地盤情報データベースを用いた地下水資源の評価*

小池克明**・土井英太郎***・野間卓志**・大見美智人**

Evaluation of Ground-Water Resource Using a Geotechnical Database

Katsuaki KOIKE, Eitaroh DOI, Takushi NOMA and Michito OHMI

Abstract : An application of a geotechnical database for evaluation of ground-water resources in a sedimentary basin is proposed. The database consists of 870 borehole logs with bottom depth from 10 meters to 330 meters.

Using the optimization principle method, we determine a geometrical model on the aquifer structure of Kumamoto plain, Southwestern Japan, i.e. shapes of upper and/or lower surfaces of six strata including the alluvial clay, the four pyroclastic flow deposits, and the andesitic lava. The location of buried rivers and the features of subsurface structure are clarified using the geometric model. The amount of ground water in the study area is roughly estimated by multiplying the volume of key beds under the ground-water level by the supposed porosity for each lithology.

Multivariate regression method is applied to find out the relation between variations of ground-water level and precipitation rate in various years. The average of ground-water level in a desired year at each boring locaion can be predicted by the constructed regression model. It is concluded that the reduction of ground-water level is partly due to development of the urban area, which is confirmed by processing of the two LANDSAT TM images of the Kumamoto plain for different years.

Key Words : Geotechnical database, Ground water, Interpolation, Kumamoto plain, Aso pyroclastic flow deposits, Water resources, Multivariate regression model, Urban development

1. はじめに

数理地質学・情報地質学の分野における主な研究テーマを大別すれば、次の4つになると考えられる。すなわち、①離散的に分布するデータの補間、②多様な属性をもち、時系列的な変化も伴う情報のデータベース化とその応用、③数値・文字・画像を含む各種情報、あるいはそれらの解析結果の統合、および④塩野・弘原海(1988)などが提唱する地質学的概念や法則の定式化である。

大量の調査・測定データを体系的にまとめ上げる②のテーマにおいて、これまでに開発されたデータベースは多岐にわたり、例えば花岡ほか(1981)による地熱情報データ

ベース、中山・柿崎(1990)による石油探鉱の坑井データベースがある。特に資料の豊富さゆえに地質柱状図のデータベース化は盛んに行われ、幾志(1973)をはじめとして Buell (1984), Walters and Loyd (1985), Chaplow (1986), Raper and Wainwright (1987), 中山ほか(1989), Apon (1991), Bellotti and Dershowitz (1991) などの数多くの報告例があげられる。しかし、これらの研究ではデータベース化の手法やデータの検索・出力方法に主眼が置かれている。また、広域的な地盤情報を有するデータベースが活用される対象の殆どは地盤の地震工学的特性の評価である。すなわち、小川・星野(1976)などが指摘しているように地質とS波速度とに相関性があることから、幾志(1982)、諸星・幾志(1988)、幾志(1990)はサイスミック・マイクロゾーニングに、岩崎ほか(1990)や服部ほか(1992)は液状化ポテンシャルの算出にデータベースを利用している。地質や地盤物性の分布に関する解析例としては、地質柱状図から堆積物の重なり方の規則性を見出した Miall (1973), Yamamoto and Nakagawa (1974), 渡

* GEOINFORUM-'93(東京)で一部発表

** 熊本大学工学部材料開発工学科 Department of Materials Science and Resource Engineering, Faculty of Engineering, Kumamoto University, 2-39-1, Kurokami, Kumamoto 860, Japan.

*** 熊本大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kumamoto University.

辺 (1982), および N 値の分布を検索した松澤ほか (1989) があげられるが, 堆積盆地全体の構造をモデル化するなど広範囲のデータを取り扱った例は少ない。

このような状況を踏まえ, 小池ほか (1990a, b; 1991) は地盤情報データベースから地質分布・地質構造・地下水位分布・ N 値分布を明らかにし, 地盤構造の広域的かつ多次元的な特徴を抽出するための基礎的な手法について検討した。本研究ではこれを発展させ, 地下水資源の評価にデータベースの適用を試み, 地下水を胚胎する地層の構造, および地下水位の経年変化を明らかにする。また, ③の応用例として, 地下水位の低下域と人工衛星画像から抽出される都市環境の変化域とを重ね合わせて検討する。解析の対象には熊本平野を選んだ。本地域では上水のすべてを地下水に依存するが, 地下水汚染や地下水位低下の問題も顕在化し始め, 地下水資源量の評価と水理構造の解明が重要な課題になっている。

2. 地下水を胚胎する地層の構造解析

2.1 各鍵層の特徴

熊本平野を対象とした地盤情報データベースの内容, およびそれから地盤構造の特徴を抽出するための手法については既報 (小池ほか, 1990a; 1991) のとおりである。そのデータベースに370本のボーリング資料を追加したことによる計870本のデータの分布状態を第1図に示す。これらの下底面深度は地表面下10m~330mの範囲にある。

熊本平野の北東部は傾斜が緩やかな台地状であるが, 南

第1図 地盤情報データベースに収められたボーリングデータの分布状態。Ariake Bay: 有明海(A), Mt. Kinpo: 金峰山(KP), L. Ezu: 江津湖(E), R. Shirakawa: 白川(S), R. Tsuboi: 坪井川(T), R. Iseri: 井芹川(I), R. Kiyama: 木山川(K), R. Kase: 加勢川(KS), R. Midori: 緑川(M)。括弧内は各呼称に対する略記号を, 点線は布田川断層の延長部を表す。

