

洪積台地에 있어서의 地下水의 3次元的
流動 - 3次元 定常流모델에 의한
地下水 流動解析

Three-dimensional groundwater water flow in an upland area - groundwater flow analysis by steady state three-dimensional model

啓明大學校 工科大學 土木工學科 助教授 裴 相 根

Abstract

A numerical simulation technique of three-dimensional finite difference model is developed to study the groundwater flow system in Dejima, an upland area which faces Kasumigaura Lake. For general perspectives of the groundwater flow system, a steady state three-dimensional model is simulated. For the sedimentary mud formations which are found in the representative formation, three situations of hydraulic conductivity are considered, representing an isotropic condition and situations where the horizontal permeability is equal to 10 times and 100 times of the vertical one. The finite difference grid used in the simulation has $60 \times 50 \times 30 = 90,000$ nodes. A converged solution with a tolerance of 0.001 meter of hydraulic head is set. Having determined the flow net by using a steady state three-dimensional model, the results for the three cases of hydraulic conductivity are compared with the results of

tracer methods (Bae and Kayane, 1987) With the aid of four representative vertical cross-sections, groundwater flow systems in the study area are assumed. Water balances for the three cases indicate very good agreement between total recharge and discharge in each case. Analyses of groundwater flow system based on the tritium concentrations and water quality measurements (Bae and Kayane, 1987) are confirmed by the numerical simulation and the results obtained by these two methods appeared to be in close agreement.

1. 序論

3次元 定常流모델에 의한 地下水 流動解析에 대해서는, Freeze and Witherspoon(1966)이 처음으로 不均質, 非等方帶水層에 대한 數值모델을 개발한 이래 Kuiper(1975), Gupta and Tanji(1977) 등의 理論的인 研究가 있었다. 이러한 研究로 3次元 定常流모델의 理論的인 解析은 거의 完成된 것같이 보인다. 그러나, 實用化의 面에 있어서는, 시뮬레이션을 위한 必要充分한 情報의 入手가 대단히 어려우며, 尙大한 計算時間을 必要로하는 등의 問題가 있다. 이런 問題들을 극복하기 위하여 岡(1971), Gupta and Tanji(1976) 등의 窮餘之策的인 技法에 의한 實際流域에 대한 解析이 있었으나 解析의 信賴性에 疑問이 남았다. 이와같이 實用化의 面에 있어서는 아직도 充分하다고는 말하기 어려운 상태인 것이 現實이다.

本 研究는 보다 適合한 3次元 定常流모델의 實際流域에의 適用方法을 開發하여 日本의 出島台地에 本 모델을 適用하였다. 本 台地에의 廣域地下水의 流動系

를 밝히며 定量化 함으로써, 台地에 있어서의 谷地가 가진 排水機能과 台地地下水와 湖水와의 交流關係를 糾明하기 위하여 3次元 定常流시물레이션을 행하였다

시물레이션에는 보다 正確한 地下水流動解析이 可能하게 하기 위하여 格子點 間隔을 可能한 한 짧게 취하였으며 收束判定係數도 적게 취하였으며 計算時間의 節約도 考慮하였다.

2. 基礎方程式과 數値모델化

Darcy式과 連續式으로 부터 誘導되는 非定常상태에 있어서의 非等方, 不均質 帶水層에 대한 3次元 地下水流動모델은 다음 式과 같이 表現된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + W(x, y, z, t) \quad \text{---(1)}$$

여기서, h : 水理水頭, K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} : 透水係數, x , y , z : 座標軸, S_s : 比貯留率, W : 單位體積當의 flux, t : 時間.

式(1)을 完全陰解法으로 差分化하여, 그것을 다시 再配列하여 行列式形으로 表示하면 다음 式으로 表示된다.

$$[M] \{h\} = \{g\} \quad \text{---(2)}$$

Strongly Implicit Procedure로 式(2)의 右邊을 0으로 놓고, 反復係數를 5個 取해 시물레이션을 行하였다.

3 流域算出率

地形表面에 있어서의 흐름의 垂直 및 水平方向의 velocity成分이 地下水面에서
의 流入 또는 流出量과 같다고 假定하면 Darcy의 法則으로 부터 다음 式이 얻
어진다.

