

# A Study on the Hydrologic Balance of Cenfined Ground-water in the Fukui Plains

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: Takase, Nobutada, Hirobe, Eiichi メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24517/00029604">https://doi.org/10.24517/00029604</a>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



# 福井平野における被圧地下水の 水収支に関する研究\*

高瀬信忠\*\*・広部英一\*\*\*

## A Study on the Hydrologic Balance of Confined Ground- water in the Fukui Plains

Nobutada TAKASE and Eiichi HIROBE

### Abstract

The study on the hydrologic balance of confined groundwater in an alluvial plains has indirectly been discussed, for example by investigating the series of the hydrologic data such as rainfall, or by investigating the geological constant based on pumping-tests. In these methods, we can know the characteristics, but can't get the quantitative knowledge.

In this paper, We discuss on the vertical hydrologic balance in the Fukui Plains by adding the leakage and squeeze, and more discuss the horizontal hydrologic balance by means of tank model.

### 目 次

1. はじめに
  2. 福井平野における水文資料について
  3. 解析モデル
  4. 河川流量による被圧地下水かん養量の評価
  5. おわりに
- 参考文献

---

\* 本論文は福井工業高等専門学校 研究紀要(第10号, 1977年)に発表したものに, その後の研究を加えて加筆しとりまとめたものである。

\*\* 工学部土木工学科, 日本海域研究所員

\*\*\* 福井工業高等専門学校

## 1. はじめに

沖積平野における被圧地下水の水収支に関する研究は、降雨など水文資料の経年変化を考察したり、揚水試験などによる地質学的定数を知ることにより間接的に論じられてきたが、これらの方法では、定性的な性質を知ることではできるけれども定量的な知識や解析を得るにはいたっていない。従来、被圧地下水に対して平面2次元の数理解析を組み立て、被圧地下水頭の変化をシミュレートする研究がなされている<sup>1),2)</sup>。本研究では、このモデルに漏水量と絞り出し量を付け加えたモデルを用いて、主に垂直方向の水収支を定量的に論じ、また、流出解析で用いられるタンクモデルを用いて、主として水平方向の水収支を定量的に論じたものである。

## 2. 福井平野における水文資料について

### (1) 帯水層の水理解析に用いた資料<sup>3)-10)</sup>

被圧地下水の垂直方向の水収支解析に用いた水文資料のうち、主要なものは昭和38年から昭和47年までの10年間にわたる年代別、そして、区域別の揚水量であるが、著者らはこの資料を、「中部圏地下水(深井戸)資料台帳」を基礎にして算出した。この資料は、年代別および図-4のメッシュ内での区域別の詳細な値を得ることによって帯水層モデルの入力値としての価値を持つのであるが、平均的な傾向を示すと図-1のようになる。これを見ると農業用深井戸はほとんど増えておらず、福井中心部に特に多い雑用深井戸の急増していることがわかるが、全体的にみて、井戸本数、揚水量ともに10年間で約2倍位に増加している。

