間大橋	6.42	2.43	2.85	5.66	1.95	0.11	0.12	0.06	0.03
26	刺橋	入間大橋	8.69	2.25	2.76	5.85	1.89	0.09	0.09	0.25	0.05
27	落合橋(越辺川)	入間大橋	6.71	1.89	2.76	5.85	2.15	0.12	0.08	0.15	0.02
28	高麗川大橋	落合橋(越辺川)	13.24	2.25	3.33	6.24	2.60	0.11	0.24	0.32	0.05
29	東松山橋	落合橋(越辺川)	10.63	3.60	2.85	6.63	2.73	0.04	0.23	0.11	0.02
30	上江橋(荒川)	治水橋	3.56	0.07	0.04	0.16	0.03	0.42	0.55	1.09	0.08
31	開平	上江橋(荒川)	3.29	0.09	0.06	0.20	0.14	0.25	0.31	0.60	0.05
32	大福寺橋	開平	8.83	0.27	0.27	0.59	0.12	0.14	0.15	0.36	0.10
33	御成橋	開平	14.35	0.36	0.38	0.74	0.20	0.00	0.00	0.01	0.01
34	久下橋	御成橋	12.65	0.36	0.38	0.62	0.18	0.09	0.08	0.41	0.06
35	正喜橋	久下橋	21.57	2.70	2.85	5.66	1.89	0.04	0.03	0.14	0.01
36	親鼻橋	正喜橋	16.75	2.70	2.85	5.85	2.02	0.10	0.03	0.08	0.02
37	二瀬ダム	親鼻橋	39.20	2.61	2.85	6.44	1.89	0.02	0.01	0.02	0.02

4. 2. 4 評価の条件

(1) 将来予測時の想定条件

今回の評価では、将来の水質動向に影響する要因として、特に下水道整備に着目し、それぞれの将来変化条件を変えた四つの想定条件で汚濁負荷量を算定した。

- ・ 想定条件 1：下水道普及率が平成 2 年度実績で横ばい（公共投資凍結）
- ・ 想定条件 2：下水道普及率が 1%/年で向上（基本想定条件；現行に最も近い）
- ・ 想定条件 3：下水道普及率が 2%/年で向上（公共投資微増）
- ・ 想定条件 4：下水道普及率が 3%/年で向上（公共投資大幅増）

この他の主な要因である流域人口と鉱工業出荷額については、いずれの想定条件でも以下の推計を用いた。

- ・ 流域人口：厚生労働省人口問題研究所による推計（図 4-6；「都道府県別将来推計人口」¹⁷⁾）で推移する
- ・ 鉱工業出荷額：経済産業省による推計（図 4-7；「生産・出荷・在庫統計」¹⁸⁾）で推移する

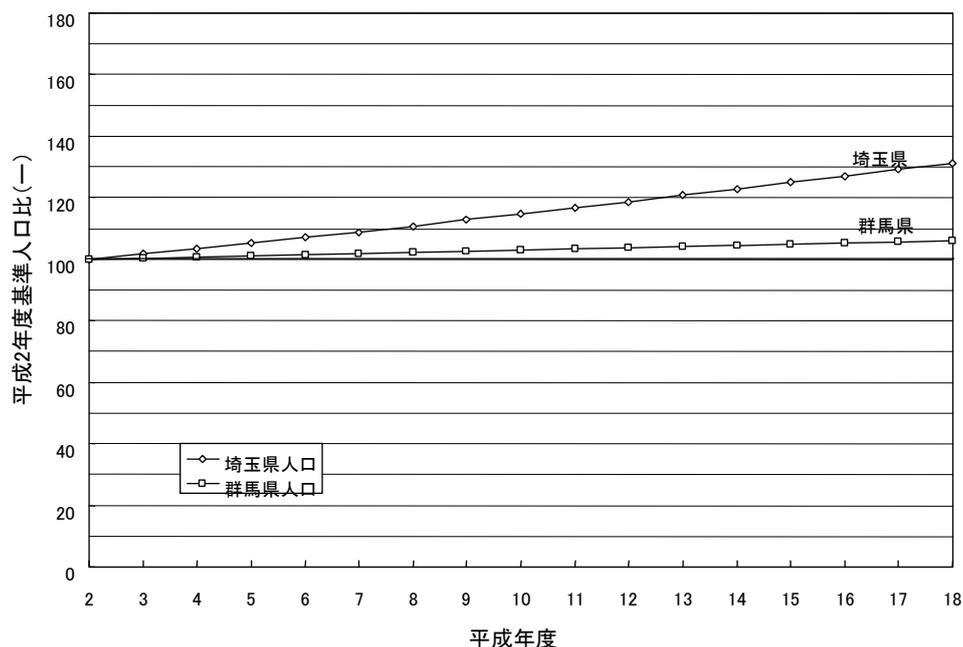


図4-6 群馬県と埼玉県の将来人口推計値

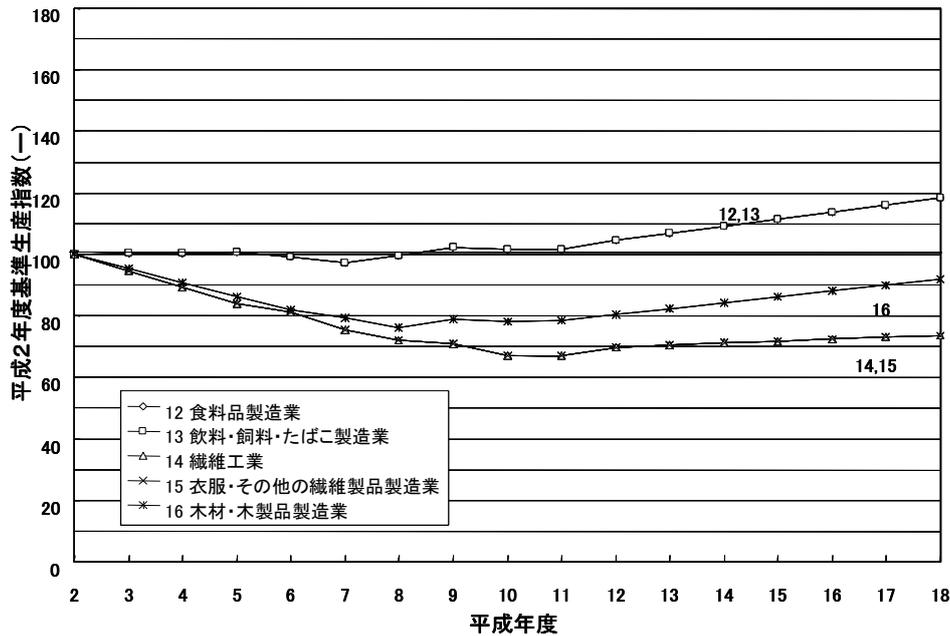


図4-7 製造業分類別の鉱工業生産指数

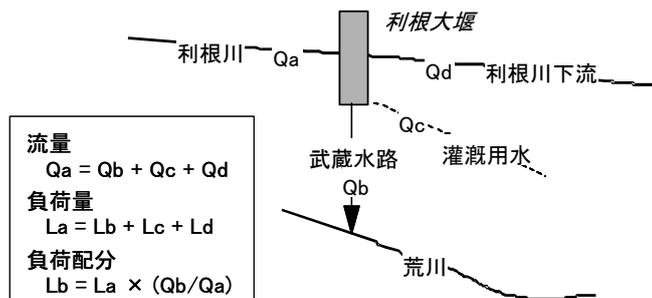
(2) 利根大堰における負荷配分の扱い

今回着目した朝霞浄水場が取水源とする荒川には、武蔵経路を經由して利根川上流の汚濁負荷が流入する。利根大堰では、①武蔵水路への取水、②灌漑用水への取水、③堰下流への放流の三つへ流量が配分される。今回の評価では、堰内の水質濃度が均一であると仮定して、流量配分比で汚濁負荷が配分されるものとした。

流量配分比は、流量データ（利根大堰取水量，武蔵水路流量，大堰下流放流量。灌漑用水量は前二者から算出）を用いて、季節ごとの平水流量（日平均水量の年間50%頻度値）を求めて計算した。流量配分比から計算した、荒川への汚濁負荷配分比を表4-11に示す。この汚濁負荷配分比を用いて、今回設定した「刀水橋～利根」リーチの汚濁負荷量のうち、「久下橋～御成橋」リーチへ流入する負荷量を計算した。

表4-11 利根大堰での負荷配分比

季節	流量(m ³ /sec)				荒川への負荷配分比 Qb/Qa
	利根大堰 Qa	武蔵水路 Qb	灌漑用水 Qc	大堰下流放流 Qd	
春期(4~6月)	213.47	34.93	51.17	127.38	0.164
夏期(7~9月)	191.61	26.92	51.21	113.49	0.140
秋期(10~12月)	251.18	32.35	6.10	212.73	0.129
冬期(1~3月)	155.74	35.70	5.28	114.75	0.229



ば過大評価となる可能性が高いところに、この方式の限界がある。また、流域総合計画の COD 原単位は、本来、下水道整備計画のためのものであるから、下水に流入する負荷を確実に処理できるような設備規模とするための安全率を見込んだ性格のものであるため、負荷量としては、やはり過大評価になったものと考えられる。

評価結果から、どの方式が最も正確であるかを検討することは難しいが、今回用いた THMFP 原単位は、厚生省が水源水質の評価のために設定した値であることから、河川水質を予測する本研究の目的に最も適合するものと思われる。これより、本解析では工場系負荷として、THMFP 原単位法による評価値を用いることとした。

4. 3. 2 流域の汚濁負荷排出量

(1) 基準年度の汚濁負荷量

利根川・荒川水系の流域全体で評価した総 THMFP 負荷量（下水道への流入分を含まない、河川への排出分）を図 4-9 に示す。基準年度の総負荷量は 193.6 ton-THMFP/年であった。負荷源ごとの内訳は、生活系 47.7%，工場系 4.9%，畜産系 2.6%，地表面系 6.2%，下水道 2.8% である。

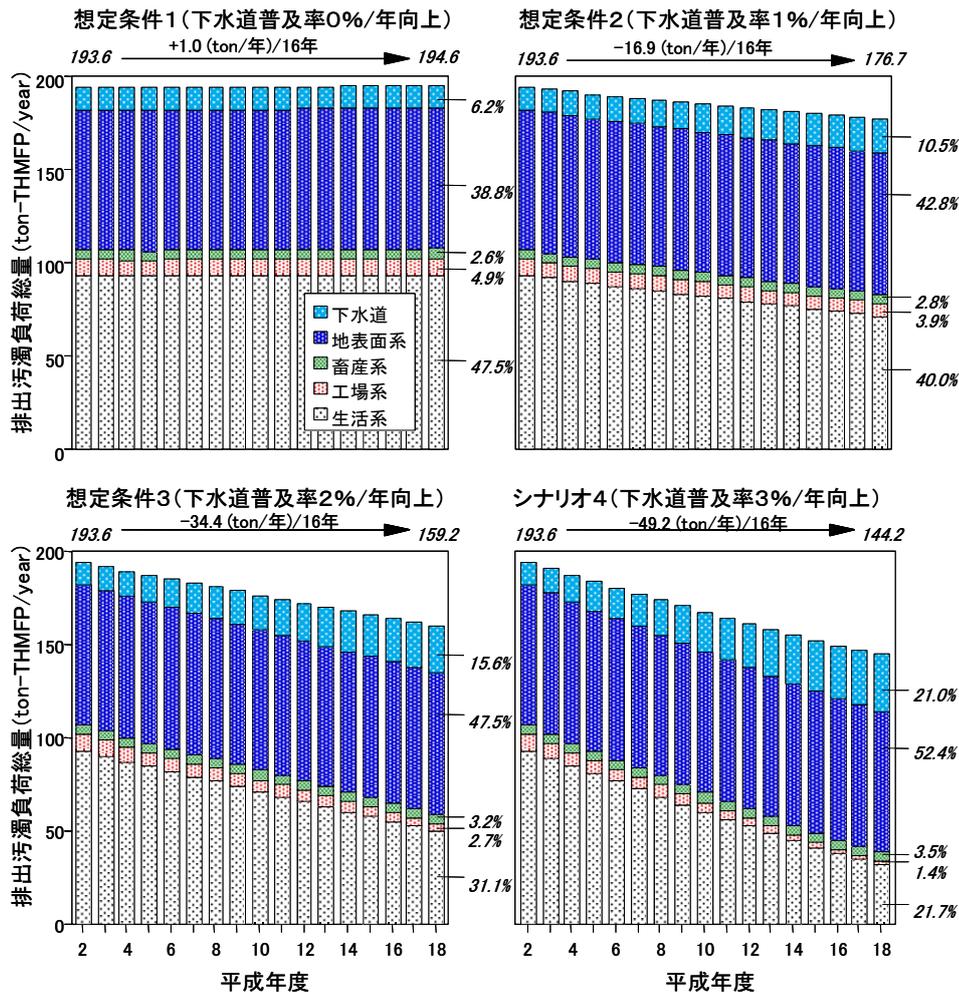


図4-9 流域全体の総THMFP排出負荷量計算結果

2.6%, 地表面系 39.0%, 下水処理場 6.1%で、生活系が半分程度を占める。また、人為的な活動に依らないバックグラウンド負荷の大部分を占める地表面系も、総負荷量の4割近くを占めていることが分かる。工場系の負荷量は5%未満あり、現状程度の排水濃度が維持されるのであれば、流域全体の水質汚濁への寄与は小さいものと言える。

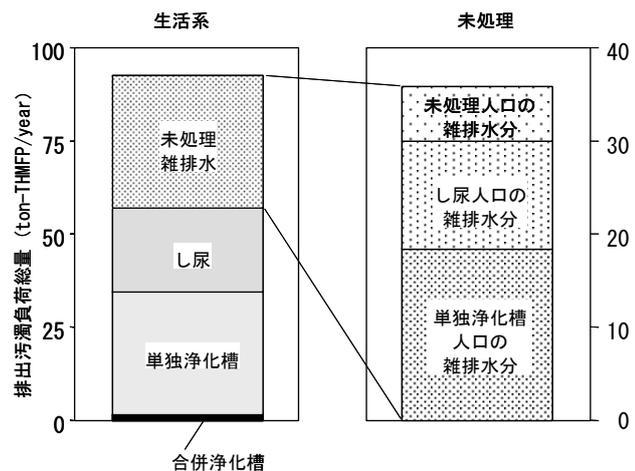


図4-12 基準年度の生活系算定負荷の内訳

水質汚濁への寄与が最も大きい生活系負荷の内訳を見ると、図4-10に示すように未処理雑排水（下水処理されない雑排水）が38.6%を占めるが、これとほぼ同等の汚濁負荷が単独浄化槽排水として排出されている。これより、生活系負荷の削減には、下水道整備により単独浄化槽の利用を廃止していくのが最も有効である。

(2) 下水道整備による将来汚濁負荷量の推移

下水道普及率が基準年度以降横ばいであるとした想定条件1（図4-9）では、負荷量が経年的に微増傾向を示したが、平成18年度までで僅かに1.0ton-THMFPの増加に留まる。増加は主に人口の伸びに起因するものであるが、秋が瀬堰までの集水領域人口約219万人（平成2年度）の半数以上を占める群馬県の推計人口の伸び自体が小さい（前出の図4-6）ためである。発生源別の内訳も殆ど変化が見られない。

下水道普及率が1%/年で増加する想定条件2では、負荷量は減少に転じている。発生源ごとの内訳では、生活系が平成2年度での47.7%から平成18年で40.0%に低減するほか、工場系の割合が4.6%から3.6%に減少する。一方、下水道は6.1%から7.4%へと増加しているが、これは下水道普及率が増加した分だけ、下水からの放流分が増加するためである。負荷量の絶対量で見ると、生活系で平成2年度の92.4ton-THMFP/年が平成18年には70.7ton-THMFP/年となり、2割以上減少している。このことから、流域人口の大幅な増加がない限りは、現行程度の下水道普及率向上で人口増加による生活系負荷の増加を十分相殺できる。

想定条件3と4についても、想定条件2とほぼ同様の傾向を示す。下水道普及率3%/年の向上を想定した想定条件4では、下水への流入水量が大きく増加するので、下水処理場放流水による排出負荷も平成2年度の11.8ton-THMFP/年から、平成18年度には30.3ton-THMFP/年にまで増加する。この場合、平成2年度での普及率が既に高い領域（例えば、朝霞市の83.6%など）では、浄化槽などによる処理分も含めると、普及率の伸びは飽和状態となるので、経年的な負荷の減少割合も小さくなる傾向にある。

下水道整備を進めると、生活系負荷の占める割合は小さくなり、逆に下水処理場からの排出負荷の寄与が大きくなることが確認できた。総排出負荷量の減少によって、相対的に地表面系負荷の寄与が大きくなる(想定条件4の平成18年度で52.4%)ので、分流式下水道の整備、雨水貯留設備の導入が重要と考える。

4. 4 水源河川水質予測による高度処理導入の検討

4. 4. 1 朝霞浄水場付近での基本想定条件での水質

下水道普及率が1%/年で向上するとした基本想定条件(想定条件2)での各季節ごとのTHMFP濃度の経年変化を図4-11に示す。ここに示す水質は、朝霞浄水場に最も近い「治水橋・秋が瀬取水堰」リーチの水質である。平成2年度の平水時と比較すると、春期0.0314mg/L、夏期0.0288mg/L、秋期0.0355mg/L、冬期0.0364mg/Lであり、冬期が最も高い濃度を示した。これらの季節間の差は、季節ごとの河川流量と自浄作用などの違いに起因する。実測値の傾向との比較のため、図4-12に秋が瀬取水堰でのTHMFP濃度の実測値を示した。これらの実測値では、全般的に流量の多い夏期に濃度が低く、冬期に高濃度となっており、推定結果もこれに符合している。

図4-11で最も濃度の高い冬期でみると、渇水時(年間の95%頻度値)には約0.07mg/L、低水時(年間の75%頻度値)でも0.05mg/L以上を示し、高度浄水設備導

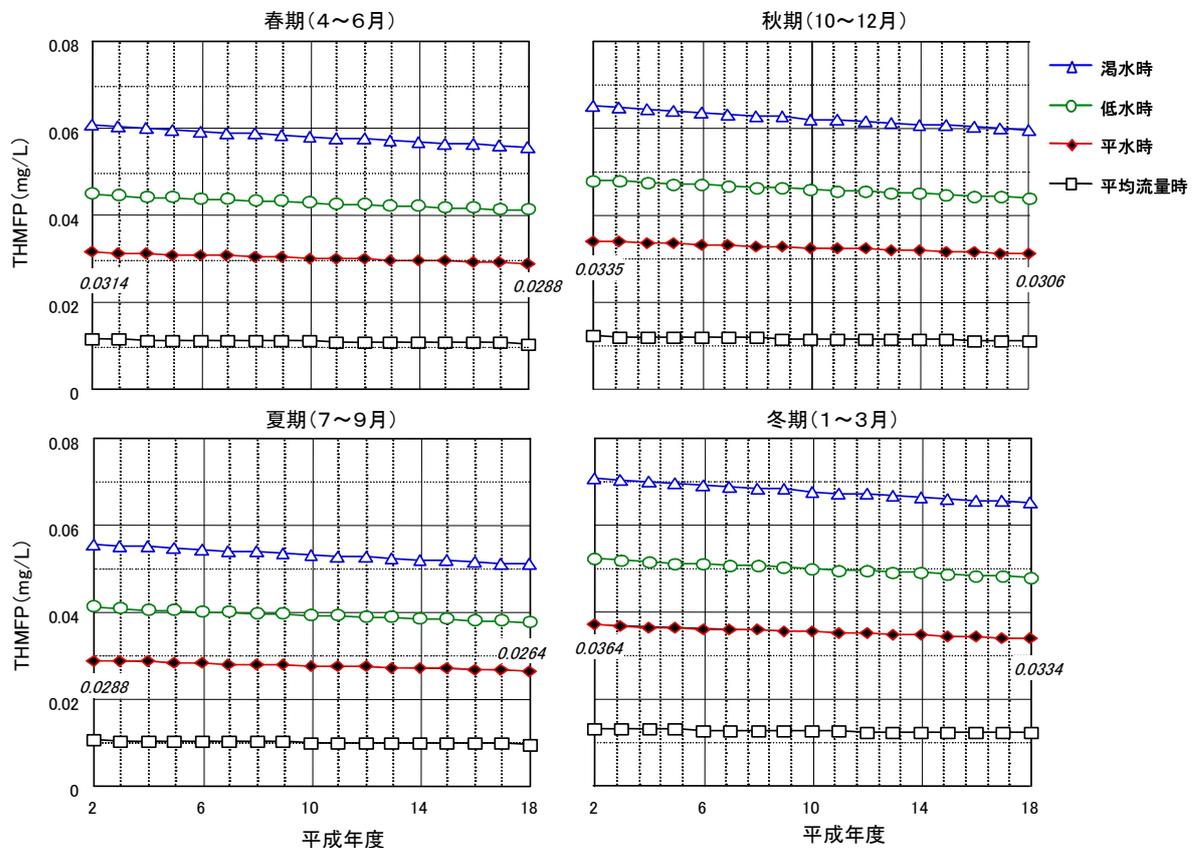


図4-11 下水道普及率1%/年向上でのTHMFP濃度予測結果

入の目安となる 0.03mg/L よりも高いレベルとなっている。

将来水質については、どの季節においても僅かな改善傾向となったが、平成 18 年度においても 10%以下の改善に留まるとの試算結果を得た。これらの結果から朝霞浄水場付近で将来的に THMFP が大幅に低減される可能性は小さく、高度浄水設備の導入が必要と考えられる。

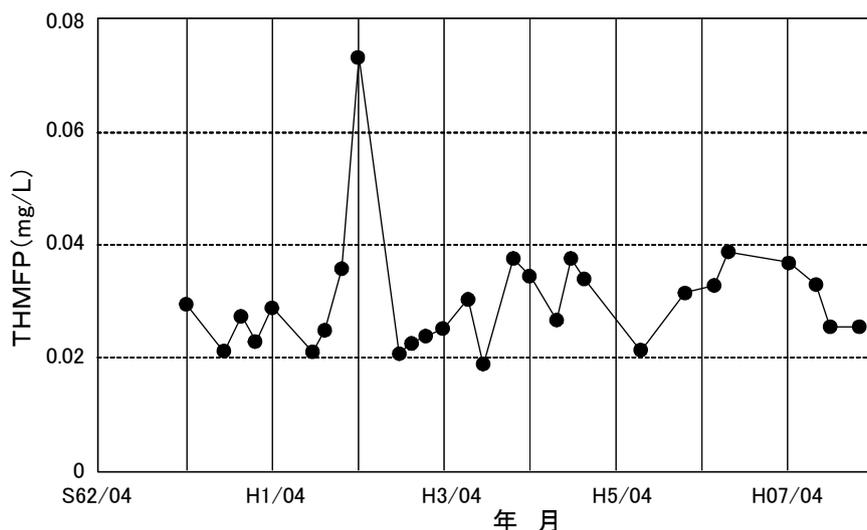


図4-12 秋が瀬堰のTHMFP濃度の過去実績値

4. 4. 2 下水道整備による水質の推移

想定条件 1～4 での冬期の THMFP 濃度の経年変化を図 4-13 に示す。下水道普及率が平成 2 年度から向上しないと想定した想定条件 1 では、前述したように汚濁負荷量が漸増することから、水質も同様に推移している。ただし、水質悪化の程度は $\mu\text{g/L}$ 程度で極めて小さく、ほぼ横ばいとみなせる。

想定条件 2 と想定条件 4 との比較により、下水道普及増加率の違いによる水質改善の差を見ることができる。平成 2～18 年度の THMFP 濃度の変化は、それぞれ -0.003mg/L と -0.009mg/L であり、想定条件 4 の方が 3 倍の水質改善がなされている。しかしながら、 $0.003\sim 0.009\text{mg/L}$ レベルの水質改善を実効ありと判断するかどうかは難しい。

下水道普及の増加率を大きくすれば、水質改善の度合いも大きくなるが、浄化槽普及率と合わせた普及率が 100% に近づくにつれて、その効果は飽和することになる。同時に下水処理場からの排出負荷の占める割合が大きくなるため、さらなる水質改善のためには、下水の高度処理導入が必要であると判断された。

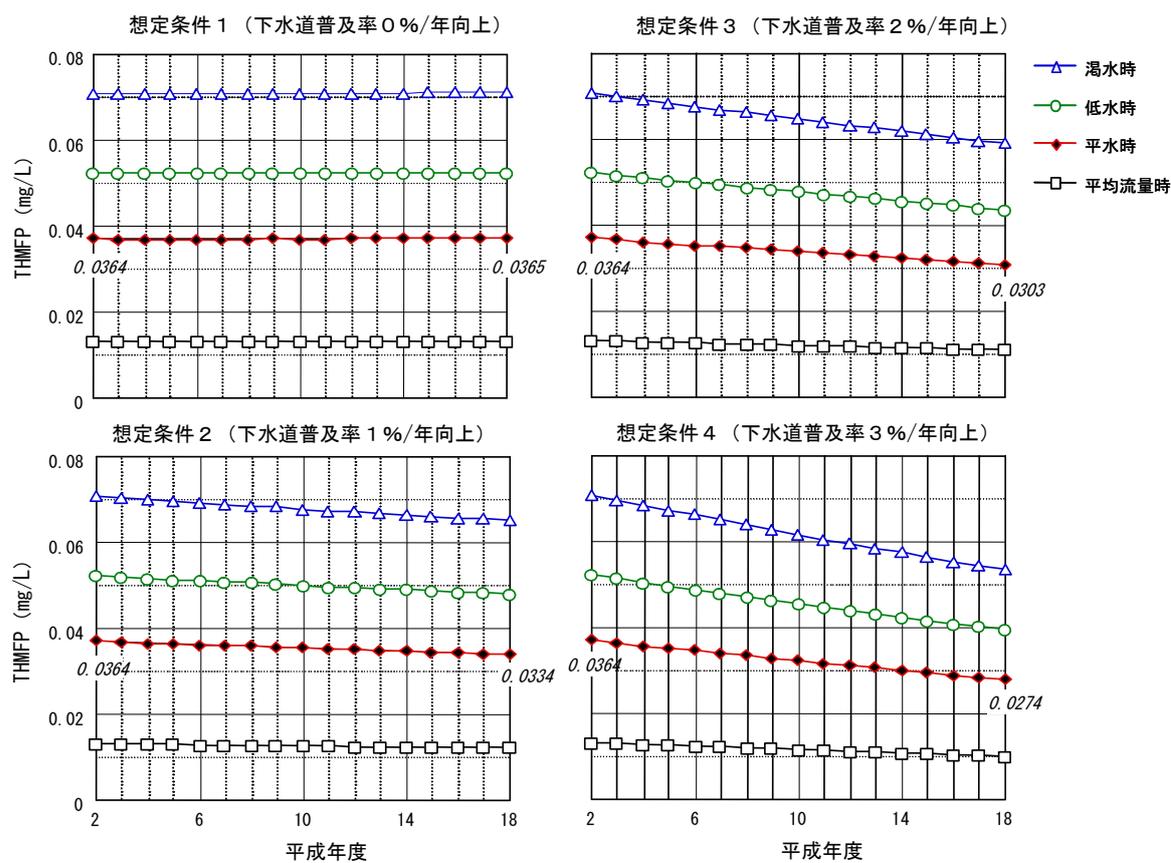


図4-13 冬期のTHMFP濃度予測結果

4. 4. 3 汚濁負荷シミュレーションの適用状況

本研究で開発したシステムは、平成9年度から東京都水道局に導入され、水源水質の長期予測などの業務に適用されている。同局が高度浄水処理の導入を進めるに当たっては、水源水質の将来動向を施設導入要否の主要な判断材料としており、本システムは、利根川水系の朝霞浄水場の高度浄水処理計画の際にも活用された。

朝霞浄水場（所在地は埼玉県朝霞市）は、東日本では最大かつ日本第2位の170万 m^3 /日の施設能力を有する大規模浄水場である。利根川水系の荒川の表流水を秋ヶ瀬取水堰で取水しているが、従前より原水水質のトリハロメタン生成能が高めに推移しており、消毒副生成物低減化の対策が検討されてきた。本研究が示した結果の通り、今後、毎年1%程度の下水道普及率の向上を見込んだとしても、人口増などによる排水負荷の増加により、取水地点におけるトリハロメタン生成能ほかの濃度は、ほぼ横ばいの状況で早急な改善が見込めない状況と判断されたことから、高度浄水施設の導入が決定された。

平成11年から建設が進められ、平成16年11月に第一期の85万 m^3 /日の高度浄水処理施設（オゾンおよび生物活性炭吸着による処理）が完成して、現在稼動中である。また、朝霞浄水場と同様に秋ヶ瀬取水堰から取水している同局の三園浄水場にお

いても、平成14年度より高度浄水施設の建設を開始している。

これらの例が示すように、GISをプラットフォームとする情報システムと、地理情報を活用した流域モデルは、水道事業者にとっての重要な計画策定に当たって、判断材料を提供しうる手段となることが期待できる。また、東京都水道局の事例では、過去に実施した同様な長期水質予測業務の工程が、GIS導入により大幅に短縮（約1/4）されており、業務効率化にも寄与できることが分かった。

4.5 河川流下シミュレーションによる水源水質事故対策

4.5.1 河川流下シミュレーションの意義

汚染物質が河川に流入する水源水質事故は継続的に発生しており²⁴⁾、事故時の対応は利水者（水道事業体）や河川管理者の重要な流域管理業務の一つである。不測の事故が発生した際には利水上の影響を予測し、可能な対策が取られている。例えば、水道事業体では、水源水質事故の通報が入ると同時に、流入汚染物質の浄水場取水口への流下時刻や濃度を推定し、これに基づき、必要な期間だけ取水停止をしたり、オイルフェンス設置、除濁措置のために人員配置が行われる。

こうした対策のために河川流下シミュレーションが適用できる。このシミュレーションは、汚染物質流入事故の発生時刻及び流入汚染物質濃度を事故発生情報として受け取り、利水上の要所への汚染物質の流下時刻、汚染物質濃度を予測し、取水停止措置等の意思決定を支援することを狙いとする。

4.5.2 河川流下シミュレーションシステムの概要

水源水質事故発生時の事故対策の意思決定支援には、①迅速な決定、②詳細な解析の2つの相反する要素を要求される。これに対応するため、本研究では、①大局的な状況を高速で予測する1次元シミュレーションシステムと、②局所的に詳細な解析が可能な2次元シミュレーションシステムの2種類を兼備することで意思決定に必要な2つの相反する要素を同時に満たすシステムを実現する。また、第2章で論じたGIS情報プラットフォーム上に構築することで、対象とする水系の詳細な地理情報を活用可能とし、境界条件などを正確に反映したシミュレーションを行うことを狙いとしている。

図4-14に河川流下シミュレーションシステム実行の流れを示す。大きく（1）条件設定モジュール、（2）予測計算モジュール、（3）結果表示モジュールの3つに分かれており、大局的傾向を把握する1次元シミュレーションシステムの計算終了後、2次元シミュレーションシステムを起動し、詳細分析を行う手順とした。

開発手順としては、1) 汚染物質流下・拡散モデルの検討、2) モデル解法の選定、3) GISへのモデル実装、4) フィールドスタディによる性能評価、の4つのステッ

プで流域管理への適用性を検証するアプローチとした。

本システムのフィールドスタディ対象流域を図4-15～図4-18に示す。対象とする河川水系は、荒川、利根川、多摩川の3水系で、図に示した点は監視地点として設定し、監視地点と監視地点の間を一つの計算単位区間として定義した。

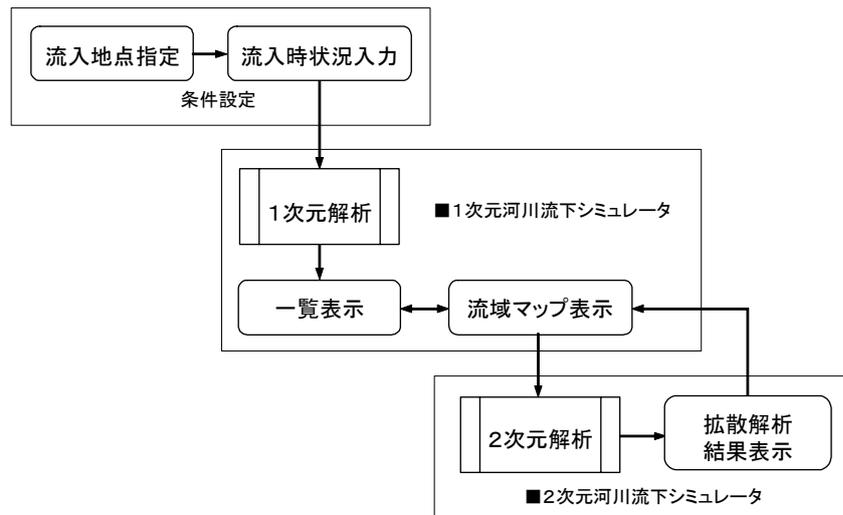


図4-14 河川流下シミュレーションシステムの実行フロー

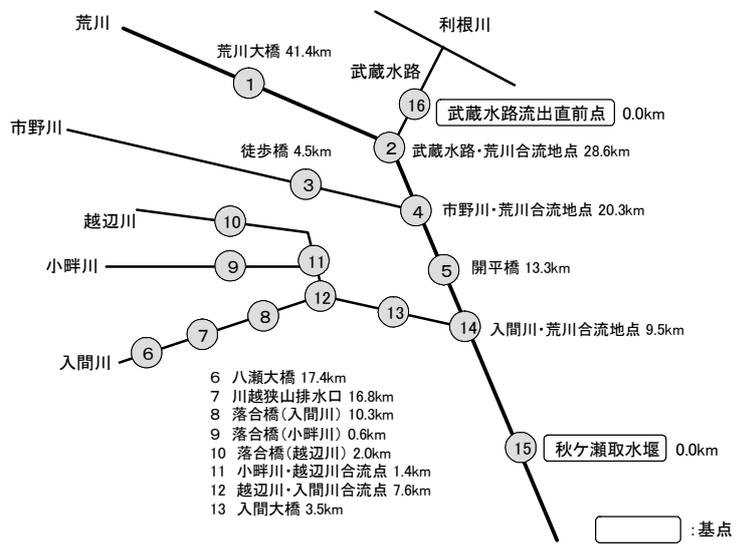


図4-15 荒川水系の監視地点

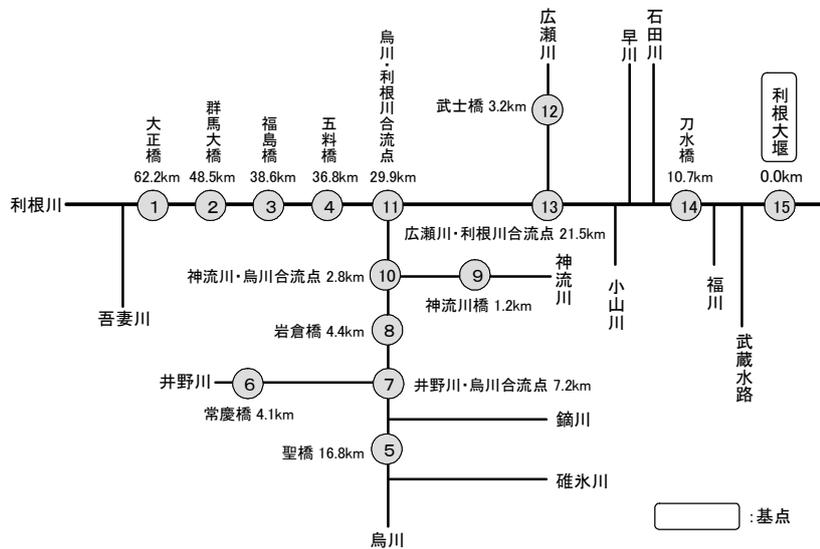


図4-16 利根川水系上流部の監視地点



図4-17 利根川水系下流部の監視地点

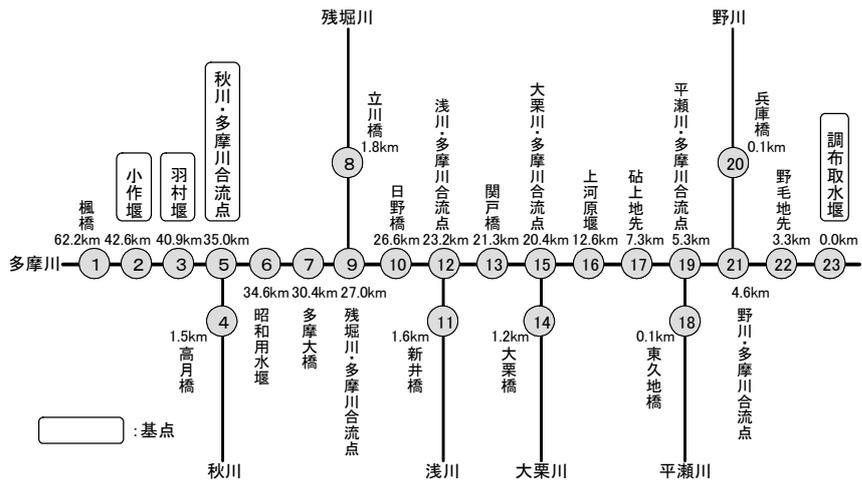


図4-18 多摩川水系の監視地点

4. 5. 3 汚染物質流下モデルの概要

本研究では川幅方向の物質輸送が考慮できる2次元シミュレータを開発することとした。基礎方程式としては、流体の流れ分布を決める2次元不等流方程式と汚染物質濃度変化を計算する拡散方程式の2つが必要となる。解法としての差分法はLax-Wendroff法、Leap Frog法など複数提唱されており、特に河川を対象にしたシミュレーションシステム開発を目的とした適切な解法の選定が課題となる。これらの解法モデルに関しては後に詳述する。

