

地下ダムタンクモデルによる地下水収支解析法と適用例

平 間 邦 興 桑 原 徹
外 山 聡

Groundwater Balance Analysis by Tank Model and its Application to Underground Dam Basin

Kunioki Hirama Tohru Kuwahara
Satoshi Toyama

Abstract

The tank model is commonly used at present not only as a method of runoff analyses of rivers, but also for unconfined groundwater balance analysis. This method enables one to comprehend an unconfined groundwater balance roughly according to simulations of observed time series data on surface runoffs and groundwater levels. This report gives the results of groundwater balance calculations by tank model for underground dam catchment area.

概 要

タンクモデルは、現在では河川の流出解析法としてのみならず、不圧の地下水収支の解析法としても一般に用いられている。この方法は、地表流出量や地下水位変動といった時系列観測値のシミュレーションに基づき、マクロな地下水収支を把握できるのが特徴である。この報告は、地下ダム流域内の地下水収支をタンクモデルにより計算した結果について述べた。

1. はじめに

水収支解析とは、水収支区を定め一定期間においてその中の水がどのように流入、流出するかを定量的に把握するものである。これは、基本的には式(1)で表わされる。

$$dS/dt = I - O \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし、S: 貯留量, I: 流入量, O: 流出量, t: 時間。水収支の解法としては式(1)に基づいて、水収支式、浸透流解析、今回述べるタンクモデルなどが知られている。水収支式は、定められた水収支区内のマクロな水収支(一般に計算期間を一年とする場合が多い)を明らかにする際に用いられる。また浸透流解析では、水収支区内の地下水の分布や変動状況などの詳細(ミクロ)な水収支の解明が可能であるが、解析の際の適切な定数、条件の設定がむずかしい。水収支解析では、これまで対象としている水収支区は広域な場合が多い。一般にタンクモデルは、広域であれば流出機構のモデル化が比較的簡単にでき、狭い流域では複雑になる傾向にあるといわれている。

このような中で、この報告は、特に狭い水収支区においてマクロな水収支を把握し、さらにミクロな水収支を解明する際の資料を得る解析手段として、タンクモデルを用い地下ダム流域内の地下水収支解析を試みた。

2. タンクモデルとは

2.1. 菅原のモデル¹⁾

タンクモデルは、河川の流出解析法として菅原によって紹介された。菅原は、河川の流出と降雨の関係が指数関数であることを、図-1(a)に示すモデルで表わした。

降雨は、図-1(a)に示す容器(タンク)内に貯留され、流出は貯留された量に比例して生じる。タンク内の貯留量が指数関数型に減衰していく状況は、次のように説明される。

図-1(a)において、ある時刻 t における貯留量が h のとき、流出量 q は、

$$q = \alpha \cdot h \quad \dots\dots\dots(2)$$

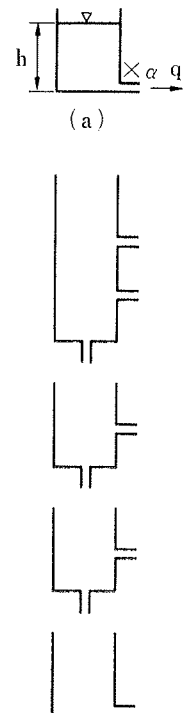
dt 時間内に流出によって生じる貯留量変化 dh は、

$$dh = -q \cdot dt \quad \dots\dots\dots(3)$$

式(3)に式(2)を代入して、

$$dh = -\alpha \cdot h \cdot dt \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\therefore dh/h = -\alpha \cdot dt \quad \dots\dots\dots(5)$$



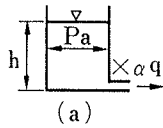
(b)
図-1
菅原のモデル

t=0 のとき h=h₀ という初期条件のもとに式(5)を積分すると、

$$\ln h = -\alpha t + \ln h_0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\therefore h = h_0 e^{-\alpha t} \quad \dots\dots\dots(7)$$

