

土研資料第1190号

土木研究所資料

地下貯水池による水資源開発

昭和52年3月

建設省土木研究所
河川部水文研究室

ま え が き

水資源の開発はこれまで主としてダム、河口堰、湖沼開発などによって進められてきたが、地域によっては水需給の逼迫が予想される。このためさらに高度な開発手段があわせて検討されねばならない。

土木研究所では昭和51年から総合プロジェクト研究「地下水の人工かん養に関する研究」を開始している。

これは地下の帯水層に豊水期の河川水を注入し、その貯留効果を利用して水資源を開発しようとするものであって地下ダム或は地下貯水池とよばれている構想の実現をはかろうとするものである。

この資料は地下貯水池によってどれほどの水量が開発可能かを概略検討したものである。

ここではケーススタディとして一致水系荒川の寄居地点の現在の流況を対象としてみた。貯水池としては荒川左岸扇状地を念頭においている。

開発水量算定にあたっての考え方については現在現業で行われているものとやや異なる点もあり、この結果がそのまま計画として採用できるものとは考えていないが、地下貯水池の効果が非常に大きいものであるという点については確信を得ることが出来た。

地下貯水池構想を実現するためには地下水のかん養方法、取水方法、地上への影響、管理手法等々解決すべき多くの点があり、現在研究を開始している所である。

今後各方面の御協力を得て構想実現に努力したいと考えている。

昭和 52 年 3 月

水文研究室長 石 崎 勝 義

目 次

I 目的及び資料	1
I-1 序	1
I-2 目 的	1
I-3 資 料	1
I-3-1 資料出所	1
I-3-2 半旬流量資料及び流況	2
II 地下貯水池による水資源開発の計算	7
II-1 計算を行うにあたって仮定及び定義	7
II-1-1 仮 定	7
II-1-2 定 義	7
II-2 検討したケース	8
II-3 計算のフローチャートとその説明	9
II-4 計算結果とその解釈	11
II-5 考 察	17
III 地下貯水池内水位を考慮した水資源開発計算	19
III-1 計算を行うにあたっての仮定及び定義	19
III-1-1 仮 定	19
III-1-2 定 義	19
III-2 計算の説明	20
III-3 計算の結果とその解釈	21
IV 地下貯水池の運用に関する考察（降雨等による開発量及び注入取水の配分方法の検討） ...	24
IV-1 試算の目的	24
IV-2 計算を行うにあたっての仮定	24
IV-3 計算の説明	25
IV-4 計算結果	28
IV-5 ま と め	33
V おわりに	36
参考1 地下ダムによる水資源開発	38
参考2 地下水かん養技術の開発	41

I 目的および資料

I-1 序

この半世紀の間に人類の科学の発展は、自然の様相を著しく変化させるに至った。しかも、古代大土木事業のような自然物（巨石等）の使用による開発とはかなり様子が違う。つまり化学物質の利用も相まって風化、または腐食すれば大地（自然）に還元される代物ばかりではなくなってきた。

このような時代の流れの中で、人口は増加の一途をたどり、日常必需の有用自然物はそのほとんどのものが将来に亘って計画的に使用されることが望まれている。とりわけ、我々が慣れ親しみなんの気なしに恩恵を受けている水そのものが不足してきている現状である。ただ、我々の大半が現在真剣に水不足を実感しないのはいろいろな「無理」が行なわれているからである。たとえば、地下水揚水量が安全の限界なのに、無理して取水し、その結果地盤沈下を引き起こすなどの場合である。

そこで、本書では、水資源開発のための一手段として地下水を無理なくしかも積極的に利用することを考える。その中でもこれから大いに期待されている地下貯水池の考え方について考察してみる。

また、開発可能水量のような量的な面に重点を置き他の水資源開発施設との比較を容易とした。

I章では試算に使用した基礎データを洗い出した。II章では容量、涵養能力に主眼を置く地下貯水池の開発水量の試算について述べた。III章では、地層の形状を考慮して地下貯水池の内容をつくり、それにII章の試算操作を行ったとき生み出し得る開発水量を考えた。さらにIV章で地層を考慮した地下貯水池内の水位変動の様子をとらえてみた。

I-2 目的

1. 地下貯水地により、水資源は、どの程度開発されるか目安を設ける。
2. 地下貯水池の有効な運用方法を検討する。

I-3 資料

I-3-1 資料出所

- 使用資料 流量年表（建設省河川局）
- 観測地点 荒川 寄居地点
- 観測期間 昭和30年6月1日～48年5月31日（ただし43年は欠測が多いため除外）
（考察期間） この期間における日平均流量を使用する。
- 参 考 寄居地点上流に二ツ瀬ダムが36年に完成し操作開始している。そのため、流量は36年以後、幾分平準化されている。
- 二ツ瀬ダム諸元

総貯水容量	25,100,000 t
有効容量	20,000,000 t
堆砂量	5,100,000 t
利水容量	1/1～6/25 20,000,000 t
	6/26～9/30 —
	10/1～12/31 20,000,000 t
治水容量	20,000,000 t

I-3-2 半旬流量資料及び流況

表 I - 1 半 旬 流 量 資 料 (t / s)

昭和 年	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
35						16.42	11.39	55.52	50.12	25.61	41.13	14.02
						18.8	11.93	121.61	27.25	22.11	14.98	10.85
36	8.24	5.54	4.11	19.17	18.07	8.19	68.38	16.39	5.21	83.55	52.06	13.16
	7.04	4.25	9.36	34.56	12.96	89.6	24.42	15.34	11.73	165.29	24.73	8.86
37	8.38	6.63	6.33	7.47	5.94	64.86	52.03	23.91	30.84	8.14	17.00	7.91
	7.02	9.00	6.00	10.97	14.85	50.52	60.59	114.21	13.52	11.95	10.37	6.58
38	8.05	4.68	10.41	12.01	10.84	64.41	19.87	15.95	24.96	10.46	13.87	5.63
	4.78	4.55	7.87	14.52	21.27	29.3	19.88	25.9	8.56	13.95	8.05	6.83
39	5.76	12.08	10.25	33.28	17.51	9.89	14.81	16.9	55.82	80.81	21.81	3.8
	7.87	8.10	10.84	18.35	7.66	12.19	17.71	81.58	107.43	48.63	16.61	6.01
40	6.67	11.53	6.97	5.07	69.87	83.07	32.13	17.51	31.95	21.29	13.62	18.11
	4.40	9.66	9.01	26.68	103.38	48.83	21.94	126.98	81.77	17.75	16.77	11.93
41	15.21	3.70	16.88	35.27	19.06	60.77	77.98	32.59	37.24	35.44	12.93	11.14
	8.93	12.30	20.21	27.45	26.08	110.06	54.06	51.11	80.35	20.79	10.93	5.48
42	1.87	6.60	8.61	13.40	22.22	7.15	42.58	21.81	16.77	73.67	30.98	8.83
	4.64	6.38	13.88	20.39	14.29	18.88	36.96	10.79	65.06	62.54	13.75	4.69
44	7.95	9.61	12.71	20.51	15.50	11.64	51.75	29.78	20.91	19.35	15.63	9.12
	9.36	17.87	27.48	31.40	12.20	26.94	26.41	23.54	29.71	31.5	11.70	6.88
45	6.96	9.61	8.65	11.77	16.03	13.14	79.43	11.86	11.86	7.38	8.54	9.63
	11.15	8.62	8.41	13.84	19.77	46.11	20.84	18.93	19.73	12.41	17.77	7.42
46	7.10	5.10	5.74	11.08	26.42							
	5.24	6.42	4.76	33.97	12.32							

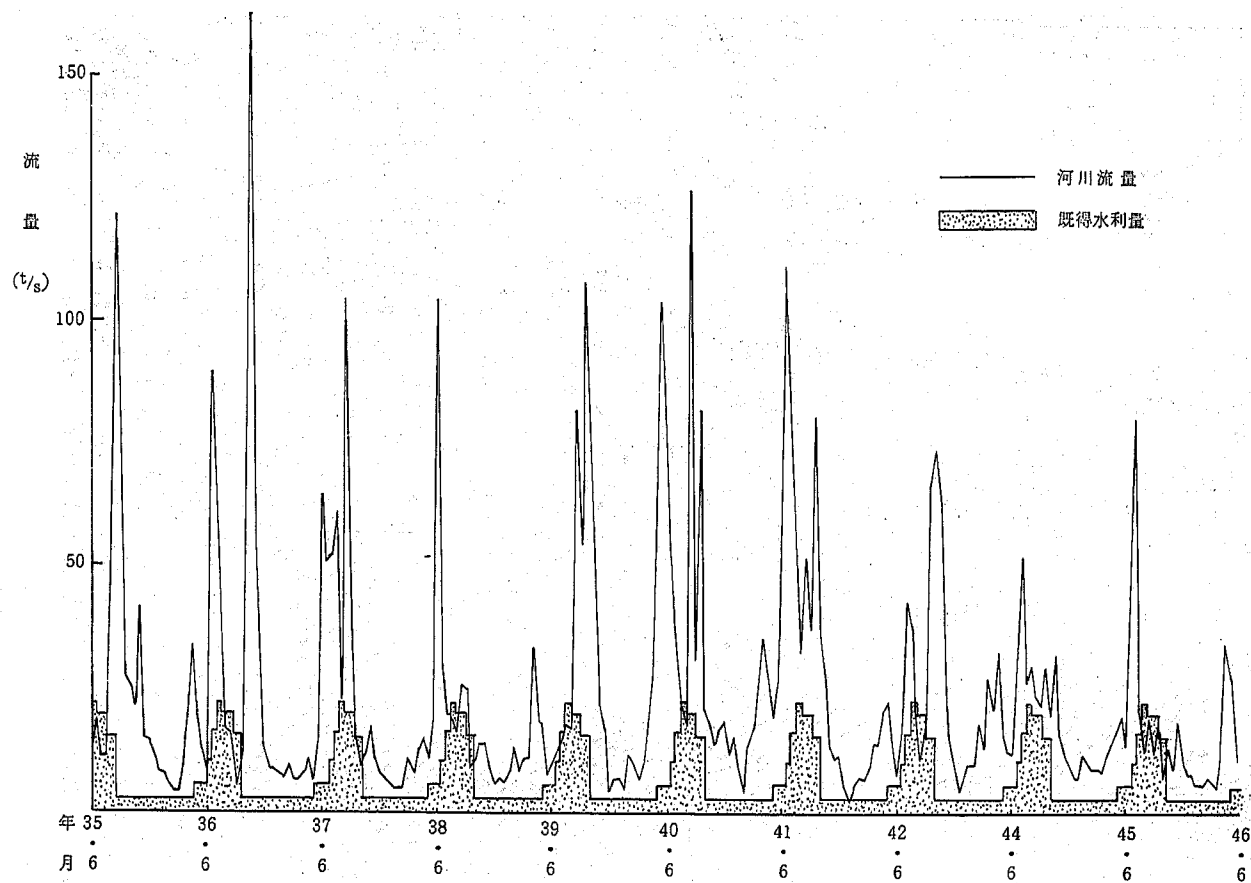


図 I - 1 流 況 及 び 既 得 水 利 量

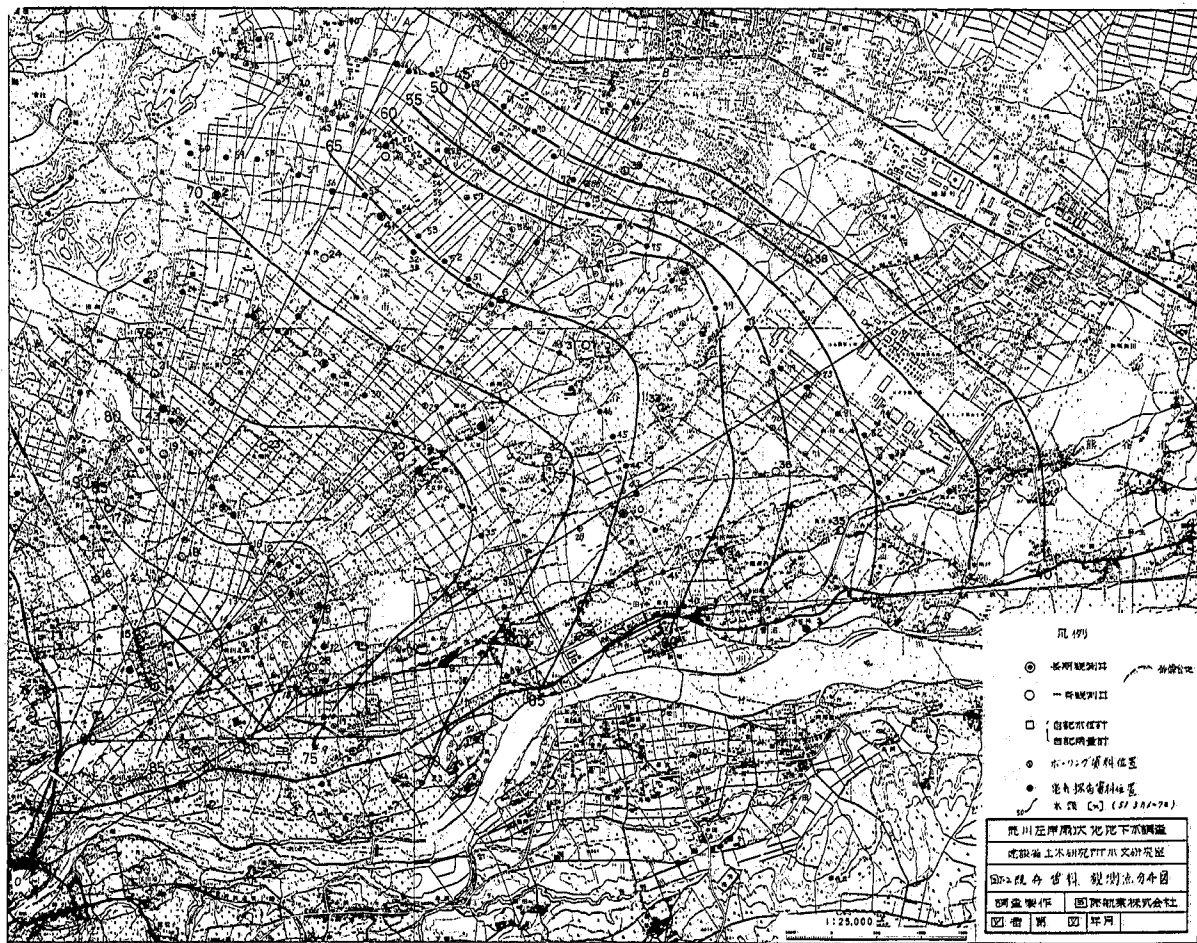
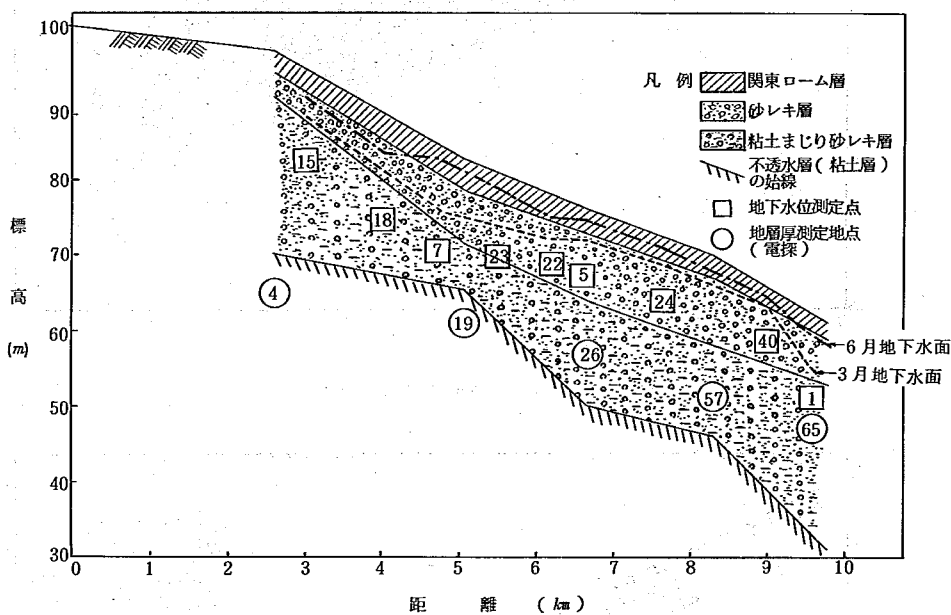