本研究の汚染物質流下モデルは、河川の川幅方向への汚染物質拡散の解析を目的としており、水質事故発生点付近や取水口周辺などの特定の地域の事故状況の詳細分析に利用可能なものとする。また、事故発生の可能性の高い地点からの仮想的な流入事故を仮定して事故評価をすることで、同種事故発生時の迅速対応に役立つという利用も想定している。

図4-19に2次元河川流下シミュレータの処理フローを示す。データ入力部では、推定開始監視地点番号、推定終了監視地点番号、メッシュ刻み幅、時間刻み幅、総シミュレーション時間の情報を入力する。1次元シミュレーション結果情報受け渡し部では、1次元モデルで使用した汚染物質の流入地点、流入時刻、初期濃度の情報に、2次元シミュレータを適用する区間の上流監視地点と下流監視地点に於ける流速と流積、及び該当区間の区間流速、区間流積の情報を1次元シミュレータの出力結果より抜粋したものを加え、データファイルとして受け取る。

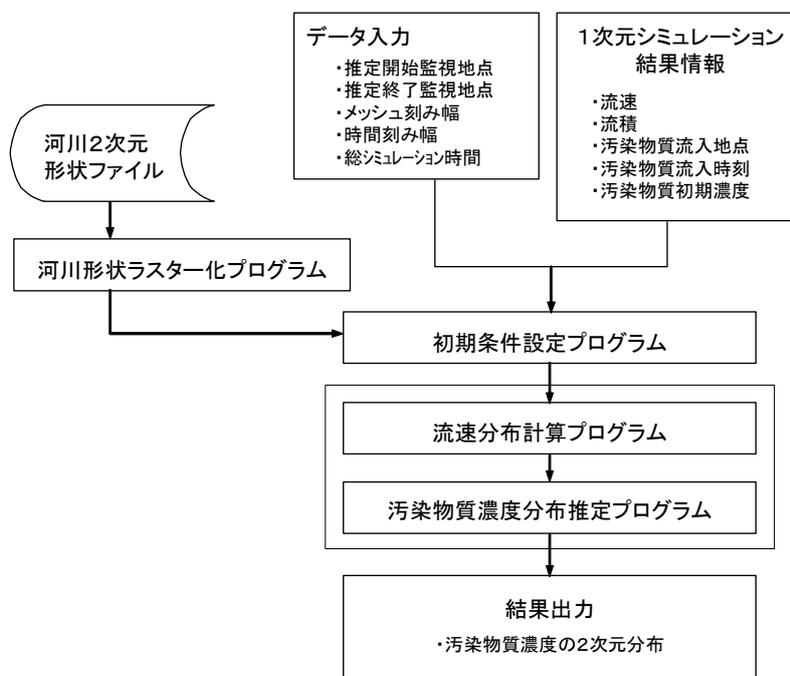


図4-19 2次元河川シミュレータの処理フロー

河川形状ラスタライズプログラムは、1次元流路+幅の形で記録されている河川形状のベクトルデータから、シミュレーション対象領域の形状データをメッシュタイプのデータ形式に変換する。

また、初期・境界条件設定プログラムは、河川流速計算に必要な河川流の初期速度と、河岸部での境界条件を設定する。初期速度は1次元シミュレータの計算値を基に算出する。また、河岸部の境界条件としては、河岸部においては河岸と垂直方向への流速が0となるという条件を採用した。流速分布計算プログラムは、2次元偏微分方程式の一般解法の一つである Two Step Lax-Wendroff 法（後述）を用いて河川流の時間変化を計算する。また、同時に汚染物質濃度分布推定プログラムを起動し、河川流の計算結果を基に汚染物質の拡散状態の時間的な変化を計算する。

出力結果として得られるのは、河川中の汚染物質濃度の2次元分布である。この汚染物質濃度分布は予め設定した時間間隔で記録されているため、汚染物質濃度の時間的な変化を地図上で視覚的に確認することが可能である。

4. 5. 4 河川形状のラスタライズ方式

本解析に於ける2次元河川の流路データは、河川中央部のサンプル点の座標とサンプル点に於ける川幅情報の組合せで与える。河川上の汚染物質濃度分布を推定するためには、この流路データをラスタライズ形式（メッシュで表現した形式）に変換する必要がある。ラスタライズ方式として図4-20に示す手順を開発し、システムに実装した。

[Step1] 川幅方向ベクトルの作成

各サンプル点において流路方向と垂直な向きに川幅方向ベクトルを作成する。このベクトルは、サンプル点における川幅情報の1/2の大きさを持つ。

[Step2] 1河川区間の包絡線の算出

サンプル点の間の1河川区間を対象に、Step1で求めた川幅方向ベクトルの端点を結んで包絡線を算出する。

[Step3] 河川包絡線の算出

Step2で求めた包絡線を繋ぎあわせることにより、シミュレーション対象領域全域に対する包絡線を算出する。

[Step4] 河川包絡長方形の算出

Step3で求めた河川包絡線をすべて含む矩形領域を算出する。

[Step5] メッシュへの分割

Step4の河川包絡長方形を、指定されたメッシュサイズで分割する。

[Step6] 河川及び河川内メッシュの検出による流路データのラスタライズ

Step3の河川包絡線と交わったメッシュを「河岸メッシュ」とし、ラスタライズ地図上で河川流路を表現する。

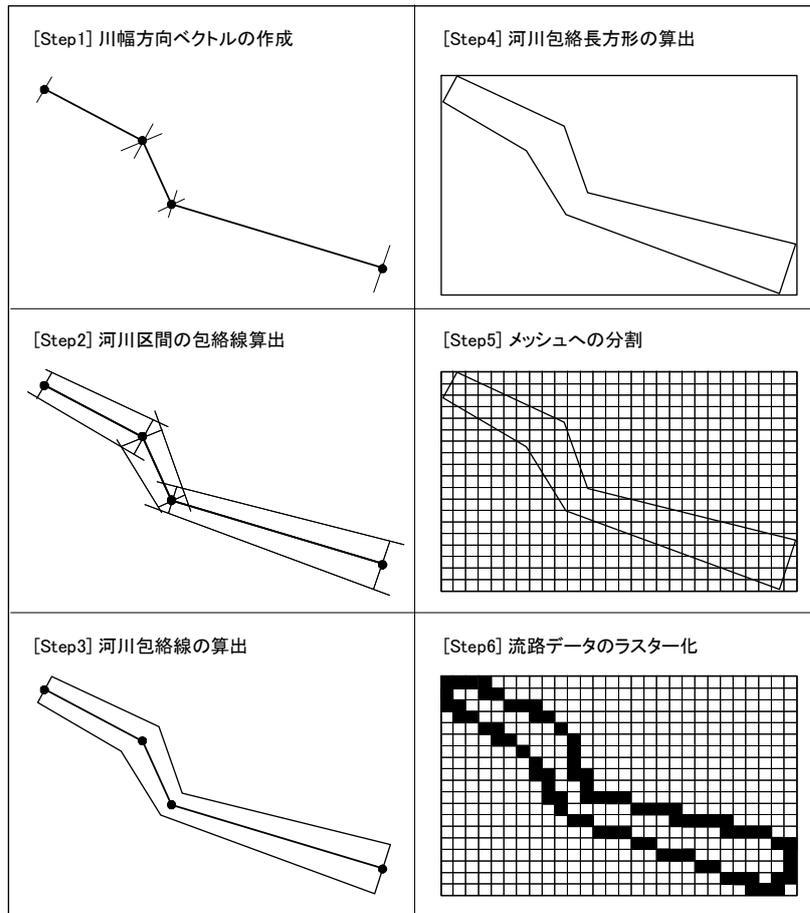


図4-20 河川流路データのラスタライズ手順

ここで作成したラスタライズ地図のメッシュにシミュレーション開始時刻での河川流速や汚染物質初期濃度の値を与え、次に説明する流速計算及び汚染物質濃度分布推定プログラムによって汚染物質濃度の時間変化を推定する。

4. 5. 5 流速計算及び汚染物質濃度分布推定

流速計算及び汚染物質濃度分布推定に用いた2次元モデルについて、その詳細を述べる。2次元モデルの河川流下シミュレータへの組み込みは、(1)基礎方程式(流速分布解析、汚染物質拡散解析)の決定、(2)流速分布計算用差分法の選択、(3)濃度計算用差分法の選択の3段階の手順で行った。

4. 5. 5. 1 基礎方程式

基礎方程式は、流速分布解析には連続の式(式(8))と運動量方程式(式(9-1), (9-2))を用い、汚染物質拡散解析には拡散方程式(式(19))を用いた。

連続の式：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad \dots (8)$$

運動量方程式：

$$\frac{1}{g} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{g} \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) u + \frac{\partial}{\partial x} (h+z) + \beta \sqrt{u^2 + v^2} u = 0 \quad \dots (9-1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{g} \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) v + \frac{\partial}{\partial y} (h+z) + \beta \sqrt{u^2 + v^2} v = 0 \quad \dots (9-2)$$

拡散方程式：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) C - \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) C \quad \dots (10)$$

但し、 u : x 方向の河川流速[m/s]、 v : y 方向の河川流速[m/s]、 h :河川標高[m]、 z :水深[m]、 C :汚染物質濃度[kg/m³]、 g :重力加速度[m/s²]、 β : 河床摩擦係数、 k : 拡散係数[m²/s]

図4-21に示すとおり、連続の式(式(8))は、ある領域に注目した場合、領域の水位変化が単位時間内にその領域に流れ込んだ流体の総量とその領域から流れ出した流体の総量の差で表せること、すなわち河川中での任意の領域で物質収支が零であることを表している。また、運動量方程式(式(9-1),式(9-2))は、微小な流体要素の運動を考えた場合、液体要素の速度変化は(1)慣性力(左辺第2項)、(2)重力勾配(左辺第3項)、(3)摩擦抵抗(左辺第4項)によって決定されることを示している。

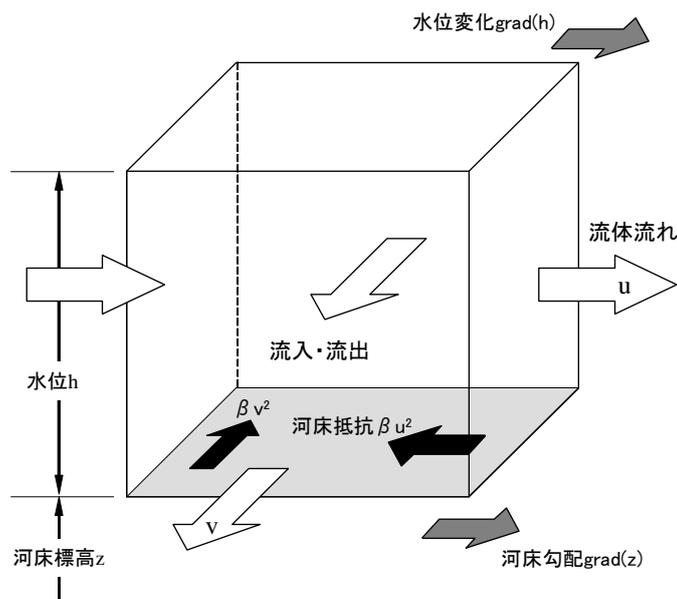


図4-21 流れ解析2次元モデル

また、図4-22に示すとおり、拡散方程式(式(10))は、ある領域に注目した場合、領域内の汚染物質濃度の変化は拡散(右辺第1項)と移流(右辺第2項)によって決まることを表している。

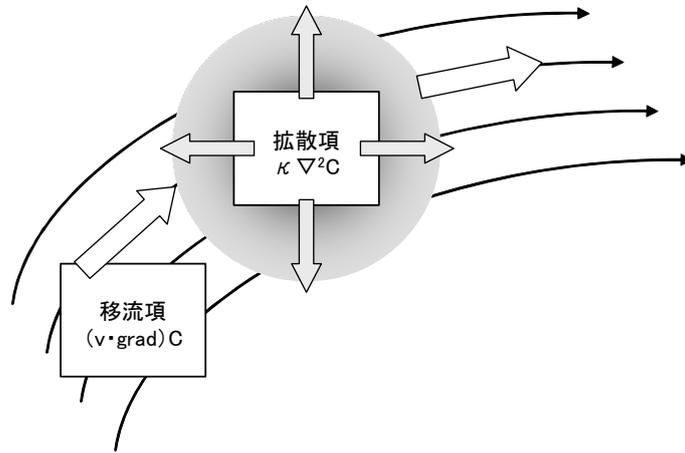


図4-22 拡散解析モデル

これらの式を差分式に直すと以下ようになる。式(11)は式(9)の、式(12-1)、式(12-2)は式(10)の、式(13)は式(10)の差分式に対応する。

連続の式：

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} + u \frac{\Delta h}{\Delta x} + h \frac{\Delta u}{\Delta x} + v \frac{\Delta h}{\Delta y} + h \frac{\Delta v}{\Delta y} = 0 \quad \dots (11)$$

運動量方程式：

$$\frac{1}{g} \frac{\Delta u}{\Delta t} + \frac{1}{g} \left(u \frac{\Delta u}{\Delta x} + v \frac{\Delta u}{\Delta y} \right) + \frac{\Delta h}{\Delta x} + \frac{\Delta z}{\Delta x} + \beta \cdot |u| \cdot u = 0 \quad \dots (12-1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\Delta v}{\Delta t} + \frac{1}{g} \left(u \frac{\Delta v}{\Delta x} + v \frac{\Delta v}{\Delta y} \right) + \frac{\Delta h}{\Delta y} + \frac{\Delta z}{\Delta y} + \beta \cdot |v| \cdot v = 0 \quad \dots (12-2)$$

拡散方程式：

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = k \cdot \left(\frac{\Delta^2 C}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 C}{\Delta y^2} \right) - u \cdot \frac{\Delta C}{\Delta x} - v \cdot \frac{\Delta C}{\Delta y} \quad \dots (6)$$

4. 5. 5. 2 流速計算：Two-Step Lax Wendroff 法

2次元河川流下シミュレーションの数値計算法としては、差分法を用いた。差分法は、微分方程式の中の微分商を差分商で置換し、得られた差分方程式を解いてもとの微分方程式の近似解を得る方法であり、もともとの自然現象を微分方程式で表現するときの過程と逆の過程である。そのため、差分法は微分方程式の近似解法としては最

も自然で直接的な方法であり、解法の中に物理的な直感が取り入れやすいという利点を兼ね備えている。

差分法は連続関数から構成される元の数理モデルを、離散的な関数として扱うものであり、まず差分式を誘導する。この差分式の表現によって、前進型、中央型、後進型の3種類がある。一方、 $t=n \cdot \Delta t$ に於ける解が得られているときに、 $t=(n+1) \cdot \Delta t$ の解を求める方法は、差分の取り方によって2種類に分けられる。 $t=(n+1) \cdot \Delta t$ において、未知量が解かれた形であるものを **explicit** 型といい、直接的には解かれていないものを **implicit** 型と呼ぶ。一般に **explicit** 型は計算の高速性に優れ、**implicit** 型は計算安定性に優れているため、計算の高速性を重視する場合は前者、精度を考慮する場合は後者を採用することになる。

水理学で用いられる主要な差分法としては、以下のものが挙げられる。それぞれについて、特徴を説明する。

Leap Frog 法は、数値的散逸のない安定性の良い計算法で計算時間も比較的短い、その反面で数値分散が大きく、急激な変化を伴う現象に対しては計算精度上の問題を生じる。また、**Crank-Nicholson** 法は、数値的散逸のない無条件安定の計算法であるが、計算過程に於ける連立方程式の解法が煩雑な反復計算となり、一般に多くの計算時間を要するため、本解析のような大規模流には不適當である。

Lax-Wendroff 法は、数値計算に伴う数値的分散が比較的小さい計算法である。また、差分式が保存形であるため、急激な水深変化がある現象についても高精度の計算が可能である。しかしながら、計算過程において、係数行列の計算が必要であるため、アルゴリズムが煩雑となり計算時間が長くなる。なお、この短所に関しては、時間方向に2ステップの計算を行うことにより解決可能であり、この改良版アルゴリズムが本解析で使用した **Two-Step Lax Wendroff** 法である。

Two-Step Lax Wendroff 法の概略を次に示す。本手法は図4-23に示すように、差分を二段階に分割し、空間方向に $1/2$ メッシュずれた座標系 $(x + \Delta x/2, y + \Delta y/2)$ 上に、時間方向に $\Delta t/2$ 後の値を中間データテーブルとして生成する手法である。

差分の第一段階は次のような一般式で計算する。

平均値：

$$\bar{\xi} = \frac{1}{4} \{ \xi(x + \Delta x, y + \Delta y, t) + \xi(x + \Delta x, y, t) + \xi(x, y + \Delta y, t) + \xi(x, y, t) \} \quad \cdots (14)$$

x 方向一階差分：

$$\frac{\Delta \xi}{\Delta x} = \frac{1}{2\Delta x} \{ \xi(x + \Delta x, y + \Delta y, t) + \xi(x + \Delta x, y, t) - \xi(x, y + \Delta y, t) - \xi(x, y, t) \} \quad \cdots (15)$$

y 方向一階差分：

$$\frac{\Delta \xi}{\Delta y} = \frac{1}{2\Delta y} \{ \xi(x + \Delta x, y + \Delta y, t) - \xi(x + \Delta x, y, t) + \xi(x, y + \Delta y, t) - \xi(x, y, t) \} \quad \cdots (16)$$

時間方向一階差分：

$$\frac{\Delta \bar{\xi}}{\Delta t} = \frac{2}{\Delta t} \left\{ \xi \left(x + \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \bar{\xi} \right\} \quad \dots (17)$$

$\bar{\xi}$ は一般の変数を表し、 x 方向の速度を計算するときは ξ を u で置き換えて計算する。式(14)~(17)を式(11)~(13)から導出した差分式(11'),(12-1'),(12-2')に適用し、中間データテーブル上の座標系($x + \Delta x/2, y + \Delta y/2, t + \Delta t/2$)に於ける u, v, h を求める。

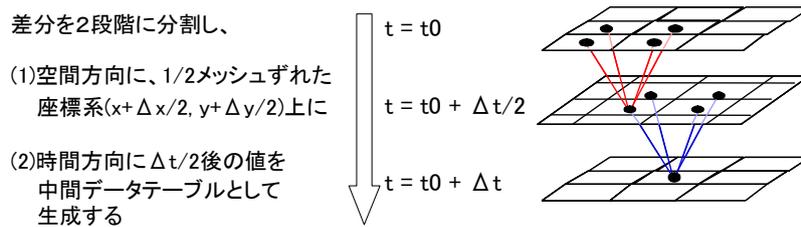


図4-23 Two-Step Lax Wendroff法

連続の式：

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} + u \frac{\Delta h}{\Delta x} + v \frac{\Delta h}{\Delta y} + h \frac{\Delta u}{\Delta x} + h \frac{\Delta v}{\Delta y} = 0 \quad \dots (11')$$

運動量方程式：

$$\frac{1}{g} \frac{\Delta u}{\Delta t} + \frac{1}{g} \left(\bar{u} \frac{\Delta u}{\Delta x} + \bar{v} \frac{\Delta u}{\Delta y} \right) + \frac{\Delta h}{\Delta x} + \frac{\Delta z}{\Delta x} + \beta \cdot |\bar{u}| \cdot \bar{u} = 0 \quad \dots (12-1')$$

$$\frac{1}{g} \frac{\Delta v}{\Delta t} + \frac{1}{g} \left(\bar{u} \frac{\Delta v}{\Delta x} + \bar{v} \frac{\Delta v}{\Delta y} \right) + \frac{\Delta h}{\Delta y} + \frac{\Delta z}{\Delta y} + \beta \cdot |\bar{v}| \cdot \bar{v} = 0 \quad \dots (12-2')$$

差分の第二段階は、以下の一般式(18)~(21)を差分式(11'),(12-1'),(12-2')に適用し、中間データテーブルの値を用いて元の座標系(x, y, t)上の $t = t + \Delta t$ に於ける u, v, h を求める。

平均値：

$$\begin{aligned} \bar{\xi} = \frac{1}{4} \{ & \xi \left(x + \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) + \xi \left(x + \frac{\Delta x}{2}, y - \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) \\ & + \xi \left(x - \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) + \xi \left(x - \frac{\Delta x}{2}, y - \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) \} \end{aligned} \quad \dots (18)$$

x 方向一階差分：

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \bar{\xi}}{\Delta x} = \frac{1}{2\Delta x} \{ & \xi \left(x + \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) + \xi \left(x + \frac{\Delta x}{2}, y - \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) \\ & - \xi \left(x - \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) - \xi \left(x - \frac{\Delta x}{2}, y - \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2} \right) \} \end{aligned} \quad \dots (19)$$

y 方向一階差分：

$$\frac{\Delta \xi}{\Delta y} = \frac{1}{2\Delta y} \left\{ \xi\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right) - \xi\left(x + \frac{\Delta x}{2}, y - \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right) \right. \\ \left. + \xi\left(x - \frac{\Delta x}{2}, y + \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right) - \xi\left(x - \frac{\Delta x}{2}, y - \frac{\Delta y}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}\right) \right\} \quad \dots (20)$$

時間方向一階差分：

$$\frac{\Delta \xi}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \{ \xi(x, y, t + \Delta t) - \xi(x, y, t) \} \quad \dots (21)$$

以上の手順により、 $t=t$ に於ける u , v , h の値から $t=t + \Delta t$ に於ける u , v , h の値を求めることができる。この手順を繰り返すことで、任意の時刻に於ける河川流速分布(u , v)を計算できる。

4. 5. 5. 3 濃度計算：風上差分法

次に、求めた河川流速分布(u , v)を用いて式(13)に示す拡散方程式におり汚染物質濃度を計算する。差分法としては、流れの向きによる影響を考慮できる点で有利な風上差分法を用いた。差分式は式(22)～(26)に示すとおりである。

x 方向二階差分：

$$\frac{\Delta^2 C(x, y, t)}{\Delta x^2} = \frac{1}{(\Delta x)^2} \{ C(x + \Delta x, y, t) - 2C(x, y, t) + C(x - \Delta x, y, t) \} \quad \dots (22)$$

y 方向二階差分：

$$\frac{\Delta^2 C(x, y, t)}{\Delta y^2} = \frac{1}{(\Delta y)^2} \{ C(x, y + \Delta y, t) - 2C(x, y, t) + C(x, y - \Delta y, t) \} \quad \dots (23)$$

x 方向一階差分：

$$u \cdot \frac{\Delta C(x, y, t)}{\Delta x} = \begin{cases} \frac{u(x, y, t)}{\Delta x} \{ C(x, y, t) - C(x - \Delta x, y, t) \} & (u > 0) \\ \frac{u(x, y, t)}{\Delta x} \{ C(x + \Delta x, y, t) - C(x, y, t) \} & (u < 0) \\ 0 & (u = 0) \end{cases} \quad \dots (24)$$

y 方向一階差分：

$$v \cdot \frac{\Delta C(x, y, t)}{\Delta y} = \begin{cases} \frac{v(x, y, t)}{\Delta y} \{C(x, y, t) - C(x, y - \Delta y, t)\} & (v > 0) \\ \frac{v(x, y, t)}{\Delta y} \{C(x, y + \Delta y, t) - C(x, y, t)\} & (v < 0) \\ 0 & (v = 0) \end{cases} \quad \dots (25)$$

時間方向一階差分：

$$\frac{\Delta C(x, y, t)}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \{C(x, y, t + \Delta t) - C(x, y, t)\} \quad \dots (26)$$

風上差分法は、式(24)、(25)で特徴づけられるように、流れの向きを考慮し、流れの上流方向からの影響のみを考える差分法である。上記の式(22)～(26)を、前述の式(13)に代入し、汚染物質濃度の時間変化を計算する。

4. 5. 6 モデルの適用条件

本シミュレータは差分法を用いているため、差分法に特有の計算中の発散という問題が予想される。この問題は、連続変数の方程式を離散化して解く場合に不可避であるが、所定の条件を満たす場合は発散を抑制できるということが知られている。

$$L/t \gg v \quad \dots (27)$$

但し、L:メッシュ幅、t:シミュレーションの時刻刻み幅、v:計算対象地点における河川の実流速。記号「 \gg 」は左辺に較べて右辺が無視できる程度の量(通常 1/10～1/100 以下)であることを示す。

この条件は C.F.L.条件と呼ばれ、ここで採用した Two-Step Lax Wendroff 法を始めとする explicit 型の差分法の計算収束条件として知られている。本開発のシミュレーションシステムもこの条件が満たされている範囲で正常な計算が可能となる。逆に、この条件から外れる場合には、計算中の発散が生ずる可能性があり、適用上の限界が存在することになる。

4. 5. 7 フィールドスタディ結果

シミュレータの計算結果と計測値を比較した。計算対象は、東京都水道局の水源となる 4 水系(利根川水系上流、利根川水系下流・江戸川水系、荒川水系、多摩川水系)

から選んだ区間とした。各区間において、上流端付近で汚染物質流出事故を想定した。

計算条件である河川流速は表4-12に示すとおりである。汚染物質流入濃度は100mg/Lとした。モデルパラメータである水平方向の拡散係数は、Richardsonの4/3乗則に従うものとして、計算メッシュサイズ(10m四方)から算出した。また、河床摩擦係数は、Chezy係数の関数として、粗度係数と各地点の水深から算出した¹²⁾。

水源事故事例データは、東京都水道局が保有するテストデータを使用した。このテストデータは、事故時のフィールド計測値を元に準備されたもので、流下方向への相対的な濃度プロファイル値である。本来、個別の事故事例データでの性能評価が望ましいが、十分なデータが確保できないため、次善の手段として、上述のテストデータを用いた。

表4-12 汚染物質流下シミュレーション条件

対象水系	観測地点	基点流量[m ³ /sec]
利根川水系 上流	利根大堰	129.98
利根川水系 下流	利根大堰下流放流	77.33
	野田	114.00
荒川水系	武蔵水路	28.02
	秋ヶ瀬取水堰	70.50
多摩川水系	小作	12.56
	調布	17.62

・利根川水系上流

2次元シミュレータの計算結果と計測値との比較を図4-24に示す。ここでは、13.7kmの流下距離を約5時間で流下するケースを計算している。濃度について計算値の誤差が大きいのは、関越自動車道地点の約8mg/Lで、これは相対誤差11%に相当する。流下時間では、計算区間の最下流地点の群馬大橋で18minの誤差があり、これは相対誤差6%に相当する。

・利根川水系下流・江戸川水系

計算結果の比較を図4-25に示す。計算対象の流下距離が3.6kmと短いこともあり、誤差が小さい結果となっている。最下流地点の三国橋地点での流下時間の誤差が約2minであった。

・荒川水系

計算結果の比較を図4-26に示す。流下距離で12.8kmの計算区間に対して、最下流店での流下時間の誤差16minで、相対誤差では5%に相当する。汚染物濃度は良く再現できている。

・多摩川水系

計算結果の比較を図4-27に示す。流下時間、汚染物濃度の傾向が比較的良く再現できている。濃度誤差の最大は、睦橋地点の約3mg/Lであり、相対誤差では約7%に相当する。

予測精度については、その用途との見合いで要求レベルが異なる。水源水質事故対策向けの用途としては、利水上の重要地点で対策が必要な汚染物質濃度であるかどうか、また、対策が必要な場合にはその人員配置などの計画策定を判断できる程度の到達時刻の予測が必要である。本シミュレータのユーザである東京都水道局での実用上の精度として、濃度で±20%、時刻については最下流部で±1時間以内程度の誤差が目安とされている²⁵⁾。本シミュレータによる計算結果は、こうした実用上の必要条件を満足する精度との評価を得ている。

上述した計算結果例でみると、相対誤差で10%を越えるような誤差が生じるケースがあったものの、全般的には計測値の傾向を概ね再現することができており、河川水質事故時の判断を支援する情報としては、実用上許容される精度であると判断される。

ここで構築した河川シミュレータは、GISをプラットフォームとしたことにより、シミュレーションに必要な基本情報の多くを公開情報からの移植作業のみで取得することができている。実フィールドを対象とする場合には、こうした基本情報データベースの構築の労力が大きく、実務へのシミュレータ導入を阻害する要因の一つとなっている。GISの導入は、こうした要因を解消する手段として有効である。

