

## 4. 地下水理と地盤沈下に関する研究

宇野一治・猿山光男

九州農政局

### 4. Studies on Hydrology of Underground Water and Ground Settlement

By

Kazuharu Uno and Mitsuo Sayama

Kyushu Agricultural Administrative Bureau, Kumamoto

#### 目 次

はじめに .....	67	2. 注入試験 .....	71
1. 地下水・地盤沈下・塩水侵入 .....	67	2.1 試験の概要および工程	
1.1 調査事項	1.2 地下水位	2.2 注入量の減少傾向	2.3 段階試験の結果
1.3 かんがい期の揚水量の推定		2.4 揚水による効果	2.5 注入井の耐圧試験
1.4 地盤沈下	1.5 地下水の水質	2.6 注入試験による周辺水位の変化	
1.6 水収支		2.7 水質の変化	2.8 注入計画

#### はじめに

佐賀県白石平野において、地下水の過剰揚水によってひきおこされた、地下水位低下、地盤沈下、塩水侵入等の被害の実態をあきらかにするため、昭和40年度・41年度にわたり種々の観測をおこなった。また、この対策として地下水かん養のため人工注入試験を実施して、その技術的基礎資料をうることに努めた。その結果について概要を報告する。

注入試験(40年度および41年度の一部)は本総合研究費により、その他の調査は、農林省および佐賀県の調査費により試験を行なったものである。なお諸種の観測は佐賀県農林部土地改良課・勝木茂雄・平川正司・注入試験は昭和水土木株式会社・溝口四郎・保利博明・とりまとめは資源科学技術研究所・柴崎達雄が主としてあたった。

#### 1. 地下水・地盤沈下・塩水侵入

##### 1.1 調査事項

地下水位の観測 平野内に分布する11井の長期測水をおこなった。そのうち8井は、自記水位計により、他の3井はテープによる定時観測をおこなった。又、夏期(かんがい期)と冬期(非かんがい期)の年間二回、一斉水位の測定をおこなった。

