

新島の地下水についての調査と解析

OBSERVATION AND ANALYSIS OF THE GROUND
WATER IN NIJIMA ISLAND本間 仁*・荻原国宏**・新藤静夫***
By Masashi Hom-ma, Kunihiro Ogihara and Shizuo Shindo

1. はじめに

われわれは1972年度に海岸地下水の問題として非常に興味深い、島における水収支問題を扱う機会を得て、現地調査とそれらの資料についての解析を行った。本論文はこれらの調査、解析のうち特に海岸地下水の問題として興味深い水収支の問題を、2層流地下水として扱った数値計算の部分を中心としてまとめたものである。

対象とした場所は東京都下新島の本村地区である。ここには3本の簡易水道水源井が存在し、平常時で400 m³/日、夏期ではその3倍の1100 m³/日の地下水が揚水されている。そのほかに250本余りの自家用の浅井戸があって、夏の需要増大期には150本程度の井戸が補助水源として利用されている。そのほかに農業用井戸3本により150 m³/日の水が揚水されている。このような状態で簡易水道井戸の地下水水面は-5 m(海拔)にも達している。現状では海水の混入がみられていないが、はたしてこのような状況が海岸地下水の場合で可能なのか、地質学的な特殊な状況があるのかなどについて面白い問題が含まれている。

2. 新島本村地区の地下水、降雨そのほかの現況について

この地区の地下水の状況および地質的な状況、降雨滲透状況、蒸発散量の観測等16項におよぶ観測、測定を約1年間にわたって行った。そのうちの主要のものを次にまとめておく。

(1) 透透能, 透水係数

* 正会員 工博 東洋大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 東洋大学助教授 工学部土木工学科
*** 理博 東洋大学講師 工学部土木工学科

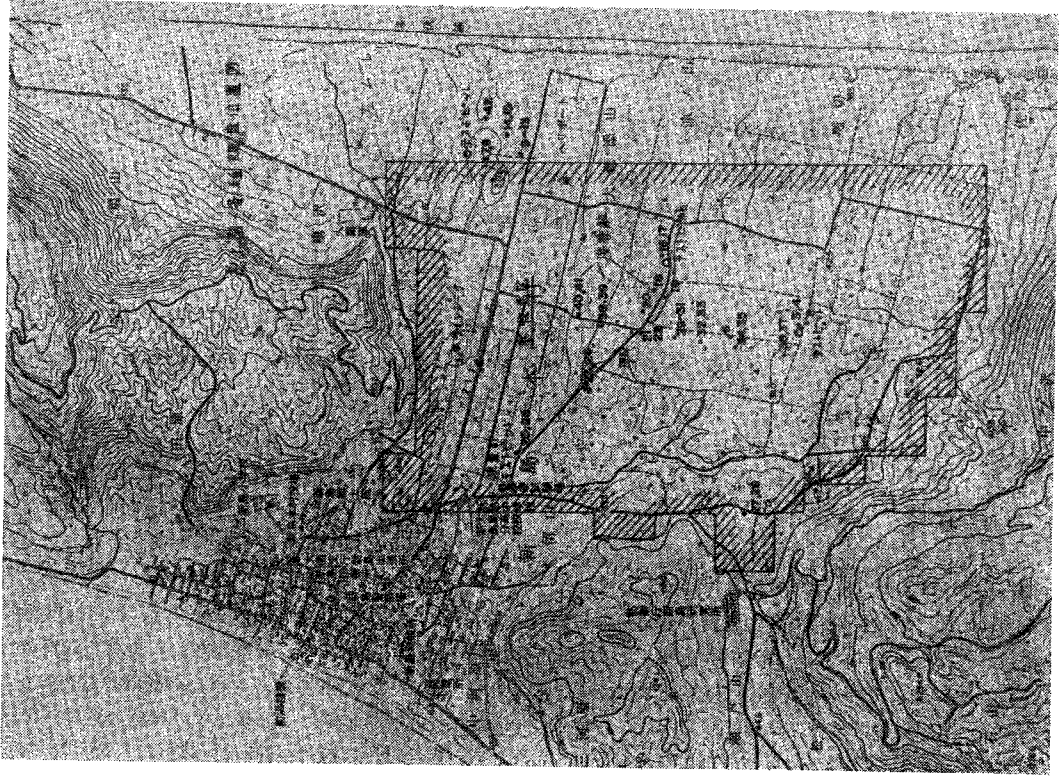
図-1(a)に示されているNo. 1~42の各地点において透透能試験(内径20 cm, 長さ50 cmの鉄管を土中に差し込み、これに水を注入し時間観測を行った)の結果0.4~30 mm/分の終期透透能の結果を得た。このことよりもっともしみ込まない地点でも24 mm/時の降雨までは地下に透透することがわかる。またこの地域(通称白ママ層)の透透係数について、室内定水位法による方法および現場における井戸による実験とを行った結果 $1.5 \times 10^{-3} \sim 1.9 \times 10^{-2}$ cm/秒(室内), $1.85 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-3}$ cm/秒(室外)程度の値を得た。室外の場合のほうが小さい値を示しているが、白ママ層内に存在する薄層をなしている粘土層に影響されているものと考えられる。

(2) 貯留性試験

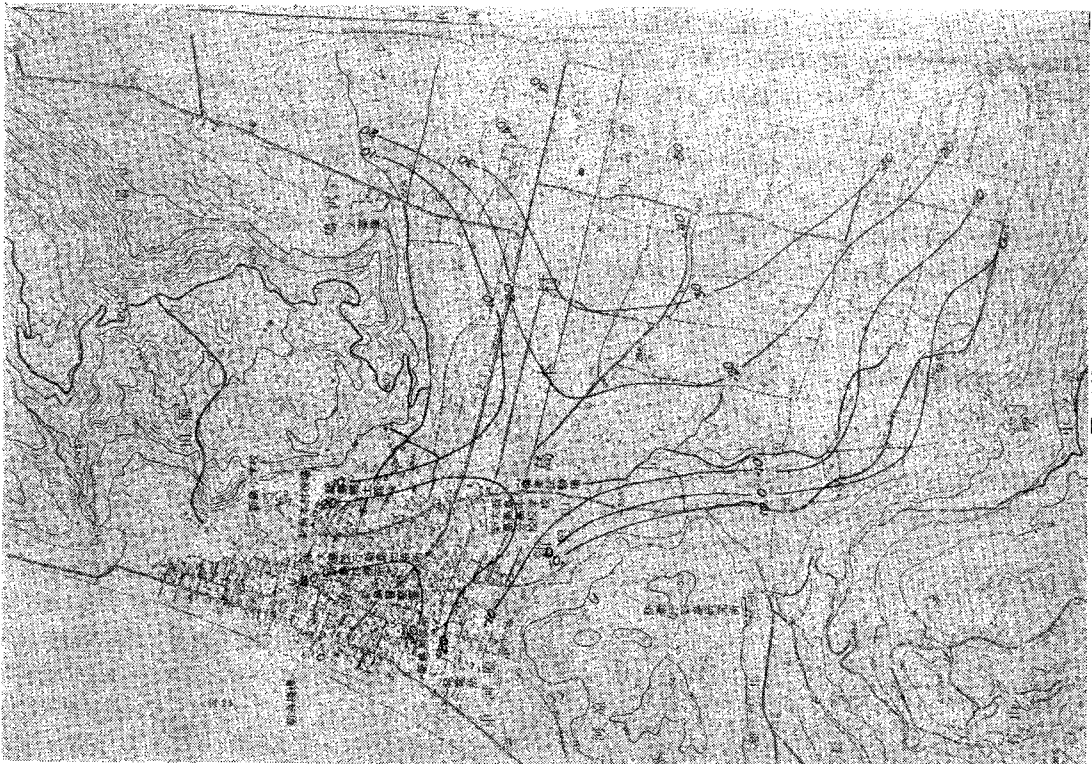
白ママ層は吸水性が大きく、またその割に透透性が大きいので帯水層としては非常にめぐまれた性質を持っている。これを量的に把握するために有効空け率(貯留係数とほぼ同義)を測定した。資料は28地点より100 cc容量の採取管に不攪乱試料をとり、土壌水分測定(PF試験)¹⁾を行った。その結果、有効空け率8.9~35.7%(平均15.69%)の値を得た。

(3) 深井戸について

この地区内の深井戸は先に述べたごとく簡易水道用1~3号、農業用1~3号の6本の井戸がある。これらの井戸の大きさおよび水位についての諸元は表-1に示されている。この表をみて目立つ事実は、簡易水道用の井戸の水位が井戸完成時(45年)より2年後に約6 mも低下していることである。なお同表中の水位は地表よりの深さで示されている。また揚水能力を示す比湧出量(水位低下1 m当りの揚水量)をみると簡易水道の3本が非常に大きな値を示している。このことは逆に理解すると、水位が低下しにくいことを示している。事実揚水開始後一時期までに水位が急激に低下して、以降一定水