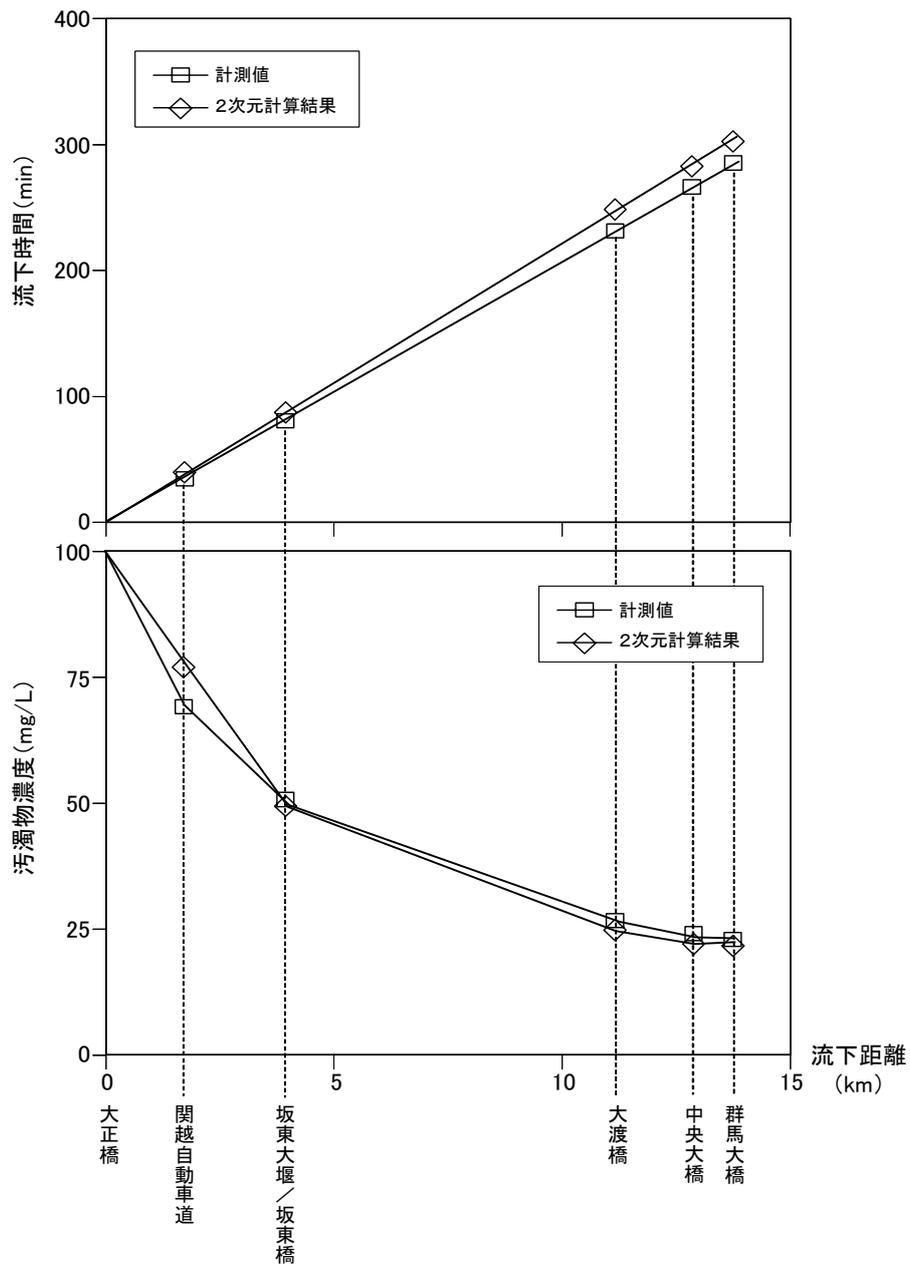


図4-24 利根川水系上流:大正橋～群馬大橋

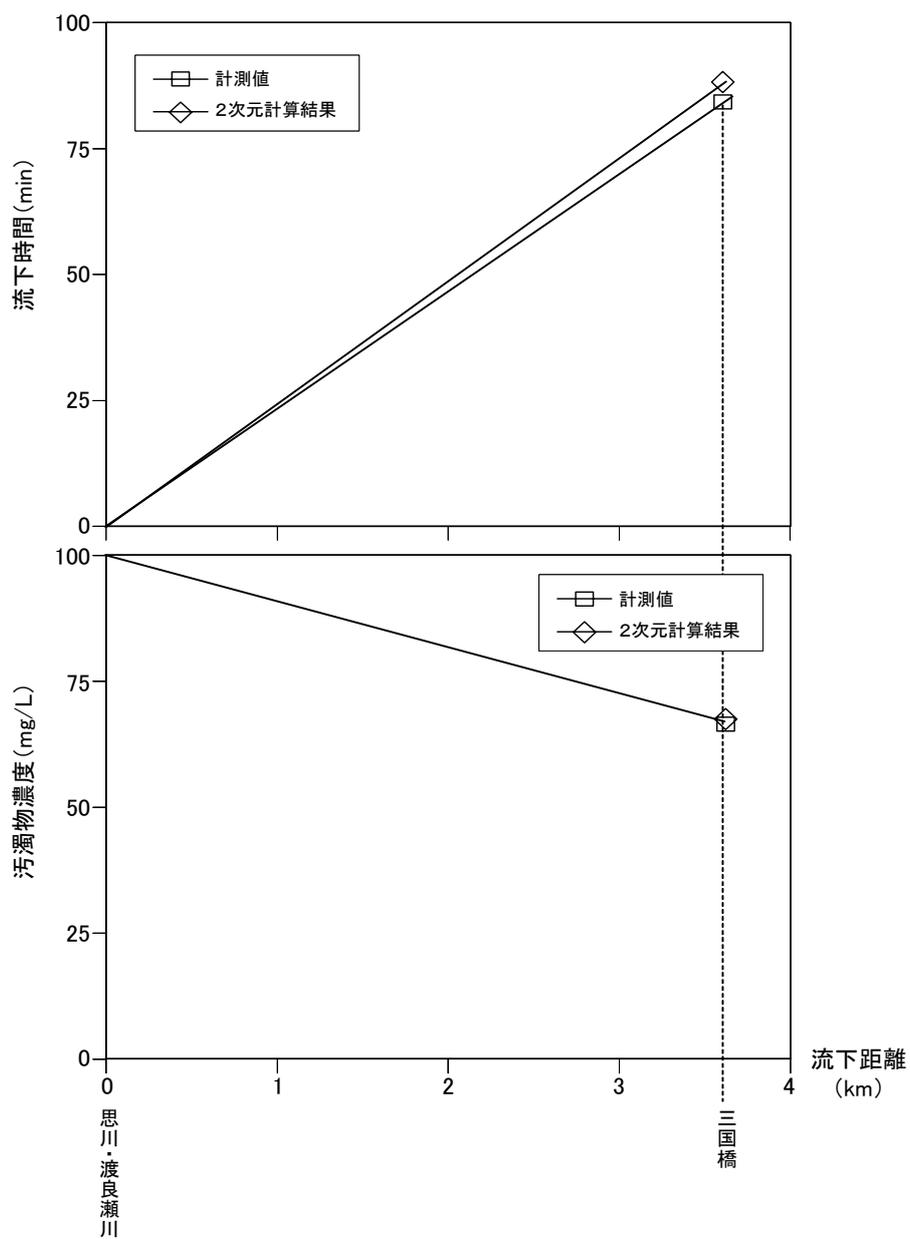


図4-25 利根川水系下流: 思川・渡良瀬川～三国橋

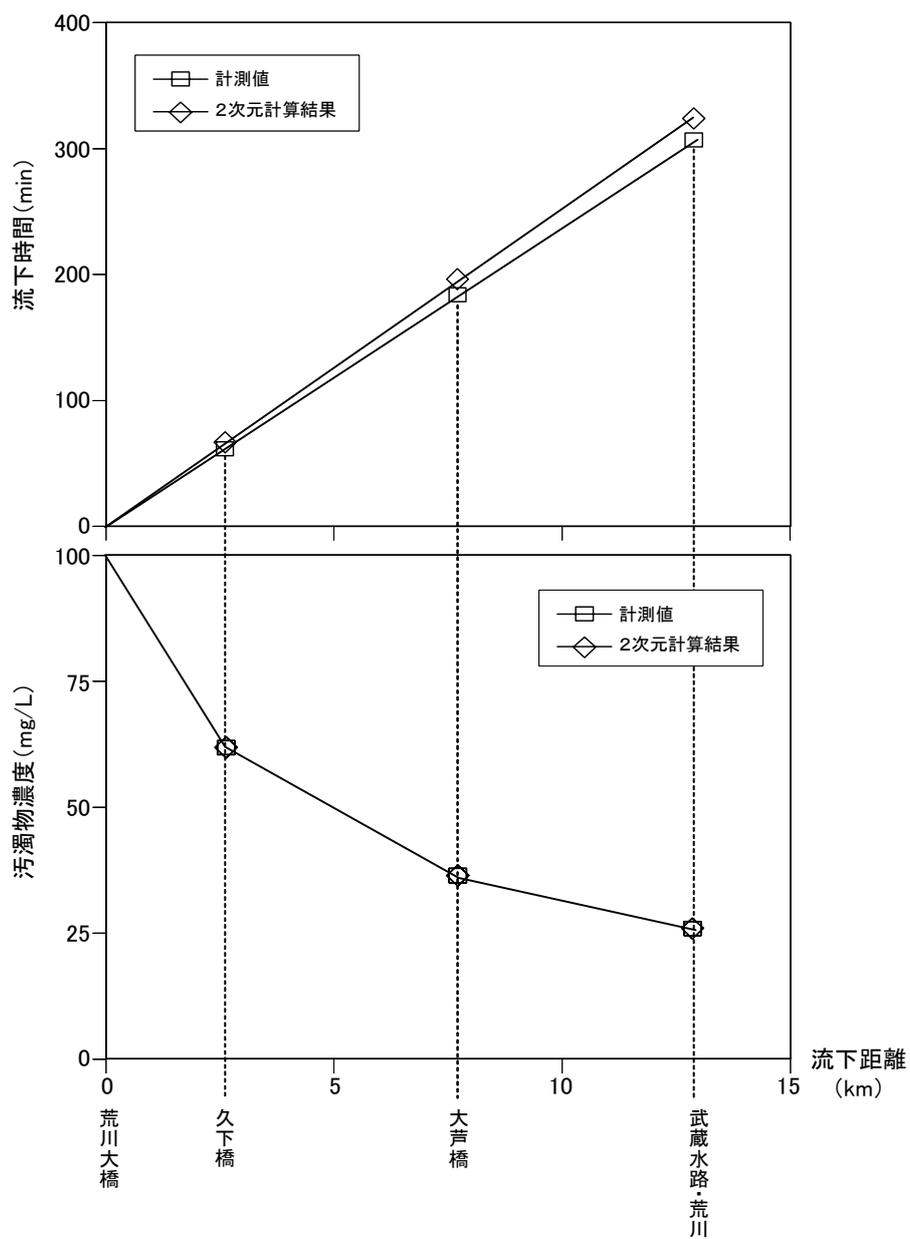


図4-26 荒川水系：荒川大橋～武蔵水路・荒川

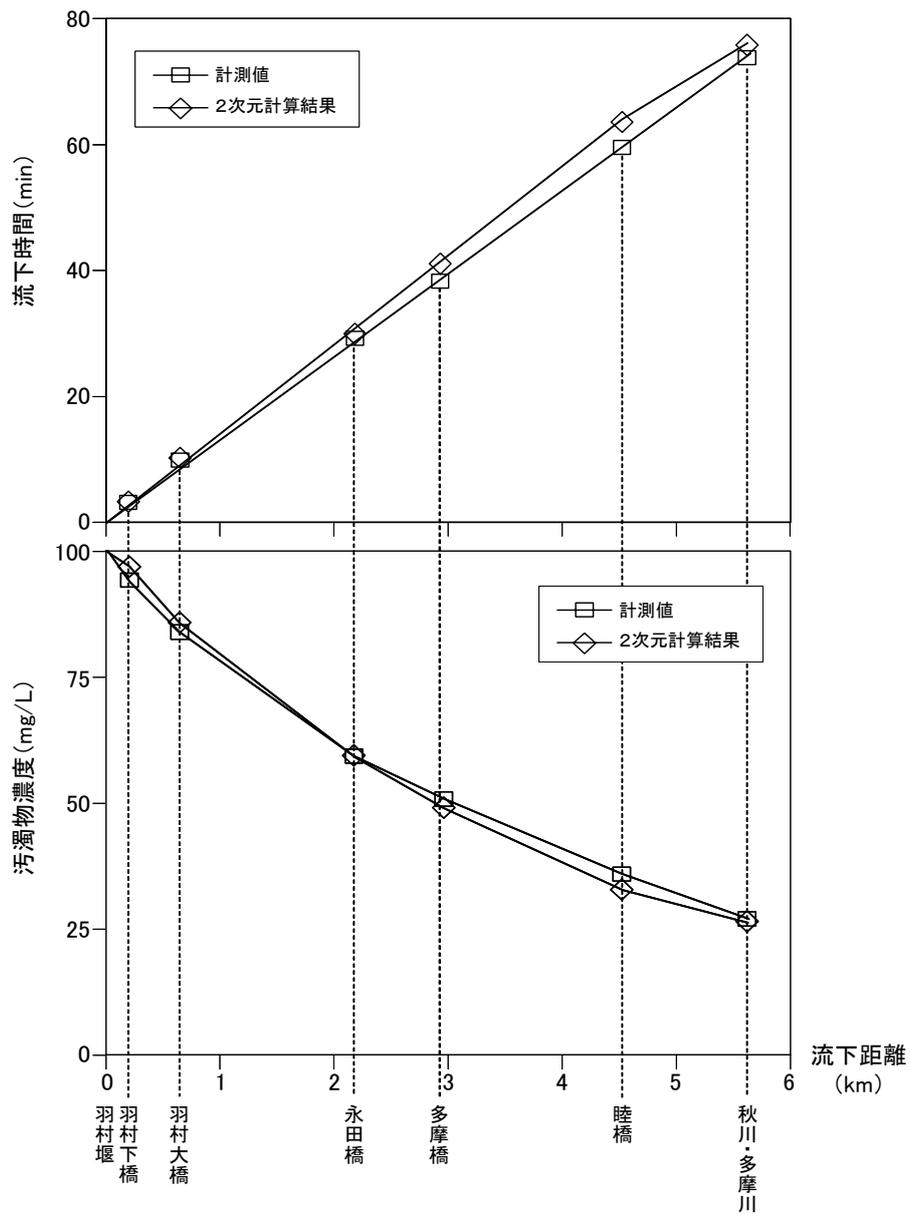


図4-27 多摩川水系:羽村堰~秋川・多摩

4. 5. 8 河川流下シミュレータの適用状況

本研究で開発した河川流下シミュレーションシステムは、東京都水道局水質センターにおいて稼動中である（2007年3月現在）。同センターでは、主要業務の一つとして、水源河川の水質事故時の対策に当たっている。軽微な水質事故も含めると、平均で1回/月程度の水質事故が発生しており、事故の重篤度を評価する目的で、その都度、本システムによるシミュレーションを実行している。得られた計算結果（汚染物質濃度、流下時刻）に従って、取水停止要否の判断、現場への除濁措置要否の判断などを行っている。

こうしたシミュレーションシステムの活用は、利水者サイドの流域管理実務に取り込まれており、同センターにおいて、今後も継続的に活用がなされる計画（2007年4月にシステム更新し、継続して運用）となっている。

4. 6 まとめ

水源保全計画や利水者サイドでの浄水設備導入計画の策定には、水源河川の長期的な水質予測が必要となる。本章では、流域管理に係る長期計画の策定支援を想定した流域管理向けのモデリング手法について検討した。

具体例として、水源河川の長期水質予測を目的とする汚濁負荷シミュレーションモデルを検討した。この結果、

- ・長期予測モデルとして、汚濁負荷の発生を説明できる流域人口や鉱工業出荷額などの情報に基づいて、流域から河川に流入する汚濁負荷量を算定し、河川水質の経年変化を予測するモデルを構築した。利用可能な流域情報に見合った簡便なモデルとし、流域の下水道普及率の推移など、様々な将来シナリオでの水質予測を行い、設備導入計画に関わる選択肢を具体的に比較検討可能とした。
- ・評価解析の事例として、利根川・荒川水系における微量有機成分（トリハロメタン生成能）濃度を長期予測した結果について示した。この解析結果により、浄水場での高度処理設備の導入可否を判断することができた。

さらに、本章では、河川水質事故の発生時または事前対策の判断材料を提供できる、河川流下シミュレーション技術を検討した。

- ・広域な水系を即時的、かつ詳細に解析する手段として、1次元と2次元河川モデルを組み合わせた河川流下シミュレーションモデルを構築し、汚染物質の流下を予測可能とした。
- ・GISプラットフォーム上にモデルを実装したシミュレーションシステムを開発し、東京都を流域とする水系に適用した。この適用事例により、実用に供するレベルのシミュレーション性能を実現できることを確認した。これにより、GISプラットフォームによるアプリケーションが、流域管理業務に有効であることを示した。

4. 7 参考文献

- 1) 圓佛伊智朗ほか (2000) 水系の長期計画を支援する水源水質動向予測システム、日立評論、Vol. 82, No. 8, pp. 55-58
- 2) 東京都水道局水質センター編 (1995) 水道水源水質の将来動向予測調査委託特記仕様書、東京都
- 3) 和田安彦ほか (1996) 湖沼集水領域での汚濁負荷の発生とその制御、水環境学会誌、Vol. 19, No. 2, pp. 161-169
- 4) 福島武彦ほか (1990) 流域管理とその支援システム (第1報)、環境システム研究、Vol. 18, pp. 129-135
- 5) 国松孝男ほか (1989) 河川汚濁のモデル解析、技報堂出版
- 6) G. Mihailov, et. al. (1995) The impact of runoff and sediment transport from the Provadiyska and Devnenska rivers on the Beloslav lake, Water Science and Technology, Vol. 32, No. 7, pp. 1-8
- 7) 原沢英夫ほか (1992) 流域管理とその支援システム (第2報)、環境システム研究、Vol. 20, pp. 93-100
- 8) 小林節子ほか (1996) 湖沼の水環境保全のための流域総合管理手法、水環境学会誌、Vol. 19, No. 2, pp. 121-131
- 9) 野村総合研究所 (1987) 水源水質動向調査報告書、東京都水道局報告書
- 10) 栗林宗人 (1980) 日本における合流式下水道問題とその対策の現状、第7回日米下水処理技術委員会会議録
- 11) 関根雅彦ほか (1986) 揖保川のポルーツグラフシミュレーション、衛生工学研究論文集、Vol. 22, pp. 103-110
- 12) 建設省国土地理院 (1996) 国土数値情報3次メッシュ磁気テープ、建設省
- 13) 財団法人統計情報研究開発センター (1991) 平成2年度国勢調査に関する地域メッシュ統計磁気テープ、総務庁
- 14) 財団法人通商産業調査会 (1991) 平成2年度工業統計表磁気テープ (市町村編)、通産省
- 15) 東京都水道局編 (1991) 平成2年度公共用水域の水質測定結果 (資料編)、東京都
- 16) 栃木県衛生環境部編 (1991) 平成2年度栃木県水質年表、栃木県
- 17) 厚生省人口問題研究所編 (1992) 日本の将来推計人口 (平成2年版)、厚生省
- 18) 通産省編 (1995) 生産・出荷・在庫統計、通産省
- 19) 水道水質保全対策検討会 (1995) 水道水質保全対策ガイドライン、厚生省
- 20) 社団法人日本下水道協会編 (1993) 流域別下水道整備総合計画調査 - 指針と解説 - 、建設省
- 21) 村上健 (1969) 河川の自浄作用及び汚濁負荷の流出率について、第5回衛生工学

- 研究討論会講演論文集、pp. 1-10
- 22) 松田奉康、圓佛伊智朗ほか（1999）地理情報利用による河川流域汚濁負荷量の予測、日本水道協会誌、Vol. 68, No. 4, pp. 11-21
 - 23) 松田奉康、圓佛伊智朗ほか（1999）河川流域汚濁負荷量に基づく長期水質予測、日本水道協会誌、Vol. 68, No. 10, pp. 2-13
 - 24) 国土交通省（2006）国土交通白書 2006
 - 25) 東京都水道局（1996）水道水源水質の将来動向予測調査委託報告書
 - 26) 岩佐義朗（1995）数値水理学、丸善
 - 27) 西畑勇夫（1973）河川工学、技報堂
 - 28) Landau and Lifshitz（1984）Fluid Mechanics、Pergamon Press
 - 29) 岡憲一郎ほか（1997）二次元河川シミュレータの開発、第 48 回全国水道研究発表会講演集、pp. 546-547
 - 30) 日本水道協会（2002）突発水質汚染の監視対策指針
 - 31) 東京都水道局（1987）水源水質動向調査報告書
 - 32) 依田幹雄、圓佛伊智朗（2006）流域管理のためのモニタリングソリューション、検査技術、Vol. 11 No. 4、pp. 43-48
 - 33) 圓佛伊智朗、依田幹雄（2003）IT 技術を駆使した水源水質監視/管理システム開発の試み、第 6 回水道技術国際シンポジウム講演集、pp. 113-120
 - 34) 日立製作所（1997）河川汚濁物流下シミュレータ、技術資料
 - 35) 土木学会（1999）水理公式集 平成 11 年版
 - 36) 土木学会（2004）環境工学公式・モデル・数値集

第5章 流域管理のためのGISデータモデリング

概要

流域管理の個別業務に対応する河川水質モデルなどを構築し、アプリケーション事例を積上げていくアプローチと並行して、流域管理システムの情報プラットフォームとなるGISの基本データ形式に適するモデリング手法の拡充も重要と考えた。

本章では、GISの基本データ形式であるラスタ型データに適した汎用的なモデリング手法の開発を目的に、セルラオートマトンモデルを検討した。このモデルは、経時的な状態変化を定義する遷移ルールによって流域内の現象を記述することができ、数値データのほか、属性情報も用いることができるため、GISを用いた流域のモデリングに高い適用性を有する。

本研究では、特にセルラオートマトンのモデリング手法として、ニューラルネットワークを用いた学習アルゴリズムにより遷移ルールを獲得する手法を提案し、シミュレーション実験により、その性能を確認した。これにより、GISへの高い適合性を有するモデリング手法を提供可能とした。

5.1 流域管理のためのGISデータモデリング

本研究では、流域に関連する情報を地図と対応させて取り扱うことができる地理情報システム（Geographic Information System; GIS）に着目し、流域管理のためのモデリングについて検討する。4章で述べたような、流域管理の個別業務に対応する河川水質モデルなどを構築し、アプリケーション事例を積上げていくアプローチと並行して、流域管理システムの情報プラットフォームとなるGISの基本データ形式に適するモデリング手法を拡充することも重要と考えた。

本章では、GISの基本データ形式であるラスタ型データに適したセルラオートマトンモデルに着目し、このための汎用的なモデリング手法を提案する。

5.1.1 セルラオートマトンモデル

セルラオートマトンは、図5-1に示すように対象とする空間を等分に区切った各格子（セルと呼称）に、その状態を表す変数を付与し、この状態変数の時間的な変化を遷移ルールで記述することにより、空間（セルスペース）内の現象をシミュレートするモデルである。このモデルの従来の応用例としては、流域内の土地利用用途の変遷モデル、森林火災の延焼モデルなど^{1)、2)、3)}が知られている。セルラオートマト

ンのモデル構造は、図5-2に示したGISの基本的なデータ形式であるラスタ型データと同一である。このため、流域に関連する事象のモデリングにおいて、GISデータベース中の流域データ（衛星画像など）を直接利用できるので、GISと組み合わせた応用が有望と考えている。

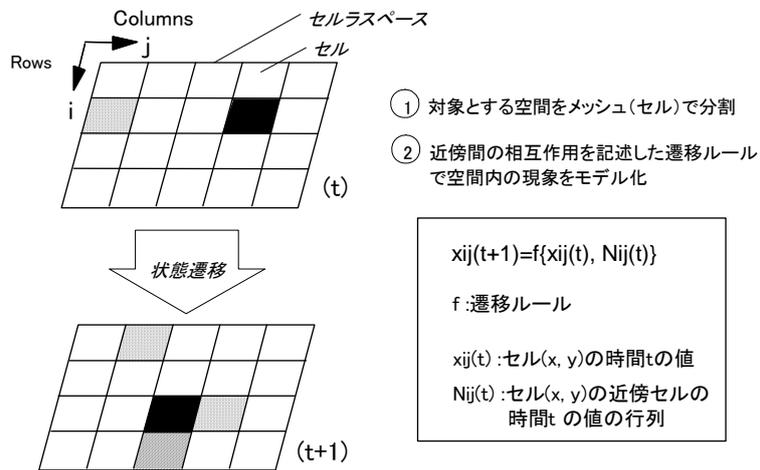


図5-1 セルラオートマトン

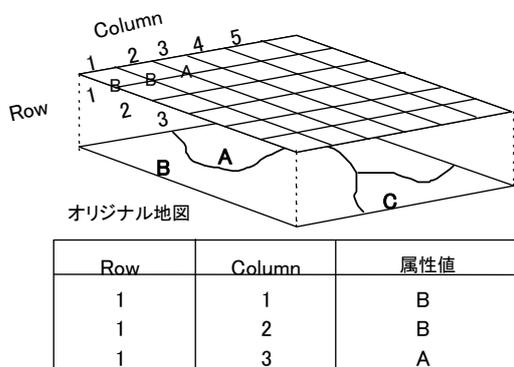


図5-2 ラスタ型データ形式

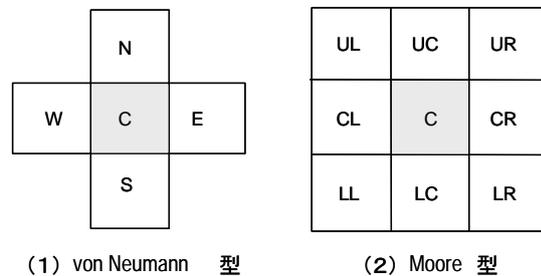


図5-3 セルラオートマトンの近傍のタイプ

セルラオートマトンの遷移ルールは、空間的には図5-3に示すような中心セルとその近傍セルとの関係を表す。近傍のタイプとしては、von Neumann型と呼ばれる4近傍、Moore型と呼ばれる8近傍が一般的である。時間的には、式(1)に示すような関係に従って、時刻tからt+1への状態変数の変化を表す。

$$x_{ij}(t+1) = f\{x_{ij}(t), N_{ij}(t)\} \quad \dots (1)$$

$x_{ij}(t)$: 中心セルcの時間tの状態変数値、
 f: 遷移ルール、
 $N_{ij}(t)$: 中心セルcの近傍セルの状態変数値行列

遷移規則の種類には、図5-4(1)に示す if-then 型ルールと(2)ルックアップテーブル型ルールとがある。一般に遷移規則の作成は、対象とする現象に関する既存の知見に基づいて行なうが、実フィールドの複雑な現象を扱う場合、過去のデータに基づいて、統計的または経験的に決定することも多い。実際のフィールドデータを用いてモデリングする際には、ルール作成を支援できる手段が必要である。

本研究では、新たなルール作成支援手段として、データからの学習（関数近似）機能を実現できるニューラルネットワークを用いたルール獲得方式を提案する。

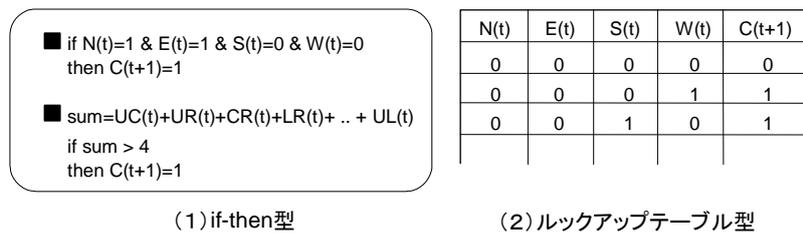


図5-4 遷移規則のタイプ

5. 1. 2 流域環境モデリングへの適用上の課題

セルラオートマトンを流域環境モデリングに適用する場合、従来の適用例にはなかった以下のような技法上の課題を解決する必要がある。

第一に、これまでの適用例でのセルスペースは、図5-5に示すような境界のないトーラスタイプ（右端境界上のセルは左端境界上のセルとする。この他、左端、上端、下端も同様）に限定されていた。しかしながら、実際の流域空間を対象とするモデリングでは、セルスペースの境界を非トーラスで取り扱う必要がある。

第二に、セルラオートマトンは、ユーザが定義した遷移規則を用いて現象をシミュレートするが、流域内の事象（物理現象）では、遷移規則そのものが不明である場合がある。このため、実用上の適用性を向上させるには、流域内の各種データを用いて、遷移規則を獲得する手法が必要である。

第一の課題に対しては、遷移規則の適用領域割当て方式で対応することとした。この方式は、セルスペースの外部境界上のセルとそれ以外のスペース内部のセルに対して、別々の遷移規則を適用する。外部境界上のセルは、境界外にセルが存在しないので、境界外セルの値を参照しないようなルールを割り当てるものとした。

第二の課題に対しては、流域の計測データの学習により、計測データに内在するセル間の相互作用関係を獲得し、if-then 型ルールとして明示する方式を考えた。本方式は、ニューラルネットワークモデルを応用するもので、詳細を次節で提案する。

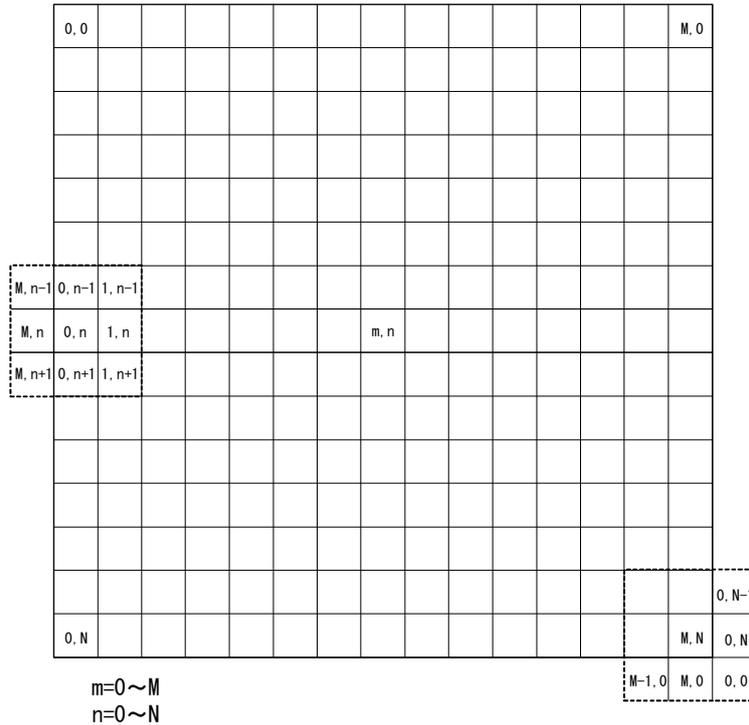


図5-5 トーラスタイプセルラスペース

5. 2 遷移ルール獲得方式の提案

5. 2. 1 提案方式の手順

本研究で提案するニューラルネットワーク応用によるルール獲得方式の手順を図5-6に示す。第一ステップでは、ニューラルネットワークに学習させる教師データを作成する。教師データは、観測したデータベースの中から、モデル化する対象を適切に表す代表的なデータを選択する。遷移ルールは、経時的な状態遷移を表すルールなので、観測データから、ニューラルネットワークへ入力させる説明変数（時刻 t ）と、出力させる目的変数（ヒートアイランドの例では熱移動量等）の値（時刻 $t + 1$ ）を選び、教師データとする。

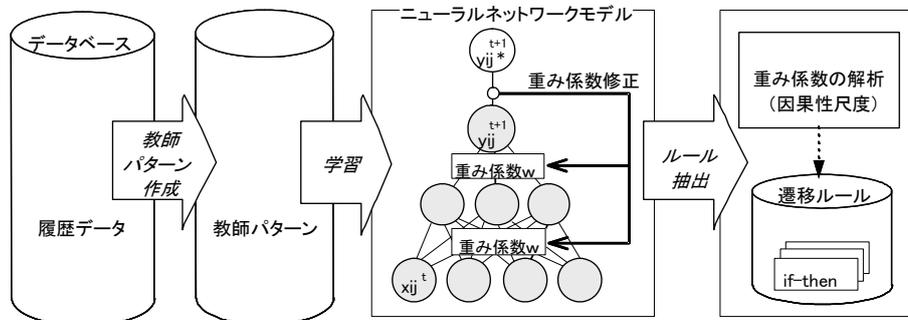


図5-6 遷移ルール獲得方式手順

5. 2. 2 ニューラルネットワークモデル

第二ステップでは、この教師データをニューラルネットワークで学習する。ニューラルネットワークモデルは、神経回路網の構成と学習機構を工学的に模擬したモデルである⁴⁾。一般に用いられているニューロン（神経細胞）は、重み係数付きの多入力1出力のニューロンの変換部分に、しきい値特性を有するシグモイド関数を用いたものである。重み係数を調整することで、ある入力信号パターンに対して、所定の信号パターンを出力できるようになる。この重み係数の調整を学習と呼ぶ。

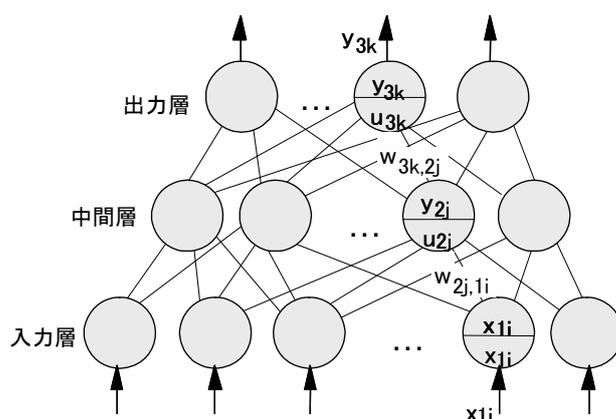


図5-7 階層型ニューラルネットワークの構造

階層型ニューラルネットワークモデルの構成を図5-7に示す。中間層のニューロン $2j$ は、式(2)に示すように入力 x_{1i} と重み係数 $w_{2j,1i}$ との積和 u_{2j} を求め、これを式(3)のシグモイド関数 f で変換した値を、出力 y_{2j} として出力層のニューロン $3k$ へ送る。ニューロン $3k$ は出力同様の動作で出力 y_{3k} を出力する。ただし、入力層のニューロン $1i$ の動作は、中間層、出力層と異なり、入力 x_{1i} を変換せず、そのまま中間層ニューロン $2j$ に出力する。

$$u_{2j} = \sum_i w_{2j,1i} \cdot x_{1i} \quad \dots (2)$$

$$y_{2j} = f(u_{2j}) = \frac{1}{1 + e^{-u_{2j}}} \quad \dots (3)$$

但し、 u_{2j} ：中間層ニューロン $2j$ への入力と重み係数の積和値

$w_{2j,1i}$ ：中間層ニューロン $2j$ と入力層ニューロン $1i$ 間の重み係数

x_{1i} ：入力層ニューロン $1i$ への入力

$w_{3k,2j}$ ：出力層ニューロン $3k$ と中間層ニューロン $2j$ 間の重み係数、

f ：シグモイド関数

5. 2. 3 ネットワークに獲得した学習内容評価

学習後のニューラルネットワークが、教師データの入出力を正しく再現できる場合には、ネットワーク内部に入出力間の因果関係が獲得されているといえる。この因果関係は重み係数行列として分散表現されているので、そのままでは関係を陽に表現することができない。

そこで本研究では、重み係数の解析で学習内容を評価する方法を検討した。まず最初に、着目した入力 x_{1i} が中間層を通過して、着目した出力 y_{3k} に及ぼす影響の度合いを解析的に調べた。このうち、中間層ニューロン $2j$ を通過する経路 j の影響は式 (4) で表される。

$$(\text{経路}j\text{の影響}) \propto \left(\frac{\partial y_{3k}}{\partial x_{1i}} \right)_{2j} \quad \dots (4)$$

式 (4) の右辺をニューラルネットワークの基本動作である式 (2)、(3) に基づいて変形すると、式 (5) で表現されることがわかる。

$$\left(\frac{\partial y_{3k}}{\partial x_{1i}} \right)_{2j} = \frac{\partial y_{3k}}{\partial u_{3k}} \cdot \frac{\partial u_{3k}}{\partial y_{2j}} \cdot \frac{\partial y_{2j}}{\partial u_{2j}} \cdot \frac{\partial u_{2j}}{\partial x_{1i}} = f'(u_{3k}) \cdot w_{3k,2j} \cdot f'(u_{2j}) \cdot w_{2j,1i} \quad \dots (5)$$

着目した入力 x_{1i} から着目した出力 y_{3k} に至る全経路について総和をとることにより、式 (6) を用いて両者の因果関係を定量的に評価することにした。ここで定義した $C_{3k,1i}$ を入力 x_{1i} と出力 y_{3k} の因果関係を評価する尺度として「因果性尺度」と呼ぶ。

$$C_{3k,1i} \equiv \sum_j \{ f'(u_{3k}) \cdot w_{3k,2j} \cdot f'(u_{2j}) \cdot w_{2j,1i} \} \quad \dots (6)$$

式 (6) のうち、シグモイド関数の微分値 $f'(u_{2j})$ は、入力層からの入力パターン ($x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1i}$) に依存するので、入出力間の因果関係も入力パターンごとに違ったものとなる。しかし入出力間の非線形性が強くない場合には、 u_{3k} と u_{2j} は、0 の近傍でしか変動しないので、 $f'(u_{3k})$ と $f'(u_{2j})$ を定数とみなすことができる。このとき、式 (6) は式 (7) のように、 $w_{3k,2j}$ と $w_{2j,1i}$ の積和で表現され、 $C_{3k,1i}$ を学習後の重み係数行列のみから求めることができる。

$$C_{3k,1i} \equiv \sum_j (w_{3k,2j} \cdot w_{2j,1i}) \quad \dots (7)$$

この方法は、入出力間の関係を入力パターンに依存しない重み係数のみで評価するものである。上述のように入力と出力の偏微分で両者の因果関係を評価する方法は、重回帰分析で偏回帰係数を求めるのと同じ発想であり、 $C_{3k,1i}$ は偏回帰係数と同様に、その値の符号と絶対値の大小によって、入出力間の関係を相対的に評価する尺度として用いることができる。

この因果性尺度を用いることにより、図5-6に示す手順でネットワークからルールを抽出し、明示することが可能となる。

5. 2. 4 ルール抽出向け学習アルゴリズムの提案

ルール抽出は、ネットワーク内の重み係数行列を用いて行うため、抽出されるルールの信頼性は、学習が適切に行われたかどうか依存する。ここでいう適切な学習とは、有限個の教師データの学習により、誤差を小さくすると同時に、教師データの母集団がもつ因果関係を選択的に重み係数行列に獲得できるような学習である。本研究では、この条件を満足するルール抽出に適した学習法について提案する。

(1) 従来の学習アルゴリズムと課題

階層型ニューラルネットワークの学習アルゴリズムとしては、Rumelhart⁴⁾による誤差逆伝搬法 (Error Backpropagation Method、以下 BP 法と略称) が広く用いられている。BP 法は、式 (8) に示すネットワークの出力 y_{3k} と教師データの教師値 y^*_{3k} との誤差二乗和 E_E を減少させるように重み係数を修正する再急降下法である。

$$E_E = \frac{1}{2} \sum_k (y^*_{3k} - y_{3k})^2 \quad \dots (8)$$

出力層と中間層間の重み係数 $w_{2k,2j}$ の修正量 $\Delta w_{3k,2j}$ は式 (9)、同様に中間層と入力層間の重み係数 $w_{2j,1i}$ の修正量 $\Delta w_{2j,1i}$ は式 (10) で表される。

$$\Delta w_{3k,2j} \propto -\frac{\partial E_E}{\partial w_{3k,2j}} \quad \dots (9)$$

$$\Delta w_{2j,1i} \propto -\frac{\partial E_E}{\partial w_{2j,1i}} \quad \dots (10)$$

BP 法は、評価関数である E_E を減少させる方向にのみ、重み係数を修正するため、重み係数の初期値の考え方によって、 E_E の最小値や極小値に相当する異なった値に収束することになる。このような学習アルゴリズムでは、与えられた教師値 y^*_{3k} の母集団が本来もっている入出力間の関係を正しく学習しない場合が生ずる。本論文での目的であるルール抽出を行う場合、得られるルールの信頼性が低くなる可能性が考えられる。また、未学習のデータに対する想起誤差も大きくなる可能性がある。

学習法は BP 法以外にも高速化を目的とするアルゴリズム^{11) 12)}や構造化を目的とするアルゴリズム¹³⁾¹⁴⁾などが提案されているが、ルール抽出という観点からは BP 法と同じ課題を含んでいる。このため、ルール抽出に適した学習法が必要と考えた。

(2) 因果選択型学習アルゴリズム

先に述べた不正確な学習の要因として、教師値への過剰な適合、重回帰分析でも見られるような独立でない入力間の影響の相殺などがあると考えた。このような学習を避け、抽出ルールの信頼性を向上させるためには、ネットワーク内の無数の結合のうち、その結合がなければ正確な出力ができないような必要最小限の結合のみを残し、出力への影響が小さい結合を省くことが有効と考えた。

