

2-4-4 開発後の運用計算結果

本節では琵琶湖総合開発後の枚方確保流量（月別波型あり、平均161.14 m^3/s ）を対象として（2-4-3）節で設定した取水制限率パターンと同様の考え方で図2-4-4に示す3ケースについて運用計算を実行した。

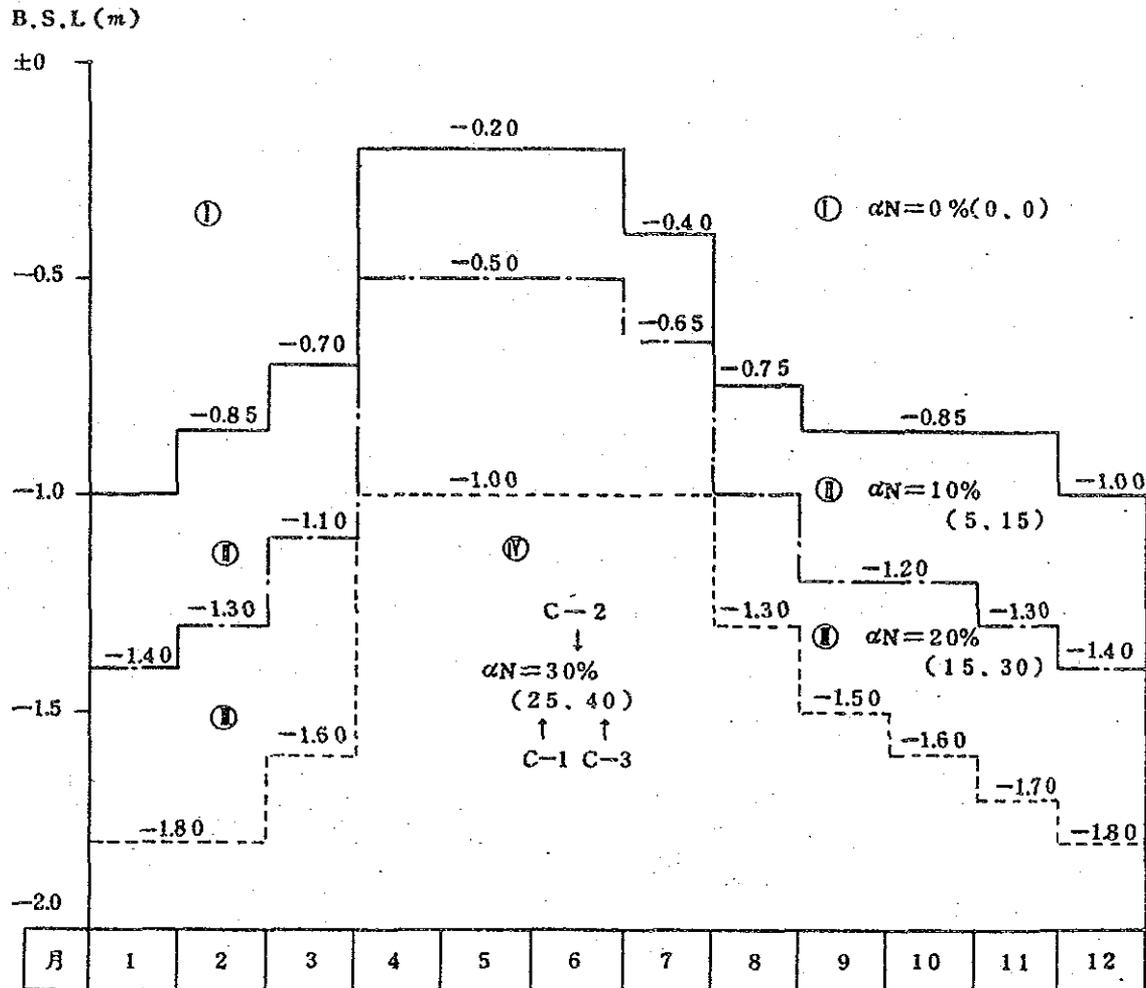


図2-4-4 月別水位別取水制限率パターン（開発後）

計算結果から、計画対象年における最低水位、取水制限日数、P・D値および平均取水制限率をまとめると下表のようになる。また、各年の琵琶湖水位と枚方流量の半月変化を図2-4-6に示す。

これらの図表から次のことが考察できる。

- ア) 3ケースの取水制限率パターンと最低水位、取水制限率およびP・D値等との全般的な関係については開発前の場合とほぼ同じ傾向にある。
- イ) 開発後の特徴的なことは所与の取水制限率そのまま適用される場合が多いことである。

表 2-4-5 各ケースの運用計算結果 (開発後)

計 画 対象年	取水制 限なし	ケース C-1				ケース C-2				ケース C-3			
		SH	t	P·D	\bar{a}	SH	t	P·D	\bar{a}	SH	t	P·D	\bar{a}
T.13	-1.75	-1.35	269	2,445	9.1	-1.27	264	3,185	12.1	-1.23	239	3,862	16.2
S.14	-3.00	-2.06	351	6,045	17.2	-1.89	331	6,938	21.0	-1.76	295	7,482	25.4
(15)	(-3.19)	(-1.62)				(-1.56)				(-1.46)			
26	-1.67	-1.46	183	1,575	8.6	-1.41	178	2,240	12.6	-1.32	162	2,820	17.4
37	-1.62	-1.46	130	1,123	8.6	-1.40	130	1,581	12.2	-1.34	125	1,925	15.4
42	-1.36	-1.27	141	705	5.0	-1.23	126	1,260	10.0	-1.19	111	1,665	15.0
44	-1.58	-1.46	107	616	5.8	-1.40	107	986	9.2	-1.32	107	1,465	13.7
48	-1.33	-1.17	134	670	5.0	-1.13	103	1,076	10.4	-1.08	83	1,245	15.0

注-1 記号説明は前表2-4-4に同じ

これは確保流量が大きいので多少の取水制限率では必要放流量が責任放流量を上回るためである。したがって、開発後では最低水位を一定の許容値におさめるための取水制限率パターンは、許容値と対象年のとり方によっては種々の与え方を選択することが可能である。

ウ) 仮りに、許容値として「-1.50m以内、ただし、S.14年は-2.0m程度」という条件であればケースC-1が該当し、-2.0m以内の条件ではケースC-2が該当する。