貯留量と比例関係にある流出量は、指数関数型に減衰していき、したがって降雨と流出の関係は、図-1 (a)のモデルによって表わすことができる。



しかし、実際の河川の流出状況を再現するには、図-1 (a)のモデルのみでは不十分であり、各地で流出解析がなされた結果、現在では図-1 (b)に示すモデルが一般に用いられている。図-1 (b)のモデルにおいて、最上段および最下段のタンクは、それぞれ表面流出、地下水流出を受け持ち、中間のタンクは中間流出を表わす。

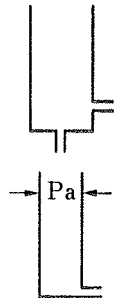


図-2

2.2. 吉川のモデル²⁾

吉川は、図-1 (b)に示す菅原のモデルにおいて、地下水流出を受け持つタンクに地層の有効空隙率を考慮させ、不圧の地下水位変動と降雨の関係が指数関数であることを、図-2 (a)に示すモデルで表わした。

菅原のモデルはタンクの断面積を1と考え、流入量、流出量とタンク内の水深は1:1の対応をするが、吉川のモデルではタンクの断面積に有効空隙率(Pa)を与え、水深の対応が1:1/Paであるような構造を表わしている。図-2 (a)に示したモデルにおける貯留量の減衰は、式(7)同様に示すと式(8)となる。

$$h = h_0 \cdot e^{-(\alpha/Pa)t} \quad \dots\dots\dots(8)$$

吉川のモデルの一例を、図-2 (b)に示す。図-2 (b)において、上段のタンクは表層を表わし、下段のタンクは帯水層を表わす。

2.3. その他のモデル

現在では、菅原、吉川のモデルを応用したもので複雑な構造のモデルも紹介されている。例えば、水循環モデル^{3),4)}、総合貯留モデル⁵⁾などがあり、他にも多くの適用例が報告されている。

今回述べる例は、これまでに報告されてきた中では樺島地下ダムの例⁶⁾に流域規模が近いものである。

3. 地下ダムタンクモデル

3.1. モデルの概要

地下ダムタンクモデルを作成するにあたっては、地下ダム流域を貯留域と集水域に分けて考える。したがって、地下ダム流域内の水循環を表現するモデルは、図-3に

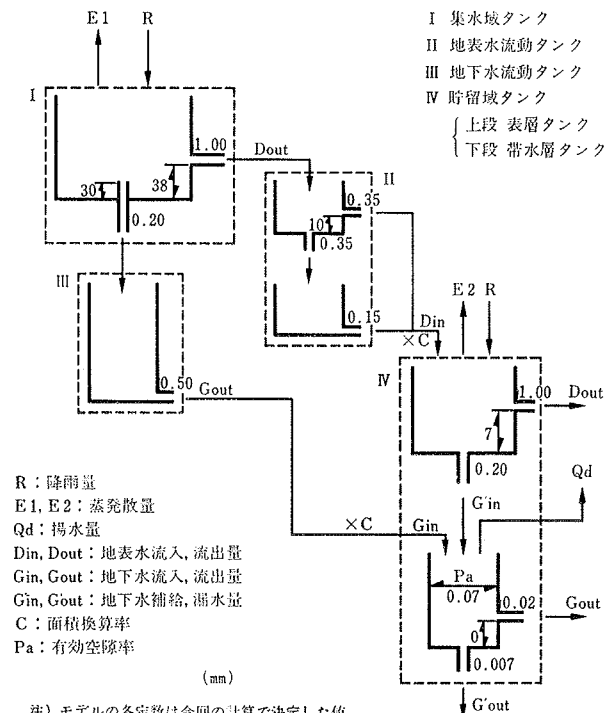
示すように、貯留域、集水域、さらに両域間の地表水、地下水の流出入を受け持つそれぞれのタンクによって構成されるものとした。

図-3に示したモデルにおいて、各タンクからの流出はタンク内の水深に比例して生じる。また、貯留域と集水域では面積が異なるため、集水域から貯留域への流入量には貯留域面積を1とした換算率を剰じる。単位はすべてmm(単位面積当たりの水柱高)で表わし、計算は4t=1日として時系列により日雨量から日流量を求める。モデルを構成するタンクについて、以下に説明する。