そこで本研究では、想起誤差が増加しない範囲で、 $C_{3k,li}$ の二乗和を小さくするという制限条件付きの学習を考えた。 $C_{3k,li}$ は絶対値が大きいほど、因果関係の強度が強いという性質のものであるから、その二乗和は冗長な因果関係も含めてネットワーク全体がもつ因果関係の強度に相当する。従って、ネットワーク全体の因果関係の強度を必要最小限にし、冗長な因果関係を抑制する学習を提案する。以下に、本学習法の重み係数修正方法を示す。

1) 中間層と出力層間の重みの係数 $w_{3k,2j}$ の修正

評価関数 E_{EC} は、式 (11) のように学習誤差と因果性尺度の項からなると定義する。

$$E_{EC} = E_E + E_C \quad \text{--- (11)}$$

E_E は式 (8) で示した誤差二乗和項である。また、 E_C はここで導入した因果性尺度の二乗和の項であり、式 (12) のように定義する。

$$E_C = \frac{\varepsilon}{2} \sum_k \sum_i (C_{3k,li})^2 \quad \text{--- (12)}$$

式 (12) はネットワーク全体のもつ因果関係の強度に相当する量である。 ε は学習時に誤差を小さくすることを重視するか、冗長性を除くことを重視するかを調整する係数で、因果係数と呼称している。重み係数 $w_{3k,2j}$ の修正量 $\Delta w_{3k,2j}$ は、式 (13) のように評価関数 E_{EC} が減少するように決定する。

$$\Delta w_{3k,2j} \propto -\frac{\partial E_{EC}}{\partial w_{3k,2j}} \quad \text{--- (13)}$$

ここで式 (8) と式 (12) を $w_{3k,2j}$ で偏微分すると、式 (14) と式 (15) となる。

$$\frac{\partial E_E}{\partial w_{3k,2j}} = -(y_{3k}^* - y_{3k}) \cdot f'(u_{3k}) \cdot y_{2j} \quad \text{--- (14)}$$

$$\frac{\partial E_C}{\partial w_{3k,2j}} = \frac{\varepsilon}{2} \sum_i \left\{ 2C_{3k,li} \cdot \frac{\partial C_{3k,li}}{\partial w_{3k,2j}} \right\} = \varepsilon \sum_i (C_{3k,li} \cdot w_{2j,li}) \quad \text{--- (15)}$$

ゆえに、式 (11) と式 (13) より $\Delta w_{3k,2j}$ は式 (16) となる。

$$\Delta w_{3k,2j} = \eta \left\{ (y_{3k}^* - y_{3k}) \cdot f'(u_{3k}) \cdot y_{2j} - \varepsilon \sum_i (C_{3k,li} \cdot w_{2j,li}) \right\} \quad \text{--- (16)}$$

η は加速係数であり、1 回の重み係数の修正量を調整するための係数である。実際の修正は、以下の重み係数修正式の式 (17) に式 (16) を代入して行う。

$$w_{3k,2j}(t) = w_{3k,2j}(t-1) + \Delta w_{3k,2j}(t) + \alpha \Delta w_{3k,2j}(t-1) \quad \text{--- (17)}$$

α はスムージング係数であり、前回修正量をどの程度反映させるかを調整する。また、 t は修正のステップ数である。

2) 入力層と中中間層の重み係数 $w_{2j,li}$ の修正

$$\Delta w_{2j,li} \propto -\frac{\partial E_{EC}}{\partial w_{2j,li}} \quad \text{--- (18)}$$

式 (18) を先と同様に変形すると、式 (19) が導かれる。

$$\Delta w_{2j,li} = \eta \{ (y_{3k}^* - y_{3k}) \cdot f'(u_{3k}) \cdot w_{3k,2j} \cdot f'(u_{2j}) \cdot x_{li} - \varepsilon C_{3k,li} \cdot w_{3k,li} \} \quad \text{--- (19)}$$

これを式 (20) によって修正する。

$$w_{2j,li}(t) = w_{2j,li}(t-1) + \Delta w_{2j,li}(t) + \alpha \Delta w_{2j,li}(t-1) \quad \text{--- (20)}$$

修正のステップは、教師データに対する平均の想起誤差が終了条件以下となるまで繰り返す。この学習法を「因果選択型学習法」と呼ぶことにする。因果選択型学習法で ε を調整することは、重回帰分析の目的変数の選択を帰無仮説の検定で行うときの有意水準の調整と考えれば理解しやすい。

5. 2. 5 因果性尺度によるルール抽出

第三のステップでは、入力層に配置した説明変数と出力層の目的変数との相関関係を調べてルールを抽出する。因果性尺度 C は、式 (7) で定義したように、着目した入出力間の総てのネットワークルートの重み係数を積和した値であるので、その絶対値の大小が相関関係の大小を、また符号が相関関係の正負を表すことになる。これにより、因果性尺度 C の絶対値が予め与えたしきい値 α よりも大きいものについて、式 (21) のような if-then 型ルールへ変換することとした。バイナリ変数を扱う場合には、状態 High, Low はそれぞれ、1、0 を示す。

$$\begin{aligned} \text{if } x_{li} = \text{Hight} \quad \text{then } y_{3k} = \text{High} \quad \text{when } C_{3k,li} > \alpha \\ \text{if } x_{li} = \text{Low} \quad \text{then } y_{3k} = \text{High} \quad \text{when } C_{3k,li} < -\alpha \end{aligned} \quad \text{--- (21)}$$

α : ルール変換のしきい値 (正数)

以上の手順により、過去の観測データから遷移ルールの候補を得ることができる。

5. 3 ルール獲得評価シミュレーション

5. 3. 1 評価ルール

本研究での提案方式がセルラオートマトンに対して有効であることを確認するために、テストシミュレーションを実施した。遷移ルールを定義する上で重要な項目は、

- ・ 中心のセルに対して、どの近傍の値が効いているか
- ・ 中心のセルに対して、自身または近傍の何ステップ前までの値が効いているか
- ・ 中心のセルに対して、近傍の値がどのような入出力関係にあるか

の3つである。これら3つの項目を実際に獲得できることを示すために、以下のようなタイプの異なる遷移ルールを準備して、検証した。ルールの概要を図5-8に示す。

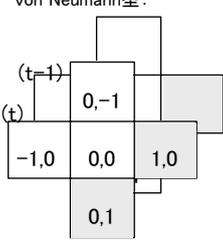
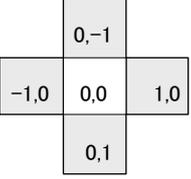
	ルール内容	近傍の定義	ルール(cellang形式)																																																																																																												
1)	シンプルバイナリルール : 右近傍と下近傍が同時に1のときのみ、次ステップの中心セルが1となる。	Moore型: <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td>-1,-1</td><td>0,-1</td><td>1,-1</td></tr> <tr><td>-1,0</td><td>0,0</td><td>1,0</td></tr> <tr><td>-1,1</td><td>0,1</td><td>1,1</td></tr> </table>	-1,-1	0,-1	1,-1	-1,0	0,0	1,0	-1,1	0,1	1,1	2 dimensions of data of 0 .. 1 end cell.data := 1 when [1,0].data=1 & [0,1].data=1 := 0 otherwise																																																																																																			
-1,-1	0,-1	1,-1																																																																																																													
-1,0	0,0	1,0																																																																																																													
-1,1	0,1	1,1																																																																																																													
2)	高次ルール: 現ステップの右近傍と下近傍が1であり、かつ前ステップの右近傍が1のときのみ、次ステップの中心セルが1となる。	von Neumann型: 	2 dimensions of now of 0 .. 1 old of 0 .. 1 end cell.now := 1 when [1,0].now=1 & [0,1].now=1 & [1,0].old=1 := 0 otherwise cell.old := cell.now																																																																																																												
3)	ルックアップテーブル型 ルール: 4つの近傍の全ての組み合わせで、次ステップの中心セルの値が決まる。	von Neumann型: 	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="4">if部</th> <th>then部</th> </tr> <tr> <th></th> <th>[1,0]</th> <th>[0,-1]</th> <th>[-1,0]</th> <th>[0,1]</th> <th>[0,0]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>		if部				then部		[1,0]	[0,-1]	[-1,0]	[0,1]	[0,0]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	if部				then部																																																																																																										
	[1,0]	[0,-1]	[-1,0]	[0,1]	[0,0]																																																																																																										
0	0	0	0	0	0																																																																																																										
0	0	0	0	1	1																																																																																																										
0	0	1	0	0	0																																																																																																										
0	0	1	1	1	1																																																																																																										
0	1	0	0	0	1																																																																																																										
0	1	0	1	1	0																																																																																																										
0	1	1	0	1	1																																																																																																										
0	1	1	1	1	0																																																																																																										
0	0	0	0	0	1																																																																																																										
1	0	0	0	1	0																																																																																																										
1	0	1	0	1	1																																																																																																										
1	0	1	1	1	1																																																																																																										
1	1	0	0	0	0																																																																																																										
1	1	0	1	1	0																																																																																																										
1	1	1	0	0	0																																																																																																										
1	1	1	1	1	1																																																																																																										

図5-8(1) テストシミュレーション用遷移ルール

- 1) シンプルバイナリルール：前述の Moore 型 8 近傍のうちのある 2 つのセルのみ（図中網かけ部）が中心セルに影響するというルール。影響する 2 つのセルを特定できるかどうかを調べた。
- 2) 高次ルール：複数ステップ前の値が中心セルに影響するというルール。ここでは 2 次のルールを例に、高次の時間の影響を特定できるかどうか調べた。
- 3) ルックアップテーブル型ルール：近傍の 4 つのセルの値のパターンと中心セルの関係を示す 16 通りのルール。排他的論理和（Exclusive OR）のように、関数式で表現されない非線形関係を獲得できるかどうかを調べた。
- 4) バイナリ関数型ルール：近傍セルの値の関数で中心セルの値が決まるルール。周辺環境に影響される生物の消長（生死）をシミュレートする例題として、セルラオートマトンの典型的なルールの一つである。このルールでは、8 つの近傍セルのうち、いくつのセルが生存（1 の値を取る）しているか、つまり近傍値の和によって中心セルの生死を決定する。

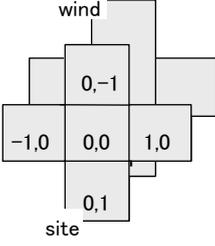
	ルール内容	近傍の定義	ルール(CELLANG形式)
4)	バイナリ関数型ルール（生命モデル）：8近傍のビット値の和が3であるか、または自身の値が1で、かつ近傍の和が2であるとき、次ステップの中心セルの値が1となる。	Moore型： 	<pre> 2 dimensions of data of 0..1 end sum := [1,0].data +. + [1,-1].data cell.data := 1 when sum=3 (cell.data=1 & sum=2) := 0 otherwise </pre>
5)	非バイナリ関数型ルール（火災延焼モデル）：近傍が弱く燃えていて、かつ、その方向から風が吹いているか、または近傍が強く燃えていると、次ステップの中心セルが発火する。	von Neumann型： 	<pre> 2 dimensions of site of 0..4 wind of 0..3 end BURN := 1 when [1,0].site=1 [0,1].site=1 [-1,0].site=1 [0,-1].site=1 := 0 otherwise WEAK := 1 when ([1,0].site=2 & [1,0].wind=0) ([0,1].site=2 & [0,1].wind=2) ([-1,0].site=2 & [-1,0].wind=1) ([0,-1].site=2 & [0,-1].wind=3) := 0 otherwise cell.site := 0 when cell.site=1 cell.site=0 := 1 when cell.site=2 := 2 when (cell.site=4 & BURN=1) (cell.site=4 & WEAK=1) := cell.site otherwise </pre>

図5-8(2) テストシミュレーション用遷移ルール

5) 非バイナリ関数型ルール：各セルが0、1だけでなく整数値（カテゴリ値という）を取り、その値の関数で中心セルの値が決まるルール。ここでは、火災の延焼を例題に検証した。これらの遷移ルールを適当な初期値でシミュレートし、得られた時系列データからニューラルネットに学習させる教師パターンを作成した。

シミュレーションは、 128×128 サイズのセルラスペースの10ステップ分の時系列データ（ $128 \times 128 \times 10 = 158760$ ）から、セル値の遷移パターンを抽出し、そこから所定の数だけランダムに選択したものを教師パターンとした。この教師パターンを基に獲得したルールが、元の遷移ルールと同じものであれば、正しくルール獲得が行なわれたことを確認できる。

5. 3. 2 シミュレーション結果と考察

上述した1)～5)の各遷移ルールに対して実行したルール獲得シミュレーションの結果を順に述べる。

1) シンプルバイナリルール

本ルールの学習には、時刻 t における8近傍（ $[1, 0]$, $[1, 1]$, $[0, 1]$, $[-1, 1]$, $[-1, 0]$, $[-1, -1]$, $[0, -1]$, $[1, -1]$ ）と中心セル $[0, 0]$ を入力層に、時刻 $t + 1$ における中心セル $[0, 0]$ を出力層に各々配置したネットワークを用いた。入出力間の因果製尺度の値を図5-9に示す。図5-9から、時刻 $t + 1$ の中心セル $[0, 0]$ に対して、近傍 $[1, 0]$ と $[0, 1]$ が明確な正の相関を持つことを確認した。これに対して、その他の入力因子（6近傍と中心セル自身）は、先の2近傍に比べて相関が小さいことから、中心セル値の決定に殆ど影響しないことが分かる。

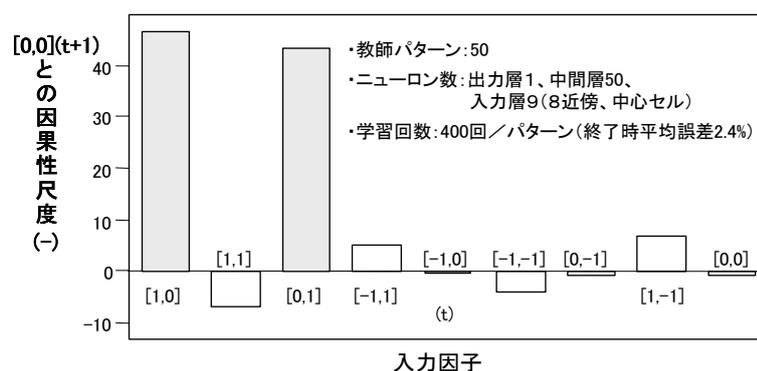


図5-9 シンプルバイナリルール学習結果

この2つの近傍値の組み合わせに対する、学習済みネットワークの出力値（時刻 $t + 1$ の中心セル値）を表5-1に示す。ここでの出力値は、当該2近傍を除いた7入力をランダムに与えた時の平均値で示す。本シミュレーションで用いたルールは、バイナリ値を扱うので、0.5をしきい値として0、1に整数化すると、近傍 $[1, 0]$ と $[0, 1]$

が同時に 1 の時のみ、出力値が 1 となることが分かる。すなわち、表 5-1 の結果から得られるルールは、

$$\text{if } [1, 0](t)=1 \text{ AND } [0, 1](t)=1 \text{ then } [0, 0](t+1)=1$$

であり、図 5-8 (1) の 1) で設定した元のルールと一致した。この結果は、本ルール獲得方式によって、遷移ルールを獲得できたことを示す。

表5-1 シンプルバイナリルールシミュレーション結果

ニューラルネットへの入力			出力平均値
[1,0](t)	[0,1](t)	その他の近傍、[0,0](t)	[0,0](t+1)
0	0	0、1の組み合わせ (128パターン)	0.07
0	1		0.10
1	0		0.09
1	1		0.92

2) 高次ルール

本ルールの学習には、時刻 $t-1$ と t とにおける 4 近傍 ($[1, 0]$, $[0, 1]$, $[-1, 0]$, $[0, -1]$) と中心セル $[0, 0]$ とを入力層に配置したネットワークを用いた。図 5-10 の結果は、時刻 $t-1$ の $[1, 0]$ と時刻 t の $[1, 0]$ と $[0, 1]$ が次ステップの中心セル $[0, 0]$ に影響し、その他の近傍は殆ど影響しないことを示す。これら 3 つの値の論理結合は、因果性尺度のみからでは知ることができないので、1) の例と同様に、すべての値の組み合わせに対するニューラルネットの出力 (時刻 $t+1$ の中心セル値) を調べた。

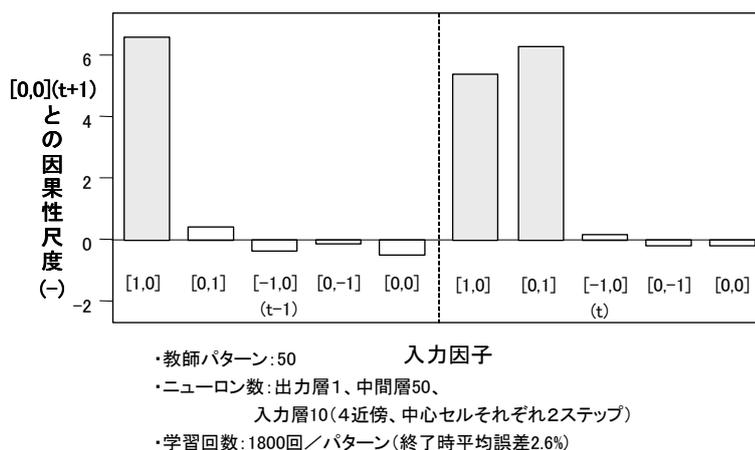


図5-10 高次ルール学習結果

表 5-2 左に示す組み合わせの入力を与えた時の出力平均値を示す。この表も先と同様に 0.5 をしきい値として整数化すると、3 入力すべてが 1 の場合のみ、時刻 $t+1$

の中心セル[0,0]が1になることが分かる。すなわち、獲得されたルールは、

$$\text{if } [1,0](t-1)=1 \text{ AND } [1,0](t)=1 \text{ AND } [0,1](t)=1 \text{ then } [0,0](t+1)=1$$

であり、元のルールと一致した。本ルールのように複数の時間ステップの値が影響するケースでも、各時間ごとの値を独立変数として扱う（入力層の別のニューロンとして配置する）のであれば、空間的に隣接する近傍の数が増えるのと等価である。したがって、1)と同様に適切なルール獲得ができたのは予想通りの結果ともいえる。

表5-2 高次ルールシミュレーション結果

ニューラルネットへの入力				出力平均値
[1,0](t-1)	[1,0](t)	[0,1](t)	その他の近傍、[0,0](t)	[0,0](t+1)
0	0	0	0, 1の組み合わせ (128パターン)	0.03
0	0	1		0.07
0	1	0		0.03
0	1	1		0.04
1	0	0		0.05
1	0	1		0.10
1	1	0		0.09
1	1	1		0.93

3) ルックアップテーブル型ルール

図5-11の因果性尺度から、4つの近傍のみが時刻t+1の中心セル値に影響することが分かる。ただし、各近傍と中心セル値との相関関係が常に一定であった前述の2つの例とは異なり、各近傍は他の近傍値との組み合わせによって、時刻t+1の中心セル[0,0]との相関関係が変わりうる。したがって、各近傍と中心セル値との相関を個別に評価した因果性尺度の正負の符号は、式(5)のルール変換規則に当てはめることができないことに注意する必要がある。

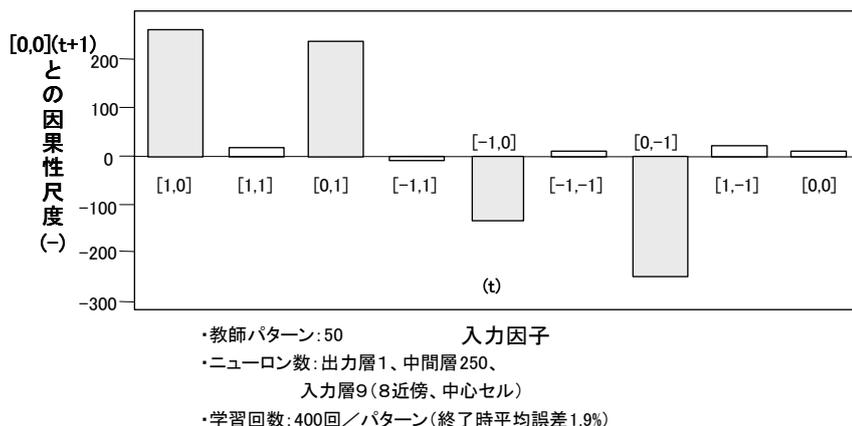


図5-11 ルックアップテーブル型ルール学習結果

表5-3に当該4近傍の組み合わせに対するニューラルネットの出力平均値を示す。この結果を0.5をしきい値として整数化すると、元のルックアップテーブルと一致し

ていることが分かる。本シミュレーションでは、セルラオートマトンの 10 ステップ分の時系列データからランダムに選択した 50 の教師データを用いたが、獲得ルールが正しかったことから、結果的に必要な 16 パターン（4 近傍のすべての組み合わせ）が含まれていたことになる。仮に教師データが欠損していた場合、ルックアップテーブル型ルールでは、欠損に対する内挿や外挿などの補間値は意味を持たない。このため教師データの選択は他のタイプのルールに比べて特に重要と考えられる。

表5-3 ルックアップテーブル型ルールシミュレーション結果

ニューラルネットへの入力					出力平均値
[1,0](t)	[0,-1](t)	[-1,0](t)	[0,1](t)	その他の近傍、[0,0](t)	[0,0](t+1)
0	0	0	0	0、1の組み合わせ (32パターン)	0.05
0	0	0	1		0.83
0	0	1	0		0.10
0	0	1	1		0.85
0	1	0	0		0.90
0	1	0	1		0.13
0	1	1	0		0.88
0	1	1	1		0.07
1	0	0	0		0.88
1	0	0	1		0.09
1	0	1	0		0.90
1	0	1	1		0.89
1	1	0	0		0.07
1	1	0	1		0.11
1	1	1	0		0.12
1	1	1	1		0.93

4) バイナリ型関数ルール

1) ~ 3) では、各近傍や中心セル[0, 0]そのものを入力層に配置した。本ルールでも同様のネットワークで学習させ、入出力関係を獲得することもできるが、関数の具体的な形を得ることは難しい。近傍のどのような組み合わせが中心セルに影響するかが、既存の知見で分かっているならば、これを反映したネットワーク構造とし、ルール獲得を容易にすることができる。生命モデルのルールは、生物の増殖を模擬したものであるため、近傍での生物密度、すなわち「近傍値の和」が中心セルの生物の生死に影響するものと仮定した。そこで、近傍値の和を示す変数 (sum N: N=0~8) を入力層に配置したネットワークで学習させることにした。

図5-12に示すように、近傍値の和が2と3 (sum2, sum3)、および時刻 t の中心セル[0, 0]の値が影響していることが分かる。また、近傍の和が0、1、4~8は、どれも負の相関を示しており、sum0, sum1, sum4~sum8が1のとき、時刻 t + 1 の中心セル[0, 0]の値が0になる。

sum2, sum3、および[0, 0]との論理結合を求めるために、すべての値の組み合わせに対するネットワーク出力を求めた。sum2 と sum3 は排他的であるので、全部で6パタ

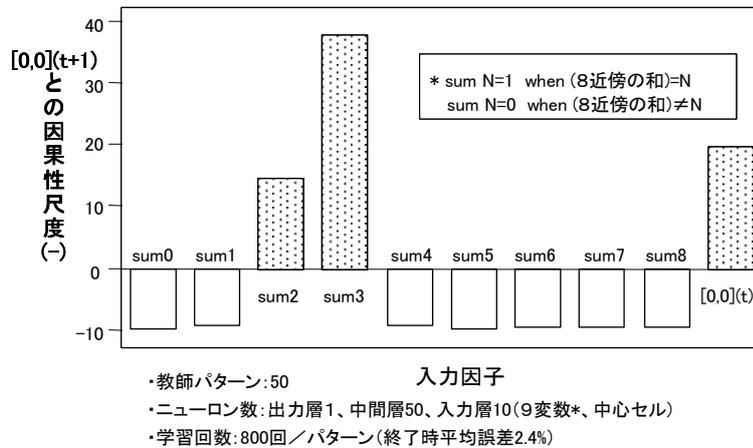


図5-12 バイナリ型関数ルール学習結果

ーンである。表5-4より、sum2 単独では時刻 $t + 1$ の中心セル $[0, 0]$ は1にならず、時刻 t の中心セル $[0, 0]$ と同時に1となる必要があることが分かる。一方、sum3 は中心セル $[0, 0]$ とは独立に次ステップの $[0, 0]$ を1とすることが示されている。すなわち、獲得されたルールは、

$$\text{if } (\text{sum}=2 \text{ AND } [0, 0](t)=1) \text{ OR } \text{sum}=3 \text{ then } [0, 0](t+1)=1$$

であり、図5-8(2)の4)のルールと一致している。但し、先にも述べたように、ここでは近傍値の和が影響することが既知であることを仮定しており、このような仮定なしでは上述のような具体的な関数形式のルール獲得は難しい。

表5-4 バイナリ型関数ルールシミュレーション結果

ニューラルネットへの入力				出力
sum2	sum3	$[0, 0](t)$	sum N (N=0, 1, 4-8)	$[0, 0](t+1)$
0	0	0	only one sum N=1	0.06 *
0	0	1	only one sum N=1	0.09 *
0	1	0	0	0.92
0	1	1	0	0.93
1	0	0	0	0.10
1	0	1	0	0.95

*: 平均値

5) 非バイナリ型関数ルール

本例では、site (燃えているかどうかの状態) と wind (風向) の2つのセルスペースを想定し、図5-8(2)の5)に示したように各セルが5種類と4種類の整数値(カテゴリ値)を持つ。火災延焼においては、近傍の影響が等方性を持つことから、次のような変数を導入して、入力数を低減させることにした。

BURN：どれかの近傍が1つでも燃えていれば、1。その他は0。

WEAK：どれかの近傍が1つでも弱く燃えていて、
かつその方向から風が吹いていれば、1。
その他は0。

4近傍に関する2つの変数 BURN, WEAK と中心セル[0,0]自身の9種類のカテゴリ値 (site の5種類と wind の4種類) をニューラルネットの入力層に、セルラスペース site の時刻 $t + 1$ の中心セル[0,0]の5種類のカテゴリ値を出力層に配置した。このニューラルネットを用いて、図5-8(2)の5) ルールの実行結果から選択した教師データを学習させた。その結果、図18に示すように、以下のことが分った。なお、文中の記号は、図5-8(2)の5) のカテゴリ値の定義を参照のこと。

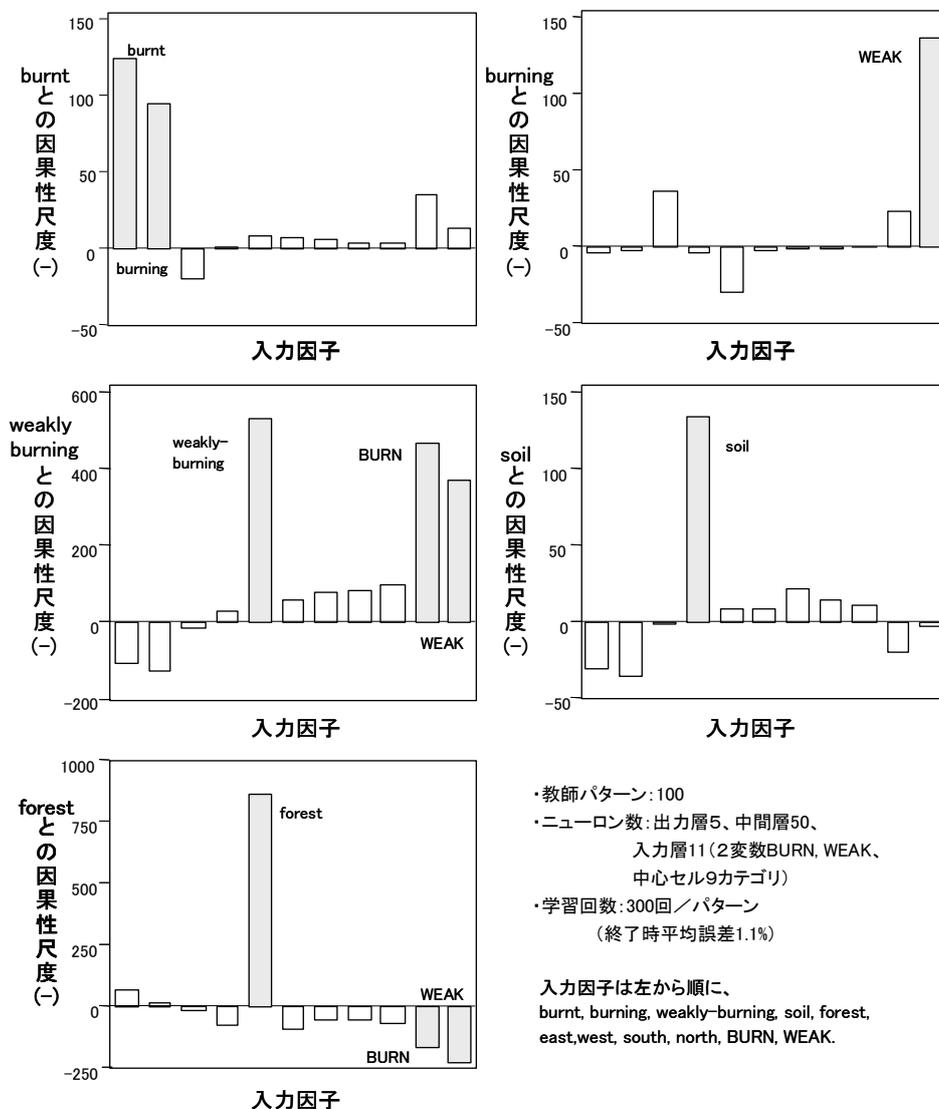


図5-13 非バイナリ型関数ルールシミュレーション結果

- i) 時刻 $t + 1$ の burnt には、時刻 t の burnt, burning が影響する、
- ii) 時刻 $t + 1$ の burning には、時刻 t の WEAK が影響する、
- iii) 時刻 $t + 1$ の weakly-burning には、時刻 t の weakly-burning, WEAK, BURN が影響する、
- iv) 時刻 $t + 1$ の soil には、時刻 t の soil が影響する、
- v) 時刻 $t + 1$ の forest には、時刻 t の forest, WEAK, BURN が影響する

ここで抽出された影響因子の組み合わせに対するネットワークの出力結果を表 5-5 に示す。なお、影響因子以外の入力には 0、1 のランダムパターンを与えた。しきい値 0.5 で整数化して 1 となる出力に着目して、入力の値の組み合わせ、すなわち、ルール条件部を翻訳すると、以下の 5 つのルールが得られた。

表5-5 非バイナリ型関数ルールシミュレーション結果

ニューラルネットへの入力											出力	
[0,0].site(t)					[0,0].wind(t)				4近傍変数		[0,0].site(t+1)	
burnt	burning	weakly	soil	forest	east	west	south	north	BURN	WEAK	カテゴリ	平均値
0	0										burnt	0.10
0	1											0.95
1	0											0.93
										0	burning	0.07
										1		0.89
				0					0	0	weakly	0.02
				0					0	1		0.05
				0					1	0		0.07
				0					1	1		0.07
				1					0	0		0.09
				1					0	1		0.91
				1					1	0		0.86
				1					1	1		0.92
			0								soil	0.05
			1									0.98
				0					0	0	forest	0.10
				0					0	1		0.13
				0					1	0		0.09
				0					1	1		0.09
				1					0	0		0.87
				1					0	1		0.09
				1					1	0		0.08
				1					1	1		0.09

(入力の空欄部は、0、1のランダムパターン)

- i) if $[0,0].site(t)=burnt$ OR $[0,0].site(t)=burning$
then $[0,0].site(t+1)=burnt$,
- ii) if $weak(t)=1$
then $[0,0].site(t+1)=burning$,
- iii) if $[0,0].site(t)=forest$ AND $\{WEAK(t)=1$ OR $BURN(t)=1\}$
then $[0,0].site(t+1)=weakly-burning$
- iv) if $[0,0].site(t)=soil$ then $[0,0].site(t+1)=soil$,
- v) if $[0,0].site(t)=forest$ AND $WEAK(t)=0$ AND $BURN(t)=0$
then $[0,0].site(t+1)=forest$

iv), v)は図5-8(2)の5)のルールに明示されていないが、いずれも元のルールと一致した。これとは別に、近傍の影響の等方性を考慮せずに、4つの近傍それぞれについて9つのカテゴリ、計45入力を入力層に配置したネットワークにより学習および重み係数の解析を行なった(詳細結果は図示せず)。入出力関係については、元のルールと概ね同じ傾向を示したが、個別の近傍について見ると、元のルールと矛盾する結果もみられた。これは、ネットワークの入出力の組み合わせ数が多くなった場合の共通の課題である、教師データの欠損によるものと考えられ、適切な教師データ作成の観点からは、前者の例のように適当な変数の導入により、入出力数を事前に低減する必要がある。

テストシミュレーション(4)と(5)に共通して、ルール化しようとする現象(本章の例では、生物の増殖、火災の延焼)に関する知見をうまくニューラルネット構造に反映させなければ、適切な遷移ルールを獲得できないケースがあることが分かった。

5. 3. 3 流域管理への適用について

セルラオートマトンは、GISの基本データ形式のひとつであるラスタ型データを取り扱うことができるモデルである。流域管理に係るデータは、第2章で詳しく述べたように、国土数値情報、リモートセンシング情報(衛星画像データ)などが主要なものであり、流域管理システム上にデータベース化される。このため、本研究で提案したモデリングは、これらのラスタ型データを用いる流域シミュレーション全般に適用することができる。

本論文では、具体的な事例として、衛星画像データなどを活用する流域熱環境評価の事例を第6章で詳述する。

5. 4 まとめ

本章では、GIS の基本データ形式であるラスタ型データに適した汎用的なモデリング手法の開発を目的に、セルラオートマトンモデルを検討した。このモデルは、経時的な状態変化を定義する遷移ルールによって流域内の現象を記述ことができ、数値データのほか、属性情報も用いることができるため、GIS を用いた流域のモデリングに高い適用性を有する。

本研究では、特にセルラオートマトンのモデリング手法として、ニューラルネットワークを用いた学習アルゴリズムによる遷移ルールを獲得する手法を検討した。

- ・階層型ニューラルネットワークの新たな学習アルゴリズムとして、因果選択型の逆誤差伝播法を提案した。この提案アルゴリズムにより、冗長な学習を避け、教師データが有する実質的な因果関係を選択的に学習可能とした。
- ・学習によって得られたニューラルネットワークの重み係数から、入出力の因果関係を **if-then** 型のルールで抽出できる評価指標（因果性尺度）を提案した。テストデータによるシミュレーション評価により、教師データが有する因果関係を正しく抽出できることを示した。

これにより、流域管理において重要な時系列データの評価解析に対して、GIS への高い適合性を有するモデリング手法を適用可能とした。

5. 5 参考文献

- 1) Roger White(1992) Cellular Automata and Fractal Urban Form - A cellular Modeling Approach to the Evolution of Urban Use Patterns, Working paper no. 92064, Research Institute for Knowledge Systems, The Netherlands
- 2) Keith C. Clarke (1994) A Cellular Automaton Model of Wildfire Propagation and Extinction, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.60, No. 11, pp. 1355-1367
- 3) Helen Couclies (1985) Cellural Worlds - a framework of modeling macro micro dynamics, Environment and Planning A, Vol.17, pp.585-596
- 4) D.E.Rumelhart (1986) Learning Internal Representations by Error Propagation, Parallel Distributed Processing Vol.1, MIT Press
- 5) 圓佛伊智朗ほか (1991) ニューラルネットを用いたプラント運転ルールの抽出に関する研究：電気学会論文誌D、第111巻1号、pp.20-28
- 6) Ichiro Embutsu, et al. (1991) Fuzzy rule extraction from a multilayered neural network、Proceedings of IJCNN-Seattle, pp.461-465
- 7) Ichiro Embutsu, et al. (1994) A cellular automaton modeling for urban heat island mitigation, Proceedings of GIS/LIS' 94, pp.263-272
- 8) 圓佛伊智朗 (2001) 衛星画像を用いた都市域における環境計測、計測と制御、Vol. 40, No. 4, pp. 298-302
- 9) J. Eckart (1992) A Cellular Automata Simulation System - Version3.0 - : Computer Science Dept., Radford University
- 10) Martin Gardner (1971) Mathematical Games, Science America
- 11) 木本隆ほか (1988) ニューラルネットワークによる移動ロボットの制御、計算機アーキテクチャ、Vol.1988 No.45, pp.101-108
- 12) 三谷光照ほか (1994) パターン認識用ニューラルネットの学習高速化手法、電子情報通信学会論文誌D-II、Vol.77, No.1, pp.211-218
- 13) 石川真澄 (1990) 忘却を用いたコネクショニストモデルの構造学習アルゴリズム、人工知能学会誌、Vol.5 No.5, pp.595-603
- 14) 石川真澄 (1989) コネクショニストモデルの忘却を用いた構造化学習、電子情報通信学会技報、MBE89-144
- 15) W.S. McCulloch & W.Pitts (1943) A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity、Bullet. Math. Biophysics.5