西部は標高5m以下の広範な低地帯である。平野下表層部の層序については渡辺・小野 (1969), 渡辺 (1984), 石坂ほか (1992) などに詳しい。それらの文献によると, 広域的に分布し, 堆積年代が明らかであるという鍵層の条件を満足する地層は, 噴出時期が異なる4層の火砕流堆積物, すなわちAso-1 (27万年前), Aso-2 (14万年前), Aso-3 (12万年前), Aso-4 (9万年前) と層序的にAso-1とAso-2の間に位置する砥川溶岩 (15万年前), および後氷期の海進に伴う有明粘土層である。各鍵層の存在位置と深度を地盤情報データベースから抽出するに当たっては, 次のような各鍵層の特徴を検索条件に設定した。

有明粘土層: N 値は3以下の極めて柔らかい粘土層で, 下部に腐食土層・ビート層をもつ。

Aso-4: 主として非溶結の軽石流堆積物で, 軽石に角閃石が含まれる。

Aso-3: スコリアや黒曜石を含む非~弱溶結のスコリア流で, スコリアには斜長石の斑晶が多量に含まれる。

Aso-2: 上部は非~弱溶結, 下部は強溶結のスコリア流で, スコリアは無斑晶または少量の斜長石斑晶を含む。

砥川溶岩: 多孔質で亀裂の多い普通輝石安山岩からなる (第2図)。

Aso-1: 黒色の強溶結の凝灰岩で, 斜長石, 輝石の斑晶を含む (第2図)。

砥川溶岩は上記の特徴をもつため特に有能な被圧帯水層であると考えられているので, その詳細な形状と溶岩の流出方向を明らかにすることを目的とし, 上面と下面を検索

第2図 砥川溶岩の多孔質部 (左) と Aso-1 (右) のコア試料

の対象とする。また、有明粘土層は、その最上部と現河川による堆積物との区別がつきにくいので、堆積開始時の古地形を推定するために下面のみを扱う。これらの地層に対して阿蘇火砕流堆積物の層相の変化は大きく、地質柱状図からは火砕流間ローム層と火砕流風化層との区別が困難なために上面のみを対象とする。なお、Aso-4・Aso-3、砥川溶岩の上面の形態については小池ほか(1990a)で論じたが、情報量を増やした本研究のデータベースに基づき、解析精度を高めるために再度それらの構造のモデル化を試みる。

2. 2 鍵層の構造モデル構築のための補間法

各鍵層の上面、あるいは下面が検索されたボーリングデータの位置は第3図のようであり、対象領域のほぼ全域から検索されたAso-4の情報量が最も多く(データ数425)、Aso-3がこれに次ぐ(データ数244)。有明粘土層の分布は西部に限られ(データ数144)、砥川溶岩を貫通したボーリングは少ないために、上面のデータ数179に対して下面は45である。また、Aso-2と深部に位置するAso-1のデータ数はそれぞれ33、49で、それらの分布域も限られている。

離散的に分布するデータから鍵層の構造を推定するには補間の操作が必要であるが、これに塩野ほか(1987)による最適化原理を適用した。その理由については小池・大見(投稿中)で述べる。最適化原理とは、各格子点において補間される値 f_{ij} ($i=1, \dots, nx; j=1, \dots, ny; nx, ny$ は x 軸, y 軸方向の格子数) で曲面を離散表現した場合、最も滑らかな曲面を与える f_{ij} を最適解とする手法である。最適解 f_{ij} は次式の拡大目的関数 $Q(f; \alpha)$ を最小化することで求められる。

$$Q(f; \alpha) = J(f) + \alpha \phi(f) \quad (1)$$

ただし、 α は正の重み係数、 $\phi(f)$ はペナルティー関数で、 f_{ij} の誤差の2乗和を意味する。 $J(f)$ は

$$J(f) = m_1 \iint \left\{ \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy + m_2 \iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 \right\} dx dy \quad (2)$$

と表される汎関数で、 m_1, m_2 は正の重み係数である。

第3図 各鍵層の上面あるいは下面が検索されたボーリングデータの位置。
(a)有明粘土層下面 (b)Aso-4上面 (c)砥川溶岩上面 (d)Aso-1上面。

$Q(f; \alpha)$ を最小化するには、未知量 f_{ij} で式 (1) を微分した結果を零とおき、それを連立させればよい。その連立一次方程式の元数は大きいので、小池・大見 (1992) のように繰返し法によって f_{ij} を求める。 f_{ij} の初期値としては最も近くに位置するデータを用い、繰返し数 l での計算値を $f_{ij}^{(l)}$ とする。計算の収束を速めるために、緩和係数 r ($1 \leq r \leq 2$) によって

$$f_{ij}^{(l)*} = f_{ij}^{(l)} + r(f_{ij}^{(l)} - f_{ij}^{(l-1)}) \quad (3)$$

$$(i = 1, \dots, nx; j = 1, \dots, ny)$$

とし、 $f_{ij}^{(l)*}$ を新たに $f_{ij}^{(l)}$ の値におく。また、収束条件

$$\max |f_{ij}^{(l)} - f_{ij}^{(l-1)}| \leq \epsilon \quad (\epsilon \text{ は微量}) \quad (4)$$

