

塩水侵入阻止型地下ダムによる水資源開発可能量の評価について

The Feasibility Study for Development of Groundwater Resources by Subsurface Dam for Prevention of Salt Water Intrusion

神野健二*、茹 瑛**、中川啓***、細川土佐男****、田尻要*****、西山浩司*****

by Kenji JINNO, Ying RU, Kei NAKAGAWA, Tosao HOSOKAWA, Kaname TAJIRI and Koji NISHIYAMA

Groundwater development in small islands often requires management to prevent sea water intrusion into coastal aquifers. In this paper, therefore, a two-dimensional fresh and salt water flow model is studied to increase irrigation water supply to a sugar cane field. Both the groundwater flow rate across the area of a planned subsurface dam and the movement of immiscible fresh-salt water interface are predicted by the present model. A preliminary evaluation for a feasible groundwater development is attempted. The groundwater flow rate across the dam site to the sea is predicted as about $329 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{year}$ for the precipitation 1267 mm in 1991, which is 73 % of the average annual precipitation of 1734 mm.

keywords : subsurface dam, sea water intrusion, groundwater, unconfined aquifer

1. はじめに

沖縄地方などの島嶼部では、降雨量が多いにもかかわらず地上ダムに適した地形に乏しく水資源が不足している。そのため、このような地域では、地下ダムを建設することにより水資源を確保する事業がすすめられている。地下ダムを計画、あるいは管理する際には、数値解析をおこなって周辺地下水の流動や、水資源の開発可能量の評価を行うことが重要である。この場合、現地の降雨量や土地利用に応じた蒸発散量などの水文解析も十分おこなっておく必要がある。さらに地下ダムが沿岸部に建設される場合には塩水の挙動も問題となる。即ち、淡水を取水して陸側の地下水位が低下すれば、海からの塩水の侵入が起きるから、塩水侵入阻止の効果の評価が重要となる。本研究では、このような状況が起きる地域を想定して数値計算をおこない、期待される貯留量や開発可能量の評価を試みている。

*	正会員	工博	九州大学教授	工学部建設都市工学教室 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)
**	学生会員	工修	九州大学大学院	工学研究科博士後期課程学生
***	学生会員		九州大学大学院	工学研究科修士課程学生
****	正会員	工博	九州産業大学助教授	工学部土木工学教室 (〒813 福岡市東区松香台2-3-1)
*****	正会員	工修	西松建設(株)技術研究所	(〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4)
*****		理修	九州大学助手	工学部建設都市工学教室

2. 解析想定地区における降雨と地下水位の関係

図-1に、解析モデル領域および地下水観測孔の位置を示す。水文データについては、地下ダムが計画されている沖縄県 I 島の1991年の実測値を用いた。地下水位の変化は、井戸からの揚水、灌漑用水の影響などの人為的要因と、降雨による上昇、淡水の海側への流出や蒸発散による低下、気圧変化にともなう変化などの自然的要因が考えられる。ここでは、降雨による上昇について考える。そこで、一雨の涵養高さ($\Sigma r - R_0$)(mm)と有効空隙率 n_e について検討した。なお涵養高さは、一雨の積算降雨量 Σr (mm)から初期損失雨量 R_0 (mm)を差し引

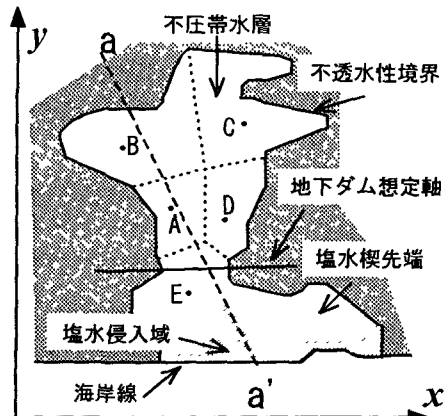


図-1 解析モデル領域

表-1 観測孔ごとの有効空隙率、初期損失量、タンクモデルの流出係数、および流出孔高さ

	n_e	R_0	a_L	R_0^*
A	0.223	10.0	0.3	20.0
B	0.123	10.0	0.8	10.0
C	0.148	9.0	0.8	5.0
D	0.311	14.0	0.3	10.0
E	0.110	9.5	0.9	5.0

たものである。ここで、 R_0 は一雨の降雨量 Σr の中で、地下水位上昇が認められなかった最大の Σr の値を初期損失雨量として取り扱った。なお、実際は植生による降雨遮断等の損失を含む地域と裸地の地域が混在しており、いわゆる土壌の圃場容水量とは厳密には異なるが、ここでは広義に初期損失量として取り扱った。また、降雨期間中については蒸発散は考慮していない。また、有効空隙率 n_e は、涵養