第6章 地理情報を応用した流域管理システムの構築

概 要

本章では、本研究で開発したサブシステムと要素技術を実装した流域管理システムの構築とその適用について述べる。このシステムは、水安全計画（WSPs）に関連した流域管理業務の実施と計画の策定を支援するもので、想定した各種シナリオにおける流域状況の評価、予測を可能とした。

本システムの機能を活用し、フィールドスタディを実施した。「江戸川流水保全水路整備事業」と「サンノゼ市熱環境改善計画」での適用事例では、水質や熱環境改善効果を予測し、事業への費用投資効果を定量的に示すことができた。これらのフィールドスタディを通して、GISをプラットフォームとする流域管理システムを構築し、活用していくことは、流域管理の実務において有用であることを示した。

6. 1 流域管理システムの構築

本研究では、流域管理に求められる計測やモデリングなどの技術を統合した流域管理システムを構築した。第2章で検討したGISをベースとした情報プラットフォームの機能要件を考慮し、第3章から第5章で検討した各々の要素技術を取り込んでいる。システム構成を図6-1に示す。本システムは、流域監視システム、流域情報データベース、及びモデル評価システムの3つのサブシステムで構成している。流域で計測した情報をデータベースで管理し、これを用いて流域環境を評価するという一連の機能を実装している。これにより、水安全計画などで設定した施策や将来シナリオを条件として、将来の水質リスクや流域環境、施策の効果を評価することができる。

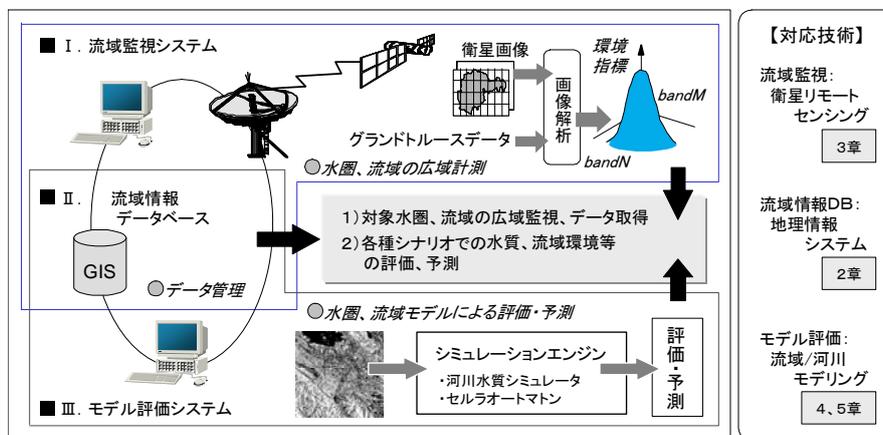


図6-1 構築した流域管理システムの概略構成

した計画策定の主旨では、水質にかかわる事象に重点が置かれているが、国内における水安全計画の検討では、例えば、横浜市水道局などでは水質はもとより、量的な安定給水にかかわる事象も主要な計画対象と位置付けている。このほか、今後は水源を中心とした流域環境に関わる事象にも対象範囲が拡大されることが予想される。本研究で開発した流域管理システムは、こうした広義の水安全計画にも対応しようとするものである。

対象とする代表的な事象は、以下のように区分して考えることができる。

1) 水源水質保全

利水および水環境における中長期的な水質の改善施策に関する取り組み
(流域の汚濁負荷発生源対策、汚濁負荷除去対策など)

2) 水源水質事故対策

突発的な水質事故に関する取り組み
(河川への有害物混入時の影響評価、想定条件での事前評価など)

3) 流域環境改善

流域で顕在化した環境問題の改善と緩和に関する取り組み
(水需要にも関連する都市気象評価など)

4) 治水対策

都市型洪水などに関する取り組み
(降雨時の雨水流出解析、流域の氾濫・浸水被害予測など)

上記で例示した事象のうち、流域の汚濁負荷評価に基づく水源河川の長期水質予測と、突発的な水質事故時の河川水質予測については第4章において、対応する要素技術の開発とフィールドスタディ結果、および流域管理システムの適用性について述べた。本章では、さらに本システムの導入効果と適用性を評価する目的で、フィールドスタディを実施した。一つは1) 水源水質保全に関するもので、複数の水質保全事業のシナリオを想定し、費用対効果について試算した。もう一方は、3) 流域環境改善に関するもので、水需要にも影響する都市のヒートアイランド現象について、各種緩和策の効果を試算して評価した。水質保全事業のフィールドスタディは、東京都水道局からの委託研究で、同局の水源河川を対象に実施したものである。また、都市ヒートアイランドについては、カリフォルニア大学サンタバーバラ校（米国立・地理情報解析センター）との共同研究において、米国カリフォルニア州サンノゼ市を対象に実施した。

これらのフィールドスタディを通して、GISをプラットフォームとする流域管理システムの活用が、流域管理の実務において有用であることを示すことが目的である。

6. 3 水源河川における水質保全事業への適用

6. 3. 1 水安全計画における水質保全事業の位置付け

水安全計画は、水源から給水栓に至るまでの範囲を網羅し、主に水質に影響を与える可能性のある危害要因（水質リスク）を抽出し、これに対する対策を予め定めておくというものである。表1-1で前掲したように、水源流域から流入する汚濁負荷が主要な危害要因であり、これに対する防止対策が求められる。未然の防止対策が基本であることは云うまでもないが、現状の水質レベルが所定のレベル以下である場合や将来的にレベル低下が予想される場合には、水質保全（改善）事業がプライオリティの高い対策と位置付けられる。

これまでに実施、もしくは提案された水質保全事業の種類を表6-3にまとめた。

表6-3 主な水質保全事業まとめ

	対象負荷	保全事業(または施策)	内容	本調査での試算
発生源対策	生活系負荷	下水道整備	下水道の整備により、未処理の生活系、及び事業場系の排出負荷を低減する	有
	事業場系負荷			
	面源負荷	降雨流出抑制	合流式下水の越流水対策として雨水貯留施設を整備し、初期汚濁雨水の河川流入負荷を低減する	無
除去対策	下水処理場	下水高度処理導入	嫌気無酸素好気法やオゾン、凝集剤添加プロセス導入により、処理率を向上させ、処理場からの排出負荷を低減する	有
	流達負荷	河川浄化促進	れき間接触酸化設備(流水保全路)の設置やばっ気装置の導入により、自浄を促進させる	有
		高度浄水処理導入	オゾン、活性炭処理の導入により、水道水質を向上させる	有
	面源負荷	市街地清掃	道路・側溝の定期清掃を高頻度化し、埃などの堆積負荷を低減する	無

これらの事業を大別すると、1) 河川へ排出される汚濁負荷そのものを低減する発生源対策と、2) 河川へ流達した汚濁負荷を低減させる除去対策とに分けられる。

1) の発生源対策で最も代表的なものは、下水道整備による生活系汚濁負荷の低減である。事業場排水規制の策定なども発生源対策として重要であるが、排水処理強化に係る実施費用は主として対策する事業場が負担するもので、規制する行政側にとっては外部費用となるため、今回の費用対効果の検討対象からは除外した。

2) の除去対策としては、河川の直接浄化などが知られており、代表例が江戸川保全事業である。同事業の詳細は次節で述べる。他方、飲用に供する水道水のみを対象とする対策として、浄水場での高度浄水処理導入が進められており、本章でもその費用試算結果を示す。

6. 3. 2 水質保全事業による水質改善効果の評価

6. 3. 2. 1 江戸川流水保全水路整備事業

(1) 事業の背景と概要

本事業は昭和 62 年度より国土交通省河川局が進めている。図 6-2 に示すように、江戸川に流入する坂川系河川（坂川、新坂川、六間川、及び横六間川）の水を直接江戸川に流入させずに、礫間接触酸化方式により浄化する。浄化後の水は金町、古ヶ崎などの水道原水取水地点を迂回して、江戸川下流の柳原水門付近に放流される。坂川系河川は、千葉県松戸市内を流れる典型的な都市河川で、水質の悪いことで知られる。THMFP を例に江戸川本川と比較すると、平成 7 年度の平均値¹⁰⁾ は江戸川上流（三郷取水庭地点）で 0.030mg/L なのに対して、新坂川（一平橋地点）ではこの 2 倍以上の 0.066mg/L である。坂川系河川からの流入水は江戸川の水質を悪化させる一因である。

本事業の浄化施設と流水保全水路は、平成 9 年度中に完成し、平成 10 年度から運用された。なお、金町取水塔付近の将来水質に影響する別の要因として、北千葉導水路整備事業が進行中である。この事業の目的は、利根川の水を導水することで江戸川の河川流量を確保することである。これは具体的には、坂川放水路を通して三郷取水庭付近に導水するもので、平成 11 年度からの運用である。

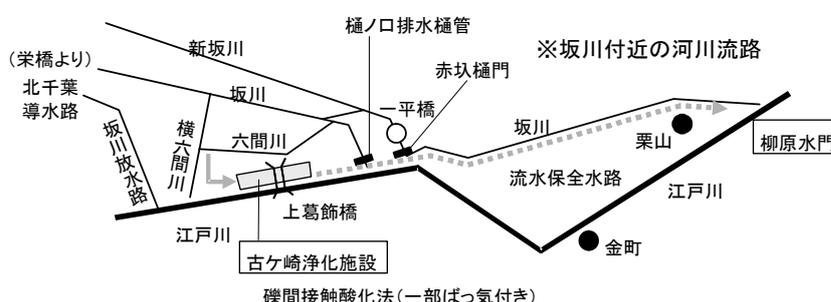


図6-2 江戸川流水保全水路整備事業の概要

(2) 礫間接触酸化方式

本事業では礫間接触酸化方式による浄化施設を整備する。この方式では、100～150mm の礫を層状に敷き詰めた浄化槽を設け、2 時間程度の滞留時間で通水させることにより、河川水を浄化する。浄化の過程は、河川の自浄作用と同様に、汚濁成分の沈殿、吸着、酸化分解で進み、BOD や SS で 60～75% 程度の浄化率で処理できる。維持管理として、礫間に沈殿した無機質の泥の除去を半年に 1 回程度、礫交換を 10 年に 1 回程度行う必要がある。

古ヶ崎浄化施設では、0.5m³/s を処理できる浄化槽（水路幅 125m×流下長 28m×層高 3m）を 5 槽整備し、坂川系の水 2.5m³/s を全量処理可能とする。本解析では、礫間接触酸化施設による河川の直接浄化や導水が金町取水塔地点の水質に及ぼす影響を評価した。評価の詳細な条件については次節で後述する。

6. 3. 2. 2 水質改善効果の評価手順

(1) 水質汚濁負荷の移動過程

将来水質を5～10年の長期で予測するためには、河川に流入する将来汚濁負荷量を算定する必要がある。負荷発生源から排出された汚濁負荷は、幾つかの過程を経て河川に流入する。一般的に、これらの過程は第4章でも述べたように、図6-3に示すような汚濁負荷の流れとして定式化される。すなわち、負荷発生源より排出した汚濁負荷が河川に至るまでの流達過程と河川に流入した汚濁負荷が着目する地点に至るまでの流下過程で評価する。

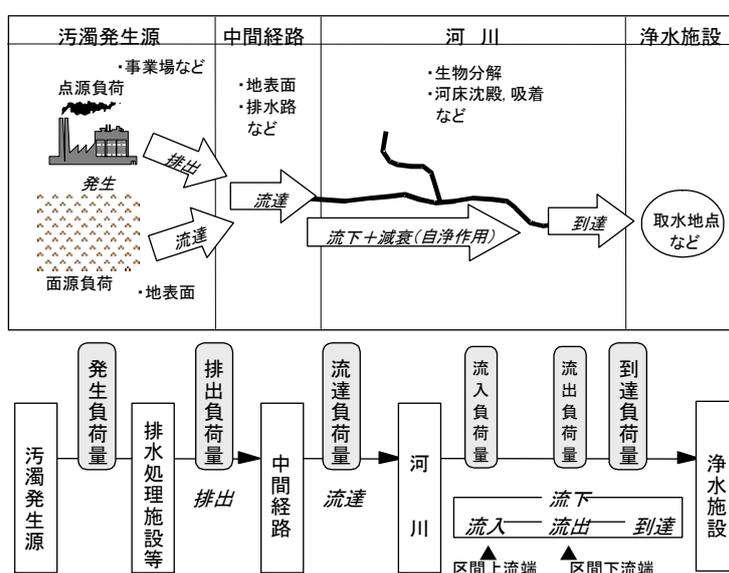


図6-3 水質汚濁負荷移動の過程

いずれの過程も減衰モデルで定式化することができ、前者は主に地表面での吸着や堆積による減衰、後者は河川水中での生物分解や沈殿・吸着などによる減衰を取り扱う。本研究での汚濁負荷予測では、図6-4に示すように、排出負荷量（または発生負荷量）、流達負荷量を順に評価し、最終目的となる水質予測に必要な到達負荷量を算定する。

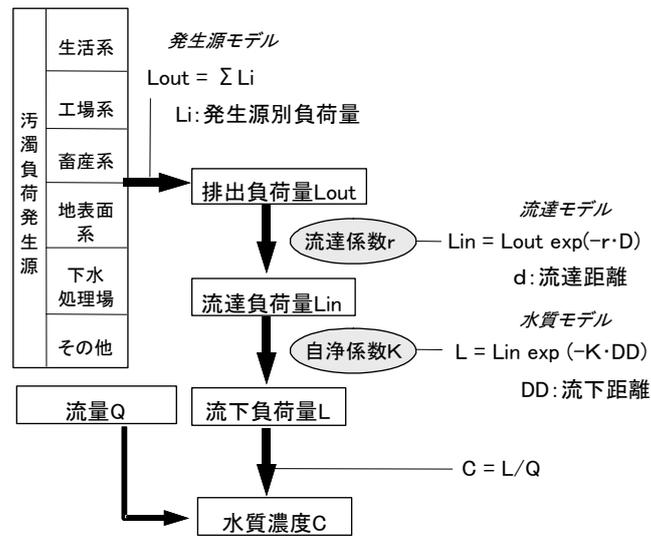


図6-4 水質予測計算の手順

(2) 流路区間の定義

水質評価には、河川流路を適当な区間（以下、リーチと呼称）に分割し、各リーチでの汚濁負荷収支に基づくモデルを用いる。このモデルの係数調整には、リーチの上・下流端の水質データが必要なので、水質と流量が定期観測される地点（環境基準点など。水質基点と呼称）を用いてリーチを定義した。江戸川水系での東京都や建設省の水質基点の中から表6-4に示す45点を選定し、46区間のリーチを定義した。

定義したリーチに対しては、国土数値情報¹¹⁾ (KS-273；流域界・非集水域界位置)を参照して、汚濁負荷が流入する集水領域を設定した。設定した集水領域は、負荷流達モデルの実行に用いられる。

表6-4 江戸川・中川水系の水質基点とリーチ

基点No.	水質基点名	リーチNo.	始点	始点基点名	終点	終点基点名	区間長 (m)	集水域(km ²)
		50	30	利根大堰	406	埼玉大橋	18070	27
406	埼玉大橋	49	406	埼玉大橋	443	栗橋	5970	3
401	高津戸橋	91	401	高津戸橋	422	葉鹿橋	10910	485
420	観音橋	92	420	観音橋	421	境橋	9510	102
421	境橋	93	421	境橋	422	葉鹿橋	4040	18
422	葉鹿橋	90	422	葉鹿橋	402	福猿橋	10740	47
402	福猿橋	89	402	福猿橋	403	藤岡大橋	18570	504
403	藤岡大橋	80	403	藤岡大橋	405	三國橋	11070	217
431	落合橋	79	431	落合橋	433	巴波橋	37300	188
432	吾妻橋	78	432	吾妻橋	433	巴波橋	12000	59
433	巴波橋	77	433	巴波橋	405	三國橋	11300	56
434	保橋	82	434	保橋	404	乙女大橋	20710	374
435	御成橋(黒川)	81	435	御成橋	404	乙女大橋	20040	276
436	宮前橋	75	436	宮前橋	404	乙女大橋	17880	172
404	乙女大橋	76	404	乙女大橋	405	三國橋	10950	15
405	三國橋	48	405	三國橋	443	栗橋	5630	9
443	栗橋	47	443	栗橋	444	豊橋	30590	171
444	豊橋	42	444	豊橋	446	中島橋	5690	9
445	養橋	43	445	養橋	446	中島橋	5670	206
446	中島橋	41	446	中島橋	416	中川取水口	8670	280
416	中川取水口	45	443	栗橋	407	関宿橋	11550	23
407	関宿橋	44	407	関宿橋	408	野田橋	22800	24
408	野田橋	40	408	野田橋	409	流山橋	7380	34
409	流山橋	39	409	流山橋	411	三郷取水庭	2610	2
411	三郷取水庭	38	411	三郷取水庭	412	上葛飾橋	3170	3
412	上葛飾橋	37	412	上葛飾橋	414	金町取水塔	4520	24
414	金町取水塔	46	443	栗橋	419	境大橋	21640	146
419	境大橋	36	419	境大橋	418	栄橋	33230	194
441	馬洗橋	35	441	馬洗橋	418	栄橋	32160	152
442	豊袖橋	34	442	豊袖橋	418	栄橋	33590	77
428	大曾橋	88	428	大曾橋	429	明治橋	17440	520
429	明治橋	87	429	明治橋	430	梁橋	22570	74
430	梁橋	74	430	梁橋	417	滝下橋	41720	118
423	川治第一発電所	85	423	川治第一発電所	426	鬼怒川橋	84630	430
424	川治橋	83	424	川治橋	426	鬼怒川橋	85350	423
425	間新橋	86	425	間新橋	426	鬼怒川橋	63350	35
426	鬼怒川橋	84	426	鬼怒川橋	427	川島橋	8000	119
427	川島橋	71	427	川島橋	417	滝下橋	43440	83
417	滝下橋	33	417	滝下橋	418	栄橋	24390	47
440	下岡橋	73	440	下岡橋	438	黒子橋	6790	336
437	三谷橋	72	437	三谷橋	438	黒子橋	14820	225
438	黒子橋	70	438	黒子橋	439	文巻橋	54400	187
439	文巻橋	32	439	文巻橋	418	栄橋	10540	187
418	栄橋	96	418	栄橋	411	三郷取水庭	32250	173
413	一平橋	97	413	一平橋	450	古ヶ崎	500	13
450	古ヶ崎	98	450	古ヶ崎	412	上葛飾橋	1	0

(3) 基礎データの扱いと評価条件等

主な基礎データである国勢調査¹²⁾や工業統計¹³⁾は、対象地域を矩形に分割した小地域、すなわちメッシュごとのデータとして入手できたが、行政区分ごとのデータしかない項目については、メッシュ変換して用いた。メッシュ位置と実際の地理的位置との対応は、各種地図の位置基準である「国土数値情報3次メッシュ」(建設省国土地理院が制定)に準拠させた。メッシュ寸法も3次メッシュに合わせて、1kmとした。基礎データは、一都四県を含む240×240メッシュ(240km四方相当)について収集した。

河川水質は、流域内の発生源から排出され河川に流入する汚濁負荷量によって決定される。前掲の図6-4に示した3つのモデルは、第4章でも述べたので、ここでは詳細は省略し、本ケーススタディに固有の部分のみを説明する。

1) モデル係数調整

モデル中の係数である流達係数 r と自浄係数 k は、基準年度（平成2年度）の実績値データを用いて調整した。この係数調整は、「モデルによって計算された計算到達負荷量 L^* 」と「水質測定値と測定時流量で計算された実測到達負荷量 L 」との誤差が小さくなるように行った。

計算到達負荷量 L^* と実測到達負荷量 L との誤差を小さくする流達係数 r と自浄係数 k との組合せを探索することは、数値解法上は可能であるが、準最適解が無数に得られることが予想される。この場合、無数の解の中から流達などの現象と矛盾しない解を人為的に選択する必要があることから、2つの係数を同時に調整する方式は取らないこととした。図6-5に示すように、本調査では、流達係数 r の値を先に設定し、その値に対応する自浄係数 k を後に求める手順とした。

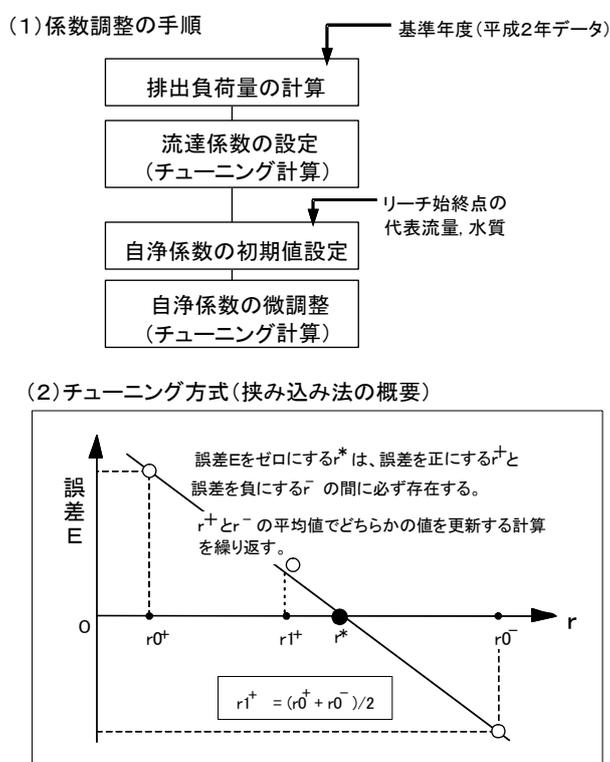


図6-5 モデル係数調整の手順

自浄係数 K 、及び流達係数 r の調整結果を表6-5にまとめた。これら係数は、経年変化がないものと仮定して用いた。

表6-5 江戸川・中川水系のモデル係数調製結果
(通年ベース; THMFP)

No.	リーチ		流達係数 (1/km)	自浄係数 (1/km)	バックグラウンド [*] 負荷 (kg/年)
	上流点	下流点			
32	文巻橋	栄橋	0.0078	0.1575	0
33	滝下橋	栄橋	0.0086	0.0681	0
34	豊神橋	栄橋	0.0070	0.0049	0
35	馬洗橋	栄橋	0.0070	0.0052	0
36	境大橋	栄橋	0.0070	0.0500	0
37	上葛飾橋	金町取水塔	0.0094	0.0120	0
38	三郷取水庭	上葛飾橋	0.0086	0.5105	0
39	流山橋	三郷取水庭	0.0125	0.0128	0
40	野田橋	流山橋	0.0141	0.0008	0
41	中島橋	中川取水口	0.0070	0.0983	0
42	豊橋	中島橋	0.0109	0.2988	0
43	寿橋	中島橋	0.0063	0.2015	0
44	関宿橋	野田橋	0.0094	0.0002	0
45	栗橋	関宿橋	0.0063	0.0129	0
46	栗橋	境大橋	0.0086	0.0084	0
47	栗橋	豊橋	0.0055	0.0081	0
48	三国橋	栗橋	0.0109	0.0000	38332
49	埼玉大橋	栗橋	0.0055	0.0000	134121
50	利根大堰	埼玉大橋	0.0086	0.0157	0
70	黒子橋	文巻橋	0.0055	0.0000	63679
71	川島橋	滝下橋	0.0051	0.0239	0
72	三谷橋	黒子橋	0.0066	0.0087	0
73	下岡橋	黒子橋	0.0051	0.0775	0
74	梁橋	滝下橋	0.0059	0.0249	0
75	宮前橋	乙女大橋	0.0047	0.0639	0
76	乙女大橋	三国橋	0.0094	0.0850	0
77	巴波橋	三国橋	0.0094	0.0824	0
78	吾妻橋	巴波橋	0.0094	0.0050	0
79	落合橋	巴波橋	0.0094	0.0016	0
80	藤岡大橋	三国橋	0.0094	0.0828	0
81	御成橋(黒川)	乙女大橋	0.0055	0.0622	0
82	保橋	乙女大橋	0.0063	0.0697	0
83	川治橋	鬼怒川橋	0.0055	0.0014	0
84	鬼怒川橋	川島橋	0.0055	0.0328	0
85	川治第一発電	鬼怒川橋	0.0051	0.0014	0
86	開進橋	鬼怒川橋	0.0059	0.0018	0
87	明治橋	梁橋	0.0063	0.0125	0
88	大曾橋	明治橋	0.0043	0.0000	0
89	福猿橋	藤岡大橋	0.0086	0.0897	0
90	葉鹿橋	福猿橋	0.0094	0.0643	0
91	高津戸橋	葉鹿橋	0.0070	0.0578	0
92	観音橋	境橋	0.0117	0.0066	0
93	境橋	葉鹿橋	0.0078	0.3510	0
96	栄橋	三郷取水庭	0.0563	0.0000	0
97	一平橋	古ヶ崎	0.1483	0.8506	0
98	古ヶ崎	上葛飾橋	0.0000	0.0000	0

2) 評価条件

① 将来予測時の想定条件

今回の評価では、将来の水質動向に影響する要因として、特に下水道整備に着目し、下水道普及率を0%/年、0.5%/年、1.0%/年、2.0%/年、3.0%/年、及び4.5%/年向上とする6つの想定条件で汚濁負荷量を算定した。この他の主な要因である流域人口と鉱工業出荷額については、いずれの想定条件でも以下の推計値を用いた。

- ・流域人口：厚生省人口問題研究所推計（「都道府県別将来推計人口」¹⁶⁾）で推移
- ・鉱工業出荷額：通産省推計（「生産・出荷・在庫統計」¹⁷⁾）で推移

② 江戸川保全事業の評価に関する条件

将来水質の予測結果に影響する各種条件については、下記にまとめた内容に設定した。確度の高い将来計画値があるものは、それを適用している。また、例えば、導水事業開始後の流況（年間の50%積算頻度値である平水流量など）のように不確定な要素が多い将来条件については、東京都水道局殿からの助言を受け、下記に設定した。

■江戸川流水保全水路について

- ・高水敷（河川水の金町付近の迂回部；古ヶ崎～小山地先）が完成するまでは、坂川系の負荷は江戸川に流入する。流入負荷量は、古ヶ崎の水質が一平橋の水質と同じと仮定し、流量が $2.5\text{m}^3/\text{s}$ の場合の負荷量とした。
- ・浄化施設の処理量は、高水敷完成前は処理量 0、完成後の平成 10 年から $2.5\text{m}^3/\text{s}$ （坂川系の総流量）とした。
- ・高水敷の完成後は、坂川系負荷は金町取水塔地点を迂回し、柳原水門で江戸川に流入する。

■北千葉導水路について

- ・江戸川への流入地点は三郷取水庭近くであるが、三郷取水庭地点の水質に直接影響しないことが知られているので、負荷計算上は上葛飾橋に流入するものとした。
- ・北千葉導水路は平成 11 年から $10\text{m}^3/\text{s}$ の流量で通水するものと想定した。それ以前については、1) 栄橋よりも上流からの流下負荷、2) 北千葉導水路の集水域からの流達負荷、のどちらも無いものと想定した。
- ・北千葉導水路の自浄係数は 0 であると仮定した（自浄のない水路と想定）。

■金町取水塔地点の流量について

- ・流水保全路による迂回流量分 $2.5\text{m}^3/\text{s}$ 、及び北千葉導水路からの流入分 $10.0\text{m}^3/\text{s}$ が直接の流量に反映されるものとした。基準年度の平水流量は $73.0\text{m}^3/\text{s}$ であるので、平成 10 年度以前： $73.0\text{m}^3/\text{s}$ 、平成 10 年度： $70.5\text{m}^3/\text{s}$ 、平成 11 年度以降： $80.5\text{m}^3/\text{s}$ として扱った。

6. 3. 2. 3 江戸川・中川水系の排出負荷量予測結果

下水道普及率がそれぞれ 0%/年、0.5%/年、1%/年、2%/年、3%/年、及び 4.5%/年で向上するような 6 つの想定条件での排出負荷量を算定し、経年的な傾向の違いを比較した。各想定条件での THMFP 排出負荷量の算定結果を図 6-6 に示す。前述のとおり、各想定条件の平成 2～8 年度までの下水道普及率については、基本想定条件の 1%/年で共通とした。

下水道普及率を横ばいとした想定条件 1 では、平成 9 年度以降は経年的に排出負荷量が増加する。平成 8 年度と比較すると、平成 18 年度までに江戸川・中川水系の流域で 12.0ton-THMFP だけ年間排出量が増加する。これは、平成 8 年度比で 3.4%の増加に相当するもので、図 4-6 でも前掲した流域人口の増加による生活系負荷の伸びに起因する。

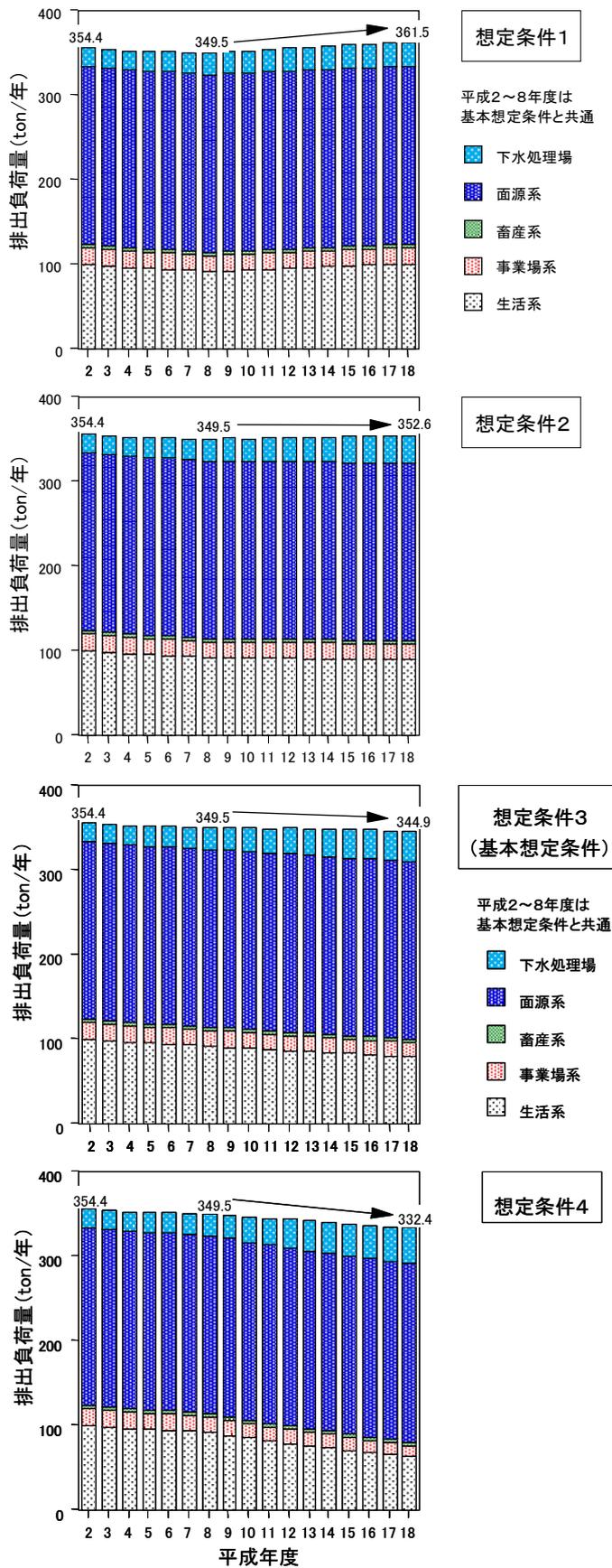


図6-6(1) 江戸川・中川水系THMFP排出負荷量予測結果

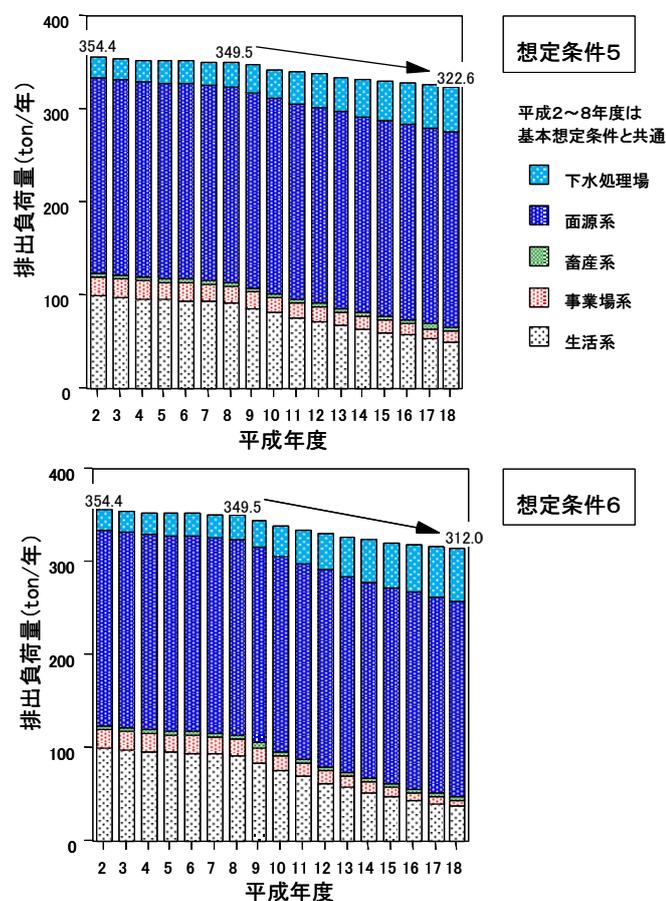


図6-6(2) 江戸川・中川水系THMFP排出負荷量予測結果

他方、下水道普及率が1%/年で増加する想定条件3では、排出負荷量は減少に転じる。発生源ごとの内訳では、事業場系の割合が平成8年度の5.3%から4.7%に減少するほか、下水道が7.4%から10.4%へと増加する。これは、下水道普及率が増加した分だけ、事業場排水の下水流入分が増加するためである。生活系については、平成8年度の90.9ton-THMFP/年が平成18年には78.6ton-THMFP/年へと減少する。このことは、1%/年の下水道整備が、流域人口増加による生活系負荷の増加を相殺することを示す。

想定条件4、5についても、上述の想定条件3とほぼ同様の傾向を示す。下水道普及率3%/年の向上を想定した想定条件5では、下水への流入分が大きく増加するので、下水処理場放流水による排出負荷量も増加する。具体的には、平成8年度の25.9ton-THMFP/年から平成18年度には1.86倍の48.1-THMFP/年にまで増加する。これは主に事業場排水からの流入増加分に起因する。下水道普及率3%/年や4.5%/年の向上を想定した場合、浄化槽などによる処理分も含めると、将来の下水道普及率の伸びは飽和状態となり、経年的な負荷の減少割合も小さくなることが予想される。

