

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.322

March 2006

地下水モデルに関する研究 報告書

河川研究部

Research on Groundwater Model

Report

River Department

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Japan

地下水モデルに関する研究

報告書

安田 成夫*
川崎 将生**
村瀬 勝彦***
富澤 洋介****
天方 匡純*****

概 要 :

本資料は平成17年度までに行われた地下水モデルに関する研究の内容を取りまとめたものである。

キーワード： 地下水、地下水管理、データベース、水循環

-
- * : 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部ダム研究室長
** : 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部ダム研究室 主任研究官
*** : 国土交通省 国土技術政策総合研究所 企画部企画課長
(前 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部ダム研究室 主任研究官)
**** : 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部ダム研究室 研究官
***** : 国土交通省 国土技術政策総合研究所 河川研究部ダム研究室 交流研究員

Research on Groundwater Model

Report

Nario Yasuda*

Masaki Kawasaki**

Masahiko Murase***

Yosuke Tomizawa****

Masazumi Amakata*****

Synopsis

This report made up contents of research on the groundwater model.

Key Words : groundwater, groundwater management, data base, water circulation

-
- * : Head, Water Management and Dam Division, River Department, NILIM
** : Senior Researcher, Water Management and Dam Division, River Department, NILIM
*** : Chief, Planning Division, Planning and Research Administration Department, NILIM
**** : Researcher, Water Management and Dam Division, River Department, NILIM
***** : Guest Research Engineer, Water Management and Dam Division, River Department, NILIM

第1編 地下水管理モデルの構築

| | |
|--------------------------|-----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 地下水管理モデルの基本構造 | 2 |
| 2.1. データベース機能と解析機能の結合 | 2 |
| 3. データベース構造検討・作成 | 3 |
| 3.1. データベース構造検討 | 3 |
| 3.2. データベースの作成 | 8 |
| 4. 地上部水収支モデル | 16 |
| 4.1. 地上部水収支モデルの選定 | 16 |
| 4.2. SHERモデルの概要 | 19 |
| 5. 地下水解析モデル | 26 |
| 5.1. 地下水解析モデルの選定 | 26 |
| 5.2. 広域地下水解析モデルの理論 | 26 |
| 5.2.1. 帯水層内の流動特性 | 28 |
| 5.2.2. 支配方程式 | 30 |
| 5.2.3. 境界条件および初期条件 | 34 |
| 5.2.4. 準三次元への近似 | 35 |
| 5.3. 広域地下水モデルの有限要素法による解法 | 39 |
| 5.3.1. 定常モデルによる有限要素解法 | 40 |
| 5.3.2. 非定常モデルによる有限要素解法 | 44 |
| 6. 地上部水収支モデルと地下水解析モデルの結合 | 51 |
| 第2編 実流域への適用 | |
| 7. 両筑平野での地下水解析 | 53 |
| 7.1. 資料収集 | 53 |
| 7.2. 定性的把握 | 56 |
| 7.3. モデル作成 | 57 |
| 7.4. モデル精度検証 | 70 |
| 8. 番匠川流域での地下水解析 | 77 |
| 8.1. 資料収集 | 77 |
| 8.2. データベース化 | 112 |
| 8.3. 定性的把握 | 114 |
| 8.4. モデル作成 | 121 |
| 8.5. モデル精度検証 | 129 |
| 8.6. モデルを用いた番匠川流況に関する考察 | 135 |
| 9. 地下水管理モデルの課題 | 140 |

第1編 地下水管理モデルの構築

1. はじめに

世界規模で進む地球温暖化による水資源賦存量の変化や人口減少に伴う水需要供給構造の変化等、今後、わが国が抱える水資源上の課題は多様である。このようななか、水資源の有効利用のため、また、水資源有効利用の際に必要な合意形成の円滑な推進支援のため、水資源を解析対象としたツール開発が不可欠である。そして、水資源の有効利用の試みにあたっては、表流水だけでなく、地下水に関しても定量的把握を行い、全流域、あるいは、サブ流域を対象とした水収支・水循環の流れを捉えることが重要である。

流水の定量的な把握にあたって、最も重要なものは水文観測である。しかし、河川、地下水に関わらず、定点の水文観測のみで流域・水系全体の流水動向を把握することは困難である。また、3次元の広がりを持つ地下水を一元的に管理する者が不在であること等に起因して、地下水観測データの絶対的な不足が流水動向把握・解析時の大きな問題となることが多い。

本研究は、「円滑な地下水管理を支援するツール開発」及び「地下水流を精度良く再現できるモデル開発」を目的とし、系統的な流水動向の把握や不十分な観測体制の支援を目的とした地下水管理モデルの開発を目指している。

本研究で開発した地下水管理モデルは、データベースモデル、地下水解析モデル、地上部水収支モデルからなり、とで対象地域の水循環系を解析する。地下水解析モデルについては、岡山大学で開発された Ground Water Analysis Program¹（以下、GWAP）を利用している。GWAPは、2次元鉛直積分格子を有限要素法で解くプログラムであり、3次元モデルに比較して解析精度に限界はあるものの、「モデル構築の容易さ」と「計算速度の速さ」の観点から、利便性向上の面で発展の可能性があると考えた。また、地上部水収支モデルについては、ダムによる洪水調節・利水補給、河川取水・還元等の水収支が再現可能なモデルとした。更に、河川と地下水の相互通水機能等のスケールの小さな水循環機能を加え、地下水解析精度の向上に着目した。

本書では、地下水管理モデルの根幹となるデータベース機能に関して記述するとともに、水循環解析機能を担う地上部水収支モデルおよび地下水解析モデルについて述べ、最後に適用流域での解析精度について言及する。

2. 地下水管理モデルの基本構造

2.1. データベース機能と解析機能の結合

図 2-1 は、地下水管理モデルの基本構造を示したものである。地下水解析モデルと地上部水収支モデルのパラメタ設定に必要なデータ及び両モデルの計算に必要なデータはデータベースから抽出される。このデータに基づき、地上と地下が相互に関連した水収支計算により当該地点の水位・流量を算出する。

具体的には、地上部水収支計算は、ダム諸元、取水量、蒸発散量等に係るパラメタを設定し、地下水解析では透水係数、貯留係数、層厚等をパラメタとして設定する。その後、雨量、河川水位・流量、地下水位の水文緒元を交えて水循環計算を行う。

降雨から地下水浸透までの地上部水収支過程は、日単位のスカラー計算である。このスカラー計算は、各メッシュ要素単位で水収支計算を行い、連続式のみを満たす。この計算から地下水浸透量を算出し、地下水解析モデルを構成するメッシュの各節点に浸透量を均等配分することで地上部水収支計算と地下水計算を連結した。その後、連続式と運動方程式からなる GWAP の地下水計算により地下水の水位、流動量計算が行われる。

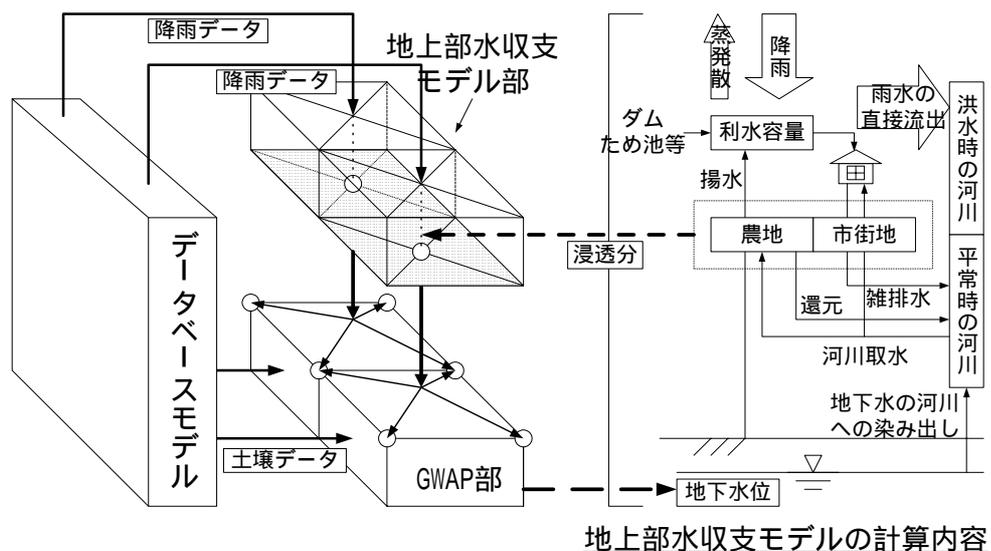


図 2-1 データベースと解析機能の結合

3. データベース構造検討・作成

現在まで地下空間を一元的に管理する者が不在であったことから、地下水動向を把握するための水文観測（地下水位観測等）が十分に行われてきたとは言いがたい。このため、地下水管理に必要なデータの種類の種類等に関する知見は一般的には形式知として蓄積されていない。

そこで、本研究では、地下水管理に必要なデータの種類の種類を明示し、ユーザーフレンドリーにデータ蓄積が可能となる環境を整え、継続的な地下水管理データ集積を支援することを目的にデータベースの開発を行った。

データベースは、複数の解析プログラムへの流用を想定した汎用的な構造とする。汎用性の確保にあたって、データベースの種類、データのフォーマット、結果の表示方法の3面から検討する。

3.1. データベース構造検討

1) データベース

データベースとしては、EXCEL、ACCESS、SQL、ORACLE などがある。この中では、今回扱うデータがあまり多くないこと、扱いやすいことから、EXCEL が適当と判断した。EXCEL は、データ処理部分と計算部分(VBA)を併せ持つことから、データと解析プログラムの一元管理が可能であるという特徴を持つ。

データベースは、データ項目毎に Excel のファイルを持つ構成とした（**図 3-1**、**表 3-1**、**表 3-2**）。

具体的には**表 3-1** に示すデータがデータベースに蓄積される。地質、河道断面及び堰等の一般的に資料の継続的蓄積がないデータについては、単年度分のみを収納し、雨量、河川流量、河川取水量、地下水揚水量等の継続的な観測データについては、観測地点ごとに毎年のデータを収納している。データ選択の際には、地点ごとに各年のデータ参照が可能である。

また、このデータベースのデータを基に地下水解析モデル変数の一次設定の自動化を可能とし、キャリブレーション作業の効率化を図っている。

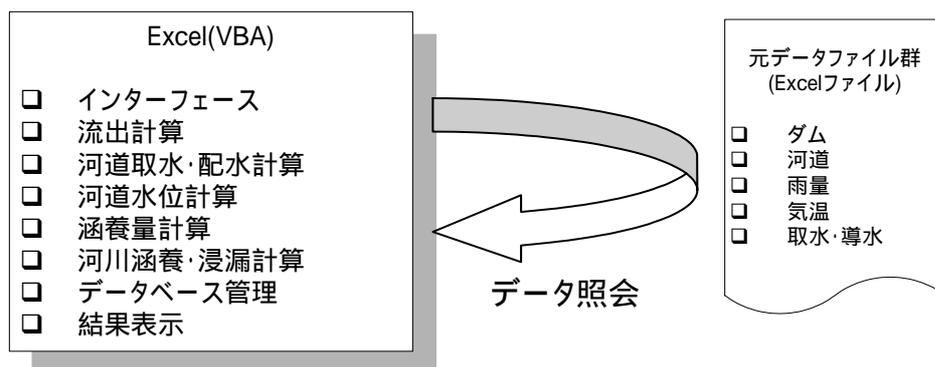


図 3-1 データベースの構成

表 3-1 データベースに登録されているデータ種別一覧（両筑平野モデル）

| 項目 | 小項目 | 両筑平野モデル ¹ |
|----|-----|------------------------|
| 気象 | 雨量 | 江川ダム, 寺内ダム地点, 甘木(アメダス) |

¹ 小石原川・佐田川流域水収支データベース・モデルver.4 システム使用説明書; 国総研ダム研究室より

| | | |
|-----------|---------------|--------------------------|
| | 気温 | 甘木(アメダス) |
| ダム諸量 | 流入量, 放流量, 貯水位 | 江川ダム, 寺内ダム |
| 河川流量 | 河川流量 | 金丸橋, 栄田橋, 筑後川 |
| 河川 取水量 | 都市用水 | 甘木市, 福岡市, 下流取水(左岸, 右岸取水) |
| | 灌漑用水 | 頭取工取水量, 旧堰取水量 |
| | 導水量 | 寺内導水路 |
| 地下水 | 揚水量 | 灌漑用水機場, 甘木市(都市的利用) |
| | 地下水位 | 消防用井戸, 自動観測井戸 |
| 地質柱状図 | | 福岡県甘木農林事務所データ |
| 土地利用 | | 全域 |
| 水利権量 | | 江川・寺内ダム総合運用要領(案)(水資源機構) |
| 維持流量 | | 同上 |
| ダム H-V 式 | | 水資源開発施設等管理年報(水資源機構) |
| 河川 H-Q 式 | | 筑後川河川事務所資料 |
| 圃場面積 | | 両筑土地改良区資料 |
| 井戸諸元 | | 県営揚水機場一覧表(両筑土地改良区) |
| 河道諸元 | | 小石原川, 佐田川 |

表 3-2 元データファイル群(両筑平野モデル)

| 項目 | | ファイル名 |
|-----|-----------|--------------|
| ダム | | 江川ダム貯水位.xls |
| | | 江川ダム放流量.xls |
| | | 江川ダム流入量.xls |
| | | 寺内ダム貯水位.xls |
| | | 寺内ダム放流量.xls |
| | | 寺内ダム流入量.xls |
| 雨量 | | 江川ダム.xls |
| | | 寺内ダム.xls |
| | | 鹿沼(アメダス).xls |
| 気温 | | 鹿沼(アメダス).xls |
| 横断 | 佐田川, 小石原川 | 横断.xls |
| 取水量 | 井堰 | 旧堰.xls |

| | | |
|------|-------|---|
| | 都市用水 | 甘木市.xls 佐賀広域.xls 佐賀東部水道企業団.xls 福岡県南広域水道企業団.xls 福岡市.xls 福岡地区広域水道企業団.xls |
| | 農業用水 | 下淵.xls 甘木.xls 寺内.xls 女男石.xls 小田.xls 上屋敷.xls 本郷.xls |
| 水位 | | 恵蘇ノ宿.xls 荒瀬.xls 瀬ノ下.xls 片の瀬.xls 端間.xls |
| 地下水位 | 灌漑用井戸 | -21.csv , -116.xls -103.xls , -22.xls -108.xls , -134.xls L-9.xls , R-14.xls R-15.xls , R-3.xls |
| 地質 | | ボーリング.xls |
| 土地利用 | | S51.jpg S62.jpg H3.jpg H9.jpg |
| 揚水量 | | 揚水量.xls |
| 流量 | | 栄田橋.xls 金丸橋.xls 恵蘇ノ宿.xls 荒瀬.xls 瀬ノ下.xls 片の瀬.xls |
| 導水量 | | 寺内導水量.xls |

2) データフォーマット

データを EXCEL に整理した場合の長所と短所は次のように考えられる。

【長所】

- ・データのみで(データベースがなくても), 必要な情報を得ることができる
- ・データの追加・修正が容易
- ・EXCEL から呼ぶのが簡単

【短所】

- ・ファイル容量が大きくなる
- ・他のアプリケーションから呼び出すのが難しい

今回対象とするデータは基本的に日データであり, データベースとして EXCEL を使用することを考えれば上記の短所がなくなることから, データは EXCEL で整理する. その場合の各データのフォーマットは以下のとおりとした.

(1)時系列データ

時系列データ(日データ, 時間データ)のフォーマットは, 既存のデータとの互換性を考え 図 3-2 のとおりとした. Excel のシート 1 枚に 1 年分のデータを保持する. また, 欠測データはセルを空白とした.

| | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| 1日 | | | | | | | | | | | | |
| 2日 | | | | | | | | | | | | |
| 3日 | | | | | | | | | | | | |
| 4日 | | | | | | | | | | | | |
| 5日 | | | | | | | | | | | | |
| 6日 | | | | | | | | | | | | |
| 7日 | | | | | | | | | | | | |
| 8日 | | | | | | | | | | | | |
| 9日 | | | | | | | | | | | | |
| 10日 | | | | | | | | | | | | |
| 11日 | | | | | | | | | | | | |
| 12日 | | | | | | | | | | | | |
| 13日 | | | | | | | | | | | | |
| 14日 | | | | | | | | | | | | |
| 15日 | | | | | | | | | | | | |
| 16日 | | | | | | | | | | | | |
| 17日 | | | | | | | | | | | | |
| 18日 | | | | | | | | | | | | |
| 19日 | | | | | | | | | | | | |
| 20日 | | | | | | | | | | | | |
| 21日 | | | | | | | | | | | | |
| 22日 | | | | | | | | | | | | |
| 23日 | | | | | | | | | | | | |
| 24日 | | | | | | | | | | | | |
| 25日 | | | | | | | | | | | | |
| 26日 | | | | | | | | | | | | |
| 27日 | | | | | | | | | | | | |
| 28日 | | | | | | | | | | | | |
| 29日 | | | | | | | | | | | | |
| 30日 | | | | | | | | | | | | |
| 31日 | | | | | | | | | | | | |

日データ

| | 1時 | 2時 | 3時 | 4時 | 5時 | 6時 | 7時 | 8時 | 9時 | 10時 | 11時 | 12時 | 13時 | 14時 | 15時 | 16時 | 17時 | 18時 | 19時 | 20時 | 21時 | 22時 | 23時 | 24時 |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1月1日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月2日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月3日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月4日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月5日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月6日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月7日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月8日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月9日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月10日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月11日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月12日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月13日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月14日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月15日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月16日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月17日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月18日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月19日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月20日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月21日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月22日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月23日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月24日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月25日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月26日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月27日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月28日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月29日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月30日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1月31日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2月1日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2月2日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12月31日 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

時間データ

図 3-2 時系列データのフォーマット

(2)地点データ

データの汎用性・互換性を考慮し, 位置情報として緯度経度と XY 座標(平面直角座標または UTM 座標)を付加する.

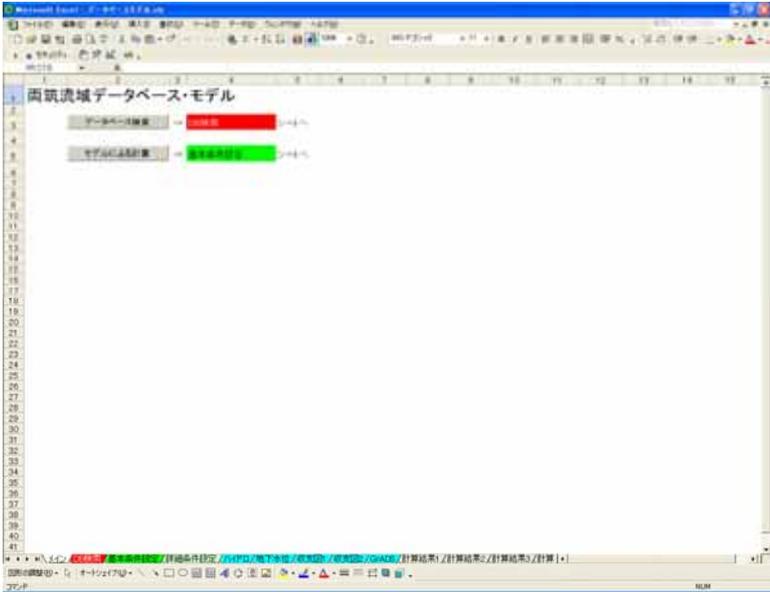
3.2. データベースの作成

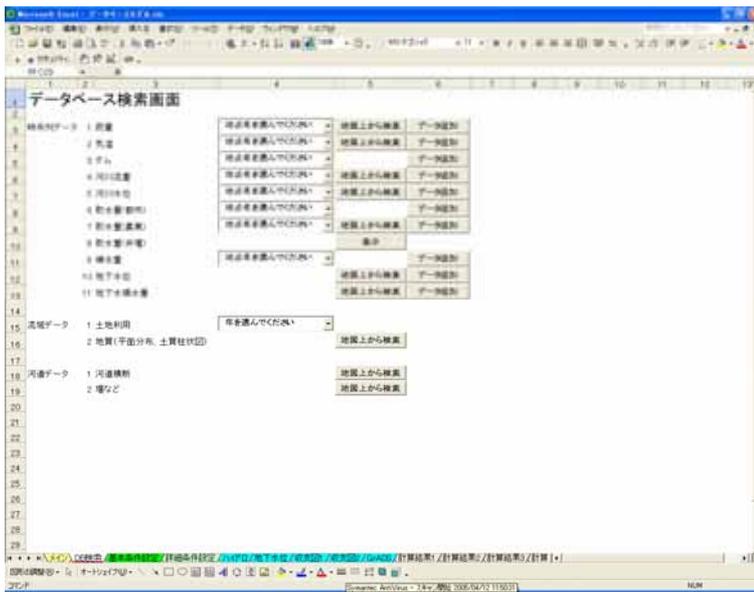
以下の点に留意してデータベースの作成を行った。

Excel ベースの統一したインターフェースへ変更した。これにより使用するパソコンの画面サイズなどの制約はなくなった。

Excel に詳しいユーザとそうでないユーザへの配慮を行った。シート上に配置したボタンを押すだけでシート間（データ表示画面間）を移動でき、Excel の操作に詳しいユーザは Excel 本来の操作により必要な画面やデータへたどり着ける。

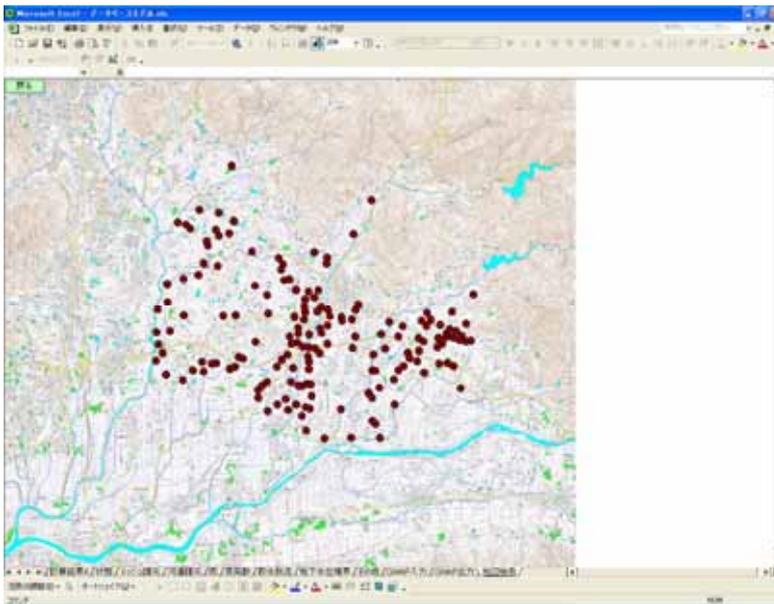
Excel のブック（ファイル）一つに GWAP を除く全てのデータ、解析プログラムを凝集させた。これにより、解析事例の保存などの保守性が向上した。但し、元データ（観測データなどのデータベース）へのアクセスには、所定フォルダーが必要となる。

| | |
|---|---|
|  | <p>メイン画面</p> <ul style="list-style-type: none">• データベース検索あるいはモデル計算のシートへの導入画面である。• Excel のワークシート上にボタンを配置した、シンプルな画面構成とした。• これにより、使用するパソコンの画面サイズなどの制約を受けなくなった。 |
|---|---|



DB 検索画面

- データベース検索を行う画面である。
- 解析に必要なデータの統計量の算出とデータを追加する手段を提供する。
- 地図上のポイントを表示して、必要な観測所データを示す機能を具備している。

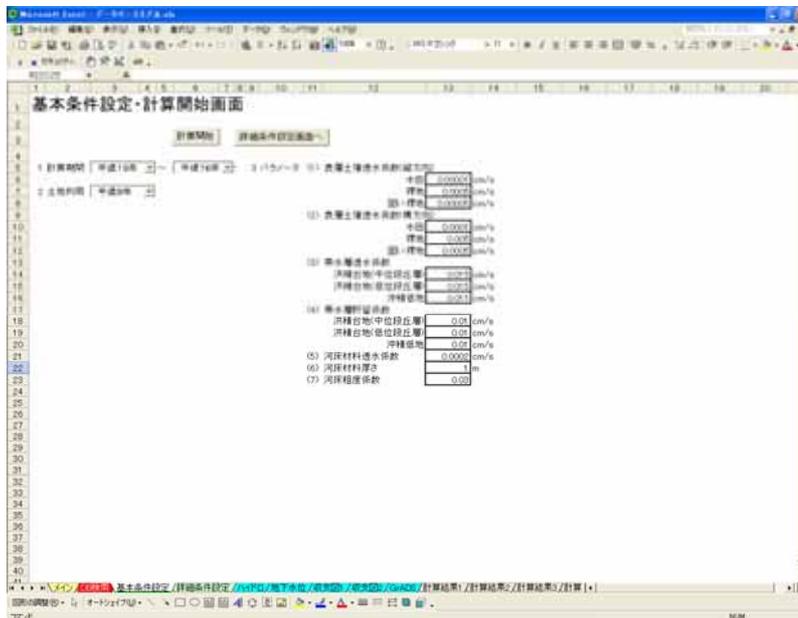


地図上からの観測地点検索

- 地図を見ながら観測地点を選択する画面である。
- Excel シートに地図画像を貼り付け、その上に観測所地点を示すボタンを配置した。
- 登録した観測地点の位置座標から、この画面を表示するたびにボタンを生成して地図上に配置するため、観測所の追加などに柔軟に対応できる。

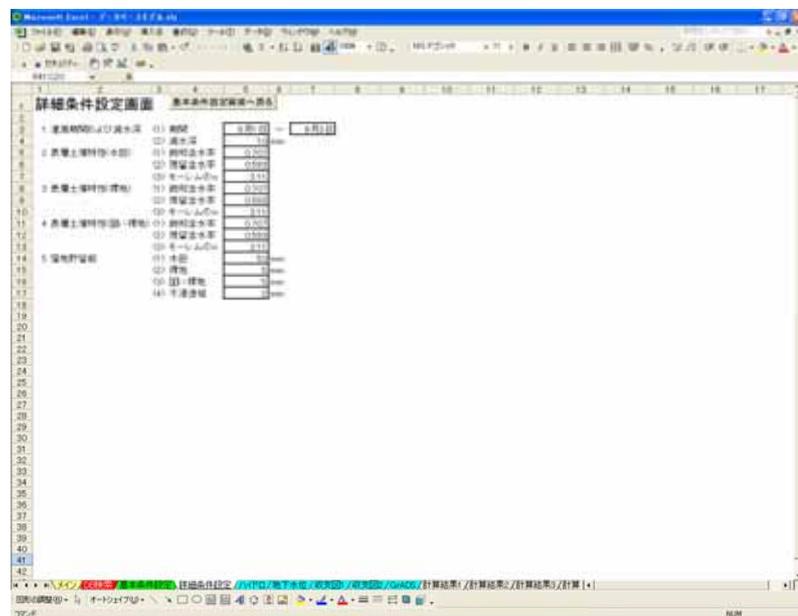
計算条件設定（基本パラメータ）

- 水循環系解析のパラメータ設定画面である。
- 解析の際に頻繁に変更されるパラメータを中心に、この画面で設定できる。
- 全てのパラメータを横並びで変更可能とするのではなく、主要なものをこの画面で表示した。
- その他のパラメータへは、ボタンを押すことにより、それらを変更する画面へ移動できる。



計算条件設定(詳細設定)

- 水循環系解析のパラメータの詳細設定を行う画面である。
- 土地利用毎の窪地貯留能など、比較的固定的な扱いがなされるパラメータを変更する。

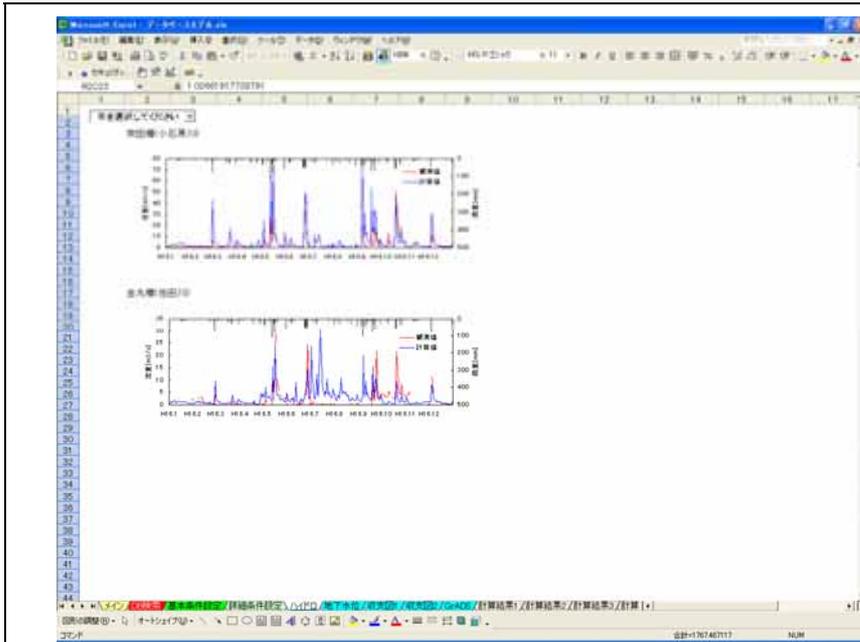


流域モデル詳細設定（詳細設定）

- 流域モデルの分割（FEM 要素相当）毎に設定する諸元の詳細設定を行う画面である。
- 流域モデルを作成したあとではほとんど変更の必要がないが、要素ごとの詳細な設定が可能である。

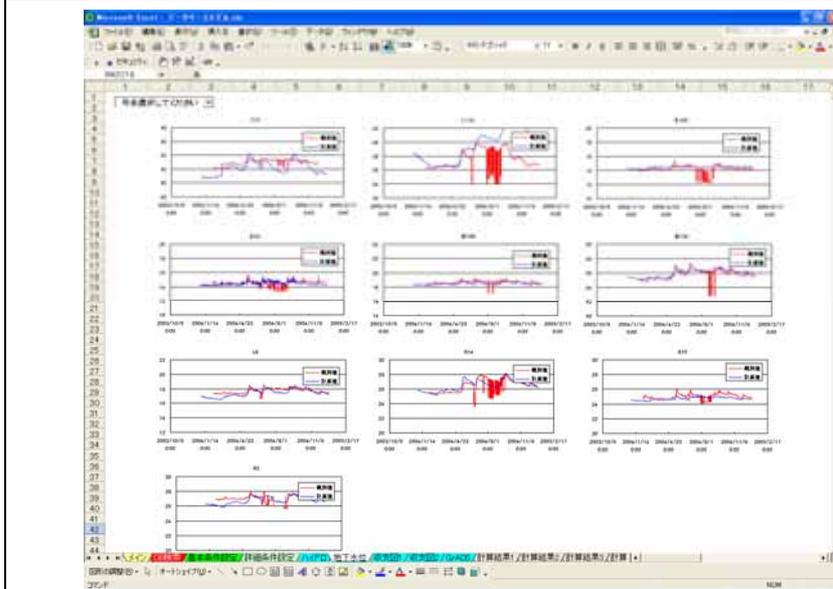
データ保存期間の表示

- データベースに保存されているデータの期間を表示する画面である。
- データベースの検索結果として表示される画面の一種である。



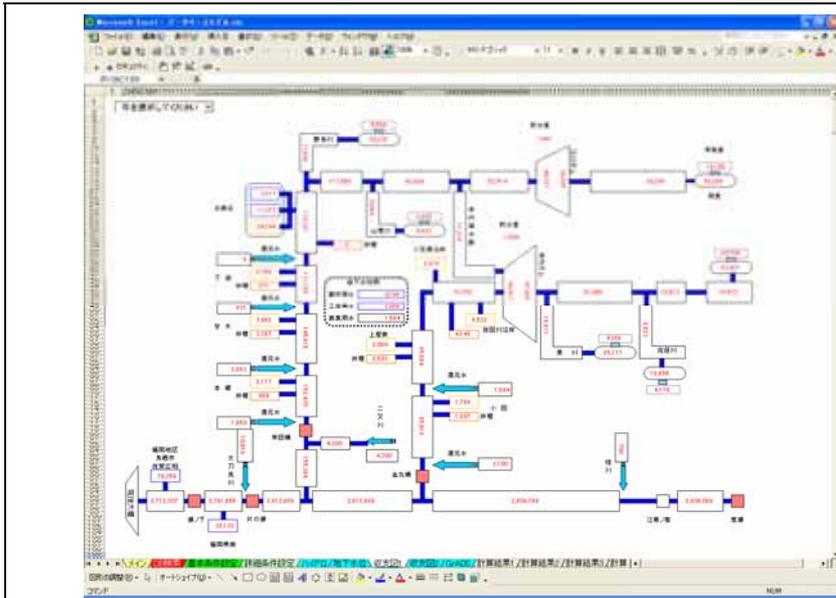
計算結果表示(1)

- 河川流量(ハイドロ)を表示する画面である。
- すでに計算済みの年について、指定した年のハイドロを表示する。



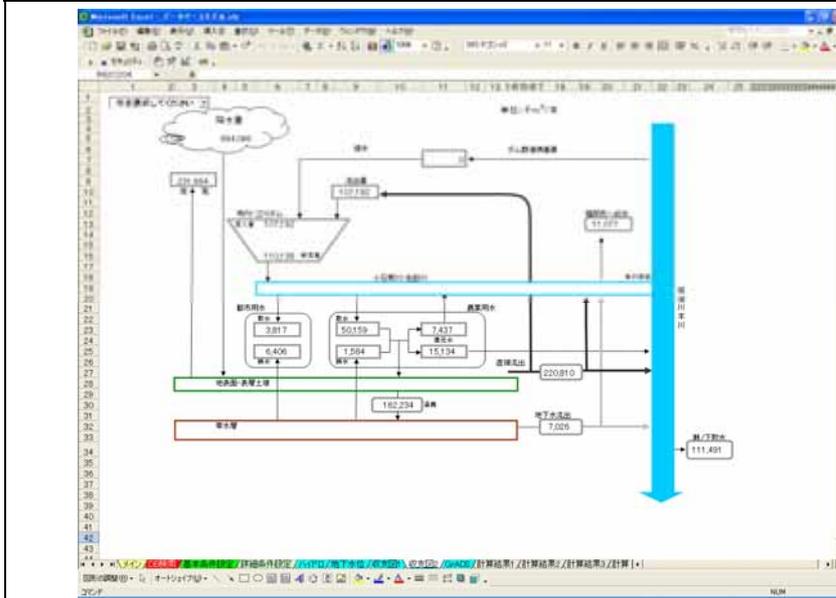
計算結果表示(2)

- 地下水位を表示する画面である。
- すでに計算済みの年について、指定した年の地下水位を表示する。



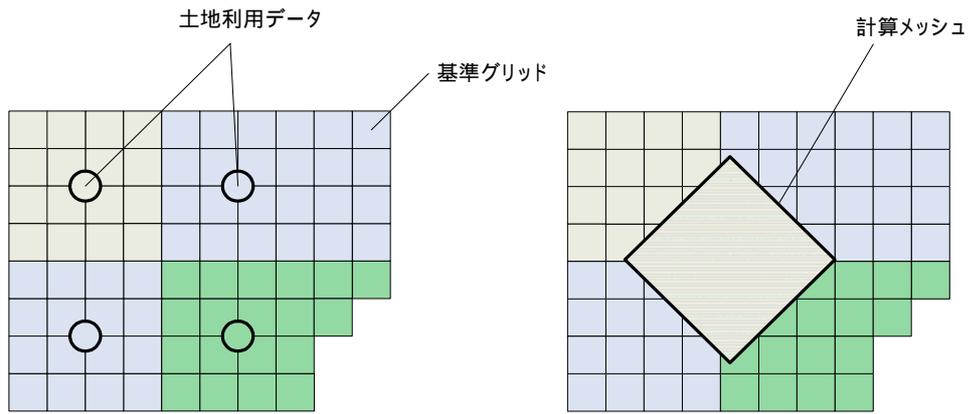
計算結果表示 (3)

- 地表水の收支を表示する画面である。
- すでに計算済みの年について、指定した年の收支を表示する。
- 年間の收支のため、1年分計算されていないと結果に不具合が生じる。



計算結果表示 (4)

- 流域全体の收支を表示する画面である。
- すでに計算済みの年について、指定した年の收支を表示する。
- 年間の收支のため、1年分計算されていないと結果に不具合が生じる。



1)点 基準グリッド

2)基準グリッド 計算メッシュ

図 3-5 土地利用データと計算メッシュの対応

4. 地上部水収支モデル

4.1. 地上部水収支モデルの選定

地上部水収支モデルと地下水解析モデルの結合により水循環系の計算が行われるが、水循環系モデルの各要素との対応は図 4-1 の通りである。

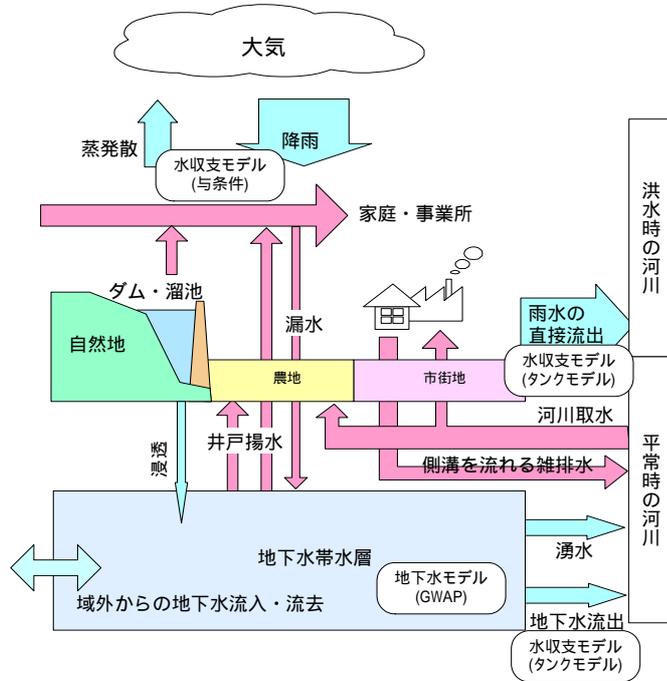
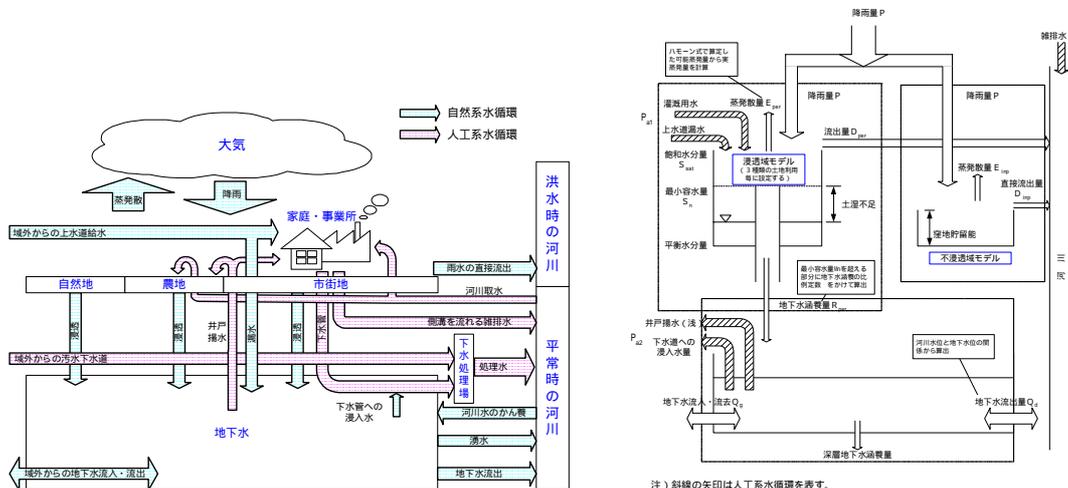


図 4-1 水循環系における各要素

図 4-1 から分かるように、水循環系の観点から見れば、地表水と地下水は相互に関連するものであるため、両者を連携したモデルを作成する必要がある。図 4-2 には、すでに構築されている代表的な 4 つの水循環系モデル(地表水と地下水が連携したモデル)を示した。それぞれのモデルは、表 4-1 に示した各対策(目的)に応じて使い分けられる。



注) 斜線の矢印は人工系水循環を表す。

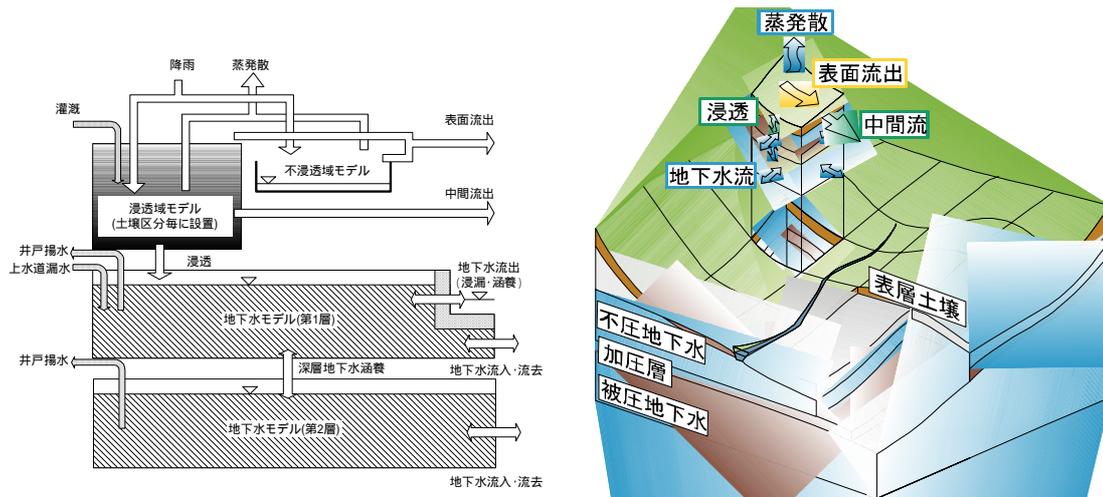


図 4-2 代表的なモデルの概念図(左上：年間水収支法，右上：SMPT，左下：SHER，右下：PDE)

- ・年間水収支法：水循環系経路を流れる水量を年間単位で把握する手法
- ・SMPT (Soil Moisture Parameter Tank Model)：表層土壌をタンクモデルで表現．流域は水文学的に均一な特性を持つ地域ごとに分割し，それぞれにモデルを一つずつ対応させ，流域全体を表現
- ・SHER (Similar Hydrologic Element Response Model)：SMPT において，表層土壌部分に不飽和浸透計算を組み込んだ手法
- ・PDE (Physically based Distributed model for Ebigawa-river)：流域をメッシュ分割し，各メッシュにおいて鉛直方向の水分移動を計算し，それを地表面，表層土壌，地下水のそれぞれに平面的に接続し，流域全体を 3 次元的に連続したものとして表現した手法

表 4-1 対策と対応する解析モデル

| 対策 | | 年間 水収支法 | SMPT モデル | SHER モデル | PDE モデル |
|--------------------|----------|------------|-------------|-------------|------------|
| 課題 (評価指標) | 対策分類 | | | | |
| 平常時の流量の確保 (日流量) | 河川水の利用 | | | | |
| | 下水処理水の活用 | | | | |
| | 地下水の利用 | | | | |
| | 貯留水の利用 | | | | |
| | 雨水浸透 | | | | |
| | 自然地の保全 | | | | |
| 洪水制御 (ピーク流量) | 河川の整備 | | | | |
| | 下水道の整備 | | | | |
| | 雨水貯留 | | | | |
| | 雨水浸透 | | | | |

| | | | | | |
|---------------------|----------------|--|--|--|--|
| 水資源の保全と開発 (年間水量) | 雨水, 再生水の利用 | | | | |
| 生態系の保全と復元 (日流量) | - | | | | |
| 汚濁制御 (日流量) | 浄化水の導入 | | | | |
| | 下水道の整備 | | | | |
| | 合流式下水道の越流対策 | | | | |
| | 河川, 池沼における直接浄化 | | | | |
| | 汚濁負荷流入の分離 | | | | |
| 熱環境の改善等 (蒸発散量) | - | | | | |

印は対応する事を示す。 印は限定的に対応することを示す。

出典:「都市域における水循環系の定量化手法」 都市小流域における雨水浸透, 流出機構の定量的解明研究会 平成 12 年

4 つのモデルの中では, PDE モデルの精度が 1 番高く, 多くの対策評価が可能である。この PDE モデルのようにモデル化を行う場合は, 地下水モデルに大気格子モデルを組み込む必要がある(図 4-3 左)。ただし, 目的や開発コスト, 計算時間等を考慮した場合, 地下水モデルに SHER モデルの地表(+ 表層土壌)部分を組み込んだモデルも考えられる(図 4-3 右)。両モデル化の比較を表 4-2 に示す。本研究の目的が, 洪水追跡計算ではなく, 水収支の算定であることを考えれば, SHER モデル+地下水モデルでも十分対応可能である。

以上のことから, 地上部水収支モデルとして SHER モデルを選定する。

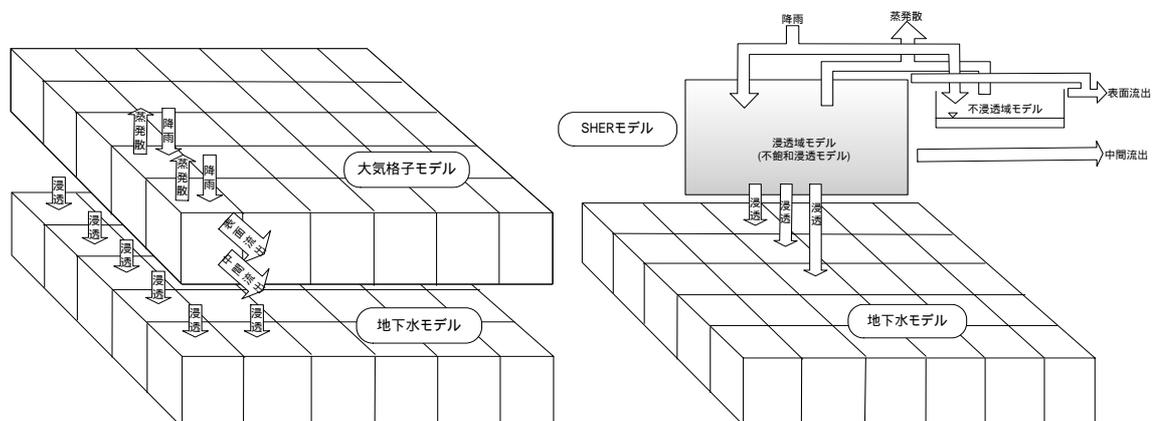


図 4-3 地表流モデルと地下水モデルの組み合わせ
(左: 大気格子モデル+地下水モデル, 右: SHER モデル+地下水モデル)

表 4-2 地下水モデルと地表流モデルの組み合わせ比較

| | | 大気格子 + 地下水モデル | SHER + 地下水モデル |
|--------------|----------|---------------|---------------|
| 評価対象 (用途) | 年間水収支 | | |
| | 日単位の河川流量 | | |
| | 洪水追跡計算 | | - |
| | 氾濫解析 | | - |
| 計算精度 | | 高い | 比較的高い |
| 計算の安定性 | | 中 | 高い |
| 計算時間 | | 長い | 短い |
| 開発コスト | | 非常に大きい | 小さい |

4.2. SHER モデルの概要

以下に SHER モデルにおける地表面 + 表層土壌部分のモデル化の考え方を記す。

SHER モデルでは、地下水位と河川水位の関係を現実に近いものとするため、また、部分流出寄与域 (図 4-4) の考え方にならない、低平地で地下水深度が浅い地域では流出応答が異なることを再現するために流域分割を行う。分割は河川近傍とその外周部分とに分割することを基本的な方針とする。

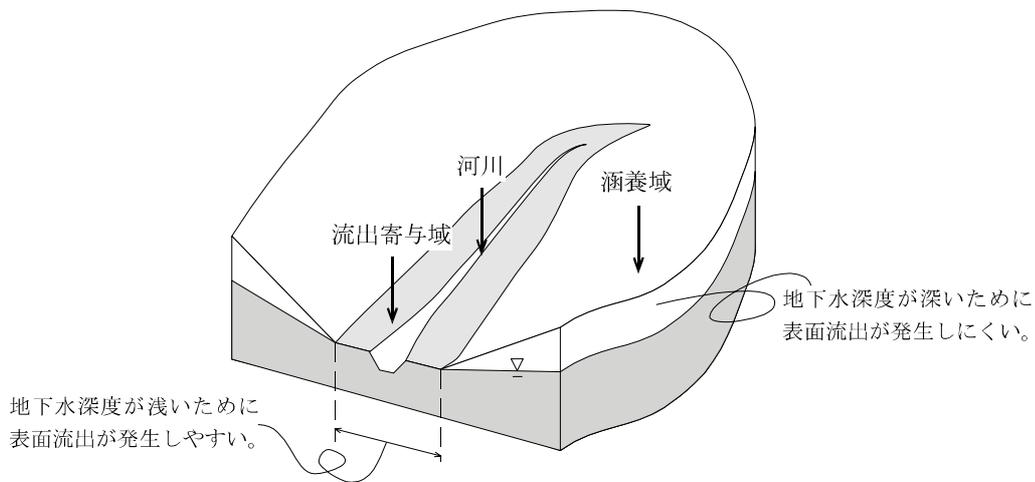


図 4-4 涵養域と流出寄与域

それぞれの流域(ブロック)においては、地表面を表 4-3 に示した 4 種類に分類する。それぞれの地表面からの水の流れは、図 4-4 に示すようである。

表 4-3 モデル上の地目分類

| 地表面の分類 | 概要 | 対応するモデル |
|--------|---------------------------|---------|
| 不浸透域 | 屋根や道路 | 不浸透域モデル |
| 水田 | 水田。水田は特殊な土壤であることから他と区分する。 | 浸透域モデル |

| | | |
|-----------------------|----------------------------|--|
| 浸透域 (締め固められていない土地) | 国土数値情報の土地利用で山林、畑地等をこの区分とする | |
| 浸透域 (締め固められた土地) | 造成などにより締め固められた土地利用の浸透域 | |

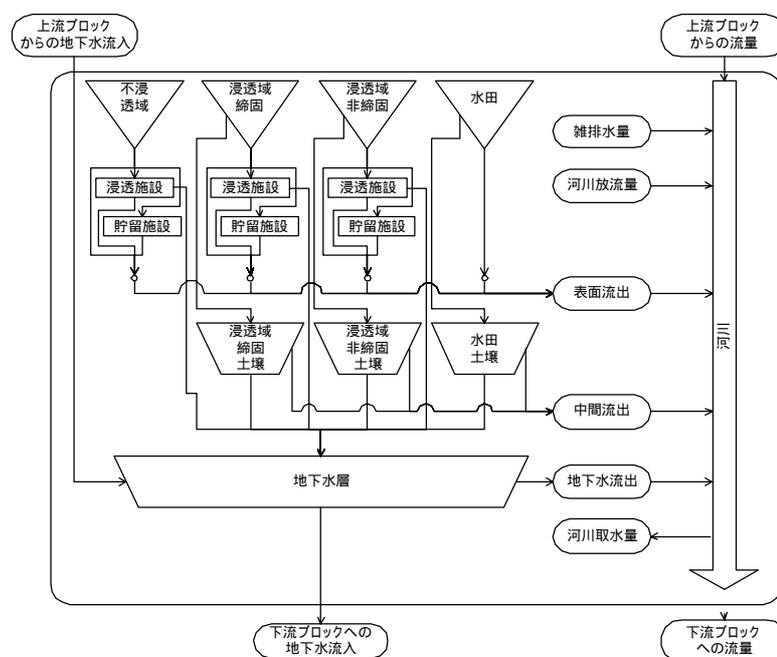


図 4-5 ブロック内の水の流れ概要図

以下に不透透域と浸透域モデルの考え方を示す。

1) 不透透域モデル

a. 概要

不透透域モデル (図 4-6 , 図 4-7) の基礎式を示すと次式となる。

$$\frac{dS_{imp}}{dt} = P - D_{imp} - E_{imp} \quad (1)$$

ここに、

- P : 降水量
- S_{imp} : 不透透域窪地貯留池の貯留量
- D_{imp} : 不透透域からの表面流出
- E_{imp} : 不透透域窪地貯留池からの蒸発量