高さ($\Sigma r - R_0$)を地下水位上昇量 ΔH で割ったものとして算出した。表-1に上の計算で求めた有効空隙率、初期損失雨量を各観測孔ごとに示す。図-2には、例として観測孔Bにおける涵養高さ($\Sigma r - R_0$)と地下水位上昇量 ΔH の関係を示している。 n_e は、0.050から0.200の範囲にばらっている。表-1に示す n_e の値は平均値0.123である。なお、表-1中に示しているタンクモデルの流出係数と流出孔高さについては、「4.2 涵養量の取り扱い」の中で後述する。

3. サトウキビ畑における蒸発散量の推定

本研究では、蒸発散量を推定する方法として修正ペンマン法を用いた。修正ペンマン法は次式で表される。

$$ET_0 = W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d) \quad (1)$$

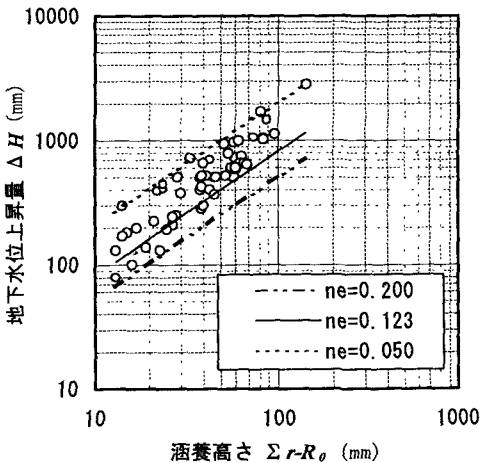


図-2 一雨の涵養高さと地下水位上昇量の関係

ここで、 ET_0 ：推定した蒸発散位、 W ：蒸発散量に及ぼす放射の影響を補正する係数で、気温と高さの関数、 R_n ：純放射(cal/cm²/day)、 $f(u)$ ：風速の関数 $=0.27(1+u/100)$ 、 u ：地上2mの高さにおける風速(km/day)、 e_a ：平均気温(°C)における飽和蒸気圧(hPa)、 e_d ：平均気温(°C)における実際の蒸気圧(hPa)である。一般に、植物の形態によって蒸発散量は変化するので、修正ペンマン式に作物固有の効果を作作物係数 K_c によって補正する方法が採られる。本研究では、山城¹⁾により導かれたサトウキビの作物係数を修正ペンマン法によって計算された蒸発散位に乗じて蒸発散量を推定した。図-3(a)には、このようにして求めた蒸発散量のうち、蒸発散量の少ない時期の例として1991年の2月16日～18日、同じく図-3(b)には多い時期の例として7月29日～31日について示したものである。2月の蒸発散量は、蒸発散位のおよそ40%で、0.2(mm/h)程度である。また7月の蒸発散量は、蒸発散位とほぼ同程度の0.7(mm/h)である。

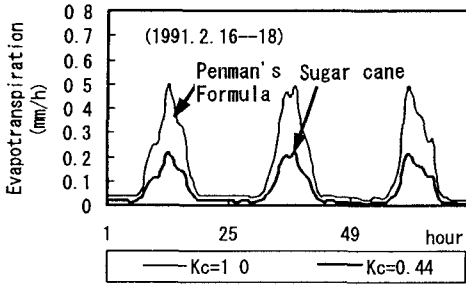


図-3(a) 冬期の時間蒸発散量

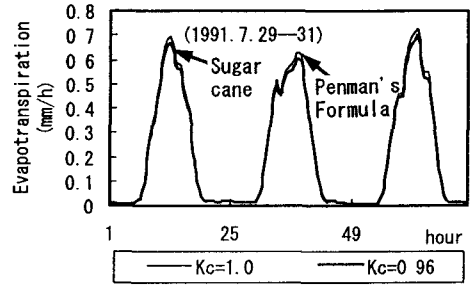


図-3(b) 夏期の時間蒸発散量

4. 数値計算^{2), 3)}

4.1 基礎式

モデルとした帯水層は、深度12mにある粘土層を下部の不透水層とした不圧帯水層で、一様な透水係数および有効空隙率をもつものとする。地下水流について垂直流速を無視した準一様流を仮定すれば基礎式は、それぞれ塩水および淡水について(2)式および(3)式が成り立つ。

