

土木研究所資料

渇水時の水管理に関する計画学的研究

昭和54年6月

建設省土木研究所
ダム部水資源開発研究室
河川部水文研究室

渇水時の水管理に関する計画学的研究

序

わが国の現在の河川の水利用率は20%近くに達している。利根川、淀川などの大河川では50%前後に達し、開発余力は少なく渇水危険度は大きくなっている。従って長期的に水資源開発に余力を持たせ、渇水に対し強い体質の社会を作りあげるためには、貯水池の操作運用について合目的な指針を与えるとともに、地下水の活用を図るなどの渇水対策を確立する必要がある。

貯水池の操作運用に関する意志決定のための手法については、幾つかの報文があるが、貯水池が超過外力としての異常渇水に見舞われたときの具体的な運用のあり方については、従来あまり明確にされたものはなかった。その理由としては、貯水池操作の問題は非線形であって理論的取り扱いが難しいことや、渇水被害についての事例調査に乏しく必要な資料の入手が難しいことなどがあげられる。しかし、昭和53年の福岡の渇水の実例が示すように、その被害は社会的にも大きな影響があるので、渇水による被害を軽減するとともに水資源を効率的に利用するため、渇水の特性と貯水池の関係を明らかにし、渇水時における貯水池の操作運用のルールについて何らかの指針を与える必要があると考えられる。本研究では、渇水被害の軽減額を評価基準として貯水池の操作運用を最適化するには、確率ダイナミック・プログラミング法に基いた操作運用を行なうことが最も適切であることを明らかにした。

また、地下水の活用については、地下を大容量の貯水池であると想定し、通常は地下水として利用している水量を河川の無効放流となっている豊水時の流量で代替し、豊水が利用不能の時のみ地下水を使用するように、河川の表流水と地下水を連結した水利用システムを構成することが渇水時の有力な対策の一つであることを明らかにするとともに、荒川流域における地下貯水池構想について事例研究を行ない、荒川の豊水利用と地下水かん養により開発余力の温存と異常渇水対策のための地下水の活用について試算を行なった。

本稿をまとめるに当たり充分考察できなかった問題もある。たとえば水需給の均衡を論ずる上での維持用水の取扱い、ダム放流水が河道を流下する際の河道内水収支の変動特性、地下水の涵養技術などがそれであるが、これらは今後の研究に期待したい。

最後に本論文をまとめるにあたり渇水被害の調査や資料提供に協力していただいた建設省の関係地方建設局の方々に深甚なる謝辞を捧げるものである。

昭和54年6月16日

建設省土木研究所長	中	澤	弼	仁
同 水資源開発研究室長	今	村	瑞	穂
同 水文研究室長	石	崎	勝	義
同 水資源開発研究室 研究員	中	村		昭

渇水時の水管理に関する計画学的研究 (要 旨)

1. 人口の増加、生活内容の多様化とともに、世界的に消費水量は増加の傾向にある。わが国では各種用水の水源を主として河川に依存しているが、水需要の増加に対応した水資源の開発が遅れて慢性的に水不足の状態に置かれており、開発施設の着工を条件として豊水時のみの緊急暫定取水が許可されている。その結果、その開発段階での平年の流況レベルの場合には水不足の状態を惹起する結果を招き、渇水危険度は高まることになる。
2. 歴史的にみても、わが国では人口の増加、耕地面積の拡大に伴って水需要が増加する一方、水を供給する河川の流況は不安定であったため、耕地面積の急激な拡大をみた16世紀以降ほとんど毎年渇水が発生し、10年に1回程度は広範かつ深刻な大渇水による被害が発生している。19世紀以降近年における渇水時の気象条件即ち渇水と関係の深い夏期(5~9月)の降雨特性の水文統計値を全国に亘って考察したところ、夏期の総雨量が平年の70%以下になるのは再現年であれば10年、60%以下が50年、50%以下が100年以上に相当している。また代表的渇水である昭和14年、42年の西日本渇水では、降雨日数が少なく、無降雨継続日数の再現年は50~100年又はそれ以上の観測地点が多かったことが判明し、これらの指標を用いて気象的な意味の渇水を表現することが適切であることが明らかとなった。
3. 水資源開発の計画策定における渇水基準年の選定には、以前は10年間第2~3位の渇水を計画対象としていたが、最近は安全度を向上せしめるため10年間第1位の渇水を計画対象として貯水容量の規模決定を行っている。この基準年選定の妥当性検証のため、小瀬川の45年間の流量資料を用いて45年間第5位以上の5回の渇水時における不足容量を計算し、節水による回避策をとったときの節水率と節水日数の積(%・日)の累加値と確保流量(基準地点において常時確保されるべき流量)とを対比したところ、同じ安全度の水準(必要容量の超過確率で約1/10)で貯水池規模を設定しても、河川の利用率の上昇とともに水不足(%・日で表示する)の大きさは増加する、即ち利用率の上昇に伴い渇水の危険度は高まることが認められた。
4. 長期的な水需要の増加に起因する水需給ギャップ解消が水資源開発であるが、計画対象渇水を越える異常渇水の被害の軽減が渇水対策である。水資源開発の開発効率は開発コストと便益の関係から評価されるが、渇水対策は渇水被害額、同軽減額及び渇水対策費の関係から評価される。この渇水対策として直接的な費用を要せずしかも効果的な手段として貯水池操作の最適化がある。
5. 過去における渇水の実績では、渇水の長期化、深刻化に伴い取水制限を強化し、貯水池保有量の回復に従い制限を緩和するというパターンを繰り返している。これらの体験を踏まえ、異常渇水に際して河川の自然流況と貯水池保有量を有効に活用しつつ、渇水被害を最小ならしめる貯水池の運用方式を確立するための原理を検討することとした。

6. まず渇水被害の構造分析と計量化を行なうこととし、利水者の蒙る渇水被害の構造及び対応策は渇水の深度の指標としての節水率ごとに整理可能であるとの前提に立ち、昭和48年夏の高松、松江などの渇水時における対応の実態から節水率と渇水被害額との関係を求め、さらに農業用水についても節水した場合の具体的対策を考察し、各種用水の渇水時における渇水被害原単位と節水率との関係式を求めた。実績によれば、節水率の低い段階と大巾な節水をした場合の被害の様相が著しく異なるので、渇水被害原単位を節水率の2次式を以て表現したが、昭和53年夏の福岡渇水の被害状況の調査によって、この手法による計量化の妥当性が検証された。
7. 上記の渇水被害の構造分析による節水率と被害原単位の関係を用い、検討対象3ダムについて渇水期間を通じての全被害額を評価した。そのうちAダムはかんがい期は農業用水中心、非かんがい期は水道及び工業用水のみの利水目的を有し、Bダムは生活用水の比重が高く、Cダムは工業用水の比重が高いダムであって、現実の渇水時における貯水池の操作運用は貯水池ごとの個々の事情に応じて異なっている。計画を越える異常渇水時の貯水池運用は特に慎重にする必要があるが、その運用上の最大の問題は将来流況が未知であり、過去の統計量から得られる期待値のみが既知である点である。そこで本研究では渇水が深刻化、長期化しても被害を最小限にとどめる操作運用の手法を求めるため、(1)予測方式、(2)段階的節水方式、(3)確率ダイナミック・プログラミング(確率D.P.)方式の3方法を選び、渇水の影響や被害を測定する尺度として前記の渇水被害原単位を使用して、各方法ごとの渇水被害軽減効果を比較分析した。(1)は流況を気象長期予報によって予測し、渇水時の貯水池運用を行なうもの、(2)は貯水残量に応じて節水率を段階的に定め貯水池を運用する方法、(3)は数学的最適化手法の1つである確率D.P.法を適用して貯水池を操作する方法である。
8. 選定したA、B、Cの3ダムは水利用率が高く、昭和40年代の少雨期に再々渇水期を経験している。これらのダムについて、(1)の予測方式を適用して各ダム毎に貯水池運用をシミュレートした結果、長期予報の渇水予測が適中すれば効果があるが、予報が外れると全く効果がない、(2)の段階的節水方式の場合は、貯水量と節水率の関係をルール化しておき、貯水量の減少とともに節水を強化してゆくこととしたが、その結果は節水の限度を適切に選ぶことにより、時間の遅れを伴った形で流況が平滑化され、渇水インパクトを緩和することができるが、無効放流が増加する欠点がある。(3)の確率D.P.方式では流量の季節変動の確率モデル化を行ない、渇水被害値の累加期待値を最小にするという評価基準に基づいて確率D.P.法の適用により節水率を定める方法であるが、その結果は渇水被害の軽減効果が大きいことが認められた。
9. 対象3ダムについて、前記の貯水池運用の3方式を適用して得られた渇水被害軽減効果を、節水運用しない方式の適用結果と比較したところ、下記の点が明らかとなった。
- (1) 渇水被害額を最小ならしめる方式は確率D.P.方式で、節水しない方式に対し約40%被害を軽減する効果がある。
- (2) 段階的節水方式(3段階)では、節水開始貯水量を大きくすると節水運用の効果が減少し、節水開始貯水量を利水容量の約30%とすれば被害額が最も少なくなり、節水しない方式に対し被害軽減効果

は約 10 ～ 25 %大きい。

(3) 予測方式では節水しない方式と比べ渇水被害軽減効果は若干は認められる。

10. 以上の各運用方式の特徴を言えば、確率D.P.方式は、渇水時の必要貯水容量が計画利水容量を下廻る場合、渇水被害は計画どおり節水しない運用方式に対し若干増加するが、異常渇水時では他の方式に比較して被害軽減効果は大きい。

確率D.P.方式に次いで大規模渇水に対し被害軽減効果の大きな方法は段階的節水方式である。

予測方式は予測が適中した場合は渇水被害軽減効果が大きい反面、適中しなかったときは渇水被害がむしろ増大する危険性があり、被害軽減を図る運用としては安定した手法ではない。

11. 渇水時には地下水の活用も考慮されるべきである。計画基準渇水年の選定にあたり、流量資料の観測期間が短い程利水容量の誤差は大きくなる。例えば、荒川秋ヶ瀬地点において荒川の流出量を80%利用するために必要な貯水容量の誤差は約 1.8 億 m^3 に達する。荒川に水源を依存する地域で過去最も渇水の甚しかった異常渇水年の不足容量は 3.6 億 m^3 に達するが、この両者を合せた補給必要水量は、荒川洪積台地の地下を貯水池として利用し、地下水を補給することにより、この不足量を充足することが可能である。

12. 既存の地下水利用をそのままとして、新規利水のために河川の豊水を充当し、不足する時のみ地下水を追加使用する、即ち、河川の豊水と地下水の連結利用することにより、地下水を保存しながら流域全体の水供給能力の拡大を図ることができる。この河川の豊水と地下水の連結利用をさらに進めて、河川の貯水池と地下貯水池の連結利用によって新規利水を開発することが可能である。

13. 埼玉県における昭和 53 年から 60 年に至る 8 年間の水需給の見通しは、ダムの建設が順調な時は水不足の総量が 9.8 億 m^3 であるが、河川の豊水と地下水の連結利用により、9.8 億 m^3 の内 8.4 億 m^3 の不足分を解消できる。水資源開発が遅れる場合は、地下水依存量が地下水かん養量を上廻り、供給不足水量が出る。なお水使用の合理化が前記対策と併行して進められることによって、水資源開発が遅れた場合における地下水依存量が大幅に減り、地下水かん養量に近付いて、ほぼ安定した水供給が可能となる。

目 次

第1章 序 論	1
1.1 水資源問題の意味	1
1.2 水資源の存在	12
1.3 維持流量と水資源開発	17
要 約	19
第2章 長期的な水需給の推移	21
2.1 長期的にみた水需要の増加傾向	21
2.2 河川の利用率の上昇と水資源の開発効率	26
要 約	39
第3章 渇水と降雨特性	41
3.1 干ばつの特性	41
3.2 渇水の降雨特性	43
3.3 既往渇水の降雨特性	59
要 約	83
第4章 渇水と貯水池の最適運用	85
4.1 水利用率と水資源開発安全度	85
4.2 水資源開発と渇水対策	91
4.3 貯水池運用の実態	94
4.4 貯水池の最適運用	99
要 約	100
第5章 渇水被害の構造と計量化	103
5.1 渇水被害の構造と対応策	103
5.2 渇水被害の計量化	117
5.3 渇水被害の評価	131
要 約	134
第6章 貯水池の運用方式	135
6.1 貯水池の運用方式の種類	135
6.2 適用ダム	136
6.3 予測方式	138

6.4	段階的節水方式	149
6.5	確率D.P.(ダイナミック・プログラミング)方式	157
6.6	渇水被害による種々の運用方式の比較	171
	要 約	181
第7章	水資源計画における地下水の役割	184
7.1	河川開発の手段としての貯水池の補完	184
7.2	水資源計画における異常渇水対策	185
7.3	当面の水需給ひっ迫を乗切る緊急対策としての地下水	188
	要 約	191
第8章	地下貯水池による水資源開発	192
8.1	地下貯水池のサイトと運用	192
8.2	地下貯水池による水資源開発水量	196
8.3	地下水かん養の方法	206
8.4	地下貯水池が地上に及ぼす影響とその対策	206
8.5	地下貯水池の経済性	207
	要 約	208
第9章	河川水と地下水の連結利用	210
9.1	荒川の流況と豊水による補給可能性	210
9.2	埼玉県の水利用の現況と水需給見通し	217
9.3	連結利用の方法と設定条件	221
9.4	連結利用の効果	228
9.5	水使用合理化を含む連結利用	238
	要 約	243
第10章	ま と め	244

第1章 序 論

1.1 水資源問題の意味

地球上の生物は、生理的機能を維持するため本能として水を体内に摂取する。その摂取量は生物の種類、生理機能、個体の大小によって差があるが、水を摂取しなければ、いかなる生物といえども生命を維持することは不可能であり、存在を全うすることはできない。人間も生物の一種であるから、栄養分や老廃物の運搬、消化、その他の生理作用を営むための最小限の水は不可欠であるが、人間には個体生命の保持だけでなく自らの生活の場を快適な環境に改善しようとする本能的な欲求があって、単に生理的欲求を充足するための必要最小限の量を超えて、水を多種多様な用途に利用してきた。たとえば水は天然の溶剤として優れた性質を持っているため、衣類や食器等の洗滌に使用したり、大きな熱容量を持っているため温度調整に利用したり、流動性を利用して水力発電によるエネルギーを開発することなどがその好例である。

いずれにせよ過去における人類の生存活動が水によって支えられてきたことは否定できない事実であって、有史以前から歴史時代を通じて、狩猟採取にせよ、定住農耕にせよ人間が集団生活を営むにあたって、その生活集団が組織体として機能し、存在を継続してゆくためには必要最小限の水が常時得られることが前提であった。従って近年における考古学上の発見が物語るように、ユーラシア大陸の内陸部や北アフリカなどの乾燥地帯における隊商都市、オアシス都市など、ある程度の人口を収容した都市が、都市形成の初期には都市機能を支えるのに十分な水を供給することができて、人口の増加、気候の乾燥化など長期的な環境変化、若しくは異民族の侵入によるかんがい施設の破壊にともなって、必要な量の水が確保できなくなれば、当該居住地を放棄し、水より豊かな土地を求めるか、住民の一部が分離して水が存在する新たな土地を求めて移り住むことを余儀なくされたことが知られている。1人の人間が消費する水の量には変化があるにしても、ある生活様式を持った人間集団においては一定と考えることができ、その人間の生活集団は、擁する人口に見合うだけの水の量が常時確保できなければ、新たな水源を見出さない限り、その集団は維持してゆけないのである。

水の供給量が人口の増加や人間の生活集団の拡大を制約する要因であることは歴史的にも容認できるものと考えられる。

過去の歴史時代においては、人間の消費する水の量はごく少量にとどまっていたため、乾燥の特に甚しい地域、又は入手できる水量が極めて著しく変動する地域でない限り、水の不足が集団生活の維持に脅威を与えるほどに問題となることは稀であって、むしろ気温、日照のような気候の条件や、交易ルートとなる河海の地理的環境など、土地の持つ自然条件の良否が人間の集落の形成に重要な役割を果たしていたことも事実である。しかしながら一般的に言えば、2節にも述べるように、有史以来人口の増加や生活内容の多様化に応じて水の需要は長期的傾向として増加の一途を辿っており、新規水源の獲得は地域社会の形成とその発展にとって基本的に重要な課題であり、逆に言えば水源が確保されない限り地域社会の発展はあり得なかったといえることができる。

わが国では水利用の大宗はごく近年まではかんがいであった。そこでこのかんがいの発展過程と用水源の問題について歴史的に考察してみる。

弥生時代（縄文時代に始まったとする最近の説は暫らく措く）まず人工的施設を要しない大河川下流部

の氾濫原たる湿地帯，あるいは天水田，湧水地などに稲作が始まったが，荘園制に至るまでの古代・中世社会においては水田耕作は山峡いの溜池や小河川の流水に依存するかんがい様式をとっていたとされている。²⁾ この段階までは高度の治水かんがい技術を必要としない土地が開発対象となっていたことがうかがわれる。15世紀の耕地面積は約94万町歩で現在の約1/6，この時代の稲作は水源に合わせて行われており，耕地面積の増加に伴うかんがい用水需要の増加に対応して新規水源が平行して確保されていたが，この水源開発は当時の経済社会制度にも助けられ，さしたる支障なしに行われていたとされる。

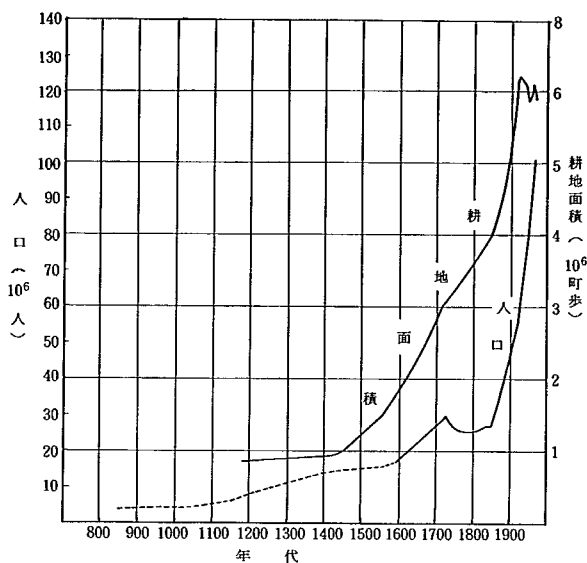


図-1.1 わが国の人口と耕地面積の推移

表-1.1 わが国の人口および耕地面積の推移

人 口		耕 地 面 積		
年 次	推 定 人 口 (1,000人)	年 次	耕 地 面 積 (1,000町歩)	田 面 積 (1,000町歩)
9 世紀	3,700 ¹⁾	1181	860	
11 "	4,400	1429	940	
13 "	9,800	1555	1,500	
1600 AD	18,000	1711	2,970	
1650 "	23,000	1850	4,000	
1700 "	27,000	1878		2,489
1721 "	29,000~32,000	1903	5,266	2,832
1750 "	25,900	1921	6,162	3,053
1756 "	26,100	1926	6,080	3,119
1804 "	25,600	1940	6,078	3,207
1834 "	27,100	1945	5,846	2,987
1852 "	27,200	1950	5,091	2,876
1872 "	34,800	1959	6,123	3,392
1920 "	55,390	1969	5,852	3,441
1965 "	98,280	1975	5,572	3,171

1) 奈良時代 5,573,000人の推計もある。

参考資料 人口 「人口の増加と土地利用」 コーリンクラーク 大明堂 P88~90
耕地面積 「日本の水資源」 資源調査会 1961. 3

この時代までは自然的条件がかんがいに適した土地のみが開発利用され、水田耕作が行われたのであって、当時の農業水利技術ではかんがいの不可能な水田は開発されなかったため、農業用水不足の事態の発生は稀であり、仮に発生してもその不足の程度は深刻なものではなかったと推測される。過去におけるわが国の人口³⁾と耕地面積⁸⁾の推移は図-1.1に示すとおりであるが、この図で見るとおり15世紀(戦国時代)以後は耕地面積が時代を追って増加しているが、これは同時代以降土木技術の発達などもあって河川かんがいを主体とした洪積台地の開発が進み、下って江戸時代中期以降には幕藩体制の下でもたらされた諸藩の財政窮乏を救済する目的をもって、治水かんがい工事による大河川下流域における新田開発、農業水利の整備が強力に推進され、耕地が急速に増加したものである。このように農業水利施設の整備は進んだものの、水源としては溜池又は河川のみで大貯水池がなく、稲作の作況は天候に大きく支配されるので、一旦無降雨が継続すると稲作への打撃は大きく、この時代特に江戸時代中期におけるかんがい様式によっては用水量の不足、取水の不安定性は避けがたいものであった。以上の点をごく大雑把に定量的に推定してみよう。

12世紀頃における耕地面積は約86万町歩であるが、仮にその50%が水田であるとすればかんがい必要水量は約2,064㎥。現在のかんがい用水必要量の算定と同じようにそのうち1/3のさらにその80%すなわち全体の1/4が降水量により補給されると仮定すれば、かんがい用水として常時確保すべき河川流量は、90日間補給として毎日199㎥/sに相当する。わが国の河川の低水流量の比流量は、建設省の資料に基いて平均値2.1㎥/s/100㎥と想定し、古い時代も同じ値が使用可能とすれば、前記の流量は10,000㎥程度の集水面積の河川の低水流量に相当する。即ち全国面積の1/37程度の集水面積の河川の低水流量があれば水不足の現象は発生しないことになる。この時代いわゆる干魃の頻度は小さかったのも当然である。しかるに江戸時代中期18世紀初めの耕地面積約300万町歩の半分150万町歩が水田と仮定すれば、全国面積の1/10の河川の低水流量を常に確保しなければ水不足になることは上記の推定から明らかである。大規模な貯水池のなかった点では12世紀でも18世紀でも殆んど変わらず、かんがい用水の大部分を自然の河川流量に依存していた点はいずれも同様であったので、12世紀に水不足が発生することは稀でも18世紀には頻繁に水不足が発生したことが考えられる。この点を過去の史料によって考察してみよう。いま8世紀以後の古文書による異常気象記録を整理した荒川秀後による資料⁵⁾に基いて、過去における気象災害の中から干魃に関する事項を拾い出し、5ヶ年を単位としてその5ヶ年間に被害の生じた干魃がわが国のどこかで発生した旨の記録がみられる年数をまとめ5年毎の時系別で整理したものを図-1.2に示した。古文書の記録は、記録者の主観が介在するものであり、記録の多寡がその当時の社会経済や政治等により影響されることも考えられるので、このような取扱いが意味があるかどうかは疑問があるとしても、一応この資料を前提とすれば古代から中世にかけての干魃に比べて、耕地面積が急激な増加をみせる17世紀以降に干魃の頻度が高くなることが観察される。このことは、渇水時も安定的に水を確保できる土地以外に新規開田を進めたことが大きな理由であったと思われる。

特に、地域的に広い範囲にわたり発生したとされる干魃、又は狭い範囲でも深刻な被害を受けたと推定される干魃を大干魃と定義したとき、図-1.3に示すようにこの大干魃の頻度が耕地面積の拡大と時期的には重なっており、前記の推論を裏付けしているものと考えられる。またその頻度は、同図に示すように、15世紀頃までは5ヶ年に1回程度であったものが耕地の急激に増加する17世紀から19世紀末まで渇水の頻度が高まり、また渇水の中でも大渇水が起る割合(表-1.3におけるC/Aで渇水の深刻度とも言うべ

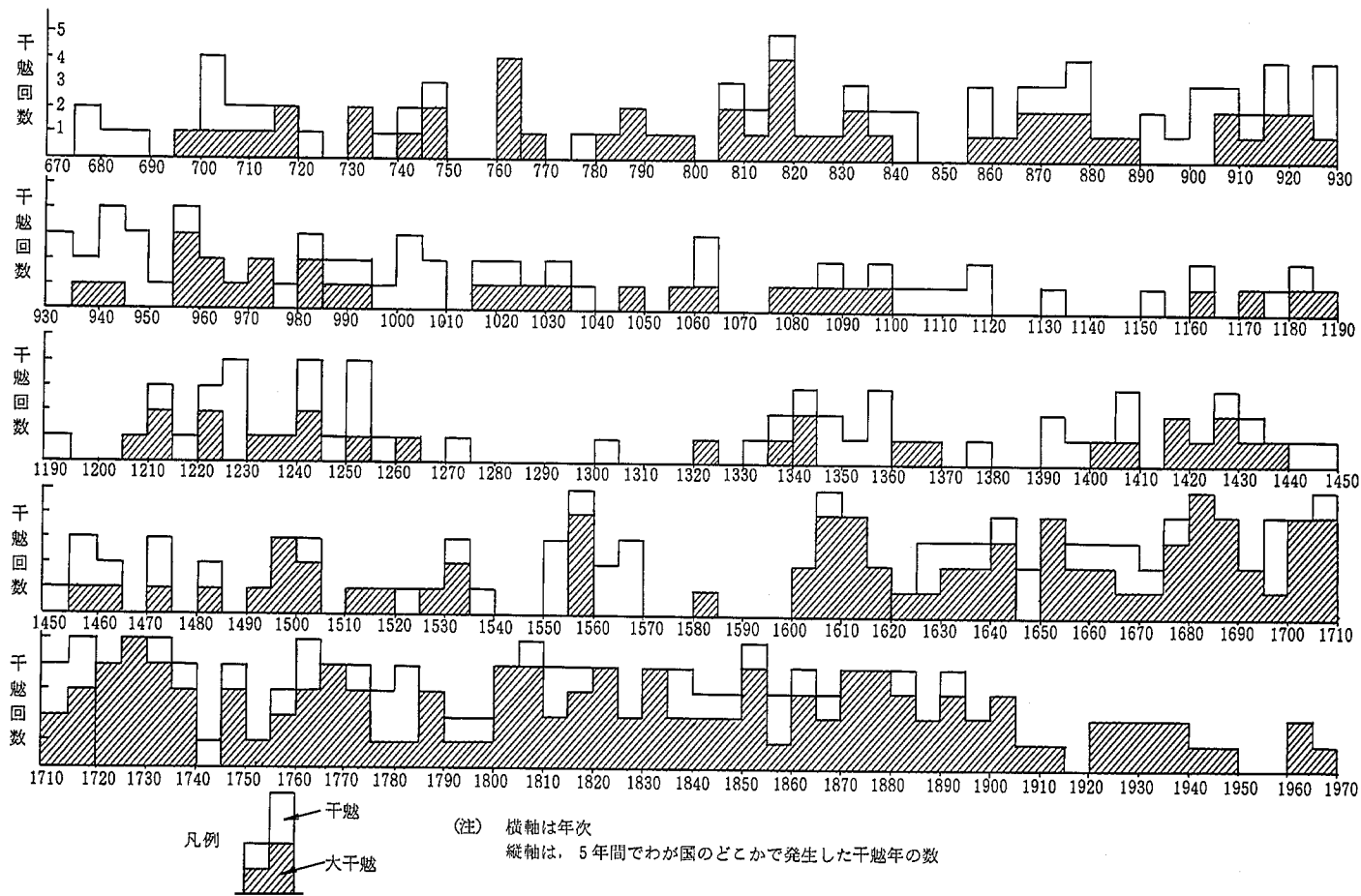


図 - 1.2 わが国の干魃発生記録

表-1.2 わが国の干魃の頻度

回数は5年の間に干魃の起きた年数

年次	干魃回数	内大千魃回数	年次	干魃回数	内大千魃回数	年次	干魃回数	内大千魃回数
651~655AD	0	0	841~845AD	2	0	1031~1035AD	2	1
656~660	0	0	846~850	0	0	1036~1040	1	0
661~665	0	0	851~855	0	0	1041~1045	0	0
666~670	0	0	856~860	3	1	1046~1050	1	1
671~675	0	0	861~865	1	1	1051~1055	0	0
676~680	2	0	866~870	3	2	1056~1060	1	1
681~685	1	0	871~875	3	2	1061~1065	3	1
686~690	1	0	876~880	4	2	1066~1070	0	0
691~695	0	0	881~885	1	1	1071~1075	0	0
696~700	1	1	886~890	1	1	1076~1080	1	1
701~705	4	1	891~895	2	0	1081~1085	1	1
706~710	2	1	896~900	1	0	1086~1090	2	1
711~715	2	1	901~905	3	0	1091~1095	1	1
716~720	2	2	906~910	3	2	1096~1100	2	1
721~725	1	1	911~915	2	1	1101~1105	1	0
726~730	0	0	916~920	4	2	1106~1110	1	0
731~735	2	2	921~925	2	2	1111~1115	1	0
736~740	1	0	926~930	4	1	1116~1120	2	0
741~745	2	1	931~935	3	0	1121~1125	0	0
746~750	3	2	936~940	2	1	1126~1130	0	0
751~755	0	0	941~945	4	1	1131~1135	1	0
756~760	0	0	946~950	3	0	1136~1140	0	0
761~765	4	4	951~955	1	0	1141~1145	0	0
766~770	1	1	956~960	4	3	1146~1150	0	0
771~775	0	0	961~965	2	2	1151~1155	1	0
776~780	1	0	966~970	1	1	1156~1160	0	0
781~785	1	1	971~975	2	2	1161~1165	2	1
786~790	2	2	976~980	1	0	1166~1170	0	0
791~795	1	1	981~985	3	2	1171~1175	1	1
796~800	1	1	986~990	2	1	1176~1180	1	0
801~805	0	0	991~995	2	1	1181~1185	2	1
806~810	3	2	996~1000	1	0	1186~1190	1	1
811~815	2	1	1001~1005	3	0	1191~1195	1	0
816~820	5	4	1006~1010	2	0	1196~1200	0	0
821~825	1	1	1011~1015	0	0	1201~1205	0	0
826~830	1	1	1016~1020	2	1	1206~1210	1	1
831~835	3	2	1021~1025	2	1	1211~1215	3	2
836~840	2	1	1026~1030	1	1	1216~1220	1	0

(表-1.2のつづき)

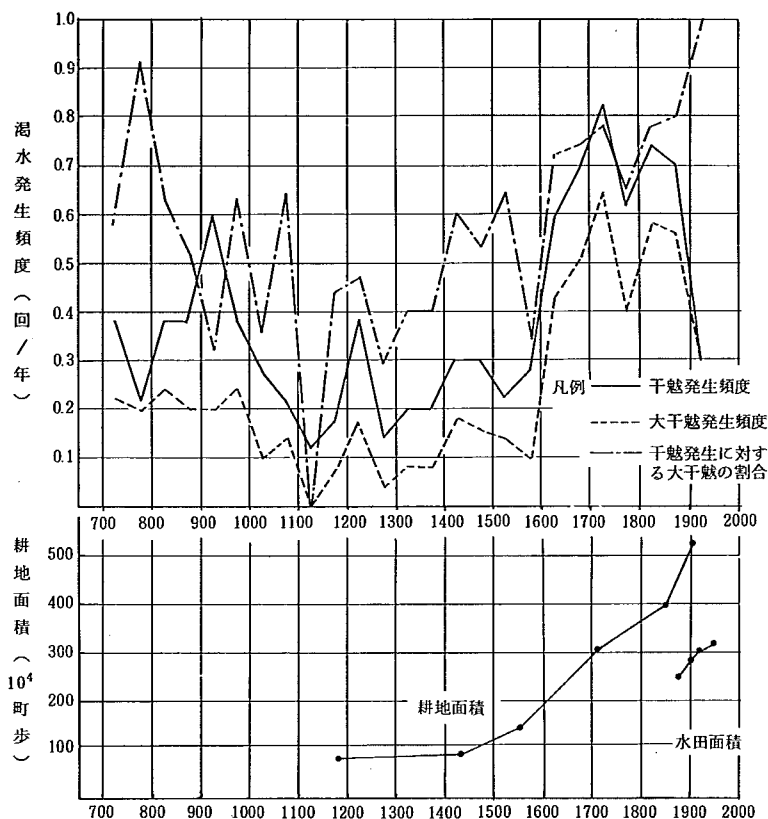
年 次	干魃回数	内大千魃 回 数	年 次	干魃回数	内大千魃 回 数	年 次	干魃回数	内大千魃 回 数
1221~1225AD	3	2	1426~1430AD	3	2	1631~1635AD	3	2
1226~1230	4	0	1431~1435	2	1	1636~1640	3	2
1231~1235	1	1	1436~1440	1	1	1641~1645	4	3
1236~1240	1	1	1441~1445	1	0	1646~1650	2	0
1241~1245	4	2	1446~1450	1	0	1651~1655	4	4
1246~1250	1	0	1451~1455	1	0	1656~1660	3	2
1251~1255	4	1	1456~1460	3	1	1661~1665	3	2
1256~1260	1	0	1461~1465	2	1	1666~1670	3	1
1261~1265	1	1	1466~1470	0	0	1671~1675	2	1
1266~1270	0	0	1471~1475	3	1	1676~1680	4	3
1271~1275	1	0	1476~1480	0	0	1681~1685	5	5
1276~1280	0	0	1481~1485	2	1	1686~1690	4	4
1281~1285	0	0	1486~1490	0	0	1691~1695	2	2
1286~1290	0	0	1491~1495	1	1	1696~1700	4	1
1291~1295	0	0	1496~1500	3	3	1701~1705	4	4
1296~1300	0	0	1501~1505	3	2	1706~1710	5	4
1301~1305	1	0	1506~1510	0	0	1711~1715	4	2
1306~1310	0	0	1511~1515	1	1	1716~1720	5	3
1311~1315	0	0	1516~1520	1	1	1721~1725	4	4
1316~1320	0	0	1521~1525	1	0	1726~1730	5	5
1321~1325	1	1	1526~1530	1	1	1731~1735	5	4
1326~1330	0	0	1531~1535	3	2	1736~1740	4	3
1331~1335	1	0	1536~1540	1	0	1741~1745	1	0
1336~1340	2	1	1541~1545	0	0	1746~1750	4	3
1341~1345	3	2	1546~1550	0	0	1751~1755	1	1
1346~1350	2	0	1551~1555	3	0	1756~1760	3	2
1351~1355	1	0	1556~1560	5	4	1761~1765	5	3
1356~1360	3	0	1561~1565	2	0	1766~1770	4	4
1361~1365	1	1	1566~1570	3	0	1771~1775	4	3
1366~1370	1	1	1571~1575	0	0	1776~1780	3	1
1371~1375	0	0	1576~1580	0	0	1781~1785	4	1
1376~1380	1	0	1581~1585	1	1	1786~1790	3	3
1381~1385	0	0	1586~1590	0	0	1791~1795	2	1
1386~1390	0	0	1591~1595	0	0	1796~1800	2	1
1391~1395	2	2	1596~1600	0	0	1801~1805	4	4
1396~1400	1	0	1601~1605	2	2	1806~1810	5	4
1401~1405	1	1	1606~1610	5	4	1811~1815	4	2
1406~1410	3	1	1611~1615	4	4	1816~1820	4	3
1411~1415	0	0	1616~1620	2	2	1821~1825	4	4
1416~1420	2	2	1621~1625	1	1	1826~1830	2	2
1421~1425	1	1	1626~1630	3	1	1831~1835	4	4

(表-1.2のつづき)

年 次	干魃回数	内大干魃 回数	年 次	干魃回数	内大干魃 回数	年 次	干魃回数	内大干魃 回数
1836~1840 ^{AD}	4	2	1886~1890 ^{AD}	2	2	1936~1940 ^{AD}	2	2
1841~1845	3	2	1891~1895	4	3	1941~1945	1	1
1846~1850	3	2	1896~1900	2	2	1946~1950	1	1
1851~1855	5	4	1901~1905	3	3	1951~1955	0	0
1856~1860	3	1	1906~1910	1	1	1956~1960	0	0
1861~1865	4	3	1911~1915	1	1	1961~1965	2	2
1866~1870	3	2	1916~1920	0	0	1966~1970	1	1
1871~1875	4	4	1921~1925	2	2	1970~1975	1	1
1876~1880	4	4	1926~1930	2	2			
1881~1885	4	3	1931~1935	2	2			

表-1.3 半世紀毎の干魃の発生頻度

世 紀	干 魃		大 干 魃		C / A
	発生年数 A	頻 度 B	発生年数 C	頻 度 D	
8 世 紀 前 半	19	0.38	11	0.22	0.58
〃 後 半	11	0.22	10	0.20	0.91
9 〃 前 半	19	0.38	12	0.24	0.63
〃 後 半	19	0.38	10	0.20	0.52
10 〃 前 半	30	0.60	10	0.20	0.33
〃 後 半	19	0.38	12	0.24	0.63
11 〃 前 半	14	0.28	5	0.10	0.36
〃 後 半	11	0.22	7	0.14	0.64
12 〃 前 半	6	0.12	0	0	0
〃 後 半	9	0.18	4	0.08	0.44
13 〃 前 半	19	0.38	9	0.18	0.47
〃 後 半	7	0.14	2	0.04	0.29
14 〃 前 半	10	0.20	4	0.08	0.40
〃 後 半	10	0.20	4	0.08	0.40
15 〃 前 半	15	0.30	9	0.18	0.60
〃 後 半	15	0.30	8	0.16	0.53
16 〃 前 半	11	0.22	7	0.14	0.64
〃 後 半	14	0.28	5	0.10	0.36
17 〃 前 半	29	0.58	21	0.42	0.72
〃 後 半	34	0.68	25	0.50	0.74
18 〃 前 半	41	0.82	32	0.64	0.78
〃 後 半	31	0.62	20	0.40	0.65
19 〃 前 半	37	0.74	29	0.58	0.78
〃 後 半	35	0.70	28	0.56	0.80
20 〃 前 半	15	0.30	15	0.30	1.00



図－1.3 わが国の耕地面積の推移と干魃発生頻度の推移

きもの)も大きくなっていることが認められる。このように100年ほど前までは毎年のように全国各地で深刻な洪水被害が発生したのは、第2節で詳細に述べる長期的な水需要の増加に水資源開発が的確に対応できず遅れていたことが主たる原因であるが、変化の激しい気象条件がこれに関与していることも否めない事実である。

わが国は地理的にはアジア大陸の東の辺縁に位置し、亜熱帯並びに温帯に属している。このような地理的条件のため、わが国は前線性の降雨及び台風や熱帯性低気圧による豪雨並びに冬期における日本海側の豪雪など、四季を問わず降水に恵まれている。しかしながら、降水量の時系列的変化は、微視的にみれば激しいもので、日雨量が1000 mmを超える場合があるかと思えば、無降雨継続日数が1ヶ月を越える事例も少なくない。また地域によっては数週間に亘り僅か数mmの降雨しかなく、その結果小河川の流量が0となったり、大河川でも洪水量が平均流量の数分の1に減少することも稀ではない。この点については第2章で詳述するが、いずれにせよかんがい用に又は都市に供給される水が河川の表流水や降水に依存する場合、異常な気象条件のため長期に亘って無降雨のまま推移し、その結果河川の表流水が減少し、消費者の需要を充足し得ない事態が起きることがある。これは自然現象の変化が激しいため水不足が発生したものである。

いま時間のスケールを1年又は1日の単位で考えたとき、ある時刻に一定の水需要に対し水不足が発生することがある。これは人間が消費する水量が常に一定ではなく、水利用の本質として、季節に応じて変化するからである。人間が消費する水の量は、温度が高く人間の活動が活発な夏は冬に比し当然多いし、かんがい用水にしても、稲が熟すまでの生育過程における時期別消費水量には変化がある。このためかんがい用水の使用水量、したがって河川から取水する場合は取水量となるが、その時間分布は様ではない。厳密に言えば、ほとんどの水利用のための取水量は一定ではなく、季節の変化に応じ、また1日の間でも昼夜の別によって変動する。需要水量が一定ではなく時間と共に変化するため、平均値としては不足しなくとも、1年のある時期または1日の間で需要が大きいつき水不足という事態が発生する。しかし1日乃至数日程度の期間にわたる水不足は、通常水の消費者にとって支障を生ずることはまず無いと言ってよいが、さらに長期の時間のスパンにわたって水不足が継続するとすれば、はじめて消費者に諸々の支障が起ることとなる。

水不足が発生する条件としては、問題を河川からの取水に限定した場合、一定のパターンで一定の量の水需要に対し、平水年では常に河川流量が上回っていても渇水年に河川流量が減少してある期間水が不足する場合と、水需要が増加したため、平水年でも相対的に水需要が河川流量を上回り水が不足する場合とがある。前者は通常渇水による水不足といわれる現象であるが、後者はいわば潜在的な水不足であったものが、水源施設が完成するまでの間、豊水時のみに限って取水を許可される豊水暫定水利権（通称）に基づいて、現実水利秩序に参加していることのために、平水年でも水不足が発生するに至った事態であると考えられる。前者が供給側の事情による水不足であるとすれば、後者は需要側の理由による水不足であって、前者と後者ととは本来は、厳密に区別して取扱われるべきものである。ただし両者の間には、第2節で詳細に述べるように長期的には水需要は増大するものであり、その水源の河川表流水への依存が続けば、河川の利用率が上昇し、それに伴って河川表流水の水不足現象が生起する危険度は高まってくるので、需要側の理由による潜在的な水不足はそれが顕在化すると供給側の事情による水不足に転換し、しかもその頻度が大きくなるという関係にある。

いずれにせよ必要な水量を適時確保できなければ人間の生生活動にとって大きな支障となるので、必要な時期に必要な水量を供給できるシステムを形成することが水資源開発の基本的課題である。そのほか水質保全も水資源開発にとっては重要な課題である。塩分濃度の高い海水又はかん水を摂取すれば生理的に変調を来し、限度を超えれば死に至るのは人間のみでなく、常時淡水のみにより生存している稲を含めた動植物すべてに適用される。また重金属類やその他の不純物を含む水が、他の用途はともかくとして少なくとも飲料水として不適であることは明白である。以上のことから、必要な時期に、一定の水質基準以上の良好な水質を持つ水を必要量確保することが水資源開発の基本的課題であると理解される。すなわち水が資源としての価値を有するか否かは、任意の地域において、時期、水量、水質に関する条件を満足するか否かで定められると考えられる。

地球上に天然のまゝで存在する水は、第3節で述べるように海洋・氷河・氷山・河川・湖沼・土壌中の水分・水蒸気などその存在の態様は変化に富んでいるが、人間の利用に好適な態様をとっているのは流体状の河川や湖沼の表流水のみであり、他は固体又は気体状をなし、そのまゝの状態で各種用途に利用するには経済的に不利であるか、効率的でないか、著しく困難であるか、若しくは塩分濃度が高すぎるため純化して水質を改善したり態様を変えることを不可欠ならしめている。従って時期・水量・水質の三要素を充足して

水利用を行うには、用水として要求される各種条件を満たし且つ入手し易い態様をとっている陸水が最も望ましいことと考えられる。しかしこの陸水の量は後述するように地球上では偏在しているため、経済性の観点から判断すれば地域ごとに使用可能な水量には限界がある。わが国では地下水の存在量について詳細かつ広範囲な調査が行われていないため不明であるが、降水量及び表流水の全国的分布、存在量については調査が行われている。わが国の降水量や表流水は、地域的にも時間的にも変化が大きいのが特徴とされており、水利用の観点からは好適な条件にはないので、特に表流水について季節を通じ平均化することによって利用可能な水量を増加せしめることが必要であり、そのために貯水池を造成することによって流量調整を行うことを狭義の水資源開発といっている。

水資源開発とは、広義に言えば「循環過程にある水を人間の生生活動に利用する行為の拡大」と定義することができる。わが国では今まで水資源開発を厳格に定義せずに使用してきており、通常は上に述べたように貯水池により河川流況を平滑化するという狭義の意味に使われることが多いが、前記の広義の定義で容易に想像されるように、そのほかにも水資源開発は幾つかある。たとえば未利用地下水を探索し新たに揚水し利用に供することも、また天然の湖沼に堰上げ水門などの施設を建設して利用水深を拡大し、湖水の計画的な貯溜放流によって取水量を増加することも水資源開発である。また海水の脱塩淡水化や下水廃水の有害物・不純物の除去・処理による再生も水資源開発であり、人工降雨及び湖沼面からの蒸発散抑制の如く直接間接に利用可能水量を増加する行為も水資源開発に含まれると考えられよう。なおわが国では、水力発電・舟運・観光など水の利用価値を創出または増加する行為は、慣例として水資源開発とは扱っていない。本稿では河川の表流水の開発利用にかかわる水資源開発を考察の対象とする。

水資源開発を考察する上で、地域、時期、水量、水質が重要な因子であることは既に述べたとおりであるが、このうち地域については暗黙裡に取水地点と水利用の範囲とが、歴史的慣行として当該水系の水利用関係者によって容認されているという前提がある。従って関係者の承諾なしに水利用の範囲を拡大して新規に取水することは実際上不可能である。このような理由があるために取水地点は水利用の範囲と不可分の関係にあり、取水が容認されている限り水利用の範囲についても支障はないと考えてよいが、近年都市用水が河川の水利用秩序の中でその比重を増大してきた結果、水利用の範囲が取水地点とは切り離される傾向があり、沿岸農業水利の取水秩序の歴史的産物である河川の水利用秩序の混乱を招く一因となっているのであるが、その場合であっても拡大された水利用の範囲は在来水利用秩序に属する受益耕地と同一経済圏に属することが多いので、拡大された水利用の範囲が在来の供給圏を、はみ出す場合でもその大部分は社会的に黙許され、問題視されることが稀であって、水資源開発の要素の中で地域の受益範囲と取水地点との関係はそれほど重要な問題ではない。また水質の問題については、濃度を媒介として流量の多寡の問題に還元される面があるうえ、流域下水道の整備の程度も影響するので、本稿では水質についても考察の対象から外すこととする。

最後に水量と時期の要素を考えてみたい。第2節で述べるようにわが国の年平均降雨量は約559㎢、年平均流出量が約400㎢、水資源の存在状況は降雨の地域分布とはほぼ一致しており、流出高そのものは少ない地域でも年平均1,000 mm近くあるので、年平均200乃至300 mm程度の流出高が普通である諸外国に比べれば恵まれていると言える。

わが国の耕地面積5,572,000ha（昭和50年農林省統計資料）のうち水田は3,171,000ha、水田の減水深は開花期の2.9 mm（湿田）から幼穂伸長期20.0 mm（乾田化水田）の範囲にあり、全育成期間を通じて

480mm程度¹⁰⁾であるから、流出高が少なくとも1,000mm程度あるわが国では当該地域の年間流出高を仮にすべて農業水利に使ったとすれば水不足は起きない。にも拘らず1960年代以降(正確には1955年利根川の渇水以来)、1964年の東京オリンピックの年の渇水、1967年の西日本渇水、1973年の東京及び西日本渇水、1978年の利根川及び北九州渇水など頻々と各地で水不足が発生しているのは何故であろうか。筆者はその原因を次のように考える。

(1) 異常気象が頻発したこと

わが国の河川は、無降雨が継続すれば表面流出の減少の度合が甚しいが、第2章で詳細に述べるように最近はその無降雨継続期間が長い若しくは夏期5ヶ月間の降雨量が少ない気象が頻発し、その結果必要時期に河川流量が必要取水量を下廻るような事態が屢々生じたこと。

(2) 利用率上昇に起因して渇水発生パターンが変化したこと。

従来の水資源開発計画では、夏のかんがい期に生じする渇水に対しては梅雨期に貯溜した水を放流補給し、冬の渇水には夏の終り、秋の始めの台風の水を補給する貯水池運用パターンを基本としているが、近年水需要の増加に応じて水資源開発が進展したため河川の水の利用率が上昇し、その結果補給に必要な水量と日数が利用率が低い段階にくらべ相対的に増加したので、貯水容量が不足し易く、一旦貯水池の水を使いきってしまうと貯水池は回復しにくく、取水は河川の自流のみに依存せざるを得ず、空になった貯水池を回復するための大洪水がないかぎり水不足が継続し深刻化する傾向がある。

(3) 社会の耐渇水性の劣弱化

従来水道水源として利用されていた井戸などの地下水利用が、都市用水の需要拡大、過剰揚水による地盤沈下対策としての汲上げ規制に伴って表流水に転換し社会が河川水への依存度を高めた結果、河川の渇水が直ちに飲料水の不足につながり、社会が水不足による被害を受け易い体質となったこと。

(4) 水資源開発の遅れ

長期的に増加傾向にある都市用水の需要が、潜在的需要として顕在化しなければ、渇水の発生による水不足現象は(1)に述べた理由でもないかぎり頻発することはないが、水源開発の遅れている地域特に大都市周辺では、貯水池が完成するまで暫定的に豊水時のみ取水を許可するいわゆる豊水水利権の付与によって急増する新規需要による需給圧力を緩和しているため、計画対象渇水時より豊水であっても水不足が発生し易い体質にある。

以上のように、近年水不足現象が頻発する理由は、基本的には都市化の拡大、生活様式の多様化などによる水需要増加の長期的趨勢に起因する慢性的な水の供給不足があって、その上に近年における無降雨継続期間の長い又は相当期間に亘って降雨の少ない気象が頻発したこと、水利用率の上昇によって河川表流水の需給弾力性が硬直化したこと、社会の体質が水道水源を河川表流水のみに依存しすぎたことにあると考えられる。

今後わが国の水不足を解消してゆくためには以上の4つの点について考察を加え、その的確な対策を樹立する必要がある。

まず基本的には慢性的な水需給の逼迫を緩和する必要があるが、そのためには在来水資源開発の手法であるダム建設による河川表流水の開発を進めねばならない。また海水脱塩、気象制御、廃水再利用などの手段についても研究開発を進め、具体化する必要があり、その一部は逐次実用化されつつある。しかし利用率が上昇したための河川の表流水による水補給の安全度の低下の問題や、地下水の有効利用を欠いた社会の水道用水

補給システムの問題は未だ十分に解明されていない。現在水資源問題は総合水管理の問題であると言われている。1977年3月、アルゼンチンで開催された国連水会議（U.N. Water Conference）に提出された準備委員会事務局による基調報告¹⁾でも「サハラ砂漠さえも開発により比較大量の水が利用できるのであって、真の問題は水資源そのものの不足ではなく、現在の悲劇的条件を緩和し、これ以上の（地球の）砂漠化の防止に役立つような総合的な水管理政策の欠如である。」と強調されているように、利用可能の状態にある水を、地域、時期、質、量に応じて効率的に管理し利用することが真の意味での水資源問題を解決するためのアプローチであると思われる。

以上のような認識に立ち、本稿ではまず渇水現象特に近年頻発している各地の渇水の水文特性を明らかにし、これら現実に発生した渇水及び水不足に起因する各用途毎の被害の解析結果から渇水被害の評価関数を誘導した。また河川の表流水の利用率の上昇に伴って渇水による水不足の危険度が高まるが、その理由を考察するとともに、渇水被害の評価関数を用い、確率ダイナミック・プログラミング（確率D.P.法と略称する）を含む各種手法を適用した結果、河川の利用率が上昇した場合渇水被害を最小にするための水管理の手法として、貯水池の最適運用の方法を提案するとともに、河川表流水の利用効率を高めることを目的として、河川の表流水と地下水の連結利用の方法をまとめたものである。

1.2 水資源の存在

渇水問題を考察する前に、地球上に存在する水の量、水資源として通常最も利用されている河川の表流水の量について説明しておきたい。

降水は地表に到達したのち地上又は地下を流れ、一部はその過程で直接地表や氷雪面から或は葉面を経由して蒸発し、一部は海洋に出たあと海岸に降った雨と共に蒸発していずれも再び雲となり、再び降水となって地表に落ちる。また極に近い地域及び高山では氷山、氷河など固体状態で存在し、長年月にわたる地

表- 1.4 世界の水の総量

態 様	構 成 比		(容 積)
海 洋	9 7.3		$1.362 \times 10^9 \text{ km}^3$
淡 水	2.7	100.0	$0.038 \times 10^9 \text{ km}^3$
氷山、氷河		77.2	$29.3 \times 10^6 \text{ km}^3$
地下水、 ¹⁾ 土壌中水分		22.4	8.5 "
湖 沼		0.35	0.13 "
大気中水分		0.04	0.017 "
流 水		0.01以下	$0.0012^{2)} \text{ km}^3$
計			$1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$

資 料 国連水会議 1977 Mar. 70/CBP/1 P.10

1) このうち2/3は地表から750 m以深に存在

2) K.Szesztay 1970 Dec. The hydrosphere & the human environment.

球の気温の昇降に応じて融解・凍結を繰り返すため、海水の容積が変化し、海水面の昇降を斉している。

以上のように水は各種の態様をとって地球上に存在しているが、その総量については多くの推計が行なわれており、それぞれ若干の差異がある。ただしそのいずれも概ね $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$ に近い値となっている。この差を生じた理由は主として地下水の総量の推計に差異があるためで、地球上の水の総量の正確な値は、特に地下水の調査を中心とした将来の精密調査の結果に待たねばならない。ここでは前出の国連水会議の基調報告¹⁾に従って $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$ としておく。各態様別の水の容積比は同報告によれば表-1.4に示すとおりであって、地球上の水の総量を $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$ としたときの各態様の水の容積を計算したものを同表の右に参考として掲げた。

この表に示すように、全量の 97.3% は海洋に存在しており、淡水として存在する水、換言すれば全量の 2.7% の水の 77.2%, 又は全量の 2.08% は氷山、氷河に貯溜され、人間の最も利用し易い河川、湖沼に存在している表流水や地下水は淡水の 2.276%, 全量の 0.6% 程度にすぎない。しかもその中では地下水と土壤中の水分が最も多く、河川や湖沼に存在する表流水は淡水全量の 0.36%, 地球上の水の総量に対しては 0.01% 以下の少量である。

地球上に存在しているこれらの水は、凍結・融解・蒸発を繰り返すことによって態様を変え、水圏内を循環している。表-1.4に示す各態様の水の量は人間の一世代の単位のタイムスケールではほぼ一定として差支えないが、 10^3 年以上の単位のタイムスケールでは、各態様の水の循環する速さが異なるため態様毎の水量は変化するとされている。

たとえばよく知られているように氷河期に氷として存在した水が、地球の気候の温暖化に伴って融解して海水面の上昇をもたらす。このように地球上の各態様の水がその状態を変える動きを模式的に示せば図-1.4のとおりである。この図でみるように、海洋、極の氷及び陸水からの蒸発量は $496 \times 10^6 \text{ km}^3/\text{年}$ 、また陸地の降水量は極の分も含めて $111 \times 10^6 \text{ km}^3/\text{年}$ 、蒸発分を差引いた海洋への流出量は $40 \times 10^6 \text{ km}^3/\text{年}$ である。

この図-1.4に示す各態様の水の流れ図から、循環の速さすなわち年平均の態様の变化量で総量 V を除すことにより、各態様の水が一回完全に入れ替る時間、いわゆる循環日数(交換日数ともいう)が求められる。たとえば河川の年間総流出量は、極の氷の融解流入を除けば $38 \times 10^6 \text{ km}^3$ であるが、河川に存在し

(単位: $10^3 \text{ km}^3/\text{年}$)

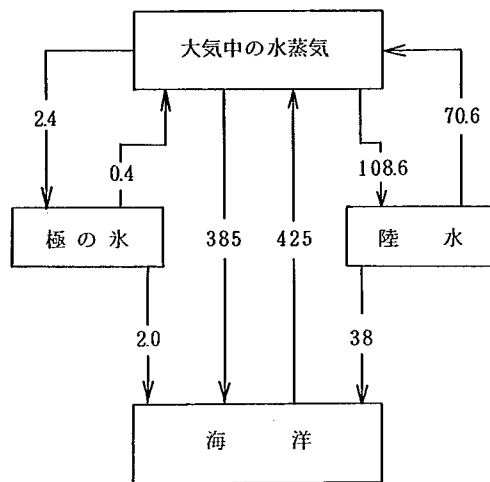


図-1.4 地球の水収支
(Baumgartner による)

表-1.5 水の循環日数

項 目	全 量 km^3	循環の速さ $\text{km}^3/\text{年}$	循環日数 年
海 洋	1.362×10^9	425×10^3	3,200
極 の 氷	29.3×10^6	2.4×10^3	12,200
陸 水	表流水	1.2×10^3	38×10^3
	湖 沼	0.13×10^6	38×10^3
	地下水	8.5×10^6	13×10^3
大気中の水蒸気	0.017×10^6	496×10^3	0.034

1) 国連水会議 1977. Mar. 70/CBP/1

ている水量 V は表-1.4にも記したように 1,200 km³ であるから、循環日数 (T) は $1,200/38,000 = 0.032$ (年)、又は 12 日という結果が得られるが、このことは、降水が地表に到達後河川の流れを形成し、海洋に流れ込んで 1 サイクルを終える時間は平均して 12 日ということを意味している。各態様の水が 1 サイクルを終える時間、すなわち循環日数を求めた結果を表-1.5に示す。

この表に示すように、人間が最も利用し易い河川の表流水の 1 サイクルが 12 日、湖沼の水が 1 サイクルを完了する時間が 33 年、地下水が 1 サイクル 650 年であって、河川の表流水の利用に当って、その循環過程に擾乱を与えても影響を長期に亘り残すことはないが、湖沼の場合は河川に比べ 100 倍も循環日数が長く、地下水に至っては循環日数が極めて長いので、その開発利用を急速に増加せしめた場合影響が長く残留する危険性があり、特に地下水は一旦枯渇を招けばその回復に長年月を要するので、長期的視点から言えばその継続の利用は慎重にしなければならない。

人間が資源として扱う水は、現在の段階では海水及び不純物や有害成分の少ない新鮮な淡水がその主要なものである。このうち海水は温度調節及び脱塩用に一部が利用されるのみで、水資源といえば通常は新鮮な淡水を指す。従って人間の関心の対象となるのは、降水及びそれが流出した河川水または地下水である。河川の表流水にしても地下水にしても、その原因である降水の地域的・時間的分布は地理的・地形的条件や地被、気象条件が異なるため著しく変化に富んでいる。特に水利用の対象としての河川の表流水についてみれば、緯度や地理的・地形的条件の差による気温、湿度などの気象的要素のほかに、形成される流路の位置も大きく影響するため、河川の流出波形は沿川の地点降雨とは著しく異った時間分布を示すことも稀ではない。特にナイル川やメコン川などの大河川でその傾向が顕著である。さらにサハラ砂漠などで見られるように過去数十世紀も遡った地下化石水の汲上げ利用の如く、社会経済的な理由に基く恣意的な水利用も行われており、現在の降雨分布がそのまま水資源分布と結びつくとは限らず、降雨の分布は地形と時間のフィルターを通して歪められた流出分布になることを認識しておかねばならない。

降雨は地球上の大気の状態すなわち気候によってその範囲、量、強度が変化する。この気候を支配するエネルギー源は主として太陽であり、地球が 1 年の周期で公転しているから、大気の分布や移動はある幅をもってほぼ一定の傾向をもって 1 年を周期とした変化を繰り返す。地球上の各地域はその位置する地理的条件に応じた特有の周期的な気象変化をしており、降雨についても毎年ほぼ同様な傾向で変化している。ここで地球全体の降雨及び表流水の存在量を概括的に述べたのち、わが国の水文について概説しておく。

地球上の気象をマクロ的にみれば⁹⁾、水蒸気が大気の循環によって熱や運動量とともに運搬され、性質の異なる気団の衝突、接触によって大気の擾乱が起きると、水蒸気が降雨に変わる。従って、大気の移動の方向や高度、その消長並びに水蒸気の発生や分布の状況が世界の各地の降雨パターンに大きな影響を与える。最近の観測の結果によれば、一般に水蒸気の量は低緯度によく、極地方に少ない。実際の雨量観測の結果、赤道付近が降雨量が多く、赤道を離れるにつれて寡雨となっていくことがこの事実によって説明される。

地球の大気循環が地域降雨に及ぼす影響は大きく、地球全体のマクロ的な降雨分布に対する決定的な支配要因となっている。すなわち各大陸の西岸では高緯度地帯では多雨、低緯度地帯では少雨の傾向があり、大陸東岸は西岸ほど明瞭ではないがこれと逆の傾向があるとされている。また大陸の位置、広さなど、海洋の位置、面積、深さなど大陸及び海洋そのものが降雨分布に及ぼす影響や、山地の降雨への影響なども認められている。

以上のような地域降雨の多寡を支配する気象因子が複雑に絡みあって、地球上の降雨量の分布が定まる。

前出の国連水会議の基調報告に従って、世界の各地域の降雨量を示せば表-1.6.2のとおりであって、南米大陸の降水量が卓越しているほかは、他の各大陸とも大差なく、概ね600mmから800mmの間にある。地

表-1.6 世界の平均的水収入

表-1.6.1 (1) 水量 (10^3 km^3)

地 域	Baumgartner による			ソ連のmonographによる			Lvovichによる		
	降 水	蒸 発	流 出	降 水	蒸 発	流 出	降 水	蒸 発	流 出
ヨーロッパ	6.6	3.8	2.8	8.3	5.3	3.0	7.2	4.1	3.1
アジア	30.7	18.5	12.2	32.2	18.1	14.1	32.7	19.5	13.2
アフリカ	20.7	17.3	3.4	22.3	17.7	4.6	20.8	16.6	4.2
オーストラリア	7.1	4.7	2.4	7.1	4.6	2.5	6.4	4.4	2.0
北米	15.6	9.7	5.9	18.3	10.1	8.2	13.9	7.9	6.0
南米	28.0	16.9	11.1	28.4	16.2	12.2	29.4	19.0	10.4
南極	2.4	0.4	2.0	2.3	0	2.3	...	...	...
陸地 ¹⁾	111	71	40	119	72	47	113	72	41
海洋	385	425	-40	458	505	-47	412	453	-41
世界	496	496	0	577	577	0	525	525	0

表-1.6.2 (2) 水深 (mm)

ヨーロッパ	657	375	282	790	507	283	734	415	319
アジア	696	420	276	740	416	324	726	433	293
アフリカ	696	582	114	740	587	153	686	547	139
オーストラリア	803	534	269	791	511	280	736	510	226
北米	645	403	242	756	418	338	670	383	287
南米	1,564	946	618	1,595	910	685	1,648	1,065	583
南極	169	28	141	165	0	165	...	...	...
世界	973	973	0	1,130	1,130	0	1,030	1,030	0

資 料 国連水会議 1977. Mar. 70/CBP/1

1) 各著者による値を比較するため南極大陸を含めた値に調整してある。

表-1.7.1 わが国の水資源存在量 (1976:国土庁調査による⁷⁾)

基準年	年降水量(mm/年)	年降水総量(km^3 /年)	年存在高(mm/年)	年存在量(km^3 /年)	備 考
渇水年	1,480	558.7	883	333.3	渇水第2位
平水年	1,788	674.9	1,191	449.4	通年平均
豊水年	2,131	804.4	1,534	579.1	豊水第2位

注:算定対象年次は1956年1973年までの18ヶ年

表－1.7.2 わが国の地域別水資源存在量（平水年）

地 域 名	年 降 水 量	年 降 水 総 量	年 存 在 高	年 存 在 量
北 海 道	1,237 mm/年	103 (km ³ /年)	764.2 mm/年	63.8 (km ³ /年)
東北（日本海側）	1,350	49	1,439.4	61.8
東北（太平洋側）	2,107	91	897.6	32.9
関 東	1,548	78	1,023.3	51.5
北 陸	2,789	35	2,036.2	25.7
東 海	2,285	67	1,779.8	52.1
近 畿	1,954	53	1,282.8	35.0
中 国	1,856	59	1,191.6	38.0
四 国	2,169	91	1,438.9	27.0
九 州	2,231	94	1,406.1	59.2
沖 縄	2,107	5	1,126.9	2.5
全 国	1,788	675	1,190.6	449.4

注：地域区分 新潟県は東北（日本海側）、長野県は関東、三重県は東海、福井は北陸に含む。

球全体では 1,000 mm 程度である。なお陸上のみの年平均降水量は 750mm 乃至 800mm、海洋のみの年平均降水量は 1,100 mm 乃至 1,200 mm で、海洋における降水量は陸地のそれに比べ約 5 割多くなっている。

また、降雨の流出については、表－1.6.1 に示すように全世界の年総流出量は 40 乃至 47×10^3 km³ であって、アジア及び南米両大陸の流出量がそれぞれ 1/3 及び 1/4 を占めており、他の大陸に比べて多い。なお年間総降水量が 111 乃至 119×10^3 km³ であるから、流出率は 36 乃至 40 % である。

次にわが国の水文及び水資源存在量について概説する。

わが国の位置する緯度帯は春秋には移動性の高気圧や低気圧が頻繁に通過し、いわゆる前線の消長が激しい地帯である。太平洋高気圧が卓越して日本を蔽い気候が比較的安定し晴天が続く真夏といえども、太平洋低緯度帯で発生する台風によって 1 年に数回暴風雨を経験する。一方冬は大陸の高気圧から吹き出す北西の乾いた風が原因となって、日本海側に多量の降雪をもたらす。これらの気象によってわが国土は多量の降水がもたらされ、世界でも有数の多雨国になっている。

年間平均降水量は統計年の範囲が変ればその値は当然変るものであり、また観測地点の地点降水量から面積雨量を求める手法によっても異なる値が得られることも理由となって、通常その値は統計年と面積雨量を評価する方法を明らかにして示される。

建設省が昭和 46 年発表した広域利水第一次報告書では、昭和 34 年から昭和 43 年に至る間のわが国雨量観測地点における地点雨量から等雨量線図を作成して面積雨量を求め、わが国の年平均降水量を求めたところ 1,818 mm を得たとしている。また国土庁が昭和 51 年発表した水資源賦存量調査報告⁷⁾では全国 1,260 箇所の雨量観測所における昭和 31 年から昭和 48 年までの 18 年間の観測雨量を用いてわが国の平水年年降水量を求めたところ 1,788 mm を得たとしており、建設省の発表値とは 2 % 弱の差があるがほぼ一致していると言ふべきであろう。

わが国で最も降水量の大きい地域は北陸であって、年降水量は 2,789 mm、次いで東海の 2,285 mm、九州

の 2231 mm と続き、最も降水量の少ないのは北海道の 1237 mm である。国土庁の報告では各地域の損失量も評価して降水量から差引き、水資源の年賦存高を求めている。国土庁調査による全国及び地域別の水資源存在高及び地域別の平水年降水量を表 1.7.2 に示した。

この表でみるように、わが国で最も年降水量の大きい北陸地方は水資源存在高（水資源として利用可能な降水量を水深で表わしたもので、有効降水量と考えてよい）も 2036 mm と、わが国で水資源に最も恵まれた地方である。一方わが国で最も水資源に乏しい北海道の水資源存在高は 764 mm で 1000 mm にも達せず、北陸地方の 1/3 強に過ぎない。そのほか東北地方の太平洋岸も水資源存在高は 1000 mm に達していない。

なおわが国では河川の流域面積が狭いため流出特性の差が水資源の地域分布に影響を及ぼすことは殆んどないので、国土庁では降水量から損失量を差引いて水資源存在高を求めたのであって、わが国のような狭い国土、地形、地質の状況では、降雨分布はそのまま水資源の存在状況を示すものと考えられる。

1.3 維持流量と水資源開発

狭義の水資源開発とは第 1 節に述べたように変動する河川の流況を貯水池によって平滑化することであるが、河川の流量は流路に沿って水の出入りがあり河川の縦断方向には流量が変化するため、適宜流量観測地点を選定し、これを基準として渇水時における流況調整を行うこととしている。この流量観測地点としては長期に亘り観測記録が得られている観測地点が選定され（基準地点という）、利水計算や水管理の基準地点とされることが多く、本稿の利水計算においても基準地点の存在を前提としている。そこで本節では利水計算における基準地点の持つ意味を明らかにしておく。

河川が水源地に発し河口で海洋又は湖沼に流れ込むまでの間、支派川の分合流、取水、排水または河床等を介して地下水との交換があるため、流路に沿っての流路は、ある時間断面をとれば河川の縦断方面に大きな変化がある。しかしすべての区間において、その河川が河川として本来具備すべき機能を維持するための流量（維持流量という）は常に流れていなければならない。河川の流量がこの維持流量を下廻れば、水利権量の取水、舟運、漁業、観光、水質、塩害防止、河口閉塞、河川管理施設、沿岸の地下水位の維持などに支障を来すとされる。いま無降雨の気象が継続し河川流量が減少した場合、沿岸の場所によってはこれが前記の維持流量を下廻る事態が生ずることがあり得る。

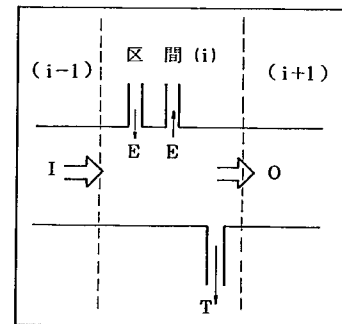
さて河川を縦断方向に幾箇の区間に分割したとき、上に述べたように任意の区間で河川流量が常に維持流量より大でなければならない。従って次式が成立する。（図一

1.5 参照）

$$\left. \begin{array}{l} I_i = E_i + T_i + O_i \\ O_i > q_i \text{ 及び } T_i = T_A \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1.1)$$

- こゝで、 I_i : 区間 i の上流端からその区間への流入量
 E_i : 河床の伏没還元を含む区間流入量及び区間分派量
 T_i : 区間 i の中での取水量
 O_i : 区間 i の下流端から下流への流出量
 q_i : 区間 i の下流端断面における維持流量
 T_A : 水利権取水量

上記の式は河川の水利秩序を保つための必要条件を示すものであ



図一 1.5 河道水収支概念図

る。しかしこの条件は常にすべての区間で成立するものではなく、分派量や取水量が大きくなれば成立しない場合もあり、また渇水が甚しくなれば $T > E$ となるので $I > 0$ となり、その結果河川の下流部ほど維持流量の確保が困難になり易い。現実には、農業用水の取水は上流取水優先が慣行的に確立している場合が多いため、渇水時には通常多くの河川で下流部ほど流量の減少が甚しく、前記の条件を満足することが困難になる。流量が減少する一方で河川に流入する汚濁負荷量はほとんど変わらないため、水質の点でも水質が悪化するのとは避け難い。このような条件の下における水資源問題の基本的課題は、河道のすべての区間において

$$T_A - T = I - (O + E) > 0$$

を常に満足することにあり、 $I < O + E$ となったとき、区間流入量即ち当該地点の河川流量をこの条件に適合せしめるよう貯水池を上流に建設することである。

河道の全区間において、常に

$$O_i > q_i$$

が成立つとすれば、この q_i なる維持流量は次の河道区間 ($i + 1$) における I に等しいので区間 ($i + 1$) における条件式

$$I_{i+1} \geq E_{i+1} + T_{A_{i+1}} + O_{i+1}$$

から

$$q_i = I_{i+1} \geq E_{i+1} + T_{A_{i+1}} + O_{i+1}$$

$$\text{即ち、} q_i - T_{A_{i+1}} \geq E_{i+1} + q_{i+1} \dots\dots\dots (1 \cdot 2)$$

が常に成立しなければならない。

上式で明らかのように、連続する次の区間内での分合流量、伏没還元流量がなく $E_{i+1} = 0$ とすれば、仮に当該区間の上下流端での維持流量が同じとすると取水量分だけは常に維持流量の一部として確保しておかねば水制秩序が保てない。そこで取水量と維持流量を加えた流量を当該地点における確保流量ともいう。そして河道の任意の地点において、渇水のため河川流量が確保流量を下廻れば、その差の流量を貯水池から補給する必要がある。すなわち上流の貯水池の貯水容量は、渇水時任意の地点において少なくとも確保流量を流すための放流を可能ならしめるものでなければならない。

現在水資源開発のための利水計算にあたり、貯水池の必要容量を定めるため前記の如く河道に沿ったすべての地点で確保流量を定め、それぞれに応じた必要貯水容量を評価するのは煩雑すぎるので、本節の初めに述べたように河道に沿った地点のうち流量記録が長期間に亘り整備された 1ヶ所を基準地点として選定し、その基準地点における計画対象渇水時の必要貯水容量を求めるのが慣行である。このことは前記の式において区間 ($i + 1$) を基準地点から河口までの河道にとることを意味しており、このように考えて必要貯水量を計算しても誤差が少なく実用上支障がないので、本稿ではこの慣行に従って利水計算を行うこととする。

1.1 水資源問題の意味

要 約

人間が生体機能を維持し、集団生活を営むためには、その擁する人口に見合う水量を確保する必要がある、供給可能な水の量が人口や生活集団の拡大を制約する因子である。従って長期的には、人口が増加し生活の内容が多様化すれば当然消費水量が増加する。わが国では、15世紀までは、容易にかんがい用水の新規取得が可能であったが、16世紀以降は耕地の急激な拡張に伴って水の供給施設の整備不足に基く渇水が頻発した。本来水不足には需要圧力の高まりに基く水不足と計画対象渇水を越える渇水の発生による水不足とがある。水資源問題とは、必要な時期に一定の基準を満足する水質を持つ水を必要量確保することを意味するものであるが、この条件を充足するためには、河川の表流水などを、その変動を平均化して利用可能な水量を増加する必要がある、これを水資源開発という。近年増加の一途にある水需要を充足するため河川の表流水の開発が進められ、利用率が上昇した結果、水資源開発の効率が低下したほか、水需給の弾力性が硬直化し渇水を招き易くなっていることが最近の各地における水不足多発の原因である。その対策として、渇水時における貯水池操作の合理化と、地下水の揚水利用による河川水との連結利用が好ましい。

1.2 水資源の存在

要 約

地表で各種の態様をとって循環過程にある水の総量は概ね $1.4 \times 10^9 \text{ km}^3$ 、そのうち97.3%は海洋に存在し、残りが淡水であるが、その大半は氷として存在し、人間が最も利用し易い水は淡水の22.76%、水の総量の僅か0.6%程度に過ぎない。これらの水は態様を変えつつ循環を繰り返しており、その変化の量から循環日数を推計すると、河川の表流水の周期が最も短かくて12日、湖沼の循環周期が33年、地下水が650年となっている。継続的にこれらの水利用を進めるとすれば、表流水は周期が短いいため与えられるインパクトの影響は短期間に消失するが、地下水の周期は長いのでその利用には慎重でなければならない。水資源としての降水の分布は、地形と時間のフィルタを通して歪められた流出分布になるので、水資源の存在量としての流出量の分布は降水分布とは必ずしも一致せず、世界的にはナイル川やメコン川の流域のように、降水分布はそのまま水資源の存在量の分布を示すものではないが、わが国程度の地理的地形的条件では降水分布はそのまま水資源の存在量の分布と考えてよい。降水量は世界の平均値は1,000 mm程度、陸上部で750乃至800 mm、海洋部で1,100乃至1,200 mmである。水量にして111乃至119 $\times 10^3 \text{ km}^3$ 、世界の総流出量が40乃至47 $\times 10^3 \text{ km}^3$ であるから流出率は36乃至40%。これに対しわが国では降水量が1,800 mm前後、流出量は平年で1,190 mm程度、流出率は65乃至70%と推計される。

1.3 維持流量と水資源開発

要 約

通常河川の水資源開発における貯水池規模決定のための補給水量の計算と貯水池の操作は、建設省の河川砂防技術基準で定める方法により基準地点における流量の過不足を評価して定めている（詳細は第4章で述べる）が、この評価の結果得られる新規利水の水量は危険側にある。即ち本来は河道のいかなる区間

においても常に流量は当該区間下流端における確保流量（当該区間における維持流量プラス下流取水量）を上廻る必要があるが、渇水のため流量が確保流量を下廻った場合はその不足量を評価し、河道沿いのあらゆる区間において計算された不足量のうち最大のものを以て要補給水量とせねばならない。しかしこの厳密な方法は煩雑であり、流量観測資料の整備されている地点は少なく、また河川の下流部で基準地点を選定すれば問題も少ないので、本稿でもこの在来の手法によった。

第1章 参 考 文 献

- 1) 国連水会議資料, Resources and Needs-Assessment of the World Water Situation, July 1976
- 2) 古島敏雄, 日本農業史, 岩波書店
- 3) 馬場 昭, 水利事業の展開と地主制, 御茶の水書房
- 4) クラーク, 人口増加と土地利用, 大明堂
- 5) 荒川秀俊, 災害の歴史, 至文堂
- 6) M.I. Lvouitch, Water of the World and its future, Water Resources Journal ECAFE, December 1969
- 7) 国土庁水資源局, 水資源の賦存量と水利用, 「人と国土」 November 1976
- 8) 科学技術庁資源調査会, 日本の水資源, 「日本の資源問題」 資源調査会報告第19号, 昭和36年3月22日
- 9) 吉野正敏, 気候学, 地人書館
- 10) 「水資源便覧」, 国土庁水資源局

第2章 長期的な水需給の推移

2.1 長期的にみた水需要の増加傾向

近年頻発する渇水は、基本的には水需要が長期的に増加の趨勢にあり、さらにこの水需要の増加を充足するための水資源開発を進めた結果、河川の利用率が上昇し、渇水を招来し易くなっているためである。この点については第1章で述べたとおりであるが、本節では水需要が長期的に増加の傾向にあること、並びに水需給の推移について述べる。

いかなる生産活動といえども水が必ず関与する現在の人間社会では、財貨の生産が増加することは水消費量が増大することを意味する。まず農業生産においては、わが国のように水田稲作を主体とする場合は勿論、畑作、牧草に至るまですべての農業生産において適期適量のかんがい必須とされる。国連農業機構FAO¹⁾の報告によれば、全世界のかんがい収穫地面積は1970年現在 226×10^6 haで、これに要する純用水量は2,571 ㎥に達している。もし世界の人口が年率2%の割合で増加し、現在の食糧生産と同じ割合の土地と耕地を必要とすると仮定すれば、50 ㎥の水を今後毎年開発してゆかねばならない(ただし実際にはこの数字はやや過大である)。新規の水需要のうち最大のものはかんがい用水であるが、世界的には農業用水のほか都市用水の増加による水消費の拡大も著しいものがある。

現在、全世界の人口増加は著しいが、特に雇傭機会を求める大都市への流入人口は逐年激しさを増しており、大都市の人口は急激に膨張しつつあり、しかもこの傾向は開発途上国において特に激しい。そのため清浄で容易に入手可能な飲料水を家庭で供用している人が、1975年現在で中国を除いて都市人口の77%に過ぎない。農村では普及率はさらに低く、僅かに22%、その結果清浄な水を家庭用水として供用している人口は全世界の人口の僅か38%となっている。このため清浄な飲料水、生活用水のための水供給システムの改善を望む声が依然として大きい。世界保健機構WHOでは1980年までに、都市人口の91%、農村人口の36%までが良質の生活用水が入手できるように各国政府当局が努力するよう勧告している。従って今後安全かつ衛生的に入手できる水道施設の整備が進められると、水道用水のための水利用量は急速に増加するものと考えられる。

工業用水の需要の増加も著しいものがある。わが国を含め先進国と称されて国民所得の高い国は、その産業構造の如何にかかわらず、すべて第二次産業の分野での成熟度は高く、このため開発途上国、低開発国はこれらの先進国に倣って工業指向の経済政策をとっている国が少なくない。現在中進国と称される韓国、メキシコ、ブラジルなどはその好例であるが、その結果世界的に鉄鋼、石油化学などの生産力が拡充され、国際競争が激しさを加えつつある。この鉄鋼にせよ石油化学にせよいわゆる素材産業と称せられる業種は、その製造工程で大量の水が使用される。1960年代のわが国の高度経済成長を支えた鉄鋼その他の臨海型装置産業の急激な発展がわが国の水使用量を増加せしめた主要な原因となっている。1970年代の半ば以降は水供給の限界が指摘されると共に、地盤沈下対策として地下水の利用が規制され、代替として料金の高い水を使用することとなったため、各工場における用水の循環再利用が奨励され、工業用水の再利用率が向上した結果、工業製品の水消費原単位は減少し、現在ではスエーデンの如き環境保全に努めている国における原単位と比較しても遜色のないほどに工業用水の利用の効率化が図られている。しかしなお後述するように工業用水の補給淡水需要量は増加の傾向にある。

以上述べたように人口が増加し、生活様式が多様化してその内容が豊富になり、経済活動が活潑化すれば、これに付随して水の使用量が増加するのは避け難いものである。第1章で触れたように、人間が生産活動を維持するためにはその生活内容に応じて一定の水を消費するものである。したがって個人の集団である国家単位で考えれば、国の経済活動に応じた水の量が消費されるものと想像される。いま国の経済活動の指標として国民総生産（GNP）をとり、年間消費される水量（取水量ベース）との関係を求めれば図-2.1に示すとおりである。この図によれば、国の経済活動と水利用量との間にはある程度の相関が認められよう。大雑把な見方をすれば次のようなことが言えよう。

(1) 国民総生産と水消費量の間には直線関係があり、国民総生産 10^9 米ドルにつき 1 km^3 の水が消費される。

(2) 先進工業国の場合は、水消費量 1 km^3 につき国民総生産は 2×10^{10} 米ドルに達する国もあり、水の生産性は平均の20倍に達する。

(3) これに反し開発途上国の場合は、水消費量 1 km^3 につき国民総生産が 10^8 米ドルに達しない国もあり、水の生産性は平均の $1/10$ 、先進工業国の $1/200$ 以下である。

(4) わが国の水の生産性は先進工業国グループの中では低い。ただし水の生産性の高低は(2)、(3)から想像されるように産業構造と大いに関係があると思われる、その改善は容易ではないと考えられる。

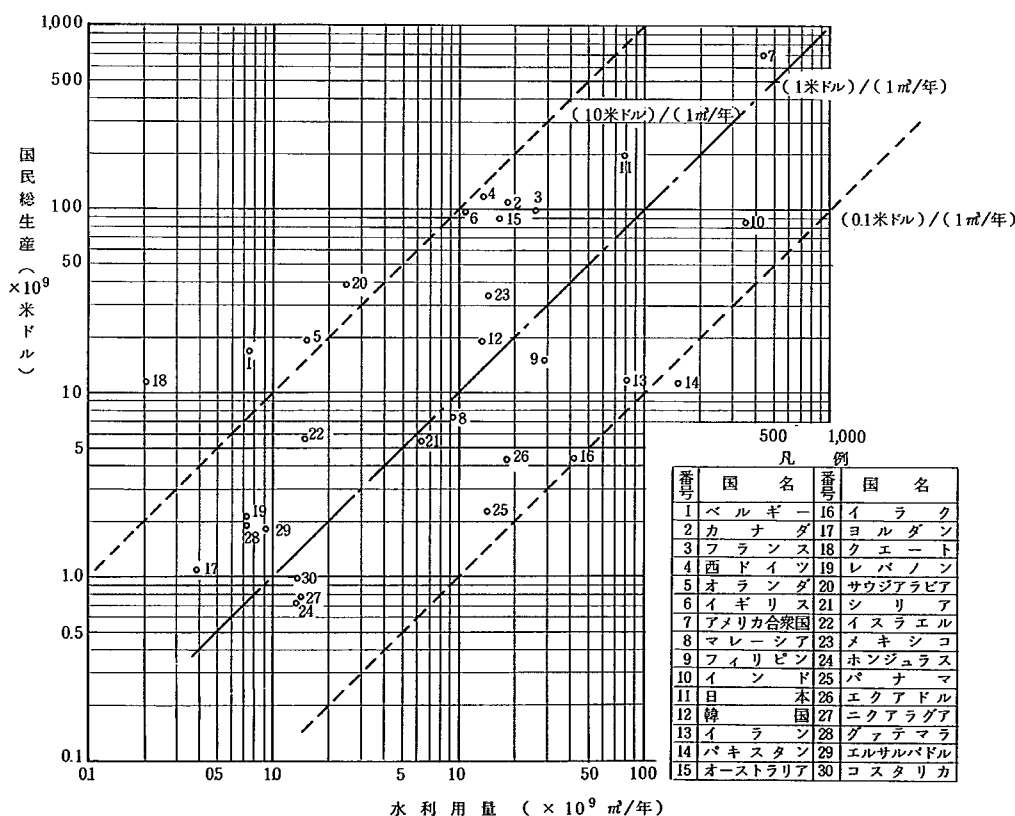


図-2.1 国民総生産と水利用量

いずれにせよ、国民総生産が増大し国民所得が増加すれば、産業構造が変わらず水利用にかかわる社会のシステムを変えない限り、図-2.1からも容易に理解されるように水消費量の増加は避け難いものと考えられる。

世界各国いずれも経済の水準が低く、水利用が少量にとどまっている間は水資源開発がとりあげられることは少なかった。水資源の開発がわが国を含め世界各国で行政上の重要な課題として浮び上ったのは、僅に20年ほど前のことである。世界的にみれば、それまでもキプロスを初めとして、小さな島嶼に大きな人口を擁する国や離島では水の安定供給が問題であったが、第2次世界大戦後世界経済が復興し安定成長期に入った1960年頃には世界の主要先進国では大きな経済成長率を示し、また開発途上国において急激な人口増加に対応するための食糧増産対策に要するかんがい用水、世界的な傾向として大都市への人口流入の結果齎された都市用水の水需要の増大など、各種用途に供する水利用の拡大に対応する水資源開発の必要性が1960年前後世界各国において認識されるようになったのである。

わが国においても1955年(昭和30年)、1958年(昭和33年)と相次いで利根川が渇水となって関東一円に大きな被害がもたらされ、その恒久対策の検討が政府部内で行われたが、時期を同じくして昭和35年頃から東京を中心とする首都圏への人口集中が始まり、多摩川の流出量を大半水道用水源として利用し尽くした東京都は新たな水源を利根川に求めている。わが国の水資源問題は第二次世界大戦直後の食糧増産対策のための農業用水確保に端を発してはいるものの、生活用水、工業用水などの各種用途も含め国の重要な政策課題としてその実施が推進されるに至った時期は、食糧増産対策が一段落し、高度経済成長と軌を一にした人口の都市集中のための対策が重視され、水政策の重心が農業から都市や工業へと移り始めた時期に対応している。わが国の水資源開発に対する強い要請は都市用水の需要が急増したことが、主たる原因であったことは注目されてよい。

ここでわが国の長期的視点でみた水需給について考察しておこう。

わが国では水源補償の問題解決は極めて難かしいために、水資源開発のための貯水池の造成には短かい場合で5年、長い場合には10年を超える長い期間を要することから、長期的な水需要の増加に対応するためには、長期にわたる水需要を推計し、計画的に貯水池の建設を進める必要がある。わが国において水資源開発の全体的長期計画に対応したマクロ的全国水需要の予測を公表したのは、1960年の所得倍増計画策定時における通商産業省の工業用水需要の推計が最初である。以来、厚生省による水道用水や農林省による農業用水の需要推計、建設省や国土庁による各種用水の需要推計が相次いで発表されている。これらの各推計においては、究極的には用水原単位の妥当性、適合性についての判断が介在するので、推計の基礎となるかんがい面積、給水人口、工場面積や業種、生産規模、製造業出荷額に大きな差がない限り、推計の結果には大差がない。そこで最も新しい時点(1978年)に発表された国土庁による各種用水の推計結果を昭和40年、昭和45年の実績と併記し、水需要の長期的推移を示せば表-2.1のとおりである。

このような長期的な水需要の増加傾向に対応する水源の開発状況をみてみよう。各用水の水源を表流水、回収水量、地下水(伏流水を含む)の別に区分し、記録の及ぶ限り遡った昭和30年代の各種水源のシェア、及び使用実績、及びそれから約10年後、15年後のそれを求め表-2.2に示した。この表によれば、農業用水の水源としては当然のことながら表流水、湖沼等が大半を占めているが、昭和30年から50年までの間地下水に依存する水源はシェアも水量も着実に増加し続け、昭和50年には全農業用水量の約7%、4km³が地下水から補給されている。水道水源は地下水に依存するものがほぼ30%前後で、昭和30年代以降ほとん

表-2.1 水需要の長期的推移

(単位: $10^8 \text{ m}^3/\text{年}$)

年 目 的	昭和40年	昭和45年	昭和50年	昭和60年	昭和65年
生活用水	42.0 (54.2)	68.5 (88.4)	95.9 123.4	— 188.3	— 214.6
工業用水	122.1 (129.1)	172.6 (182.5)	172.9 182.8	— 259.3	— 292.8
農業用水	—	—	570.0 570.0	— 620.0	— 637.8
計	—	—	838.8 876.2	— 1,067.6	— 1,145.2

1) 上段は有効水量ベース(長期水需給計画より)

2) 下段は取水量ベース(長期水需給計画より)

3) 下段()内数字は、昭和50年における有効水量ベースと取水量ベースの比率を用いて仮に取水量ベースを算出したものである。

ど変わらず、水道用の供給水量の増加につれて地下水の依存量は増加しており、昭和44年には全地下水使用量12.36 ㎥の20%強、49年には工業用水への地下水利用が相対的に減少したため全地下水使用量約13.8 ㎥の25%にその比重を増大させている。工業用水についてみれば、工業用水全体の使用量の伸びが著しいため、地下水を水源とするものは昭和33年の41%のシェアから昭和44年には19.2%に、さらにその5年後の昭和49年には14.8%にそのシェアを縮小しているが、実際の水量としてはこの11年間に約倍増して6.45 ㎥となり、全地下水使用量の半分を占めるに至った。ただし、その後は地盤沈下対策としての地下水の採取規制が促進されたため、地下水の使用量は横這いで推移し、昭和49年における地下水使用量は昭和44年と全く同量であった。

長期的な傾向としては、昭和30年代初めに水源として使用された地下水量年間約6 ㎥が40年代の半ばには13 ㎥を越え、さらに昭和50年には14 ㎥になるなど逐年飛躍的に地下水の利用が高まったことが認められる。戦後昭和44年度末までに開発された水資源が年間約6.5 ㎥であることを考えると、昭和30年代ダム建設の遅れのため水資源の開発が水需要の伸びに追いつかない時代に、用水の供給源を地下水に求めていったことを如実に示している。そしてこれがよく言われているように昭和30年代に入って地盤沈下が激しさを増した大きな原因である。

地下水の過剰な汲上げによる地盤沈下を防止するため、昭和30年代後半から工業用水法等により主として工業用水の地下水採取の規制が強化された結果、工業用水は勿論、水道用水も新規水源を表流水に依存することになっただけでなく、さらに進んで地盤沈下地域において既存の地下水利用水源についても表流水への転換が政策として実施される方向にあり、河川の水資源開発に大きな負担が加わることとなった。

わが国の河川は、菅原正己⁵⁾も既に指摘しているように、低水流量以下の流出部分は既存の農業用慣行水利権の行使によって余剰はなく、表流水を取水するため河川に新規水利権を設定するには、在来の水利秩序を乱さず既得水利を侵さない範囲で取水しなければならない。河川の自流がこの既得水利の取水量より少なければ、流量補給のための貯水池の建設が水需要の増加に応じて進められなければならない。これらの貯水池は既に述べたように、長期的に逐年増加する水需要を充足するための水量補給を目的とするもので

表-2.2 わが国における各種用水の水源別用水量の推移

		昭和30年 ¹⁾ (1955)	昭和44年 ²⁾ (1969)	昭和50年 ³⁾ (1975)
農 業 用 水	表流水等によるもの	96.0% (57.6km ³)	93.8% (49.5km ³)	93.1% (53.1km ³)
	地下水によるもの	4.0% (2.4km ³)	6.2% (3.27km ³)	6.9% (3.94km ³)
水 道 用 水	表流水等によるもの	昭和35年 (1960)	昭和44年 (1969)	昭和49年 (1974)
	地下水によるもの	69.6% (4.25km ³)	70.2% (6.24km ³)	67.6% (7.11km ³)
工 業 用 水	表流水等によるもの 〔内回収水〕	30.4% (1.86km ³)	29.8% (2.64km ³)	32.4% (3.40km ³)
	地下水によるもの	昭和33年 (1958)	昭和44年 (1969)	昭和49年 (1974)
	表流水等によるもの 〔内回収水〕	59.0% (5.16km ³)	80.8% 27.16km ³	85.2% (37.35km ³)
	地下水によるもの	$\left[\begin{array}{l} 2.01\% \\ 1.76\text{km}^3 \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{l} 38.9\% \\ 13.06\text{km}^3 \end{array} \right]$	$\left[\begin{array}{l} 64.8\% \\ 28.39\text{km}^3 \end{array} \right]$
		41.0% (3.57km ³)	19.2% (6.45km ³)	14.8% (6.46km ³)

- 注 1) 「日本農業と水利用」1960 農林省農地局編、水利科学研究所、地下水以外は表流水等を含む
 2) 農業用地下水の利用実態 昭44. 農林省調べ
 3) 国土庁「長期水需給計画」昭53.8による。昭50年の農業用水570億m³のうち地下水(138-34-64.6)÷39.4
 4) 水道用水、工業用水は水道統計及び工業用水統計による

あるが、現実に日照、無降雨が継続して河川の自流水が減少し、貯水池が計画対象としている流量を下廻るような渇水となって許可水利権量を充足し得なくなる水不足と、長期的にみて水需要の増加に水資源開発が追いつかず、既に述べたように地下水汲上げや豊水水利権による対応を余儀なくされている水不足とを混同している傾向がある。ただし第1章で述べたように近年における水不足の事態が頻発するのは、基本的には長期的な水需給の逼迫にその理由が求められるのであり、経済の伸びに水需要が対応して増加するも

のである以上、計画対象渇水を上廻る渇水対策と共に、長期的な水需要の伸びに対する手法についても一部触れておくこととしたい。

2.2 河川の利用率の上昇と水資源の開発効率

2.1 節に述べたように、長期的には国民経済の拡大に伴って水需要は増加する傾向がある。この増加する水需要を充足するため、河川の表流水の開発が進められているが、その結果河川の水利用率は年を逐って上昇し、開発効率の低下や開発コストの上昇をもたらすことになる。本節では、この水資源開発の進展に伴う河川の利用率の上昇と水資源開発との関係について考察をしておきたい。

わが国における利用可能の水資源量は第1章で述べたように年間降水量で表せば、渇水年（18年統計資料の存在している年数で昭和31年から昭和48年までの内少ない方から第2位）で558.7㎥、平年で674.9㎥、表流水で表現すれば渇水年で333.3㎥、平年で449.4㎥と推計されている。このうち昭和50年現在ですでに86.7㎥の水が農業用水、家庭用や業務用などの都市用水等に取水利用されているので、取水量ベースで言えば、平年で表流水の利用率は19.4%に達している（表-2.3.1）。またわが国の河川は洪水の発生が多いため、年間流出量の15乃至20%は洪水時の流出であり、その上必ずしもすべての山地にダム建設が可能とは限らないので、現実に利用可能の水資源量は平年で300㎥を下廻るものと推定され、上記の取水量ベースの利用率（見掛けの利用率という）は20%を遥かに上廻るものと考えられる。

世界的には、地球上で利用可能な表流水のうち現在使用されている水量及び利用率は、国連その他の機関で発表した資料によって推計すれば表-2.3.2に示すとおりである。（表の中で利水量が地下水使用量を含んでいるものは表流水のみを抽出して年間流出量で除して利用率を求めている。このため利水量を年間流出量で除した値と利用率は等しくない）この表でみるとおり、（見掛けの）利用率は各国の水資源の

表-2.3.1 わが国地域別水資源利用実態（国土庁 1976.11による）

地 域 名	水資源存在量	昭和50年（1975）	
	平水年（㎥/年）	水使用量（㎥/年）	見掛けの利用率
北 海 道	63.8	7.1	18.7%
東 北	94.7	15.9	16.8
関 東	51.5	17.0	33.0
東 海	52.1	11.0	21.1
北 陸	25.7	4.4	17.1
近 畿	35.0	10.0	28.6
中 国	38.0	7.7	20.3
四 国	27.0	4.0	14.8
九 州	59.2	9.6	16.2
全 国	446.9	86.7	19.4

（沖縄を除く）

表-2.3.2 世界各国の表流水の流出率と利用率（見掛けの利用率）

国 名	年平均降水高 mm	年平均流出高 mm	年平均流出量 km ³	流 出 率	利 水 量 10 ⁶ m ³	水利用率	
ア フ リ カ	686	139	4200	0.20	82,500	0.02	1)
タ ン ザ ニ ア	930	120	113	0.14	480	0.005	2)
マ レ ー シ ア	2,850	1,370	456	0.48	9,425	0.02	3)
フ ィ リ ピ ン	2,360	1,076	323	0.45	29,508	0.09	3)
イ ン ド	1,170	543	1,780	0.47	355,000	0.20	3)
韓 国	1,159	641	63	0.55	13,679	0.22	3)
イ ラ ン	250	67	118	0.25	81,340	0.69	4)
オーストラリア	460	45	343	0.10	16,930	0.05	5)
西 独	803	310	77	0.39	13,910	0.18	6)
ベ ル ギ ー	850	361	11	0.42	760	0.07	6)
ブルガリア	672	162	18	0.24	5,050	0.28	6)
フ ラ ン ス	750	305	168	0.41	26,400	0.16	6)
チェコスロバキア	717	219	28	0.30	4,050	0.15	6)
ハンガリー	640	65	6	0.10	3,980	0.66	6)
フィンランド	550	297	100	0.54	1,113	0.11	7)
イ ギ リ ス	1,064	506	122	0.48	10,930	0.09	8)
東 独	600	150	16	0.13	6,080	0.38	8)
オ ラ ン ダ	750	294	10	0.39	1,550	0.16	8)
ポーランド	583	157	49	0.27	7,870	0.16	9)
ルーマニア	700	156	37	0.22	3,040	0.08	10)
米 国	760	263	2,460	0.35	447,200	0.18	11)
カ ナ ダ	522	313	3,122	0.60	18,440	0.006	12)
パ ナ マ	3,300	1,896	144	0.58	14,410	0.10	13)
ニカラグア	2,140	1,339	174	0.63	1,612	0.01	14)
ソ 連	500	198	4,350	0.40	230,600	0.05	15)

1) 国連水会議 提出報告書 1977

2) 国際水資源計画会議 提出 国連UNDP. メキシコ

3) 国連水会議 提出報告書 1977 ESCAP

4) 同上。ただし、資料の値は他の報告と比べかなり違うので見直しが必要

5) 水利科学

6) 8) 国際水資源計画会議 提出 国連UNDP. メキシコ

7) 国連水会議 提出報告書(1977)と資源調査会資料(工業用水)から作成

9) 1) 2) から作成

11) " "

12) " "

13) 1) に同じ

14) 1) に同じ

15) 'Water of the world and its future' M.I.Lvovitch, P7, Water Resources Journal, Dec. 1969

存在状況、歴史的事情、経済社会的条件によって差があるが、一般的に言えば中東諸国など乾燥地域の国々を除けば、利用水量が少ないため、利用率は低い国が多く、長期的にみて水不足の事態が頻発する懸念のある国は少ない。

しかし1975年現在、国連のヨーロッパ経済委員会に属し、1977年の国連水会議への報告を提出した33ヶ国中で現在すでに水不足を訴えている国又はA. D. 2000年までには水不足必至としている国が、キプロス、ハンガリー、マルタ、ポーランド、ルーマニア、ウクライナ共和国と、6ヶ国を数えていることからみても水資源問題の解決の緊要性は少なくない。ヨーロッパのみならず、乾燥地帯である中東諸国においても、社会基盤施設の整備、生活の近代化、生活水準の向上に伴って、元来稀少で不足している水資源の開発が重要な政治課題になっている。現在、世界全体の水利用量は正確な値は不明であるが、1972年の国連人間環境会議や前記国連水会議の資料によれば3,000 km³と推測されるので、世界の年間流出総量40,000乃至47,000 km³に対し7%前後と推定される。わが国の利用率約20%という値は世界の平均値に比べ約3倍で、高い水準にある。表-2.3.2に示すように、前記水不足を訴えている国の（見掛けの）利用率は、キプロス、マルタは小さい島であるので別とすれば、ハンガリーが66%、ポーランドが16%、ルーマニアが8%と、わが国より利用率の遥かに低いルーマニアが水不足を訴えている理由は不明であるものの、他の2ヶ国、特にハンガリーの利用率は極めて高く、水需給の将来について不安を抱くのも当然であろう。

このような河川の利用率の上昇は、水資源開発にどのような影響を与えるであろうか。

菅原正己は昭和40年、河川の利用水量と貯水池規模との関係について考察している。菅原は簡単のために、河川の日流量の変化が1年周期の三角波形の繰返し（図-2.2参照）と仮定し、わが国の河川について利用水量 q と渇水流量 q_0 及び貯水容量 V との関係を流量要覧を用いて計算した結果、次の結論を得たとしている。