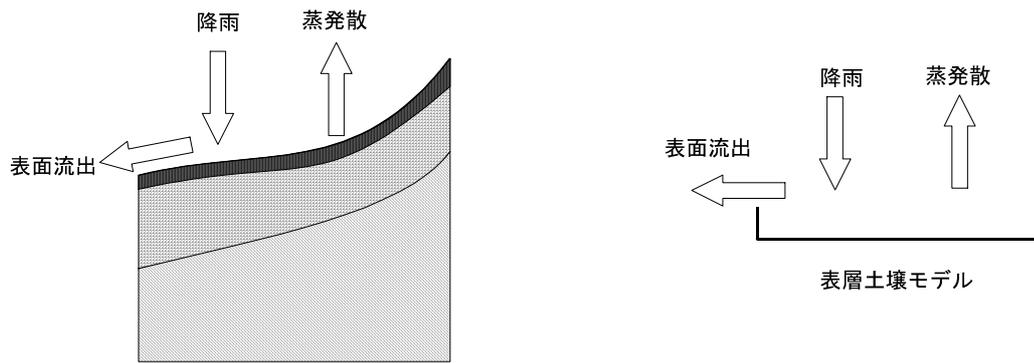


図 4-6 不浸透域のモデル化の概念

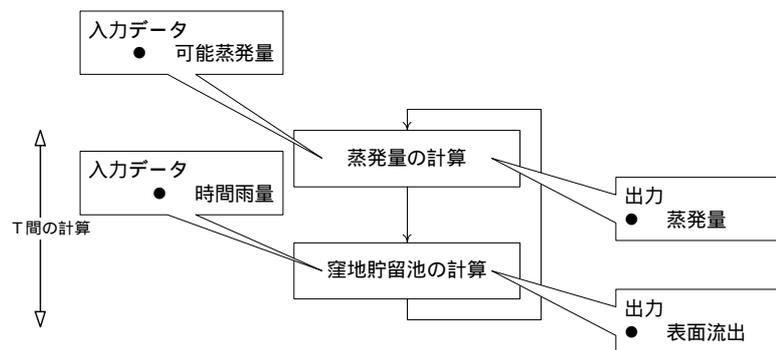


図 4-7 不浸透域モデルの計算フローと入出力の関係

b. 表面流出

降水量と窪地貯留能を比較して，降水量が上回ればその余剰分を表面流出とする．

c. 蒸発散

ここではハーモン式により可能蒸発量を算定し，窪地貯留池の水量を上限として実蒸発量を算定する．計算の手順は下記である．

降水中は，可能蒸発量はゼロとする．

窪地貯留池の水量と可能蒸発量を比較し，窪地貯留池の水量を上限として実蒸発量を求める．

2) 浸透域モデル

a. 概要

一般に河川への流出は表面流出と中間流出（速い中間流と遅い中間流），それに地下水流出により構成されていると言われる．ここでは，図 4-8 に示すようなモデルを作成する．図中の左側の図が雨水流出経路の概念図であり，それを右図のように表層土壌モデル及び地下水層モデルとして表現することとする．表層土壌モデル内では，土壤の水分伝達特性として Richards 式を基礎式として表現し，簡単な数値解法で水分量の追跡を行うこととする．計算フローと入出力の関係を図 4-9 に示した．

貯留量を窪地貯留池，表層土壌内，および地下水層内の 3 種類に分けて考えることとし，次式を基礎式とする．

$$\frac{dS_1}{dt} = U_s - E_1 - D_s \quad (2)$$

$$\frac{dS_2}{dt} = P - E_2 - R - I - U_s + P_{a1} \quad (3)$$

$$\frac{dS_g}{dt} = R - D_g - P_{a2} \quad (4)$$

ここに、

- S_1 : 窪地貯留池の貯留量
- S_2 : 表層土壌内の貯留量
- S_g : 地下水層内の貯留量
- D_s : 表面流出量
- E_1 : 窪地貯留池からの蒸発量
- E_2 : 表層土壌内からの蒸発量
- P : 表層土壌への浸潤量 (= 降水量)
- R : 地下水涵養量 (降下浸透量)
- I : 中間流出量 (側方浸透流)
- U_s : 地表面への復帰流
- D_g : 地下水流出量
- P_{a1} : 表層土壌へ浸入する人工系水循環水量
(灌漑水量 (水田の場合のみ), 上水道漏水量などの合計)
- P_{a2} : 帯水層から引き抜かれる人工系水循環水量
(井戸揚水量, 下水道管渠への浸入水量などの合計)

以下に、蒸発散、鉛直浸透、側方浸透、復帰流の順に計算手法を説明する。

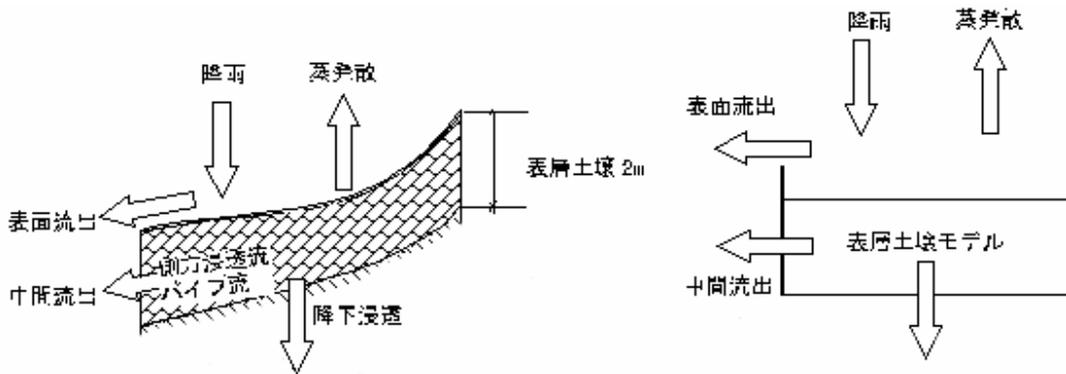


図 4-8 裸地のモデル化の概念

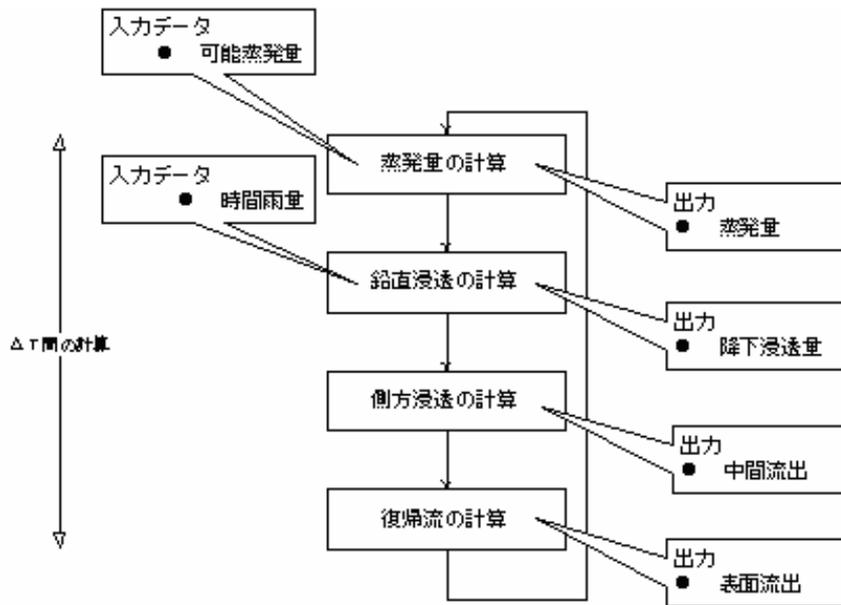


図 4-9 裸地モデルの計算フローと入出力の関係

b. 蒸発散

蒸発散は、樹冠などからの蒸散と窪地や裸地からの蒸発に大別できる。これらの現象に影響を与える要因は、気温、風速、湿度、樹種など多くが言われており、その確定した評価手法は未だ開発段階といってよい。そこで、ここではハーモン式により可能蒸発量を算定し、窪地貯留池と土壌含水量の合計を上限として実蒸発量を算定する。計算の手順は下記である。

降水中は、可能蒸発量はゼロとする。

窪地貯留池の水量と可能蒸発量を比較し、窪地貯留池の水量を上限として実蒸発量を求める。可能蒸発量からで算定した実蒸発量を比較して、可能蒸発量が余る場合はその余剰部分を土壌からの可能蒸発量とする。

土壌からの可能蒸発量と土壌含水量を比較して、土壌含水量を上限として実蒸発量を求める。

で求めた窪地貯留池からの実蒸発量にこれを加えて、流域からの実蒸発量とする。

土壌の体積含水率は、実蒸発量を減じた値で更新する。

c. 鉛直浸透

[浸潤（地表面を通過する浸透量）]

地表面を通過する浸潤量（浸透量）は、土壌の含水率（乾き具合）により様々に変化することが言われている。含水率が低ければ、浸潤の速度は大きくなり、この速度は土壌が飽和に近づくにつれて飽和透水係数に漸近する。しかし、ここでは単純に、地下水層モデルが飽和するまでは無条件で浸潤が生じるとする。

降水量と窪地貯留池の水分量は全て、地表面を通過し、その分だけ土壌含水量が増加することとする。計算上は一時的な過飽和状態（土壌の全空隙よりも水分量が上回る状態）が生じる場合もある。

[降下浸透（地下水涵養）]

土壌の水分量は、鉛直下方向には重力により排水されるが、排水が進み含水率が低下すると、土壌

の不飽和透水係数が小さくなり、排水速度が減少することとなる。ここでは、この機構を単純にモデル化するために、 T （ここでは1時間）を10等分して、状態量（土壌の体積含水率）を順次更新して行く陽形式の差分計算とする。計算手法は下記である。

土壌の含水率から不飽和透水係数を算定する。

$dt (= T/10)$ の間はその不飽和透水係数が継続するとして、土壌含水量を重力排水する。

流速は（不飽和透水係数） \times （1.0）とする。

土壌含水量から排水量を減じ、土壌の体積含水率を更新する。

に戻り、これを10回繰り返す。

$$R = \int_T^{T+\Delta T} K_0 \cdot k_r(\theta) dt \quad (5)$$

ここに、

K_0 : 飽和透水係数

$k_r(\theta)$: 相対透水係数

θ : 体積含水率

d. 側方浸透

土壌内に浸潤した水分は鉛直方向に重力排水されると同時に斜面に平行な方向（斜面方向）にも流速ベクトルを生じる。これには直接流出成分を構成する速い中間流と基底流出を構成する遅い中間流が含まれる。速い中間流は、土壌中の大孔隙（動植物がつくる穴など）や土壌中に発達した亀裂や水みちを通る流れが主成分と考えられ、これはパイプ流などと呼ばれる。他方、遅い中間流は土壌の中を一樣に進行する浸透流であり、側方浸透などと呼ばれる。

斜面方向の流れは鉛直方向の浸透現象と同時に生じているが、モデル化の際には簡単化のために、鉛直方向の浸透を先に計算し、その状態から斜面方向の流れを計算する。また、パイプ流の存在を考慮して、鉛直方向と斜面方向の飽和透水係数は異なることとし、斜面方向を大きな値とする。計算手法は下記である。

土壌の含水率から不飽和透水係数（斜面方向）を算定する。

$dt (= T/10)$ の間はその不飽和透水係数が継続するとして、流量を算定する。流速は

（不飽和透水係数） \times （斜面勾配）とする。

土壌含水量から流量を減じ、土壌の体積含水率を更新する。

に戻り、これを10回繰り返す。

$$I = \int_T^{T+\Delta T} K_{0I} \cdot k_r(\theta) \cdot s dt \quad (6)$$

ここに、

K_{0I} : 斜面方向飽和透水係数

k_r : 相対透水係数

s : 斜面勾配

e. 復帰流

側方浸透流の計算を終えた段階で、土壌の含水率が飽和含水率を上回る場合は、復帰流が生じたこととして、地表面流を発生させる。計算手法は下記の通りである。

側方浸透の計算を終了した時点で、土壌の体積含水率と飽和含水率を比較して、土壌の体積含水率が飽和含水率を上回る場合は、その過剰分を地表面へ戻す。

地表面上の水深と窪地貯留能を比較して、窪地貯留能を上回る部分の水量は、表面流出させる。

f. 水分伝達特性

鉛直方向と斜面方向の浸透量を計算する際に、不飽和透水係数を用いるが、その式形はここでは Mualem の式形を用いる。鉛直方向は(8)式であり、斜面方向は(9)式で求める。

Mualem(1978) の不飽和透水係数～含水率の関係

$$k_r(\theta) = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_0 - \theta_r} \right)^n \quad (7)$$

$$k = K_0 k_r(\theta) \quad (8)$$

$$k = K_{0f} k_r(\theta) \quad (9)$$

ここに、

- k_r : 相対透水係数
- k : 不飽和透水係数 [cm/s]
- K_0 : 飽和透水係数 [cm/s]
- K_{0f} : 斜面方向飽和透水係数 [cm/s]
- n : 定数 (Mualem の n)
- θ : 体積含水率 [cm³/cm³]
- θ_0 : 飽和水分量 [cm³/cm³]
- θ_r : 残留水分量 [cm³/cm³]

5. 地下水解析モデル

5.1. 地下水解析モデルの選定

地下水モデルは、地表水と一体化して水収支を求める目的から、ソースコードが公開されており改良可能なモデルが対象となる。このため、表 5-1 の 2 モデルを候補とした。

表 5-1 各地下水モデルの特徴

| | GWAP | MOD-FLOW |
|----------|------------------|------------|
| 作成元 | 岡山大学 | USGS |
| 次元数 | 準 3 次元 (実質 2 次元) | 3 次元 |
| 不圧地下水の対応 | 対応 | 対応 |
| 河川とのやり取り | 未対応 | パッケージにより対応 |
| 涵養量 | 期間ごとに設定可能 | |

地下水解析精度が求められると同時に、合意形成のための計算速度の短縮化についても気に掛けておく必要がある。また、実際的な地下水データ、鉛直方向の土壌データ等の整備状況を考えると、無闇に高度な 3 次元の解析を行うよりも、存在するデータを最大限に利用して精度向上を目指す必要がある。このため、地下水解析プログラムとしては GWAP を選択する。なお、GWAP の特徴としては、広域地下水解析モデル及び有限要素法がキーワードとして挙げられる。

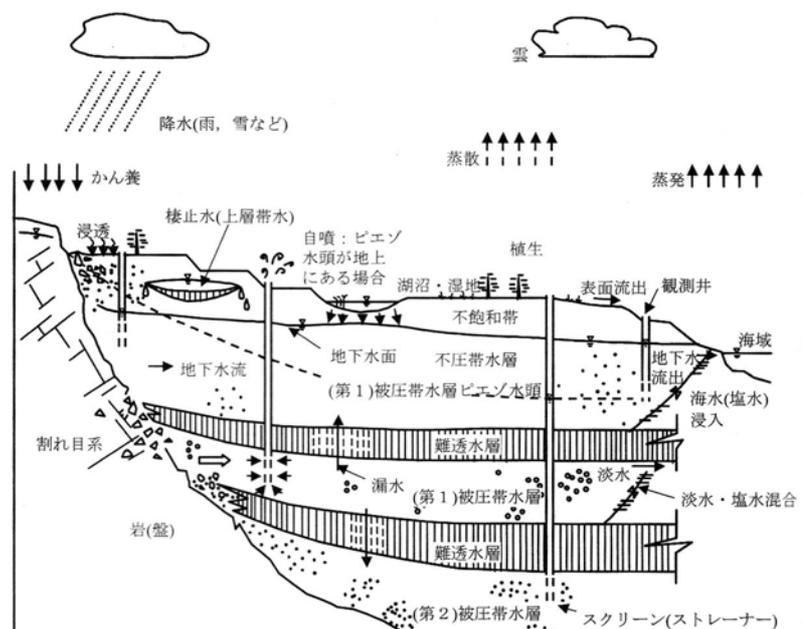
5.2. 広域地下水解析モデルの理論

本節で紹介する地下水流動モデル(GWAP:Ground Water Analysis Program)は、広域地下水の流れを表現する。これは、帯水層の厚さに較べて水平方向に十分な広がりを持っている帯水層あるいは帯水層の一部を対象としていることを意味する。

地下水の流れは大きく被圧地下水流と不圧地下水流に分類され、それぞれ被圧帯水層および不圧帯水層を流動する地下水流

のことである。被圧帯水層とは、その上位に水の移動を阻害する多孔体の单元である加圧層が存在するものをさし、不圧帯水層とはその上部の境界が地下水面であるものをさす。GWAP では、被圧帯水層および不圧帯水層における飽和地下水流動解析を可能としている。

図 5-1 地下水形態 (出典：地下水理学 丸善株式会社 P16)



なお、不圧帯水層には飽和流と不飽和流[次ページ参照]が介在するが、GWAP では飽和浸透流解析のみを再現し、不飽和過程の浸透は浸透率により表現している。

[飽和流と不飽和流]

下図は代表的な含水状態（ペンデュラー水、ファニキュラー水、おおび飽和）、つまり含水率の増減に伴う誘導力、つまり、表面張力（毛管力）、重力、および圧力の三者がどのように変化するかが定性的に描かれている。含水率が小さいとき、間隙水は土粒子の接触点に表面張力によって保持され、液島（liquid islands）を形成する。この場合は、表面張力が支配的となり、液島に作用する重力は間隙水の運動には弱い影響しか与えない。含水率が増し、液島が消え、土粒子間隙中に球状気泡が形成される含水状態になると、表面張力は気泡形状を保つ程度になり、重力と水圧によって間隙水は運動するようになる。表面張力は弱く、重力と圧力が間隙水の運動に関与するようになる。更に含水率が増し、飽和状態になると、表面張力は消え、重力と圧力のみが間隙水の運動に関与するようになる。

結論的には、含水率が小さいと表面張力が支配的となるが、飽和になると重力と圧力が支配的となる。このことは、地下水の流れのモデル化を行う際、基本的に重要となる。

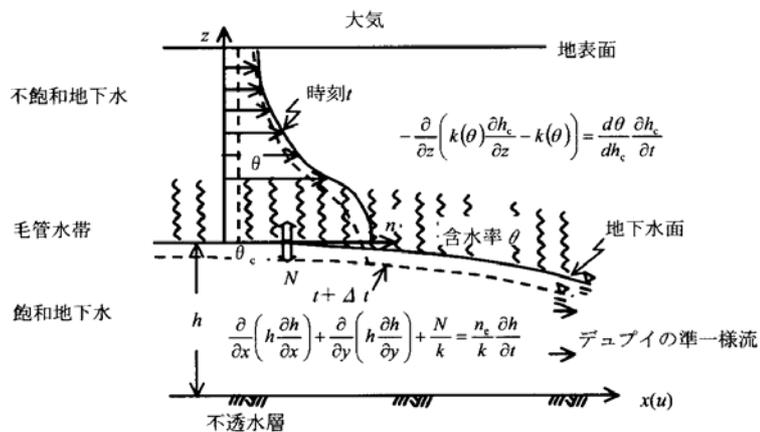
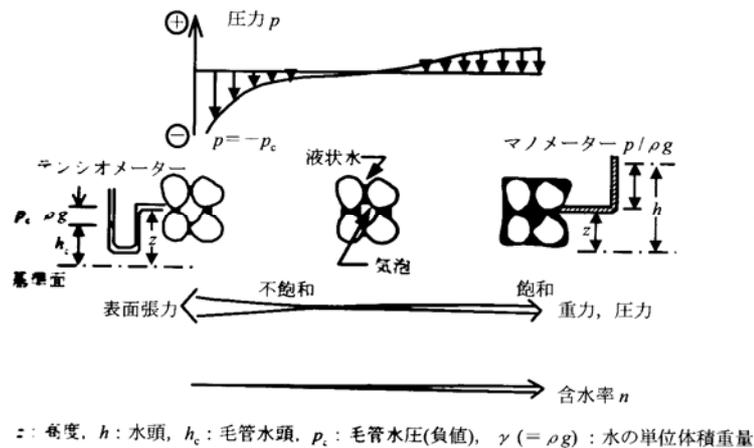


図 5-2 飽和流と不飽和流の関係（出典：地下水理学 丸善株式会社 P14,P83）

ここで、

$i, j: 1, 2, 3$ (主透水座標方向)

K : 透水係数(L/T)

h : 水頭(L)

S_s : 比貯留係数(L^{-1})

Q : 単位体積当たりの部分的な注水あるいは吸い込み($1/T$)

x : 空間座標(L)

t : 時間(T)

(数式 5-1)中の比貯留係数 S_s は、単位水頭変化に対して帯水層内の単位体積当たりに貯留から解放あるいは貯留される水量を表している。 S_s は不圧条件下では 10^{-1} のオーダーである比産出率を用い、被圧条件下では 10^{-4} のオーダーの比貯留係数を用いる。また、比算出率は有効間隙率に等しいとされる。

表 5-2 比貯留係数

| 材料 | 比貯留率(1/m) |
|----------|------------------------------------|
| 塑性粘土 | $2.6-20 \times 10^{-3}$ |
| 硬質粘土 | $1.3-2.6 \times 20^{-3}$ |
| 中程度の硬質粘土 | $9.2-13 \times 10^{-4}$ |
| 蜜詰め砂礫 | $4.9-10 \times 10^{-5}$ |
| 接合亀裂性岩 | $3.3-69 \times 10^{-6}$ |
| 緩詰め砂 | $4.9-10 \times 10^{-3}$ |
| 蜜詰め網 | $1.3-2.0 \times 10 \times 10^{-3}$ |

表 5-3 比産出率

| 材料 | 比産出率〔無次元〕 |
|-------|-----------|
| 粘土 | 0.01-0.18 |
| 細礫 | 0.13-0.40 |
| 中礫 | 0.17-0.44 |
| 粗礫 | 0.18-0.43 |
| 石灰岩 | 0.00-0.36 |
| レス | 0.14-0.22 |
| 細砂 | 0.01-0.46 |
| 中砂 | 0.16-0.46 |
| 粗砂 | 0.18-0.43 |
| イオリス砂 | 0.32-0.47 |
| 細粒砂岩 | 0.02-0.40 |
| 中粒砂岩 | 0.12-0.41 |
| 片岩 | 0.22-0.33 |

| | |
|------|-----------|
| 風化片岩 | 0.06-0.21 |
| シルト | 0.01-0.39 |
| シルト岩 | 0.01-0.33 |
| 凝灰岩 | 0.02-0.47 |

5.2.2. 支配方程式

ここでは、地下水の流れの基礎方程式について記述する。

1) 質量保存則

最初に、control volume と称される図 5-4 に示すような微小立方体を考える。この立方体はこれから我々が議論する地下水および地下水流動媒体のあらゆる特性を有するものとする。

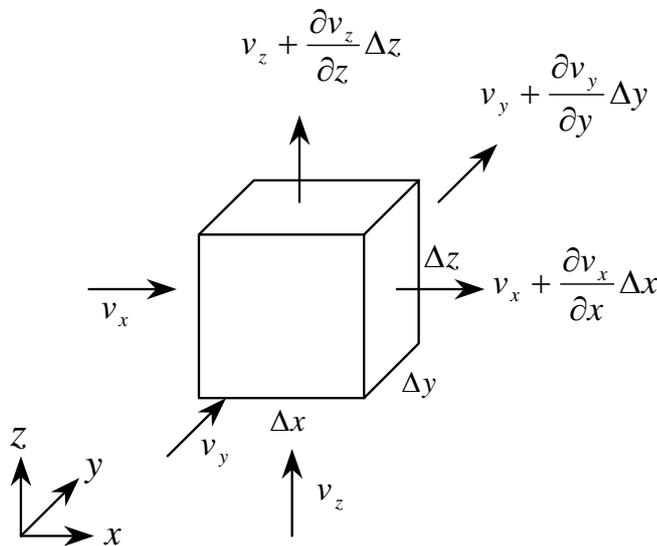


図 5-4 Control Volume

この立方体内を流れが通過し、その成分を xyz 直交座標の三成分に分割して整理すると、立方体の各軸直交面を通過する流れは図 5-4 に示す標記で表す事ができる。ここで、上流側から流入した 1 成分方向の流れ(例えば v_x)は control volume を通過する間に成分方向の増分項 $[(\partial v_x / \partial x) \Delta x]$ だけ変化する事を示している。これにはいくつかの説明があるが、ここでは Istok(1989)の解説を紹介する。

流入(あるいは上流)側で (v_x)の質量流入を有する流れが、微小区間 Δx 間に速度変化を受けた場合、流出(あるいは下流)側では Taylor 展開を適用すると次式で表す事ができる。

$$\rho v_x + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x)\Delta x + \frac{\partial^2}{2!\partial x^2}(\rho v_x)(\Delta x)^2 + \frac{\partial^3}{3!\partial x^3}(\rho v_x)(\Delta x)^3 + \dots \quad (\text{数式 5-2})$$

ここで、 ρ は流体密度

上式の形で用いられる事の多い「微小区間 Δx では高次のべき乗項は無視できる」という仮定を導入すると、流出側の質量流速成分は次式となる。

$$\rho v_x + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) \Delta x \quad (\text{数式 5-3})$$

さらに、体積内で単位体積当たりの sink / source(排水/注入)項 $q (>0$ で排水)を導入、単位時間当たりの流出入流量を三方向成分について総計すると、この体積内での質量保存則から以下の連続の式が誘導できる。

$$\begin{aligned} & \rho v_x \Delta y \Delta z + \rho v_y \Delta z \Delta x + \rho v_z \Delta x \Delta y \\ & - \left(\left(\rho v_x + \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} \Delta x \right) \Delta y \Delta z + \left(\rho v_y + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} \Delta y \right) \Delta z \Delta x + \left(\rho v_z + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} \Delta z \right) \Delta x \Delta y \right) \quad (\text{数式 5-4}) \\ & - \rho q \Delta x \Delta y \Delta z = \frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w n) \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned}$$

ここで、 S_w は飽和度、 n は有効間隙率、

q は体積内の単位体積当たりのシンク/ソース流量 [L^3/TL^3] (排水時、 $q > 0$)

上式は、「左辺第1項の流入量から第2項の流出量と第3項の排水流量を差し引くと、右辺貯留項が残留する」ことを示している。右辺貯留項は、ある体積内の空隙（間隙率で表現）にどれくらいの水が貯まっている（飽和度）程度を示している。

（数式5-4）を整理し、両辺を立方体体積（ $x \ y \ z$ ）で除し、単位体積当たりの収支をみると以下となる。

$$-\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} - \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} - \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} - \rho q = \frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w n) \quad (\text{数式 5-5})$$

定常流解析（時間変化を考慮しない）のときは、時間変化が無視できることから（数式5-5）の右辺項を $\frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w n) = 0$ とした、以下の式が用いられる。

$$-\frac{\partial \rho v_x}{\partial x} - \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} - \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} - \rho q = 0 \quad (\text{数式 5-5'})$$

2) 運動方程式と透水係数テンソル

ここで、Darcy 則を運動の式として左辺流速項 v に適用して、水頭 h を導入する。

Darcy 則は以下のように流れ方向成分に着目したものが一般に知られている。

$$v_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \quad v_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \quad v_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \quad (\text{数式 5-6})$$

一般化表現として透水係数テンソルを用いた各方向成分の流速を示す。

$$\begin{Bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial h}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (\text{数式 5-7})$$

この透水係数テンソルは対称性 ($K_{xy}=K_{yx}$, $K_{yz}=K_{zy}$, $K_{xz}=K_{zx}$) である。

3) 支配方程式

これらの流速 v を (数式 5-5) に代入すると次式を得る。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + \rho K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} + \rho K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + \rho K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} + \rho K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} + \rho K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} + \rho K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \rho q = \frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w n) \end{aligned} \quad (\text{数式 5-8})$$

アインシュタインの縮約 (以後, i, j のみ縮約記号) を用いれば, 以下のとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \rho q = \frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w n) \quad (\text{数式 5-9})$$

$i, j = 1, 2, 3, (1: x, 2: y, 3: z)$

(数式 5-9) を流体密度とダルシー則項に分けて微分を進めると以下のとおり。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \cdot K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} + \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \quad (\text{数式 5-10})$$

ここで, 流体密度 ρ は空間について非圧縮性であるとする上式右辺第一項は 0 となる。よって, (数式 5-10) は次式となる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \quad (\text{数式 5-11})$$

また, (数式 5-9) 右辺時間微分項 ($\partial/\partial t$) を全微分すると以下のとおりとなる。

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho S_w n) = \rho S_w \frac{\partial}{\partial t} (n) + S_w n \frac{\partial}{\partial t} (\rho) + \rho n \frac{\partial}{\partial t} (S_w) \quad (\text{数式 5-12})$$

ここで, 上式の各項に以下の貯留性の解釈を適用する。

$\frac{\partial}{\partial t} (n)$ について

以下の議論は、飽和媒体内の水頭変化による空隙変化とこれに伴う排水/貯留を検討するものとし、不飽和状態ではこの関連による変化は考慮しない。

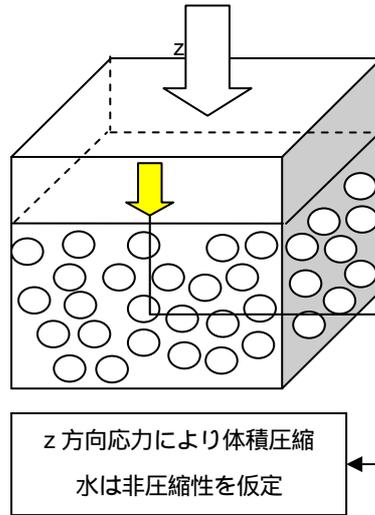
微小帯水層の固体部分のポリューム $(1-n) \times y \times z =$ 一定と考え、 n で微分を行った上で時間微分表示を行うと以下のとおり。

$$\Delta z \left(\frac{\partial n}{\partial t} \right) = (1-n) \frac{\partial(\Delta z)}{\partial t} \quad (\text{数式 5-13})$$

また、微小帯水層（骨格）の圧縮率 を用い $\alpha(1-n) = -\frac{\partial n}{\partial \sigma_z}$ (σ_z : 鉛直有効応力) より以下

のとおりとなる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\alpha(1-n) \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \quad (\text{数式 5-14})$$



土粒子(固体部分)以外の部分を空隙=水分と仮定.この空間を空隙率で表現すると以下のとおり.
固体部分比率 = $1-n$ 水部分比率 = n

土粒子(固体部分)の圧縮率を α とし、圧縮した分空隙率が減った(水分流出)とすると以下の式が成り立つ.

$$\alpha(1-n) = -\frac{\partial n}{\partial \sigma_z}$$

さらに、全応力(一定) = 有効応力 + 空隙水圧より $\frac{\partial \sigma_z}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial t}$ となるため、最終的には以下の形にまとめることができる。

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \alpha(1-n) \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{数式 5-15})$$

ここで、媒体の圧縮は飽和状態($S_w=1$)でのみ生じるとしている。

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho)$ について

流体を非圧縮性($\rho = \text{constant}$)とみると微分項は0となるが、流体が圧縮すると考え、その圧縮率をとると以下のようになる。

$$\beta_\rho = \frac{\partial \rho}{\partial p}$$

また、時間微分表示を行うと、

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \beta_\rho \frac{\partial p}{\partial t}$$

$\frac{\partial}{\partial t}(S_w)$ について

飽和流のみを扱う場合にはこの項は0となる。

飽和流($\frac{\partial S_w}{\partial t} = 0$)を扱うと考え($S_w=1.0$ =一定), また, $\frac{\partial p}{\partial t} = \rho g \frac{\partial h}{\partial t}$ を用いて, これらをまとめる

と以下の地下水の支配方程式が整理される。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - q = [\alpha(1-n) + \beta n] \frac{\partial p}{\partial t} = [\alpha(1-n) + \beta n] \rho g \frac{\partial h}{\partial t} = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{数式 5-16})$$

【メモ】

不圧条件下では実用上, 比貯留係数は比産出率に等しい。被圧条件下では, 水と土粒子マトリックスの圧縮性によって水は貯留あるいは解放される。 10^{-1} のオーダーである比産出率と比較すると, 被圧下の貯留係数は小さく 10^{-4} のオーダー範囲である。

また, 不圧条件下では比貯留係数を有効間隙率 n_e とし, h を不圧面までの高さとするので(数式 1-16)

を適用できる。(参考: 右辺 = $n_e \frac{\partial h}{\partial t}$)

5.2.3. 境界条件および初期条件

1) 境界条件

浸透解析で考慮される事の多い境界条件は以下のものである。

既知水頭境界 (第一種境界, Dirichlet 条件)

既知水頭境界は, 河川, 湖沼, 運河, 海岸, 水たまりといった表面水が帯水層と自由に接触するときにみられる。

浸透解析では水頭値が変数として扱われるが, 既知水頭境界ではこれを変数とは扱わず, 指定された経過時間に対応した既知量を強制的に水頭値として指定する。

$$h(x, t) = H_b(x, t) \quad (\text{数式 5-17})$$

ここで, H_b は既知水頭の時間に対する関数であり, 最も簡単なものは時間に依存せず一定値を導入する。

既知流量境界 (ノイマン条件)

流量値を境界条件とするもので, 境界面を通過する流量で規定される。非流動境界条件の場合は流束に0を与える。

$$K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = -V(x_i, t) \quad (\text{数式 5-18})$$

V は境界面を通過する流速， n_i は境界面に垂直なベクトルの i 座標方向成分である。

半透水性境界（第3種，混合，コーシー，フーリエ，水頭依存境界）

半透水性境界は，帯水層と表面水の間で水が表面水と地下水間の水頭差に依存して移動する境界である（流量あるいは水頭が前もって規定できない）。この境界は表面水域からの漏水を表現するために一般に用いられる。

漏水原理を用いるモデルでは半透水性境界を導入すると便利である。流量はダルシー則を適用することで近似される。動水勾配は半透水性境界河床厚さ間の水頭差である。以下の式により現地検討で未知量となる透水係数 K と層厚 d を漏水抵抗 c と呼ばれる 1 つのパラメタで表現し，半透水性境界を表現する。

$$c(c: \text{漏水抵抗}(leakance)) = \frac{K}{d} (K: \text{透水係数}, d: \text{層厚})$$

ここで， c は次元 $[T^{-1}]$ で示される。

こうして，半透水性境界は以下の形になる。

$$K \frac{\partial h}{\partial x} - c(h - H) = 0 \quad (\text{数式 5-19})$$

h : 地下水水頭[L]

ここで， H : 表面水高さ[L]

K : 帯水層の透水係数[L/T]

半透水性境界では境界における地下水水頭と地下水流量には線形関係にある。よって，非常に大きな c の値を選ぶときには，半透水性境界は既知水頭境界として作用する。反対に，もし c がゼロに近づくと，表面水は地下水系から全く分離される。

2) 初期条件

非定常問題では，計算開始段階での水頭分布を設定する。

$$h(x, t = 0) = H_0(x) \quad (\text{数式 5-20})$$

一般には，初期条件は非定常問題でのみ必要である。しかし，非線形解析では前段階の水頭分布を基に物性および境界条件を設定する事から，定常問題であってもリーズナブルな分布条件を用いるべきである。

5.2.4. 準三次元への近似

三次元方程式を準三次元方程式に変換する。これは，水平方向の地下水流動が鉛直方向に比較して大きいと仮定できるためである。透水係数に 2 桁程度の違いがあれば，鉛直方向の流れを無視できると考える。これは，この程度の透水性のちがいがあれば，流線に屈折が起こって，透水性が高い地層

中の流れは境界とほぼ平行になり，透水性が低い地層中の流れはほぼ鉛直になるためである．
 三次元浸透場での支配方程式を再掲する．

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{数式 5-21})$$

これに対する境界条件，初期条件はそれぞれ以下のとおり．

$$h(x, t) = H_b(x, t)$$

$$K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i = -V(x_i, t)$$

$$h(x, t = 0) = H_0(x)$$

ここで，広域地下水解析を行うにあたり，以下の仮定を導入する．

《準三次元モデルへの仮定》

【仮定】

任意の平面位置 (x, y) において， $z(x_3)$ 方向の全水頭 h は一定である（静水圧分布）：

$$\frac{\partial h}{\partial x_3} = 0$$

【仮定】

仮定 を保ちながら，平行流れのみ扱う（Dupuit-Forchheimer の仮定）

【仮定】

鉛直方向流れ成分を無視できることから，地下水位下の浸透層厚さわたって $z(x_3)$ 方向に積分する事で質量保存を満たす．

地下水面（自由表面）をもつ不圧地下水流は，水面勾配があまり大きくない場合，デュプイの準一様流近似 (uniform flow approximation) を用い，鉛直流速を無視し，水平流速のみを考えればよい．

下図に示した x-z 軸面内の 2 次元地下水流を考える．不圧地下水は，水平流速 u と鉛直流速 w をもつ 2 次元流であり，断面内の流速分布は一様ではない．自由表面近傍の流速 q_s は，

$$q_s = -k \frac{dz}{ds} = -k \sin \beta \quad . \quad k : \text{透水係数}, \quad \beta : \text{自由表面と水平のなす角} . \quad \text{もし}, \quad \beta \text{ が小さければ},$$

$\sin \beta \approx \tan \beta = \frac{dh}{dx}$ とかけ， $q_s \approx u, w \approx 0$ となり，以下のように表現できる．

$$u = -k \frac{dh}{dx}$$

この式が意味することは，微小水平区間では自由表面は水平と近似でき，静水圧近似できるということ．つまり，下図の L 区間において自由表面は dx で分割された区間毎に水平に近似され，トータルでは階段状の水位が形成されるということとなる．

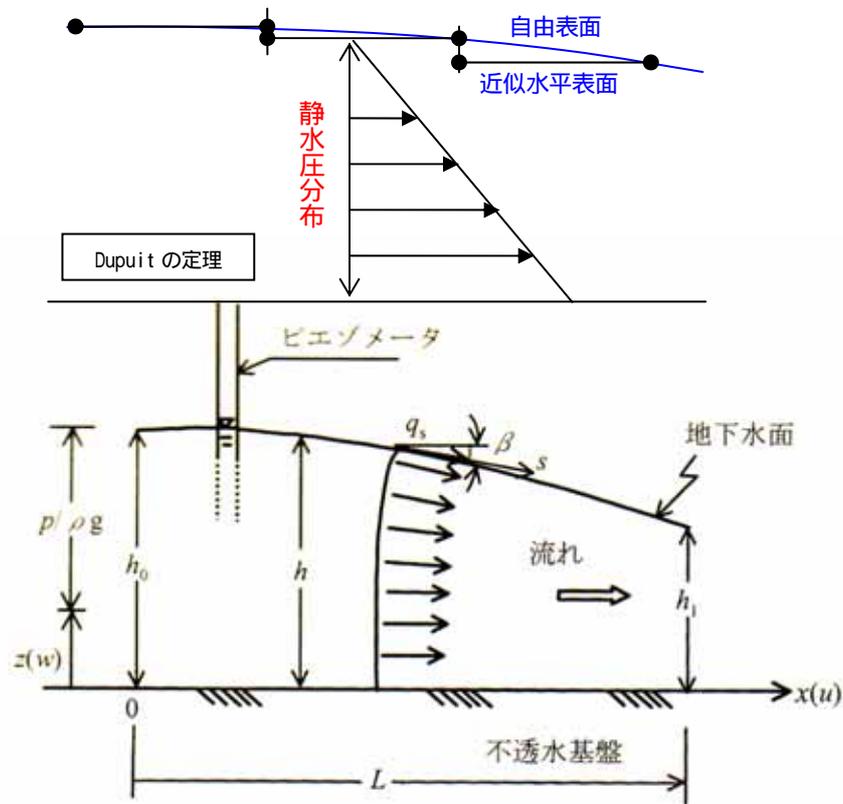


図 5-5 不圧地下水流におけるデュプイの準一様流

ゆえに、 z 方向の積分を行うことで、3次元方向の表現を以下の式により近似する。

$$\int_0^h \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - q \right) dx_3 = \int_0^h S_s \frac{dh}{dt} dz \quad (\text{数式 5-22})$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\int_0^h K_{ij} dx_3 \cdot \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \int_0^h q dx_3 = \int_0^h S_s dz \cdot \frac{dh}{dt} \quad (\text{数式 5-23})$$

$$T_{ij}(h) = \int_0^h K_{ij} dx_3 \quad (\text{数式 5-23a})$$

$$Q(h) = \int_0^h q dx_3 \quad (\text{数式 5-23b})$$

$$S = \int_0^h S_s dx_3 \quad (\text{数式 5-23c})$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(T_{ij}(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x_j} \right) \right) - Q(h) = S(h) \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (\text{数式 5-24})$$

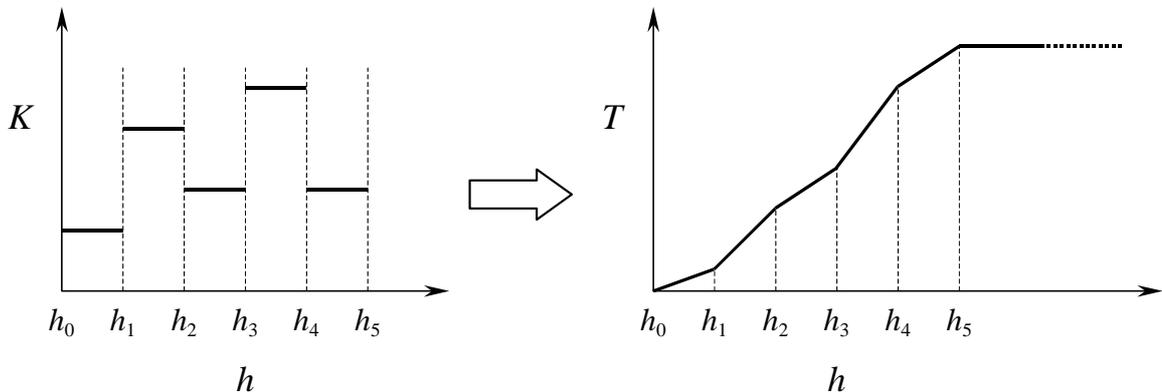
(数式 5-24)の縮約を解くと、以下のとおり。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} + T_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} + T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) - Q = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{数式 5-25})$$

定式は T, S, Q が変数 h の関数となり、非線形問題を表す。各項について以下に解説する。

(1) 透水量係数 T

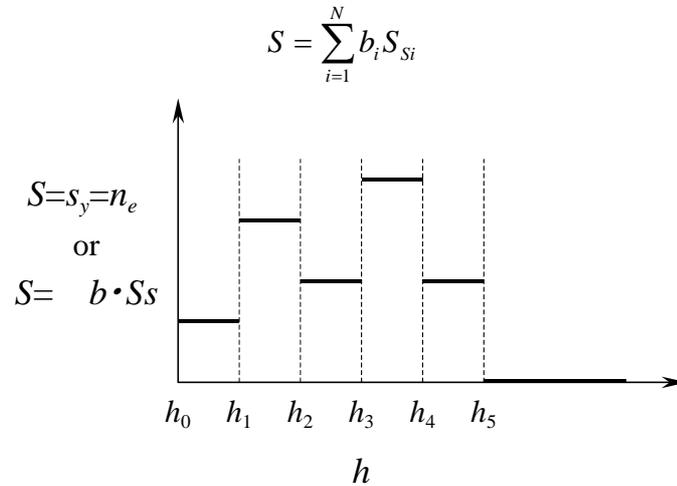
(数式 5-23a)をみると積分は以下の足し合わせに相当する。また、被圧状態では、 h はポテンシャル水頭を表し、実際の浸透断面高さは h ではなく層厚和になる。



(2) 貯留係数 S

貯留係数は「単位面積をもつ土柱において単位地下水頭の変化によって排出される水量」と定義でき、比貯留係数に深さを掛けたものであらわされる。貯留係数は、不圧状態と被圧状態で大きく異なる。

不圧帯水層では実際に地下水面が移動する区間の比産出率 S_y を S とおく。一般に S_y は有効間隙率に等しいと考えられる。被圧帯水層では層厚さにおける土の圧縮性に依存する。



不圧地下水で有効間隙率を下記の理由で近似的にもちいている。

不圧地下水での貯留係数は、正確には $S = n_e[\text{無次元}] + S_s[L^{-1}] \times D[m]$ となる。ところが、 $n_e \gg S_s * D$ より $S \approx n_e$ とされている。

(3) 流量 Q

q が微小立方体内の流量を考えているのに対して Q は q を地下水面高さで積分する事で、単位面積を有する土柱内の流量を考える。

境界条件で既知流量境界の(数式 5-18)がそのまま適用されるが境界においても静水圧分布条件を確保しなければならない。

既知流量境界は以下の積分を考慮する。

$$\int_0^h K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} dx_3 \cdot n_i = - \int_0^h V(x_i, t) \quad (\text{数式 5-26})$$

$$T_{ij}(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} \cdot n_i = - \int_0^h V(x_i, t) \quad (\text{数式 5-27})$$

流速 V を浸透断面高さにわたって積分されたものであり、流束 Q に一致するディメンジョンをもつ。ゆえに

$$T_{ij}(h) \frac{\partial h}{\partial x_j} \cdot n_i = -Q(x_i, t) \quad (\text{数式 5-28})$$

5.3. 広域地下水モデルの有限要素法による解法

前章にあるとおり、地下水解析における準三次元の支配方程式は以下のとおりである。

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[T_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right] = S \frac{\partial h}{\partial t} + Q \quad (\text{数式 5-29})$$

(ただし、 $i, j = 1, 2$)

(数式 5-29)を有限要素近似で表す。まず、全領域を所定の多角形で分割し、この多角形を要素、多角形を構成する頂点を節点と呼ぶ。各多角形は、節点と隣り合う節点で結ばれる境界面で結合しているものとし、浸透解析では各節点に水頭をもつことになる。

ここで、(数式 5-29) 式はあくまでも一つの微小要素内での釣り合いを考慮したものであるため、微小とは言えない大きさの要素にわたっての釣り合い関係を評価する必要がある。このためには、要素内での水頭分布を近似する必要がある。この水頭近似に用いられるのが内挿関数と呼ばれるものである。

5.3.1. 定常モデルによる有限要素解法

ある要素 E のなかの内挿関数は、以下のように表現できる。

$$h(x, y) = \alpha + \beta x + \gamma y \quad (\text{数式 5-30})$$

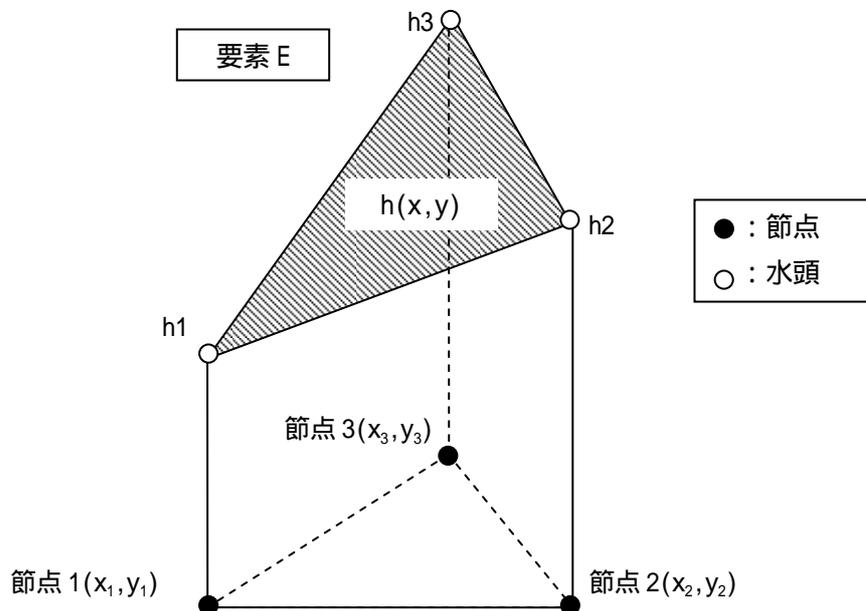


図 5-6 三角形要素における節点と水頭の考え方

ここで、それぞれの節点に対して内挿関数を適用すると以下のように表現できる。

$$\left. \begin{aligned} h(x_1, y_1) &= h_1 = \alpha + \beta x_1 + \gamma y_1 \\ h(x_2, y_2) &= h_2 = \alpha + \beta x_2 + \gamma y_2 \\ h(x_3, y_3) &= h_3 = \alpha + \beta x_3 + \gamma y_3 \end{aligned} \right\} \quad (\text{数式 5-31})$$

これらを連立方程式として解くと、各係数 (α, β, γ) は以下ようになる。

$$\alpha = \frac{\begin{vmatrix} h_1 & x_1 & y_1 \\ h_2 & x_2 & y_2 \\ h_3 & x_3 & y_3 \end{vmatrix}}{D} \quad \beta = \frac{\begin{vmatrix} 1 & h_1 & y_1 \\ 1 & h_2 & y_2 \\ 1 & h_3 & y_3 \end{vmatrix}}{D}$$

(数式 5-32)

$$\gamma = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & h_1 \\ 1 & x_2 & h_2 \\ 1 & x_3 & h_3 \end{vmatrix} / D \quad D = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = 2F_{\Delta}$$

ここで、 F_{Δ} は節点 1, 2, 3 を結んだ三角形の面積。上記小行列式に以下の記号を導入し、(数式 5-31) に代入すると、

$$\begin{aligned} A_1 &= x_2 y_3 - y_2 x_3 & B_1 &= y_2 - y_3 & C_1 &= x_3 - x_2 \\ A_2 &= x_3 y_1 - y_3 x_1 & B_2 &= y_3 - y_1 & C_2 &= x_1 - x_3 \\ A_3 &= x_1 y_2 - y_1 x_2 & B_3 &= y_1 - y_2 & C_3 &= x_2 - x_1 \end{aligned} \quad (\text{数式 5-33})$$

$$h(x, y) = (h_1(A_1 + B_1 x + C_1 y) + h_2(A_2 + B_2 x + C_2 y) + h_3(A_3 + B_3 x + C_3 y)) / D \quad (\text{数式 5-34})$$

となる。この式は、要素 E 中の任意の点の水頭を各節点 (節点 1, 節点 2, 節点 3) の水頭値を用いて表現している。

この算定した水頭にダルシー則を適用する。ただし、要素内の透水係数は k_f の一定値とする。

$$\begin{aligned} v_x &= -k_f \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = -k_f (h_1 B_1 + h_2 B_2 + h_3 B_3) / D \\ v_y &= -k_f \cdot \frac{\partial h}{\partial y} = -k_f (h_1 C_1 + h_2 C_2 + h_3 C_3) / D \end{aligned} \quad (\text{数式 5-35})$$

透水係数と飽和帯の厚さは、節点よりも要素内の特性として表現される。このため、節点それぞれに透水係数または飽和帯の厚さを割り当てるならば、平均化操作が必要である。

ここで、三角形の各辺を横切る流量を Q_{S1} 、 Q_{S2} 、 Q_{S3} とする。これらについて要素内の連続性を考えるため、辺を横切る流量を要素の 3 節点に割り当てることを考える。節点流量を W_1 、 W_2 、 W_3 とし、どの節点にもそれを挟む 2 つの辺を横切る流量の半分を割り当て、要素内の連続性 ($Q_{S1} + Q_{S2} + Q_{S3} = 0$) を適用すると、以下の式が考えられる。

$$\begin{aligned} W_1 &= 0.5Q_{S3} + 0.5Q_{S2} = -0.5Q_{S1} \\ W_2 &= 0.5Q_{S1} + 0.5Q_{S3} = -0.5Q_{S2} \\ W_3 &= 0.5Q_{S2} + 0.5Q_{S1} = -0.5Q_{S3} \end{aligned} \quad (\text{数式 5-36})$$