昭和41年度には、全域の深井戸169井のうち水位測定可能であった夏期60井、冬期63井を観測した。

地下水揚水量 昭和41年8月上旬、38井について揚程および揚水量の測定を行ない、これにより全体の井戸の揚水量を推定した。

地盤沈下の観測 10カ所の簡易沈下計により、観測をおこなった。

水質の観測 地下水位の一斉観測の際、電気伝導度をあわせて測定した。又、昭和41年度には深井戸3井について、年間の電気伝導度の変化を測定した。

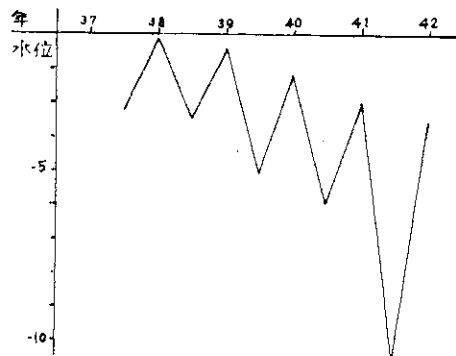


図4-1 深井戸測水による平均地下水位の経年変化

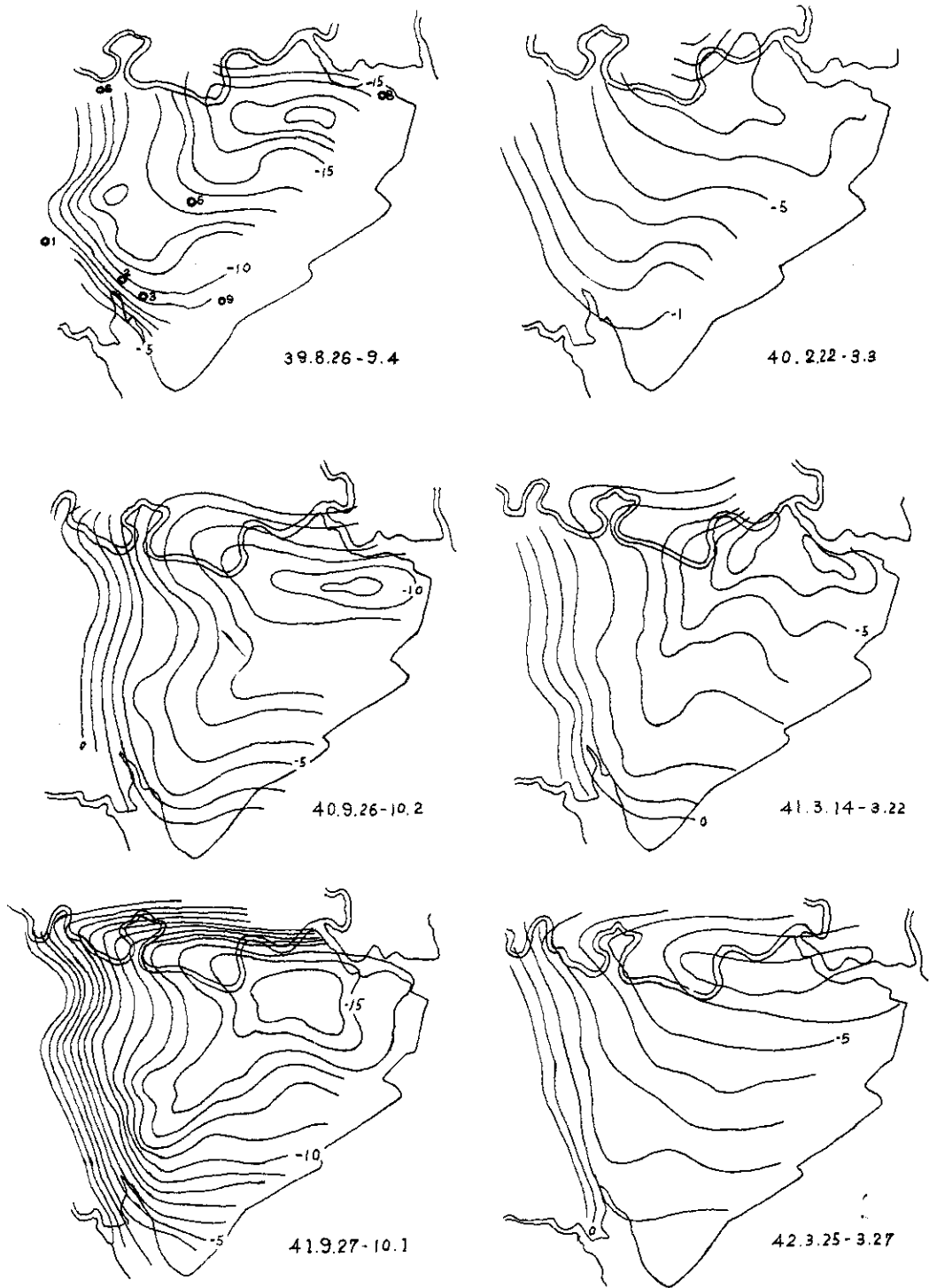


図4-2 地下水位等高線図（昭和39.8～42.3）

1. 2 地下水 位

昭和40年は、降雨にめぐまれ地下水の揚水量も割合に少なかったが、昭和41年は7月中旬以降、いちじるしい降雨がなく、7月下旬・8月上旬頃から、揚水井はフル運転を開始し、9月17日まで連続揚水を行なった。一部には自己規制が行なわれ、一部には揚水不能も生じた。揚水量も約1,500万 $m^3$ と推定され、一斉観測による地下水水位は、観測開始以来の最低を記録した。又、冬期の一斉観測によると、揚水終了後の自然かん養による回復水位は40年度同期より0.3m程度低い(図4-2)。長期観測水位についてみると、浅井戸も含むため、降雨、クリーク、潮汐、上水道井等の影響がみられるが、かならずしも原因は明瞭でなく、複雑な変化を示している。年間変化を典型的に示しているものに、No.1, No.8, No.9井がある(図4-3)

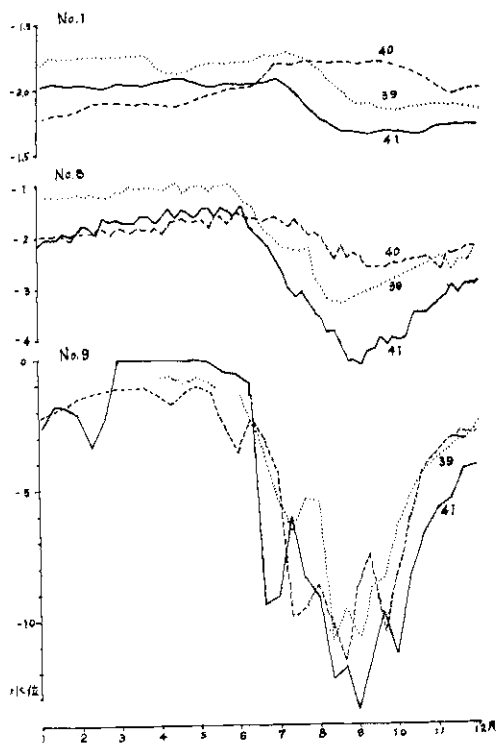


図4-3 地下水位の経年変化

過去数年来の一斉観測の平均水位をとりまとめてみると、次のようになる。(図4-1, 図4-2)