1) わが国の河川の豊水流量（95日流量）約3乃至4 m³/s / 100 km²の約30%に当る1 m³/s / 100 km²位が渇水流量 q_0 に当り、利用水量 q がそれ以下ならば貯水池は不要である。

2) q_0 の限度を越えて水を利用しようとすれば、必要な貯水容量は加速度的に増大し、貯水池容量 V はおおよそ $(q - q_0)$ の平方に比例する。すなわち

$$V \propto (q - q_0)^2$$

$$\text{又は } V = C (q - q_0)^2$$

3) この関係が成立するのは利用率70%までで、利用率をこれより上げると増加の程度はさらに急激になる。

そして菅原はわが国の主要河川について、任意の n 年間の平均流量 q の λ %に相当する q_λ の水を全期間を通じて定期的に利用するのに必要な貯水容量を計算し、必要貯水容量が利用水量 q_λ の何ヶ月分に相当するか、すなわち

$$n_\lambda = V_\lambda / q_\lambda = C (q - q_0)^2 / q_\lambda$$

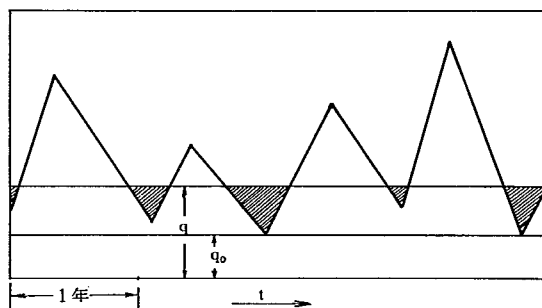


図-2.2 河川流量の時間変化概念図（菅原の三角波）

における λ を求め、わが国の流況の良好な河川で、
 $\lambda = 100\%$ における λ は、8.6 ヶ月、悪い河川で 55
 ヶ月という結果を得ている。(表-2.4)

筆者は、菅原が仮定した三角波の代りに、河川の基
 準地点における流況を洪水が年 1 回だけ発生する流況
 でそのい減曲線が指数曲線と仮定して(ナイル川や、
 メコン川のような大陸の大河川でこのような流況が見
 られる)、利用率と貯水池容量との関係をモデル的に
 明らかにしてみることとする。

図-2.3.1 に示すように、 q_b なる年間最小流量を
 取水量として年間を通じて利用するとすれば、利用率
 f は次式により表される。

$$f = 365 \cdot q_b / \sum_{i=1}^{365} q_i$$

次に取水量 q を増加し、 q_0 を年間通じて
 取水するとすれば、 $q_0 \leq \frac{1}{365} \sum_{i=1}^{365} q_i$ の範囲
 内で利用率 f は次式で表わされる。

$$f = 365 \cdot q_0 / \sum_{i=1}^{365} q_i$$

渇水補給という観点でみれば、年間ハイド
 ログラフは流量の大きい順序に日流量を並べ
 た年間流況曲線と同等と考えられるから、図

-2.3.1 に相当する年間流況曲線が図-2.3.2 で表わされるとして、図-2.3.2 に示す年間流況曲線が

$$q(t) = q_h \cdot e^{-\alpha t} \dots\dots\dots (2.1)$$

但し t : 時間(日単位)

q_h : 年最大流量 ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{日}$)

α : 定数

で表わされると仮定すれば、年間総流出量 F は次式のとおりである。

$$\begin{aligned} F &= \int_0^b q(t) dt \\ &= \int_0^b q_h \cdot e^{-\alpha t} \cdot dt \\ &= \frac{q_h}{\alpha} (1 - e^{-\alpha b}) \dots\dots\dots (2.2) \end{aligned}$$

次に、使用水量を q_0 としたときの年間総使用水量 T は、

$$T = \int_0^b q_0 dt = b \cdot q_0 \dots\dots\dots (2.3)$$

従って、 q_0 に対する利用率 f は

$$\begin{aligned} f &= T/F = b \cdot q_0 / \frac{q_h}{\alpha} (1 - e^{-\alpha b}) \\ &= \frac{\alpha \cdot b \cdot q_0}{q_h} / (1 - e^{-\alpha b}) \dots\dots\dots (2.4) \end{aligned}$$

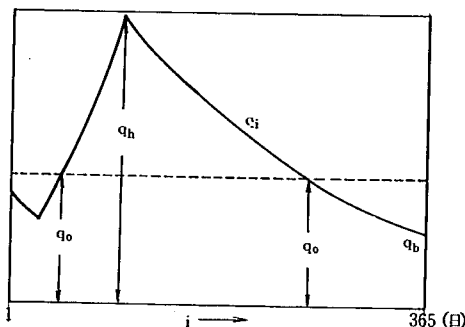


図-2.3.1 河川流量の変化概念図(指数曲線)

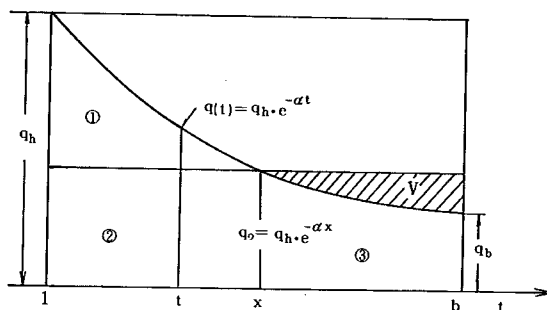


図-2.3.2 河川流況の指数函数表示

表-2.4 n_{λ} の表 ($\lambda=100\%$)

(管原正己による)

河川名	地点名	流域面積	統計期間	$n_{\lambda}(\lambda=100)$	河川名	地点名	流域面積	統計期間	$n_{\lambda}(\lambda=100)$
石狩川	双雲別	435km ²	1927~1958	17.08ヶ月	宮川	天ヶ瀬	267km ²	1923~1945	23.84ヶ月
長流川	蟠溪	160	1923~1944	16.46	熊野川	風屋	660	1923~1959	27.24
馬淵川	似島	404	1923~1945	13.93	紀ノ川	寺尾	253	1923~1943	20.82
北上川	川前	1,160	1924~1957	13.91	市川	南小田	214	1923~1943	28.48
名取川	落合	275	1923~1942	9.49	揖保川	閭賀	338	1923~1943	13.48
阿武隅川	供中	2,400	1926~1957	20.08	旭川	柴原	373	1923~1944	11.22
米代川	大湯	162	1923~1957	15.72	高梁川	布寄	669	1923~1943	24.18
雄物川	田沢	345	1923~1957	13.14	太田川	大野	1,100	1926~1943	12.39
最上川	三栗屋	281	1928~1957	14.75	小瀬川	釜ヶ原	252	1926~1957	17.68
阿賀野川	田子倉	712	1930~1958	10.78	円山川	加保	119	1923~1942	15.01
那珂川	福渡戸	107	1923~1957	15.11	千代川	古用瀬	271	1923~1942	15.39
利根川	幸知	413	1924~1945	10.01	神戸川	菅田	240	1923~1957	12.72
荒川	滝川	478	1929~1957	15.02	江川	熊見	2,570	1924~1943	13.85
多摩川	熱海	254	1924~1955	13.94	阿武川	高瀬	401	1925~1953	23.37
相模川	明見	191	1924~1957	19.34	吉野川	新宮	218	1923~1952	26.21
酒匂川	嵐	389	1924~1957	18.09	渡川	秋丸	360	1938~1957	12.42
大井川	井川	447	1927~1957	20.25	五ヶ瀬川	吐ノ瀬	322	1930~1954	25.77
天竜川	佐久間	4,190	1923~1943	11.94	耳川	岩屋戸	374	1929~1950	24.70
木曽川	握	1,580	1923~1957	20.09	一ツ瀬川	黒原	403	1927~1956	32.90
信濃川	照岡	6,970	1923~1957	19.74	大淀川	南俣	133	1923~1944	25.93
黒部川	樺平	313	1926~1958	18.29	川内川	宮入	720	1924~1957	55.37
庄川	鳩ヶ谷	585	1928~1955	15.29	球磨川	栗瀬	242	1927~1949	20.14
九頭竜川	白栗	155	1923~1948	8.61	白川	河蔭	155	1923~1944	16.89
琵琶湖		3,848	1875~1962	32.48	筑後川	桜竹	456	1923~1957	32.26
淀川	月ヶ瀬	615	1923~1942	13.02					

となる。

ここで、河川の流量が q_0 となる t の値を X とすれば、 $q_0 = q_h \cdot e^{-\alpha x}$ であるから、

$$f = \frac{\alpha \cdot b}{q_h} q_h \cdot e^{-\alpha x} / (1 - e^{-\alpha b})$$

$$= \alpha \cdot b \cdot e^{-\alpha x} / (1 - e^{-\alpha b}) \dots\dots\dots (2.4)'$$

一方、これに対して、 q_0 の水量を年間通じて、定常的に取水するために必要なダムの貯水容量 V は次式により求められる。

$$V = \int_x^b (q_0 - q_h \cdot e^{-\alpha t}) dt$$

ここで、 $q_0 = q_h \cdot e^{-\alpha x}$ であるから、

$$V = \int_x^b (q_h \cdot e^{-\alpha t} - q_h \cdot e^{-\alpha t}) dt$$

$$= q_h \left\{ e^{-\alpha x} \left(b - \frac{1}{\alpha} - X \right) + \frac{1}{\alpha} e^{-\alpha b} \right\} \dots\dots\dots (2.5)$$

さて、単位の貯水容量をもって開発できる新規の水量を、その地点における水資源開発効率と定義した場合の任意の取水量 q_0 に対する必要貯水容量と利用率の関係、換言すれば利用率の上昇にともなう開発効率の変化 df/dV について考察してみる。

いま、 t 軸上において、 $X_{100} \leq t \leq b$ の間について考える。 X_{100} は、河川の利用率が 100% となる t の値であり、次式により求めることができる。つまり、 X_{100} に相当する流量が、年間流量の平均値以下でなければならないという条件から、

$$q_h \cdot e^{-\alpha x_{100}} \leq F/b = \frac{q_h}{\alpha \cdot b} (1 - e^{-\alpha b})$$

$$e^{-\alpha x_{100}} \leq \frac{1}{\alpha \cdot b} \cdot (1 - e^{-\alpha b}) \dots\dots\dots (2.6)$$

次に、 X を媒介変数として

$$df/dV = \frac{df}{dX} / \frac{dV}{dX} \text{ であるから、}$$

$$(2.4)' \text{ 式より } \frac{df}{dX} = -\alpha^2 \cdot b \cdot e^{-\alpha x} / (1 - e^{-\alpha b}) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$(2.5) \text{ 式より } \frac{dV}{dX} = q_h \left\{ -\alpha \left(b - \frac{1}{\alpha} - X \right) e^{-\alpha x} - e^{-\alpha x} \right\}$$

$$= -q_h \cdot \alpha \cdot (b - X) e^{-\alpha x} \dots\dots\dots (2.8)$$

したがって、(2.7)、(2.8) 式より

$$\frac{df}{dV} = \left\{ -\alpha^2 \cdot b \cdot e^{-\alpha x} / (1 - e^{-\alpha b}) \right\} / \left\{ -q_h \cdot \alpha \cdot (b - X) e^{-\alpha x} \right\}$$

$$= \alpha \cdot b / \{ q_h \cdot (1 - e^{-\alpha b}) (b - X) \} \dots\dots\dots (2.9)$$

(2.9) 式が、利用率向上にともなう、貯水池必要容量の増分、つまり開発効率を示すものである。この式における df は、河川利用率の増分、つまり無次元量であり、一方 dV はそのときの貯水容量の増分でありその単位は m^3 で表示されるものである。ここで、 dV を無次元化するために、 dV を、年間総流出量 F で除した値 $v (= V/F)$ を必要容量率と定義すれば、(2.9) 式と (2.2) 式から、

$$\frac{df}{dv} = \frac{df}{dV/F} = \frac{b}{b - X} \dots\dots\dots (2.10)$$

となる。

つまり、河川の流況が前に仮定したとおり、 t の指数函数であるとすれば、開発効率は、補給日数に逆比例という単純な形に整理することができる。

ここで、河川の利用率と開発効率を各々無次元化された指標によってその関係を分析するためには、 X を媒介変数として(2.4)'式と(2.10)式の f と $\frac{df}{dv}$ の関係を明らかにすれば良いこととなる。一方(2.4)'式における f は流況係数 α により変化することとなる。わが国の河川における α の値は、昭和51年度流量年表(建設省河川局編)における観測期間内平均流況から逆算すれば、流況の良好な河川で約 $0.3 \times 10^{-2}/\text{日}$ 、流況の悪い河川で約 $0.8 \times 10^{-2}/\text{日}$ との結果が得られた。これらの結果から、 α を $0.3 \times 10^{-2}/\text{日}$ から $0.8 \times 10^{-2}/\text{日}$ の間に変化させ、それぞれの α に対する f と $\frac{df}{dv}$ の関係を示したものが図-2.4である。

この図で示すように、河川の水資源開発においては、その開発が進み利用率が上昇すると同一河川において同一貯水容量の貯水池であっても新規の開発水量は減少し、新規の水利用の開発効率は低下する。また、(2.4)'式と(2.10)式で定義したように、 $\frac{df}{dv}$ と f は、 α 及び X の関数であるから、河川の流出特性(この図では α の変化)によりその開発効率は千差万別であるが、いずれの α に対しても、利用率の増大に対する開発効率の減少傾向を図-2.4は示している。

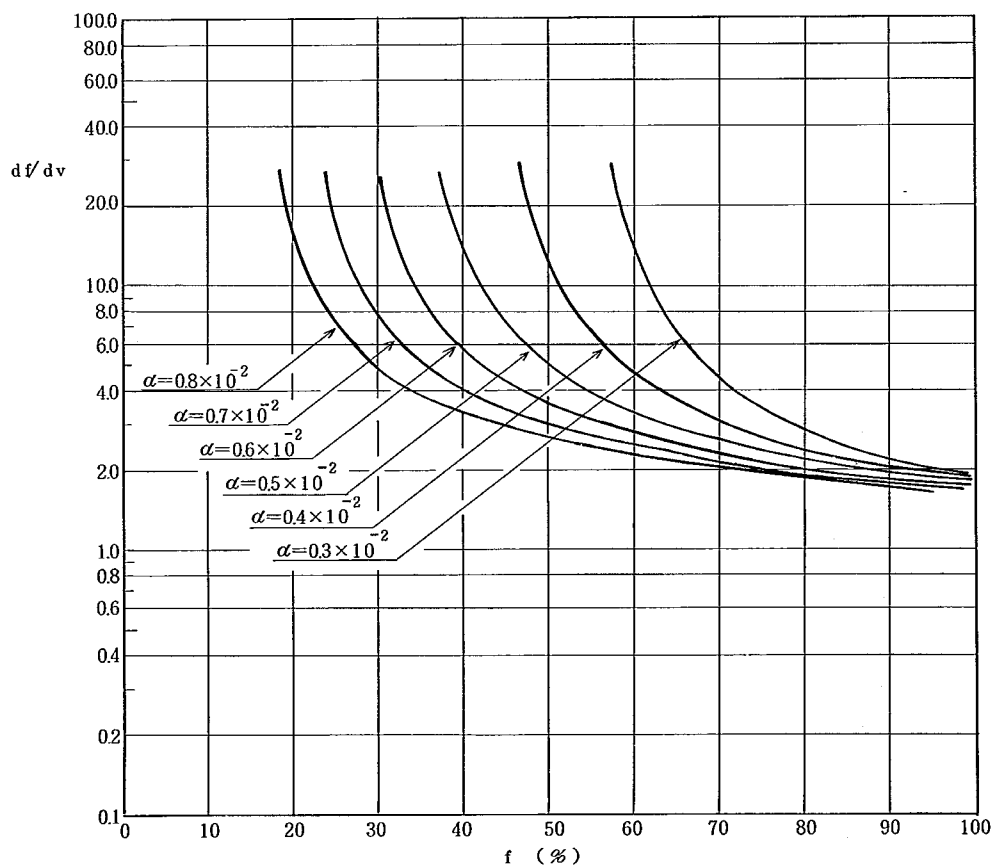


図-2.4 流況モデルによる $f \sim \frac{df}{dv}$ の関係

表-2.4 わが国河川の開発効率と利用率

河川名	地点名	統計年	利用率	10%	20	30	40	50	60	70	80	90	100
石狩川	双雲別 流域面積 435km ²	総流量 0.5875km ³ 1927~1958	Vf (10 ⁶ m ³)	0	0	5.7	23.1	47.4	87.9	131.8	187.9	361.9	838.3
			Vf/Vf100=v	0	0	0.010	0.039	0.081	0.150	0.224	0.320	0.616	1.427
			Δv	0	0	0.010	0.029	0.042	0.069	0.074	0.09	0.296	1.811
			Δf/Δv			100	3.45	2.38	1.45	1.35	1.04	0.33	0.06
馬淵川	似島 404km ²	0.3882km ³ 1923~1944	Vf	0	0	0	5.3	17.8	43.2	72.3	101.4	199.2	450.5
			v	0	0	0	0.014	0.046	0.111	0.186	0.261	0.513	1.160
			Δv	0	0	0	0.014	0.032	0.065	0.075	0.075	0.252	0.647
			Δf/Δv				7.14	3.12	1.54	1.33	1.33	0.40	0.15
北上川	川前 1,160km ²	1.1982km ³ 1924~1957	Vf	0	0	9.3	29.0	54.5	112.5	203.0	293.5	563.8	1,393.2
			v	0	0	0.008	0.024	0.045	0.094	0.169	0.245	0.471	1.163
			Δv	0	0	0.008	0.016	0.021	0.049	0.075	0.076	0.226	0.692
			Δf/Δv			12.50	6.25	4.76	2.04	1.33	1.32	0.04	0.14
阿武隈川	供中 2,400km ²	1.8571km ³ 1926~1957	Vf	0	0	16.8	62.4	182.4	338.4	552.0	1,024.8	1,636.8	3,122.4
			v	0	0	0.009	0.034	0.098	0.182	0.280	0.552	0.881	1.681
			Δv	0	0	0.009	0.025	0.064	0.084	0.098	0.272	0.329	0.800
			Δf/Δv			11.11	4.00	1.56	1.19	1.02	0.37	0.30	0.13
利根川	岩本 1,700km ²	2.6247km ³ 1923~1957	Vf	0	0	5.1	45.9	132.6	255.0	452.2	649.4	975.8	2,590.8
			v	0	0	0.002	0.018	0.051	0.097	0.172	0.247	0.372	0.987
			Δv	0	0	0.002	0.016	0.033	0.046	0.075	0.075	0.125	0.615
			Δf/Δv			50.00	6.25	3.03	2.17	1.33	1.33	0.08	0.16
黒部川	樺平 420km ²	1.7124km ³ 1926~1936	Vf	0	0	23.2	76.9	141.1	241.0	345.2	459.5	811.4	2,615.8
			v	0	0	0.014	0.045	0.082	0.141	0.202	0.268	0.474	1.528
			Δv	0	0	0.014	0.031	0.037	0.059	0.061	0.066	0.206	1.054
			Δf/Δv			7.14	3.23	2.70	1.69	1.64	1.52	0.49	0.10
熊野川	風屋 660km ²	1.2165km ³ 1923~1959	Vf	0	12.5	45.5	91.7	142.6	308.9	596.0	900.9	1,461.9	2,770.0
			v	0	0.010	0.037	0.075	0.117	0.254	0.490	0.741	1.202	2.277
			Δv	0	0.010	0.027	0.038	0.042	0.137	0.236	0.251	0.461	1.075
			Δf/Δv		10.00	3.70	2.63	2.38	0.73	0.42	0.40	0.22	0.09
小瀬川	釜ヶ原 252km ²	0.3514km ³ 1926~1957	Vf	1.0	11.6	26.2	47.6	89.5	144.4	206.1	267.9	332.6	518.9
			v	0.003	0.033	0.075	0.135	0.255	0.411	0.587	0.762	0.947	1.477
			Δv	0.003	0.030	0.042	0.060	0.120	0.156	0.176	0.175	0.185	0.530
			Δf/Δv	33.33	3.33	2.38	1.67	0.83	0.64	0.57	0.57	0.54	0.19
吉野川	新宮 218km ²	0.3676km ³ 1923~1952	Vf	0	28	11.3	26.2	43.3	99.0	191.0	294.3	445.4	805.1
			v	0	0.008	0.031	0.071	0.118	0.269	0.520	0.800	1.211	2.190
			Δv	0	0.008	0.023	0.040	0.047	0.151	0.251	0.280	0.411	0.979
			Δf/Δv		12.50	4.35	2.50	2.13	0.66	0.40	0.35	0.24	0.10
筑後川	桜竹 456km ²	0.6491km ³ 1923~1957	Vf	0	0	0	7.3	29.2	67.0	140.0	272.7	519.8	1,750.1
			v	0	0	0	0.011	0.045	0.103	0.216	0.420	0.801	2.696
			Δv	0	0	0	0.011	0.034	0.058	0.113	0.204	0.381	1.895
			Δf/Δv				9.09	2.94	1.72	0.88	0.49	0.26	0.05

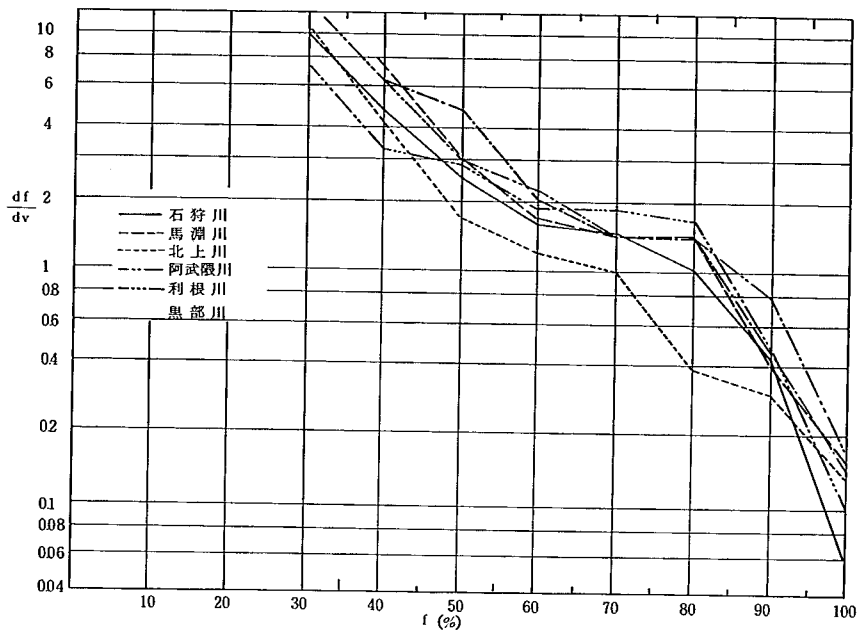


図-2.5.1 $f \sim df/dv$ の関係図 (その1)

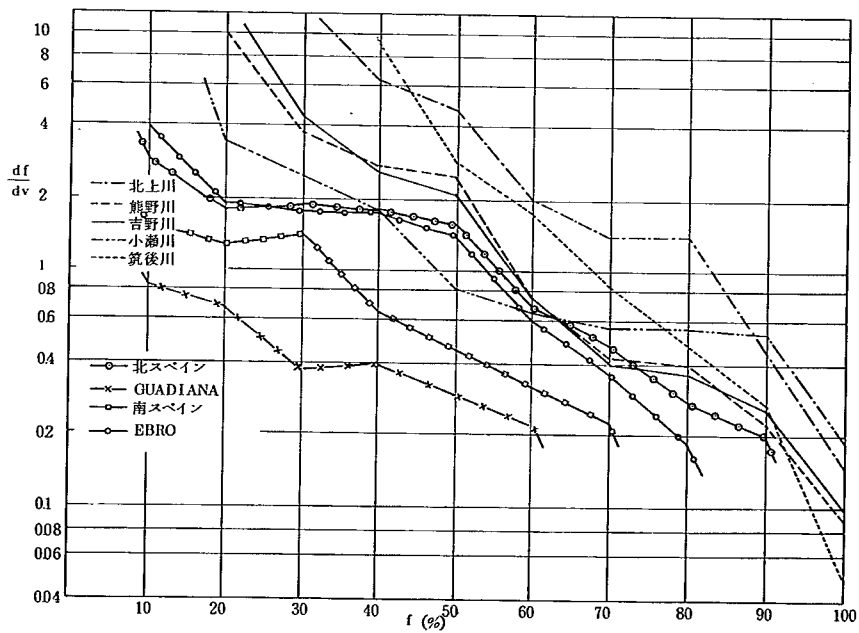


図-2.5.2 $f \sim df/dv$ の関係図 (その2)

以上は、全国の河川流況をモデル化することにより、マクロな立場から利用率と開発効率の関係を分析したものであるが、このような視点から先の菅原の分析した資料を用いてわが国の代表的な10河川を選定し、利用率 f と、開発効率 df/dv ($df/(dV/F)$)との関係を計算したのが表-2.4である。

さらに、スペインの幾つかの地方の河川⁴⁾の f と df/dv の関係を表-2.5.1、表-2.5.2により計算し、表-2.4のわが国の河川の f と df/dv の関係とあわせて図示したものが図-2.5.1、図-2.5.2、図-2.6である。

これらの図において、ある利用率において $\Delta f/\Delta v$ が大きいほど、同じ利用率での開発効率が高いこと

表-2.5 スペインの河域の開発効率と利用率

表-2.5.1 $f \sim v$ ($= Vf/Vf_{100}$)

$v(=Vf/Vf_{100})$	0	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
北スペイン	0.040	0.480	0.660	0.740	0.800	0.825	0.850	0.870	0.890
GUADIANA河域	0.015	0.190	0.290	0.385	0.465	0.520	0.580	0.615	0.650
南スペイン	0.005	0.335	0.460	0.550	0.615	0.685	0.710	0.740	0.770
EBRO河域	0.050	0.485	0.640	0.710	0.760	0.795	0.830	0.855	0.880

表-2.5.2 $f \sim df/dv$

地域	$V_{100}, C.A.$	統計年	利用率 (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
北 ス ペ イ ン	3721km ² 53800km ²	1912~ 1971	v	0.035	0.095	0.150	0.210	0.280	0.420	0.625	1.000	1.500	—
			Δv	0.035	0.060	0.055	0.060	0.070	0.140	0.205	0.375	0.500	—
			df/dv	285	1.67	1.82	1.67	1.43	0.71	0.49	0.27	0.20	—
GA UA DI A	505km ² 59870km ²	1912~ 1971	v	0.120	0.270	0.545	0.800	1.140	1.620	—	—	—	—
			Δv	0.120	0.150	0.275	0.255	0.340	0.480	—	—	—	—
			df/dv	0.83	0.67	0.36	0.39	0.29	0.21	—	—	—	—
南 ス ペ イ ン	863km ² 18390km ²	1912~ 1971	v	0.070	0.150	0.225	0.380	0.605	0.925	1.375	—	—	—
			Δv	0.070	0.080	0.075	0.155	0.225	0.325	0.450	—	—	—
			df/dv	1.43	1.25	1.33	6.65	0.44	0.31	0.22	—	—	—
E B R O	5220km ² 85550km ²	1912~ 1971	v	0.025	0.080	0.140	0.200	0.275	0.430	0.715	1.280	—	—
			Δv	0.025	0.055	0.060	0.060	0.075	0.165	0.285	0.565	—	—
			df/dv	4.00	1.82	1.67	1.67	1.33	0.61	0.35	0.18	—	—

表-2.5.3 スペインの河川の水文特性(参考, 統計期間 1912~1970)

河川名	基準地点	流域面積 (km ²)	降雨高 (mm)	降雨量 (km ³)	流出高 (mm)	流出量 (km ³)	流出率
GUADIANA	BENAVIDES	49,437	547	27,042	75	3,746	0.137
EBRO	TORTOSA	84,230	668	56,265	227	19,122	0.339

を意味しているから、北上川、馬淵川、利根川などの北日本、東日本の河川の開発効率が全般に優れていることが認められる。一方小瀬川の開発効率は他の諸河川に比べて非常に低く、水資源の開発利用の上で同河川が極めて不利な河川であることが明らかである。また熊野川と吉野川の $\Delta f/\Delta v$ と f の関係はよく似ており、東北日本の河川に比べ開発効率は劣っており、特に利用率 f が50%を越えると小瀬川よりも $\Delta f/\Delta v$ は同じ利用率でも低く、西日本の太平洋岸の河川の流況は利用率が50%を越えると不安定となり、開発利用の上では著しく不利となることが判明した。

またスペインの河川の開発効率はわが国の河川と比較すれば極めて悪い。利用率が50%程度で北スペイン及びEBRO地方の河川の水資源開発効率がわが国の小瀬川のそれを若干上廻る程度で、それ以外はすべての開発段階であらゆる河川流域で水資源の開発効率がわが国に比べ劣っていることが認められる。

このように、わが国の水資源の開発効率は必ずしも海外に比べ悪いとは言えない。しかし開発効率が優れていることが必ずしも水資源の開発利用の上で優れていることにはならない。水資源開発の経済性、即ちその投資効率は開発効率のみならず、貯水効率ならびにダムの単位体積の建設費などにより影響されるからである。

投資効率は投資額に対する便益の比であるから、水資源開発の場合、便益を新規開発水量そのものと考えれば次式で表わされる。

$$\text{水資源の投資効率} = \text{水資源開発水量} / \text{開発の費用}$$

いまこの投資効率にかかわる要素として、開発効率、貯水効率、ダムの建設コストがある。これらの要素を次のように定義する。

開発効率： 単位貯水容量で開発される新規利水量（今までは利用率を用いたが、開発水量に換算可能である）

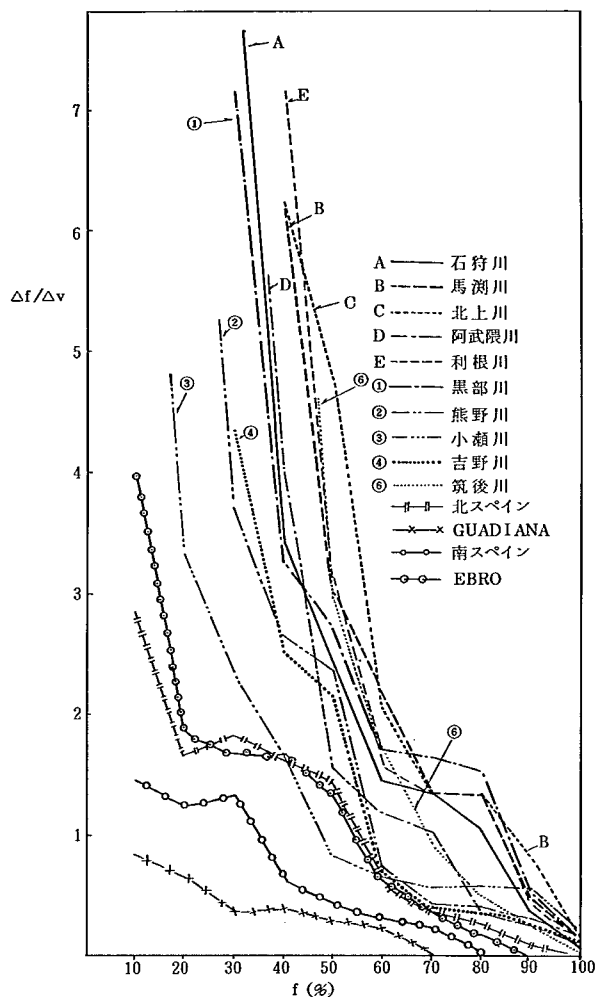


図-2.6 わが国10河川とスペイン河川の利用率と開発効率

貯水効率： 単位のダム体積で貯留し得る貯水容量

ダムの建設コスト： ダムの単位体積当りの工事費

前記投資効率をこれらの諸要素で書き直すと次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \text{水資源開発の投資効率} &= \frac{\text{新規開発水量}}{\text{貯水容量}} \times \frac{\text{貯水容量}}{\text{ダム体積}} \times \frac{\text{ダム体積}}{\text{開発費用}} \\ &= \text{開発効率} \times \text{貯水効率} \times \frac{1}{\text{ダム単位体積建設費}} \end{aligned}$$

即ち水資源開発の投資効率は、開発効率と貯水効率に比例し、ダムの単位体積コストに反比例する。

開発効率についてはすでに述べたようにわが国の河川では少なくともスペインの河川よりも優れ投資効率が開発効率により悪影響を受けることはないと考えられる。

貯水効率については、表-2.6に示すようにわが国の貯水池は地形的条件に恵まれない限り、堤体積1㎡当り貯留し得る貯水量は、コンクリートダムの場合でダム体積の1000倍以下3桁が普通であり、フィルダムで2桁、100に満たないことが多い。一方海外の貯水池では、スイスの如く地形の急峻でわが国の建設地点と相似している国では、貯水効率はわが国と大差ないが、カナダ、ソ連、アメリカのように平坦かつ広大な地形条件にある国々では、コンクリートダムの貯水効率は少くとも4桁、場合によっては6桁に達するものもあり、フィルダムの場合でも4桁に達し、わが国のコンクリートダムの貯水効率を凌ぐ場合がみられる。従って、わが国の貯水池建設の投資効率を低める大きな原因として、貯水効率の悪さが挙げられる。

ダムの単位体積コストについては、表-2.7に海外のダムとわが国のダムの型式別にダム体積1㎡当りの工事費をまとめて掲げた。工事費についてはいずれも昭和45年(1970年)単価に換算してある。

この表によれば、コンクリートダムについては重力ダムとアーチダムを問わず、海外国内いずれもダム体積1㎡当り22,000円乃至55,000円で、ほとんど較差はない。またフィルダムでは、海外のダムで1㎡の体積当り820円乃至5,690円、わが国でも2,500円乃至3,000円で、桁が違うほどの大きな差はないと言ってよい。結局ダム建設については、いずれの国においても最新の土木技術を駆使して建設されるものであり、その工事費は国際的に経済合理性に貫かれた入札によって決定されると考えれば、

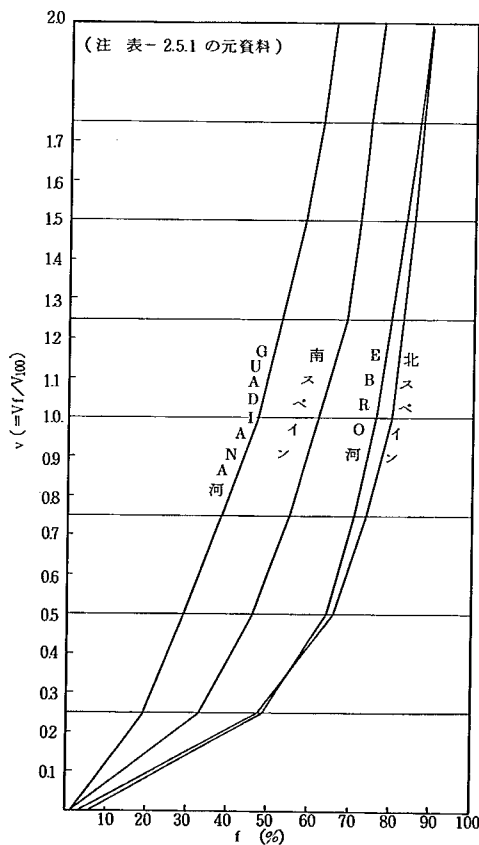


図-2.7 スペイン河川の利用率と必要容量 v (V_f/V_{100}) の関係

表-2.6 ダム単位体積当り貯水容量

型 式	国 名	ダ ム 名	ダ ム 体 積	総 貯 水 容 量	ダム体積 1 m ³ 当り貯水量
			m ³	10 ³ m ³	m ³ / m ³
重 力 ダ ム	日 本	奥 只 見	1,627,000	601,000	369
	"	早 明 浦	1,150,000	316,000	275
	"	小 河 内	1,675,700	189,100	113
	"	古 久 保	1,191,000	130,000	109
	米 国	グランドクーリー	8,093,000	11,597,000	1,433
	"	フ ー バ ー	3,364,000	38,547,000	11,459
	イ タ リ ア	プラチェムーラン	1,500,000	101,000	61
	イ ン ド	ス リ サ イ ラ ム	1,985,000	8,720,000	4,393
	ソ 連	ウ グ リ ッ チ	278,000	1,900,000	6,835
	カ ナ ダ	ゴ バ ン	55,000	8,005,000	145,545
ア ー チ ダ ム	日 本	矢 木 沢	601,300	204,300	340
	"	池 原	646,600	338,000	523
	米 国	ロ ス	695,000	1,733,000	2,494
	ス イ ス	コ ン ト ラ	660,000	86,000	180
	タ イ	プ ミ ボ ル	970,000	12,200,000	12,577
	フ ラ ン ス	モ ン テ ナ ール	456,000	240,000	526
ロ ッ ク フィ ル ダ ム	日 本	御 母 、 衣	7,950,000	365,800	46
	米 国	ニューブラズバー	15,238,000	1,147,000	75
ア ー ス フィ ル ダ ム	日 本	山 口	1,501,000	20,600	14
	カ ナ ダ	ボラジマウンテン	45,587,000	70,475,000	1,677
	パキスタン	ザ ャ リ	26,000,000	34,000,000	1,308

補償費などに起因する工事外要素が大幅に異なる場合を除けば、m³当り単価は国際的にほとんど変わらないのは当然であろう。

以上のように、わが国の水資源開発が経済的に効率が悪いのは、開発効率、貯水効率、ダムの単位体積当りの工事費の3要素のうち主として貯水効率の低さによるものであることが明らかになった。

しかし開発効率についても、開発が低次の段階と開発が進み利用率が上昇した場合とではその効率に大きな格差が生ずるため、河川によっては利用率の上昇とともに投資効率が10分1以下になる場合もあり得ることに注目する必要がある。

以上説明したように、水需要の増加に対して河川の水資源開発を進めれば利用率が上昇し、その結果開発効率即ち1単位の貯水容量によって開発し得る新規利水量は減少する。このことは開発の進展と共に水資源開発の投資効率を悪化せしめることを意味するものであるが、別の側面からみれば、利用率の上昇により一定量の貯水池容量が渇水時に補給して安定取水を可能ならしめる水量は減少することを意味している。即ち水資源開発が進み利用率が上昇している河川では、渇水時に安定的に供給し得る水量を確保する

表-2.7 ダム体積1 m³当り建設費

型 式	国 名	ダ ム 名	ダ ム 体 積	ダ ム 費	ダム体積1 m ³ 当り建設費	備考
			m ³	10 ⁶ 万円	(1970P)円/m ³	
重 力 ダ ム	日 本	大 渡	950,000	57,100(1978)	33,260	
	"	桐 生 川	324,000	22,000(")	37,600	
	タンザニア	スチーグラージョ	698,000	10,500(1961)	22,580	計画中
ア ー チ ダ ム	日 本	川 治	837,000	66,100(1978)	43,700	
	"	小 浜	268,525	8,196(1966)	40,430	
	"	矢 作	305,427	14,391(1968)	55,170	
	フィリピン	マ リ キ ナ	400,000	9,250(1958)	44,600	
	イ ラ ン	カ ラ ジ	750,000	26,856(1961)	53,280	
ロ ッ ク フ ィ ル	日 本	三 国 川	7,214,000	37,000(1978)	2,840	
	"	高 見	5,120,000	24,500(")	2,650	
	タンザニア	ニュンバヤムンガ	414,000	1,312(1961)	4,760	
	カ ナ ダ	南サスカチワン	63,460,000	34,560(1962)	820	
	エジプト	ア ス ワ ン ハ イ	42,000,000	123,840(1958)	5,690	
	米 国	グリーンマウンテン	3,333,000	2,537(1954)	1,630	
	"	グ ラ ン ビ イ	2,274,000	4,681(")	4,350	
	タ イ	モ ー ナ カ リ ン	12,100,000	27,000(1974)	2,230	
ア ー ス フ ィ ル	日 本	白 川	613,000	1,500(1971)	2,490	
	米 国	カ シ タ ス	7,260,000	6,080(1956)	1,660	

ための貯水量は、利用率の低い段階に比べ相対的に多量の貯水容量を必要とする。その結果第4章でも詳細に述べるが、利用率が上昇するにしたがって、渇水の安全度が低下することとなるので、利用率の高い河川では貯水池の操作の上でも慎重に行なう必要がある。

本論文では、最近の水資源開発の進展に伴う河川の表流水の利用率上昇に起因して頻発する渇水、水不足現象についてその特性を明らかにし、その対策として貯水池の最適操作と、地下水を効率的に活用するための表流水との連結利用について提案したものである。

2.1 長期的な水需要の増加傾向

要 約

人間の生活には水が必ず関与するので、財貨の生産量増加は水消費量の拡大を意味する。世界の人口増加とともに農業生産が増加し、飲料水の消費が拡大し、開発途上国が工業立国を指向する現代の世界では、水の使用量が増加し、水資源の開発が進められる。一般的に水使用量と関係する経済活動の指標を国民総生産(GNP)で表わすとすれば、水使用量とGNPとは相関関係があり、平均的にはGNP 10⁹

米ドルにつき年間 1 ㎩程度の水が利用されている。わが国を含めて水資源問題が重要な政治課題となったのは、世界的な規模で経済成長が始まった 1950 年代からである。わが国における長期的な水需給についていえば、各種用途の水は昭和 30 年代の初期から急激に水需要が増えたにも拘らず水資源開発が遅れこれを充足できなかったため、代替として地下水の開発が進められ、地下水の揚水利用量は昭和 30 年代初期の 60 億 ㎡から 40 年代には 130 億 ㎡まで増加し、その結果各地に地盤沈下が発生し、地下水の利用が一部規制されるに至った。しかし河川水の利用率が上昇し、渇水の危険度が高まった現在では、地下水についても、地盤沈下を惹起しない範囲で地下水の活用をはかる必要がある。

2.2 利用率の上昇が及ぼす影響

要 約

わが国の水資源量は年平均で 449.3 ㎩、水利用量は昭和 50 年現在で 86.7 ㎩、利用率は 19.4% である。高度に水利用が行われている利根川、淀川ではいずれも 40 % を越えている。世界的にも、河川水の見掛けの利用率が 20 % を越える国があり、今後長期的にみて水需要の増加が避けられないと考えれば、利用率が上昇し、その結果水資源の開発利用に大きく影響を与えることが予想される。

その 1 つは開発効率の低下によるコストの上昇である。水資源開発の投資効率は、開発効率（貯水容量 1 単位で開発し得る新規利水量）と貯水効率（ダム の 単位体積で貯留し得る貯水容量）及びダム の 単位体積当りの建設費の逆数の積で表わせるが、開発効率は河川の流況によって較差があるほか、利用率の上昇に伴って効率が低下する。わが国の河川の開発効率は海外の貯水池のそれに比べ必ずしも劣ってはいない。しかしわが国の河川の水資源開発の投資効率は、ダム の 単位体積当りの工事費は国際的に変らないが、貯水効率が海外の貯水池に較べ著しく低い水準にあり、開発効率は河川の利用率の上昇とともに低下するため、全体としては効率が悪い。

利用率の上昇が水資源の開発利用上に及ぼす影響の第 2 は、渇水時の実際の安全度が水利用率の上昇とともに低下することであって、この考察と対策としての貯水池の合理的運用及び地下水の活用 の 提案が本論文の主たる目的である。

第 2 章 参 考 文 献

- 1) FAO (国連農業機構) 報告書, 国連水会議, 1976.7
- 2) WHO (世界保健機構) 報告書, 国連水会議, 1976.7
- 3) 国連経済社会局, Water Demand Forecasting, Nature and Dimensions of the Problem at National Global Scale, November 1972.
- 4) Dr Rafael Helas et al Inventario, Estudio y Planificación de Recursos Hidráulicos en España, November 1972.
- 5) 科学技術庁資源調査会, 水資源の変動様相に関する調査報告, 資源調査会報告第 34 号, 昭和 40 年 10 月 19 日
- 6) 国土庁, 長期水需給計画, 昭和 53 年 8 月

第3章 渇水と降雨特性

3.1 干ばつの特性

前章では、河川の利用率が上昇するにつれて水資源の開発・利用上、不利となることを示した。このことは、渇水が単に異常な流況の悪化という状況だけで説明される現象ではなく、流況と水利用水準の二つの要素が関係して発生する現象であることを示している。すなわち、河川の利用水量が少ないときは、流況が悪化しても渇水による水不足の発生する確率は小さいが、河川の利用水量が増大すると、流況が少し悪化するだけで渇水による水不足が発生する確率は高くなる。ここでは、渇水による水不足を単に渇水と呼ぶことにする。

渇水に類似した用語として、気象関係では、“干ばつ”という用語があり、1.1でも使っているが、干ばつとは、“干害の要因となるような大規模な水不足をきたす異常天候をいう”と定義されている。¹⁾

昔の干ばつは、農作物の被害に対してのみ用いられたものである。

干ばつの歴史的な発生数の概要については、第1章で述べたが、近年における干ばつの実態と干ばつの予報に関しては、気象庁の季節予報指針（下巻、第15章）に“西日本の干ばつとその予報”としてとりまとめられているので、本節ではそれを簡単に紹介することとする。

まず、干ばつの周期であるが、最近の典型的干ばつ年は、1929年（昭和4年）、1939年（昭和14年）、1947年（昭和22年）、1958年（昭和33年）、1967年（昭和42年）などで、概ね10年を周期として発生している。表-3.1.1は、最近の干ばつの記録をまとめたものであるが、これによれば、西日本では、昭和4年、14年、42年が近年の厳しい干ばつ年であり、東日本では、昭和4年、33年が厳しい干ばつ年である。

日本全国の年降水量の経年変化を調べた結果を図-3.1.1に示す。この図によれば34年ないし36年の周期が目だっており、これはブルックナー周期と考えられている。これによると、1925～1945年は、渇水期、1945～1965年は豊水期である。

干ばつの発生する季節は、夏（7～9月）に多い（図-3.1.2）。

干ばつと降水量の関係についてみれば、干ばつ年の福岡の旬別降水量を調べた結果から、降水量が平年の60%以下の旬が3旬以上継続しており、一定期間内の降水量が平年値に比べて少ない場合干ばつになることを示している。¹⁾

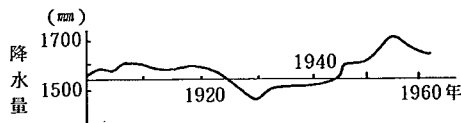


図-3.1.1 日本全国の年降水量の経年変化
（5年移動平均、朝倉、1968）

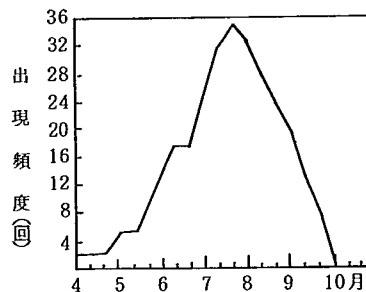


図-3.1.2 干ばつの出現頻度（横尾ら、1952）

表-3.1.1 最近の干ばつの記録(1893~1967)

西歴	年 代	期 間 (月)	程 度	主 要 干 害 地 域						5月降水 平 年 比 (%)			6月降水 平 年 比 (%)			7月降水 平 年 比 (%)			8月降水 平 年 比 (%)			9月降水 平 年 比 (%)		
				九	四	中	近	東	中	東	北	西	東	北	西	東	北	西	東	北	西	東	北	西
				州	国	国	畿	海	部	日本	陸	日本	日本	陸	日本	日本	陸	日本	日本	陸	日本	陸	日本	
1893	明治 26	6~8	大	○	○	○	○	○		-	-	-	77	39	70	70	30	5	-	-	-	55	57	85
1894	27	7~9	大	○	○	○	○			60	-	44	63	-	37	-	50	43	-	-	39	-	63	-
1897	30	7~8		○	○					-	-	-	63	47	57	-	-	91	-	-	79	-	-	81
1903	36	7~9		○	○	○	○			-	-	-	-	-	-	-	-	49	83	12	-	-	67	
1904	37	7~9	大	○	○	○	○	○		-	-	-	-	-	-	-	-	48	47	26	46	-	-	53
1913	大正 2	6~8	大	○	○	○	○			-	-	-	-	68	73	-	63	27	-	-	101	-	42	76
1917	6	6~7		○	○	○				52	60	46	-	-	94	20	86	27	57	73	-	-	-	-
1922	11	6~9	大	○	○	○	○			84	87	36	70	75	62	67	-	-	-	74	9	56	94	81
1923	12	5~8		○			○		○	-	-	-	-	-	-	-	-	20	4	69	-	-	-	
1924	13	6~8	大	○	○	○	○	○	○	-	-	-	65	73	44	11	64	34	89	82	96	-	-	-
1926	15	7~8		○		○	○		○	-	-	-	61	36	58	45	88	-	82	-	53	-	-	-
1927	昭和 2	5~8					○		○	-	81	46	67	20	56	82	-	90	92	-	-	-	-	-
1929	4	5~9	大	○	○	○	○	○	○	-	86	86	63	28	42	28	38	-	39	-	40	-	-	-
1933	8	6~9			○	○	○			48	94	78	38	46	74	46	-	40	38	-	-	25	65	31
1934	9	6~8	大	○	○	○	○			78	61	59	-	89	64	-	-	63	83	-	32	-	-	-
1939	14	5~9	大	○	○	○	○		○	78	59	41	-	54	75	77	42	21	-	39	44	90	-	58
1944	19	6~8		○	○					-	-	-	55	30	41	-	-	41	30	-	88	-	-	-
1947	22	7~8			○	○	○		○	-	-	-	-	-	-	-	-	50	-	44	42	-	-	46
1951	26	7~8	大	○	○	○	○		○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	97	32	21	86	47	64
1958	33	3~7	大	○	○	○	○		○	56	65	69	44	54	49	-	-	44	-	-	-	-	-	-
1960	35	7~8		○		○			○	-	-	-	48	94	96	51	81	64	99	107	106	-	-	-
1967	42	8~9		○	○	○				50	44	63	92	77	43	-	69	-	57	-	23	-	61	26

資料, 気象庁「季節予報指針」下巻, 第15章⁽¹⁾

干ばつと土壌水分の関係では, 香川県の干ばつについて, 7月~9月の土壌水分不足が135mm以上の年に干害が多くなっていることを示している。

以上のように干ばつの気象因子としては, 降水量の他に蒸発量が関係しているが, 蒸発量は気温と関係があるので, 干ばつ指数として $\sqrt{R+400}T$ を用いることがある。ここに, R, Tは1カ月の総雨量, 月平均気温である。干ばつと降水量の関係は, 多くの調査例があるが, 夏の一般の干害は, おおむね年の70%以下の降水量で起こるとしている。¹⁾

干ばつと天気図の関係については,

(1) からつゆ型……梅雨前線が日本の南で活動し, 一挙に北上して内地に雨を降らせない型(昭和14年)。

前線が日本の北方で活動する場合(昭和9年)。

(2) 秋の好天型……台風の日本への接近が妨げられた年(昭和42年)

干ばつは, 上層高気圧と関係が深い。干ばつの予報は, 過去の実験から得た予報則, 総観的方法, 相関

法等の研究が行なわれている。

以上のように、渇水あるいは干ばつと気象は、密接な関係があるが、最初に述べたように、渇水は流況と水利利用の相互関係によって発生するものであるから、降雨量が少ないからといって渇水になるとは限らず、また降雨量が多いから渇水にならないとも言えない。渇水が発生するかどうかは、河川流況の時系列と水利利用量の時系列の両者の関係で決まるからである。

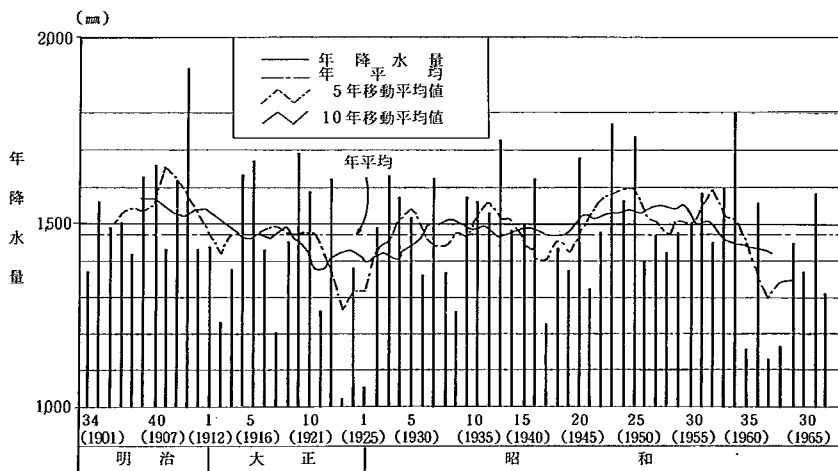
渇水と河川利用率の関係については、第4章で分析することにして、本章では、渇水の降雨特性について分析し、いかなる水文量が最も渇水を良く表現しているか検討を加えることとする。

3.2 渇水の降雨特性

本節では、降雨量の経年的な変動特性、及び降雨の季節変動特性について分析する。また、渇水と関係が深い夏期降雨特性のうち、日本の主要地点において、夏期（5月～9月）総降雨量、降雨日数、無降雨継続日数の統計値を調べる。

a. 年雨量の経年変動

図－3.2.1は、利根川の流況を支配する八斗島から上流域の年平均降水量の経年変化を示しており、そ



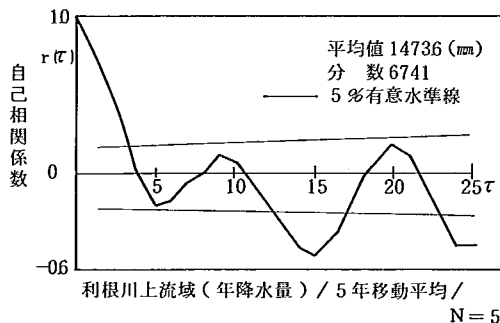
注：（ ）内は西暦を示す

図－3.2.1 利根川上流域の年降水量（八斗島上流域，藤吉，1971）

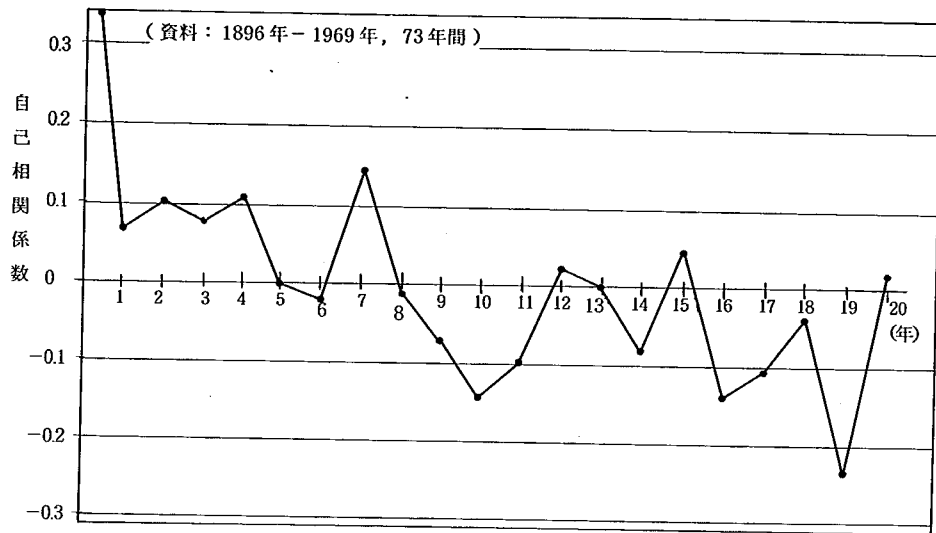
の5年移動平均値には、10年ないし、15年の周期的な変動が認められる²⁾。これによると、1924～26年頃、1960～63年頃が厳しい渇水年になっている。

また、図－3.2.2は、同流域の5年移動平均のコレログラムで、10年または20年の周期性が卓越している。

次に、図－3.2.3は琵琶湖流域の年平均雨量のコレログラム及びピリオドグラムである³⁾。

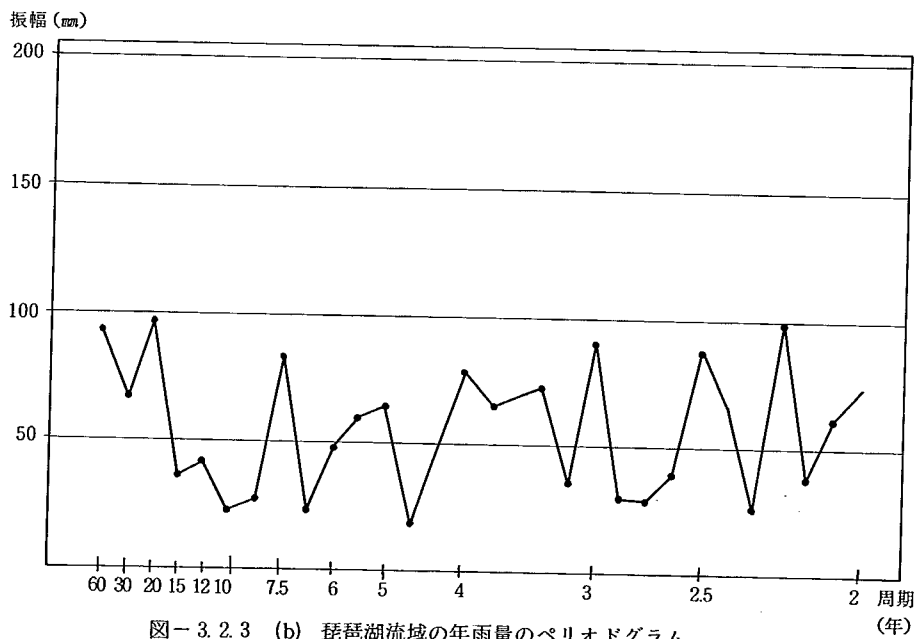


図－3.2.2 年降水量のコレログラム（藤吉，1971）



図－3.2.3 (a) 琵琶湖流域の年雨量コレログラム (歴 年)

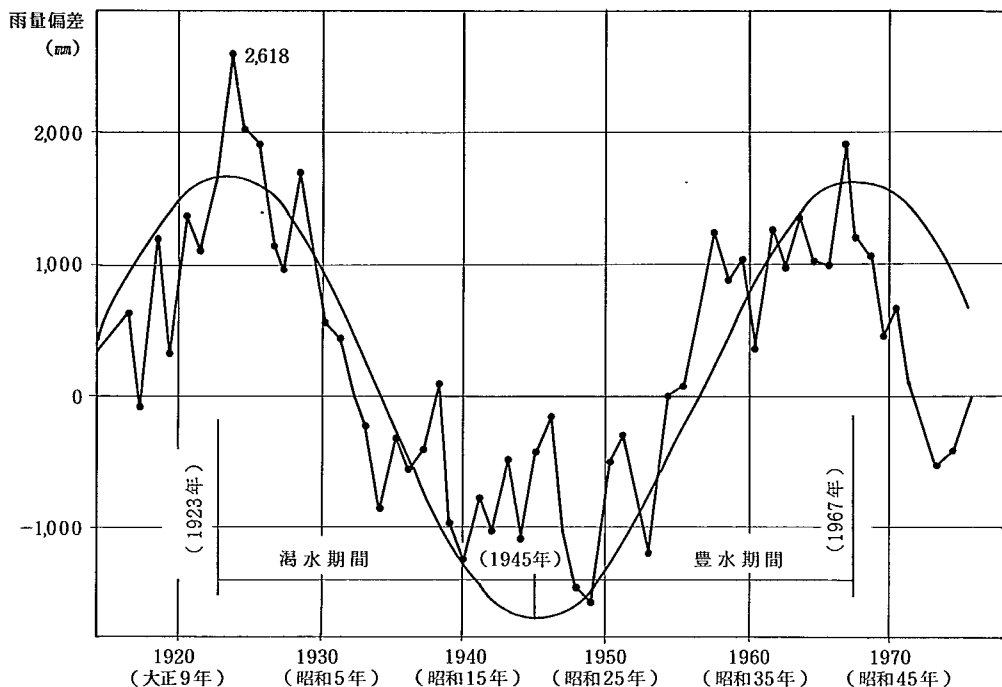
(資料：1896年－1969年，73年間)



図－3.2.3 (b) 琵琶湖流域の年雨量のペリオドグラム

これによると、あまり卓越した周期は見られないが、約2年，7.5年，20年の周期がやや卓越している。

図3.2.4は、吉野川早明浦上流域の年平均雨量の偏差の累加図である。累加曲線が右上りのときは、年雨量が平均値よりも多い年を示し、右下りのときは、平均値よりも少ないことを示している。これから、1923年から1945年までは渇水期，1945年から1967年まで豊水期であり、約44年の周期が卓越していることがわかる。



図－3.2.4 年雨量偏差累加図（吉野川早明浦ダム上流域，1915年～1975年）

以上のことから、年雨量にはかなり長期的な経年変動があり、利水計画においては、資料期間の選定が重要であることがわかる。このことについては、次章で検討する。

b. 夏期降雨量の変動要因

わが国の降雨の季節変動特性は明瞭にみられ、西日本、東日本で多量の降雨をもたらすのは梅雨と台風である。また、北日本では降雪が多量の降水をもたらす。流況の季節変動特性は、1.2節で述べたようにマクロ的には降雨の季節変動に基づくから、もし、梅雨・台風に伴う降雨がないときには渇水が発生する危険性が高い。

図－3.2.5は、利根川水系神流川万場地点における夏期（6月～9月）総雨量と梅雨期雨量及び台風性雨量の関係を示したものである。

20年間の夏期総雨量の平均値は約710mmであり、そのうち、梅雨期雨量は約270mmで全体の38%、台風に伴う雨量は約255mmで全体の36%である。梅雨期雨量と台風に伴う雨量を合わせると約520mmとなり夏季雨量の74%になる。また、昭和30年、35年、48年の渇水年は、梅雨期雨量、台風雨量が共に少ない。昭和33年は、梅雨期雨量が少ない。（ ）内は、梅雨明けの7月日付を示しているが、昭和30年、33年、35年、44年、48年等、渇水年においては、梅雨明けが早く、からつゆであったと考えられる。

このように、夏期降雨量が梅雨期雨量と台風に伴う雨量の影響を受け、また、梅雨明けの時期と渇水との関係は非常に重要な要因である。すなわち、季節の変り目が毎年異なり、それによって降雨量も影響を受けることを示している。

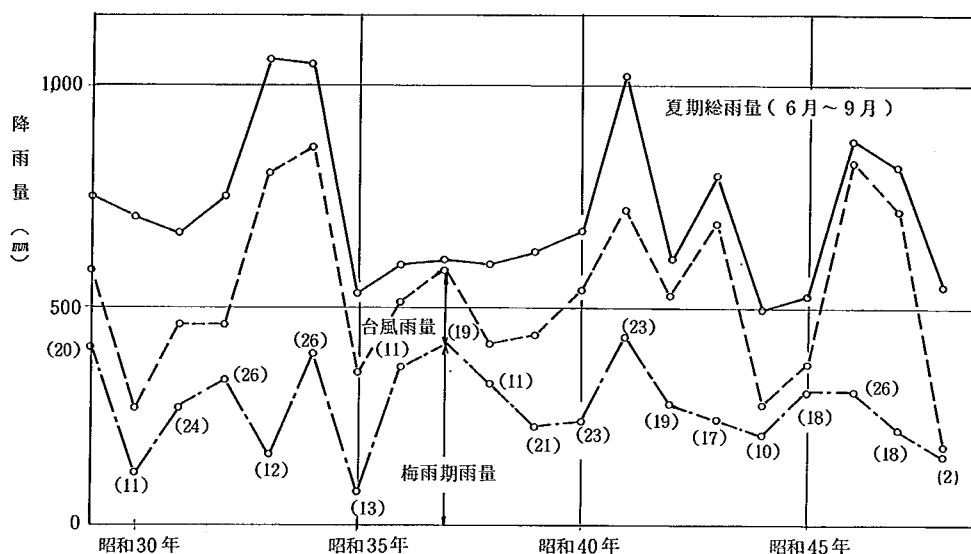


図-3.2.5 夏期要因別雨量（利根川水系神流川万場地点）
()内は、天気図から判断した梅雨明けの7月日付

c. 夏期総雨量の最小値

ここでは、渇水と関係が深い夏期（5～9月）の降雨特性のうち、総雨量、降雨日数、無降雨継続日数（最大値）の統計値を調べる。

調査地点は、全国の主な気象官署48地点、資料期間は各観測所の観測開始年から1976年に至る約80年から100年の期間とし、日雨量記録のうち5月から9月までの夏期降雨資料を調査した。

各用語の定義は、次のとおりとする。

夏期総雨量は、5月から9月までの日雨量の合計値。

降雨日数は、日雨量が2mm以上の総日数。

無降雨継続日数は、5月から9月までの間で降雨量が2mm未満の日の連続日数の最大値。

確率解析は、総雨量及び無降雨継続日数は3乗根変換して正規化を行ない、降雨日数はそのまま、正規確率紙上にThomas法によりプロットし、確率紙上の回帰直線を引いて、再現年が2年、5年、10年、20年、50年、100年に相当する値を求めた。

結果を表-3.2.1に示す。

図-3.2.6(a)～(d)は、夏期総雨量の記録最小値、再現年が10年、20年、100年の最小総雨量を示したものである。

記録最小値は、

北海道・東北地方	約230～400mm
関東・甲信越地方	約300～400"
東海・近畿・北陸地方	約300～500"
瀬戸内地方	約200～300"
九州・四国南部地方	約400～700"

表-3.2.1 夏期の降雨特性解析

		5 ～ 9 月 雨 量 (mm)								降 雨 日 数 (日)								無降雨継続日数 (日)								開始日 月 日	資 料 年 (欠測を含む)	資 料 年 数
No	地名	記 録 最小値	生起年	R. P. (年)						記 録 最小値	R. P. (年)						記 録 最大値	R. P. (年)										
				2	5	10	20	50	100		2	5	10	20	50	100		2	5	10	20	50	100					
1	網 走	231	1906	425	342	303	274	243	224	25	39	34	31	29	26	25	38	16	21	23	26	28	30	7. 19	1890 ～ 1976	87		
2	札 幌	228	1906	456	366	324	292	259	238	22	38	33	31	29	27	25	37	17	22	24	27	29	31	7. 18	1879 ～ "	97		
3	青 森	303	1900	533	436	391	356	319	296	30	41	36	34	32	30	28	40	17	22	25	27	31	33	7. 29	1882 ～ "	95		
4	秋 田	446	1970	798	642	569	513	455	418	29	50	44	41	38	35	33	43	15	21	24	27	30	33	6. 29	1883 ～ "	94		
5	宮 古	314	1963	702	552	484	431	377	343	30	43	37	34	31	28	27	55	17	22	25	27	30	32	6. 20	1883 ～ "	94		
6	山 形	254	1928	592	476	421	380	337	310	30	44	39	35	33	30	28	40	16	20	23	25	27	29	7. 11	1890 ～ "	87		
7	仙 台	398	1975	734	552	470	409	347	309	33	47	40	37	35	32	30	23	15	18	20	21	23	24	7. 31	1927 ～ "	50		
8	福 島	275	1898	673	537	473	425	375	343	32	46	39	36	33	30	28	29	15	19	22	24	26	28	7. 3	1889 ～ "	88		
9	宇都宮	621	1970	971	807	729	669	605	565	37	56	49	46	43	40	38	26	11	14	16	17	19	20	7. 3	1891 ～ "	86		
10	水 戸	425	1933	761	617	550	498	444	410	32	48	41	38	36	33	31	31	15	20	23	25	28	31	7. 22	1897 ～ "	80		
11	銚 子	292	1933	729	562	486	429	370	334	25	42	35	32	29	26	24	45	20	28	32	36	41	44	7. 9	1887 ～ "	90		
12	前 橋	408	1944	845	708	643	592	538	504	35	54	47	44	41	37	35	26	13	17	19	21	24	26	8. 4	1897 ～ "	80		
13	熊 谷	358	1933	805	656	587	533	476	441	34	48	42	39	37	34	32	26	14	19	21	23	26	28	4. 20	1897 ～ "	80		
14	東 京	224	1933	816	641	560	499	436	397	25	45	38	34	31	27	25	38	17	22	25	28	31	33	8. 27	1876 ～ "	101		
15	横 浜	296	1933	894	706	618	552	484	441	26	45	37	33	30	27	24	41	17	23	26	29	33	35	7. 10	1897 ～ "	79		
16	新 潟	255	1928	670	530	465	415	364	332	27	45	39	36	33	30	28	32	17	22	25	28	31	33	7. 19	1883 ～ "	94		
17	長 野	345	1915	568	470	424	388	350	326	29	44	38	36	33	31	29	32	15	20	23	25	29	31	7. 20	1890 ～ "	87		
18	甲 府	343	1946	693	534	462	407	351	317	28	43	36	33	30	27	25	36	16	20	23	25	28	30	8. 29	1895 ～ "	81		
19	伏 木	430	1915	829	653	572	511	447	408	32	49	43	40	37	35	33	33	16	21	23	26	29	31	5. 14	1886 ～ "	91		
20	金 沢	464	1939	922	733	645	578	508	465	33	50	43	40	37	34	32	47	16	22	25	28	32	35	7. 2	1882 ～ "	95		
21	福 井	478	1939	890	722	643	582	519	479	27	50	43	40	37	34	32	30	16	21	24	26	29	32	7. 26	1897 ～ "	78		
22	岐 阜	667	1922	1161	930	822	739	653	600	35	52	45	42	39	36	34	33	14	18	21	23	25	27	7. 4	1883 ～ "	94		
23	名古屋	518	1933	933	747	661	595	526	483	30	47	40	37	34	31	28	42	16	21	25	28	31	34	6. 23	1892 ～ "	85		
24	浜 松	594	1940	1093	845	732	647	559	505	30	48	40	36	33	29	27	35	17	23	26	29	33	36	7. 18	1883 ～ "	94		
25	津	474	1939	1054	843	745	669	591	543	30	50	43	39	36	32	30	35	16	21	24	27	31	33	7. 18	1890 ～ "	87		
26	彦 根	403	1922	869	672	582	514	444	402	23	47	40	37	33	30	28	39	16	21	24	27	30	32	7. 25	1894 ～ "	83		

(表-3.2.1のつづき)

		5 ～ 9 月 雨 量 (mm)								降 雨 日 数 (日)								無降雨継続日数 (日)								開始日 月 日	資 料 年 (欠測年含む)	資料 年 数
No.	地点名	記 録 最小値	生起年	R. P. (年)						記 録 最小値	R. P. (年)						記 録 最大値	R. P. (年)										
				2	5	10	20	50	100		2	5	10	20	50	100		2	5	10	20	50	100					
27	京 都	458	1883	921	724	633	563	492	448	26	48	42	39	36	33	31	34	15	20	22	25	28	30	7. 17	1881 ～ 1976	95		
28	奈 良	437	1964	801	637	562	504	444	406	25	47	40	36	33	30	27	42	16	20	23	26	29	31	7. 18	1897 ～ "	78		
29	和歌山	332	1930	799	605	517	451	384	344	23	42	36	32	29	26	24	49	19	25	29	33	37	40	7. 1	1880 ～ "	96		
30	大 阪	312	1883	764	604	530	473	415	379	24	43	36	32	29	26	24	51	19	26	30	34	39	42	7. 2	1883 ～ "	94		
31	神 戸	404	1973	787	619	542	484	423	385	26	42	35	32	29	26	24	36	20	26	30	33	37	40	7. 27	1897 ～ "	80		
32	岡 山	196	1939	668	517	448	396	342	309	17	40	33	30	27	24	22	44	19	26	30	33	38	41	7. 13	1891 ～ "	85		
33	米 子	428	1973	913	722	633	566	496	453	28	47	41	37	34	31	29	40	19	25	29	32	35	38	7. 20	1940 ～ "	37		
34	松 江	297	1973	978	777	683	612	538	493	28	46	40	36	33	30	28	40	18	25	30	34	38	42	7. 20	1941 ～ "	36		
35	広 島	315	1939	923	734	647	580	510	467	25	42	36	33	30	27	25	44	18	24	28	31	35	38	7. 8	1879 ～ "	98		
36	下 関	357	1939	986	790	699	629	556	511	24	44	38	34	32	29	27	36	18	23	27	30	33	36	7. 23	1883 ～ "	94		
37	徳 島	408	1939	1007	742	624	537	449	396	25	47	40	36	33	29	27	41	17	23	26	29	32	34	7. 5	1892 ～ "	85		
38	多度津	237	1939	662	519	453	402	351	319	20	41	35	31	29	26	24	44	20	27	32	36	41	44	7. 7	1893 ～ "	84		
39	高 知	710	1930	1637	1318	1169	1054	935	861	33	58	51	48	45	42	39	25	13	16	18	20	22	24	6. 25	1883 ～ "	94		
40	松 山	272	1939	779	612	536	473	417	380	24	42	35	31	29	25	23	41	19	25	28	32	35	38	7. 18	1890 ～ "	87		
41	福 岡	365	1939	969	764	670	598	523	477	26	45	39	36	33	30	28	36	17	22	24	27	30	32	8. 1	1890 ～ "	87		
42	佐 賀	454	1939	1147	906	795	710	622	568	29	47	40	36	33	30	27	59	17	22	25	28	31	34	8. 15	1891 ～ "	86		
43	長 崎	402	1894	1196	932	811	719	624	566	26	48	42	38	36	33	31	49	17	22	25	27	30	32	8. 25	1883 ～ "	94		
44	熊 本	374	1894	1164	896	774	682	587	529	30	49	42	38	35	32	30	30	16	20	23	25	28	30	7. 2	1890 ～ "	87		
45	大 分	514	1917	1023	803	702	625	546	497	26	47	40	37	34	31	29	38	16	21	24	26	30	32	7. 25	1887 ～ "	90		
46	宮 崎	725	1894	1546	1264	1131	1028	921	854	36	59	52	49	46	43	41	41	14	19	21	24	27	29	7. 4	1883 ～ "	94		
47	鹿児島	691	1894	1370	1066	927	822	713	646	33	54	47	44	41	38	36	30	15	19	21	23	25	27	7. 8	1883 ～ "	94		
48	那 覇	516	1904	1154	917	807	723	636	582	30	51	46	43	40	38	36	31	17	21	24	26	29	31	6. 16	1891 ～ "	76		
	平 均 値	401		888	703	618	553	485	444	28	47	40	37	34	31	29	38	16	22	25	27	30	33					
	平 年 比 (%)	45		100	79	70	62	55	50	60	100	85	79	72	66	62	238	100	138	156	169	188	206					

図-3.2.6 夏期総雨量（5月～9月，最小値）の全国分布

資料期間（観測開始年～1976年）

(a) 記録最小値（単位：mm）

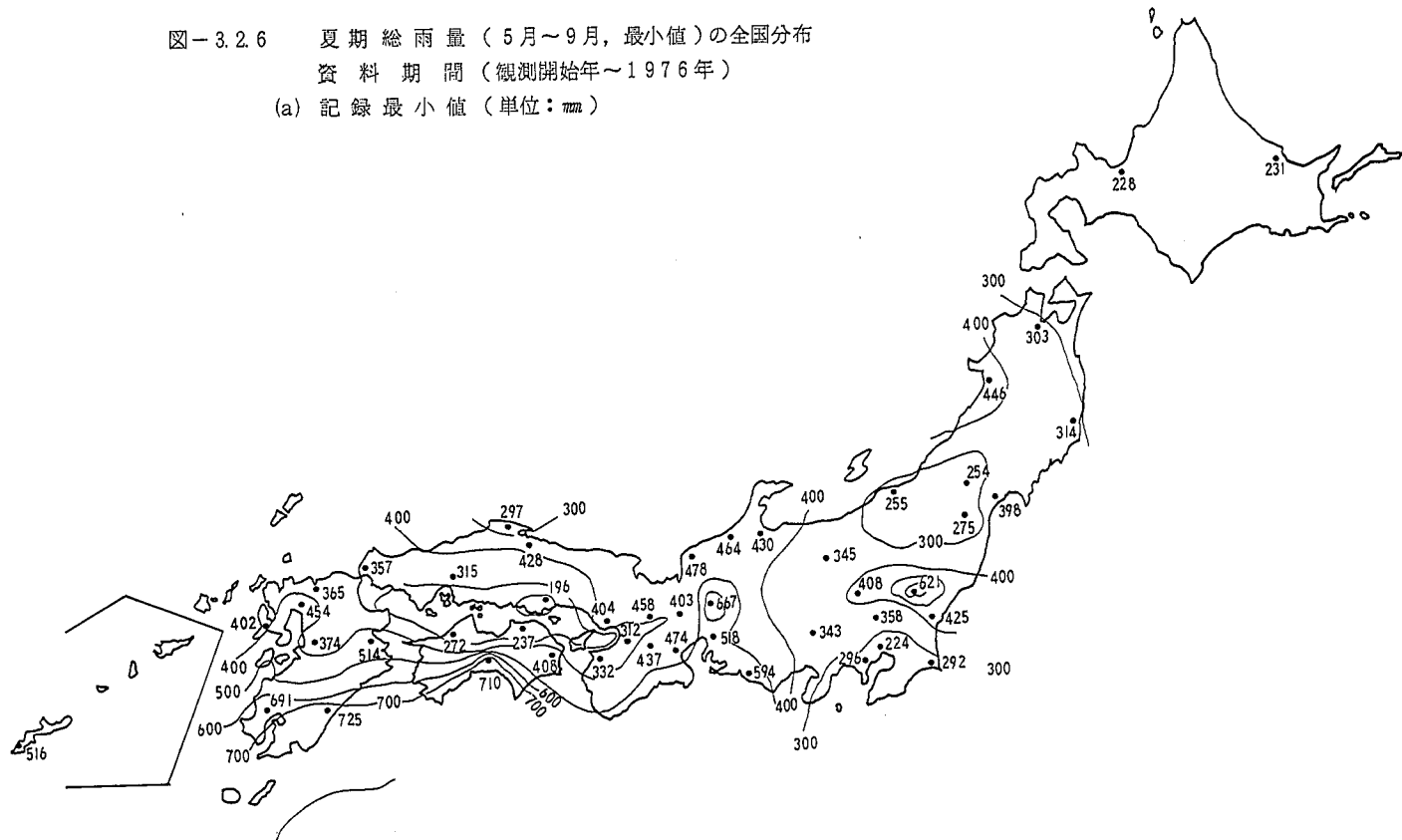


図-3.2.6 夏期総雨量（5月～9月，最小値）の全国分布

資料期間（観測開始年～1976年）

(b) 最小降雨量（再現年＝10年）

（単位：mm）

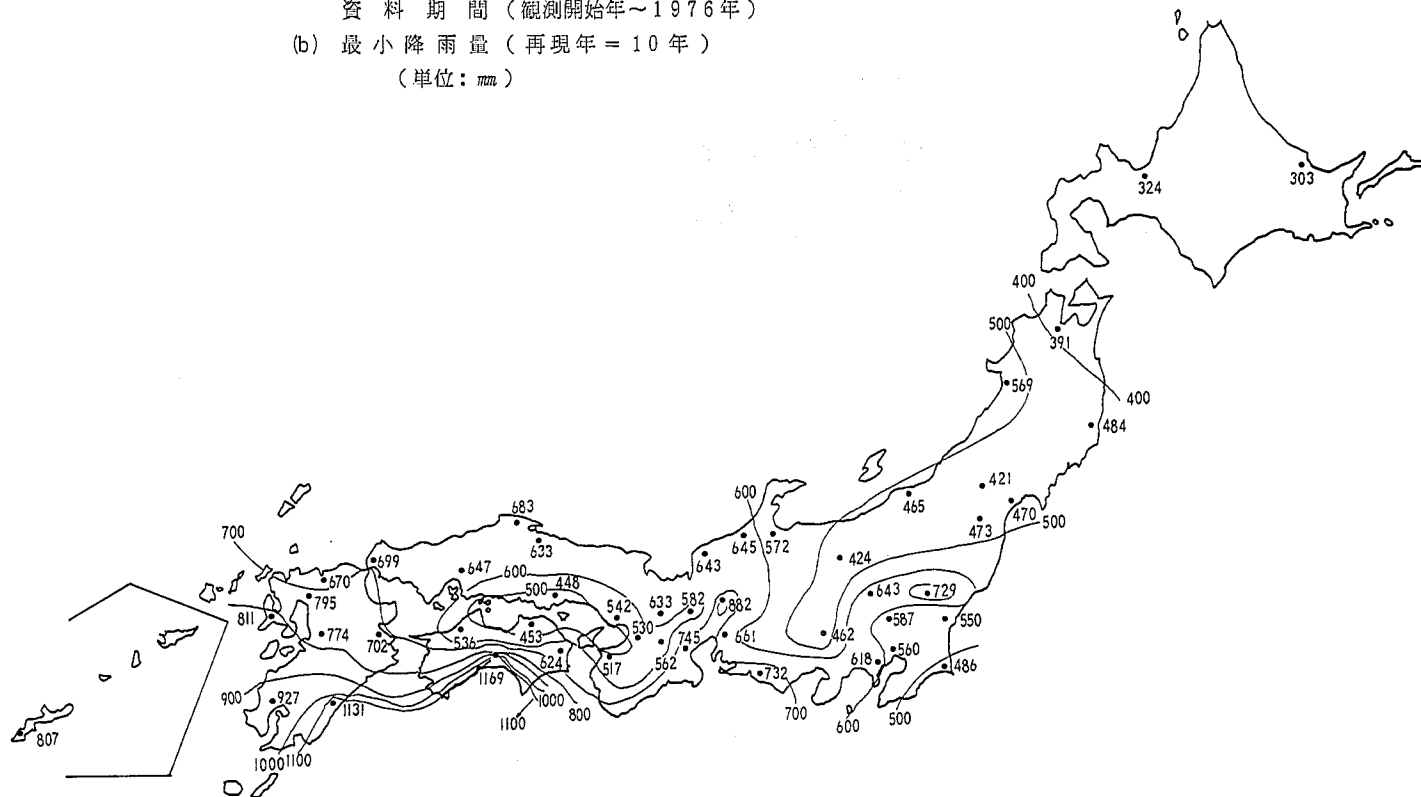


図-3.2.6 夏期総雨量（5月～9月，最小値）の全国分布
 資料期間（観測開始年～1976年）
 (c) 最小降雨量（再現年＝20年）
 （単位：mm）

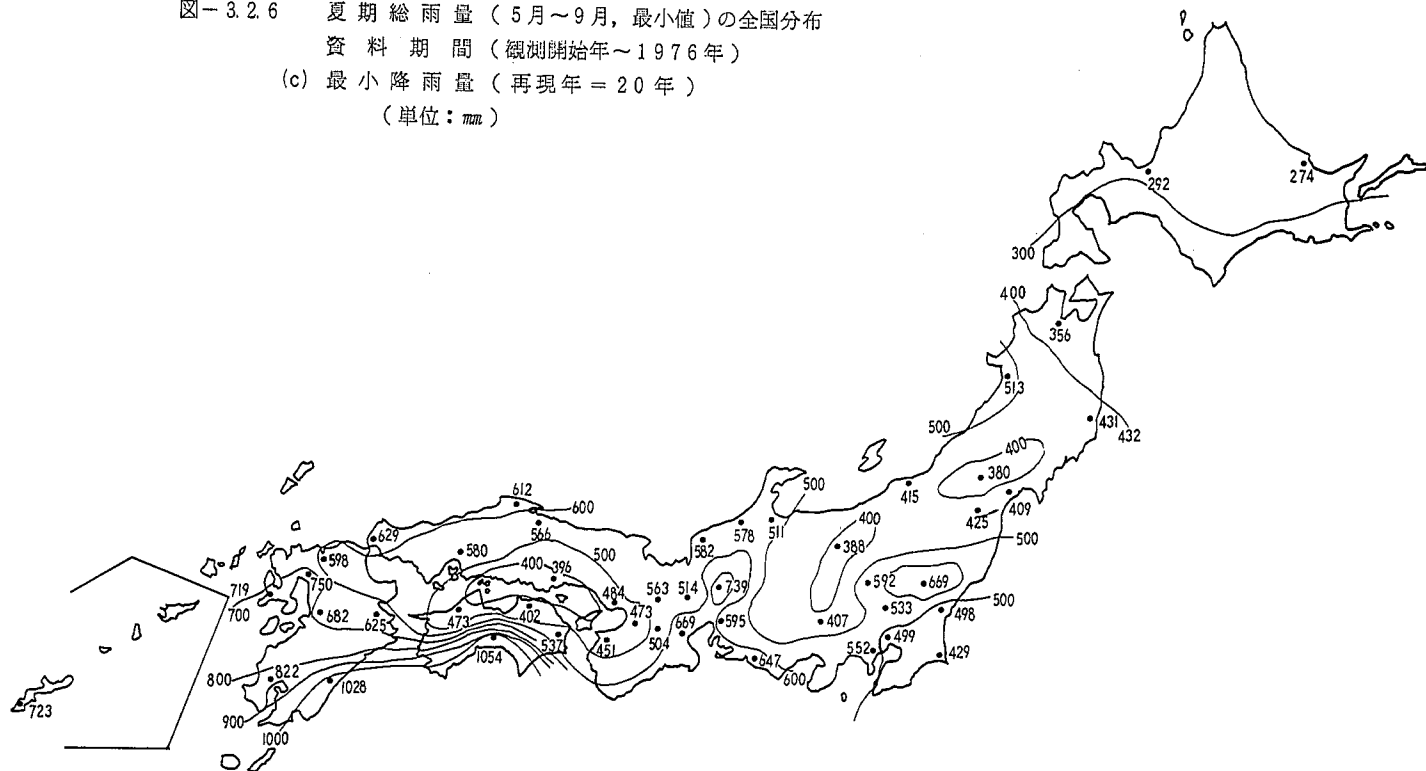
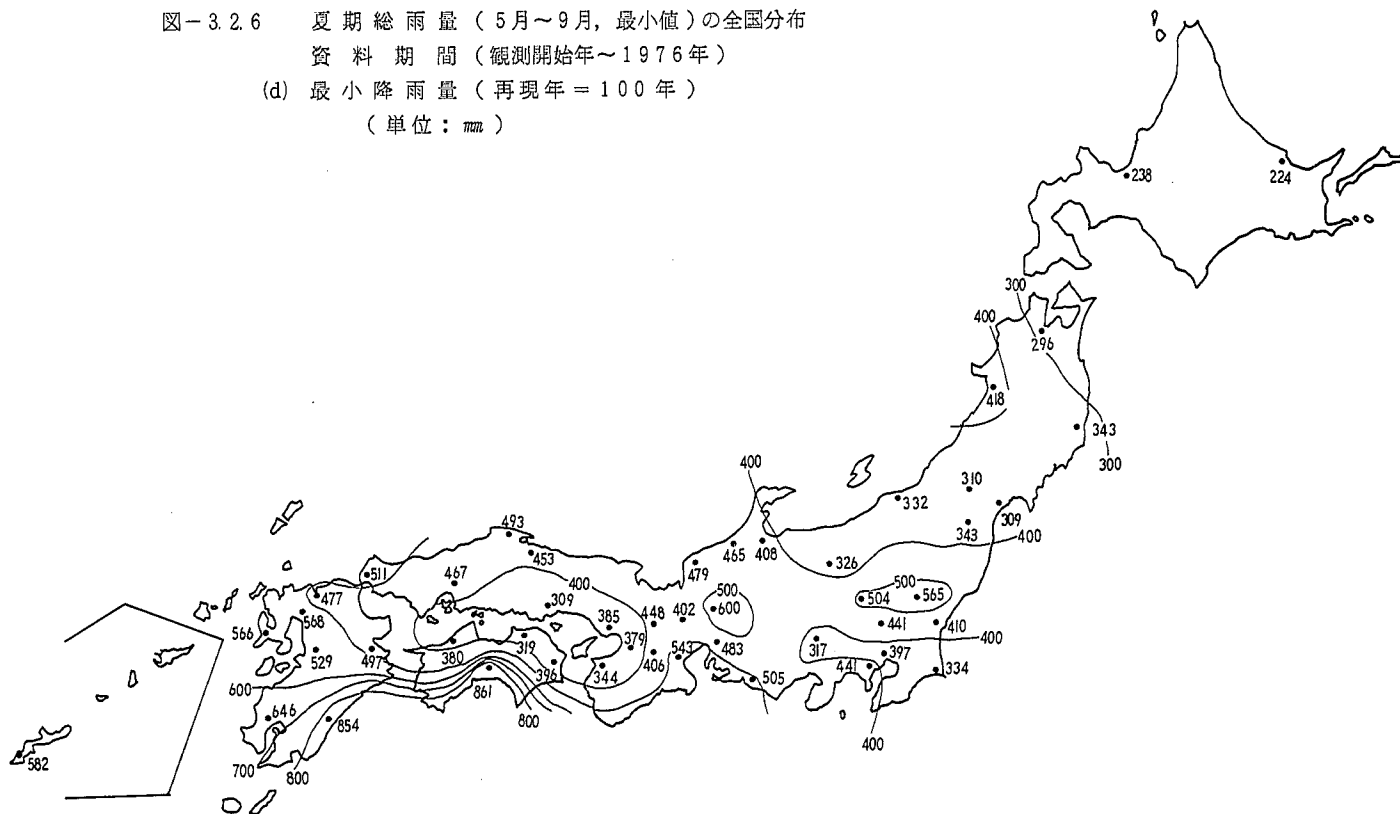


図-3.2.6 夏期総雨量（5月～9月，最小値）の全国分布

資料期間（観測開始年～1976年）

(d) 最小降雨量（再現年＝100年）

（単位：mm）



となる。我国の年間降水量分布⁴⁾と比べると、裏日本の積雪地域を除いて、地域的傾向は良く似ている。

48地点の平均値は、約 400 mm であり、平年雨量（再現年が 2 年）の平均値約 890 mm の 45% に過ぎない。各地点の夏期総雨量の記録最小値と平年雨量の比率のヒストグラムを図- 3. 2. 7 に示す。

次に、再現年が 10 年の場合、夏期総雨量の最小値は、

北海道・東北地方	約 300 ～ 500 mm
関東・甲信越地方	約 420 ～ 600 "
東海・近畿・北陸地方	約 500 ～ 700 "
瀬戸内地方	約 450 ～ 650 "
九州・四国南部地方	約 700 ～ 1,000 "

となる。

再現年が 10 年の総雨量の平均値は、約 620 mm であり、平年雨量の平均値の約 70 % に相当する。

再現年 = 20 年の場合、夏期総雨量の最小値は、

北海道・東北地方	約 270 ～ 400 mm
関東・甲信越地方	約 400 ～ 500 "
東海・近畿・北陸地方	約 500 ～ 650 "
瀬戸内地方	約 400 ～ 600 "
九州・四国南部地方	約 600 ～ 1,000 "

となる。

再現年が 20 年の場合の総雨量最小値の全国平均値は、約 550 mm であり、平年雨量の約 62 % になる。

再現年が 100 年の場合、夏期総雨量の最小値は、

北海道・東北地方	約 220 ～ 400 mm
関東・甲信越地方	約 300 ～ 500 "
東海・近畿・北陸地方	約 380 ～ 500 "
瀬戸内地方	約 300 ～ 500 "
九州・四国南部地方	約 500 ～ 850 "

となる。

再現年が 100 年の場合の総雨量最小値の全国平均値は、約 440 mm であり、平年雨量の約 50 % になる。

以上のことから、夏期総雨量の最小値は、全国平均値で約 400 mm（平年雨量の 45%）、再現年が 10 年の場合で約 620 mm（同 70%）、再現年が 20 年の場合で約 550 mm（同 62%）、再現年が 100 年の場合で約 440 mm（同 50%）であることが認められた。

したがって、夏期降水量が平年の 70 % 以下となるのは 10 年に 1 回、60 % 以下となるのは 20 年に 1 回、50 % 以下となるのは 100 年に 1 回起る現象といえる。前節で述べたように干ばつの被害が平年雨量の 70 % になると発生するというのは 10 年に 1 度の干ばつに相当している。

地方別では、北海道・東北・瀬戸内地方が全国平均値よりも少なく、九州・四国南部地方が全国平均値よりも多い。

一方、年損失雨量は、全国平均で約 500 mm、九州・瀬戸内地方で 600 mm、北海道は 400 mm であるから⁵⁾、

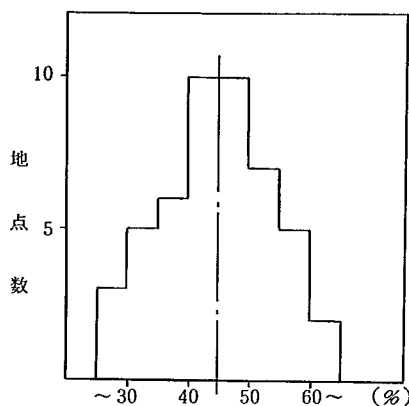


図- 3. 2. 7 夏期総雨量の最小値と平年雨量（再現年 = 2 年）の比率

全国平均で夏期の損失雨量を年損失雨量の1/2すなわち250mmと仮定すると、夏期有効雨量(=総雨量-250)の全国平均値は、

記録最小値 約150mm(1mm/日)

再現年=10年 約370“(2.4”)

” 20年 約300“(2”)

” 100年 約190“(1.2”)

となる。これは、100km²当りの流出量に換算するとそれぞれ、1.1 m³/s, 2.8 m³/s, 2.3 m³/s, 1.4 m³/sとなる。この値は、降雨観測所が平地にあること、洪水流出となる降雨を含んでいるため精度が劣るが、一応、渇水年の夏期の平均流況のオーダーを示していると考えられる。

d. 夏期の降雨日数(最小値)

図-3.2.8(a), (b)は、夏期の降雨日数(降雨量2mm以上の日の総日数)の記録最小値及び再現年が10年の場合の最小値を示す。

降雨日数の記録最小値は、全国的にみると17日ないし37日である。地方別では、北海道、瀬戸内が少なく(約20日)、関東北部、東海・九州南部、四国南部が多い(30日ないし37日)。全国平均値は、28日である。

再現年が10年の場合、最小降雨日数は、30日ないし49日となる。地方別では、北海道、瀬戸内約30日で少なく、関東北部、九州南部、四国南部が約45日ないし50日が多い。全国平均値は、37日である。

平年値(再現年が2年)の夏期降雨日数の全国平均値は47日であり、記録最小降雨日数は平年の約60%、再現年が10年の場合は平年の約80%になる。再現年が20年の場合は平年の約70%、再現年=100年の場合は平年の約60%に相当する。

e. 夏期の無降雨継続日数(最大値)

正務らは、夏期(7月~8月)及び冬期(1月~2月)の無降雨継続日数(日降水量が0.1mm未満の連続日数)を調べ、夏期の場合、再現年が20年で10日~30日、再現年が100年で20日~40日という結果を得ている⁶⁾。

ここでは、夏期(5月~9月)の日雨量が2mm未満の連続日数を無降雨継続日数とした。

図-3.2.9(a), (b)に、記録最大値、及び再現年が10年の場合の最大値の全国分布を示す。

記録最大値は、26日ないし59日である。地方別では、宮古、銚子、大阪、和歌山、九州西部が約50日と大きく、関東北部、信越、四国南部が約30日と小さい。全国平均値は、約38日である。

また、無降雨継続日数が最大のときの、開始日は、7月か8月である。

再現年が10年の最大値は、16日ないし32日であり、瀬戸内、山陰が大きい。全国平均値は、約25日である。

平年値(再現年=2年)の夏期無降雨継続日数(最大値)の全国平均値は、16日であり、記録最大値は平年の約2.4倍、再現年=10年のときには平年の約1.6倍となる。また、再現年=20年のときは平年の1.7倍、再現年=100年のときは平年の2倍になる。

以上をまとめると次のようになる。

- 1) 年降水量は、経年的な長期変動を示し、10年、20年、34年ないし36年等の周期がある。
- 2) 夏期降水量の変動は、梅雨期雨量、台風に伴う雨量の影響を強く受け、から梅雨あるいは台風が少

図-3.2.8 夏期降雨日数（5月～9月，最小値）の全国分布
 （資料期間＝観測開始年～1976年，日雨量2 mm以上の日数）
 (a) 記録最小値（単位：日）



図-3.2.8 夏期降雨日数（5月～9月，最小値）の全国分布
 （資料期間＝観測開始年～1976年，日雨量2mm以上の日数）
 (b) 最小降雨日数（再現年＝10年）
 （単位：日）

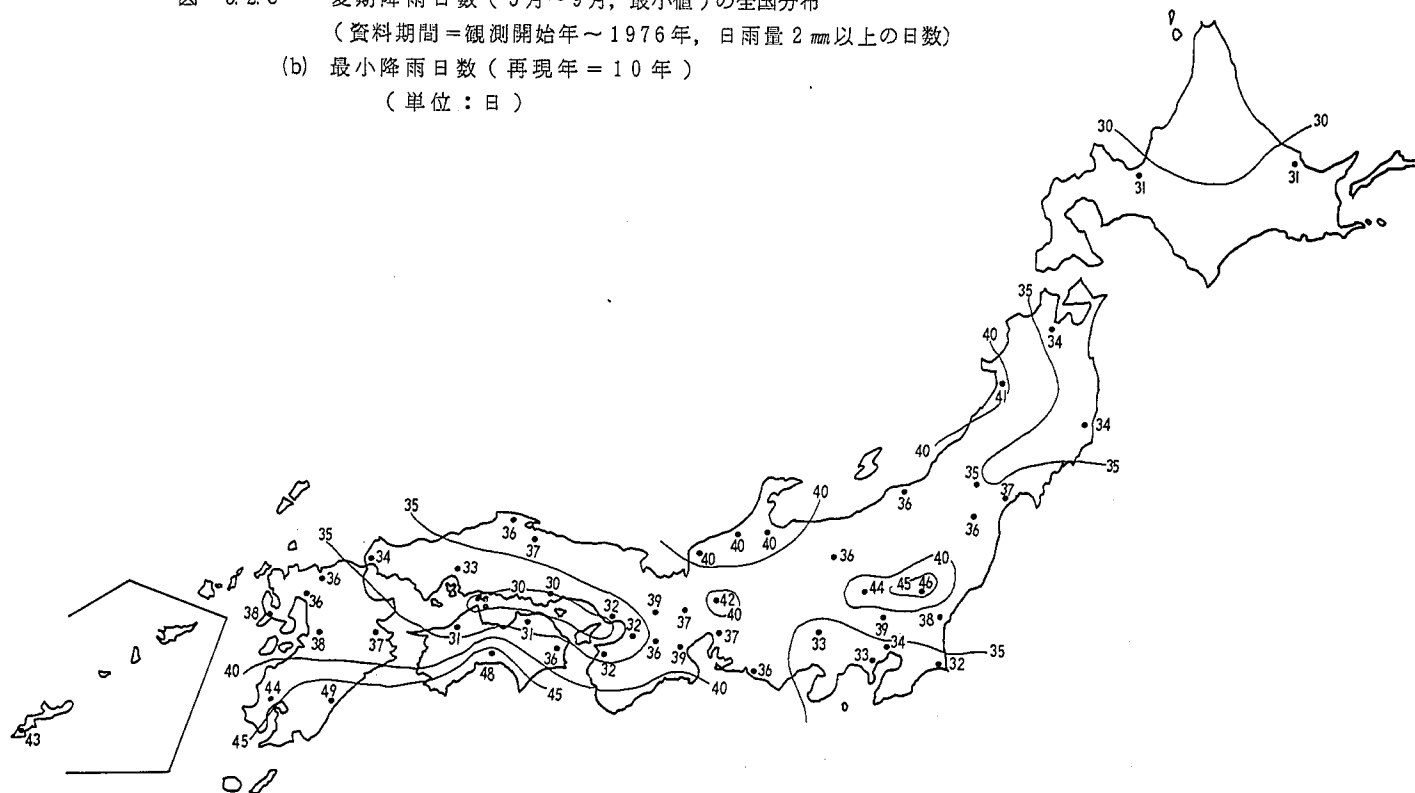
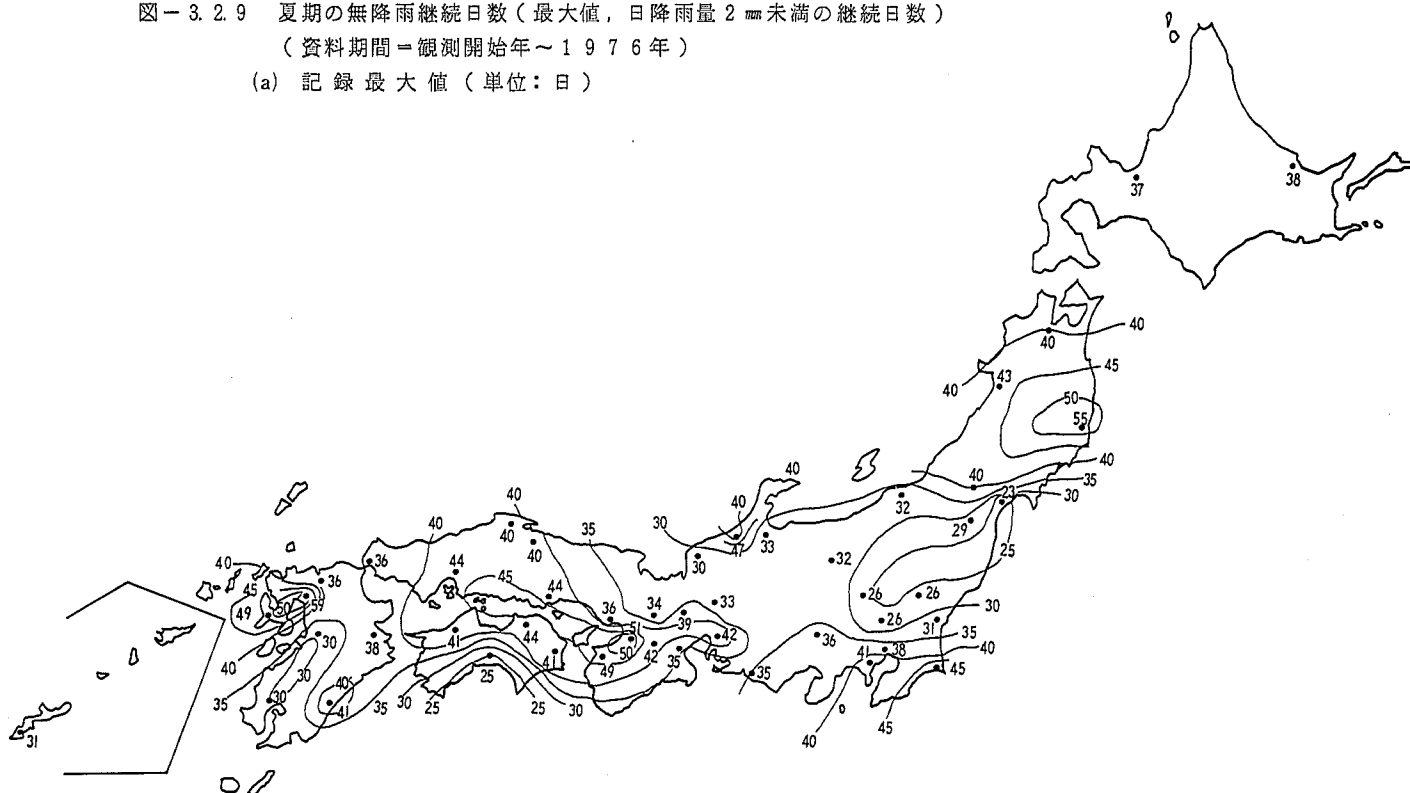