また、数理解析の出力値となる地盤沈下量および被圧地下水頭の等高線図については、いろいろの資料

を用いて図-2～図-4のような結果を得たが、図-3は、「福井県水理(地下水)地質図説明書」によったものである。

### (2) タンクモデルによる流出解析に用いた資料<sup>11)-14)</sup>

福井県水理地質図の水比抵抗等値線によれば、福井平野の地下水は、日本海に注ぐ九頭竜川本川

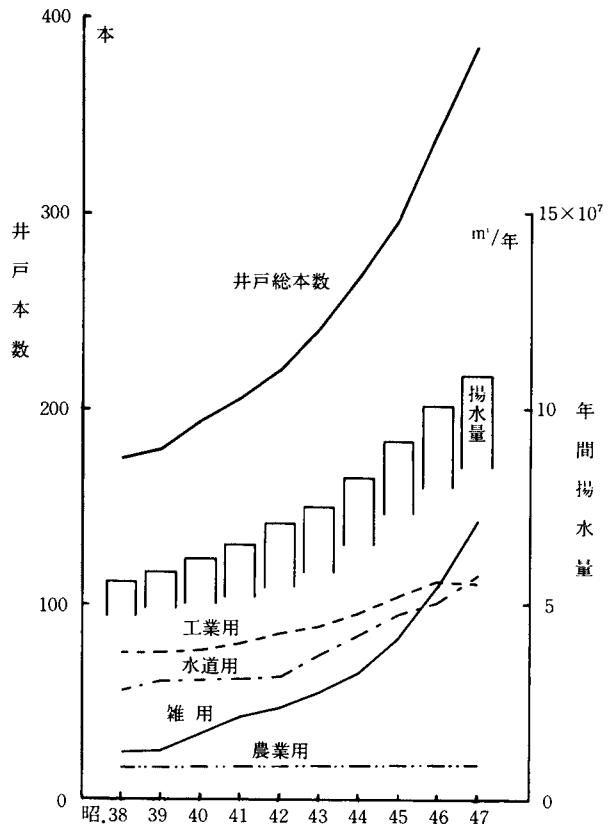


図-1 揚水量と井戸本数の経年変化

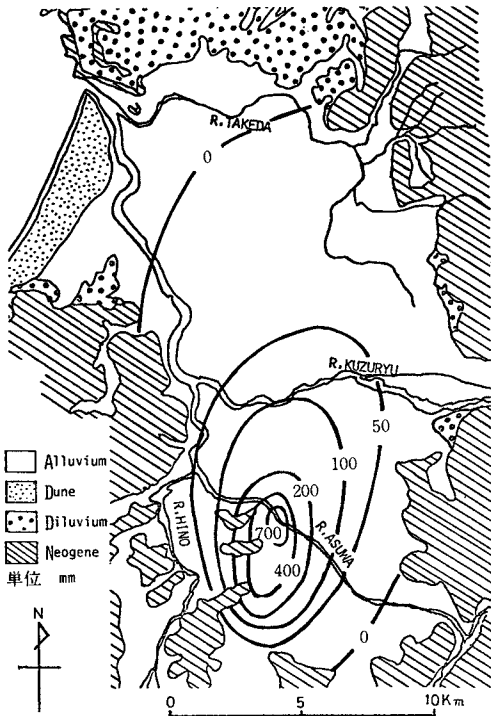


図-2 累積地盤沈下量(昭和38~47年)

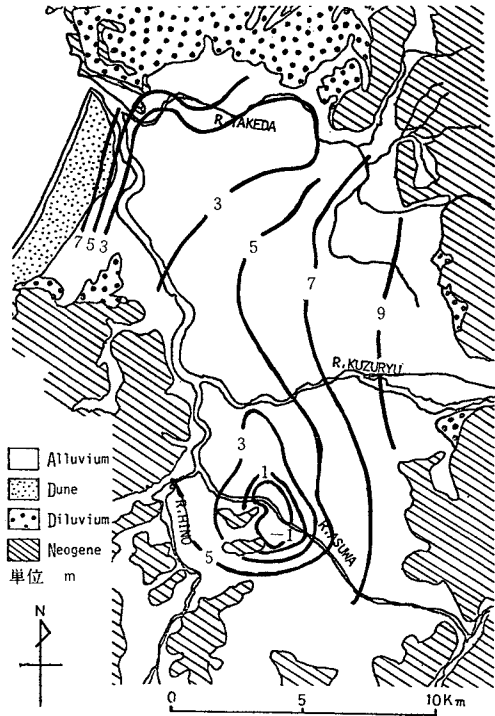


図-3 被圧地下水頭(昭和37年)

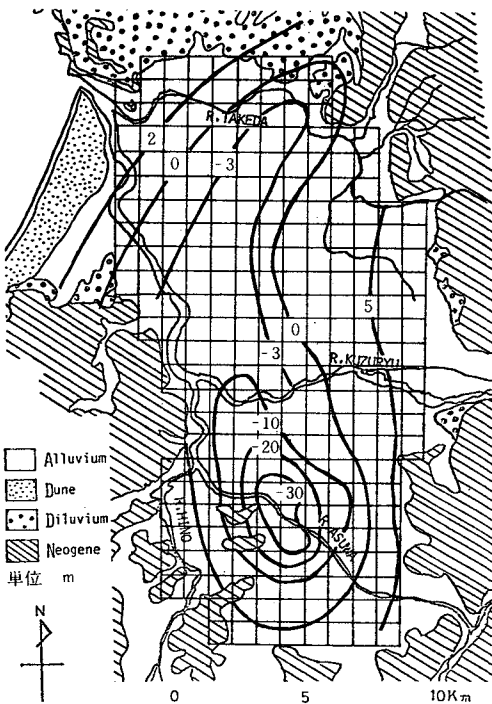


図-4 被圧地下水頭(昭和47年)

