

マイクロフィルム用資料

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第3713号

土木研究所資料

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

平成12年3月

建設省土木研究所
河川部都市河川研究室

Copyright © (2000) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

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

都市河川研究室	室長	末次 忠司
	主任研究員	河原 能久
	科学技術 特別研究員	賈 仰文
	交流研究員	倪 広恒*

要 旨

都市河川流域における水循環と熱収支を解析するために、分布型物理モデルである水・熱循環統合解析モデル (WEPM) とそれを核とするシステムを開発した。その水・熱循環解析モデルの内容とシステムの全体構成を説明している。また、モデルを都市化の影響が顕著な千葉県海老川流域に適用し、日流量、時間流量、地下水位などの再現性を確認している。さらに、将来の土地利用が水収支や熱収支に及ぼす影響を検討するとともに、雨水浸透施設の導入による水循環の改善効果を明らかにしている。

キーワード：水循環，熱収支，分布型モデル，都市化，海老川，雨水浸透施設

* 交流研究員在職期間（平成11年4月から平成12年3月まで）

はじめに

都市河川流域では、地表面の改変や下水道の普及などの人工的な給水・排水系の影響を強く受けて、水循環系が大きく変貌しつつある。河川では、洪水時の流量が増加し、流出時間が短くなる一方で、平常時の水量の減少や水質の悪化は依然として改善されていない。今後の都市の健全な発展のためには、流域全体における水循環系の実態の把握とそれに基づいた体系的かつ効率的な対策の実施が不可欠である。

本研究は流域管理の要となる水循環解析システムを開発したものである。このような解析システムは観測結果を正確に理解したり、将来の予測を客観的に行うために不可欠なものである。本報告書では、開発した解析システムの内容を説明するとともに、システムの適用例を示した。すなわち、都市化が急速に進展した千葉県海老川流域に適用し、水循環系の現在と将来の姿を明らかにした。さらに、健全な水循環系を保全するために、雨水浸透施設の設置対策の効果を検討し、その有効性を検討した。

目 次

はじめに

1.	都市域での水循環系の変化と解析モデル	1
1. 1	水循環系の変化とその影響	1
1. 2	水循環解析モデルの役割と分類	3
1. 3	本研究の目的と構成	5
2.	既往の分布型モデル	6
2. 1	MIKE SHE	6
2. 1. 1	モデルの開発経緯	6
2. 1. 2	モデルの構成及び計算手法	6
2. 1. 3	モデルの入力データとパラメータ	8
2. 1. 4	モデルの適用事例	8
2. 1. 5	注意事項と検討課題	11
2. 2	IHDM	12
2. 2. 1	モデルの開発経緯	12
2. 2. 2	モデルの構成及び計算手法	12
2. 2. 3	モデルの入力データとパラメータ	13
2. 2. 4	モデルの適用事例	13
2. 2. 5	注意事項と検討課題	13
2. 3	SWMM	15
2. 3. 1	モデルの開発経緯	15
2. 3. 2	モデルの構成及び計算手法	15
2. 3. 3	モデルの入力データとパラメータ	16
2. 3. 4	モデルの適用事例	17
2. 4	IISDHM	19
2. 4. 1	モデルの開発経緯	19
2. 4. 2	モデルの構成及び計算手法	19
2. 4. 3	モデルの入力データとパラメータ	20
2. 4. 4	モデルの適用事例	20
2. 4. 5	注意事項と検討課題	21
2. 5	モデルの比較と問題点	22

3.	水・熱循環統合解析モデルの説明	24
3. 1	モデルの全体構造	24
3. 2	水循環過程のモデル化	26
3. 2. 1	蒸発散	26
3. 2. 2	浸透	29
3. 2. 3	表面流出	30
3. 2. 4	中間流出	31
3. 2. 5	地下水流れと地下水流出	31
3. 2. 6	人工系の水循環過程の表現	32
3. 2. 7	河道内の流れ	33
3. 3	熱輸送過程のモデル化	33
3. 3. 1	正味放射	33
3. 3. 2	短波放射	33
3. 3. 3	長波放射	35
3. 3. 4	潜熱フラックス	36
3. 3. 5	顕熱フラックス	36
3. 3. 6	人工排熱	36
3. 3. 7	地中熱フラックス	36
3. 3. 8	地表温度	36
3. 4	空気力学的抵抗と植生の群落抵抗	38
3. 4. 1	空気力学的抵抗	38
3. 4. 2	植生の群落抵抗	38
4.	水・熱循環統合解析システムの概要	40
4. 1	解析システムの構成	40
4. 2	解析コードの構成	41
4. 3	入出力データ	44
5.	水・熱循環モデルの検証	46
5. 1	海老川流域の概要	46
5. 2	入力データとモデルパラメータ	47
5. 2. 1	流域データ	47
5. 2. 2	モデルパラメータの設定	50
5. 3	日流量の比較	53
5. 4	地下水位の比較	55

5. 5	出水時の時間流量の比較	57
5. 6	熱輸送過程の比較	57
6.	水・熱循環統合解析モデルを用いた対策の評価	60
6. 1	現在の水循環系の特徴	60
6. 2	将来の水循環系の特徴と問題点	61
6. 3	雨水浸透施設導入の効果の評価	64
7.	まとめと今後の課題	68
	参考文献	70

1. 都市域での水循環系の変化と解析モデル

1.1 水循環系の変化とその影響

水は生命を育む上で最も重要な物質であり、降水、土壌水、地下水、表流水、水蒸気、氷雪など様々な形態を変化させながら循環系を形成している。また、水循環系は様々な物質の移動経路としても重要な役割を果たしており、多様な生態系の保全に大きく寄与している。

人間社会の発展は自然の水循環系の改変を通して実現されてきた。我が国では、20世紀後半以降に進行した都市への人口集中により、雨水の不浸透域の拡大、河川や運河などの水域の消失、森林や水田の減少などが急速に進み、河川流量の変化、地下水低下、湧水の枯渇、生態系の劣化などが生じてきた。一方、増大する都市活動を支えるために、流域外から多量の導水を行ったり、下水道を整備するなど、人工的な給水・排水システムの普及も進められてきた。河川に関しても、下流部の沖積平野に集積された人口や資産を、水循環の一現象である洪水から守るために、築堤やダム建設等が進められてきた。

そして現在、都市型水害の発生、渇水時の給水安全度の低下、平常時の河川流量の減少、公共用水域の水質悪化、地下水汚染など様々な弊害が発生している。これらの問題のいくつかは、都市の構造や都市生活者の水・エネルギー多消費型の活動にも関連するが、行政が利便性や経済性を追求するあまり、水循環系を見つめた対策をとってこなかったことにも起因する。今後、空間的にも財政的にも制約が強まる中で、健全な水循環系を構築・保全するためには、水にかかわる各行政部門の施策を、健全な水循環系の構築という視点から再検討し、体系的かつ効率的に進めることが不可欠である。

都市化が水循環系へ及ぼした影響を整理すると、次のようになる¹⁾ (図-1.1 参照)。

1) 都市域の拡大に伴う洪水形態の変化と洪水被害ポテンシャルの増大

不浸透域の拡大と保水・遊水機能の減少により、降雨後短時間に洪水が発生し、そのピーク流量が増大するように洪水の形態が変化してきた。これにより、河川への負担が増加し、治水計画の見直しが必要となったり、水防活動や洪水に対する警戒・避難体制の確保が困難になる等の問題が生じてきた。

また、都市の氾濫域での人口・資産の集中、地下空間の拡大、水に弱いハイテク機器の普及によって、水害に対する社会の脆弱化が進み、洪水による被害ポテンシャルが激増している。

2) 平常時の河川流量の減少

都市化による不浸透域の拡大は、雨水の地下浸透を減少させた。また、下水道の整備により、それまでは、河川に流れ出ていた水が地下の管路を流れるようになった。農業用水の取水形態の合理化・集約化によりきめ細かく循環利用されてきた水の流れが変化した。これらにより、通常時の河川流量の減少を招くとともに川らしさの喪失や河川環境の悪化を招いている。

3) 水質の汚濁と新たな水質問題の発生

下水道未整備地域からの生活排水、小規模の未規制事業場からの排水、森林、農地、道路等からの面的汚濁負荷源への対策等が残されており、都市内の河川や湖沼等の閉鎖性水域を中心に、水質改善が依然として

進まない状況にある。また、下水道の整備が進展しても下水処理水中のアンモニア性窒素濃度が高いためにBODが高い値を示す。

また、発ガン性を指摘される有機塩素系化合物の問題、病原性大腸菌O-157、クリプトスポリジウム等の病原性微生物の問題、環境ホルモンの問題等、人の健康や生態系に対して有害な影響が指摘される新たな水質問題が次々と顕在化しており、水道をはじめとする利水や河川環境への深刻な影響が懸念されている。

一方、地下水についても、毒性を有するトリハロメタン等の有機塩素化合物や農薬、硝酸性窒素等の地下水汚染も広がりつつある。

4) 生態系の変化

水辺・緑地空間の減少、河川の直線化や排水路化、基底流量の減少、水質の悪化など水循環系に係わる環境の変化により、生態系に変化が生じている。とりわけ、洪水氾濫の減少や土地利用の変化によって豊かな生態系を育んできた湿地が大幅に減少している。

5) 都市気候の変化

都市のコンクリート・アスファルト化、水域や緑地の減少、人工排熱の増加などにより、都市域の高温化現象（ヒートアイランド現象）が生じてきている。この現象は、夏期における熱帯夜の増加、冷房機器の使用等による電力需要の増加を引き起こしている。また、自動車交通や工場からの排出ガス等により大気汚染も進行している。

6) 渇水被害ポテンシャルの増大

都市への人口の集中や経済活動の高度化に加え、水洗トイレ等水の多量使用を前提とした生活様式の普及や水冷式クーラーによる温度管理が不可欠なオフィスビルの増加等により、渇水による被害ポテンシャルが

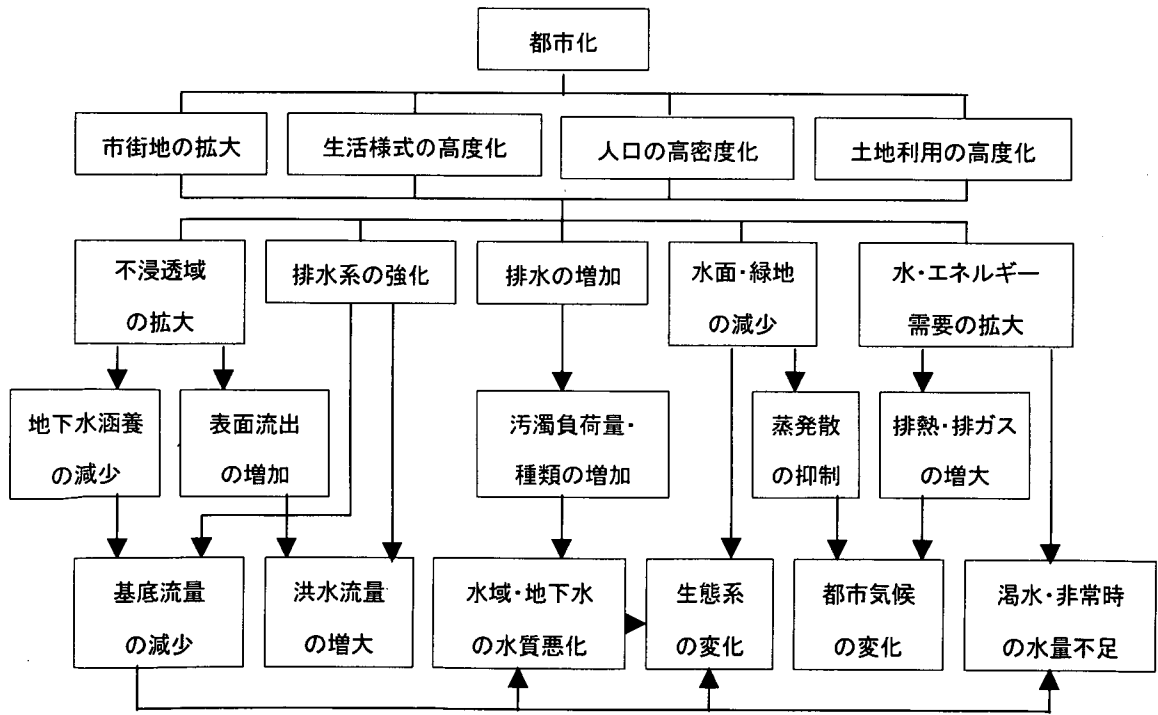


図-1. 1 都市化の水循環系への影響

増大している。

7) 防災対策上の水不足

阪神・淡路大震災での教訓として、過密都市において、身近にある河川、水路、池沼等に水が存在することが、初期消火、延焼拡大防止、生活用水等の確保にとって非常に重要な意味を持つ。

8) その他

従来から地下水に頼って生活していた地域では、人口の集中にともない、大量の地下水汲み上げが行われ、地下水位の低下とそれに伴う地盤沈下が社会問題化してきた。特に、水資源開発施設の整備の遅れにより安定的に表流水取水ができず、渇水が発生するたびに過剰な地下水取水が行われ、地盤沈下が発生している。

さらに、普段の生活において、自然の水循環系を認知する機会が減少した結果、水にまつわる社会活動の維持や文化の伝承が危ぶまれている。

このような状況に対して、河川審議会総合政策委員会水循環小委員会は、平成10年7月に、次の3つの基本的な考え方を徹底すべきであることを強調し、施策を提案した¹⁾。

- 1) 国土マネジメントに水循環の概念を取り入れること
- 2) 河川・流域・社会が一体となって取り組むこと
- 3) 水循環を共有する圏域毎の課題を踏まえた取り組み

水行政に関連する諸省庁も同様な問題意識を共有するに至っている。環境庁、国土庁、厚生省、農林水産省、通商産業省、及び建設省の6省庁からなる「健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議」は、平成11年10月に、中間報告をとりまとめ、流域の視点の重視、水循環系の機構の把握・評価・関連情報の共有、流域における各主体の自主的な取り組みの推進を施策の基本方針として挙げている²⁾。なお、そこでは「健全な水循環系」とは、「流域を中心とした一連の水の流れの過程において、人間社会の営みと環境の保全に果たす水の機能が、適切なバランスの下にともに確保されている状態」とであると定義している。

1.2 水循環解析モデルの役割と分類

流域の水循環系を総合的に管理するためには、水循環系のモニタリングと解析モデルの構築が必要である。流域に降った雨や流域外から導入された水の多くは様々な経路を経て海に到達する。水の移動現象には、洪水のように1日から数日で終わる現象もあれば、地下水のように1日から100年以上の時間を要するものもある。また、市街地と農耕地では発生する現象が異なる。さらに、自然現象の一部として発生する現象もあれば地下水の揚水や下水処理水の河川への放流のように人為的な現象がある。このように、時間的にも空間的にも変化する様々な水文現象を1つのシステムとしてを理解するためには、まず、どの経路でどのような水質の水がどれだけ移動しているのかを実測することが不可欠である。しかし、実測データのみでは複雑な水循環系の構造、因果関係を知ることができない。ここに、水循環解析モデルの役割がある。すなわち、様々な観測結果を基に水循環系を構成する因子間の関係を定量的に明示することにより、流域の水循環系の特徴を理解するとともに、水循環系の一部の改変が他の部分に及ぼす影響を評価することが可能になる。また、流域全体を視野に入れて水循環系を健全化する対策を検討できるようになる。さらに、解析モデルは、様々な利害関係を有する人々にとって共通の検討手段となり、具体的な対策を決定する過程においても意見の集

約をはかることに貢献すると考えられる。

水循環解析モデルとは、流域の地表面や地下での水の移動現象を数式や数値で表現したものの集合であり、降雨などの入力に対して流域の応答を与えるものである。現状のモデルには、河川水質モデルが組み込まれているものもあるが、流域での生物学的、化学的な応答までを解析しているものはほとんどない。ここでは、水量を解析対象とするモデルに限定してモデルの分類を整理する。

モデルを分類する基準としてよく使用されるものに以下の2つがある。

1) 流域の分割方法

- 集中型モデル (lumped model) : 流域を一様な一つの計算単位として扱う。
- 分布型モデル (distributed model) : 流域を小さな要素 (特性の類似な小流域やメッシュ) に分割し、要素ごとに流出機構を解析する。

2) 計算要素内での水移動の表現方法

- 概念型モデル (conceptual model) : 物理機構を単純化し、その単純化した系の解を流出機構の挙動とする。モデルパラメータを物性値と直接的に関係付けることは困難である。
- 物理型モデル (physically-based model) : 現象を記述する方程式を直接離散化し、数値解析により解を得る。適切なスケールの解析範囲であれば、モデルパラメータは物理性を有している。

この分類に応じて、いくつかのモデルを整理したものを表-1.1に示す³⁾。

表-1.1 水循環解析モデルの分類とモデルの例³⁾

	概念型モデル	物理型モデル
集中型モデル	CREAMS、EPIC、タンクモデル、安藤・虫明・高橋モデル	—
分布型モデル	AGNPS、HEC-1、HBV、HSPF、KINEROS、MIKE11、MOUSE、NAM、NWSRFS、PORB、PRMS、土研改良PRMS、SHER、SLURP、SPR、SPUR-91、SSARR、SWMM、SWRRB、TOPMODEL、UBC、XINANJIANG、土研モデル	IHDM、SHE (MIKE SHE、SHESED)、THALES、京大モデル、小尻モデル、東大生研モデル(IISDHM)、土研モデル (WEPM)

表-1.2 水循環解析手法の特徴

	分布型概念モデル	分布型物理モデル
概要	流出の各素過程をタンクモデルなどの概念的なモデルの集合として表現したもの。モデル中の定数は観測流量との一致度により同定する。	流出の各素過程を理論的な数理モデルで表現したもの。モデル中の定数は計測可能な特性値で設定することを原則とする。
入力情報の量	中	多
出力情報の量	中	多
演算の複雑さ	中	高
計算時間単位	日	秒～時間
計算空間単位	分割した小流域ごと	計算メッシュごと
総計算時間	少	多

表－1.1中の分布型概念モデルと分布型物理モデルを例に取り、それらの特徴をまとめたものが表－1.2である。また、どのモデルを用いることにより、流域内で行われる対策が河川流量に及ぼす影響を検討することができるかを例示したものが表－1.3である。なお、本研究で開発するモデルは分布型物理モデルに属する。

表－1.3 モデルと検討できる課題³⁾

課 題	対 策	分布型概念モデル	分布型物理モデル
洪水制御	河川の整備	×	○
	下水道の整備	△	○
	雨水貯留施設の設置	△	○
	雨水浸透施設の設置	△	○
平常時の 流量の 確保	下水処理水の再利用	○	○
	地下水の利用	○	○
	貯留水の利用	○	○
	雨水浸透施設	○	○
	自然地の保全	○	○

○：検討可能、△：部分的に検討可能、×：検討できない。

1.3 本研究の目的と構成

本研究の主たる目的は、土地利用が複雑な中小都市河川流域の水循環系の実態を解析することのできるモデルを構築することにある。また、モデル解析を通して、水循環系の将来の変化を把握するとともに、水循環系の回復をはかる対策の効果を明らかにすることを行う。

本報告書の構成は次のようである。第1章では、研究の背景として、水循環系の変化と解析モデルの分類を説明している。第2章では、既存の著名な分布型モデルの概要を説明している。第3章では、本研究で開発した水循環・熱輸送解析モデルを記述している。そのモデルを核にし、データ管理モジュールや対策効果の検討モジュールを付加して構築した水・熱循環統合解析システムの概要を第4章で説明している。第5章では、そのシステムを千葉県海老川流域にて適用して検証した結果を報告している。第6章では、宅地化が一層進んだ将来時点での海老川流域における水循環系を解析し、水循環系の大きな変化を明らかにするとともに雨水浸透施設を設置する効果を議論している。第7章では、本研究の成果と今後の課題をとりまとめている。

2. 既往の分布型モデル

ここでは、既存の代表的な分布型モデルの特徴を整理し、本研究で新たに開発したモデルの位置づけを明確にするとともに、今後のモデル改良において参考とすべき課題をとりまとめる。取り上げるモデルはMIKE SHE、IHDM、SWMM、IISDHMの4つである。

2. 1 MIKE SHE

2. 1. 1 モデルの開発経緯

SHE (Système Hydrologique Européen) は、ヨーロッパ共同体委員会 (Commission of European Communities) の補助金を受け、デンマーク水理研究所 (DHI : Danish Hydraulic Institute)、イギリス水文研究所 (IH : Institute of Hydrology, UK)、フランスのコンサルタント会社 (SOGREAH) の三者によって開発されたものである^{4), 5), 6), 7)}。ヨーロッパに適用することのできる水文モデルを開発することが、SHEプロジェクトの最初の目的であった。1976年にSHEの開発が決定され、1982年にその第1版が出された。その後、デンマーク水理研究所 (DHI)、イギリスニューキャッスル大学 (University of Newcastle upon Tyne) の水資源システム研究所 (WRSRU : Water Resource System Research Unit)、SOGREAH社の水理研究室 (Laboratoire d'hydraulique de France) のそれぞれの機関を中心とし、SHEの研究開発が進められた。その結果、WRSRUでは、1985年に土砂輸送の解析コード (SED : soil erosion and sediment yield) が開発され、SHEと合わせて流域の水と土砂の輸送を解析できる一般的なシステムになった。一方、DHIでは、SHEを発展させ、分布型物理モデルとして最も有名なMIKE SHEを開発した。現在、MIKE SHEは水文、環境、生態、気象等の分野で世界的に幅広く利用されている。ここでは、第4世代のMIKE SHEを中心に紹介することとする。

2. 1. 2 モデルの構成及び計算手法

このモデルはメッシュベースのモデルであり、計算に当たって流域全体を水平方向には直交するメッシュに、鉛直方向には柱状の複数の土壌層に分ける。分割されたブロック毎に、降雨などの観測値と透水係数などのパラメータ値を与えて、流域全体における水の流れを解析する。また、利用しやすいように、前・後処理、紙面の情報のデジタル化、データの内挿、結果のグラフ表示やアニメーション等のためのオプションが準備されている。なお、ソースコードは非公開である。

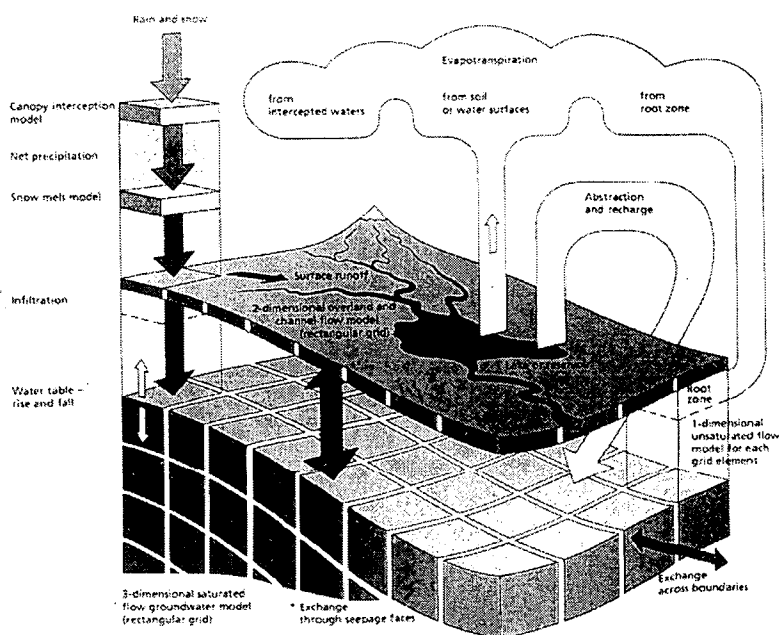


図-2. 1 MIKE SHEの概念図

モデルの全体構造を図-2.1に示す。モデルは大きく、水移動モジュール(WM)、溶質の移流拡散モジュール(AD)、地中における地球化学的/生物学的変化を扱うモジュール(GC)、植生成長と根層窒素の変換モジュール(CN)、土壌侵食モジュール(SE)、地中の割れ目の影響を表現する二重間隙(Dual porosity)モジュール(DP)、及び灌漑モジュール(IR)のコンポーネントから構成されている。ここでは、本研究に関する水移動モジュール(WM)のみを説明する。

水移動モジュール(WM)は、図-2.2に示すように、遮断・蒸発散(ET)、表面流・河道流(OC)、不飽和流(UZ)、飽和流(SZ)、帯水層と河川との水交換(EX)、融雪(SM)

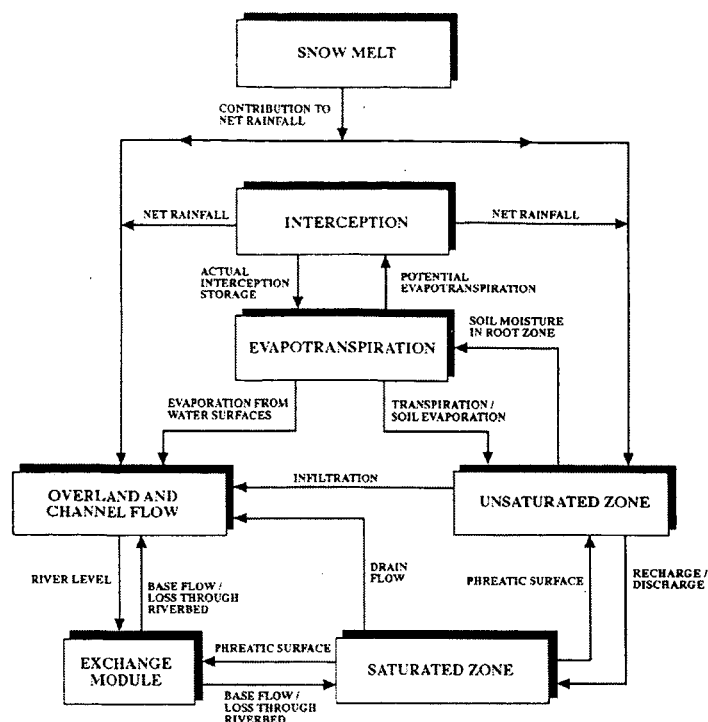


図-2.2 水移動モジュール(WM)での計算フロー

の6つの部分から構成され、水循環過程をほぼ

漏れなく表現している。水移動モジュールでは各部分が独立に計算ができ、それぞれの最適な時間スケールに合わせた時間ステップで計算し、共通の時刻で全ての計算結果を更新するように設計されている。これにより長時間の計算でも効率よく計算ができるようになっている。

水循環過程のモデル化は次のように行われている。

(1) 遮断と蒸発散(ET: Interception-Evapotranspiration)

植生による遮断と蒸発散量の計算には2つの方法が準備されており、選択することができる。

選択1では、遮断計算に修正Rutter法を用い、植生の遮断貯留量、地表面に到達する降雨量等を計算する。また、実蒸発散をPenman-Monteith法により推計するとともに、可能蒸発散は気象と植生データから直接推定する。

選択2では、葉面積指数(LAI)と遮断貯留能力の関数によって植生の遮断貯留を算出し、地表面に到達する降雨量を簡単な水収支法により計算する。実蒸発散量は土壌水分状態を考慮し、Kristensen-Jensen法によって可能蒸発散量から算出する。

算出した蒸発量は水分損失として地表面の節点に与える。また、蒸散量は損失として根層の存在する各節点に分布させる。

(2) 表面流と河道流(OC: Overland-Channel Flow)

St. Venant方程式を簡略化したdiffusive waveモデルと連続の式により表面流と河川流を記述する。表面流は2次元モデル、河川流は1次元モデルで表している。表面流の解析では、河道までの流下過程における水の蒸発と浸透を考慮している。多くの場合、河川表面積は流域全体面積と比べて小さいため、河川はグリッドの辺に沿う線として、また河川の節点はグリッドの節点と一致するように取り扱われている。方程式は陰的

差分法で離散化されている。

(3) 不飽和流 (UZ : Unsaturated Zone)

地下水涵養や地表水と地下水とのやりとりは通常不飽和層を通して行われるため、不飽和流の計算はモデル上の重要な部分である。不飽和土壌層における水の流れは、1次元Richards 方程式を用いて表現している。さらに、根の発達する表層では根による土壌からの吸水を考慮している。一般に地表面での境界条件はフラックスで与えるが、地表面で湛水が発生する場合には、水位を指定する境界条件に変える。鉛直下方の境界は地下水面とし、一定の正圧を与えている。なお、地下水面の位置が場所的にも時間的に変化するため、不飽和流と飽和流の連成解析は繰り返し計算となる。

なお、モデルでは不飽和層底部の土壌水分と地下水位の変動を連成させているが、土壌水分の移動を1次元モデルで取り扱っているため、斜面方向の水分移動が顕著になる場合には、モデルの適用性に問題が生ずる。

(4) 飽和流 (地下水流) (SZ : Saturated Zone, Groundwater Flow)

地下水計算は水循環に大きな影響を及ぼす部分と位置付けられる。一層の帯水層の場合には2次元モデルを、多層の帯水層の場合には3次元モデルを用いる。基礎方程式は差分法で離散化され、修正Gauss-Seidel法を用いた繰り返し計算によって解かれる。完全な3次元流れの場合では帯水層を3次元的に分割するが、流れを2次元(準3次元)に近似できる場合には、地質構造に従って帯水層を分割する。準3次元の場合は、準一様流を仮定し水頭の鉛直方向の変化は考慮しない。また、地下水の計算では、不飽和層や河川水との水のやりとり、井戸による揚水・注水、敷設パイプによる排水等のモデルを組み込んでいる。このモデルでは地下水帯水層の非均質性や透水係数の異方性を考慮することができる。

(5) 帯水層と河川間の交換 (EX : Aquifer-River Exchange)

ダルシーの法則を用いて帯水層と河川水とのやりとりを表現する。河川と帯水層の接続状況として次の2つの場合を取り扱うことができる。1つは、河床と地下水帯水層が直接接している場合であり、他の1つは、河床と地下水層の間に透水性の低い堆積層が存在する場合である。

(6) 融雪 (SM : Snow Melting)

融雪計算には熱収支法あるいは簡単な積算温度 (degree-day) 法を選択できる。

2. 1. 3 モデルの入力データとパラメータ

モデル計算に必要な入力データ及びパラメータを表-2.1に整理する。表に示すように、モデルは数多くのパラメータを必要とするが、流域の特徴や収集したデータによって、モデルを簡略することも可能である。一方、パラメータを同定し直すことが必要となることもある。例えば、粗度係数、特に地表面の粗度係数を同定し直すことが多い。

2. 1. 4 モデルの適用事例

デンマークのKarup川流域に適用した事例を紹介することとする。Karup川流域はデンマークにある面積400km²の流域である。流域を平面的に500mのメッシュに分割し、MIKE SHEモデルを用いて水循環解析が行っている。図-2.3、図-2.4に、河川流量、地下水位、蒸発散に関する解析結果を示す。

表－ 2. 1 MIKE SHEモデルに必要なデータ及びパラメータ

対象モデル		入力データ	パラメータ
全 体		平面離散 地表面標高 降雨・気象観測地点の分布	
遮 断	Rutter法	降雨量	植生キャノピーの排水パラメータ 植生キャノピーの貯留能力 地表面被覆
	Kristensen －Jensen法	降雨量	植生の葉面積指数 (LAI) 遮断能力係数
蒸発散	Penman- Monteith法	気象データ	キャノピー抵抗 空気抵抗 地表面被覆指数 実蒸発散と可能蒸発散の割合 (土壌水分の関数) 根の分布
	Kristensen －Jensen法	気象データ	実蒸発散と可能蒸発散の割合を表現する経験係 数 (土壌水分の関数) 植生の葉面積指数 (LAI) 根層の深さ 根の分布係数
表面流・河道流		境界条件としての流量、水位 人工的な放流 地形・河道横断面図 河床堆積物の厚さ 河床堆積物の透水係数	地表面や河道の粗度係数 地表面窪地貯留 堰の流量係数
不飽和流		土壌鉛直分布、土壌種類	土壌水分曲線 不飽和透水係数 純降雨の最大バイパス率
飽和流		境界条件としての流量、勾配、 水頭 揚水・注水井戸の位置 井戸の揚水・注水強度 飽和層の鉛直方向の分布	貯留係数 飽和透水係数 排水深さ 排水間隔
融 雪		気象データ・降水データ	積温係数 雪面のゼロ面変位 雪面の粗度係数

出典：V. P. Singh(1995)：Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications.