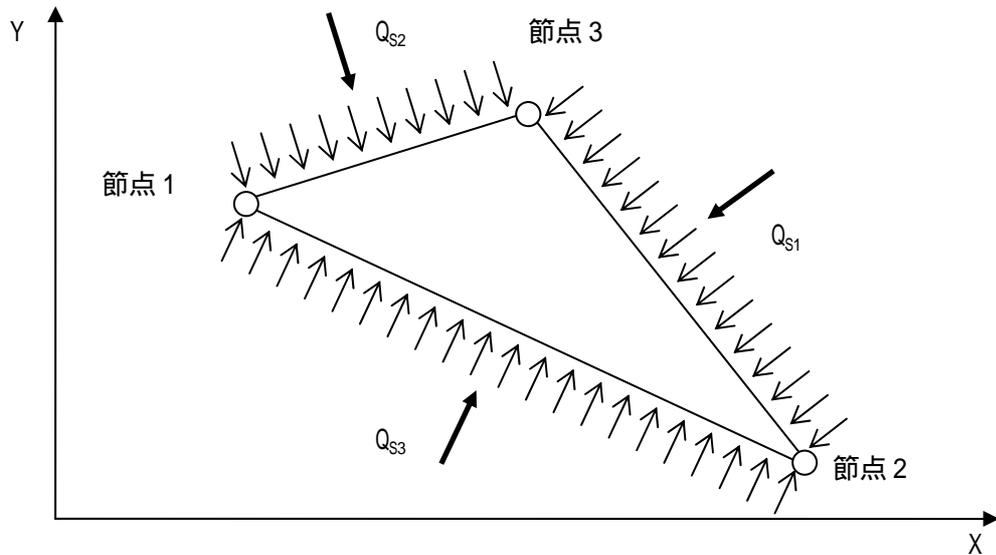


図 5-7 節点流量の定義

各辺を横切る Q_{S1} 、 Q_{S2} 、 Q_{S3} をダルシー流速 W_1 、 W_2 、 W_3 で表現すると以下のとおりとなる。ただし、飽和帯の厚さを m とする。

$$Q_{S1} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_2 - y_3 \\ -(x_2 - x_3) \end{pmatrix} \cdot m \quad Q_{S2} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_3 - y_1 \\ -(x_3 - x_1) \end{pmatrix} \cdot m \quad (\text{数式 5-37})$$

$$Q_{S3} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 - y_2 \\ -(x_1 - x_2) \end{pmatrix} \cdot m$$

(数式 5-36) に (数式 5-35) , (数式 5-37) を代入し, $T=k_f \cdot m$ を用いると, 要素内の節点流量を得る。

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{T}{2D} [h_1(B_1B_1 + C_1C_1) + h_2(B_2B_1 + C_2C_1) + h_3(B_3B_1 + C_3C_1)] \\ W_2 &= \frac{T}{2D} [h_1(B_2B_1 + C_2C_1) + h_2(B_2B_2 + C_2C_2) + h_3(B_3B_2 + C_3C_2)] \\ W_3 &= \frac{T}{2D} [h_1(B_3B_1 + C_3C_1) + h_2(B_3B_2 + C_3C_2) + h_3(B_3B_3 + C_3C_3)] \end{aligned} \quad (\text{数式 5-38})$$

水頭以外の変数を $E_{ij} = (B_iB_j + C_iC_j) \cdot T / (2D)$ とすると, (数式 5-38) は以下のような簡単な式となる。

$$W_i = \sum_{j=1}^3 E_{ij} \cdot h_j \quad (\text{数式 5-39})$$

ここに, $i=1,2,3, j=1,2,3$ である。

これより，節点の局所標示を全体標示に変換する．節点の全体番号 k を要素番号 e と局所節点番号 i として与えると以下ようになる．

$$k = n(e, i) \quad (\text{数式 5-40})$$

ここに， $i=1,2,3$ ， $e=1,2, \dots, M$ である．

隣り合う要素のかどの点として表現される節点は，複数の組み合わせ (e, i) で表現されるが，それら全ては(数式 5-40)によりただ一つの全体節点番号として変換される．

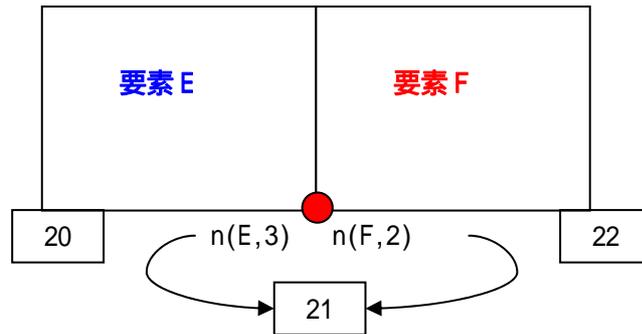


図 5-8 局所標示から全体標示への変換

要素 E についての節点座標，水頭値，流量は次のように変換される．

$$x_i^e \rightarrow x_k \quad y_i^e \rightarrow y_k \quad h_i^e \rightarrow h_k \quad W_i^e \rightarrow W_k^e \quad (\text{数式 5-41})$$

ここに， $k = n(e, i)$ である．また，流量については隣り合う要素の重複した節点のうち要素 E に係わる流量の意味で W_k^e の表現としている．

現在は要素 E の諸元のみを算出対象としているため，要素の任意水頭 $h(x, y)$ を算出する際，三つのベクトル A_i^e, B_i^e, C_i^e の 3 成分以外はすべてゼロの N 個のベクトルに変換される．そして，結果的には要素 E の各節点の流量を算出する際に用いる要素行列 E_{ij}^e は 9 成分以外はすべてゼロである N 行 N 列の行列に変換される．

$$A_i^e \rightarrow A_k^e \quad B_i^e \rightarrow B_k^e \quad C_i^e \rightarrow C_k^e \quad E_{ij}^e \rightarrow E_{kl}^e \quad (\text{数式 5-42})$$

ここに， $i=1,2,3$ ， $j=1,2,3$ ， $k = n(e, i)$ ， $l = n(e, i)$ であり，他の全ての成分 (k, l) については $A_k^e = B_k^e = C_k^e = E_{kl}^e = 0$ となる．要素方程式を全体番号で表現すると以下ようになる．

$$W_k^e = \sum_{l=1}^n E_{kl}^e \cdot h_l \quad (\text{数式 5-43})$$

なお，要素 E に含まれない全節点 k についての W_k^e は自動的にゼロである ($\because E_{ij}^e = 0$)．

全要素の方程式が各節点で連続性を満たすように全体方程式の中に集められる．これは節点 k への全要素の流れの寄与

W_k^e と節点 k への外部からの流入（流出）量の総和がゼロでなければならないことを意味する。

$$\sum_{e=1}^M W_k^e - Q_k = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (\text{数式 5-44})$$

(数式 5-44)に(数式 5-43)を代入すると以下のとおり。

$$\sum_{e=1}^M \left[\sum_{l=1}^N E_{kl}^e h_l \right] - Q_k = 0 \quad (\text{数式 5-45})$$

または,

$$\sum_{l=1}^N \left[\sum_{e=1}^M E_{kl}^e \right] h_l - Q_k = 0 \quad (k = 1, \dots, N) \quad (\text{数式 5-46})$$

一般形で表すと,

$$\sum_{l=1}^N a_{kl} h_l - Q_k = 0 \quad (k = 1, \dots, N) \quad (\text{数式 5-47})$$

5.3.2. 非定常モデルによる有限要素解法

水頭分布を内挿関数で近似した(数式 5-31)を利用することで, 実際の水頭分布と幾ばくかの差違が生じる。つまり, 支配方程式 $L(h(x,y,t))=0$ に内挿近似 h^N を導入すると, 残差があることから以下のように式値は0とはならない。

$$L(h^N(x, y, t)) \equiv \frac{\partial}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} \right) - Q - S \frac{\partial h^N}{\partial t}$$

$$L(h^N(x, y, t)) \neq 0 \quad (\text{数式 5-48})$$

そこで, 残差方程式に重みを掛けたものを領域全体にわたって平均化(積分)することで, 全体領域 R での全体的な残差を0にする重み付き残差法(WRM)を用いる。

$$\int_R L(h^N(x, y, t)) W(x, y) dR = 0 \quad (\text{数式 5-49})$$

ここで, 重み関数 W の満たすべき条件について考えてみる。

残差が生じているのは節点間あるいは要素内の地点での式値であり, 各節点では残差は生じないことから, 当該節点水頭を求める場合は $W_n(x_n, y_n) = 1$ (Lotation的役割をイメージ), それ以外の節点では $W = 0$ をとるようなものとなる。

一般に, 重み付き残差法に用いられる重み関数 W にはいくつかのものが知られているが, ここでは重み関数 W に内挿関数 N を適用する Galerkin 法を用いる。

1) Galerkin 法による定式化

(数式 5-48)に重み関数 W を掛けて、領域全体にわたって積分する。

$$\int_R \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} \right) - Q - S \frac{\partial h^N}{\partial t} \right] W_n dR = 0 \quad (\text{数式 5-50})$$

W を各項に掛けそれぞれの整理を試みる。

$$\int_R \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} \right) W_n - Q W_n - S \frac{\partial h^N}{\partial t} W_n \right] dR = 0 \quad (\text{数式 5-51})$$

ここで、 h^N が要素内で線型分布している(三角形要素ではこれに相当する)場合には、 h^N の1次の空間微分項は定数 $\left(\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial h^N}{\partial x_j} \right) = 0 \right)$ となり、さらに T_{ij} が要素内で一定値(均質)であるなら、(数式

5-51)の透水量係数を含んだ微分項は $0 \left(\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_i} = 0 \right)$ となり、(数式 5-51)を解くことができない。

そこで、以下の手順で(数式 5-51)を変形する。まず、各高次微分項は部分積分技法を用いて変形する。

$$\int_R \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} \right) W_n \right] dR = \int_R \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} W_n \right) \right] dR - \int_R \left[\frac{\partial W_n}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} \right) \right] dR \quad (\text{数式 5-52})$$

さらに、Gauss の積分定理から次式が誘導できる。

$$\begin{aligned} \int_R \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} W_n \right) \right] dR &= \int_L W_n T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} n_i dL \\ \therefore \int_R \operatorname{div} \left(T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} W_n \right) dR &= \int_L T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} W_n \cdot n_i dL \end{aligned} \quad (\text{数式 5-53})$$

ここで、 n_i は境界に垂直な法線の $x(x_1)$ および $y(x_2)$ 方向成分であり、境界からの水の流入出を表している。(数式 5-52 及び 5-53)をまとめると以下のとおりになる。

$$\int_L \left(T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} W_n \cdot n_i \right) dL - \int_R \left(\frac{\partial W_n}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial x_j} \right) \right) dR - \int_R S \frac{\partial h^N}{\partial t} \cdot W_n dR - \int_R Q \cdot W_n dR = 0 \quad (\text{数式 5-54})$$

(数式 5-54)の左辺第 1 積分項は境界面を通過する流入(流出)を示しているの以下のように表現できる。ただし、境界面流入(流出)のうち、 x 方向、 y 方向の流入(流出)を Q_x^N 、 Q_y^N とする。

$$\int_L W_n \cdot T_{ij} \frac{\partial h^N}{\partial t} \cdot n_i dL = \int_L W_n [-Q_x^N - Q_y^N] dL = - \int_L W_n \left[\sum_{i=1}^2 Q_{xi}^N \right] dL \quad (\text{数式 5-55})$$

ここで、 h^N を内挿近似式で置換する。

$$\int_R \left(\frac{\partial W_n}{\partial x_i} \cdot T_{ij} \frac{\partial \sum_{m=1}^M N_m h_m}{\partial x_j} \right) dR + \int_L W_n \left(\sum_{i=1}^2 Q_{xi}^N \right) dL + \int_R Q W_n dR + \int_R S \frac{\partial \sum_{m=1}^M N_m h_m}{\partial t} W_n dR = 0 \quad (\text{数式 5-56})$$

さて、全体領域 R を有限要素に分割すると各要素領域 R^e でも上式が成立する、すなわち以下となる。

$$\int_R L(h^N(x, y, t)) W(x, y) dR = \sum_1^{\text{Num.Elements}} \int_{R^e} L(h^N(x, y, t)) W(x, y) dR^e \quad (\text{数式 5-57})$$

$$\int_{R^e} \left(\frac{\partial W_n^e}{\partial x_i} \cdot T_{ij} \frac{\partial \sum_{m=1}^M N_m^e h_m^e}{\partial x_j} \right) dR^e + \int_{L^e} W_n^e \left(\sum_{i=1}^2 Q_{xi}^N \right) dL^e + \int_{R^e} Q W_n^e dR^e + \int_{R^e} S \frac{\partial \sum_{m=1}^M N_m^e h_m^e}{\partial t} W_n^e dR^e = 0 \quad (\text{数式 5-58})$$

これより全体領域に対しては、要素毎の(数式 5-58)を全要素にわたって連立(総和)した方程式が得られる。

$$\sum_{e=1}^{\text{Num.Elements}} \left[\int_{R^e} \left(\frac{\partial W_n^e}{\partial x_i} \cdot T_{ij} \frac{\partial \sum_{m=1}^M N_m^e h_m^e}{\partial x_j} \right) dR^e + \int_{L^e} W_n^e \left(\sum_{i=1}^2 Q_{xi}^N \right) dL^e + \int_{R^e} Q W_n^e dR^e + \int_{R^e} S \frac{\partial \sum_{m=1}^M N_m^e h_m^e}{\partial t} W_n^e dR^e \right] = 0 \quad (\text{数式 5-59})$$

各節点水頭値 h_m は $W(x, y) = 1$ 時の値であり、座標には依存しないので積分の外に出る。よってこれをマトリックス表示すると以下のようである。

$$\boxed{[A_{nm}] \{h_m\} + [F_{nm}] \left\{ \frac{dh_m}{dt} \right\} = \{Q_m\} - \{D_m\}} \quad (\text{数式 5-60})$$

ここで、

$$\begin{aligned}
[A_{nm}] &= \sum_{e=1}^{Num.Elements} [A_{nm}]^e \\
&= \sum_{e=1}^{Num.Elements} \int_{R^e} \left(\frac{\partial W_n^e}{\partial x_i} \left(T_{ij} \frac{\partial N_m^e}{\partial x_j} \right) \right) dR^e
\end{aligned}
\tag{数式 5-61}$$

$$\begin{aligned}
\{Q_m\} &= - \sum_{e=1}^{Num.Elements} \{Q_m\}^e \\
&= - \sum_{e=1}^{Num.Elements} \int_{L^e} W_n^e N_m^e \sum_{i=1}^2 Q_{xi} dL^e
\end{aligned}
\tag{数式 5-62}$$

(要素境界を横切る流入(流出)量)

$$\begin{aligned}
\{D_m\} &= \sum_{e=1}^{Num.Elements} \{D_m\}^e \\
&= \sum_{e=1}^{Num.Elements} \int_{R^e} Q W_m^e dR^e
\end{aligned}
\tag{数式 5-63}$$

(要素内に流入(流出)する量)

$$\begin{aligned}
[F_{nm}] &= \sum_{e=1}^{Num.Elements} [F_{nm}]^e \\
&= \sum_{e=1}^{Num.Elements} \int_{R^e} S N_m^e W_n^e dR^e
\end{aligned}
\tag{数式 5-64}$$

(数式 5-61~64)を見ると、積分は内挿関数 N と重み関数 W (Galerkin 法では両者は一致) の微積分となっている。

ここで、以下の簡略化を導入する。

- (1) 透水量係数 T は要素内で一定であると考え、透水量係数 T は節点上の全水頭 h に依存するため、 T は要素内では h と同様に内挿関数による近似を行なう。よって、 $T = T_l N_l^e$ (ここで、 l は要素節点番号) と表すが、これは節点値の平均値 \bar{T} である。
- (2) 境界面で定義される断面通過流束 Q については上式では節点で定義される流束値の内挿式を示しているが、三角形要素内では一様分布とする。
- (3) 貯留成分では、飽和状態の貯留係数 S は要素内では均一であるが、不圧状態では節点の全水頭値に依存する。よって、 $S = S_l N_l^e$ (ここで、 l は要素節点番号) と表すが、これは節点値の平均値 \bar{S} である。

また、 $[F]$ はマトリックスを表しているが、Neuman の提唱する差分法で用いられる技法の適用である Lumped Mass Method を適用して、ベクトル化する。

ここで、以下の三角形（定歪）要素における内挿関数の微分および積分を導入する。また、 $W=N$ とした。

$$\begin{aligned}
 \int_{R^e} N_j dR^e &= \frac{\Delta}{3} \\
 \int_{R^e} N_i N_j dR^e &= \frac{\Delta}{12} & \int_{R^e} N_i N_i dR^e &= \frac{\Delta}{6} \\
 \int_{R^e} \frac{\partial N_i}{\partial x} dR^e &= \frac{b_i}{2} & \int_{R^e} \frac{\partial N_i}{\partial z} dR^e &= \frac{c_i}{2} \\
 \int_{R^e} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} dR^e &= \frac{b_i b_j}{4\Delta} & \int_{R^e} \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial z} dR^e &= \frac{b_i c_j}{4\Delta} & \int_{R^e} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} dR^e &= \frac{c_i c_j}{4\Delta}
 \end{aligned}
 \tag{数式 5-65}$$

(数式 5-65)を(数式 5-61~65)に代入する。

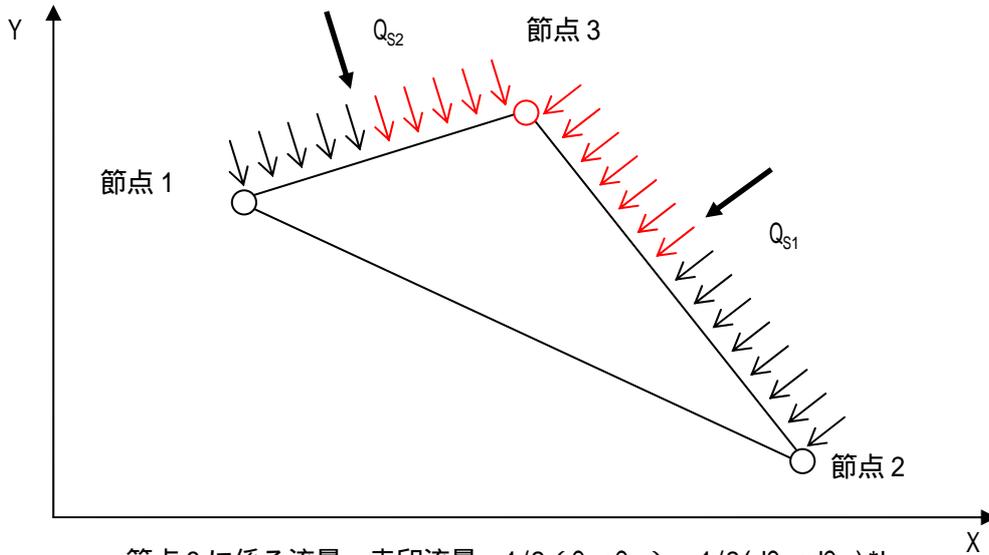
$$\begin{aligned}
 [A_{ij}]^e &= \int_{R^e} \left[\begin{array}{l} \frac{\partial W_i^e}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_i^e}{\partial x} \left(T_{xy} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial W_i^e}{\partial y} \left(T_{yx} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} \right) + \frac{\partial W_i^e}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} \right) \end{array} \right] dR^e \\
 &= \frac{1}{4\Delta} \left\{ T_{xx} b_i b_j + T_{xy} b_i c_j + T_{yx} b_j c_i + T_{yy} c_i c_j \right\} \\
 [A_{ij}]^e &= \frac{1}{4\Delta} \left\{ \begin{array}{l} T_{xx} \begin{bmatrix} b_1 b_1 & b_1 b_2 & b_1 b_3 \\ b_2 b_1 & b_2 b_2 & b_2 b_3 \\ b_3 b_1 & b_3 b_2 & b_3 b_3 \end{bmatrix} + T_{yy} \begin{bmatrix} c_1 c_1 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_2 c_1 & c_2 c_2 & c_2 c_3 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3 c_3 \end{bmatrix} \\ + T_{xy} \begin{bmatrix} b_1 c_1 & b_1 c_2 & b_1 c_3 \\ b_2 c_1 & b_2 c_2 & b_2 c_3 \\ b_3 c_1 & b_3 c_2 & b_3 c_3 \end{bmatrix} + T_{yx} \begin{bmatrix} c_1 b_1 & c_1 b_2 & c_1 b_3 \\ c_2 b_1 & c_2 b_2 & c_2 b_3 \\ c_3 b_1 & c_3 b_2 & c_3 b_3 \end{bmatrix} \end{array} \right\}
 \end{aligned}
 \tag{数式 5-67}$$

透水係数テンソルは対称であるから、 $T_{xy}=T_{yx}$ であり、これを代入すると、(数式 5-67)の $[A]^e$ マトリックスも対称になる。

$$[A_{ij}]^e = \frac{1}{4\Delta} \left\{ \begin{array}{l} T_{xx} \begin{bmatrix} b_1 b_1 & b_1 b_2 & b_1 b_3 \\ b_2 b_1 & b_2 b_2 & b_2 b_3 \\ b_3 b_1 & b_3 b_2 & b_3 b_3 \end{bmatrix} + T_{yy} \begin{bmatrix} c_1 c_1 & c_1 c_2 & c_1 c_3 \\ c_2 c_1 & c_2 c_2 & c_2 c_3 \\ c_3 c_1 & c_3 c_2 & c_3 c_3 \end{bmatrix} \\ + T_{xy} \begin{bmatrix} b_1 c_1 + c_1 b_1 & b_1 c_2 + c_1 b_2 & b_1 c_3 + c_1 b_3 \\ b_2 c_1 + c_2 b_1 & b_2 c_2 + c_2 b_2 & b_2 c_3 + c_2 b_3 \\ b_3 c_1 + c_3 b_1 & b_3 c_2 + c_3 b_2 & b_3 c_3 + c_3 b_3 \end{bmatrix} \end{array} \right\}
 \tag{数式 5-68}$$

$$\{Q_j\}^e = -\int_{L^e} W_i^e N_j (Q_{xj} + Q_{yj}) dL = -\frac{(L(Q_{xj} + Q_{yj}))_j}{2} \quad (\text{数式 5-69})$$

(節点 j に係わる辺を横切る 1/2 の流量が節点流量として換算される)



節点3に係る流量 = 赤印流量 = $1/2 (Q_{s1} + Q_{s2}) = 1/2 (dQ_{s1} + dQ_{s2}) * L$

$$\{D_j\}^e = \int_{R^e} Q W_i^e dR^e = \frac{Q\Delta}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (\text{数式 5-70})$$

(各要素への流入(流出)量は3等分される.)

$$[F_{ij}]^e = \int_{R^e} S N_j^e W_i^e dR^e = \frac{\bar{S}\Delta}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{数式 5-71})$$

ここで、差分法で用いられるように貯留項(時間微分項の係数項)は対角項に集約される形にするため、lumped matrix 法を用いると次式となる。

$$[F_{ij}]^e = \frac{\bar{S}\Delta}{12} \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} = \frac{\bar{S}\Delta}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{数式 5-72})$$

2) 時間項の取り扱いと非線形特性の考慮

解くべきマトリクス方程式は以下のとおりであるが、時間項については有限要素法によらず差分法により計算する。計算ステップとしては、最初に仮定水位を設定し、これによってマトリクス方程

式を解き，収束条件に至らなければ，水位を再設定し再度マトリクス方程式を解くというルーチンを追う．

$$[A_{nm}]\{h_m\} + [F_{nm}]\left\{\frac{dh_m}{dt}\right\} = \{Q_n\} - \{D_n\} \quad (\text{数式 5-73})$$

扱い易くするために，上式右辺ベクトル項を一まとめにする．

$$[A_{nm}]\{h_m\} + [F_{nm}]\left\{\frac{dh_m}{dt}\right\} = \{C_n\} \quad (\text{数式 5-74})$$

差分法における一般式は差分重みパラメータ ω を用いると次式で表される．

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{nm}]^{k+1} + \omega [A_{nm}]^{k+1} \right\} \{h_m\}^{k+1} \\ & = \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{nm}]^k - (1-\omega)[A_{nm}]^k \right\} \{h_m\}^k + \left\{ (1-\omega)\{C_n\}^k + \omega\{C_n\}^{k+1} \right\} \end{aligned} \quad (\text{数式 5-75})$$

ここで， ω は $0 \leq \omega \leq 1$ の範囲にある実数をとることができ，特に以下が知られている．

$\omega = 1$: 後退差分

$\omega = 1/2$: 中央差分

また， $[A]$ ， $[F]$ ， $\{C\}$ を確定するためには(数式 5-75)にみられるように， h^{k+1} が必要である．そこで，推定による h^{k+1} からこれらの係数マトリクスや定数ベクトル項を求め，収束計算を行なう．

しかし，プログラム GWAP では，(数式 5-75)の全ての係数マトリクス($[A]$ ， $[F]$)や定数ベクトル($\{C\}$)項にステップ($k+1/2$)での値を用いる．この場合も同様に $h^{k+1/2}$ を推定するが，推定時間間隔を t から $t/2$ にすることになり，推定精度が幾分向上し，結果的に収束性が増すことになる．

$$\begin{aligned} & \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{nm}]^{k+1/2} + \omega [A_{nm}]^{k+1/2} \right\} \{h_m\}^{k+1/2} \\ & = \left\{ \frac{1}{\Delta t} [F_{nm}]^{k+1/2} - (1-\omega)[A_{nm}]^{k+1/2} \right\} \{h_m\}^k + \{C_n\}^{k+1/2} \end{aligned} \quad (\text{数式 5-76})$$

また， $h^{k+1/2}$ の推定には以下の公式が用いられる．

各タイムステップでの最初の繰り返し計算には次式を用いる．

$$\begin{aligned} \frac{h_m^{k+1/2} - h_m^k}{\frac{\Delta t_k}{2}} &= \frac{h_m^k - h_m^{k-1}}{\Delta t^{k-1}} \\ \therefore h_m^{k+1/2} &= h_m^k + \frac{\Delta t^k}{2\Delta t^{k-1}} (h_m^k - h_m^{k-1}) \end{aligned} \quad (\text{数式 5-77})$$

ここで， $t^k = t^{k+1} - t^k$

各繰り返し過程に入ってから次式を用いる．

$$h_m^{k+1/2} = \frac{1}{2}(h_m^k + h_m^{k+1}) \quad (\text{数式 5-78})$$

なお、後退差分の場合は以下の式を用いる。

$$\frac{h_m^{k+1} - h_m^k}{\Delta t^k} = \frac{h_m^k - h_m^{k-1}}{\Delta t^{k-1}} \quad (\text{数式 5-79})$$

$$\therefore h_m^{k+1} = h_m^k + \frac{\Delta t^k}{\Delta t^{k-1}}(h_m^k - h_m^{k-1}) \quad (\text{数式 5-80})$$

6. 地上部水収支モデルと地下水解析モデルの結合

地上部水収支モデルである SHER モデルと地下水解析モデルである GWAP を結合し、水循環モデルの構築を図る（**図 6-1**）。

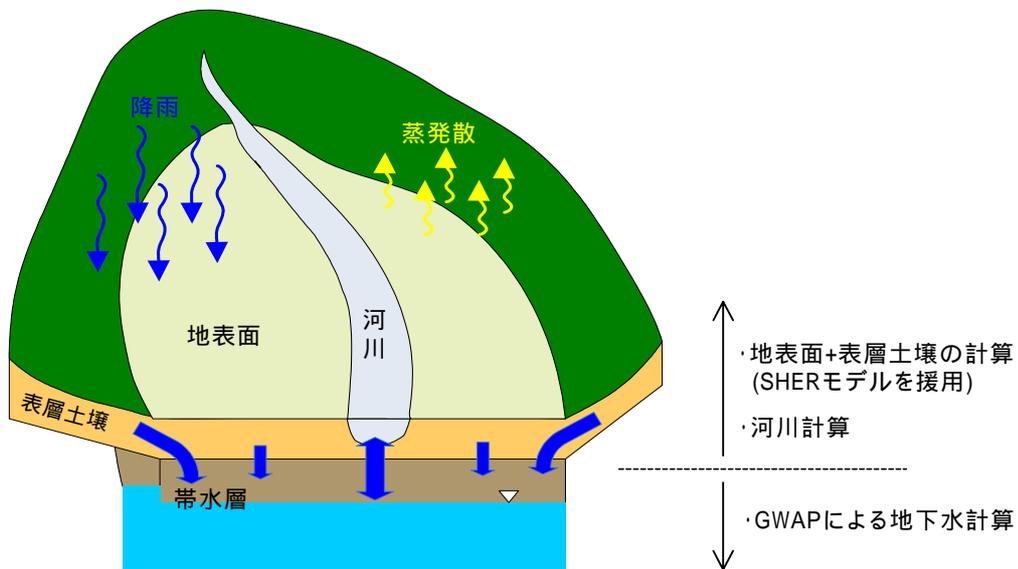


図 6-1 地表流モデルと地下水モデルの結合の概念

SHER モデルは一般的に集中型モデルとして扱われる。しかし、地下水への浸透が一点集中的に行われると、GWAP の有限要素格子単位の計算を有効に活用できない。このため、GWAP の有限要素格子単位の合わせて、地上部水収支モデルも格子単位の計算を行うものとした。地上部水収支計算の結果を地下水へと伝達する様子を**図 6-1**に示す。

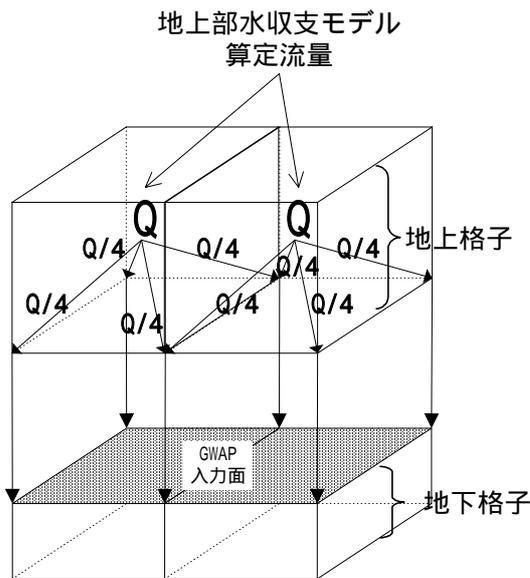


図 6-2 表流水モデルと地下水モデルの関係

地上部水収支モデルは、GWAP 地下格子の上に組み込まれ地上格子の役割を果たす。流域に降った雨は地上格子モデルでの一連の過程（ダム補給、取水、還元、蒸発散等）を経て、涵養水分が GWAP に入力される。本研究目的の背景には「水資源の有効利用」があり、洪水解析の併用は必ずしも必要ない。このため、計算時間の短縮化やデータ収集・蓄積の効率化の観点から日計算をベースにした水収支計算を行った。

地上部水収支モデルは、先に紹介したデータベースと融合したパッケージとするため、Excel ベースで開発を行った。このため、条件入力はパソコンを利用する人であれば比較的身近なインターフェースを通して実行可能である。データベースと地上部水収支機能、そして、実行形式の GWAP との計算関係は図 6-3 のようになる。

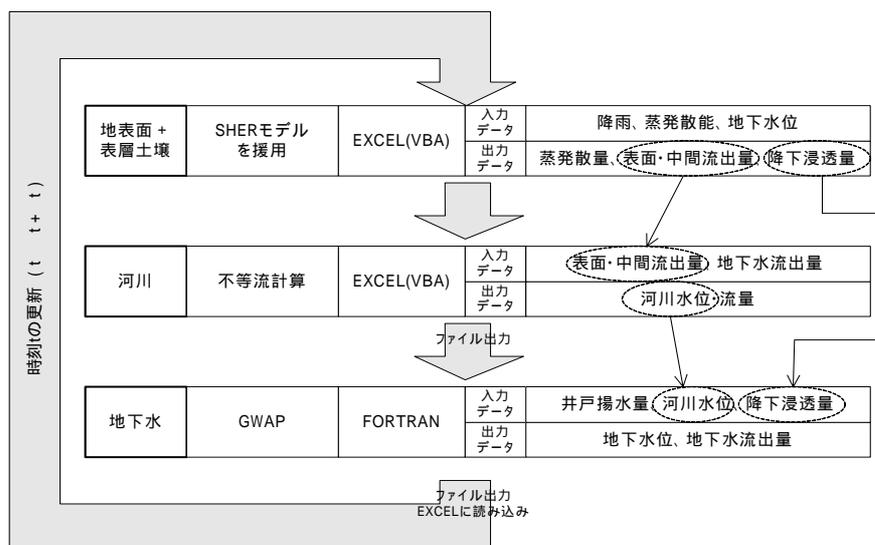


図 6-3 地上部水収支計算，GWAP の計算順序

第2編 実流域への適用

7. 両筑平野での地下水解析

7.1. 資料収集

資料収集範囲は、水収支モデル(地表流モデル)および地下水モデルの解析範囲内とする。両筑平野での収集範囲は次のとおりである。

地下水の流動を考慮しなければならないのは、北および東側は山地と平地の境界からであり、南側は筑後川、西側は宝満川までと考えられる。したがって、資料収集範囲は、**図 7-1** に示した黒点線と2河川(筑後川, 宝満川)に囲まれた地域とする。

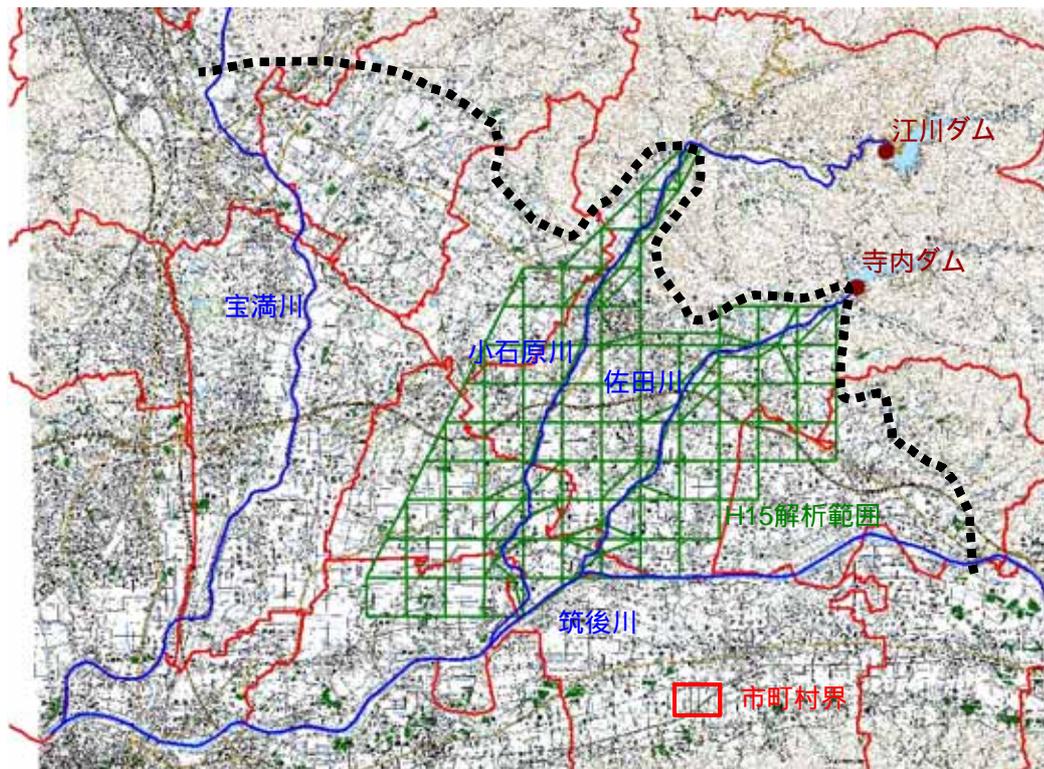


図 7-1 両筑平野の資料収集範囲

1) 収集資料概要

表 7-1 に今回収集した資料を示した。

表 7-1 既存データベース内のデータおよび収集資料

| データ内容 | | DB 内容 |
|---------|----------------------|--|
| ダム | 雨量, 貯水位, 流入量, 放流量 | 江川ダム ¹ , 寺内ダム |
| 河川流量・水位 | 流量 | 金丸橋(佐田川), 栄田橋(小石原川), 荒瀬, 江蘇ノ宿, 片ノ瀬, 瀬ノ下(筑後川) |
| | 水位 | 端間橋(宝満川) |

| | | | |
|-------|-------|--|---------------|
| 河川取水 | 都市用水 | 福岡市，甘木市(女男石) 福岡地区広域，福岡県南，佐賀東部(筑後大堰) | H3～H15 |
| | 灌漑用水 | 各頭首工(女男石，下湊，甘木橋，本郷，上屋敷，小田)，寺内(佐田川沿岸，小石原川沿岸) ² | H3～H15 |
| | 導水量 | 寺内導水量 ³ | H3～H16.11 |
| | 水利権 | 上記の都市用水，灌漑用水取水堰および旧堰 | |
| 河道諸元 | 縦断，横断 | 佐田川(0.0～10.6)，小石原川(-1.0～3.6) | |
| | 堰構造物 | 佐田川(固定堰 16，可動堰 2) | |
| 地下水 | 揚水量 | 井戸揚水量 | S57～H13 |
| | 地下水位 | 消防用井戸水位 | H2～H11 |
| | 井戸諸元 | 上記井戸 | |
| 地質柱状図 | - | - | |
| 土地利用 | - | - | S51，S62，H3，H9 |
| 圃場面積 | - | - | |

1 江川ダムの流入・放流量は9時のデータ，その他は0時のデータ

2 三奈木導水路のうち，寺内幹線分を佐田川沿岸，福田幹線分を小石原川沿岸とする

3 日向石取水工の注水(-取水)量と寺内ダムの小石原川注水量は1日ずれて同じ値のため，寺内ダムの小石原川注水量の値を使用

2) 河川水位・流量

両筑平野における河川水位・流量の観測地点を図7-2に示す。流量観測地点は，小石原川・佐田川に各1箇所，筑後川に4箇所存在している。また，宝満川では，水位観測地点が1箇所存在する。

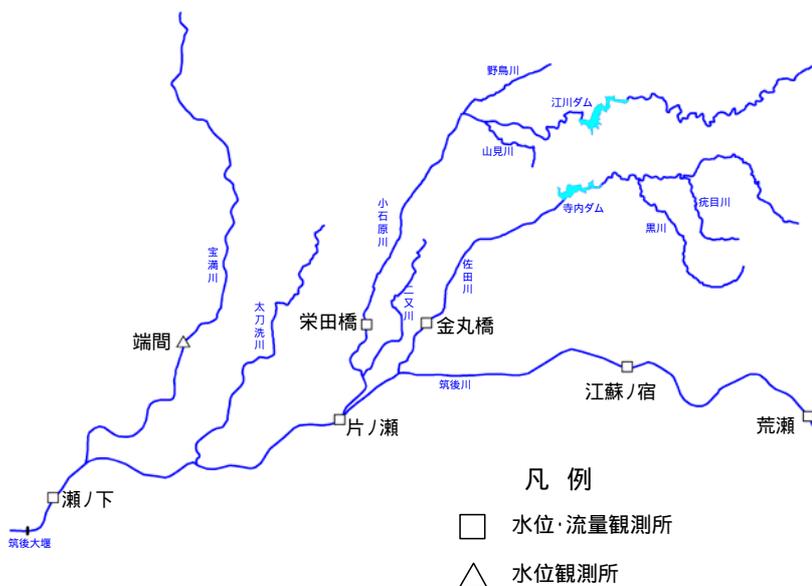


図 7-2 河川水位・流量観測地点

7.2. 定性的把握

1) 地形・地質

両筑平野は筑後川中流の右岸側に展開する洪積段丘と、これを刻んだ沖積地からなっている。低位段丘面は、標高 20~50m にわたって広く分布し、ほとんどの陸田がこの面上に位置する。この段丘面は筑後川の支川である佐田川、小石原川、草場川および宝満川の浸食によって分断されている。また、段丘面の南縁は旧筑後川の乱流によって浸食されている。これら河川の沖積面との比高は 4~5m 程度である。段丘堆積物は砂礫層からなるが、阿蘇 4 火砕流堆積物に対比される軽石火山灰層を挟んでおり、表層は火山灰で覆われている。さらに、草場川や曾根田川に沿って部分的に日佐面といわれる地形面が見られる。

各河川沿いには、扇状地性の砂礫層からなる沖積層が分布している。小石原川の上流部にある女男石から馬田にかけては、これらの沖積層が中位段丘低位面を覆っており、段丘地形は判然としない。

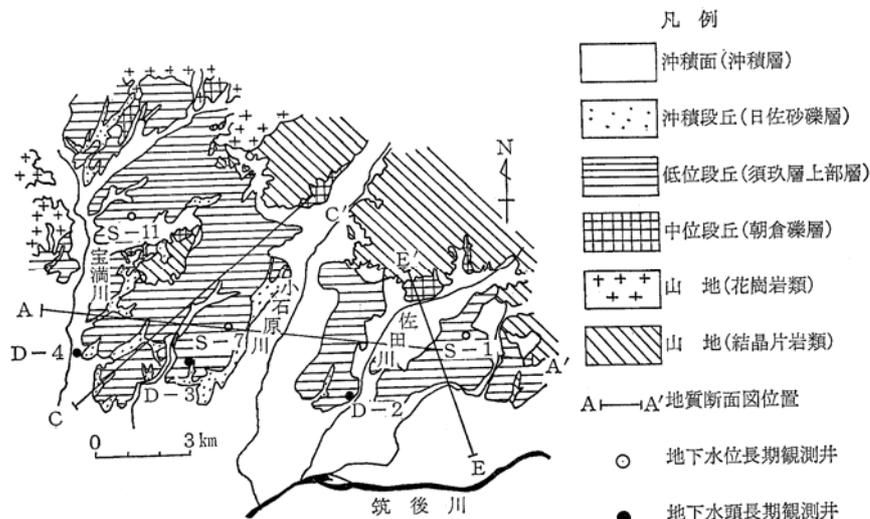


図 7-5 両筑平野地形・地質区分図 (出典：日本の地下水)

2) 地下水

低位段丘の堆積物は層厚 5~10m で、比抵抗値 200~700 Ω m 程度を示す砂礫層からなる(第 1 層)。浅井戸は口径 1~3m 程度のもので、その大半は本層内から取水している。水理定数は比湧出量 1,000~3,000 m³/d/m、透水量係数 1,000~3,000 m²/d、貯留係数 $n \times 10^{-1}$ のものが約半数を占め良好な帯水層であることを示している。段丘堆積物の下位にはあまり連続性の良くない粘土層を挟む砂礫層がある。層厚はほぼ 150m 程度であるが、筑後川沿いでは 300m 程度となっている。この堆積物は比抵抗値 100~400 Ω m を示す第 2 層と、70~120 Ω m を示す第 3 層に区分できる。第 2 層と第 3 層の地下水は被圧地下水であるが、湧出能力は第 1 層の不圧地下水に比してかなり劣っている。

不圧地下水位の季節変化の例を図 7-6 に示す。降水量の多い 6~7 月にかけて地下水位が高く、降水量の少ない 11~12 月にかけて低くなるといった普通のパターンを示す。また、小石原川は上流部において河床堆積物が洪積段丘面を覆っていて、そこを通して洪積段丘の地下水を涵養している。その他の河川はすべて排水河川となっている。

不圧地下水面勾配は、上流側から下流側にかけて 1/300~1/350 と緩くなるが、段丘末端部で再び急勾配となり、数 m³/s に及ぶ湧水群が見られるところがある。

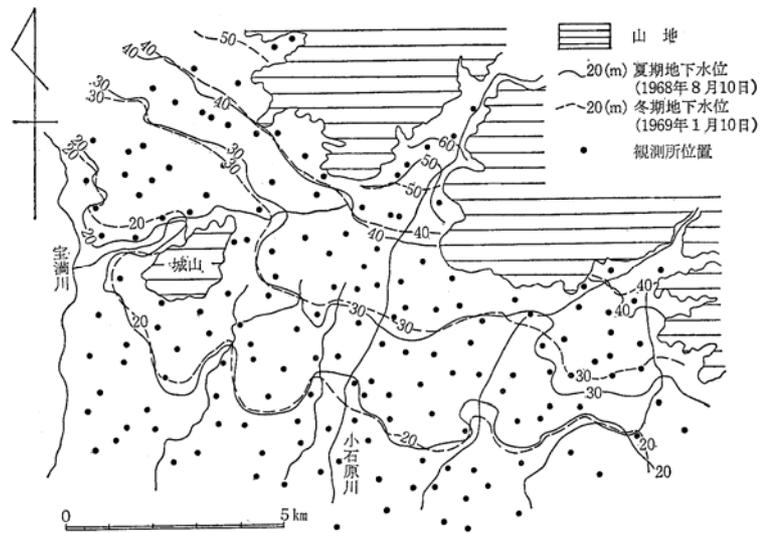


図 7-6 地下水面図 (出典：日本の地下水)

7.3. モデル作成

1) 解析メッシュ

山地部は、評価地点(ダム地点、取水地点)ごとに流域を分割した。また、平地部については、地下水コンター図を参考に、地下水流動の主要な方向が有限要素法メッシュの境界線と直交するように、また、河川と周辺地下水との局所的な関係が再現されるように配慮して設定することとした。その結果、南西方向に拡散する放射状の形状を基本構造とし、主要河道周辺では河川に向かったあるいは河川から拡散する形の地下水位差が再現できるように比較的詳細なメッシュが必要なこととなった。

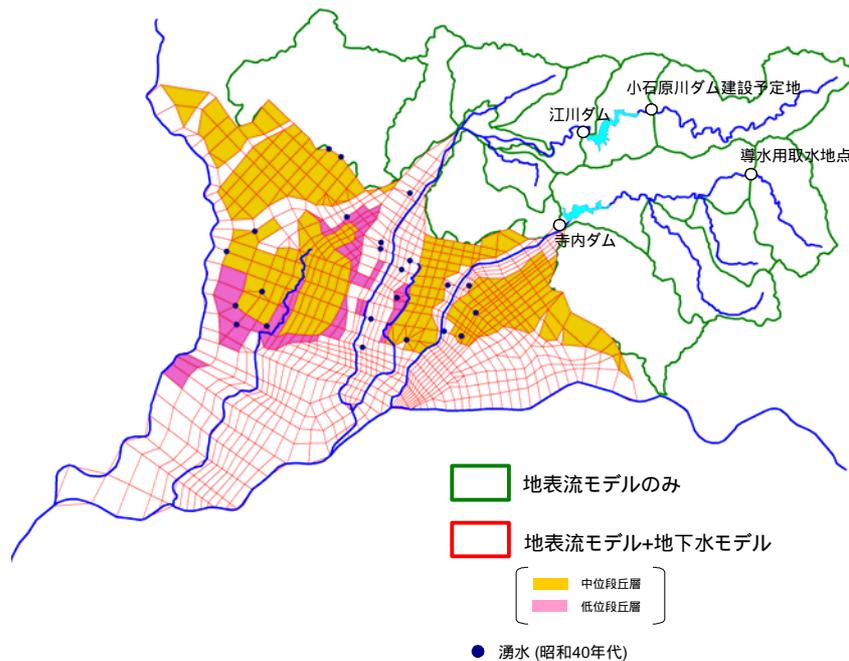


図 7-7 両筑平野の解析メッシュ

2) 時系列データ

a. 雨量

流域内の雨量データとしては、江川ダムおよび寺内ダムの日流量がある。しかしながら、今回のモデルは、全体としては日単位の計算を行っているが、表層土壌部分のみ時間単位で計算を行っているため、時間単位の雨量データが必要となる。そこで、アメダス甘木の時間雨量データを用いた。



表 7-2 年間降水量の比較

| | 江川ダム | 寺内ダム | アメダス甘木 |
|-----|------|------|--------|
| H3 | 2344 | 2165 | 2087 |
| H4 | 1788 | 1591 | 1531 |
| H5 | 2753 | 2572 | 2491 |
| H6 | 966 | 875 | 981 |
| H7 | 1917 | 1979 | 2040 |
| H8 | 1645 | 1472 | 1650 |
| H9 | 2756 | 2359 | 2323 |
| H10 | 1989 | 1903 | 1973 |
| H11 | 2151 | 2047 | 1991 |
| H12 | 1801 | 1855 | 1693 |
| H13 | 1964 | 1954 | 1867 |
| H14 | 1736 | 1637 | 1660 |
| H15 | 2042 | 2193 | 1984 |
| H16 | 2102 | 1959 | 2007 |

図 7-8 雨量観測所位置

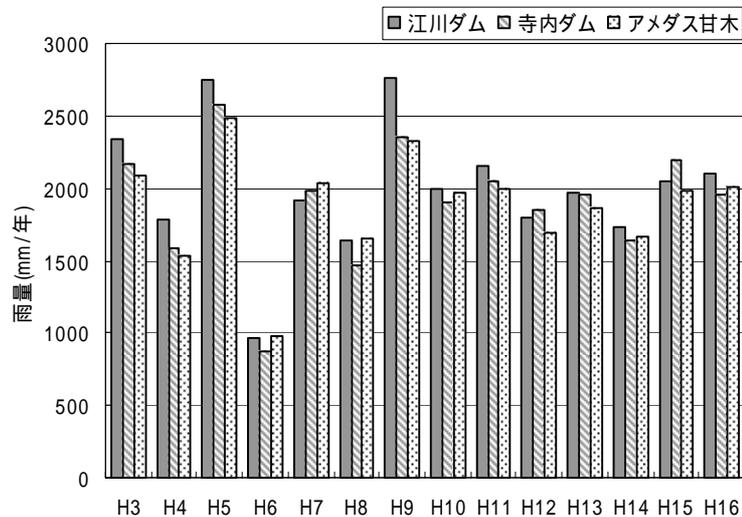


図 7-9 年間降水量の比較

b. 蒸発散

蒸発散の計算に必要となる可能蒸発散量については、アメダス甘木の日気温データからハーモン式を用いて算定した。

$$\text{ハーモン式} : E_p = 0.14D_0^2 P_t$$

ここに、 E_p : 日平均蒸発散能[mm/日]

D_0 : 日照時間[12hr/日]

P_t : 日平均気温に対する飽和絶対湿度[gm/m³]

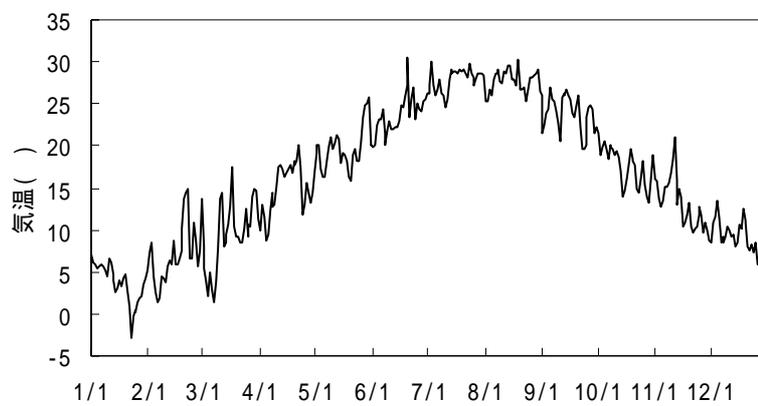


図 7-10 日気温(平成 16 年)

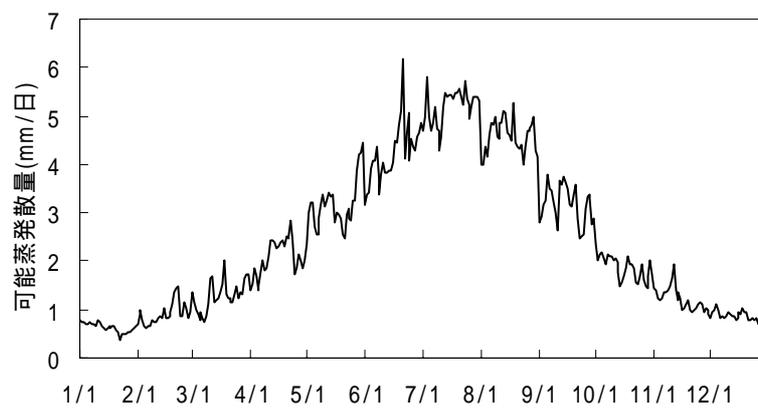


図 7-11 可能蒸発散量(平成 16 年)

c. 農業用水量

農業用水量は、河川取水量および井戸揚水量を各圃場に分配し、圃場内では均一に与えることとした。圃場については、水収支データベースの区域を参考に、河川、幹線水路などから、**図 7-12** のように設定した。河川取水量の分配については、頭首工と圃場の関係を**表 7-3**のように設定し、1つの頭首工が複数の圃場に対応する場合は、取水量を圃場の面積で案分することとした。なお、井堰については、計画合口をもとに各頭首工での合計の水利権量を取水量とみなし、同様に圃場に分配した。井戸揚水量については、地点データのない -122, -137, -9を除く井戸について、圃場ごとに年間の総揚水量を集計した。**表 7-5**には、こうして作成した圃場ごとの取水および揚水量の年間値を示した。この値を各圃場内の水田面積で除した値が、水田ごとに与える農業用水量であるが、昨年度の水収支計算においては、次のように還元率を45%に設定し還元水量を算出し、**表 7-6**に示したマトリクスの比率で各河川に放流されているとしている。

(還元率の考え方)