図一(a)



図一(b)

表-1 井戸に関する諸元

名称	施工年(年)	口径(mm)	深度(m)	施工時自然水位(m)	昭和47年9月2日(m)	昭和47年9月9日(m)	比湧出量(現在)(m ³ /d/m)	標高(m)
簡水1号	45	300	34.0	23.93	29.20	29.195	18 035.7	24.669
簡水2号	45	300	30	20.25	26.60	26.78	8 521	20.825
簡水3号	45	300	38.5	27.20	34.50	34.565	28 056	28.568
農水1号	41	700	43.0	41.00	41.00	40.22	346	42.32
農水2号	43	300	59.9	41.70	41.80			45.201
農水3号		700	26.0	23.448	23.00	22.96	1 336	24.488

位の状態が続いていることからわかる。しかし、井戸完成時の比湧出量の値が 415~808 m³/日/m の値で、現在の農業用水の井戸のそれと同じ程度であったことと、現在の状況を比較すると非常に興味深い問題が含まれているようである。

なお、これらの井戸およびほかの浅井戸についても、日記水位計を取りつけ、長期の水位変動の記録を取った。また一方、井戸の非定常揚水試験も行ったが、これについては有効な結果は得られなかった。

(4) 降雨による観測

降雨の継続観測および簡易ライシメーター²⁾を設置して、地中への透過量および蒸発散量の測定、さらに長期にわたる地下水位変化と降雨量の関係等によって、地下水への降雨の補給の割合を示す透過率の推定を行った。

新島の測候所の 20 年間の月別蒸発量が求められている(表-2)。この値より蒸発散量を求め、降雨に対する

比をとると 63% となる。したがって、流出量と浸透量の和が 37% となる¹⁾。

またライシメーターの観測より得られた透過量の降雨に対する割合は、表-3 に示したとおり、降雨状況によって異なっているが 17~46% であり、全降雨量に対する全透過量で考えると 33% となっている。したがって、残りの 67% が流出と蒸発散量である。またこの観測期間中の降雨量、蒸発散量を用い、土湿不足の最大を 30 mm とし、さらに流出は透過能試験値から 24 mm/時以上の降雨時のみ発生するとして水収支計算をし、透過し得る水量を推定した結果、全透過量の降雨量に対する割合は 53.5% となる。この値は一般にいわれている値(約 30%) よりかなり高いのは土湿不足、つまり浸透が開始されるまでに、土層中に吸収される水量の最大値を少な目にみたためと考えられる。なお別に長期間にわたる地下水位の変化状態(図-2 中の折線)と降雨の関係(図-2 中の棒線)より浸透率を求めると 45% となった。

これらの観測と同時に表面流出率を求めるために、クリティカル・フローメーターおよび三角堰による流量観測も行った。十分なデータを得ることはできなかったが、33 mm の降雨に対し 0.043 mm (8月20日)、および 33.5 mm に対し 0.2 mm (10月20日)の2つの観測値を得た。これから流出率は非常に小さいことがわかる。このことは島に川が見当たらないことからもうなづける。

(5) 地下水の水質

この地区の井戸水の電気伝導度、水温、水質一般についての試験を行った結果、電気伝導度は 300 μV/cm~600 μV/cmの値を示し、部分的に汚染の影響と思われる高い値を示す所があるが、内陸で小さく海岸で大きな値を示している。また温度でも同様な傾向を示し、内陸で水温が高く、海岸で低い値を示している。

また pH の値は全体としては微弱酸性を示しているが簡易水道水源井、農業水源井はこれに反してややアルカリ性に片寄った値を示している(表-4)。

表-2

蒸発量(新島測候所)(1946-1965 平均) mm/月											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
120	107.8	129.9	133.9	137.5	125.0	166.7	179.3	140.3	116.6	105.6	122.8
蒸発散量 (mm)											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2.7(日)	2.7	3.5	3.8	4.3	4.1	6.0	6.4	5.2	4.2	3.5	3.4

