

地下水に関するデータベースと 涵養作用に関する研究

STUDY ON THE DATABASE AND THE RECHARGE ACTION OF GROUNDWATER

天方匡純¹・川崎将生²・富澤洋介³・安田成夫⁴・村瀬勝彦⁵・西垣誠⁶
Masazumi AMAKATA, Masaki KAWASAKI, Yosuke TOMIZAWA,
Nario YASUDA, Masahiko MURASE and Makoto NISHIGAKI

¹正会員 国土交通省国土技術政策総合研究所 ダム研究室 交流研究員 (〒305-0804 つくば市旭1)

²工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 ダム研究室 主任研究官 (同上)

³正会員 政策修 国土交通省国土技術政策総合研究所 ダム研究室 研究官 (同上)

⁴正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 ダム研究室 室長 (同上)

⁵正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所 企画課 課長 (同上)

⁶正会員 工博 岡山大学大学院環境学研究科教授 (〒700-8530 岡山市津島中三丁目1-1)

Physical understanding of subsurface water characteristics is quite important for the efficient use of water resources, since heavy rainfall infiltrates into the underground and much water is being used from the underground through the pump or the well in our lives. From this point of view, we developed a practical tool that can analyze the quantity of the water under water circulation. The model consists of three sub-models: surface model, subsurface model, and database model. In this integrated model, we have also incorporated a function which can precisely evaluate the interaction between river and subsurface and can assess the cultivation water for the paddy field. The model has been applied to the simulation for the Ryochiku plain, Japan. The numerical results on the groundwater level and the river discharge have been compared with corresponding field observations. Good agreements have been obtained.

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

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次元的な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、①データベースモデル、②地下水解析モデル、③地上部水収支モデルからなり、②と③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。

本論文では、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、水循環解析機能の精度に関して記述する。

2. 地下水管理モデルの基本構造

(1) データベース機能と解析機能の結合

図-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。

(2) データベースの内容

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。

具体的には表-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

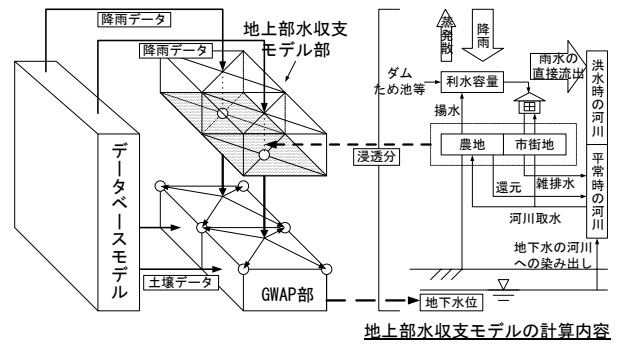


図-1 データベースと解析機能の結合

表-1 データベース項目

大項目	中項目	備考
モデル要素	土地利用	
	地質	
	土質柱状図	
	圃場データ	
	堰データ	
	河道データ	横断面図
水文要素	雨量	
	河川流量	
	河川水位	境界条件
	地下水位	
水利用要素	河川取水量	都市、農業
	地下水揚水量	ポンプ揚水

データベース検索画面

時系列データ

1 雨量

2 気温

3 ダム

4 河川流量

5 河川水位

6 取水量(都市)

7 取水量(農業)

8 取水量(井堰)

9 導水量

10 地下水位

11 地下水揚水量

地点名を選んでください

地図上から検索

データ追加

地点名を選んでください

地図上から検索

データ追加

地点名を選んでください

地図上から検索

データ追加

地点名を選んでください

地図上から検索

データ追加

地点名を選んでください

地図上から検索

データ追加

表示

地点名を選んでください

地図上から検索

データ追加

地点名を選んでください

地図上から検索

データ追加

地点名を選んでください

地図上から検索

データ追加

流域データ

1 土地利用

2 地質(平面分布、土質柱状図)

年を選んでください

地図上から検索

河道データ

1 河道横断

2 堰など

地図上から検索

地図上から検索

図-2 データベース検索画面

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。

なお、多くの人がデータ蓄積作業をストレスなく行えるように、ユーザビリティを重視して表計算ソフトウェアExcelをベースにした開発を行った。

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。

3. 地下水解析精度向上に資するプログラム改良

表-2 モデル上の地目分類²⁾

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	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、畑地等をこの分類とする。	
浸透域（締め固められた土地）	造成等により締め固められた土地利用の浸透域	