表4-1

年	37	38	39	
冬期水位		-1.18 (2.24)	-1.41 (2.12)	
夏期水位	-3.29 (8.24)	-3.45 (8.9)	-5.08 (9.4)	
	40	41	42	年平均低下量
	-2.27 (2.22)	-3.02 (3.14)	-3.32 (3.25)	0.60 m
	-5.59 (9.27)			1.79 m

( )内は観測月日を示したものであるが、このように各期とも地下水水位は年毎に低下の傾向を示している。特に夏期水位の低下は漸増傾向すら示している。

1. 3 かんがい期の揚水量の推定

地下水揚水量の把握は最も基本的であるが困難な問題である。昭和33年、35年に抽出井50井について、かんがい期間中の旬別揚水量の測定結果にもとずき、旬別の揚水量変化率表をつくり、揚水機の計画揚水能力、揚水時間から、今まで推定してきた。(昭和39年~40年)

昭和41年度は、38井につき、揚水時間前に揚水位、揚水量の測定をおこなって揚水機効率を45%とし、揚水量の時期的変化は、調査時の実測を基にして、ききとりをおこない推定した。

水道用揚水については、3井について旬別の給水率を実測し又、人口一人当たり年間使用量151 $m^3$ (全国水道施設調査)として、年間使用量100万 $m^3$ 程度と推定した。

かんがい期間中(6月~10月)の農業用、水道用揚水総量は、次のようになる。(単位万 $m^3$ )

表4-2

用途別	年次	39	40	41	備考
農業用		906.4	219.6	1495.2	41年度は従来の方法によれば1491.1
水道用		62.0	51.1	51.1	
合計		968.4	270.7	1546.3	

1.4 地盤沈下

白石平野における簡易沈下計(有明粘度層基底に基礎をおき、粘土層の圧縮を測定する)による

と地盤沈下は、年々進行しており地下水の揚水開始より急激に促進され、降雨によって地下水揚水が減少又は停止すると、沈下量も減少又は停滞の傾向を示し、地下水位の低下と沈下量とは相関的な関係がある。又、各観測箇所とも沈下量の多少にかかわらず沈下量の増大、減少の時点は、ほぼ

一致していて、特に促進される時期は、地下水の本格的な揚水開始より約1か月程度おくれ、沈下の緩慢になるのは、揚水を停止して3~4か月後である。(図4-4)。

かんがい期だけについてみれば、その沈下量は年間沈下量の約6割をしめている。又、地下水位

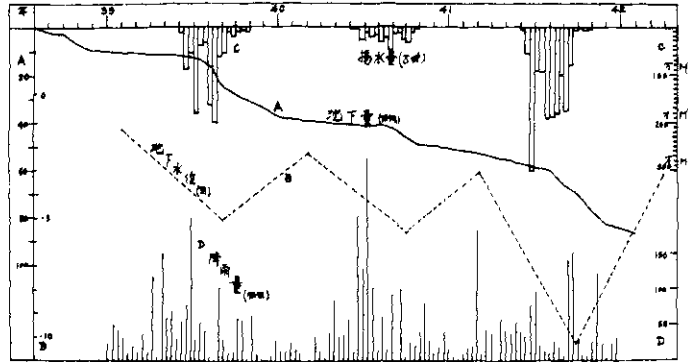


図4-4 沈下量，地下水位，揚水量，降雨量の関係

A: 沈下量 (mm), B: 地下水位 (m)

C: 揚水量 (万 $m^3$ ), D: 降雨量 (mm)

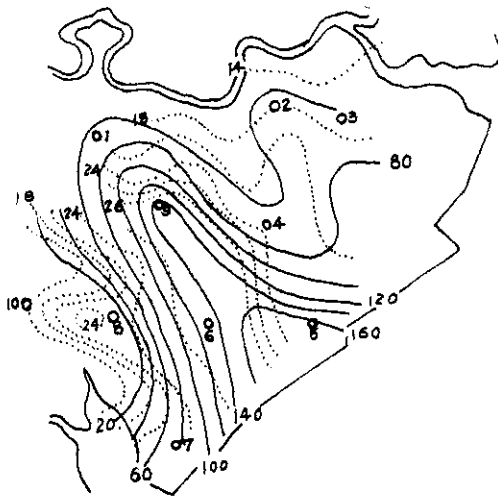


図4-5 簡易沈下計の沈下量分布(昭和38.8.4.1.1.2)○印は簡易沈下計，実線は沈下量20mm等高線，点線は有明粘土層厚2m等厚線

の高い地域では(No.8. No.10)非かんがい期の水位上昇にともない地盤は逆に上昇し、復元を示した時もある。又、昭和40年11月以降は、冬期例年以上に降雨量が多かったが、沈下の平均的進行状況は例年なみであった。勿論一部には一時停滞を示す箇所もある。

