中国四国地方の地下水の研究(とくに地下水
の単位面積排水量と水理地質条件との関連)

清水 欣 一*

Study on Groundwater of Chūgoku-Shikoku District.
—with Special Reference to the Relation between
Unit Area Discharge and Hydrogeological Condi-
tions of Groundwater

by Kinichi Shimizu

Abstract

Unit area discharge of groundwater, Z of typical ground-
water basins in Chūgoku-Shikoku District was computed, and the
relation between Z and their hydrogeological conditions was in-
spected. The results are as follows:

- (1) It seems that there is a mutual relation between Z of con-
fined and unconfined groundwater of Shikoku Setonaikai coastal
plain areas, Hirusenbara area and Misato area and Y value.
Value, Y is a ratio of total annual precipitation in the catchment
area of groundwater basin to the area of groundwater basin.
- (2) It is also noted to be some mutual connections between Z of
Shikoku Setonaikai coastal plain areas and the degree of develop-
ment of aquifer, especially of gravel bed.
- (3) Apparent unit area discharge of spring, Z of the North-
West area of Mt. Daisen Volcano and Kusama Karst areas shows
a linear zonal relationship with discharge average of spring in
" $Z - Q - \frac{n}{A}$ " diagram (Fig. 7).
- (4) Though land-subsidence by over-pumping has not been oc-
curred in Shikoku Setonaikai coastal plain areas, Z of these areas
shows higher value than that of typical land subsidence areas in

* 農林省東海農政局

1966年3月16日受理

Japan such as Tokyo downtown area, Osaka sea-side area and Niigata coastal plain area. Salt-water intrusion has been occurred in some coastal aquifers of Shikoku Setonaikai coastal plain areas.

From above results, the author insists to be of importance to compare Z of various groundwater basins with their hydrogeological conditions for the evaluation, further development and the conservation of groundwater resources.

1. 緒 言

将来の地下水開発を行なうべき場と、その可能性を検討するため、中国四国地方の代表的な地下水区の水理地質を調査し、とくに地下水使用量の実態についての資料を収集した。

この作業課程で、筆者は各地下水区の現況地下水利用量を比較するため、地下水の単位面積排水量という概念を導入した。

本論文はこの概念と中国四国地方の代表例を記し、さらに水理地質条件との関係を考察したものである。従来の水理地質学は地層水をおもな研究対象とし、したがってわが国の地下水開発も地層水をおもな対象とし、とくに深井戸開発が展開されてきている反面、山地の裂か水についてはほとんど顧みられていない。しかし、この概念を導入することによつて、各地下水区の地下水資源の量的な価値判断がある程度可能となり、裂か水のあるものは地層水と比較して量的に見劣りのないことが明らかとなつた。したがって、将来の地下水開発では裂か水をもその対象とすることが望まれる。地層水についても、地盤沈下や塩水侵入などの地下水災害や、今後の開発の可能性について、この概念とその展開が有力な手掛りを与えるものと考えられる。

本研究を行なうにあたり、資料収集に協力された香川・愛媛・鳥取・岡山各県の耕地課・土地改良課、中国四国農政局計画部の関係各位に謝意を表するとともに、とくに恩師吉沢甫・初田甚一郎両教授の御指導・御鞭撻に深く感謝する。故瀬野錦蔵教授にはこの概念について種々御教示を賜わり、山本荘毅博士・迎三千寿博士・奥田節夫博士には御助言・御支援を賜わつた。ここに御礼申し上げる。なお、本論文は同名の京都大学審査学位論文の概要を公表したものである。

2. 地下水の単位面積排水量の定義

地下水の単位面積排水量とは面積 1Km^2 あたりの地下水の揚水量または湧泉の湧泉量で、水理地質条件が連続の範囲に分布するすべての井戸・湧泉の総揚水量・総湧出量を、その範囲の面積で割つて求める。単位は $\text{m}^3/\text{day}/\text{Km}^2$ 、すなわち $[\text{L} \cdot \text{T}^{-1}]$ で $1 \text{ m}^3/\text{day}/\text{Km}^2 \div 1.159 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{sec}$ である（文献 1・2・3・4・5 参照）。

一般に実用上の目的で取得されている地下水は重力水で、その細分にしがたい地下水の単位面積排水

量を分類すれば表-1 のようになる。

表-1 地下水の単位面積排水量の分類

地層水は、ある範囲の間では層状の連続性のあることが知られており、沖積層、洪積層の分布する海岸平野や盆地などの全域や一部を範囲の面積としてとれば、上記の定義を適用できる。しかし裂か水の分布は一般に脈状とされ、火山岩や石灰岩の地下水の賦存機構—とくに水理地質条件の連続性—については未知のことがらが多く、上記の定義をそのまま適用できない。したがって、裂か水については“同一の地質の範囲は一応水理地質条件が連続である”と仮定して、同一の地質の範囲を面積としてとり、見掛け単位面積排水量と定義する。この概念は裂か水資源を地層水資源と比較・考察するとき有効である。

定義より、特定の地下水区の地下水の単位面積排水量は実測可能な値であり、かつ地下水の使用状況により、すなわち季節的に変化する値であるといえる。地下水使用量の詳細な実測が行なわれた場合には、自由地下水・被圧地下水別に単位面積排水量がわかり、湧泉水では湧泉の単位面積排水量が求められる。

2.1 地下水の単位面積排水量の一般式

一般に地下水の単位面積排水量 Z は定義より(1)、(2)式で表現できる(文献5参照)。

$$Z = \frac{\sum_{a=1}^n Q_a}{A} \quad \text{----- (1)}$$

ここに Q_a : 範囲内の個々のさく井の揚水量, または湧泉の湧出量

A : 範囲の面積

$$Z = \frac{n}{A} \bar{Q} \quad \text{----- (2)}$$

ここに n : 範囲内のさく井数, または湧泉数

$\bar{Q}$: さく井の揚水量平均値, または源泉の湧出量平均値

(2)式で $\frac{n}{A}$ は単位面積あたりのさく井数, または湧泉数をあらわし、さく井分布係数または湧泉分布係数と呼ぶ。 Z を $m^3/day/Km^2$, $\bar{Q}$ を l/sec で示すと(2)式は

$$Z = 86.4 \frac{n}{A} \bar{Q} \quad \text{----- (3)}$$

となる。すなわち Z は $\frac{n}{A}$ と $\bar{Q}$ の関数で、両対数グラフの Y 軸に Z を、X 軸に $\bar{Q}$ をとると、 $\frac{n}{A}$ 線群は平行線として表現でき、(3) 式の共点図表 " $Z - \bar{Q} - \frac{n}{A}$ 図" が得られる (図-7 参照)。

2.2 地層水の単位面積排水量の式

地層水の透水係数は Darcy により動水勾配が 1、水温 60 °F のとき帯水層の単位面積を水平方向に通過する地下水の流量であると定義され、速度のデイメンション [$L T^{-1}$] をもつ (文献 6 pp. 7~11, 7 pp. 321~325, 8 pp. 50~53, 9 pp. 72~73 参照)。地層水の単位面積排水量は面積 1 km^2 の範囲内のすべての地下水の取得量であると定義したので、透水係数と同じ速度のデイメンション [$L T^{-1}$] を持つが、透水係数とは本質的に異なつた単位である。地下水が井戸のみによつて取得され、かつ面積が極小の条件を想定すると、地層水の単位面積排水量は帯水層よりポンプ揚水によつて水平方向の単位面積を鉛直方向に通過する地下水の流量であると考えられる。