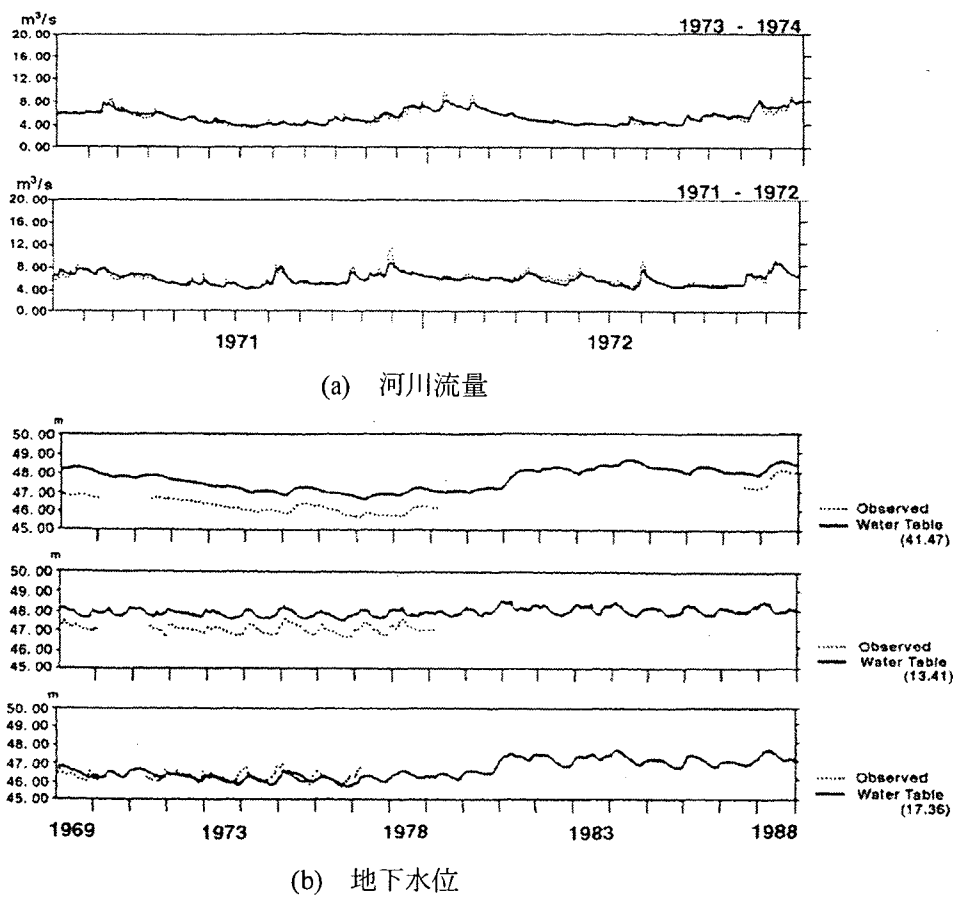


図-2. 3 観測結果との比較



図-2. 4 植生域と蒸発散の分布

2. 1. 5 注意事項と検討課題

MIKE SHEを利用にあたっては、次のことに注意する必要がある。

- 1) 地下水帯水層と河川との間のやりとりについて、動水勾配を河川の水位と隣接するグリッドの地下水位を用いて算出するが、その動水勾配にグリッドサイズの影響が現れやすい。
- 2) 密集した排水ネットワークがある流域の場合には、グリッド内部の地形変化を考慮する必要がある。
- 3) 基本方程式を導出した空間スケール以外の対象に適用する場合には、パラメータの同定が必要となる。また、この場合、モデルの出力が持つ意味と実際の現象の持つ意味とは異なり、両方を比較するときには注意が必要である。不飽和流の計算を例にとると、土壌の不飽和透水係数は室内の不攪乱実験により測定できるが、その結果を数10mのグリッドに適用する場合には、その代表性が問題となる。一方、計算結果の代表性にも問題が残る、観測した土壌水分との直接の比較が困難な場合がある。
- 4) 流域における分布情報が少ない場合には、モデルパラメータに通常使用される値を設定し、同定すべきパラメータの数を減らして計算を行うことが必要となる。

また、現在検討されている課題は次のようである。

- 1) 水文素過程のモデル化：
大空隙における水の流れ、土壌水分特性におけるヒステリシスの影響を表す手法の開発。
- 2) 計算速度の向上。
- 3) GISとのインターフェースの改善。
- 4) 複雑な河川ネットワークを解くことのできるような河川モデルとの連携による、モデルの適用性を拡大。
- 5) パラメータの選定、同定、及びモデルの検証に有力な方法の開発。
- 6) スケールの問題：
データサンプリング、水文素過程のモデル化、モデルの離散化において、それぞれスケールが異なるため、データの取り扱いや解釈に十分注意することが必要である。

2. 2 IHDM

2. 2. 1 モデルの開発経緯

このモデルは、1980年代に物理的な降雨流出モデルとして、イギリス水文研究所（Institute of Hydrology、U.K.）が開発したものである^{4),8)}。計算にはワークステーションが適当であるが、モデルパラメータの同定作業が少ない場合にはパソコン上でもモデルを実行することができる。モデルのソースコードは非公開である。

2. 2. 2 モデルの構成及び計算手法

モデルの全体構成を図-2.5に示す。計算にあたって、まず、地質データと地形データを考慮して、流域全体を幾つかの河道と斜面に分割する。分割したそれぞれの河道、斜面における水の流れを独立に計算し、その結果をそれぞれの河道、斜面の接続先（下流）で合計する。モデルは表面流、河道流、地中流（土壌水、地下水）の解析を行う3つの部分から構成されている。各部分の計算手法は以下の通りである。

（1） 樹冠遮断及び蒸発散

樹冠遮断量はRutterの遮断モデルにより求めている。蒸発散量の計算では、Penman-Monteith式を使用しているが、土壌水分の減少が根の吸水に与える影響を考慮している。地表面に到達する正味の降雨量は、入力データの降雨量から樹冠の遮断と蒸発散を差し引いて算出している。なお、融雪計算のルーチンも含まれている。

（2） 表面流と河道流

斜面の地表面における流出は、降雨強度が土壌の飽和透水係数を越え表面流出が生ずる場合と土壌が飽和して流出が発生する場合に分けて、算出している。斜面上の表面流や河道における水の流れは、1次元kinematic wave方程式と連続の式を用いて解析される。表面流の計算では、降雨、流下過程における水の浸透、浸出を考慮している。河道流の解析では、降雨、横流入、地下水との水のやりとりが考慮されている（図-2.5を参照）。

（3） 地中流

地中水の流れ（飽和、不飽和）は、ダルシーの式と連続の式に基づく鉛直2次元モデルで表現している。また、植生の根が発達する斜面の表層においては、蒸発散モデルによって根の吸

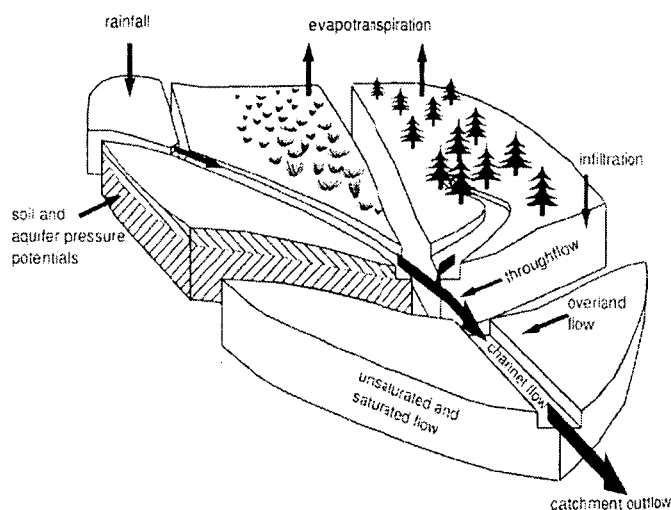


図-2.5 IHDMの概念図

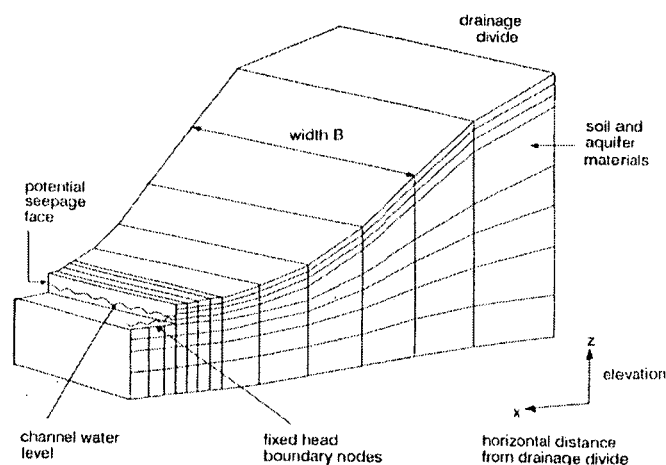


図-2.6 IHDMにおける斜面の取り扱い

水の影響を考慮している。モデルの変数は水頭であり、有限要素法により解かれる。図－2.6に示すように、斜面の横幅は、位置によって変化させることができる。

地中流を解析するときの境界条件は以下のようである。斜面の上流側では分水嶺にてフラックス・ゼロの条件を課す。斜面上の地表面では次の境界条件を与える。地中流が不飽和流れの場合には、有効降雨をフラックスとして指定する。一方、地中流が飽和している場合には、有効降雨は表面流出への入力として取り扱い、地下水の水頭を地表面の標高に指定し、表面流の水深の影響は小さいとして無視する。また、斜面の底部における境界条件は、既知の下層へ浸漏するフラックスを指定する。斜面の下流端においては、表層土壤が飽和の場合にはフラックスはゼロとする。地下水位の変動により河川との境界面では浸出面ができるが、この浸出面の位置は変動し、場合によっては不連続の場合もある。浸出面の判断基準はその地点の水頭が位置水頭と等しいか否かである。

2.2.3 モデルの入力データとパラメータ

流域全体を分割して作成した河道と斜面ごとに計算を行う。計算に必要なデータは、地形・標高・土地利用データ、降雨量に代表される気象データ、土壌・地質データ等である。また、主なモデルパラメータとして、地表面・河道の粗度係数、土壌の透水係数等がある。

モデルパラメータについては、確定性の高いパラメータの値は既往の文献等に基づき設定するが、不確定性の高いパラメータは同定することによって設定する。また、同定するパラメータは計算結果への感度性が高いパラメータに限定し、パラメータが水文的な意味を持つ範囲を設定内で同定計算を行う。

2.2.4 モデルの適用事例

(1) 適用事例1

イギリス・ウェールズ中部にある、流域面積が1～5km²の高地において、モデルの感度分析を行った。その結果、透水係数、表面流が発生している場合には粗度係数、土壌の空隙率が重要なパラメータであり、最も大きな影響を与えるものが透水係数であることがわかった。これは、透水係数が土壤水の移動のみならず、浸透についても支配因子となっているためである。また、モデルパラメータではないが、土壤水分の初期状態も非常に重要であることが例示された。

(2) 適用事例2

イギリスのLuxembourgにある実験斜面にモデルを適用し、河川流量のみでなく、飽和地下水位の観測データに関しても計算結果と比較した。流量については合理的な結果が得られたが、飽和・不飽和の境界位置についてはばらつきがあった。その原因として、土壌中に存在する大空隙における水の流れをダルシー則で近似できないことが挙げられた。

(3) 適用事例3

不飽和・飽和状態が交錯する斜面において、土壌空隙中の水粒子の移動を追跡した⁹⁾。図－2.7にその結果を示す。解析では土壌空隙中の水流をダルシー流と仮定した。

2.2.5 注意事項と検討課題

IHDMを利用するにあたっては、次のことに注意する必要がある。

- 1) 流域分割が異なると解析結果も異なるため、流域を適当に分割することが重要である。また、計算時

間は流域全体の分割の数に伴い増大する。

- 2) 分割された斜面における土壌水分の移動は代表斜面で詳細に表現されているが、斜面と斜面の間でのやりとりはないと仮定している。
- 3) 土壌に大空隙や自然土壌パイプが発達する流域では、ダルシー則の適用に問題がある。
- 4) 流量グラフが急激に立ち上がるような場合には、ダルシー流以外に、大空隙や自然土壌パイプの流れ、人工的な排水また表面流出を考慮する必要があると指摘されている。なお、IHDMを適用した経験から言えば表面流出が発生する場合は僅かであった。

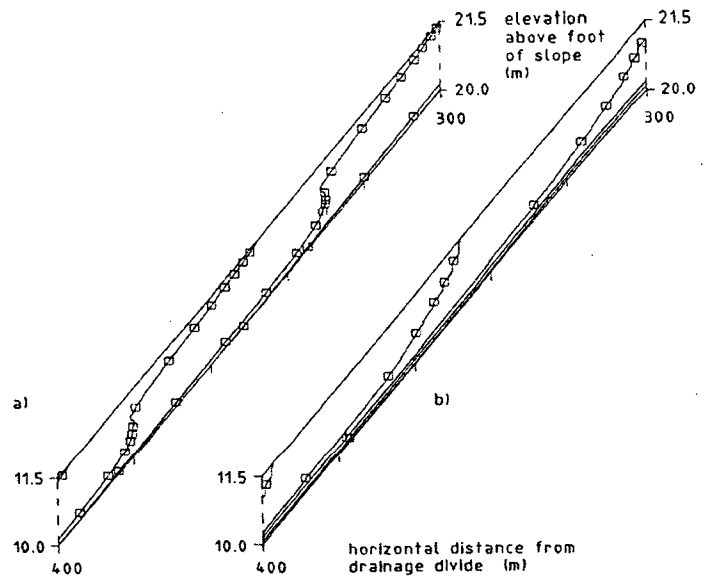


図-2.7 斜面における水の流れの追跡

2. 3 SWMM

2. 3. 1 モデルの開発経緯

SWMM (EPA Storm Water Management Model) は都市域の水量・水質解析モデルとして広く利用されているモデルである^{4), 10), 11), 12)}。その開発は、アメリカ環境保護庁 (U.S. Environment Protection Agency) の指導・援助を受け、1969～1971にかけて、コンサルタント会社のMetcalf and Eddy社、フロリダ大学 (University of Florida)、Water Resources Engineers社 (現Camp, Dresser and McKee, Inc.) の3機関によって行われた。1971年に第1版が発表されてから、1981年にEXTRANが発表されまで、開発が進められた。現在、EPAとフロリダ大学によりサポートが行われ、解析コードは1～2年ごとに更新されている。

このモデルは、当初、都市域における合流式下水道の越流による河川水の汚染問題を解決するために開発されたが、その後、都市域におけるノンポイントソースによる汚染問題や合流・分流式下水道に関する水文・水理現象の解析に広く用いられている。アメリカ、カナダ等で数百箇所に適用した事例がある。

モデルのソースコードは無料で公開されており、パソコン上で実行可能である。

2. 3. 2 モデルの構成及び計算手法

モデル計算にあたり、流域全体を幾つかの小流域に分割し、その小流域を計算単位とする。図-2.8に示すように、モデルは多数の計算モジュール (ブロックと呼ばれている) から構成されているが、主なブロックは流出 (Runoff)、輸送 (Transport)、貯留・処理 (Storage/Treatment)、拡張輸送 (Extended Transport、またはExtran) の4つである。各ブ

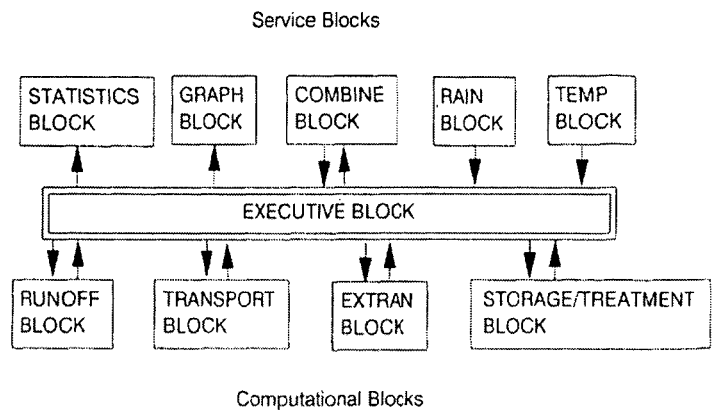


図-2.8 SWMMの構成

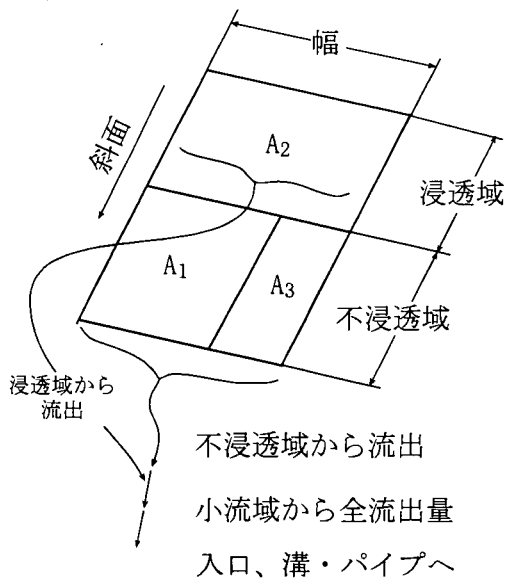
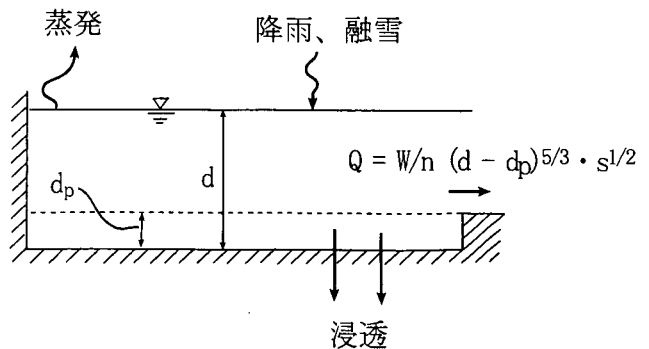


図-2.9 非線形貯留池法の概念図



ロックは独立に計算することができ、解析目的に応じて必要なブロックだけを利用することもできる。また、各ブロックの入出力を自由に修正することができる。

(1) 流出 (Runoff) ブロック

流出ブロックでは、分割された各小流域に対して、非線形貯留池法 (nonlinear reservoir technique) を用いて表面流出ハイドログラフを作成する。非線形貯留池法は、図-2.9に示すように、地表面流の水は広い範囲にわたった薄い層であると仮定し、連続方程式と表面流のManning方程式を結びつけて解く方法である。図中の小流域の幅 (W) は流域面積を表面流出の集中距離で除して求められる。この方法では、地表面における浸透域・不浸透域、窪地貯留を考慮している。また、地下への浸透はGreen-Ampt式または積分したHorton式によって計算される。地下へ浸透した水は不飽和層と飽和層での貯留の解析で考慮される。また、融雪は積算温度 (degree-day) 法と熱収支 (energy balance) 法の組み合わせ法によって計算される。

(2) 輸送 (Transport) ブロック

この輸送ブロックでは、流出ブロックで算出された流出量の河道や下水管での挙動をkinematic wave法を用いて解析する。このため、逆流や背水の影響が強い場合やループをなすネットワークには適用できない。

(3) 貯留・処理 (Storage/Treatment) ブロック

このブロックでは、貯水池・下水処理場における水の挙動を解析する。単一の貯水池・下水処理場、または貯水池・下水処理場ネットワークを解析することができる。モデルでは、貯水池・下水処理場中水の滞留時間を考慮する。図-2.10は、貯水池・下水処理場施設における流入・放流の概念図である。

(4) 拡張輸送 (Extran) ブロック

Extranブロックでは、dynamic wave法で水理計算を行う。排水系統 (管渠網) をノードとリンクに分ける。リンクは水路、管、ポンプ、堰等を表し、輸送特性を持たせ、ノードはリンクの接点等を表し、貯留特性を持たせる。各ノードでは連続式を、各リンクでは運動量方程式を陽式差分法によって解く。St. Venant方程式の全項を考慮しているため、逆流や背水の影響、ループをなすネットワークの計算なども精度高く計算することができる。また、ユーザが河道の横断面形状を設定して水理計算を行うこともできる。

2.3.3 モデルの入力データとパラメータ

各ブロックの計算に必要な入力データとパラメータを表-2.2にまとめた。

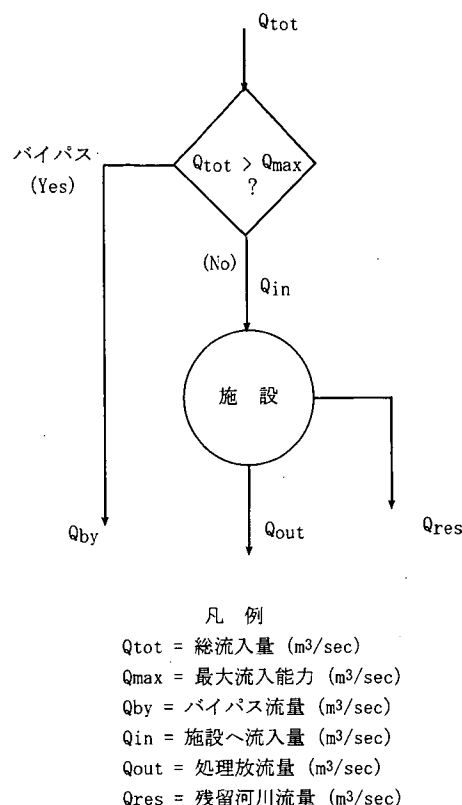


図-2.10 貯水池・下水処理場施設における流入・放流の取り扱い

表－2.2 SWMMモデルの入力データとモデルパラメータ

モデルのブロック	入力データ	パラメータ
Runoff	降水量 気温、風速（融雪計算のみ） 地形データ 排水管網データ	面積 不浸透域面積率 不浸透面の勾配 浸透面の勾配 不浸透面粗度 浸透面粗度 3つの浸透パラメータ
Trans	排水管網データ 流入量	勾配 粗度係数 各施設の水利特性パラメータ
Storage/Treatment	貯水池、処理場施設のデータ 流入量 蒸発データ	各施設の水利特性パラメータ
Extran	排水管網データ 流入量	勾配 粗度係数 各施設の水利特性パラメータ

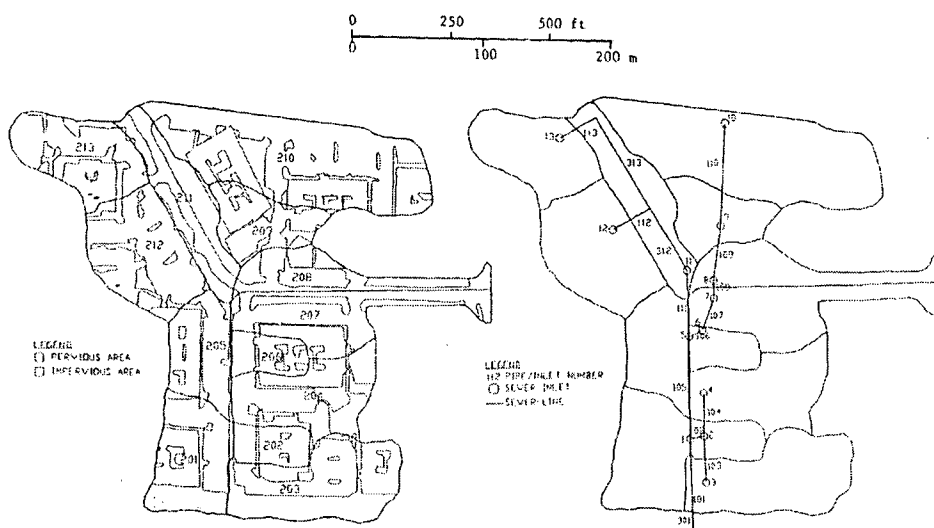
モデルパラメータはハイドログラフのピークとピークの到達時間を合わせるように設定する。

流出ブロックについては、モデルパラメータの感度分析が行われている。その結果によれば、面積と不浸透率が流出（Runoff）ブロックの重要なパラメータである。流域幅、浸透率も同定すべきパラメータになる場合が多い。また、浸透面積が多い場合には浸透パラメータは重要なパラメータになる。

2.3.4 モデルの適用事例

(1) 適用事例1

アメリカ地質調査所（USGS）が1977年、1978年にわたって、フロリダ州のマイアミに位置する住宅区域の流出と水質のモニタリングを実施した。住宅区域の面積は5.9haであり、不浸透域面積率は70%であった。流域の分割と排水管網を図－2.11に示す。図－2.12には、SWMMの流出（Runoff）ブロックによって