(1) 地上部水収支計算の内容

地上部水収支計算は、SHERモデル²⁾の考え方にならない、プログラム構築を行った。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、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した。それぞれの流域（ブロック）においては、地表面を表-2に示した4種類に分類する。

以下に不浸透域モデルと浸透域モデルの考え方を示す。

a) 不浸透域モデル

不浸透域モデルの基礎式は式(1)の通りである。

$$\frac{dS}{dt} = P - D - E \quad (1)$$

ここで、 P は降水量、 S は不浸透域窪地貯留池の貯留量、 D は不浸透域からの表面流出、 E は不浸透域窪地貯留池からの蒸発量である。

降水量と窪地貯留能を比較し、降水量が上回れば、その余剰分を表面流出とする。また、蒸発散量の算定は窪地貯留池の水量を上限としてハーモン式を用いている。

b) 浸透域モデル

河川への流出は表面流出、中間流出、地下水流出により構成される。ここでは、表層土壌モデルと地下水層モデルとして表現し、貯留量を式(2)のように窪地貯留及び表層土壌内貯留の2種類に分けて考えることとした。

$$\begin{aligned} \frac{dS_1}{dt} &= U_s - E_1 - D_s \\ \frac{dS_2}{dt} &= P - E_2 - R - I - U_s + P_{a1} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 S_1 は窪地貯留池の貯留量、 S_2 は表層土壌内の貯留量、 D_s は表面流出量、 E_1 は窪地貯留池からの蒸発量、 E_2 は表層土壌内からの蒸発量、 P は表層土壌への湿潤量（＝降水量）、 R は地下水涵養量（GWAPへの入力値）、 I は中間流出量（側方浸透流）、 U_s は地表面への復帰流、 P_{a1} は表層土壌へ進入する人工系水循環水量である。

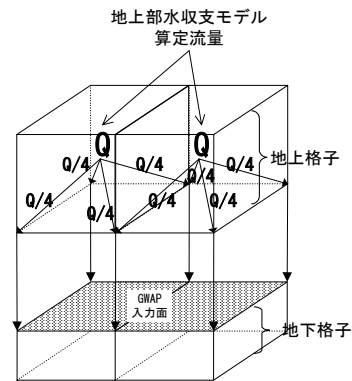


図-3 表流水モデルと地下水モデルの関係

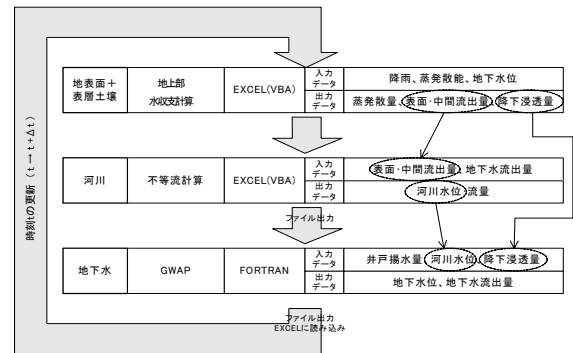


図-4 地上部水収支計算、GWAPの計算順序

(2) 地上部水収支計算結果のGWAPへの反映方法

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に合わせて、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-3に示す。