最近の井戸の理論によると、揚水試験による透水係数の計算式はタイス・野満の非平衡式が最も理論的で、かつ実際にもよく適合するとされている。この式の解は数法あるが、そのうち Theis の回復式 (文献 6 pp. 95, 7 pp. 371, 9 pp. 100~102 参照) が最も簡単で、 U が 1 に比して非常に小さくなれば以下の解となる。

$$T = \frac{0.183 Q}{s'} \log \frac{t}{t'} \quad (4)$$

ただし $U = r^2 S / 4 T t$

ここに T : 透水量係数

Q : 揚水量

s' : 残留降下水位 (回復水位と原水位との差)

t : 揚水時間

t' : 揚水を停止してからの時間

r : 距離

S : 貯溜係数

また、透水係数を K 、帯水層の厚さを M とすると

$$K = \frac{T}{M} \quad (5)$$

(1) 式に (4)、(5) 式を代入すれば

$$Z = \frac{1}{0.183 A} \sum_{a=1}^n \frac{M a \cdot K a \cdot s'_a}{\log t a / t'_a} \quad (6)$$

いま簡略化のため、範囲内のすべての井戸の透水係数および帯水層の厚さが同じであると仮定すれば

$$Z = \frac{MK}{0.183 A} \sum_{a=1}^n \frac{s'_a}{\log t a / t'_a} \quad (7)$$

となり、(6)、(7)式が透水係数と地層水の単位面積排水量の関係を示す。

3. 地下水の単位面積排水量の実例

地下水の単位面積排水量を試算した地区は図-1に示す中国四国地方の12地区で、海岸平野・盆地のほか砂洲・浜堤や火山・カルスト台地などの代表例をとりあげた。また参考のため、日本の海岩平野の地盤沈下地帯の代表として、東京下町・大阪平野臨海部・新潟平野の例をとりあげた。

図-1 位置図

3.1 海岸平野—四国瀬戸内海岸平野地区（地層水の単位面積排水量の例）

四国地方の瀬戸内海沿岸部には点々と海岸平野が分布している。すなわち、讃岐平野・三豊平野・宇摩平野・道前平野・松山平野などが主なものである。いずれも和泉層群・花崗岩類・結晶片岩類などの基盤岩類よりなる山地を刻む河川が瀬戸内海に注ぐところに発達し、山地との接合部には洪積段丘や扇状地が分布している。平野の地質は沖積世・洪積世の砂・れき・粘土の互層であるが、地下地質における沖積世・洪積世の区分については未だ定説がない。

これらの海岸平野には自由地下水・被圧地下水が存在し、浅井戸・深井戸・集水池・集水渠・湧泉などによつて取得され、農業・工業・水道用水として利用されている。道前平野の海岸部には有力な自噴地下水帯が存在し、掘抜き井戸による地下水利用が盛んである。

これらの海岸平野は昭和21年12月の南海地震にともなつた地殻運動で55~20cm沈下し、その後じよじよに回復しつつあるが、地下水の過剰揚水による地盤沈下の現象は道前平野の埋立地の一部で局

地的に発生したことがある（文献 10 参照）以外には，目下のところ確認されていない。塩水侵入は一部の平野の沿岸部で発生しており，地下水開発にともない問題となつている。

平野の地層水の単位面積排水量は以下のようにして試算した。各平野の浅井戸（一般の家庭用の飲雑用の井戸程度のものは除き，おおむね使用水量 $1 \text{ m}^3/\text{day}$ 以上のものを取りあげた）・深井戸・集水池・集水渠・湧泉などの地下水採取施設の位置を地形図に記し，それらの比較的密に分布する範囲を対象とした。これらの範囲は四国瀬戸内海岸平野地区では各平野の主要部分を占めている。讃岐平野高松地区，琴平・丸亀・多度津地区，三豊平野地区などでは平野の主要部分をまとめ試算範囲をとり，宇摩平野地区では資料の整つている川之江地区と寒川・関川地区にわけて試算範囲をとつた。新居浜平野地区，道前平野地区，松山平野地区などでは平野の主要部分を試算範囲としたほか，河川などを考慮して試算範囲を小区分した。以上の各地区の試算範囲内の地質は沖積・洪積層で，大局的には地層水の連続性，すなわち水理地質条件の連続性を考えてよい。さらに昭和 38 年度調査資料（文献 11）より，各試算範囲内での地下水採取施設による地下水平均使用量（湧泉のうち平均取水量より平均湧出量が多いものについては後者）を求めた。なお，各平野の農業用地下水利用は現在のところ大多数が水田の補助水源を目的としており，夏期（一般に 6～9 月）のみに使用されている。したがつて，工業・飲雑用地下水使用量に農業用地下水使用量を加えた値は夏期の地下水使用量であり，工業・飲雑用地下水使用量に農業用の湧泉の湧出量を加えた値は冬期の地下水取得量になる。既述の試算範囲や小区分の面積で，その範囲や小区分内での夏期および冬期の地下水取得量を割つて，夏期および冬期の地層水の単位面積排水量を試算した。

各平野の地層水の単位面積排水量の試算範囲，その流域（後背地の山地をふくむ），および雨量観測点を図-2 に示す。

各平野の試算値は表-2・3・4・5・6・7・8・9 のごとくである。

表-2 讃岐平野高松地区の地層水の単位面積排水量

種 別	箇所数	掘削深度 m	用 途	利用期間	平 均 取水量 m^3/day	地区面積 Km^2	地層水の単位面積排水量 $\text{m}^3/\text{day}/\text{Km}^2$	
							夏 期	冬 期
さく井 1	472	3～27	農(水田)	かんがい期	71,900	115	2,350	1,400
湧 泉	89	0.4～4	"	"	55,500			
集水渠	10		"	"	13,000			
集水池	3		"	"	900			
さく井 2	41	30～90	"	"	18,900			
"	236	30～215	工・飲雑	年 中	110,000			

さく井 1～掘削深度 0～30m 未満のもの（表-2・3・4・5・6・7・8・9 に共通）

さく井 2～掘削深度 30m 以深のもの（" "）

表-3 讃岐平野琴平・丸亀・多度津地区の地層水の単位面積排水量

地 区	種 別	箇所数	掘削深度 m	用 途	利用期間	平均取水量 m ³ /day	地区面積 Km ²	地層水の単位面積排水量 m ³ /day/Km ²	
								夏 期	冬 期
Ⅰ 琴 平	さく井1	71	3~ 5	農(水田)	かんがい期	—	21	2,700	1,700
	" 2	8	4~ 7	水 道	年 中	6,200			
	集水渠	13		農(水田)	かんがい期	2,200			
	"	1		水 道	年 中	1,000			
	集水池	6	1~ 8	農(水田)	かんがい期	—			
	"	2	0.8~ 0.9	水 道	年 中	—			
	湧 泉	80	0.5~ 8	農(水田)	かんがい期	2,750			
	さく井2	1	40	工 業	年 中	400			
Ⅱ 丸 亀	さく井1	54	1~ 11	農(水田)	かんがい期	3,040	45	3,500	1,450
	"	3	6~ 7	上水道	年 中	1,200			
	集水渠	3		農(水田)	かんがい期	4,000			
	集水池	12	2~ 7	"	"	3,340			
	湧 泉	115	1.5~ 1.5	"	"	4,670			
	さく井2	11	70~ 100	"	"	2,570			
	"	16	40~ 136	工・水道	年 中	1,730			
Ⅲ 多度津	さく井1	37	3~ 15	農(水田)	かんがい期	10,000	33	3,500	2,200
	"	9	5~ 21	水 道	年 中	9,800			
	集水池	104	1.5~ 9	農(水田)	かんがい期	2,350			
	湧 泉	53	1.5~ 10	"	"	4,860			
	さく井2	11	70~ 130	"	"	10,200			
	"	12	36~ 137	工・水道	年 中	14,600			
計						33,250	99	3,400	1,750