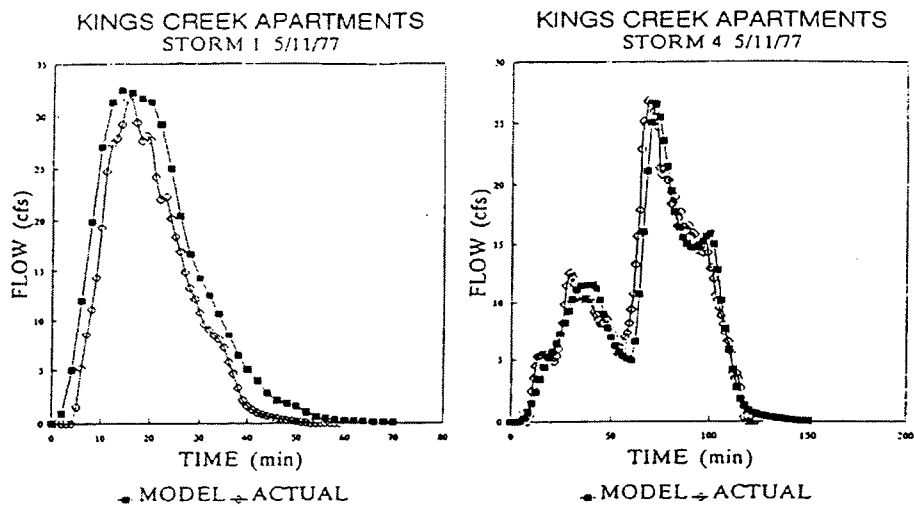


図－2.11 流域分割と配水管網

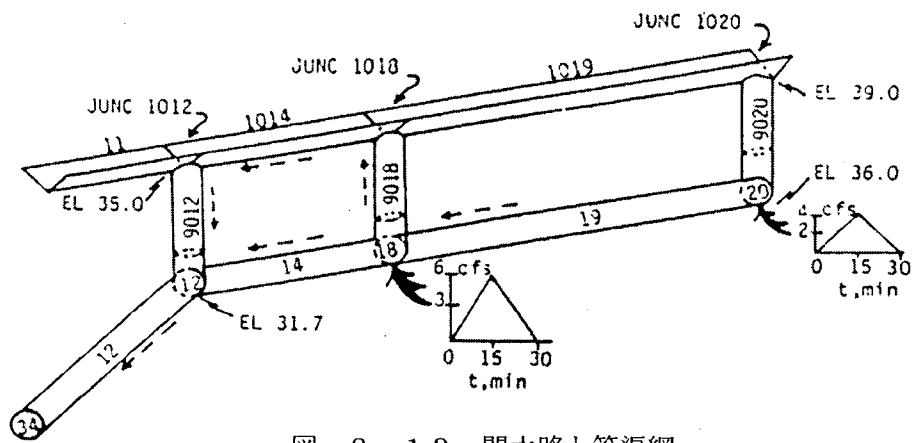
解析した結果と観測結果の比較を示す。

(2) 適用事例 2

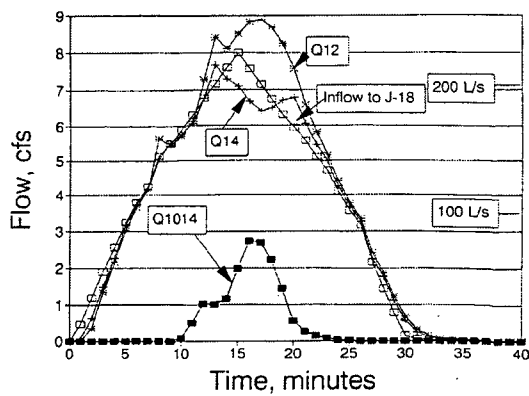
EXTRANブロックの解析実例として、図－ 2. 1 3 に示した開水路と管渠網における流れの水理解析が行なわれた。開水路と管渠網における流量の解析結果を図－ 2. 1 4 に示す。



図－ 2. 1 2 流出解析結果と観測結果との比較



図－ 2. 1 3 開水路と管渠網



図－ 2. 1 4 開水路と管渠網における流量の時間変化

2. 4 IISDHM

2. 4. 1 モデルの開発経緯

IISDHM (IIS Distributed Hydrological Model) は、東京大学生産技術研究所がこれまでの水文モデルを改良して開発したものである^{13), 14)}。日本の山地流域のような急勾配を持つ流域にも適用できる水文モデルを作成することが、モデル開発の当初の目的であった。モデルは数 km^2 ～数千 km^2 の面積の国内外の流域に適用されている。なお、モデルのソースコードは非公開である。

2. 4. 2 モデルの構成及び計算手法

モデルはメッシュベースのモデルであり、メッシュの大きさや鉛直方向の土壌層の厚さは、流域の大きさ、土地利用、地形・地質、要求される精度・情報、コンピュータの計算能力等により定める。モデルの構成を図-2.15、2.16に示す。モデルは大きく樹冠遮断、地表面流・河道流、不飽和流、地下水の4つの部分から構成されている。

(1) 樹冠遮断

樹冠遮断の計算には修正したBATSを用いる。樹冠遮断量は植生の葉面指数 (LAI) の関数から算出し、樹冠からの蒸発散量は遮断貯留量がなくなるまで可能蒸発散量とする。また、地表面に到達する降雨量も算出する。

(2) 蒸発散

実蒸発散量は、植生からの蒸発散量と地表面からの蒸発量の2つに分け、Kristensen-Jensen法を用いて可能蒸発散量から算出する。モデル計算にあたり、植生状況 (LAI、根の分布) と根層の土壌水分状況が必要とする。また、可能蒸発散量の計算では、利用できるデータの種類に応じてHamon式またはPenman式等を選択する。

(3) 地表面流・河道流

St. Venant 方程式の平面2次元diffusive wave近似式と連続の式を用いて地表面流を計算する。なお、連続の式中の流速には1つ前の時間ステップでの流速を用いることとし、水深を簡便に算出している。

河川ネットワーク解析の難しさと、一部河川において流量がゼロの場合があることを念頭に置き、河川流

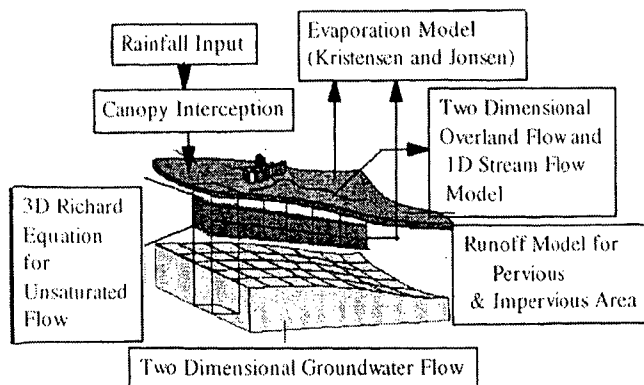


図2. 15 IISDHMの構成

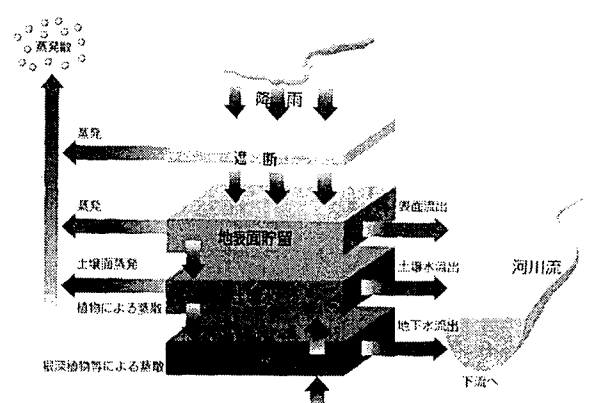


図2. 16 対象とする水文現象

を基本的にはkinematic wave法を用いて解析している。なお、感潮域や河床勾配が緩く背水の影響を考慮することが必要な場合には、dynamic wave法を用いる。

(4) 不飽和流

不飽和層は、地表面から地下水位までの部分とし、不飽和層における土壌水の移動は3次元Richards方程式を用いて表す。有限差分法によって方程式を解くとき、平面内では陽式差分法を用いるが、鉛直方向には陰式差分法を使う。上部（地表面における）境界条件はフラックス（降雨、蒸発）、または水頭の値を与える。地下水が地表面まで上昇する場合には、不飽和層の計算はしない。植生の根による吸水は、土壌中の吸い込み（sink）として考慮する。また、大空隙等において発生するパイプ流の影響を、不飽和流の計算に取り込んでいる。

なお、流域の条件及び要求される解析の精度によって、不飽和層は地表面から2mとし、不飽和層における土壌水の移動は鉛直1次元モデル、また横方向の土壌水移動を斜面に沿った移動すると仮定した準2次元モデルを用いる場合もある。

(5) 地下水

地下水モデルは、2次元多層モデルである。帯水層は不圧または被圧、均質または非均質で考慮する。河川水と地下水間のやり取りは河川水位と河川を持つ隣接するメッシュ中の地下水位の差によって計算する。井戸の取水も考慮することができる。

2. 4. 3 モデルの入力データとパラメータ

IISDHMモデル計算に必要なデータとパラメータを表－2.3に示す。

表－2.3 IISDHM モデルの入力データとパラメータ

入力データ		パラメータ
地形・地質データ	標高	植生冠遮断係数 植生の葉面積指数（LAI） 窪地貯留 表面勾配 表面粗度係数 河道勾配 河道粗度係数 土壌水分特性（pF曲線） 土壌透水係数（飽和・不飽和） 地下水貯留係数
	土地利用	
	河道諸元	
	不飽和層諸元	
人工系 用水・排水等	地下水帯水層諸元	
	農業用水	
	工業用水	
	上水	
気象データ	雑排水	
	下水道漏水	
流量データ	下水道滲出	
	降雨	
	気温	
	河川流量	

2. 4. 4 モデルの適用事例

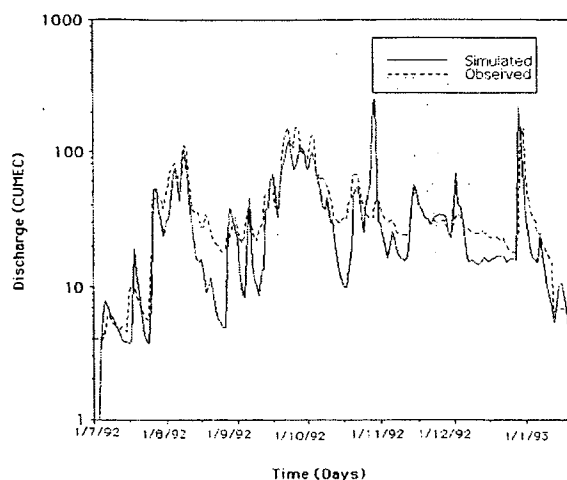
Ping川流域はタイの北西部にある面積が6,300 km²の流域である。モデル適用にあたってGISソフト（ARC/

INFO) を用いて、標高データから流域の落水線を作成した。流域全体を平面に1kmサイズのメッシュに分割し、時間降雨データを使用した。ハイドログラフに関する解析結果と観測結果の比較を図－2.17に示す。また、得られた流域内地下水位と実蒸発散量の分布を図－2.18に示す。

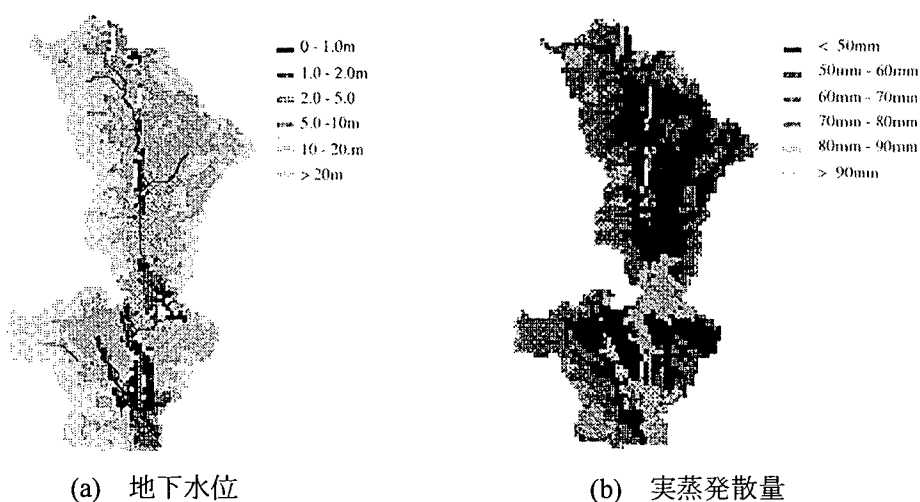
2.4.5 注意事項と検討課題

IISDHMモデルを利用にあたっては、次の事項に注意する必要がある。

- 1) データの入力方法や計算結果のグラフィック表示など、使いやすさに改良の余地がある。
- 2) 土壌水流出（中間流）計算のパラメータの設定根拠を検討する必要がある。
- 3) 地下水から下水管への浸出、また上水道からの漏水を考慮することができるが、管渠網における水流の詳細な挙動は解析できない。
- 4) 長期間にわたる連続計算では、土地利用等のデータも時間と共に変化させる必要がある。



図－2. 17 ハイドログラフの比較



図－2. 18 解析結果

2.5 モデルの比較と問題点

前述の分布型・物理モデルの特徴を表－2.4にまとめている。

他のタイプの水文モデルに比べて、分布型物理的な水文モデルについては次の特徴が挙げられる。

- 1) 流域情報をより詳細かつ正確にモデルに取り入れることができる。
- 2) 各水文過程は物理的根拠のある基礎方程式を用いて表現する。従って、土地利用の変化などによる水循環変化の予測、また対策効果を評価することができる。
- 3) モデルパラメータは物理的意味を持ち、測定ができる。
- 4) モデルの出力情報が多く、水循環経路ごとに水量を把握できる。

しかし、現段階での分布型物理水文モデルには次のような問題点がある。

- 1) 多くの入力データ（時間的、空間的）を必要とするが、それらの中には未整備なデータが多い。
- 2) 必要なコンピュータ性能が高く、長い計算時間を要するため、実務への適用が制限される。
- 3) 実際の水循環は多くの水文過程から構成されているため、モデルは複雑となり、モデルを理解・操作するには専門知識が必要であり、また、一定の訓練も必要となる。
- 4) 理論的に把握していない水文素過程がある。
- 5) モデルを実流域へ適用する場合には、水文過程を表現する方程式の適用性や計算結果の物理的意味を検討することが必要である（スケール問題）。
- 6) モデルを検証するのに必要なデータが充分整備されているとは言えない。
- 7) 降雨、流出、生活用水、工業用水、農業用水、下水処理水の再利用、地下水等のすべてを含む水文モデルは構築されていない。実際問題への適用に当たっては、新たなブロックを追加する必要がある。

表-2. 4 代表的な分布型水文モデルの比較

比較項目		MIKE SHE (デンマーク)		IHDM (イギリス)		SWMM (アメリカ)		IISDHM (日本)		WEPM (日本)		
特 徴		流域をメッシュに分割。メッシュ毎に入力データ、パラメータを設定可能。各水文素過程を物理式で表現。適用例が多い。		流域をカスケード状に接続する幾つかの河道と斜面に分割。斜面内の不飽和・飽和流を一体として2次元モデルで解析。		流域を小流域に分割。不浸透性、地表面貯留を考慮した流出計算。管渠網での水の挙動の詳細な解析が可能。		メッシュベースのモデル。メッシュ毎にパラメータを設定可能。差分法による解析。		総合的な流域管理ツールとして開発されたメッシュベースのモデル。流域における水と熱移動を統合的解析。		
水循環素過程	流出	降水	降雨、融雪の両方を考慮	●	降雨、融雪の両方を考慮	●	降雨、融雪の両方を考慮	●	降雨のみ	△	降雨のみ	△
		降水遮断	Rutter モデルまたは Kristensen-Jensen モデル	●	Rutter モデル	●		—	葉面指数 LAI の関数	●	Rutter または Noilhan-Planton モデル	●
		蒸発散	Penman-Monteith 式または Kristensen-Jensen モデル	●	Penman-Monteith 式	●	簡易式により算出	△	可能蒸発散から算定 (土壌水分状態等を考慮)	●	Penman-Monteith 式 (表層における熱収支を計算)	●
		窪地貯留	土地利用別に考慮	●	土地利用別に考慮	●	小流域別に考慮	●	土地利用別に考慮	●	土地利用別に考慮	●
		浸透・不浸透域	メッシュ毎に不浸透面積率指定	●	土壌の浸透性で考慮	●	小流域毎に不浸透面積率指定	●	メッシュ毎に不浸透面積率指定	●	メッシュ毎に不浸透面積率指定	●
		不飽和流	鉛直 1 次元モデル	●	Richards 式を用いた斜面 2 次元不飽和・飽和モデル	●	不飽和層の貯留特性	△	Richards 式を用いた 3 次元不飽和流モデル	●	一般化した Green-Ampt モデルと 1 次元 Richards 式	●
		地下水	物理式を用いた 3 次元モデル	●			飽和層の貯留特性	△	2 次元多層モデル	●	2 次元多層モデル	●
	流出追跡	地表面流	平面 2 次元 Diffusive wave モデル	●	1 次元 Kinematic wave モデル	●	非線形貯留池法・1 次元 Kinematic wave モデル	●	2 次元 Kinematic wave モデル	●	遅延時間で考慮	△
		河道流	1 次元 Diffusive wave モデル	△	1 次元 Kinematic wave モデル	△	1 次元 Dynamic wave network モデル	●	1 次元 Kinematic wave network モデル	△	Manning 式を用いた 1 次元 Kinematic wave network モデル	△
制御施設	側溝		—	—	非線形貯留池法・1 次元 Kinematic wave モデル	●	—	—	—	—		
	管渠網		—	—	リンク・ノード形の 1 次元 Dynamic wave モデル	●	—	—	—	—		
	堰	水位・流量式で考慮	●	—	組み込み	●	—	—	—	—		
	オリフィス		—	—		—	—	—				
	ゲート		—	—		—	—	—				
	ポンプ場		—	—	3 種類のモデル	●	—	—	—	—		
	貯水池・処理場		—	—	流入・貯留・放流特性で考慮	●	—	—	—	—		
人工系流量	導水	人工系流量は入力データ	●	—	入力ハイドログラフ	●	流域内外からの導水	●	モデルへの入力データ	●		
	生活用水		—	日・季節変動パターンを考慮		●						
	農業用水		—	灌漑季節を考慮		●						
	工業用水		—	井戸取水等を考慮		●						
対策評価	貯留浸透施設		—	—	貯留施設を考慮可能	△	メッシュ毎に統合的に表現	●	メッシュ毎に物理式を利用	●		
	下水処理水の活用		—	—		—		—		—		
利 便 性		GIS ソフトと連携。データ処理や結果表示は便利。商用ソフト。		ソースコードは非公開。		ソースコードは公開。ユーザサポートがある。		GIS ソフト ARC/INFO を用いている。ソースコードは非公開。		GIS ソフト ARC/VIEW を用いている。ソースコードは公開予定。		

注： ●：モデルでは明確な物理式によって素過程を忠実に表現する。 △：モデルで一部簡略化して考慮する。 -：モデルで考慮しない。

3. 水・熱循環統合解析モデルの説明

分布型物理モデルは、様々な水循環過程の物理表現を直接解析するため、モデルの適用性が広く、水循環の改善対策等の効果をより正確に検討することができるという長所を有している。しかし一方、分布型物理モデルは多くの入力データやモデル係数を必要とする複雑なモデルであり、利用する上で改良すべき課題も多い。例えば、計算負荷の軽減、計算メッシュ内の混在化した土地利用に対する素過程の取り扱い方法の確立、モデルのキャリブレーション方法の確立、地表面過程のモデルの改良（土壌－植物－大気間での相互作用）等の課題が挙げられる。

本章では、複雑な土地利用を有する都市河川流域での水・熱循環系を対象として新たに開発した分布型モデル (WEPM : PWRI's Water and Energy transfer Process Model for watershed management) の説明を行う。なお、前述のような分布型モデルに対する課題に対して、本モデルは次のような特徴を有している。

- 水循環のみならず熱輸送も同時に解析できる。
- 土壌－植物－大気間での相互作用をモデル化しており、地表面過程を詳しく解析できる。また、気象モデルとの連携をとりやすい。
- モザイク法の採用によりメッシュ内の土地利用の不均質性を考慮できる。
- 不飽和土壌水流れに対して、Richards方程式と同程度の精度を有し、計算時間の短い一般化したGreen－Amptモデルを作成し、使用している。
- 飽和地下水流れに対して、鉛直方向の水の移動を考慮した平面多層モデルを用い、計算速度の向上をはかっている。
- 雨水浸透施設に対するモデルを組み込んでおり、雨水浸透施設の整備が豪雨時の洪水や平常時の河川流量、さらには地下水位などに与える効果を検討することができる。

3.1 モデルの全体構造

新たな水・熱循環解析モデルが対象としている水・熱輸送過程を図－3.1に示す。1つの計算メッシュ内には様々な土地利用が含まれており、図－3.1の全ての過程は1メッシュ内で取り扱われるものである。

流域の土地利用は水域、裸地－植生域、不浸透域に大分類した。裸地－植生域はさらに裸地、丈の低い草地および農耕地、丈の高い樹木の3種類に、不浸透域は都市地表面と都市キャノピーとに分類した。なお、裸地－植生域においてのみ、植生の根系による土壌水分の吸水を表現するために表層の土壌を3層に細分割している。また、1計算メッシュからの水・熱輸送量は、土地利用ごとに算出される輸送量にその面積占有率を乗じることによって算出した（モザイク法）。

図－3.2にモデルの平面構造を示す。後述するように、本研究ではメッシュの大きさが50m×50mであり、計算時間間隔が1時間であるため、表面流出については2次元平面解析を行わず、小流域ごとに算出した表面流出量を河川への横流入量として与えた。河道内の流れの解析にはkinematic wave法を用いた。また、地下水流れに関しては、2次元多層地下水流れの方程式を解き、地下水位の表面流出に与える影響などを検討で

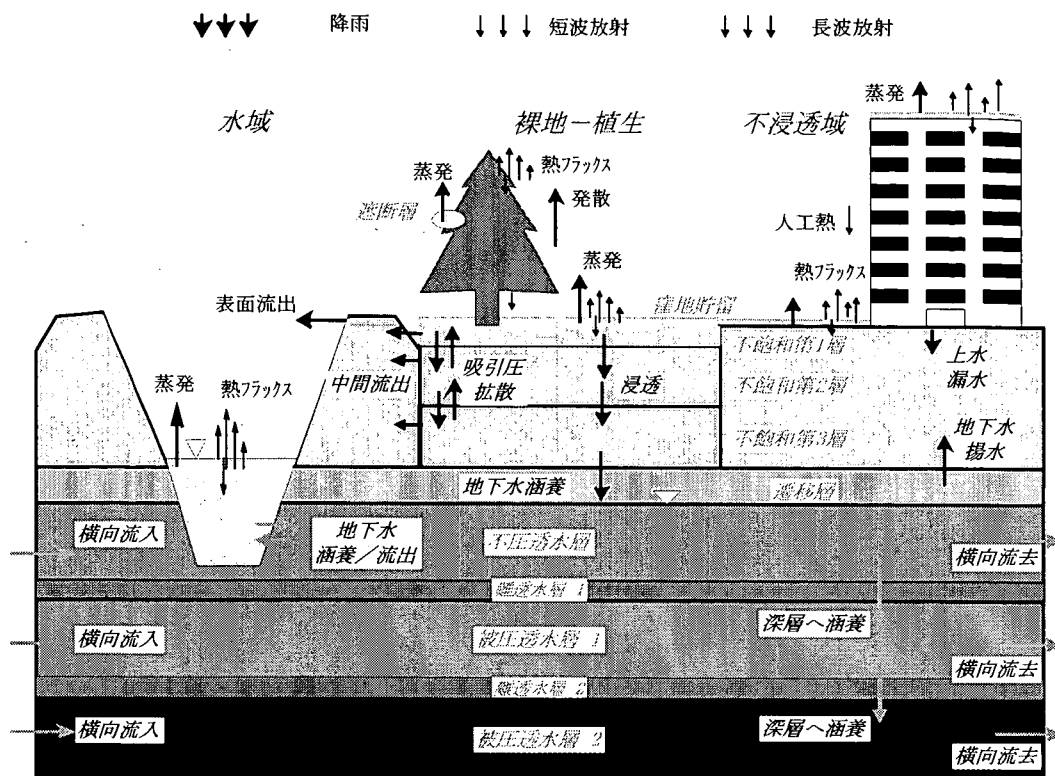


図-3. 1 対象とする水・熱輸送過程とモデルの鉛直構造

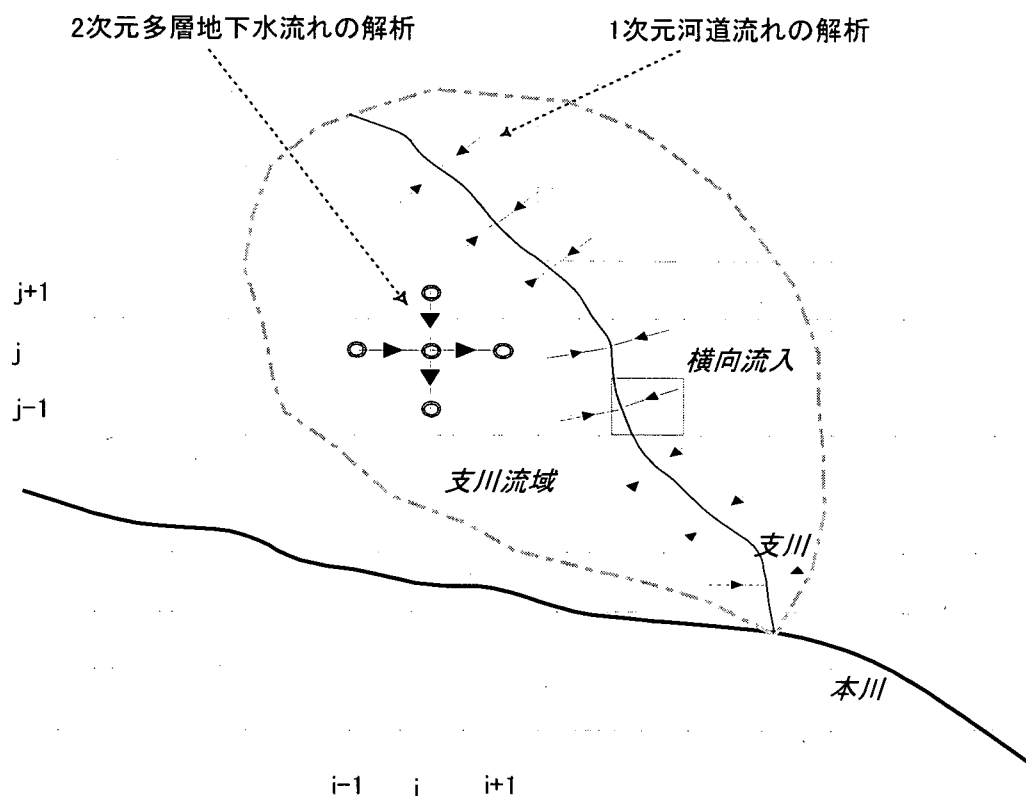


図-3. 2 モデルの平面構造

きるようにした。

なお、本モデルの適用性を拡大するために、表面流出の2次元解析や河川流のdynamic wave法による解析を現在検討している。

3.2 水循環過程のモデル化

3.2.1 蒸発散

メッシュ内の蒸発散は、植生キャノピーの濡れた葉面（降雨遮断）、水域、土壌、都市地表面、都市キャノピー等からの蒸発、及び植生キャノピーの乾いた葉面からの蒸散からなる。メッシュ平均の蒸発散は次式より算出した。

$$E = F_w E_w + F_{sv} E_{sv} + F_u E_u \quad (3.1)$$

ここで、 F_w 、 F_{sv} 、 F_u ：メッシュ内の水域、裸地－植生域、不透水域の面積割合（%）、 E_w 、 E_{sv} 、 E_u ：水域、裸地－植生域、不透水域における蒸発量あるいは蒸発散量である。上式中の土地利用の蒸発あるいは蒸発散の算出方法は以下の通りである。

（1）水域

水域からの蒸発量（ E_w ）は次式で表されるPenman方程式を用いて算出した。

$$E_w = \frac{(RN - G)\Delta + \rho_a C_p \delta e / r_a}{\lambda(\Delta + \gamma)} \quad (3.2)$$

上式で、 RN ：正味の放射、 G ：水中への熱伝導、 Δ ：飽和水蒸気圧の温度に対する変化率、 δe ：水蒸気圧の飽和水蒸気圧との差、 r_a ：水表面の空気力学的抵抗、 ρ_a ：空気密度、 C_p ：空気の定圧比熱、 λ ：水の気化潜熱、 $\gamma = C_p / \lambda$ である。

（2）裸地－植生域

裸地－植生域からの蒸発散量（ E_{sv} ）は次のように計算した。

$$E_{sv} = Ei_1 + Ei_2 + Etr_1 + Etr_2 + Es \quad (3.3)$$

ここで、 Ei ：植生遮断（濡れている葉からの蒸発）、 Etr ：植生蒸散（乾いている葉からの蒸散）、 Es ：裸地土壌からの蒸発である。また、下付き添字1は高い植生（森林、都市樹木）を、下付き添字2は低い植生（草、農作物）を示す。また、式(3.3)中の各蒸発散は次のように算出した。

植生遮断（ Ei ）の算出にはRutter¹⁵⁾やNoilhan－Planton¹⁶⁾によるモデルを使用した。

$$Ei = Veg \cdot \delta \cdot Ep \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial W_r}{\partial t} = Veg \cdot P - Ei - Rr \quad (3.5)$$

$$Rr = \begin{cases} 0 & W_r \leq W_r \max \\ W_r - W_r \max & W_r > W_r \max \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\delta = (W_r / W_r \max)^{2/3} \quad (3.7)$$

$$W_r \max = 0.2 \cdot Veg \cdot LAI \quad (3.8)$$

ここで、 Veg ：裸地－植生域での植生の面積割合、 δ ：濡れた葉面の面積比率、 Ep ：可能蒸発量（Penman方

程式で計算)、 Wr : 遮断タンクの貯水量、 P : 降雨量、 Rr : 植生キャノピーからの流出、 W_{max} : 遮断タンクの最大貯水量、 LAI : 葉面積指数である。方程式 (3.7) はDeardorff¹⁷⁾ に、方程式 (3.8) はDickinson¹⁸⁾ に従った。

蒸散はPenman-Monteith方程式¹⁹⁾より算出した。

$$E_{tr} = Veg \cdot (1 - \delta) \cdot E_{PM} \quad (3.9)$$

$$E_{PM} = \frac{(RN - G)\Delta + \rho_a C_p \delta e / r_a}{\lambda [\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)]} \quad (3.10)$$