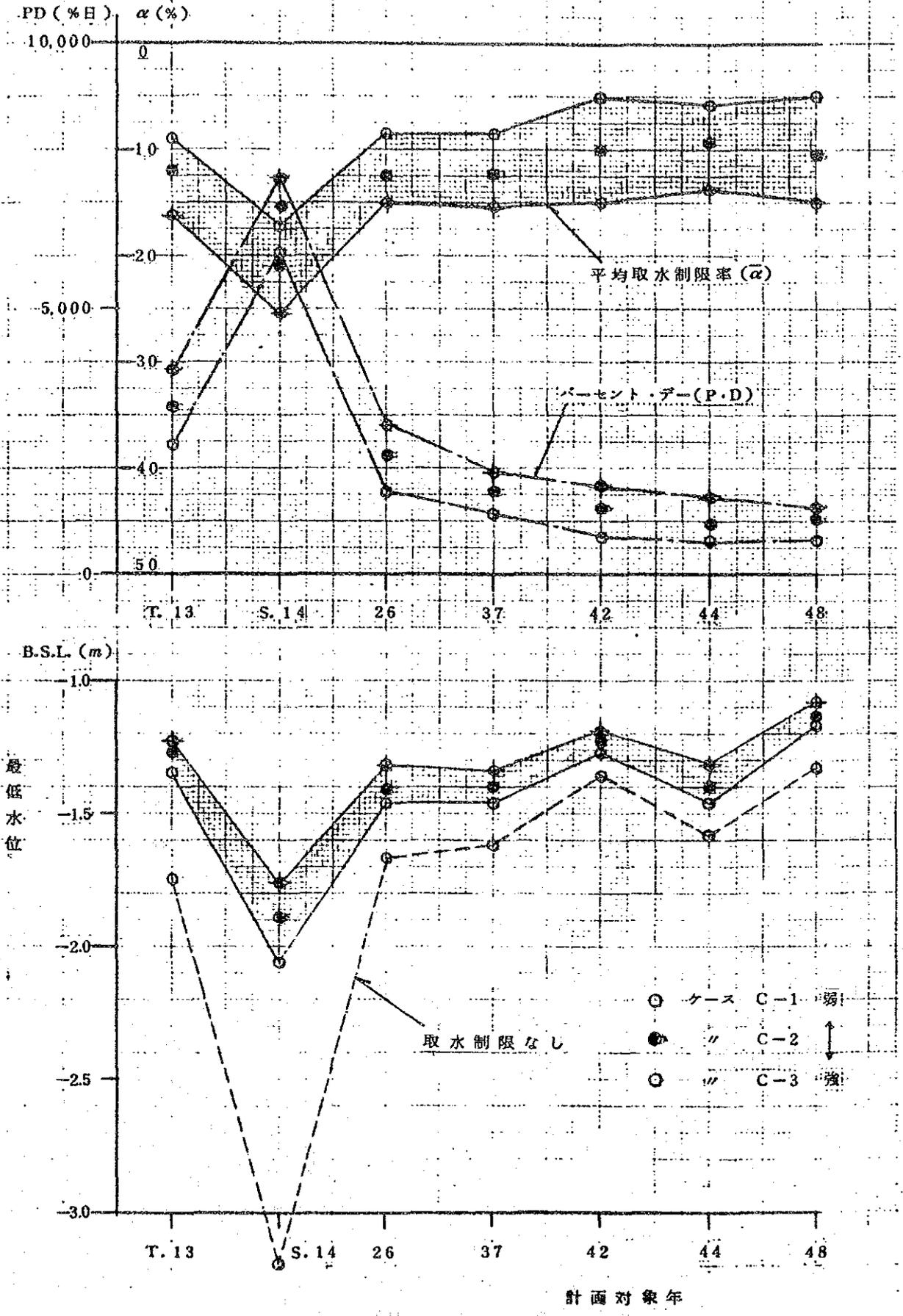


図 2-4-5 取水制限ルール比較図 (開発後)

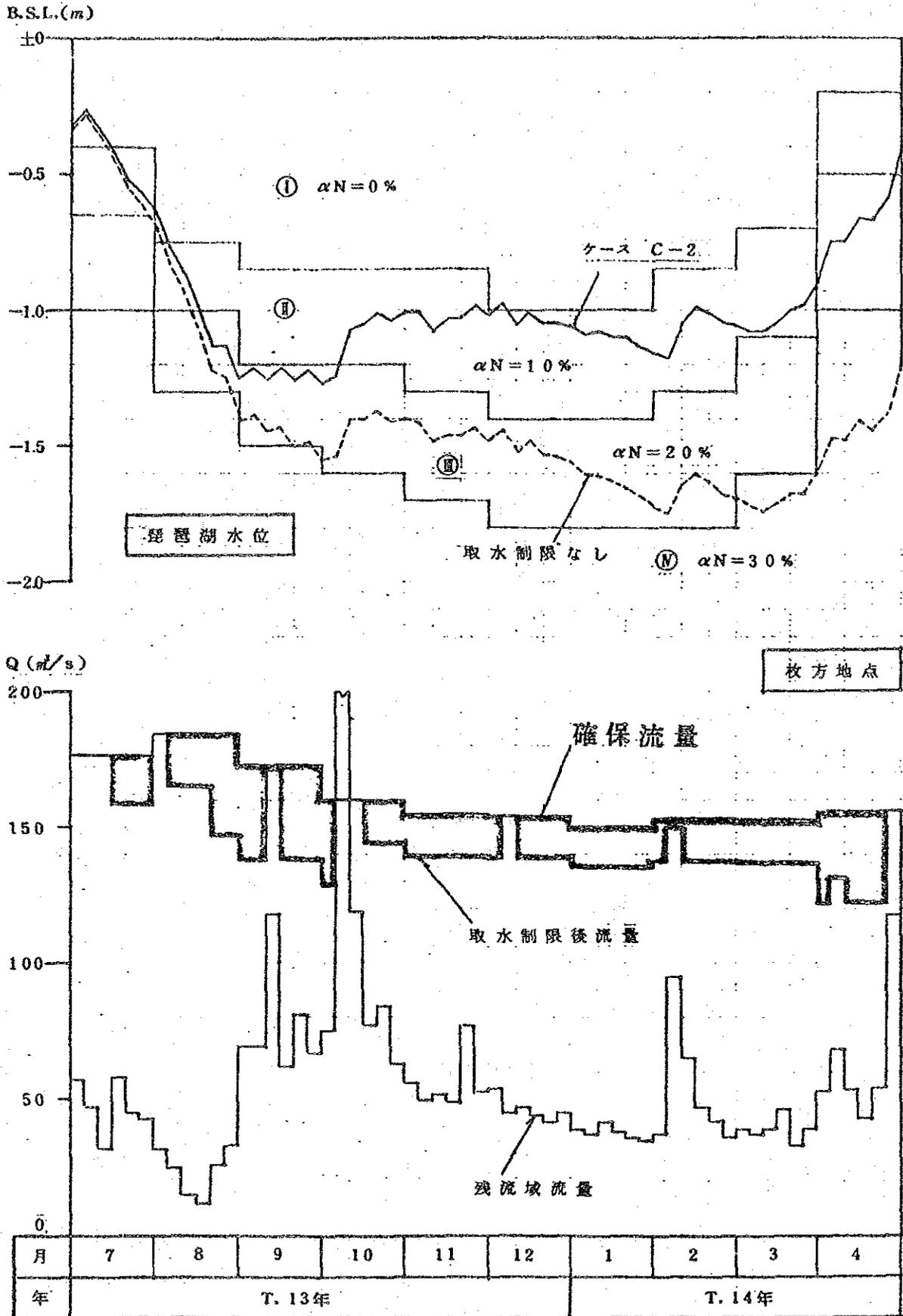


図2-4-6~1 琵琶湖水位と枚方流況図(開発後)

