

1. はじめに

地下水管理を表流水を含めた流域全体の水循環系のなかで、総合的な水資源管理の一環として与えられる必要がある。そのためには地下水管理が点としての井戸管理から、面または3次元的な流域（地下水盆地）管理へと発展しなければならない。ここで地下水盆地（groundwater basin）の概念を導入したが、地下水盆地とは地質学的な堆積盆地に一致し、その表面の形状が流域に相当している。1930年～1950年にかけて Theis, Jacob, Wensel, Chow, らにより体系づけられた一連の井戸理論は、単井での可能取水量の定量的な評価が重要な課題であった。しかし地下水資源の開発が急速に激化すると、過剰揚水による井戸間の相互干渉、海岸部の塩水侵入、地盤沈下など今日の問題が発生し、単井（点）から群井（面）の解析が必要になつた。この時点で地下水開発（mining yield）の考え方から地下水管理（management）の考え方と大きく方向を転じ、今日に到っている。ここでは解析の基礎となる井戸理論を異なるタイプの帯水層システムごとに、non-leaky model, leaky model, leaky-squeeze model と3つのタイプのモデルに分類し、それぞれの解析解について単純な仮想帯水層モデルをもうけて検討し、さらに差分法（ADI法）による数値解析により得られた解との比較をこころみた。つぎに扇状地平野と沖積平野における現実の地下水問題（水位低下、塩水侵入、地盤沈下）での地下水盆地管理シミュレーションの一例を示した。

2. 井戸理論の展開 i) non-leaky model ii) leaky model iii) leaky-squeeze model

i) Theis (1935) の非平衡理論にもとづいて完全弾性被圧帯水層システムにおける数々の解析法が開発された。Jacob (1940), Wensel (1942), Cooper & Jacob (1946), Chow (1952)。しかし完全被圧という条件は化石水をのぞいては考えられず、地下水開発の主要な対象は循環性の帯水層にあるため、漏水および絞り出しによる垂直方向の涵養量を被圧地下水の大きな涵養源として評価する必要が生じた。ii) Jacob (1946) は最初に漏水現象に注目し、解析的な検討を行つた。以後 Jacob と Hantush を中心として急速に発展した漏水理論 (1954, 1955a, b, c, 1956, 1957, 1959,) は難透水層を通して主帯水層に向う垂直涵養又は流出を解析的に解くために、次の仮定をもうけた。a) 3次元流としてはとりあつかわない。b) 垂直涵養(leakage)を与える帯水層（自由地下水）の水頭は変化しない。c) 主帯水層と隣り合う難透水層との透水係数の差がきわめて大きく、水の流れは難透水層中では垂直、主帯水層中では水平方向のみとする。d) 難透水層中の貯留水の絞り出しは無視する。iii) Hantush (1960) は d) の仮定に注目し、絞り出し量が水収支に占める比重が大きいとして難透水層からの絞り出しによる涵養量を最初に解析的に検討した。つぎに i) ~ iii) のモデルの基礎方程式は $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} + W(x, y, t) \dots\dots\dots (0)$ となり、(0)式をそれぞれに極座標に書き改めると

i) $\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots (1.1)$ $s(r, 0) = 0$ $s(\infty, t) = 0$ $\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial s}{\partial r}(r, t) = -\frac{Q}{2\pi T}$	ii) $\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} - \frac{s}{B^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \dots\dots (1.2)$ $s(r, 0) = 0$ $s(\infty, t) = 0$ $\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial s}{\partial r}(r, t) = -\frac{Q}{2\pi T}$	iii) $\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} + \frac{P'}{T} \frac{\partial s}{\partial z} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \dots\dots (1.3)$ $s(r, 0) = 0$ $s(\infty, t) = 0$ $s_c(r, z, 0) = 0$ $s_c(r, b', t) = s(r, t)$ $\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial s}{\partial r}(r, t) = -\frac{Q}{2\pi T}$ $s_c(r, b + b', t) = 0$
---	--	--

記号 s : 水位降下 Q : 揚水量 T : 透水量係数 S : 貯留係数
 B : 漏水因数 K' : 加圧粘土層の透水係数 b' : 粘土層の厚さ

(1.1) (2.1) (3.1)は数学的な境界値問題であり、これを解くと、 $s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \dots\dots\dots (2.1)$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{1}{y} \exp\left(-y - \frac{r^2}{4B^2y}\right) dy \dots\dots\dots (2.2) \quad s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} \operatorname{erfc}\left[\frac{\beta\sqrt{y}}{\sqrt{y(u)}}\right] dy \dots\dots\dots (2.3)$$

