

宮古島における地下ダム水文挙動

The hydrologic behavior of underground reservoir in the Miyako-jima Island

あい	ば	みず	お	くろ	かわ	むつ	お
相	場	瑞	夫*	黒	川	睦	生**
なが	た		さとし	ほそ	たに	ひろ	し
永	田		聡***	細	谷	裕	士****
		よし	かわ		みつる		
		吉	川		満*****		

1. ま え が き

農業用水資源を地下ダムにより確保しようとする構想は、可地が1940年に那須野ヶ原の農業水利計画に初めて提案¹⁾した。1973年には長崎県野母崎町樺島に本邦最初の地下ダムが築造され、上水道水源として利用されている。最近になってこのような地下ダム構想の実現の機運が高まり、各方面で具体的な計画が策定されており、現在建設中のものもある。

農林水産省と沖縄開発庁は、1974年以来沖縄県宮古島において、地下ダムの開発調査に着手し、1979年には実験用の地下ダム（皆福ダム）を完成し、各種の試験・解析を行った。皆福ダムは、予想以上の貯水効果を発揮するとともに地下ダムに関する多くの知見をもたらした。沖縄総合事務局は、皆福ダムの成果に基づいて、宮古島・沖縄本島南部などで地下ダムを水源とするかんがい計画を策定している。宮古島ではほぼ全島にわたるおよそ8000 haの畑地かんがいの主水源として地下ダム群を建設する計画をとりまとめつつある。

本文は、これらの成果のうち、特に地下ダム計画における水文収支解析の位置づけ、宮古島に適用した水文収支モデル、このモデルによる水文収支解析および皆福ダム完成後に行われた水文観測および取水実験などの結果明らかとなった宮古島における地下ダムの水文挙動の特徴について述べる。

宮古島全体および皆福ダムの水文地質環境、皆福ダムの諸元などについては、筆者らのうち、相場、黒川などが既に報告^{4)~10)}しているので、本文では重複を避けるため省略する。

2. 地下ダム計画における水文収支解析

地下ダムを水源とする利水計画の最大の特徴は、水文学の評価に当たり、地下水のかん養・貯留・流動といった浸透現象を取り扱うことにある。地下ダムは、貯留効率からいって不圧の帯水層に設けられるのが一般的であるために、

この浸透現象は単に帯水層の地下水の流れといった飽和状態のものだけでなく、表層をなす土壌体や岩層などの媒体を通る不飽和状態のものも取り扱うこととなる。

地表系の水源計画における水文量の調査・観測・解析などの手法は確立しており、既往例も多く幅広い選択ができる。地下系の場合には、流域規模のかん養量を始めとして、地下水の流量などの調査・観測の手法でさえ実用的なものが確立されているとはいえない。

例えば、地表系の場合には河川流量の時系列観測が基本的水文量への直接的なアプローチであるのに対し、地下系の場合には地下水流域の特定な断面での流量の直接的な時系列観測は事実上不可能である。この場合には特定地点に設けた観測井における地下水頭の時系列観測に頼る他ない。

地下ダム計画における水文および水文地質調査のうち最も困難で重要な点は、流域規模の地下水かん養量と貯留率^{注1)}の評価である。地下水かん養量は、不圧帯水層では表層からの鉛直方向の不飽和浸透によってもたらされるものが多いが、このような浸透を演えき的に解く実用的な手法で確立されたものはない。

地下ダムによる利水計画でも、長期間にわたる水文収支を確率論的に処理して妥当な計画諸元を決定しなければならないことはいままでもない。しかしながら、確率論を展開するのに十分な地下系の水文データが集積されている場合はまれである。

上記のようなもろもろの問題点は、地下ダムによる利水計画策定のためには、このダム流域の水文収支解析のためのシミュレーション・モデルの構築が不可欠であることを示している。このモデルは、数値モデルとしてコンピューターにより作動できるものとするのが便利である。

このモデルの基本機能は、対象とする流域の地下水のかん養量・貯留量および流出量の時系列変化が定量化できるものであり、また地下ダムをその諸元に応じた形で組み込めるものでなければならない。この条件から、通常は、降水記録を入力パラメーターとし蒸発散・地表流出といった地表系水文量を地下浸透系の水文学量から分離できるような総合的水文収支モデルとする必要がある。

このモデルは、対象流域の地表系・地下系の物理形状お

*農林水産省 構造改善局計画部
 **農林水産省 九州農政局計画部
 ***沖縄総合事務局 農林水産部
 ****沖縄総合事務局 八重山宮古農業開発調査事務所
 *****㈱三祐コンサルタンツ