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3)$$

여기서, V_x, V_y, V_z 는 x, y, z方向의 地下水 flow

地下水面의 各 節點에 있어서의 涵養量 또는 流出量은 다음 式과 같이 된다

$$R(i, j) \text{ or } D(i, j) = V_x \Delta y \Delta z + V_y \Delta x \Delta z + V_z \Delta x \Delta y \quad (4)$$

여기서, $R(i, j)$ 는 節點 (i, j) 에 있어서의 全涵養量, $D(i, j)$ 는 節點 (i, j) 에
있어서의 全流出量, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 x, y, z方向에 있어서의 格子點의 間隔이다.

시물레이션 領域 全體의 平均地下水涵養高 r 은 다음 式과 같다.

$$r = \frac{\sum_{i=1, j=1}^m R(i, j)}{(i \cdot \Delta y, j \cdot \Delta x)} \quad (5)$$

Parameter의 값은 式 2의 시물레이션 結果로 부터 式 5을 사용하여 얻어지
는 平均地下水涵養高와 水文資料로 부터 豫想되는 地下水涵養高를 比較하여 兩
者가 거의 一致되게 試行錯誤의으로 調整하여 決定한다

4 3次元 定常流解析

4.1 研究地域의 概要

出島台地는 圖 1에 나타난 바와같이 Kasumigaura Lake의 北西部에 位置하며
台地의 北岸, 東岸과 南岸이 Kasumigaura Lake와 接하고 있는 面積 約 71km²의

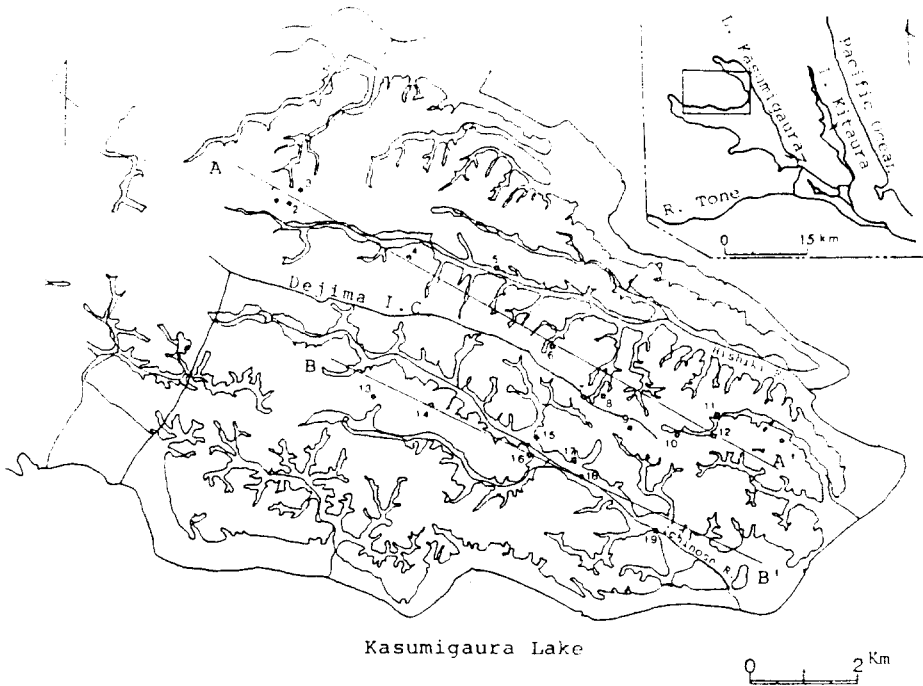


Figure 1 Location of study area.

洪積台地이다. 이 台地는 多數의 支流를 가진 Ichinose川과 Hishiki川에 의해 浸蝕되어 있다. 이들 兩 河川은 台地의 南西部에 起原을 두고 南東方向으로 흐른다. 台地는 全般的으로 서쪽이 높고 동쪽이 낮으며 全比高는 30m 程度이다. 湖岸에 가까운 谷壁에는 많은 急傾斜地가 보이며, 湖岸에는 冲積低地가 넓게 分布한다.