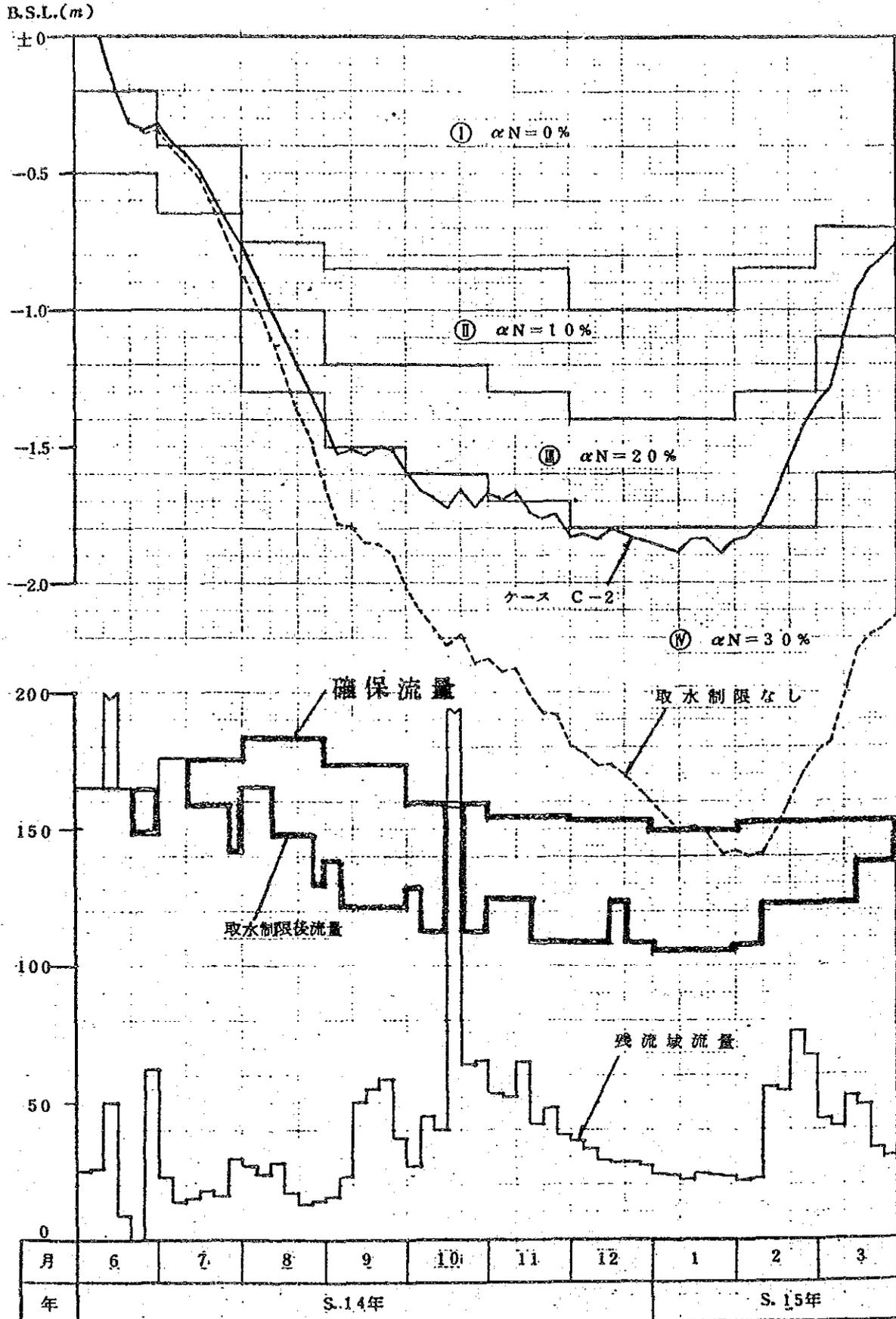


図2-4-6~2 琵琶湖水位と枚方流況図(開発後)

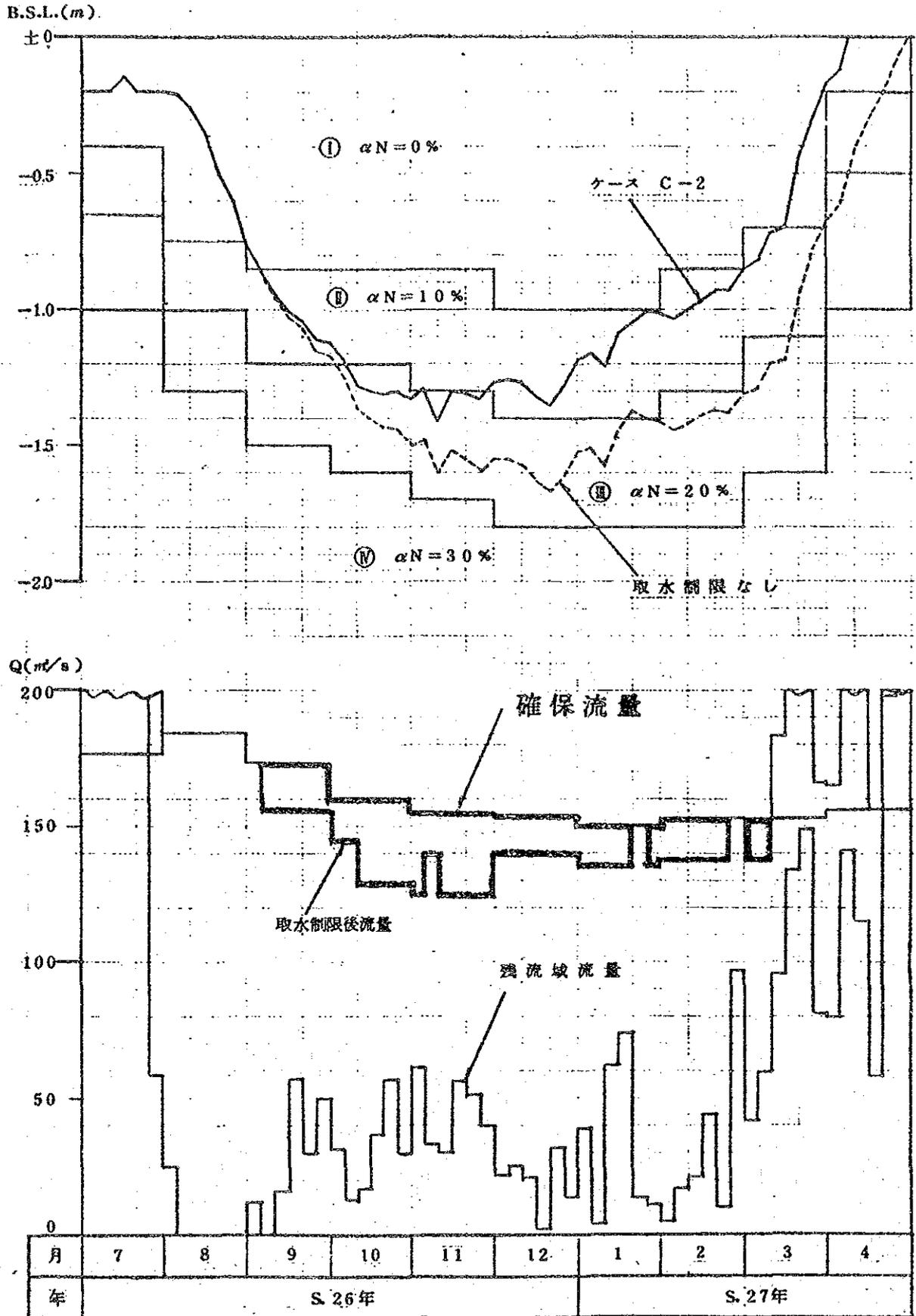


図 2-4-6~3 琵琶湖水位と枚方流況図 (開発後)