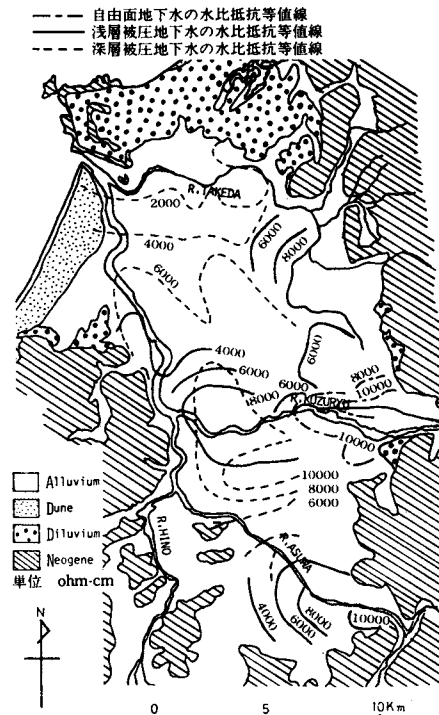


図-5 水比抵抗等値線

および支川の足羽川、竹田川などによってかん養されていることが推定される（図-5）。これらのうち、河川規模では最大の九頭竜川本川から供給を受ける九頭竜川水系の地下水が最も顕著で、足羽川の地下水がこれに次ぎ、竹田川の地下水は九頭竜川水系の地下水に包含されているようである。これらのことは定性的な状況を示すのみであるが、本研究では、福井平野における揚水量の地域的分布を考慮し、かん養源としては九頭竜川本川および支川のみを考慮した。

a) 流量資料

九頭竜川水系流域では、建設省によって4箇所（布施田、中角、深谷、三尾野）の流量観測が行なわれている（図-6）が、本研究では、これらのうち九頭竜川本川流域を対象として中角の流量資料を用い、支川の足羽川および日野川流域を対象として深谷の流量資料を用いた。

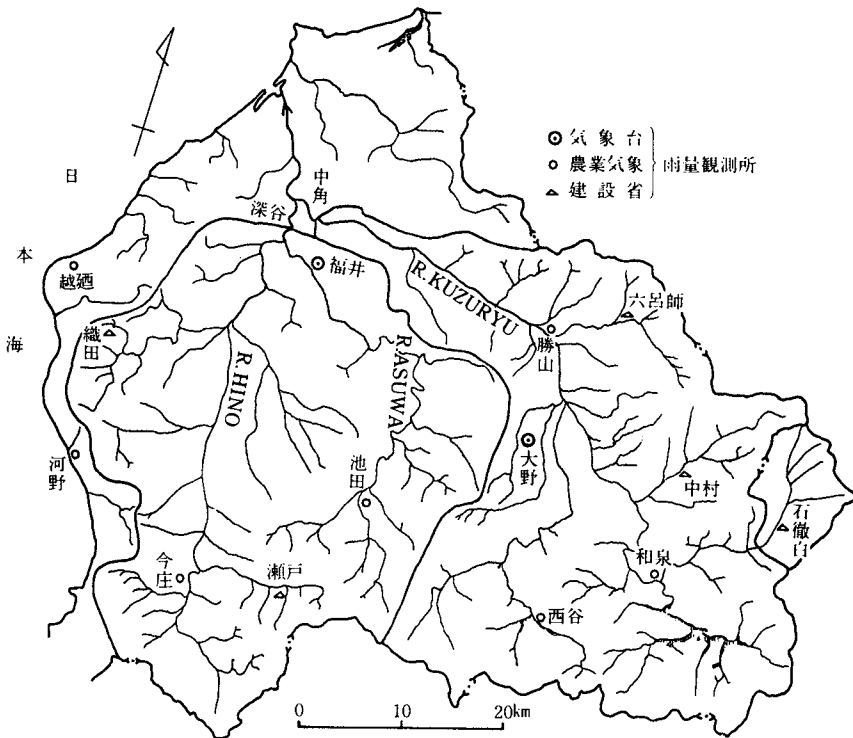


図-6 九頭竜川流域における流量観測所(中角、深谷地点)、雨量観測所

b) 雨量資料

九頭竜川本川流域で得られる雨量記録は、建設省と気象台により観測されたものが主な資料である（図-6）。これらのうち解析対象期間中に日単位の資料が得られた観測所は、福井地方気象台で観測された記録のみであり、月単位の資料が得られた観測所も数箇所あった。