を満足したときに最適解が得られたと仮定する。

2. 3 各鍵層の構造モデル

最適化原理を用いた 2 次元補間によって、250m 四方の単位格子における各鍵層の上面、あるいは下面の標高を算定すると、鍵層ごとにデータの分布状態が異なるので、例えば Aso-3 が Aso-4 の上部に位置するなど層序が逆転する部分も生じた。このような部分に対しては、より多くのデータから作成されたモデルの方が信頼性が高いと考え、その標高に他方のモデルの標高を一致させるという補正を行った結果が第 4 図(a)~(f)である。各鍵層の構造に関する特徴を等高線図、および層序順に重ね合わせた断面図に基づいて以下にまとめる。

有明粘土層：下面の等高線 (第 4 図(a)) に基づくと、本層は有明海の方へと 緩く傾斜しており、海進が江津湖西岸まで及んでいたことがわかる。また、現在の河川とは異なる位置に連続性の良い 2 本の谷構造がみられ、これらは旧白川・旧加勢川の流路を表す埋没谷であると考えられる。

Aso-4, 3：両層の上面の形状は類似しており、領域東端の台地部と西端の有明海沿岸部とでは 150m 以上の標高差がある (第 4 図(b), (c))。それらの傾斜は東北東-西南西方向の断面図 (第 6 図(a)) が示すように、有明粘土層よりも大きい。江津湖が両層の僅かな凹みに位置していることも断面図からわかる。また、領域北東部には現在の河川の位置に浸食地形が存在するとともに、白川南部にも谷地形の発達が認められ、これは旧河川による浸食と考えられる。低地帯での特徴として、有明粘土層にみられた埋没谷が両層にもほぼ同じ位置に現れている。

Aso-2：砥川溶岩上面と重ね合わせた鳥瞰図 (第 5 図) からわかるように、本層の主な分布域は木山川流域における砥川溶岩上面の凹地に限られている。

砥川溶岩：溶岩の性質上閉曲面をなすと考えられるので、上面が検索された地域内である層厚をもつような構造を仮定した。本層の上面・下面は、木山川の南側では急傾斜の北落ちを示すのに対して、その北側では緩やかな南落ちになっている (第 4 図(d), (e))。この特徴は北北西-南南東方向の断面図 (第 6 図(b)) を描くと、さらに顕著に現れる。砥川溶岩の凹みは、第 1 図に示すように活断層である布田川断層 (九州活構造研究会編, 1989) の延長部に相当し、地溝帯形成運動による構造谷を反映していると考えられる。

Aso-1：本層は第 2 図に示すように溶結度が高いので、上位の火砕流堆積物よりも間隙率が小さく、通常の固結岩盤と同様に地下水の流れは亀裂分布に支配されると推測できる。Aso-1 よりも深部の鍵層に関するデータは極めて少ないこともあり、ここでは本層を水理的基盤とみなすことにする。その上面の形態は盆地状であり、標高-160m 以下の特に深い部分と布田川断層との関連が第 4 図(f)に表されている。

2. 4 砥川溶岩の流出方向の推定

砥川溶岩の水平面上での分布は、第 3 図(c)に示すように楕円体状である。また、種々の垂直断面図に砥川溶岩は線対称をなす形状であるように現れる。本層は比較的粘性の低い溶岩であるので、噴出時の地表面の最大傾斜方向、もしくは凹地に沿って流れたと推定できる。したがって、溶岩の重量分布の釣り合いに関しての長軸、すなわち対称軸の方向は溶岩の流出方向に関連をもつと考えられ、この情報は地下水を胚胎する溶岩中の気泡の形状を考察する上で役立つであろう。

対称軸を求めるために、まず砥川溶岩の分布に対する水平面上での重心位置を明らかにする必要がある。砥川溶岩の存在が推定された格子数を N 、 i 番目の格子の東西、南北方向での中心座標を (x_i, y_i) 、溶岩の厚さ (上面と下面との標高差) を T_i とすると、重心の座標 (x_g, y_g) は

$$(x_g, y_g) = \left(\frac{\sum_{i=1}^N T_i x_i}{\sum_{i=1}^N T_i}, \frac{\sum_{i=1}^N T_i y_i}{\sum_{i=1}^N T_i} \right) \quad (5)$$

で与えられる。対称軸はこの重心を通る。水平面上で重心を通る直線を境に 2 つの領域 U, L に分割し、各領域内にあるデータの直線に対するモーメントの和をとり、それらの差 d

第 4 図 各鍵層の上面あるいは下面の等高線図。(a)有明粘土層下面。A-A'とB-B'は第 6 図の断面図の位置、太線は連続性の良い谷地形を表す。(b)Aso-4上面 (c)Aso-3上面 (d)砥川溶岩上面。星印は重心の位置、点線は対称軸を表す。(e)砥川溶岩下面 (f)Aso-1上面。

$$d = \left| \sum_{(xi, yi) \in U} riTi - \sum_{(xi, yi) \in L} riTi \right| \quad (6)$$