前述の表4-8のTHMFP排出濃度原単位に示すように、未処理雑排水198 μ g/Lに対して、下水処理場放流水は94 μ g/Lと下水処理されても半分程度にしかならない。また、事業場排水濃度に比べても、下水放流水中の濃度が十分に低いとはいえない。したがって、THMFPについては、下水道の整備が進んだとしても、河川への負荷排出源が、個別の家庭や事業場から下水処理場に移るだけで、総排出負荷量の大きな減少は望めない。表6-6にまとめたように、下水道普及率の伸びを実施困難なほど大きなレベルに想定した想定条件6でも、排出負荷量は平成18年度までで10.7%の低減に留まる。このことから、THMFP負荷量の大幅な低減には、下水道整備のみならず、4割を占める面源系負荷対策や江戸川保全事業などの河川浄化が必要である。

表6-6 想定条件別THMFP排出負荷量の比較

	排出負荷量 (ton-THMFP/年)	
	平成8年	平成18年
想定条件1 下水道普及率0%/年向上	349.5	361.5
		+12.0 (+3.4%)
想定条件2 下水道普及率0.5%/年向上		352.6
		+6.1 (+1.7%)
想定条件3 下水道普及率1.0%/年向上 (基本想定条件)		344.9
		-4.6 (-1.3%)
想定条件4 下水道普及率2.0%/年向上		332.4
	-17.1 (-4.9%)	
想定条件5 下水道普及率3.0%/年向上	322.6	
	-26.9 (-7.7%)	
想定条件6 下水道普及率4.5%/年向上	312.0	
	-37.5 (-10.7%)	

下段は平成8年からの変化量 (カッコ内は増減率)

6. 3. 2. 4 金町取水塔地点での水質予測結果

前項で述べた条件で計算した基本想定条件での水質予測結果を図6-7に示す。平成2~9年度までは0.0320mg/Lから微減で推移するが、坂川系負荷の迂回が開始される平成10年度には、0.0302mg/Lにまで水質が改善される。この改善効果は、平成9年度水質に対して、4.7%低減に相当する。しかしながら、今回想定した条件では、改善された水質が平成11年度の北千葉導水路の通水開始で0.0308mg/Lとなり、水質改

善効果の4割相当が相殺される。

各想定条件での水質予測結果の比較を図6-8と表6-7に示す。基本想定条件での平成18年度では、THMFPが0.0307mg/Lとなり、東京都水道局がオゾン、活性炭処理などの高度浄水処理実施のガイドラインとする0.03mg/Lを上回っている。このガイドラインを下回るためには、下水道整備を2.0%/年程度で進める必要がある。あるいは現行の下水道整備状況（基本想定条件の1.0%/年程度）では、金町浄水場に導入済みの高度浄水設備の運用を継続する必要がある。

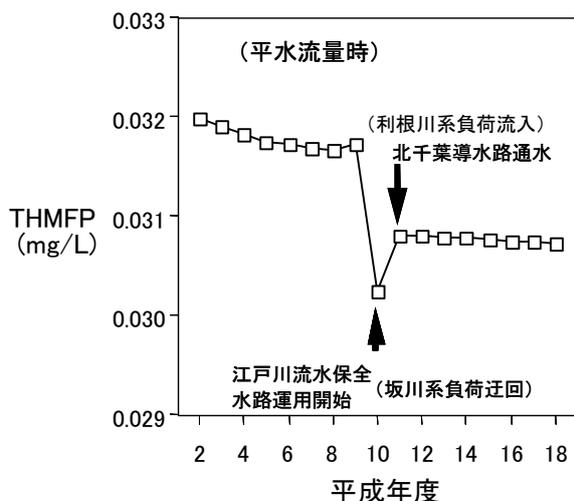


図6-7 基本想定条件での金町取水塔地点THMFP予測値

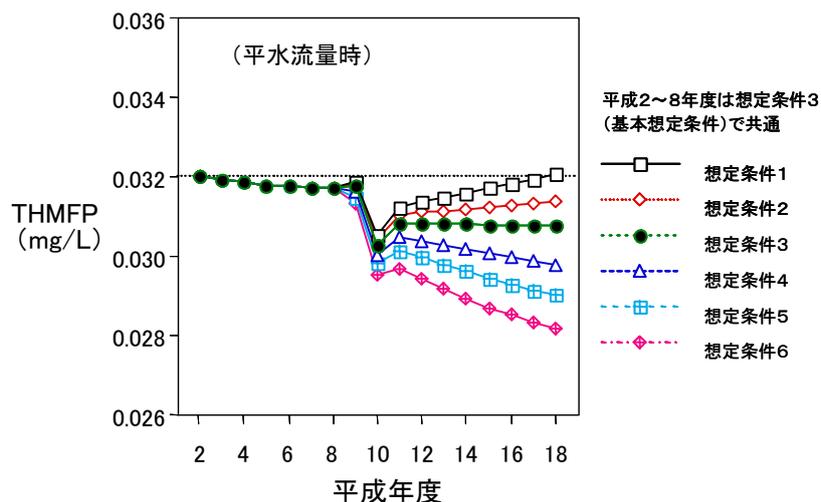


図6-8 想定条件別金町取水塔地点THMFP予測値

表6-7 想定条件別THMFP濃度の比較

	平水流量時 THMFP濃度 (mg/L)	
	平成8年	平成18年
想定条件1 下水道普及率0%/年向上	0.0317	0.0320
		+0.9%
想定条件2 下水道普及率0.5%/年向上		0.0313
		-1.3%
想定条件3 下水道普及率1.0%/年向上 (基本想定条件)		0.0307
		-3.2%
想定条件4 下水道普及率2.0%/年向上		0.0297
		-6.3%
想定条件5 下水道普及率3.0%/年向上		0.0290
		-8.5%
想定条件6 下水道普及率4.5%/年向上		0.0281
		-11.4%

下段は平成8年からの増減率

6. 3. 3 水質保全事業の費用対効果の試算

6. 3. 3. 1 事業費用試算結果

ここでは、想定条件4（下水道普及率2%/年向上）に相当する負荷量低減を実施する場合の費用を試算した。下水道整備，下水高度処理導入などの事業対象区域は、朝霞浄水場の集水域とした。

(1) 下水道整備

2%/年の下水道整備の場合、下水処理流量の増加は、平成18年度までで35.79万m³/日と試算された。費用試算結果を表6-8に示す。建設費用のうち、管渠埋設に係る費用が最も大きい、この費用は管渠延長の見積り方に大きく依存する。ここでは、

表6-8(1) 下水道整備に係る費用試算結果1/2

	流域人口	下水処理人口	下水道普及率	
H2	298万人	88.1万人	29.57%	2%up/年 × 16年
H18	366万人(推計)	207.4万人	56.68%	

・新規処理人口: 207.4 - 88.1 = 119.3万人
 ・新規下水処理流量: 119.3万人 × 0.3 m³/日 = 35.79 万m³/日

参考)
小台下水処理場
35.8万m³/日

・新設下水処理場規模 (1) 日最大処理量Q1: 40万m³/日 = 400千m³/日 = 277.8m³/分
 (2) 日平均処理量Q2: 36万m³/日 = 360千m³/日 = 250.0m³/分
 (3) 主要管渠延長L: 100km = 100000m

●建設費 1) 管渠(シールド工法; φ1500mm)
 建設費C1(万円) = y × L
 y: メートル当りの建設費(万円/m)
 L: 管渠総延長(m) = 100000

$$y = (7.54 \times 10^{-6} x^2 + 5.35 \times 10^{-3} x + 57.48) \times (105.8/90.1)$$

x: 管径(mm) = 1500
 y = 96.84(万円/m)
 C1 = 96.84 × 100000 = 9684000(万円) = 968.4(億円)

2) ポンプ施設
 建設費C2(百万円)
 $C2 = 85.51Q^{1.598} \times (105.8/90.1)$
 Q1: 全体計画流量(m³/分) = 277.8
 C2 = 2904.9(百万円) = 29.0(億円)

3) 下水二次処理施設(標準活性汚泥法; 焼却なし)
 建設費C3(百万円)
 $C3 = 393Q^{1.730} \times (105.8/90.1)$
 Q1: 日最大処理水量(千m³/日) = 400
 C3 = 36614.8(百万円) = 366.1(億円)

総建設費C = C1 + C2 + C3 = 1363.5(億円) 費用関数は文献18)建設省「流総計画」より

他の下水処理場の延長を参考に、新設処理場ほど延長が長くなる傾向にあることを加味して100kmとした。用地費を除く、総建設費は建設省の流総計画¹⁸⁾の費用関数を用いると、1363.5億円となった。

維持管理費については、ポンプ施設と下水二次処理施設（標準活性汚泥法；汚泥処理なし）分を計算した。両者合計で16.8億/年となった。

ここで想定した規模の下水処理場新設により、新設を行わなかった場合（想定条件1）に比べて、河川への排出負荷量は平成18年度で31.7ton-THMFP/年低減するので、単位負荷削減量当りの費用は建設費比で43.01億円/ton-THMFP/年、維持管理費比で0.53億円/ton-THMFPとなった。

表6-8(2) 下水道整備に係る費用試算結果2/2

<p>●維持管理費</p> <p>1)ポンプ施設(新設分)</p> <p>維持管理費M1(百万円/年)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> $M1 = 1.00Q2^{0.690} \times (105.8/90.1)$ </div> <p>Q2:揚水量(m3/分)=250.0</p> <p>M1 = 53.0(百万円/年) = 0.6(億円/年)</p> <p>2)下水二次処理施設(新設分;標準活性汚泥法;焼却なし)</p> <p>維持管理費M2(百万円/年)</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 5px auto;"> $M2 = 48.4Q2^{0.596}$ </div> <p>Q2:日平均処理水量(千m3/日)=360</p> <p>M2 = 1615.9(百万円/年) = 16.2(億円/年)</p> <hr/> <p>●単位負荷低減費用</p> <p>(想定条件4による負荷削減量)</p> <p>= (想定条件1での排出負荷量) - (想定条件4での排出負荷量)</p> <p>= 185.0 - 153.3 = 31.7 ton-THMFP/年</p> <p>・建設費比 = 1363.5億円 ÷ 31.7ton-THMFP/年 = 43.01億円/ton-THMFP/年</p> <p>・維持管理費比 = 16.8億/年 ÷ 31.7ton-THMFP/年 = 0.53億円/ton-THMFP</p> <p style="text-align: right; font-size: small;">費用関数は文献18)建設省「流総計画」より</p>
<p>総維持管理費M = M1 + M2 = 16.8(億円/年)</p>

(2) 下水高度処理施設導入

ここでは、下水処理場の整備が横ばいと仮定し、想定条件4に相当する負荷量の削減を下水高度処理の導入で実施する場合を試算した。表6-9に示すように、仮に下水処理場からの排出負荷量17.7ton-THMFP/年（平成2年度）の総てを高度処理で除去できると仮定しても、想定条件4の負荷低減量31.7ton-THMFP/年よりも小さい。これ

より、既設下水処理場への高度処理導入だけでは、想定条件4に相当する効果を得られない。前述の下水道整備とは同じ実施効果の条件では比較できないが、現行実現しうる最も除去率の高い処理法を導入した場合で試算した。処理法としては、65～75%のCOD除去率（THMFPも同程度の除去率と仮定）が得られる「凝集沈殿法+急速ろ過法+活性炭吸着法」を想定した。

設備費は活性炭施設が80.3億円ほか、3つの処理法施設の合計で151.4億円となった。また、維持管理費は合計41.8億円/年で活性炭施設が8割以上を占める。下水道整備に比べると管渠埋設工事などがいないため、建設費は小さくなる。単位負荷削減量当りの費用は建設費比でも、12.24億円/ton-THMFP/年となっており、下水道整備の3分の1程度である。

表6-9(1) 下水高度処理導入に係る費用試算結果1/2

THMFP排出負荷量(H18)		
想定条件1	185000 kg-THMFP/年(うち下水処理17668)	↓ -31700 kg-THMFP/年
想定条件4	153300 kg-THMFP/年(うち下水処理32178)	

既設処理場への高度処理導入で想定条件4に相当する効果を得るには31700kg-THMFP/年の低減が必要だが、仮に下水高度処理で二次処理水の負荷17668kg-THMFP/年を全部除去できても、想定条件4には及ばない。

下水高度処理のみで想定条件4に相当する効果を得ることはできないが、ここでは最大限の処理を実施した場合で費用試算した。

想定した高度下水処理：
二次処理水に対して「凝集沈殿法+急速ろ過法+活性炭吸着法」

・既設下水処理場規模 処理人口88.1万人×0.3m³/日=26.43万m³/日
(1) 日最大処理量Q1:30.0万m³/日=300千m³/日
(2) 日平均処理量Q2:26.5万m³/日=265千m³/日

●建設費

1)急速ろ過法
建設費C1(百万円)
 $C1 = 100.8Q^{0.538} \times (105.8/98.8)$
Q1:日最大処理水量(千m³/日)=300
C1 = 2322(百万円)=23.2(億円)

2)凝集沈殿法
建設費C2(百万円)
 $C2 = 94.2Q^{0.677} \times (105.8/98.8)$
Q1:日最大処理水量(千m³/日)=300
C2 = 4794(百万円)=47.9(億円)

3)活性炭吸着法
建設費C3(百万円)
 $C3 = 110.8Q^{0.739} \times (105.8/98.8)$
Q1:日最大処理水量(千m³/日)=300
C3 = 8032(百万円)=80.3(億円)

費用関数は文献18)建設省「流総計画」より

総建設費C = C1 + C2 + C3 = 151.4(億円)

表6-9(2) 下水高度処理導入に係る費用試算結果2/2

<p>●維持管理費</p> <p>1) 急速ろ過法</p> <p>維持管理費M2(百万円/年)</p> $M1 = 6.65Q2^{0.546} \times (105.8/98.8)$ <p>Q2: 日平均処理水量(千m³/日) = 265</p> <p>M1 = 149.8(百万円/年) = 1.5(億円/年)</p> <p>2) 凝集沈殿法</p> <p>維持管理費M2(百万円/年)</p> $M2 = 7.63Q2^{0.730} \times (105.8/98.8)$ <p>Q2: 日平均処理水量(千m³/日) = 265</p> <p>M2 = 479.9(百万円/年) = 4.8(億円/年)</p> <p>3) 活性炭吸着法</p> <p>維持管理費M3(百万円/年)</p> $M3 = 20.46Q2^{0.912} \times (105.8/98.8)$ <p>Q2: 日平均処理水量(千m³/日) = 265</p> <p>M3 = 3553(百万円/年) = 35.5(億円/年)</p>
<p>●単位負荷低減費用</p> <ul style="list-style-type: none"> ・COD除去率: 「急速ろ過+凝集沈殿+活性炭吸着」で下水二次処理水に対して65~75% ・下水処理場からのTHMFP負荷量17.7ton-THMFP/年 ・THMFPの除去率がCODと同程度(70%)と仮定すると、 (下水高度処理導入による負荷削減量) = 17.7 × 0.70 = 12.39ton-THMFP/年 ・建設費比 = 151.4億円 ÷ 12.39ton-THMFP/年 = 12.24億円/ton-THMFP/年 ・維持管理費比 = 41.8億/年 ÷ 12.39ton-THMFP/年 = 3.38億円/ton-THMFP <p style="text-align: right;">費用関数は文献18) 建設省「流総計画」より</p>
<p>総維持管理費M = M1 + M2 + M3 = 41.8(億円/年)</p>

しかしながら、負荷低減効果は上述のように下水道整備には及ばないにも係わらず、維持管理費は下水道整備の17.8億/年の2倍以上の41.8億/年となっている。維持管理費比では3.38億円/ton-THMFPで活性汚泥処理の6倍強である。これは、処理の容易な負荷成分が除去された後の下水二次処理水を処理することによる。

(3) 流水保全水路整備

費用試算結果を表6-10にまとめた。建設費については、当該河川を対象とした「直轄流水保全水路整備事業」と「河川環境整備事業」の予算額から計算した。事前調査の費用を除くと、昭和62~平成9年度までの事業期間に208.2億円が投入される。

本事業で導入される礫間接触酸化施設については、同規模の施設の運用実績例がなく、維持管理費は小規模施設の事例データ¹⁹⁾から推算した。維持管理費の主な内訳は、取水ポンプ動力費や曝気装置動力費である。5槽全面運用時の2.5m³/sの処理量では、1.7億円/年という試算結果となった。費用対効果でみると、建設費比は47.53億円/ton-THMFP/年となり、上述の下水道整備と同等の値となっているが、維持管理費比は0.39億円/ton-THMFPで下水処理の7割程度で済む。

表6-10 流水保全水路整備に係る費用試算結果
—江戸川流水保全事業の例—

<p>江戸川流水保全水路整備事業は、坂川の水を江戸川を分離して、浄水場の下流へ流す水路を整備する。江戸川本川に流入していた坂川の水は「曝気付礫間接触法」及び「礫間接触法」により、古ヶ崎浄化施設で浄化される。浄化施設は、1槽当り0.5m³/秒の処理能力を有し、最終的には5槽で2.5m³/秒の施設能力となる。</p>	
<p>●建設費：調査開始時から完成時までの事業予算(昭和62年～平成9年)</p> <p>・「直轄流水保全水路整備事業」及び「河川環境整備事業」の予算額合計</p> <p>C=208.2億円(水量・水質等の事前調査費用を除いた分)</p>	
<p>●維持管理費：文献¹⁹⁾「河川・湖沼・水辺の水質浄化、生態系保全と景観設計」(工業技術会編)での試算例</p> <p>・0.08億/年：10000m³/日規模、礫交換10年 (取水ポンプ動力、曝気装置動力、汚泥除去、礫交換)</p> <p>・処理能力2.5m³/秒=216000m³/日</p> <p>M=0.08(億/年)×216000/10000=1.7億/年</p>	
<p>●単位負荷低減費用</p> <p>・除去率：BOD除去(計画値)で23mg/L→5.7mg/L：75%(主にSS分での除去)</p> <p>BOD負荷削減量=2.5m³/秒×23mg/L×0.75=1363ton-BOD/年</p> <p>・THMFP除去率を同程度と仮定するとTHMFP削減量aは</p> <p>1363：a=BOD排出負荷量：THMFP排出負荷量=110254ton：354ton (江戸川・中川水系；平成2年度)</p> <p>a=4.4ton-THMFP/年</p> <p>・建設費比=208.2億円÷4.4ton-THMFP/年=47.53億円/ton-THMFP/年</p> <p>・維持管理費比=1.73億/年÷4.4ton-THMFP/年=0.39億円/ton-THMFP</p>	
総建設費M = 208.2(億円/年)	総維持管理費M = 1.7(億円/年)

(4) 高度浄水施設導入

表6-11に示すように、高度浄水処理施設導入により想定条件4相当の効果を得るには、従来処理比で10%程度の除去率向上が必要となる。ここでは3つの方式を対象としたが、それぞれの除去性能が同一ではないため、直接の比較は難しい。粒状活性

炭は設備が簡単のため、建設費は他の方式に比べて一桁以上小さい。しかしながら、除去性能がオゾン+粒状活性炭よりも低いにも係わらず、同程度の維持管理費が必要となる。

表6-11 高度浄水処理導入に係る費用試算結果

<table border="1"> <tr> <td>平成18年度THMFP濃度</td> </tr> <tr> <td>想定条件1:0.0296mg/L</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">↓</td> </tr> <tr> <td>想定条件4:0.0268mg/L</td> </tr> </table>	平成18年度THMFP濃度	想定条件1:0.0296mg/L	↓	想定条件4:0.0268mg/L	<p>-0.0028 mg/L</p>	<p>想定条件4に相当する効果を得るには、従来比で9.5%程度の除去率向上が必要</p> <p style="text-align: right;">$0.0028/0.0296=0.0945$</p>								
平成18年度THMFP濃度														
想定条件1:0.0296mg/L														
↓														
想定条件4:0.0268mg/L														
<p>・朝霞浄水場(処理能力170万m³/日)相当の規模を想定して試算</p> <p>・高度処理設備:50万m³/日×3基を想定</p>														
<p>(1)粉末活性炭</p> <p>●建設費:活性炭投入装置(ホッパー、クレーンなど)</p> <p style="text-align: center;">$3.68\{億円/(50m^3/日設備)\} \times 3基 = 11.0(億円)$</p> <p>●維持管理費:20mg/L注入、活性炭500円/kgで算出</p> <p style="text-align: center;">$10(円/m^3) \times 150(万m^3/日) \times 120(日注入/年) = 17.9(億円/年)$ = 3600.0 ton/年</p>		<p>参考)</p> <p>金町浄水場での粉末活性炭使用</p> <p>1595ton, 129日(平成2年)</p>												
<p>(2)粒状活性炭(GAC)</p> <p>●建設費:活性炭吸着池、活性炭再生設備など</p> <p style="text-align: center;">$53.82\{億円/(50m^3/日設備)\} \times 3基 = 161.5(億円)$</p> <p>●維持管理費:空間速度SV10、活性炭寿命300日、張り込み厚2m、再生ロス10%</p> <p style="text-align: center;">$1.24(円/m^3) \times 150(万m^3/日) = 6.8(億円/年)$</p> <p style="text-align: right; font-size: small;">費用関数は文献20)厚生省「高度浄水施設導入ガイドライン」より</p>														
<p>(3)オゾン+生物活性炭(BAC)</p> <p>●建設費:オゾン発生装置、オゾン接触池など</p> <p style="text-align: center;">オゾン:$26.64\{億円/(50m^3/日設備)\} \times 3基 = 79.9(億円)$</p> <p style="text-align: center;">GAC:$53.82\{億円/(50m^3/日設備)\} \times 3基 = 161.5(億円)$</p> <p>●維持管理費:平成8年度の金町浄水場実績値(3.92円/m³)により算出</p> <p style="text-align: center;">$3.92(円/m^3) \times 150(万m^3/日) = 21.5(億円/年)$</p>														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>高度浄水処理方式</th> <th>建設費(億円)</th> <th>維持管理費(億円/年)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(1)粉末活性炭</td> <td style="text-align: center;">11.0</td> <td style="text-align: center;">17.9</td> </tr> <tr> <td>(2)粒状活性炭(GAC)</td> <td style="text-align: center;">161.5</td> <td style="text-align: center;">6.8</td> </tr> <tr> <td>(3)オゾン+生物活性炭(BAC)</td> <td style="text-align: center;">241.4</td> <td style="text-align: center;">21.5</td> </tr> </tbody> </table>			高度浄水処理方式	建設費(億円)	維持管理費(億円/年)	(1)粉末活性炭	11.0	17.9	(2)粒状活性炭(GAC)	161.5	6.8	(3)オゾン+生物活性炭(BAC)	241.4	21.5
高度浄水処理方式	建設費(億円)	維持管理費(億円/年)												
(1)粉末活性炭	11.0	17.9												
(2)粒状活性炭(GAC)	161.5	6.8												
(3)オゾン+生物活性炭(BAC)	241.4	21.5												

6. 3. 3. 2 事業間の費用対効果比較

上述の各事業の費用試算結果を表6-12にまとめた。今回の解析で着目した流水保全水路整備事業は、同一の実施効果（THMFP 負荷量の削減当り）を実現する費用でみた比建設費で下水道整備とほぼ同程度である。維持管理費比では、下水道整備の7割程度であり、投資費用に対する水質改善効果がより高いことが分かった。下水高度処理は、易分解性の汚濁成分が除去された後の下水処理水を対象とすることもあり、維持管理費比が他よりも一桁高く、費用対効果が小さい。流域全体の THMFP 負荷を削減するという観点では、未処理の下水（いわゆる生下水）や河川水などを処理対象とした事業の方が有利である。

表6-12 水質保全事業等の費用試算結果のまとめ

保全事業等	建設費(億円) (用地費を含まず)	維持管理費(億円/年)	単位負荷低減費用		
			建設費比 (億円/ton-THMFP/年)	維持管理費比 (億円/ton-THMFP)	
下水道整備(標準活性汚泥法)	1363.5 *1	17.8	・汚泥処理なし	43.01	0.53
下水高度処理導入(急速ろ過+凝集沈殿 +活性炭吸着)	151.4 *2	41.8	・汚泥処理なし	12.24	3.38
流水保全水路整備(礫間接触法)	208.2 *3	1.7	・礫交換10年毎 ・曝気付き	47.53	0.39
高度浄水 処理	粉末活性炭	11.0 *4	17.9	・20mg/L ・120日注入/年	
	粒状活性炭	161.5 *4	6.8	・SV10, 再生ロス10% ・活性炭寿命300日	
	オゾン+生物活性炭	241.4 *4	21.5	・金町実績コスト 適用	

*1: 日最大処理量40万³/日規模(新設想定分) *3: 処理流量2.5m³/秒規模(日処理量21.6万³; 江戸川流水保全水路完成時)

*2: 日最大処理量30万³/日規模(既設相当分) *4: 日最大処理量150万³/日規模(50万³/日×3基)

流水保全水路整備事業は、最も高い費用対効果を持つことが分かった。下水道整備には、流域の汚濁負荷低減という目的だけでなく、快適な都市生活を実現するための社会インフラ整備という意味合いもある。このため、流水保全水路整備事業よりも費用対効果が低いという理由で下水道の整備が凍結されるべきではない。目的に応じた事業の選択が必要であり、特定の河川区間の水質を改善しようとする場合には、流水保全水路整備事業が最適である。

6. 4 流域環境改善事業への適用

流域環境改善事業のフィールドスタディとして、本研究では流域における熱環境問題として顕在化している都市ヒートアイランド緩和策について、開発システムによる評価解析を行った。都市における熱環境の変化、すなわち流域都市域での気温の上昇は、流域での降雨や水需要に関連するだけでなく、その緩和策として下水道の活用が検討されるなど、水管理との関わりが大きい。フィールドスタディを通して、各種緩和策の費用対効果を試算するとともに、流域管理システムの適用性を確認する。

6. 4. 1 流域環境改善に向けた評価解析

環境問題への取り組みが国内で積極的に進められている。都市インフラシステムは、流域環境への寄与が大きく、相互関係を考慮した適正な配置や運転がエネルギー効率(省エネルギー)と環境改善に有望であるにもかかわらず、都市インフラシステムの一つ一つが視野に入るようなスケールで、これらの相互関係を扱うような流域環境の解析は緒についたところであり、今後の課題として残されていた。

本研究では、流域内の環境に関連した情報を地図と対応して扱える地理情報システム (Geographic Information System; GIS) に着目し、都市インフラシステムの計画・制御によって改善が可能な環境問題の解析を取り扱った。特に、都市インフラとの関わりが深いと考えられる環境問題の一例としてヒートアイランドを取り上げ、流域評価とリンクさせた環境問題の定式化手法と GIS 上での環境モデリング技法について検討した。

都市インフラによる広域最適化問題を定式化するには、可能なかぎり「総合的」であることが望ましいが、流域内の複雑な現象を総て含むような定式化は現実には困難である。そのため、ある着目する観点から問題を切り出して、複雑な問題を、具体的に処理できるレベルの部分問題として、整理する必要がある。代表的な環境問題は、この観点を与えるもので、例えば、ヒートアイランド(流域/都市の熱環境)という観点を設定すると、熱を媒体とした都市インフラ間の関係を定式化すべき、というような見通しを得ることができる。ヒートアイランドや水圏問題などを、都市インフラを影響因子として含んだ形でモデル化する手法を適用する。これにより、都市インフラの配置や運転を改善したときの都市環境改善の効果を評価できる。ここでの技術課題は、GIS の基本データ形式であるラスタ型データ(一般的には、整数や記号などの属性情報)での適切なモデル化形式とシミュレーション方式にある。

シミュレーション方式としては、第5章で提案したセルラオートマトンによるモデリングを適用し、ケーススタディにて具体的な事例を示す。

6. 4. 2 都市ヒートアイランドの評価解析

6. 4. 2. 1 ヒートアイランド概要

(1) 現象

ヒートアイランドは、都市内での気温がその周辺部（郊外）に比べて高くなる現象である。図6-9の模式図に示すように、東京やニューヨークなどの大都市では、都心部の温度が数℃、最高で8℃程度高くなるということが知られている。²⁶⁾ これら大都市以外でも、程度の差はあるものの、日本を含む世界中の都市でヒートアイランドが観測されている。ヒートアイランド発生主な原因は、都市の成長（人口、工業規模の増加）による人工排熱の増加、都市地表面の変化（コンクリート、アスファルト化）による都市の熱環境変化などとされており、都市化の進行に伴って発生する現象である。

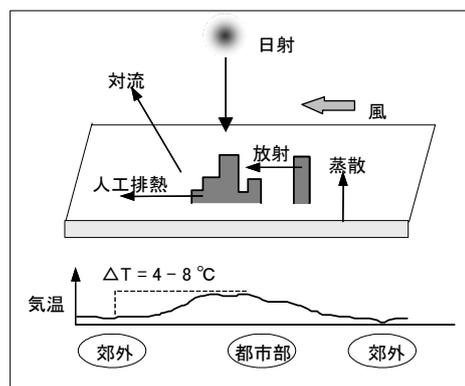


図6-9 ヒートアイランド模式図

(2) ヒートアイランドの影響

ヒートアイランドによる都市温暖化の影響は、時期と都市の気候条件によって異なる。欧州など緯度の高い地域では、温暖化による影響は殆ど問題とならない。しかし、日本や米国など、中緯度以下の地域では、夏季の不快感の増加により、住民にとっての快適な環境が損なわれる。また、不快感の増加による冷房機器稼働率の増加は、戸外への人口排熱を増やすことになり、これがヒートアイランドを更に加速させる悪循環を引き起こす。これらの影響について、エネルギー消費の観点から既存の知見を整理すると以下のようなになる。

- ・東京など、冬季に暖房が必要な都市では、冬季の温暖化は暖房用エネルギー低減に有利であるが、エネルギー消費率が更に高い、夏季の冷房用エネルギー増加も伴い、年間では冷暖房用のエネルギー消費を1割程度増加させる。²⁷⁾
- ・エネルギーの生成には、必ず環境への悪影響（大気汚染、二酸化炭素放出など）が伴い、ヒートアイランドによるエネルギー消費増加は、これを助長する。
- ・ヒートアイランドによる冷房用エネルギー増加のピークは、夏季の電力需要ピークと一致し、東京、ニューヨークなどの都市では、電力供給能力を越える需要により、広範囲の停電を引き起こす可能性がある。²⁸⁾ 停電による被害は、東京の場合、3時間で1.8兆円との試算もあり、影響は広範に及ぶ。²⁹⁾

(3) 従来への取り組み

ヒートアイランドは、新しい都市環境問題ではなく、これまでも様々なアプローチでモデル化や緩和策の検討が行われてきた。

モデル化に関しては、1) マクロモデル、2) ミクロモデルに分けられる。前者は、都市の人口や物理的構造によって温暖化の強度をモデル化するもので、Mitchell³⁰⁾、Oke³¹⁾ などの研究が知られている。また、後者では、都市を分割したメッシュ単位で主に人工排熱を考慮した熱収支や流れの計算によって、都市内の昇温分布をモデル化しており、Terjung³²⁾ や尾島³³⁾、斉藤³⁴⁾ などのシミュレーション結果が出されている。

また、緩和策では、実際に実施されたケースとして、1970 年前後の米国カリフォルニア州パームスプリングスでの緑被率の向上が知られている。植物による蒸散作用による熱吸収で、気温が数°C 低下したことが観測されている。また、日本では具体的な実施例はないが、1992 年より建設省（現国土交通省）のエコシティプロジェクトの緑化専門分科会³⁵⁾、東京都、大阪府が屋上緑化による温暖化緩和策を検討している。

6. 4. 2. 2 ヒートアイランド解析の手順

本研究でのヒートアイランド解析の目的は、実際の都市で実現可能な緩和策を評価することである。この目的に対し、先に述べた従来のモデルでは、以下のような問題が発生する。

- 1) マクロモデルによる解析では、都市内の温度分布を予測できないので、都市インフラの配置や運転に関する評価に使えない。
- 2) 発表の事例が最も多い、ミクロモデルによる3次元の空気・熱の流れシミュレーション（Navier-Stokes などの基礎方程式）では、現実の都市の複雑な地理的な条件を境界条件として取り込むことが難しい。これまでの発表は、いずれも簡略化された仮想の都市でのシミュレーションに留まっている。
- 3) 複雑な地理的条件を境界条件として取り込んだとしても、実用的な計算時間内での求解は困難であることが予想される。スーパーコンピュータでなければ、解けないようなモデルでは、汎用のパーソナルコンピュータをベースとする GIS システムへの適用が困難である。

このため、本研究では複雑な地理的条件を取り込み、かつ、少ない計算時間で解の求まるミクロモデルを新たに開発する必要がある。本研究では、図6-10に示す通り、(1)GIS モデリング手法を利用した経験的モデルの開発、(2)開発モデルによる実都市でのシミュレーション、(3)都市インフラによる緩和策評価の手順で進める。

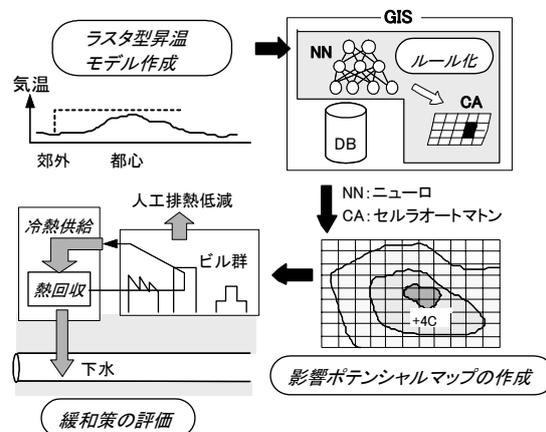


図6-10 本研究でのヒートアイランド解析手順

6. 4. 2. 3 ヒートアイランドモデル

(1) 現象の分類

ヒートアイランドは、都市の熱収支がその周辺地域（郊外）に比べると、取り込まれる熱がより多いことに起因する。したがって、熱収支を数量化できれば、ヒートアイランドの強度（都市部と郊外の温度差）を予測することができる。都市の熱収支に大きく寄与する現象は、図6-11に示すよう6つの現象であり、ヒートアイランドの強度 ΔT_{u-r} は、式(1)で表現できる。

$$\Delta T_{u-r} = T^u - T^r = (T_0^u + \Delta T_s^u + \Delta T_a^u + \Delta T_i^u + \Delta T_e^u + \Delta T_c^u + \Delta T_r^u) - (T_0^r + \Delta T_s^r + \Delta T_a^r + \Delta T_i^r + \Delta T_e^r + \Delta T_c^r + \Delta T_r^r) \quad \dots (1)$$

ΔT_s : 地表面への日射による気温の変化分、

ΔT_a : 人工排熱による気温の変化分、

ΔT_i : 地表面からの赤外線放射による気温の変化分、

ΔT_e : 蒸発散による気温の変化分、

ΔT_c : 対流による気温の変化分、

ΔT_r : 周辺の建物からの熱の再放射による気温の変化分、

T_0 : 初期気温（バックグラウンド値）

単位は全て $^{\circ}\text{C}$ である。また、上添字 **u** と **r** は、それぞれ都市部(urban)と郊外(rural)の値であることを示す。ここでのモデルは、対象とする区域を分割したメッシュ（以下では、GIS の用語にならってセルと呼ぶ）単位で扱うが、最初の4つの現象は、各セルの地理的特徴（エネルギー消費率、建築物の構造など）に依存していることが分かる。一方、残りの2つの現象は、セル間の相互作用によって引き起こされる現象である。前者は、熱の基本法則に基づく既存の物理モデルで記述することができる。また、後者はセル間の相互作用をルール形式で記述してシミュレートすることができるセルラオートマトンでのモデル化が好適であるため、本研究でのヒートアイランドのモデルは、両者を併用して記述することとした。