昭和38年以降10カ所の累加沈下量平均は86.3mmで、年平均沈下量は21.6mmである。最大沈下地点(No.5)では累計168.5mmを示した。沈下量の多少は有明粘土層の層厚に強く影響され、累加沈下量分布は粘土層層厚分布とよく似た形態を示している。(図4-5)

この年平均沈下量を、従来の水準測量による年平均沈下量、25.3mmと比較すると、白石平野の地盤沈下の大半が現在までのところ有明粘土の圧密によるものと考えられるが、昭和41年度の国土地理院による水準測量の結果は有明粘土層より下部の地層の圧密が急激に進行しはじめていると

とを示しているようである。

### 1. 5 地下水の水質

pH、水温、電気伝導度の一斉観測を夏期水位観測と同時に起こしたが、pHについては測定不良で失敗した。水温については、例年夏期の如く、西側の山よりが低く18℃～20℃で、干拓地域が24℃前後、中央やや東よりの白石町福田附近が最高の30℃を示している。

電気伝導度の分布形態は、昭和41年度の未曾有の揚水量にもかかわらず例年の分布とあまり変化がない。昭和40年の分布とくらべると、400  $\mu\text{mho}/\text{cm}$  の線が南部の牛屋附近では進出している。例年電気伝導度の高い、東北部の大福附近では、依然として高く、40年の1,200  $\mu\text{mho}/\text{cm}$  が41年では、1,700  $\mu\text{mho}/\text{cm}$  となっている。(図4-6)

水質の長期観測は、水質の時期的変動をとらえるために、3井について、水位と電気伝導度を測定したものである。この観測によると地下水位の変化ないし、揚水量の変化に対応してかなり顕著に塩分濃度の変化がおこることがわかった。(図4-7)

### 1.6 水収支

白石平野全体の地下水の収支関係については次式をもって考察した。

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q_r - Q_d}{AS}$$

$dh/dt$ : 単位時間あたりの水位変化量,

$A$ : 地区面積,

$S$ : みかけの貯留係数,

$Q_r$ : 単位時間あたりの自然かん養量,

$Q_d$ : 単位時間あたりの地区内揚水量,

具体的な解法としては、(1)地下水等高線図から流線網をえがき各平均水位に対する  $Q_r$  を求め、平均水位と  $Q_r$  との関係式を求める。(2)時間単位を旬として初期水位を定めて(1)の関係式から  $Q_r$  を求める。(3)  $Q_d$  の実績から  $Q_r - Q_d$  を求めると  $dh/dt$  が求められる。

試算の結果によれば一度下水が揚水されたならばそれを再補充するだけの自然かん養量は期待できない。又、1600万  $\text{m}^3$  程度の揚水に対しては自然かん養量以外に250万  $\text{m}^3$  程度の水量を人工的に注入すれば水位は復元されることになる。

