

## 55. 地下水研究 50 年史

### ーコンピュータが雲の上の存在だった頃の地下水シミュレーションー

#### (その 1)

##### (1) はじめに

今回取り上げる話題は、我が国のコンピュータの黎明期である 1950 年代から 10 年ほど経ったばかりのコンピュータの開発途上、あるいはまだ希少な時代のことである。[その 1] は今から 50 年以上も前の 1960 年代初期の頃と、[その 2] はそれから 10 年後の、容積だけはばかに大きいコンピュータが出始めた頃の話である。いずれにしてもコンピュータはまだ一般には手の届かない遠い存在の時代の話である。もちろんこの時代はまだ“パソコン”などの言葉もなかった。

地下水を中心としたその時代の背景として、1960 年代にあつては戦後の緊急農地開発の主役を果たしてきた地下水の涸渇への対策に必要な定量的把握、つまり水収支の解明が要望されるようになってきたこと、また 1960 年代後半～1970 年代前半にあつては、日本各地で深刻さを増してきた地盤沈下問題に対処するための地下水揚水規制などに必要な科学的かつ定量的な検討が求められるようになってきたことなどを挙げる事が出来る。

幸い筆者は齢 20 代の後半からその両方の課題に携わることができたが、前者にあつては上述のようにコンピュータのない時代であり、地下水の定量的予測に関しては手探りと、計算は“手回し計算器”のレベルにあつた。また後者にあつては、経験を重ねて多少知見を高めてきたこともあり、また職場を大学に変えて研究に集中できるようになったので、それまでの膨大な観測資料の処理を行いつつ地盤沈下の予測問題に傾注することが出来た。

今回の話題は多少“手前味噌”気味のところがあつて気が退けるが、最近の地下水研究の動向に対して、“流れに棹さす”のつもりで敢えて本文を草することとした。

##### (2) 両筑平野の地下水収支<sup>脚注1)</sup>

###### a) 回想

この業務は農林省熊本農地局(当時)からの委託調査としてスタートしたものである。当時は地下水資源に関しては本庁の構造改善局資源課が中核となっていて、そこに故山本莊毅先生が班長としておられ、地方農地局管内の地下水調査の統括をされていた。本業務についてもその立場から先生は度々現地に来られ、筆者もその指導を受けることができた。水収支という概念もその一つで、それをこの業務の中心に据えて調査を続けながら勉強もした。

先生はその後、東京教育大学に教授として移られたが、農林省にあつて地下水業務に携わっていた後進諸氏<sup>脚注 2)</sup>の仕事を引き続き後押されていた。筆者もこの調査の際には先生を囲んで、共に夜を徹して議論を重ねたものである。先生も新しく出来る「水収支講座」の構想について熱く話されていたことを今でも鮮やかに憶えている。

脚注 1: 本題は筆者が(株)日さく(旧名日本鑿泉探鉱株式会社)に勤務していた頃の最後の仕事に基づき、その後の東洋大学時代に仕上げたもので、出典は地理学評論(Vol.39, No.11)に掲載された拙文「自由地下水における水収支の検討ー両筑平野の地下水を例としてー」を基としている。

脚注 2: 東京教育大学系では、大野勝次、柴崎達雄、宮本 昇、猿山光男、高橋 一、熊井久雄の諸氏

## b) 調査地域の概要

筑後川中流域の右岸に位置する両筑平野は、図1のように北部の宝満山系から流れ出す佐田川、小石原川、宝満川などの河川によって分断、段丘化した扇状地（写真1）と筑後川の氾濫原からなる。



写真1 両筑平野の東、太平山より西方を望む  
(手前は小石原川、その前方は台地上の陸田地帯、現在の景観)

戦後台地部の開田が進み、稲作が行われるようになったが、灌漑用水は数多くの浅井戸（写真2）、あるいは溜池（写真3）に依存し、水不足に遭遇することもしばしばであった。

