福井県芦原台地の地下水

磯崎義正* 中山 康**

Ground-water of Awara Terrace, Fukui Prefecture

By Yoshimasa Isozaki and Yasushi Nakayama

Abstract

Awara Terrace consists of diluvial sand and conglomerate, which bear unconfined ground-water. The basal bed is Miocene sandstone and early Pliocene pyroclastic substances.

Several deep wells were developed for the sake of irrigation, and the resources of city water have been here looked for. A planning of such deep wells may stand in the way of irrigation owing to ground-water. An agricultural discharge of ground-water brings a recharge with time lag, while the others take water out of strata solely. This paper deals with a difference of theirs to that effect, striking a hydrologic balance by means of an intake rate, a fall of the static level, and all the withdrawal.

1. まえがき

芦原台地は深井戸によつて水田・草地を作っている洪積台地である。そこへ三国町の上水道水源井が掘られ、農業用の地下水利用に支障を生ずるおそれがでてきた。このため、北陸農政局では昭和40～42年度に電気探査・地質柱状図の収集・試掘などにより水理地質を明らかにし、注入試験も行なっている。その途中、上水道の利用方式は地下水収支のうえで、農業用のものとはかなり異なつた影響を与えるのではないかという予想を立てることができたので、ここに報告する。

なお地表地質踏査・コア分析では福井大学三浦静助教授、インテークレートは農業土木試験場椎名・小菅両技官、測水関係は福井県耕地課の御協力をいただいている。また東京教育大学山本莊毅教授、当時農地局・北陸農政局に在職した大野勝次・田中恭一・工藤 浩・川崎敏・黒川陸生の各氏の御尽力が大きい。ここに記して、謝意を表する。

2. 自然条件および土地の利用

芦原台地は福井県北東の洪積台地で、坂井郡三国町・芦原町・金津町にわたる。台地上は畑および山林、台地を刻む谷は水田として利用されている。

* 農林省北陸農政局計画部資源課

** 農林省農地局計画部資源課

年間降水量は 2,397 mm, このうち 867 mm が 5～9 月に降っているが (福井, 明 30～昭 30 の 59 年間), 昭 33.には北潟から台地上へ揚水するポンプ場が作られた。地下水については昭 34～35 に美保で M-1, M-2 が, 昭 36～37 に池上で 7 本の深井戸 (別に台地下のポンプ場) が作られた。これらによつて輪換田・畑地かんがい・芝の造成・水稻畑かんなどが行なわれている。普通畑の作目はタバコ・スイカ・牧草・バレイシヨ・カンシヨを夏作に, ダイコン・ムギ・牧草・カンラン・ハクサイを冬

図一 芦原台地位置図

作にしている。

3. 地形および地質

踏査に関することは三浦 静 (1957) によつて記述する。

3.1 地形

この台地は、北は大聖寺川をへだてて石川県の橋立丘陵に連なり、東は橘・細呂木・滝・宮谷・菅野を結ぶ線に限られる。これを縁どつて、おおむね70~100m内外の丘陵地があり、以東の地域は急に高度を増し、壮年期の山容を呈する加賀越前山地となる。南は三国・芦原・金津を結ぶ急崖をもつて福井平野となる。

この地域の段丘地形は段丘面の海拔高度、開析の度合、起伏の特徴、堆積物・土壌の性状から三つに大別できる。

ア 地形面Ⅰ (陣ヶ岡面)

この高位面は海岸寄りの三国町陣ヶ岡付近、金津町細呂木駅北側から大聖寺町周辺の丘陵頂部にかけてやや広い分布を示す。県境付近でその標高は70~100mにおよぶが、開析が相当進み、堆積物はせまい尾根筋に沿つて残つている。陣ヶ岡周辺では、比較的地形面の保存が良く、大局的には東へ傾く。それらは砂礫層からなり、その表層部は赤色化している。中位面とは15~30m内外の比高をもち、その境界は一般に明瞭である。