図-3.2.9 夏期の無降雨継続日数(最大値, 日降雨量 2 mm 未満の継続日数)

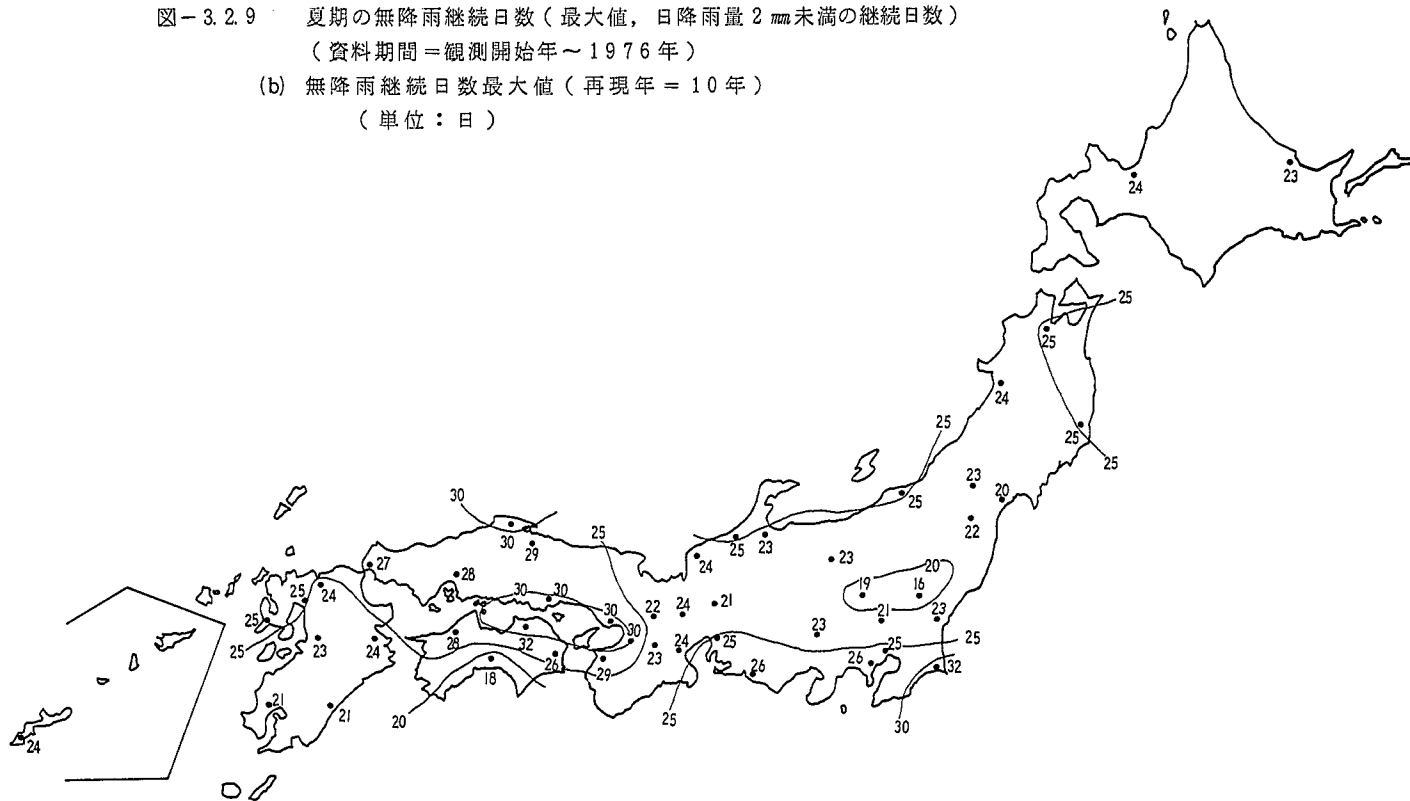
(資料期間=観測開始年~1976年)

(a) 記録最大値(単位:日)



(資料期間=観測開始年～1976年)

(單位：日)



ない年は、渇水年になりやすい。

3) 夏期(5～9月)の最小雨量は、全国的にマクロ的にみると、記録最小値で約400mm(平年の約45%)、再現年が10年で約620mm(平年の約70%)、再現年が20年で約550mm(平年の約62%)、再現年が100年で約440mm(平年の約50%)である。また、地域別には、裏日本の積雪地方を除いて、年降水量の全国分布と同じ傾向を示し、北海道、瀬戸内地方が少ない。

4) 夏期の最小降雨日数は、全国的には、記録最小値で約28日、再現年が10年で約37日である。

夏期の最大無降雨継続日数は、全国的には、記録最大値で約38日、再現年が10年で約25日である。

以上の結論は、渇水と関係が深い夏期の降雨特性を中心に統計的な解析を行なった結果である。次節では既往渇水年の降雨特性を分析し、渇水と降雨特性の関係を考察する。

3.3 既往渇水の降雨特性

前節では、渇水と関係が深い夏期(5月～9月)の降雨特性のうち、総雨量、降雨日数(2mm以上の降雨のあった日の総日数)、無降雨継続日数(日雨量2mm未満の日が連続した日数の最大値)について、全国的に統計値を調べた。いま、その結果をあらためて平年値(再現年が2年)に対する比率で表わすと表-3.3.1のようになる。

以上の統計値をもとに、本節では既往渇水年の統計的な位置づけを行ない、渇水と降雨特性の関連づけを行なう。

最初に、近年発生した渇水を全国的に整理してみる。図-3.3.1は、国土庁が調査した最近の渇水第1位の生起年を表示したものである⁷⁾。調査対象期間は、昭和31年～48年の18年間であり、この期間における年降水量の最小年を渇水第1位の年としている。

表-3.3.1 再現年別にみた夏季降雨特性の平年比(全国平均値)

再 現 年	単位：平年比(%)		
	夏期総雨量 (最小値)	夏期降雨日数 (最小値)	無降雨継続 日数 (最大値)
10年	70	79	156
20年	62	72	169
50年	55	66	188
100年	50	62	206
極 値	45	60	238

これによると、渇水第1位生起年は、

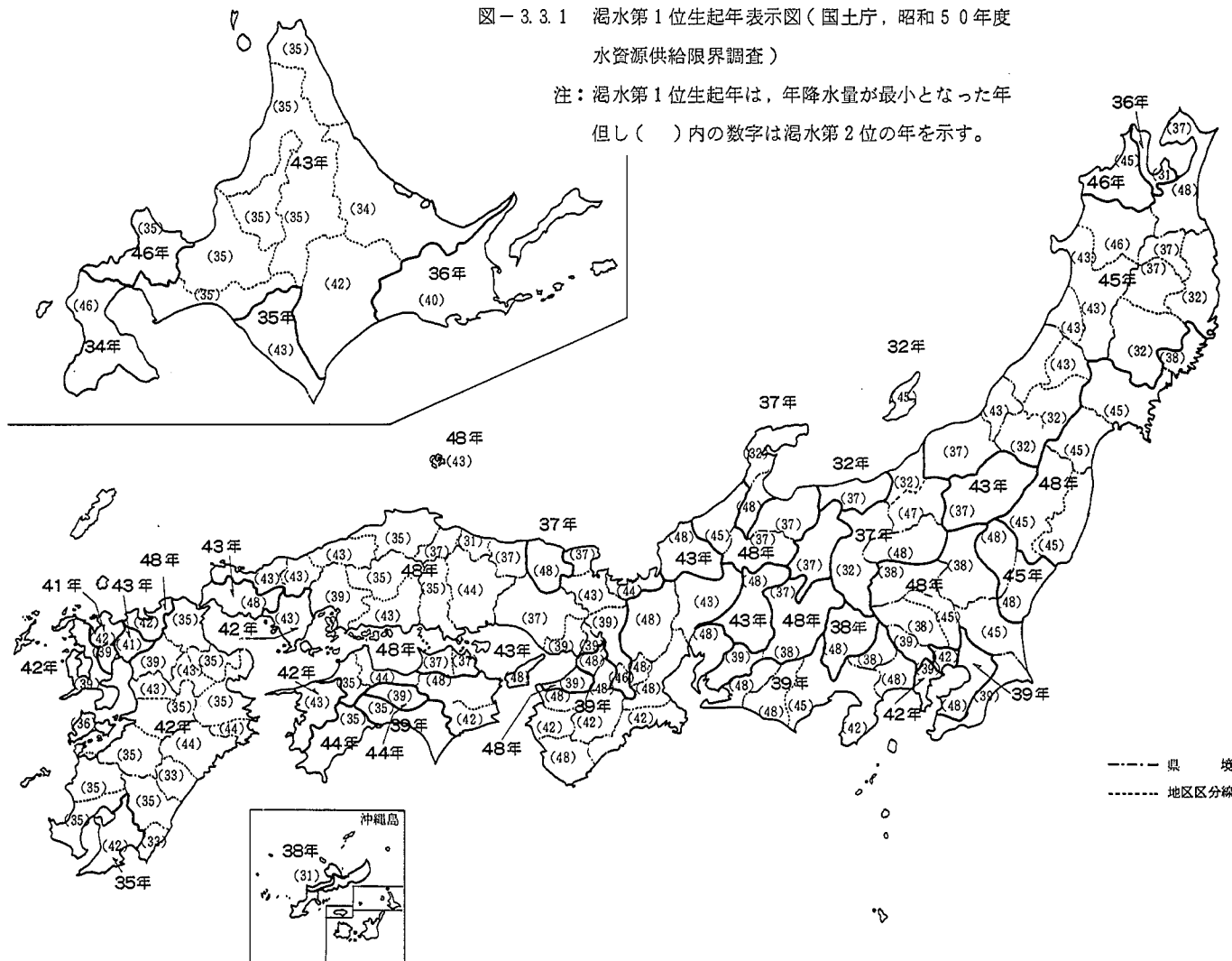
- 北海道中央部 昭和43年
- " 南部 " 34年, 35年, 36年
- 東北日本海側 " 45年
- " 太平洋側 " 45年, 48年
- 関東北部 " 45年, 48年
- " 南部 " 39年, 42年
- 北陸, 信越 " 32年, 37年, 43年, 48年
- 東 海 " 39年
- 近 畿 " 37年, 39年, 48年
- 山陰, 瀬戸内 " 42年, 43年, 48年
- 四国南部 " 37年, 39年, 44年
- 九州北部 " 41年, 42年, 43年, 48年

図-3.3.1 湧水第1位生起年表示図(国土庁, 昭和50年度)

水資源供給限界調査)

注：渇水第1位生起年は，年降水量が最小となった年

但し()内の数字は潟水第2位の年を示す。



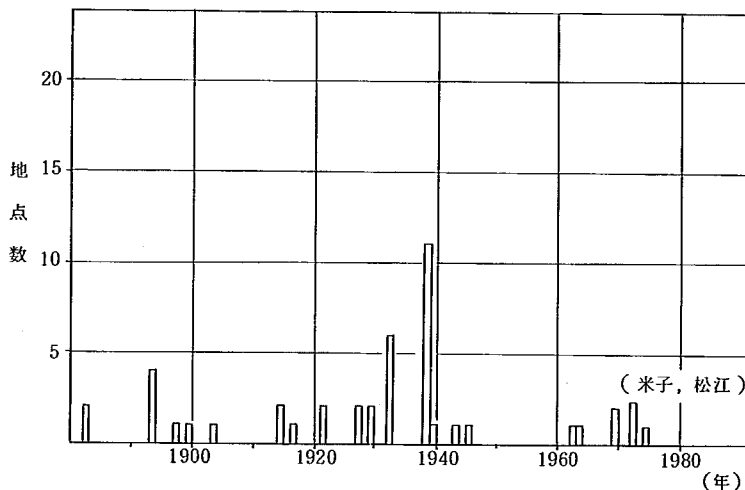
○九州南部 昭和 35 年, 42 年

○沖 縄 “ 38 年

となる。このうち、もっとも広域的なのは、昭和 48 年である。

次に、前節で調べた気象官署（48 地点）について、長期の資料をもとにして夏期の渇水発生頻度と生起年を調べてみる。資料期間は、観測開始年から 1976 年（昭和 51 年）に至る約 90 年間である。

図－3.3.2 は、夏期総雨量の最小年のヒストグラムであるが、1939 年に夏期総雨量の最小値を記録した



図－3.3.2 夏期の最小雨量発生年（48 地点）

地点が 11 地点と最も多い。次が 1933 年の 6 地点、1894 年の 4 地点である。

さらに、夏期総雨量（最小値）の再現年から渇水生起年を整理すると表－3.3.2 になる。ここでは、関東・甲信越以東を東日本地方、東海・北陸以西を西日本地方として全国を 2 地域に分けた。さらに、これを年別、再現年別にまとめたのが表－3.3.3(a)、ヒストグラムで表わしたのが図－3.3.3（東日本地方）及び図－3.3.4（西日本地方）である。

さらに、近年発生した渇水年における地域ごとの渇水頻度を年代別に整理したものを表－3.3.4(b)に示した。

東日本では、再現年 50 年以上の渇水年は、1939 年が一番多く（5 地点）、次が、1946 年（4 地点）である。年代別では、1940 年代が最も多く、1970 年代、1930 年代の順である。最も少ないのは 1950 年代である。

再現年が 20 年～50 年の渇水年は、1942 年が一番多い（3 地点）。年代別では、1920 年代及び 1960 年代が多い。

再現年が 10～20 年の渇水年は、1946 年が最も多く（7 地点）、次が 1944 年及び 1973 年（5 地点）である。

また、夏期総雨量の再現年 10 年以上を渇水年と考えると、1946 年（11 地点）、1973 年（10 地点）、1933 年及び 1944 年（9 地点）が東日本における代表渇水年である。年代別では、再現年 10 年以上の渇水年が多いのは、1940 年代が 1 番多く（33 回）、1970 年代（24 回）、1930 年代（23 回）の順となる。

表-3.3.2 湯水生起年(夏期総雨量の再現年)

注) R₅₀ = 再現年50年最小雨量R₂₀ = " 20年 "R₁₀ = " 10年 "

地域	No	地点名	再現年50年以上			再現年20~50年			再現年10~20年		
			R ₅₀	生起年	年数	R ₂₀	生起年	年数	R ₁₀	生起年	年数
東 日 本	1	網走	243	1908,1906	2	274	1916,1905	2	303	1976,1968,1952,1970	4
	2	札幌	259	1915,1906	2	292	1921,1897,1949	3	324	1946,1976,1881,1880,1908, 1925,1895,1944	8
	3	青森	319	1900	1	356	1906	1	391	1895,1915,1883,1908,1924, 1928,1956	7
	4	秋田	455	1942,1970	2	513	1924,1895,1929,1925	4	569	1906,1951,1954,1943,1883	5
	5	宮古	377	1928,1946,1942,1963	4	431	-	0	484	1937,1932,1960,1933,1886, 1883,1951	7
	6	山形	337	1970,1951,1975,1928	4	380	1973,1931,1895,1933,1942	5	421	1939	1
	7	仙台	347	-	0	409	1975	1	470	1943,1933,1946	3
	8	福島	375	1942,1970,1973,1898	4	425	-	0	473	1972,1928,1939,1943,1931, 1960,1975,1946	8
	9	宇都宮	605	-	0	669	1970	1	729	1973,1918,1924,1963,1964, 1961,1926,1944,1946,1934	10
	10	水戸	444	1946,1933	2	498	1926	1	550	1970,1917,1931,1973,1944	5
	11	銚子	370	1946,1917,1891,1933	4	429	1926,1896	2	486	1973,1894,1934,1900,1944, 1918	6
	12	前橋	538	1944	1	592	1942,1900,1960,1963,1933	5	643	1973,1934	2
	13	熊谷	476	1973,1933	2	533	1964,1934	2	587	1944,1900,1946	3
	14	東京	436	1944,1933	2	499	1937,1973,1967,1961	4	560	1975,1934,1894,1964,1946	5
	15	横浜	484	1937,1967,1933	3	552	1944,1900	2	618	1946,1964,1947	3
	16	新潟	364	1895,1973,1928	3	415	1940	1	465	1968,1951,1886	3
	17	長野	350	1915	1	388	1951,1944,1922,1942	4	424	1924,1926,1972	3
	18	甲府	351	1946	1	407	1967,1964	2	462	1916,1940,1973	3
西 日 本	19	伏木	447	1939,1915	2	511	1943,1928,1951	3	572	-	0
	20	金沢	508	1915,1939	2	578	1938,1973,1883,1951	4	645	1945,1928,1940	3
	21	福井	519	1939	1	582	1973,1940,1922	3	643	1913,1937,1915,1946,1951	5
	22	岐阜	653	-	0	739	1947,1924,1944,1940,1933, 1883,1894,1922	8	822	1934,1939	2
	23	名古屋	526	1933	1	595	1943,1944	2	661	1947,1939,1964,1937,1934, 1924,1973,1913,1922	9

(表-3.3.2のつづき)

地域	No	地点名	再現年50年以上			再現年20～50年			再現年10～20年		
			R ₅₀	生起年	年数	R ₂₀	生起年	年数	R ₁₀	生起年	年数
西 日 本	24	浜松	559	—	0	647	1946,1883,1967,1940	4	732	1891,1913,1944,1939,1888, 1924,1964	7
	25	津	591	1939	1	669	1922,1964,1933,1894	4	745	1937,1936,1947,1900,1955 1944	6
	26	彦根	444	1939,1894,1922	3	514	1935,1933,1944	3	582	1924	1
	27	京都	492	1894,1939,1883	3	563	1944,1924,1922	3	633	1940,1882,1888,1933	4
	28	奈良	444	1964	1	504	1922,1936,1947,1955	4	562	1973,1924,1927,1944,1934 1939	6
	29	和歌山	384	1883,1930	2	451	1939,1944,1964,1894,1880 1967	6	517	1887,1922,1937,1973,1947	5
	30	大阪	415	1939,1883	2	473	1937,1964,1894	3	530	1913,1924,1930,1973,1936, 1944	6
	31	神戸	423	1973	1	484	1944,1947	2	542	1964,1924,1934,1939,1908, 1937,1955,1933,1898	9
	32	岡山	342	1944,1933,1939	3	396	1894	1	448	1891,1967,1913	3
	33	米子	496	1973,	1	566	1951,1946	2	633	1944,	1
	34	松江	538	1973	1	612	1951	1	683	1975	1
	35	広島	510	1933,1883,1939	3	580	1929	1	647	1961,1968,1967,1917,1913	5
	36	下関	556	1967,1939	2	629	1929,1888,1894	3	699	1893,1907,1944,1933	4
	37	徳島	449	1930,1967,1939	3	537	1944,1913	2	624	1922,1936,1933,1940	4
	38	多度津	351	1894,1939	2	402	1933,1944	2	453	1934,1913,1930,1967,1973	5
	39	高知	935	1940,1894,1930	3	1054	1904,1964	2	1169	—	0
	40	松山	417	1967,1939	2	473	1894,1933	2	536	1917,1958,1934	3
	41	福岡	523	1894,1939	2	598	1967,1913,1968	3	670	1895,1929	2
	42	佐賀	622	1967,1894,1939	3	710	1904	1	795	1895	1
	43	長崎	624	1939,1967,1894	3	719	1940	1	811	1958,1904,1961,1895,1964, 1888,1930,1933,1917	9
	44	熊本	587	1967,1894	2	682	1934,1930	2	774	1904,1895,1890,1939	4
	45	大分	546	1967,1917	2	625	1893,1904,1926,1933,1958	5	702	1930,1948,1897	3
	46	宮崎	921	1904,1944,1934,1894	4	1028	1967,1926,1958	3	1131	1930,1973,1917,1897	4
	47	鹿児島	713	1894	1	822	1974,1904	2	927	1939,1926,1934,1946,1893	5
	48	那覇	636	1963,1971,1904	3	723	1911,1968	2	807	1927,1893,1962,1926,1958	5
	合 計				97			124			208

表-3.3.3 (a)夏期総雨量(5~7月)の再現年からみた渇水生起頻度

注) 50~ =再現年50年以上
20~50 = " 20年~50年
10~20 = " 10年~20年

年	東 日 本			西 日 本			年	東 日 本			西 日 本			年	東 日 本			西 日 本		
	50~	20~50	10~20	50~	20~50	10~20		50~	20~50	10~20	50~	20~50	10~20		50~	20~50	10~20	50~	20~50	10~20
1880			1		1		1913					2	7	1946	4		7		2	2
81			1				14							47			1		3	3
82						1	15	2		1	2		1	48						1
83			3	4	3		16		1	1				49		1				
84							17	1		1	1		4	1950						
85							18			2				51	1	1	3		4	1
86			2				19							52			1			
87						1	1920							53						
88					1	3	21		1					54			1			
89							22		1		1	5	3	55				1		2
1890						1	23							56			1			
91	1					2	24		1	3		2	6	57						
92							25		1	1				58				2		3
93					1	3	26		2	2		2	2	59						
94			2	10	7		27						2	1960		1	2			
95	1	2	2			4	28	3		2		1	1	61		1	1			2
96		1					29		1			2	1	62						1
97		1				2	1930				3	1	5	63	1	1	1	1		
98	1					1	31		1	2				64		2	3	1	4	4
99							32			1				65						
1900	1	2	2			1	33	5	2	2	3	6	5	66						
01							34		1	4	1	1	7	67	1	2		7	4	3
02							35					1		68			2		2	1
03							36					1	3	69						
04				2	4	2	37	1	1	1		1	5	1970	3	1	2			
05		1					38					1		71				1		
06	2	1	1				39			2	16	1	7	72			2			
07						1	1940		1	1	1	4	3	73	3	2	5	3	2	6
08	1		2			1	41							74					1	
09							42	3	3					75	1	1	2			1
10							43			3		2		76			2			
11					1		44	2	2	5	2	8	6	計	38	40	86	59	84	122
12							45						1		164			265		

表-3.3.3(b) 年代別、再現年別渇水頻度

年 代	東 日 本 (18 地点)			西 日 本 (30 地点)		
	再 現 年 50年以上	再 現 年 20年~50年	再 現 年 10年~20年	再 現 年 50年以上	再 現 年 20年~50年	再 現 年 10年~20年
1880	0	0 (0)	7 (7)	4	5 (9)	5 (14)
1890	3	4 (7)	4 (11)	10	8 (18)	13 (31)
1900	4	4 (8)	5 (13)	2	4 (6)	5 (11)
1910	3	1 (4)	5 (9)	3	3 (6)	12 (18)
1920	3	7 (10)	8 (18)	1	12 (13)	15 (28)
1930	6	5 (11)	12 (23)	23	13 (36)	32 (68)
1940	9	7 (16)	17 (33)	3	19 (22)	16 (38)
1950	1	1 (2)	6 (8)	0	7 (7)	6 (13)
1960	2	7 (9)	9 (18)	9	10 (19)	11 (20)
1970*	7	4 (11)	13 (24)	4	3 (7)	7 (14)

注) * 1976 まで
() 内は累加数

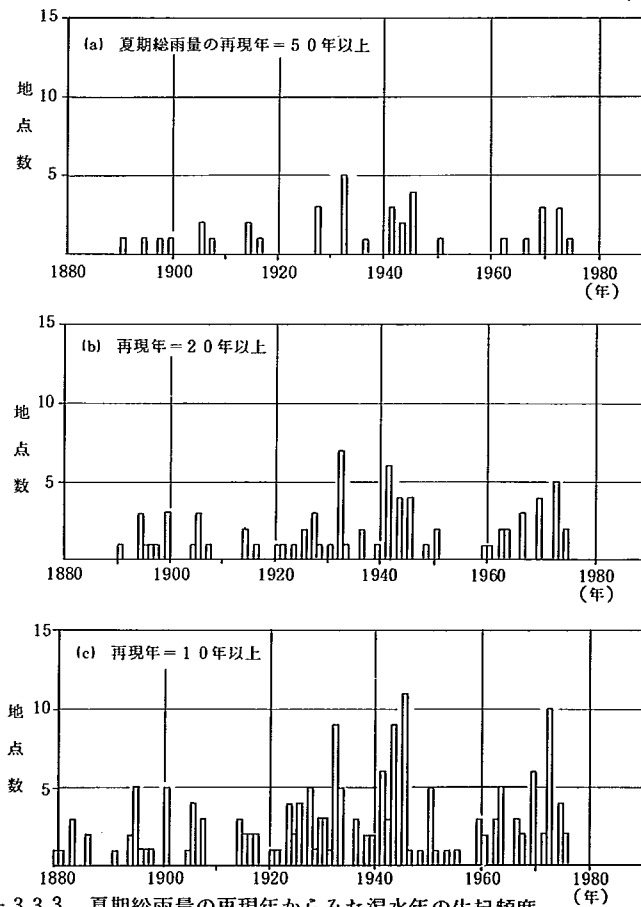
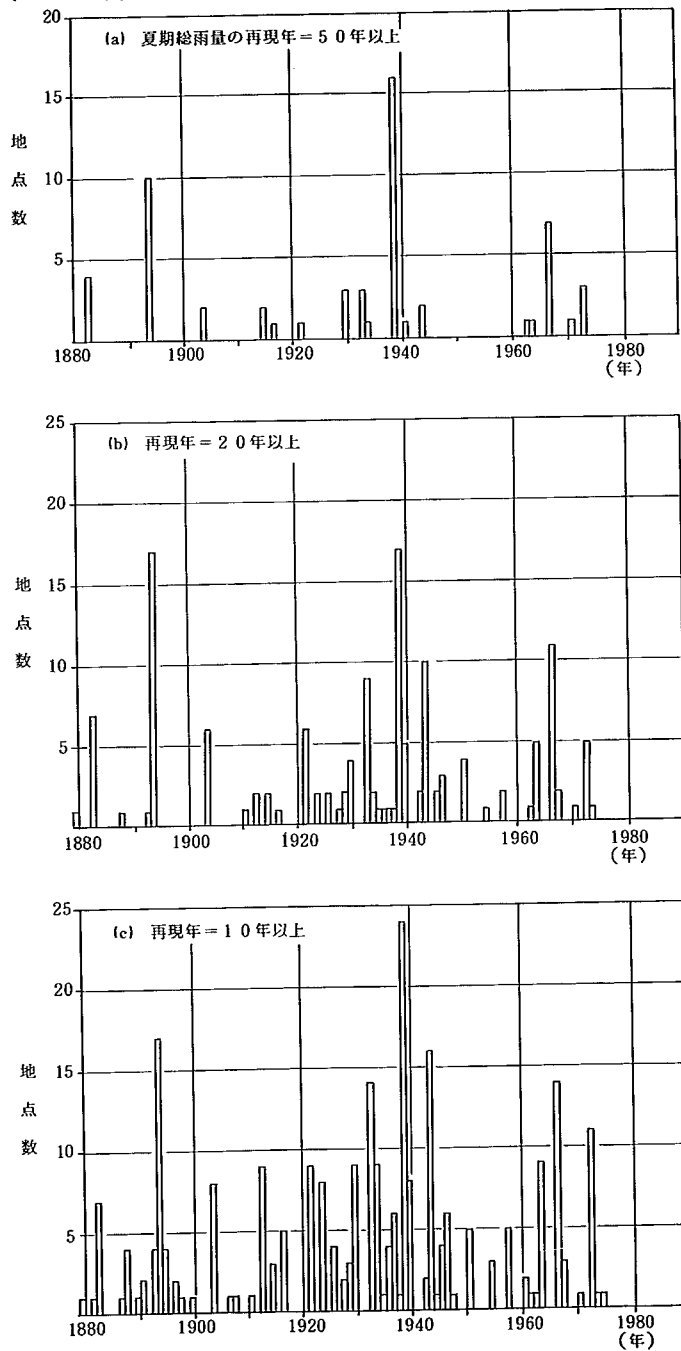


図-3.3.3 夏期総雨量の再現年からみた渇水年の生起頻度
(東日本, 18 地点)

西日本では、夏期渇水年がかなり顕著に現れている。夏期総雨量の再現年50年以上の渇水年は、1939年が一番多く（16地点）、1894年（10地点）、1967年（7地点）の順である。



図一 3.3.4 夏期総雨量の再現年からみた渇水年の生起頻度
(西日本, 30 地点)

図 3.3.5 代表渇水年の夏期総雨量（平年比）分布

(a) 明治 27 年（1894）

注）未は観測開始以前

数字は百分比（％）

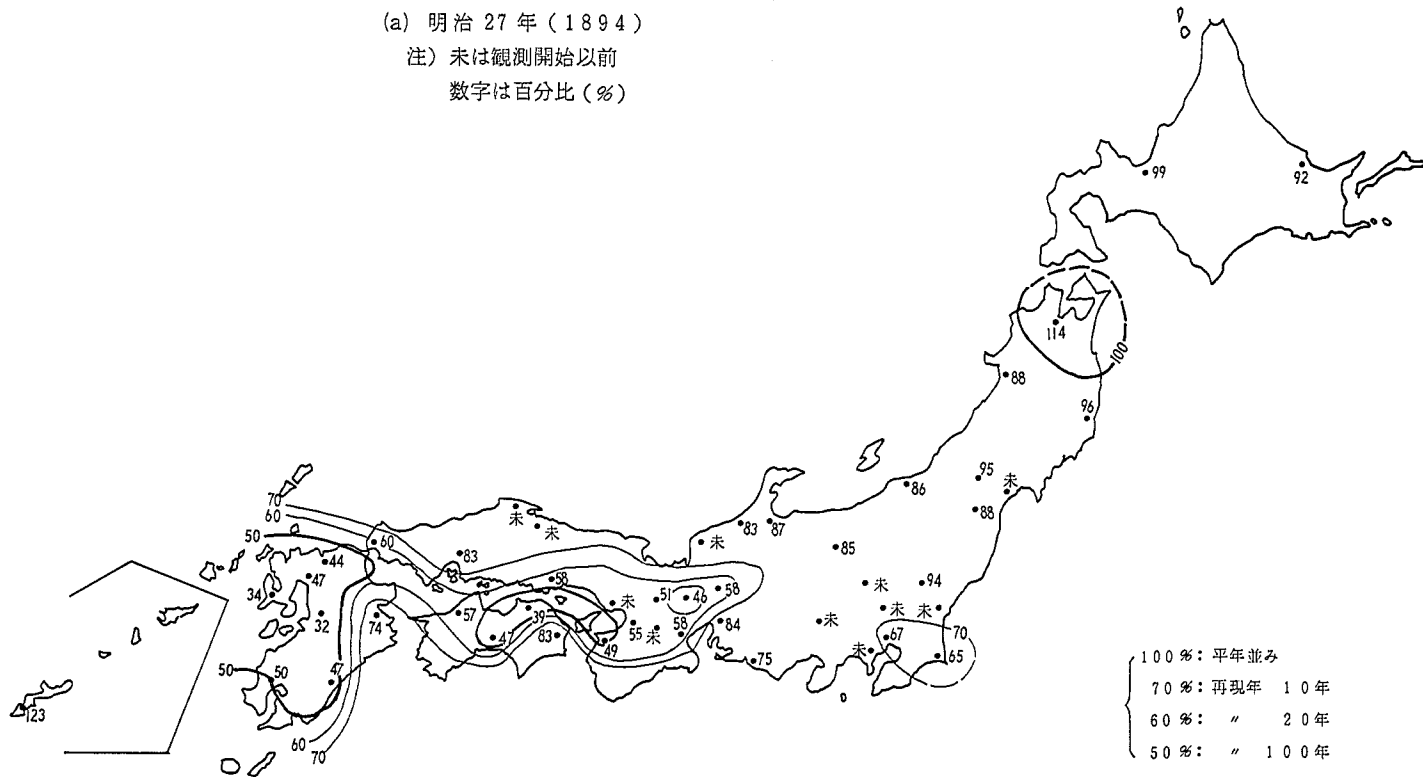


図 3.3.5 代表渇水年の夏期総雨量（平年比）分布

(b) 昭和 14 年 (1939)

注) 未は観測開始以前

数字は百分比 (%)

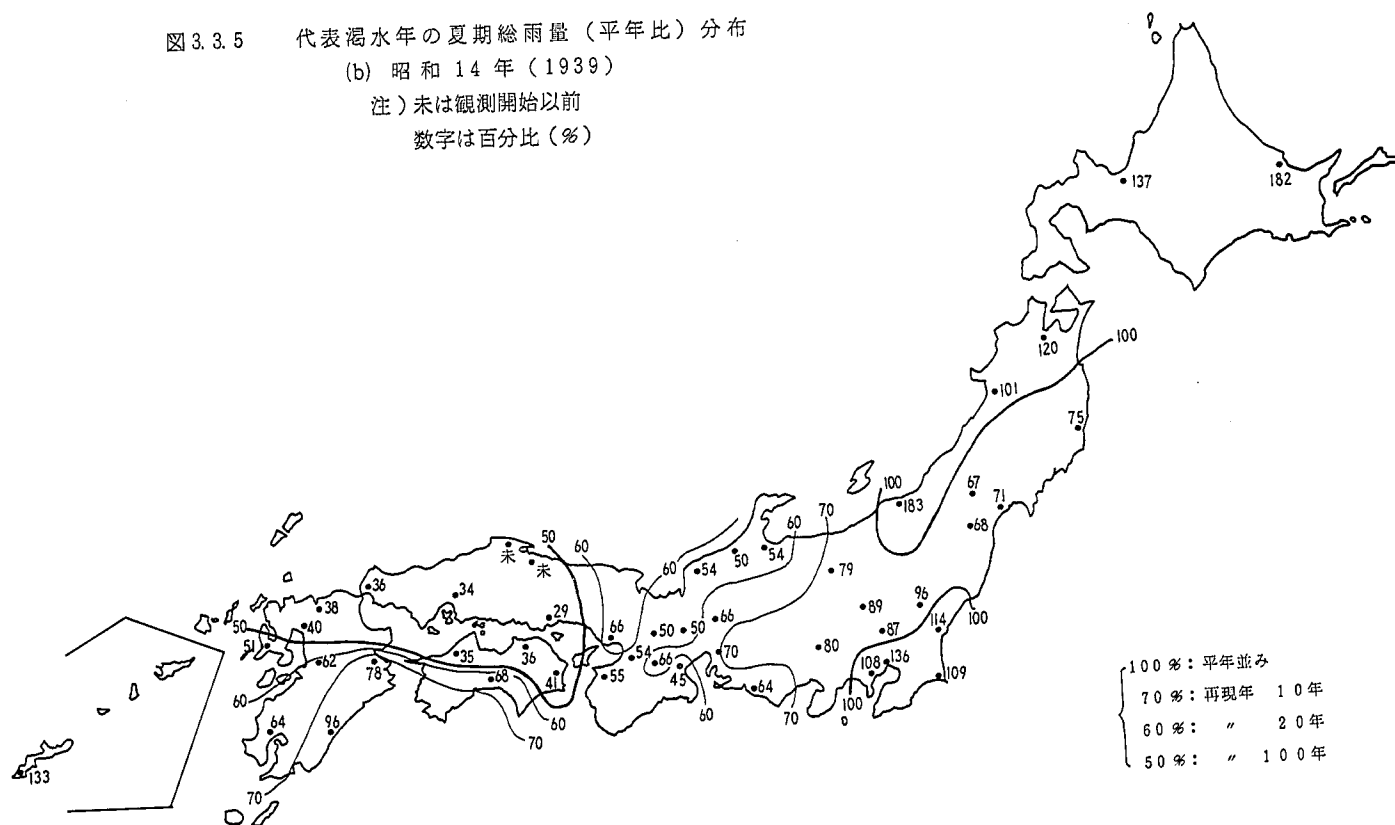


図 3.3.5 代表渇水年の夏期総雨量（平年比）分布

(c) 昭和 42 年 (1967)

数字は百分比 (%)

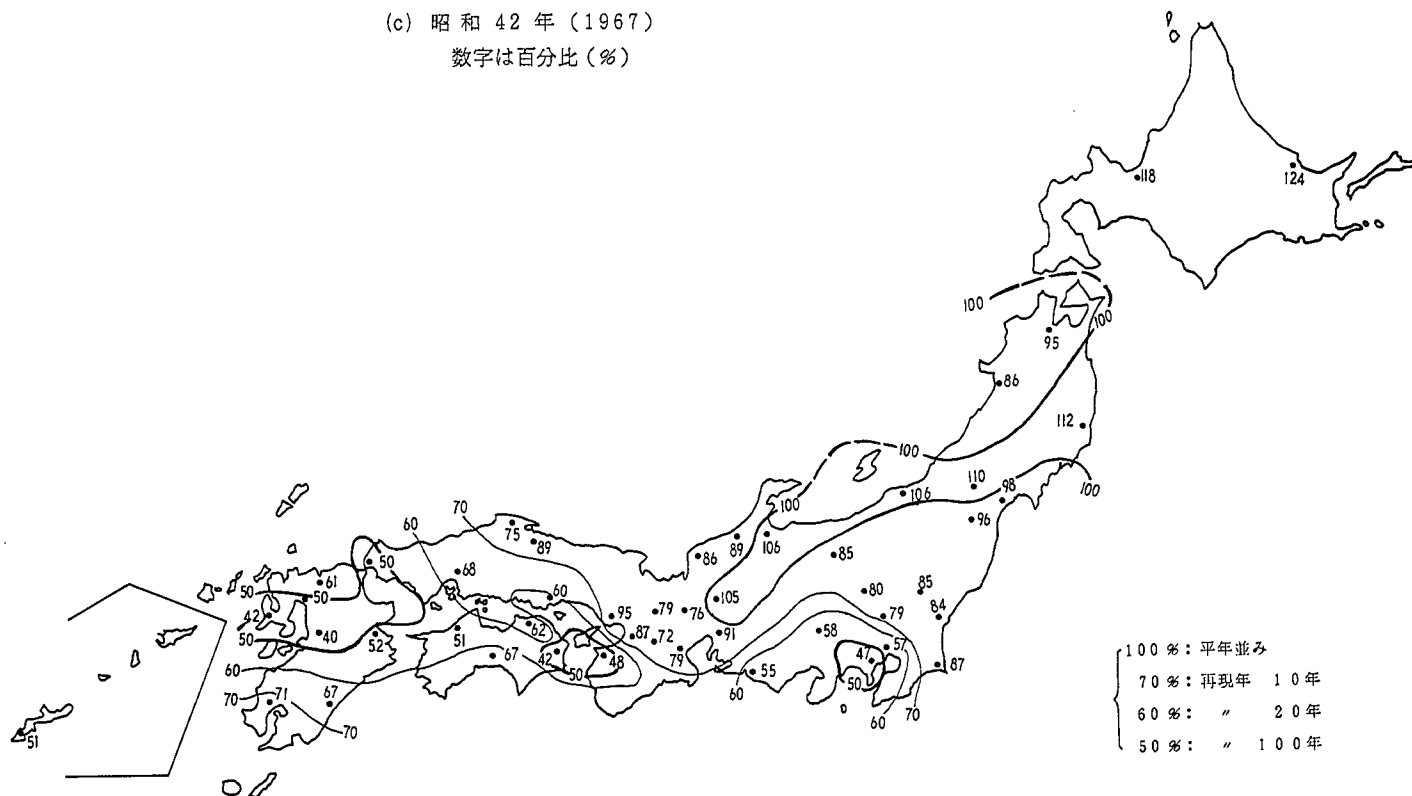


図3.3.5 代表渇水年の夏期総雨量（平年比）分布
 (d) 昭和48年(1973)
 数字は百分比(%)

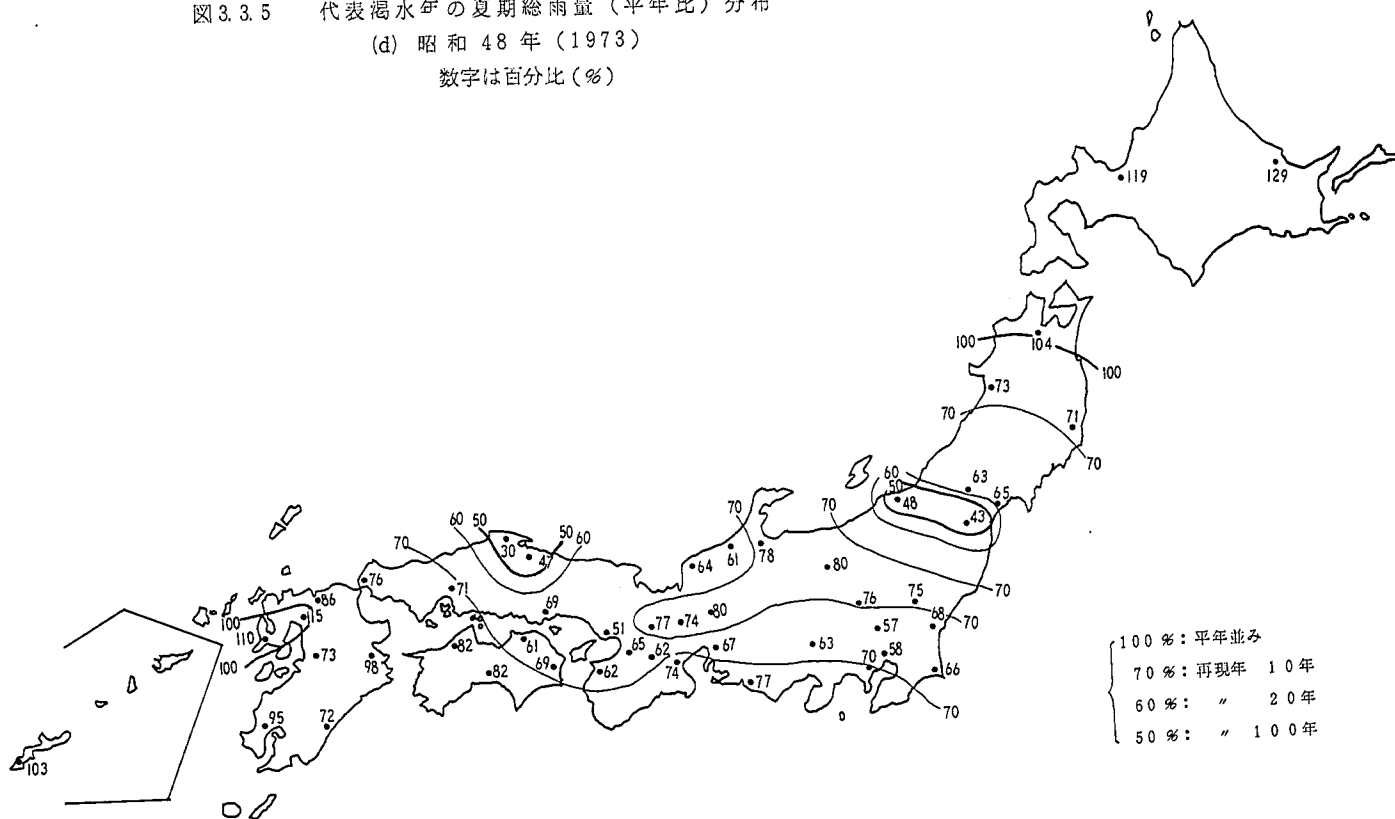
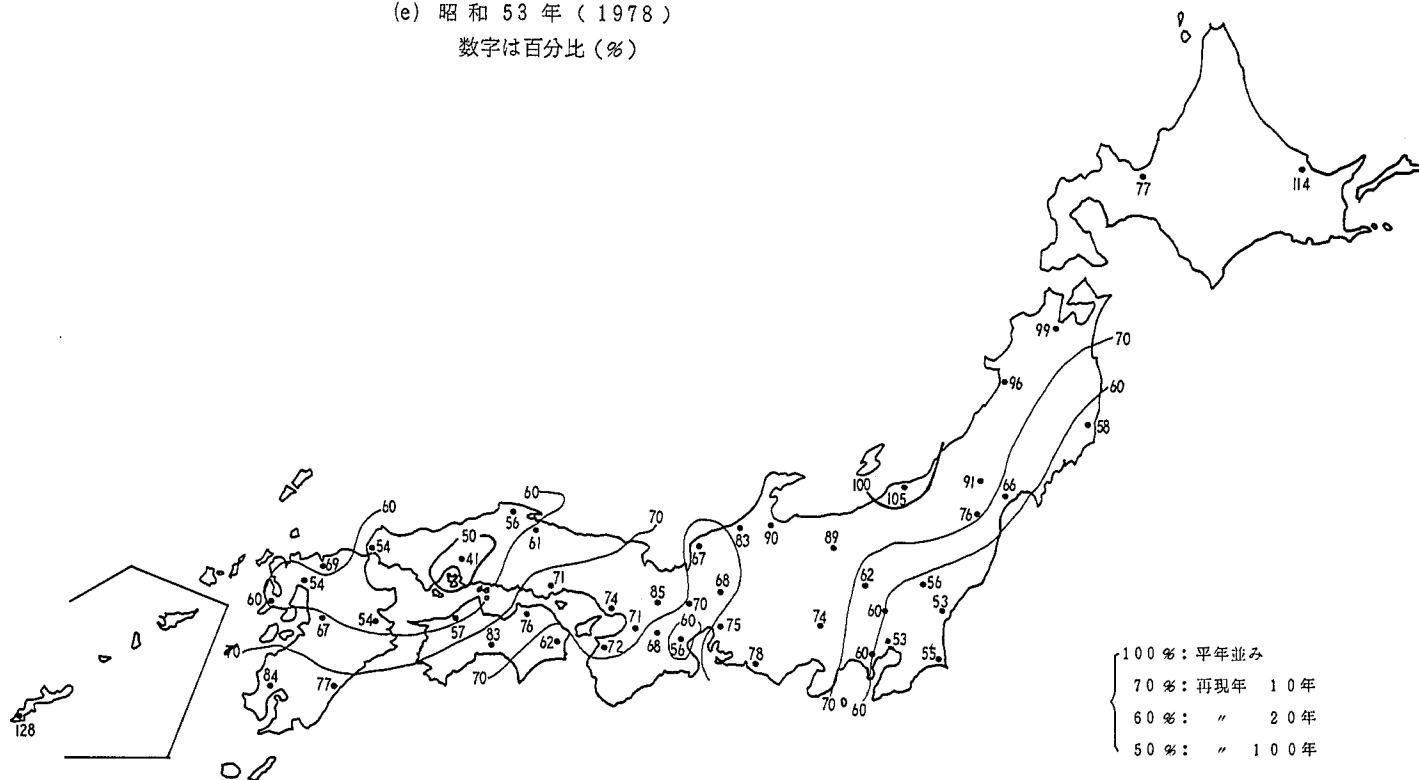


図3.3.5 代表渇水年の夏期総雨量（平年比）分布
 (e) 昭和53年（1978）
 数字は百分比（%）



再現年が20～50年の渇水年が多いのは、1944年(8地点)、1894年(7地点)、1933年(6地点)である。
再現年10～20年の渇水年が多いのは、1913年、1934年、1939年(7地点)、1924年、1944年、
1973年(6地点)である。

再現年10年以上の夏期渇水年は、1939年(24地点)、1894年(17地点)、1944年、1933年、
1967年、1973年となり、これらが西日本の代表渇水年である。年代別では、1930年代が最も頻度が多く
(68回)、1940年代(38回)、1890年代(31回)、1920年代(28回)の順である。

次に、代表渇水年の夏期総雨量の平年比の分布を調べてみる。

図-3.3.5(a)は、1894年の夏期総雨量の平年比の分布を示したものである。瀬戸内、九州西南部が平年
雨量の50%以下となり、再現年100年以上であることが認められる。総雨量が平年以上となっているのは青
森だけであり、西日本を中心とした渇水であるということができよう。

図-3.3.5(b)は、1939年の全国的な渇水の夏期総雨量(平年比)分布図である。特に厳しいのは、瀬戸
内、九州北部で総雨量の平年比は30～40%であり、その再現年は100年以上である。近畿、北陸も平年の
50～60%の総雨量で再現年は20～100年である。

図-3.3.5(c)は、1967年の渇水の夏期総雨量(平年比)の分布図を示したもので、このときは、九州西
部、瀬戸内、関東南部で平年雨量の50%以下となっている。

図-3.3.5(d)は、1973年の夏期渇水の総雨量(平年比)の分布図である。このときは、高松市、松江市
等で厳しい給水制限が実施されている。山陰では、平年の30～40%の雨量となっている。また、福島、新
潟でも平年の50%以下であり、東北も夏期渇水であった。このことから、1973年は、関東南部、近畿も
含めて全国的な夏期渇水年であったことがわかる。

図-3.3.5(e)は、1978年の夏期総雨量(5～9月)の平年比の分布図である。このときは福岡市では5
月下旬から翌年の3月まで10カ月間にわたって、給水制限が実施されたのをはじめとして、北九州、首都
圏等全国各地で給水制限あるいは取水制限が実施されている。夏期総雨量は、東京が平年比53%であり、
関東南部が少ない。広島市では7月降水量1.5mmと極端に少なく、夏期総雨量では平年比41%であってそ
の再現年は100年以上である。

福岡市では夏期総雨量は平年比69%であるが、夏期総雨量のうち6月雨量が半分以上あり他の月は少な
く、また水源地域で降水量が少なかったことから渇水が長期化したものである。

このように、1978年は北海道及び東北地方の裏日本側を除き、全国的な渇水年である。

次に既往の代表渇水年の夏期降雨特性を調べ、どのような要素が渇水と関係が深いか考察する。

表-3.3.4は、代表渇水年の夏期総雨量、降雨日数、無降雨継続日数(最大値)の値と資料期間中の順
位をまとめたものである。観測地点は代表地点を選んだ。昭和14年、42年、44年は西日本における渇水
年である。昭和35年は利根川流域の渇水年(図-3.2.1参照)、昭和39年は“東京オリンピック渇水”
年、昭和48年は、“高松渇水”、“松江渇水”等全国的に渇水が頻発した年である。

以上のうち、最も降雨条件が厳しかったのは、昭和14年の西日本渇水である。広島、多度津、福岡では、
夏期降雨量、降雨日数とも資料期間中最小値となっている。夏期降雨量はいずれも再現年100年以上、降
雨日数も再現年100年以上である。しかし、無降雨継続日数の再現年は、広島5年ないし10年、多度津20
年ないし50年、福岡100年であり、他の要素に比べて小さい。

次に、利根川の渇水年である昭和35年には、前橋では、降雨量及び降雨日数の再現年が20ないし50年、

表- 3.3.4 代表渇水年の夏期降雨特性

		昭和 4 年 (1929)							昭和 14 年 (1939)								
地 点 名	資料	降 雨 量		降 雨 日 数		無 降 雨 日 数		同 始 左 日		降 雨 量		降 雨 日 数		無 降 雨 日 数		同 始 左 日	
	年数	(mm)	順位	(日)	順位	(日)	順位	月	日	(mm)	順位	(日)	順位	(日)	順位	月	日
前 橋	80	853	41	49	23	24	3	7	21	754	26	58	54	14	27	8	25
東 京	101	1037	82	38	18	22	19	7	21	1106	92	48	65	10	90	4	28
大 阪	94	686	35	42	45	19	40	7	27	412	2	24	1	38	5	8	3
松 江	36	資 料		な し						資 料		な し					
広 島	98	567	4	32	9	15	61	9	5	315	1	25	1	26	14	5	13
多 度 津	84	581	28	41	44	25	21	7	10	237	1	20	1	37	6	8	4
福 岡	87	608	6	37	10	21	18	7	11	365	1	26	1	32	2	8	9

		昭 和 3 5 年 (1 9 6 0)						昭 和 3 9 年 (1 9 6 4)									
地 点 名	資料	降 雨 量		降 雨 日 数		無 降 雨 日 数		同 始 左 月 日		降 雨 量		降 雨 日 数		無 降 雨 日 数		同 始 左 月 日	
	年数	(mm)	順位	(日)	順位	(日)	順位	月	日	(mm)	順位	(日)	順位	(日)	順位	月	日
前 橋	80	571	4	39	2	17	16	5	29	866	45	51	29	14	27	9	2
東 京	101	631	19	40	27	10	90	6	22	509	8	31	2	19	32	7	17
大 阪	94	860	64	47	68	14	68	8	15	465	4	31	4	18	44	8	3
松 江	36	788	10	46	14	14	25	8	15	1460	34	45	13	35	2	7	20
広 島	98	1019	69	50	86	23	22	7	19	704	17	30	6	34	5	7	20
多 度 津	84	757	61	40	42	15	65	7	26	552	22	31	8	16	52	8	7
福 岡	87	1082	61	47	52	24	10	7	3	689	10	34	7	20	21	6	28

		昭和 4 2 年 (1 9 6 7)						昭和 4 4 年 (1 9 6 9)									
地 点 名	資料	降 雨 量		降雨日数		無 降 雨 継続日数		同 始 左 まり日		降 雨 量		降雨日数		無 降 雨 継続日数		同 始 左 まり日	
	年数	(mm)	順位	(日)	順位	(日)	順位	月	日	(mm)	順位	(日)	順位	(日)	順位	月	日
前 橋	80	680	14	50	25	16	20	5	12	670	11	51	29	12	42	7	10
東 京	101	463	4	42	37	16	53	5	12	748	40	46	56	13	73	7	10
大 阪	94	660	31	35	14	15	57	5	12	625	26	41	41	21	21	7	10
松 江	36	737	7	37	5	17	17	7	21	979	19	41	9	35	2	8	3
広 島	98	624	7	26	2	40	2	7	27	971	63	37	17	17	45	7	14
多 度 津	84	409	6	35	17	26	19	7	26	603	34	42	50	17	42	7	14
福 岡	87	586	5	28	2	19	24	8	15	850	30	45	43	17	36	7	14

		昭和 48 年 (1973)									
地 点 名		資料 年数	降 雨 量		降 雨 日 数		無 降 雨 継 続 日 数		同 始 左 ま り 日		
			(mm) 順位	(日) 順位	(日) 順位	(日) 順位	月	日			
前	橋	80	640	8	48	21	25	2	7	30	
東	京	101	473	5	41	42	17	41	7	3	
大	阪	94	496	8	31	4	28	12	7	4	
松	江	36	297	1	28	1	28	6	7	3	
広	島	98	696	15	37	17	28	11	7	3	
多	度 津	84	407	5	31	8	43	2	7	3	
福	岡	87	832	28	35	9	18	30	6	30	

無降雨継続日数の再現年が5年である。

昭和39年の東京渇水では、東京の降雨量の再現年は10年ないし20年、降雨日数の再現年20年、無降雨継続日数の再現年は2年ないし5年である。

昭和42年の西日本渇水では、広島では、降雨量の再現年は10年ないし20年、降雨日数の再現年は50年ないし100年、無降雨継続日数の再現年は100年以上である。

昭和48年は、松江では、降雨量の再現年100年以上、降雨日数の再現年100年、無降雨継続日数は5年ないし10年である。多度津（高松）では、降雨量の再現年10年ないし20年、降雨日数の再現年10年、無降雨継続日数の再現年50年ないし100年である。

このように各渇水年の降雨特性については、降雨量、降雨日数、無降雨継続日数などのマクロ的な指標の再現年を調べることによってその水文統計学的な位置づけを行なうことが可能である。

しかし、渇水の本質は河川流況と計画利水予定量のアンバランスにあり、両者がともに時系列量であるため、渇水時不足量も時系列量でとらえる必要がある。

また、渇水は、同一水文条件においても計画利水量の大小によって渇水になったりならなかったりする。

したがって、渇水と降雨特性の間には、密接な関係があるものの、必ずしも渇水をマクロ的な降雨特性を表わす指標で一義的に評価することは適切ではない。

この点について流量資料から求めたダムの補給必要容量（各年最大値）と年降雨量の関係を分析してみよう。

表-3.3.5は、河川水の利用率がすでにかなり高くなっている河川にあるAダム、Bダム群、Cダムにおいて、渇水補給に必要なダム貯水量の年間最大値とダム流域平均年降水量の関係をそれぞれとりまとめたものである。河川利用率を昭和50年時点での基準地点下流における開発水量の総流出量（観測期間の平均値）に対する比率と考えれば、Aダムの基準地点では約46%、Bダム群は約90%、Cダムは44%になる。さらに、利用率を開発水量と河川維持流量の和の総流出量に対する比率と考えれば、Aダムは55%、Bダム群は99%、Cダムは46%になる。

表-3.3.5の年最大補給必要容量は、流況の変動を調整して、豊水時にダムに貯留し渇水時にダムから補給することにより流況を計画に必要とされる利水パターンにするために必要なダム容量の年間最大値である。ダム補給が2年以上にわたって行なわれるときには、当該年の補給に必要な容量分をとった。対象とした3ダムについては、6.1で説明している。

年最大必要補給容量と年降雨量の相関係数は、Aダム-0.6、Bダム群-0.5、Cダム-0.2となり、相関性はAダム及びBダム群、Cダムの順に低い。

図-3.3.6(a)~(c)は、各ダムの年最大必要利水容量と年雨量の二次元同時生起確率分布を示している。図中の楕円は等確率線を表わし、累積確率(%)は楕円内に入る確率を示している。等確率性は右下りとなり、年最大必要補給容量と年雨量の関係が負相関であることを示しているまた、楕円が偏平なほど相関性の高いこと、楕円が円に近いほど相関性の低いことを示している。

図-3.3.6(a)から、Aダムの必要補給容量が計画利水容量に等しいとき、年雨量の変動範囲は、累積確率が90%の等確率線で考えると、900mm~3,700mmとなる。また、逆に年雨量が平均雨量に等しいとき、必要補給容量は、累積確率=90%の等確率線内に入るためには、25~220($\times 10^6$ m³)の範囲で変動する。

このことは、必要補給容量が単に年雨量のようなマクロ的な指標で決まるものではなく、年雨量の時間的配分、すなわち雨量時系列が必要補給容量の大きさに関係していることを示していると考えられる。つ

表-3.3.5 必要補給量(年最大)と年雨量の関係

年	A ダム		B ダム群		年	C ダム	
	年雨量(mm)	必要補給量	年雨量(mm)	必要補給量		年雨量(mm)	必要補給量
昭和 23	241620	14446			昭和 1	183000	1305
24	289620	4231			2	200350	2661
25	391670	880			3	203220	8253
26	308020	8464			5	171620	3203
27	240060	20964			6	199940	3434
28	258670	7878			8	160280	4515
29	403980	4671			9	166250	1305
30	275610	8412	203290	6680	10	240680	1328
31	308530	15742	238960	6860	11	175480	275
32	308990	4520	241950	8220	13	194230	18955
33	224830	7789	176550	9810	15	164820	2654
34	291100	12585	388920	6330	17	169120	5846
35	206450	10685	231110	4000	18	188230	356
36	349060	4921	273420	2130	21	184080	16559
37	227210	18448	313270	5710	25	199720	1505
38	296070	3450	152630	10120	26	212380	897
39	225500	30958	283390	8550	27	175540	3416
40	264990	13615	299300	7930	28	240140	1783
41	358520	13625	362360	4730	29	242920	3505
42	200210	36141	240320	7410	30	189530	2525
43	255770	8048	204150	10470	31	241840	3581
44	211110	30922	378420	7200	32	218860	1758
45	266230	6354	336690	3250	33	164810	3156
46	214440	8103	259950	7410	34	172550	5414
47	345470	4928	302540	3270	36	172780	2473
48	194360	20041	252470	3720	37	197170	2874
49	274890	5342	288290	5980	38	250440	694
50	282950	3492	310200	2240	39	172460	4963
					41	218800	1034
					42	195230	8529
					43	164490	3325
					44	180230	8629
					45	206960	3818
					46	168780	3135
					48	138590	7832
					49	201210	2468
					50	190020	1578
計画利水容量	$173 \times 10^6 \text{ m}^3$		$61 \times 10^6 \text{ m}^3$			$495 \times 10^6 \text{ m}^3$	
平均年雨量	2756 mm		2732 mm			1923 mm	
相関係数	-0.599		-0.480			-0.200	

注) 必要補給量は、年最大値($\times 10^6 \text{ m}^3$)

年雨量は、ダム流域平均

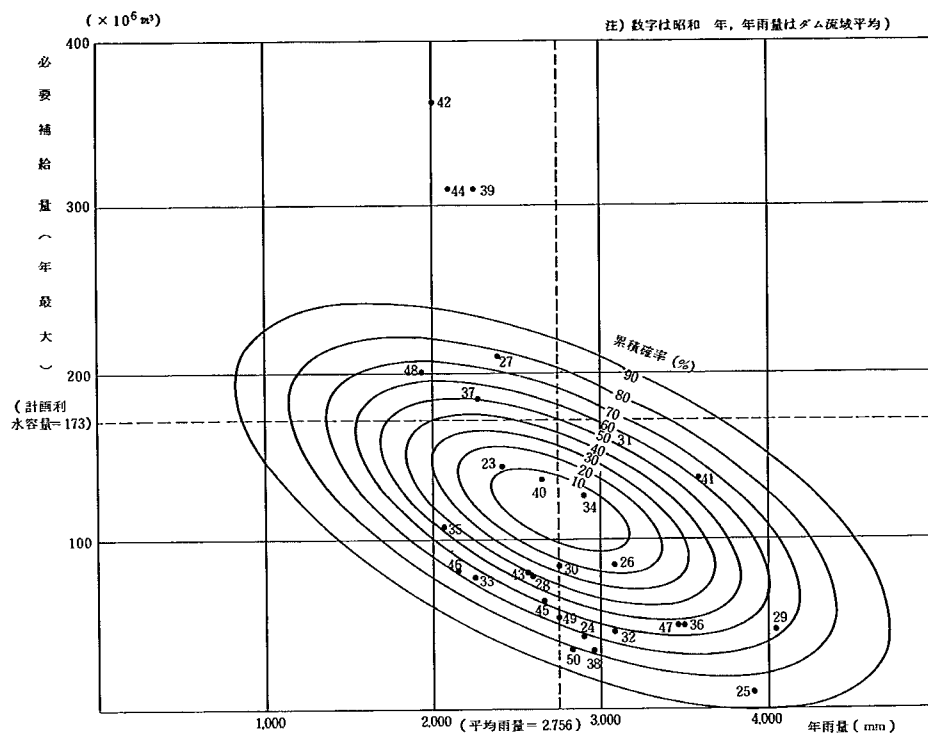


図- 3. 3. 6(a) 必要補給量 (年最大) と年雨量の関係 (Aダム, 昭和 23 年~昭和 50 年)

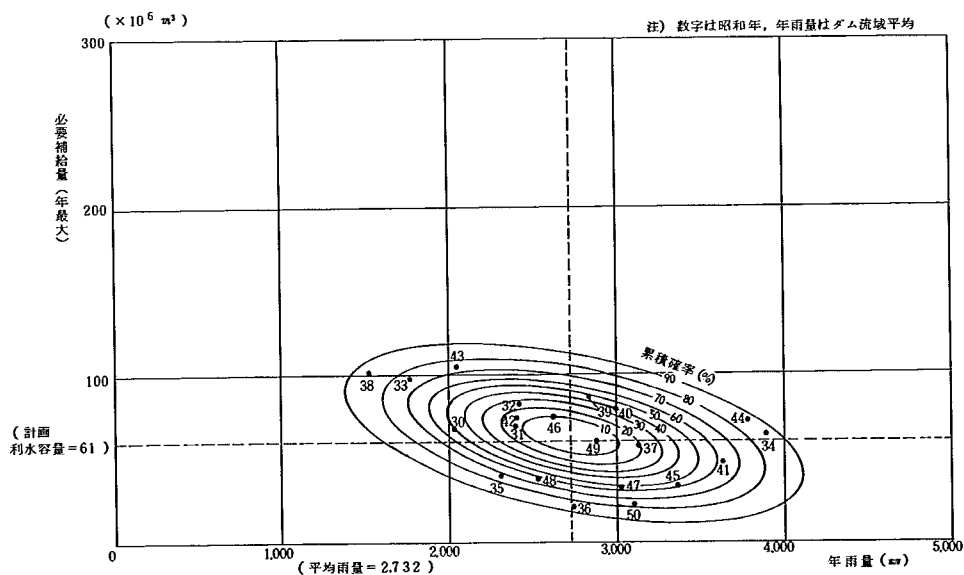


図- 3. 3. 6(b) 必要補給量 (年最大) と年雨量の関係 (Bダム群, 昭和 30 ~昭和 50)

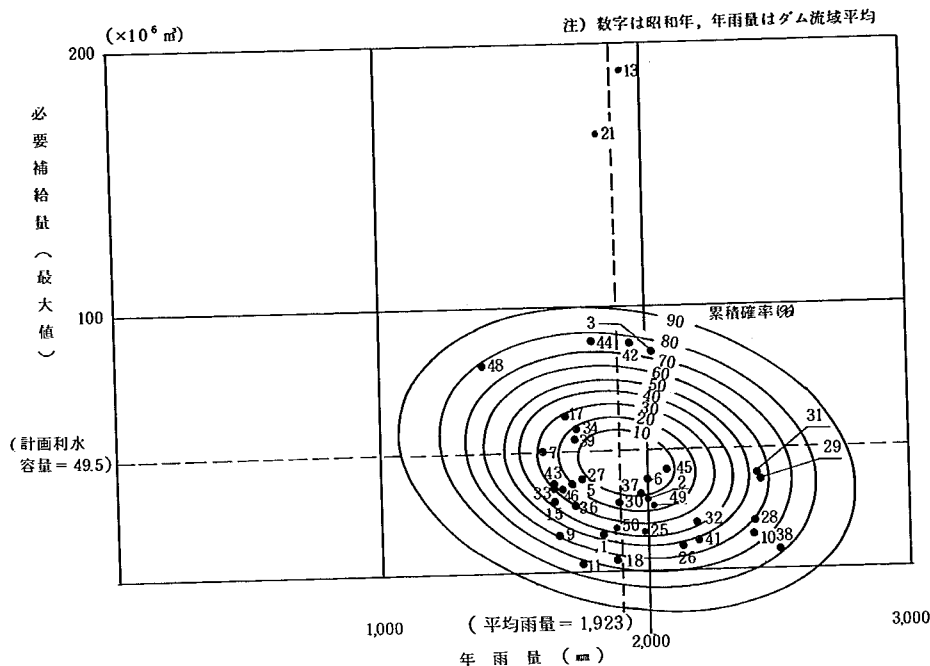


図-3.3.6(c) 必要補給量(年最大値)と年雨量の関係(Cダム)

まり, 同一降雨量であっても, その時間的な配分がわれわれの欲する水利用パターンと異なれば異なるほど多大のダム容量を必要とするわけである。

Bダム群についても, 年雨量が平均雨量に等しいとき, 必要補給容量が累積確率90%の等確率線内に入るためには, $18 \sim 112 (\times 10^6 \text{ m}^3)$ の範囲で変動する。

Cダムについても, 同様に, $0 \sim 98 (\times 10^6 \text{ m}^3)$ の範囲で変動する。

次に, 年雨量ではなく, 降雨時系列から必要補給容量(年最大値)を求め, これと流量資料から求めた必要補給容量との相関性を調べてみる。

降雨時系列は, 流域平均半月雨量を用いることとし, 必要補給容量を求めるに際しては, 次の3方法で半月雨量を半月平均流量に変換した。

(1) 損失雨量法 ($\bar{r}_\ell$ 法)

年間を2期(4月～10月及び11月～3月)に分け, それぞれの期間で総雨量 R (mm) から総流出高 Q (mm) を差し引いて損失雨量 R_ℓ (mm) を求める。資料期間内の各年の期ごとの損失雨量の平均値 $\bar{R}_\ell$ を求め, さらにこれを半月数で除して半月損失雨量 $\bar{r}_\ell$ (mm) を求める。次に, 半月雨量 r (mm) が与えられたとき, 半月平均流量 q (m^3/s) を次式から求める。

$$q = (r - \bar{r}_\ell) A / 86.4 D \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

ここで, A は流域面積 (km^2), D は半月日数である。

このようにして求めた q の時系列と必要取水量の時系列とから, 必要補給容量が計算できる。

(2) 流出率法 (fr 法)

(1)と同様に年間を2期にわけて、それぞれの期で流出率 $f = Q/R$ を求め、この資料期間における平均値を $\bar{f}$ とする。

半旬雨量 r (mm) から、半旬平均流量 q を次式によって求め、必要補給容量を求める。

$$q = \bar{f} \cdot r \cdot A / 86.4 D \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

(3) 重回帰式法

(1)と同様に年間を2期に分けて、次式重回帰式によって半旬平均流量を計算し、必要補給容量を求める。

$$q_i = \alpha_0 + \alpha_1 q_{i-1} + \alpha_2 r_i \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

ここで q_i = 第 i 半旬平均流量, q_{i-1} = 第 $(i-1)$ 半旬平均流量, r_i = 第 i 半旬雨量である。

以上の3方法により、半旬雨量の時系列から必要補給容量を求め、流量資料から求めた必要補給容量 (いずれも年最大値) の相関性をAダム

及びCダムについて調べた結果は表-3.

3.6のようになった。

また、このときの相関図を図-3.3.7 (Aダム), 図-3.3.8 (Cダム) に示す。

Aダムで最も相関性の高いのは、重回帰式法で相関係数は0.76である。次に相関性の高いのは、流出率法である。

Cダムで最も相関性の高いのは、流出率法で相関係数は0.76である。次に相関性の高いのは重回帰式法である。

表-3.3.6 半旬雨量時系列から求めた必要補給容量と流量資料から求めた必要補給容量の相関係数

方法 \ ダム	A ダム	B ダム
年 雨 量	-0.60	-0.21
(1) 損失雨量法	0.60	0.46
(2) 流出率法	0.67	0.76
(3) 重回帰式法	0.76	0.75
資 料 年 数	28	51

損失雨量法は3方式のうちで最も相関性が低いが、図-3.3.7及び図-3.3.8をみると、この方法で求めた必要補給容量は、流量資料から求めた必要補給容量よりも大きい傾向がある。

これに対して、流出率法、重回帰式法では、必要補給容量は、流量資料から求めた必要補給容量よりも小さい傾向がある。これは、流出率あるいは重回帰式が資料期間において平均化された値であるため、推定流況も平滑化されているためである。実際には流出率は年ごとに違う値をとる。

損失雨量法では、毎半旬、半旬雨量から一定雨量を差引いて流況を求めているため、無降雨半旬では負の流量となることもあり、結果的に必要補給容量が大きく計算される。

以上のことから、半旬雨量の時系列を用いて必要補給容量を求めると、年雨量の場合に比べて相関性は高くなるものの、流量資料から求めた必要補給容量との相関性は、まだ十分とはいえない。

したがって、渇水と降雨特性は密接な関係を有しているものの、渇水は流況時系列と計画利水量の時系列とのギャップにより発生するものであり、降雨指標だけで渇水进行评估することは難しいことが明らかとなった。

そこで、次章では流況時系列資料をもとにして、水資源開発の進展に伴う河川利用率の上昇と渇水の危険性増大の関係について分析してみる。

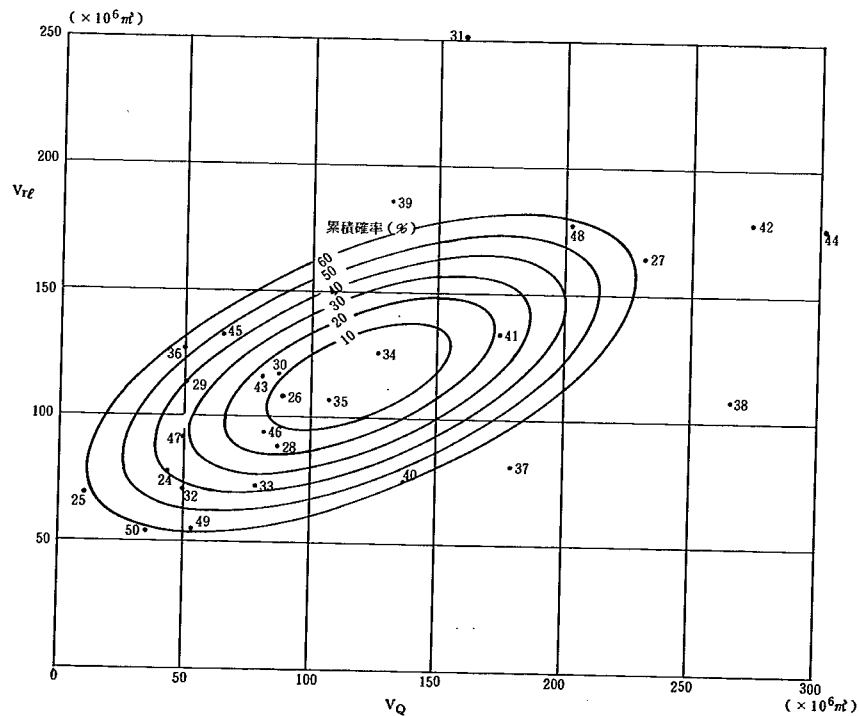
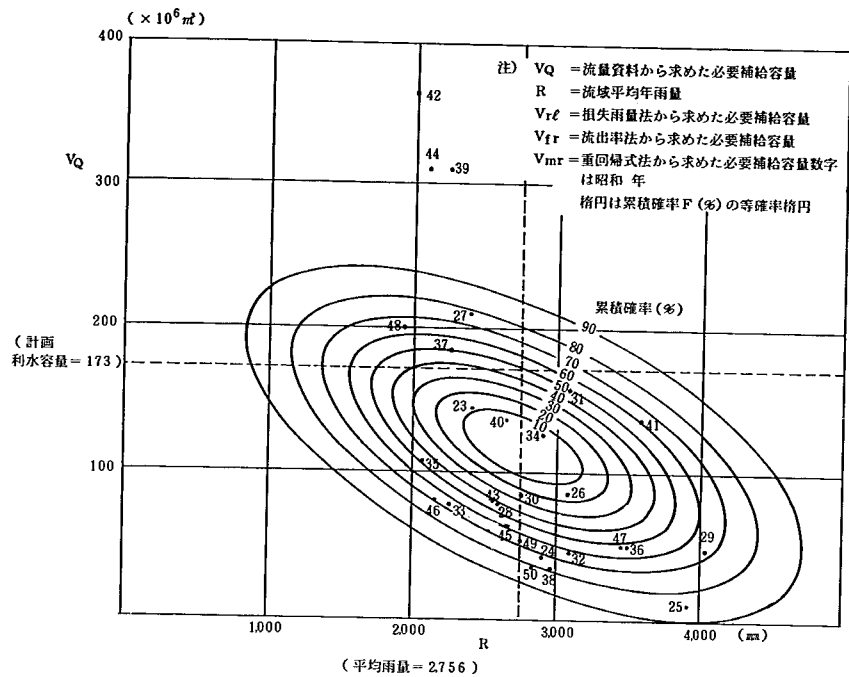


図-3.3.7 必要補給容量の相関性 (Aダム)

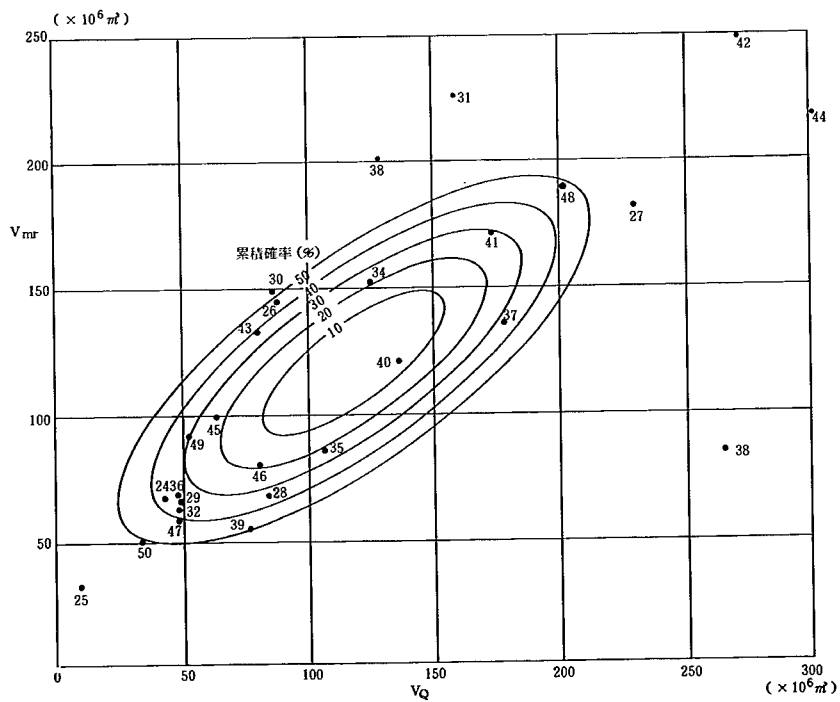
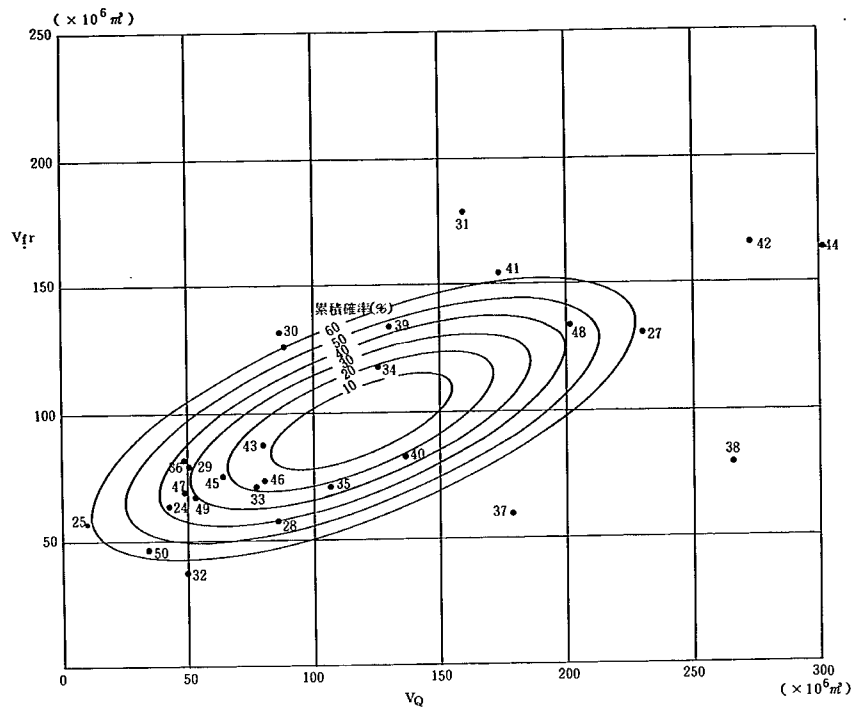


図-3.3.7 必要補給容量の相関性(Λダム) 続き

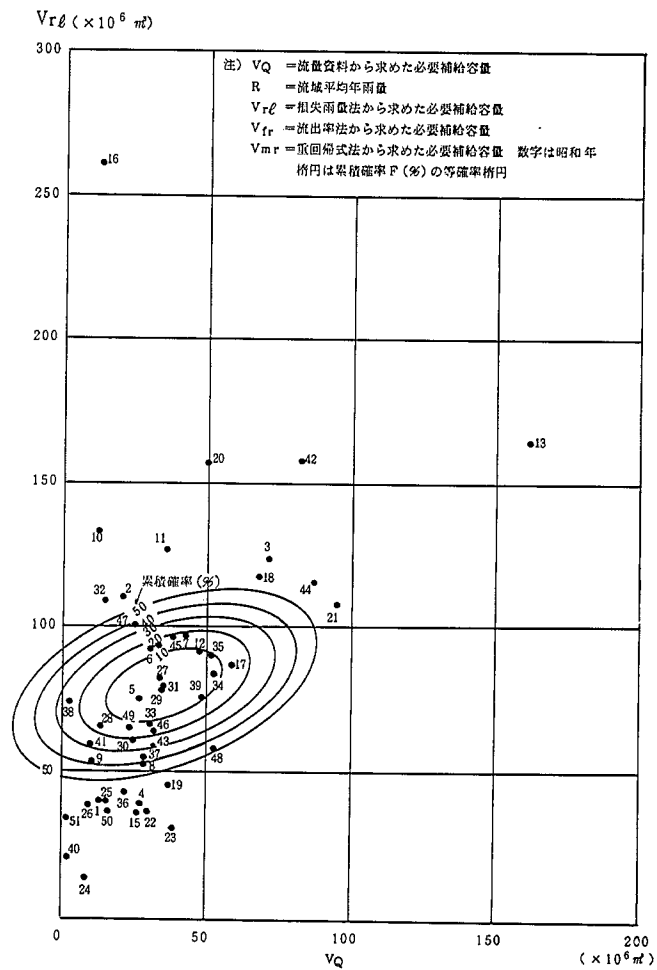
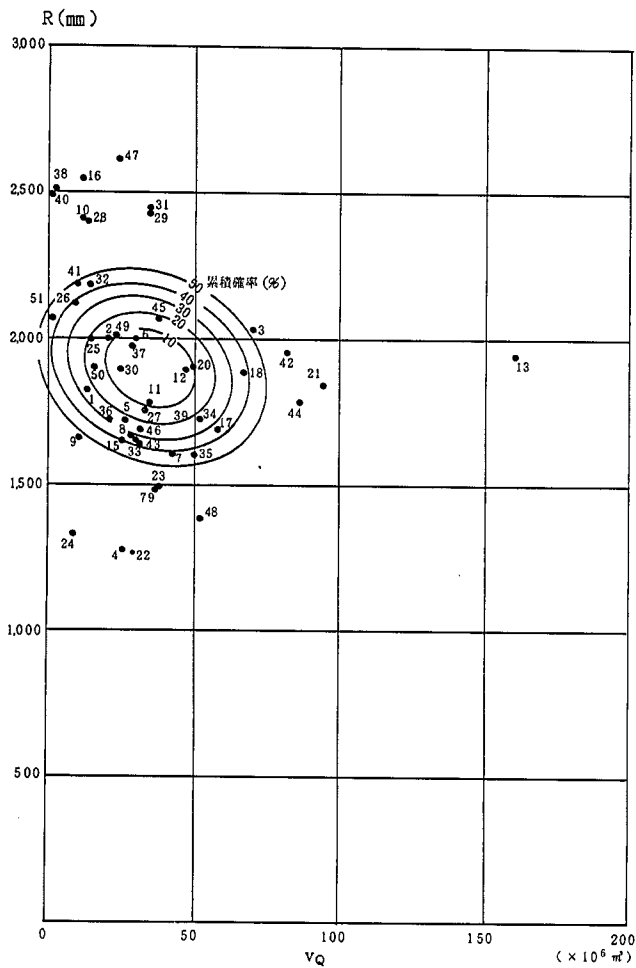


図-3.3.8 必要補給容量の相関性 (C ダム)

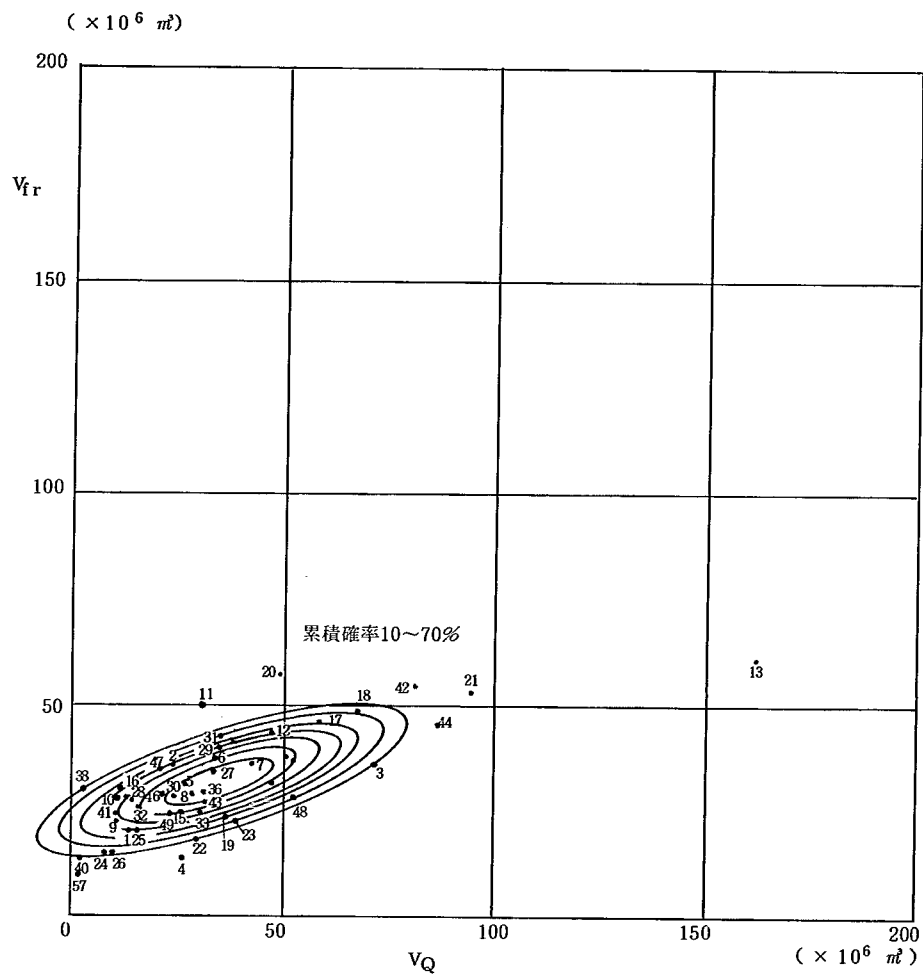


図-3.3.8 必要補給容量の相関性(Cダム) 続き

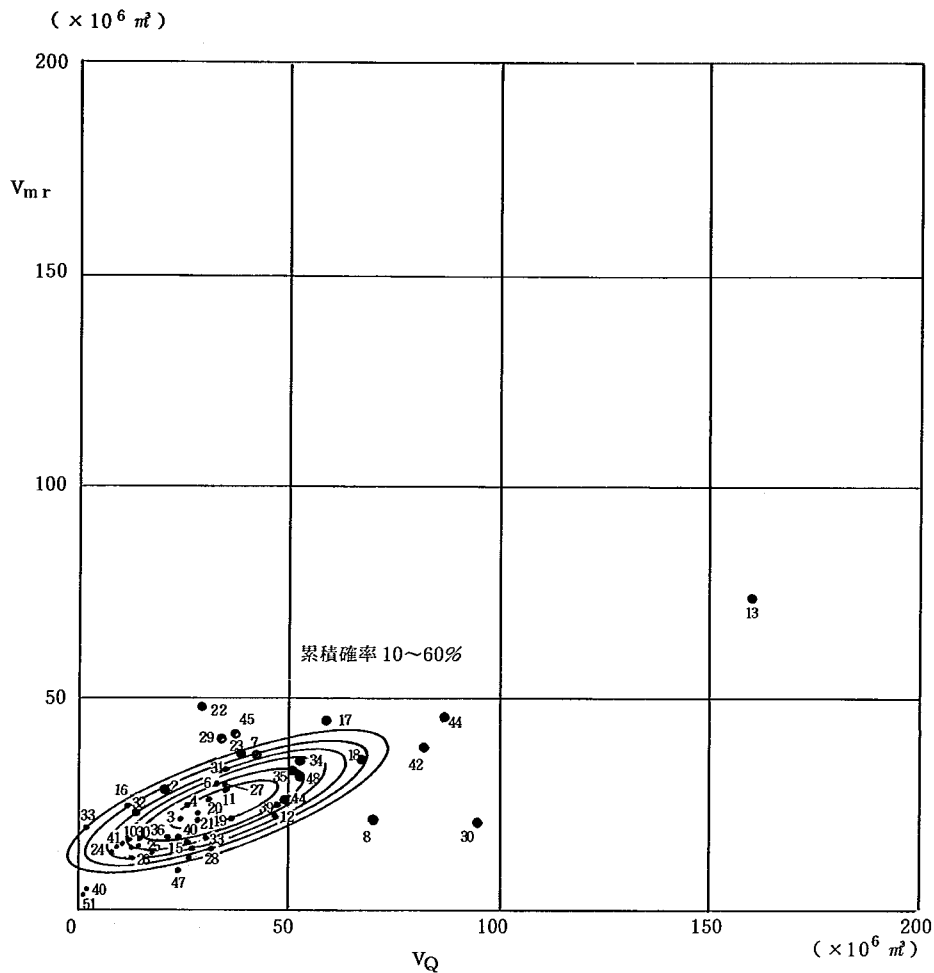


図- 3. 3. 8 必要補給容量の相関性 (Cダム) 続き

第3章 渇水と降雨特性

要 約

本章では、渇水と降雨特性の関係について種々の分析を行なった。

3.1では、まず、干ばつの実態と気象要素の関係を文献によって整理した。

次に、3.2では降雨の経年変動特性を調べ、流域によって異なるが10年、20年、44年等の長期的な周期性が存在し、豊水期及び渇水期が表れることを確めた。また、降雨の季節的な変動要因の例として、夏期降雨量が梅雨期・台風期雨量にかなり支配されていることを分析した。

さらに、渇水と関係が深い夏期(5~9月)降雨特性の水文統計値を全国的にマクロ的に調べた。その結果、夏期総雨量が平年の70%以下となるのは再現年で表わすと10年に1度、60%以下となるのは再現年

が20年、55%以下となるのは再現年が50年、50%以下となるのは再現年が100年以上であることがわかった。夏期降雨日数及び無降雨継続日数についても、同様に再現年別の統計値、及び平年比をもとめた。

3.3では、前節の結果をもとにして、既往の代表渇水年の夏期降雨特性の水文統計的位置づけを行なった。

まず、最近の渇水生起年の全国的な分布状況を調べ、次に、東日本及び西日本において、夏期総雨量の再現年ごとに、渇水生起年の発生頻度を調べた。その結果、東日本では1939年、1946年が再現年50年以上の渇水が頻発し、1942年、1944年、1973年が再現年10～20年の渇水が頻発している。西日本では、1939年、1894年、1967年が再現年50年以上、1944年、1933年が再現年20年ないし50年、1913年、1934年、1924年、1973年が再現年10年ないし20年の渇水が頻発している。

次に1894年、1939年、1967年、1973年、1978年の代表渇水年の総雨量分布図(平年比)を作成して渇水の広域性について調べるとともに、代表地点における降雨特性を再現年によって水文統計的に分析した。

最後に、ダムの年最大補給容量と年雨量の相関解析を行なった結果、相関性の低いことを確めた。このことから、マクロ的な降雨特性を表わす指標が、必ずしも渇水を適確に表現し得ないことがわかり、渇水を表現するには流況あるいは降雨時系列と利水量時系列の両者から決まる“不足水量の時系列”が考慮されるべきであるといえる。このような観点から、次章では、流況時系列をもとにして、河川利用率と渇水危険性の増大の関係を分析する。

第3章 参 考 文 献

- 1) 気象庁、西日本の干ばつとその予報、季節予報指針 下巻 第15章、1972、3
- 2) 藤吉、利水計画の安全度に関する二、三の考察、土木学会誌 56 - 11、1971.
- 3) 建設省近畿地建、淀川流域計画渇水解析、昭和48年3月
- 4) 建設省河川局、広域利水第一次報告書、昭和46年4月
- 5) 建設省土木研究所、利水計画における流況把握に関する研究、第23回建設省技術研究会報告、昭和44年
- 6) 正務、待井、本邦各地の無降水継続日数のReturn Periodについて、研究時報8巻7号、1956.
- 7) 国土庁水資源局、水資源供給限界調査報告書(水資源賦存量調査)、昭和51年3月

第4章 渇水と貯水池の最適運用

4.1 水利用率と水資源開発安全度

水資源開発計画における開発施設の必要貯水池容量は、第1章3節でのべたように、当該河川における計画対象年を定め、その計画対象年における計画地点（貯水池設置地点および利水基準地点）の河川流況をもとに、当該河川において占有されている既得権益を損わない範囲で、すなわち、下流利水基準地点から下流における既得水利権、ならびに、河川管理者が必要と認める流量（河川法施行令第十条に規定されている河川の適正な利用及び流水の正常な機能の維持をはかることを目的として、流水の占有、舟運、観光、流水の清潔の保持、塩害の防止、河口の閉塞防止、河川管理施設の保護、地下水位の維持等総合的立場から定められる流量で通称「維持流量」という。）を確保した上で、さらに新規に取水しようとする流量を加えた流量（基準地点における確保流量）に対して十分に補給可能なものでなければならないとされている。

計画対象年の決め方としては、最近10ヶ年間の計画地点の流況により利水基準地点における確保流量に対する貯水池よりの補給運用を試行し、補給のために必要な貯水池容量が最大となる年を採用することを原則としている。

しかしながら、水利用体系が錯綜しかつ河川水の利用率が高くなっているために高度な水管理を要求される利根川、木曽川、淀川等においては、計画対象年を固定することにより先発開発と後発開発との複雑な権利関係の調整作業を避けているのが実態であるが、これらの河川における計画対象年も、当初決定される段階における考え方は、他水系で実施されている考え方と原則的には同一であったと見て良い。

このように、最近10ヶ年間の渇水第1位を貯水池計画の対象年として採用することについて法制的に明文化された規定はなく、河川水を利用するに当って、法制度運用上、慣習的に採用されてきた一基準に過ぎない。

したがって河川水利用に関する社会通念が変化してくれば、これに対応した考え方を採用すべきであり、考え方を变化させたために新たに発生した種々の問題点は、その都度社会情勢に適合した解決策を見出して対応していく必要があろう。

水資源開発は、地域の社会経済活動の発展にともない発生する各種用水の需要に対応すべく策定されるものであるから、地域社会の側から言えば、これら開発された各種用水は、地域の社会経済活動を安定的に継続していくために、ある水準以上の水供給の安全度が確保されなければならない。

ここでは、現在、水資源開発計画の安全度指標として用いられている補給必要容量の評価手法について考察することとする。

我国における河川水の利用度は、昭和30年代に入り高度経済成長路線を目指してから、急激に高まってきたところであるが、この過程において、水資源開発の安全度水準がどのような変化をしてきたかについて、建設省関連の基準等より抜粋してみると次のとおりである。

(a) 河川砂防技術基準案、昭和32年、建設省

第2編 計 画

第6章 ダム計画

第1節 多目的ダム計画

1.2.3. かんがい補給容量

「かんがい用水補給区域の地区別、期間別の必要水量にその他地区の既得水利を考慮して、計画かんがい取水地点において必要な河川流量を期間別に定め、基準渇水における当該地点の自然流量に対する過不足計算によりかんがい容量を求める。」

— 解 説 —

……………略…………… 基準渇水としては普通既往渇水中第2位または第3位を選んでいるが、渇水の非超過確率についても考慮することが望ましい。……………略……………

(b) 河川総合開発と水利行政、昭和37年、建設省河川局長、山内一郎

第三章 多目的ダムの計画、建設及び管理

……………略…………… 用水補給に必要な貯水容量は、その水系の渇水基準時における基準地点の流量と必要水量の差の累積として求められる。

基準渇水としては、既往の渇水実績、非超過確率、事業の性格、経済性などを勘案して決定されるが、通常過去10ヶ年の二位又は三位程度の渇水を選ぶ場合が多い。

必要水量は、基準地点より下流の既得水量、河川の流量維持、汚濁防止、舟運、漁業、逆潮防止、風致保護などのために必要な水量（これを河川維持用水という）及び新規水量の合計として与えられる。

……………略……………

(c) 逐条河川法、昭和41年、建設省河川法研究会

第二十三条 流水の占用の許可

5. 水利使用に関する許可の基準

……………略…………… このような水計算の基礎となる河川の流量としては新たに取水しようとする地点における最近十年間の最小流量を採用することを原則とする。……………略……………、水の需給関係の逼迫している河川では最近十年間における十の渇水流量のうち少ない方から第二位のものをその取水地点における基準渇水流量と定めることもある。

取水地点における河川の流量をこのように定めるのは、このようにして定めたものが一般にその河川について各河川使用者が円満に取水することができる限界の水量であるという河川管理上の経験的事実に基く。すなわち、河川の流量を多目に見積って、次々に新たな水利権を付与していけば各河川使用者が十分に取水することができない日がひんぱんに起こって水利権の優先順位を侵してわれ勝ちに取水するというような水利秩序の混乱が生じ、ついには、干害によって一部の河川使用者が致命的な打撃を被ることになる。

一方、河川の流量の査定をきびしくして過度に取水を抑制すれば通常利用しうべき水資源を徒らに海に放流することとなろう。その調整点として最近十年間における最小渇水流量をその河川の流量と定めて、その上に水利秩序を樹立するという行政慣習が樹立されたのである。……………略……………

(d) 建設省河川砂防技術基準（案）計画編、昭和51年、建設省河川局監修

第3章 低水計画の基本

2.3. 正常流量の設定

「正常流量は、その河川の計画基準点について定めるものとし、原則として、10カ年の第1位相当の

渇水時において維持できるように計画するものとする。」

— 解 説 —

正常流量は、河川に関する今後の諸計画の前提として維持すべきものであり、計画に当っては既往の水文資料からできるだけ長い期間（20～30年、やむを得ぬ場合は10年程度）の資料を収集し、原則として10カ年第1位相当（20年第2位～30年第3位、やむを得ぬ場合は10年第1位）の渇水時において維持できるよう計画する必要がある。なおそれが維持できないところにあつては、治水事業の目的の一つとして積極的にその維持を図るよう計画するものとする。なお、正常流量を確保すべき安全度は原則として10カ年第1位相当としているが、これは過去に計画された水資源開発計画が原則として10カ年第1位相当を基準として策定されており、また、水利使用許可も10カ年第1位相当を基準として処分されているため既得の水利使用の安全度を尊重したことに基づいている。