本業務では、小石原川の上流に計画されていた江川ダムからの農業用水の導水による台地部の地下水変動を予測することが求められていた。



写真2 灌漑用の浅井戸（当時）

浅井戸の口径は 1.2m 前後のものが多く、中には 3m 近いものがある。深度は 6~8m のものが多い。



写真3 灌漑用のため池（当時）

溜池は主に平野の北を限る宝満山系の南麓斜面や城山（花立山）の山裾の地形、台地を刻む谷地を利用して造られ、灌漑地に導水されていた。

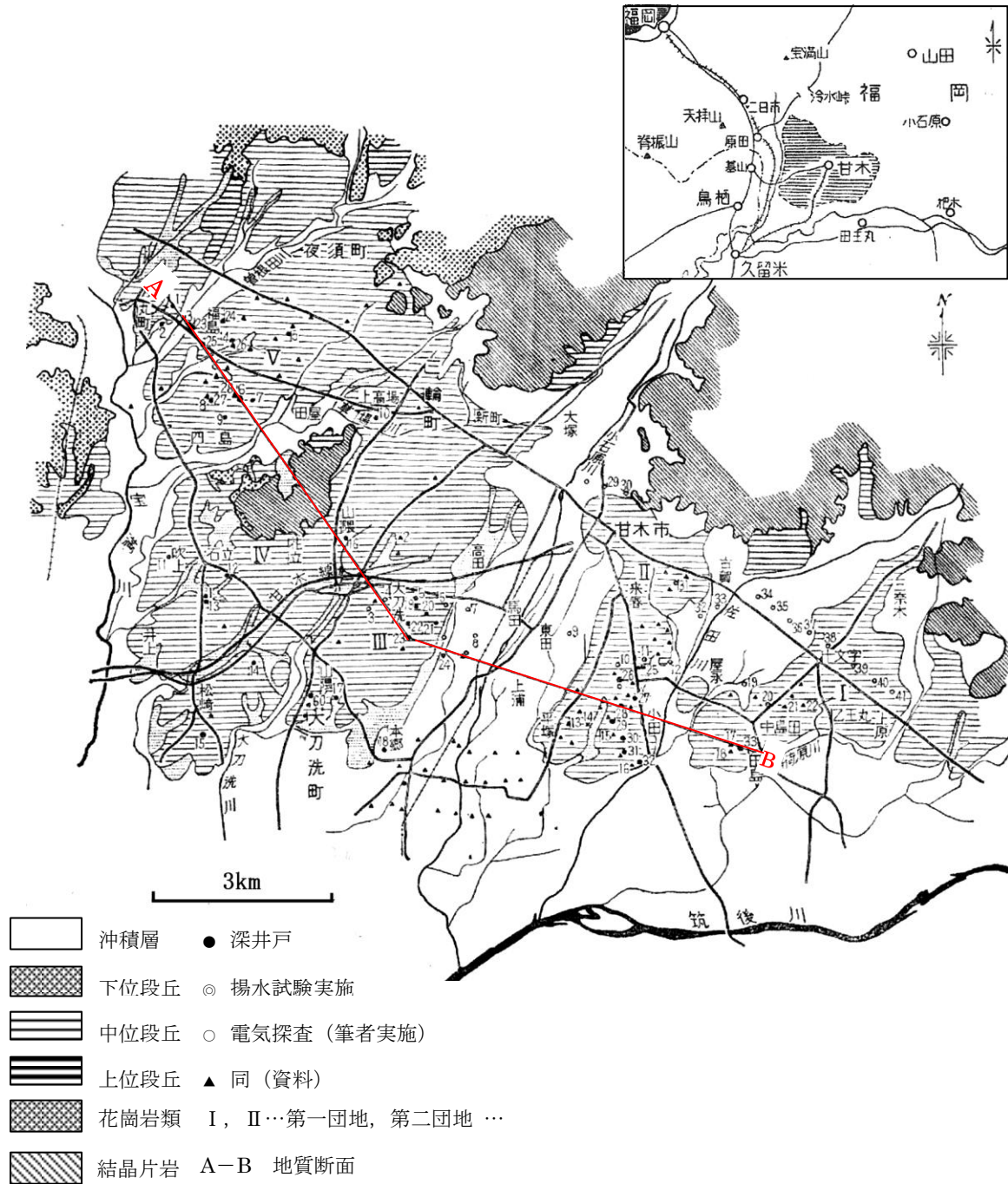


図1 調査地区の地形・地質

図2はこの地域をおよそ東西に切る地質断面である。基盤をなすのは図中、城山（花立山）以西にあっては花崗岩質岩石であり、以東にあっては結晶片岩及び千枚岩である。深井戸並びに電気探査によれば基盤の深度は大刀洗付近では40~70m、花立山西麓の小郡市吹上付近では30~40mでこれに到達するが、その他の地域では100m以上に達する。