イ 地形面Ⅱ

この中位面は地域全般を通じて最も広い分布を示す。これを段丘構成層・基盤の性状からみると、一般

に構成層をほとんど伴わない部分、基盤はかなり平坦で通常5~10mの厚さの構成層をのせる部分、基盤の起伏が大きく、層厚20m以上の構成層からなる部分がある。しかし、地形面の標高、開析の程度・発達順序などを考慮すると、これはさらに二つの地形面に細分できる。

すなわち地形面Ⅱの標高は約20m~約60mにおよぶが、これは20~30mの下位面(地形面Ⅱa)と、35~60mの上位面(地形面Ⅱb)に区別できる。しかし、これら両面が全域を通じて常に明瞭に区別できるとは限らない。地形面Ⅱbは一般に不規則な起伏を示し、千束・坂口・柿原周辺や城新田—北潟東にかけて平坦性をもち、三国北側・芦原北方・国鉄線以東の宮谷周辺に発達する。

ウ 地形面Ⅲ

この面は海拔10~20mで、堆積物もきわめてうすく、松島安島付近、三国町付近、山室横垣付近に局部的に分布するにすぎない。

3.2 地質

台地を構成する堆積物は洪積層に属し、砂・粘土・礫からなる。ただし、地形面Ⅱにはその面にそつたロームがあり、浜坂付近には新しい砂丘砂をのせているところがある。この洪積層の下位にあたる基盤はかなり起伏にとむ。浜坂・細呂木・金津を結ぶ南北方向の線以東の台地山麓にみられる基盤岩は新第三紀中新統からなり、日本海側に傾く単斜構造を示している。これに対して、三国付近には各種安山岩・火山碎屑物を伴う米ヶ脇累層がみられる。その走向はNSないしNW-SE、傾斜はEまた

図—2 地質図 (福井大学資料)

表—1 地質層序表 (福井大学資料)

時 代	層		相	層 厚
沖 積 世	沖 積 層		砂, 泥, 砂レキ, 腐植	
洪 積 世	ロ ム		ローム, ローム質砂	1 m±
	芦 原 層	上 部 砂 層	風化帯をはさむ中粒砂	30~50 m
			粗~中粒砂 細粒砂 (周辺部はうすく泥をはさむ) 粗粒砂 (レキ多く分級不良)	
		中 部 泥 層	シルト	
			下 部 砂 レキ 層	レキまじり砂, 粘土質砂レキ
第 三 紀	第 三 紀 層		安山岩, 凝灰岩, レキ岩, 砂岩	30~50 m

図—3 断 面 図

はNEに10°~25°である。東部の中新統とは岩相・構造的にも異なり、鮮新世初期に属するものと考えられている。

電気探査は農資S型電気探査装置 EMD 11 B を使い、ウエンナーの4極法による直流測定を49点(深度最大200m)行なっている。図—3は作井の地質柱状図のほか、電気探査も考慮して作っている。

4. 水理地質と地下水の利用

図—4に示すように農業用深井戸は台地の中央部一池上周辺に集中している。そこで池上付近の水理地質を模式的に説明する。

ここでは台地の標高は約30m, 台地を作っている砂層の厚さは約90mである。地表からの深度約40mのところには厚さ約2mのシルト層をはさんでいる。砂層の透水係数は $2 \sim 4 \times 10^{-4}$ m/secで、台地の中央部の地下水位は標高約10mのところにある。

地下水の性質は不圧水であり、台地上から供給される降雨、かんがい用水がその供給源となつていることがわかる。また地下水位が上昇すると、台地の周縁の湧水として流去するので、地下水位はほぼこの標高に落ち着いているものと思われる。

5. 地下水の収支計算

耕土の直下は透水層で地下水が不圧水なので、時間の遅れはあつても、かんがい用水の垂直浸透が直接地下水に供給される。そこでかんがい用水の地下浸透量や深井戸の揚水量が水田地帯の地下水位にどんな変化を与えているかを調べてみた。