を求める。ただし、 ri は (xi, yi) から直線までの距離を表す。対称軸は上式の d を最小にする方向である。
計算の結果、重心の位置は第 4 図(d)のように得られ、

d を最小にしたのは $N44^{\circ}W$ 方向であった。さらに、対称軸は木山川の南側における分布域の境界付近で、砥川溶岩上面の孤立峰状の小さな高まりを通る。この高まりは松本 (1974) によって推定された溶岩の噴出口よりも約 5 km 南西に位置するが、噴出口に関する新しい情報を示すものと考えられる。

Kiyama River

第5図 砥川溶岩上面（白）とAso-2上面（緑）との重ね合わせ。視線方位は北東から南西を見る方向。

第6図 測線(a)A-A'と(b)B-B'に沿う各鍵層の地下構造断面図

2.5 断層の活動度の推定

九州活構造研究会編(1989)によると、布田川断層は河成段丘や沖積錐を変位させ、明瞭な低断層崖を伴う。しかし、断層の具体的な活動度は求められていない。その大まかな評価のために、布田川断層と直交する断面(第6図(b))において、Aso-1・砥川溶岩・Aso-3・Aso-4上面の高まりでの標高と断層の推定位置での標高の差をとり、

これらを断層の活動による変位量とみなした。ただし、Aso-3・Aso-4の分布は断層の南側(砥川溶岩の噴出口側)では不明瞭なので、断層北側での上面の標高を採用した。

各鍵層の地質年代と変位量との関係を表すと第7図のようになる。河川による浸食量は変位量に考慮していないが、両者はほぼ線形の関係にあるとみなせる。そこで、原点を通る直線に当てはめると約45cm/1000年の変位速度が得られる。すなわち、布田川断層は松田(1975)の分類においてB級の活断層であると推定される。

第7図 各鍵層の地質年代と布田川断層に直交する断面での各層上面の垂直変位量(第6図で印を付けた2つの位置での標高差)との関係

3. 地下水位の経年変化の解析

3.1 地下水面に分布する地質

地盤情報データベースにはボーリング調査時点での孔内水位データが多数収められている。一般に地下水位は季節的に変動し、その変動パターンは地域ごとに異なる。小池ほか(1990a)は調査時期が様々な水位データから地下水位の大略的な傾向を描くために、2次元多項式に基づく傾向面解析を試みた(第8図)。その解析では原データとモデルとの残差に対する重み係数として、1年間の水位変動幅の逆数を与えている。

本研究でのデータベースから地下水位における地質を検索すると、その分布は第9図のように表せる。地下水位は主に地表面から深度15m以浅に位置するが、そこでの地質分布には地域的に良いまとまりがみられる。すなわち、解析領域の北東部では火砕流堆積物の分布が顕著であるが、河川の流れに沿って粗粒から細粒の河川堆積物へと地質は遷移し、中央部では砂礫や砂、特に浅部(深度5m以浅)

第8図 小池ほか（1990a）による地下水位データの傾向面解析に基づく地下水流動モデル。数字は等水位線の標高、星印は湧泉地点、矢印は流動ベクトルを表し、点線は推定される流路を示す。

に地下水が存在する平野南部では粘性土が卓越している。しかし、有明海沿岸部で主に分布するのは砂である。

このような地質分布に地下水位の等高線を重ね合わせた結果、火砕流堆積物と砂礫、および砂礫と砂の分布域に対する2つの境界線がほぼ同じ地下水位に位置していることがわかり、前者は標高30m、後者は標高10mの等水位線と相似形をなす。また、第8図に示す流動ベクトルの大きさは火砕流堆積物の分布域において大きく、砂礫、砂、粘性土の分布域ではこの順に従って小さくなる。有明海沿岸部の砂が分布する範囲では、粘性土に比べてベクトルの大きさが増加する傾向も調和的である。ゆえに傾向面解析によって得られた地下水の流動形態は、表層での地質分布と関連することが明らかになった。

3.2 多変量回帰モデルを用いた地下水位変動の解析手法
小池ほか（1991）は地下水位 y_t を目的変数、対象地域の降水量 x_t を説明変数とし、この時系列データを次式の変量回帰モデルによって関係付けた。

$$y_t = \sum_{i=0}^{m^*} \hat{\beta}_i x_{t-i} + \bar{y} \quad (7)$$

ここで、 m^* はAICと呼ばれる情報量規準によって見出される最適次数、 $\hat{\beta}_i$ ($i = 0, \dots, m^*$) は正規方程式から得られる最尤回帰係数、 i はタイムラグ、 $\bar{y}$ はモデル作成に用いた地下水位データの平均値である。多変量回帰モデルには自己回帰モデルと異なって、過去の地下水位データを予測に必要としないという特長がある。小池ほか（1991）

第9図 データベースから検索された地下水位の深度における地質の分布

は長期間にわたる地下水位観測データが得られている9つの観測井を対象に、まず各観測井データに対する最適モデルを構築した。これらの観測井は台地部、台地の末端部、および低地帯に位置する。次に、各ボーリング地点での水位は最近傍の観測井データと同じ確率的構造をもつと仮定して、熊本平野における広域的な地下水位の季節変動を明らかにした。

さらに、各地点における多変量回帰モデルの最適次数 m^* と最尤回帰係数 $\hat{\beta}_i$ がいずれの年でも不変であると仮定すれば、任意の水位観測データから季節変動成分を除き、その観測年での平均水位が推定できる。すなわち、ボーリング調査年 τ と月 t が既知である水位データを y_t とする。 τ 年での平均水位を y_τ 、 y_t の y_τ からの偏差成分を γ_t とすると、これらは式(7)と t 月での降水量データ x_t より

$$\left. \begin{aligned} y_t &= \sum_{i=0}^{m^*} \hat{\beta}_i x_{t-i} \\ y_\tau &= y_t - \gamma_t \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