台地는 全般的으로 關東 loam層이나 表土로 덮여 있으며, 그 깊이는 3-5m이다. 그 下位에는 Ryugasaki層이라고 하는 두께 約 5m로 작은 자갈이 包含된 砂質層이 分布하고 있다. 이 地層의 下位에는 두께 10-20m의 Narita層이 있다. 이 層은 細-中粒砂로 시작하여 細砂, silt의 反復層, 細-中 자갈이 겹쳐지는 上部 Narita層과, 下部는 silt 또는 泥質砂이며 上部로 갈수록 砂質로 되는 下部

Narita層으로 構成되어 있다. Narita層의 下位에는 層相으로 부터 全體로서 모래와 실트가 反復되는 堆積相 또는 中-細粒砂의 部分이 많다. 本 地域에 있어서의 基盤岩類의 位置는 5000m 보다 길다.

4.2 數值解析

시물레이션에 사용한 境界條件 및 grid의 分割圖가 圖 2에 나타나 있다. grid

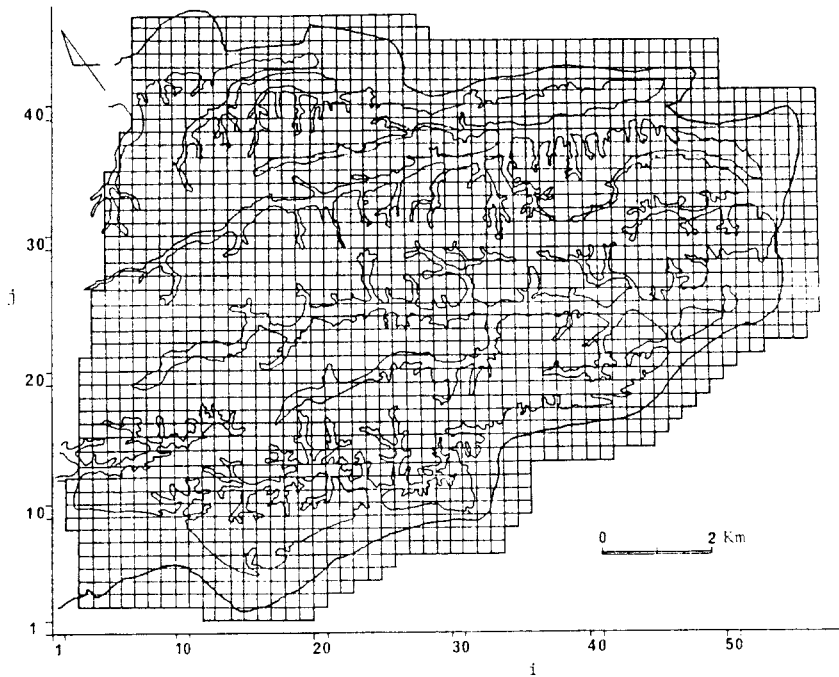


Figure 2 Grid spacing used in steady state three-dimensional model.

의 間隔은 $X(i)$, $Y(j)$ 方向으로는 250m, $Z(k)$ 方向으로는 3m이며, Z 方向의 node의 數는 30이다. 地下水의 水位는 水位가 安定상태인 겨울이나 초봄의 data를 利用

하였다. 상당수의 透水係數의 data가 있으나 對象地域에의 地質 Parameter 전부를 알기에는 不充分하다. 그래서, 地層을 모델化하여 各各의 代表地層은 水平方向으로 同一 두께로 分布하며 이들 地層의 透水係數의 水平成分은 同一하다고 假定하였다.

本 地域에는 異方性이 豫想되어 異方性이 1, 10, 100倍의 경우에 대해 시물레이션을 行하였으며 收束伴定係數는 0.001로 하였다.

5. 結果와 考察.