### 2. 注入試験

### 2. 1 試験の概要および工程

本地域における注入試験は、昭和39年度から実施されているが、いずれも試験費の制約のため試験の準備的段階にとどまっていた。昭和41年

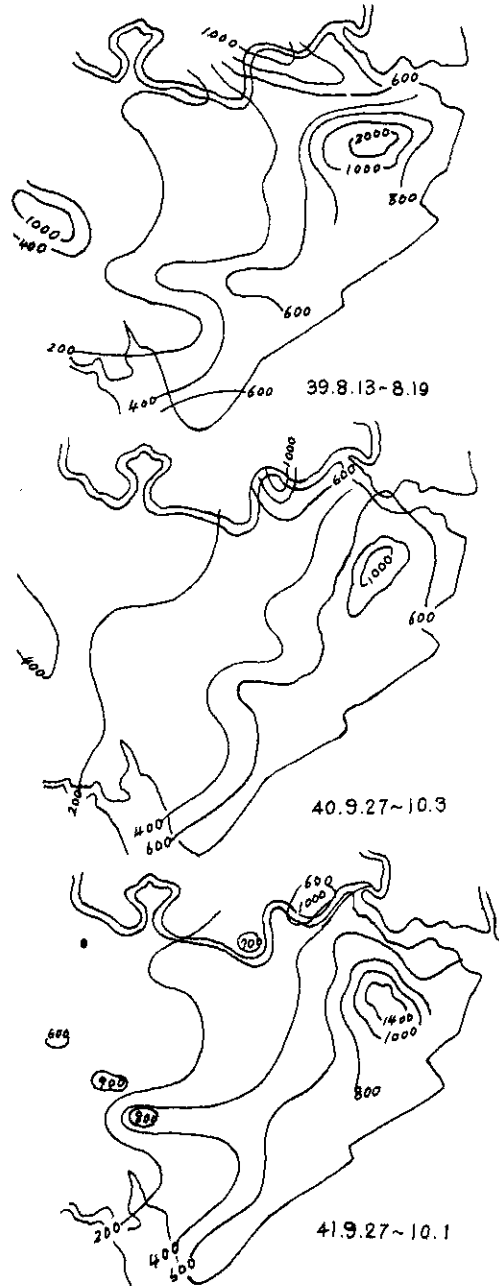


図4-6 電気伝導度等高線図(昭和39.8～41.9)  
等高線はおおむね200  $\mu\text{mho}/\text{cm}$

度においては、今までの試験結果を参考にして、やや長期間の試験をおこない、若干の資料を得た。

従来の試験では、注入水源をクリーク（39年）距離500mの既設井（40年）にもとめたが、今回は周辺井戸に対する影響を調べるため水源を、2150m離れた有明干拓9号井（No.125）に求め、既設および仮設の水路によって注入井に近接した貯水槽に導入し、これをポンプにより加圧して注入井に注入した。注入井の諸元は、次のとおりである。

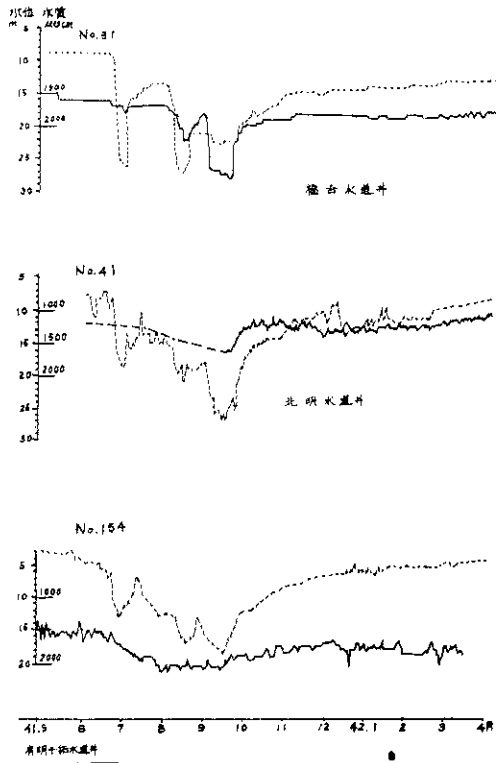


図4-7 深井戸水位変化と水質の関係

位置： 国営有明干拓地，佐賀県干拓試験場  
 場内  
 完成年月日： 昭和39年1月15日  
 深 度： 165m  
 口 径： 150% = 0~31.5m，  
 75% = 31.5~165m，  
 ストレーナー： 孔径4%，孔間隔25~30%，  
 開孔率5%，6段延67.5m  
 新設時の帯水層定数： 浸透量係数  $3.0 \times 10^{-3} m/sec$ ，  
 貯留係数  $4 \times 10^{-4}$ ，  
 注入井は、漏水防止のためグラウトおよび止水

壁を補強した。注入量は量水計により計測され、注入圧は、圧力計およびビニールパイプの水位計で測定した。周辺に対する注入の影響をみるために既設井について毎日2回の水位観測を、又干拓試験地内旧井戸で自記水位計による記録をとった。（図4-8）