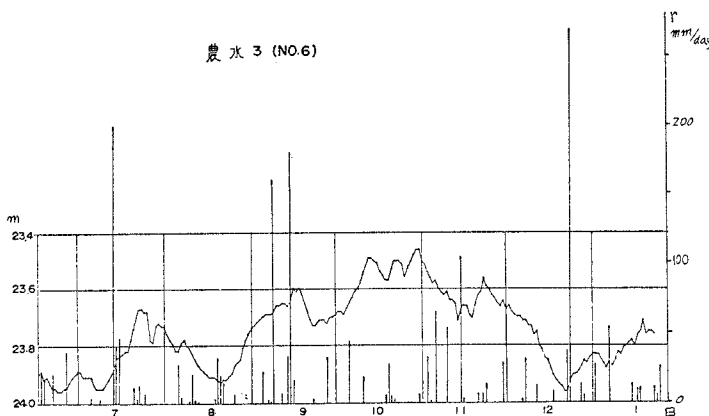


図-2

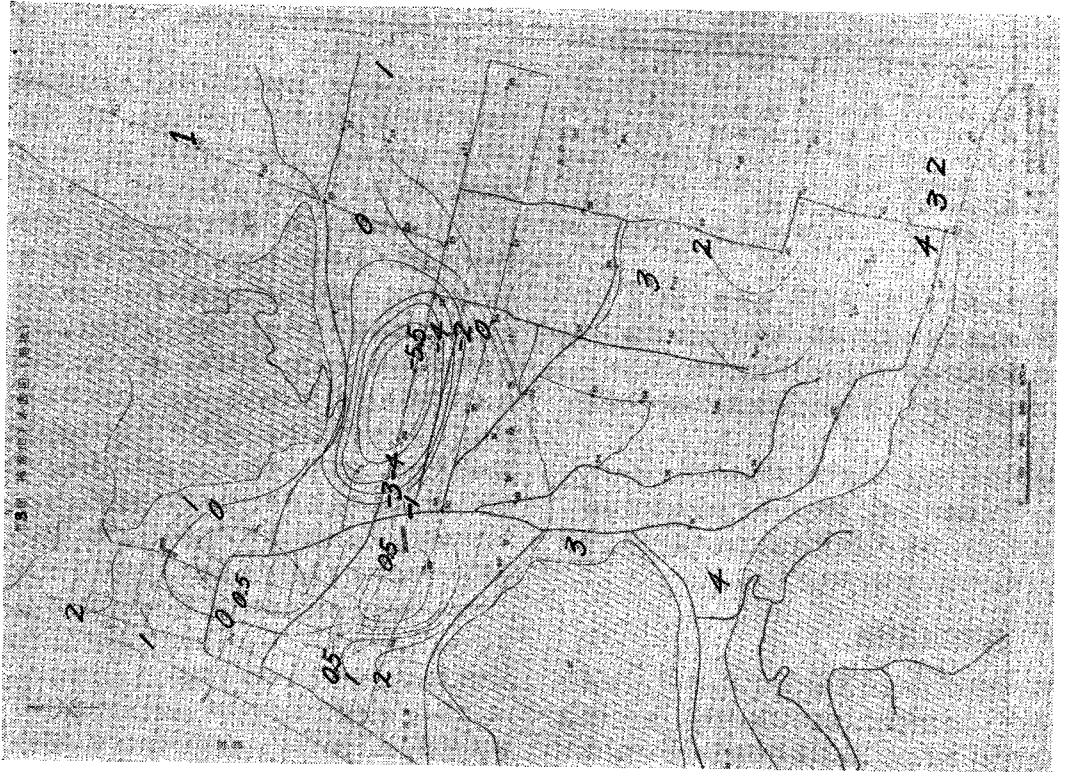


図-3

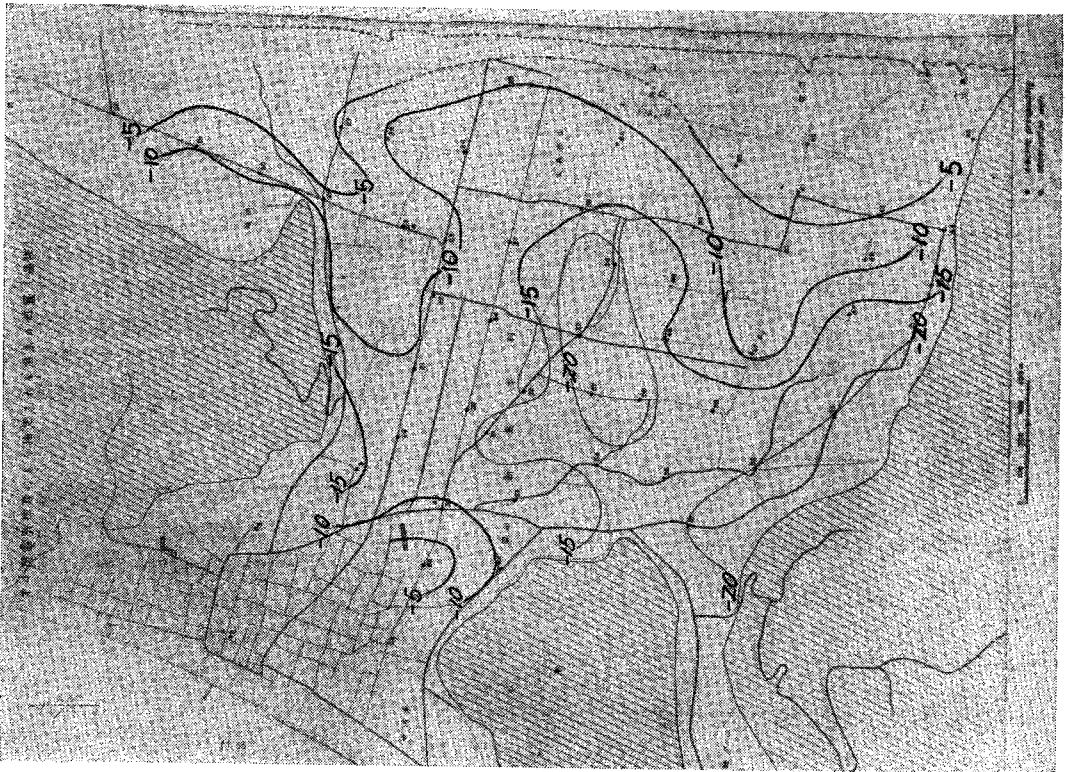


図-4

表-3 実測値による滲透量

降 雨		滲 透		降 雨		滲 透	
日 付	降雨量 (mm)	日 付	滲透量 (mm)	日 付	降雨量 (mm)	日 付	降雨量 (mm)
9月 5日	23.0	9月 11日	0.08		95.0		30.76
7	2.0	12	0.6				32%
8	1.5	13	1.5	10月 31日	7.5	11月 3日	5.88
9	160.0	14	9.12	11月 3日	33.5	4	7.40
12	8.5	15	25.48	4	1.0	5	4.88
14	33.0	16	12.74	6	65.0	6	23.40
15	178.5	17	9.84			7	5.5
16	16.5	18	1.52			8	1.42
		19	0.2			9	0.72
		20	42.20		107.0		49.20
		21	11.98				46%
		22	2.08	11月 10日	52.5	10	14.76
	423.0		117.34			11	6.22
			28%			12	1.76
9月 28日	32.0	10月 1日	0.36			13	0.48
29	0.5	2	0.04			14	0.24
10月 6日	44.0	3	0.02		52.5		23.46
11	18.5	6	17.06				45%
		7	4.82				
		8	1.52	11月 15日	103.5	15	6.28
		9	0.68	16	2.5	16	8.60
		10	0.42			17	2.12
		11	1.66			18	0.04
		12	2.80				
		13	0.94		106.0		17.44
		14	0.34				17%
		15	0.10				

全降雨量に対する全滲透量の割合 33%

(6) 地下水面および想定海水面

地下水面の位置および海水の位置を推定するために、この地域に 66 の地点を選び、電気探査を行った。この結果をもとに地下水面および海水の位置を求め、等水位線を引いたものが図-3,4 である。いずれも平均海面よりの上 (+), 下 (-) で示している。なお図-3,4 中に書かれている黒丸および数字番号は探査地点を示す。

3. 水収支計算に使用する式

現地における実測値に基づいて地下水の水収支計算を行い、現地がどのような状況にあるのか、また将来においてどのようなことが予想されるかについて計算を行うことにした。その前に島中央部に水収支計算ブロック (222×10⁴m²) を設定し、7月~12月の6カ月間の地下水位変化より水収支の概況を検討したところ (2層流の扱いはしていない)、この地区の地下水涵養量の約 10% が水源として利用されているにすぎず、その 90% は海へ流れていることがわかった。このような状態でも図-3 に示されるごとく局部的には地下水面が海面より低い所があることを示している。したがって、2層流としての水収支計算を行わなければ実態はつかめないことが

わかり、以下のような解析を行った。

(1) 基礎方程式³⁾

図-5 のごとく海面に x 軸をとり、地下水面までの高さを z 、海水面までの深さを h_1 とし、不透水層と海面との深さを H_3 とすると、地下水の流れを Darcy の法則に従う準一様流とすると、流速 v_1, v_2 は

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= -\frac{k}{w_1} \left(\frac{dp_1}{dx} \right) \\ v_2 &= -\frac{k}{w_2} \left(\frac{dp_2}{dx} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

圧力は静水圧分布を仮定すると

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= w_1(\zeta + z) \\ p_2 &= w_1(\zeta + h_1) + w_2(z - h_1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

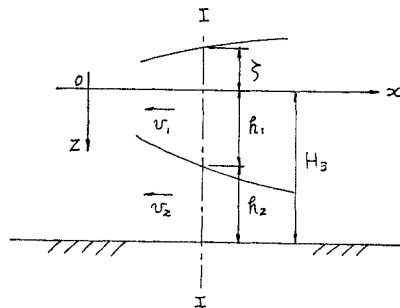


図-5

表-4 水質分析値

観測井 番号	採水時地 下水面標 高 (m)	pH	RpH	導電率 μS/cm 18°C	M-アル カリ度 (CaCO ₃ ppm)	全硬度 (CaCO ₃ ppm)	炭酸塩 硬度 (CaCO ₃ ppm)	非炭酸塩 硬度 (CaCO ₃ ppm)	カルシウ ム硬度 (CaCO ₃ ppm)	マグネシ ウム硬度 (CaCO ₃ ppm)	Ca ⁺⁺ (ppm)	Mg ⁺⁺ (ppm)	Ca ⁺⁺ / Mg ⁺⁺ (重量比)	HCO ₃ ⁻ (ppm)
1	2.13	6.4	6.9	441	29.0	62.5	29.0	33.5	24.0	38.5	9.6	9.4	1.026	35.3
2	—	6.6	6.9	351	32.9	71.0	32.9	38.1	26.5	42.5	11.4	10.3	1.104	40.1
4	—	6.1	6.4	466	23.4	94.0	23.4	70.6	46.5	47.5	18.6	11.5	1.611	28.5
5	—	6.4	6.7	316	31.7	48.5	31.7	16.8	22.5	26.0	9.0	6.3	1.425	38.7
6	—	6.2	6.6	441	27.3	100.5	27.3	73.2	51.5	49.0	20.6	11.9	1.730	33.3
7	-0.54	6.3	6.8	516	43.4	124.0	43.4	80.6	57.5	66.5	23.0	16.2	1.423	53.0
8	-0.45	6.1	6.5	361	24.0	72.0	24.0	48.0	37.0	35.0	14.8	8.5	1.740	29.2
9	0.35	6.3	6.7	413	27.9	75.5	27.9	47.6	40.5	35.0	16.2	8.5	1.905	34.0
10	0.07	6.0	6.5	501	34.0	81.5	34.0	47.5	46.0	35.5	18.4	8.6	2.133	41.5
11	—	6.7	7.0	404	39.0	83.0	39.0	44.0	27.5	55.5	11.0	13.5	0.816	47.6
12	-0.73	6.7	7.0	359	37.9	74.0	37.9	36.1	38.0	36.0	15.2	8.7	1.738	46.2
13	—	6.2	6.7	430	36.8	85.5	36.8	48.7	42.5	43.0	17.0	10.4	1.627	44.8
14	—	6.5	6.6	326	39.0	57.5	39.0	18.5	36.5	21.0	14.6	5.1	2.861	47.6
16	-0.08	6.1	6.9	481	47.9	111.0	47.9	63.1	56.5	54.5	22.6	13.2	1.706	58.4
17	0.51	5.9	6.6	190	20.6	26.5	20.6	5.9	12.5	14.0	5.0	3.4	1.470	25.1
18	0.22	5.6	BCG 6.3	521	33.4	96.0	33.4	62.6	51.0	45.0	20.4	10.9	1.866	40.8
19	—	6.9	7.1	158	57.9	50.0	50.0	0	32.0	18.0	12.8	4.4	2.926	70.7
20	-0.81	6.7	7.1	401	50.1	103.0	50.1	52.9	32.0	71.0	12.8	17.3	0.742	61.2
21	-0.86	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	2.18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23	—	6.1	6.7	351	45.7	82.5	45.7	36.8	30.0	52.5	12.0	12.8	0.941	55.7
24	-0.15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	—	6.4	6.8	403	49.6	85.5	49.6	35.9	42.5	43.0	17.0	10.4	1.627	60.5
無番	—	6.7	6.9	242	25.1	60.5	25.1	35.4	30.0	30.5	12.0	7.4	1.619	30.6
無番	—	7.4 PR	7.4 PR	262	36.8	56.0	36.8	19.2	17.5	38.5	7.0	9.4	0.748	44.8
農 1	—	7.4 7.7	7.7	216	43.4	56.5	43.4	13.1	22.0	34.5	8.8	8.4	1.050	53.0
農 2	—	7.4 8.4	8.1	181	53.5	45.0	45.0	0	33.0	12.0	13.2	2.9	4.527	65.2
農 3	—	7.4 7.5	7.4 7.5	281	42.9	57.0	42.9	14.1	24.5	32.5	9.8	7.9	1.241	52.3
水 1	—	7.0 7.3	7.0 7.2	230	27.9	35.5	27.9	7.6	8.0	27.5	3.2	6.7	0.479	34.0
水 3	—	7.3 7.4	7.4 7.4	301	44.6	67.5	44.6	22.9	19.5	48.0	7.8	11.7	0.669	54.4
水 3	—	7.4 8.0	8.0	225	59.6	61.0	59.6	1.4	28.5	32.5	11.4	7.9	1.443	72.7
湧水 1	—	6.9	6.9	234	20.6	33.5	20.6	12.9	7.0	26.5	2.8	6.4	0.435	25.1