3.1.1. 集水域タンク 集水域タンクには降雨を入力し、降雨が0のときには蒸発散として負の値を入力する。地下水の浸透は、タンク底に設けた浸透孔より生じ、浸透孔の高さは平常保水量を表わす。したがって、降雨があってもタンク内の水深が浸透孔の高さに至らない場合、降雨は土湿不足として捕捉され、蒸発散によってのみ消失する。地表流出は、タンク側方に設けた流出孔より生じる。流出孔の高さは土壤の最大容水量に相当し、水深が流出孔の高さに至らない場合には、地表流出は生じない。また流出孔の係数は1とし、タンク内の水深が流出孔の高さを越える場合には、地下水になり得る量を除く全量を溢流させる。

3.1.2. 地表水流動タンク このタンクは、集水域において溢流された地表流出量の、貯留域への流入過程を受け持ち、同時に地下ダム流域からの地表流出のパターンを表わす。

3.1.3. 地下水流動タンク このタンクは、集水域に



注) モデルの各定数は今回の計算で決定した値

図-3 地下ダムタンクモデル

において浸透し地下水となった量が、貯留域へ流入してくる過程を受け持つ。集水域からの蒸発散は、土壌の湿り気から消費されるが、その不足分は地下水の毛管上昇によって補われる。そこで、集水域タンクからの蒸発散の不足分は、このタンクから差し引く。

3.1.4. 貯留域タンク 上段のタンクは表層を表わす。このタンクに降雨を入力し、降雨が0のときには蒸発散として負の値を入力する。タンクの構造は集水域タンクと同様である。ただし、貯留域は地下貯水池に相当するもので、地下水位が山地部に比較して地表面に近いことから、地表からの浸透水はただちに地下水へ転化するものとした。下段のタンクは帯水層を表わす。表層タンクからの蒸発散の不足分および揚水量は、このタンクから差し引く。このタンクは、帯水層の有効空隙率を考慮した構造とする。タンク側方の流出孔は、貯留域から遮水壁を越流して流出する地下水流出を表わし、流出孔の高度は、遮水壁位置における下流側地下水位と遮水壁天端との差に相当する。また、タンク底には貯留域からの漏水を表わす漏水孔を設けた。

3.2. モデルの検定

河川の流出解析では、実測の流出パターンを検証値として計算を繰り返す、モデルの検定を行っており、地下水収支の解析では、実測の地下水位変動を検証値としてモデルの検定を行なっている。このような検定法を参考に、今回のモデルでは、図-4に示すような検定手順をとった。すなわち、降雨量と揚水量の実測値を用いて地下水位変動、地表流出量を計算し、これらが観測値と合うまで計算を繰り返し行ない、流域内の地下水収支を求めた。

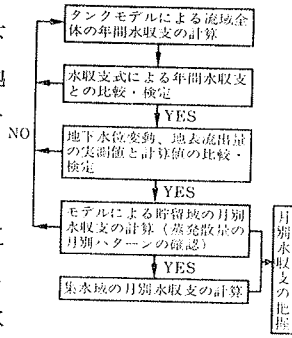


図-4 検定手順

4. 適用例

4.1. 常神地下ダム

常神地下ダムについては、これまでいくつか報告してきた^{6),7)}。今回は、遮水後の貯留域における地下水収支の把握を目的として、タンクモデルによる計算を行なった。なお、不圧地下水という仮定を設ける。

- 常神地下ダムの概略の諸元は、次の通りである。
- 流域面積：0.45 km² (貯留域 0.02 km², 集水域 0.43 km²)
- 遮水壁：地下連続壁 (SG, 延長 204 m, 平均深さ 17m, 厚さ 0.5 m)
- 主帯水層：粘土混り砂レキ (透水係数 10⁻³~10⁻⁴ cm/sec, 貯留係数 0.1~0.2)