注 1) 有効間隙率あるいは貯留係数などと混用されているが筆者らは流域規模の産水率 (specific yield) を貯留率と呼ぶことを提唱している。

よび水理特性などを基本的なモデル・パラメーターとし、観測された河川流量および地下水ハイドログラフ注2)などをそれぞれ地表系および地下系の水文事象の検証値として同定される。次いで計画されている地下ダムの水理諸元をこのモデルに組み込んで利水計画シミュレーションを行い、妥当な計画諸元を確定するという手順をとる。

3. 宮古島における水文収支モデル

宮古島の地下ダム群は畑地かんがいの水源を確保するために計画されている。したがって、最終的には、このダム群を運用して所定の畑地をかんがいするため計画基準年を決定すると同時に、ダム依存量および容量を確定し、豊水年における地下水上昇の影響を評価するなどを目的とした相当厳密な水文収支解析が要求される。

これらの目的を果たすために地下ダムの建設が予定される流域ごとに水文挙動を再現できるシミュレーション・モデルが作られているので、ここにその概要を紹介する。

3.1 地下水かん養モデル

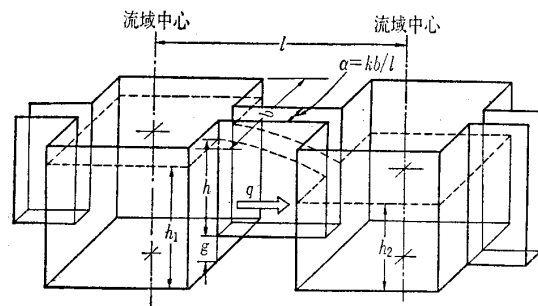
流域規模の地下水かん養量の評価は、筆者らの一人、吉川が提唱している貯留モデル^{11),12)}を適用して行われた。このモデルは、菅原の直列貯留モデル¹⁶⁾を応用したものであり、その特徴はモデルの検証を地下水ハイドログラフにより行うため、帯水層に相当するタンクに貯留率の概念が導入されていることである。すなわち、流出係数を α 、貯留率を λ としたとき、帯水層は減衰率が α/λ であるような減衰モデルとしている。

このモデルを適用することによって、降水を入力パラメーターとして、蒸発散・地表流出・地下水かん養という水文量を時系列的、構造的に解析することができる。

3.2 地下水系のモデル

地下水のかん養量および揚水量などの地下水系の入出力パラメーターが明らかであれば、ある帯水層の水文収支モデルは、差分法や有限要素法による浸透モデルを適用することによって比較的容易に作ることができる。

宮古島においても、当初の段階では、これらの方法によ



図—1 貯留モデルの不圧の流出係数の概念図

る平面二次元の非定常浸透モデルが適用された。しかしながら、差分法は解を安定させるため演算の時間刻みを細分する必要がある、長期間にわたるシミュレーションを行うには難点がある。有限要素法は、水頭変動の大きい不圧条件の浸透解析には難点が多すぎる。これらの方法は、基本的に水頭ポテンシャル解であり、宮古島の場合のように、流域の一部の地下水が時々枯渇するような条件を取り扱う場合には不適當である。更に、これらの浸透モデルを適用する場合、前述のかん養モデルと併せて、二つのモデルをフィード・バックしつつ、同定を行うため多大の労力と時間を必要とする。

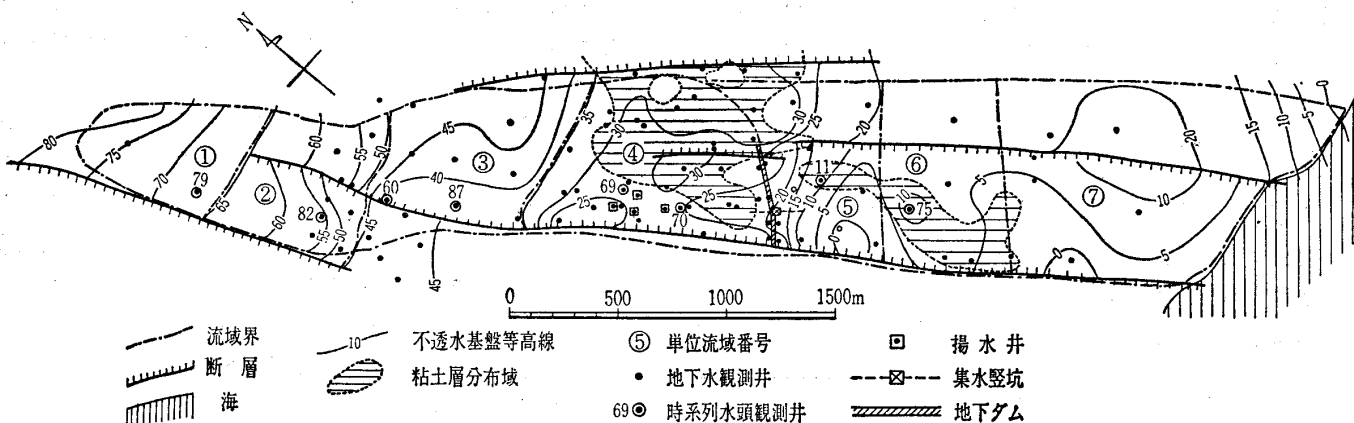
このような経験に基づいて、吉川は、総合貯留モデルと呼んでいる新しい解析法¹³⁾を開発した。