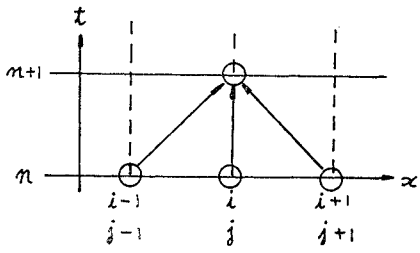
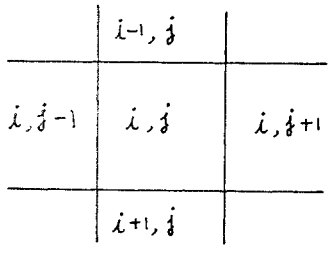


図-6

$w_1/w_2 = \epsilon$, w_1, w_2 はそれぞれ淡水, 海水の単位重量である。これらの式を使って図-5 の I-I 断面を通過する流量を求めると

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= -k \cdot B(h_1 + \zeta) \frac{d\zeta}{dx} \\ Q_2 &= -k \cdot B h_2 \left[\epsilon \frac{d\zeta}{dx} + (1 - \epsilon) \frac{dh_2}{dx} \right] \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

を得る。B は領域の幅である。連続の方程式は

$$\left. \begin{aligned} \lambda \frac{\partial}{\partial t} (h_1 + \zeta) \cdot B + \frac{\partial Q_1}{\partial x} &= 0 \\ \lambda \frac{\partial h_2}{\partial t} \cdot B + \frac{\partial Q_2}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

となる。λ は空げき率である。式 (3), (4), (5) を使ってこの地区の地下水の変動を調べるわけであるが、数値解析をするための方法は比較的簡単な差分表示による数値積分法によることにした。

(2) 差分表示式

領域を $B \times B$ の正方形のブロックに分割し、南北方向を i , 東西方向を j のステップとし、時間のステップ

また

$$h_1 = H_3 - h_2 \dots (3)$$

を n で表示するとき、 j 方向のステップについて (4)、(5) 両式を差分表示すると

$$\left. \begin{aligned} \Delta(h_1 + \zeta) &= -\frac{\Delta Q_1}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta t}{B} \cdot \frac{1}{\lambda} \\ \Delta h_2 &= -\frac{\Delta Q_2}{\Delta x} \cdot \frac{\Delta t}{B} \cdot \frac{1}{\lambda} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

$\Delta Q_1/\Delta x$, $\Delta Q_2/\Delta x$ は式 (4) より

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta Q_1}{\Delta x} &= -\frac{kB}{\Delta x} \left\{ \Delta \left[(h_1 + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right] \right\} \\ \frac{\Delta Q_2}{\Delta x} &= -\frac{kB}{\Delta x} \left\{ \Delta \left[h_2 \left[\varepsilon \frac{\partial \zeta}{\partial x} + (1-\varepsilon) \frac{\partial h_2}{\partial x} \right] \right] \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(7)$$

式 (7) の { } 中の Δ 項は次のような差分式で近似することにした。

$$\begin{aligned} \Delta \left[(h_1 + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right] &= \frac{(n^{\zeta} j + n^{\zeta} j_{+1} + n h_{1,j} + n h_{1,j+1})}{2} \\ &\cdot \frac{n^{\zeta} j_{+1} - n^{\zeta} j}{\Delta x} - \frac{(n^{\zeta} j + n^{\zeta} j_{-1} + n h_{1,j} + n h_{1,j-1})}{2} \\ &\cdot \frac{n^{\zeta} j - n^{\zeta} j_{-1}}{\Delta x} \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta \left(h_2 \left[\varepsilon \frac{\partial \zeta}{\partial x} + (1-\varepsilon) \frac{\partial h_2}{\partial x} \right] \right) &= \frac{n h_{2,j} + n h_{2,j+1}}{2} \\ &\cdot \left[\varepsilon \cdot \frac{n^{\zeta} j_{+1} - n^{\zeta} j}{\Delta x} + (1-\varepsilon) \cdot \frac{n h_{2,j+1} - n h_{2,j}}{\Delta x} \right] \\ &- \frac{n h_{2,j} + n h_{2,j-1}}{2} \cdot \left[\varepsilon \cdot \frac{n^{\zeta} j - n^{\zeta} j_{-1}}{\Delta x} + (1-\varepsilon) \right. \\ &\left. \cdot \frac{n h_{2,j} - n h_{2,j-1}}{\Delta x} \right] \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

これらの式は j ステップのみについて書いてあるが、 i ステップについても同じ表示ができる。

式 (7) で求まる ΔQ_1 , ΔQ_2 は水平方向の淡水、海水の流れる量であるが降雨よりの補給および、地下水よりの取水がある場合には ΔQ_1 にその項を考えなければいけない。したがって

$$\overline{\Delta Q_1} = \sum_{i,j} \Delta Q_1 + Q_4 - Q_3 \dots\dots\dots(10)$$

とし、 Q_4 は降雨の浸透量、 Q_3 は地下水よりの取水量である。この $\overline{\Delta Q_1}$ を式 (6) の ΔQ_1 に入れることによってそれらの影響を考慮に入れることができる。

(3) 差分表示式の安定性の検討⁴⁾

i, j 方向の差分値を Fourier 成分に分けた各項の増幅率を求めることによって、数値計算の安定条件として次の式を得る(詳しくは参考文献に示されている^{4),7)})。

$$\left. \begin{aligned} 0 < M \zeta < \frac{1}{2} \\ 0 < M [\varepsilon \zeta + (1-\varepsilon) h_2] < \frac{1}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)$$

ただし $M = \frac{k \cdot \Delta t}{\lambda \cdot \Delta x^2}$ である。

この新島の計算の場合、 $\Delta x = 400$ m, $\lambda = 0.16$, $k = 0.002$ m/秒, $h_2 = 20$ m, $\varepsilon = 0.97$, $\zeta = 2$ m とした場合の

式 (11) を満たす Δt の値は第 1 式より $\Delta t < 37$ 日、第 2 式より $\Delta t < 16$ 日が求まった。

(4) $n+1$ ステップの ζ, h_1 の値

結局式 (6)~(10) によって n ステップの値によって $(n+1)$ ステップへの加算量 $\Delta \zeta, \Delta h_1$ を求めるわけであるが、式 (6) でわかるごとく h_1 と ζ は和の形で求まるので次の方法をとった。

$$\begin{aligned} n_{+1} h_{1,ij} &= H_3 - n_{+1} h_{2,ij} = H_3 - (n h_{2,ij} + \Delta h_2) \\ &= n h_{1,ij} - \Delta h_2 \dots\dots\dots(12) \end{aligned}$$

で $n+1$ ステップの h_1 の値を求め

$$n_{+1} \zeta_{ij} = n h_{1,ij} + n^{\zeta} \zeta_{ij} + \Delta(h_1 + \zeta) - n_{+1} h_{1,ij} \dots\dots(13)$$