5.1 かんがい用水の地下浸透量

これはインテークレートを測定することによつて知ることができる。インテークレートは、特定の条件の下で、土壌が雨水またはかんがい水を吸収する割合であり、通常 mm/hr の単位で表わされる数値である。

図—4 深井戸位置図

表—2 深井戸一覧表

名 称	標 高	深 度	口 径	自然水位	揚水水位	揚 水 量	備 考
	m	m	mm	m	m	l/sec	m ³ /KWH
I-1	32.959	96	300	20.39			
I-2	34.509	96	300	26.88	33.36	19.7	3.66
I-3	24.352	82	300	16.41	27.61	16.98	3.22
I-4	24.281	70	300	17.00	24.03	15.16	2.80
I-5	27.791	86	300	20.64	27.73	17.9	2.97
I-6	31.439	80	300	23.37	28.24	8.82	
I-7	30.525	85	300	22.21	29.72	17.9	
J	30	90	300	21.35	28.90		
M-1	17.039	75	(200 150)	10.16	17.28	15.05	2.93
M-2	16.103	101	(250 200)	9.09	13.33	14.7	
H	37.193	63		35.14			
MK-1	14	71	340	13.52			
MK-2	14	66	350	12.74			
K-1	41.475	75	(250 150)	27.40	40	4.97	
K-2	35	92	(150 100)				
K-3	30	70	250				
S	39.5	80	190	17.36	20		
Y	41.5			30.98			
BD	6	28	150	2.1	7.2	9	
N	36	97	150	35		10	
F	25.5	80	150	20	45	15	
U-1	6.5	100					
U-2	7	100	150				
A				16.06			

測定の方法は長さ（高さ）が 30~35 cm, 内径が 28, 29, 30 cm の鉄製円筒を 1 組として使う。1 カ所の測定についてこれらの円筒を別々に土壌面にたて、およそ 20 cm の深さまで打込む。円筒の外側約 10 cm のところ

に土手を設け緩衝壁とする。水の便の悪いところや透水性の大きいところでは土手の代用として金属製の円筒を使う。いずれにしても土手の内側の土壌を乱してはならない。円筒内の土壌面に麻布またはビニル布などを置

き、おおむね水深 10 cm まで注水してから布を除去する。同時にフックゲージによる水面測定を行なう。測定の頻度は、水の浸入速度にもよるが、普通の土壌では測定開始後 5, 10, 20, 30, 45, 60 分後に行なう。

3 箇の円筒の中央値のものについて浸入曲線を作成しその定数を決定する。両対数紙の横軸に経過時間 (T) をとり、縦軸に積算浸入量 (D) をとると、ほぼ直線となる。インタークレート (I) はこれを微分する。

$$D = CT^n \quad (\text{mm})$$

$$I = 60 Cn T^{n-1} \quad (\text{mm/hr})$$

ここに D : 積算浸入量 (mm)

I : 浸入速度 (インタークレート) (mm/hr)

T : 給水開始後の時間 (min)

図—5 浸入曲線 (芦原台地平均値)

表—3 インタークレート調査表

土 壌 区 名	インタークレート
舟 津—1	$I = 554 \times T^{-0.31}$
—2	$I = 198 \times T^{-0.81}$
波 松 A—1	$I = 706 \times T^{-0.14}$
A—3	$I = 528 \times T^{-0.56}$
赤 尾—1	$I = 1,070 \times T^{-0.46}$
—2	$I = 1,270 \times T^{-0.32}$
嫁 威—1	$I = 1,060 \times T^{-0.27}$
—2	$I = 1,056 \times T^{-0.38}$
—3	$I = 1,510 \times T^{-0.32}$
山 室—1	$I = 1,580 \times T^{-0.26}$
—2	$I = 990 \times T^{-0.24}$
富 津 A—1	$I = 1,132 \times T^{-0.3}$
A—2	$I = 1,235 \times T^{-0.36}$
A—3	$I = 340 \times T^{-0.19}$
B—1	$I = 1,660 \times T^{-0.27}$