基盤を覆って堆積する洪積層は、深井戸資料によれば上部・中部・下部の3部層に区分できるが、このうち浅層地下水に関係するのは上部洪積層である。層厚は5~10mで、その下位は厚さ10m前後の粘土、または粘土質な地層がほぼ一様に発達して浅層地下水の不透水層となっている。したがってここでは上部洪積層に賦存するものを不圧地下水として取り扱い、中・下部洪積層に賦存するものを被圧地下水として取り扱うこととし、両者は上記の不透水層によって分離されているものとした。

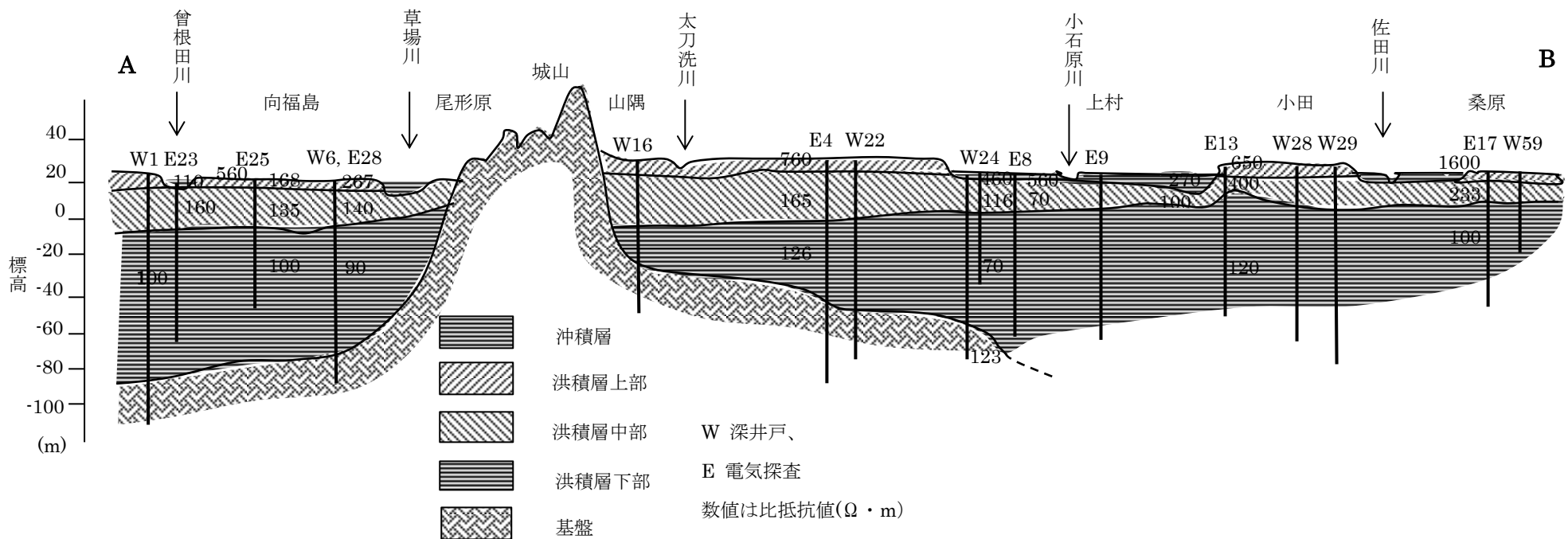


図2 深井戸資料・電気探査によって推定された地質断面図

この地域は表層部の浸透能が高いため、浅層地下水を経由した反復利用率<sup>脚注 1)</sup>が高いのが特徴である。その論拠は以下のとおりである。当時台地地域の 6 割に相当する 960ha が 1,400 本余りの浅井戸（深さ 5~7m）によって灌漑されていたが、1 井当たりの揚水量を 1 日平均 200 m<sup>3</sup>とすると、灌漑期（6 月下旬~10 月上旬の約 100 日間）における汲み揚げ総量は 27,726,000m<sup>3</sup>で、これを関係面積で割って水柱高であらわすと約 1.4m になる。一方同年同時期の降水量は 865.1 mm で、このうち 431.5 mm が自然流去したと推定されるので新たに地下水の増量分になったのは 433.6 mm である。したがって上記の汲み上げ量（蒸発散量を含む）に対する不足量 966.4 mm は地下水貯留量によってまかなわれていることになる。これは有効空隙率を一様に 0.27 として地下水位の変動量に換算すると 3.6m である。しかしながら実際には同時期の低下量は 0.7m にとどまっているので、800 mm 程度の水量は再び浸透して地下水に戻っているものと考えなければならぬ。