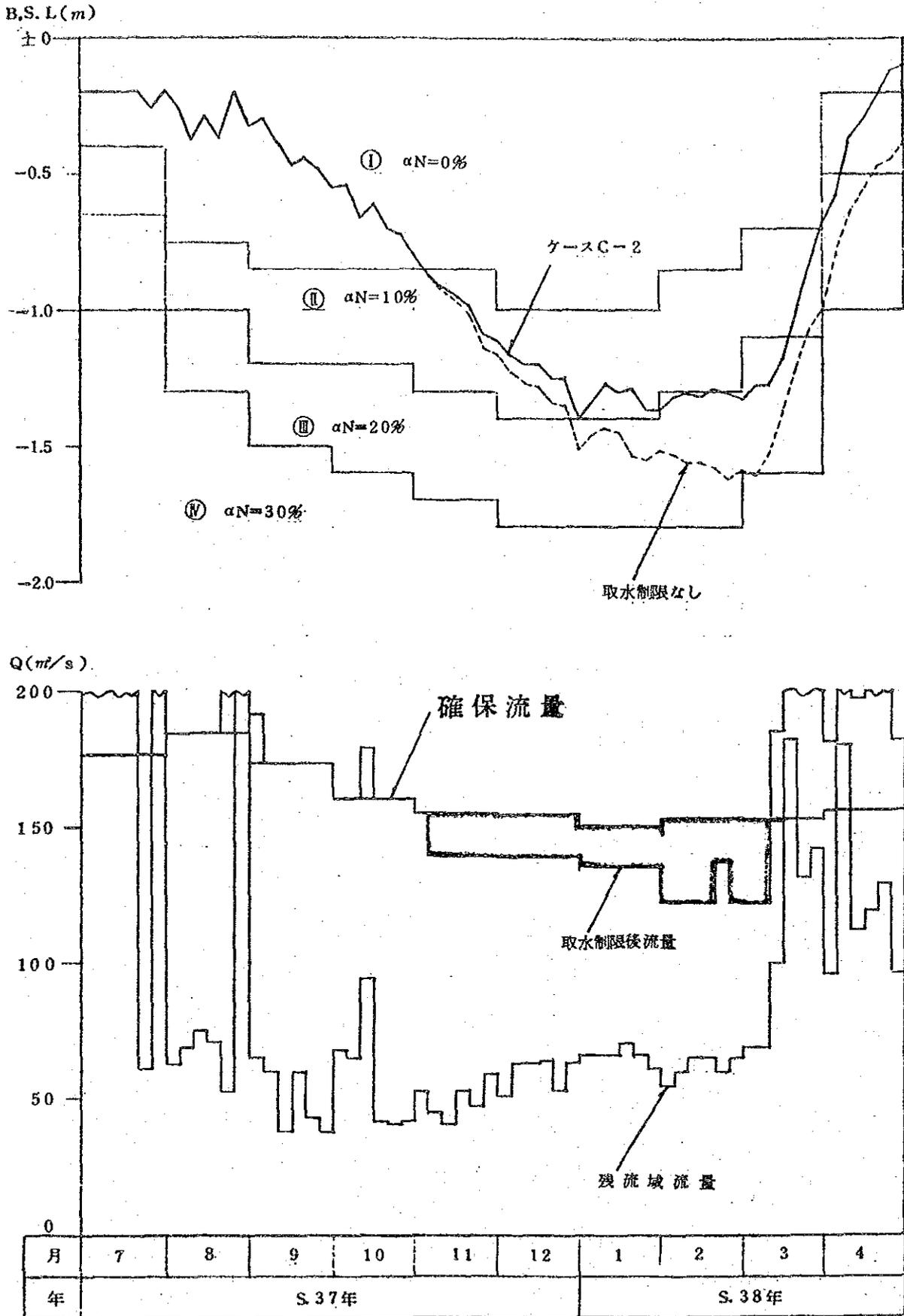


図2-4-6~4 琵琶湖水位と枚方流況図(開発後)