表-4 三豊平野地区の地層水の単位面積排水量

種 別	箇所数	掘削深度 m	用 途	利用期間	平均取水量 m ³ /day	地区面積 Km ²	地層水の単位面積排水量 m ³ /day/Km ²	
							夏 期	冬 期
さく井1	2,121	2~ 9	農(水田)	かんがい期	2,440	48	1,800	340
"	2	6.5~ 7	水 道	年 中	360			
集水渠	26		農(水田)	かんがい期	1,600			
集水池	18	0.7~ 1.0	"	"	2,130			
湧 泉	20	3~ 4.5	"	"	600			
さく井2	20	50~ 120	"	"	2,380			
"	16	40~ 100	工・水道	年 中	15,600			

表-5 宇摩平野川之江地区の地層水の単位面積排水量

地区	種 別	箇所数	掘削深度 m	用 途	利用期間	平均取水量 m ³ /day	地区面積 Km ²	地層水の単位面積排水量 m ³ /day / Km ²	
								夏 期	冬 期
i	さく井1	3	1.5~2.0	農(水田)	かんがい期	5,600	1	12,400	6,800
	" 1	19	6~3.0	工	年 中	6,300			
	" 2	2	3.8~4.0	"	"	500			
ii	さく井1	6	5~1.5	農(水田)	かんがい期	10,400	3.3	8,150	5,000
	" 1	46	4~3.0	工	年 中	16,500			
	計					39,300	4.3	9,100	5,400

表-6 宇摩平野寒川・関川地区の地層水の単位面積排水量

地区	種 別	箇所数	掘削深度 m	用 途	利用期間	平均取水量 m ³ /day	地区面積 Km ²	地層水の単位面積排水量 m ³ /day / Km ²	
								夏 期	冬 期
iii	さく井1	16	2.5~1.5	農(水田)	かんがい期	22,200	2.4	15,200	6,970
	" 1	11	5~1.7	工	年 中	16,700			
iv	さく井1	13	5~1.5	農(水田)	かんがい期	26,800	2.1	12,700	-
v	さく井1	25	3.5~1.3	農(水田)	かんがい期	33,700	9.2	3,900	-
	湧 泉	3	0.5	"	"	2,100			
vi	さく井1	2.9	4.5~1.2.5	農(水田)	かんがい期	42,000	4.6	9,100	-
	計					143,500	18.3	7,800	1,030

表-7 新居浜平野地区の地層水の単位面積排水量

地区	種 別	箇所数	掘削深度 m.	用 途	利用期間	平均取水量 m ³ /day	地区面積 Km ²	地層水の単位面積排水量 m ³ /day/Km ²	
								夏 期	冬 期
i	さく井1	17	10~20	農(水田)	かんがい期	39,800	7.8	17,900	13,000
	"	13	8~16	工・飲雑	年 中	46,400			
	さく井2	20	40~60	"	"	53,500			
ii	さく井1	20	7~20	農(水田)	かんがい期	41,200	11.3	22,700	19,000
	"	54	7~25	工・飲雑	年 中	150,200			
	さく井2	17	30~90	"	"	65,200			
iii	さく井1	30	5~29	農(水田)	かんがい期	22,200	15.2	4,300	2,900
	"	9	5~12	工・飲雑	年 中	5,600			
	湧 泉	3	1.5~4	農(水田)	かんがい期	38,000			
iv	さく井1	4	6~8	農(水田)	かんがい期	2,800	1.6	4,300	2,500
	"	2	1.5~6	"	"	4,000			
	湧 泉	2	1.5~6	"	"	4,000			
計						468,900	35.9	13,000	10,000

表-8 道前平野地区の地層水の単位面積排水量

地区	種 別	箇所数	掘削深度 m	用 途	利用期間	平均取水量 m ³ /day	地区面積 Km ²	地層水の単位 面積排水量 m ³ /day/Km ²	
								夏 期	冬 期
i	さく井 1	112	24~20	農(水田)	かんがい期	45,800	6.4	11,800	63
	"	11	10~20	工・飲雑	年 中	400			
	集 水 池	5	9~15	農(水田)	かんがい期	29,200			
ii	さく井 1	1390	5~20	農(水田)	かんがい期	141,100	14.6	44,000	33,000
	"	251	4~30	工・飲雑	年 中	19,700			
	集 水 池	8	4~ 8	農(水田)	かんがい期	19,500			
	湧 泉	15	0.4~ 1	"	"	307,200			
	暗渠(伏樋)	1		工	年 中	86,400			
	さく井 2	13	40~45	"	"	71,300			
iii	さく井 1	63	3~27	農(水田)	かんがい期	23,300	15.5	3,000	1,400
	"	19	2~30	工・飲雑	年 中	400			
	集 水 池	1	3.6	農(水田)	かんがい期	800			
	湧 泉	4	0.6~1.5	"	"	21,000			
	さく井 2	1	93	工	年 中	300			
iv	さく井 1	17	5~17	農(水田)	かんがい期	29,800	6.6	5,400	850
	"	2	8~10	飲 雑	年 中	300			
	湧 泉	5	2~10	農(水田)	かんがい期	5,300			
v	さく井 1	355	5~28	農(水田)	かんがい期	59,400	19.4	3,800	540
	"	7	18~28	工・飲雑	年 中	700			
	集 水 渠	1	10	農(水田)	かんがい期	4,400			
	湧 泉	2	2.5~10	"	"	5,300			
	さく井 2	3	45~90	工	年 中	4,500			
vi	さく井 1	38	4~26	農(水田)	かんがい期	50,000	12.3	4,900	140
	"	6	4~12.5	工・飲雑	年 中	1,100			
	集 水 池	4	4~ 8	農(水田)	"	6,700			
	湧 泉	3	5~6.5	"	"	600			
	さく井 2	1	50	飲 雑	年 中	50			
	"	1	90	農(水田)	かんがい期	2,000			
vii	さく井 1	36	—	農(水田)	かんがい期	10,500	10.1	2,200	1,180
	"	91	18~28	工	年 中	5,900			
	湧 泉	7	—	農(水田)	かんがい期	6,000			
viii	さく井 1	52	7~15	農(水田)	かんがい期	2,400	7.9	1,400	1,000
	湧 泉	29	3~10	"	"	8,000			
	集 水 渠	2	5~ 6	"	"	800			
計							92.8	10,400	5,900

表-9 松山平野地区の地層水の単位面積排水量

地区 種 別	箇所数	掘削深度 m	用 途	利用期間	平均取水量 m ³ /day	地区面積 Km ²	地層水の単位面積排水量 m ³ /day/Km ²	
							夏 期	冬 期
i さく井1 " 湧 泉	4	7~11	農(水田)	かんがい期	14,000	5.8	3,500	1,100
	7	6~12	飲 雑	年 中	400			
	8	0.6~7	農(水田)	かんがい期	5,900			
ii さく井1 " 湧 泉 集 水 渠	32	5~12	農(水田)	かんがい期	14,000	14	12,800	2,000
	22	6~11	飲 雑	年 中	400			
	11	3~7	農(水田)	かんがい期	27,000			
	4		"	"	11,500			
iii さく井1 " 集 水 渠 集 水 池 湧 泉	10	3~10	農(水田)	かんがい期	29,500	88	10,300	2,600
	3	6	飲 雑	年 中	500			
	1		農(水田)	かんがい期	200			
	17	1.8~10	"	"	38,300			
	4	3~6	"	"	22,100			
iv さく井1 集 水 渠 さく井2	79	3~15	農(水田)	かんがい期	287,600	177	18,900	2,300
	1		工	年 中	41,300			
	3	30~50	農(水田)	かんがい期	5,700			
v さく井1 " 集 水 渠 さく井2	31	4~10	農(水田)	かんがい期	34,300	14	4,400	340
	4	3.6~9	飲 雑	年 中	100			
	8	30~35	農(水田)	かんがい期	22,800			
vi さく井1 " 集 水 渠 さく井2 "	6	35~120	飲 雑	年 中	4,600	12	7,300	3,200
	8	5~10	農(水田)	かんがい期	45,500			
	58	5~27	飲 雑	年 中	21,500			
	40	30~56	"	"	17,200			
vii さく井1 " 集 水 渠 集 水 池 湧 泉	1	35	農(水田)	かんがい期	3,600	6.4	35,000	13,300
	15	5~8	農(水田)	かんがい期	82,200			
	4	6~8	飲 雑	年 中	1,600			
	1		農(水田)	かんがい期	53,900			
	1	3	"	"	3,100			
viii さく井1 " 集 水 渠 " 湧 泉	13	15~8	"	"	83,600	25.4	10,400	4,000
	56	4~20	農(水田)	かんがい期	111,600			
	47	2~25	工・飲雑	年 中	10,400			
	11	30~140	"	"	19,900			
	1		"	"	72,000			
	4		農(水田)	かんがい期	10,900			
ix さく井1 さく井2 " 集 水 渠	19	1~9	"	"	39,800	16.4	6,100	1,900
	17	5~10	農(水田)	かんがい期	52,200			
	5	30~40	"	"	15,700			
	9	30~50	工・雑飲	年 中	11,200			
計						120.5	11,300	3,000