I : mm/hr T : min

C : 定数

n : 定数 (直線の傾斜度)

インタークレートは土壌の種類で異なる。とくに n の値は $0 < n < 1$ であるが、粘質であると 0 に近く、砂質では 1 に近い。しかも同じ種類の土壌でも測定時の条件で差を生ずる。池上付近の測定 2 例のインタークレートでは数値がかなり異なるので、むしろ台地全域の平均値をもつて代表させる。

インタークレート:

$$I = 993 \times T^{-0.346}$$

積算浸入量:

$$D = 25.32 \times T^{0.654}$$

単位は I : mm/hr, D : mm, T : 分である。

5.2 自然水位

かんがい期の水田地帯で地下水の自然水位がどのような変化をしめすかを知ることは、揚水していない井戸でもないかぎり不可能である。地下水位の毎日観測は M-2 および I-4 の井戸で行なつたが、M-2 では時々揚水を休止した日の測定値が得られているので、これを結んで自然水位の変化とみなした。

5.3 揚水量

地域内で揚水試験を行なつたとき、揚水量の測定とともに積算電力量計の指示目盛の進度を調べ、揚水量の電力量に対する当量を求めてみた。表—2 の備考欄に記してある数値がそれであるが、平均して $3 \text{ m}^3/\text{KWH}$ と考えてよい。したがって使用電力量から揚水量を推定することができる。

5.4 収支計算

ここでは自然水位の低下は揚水量に比例するが、同時に横方向からの供給は低下に比例して生ずる。

すなわち

$$(\text{揚水量}) - (\text{供給量}) \propto (\text{自然水位低下量})$$

$$(\text{供給量}) \propto (\text{自然水位低下量})$$

という考え方から出発している。この考えは柴崎達雄・新藤静夫・熊井久雄 (1968) と同じものである。

芦原台地では不圧水なので、これに水田からの垂直浸透という要素をいれてみた。かんがい用の深井戸で揚水を開始すると、(揚水量) - (供給量) に比例して水田地帯の自然水位が低下する。水は蒸発・蒸散・排水・台周縁の湧水となる分を除き、地下水に還元されてくる。ただし、地表面から地下水面に達する時間があるので、遅れて自然水位に影響を与える。

$$(\text{揚水量}) - (\text{水田からの垂直浸透}) - (\text{供給量})$$

$$\propto (\text{自然水位低下量})$$

$$(\text{供給量}) \propto (\text{自然水位低下量})$$

池上・美保周辺の農業用深井戸9カ所の揚水量は使用電力量検針カードから求めた。昭41.では約120万 m^3 に達している。これは月間の使用電力量から計算したが、水の方の収支計算は旬を単位としたため、揚水量を表—4の Q_d のように割り振った。垂直浸透でかん養される地下水量を Q_i 、積算浸入量を D 、遅れたものを D' 、外周からの供給量を Q_r 、自然水位の低下量を s とすると

$$\sum_i Q_i = k_1 D'$$

$$Q_r = k_2 s, \quad \sum_i Q_r = k_2 \sum_i s$$

上の2式の比例定数および D の遅れの時間の要素をさまざまに変えて、「試行錯誤」によつて三つの値を求める。つまり k_1 , k_2 , および「遅れ」を変えて

$$Q = \sum_i Q_d - \sum_i Q_i - \sum_i Q_r$$

の Q の変化が s のそれと同じ形状になるようにする。その結果が表—4である。ここに、 $\sum_i$ は始めから i 番目の旬までの累計を表わすものとする。 Q_d , Q_i , Q_r , Q の単位は m^3 , D' は mm , s は m である。