そこで、これらの資料から流域面積日雨量を得るために次のような方法を考えた。中角地点における流域については、福井、勝山、和泉における月単位の観測値を Tiessen 分割して流域面積月雨量を求め、この値を用いて次式に示すように流域面積日雨量を算出した。

$$\text{流域面積日雨量} = \text{福井地方気象台日雨量} \times \frac{\text{流域面積月雨量}}{\text{福井地方気象台月雨量}} \dots\dots(1)$$

また、深谷地点における流域については、昭和40年5月までは、福井、今庄、昭和40年6月以降は、福井、今庄、池田における月雨量を Tiessen 分割し、中角地点における流域と同じ方法で流域面積を算出した。

c) 蒸発散量

九頭竜川水系流域で観測された蒸発散の資料としては、福井地方気象台において昭和26年から昭和35年にかけて測定された月単位の蒸発散能の記録があるのみである。それによれば、年間蒸発散能は約1000mmであり、蒸発散比を0.7前後としても、かなり大きな量となる。本研究は、日水文学の解析であるため昭和38年以降の日蒸発散量が必要となるが、前述のように継続的で信頼性のある記録は無いので、次式を用いて蒸発散量を推定した。<sup>15)</sup>

Hamon の式

$$E_p = 1.40 \cdot D_o^2 \cdot P_t \dots\dots(2)$$

$E_p$  : 日平均蒸発散能 (mm/day)

$D_o$  : 可照時間 (12hr/day)

$P_t$  : 日平均気湿に対する飽和絶対湿度 (gm/m<sup>3</sup>)

Thorntwaite の式

$$E_p = 0.533 D_o (10t_j/J)^a \dots\dots(3)$$

$a$  :  $0.00000675J^3 - 0.0000771J^2 + 0.01792J + 0.49239$

$J$  :  $\sum_{j=1}^{12} (t_j/5)^{1.514}$

$E_p$  : 月平均蒸発散能 (mm/day)

$D_o$  : 月平均可照時間 (12hr/day)

$t_j$  : j月の月平均気温 (°C)

しかし、実際に流出モデルに適用する場合には、これらの式の平均値を用いた。

### 3. 解析モデル

#### (1) 帯水層モデル

##### a) 被圧地下水の基礎式

帯水層の水収支解析には、次の数理モデルを用いた。<sup>16)</sup>

$$\left(T_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right) + \left(\frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y}\right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + (Q_d + L_q + S_q) \dots\dots(4)$$

ここに、 $T_x$ 、 $T_y$  : x、y方向 (平面方向) の透水量係数

S : 貯留係数

h : 被圧地下水頭

x、y : 直角座標軸

$Q_d$  : 揚水量

$L_q$  : 漏水量

$S_q$  : 絞り出し量

式(4)の外力のうち、揚水量は前述のように種々の資料を整理することにより、場所別、年代別の値が得られるが、漏水量、絞り出し量については、後述するようにして推算される。また、式(4)の数値計算は、次の手順で行なうことができる。

式(4)を時間微分は前進差分、他は中心差分をとり差分方程式に書き換えると次のようになる。

$$T_x \frac{h_{i+1,j}^k - 2h_{ij}^k + h_{i-1,j}^k}{(\Delta x)^2} + T_y \frac{h_{i,j+1}^k - 2h_{ij}^k + h_{i,j-1}^k}{(\Delta y)^2} + \frac{\partial T_x}{\partial x} \frac{h_{i+1,j}^k - h_{i-1,j}^k}{2\Delta x} + \frac{\partial T_y}{\partial y} \frac{h_{i,j+1}^k - h_{i,j-1}^k}{2\Delta y} \\ = S \frac{h_{ij}^k - h_{ij}^{k-1}}{\Delta t} + Q_{d(i,j)}^k + L_{q(i,j)}^k + S_{q(i,j)}^k \quad \dots\dots\dots(5)$$