貯留域形状は図-5に示し、同図に地下水位観測孔、流量測定せき、揚水井の位置をそれぞれ示す。計算期間は、昭和58.7~昭和59.6の一年間である。

4.2. 計算・検定に用いた観測値

4.2.1. 降雨量 現地に設置された雨量計の記録 (日雨量) を用いた。

4.2.2. 揚水量 現地での記録は、5本の揚水井 (No.1~5) からの一ヶ月間の累計値であるため、各月において月値から日平均値を算定して用いた。なお、現地では揚水量のほぼ全量は、No.2 (南沢), No.5 (北沢) の2井でまかなわれている。

4.2.3. 地下水位変動 ある流域の水循環をタンクモデルを用いて再現しようとする場合、地下水位変動が降雨に対して明らかな応答関係にあるならば、実測の地下

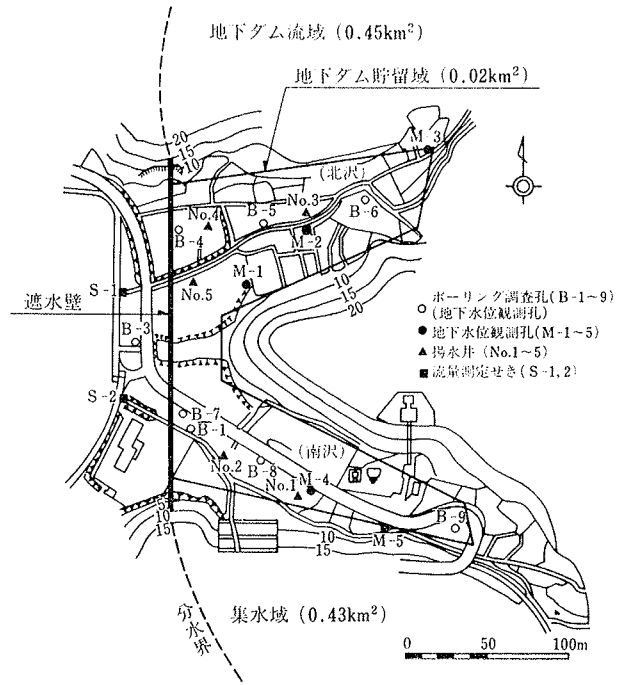


図-5 地下ダム貯留域

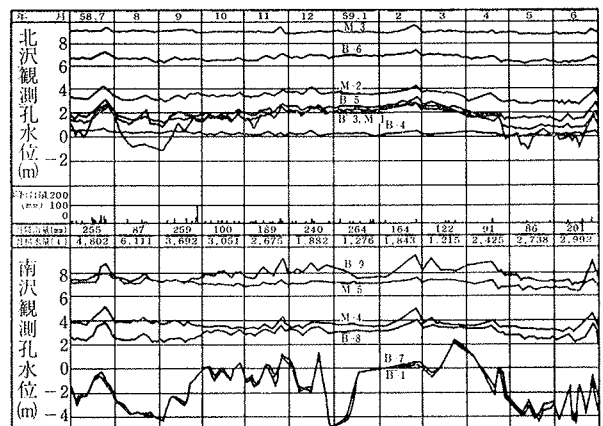


図-6 地下水位変動

水位変動を検証値として計算することにより、地下水収支の解明が可能となる。ここに検証値とする地下水位変動は、その流域内の地下水位変動を代表し得る平均的な値であるという前提が必要である。

図一6は、常神地下ダム貯留域内における各観測孔の地下水位変動である。前述のように、揚水は主に遮水壁近傍の2井(No. 2, No. 5)で行なっている。このことから、図一6において貯留域内の地下水位変動を代表し得る観測値としては、M-2(北沢), M-4(南沢)における観測結果を採用した。さらに、両観測孔の地下水位変動状況は類似していることから、今回の検証値としては、M-4における観測結果を用いた。

4.2.4. 地表流出量 両沢に設置された流量測定せき(三角せき)による越流水深の記録から、日流量を算定しそれらの合計を用いた。

4.3. 計算結果

4.3.1. 地下ダム流域の年間水収支 水収支を表わす式は、前述の式(1)に基づく、図一7から一般に式(9)のように示される。

$$\left. \begin{aligned} R - (D_{out} - D_{in}) - E - (G_{out} - G_{in}) - \Delta S - Q_d &= 0 \\ \Delta S &= M + W_s + Pa \cdot \Delta H \end{aligned} \right\} (9)$$