$$\begin{aligned} \frac{n_e}{k} \frac{\partial h_s}{\partial t} = & \frac{\rho_f}{\rho_s} \left(\frac{\partial h_s}{\partial x} \frac{\partial h_f}{\partial x} + h_s \frac{\partial^2 h_f}{\partial x^2} \right) + \frac{\Delta \rho}{\rho_s} \left(\left[\frac{\partial h_s}{\partial x} \right]^2 + h_s \frac{\partial^2 h_s}{\partial x^2} \right) \\ & + \frac{\rho_f}{\rho_s} \left(\frac{\partial h_s}{\partial y} \frac{\partial h_f}{\partial y} + h_s \frac{\partial^2 h_f}{\partial y^2} \right) + \frac{\Delta \rho}{\rho_s} \left(\left[\frac{\partial h_s}{\partial y} \right]^2 + h_s \frac{\partial^2 h_s}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{n_e}{k} \frac{\partial h_f}{\partial t} = & \frac{n_e}{k} \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial h_s}{\partial x} \left(\frac{\partial h_s}{\partial x} - \frac{\partial h_s}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial^2 h_s}{\partial x^2} \right) (h_f - h_s) \\ & + \frac{\partial h_s}{\partial y} \left(\frac{\partial h_s}{\partial y} - \frac{\partial h_s}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial^2 h_s}{\partial y^2} \right) (h_f - h_s) + \frac{q_w(t)}{k} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 n_e ：有効空隙率、 k ：透水係数($=5.8 \times 10^{-2}$ cm/s)、 h_f ：淡水上面までの高さ、 h_s ：淡塩境界面までの高さ、 ρ_s ：塩水密度、 ρ_f ：淡水密度、 $\Delta \rho = \rho_s - \rho_f$ 、 $q_w(t)$ ：降雨による涵養量。

数値計算については、(2)、(3)式を差分化し、繰り返し計算を行い、 h_f および h_s を求める。塩水くさびの先端位置の算定は近似的に求める方法を用いる。詳細は参考文献2), 3)を参照されたい。

4.2 涵養量の取り扱い

本地区においては、平坦な地形特性から、降雨については表面流出、中間流出などはおこらず、蒸発散以外は土壤中に浸透すると考えられる。また、各観測孔とも地下水位は深度1.5～2.0m近くにあることから降雨の浸透による地下水位の応答は時間単位で生じていると考えられる。図-4に示すような地下水涵養モデルを考える。 $r(t)$ を時間降雨量、 $ET(t)$ を時間蒸発散量、 $h_T(t)$ をタンクの中の水位、 R_o^* を流出孔の高さ、 a_L を流出係数、 $q_w(t)$ を不飽和帯から地下水面への涵養量、 $Y(h_T(t)-R_o^*)$ を $h_T(t) \geq R_o^*$ のとき1、 $h_T(t) < R_o^*$ のとき0をとるステップ関数として次式を考える。タンクの中の水位の変化式として、

$$\frac{dh_T}{dt} = r(t) - q_w(t) - ET(t) \quad (4)$$

地下水位への涵養量を表わす式として、

$$q_w(t) = a_L \cdot Y(h_T(t) - R_o^*) \cdot \{h_T(t) - R_o^*\} \quad (5)$$

一方、一雨の降雨が終わるまで地下水の水平方向への流動が無視できると仮定すれば、観測孔地点の地下水位の不透水層からの高さ $h_{fw}(t)$ に対して次式が成り立つ。

$$n_e \frac{\partial h_{fw}(t)}{\partial t} = q_w(t) \quad (6)$$

なお流出孔の高さは、前述の初期損失雨量 R_o を用いるべきであるが、時間レベルでの応答を調べるためにここであらためて R_o^* と a_L を同定している。すなわち、あらかじめ本モデルで式(4)中の $ET(t)=0$ として、地下水位の上昇期に式(6)による計算値がもっとも良く合うように求めたものを使用する。また n_e については、2.で求めたものを用いている。なお、 R_o^* や a_L などについては水平流動の式(2)、(3)を数値解析しながら再調整する必要がある。各観測孔ごとの R_o^* と a_L は、表-1にあわせて示している。これらの値を、図-1に示すようなティーセン分割に従って各観測孔ごとの支配領域に分配させて数値計算をおこなう。

4.3 地下ダムによる開発可能水量の評価方法

開発可能水量については、ダム建設想定軸を横切る流量を式(7)で計算する。

$$Q_d(T) = \left(\sum_{i=1}^N \int_0^T h_{fi}(t) v_{fi}(t) dt \right) \cdot \Delta l \quad (7)$$