と表せる。また、 τ のみが記載されているデータに対しては、 τ 年での偏差成分 γ_t の平均値 $\bar{\gamma}_t$

$$\bar{\gamma}_t = \left(\sum_{t=1}^{12} \sum_{i=0}^{m^*} \hat{\beta}_i x_{t-i} \right) / 12 \quad (9)$$

を求め、式(8)の γ_t を $\bar{\gamma}_t$ で置き換えればよい。

以上の手法によれば各ボーリング地点における調査年での平均水位が算出され、それらを統計処理すれば対象地域での地下水位の経年変化を把握することが可能となる。これは、地下水位の低下域の抽出へ応用できる。

3.3 地下水位低下域の抽出結果

データベースに収められた地下水位データ数は409であり、それらの調査時期は1948年から1992年までの広い範囲にわたる。したがって、任意の期間における地下水位の分布を表すことが可能であるが、期間を細かく分けるとそれに含まれるデータの数と分布域が限られ、妥当な地下水位分布モデルは得られない。これを考慮して地下水位の経年変化の把握を目的とし、各期間でのデータの数と分布状態とがなるべく均等になるように、データを1948年～1978年と1979年～1992年の2つの期間に分けた。それらを期間Ⅰ、Ⅱと呼ぶことにする。各期間に含まれるデータ数はそれぞれ192、217である。

台地の末端部に位置する1つの観測井を対象とし、小池ほか(1991)は1982年1月～1983年12月と1986年1月～

1987年12月の観測時期が異なる水位データから2つの多変量回帰モデルを作成したところ、それらはほぼ同じであることが認められた。よって、経年変化を算定するための仮定が成り立つと考えられる。そこで、多変量回帰モデルから各ボーリング地点で調査年における平均水位を推定したところ、第10図に示す結果が得られた。期間Ⅰ、Ⅱでの全体的な地下水位分布は同様の傾向を有するのがわかる。しかし、データの位置が各期間で重なっていない部分もあるので、概略的な地下水位の分布を示す傾向面を各期間に対して求め、それらを比較するのは適当でない。なぜならば、傾向面の形状はデータの分布状態に影響されるからである。それゆえ、平均水位の分布モデルが各データの位置でその値とほぼ一致するように、最適化原理による補間を行った。このとき、式(2)に示すパラメータの値を $m_1=m_2=1$ 、 $\alpha=30$ 、式(4)の収束条件を $\epsilon=0.1$ と設定した。

補間の結果、期間Ⅱに対する平均水位分布から期間Ⅰでの分布を差し引くことによって、第11図に示すように地下水位の低下域が特定できる。すなわち、その現象は有明海沿岸、江津湖周辺、解析領域の中央に位置する熊本市中心部、領域の境界付近に相当する北部・東部の近郊域で生じていることが予想される。250m四方の単位格子当たりの平均低下量は1.5mである。上記の低下域の中では、データ分布の疎密性から江津湖周辺と領域中央部に対する解析結果の信頼性が相対的に高い。有明海沿岸部では地表面近くの砂や粘性土が帯水層となっており(第9図)、最近観測された地盤沈下(熊本県, 1983)はこの層における水位の低下と関連するとも考えられる。また、市近郊域に対してはデータ数が少ないことに注意を要するので、抽出結果の妥当性を次章で土地利用の変化との関連から検討する。

第10図 (a)期間Ⅰ(1948～1978年)と(b)期間Ⅱ(1979～1992年)における各ボーリング地点での平均水位の推定分布図

第11図 2つの期間に対する平均水位を最適化原理によって補間し、それらの差による地下水位の低下域の抽出図

4. 考察

4. 1 地下水資源量の算定

熊本平野下における各鍵層の代表的な間隙率が既知であれば、鍵層の構造モデルに基づいて地下水資源量が評価できるようになる。本研究では、水位データの傾向面解析に基づく地下水面（第8図）から Aso-1 上面までの各地層の体積に、それらの推定間隙率を乗じることでこの評価を試みる。ただし、水理的基盤とみなす Aso-1 の分布域は平野東部に限られているので、砥川溶岩の分布域のみを計算の対象とする。

この範囲内での各鍵層の分布体積、平均層厚、および水田ほか（1990）を参照して仮定した間隙率を第1表に示す。これらの数値から砥川溶岩の分布域での地下水量は $1.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、すなわち12億 ton と算定された。熊本県・熊本市（1986）によれば、熊本地域における1983年度の地下水涵養量が $8.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ であるのに対し、揚水量を含めた地下水流出量の合計が $8.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ で、 $1.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ ほど流出する量が多いと報告されている。このような水収支の現状から、上記の評価値は地下水資源に関する重要な情報であるといえる。また、各地層がもつ水量を分布面積で割った値については、砥川溶岩の 6 ton/m^2 が最も大きく、この地層は熊本地域の「水瓶」であることが確かめられる。なお、各地層に対する間隙率を正確に見積り、間隙率の空間的分布状態も把握するために、現在ボーリングコアの解析と電気探査を進めているところである。