式(9)を地下ダム流域に適用する際には、流域は分水界によって定めているので、 D_{in} , G_{in} は0とおける。したがって式(9)の第1式は、式(10)となる。

$$R - D_{out} - E - G_{out} - \Delta S - Q_d = 0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

式(10)により、地下ダム流域の年間水収支を計算した。ここで式(10)において、 R , D_{out} , Q_d は既知量であり、 E はソーンズウェイト法による推定値を用い、 $G_{out} + \Delta S$ は未知量として扱った。

以上の水収支式による結果とタンクモデルによる計算結果を比較して表一1に示す。表一1より、タンクモデルによる流域全体の年間水収支結果は、水収支式による値にほぼ一致すると判断した。

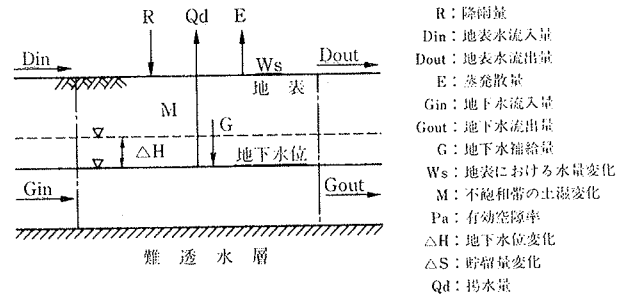
	(mm)	
	水収支式	タンクモデル
R	2,058	2,058
E	812	814
Dout	1,047	1,034
Qd	77	77
Gout + ΔS	122	133

注) 1mm=450m³に相当する。

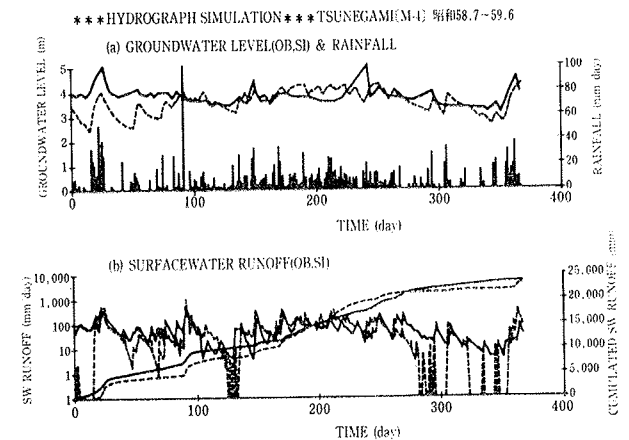
表一1 年間水収支結果

4.3.2. 地下水位変動および地表流出量 地下水位変動の実測値(実線)とタンクモデルによる計算値(破線)を比較して図一8(a)に示し、地表流出量を同様に図一8(b)に示す。図一8より、タンクモデルによる計算値は、実測値の傾向をほぼ再現し得るものと判断した。

4.3.3. 蒸発散パターン 貯留域における水収支は、前述の式(9)によって示される。式(9)において、計算期間が長ければ一般に M , W_s は無視でき、 ΔS はそのまま $Pa \cdot \Delta H$ に相当する。ここで、貯留域では月単位の水収支に関しても M , W_s は無視できると仮定し、月ごとの



図一7 水収支概念図



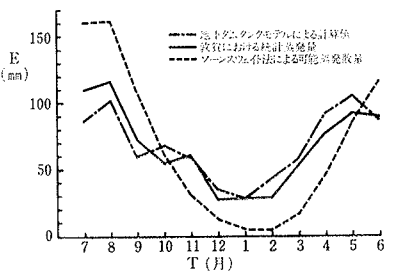
図一8 地下水位変動および地表流出量

水収支を式(11)で表わした。

$$R - (D_{out} - D_{in}) - E - (G_{out} - G_{in}) - Pa \cdot \Delta H - Q_d = 0 \quad \dots\dots\dots(11)$$