「試行錯誤」といっても概略の値を求めてから計算を始めることができる。4月下旬から8月下旬までの $\sum_i Q_d$, D' , $\sum_i s$, s を1行置きに選んで、おのおの x_4 , x_1 , x_2 , x_3 と表わす。

	x_4	x_1	x_2	x_3
	7×10^3	0	0.3	0.2
106	"	0	1.1	0.5
270	"	21×10^3	3.6	1.4
466	"	33	"	6.7
660	"	43	"	9.9
862	"	52	"	13.7
1,074	"	60	"	18.5

これらの数値の組合わせから

$$k_3 x_3 = x_4 - k_1 x_1 - k_2 x_2$$

という係数 k_1 , k_2 , k_3 の入った回帰式を求める。ここで、 k_1 を例にとると

$$\sum (x_4 - \bar{x}_4)^2 = 938,175 \times 10^6$$

$$\sum (x_1 - \bar{x}_1)^2 = 3,443 \times 10^6$$

$$\sum (x_2 - \bar{x}_2)^2 = 273.61$$

$$\sum (x_3 - \bar{x}_3)^2 = 4.03$$

$$\sum (x_4 - \bar{x}_4)(x_1 - \bar{x}_1) = 55,832 \times 10^6$$

$$\sum (x_4 - \bar{x}_4)(x_2 - \bar{x}_2) = 15,956 \times 10^3$$

$$\sum (x_4 - \bar{x}_4)(x_3 - \bar{x}_3) = 1,856 \times 10^3$$

$$\sum (x_1 - \bar{x}_1)(x_2 - \bar{x}_2) = 939 \times 10^3$$

$$\sum (x_1 - \bar{x}_1)(x_3 - \bar{x}_3) = 114.6 \times 10^3$$

$$\sum (x_2 - \bar{x}_2)(x_3 - \bar{x}_3) = 31.15$$

を計算し、 k_1 が定まる。

$$k_1 = \frac{\begin{vmatrix} 55,832 & 939 & 111.6 \\ 15,956 & 273.61 & 31.15 \\ 1,856 & 31.15 & 4.03 \end{vmatrix} \times 10^6}{\begin{vmatrix} 3,443 & 939 & 114.6 \\ 939 & 273.61 & 31.15 \\ 114.6 & 31.15 & 4.03 \end{vmatrix} \times 10^6} = \frac{173,100,000 - 172,900,000}{10,540,000 - 10,520,000} = 10$$

この場合、 k_1 の精度はあまりよくないので、 k_1 を0.5刻みに変えると、 $8.5 < k_1 < 9.0$ であることがわかる。表—4はこれから $k_1 = 8.75$ として作成した。

D' の遅れの時間については s の変化から比較的容易に見当をつけることができる。芦原台地ではかような手数をかけているが、将来地下水位定点観測が行なわれ、 s の変化が正確には握できれば、回帰式を出さなくても、 (x_4, x_1, x_2, x_3) の組合わせを三つとり、連立方程式を1回解いて、不圧水における k_1 , k_2 , k_3 を決定できることになる。これらは、現況の地下水利用のもとにおける、帯水層単元の特性を表わす。

表—4からは次のようなことがわかる。

- (1) かんがい期の Q_i の総計は62万 m^3 となるが、 Q_d の約50%にあたる。
- (2) かんがい用水の還元には約2旬のおくれがある。
- (3) かんがい期(揚水期)の Q は水田における純消費水量と考えられ、

$$Q = D_2(\text{地表流去}) + G_2(\text{地下水流去}) + E(\text{蒸発散量})$$

に分けられる。構成地質から $D_2 = 0$ とみなすと

$$Q = G_2 + E$$

となる。 E を中川昭一郎(1967)によつて推定すると、面積600haにつき約25,000~35,000 $\text{m}^3/\text{日}$ となり、 Q に対する E の割合は100~80%となる。すなわち、地区外(台地外)への地下水流去量は非常に小さく、せいぜい20%程度ということができる。