なお、 RN : 正味放射量、 G : 植生への熱フラックス、 r_c : 植生の群落抵抗 (canopy resistance) である。蒸散は土壌、植物、大気を一体としたシステム (SPAC: Soil-Plant-Atmosphere Continuum) における水循環の一環でもあり、光合成、大気湿度、土壌水分などの制約を受ける。式(3.10)では、それらの影響は植生の群落抵抗 (r_c) で考慮されているが、詳細については後述する。

蒸散により土壌水分は減少する。土壌水分の分布を算出するためには、植生の根系分布と根系による吸水量を求めることが必要である。ここでは、Leiら²⁰⁾による根系吸水モデルを用いた。このモデルでは、吸水強度が地中深くなるにつれて直線的に減少することや、根系層の上半分の吸水量が根系による吸水総量の70%になることを仮定している。モデルの具体的な表現は次のようである。

$$S_r(z) = \left(\frac{1.8}{lr} - \frac{1.6}{lr^2} z \right) E_{tr} \quad (0 \leq z \leq lr) \quad (3.11)$$

$$E_{tr}(z) = \int_0^z S_r(z) dz = \left(1.8 \frac{z}{lr} - 0.8 \left(\frac{z}{lr} \right)^2 \right) E_{tr} \quad (0 \leq z \leq lr) \quad (3.12)$$

ここで、 E_{tr} : 蒸散 (式(3.9)より算出される)、 lr : 根系層の厚さ、 z : 地表面からの深さ、 $S_r(z)$: 深さ z での根系による吸水強度、 $E_{tr}(z)$: 深さ z までの土壌からの吸水量である。

以上より、植生に対して根系層の厚さ (lr) を与えれば土壌からの吸水量を計算することができる。裸地-植生域において表層土壌を3層に分割していることを前述したが、本モデルでは根系と吸水量を次のように取り扱っている。

丈の高い植生の根は約2m (第3層) まで伸びていると仮定している。このため、吸水量は以下のように算出できる。

$$E_{tr1} = E_{tr11} + E_{tr12} + E_{tr13} \quad (3.13)$$

$$E_{tr11} = E_{tr}(d_1) \quad (3.14)$$

$$E_{tr12} = E_{tr}(d_1 + d_2) - E_{tr}(d_1) \quad (3.15)$$

$$E_{tr13} = E_{tr}(lr) - E_{tr}(d_1 + d_2) \quad (3.16)$$

$$lr = d_1 + d_2 + d_3 \quad (3.17)$$

ここで、 E_{tr1i} : 丈の高い植生域 (添字1) の土壌第 i 層からの吸水量、 d_i : 第 i 層の厚さである。

丈の低い植生の根は約1m (第2層) まで及んでいると考え、各土壌層からの吸水量を次のように算出した。

$$E_{tr2} = E_{tr21} + E_{tr22} \quad (3.18)$$

$$Etr_{21} = Etr(d_1) \quad (3.19)$$

$$Etr_{22} = Etr(lr) - Etr(d_1) \quad (3.20)$$

$$lr = d_1 + d_2 \quad (3.21)$$

で、 Etr_{2i} ：丈の低い植生域（添字 2）の土壤第 i 層からの吸水量である。

（3）裸地での蒸発

蒸発に伴う水分移動は第 1 土壤層内で生ずると仮定した。Penman 方程式 (3.2) の導出にならい、蒸発効率 (β) を用いて、裸地蒸発 (Es) の計算式を導出した。

$$Es = \frac{(Rn - G)\Delta + \rho_a C_p \delta e / r_a}{\lambda(\Delta + \gamma / \beta)} \quad (3.22)$$

蒸発効率について、Lee-Pielke²¹⁾が次の関数形を提案している。

$$\beta = \begin{cases} \frac{1}{4} \left[1 - \cos(\pi \theta / \theta_{fc}) \right]^2 & \theta < \theta_{fc} \\ 1 & \theta \geq \theta_{fc} \end{cases} \quad (3.23)$$

しかし、土壤の含水率がある限界値（単分子吸引圧に対応、約 pF6.0～7.0）以下であれば、蒸発は起こらないと考えられる（Nakaegawa²²⁾）ため、ここでは次のように修正した関数形を用いている。

$$\beta = \begin{cases} 0 & \theta \leq \theta_m \\ \frac{1}{4} \left[1 - \cos(\pi(\theta - \theta_m) / (\theta_{fc} - \theta_m)) \right]^2 & \theta_m < \theta < \theta_{fc} \\ 1 & \theta \geq \theta_{fc} \end{cases} \quad (3.24)$$

なお、方程式 (3.23) と (3.24) において、 θ ：表層土壤の体積含水率、 θ_{fc} ：表層土壤の圃場容水率、 θ_m ：単分子吸引圧時の土壤体積含水率である。

（4）不浸透域

都市地表面と都市キャノピーでは窪地貯留を表現するタンクがあると仮定した。タンクに水がある場合には蒸発を可能蒸発量と考えて、Penman 方程式で計算した。

$$E_u = cE_{u1} + (1 - c)E_{u2} \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial H_{u1}}{\partial t} = P - E_{u1} - R_{u1} \quad (3.26)$$

$$R_{u1} = \begin{cases} 0 & H_{u1} \leq H_{u1 \max} \\ H_{u1} - H_{u1 \max} & H_{u1} > H_{u1 \max} \end{cases} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial H_{u2}}{\partial t} = P - E_{u2} - R_{u2} \quad (3.28)$$

$$R_{u2} = \begin{cases} 0 & H_{u2} \leq H_{u2 \max} \\ H_{u2} - H_{u2 \max} & H_{u2} > H_{u2 \max} \end{cases} \quad (3.29)$$

ここで、 P ：降雨、 H_u ：窪地貯留、 E_u ：蒸発、 R_u ：表面流出、 $H_{u \max}$ ：最大窪地貯留、 c ：不浸透域での都市キャノピーの面積割合である。下付き添字 1 は都市キャノピーを、2 は都市地表面を示す。

3. 2. 2 浸透

代表的な浸透モデルとして、Green-Amptモデル²³⁾、Hortonモデル²⁴⁾、Philipモデル²⁵⁾等が挙げられる。Green-Amptは、初期含水率が低い一様な土壌コラムに対して、強い降雨などで地表面が湛水する場合には、浸入前線（wetting front）が形成されると仮定し、Darcyの法則を用いて浸透現象を表現した。そのモデルは、他のモデルと比較すると、構造が明確であり、計算が簡単であるという長所を有している。

Mein-Larson²⁶⁾ やChu²⁷⁾はGreen-Amptモデルを一様な土壌コラムの浸透問題へ適用した。また、Moore-Eigel²⁸⁾ は二層からなる土壌に適用できるように浸透モデルを拡張した。さらに、Jia-Tamai²⁹⁾ は実降雨の多層土壌における浸透に適用できるGreen-Amptモデルを提出した。本研究では、これを一般化したGreen-Amptモデルと呼ぶ。このモデルは次のように定式化される。なお、図-3.3は浸入前線が第 m 土壌層に達した状態を表している。

$$f = k_m \cdot \left(1 + \frac{A_{m-1}}{B_{m-1} + F}\right) \quad (3.30)$$

ここで、 f ：浸透速度、 F ：積算浸透量であり、 k_m 、 A_{m-1} 、 B_{m-1} については後述する。積算浸透量（ F ）の算出方法は、地表面での湛水の有無に応じて場合分けされる。浸入前線が第 $m-1$ 土壌層にあった時点から地表面の湛水が継続している場合には、積算浸透量は次式から算出される。

$$F - F_{m-1} = k_m(t - t_{m-1}) + A_{m-1} \cdot \ln\left(\frac{A_{m-1} + B_{m-1} + F}{A_{m-1} + B_{m-1} + F_{m-1}}\right) \quad (3.31)$$

一方、前の時間ステップ t_{m-1} では湛水がなく、現在の時間ステップ t_n で湛水が開始した場合には、積算浸透量は以下の式から求められる。

$$F - F_p = k_m(t - t_p) + A_{m-1} \cdot \ln\left(\frac{A_{m-1} + B_{m-1} + F}{A_{m-1} + B_{m-1} + F_p}\right) \quad (3.32)$$

$$A_{m-1} = \left(\sum_1^{m-1} L_i - \sum_1^{m-1} L_i k_m / k_i + SW_m\right) \Delta \theta_m \quad (3.33)$$

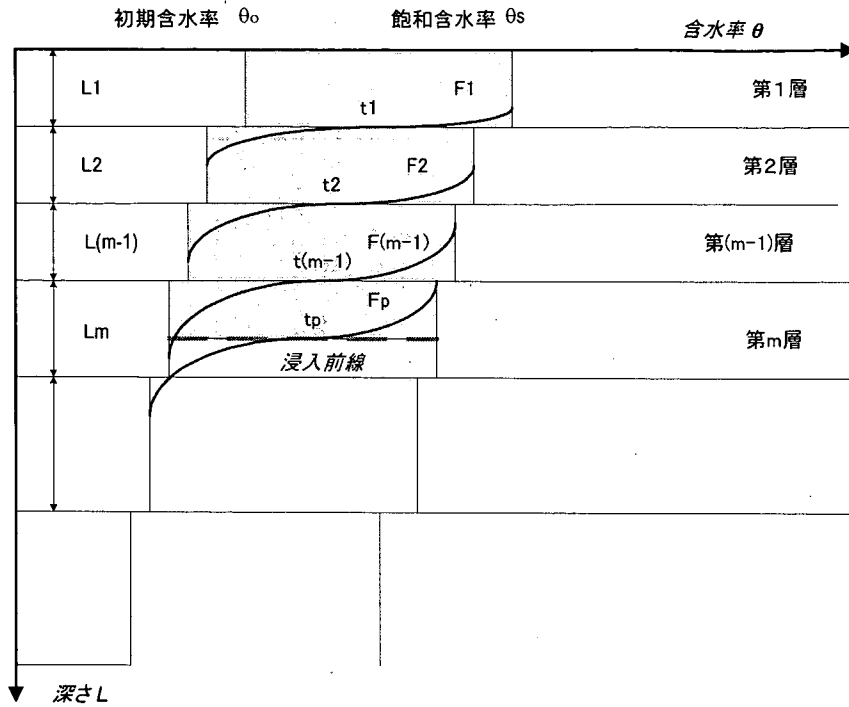
$$B_{m-1} = \left(\sum_1^{m-1} L_i k_m / k_i\right) \Delta \theta_m - \sum_1^{m-1} L_i \Delta \theta_i \quad (3.34)$$

$$F_{m-1} = \sum_1^{m-1} L_i \Delta \theta_i \quad (3.35)$$

$$F_p = A_{m-1}(I_p / k_m - 1) - B_{m-1} \quad (3.36)$$

$$t_p = t_{n-1} + (F_p - F_{n-1}) / I_p \quad (3.37)$$

ここで、 SW ：浸入前線での毛管吸引圧、 k ：伝達層（浸入前線より上部）の透水係数、 θ ：伝達層の土壌含水率、 θ_0 ：初期土壌含水率、 t ：時刻、 F_p ：地表面湛水時の積算浸透量、 t_p ：湛水開始時刻、 I_p ：湛水開始時の降雨強度、 t_{m-1} ：浸入前線が第 m 層と第 $m-1$ 層の界面に到達した時刻、 L ：浸入前線の地表面からの深さ、 L_i ：第 i 層の厚さ、 $\Delta \theta = \theta_i - \theta_0$ である。



図－ 3. 3 多層構造を有する土壌における浸透の概念

3. 2. 3 表面流出

水域での表面流出は、蒸発を無視し降雨量に等しいとした。また、不浸透域での表面流出は式(3. 27)と(3. 29)で計算される。裸地－植生域での表面流出は次の2つのタイプに分類される。

(1) 浸透超過流出 (Hortonタイプ)

このタイプの流出は、降雨強度が土壌の飽和透水係数より大きい場合に発生する。このときの表面流出(Rl_{ie})は次式より算出した。

$$\frac{\partial H_{sv}}{\partial t} = P - E_{sv} - f_{sv} - Rl_{ie} \quad (3.38)$$

$$Rl_{ie} = \begin{cases} 0 & H_{sv} \leq H_{sv \max} \\ H_{sv} - H_{sv \max} & H_{sv} > H_{sv \max} \end{cases} \quad (3.39)$$

ここで、 P ：降水量、 H_{sv} ：裸地－植生域での窪地貯留、 $H_{sv \max}$ ：最大窪地貯留、 E_{sv} ：蒸発散、 f_{sv} ：一般化したGreen－Amptモデルで算出される浸透である。

(2) 飽和超過流出 (Dunneタイプ)

不圧地下水位が表層土壌にまで達した状態で降雨が続き、土壌が飽和状態に達すると表面流出が発生する。この場合の表面流出(Rl_{se})は、窪地貯留及び3つの土壌層の水収支方程式から求められる。

1) 窪地貯留

$$\frac{\partial H_s}{\partial t} = P(1 - Veg_1 - Veg_2) + Veg_1 \cdot Rr_1 + Veg_2 \cdot Rr_2 - E_0 - Q_0 - Rl_{se} \quad (3.40)$$

$$Rl_{se} = \begin{cases} 0 & H_s \leq H_{s \max} \\ H_s - H_{s \max} & H_s > H_{s \max} \end{cases} \quad (3.41)$$

2) 表層土壌層:

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial t} = \frac{1}{d_1} (Q_0 + QD_{12} - Q_1 - R_{21} - Es - Etr_{11} - Etr_{21}) \quad (3.42)$$

3) 第2土壌層:

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = \frac{1}{d_2} (Q_1 + QD_{23} - QD_{12} - Q_2 - R_{22} - Etr_{12} - Etr_{22}) \quad (3.43)$$

4) 第3土壌層:

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial t} = \frac{1}{d_3} (Q_2 - QD_{23} - Q_3 - Etr_{13}) \quad (3.44)$$

なお、

$$Q_j = k_j(\theta_j) \quad (j=1, 3) \quad (3.45)$$

$$Q_0 = \min\{k_1(\theta_s), Q_0 \max\} \quad (3.46)$$

$$Q_0 \max = W_1 \max - W_{10} - Q_1 \quad (3.47)$$

$$QD_{j,j+1} = \bar{k}_{j,j+1} \cdot \frac{\psi_j(\theta_j) - \psi_{j+1}(\theta_{j+1})}{(d_j + d_{j+1})/2} \quad (j=1, 2) \quad (3.48)$$

$$\bar{k}_{j,j+1} = \frac{d_j * k_j(\theta_j) + d_{j+1} * k_{j+1}(\theta_{j+1})}{d_j + d_{j+1}} \quad (j=1, 2) \quad (3.49)$$

ここで、 Hs : 窪地貯留、 $Hsmax$: 最大窪地貯留、 Veg_1 、 Veg_2 : 裸地一植生域での丈の高い植生と低い植生の面積割合、 $Rr1$ 、 $Rr2$: 丈の高い植生と低い植生の葉面から地表面への流出、 Q : 重力排水、 QD_{jj-1} : 吸引圧による土壌 j 層と $j+1$ 層間の水分拡散、 E_0 : 窪地貯留からの蒸発、 Es : 表層土壌からの蒸発、 Etr : 蒸散（一番目の下付き添字 1 は高い植生を、2 は低い植生を示す。二番目の下付き添字は土壌層の番号を示す）、 R_2 : 中間流出、 $k(\theta)$: 体積含水率 θ の土壌の透水係数、 $\psi(\theta)$: 体積含水率 θ における土壌の吸引圧、 d : 土壌層の厚さ、 W : 土壌の貯水量 ($= \theta d$)、 W_{10} : 表層土壌の初期貯水量である。なお、下付き添字 0、1、2、3 はそれぞれ窪地貯留層、表層土壌層、第2土壌層と第3土壌層を示す。土壌の水分特性曲線及び不飽和透水係数はHerathら^{30),31)}を参考にして決定した。

3. 2. 4 中間流出

河川への中間流出は不飽和土壌層からの側方流れと考え、次式より計算した。

$$R2 = k(\theta) \sin(slope) Ld \quad (3.50)$$

上式において、 $k(\theta)$: 体積含水率 θ の土壌の透水係数、 $slope$: 地表面の勾配、 L : 1 メッシュ内の河川の長さ、 d : 不飽和土壌層の厚さである。

3. 2. 5 地下水流れと地下水流出

飽和地下水流れは不圧、被圧地下水に分け、準一様流の仮定を用いて定式化した。また、被圧帯水層は流域の地質条件に応じて多層に分けた。各帯水層においては、上方からの涵養量、下方への浸透量、井戸の揚

水量の影響を考慮した。また、河川の存在するメッシュにおける不圧帯水層の流れの解析では、河川と地下水との間の水分移動である地下水流出（RG）を考慮した。被圧帯水層が2層の場合には、基礎方程式は次のように表される。

1) 不圧帯水層

$$C_u \frac{\partial h_u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [k(h_u - z_u) \frac{\partial h_u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [k(h_u - z_u) \frac{\partial h_u}{\partial y}] + (Q_3 + WUL - RG - E - Per - GWP) \quad (3.51)$$

2) 被圧帯水層 1

$$C_1 \frac{\partial h_1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_1 D_1 \frac{\partial h_1}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_1 D_1 \frac{\partial h_1}{\partial y}) + (Per - RG_1 - Per_1 - GWP_1) \quad (3.52)$$

3) 被圧帯水層 2

$$C_2 \frac{\partial h_2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k_2 D_2 \frac{\partial h_2}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_2 D_2 \frac{\partial h_2}{\partial y}) + (Per_1 - Per_2 - GWP_2) \quad (3.53)$$

ここに、 h ：地下水位（不圧帯水層）あるいは水頭（被圧帯水層）、 C ：貯留係数、 k ：透水係数、 z ：帯水層底部の標高、 D ：帯水層の厚さ、 Q_3 ：不飽和透水層からの涵養、 WUL ：上水道漏水、 RG ：地下水流出、 E ：蒸発散、 Per ：下部帯水層への涵養、 GWP ：地下水揚水である。なお、下付き添字 u 、 1 、 2 はそれぞれ不圧帯水層、被圧第1帯水層、被圧第2帯水層を示す。

地下水流出は地下水位（ h_u ）と河川水位（ H_r ）との高さ関係に応じ、次式により算出した。

$$RG = \begin{cases} k_b A_b (h_u - H_r) / d_b & h_u \geq H_r \\ -k_b A_b & h_u < H_r \end{cases} \quad (3.54)$$

ここに、 k_b ：河床の土壌の透水係数、 A_b ：1メッシュ内の河床での浸透面積、 d_b ：河床での土壌厚である。

3. 2. 6 人工系の水循環過程の表現

(1) 上水道

流域内での使用水量の実績に基づき用水量の原単位を定めた。これにメッシュ内の人口を乗じてメッシュ用水量とした。上水道漏水量は用水量と漏水率から算出した。

(2) 下水と雑排水

メッシュ内の用水量に下水道面積率を乗じて、下水道への下水として、その残りを河川への雑排水とした。

(3) 地下水揚水

地下水揚水は上水用と灌漑用の2種類を含む。上水用の揚水量は年間総揚水量と人口分布を用いて計算した。メッシュ内の灌漑用の揚水量は年間総揚水量と水田面積、灌漑期間に基づいて計算した。

(4) 農業用水の流域外からの給水

流域外から給水された農業用水の分布は年間総給水量、水田面積と灌漑期間に基づいて計算した。

(5) 浸透トレンチ

浸透トレンチからの浸透量の計算は次のように行った^{32), 33)}。

$$\partial S_i / \partial t = Q_m - Q_{inf} - Q_{ovf} \quad (3.55)$$

$$S_i = nLWH \quad (3.56)$$

$$Q_{inf} = K_0 L(aH + b) \quad (3.57)$$

$$Q_{ovf} = cL(H - H_m)^{3/2} \quad (3.58)$$

ここに、 S_i ：貯留量、 Q_m ：流入量、 Q_{inf} ：浸透量、 Q_{ovf} ：越流量、 n ：空隙率、 L ：長さ、 W ：幅、 H ：水深、 H_m ：計画水深、 K_0 ：トレンチ直下の土壌の飽和透水係数である。定数 a と b は文献³³⁾に従い定めた。また、定数 c は堰頂越流を想定して $0.4\sqrt{2g}$ （ g ：重力加速度）と評価した。

3. 2. 7 河道内の流れ

河道内の流れは、河川に接するメッシュ毎に算出した流出量をもとに、Manningの平均流速式を用いた kinematic wave法により解析した。

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_L \quad (3.59)$$

$$\text{運動量式} \quad Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S_0^{1/2} \quad (3.60)$$

ここで、 A ：断面面積、 Q ：流量、 q_L ：河道単位長さ当たりの横流入量、 n ：Manningの粗度係数、 R ：径深、 S_0 ：河床の縦断勾配である。

3. 3 熱輸送過程のモデル化

本モデルでは地表面での熱輸送を水分輸送と連成させて解析している。地表面における熱収支式は次のように表される。

$$RN + Ae = IE + H + G \quad (3.61)$$

上式中において、 RN ：正味放射、 Ae ：人工熱排出、 IE ：潜熱フラックス、 H ：顕熱フラックス、 G ：地中熱フラックスである。

3. 3. 1 正味放射

正味放射（ RN ）は正味の短波放射（ RSN ）と正味の長波放射（ RLN ）よりなる。

$$RN = RSN + RLN \quad (3.62)$$

以下に正味の短波・長波放射の計算方法を説明する。

3. 3. 2 短波放射

短波放射の観測データが利用できる場合にはそのデータを使用するが、そのデータがなく日照データから短波放射を推定する場合も多い。その推定法について多くの研究が行われている^{34), 35)}。ここではアメダス

(AMeDAS) の日照時間データから時間短波放射を推定するShimazakiらの方法³⁵⁾を用いた。計算式は以下のようである。

$$RS = I \cos \theta + S \quad (3.62)$$

ここで、 I : 直達短波放射、 S : 拡散短波放射、 θ : 太陽天頂角である。直達短波放射は次のように求められる。

$$I/I_{\max} = 0.0011N_p + 0.0482N_c + 0.0021N_cN_p \quad (3.63)$$

$$I_{\max} = I_{00} (d_0/d)^2 \exp(-k_0 \tau_0 m) \quad (3.64)$$

$$d/d_0 = 1.0 - 0.017 \cos \eta \quad (3.65)$$

$$k_0 = 0.128 - 0.054 \log_{10} m \quad (3.66)$$

$$m = [\cos \theta + 0.15(5.456 - \theta)^{-1.253}]^{-1} \quad (3.67)$$

$$\cos \theta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cosh \quad (3.68)$$

$$\delta = \arcsin(0.398 \sin(4.872 + \eta + 0.033 \sin \eta)) \quad (3.69)$$

$$h = \pi(H - 12)/12 \leq \omega \quad (3.70)$$

$$\omega = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.71)$$

$$\eta = (2\pi/365)J \quad (3.72)$$

また、拡散短波放射は以下のよう計算される。

$$S/S_{\max} = \begin{cases} 0.5517 + 0.0482N_c - 0.0056N_c^2 & N_c > 0 \\ 0.267 & N_c = 0 \end{cases} \quad (3.73)$$

$$S_{\max} = 2.5(d_0/d)^2 m^{-1.0} \quad (3.74)$$

上式で、 $I_{\max}$: 晴天時の最大直達短波放射、 I_{00} : 太陽定数 (4.921MJ/m²·hour)、 $S_{\max}$: 最大拡散短波放射 (MJ/m²·hour)、 N_c : 当時間内の日照レベル (0~10)、 N_p : 前時間内の日照レベル、 d 、 d_0 : 太陽と地球間の距離と年平均距離、 k_0 : 標準大気圧での空気分子の消散係数、 τ_0 : 最小空気濁度、 m : 大気路程、 θ : 太陽天頂角、 ϕ : 観測点の緯度、 δ : 太陽傾角、 h : 太陽時角、 ω : 日出から南中までの角度、 H : 0時を起点して数えた時間 (0~24)、 J : 1月1日を起点として数えた日数である。

地表面に到達する短波放射のうち、地表面で一部は反射され、残りが地表面で吸収されることになる。この正味の短波放射の算出方法を土地利用別にまとめると以下のようになる。

(1) 水域

$$RSN_w = RS (1 - \alpha_w) \quad (3.75)$$

(2) 裸地-植生域

$$\text{裸地} : RSN_s = RS(1 - \alpha_s)(F_{soil} + \tau_1 \cdot \text{veg1} + \tau_2 \cdot \text{veg2}) \quad (3.76)$$

$$\text{丈の高い植生} : RSN_{v1} = RS(1 - \alpha_{v1})\text{veg1} - RS(1 - \alpha_s)\tau_1 \cdot \text{veg1} \quad (3.77)$$

$$\text{丈の低い植生} : RSN_{v2} = RS(1 - \alpha_{v2})\text{veg2} - RS(1 - \alpha_s)\tau_2 \cdot \text{veg2} \quad (3.78)$$

$$\tau_1 = \exp(-0.5LAI1) \quad \tau_2 = \exp(-0.5LAI2) \quad (3.79)$$

(3) 不浸透域

$$\text{都市地表面} : RSN_{u1} = RS(1 - \alpha_{u1})F_r\beta \quad (3.80)$$

$$\text{都市キャノピー} : RSN_{u2} = RS(1 - \alpha_{u2})(1 - F_r\beta) \quad (3.81)$$

ここで、 RSN ：正味短波放射、 α ：アルベド、 τ_1 、 τ_2 ：丈の高い植生及び低い植生の短波透過率、 F_{soil} 、 veg1 、 veg2 ：裸地－植生域での裸地、丈の高い植生、低い植生の面積割合、 LAI ：葉面積指数、 F_r ：不浸透域での都市地表面の面積割合、 β ：都市地表面での天空率（0.8と仮定）である。下付き添字 w 、 s 、 $v1$ 、 $v2$ 、 $u1$ 、 $u2$ ：水域、裸地、高い植生、低い植生、都市地表面と、都市キャノピーをそれぞれ示す。水面のアルベドを0.08に、土壌のアルベドを土壌含水率と太陽天頂角の関数に、植生と都市キャノピーのアルベドをキャノピーの高さと太陽天頂角の関数として表示した。詳細についてはJia³⁶⁾を参照されたい。

3.3.3 長波放射

長波放射の計算にはKondo³⁷⁾を参照した。

$$RLD = [1 - (1 - \varepsilon_{ac})F_c]\sigma(T_a + 273.2)^4 \quad (3.82)$$

$$RLU = 0.98\sigma(T_s + 273.2)^4 \quad (3.83)$$

$$\varepsilon_{ac} = 1 - 0.261 \exp(-7.77 \times 10^{-4} \cdot T_a^2) \quad (3.84)$$

$$F_c = 0.826N_c^3 - 1.234N_c^2 + 1.135N_c + 0.298 \quad (3.85)$$

ここでは、 RLD ：大気から地表への長波放射、 RLU ：地表から大気への長波放射、 T_a ：気温、 T_s ：地表温度、 F_c ：雲の影響に関するパラメータ、 σ ：ステファン－ボルツマン定数、 ε_{ac} ：晴天時の大気放射パラメータである。

以上の結果を用いて土地利用別の正味長波放射を算出することができる。

(1) 水域

$$RLN_w = RLD - RLU_w \quad (3.86)$$

(2) 裸地－植生域

$$\text{裸地} : RLN_s = (RLD - RLU_s)F_{soil} + (RLU_{v1} - RLU_s)\text{veg1} + (RLU_{v2} - RLU_s)\text{veg2} \quad (3.87)$$

$$\text{丈の高い植生} : RLN_{v1} = (RLD + RLU_s - 2RLU_{v1})\text{veg1} \quad (3.88)$$

$$\text{丈の低い植生} : RLN_{v2} = (RLD + RLU_s - 2RLU_{v2})\text{veg2} \quad (3.89)$$

(3) 不浸透域

$$\text{都市地表面} : RLN_{u1} = [RLD\beta - RLU_{u1} + RLU_{u2}(1 - \beta)]F_r \quad (3.90)$$

$$\text{都市キャノピー} : RLN_{u2} = RLD(1 - F_r\beta) - RLU_{u2}[1 - F_r + 2F_r(1 - \beta) + RLU_{u1}F_r(1 - \beta)] \quad (3.91)$$

3.3.4 潜熱フラックス

蒸発散と地表面温度の関数である水の潜熱を用いて算出した。

$$lE = l \cdot E \quad (3.92)$$

$$l = 2.501 - 0.002361T_s \text{ (MJ / kg)} \quad (3.93)$$

ここでは、 l ：水の潜熱、 T_s ：地表面温度、 E ：蒸発散（Penman-Monteith方程式により計算）である。

3.3.5 顕熱フラックス

顕熱フラックス（ H ）は地表面と大気温度差、空気力学的抵抗により算出される。

$$H = \rho_a C_p (T_s - T) / r_a \quad (3.94)$$

$\rho_a C_p$ ：空気の熱容量、 T_s ：地表面温度、 T ：気温、 r_a ：空気力学的抵抗である。

3.3.6 人工排熱

土地利用別、時刻別に人工排熱を与えた。人工排熱の半分は地表面へ、残りの半分は大気へ放出されると仮定した。統計資料に基づいて求めた東京都の人工排熱の日変動データを表3-1に示す³⁸⁾。