式(5)で添字  $i, j$  はそれぞれ  $x$  方向,  $y$  方向のメッシュ番号であり,  $k$  は時間ステップである。また,  $T_x, T_y$  をそれぞれ  $x$  軸,  $y$  軸に関して Taylor 展開して, 2 次以上の項を省略し,  $\Delta x = \Delta y$  とすると, 次のようになる。

$$\frac{T_{x(i+\frac{1}{2},j)} h_{i+1,j}^k}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{x(i-\frac{1}{2},j)} h_{i-1,j}^k}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{y(i,j+\frac{1}{2})} h_{i,j+1}^k}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{y(i,j-\frac{1}{2})} h_{i,j-1}^k}{(\Delta x)^2} - \left\{ \frac{2T_x}{(\Delta x)^2} + \frac{2T_y}{(\Delta x)^2} \right\} h_{ij}^k \\ = S \frac{h_{ij}^k - h_{ij}^{k-1}}{\Delta t} + Q_{d(i,j)}^k + L_{q(i,j)}^k + S_{q(i,j)}^k \quad \dots\dots\dots(6)$$

式(6)が数値計算に用いた基本的な差分方程式であるが, 実際に式(6)を解くには, ADI法を用いた。

b) 地盤沈下量の計算法

圧縮応力が圧密層に加わったとき, 荷重増分  $\Delta\sigma$  が, すべて有効応力  $\Delta\sigma'$  になったとすると圧縮量  $S_c$  は, 次のようにして得られる。

$$S_c = \int_0^b m_v \Delta\sigma' dz \quad \dots\dots\dots(7)$$

$b$  : 圧密層厚,  $m_v$  : 体積圧縮係数

また, 載荷直後に圧密層に加わる応力は, すべて過剰間隙水圧  $\Delta u$  となるので, 載荷時には  $\Delta\sigma = \Delta u$  であるが, 最終的には前述のように  $\Delta\sigma = \Delta\sigma'$  となって圧密が完了し, 最終圧密沈下量は式(7)より次のようになる。

$$S_c = \int_0^b m_v \Delta u dz \quad \dots\dots\dots(8)$$

ただし,  $\frac{\Delta u}{r_w} = h^{(k)} - h^{(k-1)}$  であるので, 式(8)は差分表示では次のように表わされる。

$$S_c = \int_0^b m_v r_w \{h^{(k)} - h^{(k-1)}\} dz = \sum_{l=1}^L m_v r_w \{h_l^{(k)} - h_l^{(k-1)}\} \Delta z \quad \dots\dots\dots(9)$$

$r_w$  : 水の単位体積重量

$h'$  : 過剰間隙水頭

$L$  : 加圧層の分割数

$\Delta z$  : 加圧層分割厚

$l$  : 加圧層分割

$k$  : 時間軸分割

式(9)は、応力と歪との関係より圧密理論を基礎に導かれた圧密沈下量であるが、圧密層から絞り出される水の体積は地盤の収縮量に等しいと考えられる。つまり地盤全体の絞り出し量 $S_q$ は、式(9)より次のようになる。

$$S_q = \sum_{i=1}^L m_v r_w \{h_i^{(k)} - h_i^{(k-1)}\} \Delta z \quad \dots\dots\dots(10)$$

なお、式(9)における過剰間隙水頭 $h'$ は、次のような手順で得られるが、加圧層の収縮を表わす式は、次のような拡散型の式となる。

$$\frac{\partial^2 h'}{\partial z^2} = \frac{m_v r_w}{k_z} \frac{\partial h'}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$k_z$ ：加圧層の鉛直透水係数

式(11)を時間微分を前進差分、方向微分を中央差分にとると次のようになる。

$$h_i^{(k)} - h_i^{(k-1)} = \{\Delta t \cdot k_z / m_v \cdot r_w (\Delta z)^2\} \{h_{i+1}^{(k-1)} - 2h_i^{(k-1)} + h_{i-1}^{(k-1)}\} \quad \dots\dots\dots(12)$$