この方法は対象とする流域をいくつかの単位小流域に分割し、それぞれの小流域ごとに地表系と地下系を総合した貯留モデルを作るものである。隣接する流域間では、地表系および地下系のそれぞれについて関係づけをしておくことはいままでのない。ある流域の地表流出は、下流流域の地表流入とする。地下系は、隣接流域のすべてと、水頭差に比例した交流をするものとする。

例えば、不圧系の交流条件は、ダルシー則に基づいて下記のような差分解によるものとする。図—1に示す記号を用い、透水係数を k とすると、

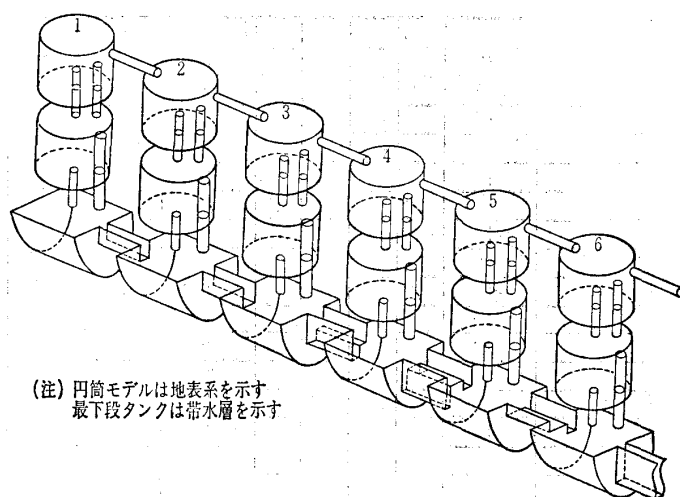
$$q = kbb(h_1 - h_2)/L \dots \dots \dots (1)$$

ここで $\alpha = kb/L$ とおくと、(1)式は



図—2 皆福流域平面図

注 2) 地下水頭の時系列観測値



図—3 皆福ダム単位流域の水頭と貯水量の関係

ある。水頭値は、流域ごとにあらかじめ定義しておいた貯水量(Q)と水頭(H)の関係により算出する。

不圧帯水層の $Q \sim H$ 関係は、貯留率を λ 、ある高さまでの帯水層の体積を V_h 、 $V_h=0$ なる高さを g とすると、

$$Q = \lambda V_h \dots\dots\dots (5)$$

という太さのパイプにより行われるし、漏水性被圧帯水層は、漏水関数を k'/b' 、流域面積を A とすると

というパイプにより漏水かん養が行われることになる。

このモデルを貯留モデルと呼ぶ由来は、他の浸透モデルが水頭ポテンシャル解であるのに対し、このモデルでは、対象とする帯水層における地下水の貯留量の収支解析を主眼とする点に