以上4例の文献から注目すべきことは、水利利用が未だ進展しなかった昭和30年代においては、水資源開発の安全度は「10カ年において2～3位の渇水に対して補給可能」であれば可としたものが、40年代、水の利用率が飛躍的に増大する過程におけるそれは、「原則として10カ年における渇水第1位を採用する。」こととなっている事実である。

このことは、水利利用の高度化に従い水の安定供給が社会経済活動の円滑な継続を支える主要な要素であるとの認識が深まり、さらに河川管理上は、円滑な水利調整において困難の度合いが増加することにより、必然的に高い安全度の水供給が要請されることとなったことを示しているものといえよう。

また、同時に水利利用率の変化にともないその安全度水準の変更をおこなわなければならなかったことは、とりもなおさず水資源開発計画策定の指標として現在採用されている統計的評価手法による補給必要容量が必ずしも水供給の安定度を直接的に示す指標とはいえないことの表われであると言えよう。

一方、仮に補給必要容量の統計的評価手法が水資源開発計画の策定指標として適格であったとしても、最近10年間における最渇水を採用することの純統計的見地からの問題点が残されている。

以上の2点についてモデルケースについて考察することとする。

A水系における利水基準地点の流域面積は約320 km²、この基準地点の上流で流域面積が約300 km²の地点にダムを建設すると仮定して1924年から1968年までの間の45年間の流量資料により水資源開発計画を検討したものである。

現況水利利用状況は基準地点において河川維持用水も含めて基準地点において約6.0 m³/sが必要とされており、これに新規開発水量約3.0 m³/sを加算して開発後の基準地点確保流量を約9.0 m³/sに増量しようとする計画である。

基準地点における最近の流況は表一4.1.1に示すとおりである。

ここでは、新規開発水量を1.0, 2.0, 3.0, 4.0 m³/sと仮定して、基準地点確保流量を7.0, 8.0, 9.0, 10.0 m³/sとして対応させ各々のケースについて貯水池補給必要量を45年間の流量資料により計算している。これらの確保流量に対する必要補給容量の第5位をその確保流量に対する計画貯水池容量として第5位以上の渇水に対する不足容量を節水率%とそれが継続した日数の積の総和%・日で表示したものが表一4.1.2である。この表から同じ安全度水準（必要容量の非超過確率で約10分の1）で貯水池規模を設定しても、河川水の利用率が高まるにしたがい不足%・日は増加することとなる。

また、各々の確保流量と同一の%・日（同一の節水率と言い換えることができる。）を維持するために必

表-4.1.1. A 水系基準地点流況 (流域面積=約320 km²) (単位: m³/s)

年 \ 流況	最 大	豊 水	平 水	低 水	渇 水	最 小	平 均
1965	799	1464	1042	657	428	402	1406
1966	362	1439	1440	694	556	471	1502
1967	485	1257	792	504	313	236	1291
1968	153	702	566	482	449	387	773
1969	480	666	540	453	351	294	1011

表-4.1.2 第5位を渇水対象容量としたときの不足%・日 (単位: %・日)

順位 \ 確保流量	1 位	2 位	3 位	4 位	計
3.0 m ³ /s	2,617	2,187	1,273	417	6,489
4.0	5,445	3,522	2,282	850	12,099
5.0	6,708	3,759	2,586	1,241	14,294
6.0	8,017	3,879	2,544	837	15,277
7.0	11,225	3,661	1,969	28	16,883
8.0	14,939	5,161	1,500	1,387	22,987
9.0	15,418	9,922	696	280	26,316
10.0	17,013	15,769	2,116	1,058	35,956

(資料期間: 1924 ~ 1968 年)

表-4.1.3 %・日を貯水容量決定指標とした場合の確保流量と必要容量

確保流量 (m ³ /s)	利 用 率 (%)	第5位容量 (10 ⁶ m ³)	不足%・日に対する必要容量 (10 ⁶ m ³)			
			16883%・日	22987%・日	26316%・日	3596%・日
7.0	62	40.7	40.7※	68.0	120.0	185.0
8.0	71	58.1	33.0	58.1※	102.0	162.0
9.0	80	93.2	31.0	54.0	93.2※	154.0
10.0	88	130.0	24.0	44.0	80.0	130.0※

※印の容量は第5位容量に同じ。

要な容量を同時に表-4.1.3に示した。この表を確保流量と貯水池必要容量及び不足%・日の関係で図示したものが図-4.1.1である。この図から明らかに河川の利用率を増加しようとした場合同一節水率を維持するためには、安全率評価基準を1/10 確率容量を採用した場合に較べてより多くの貯水池容量を必要とすることが判る。逆に1/10 確率容量を基準に河川の利用率を増加させた場合渇水時における節水率は

次第に厳しくなるということを示している。これらの分析結果は本節前段で紹介した30年代前半から40年代にかけて非超過確率にもとづく安全度水準が変化した過程を説明するものと言えよう。

次に、図一 4.1.2 は我国における水需給計画を考えた場合における主要河川の利用率の変化予測であり、昭和65年における河川水利用率は河川維持用水も含めて主要水系において50%以上にも及ぶものと想定される。これらの実態と前記モデル分析とを対比した場合、より充実した渇水対策の方針確立が必要であると言わなければならない。

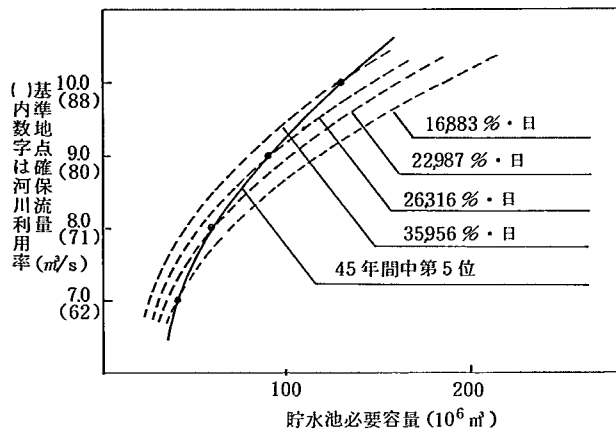
次に、貯水池計画と資料期間との関係についてA水系における検討結果を紹介することとする。A水系においては45年間の流量資料が整備されているが、これらの資料期間内で、10年の長さを単位とした連続流量資料

が36個得られる。これら10年間の資料にもとづき確保流量（この場合は $9.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ）を設定して貯水池必要容量を計算し各10年における貯水池必要容量の中で、その第1位及び第2位を仮にその計画貯水池容量と仮定する。一方45年間の全期間を通じて決定した貯水池必要容量（第5位）とを比較して示したものが図一 4.1.3である。10年間渇水第1位（或は第2位）といった貯水池規模決定手法による貯水池規模の大巾な変動性をよく表現している。

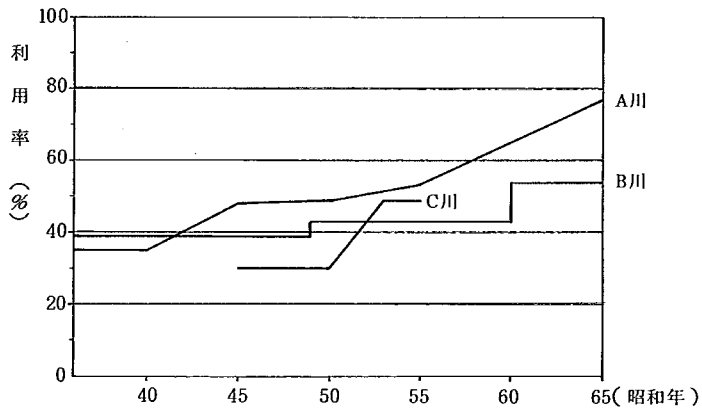
また、図一 4.1.4はCダムにおける28年間の確保貯留量曲線を示したものである。本ダムは、前期10年における流量資料にもとづき貯水池計画が策定されたが、その後貯水池規模決定の対象渇水を上廻る渇水が発生し、節水ルールの設定が円滑な貯水池運用を達成する上での必須条件とされており、目下関係機関を含めて協議がなされている現状である。

以上の分析結果から貯水池計画上の留意点として次のような事項が挙げられる。

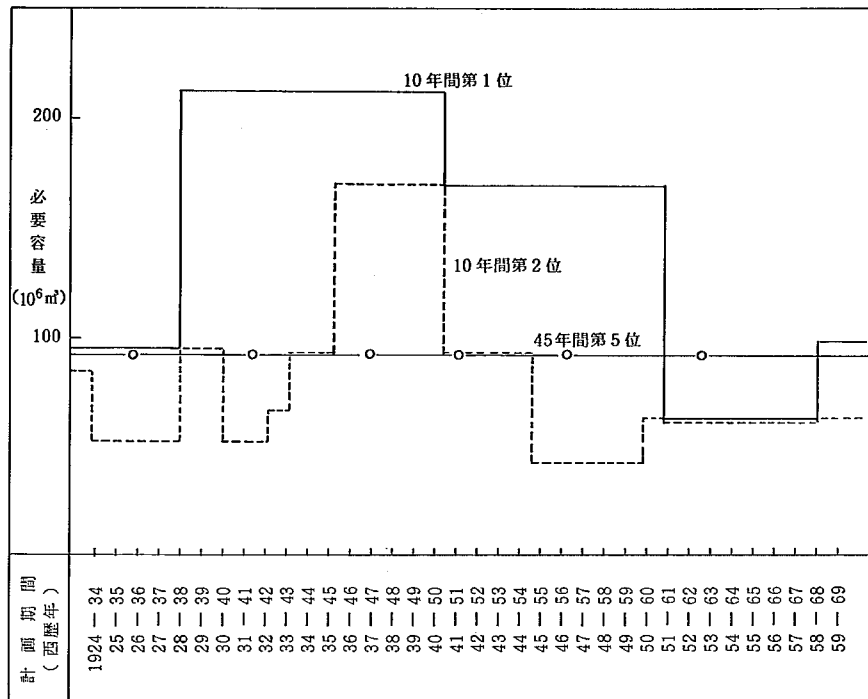
ⅰ) 貯水池計画指標として現在採用されている貯水池必要容量の非超過確率による評価手法は河川の利用率の増加にともない渇水の危険度を増大させる傾向にある。



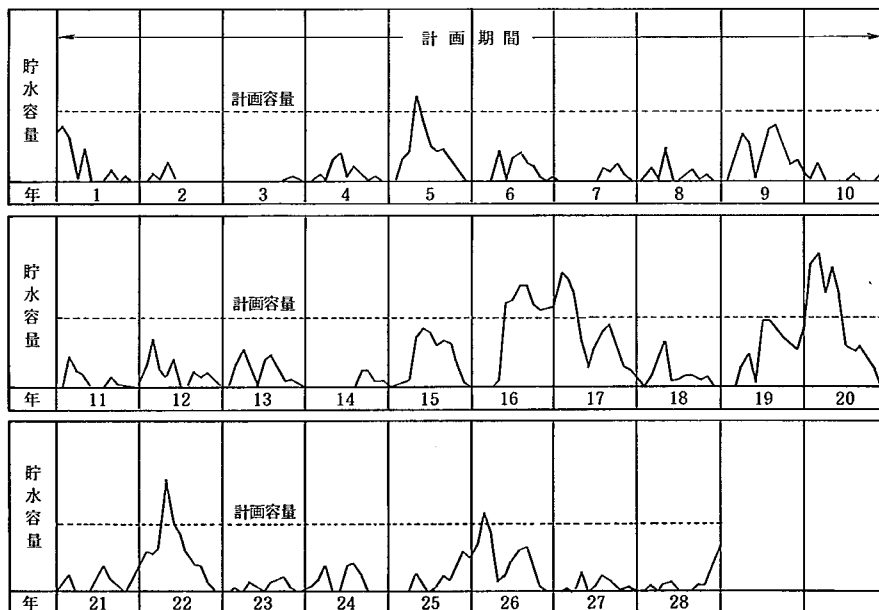
図一 4.1.1 非超過確率と%・日を評価指標とした場合の必要容量と確保流量の関係



図一 4.1.2 主要河川の利用率の推移



図－4.1.3 計画期間と渇水順位及び第2位貯水池容量の変動状況



図－4.1.4 Cダム計画期間とその後の渇水評価

河川の利用率が増加する一途にある水資源開発の現状と対比した場合、計画された貯水池容量の渇水に対する対応性について十分に検討を加える必要がある。

ⅱ) 現在採用されている貯水池安全度の評価手法の是非はともかくとして、純統計的立場から見た場合さらに、長期間の水文資料により計画策定がなされるべきである。また、渇水に対する対応性を検討するに当たっても、長期間の水文資料整備は不可決の要件である。

4.2 水資源開発と渇水対策

前節において貯水池計画の現状とその供給安全度についてのべたが、本節においては水資源開発と渇水対策の関係について考察してみることにする。

渇水がある地域に発生する毎に水資源の緊急の開発がさげばれているが、水資源の開発即渇水対策と判断できるものであろうか。

前節においてのべたように、新規の水資源開発計画の供給安全度を「原則として10年に一度発生するような渇水」に対応すべく貯水池規模が決定されるとして、仮に渇水危険度評価指標を不足%・日により表示するものとすれば、水利用率が向上するに従い渇水危険度が増大していく事実から見ても結論は明らかであろう。

つまり従来より実施されてきている水資源開発は水の需要と供給の間に存在するアンバランス、即ち水不足を解消することを目的としているものであり、渇水対策は、これらの水資源開発も含めた需要と供給の間に内在する異常気象時における渇水被害の危険度に対する対応であると言える。

もっとも、水資源の開発が完了しこれら供給施設の能力に対して需要が未発生の場合、いわゆる開発先行型のケースや、従来の既得水源の安全度に比べ、新規開発の水源の安全度が高いケースにおいては間接的に水資源の開発が渇水対策となる場合もあり得る。

しかしながら、水需給の逼迫した地域においては、水資源開発計画が策定され、その開発事業が軌道に乗った段階において暫定的な豊水水利権が賦与される場合もあり、このような利用先行型の水系においては取水開始とともにこれら取水に応じた新たな地域の水利利用構造が型成されることにより渇水の危険度は増大する傾向にあると言えよう。

以上のような視点から水資源開発と渇水対策の関係につきさらに具体的なモデルによって特性をとらえることとする。

いまある地域において新規の水需要 Q が発生し、これに対して水資源開発をおこなう場合、その安全度をどのように評価決定するかについて考察してみる。

考察に当っては次のような仮定を設ける。

- i) 新規の水供給による便益を1つの指標により計量化することができる。
- ii) 水供給と水利用(工場立地等の設備投資も含む)のための費用が、i)と同一指標により計量化することができる。
- iii) 水利用と供給の間に存在する渇水被害がi)と同一指標により計量化することができる。
- iv) 渇水対策のための費用が、ii)と同一指標により計量化することができる。

これらの仮定にもとづいて開発量 Q の水資源開発における安全度と渇水対策の関係を図-4.2.1のような概念でとらえることができる。

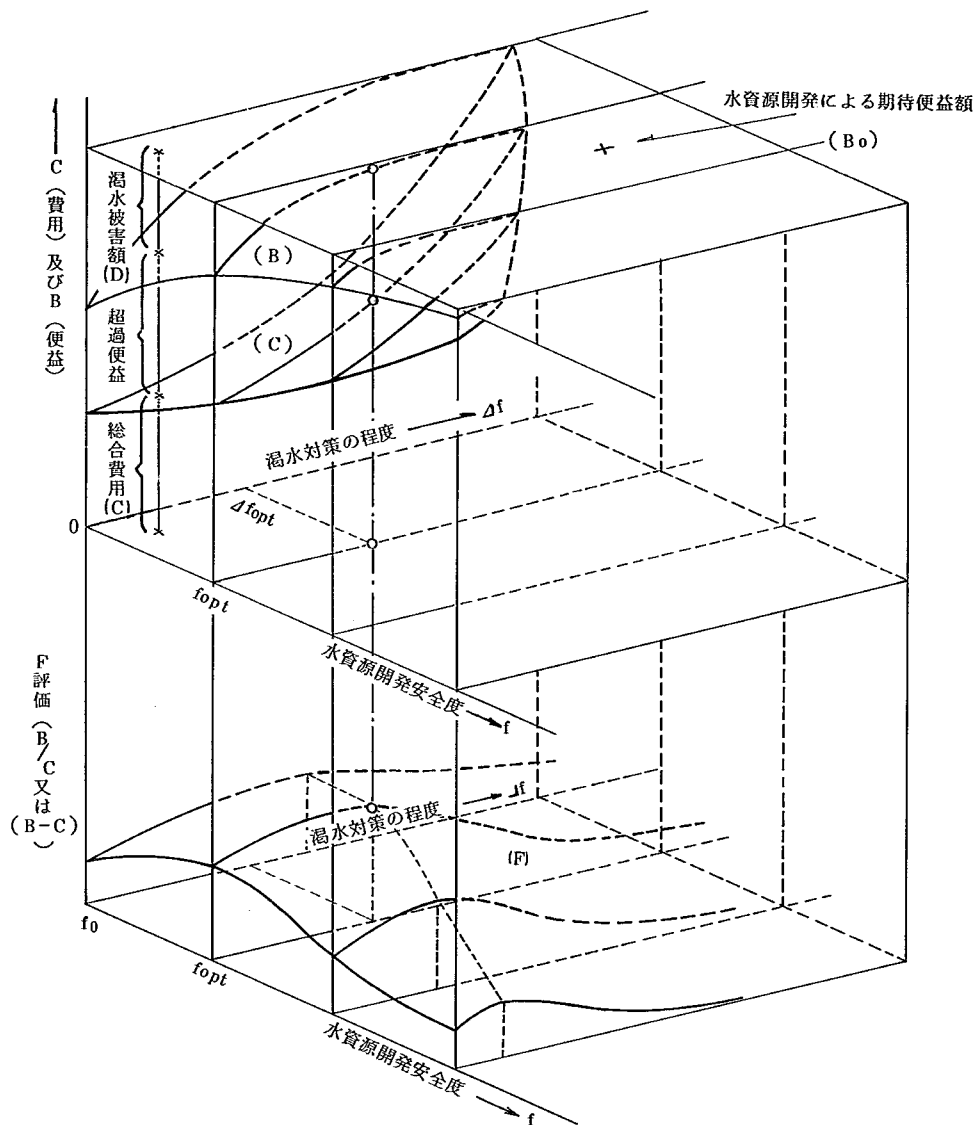


図-4.2.1 開発量 Q (一定) における適正水資源開発安全度及び
洪水対策の程度に対する費用便益概念図

- 注1. 本図は Q なる開発をおこなう場合の適正な水資源開発安全度と洪水対策の程度を得るための概念を示したものである。
- 注2. 上段座標では、水資源開発安全度(f)と洪水対策の程度(Δf)に対応した総合便益(B)と総合費用(C)を面的に表示したものである。また、総合便益(C)は、水資源開発による期待便益額(B_0)から水資源開発安全度(f)と洪水対策の程度(Δf)に対する洪水被害額(D)を差し引くことにより求められる。
- 注3. 下段座標では、上段座標における B と C を B/C 、又は $(B-C)$ の形で評価した場合の値を同一の f 、 Δf の函数として示したものである。
- 注4. 最適な評価を与える f 、 Δf を各々 f_{opt} 、 Δf_{opt} として表示すれば、 f_{opt} と Δf_{opt} は適正な水資源開発安全度と洪水対策安全度を示すものとなる。

図-4.2.1で f 軸は、開発量 Q に対する供給の安全度であり開発量 Q に対応する便益期待額は供給安全度 f に関係なく一定値である。

安全度の増加にともなう増加するものとして開発に要する費用があり、一方安全度の増加にともなう減少するものとして供給量 Q に内在する渇水被害額がある。

開発量 Q に対する便益期待額から内在する渇水被害額を差し引いたものを開発量 Q に対する総合便益と定義すれば、この総合便益は供給安全度の増加にともなう増大していくことは当然のことである。

ii) より算出される費用を総合費用と定義すれば総合便益との関係において妥当な評価指標があれば最適な水資源開発の安全度 f_{opt} を見出すことができる。

一方 f 軸と水平に直角方向に Δf 軸を考えることとする。 Δf は水資源開発以外の手段例えば、緊急備蓄水源よりの水供給等総合的な渇水対策の度合いを示す指標である。

開発量 Q に対する便益期待額は Δf 方向についても一定であるが、 Δf の増加にともなう渇水対策費は増大し、逆に、渇水被害額は減少する。つまり、 Δf 軸を考えることにより、水供給と利用に関する総合費用としては、

総合費用＝水資源開発と利用に要する費用＋渇水対策に要する費用

となり、また総合便益としては、

総合便益＝水資源開発 Q による期待便益額－水資源開発における渇水被害額＋渇水対策による渇水被害軽減額

となる。

以上のようにして、開発量 Q に対して、渇水対策を考慮した場合の総合費用と総合便益を概念的に説明することができるが、これら総合費用(C)と総合便益(B)はいずれも水資源開発安全度(f)と渇水対策の程度(Δf)の関数として求められるものである。

したがって、総合費用(C)と総合便益(B)の関係を評価する指標として F を次の式のように定義する。

$$F = B(f, \Delta f) / C(f, \Delta f) \quad \text{又は} \quad B(f, \Delta f) - C(f, \Delta f) \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

F の最適値は

$$\partial F / \partial f = 0 \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\partial F / \partial \Delta f = 0 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

(2), (3)式から求められる f と Δf の値を f_{opt} , Δf_{opt} とすれば、 F の最適値を与える、 f と Δf であり、 f_{opt} と Δf_{opt} は、最適な水資源開発安全度と、最適な渇水対策の度合いを示すものと言うことができる。

以上、最適な水資源開発安全度と最適な渇水対策の度合いを求めるための手続きについて概説したが、これは、水資源開発と渇水対策の関係を概念的に説明するための手段として用いたものであり、これらの概念を現実の水資源開発と利用計画策定手段として適用するためには前記i)～iv)に挙げた仮定のすべてを実現しなければならないが、現実的にみて、i), ii)を実現することは不可能であると言わざるを得ない。

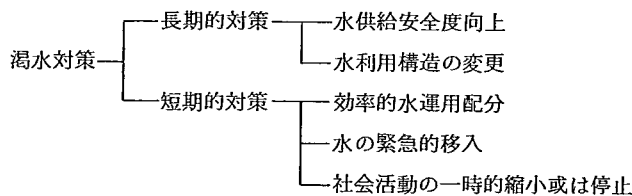
しかしながら、現実的には水資源開発の安全度は(その是非はともかくとして)「原則として10年に1度の渇水」に対応すべく策定されており、今後も計画手法を変更しない限り同様の方針で計画が策定されるであろう。

一方、完成ダムにおいては、その供給安全度は既定のものである。したがって水資源開発の安全度そのものについて論議する場合は別として、渇水対策に焦点をしばった場合においては、水資源開発の安全度 f は既与のものとして取り扱ってもさしつかえない。

このような観点から渇水対策にのみ焦点をしばった場合の指標としては、渇水対策費と渇水被害軽減額との関係において論じればその渇水対策の費用効果の分析は可能であろう。

渇水対策費と渇水被害軽減額の間を論じる場合、固定された渇水対応の度合い Δf に対して無数の代替案が想定されその中での最適案が図-4.2.2に示す渇水対策であり渇水被害軽減額となる。

これら渇水対策の代替案としては、次のような対応方策の中から具体的手段が選択されるものであろう。



選択される手段としては、必ずしも単一とは限らず複数の手段の組合せとして採用される場合が多くなるものと想定される。

またこれらの対応手段の中には、長い期間と莫大な費用を要するものもあるが、ソフト的対応によって対策が可能なものもあり、さらにこれらソフト的対応を踏えた長期的対応を目指すケースも考えられる。したがって、ソフト的対応方針を先ず明確にすることが、渇水対策の第一段階とすることができる。このソフト的対応の中で最も影響度の高いものとして合理的な渇水対策としての貯水池運用方式の確立が挙げられる。

4.3 貯水池運用の実態

貯水池の運用に関して、その貯水池が計画時点で必然的に渇水被害の危険を内在していること、また、渇水被害軽減対策として貯水池の効率的運用が存在することは前述のとおりであるが、本節では貯水池運用の実態を分析することにより貯水池運用段階での水供給安全度を追求し貯水池の効率的運用の足がかりとしたい。

貯水池運用の手順としては、一般的な基準地点開発方式を考えた場合、通常次のような形で実施されている。

- 1) 需要量（取水予定量）の設定
- 2) 基準地点確保流量の設定（河川維持用水も含む）

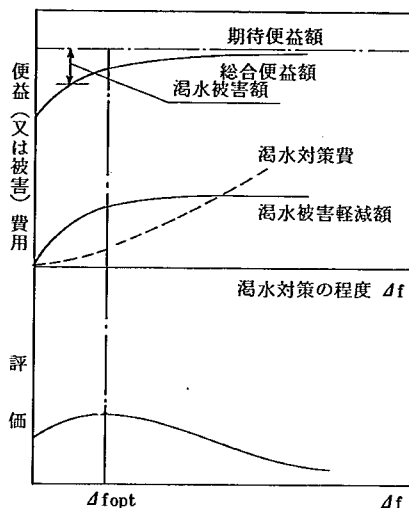


図-4.2.2 開発量、水資源開発安全度を固定した場合の渇水対策費と渇水被害軽減額の関係を示す概念図

- 3) ダム～基準地点間の残流域流出の推定
- 4) ダムよりの補給（放流）目標量の設定
- 5) 貯水容量の安全度確認（安全度に不安があれば、1）にフィードバックする。）
- 6) ダムよりの放流

需要量の設定は、水道用水、工業用水等比較的時局的変動要素の少ない用水についてはあらかじめ取水期間別の取水量を設定しておき特別な状況のときにのみ取水管理者からダム管理者へ変更内容を通報するといった形が多い。農業用水については当該かんがい地区における降雨量によりその取水量は変化するものとして計画されるケースが多い。したがって、上記上水道・工業用水よりは短い間隔で当日或は週間の取水予定量を土地改良区等の取水管理者よりダム管理者へ通報する方法をとっている。一方、慣行の農業水利等においては新規の農業用水ほど厳密な用水管理がなされていない場合が多く、このような場合においては従来の慣行権を尊重して現状での用水管理状態を継続しても支障を及ぼさないような流量を基準地点において確保するといった方法を計画段階で配慮しているケースが多い。

ダム～基準地点間の残流量の推定については、ダムより直接取水する場合は問題とならないが、ダム残流域流出量をその開発計画に見込んでいる場合においては、ダム～基準地点間の残流域流出量の推定が貯水池運用上重要な要素となってくる。これら残流域流出の予測手法としては、当日の残流量から逓減量を過去のデータを用いてあらかじめ定めておき、ダムの放流量が基準地点に到達する時期の基準地点における残流域流出量を推定する方法や、これらの方法に降雨量との相関を加味する方法が初步的手法としてとられており、さらに進展した場合においては、タンクモデル法、貯留函数法等の流出函数を応用している事例も見受けられる。

ダムからの放流（補給）目標量の設定に当たって考慮されることは、とくにダムと基準地点間の距離が長い場合、ダム放流量の到達率、或はその放流量の河道でい減状況、到達時間等の総合的な要因を考慮して検討が必要となる。一般的には、従来の運用実績にもとづいて、経験的に実行されている事例が多いようであるが、場合によっては河道貯留函数を応用している事例もある。

貯水容量の安全度確認については、今後この放流状態を継続しても予想される渇水に充分対応できるか否かの検討をおこない、仮に今後予想される渇水に対応できる見通しがない場合においては、節水運用という形での需要量（取水予定量）の見直しが必要となる。

貯水容量の安全度確認の方法としては、既往流量資料にもとづいて貯水池保有量と節水率の関係を定めておくことにより或る貯水限界を越えた場合においては、定められた節水ルールにもとづいて水利用者との協議にもとづき節水運用に移行するといった事例が何件か認められるが、殆んどの場合、渇水により貯水池容量が減少した段階でその都府協議会等で、節水方法を協議した後に節水運用に移行するケースが多い。

以上が現状における貯水池運用に関する概略の実態であるが、現状における貯水池運用の課題として次の2点が挙げられる。

その第1は、計画された基準地点確保流量に対していかに適確に放流を達成するかという課題であり、その2は、計画された貯水池安全度に内在する渇水の危険を回避するための運用方法をいかにして確立するかといった課題であろう。

計画された基準地点確保流量に対していかに適確に放流を達成するかということは計画段階で意図され

た安全度と管理段階においていかに達成するかということに言い換えることができる。つまり貯水池管理の実態を分析してみた場合計画段階における安全度と管理段階における安全度の間に差異を生じる次のような要因に対し、いかに適切に対処するかということである。

即ち、計画段階より管理段階に至って貯水池安全度を低下させる要因としては、

i) ダム～基準地点間残流域の流出予測において降雨の予測が不確実なため、予測されない降雨があった場合、ダムと基準地点間の流達時間が長いケースにおいて予測されない降雨量相当の流出量は無効放流量となる。

ii) 農業用水の取水量で、田面有効降雨量がその取水量決定の一要因となっているケースにおいては、ダム放流後の予測されない田面有効降雨量相当の取水減量分は無効放流となる。

これら i), ii) に挙げた無効放流の原因となった降雨量の予測誤差は、計画段階においては完全に予測されたものとして取り扱われているものである。

これらの降雨予測誤差に起因する無効放流を解消するためには、無効放流相当分を取水地点付近で一時貯溜可能とするような調整池を設ければ良いが、このような目的で設置された貯水池の例としては、吉野川水系において早明浦ダムの無効放流量を一時的に貯溜調整するために下流の池田ダムに低水調整容量 800,000 m³を確保した 1 例がある。

管理段階に至って計画段階と比較して安全側の要因として挙げられるものにダムと基準地点間で取水される新規開発用水の還元量がある。

新規開発用水の還元量については農業用水計画において地区内還元等で計画考慮されている場合もあるが、通常は河川より取水した各種用水は発電用水、冷却用水等の特殊な場合（水利使用許可に当って、取水と同量の還元を明確にした場合等）を除いて、取水した河川には還元しないという前提でダム補給必要容量が設定されている。これは公水である河川水が一旦河川区域外に取水されれば、その用水は河川管理者の権限の及ばない私水と化し、取水河川への還元が保証されていないという伝統的河川管理思想にもとづくものであると判断される。しかしながら、このような河川法制上の判断はともかくとして、現実的には取水量の相当部分が取水河川に還元されこれら還元用水は基準地点における河川流量の一構成要素となり、意識的、無意識とを問わずダム運用上の一要因として運用に反映されており、このようなケースにおいては計画段階にくらべて管理段階での安全度は向上することになる。

しかしながらこれらの還元水も最近においては、大規模な流域下水道により基準地点を通過することなく、はるか河川の下流部で放流される場合もあり、さらには新規用水の還元水のみならずダム計画時点においては基準地点における流況として計画対象時の流量として考慮された既得取水の還元水までも同時に基準地点を通過しない場合がある。このような場合においては、逆に管理段階における安全度は低下することとなる。

このように還元水の取り扱いについては用水の取排水系統の変化により貯水池運用の安全度に及ぼす影響も変化してくるものであるが、河川の利用率が増加しその還元水が河川の流況に占める比率を高めてきている現状においては河川の流水管理上無視できない重要な要因の一つに挙げなければならない。これら還元水の取り扱いについては、河川区域外における水の取り扱いも含めて、行政的立場からも技術的立場からも明確にすべき時期に来ていると言わなければならない。

以上を要約すると、計画段階における貯水池の安全度と管理段階における貯水池の安全度の間には次の

ような関係が成り立つ。

〔管理段階における安全度〕＝〔計画段階における安全度〕＋①〔降雨予測誤差にもとづく無効放流による安全度の低下〕＋②〔還元水を考慮した場合の安全度の向上、又は取排水系統変更にもとづく安全度の低下〕＋③〔その他〕。

実行安全度とも言ふべき管理段階における安全度と計画上意図された安全度の間には上述のような各々の安全度に差異を生ぜしめる要因が含まれている。

①の項目については、計画上意図されたレベルに近づけるべく管理者側において最大限の努力が払われるべきであるが、その技術的限界が明確になれば計画へのフィードバックについても考慮されなければならない。

②の項目については、河川の流量管理が流域の総合的水循環の立場から技術的、行政的に明確にされなければならないが、これら還元水の取り扱いについて、水需給の逼迫している地域において水資源の効率的開発の一要因としてとらえようとする動きがある。しかしながら前述のとおりこれら還元水は、水供給安全度を支配する重要な要因の一つとして挙げられることから、先ず還元水と水供給の安全度の関係を明確にすることが先決であろう。

次に、第2点目の課題として挙げた計画上意図された安全度の裏にある渇水被害の危険度を貯水池運用方法によりいかに回避するかという問題について考察してみる。

貯水池運用の実行安全度つまり管理段階における安全度は、計画上意図された安全度に対してその安全度向上要因と、低下要因を加味して最終的に評価されるものであるが、いずれにしてもこれらの貯水池計画がある計画水準のもとに設定されているものであれば、すべての渇水に対応できるという保証はなく、必然的にその安全度の裏にある渇水危険度への対応が必要となってくる。ここに第1点目に挙げた貯水池計画安全度に近づけるべく実施する貯水池運用とは異なった角度からの貯水池運用のあり方が論議されなければならない。

渇水に見舞われた場合、現実的にどのような対応がなされているかを運用実態をもとに分析してみるとする。

図－4.3.1は利根川水系における流域ダム貯留量と節水率（取水制限率）の関係を示したものである。

この図から判断すると貯水池保有容量が全体の約50%を割った段階で第1次取水制限に入りさらに貯水池保有量が減少すれば取水制限率を強化する形になっている。逆に貯水池保有量が回復するにともない順次取水制限の度合いを緩和している状況が明確に示されている。これら取水制限の強化と緩和の過程から当然のことながら次のようなことが推察される。

- i) 節水率は、できるだけ小さい方が好ましい。
- ii) 最悪事態を回避するためには、事前の取水制限をして対応する必要がある。
- iii) 急激な節水率の変化は、水利用者の対応を配慮した場合問題があり、事前の予告と段階的節水について検討する必要がある。

このような渇水時対応の実態をふまえて貯水池の効率的運用のあり方について考察する必要がある。

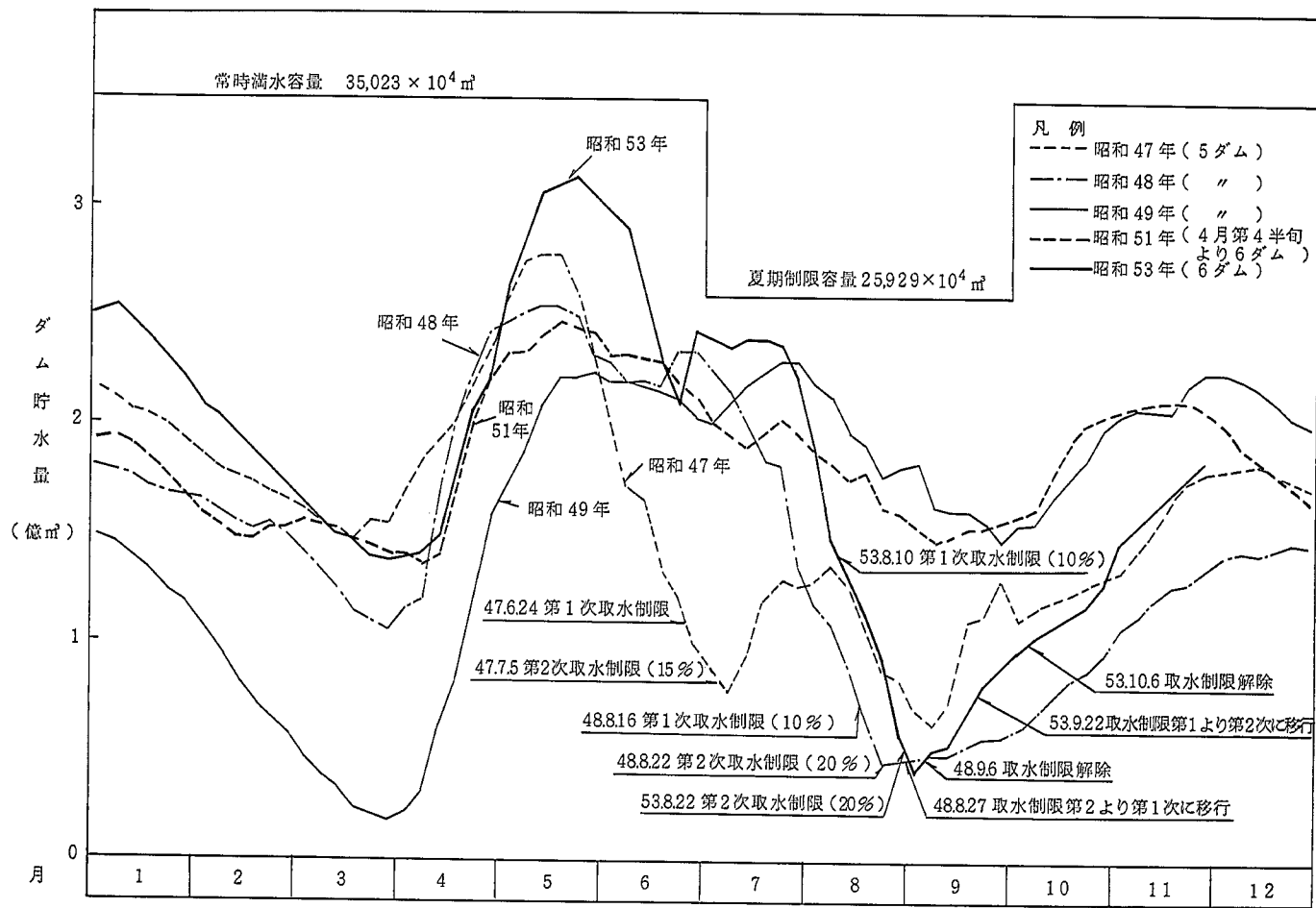


図-4.3.1 利根川上流ダム群貯水量図

4.4 貯水池の最適運用

前節において貯水池運用の実態分析を通じて貯水池運用に関する2つの課題を挙げた。第1の課題は、意図された貯水池計画安全度を運用段階でいかに確保するかということであり、第2の課題は、貯水池安全度の裏に内在する渇水危険をいかにして回避するかということである。

第1の課題については、問題の内容は比較的に明確であり別途の研究に期待することとして本節においては、第2の課題について、さらに追求を試みることにする。

貯水池がその計画水準を越える渇水に見舞われた場合、限られた河川の自然流量と貯水池保有量を有効に活用して安定的な社会経済活動の継続に資するための貯水池運用を「貯水池の最適運用」と定義すれば、貯水池の最適運用の目標としては前記取水制限の実態をも考慮して次のようなイメージでとらえることができる。

(1) 豊水期或は、渇水前期における水利用量を節約してより厳しい渇水に対処するための貯水池保有量を確保する。

(2) 社会活動の慣性を考慮した段階的節水ルールの確立をはかる。

(3) 上記(1)、(2)の条件に留意しつつ渇水時における渇水被害が最小となるような貯水池運用方式を確立する。

このような目的を達成するための手段としては、

i) 貯水池運用に関する長期的な水文予測。

ii) 貯水池運用の最適化を評価するための評価基準。

が必要となってくる。

i) については、すでに記述したとおり計画段階では、計画期間における流況がすべて確認されているのに対し貯水池運用段階における情報は極度に限定されることによるものであり、とくに河川の利用率の高度化にともない、その渇水継続期間や流況を予測すべき期間はいよいよ長期化する傾向にある。これらの実態に対して現在長期気象予報としては、1ヶ月、3ヶ月予報があるが、「多目」、「少な目」といった予報内容のダム運用への適用方法や、予報の精度等に関する問題がある。しかしながら現状において入手し得る最も長期的予測資料であり、これらの長期予報を用いた予報手法について検討分析をおこなうこととした。

また、上記予測に問題があるとすれば次に考えられることは、水文資料の統計値を利用する手法が考えられよう。これは、現在の貯水池計画が既往の水文資料にもとづき策定されている実態から当然考えられるものであるが、統計的分析をおこなうに当っては4.1節及び7.2節で論じた理由とは別の理由で長期間の水文資料が必要となってくる。つまり貯水池計画が仮に10年間の水文資料にもとづき原則として渇水第1位をもとに策定されたものとすれば計画上は、渇水状態を再現することは不可能である。つまりできるだけ長期間の水文資料を収集して数多くの渇水現象を再現することによりこれらの渇水をいかにして乗り切るかといった検討がはじめて可能となるものである。

長期間の水文データをいかにして再現するかといった方法については別の研究に期待することとして、本論において採用したモデルケースとしては、比較的に水文資料が長期間整備されたケースについて第6章において検討することとしている。

次に、ii)の問題については、渇水被害の実態調査と構造分析を通じて計量化をおこない、これを貯水

池運用の評価基準として適用を試みた。

渇水による被害額としては、直接的な一次被害のほか、産業連関等にもとづく2次被害や、たとえば、計量不可能な利便性の疎害等があり絶対値としての被害の計量化は不可能である。しかしながらどの運用方式が最適であるかといった評価基準として用いる場合には一次被害のみで十分その目的を達成できるものと判断される。

以上、i)、ii)により貯水池運用による1次的渇水被害が最小となるような運用方式を最適運用とするが、貯水池運用方式としては次の3ケースを検討することとした。

a) 長期流量資料により貯水池残量別に節水率を定め渇水を切り抜ける。

b) a)の方式に長期気象予測を加味する。

c) 基本的には、a)に近いが確率ダイナミックプログラム方式を適用することにより渇水被害が最小となるような月別、貯水池残量別節水率を定め渇水を切り抜ける。

これら3方式の各々の運用ルールの特徴としては、b)の方式は、予測手法を採用しているため年々の節水方式が河川流量の豊渇によって左右されてその時点における最適運用が得られ最も合理的方法であるが、予測に誤差がともなうことにより予測が外れた場合における被害額は増大する。

a)、c)は既往データの統計値にもとづくものであるから予測外れによる被害額は無いものの既往データより厳しい渇水には勿論対処できないし、又、毎年同一の節水ルールを採用することとなるため本来なら節水が結果的に不要な豊水年においても節水しなければならない欠点がある。

貯水池最適運用の究極としては、これら各々の運用の利点のみを活用するような併用方式の存在が予想されるが、本稿においては、各々の運用方式の利点欠点を明確にするためと、実用化を考慮して各々の単独案についてモデルケースにより検討を加えることとした。

4.1 水利用率と水資源開発安全度

要 約

水資源開発計画における開発施設の必要貯水容量は、計画渇水対象年における流況で当該河川の水利秩序を維持しつつ下流の新規取水量を確保するものでなければならない。

この場合の基本量である計画対象渇水は、10年間の渇水第1位の流況を採用しているが、河川の水利に関する社会の情勢が変化すれば、それに応じた対応を必要とする。

わが国の河川の利用度は戦後急激に上昇したが、それとともに貯水池の必要容量決定のための基本量としての計画対象渇水は、水利用が未だ進展しなかった昭和30年代においては、10ケ年の2乃至3位程度であったものから水の利用度が急激に上昇してきた昭和40年代には、10ケ年の1位の渇水に改められ、水の供給の安全度水準が向上せしめられた。しかしこの統計的評価手法により10ケ年第1位の渇水を計画対象として採用することが実際の安全度の向上を意味するか否かについては検討の必要があると思われる。そこで、モデルケースにおいて、45ケ年間の流量の統計資料を用い、45ケ年中渇水第5位(ほぼ10ケ年第1位)、以上5回の渇水について不足容量を計算してこれを節水で回避とした時の節水率と日数の積(%・日)で表示し、基準地点における確保流量と対比したところ、在来の非超過確率1/10で貯水池規模を決定しても、河川の利用率が上昇すれば、その貯水容量による渇水補給では、不足の(%・日)は増

加する。逆に不足の(％・日)が一定の場合は、河川の利用率上昇に伴ない貯水池容量が増加する、即ち渇水の安全度が低下することが明らかにされた。

4.2 水資源開発と渇水対策

要 約

長期的な水需要増加に起因する水需要ギャップの解消が水資源開発であり、計画対象渇水を超える異常渇水時に発生する渇水被害の軽減が渇水対策である。

水資源の開発効率は通常開発利用コストと期待便益額から評価されるが、渇水対策を含めた水資源の総合的な開発利用の経済性は、渇水対策費を含めた水供給の総合コストと、渇水被害額と当該対策による被害軽減額を考慮した総合便益の関係から評価される。一方、既設のダム開発を含めた既得の水利権の場合においては一定の安全度(原則として10ヶ年間第1位の渇水)を前提としているので、渇水対策の経済評価は渇水対策費と渇水被害軽減額との関係から導かれる。

渇水対策の手段としては、長期的対策として水の供給安全度を向上することなどのほか、水の緊急移入、社会活動の一時的縮減などの短期的対策があるが、貯水池そのものの最適操作もその有力な手段と考えられる。

4.3 貯水池運用の実態

要 約

貯水池運用上の課題としては、計画上意図された安全度を運用上いかに達成するかといったものと、計画を上廻る異常渇水に対して渇水被害を最小限に止めるための運用をいかにして達成するかといった、2つの側面がある。計画上意図された安全度達成のための方策としては、ダム放流後取水地点までの流下時間内の降雨予測、流出予測の精度向上や、還元量の把握評価手法の確立があり、また、異常渇水時における渇水被害軽減のためには貯水池最適運用手法の確立がある。これら貯水池操作面からの対応方策及びその対応限界を明らかにすることにより、貯水池計画のあり方についての提案がなされなければならない。

4.4 貯水池の最適運用

要 約

貯水池が、計画水準を越える渇水に見舞われた場合、限られた河川の自然流量と貯水池保有量を有効に活用して安定的な社会経済活動に資するための貯水池の操作を「貯水池の最適運用」と定義する。

貯水池最適運用における対応方向としては、

- i) 豊水期或は渇水前期における水利用量を節約して、より厳しい渇水に対処するための貯水池保有量を確保する。
- ii) 社会活動の慣性を考慮した段階的節水ルールの確立をはかる。
- iii) 上記 i), ii) の条件に留意しつつ渇水時における渇水被害が最小となるような貯水池運用方式を確立する。

ということができる。このような目的を達成するための手段としては、

- i) 貯水池運用に関する長期的水文予測。

ii) 貯水池運用を評価するための評価基準。

が必要となってくる。

このような、貯水池最適運用の方向とそれを達成するための手段を分析した結果、貯水池最適運用手法としては、

i) 長期流量資料により貯水池残量別に節水率を定めて渇水被害の軽減をはかる。

ii) i) の方式に長期気象予測を加味する。

iii) 基本的には、i) に近いが、確率ダイナミック・プログラム方式を適用することにより、渇水被害が最小となるような月別、貯水池残量別節水率を定めて渇水に対応する。

といった方法が考えられる。

第4章 参 考 文 献

- 1) 建設省，河川砂防技術基準案，第2編，第6章，昭和32年
- 2) 山内，河川総合開発と水利行政，第3章，昭和37年
- 3) 建設省河川法研究会，逐条河川法，第23条，昭和41年
- 4) 建設省河川局，河川砂防技術基準（案），計画編，第3章，昭和51年
- 5) 斉藤等，小瀬川利水計画について（第1報），中国地建管内技術研究会論文集，昭和45年

第5章 渇水被害の構造と計量化

第1章から第4章までは、河川の利用率が上昇するにつれて渇水の危険性が増大すること、渇水は河川の流況及び取水パターンの両者の時系列によって決まるものであり、単に降雨量の大小のみで評価できるものでないこと、現在の貯水池計画基準では、水資源開発がすすむにつれて計画基準年の渇水規模を上まわる渇水が発生したときに不足総量が急激に増大し、安定的な水供給システム計画の観点からは問題があり、渇水時の貯水池運用の最適化（効率化）を図る必要性が指摘できた。

本章では、渇水時の貯水池運用の最適化を図るうえでの目標を明確にするために、渇水が及ぼす社会・経済的影響に関して、既往調査資料をもとに分析をおこなうとともに、渇水被害の計量化の方法を提案し、次章において貯水池の最適運用方式の分析をおこなうための準備とする。

5.1 渇水被害の構造と対応策

近年、水利用量の増大及び少降雨傾向によって渇水が頻発し、深刻な社会的・経済的影響を与えている。第4章でも述べたように、水資源開発が行なわれるということは、それに応じた一定の水利用システムが水利用の場所ごとに整備されることを意味し、社会・経済活動も新しい水利用システムを前提として繰り広げられる。しかし、河川流況の悪化に伴って、いったん取水制限あるいは給水制限が実施されると、これまで社会・経済活動の前提としてきた水供給システムが機能しなくなる結果、水利用者は種々の渇水対応策を迫られる。すなわち、一般家庭では、給水制限に伴ない生活時間の拘束、家事労働時間の増加、家計からの臨時出費、利便性・快適性のそ害、精神的不安・不満の増大といった影響・被害を生じる。また、事務所・営業所では、業務能率の低下、売り上げの減少、営業経費の増大といった影響・被害を生じる。

また、工業用水では、水使用量削減に伴う操業短縮等によって生産量の低下あるいは製品品質の低下といった被害を生じ、さらに産業連関を介しての2次的被害の波及といった例もある。

特に、昭和53年5月から54年3月にかけて発生した福岡市渇水では、都市型渇水としての特徴をみせ、大都市の水供給システムの脆弱性と渇水が及ぼす影響の大きさをみせた。

本節では、既往調査資料をもとにして渇水被害の構造と利水者の対応策を用水別に整理・分析してみる。まず、渇水の被害発生から終熄に至るまでのプロセスを概観してみると、以下ようになる。

- ① ダム貯水量の減少あるいは河川流況の悪化に伴ない渇水調整・取水制限の実施。
- ② 節水PR等の実施、大口需要者の自主規制依頼、給水圧の低下・バルブ調整等の節水対策を実施。
- ③ 給水制限の実施。断水地区の発生に伴ない給水車が出動。
- ④ 直接的影響・被害の発生。
- ⑤ さらにダム貯水量が減少し、河川流況が悪化して水源状況が悪くなると取水制限・給水制限が強化される。
- ⑥ 渇水の社会・経済的影響が拡大し、その影響は極限状態になる。
- ⑦ 降雨によりダム貯水量が回復し、あるいは農業用水のかんがい期が終わって取水量が減少することにより、河川流況が改善されるに従って取水制限、給水制限が緩和される。

⑧ 取水制限・給水制限の解除。

以上のプロセスは、渇水の厳しさの程度、河川流況の時系列的変化、ダム等の水資源開発施設の規模、地下水等の代替水源の保有状況、渇水調整の方法、給水施設の安全度等によって異なり、さまざまな渇水被害発生プロセスがあるが、利水者側の渇水被害の構造及び対応策は一応、渇水の強度の指標としての節水率（給水制限率）ごとに整理できるものと考えられる。

以上の観点から本節では、既往の渇水資料をもとに、節水率と渇水被害構造の関係を利水者別に分析する。

(1) 水道事業体

上水道における用途別給水量は、昭和50年度水道統計（厚生省編）によれば、給水契約数約 17.2×10^6 件、年間有収水量（水道料金算定の基礎となった水量）約 $5,672 \times 10^6 \text{ m}^3$ のうち、家庭用（一般及び集合）の占める割合は、契約数

で92.9%，給水量で約66.4%となっている。業務用（営業用、官公署・学校用及び湯屋用の合計値）は、契約数で約6.2%，給水量で約25.7%である。また、工業用は契約数で0.5%，給水量で6.4%となっている。

従って、渇水時における給水活動の重点は、契約数においても給水量においても多数を占める家庭用水の確保におかれる。

昭和48年夏の高松市渇水（給水制限期間は7月13日から9月13日までの延べ63日間、最大給水制限率は60%，平均給水制限率は50%）、松江市渇水（給水制限期間は6月20日から10月31日までの延べ134日間、最大給水制限率は54%，平均給水制限率は40%）における給水制限実施状況をもとに、水道事業体における渇水対応策を節水率ごとに給水方式、節水対策、水源獲得策等に関して整理すると表－5.1.1のようになる。

給水方式としては、初期段階では給水圧を10～20%減圧することにより節水が図られる。続いて制限率が30～40%になれば、時間給水、大口需要者のバルブ調整が実施され、さらに断水地区が発生するようになると給水車による給水活動が行われる。

さらに、渇水が進行して制限率が60%を越えると緊急共用栓による最低必要水量の割当て給水等の緊急措置がとられる。

一方、水獲得の方法としては、既設井戸の活用等の各種水源の活用、工業用水道の転用、応援水輸送、河川伏流水の利用等の手段がとられる。

(2) 家庭用水

家庭用水の渇水被害の構造は、渇水の強度すなわち節水率、ふだんの節水意識、給水制限時間帯、給水

表－5.1.1(a) 上水道における用途別有収水量

用 途	50 年 度		
	給水契約数	年 間 有 収 量	1件1カ月当りの給水量
家庭用（一般）	15,734,705	3,507,114	18.6
“（集合）	218,393	260,093	99.2
営 業 用	923,292	1,044,796	94.3
工 業 用	88,005	363,227	343.9
官公署・学校用	126,450	339,616	223.8
湯 屋 用	11,060	86,322	650.4
船 舶 用	1,949	6,373	272.5
そ の 他	68,342	64,644	78.8
計	17,172,196	5,672,185	27.5
共 用 せ ん	30,743	13,501	36.0
公 共 せ ん	3,703	30,808	—
合 計	17,206,642	5,716,494	27.7
メーター設置数	17,836,881	—	—

註 1398事業所を集計

資料：昭和50年度水道統計，厚生省

表-5.1.1 上水道事業体の渇水対応策

節水率	給水制限	給水方式	節水対策	給水方式の狙い	給水方式実現の条件	水獲得策
20%	第1次給水制限 水道局単位の対応	給水圧 10 ～ 15 % 減圧	- 節水 P R - 洗車、散水、プール等不要不急用途のバルブ調整	需要量増大の抑制	平常の給水圧が 2 キロ以上であること。また地域が平坦であること。ないし土地の高低別に給水網が完備していること。	- 既存井戸の活用 - 井戸掘削
30%	第2次給水制限 市をあげての対応	時間給水と時間外の給水圧減圧	6 ～ 4 時間の給水 - 給水圧 50 ～ 70 % 減圧	節約効果の大きいところの節水	給水圧の高い地区の需要者の協力が得られなければ、あまり効果は期待できない。	工業用水の 30 ～ 50 % 転用
40%	第3次給水制限 自衛隊や他の水道局等外部機関の応援必要	時間給水断水	- 大口需要者のバルブ調整 8 ～ 20 時間断水 - 水圧の強い地区の需要者のバルブ調整	減圧時でも、水圧の高いところでは受水槽が位置の低いところでは取水が可能であるため、これを止める。	- 赤水の発生対策が必要である。すなわち老朽施設の水道事業体では実施しにくい方策である。 - 医療用等緊急用水に対する手当てが必要となる。	- 地区内の各種水源活用 - 他水道事業体よりの応援水
50%		地区別、時間制給水	1 日 2 ～ 3 時間給水 - 給水不良地区臨時給水施設設置	地区別不公平の解消と少量の水を水道局の意図に近い形で給水	地区別に水使用時間が異なっている場合には実施しやすい。また、この時間帯を考慮に入れて地区の給水時間設定が必要。	- 工業用水の 50 ～ 100 % 転用 - 地区内外各種水源やデッドウォーターの活用 - 水の運搬 - 導水
60%以上	第4次給水制限	緊急共用栓のみによる給水	需要者 1 人当り割当給水 (1 世帯 1 日 200ℓ)	生活する上での最低水量の給水とそれ以上の水の完全カット	- 需要者の全面的協力が必要 - 緊急用水の給水体制が必要	

資料：建設省中国地建，「渇水被害影響調査報告書」昭 52. 3

制限の時間的プロセス、渇水経験の有無、家族構成等によって異なるものと考えられるが、本章では節水率と渇水被害の構造との関係を中心に分析する。

節水率と家庭用水への影響・被害の関係は、20～30%の軽度の節水では、蛇口給水が実施されているかぎり、生活パターンをあまり変更することなしに節水努力をもって対応することができる。しかし、節水率が50%近くにもなれば、水道事業体の項でも述べたように時間給水方式となるため、生活時間の拘束を受けるとともに、日常生活に不自由感、不便感を感じ、また水のくみ置き用にポリ・バケツの購入する等の臨時出費を伴うようになる。

さらに、節水率が高くなると生活パターンの全面的変更を必要とし、給水車による給水状態（1人1日当り使用水量が20～30ℓ、節水率が80%以上）になれば、水確保のための時間、水使用量の減少に伴う家事労働時間の増大といった生活パターンのかなりの変更を余儀なくされるとともに、水使用の代替として紙コップ購入、ジュース購入、外食費の増大等の家計出費を伴ない実質的被害が生じる。

家庭用水における渇水被害の構造を昭和48年夏高松市渇水の断水地区でのヒアリング（昭和52年四国地建が実施した調査）結果から、一応金銭的評価が可能な項目と不可能な項目に分けて整理すると表-5.1.2のようになる。

金銭的評価が可能なものとしては、

- ① 家事労働時間の増大（給水車から家までの水運び、洗たくあるいは炊事の手間の増大）
- ② 物品・サービス購入費の増大（クリーニング代、紙コップ、紙オムツ、外食費等）
- ③ 水確保のための機器購入（水のくみ置き用のポリ・バケツ、貯水槽等）

があげられる。

一方、金銭的評価が不可能な項目としては、水量削減に伴う不潔感、不便感、疲労、給水制限に対する不安・不満感があげられる。

次に家庭用水の渇水時における節水対応策としては、以下の項目に整理できる。

- ① 水使用回数の減少（例：入浴回数を減らす）
- ② 水使用方法の変更（例：流し洗いをため洗いに変更する）
- ③ 不急不要用水の使用停止（例：洗車、散水）
- ④ 再利用（例：風呂水を洗濯用水、雑排水を水洗便所用水へ再利用）
- ⑤ 代用品の使用（例：紙コップ）

これらの節水対応策は、節水率によって異なるが、標準的水使用量をいま150ℓ/人・日とし、節水時の水使用量が100ℓ/人・日（節水率30%）、60ℓ/人・日（節水率60%）、30ℓ/人・日（節水率80%）とそれぞれ仮定したときの用途別水使用量及び使用方法を試算した例を表-5.1.3に示す。この表から渇水時の節水率としては、60%が限界といえるであろう。

(3) 都市活動用水（業務用水）

都市活動用水として使用されている水の用途は、家庭用水の用途と似ているものが多いが、業種あるいは事業所による使用量のばらつきが大きい。

また、使用水量からみると官公署、学校、病院、ホテル、運輸関係等が大口需要先である。

表-5.1.4は、昭和48年夏高松市渇水のとときのヒアリング結果（昭和52年四国地建が実施した調査）から、都市活動用水の渇水対応策をとりまとめたものである。

表-5.1.2 家庭用水被害構造

家庭における渇水被害区分と被害項目

渇水被害区分			被害項目	被害量の変動要因等
金銭による換算が可能な項目	渇水日数に比例して被害が増加するもの	家事労働量の増加	○水運び（待ち時間を含む） ○洗たく ○炊事 ○その他汚水の運搬など	○断水にならなければ発生しない。給水車から自宅まで坂があるか、否か、階段があるか否かで労働量は大巾にかわる。 - 制限給水率の大小によって変化する。
		購入品目、購入数量の増加（サービスを含む）	○クリーニング代、店屋もの食事 - ジュース、缶詰、紙皿、紙コップ - 紙オムツ、ティッシュ - 牛乳、ビタミン剤、サロンパス - 病院通い、お礼	
	渇水日数に比例しないもの	用水確保のための設備機器の購入	○貯水槽 ○ポリバケツ（大） 〃（小） ○水中ポンプ ○ホース	○渇水日数の増加、長期化に伴って、労働量軽減のために買い増されることもあるが、概して給水制限開始と同時に購入される。
金銭による換算が不可能な項目	○各用途で水が充分に使えないための不潔感。（水洗便所の悪臭などの不快感） ○すべての洗浄を手ジャックで行なうことの不快感。 ○不慣れな水運びなどによる筋肉痛や疲労、ひいては過労による健康障害。 ○いつ制限給水が解決するか見通しが立たないことによるイライラ。 ○高低差、変水槽の有無による給水の不公平からくる不満。 ○給水車の配車の不公平による不満。 ○給水車の配車時間の無計画によるイライラ。			- 断水日数が長くなると、他の要因の方が大きく感じられるため、どうしてもよくなる。 - 軽度の給水制限なら問題は少ない。 - 概して断水日数に比例して累積的な増加をみる。

資料：建設省四国地建「節水ルール検討業務報告書」昭和52年10月

表-5.1.3 1人1日当り使用量別使用方法(試算)

注) 〇勤労者世帯を前提としている。

〇いずれも給水制限(時間給水)を前提としている。

用途	1人1日当り使用量30ℓの場合(節水率≒80%)				1人1日当り使用量60ℓの場合(節水率≒60%)				1人1日当り使用量100ℓの場合(節水率≒30%)			
	平常時の水使用目的を達成するための手段	新水	再生水	貯留排水	平常時の水使用目的を達成するための手段	新水	再生水	貯留排水	平常時の水使用目的を達成するための手段	新水	再生水	貯留排水
共通		ℓ/世帯・日 120	ℓ/世帯・日 71	ℓ/世帯・日 71		ℓ/世帯・日 240	ℓ/世帯・日 115	ℓ/世帯・日 115		ℓ/世帯・日 400	ℓ/世帯・日 170	ℓ/世帯・日 170
炊事・飲料	・飲料水汲みおき。ため洗い、ためすぎ ・献立簡素化 野菜葉物→実根 ・昼食は水を使わず。魚料理なし ・食事準備(野菜他洗い+茶+汁)4~16ℓ ・食事片付(ため洗い+3ℓ容器ためすぎ2回)8~15ℓ	22	0	11	野菜, その他皿数増える	40	0	25	・献立平常に近い ・野菜の葉物洗う ・魚料理できる	52	0	35
手洗・洗面	・洗面器でため洗い ・朝の洗顔 25ℓ/人・日×4=10ℓ ・手洗い 2ℓ/人・日×4= 8ℓ	18	0	15	3ℓ/人・日×4=12ℓ 2ℓ/人・日×6=12ℓ	24	0	20	4ℓ/人・日×4=16ℓ 2ℓ/人・日×7=14ℓ	30	0	25
風呂	・大やかんでわかした湯で行水 ・2ℓ入り洗面器 2~4杯/人・回 4~8ℓ	24	0	0	大やかんでわかした湯をタライにとって行水 17ℓ×4=68ℓ	68	0	0	大やかんでわかした湯をタライ(浴槽)にとって行水 37.5ℓ×4人	150	0	0
洗濯	・洗たく機で少量(平常時の1/2)の水で洗う ・手でためすぎ 9ℓ入りタライ×2回すすぎ×2回/日	20 36	0 0	15 30	洗たく機 30ℓ×1回×2回/日 9ℓタライ1回×2回/日	30 18	0 0	20 50	洗たく機 30ℓ×2回×2回/日 9ℓタライで1回×2	30 138	0 0	20 100
散水掃除洗車	なし				なし					0 0 0	40 10 0	0 0 0
水洗便所	・小便時毎回流さずペーパーは別にとってごみに捨てに ・大便時再生水を10ℓ/回くらい	0	71	0		0	115	0		0	120	0

資料: 建設省四国地建「節水ルール検討業務報告書」昭和52年10月

表－5.1.4 都市活動用水の漏水対応策

節水率	節水策	節水策実現の条件	水獲得策	水獲得策実現の条件
20%	- 大口需要者の元バルブ調整 - 散水、洗車用回数削減			
30%	- 散水、洗車停止 - 水洗便所弁開度調整 - 男子小便器夜間閉栓 - 冷却用冷却水の回収率向上	- 男子小便器が高置水槽型自動洗浄方式である場合に可能 - 冷却水を限度まで循環していない場合に可能		
40%	- 冷房時間短縮、停止 - 水洗便所一部使用停止 - 公衆浴場、理髪・美容室などで対応困難			
50%	- 食堂のメニュー変更 - 紙食器の利用		- 車輻による水の運搬 - 井戸ボーリング	- 車輻・タンク（車輻に積載）受水槽があること。 - 地下水の出る土地があること。 井戸掘り費用、浅井戸1本9～16万円
80%	対応不可能			

資料：建設省中国地建「漏水被害影響調査報告書」昭52.3

業種によって相違はあるものの、20％程度の節水率であれば、日常業務にあまり影響を与えないものと思われる。

しかし、節水率が40～50％になれば、冷房停止、水洗便所一部使用停止等の措置がとられ日常業務に支障をきたす。特に、営業用水として多量の水を使用する浴場、理美容、飲食等は対応が困難になる。

渇水被害の構造としては、

- ① 節水機器購入（ポリバケツ、貯水槽、循環使用機器等）
- ② 節水による経費増（紙コップ等）
- ③ 売り上げ減少（客の減少）
- ④ 営業停止損失
- ⑤ 水確保費用（水の輸送等）の増大

が挙げられる。

(4) 工業用水

工場における水の用途は、ボイラー用水、原料用水、製品洗浄用水、冷却用に大別できる。このうち、昭和50年の工業統計表によれば、冷却用水としての使用量が淡水使用量の68％近くを占めている。

また、水源別では、淡水は総量の73％使用され、淡水のうち回収水が67％と大きなウェイトを占めている。

業種別では、化学工業が総量（淡水及び海水使用量）の35％、鉄鋼業が27％、パルプ・紙が8％、石油製品・石炭製品製造が8％と、4業種で総量の77％を占めている（以上は昭和50年工業統計表による）。

渇水時の節水で特に問題となるのは、平常時における水利用合理化の水準である。平常時、水利用の合理化に努め節水している工場であれば、渇水時にさらに節水することは困難であり、操業短縮等の影響を受けやすい。

表－5.1.5(d)は、昭和48年夏の坂出地区工業用水道給水制限（制限期間は7月25日から9月2日までの40日間、最大給水制限率は50％、平均給水制限率は42％）のときの主要企業に対する影響をとりまとめたもので、0～50％の生産減少額、及び回収率向上、海水転換等の工業用水確保のための設備投資、船舶・車両等による水輸送費等の被害を受けている。

表－5.1.6は、小瀬川水系にある2工場の節水率ごとの工場の節水対応策をとりまとめたものである。小瀬川は、昭和44年、昭和48年、昭和52年に渇水調整が実施されており、渇水経験を有しているので、各工場の節水対策はすすんでおり、水利権量に対して40～50％の節水率までは、操業短縮には至らないとしている⁴⁾。

以上の資料及び高松・坂出渇水のヒアリング結果²⁾等から、工業用水の渇水対応策を節水率ごとにまとめると表－5.1.7のとおりになる。

節水率が40～50％より低い場合には、雑用水及び冷却用水の節約、回収率の向上あるいは海水転換のための設備投資が行なわれ、水不足を補って操業を維持するための節水努力が実施される。

しかし、節水率が50％を越えると、水不足が節水努力の範囲を越えて操業率を維持することが困難となり、一部生産装置の稼働停止あるいは操業短縮の事態に追い込まれる。一部製品転換等の一時的対応策はとられるとしても、生産量の低下、出荷額の減少は避けられない。

さらに、節水率が80％以上にあれば、保安用水を確保するだけとなって全面的操業停止の事態となるも

表-5.1.5(a) 水源別用水量

業 種	淡水使用量 ($\text{m}^3/\text{日}$)	内 回 収 水 量 ($\text{m}^3/\text{日}$)	回収水を除く 淡水使用量 ($\text{m}^3/\text{日}$)	海 水 ($\text{m}^3/\text{日}$)
化 学 工 業	42,624,138 (35.0)	33,155,686 (40.7)	9,468,452 (23.6)	14,738,673 (32.7)
鉄 鋼 業	29,411,283 (24.2)	24,930,784 (30.6)	4,480,499 (11.1)	15,548,110 (34.5)
パ ル プ ・ 紙	13,851,243 (11.4)	4,124,119 (5.1)	9,727,124 (24.2)	91,700 (0.2)
石 油 製 品 ・ 石 炭 製 品	5,278,516 (4.3)	4,325,849 (5.3)	952,667 (2.4)	7,343,713 (16.3)
全業種合計	121,624,813 (100)	81,432,326 (100)	40,192,487 (100)	45,107,683 (100)

資料：昭和50年工業統計表

()内は合計値に対する百分比

表-5.1.5(b) 淡水の用途別用水量

業 種	ボイラー用水 ($\text{m}^3/\text{日}$)	原 料 用 水 ($\text{m}^3/\text{日}$)	製品処理用および 洗じょう用水 ($\text{m}^3/\text{日}$)	冷 却 用 水 ($\text{m}^3/\text{日}$)	温 調 用 水 ($\text{m}^3/\text{日}$)
化 学 工 業	642,780 (1.5)	14,021 (0.03)	2,506,684 (5.9)	37,204,444 (87.3)	1,384,054 (3.2)
鉄 鋼 業	122,454 (0.4)	—	2,873,002 (9.8)	25,113,460 (85.4)	505,687 (1.7)
パ ル プ ・ 紙	355,342 (2.6)	—	11,375,488 (82.1)	1,373,750 (9.9)	176,190 (1.3)
石 油 製 品 ・ 石 炭 製 品	208,460 (3.9)	—	148,103 (2.8)	4,756,718 (90.1)	30,696 (0.6)
全業種合計	2,225,321 (1.8)	424,860 (0.3)	25,161,514 (20.7)	82,232,471 (67.6)	6,974,948 (5.7)

資料：昭和50年工業統計表

()内は淡水使用量に対する百分比

表-5.1.5(c) 用 水 原 単 位

業 種	淡 水 原 単 位 (製造品出荷額 1 億 円 当 り ($\text{m}^3/\text{日}/\text{億円}$)	海 水 原 単 位 ($\text{m}^3/\text{日}/\text{億円}$)
化 学 工 業	431.30	149.13
鉄 鋼 業	276.08	145.94
パ ル プ ・ 紙	403.29	2.66
石油製品・石炭製品	71.35	99.26
全 業 種 合 計	116.93	43.36

資料：昭和50年工業統計表

表-5.1.5(d) 渇水による主要企業への影響(昭和48年坂出地区渇水)

会社名	項目	生産減少額	工業用水確保のための設備投資額	船舶給水車等による補給水量, 料金等
三菱化成工業(株)坂出工場	装置により20~50%減産		イ、回収率向上 2,900千円 ロ、海水転換 1,100千円 ハ、その他配管等 4,100千円	イ、補給水累計 2,000 m^3 ロ、水料金 2,550千円 8.10~9.8給水 ハ、船舶利用
吉田工業(株)四国工場	アルミサッシ, 35%減産 減産分出荷額 350,000千円		イ、 4,000千円	なし
アジア共石(株)坂出製油所	減産なし		イ、 1,735千円 ロ、 9,569千円	イ、 3,298,000 m^3 ロ、 1,700千円 8.15~9.8給水 ハ、船舶利用
川崎重工業(株)坂出造船事業部	修繕船 7,000千円売上減 約10%減産		なし	イ、2,400 m^3 ロ、1,000千円 7.19~9.9給水 ハ、船舶利用
四国電力(株)坂出発電所	なし		なし	なし
協和化学(株)坂出工場	酸化マグネシウム30%減産		イ、600千円 ロ、120千円	なし
日本ヒドラジン工業(株)坂出工場	なし		イ、 500千円	なし
東亜合成化学工業(株)坂出工場	苛性ソーダ, 塩素等 減産分出荷額 5,600千円 29.9%減産		イ、 30千円 ロ、 250千円 ハ、 500千円	イ、 587 m^3 ロ、 235千円 ハ、8.30~9.10給水総水車利用
常盤産業(株)	ちり紙 高I工場14,000千円減8%減産 高II工場4,500千円減10%減産		ハ、 300千円	なし
東洋テックス(株)	吸音テックス 20%減産 97,200千円減		なし	なし
昭南製紙(株)	家庭用薄葉紙 25%減産 23,000千円減		イ、 500千円	なし
計			イ、 72,435千円 ロ、 11,370 ハ、 51,369	イ、 3,320,987 m^3 28,455千円

資料:「工業用水」, 第188号, 昭和49.5

表-5.1.6 企業の節水対応策事例

E工場

各企業の節水率	内 容 (具 体 的 処 置)
20%の場合 (1,187.5 m^3 /H)	常時の清水回収設備稼働は1基であるがこれを2基とし、雑用水の節水に努める。 又、一部冷却水について清水から海水への切替をはかる。
30%の場合 (1,000 m^3 /H)	清水回収設備稼働基数を増し、且つ、一部冷却水について清水から海水への切替をはかる。
40%の場合 (862.5 m^3 /H)	清水回収設備稼働基数を増加し、冷却水の海水切替を増す。
50%の場合 (656.25 m^3 /H)	清水回収設備について全基を稼働させ、冷却水は可能な限り海水に切り替る。夏期については定期整備の為プラントが順次停止することが多いが、スタート、ストップの中間において全装置運転の時期があり、この時は一部装置の操業短縮が避けられない。
60%の場合 (600 m^3 /H)	主力装置は操業率を下げて運転継続とし他は運転を休止する工場としては稼働率は1/2~2/3となる。
70%の場合 (450 m^3 /H)	保安用水を確保し、主力装置は運転・停止の上循環操作を行なう。工業用水需要の少ない装置については、運転を継続する事がある。
80%の場合 (300 m^3 /H)	全装置の操業を停止し、次の如き保安用水を確保する。 1. 高粘度油のタンク及び配管の加熱蒸気発生用水 2. 消火配管圧力維持用給水 3. その他保安用水

F社 A工場

各企業の節水率	内 容 (具 体 的 処 置)
20%の場合	既に取水権よりも21,400 m^3 /日節水していたので影響なし
30%の場合	同 上
40%の場合	実質的には、通常時より約8.7%の節水に相当し、下記程度に絞ることで達成。(取水権に対して)シャワー11.5% 稀釈水6.9% 冷却水6.9% 雑用水5.3% 洗浄水41%…計40%節水 冷却水、雑用水中のシール水などきれいな排水を捕集して再使用
50%の場合	取水権に対し、シャワー水15.6% 稀釈水13.7% 冷却水8.9% 雑用水6.4% 洗浄水5.4%……計50%節水 品質低下、薬品原単位の悪化があっても止むなく、上記の如く用水バルブを絞った。きれいな排水の再使用は勿論のこと。パーカーなどは汚れた原料廃水に切替るなど廃水の再使用を図った。
60%の場合	取水権に対し、シャワー水18.4% 稀釈水16.3% 冷却水11.2% 雑用水7.2% 洗浄水6.4%更に蒸気用水0.3%……計60%節水 50%の場合に更に加えて、用水のピーク時には白板抄紙機を断続的に停機。尚、若干のバルブの減産。
70%の場合	経験なし 白板抄紙機は全面停機。更にバルブ工程の用水ピークを吸収出来ないのも、バルブも相当の減産が考えられる。
80%の場合	経験なし 白板抄紙機のみ運転、又、白板抄紙機を停機して、バルブ工程の半減運転。……この交互運転になることが考えられる。

資料：建設省太田川工事事務所「昭48年小瀬川の漏水調査」(水利篇)

表－5.1.7 工業用水の渇水対応策

節水率	生産用水節水方法	生活用水節水方法	節水方法実施の条件	水獲得方法	水獲得方法実施の条件	その他の対応策
20%	◦節水PR ◦余裕水量の吐き出し ◦冷却水を循環式に切替えるか、循環を強化する ◦雑用水系の弁開度調整	◦同 左 ◦同 左 ◦洗車停止	◦契約水量が実使用量に比べて多い場合 ◦冷却水の回収率が低い場合 ◦洗車回数、台数が多い場合のみ有効	◦海水転換		
30%	◦転換条件の変更	◦厨房食器洗浄水量の削減				◦使用水量の少ない製品に製造品目変更
40%	◦洗浄水の回収利用					◦一部操短 ◦操 短 ◦排水利用
50%	◦未利用冷却水の回収利用 (コンプレッサー・ポンプ冷却水等)	◦事務所の空調停止	◦事務所と工場が分離している場合	◦井戸ボーリング ◦自動車、給水船等による水運搬		
80%				◦他の工業用水とパイプで結合		◦保安用水のみ確保し操業停止
100%						◦対応不可能

資料 建設省中国地建, 「渇水被害影響調査報告書」 昭和52.3

のと考えられる。

(5) 農業用水の渇水対応

わが国の河川の渇水流量は、大部分が農業用水として利用されており、その後、発生した水道用水、工業用水需要は、ダムによる水資源開発により充足されてきた。

河川水の農業用水の利用は、図-5.1.1に模式的に示すように、階層的な構造をもつ用水系統によって行なわれている。すなわち、〇〇用水として河川から

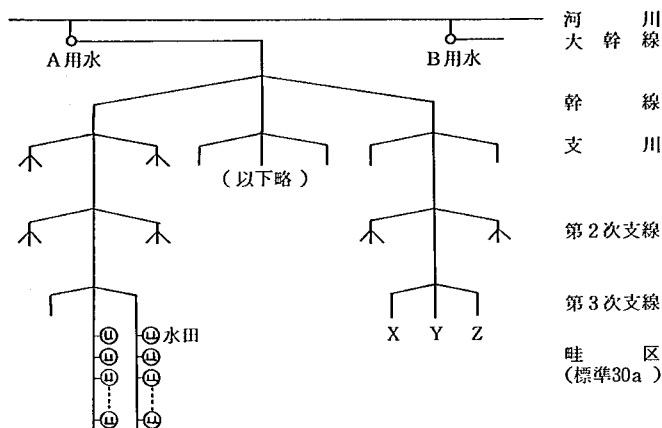


図-5.1.1 水田用水水路系統模式図

ら取水された水は、幹線水路、支線水路を経て最終需要地である畦区へ分配される。このとき、水道用水等の他の水利用方法と異なる点は、水の輸送方式が開水路により、自然流下方式によって行なわれる点である。したがって、水の利用は、上流から順次行なわれる。また、取水施設も複雑な制御施設ではなく、簡単な方法で取水が行なわれるため、水位を維持するための水量、支線間での分水を行なうための水量等の水田での用水需要量以上の水量を必要とする。

次に、水田に必要な河川水量は、常時、水田での需要水量から水田への有効雨量を差引いた分である。したがって、渇水時に域内に降雨がないと、河川に対する農業用水需要量は、増大することになる。

渇水による用水不足発生メカニズムは、図-5.1.2のように表わすことができ、渇水時には、農業用水では、河川の取水可能量の減少と、地区内有効雨量の減少による取水必要量の増大（需要量の増大）という2つの要因によって用水不足が発生する。

次に、農作物である水稻の必要水量をみると、育成段階に応じて必要水量は異なり（図-5.1.3）、渇水の影響は、農作物の育成段階によっても異なる。このうち、植付け期（田植期）に発生する渇水が最も大きな影響を与え、節水率は、水田植付け率に影響してくる。その他の期間では、農作物は渇水になったからといってすぐに被害を受けるのではなく、その後の期間において育成を回復できる。

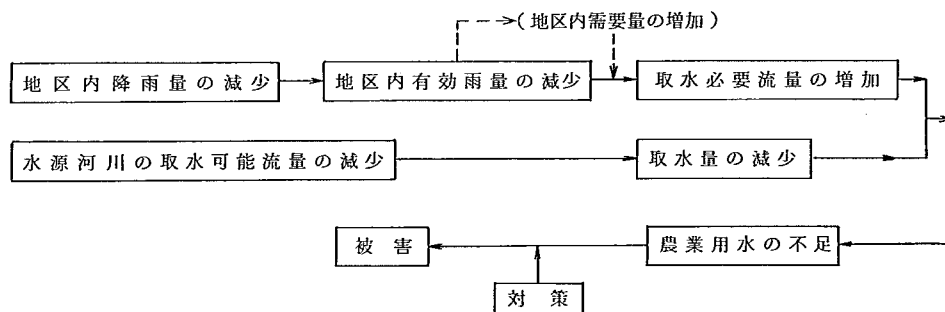
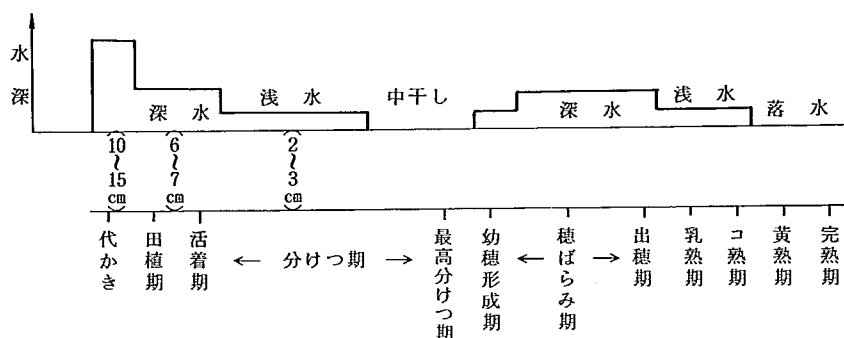


図-5.1.2 渇水による用水不足発生メカニズム



図－5.1.3 水 田 の 水 管 理

また、渇水年は、気温・日照等の気象条件に恵まれるから、豊作となることも多い。

以上のように、農業用水の渇水対応と被害を分析する場合、取水及び地区内配水方式、渇水時における河川必要水量の増大、水稻の期別必要水量と渇水が与える影響を考慮する必要がある。

渇水時における農業用水の対応は、大きく分けて、ソフト的対応とハード的対応に分けられる。

ソフト的対応策としては、番水がある。これは、土地改良区あるいは水利組合等の上部団体、井組、区等の中間団体において、渇水時において採用される一種の制限給水方式である。この方式の目的は、地区内用水需要を減少させることであり、数日分の必要水量をまとめて特定地区に送水することにより、常時における送水による損失を大巾に減少させるものである。

取水制限率が低率のときは、全地区一斉に取水量を削減することにより節水を実施できるが、制限率が高いときは、全地区一律削減方式では、末端水田に送水できなくなり、給水地区を順番にローテーションしていく方式がとられることになる。このような時間給水方式が番水と呼ばれる。

さらに、渇水が厳しいときは、犠牲田方式がとられたこともある。

個別の農家におけるソフト的対応としては、各水田での節水、及び水管理の強化（畦からの漏水防止等）がとられる。

ハード的対応策としては、ポンプの設置・運転、地下水揚水等の対応策がある。これらは、農業用水団体、地区、個別農家の各レベルにおいて実施される。

表－5.1.8 は農業用水における渇水時の対応を施設的対応策（ハード）、地域的対応策（ソフト）及び個別農家の対応策に分けて整理したものである。

前述したように、施設的対応策としては、ポンプ設置の外に取水口、水路の改修、井戸の掘削等の方法がある。地域的対応策としては、番水に代表される水利調整の実施があり、個別農家の対応としては、間断かんがいによる節水栽培、水田水管理の強化、小型ポンプ設置等の対応策がある。

以上の渇水対応の分析から、農業用水における渇水の被害構造を整理するとおおむね次のようになる。

① 農業用水団体レベル

イ。番水実施に伴う労力費など

ロ。ポンプ設置・運転経費

ハ。その他、維持管理費用の増大

② 個別農家レベル

イ。農作物収量減あるいは品質低下による収入の減少

ロ。水管理強化のための労働時間の増大

ハ。小型ポンプ設置・運転経費

ニ。その他、維持管理費用の増大

ホ。渇水時の農産物高騰による収入増大（畑作物の場合）

③ 社会的レベル

農産物の高騰

以上の渇水対応及び被害は、一般的な事項であって以下の要因により変動する。

イ。水源の種類（河川、ため池、地下水）

ロ。施設の整備水準

ハ。圃場の整備水準

ニ。用水の管理水準

ホ。水利団体間、あるいは水利団体と農家の関係

ヘ。渇水の発生時期と渇水の強度、継続時間

ト。農作物と品種

チ。その他

渇水被害の計量化については、これらの要因を把握したうえで行なう必要があるが、

本研究では、一応、節水率が低い段階での水管理強化費用、及び節水率が高い渇水が長期間継続したときの農作物減収による被害を想定し、次節において計量化を行なう。

表－ 5. 1. 8 渇水被害の対応策（農業用水）

施設の対応策 a. かんがい水源の確保及び安定化 ・ 取水口、溜池等の改修と維持管理 ・ 河川の仮締切り、導水路の掘削 ・ 伏流水、井戸の利用（新規掘削） ・ 枯渇した井戸、川底、湧水池の掘下げ ・ ポンプの設置、送水管の敷設 b. 配水施設の整備 ・ 水路の補修（漏水の防止） ・ 塩ビ管等の応急配水施設の整備 c. 圃場整備 ・ 床締・客土による地下浸透防止 ・ 畦畔整備による漏水防止
地域的対応策 a. 水利調整方法の確立とその実施 b. 計画配水方法の確立とその実施 ・ 番水制の採用 ・ 計画配水量の決定と監視 ・ 犠牲田（あげ田）の採用
個別農家の対応策 ・ 節水栽培（間断かんがい） ・ 小型ポンプ設置 ・ 水田水管理の強化

5. 2 渇水被害の計量化

前節では、渇水被害の構造を分析し利水者の対応策を用水ごとに整理した。本節では、これらの分析によって明確となった事項を基礎として渇水被害の計量化の方法を提案し、第 6 章における貯水池の運用方式の分析のための準備とする。

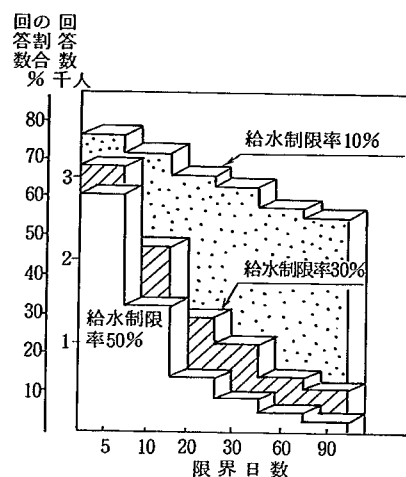
渇水被害の計量化の目的は、治水事業の投資効果の計測の基礎資料となっている治水経済調査と同じ性格のものであって、種々の渇水対策、たとえば、貯水池の節水運用、経年貯留ダム等の各種の手法の効果を何らかの指標で工学的に明確にすることである。

したがって、渇水被害のうち計量化不可能な要素、たとえば快適性・利便性のそ害、生活を維持していくための必要最小限水量といった要素は、計量化が不可能又は困難であるという理由のみで行政的に無視

することはできないことは言うまでもない。

さて、渇水の影響を表わす指標として、第3章でも用いた節水率と制限日数の積の総和（％・日）で表わす方法がある。

この方法は、昭和44年、建設省関東地建により昭和39年の「東京オリンピック渇水」を対象にして約5,000人の都民に対して行なわれたアンケート調査の中で、節水率（％）と節水をがまんできる日数に関する質問を整理するのに用いられた方法である。図－5.2.1はその調査結果を示したものである。この図から、水利用者の意識として10％の給水制限の場合はあまり期間にとらわれないが、30％のときは限界日数が30日のとき、50％のときは10日で回答者の割合が急増しており、これを給水制限率と日数の限界と考えると500～900％・日が一応の限界といえる。



図－5.2.1 給水制限と許容限界期間についての回答者率

著名渇水の％・日を示すと表－5.2.1のようになり、これらの渇水は、おおむね2,000％・日以上であり渇水の影響が相当大きいことが予想される。特に、昭和53年5月から発生した福岡市渇水は、渇水期間が約300日となり非常に長い点が特徴であり、約8,400％・日にも達する。

その他、％・日の大きな渇水としては、昭和42年長崎渇水、昭和48年松江渇水、昭和48年高松渇水がある。これらはいずれも上水道の給水制限であり、渇水の影響は大きかった。

工業用水では、昭和52年小瀬川渇水が大きな％・日を示しているが、この地域ではたび重なる渇水経験により渇水対策がすすんでおり影響は少なかった。

％・日は、渇水の規模、すなわち、渇水の総不足水量を表わす指標であるが、次のような欠点がある。

- ① 渇水の総不足水量が同じであれば同じ％・日となる。しかし、不足水量の時系列パターンの違いによって渇水の影響が異なることもあり、渇水強度あるいは節水率の違いによっても渇水の影響が異なる。

表－5.2.1 既往著名渇水の％・日

年 月	都市名	日数(日)	最大節水率(%)	給水時間(時間)	％・日	備 考
昭和3 7～10	東 京	84	50	9	2,700	上 水
4 2.9～12	長 崎	86	88	6	5,000	〃
4 8.7～ 9	高 松	63	60	3	2,390	〃
4 8.6～ 9	松 江	67	40	2	3,930	〃
昭和5 2.5～5.3.4	沖 縄	167	19	各日給水	2,401	〃
5 3.5～54.3	福 岡	309	48	5～15	8,376	〃
〃 6～53.1	北九州	224	35.9		4,897	工水、下水処理水混入
4 8.7～ 9	福 山	49	78		2,460	工水、工水を上水へ転用
〃 7～ 9	小瀬川	49	40		1,600	工 水
〃 7～ 9	広 瀬	52	40		1,334	〃
52.10～53.1	小瀬川	115	50		4,320	〃
5 3.8～10	小瀬川	62	55		2,330	〃
〃 6～12	北九州	170	20		2,070	上 水

ることがあるが、同じ%・日ではその違いを表現できないこと。

② 渇水の与える影響は、社会・経済的側面が大きく、たとえば、東京のような政治・経済的に重要な地域でおこった渇水とそうでない地域で起こった渇水の与える影響の差を考慮できないこと。

このうち、①は、渇水時の貯水池運用を考えると、同一不足水量であれば節水率が高く節水期間の短い運用方式と節水率が低く節水期間の長い運用方式が同一効果を有することになり、できるだけ流況を平滑化するという貯水池の運用目標に対して不都合である。また、②に関して経年貯留ダム等、現在必要性が叫ばれている渇水対策の投資妥当性あるいは効果を算定するためには、%・日では不都合であり、何らかの方法で渇水を経済的側面から評価する必要がある。

一方、山中・中村は、渇水時における貯水池運用の最適化を図るための評価関数として、全用水について

$$(\text{節水率})^2 \times \text{用水需要量} \dots\dots\dots (5.1)$$

の渇水期間における総和なる関数が有効としている⁸⁾。この関数は、

$$\text{節水率} \times \text{用水不足水量} \dots\dots\dots (5.2)$$

の総和とも表わすことができ、渇水被害原単位（不足水量1 m³当たりの被害値）が節水率に比例することを意味している。

以上の点及び前節の渇水被害の構造分析の結果をもとにして、本研究では、経済的側面から渇水被害の計量化を行なってみる。

さて、前節の結果は、取水制限・給水制限が利水者に与える影響は、10～20%の低い節水率と50～80%の高い節水率で様相が異なるということであった。

10～20%の低い節水率では、日常の節水努力の差はあるが、主として節水努力による渇水対応策がとられ、それに伴って機器購入投資等が行なわれた。一方、50～80%の高い節水率、あるいは断水状態では、生活パターンの変更を余儀なくされ、事業所・工場では、営業停止・操業短縮・操業停止による損害を発生する。

本研究では、渇水被害を節水率と被害原単位（不足水量1 m³当たりの被害）の形で把握する。分析の方法は、以下のとうりに行なう。

① 渇水被害原単位は、用途別に求める。

② 節水率と被害原単位の関係は、10～20%の低い節水率段階で生じる節水対策費用、50～80%の高い節水段階で発生が予想される営業停止損失・操業停止損失の2点から、2次式を仮定して求める。

③ 河川流域等、地域における渇水被害値は、用途別、節水率別に渇水被害原単位に不足水量を乗じた後、その総和をとって求める。

以上の仮定は、かなり大胆なものであり今後検討すべき点が多いが、本方法により渇水の与える経済的影響評価が可能である。

次に用途別の渇水被害原単位の推定結果を述べるが、ここで用いたデータは、主に昭和52年建設省四国地建において、昭和48年夏高松市渇水を対象として、一般家庭20世帯（断水経験地区）、工場14カ所、事業所20業種24カ所、農業用水5地区に対して行なわれた渇水被害状況と対応策に関するヒアリング結果を使用した²⁾。

(1) 上水道事業体

上水道事業体における渇水被害としては渇水対策費及び水道料金減収がある。

渇水対策費の内訳は、人件費、広報（P.R.）費、水輸送費（水運搬車・給水車借上げ）、水源対策費（取水施設投資、井戸掘削）等である。

渇水被害原単位は、単位不足水量に対する渇水対策費として求められ、昭和48年松江市渇水時の渇水対策費215,820（千円）、年間平均値に対する渇水期間中の不足総量1,445（千 m^3 ）から、150（円/ m^3 ）と推定した。また、被害原単位は、節水率に関係なく一定値とする。

(2) 家庭用水

昭和48年高松市渇水の断水経験世帯20世帯において、1人1日当たり30 ℓ の使用水量（高松市の当時の平常時使用水量は、150 ℓ /人・日であるから節水率80%となる。）のときの不足水量1 m^3 当たりの平均被害額は、4,000円であった（表-5.2.2にヒアリング結果の総括表を示す。）。ここで、被害額は、給水制限に伴う臨時の家計出費（ポリバケツ購入、紙コップ代、外食、お礼等）+家事労働増加時間×400（円/時間）として求めている。

また、1人1日30 ℓ に水使用量を制限したときに、「1カ月に水に対して支払える金額（1世帯当たり）」を聞いた質問に対しては、3,000～5,000円という回答を得ており、これを水不足により不便を感じ始める点での支払い限度額＝渇水被害値と考える。このときの被害原単位は、標準家庭で水使用量＝150 ℓ /人・日、水不足により不便を感じる節水率を50%とすれば、次式から求まる。

$$\frac{5,000 \text{ 円} - 150 \ell \times 4 \text{ 人} \times 30 \text{ 日} \times 0.1 \text{ 円}/\ell}{(150 \ell - 80 \ell) \times 4 \text{ 人} \times 30 \text{ 日}} = 381 \text{ 円}/\text{m}^3$$

また、100 ℓ /人・日の使用量が確保できれば、家庭によっては若干の不便は生じるものの日常生活に大なる支障をきたすことはないので、節水率＝30%までは、渇水被害＝0とする。

以上の3点から、被害原単位P（円/ m^3 ）と節水率S（%）の関係は次のとおりとなる。

$$S = 30 \text{ のとき } P = 0$$

$$S = 50 \text{ のとき } P = 400$$

$$S = 80 \text{ のとき } P = 4,000$$

SとPの関係を2次式と考え、これらの3点を通る式を求めると、

$$P = 2.05 S^2 - 147 S + 2,613 \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

となり、図-5.2.2(a)のように表わせる。

(3) 業務用水

前節でも述べたように、業務用水（営業用水）は、家庭用水の性格が強いものと、生産（あるいはサービス）用水の性格が強いものに大別される。

また、業務用水は大口需要者が多く、給水制限が始まると最初に節水を求められる性格のものである。

いま、給水停止となった事態を想定すると、完全に業務・営業は停止せざるを得ない状態となるものと予想される。従って、このときの渇水被害は、

$$\text{営業停止損失額} = \text{平常時営業売り上げ額} - (\text{原材料} + \text{動力費} + \text{その他営業経費}) \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

として求められ、被害原単位＝営業停止損失÷平常時使用水量として求められる。

昭和48年高松市渇水に対するヒアリングの結果から（表-5.2.3に総括表を示す）、営業停止損失を求

表-5.2.2 被害額の推定（昭和48年高松市渇水，一般家庭）

- ※1. 増加労働費用＝400円/時間×家事労働費（時間/日）
 ※2. 発生費用の合計
 ※3. ※1×断水日数（原則として23日）＋※2
 ※4. ※3÷（当該世帯1人1日当り使用量×世帯人員数×断水日数（23日））

世帯 No	家事労働量 分/日					増加 労働 費 ※1	発 生 費 用			総損失額 ※3	断水水量 1ℓ当り 損失額 ※4	精 神 的 苦 悩 含 め た 被害倍率
	計	水運び	洗濯	炊事	その他		計 ※2	ポ バ ケ ツ	そ の 他			
1	130	60	50	20		868 ^円	6,038 ^円	4,238 ^円	ミネラルウォーター 1,800 ^円	14,718 ^円	327 ^{円/ℓ}	3
2	170	90	20	30	30	1,120	5,000	5,000		30,760	267	5
3		30										
4	240	60	60		120	1,600	53,700	3,700	ワイシャツ洗たく 2,000 病院リュウマチ 48,000	90,500	1385	
5	270	90	60	60	30	1,600	9,500	6,500	クリーニング 1,000 お礼 2,000	46,300	30.00	3
6	210	60	60	30	60	1,500	5,000	5,000		39,500	156	10
7	180	90	90			1,200	15,600	3,700	お礼 2,000 副食 6,900 クリーニング 3,000	43,200	333	
8	180	60	60		60	1,200	3,400	2,000	使い捨て食器 500 サロンパス 500 もらい水のガソリン代 400	27,400	132	はかり知れ ない
9	150	60	90			1,000	6,200	5,600	ポンプ 600	29,200	217	
10	90	60	30			600	15,000	5,000	お礼 10,000	28,800	626	
11	180	60		120		1,200	7,300	6,300	水槽用ビニール 1,000	34,900	300	金銭で表わ せない
12	記入なし											
13	160	40	80	40		1,066						
14	120	60			60	800	2,100	2,100		24,518	183	
15	150	30	60		60	1,000	9,600	9,600		14,100	186	
16	90	60	30			600	17,200	3,700	ホース 2,000 店屋物 11,500	32,600	141	
17	記入なし						23,250	11,250	クリーニング 6,000 お礼 12,000	休業のため 30万～50万	449	
18	金で換算できるものではない						31,100	3,400	紙皿コップ 1,000 薬品 2,800 クリーニング 1,000 病院 15,000			
19	180	60	60		60	1,200						
20	記入なし											

資料：建設省四国地建，「節水ルール検討業務報告書」（資料編），昭和52年10月

表－5.2.3 事業所用水漏水対策調査アンケート整理表

$$e5 = e1 - (e2 + e3 + e4)$$

$$e7 = e5 \div e6$$

No	操 業 停 止 に よ る 水 1 m ³ 当 り 損 失 額							備 考
	売 上 額 万円/月	動 力 費 万円/月	原 材 料 費 万円/月	その他費用 万円/月	停止による損 失額 万円/月	月間用水量 m ³ /月	1 m ³ 当り損 失額 円/m ³	
	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	
1	—	—	—	—	—	—	—	48年当時の建物は4Fで、衛生公害研はなし
2	/	/	/	/	/			被害損失なし（夏休みのため）
3	/	/	/	/	/			郵政、電々公社の家族をみるだけ 一般病院とは異なる
4		電 13800 ガ 270 水 760	なし					
5	50000	194	42500	0	7306	3380	21,6150	
6		電 70 ガ 水	なし	なし		890	/	
7	44170	370	35340	—	8460	2220	38,1080	
8	3500	200	1400	なし	1900	1770	10,7340	
9	2330	電 40	400	0	1090	670	28,2090	
10	54500	290	—	4570	4,9640	7430	668100	
11	50000	水 210 電 860 ガ 270	サービス 870 部品 336 乾油 2,380 車	—	20790	1270	163,7010	
12	7330	23	5900	10	1400	400	34,9250	
13	5830	130	2220	—	3480	1670	20,8380	電気5万+ガス5万+水道3万 肉100万+野菜40万+調味40万
14	4500	電 100(仮) ガ 28	2200	0	2150	2970	7,2400	
15	5500	*1 1200	—	*1 1250	3050	1,9700	1,5480	*1.電気30万(冬)~50万 平均40万 重油30万~60万(冬) 平均45万 ガス0.5万 水道35万 *2.マッサージ100万 クリーニング25万
16	166	—	133	/	33	/	/	?
17	1,0000	205	8200	0	1595	上水2000 井戸6000	200なら7,975 800なら1,983	ガス4万 水道3.5万 電気10万 30万
18	1,2000	110	1,0000	—	—	860	21,9770	水道1.3万 電気2.7万 ガソリン7万 ガス0.2万
19	128	14	51	—	63	300	20870	ガス0.2万 電気0.8万 水道0.4万 重油1.6万
20	2000	16	1100	0	884	500	17,6800	
21	2000	38	500	100	1360	830	16,3860	電気1.8万 ガス1万 水道1万弱
22	833	50	—	50	/	700	10,4290	
23	500	40	0	100	360	700	5,1430	
24	3320	*1 86	*2 105	—	3129	1740	17,9830	*1.(水道32万+ガス10万+電27万 +灯油34万)÷12=8.6万 *2. 125万÷12=10.5万