- ・ 農業用水として取水された水量のうち、稲の生育に必要な純水量は取水量の50%で残りの50%は水路維持用水である

- ・ 水路維持用水の10%は水路における損失水量となる

そこで、この考え方にならい、還元率を45%に設定し、残りの55%分が常に水田上にある農業用水量とする。ただし、井戸揚水分については還元先を設定していないため、すべて農業用水分とする。まとめると、農業用水量は次のようになる。

$$\text{農業用水量} = (\text{日ごとの頭首工取水量} + \text{井堰取水量}) \times 0.55 + \text{井戸揚水量}$$

こうして求めた各圃場ごとの農業用水量について、面積で除し、高にした値(減水深に相当)を**表 7-7**および**図 7-13**に示した。ここで、灌漑期間は5/16~9/28の136日間とした。



図 7-12 圃場の設定

表 7-3 圃場と頭首工の関係

| No. | 圃場名 | 面積(ha) | 頭首工 |
|-----|--------|--------|-----|
| 1 | 寺内 | 465 | 寺内1 |
| 2 | 寺内南 | 232 | 寺内1 |
| 3 | 福田 | 211 | 寺内2 |
| 4 | 上屋敷 | 222 | 上屋敷 |
| 5 | 小田 | 222 | 小田 |
| 6 | 女男石 | 197 | 女男石 |
| 7 | 下淵 | 186 | 下淵 |
| 8 | 甘木(左岸) | 244 | 甘木 |
| 9 | 甘木(右岸) | 352 | 甘木 |
| 10 | 本郷 | 285 | 本郷 |
| 11 | 夜須(三輪) | 237 | 女男石 |
| 12 | 夜須(夜須) | 715 | 女男石 |
| 13 | 三輪 | 220 | 女男石 |
| 14 | 草葉川 | 344 | 女男石 |
| 15 | 立石(3号) | 169 | 女男石 |
| 16 | 立石(1号) | 216 | 女男石 |
| 17 | 立石(6号) | 127 | 女男石 |
| 18 | 乙隅 | 150 | 乙隅 |

表 7-4 井堰の水利権量

| 河川 | 計画合口 | 井堰名 | 水利権 m ³ /s | 計 m ³ /s | |
|------|-------|-------|--------------------------|------------------------|-------|
| 小石原川 | 女男石 | - | - | - | |
| | | 下淵 | 香田 | 0.013 | 0.033 |
| | | | 新 | 0 | |
| | | | 白鬚 | 0.001 | |
| | | | 石井 | 0.003 | |
| | | | 上大神田 | 0.007 | |
| | | | 大神田 | 0.009 | |
| | 甘木 | 花園 | 0.027 | 0.459 | |
| | | 車 | 0.026 | | |
| | | 向川原 | 0.003 | | |
| | | 中川原 | 0.019 | | |
| | | 下川原 | 0.009 | | |
| | | 千反川原 | 0.056 | | |
| | | 松ノ木 | 0.015 | | |
| | | 東田第一 | 0.022 | | |
| 落合 | | 0.022 | | | |
| 東田第三 | | 0.007 | | | |
| 上々浦 | | 0.066 | | | |
| 中川原 | 0.067 | | | | |
| 八ツ江 | 0.055 | | | | |
| 下り松 | 0.033 | | | | |
| 高良 | 0.021 | | | | |
| 東鍛田 | 0.011 | | | | |
| 本郷 | 大坪 | 0.06 | 0.118 | | |
| | 草場 | 0.058 | | | |
| 佐田川 | 寺内 | 寺内 | 0.505 | 0.505 | |
| | | 上屋敷 | 西 | | 0.021 |
| | 星熊 | 0 | | | |
| | 上川原 | 0.116 | | | |
| | 松本 | 0 | | | |
| | 入雨 | 0.004 | | | |
| | 相窪 | 0.091 | | | |
| | 下古賀 | 0.039 | | | |
| | 宮田 | 0 | | | |
| | 尾辺田 | 0.013 | | | |
| | 金の手 | 0.021 | | | |
| | 小田 | 白鳥 | 0.071 | 0.147 | |
| | | 三川 | 0.076 | | |

表 7-5 圃場ごとの取水および揚水量(その1)

| No. | 圃場名 | 面積 (ha) | 面積 (ha) | 井堰 (千m ³ /年) | H6 | | H7 | | H8 | | H9 | | H10 | |
|-----|--------|------------|------------|----------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|-------|---------|--------|---------|--------|
| | | | | | 取水 | 揚水 | 取水 | 揚水 | 取水 | 揚水 | 取水 | 揚水 | 取水 | 揚水 |
| 1 | 寺内 | 465 | 487 | 1747.9 | 7286.6 | 2020.4 | 10287.4 | 559.7 | 11112.0 | 396.5 | 12338.8 | 1302.4 | 12168.7 | 1532.9 |
| 2 | 寺内南 | 232 | 238 | 872.1 | 3635.4 | 700.5 | 5132.6 | 267.8 | 5544.0 | 17.5 | 6156.2 | 215.1 | 6071.3 | 337.5 |
| 3 | 福田 | 211 | 129 | 3314.0 | 2610.0 | 76.3 | 3795.0 | 4.2 | 673.0 | 10.0 | 1129.0 | 26.1 | 2216.0 | 128.6 |
| 4 | 上屋敷 | 222 | 332 | 3583.9 | 1404.8 | 869.8 | 2818.8 | 212.6 | 3355.7 | 66.2 | 2819.9 | 229.9 | 3294.6 | 208.3 |
| 5 | 小田 | 222 | 161 | 1727.3 | 1772.2 | 1620.6 | 2844.1 | 1422.7 | 3117.2 | 26.6 | 2977.9 | 20.6 | 2392.0 | 0.0 |
| 6 | 女男石 | 197 | 161 | 0.0 | 1455.0 | 0.0 | 1840.8 | 0.0 | 2105.4 | 0.0 | 2402.9 | 0.0 | 2105.4 | 0.0 |
| 7 | 下淵 | 186 | 105 | 387.8 | 2376.9 | 6.7 | 2015.2 | 0.5 | 1616.6 | 0.5 | 2898.2 | 31.7 | 3265.7 | 40.2 |
| 8 | 甘木(左岸) | 244 | 406 | 2208.0 | 974.9 | 709.7 | 1446.5 | 611.7 | 2009.3 | 364.0 | 2267.2 | 741.1 | 1681.0 | 553.4 |
| 9 | 甘木(右岸) | 352 | 415 | 3185.4 | 1406.4 | 1048.1 | 2086.7 | 590.1 | 2898.6 | 213.5 | 3270.8 | 865.9 | 2425.1 | 963.8 |
| 10 | 本郷 | 285 | 486 | 1386.5 | 0.0 | 425.6 | 0.0 | 51.4 | 3237.4 | 25.8 | 3101.7 | 82.1 | 1866.6 | 94.8 |
| 11 | 夜須(三輪) | 237 | 310 | 0.0 | 1750.4 | 0.0 | 2214.5 | 0.0 | 2532.9 | 0.0 | 2890.8 | 0.0 | 2532.8 | 0.0 |
| 12 | 夜須(夜須) | 715 | 875 | 0.0 | 5280.7 | 854.8 | 6680.9 | 559.6 | 7641.5 | 638.2 | 8721.0 | 300.8 | 7641.3 | 235.8 |
| 13 | 三輪 | 220 | 252 | 0.0 | 1624.8 | 95.1 | 2055.7 | 121.2 | 2351.2 | 123.9 | 2683.4 | 160.8 | 2351.2 | 235.5 |
| 14 | 草葉川 | 344 | 325 | 0.0 | 2540.7 | 72.7 | 3214.3 | 60.8 | 3676.5 | 62.8 | 4195.9 | 47.3 | 3676.4 | 84.2 |
| 15 | 立石(3号) | 169 | 149 | 0.0 | 1248.2 | 271.2 | 1579.1 | 207.3 | 1806.2 | 131.5 | 2061.3 | 274.9 | 1806.1 | 79.0 |
| 16 | 立石(1号) | 216 | 341 | 0.0 | 1595.3 | 353.7 | 2018.3 | 312.8 | 2308.5 | 269.3 | 2634.6 | 296.4 | 2308.4 | 175.9 |
| 17 | 立石(6号) | 127 | 135 | 0.0 | 938.0 | 1093.5 | 1186.7 | 58.2 | 1357.3 | 43.7 | 1549.1 | 138.8 | 1357.3 | 177.2 |
| 18 | 乙隅 | 150 | 174 | 0.0 | 0.0 | 52.4 | 0.0 | 12.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

表 7-5 圃場ごとの取水および揚水量(その2)

| No. | 圃場名 | 面積 (ha) | 面積 (ha) | 井堰 (千m ³ /年) | H11 | | H12 | | H13 | | H14 | | H15 | |
|-----|--------|------------|------------|----------------------------|---------|-------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|---------|
| | | | | | 取水 | 揚水 | 取水 | 揚水 | 取水 | 揚水 | 取水 | 揚水 | 取水 | 揚水 |
| 1 | 寺内 | 465 | 487 | 1747.9 | 11358.8 | 917.0 | 11394.8 | 563.0 | 4193.6 | 396.4 | 3332.4 | 396.4 | 4357.7 | 396.363 |
| 2 | 寺内南 | 232 | 238 | 872.1 | 5667.2 | 416.3 | 5685.2 | 119.3 | 2092.3 | 174.7 | 1662.6 | 174.7 | 2174.2 | 174.661 |
| 3 | 福田 | 211 | 129 | 3314.0 | 3695.0 | 40.1 | 3794.0 | 40.3 | 2610.5 | 0.0 | 2220.5 | 0.0 | 2817.7 | 0 |
| 4 | 上屋敷 | 222 | 332 | 3583.9 | 2999.4 | 159.4 | 2689.0 | 0.0 | 3023.6 | 0.0 | 2469.5 | 0.0 | 2079.8 | 0 |
| 5 | 小田 | 222 | 161 | 1727.3 | 2834.0 | 0.0 | 2958.1 | 1.6 | 2829.0 | 4.0 | 2485.0 | 4.0 | 1788.3 | 3.974 |
| 6 | 女男石 | 197 | 161 | 0.0 | 1872.9 | 0.0 | 1899.9 | 0.0 | 1880.2 | 0.0 | 1721.2 | 0.0 | 2146.5 | 0 |
| 7 | 下淵 | 186 | 105 | 387.8 | 1647.7 | 21.5 | 1782.9 | 0.0 | 3684.3 | 0.0 | 3341.3 | 0.0 | 2367.7 | 0 |
| 8 | 甘木(左岸) | 244 | 406 | 2208.0 | 1492.1 | 432.9 | 1816.0 | 0.0 | 1938.4 | 0.0 | 1772.7 | 0.0 | 1622.0 | 0 |
| 9 | 甘木(右岸) | 352 | 415 | 3185.4 | 2152.5 | 879.9 | 2619.8 | 406.2 | 2796.4 | 405.8 | 2557.3 | 405.8 | 2340.0 | 405.794 |
| 10 | 本郷 | 285 | 486 | 1386.5 | 3075.5 | 135.1 | 2873.9 | 722.3 | 2441.8 | 130.8 | 2484.4 | 130.8 | 2117.4 | 130.773 |
| 11 | 夜須(三輪) | 237 | 310 | 0.0 | 2253.1 | 0.0 | 2285.6 | 0.0 | 2261.9 | 0.0 | 2070.6 | 0.0 | 2582.4 | 0 |
| 12 | 夜須(夜須) | 715 | 875 | 0.0 | 6797.4 | 110.9 | 6895.5 | 43.9 | 6823.9 | 121.0 | 6246.9 | 121.0 | 7790.7 | 120.999 |
| 13 | 三輪 | 220 | 252 | 0.0 | 2091.5 | 149.3 | 2121.7 | 125.4 | 2099.7 | 85.7 | 1922.1 | 85.7 | 2397.1 | 85.65 |
| 14 | 草葉川 | 344 | 325 | 0.0 | 3270.4 | 69.6 | 3317.5 | 91.8 | 3283.1 | 73.5 | 3005.5 | 73.5 | 3748.2 | 73.527 |
| 15 | 立石(3号) | 169 | 149 | 0.0 | 1606.7 | 91.3 | 1629.8 | 151.1 | 1612.9 | 44.2 | 1476.5 | 44.2 | 1841.4 | 44.204 |
| 16 | 立石(1号) | 216 | 341 | 0.0 | 2053.5 | 228.7 | 2083.1 | 186.3 | 2061.5 | 87.1 | 1887.2 | 87.1 | 2353.5 | 87.087 |
| 17 | 立石(6号) | 127 | 135 | 0.0 | 1207.4 | 86.3 | 1224.8 | 33.1 | 1212.1 | 60.6 | 1109.6 | 60.6 | 1383.8 | 60.6 |
| 18 | 乙隅 | 150 | 174 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0 |

表 7-6 農業用水還元先マトリクス

| 水収支上の下流側河道名 | 灌漑水路1 小石原川4 | 灌漑水路2 小石原川3 | 灌漑水路3 小石原川2 | 灌漑水路4 小石原川1 | 灌漑水路5 佐田川1 | 灌漑水路6 本川4 | 灌漑水路7 二又川2 | 灌漑水路8 本川5 | 灌漑水路9 本川2 |
|-------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| 女男石 | | | | | | | | | 1 |
| 下淵 | | 0.7 | 0.2 | | | | 0.1 | | |
| 甘木 | | | 0.8 | 0.1 | | | 0.1 | | |
| 本郷 | | | | 0.9 | | | | 0.1 | |
| 寺内1(佐田川沿岸) | | | | | 0.2 | 0.3 | 0.5 | | |
| 寺内2(小石川沿岸) | | | | | | | 1 | | |
| 上屋敷 | | | | | | 0.5 | 0.2 | 0.3 | |
| 小田 | | | | | | 0.5 | 0.3 | 0.2 | |
| 井堰1(女男石) | 0.7 | 0.3 | | | | | | | |
| 井堰2(下淵) | | 0.7 | 0.3 | | | | | | |
| 井堰3(甘木) | | | 0.7 | 0.3 | | | | | |
| 井堰4(本郷) | | | | 0.7 | | | 0.3 | | |
| 井堰5(寺内) | | | | | 0.7 | 0.3 | | | |
| 井堰6(上屋敷) | | | | | | 0.7 | 0.3 | | |
| 井堰7(小田) | | | | | | | 0.7 | 0.3 | |

表 7-7 圃場ごとの農業用水量の平均値(mm/日)

| No. | 圃場名 | H6 | H7 | H8 | H9 | H10 | H11 | H12 | H13 | H14 | H15 |
|-----|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 寺内 | 10.5 | 10.8 | 11.3 | 13.7 | 13.9 | 12.3 | 11.8 | 5.5 | 4.8 | 5.7 |
| 2 | 寺内南 | 9.8 | 11.0 | 11.0 | 12.6 | 12.8 | 12.4 | 11.5 | 5.6 | 4.8 | 5.7 |
| 3 | 福田 | 19.0 | 22.3 | 12.6 | 14.1 | 18.1 | 22.2 | 22.5 | 18.6 | 17.4 | 19.2 |
| 4 | 上屋敷 | 8.0 | 8.3 | 8.6 | 8.3 | 8.8 | 8.4 | 7.6 | 8.1 | 7.4 | 6.9 |
| 5 | 小田 | 16.2 | 18.0 | 12.3 | 11.9 | 10.3 | 11.4 | 11.8 | 11.4 | 10.6 | 8.8 |
| 6 | 女男石 | 3.7 | 4.6 | 5.3 | 6.1 | 5.3 | 4.7 | 4.8 | 4.7 | 4.3 | 5.4 |
| 7 | 下湊 | 10.7 | 9.3 | 7.7 | 12.9 | 14.4 | 8.0 | 8.4 | 15.7 | 14.4 | 10.6 |
| 8 | 甘木(左岸) | 4.5 | 4.7 | 4.9 | 5.8 | 4.9 | 4.5 | 4.0 | 4.1 | 4.0 | 3.8 |
| 9 | 甘木(右岸) | 6.3 | 6.2 | 6.3 | 7.8 | 7.2 | 6.8 | 6.4 | 6.5 | 6.3 | 6.1 |
| 10 | 本郷 | 1.8 | 1.2 | 3.9 | 3.9 | 2.9 | 3.9 | 4.6 | 3.4 | 3.4 | 3.1 |
| 11 | 夜須(三輪) | 2.3 | 2.9 | 3.3 | 3.8 | 3.3 | 2.9 | 3.0 | 3.0 | 2.7 | 3.4 |
| 12 | 夜須(夜須) | 3.2 | 3.6 | 4.1 | 4.3 | 3.7 | 3.2 | 3.2 | 3.3 | 3.0 | 3.7 |
| 13 | 三輪 | 2.9 | 3.6 | 4.1 | 4.8 | 4.5 | 3.8 | 3.8 | 3.6 | 3.3 | 4.1 |
| 14 | 草葉川 | 3.3 | 4.1 | 4.7 | 5.3 | 4.8 | 4.2 | 4.3 | 4.3 | 3.9 | 4.8 |
| 15 | 立石(3号) | 4.7 | 5.3 | 5.5 | 6.9 | 5.3 | 4.8 | 5.2 | 4.6 | 4.2 | 5.2 |
| 16 | 立石(1号) | 2.7 | 3.1 | 3.3 | 3.8 | 3.1 | 2.9 | 2.9 | 2.6 | 2.4 | 3.0 |
| 17 | 立石(6号) | 8.7 | 3.9 | 4.3 | 5.4 | 5.0 | 4.1 | 3.8 | 4.0 | 3.6 | 4.5 |
| 18 | 乙隅 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

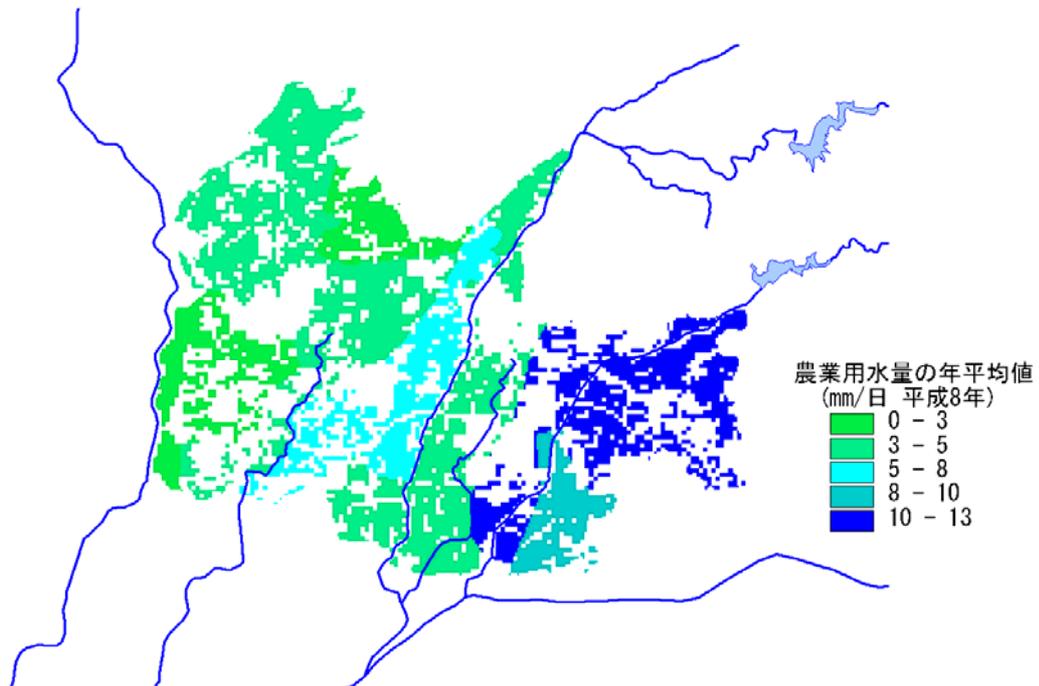


図 7-13 農業用水量(平成8年)

3) 流域情報の整理

収集した流域情報をもとに流域モデルを作成した。解析に必要となるデータは、GIS上でモデル要素毎に集計した。図7-14～図7-18には、GISで整理した流域情報を示した。

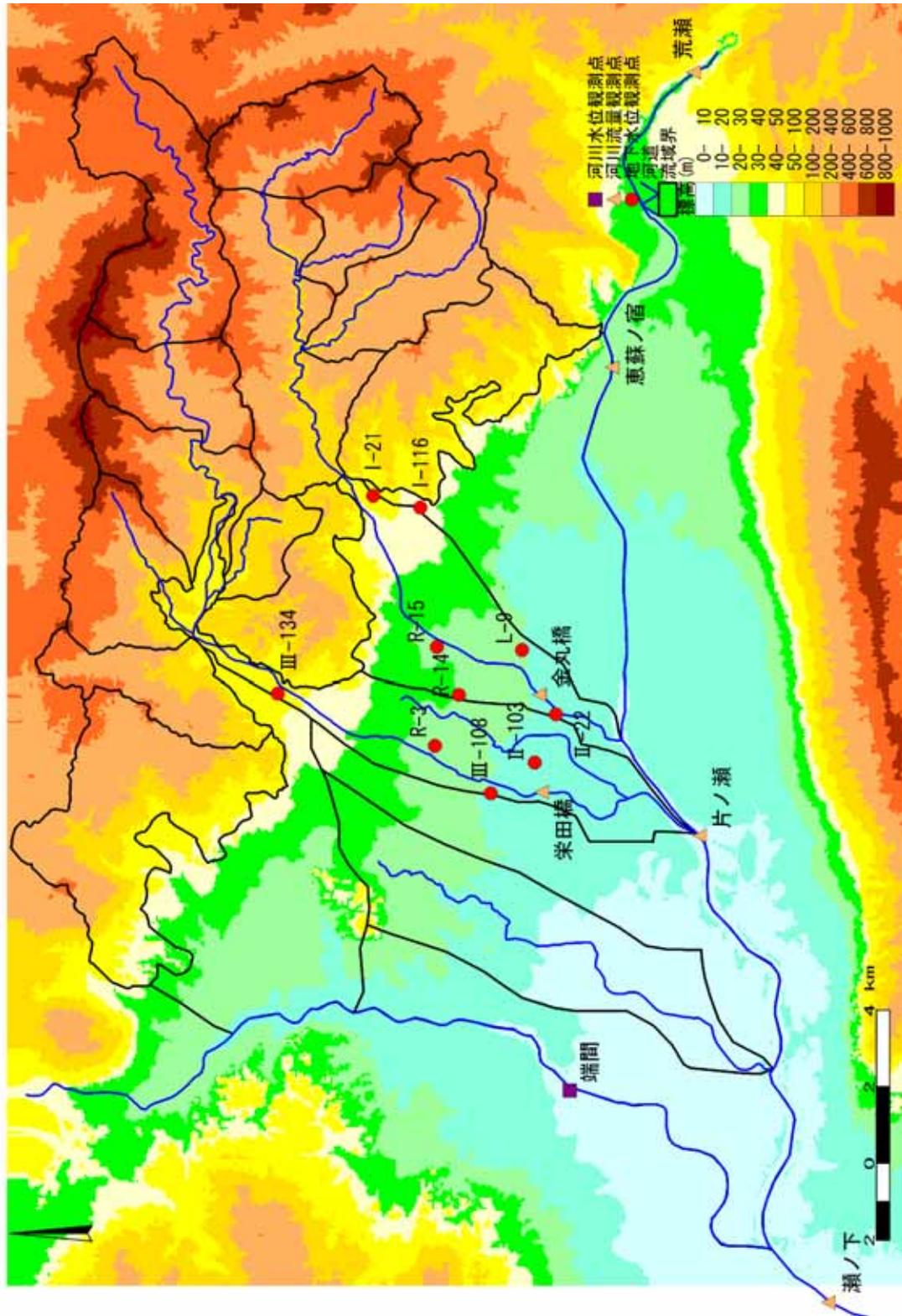


図 7-14 両筑平野 標高

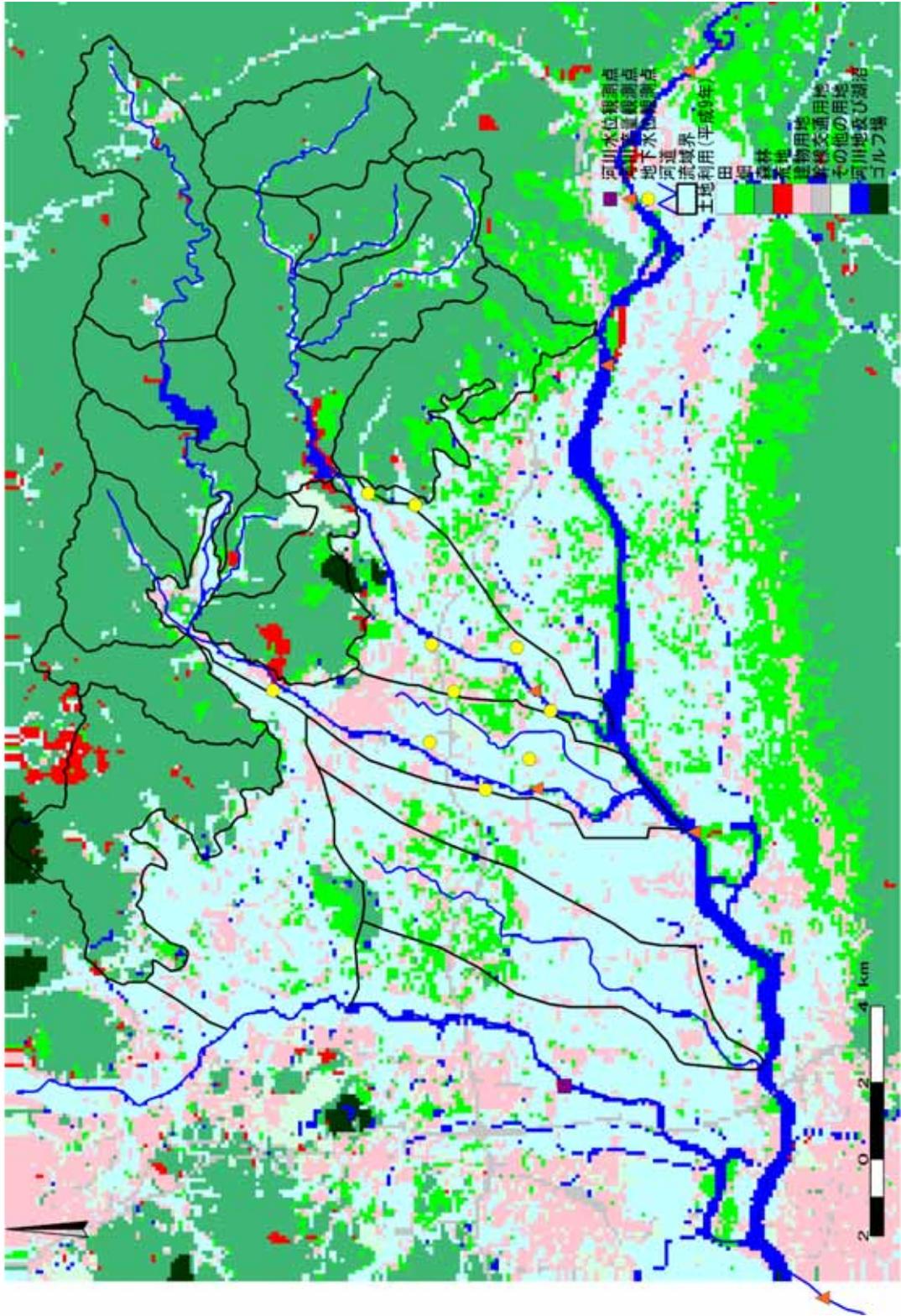


图 7-15 両筑平野 土地利用

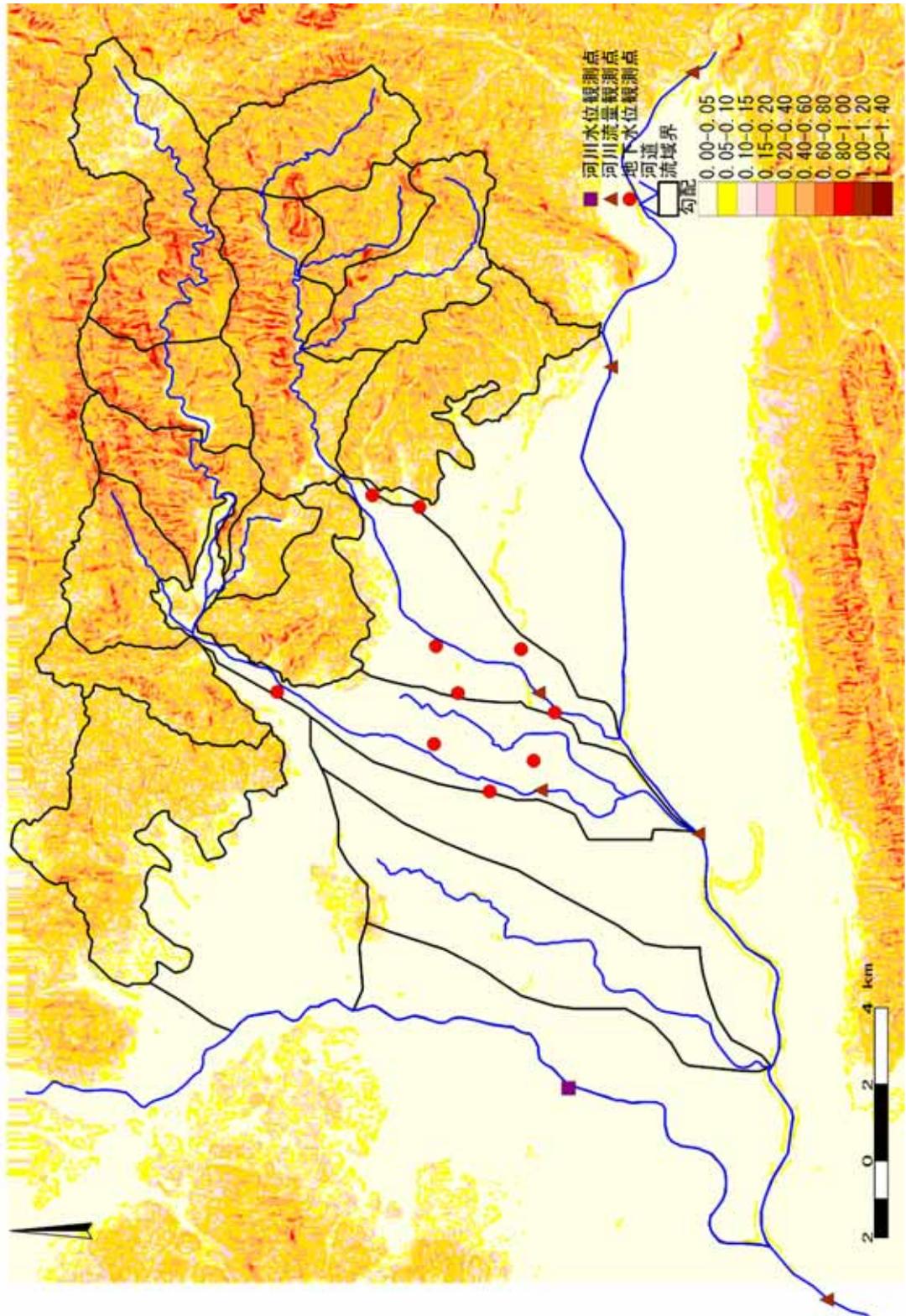


图 7-16 两筑平野 勾配

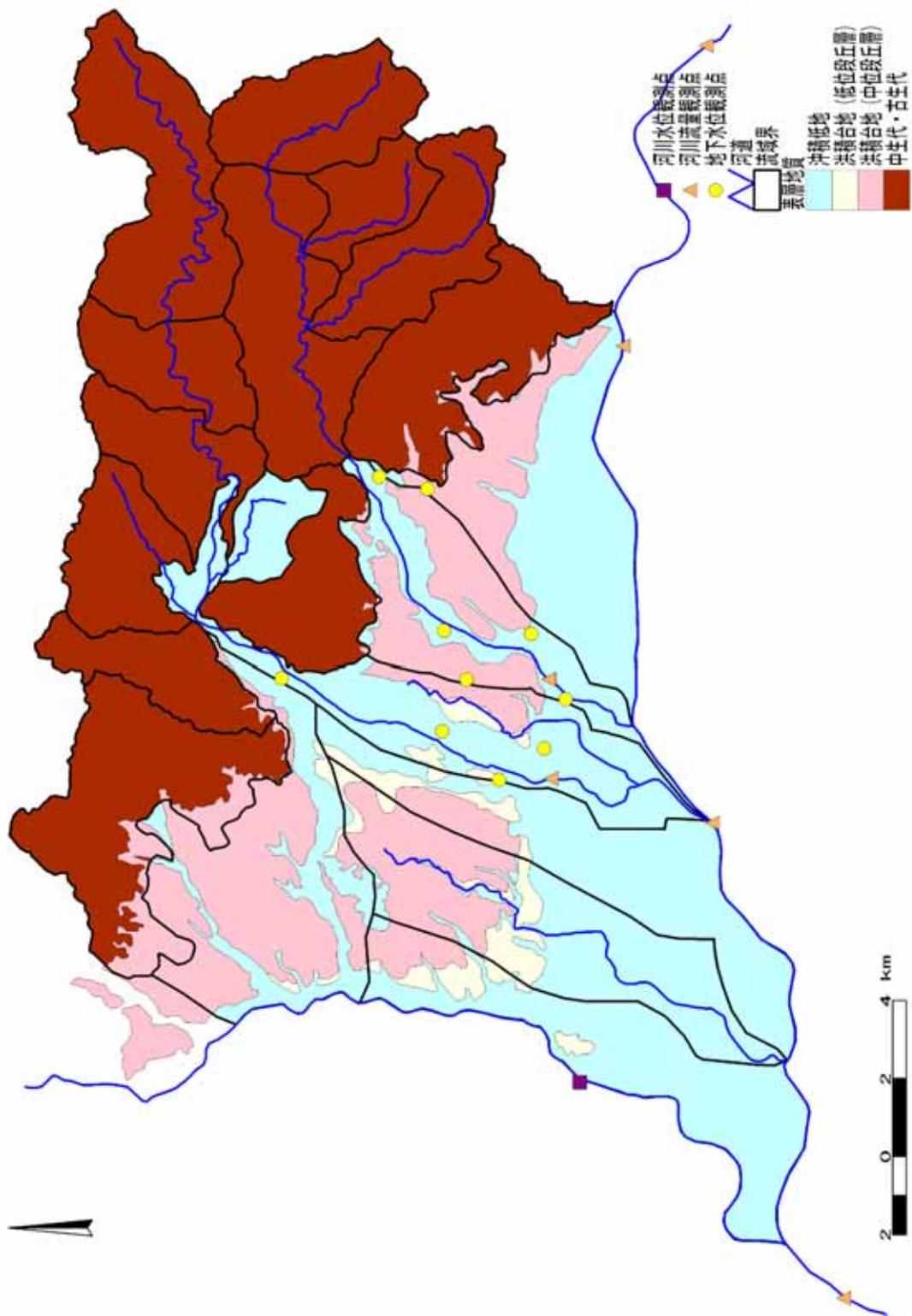


图 7-17 两筑平野 表层地质

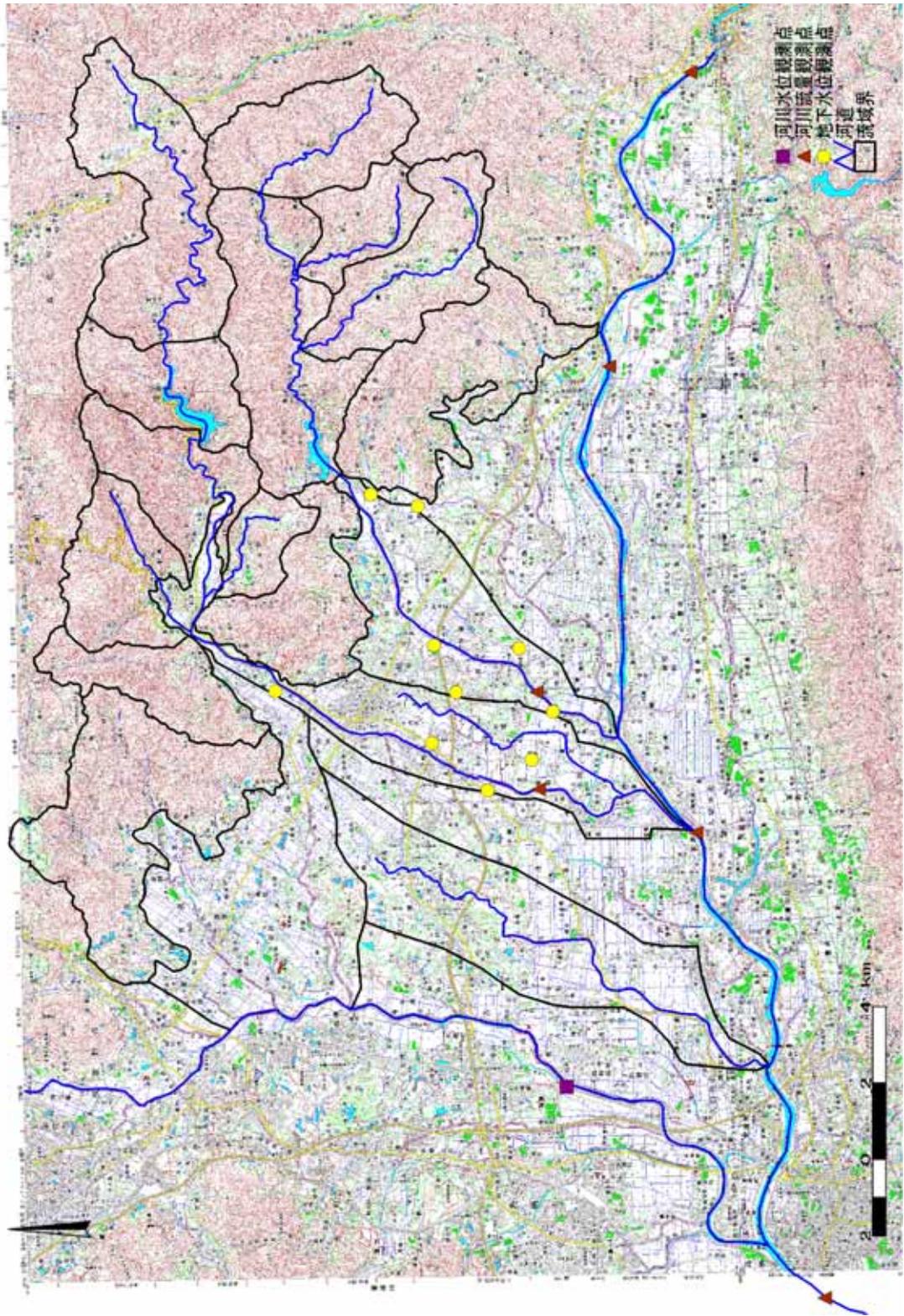


图 7-18 两筑平野 地图画像

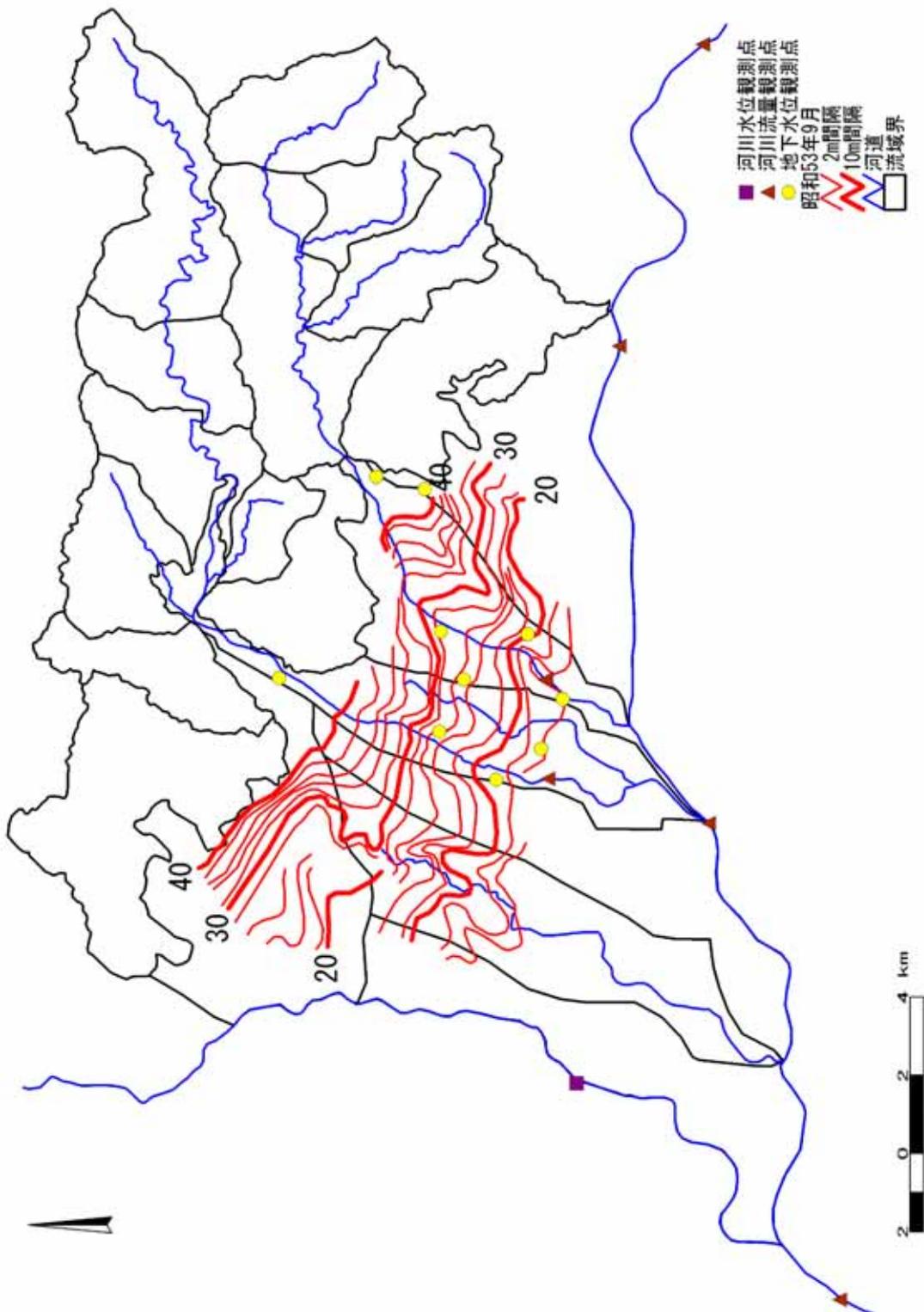


図 7-19 両筑平野 地下水位コンター

7.4. モデル精度検証

両筑平野を対象とした検証計算では下記のような結果となった。

- 河川流量と地下水位の再現計算のグラフをみると、豊水期と渇水期の間の比較的長期の地下水位変動は良好に再現できており、当該流域の長期的な水循環変動機構はこのモデルで再現できている。
- 一方、大きな降雨イベントに対する再現性の点では、地下水位の変動幅が十分に再現されない傾向にあり、帯水層の貯留係数に関する調整が必要である。
- 灌漑期間中の地下水位変動については、明らかに揚水ポンプの稼働タイミングに左右されている部分があり、これらについてはモデル内で同様な揚水パターンを設定しない限り再現は困難であるが、日々の揚水量データが得られないので、課題として残る。

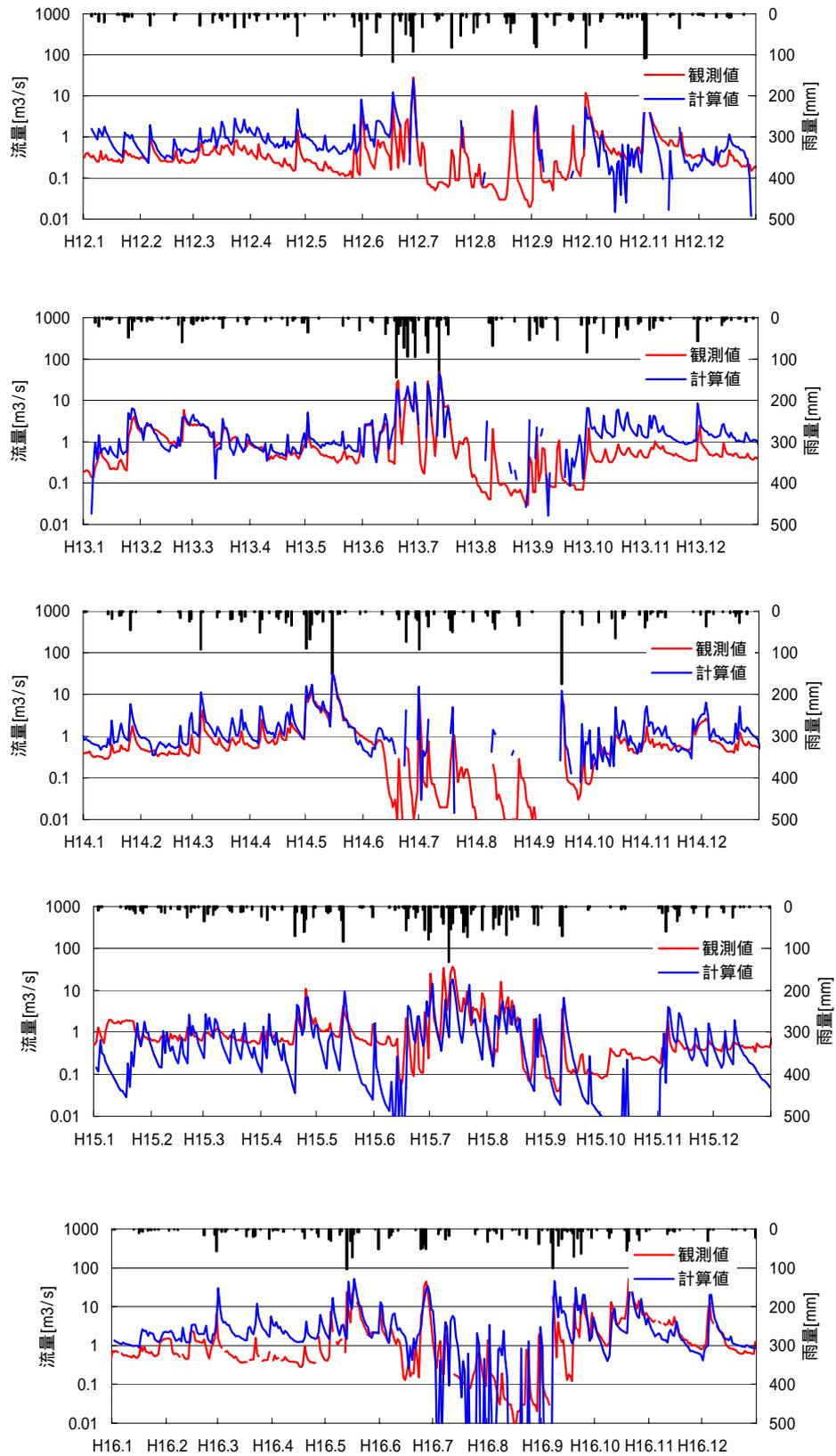


図 7-20 ハイドロ比較(栄田橋, 小石原川)

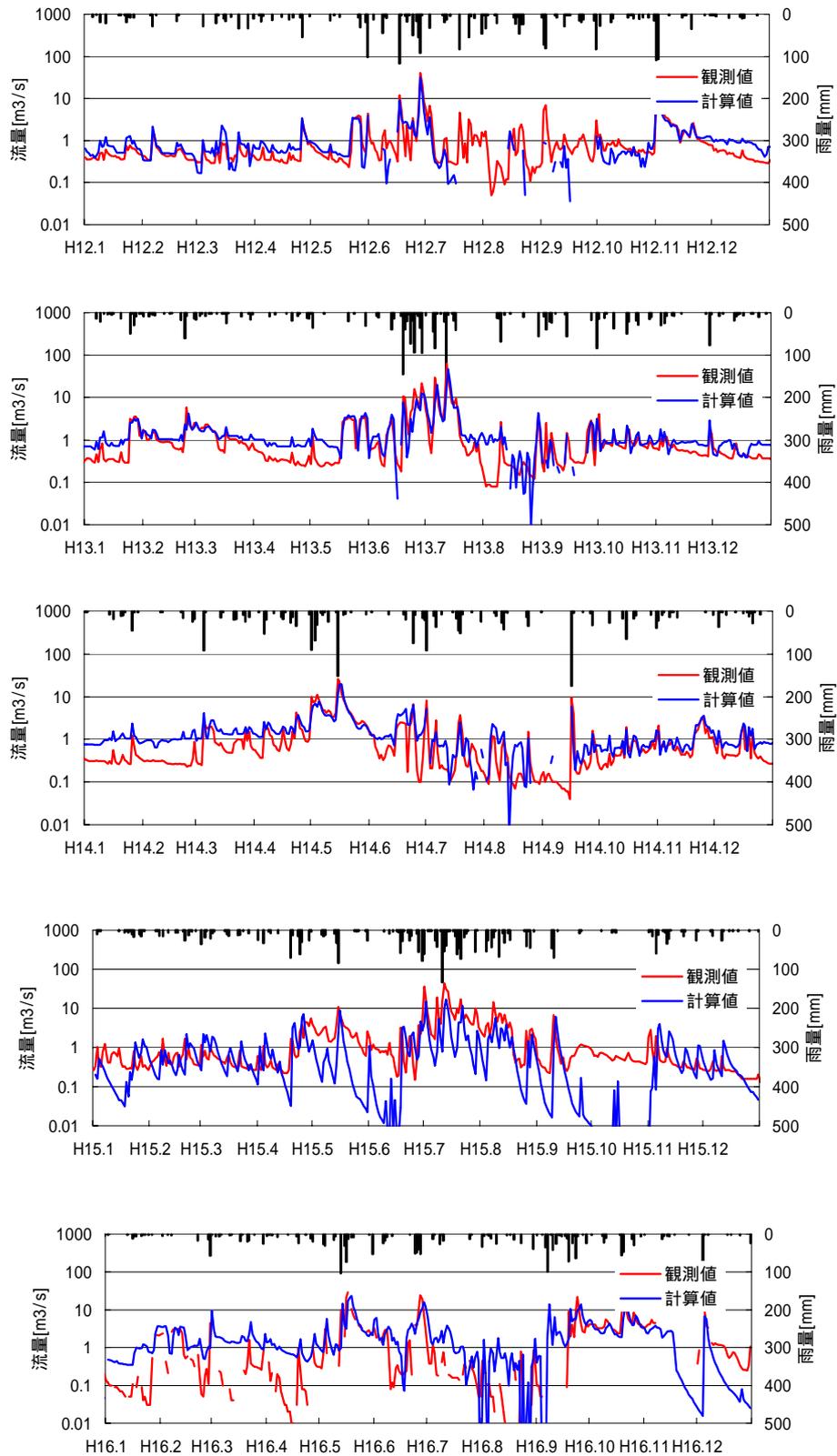
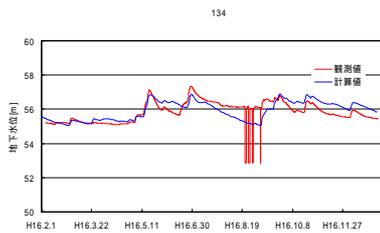
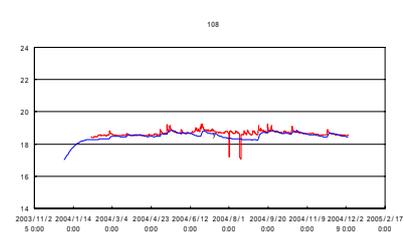
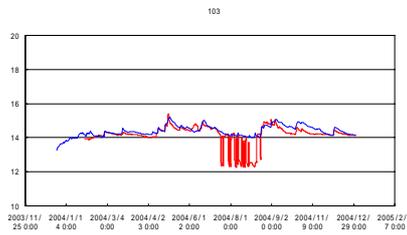
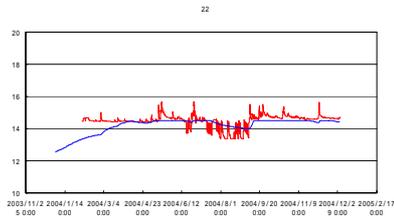
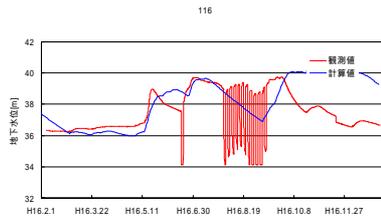
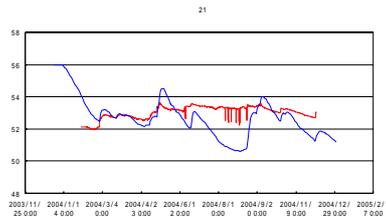
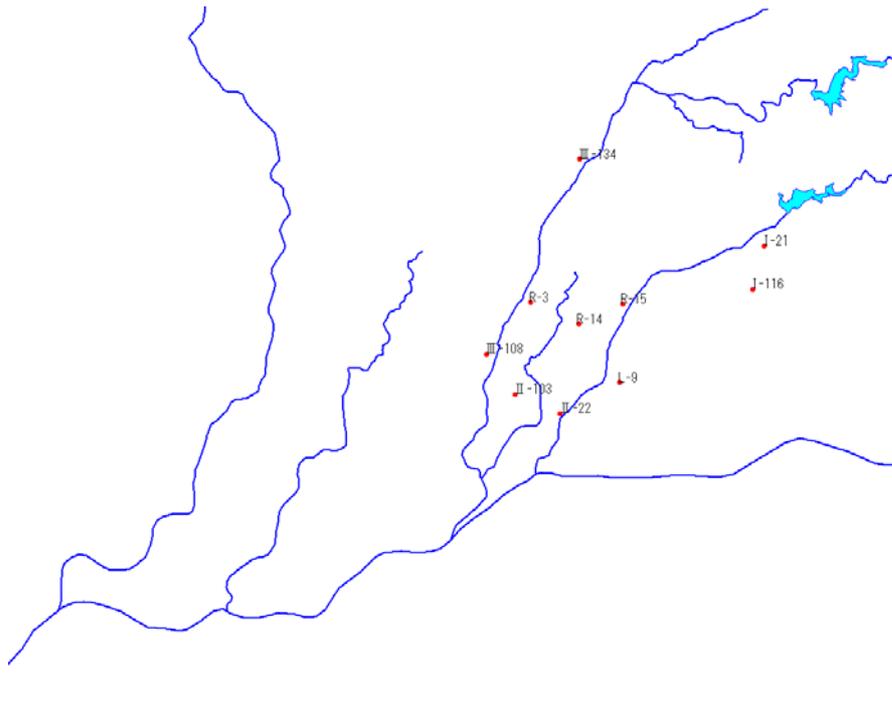