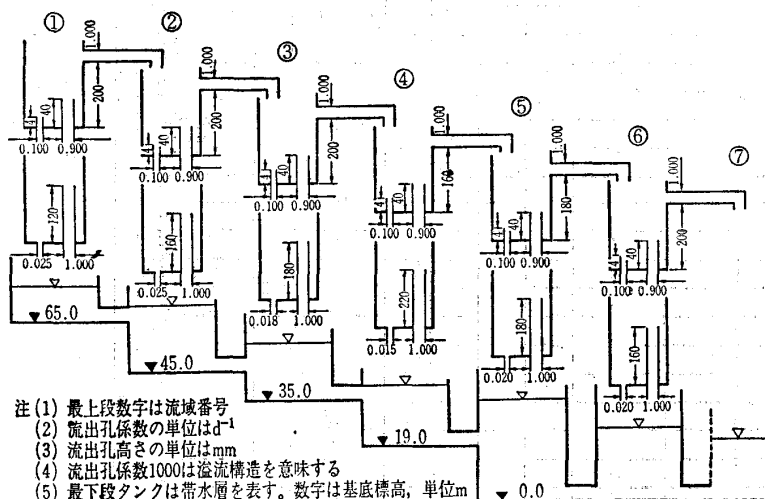
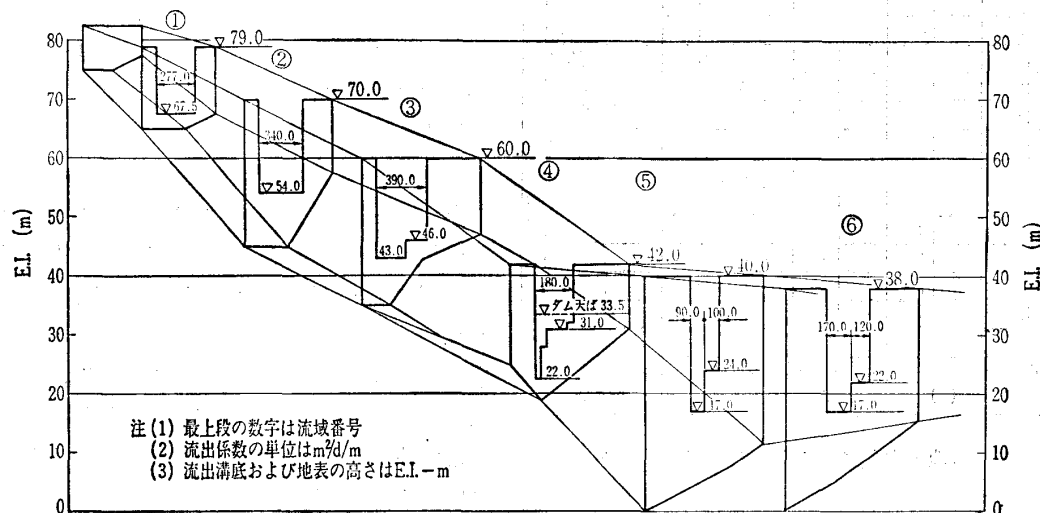
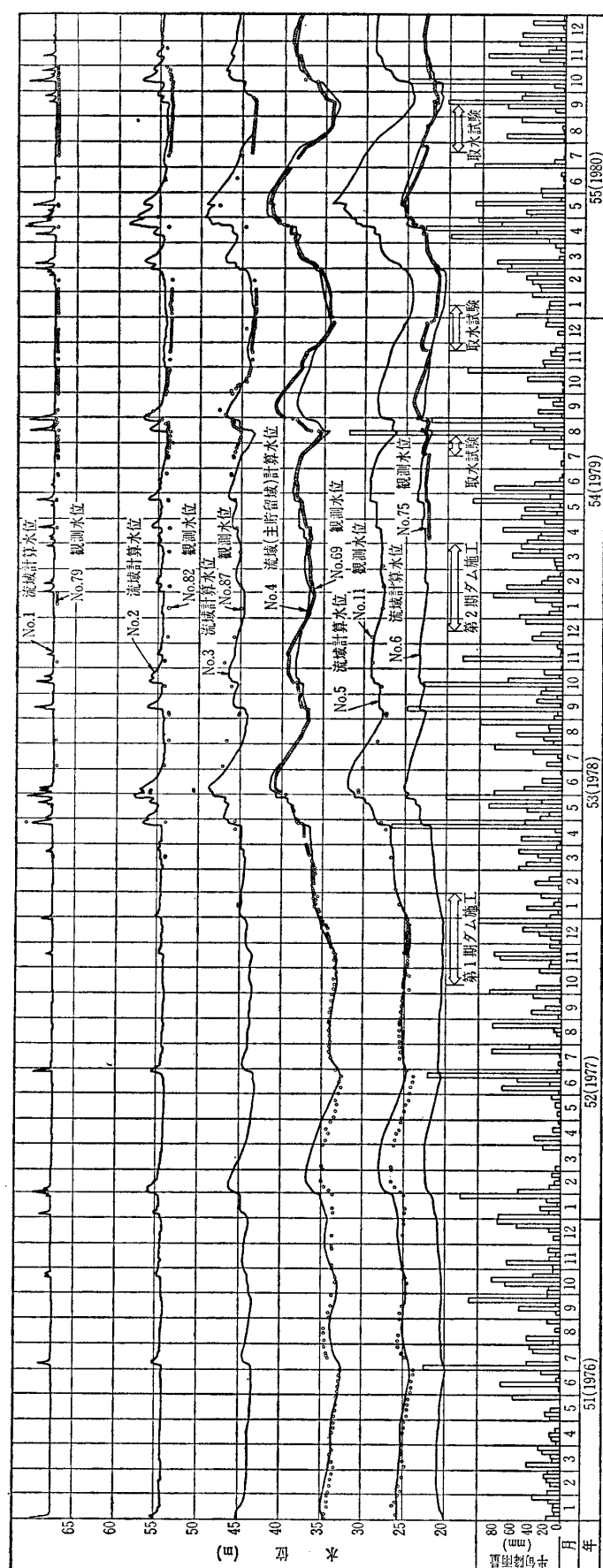


図-5 皆福ダム地下水かん養構造模式図



図一6 皆福流域帯水層貯留モデル模式図



図一七 皆福流域の地下水頭による水収支モデルの検証

ただし $V_h = f(D)$, $D = H - g$

で表される。

被圧帯水層の場合には、過剰水圧 $p=0$ のときの帯水層内の貯水量 Q_0 、その時の水頭を G 、貯留係数を S とすると、

$$\left. \begin{aligned} Q &= Q_0(1 + Sp) \\ \text{ここで } p &= \rho g(H - G) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