各地区の地下水産害の現況を略記する。

讃岐平野高松地区：高松市街地の深井戸群は近年自然水位・揚水水位の低下が著しく、それにつれて塩分濃度も増加している（文献 12・13 参照）。深井戸のらん掘，過剰揚水による塩水侵入である。市街地東郊では水位低下はめだたないが，春日川の河口附近のさく井水の電気伝導度は $5,000 \mu\text{mho}/\text{cm}$ 以上に達し，塩分で汚染されている（1964 年 9 月測定）。

讃岐平野丸亀地区：海岸ぞいの深井戸の一部で Cl^- $2,000 \text{ ppm}$ を示すものがある（文献 12 参照）。

三豊平野地区：観音寺市街周辺で被圧地下水・自由地下水ともに塩水侵入が発生しつつある。自由地下水の塩水侵入は財田川の上げ潮に関係しており，被圧地下水の塩水侵入は深井戸群の過剰揚水によるものである（文献 14 参照）。

宇摩平野川之江地区：井戸相互の干渉や工場廃水による水質汚染，さらに金生川河口附近の塩水侵入が報告されている（文献 15 pp. 95～98 参照）。

新居浜平野地区：海岸部のさく井には塩水侵入が認められ，過剰揚水の影響が塩水侵入の形となつて，次第に内陸部にあらわれている（文献 15 pp. 86～87・16 pp. 5～6）。

道前平野地区：文献 10 によれば西条市街の海岸部の埋立地に位置する K 工場では，深井戸の過剰揚水のため敷地内で小規模な地盤沈下が発生したという。K 工場敷地は 13 万坪で，掘削深度 45～50 m の 13 のさく井で各々 $5,000 \text{ m}^3/\text{day}$ 揚水したところ地盤沈下が生じたので，各井とも $2,500 \text{ m}^3/\text{day}$ 前後にしたところ沈下現象も止まつたとしているから，地層水の単位面積排水量の見地から考えれば

$$2,500 \text{ m}^3/\text{day} \times 13 \div 13 \text{ 万坪} \div 76 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{day}/\text{Km}^2$$

が K 工場の適正揚水量の条件での値である。もつとも，道前平野全般としてみたとき，地下水災害を引き起こす限界の地層水の単位面積排水量を論ずるには，さらに資料のしゅう積が必要である。なお，現在のところ道前平野に地下水災害は発生していない模様である。

松山平野地区：臨海部の自由地下水・被圧地下水について塩水侵入が報告されている（文献 16 pp. 17～18）。

3.2 海岸平野—地盤沈下地区（地層水の単位面積排水量の例）

近年，東京・大阪・新潟などをはじめとする海岸平野の一部が地盤沈下するという事実があり，工業開発～とくに地下開発～にもなる公害として世論を騒がせている。地盤沈下の原因の一つとして地下水の過剰揚水という現象が指摘され，各地区の水理地質に関する資料・研究が次第に公表されつつある。これらの公表された地下水関係資料より，地盤沈下地区の地層水の単位面積排水量を試算した。試算値は表-10.11.12 のごとくである。

表-10 東京下町地区の地層水の単位面積排水量

地盤沈下地区		面積 Km ²	揚水量 m ³ /day	地層水の単位面積排水量 m ³ /day/Km ²	
東京下町地区	江東地区(隅田川と荒川放水路に囲まれた三角地帯)	44	179,041	4,080	文献17
	城北地区(荒川右岸ぞいの荒川・北・板橋区の低地)	35	338,274	9,070	
	城南地区(大田区南六郷一帯)	7	37,617	5,400	
	東京下町	20	50,000	2,500	文献18

表-11 大阪平野臨海部地区の地層水の単位面積排水量

地盤沈下地区		面積 Km ²	揚水量 m ³ /day	地層水の単位面積排水量 m ³ /day/Km ²	
大阪臨海平野地区	大阪市地区	80	260,000	3,250	文献19
	尼崎市地区	47	110,000	2,300	文献20
	西宮市地区	—	—	2,500	文献21

表-12 新潟平野地区の地層水の単位面積排水量

地盤沈下地区		面積 Km ²	揚水量 m ³ /day	地層水の単位面積排水量 m ³ /day/Km ²	
新潟平野地区	新潟平野海岸部地区	半径1.5Kmの円内	30,000~ 40,000	4.2~5.6 × 10 ³	文献22
	新潟平野内陸部地区	面積4Km ² の方眼あたり		1.3~0.08 × 10 ³	文献23*

* 文献23より昭和34.9~37.9までの沈下量100mm以上の地帯を対象として記した。なお福島潟西方では1.3~0.8 m³/day/Km²を示す地帯がほとんど沈下していないなどの例外がある。

3.3 盆地-蒜山原地区(被圧地下水の単位面積排水量の例)

蒜山原は中国山地のほぼ中央部に位置する蒜山盆地の大半を占める。地区の地質は洪積世の蒜山原層で、砂・れき・粘土・珪藻土などの互層から成り、湖成堆積物とされている。この地層を対象として深井戸開発が行なわれつつあり、被圧地下水の単位面積排水量は表-13のごとくである(文献1参照)。

表-13 蒜山原地区の被圧地下水の単位面積排水量

地 区 名		採水施設 の 種 類	箇所数	掘削深度 <i>m</i>	用 途	利用期間	平均取水量 <i>m</i> ³ /day	試算範囲 の面積 <i>Km</i> ²	地層水の単位面積 排水量 <i>m</i> ³ /day/ <i>Km</i> ²
蒜山 原地区	中部地区	さく井 2	2	1 1 2 1 2 1	農(畑かん)	春・夏・秋	3,450	1.4	2,500
	芽部地区	"	2	8 0 1 0 1.5	"	"	5,140	1.1	4,700

3.4 砂洲・浜堤－三里地区（自由地下水の単位面積排水量の例）

三里地区は太平洋に面する砂洲・浜堤で、地質は沖積世の砂れき層である。砂れき層に自由地下水が存在し、浅井戸で取得されているが、いわゆるヘルツベルグ・レンズの淡水様で淡水層の厚さはきわめて薄く、ときに塩水侵入が発生する。自由地下水の単位面積排水量は表－14のごとくである（文献4参照）。