圖 3은 地形이 複雜한 $j=29$ 斷面(圖 2)에서의 異方性을 달리하는 세가지 경우

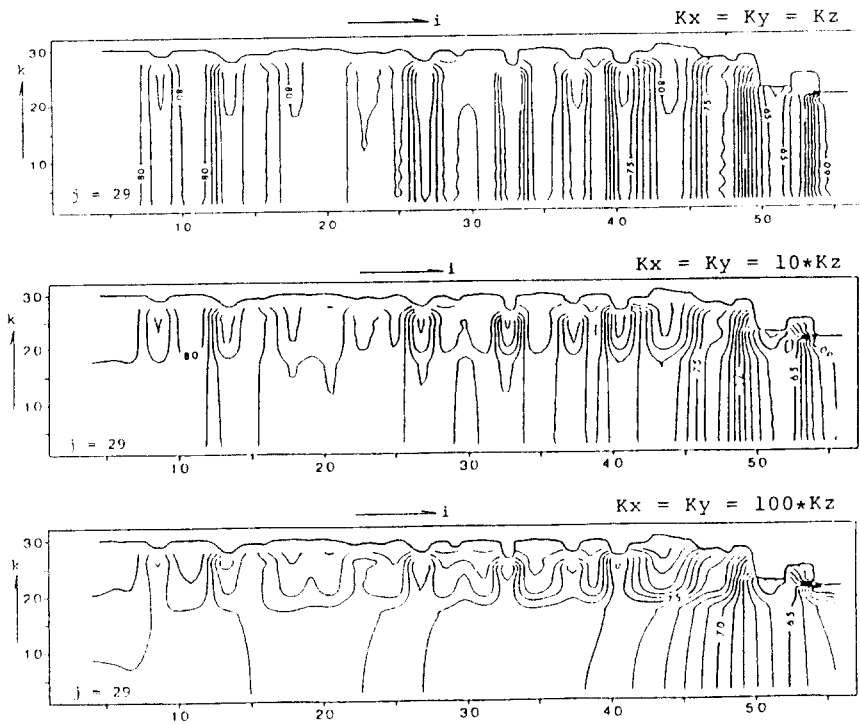


Figure 3 Comparisons of potential lines resulted from different anisotropic conditions.