4. 2 地下水流動と地質構造との関係

熊本平野下では、層序的には Aso-3 と 4 の間に位置するシルト・粘土・ローム層（花房層・布田層）を境にして不圧（浅層）と被圧（深層）の地下水に分かれると考えられている（例えば熊本県・熊本市（1986）など）。地下水位における地質の検索結果、第8図に示した地下水面は主に Aso-4 上部に位置することがわかったので、これは浅層の地下水面であることが確かめられる。同図中のベクトルが

示すように、対象領域の北東部において白川や坪井川に沿った浅層地下水の流れが推測されることは、小池ほか（1990a）が述べたとおりである。しかし、領域中央部以西の地下水は河川の流路とは同調せず、有明粘土層の下面と Aso-3・4 の上面の形状に共通して現れた旧白川に沿って流れるようにみえる点が特徴的である。また、水理的基盤とみなした Aso-1 上面（第4図(f)）と浅層地下水面とを比較すると、いずれも北東部から江津湖に向けて低くなるという共通性がある。深層地下水の流れは Aso-1 の分布形状に関連すると考えられる。ゆえに、熊本地域では浅層・深層地下水ともに同様の流動形態をもつといえる。

さて、徳本（1991）は熊本平野の多数の地点においてブーゲ異常データを求め、重力異常図を作成している。これによって、各鍵層の特徴を深部の地下構造との関連から考察できるようになる。重力異常図には布田川断層付近が等値線の密な部分として表されている。その他に、白川に沿い有明海沿岸までの北東－南西方向に、および領域中央部では北西－南東方向に重力異常の低まりが連続するという特徴がみられる。これらは前述の有明粘土層と Aso-3・4 に現れた谷地形の位置、砥川溶岩の対称軸の方向、および Aso-1 上面の凹地形と対応する。よって、徳本（1991）が考察したように、熊本平野表層部で地下水を胚胎する地層の構造は、より深部に位置する基盤岩（白亜紀の御船層群など）の構造と関連し、その形状に地下水の流れが支配されていると予測できる。

4. 3 都市環境の変化と地下水位の低下との関係

人工衛星画像は土地利用状況の把握に有効に利用できる。その経年変化の解析には長期間にわたる画像データの蓄積が必要であるので、観測開始時が最も古いランドサットの解像度30mで可視・近赤外・中間赤外・遠赤外域に7つの観測波長帯（バンド）をもつTM画像を対象とする。植生域、水域、都市域などの地表物質は各バンドごとに特徴的なスペクトル特性を示す。ゆえに、スペクトルパターンの

第1表 各地層の分布体積、平均層厚、および仮定した間隙率

Water bearing strata (Upper and Lower levels of strata)	Volume distribution ($\times 10^9 \text{ m}^3$)	Average thickness ($\times 10^6 \text{ m}$)	Supposed porosity (%)
Ground-water level—Upper face of Aso-4	0.82	19.8	30
Upper face of Aso-4—Upper face of Aso-3	0.53	11.8	25
Upper face of Aso-3—Upper face of Aso-2	0.75	15.2	20
Upper face of Aso-2—Upper face of Togawa lava	0.08	1.8	15
Upper face of Togawa lava—Lower face of Togawa Lava	1.98	41.0	15
Lower face of Togawa lava—Upper face of Aso-1	3.99	59.2	10

類似性をもとに画像を分類し、地表物質を同定することが可能となる．そのために、予めトレーニングサンプルの設定によって特徴空間における各クラスの分布を求めておき、それと各データとの距離に基づいて分類を行うという教師付き分類が一般に用いられる（例えば新井，1988）．

いま， p 番目のピクセル（画像の最小構成単位）におけるデータ Xp は k 個の属性からなるとする．すなわち，

$$Xp = (xp_1, xp_2, \dots, xp_k)^T \quad (10)$$

m 番目のクラスは n 個のトレーニングサンプル ($X_1, X_2, \dots, X_n$) をもつとし，その平均ベクトル U_m と共分散行列 Σm は次のように表せる（田村，1985）．

$$\left. \begin{aligned} U_m &= (\mu_1, \dots, \mu_k)^T, \quad \mu_j = \left(\sum_{i=1}^n x_{ij} \right) / n \\ \Sigma m &= \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \dots & \sigma_{1k} \\ \vdots & & \vdots \\ \sigma_{k1} & \dots & \sigma_{kk} \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ただし， $\sigma_{ij} = \left\{ \sum_{s=1}^n (x_{si} - \mu_i)(x_{sj} - \mu_j) \right\} / (n-1)$

教師付き分類の判別法としては最短距離法と最尤法が代表的であり，前者ではトレーニングサンプルとピクセル p との距離 Dpm

$$\left. \begin{aligned} Dpm &= \sum_{s=1}^k \left\{ (xps - \mu_s) / \sigma_s \right\}^2 \\ \text{ただし，} \sigma_s &= \sqrt{\sum_{i=1}^n (xis - \mu_s)^2 / (n-1)} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

が最小となるクラスに，後者では尤度関数 Fpm

$$Fpm = (2\pi)^{-n/2} |\Sigma m|^{-1/2} \cdot \exp[-1/2(Xp - U_m)^T \cdot \Sigma m^{-1}(Xp - U_m)] \quad (13)$$