圖 I - 2 既 存 資 料 , 觀 測 點 分 布 圖

。 地層のデーター

埼玉県深谷市櫛挽台地を例にとり、その扇央から放射状な断面を3つ取る。(図I-2)その地層断面図を図I-3(a)、図I-3(b)、図I-3(c)に示す。地層モデルの地盤高、地表面高は図I-3(a)、図I-3(b)の平均値を用いた。また、初期水位は、6月の値とし、同様に両図の値の平均値を用いる。



図I-3(a) 地層断面図 A断面

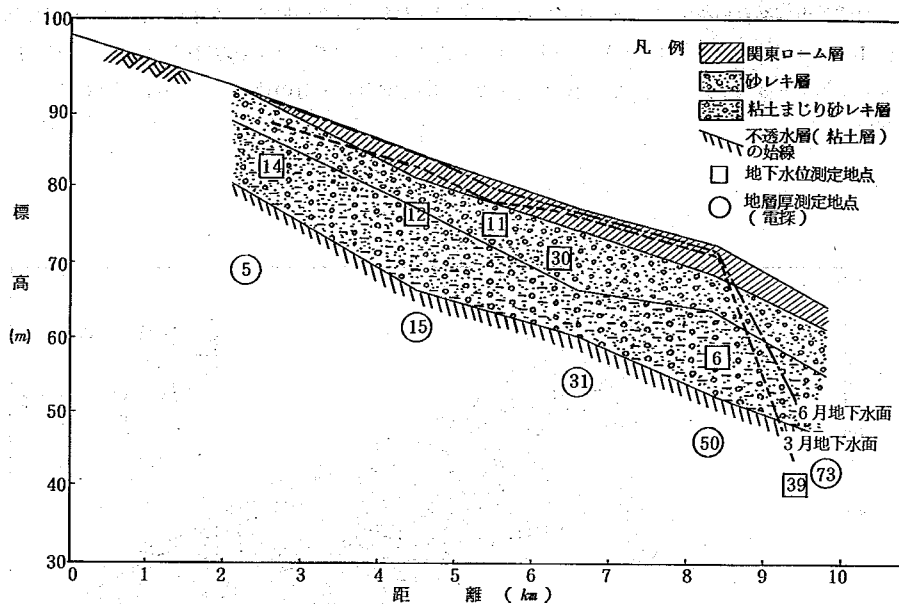


図 I - 3 (b) 地層断面図 B断面

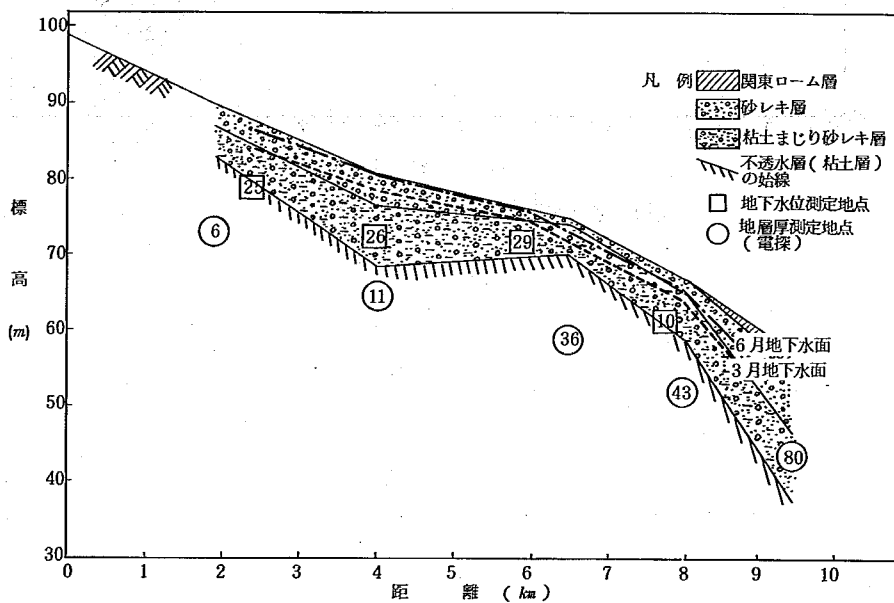


図 I - 3 (c) 地層断面図 C断面

Ⅱ 地下貯水池による水資源開発の計算

Ⅱ-1 計算を行うにあたって仮定及び定義

Ⅱ-1-1 仮 定

工学上の試算において、その仮定条件は、大きな意味を有する。そこで、本試算の仮定を次に銘記する。

- ① 地上ダム、地下貯水池間の距離は十分短く、相互間水輸送時間は無視できるものとする。
- ② ①に関連し、地下貯水池から揚水し地上ダムへ補給する際、揚水井は十分存在し、需要水に対し即座に適應できるものとする。更に、その補給時間は無視する。

Ⅱ-1-2 定 義

個々の用語について不明確な点を明らかにするため、定義として次に述べる。特に「開発水量」の定義については、注意を要する。

- ① 地上ダム容量、地下貯水池容量

それぞれ有効貯留容量である。

- ② 地下貯水池涵養能力

地下貯水池に対し、単位時間（秒）において涵養可能な水量である。

- ③ 開 発 水 量

一般の地上ダムの場合は、建設省河川砂防技術基準（案）計画編＜山海堂＞において、新規に開発すべき水量の算定として次のように述べている。

『計画目標年次における水需要量から現時点における供給可能量を差し引き今後新たに開発すべき水量を求め、そのうち水資源開発施設に依存すべき水量を算定する。即ち将来の水需要量と現時点における供給可能量との差が今後、開発により確保すべき水量となる。』

以上のように河川の開発水量を定義できる。しかしながら一般の地上ダムについての開発水量算定における試算期間と、地下貯水池のそれとは両者の性格上、自ら差異が存する。

地上ダムの場合、1年間を通じてダム貯留量が底をつかぬように開発水量を算定している。1年間という期間であれば夏期と冬期の降雨量や利用水量の違いから渇水期、豊水期の周期が大体把握できる。そのため、豊水期から渇水期を経て次の豊水期に達するまでにダム貯留量が底をつかぬようにすれば良い。

ところが地下貯水池の場合、その性質上、試算期間は5年間と長期にわたるものとした。すると夏期・冬期のような季節的変動はもちろん、それ以上に渇水年・豊水年といった単位の流量変動が、開発水量に大きく影響を与える。そこで、次に述べるような条件に従って、地下貯水池の開発水量を算定する。

1. 20年間の年平均流量を対象に5年間単位の移動平均を行う。そのうち最も流量の少ない期間を試算期間として選定する。なお、従来の地上ダムの場合は20年間の流量資料の毎年について、それぞれ開発水量の試算を行い、その開発水量の最小のものから2・3番目の値を取っている。
2. 5年間の渇水期間が決定したら、その期間において地下貯水池貯留量が1度も皆無にならない

ように操作する。ただし、その5年間に続く次の5年間で貯留量がほぼ容量に等しくなるまで回復することを必要とする。

3. なお、地下貯水池初期貯留量は容量と等しくする。そのため、地下水貯留量が一般に多い時期である6月から試算を開始し、終了日は5月末日とする。

II-2 検討したケース

地下貯水池の開発水量の試算では、様々の条件が考えられる。たとえば、地上ダム、地下貯水池それぞれの容量を変化させた場合などである。

ここでは、そのような条件の変化つまり検討したケースを次のように銘記する。

1. 容量及び涵養能力の変化

① 地上ダム容量	VDM (L) (記号)	20,000,000 t
		40,000,000 t
		60,000,000 t
② 地下貯水池容量	VGM	150,000,000 t
		300,000,000 t
		450,000,000 t
		600,000,000 t
③ 地下貯水池涵養能力	QT (K)	0.5 t/s ~ 10.0 t/s
		(0.5 t/s キザミ)
④ 開発水量	QK	0.0 t/s ~ 100.0 t/s
		(0.1 t/s キザミ)

2. 地上ダムと地下貯水池の組み合わせ

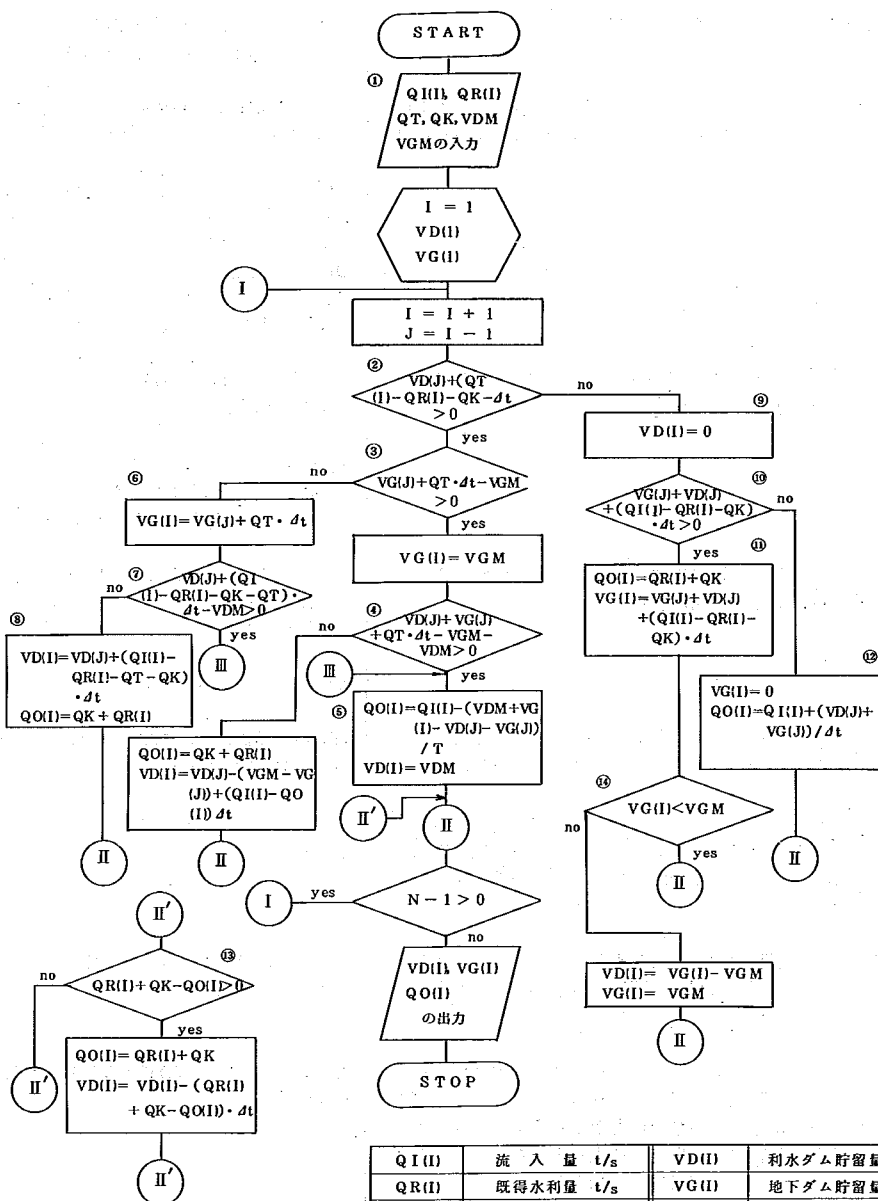
- ① 地下貯水池のみ操作させる。
- ② 地下貯水池の上流に流量平準化のための地上ダムを設置する。ただし地上ダムは可能な限り既得水利量を補給するよう操作する。
- ③ 地下貯水池と地上ダムを一体化して運用する。

地上ダムの空き容量をなるべく大きくするため地下貯水池に余裕があるときは常に地上ダムから地下貯水池に水を送り込む。

また、流入量が少ないため下流に対し補給が必要なときは、まず地上ダムの方から先に放流し流量を補う。そのとき、地上ダム貯留量が無くなった場合、地下貯水池から補給する。

- ④ さらに、既存の地上ダムが行う操作であるところの下流への補給が無い場合を検討する。この操作は、渇水時に特色を持つ。これは、上流からの流入量が下流の既得水利量より小さいとき、そのままの流入量を下流へ流してしまう操作である。つまり開発水量は既得水利量を考慮せずその渇水時流入量に直接上載されることになる。したがって、既得水利量は満足されない期間が発生する。

II-3 計算のフローチャートとその説明



Q I (I)	流入量 t/s	VD (I)	利水ダム貯留量 t
QR (I)	既得水利値 t/s	VG (I)	地下ダム貯留量 t
Q T	函養可能量 t/s	VDM	利水ダム容量 t
Q K	開発水量 t/s	VGM	地下ダム容量 t
Q O (I)	流出水量 t/s	Δt	1 日 (86400 sec)

計算法の説明

プログラムの内容

- ① DATAと変数の初期値を入力する。
- ② 地上ダムに既にある貯留量と流入量の両者により地下貯水池への涵養量と既得水利量、開発水量を負担できるか判定する。

- ③ ②が可能な場合、更にその時点の涵養能力で地下貯水池を飽和貯留量にできるか判定する。

- ④ 地下貯水池が飽和貯留に達する場合。更に利水ダムも飽和貯留量にできるか判定する。

- ⑤ ④も可能な場合、つまり地下貯水池も利水ダムも飽和状態になるとき、残った水量はすべて流出量へ付加する。

- ⑥ 次にもしも、利水ダムは必要水量（涵養量、既得水利量、開発水量）を負担可能であるが、時間あたりの地下貯水池への涵養量が足りないため地下貯水池が飽和貯留量にならない場合。

- ⑦ そこで、地下貯水池へ入れた涵養量よりも活用できる水量（流入量から既得水利量、開発水量を差し引いたもの）が大きく、水量が余れば、今度は利水ダムへ水を入れることになる。

この操作を行った結果、もしも利水ダムが飽和貯留量になる場合。その時点で計算は⑤に移る。すると地下貯水池は飽和貯留量になっていないにもかかわらず利水ダムも地下貯水池も、現在はこれ以上水を入れられないことになる。そこで残った水量は、流出量へ付加される。

- ⑧ 地下貯水池へ涵養可能量を補給することはできる場合。しかし、余った水量を利水ダムに入れる際に利水ダムが飽和貯留量になるにはまだ水量が不足しているとき。

VD(I) 利水ダム初期貯留量
VG(I) 地下貯水池初期貯留量

$$VD(J) + (QI(I) - QR(I) - QK - QT) \cdot \Delta t \geq 0.0 \quad (\Delta \cdots \text{比較の意})$$

VD(J) ワンステップ前の利水ダム貯留量 t
QI(I) 現在の流入量 t/s
QR(I) 既得水利量 t/s
QK 開発水量 t/s
QT 地下貯水池への涵養可能量 t/s
I…現ステップ J…ワンステップ前

$$VG(J) + QT \cdot \Delta t - VGM \geq 0.0$$

$$VG(I) = VGM$$

VG(I) 地下貯水池貯留量 t
VGM 地下貯水池容量 t
 Δt 1日 (86400 sec.)

$$VD(J) + VG(J) + QT \cdot \Delta t - VGM - VDM \geq 0.0$$

$$VD(I) = VDM$$

VDM 利水ダム容量 t

$$Q\bar{o}(I) = QI(I) - (VDM + VG(I) - VD(J) - VG(J)) / \Delta t$$

$$VG(I) = VG(J) + QT \cdot \Delta t$$

$$VD(J) = (QI(I) - QR(I) - QK - QT) \cdot \Delta t - VDM \geq 0$$

$$Q\bar{o}(I) = QI(I) - (VDM + VG(I) - VD(J) - VG(J)) / T$$

$$VD(I) = VD(J) + (QI(I) - QR(I) - QK - QT) \cdot \Delta t$$

$$Q\bar{o}(I) = QK + QR(I)$$

利水ダムへは、できる限り貯水し下流へは開発水量と既得水量だけを流すようにする。

- ⑨ 次に②まで逆昇って考える。以前からの利水ダム貯留量と流入量のみでは、地下ダムへの涵養量と既得水量、開発水量を負担できないとき利水ダム貯留量は無くなる。

そこで、一切、利水ダムへは注水せず以前からの利水ダム貯留量は現在の既得水量、開発水量を負担するための利用に供される。

- ⑩ そこで、地下貯水池が利水ダムを補うため登場する。以前からの〔地下ダム貯留量+利水ダム貯留量〕と現時点の流入量により既得水量と開発水量を負担できるか、判定する。