より $n+1$ ステップの ζ の値を求めることにした。

4. 水収支に関する数値計算結果

(1) 数値計算に使用する基礎データ

この地区を 400 m × 400 m の正方形のブロック 6 (東西) × 8 (南北) = 48 を計算対象ブロックとし、その外側に境界条件を与えるブロックを考え、全部で 80 ブロックに分割した。

降雨量は過去 5 年間の新島測候所における降雨記録の平均値として表-5 の値を使用し、地下水汲み上げ量としては表-6 のごとく、新島役場の統計値より決定した。なお本村部落内の井戸よりの汲み上げ量は簡易水道水源井 1, 2, 3 号の合計値の 20% として扱っている。

地盤の透水係数は調査結果の値より 0.02~0.002 cm/

表-5

1 月	116.5 mm/m	7 月	158.0
2	119.3	8	197.6
3	194.9	9	267.3
4	187.4	10	300.8
5	266.6	11	210.9
6	286.3	12	117.9

m (は月

表-6

月	簡易水道 1,2,3 (t/m)	農業 No. 1 (t/m)	農業 No. 2 (t/m)	農業 No. 3 (t/m)
1	12 963	1 395	2 790	950
2	12 963	1 395	2 790	950
3	12 963	1 395	2 790	950
4	12 963	1 395	2 790	950
5	12 963	1 395	2 790	950
6	14 747	1 257	2 514	720
7	30 629	1 488	2 976	936
8	35 017	1 605	3 210	477
9	16 827	1 406	2 812	854
10	15 448	1 220	2 440	872
11	11 921	1 068	2 136	1 439
12	11 643	1 236	2 476	812