が最大となるクラスに p を帰属させる．

ランドサット画像は衛星の軌道に沿って得られており，ボーリングデータの位置が記載されている地形図とは一致しない．しかし，両者とも UTM 座標系に投影されているので，アフィン変換によって対応付けられる．すなわち，ある対象物の画像上での座標を (X_L, Y_L) ，地形上での座標を (X_M, Y_M) とすると，それらの対応関係は

$$\begin{pmatrix} X_L \\ Y_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

と定義される．例えば河川の合流点など画像上で容易に識別できる基準点を数点設け，それらの座標をもとに最小 2 乗法によって上式の係数を求めればよい．

さて，ランドサット TM 画像が利用できる時期は 1984 年以降であり，解析に用いたのは熊本平野に対する気象条件

第12図 2つの時期に対するランドサットTM画像の分類処理結果の重ね合わせ．緑色は1984年での市街域，赤色は1984年から1991年にかけて市街域が拡大した部分，矢印は地盤情報データベースの対象範囲，およびKKは熊本空港の位置を表す．

第13図 地下水位の低下域と市街地の拡大域との重ね合わせ

が良い1984年10月22日と1991年1月18日の画像である。これらの画像を教師付き分類法の最短距離法と最尤法によって水域、市街域、水田域、畑域、植生域の5つの領域に分類したが、両手法の分類結果には殆ど差はみられなかった。2つの画像に対する分類結果を重ね合わせたのが第12図であり、黄色は水田域・畑域・植生域を合わせた地下水の涵養域、緑色は1984年での市街域、および赤色は1984年から1991年にかけて市街域が拡大した部分を表す。市街地の拡大域は主に北部・東部の郊外に集中しているのがわかる。2つのランドサットTM画像の観測時期に比べて、地下水位データは長期間にわたるものである。しかし、市街地が発展する領域は変わらないと考えられるので、アフィン変換により市街地の拡大域と地下水位の低下域（第11図）とを重ね合わせる。その結果は第13図に示すように、両者は必ずしも一致していないが、低下量の大きい部分には涵養域の減少の影響が及んでいると推測できる。ゆえに、都市の開発計画においては、このような傾向と第8図の地下水流動モデルとを特に考慮する必要があるといえる。

5. まとめ

堆積盆における地下水資源の評価を目的とし、多数のボーリングデータを含む地盤情報データベースから地下水を胚胎する地層の構造、および地下水位の経年変化を明らかにする手法について検討した。本研究で得られた成果を要約すると次のようである。

(1) 熊本平野下に広く分布する沖積粘土層、4枚の火砕流堆積物、および安山岩質溶岩を鍵層とし、それらの上面あるいは下面の標高データを最適化原理によって補間することで地下構造のモデルを構築した。このモデルから旧河川と断層の位置が特定できた。また、最も古く溶結度が高い火砕流堆積物の形状から、熊本平野では浅層・深層地下水ともに同様の流動形態にあり、これらは地質構造に関連していると推定した。各地層の間隙率を仮定することで、地下水資源量の評価も可能となった。

(2) 降水量と地下水位との関係に多変量回帰モデルを適用し、ボーリング調査年での平均水位を推定した。ボーリングデータを調査年に応じて2つのグループに分け、それらの平均水位の分布を比較することで地下水位の低下域が明らかになった。これと2つの時期のランドサットTM画像の分類処理による市街地の拡大域とを重ね合わせたところ、都市環境の変化と地下水位の変化との関連が示唆された。

謝辞：熊本平野の貴重なボーリングデータを提供していただいた熊本市役所の石坂信也氏、(株)ニチボー、(株)千代田工業、(株)東亜建設コンサルタント、(株)肥後地質、日本技術士会熊本技術センターの野中雅子氏、データベース

の構築法について御指導いただいた宇都宮大学の今泉繁良先生、ならびに重力異常について御教示いただいた熊本大学の中田正夫先生に心から感謝の意を表したい。

文 献

- Apon, W. (1991) A new algorithm for coding geological terminology, *Computers & Geosciences*, **17**, 883-893.
- 新井康平 (1988) TM データの最尤法分類における最適閾値, 日本リモートセンシング学会誌, **8**, 263-270.
- Bellotti, M.J. and Dershowitz (1991) Hydrogeological investigations: data and information management, *Computers & Geosciences*, **17**, 1119-1136.
- Buell, D.A. (1984) A retrieval system for well information data, *Computers & Geosciences*, **10**, 205-209.
- Chaplow, R. (1986) Production of borehole logs using a microcomputer, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **19**, 291-299.
- 花岡尚之・矢野雄策・津 宏治・小川克郎 (1981) 地熱情報データベースシステム, 月刊 地球, **3**, 286-294.
- 服部定育・後藤典俊・小関賢裕・高屋 正・今里武彦 (1992) 小都市地域における地震災害の予測と対策 その2: 室蘭市港地区における液状化予測, 地震 第2輯, **45**, 157-167.
- 石坂信也・渡辺一徳・高田英樹 (1992) 熊本平野地下における第四系の最近15万年間の沈降運動, 第四紀研究, **31**, 91-99.
- 岩崎好規・諏訪靖二・山本浩司 (1990) 地域地盤地質情報に対する地盤工学データベース・システムの開発と構築理念, 情報地質, **1**, 103-113.
- 幾志新吉 (1973) 地盤資料(土質柱状図)の電算化と検出法, 土と基礎, **21**, 89-94.
- 幾志新吉 (1982) 震害予測のための土質柱状図データベースの利用手法, 土質工学会論文報告集, **22**, 152-160.
- 幾志新吉 (1990) 都市地盤地質柱状図データベースシステム, 地学雑誌, **99**, 578-586.
- 小池克明・清水信宏・大見美智人 (1990a) データベースを用いた地盤構造解析システムの開発とその応用, 情報地質, **1**, 75-84.
- 小池克明・西山 孝・石田志朗・藤田和夫 (1990b) ボーリングデータベースを用いた大阪・京都・亀岡盆地表層堆積物の層相解析, 第四紀研究, **29**, 395-404.
- 小池克明・土井英太郎・大見美智人 (1991) 多変量回帰モデルによる地下水位の季節変動の解析, 情報地質, **2**, 255-263.
- 小池克明・大見美智人 (1992) 亀裂情報を組み込んだ採掘シミュレーション, 資源と素材, **108**, 345-350.