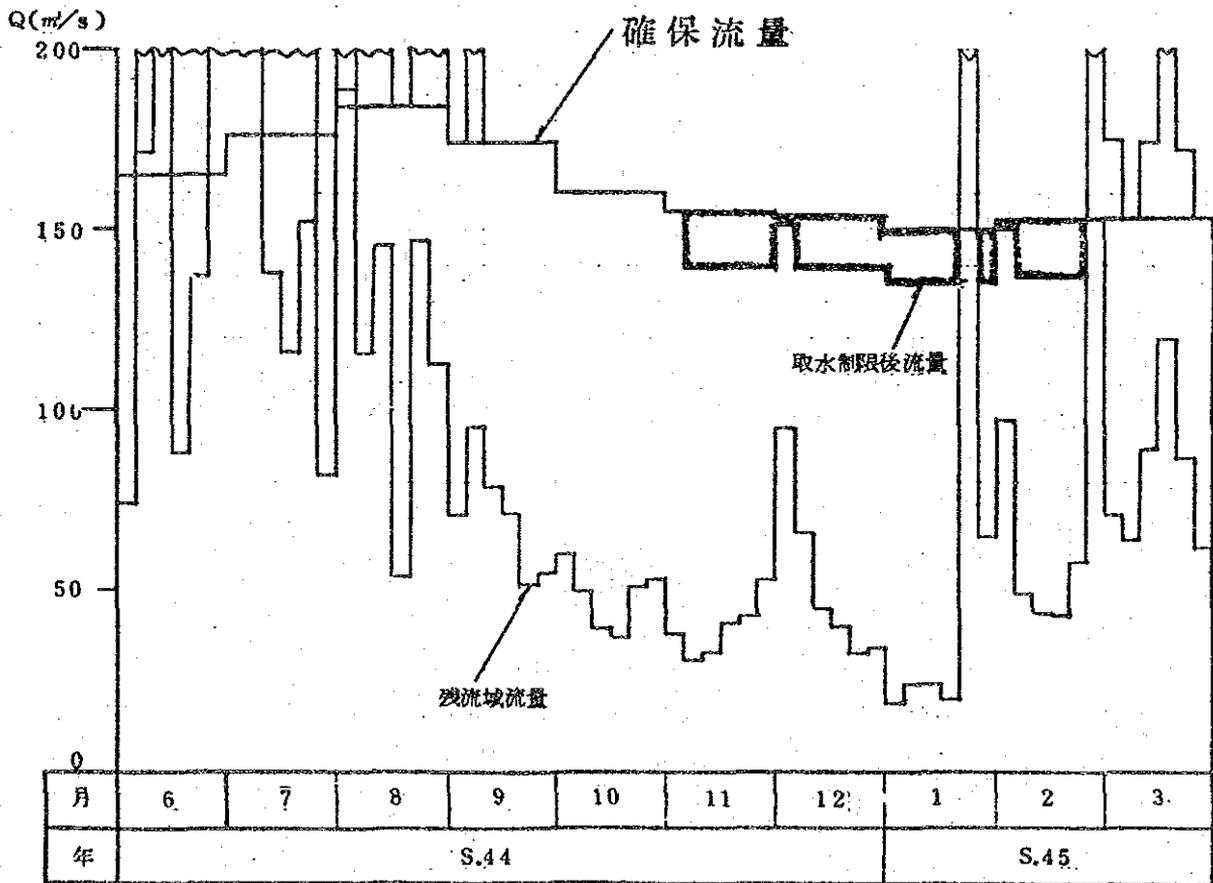
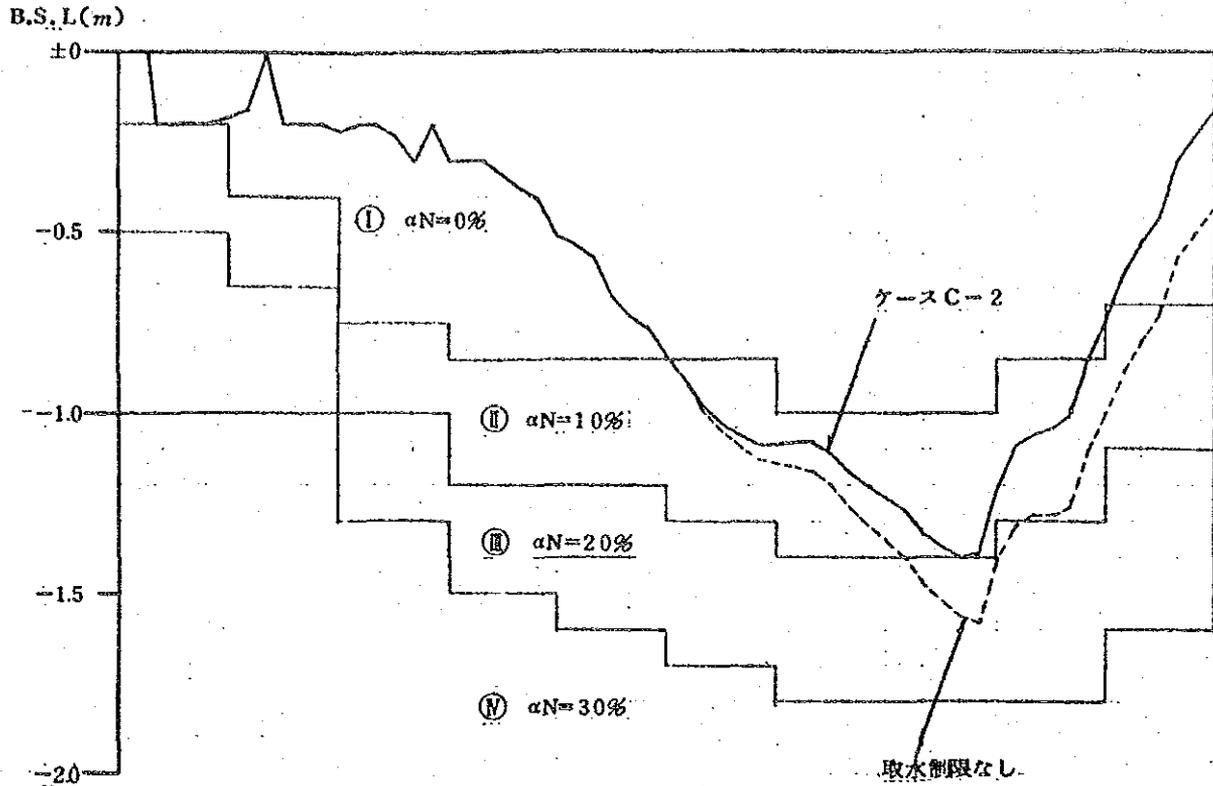


図2-4-6~5 琵琶湖水位と枚方流況図(開発後)

2-5 総合検討

2-5-1 概要

本節では前節までに検討した種々の放流制限ルール¹⁾の運用計算結果より、渇水時における管理手法をどのような評価基準で設定することができるか、放流制限ルール²⁾の良否とあわせて考察し、今後の検討のための1つのメルクマールとする。

2-5-2 制限ルールに対する考察

本検討では大別して3ケースの制限ルールを設定して琵琶湖の運用計算を実行して管理手法のあり方を検討した。この結果から3ケースの制限ルールの特徴、評価等を比較すると、表2-5-1のとおりである。

過去の渇水年の特性が多様であるため、各項目について運用結果から単純に定量的な比較をして、その良否を的確に判断することはむずかしく、かつ総合的にも3ケースのルール³⁾の優劣をつけることは困難である。

とくに、琵琶湖の運用上、責任放流量の条件が放流量および最低水位の下限値を支えているため、各ルールとも所定の制限条件がこれに制約されてしまうことになる。また、渇水補給期間中の水位の変化を通観すると、補給初期(多くの場合7月~9月)の短期間の放流量によってほぼ最低水位が決まり、その後の補給期間中は平均的には自流放流の状態になって水位は横バイ状態を保っている。

もちろん各ルールとも一定の管理目標が与えられれば、それなりに改善の余地はあり、それぞれきめ細かいルールを作成することは可能であることを付記しておく。

渇水時における管理手法としては、

- ア) あらかじめ取水制限率が琵琶湖水位との関係でわかっていると、水需要者間の調整が容易となる。
- イ) 過去の渇水時の経験から、渇水の特徴を認識して取水制限率のパターンを渇水特性別に設定することができる。
- ウ) 琵琶湖放流制限後の枚方流量は、できるかぎり平滑化され、需要波型に対して一定の節水率となることが望ましい。
- エ) 実際の放流制限操作は自然的、社会的環境条件によって決定されるから、制限ルールは単に簡単であるばかりでなく、それらの諸条件を総合的に勘案してルールの中へ入力できることが望ましい。

等々の要件を備えていることが望ましい。この観点から、今回検討した3ケースの制限ルールを比較、評価すれば、ルールCは上記要件のうちエ)を除く各要件をおおむね満足しているとともに、今後の調査、研究によってイ)およびエ)の要件の具体的内容を内包したルールに改良する可能性を有している点において、最も優れていると考える。