1 カ月当りの汲み上げ量, m(は月

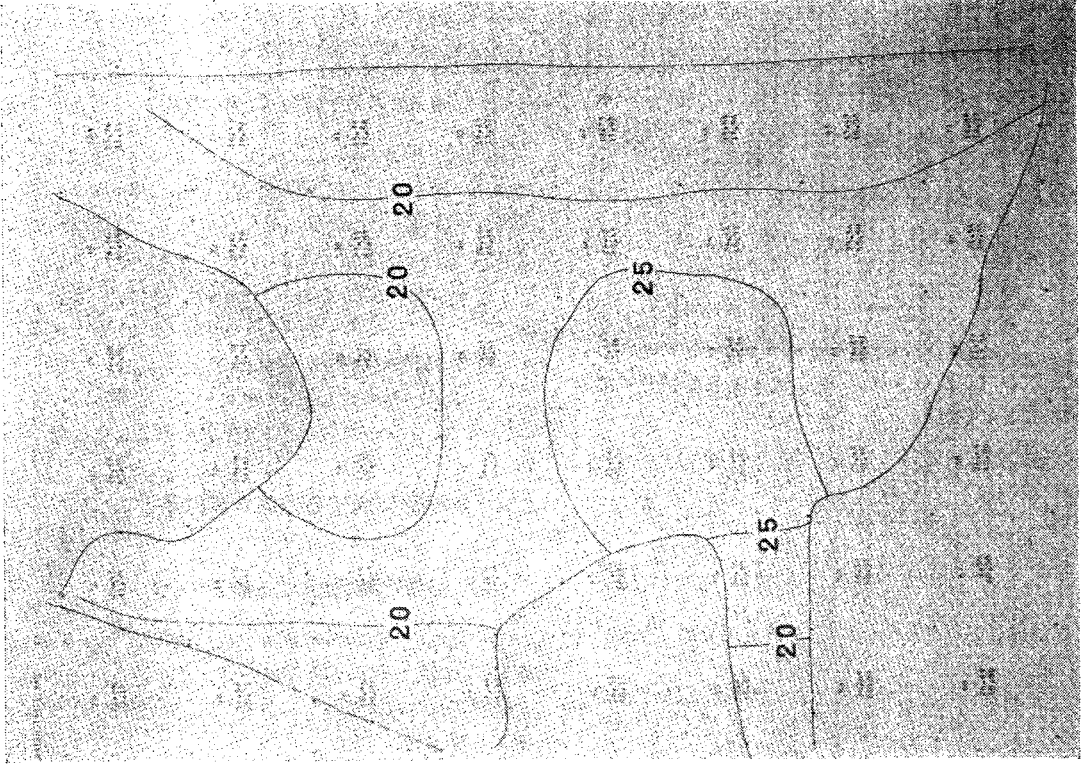


図-7

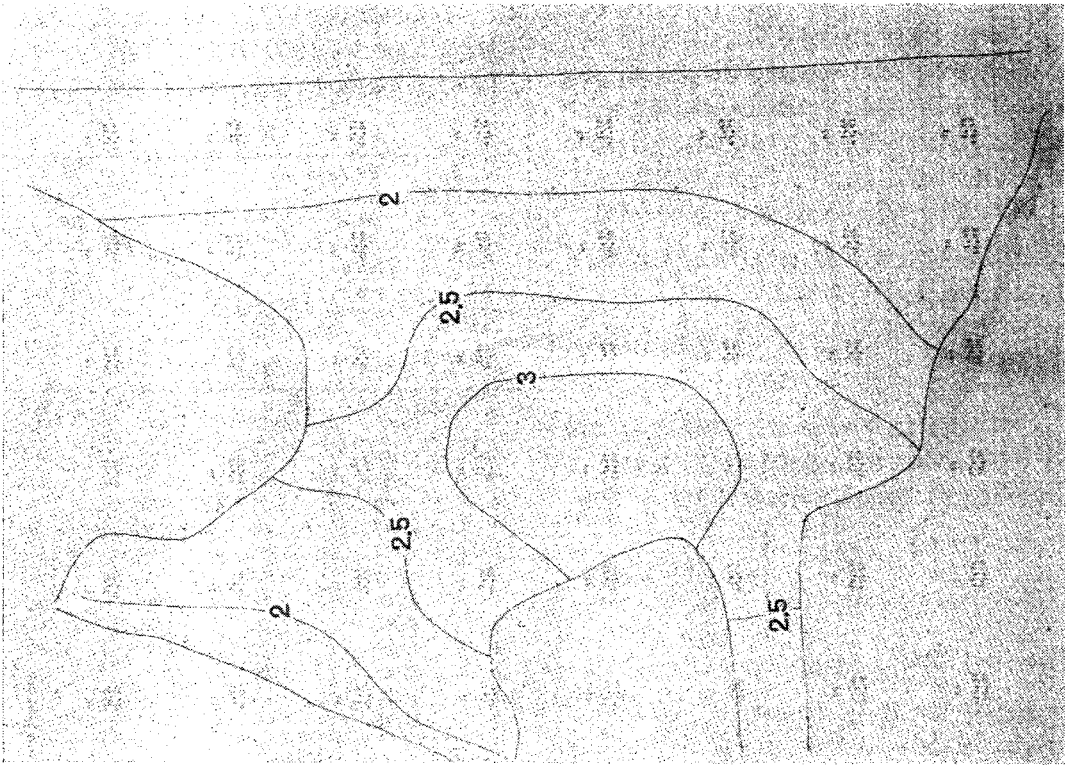


図-8

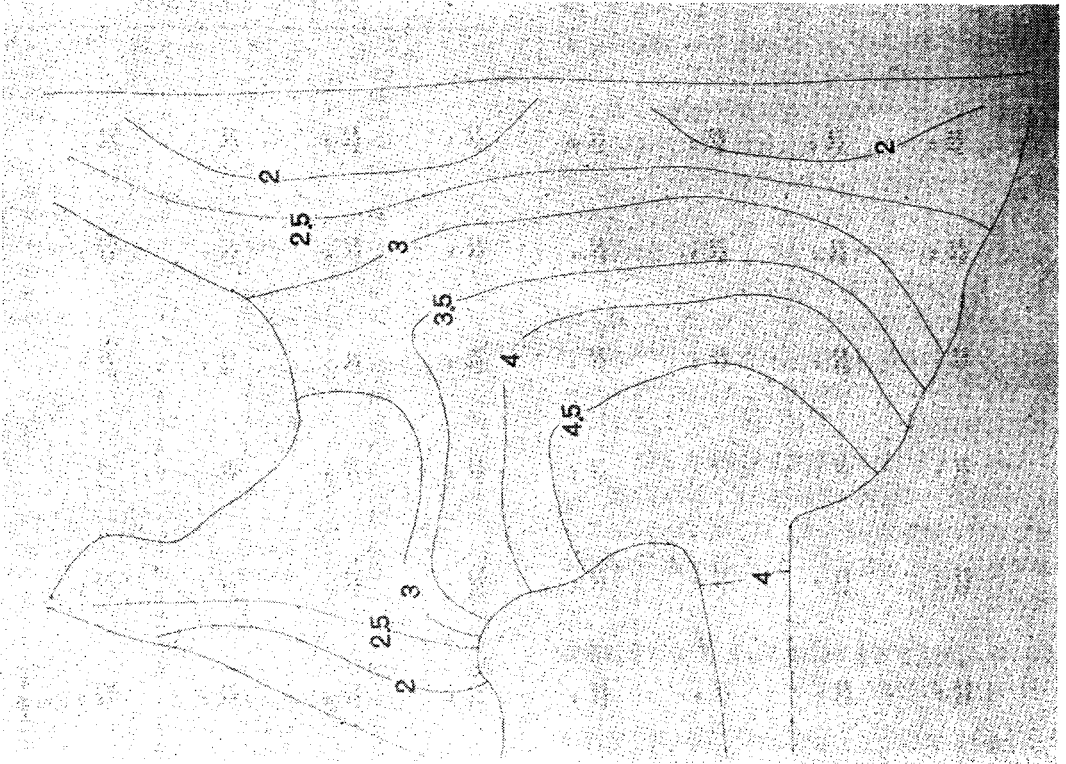


図-9

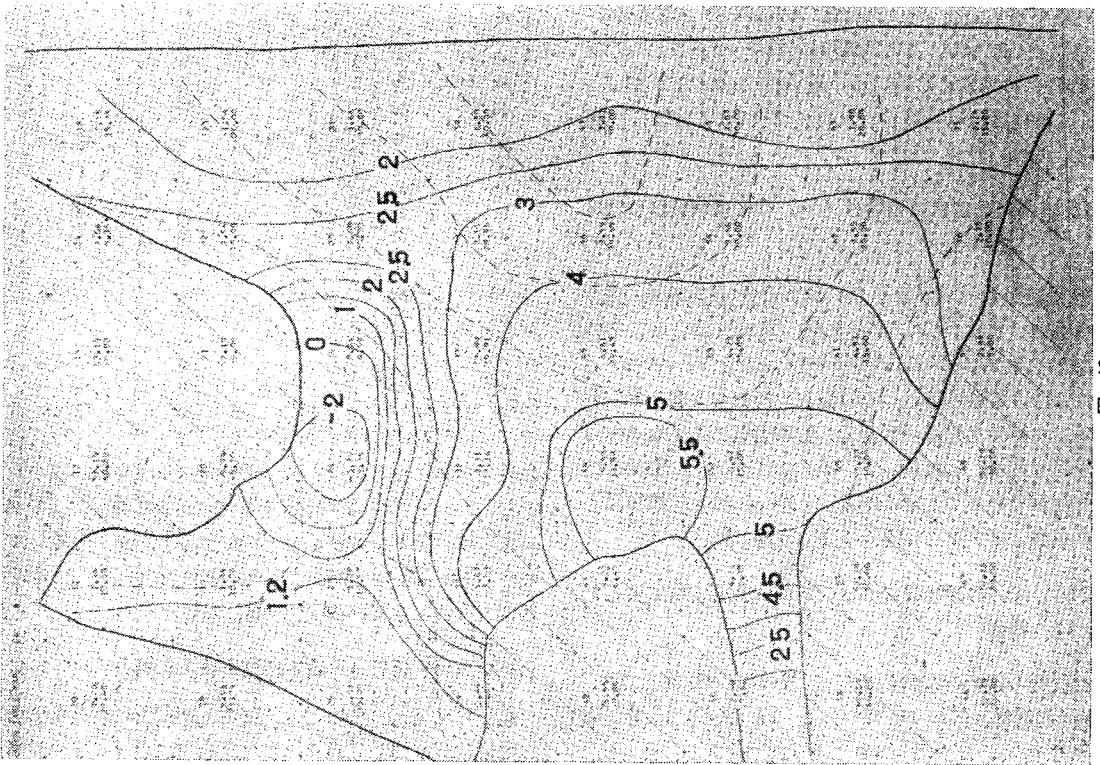


図-10

秒 (0.0002~0.00002 m/秒) を使用することにした。降雨量の滲透率は 40~44% 程度の値を考え、地区によってその値を変化させることとした。

このほかに岩盤までの深さ、涵養率(滲透率)および透水係数の値も場所によって変えることにしたが、これは計算のいくつかのステップを経て変えてゆくことにし、次のようなステップを行った。

- i) すべての場所で一様な深さ、一様な透水係数、空けき率、降雨涵養量があるとした場合
 - ii) 透水層の厚さを場所によって変化させ、ほかの要素は同一とした場合
 - iii) 透水層の厚さ、降雨涵養量ともに場所によって異なるとした場合
 - iv) iii) にさらに透水係数も変化させた場合
- これらの段階を経て現状の新島の地下水面状況に最も近似できる各種の要素を決定した。以下順にしたがって、この結果を示す。なお各ブロックの面積は表-7の中に示してある。

(2) i) に相当する全地区の H_3 , k , λ , 降雨浸透率を同じとした場合

以下の電子計算機による結果は年間で最も地下水面の低下を示す8月の値をもって示すことにし、各ブロックの番号と地下水面 k および海水面 h_1 の値を印刷して、図-7のごとく示してある。この図は地盤の深さ $H_3=100$ m で透水係数 $k=0.000002$ m/秒、地下水涵養率 20% の場合であって、この地域全体に均一である。この結果では k の値が小さいために淡水の水面勾配が急になり、この地区の中央部での水位が 20 m にも達して現実ばなれしている。

(3) ii) の透水層の厚さ (H_3) を島の中央部で浅くした場合

透水係数 $k=0.0002$ /m 秒、地下水涵養率 20%、島の中央部のブロック(2ブロック)を $H_3=30$ m とし、その海岸よりは $H_3=50$ m、海岸のブロックを $H_3=80$ m とした場合の結果である。この場合に島の中央部(No. 44ブロック)で水位が一番高く、他は海岸に平行な水位分布をしている。したがって、淡水はほぼ一様に海岸に向かって流れていることがわかる。しかし、この状態は図-3の状態とはかなり相違している(図-8)。

(4) iii) の透水層の厚さ、降雨涵養量ともに変えた場合

地表面の起伏の状況を考えて No. 28, 29, 36 (5%), No. 37(25%), No. 44, 45, 46, 47, 52, 53, 54, 55, 61, 62 (45%) とし、ほかは 35% の雨水浸透率とし、 H_3 も山

表-7 (5) の計算の諸元

ブロック No.	岩盤までの深さ H_3 (m)	透水係数 k (m/sec)	涵養率 (%)	ブロック面積 (m ²)
10	80	0.0002	—	102 000
11	10	"	15	160 000
12	80	"	—	"
13	80	"	—	38 500
14	80	"	35	187 500
15	20	"	35	160 000
18	30	0.0002	35	38 000
19	10	"	15	160 000
20	5	0.00002	5	38 000
21	30	0.0002	—	160 000
22	10	"	35	122 000
23	20	"	35	176 000
26	30	0.0002	15	123 900
27	20	0.0002	15	160 000
28	10	0.00002	5	"
29	10	"	5	"
30	20	0.0002	—	"
31	30	"	—	172 000
34	5	0.0002	15	112 000
35	15	0.00002	15	137 950
36	15	"	5	160 000
37	20	0.0002	25	"
38	30	"	35	"
39	40	"	35	165 000
42	80	0.0002	—	160 000
43	10	0.00002	5	40 000
44	15	0.0002	45	160 000
45	25	"	45	"
46	40	"	45	"
47	50	"	45	"
50	20	0.0002	35	80 000
51	10	"	35	98 000
52	15	"	45	160 000
53	25	"	45	"
54	30	"	45	"
55	30	"	45	"
58	80	0.0002	—	160 000
59	50	"	—	"
60	10	"	35	"
61	15	"	45	"
62	20	"	45	"
63	20	0.0002	35	"
66	80	0.0002	—	160 000
67	50	"	—	"
68	30	"	—	"
69	5	"	35	50 000
70	10	"	35	82 000
71	15	"	35	122 200

に近い周辺部分では浅く海岸部へ向って深くなっているとし、5 m~50 m までの値を与えた場合である。図-8に比して涵養率が大きくなっただけで地下水面が上昇しており、No. 28, 29 (簡易水道井のあるブロック) で水位が低くなってきている(図-9)。