式(12)をmatrix表現にして解けば、加圧層内の各位置および各時間段階における過剰間隙水頭が求まることになる。

また、解析条件は次のようにして与えたが、時間段階が $k=0$ 、つまり、解析当初の初期条件は、加圧層内の全ての位置で $\{h^{(k)}\}_{k=0} = 0$ となる。解析途中の時間段階が $k$ 時における加圧層上下の初期条件は、不圧帯水層との境界面では、 $h_0^{(k)} = 0$ となり、被圧帯水層との境界面では、 $h_0^{(k+1)} = h_1^{(k-1)} - h_1^{(k)}$ となって加圧層中では静水圧分布と考え、1段階前の $h'$ に加算した。

c) 漏水量の計算法

完全な不透水層に挟まれた被圧帯水層では、被圧帯水層の減圧によって上下に位置する不透水層からの水の浸出はないが、わが国の沖積平野に存在する被圧帯水層のように、これら上下の不透水層が圧力の変化を伝導する地質からなり、透水係数がある程度の値をもっている場合には、主帯水層の減圧によって漏水が生じることになる。加圧層内で静水圧分布を仮定すれば、単位面積当りの漏水量 $L_q$ は、次のようになる。

$$L_q = \frac{k_z}{b} (H - h) \quad \dots\dots\dots(13)$$

H：不圧地下水位

(2) 流出モデル

a) タンクモデル<sup>17)</sup>

流出モデルはタンクモデルを用いたが、低水流出解析には一般に直列貯留型が用いられる。直列4段のタンクモデルでは、最上段が洪水の表面流出、第2段が表層浸透流出（中間流出）、第3～4段が地下水流出に対応し、4段目底面の孔からの浸出成分は、流域外流出あるいは流域内貯留と考えられる。

本研究では、この浸出成分を沖積平野扇状地から浸入する不圧地下水帯および被圧地下水帯へのかん養源と考えた。



#### b) 蒸発散量

蒸発散量は前述したように Hamon の式と Thornthwaite の式を用いて計算し、1 か月ごとに一定値としたが、無降雨日のみ 1 段目のタンクから差し引き、1 段目のタンクに貯留の無い場合には、2 段目のタンクから差し引いた。

#### c) 積雪、融雪量

低水流解析において、年間の流出波形を問題にする場合、冬期間の積雪、融雪の問題が大きな影響を与える。融雪に対して最も重要な気象要素は気温であるが、この資料は福井地方気象台で観測された値のみ入手できたので、中角および深谷地点における流域とともに、流域面積を高度差より 4 地帯に分割し、各分割地帯の日平均気温は、気温の高度低減率より一定の温度差を仮定して、福井地方気象台の資料から差し引いて推定した。そして、各分割地帯の融雪量は、次式により求めた。

$$S_M = M \cdot t + \frac{1}{80} R \cdot t, \quad t > 0 \quad \dots\dots(14)$$

$S_M$  : 融雪量 (mm/day)

$t$  : 日平均気温(°C)

$R$  : 日雨量(mm/day)

$M$  : 融雪に関する係数(一般に、4 ~ 6 mm/day°C)

80 : 水の融解熱(cal/gm)

なお、融雪期における実測 hydrograph および計算 hydrograph の比較により、高度低減率は、100 m につき、0.6°C、係数  $M$  は、6.0 mm/day°C を用いた。

#### d) 流域面積雨量

中角および深谷地点における流域とともに、前述した方法により、月雨量を用いて日雨量の流域面積雨量値を推算した。

### 4. 河川流量による被圧地下水かん養量の評価

帯水層の水理解析より得られた水収支の経年変化およびその予測を図-7 に示してあるが、この図は、年平均降水量と比較のため単位を水頭高(mm/年)で整理してある。これをみると昭和38年以降の揚水量および横方向からのかん養量、漏水量、絞り出し量の経年変化の概要はわかるが、今後、揚水量が増加するに従い、漏水量などが急激に増加することも予想されるところである。図-7 で示された横方向かん養量は、支川も含めた九頭竜川が山地部から福井平野に流入する過程で扇状地から表流水が地中に浸入し、順次、自由地下水、浅層被圧地下水、深層被圧地下水へと移行した成分であるとみなされよう。これらの移行は、本来、水文学的な原則の基に、気象条件の変化に応じて、量的な変化を生じるものであるが、現実には、揚水による圧力変化が移行への大きな負荷となるものと推定される。

2. で前述した水文資料を用いて、そして、3. で説明した手順でタンクモデルのパラメータを決定した結果、中角および深谷地点の各流域については図-8 が得られたが、流出孔、浸出孔の単位は流出高、浸出高で表わすと、mm/day である。しかしながら、4 段直列タンクモデルは本来、流出機