表2-5-1 制限ルールの比較

項目		ルール名		ルール A				ルール B				ルール C			
放流量の決定法		枚方不足量に対して貯水池残容量比率($\alpha = VB(n-1)/V_{max}$)を乗じて決定する。				貯水池残容量に対して一定比率($\beta = Const$)を乗じて決定する。				枚方確保流量に対して取水制限率を与えて不足量を求めて完全補給する。					
最低水位を規定する要素とその決定法		V_{max} (利用最大容量) 簡便である。 V_{max} の決定方法も簡単な根拠をもつ。				β β の決定方法はむづかしい。				枚方取水制限率 やや複雑であるが、濁水の障害評価を月別制限水位と結びつけることができる。					
運用結果	時点	開発前		開発後		開発前		開発後		開発前		開発後			
	項目(*)	SH	P·D	SH	P·D	SH	P·D	SH	P·D	SH	P·D	SH	P·D		
	主要濁水年	S.14	-1.22	3833	-1.85	6730	-1.19	4,029	-1.64	7,645	-1.12	4,390	-1.89	6,938	
		S.26	-0.80	751	-1.45	1,864	-0.84	359	-1.35	2,540	-0.72	1,434	-1.41	2,240	
		S.37	-0.85	33	-1.44	1,306	-0.86	0	-1.47	1,070	-0.82	100	-1.40	1,581	
		S.42	-0.68	56	-1.30	794	-0.69	0	-1.28	922	-0.61	552	-1.23	1,260	
S.44	-0.71	242	-1.40	838	-0.74	47	-1.33	1,073	-0.63	781	-1.40	986			
適用ルール		ルール A - 2				ルール B				ルール C - 2					
評価	開発前	SH	△ 中位			× 低い			○ 高い						
		P·D	△ やや小さい			○ 小さい			× 大きい						
	開発後	SH	× 低い			△ やや高い			△ やや低い						
		P·D	○ 小さい			△ やや大きい			△ やや小さい						
枚方制限率		水位の低下とともに放流量が漸減し、妥当な放流制限率を与えるが、許容最低水位付近では制限率が比較的厳しい責任放流量がなければ $\alpha = 0$ ともなりうる。				小濁水時には一定の放流を約足するため貯水池を有効に使用し、制限率は弱くなる。大濁水時には放流量が不足して制限率がかなり強くなる。				制限率の区分(月別水位別)によって放流量が決まるため、制限率の最大値は所与である。					
枚方流況		放流量は制限率が強化されるに伴ない階段状に減少し、ついには責任放流量のみとなるため、枚方流量は凹凸状に変化する。				一定の取水制限率で減少するため、残流域流量が過大でない限り一定流量となる。									
備考															

注-1 (*) SH : 琵琶湖最低水位 (B.S.L.m) P·D : 濁水評価指数 (%・日)

注-2 木津川 2 ヶムの枚方補給についてはルール A, B ではなし、ルール C ではありの相違がある。

2-5-3 管理手法の評価基準

これまでの検討結果で明らかとなり、琵琶湖水位を最適に制御するための諸条件の組合せはいわば無限に存在しうる反面、それらは結果的には大差のない制御手法でもあることが少なくない。

換言すれば、枚方流量を既知とすれば、琵琶湖水位を決める条件は明らかに放流流量のみであるから、放流流量をどのようなルールで決定しようとも、貯水池の使用状態が複雑に変化するだけで最低水位はほぼ目標値におさまるようになる^(*)。

したがって、主要な問題は結果としての最低水位が同じでも枚方不足流量の程度と不足期間の長さ、すなわちP・D値（パーセント・デーの値）が放流制限ルールの評価基準となる。

もちろん、枚方流量の最低確保流量を満足するかどうかは絶対的条件となる。

以上のことを概念的に示すと右図のとおりであり、制限ルールのとり方によって図の描き方が変化するのは言うまでもない。

簡単に同図について説明して、管理手法を決定する諸条件のプライオリティーを考察すると次のようである。

(1) 琵琶湖水位の範囲

制限ルールを決定する際の与件となるが、責任放流量を満足させなければならない条件から一意的に決まる水位と完全補給時の水位とは意外に接近している。S.14年のような異常渇水年ではその差はきわめて大きい、通常

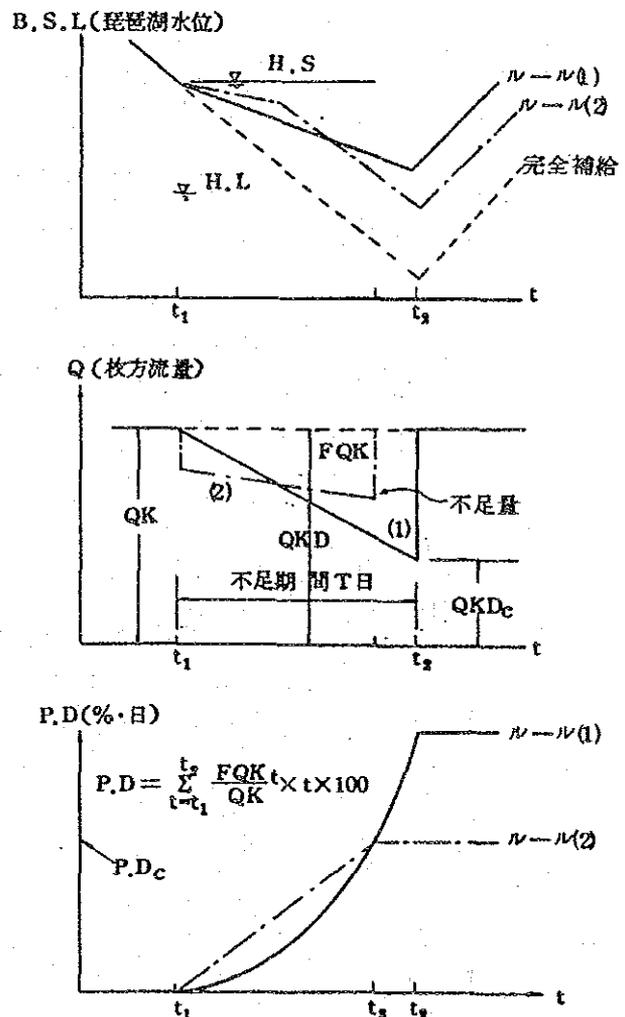


図 2-5-1

(*) なぜならば、ルールの決定条件であるから。

(**) 同図ではルール(1)よりルール(2)の方が優れていると考えて作図してある。

規模の渇水年では両者の水位の間に適切な制限ルールを設定することは恣意的でさえあると思われる。ただし、琵琶湖からの放流が責任放流量のみとなる時点、すなわち放流制限開始水位の設定の方が重要問題となる。

一方、管理上の制限ルールとしては許容最低水位に完全に一致させんがための制限ルールをさがし求める必要性は全くないので、目標値としての最低水位を予め設定することはしない。

以上のことから、放流制限ルールを決定する上での琵琶湖水位の条件は「ストックとしての貯水池容量があといくら残っているか？」という判断と同義となる。すなわち、放流量を決定する時点でルールAでいう V_{max} の値をいくらにとることが可能であるか、という問題に帰着する。