図 7-21 ハイドロ比較(金丸橋, 佐田川)



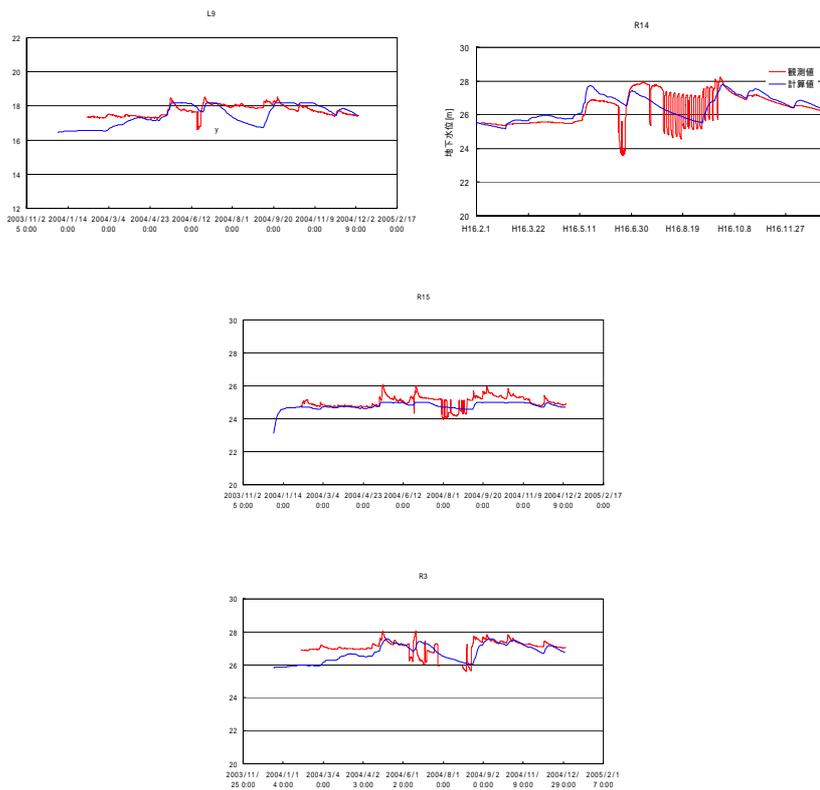


図 7-22 地下水位の比較

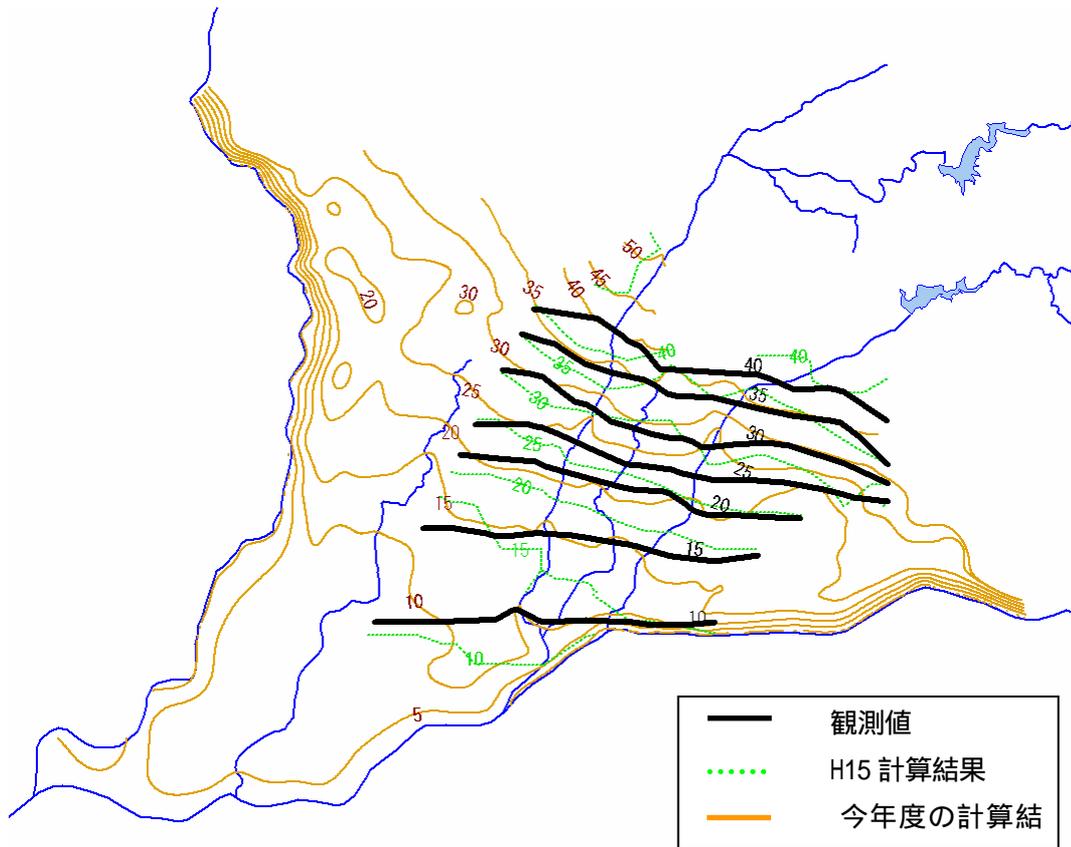


図 7-23 地下水コンター比較(平成 8 年)

河川堰および灌漑用水が地下水に与える影響

両筑平野の地下水位観測結果を見ると、河川近くの井戸と河川と離れている井戸では反応が違い、河川近くでは、大きな降雨後、河川への流出により速やかに元の水位に戻っているのに対し、河川と離れている井戸は、大きな降雨後も戻り方が遅く、灌漑期は地下水位が高くなっている(図 7-24 図 7-25)。この灌漑期における地下水位上昇が、堰使用による河川水位の上昇によるものか、灌漑用水によるものかについて検証するため、次の 2 ケースの計算を行った。

(ケース 1) 灌漑用水を 0 とする

(ケース 2) 堰の使用により、灌漑期の河川水深を最低 1m とする

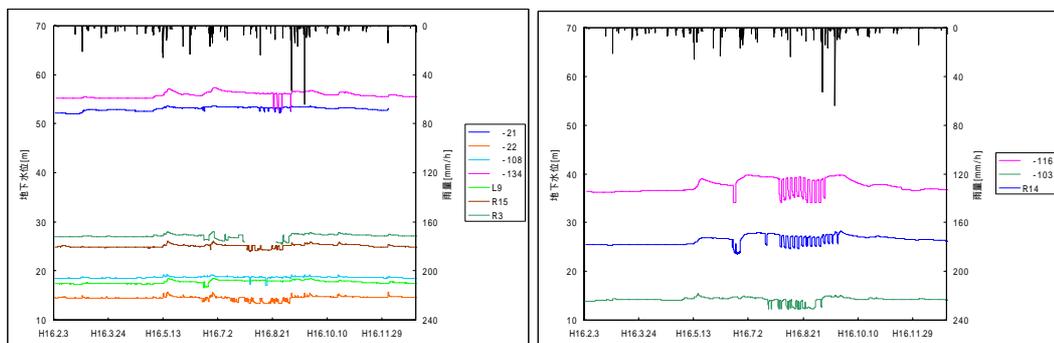


図 7-24 地下水位観測結果(国土交通省, 左: 河川に近い, 右: 河川から離れている)

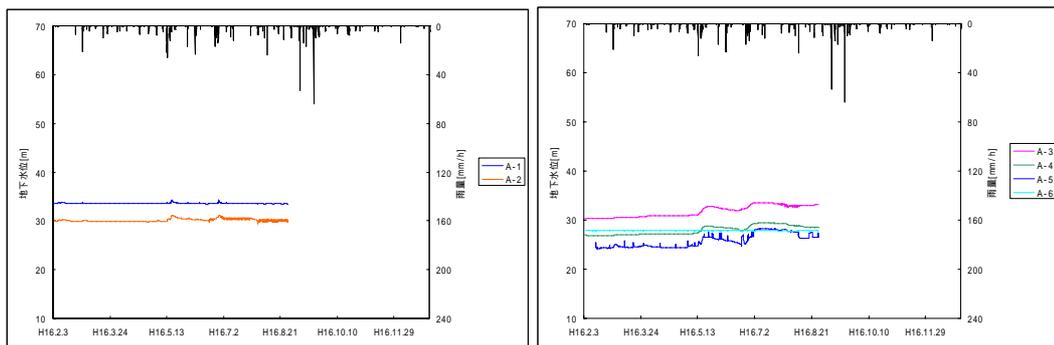


図 7-25 地下水位観測結果(甘木市, 左: 河川に近い, 右: 河川から離れている)

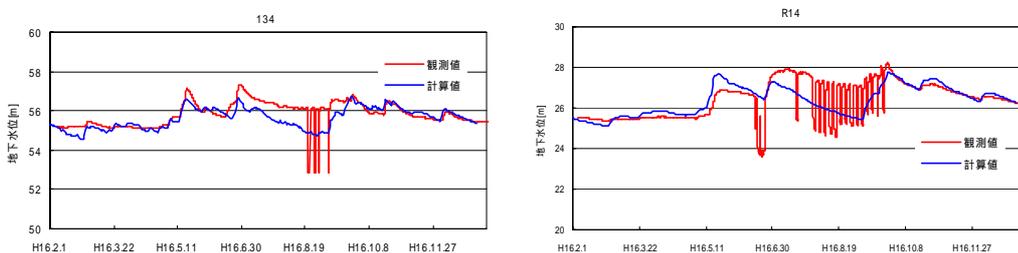


図 7-26 計算結果(ケース 1)

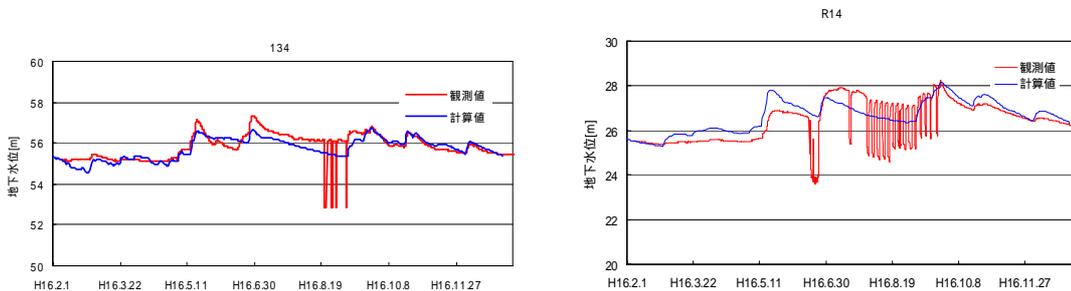


図 7-27 計算結果(ケース 2)

ケース 1 の場合は、両井戸とも夏場の地下水位が再現されない。ケース 2 の場合は、河川近くの 134 の地下水位の再現性はよくなるが、河川から離れている R14 への影響は小さい。これより、灌漑期の地下水位上昇は、河川近くでは堰および灌漑用水の複合的影響、河川から離れた場所では、灌漑用水による影響と考えられる。

8. 番匠川流域での地下水解析

8.1. 資料収集

解析範囲は以下を考慮して決定する。

- ・ 観測水位または堰を境界条件とする
- ・ 番匠橋付近までは、浅層と深層帯水層は一つの不圧帯水層と考えられるが、番匠橋より下流で不圧帯水層と被圧帯水層に分かれる。
- ・ 佐伯市の上岡揚水井により地下水が塩水化しており、下流域の地下水流動は複雑となる。
- ・ 同時流量観測によると山梨子橋付近で伏流し、番匠橋下流付近で流出している。

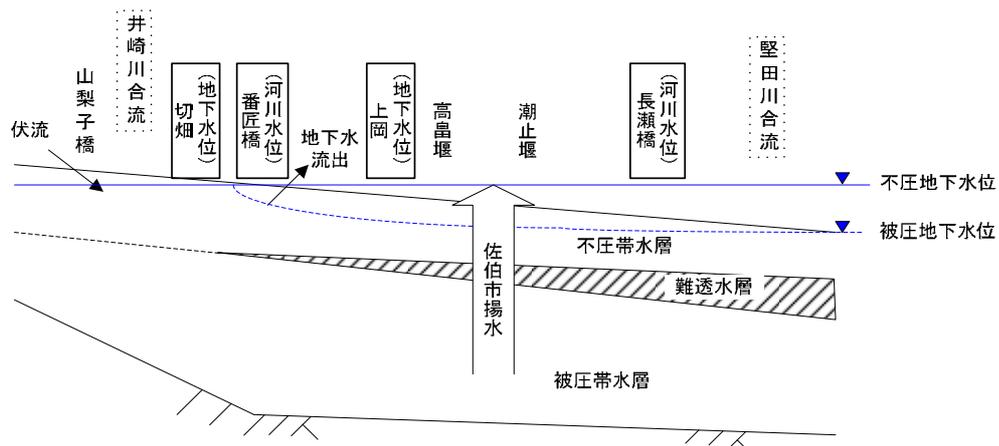


図 8-1 番匠川中流～下流模式図

これらから、地下水解析範囲を図 8-2 のように設定する。なお、下流端境界条件としては、塩水の浸入が見られるため、上流からの淡水の流れは塩水でせき止められるとして、流出入なしとする。



図 8-2 地下水解析範囲(オレンジ部分)

1) 収集資料概要

収集した資料の概要を表 8-1 に示す。

表 8-1 収集資料(その1)

| 分類 | データ | 出所 | 地点, 期間等 |
|------------|---------|--|---|
| 時系列 データ | 雨量(日) | 佐伯河川国道事務所 | 因尾・・・S52～H16 佐伯・・・S52～H16 宇藤木・・・S52～H16 直川・・・S52～H16 青山・・・S52～H16 |
| | 雨量(時) | アメダス(気象庁) | 佐伯・・・S52～H16 |
| | 気温 | アメダス(気象庁) | 佐伯・・・S52.3～H16 |
| | 河川水位(日) | 佐伯河川国道事務所 | 小川橋・・・S53～H16 白山・・・S52～S57, S63～H16 番匠橋・・・S52～H16 長瀬橋・・・S52～S54, H3～H16 灘・・・S52～S54, S56～H16 間庭橋・・・S52～H16 蕨野橋・・・S52～H16 堅田橋・・・S52～H16 |
| | 河川流量(日) | 佐伯河川国道事務所 | 小川橋・・・S57～H15 番匠橋・・・S52～H15(ただし S62 除) 間庭橋・・・S57～H15 蕨野橋・・・H6～H15 堅田橋・・・S55～H15 |
| | 地下水位(日) | 佐伯河川国道事務所 | 切畑(浅, 深)・・・S53～H16 上岡(浅, 深)・・・S56～H16 |
| | 地下水位(月) | 番匠川水資源保全及び活用計画 検討業務報告書 H10.3 (佐伯河川国道事務所) | 佐伯市上岡取水井戸(第1～第9) ・・・S56～H8 |

| | | | |
|--|--------------|-----------|---------------------------------|
| | 地下水揚水量 | 佐伯河川国道事務所 | 佐伯市上岡浄水場・・・S61～H8 およびH13～H16 |
| | ダム流入・放流量・貯水位 | 佐伯河川国道事務所 | 床木ダム・・・S63～H16 |

表 8-2 収集資料(その2)

| 分類 | データ | 出所 | 地点, 期間等 |
|-----------------|-----------------|--|--|
| 流域 データ | 行政界 | 数値地図 25000(行政界・海岸線) (国土地理院) | 佐伯市(佐伯市および周辺 8 町 村は H17.3 合併) |
| | 標高 | 50m メッシュ標高(国土地理院) | 番匠川流域内 |
| | 土地利用 | 国土数値情報 土地利用メッシュ (国土交通省) | 番匠川流域内 |
| | 不浸透域 (道路・鉄道) | 数値地図 25000 (空間データ基盤) | 番匠川流域内 |
| 河川 データ | 河川縦・横断図 | 佐伯河川国道事務所 | -1k～19k (0.2k ピッチ)・・・H14 S57, S62, H5, H9, H14 重ね合わせ 図 |
| | 河川平面図 | 佐伯河川国道事務所 | |
| | 河川構造物 | 佐伯河川国道事務所 | 固定堰・床止台帳(直轄区間) |
| | 取水量 | 正常流量検討資料 (佐伯河川国道事務所) | 直轄区間および指定区間 |
| | 還元量(排水量) | 佐伯河川国道事務所 | |
| | 同時流量観測 | 佐伯河川国道事務所 | 山梨子橋～檉野・・・S52～H4 |
| | 旧河道状況 | 九州地方の古地理に関する調査(九 州地方整備局) | 番匠川水系 |
| 水理 地質 データ | 帯水層構造 | 番匠川水資源保全及び活用計画検 討業務報告書 H10.3 (佐伯河川国道事務所) | |

2) 時系列データ

(1)雨量

雨量データについては、アメダス佐伯の時間データおよび国土交通省観測地点での日データを収集・整理した。各観測所の年雨量を表 8-3 および図 8-3 に示す。また、各観測所間の日雨量の相関関係について表 8-4 に示した。表より、国土交通省の観測所間の相関は高いことがわかる。アメダス観測所との相関については、全年で見ると低くなっているが、各年の相関を見ると 1996 年を境に相関が良くなっている(表 8-5)。これは、1996 年から日雨量算出の日界が 0 時になったため、それ以前は 9 時であったためと考えられる(アメダス日雨量の算出は、全年、0 時)。

解析では、国土交通省観測の 5 地点で流域をテーゼン分割し、それぞれの観測地点の時間雨量として次式で変換した値を用いることとする。

$$(\text{国土交通省各観測地点の時間雨量データ}) = a \times (\text{アメダス時間雨量データ}) + b$$

ただし、係数 a と b は、1996 年～2004 年の日雨量関係から得られた平均値



図 8-3 雨量観測地点

表 8-3 各観測所の年雨量

| 地点 年 | 因尾 | 佐伯 | 宇藤木 | 直川 | 青山 | アメダス佐伯 |
|---------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|
| 1977 | 1851.4 | 1902 | 2097.4 | 1876 | 2252.6 | 1865 |
| 1978 | 1544.4 | 1577.4 | 1657.2 | 1803.2 | 1874.4 | 1494 |
| 1979 | 2458.3 | 2581.9 | 2761.8 | 2989.4 | 3078.6 | 2311 |
| 1980 | 2241.9 | 2994.6 | 3263.1 | 3023.5 | 3009.8 | 2782 |
| 1981 | 1596 | 1741 | 1512.6 | 1612.8 | 1748.9 | 1570 |
| 1982 | 2582.7 | 2613.9 | 2751.4 | 2621.1 | 3307.6 | 2454 |
| 1983 | 1611.9 | 2070.5 | 1871.3 | 1806.1 | 2227.1 | 1875 |
| 1984 | 1706.3 | 2018.8 | 1788.6 | 1940.7 | 2382.7 | 1718 |
| 1985 | 2042.9 | 1981.5 | 1971.2 | 1999.4 | 2437.723 | 1810 |
| 1986 | 1529.4 | 1800.7 | 1463.2 | 1583.2 | 1872 | 1565 |
| 1987 | 2296 | 2184 | 2405.2 | 2300.5 | 2741.2 | 2136 |
| 1988 | 1719.9 | 1706 | 1782.2 | 1743.7 | 2159.8 | 1622 |
| 1989 | 2153.4 | 2407 | 2176.6 | 2414 | 2713.1 | 2305 |
| 1990 | 2247.4 | 2526 | 2311 | 2672.1 | 2798.8 | 2424 |
| 1991 | 2269.2 | 2126 | 2529.8 | 2362.7 | 2532.6 | 2126 |
| 1992 | 1925.4 | 1897 | 2148.7 | 2276.7 | 2668.3 | 1848 |
| 1993 | 3146.5 | 3184 | 2998.5 | 3344 | 3420.5 | 3068 |
| 1994 | 1244.5 | 1252 | 1300.5 | 1324 | 1512.5 | 1221 |
| 1995 | 1681 | 1726 | 1675.5 | 1562 | 1847.5 | 1626 |
| 1996 | 1585 | 1488 | 1702 | 1509 | 1622 | 1412 |
| 1997 | 2124 | 1822 | 2199 | 2001 | 2037 | 1755 |
| 1998 | 2486 | 2419 | 2472 | 2453 | 2771 | 2400 |
| 1999 | 3269 | 3020 | 3255 | 3199 | 3604 | 2548 |
| 2000 | 1840 | 1906 | 2212 | 2051 | 2215 | 1872 |
| 2001 | 1776 | 2032 | 1888 | 2003 | 2193 | 2108 |
| 2002 | 1933 | 1519 | 2078 | 1856 | 1691 | 1595 |
| 2003 | 2551 | 3051 | 2699 | 2934 | 3293 | 2777 |
| 2004 | 3202 | 2816 | 3231 | 3292 | 3229 | 2747 |

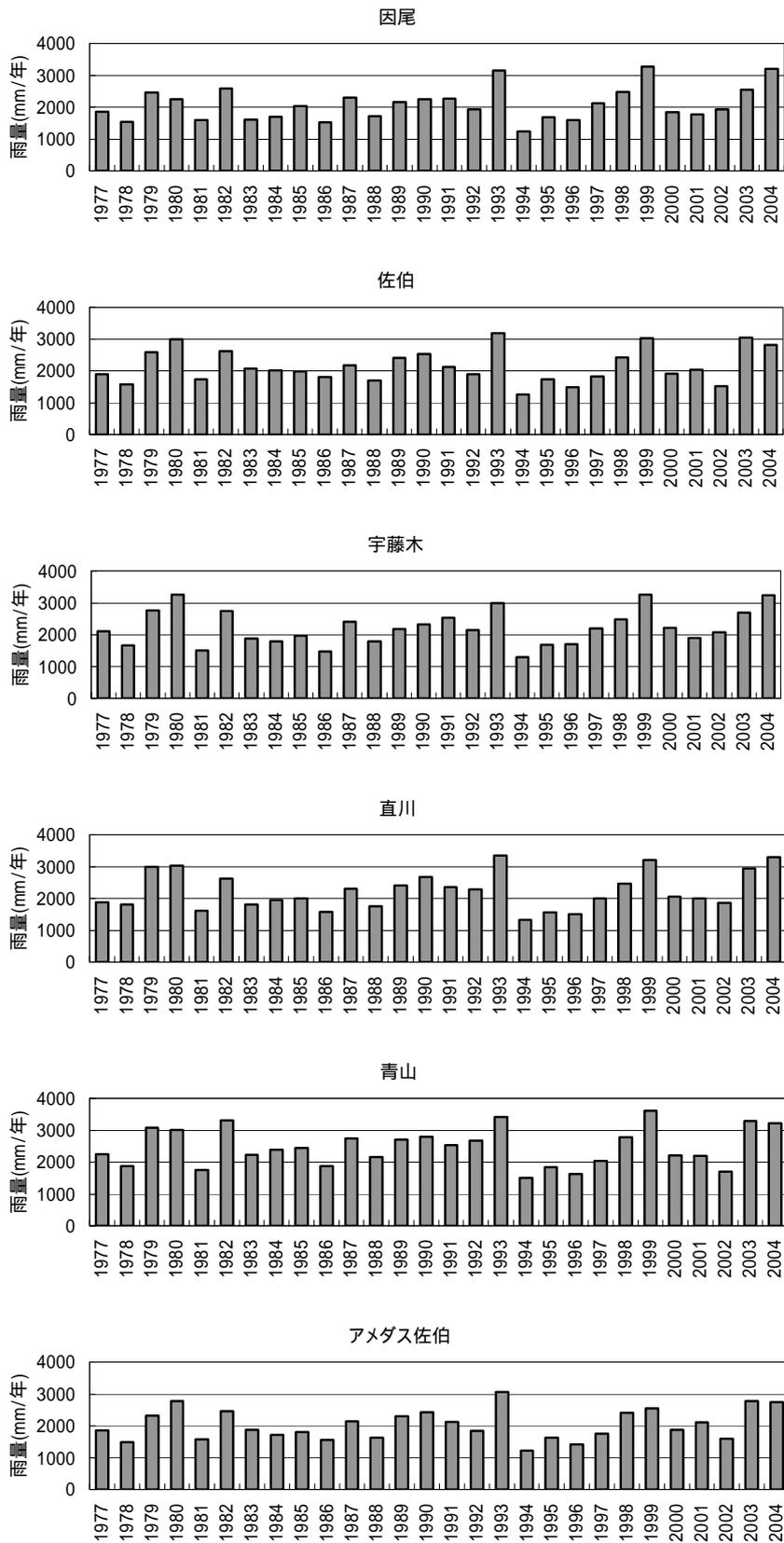


図 8-4 年雨量

表 8-4 各観測所間の相関係数(1977～2004)

| | 因尾 | 佐伯 | 宇藤木 | 直川 | 青山 | アメダス佐伯 |
|--------|------|------|------|------|------|--------|
| 因尾 | 1.00 | | | | | |
| 佐伯 | 0.86 | 1.00 | | | | |
| 宇藤木 | 0.93 | 0.88 | 1.00 | | | |
| 直川 | 0.93 | 0.92 | 0.92 | 1.00 | | |
| 青山 | 0.85 | 0.94 | 0.87 | 0.91 | 1.00 | |
| アメダス佐伯 | 0.75 | 0.81 | 0.76 | 0.78 | 0.78 | 1.00 |

表 8-5 アメダス佐伯と各観測所の年別相関係数

| 年 | 因尾 | 佐伯 | 宇藤木 | 直川 | 青山 |
|------|------|------|------|------|------|
| 1977 | 0.60 | 0.67 | 0.61 | 0.57 | 0.64 |
| 1978 | 0.71 | 0.77 | 0.73 | 0.74 | 0.72 |
| 1979 | 0.77 | 0.80 | 0.75 | 0.81 | 0.83 |
| 1980 | 0.58 | 0.65 | 0.62 | 0.62 | 0.64 |
| 1981 | 0.60 | 0.47 | 0.73 | 0.52 | 0.48 |
| 1982 | 0.60 | 0.75 | 0.71 | 0.68 | 0.72 |
| 1983 | 0.66 | 0.76 | 0.68 | 0.75 | 0.79 |
| 1984 | 0.53 | 0.66 | 0.53 | 0.58 | 0.61 |
| 1985 | 0.73 | 0.81 | 0.65 | 0.78 | 0.77 |
| 1986 | 0.56 | 0.62 | 0.55 | 0.52 | 0.54 |
| 1987 | 0.68 | 0.78 | 0.79 | 0.77 | 0.79 |
| 1988 | 0.83 | 0.88 | 0.83 | 0.77 | 0.83 |
| 1989 | 0.64 | 0.71 | 0.63 | 0.72 | 0.65 |
| 1990 | 0.72 | 0.76 | 0.76 | 0.73 | 0.63 |
| 1991 | 0.74 | 0.78 | 0.73 | 0.78 | 0.72 |
| 1992 | 0.72 | 0.76 | 0.73 | 0.68 | 0.67 |
| 1993 | 0.81 | 0.76 | 0.75 | 0.77 | 0.81 |
| 1994 | 0.62 | 0.67 | 0.65 | 0.56 | 0.57 |
| 1995 | 0.70 | 0.74 | 0.71 | 0.71 | 0.73 |
| 1996 | 0.90 | 0.99 | 0.92 | 0.93 | 0.94 |
| 1997 | 0.96 | 1.00 | 0.94 | 0.97 | 0.97 |
| 1998 | 0.91 | 0.99 | 0.89 | 0.92 | 0.97 |
| 1999 | 0.80 | 0.85 | 0.81 | 0.83 | 0.89 |
| 2000 | 0.85 | 0.99 | 0.78 | 0.90 | 0.93 |
| 2001 | 0.93 | 0.99 | 0.95 | 0.93 | 0.96 |
| 2002 | 0.75 | 1.00 | 0.78 | 0.81 | 0.91 |
| 2003 | 0.84 | 0.90 | 0.85 | 0.85 | 0.87 |
| 2004 | 0.94 | 1.00 | 0.96 | 0.97 | 0.97 |

表 8-6 変換係数

| 係数 | 因尾 | 佐伯 | 宇藤木 | 直川 | 青山 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| a | 1.047 | 1.024 | 0.975 | 1.033 | 1.087 |
| b | 0.569 | 0.122 | 0.657 | 0.433 | 0.515 |

(2) 気温

気温は、アメダス佐伯の日気温データを用いる。

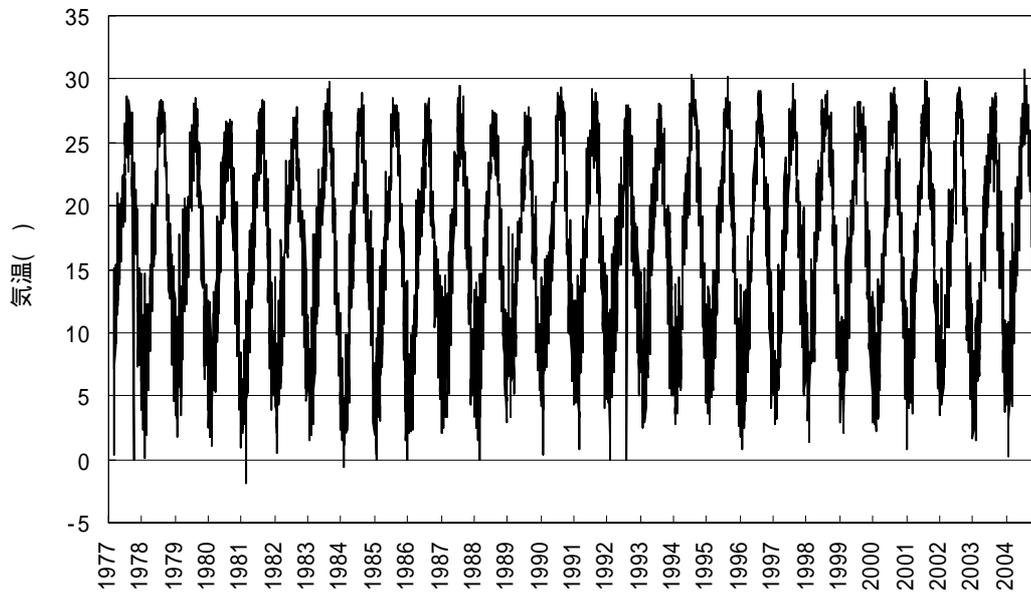


図 8-5 日平均気温 (アメダス佐伯)

(3) 河川水位

流域内の水位観測所 8 箇所について、日水位データを整理した。



図 8-6 水位観測所

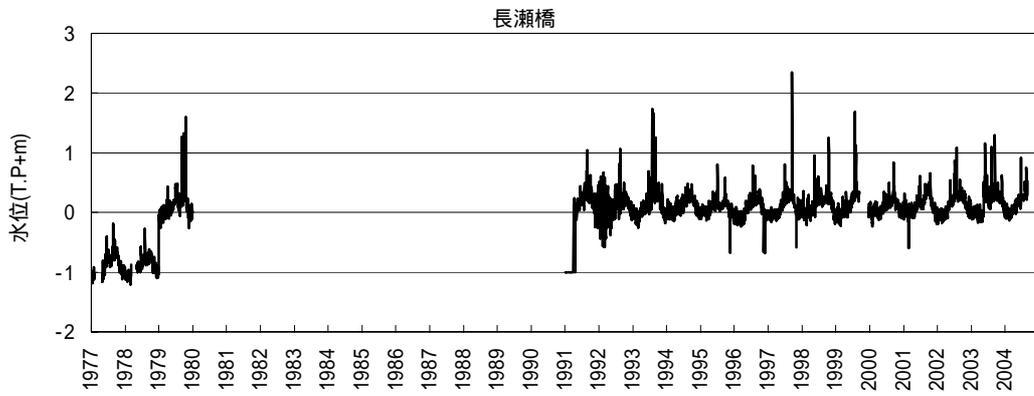
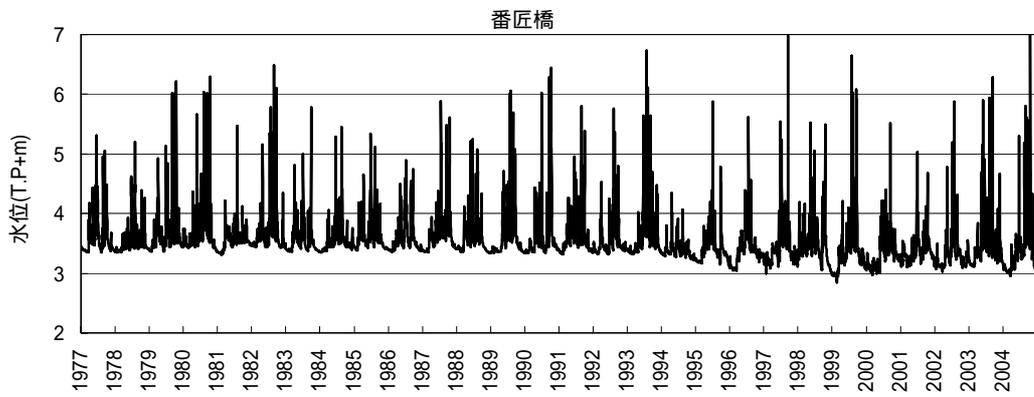
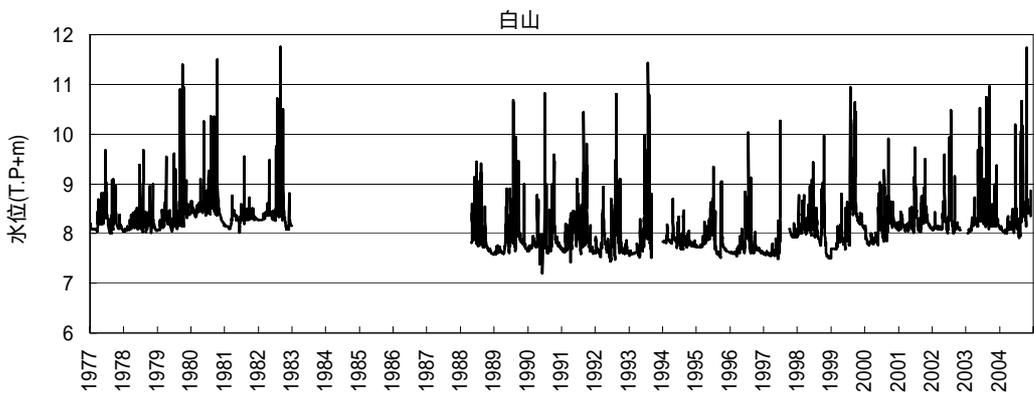
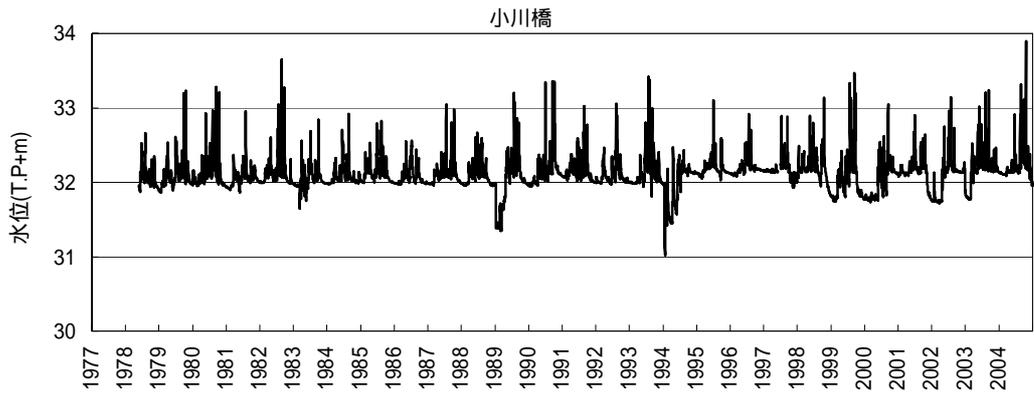


図 8-7 河川水位(その1)

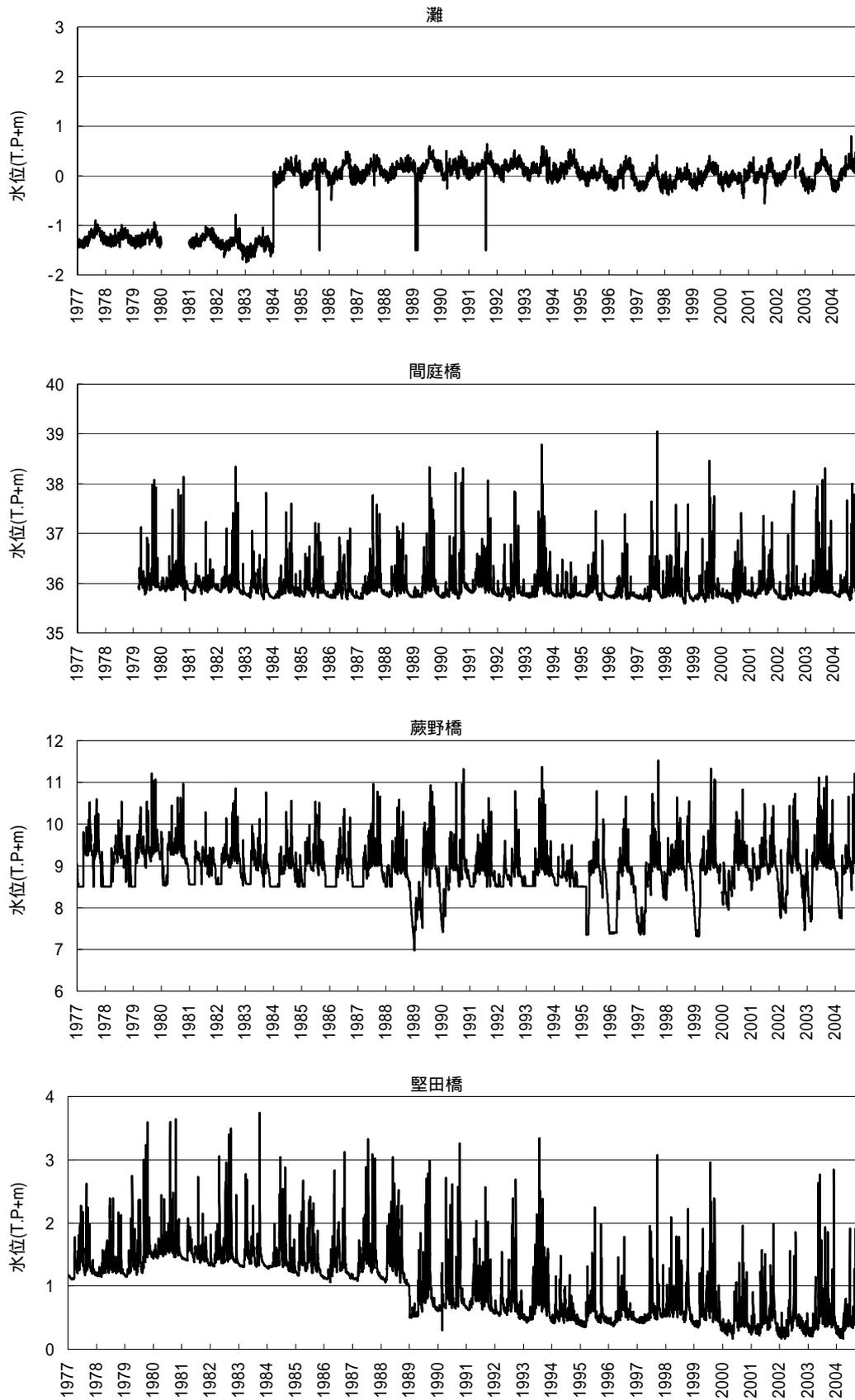


図 8-8 河川水位(その2)

(4)河川流量

河川流量は、流域内の5箇所の日流量を収集整理した。

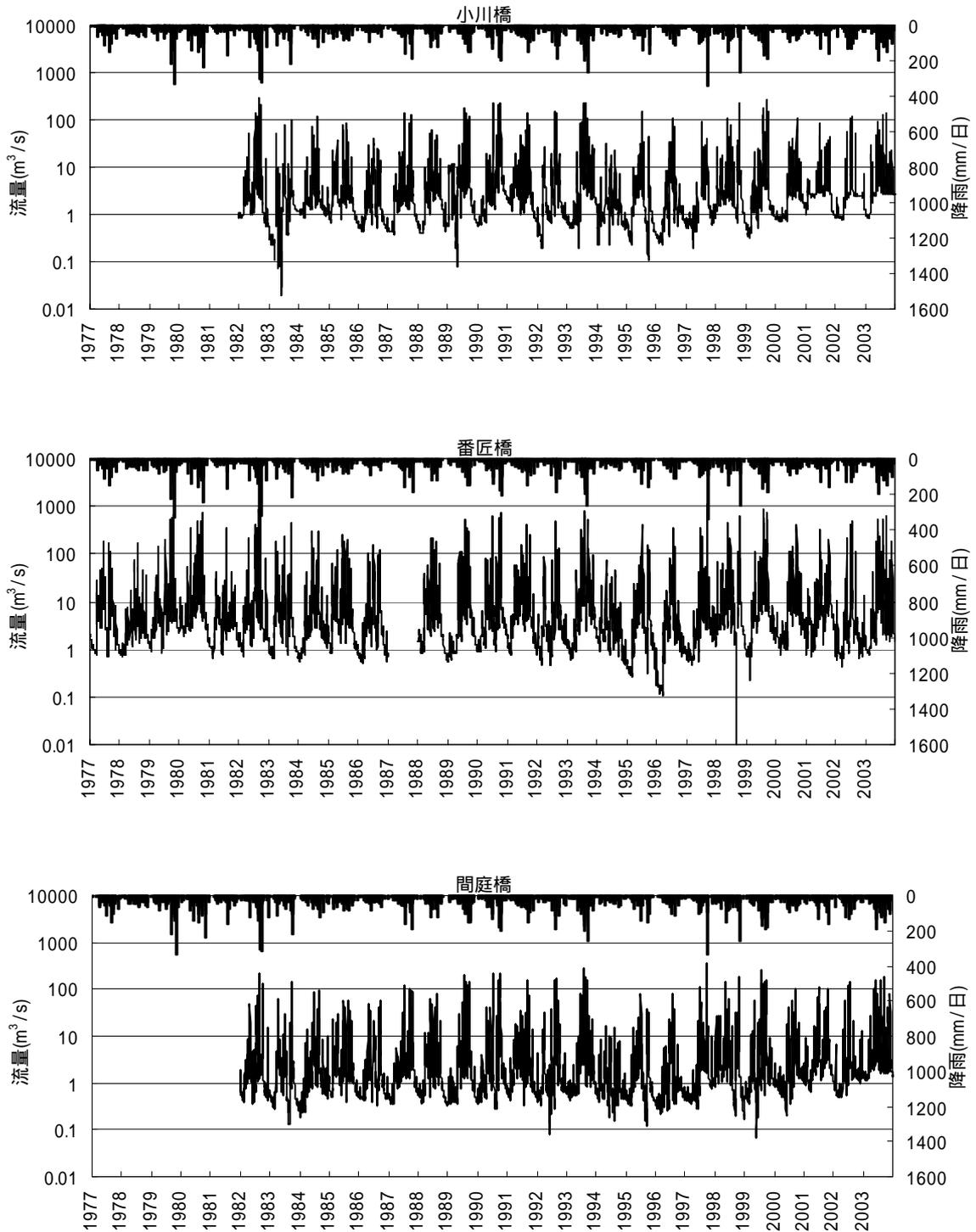


図 8-9 日流量ハイドロ(その1)

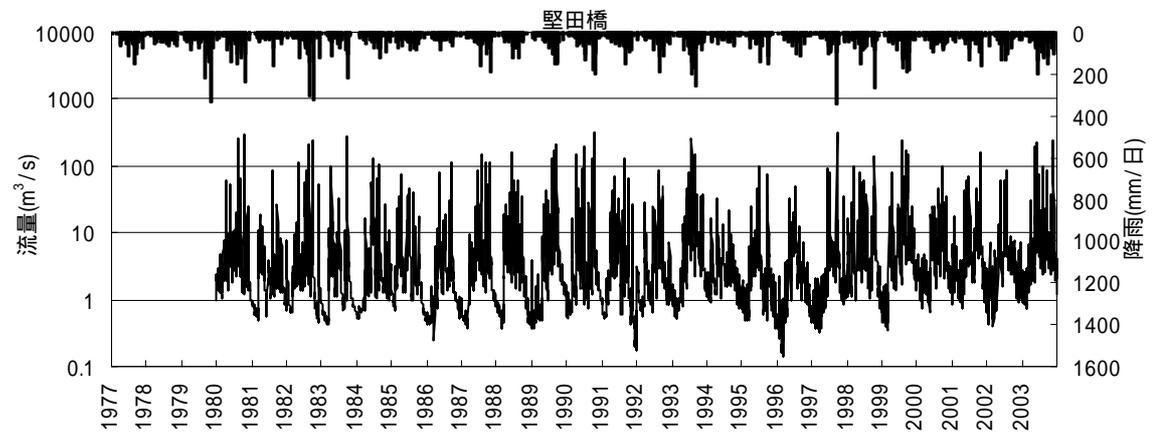
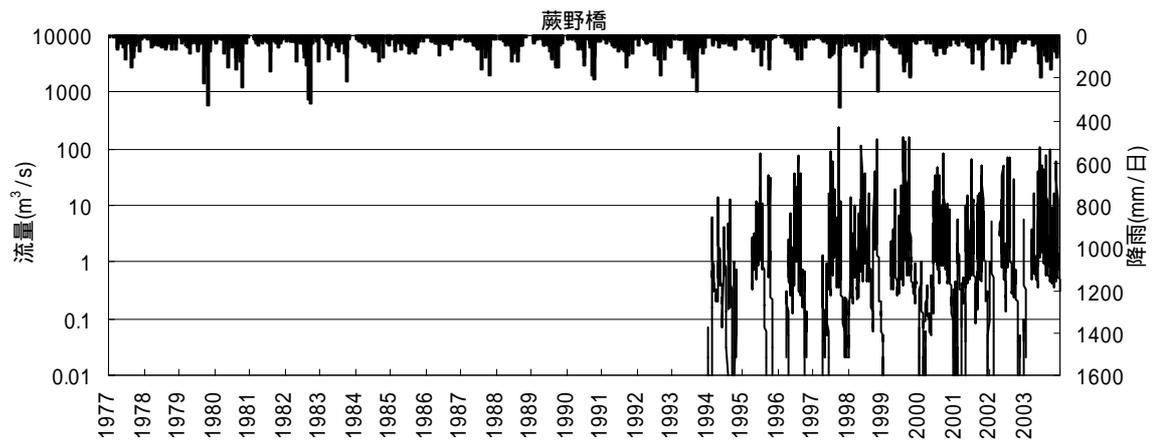


図 8-10 日流量ハイドロ(その2)

(5)地下水位

国土交通省の地下水観測所 2 箇所の日地下水位および佐伯市上岡揚水井の地下水位（ポンプ運転水位，自然水位）のデータを収集，整理した．上岡揚水井の地下水位(運転水位)は，月 1～2 回程度計測されているものであり，月平均値ではない．



図 8-11 地下水観測位置(国土交通省)

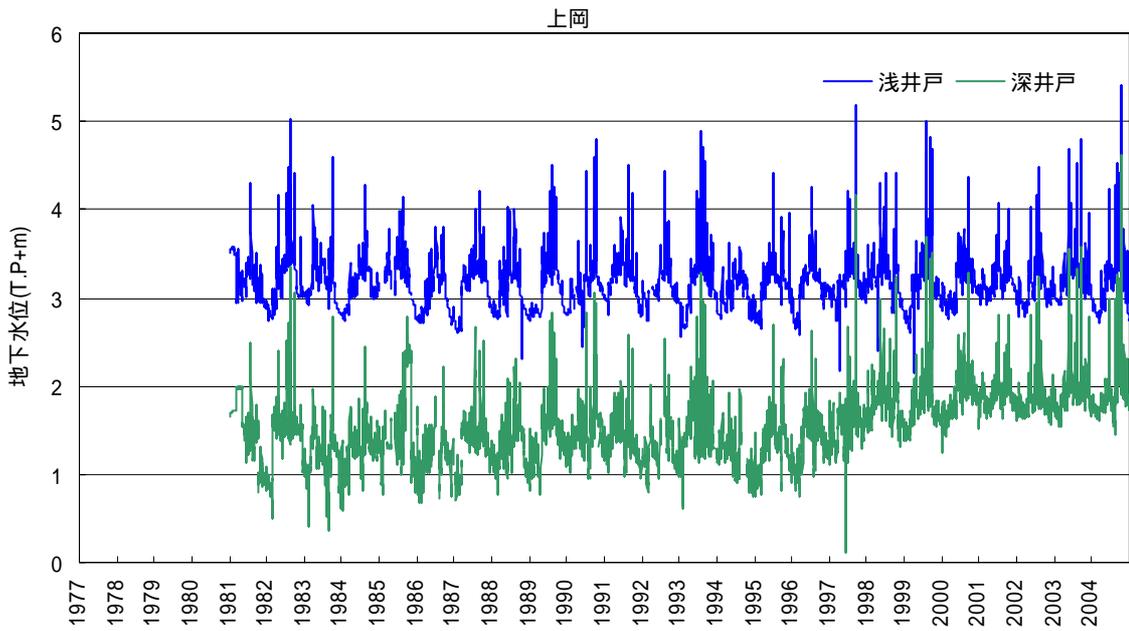
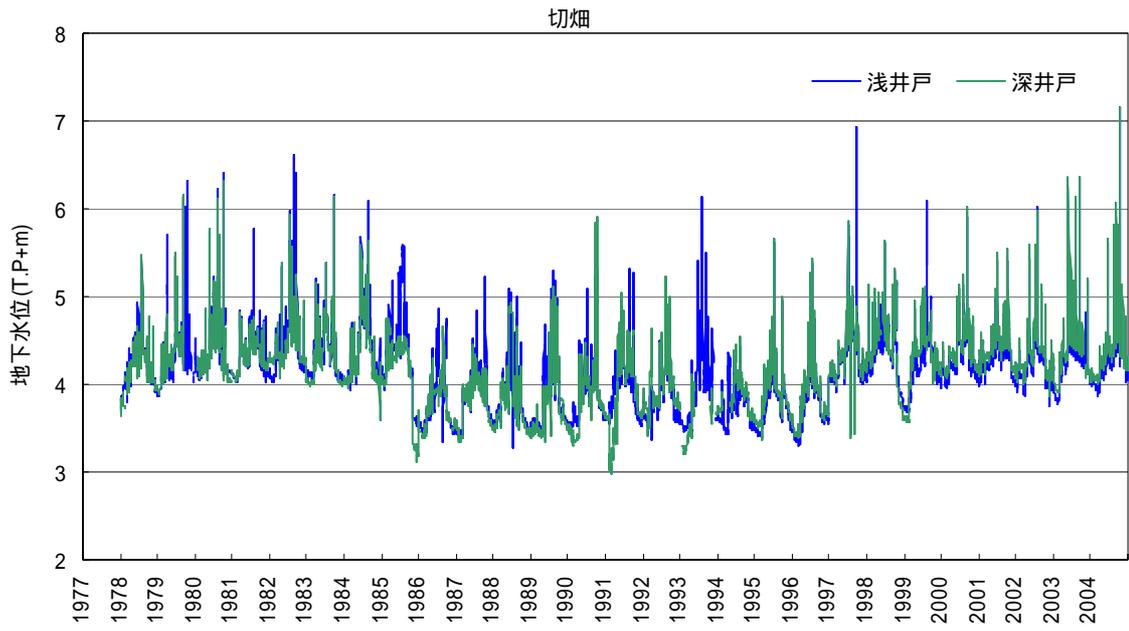