ここで、 Δl : ダム軸上の微小水平方向長さ、 h_{fi} : i 点における淡水上面までの高さ、 $v_{fi}(t)$: ダルシー則から計算されるダム軸の法線方向の淡水の流速、 T : 流量評価を行う期間、 N : ダム軸上にある格子間隔数、 i : 格子間隔の番号である。

4.4 結果と考察

図-5は1991年1月から3月の図-1中a-a'縦断面での淡水と塩水くさびの挙動を示している。本解析においては、井戸を実際に配置した直接の揚水を考慮していないので、くさびの侵入は顕著でない。この期間中の降雨、特に2月9日から15日の降雨(計128mm/hour)によりくさびが海側へ25m程度押し戻されている様子が示されている。降雨がなく揚水量が多くなると、塩

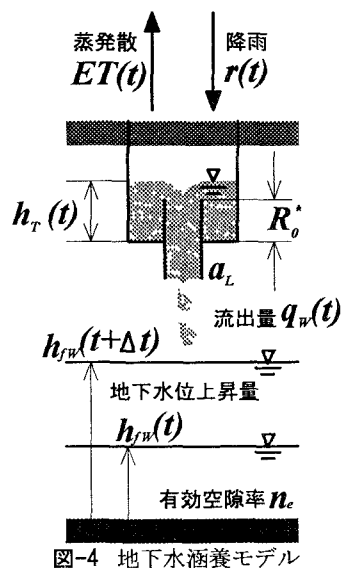


図-4 地下水涵養モデル

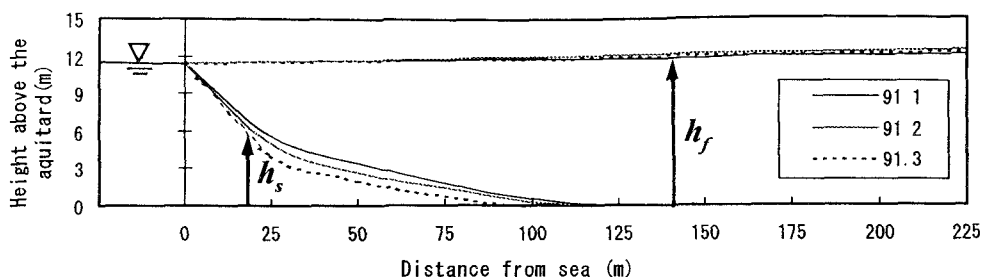


図-5 断面での地下水位変動と塩水くさびの変動

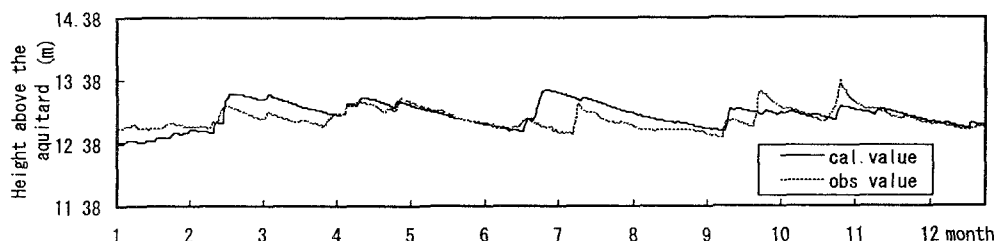


図-6 観測孔Aにおける地下水位変動の実測値と計算値

水くさびが内陸部へ侵入してくると予想される。この点については今後、揚水井の配置を考慮して解析を行い、くさびの侵入状況を考えながら止水壁効果を検討したい。図-6には、観測孔Aにおける淡水の地下水位の実測値と計算値を比較している。計算値は、概ね実測値を表現できている。図-7はダム軸を通過する日流量、簡易水道用として揚水された水量、および期間中の降雨量の時系列を日単位で示している。今回の計算例では、一日平均ほぼ $900\text{m}^3/\text{day}$ の淡水が流出しており、揚水期間中の簡易水道の平均揚水量を差し引いたとしても、地下ダムを建設することによって $730\text{m}^3/\text{day}$ 程度の水資源の開発が可能であると推算される。また図-8には、1991年1年間の開発が期待される水量の累積時系列を記号Aで示している。記号Bで簡易水道による揚水の累積時系列も示しているが、これを差し引いた部分が海へ流出する水量に相当するといえよう。この場合、1年間で計 $329,000\text{m}^3/\text{year}$ の淡水が海へ流出していることから、モデル計算では年間の簡易水道揚水量 $50,000\text{m}^3/\text{year}$ を差し引いたおよそ、 $280,000\text{m}^3/\text{year}$ の水量の開発がモデル地区では可能であると推算される。図中には、降雨量に貯留域 0.8km^2 の面積をかけた降雨補給量の累積時系列を記号Cで示しており、開発可能な水量は総降雨補給量の28%となっている。