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-4のようになる。

(3) 河川・地下水相互通水機能

精度の高い「河川・地下水相互通水機能」を開発するため、河川水位の算定にあたっては、堰の背水計算も可

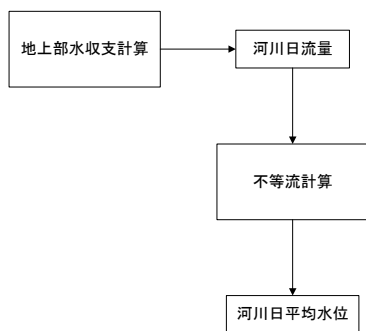


図-5 河川水位の算定方法

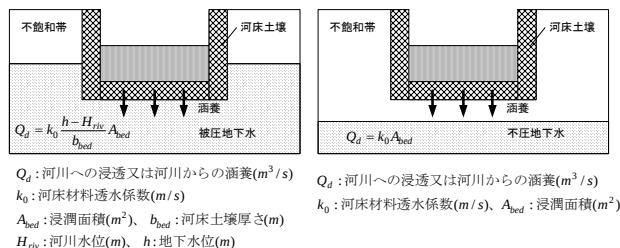


図-6 河川水と地下水の相互通水機能

能とする不等流計算を採用した(図-5)。計算単位は日計算であるが、堰による湛水涵養の影響が地下水位に反映されるモデルとなっている。

なお、河川水位と地下水位の関係から算定される地下水への涵養量の算定にあたっては、PINDER等の考え方³⁾に基づいて図-6の通りとした。

(4) 河川取水を通じた水田涵養機能

水田による土地利用が卓越する区域では、水田涵養が地下水に与える影響が大きいため、その涵養量については精度の高い定量的な評価が必要となる。本論文においては、河川取水を通じた水田への流量配分については、図-7のように河川取水量を減水深の大きさに応じて配分し、水田から地下水への涵養量を表現している。

(5) 既知流量境界設定及び揚水量の時系列化

GWAPでは、既知流量境界が整備されておらず、また、揚水量が一定値入力となっている。これを既知流量境界・揚水量共に時系列データとして境界条件に組み込むように改良を行った。

4. 実流域への適用

(1) 研究対象地域の地下水概要

本研究対象地域は、筑後川水系小石原川・佐田川流域(以後、両筑平野)である。両筑平野では、昭和50年代頃まで井堰、ため池、湧水係り用水を中心とした水利用が行われてきた。ところが、昭和60年代から圃場整備、ダム整備、揚水機場整備等の総合的機能が発揮され、水

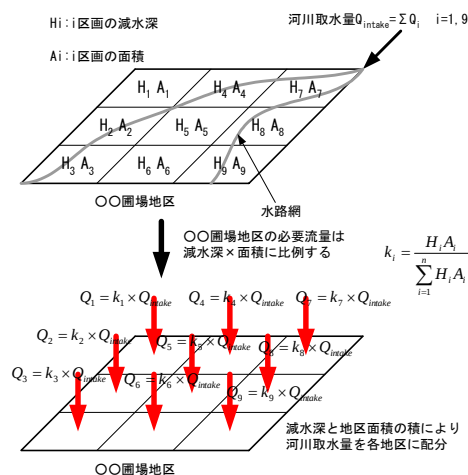


図-7 水田涵養量の計算方法

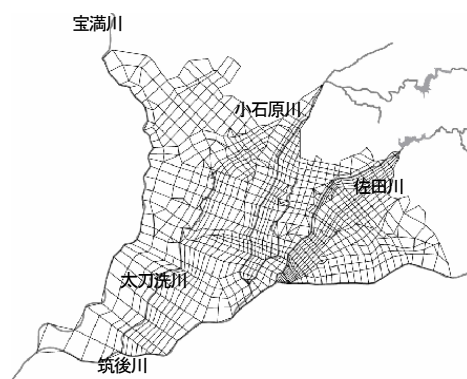


図-8 解析領域の設定

利用のあり方が一変した。このようななか、既往文献やヒアリング調査⁴⁾から両筑平野の地下水位が低下傾向にあることが確認されている。また、河川では冬場の渇水期に伏流による「瀬切れ」が確認されている。

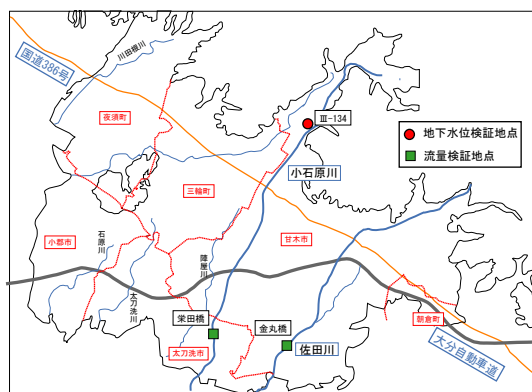
以上のように、両筑平野では、表流水(河川水)、地下水、そして、水利用が密接に関わり合うなか、水循環上の課題が発生している。