資料：建設省四国地建、節水ルール検討業務報告書（資料編）昭和52.10

めると、次の2グループに分けることができた。

- ① 営業停止損失の大きいグループ
業種…学校、事務所、飲食店、ホテル、旅館
- ② 営業停止損失の小さいグループ
業種…飲食店、サウナ、鮮魚、豆腐、クリーニング

①における営業停止損失の平均値は、使用水量1㎡当たり20,000円、②は、5,000円という結果を得ている。

次に、給水制限下の業務用水の確保をトラック等による水輸送により行なうことが考えられるが、このときの費用は、高松市渇水のときの事例では、3,000円/㎡程度である。従って、水輸送費=限界渇水対策費=渇水被害と考えることができる。

以上のことから、渇水被害原単位P(円/㎡)と節水率S(%)の関係は次のようになる。

- ① 営業停止損失の大きい業種(業務用水1)

S=0 のとき P=0

S=30 のとき P=3,000

S=80 のとき P=20,000

この3点を通る2次式は、

$$P = 3S^2 + 10S \dots\dots (5.5)$$

となり、図-5.2.2(b)のように表わせる。

- ② 営業停止損失の小さい業種(業務用水2)

S=0 のとき P=0

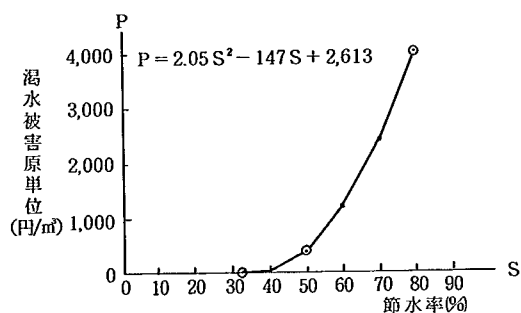
S=30 のとき P=3,000

S=80 のとき P=5,000

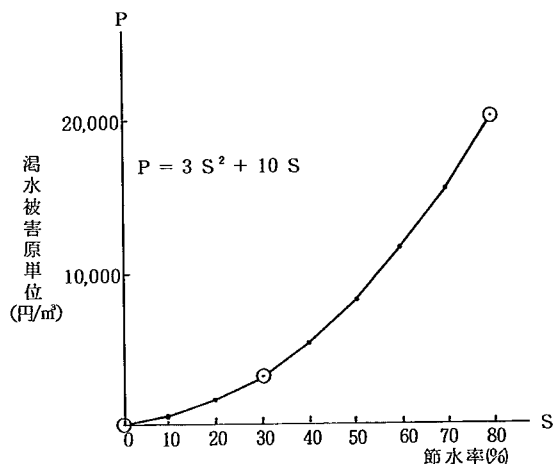
この3点を通る2次式は、

$$P = -0.75S^2 + 1.225S \dots\dots\dots (5.6)$$

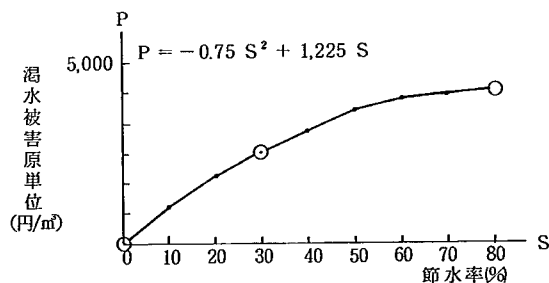
となり、図-5.2.2(c)のように表わせる。



(a) 節水率～渇水被害原単位(家庭用水)



(b) 節水率～渇水被害原単位(業務用水1：大口)



(c) 節水率～渇水被害原単位(業務用水2：小口)

図-5.2.2

(4) 工業用水

工場の水利用の方法は多岐に亘っており、家庭用水のように画一的に扱うことは難しいが、以下に述べることから工業用水においても業務用水の場合と同様にして漏水被害原単位を推定する。

つまり、工場には、多用水型事業所と非多用水型事業所があり、昭和50年工業統計によれば、化学工業、鉄鋼業、パルプ・紙、石油・石炭製品製造の4業種で工業用水使用総量の77%を占めている。従って、漏水時に影響の大きい業種は、これらの業種と考えられる。多用水型の業種の中でも、製造品出荷額1億円当りの用水原単位（回収水を除く淡水，単位は $\text{m}^3/\text{日}$ ）は、昭和50年工業統計表によれば、紙・パルプ282，石油・石炭製品製造13，鉄鋼41，化学93であり、淡水原単位の大きいグループ（紙・パルプ）と小さいグループ（石油・石炭，鉄鋼，化学）に分けられる。従って，漏水被害の推定に当ても2つのグループに分けて行なうことにする。

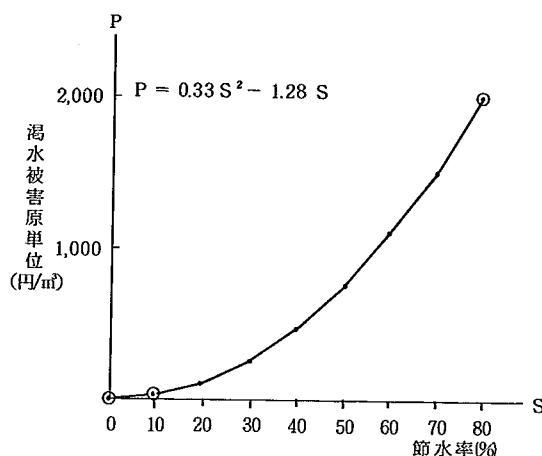
高松漏水のヒアリング結果から（表-5.2.4に総括表を示す），節水率が80%になったときに操業停止の事態になるとして，使用水量 1m^3 当りの操業停止損失を求めると（操業停止損失＝平常時生産額－（動力費＋原材料費＋その他操業経費）とする），その平均値は，

- ① 石油，化学（工業用水1）は， $2,000\text{円}/\text{m}^3$
- ② 紙・パルプ（工業用水2）は， $300\text{円}/\text{m}^3$ となった。

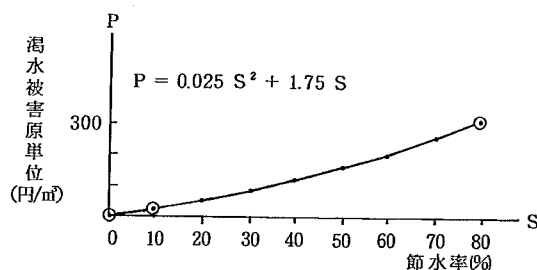
また，節水率の低いときは，水使用合理化のための設備投資を必要とし， $1\sim 20\text{円}/\text{m}^3$ 位であり，この値を被害原単位とする。

以上のことから，漏水被害原単位 P （ $\text{円}/\text{m}^3$ ）と節水率 S （%）の関係は，

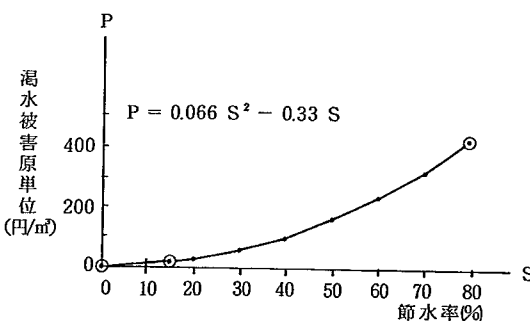
- $S = 0$ のとき $P = 0$
- $S = 10$ のとき $P = 20$
- $S = 80$ のとき $P = 2,000$ （工業用水1）
 300 （工業用水2）



(d) 節水率～漏水被害原単位
（工業用水1：石油・化学等）



(e) 節水率～漏水被害原単位
（工業用水2：紙・パルプ等）



(f) 節水率～漏水被害原単位（農業用水）

図-5.2.2

表-5.2.4 工業用水渇水対策調査アンケート整理表

工場 No	海水	淡水の用途別水量							主要指標		操業停止による1㎡当り損失額 単位(万円/月, 千㎡/月, 円/㎡)								備考
		ボイ ラー 用水	原料 用水	製品 処理 用水	冷却 用水	温調 用水	その他 用水	合計	従業員 1人当り 売上高 (万円)	出荷額1 億当り 淡水 取水量	出荷額	動力費	原 材 料 費	そ の 他 費 用	停 止 による 損失額	月 間 取水量	1 ㎡ 当 り 損失額		
		b 80	c 1	c 2	c 3	c 4	c 5	c 6	c 60	d 1	d 2	e 1 *1	e 2	e 3	e 4	e 5 *2	e 6	e 7 *3	
1	0	15.50	0	281.40	11.50	0.10	5.10	313.60	4,200	320	665,293	130,855	352,690	10,442	219,313	8,340	205		
2		3	0	118.90	20	0.40	0.1	142.40	2,700	340	235,000	22,586	113,763	16,299	51,552	2,472	334		
3		0.1	3.8	10.10	0	0	9.8	23.83	4,300	280	144,300	10,000	62,400	0	71,900	715	1,598		
4		0.60	11.60	4.19	0.86	0	0.02	17.27	1,800	230	62,400	3,200	49,000		10,100	518	200		
5		0.20	8.69				0.05	8.94	1,500	290	17,274	700	11,181	0	11,919	244	360		
6		0.01	3.0	5.0	0.1		0.49	8.6	1,400	330	12,500	360	8,000	0	5,840	168	493		
7			6.0				0.50	6.5	7,100	150	25,000	1,500	1,800	0	21,700	135	1,607		
8	190	0.27	0	0	36.7	0	5.9	43.04	19,200	10	1,000,000	18,000	800,000	0	182,000	458	3,974		
9	0	0.1	0	10.0	12.24	0	0.36	22.71	2,600	80	120,000	5,600	55,600	5,380	53,420	335.7	1,591		
10	48	3.8	0	0	182.4	0	0.14	186.34	2,400	70	769,700	22,390	707,930	17,950	21,430	190.2	1,127		
11	2,701	2.8	1.8	0	0.8	0	0.34	5.75	31,800	10	594,000	17,800	356,400	0	219,800	173	12,705		
12		0.05	0.1	0.95	10.09	0.2	0.34	11.73	3,400	130	30,149	462	5,000		24,687	136	1,815		
13									2,100	4	766,000	7,827	400,000	0	358,173	126.8	28,247		
14	10	0.1	0.6	2.01	0	0	0	2.71	8,400	20	11,470	2,650	2,900	0.1	5,820	81	719		

*1 = $a1 \div 12 \times 10^4$ *2 = $e1 - (e2 + e3 + e4)$ *3 = $e5 \div e6 \times 10$

資料：建設省四国地建，節水ルール検討業務報告書（資料編），S52, 10

となり、3点を通る2次式を求めれば、

$$P = 0.33 S^2 - 1.28 S \quad (\text{工業用水1}) \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

$$P = 0.025 S^2 + 1.75 S \quad (\text{工業用水2}) \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

となり、各々、図-5.2.2(d), (e)のように表わせる。

(5) 農業用水

渇水が農業用水に与える被害としては、水稻のみの被害を考える。一般に、渇水時には、好天が続くので、他の災害と異なり豊作となる場合が多いが、いま、最悪の事態を想定して1カ月の取水停止により水稻が枯死して100%減収になったと仮定すると、

$$\begin{aligned} 1 \text{ ha 当り 損害} &= \text{生産者米価} \times \text{反当り収穫高} \times 10 \quad (\text{反/ha}) \\ &= 280 \quad (\text{円/kg}) \times 60 \quad (\text{kg/俵}) \times 10 \quad (\text{俵/反}) \times 10 \quad (\text{反/ha}) \\ &= 1,680 \quad (\text{千円}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ ha 当り 使用水量} &= \text{減水深} \times \text{面積} \times 30 \quad (\text{日}) \\ &= 14 \quad (\text{mm/日}) \times 10,000 \quad (\text{m}^2/\text{ha}) \times 30 \quad (\text{日}) \\ &= 4,200 \quad (\text{m}^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{被害原単位} &= 1,680 \quad (\text{千円}) \div 4,200 \quad (\text{m}^3) \\ &= 400 \quad (\text{円/m}^3) \end{aligned}$$

となる。

ここで、生産者米価は昭和51年度政府買入価格60kg当り16,572円から、1kg当り米価を求めると276円となり、約280円とした。

次に、用水管理水準を無視して、節水率=15%のときに、水路補修等の節水対策費用を必要とするものとする。香川県高濃地区における土地改良事業の年間償却費と年間節水量(15%節約されると仮定)から、節水コストを求めると10円/m³となり、これを被害原単位とする。

以上のことから、渇水被害原単位P(円/m³)と節水率S(%)の関係は、

$$S = 0 \quad \text{のとき} \quad P = 0$$

$$S = 15 \quad \text{のとき} \quad P = 10$$

$$S = 80 \quad \text{のとき} \quad P = 400$$

となり、3点を通る2次式を求めると

$$P = 0.066 S^2 - 0.33 S \quad \dots\dots\dots (5.9)$$

となって、図5.2.2(f)のように表わせる。

以上の各用水ごとの節水率と渇水被害原単位の関係を検討結果から、表-5.2.5の渇水被害原単位表を得る。本表は、前節の渇水被害構造の分析結果及び高松渇水のヒアリング結果をもとに推定したものであり、精度の点でまだ問題がないとは言えないが、渇水被害の傾向は十分表現されており、次章で考察をすすめる貯水池の運用方式の相互比較における評価関数として使用することは、工学的には妥当と考える。

その理由は、本研究では渇水時の貯水池運用方式としてどのような方式が実行可能であり、かつ、どのような方式が渇水の与える社会経済的な影響を少なくできるかを明らかにすることを目的としており、渇水被害の計量化の精度が十分でなくとも、以上の被害関数は渇水被害の構造分析において明らかとなったように、節水率が大きくなると急激に渇水被害が増大するという特性を評価関数の中に表現しており、

表-5.2.5 渇水被害原単位(不足水量1㎡当り被害額)

(単位 円/㎡)

節水率% 区分	10	20	30	40	50	60	70	80
上水道事業体	150							
家庭用水	—	—	—	20	400	1,200	2,400	4,000
営業用水1	400	1,400	3,000	5,200	8,000	11,400	15,400	20,000
営業用水2	1,150	2,150	3,000	3,700	4,250	4,650	4,900	5,000
工業用水1	20	106	258	476	761	1,111	1,527	2,000
工業用水2	20	45	75	110	150	195	245	300
農業用水	3	20	50	92	150	218	300	400

貯水池の運用方式を相互に比較して、その内から節水率の急激な増大を招かない方式を追求するという立場からは、本章で提案した被害関数を使用することは妥当であると考えられるからである。

しかし、主として行政的な立場からは、快適性・利便性の阻害といった計量化の困難な要素が政策判断を行なううえでの重要な要素であり、これらの要素の把握及び渇水のもたらす二次的被害の把握が今後の研究課題であろう。

ここで、上記の渇水被害の計画化の普遍性・妥当性について、昭和53年福岡市渇水における調査例によって検討しておきたい。

昭和53年5月から始まった福岡市渇水は、水資源開発の遅れ(筑後川からの導水)と水源地域での異常少降雨が原因となった都市型渇水といえる。

給水制限は、表-5.2.6に示すとうりて、6/1～6/10の第3次給水制限が最も厳しく、大口需要者のバ

表-5.2.6 昭和53年福岡市渇水における給水制限状況

給水制限	期 間	給 水 時 間	節 水 率%	%・日
第1次	5/20～5/24(5日間)	6時～21時(15時間)	10	50
第2次	5/25～5/31(7")	12時～21時(9")	25	175
第3次	6/1～6/10(10")	16時～21時(5")	48	480
第1次	6/11～6/25(15")	6時～22時(16")	18	270
第2次	6/26～7/26(31")	11時～21時(10")	25	775
第3次	7/27～8/31(36")	13時～21時(8")	34	1,224
第4次	9/1～10/31(61")	15時～21時(6")	36	2,196
	11/1～11/30(30")	14時半～21時半(7")	33	990
	12/1～12/19(19")	13時～21時(8")	27	513
全面給水	12/20～1/10(22")	(24")	15	330
	1/11～2/23(44")	10時～22時(12")	20	880
	2/24～3/24(29")	6時～24時(18")	17	493
合 計	5/20～3/24(309")		平均 28	8,376

ルプ規制（節水率 61 %にも及ぶ）高台での断水、給水車の出動が発生した。

本渇水に対して、6月末に、建設省九州地建により、一般家庭約 2,000 世帯、事業所 500 カ所を対象に渇水の影響・被害に関するアンケート調査が実施されている⁹⁾。

本研究では、その調査の一部を使って分析を進める。図-5.2.3は、高台にあるため断水した団地におけるアンケートの集計結果の一部である。その結果から、次のことがいえる。

- ① 水のため置きが、1日1世帯当り 100 ℓ程度行なわれた。
- ② 給水制限によって最も困った用途は、水洗便所、炊事、風呂、洗濯等である。
- ③ 渇水に対する不満・不安な項目としては、保健衛生、余計な出費、生活時間の拘束等があげられ、不満・不安の度合いは、第2次制限から急増している。
- ④ 「給水制限時、もし、水を購入できるとしたときに支払える金額」としては、完全断水時で平均 700 円/㎡となっている（図-5.2.3(a)）。

- ⑤ 渇水の被害としては（図-5.2.3(b), (c), (d)），中央値をとると、

家事労働の増加時間（水運び等、1日当り）……………約 3 時間

物品購入等の臨時出費……………約 6,300 円

となり、主婦の労働単価を 400 円/時間とすると、渇水被害原単位は、不足水量 1 ㎡当り約 3,000 円となる。

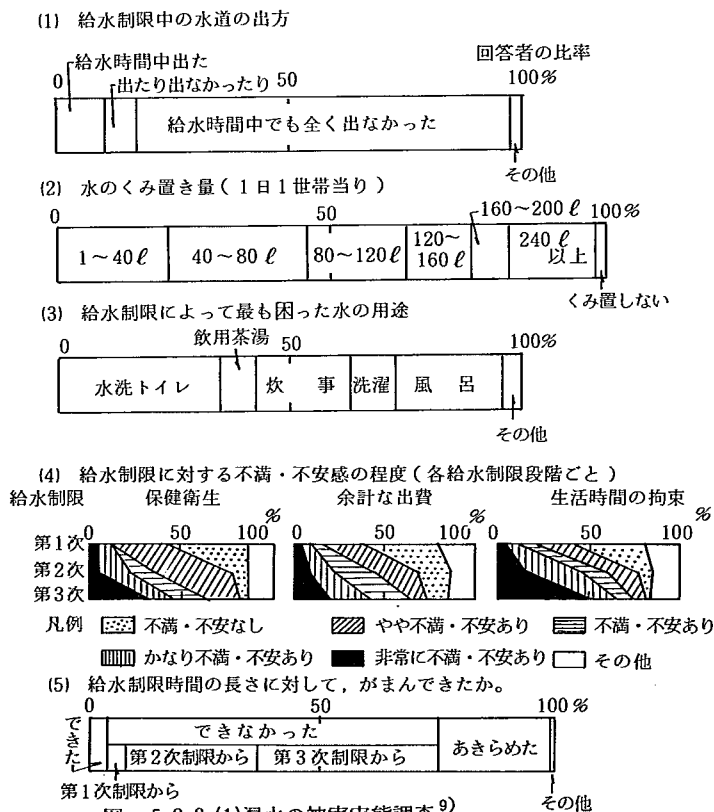


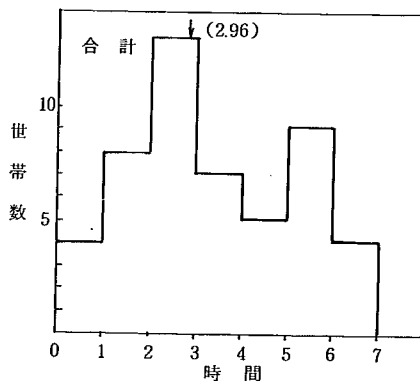
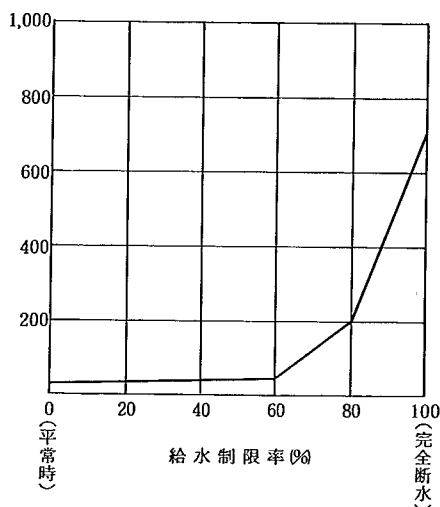
図-5.2.3 (1)渇水の被害実態調査⁹⁾
(昭和53年福岡市渇水、断水経験の団地)

この値は、高松渇水で求めた値 4,000 円/㎡よりは低いが、傾向としては、本節で示した被害の計量化方法がほぼ妥当であることを示している。

渇水時の生活で特徴的な点は、給水時間が決まっているのでこれに生活時間を拘束され、断水時には水運びに時間をとられるので、主婦の外出機会が減少し、全般的な生活の活動レベルは、かなり低下することである。

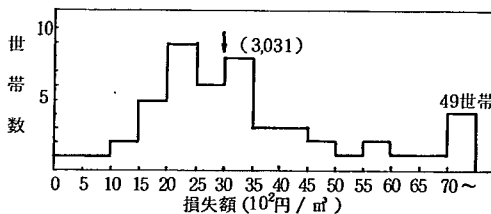
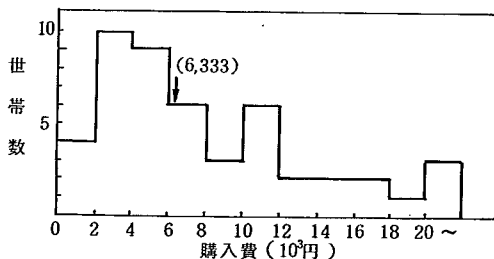
次に、事業所への影響について述べる。福岡市は、九州の行政・経済の中心地であり、100万人の人口を擁する消費都市である。本渇水が、都市機能に与えた影響としては、次のことがあげられる。

- ① 主婦の外出時間が水確保のため減少し、行動半径が狭くなって中心部での買物客が減少した。また、渇水時の余計な出費のため、不要不急な物品の購入が減少した。
- ② ビジネスマンの帰宅時間が早まり、飲食業の客が減少した。
- ③ 旅行客の減少
- ④ コンピュータを使用する事務所では、コンピュータの冷房用水を確保するため、従業員の生活用水を切りつめて対応した。



(a) 渇水時、水を購入できると仮定したときに支払える金額(水 1 ㎡当り、全世帯平均)

(b) 家事労働の増加時間(1日当り)



(c) 物品購入費

(d) 不足水量 1 ㎡当り損失額

図-5.2.3(2)渇水被害の実態調査

注) ↓は中央値(メジアン)を示す

(昭和53年福岡市、断水経験団地を対象としたもの)

⑤ 学校の休校

⑥ 病院の入院患者の制限

表－5.2.7 は、今回の渇水が事業所に与えた経済的影響として売上げ減少の程度をとりまとめたもので、ホテル、飲食、理容、クリーニング等の影響の大きい業種で 10～30 %の売上げ減少及び 5 %程度のコストの増加を生じている。また、公共サービス機関でも残業時間の短縮等、業務能率の低下が生じている。

以上のように今回の渇水が社会・経済に与えた影響は、相当大きいと考えられる。

最後に、本章で分析した渇水被害の計量化の適用限界についてまとめておく。

まず、家庭用水については、

- (1) 渇水時の生活レベルの低下、精神的・肉体的疲労、不安、ストレス、保健・衛生等の金銭的に表わせない項目を評価できない。

表－5.2.7 給水制限の経済的影響（業務用水）

	業 種	売 上 減 少 率
影 響 の 大 き い 業 種	ホテル、旅館業	20 ～ 30 %
	飲食店（レストラン、和食業、中華料理店）	10 ～ 30 %
	デパート、量販店	5 ～ 20 %
	理髪・美容業	20 ～ 30 %
	クリーニング業	5 ～ 10 %
	浴場およびサウナ	20 ～ 30 %
	給食センター	10 %
	生鮮食品（鮮魚、野菜類）	20 %
波 及 的 な 影 響 の あ る 業 種	運輸業（特にバス、タクシー）	約 10 %
	ガソリンスタンド	約 12 %
	プロパンガス供給業	約 5 %
	観 光 業	約 30 %
	遊 戯 娯 楽 業	10 ～ 20 %
	写 真 業	15 %
	生鮮食品販売業	約 15 %
	耐久消費材販売業	20 ～ 30 %
公 共 サ ー ビ ス	情報提供サービス（放送局、新聞社、気象台）	売上減少は起っていないが、残業時間の短縮、稼働時間等の 5～10 %低下が生じている。
	銀行、金融業	
	通信業（電々公社、電話局）	
	病院、診療所	
	学 校	
	官 公 庁	

* 水の購入、ドライアイス購入、使い捨て容器、従業員の食事形態の変更等により平均 5 %程度（対売上高比）のコスト増加を生じている。

(2) 同じ給水制限においても、水の出方は地区、建物、受水槽の有無等によって異なり、実質節水率にばらつきがあり、平均的な節水率で被害を把握するのは困難である。

(3) 世帯構成、所得水準、渇水体験の有無等の要因によって、同じ節水率でも渇水時の対応と影響は異なる。

等の問題点がある。

業務用水については、

(1) 節水率のばらつき

(2) 業種の違い、水使用量の程度、受水槽の有無、ふだんの水利用合理化の程度、井戸等の自己水源の有無等の要因によって同じ節水率であっても渇水時の対応策及び影響は異なる。

等の問題がある。

工業用水については、業種、水使用量の大小、水使用の用途、水使用の合理化水準、渇水経験の有無、自己水源の有無等の違いによって、工場ごとに渇水時の節水対応と影響はかなり異なり、本章で分析した被害関数ではこれらの変動要因を十分に表わしていない。

農業用水についても、河川の取水位置、用水路からの取水位置、水管理水準、渇水経験の有無等によって渇水時対応と影響は異なる。また、渇水時は一般に日照時間が増加するので、かえって増収となることが多い。したがって渇水の影響としては、番水実施時の労務提供、水管理強化のための労働時間の増大等の影響が大きく、これらは把握しにくい。さらに、渇水の影響は、時期によって異なり、最も厳しいのは、植付期の渇水である。

以上の他に、渇水被害と渇水期間の長さの関係の把握、渇水の二次的被害の把握等の点でここで分析した被害関数は十分なものといえない。

しかしながら、これまでの研究では、渇水被害について節水率と利水者の渇水対応及び渇水被害構造を分析することによって計量化したものはなく、種々の適用限界及び今後の調査に待つ点も多いが、本節で提案した渇水被害原単位式は、渇水の与える社会・経済的影響の評価指標として有効な方法である。

5.3 渇水被害の評価

前節では、渇水被害の構造分析結果及び既往渇水調査結果をもとにして、渇水被害の経済的計量化方法に関する分析を行ない、節水率と被害原単位の関係を用い別々に求めた。このような方法により求めた渇水被害額は、次の目的に使用できると考えられる。

① 渇水時の用途間水配分の検討

② 渇水時の貯水池運用方式の検討

③ 経年貯留ダム（渇水時の緊急補給用の備蓄ダム）等渇水対策事業の投資効果分析

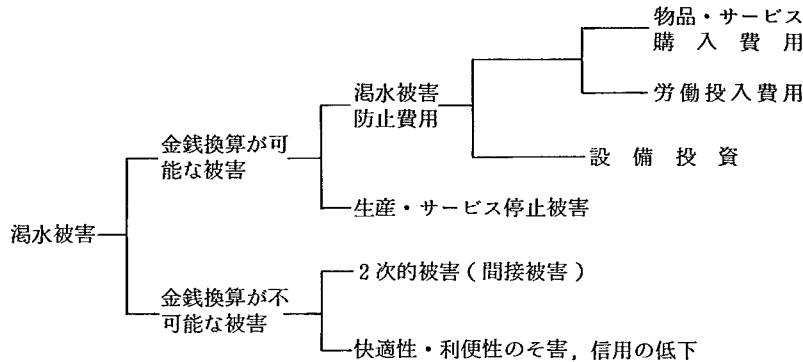
①は、渇水時の水利調整の問題であり、地域での渇水被害を最小とするように用途間水配分を行なうことが考えられるが、実態とかけ離れてしまう恐れがあり、現状での適用は困難である。

②は、本研究の次章において分析を行なう問題であり、渇水被害を最小にする貯水池運用方式の分析を通じて、節水開始貯水量、節水率の設定法等を明らかにできる。

③は、現在、行政的に要請の高まっている経年貯留ダム等渇水対策事業の渇水被害軽減効果を計量的に把握することにより、投資効果を分析するものである。

本節では、次章において検討を行なう渇水時の貯水池運用方式比較のために、ダム・河川における渇水被害額推定のための方法を考察する。

渇水被害の構造は、概略以下のように整理できた。



これらの渇水被害のうち、前節では、金銭的な換算が可能な被害のみ計量化したものである。

また、被害原単位式の推定に当っては、昭和48年高松渇水のヒアリング結果を使用している。

したがって、この被害原単位式が一般化して他地区に適用できるかどうかは、今後の調査を待つ必要があるが、前節で検討したように昭和53年福岡市渇水の調査事例から、傾向的には本被害原単位式は妥当であると考えられ、又、上水道の水利用構造に大きな地域差はないと考えられるので、本研究では前節の考察の結果が一般性を有し他地域にも適用可能とすることにした。

さて、ダム・河川の渇水被害を評価する場合、用途間の水配分をどうするかによって被害額は変化するが、次章の貯水池の運用方式検討という目的のもとでは、各用途の節水率を等しいとした方が現実的である。このことは渇水調整の実態からすると必ずしもそうでないが、本研究では貯水池の最適運用を行なうことによって、深刻な渇水被害が発生するのを未然に防止することを研究目的としているので、渇水時の水配分は2次的な問題と考え、渇水時の水配分方法を各用途とも等節水率によって配分するものとした。

いま、ダム・河川からの各用水の取水量（計画値1日当り）を Q_{α} 、これに対する不足水量を ΔQ_{α} （1日当り）、第 i 次取水制限率（節水率）を S_i 、取水制限日数を D_i （日）、渇水被害原単位（節水率の関数とする）を $f_{\alpha}(S_i)$ とすれば、渇水被害額の全用水合計値 F は、

$$\begin{aligned}
 F &= \sum_i \sum_{\alpha} f_{\alpha}(S_i) \cdot \Delta Q_{\alpha} \cdot D_i \\
 &= \sum_i \sum_{\alpha} f_{\alpha}(S_i) \cdot Q_{\alpha} \cdot S_i \cdot D_i \\
 &= \sum_i \sum_{\alpha} f_{\alpha}(S_i) \cdot W_{\alpha} \cdot Q \cdot S_i \cdot D_i \\
 &= \sum_i f(S_i) \cdot \Delta Q \cdot D_i \quad \dots\dots\dots (5 \cdot 10)
 \end{aligned}$$

ここに、 $W_{\alpha} = Q_{\alpha} / Q$ = 用水取水量ウェイト、 Q = 取水量合計 = $\sum_{\alpha} Q_{\alpha}$ 、 ΔQ = 不足水量合計 = $\sum_{\alpha} \Delta Q_{\alpha}$ 、 $f(S_i) = \sum_{\alpha} f_{\alpha}(S_i) \cdot W_{\alpha}$ = 平均被害原単位である。

したがって、前節の渇水被害原単位式（用途別）に、用水取水量ウェイトを乗じて平均被害原単位（節水率別）を求めておき、渇水被害額 = 平均被害原単位 × 不足水量合計値（1日当り） × 制限日数として各節水率ごとに被害額を求め、これを渇水期間について累加値を求めると一渇水の渇水被害がマクロ的に評

価できる。

このような考え方をもとにして、次章の検討対象ダムの渇水被害原単位を計算してみる。

いずれのダムも基準地点において渇水被害評価を行なうものとする。基準地点における確保流量の用水別内訳（上水、工水、農水。維持流量は除く。）を求め、さらに、昭和50年水道統計によって上水を家庭用水と業務用水に分け、昭和50年工業統計表によって工水を工業用水1型産業（化学、石油、鉄鋼等の業種）と工業用水2型産業（紙・パルプ、食料品等の業種）に分け、用途別使用量ウェイトをマクロ的に求めた。結果を表－5.3.1に示す。

前節の表－5.2.5で求めた用途別被害原単位に表－5.3.1の用途別使用量比率を乗じて全用水について加え合わせ、平均被害原単位を求めた結果を、表－5.3.2及び図－5.3.1に示す。

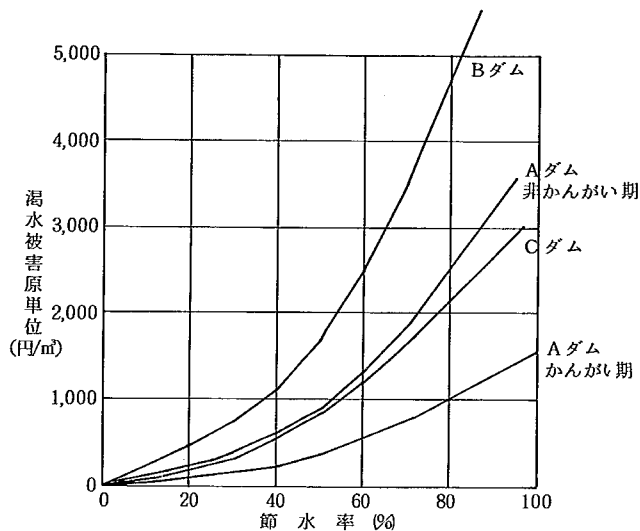
水が中心で（総量の77%）、被害原単位が最小となっている。非かんがい期は、上水及び工水がほとんどで被害原単位が高くなっている。

Bダムは、生活用水のウェイトが高く、特に業務用水のウェイトが他のダムに比べて高いので、被害原単位も最大となっている。

Cダムは、石油、化学等の工水のウェイトが高く、被害原単位は中間値をとっている。

表－5.3.1 用途別使用量比率（%）

用 途	A ダム	B ダム	C ダム
家 庭	6	40	7
業 務	2	20	4
工業用水1	7	10	65
” 2	15	30	19
農 業 用 水	70	0	5
合 計	100	100	100



図－5.3.1 渇水被害原単位（全用水平均）

表－5.3.2 渇水被害原単位（単位＝円／不足水量1 m^3 ）

ダム名 \ 節水率 (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	備 考
A ダム	30	80	150	240	370	550	770	1,050	かんがい期
”	110	230	380	570	880	1,320	1,870	2,550	非かんがい期
B ダム	240	460	740	1,100	1,670	2,480	3,520	4,780	
C ダム	60	170	320	540	830	1,210	1,670	2,230	

以上のように、渇水被害原単位は、節水率と渇水被害の関係、水系の水利用構造を良く反映しており妥当と考えられるので、次章においては、表— 5.3.2 の値を被害原単位として用いて渇水被害の評価を行なうことにする。

第5章 渇水被害の構造と計量化

要 約

本章では、渇水が与える社会・経済的影響に関して用途別に既往渇水調査資料をもとに分析を行ない、渇水被害の計量化方法を考察し、貯水池の運用方式の検討において必要とされる渇水被害の評価方法を示した。

5.1 では、用途別に渇水被害の構造分析を行ない、水使用者の渇水時対応策を節水率との関係において整理した。その結果、節水率の低い段階では、節水対策及びそれに伴う費用が被害として扱えられること、節水率がある限界値（60～80%）を越えると、家庭用水では生活パターンの大巾な変更を伴い、業務用水では営業停止、工業用水では操業停止等の事態となることが想定された。

5.2 では5.1の結果をもとにして、節水率が低い段階での節水投資費用、家庭用水では節水率が限界状態での家事労働増加時間及び家計出費、業務用水では営業停止損失、工業用水では操業停止損失、農業用水では水稻収穫がないときの損失を金銭的に評価し、不足水量1 m³当りの渇水被害額、すなわち被害原単位を推定し、渇水被害の計量化を計った。

5.2 では、渇水時の貯水池運用方式の検討に当って必要となる渇水被害の評価方法として、5.2の結果と渇水時の用途間の水配分を等節水率で行なうという仮定から、平均渇水被害原単位を求めた。その結果は、節水率と渇水被害の関係、水系の水利用構造をマクロ的に反映しており妥当と考えられる。

第5章 参 考 文 献

- 1) 建設省中国地建、渇水被害影響調査報告書、昭和52年3月
- 2) 建設省四国地建、節水ルール検討業務報告書、昭和52年10月
- 3) 四国通産局、四国地方の渇水と対策、工業用水、第188号、昭和49年5月
- 4) 建設省太田川工事々務所、昭和48年小瀬川の渇水調整（水利編）
- 5) 建設省土木研究所、渇水被害の計量化に関する調査報告書、昭和53年3月
- 6) 建設省関東地建、渇水アンケートの統計、昭和46年3月
- 7) 建設省四国地建、昭和48年夏季渇水の概要（高松市地域）、昭和49年1月
- 8) 山中、中村、降雨の長期予報の貯水池管理への利用、土木技術資料 19-6、昭和52年6月
- 9) 建設省九州地建、福岡市渇水実態調査（概要版）、昭和53年10月

第6章 貯水池の運用方式

6.1 貯水池の運用方式の種類

第4章では、現在採られている貯水池計画の方法を述べ、水資源開発が進展し利用率が上昇するほど、計画を超える渇水が発生したときに不足総量が増大するという問題点を有していることを論じた。また、管理段階での利水安全度は、計画段階の利水安全度と異なることを述べた。すなわち、現在の流況把握の方法では基準点へのダム補給を正確に実施できないこと、及び用水の還元を計画論的には無視しているが、実態としては還元量があることによって利水安全度が計画上の安全度とは異なってくるなどの問題点があるからである。

第5章では、渇水の与える社会的・経済的影響に関して分析を行ない、貯水池運用の目標に関する考察を行なった。

以上のことから、渇水時の貯水池運用をどのように実施するかということが、今後の貯水池計画を考えるうえで重要な問題であることが明確になった。すなわち、今後の水資源開発計画では、単に渇水補給に必要な貯水容量の超過確率が1/10という基準で貯水池規模を決めるのではなく、計画を超えるような渇水が発生しても社会・経済的に最悪の事態を回避できるような貯水池運用計画が立案されなければならない。

しかし、貯水池操作は関係地域住民の利害に大きく関係するため、多くのダムでは渇水が発生してから関係地域の利害関係者と協議し、その都度、対応しているのが現状であるから、渇水による被害を軽減するための貯水池運用の方式を早急に確立する必要がある。

本章では、計画を超える渇水が発生したときの貯水池運用方式に関して検討を行なう。ここで、計画を超える渇水とは、渇水補給に必要な容量が貯水池計画容量を超過するような渇水を意味する。

貯水池の運用における制約条件は、将来流況が未知であることである。将来流況の値は、単に過去の統計値から得られる期待量でしかありえない。したがって、渇水の大きさが未知であるから、ダム貯水量を完全に有効に使用して渇水の与える影響が最も小さくなるように運用することはできない。

そこで、本研究では、渇水が発生しても、渇水が深刻化、長期化して利水者に決定的な被害を可能なかぎり生じないように、渇水時には予めダム補給量を節水する方式について検討する。

渇水時に節水運用を図る方式として、本研究では、渇水の影響・被害を把握する尺度として5.3節で求めた渇水被害原単位を使用して次の3方式について検討を加え、各方式の渇水被害軽減効果を比較分析することとする。

(1) 予測方式

(2) 段階的節水方式

(3) 確率D. P. (ダイナミック・プログラミング)方式

(1)は、気象庁から発表される長期予報(3カ月予報)を利用して降水量の予測を行ない、長期の流況予測を行なって、貯水量を有効に利用して渇水時の貯水池運用を実施する方式である。

(2)は、貯水量に応じて節水率を段階的に定めて渇水時の貯水池運用を行なう方式である。この場合、節水開始貯水量及び段階的に節水率をどのように定めるかが問題となる。その理由は、節水開始貯水量を大き

くとると、渇水の初期段階でもすぐ節水が必要となり、常時の水利用量が減少し、逆に節水開始貯水量を小さくし過ぎると、渇水が結果的に大きくなってくと渇水をしのぐ事ができなくなる。そこでここでは、渇水被害値を最小にするような節水開始貯水量を試算により求めることにする。

(3)は、渇水時の貯水池運用方式の策定に当って、数学的な最適化手法の一種である確率 D. P. (ダイナミック・プログラミング)法を適用するものである。適用に際しては、将来流況を確率統計的に期待される値と考え、渇水被害値の累加値の将来期待値を最小とするように節水率を最適化する。このとき、節水率は、月別及び貯水量別に最適化される。

以上の基本的な 3 ルールについて、ダム貯水池での運用シミュレーションを行ない、前章で求めた渇水被害原単位を使用して渇水被害額による評価を行ない、渇水時の貯水池運用方式としてどの方式が最も有効であるか分析する。

6.2 適用ダム

最初に、3 方式の渇水被害軽減効果を分析するために、運用方式検討の対象ダムについて説明する。

対象ダムは、利用率の高い 3 ダムとした。

検討に当っては、各ダムとも運用方式は 1 ダム 1 基準地点にモデル化し、水資源開発方式は確保流量方式とした。すなわち、基準地点において確保すべき流量時系列を設定し、基準地点流量が確保流量以上のときはダムに余剰水を貯留し、基準地点流量が確保流量以下のときは不足水量分だけダムから補給を実施する方式である。ただし、節水運用を実施する場合は、確保流量を一時的にある比率分だけ下げ、ダムからの補給量を減少させる。

また、用水間の水配分及びダム容量の目的別配分はここでは考えない。確保流量の内訳としては、基準地点から下流で取水される上水道用水、工業用水、農業用水及びその他流水の正常な機能を維持するために必要な流量がある。したがって、一たん基準地点での確保流量を決めておけば、各ダムの有する各目的の利水容量をまとめて使って、確保流量に対して補給していくのが全体として最も効率的といえる。このような方式は、現実に利根川ダム群等において実施されている。

一方、渇水時の取水制限では、利水者間の話し合いにより制限率(節水率)を決めるのが原則となっているが、実態としては、各用水で制限率を等しくする場合(利根川の場合)と、用水によって制限率を変える場合がある。どちらの方式が選ばれるかは、単に渇水被害を少なくするといった観点から決まるものではなく、歴史的な背景、社会的な影響力の大小等他の要因も絡んでくるので一概には言えない。

本研究では、ダム貯水池による渇水時の水管理の効率化、すなわち、できるだけ渇水時にもダムを空とすることなく安定的な流況調整を図れる運用方式を分析することを目的としており、渇水時の水配分方法にまで言及することは、問題を複雑化し、必ずしも安定的な流況調整の方法が得られない恐れがあるので、渇水時の水配分については、別途、水利調整に関する歴史的かつ社会・経済的観点からの分析に委ねることとし、本研究では、安定的な流況調整を目的とした渇水時の貯水池運用の効率化方法を対象として分析する。

表-6.2.1 は、本研究で用いた各ダムの基礎データ、計画利水容量、基準地点確保流量、運用シミュレーションの検討期間をとりまとめたものである。

表-6.2.2 は、節水運用を行わない場合(基準地点確保流量に対して計画どおりに補給した場合)に、

表-6.2.1 貯水池運用方式検討条件

ダ ム 名	A ダ ム	B ダ ム 群	C ダ ム
1. ダム地点流域面積(km ²) 基準地点流域面積(km ²)	299.5(分水流域を除く) 1,330.0(")	81.5 217.8	239 330
2. 流域平均雨量資料期間 流域平均雨量計算方法	昭和23年～昭和51年 ティーセン法及流域面積比	昭和28年～昭和51年 代表観測所	昭和1年～昭和51年 ティーセン法
3. 流量資料期間 流量計算方法	昭和24年～昭和50年 実測値をもとに計算された値	昭和30年～昭和50年 タンク・モデル法	昭和1年～昭和51年 タンク・モデル法
4. 基準地点確保流量	かんがい期 69.5 m ³ /s (5/21～9/20) 非かんがい期 33.0 m ³ /s (9/21～5/20)	6.94 m ³ /s	かんがい期 8.77 m ³ /s (6/16～9/15) 非かんがい期 8.35 m ³ /s (9/16～6/15)
5. 計画利水容量(10 ³ m ³)	173,000	61,000(4ダム合計)	49,500(2ダム合計)
6. 貯水池運用計算期間	昭和40年～昭和49年	昭和40年～昭和49年	昭和40年～昭和49年

表-6.2.2 各年不足容量及び節水率%・日

(不足容量×10⁶ m³)

年	A ダ ム		B ダ ム		C ダ ム	
	不足容量	%・日	不足容量	%・日	不足容量	%・日
昭和40	0	0	28.85	4,315	0.13	18
41	0	0	0	0	0	0
42	130.84	3,165	0	0	0	0
43	56.82	2,009	66.71	9,975	35.79	4,911
44	66.11	2,344	22.07	3,301	0	0
45	62.63	2,216	0	0	36.78	5,099
46	0	0	24.07	3,599	0	0
47	0	0	0	0	0	0
48	28.9	442	0	0	3.18	441
49	0	0	0	0	25.64	3,554
最大値	130.84	3,165	66.71	9,975	36.78	5,099

渇水補給を計画どうり行なうのに不足する容量及び節水率%・日の合計値を年ごとにまとめた結果である。

Aダムは、計画基準年(ダム利水計画の基準となる渇水年)を昭和23年、計画利水容量を173,000(×10³m³)とする多目的ダムであり、昭和40～49年の10年間で5ヶ年利水容量が不足する。最大不足容量は、130,840(×10³m³)、節水率%・日の最大値は3,165%・日となる。

Bダム群は、取水ダムで取水した小河川の水を貯留ダムへ導水して水資源開発を行なう計画で、貯留ダム2ダム及び既設ダム2ダムの合計容量を単一ダムの利水容量として扱い、プール計算を行なったものである。用水需要量は、想定値である。計画基準渇水(ダム利水計画の基準となる渇水)は、昭和41～44年の3年間にわたる渇水で、計画利水容量は、61,000(×10³m³)とした。昭和40～49年の10年間に4年、利水容量が不足し、最大不足容量は、66,710(×10³m³)、節水率%・日の最大値は、9,975%・日である。

Cダムは、既設ダムの下流に計画されている多目的ダムで、計画基準渇水は、昭和39～40年、計画利水容量は、49,500(×10³m³)である。昭和40～49年の10年間に5年、利水容量が不足し、最大不足容量

は、 $35,790 (\times 10^3 \text{ m}^3)$ 、節水率 $\%$ ・日の最大値は、 $5,099 \%$ ・日である。

以上のように、3 ダムは利水安全度が低いために、昭和 40～49 年の対象期間において利水容量がたびたび不足し、計画を超える渇水が予想されることから、渇水時の貯水池運用方式を検討する対象ダムとして選定したものである。

6.3 予測方式

渇水時の貯水池運用の効率化を図るために、降雨の長期予測を利用することが考えられる。

現在、長期予測としては、気象庁から発表される 1 カ月予測、3 カ月予測、6 カ月予測があり、図-6.3.1 の地域区分に従って地方別に発表される。

長期予測の内容は、1 カ月予測が翌月の各旬の、3 カ月予測が向う 3 カ月先までの各月の気象概況・天気・気温・降水量の予測である。

長期予測の発表は、1 カ月予測が毎月月末に、3 カ月予測が毎月 20 日頃に行なわれる。

降雨の長期予測の表現は、5 ランクあって平年よりも少ない、平年よりもやや少ない、平年並み、平年よりもやや多い、平年よりも多いという形で表現され、表-6.3.1 の出現率を標準としている。しかし、実際には、“並あるいはやや少ない”というふうに併用した表現の場合が多く、また、概して“並”の予測が多く、“少ない”あるいは“多い”といった極端な予測が発表されることは少ない。

長期予測の方法は、統計的方法と平均図法とがあり、平均図の予測方法は、外挿法、相関法、類似法、力学法が併用されている¹⁾。

さて、長期予測を渇水時の貯水池運用に適用しようとするとき、予測の対象地域、予測雨量をどう解釈

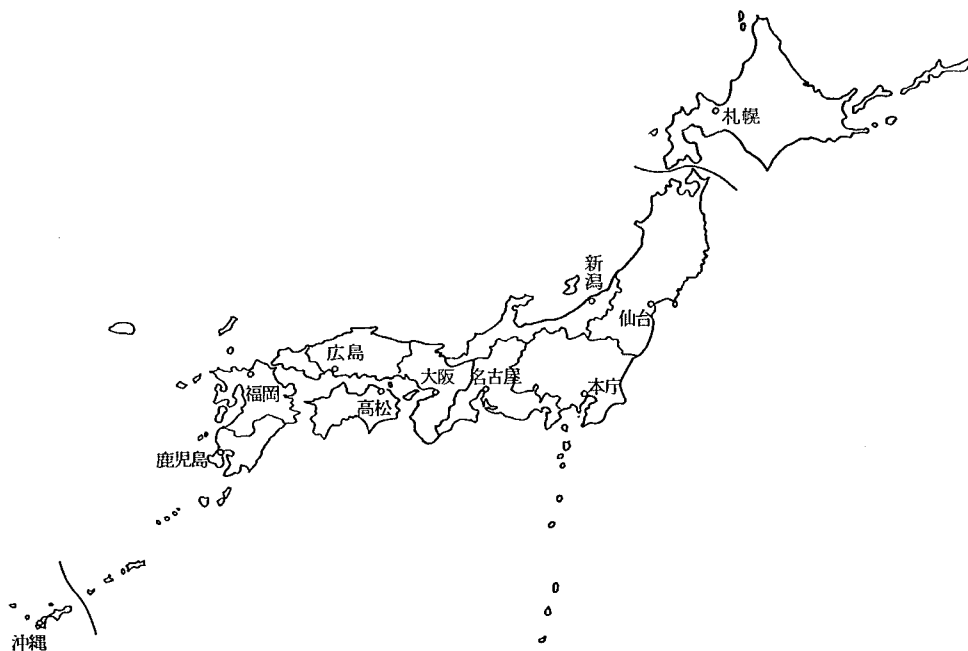


図-6.3.1 長期予測の地域区分

するかが問題となる。また、予報の信頼度あるいは適中率も重要である。

予報の対象地域としては、一応、本研究では、ダム流域の存在する地方の予報をそのまま使用することにし、予測雨量としては、表－6.3.2に示すように予報階級に流域の確率月雨量を各々対応させる。

予報の信頼度に関しては、3カ月予報の適中率（予報階級と実績降雨の階級が一致する回数の予報発表総回数に対する百分率）を、4ダム流域について、昭和40年～51年の12年間分について調査したところ、表

表－6.3.1 降水量の階級区分（平年比％）

（気象庁）

予 報 階 級	少 ない	やや少ない	並	やや多い	多 い
月 降 水 量 (mm)	0 ～ 39	40 ～ 69	70 ～ 119	120 ～ 169	170 以上
旬 降 水 量 (mm)	0 ～ 19	20 ～ 39	40 ～ 139	140 ～ 239	240 以上
標準出現率(%)	10	20	40	20	10

表－6.3.2 予報と予測雨量の超過確率の関係

予 報 階 級	少 ない	やや少ない	並	やや多い	多 い
雨量の超過確率 (%)	95	80	50	20	5

表－6.3.3 長期予報の適中率

（単位 %） { +1 実績値が予報値よりも1階級上のとき
-1 " " 下 "

河 川 名 (期 間)	ダ ム, 残 流 域	季 節	1 カ月前予報			2 カ月前予報			3 カ月前予報		
			適 中	+ 1	- 1	適 中	+ 1	- 1	適 中	+ 1	- 1
矢 作 川 (昭和40年～51年)	矢作ダム	冬	36	36	8	41	22	5	38	33	11
		春 秋	25	28	18	28	25	20	28	35	11
		夏	20	41	8	20	33	14	22	37	12
	岩津残流域	冬	27	44	8	30	25	8	27	33	16
		春 秋	28	25	11	21	33	18	21	45	10
		夏	18	41	12	27	27	12	27	31	6
芦 田 川 (昭和40年～50年)	八田原ダム	冬	33	27	9	24	39	12	30	39	9
		春 秋	25	23	16	25	16	20	32	9	20
		夏	20	31	13	22	31	18	25	31	11
	残 流 域	冬	30	27	12	21	39	15	27	39	12
		春 秋	27	27	12	23	20	18	32	14	14
		夏	18	25	13	20	25	18	27	22	9
吉 野 川 (昭和40年～51年)	早明浦ダム	冬	13	36	8	16	25	8	11	38	13
		春 秋	28	30	10	18	35	15	23	26	18
		夏	22	25	10	16	25	14	20	25	18
	池田残流域	冬	19	33	2	19	22	8	27	30	2
		春 秋	21	35	10	20	35	13	28	20	16
		夏	18	25	12	25	18	8	29	14	12
沖 縄 (昭和40年～51年)	与那覇岳	冬	16	30	11	22	13	8	冬 12月～2月 春秋 3月～5月, 10月～11月 夏 6月～9月		
		春 秋	18	28	6	16	31	6			
		夏	27	35	6	22	22	12			
	名 護	冬	22	27	8	16	22	16			
		春 秋	25	31	3	23	36	5			
		夏	25	35	12	20	20	14			

－ 6.3.3 のような結果を得、11%～41%であった。季節別では、冬(12～2月)の適中率が高く、夏(6～9月)の適中率が低い。予報の発表される時期と適中率の関係では、1カ月前、2カ月前、3カ月前とで適中率の相違は認められない。また、予報の傾向として予報が実績降雨階級よりも1ランク下の場合が10～40%あり、実績よりも少な目の予報が出されている傾向がうかがえる。

以上のように、長期予報は適中率が低い、少な目の予報が出されている傾向があることを考慮しながら、長期予報から予測雨量を求めて、流況予測を行ない渇水時の貯水池運用を行なってみる。この運用の方法は、以下のとおりである。

- ① 毎月、3カ月予報が発表されるごとに、予報階級に対応した確率月雨量(表－6.3.2の超過確率に対応する流域平均月雨量)を予測月雨量として求める。
- ② 予測月雨量からダム流域及び残流域の向う3カ月先までの総流出量を求める。流出量予測は、本研究では、前月流出量及び3カ月先までの各月雨量を説明変数とする重回帰式によって行なう。
- ③ 貯水量が、節水開始貯水量(パラメータとする)を下まわったときから、節水運用を始める。節水率は、向う3カ月の総流出量の予測値とダム貯水量の和、及び向う3カ月の必要利水総量から不足総量を算出し、不足量の生ずるときのみ次式から目標節水率を決める。

$$\text{節水率} = \text{不足総量} \div \text{必要利水総量} \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots (6.1)$$

- ④ ①～③の検討を逐次(二半句ごと)行ない、渇水が予測されるときは、貯水池の節水運用を実施する。

以上の方式をAダム及びBダムに適用し、昭和40年～49年の10年間の運用シミュレーションを行なったが、その適用結果は次のとおりである。

(1) Aダムへの適用

流量予測式は、表－6.3.4に示すとおりであり、年を2期に分けてダム流域及び残流域に関して昭和24～50年の資料をもとに重回帰式を作成した。実績値と推定値の相関係数は、0.79～0.92であり、この程度であれば予測式として使用できるものと判断される。

表－6.3.5は、Aダムの当該地域において昭和40年から昭和51年にかけて出された3カ月予報とダム流域・残流域の実績月雨量をまとめたものである。この表で、たとえば、昭和48年7月の雨量は、3カ月

表－6.3.4 流 量 予 測 式

	流 域 名	期 別	流 量 予 測 式	適用範囲 (m^3/s)	誤差の 標準偏差 (m^3/s)	実測値と 推定値の 相関係数	資料 期間
A ダ ム	ダム流域	4月～ 10月	$Q_i = 0.022 Q_{i-1} + 1.312 R_i + 0.112 R_{i-1} + 0.038 R_{i-2} - 12.534$	5.10 ～ 190.25	13.92	0.921	昭 和 24 年 ～ 50 年
		11月～ 3月	$Q_i = 0.034 Q_{i-1} + 0.619 R_i + 0.260 R_{i-1} + 0.022 R_{i-2} + 0.565$	2.35 ～ 38.81	3.89	0.788	
	残流域	4月～ 10月	$Q_i = 0.144 Q_{i-1} + 1.443 R_i - 0.085 R_{i-1} + 0.022 R_{i-2} - 41.384$	8.09 ～ 576.63	37.07	0.923	
		11月～ 3月	$Q_i = 0.071 Q_{i-1} + 0.799 R_i + 0.264 R_{i-1} + 0.024 R_{i-2} - 8.523$	6.50 ～ 120.22	11.10	0.829	

記号 Q_i = 当該月平均流量 (m^3/s) Q_{i-1} = 前月平均流量 (m^3/s)
 R_i = 当月雨量 (mm) R_{i-1} = 前月雨量 (mm) R_{i-2} = 前々月雨量 (mm)

表-6.3.5 月雨量予報値表(Aダム)

(実測単位: mm)(凡例: - 少ない, < やや少ない, * 普通, > やや多い, + 多い)

年	月	ダム流域平均雨量	残流域平均雨量	1月予報	2月予報	3月予報	年	月	ダム流域平均雨量	残流域平均雨量	1月予報	2月予報	3月予報	年	月	ダム流域平均雨量	残流域平均雨量	1月予報	2月予報	3月予報	年	月	ダム流域平均雨量	残流域平均雨量	1月予報	2月予報	3月予報
40	1	80 >	65 *	<	<	*	43	1	62 *	56 *	<	<	*	46	1	48 *	42 <	<	<	<	49	1	48 *	52 *	*	<	<
	2	64 *	57 *	<	*	*		2	129 >	97 >	*	*	*		2	80 *	64 *	<	*	<		2	114 >	118 >	<	*	*
	3	93 *	72 <	<	>	<		3	140 *	97 *	<	<	*		3	108 *	118 >	<	*	>		3	110 *	90 *	<	<	*
	4	222 *	145 *	>	*	<		4	124 <	99 <	*	*	*		4	61 -	87 -	*	*	<		4	313 >	263 +	>	*	>
	5	293 >	278 +	>	*	*		5	154 <	122 *	*	>	*		5	211 *	176 >	*	>	*		5	185 *	121 *	*	*	*
	6	277 *	281 >	<	<	*		6	204 <	173 *	*	*	*		6	235 *	164 *	*	*	*		6	298 *	276 >	*	*	<
	7	197 *	224 *	<	<	*		7	560 +	406 >	<	<	<		7	145 <	175 *	<	*	*		7	622 +	547 +	*	*	*
	8	202 <	109 <	<	<	<		8	550 >	538 +	<	<	*		8	629 >	532 +	<	<	<		8	213 <	169 <	*	<	<
	9	876 +	775 +	*	*	*		9	472 >	317 *	<	<	<		9	216 *	182 *	*	<	*		9	520 >	610 +	*	*	*
	10	108 *	78 <	*	<	*		10	52 <	52 <	<	<	<		10	116 *	145 >	*	*	*		10	165 >	170 >	*	<	*
	11	146 >	133 >	*	<	<		11	32 -	22 -	*	<	<		11	36 <	42 <	<	*	*		11	69 *	54 <	*	<	<
	12	85 >	69 >	<	<	*		12	104 >	76 >	<	<	<		12	84 >	106 +	<	<	<		12	103 >	82 >	<	<	*
41	1	76 *	88 >	*	<	<	44	1	128 +	119 +	*	*	<	47	1	201 +	137 +	<	*	<	50	1	79 >	92 >	*	<	*
	2	142 >	117 >	<	<	<		2	114 >	104 >	*	<	<		2	190 +	192 +	*	*	*		2	128 >	115 >	*	*	*
	3	291 +	212 +	*	<	*		3	113 *	97 *	*	<	>		3	128 *	134 >	*	*	*		3	143 >	120 >	*	*	*
	4	191 *	140 *	<	*	*		4	137 <	101 <	<	*	*		4	265 >	200 >	*	*	*		4	265 >	202 >	*	*	*
	5	373 +	242 +	*	*	*		5	130 <	114 *	*	>	>		5	148 <	115 *	*	*	*		5	156 <	83 <	*	<	*
	6	318 >	259 *	<	<	<		6	393 >	456 +	*	<	<		6	600 +	415 +	<	*	+		6	264 *	279 >	*	<	*
	7	195 *	243 *	<	<	<		7	316 >	287 >	<	<	<		7	469 >	493 +	*	<	*		7	260 *	271 *	<	<	<
	8	916 +	382 >	<	<	<		8	260 *	148 <	<	<	<		8	106 -	155 <	<	<	<		8	778 +	618 +	<	*	<
	9	796 +	677 +	*	<	<		9	328 *	89 <	<	*	*		9	909 +	693 +	<	<	*		9	148 <	120 <	*	*	*
	10	59 <	84 *	<	<	*		10	69 <	74 <	<	<	<		10	199 >	144 >	<	*	*		10	313 +	212 +	*	<	*
	11	130 >	87 *	<	<	*		11	109 *	89 *	<	<	<		11	170 >	98 >	<	<	<		11	227 +	206 +	*	*	*
	12	73 >	66 >	<	<	<		12	58 *	76 >	<	<	>		12	80 >	90 >	<	<	<		12	77 >	65 >	*	<	<
42	1	69 *	65 *	<	*	<	45	1	50 *	80 >	<	*	>	48	1	211 +	158 +	<	<	<	51	1	38 <	36 <	*	*	<
	2	53 <	52 *	*	>	*		2	52 <	40 <	<	*	*		2	94 *	82 *	*	*	<		2	250 +	219 +	<	<	*
	3	261 +	210 +	<	*	*		3	94 *	84 *	<	<	*		3	14 -	27 -	*	*	*		3	149 >	93 *	*	<	*
	4	413 +	329 +	*	>	*		4	287 >	221 >	<	<	<		4	253 >	225 >	*	<	<		4	376 +	261 +	*	<	*
	5	128 <	98 <	<	*	*		5	273 >	191 >	>	>	>		5	251 >	199 >	<	<	<		5	256 >	186 >	<	*	<
	6	156 <	95 <	<	>	*		6	446 >	358 >	*	*	*		6	151 <	103 <	*	*	*		6	304 *	296 >	<	*	<
	7	389 >	524 +	<	<	*		7	357 >	217 *	>	*	*		7	114 <	94 -	<	*	*		7	614 +	314 >	<	<	<
	8	111 -	146 <	*	*	*		8	680 +	686 +	*	*	<		8	502 >	282 *	<	*	*		8	242 *	195 *	*	*	*
	9	34 -	65 -	*	*	<		9	142 <	224 *	<	<	*		9	220 *	246 *	<	*	*		9	1759 +	960 +	*	*	*
	10	269 +	272 +	<	<	*		10	138 *	130 >	<	<	<		10	144 *	125 *	<	<	<		10	219 >	176 >	*	*	<
	11	114 >	85 *	*	<	*		11	86 *	123 >	*	<	<		11	71 *	50 <	*	<	*		11	120 >	117 >	<	*	<
	12	15 -	32 <	<	<	<		12	70 >	80 >	<	<	<		12	21 <	37 <	<	<	<		12	62 *	54 *	<	<	<

前の予報では“並”，2カ月前の予報も“並”，1カ月前の予報は“やや少ない”であったが，実績値はダム流域で114mmであり，非超過確率は10%～30%の間にあるので“やや少ない”となる。残流域では7月雨量は94mmであり，非超過確率は0%～10%の間にあるので“少ない”となった。他の月も同様に説明される。

図－6.3.2は，当該地域の3カ月予報から予測雨量を求め，予測式（重回帰式）に代入して流況予測を行なった結果を示す。この図によれば，季節的な流況変化は一応予測できるが，昭和42年8月から9月まで，昭和43年4月から6月まで，昭和48年6月から7月までの期間で渇水時の流況予測の精度が良くない。このときの長期予報には“並”が多く，結果的には渇水を予測できなかった。

このようにして得られた予測流況にもとづいて，Aダムの渇水時の貯水池運用をシミュレーションする。節水開始貯水量は，計画利水容量の30%とした。ここで，30%とした理由は6.6節で説明するが，渇水被害値が最小となったからである。

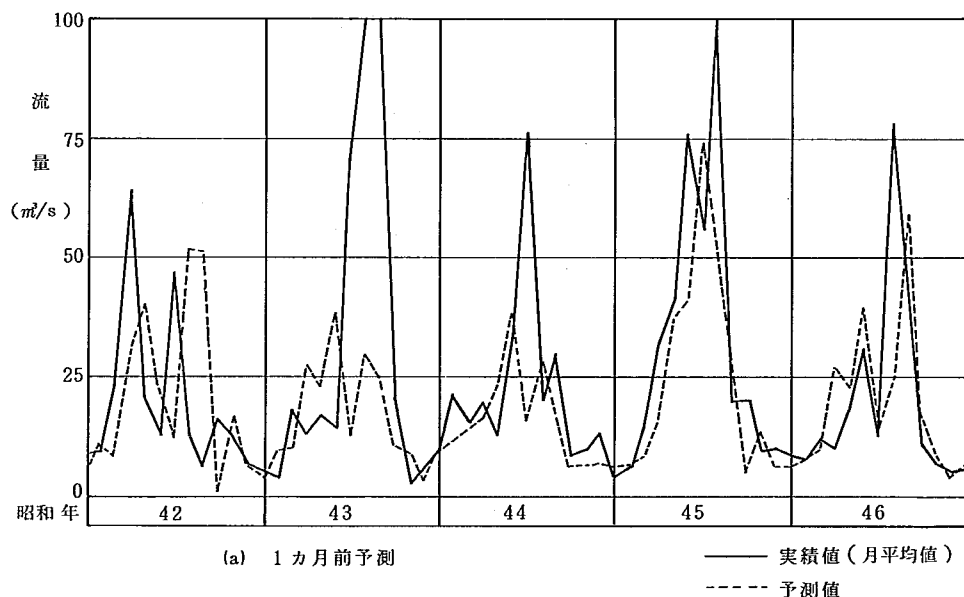
昭和42年～43年の運用結果を図－6.3.3に示す。その結果，昭和42年9月，8月及び9月の予報が“並”であったために渇水を予測できず，貯水池が底をついてしまっている。その後，10月の予報は“やや少ない”となり，渇水を予測して節水運用を実施したために，12月～1月の渇水を緩和しているが，2月には再び貯水池が底をついている。以上のことから，予測方式は，渇水が予測されれば効果があるが，渇水を予測できないときは，効果のないことが明らかである。

(2) Bダム群への適用

予測方式をBダム群の渇水時の貯水池運用に適用する。

表－6.3.6はBダム群流域で得られた2カ月予報と実績月雨量（代表観測所）の該当階級を示す。

流量予測式は，表－6.3.7に示した。この場合当該地方の2カ月予報から予測雨量を求め，流況予測を行なった結果を図－6.3.4に示したが，全般的に予測値が実績値を下まわる傾向が見られる。これは，長



図－6.3.2 Aダム流域流況予測結果

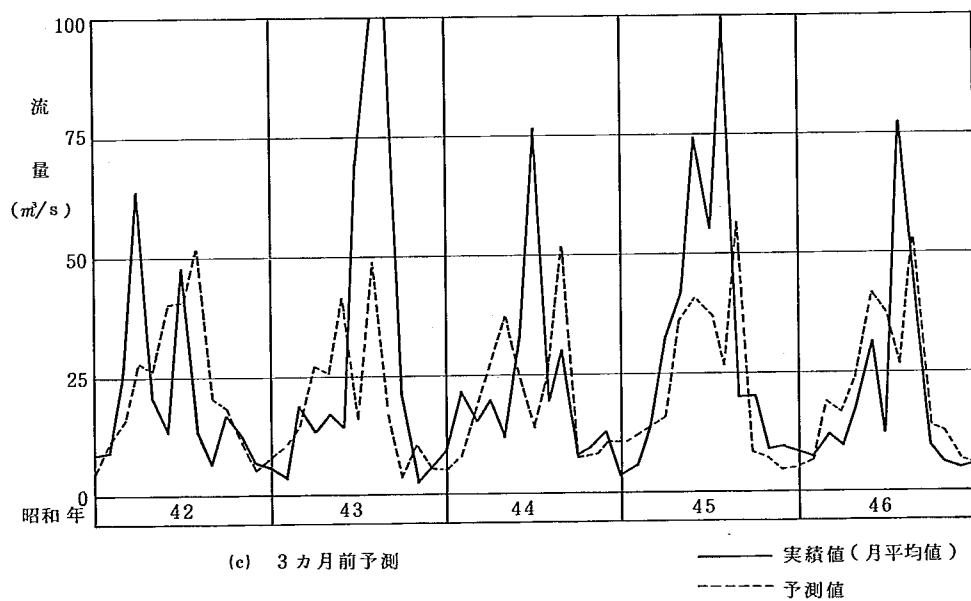
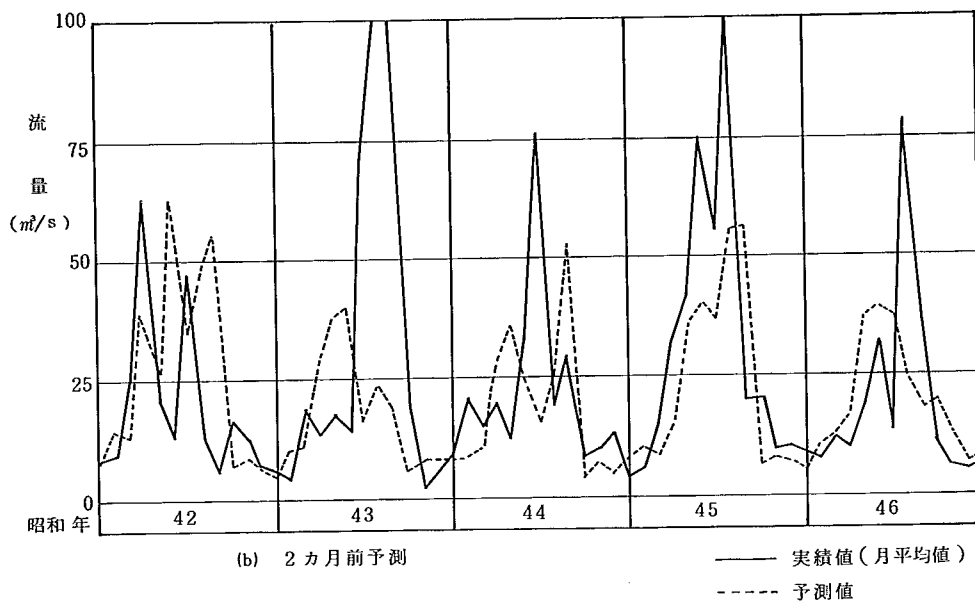


図-6.3.2 Aダム流域流況予測結果 (続き)

凡例

—— 基準地点自然流況

—— 基準地点ダム操作後流況

----- 計画確保流量

▨ 節水量

▤ 不足量

昭和42～43年 VA = 30%

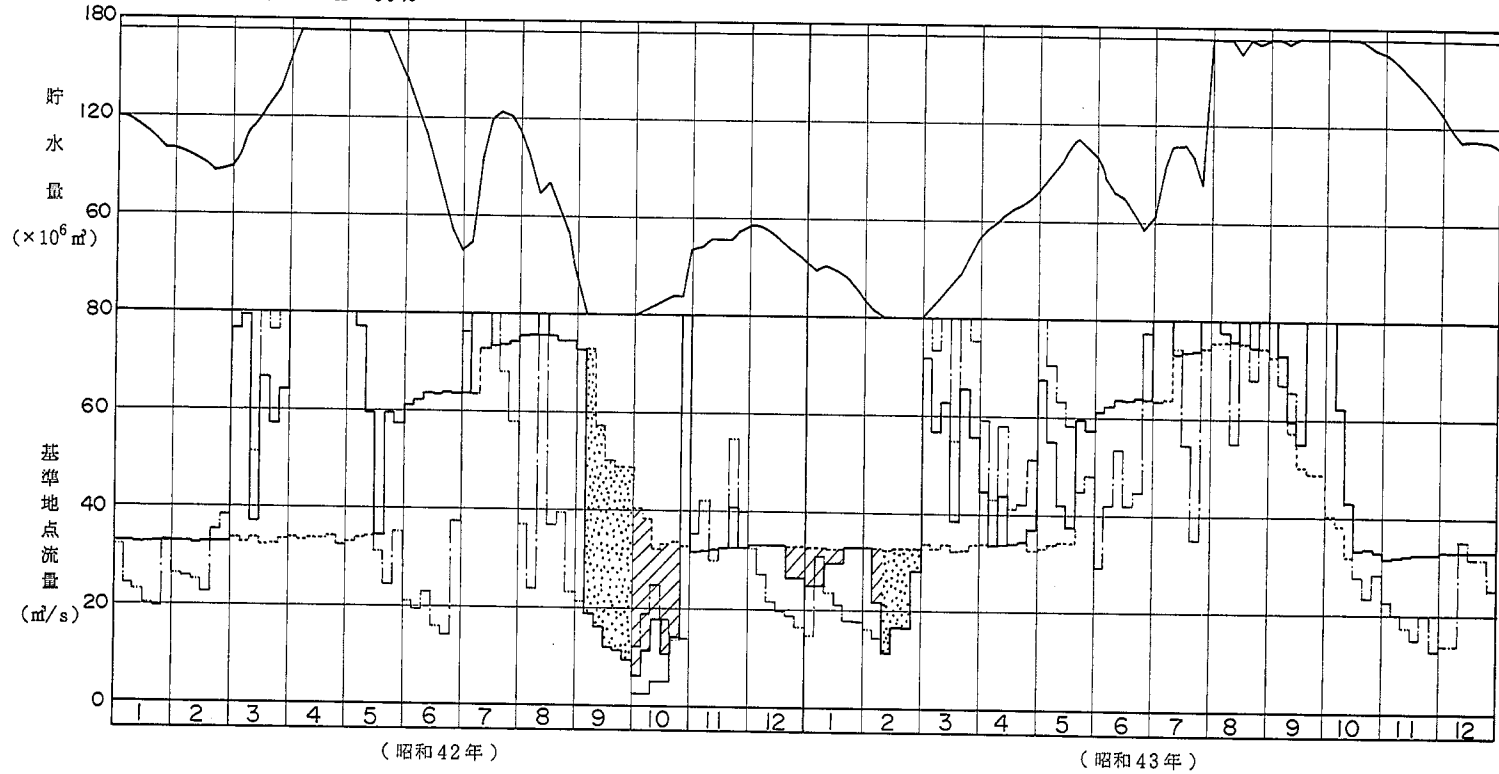
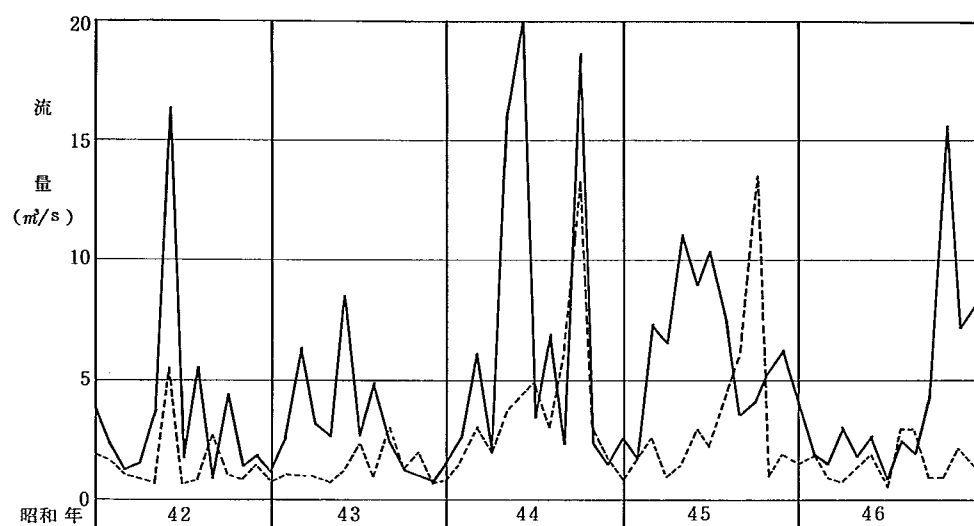


図-6.3.3 予測方式運用結果 (Aダム)

表-6.3.6 月雨量予報値表(Bダム群)

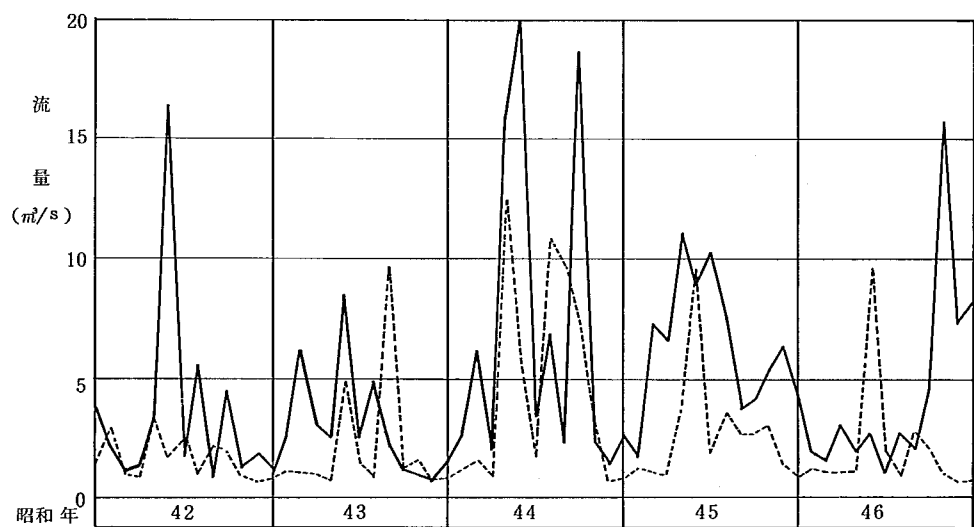
(実測単位: mm) (凡例: - 少ない, < やや少ない, * 普通, > やや多い, + 多い)

年	月	ダム流域 観測所	残流域 観測所	1月予 報	2月予 報		年	月	ダム流域 観測所	残流域 観測所	1月予 報	2月予 報		年	月	ダム流域 観測所	残流域 観測所	1月予 報	2月予 報		年	月	ダム流域 観測所	残流域 観測所	1月予 報	2月予 報	
40	1	143 *	115 >	*	*		43	1	158 *	78 *	-	-		46	1	164 *	107 *	<	<		49	1	90 <	86 *	<	*	
	2	202 >	47 <	*	<			2	256 +	176 >	-	-			2	73 <	24 -	*	<			2	194 >	164 >	<	<	
	3	158 *	99 *	*	*			3	313 +	179 >	-	-			3	100 *	120 *	<	-			3	188 >	101 *	*	*	
	4	198 >	146 >	*	-			4	136 *	89 *	-	-			4	200 >	79 <	<	<			4	272 >	174 >	<	*	
	5	530 +	385 >	*	-			5	140 <	72 -	-	-			5	175 <	53 -	<	<			5	326 >	291 >	>	*	
	6	735 +	445 >	*	-			6	319 *	256 *	-	*			6	169 <	102 <	<	>			6	327 *	336 >	<	<	
	7	35 <	45 <	-	<			7	162 *	116 *	*	*			7	76 <	54 <	-	*			7	193 *	216 >	*	-	
	8	427 >	387 >	<	<			8	409 >	268 *	<	-			8	435 >	376 >	*	<			8	459 >	524 +	+	+	
	9	334 >	150 *	>	>			9	145 *	81 *	*	+			9	180 *	158 *	*	*			9	248 >	187 >	*	<	
	10	180 *	99 *	-	<			10	64 <	17 <	-	-			10	265 >	202 >	<	*			10	590 +	384 +	*	*	
	11	279 >	142 >	<	*			11	101 <	83 *	*	*			11	709 +	390 +	<	<			11	160 *	53 <	<	*	
	12	182 >	100 *	*	*			12	117 *	68 <	-	-			12	408 +	179 >	<	<			12	229 >	105 *	<	<	
41	1	368 +	256 +	*	*		44	1	243 >	181 >	-	-		47	1	249 >	179 >	<	<		50	1	215 >	174 >	*	<	
	2	180 >	118 >	>	*			2	222 >	136 >	*	-			2	280 +	246 +	*	*			2	301 +	119 >	*	*	
	3	218 >	176 >	*	<			3	291 +	205 +	>	*			3	43 -	87 *	<	<			3	195 >	161 >	*	*	
	4	379 +	278 +	*	*			4	130 *	80 <	*	<			4	143 *	96 *	-	-			4	246 >	193 >	*	*	
	5	802 +	649 +	*	>			5	760 +	594 +	*	+			5	702 +	320 >	<	*			5	306 *	268 >	*	*	
	6	392 >	267 *	*	-			6	962 +	852 +	<	*			6	393 >	411 >	*	*			6	558 >	553 +	*	*	
	7	191 *	135 *	*	<			7	142 *	124 *	*	*			7	875 +	646 +	*	*			7	387 >	387 +	*	*	
	8	400 >	334 >	*	>			8	375 >	323 >	*	+			8	177 *	316 >	*	*			8	340 >	282 >	*	*	
	9	507 +	357 +	*	*			9	152 *	142 *	>	+			9	95 <	47 <	<	<			9	149 *	136 *	*	*	
	10	30 <	28 <	<	>			10	766 +	834 +	+	>			10	44 <	29 <	-	<			10	485 +	294 >	*	*	
	11	282 >	228 +	*	*			11	197 *	114 *	<	<			11	209 >	113 *	-	<			11	159 *	102 *	*	*	
	12	369 +	334 +	*	<			12	60 <	39 -	*	<			12	228 >	163 >	*	<			12	184 >	112 *	*	*	
42	1	78 <	52 <	*	*		45	1	221 >	168 >	-	<		48	1	274 +	170 >	<	<		51	1	52 <	29 -	*	*	
	2	185 >	85 *	*	>			2	101 *	61 <	*	*			2	197 >	182 >	>	>			2	144 *	109 *	*	*	
	3	101 *	52 <	<	<			3	332 +	232 +	>	<			3	110 *	107 *	*	<			3	185 >	89 *	<	<	
	4	226 >	147 >	-	-			4	214 >	108 *	<	-			4	285 +	203 >	<	<			4	150 *	96 *	*	*	
	5	251 *	282 >	-	*			5	391 >	328 >	<	*			5	336 >	297 >	*	>			5	359 >	265 >	<	<	
	6	615 +	526 +	*	<			6	307 *	250 *	<	>			6	395 >	278 *	<	<			6	420 >	342 >	*	*	
	7	95 *	100 *	*	*			7	412 +	366 +	*	*			7	409 +	386 +	<	<			7	390 +	264 >	<	<	
	8	309 >	188 *	<	<			8	452 >	398 >	*	*			8	76 -	253 *	>	<			8	116 <	171 *	>	>	
	9	83 <	54 <	*	*			9	241 >	209 >	>	*			9	410 +	158 *	>	>			9	367 >	351 +	*	*	
	10	479 +	278 >	-	*			10	239 >	125 *	+	*			10	178 *	171 >	>	>			10	286 >	224 >	<	<	
	11	119 *	117 *	-	-			11	275 >	102 *	<	<			11	102 <	65 <	<	*			11	303 >	158 >	*	<	
	12	190 >	117 *	*	<			12	641 +	239 +	*	*			12	97 *	59 <	<	*			12	126 *	76 *	<	<	



(a) 1 カ月前予測

—— 実績値 (月平均値)
 - - - 予測値



(b) 2 カ月前予測

—— 実績値 (月平均値)
 - - - 予測値

図-6.3.4 B ダム群流域流況予測結果

表-6.3.7 流量予測式

	流域名	期別	流量予測式	適用範囲 (m^3/s)	誤差の 標準偏差 (m^3/s)	実測値と 推定値の 相関係数	資料 期間
B ダ ム 群	ダム流域	4月～ 10月	$Q_i = 0.041 Q_{i-1} + 0.777 R_i + 0.125 R_{i-1} - 0.015 R_{i-2} - 2.646$	0.59 ~ 32.34	1.79	0.947	昭 和 30 年 ～ 50 年
		11月～ 3月	$Q_i = 0.067 Q_{i-1} + 0.599 R_i + 0.084 R_{i-1} + 0.022 R_{i-2} - 1.453$	0.59 ~ 17.25	1.32	0.894	
	残流域	4月～ 10月	$Q_i = 0.167 Q_{i-1} + 0.610 R_i + 0.235 R_{i-1} + 0.058 R_{i-2} - 2.160$	0.95 ~ 31.12	1.51	0.968	
		11月～ 3月	$Q_i = 0.092 Q_{i-1} + 0.486 R_i + 0.065 R_{i-1} + 0.023 R_{i-2} - 0.582$	0.98 ~ 22.15	1.15	0.902	

記号 Q_i = 当該月平均流量 (m^3/s) Q_{i-1} = 前月平均流量 (m^3/s) R_i = 当月雨量 (mm) R_{i-1} = 前月雨量 (mm) R_{i-2} = 前々月雨量 (mm)

期予報が実績値よりも少な目に出されているからで、特に昭和42年～43年は、“少ない”という予報が多く出されている。しかし、昭和45年10月、昭和48年8月及び10月等は、予測値が実績値よりも大きい。

昭和42年～44年の運用結果を図-6.3.5に示す。節水開始貯水量は、利水容量の60%とした。60%としたのは、渇水被害値が最小となる場合である。結果は、非常に良好で昭和42年～43年の全期間にわたって節水運用の効果をあげている。これは、流況予測結果をみてもわかるように、この期間は、おおむね渇水が予測されているためである。

以上、2ダムへの適用結果から、予測方式は、渇水予測の結果が適中したときは節水運用の効果があるが、予測が適中しないときには節水運用の効果がないことが明らかとなった。予測方式による渇水被害の軽減効果に関しては、6.6節で検討する。

凡例

——	基準地点自然流況		節水量
——	基準地点ダム操作後流況		不足量
----	計画確保流量		

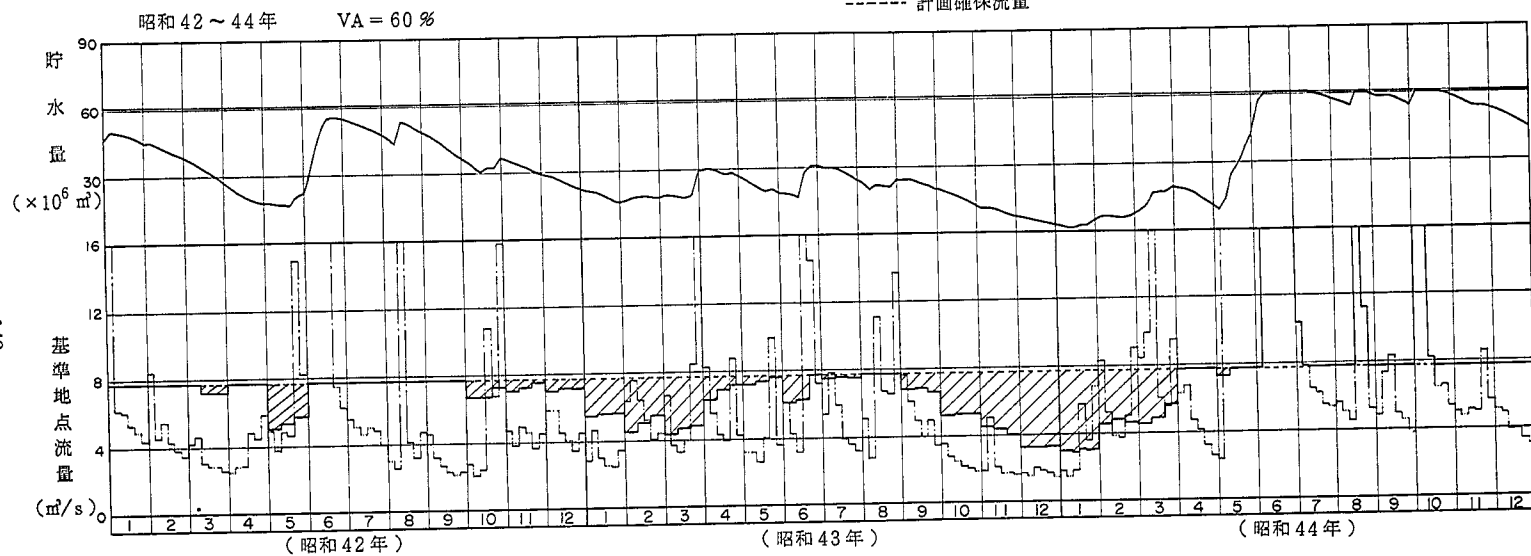


図-6.3.5 予測方式運用結果 (Bダム群)

6.4 段階的節水方式

渇水時の貯水池運用方式として、貯水池残量がある限界量に達すると節水を開始し、貯水量が減少するにつれて節水を強化する方式がとられることが多い。

図－6.4.1は、小瀬川の昭和42年、48年、52年渇水調整（取水制限）状況とダム貯水量（利水容量 $3,400 \times 10^3 \text{ m}^3$ + 発電ダム容量 $9,500 \times 10^3 \text{ m}^3 = 12,900 \times 10^3 \text{ m}^3$ ）を示したものである。渇水の大きさを節水率 $\%$ ・日で表わすと、昭和44年秋から冬にかけての渇水は、4,484 $\%$ ・日、昭和48年秋から冬にかけての渇水は、2,310 $\%$ ・日、昭和52年秋から冬にかけての渇水は、4,320 $\%$ ・日である。貯水池の運用方式をみると、昭和42年は利水容量の約20%に達した段階から節水を開始し、54%に回復してから節水を解除している。昭和48年は、貯水量が約30%に達してから節水を開始し、54%に回復してから節水を解除している。昭和52年は、貯水量が約50%に達してから節水を開始し、約50%に回復してから節水を解除している。このことから、渇水を経験するたびに、一段と早目に節水体制がとられるようになったことがうかがえる。節水率は、おおむね貯水量の減少とともに強化され、貯水量の回復にともない緩和されている。

段階的節水方式の例を、もう1例、図－6.4.2に示す。この図はDダムの渇水調整ルールであり、マス・カーブ法（ダムへの貯留を正、ダムからの補給を負として、これらの時系列を順次累加していく方法）より求められた。これによると、5月ないし6月に満水量の約66%しかない場合には第1次節水に入り、7月はほぼ利水容量の100%から節水を行なって夏期用水需要の大きい時期に備え、8月は利水容量の86%以下で節水を行ない、かんがい期の終わる前の9月は43%以下のときに節水を行なうとして節水ルールが緩和される。本例では、0～20%の低い節水率でもって貯水量の多い段階から早期節水を図るようルールが作られている。また、貯水量と節水率の関係が、月別に決められている点に特徴があり、これは流況パターン及び取水量パターンから求めるダム必要補給容量の月ごとの値でルールを決めているからである。この方式は、将来流況の期待値として過去の流況を想定したものといえる。

さて、ここでは、段階的節水方式による渇水時の運用方式を検討する。

段階的節水方式では、節水開始貯水量、及び節水率と貯水量の関係を定める必要がある。

どのような貯水量のときにどのような節水率に定めるかは、無数の案が考えられ、渇水の大きさ（不足総量の大きさ）及び渇水のパターンに応じて最適（最も渇水の影響を少なくする）組合せがあるが、本研究では、節水開始貯水量（ V_a ）をパラメータとして、節水率と貯水量の関係を以下のような条件に従うものとする。

貯水量を V 、節水率を S （ $\%$ ）とすると、

$$\left. \begin{array}{ll} \frac{2}{3} V_a < V \leq V_a \text{ のとき} & S = \frac{1}{6} S_{\max} \\ \frac{1}{3} V_a < V \leq \frac{2}{3} V_a \text{ のとき} & S = \frac{1}{2} S_{\max} \\ 0 < V \leq \frac{1}{3} V_a \text{ のとき} & S = \frac{5}{6} S_{\max} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6.2)$$

ここに、 $S_{\max}$ は、最大節水率である。

貯水量と節水率の関係を図－6.4.3に示す。

以上の運用方式は、段階節水を行なう段階を3段階と考えたものであり、 $S_{\max}$ は利水者側の対応が可能な節水率の限界値とするか、あるいは貯水池が空とならないように選定する。

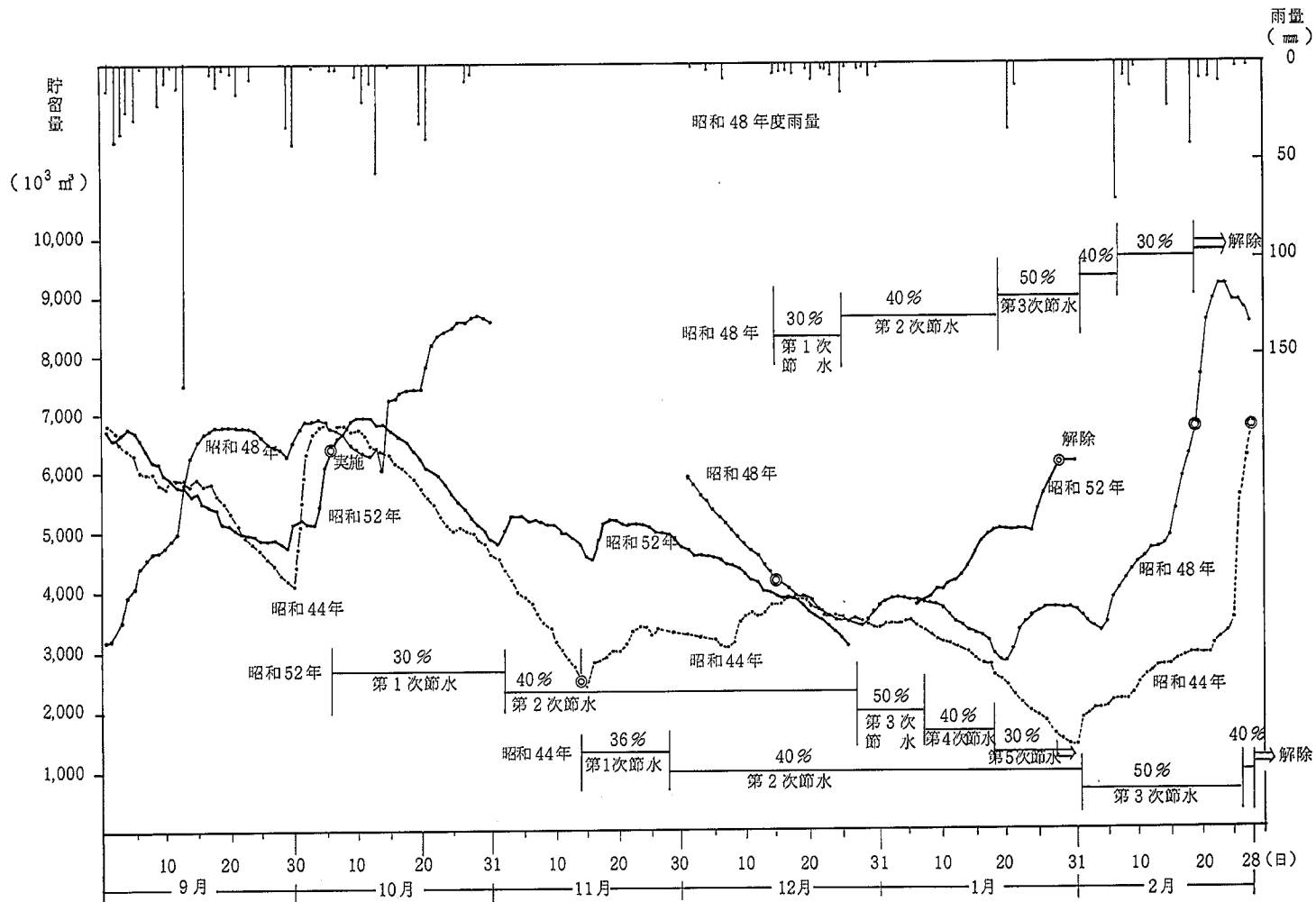


圖-6.4.1 小瀬川冬期渇水調整概況（昭和44年，48年，52年）

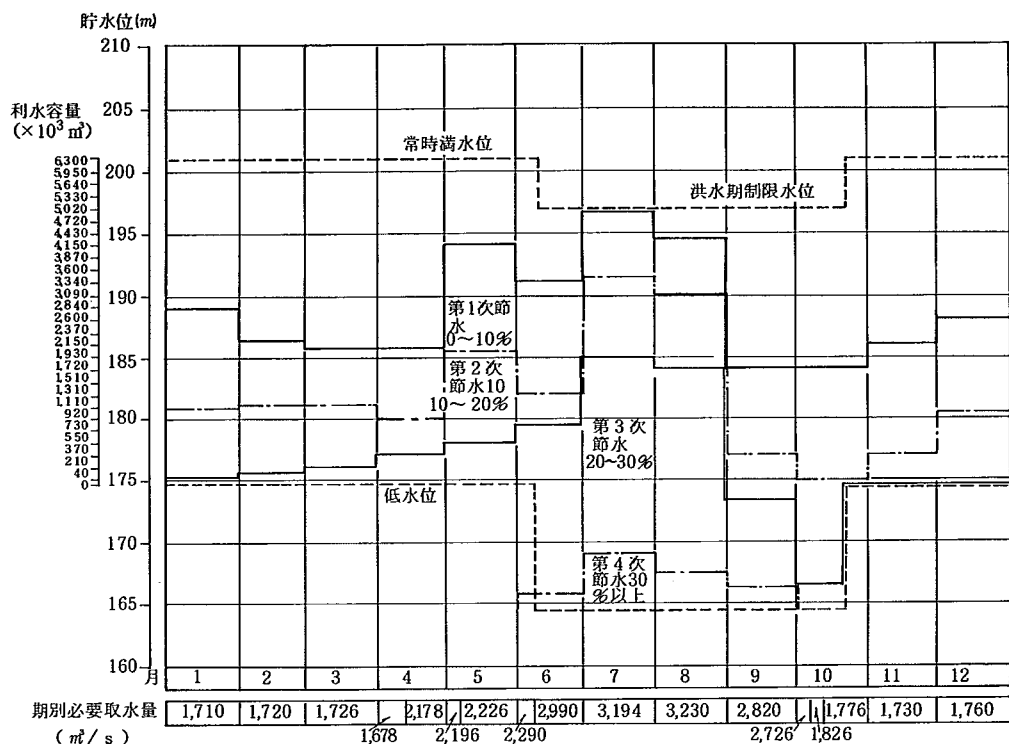


図-6.4.2 Dダム渇水調節ルール図

図-6.4.4は、段階的節水方式による貯水池運用を模式的に示したものである。①は、段階的節水方式により渇水を切り抜けた例である。②は、不足総量が大きくて節水を行っても、なお貯水池が空となった場合である。節水を実施しないときには、貯水池が空になると急激に取水量が減少するが、段階的節水方式では、徐々に取水量が減少し、徐々に取水量が回復する。③は、節水の途中で貯水量が一時的に回復する場合で、流況を平滑化していることを示している。このように、節水を行わない場合には、貯水量が空になると、急激に取水量が減少し渇水の社会・経済に与える影響が大きい。に対して、段階的節水方式では、貯水量が減少するに従い、徐々に節水を強化し、貯水量が回復するに従い、節水を緩和していくことになり、渇水のインパクトを緩和することができる。