(2) 物理モデル

ここでは物理モデルで記述されるヒートアイランドの熱移動現象のモデルを順に説明する。

1) 地表面への日射による気温変化：Cluster Thermal Time Constant モデル

地表面への日射量の変化は、地表面温度を変化させることによって、地表面に接する大気の温度を変化させる。地表面を介した日射の気温に対する影響は、地表面の熱特性によって異なる。Sharlin¹³⁾は、地中における Fourier の熱伝導方程式から導い

T: 気温					
To: 標準気温 (バックグラウンド値)				T: 気温変化	
地理的特性で説明される気温変化				近傍領域との相互作用による気温変化	
日射 Is	人工排熱 Ia	赤外放射 Ii	蒸発散 Ie	対流 Ic	再放射 Ir
物理モデル				セルラオートマトンモデル	

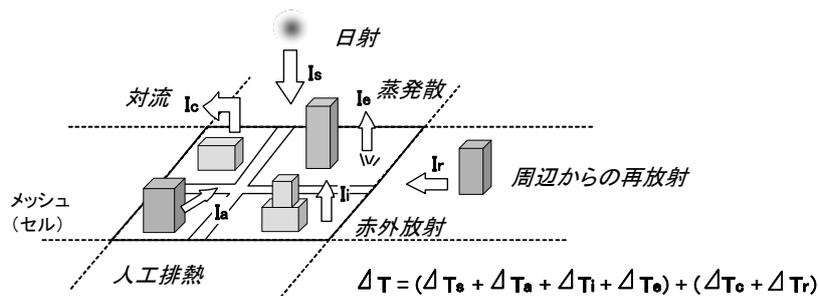


図6-11 ヒートアイランド現象の分類

た式 (2) を提案している。この式では、日射量の変化に対する気温の変化は、指数的に減衰するが、過去の時間の影響が蓄積されるようなモデルとなっている。

$$\Delta T_s(x, y, t) = \sum_{\lambda=0}^t \frac{m(x, y)}{h(x, y, \lambda)} \cdot \Delta I(x, y, \lambda) \cdot \{1 - PSA(x, y, \lambda)\} \cdot [1 - \exp\{-\frac{t - \lambda}{CTTC(x, y)}\}] \quad \dots (2)$$

m(x,y): セル(x,y)の熱吸収度 (-)、
h(x,y,t): 時間 t での総括熱移動容量係数 (Wm⁻²K⁻¹)

$$h(x, y, t) = 9.8 + 4.1u(x, y, t) \quad \dots (3)$$

u(x,y,t): 風速 (msec⁻¹)、
I(x,y,t): 日射強度 (Wm⁻²)、
PSA(x,y,t): 日陰率 (-)

$$PSA(x, y, t) = \frac{\bar{H}(x, y) \tan Z(x, y, t)}{\bar{W}(x, y)} \quad \text{if} \quad \frac{\bar{H}(x, y) \tan Z(x, y, t)}{\bar{W}(x, y)} \leq 1 \quad \dots (4)$$

$$PSA(x, y, t) = 1 \quad \text{if} \quad \frac{\bar{H}(x, y) \tan Z(x, y, t)}{\bar{W}(x, y)} > 1$$

Z(x,y,t): 太陽の天頂角 (deg)、
 $\bar{H}(x,y)$: 平均建築物高さ (m)、
 $\bar{W}(x,y)$: 平均道路幅 (m)、
CTTC(x,y): 熱時定数 (hr)

気温への影響の度合いは、地表面の熱特性（日射を受けてからの地面温度の変化の特性；熱慣性）によって異なる。この影響の度合いは、地表面の種類（Cluster Thermal Time Constant; CTTC）によって表現する。また、地表面への日射量は、セル内の建築物（ビルなど）による影響を受けるので、式（4）と図6-12に示す日陰率（Partial Shaded Area; PSA）による補正を行なう。

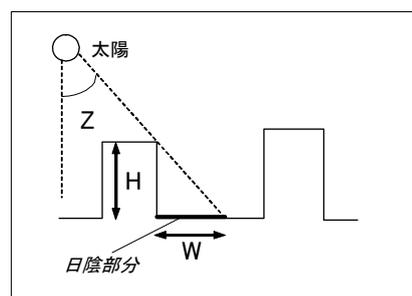


図6-12 日陰率(Partial Shaded Area)

2) 人工排熱による気温の変化

前述の気温に対する日射量の影響をコントロールすることは困難であるが、人工排熱はヒートアイランドの影響因子の中で、コントロールできるものの一つとして重要である。人工排熱による気温の変化分は、熱量と比熱に関する簡単な関係式式（5）でモデル化できる。

$$\Delta T_a(x, y, t) = \frac{Q_a(x, y, t)}{C \cdot V(x, y)} \quad \dots (5)$$

$Q_a(x, y, t)$: 人工排熱量 (J)、

C : 大気比熱 ($Jm^{-3}K^{-1}$)、

$V(x, y)$: 地表面の影響を受ける大気容積 (m^3)

このモデルを適用する際には、人工排熱の影響が及ぶ大気容積を与える必要がある。人工排熱が拡散する範囲は、大気の状態によって異なり一意に決定することが難しいが、ここでは地表面の影響が直接及ぶとされる接地境界層（一般には地上 100m 以下を指す）のみで人工排熱の拡散が起こるものとする。

気温に影響する大規模な人工排熱源は、発電所、都市ごみ焼却場、空調ユニット、冷蔵倉庫、変電所など、いずれも都市の活動に不可欠な都市インフラ施設であり、都市内の分散している。各熱源の規模を東京都 23 区を例にまとめたものを表 6-13³⁷⁾に示す。これら人工排熱の低減は、ヒートアイランドの緩和だけでなく、未利用エネルギーの活用という観点からも重要である。具体的な低減策は、後述する。

3) 地表面からの赤外線放射による気温の変化

地表面と大気は、それぞれの温度に応じた量の赤外線によって熱を放射し、両者間の放射熱の差が気温の変

表6-13 未利用熱賦存量の例
(東京都23区)

都市施設	熱賦存量の比率
発電所	33.3%
下水	42.0%
焼却炉	13.1%
冷凍倉庫	3.9%
変電所	2.1%
地下鉄	4.6%
地下ケーブル	1.0%

総賦存熱量: 18205 Tcal/年

化を引き起こす。放射熱の量は良く知られた Stephan-Boltzmann の法則で求めることができる。

$$\Delta T_i = \frac{\sigma\{\varepsilon(x,y)\cdot\theta^4(x,y,t) - Br(x,y)\cdot T^4(x,y,t)\}SVF(x,y)}{h(x,y,t)} \quad \dots (6)$$

σ : Stephan-Boltzmann 定数 G ($Wm^{-2}K^{-4}$)、
 $\varepsilon(x,y)$: 放射率 (-)、
 $\theta(x,y,t)$: 地表面温度 (K)、
 $Br(x,y)$: Brunt 数 (-)

$$Br(x,y) = a + b\sqrt{VP} \quad \dots (7)$$

VP : 蒸気圧 (mmHg)、
 a, b : 係数 (-)、
 $SVF(x,y)$: 大気開度 (-)

$$SVF(x,y) = \{1 - (\beta_{w1} + \beta_{w2})\} \quad \dots (8)$$

$$\beta_w = (1 - \cos\theta) / 2 \quad \dots (9)$$

$$\theta = \tan^{-1}(\bar{H} / 0.5\bar{W}) \quad \dots (10)$$

$\bar{H}(x,y)$: 平均建築物高さ (m)、
 $\bar{W}(x,y)$: 平均道路幅 (m)

赤外線による地表面と大気との熱交換は、地表面から見て大気がどれくらい開かれているかの度合いに依存する。例えば、ビルの密集地域では、大気に対して開かれている度合いが小さいので、熱交換の効率が悪いことになる。このような大気の開かれ方の度合いは、図6-13に示す都市構造の尺度である大気開度 (Sky View Factor; SVF) ³¹⁾によって考慮する。

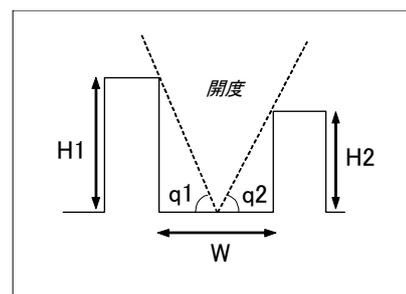


図6-13 大気開度 (Sky View Factor)

4) 蒸発散による気温の変化: Penmann モデル

蒸発散は、植物からの水分蒸散と湿った土壌からの水分蒸散から成り、いずれも水分を気化させる際に、潜熱を大気中から奪うため、ヒートアイランドを緩和させる効果がある。蒸発散率は、市販の計測器具によって計測することが可能であるが、広い範囲にわたる分布データを収集することは難しいため、評価モデルの導入が必要とな

る。ここでは、国連の食料農業機構（Food and Agriculture Organization; FAO）でも採用されている式（12）の Penmann モデル³⁸⁾に基づいて気温変化への影響を評価する。

$$\Delta T_e(x, y, t) = \frac{ET(x, y, t) \cdot A_e(x, y) \cdot \Delta t}{C \cdot V(x, y)} \times 857 \quad \text{--- (11)}$$

$ET(x, y, t)$: 蒸発散率 (Wm^{-2})

$ET(x, y, t)$

$$= k_c(x, y) \cdot k_w(x, y, t) [W(x, y, t) \cdot I(x, y, t) + \{1 - W(x, y, t)\} \cdot f\{u(x, y, t) \cdot e_d(x, y, t)\}] \quad \text{--- (12)}$$

k_c : 植生係数 (-)、

$k_w(x, y, t)$: 気象条件補正係数 (-)、

$W(x, y, t)$: 温度補正係数 (-)、

$I(x, y, t)$: 日射強度 (Wm^{-2})、

$f(u)$: 風速補正関数 ($\text{Wm}^{-2}\text{mbar}^{-1}$)

$$f(u) = 0.27 \left(1 + \frac{u}{100}\right) \quad \text{--- (13)}$$

$u(x, y, t)$: 風速 (kmday^{-1})、

$e_d(x, y, t)$: 補蒸気圧 (mbar)、

$A_e(x, y)$: 緑化（水面）面積 (m^2)、

Δt : 計算間隔 (hr)、

C : 大気の比熱 ($\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$)、

$V(x, y)$: 地表面の影響を受ける大気の容積 (m^3)

このモデルは、植物に覆われた地表面だけでなく、植生係数 k_c を変えることにより、湖沼などの水面にも適用することができる。以上、4つの物理モデルについて簡単に述べたが、シミュレーションに必要なデータ収集、シミュレーション上の条件などの詳細については後述する。

6. 4. 3 下水道を利用した緩和策の検討

ここでは、下水道を利用したヒートアイランドの緩和策について説明する。緩和策の定量的な効果は、前節で述べたヒートアイランドモデルによって評価する。

6. 4. 3. 1 従来の緩和策

前節で触れたように、既に幾つかのヒートアイランド緩和策が検討され、現実にも実施された案もある。具体的な緩和策としては、以下の3つが知られており、いずれも都市化によってもたらされた変化を都市化以前の状態に戻すような施策となっている。

(1) 緑化推進による緑被率向上

米国での実施例は、先に述べた通りであるが、日本国内での検討も活発に行なわれている。例えば、東京都や大阪府では平成4年度より研究調査会を発足させ、特にビル群の屋上緑化に関する調査を開始している。公共施設での実施から着手されており、建設会社（ゼネラルコントラクター）各社も屋上緑化のための施工技術、都市園芸技術の開発を継続している。

(2) 都市構造の改善

この緩和策は、密集したビルによって大気の停滞しがちな都市の構造を改善することによって、ヒートアイランドと大気汚染を同時に緩和することを狙っている。エコシティの緑化専門分科会では、道路や河川を利用して、恒常風向に沿った「風の道」と呼ばれる緑化空間の整備を検討している。実施には、都内での高速道路建設以上の困難が予想されるが、実施されれば、抜本的な策として大きな効果が予想される。

(3) 人工排熱の回収・低減

表6-13に示した気温に寄与する人工排熱の回収、または低減を試みるもので、ヒートポンプを用いた熱回収が、東京電力などにより検討されている。回収した熱をDHCで供給することにより、省エネを同時に実現することができる。しかしながら、ヒートポンプによる熱回収で実際に温暖化を緩和できるかどうかの具体的な検討については、未だ発表が見られない。

6. 4. 3. 2 具体的な緩和策の提案

ヒートポンプによる人工排熱の回収は、これまで利用されていなかったエネルギーを利用することであるから、省エネルギーを促進する。しかしながら、回収したエネルギーが需要家で消費されて、再び気温に寄与するようなかたちで放出されれば、ヒートアイランドの緩和には貢献できない。省エネルギーとヒートアイランドの緩和効果が期待できるのは、次の2つのケースである。

(1) ケース 1 (図6-14) : 気温の上昇の寄与する未利用熱を回収し、かつ、利用された熱が気温上昇に寄与しないかたちで都市外へ放出できるケース。

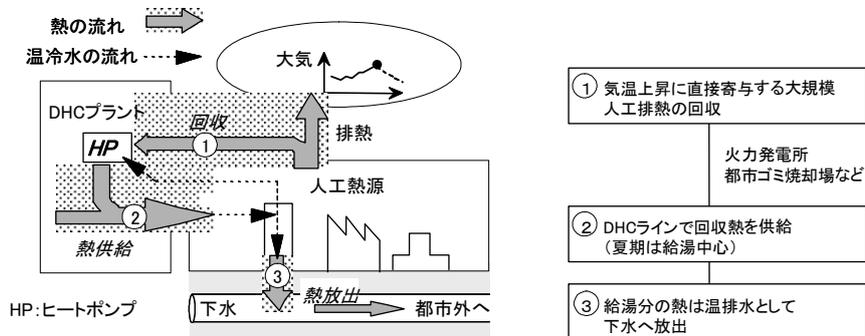


図6-14 熱回収によるヒートアイランド緩和策1

(2) ケース 2 (図6-15) : 回収した未利用熱の利用により、気温上昇に寄与する排熱が低減でき、かつ、利用された熱が気温上昇に寄与しないかたちで都市外へ放出できるケース。

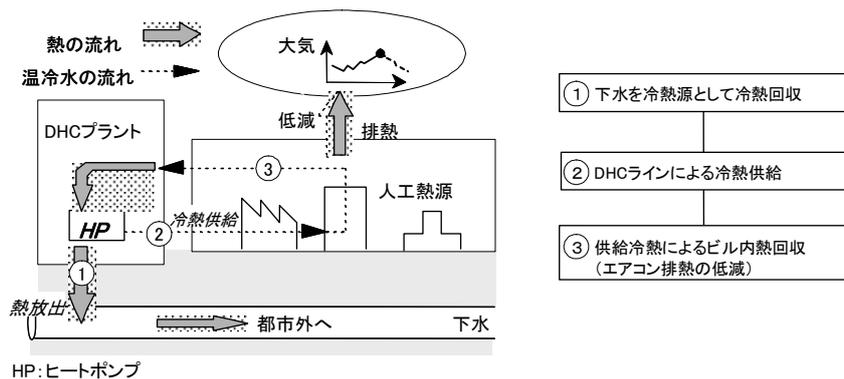


図6-15 熱回収によるヒートアイランド緩和策2

都心部では、気温上昇に寄与し、しかも回収可能な大規模な人工排熱源（火力発電所、都市ごみ焼却場など）が存在しないため、ケース1は郊外での実施のみが可能である。ケース2は、具体的には DHC プラントの設置により、従来の室外機型エアコンによる冷房を DHC による冷熱供給に変更することが考えられる。これにより、気温上昇に寄与するエアコン排熱をなくすことができ、しかも建物内から奪った熱は、DHC の冷水ラインによって気温上昇に寄与することなく排除可能である。この場合の供給冷熱（5-10℃の冷水）は、都心部でも利用可能な下水をヒートシンクとして作ることができる。エアコン排熱は、自動車排熱と並んで、夏季における都心部での人工排熱源の大きな割合を占めるので、この方法が都心部のヒートアイランド緩和に有効であると考えられる。実都市のデータを用いたケーススタディでは、この未利用熱回収による緩和策を中心に効果の検証を行なう。

6. 4. 4 モデル都市における緩和策検討結果

6. 4. 4. 1 下水道利用による都市ヒートアイランド緩和シナリオの評価

(1) モデル都市（米国サンノゼ市）

ケーススタディのモデル都市として、米国カリフォルニア州のサンノゼ市を選定した。モデル都市選定に当たっては、以下の4つの条件を考慮した。

- 1) ヒートアイランドが顕在化する程度の人口があること（数十万人以上）
- 2) 地域冷暖房（District Heating and Cooling ; DHC）プラントが設置できるような温冷熱需要があること（例えば、暖房用の熱需要が少ない米国南東部の都市は不適）
- 3) 都市の熱環境に大きく影響するような特殊な気象条件がないこと（例えば、Windy City”風の街”として知られるミシガン州シカゴ市などは不適）
- 4) シミュレーションに必要なデータがデジタル化されていること

米国の都市を中心に選定した。今回対象としたサンノゼ市は、人口約80万人のシリコンバレーとして知られる工業都市で、都市部は両側を山に挟まれた谷部に位置し、北端がサンフランシスコ湾内の浅瀬に面している。気候条件は、ここ20年平均のデグリーデー（degree day; 暖房に要する熱量、または冷房に必要なエネルギーを見積るための指数）でみると、暖房に関しては水戸市、冷房に関しては鹿児島市とほぼ同じ気候条件であり、DHCプラント設置を想定できるだけの温冷熱需要が存在する。

(2) データベース構築

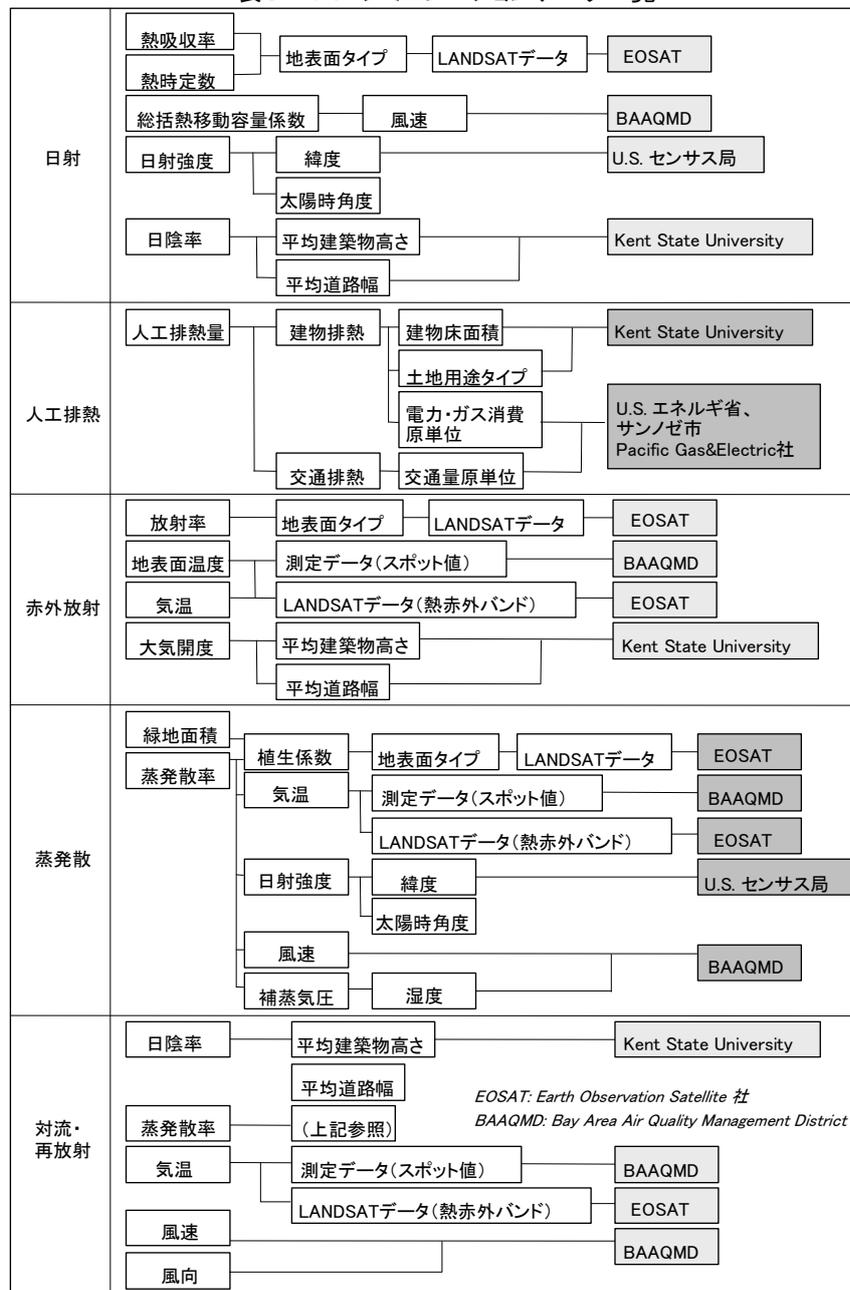
前述したヒートアイランドモデルの実行に必要なデータを収集し、GIS ツール（GRASS4.1 ; USA-CERL 提供のパブリックドメインソフトウェア）上にデータベースを構築した。データソース毎にその内容を説明する。

- ・ 気象データ : Bay Area Air Quality Management District (BAAQMD) より、サンノゼ市内の9つの観測所の気温、風速、風向データの1時間平均値データを入手した。気温データは、後述の衛星画像データと組み合わせて、また風速、風向データは各観測所からの距離に応じた重み付き平均で補間した。
- ・ 行政データ : サンノゼ市及びKent State Universityより、サンノゼ市の土地用途、建築物、交通量データなどを入手した。土地用途や建築物などは300mメッシュのラスタ型データとして、また、交通量データは、都市部での総走行距離を入手した。
- ・ エネルギー関連データ : サンノゼ市でガス・電力供給事業を行なうPacific Gas & Electric社^{49) 50)}より、各土地用途別のエネルギー消費率とその季節変動率を入手した。また、サンノゼ市でのデータが入手できなかったものについては、補足データとして、米国エネルギー省報告書^{51) 52)}の全米平均データを参照した。

・衛星画像データ：Earth Observation Satellite社（EOSAT）より、サンノゼ市をカバーするLANDSAT TMデータを入手した。全7バンドの内、30m解像度のバンド1～5、7は、地表面の分類に、また、120m解像度のバンド6（熱赤外データ）は、地表面温度、気温の分布を求めるのに使用した。

これらのデータは、リサンプリングなどの前処理により、150mメッシュのラスタ型データに変換した。データは、解析領域の38.4km四方をカバーする256×256メッシュで準備した。本解析で使用したデータ一覧を表6-14にまとめた。

表6-14 シミュレーションデータ一覧



(3) モデル実行用データ処理

ここでは、ヒートアイランドのシミュレーションの準備として行なったデータ処理の内、説明が必要と思われる3つの処理について述べる。

1) 地表面タイプ分類

日射の寄与を求める前述のCTTCモデル実行には、地表面タイプごとに異なる熱吸収度が既知でなければならず、そのために解析領域の地表面タイプデータが必要である。フィールド調査データが最も正確であるが、コスト、労力面から解析領域全体で実施することが困難なため、ここでは、本研究で開発した衛星画像データを用いた地覆分類方式（第3章で前

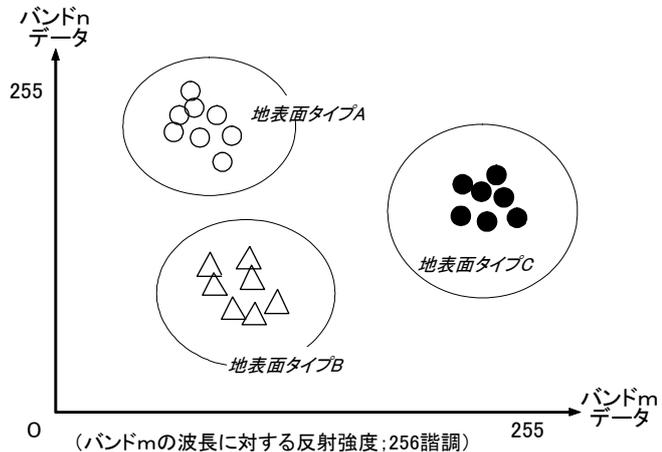


図6-16 衛星画像データによる地表面分類(2バンドの例)

述)を用いた。この分類は、図6-16に示すように、地表面タイプごとに、各バンド(波長)に対する反射の度合いが異なることを利用するものである。

ここでは、代表的な地表面タイプとして①アスファルト/コンクリート、②裸地、③緑地、④水面の4タイプに分類した。現地で実施したフィールド調査の知見も入れて、衛星画像データの中から、各地表面タイプの代表的な画素群を選択し、分類のための基準データとした。分類アルゴリズムには、式(14)に示すような最尤法(Maximum-likelihood Method)³²⁾を適用した。

$$\begin{aligned} \text{If} \quad & P(X | w_i)P(w_i) > P(X | w_j)P(w_j) \quad \text{for all } j=1,2,\dots,m \\ \text{Then} \quad & X \text{ belongs to Type } w_i \quad \dots (14) \end{aligned}$$

$P(X | w_i)$: タイプ w_i から選んだ画素が X である条件確率、

$P(w_i)$: 画像中にタイプ w_i が出現する確率、

m : 分類するタイプ数

なお、式(14)中の確率 $P(\cdot)$ は、Gaussian分布の仮定のもとに、上述の基準データから求めた。

2) 人工排熱評価

主要な人工排熱源として、各建物内での電力・ガス消費に起因する排熱(以下、建物排熱と呼ぶ)と自動車からの排熱に起因する交通排熱とを評価した。正確な評価には、建物単位の排熱量、また詳細な交通量分布のデータが必要であるが、詳細データ

の入手が困難であったため、実際に入手できた土地用途ごとの建物排熱量、および交通量の原単位を用いて、各メッシュの総排熱量を推定する方法を取った。総排熱量は、式 (15) で求めることができる。

$$Q_a(x, y, t) = a(x, y) \cdot UE(x, y) \cdot A_f(x, y) + b(x, y) \cdot TR(x, y, t) \cdot A(x, y) \quad \dots (15)$$

$Q_a(x, y, t)$: メッシュ(x,y)における時刻 t の人工排熱量 (Jh⁻¹)、

$UE(x, y)$: 単位床面積当たりのエネルギー (電気・ガス) 消費原単位 (Jm⁻²h⁻¹)、

$TR(x, y, t)$: 時刻 t の単位面積当たりの交通排熱量 (Jm⁻²h⁻¹)、

$A_f(x, y)$: メッシュ内の建物総床面積 (m²)、

$A(x, y)$: メッシュの面積 (m²)、

$a(x, y)$: 大気中への排熱として放散されるエネルギー消費の割合 (-)、

$b(x, y)$: 土地用途別の交通量レベル (-)

式 (15) の計算に必要な各土地用途の原単位には、表 6-15 に示す値を用いた。

表6-15(a) 人工排熱評価諸元(土地用途別データ)

土地用途	エネルギー消費(J/m ² /hr)	a (-)	b (-)
一戸建て住宅	82882	0.75 x level3	0.7
モバイルホーム	82882	0.75 x level3	0.7
商業	112372	0.94 x level2	1.5
文教	126981	0.94 x level2	1.0
オフィス	153950	0.94 x level1	1.5
軽工業	143386	0.80 x level2	0.9
重工業	143386	0.80 x level2	0.9
集合住宅	75927	0.75 x level3	0.8

表6-15(b) 人工排熱評価諸元(エネルギー消費日間変動率)

時刻	level1	level2	level3	時刻	level1	level2	level3
00	0.575	0.550	0.925	12	1.525	1.475	1.200
01	0.500	0.525	0.925	13	1.550	1.475	1.225
02	0.450	0.500	0.850	14	1.550	1.550	1.275
03	0.425	0.475	0.650	15	1.575	1.600	1.275
04	0.425	0.475	0.650	16	1.425	1.650	1.275
05	0.450	0.475	0.550	17	1.350	1.600	1.250
06	0.450	0.500	0.550	18	1.325	1.475	1.250
07	0.525	0.550	0.600	19	1.200	1.300	1.250
08	1.025	0.825	0.700	20	1.125	1.100	1.300
09	1.350	1.225	1.050	21	0.900	0.800	1.350
10	1.425	1.425	1.125	22	0.800	0.750	1.225
11	1.500	1.500	1.175	23	0.775	0.650	1.100

表6-15(c) 人工排熱評価諸元(交通量データ)

時間帯	交通量(mile/m ² /hr)	交通排熱量(J/m ² /hr)
07:00 - 09:59	0.017	142925
10:00 - 15:59	0.011	92513
16:00 - 18:59	0.017	142975
19:00 - 06:59	0.006	50462
平均燃費(ガソリン) : 20.92 mile/Gallon = 8410284 J/mile		

3) 対流・再放射ルール の獲得

対流と再放射によるメッシュ間の熱移動の寄与 ΔT_{inter} を説明する変数として、「風速」、「風向」、「建物構造の特性 (Sky View Factor: SVF³¹)」、及び、「隣接する 8 つのメッシュとの温度差の総和」4 変数に加えて、予備解析で ΔT_{inter} との高い相関 ($r=-0.95$) を示した「蒸発散による温度降下 ΔT_e 」を採用する。ルール獲得の手順は、第 5 章で前述したように、1) 教師データの作成、2) ニューラルネットによる学習、3) ニューラルネット解析による遷移ルール抽出の順に行った。

①教師データの作成

解析領域の 256×256 メッシュの時系列データの中から、 ΔT_{inter} の 1 ステップ間 (ここでは 1 時間) の状態遷移パターンを 100 パターン選択し、教師データとした。ニューラルネットの出力には、 ΔT_{inter} の時間変化 $d\Delta T_{inter}$ を、また、入力にはその説明変数を表 6-16 のようにレベル分け (カテゴリ化) した値を配置する。

$d\Delta T_{inter}$ は、表 6-16 (a) のように 20 レベルにカテゴリ化 (表 6-16 中では DT と表記) したが、出力層ニューロン数を低減するために、DT の絶対値を表わす DTI と符号を表わす SIGN の 2 つの変数を導入する。これにより、後述のように出力層ニューロン数を 11 に低減できる。また、説明変数の一つである風の影響は、その方

表 6-16 (a) 入出力変数カテゴリ
(対流・再放射の寄与 ΔT_{inter})

DT: ΔT_{inter} の変化分 ($d\Delta T_{inter}$)			
■ $d\Delta T_{inter}(t) = \Delta T_{inter}(t+1) - \Delta T_{inter}(t)$			
category	range (°C)	category	range (°C)
-10	$d\Delta T_{inter} < -9$	1	$0 < d\Delta T_{inter} < 1$
-9	$-9 < d\Delta T_{inter} < -8$	2	$1 < d\Delta T_{inter} < 2$
-8	$-8 < d\Delta T_{inter} < -7$	3	$2 < d\Delta T_{inter} < 3$
-7	$-7 < d\Delta T_{inter} < -6$	4	$3 < d\Delta T_{inter} < 4$
-6	$-6 < d\Delta T_{inter} < -5$	5	$4 < d\Delta T_{inter} < 5$
-5	$-5 < d\Delta T_{inter} < -4$	6	$5 < d\Delta T_{inter} < 6$
-4	$-4 < d\Delta T_{inter} < -3$	7	$6 < d\Delta T_{inter} < 7$
-3	$-3 < d\Delta T_{inter} < -2$	8	$7 < d\Delta T_{inter} < 8$
-2	$-2 < d\Delta T_{inter} < -1$	9	$8 < d\Delta T_{inter} < 9$
-1	$-1 < d\Delta T_{inter} < 0$	10	$9 < d\Delta T_{inter}$

表 6-16 (b) 入出力変数カテゴリ
(大気開度 SVF)

BU: 大気開度 SVF	
category	range (-)
1	$SVF < 0.50$
2	$0.50 < SVF < 0.75$
3	$0.75 < SVF < 0.90$
4	$0.90 < SVF < 0.95$
5	$0.95 < SVF$

表 6-16 (c) 入出力変数カテゴリ
(蒸発散の寄与 ΔT_e)

TE: ΔT_e	
category	range (°C)
1	$\Delta T_e > -5$
2	$-5 > \Delta T_e > -10$
3	$-10 > \Delta T_e > -15$
4	$-15 > \Delta T_e > -20$
5	$-20 > \Delta T_e > -25$
6	$-25 > \Delta T_e$

表 6-16 (d) 入出力変数カテゴリ
(風速・風向の変数)

WI: 8 近傍からの有効風速の総和 (sum) (有効風速: 近傍の位置と風向とが一致する風の風速)	
category	range (m/sec)
1	$sum < 1$
2	$1 < sum < 2$
3	$2 < sum < 3$
4	$3 < sum < 4$
5	$4 < sum < 5$
6	$5 < sum$

表 6-16 (e) 入出力変数カテゴリ
(近傍との気温差の総和)

TD: 8 近傍との気温差の総和 (sum)			
category	range (°C)	category	range (°C)
-6	$sum < -17.5$	1	$0.0 < sum < 2.5$
-5	$-17.5 < sum < -12.5$	2	$2.5 < sum < 5.0$
-4	$-12.5 < sum < -7.5$	3	$5.0 < sum < 7.5$
-3	$-7.5 < sum < -5.0$	4	$7.5 < sum < 12.5$
-2	$-5.0 < sum < -2.5$	5	$12.5 < sum < 17.5$
-1	$-2.5 < sum < 0.0$	6	$17.5 < sum$

向に関係なく同じであるという等方性を仮定して、風速と風向に関する中間変数（表 6-16(d)中で WI と表記）を定義し、ニューラルネットへの入力数を低減した。

②ニューラルネットによる学習

先の教師データの学習には、図 6-17 に示すような入力層ニューロン 29、中間層ニューロン 80、出力層ニューロン 11 のニューラルネットを用いる。出力層ニューロンは、上述の変数 DTI と SIGN と組み合わせにより、11 個ニューロンで変数 DT の 20 レベルを表現している。学習アルゴリズムには、著者が開発した、因果性尺度の評価に適した改良型誤差逆伝搬法⁴⁴⁾を用いた。

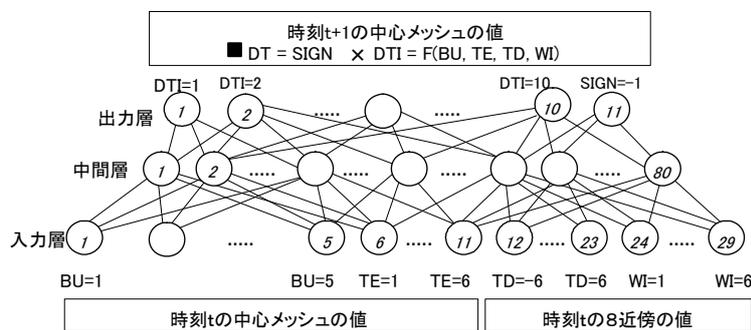


図6-17 対流・再放射ルール獲得用ニューラルネットの構成

③ニューラルネット解析によるルール抽出

前述の因果性尺度Cにより、学習後のニューラルネットの重み係数を解析し、これより求まる $d\Delta T_{inter}$ と各説明変数との相関に基づき、If-Then 型ルールを抽出した。

6. 4. 4. 2 ヒートアイランド緩和シナリオ評価結果と考察

(1) 各熱移動現象の気温への寄与

1) 日射の寄与

日射量そのものは、日が最も高くなる午後 12 時がピークであるが、地表面の熱慣性により、日射の寄与は時間遅れがある。(経時変化については、他の熱移動現象とあわせて後述する。) 昇温の最も大きい箇所では、 42.0°C に到達するという試算結果を得た。日射による気温変化に影響する因子のうち、風速は一般に変動幅も大きく、影響が最も大きい因子であるが、今回の解析では $3.0\sim 3.5\text{ msec}^{-1}$ 程度で対象エリア内で大きな差がなく、昇温分布への影響が小さかった。結果的に、地表面などの特性による寄与の差が明確にできる解析となった。表 6-17 には、各地表面タイプ別の昇温の平均値を示す。日射によって変化しない水面上の気温を除くと、昇温が最大の裸地と最小の緑地とでは、 2.6°C の差ができています。熱吸収度は緑地の方が大きく、むしろ昇温が起りやすい熱特性であるが、植物（または建築物）による遮光の度合いの指標である