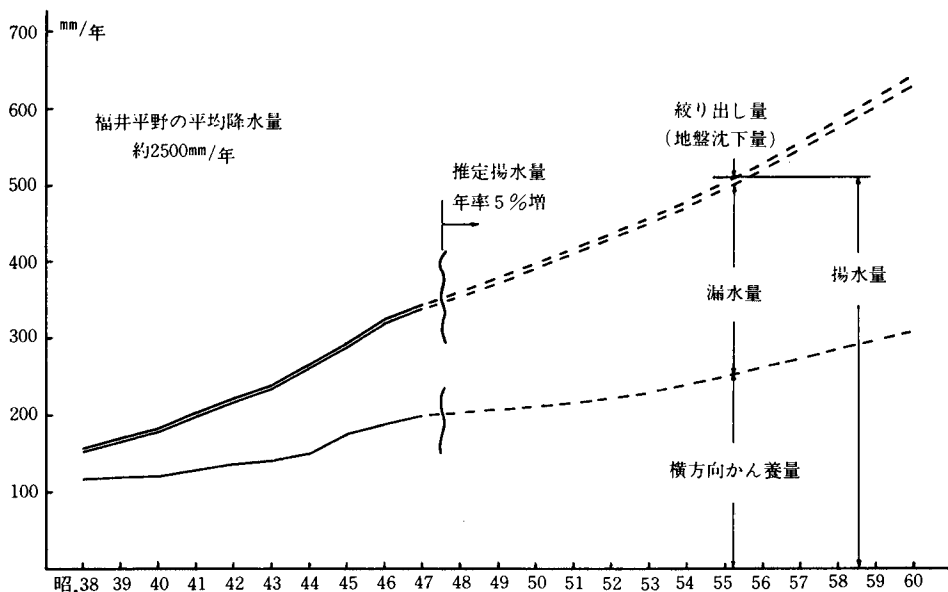


図-7 帯水層モデルによる水収支の経年変化および予測

構を物理的に表現したものではないから、この図のパラメータを流域固有の値と評価することは理論的根拠に乏しいので、以下のような考察を行なったわけである。

図-8のパラメータによると、中角および深谷地点における流域の4段目流出孔は、解析対象期間内においてタンクの貯留高を考慮すると、各々約0.55mm/dayおよび約0.45mm/dayの流出高となり、4段目浸透孔は、各々約0.0275mm/dayおよび約0.0225mm/dayの浸出高となるが、4段目流出孔の係数と浸出孔の係数の和が0.0021mm/dayであれば、計算流量のHydrographの形状には変化がなく、全体的に増減するのみである。ただし、その増減の幅には範囲が存在するが、観測Hydrographと計算Hydrographを比較すれば、中角地点

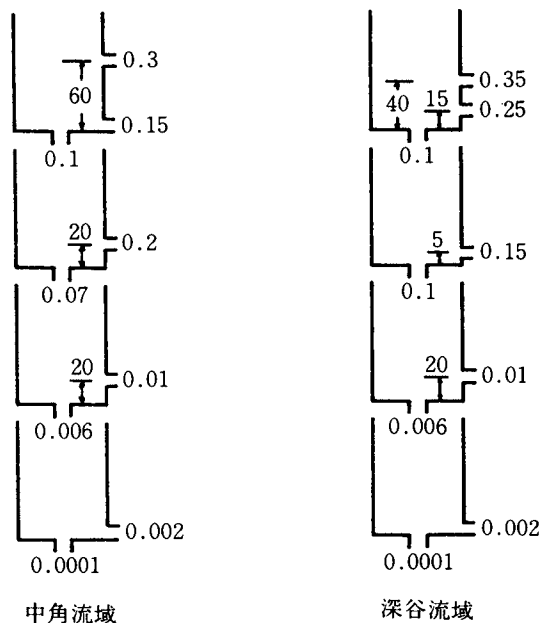


図-8 タンクモデルのパラメータ

における流域については、4段目流出孔流出高は0.3~0.6mm/day、深谷地点における流域についても、ほぼ同じ値を取るものと思われる。浸透孔流出高は、その差となることから中角地点における流域では0~0.25mm/day、深谷地点における流域では0~0.15mm/dayとなる。この流出高を1年間につき加算し、両地域における流域面積1293.6km<sup>2</sup>、1281.0km<sup>2</sup>をそれぞれ乗じて流量に変換し、次