3.3.7 地中熱フラックス

地中への熱伝導フラックス（ G ）は次式で表される。

$$G = (RN + Ae) - (lE + H) \quad (3.95)$$

3.3.8 地表面温度

人工排熱以外の熱フラックスはいずれも地表面温度の関数となっており、しかも方程式は非線形である。このため、熱伝導方程式の高速解法である強制復元法（Force-Restore 法）³⁹⁾を用いた繰り返し計算により地表面温度を算出した。

$$\alpha \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{2}{c_h \cdot d_0} G - \omega (T_s - \bar{T}) \quad (3.96)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\tau} (T_s - \bar{T}) \quad (3.97)$$

$$\alpha = 1 + 0.943(\delta/d_0) + 0.223(\delta/d_0)^2 + 0.0168(\delta/d_0)^3 - 0.00527(\delta/d_0)^4 \quad (3.98)$$

$$d_0 = \sqrt{2k_h / (c_h \omega)} \quad (3.99)$$

$$\omega = 2\pi / \tau \quad \tau = 86400 \quad (3.100)$$

表 3-1 東京都の人工排熱の日変動 (単位: W/m²)

時間	道路	教育・文化 施設	工業	事務用地	一般高密度住宅	独立住宅	中高層住宅
1	58	18	38	46	18	16	33
2	52	17	34	42	10	9	20
3	49	16	33	41	9	9	19
4	46	15	32	40	9	9	18
5	45	15	33	40	9	10	18
6	48	16	34	41	10	11	19
7	53	17	37	46	11	11	20
8	65	19	48	59	14	14	28
9	82	26	73	89	18	18	38
10	97	36	95	118	22	22	44
11	104	40	101	126	25	24	47
12	105	41	102	127	26	25	49
13	105	41	103	128	27	26	53
14	107	41	105	130	31	29	61
15	109	42	106	131	35	32	68
16	107	41	105	130	34	30	65
17	103	39	101	125	31	27	58
18	98	35	94	116	29	26	55
19	93	31	85	105	29	25	54
20	89	28	77	95	29	32	69
21	84	25	69	86	50	41	88
22	77	22	58	73	49	39	84
23	72	20	50	62	38	31	65
24	66	19	45	54	28	24	49

ここで、 G : 地中への熱伝導フラックス、 T_s : 地表面温度、 $\bar{T}$: 地中土壌温度 (時間的に一定で地表面温度の日平均値に等しいと仮定)、 δ : 計算用の土壌の厚さ (表層土壌の厚さ d_l)、 d_0 : 温度の日変化が及ぶ深さ、 k_h : 土壌の熱伝導率、 c_h : 土壌の熱容量である。方程式 (3.96) の右辺の第 1 項は熱伝導フラックスによる強制を、第 2 項は地表面温度から地中温度への復元を示す。

土壌の熱物理特性は土壌の鉱物構成及び土壌の含水率により決められる。土壌の熱容量 c_h と土壌の熱伝導率 k_h は次のように定めた⁴⁰⁾。

$$c_h = c_{hm}(1 - \theta_s) + c_{hw}\theta \quad 10^6 J m^{-3} K^{-1} \quad (3.101)$$

$$k_h = 0.243 + 0.393\theta + 1.534\theta^{0.5} \quad W m^{-1} K^{-1} \quad (3.102)$$

ここで、 c_{hm} : 構成鉱物の熱容量、 c_{hw} : 水の熱容量、 θ : 土壌の体積含水率、 θ_s : 飽和体積含水率である。土壌中の空気の熱容量は小さいため無視した。

3. 4 空気力学的抵抗と植生の群落抵抗

3. 4. 1 空気力学的抵抗

地表面付近の大気における運動量、水蒸気及び熱の輸送においては乱流拡散が重要である。空気力学的抵抗 (r_a) は、乱流拡散と密接に関連しており、中立に近い大気では次のように求められる⁴¹⁾。

$$r_a = \frac{\ln[(z-d)/z_{om}] \cdot \ln[(z-d)/z_{ox}]}{\kappa^2 U} \quad (3.103)$$

ここで、 z : 風速、湿度あるいは温度の観測点高さ、 κ : von Karman定数、 U : 風速、 d : ゼロ面変位、 z_{ox} : $=z_{om}$ (運動量輸送)、 z_{ov} (水蒸気輸送)、 z_{oh} (熱輸送) に対する粗度である。Monteith¹⁹⁾によれば、高さ h_c の植生に対して、 $z_{om}=0.123h_c$ 、 $z_{ov}=z_{oh}=0.1z_{om}$ 、 $d=0.67h_c$ である。

大気が安定あるいは不安定な場合には、運動量、水蒸気及び熱輸送が浮力の影響を受けるが、空気力学的抵抗 (r_a) はMonin-Obukhovの相似理論を用いて計算される。

$$r_a = \frac{\left\{ \ln[(z-d)/z_{om}] - \psi_m(\xi) \right\} \cdot \left\{ \ln[(z-d)/z_{ox}] - \psi_x(\xi) \right\}}{\kappa^2 U} \quad (3.104)$$

$$\xi = (z-d)/L \quad (3.105)$$

$$L = \frac{-u_*^3 \rho_a}{\kappa g \left(\frac{H}{T_a C_p} + 0.61 E \right)} \quad (3.106)$$

$$u_* = \frac{\kappa U}{\ln[(z-d)/z_{om}] - \psi_m(\xi)} \quad (3.107)$$

ここで、 ξ : 無次元高度、 L : Monin-Obukhovの安定度スケール、 u_* : 摩擦速度、 $\psi_m(\xi)$: 運動量輸送の積分普遍関数、 $\psi_x(\xi) := \psi_m(\xi)$ (運動量輸送)、 $\psi_v(\xi)$ (水蒸気輸送)、 $\psi_h(\xi)$ (熱輸送) である。積分普遍関数の計算については、文献⁴²⁾を参照されたい。

3. 4. 2 植生の群落抵抗

植生の群落抵抗は個々の葉の気孔抵抗の総和であり、Dickinsonら(1991)⁴³⁾によれば次のように表示できる。

$$r_c = \left(\sum_1^n LAI_i / r_{si} \right)^{-1} \approx \frac{\langle r_s \rangle}{LAI} \quad (3.108)$$

$$\langle r_s \rangle = r_{smin} f_1(T) f_2(VPD) f_3(PAR) f_4(\theta) \quad (3.109)$$

ここで、 LAI_i : 植生を n 個の階層に分離したときの第 i 層の葉面指数、 r_{si} : 第 i 層の葉の気孔抵抗、 $\langle r_s \rangle$: 群落の気孔抵抗の平均値、 r_{smin} : 最小気孔抵抗、 f_1 : 温度の影響関数、 f_2 : 大気の飽差 (飽和水蒸気圧と大気

の水蒸気圧の差、VPD : vapor pressure deficit) の影響関数、 f_3 : 光合成に有効な放射 (PAR : photosynthetically active radiation flux) の影響関数、 f_4 : 土壌含水率の影響関数である。

葉の気孔抵抗 (r_s) のLAI に対する変化を無視すると以下の式が得られる¹⁹⁾。

$$r_c = \frac{r_{smin}}{LAI} f_1 f_2 f_3 f_4 \quad (3.110)$$

上式における関数 $f_1 \sim f_3$ の関数形として次のように提案されている^{16), 18), 44), 45)}。

$$f_1^{-1} = 1 - 0.0016(25 - Ta)^2 \quad (3.111)$$

$$f_2^{-1} = 1 - VPD / VPD_c \quad (3.112)$$

$$f_3^{-1} = \frac{\frac{PAR}{PAR_c} \frac{2}{LAI} + \frac{r_{smin}}{r_{smax}}}{1 + \frac{PAR}{PAR_c} \frac{2}{LAI}} \quad (3.113)$$

ここで、 Ta : 気温 (°C)、 VPD_c : 葉の気孔が閉まる時のVPD値 (約 4kPa)、 PAR_c : PARの限界値 (森林: 30 W/m²、穀物: 100 W/m²)、 r_{smax} : 最大気孔抵抗 (5000 s/m)である。

また、関数 f_4^{-1} は以下のように表わした⁴⁶⁾。

$$f_4^{-1} = \begin{cases} 1 & (\theta \geq \theta_c) \\ \frac{\theta - \theta_w}{\theta_c - \theta_w} & (\theta_w \leq \theta \leq \theta_c) \\ 0 & (\theta \leq \theta_w) \end{cases} \quad (3.114)$$

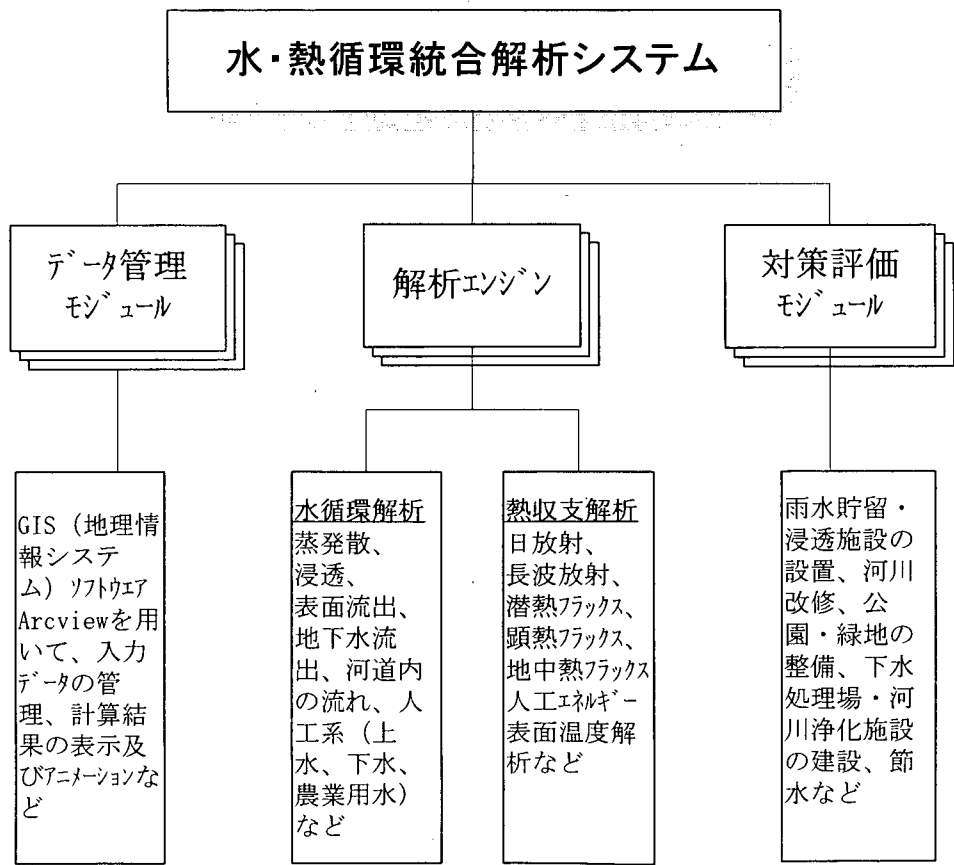
ここで、 θ : 根系層の土壌含水率、 θ_w : 植生のしおれ時の土壌含水率、 θ_c : 限界土壌含水率 (それ以上の含水率であれば蒸散への制約とならない) である。

4. 水・熱循環統合解析システムの概要

4. 1 解析システムの構成

水・熱循環統合解析システムは、解析エンジン、データ管理モジュール及び対策評価モジュールの三つの部分により構成されている（図－4.1）。循環解析システムの解析エンジンである水循環、熱収支モデルに対する解析コードはFortran言語で開発した。データ管理モジュールはGISソフトウェア（ArcView）を用いて作成しており、流域情報の管理や解析結果の表示を行う。対策評価モジュールは解析エンジンの結果を再整理し、年間水・熱収支等を算出するものである。

地表面での水・熱輸送、地中での水分輸送、地下水流れ、河道内での流れの解析手順は、図－4.2のフローチャートに示すようであり、指定した年月日まで計算を進める。



図－4. 1 解析システムの構成

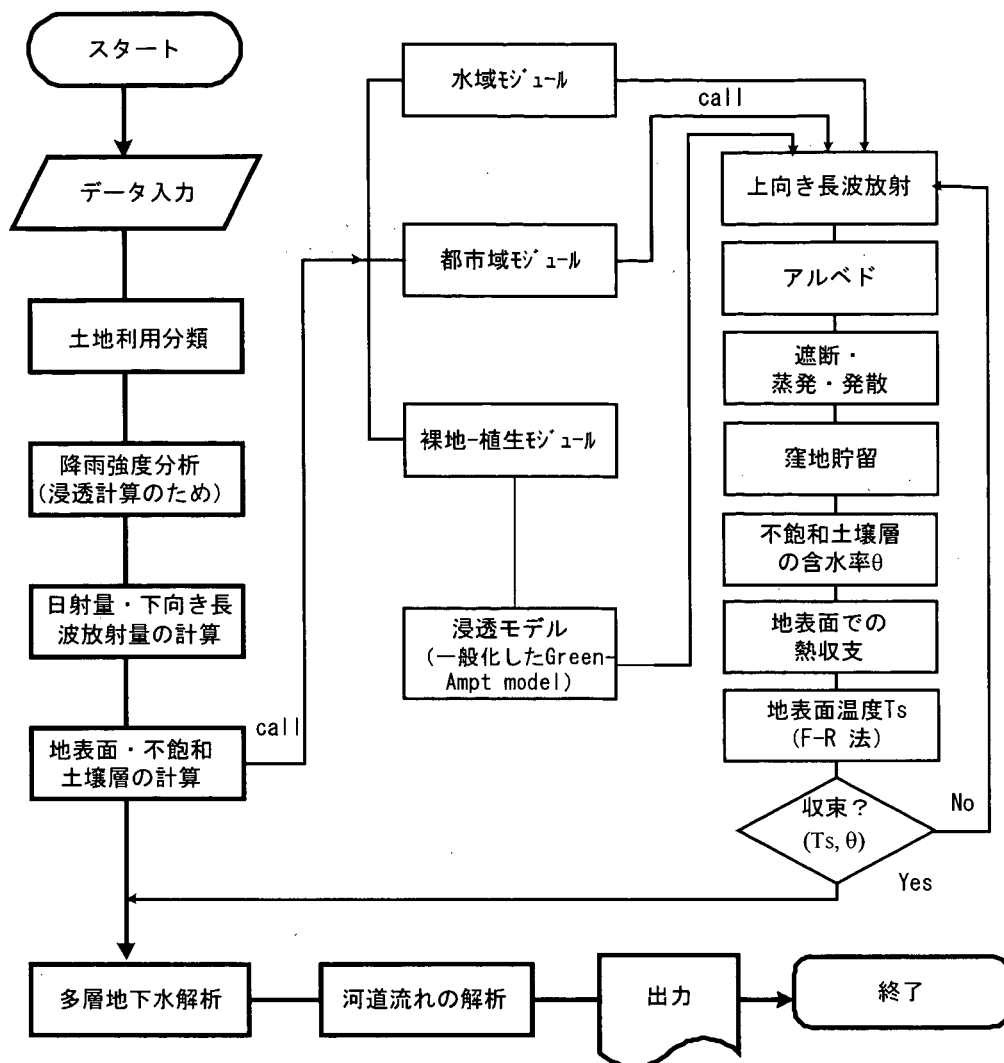


図-4.2 解析エンジンのフローチャート

4.2 解析コードの構成

解析コード中のモジュールの一覧を表-4.1に、モジュール間の相互関係を図-4.3に示す。

主なモジュールの内容は以下のようである。

(1) MAIN

これはメインプログラムであり、解析の流れをコントロールしている。

(2) INPUT

データ、パラメータの入力モジュールである。入力データとパラメータの内容については4.3節を参照されたい。

表－4. 1 解析コードのモジュール名と機能

モジュール名	機 能	モジュール名	機 能
MAIN	Main Program	SVEI	一般時期の裸地－植生域の計算
INPUT	データ、パラメータの入力	SVGA	大雨時期の裸地－植生域の計算
INC	初期条件の設定（土壌水分量、地下水位、河道流量、地表面温度等）	RESIS	空気力学的抵抗とキャノピー抵抗の計算
BDC	境界条件の設定（河道、地下水）	ALBEDO	短波放射量の反射率の計算
LUMAN	メッシュ内の土地利用の再分類	PENMAN	可能蒸発量の計算
RINDIC	Green-Ampt モデルための降雨強度分析	SCWH	地表面、キャノピー表面の水・熱輸送量の計算
MAXRAD	晴天時最大直達放射量の計算	RFRM	Force-Restore法による地表面温度の計算
SURSOIL	メッシュ内の表面及び不飽和土壌層の水・熱輸送量の計算	ROOT	植生の根系モデル
GWATER	2次元多層地下水の計算（陽的差分法、時間単位で）	BETA	土壌の蒸発効率の計算
RIVER	河道流れの計算（Nolinear Kinematic Wave法、時間単位で）	CONDOC	不飽和透水係数の計算
OUTPUT	時間、日河川流量、地下水位、表面水・熱フラックス等の出力、各支川流域の年間水・熱収支の解析	DIFSUC	吸引圧と拡散係数の計算
WATER	メッシュ内の水域の計算	PMONTE	蒸発散の計算
URBAN	メッシュ内の都市域の計算	PEMANS	土壌蒸発の計算
SOIVEG	メッシュ内の裸地－植生域の計算	UNSAT	不飽和土壌層の水輸送量計算
		GRAM	Green-Amptモデルで浸透の計算

（3） INC

初期条件の処理モジュールである。土壌水分量、地下水位、河道流量、地表面温度等の状態変数の初期値を設定する。

（4） BDC

境界条件の処理モジュールである。地下水境界の法線方向には、地下水の流出入がないと設定した。表面流出、雑排水は河道への横流入として処理した。

（5） LUMAN

細密数値情報の土地利用分類を本解析モデルで使用する6つの土地利用（水域、裸地、低い植生、高い植生、都市地表面と都市キャノピー）に変換する。それには表－5.2を使用する。丈の低い植生には草地、畑、水田が含まれる。丈の高い植生には森林と都市樹木が含まれる。また、それぞれに標記コードを与える。

さらに、表－3.1で示した人工排熱の原単位に基づいて、メッシュ内の都市地表面と都市キャノピーにおける人工排熱を算出する。

(6) RINDIC

降雨強度、降雨過程と土壌の飽和透水係数を用いて、一般化したGreen-Amptモデルを使用するか否かを決める。

(7) SURSOIL

1メッシュ内の地表面と不飽和土壌層の水・熱輸送量の計算モジュールである。その中にはWATER, URBAN, SOIL3つのサブモジュールが含まれている。メッシュの水・熱輸送量は、土地利用ごとに算出される輸送量にその面積占有率を乗じることによって算出した（モザイク法）。

(8) GWATER

陽的差分法、時間単位で多層地下水の流れを解析する。河川への地下水流出の計算も含まれた。

(9) RIVER

河道流れをNolinear Kinematic Wave法で解析する。ニュートン法による繰り返し計算を行う。

(10) OUTPUT

計算結果の統計・出力等のモジュールである。なお、計算結果を総計して、支川流域ごとの年間水・熱収支を求める。

(11) SVEI

弱い降雨時や非降雨時における裸地・植生域の水・熱輸送量の計算を行う。遮断、蒸発、蒸散、窪地貯留、不飽和土壌層の水分移動、地表面熱フラックス、地表面温度等の計算を行う。

(12) SVGA

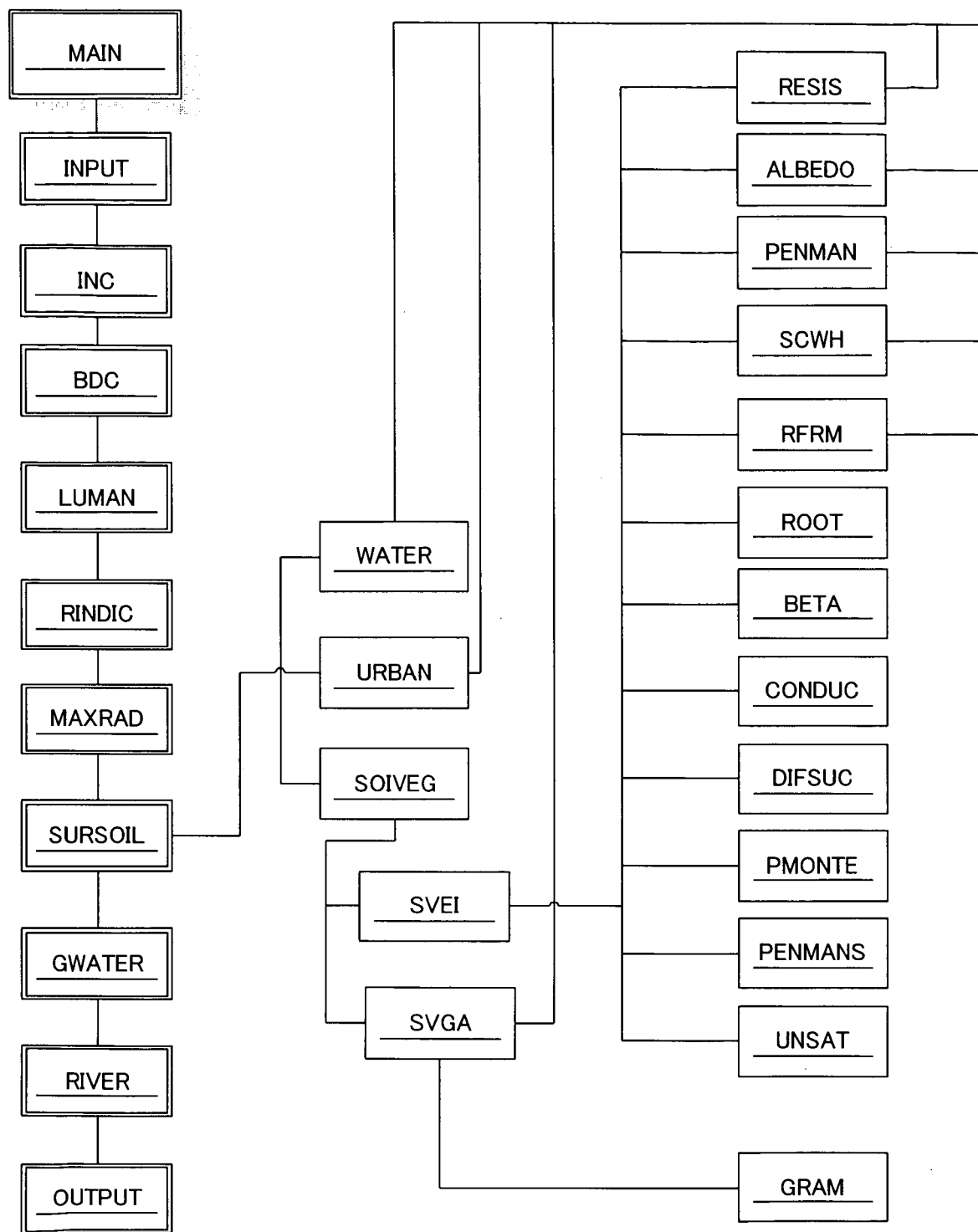
大雨時の裸地・植生域の水・熱輸送量の計算を行う。SVEIモジュールとの差異は、浸透計算に一般化したGreen-Amptを使用することである。

(13) GRAM

一般化したGreen-Amptモデルで、大雨時の浸透過程を解析する。浸入前線の位置、降雨強度により、ニュートン法を用いて浸透量を解く。

(14) RFRM

地表面温度をForce-Restore法で算出する。



図－4． 3 解析コードのモジュール間の関係

4. 3 入出力データ

表－4． 2に解析システムへの入力データとファイル名を示す。解析結果として表－4． 3に示すような情報がファイルに出力される。それらはデータ管理モジュールで管理、図示される。

表－4.2 入力データファイルとその内容

ファイル名	データの内容
@PARA.DAT	定数、AMeDAS観測点情報、植生・根系パラメータ、人工排熱、河道断面データ等
@SOIL.DAT	土壌、地質の透水係数等のパラメータ
@PREC.DAT	観測点ごとの降雨の時間値データ
@TEMP.DAT	観測点ごとの気温の時間値データ
@WIND.DAT	観測点ごとの風速の時間値データ
@SUNS.DAT	観測点ごとの日照（あるいは短波放射）の時間値データ
@HUMI.DAT	観測点ごとの湿度の時間値データ
@LAUS.DAT	メッシュの細密数値土地利用データ
@INSIDE.DAT	メッシュの解析域データ（-9999：域外、-9999以外：域内）
@SCSO.DAT	メッシュの地質種類（1：沖積土, 2：関東ローム, 3：常総粘土, 4：成田砂）
@SCAM.DAT	メッシュに対応するAMeDAS観測点の番号（ティーセン法）
@SCPR.DAT	メッシュに対応する降雨観測点の番号（ティーセン法）
@SCHU.DAT	メッシュに対応する湿度観測点の番号（ティーセン法）
@SUBC.DAT	メッシュに対応する支川流域のコード番号
@ASEW.DAT	メッシュ内の下水道普及面積
@HEIGH.DAT	メッシュの標高
@SLOP.DAT	メッシュの傾斜
@POPU.DAT	メッシュ内の人口
@GPIR.DAT	メッシュ内の灌漑用地下水揚水
@GPWU.DAT	メッシュ内の上水用地下水揚水
@WDIR.DAT	メッシュ内の灌漑用域外引水
@AQTHK.TXT	メッシュ内の透水層と難透水層の厚さ
@CNDTV.TXT	メッシュ内の透水層と難透水層の透水係数
@SCOEF.TXT	メッシュ内の透水層の貯留係数
@SCRV.TXT	メッシュ内の河道番号（-1:河道はない, その他:河道番号）
@RVBED.TXT	メッシュ内の河床標高、河床材料の厚さ、河床材料番号
@RVWIDTH.TXT	各河道の長さ、幅、縦断勾配

表－4.3 出力データ一覧表

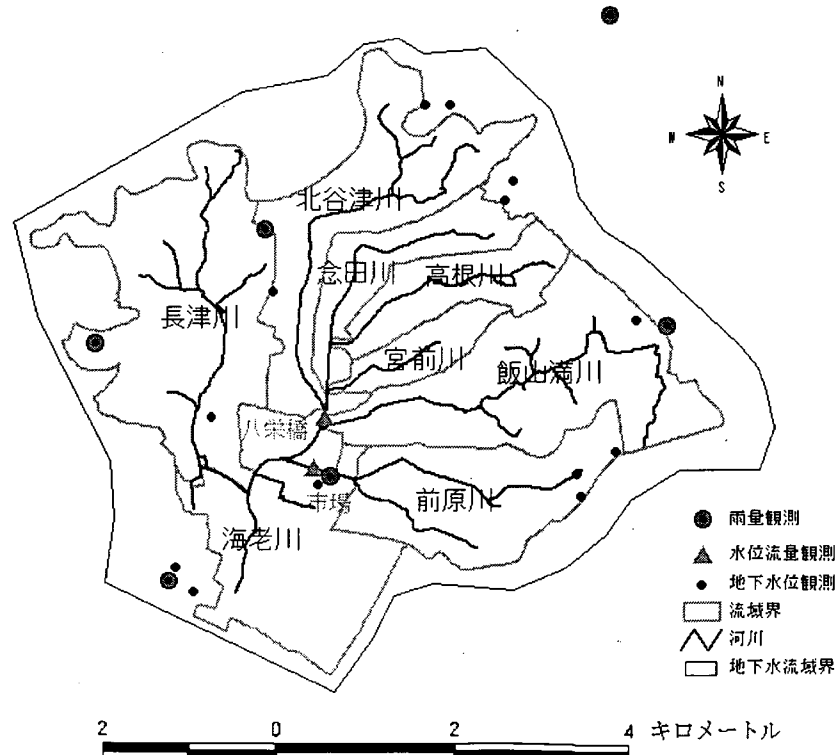
ファイル名	データの内容
RESU.DAT	指定時刻での土壌水分量、表面温度、地下水位及びフラックス分布
CHEC.DAT	入力データ、計算のチェック及びメッシュに対応する土地利用再分類結果
PRIN.DAT	全流域の年月単位の水・熱収支
HOURL.DAT	指定地点での河川の時間流量、地下水流出
PLWA.DAT	流域の末端での日流量
YEAR.DAT	年間水収支・熱フラックスの空間分布
DAIL.DAT	指定地点での各透水層の日平均地下水位
AKCOE.DAT	メッシュ内の表層土壌透水係数の修正係数（土地利用に基づく）
RFLOW.DAT	本川各断面の時間河川流量
WHSUBC.DAT	全流域、各支川流域の年間水・熱収支

5. 水・熱循環モデルの検証

5.1 海老川流域の概要

前章で説明した解析システムを千葉県海老川流域（図－5.1）へ適用した。この流域は船橋市と鎌ヶ谷市を含み、建設省の水循環再生構想の対象流域の1つである。流域面積は27km²であり、海老川本川と前原川などの7つの支川が流れている。流域内や流域界の近くには、6ヶ所の雨量観測所（アメダス船橋観測点を含める）、2ヶ所の河川水位流量観測点及び13ヶ所の地下水位観測点がある。流域内の地表標高は0～33mであり、第一透水層の厚さは2～17mである。また、この流域には4種類の土壌（関東ローム、沖積土、常総粘土と成田砂）が分布している。海老川流域の市街化率は現在（1993年時点）では約60%であるが、将来（2035年時点）では山林や農地が市街地に転換され、都市化が一層進展するものと予想されている。