- ⑪ ⑩が成立するなら地下貯水池貯留量は、その負担分だけ差し引いた値となる。

そして流出量は、既得水量と開発水量の和となる。

- ⑫ さて、しかしながら地下貯水池で利水ダムの肩がわりをするのにも限度がある。つまり地下貯水池でも補給し得ない場合、地下貯水池貯留量は皆無となる。

- ⑬ 利水ダムが、まだ飽和状態でないのでできるだけ利水ダムへ注水し、必要流量は流出させる。

- ⑭ 地下ダムが飽和状態になる場合が、この段階でもあり得るので、ここでも判定する。飽和状態になったら利水ダムへ注水する。

$$VD(I) = 0.0$$

$$VG(J) + VD(J) + (QI(I) - QR(I) - QK) \times \Delta t \geq 0.0$$

$$VG(I) = VG(J) + VD(J) + (QI(I) - QR(I) - QK) \times \Delta t$$

$$QO(I) = QR(I) + QK$$

$$VG(I) = 0.0$$

$$QO(I) = QI(I) + (VD(J) + VG(J)) / \Delta t$$

$$QO(I) = QK + QR(I)$$

$$VD(I) = VD(J) - (VGM - VG(J) + (QI(I) - QO(I)) \times \Delta t$$

$$VD(I) = VG(I) - VGM$$

$$VG(I) = VGM$$

以上により、開発水量・地下貯水池貯留量・利水ダム貯留量・地下貯水池涵養能力を印字させる。

II-4 計算結果とその解釈

(1) 地下貯水池の開発水量を試算し、その結果からどのような因子が開発水量に影響を及ぼすか。また、終局目的としてどのような条件で地下貯水池を操作すれば最大効率を挙げることができるか、次のような項目について検討を行った。

1. 地下貯水池涵養能力、地下貯水池容量、地上ダム容量の変化に応じる開発水量の変化。
2. 地下貯水池を単独で操作する場合と、地上ダムと組み合わせた場合の比較。

さて、項目1においては試算を待たずとも次のような結果が推定され、実際の試算によっても裏づけられる結果が出ている。

- ① 地下貯水池への涵養能力を大きくするにしたがって開発水量は大きくなる。
- ② 同様に、地下貯水池容量を増加させれば開発水量は増加する。
- ③ 地上ダム容量についても同様のことが言える。

このように、開発水量の増減を左右する3つの量的条件が存在する。そこで、これ等3者を相互に比較検討してみる。

(2) 各容量を変化させた場合の比較

図Ⅱ-1のように、涵養能力が大きくなると開発水量は増加する。その増加率は3 t/s～4 t/sの涵養能力のところまでが著しい。ところが、地下貯水池容量の変化に対する開発水量の動向は図Ⅱ-4に示すように、ほぼ直線変化である。

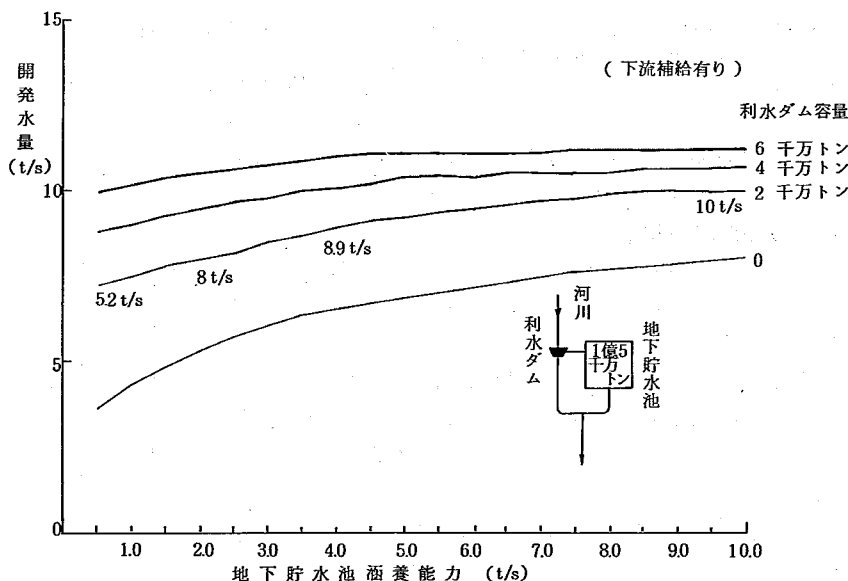
ゆえに、開発水量を効果的にアップさせるためには、涵養能力を開発水量増加率の大きい範囲の上限までひき上げると良い。

さらに、この試算では図Ⅱ-4のように涵養能力が1.0 t/sから3.0 t/sまで増加すると、それに匹敵する開発水量の創造のためには、地下貯水池容量は1億5千万トンから2億8千万トンまで増加させねばならない。すなわち、涵養能力の増大は、ある程度まではすこぶる有効であることが理解できよう。

次に図Ⅱ-1の地上ダムと地下貯水池を一体化して操作する場合と、図Ⅱ-3のように地下ダムのみ操作する場合とでは、同じような地下貯水池涵養能力の増大を行っても、幾分異った結果となる。即ち、図Ⅱ-1では開発水量の増加率が著しい範囲を越えると、涵養能力が増加しても、ほとんど開発水量は増加しない。つまり、図Ⅱ-1においては、涵養能力の増加分を地上ダム容量に、ある程度先取りし置き換えて考えることができる。

このように、地上ダムの存在は涵養能力を補う意味で、地下ダムの効果を一段と良好にする。

また、涵養能力が3～4 t/s位までの開発水量の増加が大であると述べたが、これについて若干、考えてみる。つまり、このことは、与えられた流況を効率的に地下貯水池で平滑化する状態が存在するということである。このような状態は、河川の規模、特性に起因する。たとえば、本試算の河川よりも流量変動



図Ⅱ-1 地下貯水池・利水ダムを連結し作動させる場合の開発水量

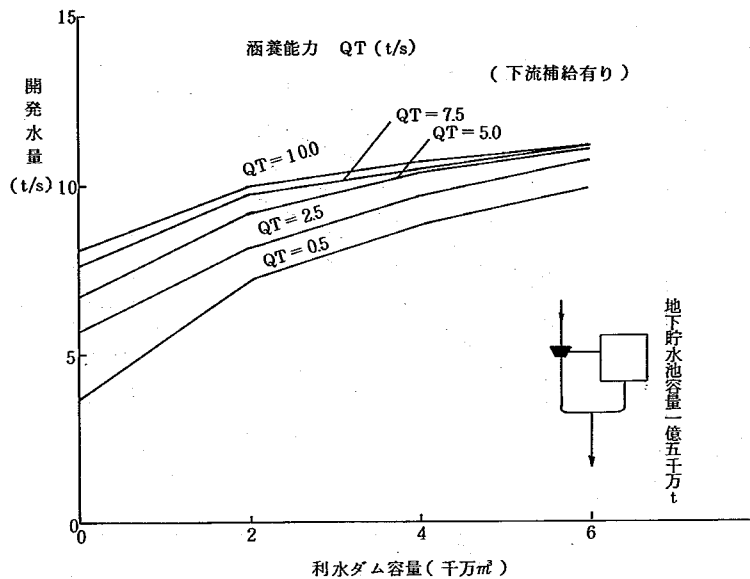


図 II - 2 利水ダム容量変化に対する開発水量 (地上ダム, 地下貯水池連結)

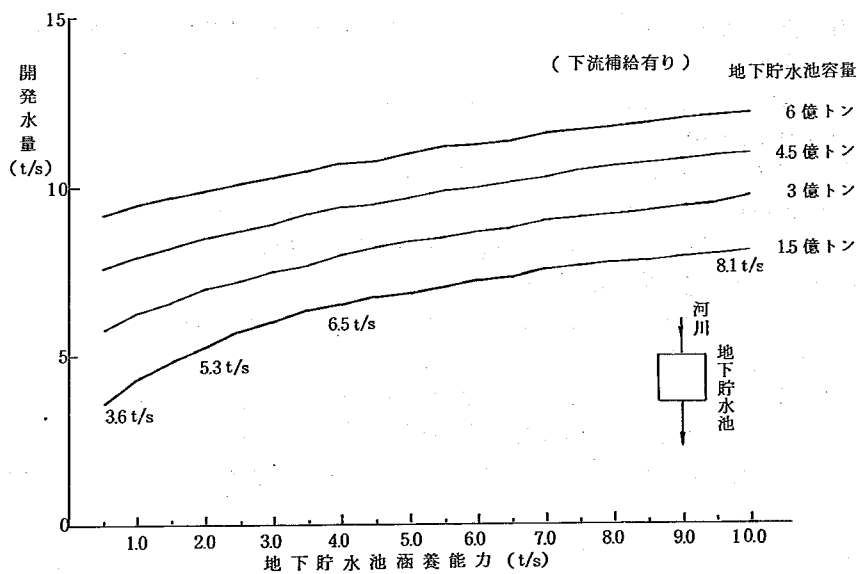
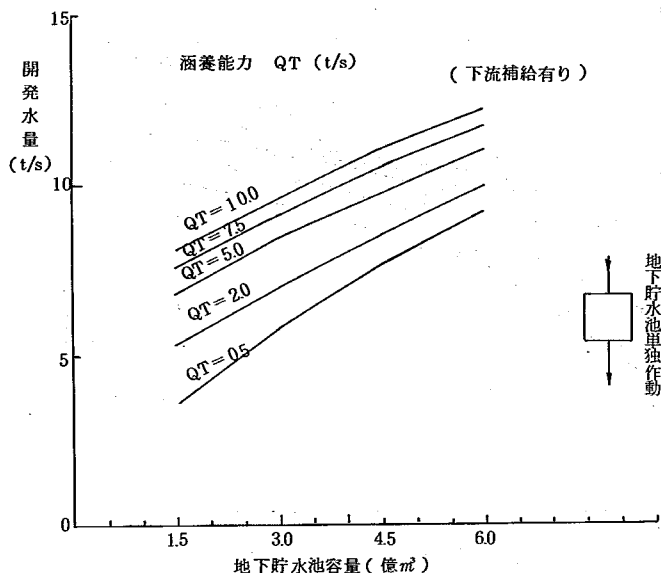


図 II - 3 地下貯水池のみ作動させる場合の開発水量



図Ⅱ－４ 地下貯水池容量変化に対する開発水量（地下貯水池単独）

量が一般に大きく、大規模な河川で地下貯水池容量が同じなら、本試算の場合に比し更に涵養能力が大のところでのこのような状態が存在すると考えられる。したがって、本試算を、任意の河川で行い開発水量に対する涵養能力の最大効率値を求めることは、実際の地下貯水池の運用計画面で大きな意義がある。

〔3〕 地下貯水池の運用方式の検討

以下の地下貯水池運用方式について図Ⅱ－５で比較する。

- a. 地下貯水池単独運用
- b. 上流地上ダムで流入量平準化後、地下貯水池単独運用
- c. 地下貯水池・地上ダム連結運用

なお、条件は、できるだけ同一にするため、地下貯水池容量、150,000,000 t、地上ダム容量20,000,000 t、地下貯水池涵養能力2 t/sと統一した。

図Ⅱ－５より明らかであるように、bよりcの組み合わせの方が開発水量を生み出す面で有利であることは歴然としている。

さて、地上ダムは容量の面でこそ劣るが、洪水期貯留のようなすばやい短期貯留に適する。これに対し地下貯水池は地下水の涵養に多少手間どるが、容量は相当大きなものが可能である。即ち、相反する地上ダム、地下貯水池の長所短所を相互に組み合わせて作動させることにより格段の効果が表われるものである。

〔4〕 地下貯水池貯留量の涵養能力による、経年変化の比較

地下貯水池貯留量の経年変化の比較には、図Ⅰ－１の流量の変動が多分に影響する。ここで、流量資料について、新たな補足説明を行わねばならない。というのは、図Ⅱ－５－cの容量及び条件の場合、実際に

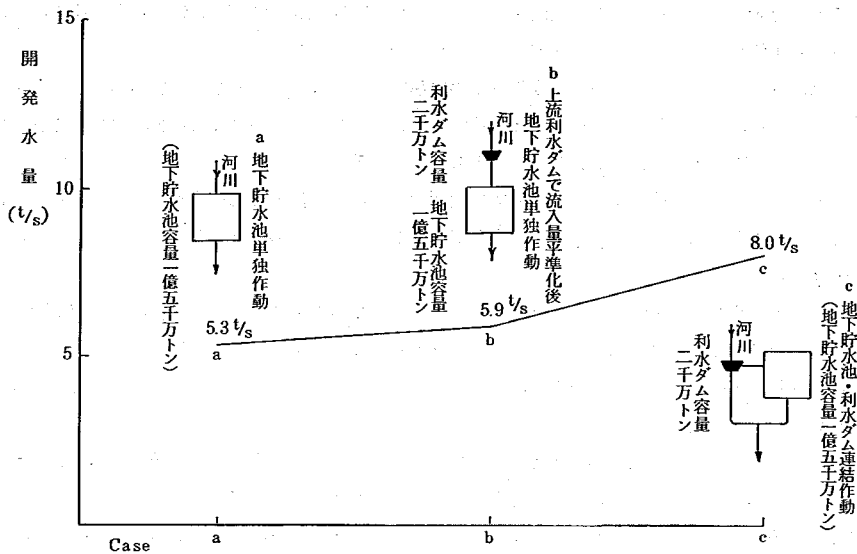


図 II-5 地上ダム，地下貯水池組み合わせによる開発水量の比較（下流補給有り）

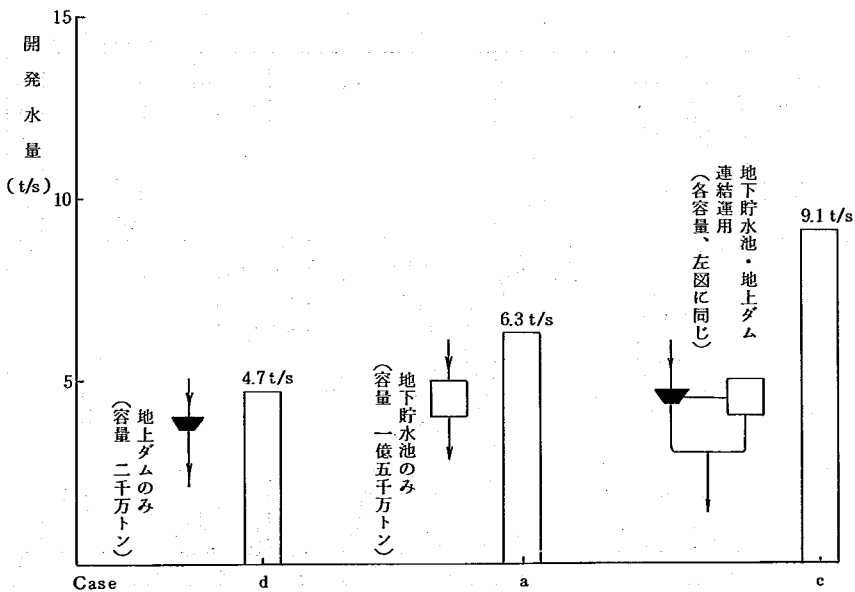


図 II-6 地上ダム，地下貯水池組み合わせによる開発水量の比較（下流補給無し）

計算した結果、2年間ぐらいの連続した渇水期間の影響力が開発水量の算定に対して、かなり大きいのである。つまり、2年以上渇水期間が継続すれば、本試算上の地下貯水池貯留量を消費し得るのである。

ということは本試算で5年間の渇水期間を選定した場合、この渇水期間以上に、地下貯水池貯留量を皆無に近づけ得る可能性をもった期間も存在するかもしれない。

たとえば、5年間トータルすると、2,3番目の渇水期間でしかないが、大きな渇水年が2年以上連続しているといった状況を内在している場合がその例として挙げられる。このようなとき、本試算で算定した開発水量では、地下貯水池貯留量が底をつくとも考えられる。

実際、本試算で選定した第1位の5年間の渇水期間の次に、第2位の渇水期間が位置している。さらに、その第2位の渇水期間には、2年連続した大きな渇水年が存在し、この図Ⅱ-7,8のように最も貯留量の減退する期間となっている。