このような傾向は当地域の特徴で、反復利用量が大きいため、一見地下水量を過大に評価する原因になっている。このことは一日平均 25 mm、最大 34 mm に達する減水深の記録からも裏付けられる。すなわちこれを関係面積に換算すると灌漑期総量で 1,380mm となり、うち 600 mm を蒸発散量とすると 780 mm が浸透量となって上記の数値とほぼ一致する。以上から当地区に関しては地下水の汲み揚げということは、水収支期間を旬<sup>脚注 2)</sup>程度とした場合には、ほとんど関与しないとしても良いとした。

#### c) 地下水状況

当地区における土地改良事業計画によると、水利用に関しては農業用水源の安定化を目的として地区内に存在する 1,400 本余りの浅井戸を全廃するとともに、新たに築造されるダム貯水量の外は、溜池貯水量、深層地下水によってこれを賄うこととしている。しかしこの計画の妥当性や灌漑方式の経済性を検討するためには、まず現況を把握しておくとともに、計画実施によって地下水の状況が如何に変容するかを予測する必要がある。これは水を有効に使い、合理的な灌漑計画を進める際に重要な情報となる。

図 3 は非灌漑期における地下水位の等高線であるが、この図から地下水の流動状況について次の諸点が指摘される。

動水勾配は 1/250 程度でほぼ地勢に応じた傾斜を示す。地域的には東部、即ち第 I 団地、第 II 団地ではやや急で、西部地域で緩く、1/300~1/350 程度となっている。いずれの地域でも地下水の流線はその周辺に広がっていて、現河道からの伏流滲透の傾向は殆ど認められない。実際周辺河川の流量は下流ほど流量が増大しており、その増量は周辺地区の地下水貯留分から流出したものに他ならない。以上から台地地域の地下水収支に関しては河川の影響はないものとしてよい。さらに台地末端部に存在する湧水の変動は、図 4 のように灌漑期と非灌漑期の湧水量に顕著な差が見られ、かつタイムラグは殆ど認められない。これは水収支の各項目間の時間差は 10 日を単位とした収支では考慮しなくても良いことを示唆している。以下は図 3 の第 I 団地を代表例としたものである。

脚注 1：農業用水が河川や地下水に還元され、再び下流で反復して利用されること。

脚注 2：10 日間のこと。

d) 水収支式の検討

水収支式については、当時東京大学出版会から発行されたばかりの A.Siline-Bekchourine 著「灌漑地の水収支」(福田仁志訳)を参考にした<sup>脚注)</sup>。その基本式を次頁に示す。

ここで  $C$  は凝縮量で我が国のような湿潤地域では無視でき、また対象地区の土地の状態から、地表流去  $(A_1 - A_2) / F$ 、地表における水量変化  $D_1$  は生じないとした。

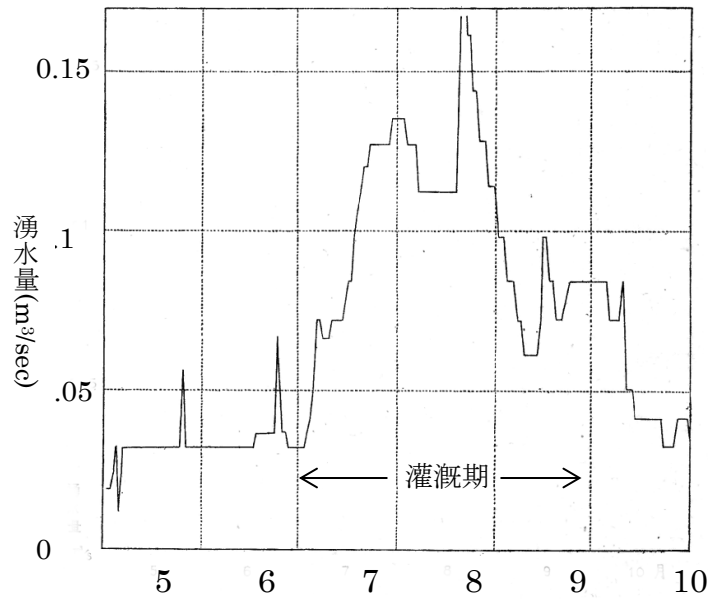


図4 台地末端部にみる湧水量記録 (善光寺 No.1)



図3 地下水位等高線図 (着色部は水収支モデル地区)