表－14 三里地区の自由地下水の単位面積排水量

採水施設の種類	箇所数	掘削深度 m	用途	利用期間	平均取水量 m^3/day	試算範囲の面積 Km^2	自由地下水の単位面積排水量 $m^3/day/Km^2$
さく井1	80	3～14	農（畑かん） 飲 雑	年中	$6\sim75 \times 10^4$	1.7	$1.2\sim1.5 \times 10^3$

3.5 火山－大山北西部地区（裂か水の湧泉の見掛け単位面積排水量の例）

地区は大山火山全域のうちでは比較的湧泉が密集し、湧泉はその分布する地質より③大山系火山砕屑岩類の湧泉、④大山系安山岩類の湧泉に区別できる。うち③は火山砕屑物のなかの部分的な帯水層より湧出し、地層水様のものであり、④は直接または間接に安山岩類の亀裂・節理から湧出する裂か水起源のものである。本地区の湧泉の見掛け単位面積排水量は表－15のごとくである（文献3・24参照）。

表－15 大山北西部地区の湧泉湧出量平均値・温泉の見掛け単位面積排水量

	面積湧泉 $A: Km^2$ 数 n	湧泉総湧出量		湧泉湧出 量平均値 $\bar{Q} \ell/sec$	湧泉分布 係数 $\frac{n}{A}$	湧泉の見掛け単 位面積排水量 $Z: m^3/day/Km^2$	備考
		m^3/day	ℓ/sec				
③大山角れき凝灰岩	32.5 26	35,300	408.8	15.7	0.80	1,090	阿彌陀川・ 佐陀川には 含まれた範 囲 孝霊山北麓 のみ
④長田軽石質凝灰岩	2.9 6	6,300	72.9	12.1	2.1	2,170	
③飯戸山安山岩	1.9 3	6,000	69.6	23.2	1.6	3,660	
④鍋山安山岩	9.8 8	42,200	488.4	61.1	0.82	4,220	
③壺瓶山潜晶質安山岩	2.24 5	41,400	479.5	95.9	2.2	18,500	

3.6 カルスト台地－草間台地地区（カルスト泉の見掛け単位面積排水量の例）

草間台地は中国山地のカルスト台地の一つで、地質は古生代石灰岩のほか非石灰岩相や三群変成岩類が介在する。石灰岩の分布より、地区を北部石灰岩地区および南部石灰岩地区に区分できる。本地区のカルスト泉の見掛け単位面積排水量は表－16のごとくである（文献5・25参照）。

表－16 草間台地地区のカルスト泉の湧泉湧出量平均値・湧泉の見掛け単位面積排水量

		面積 $A: Km^2$	湧泉数 n	湧泉総湧出量 Q		湧出量平均値 $\bar{Q} \ell/sec$	湧泉分布 係数 $\frac{n}{A}$	見掛け単位面積排水 量 $Z: m^3/day/Km^2$
				ℓ/sec	m^3/day			
草地 間地 台区	北部石灰岩地区	14.3	19	79.8	6,891	4.2	1.33	480
	南部石灰岩地区	2.8	3	48.8	4,219	16.3	1.04	1,500

4. 地下水の単位面積排水量と水理地質条件との関係

4.1 水文との関係

四国瀬戸内海岸平野の各地区，蒜山原地区，三里地区について考察する。

各地区の雨量・流域面積・流域の年間降水量を表－17に示す。なお，川之江地区・新井浜平野地区は流域外の水系のダムの貯水を地区内に導水しているので，両地区については流域の年間降水量に流域変更による河川放流量を加えた値を補正年間降水量としてとつた。

表－17 流域面積・年間降水量・Y値一覧表

試 算 範 囲	代 表 雨 量 mm (かんそく点)	流域 面積 Km^2	流域の(補正) 年間降水量 $10^4 m^3$	帯水層の 面 積 Km^2	Y 値 mm
讃岐平野高松地区	1424 (タカマツ)	389	58080	115	5050
讃岐平野丸亀・多度津・琴平地区	1275 (タドツ)	311	46780	99	4720
三 豊 平 野 地 区	1223 (トヨハン カンノンジ)	268	39800	48	8300
宇摩平野川之江地区	1408 (カワノエ)	66	2540 (12940)	4.4	6200 (23400)
宇摩平野寒川・関川地区	1595 (ド イ)	115	18350	183	10000
新居浜平野地区	1532 (ニイハマ)	117	17900 (23400)	35.9	5000 (6500)
道前平野地区	1521 (サイジヨウ)	579	103580	92.8	10300
松 山 平 野 地 区	1670 (カワカミ イヨシ)	583	104840	120.5	8700
蒜 山 原 地 区	2289 (カミナガタ)	243	5550	11.6	4800
三 里 地 区	2363 (コウチ)	2	470	1.7	2760

また，流域の(補正)年間降水量を地区の主要な帯水層の分布範囲の面積(一般には地層水の単位面積排水量の試算範囲とみなしうる)で割つた値をY値と呼ぶを求め，表－17にあわせ示す。

一般に降水量と地下水補給量との間には以下の関係があるとされている(文献26 pp.9～10)。

$$P = D_2 - D_1 + E + G$$

ここにP：降水量

D_1 ：上流からこの地域への地表水の流入量

D_2 ：この地域から下流への地表水の流出量

E：蒸発量

G：地下水補給量+土湿増加量

Pは気象庁資料により，実測値が公表されている。Eは金子良によれば，日本西南暖地で年間800～900mmであろう(文献26 pp.13)としているが，測定試験方法に関する問題点が多い。 D_1 ・ D_2 は平野を対象とすると，山地より平野に流入する各河川について，山地より平野に流入する位置および河口での河川流量を継続かん測すれば測定可能であるが，現段階ではかん測体制が整備されていない。

地下水を量的に論じるとき、 G の算出が最も望まれるが、現段階の気象・水文資料では未知の数値が多く、 G の算出はむずかしい。このような見地より、 P と D_1 に関係し、したがって G と比較的密接な関連があると考えられる Y 値について、地層水の単位面積排水量との対応関係を検討した。

図-3 地層水の単位面積排水量と雨量・流域の年間降水量・ Y 値との関係

図-4 地層水の単位面積排水量- Y 値関係図

地区別の地層水の単位面積排水量と雨量・

(補正)年間降水量・ Y 値との関係は図-3のごとくで、とくに Y 値との詳細な関係は図-4のごとくである。

図-3に明らかなように、各地区の地層水の単位面積排水量の大きさは雨量や流域の(補正)年間降水量の大きさとは対応関係が認められないが、 Y 値の大きさと一応の対応関係が認められる。なお三豊平野地区・寒川関川地区・道前平野地区は他の地区にくらべ、 Y 値の大きさの割合には地層水の単位面積排水量が小さいといえる。地層水の単位面積排水量は現況の地下水利用量に関係し、今後の地下水開発の進展如何によつてある程度の増減が予想される値であるので、上記3地区のような関係の場合には、 Y 値以外の水理地質条件との関連において今後の地下水開発の可能性を検討する余地があるものと考えられる。

また、流域変更による地区内の河川流量の増加が地下水の涵養に若干影響しているものようである。図-4に見られるように、新居浜平野地区では Y 値よりも補正 Y 値が妥当である。川之江地区の補正 Y 値は過大であるが、このことは現在の資料では地区外の赤之井川への流域変更による河川放流量を加えたため、実際の値より大きい補正 Y 値になっていることによるものと考えられる。

4.2 層相との関係

四国瀬戸内海岸平野地区のうち、さく井資料の比較的とのついている6地区について、さく井地質柱状図より層厚百分比(文献27 pp.94~96 参照)を求めた。一般にさく井は工法上、地質資料の採取が不完全で、地質学的には不正確な記載となりがちであるが、地区の層相の概略を把握するため、統計的に処理し算出した。すなわち、れき・砂れきはれき、砂・れきまじり砂は砂、れきまじり粘土・砂まじり粘土・シルト・ふしよく土などは粘土とし、さらに粘土まじりれき、粘土まじり砂の5相別の分布深度をさく井地質柱状図より求めた。さらに同一地区内の同深度のさく井では各々の平均値をとり、百分比に換算した。表-18・図-5・6に地区別の層厚百分比と地層水の単位面積排水量との関係を示す。