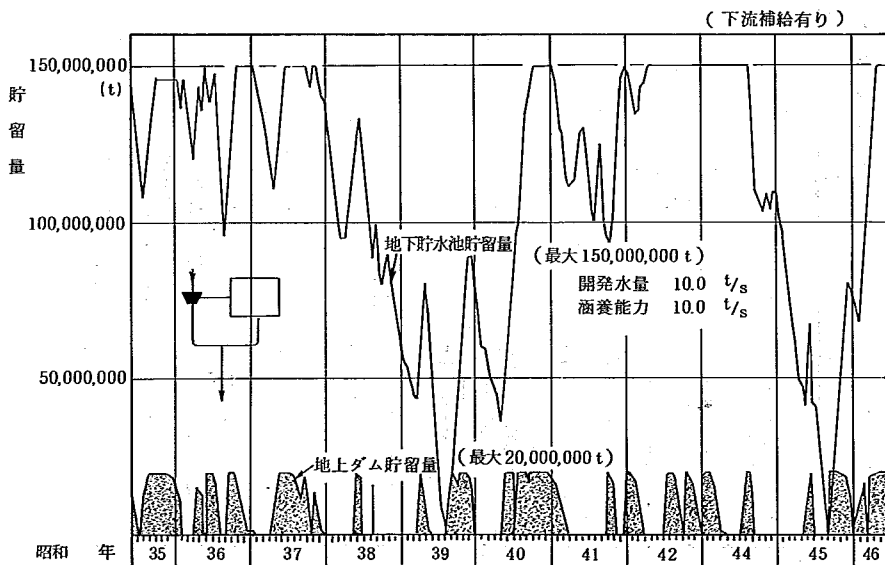
しかし、このような例はまれである。また、この点を改良するためには、1年ごとの平均流量及び2年間単位の移動平均により確認しつつ渇水期間を選定すれば十分であろう。

さらに、5年間という渇水期間の選定は、長期間の水需要に対処するという地下貯水池の思想に基づいており有効なものと言える。

次に、図Ⅱ-7,8の比較で明らかにように涵養能力が大きいときは、多少敏感に流量の増減の影響を受ける。つまり、涵養能力が大きいと迅速な貯留量回復がなされる。

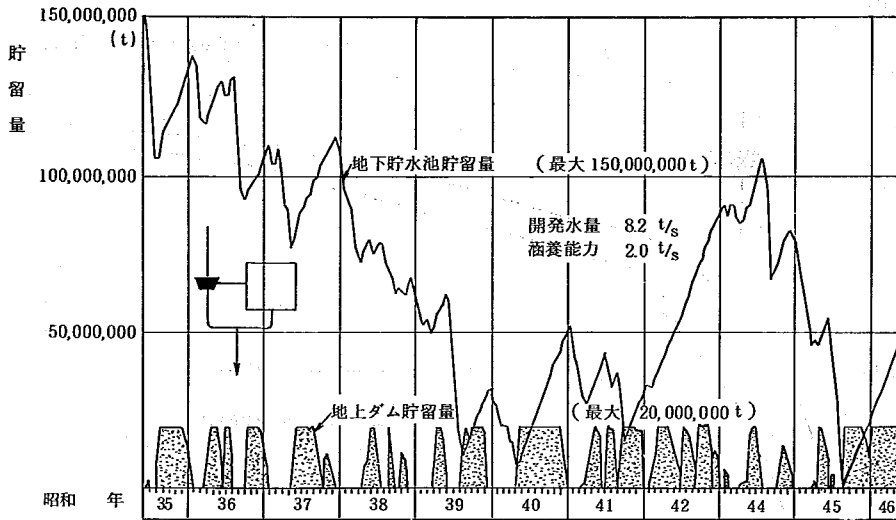
最後に、下流補給無しの場合の計算結果を次頁表Ⅱ-1に示す。渇水期には、現状では水節約で切り抜けている（補給しない）ので、表Ⅱ-1の開発水量が有効となる。

また、下流補給無しの場合の地上ダム、地下貯水池組み合わせによる開発水量の比較を図Ⅱ-6に示す。この図では、地上ダムのみの操作による開発水量4.7t/sと地下貯水池のみの操作による開発水量6.3t/s



図Ⅱ-7 地下貯水池貯留量、地上ダム貯留量の継年変化 (t)

(下流補給有り)



図Ⅱ-8 地下貯水池貯留量，地上ダム貯留量の継年変化 (t)

表Ⅱ-1 下流補給無しの場合の開発水量

試算ケースの項目		開発可能水量 (t/s)
地下貯水池容量 1億5千万t	地下貯水池のみ	6.3
	連結運用 (地上ダム+地下貯水池)	9.1
地下貯水池容量 1億t	地下貯水池のみ	5.8
	連結運用 (地上ダム+地下貯水池)	8.5

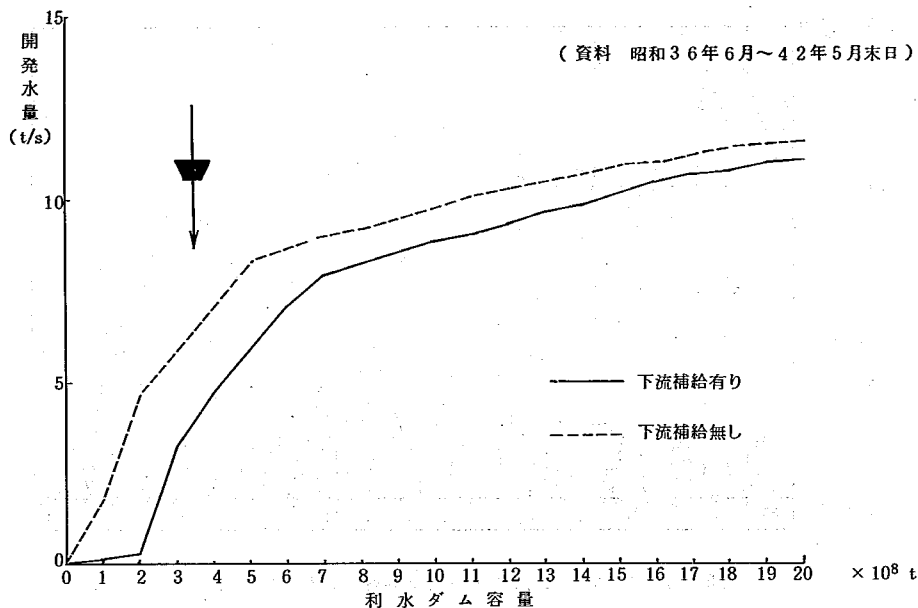
を単純に和せば11.0t/sとなる。すると，地下貯水池と地上ダムを連結運用した場合の開発水量9.1t/sより多い。だが，河川の開発水量の考え方として，低い量の開発水量の方が高い量の開発水量より生み出し易いというのが開発施設の容量について一般的である。たとえば，地上ダム容量が2千万トンから8千万トンに増加しても開発水量は下流補給無しの場合4.7t/sから9.2t/sに増加するのみである。

ゆえに，下流補給無しの場合についても，地下貯水池，地上ダムの連結運用が有効であると言える。

また，図Ⅱ-9に地上ダムのみの場合の開発水量の計算結果を示す。計算期間は5年間で地下貯水池の開発水量の計算と仮定が同じなので比較し得る。

Ⅱ-5 考察

地下貯水池による水資源開発は結局，地上ダムと相補うことにより大きな意味を持つことが明らかとなった。このことは，次の表Ⅱ-2によりあらためて理解されよう。



図Ⅱ－9 利水ダムのみの場合の開発水量

表Ⅱ－2 河川下流補給有りの場合の開発水量(まとめ)

運用方法		地下貯水池容量	地上ダム容量	涵養能力	開発水量	図番号
地下貯水池①		150,000,000 t		2.0 t/s	5.3 t/s	Ⅱ－3
				10.0 t/s	8.1	
地上ダム②			20,000,000 t		0.0	Ⅱ－9
			40,000,000 t		4.0	
① + ②	連結	150,000,000 t	20,000,000 t	2.0 t/s	8.0	Ⅱ－1
	独立	"	"	10.0 t/s	10.0	
②				2.0 t/s	5.9	Ⅱ－4

だが、ここで大きな論点となるのは、この計算の根幹をなす開発水量が、実際の地下貯水池建設後、常に利用し得る水量であるか、確認が必要である。一般の地上ダムでは、前述のような計算方式なので、次年度へ繰り越される利水量的影響は帳消しにされている。つまり、貯留量は回復している。ところが、本試算では、選定した5年間を通して、地下貯水池貯留量が0にならないようにしている。従ってそのままの開発水量を継続利用した場合、後年度からはほぼ貯留量0で操作を始めることもある。すると、以後流況が悪化即ち渇水化した際、地下貯水池貯留量が減少一方になる不安がある。

そこで、最大の渇水期間5年間にひき続き第2位の渇水期間を設け、その期間内で地下貯水池貯留量が容量近くまで、回復すれば良い。この操作を行えば、地上ダムの開発水量算定と同様の原理となる。

Ⅲ 地下貯水池内水位を考慮した水資源開発計算

Ⅲ-1 計算を行うにあたっての仮定及び定義

Ⅲ-1-1 仮定

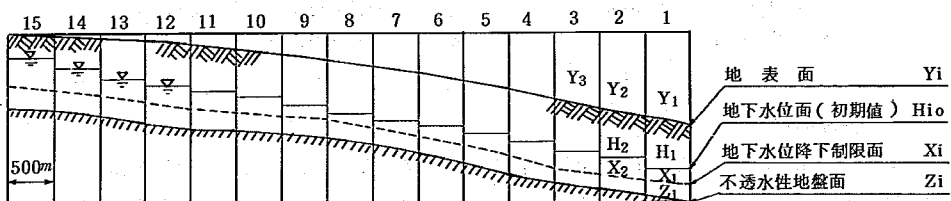
地下水位操作の仮定

- 1次元の地層を想定したものである。地層への流入は、雨と水田からの涵養、河川からの注入水である。流出は、地層下端からの下流への流去及び開発水量を生み出すための揚水である。
- 地層モデルにおける不透水性地盤高及び地表面の標高は、埼玉県による礫挽台地の電探資料に準拠する。
- 地下水位変動が、地表面上または地下水降下制限面の下方にそれぞれ及ばないような操作を行う。それに付随し、地下貯水池の容量は地表から地下水降下制限面までの差から算定することになる。
- 地下水位が地表面上におよべば、注入水の各ブロック空容量に応じての再配分、注入量削減などの操作を行う。ただし、通常は、全ブロックについて均等に揚水、注入を行う。
- 用排水路等、地下水が地表水に還元される場合は考慮していない。地表面いっぱいまで水位変動は許されるものとする。
- 地下水位による地層の浸透能変化は考慮していない。
- 地下水降下の制限面を不透水性地盤より一律に10 m上方とした。

Ⅲ-1-2 定義

1. 試算期間及び流量記録、既得水利量などの入力とはⅡ章と同じとする。試算期間は昭和39年6月から5年間である。
2. 計算領域

縦長	7 km
横幅	7 km
3. 計算ブロック間隔 500 m
4. 降雨 1 mm / day
5. 水田からの涵養量 $43.2 \text{ m/day} \times 0.8 (0.05 \text{ cm/sec} \times 0.8)$
6. 貯留係数 0.2
7. 計算時間間隔 1 日
8. 計算地層の断面



図Ⅲ-1 地層断面図

表Ⅲ-1 各 標 高

(単位 m)

地層区分	ブロック 種	15	14	13	12	11	10	9	8	7
地 表	Y i	93.50	91.00	88.50	85.00	82.50	81.00	79.00	77.00	75.50
初期地下水位	H ₁₀	91.20	87.20	83.20	82.80	81.30	78.80	70.20	74.80	71.80
地下水位下限	X i	82.10	80.10	78.20	76.20	75.00	72.20	69.00	65.90	63.70
地 盤	Z i	72.10	70.10	68.20	66.20	65.00	62.20	59.00	55.90	53.70

地層区分	ブロック 種	6	5	4	3	2	1
地 表	Y i	74.00	72.00	70.00	67.50	64.50	61.50
初期地下水位	H ₁₀	70.90	69.00	66.70	64.40	60.20	56.00
地下水位下限	X i	62.00	60.30	58.00	54.50	51.00	46.00
地 盤	Z i	52.00	50.30	48.00	44.50	41.00	36.00

上流境界条件

$$q \text{ (流入量)} = 0$$

下流境界条件

$$H - 2H_2 + H_1 = 0$$

9. 計算ステップ

時 間 ステップ	ブ ロ ッ ク (i) と の 式	備 考
t ₁	$q_{t1(i)} = K \cdot \frac{H_{t1(i)} - H_{t1(i-1)}}{\Delta x} \cdot \frac{1}{2} \{ (H_{t1(i)} - Z_{(i)}) + (H_{t1(i-1)} - Z_{(i-1)}) \}$	Darcy の式
t ₂	$H_{t2(i)} = \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot S} \{ q_{t1(i+1)} + (r_{pt} + r + E_{t2(i)}) \Delta x - q_{t1(i)} \} + H_{t1(i)}$ $q_{t2(i)} = K \cdot \frac{H_{t2(i)} - H_{t2(i-1)}}{\Delta x} \cdot \frac{1}{2} \{ (H_{t2(i)} - Z_{(i)}) + (H_{t2(i-1)} - Z_{(i-1)}) \}$	連続の式
⋮		
t _n		

諸 元

q ……単位幅流量 m³/day

K ……透水係数 m/day

H ……水 位 m

r_p ……水田からの涵養水量 m/day

Δx ……ブロック幅 m

r ……降 雨 m/day

Δt ……時間ステップ day

E ……揚水量又は注入量 m/day

S ……貯留係数

Z ……不透水性地盤高 m

Ⅲ-2 計算の説明

計算方法は、Ⅱ章に準拠する。Ⅱ章の試算は単に地下貯水池容量、地上ダム容量及び地下水涵養可能量の概念によって規定された。ところが、この地層モデルは注入、揚水による地下水位の増減と地下水流動状況を考慮するところに特色を持つ。そして、不透水性地盤面と地表面との値を入力することによって、

地下水位の増減を制限し、実際の地下貯水池の状況に近づけている。

しかし、開発水量の考え方はⅡ章の試算と同様である。

次に、地表面、不透水層の形状が指定された場合、地層中の地下水位の変動には次のようなパターンが考えられる。

- (1) 地層範囲全面にわたって地下水位が地表面以上になる場合。
- (2) 地層範囲の一部において、地下水位が地表面以上になりその他の部分では地下にある場合。
- (3) 地層範囲全面にわたって、地下水位が地層中にある場合。
- (4) 地層範囲の一部において、地下水位が不透水層面の始点以下となる場合。
- (5) 地層範囲の全面にわたって、地下水位が不透水層面の始点以下となる場合。

このような五つのパターンが考えられる。しかし、(3)以外はいずれも実際の地下貯水池の運用として不適格な状態である。そこで1日ごとの注入、揚水を行う前段階では、地下水位は(3)の状態にあるものとして話を進める。

つまり、この(1)、(2)、(3)、(4)、(5)は、注入又は揚水の操作により、次の段階で地層中の水位がこのような状態になるのではないかといった場合分けとなる。しかし、実際にはこのような(1)、(2)、(4)、(5)の状態にしないための操作を行わねばならない。

まず、次の段階で(1)、(2)になる場合、注入すべき量が涵養可能量に等しければ、各ブロックの地表面以上の地下水位に相当する水量（オーバーフロー量）は注入できない。そこで、注入できない水量は河川流況へ戻すことになる。そのとき、注入量が涵養可能量に達していないなら、オーバーフロー量を他の空容量のある涵養可能量に達していないブロックに割り振る。それでも注入できない水量は、やはり流況に戻す。この、『流況に戻す』とは結局、地上ダムに戻すことになる。しかし、(1)の場合地下貯水池の容量が与えられているので、容量面で、すでに飽和状態となり、注入はしないことになる。

(4)、(5)の場合、揚水量を地層中の地下水位に比例して取れば良い。これは、地下貯水池からの揚水量には仮定上、制限がないので可能となる。つまり、地中に残留している水量のトータルに対する各ブロックの水量の割合に応じて取水するといったことである。この操作によって、そのままでは地下水位が地下水取水制限面以下になるようなブロックからの揚水量は0に近くなり不合理は生じない。

以上のように割り振りなどを行い、地下貯水池に対する注入量、揚水量の操作が変更される。そして変更された場合、変更前の注入量もしくは揚水量は駆逐され、新たな操作でもう一度水位計算をやりなおすことになる。