ここで一例として(2.2)式を展開すると

$$s = \frac{Q}{4\pi T} 2K_0\left(\frac{r}{B}\right) - I_0\left(\frac{r}{B}\right) \left[-E_i\left(-\frac{r^2}{4B^2u}\right)\right] + \exp\left(-\frac{r^2}{4B^2u}\right) \times \left\{0.5772 + \ln u + [-E_i(-u)] - u + \frac{u[I_0(r/B) - 1]}{r/4B^2} - u^2 \sum_{n=1}^\infty \sum_{m=1}^\infty \frac{(-1)^{n+m}(n-m+1)!}{(n+2)!^2} \left(\frac{r^2}{4B^2}\right)^m u^{n-m}\right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

となり膨大な計算を要する。そこで上の3式にそれぞれ井戸関数 $W(u)$, $W(u, r/B)$, $H(u, \beta)$ を与え、

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \dots\dots (4.1) \quad s = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B) \dots\dots (4.2) \quad s = \frac{Q}{4\pi T} H(u, \beta) \dots\dots (4.3)$$

と置くことにより関数表から計算する方が便利である。

3. non-leaky, leaky, leaky-squeeze model による解析解と数値解の検討

3つのモデルによる帯水層システムの特徴を、(図-1)に示した仮想モデルで解析的に解き比較した。さらにADI法による差分近似による数値解との適合性を調べた。その結果を(図-2)に示すと、垂直補給量(leakage, squeeze)に比例して水位降下が減少している。つまり上下方向の涵養量だけ水位降下が小さくなっている。解析解と数値解との関係はほぼ満足する結果が得られたので、解析領域を2次元的に拡大し、実際モデルでの地下水盆(流域)管理デジタルシミュレーションを実施した。

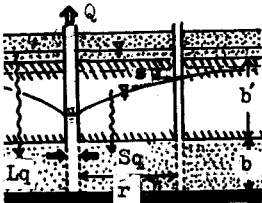


図-1 帯水層モデル ($Q: 1500 \text{ m}^3/\text{day}$ $T: 400 \text{ m}^2/\text{day}$ $S: 0.001$ $b': 10 \text{ m}$ $k': 1 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ $S': s: 2 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$)

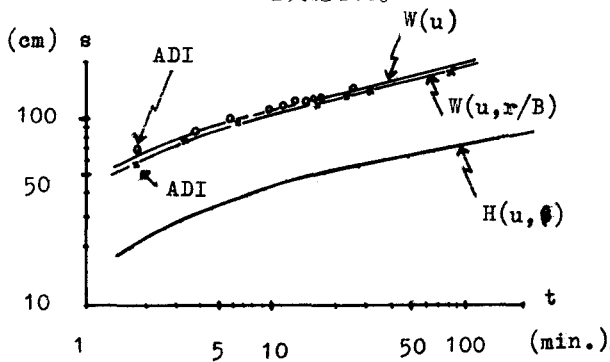


図-2 $W(u)$, $W(u, r/B)$, $H(u, \beta)$ とADI法による数値解との比較

4. 地下水盆管理シミュレーションの一例

典型的な扇状地平野での現実の地下水問題に漏水を考慮した解析を行った。16 km^2 の平野の内陸部には用水型工場が立地し、日量20万 m^3 もの大量な取水量に達し、地下水位低下、海岸部の塩水侵入が問題となった。今回の解析はとくに各種の人工地下水還元を実施した場合の地下水変動の将来予測に焦点を絞り、その結果を図-3に示した。

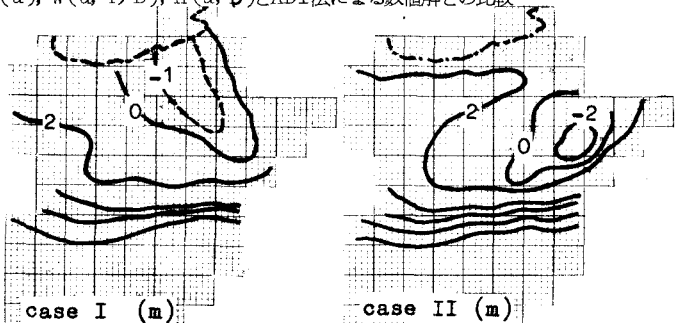


図-3 内陸部大量揚水地域の取水規制と人工地下水還元を行った場合(a)と海岸部で集中的に還元を行った場合(b)の地下水面図。

5. おわりに

シミュレーションの結果と実測水位との検定はほぼ満足する結果が得られた。しかし実測結果と合うような模擬的なモデルをつくるのがシミュレーションの出発点であり、16 km^2 にも及ぶ、巨大な現実の自然をモデル化、数量化することに現段階では多くの制約があることを忘れてはならない。