海老川流域の水循環系については、これまでにいくつかの論文、報告が発表されている。例えば、高橋ら⁴⁷⁾は観測データや統計資料に基づいて、流域全体の水収支と河川流量を分析した。Herathら⁴⁸⁾は、分布型モデルを用いて、支川の前原川の流域で水循環を検討した。しかし、水循環系の複雑性のため、水循環解析の妥当性をさらに検証することや、水循環改善対策の効果を評価できる物理モデルを開発すること等、多く課題が残されている。



図－5.1 海老川流域

5.2 入力データとモデルパラメータ

5.2.1 流域データ

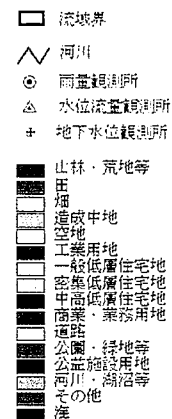
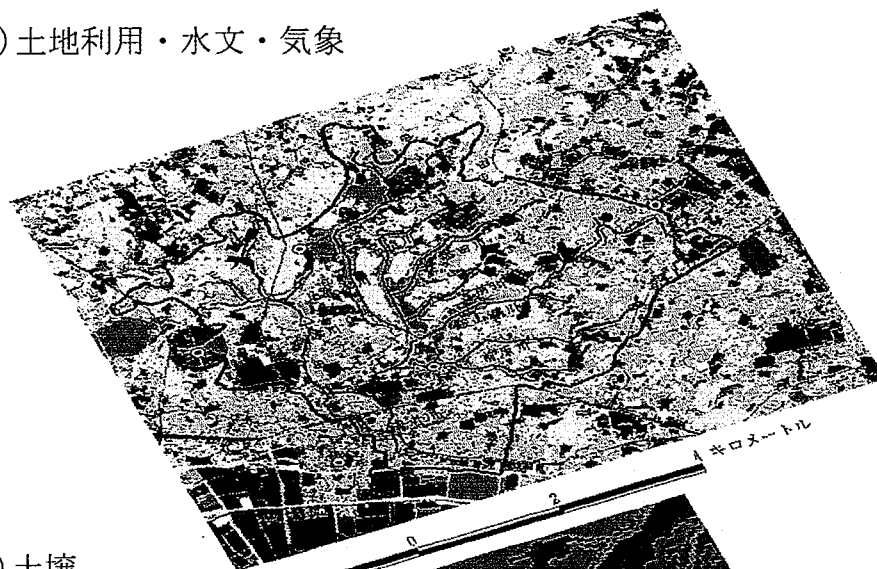
本研究で使用した入力データを表－5.1に示す。標高及び土地利用データは50mメッシュ数値地図、1994年の首都圏細密数値情報から得た。降水量、地下水位、土壌、地質及び上水、下水のデータは千葉県土木部都市河川課及び東京大学生産技術研究所虫明研究室から提供されたものである。また、気温、日照、風速、湿度については1992年～1997年のAMeDAS観測データと千葉県環境部大気保全課のデータを使用した。さらに、河川流量には生産技術研究所虫明研究室と千葉工業大学工学部高橋研究室の観測データを用いた。

図－5.2には流域の土地利用、土壌、標高を、図－5.3には第一透水層の厚さを、図－5.4には上水道の使用量等を算出するのに使用した人口の分布を示している。表－5.2は首都圏細密数値情報(1994年)に基づく土地利用別面積を示している。

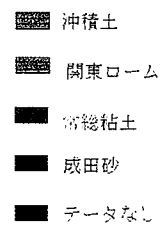
表－5.1 流域情報の種類と入手先

データの種類		観測機関／入手先	データ名称	データ期間
自然・人口	地表面標高	国土地理院	数値地図標高50mメッシュ	1990年
	土地利用	国土地理院	首都圏細密数値情報	1994年
	土壌	千葉県土木部	表層地質調査	
	人口	千葉県土木部	町丁字人口調査	
気象・水文	降雨	気象庁 東京大学生産技術研究所・虫明研究室	AMeDAS 消防署雨量データ	1992～1997年
	日照、気温、風速	気象庁	AMeDAS	1992～1997年
	湿度、気温、風速	千葉県環境部	千葉県環境データ	1992～1997年
	日射、風速、気温、土壌温度・水分等	東京大学生産技術研究所・虫明研究室	日本大学グランド観測データ	1997～1998年
利水	上水道、農業用水、地下水揚水	千葉県土木部	水道事業年報	
排水	下水道	千葉県土木部	下水道	
河川・地下水	断面形状	千葉県土木部	断面形状	
	河川流量	東京大学生産技術研究所・虫明研究室 千葉工業大学・高橋研究室	海老川水系水文・水質年報	1992～1996年
	地下水位	千葉県土木部、 (株)日本工営	地下水位連続観測、 一斉測水	1995～1997年 1996年1月

(a) 土地利用・水文・気象



(b) 土壌



(c) 標高

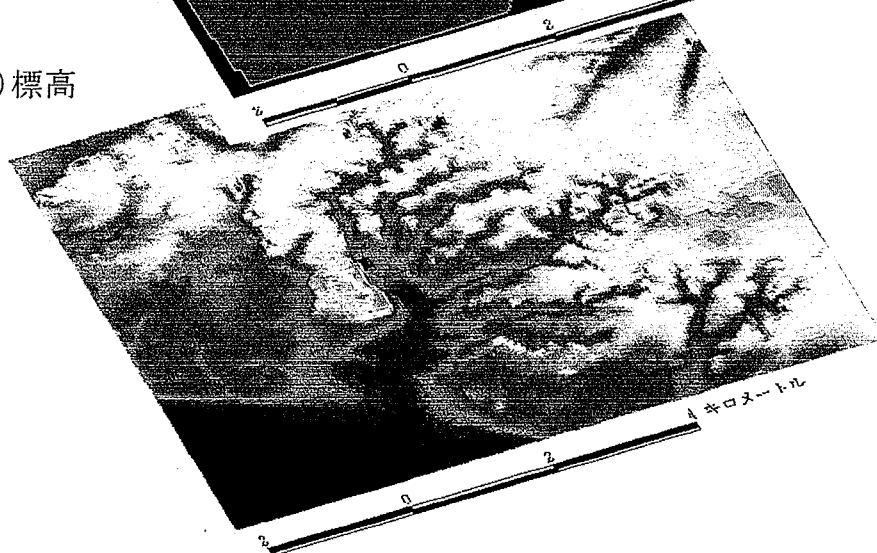


図-5. 2 海老川流域の土地利用・土壌・標高



図- 5. 3 第一透水層の厚さの分布 (単位 : m)

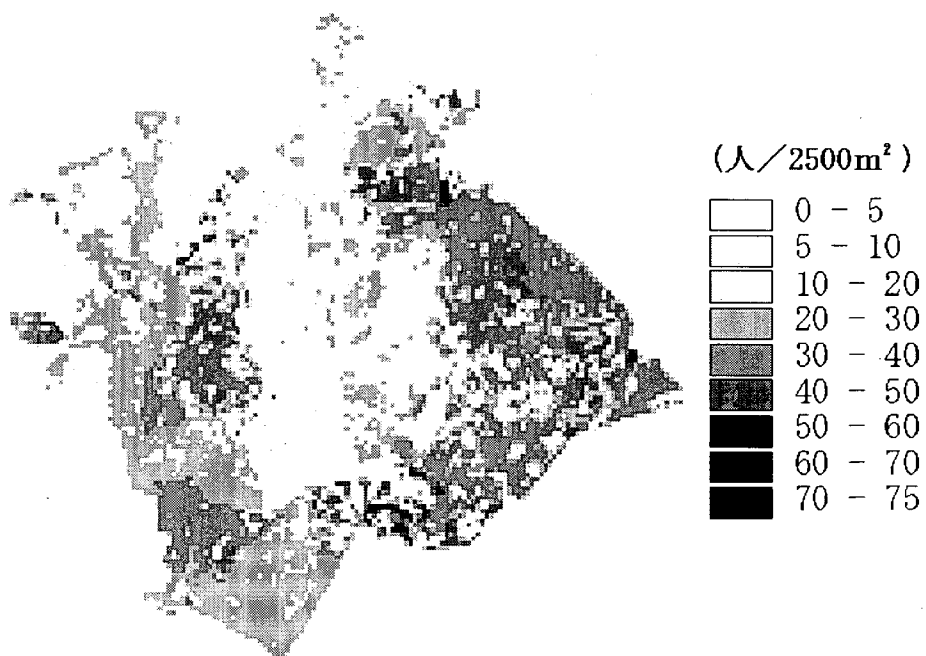


図- 5. 4 海老川流域の人口分布 (1993年)

表－5. 2 海老川流域の土地利用現況 (単位：100m²)

土地利用分類	全流域	前原川	八栄橋地点
山林	17,018	1,832	8,700
水田	14,800	1,424	7,844
畑など	59,189	9,124	21,570
造成中地	3,113	0	1,787
空地	24,302	3,396	6,432
工業	8,222	142	1,477
一般低層住宅	63,209	9,705	13,744
密集低層住宅	6,657	944	931
中高層住宅	12,053	1,999	3,938
商業	14,221	1,239	3,351
道路	16,582	1,865	3,935
公園・緑地	9,496	521	4,511
その他公益施設	19,022	1,357	4,227
河川・湖沼	1,240	2	128
その他	2	0	0

5. 2. 2 モデルパラメータの設定

本解析システムは様々なモデルパラメータを必要とする。ここでは、設定したモデルパラメータを整理する。

表－5.3は本解析システムで使用している土地利用分類と細密数値情報との対応関係を示している。細密数値情報を水・熱循環の観点から再整理したものである。表の読み方は次のようである。例えば、細密数値情報での一般低層住宅は、本研究では、丈の高い植生が3％、丈の低い植生が5％、裸地が8％（浸透域としては15％）、都市地表面が54％、都市キャノピーが31％（不浸透域として85％）からなっているとして取り扱っている。

植生パラメータを表－5.4に示す。表中で、veg：植生率、LAI：葉面積指数、hc：植生の高さ、lr：根系の深さ、 r_{smin} ：最小気孔抵抗である。森林及び都市樹木についてはその1／3を常緑樹木、残り2／3を落葉樹木と仮定した。パラメータの値の決定に際してはDunn－Mackay⁴⁹⁾、Wilsonら⁵⁰⁾、Sellersら⁵¹⁾を参照したが、本研究では季節変化も考慮した。

地表面及びキャノピーの空気力学的なパラメータを表－5.5に示す。それらの値は、Sellersら⁵¹⁾と近藤³⁷⁾を参考にして定めた。

熱力学的な特性値は、近藤³⁷⁾を参照して、表－5.6のように与えている。植生の熱容量と熱伝導率は小さいため、本研究では無視した。

土壌パラメータは表－5.7に整理している。Herathら³¹⁾の研究やモデルのキャリブレーション（透水係数）の結果を基に決定した。表中の α 、 β ：Havercamp型⁵²⁾の土壌水分～吸引圧関係式（水分特性曲線）の定数、 n ：Mualem型⁵³⁾の土壌水分～透水係数関係式の定数である。土壌層の厚さについては、第1層：地表面～20cm、第2層：20cm～60cm、第3層：60cm～200cmとした。これは、土壌水分の変化の大きい土壌厚や根系分布、

表－５．３ 細密数値情報と本研究での土地利用分類の対応関係

本研究 細密	水域	浸透域				不浸透域		
		丈の高い 植生	丈の低い 植生	裸地	合計	都市地表 面	都市キャ ノピー	合計
山林	0.00	0.80	0.20	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
水田	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
畑など	0.00	0.20	0.80	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00
造成中地	0.00	0.05	0.08	0.13	0.25	0.48	0.27	0.75
空地	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00
工業	0.00	0.04	0.06	0.10	0.20	0.51	0.29	0.80
一般低層住宅	0.00	0.03	0.05	0.08	0.15	0.54	0.31	0.85
密集低層住宅	0.00	0.02	0.03	0.05	0.10	0.58	0.32	0.90
中高層住宅	0.00	0.04	0.30	0.50	0.20	0.51	0.29	0.80
商業	0.00	0.01	0.02	0.03	0.05	0.61	0.34	0.95
道路	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00
公園・緑地	0.00	0.16	0.24	0.40	0.80	0.13	0.07	0.20
その他公益施設	0.00	0.03	0.05	0.08	0.15	0.54	0.31	0.85
河川・湖沼	0.50	0.00	0.50	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00
その他	0.00	0.14	0.21	0.35	0.70	0.19	0.11	0.30

表－５．４ 植生パラメータ

		月											
植生分類	パラメータ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
森林	veg	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.5	0.3	0.2
	LAI	2.0	2.0	2.5	3.5	5.0	5.5	6.0	6.0	5.5	4.5	3.5	2.0
	h_c (m)	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.	10.
	lr (m)	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	r_{smin} (sm ⁻¹)	250											
草地	veg	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1
	LAI	0.5	0.5	0.6	1.0	1.5	1.8	2.0	2.0	1.6	1.2	0.6	0.5
	h_c (m)	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
	lr (m)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	r_{smin} (sm ⁻¹)	250											
都市 樹木	veg	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.5	0.3	0.2
	LAI	2.0	2.0	2.5	3.5	5.0	5.5	6.0	6.0	5.5	4.5	3.5	2.0
	h_c (m)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
	lr (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	r_{smin} (sm ⁻¹)	250											
農作物	veg	0	0	0.1	0.6	0.7	0.8	.85	0.8	0.6	0.1	0	0
	LAI	0	0	0.1	0.5	2.0	4.0	6.0	6.0	5.0	1.0	0	0
	h_c (m)	0	0	0.1	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0
	lr (m)	0	0	0.1	0.5	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0	0
	r_{smin} (sm ⁻¹)	150											

表－5. 5 空気力学的なパラメータ (単位：m)

土地利用	粗度 (運動量) z_{om}	粗度 (水蒸気) z_{ov}	ゼロ面変位 d_0
森林	$0.123 h_c$	$0.1 z_{om}$	$0.67h_c$
草地	$0.123 h_c$	$0.1 z_{om}$	$0.67h_c$
都市樹木	$0.123 h_c$	$0.1 z_{om}$	$0.67h_c$
農作物	$0.123 h_c$	$0.1 z_{om}$	$0.67h_c$
水域	0.001	0.001	0
裸地	0.005	0.005	0
都市地表面	0.1	0.1	0
都市キャノピー	$0.30h_{uc}$	$0.1 z_{om}$	$0.30h_{uc}$

(h_c : 植物の高さ、 h_{uc} : 都市キャノピーの高さ)

表－5. 6 種々の材料の熱力学的パラメータ

材 料	熱容量 c_h ($Jm^{-3}K^{-1}$)	熱伝導率 k_h ($Wm^{-1}K^{-1}$)	温度の日変化が及ぶ深さ d_0 (m)
水	4.18×10^6	0.57	0.061
乾いた土壌	1.3×10^6	0.3	0.08
湿った土壌	3.0×10^6	2.0	0.135
アスファル (都市地表面)	1.4×10^6	0.7	0.117
コンクリート (都市キャノピー)	2.1×10^6	1.7	0.149
空気	0.0012×10^6	0.025	0.756

表－5. 7 土壌パラメータ

パラメータ	関東ローム	常総粘土	成田砂	沖積土
飽和土壌水分体積率 θ_s	0.772	0.394	0.400	0.707
残留土壌水分体積率 θ_r	0.589	0.120	0.174	0.598
単分子土壌水分体積率 θ_m	0.111	0.050	0.015	0.111
圃場容水率	0.676	0.384	0.174	0.622
飽和透水係数 k_s (m/s)	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-7}	2.0×10^{-4}	3.0×10^{-6}
α	366.0	6.576×10^6	1.752×10^1	72.8
β	4.13	9.00	16.95	3.92
n	4.17	4.38	3.37	3.11

表－5. 8 透水層パラメータ

パラメータ	第1 透水層	第1 難透水層	第2 透水層	第2 難透水層	第3 透水層
透水係数 (m/s)	5.0×10^{-6}	$1.0 \sim 10.0 \times 10^{-8}$	5.0×10^{-6}	2.0×10^{-9}	5.0×10^{-6}
比産流量／比貯留係数(1/m)	0.01 ~ 0.1	—	5.0×10^{-4}	—	5.0×10^{-4}
厚さ (m)	2.0 ~ 16.7	2.0 ~ 7.8	80.6 ~ 96.0	10.0	391 ~ 424

温度変化の及ぶ深さ (d_0) を考慮して定めた。

透水層のパラメータを表-5.8に示す。これは、地質調査データ、参考文献⁵⁴⁾及びモデルのキャリブレーションにより決定した。ただし、不圧透水層が地表面近くに達する場合には、第1層の比産出率 (specific yield) は土壌水分量と飽和水分量の差とした。さらに、河床堆積物の厚さを 0.1mに、その透水係数を 4.0×10^{-7} m/sに設定した。

5.3 日流量の比較

解析ではメッシュサイズを50m、時間刻みを1時間とした。解析期間は1992年から1997年の6年間である。初期条件の不確実さが解析結果に及ぼす影響を考慮し、1992年の解析結果は使用しないものの、1992年から観測データを入力して計算を行った。1993年の観測データに対してモデルのキャリブレーションを行った。1993年～1996年における2地点（八栄橋、市場）での日流量の比較を図-5.5に示す。なお、1997年の

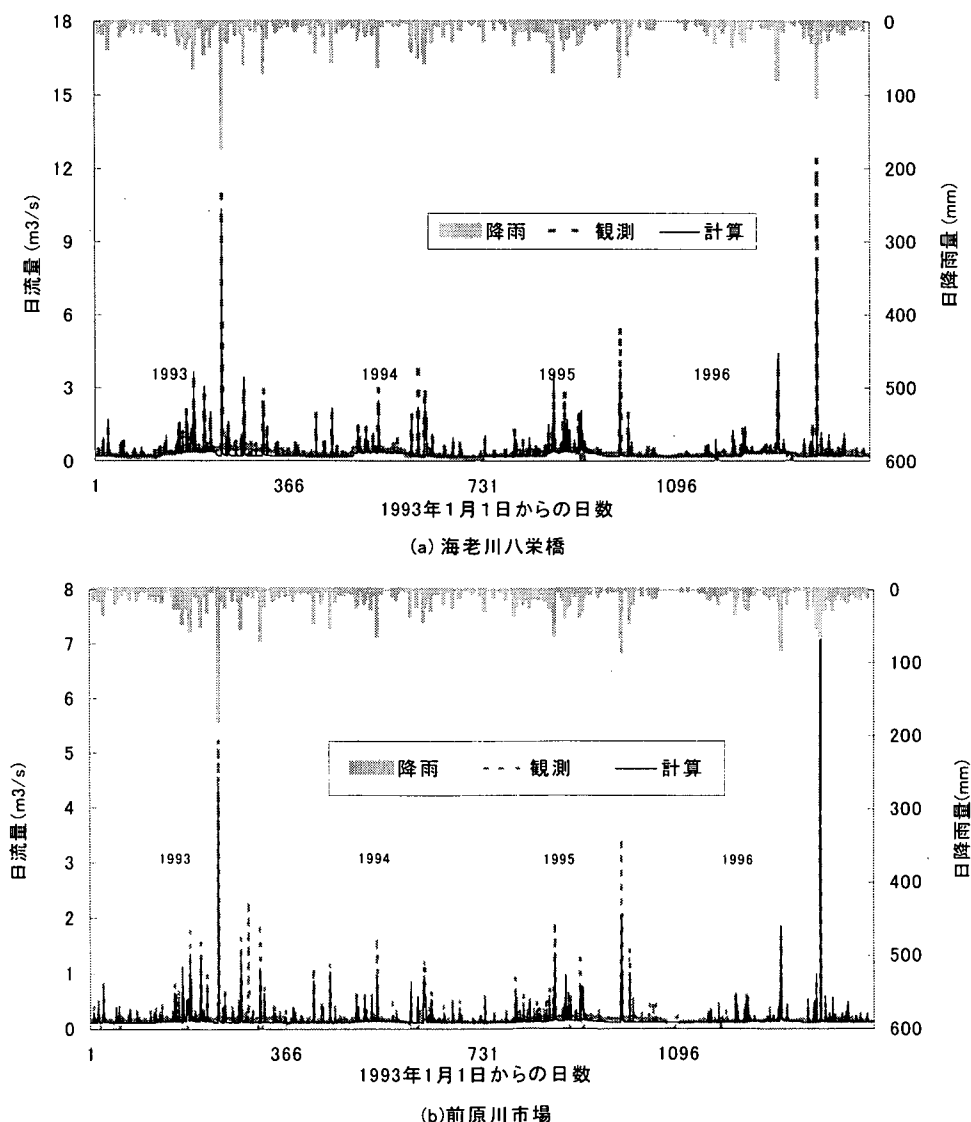
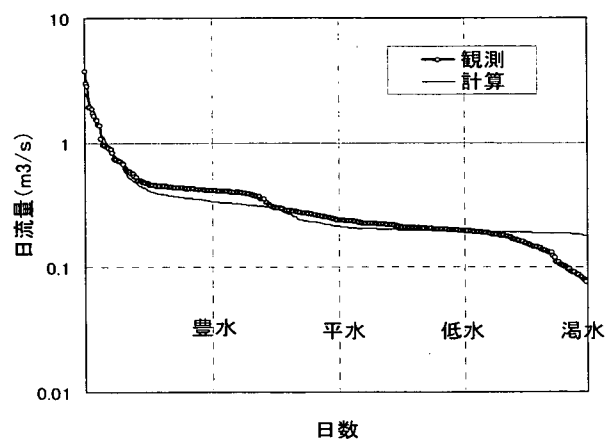
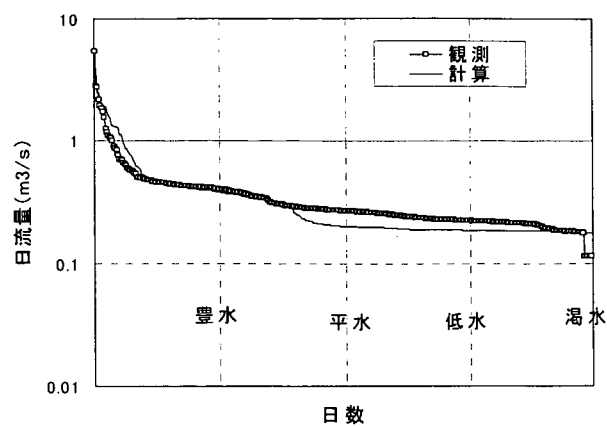


図-5.5 日流量の比較



(a) 1994年



(b) 1995年

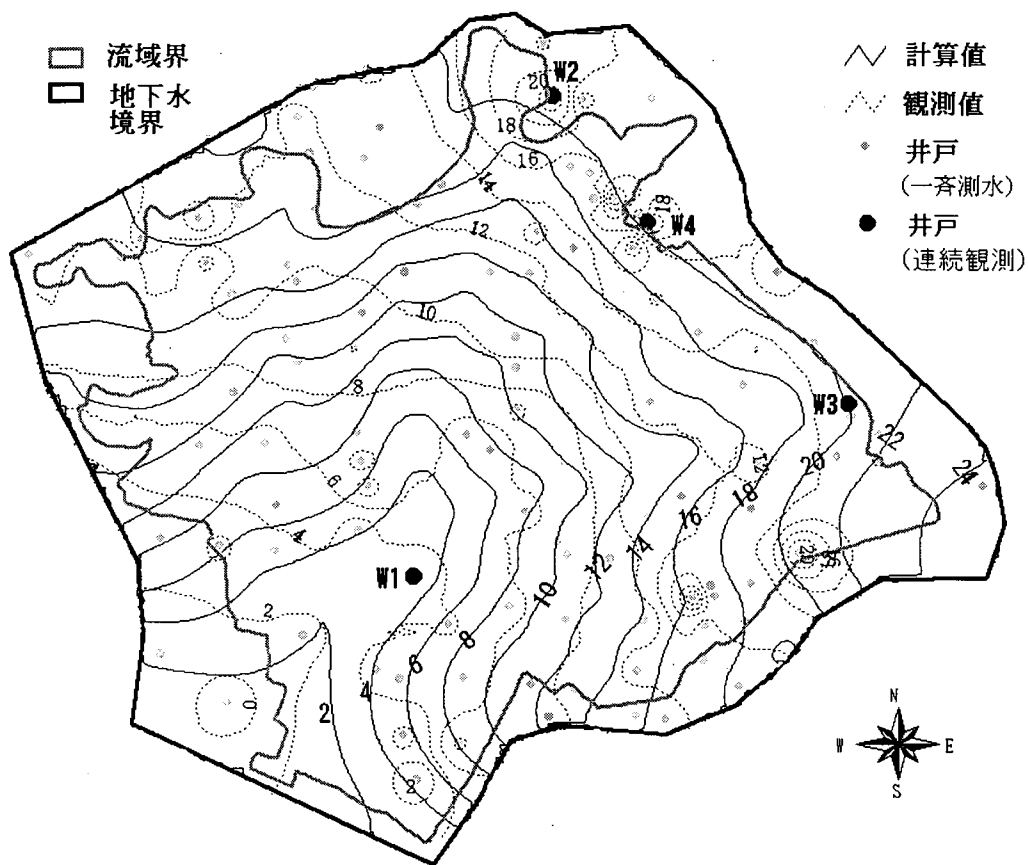
図－5.6 流況曲線の比較（海老川八栄橋）

データについては、流量観測データを入手していないため、比較を行っていない。また、図－5.6に八栄橋地点における2年間の流況曲線を比較している。これらの図より、本モデルが、渇水流量の解析には改善の余地があるものの、日流量に関しては出水時、平常時のどちらにおいても良好な結果を算出していることを確認することができる。

5. 4 地下水位の比較

モデルの検証は河川流量のみでは不十分であるため、地下水位についても行った。図－5.7は、1996年1月下旬の地下水位の空間分布を示したものである。多数の私有の井戸を一斉測水した結果と計算結果（第二層）を対比している。ただし、井戸がどの帯水層から地下水を汲み上げているのか正確にはわからないため、データの使用は定性的な比較に限られる。図より、計算は全般的な水位分布を捉えていると言える。

図－5.8は、流域内の4カ所（図－5.7と表－5.9を参照）における地下水位の時間的な変動を比較したものである。計算結果と観測結果との間に差異が認められる時期があるものの、良好に地下水位やその変動パターンを再現している。



図－5. 7 地下水分布（1996年1月25日）

表－5. 9 井戸（連続観測）の情報

名前	W1	W2	W3	W4
地盤標高(m)	4.88	26.73	27.16	27.58
井戸深(m)	浅い	4.8	深い	浅い
取水透水層	第1,2層	第1層	第3層	第1層