脚注：筆者が永年座右に置いて活用して来た本である。参考までに同書の章立てを挙げておく。1章：欧州とアジア(ユーラシア)、北アフリカの乾燥地における塩分地の分布と起源、2章：灌漑地における水の運動、3章：地表下の水の移動、4章：灌漑地における水の移動、5章：灌漑水の水収支、6章：灌漑地における自由地下水機構の予測、7章：灌漑地の水文地質的区分—その塩分化と保全に関連して—

蒸発量については各団地とも灌漑期には畑地と水田が混在する状態になることから、各々の蒸発量と面積比から団地全体の蒸発量を求めた。

$$\pm D1 \pm D2 \pm \mu \frac{\Delta H}{\Delta T} = P + C - E + \frac{A1 - A2}{F} + \frac{Q1 - Q2}{F} + \frac{Iir - Iret}{F}$$

ここで

$\pm D1$	地表における水量変化
$\pm D2$	不飽和層内の土中水の変化
$\mu \frac{\Delta H}{\Delta T}$	地下水量の変化、 $\mu$ は有効間隙率、 $\Delta H$ は時間 $\Delta t$ 内の地下水位変化
$P$	降水量
$C$	地表と地中の凝縮量
$F$	水収支地区の面積
$E$	全蒸発量

$\frac{A1-A2}{F}$  地表流去、 $A1$  は地表流入、 $A2$  は地表流出

$\frac{Q1-Q2}{F}$  地下流去、 $Q1$  は地下流入、 $Q2$  は地下流出

$\frac{Iir-Iret}{F}$  灌漑水流去、 $Iir$  は灌漑流入、 $Iret$  は灌漑流去

以上の各項目はすべて水柱高 (mm) で表示される

有効間隙率  $\mu$  は揚水試験によって算出するか、地下水位が比較的浅く、また降雨後短時間に地下浸透量  $W$  が地下水位上昇量  $\Delta H$  となってあらわれるような場合には、

$$W = \Delta H \cdot \mu$$

なる関係が成立するから、これから比較的正しく  $\mu$  を求めることが出来る。

e) 地下水流去

地下水流去量は水平流の場合、定式では次式によって求められる。

$$Q = Bk \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L}$$

ここで  $Q$ : 地下水流去量

$B$ : 水収支地区の幅

$h_1, h_2$  : 水収支地域の境界線での帯水層の厚さ

$L$  : 水収支地区の長さ

$k$  : 透水係数

この式には帯水層の厚さ ( $h_1, h_2$ ) などの絶えず変動する要素や、水収支地区を一様に決め難い透水係数 ( $k$ ) などが含まれているので、直接これを求めるのは容易ではないために水収支式の残差として示されることが多い。

ところで扇状地、段丘、山麓斜面、デルタ周辺のような地下排水が良好な地域では地下水涵養が行われない限り地下水貯留量の減少が続き、水位は逡減してゆく。そのパターンを模式的に示すと図 5

のように地下水位の高い間は、地下水位高 ( $H$ ) と逡減速度 ( $-dH/dt$ ) の間には直線的な関係が認められる。しかし  $H$  が徐々に低下してあるレベル ( $Ha$ ) 以下になると水位低下速度は徐々に減少して、最終的にはゼロに近づく。しかし通常の場合、ここまで水位が下がる

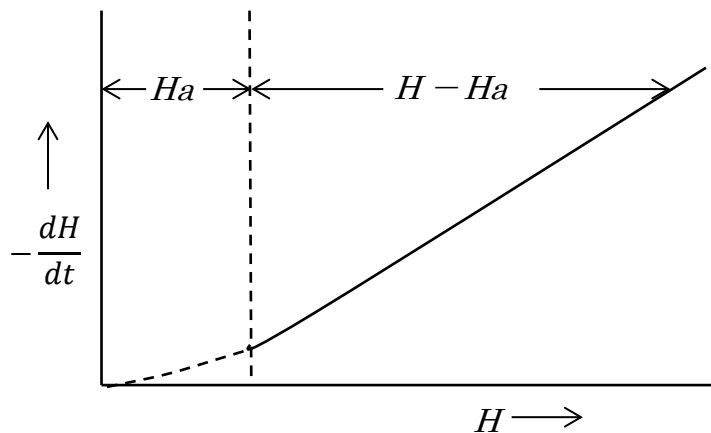


図 5 地下水位高と水位逡減速度の関係

ことは稀である。本文では以下  $Ha$  を基底水位と呼ぶことにする。これは無降雨状態が続いても地下水面はこのレベル以下には下がりにくいという状態を指す。このような現象は水位の低下による流出断面の縮小を反映したものであるが、年間では最低水位を示す 1~2 月の水位がこれに近い。したがってこの時期を水収支計算の出発点に取るのが妥当である。