これまでの検討では V_{max} は一定値で運用計算を実行したが、もっときめ細かいルールで V_{max} とその適用期間を選択することは可能である。

(2) 枚方流量と不足率

所与の枚方確保流量に対して、放流制限後の枚方流量がどの程度満足させえたか、すなわち枚方確保流量に対する不足率とその許容値を決定することが評価基準となる。

一般に都市用水の需要特性とその必要性を考慮すれば、水不足による被害は直感的にさえ、不足量が増大すれば飛躍的に増大し、被害額の評価関数が非線形であろうことは明らかである。したがって、評価関数が非線形であり、不足量が大きければ大きいほど、不足期間が長ければ長いほど、被害が大きくなるならば、供給量を制限して被害を分散させることが有利となる。

この観点から、枚方流量はできるかぎり平滑化させながら、不足期間を短縮させ、かつ最低確保流量を下回らないように操作することが条件となる。このような枚方流量に対する条件を満足させる範囲内においては、琵琶湖水位は2次的な要素とならざるを得ない。

(3) P・D値(パーセント・デーの値)

一定のルールによる放流制限後の枚方流量の期待値と所与の枚方確保流量とから、P・D値が計算されるが、この指標は水需要の側から一定の限界値を与えることができる。すなわち、水不足による限界被害(marginal damage) — 1単位の水がさらに不足することによって追加的に生じる被害をいう — の概念を用いれば、経験的に明らかなおり水不足率がある限界値を越えると加速度的に被害が増大するので、水需要の弾力性が小さい用水部門ほど限界被害は無限大に漸近すると考えられる。

たとえば、生活用水部門の水需要は必需的部分が大きいため給水制限率が30~50%以上にも達すると、社会的な限界被害の大きさは無限大であろう。(右図参照)

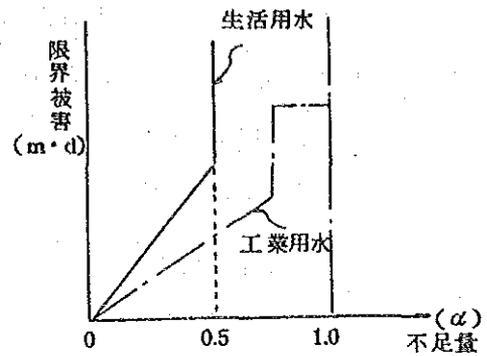


図2-5-2

しかし、このような考え方からP・D値の限界値を特定することはきわめて困難であり、現時点では過去の異常渇水時における各地での経験を基礎にして考察することが賢明であろう。

表2-5-2はその一例であるが、各地の渇水状況を考慮するとP・D値が1.000を越えると社会問題化することは必定であり、S.48年の淀川渇水では上水水あわせでわずか375%・日程度でも社会的には水不足騒ぎが現出した。

表2-5-2 各地における最近の主要渇水状況

昭和(年)	地域名	用途別	パーセント・デー (%・日)
39	東京オリンピック 渇水		2,700
42	北九州 渇水	上水道	1,450
"	"	工業用	2,380
"	筑紫野 渇水	上水道	1,450
"	長崎 渇水	"	5,000
"	本渡市(熊本) 渇水	"	4,495
48	東京 渇水	"	260
"	淀川 渇水	"	150
"	"	工業用	225
"	高松 渇水	上水道	2,390
"	松江 渇水	"	3,930
"	福山 渇水	"	740
"	"	工業用	2,460
"	"	農業用	1,850
"	小瀬川 渇水	工業用	1,600
"	広島 渇水	上水道	200
"	"	工業用	1,350

注一 単位の「%・日」とは例えば30%給水制限が10日続けば30×10=300%・日となる。

(*) 昭和53年福岡渇水(上水道)では、P・D値は7,725%・日、給水制限期間は285日、平均給水制限率27.1%(昭和54年2月28日現在)である。

第34回建設省技術研究会

水循環と水利用に関する研究

昭和56年9月

建設省河川局河川計画課

建設省土木研究所

(C-1.1)

水循環と水利用に関する研究

建設省河川局河川計画課
建設省土木研究所

目次

1. 概説	1	2.4 水循環モデルに関する研究	20
1.1 まえがき	1	2.4.1 調査・研究の目標と経過	20
1.2 水利用問題の現状認識と本課題の研究目的	2	2.4.2 水循環モデルの具備すべき機能	21
1.3 調査研究の経過	2	2.4.3 各種の水循環モデルの特長	21
2. 水循環に関する研究	3	2.4.4 まとめ	27
2.1 概要	3	3. 水利用に関する研究	29
2.2 自然水循環に関する研究	3	3.1 概要	29
2.2.1 調査・研究の目標と調査経過	3	3.2 適正な水利用計画の立案、評価に関する研究	31
2.2.2 調査結果の整理	5	3.2.1 はじめに	31
2.2.3 まとめ	12	3.2.2 流域水循環を踏まえた水資源開発 代替案の検討	31
2.3 都市用水循環に関する研究	13	3.2.3 水資源配分に関する評価	36
2.3.1 調査・研究の目標と作業経過	13	3.2.4 利水安全度と渇水対策	39
2.3.2 用水循環における一般的特性の検討	13	3.3. まとめ	41
2.3.3 還元量(率)調査の成果	16	4. 総括	42
2.3.4 まとめ	20		

1. 概説

1.1 まえがき

建設省は、将来予想される水利用情勢に関して、昭和53年に「昭和65年に向けての水資源開発計画と水利用」を公表した。本報告によれば、全国的にみて昭和51年から65年までに発生する新規需要量約269億 m^3 に地下水転換量などを加えた新規河川水依存量は約291億 m^3 /年と予測されるのに対して、供給可能量は約305億 m^3 /年と推定されている。この数値を見る限りでは、昭和65年においては水需要に見合う水資源の確保が達成されるよう見えてくる。しかしながら、これは厳しい社会的条件を克服して施設建設が推進されることを前提とした分析結果であり、また、地域別に水需給関係をみた場合、南関東地域、京阪神地域、北部九州地域など10地域でなお水需給の不均衡が予想されていることを考え合わせれば、水需給の前途は益々険しくなるものとみななければならない。

また、流域の水利用量が增大し水への依存度が高まるにつれて、流域の社会経済活動は次第に渇水に対し脆弱な体質へと変化しつつあり、昭和53年における北部九州

渇水を初めとして近年各地で頻発する渇水によってその問題の深刻さの一端を伺うことができる。さらに水利用量の増大は、一方では都市排水量の増加による水質環境の悪化、地下水過剰揚水による地盤沈下の進行などの様々なひずみを生ぜしめている。同時に、都市化の進展など流域の土地利用の変化が降雨流出機構に与える影響や、あるいは農業用水の都市用水への転換による流域水循環機構の変化など、河川水の量・質両面に影響を及ぼす要因は益々広範かつ複雑なものとなってきている。