(5) (4) にさらに透水係数も変えた場合

図-1(b)でもわかるごとく扇山と瀬戸山は新島中学校の付近にせり出しており、また同図中に示されている岩

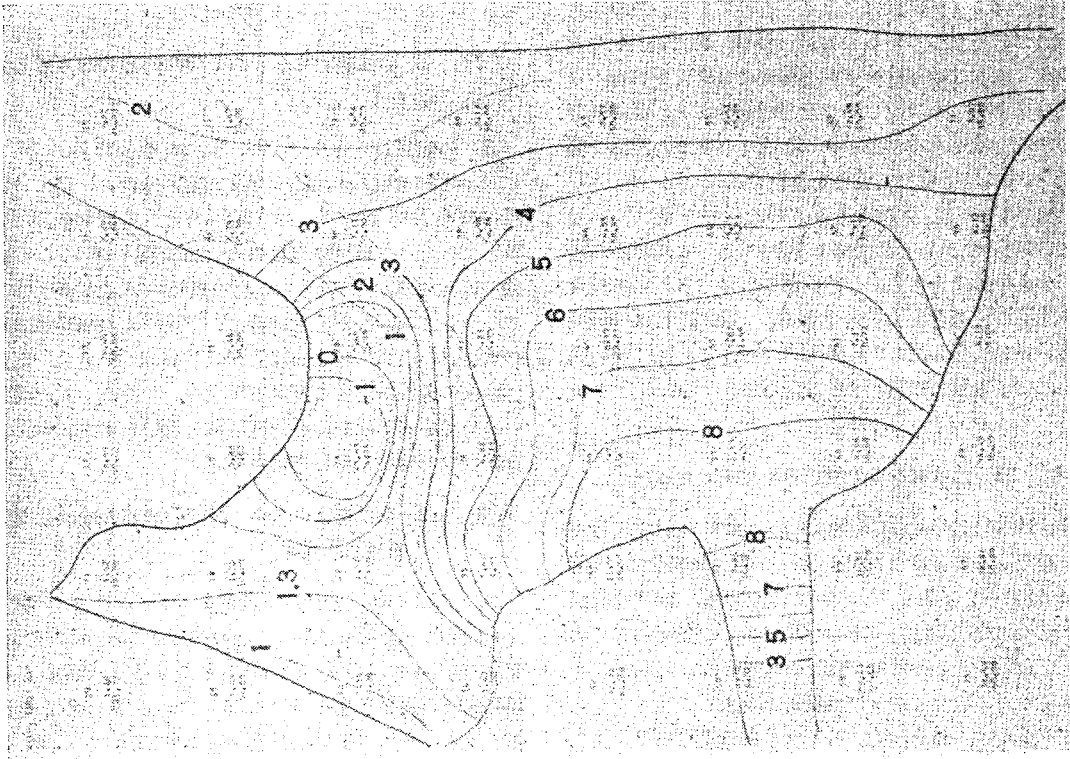


図-11

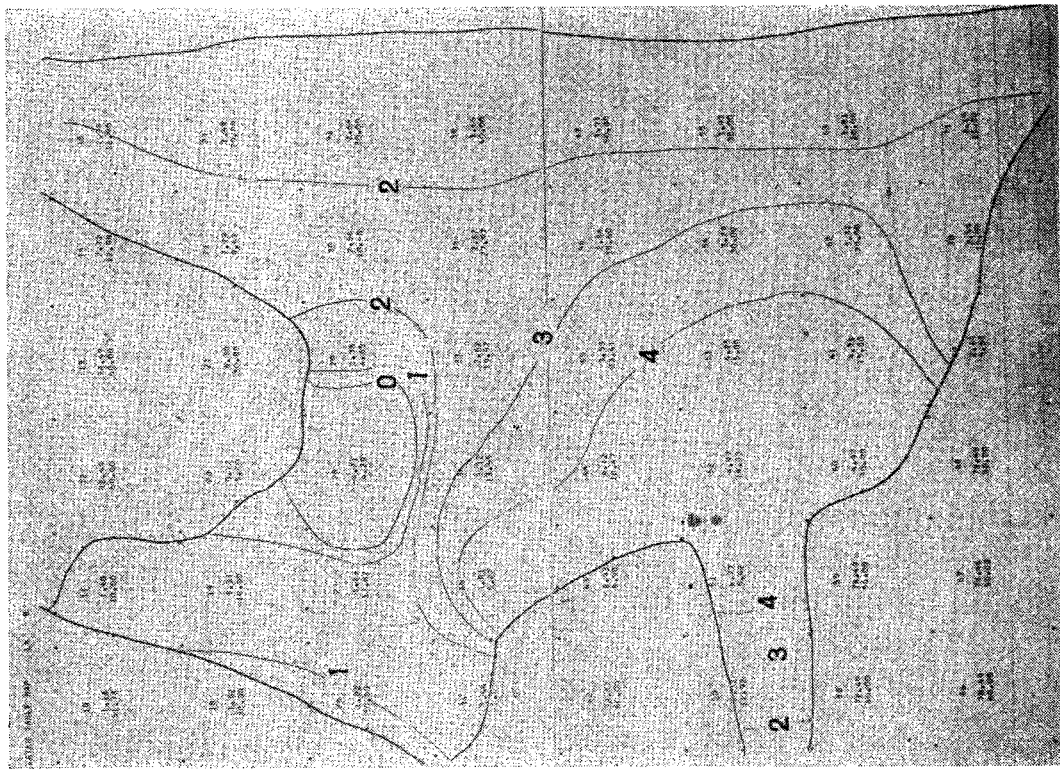


図-12

盤の推定深さ（電気探査による）をみてもこの部分が馬の背のごとくなっていることがわかる。また表-4の水質試験では、この部分の東側と西側でpH値が異なるなどの結果を得ている。このことを考慮すると、この部分で分水峰を設定する必要があると考えられる。そこで図-10の中にブロックの境界を点線で区切ったNo. 20, 28, 29, 35, 36, 43の透水係数の値を $k=0.00002$ m/秒（ほかの部分に比して2桁値が小さい）とした結果が同図中の等水位線図である。なお同図中に示されている破線は海水面の位置を示すものである。この結果はHerzbergの条件⁵⁾を満たしているものではなく、むしろ H_3 の値による岩盤の傾斜により支配されているようである。

(6) (5)の状態を5年間さらに継続した状況

図-10の状態がほぼ現在の新島における状況に似ているので、このような状況をさらに5年間継続すると図-11のごとくなる。No. 28の地点では、地下水位が -3.63 mで海水面が -4.24 m（図では+の値で示してある）となって、この状況では井戸周辺の流れの状況⁶⁾を考慮すると、取水した水には塩水が混入していると考えざるを得ない。おそらくこれより早い時期に塩水の混入が生ずるものと思われる。また同図中で地下水位が 8 mにも達しているのは、この地区の涵養率を 45% と少し

大き目になっているためと考えられる。

(7) (5)の状態よりさらに 1200 m³/日の取水をした場合

(5)の状態よりさらにNo. 29, 28地点以外の所で 1200 m³/日の取水が可能かどうかをみるため、No. 44, 37(400 m³/日) No. 45, 46 (200 m³/日)の取水をしたものとする、5年間経過後の水位図は図-12になる。図-11に比して、明らかに島中央部の水位が低下してきていることがわかると同時に、No. 28の簡易水道井の水位が -4.21 m、海水面が -4.29 mとなって、完全に海水の混入があることが判明する。したがって、現状のままでさらにほかに井戸を新設し、地下水の取水をすることは問題があると思われる。

(8) (5)の状態よりNo. 28, 29地点の取水を 200 m³/日減じた場合

No. 28, 29地点の汲み上げ量を 200 m³/日だけ現状より減じた量だけ取水して、この分だけNo. 37, 44, 45, 46地点全体で $1200+400$ m³/日の取水をした場合の5年経過後の結果が図-13である。これと図-12とを比較すると、全体の水位は低下ぎみであるが、No. 28, 29の地点ではかなり良好な結果を示している。これらの図は、ほぼ現状に近い水位図、図-10より5年後の結果