さて、図 5 の直線部分では、下式が成り立つとしてよく、

$$-\frac{dH}{dt} = C \cdot H$$

また上式より

$$\int \frac{1}{H} dH = -C \int dt$$

$$\log_e H = -Ct + \text{const}$$

ここで  $t=0$  のとき、 $H = H_0$  とすれば、

$$H = H_0 e^{-ct}$$

また基底水位を  $Ha$  とすれば、全体の地下水位の逡減は次式によってあらわされる。



$$H = Ha + (H_0 - Ha)e^{-ct}$$

ここに

$H$  : 経過時間  $t$  における地下水位高

$Ha$  : 基底水位

$H_0$  : 水収支期間初頭の地下水位高

$C$  : 定数

本文ではこれを地下水位逡減曲線とよぶことにする。ここで定数  $C$  は土地の排水機能にかかわる自然要因を包括したものといえ、重要な意味を有する。

f) 地下水収支の実際

以下に述べるのは第 I 団地の例である。まず地下流去については無降雨期の水位記録を出来るだけ多数抽出して図 6 を得る。これから基底水位として 2m、定数  $C$  として 0.02 が得られ、次式を得る。

$$H = 2 + (H_0 - 2)e^{-0.02t}$$

またこの式から図 7 の標準逡減曲を得る。これは地下流去量を図解によって求める際に利用される。

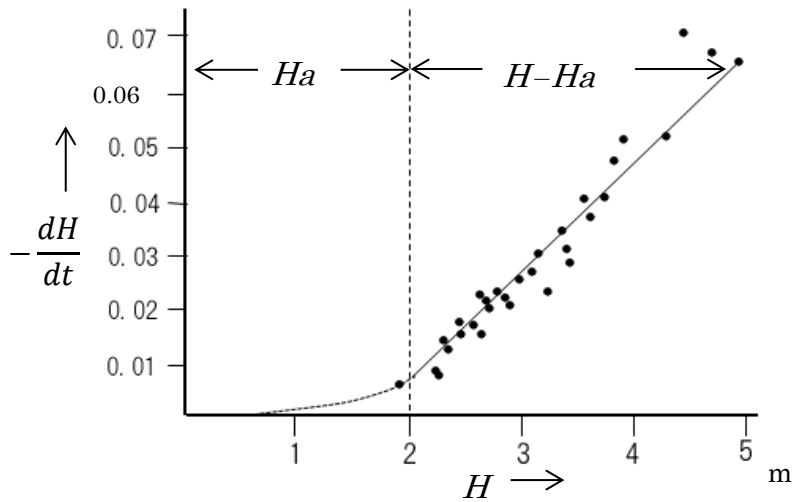


図 6 第 I 団地の標準逡減曲線

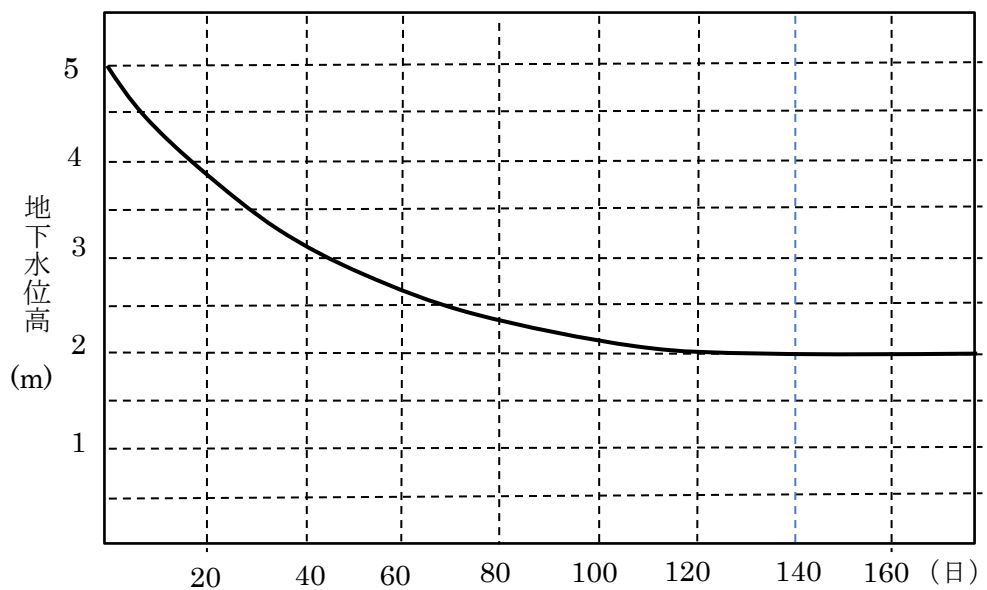


図 7 第 I 団地の地下水位逡減曲線

降雨による地下水の涵養については次のように考える。すなわち灌漑期にあつては土湿不足を考えずに蒸発散量と降雨量の差額をとる。前者が後者より多い場合は、少なくとも蒸発量に見合うだけは揚水をなし得るものとしてその中から差し引く。非灌漑期にあつては、蒸発量は土中水の保留からまかなわれることとし、土湿不足<sup>脚注)</sup>を近似的に次式によって求める。

$$Md = N \cdot E - R$$

ここで

$Md$ : 土湿不足

$N$ : 平常保水量になってからの経過日数

$E$ : その期間の平均蒸発散量

$R$ : その期間の降雨による涵養量、ただし  $R > N \cdot E$  の場合は平常保水量になる。

計算に際しては  $R > N \cdot E$  の場合はその差額が涵養量にまわり、 $R < N \cdot E$  の場合は土湿不足として次の期間に繰り越されるものとする。ただし無降雨状態が長期にわたる場合はこれに上限を設ける。表 1 はこうして得られた水収支計算の一部を切り出したものである。

表 1 第 I 団地における水収支計算例

単位 mm

期間 (Δt)	量 雨 (P)	総蒸 発量 (E)	陸田蒸発散量 /×0.65	畑地蒸発散量 /×0.35	土湿 不足 (Md)	灌漑水	灌漑水によ る浸透量 ( $w_0$ )	地下涵養 量 ( $w + w_0$ )	地下流去量 ( $Q_1 - Q_2$ ) F	水位変化 (ΔH)	地下水 位高 (H)