となる。

このモデルは宮古島の水文地質条件に非常によく適合する。図一2に示す皆福流域の不透水基盤形に見られるように、宮古島の帯水層は舟底形をしており、水位により帯水層体積も地下水の浸透断面積も非線型に変化する。

このような場合には $Q \sim H$ 関係は二次曲線で、断面変化は底高および流出係数の異なるいくつかの溝で折線近似することにより、容易にこれらの条件をモデル化することができる。皆福流域の単位小流域ごとの $Q \sim H$ 関係を図一3に示す。

貯留モデルは、海岸の2層密度流を解くこともできる。ある単位流域の塩水と淡水の貯留量に着目し、2層流の運動方程式により塩水および淡水のそれぞれの収支を解いて行くものである。

貯留モデルへの地下ダムの組込みも容易である。止水壁天端より上方の流出係数は、現況のままで、天端より下方は、現況の流出係数・流域中心間距離および止水壁の透水係数と壁厚により、止水効果に相応する細いスリットを設定すればよい。

皆福流域の貯留モデルの概念図を図一4に示す。

3.3 皆福ダム貯留モデル

宮古島においては、皆福・福里・仲原・砂川および嘉手苅の各流域の水文収支モデルが固定され、30か年にわたる水文収支が明らかになっている。

皆福ダムについて構築された貯留モデルを紹介する。

図一2に示すように、この流域は7個の小流域に分割された。ただし流域7は解析対象外で、地下水頭の境界条件のみを受けもつ仮想流域である。

最終的に固定されたモデル・パラメーターの模式図を図一5および6に、地下水ハイドログラフによるモデルの検証結果を図一7にそれぞれ示す。

3.4 宮古島の水文収支

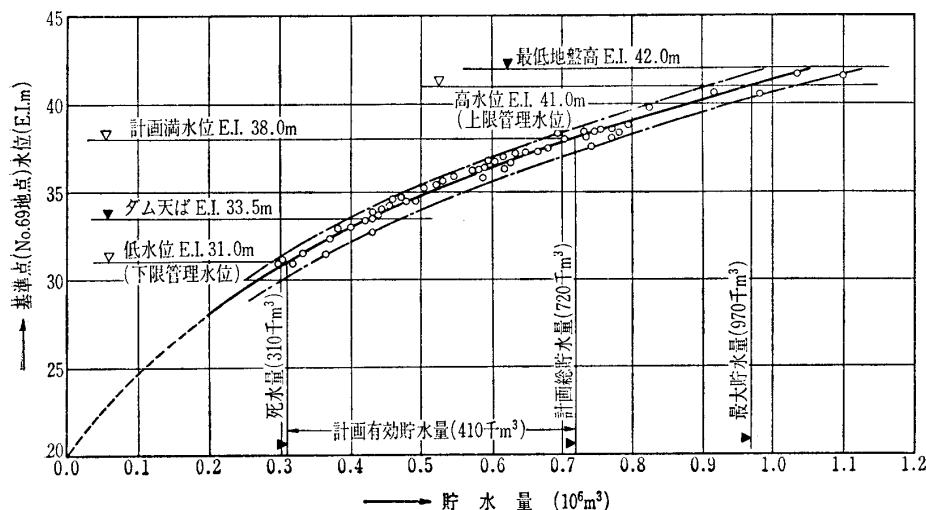
上記のような貯留モデルにより明らかとなった五つの流域の最近数年平均の水文収支を表一1に示す。

年間およそ2100mmの降水のうち、蒸発散は40%の850mm、地表流出はわずか3%の60mmに達する。地下水かん養は58%の1200mmに達する。かん養された地下水の揚水利用はわずかであり、ほとんどが海へ流去している。

この地下水かん養率を全島（面積およそ160km²）に当てはめると、宮古島には年間2億m³余りの地下水が循環していることになる。

表—1 宮古島の5流域の水文収支 (単位: mm/年)

流域	面積 (km ²)	降水	蒸発散	地表流出	地下水			備考
					かん養	揚水	流出	
皆福	2.8	2003	877	0	1121	43	1040	1976~1980の平均
福里	13.7	2187	871	35	1296	76	1215	
仲原	14.9	2187	872	32	1297	0	1322	1977~1981の平均
砂川	12.8	2187	872	40	1289	13	1290	
嘉手苅	6.6	2046	760	171	1130	0	989	1976~1981の平均
平均	—	2122	850	56	1227	26	1172	
百分率	—	100	40	3	58	1	55	



図—8 皆福ダム(水位)/(貯水量)関係および計画諸元

4. 地下ダムの水文挙動

皆福ダムの完成後、貯水域内外の地下水頭の観測が続けられると同時に、前後4回にわたる取水実験や放流孔の開閉を行って、ダムの貯水機能や、取水施設の水利特性およびかん養量などの確認を行うことができた。