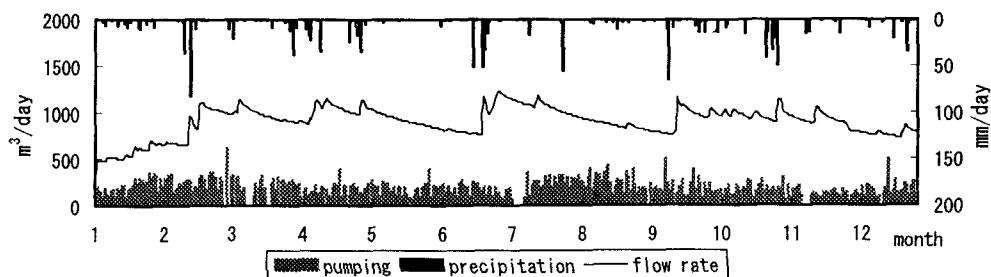


図-7 想定ダム軸の日通過流量、簡易水道揚水量、および降雨量の時系列

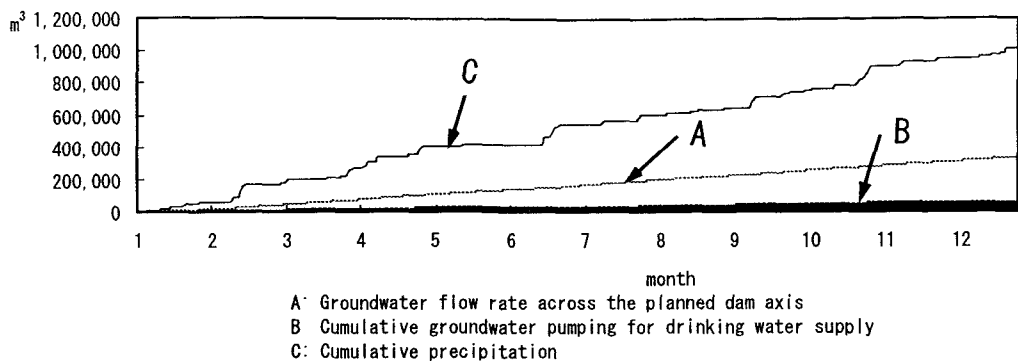


図-8 1年間の累積通過流量，累積簡易水道揚水量，および累積降雨補給量

5. おわりに

本研究では、時間降雨量、および時間蒸発散量から時間涵養量を推定し、それを地表面からの境界条件として用いて数値計算を行い、地下ダム建設予定地点での通過流量を評価し、水資源開発可能量の推定を行った。以下に、今回得られた知見を述べる。

1. 修正ペンマン法に作物係数を乗じて時間蒸発散量を求めた結果、可能蒸発散量は冬期で0.2mm/hour、夏期で0.7mm/hourであることがわかった。
2. 降雨によって、塩水くさびが海側へ後退することがわかった。このことより、降雨がなく揚水が多い時期には陸側へ塩水が侵入してくるものと推測される。
3. 地下ダムの止水壁位置を横切って海側へ流出する不圧帯水層からの流量を算定し、日量730m³/day、1991年1年間では280,000m³/year程度の水資源が開発可能であると推算された。

なお、今後本モデルを実際に適用するにあたっては、サトウキビの作付け状況に応じた作物係数の分布や、灌漑用水の揚水を涵養量の評価に組み込むこと、井戸地点を考慮した計算を行うことにより、塩水の挙動を把握しながら揚水井戸の適切な配置、また地下ダムを考慮することによる地下水位の上昇などの数値計算をおこなって、開発可能水量をの精度をあげることが必要である。

謝辞 本研究を行うにあたり貴重な資料および助言を頂いた関係諸機関に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山城三郎：沖縄におけるサトウキビの蒸発散量-第6報-サトウキビの作物係数について，琉球大学農学部学術報告，37，pp. 171-182，1990
- 2) 上田年比古・藤野和徳・平野文昭・神野健二：地下塩水楔の侵入に関する数値解，水道協会雑誌，第561号，pp. 21-28，1981
- 3) Sugio, S., K. Nakada and J. W. Urish: Subsurface seawater intrusion barrier analysis, ASCE, HY. 113-6, pp. 767-779, 1987