図-5 四国瀬戸内海岸平野代表地区の層厚百分比

図-6 地層水の単位面積排水量-層厚百分比関係図

表－１８ 四国瀬戸内海岸平野代表地区の層厚百分比表

地 区 名	れき	粘土まじり れき	砂	粘土まじり 砂	粘土	地層水の単位面積排水量 夏期 $m^3/day/Km^2$
讃岐平野高松地区	27.7	5.1	8.9	26.7	31.6	2,350
丸 亀 地 区	14.8	3.9	1.4	2.9	38.3	3,500
多 度 津 地 区	10.9	10.4	4.8	16.6	57.3	3,500
三 豊 平 野 地 区	5.6	17.2	8.8	21.4	4.7	1,800
新居浜平野地区Ⅱ	38.6	7.9	—	6.4	47.1	2,270
道前平野地区ⅡⅢⅤ	43.4	20.37	1.35	6.72	28.16	1,550

Todd (文献8 p.26)によれば, “未固結のれき層や砂層は有力な帯水層の多分90%を占めるであろう”とし, 水理地質学では, 冲積・洪積の軟弱な堆積物のれき層・砂層などを良好な帯水層, 粘土まじりれき層・粘土まじり砂層などをやや帯水層, 粘土層を難～非帯水層として取扱っている。図－5・6によれば, 代表6地区の地層水の単位面積排水量の大きさは帯水層の発達程度, れき・砂層とくにれき層の層厚百分比の大きさとの相関が認められる。なお, 高松地区はれきの発達している割合には地層水の単位面積排水量が小さく, 新居浜平野Ⅱ地区と道前平野Ⅱ・Ⅲ・Ⅴ地区との比較では逆の対応が見られるなどの若干の例外がある。これらの例外は, 地層水の単位面積排水量が現況地下水利用量に関係した値であるということに基因するもので, Y値の場合(本文4.1参照)と同様, 一般の地下水区との偏差より, 特定の地下水区の将来の地下水開発の可能性を検討する一つの目安を得る場合がある。

4.3 透水係数との関係

地層水の単位面積排水量と透水係数の理論的な関係については本文2.2で考察し, 両者の関係式として(6)・(7)式を導いた。両者の実測値を示せば表－19のごとくである。なお, 透水係数は各地区についてまれにしか実測されていないので, 現況では平野の代表値として取扱うには難点があることを附言しておく。

表－１９ 四国瀬戸内海岸平野代表地区の地層水の透水係数・単位面積排水量一覧表

地 区 名	透 水 係 数	地 層 水 の 単 位 面 積 排 水 量	
	cm/sec	$m^3/day/Km^2$	cm/sec
讃岐平野高松地区	7.4×10^{-2}	2,400	2.8×10^{-6}
三 豊 平 野 地 区	1.4×10^{-3}	1,800	2.1×10^{-6}
道前平野地区Ⅱ	2.98×10^{-1}	4,400	5.1×10^{-6}
蒜 山 原 地 区	2×10^{-3}	2,500	2.9×10^{-6}
三 里 地 区	$3.8 \sim 5 \times 10^{-1}$	1,200～1,500	$1.4 \sim 1.7 \times 10^{-6}$

4.4 湧泉湧出量平均値・さく井の揚水量平均値との関係

湧泉湧出量についてはO. E. Meinzer(文献28 p.53)の分類があり, 山本はMeinzerのC・G・S

単位による分類を補正して ℓ/sec をとり、日本の火山の代表例について湧泉湧出量平均値を試算した（文献 29 p. 263）。筆者は地質別に湧泉湧出量平均値を求め、さらに湧泉の見掛け単位面積排水量という概念を提唱した（文献 3・4 参照）。

大山北西部地区の安山岩類・火山碎屑岩類の湧泉（表-15）、草間台地地区のカルスト泉（表-16）の見掛け単位面積排水量 Z と湧泉湧出量平均値 $\bar{Q}$ を(3)式の共点図表 “ $Z - \bar{Q} - \frac{n}{A}$ 図”（本文 2.1 参照）に投影し、図-7 に示す。

なお参考のため、地層水についても $\bar{Q}$, $\frac{n}{A}$ を計算し、図-7 にあわせ示す。計算結果は表-20 のごとくである。現在時点の四国瀬戸内海岸平野地区の $\bar{Q}$ は浅井戸・深井戸・集水池・集水渠・湧泉をふくめた地下水取水箇所 1 カ所あたりの平均取水量であり、 $\frac{n}{A}$ は同様に 1Km^2 あたりに分布する地下水取水施設の箇所数である。蒜山原地区では深井戸、三里地区では浅井戸の平均取水量を $\bar{Q}$ は示し、同様に井戸数を $\frac{n}{A}$ は示す。

表-20 四国瀬戸内海岸平野地区・蒜山原地区・三里地区の $\bar{Q} \cdot \frac{n}{A} \cdot Z$ 一覧表

No.	地 区 名		面 積 $A \text{ Km}^2$	取水箇 所数 n	地下水総取得量		$\bar{Q}$ ℓ/sec	$\frac{n}{A}$	地層水の単位面積排水 量 Z $\text{m}^3/\text{day}/\text{Km}^2$
					m^3/day	ℓ/sec			
1	讃岐平野区	高松地区	115	851	270,200	3,130	3.7	7.4	2,350
2		琴平地区	21	182	57,100	660	3.6	8.7	2,700
3		丸亀地区	45	214	158,700	1,840	8.6	4.8	3,500
4		多度津地区	33	226	116,700	1,350	6.0	6.9	3,500
5	三豊平野地区		48	2,223	87,660	1,015	0.5	46.3	1,800
6	宇野摩地平区	川之江地区	4.3	76	39,300	460	6.0	17.7	9,100
7		寒川・関川地区	18.3	97	143,500	1,660	17.1	5.3	7,800
8	新居浜平野地区		35.9	189	468,900	5,430	28.7	5.3	13,000
9	道前平野地区		92.8	2,556	970,150	11,200	4.4	27.6	10,400
10	松山平野地区		120.5	565	1,363,100	15,800	28	4.7	11,300
11	蒜山原区	中部地区	1.4	2	3,450	40	2.0	1.4	2,500
12		芽部地区	1.1	2	5,130	59	29.5	1.8	4,700
13	三 里 地 区		1.7	80	$2 \sim 25 \times 10^3$	$23 \sim 29$	$0.29 \sim 0.36$	4.7	$1.2 \sim 1.5 \times 10^3$

図-7 によれば、安山岩類・火山碎屑岩類の湧泉およびカルスト泉の 7 例は $Z - \bar{Q} - \frac{n}{A}$ 図でほぼ直線的の帯状分布を示し、 Z と $\bar{Q}$ の間に対応関係が認められる。しかし、海岸平野・盆地などや砂洲・浜堤の地層水の 13 例は分布がやや散らばり、 Z と $\bar{Q}$ の間には規則性が認められない。この相違は、湧泉の見掛け単位面積排水量がほとんど自然状態のままの湧泉湧出量より求めた値であるのに対し、地層水の単位面積排水量はポンプ揚水による地下水の採取、すなわち、人工による自然状態のかき乱しを加味した値であるということに基因するものと考えられる。