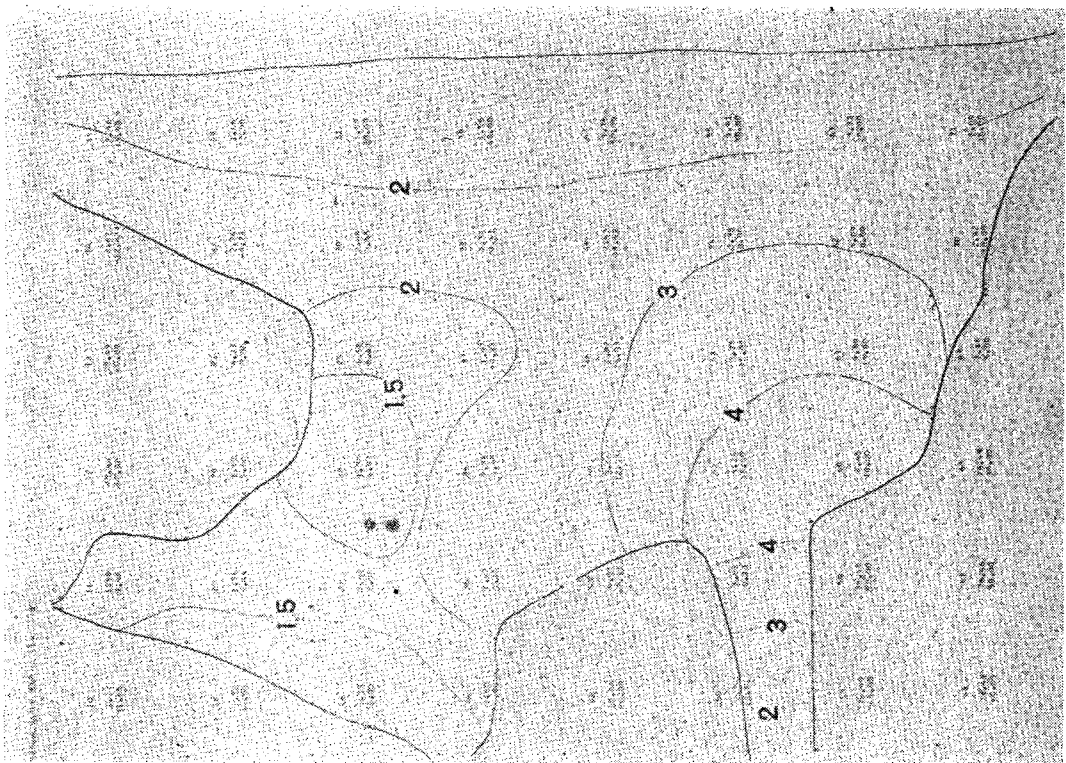


図-13

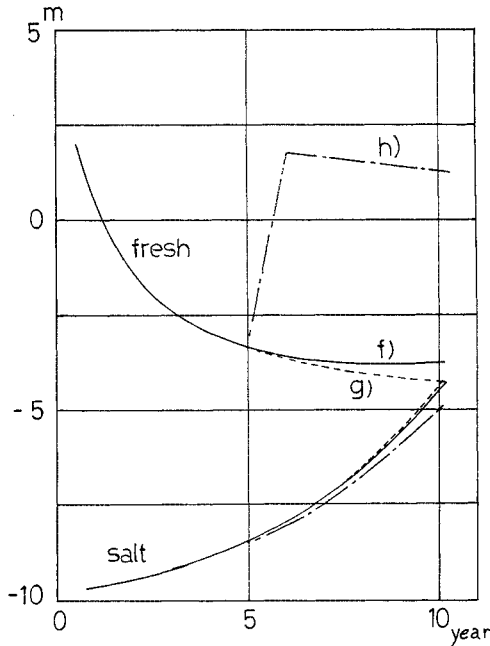


図-14

についてのみ検討したわけであるが、これだけで結論を与えるのは不十分で、経年変化をみなければまだ進行中なのか、定常状態にあるのかをつかまなければならない。そこで図-10の状態に達するまでの5年間とそれ以降の5年間について No. 28 地点の水位変化と、海水面の位置の変化を図-14 に示してみた。

この図において5年目がほぼ現状と考えて良いと思われ、このままの状態をさらに5年間(10年目まで)にわたり続けた結果が実線である。ここに示したのは最低水位を示す8月であるが、10年目には地下水面と海水面を示す両曲線が交差する直前の状態になっている。ほかの月においても、水位の値が若干異なるだけで同様な傾向を示している。さらに特に注目すべき点は5年目以降地下水面の位置がほとんど変化しないことであって、汲み上げ量の分だけ海水面が上昇してきている。このことは通常の淡水井戸のように地下水面の下降がみられないので安全であるとの判断が、このような2層流地下水の場合の井戸には当てはまらないことを示す。また同図中の点線で示したのは(7)の図-12に相当する場合であって、地下水面の低下は、ほかの部分での取水(1200 m³/日)の影響を受けて促進されている。この場合の海水面の上昇は実線の場合とあまり変っていない。さらに図-13の(8)の場合については同図中に1点鎖線で示してある。これでわかるごとく、No. 28, 29 地点で 400 m³/日の取水を現状より減ざると、地下水位は1年で(+)の値に変化している。しかし、その後の水位変化をみると、まだ低下傾向にあるため、ほかの地区での1600 m³

/日の取水がまだ過大であるとも考えられる。No. 28, 29 地点で 400 m³/日の取水を減ざるとは 12000 m³/月減ざるとを意味し、これはオフシーズンの11月～5月まではほとんど取水をしないことを意味し、かなり無理な条件を示しているわけである。これらを考えて、現状よりさらに1200 m³/日の取水をすることはかなりきびしいことになるとと思われる。

以上のような計算によって完全に新島の地下水位の状況をとらえたわけではないが、かなりの程度に地質的な面および水理学的な面の双方にわたって満足すべき結果が得られたと考えている。なお現実には山に降った雨の地下水への供給は無視しているの、それらをも考えに入れ、さらにまだ問題の多い各種の要因について現地データを考慮して、もう一度シミュレーションしてみる必要があるかと考えられる。

5. おわりに

この調査およびシミュレーションの結果として判明したいくつかの点をあげておこう。

(1) 水文地質については電気探査の結果、基盤岩は馬の背状をなして、地下水の主な帯水層はその上のっている白ママ層である。この層の透水係数は10⁻²～10⁻³cm/秒のオーダーであり、有効空げき率は16%前後である。またこの表層部は透透性がきわめて良く、24 mm/時以下の降雨はほとんど透透するようである。その量は降水量の40～44%と推定される。

(2) 地下水位は簡易水道の水源井で-5 m(海拔)にも達するくぼみが生じており、Herz-bergの条件では考えられないような様相を示している。また本村地区内にも調査時でも-0.5～-1.0 mに達しているところもあった。

(3) 水収支計算については、準一様流の取扱いによる2層流の地下水の方程式を差分表示して数値積分する方法をとった。これらを使って透水係数、基盤までの深さ、地下水涵養率などを、地質学的要素を考慮して場所によってそれらの値を変えてシミュレーションをした結果、ほぼ現状に近い地下水位分布が得られた。

(4) また、取水井において地下水面が海面下になりうることもあるが、いったんある程度まで低下してしまうと、それよりの低下はごくわずかで、海水面の上昇がかなり大きくなっていく。したがって、地下水面が低下しないからといって安心はできないという結果を得た。

(5) したがって、1箇所でも多量の地下水を取水することはさけて、広い範囲にわたって少量ずつ取水する必要があると考えられる。また、長い将来のことを考えると海面下-5 mにも水面が低下した井戸での取水は

さけるべきであると考え。

(6) この計算は山腹よりの地下水への浸透などを考えに入れていないので、きびしい条件での計算である。われわれとしてはこのような解析結果と新島での地下水の動向を今後引続いて調査を継続して、各種要因の修正をしながら問題を解析しようと考えている。また、このように地下水の解析を進めることによって広範囲にわたる地質学的な問題をも解明する手法があるのではないかと考え、この面への研究の足がかりとしたいとも考えている。

なお、この調査研究について、新島役場企業課長 釜長七氏を長とする課員の方々に非常に世話になった。また、各種観測機器の設置、解析、水質分析については自治省消防研究所 細野義純技官のご助力をいただいた。

さらに、本論文のデータ、数値解析の部分は本学卒業生、若林勝哉、島田工、永田義美の3君の卒論より引用した。記して感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) R.H. セン (山崎不二夫・山内豊聡訳) : 土質工学の基礎 鹿島出版会, p. 136.
- 2) 金子 良 : 農業水文学, 土木雑誌社, p. 29.
川畑幸夫 : 水文気象学, 地人書館, p. 52
- 3) 嶋 祐之 : 地下密度流, 1966年度水工学に関する夏期研修会講義集, Aダム河川コース, 10-7.
- 4) 伊藤 剛 : 数値計算の応用と基礎, アテネ出版
- 5) 水理公式集, 土木学会, 昭和46年版 p. 593
- 6) 3) または 5)
- 7) 東洋大学工学部工業技術研究会 : 新島本村地区 地下水調査報告書, 昭和47年4月

(1973.7.7・受付)