に解析対象の福井平野の面積263.0km<sup>2</sup>を考慮して水頭高(mm/年)で整理すると、**図-9**のようになるが、グラフは各々の最大値(0.25mm/day, 0.15mm/day)を取ったものであり、この図のかん養量は前述した**図-7**の横方向かん養量に比べ、かなり大きくなっている。このことは、扇状地において浸入した表流水が、自由地下水、浅層被圧地下水、深層被圧地下水へと順次移行していく過程を考慮すれば納得できるように思われる。

### 5. おわりに

帯水層モデルと流出モデルを用いることにより、沖積平野の例として福井平野における水収支の解析と評価を行なった。帯水層モデルとして被圧地下水を対象としたが、入力となる揚水量の被圧性判断の困難性や、数理モデルの妥当性、また、流出モデルにおける4段目浸透量の実際現象への対応など仮定的な要素も含んでおり、今後検討すべき点も少なくない。しかし、本研究における解析結果は、沖積平野における水収支定量化の1つの手法として、かなり有用なものと思われる。

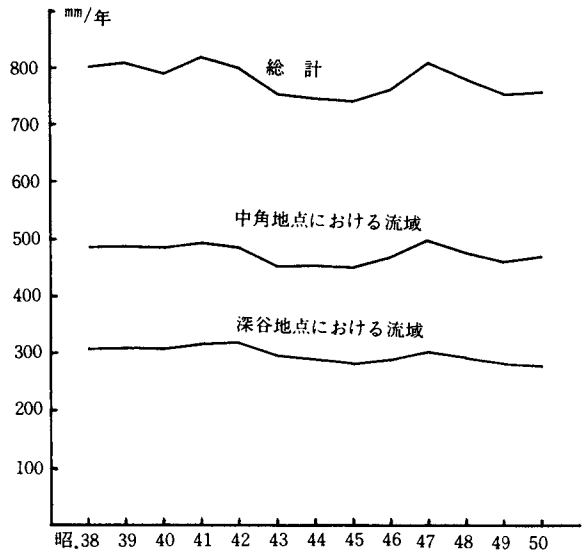


図-9 河川流量による被圧地下水かん養量

### 参考文献

- 1) Domenico: Concepts and Models in Ground water Hydrology, McGraw-Hill, 1972.
- 2) Remson, Hornberger and Molz: Numerical Methods in Subsurface Hydrology, Wiley-Int., 1971.
- 3) 福井県: 福井県水理(地下水)地質図および同説明書, 福井県, 昭.40.
- 4) 福井県: 福井県地質図幅および同説明書, 福井県, 昭.44.
- 5) 北陸農政局計画部: 福井県の水理地質と地下水, 北陸農政局, 昭.52.
- 6) 経済企画庁: 中部圏地下水(深井戸)資料台帳, 経済企画庁, 昭.38, 昭.48.
- 7) 野間泰二, 木野義人, 後藤準次: 福井県九頭竜川水系の地下水, 地質調査所月報 Vol. 20-12, 地質調査所, 1969.
- 8) 山本莊毅: 福井市における地下水の水文学的研究, 地理学研究報告XV, 東京教育大学理理学部, 1971.
- 9) 北陸地下水研究会: 北陸地方の地下水資源, 北陸地下水研究会, 昭.49.
- 10) 福井県: 福井県環境白書, 福井県, 昭.50.
- 11) 福井地方气象台: 福井県の気候, 日本気象協会福井支部, 昭.51.
- 12) 福井地方气象台: 福井県気象月報, 日本気象協会福井支部, (毎月発行).
- 13) 建設省河川局: 流量年表, 日本河川協会, (毎年発行).
- 14) 建設省河川局: 雨量年表, 日本河川協会, (毎年発行).
- 15) 土木学会: 水理公式集(昭和46年改訂版), 土木学会, 昭.46.

- 16) 広部英一：沖積平野における被圧地下水の水収支（福井平野におけるケーススタディ），福井工業高等専門学校  
研究紀要（自然科学・工学）第10号，1977.
- 17) 菅原正己：流出解析法，共立出版，昭.47.