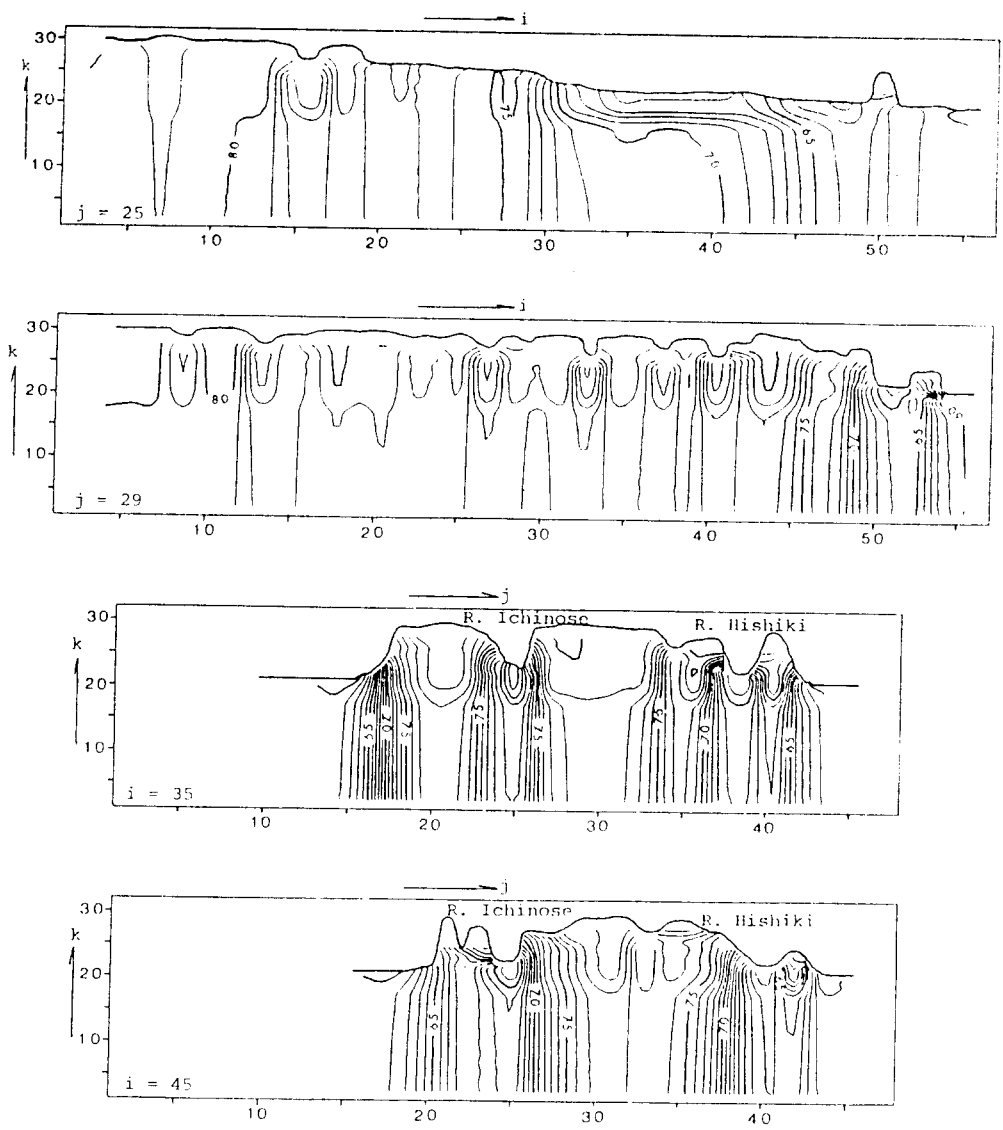


Figure 4 Cross-sectional potential lines from steady state three-dimensional model in the case of horizontal permeabilities 10 times the vertical. Interval of potential lines is 1 meter.

의鉛直2次元 포텐셜分布圖이다. 圖 3 중 異方性이 10倍인 경우가 斐·榎根 1987 의 結果와 一致하며, 粘土層을 挟재하는 地質條件으로 부터도 妥當하다고 생각된다. 그래서, 研究地域의 地層의 異方性은 10倍이라고 假定하였다.

10倍의 異方性을 가진 경우의 3次元 定常流 시뮬레이션 結果로 부터 얻어진 $j=25$, $j=29$, $i=25$, $i=45$ 圖 2의 4個의 鉛直2次元斷面의 포텐셜分布圖을 圖 4에 나타내었다. 위의 4個의 代表斷面의 포텐셜分布圖로 부터 研究地域의 地下水流動系를 推定할 수 있었다.

6. 結論

日本 出島台地에 있어서의 廣域地下水의 流動系를 밝히며 定量化하기 위하여 地下水의 3次元 定常流모달에 의한 시뮬레이션의 技法을 開發하여 應用하였다. 그 結果는 斐·榎根(1987)의 주적자법에 의한 解析으로 부터 얻어진 結果와 一致하였으며 對象地域의 地下水流動을 定性 및 定量的으로 解析할 수 있었다.

參 考 文 獻

1. 岡太郎 (1971) : 自由水面을 가진 侵透流의 3次元 解析方法과 그 考察 - 河川構造物의 侵透問題(3), 京大防災研究所年報, 14-B, 167-178. (日本語)
2. 斐相根·榎根勇 (1987) : 洪積台地에 있어서의 地下水의 3次元的 流動 - 環境 Tritium과 水質에 의한 地下水의 循環과 滯留時間 -, 地下水學會誌, 29-2, 89-98. (日本語)
3. Freeze, R.A. and Witherspoon, P.A (1966) : Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the

- mathematical model. Water Resour. Res., 2-4, 641-656.
4. Gupta, S.K. and Tanji, K.K. (1976) : A three-dimensional Galerkin Finite Element solution of flow through multiaquifers in Sutter Basin, California. Water Resour. Res., 12-2, 155-162.
 5. Gupta, S.K. and Tanji, K.K. (1977) : Computer program for solution of large, sparse, unsymmetric systems of linear equations. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 11, 1251-1250.
 6. Kuiper, L.K. (1975) : A state-wide hydrological model. Trans. Am. Geophys. U., 56-12, 982.