图 8-12 地下水水位 (国土交通省)

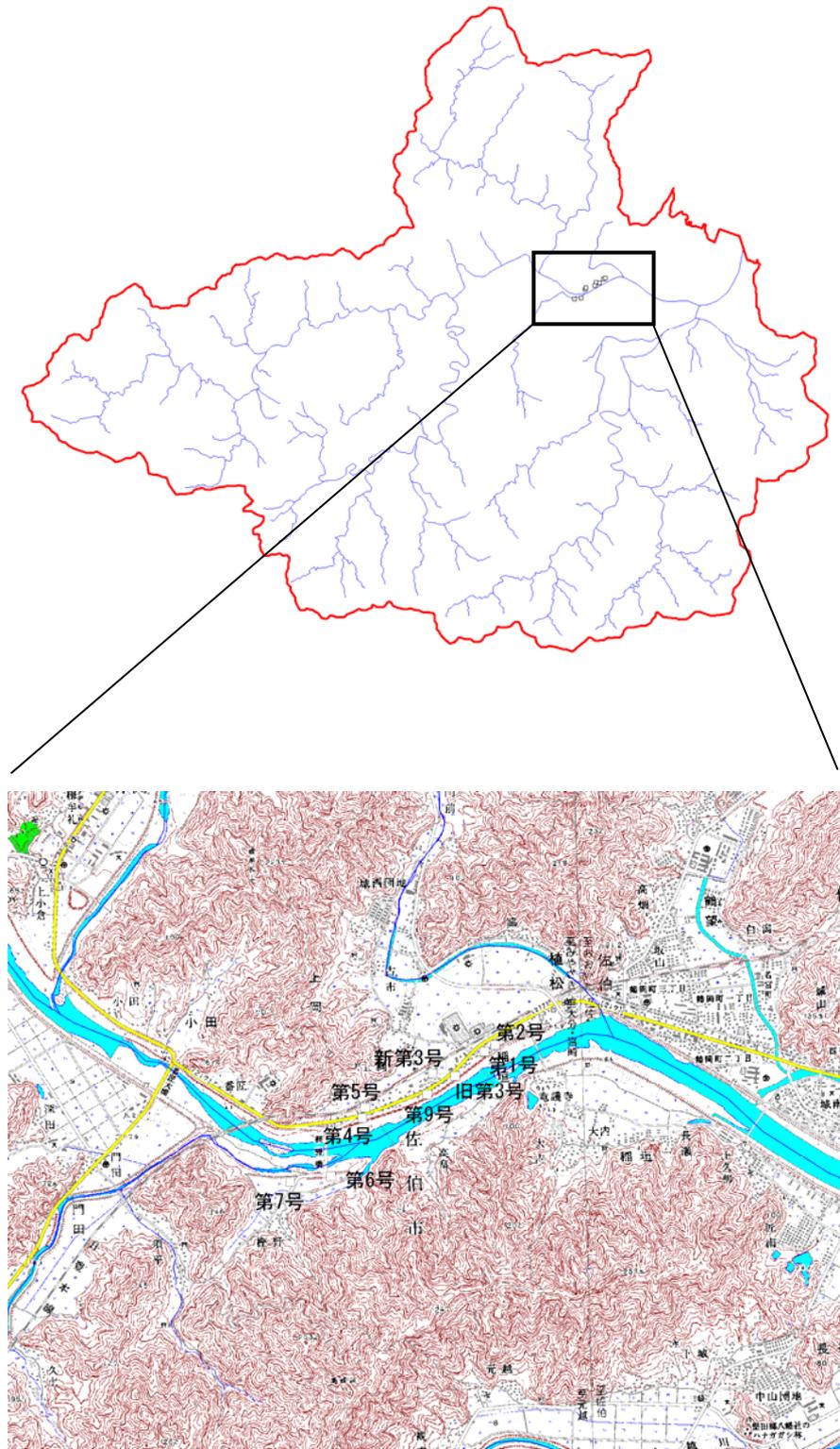


图 8-13 佐伯市上岡揚水井位置

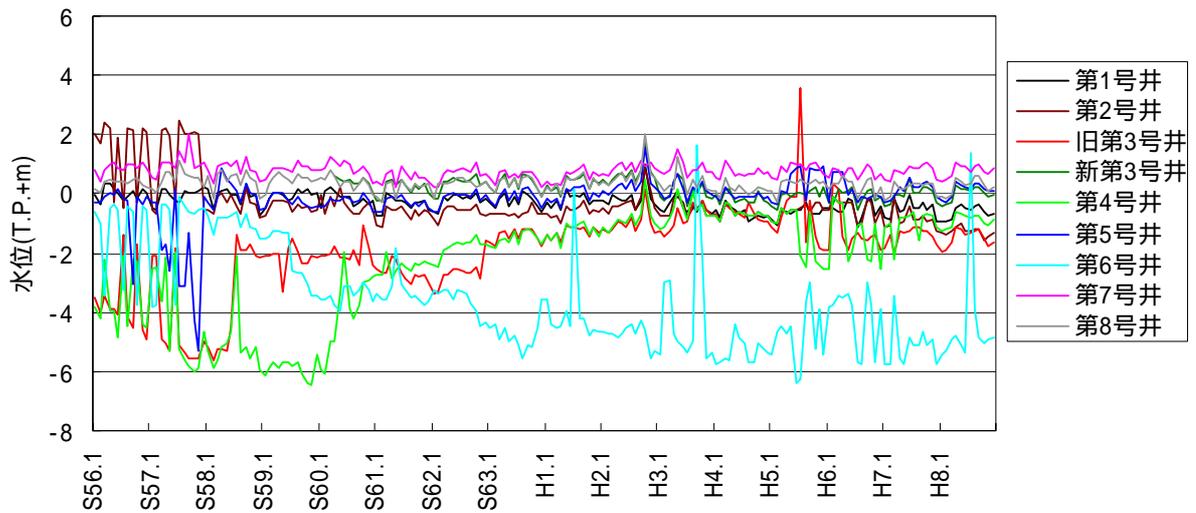


図 8-14 上岡揚水井の地下水位

(6)地下水揚水量

S61～H8 までは、佐伯市揚水井ごとの揚水量データはなく、各揚水井が接続されている第1～第3 浄水池への送水量データのみである。各浄水池への揚水井の接続状況は以下の通りである。図 8-15 に浄水場ごとの揚水量を示す。

- 第1浄水場 …… 1, 2, 新3, 旧3 号
- 第2浄水場 …… 6, 7, 9 号
- 第3浄水場 …… 4, 5 号

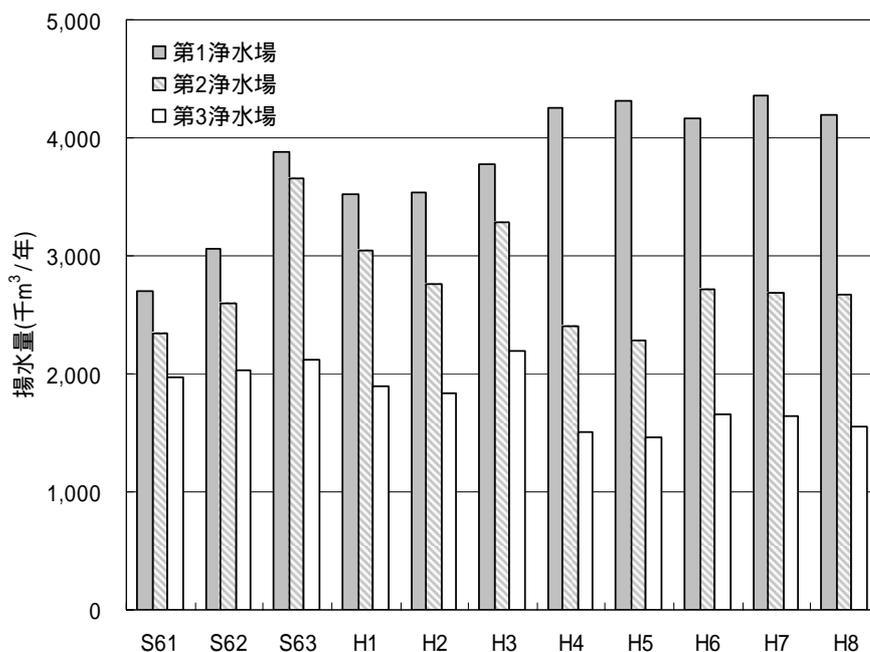


図 8-15 浄水場ごとの揚水量(S61～H8)

また、揚水量データが入手できた S61～H8 および H13～H16 の揚水量の合計を図 8-16 に示す。図より、経年的にはほぼ一定の揚水量と見られる。

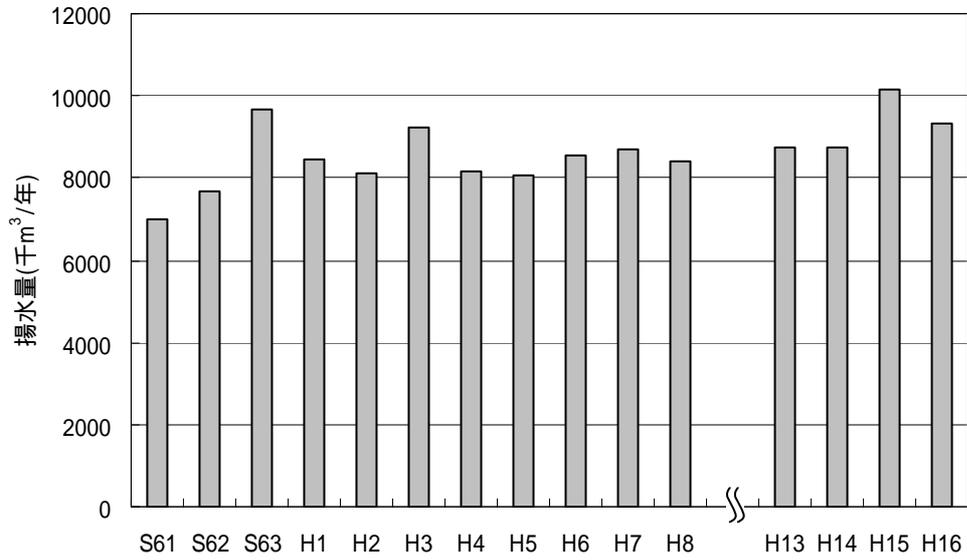


図 8-16 佐伯市の揚水量合計

(7)ダム貯水位・流入量・放流量

床木ダムについて、貯水位、流入量、放流を収集・整理した。

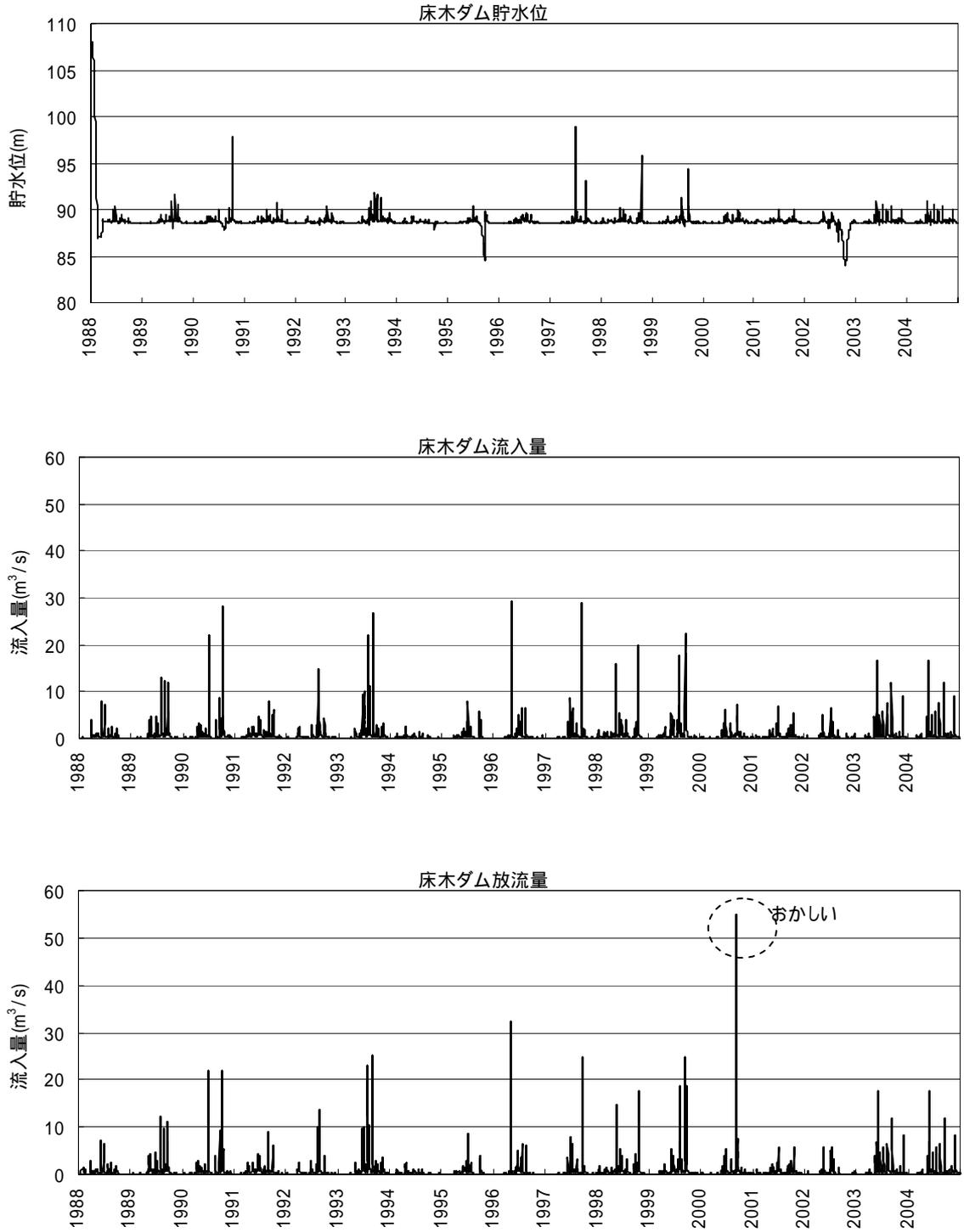


図 8-17 床木ダム貯水位・流入量・放流量

3) 流域データ

(1)行政界

平成 17 年 3 月 3 日，佐伯市および南郡 8 か町村(上浦町，弥生町，本匠村，宇目町，直川村，鶴見町，米水津村，蒲江町)が合併し，新「佐伯市」となっている．**図 8-18**には，旧市町村界を示した．



図 8-18 市町村界

(2)標高

標高は、50mメッシュ標高(1メッシュ 約50m四方)を用いた。

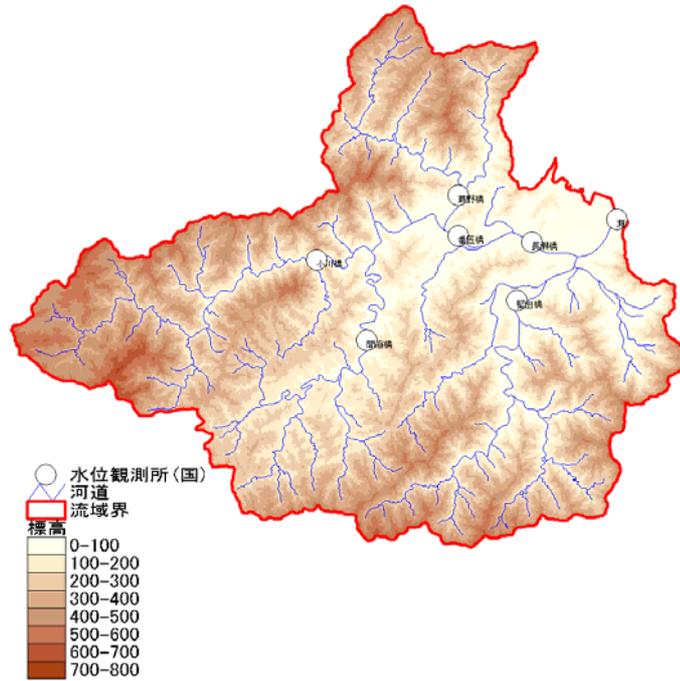


図 8-19 標高

(3)土地利用

土地利用は、国土数値情報の平成9年土地利用メッシュ(1メッシュ 約100m四方)を用いた。

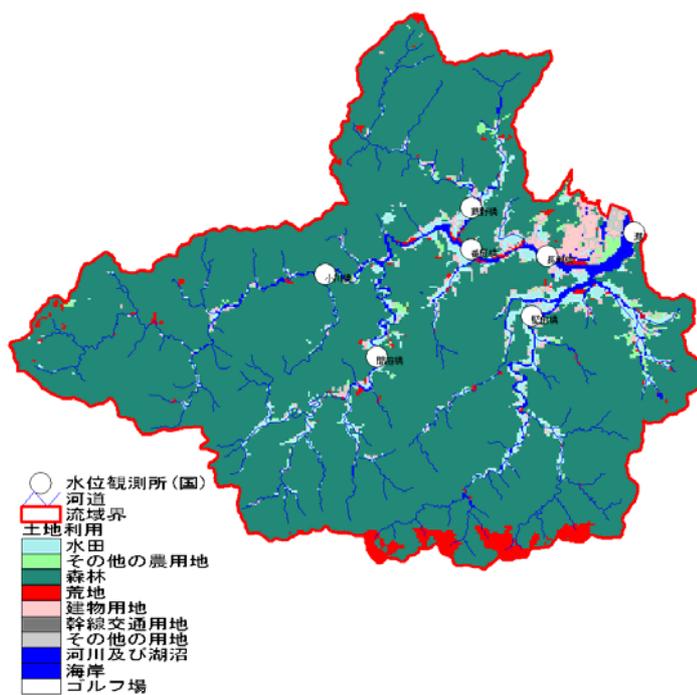


図 8-20 土地利用(平成9年)

(4)不浸透域

不浸透域のうち，道路・鉄道については，空間データ基盤の情報を用いる．

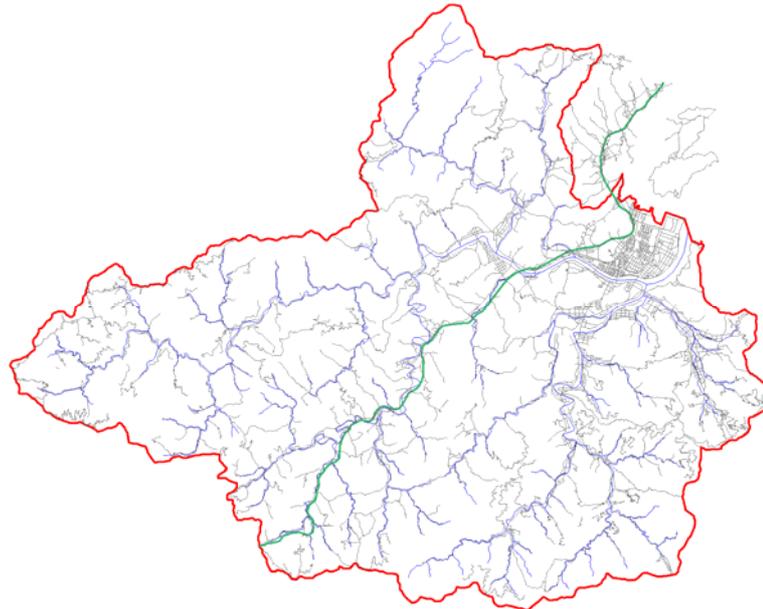


図 8-21 流域内の道路・鉄道

4) 河川データ

(1)河道縦・横断

河道横断図については，本川は0.2kピッチで-1kから19kまでの数値データがある．5kより上流について，1kごとの横断図を示すと，**図 8-23**～**図 8-25**のようである．

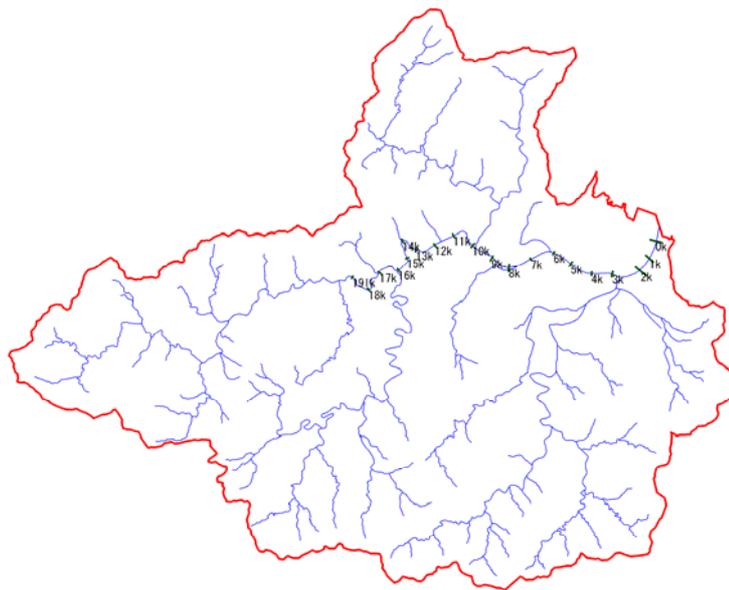


図 8-22 距離標

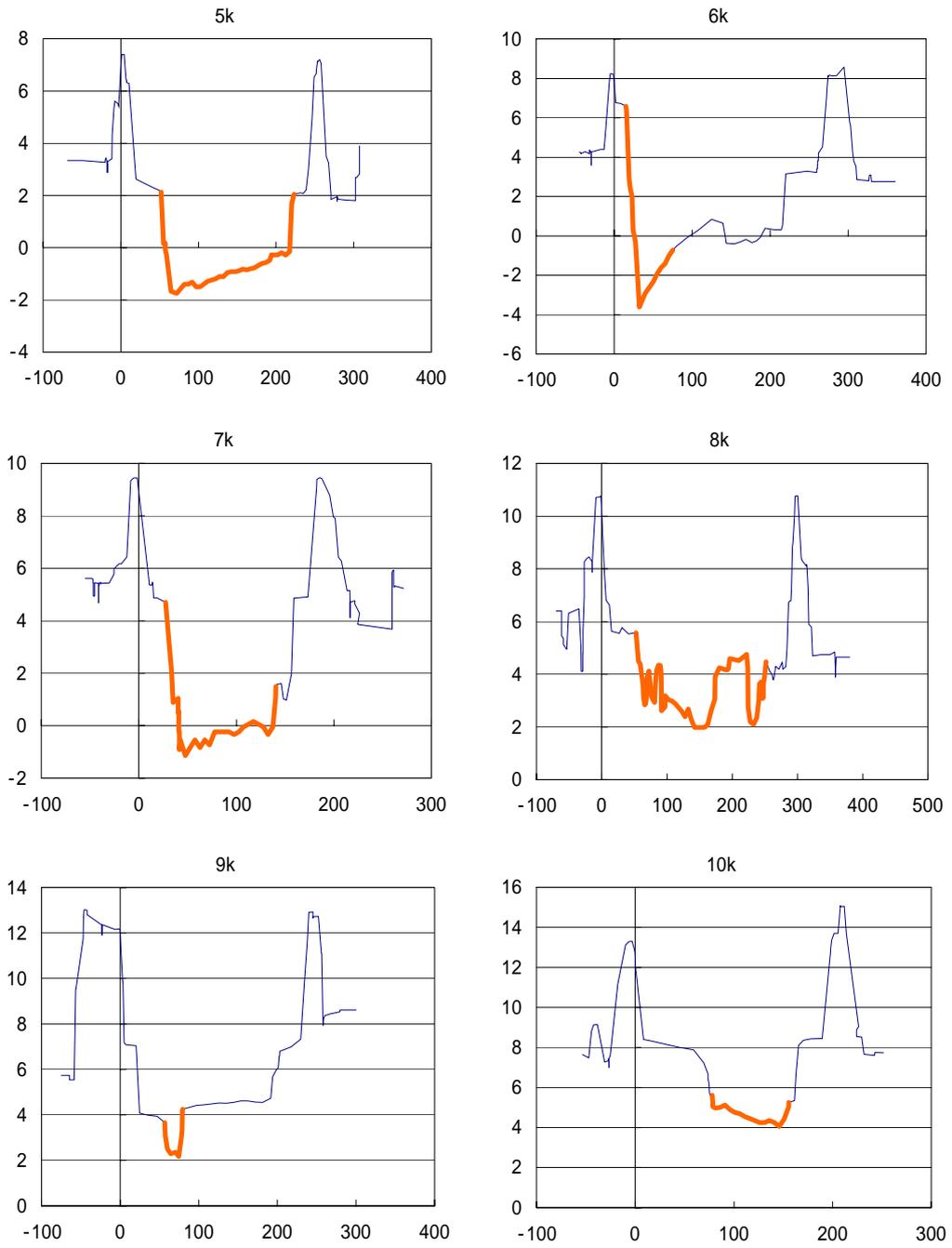


図 8-23 河道横断(その1)

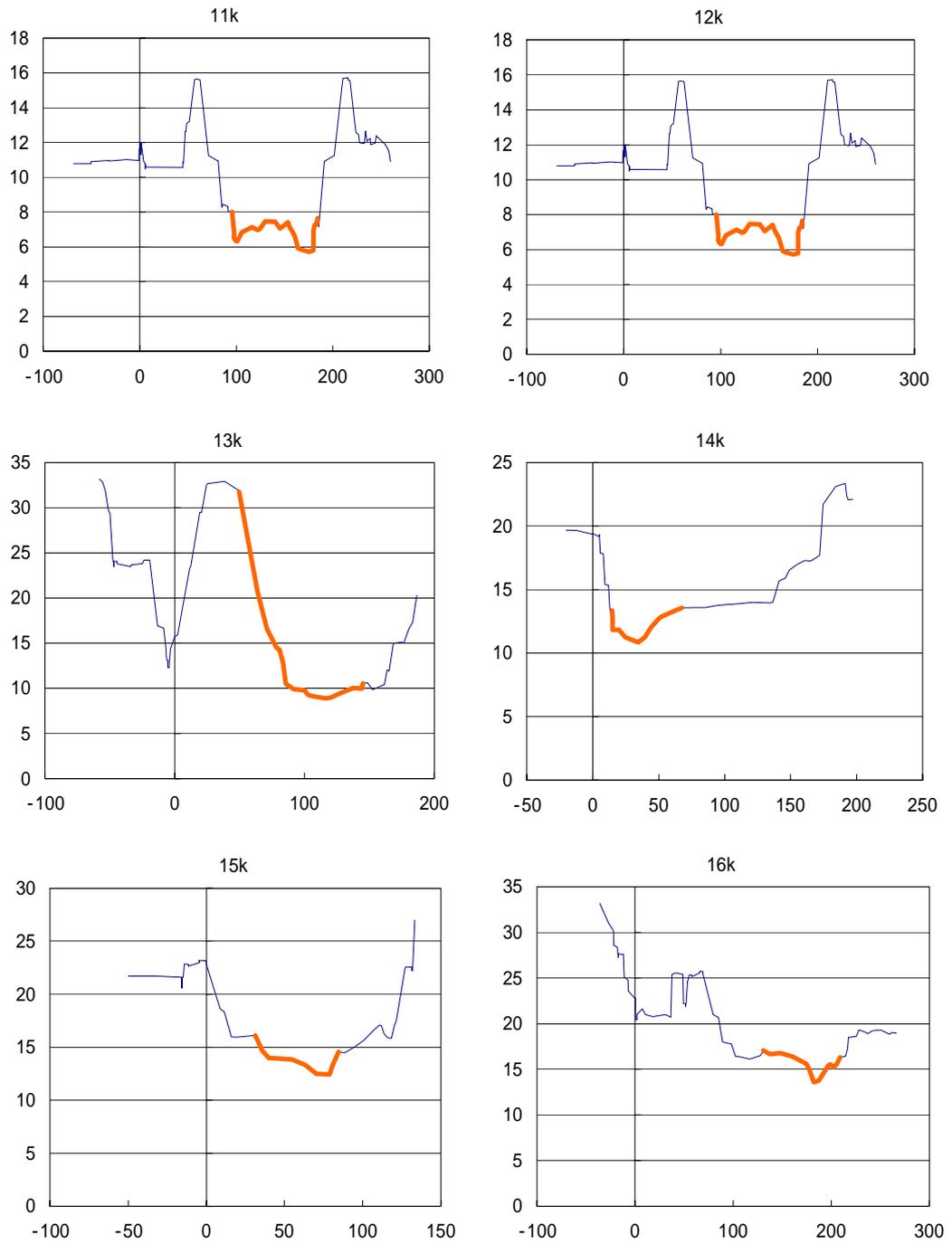


図 8-24 河道横断(その2)

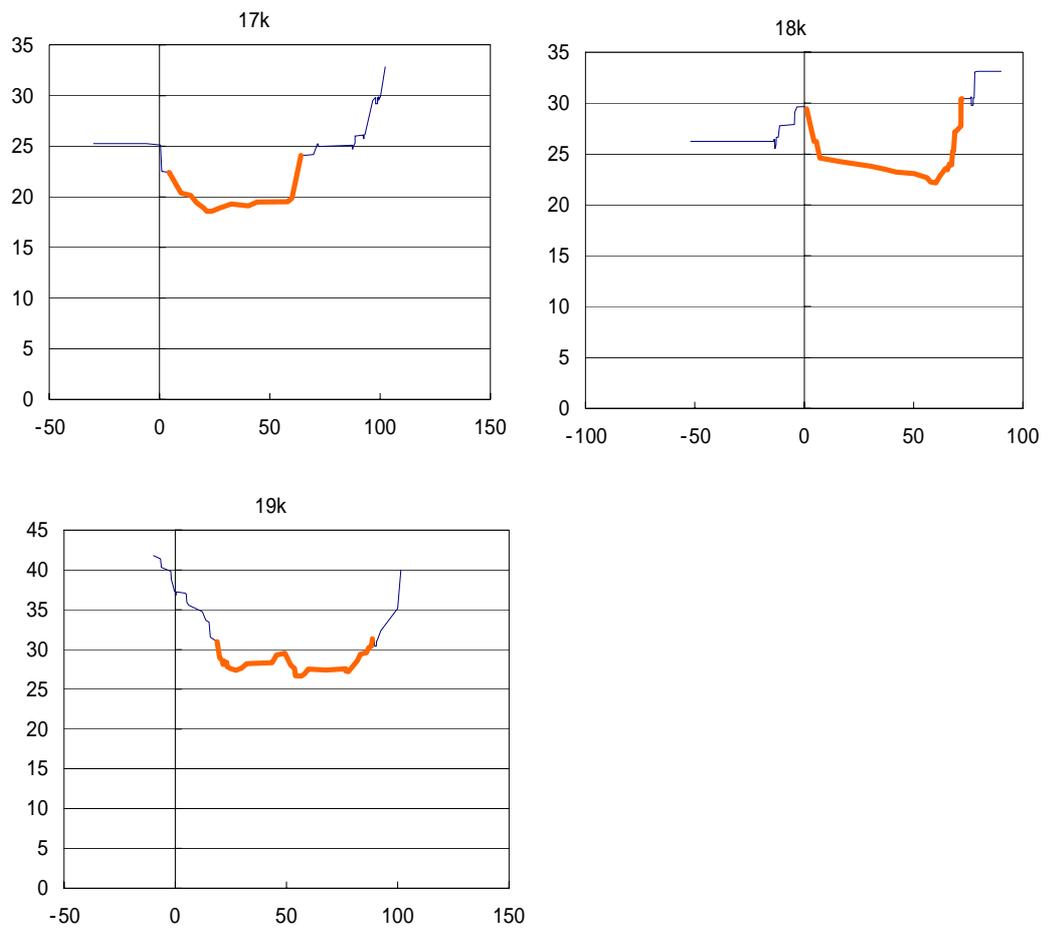


図 8-25 河道横断(その3)

また，過去の横断図を重ね合わせた次頁のように整理されている．

(2)河川構造物

流域内の堰・頭首工および樋門・樋管の位置を図 8-26 に示した。

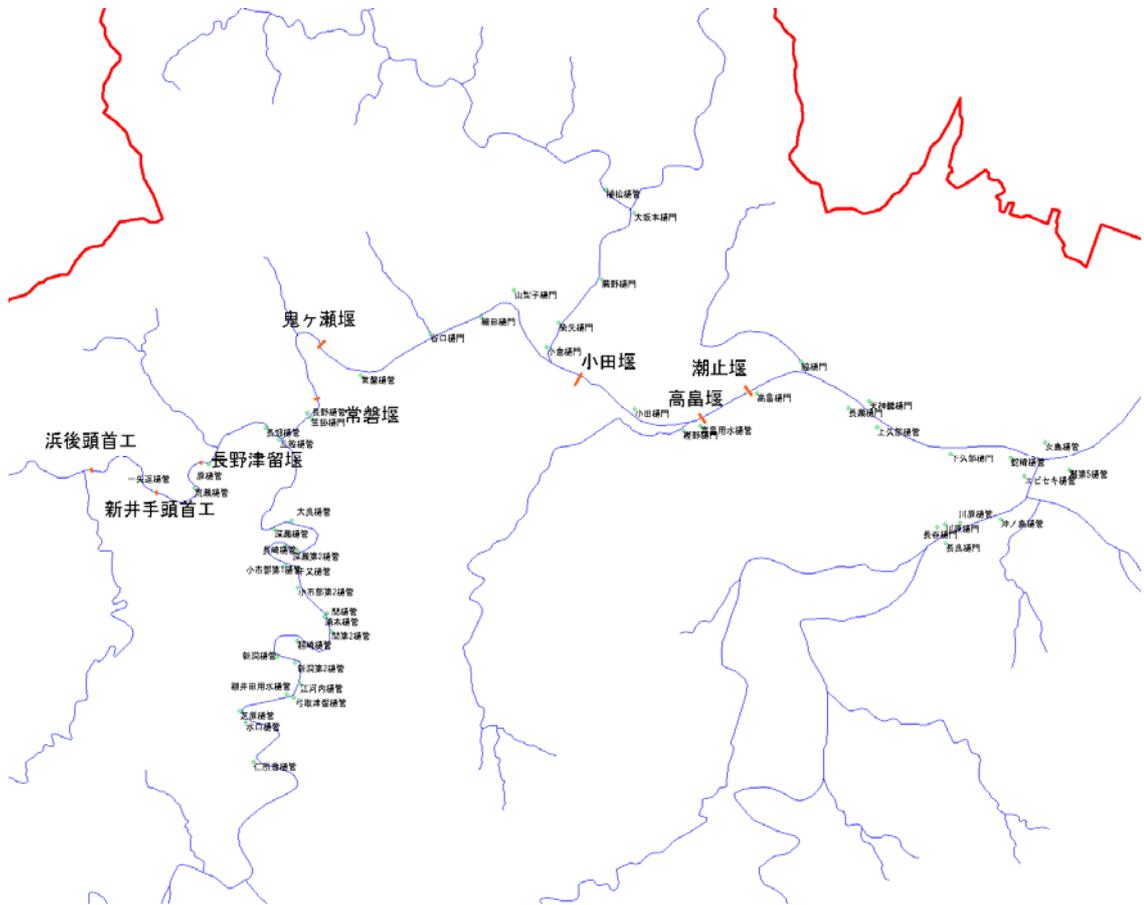


図 8-26 堰，樋門・樋管

(3)取水水量

直轄区間については、取水場所と代かき期，かんがい期，非かんがい期別の許可水利権量データがある。しかし、指定区間については、慣行水利権があり、取水場所が特定できず、期別の実測と思われる取水水量データがある。

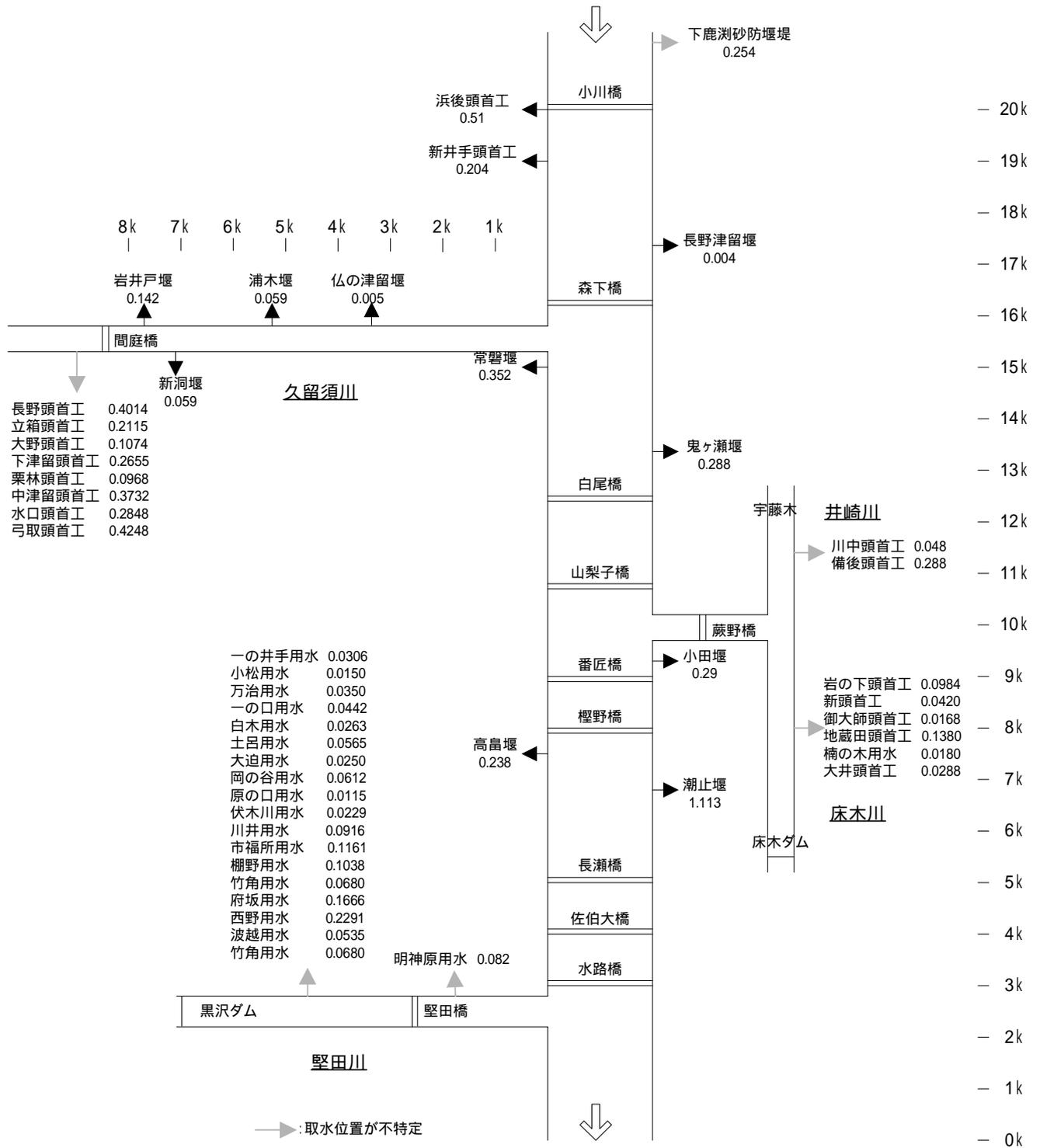


図 8-27 取水量 (代かき期)

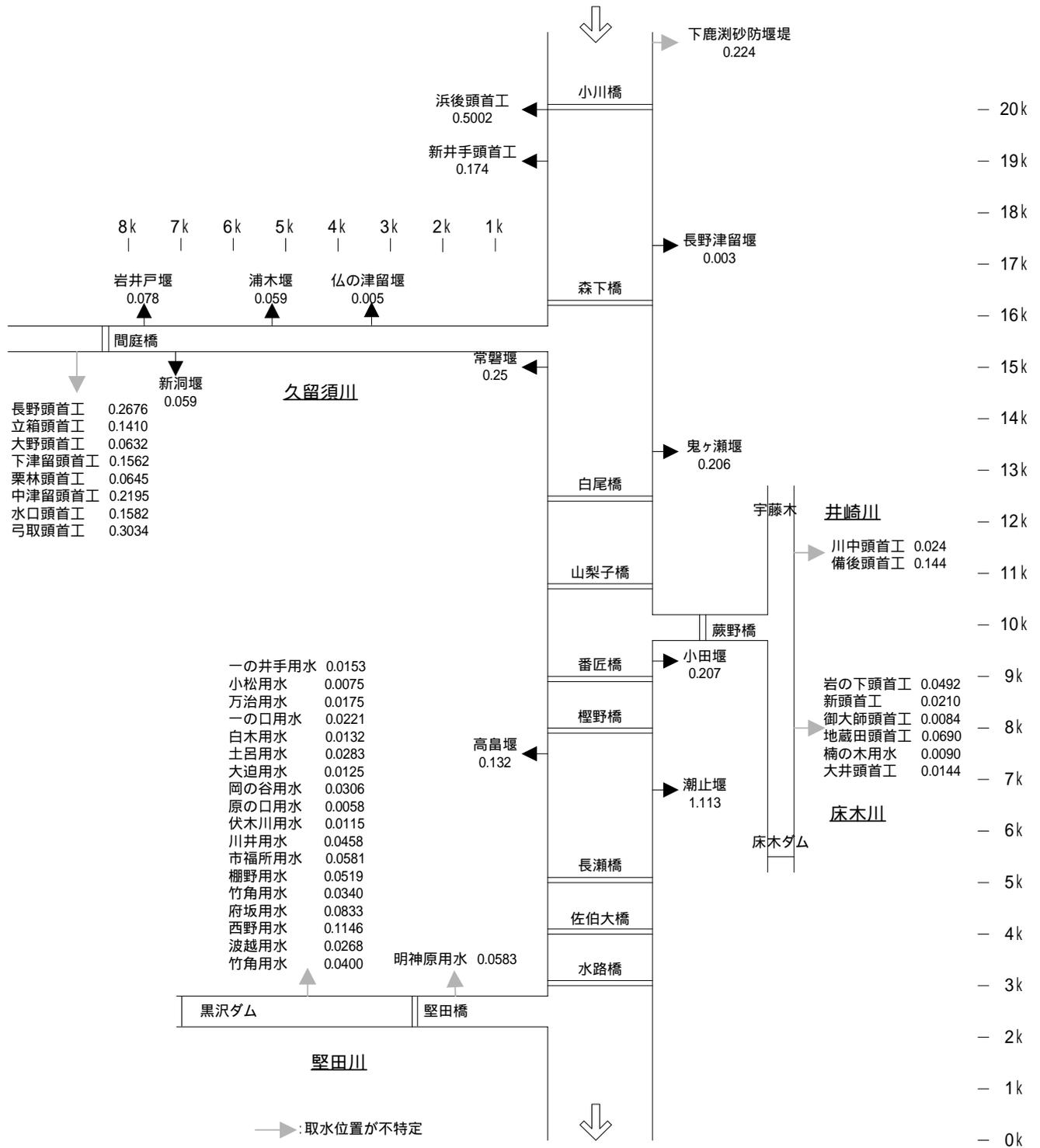


図 8-28 取水量 (かんがい期)

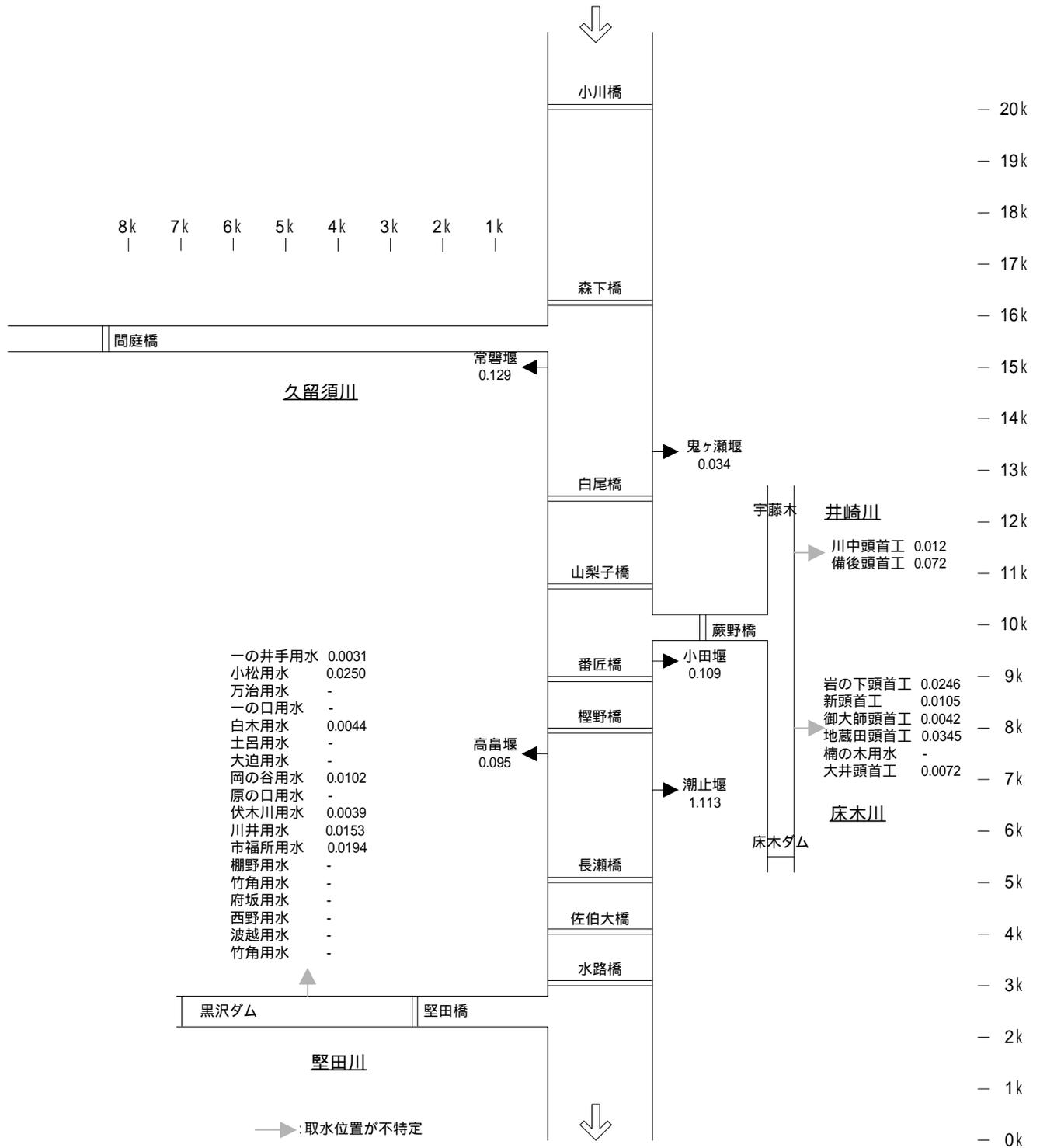


図 8-29 取水量 (非かんがい期)

(4)還元量

農水還元量については、平成7年に鬼ヶ瀬水路、常磐水路において、かんがい期、非かんがい期別に調査が行われている。調査結果によれば、還元率は、かんがい期45%、非かんがい期95%となっている。ただし、鬼ヶ瀬井堰および常磐井堰からの取水については、還元場所が複数存在するため、**図 8-30**、**図 8-31**のように還元率を割り振る。

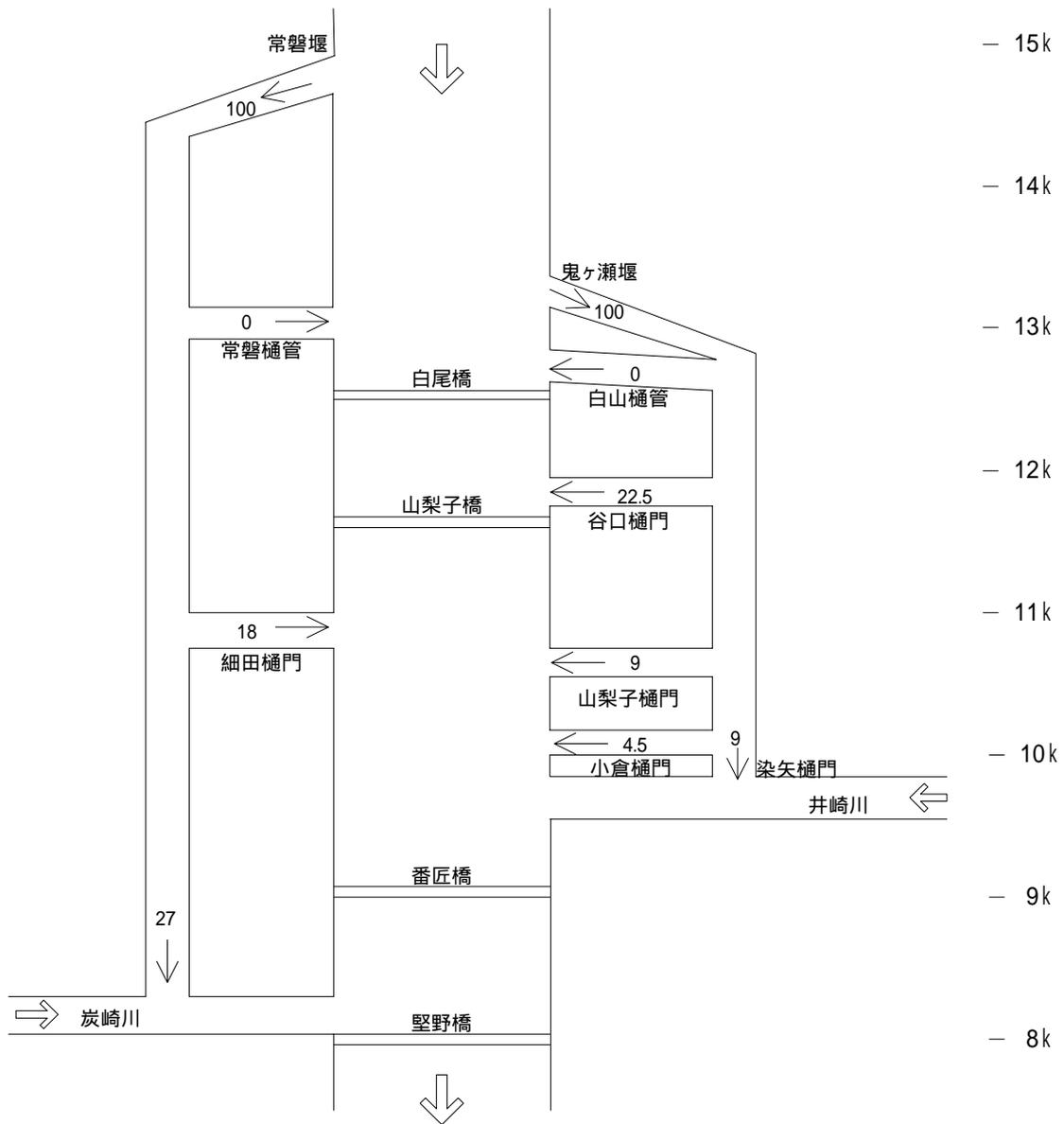


図 8-30 還元場所と還元率（かんがい期）

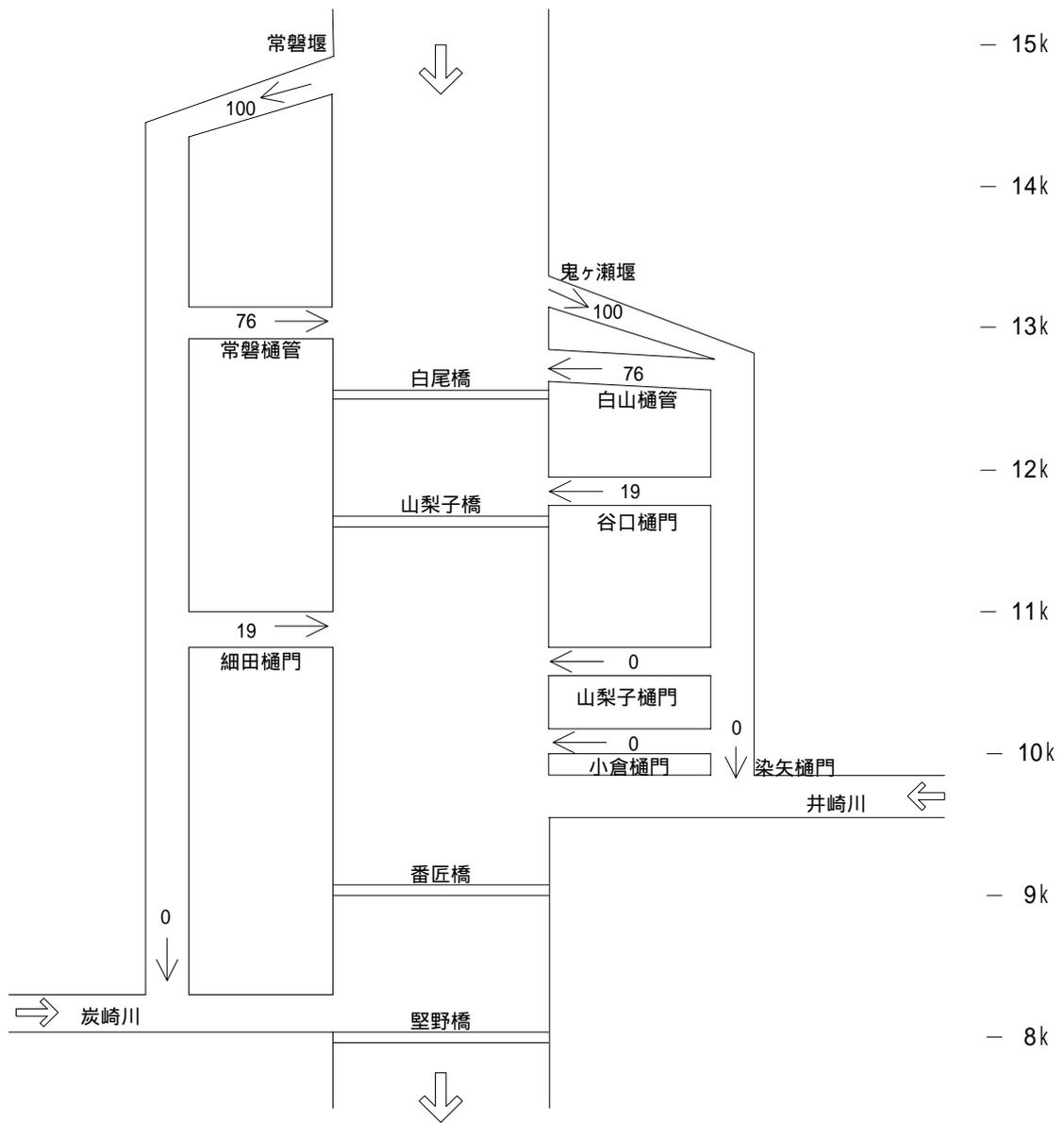


図 8-31 還元場所と還元率（非かんがい期）

(5)同時流量観測

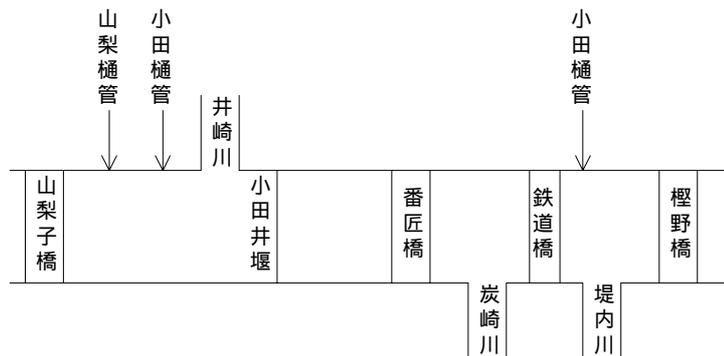
昭和52年から平成4年にかけて、同時流量観測が表8-7、表8-8のように行われている。