- 試験工程は、次のような順序で繰返した。
- (1) 段階揚水試験
  - (2) 段階注入試験
  - (3) 注入試験（連続・断続）

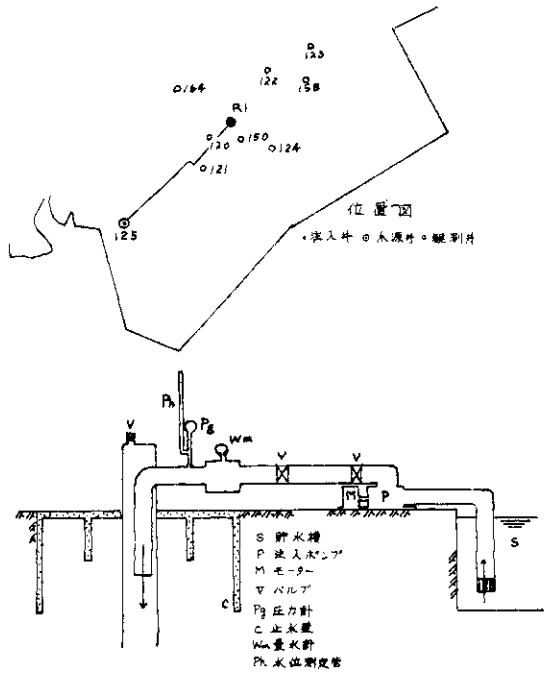


図4-8 注入試験概要

(3)の注入試験は次のように実施した。圧力は原則として0.4%とした。

- 第1回 96時間連続注入
- 第2回 15日間断続注入  
 （1日10時間注入）
- 第3回 9日間断続注入  
 （1日10時間注入）
- 第4回 4日間断続注入  
 （1日10時間注入）

（図4-9）

(4)段階注入試験

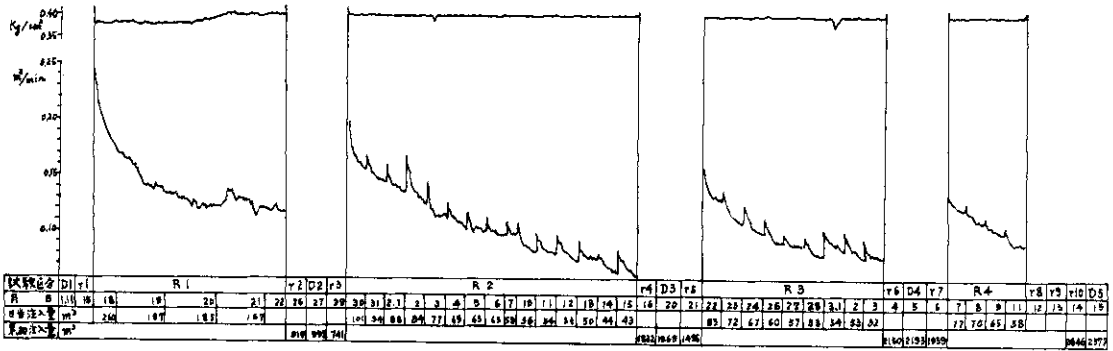


図4-9 注入試験実施工程 (R: 注入試験, D: 段階揚水試験, r: 段階注入試験)

2. 2 注入量の減少傾向

連続96時間一定圧注入試験における注入量の減少傾向は図4-10にあきらかであるが、これを指数関数として求めてみると、

$$q_t = q_0 \exp(-7.5 \times 10^{-5} t)$$

したがって累加注入量は

$$Q_t = q_0 \int_0^t \exp(-7.5 \times 10^{-5} t) dt$$

同様に断続15日、9日、4日の注入においては

$$q_t = q_0 \exp(-6.4 \times 10^{-2} t)$$

累加注入量は

$$Q_t = q_0 \int_0^t \exp(-6.4 \times 10^{-2} t) dt$$

となる。上式で  $q_0$  は初期注入量である。

以上の関係式によって累加注入量を試算すると連続注入においては、次のようになる。

表4-3

t	$q_t$	$Q_t$
1日	$0.95 q_0$	$2.050 q_0$
5日	$0.59 q_0$	$5.740 q_0$
10日	$0.36 q_0$	$9.650 q_0$
30日	$0.04 q_0$	$13.467 q_0$

また、断続注入においては

表4-4

t	$q_t$	$Q_t$
5日	$0.73 q_0$	$4.2 q_0$
10日	$0.52 q_0$	$7.5 q_0$
30日	$0.15 q_0$	$13.3 q_0$
50日	$0.04 q_0$	$15.0 q_0$