節水開始貯水量 V_a は、これを大きくとり過ぎると、小さな渇水でもすぐ節水に入ることになり平常時の用水利用に支障をきたす。逆に、 V_a を小さくし過ぎると大きな渇水に対して効果がないことは明らかである。本研究では、 V_a はパラメータと考えて、渇水被害を最小とする V_a を求めることとする。

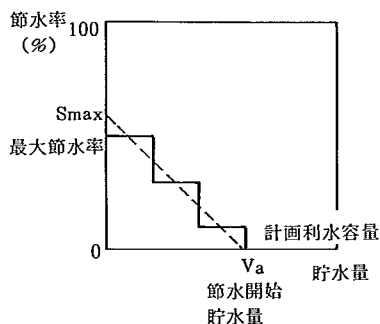


図-6.4.3 段階的節水方式 (貯水量と節水率の関係)

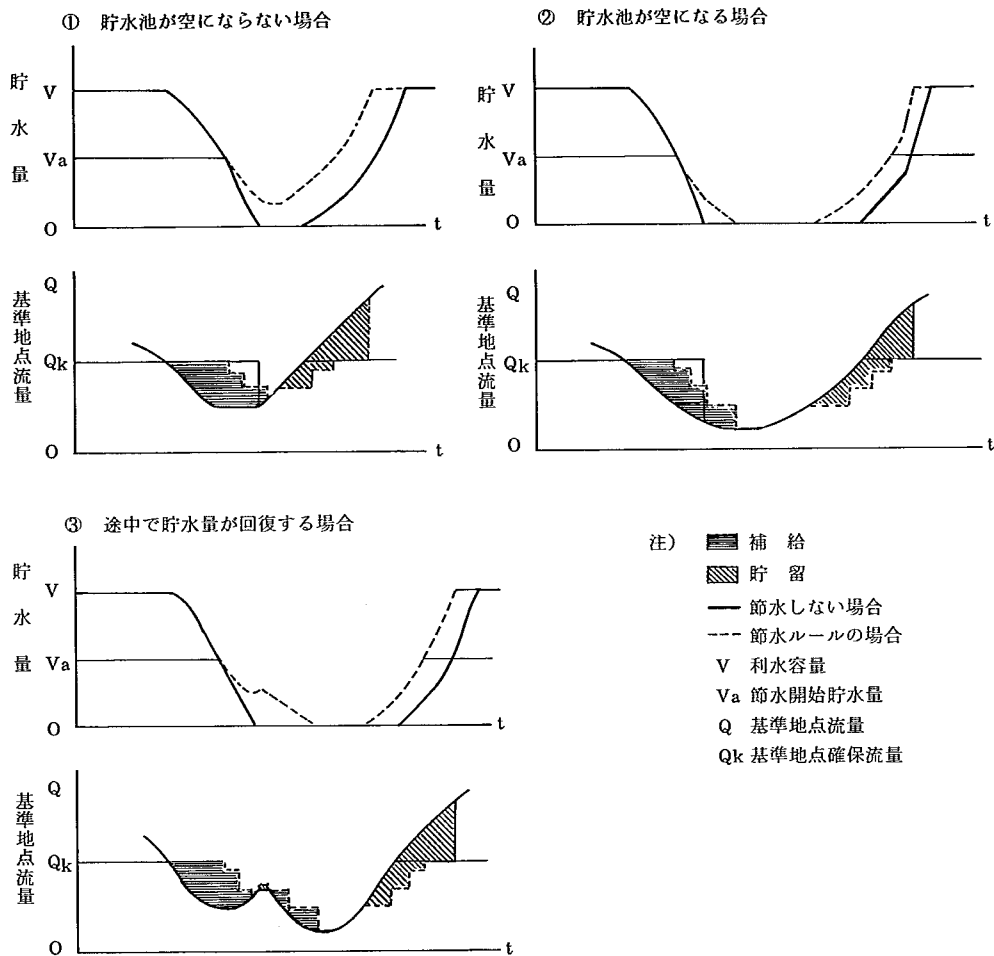


図-6.4.4 段階的節水方式による貯水池運用

本方式の3ダムへの適用例を以下に示す。

a. A ダム

図-6.4.5は、段階的節水方式をAダムの運用に適用した結果の一部(昭和42年~43年)である。

V_a は、利水容量の30%、 $S_{max} = 80\%$ とした。このとき、第1次節水率=13%、第2次節水率=40%、第3次節水率=67%となる。 S_{max} は、昭和40年~49年の運用期間において、ほぼ貯水池が空とならないように決めた。

図-6.4.5によれば、昭和42年6月末に貯水量が30%以下となり2半月の間第1次節水を行ない、7月第2半旬から9月第2半旬までは節水しないが、9月第1半旬から再び第2次節水に入り、9月第3半旬から10月第5半旬まで11半月の間、第3次節水を行なっている。その後、貯水量が回復して、節水解除となるが、12月第5半旬から再び貯水量が減少して節水に入り、2月末まで節水が続く。

本方式によれば、全般に流況が平滑化されており、貯水量の減少に伴う節水開始及び節水強化、貯水

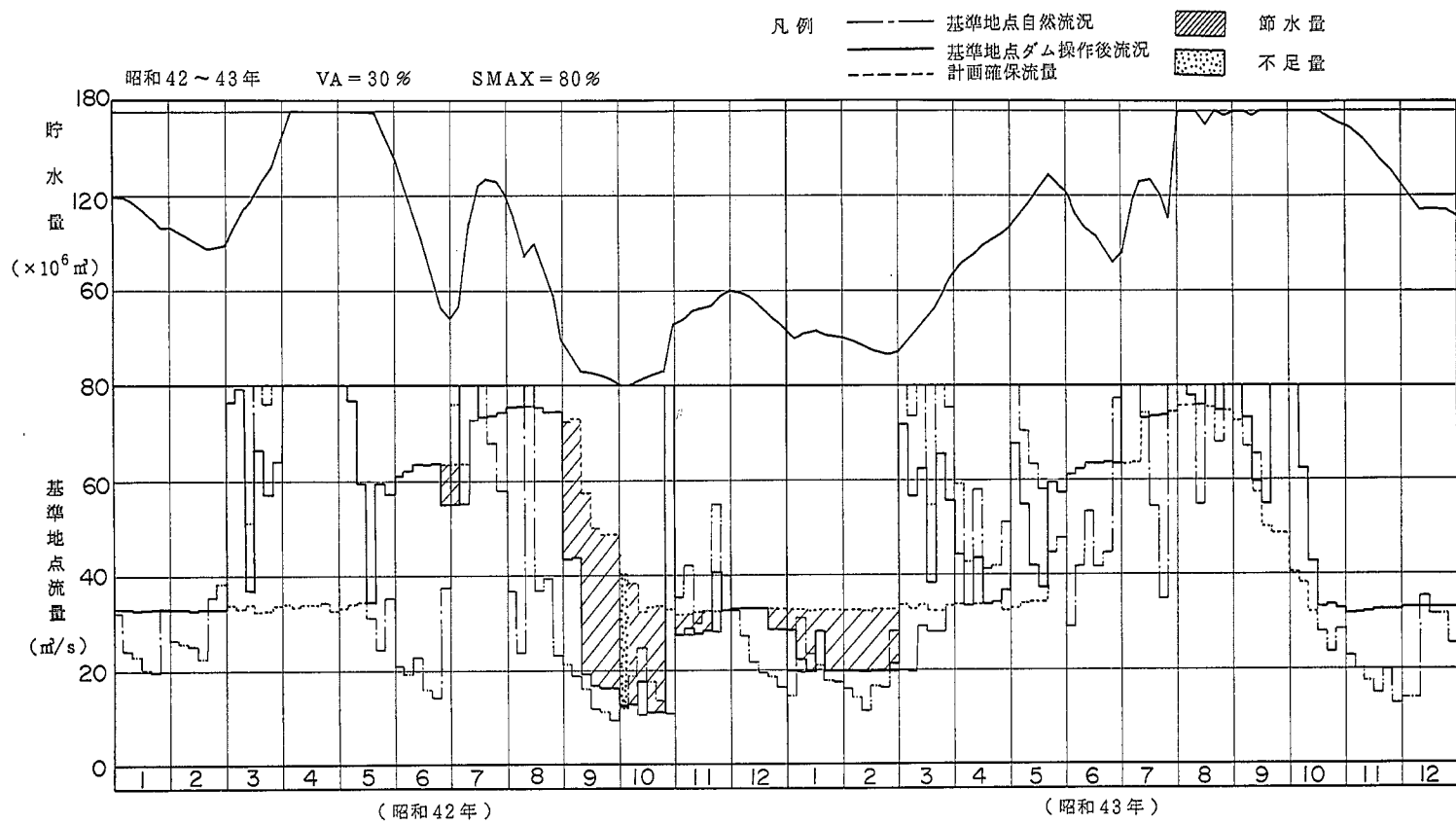


図-6.4.5 段階的節水方式運用結果 (Aダム)

量の回復に伴う節水緩和及び節水解除が、渇水インパクトを小さくする形で行なわれることがわかる。

b. B ダム 群

図-6.4.6は、段階的節水方式をBダム群の運用に適用した結果の一部(昭和42年～44年)を示したものである。

V_a は、利水容量の30%、 S_{max} は、80%とした。この方式によると、第1次節水率は13%、第2次節水率は40%、第3次節水率は67%となる。

本方式によると、全期間にわたって貯水池が空になることがなく、流況が良く平滑化されている。最大の節水期間は、昭和43年9月第4半句から昭和44年5月第3半句までの約8カ月間で、第1次節水の半句数は14半句、第2次節水は15半句、第3次節水は17半句となる。節水は、自然流況に対して1～2カ月遅れた形で行なわれ、貯水量の減少に伴ない強化され、貯水量の回復とともに緩和され、昭和44年5月第4半句で解除されている。当然のことながら、節水に伴ない貯水量が温存されるため(いいかえると貯水池の空き容量=利水容量-貯水量が少なくなるため)、昭和44年6月には、無効放流量(基準点流量が確保流量以上でダムに貯留できる余剰流量はあるが、ダムが満杯のためにダムに貯留できずに無効となった流量をいう。)の増大を生じている。

c. C ダム

図-6.4.7は、段階的節水方式をCダムの運用に適用した結果の一部(昭和42年～43年)を示したものである。

V_a は、利水容量の30%、 S_{max} は75%とした。この方式によると、第1次節水率は12.5%、第2次節水率は37.5%、第3次節水率は62.5%となる。

結果をみると、昭和42年12月に節水を開始し、貯水量をほぼ一定量温存した形で、流況の平滑化を行ない、昭和43年7月に節水を解除している。

以上の適用結果から、段階的節水方式は、 V_a 及び S_{max} を適切に選ぶことにより、貯水池を空にすることなしに、自然流況の減少よりも時間遅れを伴った形で流況を平滑化し、取水量を急激に減少させることなく節水に入り、渇水のインパクトを緩和することがわかる。ただし、流況の予測を全く行わず、貯水量を温存する方式なので、無効放流量は増大する。

本方式の渇水被害額軽減効果は、6.6節で分析する。

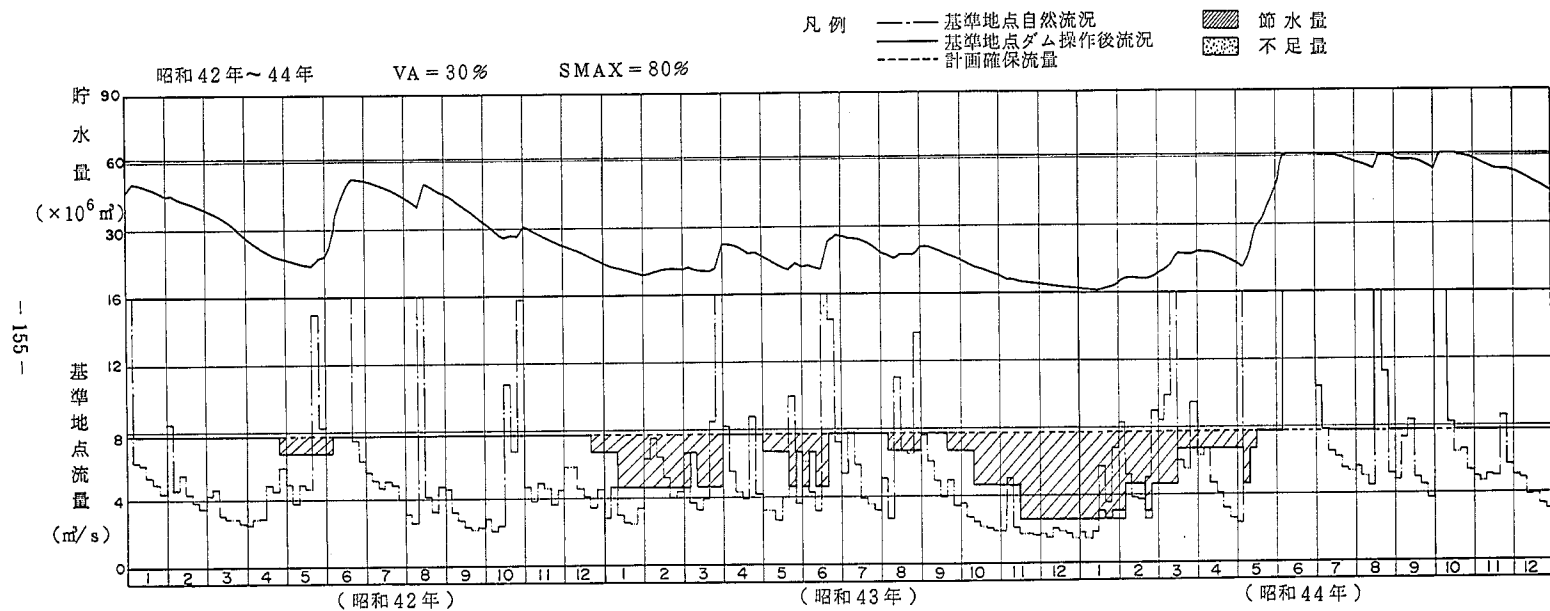


図-6.4.6 段階的節水方式運用結果 (Bダム群)

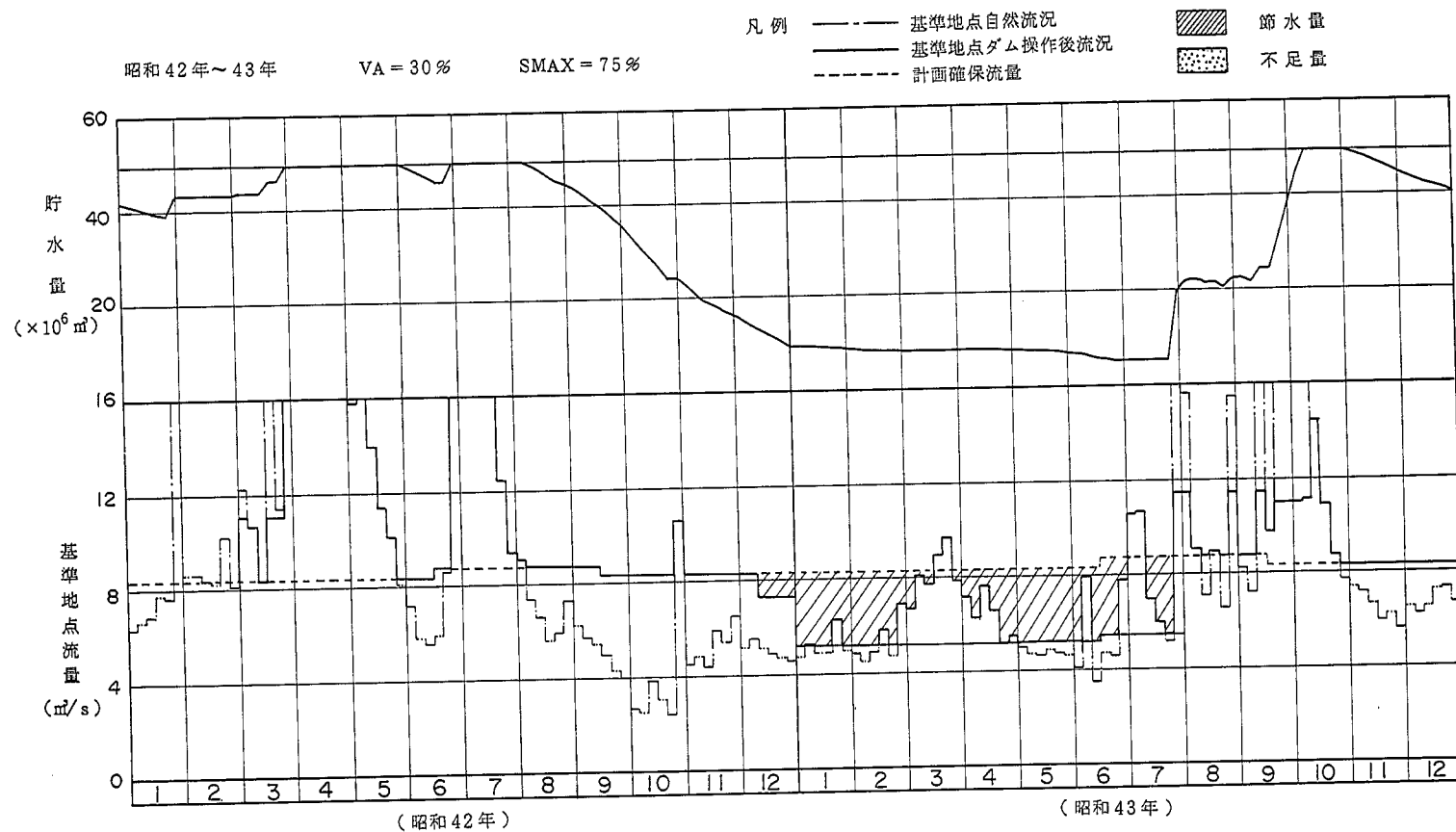


図-6.4.7 段階的節水方式運用結果 (Cダム)

6.5 確率D.P. (ダイナミック・プログラミング)方式

前節では、節水率を貯水量の関数として考えたが、この方式では流況の季節特性が考慮されていないので、貯水量が減少すれば、豊水期の前でも渇水期の前でも同じ節水を行なうことになり効率的でない。また、この方式では、節水開始貯水量を変えて最も渇水被害が少なくなるように決める必要がある。

以上の2点を改良するために、本節では、流況の季節変動の確率的モデル化を行ない、かつ渇水被害値の累加値の期待値を最小にするという評価基準のもとで、確率D.P.法によって月ごと、貯水量ごとに節水率を決める方法を考察する。

確率D.P.法は、入力変数が確率変数である制御システムの多段階決定過程問題に適用される数学的最適化手法であるが、現実のダム貯水池補給システムへこの方法を適用するには、種々のモデル化が必要となる。したがって、確率D.P.法によって求められた“最適解”も現実に行行可能であるとは限らず、与えられた条件のもとで“最適ルール”の備えるべき特性を表現したものと考えるのが妥当である。

最初にダム貯水池補給システムのモデル化を行なう。

渇水時のダムからの補給は、基準地点を目標にして実施されるものとする。また、ダムからの補給は、ダムがどの地点にあっても、また、いくつあっても基準地点に対しては同じ効果をもつので(ダム地点と基準地点の間の水量損失、還元水量はないものとする)、各ダムの利水容量の合計値と同じ容量を有するダムを想定し、ダム貯水池システムを1ダム1基準地点にモデル化する(図-6.5.1(a))。

次に流況の季節的な変動特性は、基準地点において把握するものとし、月平均流量の確率的な生起特性をモデル化する。

長尾は、貯水池をもつ河川の渇水確率を解析するにあたって、流量系列のランダム化を行ない、冬では10日、春で8日、梅雨で6日、台風期で3日以上総流出量が、ほぼランダム量に近似できるとしている⁷⁾。したがって、本研究では、月総流出量あるいは月平均流量をランダム量(独立事象量)と考えることにする。

月平均流量の確率分布は、Thomas Plotにより調べたところ(Aダム、Bダム群、Cダム)、各月ともおおむね対数正規分布に従うことがわかった。よって、ここでは、基準地点における月平均流量の生起確率は、対数正規分布に従い、かつ、各月間で相互に独立であると考えてモデル化する。

ダム地点流入量は、月ごとに基準地点との相関性を調べたところ、3ダムとも相関係数=0.85~0.99程度あり、以下の直線回帰式で表わすことができる。

$$Q_1 = a Q_0 + b \quad \dots\dots\dots (6.3)$$

ここに、 Q_1 はダム地点月平均流量、 Q_0 は基準地点月平均流量、 a 、 b は回帰係数である。ただし、 Q_1 は、月平均流量の既往最小値と最大値の範囲内にあるものとする。

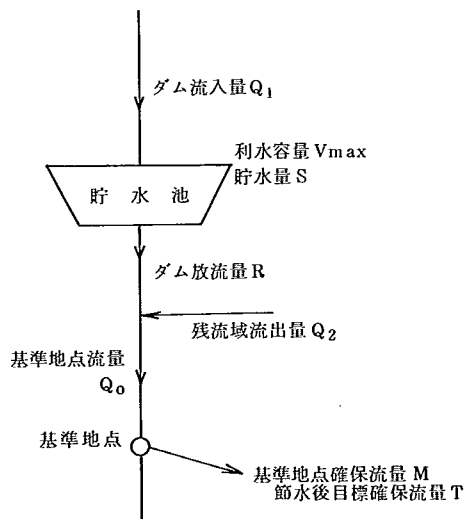


図-6.5.1(a) 利水モデル

ダムからの補給目標水量、すなわち、基準地点確

保流量は、月平均値を与えることとし、用水取水は、全て基準地点において行なわれるものと仮定する。

さて、渇水時の貯水池運用に対して渇水被害の分散を図ること（できるだけ特定の月に渇水被害が偏らないようにする）を目的として、確率 D. P. 法によって最適運用方式を決めることを考える。

稲田は、D. P. 法によって貯水池群の最適洪水調節を行なうことを提案しているが⁴⁾、最適洪水調節、すなわち、ダム洪水調節の効率化を図ることは、降雨予測技術の精度が不十分であるので予測が外れたときには、逆効果となる場合もあり、安全・確実な操作を要求されるダム洪水調節方法としては、現段階では適当でない。

竹内は、貯水量の累加損失係数を用いた貯水池群の最適操作手法として D. P. 法と L. P. 法を組み合わせた手法（Dynamic Programming Coupled with Linear Programming）を提案しているが⁵⁾、損失係数の設定根拠が十分でなく、手法が数学的に複雑であり実用的でない。

また、室田・神田は、確率 D. P. 法により、水量及び供給信頼度を評価基準とする貯水池最適操作ルールを求め、その特性を分析しているが⁶⁾、評価関数の設定根拠が不十分であり、かつ、貯水池操作の最適化基準を効用最大としている点は水の効用が十分定量的に把握されていないので現実的でない。また、貯水池操作は、利水計画どおりダムからの補給が行なわれれば、問題はないわけで、問題は、予知し得ない計画以上の渇水が来たときに、渇水の影響・被害をいかに小さくするかという点にあるからである。つまり、渇水時に限られた水量をどのように時間的・空間的に配分するのが適当かということが問題となるのである。

以上のように、これまでいわゆる貯水池操作の最適化問題に対してその評価関数も併せて実用化された数学的な最適化手法はなかったと言える。

これに対して、本研究では、緊急に対応を迫られている渇水時の貯水池運用に対して、確率 D. P. 法により、実用性の高い運用方式を求めることにする。適用にあたっての基本的な考え方は次の 4 点である。

① ダム貯水池補給システムを 1 ダム・1 基準地点を有する水系でモデル化する。

② 評価関数としては、前章で分析を行なった渇水被害原単位式を用いる。

不足水量は、ダム補給後の基準地点流量の基準地点確保流量（計画値）に対する不足量とする。

③ 評価基準は、基準地点で発生すると期待される“渇水被害の累加値の期待値”を最小化することとする。

④ 流況の季節的な変動特性は、月ごとに基準地点において確率統計的に把握し、月平均流量の生起確率分布は、対数正規分布に従うものとする。

D. P. 法は、R. Bellman によって考案された数理計画法の一種であり、多段階決定過程の問題に適用される。

多段階決定過程とは、ある系（システム）に状態を変化させる入力があるとき、状態を変化させるような決定が多段階あるいは逐次的に行なわれるような過程（プロセス）をいう。このときの決定の系列を“政策”と呼び、ある制約条件のもとで評価関数を最適化するように行なわれるときの政策を“最適政策”と呼ぶ。

D. P. 法の目的は、最適政策を求めることにあり、“最適性の原理”によって関数方程式をたて、これを、通常、数値的に解いて最適政策を求める。ここで“最適性の原理”とは、“最適政策とは、最初の状態がどうであれ、また、それに対してどんな決定をしても、この状態・決定とは無関係に、その後に行な

われる決定が、最初の決定によって生じた状態に関して最適政策となるような性質をもつことである”と説明される⁹⁾。

すなわち、ある期間の系の最適化を図るためには、最初の状態から途中の状態までの系の最適化を図ったとして、その状態から最終状態までの間も最適化を図らなければ、最初から最後まで期間における系の最適化は得られないということになる。したがって、期間の最終状態から出発して、1ステップ前のあらゆる状態における評価関数の最小値(あるいは最大値)と最適決定をもとめ、これを足がかりとしてもう1ステップ前のあらゆる状態における評価関数の最小値と最適決定をもとめ、順次、前のステップのあらゆる状態における評価関数の最小値と最適決定を求めることができる。

いま、渇水時の貯水池運用方式を決めるに際して考慮すべき点は、将来流況は不確実であり確率統計的にしか期待できないということ、及び、将来起こり得る渇水に対して、できるだけ渇水被害を小さくしたいということの2点である。前に述べた基本的考え方はこの点を表現したものである。

さて、ダム貯水池システムにおいて、状態変数をダム貯水量 S 、入力変数を基準地点流量 Q_0 及びダム流入量 Q_1 、決定変数を基準地点の節水後確保流量 T 、基準地点確保流量(計画値)を M 、ダム補給量を R 、ダム貯留量を O 、渇水被害関数を G とする。

いま、時間単位を月とし、上述の諸量の第 i 月の値に添字 i をつける。

第 i 月の節水後確保流量 T_i を決めるにあたって、“最適性の原理”を導入する。

第 i 月初めの貯水量を S_i 、第 i 月以降、将来のある時点までの間に発生すると期待される渇水被害の期待値の最小値を $F_i(S_i)$ とするとき、 $F_i(S_i)$ は、第 i 月と第 $(i+1)$ 月の間に発生する渇水被害 G_i と、 S_i の状態のときに T_i の決定をしたことによって生ずる状態 S_{i+1} に応じて第 $(i+1)$ 月以降、将来のある時点までの間にどのような運用を行なっても最小限発生するものと期待される渇水被害 $F_{i+1}(S_{i+1})$ の和の期待値の最小値であるといえる。

すなわち、 T_i は、次の関数方程式を解くことにより、月ごと、貯水量ごとに決められる。

$$F_i(S_i) = \min_{T_i} [\int \{ G_i + F_{i+1}(S_{i+1}) \} dP(Q_{0i})] \quad \dots\dots\dots (6.4)$$

ここに、 $dP(Q_{0i})$ = 基準地点流量の生起確率密度で、 $\min$ は最小値をとることを意味する。

このとき、ダムの補給・貯留、貯水量、ダム操作後基準地点流量 Q'_{0i} は、次のようになる。

- ① $Q_{0i} < T_i$ のとき、ダムからの補給を行なう。

$$\text{補給量 } R_i = \min(T_i - Q_{0i}, S_i)$$

$$\text{貯水量 } S_{i+1} = S_i - R_i \quad \dots\dots\dots (6.5)$$

$$\text{ダム操作後流量 } Q'_{0i} = Q_{10} + R_i$$

- ② $Q_{0i} = T_i$ のとき、ダムからの補給・貯留は行なわない。

$$\left. \begin{array}{l} \text{貯水量 } S_{i+1} = S_i \\ \text{ダム操作後流量 } Q'_{0i} = Q_{0i} \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (6.6)$$

- ③ $Q_{0i} > T_i$ のとき、ダムへ貯留する。

$$\text{貯留量 } O_i = \min(Q_{0i} - T_i, Q_{11}, V_{\max} - S_i)$$

$$V_{\max} = \text{利水容量}$$

$$S_{i+1} = S_i + Q_i \quad \dots\dots\dots (6.7)$$

ダム操作後基準地点流量 $Q_{0i} = Q_{0i} - O_i$

また、第 i 月に発生する渇水被害は、基準地点確保流量を M_i 、 Q_{0i} の M_i に対する不足水量を D_i とすれば、節水率は、 $D_i / M_i \times 100$ (%) だから、5.3 節で求めた渇水被害原単位 $C(x)$ 、 $x = \text{節水率}(\%)$ を用いると、

$$G_i = D_i \cdot C(D_i / M_i \times 100) \quad \dots\dots\dots (6.8)$$

と表わせる。

以上のように、第 i 月渇水量 S_i を仮定し、節水後確保流量 T_i を動かして、各流量に対してダム補給・貯留計算を行ない、不足水量から第 i 月に発生する渇水被害 G_i を算出し、これと第 i 月以降、将来時点までに発生するものと期待される渇水被害の最小値 $F_{i+1}(S_{i+1})$ の和をとり、最後に各流量の生起確率をかけて期待値を求めて、そのうち期待値が最小となるような“最適確保流量”を求めればよい。

以上の計算は、ダム貯水量、流量、確保流量、補給量、貯留量を離散化(整数化)して行なう。離散化の単位容量は、貯水池規模によって異なり、おおむね計画利水容量の $1/20 \sim 1/30$ とする。また、関数方程式(6.4)を解くには、右辺の $F_{i+1}(S_{i+1})$ が既知であることが必要である。したがって、これを解くには、適当な計算期間(3年程度とした)の最終月から出発して、逐次、前の月の貯水量ごとの最小被害値ならびに節水後確保流量を計算していく必要がある。このとき、流況の確率の変動が“定常的”、すなわち、月ごとの流量生起確率は、毎年同じ分布を示すものと仮定する。

以上の方式により、各月の流量生起確率分布を図-6.5.1(b)に示すように区分して各流量の生起確率を求め、各月の最適確保流量を、逐次求めていくと、最適確保流量は、月ごと、貯水量ごとに一定の値になるので、これを渇水時の貯水池運用の目標値あるいは目標節水率とするものである。

このようにして決定された運用方式は、月ごとの流況変動特性を考慮することにより節水の効率化を図り、また、渇水被害の軽減を図るために貯水量が少なくなるにつれて節水率を大きくする方式となる。

以下に、3 ダムへの適用例を示す。

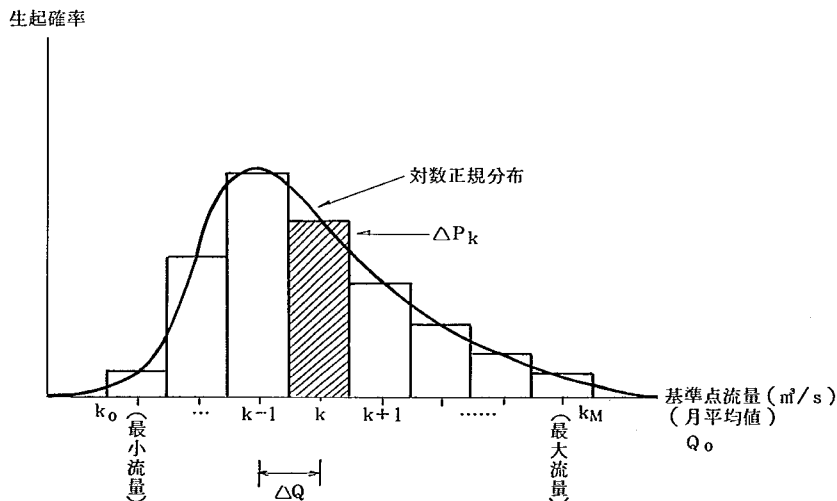


図-6.5.1(b) 基準地点流量の生起確率の求め方 (ΔQ は離散化の単位流量)

a. A ダム

最初に、確率D. P. 方式によってAダムの最適運用方式を求める。

最適化計算は、単位容量を 10^7 m^3 とした。したがって、計画利水容量は整数化すれば17となり、流量及び確保流量の単位は、 $10^7 \text{ m}^3/\text{月}$ となる。表-6.5.1は、月ごとの基準地点平均流量の確率分布式、ダム流入量の基準地点流量に対する回帰式、及び基準地点確保流量（月平均値）を単位流量で換算した値をとりまとめたものである。

最適化計算の計算年数は、3年とし、最終月末には、渇水被害 = 0 と仮定して、逐次、前の月の最小渇水被害値（期待値）及び最適確保流量を貯水量ごとにと求めた。

表-6.5.2は、このようにして求めた最適確保流量を月ごと、貯水量ごとにとりまとめたものである。結果をみると、2～5月は、流況がよく需要量も少ないので節水の必要性はない。6～9月は、満水に近い貯水量から節水を開始することになっているが、これは、非かんがい期（10月～5月）の渇水被害原単位がかんがい期（6～9月）に比べて、2倍程度高いため、流況的に渇水期となる非かんがい期の渇水被害を小さくするために、豊水期には、できるだけ貯水量を温存する結果となったと解釈される。

10月～1月は、貯水量が利水容量の20ないし40％程度から節水を開始する結果となっている。

節水率は、全般に小さな値となっており、最大値でも、12月の貯水量 $2 (\times 10^7 \text{ m}^3)$ 以下で $(9-7) \div 9 \approx 20\%$ となっている。

確率D. P. 法により求めた渇水時の貯水池運用方式では、Aダムでは、6月から9月までの豊水期に、

表-6.5.1 確率D. P. 方式最適化計算条件
(Aダム)

- 計算単位容量 = 10^7 m^3
- 利水容量 = $173 \times 10^6 \text{ m}^3 \approx 17 \times 10^7 \text{ m}^3$

月	確率分布式		ダム流入量回帰式		需 要 量	
	a_0	b_0	a_1	b_1	m^3/s	$10^7 \text{ m}^3/\text{月}$
1	0.256	1.475	0.170	3.000	32.710	9
2	0.262	1.604	0.230	2.300	32.750	8
3	0.224	1.731	0.220	3.560	33.230	9
4	0.223	2.011	0.270	-0.280	33.700	9
5	0.184	1.831	0.240	6.370	42.650	11
6	0.336	2.059	0.230	4.090	62.930	16
7	0.345	2.151	0.250	4.070	70.460	19
8	0.389	2.175	0.280	4.980	75.300	20
9	0.471	2.179	0.260	5.100	58.550	15
10	0.259	1.779	0.220	3.330	35.010	9
11	0.241	1.577	0.220	2.450	32.160	8
12	0.188	1.444	0.170	2.800	33.000	9

注) 確率分布式 $\log Q_0 = a_0 X + b_0$

Q_0 = 基準地点流量

X = 正規確率変数

ダム流入量回帰式 $Q_1 = a_1 Q_0 + b_1$

Q_1 = ダム流入量

Q_0 = 基準地点流量

流量資料期間 = 昭和24年～50年（27年間）

表-6.5.2 確立D.P.方式最適確保流量
(Aダム, 単位=10⁷ m³/月)

貯水量 (× 10 ⁷ m ³)	17	9	8	9	9	11	16	20	20	15	9	8	9
	16	9	8	9	9	11	16	18	19	14	9	8	9
	15	9	8	9	9	11	16	18	19	14	9	8	9
	14	9	8	9	9	11	16	18	19	14	9	8	9
	13	9	8	9	9	11	16	18	19	14	9	8	9
	12	9	8	9	9	11	15	18	19	14	9	8	9
	11	9	8	9	9	11	15	18	19	14	9	8	9
	10	9	8	9	9	11	15	18	18	14	9	8	9
	9	9	8	9	9	11	15	18	18	14	9	8	9
	8	9	8	9	9	11	15	18	19	14	9	8	9
	7	9	8	9	9	11	15	18	18	14	9	8	8
	6	9	8	9	9	11	15	18	18	14	9	7	8
	5	9	8	9	9	11	15	18	18	14	8	7	8
4	9	8	9	9	11	15	18	18	14	8	7	8	
3	8	8	9	9	11	15	18	18	14	8	7	8	
2	8	8	9	9	11	15	18	18	13	8	7	7	
1	8	8	9	9	11	15	18	18	13	8	6	7	
0	8	8	9	9	11	15	18	18	13	8	6	7	
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12													
(月)													
確保流量 (計画値, × 10 ⁷ m ³ /月)													
9 8 9 9 11 16 19 20 15 9 8 9													

貯水量が満水に近いときから 10 %程度の節水を行ない、流況的に渇水期となる 10 月から 1 月に備えて、貯水量の温存を図るのが良いという結果を得た。

表-6.5.2によれば、たとえばある年の10月始めの貯水量が $4 \times 10^7 \text{ m}^3$ であれば、10月の確保流量 $9 \times 10^7 \text{ m}^3$ に対して、“最適”な確保流量は $8 \times 10^7 \text{ m}^3$ となり約11%の節水を実施した方がよいことになる。このようにして各月ごとにそのときの貯水量に応じて最適な確保流量が決まり、それを目標にしてダムの運用を修正していくことになる。

次にこのようにして求めた最適運用方式を用いて、昭和 40 年～49 年の貯水池運用シミュレーションを実施した。運用方式は、表-6.5.2 で求めた最適確保流量（単位 = $10^7 \text{ m}^3/\text{月}$ ）を月平均確保流量（単位 = m^3/s ）に直し、月ごと・貯水量ごとに確保流量を決めていくものとした。

結果の一部（昭和42年～43年）を図-6.5.2に示す。昭和42年の渇水では、5月から節水を開始しているが、節水率が低いため、9月第5半旬に貯水池は7半旬の間空となっている。その後、11月からは流況がよくなり貯水量は回復するが、節水率が低いため、再び昭和43年2月に貯水池は、空となっている。このように、本渇水に対しては、確率D.P.方式では節水率が低いため、節水運用の効果はあまり大きくない。

b. B ダ ム 群

本ダムでは、容量単位は $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、流量単位は $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{月}$ 、最適化計算年数 = 3 年とした。したがって、計画利水容量は整数化すれば $30 (\times 10^6 \text{ m}^3)$ となる。

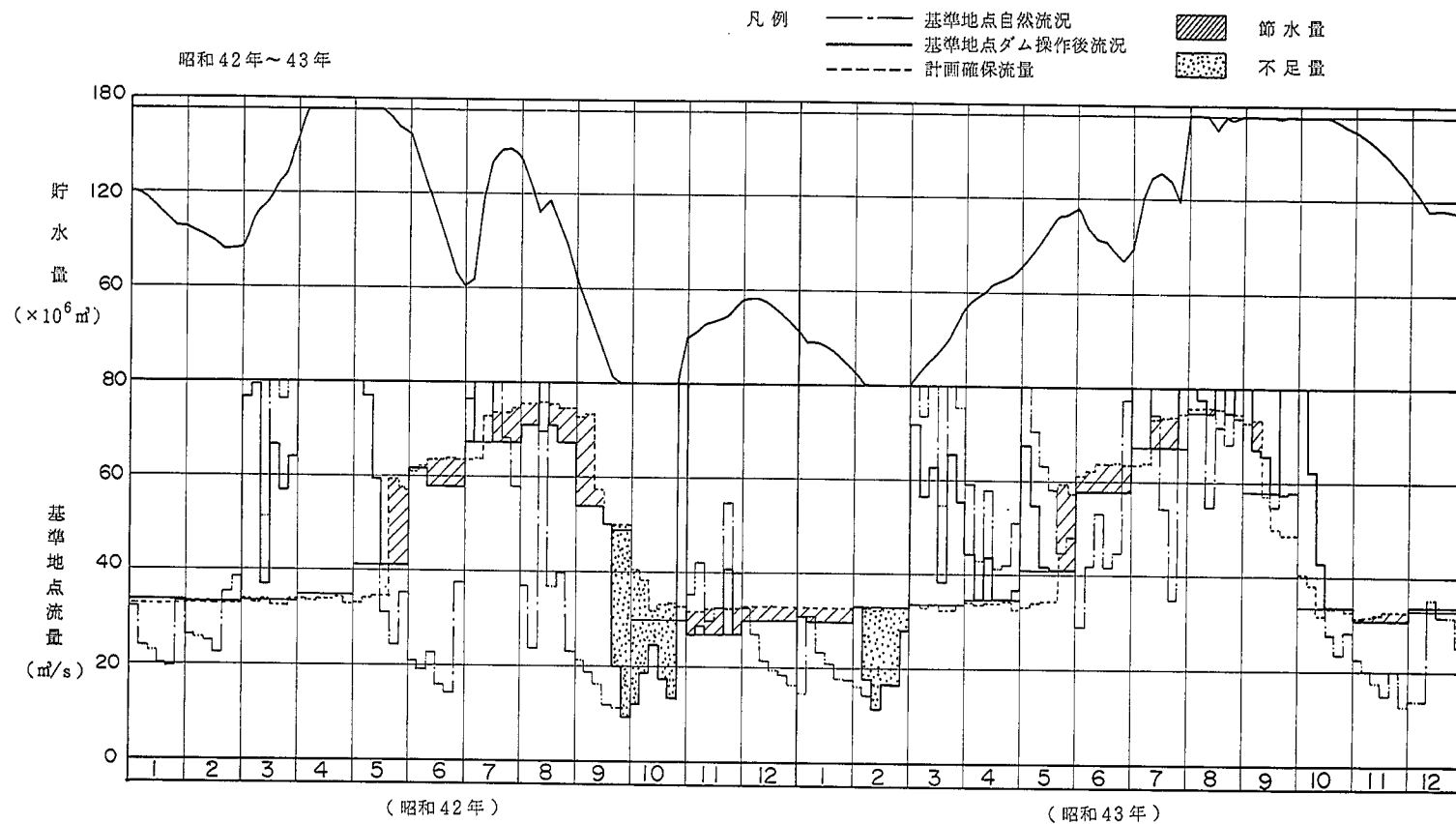


図 - 6.5.2 確率D.P.方式運用結果 (Aダム)

表-6.5.3は、Bダムの最適運用計算に用いた、月ごとの基準地点流量の確率分布式、ダム流入量の基準地点流量に対する回帰式、及び基準地点確保流量（＝年間一定）をとりまとめたものである。

また、表-6.5.4は、確率D.P.法により求めた最適確保流量を月ごと、貯水量ごとにとりまとめた結果である。表の見方はAダムの場合と同じである。

結果をみると、節水開始貯水量は、6月以降、徐々に高くなり、9月から10月までは、利水容量の55%となっている。その後は、節水開始貯水量は低下していく。したがって、本ダム群では、夏から秋にかけての豊水期の水量を貯留し、この貯水量を温存して、冬から春にかけての渇水期に備える必要があることを示している。

節水率は、10月から11月の貯水量が16%以下のときに最大で30%となり、3段階節水方式を月ごとに組み合わせた形で最適運用方式が構成されている。

次に、ここで求めた運用方式と実際のダムで行なわれた運用実態を比較してみる。図-6.5.3は、Bダム群のうち1ダム（利水容量＝ $3.9 \times 10^7 \text{ m}^3$ ）の昭和51年～53年の貯水状況を示したものである。昭和52年5月から昭和53年4月までの給水制限状況は、隔日給水方式で、平均節水率は、実績値で $2,401 (\% \cdot \text{日}) \div 167 (\text{日}) = 14.4 \%$ である。このとき当該ダムは、貯水量が満水量の約2/3から節水を開始し（昭和53年5月）、満水量の約2/5で節水を解除している。このときの運用実績と確率D.P.方式を比較する

表-6.5.3 確率D.P.方式最適化計算条件
（Bダム群）

○計算単位容量 = $2 \times 10^6 \text{ m}^3$

○利水容量 = $61 \times 10^6 \text{ m}^3 \approx 31 (\times 2 \times 10^6 \text{ m}^3)$

月	確率分布式		ダム流入量回帰式		需 要 量	
	a_0	b_0	a_1	b_1	m^3/s	$2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{月}$
1	0.235	0.766	0.540	-0.720	7.740	10
2	0.167	0.818	0.510	-0.730	7.740	9
3	0.238	0.793	0.540	-0.760	7.740	10
4	0.272	0.836	0.510	-0.520	7.740	10
5	0.342	1.066	0.530	-0.970	7.740	10
6	0.328	1.258	0.500	-0.830	7.740	10
7	0.373	0.993	0.430	-0.550	7.740	10
8	0.179	1.137	0.400	-0.360	7.740	10
9	0.342	0.910	0.480	-0.600	7.740	10
10	0.411	0.911	0.470	-0.260	7.740	10
11	0.334	0.840	0.520	-0.360	7.740	10
12	0.241	0.735	0.540	-0.630	7.740	10

注) 確率分布式 $\log Q_0 = a_0 X + b_0$

Q_0 = 基準地点流量

X = 正規確率変数

ダム流入量回帰式 $Q_1 = a_1 Q_0 + b_1$

Q_1 = ダム流入量

Q_0 = 基準地点流量

流量資料期間 = 昭和30年～50年（21年間）

表-6.5.4 確率D.P.方式最適確保流量
(Bダム群, 単位= $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{月}$)

[illegible]

と、需要量及び利水容量の違い、流量資料の違い、ダム以外の水源状況の違い等異なる点があるが、節水開始時期が実績の方が早く、節水開始貯水量も大きくなっている。すなわち、確率 D. P. 方式では、表 6.5.5 のような確保流量となり、おおむね 9 月から 3 月の間が節水となるのに対して、実績では、5 月中旬から節水を開始し、しかも断続的に節水（給水制限）を実施している。

次に、Aダムと同様に確率D. P. 方式によって、Bダム群の運用シミュレーションを実施した。結果の一部（昭和42年～44年）を図-6.5.4に示す。

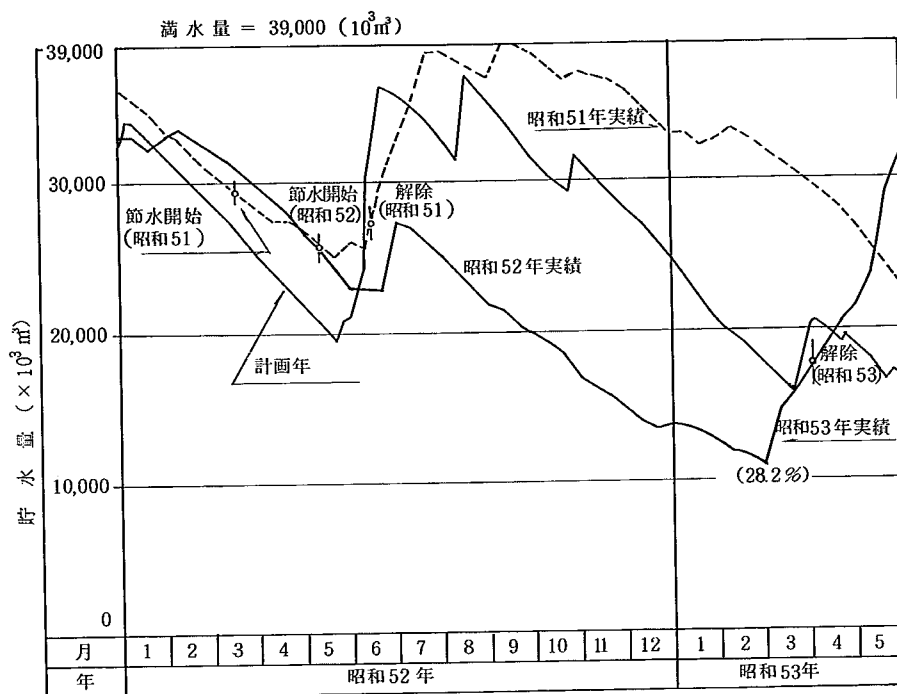


図-6.5.3 Bダム貯水状況(実績)

表-6.5.5 確率D.P.方式最適確保流量
(Bダム, 昭和52年5月~53年4月)

年月	貯水量 ($2 \times 10^6 \text{ m}^3$)	確保流量 ($2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{月}$)	最適確保流量 ($2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{月}$)	節水率 (%)	給水制限状況 (実績制限率%, 及期間)
昭和52. 5	13	10	10	0	} 6(5/16 ~ 6/ 6) } 19(6/ 7 ~ 6/25)
6	11	10	10	0	
7	14	10	10	0	
8	13	10	10	0	} 13(8/16 ~ 8/22)
9	11	10	9	10	
10	10	10	9	10	} 15(10/24 ~ 12/27)
11	8	10	8	20	
12	7	10	8	20	
昭和53. 1	7	10	9	10	} 17(1/ 5 ~ 1/20)
2	6	9	8	11	
3	6	10	9	10	} 15(3/ 1 ~ 4/ 7)
4	9	10	10	0	

注) 貯水量はダム運用実績から求めた月始めの値である。

結果をみると、昭和42年10月に節水に入り、昭和43年3月まで節水を続けて、4月は節水せずに、再び5月から11月にかけて節水を次第に強化している。しかしながら、11月第3半旬には、貯水池が空となっている。その後、約2カ月半の間、貯水池は空となり、44年2月下旬から約2カ月節水を行なっている。確率D.P.方式では、節水率が低いため、大きな渇水が発生したとき、貯水池が空になることがある。

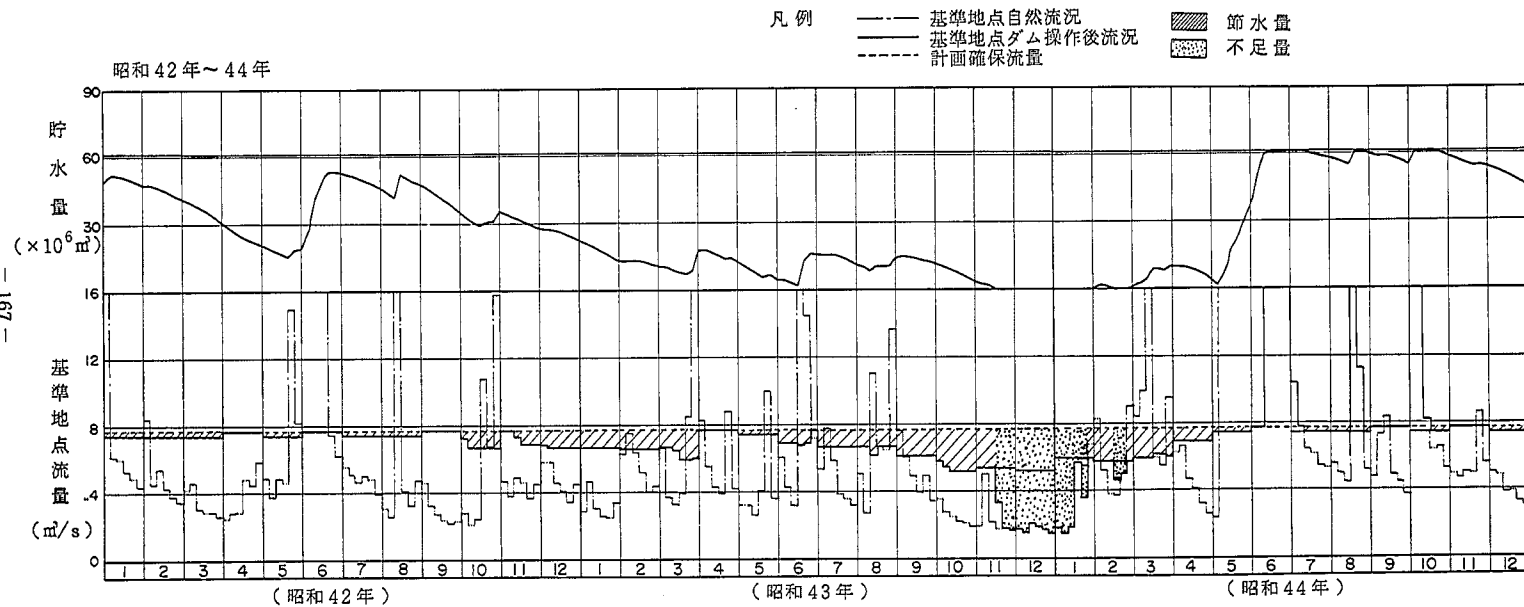


図-6.5.4 確率D.P.方式運用結果(Bダム群)

c. C ダム

確率 D. P. 方式を C ダムに適用する。最適化計算の計算条件を表-6.5.6 に示す。計算単位容量は、 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、利水容量は、 $25 (\times 2 \times 10^6 \text{ m}^3)$ とした。最適化の計算年数は、3 年とした。

表-6.5.7 は、確率 D. P. 法により求めた C ダムの月ごと・貯水量ごとの最適確保流量をとりまとめたものである。結果をみると、4 月から 6 月の間は節水の必要はなく、7 月以降、次第に節水開始貯水量が大きくなり、10 月から 11 月は、貯水量が利水容量の 64 % から節水開始を実施する結果となっている。その後、3 月までは、節水開始貯水量が減少していく。最大節水率は、11 月及び 12 月に貯水量が約 12 ~ 16 % 以下のとき、約 30 % である。

以上のことから、C ダムにおいても、夏から秋にかけての豊水期に貯水量を温存し、これを冬から春にかけて生じる渇水に備えておくという運用方式が得られる。

図-6.5.5 は、確率 D. P. 方式によって C ダムの運用シミュレーションを実施した結果の一部（昭和 42 年 ~ 43 年）を示す。

これによれば、昭和 42 年 10 月から昭和 43 年 3 月にかけて節水運用を行なっているが、節水率が低いため、本渇水では、その後、4 月 ~ 7 月に貯水池が空となっている。

以上の 3 ダムへの適用結果から、確率 D. P. 方式によると、夏から秋にかけての豊水期にダム貯水量の

表-6.5.6 確率 D. P. 方式最適化計算条件
(C ダム)

- 計算単位容量 = $2 \times 10^6 \text{ m}^3$
- 利水容量 = $49.5 \times 10^6 \text{ m}^3 \rightleftharpoons 25 (\times 2 \times 10^6 \text{ m}^3)$

月	確率分布式		ダム流入量回帰式		需 要 量	
	a_0	b_0	a_1	b_1	m^3/s	$2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{月}$
1	0.182	0.743	0.520	-0.470	8.350	11
2	0.136	0.808	0.600	-1.010	8.350	10
3	0.169	0.883	0.720	-2.040	8.350	11
4	0.191	1.014	0.810	-2.640	8.350	11
5	0.159	1.051	0.860	-3.540	8.350	11
6	0.259	1.159	0.920	-3.880	8.560	11
7	0.282	1.307	0.930	-4.280	8.770	12
8	0.230	1.028	0.880	-3.430	8.770	12
9	0.257	1.123	0.850	-2.840	8.560	11
10	0.180	0.982	0.750	-2.080	8.350	11
11	0.170	0.851	0.650	-1.240	8.350	11
12	0.148	0.768	0.540	-0.640	8.350	11

注) 確率分布式 $\log Q_0 = a_0 X + b_0$
 Q_0 = 基準地点流量 (m^3/S)
 X = 正規確率変数
 ダム流入量回帰式 $Q_1 = a_1 Q_0 + b_1$
 Q_0 = 基準地点流量
 Q_1 = ダム流入量
 流量資料期間 = 昭和 1 年 ~ 51 年 (51 年間)

表-6.5.7 確率D.P.方式最適確保流量
(Cダム, 単位= $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{月}$)

	25	11	10	11	11	11	11	12	12	11	11	11	11	
	24	11	10	11	11	11	11	12	12	11	11	11	11	
	23	11	10	11	11	11	11	12	12	11	11	11	11	
	22	11	10	11	11	11	11	12	12	11	11	11	11	
	21	11	10	11	11	11	11	12	12	11	11	11	11	
	20	11	10	11	11	11	11	12	12	11	11	11	11	
	19	11	10	11	11	11	11	12	12	11	11	11	11	
	18	11	10	11	11	11	11	12	12	11	11	11	11	
	17	11	10	11	11	11	11	12	12	11	11	11	11	
	16	11	10	11	11	11	11	12	12	11	10	10	11	
	15	11	10	11	11	11	11	12	12	11	10	10	11	
	14	11	10	11	11	11	11	12	12	10	10	10	10	(節水開始)
	13	11	10	11	11	11	11	12	12	10	10	10	10	貯水量)
	12	11	10	11	11	11	11	12	11	10	10	10	10	
	11	10	10	11	11	11	11	12	11	10	10	10	10	
	10	10	10	11	11	11	11	12	11	10	10	10	10	(節水率約10%)
	9	10	10	11	11	11	11	12	11	10	10	10	10	
	8	10	10	11	11	11	11	12	11	10	10	9	9	
	7	10	9	11	11	11	11	11	11	10	10	9	9	(節水率約20%)
	6	10	9	11	11	11	11	11	11	10	9	9	9	
	5	9	9	11	11	11	11	11	11	10	9	9	9	
	4	9	9	10	11	11	11	11	11	10	9	9	8	
	3	9	9	10	11	11	11	11	11	10	9	8	8	
	2	9	9	10	11	11	11	11	11	10	9	8	8	(節水率約30%)
	1	9	9	10	11	11	11	11	11	10	9	8	8	
	0	9	9	10	11	11	11	11	11	10	9	8	8	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
		(月)												
		確保流量(計画値, $2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{月}$)												
		11	10	11	11	11	11	12	12	11	11	11	11	

温存を図り、冬から春にかけての渇水期に備える運用方式が得られた。これは、適用ダムの利用率がいつでも高く、逆に利水安全度が低くなっているために、“季節的な流況調整”が必要となり、流量の少ない冬期を中心とした渇水の発生による被害を少なくすることが必要であるからと考えられる。

また、確率 D. P. 方式では、最適化の基準として漏水被害の期待値を最小化することにしており、流況的には、流量の平均的な値を主な対象とし、一番厳しい流況パターンを対象に最適化を行なっているのではないので、節水率は、最大 30% 程度と比較的低い値となっている。したがって、確率 D. P. 方式による貯水池運用シミュレーション例をみてもわかるように、大きな漏水のときは、貯水池が空となることがある。

しかし、確率D.P.方式は、季節的な流況変動特性及び長期的な渇水被害の期待値の最小化の2点を考慮して、段階的節水方式を月ごとに変えて構成した方式であるので、次節で分析を行なうが、渇水被害の軽減効果は、大きいことが予想される。

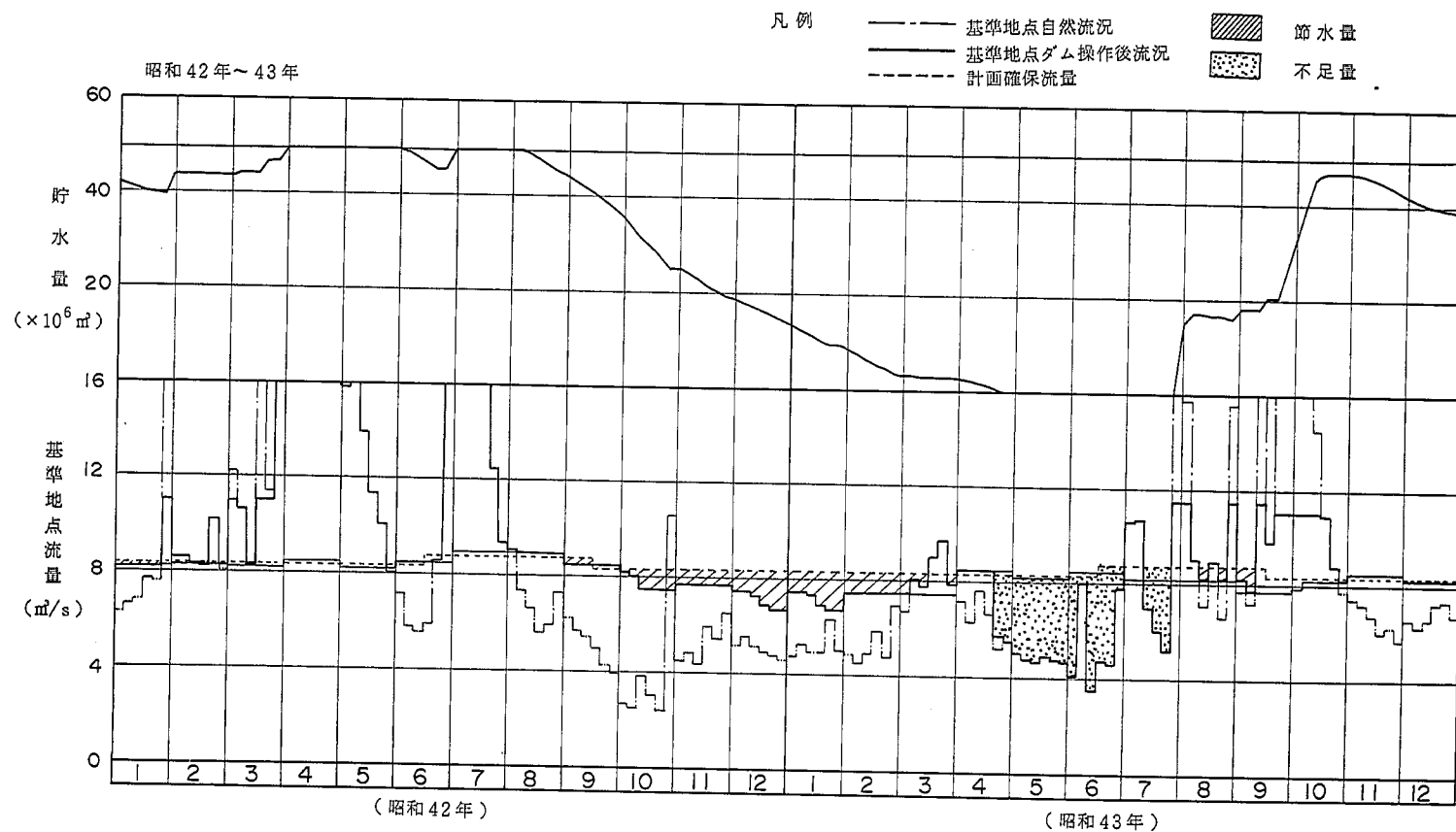


図-6.5.5 確率D.P.方式運用結果(Cダム)

6.6 渇水被害による種々の運用方式の比較

本節では、6.3節～6.5節で述べた種々の貯水池運用方式の渇水被害軽減効果を、5.3節で求めた渇水被害原単位式を使用して比較・分析する。

5.3節で求めた渇水被害原単位は、昭和48年高松渇水に対するヒアリング調査資料をもとに、渇水被害の構造を分析し、渇水被害原単位と節水率との関係を用途別にマクロ的に計量化した被害原単位を基礎としている。したがって、ここで算出した被害原単位が他地域においてもそのまま適用できるかどうかを検討する必要があるが、現在のところ資料が十分ではないので、一応、本研究では、これらのマクロ的被害原単位が渇水被害構造の特徴をよく表現していると考え、他地域にも一般的には適用可能とした。また、本章で対象とする問題は、渇水時の貯水池運用方式であり、種々の運用方式のうち、どのような方式が最も効果的であるかということ进行分析の対象としているので、渇水被害の絶対値そのものを推定する必要はないから、渇水被害構造の傾向をマクロ的に評価できれば十分であると考ええる。

さて、本節で比較する運用方式は、次の4方式である。

- (1) 節水運用を実施しない方式（計画どりの補給を行なう方式）
- (2) 予測方式
- (3) 段階的節水方式
- (4) 確率D.P.方式

(1)は、利水安全度の高いダム、言いかえると水供給量が水需要量に対して余裕のあるダムでとられる方式と考えられる。しかし、一般には、計画を上まわるような補給量を必要とする渇水が発生したとき、貯水池が空になると下流基準地点の流況が急激に悪化するので、渇水の与えるインパクトは、河川利用率が高いほど大きくなり、社会・経済的影響の大きさが急激に増大するので渇水時の運用方式としては好ましくない。

(2)は、降雨量に関する長期予報をもとに節水運用の判断を行なうものであるが、渇水がうまく予測される場合には効果が大きい、逆に、渇水が予測されなかった場合、及び渇水を予測したのに渇水とならなかった場合には、効果がなく、ときには逆効果の場合もある。

(3)は、貯水池残量がある量以下に減少したとき、渇水になったと判断し、節水運用に入る方式であり、貯水量の減少に伴ない節水を強化し、貯水量の回復に伴ない節水を緩和するので、渇水の与えるインパクトも比較的小さくてすむ。

(4)は、流況の季節的変動特性及び節水による長期的な渇水被害の最小化を図ることを考慮して、数学的最適化モデルを作成し、運用方式を求めたものであり、結果的には段階的節水方式を月ごとに变えて組み合わせた運用方式である。

以上の各方式の渇水被害軽減効果を比較・分析するために、3ダムを対象として10年間（昭和40年～49年）の運用シミュレーションを行ない、渇水被害額を算出した。

(1) 渇水被害額が最小となる運用方式

各ダムにおいて、4つの運用方式で運用シミュレーションを行ない、10年間の発生渇水被害額（年平均値）を算出した。この場合、予測方式及び段階的節水方式は、節水開始貯水量をパラメータと考え、計画利水容量に対する百分率で表わして、30%、40%、50%、60%、80%、100%と変えて渇水被害額を算出した。したがって、ここで比較する運用方式の数は、全部で14ケースになる。

表－6.6.1 発生渇水被害額（年平均値）

運用方式	節水開始貯水量	発生渇水被害額（年平均値、×10 ⁸ 円）		
		A ダム	B ダム 群	C ダム
節水しない方式	—	334.7	401.0	93.1
予測方式	30 (%)	263.6	303.5	—
	40	274.0	283.7	—
	50	293.2	275.8	—
	60	312.6	271.5	—
	80	325.8	—	—
	100	325.8	271.0	—
段階的節水方式 （3段階）	30 (%)	248.0	297.9	81.7
	40	257.6	308.8	82.1
	50	260.9	315.6	84.4
	60	276.0	336.4	81.7
	80	334.1	371.5	89.4
	100	382.2	414.7	94.2
確率 D . P . 方式	月ごとに異なる	182.6	241.2	59.2
極限ルール	渇水ごとに異なる	152.5	188.7	56.7

注) — の部分は計算せず

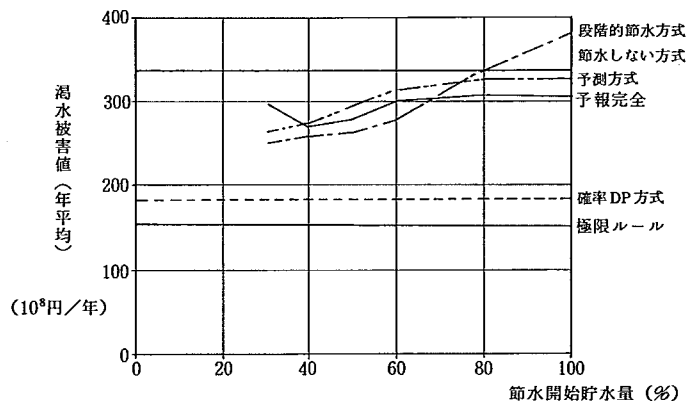
各ダムの発生渇水被害額（10年間平均値）を表－6.6.1、及び図－6.6.1～図－6.6.3に示す。

ダムごとに、種々の運用方式を採用したときの渇水被害額を比較する。

Aダムでは、節水しない運用方式のとき、平均約 330 × 10⁸ 円／年の渇水被害となった。この値は、渇水被害原単位が、節水率80%の渇水のときに、各用水で生産停止、営業停止等、利水機能がマヒして社会・経済活動が停止するものと想定して求めた値であるために、ダム建設費に匹敵する大きな値となっている。

予測方式では、節水開始貯水量が小さいほど渇水被害が小さい。渇水被害額が最小となるのは、節水開始貯水量が利水容量の 30 % のときで、そのときの被害値は、約 260 × 10⁸ 円／年となり、節水しない方式に対して約 20 % 被害額を減少している。

段階的節水方式では、節水開始貯水量が小さくなるほど渇水被害が小さくなる。これは、貯水量が大きいときに節水を開始すると、小さな渇水でもすぐ節水を行なうことになり、ふだんの水使用量が抑制され、



図－6.6.1 発生渇水被害額（Aダム）

結果的に水資源開発量を小さくしたことと同等となって、渇水被害を大きくすることを意味している。段階的節水方式のときの最小被害値は、節水開始貯水量が30%のときに、約 250×10^8 円/年となり、節水しない方式に対して約24%被害額を減少している。

確率 D. P. 方式は、4方式のうちで渇水被害額が最小となり、約 180×10^8 円/年と節水しない方式に対して、約45%被害額を軽減している。

次に、Bダム群では、節水しない方式のとき、渇水被害額は、約 400×10^8 円/年となる。

予測方式では、節水開始貯水量が大きいほど渇水被害額は小さく、最小値は、節水開始貯水量が100%のときに約 270×10^8 円/年となっている。これは、運用期間中、最も大きな渇水のときに(被害額の半分はこのときの渇水で発生している)、渇水の予測精度がよかったために、できるだけ早期に節水に入った方がよかったことを反映している。節水しない方式に対する被害額軽減効果の比率は約33%である。

段階的節水方式では、節水開始貯水量が30%のときに、被害額が約 300×10^8 円/年で最小となる。節水しない方式に対する被害額軽減効果は、約25%である。

確率 D. P. 方式では、被害額は約 240×10^8 円/年となり、節水しない方式に対する被害額軽減効果は、約40%である。

Cダムでは、節水しない方式のとき、渇水被害額は、約 90×10^8 円/年となる。

段階的節水方式は、節水開始貯水量が30%のとき、被害額が約 80×10^8 円/年で最小となる。節水しない方式に対する被害額軽減効果は、約11%である。

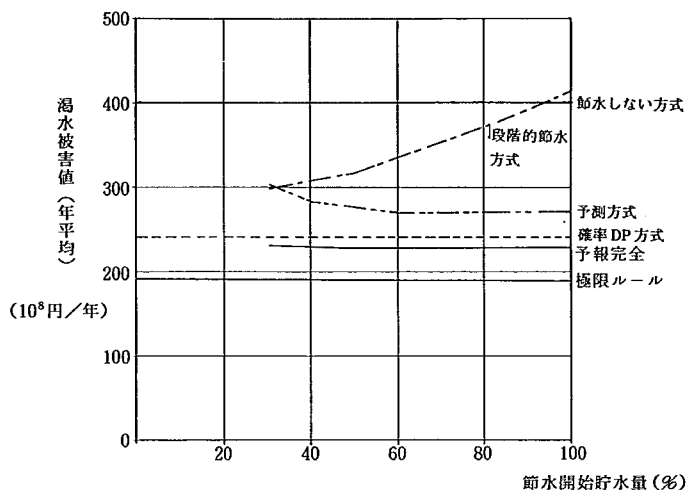


図-6.6.2 発生渇水被害額 (Bダム群)

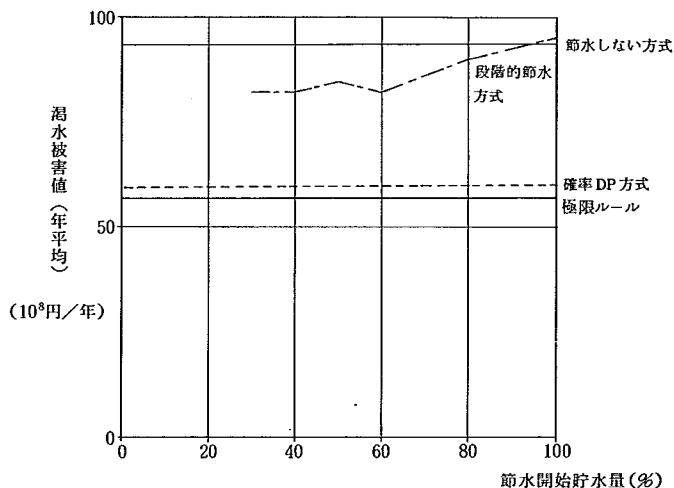


図-6.6.3 発生渇水被害額 (Cダム)

確率D. P. 方式では、被害額は約 60×10^8 円/年 となり、節水しない方式に対する被害軽減効果の比率は、約 33 % である。

以上の3ダムを対象として運用方式ごとの年平均洪水被害額を分析した結果から、次のことが言える。

洪水被害額を最小とする運用方式は、確率D. P. 方式であり、節水しない方式に対して約40%程度の被害額軽減効果がある。

段階的節水方式（3段階）では、節水開始貯水量を大きくすると節水運用の効果がなく、本研究で用いた3段階方式の場合、節水開始貯水量を利水容量の約30%とするのが、最も被害額を小さくする。節水しない方式に対する被害額軽減効果は、約 10%～25% である。

予測方式では、一応、節水しない方式に対して洪水被害軽減効果を有する。

以上の結果は、対象ダム、用水需要量、運用期間、洪水被害の評価法が異なれば、当然変わってくる可能性があるが、本研究で対象としたダムは利水安全度の比較的低いダムであり、運用期間も計画をこえる洪水が頻発する期間を選び、洪水被害評価の方法も洪水被害構造のマクロ的な特徴を反映していると考えられるので、異常洪水時の貯水池運用方式としての各運用方式の特徴をよく表していると考えられる。

(2) 各年発生洪水被害額

各運用方式と洪水被害額の各年発生値との関係を分析し、さらに詳しく運用方式の特性を調べる。

表一 6. 6. 2 は、各運用方式を採用したときの各年の（昭和 40 年～49 年）発生被害額をとりまとめた結果である。

Aダムでは、節水しない方式のとき、昭和 42 年に洪水被害額が最大で約 $1,300 \times 10^8$ 円となり、10 年の合計額の約40%を占めている。続いて、昭和 44 年、昭和 45 年、昭和 43 年、昭和 48 年の順に被害額が大きい。それ以外の年は、貯水容量が不足しないので被害は発生しない。

確率D. P. 方式では、節水しない方式に対して、昭和 42 年は約 40 %、昭和 43 年は 35 %、昭和 44 年は 86%、昭和 45 年は 44 % の洪水被害額を軽減しており、異常洪水のときに被害分散効果が大きいことがわかる。

段階的節水方式では、節水しない方式に対して、昭和 42 年は 6 %、昭和 43 年及び昭和 44 年は 44 %、昭和 45 年は 52 % 洪水被害額を軽減している。

予測方式では、昭和 43 年は洪水予測が遅れたため不足量のピークを過ぎてから節水したので、33 % 被害額を増大している。昭和 45 年は、洪水予測がうまくいったため、約 82% 被害額を減少している。

各年の発生被害額の累加曲線を図一 6. 6. 4 に示す。これから、確率D. P. 方式の被害軽減効果が最も大きく、かつ安定していることがわかる。段階的節水方式がこれについて効果的である。予測方式は、洪水予測がうまく行なわれたときは、洪水被害を小さくするが、全般に被害軽減効果は小さく、かつ、安定していない。

Bダム群では、節水しない方式のとき、昭和 43 年に最大約 $2,100 \times 10^8$ 円の被害額を生じている。これは、10 年間合計値の 53 % に当たる。その他、洪水被害額を発生しているのは、昭和 40 年、昭和 44 年、昭和 46 年である。

確率D. P. 方式では、昭和 43 年は、節水しない方式に対して、46%の被害額を軽減している。昭和 40 年は約 30 %、昭和 44 年は 25 %、昭和 46 年は約 60 % の被害額を軽減している。

段階的節水方式では、昭和 43 年は、50%の被害額を軽減し、昭和 40 年は初期貯水量が小さいため被害軽

表－6.6.2 各種節水方式による渇水被害額（年合計値）の比較

ダ ム 名 (計画利水容量)	昭 和 (年)	節水しない方式		確率 D.P. 方式		段階的節水方式		予 測 方 式	
		不足容量	年被害額	不足容量	年被害額	不足容量	年被害額	不足容量	年被害額
A ダ ム ($173 \times 10^6 \text{ m}^3$)	40	0	<u>0</u>	42.08	2,903.8	29.58	8,695.8	0	0
	41	0	<u>0</u>	26.78	1,148.7	0	0	0	0
	42	130.84	134,390.7	154.05	<u>81,478.4</u>	151.18	126,545.6	148.56	179,008.8
	43	56.82	54,997.2	82.43	35,990.4	58.62	<u>30,751.8</u>	39.10	31,718.2
	44	66.11	76,325.9	102.15	<u>18,606.9</u>	105.70	42,580.0	88.11	27,315.1
	45	62.63	60,341.6	71.99	33,520.5	61.33	29,260.1	46.94	<u>16,982.3</u>
	46	0	<u>0</u>	17.27	489.0	0	0	0	0
	47	0	<u>0</u>	29.28	3,475.7	0	0	0	0
	48	28.90	8,596.7	45.92	<u>4,673.7</u>	45.87	10,189.4	28.90	8,596.7
	49	0	<u>0</u>	13.92	344.5	0	0	0	0
	合 計	345.31	334,652.0	585.87	182,631.4	452.29	248,022.6	351.62	263,620.8
	節水開始 貯水率(%)	—		—		30		30	
B ダ ム 群 ($61 \times 10^6 \text{ m}^3$)	40	28.85	76,089.0	32.60	<u>54,465.6</u>	41.65	74,793.1	44.87	89,129.3
	41	0	<u>0</u>	6.19	732.5	3.66	1,145.5	6.06	1,635.0
	42	0	<u>0</u>	10.90	2,186.8	4.64	1,452.8	12.35	6,238.7
	43	66.71	212,619.8	54.29	115,352.7	64.02	106,483.6	57.74	<u>68,442.1</u>
	44	22.07	63,077.6	26.52	<u>47,314.6</u>	32.53	62,191.1	27.82	48,406.8
	45	0	<u>0</u>	5.11	423.1	0	0	0.88	210.5
	46	24.07	49,224.2	28.56	<u>18,459.1</u>	35.41	41,369.6	39.40	49,388.5
	47	0	<u>0</u>	5.10	419.8	0	0	0.86	94.9
	48	0	<u>0</u>	6.07	498.9	0	0	1.92	364.2
	49	0	<u>0</u>	8.36	1,347.4	15.87	10,444.2	16.56	7,570.4
	合 計	141.70	401,010.4	183.69	241,200.4	197.78	297,884.8	208.48	271,480.2
	節水開始 貯水率(%)	—		—		30		60	

注) ○単位：不足容量 ($\times 10^6 \text{ m}^3$)，年被害額 ($\times 10^6 \text{ 円}$)
 ○アンダーラインは各年における被害最小値

表-6.6.2 各種節水方式による洪水被害額（年合計値）の比較（続き）

ダ ム 名 (計画利水容量)	昭 和 (年)	節水しない方式		確率 D.P. 方式		段階的節水方式	
		不足容量	年被害額	不足容量	年被害額	不足容量	年被害額
C ダ ム (49.5×10 ⁶ m ³)	40	0.13	2.8	2.27	80.5	8.53	2,696.9
	41	0	0	1.08	13.4	0	0
	42	0	0	7.36	605.8	1.89	165.7
	43	35.79	19,629.6	31.47	15,203.1	38.96	16,281.8
	44	0	0	9.70	988.3	7.03	2,873.8
	45	36.78	35,193.4	29.27	22,239.0	34.54	29,501.9
	46	0	0	1.86	18.6	0.90	78.9
	47	0	0	1.21	35.4	0	0
	48	3.18	5,914.3	11.84	6,686.1	7.24	7,344.8
	49	25.64	32,376.2	19.09	13,320.7	25.31	22,764.9
	合 計	101.52	93,116.3	115.15	59,190.9	124.42	81,708.7
	節水開始 貯水率%	—		—		30	

注) ○単位：不足容量(×10⁶ m³)，年被害額(×10⁶円)
○アンダーラインは各年における被害最小値

減効果がなく、昭和44年及び昭和46年もあまり効果がない。

予測方式は、昭和43年は洪水予測がうまく行なわれたため、約70%の被害額軽減効果がある。昭和44年も23%の被害額を軽減するが、昭和46年は効果がなく、昭和40年は被害額を増大している。これは、昭和40年頃に洪水が発生したこのときは、予報が外れ、その後は長期予報に少雨予報が出される傾向が続き、昭和43年は予報を利用したことによって非常に大きな効果をあげたことを示している。

各年の発生被害額の累加曲線を図-6.6.5に示す。本ダムでも、確率D.P.方式が最大の被害軽減効果を示している。次に効果的なのは、予測方式であるが、これは昭和43年の被害軽減効果が大きいので、これだけでは必ずしも安定した方式とはいえない。段階的節水方式は、

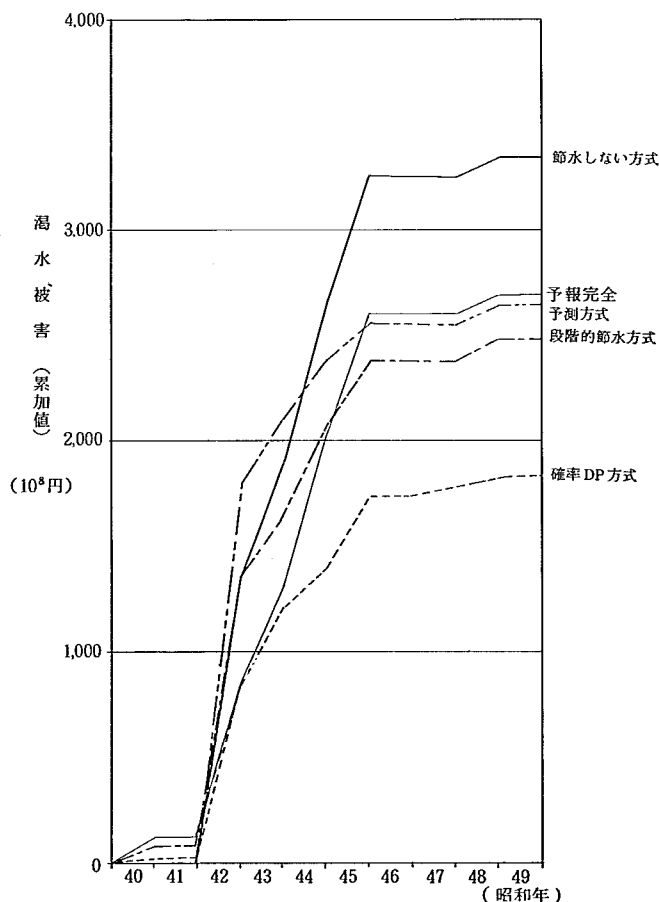


図-6.6.4 発生被害額（Aダム，累加値）

最も被害軽減効果が小さい。

Cダムでは、節水しない方式のとき、昭和45年に最大約 350×10^8 円の渇水被害額を発生しており、その他、昭和43年、昭和48年、昭和49年にも被害額が発生している。

確率D.P.方式では、節水しない方式に対して、昭和45年は約37%、昭和49年は約60%、昭和43年は約23%の渇水被害額を軽減している。逆に、昭和48年は、13%の被害額を増大している。

段階的節水方式では、昭和45年は16%の被害額を軽減している。昭和43年、昭和45年、昭和48年、昭和49年の各年とも確率D.P.方式よりも被害額は大きい。

図-6.6.6は、渇水被害額の累加曲線を示している。これから、確率D.P.方式が最も被害軽減効果の大きい運用方式であることがわかる。

(3) 渇水の大きさと渇水被害の関係

次に、渇水の大きさと、各運用方式を採用したときに発生する渇水被害額の関係进行分析する。

表-6.6.3は、各年の必要利水容量（渇水時、不足水量を補給するのに必要なダム容量）の最大値と、節水しない運用方式に対する他の運用方式（確率D.P.方式、段階的節水方式、及び予測方式の3方式）の各年渇水被害軽減額をとりまとめたものである。必要利水容量は、渇水の大きさを表わす量と考えた。本来ならば、1渇水の必要利水容量と、それに対応する期間に発生する被害額の関係进行分析すべきであるが、ここでは、便宜的に、年最大必要利水容量と渇水被害の年合計値の関係进行分析するものである。したがって、節水しない運用方式では、必要利水容量が計画利水容量よりも小さいときには、渇水被害額は発生しない。

本節の目的は、計画利水容量よりも大きな利水容量を必要とする渇水が発生したときに、各運用方式の渇水被害の軽減効果を分析することである。

図-6.6.7～図-6.6.9は、各ダムの年最大必要利水容量と対応する年の渇水被害軽減額の関係を図示したものである。計画利水容量を示す線よりも右側の領域が計画をこえる渇水が発生したことを表わしている。

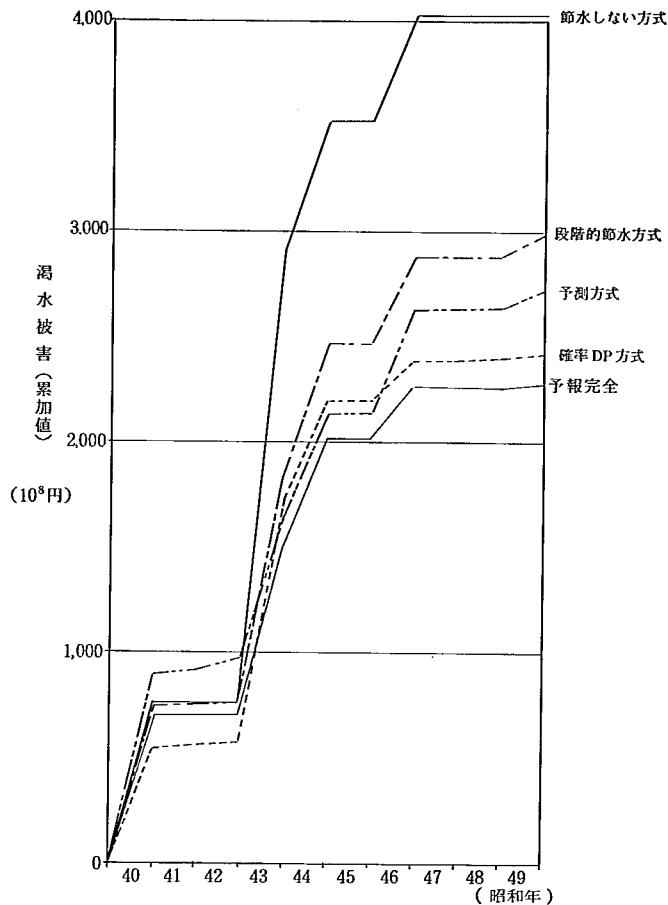


図-6.6.5 発生被害額（累加値，Bダム群）

各運用方式の特性をみると、確率D. P. 方式は、必要利水容量が計画利水容量よりも小さいときには、渇水被害は若干増大するが、必要利水容量が計画利水容量以上となる渇水に対しては、他の方式に比べて被害軽減効果が大きいことがわかる。

次に、計画利水容量を上まわる大きな渇水に対して被害軽減効果が大きいのは、段階的節水方式である。これは、確率D. P. 方式が流況の季節的変動特性及び渇水被害の期待値の最小化を評価基準として、月ごと、貯水量ごとに最適確保流量を求めているのに対して、段階的節水方式では、流況の季節変動を考慮せずに、豊水期の前も渇水期の前も貯水量が減少すると同じ節水を実施することになっているので、確率D. P. 方式よりも被害軽減効果が小さい（効率が悪い）。

予測方式は、長期予報から当

該ダムの長期的な予測雨量を求める方法が問題となるが、渇水予測がうまく行なわれたときには被害軽減効果が大きい反面、図-6.6.7に見られるように渇水予測が適確でないと渇水被害を増大する場合があるので、被害軽減を図る運用方式としては安定した方式ではない。

以上のことから、渇水時の貯水池運用方式としては、確率D. P. 方式が、長期間における渇水被害をできるだけ軽減するという意味において、適当であるといえる。

(4) 渇水被害の極小値

最後に、最も渇水被害を小さくする運用方式と被害額の極小値を考察する。

最も渇水被害を小さくする運用方式は、本研究で用いた被害関数の形のもとでは被害原単位を年間一定と仮定するとき、1渇水期間、すなわち、貯水池が満水のときから空になり再び貯留し始めるまでの期間を、同一節水率で運用を行なう方式であることは明らかである。したがって、1渇水の貯水池不足容量の用水需要量総量に対する百分率を節水率として、対象とする渇水期間を同一節水率で運用すればよいことになる。

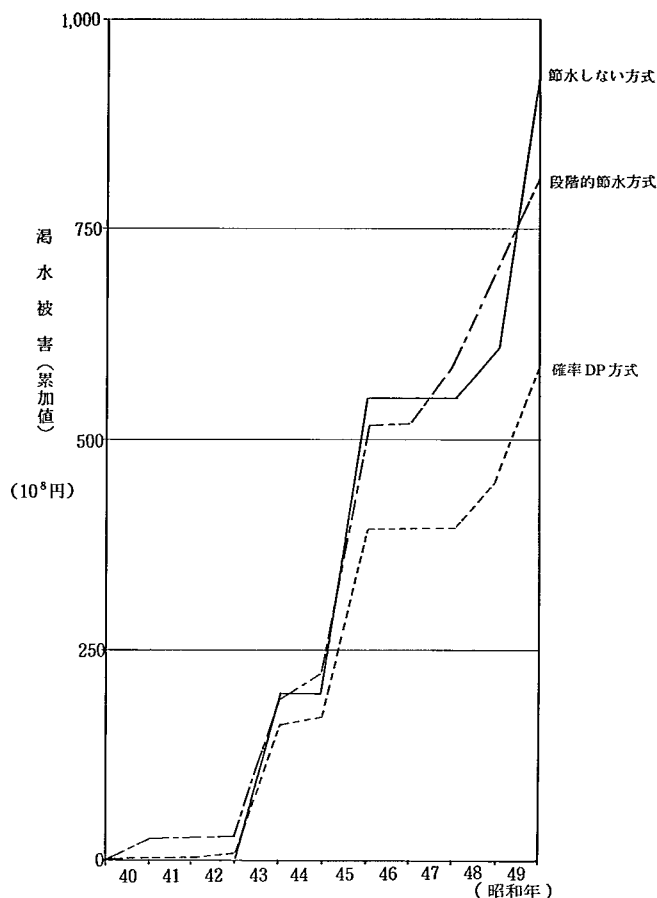


図-6.6.6 渇水被害額（累加値，Cダム）

表-6.6.3 渇水の大きさ(年最大必要利水容量)と渇水被害軽減額の関係

① Aダム(利水容量=173×10⁶m³)

年	必要利水容量(年最大)	被害軽減額(×10 ⁶ 円)		
	(×10 ⁶ m ³)	確率D.P.方式	段階的節水方式	予測方式
昭和 40	102.35	Δ 2,904	Δ 8,696	0
41	105.01	Δ 1,149	0	0
42	303.84	52,912	7,845	Δ44,618
43	229.82	19,007	24,245	23,279
44	239.11	57,719	33,746	49,011
45	235.63	26,821	31,082	43,359
46	81.04	Δ 489	0	0
47	49.28	Δ 3,476	0	0
48	201.90	3,923	Δ 1,593	0
49	53.42	Δ 345	0	0

② Bダム群(利水容量=61×10⁶m³)

年	必要利水容量(年最大)	被害軽減額(×10 ⁶ 円)		
	(×10 ⁶ m ³)	確率D.P.方式	段階的節水方式	予測方式
昭和 40	89.85	21,623	1,296	Δ13,040
41	16.32	Δ 733	Δ 1,146	Δ 1,635
42	38.97	Δ 2,187	Δ 1,453	Δ 6,239
43	127.71	97,267	106,131	144,178
44	83.07	15,763	887	14,671
45	14.66	Δ 423	0	Δ 211
46	85.07	30,765	7,855	164
47	32.68	Δ 420	0	Δ 95
48	28.54	Δ 499	0	Δ 364
49	25.81	Δ 1,347	Δ10,444	Δ 7,570

③ Cダム(利水容量=49.5×10⁶m³)

年	必要利水容量(年最大)	被害軽減額(×10 ⁶ 円)	
	(×10 ⁶ m ³)	確率D.P.方式	段階的節水方式
昭和 40	49.63	Δ 78	Δ 2,694
41	8.42	Δ 13	0
42	43.59	Δ 606	Δ 166
43	85.29	4,426	3,348
44	49.5	Δ 988	Δ 2,874
45	86.28	12,954	5,692
46	32.92	Δ 19	Δ 79
47	8.31	Δ 35	0
48	52.68	Δ 772	Δ 1,431
49	75.14	19,056	9,611

注) ○必要利水容量は、各年の最大値である。
 ○被害軽減額は、節水しない方式に対する被害軽減額である。
 ただし、Δは被害増加を表わす。

しかし、問題は、節水運用開始時点においては、流況を予測できないから、不足容量は不明であり、このような運用方式は実施しえず非現実的である。

そこで、ここでは、本章で検討を加えた4通りの運用方式から、各年において渇水被害額が最小となる方式を適切に選んで行ったときに発生する被害額を渇水被害の極小値と考える。各年において、被害額最小となる運用方式を選定する場合、貯水量が厳密には連続していないので、不合理であるが、各方式の各年の始めの貯水量は、ほぼ同一であるので、近似的に連続した貯水池運用シミュレーションとみなせる。

このようにして求めた渇水被害額の極小値の10年間平均値は、

Aダム 152.5×10^8 円/年

Bダム群 188.7 "

Cダム 56.7 "

となる。節水しない方式に対する被害額軽減率は、Aダム54%、Bダム群53%、Cダム39%となる。

したがって、渇水時の貯水池運用方式を“最も効率的に選定”したと仮定しても、約50%の渇水被害額は避けられないことになる。

これに対して、確率D.P.方式では、節水しない方式に対する渇水被害額軽減率は、Aダム45%、Bダム群40%、Cダム36%

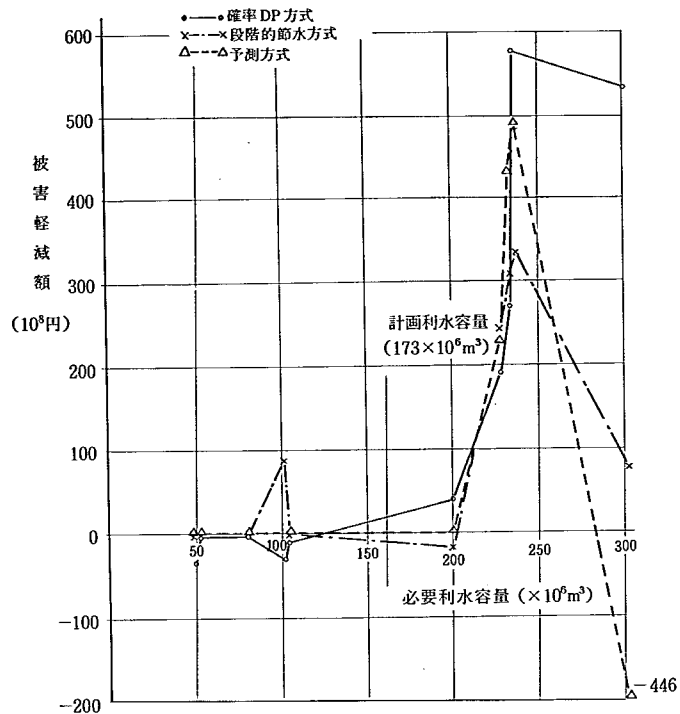


図-6.6.7 必要利水容量と渇水被害軽減額の関係 (Aダム)

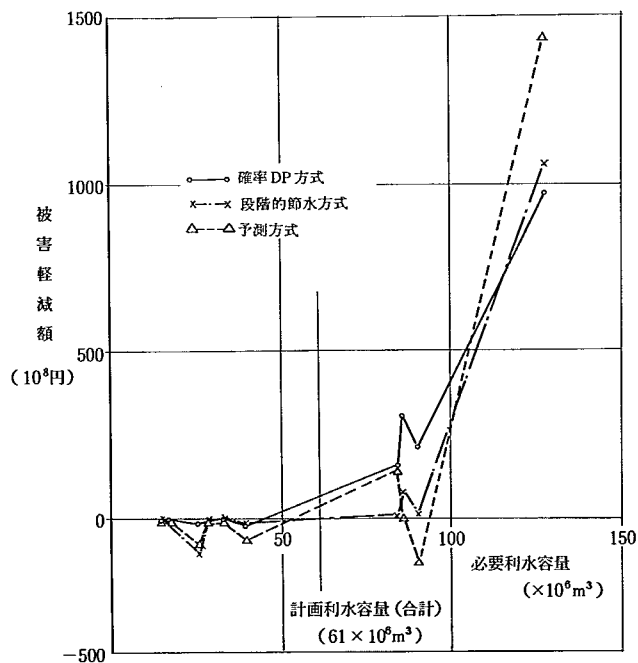
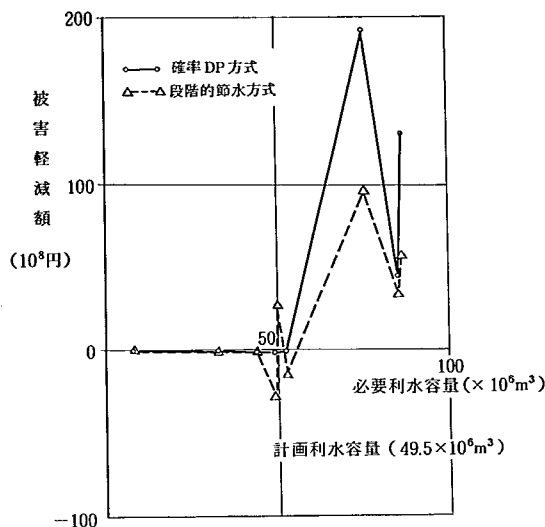


図-6.6.8 必要利水容量と渇水被害軽減額の関係 (Bダム群)

%となり、渇水時の貯水池運用方式として十分に効率的であることがわかる。

しかし、確率 D. P. 方式等の節水運用方式は、貯水池が空になる前に節水を行なうので、用水需要量（確保流量）に対する不足水量の1 渇水期間における総量は、節水しない運用方式をとる場合よりも増大することは明らかである。また、節水運用時には、貯水池空き容量（＝利水容量－貯水池残量）は小さくなるので、無効放流量は増大する。



図－6.6.9 必要利水容量と渇水被害軽減額の関係（Cダム）

第6章 貯水池の運用方式

要 約

本章では、渇水時の貯水池運用方式として基本的な3方式の特性を、貯水池運用シミュレーションを行なって分析し、どのような方式が最も適当であるか、考察した。

すなわち、第1章及び第4章で考察を加えたように、水資源開発がすみ河川の利用率が上昇すると渇水の危険度は、増大すること。つまり、計画をこえる渇水が発生したとき、ダム貯水池が空になると、流況が急激に低下するので、水資源開発の結果、大規模となった利水システムの機能がマヒするので、社会・経済的に大きなインパクトを与えることになる。したがって、このような異常事態が発生することがないように、渇水時の限られた水を効率的に使用することに貯水池運用の最適化の意義が存在する。

また、第5章では、渇水被害の構造分析の結果、節水率、すなわち、渇水強度が大きくなると、社会・経済的な影響・被害は、急激に増大するという結果を得、節水率と渇水被害の関係を計量化し、貯水池の渇水時の運用に対する評価関数を求めた。

以上の観点から、本章では、次のような分析を実施した。

6.1 では、貯水池運用方式の整理を行なった。

6.2 では、本章の分析を行なう対象ダム、利水モデル、対象とする渇水について概説した。

6.3 では、予測方式を対象ダムに適用し、その特徴を把握した。予測方式は、気象庁から発表される3ヵ月予報から長期的な予想雨量を求め、重回帰式によって3ヵ月先までの総流出量を予測して、節水率を決める方式である。この方式では、渇水がうまく予測されるときは、節水運用の効果が大きいですが、逆に、渇水を予測できないときは、効果がなく、あるいは逆効果となることがあり、種々の渇水に対して、安定した運用方式ではないことがわかった。

6.4 では、段階的節水方式として、貯水池残量が減少するに伴ない、節水率を高くする方式を対象ダム

に適用した。節水実施の段階数は、3段階とし、節大節水率は、貯水池が渇水時においても空にならないように決めた。節水開始貯水量は、あまり大きくすると、ふだんの水利用を抑制し、逆に小さくすると、大きな渇水が発生したときに効果がないので、渇水被害額を最小とするような貯水量とした。本方式は、節水開始、節水強化、節水緩和、節水解除の一連の渇水時対応を、貯水量のみから判断して行なうので、社会・経済的インパクトも小さくてすみ、また、種々の規模の渇水に対しても安定した効果をあげることができる。

6.5では、流況の季節変動の確率・統計的モデル化を行ない、渇水被害の期待値の最小化を評価基準として、渇水時の貯水池運用方式の“最適モデル”化を確率D.P.（ダイナミック・プログラミング）手法を用いて行なった。適当な計算条件のもとで得られた“最適解”は、おおむね、豊水期（4月～6月）、渇水期の前の豊水期（7月～10月）、渇水期（11月～3月）の各期における節水パターンの特性をよく表わし、渇水期の前の豊水期には、早目に節水して貯水池を温存するのが良いという結果を得た。対象ダムに適用した結果は、おおむね良好であった。

6.6では、5.3で提案した渇水被害原単位を使用して、各種の運用方式を採用したときの渇水被害額を算出し、運用方式の効果を定量的に比較分析した。

その結果、年平均発生被害額の小さい方式は、確率D.P.方式、段階的節水方式、予測方式、節水しない方式の順となる。また、各年発生被害額、及び渇水の大きさと渇水被害額の関係を比較したところ、確率D.P.方式は、大きな渇水に対して被害軽減効果が大きいことがわかり、これに次いで段階的節水方式が被害軽減効果がある。これは、段階的節水方式が、季節に関係なく貯水量だけで節水率を決めるので、効率のあまり良くない節水が発生するのに対して、確率D.P.方式では、流況の季節変動を考慮した段階的節水方式を月ごとに組合わせた形式を持つため効率的に節水を実施できるからである。

予測方式は、渇水ごとに節水の効果が変動し、安定した方式ではない。

以上のことから、渇水時の貯水池運用方式として確率D.P.方式が最も適当であることがわかり、このことから、流況及び水需要の季節変動を考慮した段階的節水方式の組合せが有効であることが推定できる。

しかしながら、ダム利水計画の規模を上まわる渇水時には、貯水池の最適運用を実施しても、なお、渇水被害を解消することはできないから、水資源開発が高度化し河川利用率が極限状態に近づいている現在、渇水が社会・経済に与える影響はますます大きくなっているため、今後、渇水予測手法の確立、利水者の渇水対応体制の確立、及び経年貯留ダム（渇水時の緊急補給用の備蓄ダム）等の渇水対策に関する研究をすすめていく必要がある。

第6章 参 考 文 献

- 1) 気象庁、降水量の長期予報、季節予報指針 上巻・第5章、1971.
- 2) 山中・中村、降雨の長期予報の貯水池管理への利用、土木技術資料 19-6、昭和52年6月
- 3) 建設省中国地建、水資源の高度開発と利水の安全性に関する研究、昭和52年
- 4) 稲田、貯水池群による淀川水系の最適洪水調節に関する研究、昭和51年
- 5) 竹内、貯水量の累加損失係数を用いた貯水池群の最適操作手法、土木学会論文報告集 No.222、昭和49年2月
- 6) 室田、神田、水量と供給信頼度を評価基準とする貯水池の流量調整機能の解析、土木学会論文報告

集 No 250, 昭和 51 年 6 月

- 7) 長尾, 貯水池をもつ河川の渇水確率について, 京都大学防災研究所年報 No 11, 1968.
- 8) 中村, 確率 DP を用いた貯水池の放流目標の決定法, 土木技術資料 18 - 8, 1976.
- 9) 鍋島, 動的計画法, 森北出版社, 1968.