またこれらの知見に基づいて、地下ダムの建設が計画されている他の流域も含めて、利水シミュレーションを行い、地下ダムの貯水機能の予察が試みられた。

以下にこれらの検討の結果明らかとなった地下ダムの水文挙動の特質を皆福ダムを例として述べる。

4.1 地下ダムの貯水機能

図—8および9はシミュレーションの結果明らかとなった皆福ダムの(水位)/(貯水量)および(水位)/(ダム流下量)の関係を示したものである。ダム流下量は堤体漏水量に堤体溢流量を加えたものである。水位はダム軸の上流650mの貯水域のほぼ中央に位置する観測井69地点の値である(図—2)。

貯水量およびダム流下量はいろいろな時点の値をプロットしてある。これらの図に示されるように、同じ水位でも貯水量で15万 m³、流下量で2000 m³/d前後の変動幅があることは興味深い。これらの関係を時系列に追跡すると、水位上昇時には図に示す包絡線の下側を、下降時には上側をたどる。この現象は貯水域においても水面に勾配があり、

貯水域への地下水流入の強さに従って水面勾配が変化する挙動を示しているものと考えられる。この勾配は、帯水層の透水性と後背流域の大きさに関連しているの、一概にいうことはできないが、宮古島の各流域で、常時1/500以上の値を示している。

図—10は皆福ダムを120ヘクタールの砂糖きび畑のかんがい用水源として運用した場合の30か年にわたる水文収支シミュレーションの結果の一部を示している。

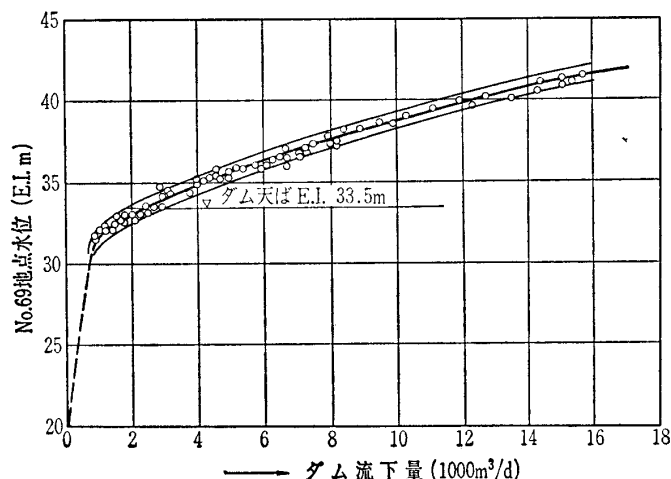
図—8に示すようにこのダムの天端標高は33.5mであり、貯水域の最低地盤標高は42.0mで、その抜水区間の厚さは8.5mである。シミュレーションの結果をみると、貯水位がこの抜水区間にある期間が相当長く、豊水年の貯水位は34.0mを下回らないことが示されている。また、このようなダムの天端をこえる部分にある余剰の貯水量は利水計画の上であらかじめ

見込んでおくことができる。このことは地下ダムの貯水機能の最大の特徴である。このような余剰貯水機能は、抜水高とこの区間の地下水疎通能によって定まる。図—9に示した皆福ダムの疎通能は(水位)/(貯水量)関係と併せて、このダムの総合的な貯水機能を示していることになる。

このように地下ダムの貯水機能は、地上のダムのように(水位)/(貯水量)関係のみによって1次元的に表されるものでなく、抜水区間の疎通能条件が関連して2次元的な性質をもっていることになる。