表8-7 同時流量観測概要

| 年度 | かんがい期 | 非かんがい期 | 観測区間 |
|-------|-------|--------|---------|
| 昭和52年 | | 3 | 番匠橋～潮止堰 |
| 昭和53年 | 2 | 3 | 〃 |
| 昭和56年 | 1 | 1 | 〃 |
| 昭和57年 | 1 | | 〃 |
| 昭和58年 | 1 | 5 | 〃 |
| 昭和59年 | | 7 | 〃 |
| 昭和60年 | 2 | 5 | 〃 |
| 昭和61年 | | 10 | 〃 |
| 平成2年 | 1 | 1 | 山梨子～潮止堰 |
| 平成3年 | | 1 | 〃 |
| 平成4年 | | 1 | 〃 |
| 計 | 8 | 37 | 〃 |

表 8-8 同時流量観測結果

| 期別 | 番号 | 年度 | 月 | 日 | 山梨子 | 山梨子樋門 | 小田樋門 | 井崎川 | 小田井堰上流 | 小田井堰取水 | 小田井堰下流 | 番匠橋 | 炭崎川 | 鉄道橋 | 小田樋門 | 堤内川 | 櫻野 |
|------|----|----|----|------|------|-------|------|------|--------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|
| 灌漑期 | 1 | 53 | 7 | 11 | | | | | | | | 1.95 | | | | 0.21 | - |
| | 2 | 53 | 8 | 28 | | | | | | | | 1.87 | | | | 0.12 | - |
| | 3 | 56 | 8 | 25 | | | | | | | | 1.27 | | | | 0.14 | - |
| | 4 | 57 | 6 | 9 | | | | | | | | 1.69 | | | | 0.12 | - |
| | 5 | 58 | 8 | 8 | | | | | | | | 1.04 | | | | 0.12 | - |
| | 6 | 60 | 8 | 2 | | | | | | | | 1.40 | | | 0.02 | 0.09 | - |
| | 7 | 60 | 8 | 6 | | | | | | | | 1.52 | | | 0.02 | 0.11 | - |
| | 8 | 2 | 8 | 16 | 0.55 | 0.03 | 0.01 | 0.28 | 3.32 | -0.44 | 0.63 | 1.52 | 0.04 | 1.97 | 0.00 | 0.03 | 2.43 |
| 非灌漑期 | 1 | 52 | 11 | 9 | | | | | | | | 1.52 | | | | 0.04 | - |
| | 2 | 52 | 12 | 13 | | | | | | | | 1.37 | | | | 0.03 | - |
| | 3 | 52 | 12 | 26 | | | | | | | | 0.91 | | | | 0.03 | - |
| | 4 | 53 | 1 | 20 | | | | | | | | 0.89 | | | | 0.01 | - |
| | 5 | 53 | 2 | 18 | | | | | | | | 1.15 | | | | 0.03 | - |
| | 6 | 53 | 5 | 30 | | | | | | | | 1.76 | | | | 0.09 | - |
| | 7 | 56 | 5 | 25 | | | | | | | | 1.89 | | | | 0.09 | - |
| | 8 | 58 | 10 | 31 | | | | | | | | 2.24 | | | | 0.28 | - |
| | 9 | 58 | 11 | 8 | | | | | | | | 1.55 | | | | 0.02 | 2.35 |
| | 10 | 58 | 11 | 29 | | | | | | | | 0.99 | | | | 0.02 | - |
| | 11 | 58 | 12 | 13 | | | | | | | | 0.87 | | | | 0.02 | 1.73 |
| | 12 | 58 | 12 | 28 | | | | | | | | 0.72 | | | | 0.01 | 1.21 |
| | 13 | 59 | 1 | 6 | | | | | | | | 0.72 | | | | 0.00 | 1.26 |
| | 14 | 59 | 1 | 30 | | | | | | | | 0.71 | | | | 0.01 | 1.49 |
| | 15 | 59 | 2 | 3 | | | | | | | | 1.00 | | | | 0.04 | 1.92 |
| | 16 | 59 | 2 | 18 | | | | | | | | 0.92 | | | | 0.04 | 1.64 |
| | 17 | 59 | 2 | 27 | | | | | | | | 1.79 | | | | 0.06 | 2.94 |
| | 18 | 59 | 3 | 8 | | | | | | | | 0.86 | | | | 0.03 | 1.16 |
| | 19 | 59 | 11 | 27 | | | | | | | | 1.47 | | | | 0.16 | 2.47 |
| | 20 | 60 | 1 | 5 | | | | | | | | 1.98 | | | | 0.15 | 3.68 |
| | 21 | 60 | 1 | 16 | | | | | | | | 1.24 | | | | 0.05 | 1.24 |
| | 22 | 60 | 11 | 12 | | | | | | | | 1.55 | 0.02 | | 0.00 | 0.07 | 2.28 |
| | 23 | 60 | 12 | 2 | | | | | | | | 0.96 | 0.02 | | 0.00 | 0.03 | 1.63 |
| | 24 | 60 | 12 | 13 | | | | | | | | 1.38 | 0.02 | | 0.00 | 0.03 | 1.47 |
| | 25 | 61 | 1 | 6 | | | | | | | | 0.71 | 0.02 | | 0.01 | 0.03 | 1.75 |
| | 26 | 61 | 1 | 10 | | | | | | | | 0.96 | 0.01 | | 0.00 | 0.03 | 1.44 |
| | 27 | 61 | 1 | 22 | | | | | | | | 0.91 | 0.02 | | 0.00 | 0.03 | 1.38 |
| | 28 | 61 | 1 | 30 | | | | | | | | 0.55 | 0.01 | | 0.00 | 0.03 | 0.79 |
| | 29 | 61 | 2 | 5 | | | | | | | | 0.54 | 0.01 | | 0.00 | 0.02 | 0.53 |
| | 30 | 61 | 2 | 19 | | | | | | | | 2.82 | 0.03 | | 0.12 | 0.08 | 3.36 |
| | 31 | 61 | 2 | 20 | | | | | | | | 1.88 | 0.01 | | 0.08 | 0.06 | 2.38 |
| | 32 | 61 | 2 | 21 | | | | | | | | 1.44 | 0.00 | | 0.07 | 0.06 | 2.20 |
| | 33 | 61 | 2 | 22 | | | | | | | | 1.40 | 0.00 | | 0.02 | 0.06 | 1.86 |
| | 34 | 61 | 2 | 25 | | | | | | | | 0.89 | 0.00 | | 0.02 | 0.06 | 1.12 |
| 35 | 2 | 12 | 26 | 1.12 | 0.00 | 0.00 | 0.61 | 1.34 | -0.05 | 1.66 | 1.85 | 0.03 | 2.44 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 3.28 |
| 36 | 3 | 12 | 19 | 0.21 | 0.00 | 0.00 | 0.05 | 0.31 | 0.00 | 0.98 | 1.06 | 0.01 | 1.06 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 1.00 |
| 37 | 4 | 1 | 20 | 0.65 | 0.00 | 0.00 | 0.31 | 0.75 | 0.01 | 1.46 | 1.56 | 0.03 | 1.63 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 1.72 |



(6)旧河道

「九州地方の古地理に関する調査 古の文化と豊かな自然」(平成 14 年 九州地方整備局)によれば、流域内の旧河道および地形状況は図 8-32 のようである。

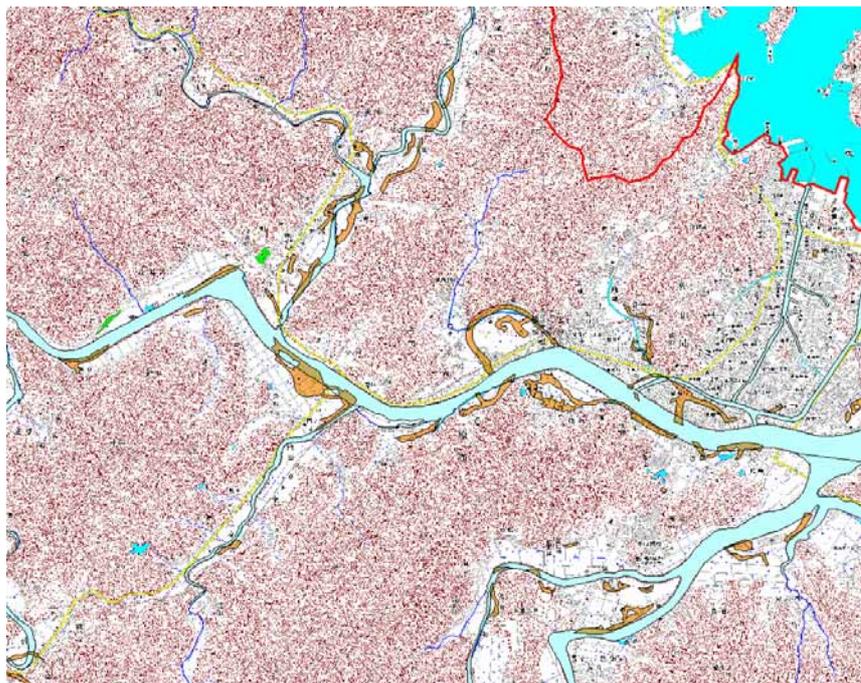
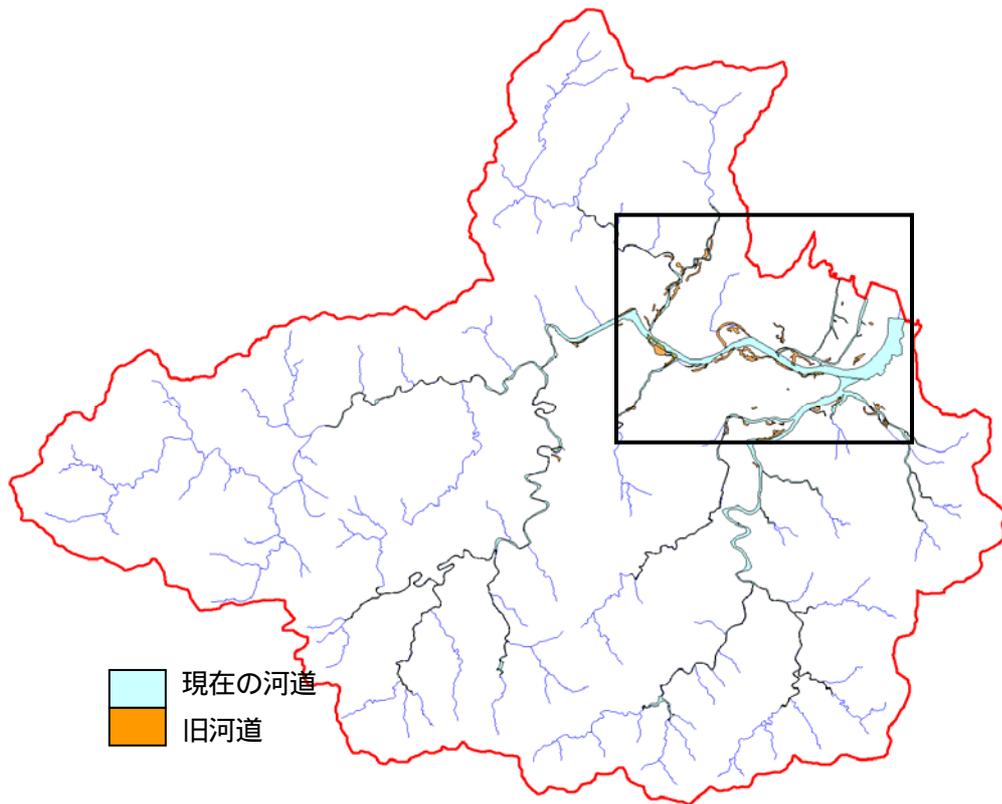


図 8-32 旧河道（上：流域全体，下：四角部分を拡大）

旧河道について

「平坦な平野において旧河道を発見するには空中写真，古地図，文献，表層地質図等を利用するわけであるが，空中写真の利用が最も便利であり，これによってまず旧河道の位置を明示し，その後資料で時代を確定する方法が最もよい．いずれの場合も現地調査による最終点検は必要である．

空中写真ではとくに米極東空軍地図局(USAMSFE)が戦後(1946～50年)撮影したものが便利である．

旧河道の状態は，浸食作用の卓越している河川と堆積作用の卓越している河川とは異なる．浸食作用卓越河川では旧河道は周辺平野より低く，数メートルから数十センチメートル掘り込んでおり，帯状に続く．

また河道が変遷して，表流水がなくなっても，地下水は数十年あるいは数百年にわたって流れ続けるので，地下水位が浅く，空中写真では黒ずんでみえる．

一方，堆積作用が卓越している河川の旧河道は，河道に沿って自然堤防が発達しているので，空中写真ではこの自然堤防が白く移る．さらに自然堤防中に澇が認められるのが普通である．澇がない場合でも自然堤防の分布だけから旧河道を見つけることが可能である．

日本の平野の地形は縄文海進以降に形成されたものであるため，最も古い河道でも4,000～6,000年前のものであるが，現在地表に明瞭に認められる旧河道は中世以降のものが多い．

旧河道の認定は前述の地形学的方法に地図学的方法や歴史学的方法を加える．地図では明治23～24年頃作成された迅速図から，その時代の旧河道を正確に復元できる．

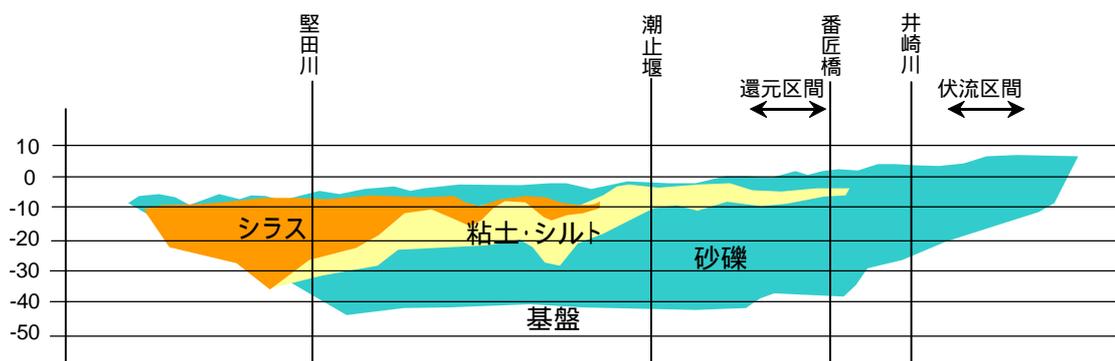
それ以前の旧河道については，まず地形学的方法で旧河道の分布を確認しておき，文献，絵図等を利用して，それぞれの旧河道の存在した時代を推定する．」

(河道変遷特性に関する研究 (財)河川環境管理財団 平成10年)

5) 水理地質データ

(1) 帯水層構造

四万十層群の基盤上に，番匠橋より上流の沖積低地には砂礫(洪積層)，下流は細粒砂～シルト(沖積層)が分布している．帯水層の厚さは，上流で30～40m，下流で10～20mである．



(2) 透水係数

深層(被圧)の透水係数は概ね $10^{-1} \sim 100 \text{ cm/s}$ である．

8.2. データベース化

収集した資料については、昨年度作成した小石原川・佐田川流域データベースと同様にデータベース化を行った。データベースに登録した項目およびファイル名を表 8-9 に示す。次ページ以降には、データベースの画面(Excel)を示した。

表 8-9 データベースに登録したファイル

| データ項目 | ファイル名 |
|-------|---|
| ダム | 床木ダム貯水位.xls 床木ダム放流量.xls 床木ダム流入量.xls |
| 雨量 | アメダス佐伯.xls 因尾.xls 宇藤木.xls 佐伯.xls 青山.xls 直川.xls |
| 気温 | アメダス佐伯.xls |
| 横断 | 横断.xls |
| 堰 | 堰台帳調書.xls 構造図.bmp, 平面図.bmp 01 興人潮止堰 02 高畠堰 03 小田堰 04 鬼ヶ瀬堰 05 常磐堰 06 長野津留堰 07 仏の津留堰 08 浦木堰 09 新洞堰 10 新洞堰 11 岩井戸堰 |
| 地下水位 | 上岡(深井戸).xls 上岡(浅井戸).xls 切畑(深井戸).xls 切畑(浅井戸).xls |

| | |
|-----------|--|
| <p>水位</p> | <p>間庭橋.xls 堅田橋.xls 小川橋.xls 長瀬橋.xls 灘.xls 白山.xls 番匠橋.xls 蕨野橋.xls</p> |
| <p>流量</p> | <p>間庭橋.xls 堅田橋.xls 小川橋.xls 番匠橋.xls 蕨野橋.xls</p> |

8.3. 定性的把握

1) 観測結果

番匠橋での河川水位と切畑の地下水位を比較すると図 8-33 のようになる。

全年にわたり、河川水位と地下水位は同様の変動を示している。S60 年(1985 年)までは、地下水位が約 1m 高い状態となっているが、その後 H8 年(1996 年)までは両者は同等の水位となっている。H8 年以降は、地下水位の上昇が見られるが、逆に河川水位は低下傾向となっている。

これらのことから、河川水と地下水は一体となっているが、直上流の堰の影響で河川水位のほうが低くなっているのではないかと考えられる。

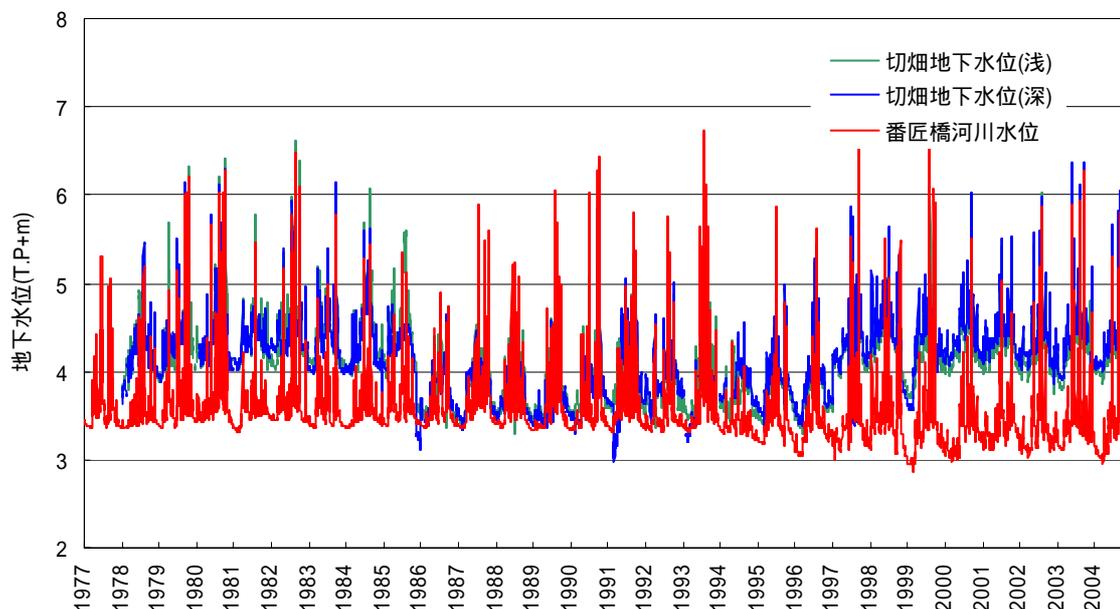


図 8-33 河川水位と地下水位の関係

2) 過去の地下水解析

番匠川流域では、過去表 8-10 のように地下水検討委員会が設置され、その中で、地下水塩水化シミュレーションが行われている。シミュレーションモデルは、平成 3 年度から作成され、最終の平成 9 年度には、表 8-11、図 8-34 のようなモデルとなっている。

概略のシミュレーション結果は次のようである。

- ・ 塩水化には特に下流側の上岡揚水井からの揚水の影響が大きい
- ・ 塩水化防止には堅田川での涵養の役割が大きい
- ・ 塩水化を進行させないためには揚水量は現況の約 6 割程度にする必要がある

表 8-10 番匠川における過去の調査経緯

| 時期 | 地下水検討委員会 | 目的 | 内容 |
|-----------|----------|---------------|-------------------------------------|
| 平成元年度～5年度 | 第1回～第5回 | 総合水管理計画の策定 | 河川水の伏流機構の調査・解明 河川表流水と地下水の適正な統合管理 |
| 平成7年度～9年度 | 第6回～第13回 | 番匠川地下水管理計画の策定 | 地下水塩水化の防止及び水資源の合理的な利用方法の検討 |

表 8-11 塩水化モデルの概要

| 項目 | | 内容 |
|--------|------|-------------------------------------|
| 解析手法 | | 平面2次元地下密度流解析 |
| 解析対象 | | 被圧地下水帯水層 |
| 解析範囲 | | 番匠橋～河口部 |
| メッシュ間隔 | | 20m |
| 境界条件 | 上流端 | 番匠橋月平均水位 |
| | 下流端 | 灘平均水位 (TP.+0.6m) |
| | 左・右岸 | 堅田川合流点は固定水位 (TP.+0.7m) その他は不透水境界 |
| パラメータ | 透水係数 | 5.0×10^{-1} cm/s |
| | 比貯留量 | 10^{-4} 1/m |
| | 空隙率 | 0.3 |

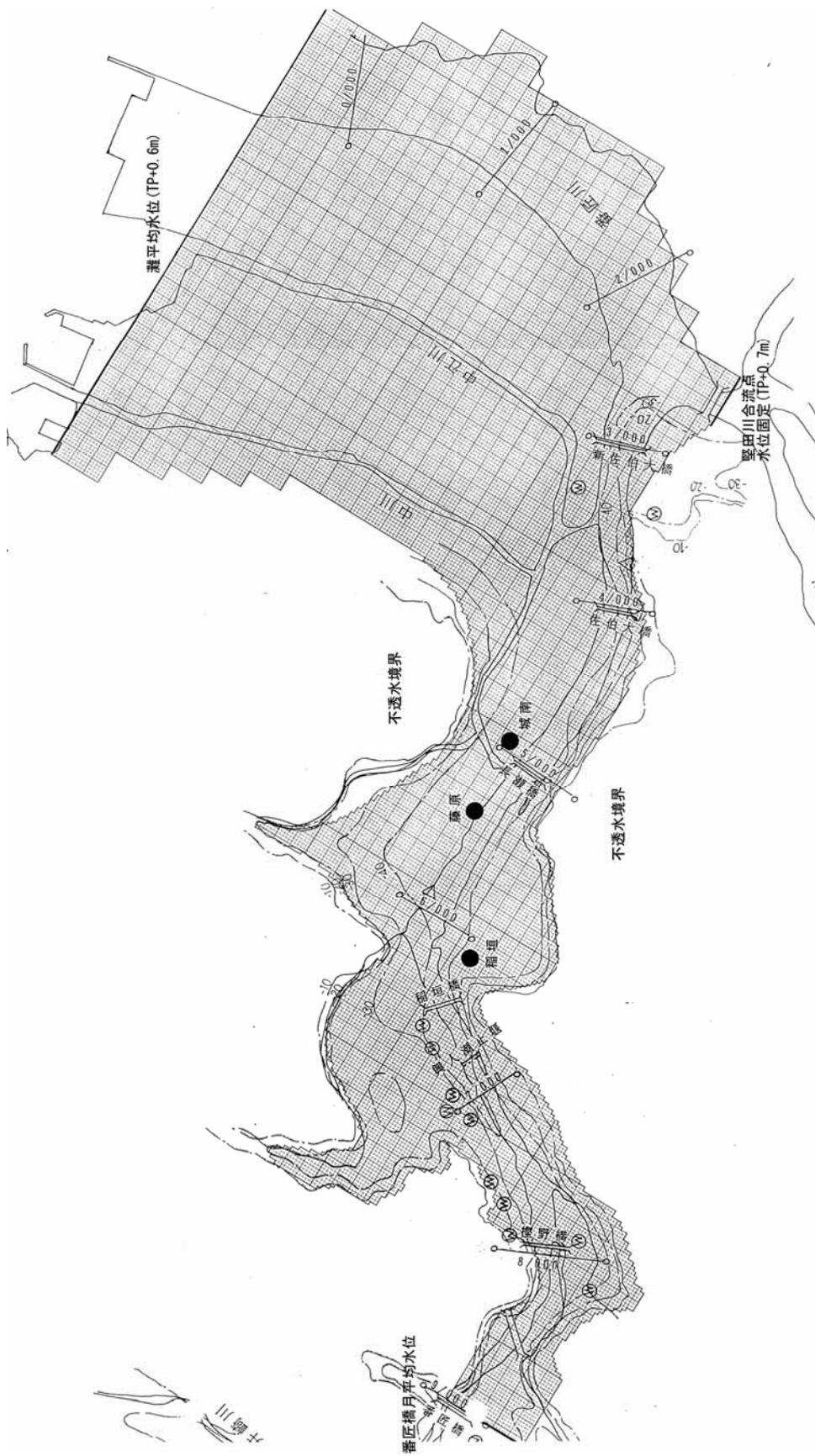


図 8-34 塩水化解析モデル (平成 9 年度)

3) 現地踏査

流域の水循環系把握のため、平成 17 年 10 月 4 日に現地踏査を行った。当日は、若干の降雨があったこともあり、本川上流を除いて伏没の様子はわからなかった。現地踏査からは、次のように考察される。

< 本川中流(番匠橋付近) >

河道が周辺地盤よりやや高い天井川のように感じられ、右岸側の水田は旧河道と思われた。堤防すぐ横には旧弥生町の簡易水道施設が存在した。これらのことから、周辺の揚水等による地下水位変化状況に応じて河川水位も変化するものと考えられた。

< 本川上流 >

当日の降雨にもかかわらず、河道内に水流が見られなかった。本川上流域は、石灰岩が多く、河道内にも巨石が見られたことから、透水性の良い石灰質の岩盤内を水が流れているものと考えられた。



図 8-35 現地踏査概要

ア) 長瀬橋



イ) 潮止堰



ウ) 番匠橋



(番匠橋やや上流)

(番匠橋上流右岸側 旧弥生町簡易水道)

工) 本川上流



オ) 蕨野橋



カ) 床木ダム



キ) 堅田橋



ク) 黒沢ダム



ケ) 間庭橋



8.4. モデル作成

1) 流域分割

地下水解析範囲外は、地表流-表層土壌モデルによって、流出量を計算する。流出量の計算にあたっては、流域を一様とみなせる範囲で分割する。分割した流域を図 8-36 に示す。分割流域は、さらに河川沿いの流出寄与域と山林の涵養域に分けるものとする。

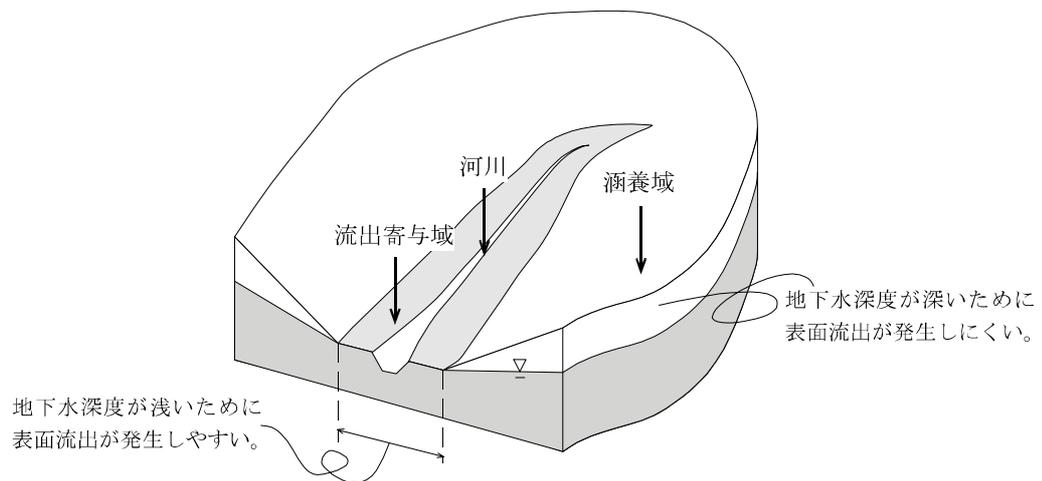
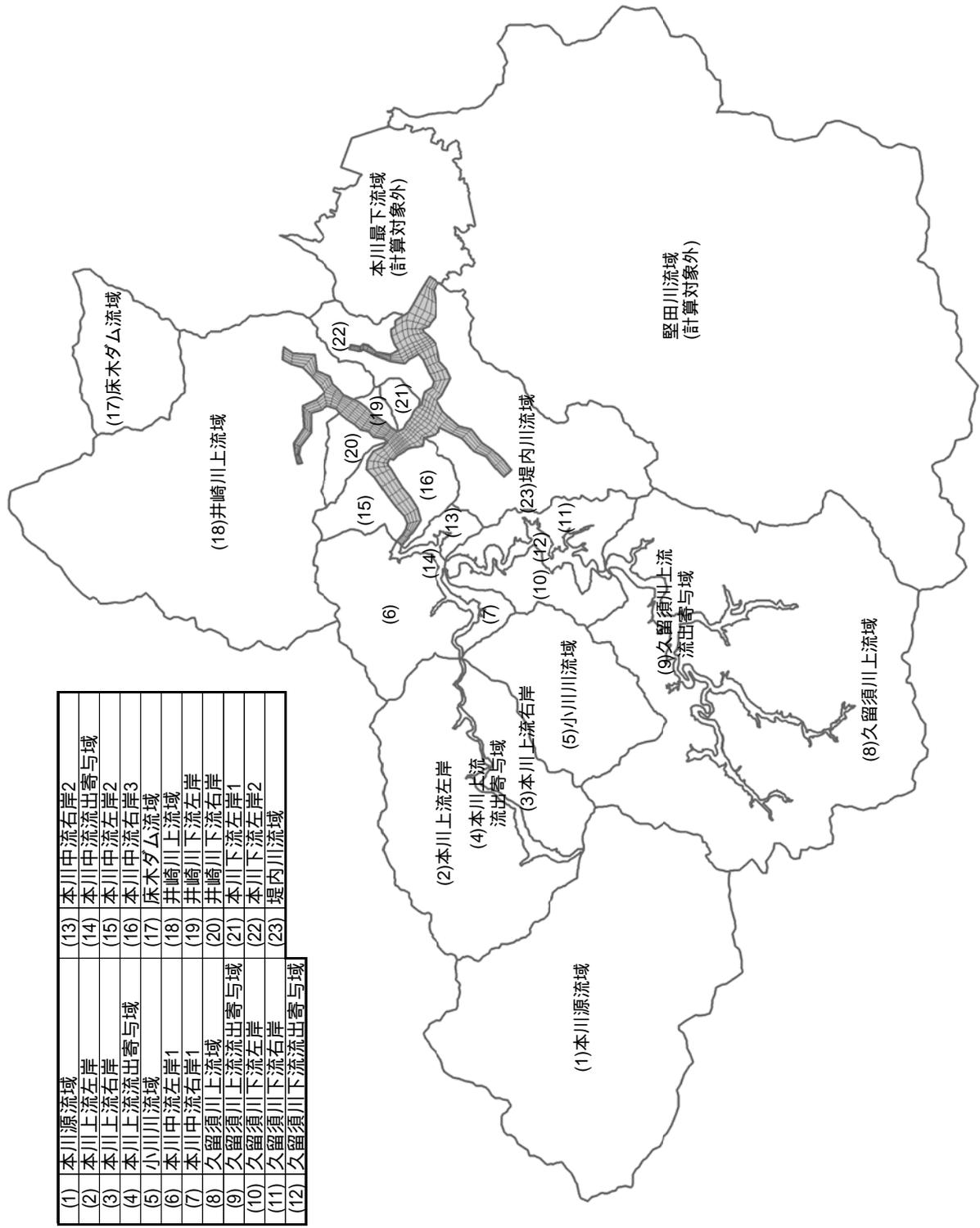


図 8-36 涵養域と流出寄与域



| | | | |
|------|-------------|------|-----------|
| (1) | 本川源流域 | (13) | 本川中流右岸2 |
| (2) | 本川上流左岸 | (14) | 本川中流流出寄与域 |
| (3) | 本川上流右岸 | (15) | 本川中流左岸2 |
| (4) | 本川上流流出寄与域 | (16) | 本川中流右岸3 |
| (5) | 小川川流域 | (17) | 床木ダム流域 |
| (6) | 本川中流左岸1 | (18) | 井崎川上流域 |
| (7) | 本川中流右岸1 | (19) | 井崎川下流左岸 |
| (8) | 久留須川上流域 | (20) | 井崎川下流右岸 |
| (9) | 久留須川上流流出寄与域 | (21) | 本川下流左岸1 |
| (10) | 久留須川下流左岸 | (22) | 本川下流左岸2 |
| (11) | 久留須川下流右岸 | (23) | 堤内川流域 |
| (12) | 久留須川下流流出寄与域 | | |

図 8-37 地下水解析範囲外の流域分割

2) 地下水メッシュ分割

地下水解析範囲内のメッシュ分割は、河川中心線、河川堤防、旧河道、河川横断位置、地下水流動方向を総合的に判断して作成した。

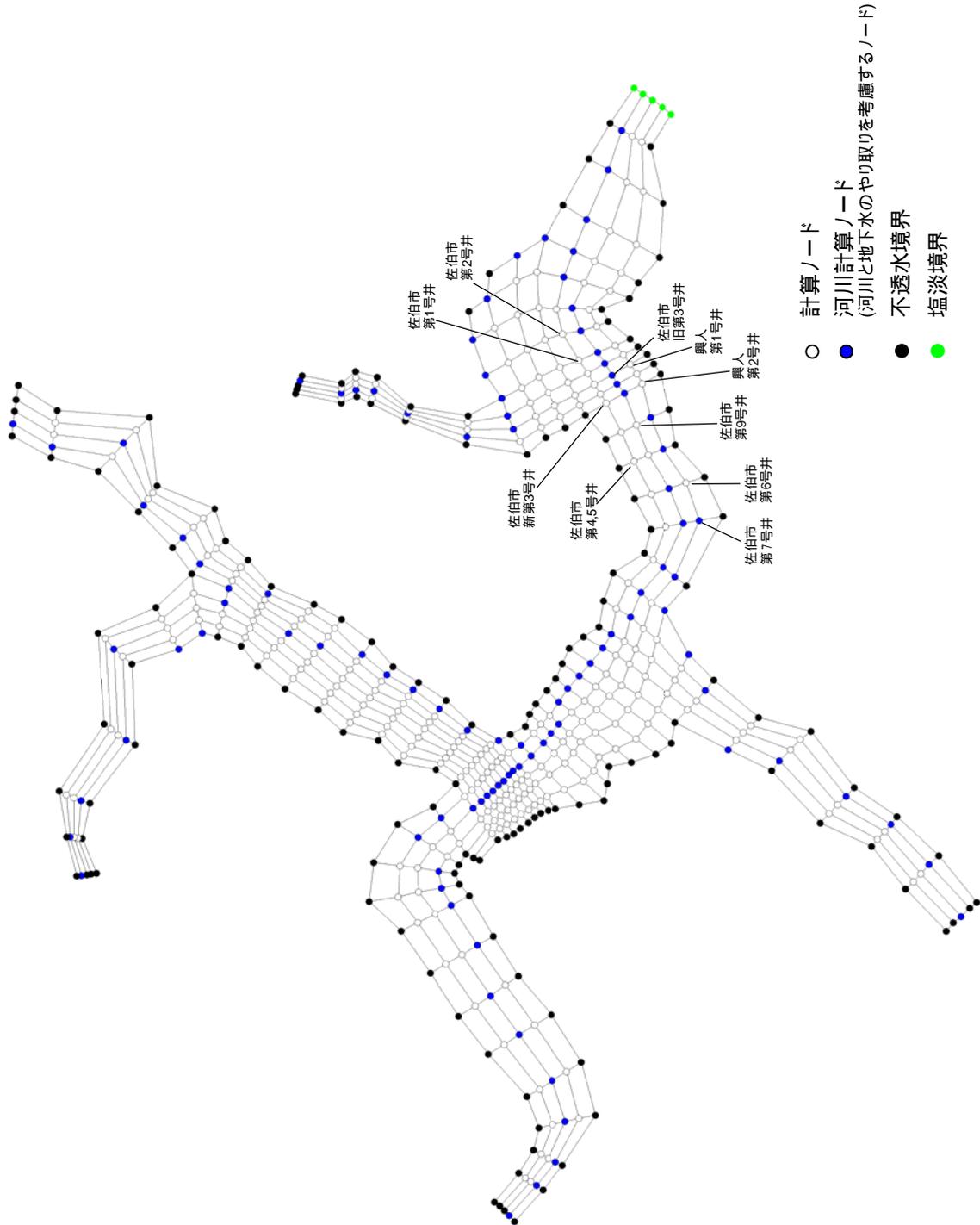


図 8-38 メッシュ分割図

3) 河川計算断面

河川の計算断面は、前述の地下水メッシュにおける河川ノード点である。

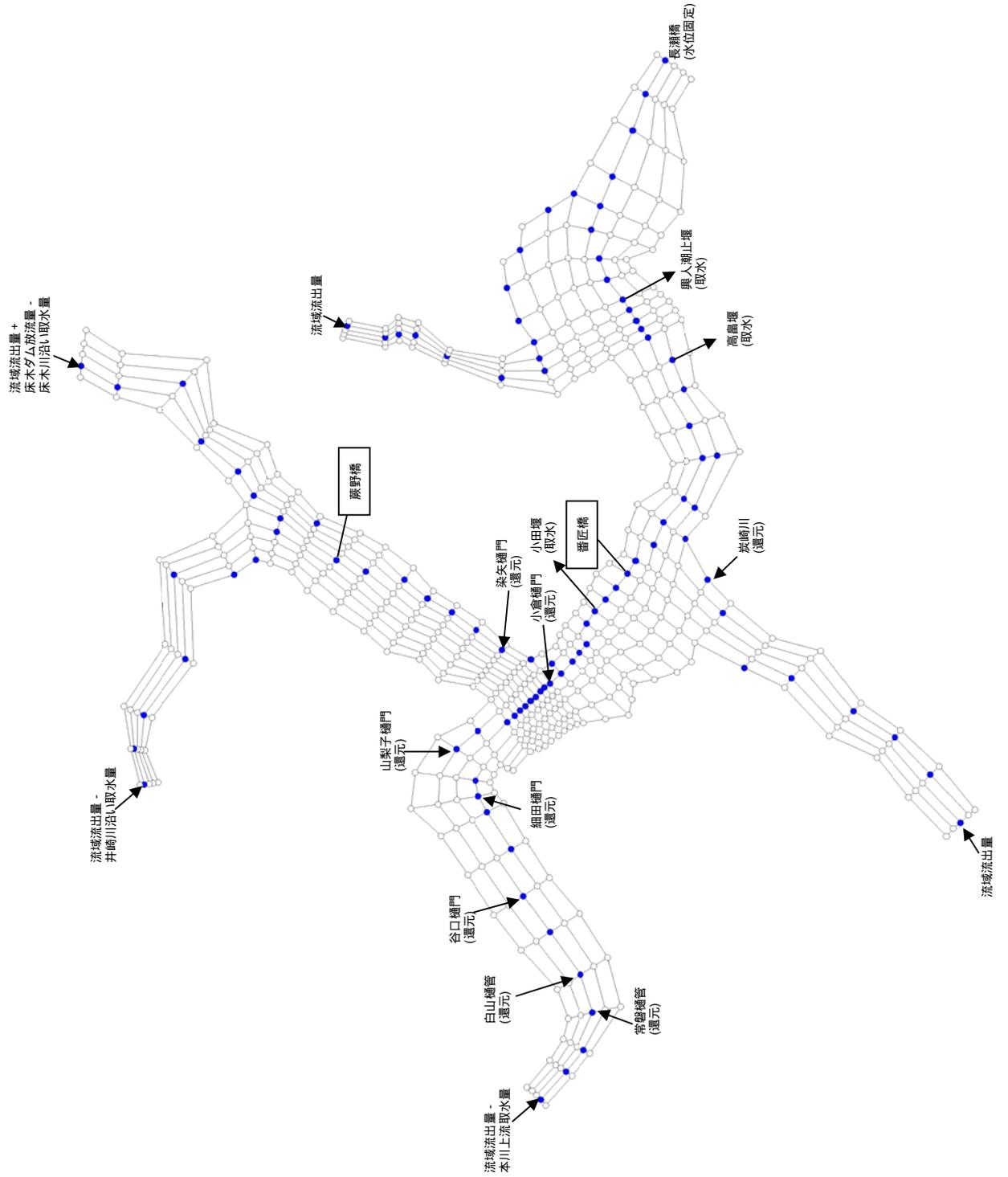


図 8-39 河川計算断面

4) 地表面-表層土壌

(2) 蒸発散量

蒸発散量は、日平均気温から、次式のハーモン式により可能蒸発散量を設定することにより、モデル内部で計算される。

$$E_p = 0.14D_0^2 P_t$$

ここに、

E_p : 日平均蒸発散能[mm/日]

D_0 : 可照時間[12hr/日]

P_t : 日平均気温に対する飽和絶対湿度[gm/m³]

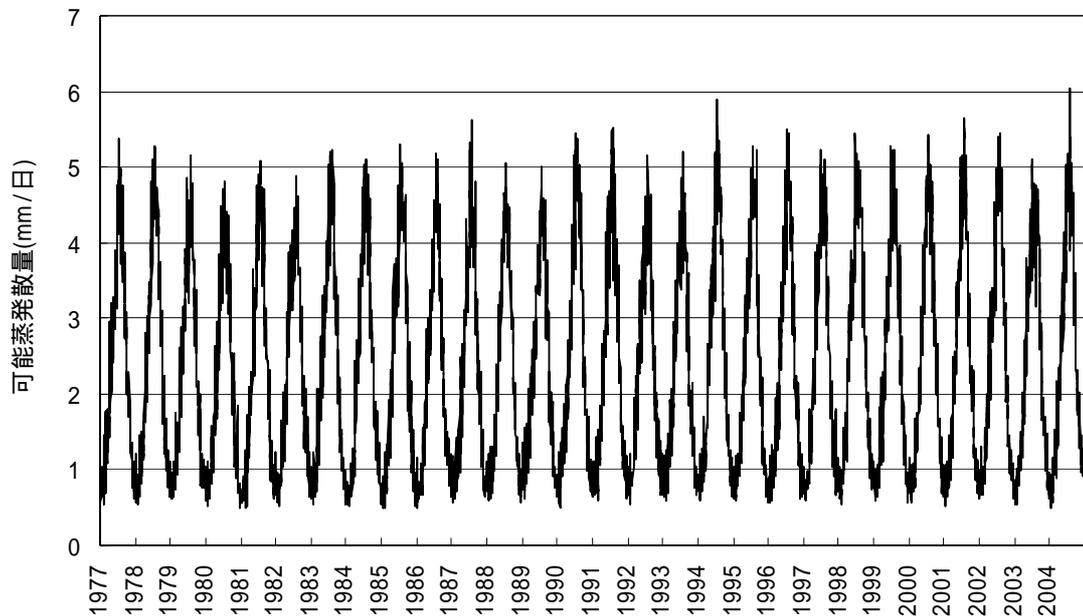


図 8-40 可能蒸発散量

(3) 土地利用データ

土地利用データは、水田、裸地、固い裸地、不浸透域の4種類に分類して、モデルに与える。各分割流域のそれぞれの割合は、**図 8-41** のようである。

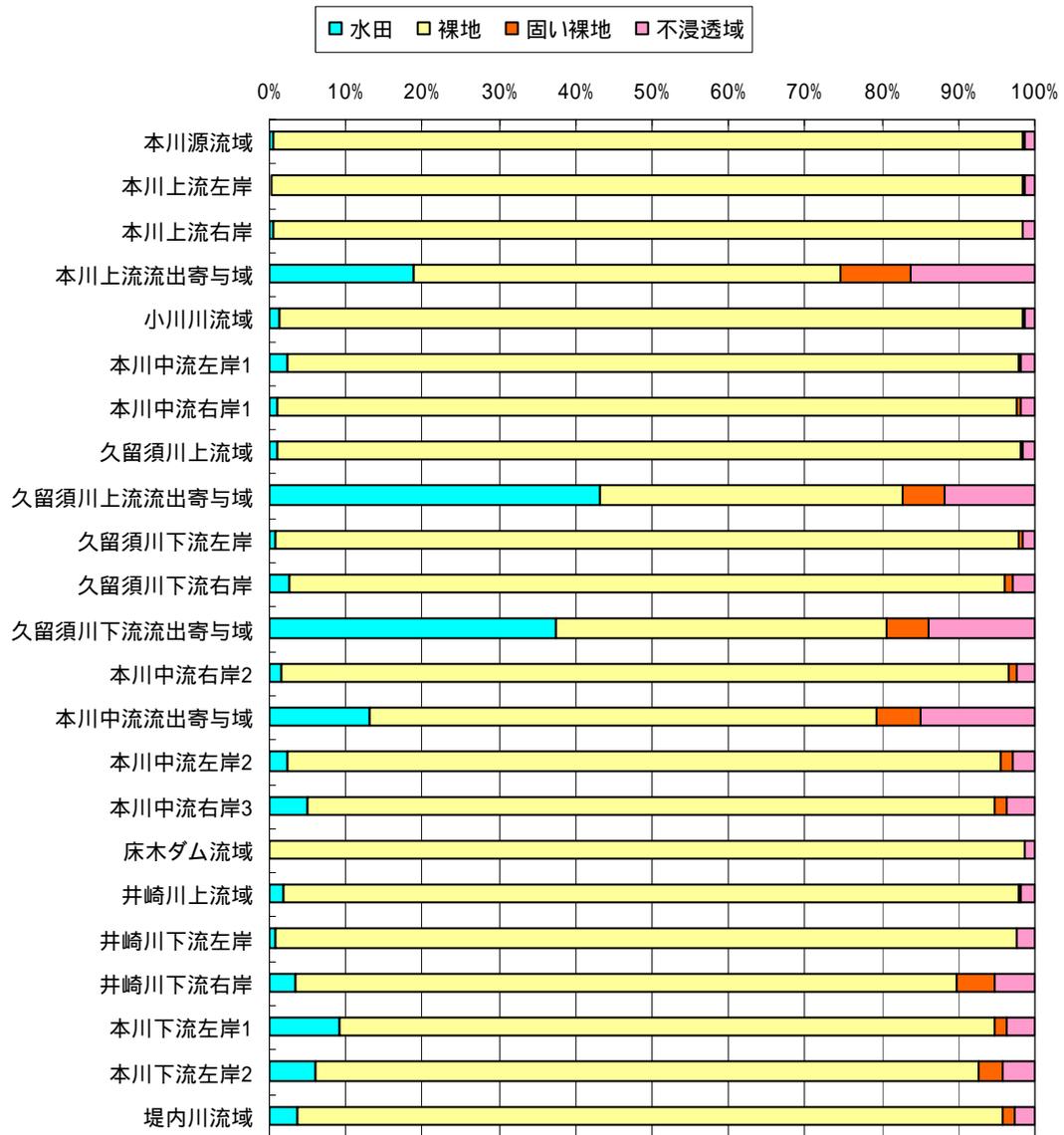


図 8-41 分割流域ごとの土地利用割合

5) 帯水層構造

帯水層は、上流は1層だが、本川約9.5km付近から下流で、難透水層を挟んだ2層構造となっている。今回の計算では、不圧帯水層1層を対象とするため、帯水層構造を次のようにモデル化する。

- ・ 2層となる箇所においては2層目(深層)へは流れない
- ・ 2層目に流れる地下水は、下流の井戸揚水量とつりあうと仮定し、2層となる箇所に揚水量として与える。

モデル化の模式図を図 8-42 に示す。このようにモデル化した場合、2層となる箇所の不圧帯水層の厚さは10mとした。また、1層部分については、井崎川合流部において、厚さを20mと30mに区分した。各メッシュに与えた層厚を図 8-43 に示す。図には、透水係数設定に必要なと思われる旧河道に対応するメッシュについてもあわせて示した。