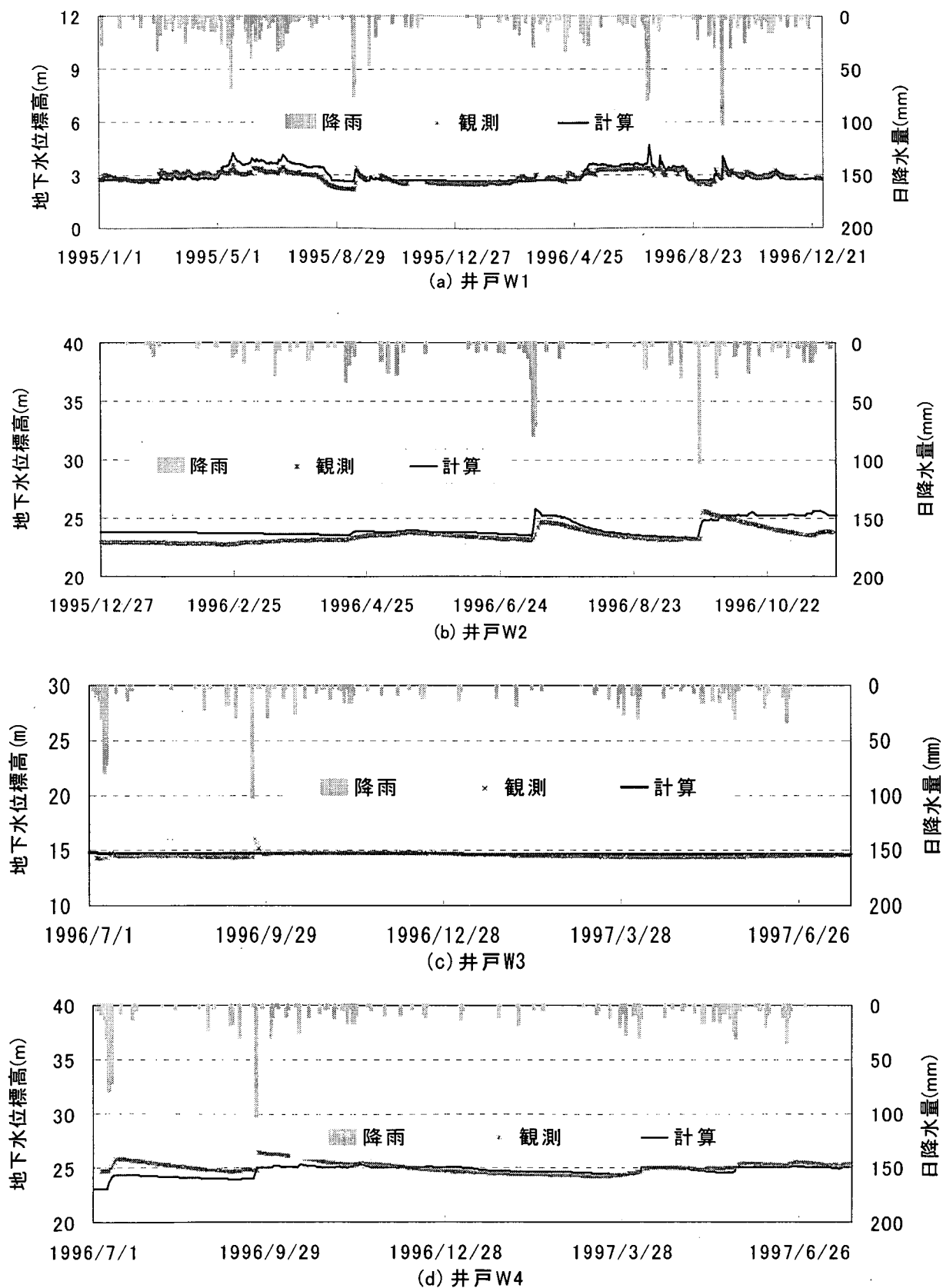
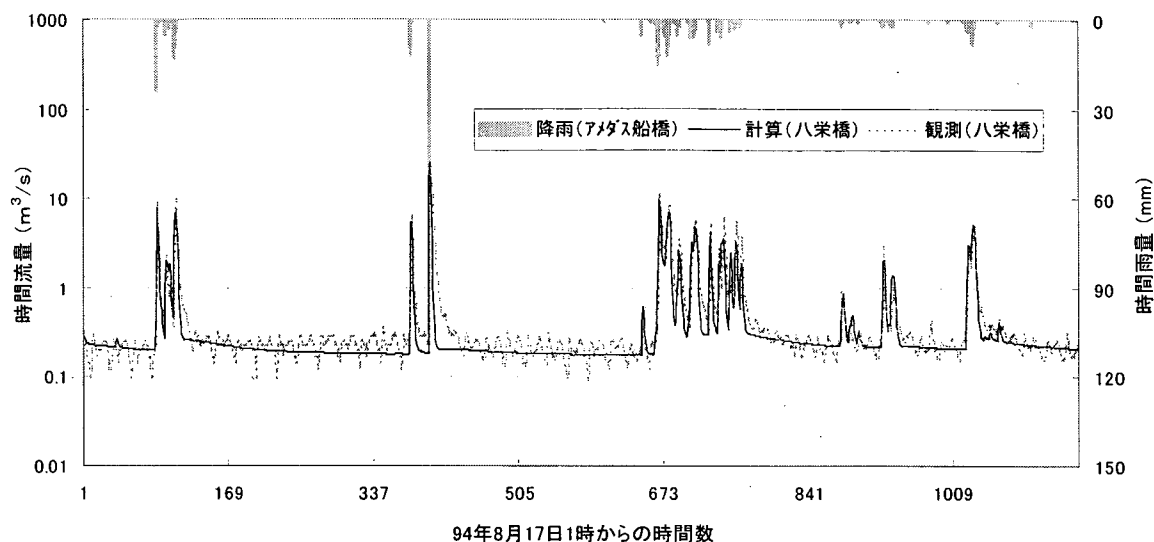


図-5.8 地下水位の季節変化の比較

5.5 出水時の時間流量の比較

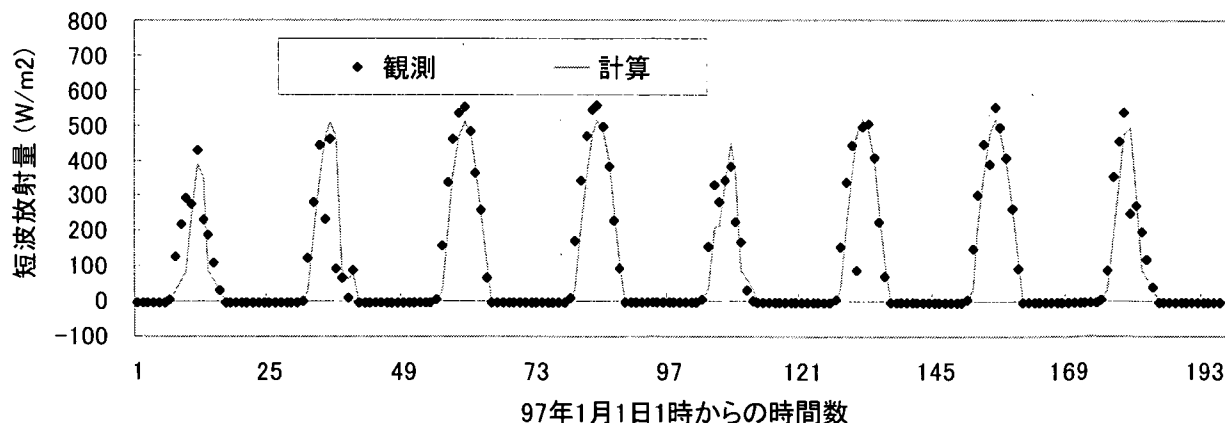
日単位だけでなく時間単位でのモデルの挙動を検証することも必要である。特に、出水時の時間流量の再現性を検討することはモデルの適用性や信頼性を明らかにする上で重要である。図－5.9は八栄橋地点での時間流量について計算結果と観測結果とを比較したものである。図より、本モデルが出水時の流量変化を良好に捉えることがわかる。



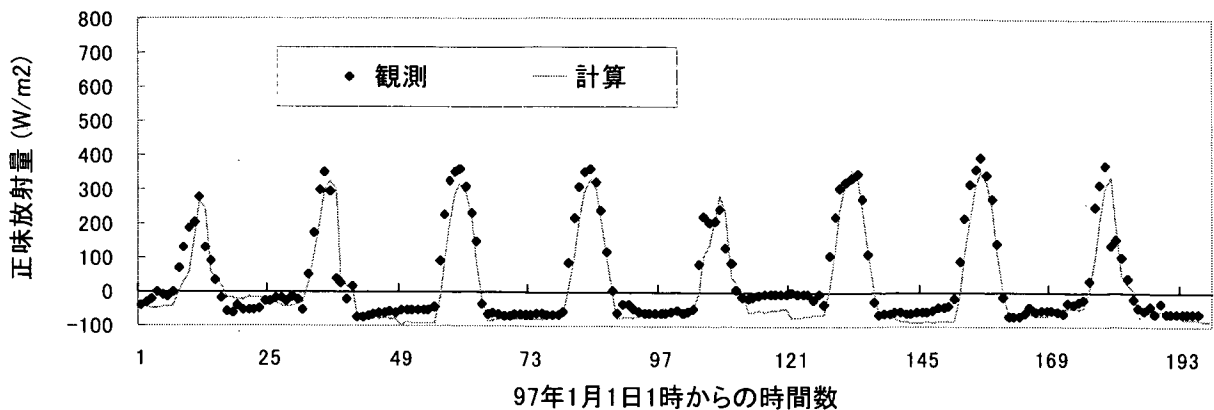
図－5.9 出水時の時間流量の比較（海老川八栄橋）

5.6 熱輸送過程の比較

流域の北部に位置する日本大学のグランドの芝地には水文・気象観測機器が観測塔に設置してあり、そこでの観測結果を用いて熱輸送過程のモデルを検証することができる。図－5.10は短波放射量、図－5.11は正味放射量について観測結果と本モデルの計算結果とを比較したものである。両図より、放射量については満足できる精度で推定できていることがわかる。



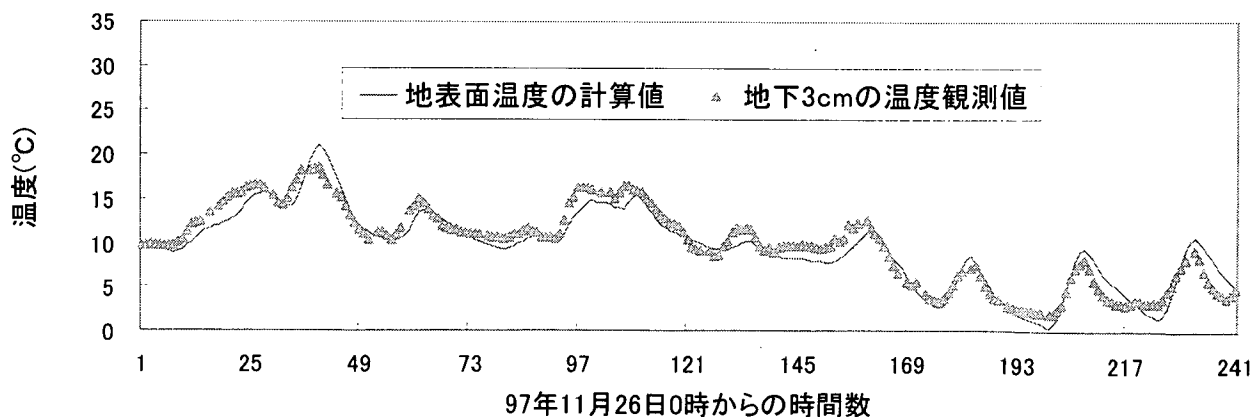
図－5.10 地表面到達短波放射量の比較（日大グランド）



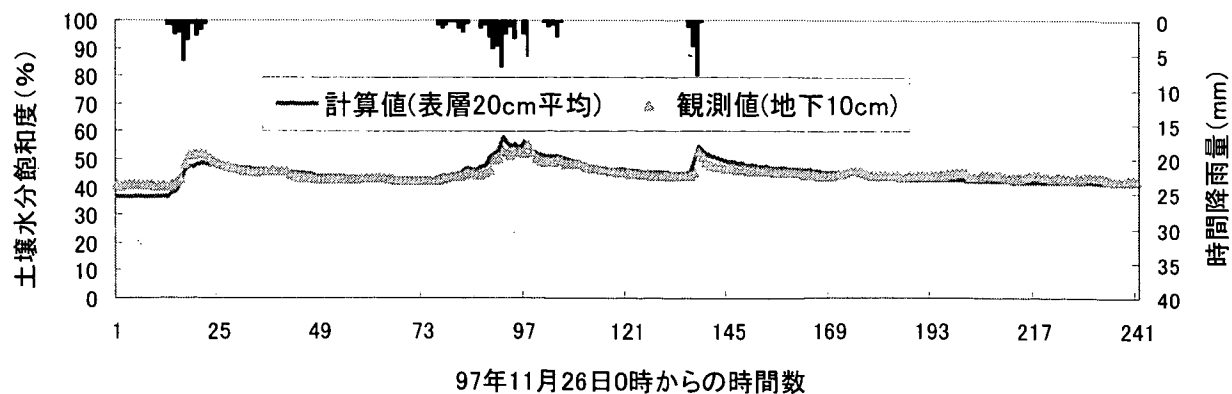
図－5.1 1 正味放射量の比較（日大グランド）

図－5.1 2は地温について比較したものである。本解析ではForce-Restore法を用いているため地表面温度を算出するものの地中の温度分布を計算していない。このため、地表面下3cmでの観測結果と直接比較することはできない。しかし、両者の時間変動パターンは類似し、温度振幅については地表面温度の方が大きくなると推定される。実際、計算結果と観測結果はほぼ良好に対応している。

このように、熱輸送解析モデルも合理的な値を算出することがわかる。ただし、注意すべきことがある。この計算では、気温や湿度など空間的に大きく変動する気象因子については、同じ地点の観測塔での観測結果を与えていることである。ここでの結果は、各メッシュでの気温、風速、湿度を精度よく指定することができれば、地表面温度や地表面熱収支を高精度で求めることを意味するが、それらの気象因子をいかに、しかも年間を通して推定するかが課題である。本解析システムではそれらのデータを少数の観測地点での結果から内挿して与えている。このため、本研究での解析が流域における時間単位の熱輸送現象までを精度よく再現しているわけではない。



図－5.1 2 温度の比較（日大グランド）



図－5.13 土壌水分飽和度の比較（日大グランド）

図－5.13では日大グランドでの土壌の飽和度について、計算結果と観測結果を対比している。本モデルでは表層の土壌は20cmの厚さを有しているため、地表面下10cmでの観測結果と比較した。図より、土壌水分についても、本解析が妥当な結果を与えることがわかる。

6. 水・熱循環統合解析モデルを用いた対策の評価

6.1 現在の水循環系の特徴

現状での水・熱輸送を時間単位で解析した結果から流域全体での年間水収支を算出した。ここでは、降水量の平年値(1,360mm)より降水量のやや多い1993年(1,463mm)と少ない1994年(980mm)について検討した結果を図-6.1に示す。なお、図中の上水は流域外からの上水と工業用水を、不浸透域での揚水も上水と工業用水を含んでいる。また、流域への流入水量と流出水量の差は地下水貯留量の変化分である。この流域では、1993年では、蒸発散、浸透、表面流出(水田からの排水を含む)が年間降雨量のそれぞれ約32%、23%、53%であり、自然流域と比べると浸透量が少なく、表面流出が大きくなっている。河川への雑排水量は中間流出と地下水流出の約4倍になっており、平常時の流量に占める雑排水の多さを示唆している。1994年の降水量は1993年のそれより480mmほど少なかったが、その影響は表面流出、浸透および表層土壌から不圧地下水への涵養に顕著に表れている。一方、蒸発散への影響は小さくなく、1994年では日射や気温が高かったために蒸発散が活発であったと推定される。

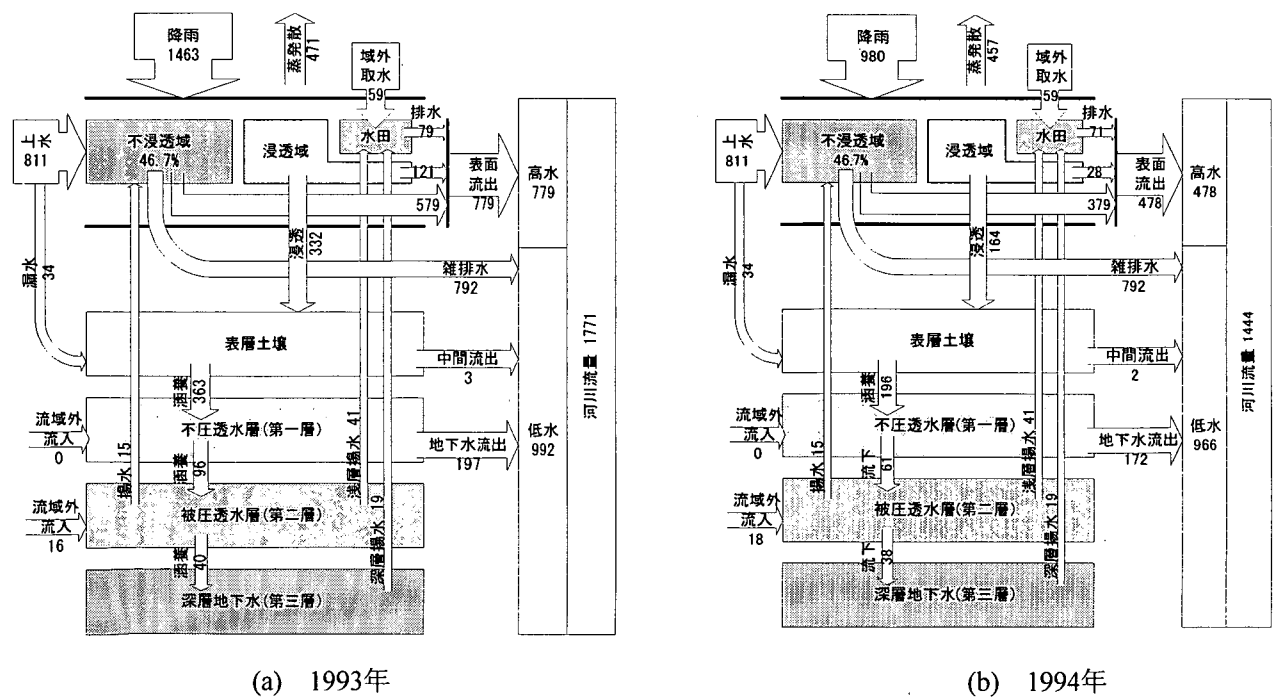


図-6.1 現時点での年間水収支 (単位: mm)

6. 2 将来の水循環系の特徴と問題点

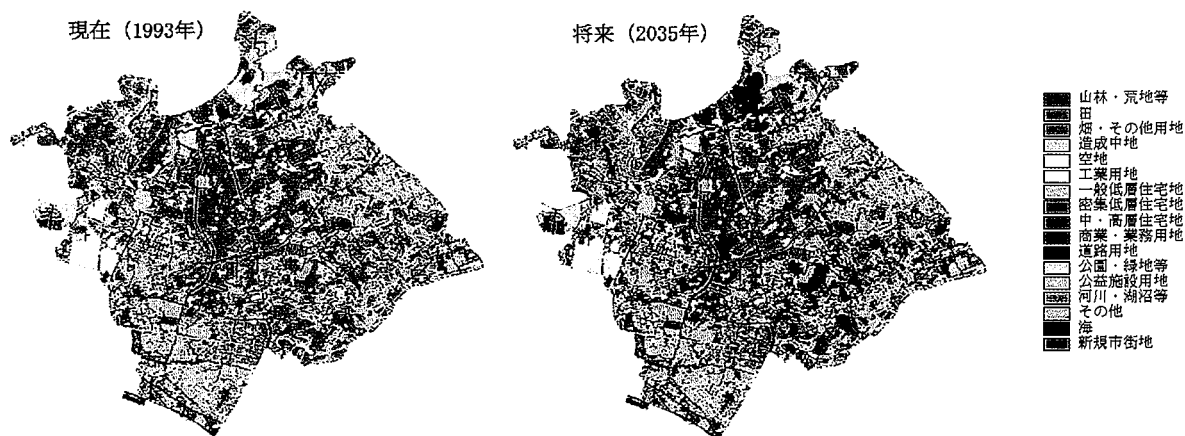
この流域では将来約5.7km²の市街地が新たに開発されるものと予測されている⁵⁵⁾(表－6.1、図－6.2)。これに伴い、人口は現在の20.3万人から26.1万人へ増加し(図－6.3)、用水量が増大する。また、下水道の人口普及率は現在の約10%から将来は100%になるものと予測されている。ここでは、現在および将来における水循環を比較し、今後の都市化の影響を明らかにすることを試みる。なお、現在と将来に対する計算を1992年始めから開始し1993年末まで行っているが、そこでは土地利用とそれに関連するパラメータ以外は同一である。比較は初期条件の影響が弱まる2年目の結果に対して行った。

将来における年間水収支の結果を図－6.4に示す。なお、比較のために1993年の結果を併記する。将来の開発により、蒸発散は90mm減少、浸透は97mm減少、地下水流出は21mm減少する。一方で、表面流出は140mm増加する。これにより、土壌の乾燥化や地下水の低下が生じると考えられる。一方、出水時には河川流量が増加すると予想される。分流式下水道の整備により、処理水を直接海へ放流する場合には、図中の河川流量の括弧内に示すように、平常時の河川流出が178mmと激減することになり、河川環境は急激に悪化することが懸念される。

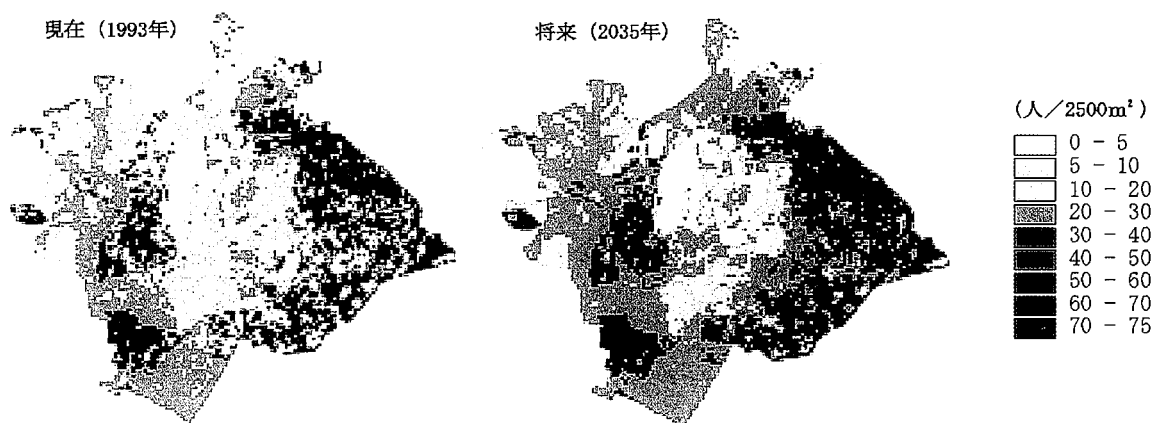
図－6.5は海老川八栄橋地点と前原川市場地点での流況曲線を2つのケースについて比較したものである。第1のケースでは、雨水・下水をすべて流域外に排水してしまう場合であり、水量は現状よりも激減する。第2のケースは、すべての排水を処理した後に、もとの地点に戻す場合である。この場合には、地被条件の変化と用水量の増加により、出水時にも平常時にも流量は現状より増加する。極端な2ケースの結果であるが、地下水から河川水への流出量がわずかであるため、下水処理水の再利用が平常時の流量の確保に極めて重要であることがわかる。

表－6. 1 海老川流域の土地利用の変化 (単位：100m²)

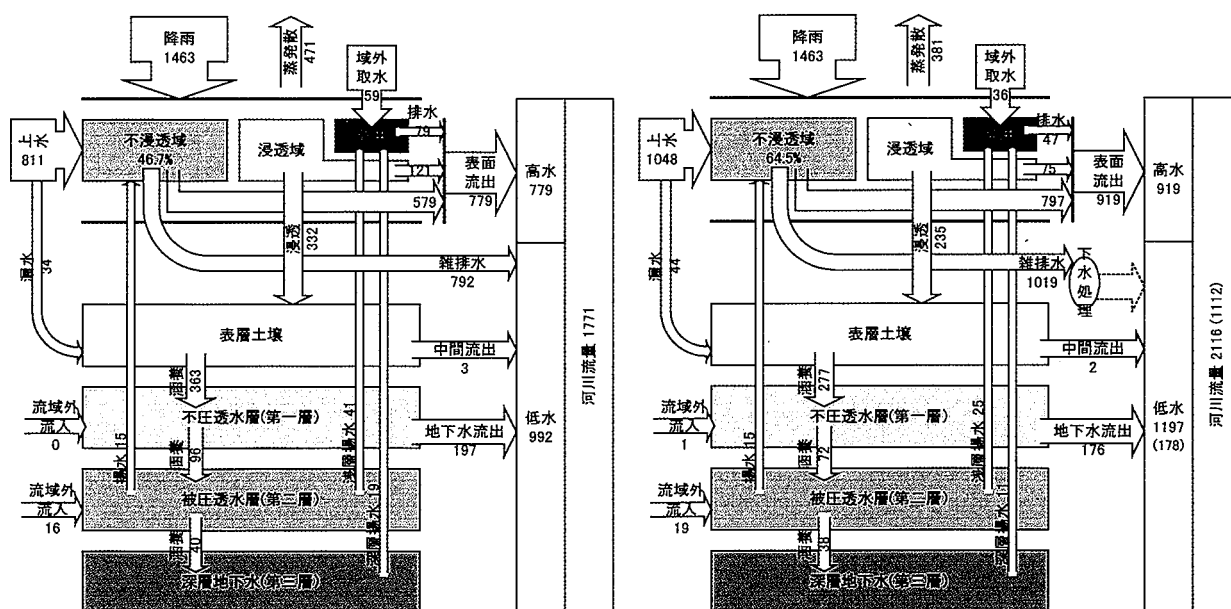
土地利用分類	現在 (1993年)			将来 (2035年)		
	全流域	前原川	八栄橋地点	全流域	前原川	八栄橋地点
山林	17,018	1,832	8,700	5,750	258	4,740
水田	14,800	1,424	7,844	8,457	641	5,431
畑など	59,189	9,124	21,570	25,621	2,130	14,487
造成中地	3,113	0	1,787	3,113	0	1,787
空地	24,302	3,396	6,432	24,301	3,396	6,432
工業	8,222	142	1,477	8,222	142	1,477
一般低層住宅	63,209	9,705	13,744	120,144	19,510	29,826
密集低層住宅	6,657	944	931	6,657	944	931
中高層住宅	12,053	1,999	3,938	12,053	1,999	3,938
商業	14,221	1,239	3,351	14,221	1,239	3,351
道路	16,582	1,865	3,935	16,582	1,865	3,935
公園・緑地	9,496	521	4,511	3,741	67	1,885
その他公益施設	19,022	1,357	4,227	19,022	1,357	4,227
河川・湖沼	1,240	2	128	1,240	2	128
その他	2	0	0	2	0	0



図－6. 2 土地利用分布の変化



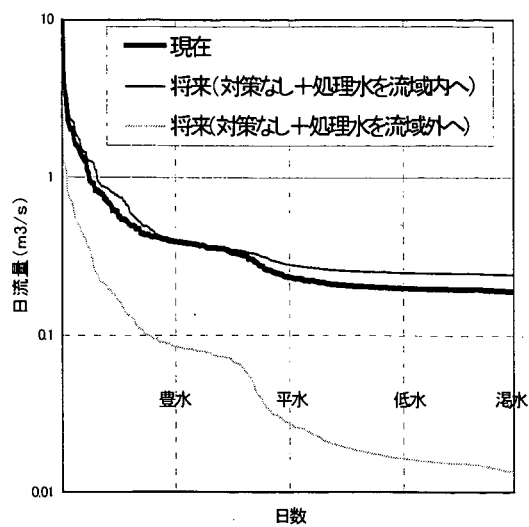
図－6. 3 人口分布の変化



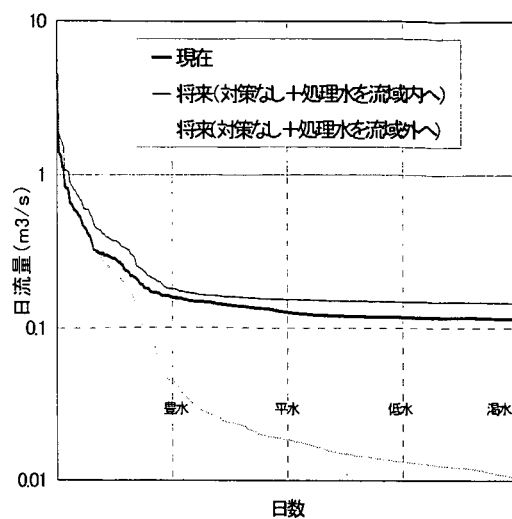
(a) 現在での水収支

(b) 将来での水収支

図－6. 4 年間水収支の変化 (単位: mm)



(a) 海老川八栄橋



(b) 前原川市場

図-6. 5 流況曲線の変化

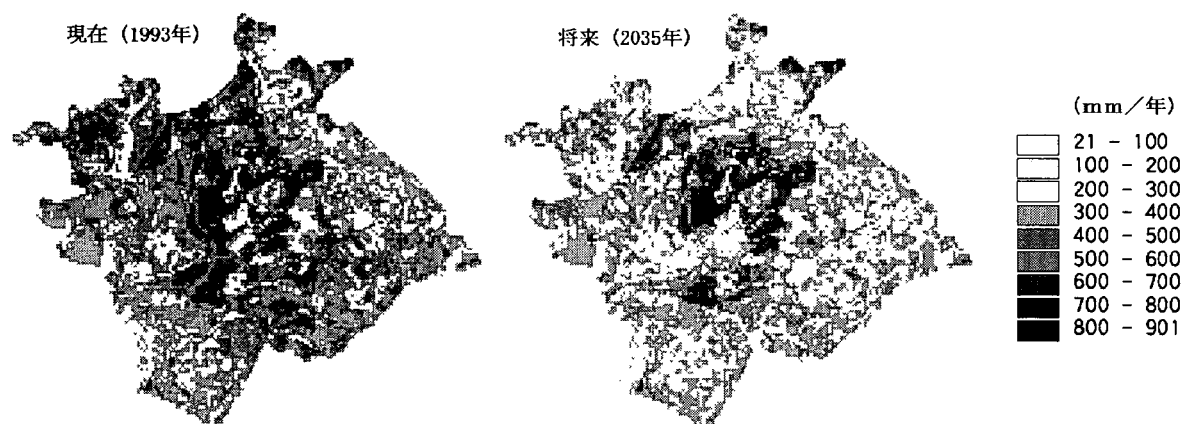


図-6. 6 年間蒸発散量の変化

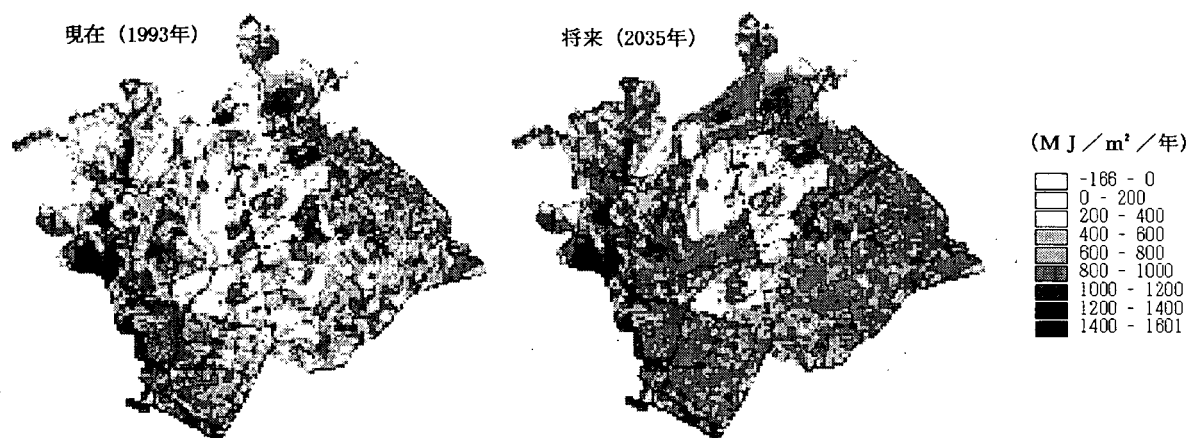


図-6. 7 年間顕熱輸送量分布の変化

開発の影響として、蒸発散や気温上昇に寄与する顕熱輸送量に見られる変化をそれぞれ図－6.6、6.7に示す。現状では、市街化の進んでいる流域の北東部と南西部を除き、蒸発散が盛んであり、顕熱輸送も抑えられている。しかし、将来においては山林や農耕地が宅地化され、蒸発散の高い地域は流域の中央部に限定され、顕熱輸送量も大幅に増加するものと推定される。このため、ヒートアイランド現象などの都市気候が顕在化することが懸念される。