6. 結論と問題点

かようにみえてくると、池上付近の地下水はかんがい用として揚水されている限り、その約50%は還元されてゆく水量に相当する。したがって、上水道のようにその外で利用するものとは、地下水に与える影響がかなり異なるといつてよいであろう。

次にここで扱った計算についての問題点としては

- (1) 自然水位

井戸の休止している日の水位をとつたが、前日まで揚水した影響が全くなくなっているとはいえない。

- (2) 降雨量

表—4 地下水収支計算表

	Q_d	$\sum_i Q_d$	D'	s	$\sum_i Q_i$	Q_r	$\sum_i Q_r$	Q
4	0 0 7,290	0 0 7,290	0 0 0	0.0 0.1 0.2	0 0 0	0 1,300 2,600	0 1,300 3,900	0 3,390
5	21,000 78,000 85,500	28,290 106,290 191,790	0 0 13,250	0.3 0.5 1.1	0 0 116,000	3,900 6,500 15,730	7,800 14,300 30,030	20,490 91,990 45,760
6	78,000 98,100 98,100	269,790 367,890 465,990	20,800 27,200 32,900	1.4 1.5 1.6	182,000 238,000 288,000	18,200 19,500 20,800	48,230 67,730 88,530	39,560 62,160 89,160
7	98,100 96,000 105,900	564,090 660,090 765,990	37,900 42,700 47,200	1.6 1.6 1.7	332,000 374,000 413,000	20,800 20,800 24,310	109,330 130,130 154,400	122,760 155,960 198,550
8	96,000 101,400 111,000	861,990 963,390 1,074,390	51,500 55,600 59,800	2.1 2.3 2.5	451,000 487,000 523,000	27,300 29,900 35,750	181,740 211,640 247,390	229,250 264,750 304,000
9	101,400 0 0	1,175,790 	63,600 67,200 70,900	2.3 1.8 1.4	557,000 588,000 620,000	29,900 23,400 18,200	277,290 300,690 318,890	341,500 287,100 236,900
10	0 0 0	 	 	1.2 1.1 1.0	 	15,600 14,300 14,300	334,490 348,790 363,099	221,300 207,000 192,700
11	0 0 0	 	 	0.9 0.8 0.8	 	11,700 10,400 10,400	374,790 385,190 395,590	181,000 170,600 160,200
12	0 0 0	 	 	0.7 0.7 0.7	 	9,100 9,100 10,010	404,690 413,790 423,800	151,100 142,000 131,900
1	0 0 0	 	 	0.7 0.7 0.6	 	9,100 9,100 7,800	432,900 442,000 449,800	122,890 113,790 105,990

降雨量については、有効雨量は要素としてとり入れられるべきであり、砂丘地の地下水ではこれがかなり大きい。

(3) 水位と水量

容水盤の水位による面積の変化、有効空隙率の深度による変化などにより

$$\frac{\partial Q}{\partial s} = \text{const.}$$

が恒等式として扱えるかどうか。

などの問題点を残している。

参 考 文 献

三浦 静 (1957): 福井県加越台地の地質第1報(特に新第三系の層序について) 福井大学学芸紀要Ⅱ自然科学7号5集

市川 渡・糸野義夫・山崎正男 (1961): 福井県東尋坊松島地区地質調査報告書

山本莊毅 (1962): 地下水探査法 (地球出版)

北陸農政局 (1967): 坂井北部 (土地利用, 畑地かんがい, 土じょう, 客土試験)

中川昭一郎 (1967): 水田用水量調査計画法 (畑地農業振興会)

柴崎達雄・新藤静夫 (1968): 地下水の水収支 第1回 水文地質に関するシンポジウム

柴崎達雄・熊井久雄 (1968): 被圧地下水盆の水収支—とくに佐賀白石平野を例にして 地質雑 Vol. 74, No. 3, pp. 165—176

北陸農政局 (1968): 農業用地下水調査地下水対策予備調査報告書芦原台地地区

農地局 (1969): 土地改良事業計画設計基準(案)第2部第1篇第4章畑地かんがい