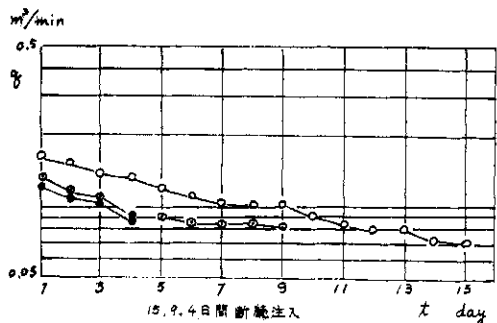
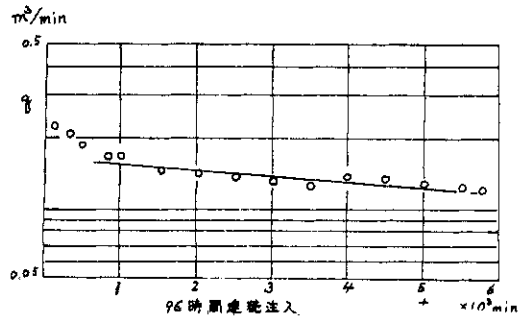


図4-10 注入量の減少状況

この試算の結果によると、かなり早く注入量がゼロに近づく注入限界に到達することになる。

### 2. 3 段階試験の結果

前後13回に亘り揚水および注入の段階試験を行なった。この結果を、図4-11の上図に示す。一般に揚水試験の水位/水量直線は図の右に、注入試験のそれは左へ片寄る傾向にある。又注入試験のうちでも揚水試験直後におこなわれたものは、右に片寄っている。これらは、揚水量が注入量にくらべて大きなことを意味し、揚水試験直後には、注入量が増加することをしめしている。

### 2. 4 揚水による効果

注入試験後、段階揚水試験をおこなって、井戸清掃作用の効果をも測定しようと試みた。図4-11の下図は、最初の揚水試験における水位低下4m時の揚水量を100%として、各段階試験の水位低下4mのときの揚水量、注入水頭4mのときの注入量を%で示したものである。揚水後の注入量は揚水前の注入量に比較して1.5~2.5倍を示し、かなりの効果が出ている。

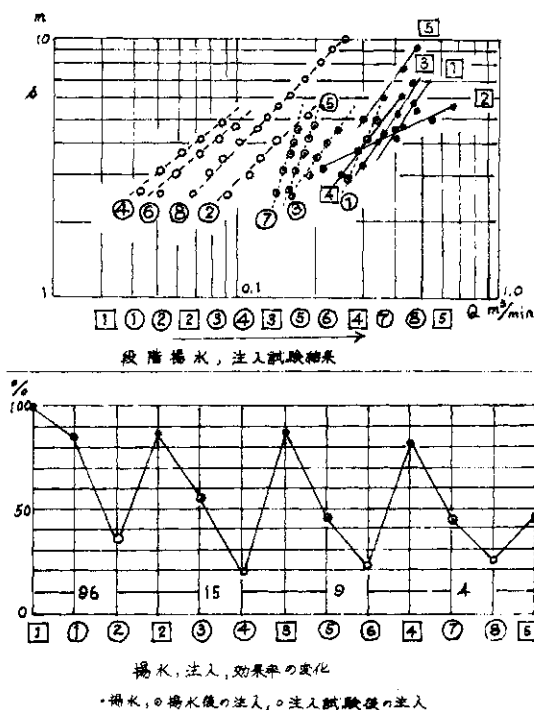


図4-11

### 2. 5 注入井の耐圧試験

注入井の注入量は、注入圧力に比例する。した

がって井戸は、出来るだけ十分な耐圧強度をもつことが望ましい。昭和40年の試験の時は、地表近く井戸を中心に1辺2mの正方形のコンクリート床を設置してあったが、0.77%の圧入で地表面に地割を生じ漏水した。昭和41年は、井壁ぞいに深度21mまで、3孔2段のグラウトを行なった後、新に6m×6m×0.15mのコンクリート床をつくり床の内側および同縁に0.5m、1.0mの遮水壁をつけた。最後の段階注入試験で0.9%の加圧で一部漏水をみたが注入圧の減少はみられず1.08%まで圧入することができた。

### 2. 6 注入試験による周辺水位の変化

周辺井戸の水位観測は、昭和39、40年度にもおこなったが、影響を確認することができなかった。41年度の結果をのべる。図4-12に注入試験前の地下水面と注入試験後の地下水面を示しているが試験前は、水面は北に傾斜する平滑な形態を示すが、試験後は、注入井を中心とした地下水位の高まりがみられ、1mの水位変動量の範囲はNE方向1.5km、EW方向0.6kmの長軸楕円形をしている。変動量は、水量の増減を直接反映するのではなくある程度ポテンシャル増として表現されるようで、この水位変化の状態をNo.122観測井について示す。