Ⅲ-3 計算の結果とその解釈

地下貯水池内水位を考慮した水資源開発計算の結果（開発水量）

地下貯水池と地上ダムの連結運用 10.0 t/s （計算条件は 図Ⅲ-3）

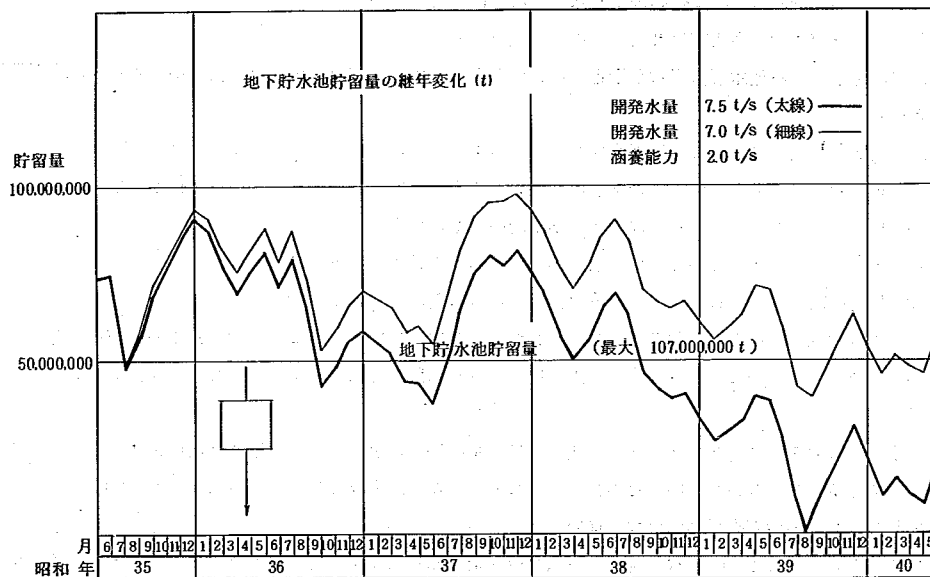
地下貯水池のみ運用 7.0 t/s （計算条件は 図Ⅲ-2）

前節までの説明で周知のごとく地下貯水池への入力、出力はそれぞれ次のように分類できる。

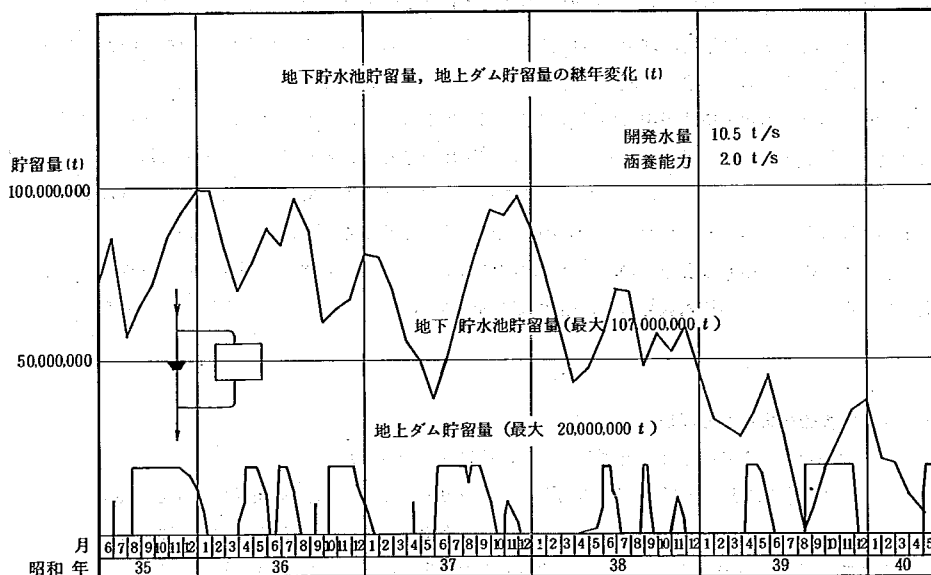
入力 —— 降雨、水田からの涵養、注入水量

出力 —— 揚水量、地層下流からの流去水量

このような入力、出力はⅡ章の場合に対して、降雨、水田からの涵養水量、地層下流からの流去水量の



図Ⅲ-2 地下貯水池のみで運用したときの開発水量



図Ⅲ-3 地下貯水池と地上ダムを連結したときの開発水量

点が異なる。そのため、単純にⅡ章の場合と比較することはできないが、そのような相異点も考慮して、計算結果について考察してみる。

地層への入力である注入水量は涵養可能量上限として、河川流量の季節変動に影響をうける。そして、揚水期間中は注入できない。ところが注入水にこのような制限があるのに対して降雨と水田からの涵養水量は、計算全期間を通じて入力として生きている。このように、本章の計算の仮定は、開発水量を伸ばすという観点では良い条件にあると言える。

ただ、出力として下流流去水と地層内に水位を保つ操作のためのロスがある。しかし、流去水は 0.4 t/sec 程度であり、あまり大きな影響は持たない。また操作ロスは、地下水位が上昇し過ぎたり下降し過ぎたりしたときの短期間なので小さな影響しかない。

そのため、地下貯水池容量は1億6百万トンと比較的小なるにもかかわらず、大きな開発水量を生み出せるものと思われる。

以上の事柄より、次のことが言える。

1. 全計算期間中継続して注入される水量は、開発水量を円滑に増大する。これは、もともと開発水量という概念が全計算期間を通して維持できるもの、という考えに基づくからである。ここで 継続して注入される水量とは降雨量、水田からの涵養量を指す。
2. 本来、本章の計算の特性であるべき地表面、不透水性地盤面に対する水位高調節操作が開発水量への影響因子としては、あまり大きな重みを持たない。
3. つまり、同じ条件であれば、Ⅱ章の計算によって算出された開発水量とⅢ章の場合のそれとは大差ないと言える。
4. 地下貯水池下流への流去水量が少ないため止水壁を築造した際の効用は小さい。

また本章の計算の問題点は、次のようである。ただし、ここで挙げる問題点は、開発水量算定計算の範囲を越えるものもある。

・ 問 題 点

1. 試算上は、ブロックごとの水位変動を行わせるため、一気に揚水・注入をする形式になっている。ゆえに現実では、十分多くの群井等を使用して地下貯水池の運用を行った場合に匹敵する。また、雨・水田による涵養を除いた掘水池による場合の涵養方法を考える場合、涵養量変化の遅滞が無視できないため本試算の完全な適用は困難である。
2. 地下水位降下制限面の標高を一律に不透水性地盤高より10m上方にしている。だがこの10mという数値は、取水限界（井戸損失、地盤沈下への憂慮）により大略的に仮定したものである。

また、地表面についても植生への影響を考慮し地下水位上昇制限面（地下1m位）が必要となる可能性がある。

ただし、本扇状地については、水位が地表面近くなる季節が現行で存在する。そのため本試算では特に地下水位上昇制限面を設けなかった。

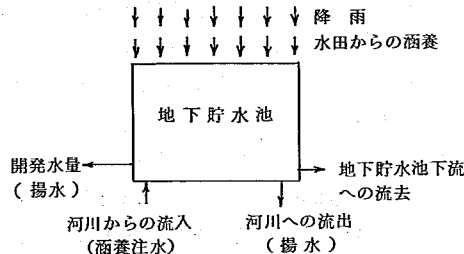
本試算では地下水を河川水と同様に扱って単に水量として計算している。しかし、実際には水質的・法律的・経済的な面の検討も必要であることを銘記しておく。たとえば、揚水した地下水は、水質も良好で処理が少なく済み経済的メリットがある。また、どの程度地下水位を変動させるかによって環境に対する影響とのかね合いもある。

Ⅳ 地下貯水池の運用に関する考察（降雨等による開発量及び注入取水の配分方法の検討）

Ⅳ－１ 試算の目的

1) 開発水量の推定

図Ⅳ－１のような水収支を考える。地下貯水池への流入水は、降雨・水田・河川からの寄与の3者となる。このような設定で、試算期間中を通じて安定に取水できる水量を求める。つまり、水位降下が生じても回復するような取水を行うということであり、試算始期の地下水位と試算最終期の地下水位が、ほぼ一致するように計算操作したときの開発可能水量を求めるものである。



図Ⅳ－１ 地下水の水収支

2) 地下貯水池内の地下水位変動状況の検討

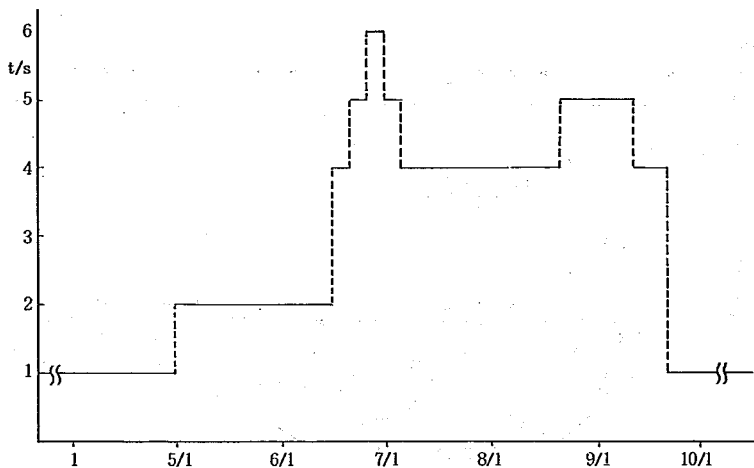
水位変動の時間的な変動をつかむ。

3) 注入・揚水量の場所的割合の検討

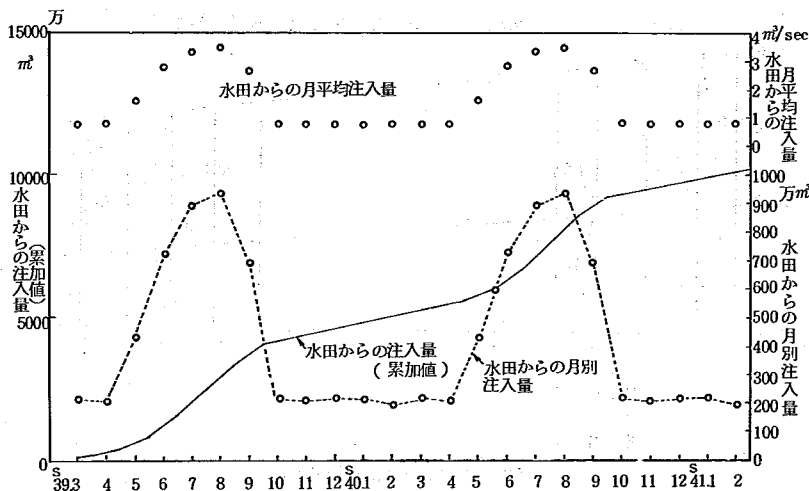
河川からの注入・揚水を計算区全域に渡って均等に行うのみならず、場所的にその水量を変化させた場合について試算検討する。

Ⅳ－２ 計算を行うにあたっての仮定

- 1) 1次元の地下構造を考慮した。Ⅲ章の計算と同じ地下構造のデータである。
- 2) 試算期間は2年間とする。
- 3) 水田からの涵養量は図Ⅳ－２に示す
- 4) 降雨による地下水涵養は 1 mm/day とし、常時供給されるものとする。
- 5) 河川から地下貯水池に注入又は揚水される水量は図Ⅳ－４に示す。このデータは、昭和39年3月から昭和41年2月末日までのⅡ章の計算の資料をそのまま使用した。これは、地下貯水池と地上ダムを連結運用し、涵養能力 2 t/s で開発水量が 8 t/s と算出されたときの地下貯水池への注入・揚水のデータである。つまり、この注入・揚水量を、そのまま本章の計算の地下貯水池への注入・揚水量とした。
- 6) 地下貯水池上流からの自然流入水は無いものとする。
- 7) 以上の仮定のように、本章の試算の注入・揚水のデータでは、河川流況に対してすでに 8 t/s の開発水量を補給している。だが、本章における開発水量とは、 8 t/s にさらに上載した開発水量の数値とする。たとえば、本章で、開発水量 1.0 t/s というのは、実質上前章までの場合なら 9.0 t/s の開発水量ということである。



図IV-2 水田からの涵養量年間パターン（本図の値の8割の水量が涵養可能として、試算では0.8をかけた値を使用する。）



図IV-3 地下貯水池への水田からの涵養量変化

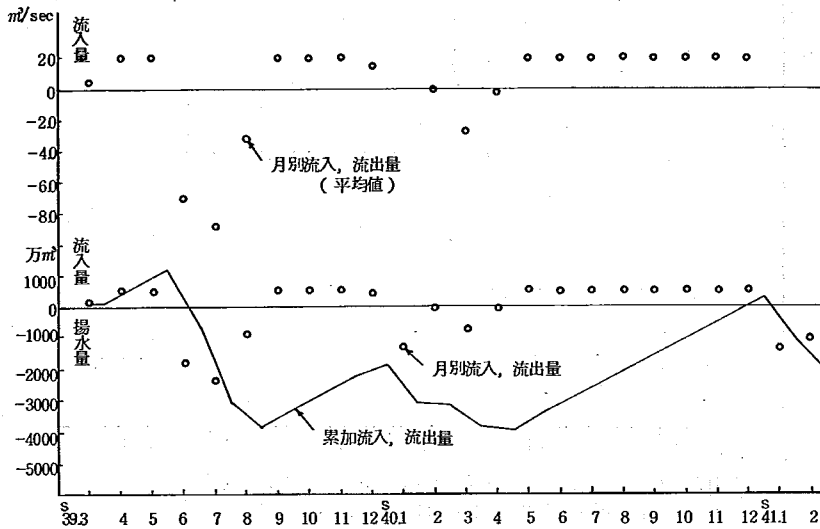
IV-3 計算の説明

計算方法

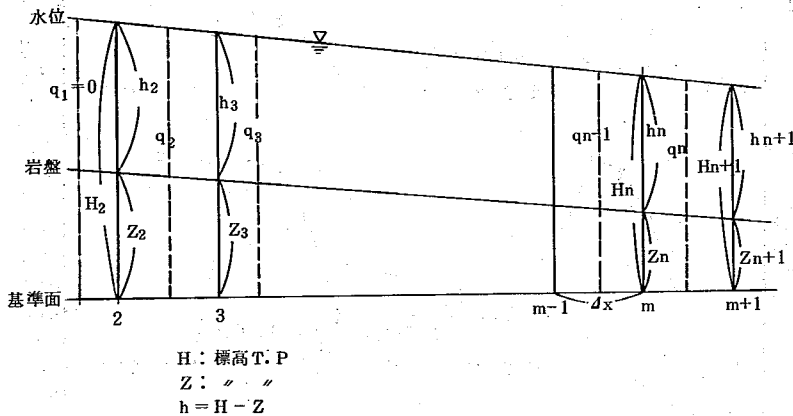
1) 地下水流動の基本式

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial q}{\partial x} + W \dots\dots\dots \text{連続の式}$$

S : 貯留係数 (non dime.), x : 距離座標 (m), t : 時間座標 (day), H: 水 位 (m)



図IV-4 地下貯水池への河川水を利用した注入量，揚水量変化



図IV-5 地下水流動一次元モデル

q : 単位幅当りの流動量 (m^3/day), W : 揚水, 涵養等すべてを含む (m/day)

$$q = k(H - Z) \frac{\partial H}{\partial x} \dots \dots \dots \text{運動の式}$$

k : 透水係数 (m/day), Z : 不透水層のレベル (m)

連続の式, 運動の式より,

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (H - Z) \frac{\partial H}{\partial x} \right\} + W$$

なる地下水流動の基本式が求められる。

2) 境界条件

上流の境界条件

$q_1 = 0$: 地下水の上流からの供給はないものとする。

下流の境界条件

$$H_{n+1} - 2H_n + H_{n-1} = 0$$

3) 計算ステップ

前項で求められた地下水流動の基本式を差分形式に変換すると、

A. 流量計算

$$I_{i,t} = \frac{H_{i+1,t} - H_{i,t}}{\Delta x}$$

$$h_{i,t} = \frac{1}{2} ((H_{i,t} - Z_i) + (H_{i+1,t} - Z_{i+1}))$$

$$q_{i,t} = k \cdot I_{i,t} \cdot h_{i,t} \quad (i = 2, 3, \dots, n)$$

I_i : 水面勾配 (non dime.), h_i : 水深 (m), q_i : 単位幅当りの流動量 (m³/day)

n : 断面

B. 水位計算

$$H_{i,t+1} = \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot s} \{ q_{i-1,t} + (V_{pt+1} + r + WX - W_{i,t+1}) \cdot \Delta x - q_{i,t} \} + H_{i,t}$$

$$H_{n+1,t+1} = 2H_{n,t+1} - H_{n-1,t+1} \quad (i = 2, 3, \dots, n)$$

V_p : 水田からの注入量 (m/day), V : 雨 (m/day), WX : 揚水量 (m/day),

W : 河川からの注入量, 河川への流出量 (m/day)