第7章 水資源計画における地下水の役割

地下水は前に述べたように水循環の一過程を形成している。この過程を水文学的に正しく認識して再生の範囲内で利用するならば地下水を涸渇させることなく永久に使用できる。

使用する場所を適当に選べば地盤沈下等の障害を発生させないで利用することが出来る。

このような意味でこれまでの地下水はその利用の方法が適当と言えなかった。さらに現在の地下水利用のもう1つの問題は、それが河川水とは別個に単独に利用されていて「貯留」という最も有効な特性が生かされていないという点にある。河川水は循環性の資源であって永久に使用できる点が魅力であるが、流量の変動が大きくて常に渇水の危険がある。この渇水の危険は地下水によって補うことが出来る。更に発展させて、地下水のかん養を人工的に強化することが出来れば更に新しい地下水利用の方式が生れる。

それでは水資源計画の中で望ましい地下水の利用方法はどのようなものであろうか。著者は次の3点であると考える。

すなわち

- ① 河川開発における貯水池の役割の補完
- ② 水資源計画における計画対象渇水を上まわる渇水（異常渇水）の対策
- ③ 当面の水資源問題を乗切するための緊急対策

7.1 河川開発の手段としての貯水池の補完

ダムによる水資源開発の原理については既に詳しく説明した通りであるが、一般に河川の利用率が小さい段階では単位水量の開発のために必要な貯水池容量は小さくて済むが、利用率が次第に高まってくると必要な貯水池容量は次第に大きくなる。すなわち開発効率が低下する。更に利用できるダムのサイトは地形的にも社会的にも適地が少なくなるので水資源の開発は利用率の上昇に伴って加速度的に難しくなっていく。とくに我国の場合は地形的に見て大容量の貯水池の数は限られているので、ダムのみによって水資源の開発をすすめて行くことが困難である。

一方地下水の存在する地下の帯水層は、地域によってその性質は異なるが、一般に地下水の流動速度はそれほど大きくないので本来ストックとしての性格を有していると見ることが出来る。もし帯水層への水のかん養及び取水が技術的に可能になれば、地下帯水層を貯水池と想定することができる。その結果、地上貯水池と同じように河川水の変動を調節して水資源開発の役割を担うことが出来るはずである。このような考えから検討を進めているのが「地下貯水池」構想である。この場合に地上の貯水池と地下貯水池は、貯留機能の量的概念の点では両者は共通しているが、貯留機能の質においては両者の性質は隔絶しており互いに補完し合うことが予想される。

すなわち

- i) 地上貯水池：水の出し入れが容易。河川水は自動的に貯水され、ゲートを開くと流出する。

容量が小さい。貯水量は我が国の場合、雨量換算で数10^{mm}位。

- ii) 地下貯水池：水の出し入れが難しい。注入には池等の施設が必要。

容量は大きい。地上ダムの数倍の容量をもつ帯水層は沢山ある。

これを電子計算機の容量に例えれば地上ダムはコアメモリに、地下貯水池は磁気テープやディスクに擬せられるであろう。

このように地下水は地上貯水池を助けて水資源の開発に寄与することが期待される。とくに河川の利用率が高まった時点で、その役割が大きくなろう。地下貯水池構想については以下の章において詳しく説明する。

7.2 水資源計画における異常渇水対策

前章で論じられたように河川水の開発水量の推算は我国の場合、10年1回程度の基準渇水年を対象として必要なダムの容量が計算される方式をとっている。このことは逆に言えば10年1回程度より厳しい渇水状況が生じたときは、貯水池の容量に不足を来すことを想定しているわけである。これは変動する外力を対象とする計画作成には常につきまとう問題である。すなわち事物の計画は大きければ良いというものではなく、経済性にも配慮した上で計画値或いは設計値を決めることになる。計画の範囲を超える外力（超過外力と呼ばれる。この場合は異常渇水）が出現したときは止むを得ないものとして便益の減少に耐えたり、最小限の対策（この場合は渇水対策）を行う。具体的には前章で述べたような節水や渇水対策が相当する。地下水はこの渇水対策の一部として大きな役割を担うことが出来る。

以上は当然予想される超過外力としての異常渇水であるが、この他に超過外力を発生させるもう一つの原因として確率渇水年の選定の方法があげられる。すなわち10年1回程度発生する確率の渇水年を選ぶにあたって過去の10年～20年程度の流況資料から基準渇水年が選ばれることが多いが、この方式は、推計の誤差を大きく含む可能性がある。図-7.1は 浜口氏が計算した利水容量推定の信頼度である。¹⁾計算の対象とした河川では流量資料が56年分整備されていたのでこれを全て用いて推定した1/10確率の利水容量を仮想真値と考え、次に流量資料のうち10年分、20年分、30年分、40年分を使って同様に1/10確率の利水容量を推定した。図-7.1によれば仮想真値が251MSDであるのに対し10年分資料からの

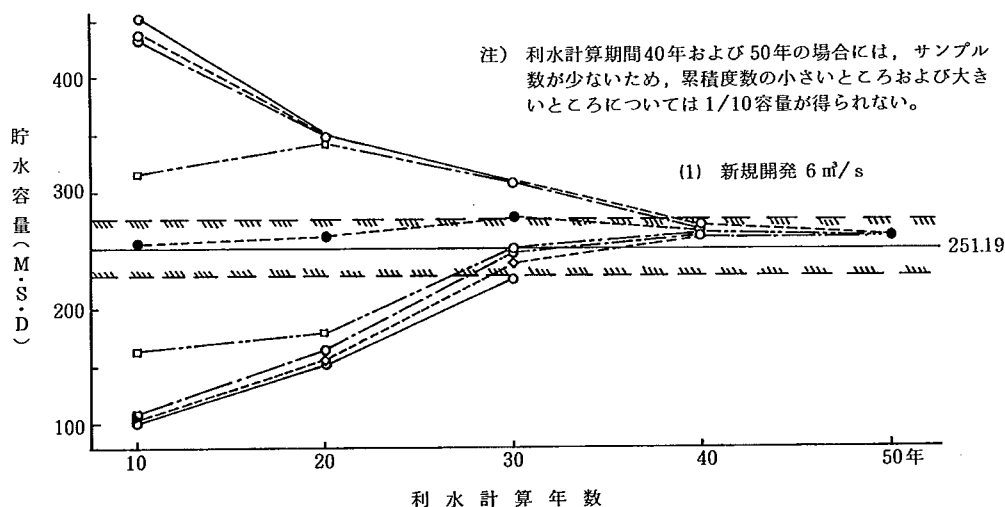


図-7.1

推定では、100～450MSD、30年分資料を使っても220～320MSDと予想以上に大きくバラツクことがわかる。(なおMSDとは容量を示す単位の一つで、毎秒1 m^3 の水を1日補給できる容量を示す)すなわち1/10確率の利水容量の推計は、10年分資料からの推定では60%、20年分の資料からでは40%程度の誤差を含む可能性のあることがわかる。

我国の場合、流量資料の少ない河川は多いので、どうしても推計誤差が大きくなることは避けられず、河川によっては渇水発生の実際の頻度はかなり大きなものになる。推計の誤差の対策の1つとして、ダムに容量に余裕を持たすことも考えられるが、上に述べたように誤差の中がかなり大きいのでこれだけの余裕を見込めば、開発水量が小さくなってしまい経済性の面も考えると得策とは思われない。そこでこのような誤差は仕方のないものと考え、計画外の渇水に対して別途方策を用意するということが考えられる。

その方策として、地下水利用が効果的と思われるのである。ここでごく大まかな目安を得る目的で上記のような、異常渇水に対する渇水対策としての地下水の効果を概算してみよう。

推計誤差の大きさは対象河川の変動特性・資料数によって変化すると思われるが、ここではとりあえず貯水池容量の30%程度と想定することにする。水資源開発に必要な貯水池容量は河川によって異なるが、大よその目安としては2章3節表-12に見られるように我国の場合、

$$\text{利 用 率} \begin{Bmatrix} 40\% \\ 60\% \\ 80\% \end{Bmatrix} \text{ で 年 流 出 量 の } \begin{Bmatrix} 6\% \sim 10\% \\ 10\% \sim 20\% \\ 20\% \sim 60\% \end{Bmatrix}$$

従って、確率推計に伴う必要貯水池容量の誤差は大よそ、

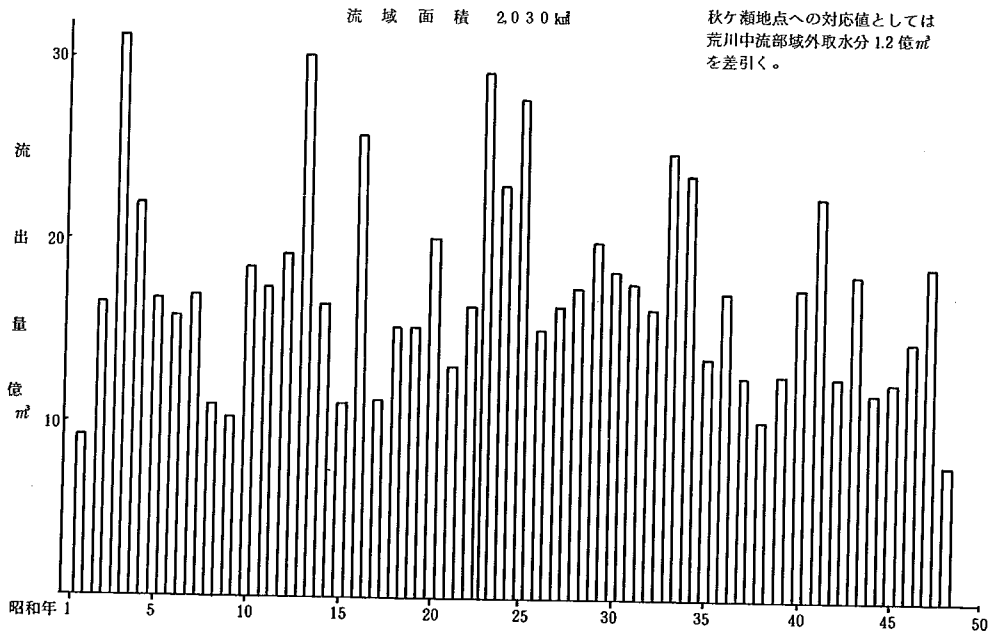


図-7.2 荒川年次別年流出量

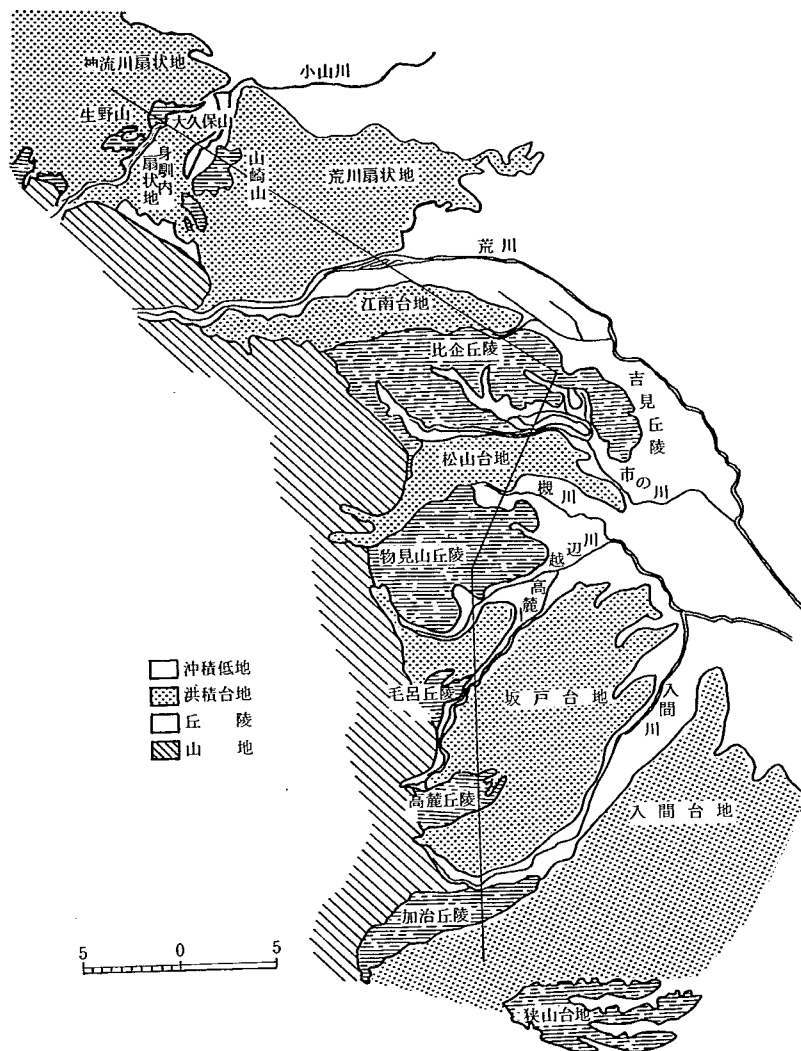


図-7.3 荒川流域における洪積台地の分布
(関東地建：関東地域地下水調査報告書 52. 3)

利 用 率	40%	2%～3%	程度となることがわかる。
	60%	3%～6%	
	80%	6%～18%	

いま荒川を例にとると、秋ヶ瀬地点の10年1回程度の渇水年の総流出量は約10億トンと想定されてい

るので、必要貯水池容量の誤差は、

$$\text{利 用 率} \left\{ \begin{array}{ll} 40\% & 20\% \sim 30\% \\ 60\% & 30\% \sim 60\% \\ 80\% & 60\% \sim 180\% \end{array} \right\} \times 10^6 \text{ m}^3 \quad \text{程度となり、}$$

決して小さなものではなく、とくに開発が進むにつれて大きくなることがわかる。

次に、10年に1回をこえる渇水時における河川水の不足量について考えてみよう。

図-7.2は降雨量から推計した荒川秋ヶ瀬地点の年流出量である。河川水の不足量は河川利用の程度によって異なるはずだが、ここでは簡単のため河川水の利用率100%の時点を想定して、年流出量によって不足量を想定する。これによると昭和元年から48年に至る過去48年間中の最小渇水年は昭和48年で、年流出量は640,000,000 m^3 である。一方10年1回の年流出量は先に述べた如く1,000,000,000 m^3 であるから、この場合の不足量は360,000,000 m^3 ということになる。

次に上記のような貯水池容量又は水量の不足が地下水によって補えるかどうかを概略検討してみよう。

地下水を利用するにあたっては、①利用後の回復のためのかん養が容易であること。②地下水位の変動に伴って地盤沈下障害を発生させないことの2条件が不可欠と思われる。礫から構成される不圧帯水層はこのような条件を満すものと考えられ、いま、このような条件をもつ不圧帯水層を荒川流域において探してみると、図-7.3において洪積台地と分類される地域がこれに該当する。その大きさは大よそ250 km^2 である。その容量を算出するには詳細な調査が必要であるが、仮に深さ10m分の地下水利用を考えると、貯留係数を0.2としても全体で約500,000,000 m^3 にもものぼることが推定される。これは先に推定した推計に伴う貯水池容量の不足(200,000,000 $\text{m}^3 \sim 180,000,000\text{m}^3$)や異常渇水年の流出量の不足(360,000,000 m^3)を十分に補える容量である。

以上は対象河川を荒川に限っての非常に大まかな検討であるが、一般化することは無理としても、地域によっては地下水が河川水の渇水を補うに足る大きな能力を有していることが推定されよう。

7.3 当面の水需給ひっ迫を乗切る緊急対策としての地下水

前2項で水資源計画の中で望ましい地下水の役割を考えたが、現実の地下水利用は主として深層地下水の過剰汲上げであって望ましい姿ではない。従って一刻も早く河川水等に転換すべきであるが、実際には転換の速度はおそい。暫定的に豊水水利権で対処しようとしていることは既に述べたとおりである。例を関東地方について考えてみよう。

関東地方の地下水使用量は最近は年間4,000 $\times 10^6 \text{ m}^3$ 程度であるが、このうち昭和60年までに可能な地下水の河川水への転換は年間1,000 $\times 10^6 \text{ m}^3$ 程度であり、少なくとも今後10年位の間には問題が解決する見通しが無い。一方、水需給のひっ迫も次第に厳しいものとなりつつある。すなわち、水資源の計画は主として昭和60年時点で需給を想定しているが、昭和60年に至る中間年次においては需要が伸びるのに対し、供給側は途中年次ではそれほど増大せず、昭和60年近くで供給が急に増大する計画となっており、中間年次では水需給のギャップが大きい。この中だるみの現象のため、昭和60年に至る中間年次において河川流況が悪いき渇水が発生する恐れが少なくない。更に、ダム等の水資源開発施設の建設も全体として遅れ気味になっており、昭和60年に予定通り完成しない施設も出ることが予想される。

以上のような事情を考えると現在の地下水利用は望ましくはないが、これを直ちに中止することは殆ん

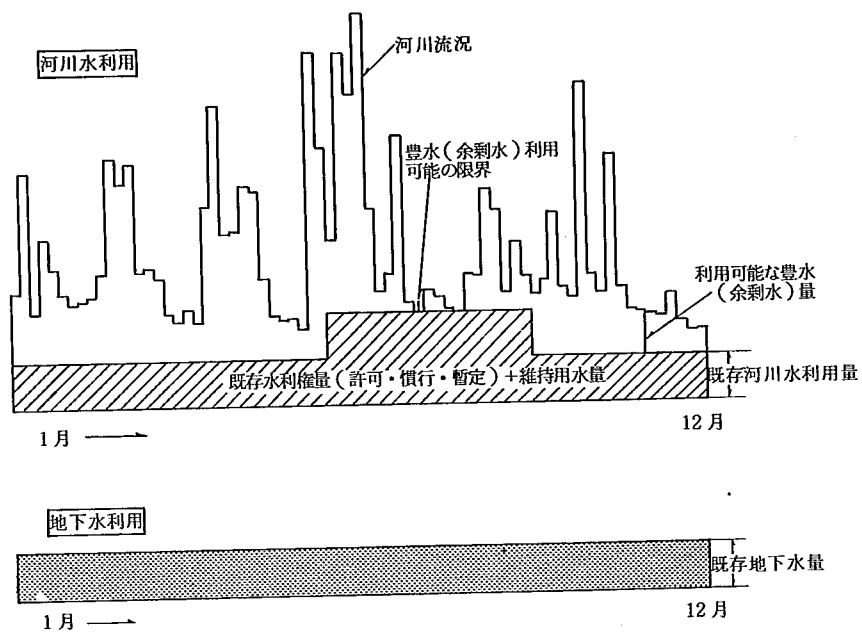


図-7.4 河川水と地下水の独立利用(現状)

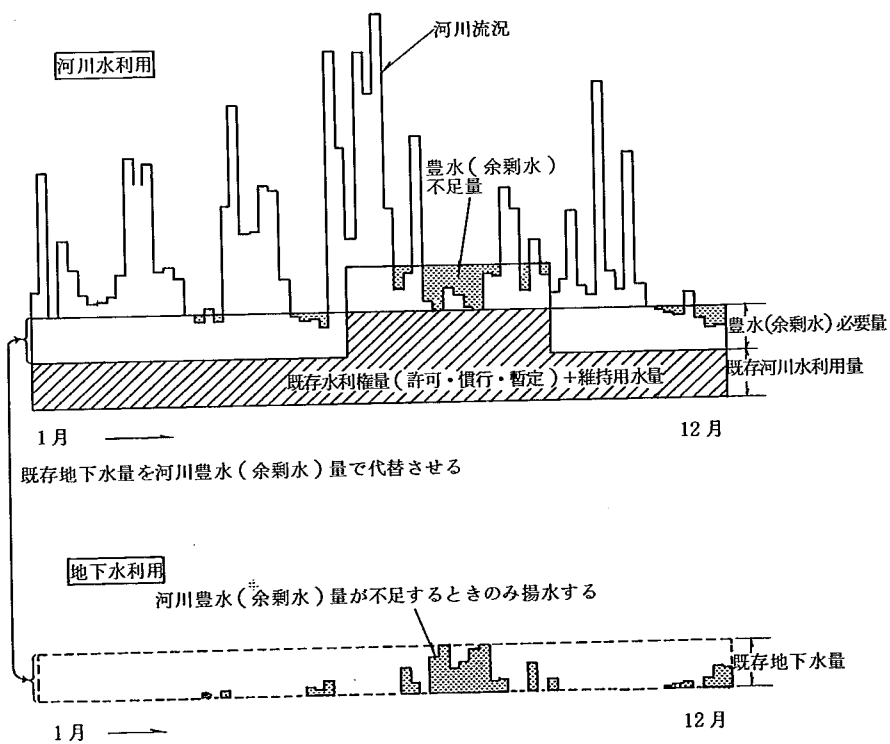


図-7.5 既存の地下水利用量を豊水(余剰水)で代替させる場合

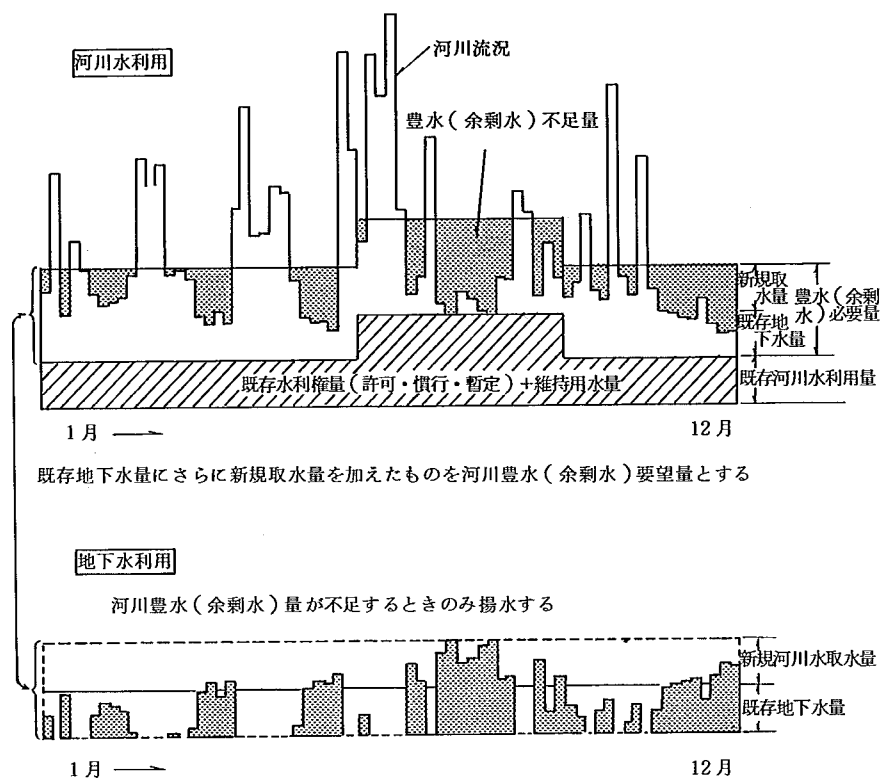


図-7.6 既存地下水利用量のほかに新規取水分を加えたものを豊水(余剰水)でまかなう場合

ど不可能で、水需給のひっ迫を考えると更に使用量が増大する可能性さえある。このため現在の地下水利用を現実として認めた上で、少しでもこれを減少させる方法を考える事は無意味ではあるまい。更に、実際に渇水が生じたときは緊急手段として現実の地下水利用に頼ることも止むを得ないかも知れない。

このような考え方において、現時点における河川水と地下水の連結利用が考えられる。

既に述べた如く、河川水には利用されずに海域に無効流出する水量が相当量ある。これは豊水と呼ばれている。豊水は量は大きいが日々の変動が激しく安定的な水源とはなりえない。そこでまず、この豊水と地下水とを連結利用する。すなわち、通常は地下水として利用している水量を豊水によって代替し、豊水が利用できないときだけ地下水を使用する。(図-7.4, 7.5, 7.6 参照)このようにして、通常は河川水を地下水の代替として使用し、地下水を温存しておくが、一たん河川水の流況が悪化したときの渇水への補給水として地下水を使用するのである。

このようにして、地下水の揚水量を増大させずに、場合によっては一部減少させながら、全体として供給量を増大させることが可能である。この方式を狭い意味での河川水と地下水の連結利用と呼ぶが詳細については後章で説明することとする。

第8章では地下貯水池による水資源の開発について説明する。

第9章では狭い意味での河川水と地下水の連結利用について説明する。

第7章 水資源計画における地下水の役割

要 約

地下水はこれまで地表水と切離されて、独立に利用されて来た。しかし地下水の「貯留」という性質は地表水の「変動」という性質を補うことが出来るので両者を一体化することにより安定した水資源計画が可能になる。本章ではこのような観点から地下水の役割を

- ① 地上貯水池の補完として
 - ② 異常渇水時の渇水対策として
 - ③ 当面の水需給ひっ迫を乗切するための緊急対策として
- の3側面から原理的な考察を行った。

このうち②異常渇水時の渇水対策としての地下水の役割については概略の量的検討を行い、地下水利用が効果的であることを示した。

- ① ③については次章以下で説明される。

第7章 参 考 文 献

- 1) 浜口達男「利水の安全度からみた貯水池容量の決定方法に関する考察」建設省技術研究会（昭和52年度）

第8章 地下貯水池による水資源開発

地下貯水池とは、前節で説明した如く地下の帯水層を利用して水を貯留することによって、河川の流況を平滑化して水資源を開発するシステムであるが、本章では埼玉県荒川扇状地を想定してのケーススタディについて、計画面に重点をおいてその概要を説明する。

8.1 地下貯水池のサイトと運用

1 地下貯水池サイトの要件

地下貯水池のサイトとしての帯水層の条件は前述した如く、①涵養が容易であること、②地下水位の変動に伴って大きな障害が発生しないことの2条件が考えられる。

①の条件を満たすものとしては砂礫層であろう。砂礫層は透水係数が大きい。このため水の平面方向の移動が容易である。砂礫層の他に石灰岩等も空隙が大きい場合は貯水池に適する。農林水産省が宮古島で調査中の地下ダムは造礁石灰岩を利用することを考えている。

次に②の条件を満たす上で最も問題となるのは粘土層の存在である。礫層の上部に圧密されやすい粘土層が厚く存在する場合は地盤沈下のおそれがある。

以上のような意味から礫で構成される不圧帯水層が地下貯水池としての条件にかなうと考えられ、荒川左岸扇状地はこのような条件に合致する。

2 荒川扇状地の地形と地下水流動

荒川扇状地は寄居町を扇頂とする半径約10km、標高35～100mで約90°の角度で広がる旧扇状地であって、櫛引台地とも呼ばれている。地形勾配は約1/200程度で平坦であるが、従来は水利にめぐまれず、畑作・桑園に利用されていたが、昭和30年頃にかんがい排水事業が実施され、最大7m/sの用水が荒川から導水され現在までに約7㎐が開田されている。

この地域の地形概念図は図-8.1のようである。地表に厚さ2～3m程度のロームが分布し、この下に砂礫層が5～30m程度の厚さで堆積している。砂礫層の下部は粘土層に続いているが、その下部にはさらに砂礫層が存在することが確められている。地下貯水池としての利用が考えられるのは上部の不圧砂礫帯水層であって、現在その分布及び厚さを調査している。

図-8.1は地下水面の位置も示している。全般に地表近く存在しているが、水田へ

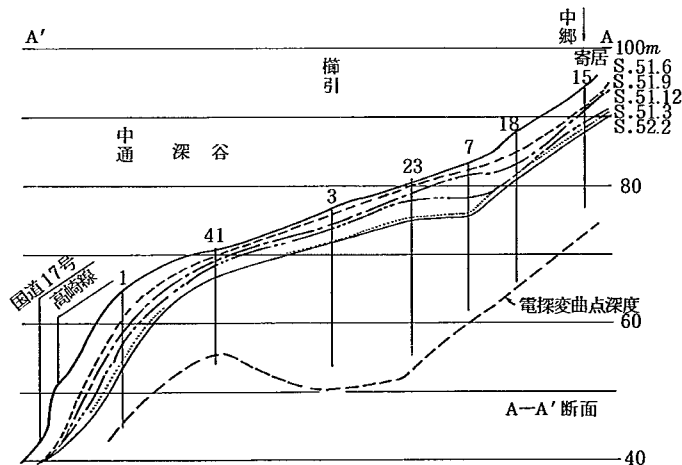


図-8.1 地形概念図

のかんがいの始まる前(3月)とかんがい期(6月)とを比較すると後者の方が2~3m程度高くなっていることがわかる。

図-8.2はこの扇状地内のいくつかの浅井戸の水位変化を示したもので、一年間を周期として地下水位の上下の変化がくりかえされていることがわかる。添付平面図においてNa1, 3, 7地点は砂礫層厚さが大きく、地下水変化も大きい。これに対してNa4, Na5, Na8地点は砂礫層厚さが小さく、そのためか地下水位変化も小さい。

帯水層の透水係数はこれまでの調査によると表-8.1に示す通りで、地下貯水池として利用しようとする扇状地の浅層地下水についての資料は1例しかないが、 10^{-2} (cm/s)より大きいオーダーであることが推定される。

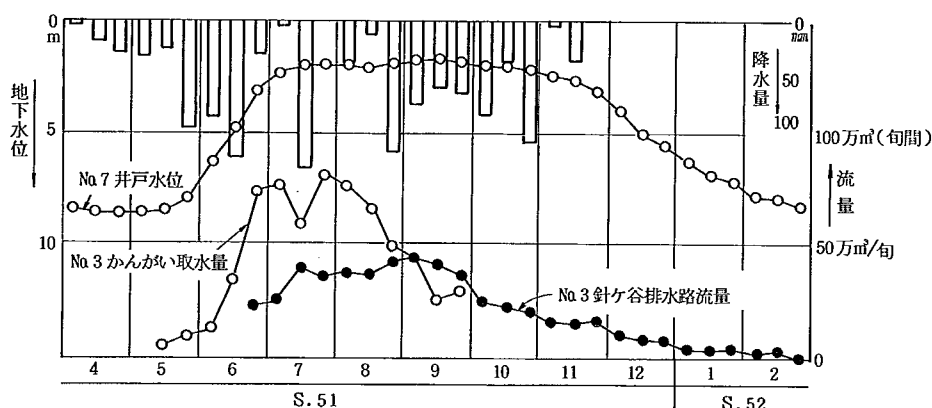


図-8.2 降水量, 井戸水位, 排水路流量, かんがい取水量関係グラフ

表-8.1 深谷地区揚水試験結果一覧

位置 番号	井戸名または 所 有 者	透水量係数 (m^3/day) (m^3/sec)		透水係数 (m/sec)	貯 留 係 数	ストレーナー位置(m)	解 析 法
15	深谷簡易水道	293.8	3.40×10^1	1.2×10^{-2}	0.226	48~75.5	タイス
49	西部第1水源井	1476.6	1.71×10^2	4.2×10^{-2}		77~101, 112~120, 137~145	ヤコブ
50	西部第6水源井	2660.5					ヤコブ
53	東部浄水場Na3	1318.0	1.53×10^2	1.09×10^{-1}		5~8, 9~20	回復(浅井戸)

(国土地理院 1977 による)

岡部町導引観測井(土木研究所)

1	20 m #	257.5	2.98×10^{-3}	5.95×10^{-2}	-	5.5~11.0 (有効長 5.0 m)	平衡式
2	40 m #	2.55	2.95×10^{-5}	2.95×10^{-4}	-	30.0~41.0 (有効長 10.0 m)	タイス, ヤコブ

注) 透水係数は透水量係数をストレーナー長で割って求めてある。

3 地下貯水池の運用

地下貯水池は地下帯水層の貯水能力を活用して水資源の開発を行うものであるが、地下水は貯留としての性質の他に流れとしての性質も有している。すなわち、帯水層の透水係数が大きく、地下水面の勾配があるときは相当量の移動が考えられる。従って、貯留した水もその一部は下流側に流失することは避けられない。

一方、地下貯水池のサイトでは、その地表で人間が生活したり農業を営んでいたりするので、地下水位の変動が地下環境にどのように影響するかを事前に予測しておく必要があるが、それにはまず、貯水池の運用に伴う地下水の動きを予測しなければならない。

ここで地下貯水池の特性を明確化するため、矩形のモデル領域を設定して2次元非定常地下水流の式を差分化して、シミュレーションを実施した。

i) 計算の基礎式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = s \frac{\partial h}{\partial t} + w(x, y, t) \quad \dots\dots\dots (8.1)$$

ここに k_{xx} : x 軸方向の透水係数, k_{yy} : y 軸方向の透水係数, h : 水頭, s : 貯留係数, w : 単位面積当りの揚水量, t : 時間。

なお帯水層基盤が勾配 I を有するときは次式を用いる。

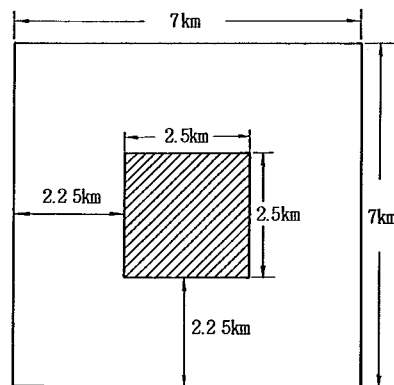
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + I k_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} = s \frac{\partial h}{\partial t} + w(x, y, z) \quad \dots\dots\dots (8.2)$$

ii) 計算方法

式(8.1)(若しくは式(8.2))を差分法により離散化し、ADI法(Alternating Direction Implicit method)によって数値解を求める。

iii) 計算の領域と条件

計算領域	7 km × 7 km
揚水層厚	15 m
計算間隔(Δx)	100 m
計算時間間隔	1 日
揚水領域	説明図中央 斜線部 (2.5 km × 2.5 km)
帯水層の勾配	なし
透水量係数	0.05 cm/s
貯留係数	0.2
揚水量	揚水区域(2.5 × 2.5 km) 全体で 1.0 m ³ /s
境界条件	$\left\{ \begin{array}{l} \text{上流側では水位一定} \\ \text{下流側では } \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \end{array} \right.$



計算および揚水領域説明図

なお、雨水のかん養、河川への流出は考えない。

図-8.3は、図中に示めされる計算条件の基で揚水期間30日、90日、180日と連続して揚水を行なった場合の地下水位を図示したもので、この図からは、地下水位の低下の様子や、境界条件の影響が読みとれる。

図-8.4は揚水を停止して放置した場合の地下水位の変化である。

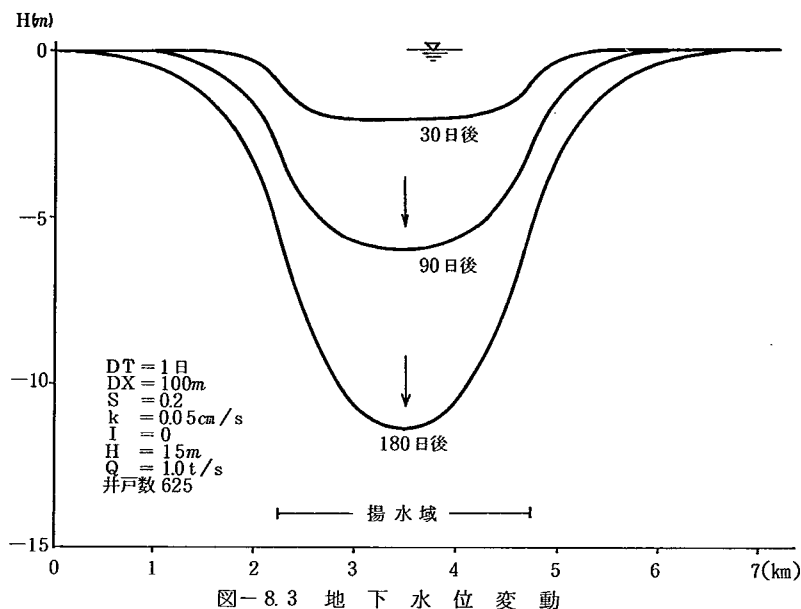


図-8.3 地下水位変動

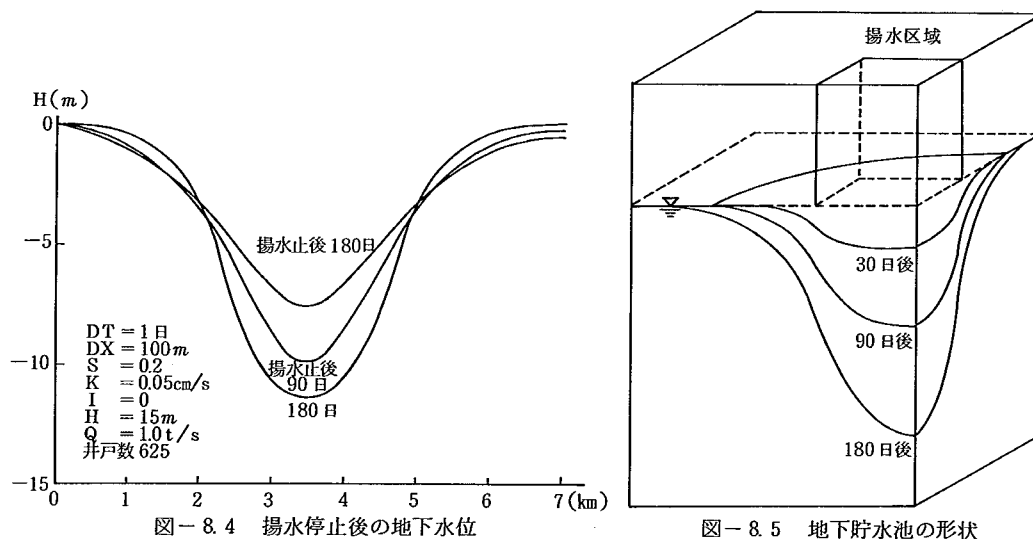


図-8.4 揚水停止後の地下水位

図-8.5 地下貯水池の形状

図-8.5は立体的に図示したものである。

揚水域の中央では、地下水位の低下は揚水期間にほぼ比例して進行するが、全体の地下水面形は揚水期間によってかなり異なる。揚水開始後30日ではナベ底のような形状をしているが、揚水期間が増すとスリパチ型に変化する。これは揚水区域へ周辺からの地下水が流入してくるためである。揚水を停止すると地下水位の低下の大きい区域では、水位の上昇がはじまる。これも周辺から地下水が流入してくるためである。周辺からの地下水流入は透水係数によって異なる。

図-8.6は、透水係数を変化させたときの地下水面形の変化を示したものである。

透水係数が0.01程度のときは、水面形変化の影響は遠くには及ばない。

次に帯水層基盤が傾斜している場合の地下水水面形変化について考えてみよう。

地下貯水池の対象となる扇状地や丘陵では1/500～1/100程度の勾配を有することが多い。

図-8.7は、帯水層基盤が1/100の勾配を有する場合の地下水水面形の変化を示すものである。これを見ると、この程度の勾配があっても、地下水水面形の変化は勾配がないときと殆んど同じになることがわかる。

以上は、地下貯水池のイメージを明確化するために実施したシミュレーションであるが、一般に透水係数が0.05 cm/sとかなり大きい場合でも地下水水面形の変化はゆるやかであり、その性質は基盤が勾配を有する場合でも、大きな変化はないことが理解できる。

8.2 地下貯水池による水資源開発水量

地下貯水池による河川開発の原理は、地上の貯水池と同じであるが、特定の流況を与えられたときの開発可能水量が地上の貯水池の場合には、貯水池容量のみによって定まるのに対し、地下貯水池の場合には貯水池容量とかん養施設の能力の両者によって定まる。

以下における検討は、地下貯水池の位置としては荒川左岸扇状地、河川としては荒川を考えて実施したものである。

1 開発水量の計算方法

ケーススタディを実施している荒川扇状地は、荒川が平地部に出る寄居から下流側に展開している。扇状地には、寄居地点で取水された農業用水が配水されている(図-8.8)。

荒川扇状地の地下帯水層を地下貯水池として利用する場合、取水又は補給を行う河川との連結地点は地理的に見て寄居地点が最も容易であるため、開発水量の計算は寄居地点を対象に行う。使用する資料は、建設省流量年表とし、昭和30年～48年のうち資料欠測の多い昭和43年を除く18年間を検討の対象期

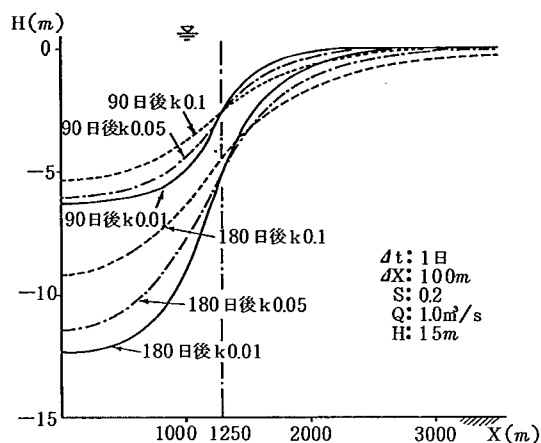


図-8.6 透水係数異なる場合の地下水変動

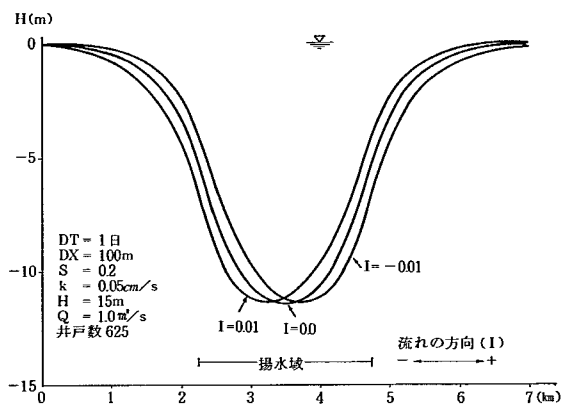


図-8.7 帯水層基盤の傾斜による地下水位の変動

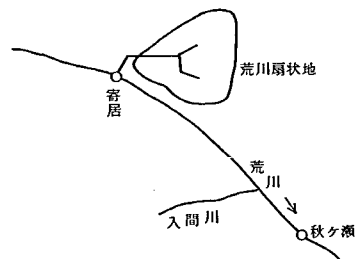


図-8.8 計算の対象地点

間とする。この間の流況を半月毎に整理すると、表-8.2、図-8.9のようである。

表-8.2 半月流量資料 (t/s)

月 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	13.15
	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							

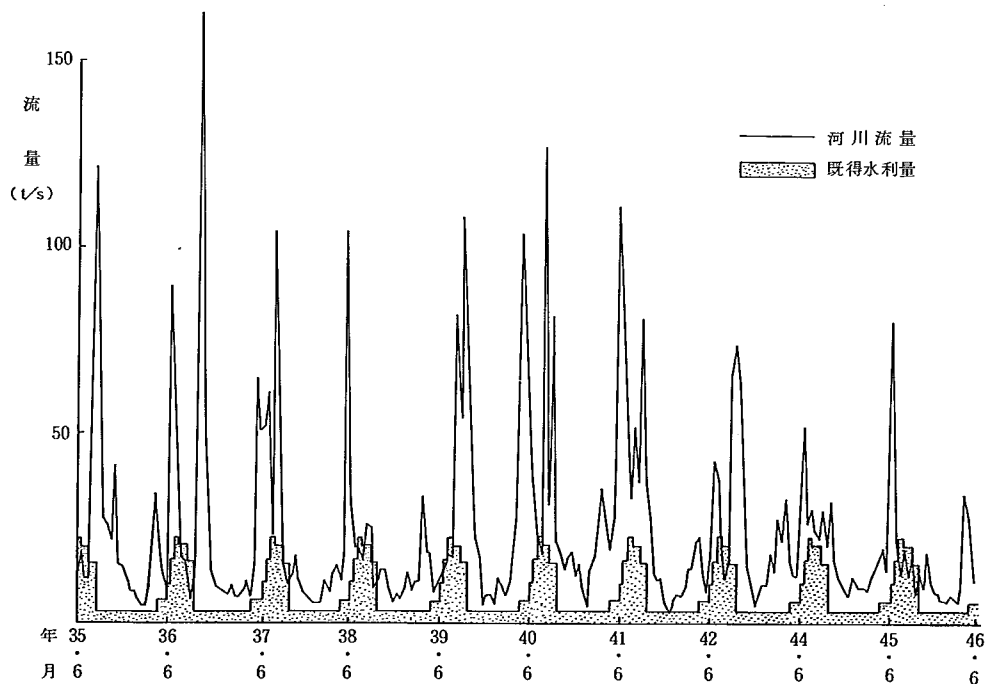


図-8.9 流況及び既得水量

開発水量の算定

一般の地上貯水池の場合には、基準渇水年である1年間を対象として、現時点での余剰水（豊水）を貯留操作して新たに常時取水が可能となる水量のことを開発水量という。この場合1年後には貯水池水位がもとに復することが必要である。

地下貯水池の場合には計算対象期間をもっと大きくする必要がある。なぜならば、先に述べたように地下貯水池の容量は地上貯水池のそれに比べて一般にかなり大きいからである。もっと具体的に言えば、地上貯水池の役割は1年間の中で河川流況の変動を調節することが多いのに対し、地下貯水池の場合には1年間の流況調節をすると共に、更に渇水年と豊水年の流出量の変動を調節することが可能となる場合が多いからである。

このような観点から地下貯水池の開発水量の算定は次のような手順によった。

① 18年間の年平均流量を対象に10年間毎の移動平均、すなわち10年間平均流量を求め、その値のその最も小さい期間を対象として開発水量の算定を行う。今回の場合、昭和35年～45年を対象期間とする。（昭和43年は欠測）

② この期間における余剰水を貯留操作して常時取水が可能となる水量を求める。このとき、この期間内で貯水池水量が回復することを条件とする。

なお、河川水を貯水池に貯えるにあたって、地上貯水池の場合にはとくに困難はないが、地下貯水池に貯えるときには地下水かん養の施設が必要である。従って、開発水量の計算にあたってはかん養能力の設定が必要となる。計算の手順と説明は図-8.10の通りである。

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。

VD(1) 利水ダム初期貯留量

VG(1) 地下貯水池初期貯留量

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。

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

VD(J) ワンステップ前の利水ダム貯留量 m^3

QI(I) 現在の流入量 m^3/s

QR(I) 既得水利量 m^3/s

QK 開発水量 m^3/s

QT 地下貯水池への涵養可能量 m^3/s

I…現ステップ J…ワンステップ前

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。

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

$$VG(I) = VGM$$

VG(I) 地下貯水池貯留量 m^3

VGM 地下貯水池容量 m^3

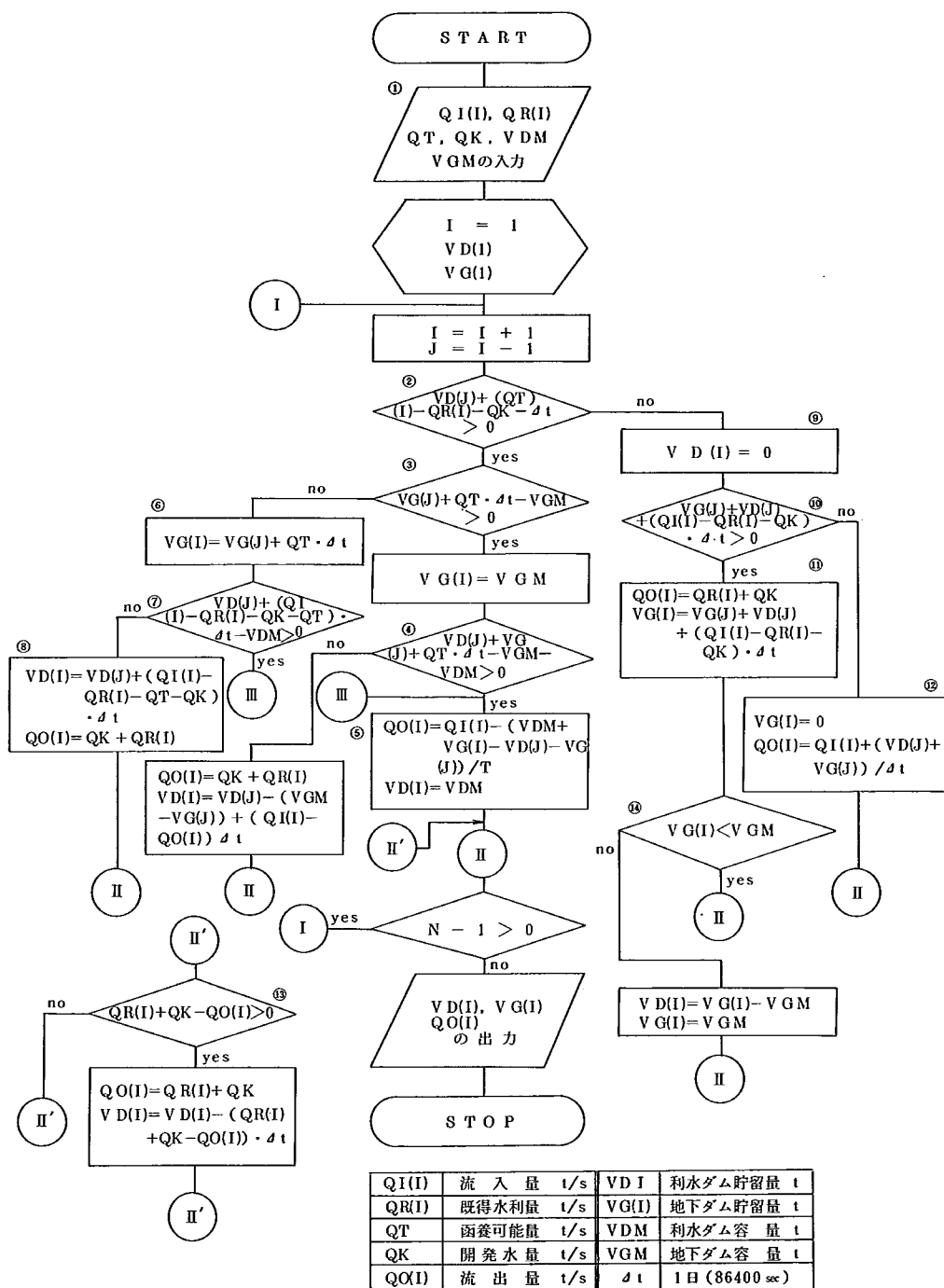


図-8.10 計算のフローチャートとその説明

$$\Delta t \quad 1 \text{ 日 } (86,400 \text{ sec})$$

- 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。

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

$$VD(I) = VDM$$

$$VDM \quad \text{利水ダム容量} \quad m^3$$

- 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。

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

- 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。

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

- 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⑥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。

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

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

- 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。

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利量だけを流すようにする。

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

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

- ⑨ 次に②まで遡って考える。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利量，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，利水ダムへは注入せず以前からの利水ダム貯留量は現在の既得水利量，開発水量を負担するための利用に供される。

$$VD(I) = 0.0$$

- 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利量と開発水量を負担できるか，判定する。

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

- 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，既得水利量と開発水量の和となる。

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

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

- ⑫ 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。

$$VG(I) = 0.0$$

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

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入し、必要流量は流出させる。

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

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

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入する。

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

$$VG(I) = VGM$$

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。

2 地下貯水池による水資源開発水量

今回行なった計算で仮定した施設の規模は次のとおりである。

i) 地上貯水池容量

$$20 \times 10^6 \text{ m}^3, \quad 40 \times 10^6 \text{ m}^3, \quad 60 \times 10^6 \text{ m}^3$$

ii) 地下貯水池容量

$$50 \times 10^6 \text{ m}^3, \quad 100 \times 10^6 \text{ m}^3, \quad 150 \times 10^6 \text{ m}^3, \quad 300 \times 10^6 \text{ m}^3, \quad 450 \times 10^6 \text{ m}^3, \quad 600 \times 10^6 \text{ m}^3$$

iii) 地下かん養能力

$$0.5 \text{ m}^3/\text{s} \sim 10.0 \text{ m}^3/\text{s}$$

(0.5 m³/s きざみ)

また、地上貯水池と地下貯水池の関係では、次のようなケースについて計算を実施した。

i) 河川に地上貯水池がなくて、地下貯水池のみが設置されるとき。

ii) 上流に地上貯水池が設置され、その下流に地下貯水池され、両者が連結して運用されるとき。

地上貯水池と地下貯水池が連結して運用されるときルールは次のように設定する。

1) 地上貯水池の空き容量をなるべく大きくしておくため、地下貯水池容量に余裕があるときは、常に地上貯水池の水を地下貯水池にかん養する。

2) 河川水が不足のとき、貯水池からの補給は、まず、地上貯水池から実施し、地上貯水池の貯留量が0のときは地下貯水池から補給する。これは地上貯水池の空き容量をなるべく大きくするためである。

さて、以上のような条件の下で計算された結果について説明しよう。

図-8.11、図-8.12は、地下貯水池単独の場合の開発水量である。

図-8.11によってかん養能力が小さいときは、地下貯水池容量の大小にかかわ

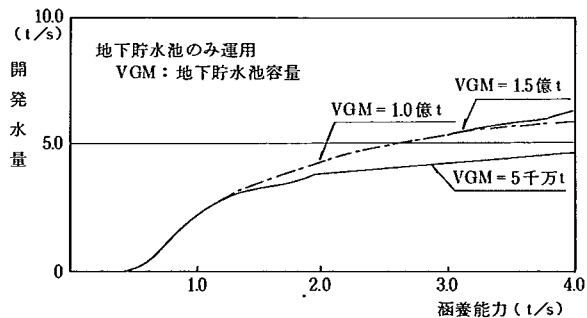


図-8.11 地下貯水池単独による開発水量(補給有り)

らず、開発水量に差がでていないことがわかる。なお、かん養能力が $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下のときは、開発水量が 0 となっている。これは、貯水池での流況調節が貯水池下流の既得水利の不足を補うことに使用されて、新規開発の余裕のないことを示す。今回の計算では全て、下流の既得水利権量の不足を補うことを前提とした。

図-8.12は、地下貯水池の容量が大きい場合を想定しているが、貯水池容量の増加によって開発水量が大きくなることが認められる。

図-8.13、図-8.14は、地上貯水池を連結した場合について開発水量を計算したものである。

図-8.13は、地上貯水池容量が $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ の場合であって、かん養能力の増大によって開発水量は増大するが、かん養能力が $2 \text{ m}^3/\text{s}$ をこえると、開発量があまりかわらないことが認められる。とくに、貯水池容量が $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ のときにはかん養能力は $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度でもかなり開発水量が大きくなる。

図-8.14は、地下貯水池容量が $150 \times 10^6 \text{ m}^3$ の場合である。地下貯水池が連結されると、地上貯水池単独の場合に比べて、開発水量が数段大きくなることが読み取れる。

図-8.15は、地下貯水池及び、地上貯水池を連結運用した場合の貯留量の変化を示したものである。

地上貯水池が1年以内での流況の調節を担当し、地下貯水池が数年に亘る流況の調節を担当するというように、自然に役割の分担が行なわれていることが読み取れる。

以上、各種の試算を行なってみたが、この中から典型的なケースについて開発水量をまとめてみると、表-8.3のようである。

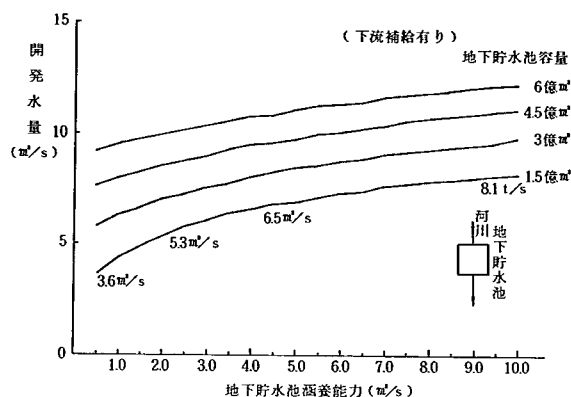


図-8.12 地下貯水池のみ作動させる場合の開発水量

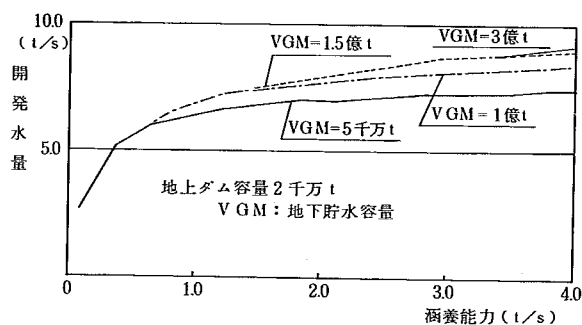


図-8.13 連結運用による開発水量 (補給有り)

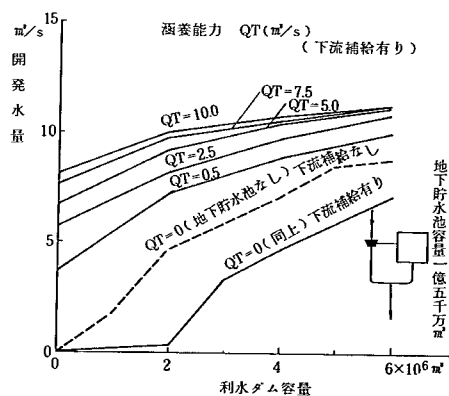


図-8.14 利水ダム容量変化に対する開発水量 (地上ダム、地下貯水池連結)

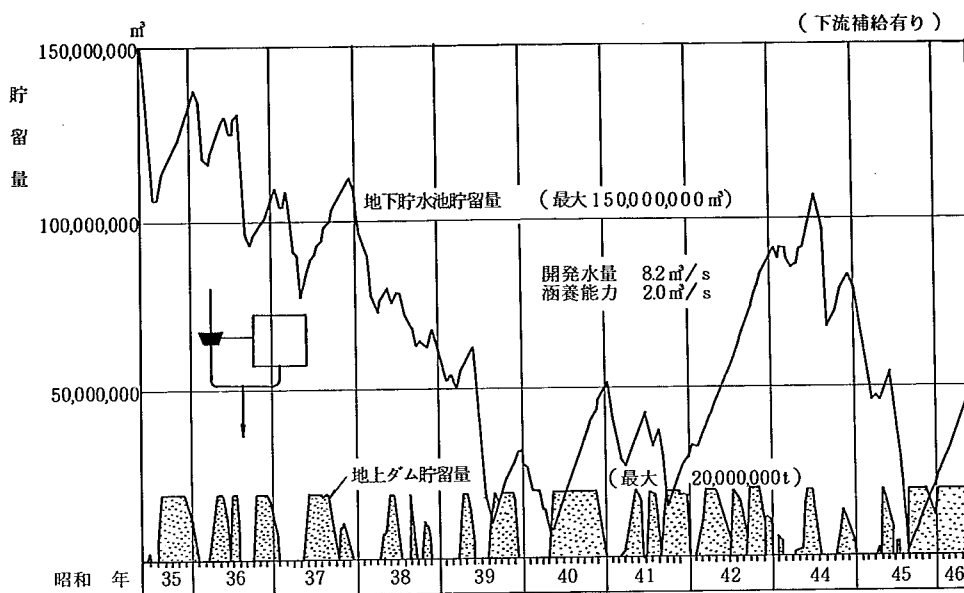


図-8.15 地下貯水池貯留量，地上ダム貯留量の経年変化 (m³)

表-8.3 地下貯水池による開発水量の試算例

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 m³		2.0 m³/s	5.3 m³/s	Ⅱ-3
				10.0	8.1	
地上ダム②			20,000,000 m³		0.0	Ⅱ-9
			40,000,000		4.0	
①+②	連結	150,000,000	20,000,000	2.0	8.0	Ⅱ-1
				10.0	10.0	
	独立	"	"	2.0	5.9	Ⅱ-4

3 地下貯水池内の地下水流動を考慮した水資源開発水量

前節において行なった地下貯水池による開発水量の計算は，貯水池から下流へ流去する地下水量を無視して実施したものである。しかし，実際には何がしかの水量は下流に流去するので，本当の開発可能な水量は前節の試算より小さくなるはずである。

ここでの計算は，前節の概念化された地下貯水池による水資源開発水量計算を基にして，地下貯水池での水位変動を考慮しながら，地下貯水池から下流域への流出量の影響と，地下貯水池の水資源開発施設としての特性を明らかにする上での前節の概念化された地下貯水池による計算手法の妥当性について検討することを目的とする。

地下貯水池としては荒川左岸扇状地の電気探査による帯水層調査をもとにして，図-8.16に掲げるような単純化された地下水域を想定することとする。

地下貯水池内の横断方向には変化がないものと考え，地下水流動の基本式として次式を用いる。

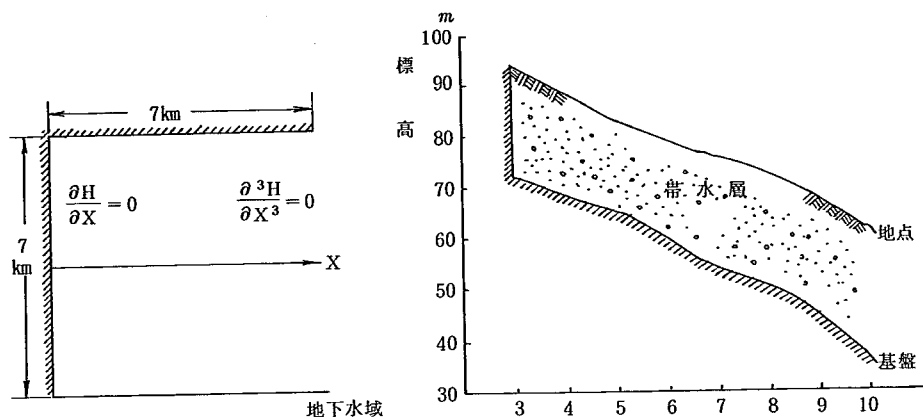


図-8.16 地下水域

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = k \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (H - Z) \frac{\partial H}{\partial x} \right\} + W - R \quad (8.3)$$

ここに、 H ：地下水位、 Z ：不透水性基盤標高、 S ：貯留係数、 k ：透水係数、 W ：揚水量、 R ：涵養量、 t ：時間、 x ：距離座標

地下水域の上流および下流での境界条件は

$$\text{上流} : \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad \text{下流} : \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} = 0 \quad (8.4)$$

上流の境界条件は、地下水面勾配が0であることを意味し、これは上流端において地下水流入が無いことを意味している。

計算は差分法を用い、上式を次のように変換する。

$$q_{i,t} = k \frac{H_{i+1,t} - H_{i,t}}{\Delta x} \cdot \frac{1}{2} \cdot \{ (H_{i+1,t} - Z_{i+1}) + (H_{i,t} - Z_i) \} \quad (8.5)$$

$$H_{i,t+\Delta t} = \frac{\Delta t}{\Delta x \cdot S} \{ q_{i-1,t} + (R_{i,t+\Delta t} - W_{i,t+\Delta t}) \Delta x - q_{i,t} \} + H_{i,t} \quad (8.6)$$

$$H_{0,t} - H_{1,t} = 0, \quad H_{n+1,t} - 2H_{n,t} + H_{n-1,t} = 0 \quad (8.7)$$

ここに $H_{i,t}$ ： i 番目ブロックの時刻 t での地下水位、 $q_{i,t}$ ： i 番目ブロックから $i+1$ 番ブロックへの単位幅当り流入量、 Z_i ： i 番目ブロックの平均地盤高、 $R_{i,t+\Delta t}$ 、 $W_{i,t+\Delta t}$ ：それぞれ i 番目ブロックでの時刻 t から Δt 間の単位面積あたりの涵養量および取水量、 Δx ：ブロック間隔、 Δt ：時間間隔である。

帯水層は均一であって、一律に透水係数 $k = 5.0 \times 10^{-2}$ cm/s、貯留係数 $S = 0.2$ とする。またブロック間隔 $\Delta x = 500$ m、時間間隔 $\Delta t = 1$ 日とした。

図-8.14 に示されるごとく、帯水層は一様に20mの厚さを仮定する。しかし、取水可能な地下水深さから不透水性地盤までは地下水位を低下できない。又、地上の環境への影響、排水路での貯留量の流出などから地下水位を地表面近くまで上昇させることもできないであろう。そこで、約20mの帯水層厚のうち10

mが地下水位の変動域から除かれるものとする。つまり残りの約10mに地下水位の変動が制限されることになる。

これまで、取水、涵養は地下貯水池から一括して行なってきたが、地下水位が許容地下水位変動域内におさまるように、取水量、涵養量を分割し、ブロックごとに行なわなければならない。開発水量を最大にするような最適操作が存在するはずであるが、ここではこだわらずに、涵養と取水について、次のような操作を行なった。

涵養能力つまり最大可能涵養量は $2 \text{ m}^3/\text{s}$ であって、地下貯水池は全体的に均等な涵養能力を有しているものとする。前回までの計算では、河川の流況あるいは利水ダムから涵養量 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ を補給する余裕があり、しかも、地下貯水池がわずかでも $2 \text{ m}^3/\text{s}$ をうわまわる割合で貯留が可能であれば、 $2 \text{ m}^3/\text{s}$ を涵養量とした。ところが今回では、均一に分割された涵養能力内でブロックごとに涵養しなければならないから、状況によっては、均一に割りふられた涵養能力いっぱいには涵養しようとすれば、地下水位が許容地下水位変動域からはずれてしまい、そこで他のブロックへ余剰の涵養量を振り向けようとしても、そこでの涵養能力を超えてしまうから不可能であって、結局全体で $2 \text{ m}^3/\text{s}$ の涵養量に達しないこともありうる。

取水に関しては、各ブロックの貯留量に比例して、必要取水量を各ブロックに分割する。貯留量が0に近いブロックでは、必然的に取水量も0近くなるから、下限水位を下まわることもない。

図-8.17 は、地上貯水池（容量 $20,000,000 \text{ m}^3$ ）と地下貯水池（容量 $150,000,000 \text{ m}^3$ ）かん養能力 $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ と算出された。

前節で述べた概念計算とを比較すると、表-8.4 に示すとおりであり、開発水量が1割程度小さくなっていることがわかる。

(註) ①の計算結果 $7.6 \text{ m}^3/\text{s}$ は、前節図-8.

表-8.4

検 討 ケ ー ス	開 発 水 量	
	① 概念計算	② 貯水池の地下水流動を考慮した場合
連 絡 運 用 地下貯水池容量 $150 \times 10^6 \text{ m}^3$ 地上貯水池 $20,000,000 \text{ m}^3$ かん養能力 $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$	$7.6 \text{ m}^3/\text{s}$	$7.0 \text{ m}^3/\text{s}$

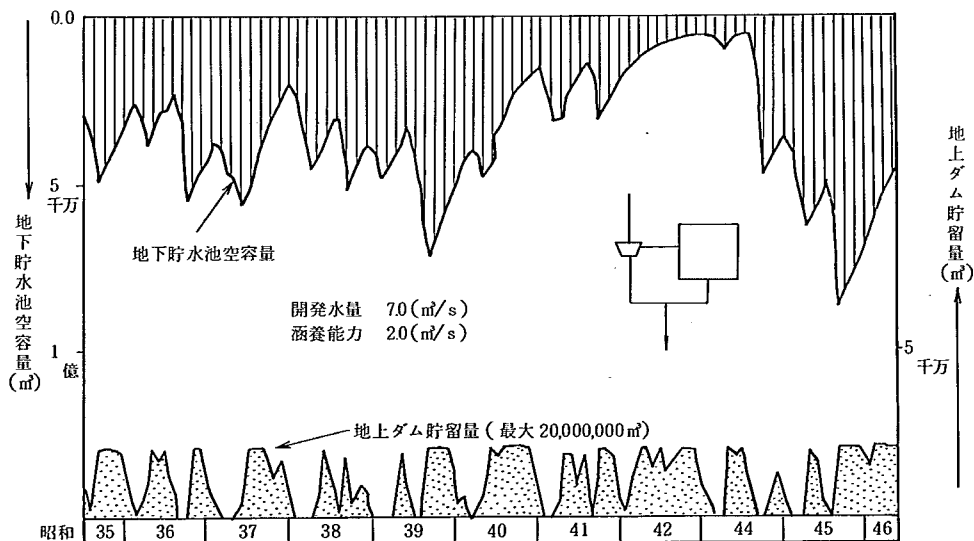


図-8.17 地下貯水池と利水ダムの経年変化

10の結果8.0 m/sと異なるが、これは計算スタート時の貯水量に差があるためである。

8.3 地下水かん養の方法

地下貯水池構想を実用化する上で重要な位置を占めるものは、地下水のかん養技術である。

かん養の方法には各種あるが、我国で実用が可能と思われるものとしては次の4種がある。

- ① 井戸による注入
- ② 池又は水路からの浸透
- ③ 水田を利用した浸透
- ④ 地下トレンチからの浸透

これらの方法には、それぞれ長短があるが、荒川左岸扇状地のような農村地域でのかん養を念頭におくと、目づまり対策の難しい井戸法は、あまり得策と思われない。

②の方法は、外国のかん養事業において、しばしば採用されているものである。

③、④は、我国の風土に適する方法として検討が望まれる方法である。

いずれにしても、地下水かん養の方法は、基本的には確立された技術であるが、更に研究をすすめることによって経済的で安定した技術の開発が望まれるのである。

8.4 地下貯水池が地上に及ぼす影響とその対策

地下貯水池は人が生活し、動物・植物が生存している土地の地下を利用するものであるから、ダム水没のような影響はないとしても、いろいろな面で影響が生ずることは避けられない。そこでその影響を予測し、必要な対策を講じたり、地下貯水池計画の内容に反映させたりすることが必要になる。

当面、考えられる影響としては、次のようなものが考えられる。

- ① 井戸涸れあるいは取水困難
- ② 地上土地利用への影響
- ③ 地盤沈下
- ④ 扇状地下流側の地下水利用への影響

以下に、これらについて考察してみる。

1 井戸涸れあるいは取水困難

地下水位が変動し、渇水期には水位が下がるので現在利用されている井戸が涸れたり、取水が困難になることが予想される。

対策としては補償工事としての水道敷設が考えられる。この扇状地の地下水水質は悪化しつつあり、一部区域では飲用が禁止されているので早晩水道が必要になると判断される。

ただここで検討すべきは将来地下貯水池の水質をどのように考えるかである。地表水は、目づまりのことを考えるとかなり浄化されてかん養されると予想されるが、地上の家庭排水、畜産排水等は下水道が敷設されるまでの間は水路等を通じて浄化されないまま地下水に達し、水質を悪化させるものと思われる。その場合地下貯水池から取水された水は再び浄化が必要になり不経済である。

そこで地下貯水池の運用をはじめると同時にこの地域の汚水処理をスタートさせて地下貯水池の水質を良好に保つようにすることが考えられる。この場合には現在利用中の井戸は水位低下対策としてこれをつ

ぎ足すことによって将来とも良好な水質の水を井戸によって利用できることになる。場合によってはこれらの井戸を地下貯水池用の取水井戸に兼用することも可能になるかも知れない。

2 地上土地利用への影響

地下水位の変化（主として低下）に伴って表土の土湿が変化することになる。この地域は渇水型の営農形態が大きな比重を占めているので、地下水位の低下はそれほど影響を及ぼさないと思われるが、一部に土湿の大きい地域もありサトイモ等湿性の作付が見られるようであり、この場合には地下水位変化の影響が大きい。

しかし地下水かん養のための配水施設は水利の改良を容易にする面もあるので、農業構造改善の方向によっては地下貯水池計画と一体的、互恵的なものとなるように総合化される可能性もある。

いずれにしても、地下水位変化の地上作物に与える影響については十分に検討することが必要と思われる、今後研究を行う予定である。

3 地盤沈下

地下水位低下に伴って地盤沈下が予想されるが、今回の場合その影響は小さいと考えられる。

荒川扇状地上の一地点で実施した地質調査及び土質試験の結果に基づきこの地点の地盤沈下量を試算してみると、地下水位を 7.1 m, 18m 低下させた場合の最終沈下量はそれぞれ、13 cm, 19 cm と計算されるが、これらの粘土層は先行圧密によって過圧密状態にあり、今回の水位低下によっても最大圧力が粘土層の圧密降伏応力に達しないので、圧密沈下は生じないことが予想される。

なお以上は 1 地点における検討であるが、今後地質調査の進展によって粘土層の厚さの分布が知られれば、扇状地全体について地盤沈下の影響の程度を予想する事が可能である。

4 扇状地下流側の地下水利用への影響

扇状地下流側には深谷市が位置し、水道用、工業用に地下水が利用されており、地下貯水池の運用によってこれら地区の地下水利用が影響を受ける可能性もある。この問題については、扇状地及びその周辺地区の水収支が明らかになれば、その影響の有無が明らかになるが、大よその見当としては影響はほとんどないと思われる。

すなわち地下貯水池計画では止水壁等を考慮していないので将来下流側に向う地下水の流れは現在とあまり変わらないことが予想される。地下水位の低下に伴って地下水面の勾配水深が小さくなり流量は多少減少するが試算ではその量はわずかである。

いずれにしても現在使用中の地下水利用の実態とこれに関連する水収支について調査して将来の見通しをつけ、その中での地下貯水池の役割と影響を検討することが必要と思われる。

8.5 地下貯水池の経済性

水資源開発の方法を検討するに当たって開発される水のコストは重要な評価事項の一つである。

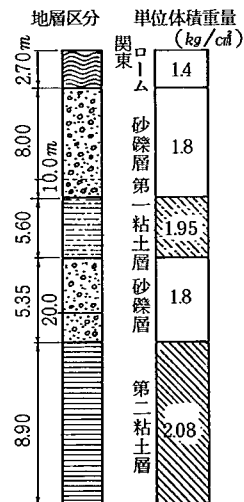


図- 8.18 地質調査例

本研究では貯水池サイトの詳細な調査が進んでいないので現時点では水コストの算定は行っていない。

しかし本章で説明した如く、地下貯水池そのものは自然の帯水層を利用するものであって遮水のための構造物等は必要としない。従って水のかん養のための施設が経費の大きな割合を占めることになるが、これらも水田からのかん養方法、地下トレンチ方式等、地上の土地利用を大きく妨げることなくかん養する方法が検討されている。

従って地下貯水池による水資源開発のコストはあまり大きくないことが予想され、かん養技術の開発によつてはコストの低い水開発も決して不可能ではないと思われる。

第8章 地下貯水池による水資源開発

要 約

地下貯水池の構想を荒川左岸扇状地をケーススタディの対象として具体的に検討した。

地下貯水池による水資源開発水量は、地下貯水池単独の場合で $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度、容量 $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ 程度の地上貯水池と連結した場合には $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度が可能であることがわかった。この開発水量は荒川の利用率を寄居地点における年平均流出量 $26.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (昭和 27 年～51 年の平均) に対する比率を考えると、それぞれ、19%、31% 高めることに相当し、決して小さなものではない。なお以上の結論は地下帯水層の範囲、貯留係数の値については大よその見積りに基いており、今後これらについての調査が進めば開発水量の値に修正が生じることが予想される。

次に地下貯水池内の地下水流動をシミュレーションによって再現して、より詳細な地下貯水池運用の検討を行なった。その結果、地下水の下流への流失量はその量が小さいため開発水量の算定については修正の必要がないことが判明した。

第8章 参 考 文 献

- 1) 建設省河川局 「地下ダム構想」 建設月報 No 320 (1976. 2)
- 2) 石崎勝義他 「地下水揚水量削減方法の比較検討」 土木学会水理講演会 (1977. 2)
- 3) 北川明 「長崎県野母崎町地下ダムについて」 建設月報 No 326 (1976. 8)
- 4) 三本木健治 「国際水法学会第2回会議の成果」(1)～(3) 河 川 No 357, 359, 360 (1976)
- 5) 橋口収, 堀和夫 「国連水会議」 水利科学 No 115 (1977)
- 6) 建設省近畿地建 「地下水涵養技術および利用計画検討業務報告書」(その1) (1977. 3)
- 7) 榎本真 「外国における地下水利用技術」 河 川 No 361 (76-8)
- 8) 建設省土木研究所 「地下水涵養技術の開発(2-7 諸外国での人工かん養の研究)」 (1977)
- 9) 吉川秀夫 「洪水の地下貯留は可能か」 土木学会誌(33巻, 5, 6号) (1948)
- 10) 落合敏郎 「水田地帯の地下水かん養機能の計量化に関する研究1), 2)」 地下水と井戸とポンプ (1977年1～3月)
- 11) 水利科学研究所 「水利合理化調査報告書」 (1977. 3)
- 12) 地域振興公団 「下水処理水の散布に関する基礎調査報告書」 (昭和51. 5)
- 13) 土木学会編 「水理公式集 P. 368」 (1971)

- 14) 前掲8) 1. 地下ダムの適用条件に関する研究 3-6 地盤沈下関係
- 15) 前掲8) 同 上 3-7 制度関係
- 16) 中沢弼仁也 「地下水有効利用の方法」 地下水ハンドブック, 建設産業調査会 (1979)

第9章 河川水と地下水の連結利用

現在の地下水利用は地下水位の一方的低下地盤沈下現象等を惹起しているもので、このまま使用を続けることは望ましくないが、その利用量が大きく、水資源供給量全体に占める役割が大きいため直ちに使用を止めることが難しい。そこで、次善の策として地下水使用量をいくらかでも減少させることを検討する必要があるが、河川水と地下水の連結利用は地下水使用量を大巾に減少させる可能性がある。この方法は、今後厳しくなると予想される水需給ギャップを埋めるための緊急対策としても有用であろう。

この研究は、以上のような観点から河川水と地下水の連結利用が、地盤沈下の防止、水需給のギャップの回避という2つの目標に対して、どの程度有効であるかを最も事態のひっ迫している埼玉県を具体例にして検討したものである。

9.1 荒川の流況と豊水による補給可能性

河川水と地下水の連結利用を検討する前に、その予備的作業として豊水（余剰水）の状況及びその利用の限度について概略の見当をつけておきたい。

図-9.1は、荒川水系の利水の状況を示したものである。

ここでは、荒川の秋ヶ瀬取水堰を豊水取水の基準点とし、下流放流量から維持用水 $5\text{ m}^3/\text{S}$ を差引いた量を豊水として、その状況を整理した。秋ヶ瀬取水堰を豊水利用のケース・スタディの基準地点としたのは、次のような理由による。

- (イ) 荒川の利水の最下流点であり、下流に維持用水以外に利水者がいないため、豊水水利権を得る時、下流水利権者の同意の必要がないこと。
- (ロ) 利水の最下流点であることから、余剰水である豊水の流量そのものが実測出来ること。
- (ハ) 上流利水の還元水も含まれているはずであり、河川水の反復利用を組み込んだ河川水の総合的な有効利用が計れること。

(ニ) ケース・スタディ対象地区である埼玉県南部の地下水利用と連結しやすいこと。

検討の対象期間としては、利根導水がはじまった昭和43年以降50年までの8年間とし、秋ヶ瀬取水堰からの実際の放流量を把握した。この放流量はダム操作後の荒川の流量、利根川からの導水量、各水利権者の取水権と、その還元量等荒川の実際の水収支の最後の帳尻である。

もし、この対象期間の8年間に河川水と地下水の連結利用構想が適用されていたとしたら、どの程度の豊水がどのような状況で利用可能であったかをみてみたい。

次節では、この豊水の状況がそのまま10年間ずれて昭和53年から60年にかけて再現したと仮定した場合を検討している。実際にはその頃には荒川のダムも増え、豊水量が減少している可能性がある。当然確保量も大きく見積られているはずであるから、余剰水はあまり望めなくなる。しかし本構想が主としてダム等の水資源施設が遅れた場合を想定した暫定対策であることから第一次の概略検討としては許されよう。

図-9.2は、秋ヶ瀬取水堰点の全流量と同堰での取水量、維持用水と豊水に分けた下流放流量の経年変化を示したものである。

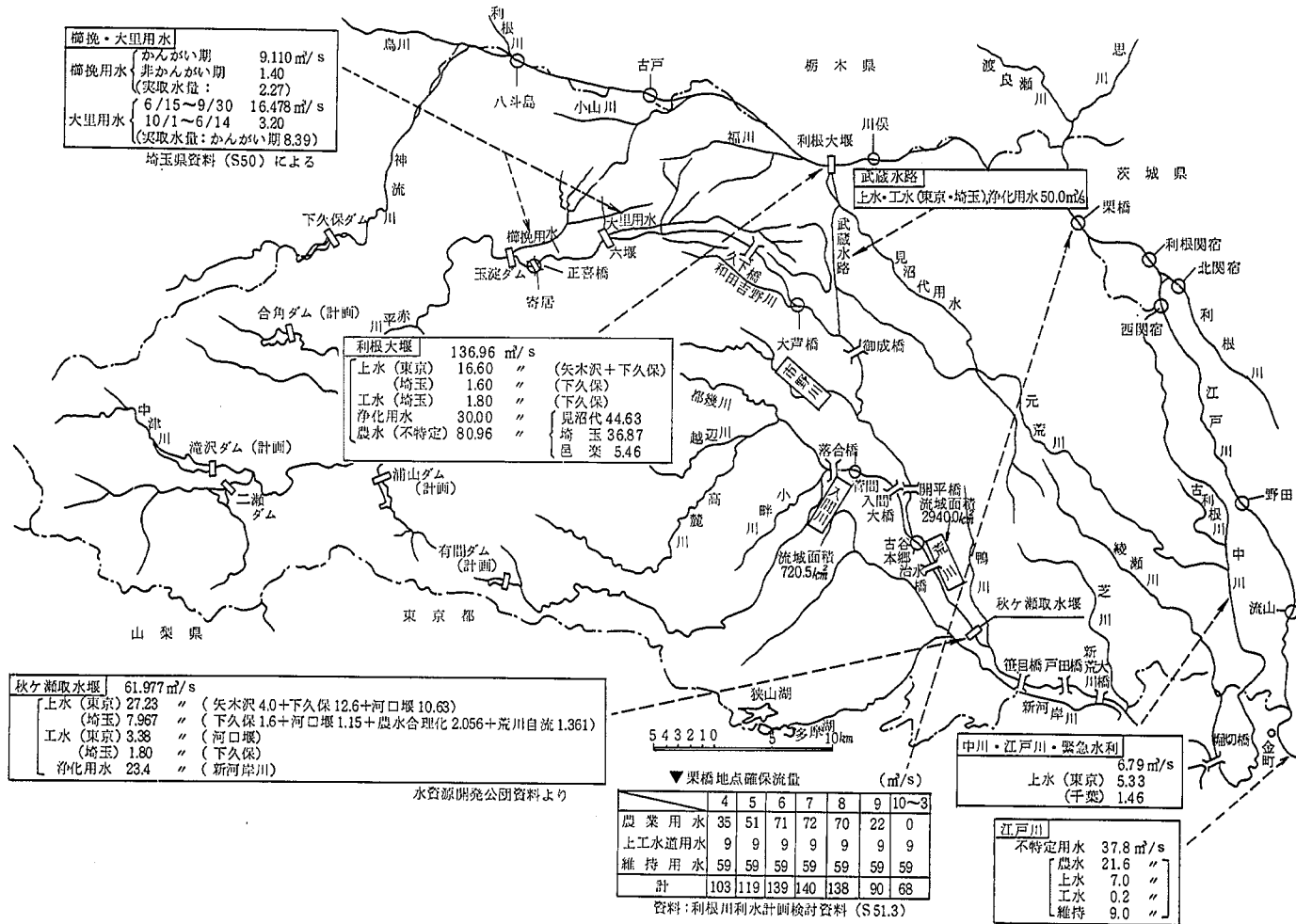
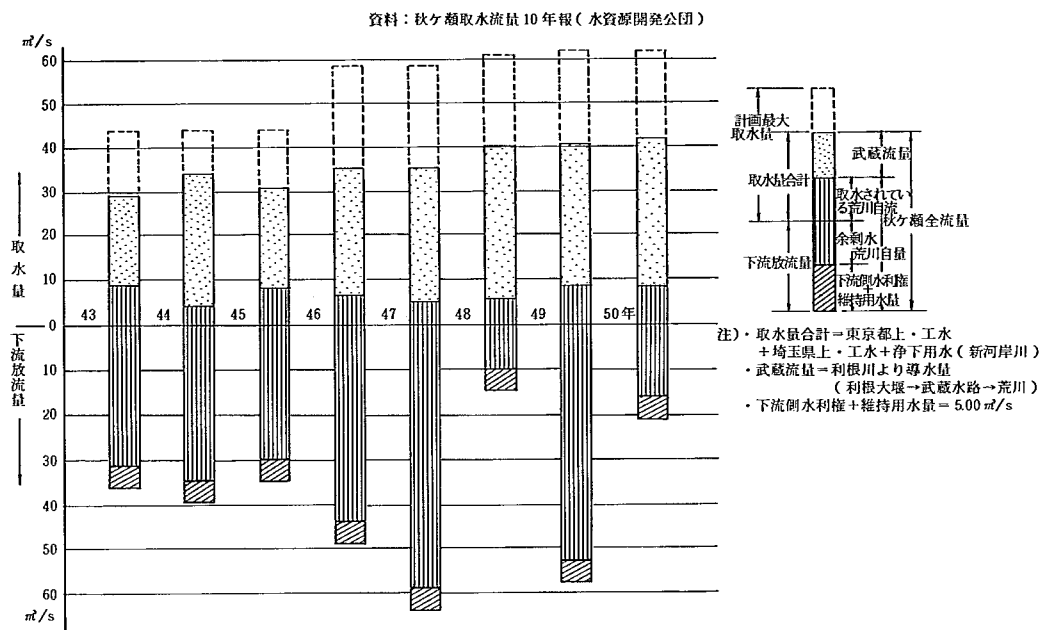


図-9.1 荒川(含利根川)水系の利水状況

なお、この図で取水量を武蔵流量からのものと、荒川自流からのものに分けているが、これはここでの検討では本質的な意味はない。

当然予想されることではあるが取水量はゆるやかな増加傾向を示しており、下流水利権と維持用水の合計水量は $5 \text{ m}^3/\text{S}$ で一定なので、年間総流量の変動は拡大された形で豊水に反映し、最大の47年に対し、最小の48年は実に5分の1に過ぎない。



図一 9.3 は、対象期間で最渇水年である昭和48年の流況を半月ごとに示したものである。

年間平均 $10 \text{ m}^3/\text{S}$ 弱であった豊水は、半月ごとに見ると大幅な変動をしていることが分かる。下流放流量のうち維持用水は8月の2～5半月を除いてかろうじて $5 \text{ m}^3/\text{S}$ を確保しているが、豊水の方は平均の約半分である $5 \text{ m}^3/\text{S}$ に満たないような期間が毎月発生している一方で $80 \text{ m}^3/\text{S}$ に達するような半月もある。

図一 9.4、9.5 は、各年の下流放流量（維持用水を含む）を日流量の小さい順に並べたものである。

一般に新規の水利権は、10年に1度程度又はそれ以上の渇水が発生するような流況年を基準渇水年として、その渇水流量の範囲で認められるが、対象期間でみると下流放流量は50年が $1.00 \text{ m}^3/\text{S}$ 、47年が $1.09 \text{ m}^3/\text{S}$ 、48年が $2.00 \text{ m}^3/\text{S}$ 、49年が $3.00 \text{ m}^3/\text{S}$ の順になっており、この流況で安定水源として考えられるのはせいぜい $1 \text{ m}^3/\text{S}$ 位である。

昭和47年は年間流量では最大であるが渇水流量は2番目に小さい。

この下流放流量の中には $5 \text{ m}^3/\text{S}$ の維持用水が含まれているが、この維持用水は安定的に確保できる量ではないことが分かる。8年間のうち渇水流量が $5 \text{ m}^3/\text{S}$ を越えたのは昭和43年から46年までの4年間である。

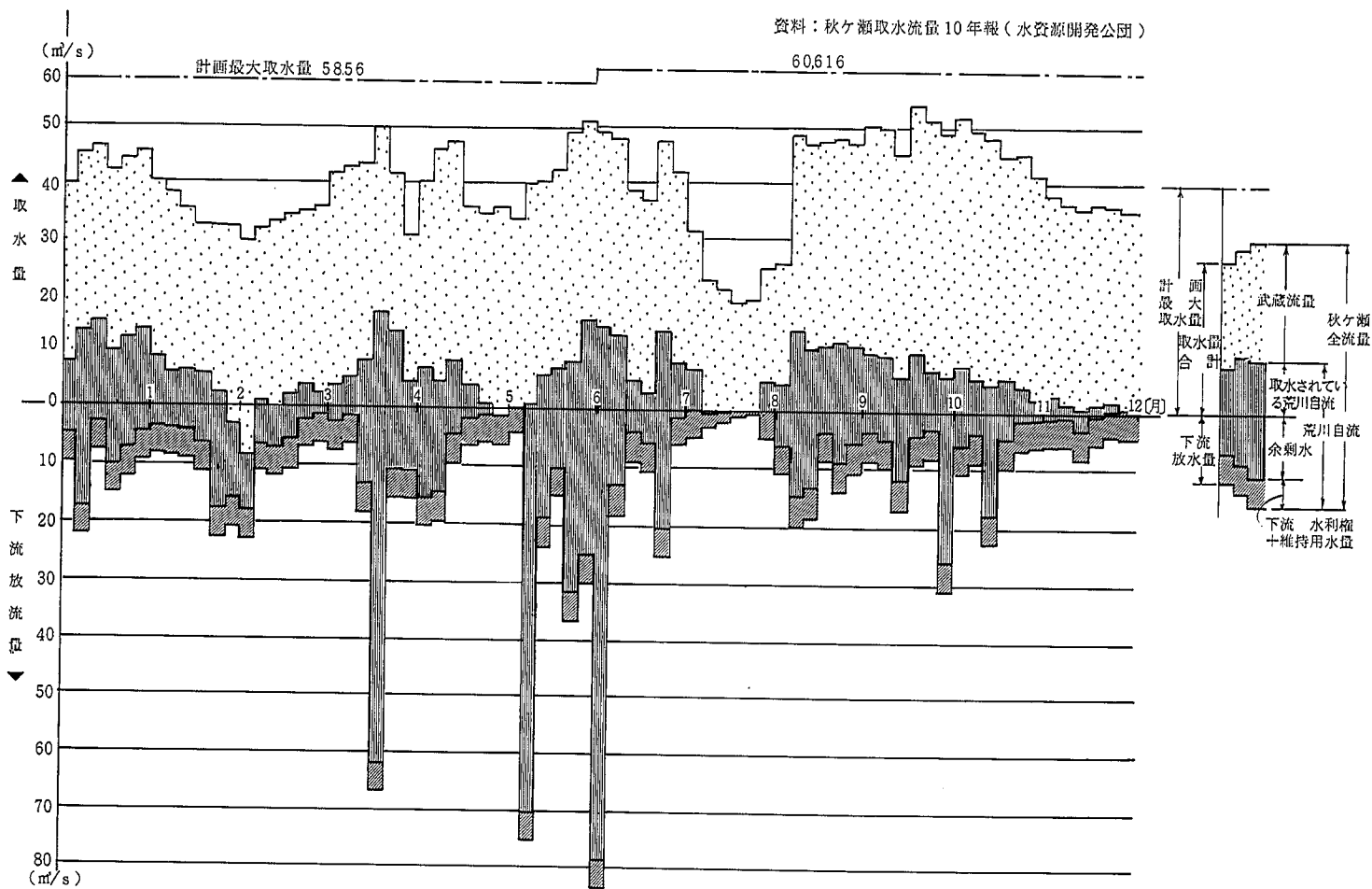


図-9.3 昭和48年荒川秋ヶ瀬における水収支（半旬平均）

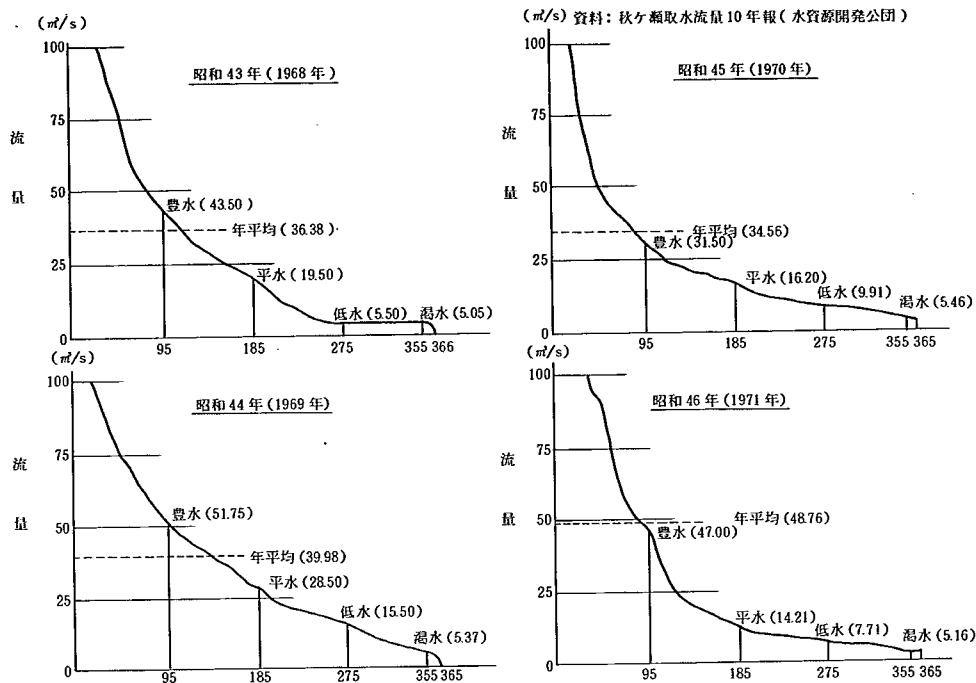


図-9.4 荒川秋ヶ瀬取水堰下流放流量の年別流況(S.43~46)

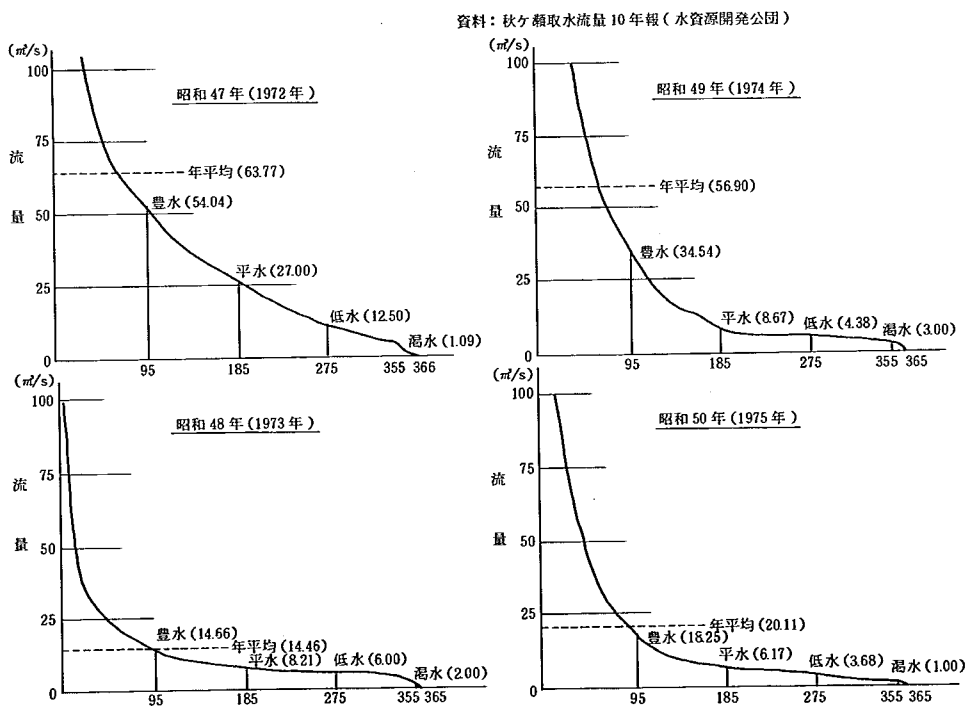
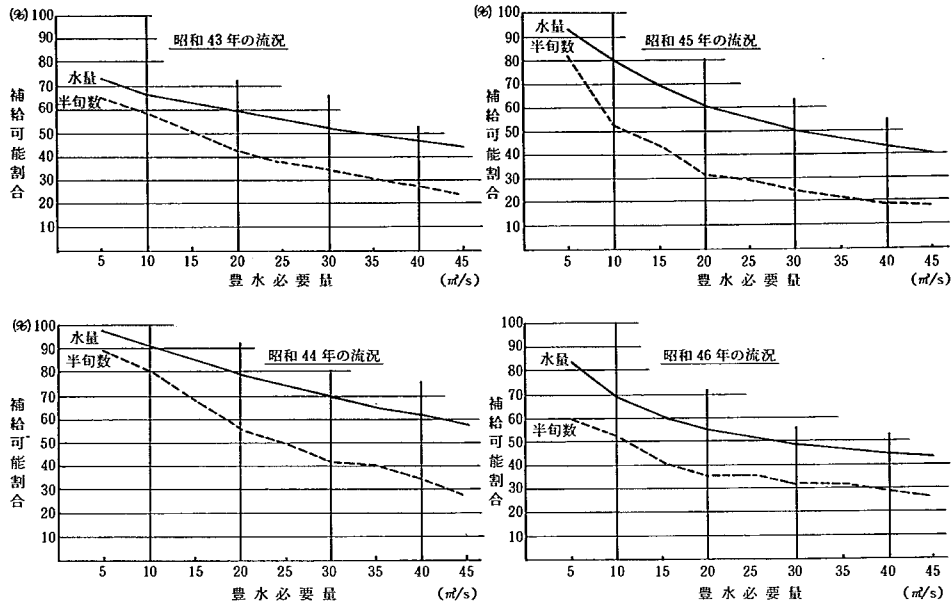
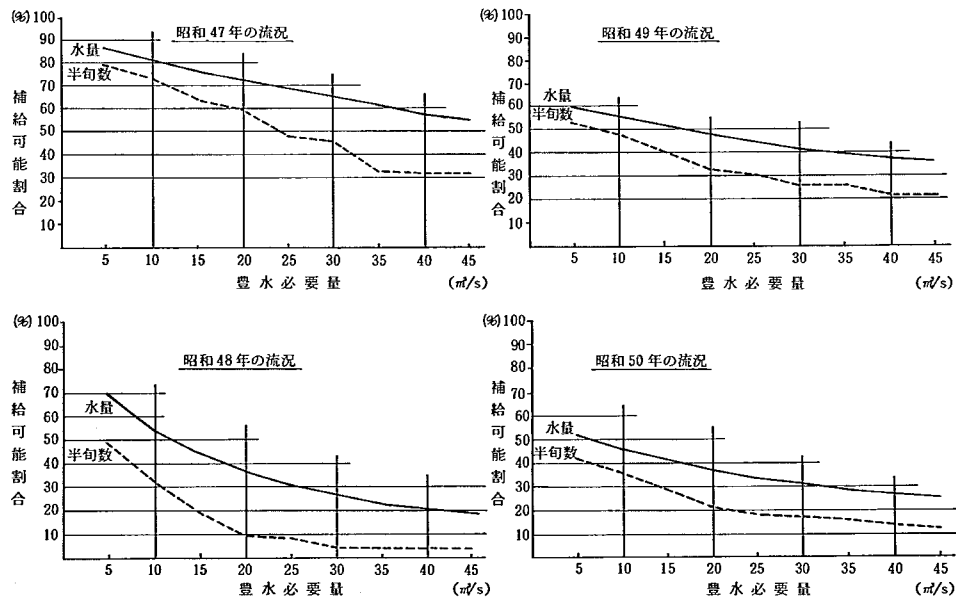