1月上旬	11	10			0	9.45	9	10	9.5	+ 2	2002
中	25	10			0	0	0	15	10.7	+16	2018
下	1.4	11			0.5	9.56	9.1	0	8.8	-35	1985
2月上旬	3.1	10			1.5	6.26	5.9	0	8	-30	1955
中	1.4	10			0	25.4	24.1	14	10.8	+22	1977
下	11.8	9			0	13.75	13.0	15.8	8.2	+28	2005
3月上旬	51.1	15			0	19.76	18.8	54.8	17.5	+138	2143
中	25.2	15			0	5.87	5.5	15.7	24.3	-32	2111
下	58.9	16.5			0	11.08	10.5	52.9	21.5	+116	2227
4月上旬	10.8	20			0	17.19	16.3	7.1	25.7	-69	2158
中	71	20			0	13.93	13.2	64.2	17.3	+128	2286
下	39.1	20			0	8.52	8.1	27.2	32.3	-19	2267
5月上旬	40.8	20			0	28.3	26.8	47.6	33.8	+51	2318
中	176.2	20			0	10.2	9.7	165.9	41.9	+458	2776
下	43.2	22			0	27.9	26.5	47.7	52.8	-19	2757
6月上旬	45	25			0	22.8	21.7	41.7	51.4	-36	2721
中	38.5	25			0	28.25	26.8	40.3	50	-36	2685
下	180.7	25	25/16.2	25/8.8	0	63.9	60.7	216.4	66.4	+555	3240
7月上旬	48.4	25	25/16.2	25/8.8	0	103.4	98.2	121.6	92	+110	3350
中	0	43.7	48.5/31.5	30/12.2	0	142.2	135	91.3	91.8	- 2	3348
		91.5	107/70	33/11.5	0	141	134	84.8	92.1	-27	3321
					0	143	136	39.1	81	-155	3166
				0	138	131	62.2	78.1	-59	3107	
							106	78.4	+102	3209	
									+810	4019	

脚注：降雨後、重力水が排水された後、土壌中に残留している水分を圃場容水量といい、その水分量と、その水分が徐々に失われていった時の水分量の差を土湿不足という。水柱高であらわす。

最後に本法によって再現された現状の地下水状態を図8に、また灌漑計画実施後の予測結果を図9に示す。図8の斜線部分はここに言う基底水位であるが、8月末期の一時期には地下水位が極度に低下し、地下水以外の利水が必要になることが示されている。

図9はIが現状で、図8と同じものである。またIIが計画によって変化した地下水状況、IIIは計画後のもの、また斜線の部分が計画によって増加した地下水量の変化である。