(2) 領域設定

河川水、地下水、水利用が相互に関わり合う両筑平野を本研究の対象地域とし、地下水位を検証対象として、本研究で構築したモデル精度の確認を行う。

改良前のGWAPのみによる両筑平野の地下水解析では、1km四方の有限要素メッシュを原則として懸案領域が過不足なく囲まれるモデル領域を設定した。この結果、下流域(筑後川側)において、観測地下水位と計算地下水位が5mも異なる領域が現れ、モデル精度の向上が大きな課題となった。この原因は、領域内計算水位が境界水位から必要以上に大きな影響を受けたためと推定される。

そこで、本研究では、モデル境界に関する不確定要素を可能な限り除去するために、遠方端境界として設定できる所までモデル領域を拡大した。具体的には、モデル



の西の境界を宝満川とし、南の境界を筑後川、北及び東の境界を筑紫山地とした(図-8)。この結果、総メッシュ数が1120となった。遠方端境界として扱った宝満川、筑後川の水位については、境界条件の振れ幅が地下水計算結果に与える影響は小さいと考え、月平均水位としている。山地は不透水尾根境界とし、山地からの浸透はSEHRモデルで計算流出量を求め、それをGWAPへの既知流量境界として用いた。

なお、モデル領域内の有限要素分割の際には、懸案領域である佐田川・小石原川周辺のメッシュは小さく切り、遠方端境界とした宝満川及び筑後川周辺のメッシュはその倍以上の大きさで切り、作業の効率化を図っている。

(3) 地下水位算定精度

図-10は、河川近傍地点（Ⅲ-134：図-9）において、河川・地下水相互通水機能（以下、相互通水機能）の効果を検証したものである。上側のグラフは相互通水機能を考慮していないもので「改良前」とし、下側のグラフは同機能を考慮したもので「改良後」としている。改良後グラフの計算値は、観測値の鋭敏な変化に追随し、全体的な合致度も良く、相互通水機能による精度向上が確認できる。

また、同じ地点(Ⅲ-134:図-9)において、水田涵養機能を考慮した場合としない場合の比較を行った。図-11はその検討結果を示したものであり、図-10と同様に、水田涵養機能を考慮していないものを「改良前」、考慮したものを「改良後」と表記している。水田涵養機能を考慮することにより、6月から9月の灌漑期の地下水位再現精度の向上が確認できる。

(4) 河川流量算定精度

図-12は、両筑平野を流れる小石原川及び佐田川における流量観測値と流量計算値を比較したものである。全体的に冬場の計算値が観測値より大きくなる傾向が見られるが、総じて良好な再現性を見せ、地上部水収支計算が良好に機能していることが確認できる。なお、河川流量オーダーに比べて相互通水流量オーダーは小さく、相