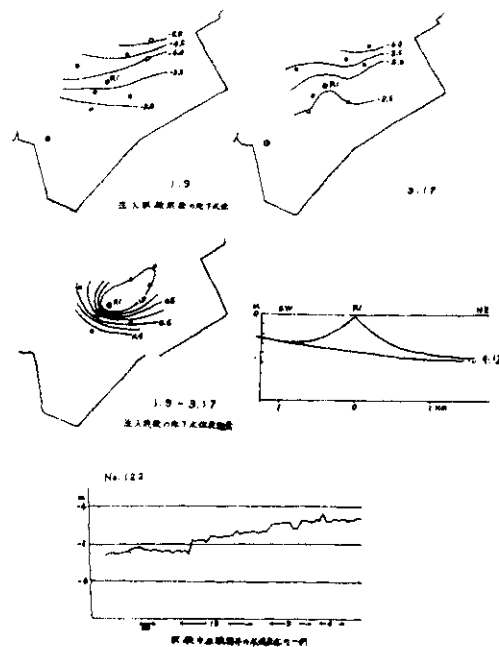


図4-12



## 2. 7 水質の変化

昭和40年度試験の失敗から、導水路の完全管理につとめたため、シルト浮遊物質の除去には成功したようであるが、導水路中での藻類の発生が著しく、それによる目づまり現象が新しい問題となった。注入井に近接した上水道水源地下水には、緑藻類がわからずに認められるだけであったが、試験直前導水路末端における注入水はすでに硅藻、緑藻、厚生動物等204個/mlを含んでいた。試験末期の注入水には藻類、緑藻、らん藻その他が274個/ml以上で種、量ともかなり多くなっている。注入試験の終了後、揚水すると揚水初期には淡黒色の水があるが、その内容はほとんど有機物の破片で一部に硅藻、緑藻がみられた。この有機物は藻類の分解したもので、目づまりの原因となっているものと思われる。

## 2. 8 注入計画

口径300mm、深度約200mの標準井を考え、従来の地下水条件を入れ、圧力水頭を0.5%とすると、初期注入量は $q_0 = 0.421 \text{ m}^3/\text{min}$ となる。これを基礎にして試算する。

初めの10日間の注入量( $Q_{n-1}$ )と次の10日間の注入量( $Q_n$ )の間には次の関係を考える。

$$Q_n = Q_{n-1} \times 0.52(1 + 0.37).$$

0.52は10日間の注入量減少率又0.37は揚水による透水量係数の増加率である。又揚水量( $Q_{pn}$ )はその前の揚水量( $Q_{pn-1}$ )に対しては次の関係がある。

$$Q_{pn} = Q_{pn-1} \times 0.86.$$

2.2節の注入量減少傾向の式を使って試算すると次のようになる。

(1) 1日10時間10日間連続注入し、その後1日10時間揚水をおこなう。これを繰返す計画でゆけば、約90日目で注入効果がなくなりその累加注入量は、 $3,759 \text{ m}^3$ となる。

(2) 1日10時間、断続注入を行い揚水をそうししない場合、80日目で注入効果がなくなり、その累加注入量は $3,902 \text{ m}^3$ となる。

(3) 1日24時間10日間連続注入、1日10時間揚水の繰返しの計画では、約140日目に注入効果がなくなり、累加注入量は、 $10,775 \text{ m}^3$ となる。

(4) 連続注入の計画では、累加注入量は極限で $5,900 \text{ m}^3$ であるから揚水の効果が認められる。いずれにせよこの試算では、注入可能量は小さい。

## 2. 9 今後の問題点

(1) この試験に使用した井戸は地質調査の目的で掘られた井戸で本格的な注入井ではない。又、この試験期間はせいぜい30日である。更に本格的な注入井による長期間の注入試験が期待される。

(2) 注入量の減少を、極少にするためにシルト等の浮遊物質の処理のほか、藻類その他の生物処理を含めた質管理をどうするかが問題である。

(3) 目づまり、加圧に対する漏水を防ぐような井戸構造の研究が必要である。

(4) 従来揚水と注入は、同一理論で解釈されていたが、揚水量と注入量の差、あるいは注入効率といわれるものの意味を明確にするための理論およびモデル実験的な研究が必要である。

## 引用文献

- (1) 九州農政局：昭和39年度農業用地下水対策予備調査、白石平野地区調査報告書
- (2) 佐賀県：昭和39年度白石平野地下水対策予備調査報告書
- (3) 佐賀県：昭和40年度有明海沿岸地下水調査報告
- (4) 佐賀県：昭和41年度有明海背後地地下水調査報告
- (5) 昭和下水道土木株式会社：「有明海北岸低地の水害防止に関する研究」地下水かん養注入試験報告書(1967)
- (6) 資源科学研究所：白石平野地下水調査報告書(1967)