4.2 地下ダムの貯水諸元

地下ダム特有の余剰貯水機能などによって、地下ダムの



図—9 皆福ダム(水位)/(ダム流下量)の関係

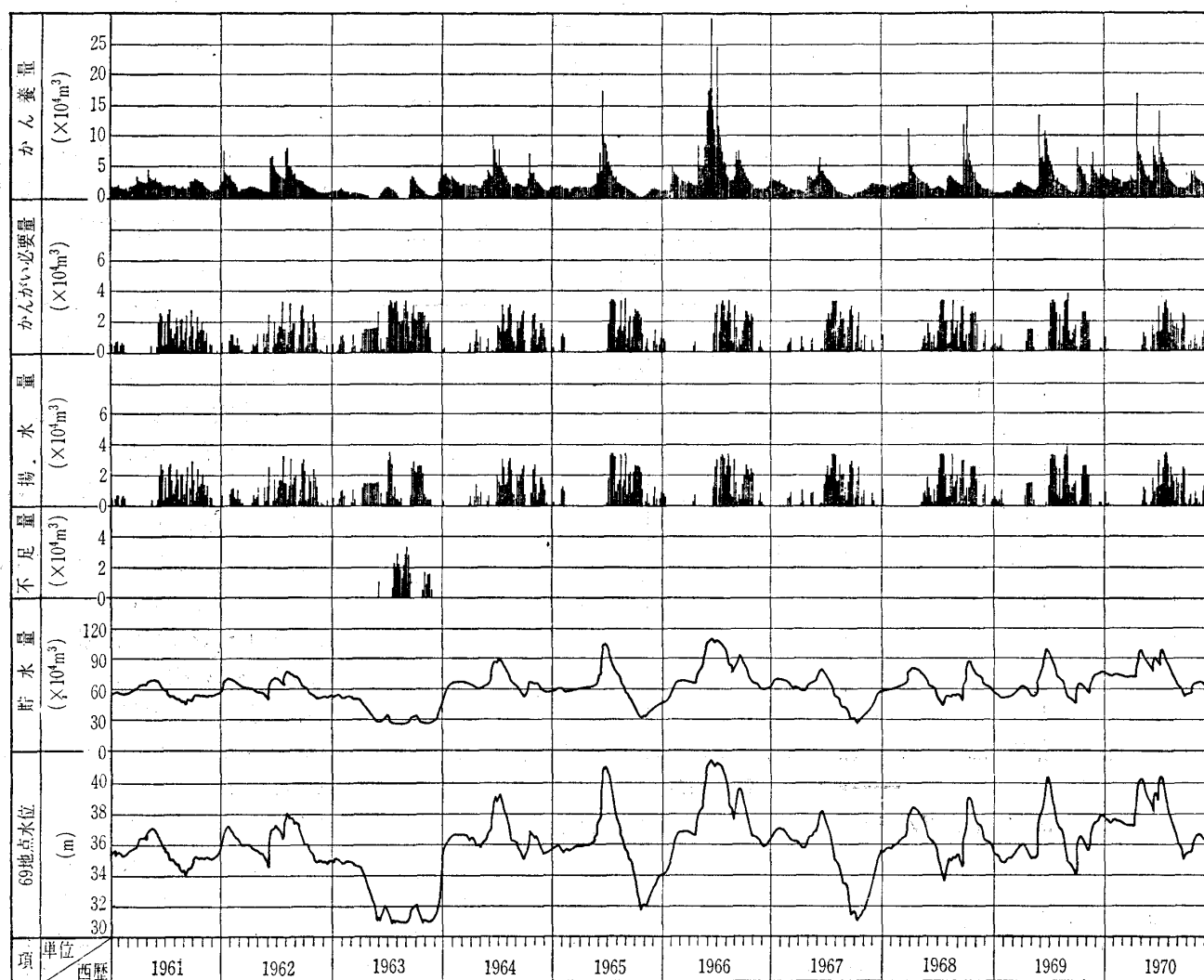


図-10 皆福ダム運用シミュレーション (かんがい面積: 120 ha)

貯水諸元の定義は、いくつかの点で地上ダムと異なっている。以下に地下ダムに特有な貯水諸元を述べるが、貯水面が水平でないため、ここでいう水位とは貯水域内の特定地点のもので代表することになる。この水位は地下ダムの運用を管理するのに最も都合のよいところに設けた管理観測井におけるものとなる。

(1) 死水量および低水位

地下ダムからの取水は、通常、地下水の揚水施設により行われ、集水のために相当な水頭差を必要とする。これは重力取水が可能な場合でも同様である。したがって、揚水施設の設計に当たり計画最大取水量の揚水が可能な最低の水深を確保する必要がある。この水深は、帯水層の水利的性質・施設の配置密度・計画基準年の基底かん養量などから決定される。この水位が低水位であり、その時の貯水量が死水量である。地上ダムでは計画堆砂量がこれに相当するが、地下ダムでは正に死水量である。

貯水位がこの低水位を下回れば、所定の取水が不可能となるので、この水位をダム運用上の下限管理水位ということもできる。

皆福ダムの場合には、低水位標高31.0m、死水量31万 m^3 とされている。

(2) 高水位および最大貯水量

前節で述べた余剰貯水の最高水位およびその時の貯水量をそれぞれ高水位および最大貯水量といえる。

皆福ダムでは、地下水を地表にあふれさせないように地表に排水路を設ける計画となっており、排水路の計画水位を地表下1.0m、標高41.0mに設定している。したがって、このダムは最大限この高さまでの貯水が可能であり、最大貯水量はおおよそ97万 m^3 である。

取水区間が十分にあり、地下水の確率洪水量を上回る疎通能がある場合には、高水位および最大貯水量は、長期間の水文収支解析を行って定めることになる。また、地表への地下水のあふれを放水孔等で調節する場合には、高水位は上限管理水位と同義となる。