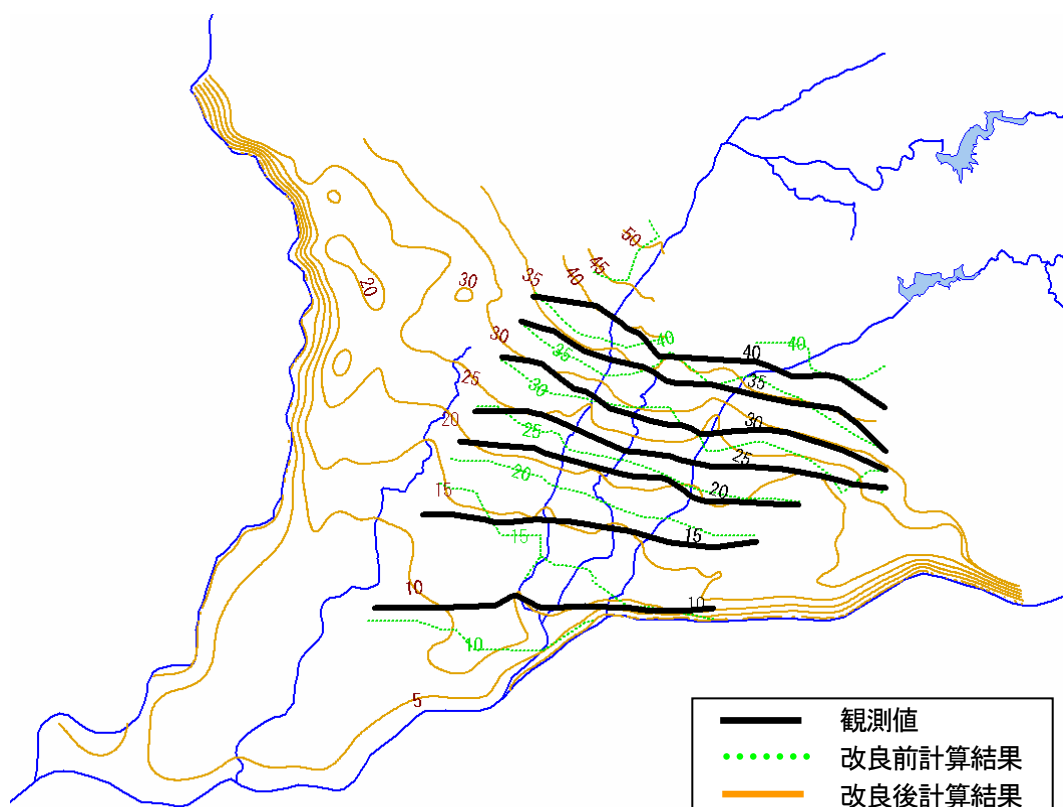


図-13 1996年12月地下水観測値に対する検証結果

(5) 広域地下水解析精度の確認

1978年9月の観測地下水位に対して平面的なモデル同定を行ったのち、相互通水機能等の改良を加え、1996年12月の観測地下水位（10mコンターに関する観測値が少なく、精度が悪いと考えられる）に対してモデル検証を行った。モデル検証の結果を図-13に示す。また、改良前のGWAPのみによる解析結果を改良前計算結果として示す。これまで述べた設定・改良により、改良前計算結果よりも改良後計算結果の精度改善が確認できる。特に、下流域地下水位の精度向上は、境界条件適正化によるものと考えられ、河川沿いの褶曲したポテンシャル線の再現は、河川・地下水相互通水機能の効果と考えられる。

5. 結論

地下水管理・解析に資するデータベースを開発した。また、河川水と地下水の相互関係に着目した地下水管理モデルを開発し、両筑平野の地下水位の再現を試みた。河川と地下水の局所的な地下水位動向については、河川・地下水相互通水機能によりモデル精度を高めることができた。また、水田涵養機能によってもモデル精度向上が見られた。更に、これらの精度向上作業の積み重ねにより、両筑平野全体に対しても、改良前モデルに比較して精度の向上を図ることができた。

本論文では、主に地下水の視点からモデル精度を確

認した。今後は、伏流等の現象再現を始めとして、河川と地下水との関係が如実に確認される事象について本モデルを適用し、河川側からの視点で解析精度の向上を図っていきたい。

謝辞：本検討にあたって、データの提供を始めとして、筑後川河川事務所から多大な協力を得た。改めて感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 西垣誠: 有限要素法による広域地下水の準三次元浸透解析, 地下水学会仙台講習会, 1995.
- 2) 水循環解析モデル (SHER モデル) の公開について, <http://www.arsit.or.jp/koukaiyou/sher1.htm>.
- 3) George, F. Pinder and Stanley, P. Sauer: Numerical Simulation of Flood Wave Modification Due to Bank Storage Effects, Water Resour. Res., 7(1), pp. 63-70, 1971.
- 4) 天方匡純, 村瀬勝彦, 川崎将生, 富澤洋介, 安田成夫, 西垣誠: 両筑平野における地下水動向の定性的把握のための調査研究, 水文・水資源学会誌, 第19巻1号, 2006 (掲載予定) .
- 5) 天方匡純, 川崎将生, 富澤洋介, 安田成夫: 洪水時の河川水と地下水の強い連関性を利用した土壌特性の推定, 第60回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM) , 2-035, 2005.

(2005. 9. 30受付)