6.3 雨水浸透施設導入の効果の評価

将来の開発に対して対策をとらない場合には、前述のように、河川の洪水時の流量の増加や平常時の流量の減少、ヒートアイランド現象の顕在化を招きかねない。そこで、ここでは対策として浸透トレンチの設置の有効性を検討することとする。これは、流域内の屋根排水を浸透トレンチに導き、流出抑制と地下水涵養を行うものであり、実際に海老川流域の対策として検討されているものである。なお、解析での気象条件は1993年と同一と仮定する。

浸透トレンチの設置条件は文献³³⁾を参考にして以下のようにした。

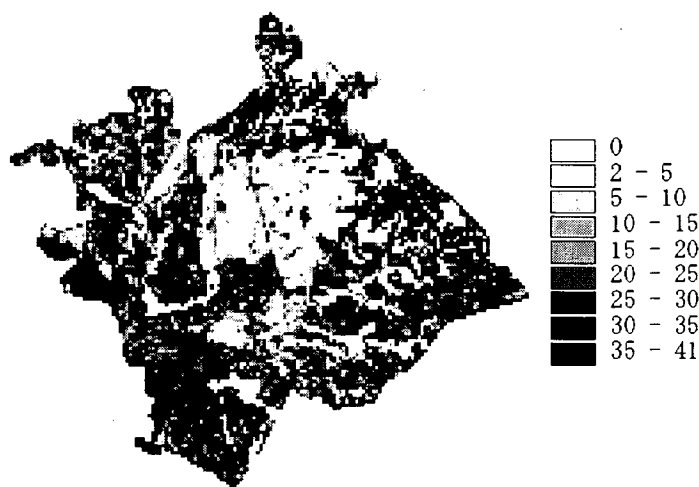
- 土地利用：屋根あり
- 地 形：勾配が10%以下
- 土 壌：粘土以外
- 地質、地下水位：難透水層と地下水位が地表面より2m以下
- 浸透トレンチの長さ：計算されたトレンチの長さが2m以下ならば設置しない。

浸透トレンチの設置数を450m/ha、幅×計画水深＝1.5m×1.0mと仮定して、浸透トレンチの設置長さを計算した。メッシュサイズが50m×50mであるので、各メッシュ内浸透トレンチ長さは、 $450 \times 0.25 \times \text{屋根の面積率}$ となる。データベース管理モジュールにより算出した浸透トレンチ長さの分布を図－6.8に示す。

浸透トレンチの設置が出水時の河川流量に与える影響を検討した。図－6.9に、海老川八栄橋地点での時間流量を1週間分示している。なお、

下水処理場の水は流域に戻されると想定した場合の結果を示している。浸透トレンチなしの場合には、現状と比較して、流量のピークがかなり増加しているが、流域が狭いためピーク流量の到達時間はほとんど変化していない。一方、浸透トレンチの導入により、出水時の流量ピークが抑制され、現状と同じ程度になると予想される。

図－6.10では海老川八栄橋と前原川市場の2地点での流況曲線に現れる浸透施設の影響を示している。両地



図－6.8 浸透トレンチ長さの分布（単位：m）

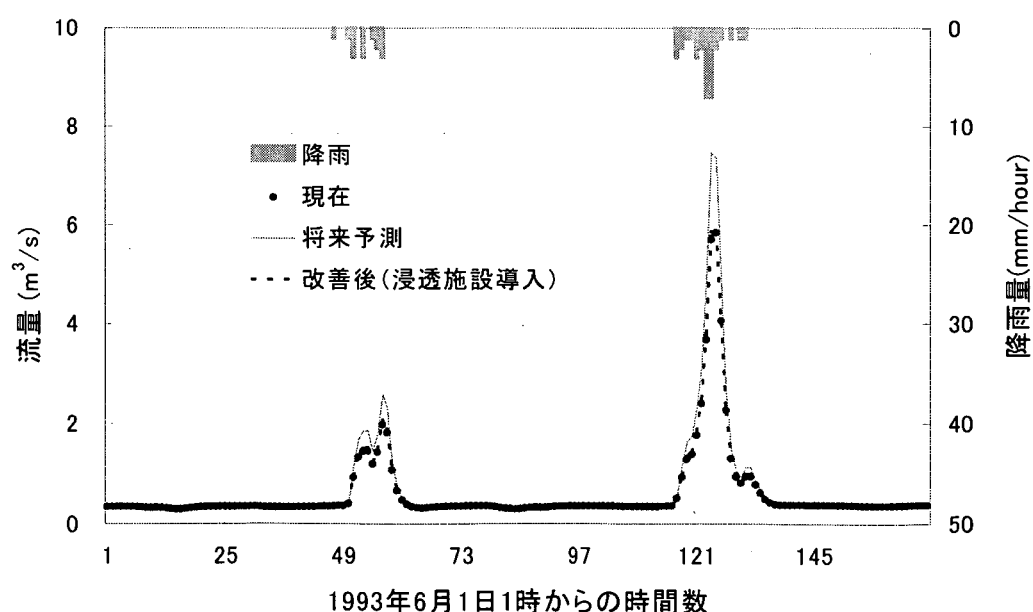
点において、浸透施設の設置により、豊水流量より大きな流量は減少し、豊水流量より小さい流量に関しては増加している。都市化が顕著な市場地点の方が八栄橋地点より浸透施設の効果は明瞭である。それは、八栄橋地点ではその上流域における浸透施設の数量が少ないためである。それに比較すると、下水処理水を流域内で再利用するかどうかは大きな影響がある。少なくとも、海老川流域では、河川への地下水流出が限られているため、平常時の流量を確保するためには下水処理水を再利用を検討することが不可欠である。

浸透トレンチの設置による前原川市場地点での不圧地下水位の変化を図－6.11に示す。浸透トレンチの導入により、渇水期の地下水位を現況レベルに復帰できることが明らかである。

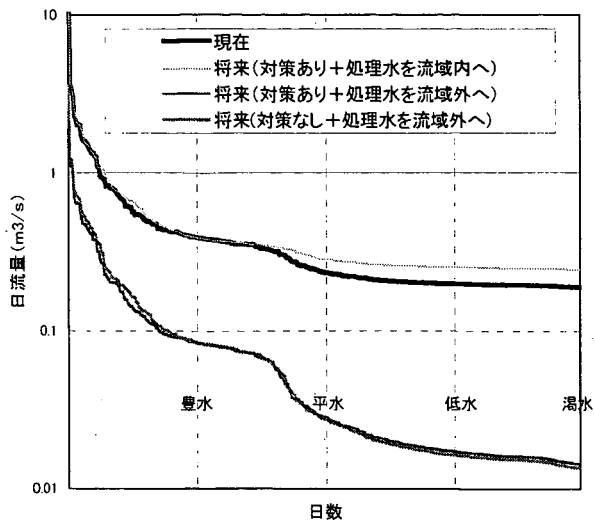
図－6.12に将来における浸透トレンチ導入後の流域の年間水収支を示す。なお参考に、前出の浸透トレンチなしの結果を併記している。導入により蒸発散はあまり変化しないが、浸透量は増加し、表面流出は約200mm減少し、河川への地下水流出も25mm増加すると推計される。河川流量に関しては下水処理水をどのように流域に戻すかが大きな問題ではあるが、流域の水循環は現在の状況と同じ程度に保全されと考えられる。

図－6.13は顕熱輸送量に及ぼす浸透トレンチの影響をみたものである。顕熱量は浸透トレンチを設置しても、顕熱輸送量は抑制されず、都市の気温上昇を防ぐことには殆ど寄与しないと考えられる。

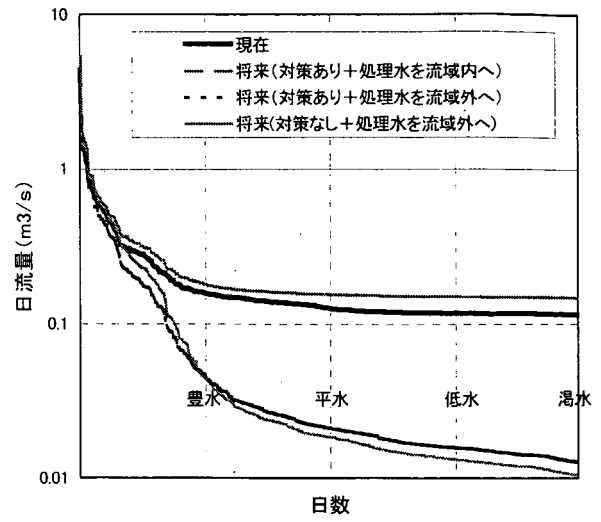
このように、浸透トレンチの設置は流域の健全な水循環を保全する上で有効な対策であることがわかる。今後、異なる対策の効果を定量的に評価するとともに、浸透トレンチの設置に関しても実行可能なレベルの案を検討していくことが必要である。



図－6.9 浸透施設有無による河川流量の比較（海老川八栄橋）

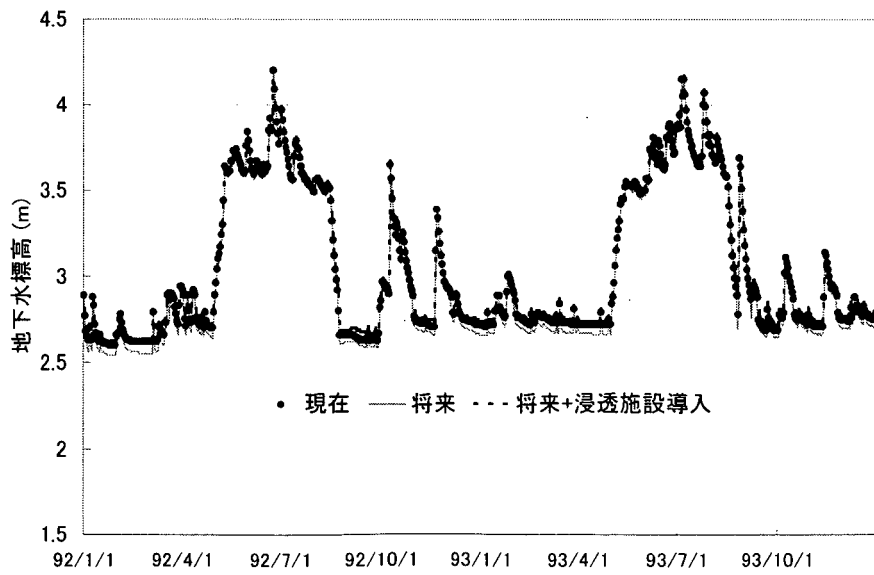


(a) 海老川八栄橋

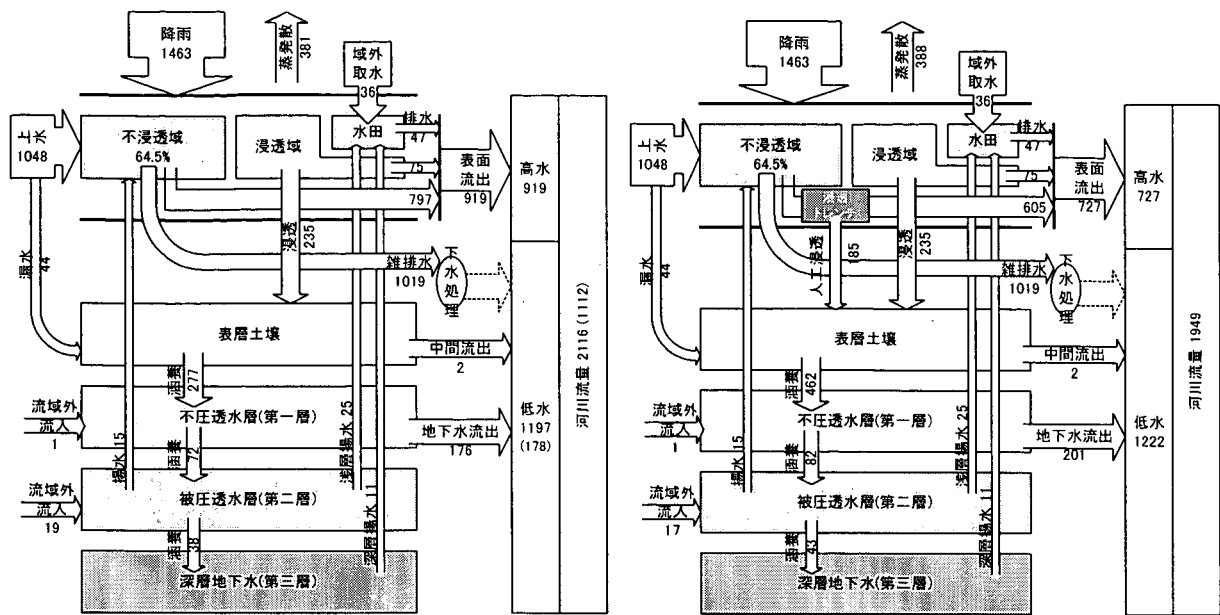


(b) 前原川市場

図－6. 10 流況曲線からみた浸透トレンチの効果



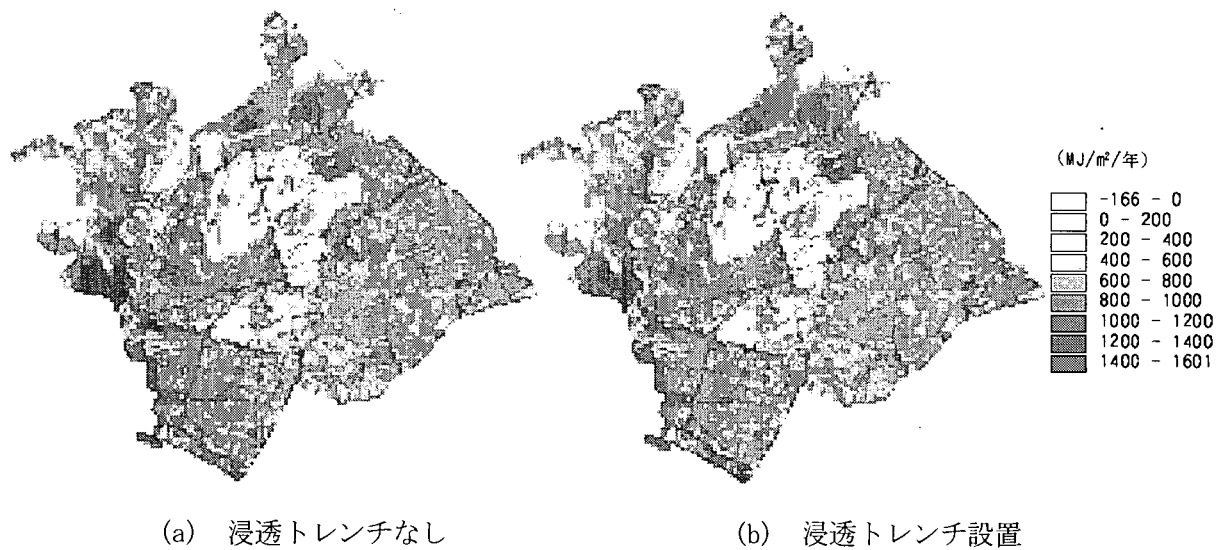
図－6. 11 浸透施設有無による地下水位の比較（前原川市場）



(a) 浸透トレンチなし

(b) 浸透トレンチ設置

図-6.12 浸透トレンチ導入による水収支の変化 (単位: mm)



(a) 浸透トレンチなし

(b) 浸透トレンチ設置

図-6.13 浸透トレンチ導入による年間顕熱輸送量の変化

7. まとめと今後の課題

都市河川流域の水循環を保全・回復することが社会的にも強く要請されている。そのためには、流域の水循環をモニタリングするとともに、総合的な観点から有効な対策を検討することが必要である。本研究は、流域の水循環改善のための対策の効果を検討できるシステムを開発するものである。水循環過程だけでなく熱輸送過程も解析することにより、蒸発散過程をより正確に表現できるようにしている。得られた成果を要約すると以下ようになる。

- 1) 既往の著名な分布型モデルとして、MIKE SHE、IHDM、SWMM、IISDHMを取り上げ、それらの特徴を整理するとともに、問題点を整理した。
- 2) 流域の水・熱循環の統合解析モデルを開発した。また、そのモデルの内容を記述した。
- 3) データの管理モジュールや対策の検討モジュールを整備し、水・熱循環解析システムの第1版を構築した。その概要を記述した。
- 4) 解析システムを都市化の著しい千葉県海老川流域に適用し、河川の時間流量、日流量、地下水位の空間分布と時間的な変動を比較した。その結果、水循環過程に関するモデルが十分な精度を有していることを確認した。また、熱輸送過程に関するモデルの検証は、限られた地点・時期の日射と地表面温度に対して行うにとどまっているが、モデルが良好な結果を算出することを確認した。
- 5) 解析システムを用いて、現在の流域の特徴を調べた。その結果、表面流出が年間降水量の半分程度と大きいこと、雑排水量が地下水の河川への流出の4倍程度と大きいことなどが確認された。また、降水量の多寡が表面流出、浸透、したがって地下水涵養に顕著に現れることを明らかにした。
- 6) 宅地化がさらに進展すると予想されている将来における流域の水循環の変化を解析した。その結果、土地利用変化により、蒸発散、浸透、地下水の河川への流出が減少すること、下水道の整備により雑排水が直接河川に流入することが少なくなることにより、平常時の河川流量が大幅に減少するものと予測された。一方、出水時の流量が増大することが判明した。このように、河川の流況は著しく悪化するものと考えられ、対策を施すことが不可欠であることがわかった。
- 7) 水循環系を復元するために、屋根排水を受ける雨水浸透トレンチを設置する対策の効果を検討した。トレンチの導入により、出水時のピーク流量の低減、平常時の流量の増加、地下水位の回復に一定の効果が期待できることを確認した。また、下水処理水の再利用の重要性を明確にした。

本解析システムが水循環系の解析に有効であることを確認したが、今後改良すべき点も多い。以下に当面の課題を記す。

- 1) 人工系の給水・排水の原単位を見直す。特に、季節変化と時間変化を検討する。
- 2) 河川流の解析モデルについて、kinematic waveモデル以外にdynamic waveモデルを追加し、下流の影響を考慮した解析を行えるようにする。
- 3) 表面流出モデルを2次元平面解析モデルとする。

- 4) 河川の水質モデルの開発・改良を進める。
- 5) 熱輸送過程の検証を進める。
- 6) 最新の水文・気象観測データまでを入手し、データベース化する。
- 7) リモートセンシングデータを利用し、流域の植生データを整備する。
- 8) モデルパラメータや入力データに関する感度分析を行い、解析結果の信頼性を明示する。

本研究では、他機関での観測結果を利用させていただいた。末尾ながら、観測データの提供や加工にご協力いただいた東京大学生産技術研究所虫明功臣教授，千葉工業大学高橋彌教授，千葉県土木部都市河川課，千葉県環境部大気保全課，社団法人雨水貯留浸透技術協会、日本工営株式会社に深謝いたします。

参考文献

- 1) 建設省河川審議会総合政策委員会水循環小委員会：流域における水循環はいかにあるべきか（中間報告），
<http://www.moc.go.jp/river/singi/9808report.html>, 1998.
- 2) 健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議：健全な水循環系構築に向けて（中間とりまとめ），
<http://www.moc.go.jp/river/press/991013b.html>, 1999.
- 3) （社）雨水貯留浸透技術協会：都市域における水循環の評価手法検討資料，1999.
- 4) Singh, V. P. : *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, 1995.
- 5) Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell and J. Rasmussen: An Introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen “SHE” 1: History and philosophy of a physically based distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87, 45-59.
- 6) Abbott, M. B., J. C. Bathurst, J. A. Cunge, P. E. O'Connell and J. Rasmussen: An Introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen “SHE” 2: Structure of a physically based distributed modelling system, *Journal of Hydrology*, 87, 61-77.
- 7) Storm, B., M.: Modeling of saturated and the coupling of the surface and subsurface flow, in *Recent advances in the modeling of hydrologic system*, Ed. Bowles D.S. and P.E. O'Connell. Kluwer, 1991.
- 8) Calver, A. : Calibration, sensitivity and validation of a physically-based rainfall-runoff model, *Journal of hydrology*, 103, 103-115, 1988.
- 9) Calver, A. and Binning, P. : On hillslope water flow paths and travel times, *Journal of hydrology*, 121, 335-344, 1990.
- 10) Huber, W. C. and Dicknson, R. E. : *Storm Water Management Model, Version 4: User's Mannual*, USEPA, 1988.
- 11) 市川新：流量・汚濁物質追跡モデルの進歩とその活用，雨水技術資料，31, pp19-30, 1998.
- 12) 市川新：ウェイン・ヒューバー教授講演概要－アメリカにおける都市流域モデリングの現状と将来，雨水技術資料，31, 43-54, 1998.
- 13) Jha, R., Herath, S. Musiake K. : Development of IIS Distributed Hydrological Model (IISDHM) and its application in Chao Phraya River Basin, 41 st Japanese Conference on Hydraulics, pp. 227-232, 1997.
- 14) Herath, A. S., Jha, R., Musiake, K. : Application of IIS Distributed Hydrological Model to northern Thailand, *Proceedings of the Third International Study Conference on GEWEX in Asia and GAME*, 125-133, 1997.
- 15) Rutter A.J., K.A. Kershaw, P.C. Robins and A.J. Morton : A predictive model of rainfall interception in forests., *Agrc. Meteorol.*, 9, 367-384, 1971.
- 16) Noilhan, J., and S. Planton : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models, *Mon. Wea. Res.*, 117, 536-549, 1989.
- 17) Deardorff, J. W.: Efficient prediction of ground surface moisture with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys. Res.*, 20, 1182-1185, 1978.

- 18) Dickinson, R. E. : Modelling evapotranspiration for three-dimensional global climate sensitivity. Geophysical Monograph 29. American Geophysical Union, Washington, DC, 58-72, 1984.
- 19) Monteith, J. L. : *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold, 236p., 1973.
- 20) Lei Zhidong, Yang Shixiu, and Xie Shenchuan : *Soil Water Dynamics*, Tsinghua Univ. Press. 276p., 1985.
- 21) Lee, T. J. and R. A. Pielke : Estimating the soil surface specific humidity, J, Appl. Meteorol., 31, 480-484, 1992.
- 22) Nagaegawa, T. : A study on hydrological models which consider distributions of physical variables in heterogeneous land surface (in Japanese), Ph.D. Dissertation submitted to Univ. of Tokyo, 305p., 1996.
- 23) Green, W.H., and G.H. Ampt : Studies on soil physics, Part I, the flow of air and water through soils, J. Agric. Sci., 4, 1, 1-24, 1911.
- 24) Horton, R.E. : The role of infiltration in the hydrologic cycle, Trans. Am. Geophys. Union, 14, 446-460, 1933.
- 25) Philip, J.R. : The theory of infiltration: 1, The infiltration equation and its solution, Soil Sci., 83, 345-357, 1957.
- 26) Mein R.G., and C.L. Larson : Modeling infiltration during a steady rain, Water Resour. Res., 9, 2, 384-394, 1973.
- 27) Chu, S.T. : Infiltration during an unsteady rain, Water Resour. Res., 14, 3, 461-466, 1978.
- 28) Moor I.D., and J.D. Eigel : Infiltration into two-layered soil profiles, Trans. ASAE, 24, 1496-1503, 1981.
- 29) Jia Y. and N. Tamai : Modeling infiltration into a multi-layered soil during an unsteady rain, Ann. J. Hydraul. Eng., JSCE, 41, 31-3a6, 1997.
- 30) Herath, S., Musiaka, K. and Hironaka, S. : Field estimation of saturated conductivity using borehole test, influence of unsaturated flow and soil anisotropy, Ann. J. Hydraul. Eng., JSCE, vol.36, pp.435-440, 1992.
- 31) Herath A. S. : Unsaturated zone hydraulic property estimation and applications to infiltration facility analysis, Ph.D. Dissertation submitted to Univ. of Tokyo, 305p., 1987.
- 32) Herath, S. : 都市域における雨水貯留浸透システムの設計, 雨水技術資料, 12, 131-139, 1994.
- 33) 雨水貯留浸透技術協会編 : 雨水浸透施設技術指針[案] - 調査・計画編, 1998.
- 34) Koike, T. : Generalizing the deduce of hourly solar radiation from sunshine hour data of AMeDAS (in Japanese), Proc. of Annual Conference of JSHWR, 26-29, 1991.
- 35) Shimazaki H. : A comprehensive approach of deducing hourly solar radiation from sunshine hour data of AMeDAS (in Japanese), Proc. of Annual Conference of JSHWR, 108-109, 1996.
- 36) Jia, Y. : Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model, Ph.D. Dissertation submitted to Univ. of Tokyo, 162p., 1987.
- 37) 近藤純正編著 : 水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, 朝倉書房, 350p., 1994.
- 38) 川又孝太郎 : 3次元都市熱環境解析モデルの開発, 東京大学修士論文, 80p., 1994.
- 39) Hu Z. and S. Islam : Prediction of ground surface temperature and soil moisture content by the force-restore method, Water Resour. Res., 31(10), 2531-2539, 1995.
- 40) Chung, S-O. and R. Horton : Soil heat and water flow with a partial surface mulch, Water Resour. Res., 23(12), 2175-2186, 1987.
- 41) Brutsaert, W. : *Evaporation Into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*, Kluwer Academic Publishers.

299p., 1982.

- 42) Hu, H., N. Tamai, and Y. Kawahara : Moisture and heat transfer in unsaturated soil in relation to atmospheric conditions, Proc. of Ninth Congress of APD-LAHR, Singapore, 1, 73-80, 1994.
- 43) Dickinson R.E., A.H. Sellers, C. Rosenzweig and P.J. Sellers : Evapotranspiration models with canopy resistance for use in climate models, a review, Agric. For. Meteorol., 54, 373-388, 1991.
- 44) Jarvis, P. G. : The interpretation of the variations on leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field, Phil. Trans. R. Soc., B273, 593-610, 1976.
- 45) Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher : The design of a simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, J. Atmos. Sci., 43, 505-531, 1986.
- 46) Feddes R. A., P. A. Kowalik and H. Zaradney : *Simulation of field water use and crop yield*, John Wiley and Sons, New York - Toronto, 1978.
- 47) 高橋彌, 本多直紀, 虫明功臣, 弘中貞之 : 都市河川海老川の上水道給水量を考慮した河川流量成分の分離について, 水文・水資源学会1995年研究発表会要旨集, 166-167, 1995.
- 48) Herath, S., Musiak, K. and Hironaka, S. : Development and application of a GIS based distributed catchment model for urban areas, Proc. of 7th int. Conf. on Urban Storm Drainage, 1695-1700, 1996.
- 49) Dunn S. M. and R. Mackay : Spatial variation in evapotranspiration and the influence of land use on catchment hydrology, J. Hydrology, 171, 49-73, 1995.
- 50) Wilson, M. F., A Henderson-Sellers, R. E. Dickinson and P.J. Kennedy : Sensitivity of the biosphere - atmosphere transfer scheme (BATS) to the inclusion of variable soil characteristics, J. Climate Appl. Meteorol., 26, 341-362, 1987.
- 51) Sellers, P. J., Y. Mintz, Y. C. Sud and A. Dalcher : The design of a simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, J. Atmos. Sci., 43, 505-531, 1986.
- 52) Haverkamp, R., M., Vauclin, J. Tournia, P.J. Wierenga, G. Vauchad : A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration, J. Soil Sci. Soc. Am., 41, 285-293, 1977.
- 53) Mualem, Y., Hydraulic conductivity of unsaturated porous media: generalized macroscopic approach, Water Resour. Res., 14, 2, 325-334, 1978.
- 54) Zaradny, H., *Groundwater flow in saturated and unsaturated soil*, Balkema, 66-82, 1993.
- 55) 海老川流域水循環再生構想検討協議会 : みんなでとり戻そう私たちの海老川—海老川流域水循環再生構想検討一, 1997.