(3) 満水位および有効貯水量

地下ダムは余剰貯水を利水容量に見込むため、利水開始水位が年によりまちまちとなり、満水位を一概に定義することができない。したがって計画基準年の貯水状況により

これを定義することが妥当であろう。この場合には、長期間のダムの水収支解析（いわゆるダム依存量解析）を行い、確率解析によって決定された計画基準年における必要貯水容量を計画有効貯水量とするべきであろう。地下ダムはその天端高の差による建設費に大差がないため、流域かん養量に比べて貯水容量を大きく計画し、経年貯水を見込む利水計画を採用しやすい性格をもっている。このような経年貯水を見込む計画で、基準年当初に貯水が回復していない場合には、前年にさかのぼって有効貯水量を定める必要がある。

このようにして決められた有効貯水量に死水量を加えたものが計画総貯水量となり、その時の水位が満水位となる。

皆福ダムの場合には、1967年が計画基準年であり、この年の必要貯水容量41万 m^3 (図-10参照) を有効貯水量とした。したがって、図-8に示したように、総貯水量は72万 m^3 、満水位標高は38.0m、利用水深7.0mとなった。

5. あとがき

宮古島の水文地質環境は、本邦で特殊な部類に入られる。この島における水資源開発は、水文循環の枠内で行う限り、地下ダムによることが唯一の方法であり、また非常に効果的である。宮古島において目下策定中の地下ダム計画は、貯水量の合計が3000万 m^3 以上に達するもの

と思われる。この計画によって得られた技術的な知見は積極的に公表して行く方針であり、小文もその一環として執筆されたものである。各方面で同様な計画の実務を担当されている方々のお役に立てれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 可地貫一：地下水強化と農業水利，地人書館，1940.
- 2) 沖縄総合事務局：宮古島地下ダム開発計画，1978.
- 3) "：単位用水量に関する調査，1979.
- 4) "：宮古島水文地質図，1982.
- 5) 農林水産省・沖縄総合事務局：皆福ダム，1982.
- 6) 農林水産省：宮古島における地下ダムの技術開発，1979.
- 7) 相場瑞夫：宮古島における地下ダムの技術開発，土と基礎，Vol. 27, No. 9, pp. 87-89, 1979.
- 8) 相場 et al.：宮古島における地下ダムの技術開発，水と土，Vol. 37, pp. 45-53, 1979.
- 9) 農林水産省地下ダム技術開発グループ：地下ダムによる地下水かん養技術，用水と廃水，Vol. 22, No. 1, pp. 17-22, 1980.
- 10) 黒川陸生：宮古島の地下ダム，土と基礎，Vol. 29, No. 1, pp. 37-42, 1981.
- 11) 吉川 満：不圧の地下水流出のタンク・モデル・シミュレーション，新潟大学理学部地鉱教室研究報告，No. 4, 1976.
- 12) 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，Vol. 23, No. 1, pp. 1-6, 1982.
- 13) 吉川 満：総合貯留モデルによる水文収支解析（未発表），1982.
- 14) 沖縄総合事務局：皆福ダム水理解析報告書，1980.
- 15) "：宮古地区水理解析報告書，1981.
- 16) 菅原正巳：流出解析法，共立出版，1972 ほか.

(原稿受理 1982.12.14)

土質工学会各支部発行図書案内

<東北支部>

○昭和56年度東北支部研究討論会講演集（56年11月）

テーマ：東北地方の local soils の諸問題とその対策

B 5 判 53頁 定価・会員特価とも ￥1,000 千￥240

<中部支部>

○中部支部25周年誌（57年4月）

B 5 判 460頁 定価¥1,000 会員特価¥500 千￥250

<関西支部>

○二十周年記念誌（53年11月）

B 5 判 165頁 定価・会員特価とも ￥2,000 千￥300

○マサ土の工学的性質とその取扱い指針（45年1月）

A 5 判 191頁 定価・会員特価とも ￥1,500 千￥300

○土と基礎の沈下と変形（講習会テキスト，51年2月）

B 5 判 146頁 定価・会員特価とも ￥4,500 千￥300

○岩の力学—軟岩を中心として—（講習会テキスト，53年3月）

B 5 判 221頁 定価・会員特価とも ￥5,000 千￥300

○現場計測工法—シンポジウム論文集—（56年12月）

B 5 判 266頁 定価・会員特価とも ￥2,500 千￥350

<九州支部>

○昭和56年度特別講演会（56年10月）

「中国における土質工学事情」概要集

B 5 判 60頁 定価¥1,000 会員特価¥800 千￥250

○九州・沖縄における特殊土（57年5月）

B 5 判 238頁 定価¥3,900 会員特価¥3,000 千￥400

○珪藻土に関する資料目録（57年6月）

B 5 判 16頁 定価・会員特価とも ￥200 千￥200

問合せ・注文先：上記の出版物についての問合せ，ご注文は土質工学会各支部へお願いします。

各支部の所在地は会告の1ページをご覧下さい。