PSA (Partial hadedArea; 日陰率) の違いが日射の寄与を小さくしていると考えられる。同様の理由により、アスファルト/コンクリート上の日射の寄与も、裸地より小さくなっている。

表6-17 地表面タイプごとの日射による昇温平均値(午後4時)

地表面タイプ	メッシュ数	熱吸収度(-)	PSA 平均(-)	昇温平均(°C)
アスファルト/ コンクリート	17130 (26%)	0.88	0.11	29.4
裸地	18677 (28%)	0.80	0.03	30.7
緑地	28202 (43%)	0.85	0.10	28.1
水面	1527 (3%)	0.00	0.00	0.0

2) 人工排熱の寄与

試算結果では、商業地区などの非住居地区(主に市街地の北部)で全般的に昇温が大きくなっている。表6-18に示すように、オフィス地区では平均で2°Cを越えており、この中で最大の値は7.3°Cにまで達している。人工排熱に占める建物排熱と交通排熱の内訳は、日中においては後者の方が大きいことが分かった。これより、前述のDHCプラントにおける建物排熱の回収・低減だけでなく、交通流制御やシンガポールなどで試みられているカープール(複数の搭乗者がいる自動車以外の都心部乗り入れを規制する制度)などの交通量抑制によるヒートアイランド緩和策も有効であるものと推測される。

表6-18 土地用途ごとの人工排熱による昇温平均値(午後4時)

土地用途	メッシュ数	建物排熱平均値 (MJ/hr/メッシュ)	交通排熱平均値 (MJ/hr/メッシュ)	昇温平均値(°C)
一戸建て住宅	16166	282	2252	0.93
モービルホーム	308	234	2252	0.91
商業	964	835	4825	2.08
文教	438	933	3217	1.52
オフィス	278	1335	4825	2.26
軽工業	1557	847	2895	1.37
重工業	580	1071	2895	1.45
集合住宅	500	625	2574	1.17

3) 赤外放射の寄与

地表面タイプがアスファルト/コンクリートの箇所で昇温の大きいことが分かった。表6-19の各地表面タイプごとの昇温の平均値に示されるように、アスファルト/コンクリート上では緑地上の1.6倍を越える昇温がある。このことは、既に知られているように、都市化の進行によって舗装率が上がるにつれて温暖化が助長される傾向があることと符合している。これは、アスファルト/コンクリートの地表面温度が最も上昇しやすく、気温との温度差が大きくなることによる。ただし、夜間では、地表面温度と気温との差が小さくなり、地表面タイプ間の寄与の差は小さくなる。

表6-19 地表面タイプごとの赤外放射による
昇温平均値(午後12時)

地表面タイプ	メッシュ数	昇温平均(°C)
アスファルト/ コンクリート	17130 (26%)	6.2
裸地	18677 (28%)	4.6
緑地	28202 (43%)	3.8
水面	1527 (3%)	1.4

4) 蒸発散の寄与

ここでは、各時刻の蒸発散率に見合うだけの水分が土壌、及び植物中に含有されているものと仮定した。降温のレベルは、水面、山間部(緑被率 100%)では 30°C程度で日射による寄与を相殺するレベルとなった。市街地では緑被率に応じて、5~15°C程度である。本解析は快晴時のケースであるが、蒸発散は日射の寄与と同じように日射量にほぼ比例するので、日射による寄与との相殺関係は雲などで日射条件が変わっても、維持されるものと考えられる。

5) 対流・再放射の寄与

先の1)~4)の1時間ごとの計算結果と対流・再放射の寄与の経時変化を図6-18と図6-19に示す。ここでは、初期気温(バックグラウンド値) T_0 として、シミュレーション当日の最低気温を用いた。

図6-18は、緑地に囲まれた住宅地区に位置する Los Gatos Climatic Station における結果を示している。このケースでは、日射、蒸発散、及び対流・再放射による寄与が大きい。蒸発散による寄与は、日射量が最大になる午後12時にピークを迎えるのに対し、日射による寄与は、地表面を介した時間遅れが生じるために、午後4時に最大となっている。対流・再放射による寄与は、これらの時間的なズレを相殺するような経時変化となっている。日射の寄与が大きくなる12時以降では、建物に吸収された熱の再放射も大きくなると考えられるが、これを大きく上回るだけの熱が対流によ

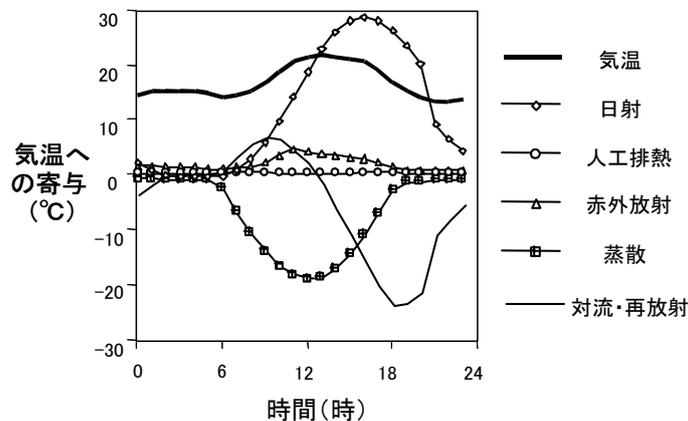


図6-18 各熱移動現象の寄与(緑地)

って、特に地表面付近よりも気温の低い上空（接地境界層の外）へ持ち出されるものと推測される。

図6-19は、蒸発散を行なう緑地のないアスファルト/コンクリートの商業地区に位置する San Jose Climatic Station における結果を示している。このケースでは、先の緑地のケースと比較すると日中の地表面温度が高くなるので、赤外放射の寄与が午後12時のピーク時で60%以上（4.9 → 7.9K）増大している。対流・再放射による寄与は、蒸発散による降温がないため、日射による寄与の経時変化にほぼ追従するように変化している。非緑地の場合、降温として作用するのは対流のみであるので、温暖化抑制のためには、対流を妨げない地表面構造がより重要となる。

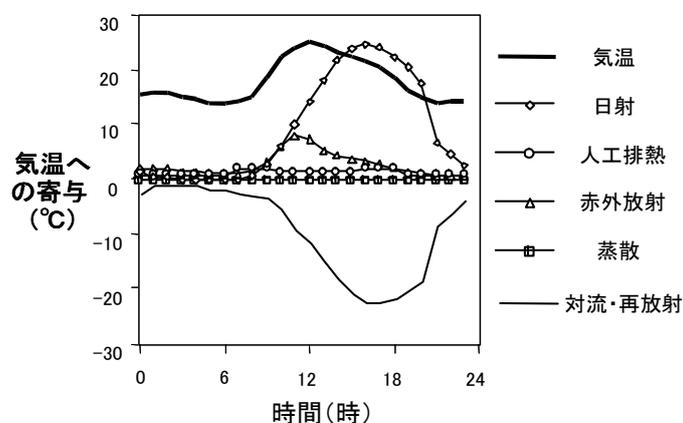


図6-19 各熱移動現象の寄与(非緑地)

(2) 対流・再放射ルールの獲得

先に求めた対流・再放射の教師データをニューラルネットに学習させ、想起誤差の減少傾向を確認しながら、各々600回（平均想起誤差7.1%）で終了させた。学習後の重み係数を用いた因果性尺度の計算結果を表6-20に示す。出力層に配置した変数DTI（ ΔT_{inter} の前ステップからの変化量）とSIGN（ ΔT_{inter} の前ステップからの変化方向）に対して、相関の高い入力変数を選択し、表6-21に示す遷移ルールに変換した。

なお、ルール条件部の論理結合決定には、条件部の入力値の組み合わせを変えたニューラルネット想起演算の結果を利用した。また、表6-21中のルールNo.7~9の下線部は、ルール同士の矛盾が生じないように条件部を補足・修正したものである。

変数BU（建築構造の特性を示すSVF）は、DTI、SIGNのいずれに対しても相関が小さい結果となっており、サンノゼ市においては、対流・再放射に対して影響していないことが分かる。これは、サンノゼ市には都心部においても高層建築物が少なく、比較的フラットな構造であることによる。

獲得したルールの検証のため、表6-21のルールで対流・再放射による寄与を予測した。図6-20には、前出の Los Gatos Climatic Station における24時間の毎時

表6-20 因果性尺度算出結果

		出力ニューロン										
カテゴリ 値	DTI										SIGN	
	<01>	<02>	<03>	<04>	<05>	<06>	<07>	<08>	<09>	<10>		
BU	<01>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	<02>	21.0	-14.2	-1.7	-2.5	10.3	5.0	1.7	-0.5	-0.1	-5.5	8.5
	<03>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	<04>	21.0	-14.2	-1.7	-2.5	10.3	5.0	1.7	-0.5	-0.1	-5.5	8.5
	<05>	4.8	-53.7	-5.5	-13.2	10.6	3.3	1.0	-1.0	-4.8	-1.7	7.5
TE	<01>	11837.9	-7685.8	-835.8	-1563.7	79.4	803.0	-930.8	-279.2	-0.9	-3033.3	3971.8
	<02>	352.1	2306.4	-291.7	-416.6	72.9	819.9	279.1	-77.4	-20.9	-880.1	1560.1
	<03>	-1647.6	4260.8	2482.4	1875.1	-3131.4	-1524.9	-556.2	156.7	-20.3	692.2	-2199.4
	<04>	-1267.2	794.2	78.9	162.0	1568.3	-330.9	-60.8	31.0	6.6	332.9	-314.9
	<05>	-1926.7	1290.3	112.7	245.2	-917.7	-465.8	-151.0	246.4	424.1	86.8	-691.9
	<06>	260.2	-1469.6	-276.9	-348.1	127.4	277.5	184.1	-44.1	-31.5	1591.7	-207.9
TD	<-6>	21.0	-14.2	-1.7	-2.5	10.3	5.0	1.7	-0.5	-0.1	-5.5	8.5
	<-5>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	<-4>	-2425.0	691.4	226.8	262.3	-1106.7	-583.9	-186.0	58.3	414.9	1639.7	1082.5
	<-3>	-2138.2	504.5	200.0	233.5	-985.8	-519.1	-167.9	451.4	13.1	567.7	995.7
	<-2>	-1518.8	254.1	813.5	2268.0	-645.4	-336.7	-104.8	31.2	-19.5	372.6	1127.4
	<-1>	23815.8	-15795.8	-2091.9	-2898.6	883.7	5709.3	878.6	-568.1	-44.9	-1254.2	9527.1
	<01>	4153.9	2391.3	333.6	443.7	-1711.0	-932.4	-252.3	105.5	-21.4	378.0	-956.0
	<02>	-3563.7	677.5	1264.6	2374.2	-1689.1	-878.4	-356.8	97.5	4.3	966.8	-1793.6
	<03>	21.0	-14.2	-1.7	-2.5	10.3	5.0	421.7	-0.5	-0.1	-5.5	-8.5
	<04>	-2410.9	662.5	223.6	271.4	-1085.6	-580.8	-184.9	57.8	510.5	1637.1	-1039.9
	<05>	21.0	-14.2	-1.7	-2.5	10.3	5.0	1.7	-0.5	-0.1	-5.5	-8.5
<06>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
WI	<01>	3421.0	-14.2	-1.7	-2.5	10.3	5.0	1.7	-0.5	-0.1	-5.5	-8.5
	<02>	-3550.7	4754.5	1543.6	964.4	-1511.1	-1814.9	-598.0	186.8	-12.4	556.2	-2537.2
	<03>	10284.8	-6913.0	-711.3	-1405.4	979.6	549.0	191.2	-239.9	-20.4	-2608.8	3821.4
	<04>	3668.5	-2538.1	-408.2	-399.4	733.8	889.6	275.5	-90.4	-23.9	-1007.5	1823.6
	<05>	-3279.9	217.9	209.3	2379.5	-1558.3	-782.3	-261.2	85.2	-38.4	828.3	832.8
	<06>	463.3	-2622.4	-361.7	-582.2	3006.6	2032.0	1316.7	-107.7	52.1	-1155.6	1249.4

表6-21 獲得した遷移ルール一覧

if (TE ≤ 2 AND TD ≤ -1) then SIGN=-1
if WI ≥ 3 then SIGN=-1
if {TE=1 AND (TD=-1 OR TD=1)} OR WI=1 OR WI=3 OR WI=4 then DTI=1
if {(TE=2 OR TE=3) AND TD=1} OR WI=2 then DTI=2
if TE=3 AND (TD=2 OR TD=-2) AND WI=2 then DTI=3
if TE=3 AND (TD=2 OR TD=-2) AND WI=5 then DTI=4
if (TE=4 AND <u>TD ≠ 3</u>) OR WI=6 then DTI=5
if TE=4 AND <u>ID=3</u> then DTI=6
if <u>TE ≠ 4</u> AND TD=3 AND WI=6 then DTI=7
if TE=5 AND TD=-3 then DTI=8
if TE=5 AND (TD=4 OR TD=-4) then DTI=9
if TE=6 AND (TD=4 OR TD=-4) then DTI=10

*:下線部——は補足した前件部

予測結果を示すが、経時変化の傾向を比較的良く再現できていることが分かる。256 × 256 メッシュのシミュレーション領域全体では予測値が真値と同様の分布傾向を示したものの、相関係数は0.62にとどまっている。一方、市街中心部のみについてみると、相関係数は0.71となる。これより、ヒートアイランドの顕著な商業地区やオフィ

ス地区が多い市街中心部の対流・再放射については、獲得した遷移ルールで昇温の傾向が説明できるものと考えた。

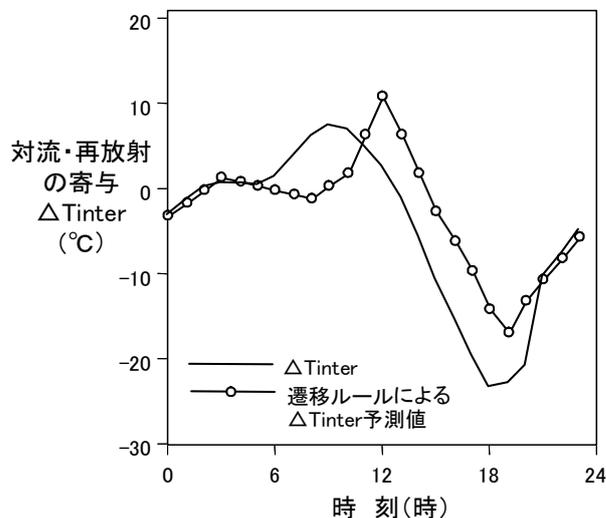


図6-20 遷移ルールによる対流・再放射の予測
(Los Gatos Climatic Station)

(3) ヒートアイランド緩和策の効果

1) DHC プラントによる人工排熱の回収

排熱回収する熱源は、規模が大きく、また、DHC プラントの設置スペースを容易に確保できる必要がある。ここでは、サンノゼ市の土地用途種別の中から軽工業地区、重工業地区を回収熱源とした。回収熱量は、回収利用後に再度、気温上昇に寄与することのない温水利用分（工業地区のエネルギー消費の 20%相当）に設定した。

排熱回収源とした軽工業地区と重工業地区での降温平均値は、それぞれ 0.20K、0.22K であり、その気温の降下を住民が実感できるレベルに比べると小さい値となっている。また、降温の効果は排熱回収の工業地区内にとどまり、周辺エリアにまでは、その効果は波及しないことが分かった。今回のシミュレーション領域内には、火力発電所や都市ゴミ焼却場など大規模な熱源が存在しなかったため、本緩和策による明確な効果は確認できなかった。

2) DHC プラントによる人工排熱の低減

この緩和策は、DHC プラントによる冷熱供給でエアコンの代替とし、エアコン室外機からの排熱相当分（各土地用途のエネルギー消費の 12.8%）が総人工排熱から低減できると仮定した。表 6-22 には各土地用途ごとの降温平均値を示す。先の人工排熱回収と同様に平均値では効果が小さいが、建物密度の高い商業地区やオフィス地区では、その効果が最高で 0.85K にまでなるメッシュが存在し、十分な効果があるといえる。今回のモデル計算の基になる人工排熱量原単位などは、都市ごとに異なるため、

今回のサンノゼ市の結果を他都市に単純に当てはめることは難しいが、人工排熱量のより大きい東京などの都市では、上述以上の効果が得られることが推測できる。

表6-22 土地用途ごとの人工排熱低減による降温平均值(午後3時)

土地用途	メッシュ数	排熱低減なしの場合の平均気温(°C)	排熱低減した場合の平均気温(°C)
一戸建て住宅	16166	21.90	21.82
モバイルホーム	308	21.98	21.90
商業	964	22.05	21.86
文教	438	21.86	21.72
オフィス	278	22.00	21.78
軽工業	1557	22.08	21.96
重工業	580	22.09	21.95
集合住宅	500	22.02	21.91

3) 交通量抑制による交通排熱の低減

この緩和策は、カープール制度や信号制御による都心部での交通量の抑制により、交通排熱を低減するものである。ここでは、交通規制の難しい住宅地区などを除外し、商業地区、オフィス地区、工業地区において、30%の交通量を削減したケースについて計算した。市街中心部の広範囲において効果が得られるような試算結果となった。表6-23の各土地用途ごとの降温平均值からも分かるように、先の人工排熱低減と比較しても、2倍程度の効果が得られており、本緩和策がより有効であると言える。本計算での交通排熱は、実走行距離ベースであり、信号待ちや渋滞によるアイドリング状態での排熱を含んでいないため、実際の効果はこれよりも、高いことが予想される。

ここでは、商業地区などの交通量抑制が住宅地区などの交通に影響しないものと仮定したが、現実には、カープール制度であれば、例えば、通勤の起点・終点となる住宅地区でも交通量の減少が予想される。一方、信号制御であれば、商業地区の迂回によって他地区での交通量が増加することなども考えられる。より現実的な条件での緩和策を評価するためには、交通流シミュレータ等との組み合わせも有効と考えられる。

表6-23 土地用途ごとの交通排熱低減による降温平均值(午後4時)

土地用途	メッシュ数	排熱低減なしの場合の平均気温(°C)	排熱低減した場合の平均気温(°C)
一戸建て住宅	16166	21.30	21.16
モバイルホーム	308	21.38	21.23
商業	964	21.45	20.85
文教	438	21.26	21.12
オフィス	278	21.40	20.76
軽工業	1557	21.48	21.04
重工業	580	21.49	21.02
集合住宅	500	21.42	21.26

6. 5 流域管理システム開発の工学的意義

本章では、本研究で開発したサブシステムと要素技術を実装した流域管理システムの構築とこれを用いたフィールドスタディ結果を示した。このシステムは、WSPsに関連した業務の支援と計画の策定・評価を支援するもので、想定した各種シナリオにおける将来の流域状況を評価可能とした。前節までに述べた「江戸川流水保全水路整備事業」と「サンノゼ市熱環境改善計画」への適用事例においては、水質や熱環境改善効果を予測し、事業への費用投資効果を定量的に示すことができた。

流域管理の日常業務、計画を進める上で、合理的な判断材料を確保することが従前からの課題であった。これに関わる定量的な情報の取得、提示の手段が常に拡充されることが求められている。本章で例示したように、このための工学的アプローチとして、流域の地理情報とこれに関連した属性情報に着目し、GISをプラットフォームとした流域管理システムを構築し、活用していくことは、流域管理の実務において、有用な手段である。

6. 6 まとめ

本章では、本研究で開発したサブシステムと要素技術を実装した流域管理システムの構築とその適用について述べた。このシステムは、水安全計画（WSPs）に関連した流域管理業務の実施と計画の策定を支援するもので、想定した各種シナリオにおける流域状況の評価、予測を可能とした。

本システムの機能を活用し、フィールドスタディを実施した「江戸川流水保全水路整備事業」と「サンノゼ市熱環境改善計画」での適用事例では、水質や熱環境改善効果を予測し、事業への費用投資効果を定量的に示すことができた。

江戸川流水保全水路整備事業では、

- 1) 国土交通省が整備中の礫間接触浄化施設の運用開始により、主要な浄水場の位置する金町取水塔付近でトリハロメタン生成能が0.0320mg/Lから0.0302mg/Lにまで低減されるが、河川流量の確保を目的とした北千葉導水路の通水により、低減効果の4割が相殺されるとの試算結果を得た。
- 2) 礫間接触浄化施設の費用試算結果から、建設費は下水道整備と同等であるが、維持管理費は7割程度であり、事業費用に対して水質改善効果の高いことが分かった。

また、サンノゼ市熱環境改善計画では、

- 3) 市街中心部での交通制御により交通量を30%抑制できれば、ラッシュ時の商業・オフィス地区では平均で0.6°C程度の降温効果がある。他方、下水を冷熱源とした地域冷暖房プラントによる冷熱供給ではエアコン排熱を低減でき、最大で0.8°C程度の降温効果があるなどの試算結果を得た。

これらのフィールドスタディを通して、GISをプラットフォームとする流域管理システムを構築し、活用していくことは、流域管理の実務において有用であることを示した。

6. 7 参考文献

- 1) 建設省編 (1995) 江戸川流水保全水路整備事業パンフレット、建設省関東地方建設局
- 2) 東京都水道局水質センター編 (1996) 水道水源水質の将来動向予測調査委託 (中間報告書) 東京都
- 3) 松田奉康、圓佛伊智朗ほか (1999) 地理情報利用による河川流域汚濁負荷量の予測、日本水道協会誌、Vol. 68, No. 4, pp. 11-21
- 4) 松田奉康、圓佛伊智朗ほか (1999) 河川流域汚濁負荷量に基づく長期水質予測、日本水道協会誌、Vol. 68, No. 10, pp. 2-13
- 5) G. Mihailov, et. al. (1995) The impact of runoff and sediment transport from the Provadiyska and Devnenska rivers on the Beloslav lake, Water Science and Technology, Vol. 32, No. 7, pp. 1-8
- 6) 国松孝男ほか (1989) 河川汚濁のモデル解析、技報堂出版
- 7) 原沢英夫ほか (1992) 流域管理とその支援システム (第2報)、環境システム研究, Vol. 20, pp. 93-100
- 8) 小林節子ほか (1996) 湖沼の水環境保全のための流域総合管理手法、水環境学会誌, Vol. 19, No. 2, pp. 121-131
- 9) 野村総合研究所 (1987) 水源水質動向調査報告書、東京都水道局報告書
- 10) 東京都水道局編 (1996) 水源河川におけるトリハロメタン生成能の測定結果、東京都
- 11) 建設省国土地理院編 (1996) 国土数値情報3次メッシュ磁気テープ、建設省
- 12) 財団法人統計情報研究開発センター (1991) 平成2年度国勢調査に関する地域メッシュ統計磁気テープ、総務庁
- 13) 財団法人通商産業調査会 (1991) 平成2年度工業統計表磁気テープ (市町村編)、通産省
- 14) 財団法人通商産業調査会 (1991) 平成2年度工業統計メッシュデータ (産業別)、通産省
- 15) 水道水質保全対策検討会 (1995) 水道水質保全対策ガイドライン、厚生省
- 16) 厚生省人口問題研究所編 (1992) 日本の将来推計人口 (平成2年版)、厚生省
- 17) 通産省編 (1995) 生産・出荷・在庫統計、通産省
- 18) 社団法人日本下水道協会 (1993) 流域別下水道整備総合計画調査 (指針と解説)、建設省
- 19) 工業技術会編 (1993) 河川・湖沼・水辺の水質浄化、生態系保全と景観設計、研修社
- 20) 社団法人日本水道協会 (1988) 高度浄水施設導入ガイドライン、厚生省

- 21) 村上健 (1968) 河川の自浄作用及び汚濁負荷の流出率について：第5回衛生工学研究討論会講演論文集、pp. 1-10
- 22) 栗林宗人 (1980) 日本における合流式下水道問題とその対策の現状、第7回日米下水道処理技術委員会会議録
- 23) 圓佛伊智朗ほか (2000) 水系の長期計画を支援する水源水質動向予測システム、日立評論、Vol. 82, No. 8, pp. 55-58
- 24) I. Uno, et al. (1989) Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer, *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 42, No. 1, pp. 77-98
- 25) Steven R. Hanna, et al. (1992) Boundary-layer parameterizations for applied dispersion modeling over urban areas, *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 58, No. 3, pp. 229-259
- 26) T. R. Oke (1978) *Boundary Layer Climates*, Methuen & Co, Ltd.
- 27) Gary Moll (1989) Cooling our Baking Cities, *American Forests*, Vol. 95, pp. 21-23
- 28) Washington Post (1988) Tottering on the brink of darkness - Heat waves keep pushing electric companies toward thier limit, August 17th Edition
- 29) Rafu Shimpo (1933) The cost estimation of damages by an electricity failure in Tokyo, August 16th Edition
- 30) Helmut E. Landsberg (1981) *The Urban Climate - International Geophysics Series* Vol. 28, Academic Press
- 31) T. R. Oke (1981) Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island - Comparison of scale model and field observation, *Journal of Climatology*, Vol. 1, pp. 237-254
- 32) W. Terjung (1980) Simulating the Causal Elements of the Urban Heat Island, *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 19, pp. 93-118
- 33) T. Ojima (1991) Changing Tokyo Metropolitan Area and its Heat Island Model, *Energy and Buildings*, Vol. 16, pp. 191-203
- 34) 齊藤武雄 (1992) 地球と都市の温暖化、森北出版
- 35) エコシテイ推進部会 (1993) 緑化分科会中間報告書、財団法人民間都市開発推進機構
- 36) N. Sharlin (1984) The Urban Complex as a Factor in the Air-temperature Pattern in a Mediterranean Coastal Region, *Energy and Buildings*, Vol. 7, pp. 149-158
- 37) Satoru Sadohara (1990) Study on Heat Source for District Heating in Tokyo, *Energy and Buildings*, Vol. 15, pp. 571-575
- 38) J. Doorenbos (1977) Guidelines for Predicting Crop Water Requirements, FAO irrigation and drainage paper 24, FAO of the United Nations
- 39) Roger White (1992) Cellular Automata and Fractal Urban Form - A cellular

- Modeling Approach to the Evolution of Urban Use Patterns, Working paper no.92064, Research Institute for Knowledge Systems, The Netherlands
- 40) Keith C. Clarke (1994) A Cellular Automaton Model of Wildfire Propagation and Extinction, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.60, No. 11, pp.1355-1367
 - 41) Helen Couclies (1985) Cellural Worlds - a framework of modeling macro micro dynamics, Environment and Planning A, Vol.17, pp.585-596
 - 42) J. Eckart (1992) A Cellular Automata Simulation System - Version3.0 - : Computer Science Dept., Radford University
 - 43) D.E.Rumelhart (1986) Learning Internal Representations by Error Propagation, Parallel Distributed Processing Vol.1, MIT Press
 - 44) 圓佛伊智朗(2001)衛星画像を用いた都市域における環境計測、計測と制御、Vol. 40, No. 4, pp. 298-302
 - 45) Martin Gardner (1971) Mathmatical Games, Science America
 - 46) Fred C. Richards et al. (1990) Extracting Cellular Automaton Rules Directly from Experimental Data, Physica D 45, MIT Press
 - 47) Campos, M.M (1990) Cellular automata, pattern recognition, and neural networks, Neural Networks for Vision and Image Processing, Wang Institute of Boston Univerity
 - 48) H. Swaid (1990) Prediction of Urban Air Temperature Variations using the Analytical CTTC model, Energy and Buildings, Vol.14, pp.313-324
 - 49) Environmental Scan (1993) City of San Jose
 - 50) Pacific Gas & Electric Company(1992)Final Report -Conditional demand analysis and UEC estimation utilyzing the 1990 RASS
 - 51) Energy Information Administration (1992) Annual Energy Review 1991, U.S. Department of Energy, DOE/EIA-0384[91]
 - 52) Energy Information Administration (1993) Assumptions for the Annual Energy Outlook 1993 : U.S. Department of Energy, DOE/EIA-0527[93]
 - 53) J. Richards (1993) Remote Sensing Digital Image Analysis -2nd revised edition, Springer-Verlag
 - 54) Ichiro Embutsu, et al. (1991) Fuzzy rule extraction from a multilayered neural network、Proceedings of IJCNN-Seattle, pp.461-465
 - 55) Ichiro Embutsu, et al. (1994) Geographic information system for the mitigation of the urban heat island, MIT Seminar on Environmental Systems
 - 56) Ichiro Embutsu, et al. (1994) A cellular automaton modeling for urban heat island mitigation, Proceedings of GIS/LIS' 94, pp.263-272

第7章 結 言

概 要

本研究では、流域管理を合理的に行う工学的な手段として情報処理技術（IT）を活用した流域管理支援のための情報システムについて論じた。特に、流域管理に係る各種のデータを取り扱う情報プラットフォームとして、地理情報システム（GIS）に着目し、その適用性と機能要件を明らかにした。また、機能要件を実現するための技術課題について整理し、それぞれに対応する要素技術として、衛星リモートセンシングによる広域計測技術、及び地理情報モデリング技術を開発した。更に、これらの技術を実装した流域管理システムを構築し、具体的な適用事例として、水源保全事業評価などのフィールドスタディを通して、流域管理システムの実用性を提示することができた。

本章では、流域管理システムの有効性と限界、加えて、適用の将来像を論じて、論文の総括とする。

7. 1 本論文の結論

本研究では、水道原水の取水源や下水処理水の放流先となる水源とその流域を取り扱う流域管理を対象に、最良の管理施策（Best Management Practice）を検討し、今日的な課題である合理的な合意形成に有用な情報を提示する流域管理システムについて論じた。

既往の研究成果により、流域内の各種現象をモデル化し、流域管理施策の効果を定量的に把握する取り組みがなされてきたが、こうした手法の適用性を高め、更に実用性を向上するには、近年急速な進歩を遂げるIT技術を積極的に取り込んだ情報プラットフォームの構築が有効と考えた。

本研究では、流域管理のための情報プラットフォームとして、地理情報システム（GIS）に着目し、その適合性と機能要件を明らかにした。また、この機能要件に対応し、流域管理システムの適用性を高める要素技術として、計測技術とモデリング技術について検討した。具体的な流域管理の実務を対象として、①技術開発、②システムへの技術実装、③実フィールドでの適用ケーススタディを進め、開発技術の適用性と有効性、制約を明らかにするアプローチを取った。本論文では、これらについて、第1章から第6章で述べた。

第1章では、流域管理に関連する水質規制や世界保健機関（WHO）の水安全計画

(WSPs) などの動向、関連する技術と既往の研究成果についてまとめ、流域管理システムの本格的な普及に向けた課題と本研究の目的について述べた。本研究で提案する流域管理システムの実現に向けた要素技術の開発とシステム構築、およびこれら研究開発成果を以下の4つの章に分けて述べた。

第2章では、流域情報の集約と共有、公開にとって有効な情報プラットフォームとして、GISの適用性について評価した。また、システム開発の観点からGISをベースとした流域管理システムのユーザモデルを提案した。各ユーザモデルに対応するシステム構成と機能について整理し、流域管理システムの実現に必要な技術と解決されるべき技術課題を明示することができた。第3章以降は、ここで抽出した技術課題に対して、具体的な要素技術を対応させ、開発を行った。

第3章では、流域管理に有用な広域性と周期性を有する計測手段として衛星リモートセンシングの適用を検討した。霞ヶ浦における富栄養化やアオコ発生などの計測事例を通して、水道原水取水、下水処理水放流、流域汚濁負荷流入などに係る水質リスクの計測、評価手段としての適用性を示すことができた。また、適用性を向上させる技術として、マルチスペクトル衛星画像の高解像度化手法を新たに開発し、SPOT画像を用いた適用事例により、その有効性を示すことができた。

第4章と第5章では、流域管理のためのモデリング技術について検討した。ここでのモデリング技術は、流域管理システムの具体的なアプリケーションに対応するモデルと、GISの基本データ形式に対応する汎用的なモデルの2つを対象とした。

第4章では、流域管理に係る長期計画や水源水質事故対策への適用を想定した、汚濁負荷シミュレーション技術を検討した。衛星リモートセンシングによる計測情報のほか、水質リスクを説明できる地理情報付きの流域属性情報を活用した汚濁負荷モデルを構築し、利根川・荒川水系での長期水質予測へ適用した事例を示した。この事例により、地理情報を用いることの有効性を確認すると同時に、こうしたモデリングが利水事業者などの実際の長期計画業務において、有効に活用できることを示した。

また、河川水質事故対策のための河川流下シミュレーション技術を検討した。広域な水系を即時的、かつ詳細に解析する手段として、1次元と2次元河川モデルを組み合わせた汚染物質流下シミュレータを開発し、東京都を流域とする水系を対象とした適用事例により、その適用性を示すことができた。

第5章では、GISの基本データ形式であるラスタ型データに適した汎用的なモデリング手法として、セルラオートマトンモデルについて検討した。同モデルは、経時的な状態変化を定義する遷移ルールによって記載するもので、数値データのほか、属性情報なども用いることができるため、高いモデル記載能力を有する。本研究では、流域に関する過去の履歴データを用い、学習アルゴリズムにより遷移ルールを獲得する手法を開発し、GISに向けた新たなモデリング技術を提案することができた。

第6章では、本研究で開発したサブシステムと要素技術を実装した流域管理システ

ムの構築について述べた。このシステムは、WSPsに関連した業務の支援と計画の策定・評価を支援するもので、想定した各種シナリオにおける将来の流域状況を評価可能とした。本論文では、「江戸川流水保全水路整備事業」と「サンノゼ市熱環境改善計画」への適用事例において、水質や熱環境改善効果を予測し、事業への費用投資効果を定量的に示すことができた。

流域管理の日常業務、計画を効果的に進める上で、合理的な判断材料を確保することが、古くて新しい課題である。これに関わる定量的な情報の取得、提示の手段が常に拡充されることが望ましい。本論文で示したように、このための工学的アプローチとして、流域の地理情報とこれに関連した属性情報に着目し、GISをプラットフォームとして流域管理システムを構築し、活用していくことは、流域管理の実務において、有用な手段であると考えられる。

7. 2 流域管理システムの将来

流域管理が取り扱う範囲は、治水、利水、および環境保全の広範にわたっている。本研究では、このうちの利水と環境保全に関わる課題に範囲を絞り、主に水質リスクについての問題を取り扱った。治水に関わる降雨流出や河川水量の事象は、水質とも密接に関連するものであり、こうした水量の問題を水質問題と陽に連成して取り扱えるような研究は国内外で進められている。本研究にとっても次のステップのテーマと考えている。

また、本研究で構築した流域管理システムが長期的に運用されるフェーズにおいては、適時なデータ更新が必要である。GISは、統一したデータ形式で広いソースからのデータ収集が可能であるが、データ更新費用の発生が避けがたいものとなる。経年変化などによって流域の実情を反映しなくなったデータのみを効率良く更新するための手法が、今後求められると考えている。

流域管理システムは、水源管理者や水道事業者が原水中の汚濁負荷を評価、制御するための水質リスク管理という用途にとどまらず、水源に係る当事者が水源のあるべき姿を合意形成するための客観的判断材料を提供することができる。当事者を水需要家（流域住民）に拡大すると、水質に関するリスクを分かりやすい評価尺度で積極的に情報公開する必要がある、リスクコミュニケーションシステムとしての用途が起こりつつある。河川や湖沼などの公共用水域は、都市活動における水資源であると同時に、その地域を特徴付ける重要な水環境でもある。住民にとっての親水エリアという位置付けは、今後、益々ウェイトを増すものと思われ、従来の「飲み水としてリスクはないか」という評価に加えて、もっとポジティブな「どれくらい安心できる健全な水か」というヘルスマonitoringとしての観点にも対応できるシステムが、流域管理システムの将来像であると考えられる。