4) 計算のフロー

$$t = H_t \rightarrow q_t$$

$$t+1 = H_t \quad q_t \rightarrow H_{t+1}, H_{t+1} \rightarrow q_{t+1}$$

$$t+2 = H_{t+1} \quad q_{t+1} \rightarrow H_{t+2}, H_{t+2} \rightarrow q_{t+2}$$

⋮

$$t+m = H_{t+m-1} \quad q_{t+m-1} \rightarrow H_{t+m}, H_{t+m} \rightarrow q_{t+m}$$

のように流量計算・水位計算を交互に行い単位時間 (Δt) 毎に計算を進めていく。

5) 計算データ

計算単位

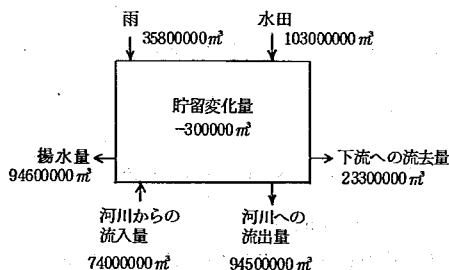
a. DT : 計算時間間隔	1	day
b. DX : " 距離 "	500	m
c. B : " 領域巾	7000	m
d. L : " " 長	7000	m
e. Z : 岩盤高 標高 T.P	m	表IV-5 参照
f. H : 水位 "	m	表IV-2 "
g. h : 水深 $h = H - Z$	m	
h. k : 透水係数	0.05 cm/sec	m/day 換算 $0.05 \times 86400 / 100 = 43.2$

- i. V : 雨 1 mm/day m/day 換算 $1/1000 = 0.001$
 j. V_p : 水田からの注入量 m/day 表IV-1 参照
 k. S : 貯留係数 0.2 —
 l. WX : 揚水量 $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ m/day $1.0 \times 86400 / (7000 \times 7000) = 0.0$
 m. W : 河川からの流入量及び河川への流出量 m/day 表IV-1 参照

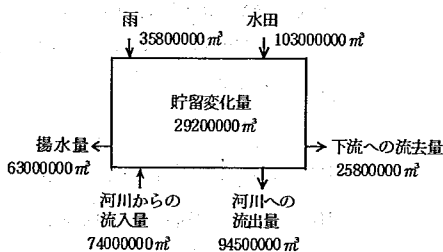
IV-4 計算結果

1) 開発水量の推定と水収支

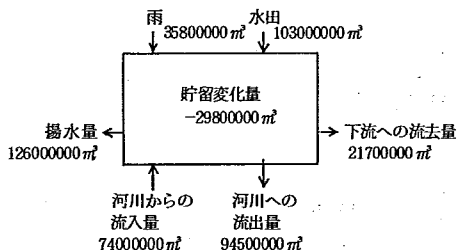
a) 開発水量の推定



図IV-6-a 揚水量(開発水量) $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ のときの水収支



図IV-6-b 揚水量(開発水量) $1.0 \text{ m}^3/\text{s}$ のときの水収支



図IV-6-c 揚水量(開発水量) $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ のときの水収支

計算スタートの日を初期貯留として2年間の変化を図示したものが図IV-6である。これによると $1.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ の揚水を2年間続けた場合は、初期貯留量と等しくなる。なおこの場合の初期貯留量は約1億5千万 m^3 となっている。図IV-7はその場合の水位変動を図示したもので、計算では時間に対する各断面の水位の上下関係はほぼ一様の割合で変化している。このことは仮定(入出力の条件)にもとづくかぎり当然といえる。

又、図IV-6に示される河川流況は10年間でもっと

も流況の悪い2年間を選んだので平年では $1.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ 以上の揚水が可能になるといえる。また図IV-7でも明らかなように地下水面と地表面との間隔が1m近くにまでなる程、地下水面が上昇しているので、さらに開発水量は増加し得るといえる。

b) 水収支

2年間の水収支

それぞれ 1.5 , 1.0 , $2.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ の揚水を行った時の水収支の結果は表IV-1の通りとなっており、揚水量を増すと地下滞水層の貯留量が直線的に減る。又、地下水の下流への流去量も2次曲線的に減ることになる。このことは揚水量は地下水深のみに対応するものであり、下流への流去量は最下

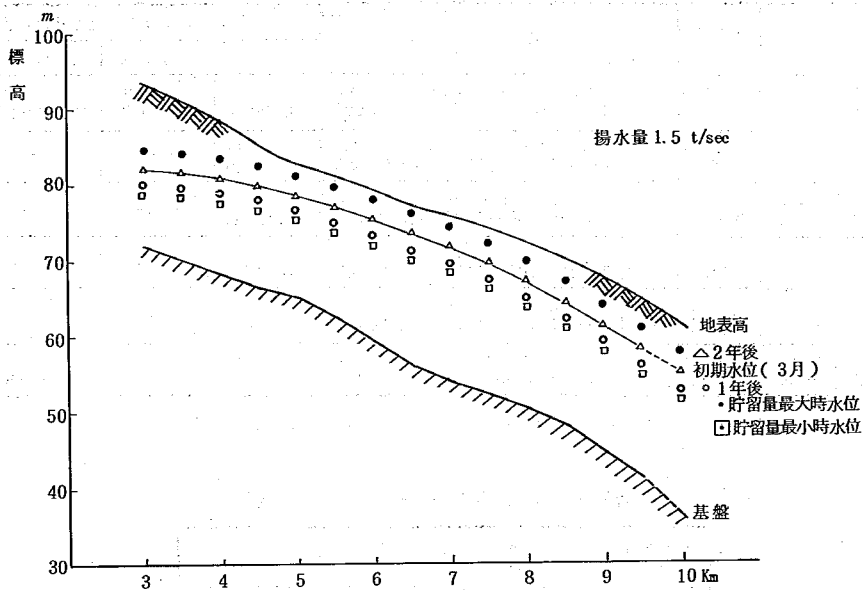


図 IV - 7 地下水位変化
揚水量 1.5 t/sec

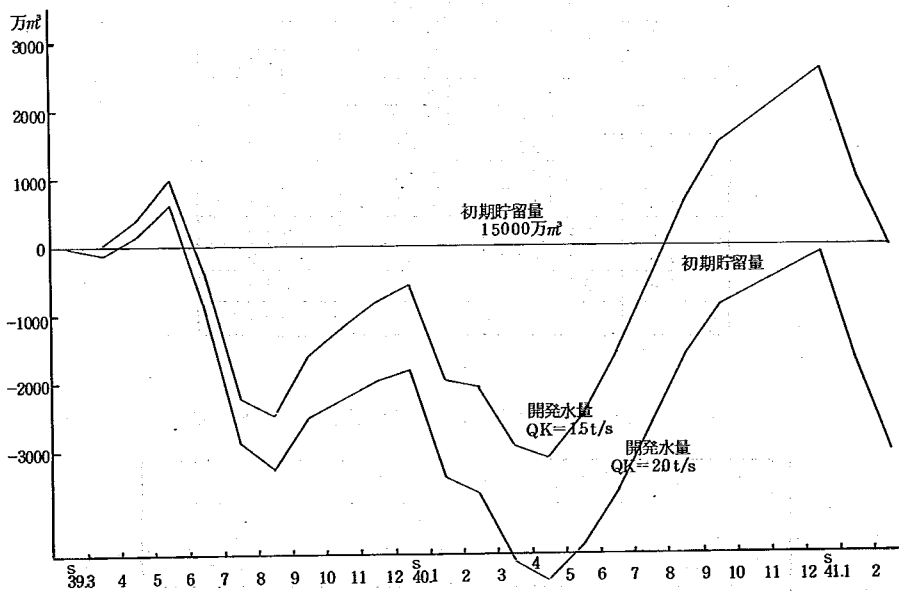


図 IV - 8 地下貯水池貯留量の変化

表Ⅳ－１ ２年間の地下貯水池の水収支

項 目	計算上の値	符号	換 算	開発水量（揚水量）を変化させた場合		
				1.5m ³ /s	1.0m ³ /s	2.0m ³ /s
※ 揚 水 量	m ³ /s 1.5	⊖	m ³ /s sec day m ³ 1.5 × 86,400 × 730 = 94,608,000	94,608,000	63,072,000	126,144,000
降 雨	m/day 0.001	⊕	m/day m m day m ³ 0.001 × 7000 × 7000 × 730 = 35,770,000	35,770,000	—	—
水田からの 涵 養 量	m 2.09617	⊕	m m m m ³ 2.09617 × 7000 × 7000 = 10,712,330	10,712,330	—	—
河川からの 流 入 量	m 1.51126	⊕	m m m m ³ 1.51126 × 7000 × 7000 = 74,051,740	74,051,740	—	—
河川への 流 出 量	m 1.92896	⊖	m m m m ³ 1.92896 × 7000 × 7000 = 94,519,040	94,519,040	—	—
※ 地下貯水池 下流端流出量	m ³ 3396.78	⊖	m ³ m m ³ 3396.78 × 7000 = 23,309,020	23,309,020	25,771,760	21,740,880

※ 開発水量（揚水量）を増加すると地下貯水池下流端流出量は減少する。

表Ⅳ－２ 開発水量 1.5 m³/s の場合の水位変化

地層断面 番 号	初期水位 (m)	最終水位 (m)	差 (m)
1	82.135	81.73	-0.405
2	81.686	81.31	-0.376
3	80.893	80.57	-0.323
4	79.806	79.55	-0.256
5	78.419	78.24	-0.179
6	76.778	76.70	-0.078
7	75.014	75.02	0.006
8	73.166	73.24	0.074
9	71.191	71.32	0.129
10	69.003	69.17	0.167
11	66.534	66.72	0.186
12	63.764	63.96	0.196
13	60.794	60.99	0.196
14	57.700	57.88	0.180
計			-0.483

表Ⅳ－３ 開発水量（揚水量）に対する地下貯水池最終貯留量

開発水量(m ³ /s)	地下貯水池最終貯留量(m ³)
1.5	$-0.483 \times 0.2 \times 500 \times 7000 = -338,100 \text{ m}^3$
1.0	29,212,257 m ³
2.0	-29,840,635 m ³

表Ⅳ-4 最終諸量の開発水量別による比較

開発水量 (m³/s)	揚水量 (m³)	貯留量 (m³)	流出量 (m³)
1.0	63,000,000 (100%)	29,200,000 (100%)	25,800,000 (100%)
1.5	94,600,000 (150%)	- 300,000 (83.5%)	23,300,000 (90%)
2.0	26,000,000 (200%)	-29,800,000 (67.1%)	21,700,000 (84.1%)

注. 図Ⅳ-6 a, b, cに対応

表Ⅳ-5 地層各断面の標高

地層断面番号	地表高	基盤高	初期水位 (3月期)	初期水位 (6月期)	制限基盤高
1	93.5	72.1	82.135	91.2	82.1
2	91.0	70.1	81.686	87.2	80.1
3	88.5	68.2	80.893	83.2	78.2
4	85.0	66.2	79.806	82.8	76.2
5	82.5	65.0	78.419	81.3	75.0
6	81.0	62.2	76.778	78.8	72.2
7	79.0	59.0	75.014	76.2	69.0
8	77.0	55.9	73.166	74.8	65.9
9	75.5	53.7	71.191	71.8	63.7
10	74.0	52.0	69.003	70.9	62.0
11	72.0	50.3	66.534	69.0	60.3
12	70.0	48.0	63.764	66.7	58.0
13	67.5	44.5	60.794	64.4	54.5
14	64.5	41.0	57.700	60.2	51.0
15	61.5	36.0	54.606	56.0	36.0

流地下水深に起因する 流出断面積 の影響を受けるからである。

2) 地下貯水池への注入・揚水量の場所的割合の検討

河川からの地下貯水池への注入・揚水量の割合を変化させて試算を行う。たとえば地下貯水池上流で1.5の割合で注入するとき下流では0.5の割合の注入しかないといった場合の試算である。

いままでの計算では、全計算区域に渡って一様な注入・揚水を行ってきた（上流、下流の注入量割合は1.0 : 1.0）。だが、素朴な疑問として次のようなことが浮かぶ。

- ① 注入・揚水を各計算断面ごとに変化させない場合、地層内の水位計算を行っても単純な水量の積

表Ⅳ-6 地下貯水池への河川水による
注入又は揚水量

項 目	計算始めを0.0 としたときの水位	注入量	揚水量
単 位	m	m ³ / sec	m ³ / sec
39年3月	0.02980	0.545	
4	0.13559	2.0	
5	0.24492	2.0	
6	-0.12293		-6.954
7	-0.60342		-8.790
8	-0.77640		-3.165
9	-0.67060	2.0	
10	-0.56128	2.0	
11	-0.45549	2.0	
12	-0.37406	1.490	
40年1月	-0.63766		-4.822
2	-0.63872		-0.021
3	-0.78712		-2.716
4	-0.79855		-0.215
5	-0.68923	2.0	
6	-0.58343	2.0	
7	-0.47411	2.0	
8	-0.36479	2.0	
9	-0.25899	2.0	
10	-0.14967	2.0	
11	-0.04387	2.0	
12	-0.06545	2.0	
41年1月	-0.20570		-4.961
2	-0.41770		-4.294

表Ⅳ-7 地下貯水池への水田からの涵養量

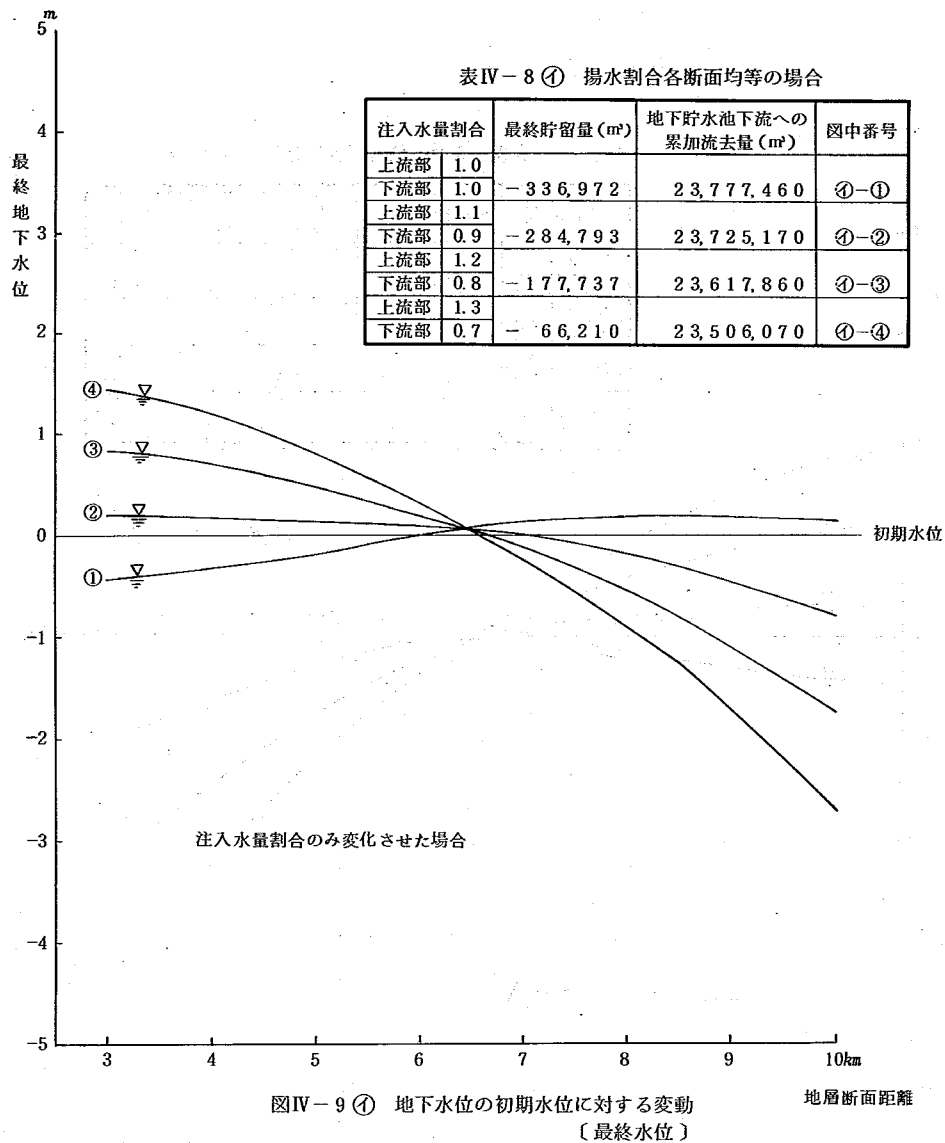
項 目	累加涵養量	月別涵養量	月平均涵養量
単 位	万m ³	万m ³	m ³ / sec
39年3月	214.277	214.277	0.80
4	421.645	207.368	0.80
5	850.199	428.554	1.60
6	1575.938	725.739	2.80
7	2467.591	891.653	3.33
8	3400.698	933.156	3.48
9	4091.892	691.194	2.67
10	4306.169	214.277	0.80
11	4513.537	207.368	0.80
12	4727.814	214.277	0.80
40年1月	4942.091	214.277	0.80
2	5135.641	193.550	0.80
3	5349.869	214.228	0.80
4	5557.237	207.368	0.80
5	5985.791	428.554	1.60
6	6711.530	725.739	2.80
7	7603.183	891.653	3.33
8	8536.339	933.156	3.48
9	9227.533	691.194	2.67
10	9441.810	214.277	0.80
11	9649.178	207.368	0.80
12	9863.406	214.278	0.80
41年1月	10077.683	214.277	0.80
2	10271.233	193.550	0.80