- 小池克明・大見美智人：地下構造モデルの構築のための補間法に関する一考察，情報地質（投稿中）。
- 熊本県（1983）昭和57年版公害白書，330p.：137-143.
- 熊本県・熊本市（1986）熊本地域地下水調査報告書，90p.
- 九州活構造研究会編（1989）九州の活構造，東京大学出版会，554p.：296-297.
- 松田時彦（1975）活断層から発生する地震の規模と周期について，地震第2輯，**28**，269-287.
- 松本幡郎（1974）砥川溶岩について，火山第2集，**19**，19-24.
- 松澤 宏・西堀高弘・杉村昌広（1989）地盤情報としての「最新名古屋地盤図」，土と基礎，**37**，53-58.
- Miall, A.D. (1973) Markov chain analysis applied to an ancient alluvial plain succession, *Sedimentology*, **20**, 347-364.
- 水田敏夫・小畑正明・江上桂子（1990）砥川安山岩溶岩中の気泡の形態と分布，火山第2集，**35**，249-262.
- 諸星敏一・幾志新吉（1988）ボーリング柱状図データベースによるサイスミック・マイクロゾーニング，地学雑誌，**93**，489-503.
- 中山 洋・古沢 二・久原文規・今泉繁良（1989）熊本地域における地質調査資料のデータベース化とその利用，土と基礎，**37**，59-64.
- 中山一夫・柿崎恭子（1990）石油探鉱における坑井データベースー“WORLDWELL”についてー，情報地質，**1**，41-49.
- 小川 好・星野 務（1976）都内のS波速度と地震基盤について，応用地質，**17**，89-99.
- Raper, J.F. and Wainwright, D.E. (1987) The use of the geotechnical database 'Geoshare' for site investigation data management, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **20**, 221-230.
- 塩野清治・弘原海清・升本眞二（1987）最適化原理による地層面の推定，情報地質，No.12，299-328.
- 塩野清治・弘原海清（1988）論理地質学のための関係の代数，情報地質，No.13，261-296.
- 田村秀行 監修（1985）コンピュータ画像処理入門，総研出版，282p.：154-158.
- 徳本洋治（1991）熊本平野の重力異常による活構造解析，平成2年度卒業論文（熊本大学理学部地学教室），45p.
- Walters, M. and Loyd, J.W. (1985) The use of a micro computer for recording and analysis of borehole logging data in hydrogeological investigations, *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **18**, 381-389.
- 渡辺一徳・小野晃司（1969）阿蘇カルデラ西側，大峰付近の地質，地質学雑誌，**75**，365-374.
- 渡辺一徳（1984）熊本県阿蘇カルデラ西方地域の活断層群とその意義，熊本大学教育学部紀要（自然科学），**33**，35-47.
- 渡辺邦夫（1982）推移確率とエントロピーを用いた平野部地下地質の定量的把握と地盤のモデル化ー埼玉県所沢，鷲宮コアボーリング柱状図の解析例ー，応用地質，**23**，33-45.
- Yamamoto, K. and Nakagawa, Y. (1974) Time trend analysis of the Plio-Pleistocene sequence in the central part of Kinki district, Japan, *Mem. Fac. Sci., Kyoto Univ., Ser. Geol. Mineral.*, **40**, 45-65.

要 旨

地盤情報データベースを用いた地下水資源の評価

：小池克明・土井英太郎・野間卓志・大見美智人

870本のボーリングデータからなる地盤情報データベースを用いて，堆積盆における地下水資源の評価を試みた。解析の対象として，上水のすべてを地下水に依存する熊本平野を選んだ。

データベースからの検索結果をもとに，熊本平野下で広く分布する沖積粘土層，4枚の火砕流堆積物，および安山岩質溶岩の各層上面・下面の分布形状モデルを作成し，地下水を胚胎する地層の3次元的な構造を明らかにした。このモデルに基づいて旧河川と断層の位置の特定，断層の活動度と地下水量の算定を試みた。さらに，降水量と地下水位との多変量回帰モデルからボーリング調査年での平均水位を推定し，地下水位の低下域と2つの時期のランドサットTM画像の分類処理による市街地の拡大域との関係を検討した。

キーワード：地盤情報データベース，地下水，補間，熊本平野，阿蘇火砕流堆積物，水資源，多変量回帰モデル，都市環境