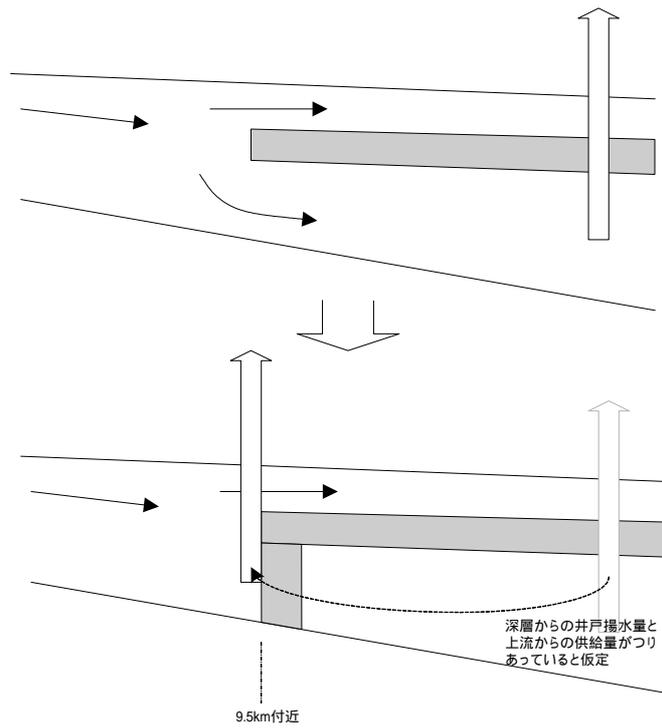


図 8-42 帯水層構造のモデル化

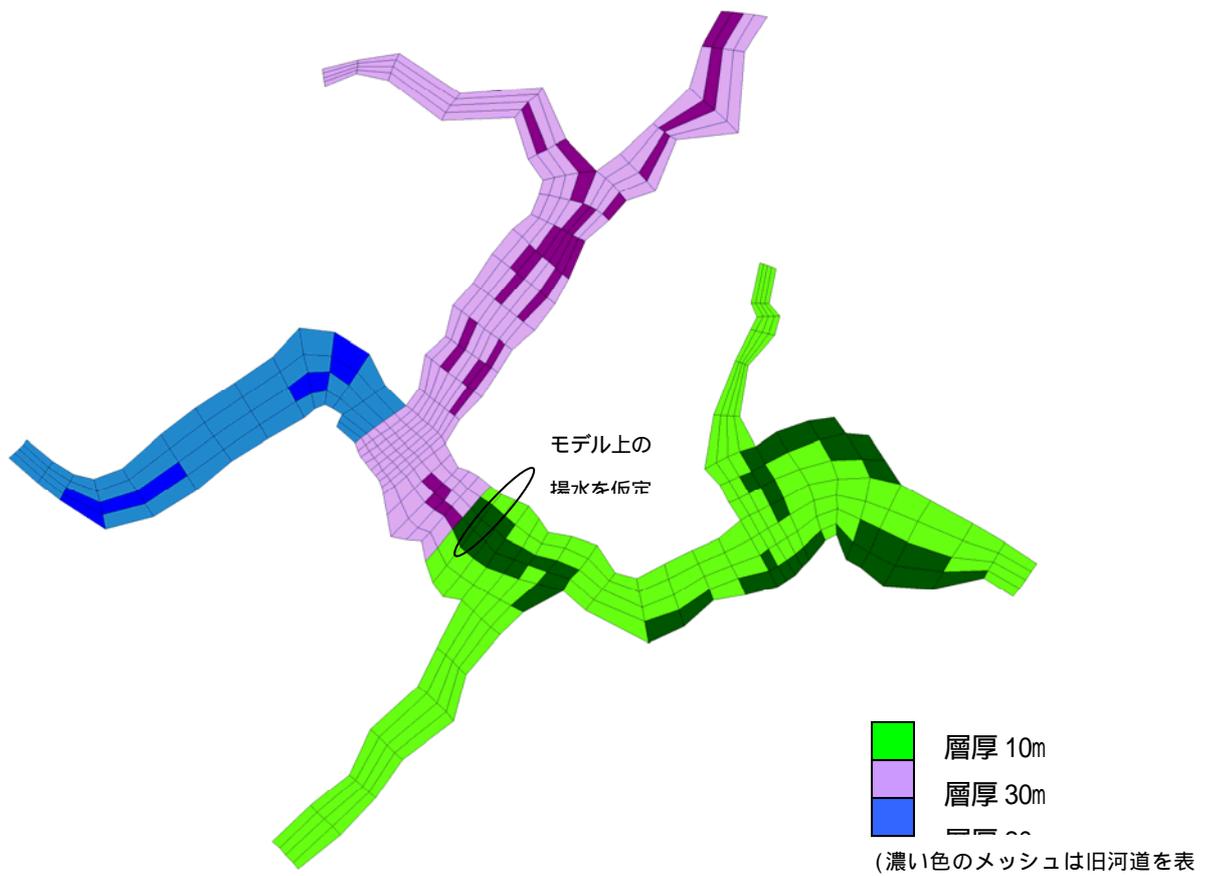


図 8-43 帯水層の設定

6) 揚水量

佐伯市の揚水量は、S61～H8、H13～H16 は月別のデータがあるため、これをそのまま用いる。H9～H12については、H8の値を用いる。

工業用の揚水としては、興人の揚水がある。ただし、揚水量のデータはなく、既往の報告書(H9 塩水化シミュレーション)では、最大で 9,600m³/日の揚水をしていたとして、この値を与えている。また、工業統計によるとH13～H15の佐伯市の工業用の井戸揚水量は、平均で約 8,400m³/日となっている。これらより、工業用の揚水量として 8,400m³/日を設定する。

両者を合計した月別の揚水量を図 8-44 に示す。

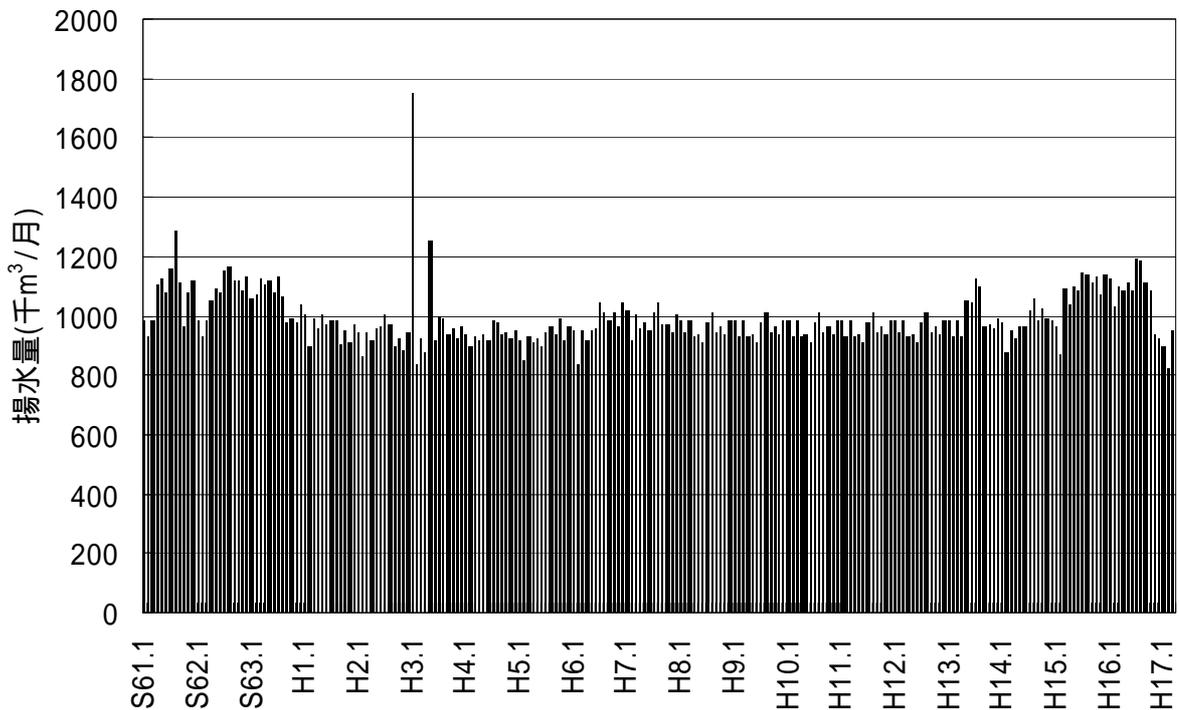


図 8-44 月別揚水量

7) 河道断面の設定

本川および井崎川は、一番近い 200m ピッチの横断測量断面形状を用いることとし、最深河床高を別に設定して、断面形状が平行移動するようにした。その他は矩形断面を仮定し、標高データ、平面図等から河床高、河川幅を設定した。

8) 取水・還元の設定

取水量は、鬼ヶ瀬堰および常磐堰以外は、近傍で還元するものとして、 $(1 - \text{還元率}) \times \text{取水量}$ を与えた。鬼ヶ瀬堰および常磐堰については、還元場所において還元率にしたがって還元するとした。

8.5. モデル精度検証

モデルのパラメタは、比較的雨の少ない H8 年の河川流量および地下水位で同定し、渇水年と豊水年である H14 年および H15 年の河川流量および地下水位で検証を行った。結果を図 8-46～図 8-51 に示す。

流量は、各地点とも計算値と観測値(低水流観測値)は、比較的好くあっていると思われる。しかしながら、番匠橋の低水部分(特に1～3月)で乖離が見られる。これは、上流の小川橋の観測精度に問題があると思われる。図 8-45 は、欠測がない年のみ抽出し、年間総雨量と年間総流出量(観測流量の合計)を比較したものであるが、小川橋と間庭橋については、総流出量は、総雨量と同じかそれより大きくなっている。つまり、観測流量は過大であると考えられる。このため、小川橋も含めた各地点で河川流量を合わせようとした場合、番匠橋の流量が過大な計算値となっている。

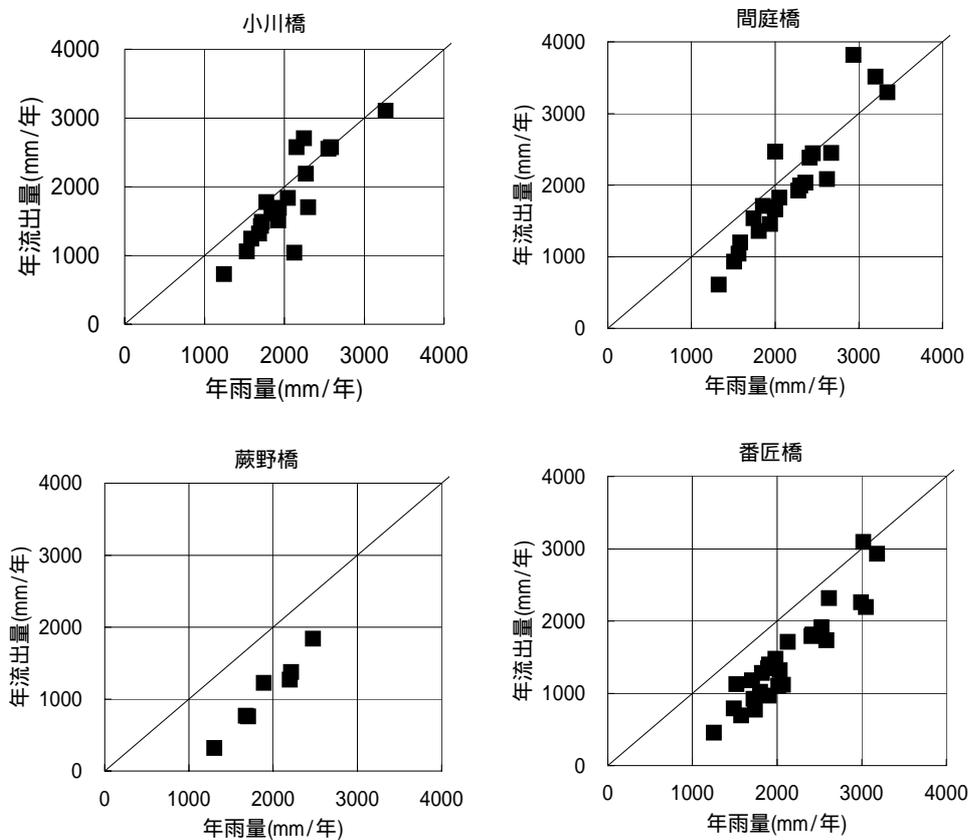


図 8-45 年間の総雨量と総流出量の比較

地下水位に関しては、降雨による反応がよく再現されている。しかしながら、切畑の夏場の水位上昇が表されていない。これは、水田からの涵養効果が大きいと思われるため、水田の用水量を見直していく必要がある。

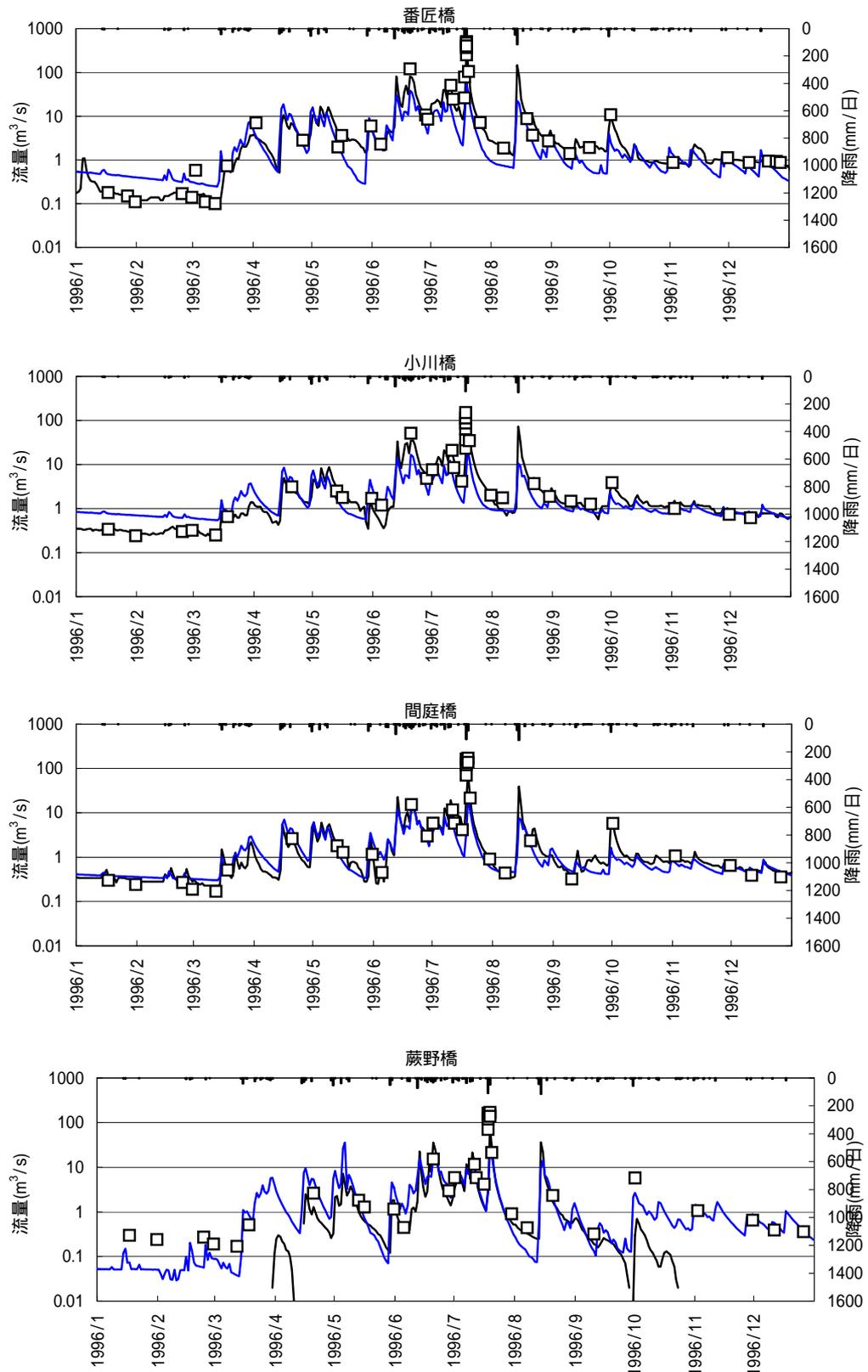


図 8-46 計算結果と観測値のハイドロ比較
(H8, 黒: 観測値, プロット: 低水観測値, 青: 計算値)

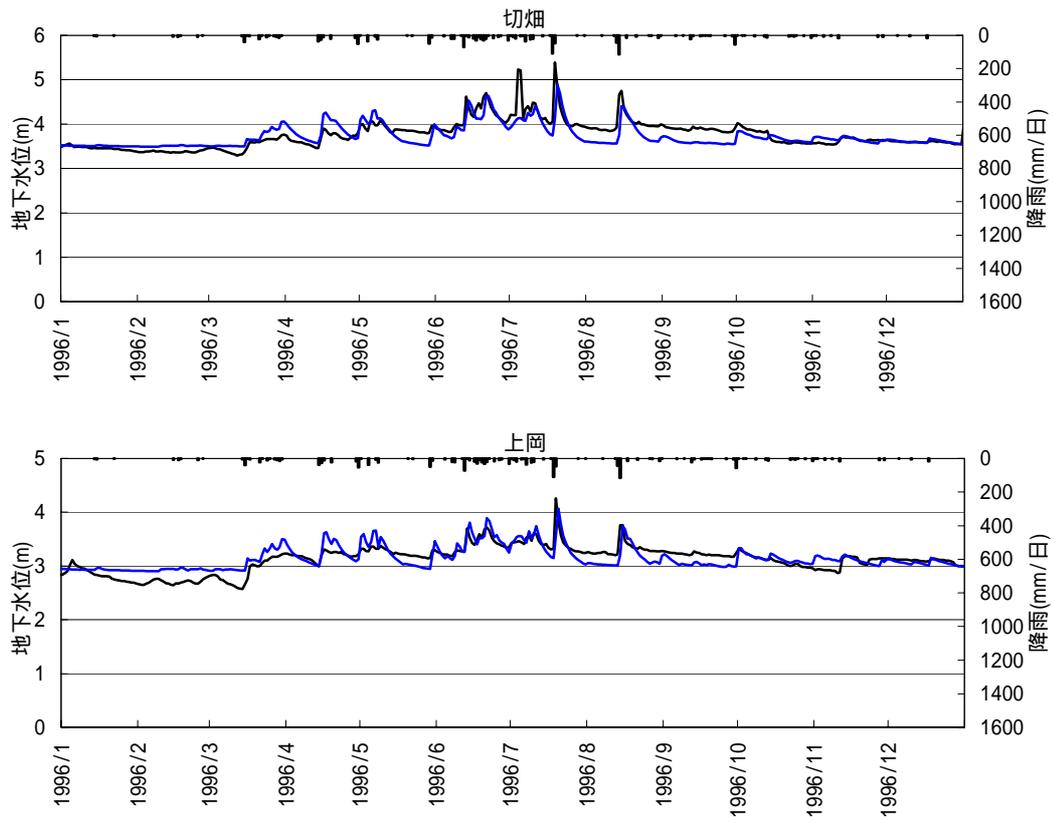


図 8-47 計算結果と観測値の地下水位比較(H8, 黒：観測値, 青：計算値)

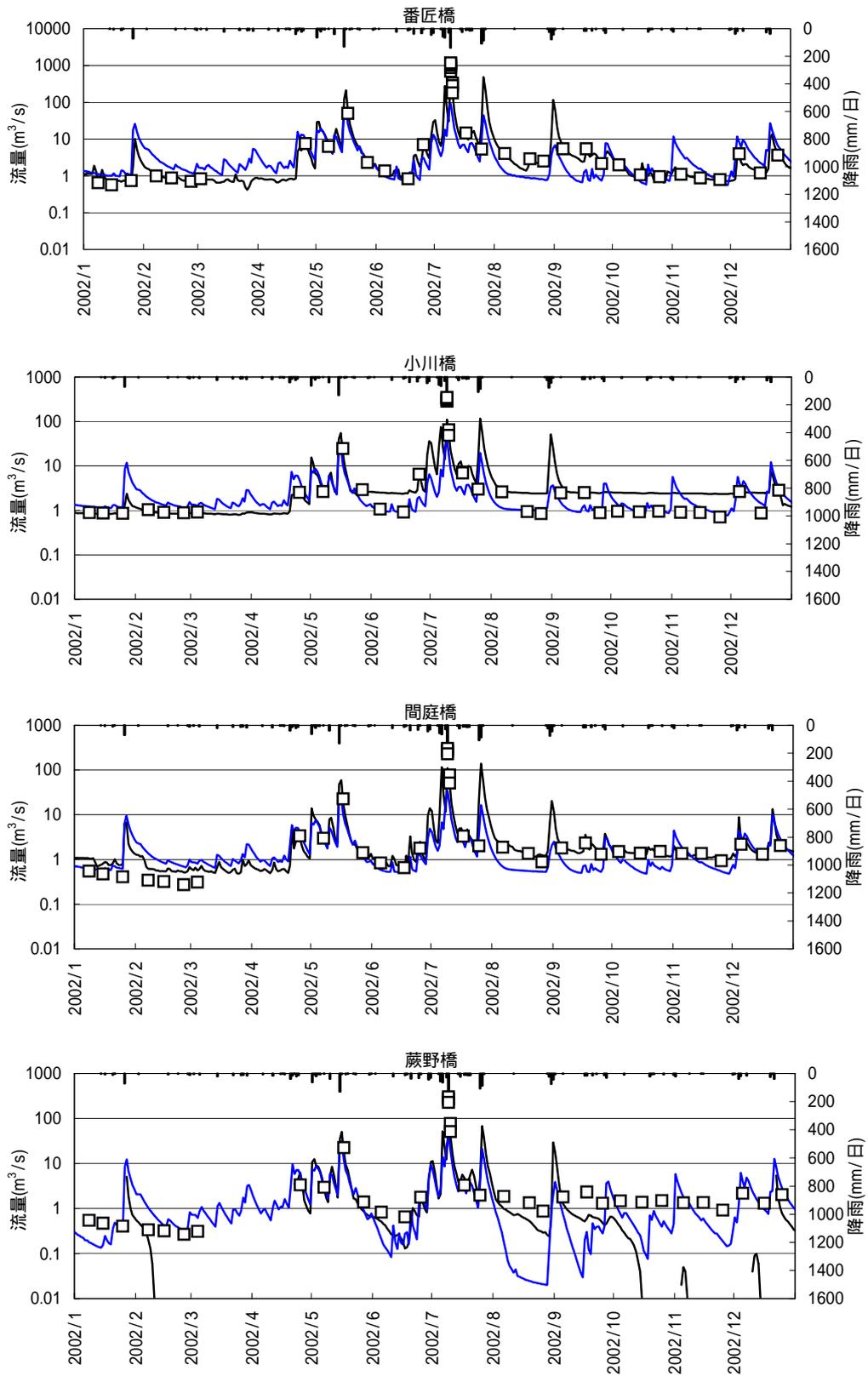


図 8-48 計算結果と観測値のハイドロ比較
(H14, 黒: 観測値, プロット: 低水観測値, 青: 計算値)

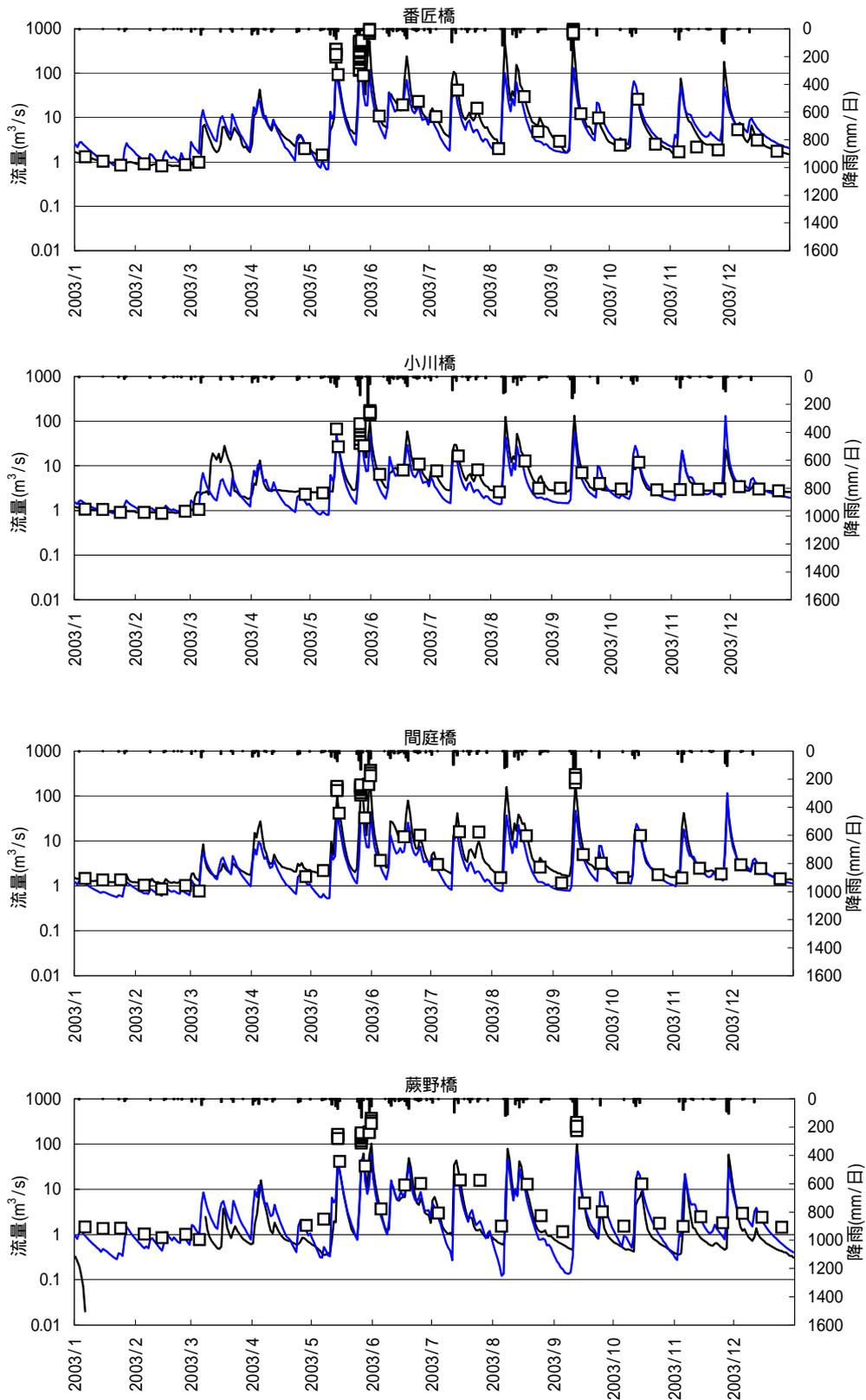


図 8-49 計算結果と観測値のハイドロ比較
(H15, 黒: 観測値, プロット: 低水観測値, 青: 計算値)

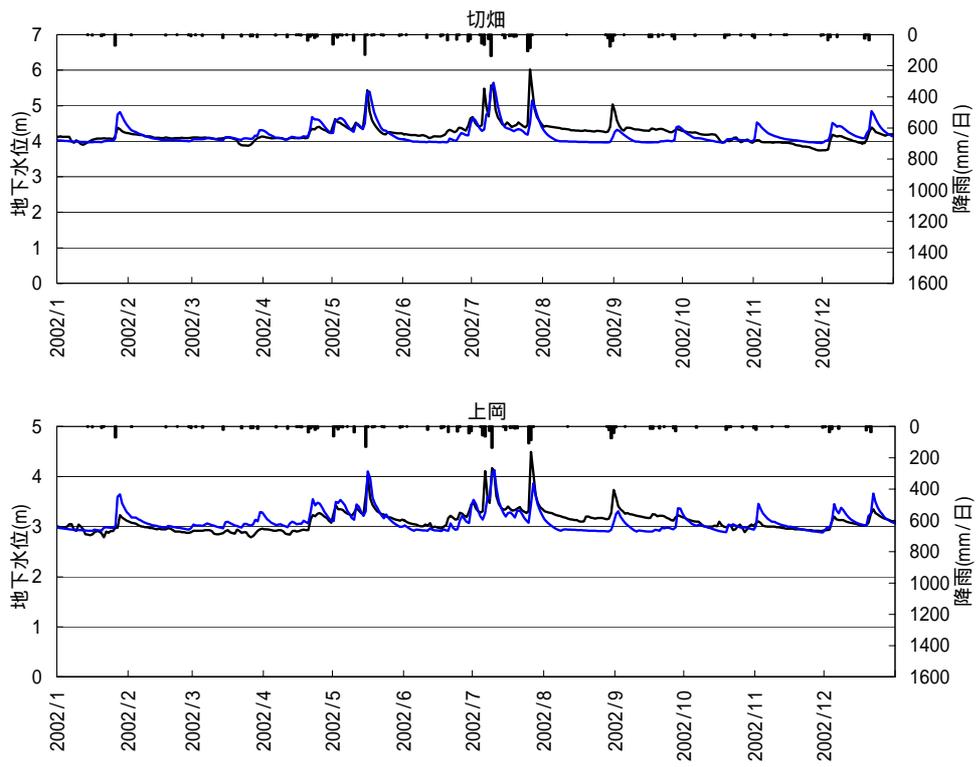


図 8-50 計算結果と観測値の地下水水位比較(H14, 黒：観測値, 青：計算値)

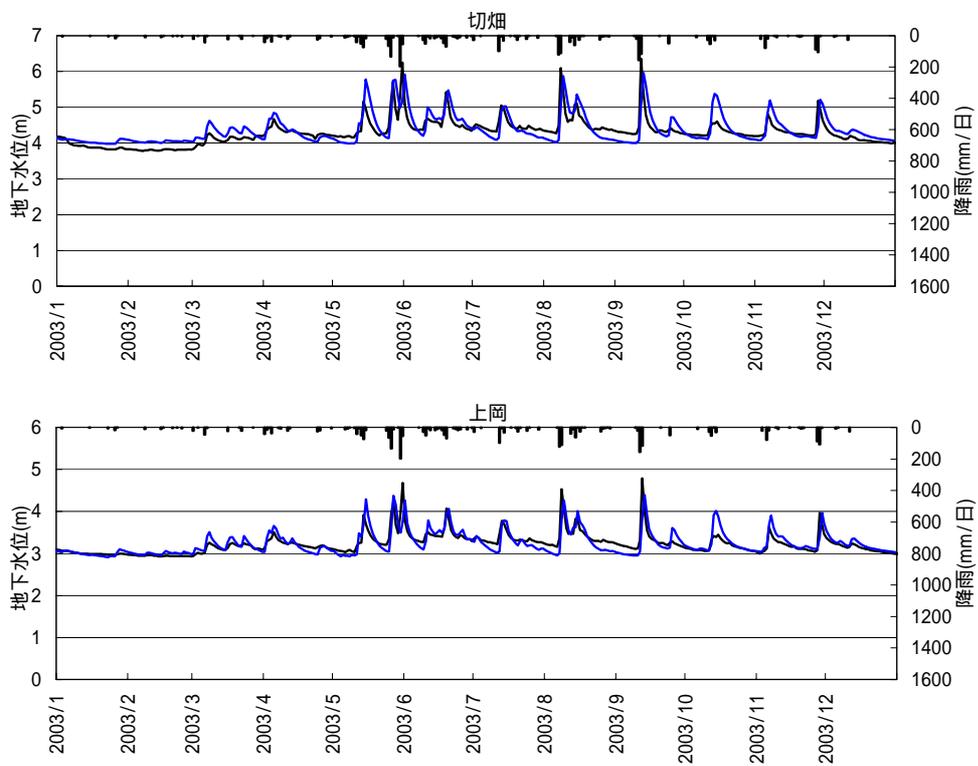


図 8-51 計算結果と観測値の地下水水位比較(H15, 黒：観測値, 青：計算値)

8.6. モデルを用いた番匠川流況に関する考察

同時流量観測では、番匠橋下流の榎野橋地点で、 $0.52\text{m}^3/\text{s}$ (非灌漑期平均)の伏流水の還元がある結果となっている。そのときの番匠橋の平均流量は $1.22\text{m}^3/\text{s}$ である。また、番匠橋と榎野橋での湧水流量の比較(間庭橋での比流量を残流域分として考慮している)からは、 $0.26\text{m}^3/\text{s}$ の還元が推定されている。

正常流量検討資料によると 過去48年間(昭和29年～平成13年)の番匠橋の1/10湧水流量が $0.3\text{m}^3/\text{s}$ であることから、それに計算流量が近い日(平成8年2月7日)の水収支(伏流・還元量)を示すと、**図 8-52** のようになる。上流側で伏流(河川 地下水)し、下流で還元(地下水 河川)している様子が再現されている。これは、河道断面の最深河床高(**図 8-53**)の高低にほぼ一致し、山梨子橋上流ではやや河床高が高いため伏流しており、潮止堰上流側では、深掘れしているため還元が発生している。潮止堰下流は感潮区間であり、河床が低く勾配も緩いことから還元が多く発生している。なお、番匠橋付近の伏流は、モデルで仮定した地下水揚水によるものであると思われる。計算の還元・伏流量は $0.1\text{m}^3/\text{s}$ 程度であり、上記の同時流観結果および潮止堰での常時約 $1\text{m}^3/\text{s}$ の取水よりは小さめとなっている。これは、解析モデルからは、モデルが日単位の現象を扱っていること、河川・地下水・河川と地下水のやり取りの計算を別々にしていることなどが原因と考えられる。

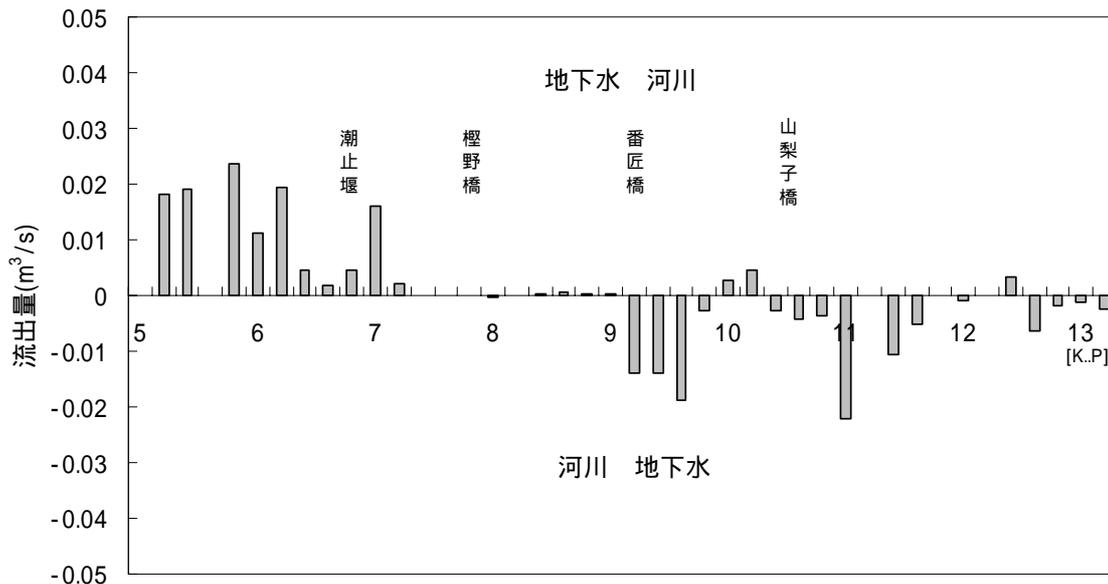


図 8-52 本川の水収支(H8.2.7)

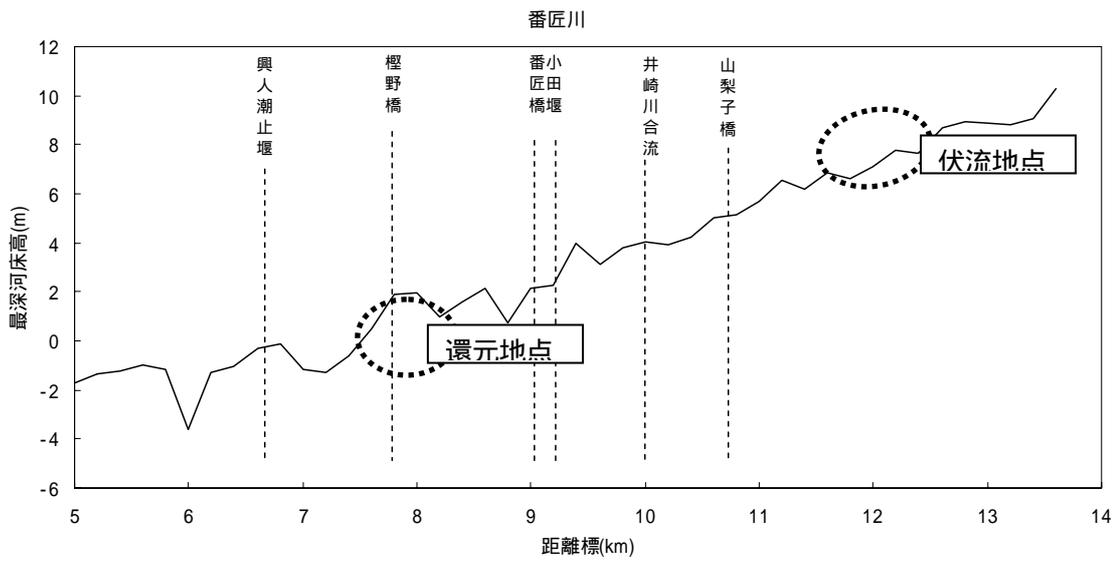


図 8-53 最深河床高

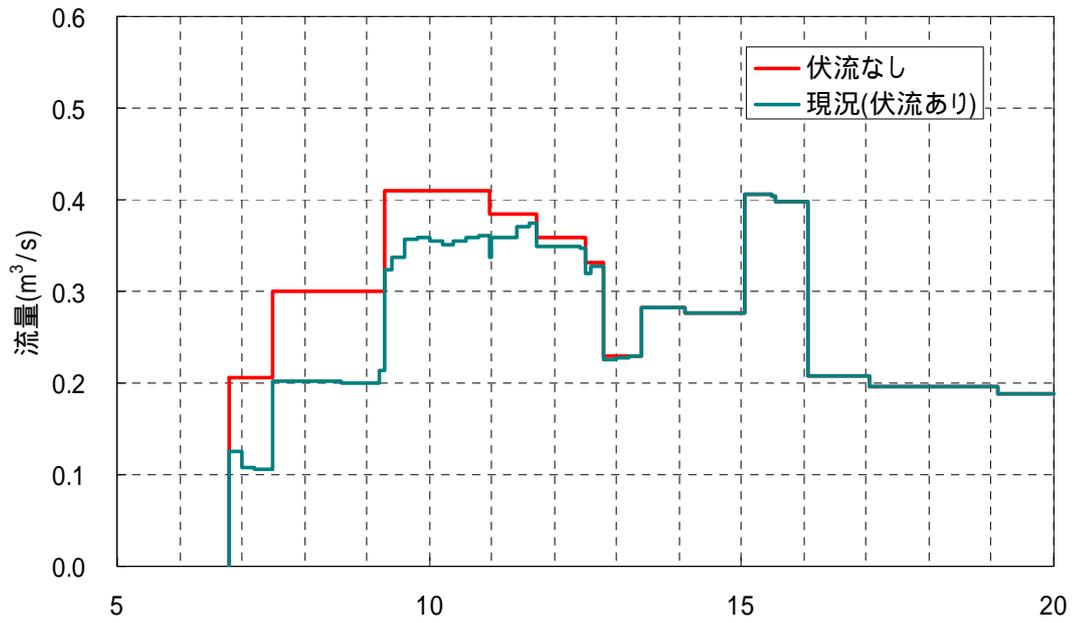


図 8-54 水収支縦断面図

また、地下水の流速ベクトル、地下水涵養量の平面図を示すと、**図 8-55**、**図 8-56** のようである。

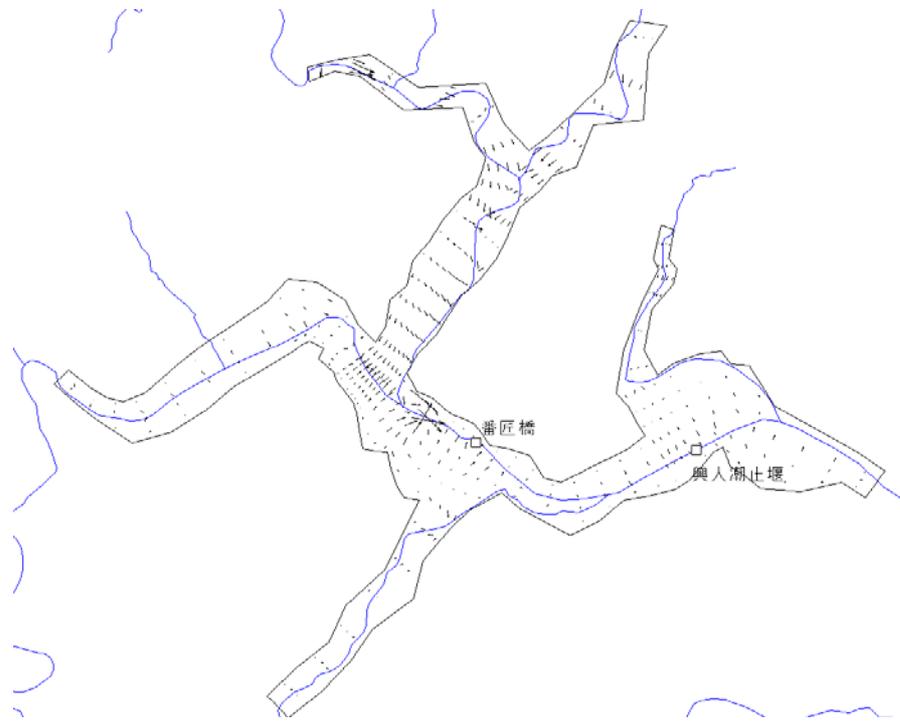


図 8-55 流速ベクトル

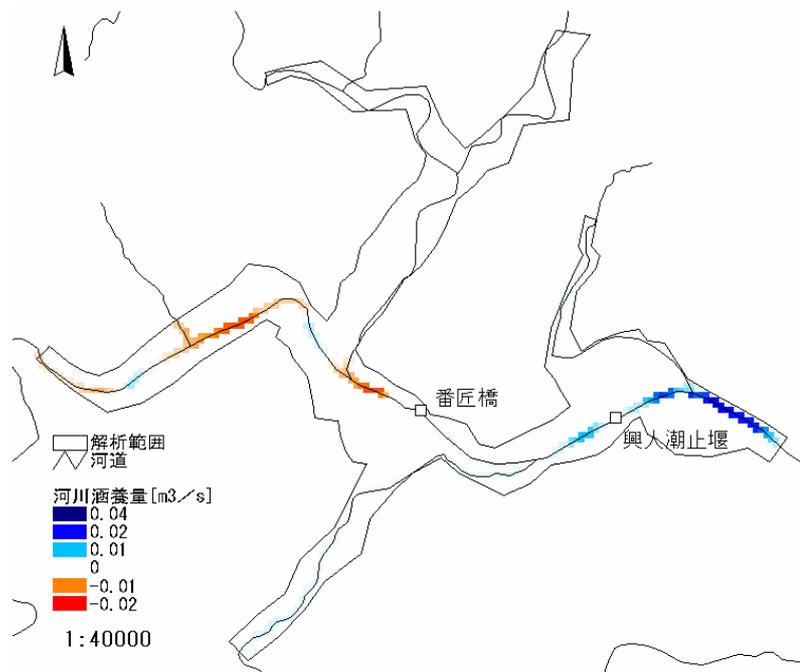


図 8-56 地下水涵養量

番匠橋および蕨野橋における流況曲線を図 8-57，図 8-58 に，流況表を表 8-12 に示す。

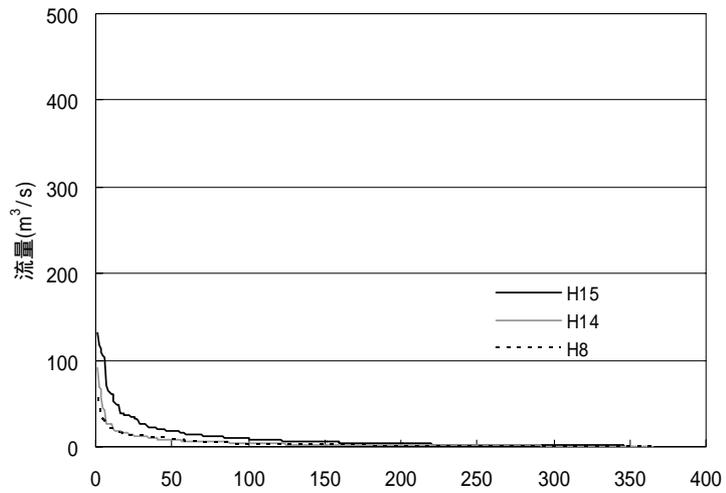


図 8-57 流況曲線(番匠橋)

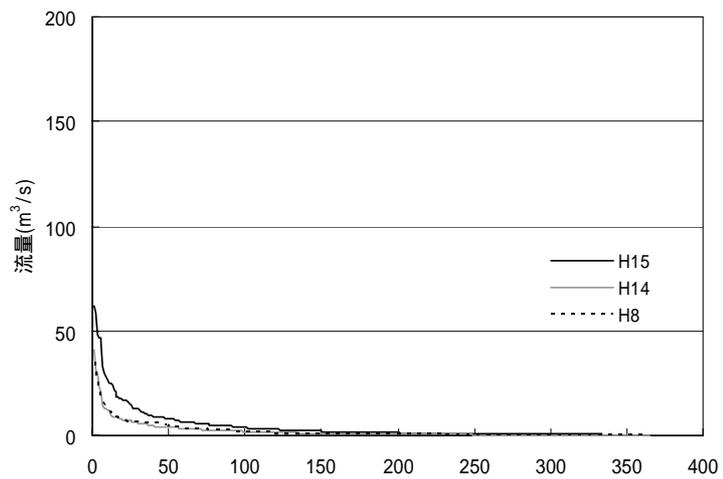


図 8-58 流況曲線(蕨野橋)

表 8-12 流況表(左：番匠橋，右：蕨野橋)

| | H8 | H14 | H15 |
|------|------|------|------|
| 豊水流量 | 2.83 | 4.50 | 9.57 |
| 平水流量 | 0.96 | 1.82 | 4.02 |
| 低水流量 | 0.51 | 1.10 | 2.11 |
| 渇水流量 | 0.29 | 0.72 | 0.87 |

| | H8 | H14 | H15 |
|------|------|------|------|
| 豊水流量 | 1.66 | 2.07 | 4.11 |
| 平水流量 | 0.64 | 0.77 | 1.42 |
| 低水流量 | 0.15 | 0.30 | 0.74 |
| 渇水流量 | 0.04 | 0.03 | 0.26 |

また、平成 14 年について、伏流を考慮しなかった場合の計算を行い、現況との比較を行うと図 8-59 のようになる。図には、現況との差を伏流量としてプロットしてある。図より、伏流量は河川流量の対数値と同様な変化をしており、伏流量変化は河川流量変化よりも小さいことが分かる。

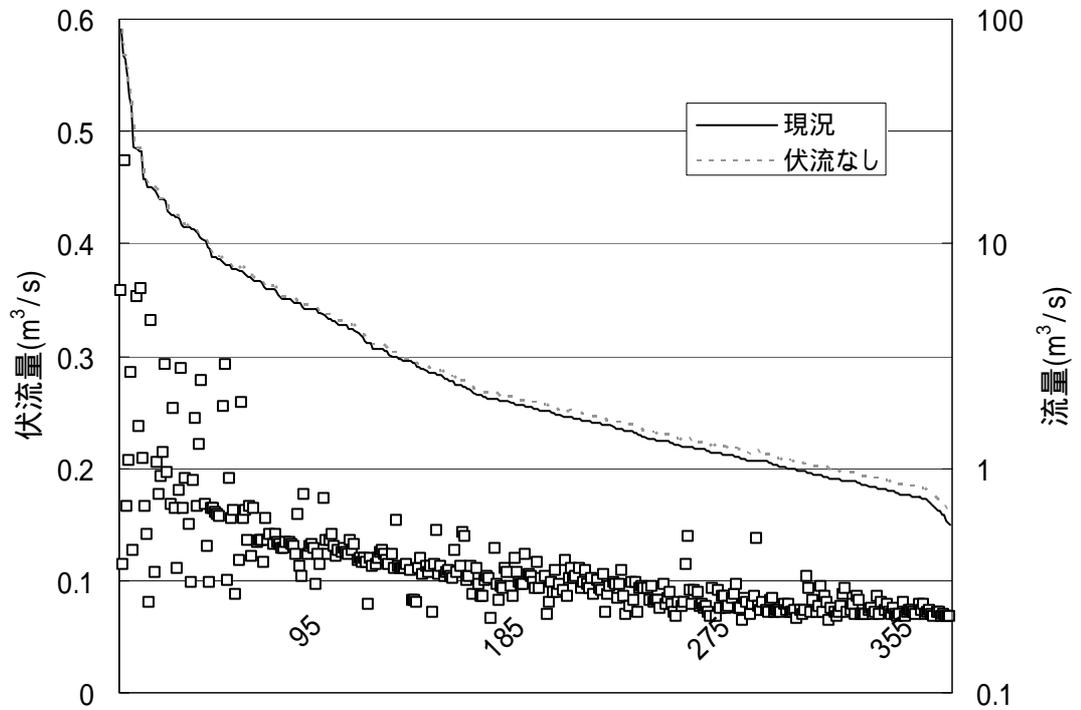


図 8-59 伏流を考慮しない場合の流況表(番匠橋)

9. 地下水管理モデルの課題

本研究では、「円滑な地下水管理を支援するツール開発」、「地下水流を精度よく再現できるモデル開発」を研究目的の柱とし、地下水管理モデルを開発した。地下水管理モデルは、データベースモデルと水循環解析機能からなり、住民の方々の多種多様な意見・疑問をその場で解決できる合意形成環境を整えるツールとしての活用も念頭に置いている。本研究を通して浮かび上がった課題を記す。

[課題] 実用上必要となる地下水解析精度が定まっていないこと

地下水管理においては、河川管理のように管理者の一元管理のもと利用者間の調整が行われる社会システムにないことから、解析モデルを利用した厳密な管理が継続されている事例がない。そのため、実用上必要となる地下水解析精度のレベルが社会通念として定まっているとは言いがたい。これまでの長い地下水研究により地下水解析の理論体系はほぼ確立し、長い計算時間や複雑な入力条件をいとわなければ多様な水文現象に対応できるようになっている。今後は解析モデルを活用した地下水の継続的管理の事例を積み重ね、使用目的に応じて実用上必要な解析精度のレベルとそれに適応した地下水解析モデルを選定できるようになることが望まれる。

例えば、今回の検討では地下水解析に GWAP を利用したが、このモデルは地下水空間を単層として表現するものであり、番匠川のように地下水構造が複層の場合には、詳細な物理現象を再現するために必要な空間構造を的確に再現できないと考えられる。しかし、今回の研究成果によれば、観測された地下水位の挙動を概ね再現できており、限りなく複雑なモデルを利用しなくても実用に耐えうる解析モデルが構築できることを示唆している。また、GWAP は、複雑なモデルよりパラメータが少なく、計算時間も短いなどパフォーマンスが高い側面もある。

以上のようなことから、使用目的、現場条件、解析精度の関係を明らかにしていき、地下水解析のための知見としていく必要があると考える。

[課題] 水文資料が不十分であることに起因して解析精度が上がらないこと

精度の良い地下水解析を行うために、複雑な計算モデルを構築できたとしても、モデルと条件となる地下水位・揚水量・土壌条件等が十分に整備されていないため、推定値を入力条件とすることが多く、境界条件精度が十分に確保できないことによって解析精度の劣化を誘発している。

例えば、今回の検討対象であった両筑平野は、取水システムが確立されていると共に、地下水観測資料が比較的豊富であったが、地下水解析に不可欠な揚水量のデータは年単位でしか把握できず、日単位揚水量は同定作業等を交えて調整している。番匠川でも、河川取水量と揚水量は推定の域を出ず、地下水位、そして、より精緻な解析精度が要求される伏流量の再現計算を困難なものとしている。更に、揚水量等の境界条件の不確実性は、モデル構造に起因する現象再現の不確実性を曖昧にしまい、課題の知見蓄積にも大きな障害となっている。

地下水解析の理論が確立し、それを再現するプログラム整備も概ね完成している今、地下水管理を行おうとする現場においては、地下水についてはもちろんのこと、表流水を含めた水文資料の充実に向けた取り組みが望まれる。

.....
国土技術政策総合研究所資料
TECHNICAL NOTE of N I L I M
No . 322 March 2006
編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

.....
本資料の転載・複写の問い合わせは
〒305 - 0804 茨城県つくば市旭1番地
企画部研究評価・推進課 TEL 029 - 864 - 2675