み上げ計算になりはしないか。

- ② さらに、もっと効果的に地層を活用するには、特定の注入・揚水の割合が存在するのではないだろうか。

このような疑問に答えるため、注入・揚水量割合を表Ⅳ-8の㊦㊧㊨のように変化させ、比較検討した。結果として、2年間の試算終了後の各断面最終水位を図Ⅳ-9の㊦㊧㊨に示す。

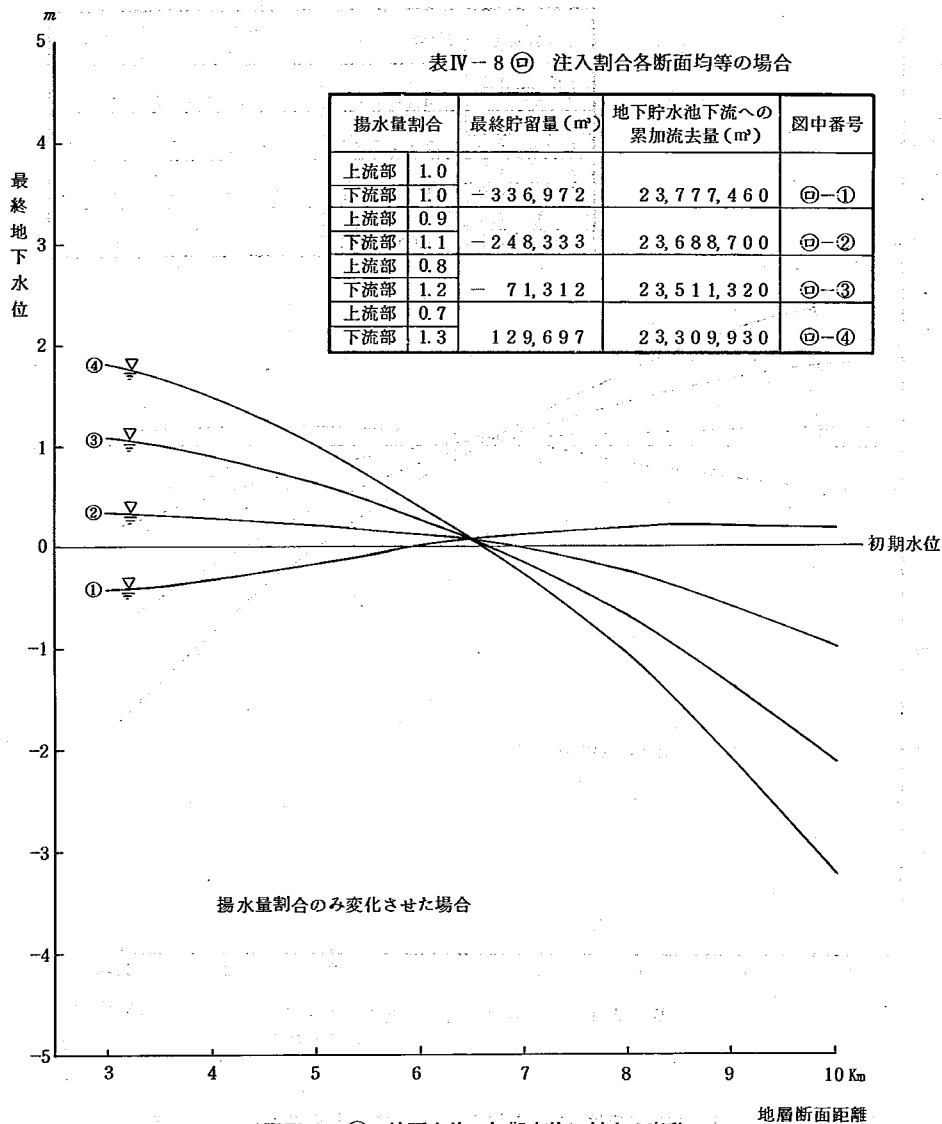
このような検討の結果、試算期間が2年間と長期に亘るため、注入・揚水量割合の小さな変化が、最終水位に大きく影響することがわかる。また、地下貯水池下流への流去量を減少させるためには、地下貯水池下流部への注入量割合を少なくすれば良いが、上流部で地表面以上の水位になる恐れがある。そのた



め、このような、ほぼ平行な地層では、均等な注入・揚水が最も無難であると言えよう。

IV-5 ま と め

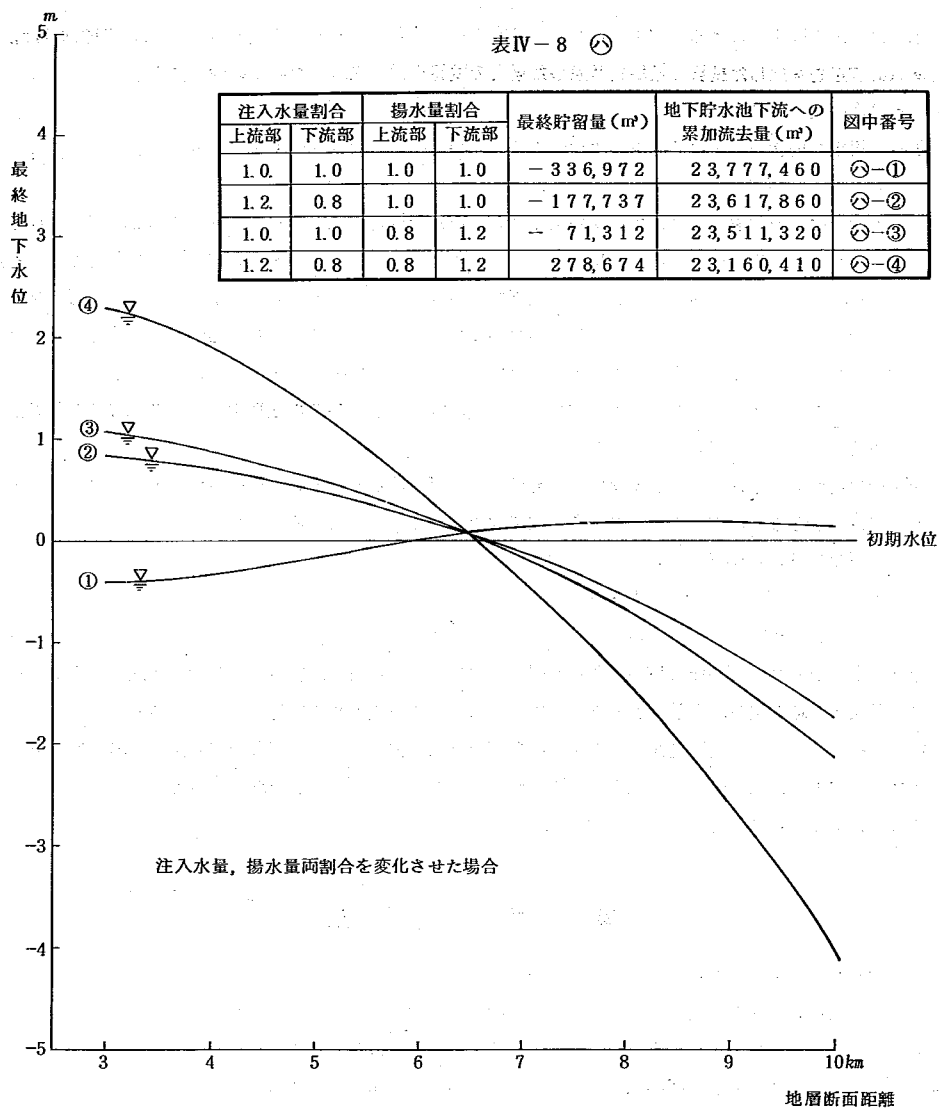
この計算ではいくつかの仮定をしているが、なかでも、井戸、水田、河川からの流入、河川への流出などすべて一様に分布している。そのためそれぞれが各計算断面で同時に起ることになっているので水位変



化にも全計算区間に亘って一次の対応関係がある。しかしながら一定の開発水量の推定はこの方法でも可能といえる。今後は井戸周辺の様子を観察していく必要がある。

表IV-8 ㊦

注入水量割合		揚水量割合		最終貯留量 (m³)	地下貯水池下流への 累加流出量 (m³)	図中番号
上流部	下流部	上流部	下流部			
1.0	1.0	1.0	1.0	-336,972	23,777,460	㊦-①
1.2	0.8	1.0	1.0	-177,737	23,617,860	㊦-②
1.0	1.0	0.8	1.2	-71,312	23,511,320	㊦-③
1.2	0.8	0.8	1.2	278,674	23,160,410	㊦-④



図IV-9 ㊦ 地下水位の初期水位に対する変動
〔最終水位〕

V お わ り に

本書は、地下貯水池による開発水量について考察を行ったものである。その内容として、地下貯水池、地上ダムの容量を考慮した試算と地層を考慮した場合の試算を行い検討した。この検討によって明らかになった点は次の通りである。

- ① 中規模な扇状地における地下貯水池は水資源開発に関して大きな能力を有することが明らかになった。

今回、検討の対象とした荒川左岸扇状地（50 km²）の場合、地下貯水池単独で2 t/s、河川と連結して5 t/s、河川と連結し、さらに地上ダムと一体化して運用すると8 t/sがそれぞれ開発され得る。

（ただし、地下貯水池涵養能力2 t/s、地下貯水池容量1億5千万トン、地上ダム容量2千万トン）

- ② 以上は、貯水池の容量のみを考慮した場合の試算であるが、次に地下貯水池の水位変化を考慮した検討を行った所、上記の容量のみを考慮した場合とほぼ同様な計算結果が出ている。つまり、単純な計算ではあるが容量のみを考慮した試算は、地下貯水池による開発水量算定について基礎的な試算方法であるということが明らかとなった。

以上の検討から地下貯水池による水資源開発は十分に可能性があるとの確信を得た。とくに地上ダムと連結して運用する場合、地上ダムの能力を大幅に向上させることが出来ると思われる。

この検討は以下の者が行った。

遠 藤 真 一 （I～III章）

山 田 利 雄 （IV 章）

全体のとりまとめは石崎勝義室長、北川明研究員の指導の下に遠藤が行った。なお、本試算の先駆的検討は、現在東北地方建設局岩手工務事務所の佐藤一助氏が本研究室時代に行ったものである。

検討を行うにあたり、建設省関東地方建設局企画課原田、古賀両氏、河川計画課井上氏、埼玉県企画財政部水資源課中川、山本両氏、本研究所水資源研究室中村氏にたいへんお世話になった。

ここに、深く感謝させていただきます。

参 考 文 献

- 1) 流量年表 建設省河川局
- 2) 建設省河川砂防技術基準（案） 山海堂
- 3) 埼玉県深谷市地質電気探査資料 埼玉県企画財政部水資源課
- 4) 「地下ダムによる水資源開発」 石崎勝義、北川 明、遠藤真一
日本地下水学会 昭和51年度秋季講演会誌

参 考

- 1 地下ダムによる水資源開発
- 2 地下水かん養技術の開発

参考 1

地下ダムによる水資源開発

建設省土木研究所水文研究室 石 崎 勝 義
北 川 明
遠 藤 真 一

1. はじめに

松尾博士は地下（地中）ダムを次のように定義している。「地中ダムは、地下水流の存在する帯水層に不透水性の壁を造ることにより、地下水流を規制して、地下水位の調節を図り、余剰の地下水を貯留しようとするものである。」しかし、一般には、何ら構造物を介することなく、地下間隙を貯水槽として利用することも地下ダムとして考えられている。地下ダムが水資源開発施設として、明確な機能が要求されるなら、当然のことながら、地下水の管理が必要不可欠となってくる。そこで、さらに地下ダムを広く捉えるなら、地下ダムとは、地下水域の表流水、地下水の総合管理の基に、地下水域の水循環を人為的に操作することによって、水資源開発を行うそのシステムであると言うことができよう。

以上に述べた地下ダムの実現には、様々な技術の結集、開発が必要とされ、また、実現したとしても様々な制約が加わるものと思われるが、本文は、地下ダムの水資源開発施設としての特性と有効性を明確にするために、計算条件を簡略化した場合について、その結果を報告するものである。

2. 地下ダムの水資源開発施設としての有効性

ダムによる水資源開発の根本的な考え方は、流況を平滑化し、供給量の安定を図ることであり、この原理は地下ダムの場合にも当然あてはまる。利水ダムと地下ダムによる水資源開発において差異を生じさせるとすれば、それは表流水と地下水の流動特性の差異であろう。地下ダムは、利水ダムの場合より、周期の長い渇水に対して有効であるような運用方法がふさわしいものと考えられる。

本計算は、荒川の埼玉県寄居地点での過去19年間、昭和30年から48年までの流量を基礎データとして用いた。5年間の移動平均をとり、第一番目の渇水期を計算期間とした。利水ダムの開発水量は、1年を通じて、渇水月と豊水月を平滑して、計算するのに対して、ここで、地下ダムによる開発水量の計算期間を5年としたのは、地下ダムは長期の流量変動に有効的に対応しようと考えたからである。

ここで、開発水量とは既得水利量からの上のせ分とした。

2-1 地下ダムのみにによる開発水量

地下ダムの開発水量に影響する因子は、地下ダム容量と涵養能力である。図1に地下ダムによる開発水量のグラフを示す。地下ダムの容量が小さい場合には、開発水量に対する涵養量の効果は大きい、容量が大きい場合にはその効果は小さくなる。このことは次のように考えられる。地下ダム容量が小さい場合には、涵養によって常に量の確保が必要であるが、大きい場合には量があるから、補給後はゆっくり貯留すればよいのである。涵養量が増加しても、開発水量はそれほど増加しないから、涵養能力を大きくすることは、不経済な地下ダムになりうる可能性がある。涵養量が 2 t/ses とは、だいたい 500 ha の水田で、

1日の減水深が約40mm程度と同等であって、扇状地等の浸透しやすい所であれば、水田のみで十分得られる涵養量である。

2-2 地下ダムと利水ダムの連結運用による開発水量

連結運用による開発水量は、地下ダム容量、利水ダム容量および涵養能力によって変化する。ここでは、計算ケースがあまりにも多くなるので、地下ダム容量を1億5千万tの一定とした。

地下ダムの容量は利水ダムと比較して大きい、地下水の流動は遅く、特に、涵養はなかなか困難であって、貯留に多大な時間が要される。利水ダムは容量が小さくても、洪水を瞬時のうちに貯留することが可能である。よって、利水ダムは、できるだけ多くの洪水量を貯留しうるように余裕をもたせ、地下ダムは常に満たされているような操作を行う。つまり、補給を行う場合、先づ、利水ダムから補給し、それで不足するようであれば、地下ダムから補給する。利水ダムからの補給で十分であれば、地下ダムへの涵養量も利水ダムから補うといった具合である。

連結運用による開発水量の図を図2と図3に示す。利水ダム容量の増加は地下ダムへの涵養能力の増加を意味しており、涵養能力の効果は、利水ダムの容量が大きくなると、小さくなっている。また、涵養能力が小さい場合には、利水ダム容量の大小によって開発水量の差異が大きいが、涵養能力が大きいと、その差異は急激に小さくなっている。このことは、利水ダムと連結運用することによって、所定の開発水量を得るには、少ない涵養能力によって十分であって、単独運用を行うより、はるかに有効な水資源開発が可能であることを示している。