蒸発散量の月値は、式(11)にタンクモデルによる計算結果を代入して求めた。以上によって得た蒸発散量を、ソーンズウェイト法による値、および常神地区に近い敦賀における蒸発計蒸発量

(1898~1955の統計資料⁸⁾)と比較して図一9に示す。図一9によれば、タンクモデルによる計算の結果得られた蒸発散パターンは、特異な結果とはならず、統計値に比較的類似した傾向を示した。



図一9 蒸発散量の月別パターン

4.3.4. 貯留域、集水域の月別水収支 貯留域の水収支は、先の4.3.3.で述べたような過程のもとに解析し、一方集水域については、月ごとの水収支を表わす式として、式(12)を用いた。

$$\left. \begin{aligned} R - D_{out} - E - G_{out} - \Delta S &= 0 \\ \sum_{i=1}^{12} \Delta S_i &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

式(12)にタンクモデルによる計算結果を代入し、蒸発散量は月別パターンが貯留域と等しいものとして与え、差と

		mm												年間
		58.7	8	9	10	11	12	59.1	2	3	4	5	6	
貯留域	R	255	87	259	100	189	240	264	164	122	91	86	201	2,058
	E	87	101	63	71	57	34	29	44	57	92	105	86	826
集水域	Din	3,213	858	2,040	1,777	1,503	3,224	3,883	2,370	1,559	84	465	1,354	22,330
	Dout	3,387	801	2,194	1,762	1,595	3,387	4,075	2,450	1,580	99	432	1,499	23,261
集水域	Gin	297	123	280	311	301	680	821	599	563	58	105	291	4,429
	Gout	55	117	72	245	184	594	808	552	579	-44	-10	35	2,953
集水域	Pa△H	-6	-24	64	-42	22	36	-9	-6	-34	-34	-7	76	36
	Qd	242	307	186	152	135	93	65	93	62	120	136	150	1,741
集水域	R	255	87	259	100	189	240	264	164	122	91	86	201	2,058
	E	86	99	62	69	57	33	29	43	56	91	102	86	813
集水域	Dout	149	40	95	83	70	150	180	110	73	4	22	63	1,039
	Gout	14	6	13	14	14	32	37	28	26	3	5	14	206
集水域	△S	6	-58	89	-66	48	25	18	-17	-33	-7	-43	38	0

注) 貯留域の1mm=20m²に相当する。集水域の1mm=430m²に相当する。

表-2 月別水収支結果

して△Sを求めた。表-2にタンクモデルによる月別水収支の結果を示す。

4.4. 予測計算

昭和58.7~昭和59.6の実測値との検定で決定したタンクモデルを用いて、昭和59.7~昭和60.6の水収支計算を行なった。蒸発散量は、年間値としてソーンズウェイト法による値を用いた。図-10に地下水位変動、地表流出量のそれぞれの実測値(実線)と予測計算値(破線)を比較して示す。地表流出量の比較では、測定せき改修などによる観測中断が含まれているが、両者とも実測値に近い計算結果となっている。また、月別水収支結果は表-3に、蒸発散量の月別パターンは図-11にそれぞれ示した。

5. まとめ

この報告は、タンクモデルを用いて地下ダム流域内の水循環を表わすモデルを作り、主として貯留域における地下水収支解析を試みた。その結果、まず流域全体の年間水収支を整合させたうえで、地下水位の変動状況さらに地表流出量について、タンクモデルの検定を行なうことにより、流域内の地下水収支解析はほぼ可能と考えられる。このことは、より詳細な水収支解析、例えば揚水による地下水位低下の状況などを解析する際、入力データに関する資料となり得る。また、検定により決定したタンクモデルを用いて予測計算を行なった結果、流域内の水循環は比較的良好に再現でき、予測モデルとしての可能性も得られた。ここで、今回のタンクモデルによる計算にあたって、地下水収支に直接影響を与える問題点として今後検討すべき点をあげると、次のようである。

- (1) 蒸発散量の設定
- (2) 検証値とする地下水位変動の設定
- (3) 各モデル定数への水文地質状況の考慮

今回の報告は、1流域の適用例で、しかも様々な仮定のもとに行なっており、上記の問題点以外にもタンクモデルそのものに対する吟味がさらに必要と考えられる。今後、他流域への適用にあたっては、さらに検討を加えなくてはならない。