一般に $Z - \bar{Q} - \frac{n}{A}$ 図で右辺・上位に位置する地下水区ほど、地下水資源が有力であるといえる。

- 地層水(自由地下水・被圧地下水) 1~13の地区名は表20と同じ
- x 火山碎屑岩類の湧泉(地層水起源)
 - 14. 大山角れき凝灰岩 15. 長田軽石質凝灰岩
- 安山岩類の湧泉・カルスト泉(裂水起源)
 - 16. 飯戸山安山岩 17. 鍋山安山岩 18. 壺瓶山潜晶質安山岩
 - 19. 草間台地北部石灰岩 20. 草間台地南部石灰岩

図-7 $Z - Q - \frac{n}{A}$

4.5 水理地質条件との総合関係—とくに地下水開発との関連

各地下水区の地形・地質・地下水の概要と地下水の単位面積排水量の値をまとめ、さらに地盤沈下や塩水侵入などの地下水災害を発生している条件での値をあわせ、図-8に示す。

図-8にまとめた地下水の単位面積排水量の値は、四国瀬戸内沿岸平野の10地区では昭和38年の推定値でほぼ同じ精度であるといえるが、その他の地区の値は観測時期を異にする実測値や推定値で、必ずしも精度が同一ではない。湧泉湧出量は雨量と関係するもののある場合が知られており、観測時期を異にする湧泉の単位面積排水量を雨量との関連において対比できる可能性がある(文献5 p.115 参

図-8 地下水の単位面積排水量比較図(地形・地質・地下水別)

照)。しかし地層水の単位面積排水量はポンプ揚水などの地下水開発工によつて取得されている現況地下水利用量を示す値で、観測時期を異にする値を理論的に対比する手掛りはない。厳密な対比を行なうためには、各地区を同時に観測し、その結果によるのが合理的であるが、現実にそのような大観測調査を行なうことは不可能に近い。以上の見地より、将来の地下水開発を考察するための一応の目安として、図-7の $Z - \bar{Q} - \frac{n}{A}$ 図および図-8の一覧表をまとめたことを附言しておく。

図-8より地下水の単位面積排水量が $10^4 \text{ m}^3/\text{day}/\text{km}^2$ 以上の地区は大山火山壺瓶山潜晶質安山岩新居浜平野地区(夏期)・道前平野地区(夏期)・松山平野地区(夏期)などで、地区の小区分を考えれば宇摩平野の一部にも同じ程度のものがある。 $10^2 \text{ m}^3/\text{day}/\text{km}^2$ の桁の地区は草間台地北部石灰岩・三豊平野地区(冬期)・新潟平野内陸部の大部分などで、以上のほかは $10^3 \text{ m}^3/\text{day}/\text{km}^2$ の桁である。

地下水の単位面積排水量で比較すると、大山火山の安山岩や草間台地の石灰岩など裂か水起源のものが、深井戸開発の進んでいる海岸平野や盆地などの地層水とくらべて見劣りがなく、とくに大山火山壺瓶山潜晶質安山岩が最大の値を示している事実が興味をひく。これらの裂か水起源の地区では、湧泉の見掛け単位面積排水量を試算したので、現在地表に湧出してしている湧泉湧出量を対象としている。従来我が国の地下水開発は沖積層・洪積層を主な対象とし、ポンプ揚水とくに深井戸開発が展開されてきている反面、山地の裂か水については地下水調査が難しいという理由からほとんど顧みられていない。しかし上記の事実は将来の裂か水開発の可能性を肯定するもので、とくに揚水をともなつた開発方法を検討する余地があり、この際地質別の湧泉の見掛け単位面積排水量の大きさが開発を行なうべき場と可能性を暗示しているものと考えられる。

また、 $Z - \bar{Q} - \frac{n}{A}$ 図で裂か水の湧泉の代表例が地層水の代表例の下位に分布している事実も、将来の裂か水開発の可能性を肯定するものと考えられる。

図-8より、地盤沈下や塩水侵入などの地下水災害を起こしている条件での海岸平野の地層水の単位面積排水量の大きさは、地区によつてかなりの違いのあることがわかる。地盤沈下地帯の値は主として工業・飲雑用の地下水利用量より算出したものであり、四国瀬戸内海岸平野地区の冬期の地層水の単位面積排水量にほぼ相当する。新潟平野内陸部は天然ガス水の過剰揚水による地盤沈下とされ、特異な例で単位面積排水量も小さい。東京下町地区・大阪平野臨海部地区では $9.7 \sim 2.3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}/\text{km}^2$ で地下水の過剰揚水による地盤沈下が発生している。新居浜平野地区の単位面積排水量は東京下町地区の値をこえ、道前平野地区・川之江地区・松山平野地区なども大阪平野臨海部地区の値をこえているが、目下のところ地下水の過剰用水による地盤沈下は報告されていない。なお、道前平野地区の西条市の埋立地では $7.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{day}/\text{km}^2$ 程度の揚水で部分的な沈下が発生したことがあり、平野の臨海部全般では現況よりも大きく、この値よりも小さい値で全面的な地盤沈下が発生するものと予想される。新居浜平野や道前平野が既述の地盤沈下地帯よりも沈下に対する抵抗性が強いのは、層相とくにれき層

がよく発達していることに関係があると考えられる。

塩水侵入は高松地区・丸亀地区・川之江地区・松山平野地区の臨海部で次第に発生しつつあり、三豊平野地区の観音寺市街周辺や新居浜平野の臨海部では $10^4 \text{ m}^3/\text{day}/\text{Km}^2$ 程度で被圧地下水帯に著しい塩水侵入が発生している。三里地区はヘルツベルグ・レンズの淡水を揚水している特異な例であるが、 $10^3 \text{ m}^3/\text{day}/\text{Km}^2$ 程度で自由地下水帯に塩水侵入が発生している。

以上の事実より、今後の四国瀬戸内海岸平野地区の地下水開発については地下水災害との関連を考慮して進めなければならない段階にきているといえる。

なお、四国瀬戸内海岸平野地区の代表6地区について、地層水の単位面積排水量・Y値・層厚百分比れき%をあわせ、図-9に示す(本文4.1・4.2参照)。なお、これらの地区ではいずれも掘削深度100~150mまでの地層水が開発されている。

図-9より、道前平野地区Ⅱ・Ⅲ・Ⅴは新居浜平野地区Ⅱと、高松地区は丸亀・多度津地区と比較すれば、Y値や層厚百分比れき%の大きい割合には地層水の単位面積排水量が小さく、これらの地区は今後なお多少の地下水開発を行ないうる余地があると予想できる。しかし、地下水災害を考慮すれば、臨海部に深井戸を集中することは避けるべきで、平野の内陸部の地下水を開発し、平野全般としての地下水取得量を増加させる開発方式をとるべきである。このような比較を他地域におよぼすためには、地下

図-9 地層水の単位面積排水量-Y値-層厚百分比(れき%)対比図

水区の規模・堆積物の厚さなどの水理地質条件を加味する必要がある。

5. 結 論

地下水の単位面積排水量は面積 1km^2 あたりの地下水の揚水量・湧出量で、単位は $\text{m}^3/\text{day}/\text{km}^2$ すなわち $[\text{L} \cdot \text{T}^{-1}]$ である。地層水の分布はある範囲の間では層状の連続性のあることが知られており、平野や盆地などの全域や一部を面積としてとれば、上記の定義を適用できる。しかし、裂か水の分布は一般に脈状とされ、その賦存機構については未知のことがらが多いので、“同一の地質の範囲は一応水理地質条件が連続である”と仮定して、見掛け単位面積排水量を定義する。