図-9.5 荒川秋ヶ瀬取水堰下流放流量の年別流況(S.47~50)



図－9.6 荒川秋ヶ瀬地点における豊水必要量に対する補給可能割合(S.43～46)〃



図－9.7 荒川秋ヶ瀬地点における豊水必要量に対する補給可能割合(S.47～50)〃

図一 9. 6, 9. 7 は、取水を希望する豊水量を毎秒 $X \text{ m}^3$ と設定した場合、半旬単位でそれを満たせる程度を年ごとに検討したものである。

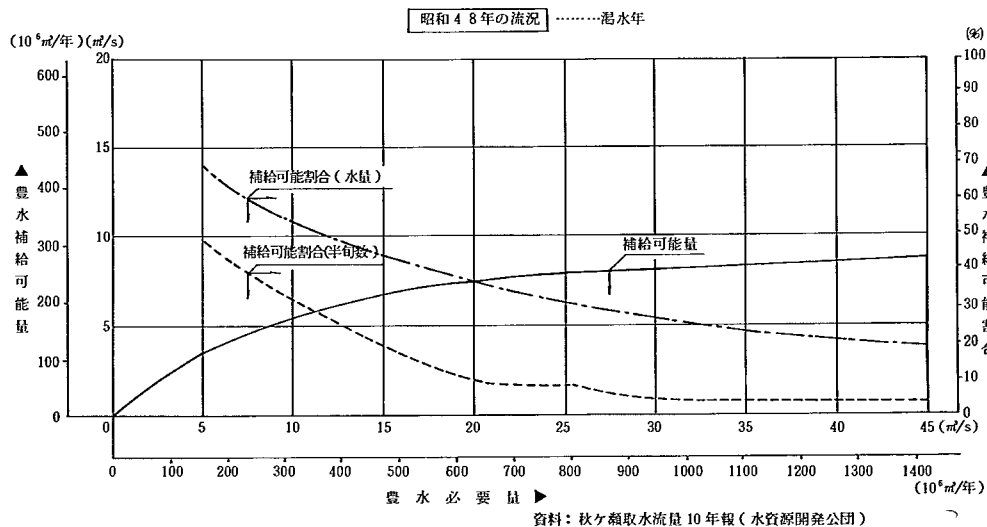
水量に関する補給可能割合とは、年間継続的に $X \text{ m}^3/\text{S}$ 取水した場合の総取水量に対する、半旬単位の平均流量を基準にして $X \text{ m}^3/\text{S}$ を目標に取水出来た量の年間合計の割合である。

また、半旬数に関する補給可能割合とは、年間の半旬数に対する、目標 $X \text{ m}^3/\text{S}$ を完全に取水出来た半旬数の割合である。

この2つの補給可能割合が最も低いのが昭和48年と50年である。まず、48年についてみると取水量を $5 \text{ m}^3/\text{S}$ とすると水量では70%、半旬数では48%となっており、取水量が $20 \text{ m}^3/\text{S}$ に増加すると、水量では36%、半旬数では10%に落ちてしまう。

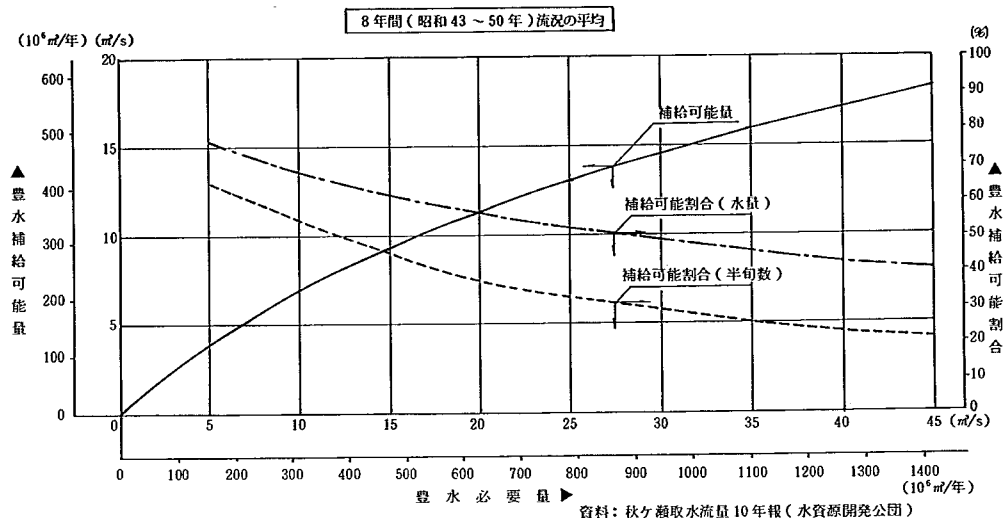
図一 9. 8 は、昭和48年について、豊水必要量に対する豊水補給可能量を図示したものである。このカーブの45度の直線になれば100%補給可能であることを意味するが、48年については $8 \text{ m}^3/\text{S}$ 以上の補給は無理であることが分かる。

図一 9. 9 は同様の検討を8年間の対象期間を通じて行なったものである。これには豊水年も含まれるので補給可能性は高まる。 $25 \text{ m}^3/\text{S}$ の必要量に対しても50%強は豊水で補給できる。残りは地下水で補給されることになるが、このように年を越えた検討は、地下水について、ある年は大量に揚水し、ある年は少なくなり、何年か平均すれば揚水量は一定の範囲におさまっているというような地下水補給パターンが認められる場合に有効である。



注）・ここでの豊水必要量は取水施設の最大能力に相当する。
・縦軸の m^3/s は、年間量 $(10^6 \text{ m}^3/\text{年})$ の次元を変えただけである（年間を通しての平均を示す）。

図一 9. 8 荒川秋ヶ瀬地点における豊水必要量に対する補給可能量と補給可能割合（S. 48）



注) ・ここでの豊水必要量は取水施設の最大能力に相当する。
 ・縦軸(m/s)は、年間量(10⁶m³/年)の次元を変えただけである(年間を通しての平均を示す)。

図－9.9 荒川秋ヶ瀬地点における豊水必要量に対する補給可能量と補給可能割合(8年間)

9.2 埼玉県の水利用の現況と水需給見通し

1. 水利用の現況

図－9.10 は埼玉県全域の水利用状況を示したものである。水道用水(上水)、工業用水(工水)とも地下水利用が大きな割合を占めていることが特徴的である。埼玉県においては現在河川水を水源とする県営水道用水供給事業が実施されつつある。これは上水・工水の両水道に水を供給するもので現在までに $820 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$ 、将来は $1,650 \times 10^3 \text{ m}^3$ の給水が見込まれ、県南地域給水の主役となる。これまで使用されてきた揚水施設のうち上水道用は市町村の事業主体が保有しているが、県水道事業が完成すると河川水と地下水の連結利用が可能な物理的条件が整うことになる。

埼玉県の水需給計画は図－9.11 のように想定されている。

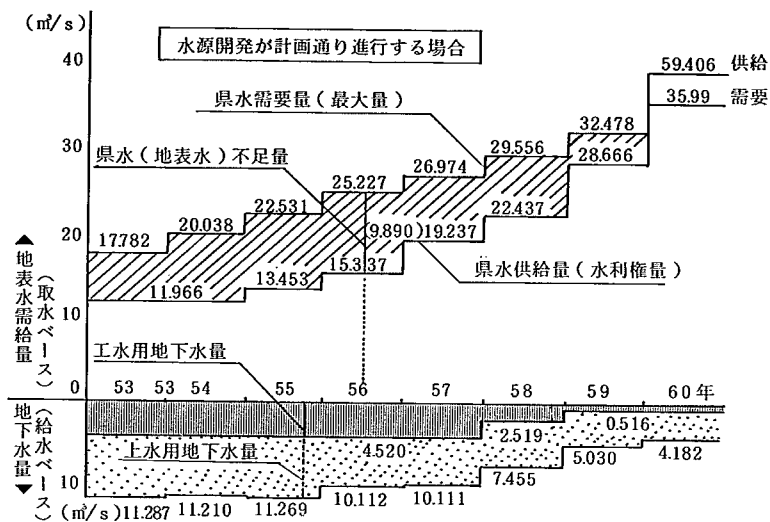
この図をみると水需要量がほぼ一定の割合で増加すると想定されるのに対し、供給量の方はダム等の完成が昭和60年頃に集中するため、昭和60年に至る中間年次(昭和55～59年)において、かなり大量の水需給ギャップが生じることが予想されるのである。

以上は、水資源開発が順調に進む場合であるが、

・下図の縦軸の長さは、水量に比例している。
 ・(%)は総量に対する値

総量 1960.0 (千m ³ /日) 715.4 (10 ⁶ m ³ /年) 100(%)	地表水	570.4(千m ³ /日) (最大681.7)	工水に利用 [528(千m ³ /日) 193(10 ⁶ m ³ /年) 27(%)]
	上水	208.2(10 ⁶ m ³ /年) 29.1(%)	
	工水	267.8(千m ³ /日) 97.7(10 ⁶ m ³ /年) 13.7(%)	
	地下水	683.7(千m ³ /日) (最大817.2) 249.6(10 ⁶ m ³ /年) 34.9(%)	工水に利用 [633(千m ³ /日) 231(10 ⁶ m ³ /年) 32(%)]
	上水	438.1(千m ³ /日) 159.9(10 ⁶ m ³ /年) 22.3(%)	

図－9.10 49年埼玉県における水利用(上水+工水)の実態



図－9.11 対象区域の水需給ギャップ量と地下水揚水量

ダム等の工事はやや遅れ気味となっているので、その完成時期がずれると、水需給ギャップは更に深刻になる。

水需給増大の内容は、主に水道用水であるが、埼玉県の場合各事業体（市町村水道局）が、地下水揚水施設を保有している。

図－9.12 は、昭和50年における、水道用水の水源構成である。

過去においては、地下水の構成比率が高かったため各事業体の有している地下水揚水能力は、実際の取水量よりかなり大きくなっている。

このような事情のため、一たん渇水が生じ河川からの給水が小さくなった場合には、不足のかん養の部分は、地下水使用に転嫁されることが懸念されるのである。

2. 地下水使用量

次に埼玉県における地下水使用について概観してみよう。

図－9.13 は、昭和50年以前の地下水使用量の推移（実績）と51年度以降の地下水使用の推定量を示したものである。

これを見ると昭和48年まで増加をつづけていた地下水使用は、昭和49年にやや減少させることが出来たが、以後はほぼ横ばいで推移し、河川供給量の増加に伴って昭和56年以降に揚水量を削減させる予定であることがわかる。この図から、昭和51年～60年の地下水使用量は、約 $2,950 \times 10^6 \text{ m}^3$ と推定される。

3. 地下水かん養量の推定

一方地下水の使用がどの程度まで許容されるかについては、現在のところ明確な数値が設定されていない。地下水を永続的に使用するためには、その取水は地下水のかん養の範囲で行なわれる必要がある。

そこで、過去の取水量と地下水位低下の実績から、その大よそのかん養量を推定してみよう。

地下水は、一般に横方向からの流入にくらべて、鉛直方向のかん養量が大きいため、次のような関係が成立つ。

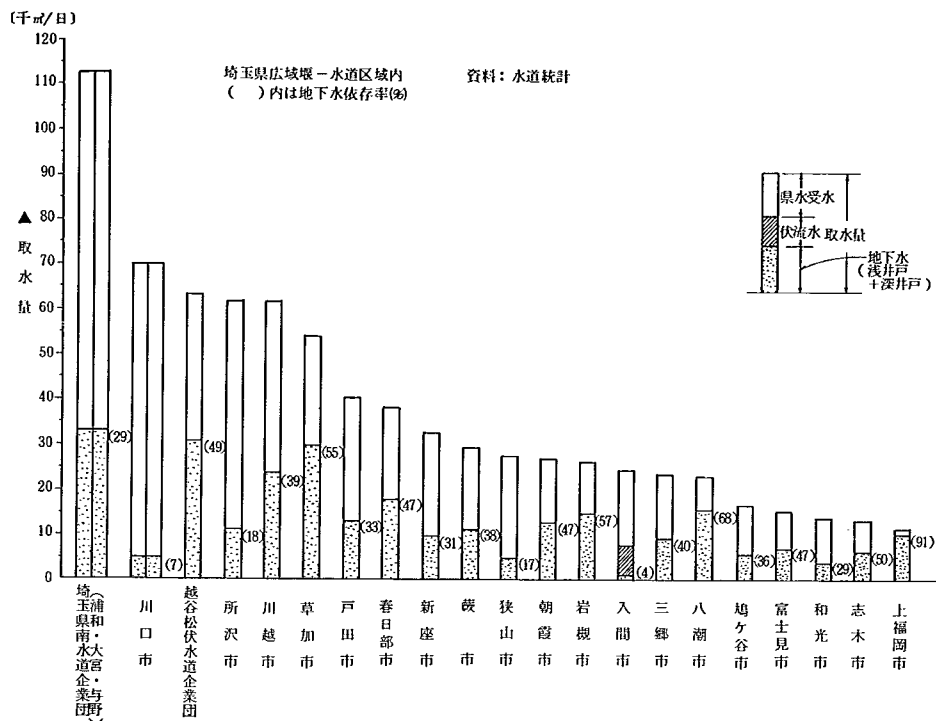


図-9.12 昭和50年市町別上水道取水量の水源構成

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta O = \lambda e \Delta H \cdot S + \Delta I \\ \Delta O: \text{取水量}, \Delta H: \text{地下水面低下量}, S: \text{地表面積}, \lambda e: \text{有効間隙率}, \Delta I: \text{かん養量}, \\ \Delta V: \text{地下水の減少量} \end{array} \right\} \dots (9.1)$$

埼玉県および関東地域を対象として資料を整理して、 ΔO 、 ΔH を求め、 λe を種々仮定するとかん養量は表-9.1のように表わされる。

このうち S 、44～50については東京都では水位回復期にあたっており、動水頭の上昇による見かけの水位上昇が多く含まれているのでこの間の資料を除いて考える必要がある。その結果 $\lambda e = 0.05$ の場合で $1,000 \sim 1,300 \times 10^3 m^3/\text{日}$ 、 $\lambda e = 0.1$ の場合で $320 \sim 550 \times 10^3 m^3/\text{日}$ のかん養量となる。関東地域を対象とした各種シミュレーションでは $\lambda e = 0.1$ 程度となっている。

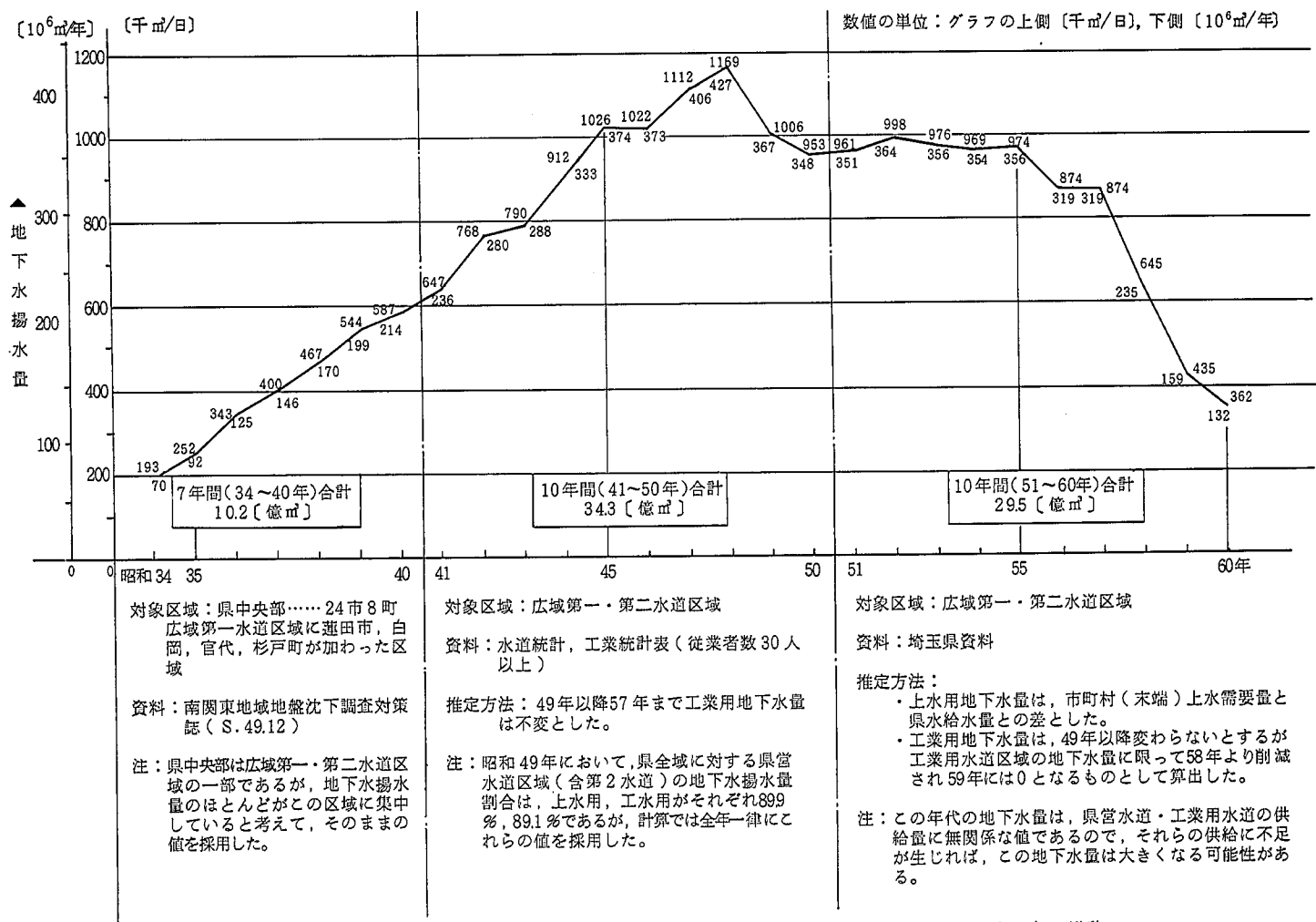


図-9.13 埼玉県広域第一・第二水道区域内の地下水揚水量(上水用+工業用)の推移

そこで当面の粗い推定としては関東地域全体でのかん養量は、 $500 \sim 1000 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$ 、埼玉県地域は $250 \sim 500 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{日}$ 程度と推定されるのである。これは年間 $100 \sim 200 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、10年間で $1 \sim 2 \times 10^9 \text{ m}^3$ の揚水量に相当し、前記の地下水使用予定量、懸念される使用量にくらべてかなり小さいものであることがわかる。

以上のような事情から埼玉県南部においては想定される地下水揚水量

を少しでも小さくすることが重要な課題であることが理解されよう。

4. 昭和53年～60年における水需給見通し

以上の説明をまとめると、今後8年間における水需給は次のようになる。

昭和53～60年水需要量・供給量合計

総需要量 (給水ベース) 7 7.7 億 m ³	{	地表水需要量 (取水ベース) 5 8.4 億 m ³	{	地表水供給量 (取水ベース)
		48.6 億 m ³ ……水資源開発計画が順調のとき		
		37.3 億 m ³ ……水資源開発計画が2年遅れると仮定したとき		
		30.2 億 m ³ ……水資源開発計画が6年遅れると仮定したとき		
		計画地下水量 (給水ベース) 2 2.3 億 m ³		

従って予想される水不足は $980 \times 10^6 \text{ m}^3$ (水資源開発計画が順調のとき)、 $2,110 \times 10^6 \text{ m}^3$ (同2年遅れ)、 $2,820 \times 10^6 \text{ m}^3$ (同6年遅れ)となるが、いま有効な対策がないまま仮に、これらの不足が地下水使用にしろよせされるとすれば、地下水揚水量は削減どころか、これまで見なかったような大きな規模の揚水が行なわれることになる。

9.3 連結利用の方法と設定条件

埼玉県営水道区域(含計画)内の上水道および工業用水道に関する水需給ギャップ量を荒川秋ヶ瀬取水堰地点における豊水(余剰水)で穴埋めし、豊水でまかないきれない不足量を地下水で補給しようとする訳であるが、このとき豊水補給可能量および地下水依存量等を算出して、後節での検討に資することを意図している。

ここでは、これらの試算の方法を説明するとともに、試算の前提となっている条件を列挙する。

1. 試算方法

試算方法の概略は図-9.14のとおりであるので、この図に沿って説明を加える。

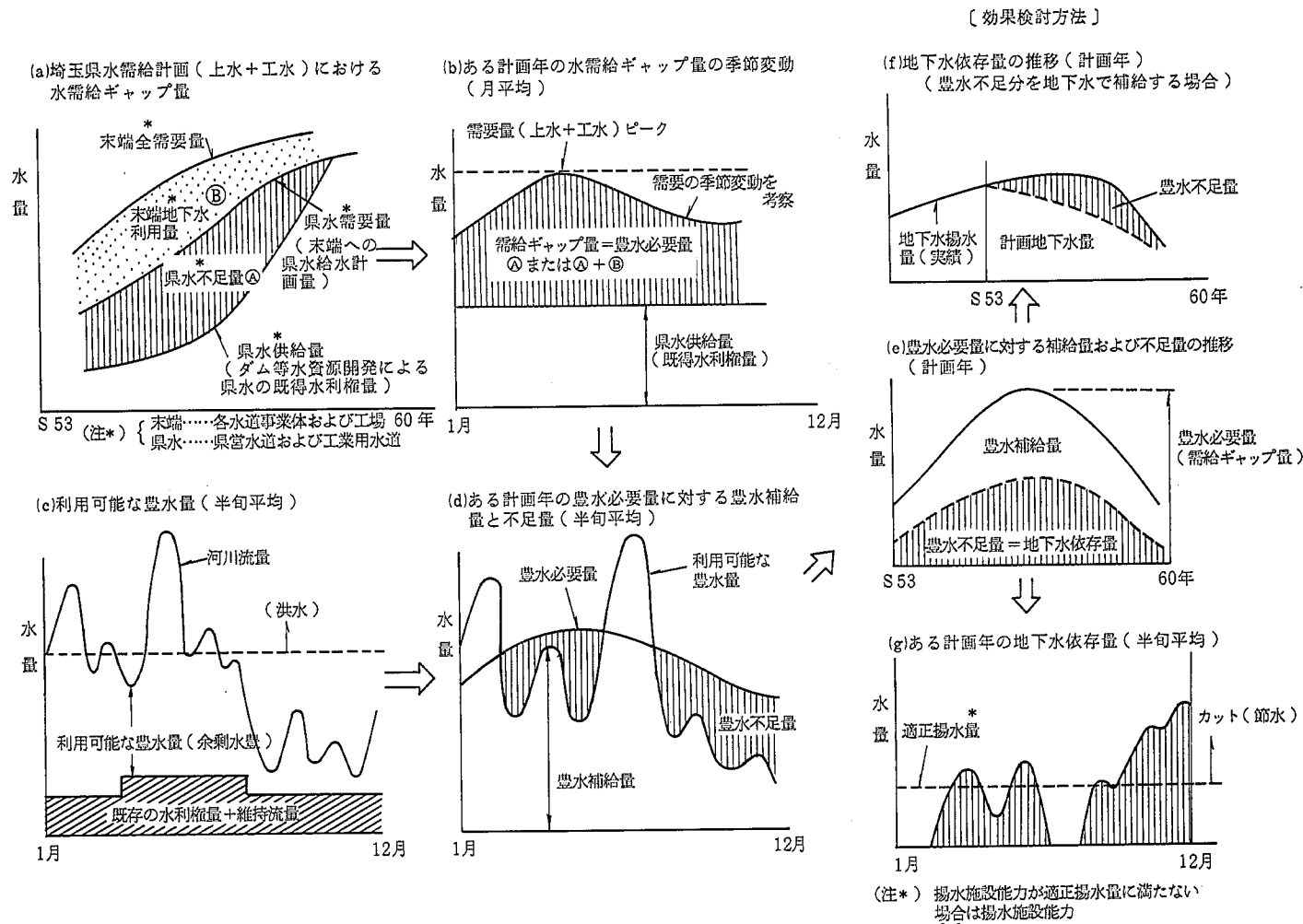
① 埼玉県水需給計画(上水+工業)における水需給ギャップ量(年平均または最大量)

県営水道および工業用水道(以下これらを県水と称する)は、それぞれ各市町村の水道事業体および工

表-9.1 ΔO , ΔI , ΔV の見積り(南関東地域)

年	有効間隙率 λ_e	$\Delta V (\times 10^4 \text{ m}^3)$	$\Delta O (\times 10^4 \text{ m}^3)$	$\Delta I (\times 10^4 \text{ m}^3)$
S35~40	5%	126,900	313,000	186,100
	10%	254,000		59,000
	15%	380,700		-67,700
S40~44	5%	113,300	307,100	193,800
	10%	226,600		80,500
	15%	339,900		32,800
S44~50	5%	-48,800	575,240	624,040
	10%	-97,550		672,790
	15%	-146,300		721,540

$$\Delta V = \lambda_e \cdot \Delta H.S (= \Delta O - \Delta I)$$



図一 9.14 河川水（豊水）と地下水の連結利用計算方法

場（以下これらを末端あるいは末端水利用者と称する）に河川水を給水する事業である。

県水に関する需要量（末端への給水量）と地表水供給量（ダム等水資源開発による県水の確保水利権量）との間には、フルプラン目標の60年では両者のバランスがとれるが、中間年次では水需給ギャップ（以下これを県水不足量と称する）が生じる。

また、末端需要量に対しては、全てを県水でまかなうわけではなく、従来よりは規制された形ではあるが地下水利用も予定されている。（以下これを末端地下水利用量と称する）。

一般的には県水不足量だけが水需給ギャップといえるが、河川水と地下水の連結利用においては県水不足量のみならず、末端地下水利用量の削減効果をも期待しているため、ここでは河川豊水（余剰水）補給対象としての水需給ギャップ量すなわち豊水必要量に、県水不足量だけの場合と、県水不足量に末端地下水利用量を加えた場合との2通りを考える。

⑥ ある計画年（将来）の水需給ギャップ量の季節変動（月平均）

需要量には、毎年ほぼ一定した季節変動パターンがあるから、ある計画年の水需給ギャップ量は、その季節変動を考えた需要量からその年の県水供給量（一定）を差引いたものであり、そして、それが河川水（豊水）補給対象すなわち豊水必要量の季節変動となる。

なお、ここでいう計画年とは53年からフルプラン目標の60年までとする。

⑦ 利用可能な豊水量（半旬平均）

河川水を取水しようとする地点において、河川流量（または流況ともいう）から既存の水利権量および河川維持流量（以下これらを既存確保量とする）を差引いた残りが利用可能な豊水量（余剰水量）である。

ここでは、河川流況、既存確保量とも過去の実績を使用する（適用しようとする流況の存在した年を流況適用年ということにする）。

しかし、秋ヶ瀬の流量は、上流のさまざまな要因が複合して現実には決まっていること、ダム等による十分な水資源開発が行なわれるまでの経過的な対策として河川水と地下水の連結利用を考えていることから、今回のような試算にも意味があるものと思われる。

⑧ ある計画年の豊水必要量に対する豊水補給量と不足量（半旬平均）

豊水利用において、必要量に対して補給しうる量を豊水補給量とし、補給できない部分の量を豊水不足量とする。

⑥でみてきた水需給ギャップ量すなわち豊水必要量と、⑦でみてきた利用可能な豊水量とを比較して、いずれか小さい方の値が豊水補給量となり、後者が前者に満たない場合に限ってそのギャップが豊水不足量となる。

この豊水不足量は、何か他の水源手当や需要抑制などの対策を施さなければ、今までのように地下水に依らざるを得ない量（以下地下水依存量という）である。

⑨ 豊水必要量に対する補給量と不足量の推移（計画年）

計画年毎に、⑧でみた半旬別の豊水補給量と不足量とを年間累計する。

⑩ 地下水依存量の推移（計画年）

⑨で算出した豊水不足量を全て地下水に依らざるを得ない量とみて、計画年に予定の地下水揚水量に豊水不足量を加えたものを全地下水依存量とする。

これによって、河川水と地下水の連結利用の効果を検討する。

- ・ 豊水補給対象：県水不足分のみ
- ・ 合理化、節水は考えない
- ・ 計画年：56年（需給ギャップ最大年）

- ・ 水源開発：計画通り進行
- ・ 流況（適用年）：48年（渇水年）
……荒川秋ヶ瀬地点

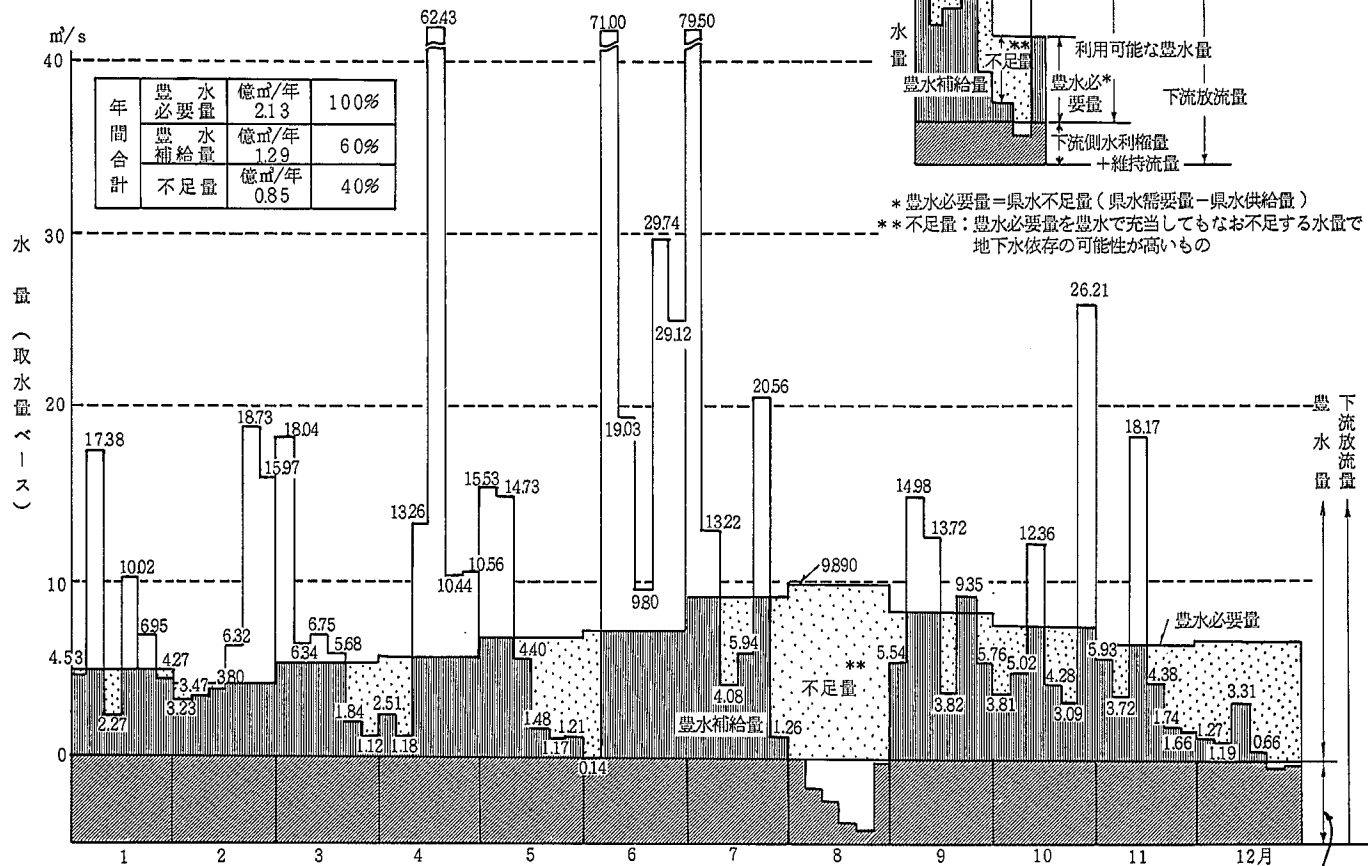


図 - 9.15 豊水利用計算の一例（半月別水量）

下流側水利縮量 + 維持流量
(この場合は維持流量 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ のみ)



図-9.17 今回の対象区域(工水……含計画)

③ ある計画年の地下水依存量（半月平均）

④でみた半月別豊水不足量のことであり、これによってどの時期に地下水揚水が集中し、どのくらいの揚水量ピークとなるのか、あるいは揚水不要なのはいつかなど、連結利用の地下水に与える短期的影響が検討できる。

また、もし適正揚水量なる限界値（揚水施設能力が適正揚水量に満たない場合は揚水施設能力が限界値となる）があるとすれば、地下水依存量がその限界値を越えるようなときは節水等の対策を要するであろう。

以上は試算の手順を示したが、実際の昭和48年の流況を適用し、56年における県水不足量を豊水必要量として、先の④の関係を表したのが図-9.15である。

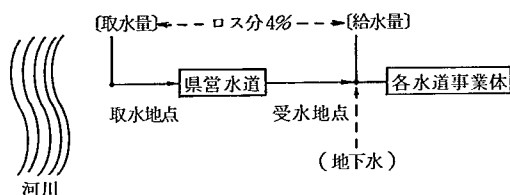
2. 設定条件

① 対象地域

図-9.16, 9.17のように県営水道の広域第一・第二水道区域を対象とする。例外として、工水の地表水需要量については、対象区域外の深谷市（北部工業用水道区域内）の分は含まれており、また対象区域内であってかつ工業用水道区域外の分（無視しうる）は除外されている。

② 給水量の取水量

各水道事業体が県営水道から受水する地点での水量を給水量とし、県営水道が河川から取水する地点での水量を取水量とする。



取水量は、給水量にロス分として、上水で4%（過去の実績）工水で8.4%を加算した水量である。

今回試算に関するデータは、埼玉県資料によった。たとえば上水の平均給水量は、給水人口に1日平均給水量を乗じて算出されている。この1人1日平均給水量（原単位）は、家庭用水はもちろん都市活動用水と、さらに漏水等損失も加味された水量である。

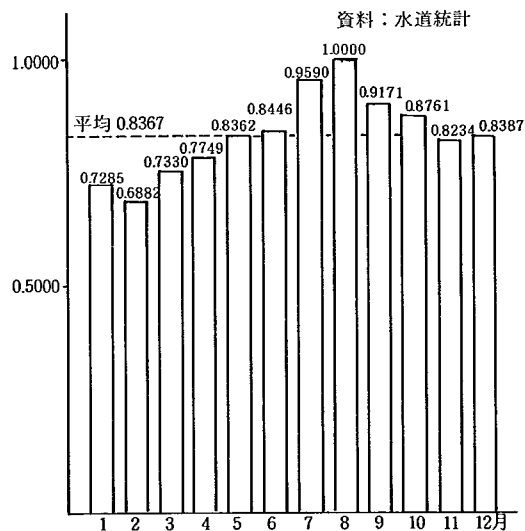
豊水利用に関する試算において、地表水はすべて河川に着目する量すなわち取水量をベースとする。

一方地下水は、各水道事業体内に点在する井戸で揚水されていることから、すべて給水量をベースとする。

③ 豊水補給対象

豊水補給対象としての水需給ギャップ量（豊水必要量）は、県水不足量のみの場合と、県水

注）8月分（最大値）を1.0000とする



最大値（8月）/平均値 = 1.1952

最小値（2月）/平均値 = 0.8225

最大値（8月）/最小値（2月）= 1.4531

図-9.18 埼玉県水道（県全域）の月別給水量指数（S45～49の平均）の変化

不足量に上水の末端地下水利用量を加えた場合の2通りのケースを考える。

後者の場合、上水に関しては末端全需要量が河川水と地下水の連結利用の対象となっている。

④ 需要量の季節変動

上水については月別の季節変化があり、工水については年間通じて一定であるとする。

上水の月別変化は、計画年（53～60年）において同様なパターンをとるものとし、その月別変化のデータとして過去5年間（45～49年）の平均値（県全域）を採用する（図－9.18参照）。

最大量があるのは上水だけで、

$$\text{上水最大量} = \text{係数} \times \text{平均値}$$

ただし、係数＝月最大量／平均量＝1.1952（5年間の平均）となる。工水の場合はすべて平均量とみなす。

⑤ 河川流況の適用方法

昭和43～50年の流況がそのまま昭和53～60年（順序はそのまま対応する）に再現するものとする。

なお昭和48年は、昭和43年以降の中で最も渇水の厳しい年であるので、最渇水年の影響を再検討する場合には、昭和48年の流況をすべて計画年（53～60年）に適用する。

① 県水供給量（ダム等水源開発による既得水利権量）の取扱い。

県水供給量については、計画年毎に定められた水量が、年間を通じて確保できるものとする。これは、河川自然流況が渇水時であろうとこれに無関係に供給できるものとする。

荒川自流暫定水利権は53年以降の既得水量から除く。荒川自流に関して、滝沢ダムが完成するまでの暫定水利権量1.361〔 m^3/S 〕は、49年7月に取得されたものであり、今回適用するはずのS.43～50年秋ヶ瀬地点の流況には、S.49,50年を除いてこの水利権量に相当する取水の影響がでていないからである。

9.4 連結利用の効果

1. 連結利用の効果（水資源開発が順調の場合）

まず、はじめに水資源開発計画が順調な場合の連結利用の効果を見てみよう。

9.1の豊水利用可能量の検討において、豊水を取水しようとする施設の規模が大きくなるほど、豊水使用量も大きくなることを見てきた。

取水された豊水の補給対象としては、県水の不足量すなわち水需給ギャップ量とすることが考えられる。

この場合の試算結果が図－9.19である。先に見た8年間合計の不足水量 $980 \times 10^6 \text{ m}^3$ のうち、 $840 \times 10^6 \text{ m}^3$ を補給できることがわかる。残り $140 \times 10^6 \text{ m}^3$ が地下水に依るものとしても、計画地下水使用量 $2,230 \times 10^6 \text{ m}^3$ に対して6%強に過ぎず、水需給ギャップがかなり改善されることがわかる。

次に豊水補給の対象を広げて、県水不足量に末端地下水利用量（ここでは上水用地下水だけを考えており、工水用地下水は除外している）を加えたものを豊水必要量とした場合の試算結果が、図－9.20である。

これをみると、豊水補給量は8年間合計で $1,710 \times 10^6 \text{ m}^3$ となり、先の不足量 $980 \times 10^6 \text{ m}^3$ を十分満たすばかりでなく、地下水依存量が、予定されていた地下水揚水量 $2,230 \times 10^6 \text{ m}^3$ のうち $85 \times 10^6 \text{ m}^3$ （約38%）も削減できて $1,380 \times 10^6 \text{ m}^3$ となり、先きに推定した地下水かん養量 $800 \sim 1,600 \times 10^6 \text{ m}^3$ 8年

- ・ 豊水補給対象：県水不足量のみ
- ・ 水源開発：計画通り進行
- ・ 流況（適用）年：昭和43～50年の流況がそっくり昭和53～60年（各々に対応）に再現するものとする。

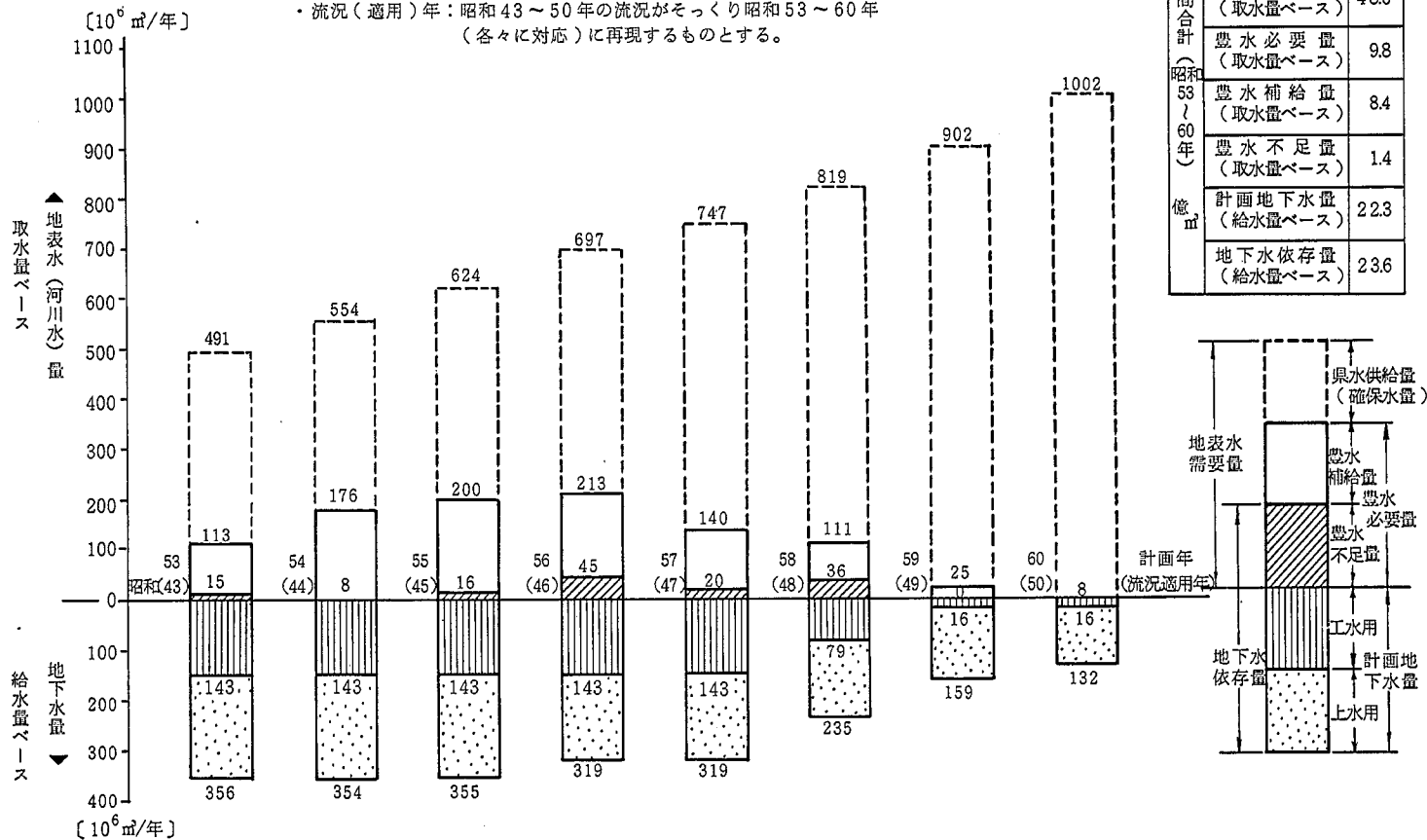


図-9.19 河川水と地下水の連結利用に関する試算結果

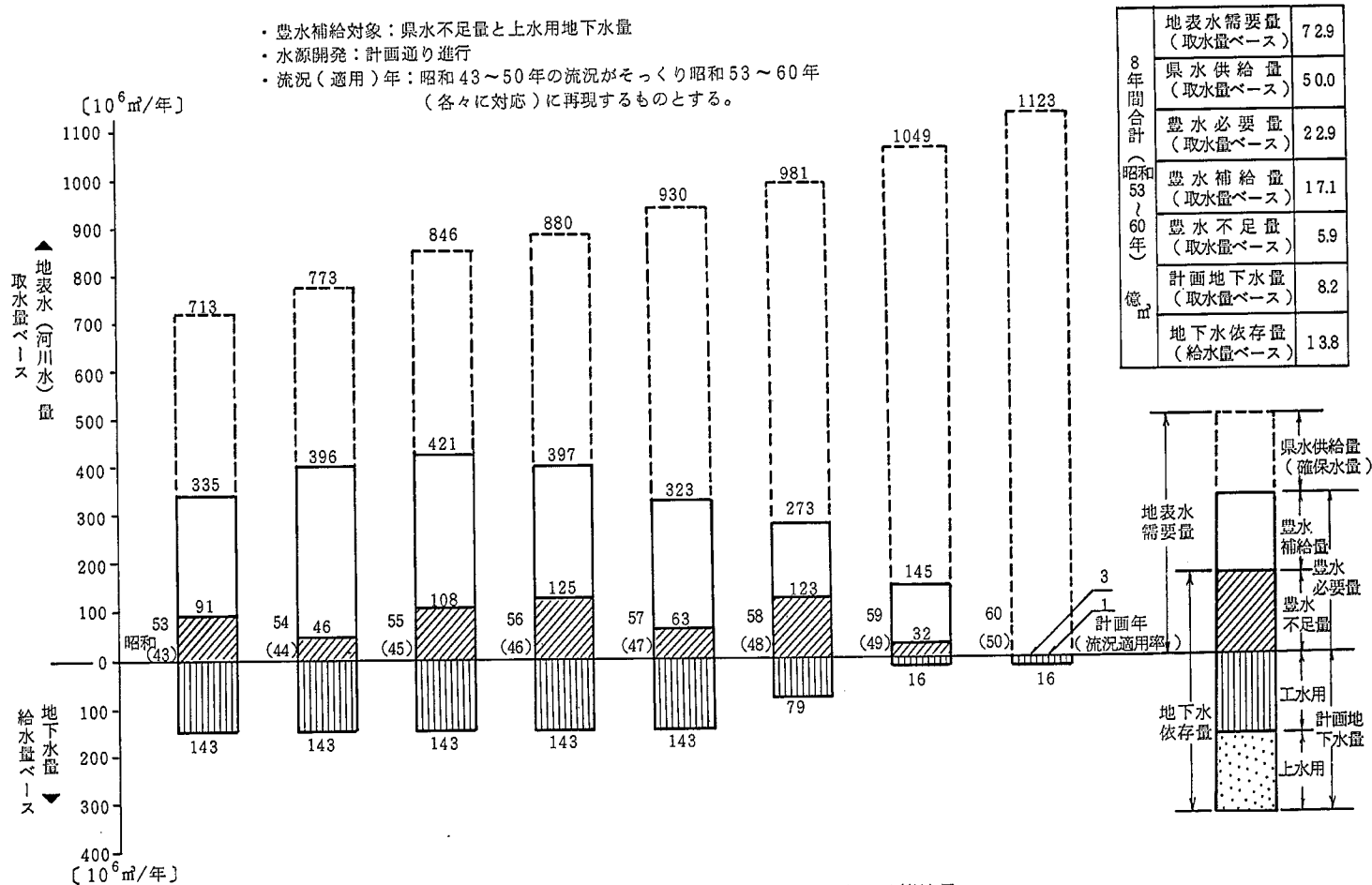


図-9.20 河川水と地下水の連結利用に関する試算結果

水源開発計画が予定通り進行する場合

※印：数字は8年間（昭和53～60年）合計値

($10^6 \text{ m}^3/\text{年}$) (給水量ベース)

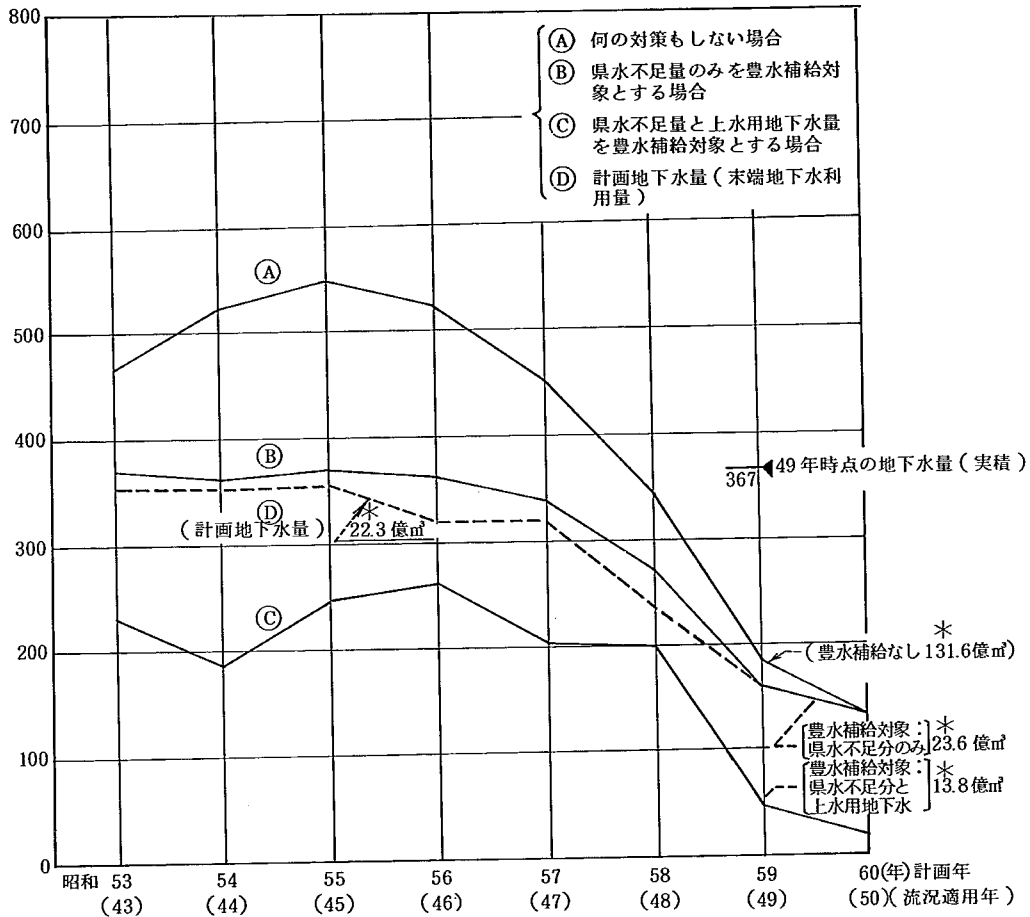


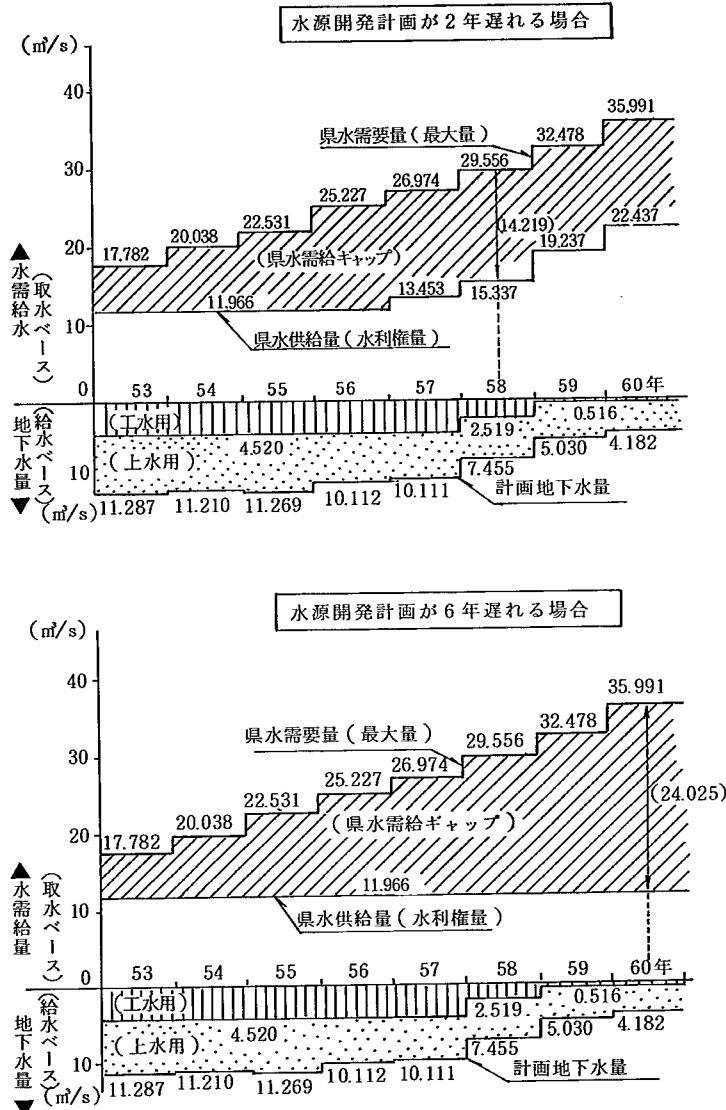
図-9.21 河川水（豊水）と地下水の連結利用の効果（地下水依存量の推移）

間）の範囲に入り、地下水の使用も適正化されることがわかる。

図-9.21は、2通りの連結利用について、地下水依存量の推移を見たものである。

これを見ると、何らの対策もないままに、水需給のギャップがそのまま地下水使用に振りかえられた場合には、地下水使用量は8年間で約 $320 \times 10^3 \text{ m}^3$ にも達することが懸念される。これに対して、河川水と地下水の連結利用を行なうと、たとえば、県水不足量と上水用地下水量を河川豊水の補給対策とすると、水需給のギャップを完全に解消した上、なお、計画している地下水取水量を4割も削減することができる。

なお、連結利用の対象として上水用および工水用の両地下水が考えられるが、上水道については井戸が各市町村の水道事業者の管理の下にあって、広域県営水道の配管と結ばれているのに対し、工業用水および事業所の井戸は各工場又は事業所毎にあり、工業用水道が設置されるまでは県営水道と結ばれることもないという状況にある。



このため、連結利用の対象地下水としては、実際的には上水道用地下水の連結が容易であり、工業用地地下水については次の段階での利用を考えるのが得策と思われる。

そこで、今回の試算では連結利用地下水の対象としては、上水道用地下水のみを考えた。

2. 水資源開発が遅れた場合の連結利用の効果

前節は、水資源開発の進捗が順調な場合を想定したが、首都圏では種々の理由でダム建設が順調ではない。

図9.22は、水資源開発の進捗が仮に2年及び6年遅れて完成した場合を想定したものである。この場合には、需給のギャップはそれぞれ最大14 m³/S、25 m³/Sにも達することがわかる。

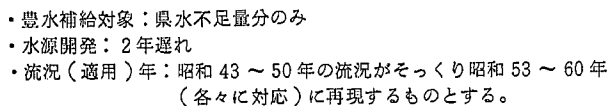
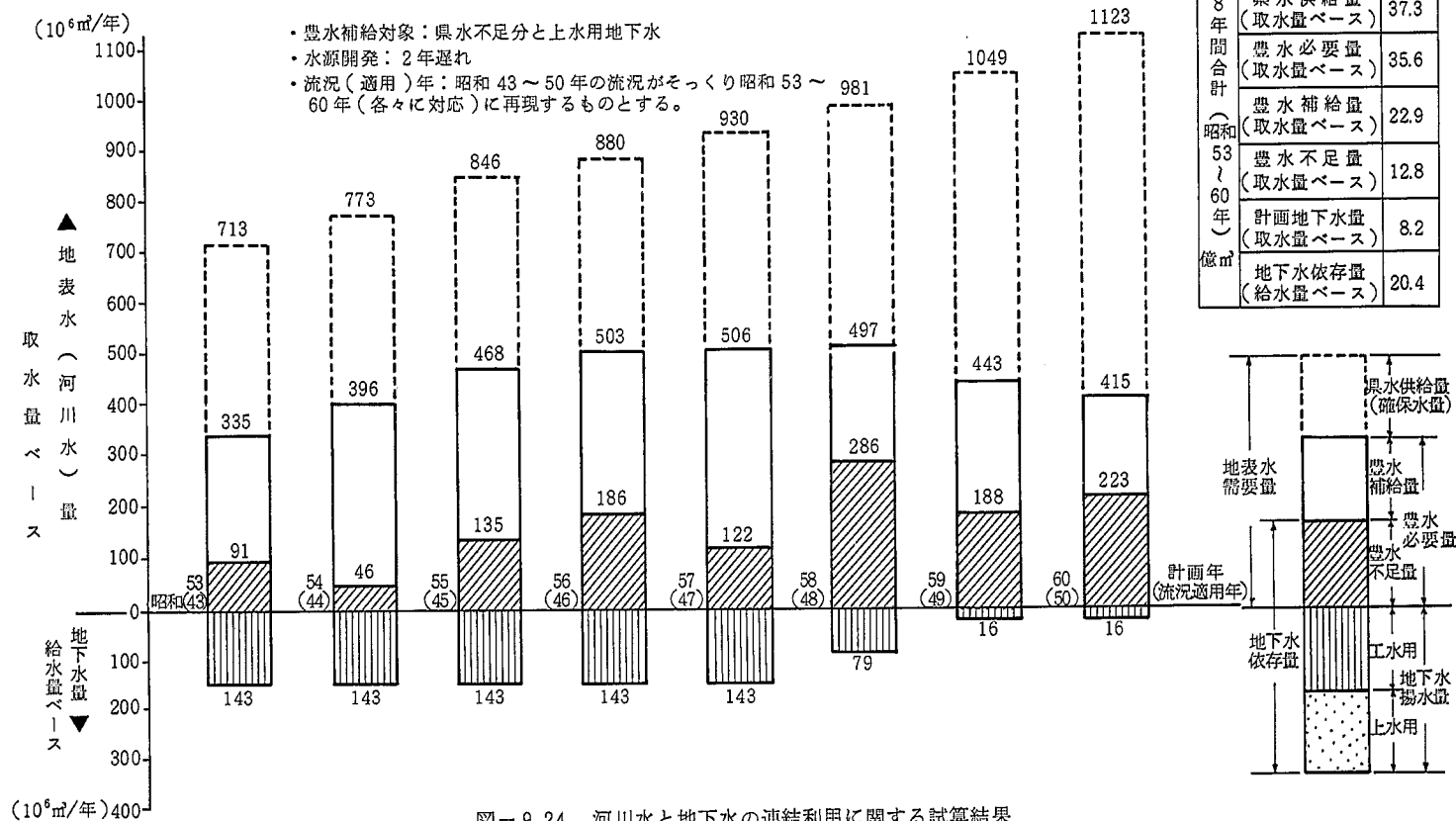


図-9.23 河川水と地下水の連結利用に関する試算結果



図一 9. 24 河川水と地下水の連結利用に関する試算結果

水源開発計画が2年遅れる場合

※印：数字は8年間（昭和53～60年）合計値
 (10⁶m³/年) (給水量ベース)

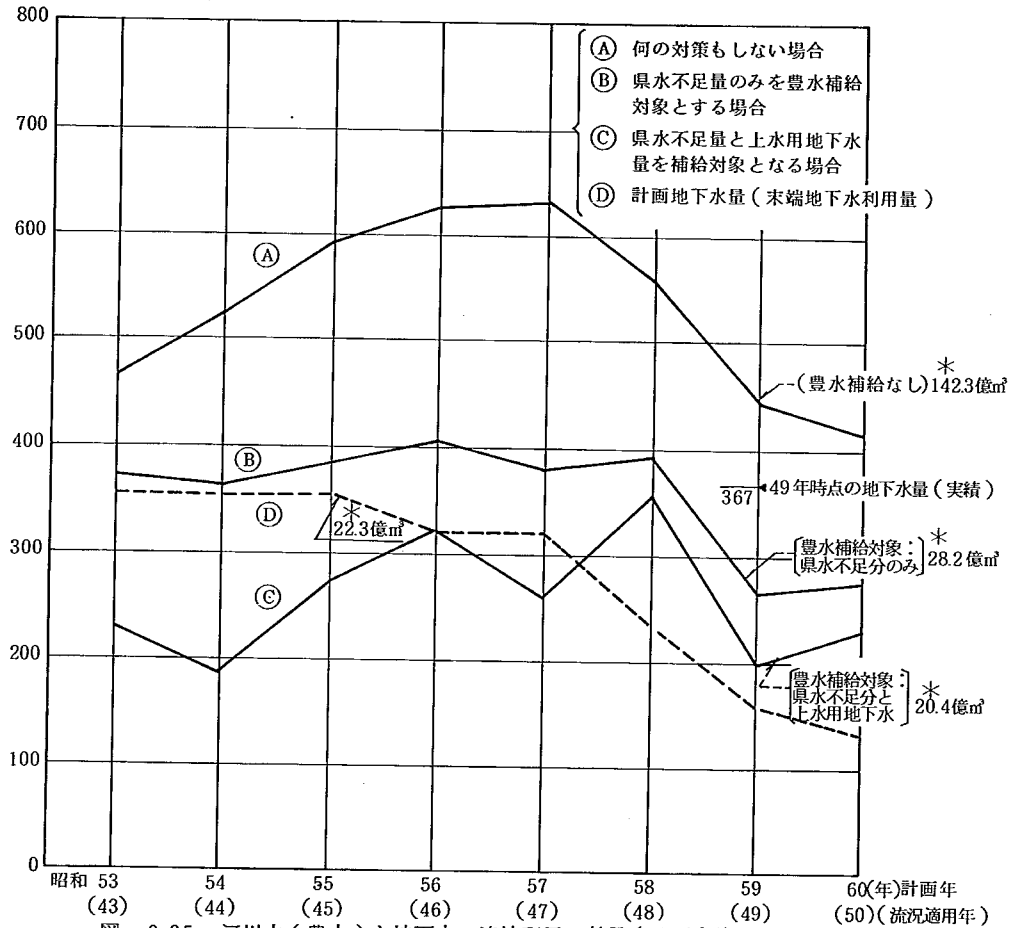


図-9.25 河川水（豊水）と地下水の連結利用の効果（地下水依存量の推移）

このような場合についての連結利用の効果を試算した結果を次にあげる。

水資源開発の進捗が2年遅れたときの結果が図-9.23, 9.24, 9.25である。

上水用地下水使用をも連結利用の対象に加えたときは、8年間の地下水使用は約 200×10^6 m³ となり、この場合でも計画している地下水使用量 220×10^6 m³ より小さくなるのがわかる。

水資源開発の進捗が6年遅れた場合の試算結果を図-9.26, 9.27, 9.28に示す。

水資源開発が6年遅れるということは、利根川・荒川水資源開発基本計画（フルプラン）目標の昭和60年までに新たな水資源開発が全くないということであって、仮定条件がやや厳しいかも知れない。

計算結果をみると、連結利用の対象として上水用地下水を考えた場合でも、使用地下水の総量は $2,500 \times 10^6$ m³ に達することがわかる。これは、何も対策をしない場合の値 $4,900 \times 10^6$ m³ にくらべれば約

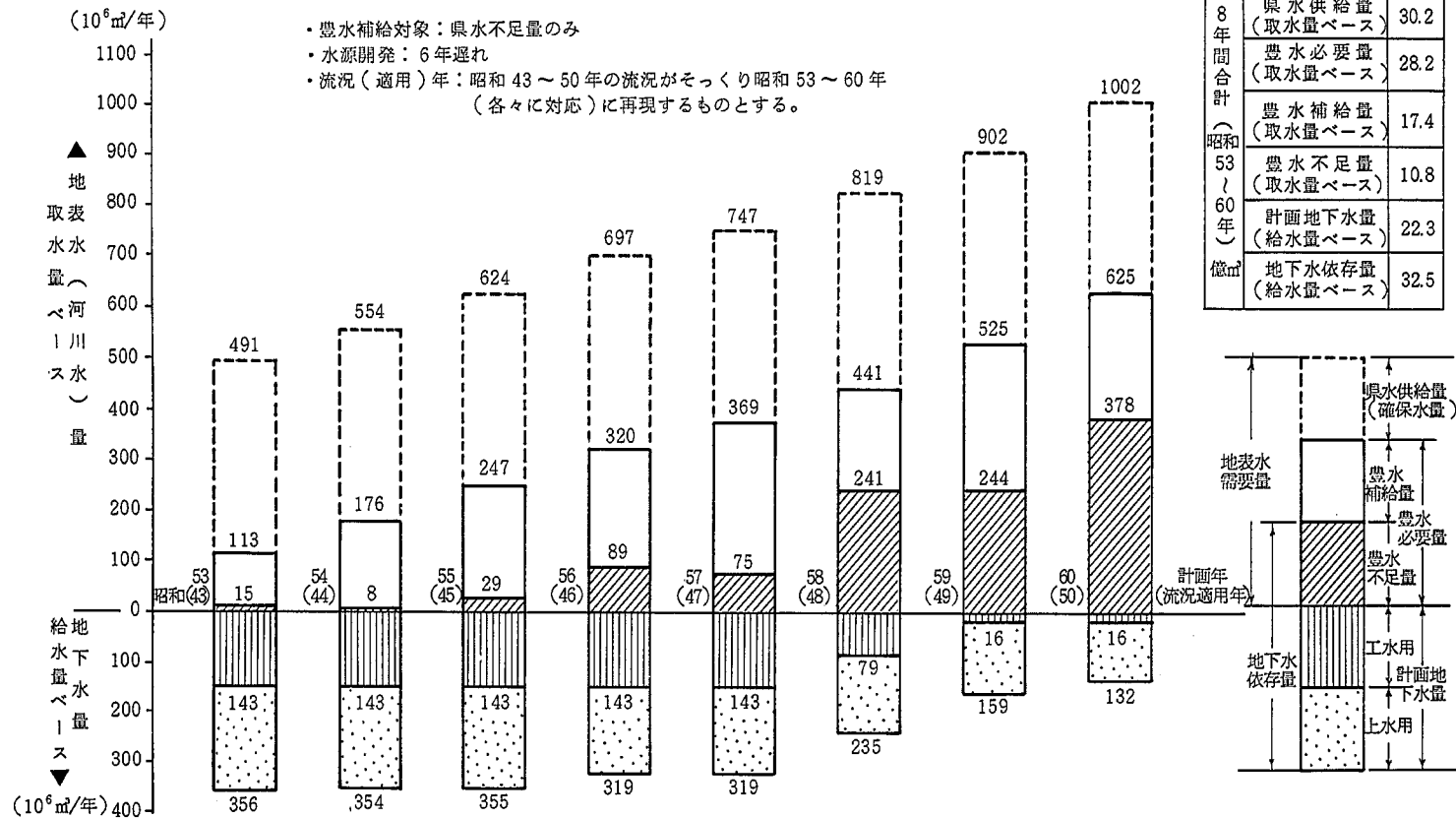


図-9.26 河川水と地下水の連結利用に関する試算結果

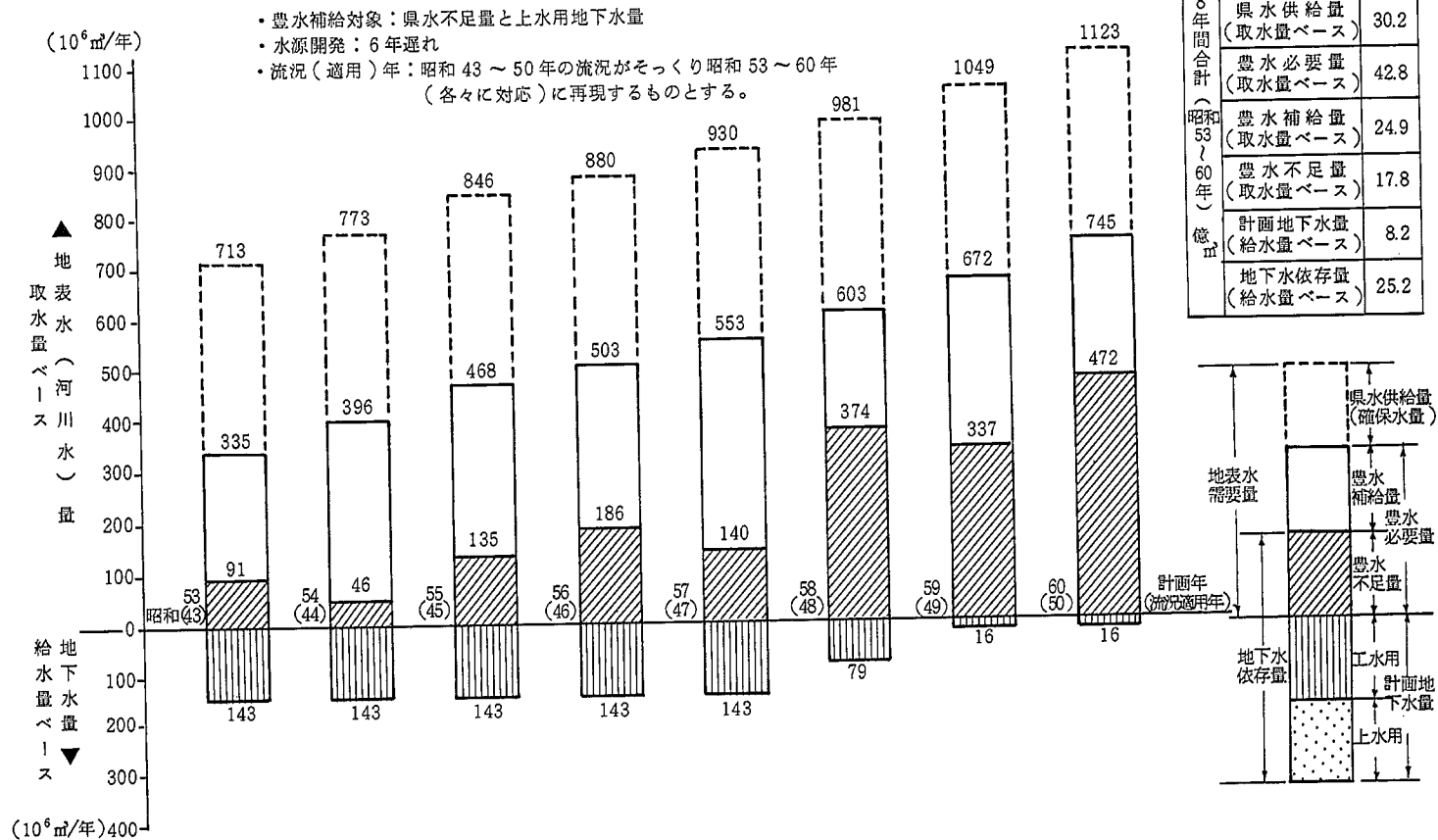


図-9.27 河川水と地下水の連結利用に関する試算結果

水源開発計画が6年遅れる場合

＊印：数字は8年間（昭和53～60年）合計値

($10^6 \text{ m}^3/\text{年}$) (給水量ベース)

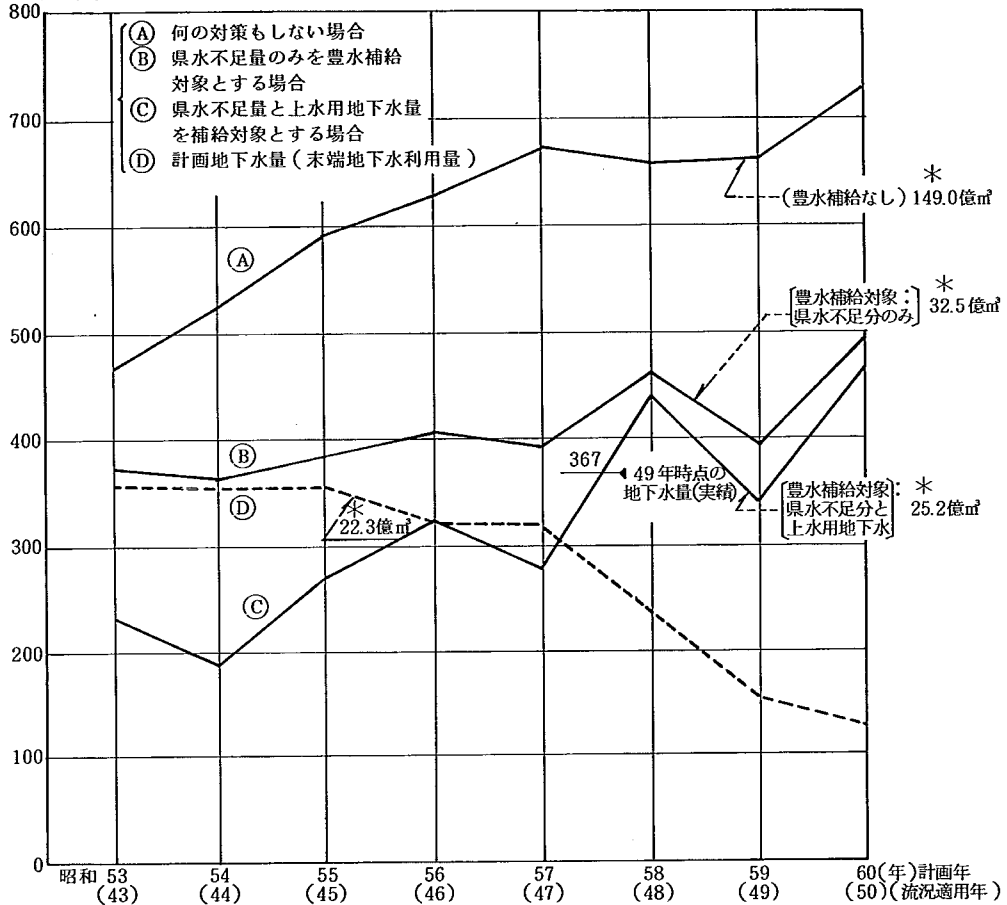


図-9.28 河川水（豊水）と地下水の連結利用の効果（地下水依存量の推移）

$2,400 \times 10^6$ トンを節約したことになり、その効果は決して小さくないが、推定される地下水かん養量 $800 \sim 1,600 \times 10^6 \text{ m}^3$ に比べるとかなり大きな値である。

従って、水資源開発が大巾に遅れるときは連結利用だけでは、引き続き望ましくない地下水利用が続くことになる。

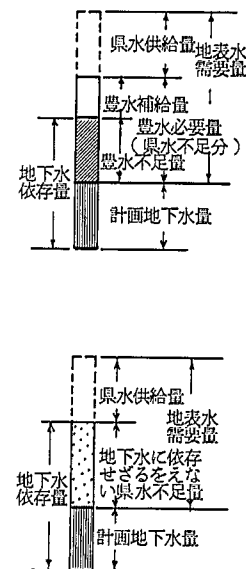
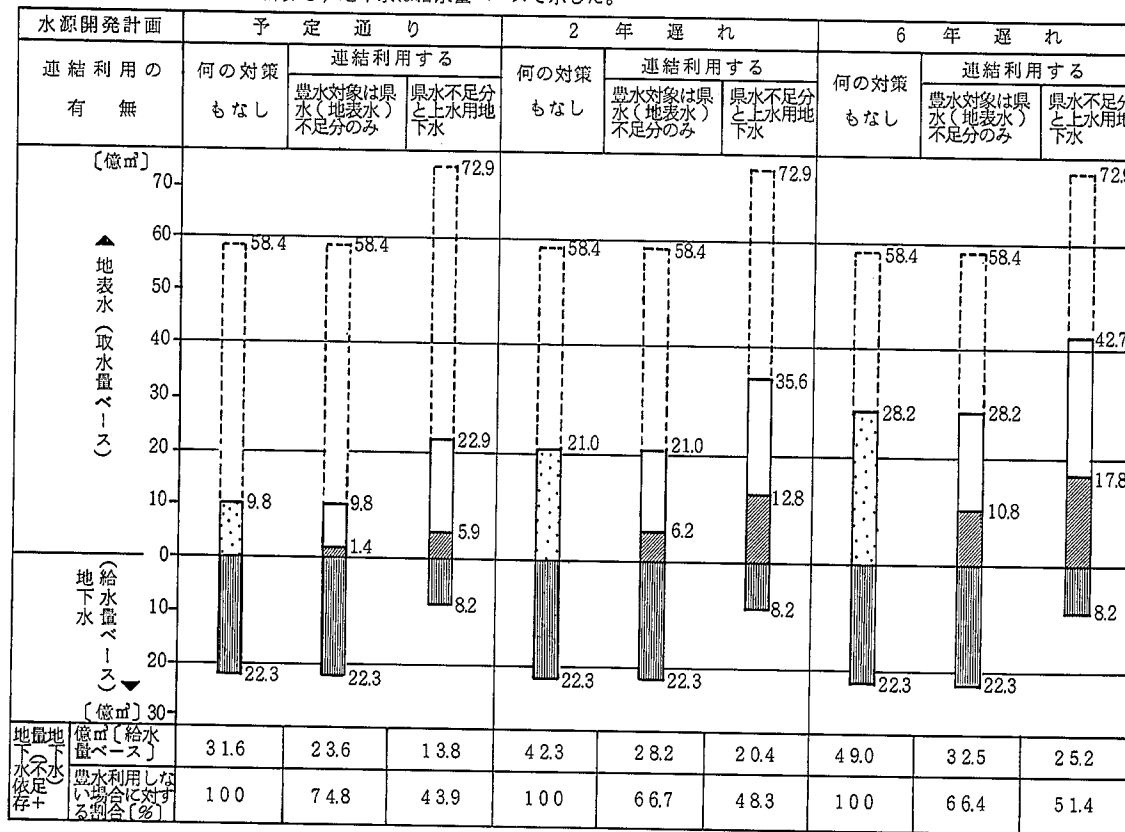
そこで、次節では、連結利用以外の対策についても考察してみよう。

なお、以上に検討した全ケースの比較を、図-9.29 に示す。

9.5 水使用合理化を含む連結利用

前節においては、河川水と地下水を連結利用して水需給ギャップの解消と、地下水利用の適正化の効果

- ・荒川豊水利用には、昭和43～50年の流況がそっくり昭和53～60年（各々対応する）に再現するものとした。
- ・結果（数値）は、8年間（53～60年）の合計値をとった。
- ・ここでは合理化、節水は考えない。
- ・県水不足量または豊水不足量は、地下水依存量とした。
- ・各水道事業体の受水地点での水量を給水量とし、河川取水口での県水量を取水量（ロス分を含むため上水は給水量の4%増し、工水は8.4%増し）とした。
- ・地表水は取水量ベースで計算し、地下水は給水量ベースで示した。



図－9.29 河川水（豊水）と地下水の連結利用の効果

を検討してみた。その結果、水資源開発が計画通りであれば、水需給のギャップを解消した上で、地下水利用も適正化される見通しであることが判明したが、水資源開発の進捗がおくれるときは、適当でない地下水利用を解消できないことがわかった。

一方、水資源対策には、水供給対策と並行して水需要抑制対策があるが、その中でも生活水の節水や、工業における回収率向上等による淡水取水量節減など、水使用合理化が最も有望であり、これらは短期的水需給ギャップの穴埋めといった暫定的処置だけでなく、長期的にも期待される対策である。

そこで次に、供給側対策である河川地下水の連結利用と、需要側対策としての水使用合理化を組み合わせた場合について検討してみよう。

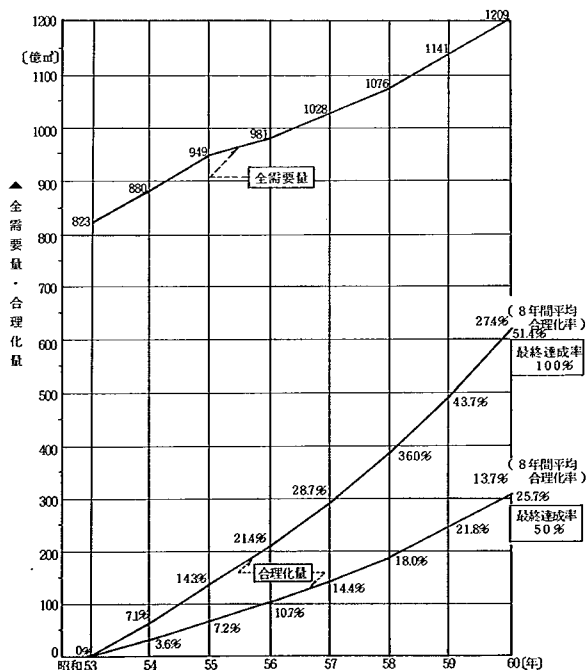
1. 合理化量の設定と試算方法

水使用合理化技術については、最近研究が進んでおり、生活水については理想的には38%程度¹⁾、工業用水については75%程度²⁾の節約が可能であるとの見通しが得られている。

その合理化(含節水)の内訳は、上水(生活水)についてみると、最高節水率38%のうち家庭洗濯用水が約12%、家庭炊事用水が約6%、家庭風呂用水が約4%、事務所水洗便所用水が約3%、家庭水洗便所用水が約3%、事務所厨房用水が約2%節水できるとした。

工水については、最高合理化率75%のうち、製品処理洗浄用水が32%、冷却温調用水が約32%、その他の用水が約12%合理化できるとした。

上記の結論は必ずしも確定的なものとは言えないがここでは連結利用との組み合わせ効果を推定するのが目的であるから、一応上記の合理可能量を仮定して検討を先に進めよう。



8年間合計

項目	平均合理化率 [%]	合理化率 [%]	全需要量 [億m³]
最終達成率			
0 [%] (合理化しない場合)	0	0	80.9
20 [%]	5.5	4.0	76.5
40 [%]	10.9	8.0	72.0
50 [%]	13.7	11.1	69.8
60 [%]	16.4	13.3	67.6
80 [%]	21.9	17.7	63.2
100 [%]	27.4	22.1	58.8

* 全需要量:

地表水需要量と地下水量(含工水用)とを合計したもの
(工水用地下水は昭和49年の実績値をもとに推定した)

* 合理化量算定方法

- 最終60年において、最高合理化率を、上水が38%、工水が75%(平均51.4%)とする。
- 合理化率が、計画初年53年に0で、漸次直線的に増加し、最終60年において最高合理化率に達する場合を最終達成率100%とする。

図9.30 全需要量と合理化量(上水+工水)……給水量ベース

上記の合理化可能量は、渇水時の一時的な節約量ではなく、水使用機器や工場施設の改善を前提としたものであって、短時間にその値に到達することは難しいであろう。

そこで、計画初年度の合理化率は0とし、次年以降合理化対象量を直線的に増加し、最終60年において理想的な合理化率（上水38%、工水75%）に達すると想定して、この場合を最終達成率100%と呼ぶことにしよう。

又、水使用合理化の達成が昭和60年においても完全でないことも考えられる。そこで、最終達成率50%の場合についても試算を行ってみることにした。

- ・河川水（豊水）と地下水（上水用のみ）との連結利用を考えた場合である。
- ・合理化最終達成率を50%^(注)とした。（8年間平均合理化率：27%）
- （注）：合理化率が計画初年昭和53年に0で漸次直線的に増加し、最終昭和60年において最高合理化率（上水が38.0%、工水が75.0%、平均51.4%）に達する場合を最終達成率100%とする。
- ・*印は8年間合計値

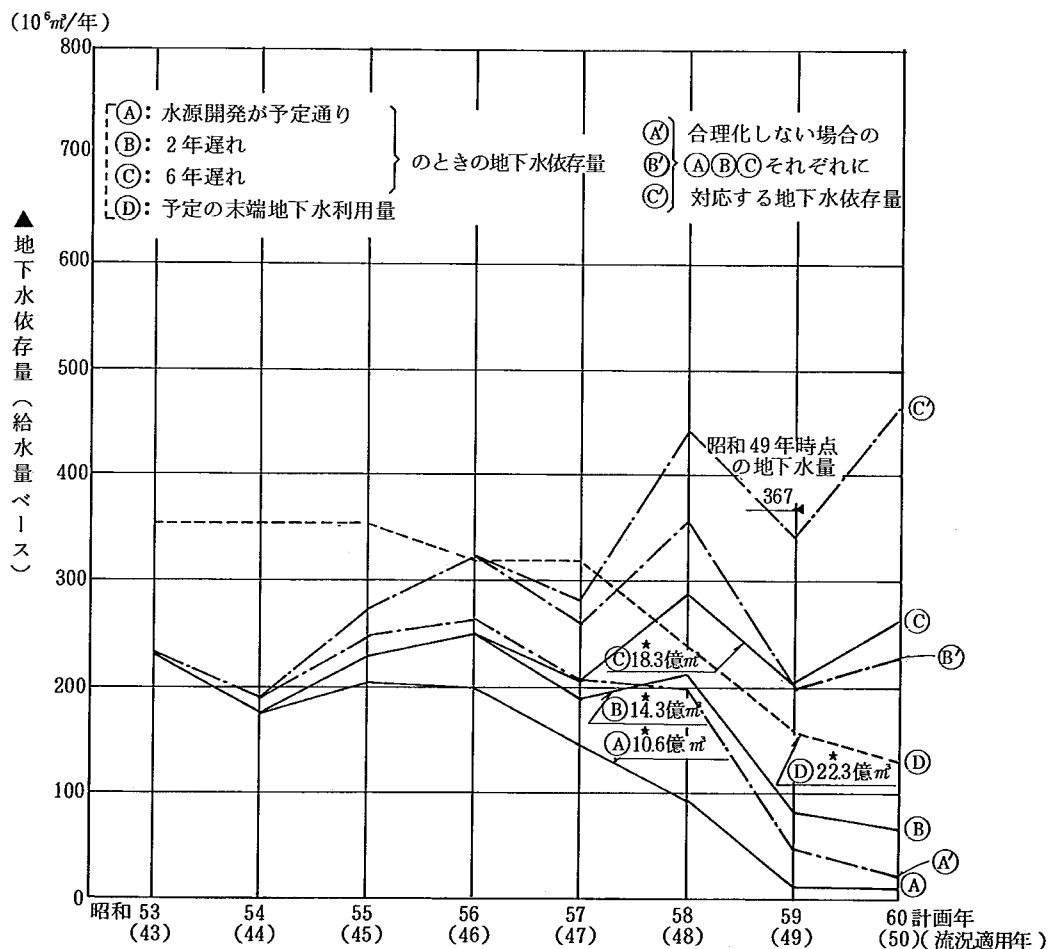
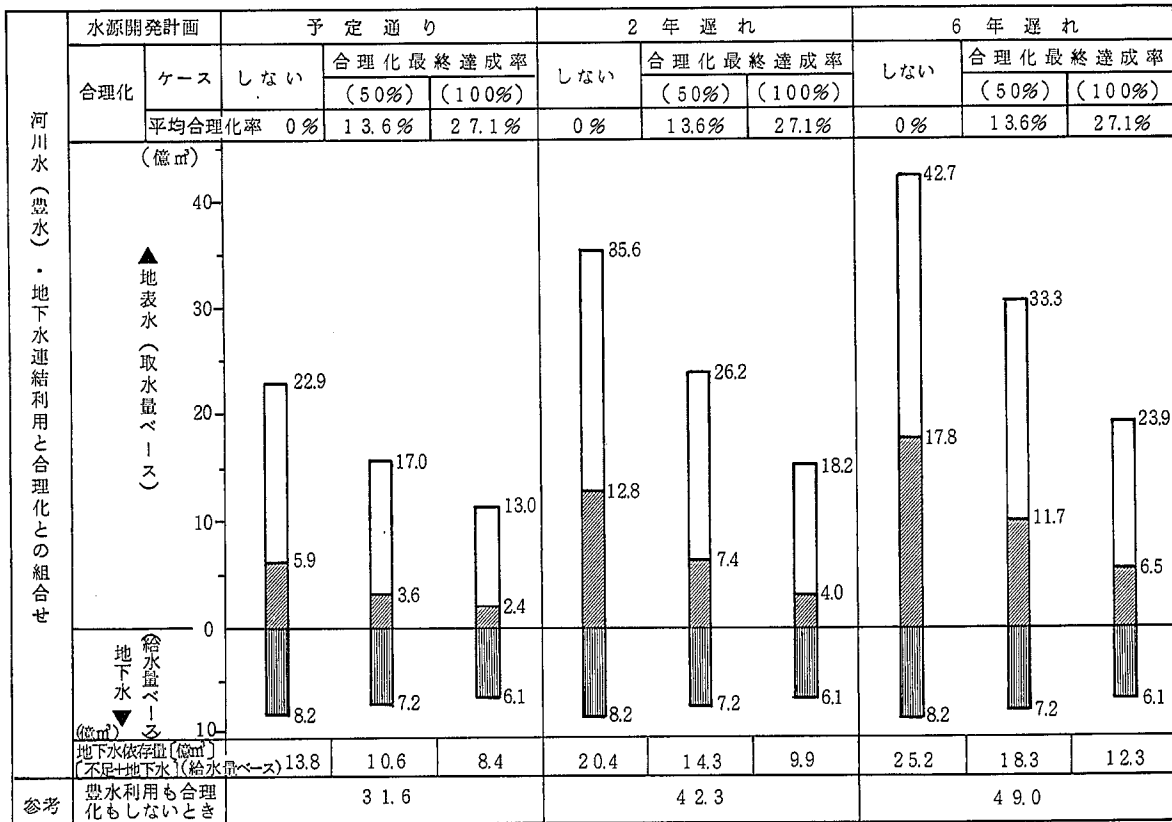


図-9.31 連結利用と合理化組合せの効果（地下水依存量の推移）

- 荒川豊水利用には、昭和 43～50 年の流況がそっくり昭和 53～60 年に再現（各々に対応）するものとした。
- 連結利用の対象とする地下水は、上水用地下水のみとした。
- 合理化については、全需要量（地表水需要量＋地下水量）に対する合理化率が初年昭和 53 年に 0 で漸次直線的に増加し、最終昭和 60 年に最高合理化率（上水が 38.0%、工水が 75.0%、平均 51.4%）に達する場合を、最終達成率 100%とした。
- 結果（数値）は、8 年間（昭和 53～60 年）の合計値とした。
- 地表水は取水量ベース、地下水は給水量ベースとした（〔取水量／給水量〕の値は、上水で 1.04、工水で 1.084 とした）。



図－9.32 河川水（豊水）－地下水連結利用と合理化との組合せによる地下水依存量の削減効果

2. 合理化を含む連結利用の効果

図-9.30は、上記のような条件を設定したときの合理化量の推移を示したものである。最終達成率100%の場合で、8年間平均の合理化率は27.4%、同50%の場合で13.7%となることがわかる。

図-9.31は、最終達成率50%の合理化と連結利用を組み合わせた場合の効果を示すものである。地下水使用量の増大が心配される水資源開発が6年遅れの場合についてみると、合理化を実施すると、昭和58年以降に急激に増大していた地下水使用量が大幅に減少し、昭和57年以前とほぼ同程度の使用量で推移していくことが予想される。これは、需給ギャップの大きくなる後年度において、合理化も次第に達成されて来るためである。

図-9.32は、検討結果をまとめたものである。これを見ると合理化を行うことの効果は大きく、とくに水資源開発がおくれる場合には顕著である。合理化は、必ずしも100%達成されなくても効果がある。例えば、最終達成率50%の場合でも、水資源開発が6年遅れた場合で地下水使用量は8年間で18億 m^3 であり、先に推定した地下水かん養量8～16億 m^3 にかなり近づく結果となっている。

第9章 河川水と地下水の連結利用

要 約

埼玉県においては、今後昭和53年～60年に地下水使用量を $2,230 \times 10^6 \text{m}^3$ と計画しているが、これは昭和60年までの中間年次に生じる大巾な水需給のギャップについての対策を考慮していないものであり、そのままでは実現するかどうか判らない性質のものである。水需給のギャップが発生したときは、これが地下水使用に転嫁される可能性が大きく、これを考慮すると地下水使用量は約 $3,200 \times 10^6 \text{m}^3$ と、過去8年間の使用量に匹敵する地下水使用が行なわれる懸念がある。しかも、これは水資源開発計画が順調に進捗した場合であって、進捗が遅れた場合には、更に大量の地下水使用が行なわれる恐れがある。

これに対して、河川水と地下水を連結利用すれば事態は大巾に改善される。すなわち、水需給のギャップを解消した上でなお地下水使用を現在の計画値程度におさめることが可能になる。

しかし、現在設定されている地下水使用計画量は、推定地下水かん養に比べるとかなり大きな値であり、地下水使用量は出来ればもう少し減少させることが望ましい。このような観点に立つと、連結利用の他に水使用合理化の対策を行なうことが望ましく、その場合には、地下水使用量は大幅に減少し、推定地下水かん養量と同程度になることが判明した。

参 考 文 献

- 1) 国土庁・埼玉県「昭和51年度水利用システム調査報告書—大都市近郊の住宅都市（所沢市）における調査結果について（1977）」
- 2) 建設省土木研究所「水使用合理化技術に関する調査報告書」土研資料1403号（1978）

第 10 章 ま と め

時代の経過につれて経済は発展拡大し、財貨の生産が増加している。いかなる生産活動においても水が関与しているので、人口が増加し、経済が発展するかぎり食糧の増産にしろ、工業生産の拡大にしろ、そのための水需要の増加は避け難いものであり、世界各国における水需要は逐年増加しつつある。わが国もその例外ではない。

一方わが国は世界の中でも多雨国に属しており、一般的には各種用途に供する水が不足することはないと一般には考えられていた。しかし歴史的にみれば干魃による農作物の被害の発生事例も少なくはなく、特に昭和 30 年代以降は、渇水の少なかった昭和 20 年代とは様相を異にし、広範囲かつ深刻な渇水が各地に発生している。

わが国の首都圏など水需要ポテンシャルの大きな地域では、水資源開発の遅れを補う必要から、暫定的に豊水時のみ河川からの取水を許可する水利用が行われているため、水不足になり易い傾向がある。すなわち渇水時を対象とした水利秩序ではなく、平水時、豊水時を対象とした水利秩序が形成されているため、渇水に対する安全度は低くなっている。

このように、水資源開発が遅れたために生起する水不足と、計画対象の基準渇水を上回る異常渇水による水不足とは区別して考える必要があり、この点を本研究の出発点として、渇水対策として貯水池の最適運用と地下水を活用する水管理の手法について考察することとした。

河川の水利用が増加すれば当然水利用率が上昇するが、このことが貯水池の操作運用の上で大きな影響を持つことは明かである。現在の貯水池の運用ルールは、建設時に定められた計画に従って、下流の基準地点における確保流量を満足するよう貯水池から放流することとしている。この場合、計画対象渇水以下の貯水容量の範囲内の放流で渇水が終熄すれば被害は起らないが、限界を越えて渇水が継続すると貯水残量の減少につれて渇水補給量が急激に 0 になって、取水は河川の自流のみに依存せざるを得なくなるため、補給効果を大きく見込んでいる貯水池ほど、換言すれば利用率の高い河川ほど貯水容量が 0 になったあとの取水量の減少は大きく、社会の受ける被害も大きくなる。昭和 53 年の福岡渇水はこれを証明するものである。わが国が全体として水資源開発が進められ、急速に河川の利用率が上昇している現在、渇水時において被害を軽減するための最適の貯水池運用はいかにあるべきかを工学的に明確にしておく必要がある。

本研究では、河川の利用率と貯水池による水資源開発特性との関係、渇水の特性及び渇水被害の実態について考察を加えたあと、利用率が高く過去再々渇水による被害を経験している 3 ダムについて、貯水池の操作運用の方式として、予測方式、段階的節水方式、確率ダイナミック・プログラミング(確率 D.P.)方式の 3 通りの方式を適用して渇水時の貯水池操作をシミュレートし、被害の軽減額を評価基準として比較した結果、

(1) 確率 D.P. 方式が 3 方式の中では渇水被害額を最小にする方式であって最も優れ、節水しない運用方式の結果に比べ約 40% の軽減効果がある。

(2) 段階的節水方式は渇水による打撃を減少せしめ、被害軽減効果も節水しない方式に対し 10 ~ 25 % 多く、優れた運用方式であるが、無効放流が増加する欠点がある。

(3) 気象庁の長期予報を利用して渇水時の運用を行う予測方式は、予報が適中すれば効果があるが、外れると全く効果がなく、効用に安定性を欠いている。

などの点が明らかとなった。

また河川水の効用を増加するため、水管理を地下水にまで拡張し、河川の豊水と地下水の連結利用を行う手法が考えられる。これは地下を大容量の貯水池と考え、地下水の涵養技術の進歩を前提として、河川の表流中の水利用における計画対象渇水年の非超過確率を従来の $1/10$ から大きくし、その結果計画どおり安定供給するのに不足する水量を地下から汲上げようとするものであって、新規利水の開発に有効な手法であるが、地下貯水池の容量規模が大きければ、計画対象渇水を上回る異常渇水時に、緊急対策として地下貯水池からの汲上げ量を追加して補給することも可能である。本研究ではこの地下貯水池の効用を荒川流域における事例研究によって考察した結果、

(1) 地下の滞水層は、地下水の流動も少なく大容量の貯水池として貯水池の補完、異常渇水対策及び当面の緊急対策に使用できる。

(2) 荒川流域においては、地下水涵養技術の開発を前提として、河川水との連結利用により地下貯水池により約 $8\text{ m}^3/\text{s}$ の新規水利が開発できるなどが明らかとなった。

貯水池運用の最適化にしても、地下水と河川水の連結利用にしても、幾つかの解明さるべき問題点がある。貯水池運用の最適化の場合は水需給の均衡を論ずるにあたっての維持用水の取扱い、ダム放流水が河道を流下する場合の河道内の水収支がそれであり、地下水と河川水の連結利用の場合は効率的な地下水涵養技術の開発である。しかしこれらの問題点はあるとしても、本研究の主題の考察の結果は大きく変わることはないと思われる。また渇水の被害原単位については、将来実例の積重ねによる精度の向上によって、貯水池がより一層効果的に運用されることが期待される。

土研資料 第1508号

「渇水時の水管理に関する計画学的研究」

訂正表

P125 表5.2.4.

工場 No.	操業停止による1m ³ 当り損失額			備考
	停止に よる 損失額	月 間 取水量	1 m ³ 当り 損失額	
	e5 *2	e6	e7 *3	
1	171,306	8,145	210	
2	82,352	2,472	333	
3	71,900	715	1,004	
4	10,200	518	197	
5	5,393	244	221	
6	4,140	168	246	
7	21,700	135	1,607	
8	182,000	458	3,974	
9	53,420	335.7	1,591	
10	21,430	190.2	1,127	
11	219,800	173	12,705	
12	24,687	136	1,815	
13	358,173	126.8	28,247	
14	5,920	81	731	

訂正力所を示す