いずれも細かな変動は均されて、計算手続き上、旬平均の変化として表現されている。なお灌漑期には計画前より地下水位が2.5m以上上昇することが予測される。

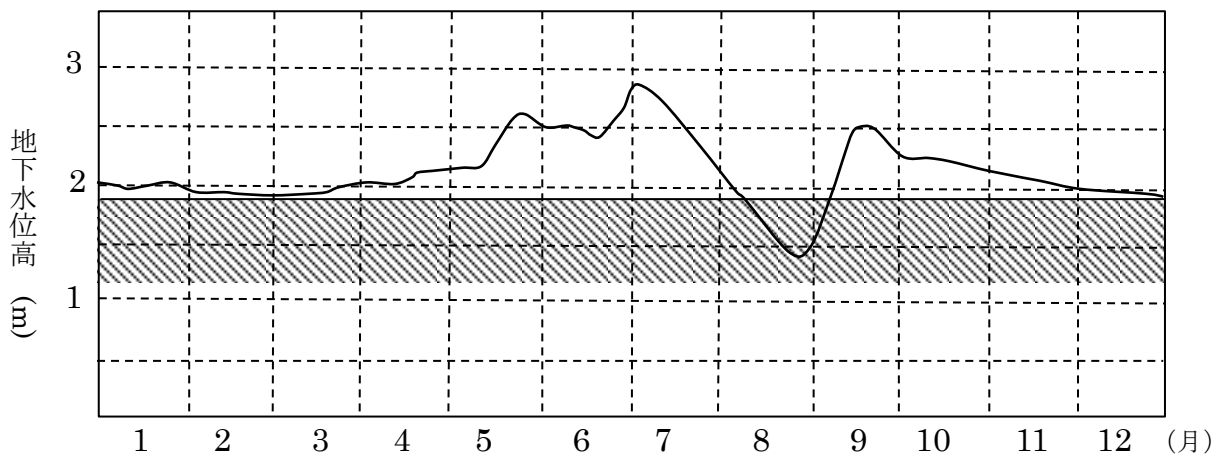


図8 再現された現状の地下水状況

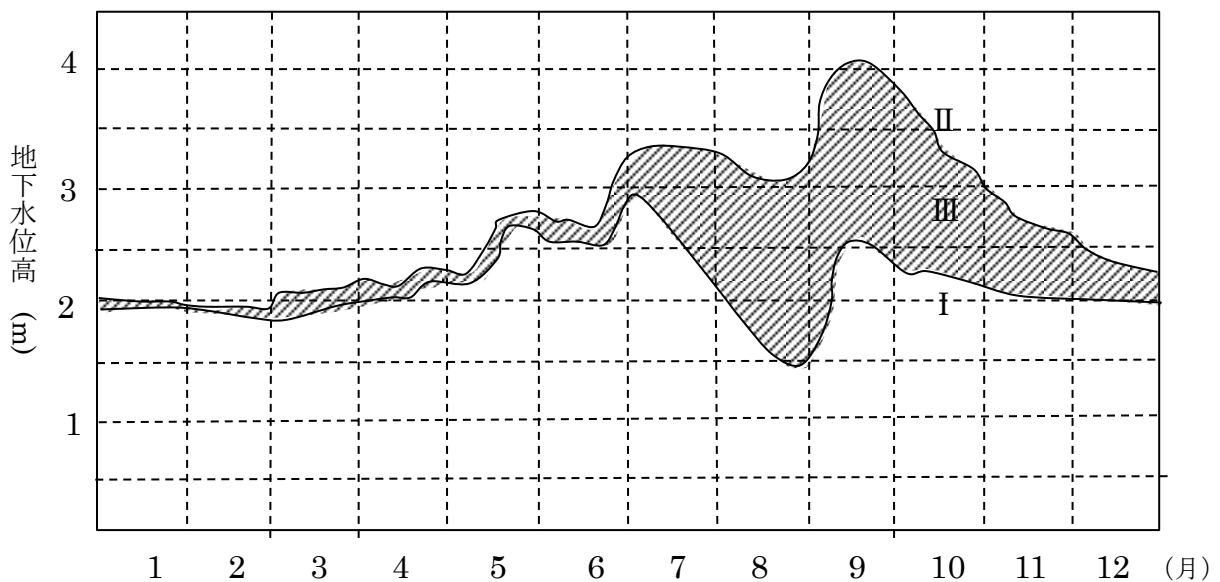


図9 予測された導水後の地下水状況