以上の連結運用による開発水量の計算結果と比較するために、地下ダムと利水ダムの単独運用を直列的に結び合せた場合の開発水量の計算も行った。その結果を図4に示す。互いの長所をいかす連結運用がいかに有効であるかが示されている。

3. 結 論

地下ダムによる水資源開発は貯留能力をいかしたものであって、涵養能力はさほど要求されない。

地下ダムと利水ダムの連結運用は互いの長所をいかす運用方法であって、有効な水資源開発システムである。また、その場合、涵養能力は地下ダム単独運用よりも小さくてすみ、経済的で合理的な地下ダム構築の可能性はある。

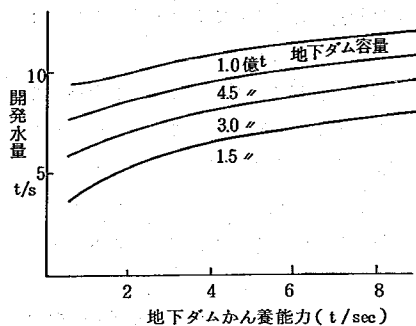


図 1

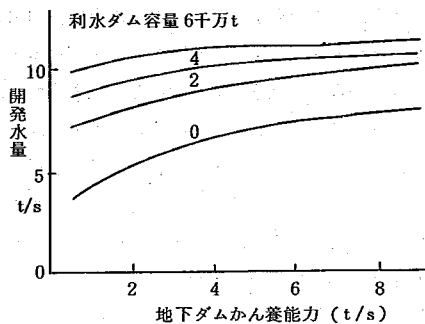


図 2

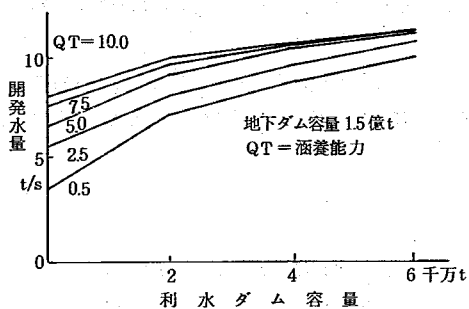


図 3

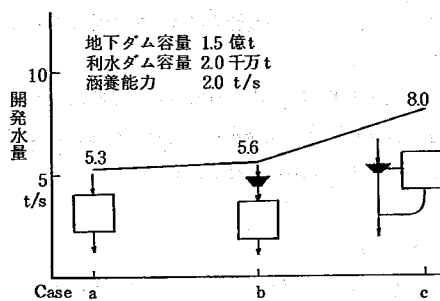


図 4

参考 2

建設省総合技術開発プロジェクト

地下水涵養技術の開発

(地下ダム計画のための研究開発)

昭和51年7月

建設省大臣官房技術調査室

Journal of Management Education 30(6)



1. 本研究の必要性

1-1 水需給の逼迫

「水」が「水資源」として認識され、その有効な利用が叫ばれている。

昭和50年現在、水の年間使用量約 870億 m^3 に対する供給量は約 830 億 m^3 で全国的に年間約40億 m^3 が供給不足の状況にあり渇水に際しては取水制限、給水制限で対処せざるを得ないのが現状である。

水需給の逼迫に対処するためにはダム等による水資源開発を急ぐ必要があるが一方、使用の合理化、水の高度利用などをはかる事も必要である。

建設省は鋭意水資源の開発につとめ、これまでに年間約63億トンの水を開発しており、今後も一層事業の推進を図るべく鋭意努力している。

しかし、ダム等の建設の現状をみると、環境問題、補償問題、好適地の減少など難かしい問題に直面しているのが実態である。

1-2 地下水利用と地盤沈下

我が国においては地下水利用は水資源の中で占める位置は大きい。すなわち、地下水は年間約 130 億 m^3 使用されており年間淡水使用量の約17%を占めている。しかしながら過剰な地下水使用は各地で地盤沈下を引きおこし地盤沈下による直接の被害もさることながら高潮や洪水といった災害に弱い国土を出現させ由々しき事態をひき起こしている。しかもこのような地域は全国的に見た場合39地域、32都道府県に及んでいる。これは過去の地下利用がただ一方的に地下水を汲み上げ、利用することにのみ急で地下水の回復や補強に関心が払われなかった事に主たる原因がある。

地下水は水質が良好であるに加えて小規模の設備でも容易に取水が出来、またその取水可能量も大きい。従って地下水の使用にあたっては常時の使用もさることながら渇水年における用水への補給や、非常時の使用には大変貴重な存在である。

今後は地下水の保全に充分の注意を払いつつ地下水を利用していくことが必要となるのである。

1-3 地下水利用の新方式

よく知られているように雨水の一部は地下に浸透し地下水を涵養している。又河川水はある場合には伏設して地下水に転化したり、ある場合は逆に地下水によってかん養されて水量を豊かにしている。

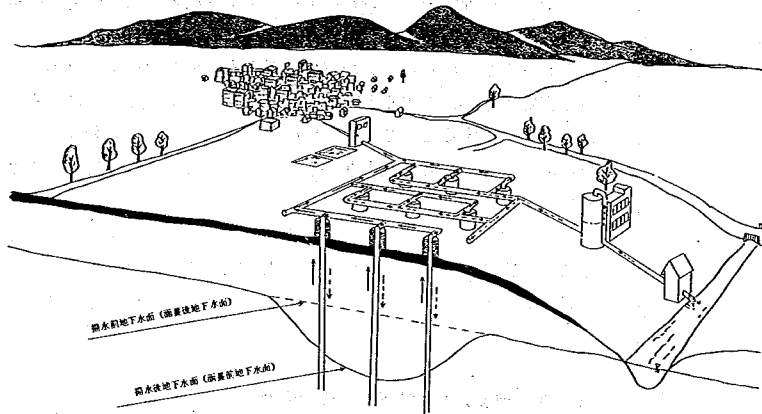
このように自然状態においては雨水、河川水、地下水は互いに密接な関係にあるが、この関係を人工的に一層強化して河川水、地下水を一体として使用するならば地下水障害を生じることなく将来とも水資源として利用することができるのである。しかし河川水などの地表水を人工的に地下水にかん養する場合、最大の問題点は目づまりによる注入効率の低下である。次に問題になるのは注入した地下水の行方である。注入した地下水を再び利用するためには地下水の動きが充分に予測できなくてはならない。もし地下水が低地域に逃げる恐れがあるときは止水工法などによってせき止めることも必要になるろう。

このような点を解決して地下を大きな貯水池として利用し、ここから水を供給するこ

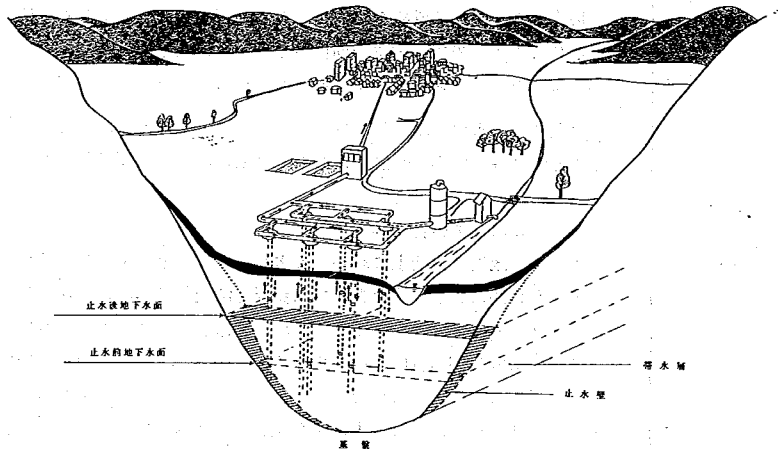
とを考えて水資源計画の中に位置づけたものが地下ダム計画である。

この研究では我が国で地下ダムを実施する場合解決すべき点を明らかにし基本的な解決方法を提示しようとするものである。

図一 地下ダムの利用タイプのいろいろ



①平地タイプ 洪水時に地下水を取りし、洪水時に地下水を涵養する。



②盆地タイプ グラウト等で止水壁を作り地下水をせき上げて貯水池として利用するとともに無効に流れていた地下水を取り水する。

2. 地下ダムの概要 (本研究により期待される成果)

2-1 地下ダムとは

地下ダムというすぐコンクリートで作った構造物が連想されるがここではもう少し

広く「貯水池として利用する地下水域」と考え、地形条件等に応じて次のようないろいろなタイプが考えられる。

2-2 地下ダムの特徴

我が国は山地が多いと言われているがすき間の多い沖積層、洪積層から成る平野（たとえば盆地、扇状地など）も国土面積の $\frac{1}{4}$ ～ $\frac{1}{3}$ を占める。

どれ位の水を貯められるか試算してみると分布面積を10万 km^2 、帯水層の厚さを20m、有効空隙率を25%とすると5000億 m^3 の水を貯留できることになる。このうち2m位の水位変動を利用するだけでも500億 m^3 にあたる。これは昭和50年までの地上ダム利水容量11億 m^3 にくらべて大変大きいものである。このように地下ダムは容量が大きいという点に特徴がある。

しかし水の出し入れは難しい。すなわち取水にはポンプを必要とする。水をかん養することは更に難しく、一時に大量の水を入れることは出来ない。

地下ダムの特徴を一言で言うならば「体はでかいが動きが鈍い」とでも表現できる。

2-3 地上ダムと地下ダムの組合せ

地上ダムは一般に容量が小さいが水の出入れは大変容易である。洪水の水を貯めることも出来る。地下ダムと逆の性質を有している。そこで両者を連動させて互いの欠点を補い合うようにすることが考えられる。

地上ダムによって貯めた水を少しずつ地下ダムに移しておくとな地上ダムはいつも容量に余裕が出来るので、洪水調節機能としても余剰水の貯水機能としても地上ダム単独の場合より多くの機能を発揮できるようになる。

地上ダムの適地はだんだん少なくなってくる。地上ダムと地下ダムをドッキングさせることによって例えば既設ダムも現在以上の能力を発揮できるようになろう。

2-4 これまでの実施例

外国では地表水を地上に貯めて渇水期に使うことは多くの国で行なわれている。

イスラエルはこのような方法で水資源を開発して南部の乾燥地帯を開発しつつある。

アメリカのニューヨークでは人工かん養によって地下水の塩水化を防いでいる。オランダでは水質改善の目的も併せてライン川の水を砂丘に貯留して使用している。

我が国でもこれまでにかなりの実験が行なわれているが神奈川県秦野市では井戸と水田を用いて約3500 m^3 /日の表流水を流して地下水を強化している。我が国では欧米にくらべて一般に地層が複雑なのでその地域の地形地質条件に適合するように地下ダムを計画することが必要になろう。

2-5 地下ダムによる影響

地下ダムの建設は水没家屋の問題がなく環境に及ぼす影響も比較的小さいと思われるが思いがけない影響があるかもしれない。そのため影響の予測には綿密な注意を払うとともに、その対策についても研究の対象とすることが必要である。

3. 地下水涵養技術の研究開発

地下ダムを水資源開発施設の一つとして位置づけ、次のような研究開発を実施する。

1. 地下ダムの適用条件に関する研究

- (1) 地下ダムの適用条件に関する研究（モデル地域における地下水盆の構造、地下水流動機構を解明し、地下ダム適地を選定するまでの適用状況を明らかにする。）
- (2) 地下ダムの事前評価に関する研究（地下ダムによる開発可能性を明らかにするとともに、長期的な利用を考慮して、河川流量に適用した地下ダムの最適規模及び最適操作の研究、また水資源開発計画における地下ダムの位置づけを明らかにするとともに、地下ダムの建設が環境に与える影響などを明らかにする。）
- (3) 地下ダムのモニタリングシステムに関する研究（地下水位、水質、地下水流出入等を監視して、地下ダムの合理的な管理を行うための研究。）

2. 地下水涵養技術の開発

- (1) 注水井による涵養技術の開発（浮遊物、有機物、微生物等による目づまり機構を解明しその防止策を検討する。）
- (2) 抽水法による涵養技術の開発（抽水施設及び浸透する地層の物理的変化と浸透量の解明、地表に含まれる浮遊物等の沈澱による浸透量の減少を防止するための沈澱物の除去法の開発。）
- (3) 止水工法の技術開発（人工的に強化される地下水の流出を防ぐための止水工法の技術開発）等である。
- (4) 取水工法の技術開発（経済的な取水工法の技術開発研究）
- (5) 地下ダムに関する総合実験研究（現地における総合応用実験）

世界の地下水の人工涵養の概況

国 名	水 源	方 法	対 象 層	投資額 (万円)	m ³ 当りコ スト(円)	水処理コ スト(%)	期 間 涵 養 量
U. S. A	地下水	W	洪 積 世 砂 礫 層	169	—	—	—
	地下水	W	Dacota 層 砂 岩	7,700	—	—	—
	地下水	W	洪 積 世 水 河 堆 積 物	7,700	—	—	—
	ダム貯水	W	沖 積 砂 礫 層	3,080	8.7	40	—
	工場排水	W	沖 積 層	924	—	—	75.6~756m ³
	河川水	W&B	洪 積 世	303,000	4.6	—	—
	河川水	W&B	融 永 流 水 堆 積 物	6,160	—	—	—
	河川水	W&B	洪 積 世 水 河 堆 積 物 砂 礫	3,080	—	—	94,625/日
	河川水	B	洪 積 層 砂 礫	3,338	0.43	17	—
	地下水	B	沖 積 世 河 床 堆 積 物	1,848	—	—	—
	地下水	B	沖 積 層	154	—	—	24,670m ³
イギリス	—	B	沖 積 層 及 鮮 新 洪 積 層	169	12.3	0	1.58×10 ⁶ m ³ /年
	河川水	B	洪 積 世 砂 礫	—	4.0	—	—
	河川水	B	第 4 紀 及 鮮 新 洪 積 層	7,794	0.44	—	56.7×10 ⁶ m ³ /年
	地下水	W	白 亜 紀 石 灰 岩	80	0.84	0	180,000~270,000m ³ /年
	地下水	W	白 亜 紀 石 灰 岩	202	昼間1.47 夜間0.03	0	205,000m ³ /年
フランス	河川水	W	沖 積 砂 礫 層	202	—	—	3,800m ³ /日
	地下水	B	ジュラ紀石灰岩	28	—	—	340m ³ /日
	河川水	B	白 亜 紀 砂 岩	2,007	—	—	22,727m ³ /日
	河川水	B	白 亜 紀	108,378	16.9	37	10×10 ⁶ m ³
ドイツ	河川水	B	沖 積 砂 礫 層	54,189	—	—	—
	河川水	B	洪 積 層	86,022	48.7	36	5×10 ⁶ m ³
	河川水	B	第 4 紀 層	17,204	—	—	—
	河川水	B	"	6,260	—	—	—
オランダ	河川水	B	"	7,455	—	—	—
	河川水	B	洪 積 砂 礫 層	3,797	3.4	—	2,000,000m ³ /年
	"	B	沖 積 及 洪 積 砂 層	75,936	1.9	10	1,000,000m ³ /年
	"	B	—	5,695	0.9	5	7.2×10 ⁶ m ³ (1967)
	"	B	砂 丘	32,935	15.2	25	(1967)
日本	河川水	B	沖 積 砂 礫 層	40,816	5.7	—	20×10 ⁶ m ³ /年
	地下水	W	大 阪 層 群 砂 礫	144	—	—	—
	河川水	W	沖 積 砂 礫 層	472	3.3	—	—
	"	W	馬 見 ヶ 崎 扇 状 地 砂 礫 層	70	—	—	—
オーストラリア	"	W&B	芦 原 層 砂 礫	104	—	—	227.4m ³ /日
	河川水	B	三 角 州 堆 積 物	10,300	—	—	12.7×10 ⁶ m ³ (1965-66)
	"	B	"	13,800	—	—	46.8×10 ⁶ (1966-67)
	"	B	"	—	—	—	28.7×10 ⁶ (1967-68)
イラン	地下水	W	沖 積 層	92,400	24.6	—	13.9×10 ⁶ m ³ (1966-67)
	ダム貯水	W&B	花 崗 岩 (始生代)	190	—	—	19.7×10 ⁶ (1967-68)
南ア連邦	ダム貯水	W&B	花 崗 岩 (始生代)	190	—	—	30,280m ³ (11~1月)

・：W=注入井
B=溜池、その他

(出典国際水文学会1970. 人工地下水
計画基礎調査報告書)