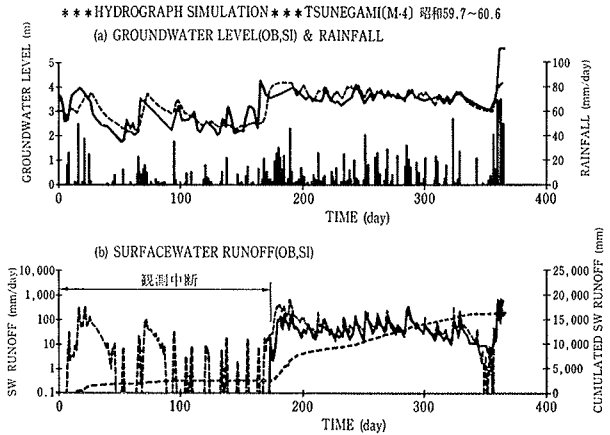


図-10 地下水位変動および地表流出量

		(mm)												年間
		59.7	8	9	10	11	12	60.1	2	3	4	5	6	
貯留域	R	169	27	91	95	47	253	195	122	192	178	158	303	1,830
	E	76	91	82	93	88	39	28	40	61	82	78	62	820
集水域	Din	1,530	256	581	19	0	2,300	3,760	1,074	2,272	1,917	1,602	3,199	18,510
	Dout	1,607	189	561	62	22	2,505	3,883	1,116	2,359	1,971	1,639	3,400	19,314
集水域	Gin	242	1	165	65	0	479	585	453	494	355	268	275	3,372
	Gout	-9	-229	-72	-160	-258	176	476	360	366	236	108	95	1,089
集水域	Pa△H	-6	-96	62	-27	-15	129	-24	4	-12	-7	-14	52	46
	Qd	273	329	204	211	210	183	177	129	174	168	217	168	2,443
集水域	R	169	27	91	95	47	253	195	122	192	178	158	303	1,830
	E	74	91	81	92	87	39	28	41	60	81	77	61	812
集水域	Dout	71	12	27	1	0	107	175	50	106	89	74	149	861
	Gout	11	0	8	3	0	22	27	21	23	17	12	13	157
集水域	△S	13	-76	-25	-1	-40	85	-35	10	3	-9	-5	80	0

注) 貯留域の1mm=20m²に相当する。集水域の1mm=430m²に相当する。

表-3 月別水収支予測結果

参考文献

- 1) 菅原正巳: 流出解析法, 共立出版, (1972)
- 2) 吉川 満: 貯留モデルによる不圧の地下水の涵養と流出の構造解析, 応用地質, 第23巻, 第1号, (1982), pp. 1~6
- 3) 石崎勝義, 他: 地下ダムの現地調査, 土木学会第34回年次学術講演会講演概要集, 第2部, (1979.10), pp. 717~718
- 4) 石崎勝義, 他: 地下水を考慮した流域水循環モデル, 土木技術資料, 第21巻, 第6号, (1979), pp. 3~8
- 5) 相場瑞夫, 他: 宮古島における地下ダムの水文挙動, 土と基礎, 第31巻, 第3号, (1983), pp. 17~23
- 6) 内藤和章, 桑原 徹: 常神地下ダムの建設, 地下水技術協会秋季講習会テキスト, (1985.11), pp.85~103
- 7) 平間邦興, 他: 地下ダム建設技術における調査・設計, 大林組技術研究所報, No. 32, (1986), pp. 11~16
- 8) 気象協会: 日本各地の気候表, (1965. 3), p. 78

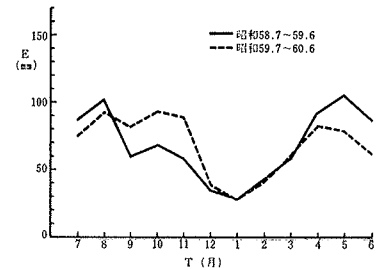


図-11 蒸発散量の月別パターン