一般に、地下水の単位面積排水量 Z は定義より次式で表現できる。

$$Z = \frac{n}{A} \bar{Q}$$

ここに n : 範囲内のさく井数, または湧泉数

$\bar{Q}$: さく井の揚水量平均値, または湧泉の湧出量平均値

A : 範囲の面積

いま両対数グラフの Y 軸に Z を, X 軸に $\bar{Q}$ をとると $\frac{n}{A}$ 線群は平行線として表現でき, 上式の共点図表 “ $Z - \bar{Q} - \frac{n}{A}$ ” 図が得られる。この図は地層水であると裂か水であるとを問わず, 地下水資源の量的な比較考察を行なうのに有効である。

地層水については以下の式が成立する。

$$Z = \frac{1}{0.183 A} \sum_{a=1}^n M_a \cdot K_a \cdot s'_a \frac{1}{\log t_a / t'_a}$$

ここに Z : 地層水の単位面積排水量 $\text{m}^3/\text{sec}/\text{m}^2$

A : 範囲の面積 m^2

M_a : 範囲内の個々の井の帯水層の厚さ m

K_a : 範囲内の個々の井の透水係数 m/sec

s'_a : 範囲内の個々の井の残留降下水位 m

t_a : 範囲内の個々の井の揚水時間 sec

t'_a : 範囲内の個々の井の揚水を停止してからの時間 sec

中国四国地方の代表的な地下水区の現況地下水利用量を比較するため, 上記の単位を導入し, 各地区の水理地質条件をあわせ考察したところ, 以下のことがらわかつた。

(1) 四国瀬戸内海岸平野地区・蒜山原地区・三里地区などの地層水の単位面積排水量の大きさは, Y 値の大きさと一応の対応関係が認められる。 Y 値は, 地下水区の流域の(補正)年間降水量を地区の主要な帯水層の面積で割つた値で, 地下水の補給量と関係のある値である。

(2) 四国瀬戸内海岸平野の代表6地区について、さく井地質柱状図より層厚百分比を求めたところ、若干の例外もあるが、地層水の単位面積排水量の大きさは帯水層の発達程度、れき・砂層とくにれき層の層厚百分比の大きさと一応の相関が認められる。

(3) 裂か水を主として、大山火山地区と草間台地地区について地質別の湧泉湧出量と湧泉の見掛け単位面積排水量を比較したところ、その大きさに対応関係が認められる。

(4) 代表例の地下水の単位面積排水量は $10^4 \sim 2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{day}/\text{Km}^2$ のオーダーである。有力な地層水の存在する地帯とされ、深井戸開発の進んでいる海岸平野や盆地などと比較して、大山火山の安山岩や草間台地の石灰岩などの裂か水の値が遜色のない事実は、裂か水の開発の可能性を肯定するもので、地質別の湧泉の見掛け単位面積排水量の大きさが、開発を行なうべき場と可能性を暗示しているものと考えられる。

(5) 代表例の比較によつて、地盤沈下や塩水侵入などの地下水災害を発生している条件での地層水の単位面積排水量の大きさは、地区によつてかなりの違いのあることがわかる。四国瀬戸内海岸平野地区のあるものは日本の既往の地盤沈下地帯の値をこえているが、地下水の過剰揚水による地盤沈下は目下のところ発生していない。しかし、塩水侵入は次第に発生しつつある。四国瀬戸内海岸平野地区の今後の地下水開発に際しては、地下水災害との関連を無視できない段階にきているといえる。

(6) 四国瀬戸内海岸平野地区の代表6地区について、地層水の単位面積排水量・Y値・層厚百分比れき率の比較を行ない、今後の地下水開発の可能性の目安を検討した。

以上、地下水の単位面積排水量という概念を導入することによつて、各地下水区の地下水資源の量的な価値判断が可能となり、とくに裂か水を地層水と量的に対比することができる。また、水理地質条件をあわせ吟味することによつて、ある特定の地下水区の地下水開発の可能性、さらに将来には海岸平野の地下水災害を発生する限界を予想する目安を得ることができると考えられる。このような見地より、地下水区の履歴として地下水の単位面積排水量を把握し、各地下水区の対比をする必要性のあることを指摘しておく。

文 献

1. 清水欣一(1963): 蒜山原の地下水, 日本地下水学会誌, 46, pp. 4~7
2. 清水欣一(1964): 地下水の単位面積排水量について, 日本陸水学会第29回講演要旨,

3. 清水欣一(1964): 大山北西部の湧泉の水理地質学的研究, 応用地質, Vol. 5, №3, pp. 136~144
4. 清水欣一(1965): 高知市三里の地下水—いわゆるヘルツベルグ・レンズの淡水の水理地質について, 日本地下水学会誌, №8, pp. 8~10
5. 清水欣一(1965): 湧泉の見掛け単位面積排水量に関する考察—主としてカルスト泉の水理地質について, 応用地質, Vol. 6, №3, pp. 145~157
6. L. K. Wenzel (1942): Methods for determining permeability of water-bearing material, U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper, 887
7. C. E. Jacob (1950): Flow of ground water, Engineering Hydraulics (H. Rouse ed), John Wiley & Sons, pp. 321~386
8. D. K. Todd (1959): Ground water hydrology, John Wiley
9. J. G. Lewis, D. B. Knowles, R. H. Brown and R. W. Stallman (1962): Theory of aquifer tests, U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper, 1536-E
10. 早川松五郎(1963): 将来のさく井はいかにあるべきか, 日本地下水学会誌, №5, pp. 1~8
11. 中国四国農政局計画部資源課(1963): 予讃地区地下水調査資料, 未公表
12. 村下敏夫・野間泰二(1961): 香川県の工業用地下水源について, 地質調査所月報, Vol. 12, №11, pp. 875~884
13. 村下敏夫・野間泰二(1963): 日本水理地質図5・香川県土器川および財田川流域水理地質図・図幅説明書, 地質調査所
14. 清水欣一・和田温之(1965): 香川県三豊平野の地下水—観音寺市街周辺の塩水侵入, 日本地下水学会誌, №9, pp. 1~5
15. 四国地方総合開発審議会(1957): 四国における工業用水について
16. 村下敏夫・野間泰二(1964): 日本水理地質図6・愛媛県金生川加茂川中山川および重信川流域水理地質図・図幅説明書, 地質調査所
17. 倉持文雄(1963): 東京の地盤沈下について, 応用地質, Vol. 4, №2, pp. 59~76

- 18 総理府資源調査会事務局(1963):課題24-R・10 地下水利用に伴なう地盤沈下,農業土木研究, Vol. 30, №6, p 53
(国際カンガイ排水会議第2回資料)
- 19 工業用水調査グループ(1958):大阪市工業用地下水源調査報告～淀川水系地域調査第2報,地質調査所月報, Vol. 9, №4, pp. 211~234
- 20 蔵田延男ほか(1957):尼崎市工業用水源小規模地域調査報告～淀川水系地域調査第1報,地質調査所月報, Vol. 8, №6, pp. 281~289
- 21 蔵田延男ほか(1963):兵庫県西宮市工業用地下水調査報告,地質調査所月報, Vol. 14, №7, pp. 509~529
- 22 丸山文行(1959):新潟市附近の地盤沈下と調査,土と基礎, Vol. 17, №3, pp. 13~18
- 23 向井久一・中川耕二・春日 明(1936):新潟地方の地盤沈下について,応用地質, Vol. 4, №2, pp. 77~80
- 24 清水欣一(1963):大山の地下水～湧泉の水理地質を主として～,日本地下水学会誌, №5, pp. 12~15
- 25 清水欣一(1965):カルスト泉に関する若干の知見,日本地下水学会誌, №9, pp. 6~9
- 26 金子 良(1957):農業水文学,土木雑誌社
- 27 山口久之助(1963):鑿泉の電気検層法,昭晃堂
- 28 O. E. Meinzer (1928): Outline of ground - water hydrology. U.S. Geol. Survey Water Supply Paper, 492
- 29 山本荘毅(1962):地下水探査法,地球出版