流域の全ての水利用行為は、決して独立な存在ではなく何らかの形で流域水循環を仲立ちとして結びついている。そこで上述のような状況のもとで、河川水を中心とする流域水を円滑かつ適正に利用、管理していくためには、流域内の水循環機構、水利用・土地利用状況とそれらの相互関連を踏まえた総合的かつ包括的な立場に立脚することが重要となる。本研究は、以上のような観点に基づいて、昭和52年度から河川部門指定課題として取上げられ、以来本年度までの4年間に亘り、

① 流域水循環の把握とそれを表現あるいは再現するための方法並びにモデルの検討

② 流域水循環を踏まえた適正な水利用のあり方を探るためのシステム及び評価手法の検討を試みてきた。本年度は、当課題の最終年度であり、いままでの調査・研究成果を取りまとめ、総合的な流域水資源管理をめざすに当たっての方法論と問題点として整理することにする。

1.2 水利用問題の現状認識と本課題の研究目的

近年顕在化している水資源の開発と利用をめぐる種々の問題は、これまで無限のものとして受けとめられてきた流域の諸容量（例えば、河川の流量・水質環境容量・地下水の限界揚水量等）が水利用の拡大に伴い、相対的に有限なものとなすことにより生じた現象であるといえる。このような観点から水利用問題の変遷を振り返ってみれば、水利用の拡大は、水利用の進展に従って付加された新たな制約条件に対処することによって達成されてきたといえる。ともあれ、現段階において考慮すべき水利用制約は、現在の流域の水量・水質環境容量であり、近い将来に予想され得る資源・エネルギー制約であろう。また流域の社会・行政上の制約も無視できないと考えられる。このような多数の錯綜する制約の下で、社会・経済活動の発展を支えるための水資源の確保と水利用が要求されている。この水利用の拡大は、単に流域の1地点に時系列的に一定の量と質の水を確保すればよいのではなく、各種の水利用目的に対応した量と質の水を、適切な水源（表流水・伏流水・地下水・再生水など）に依存して、必要な時間に、必要な時点で確保されなければならない。また、流域の各利水者は、個々に独立した水利用システムを形成している訳ではなく、流域水循環機構を媒介として従属関係を保有しているものである。例えば、流域上流部に位置する利水者の河川取水量及び河川への排水量の増加は、河川下流域における利用可能水量を量的、質的に低下させる。ある地域における地下水の過剰揚水は周辺の地盤沈下のみならず、流域全体の地下水揚水可能量をも減少させる恐れがある。さらには、1用途あるいは1利水者の利用廃水は、そのままあるいは再生処理を施すことによって、他用途、他の利水者への転用が可能である。なお、土地開発あるいは森林伐採といった流域内の土地利用形態などの変更も、流域の水循環機構の変化につながり、水利用にも何らかの影響をもたらすことが予想される。

以上、概観してきた通り、拡大する水利用は益々多様化の傾向を強めており、それが流域の水量・水質環境といった容量限界との競合を激化させているばかりでなく、各水利用問題の影響範囲を押し広げ、問題領域が重複することにより複雑な相互作用を生み出し、流域における水資源の開発と利用に関する問題自体を益々複雑なものとしつつある。そのため、水利用問題は各利用者の独立した問題でなく、流域全体の水循環機構に立脚した総合

的な水問題として取扱う必要性が高まってきている。

本研究は、このような認識に基づいて、流域水循環の把握と、それを踏まえた適正な水利用のあり方について探求しようとするものである。すなわち、次の諸項目について調査・研究を実施し、総合的な流域水管理手法の確立をめざすものである。

- ① 流域水循環要素を、その利用目的（利水計画立案や、日々の流水管理など）に応じて、要求される精度をもって把握する方法の検討
- ② 流域の水循環機構を定量的に把握し、さらにはシミュレートするための水循環モデルの開発
- ③ 水利用代替案の適正度を比較評価するための手法の確立
- ④ 流域水循環に立脚した適正な水利用計画立案のためのシステムの検討

1.3 調査研究の経過

本課題の初年度に当る昭和52年度において、本研究の目標を明確化し、全体の作業実施計画と実施体制の検討を行った。第1段階として、各地方建設局などに対して「水循環と水利用」に関するアンケート調査を実施したアンケート内容は以下の通りである。

- ① 調査・研究対象水系及び主な調査・研究テーマとその目的
- ② 既往の調査・研究の概要と今後の調査・研究に関する実施計画
- ③ 各水系における懸案事項と、それに関する現状把握の状況
- ④ 適正な水利用及び水配分、並びに水循環機構把握に対するイメージ

このアンケート結果を踏まえ、本研究の全体像を明確にし、それに基づいて作業方針を以下のように決定した。すなわち、現在各地建などが各々の対象水系において顧みられている問題点に応じ、これらの問題点の解決に必要な個々の研究項目を選定し、作業実施計画を立案して調査、研究を進める。また同時に、各水系における研究内容と実施工程を勘案し、共通するテーマをまとめて追求していく組織として、本研究体制の中に5つのワーキング・グループ（以下、「W.G.」と略称する）を設けた。

各W.G.の構成とその調査・研究項目は以下の通りである。

- (1) 水循環に関するW.G.
 - 1) 自然水循環W.G.（中国地建、東北地建、四国地建、九州地建）
自然水（地表水・地下水）及び農業用水の水循環機構の把握、並びにその関連問題に関する研究。
 - 2) 用水循環W.G.（関東地建、近畿地建）
用水（特に都市用水）を中心とする人工的水循環の把握

類、並びにその関連項目に関する研究。

3) 水循環モデル W.G. (北陸地建、北海道開発局)
流域における自然水及び用水循環の現状把握と将来予測のための(シミュレーション)モデルの作成と、その適用に関する研究。

(2) 水利用に関する W.G.

4) 最適化基準 W.G. (近畿地建、中部地建)
水利用の適用のあり方などについての基本理念とこれに基づく評価基準、評価システムの作成並びにその適用に関する研究

5) 適正水利用計画 W.G. (四国地建、関東地建、中国地建)

水循環に立脚した適正な水利用計画を検討する手法、手段と、その適用に関する研究

昭和53年から今年度まで、各地建などは、W.G.としての調整を図りつつも、その作業は対象水系が現在直面している懸案事項に力点を置いて進めてきた。以下では、本研究会における調査・研究成果を、W.G.の構成に従って、各地建などの作業の相互関係、結びつきを明確にし、できる限り系統的に取りまとめることにする。

すなわち、第2章においては、総合的な流域水管理を行うに当たっての基本情報となる流域水循環の把握・表現方法に関する調査研究結果について述べる。このとき、先ず、流域の水循環を把握・表現するために、従来の流況把握・表現手法では何が問題となるかを明確にする。次いでそれらを解決し克服するために、本研究会では何をどのように行ったかを示す。さらには、今後に残された課題について言及する。第3章では、流域水循環に立脚した水資源のあり方を検討する。すなわち、高度化した段階における流域水利用を評価する時に、現況の水資源問題を踏まえて新たに考慮すべき事項が何かを提示する。最後にこれらの事項を考慮した場合に、流域の水循環機構をどのように把握表現し、また水利用計画をどのように検討していけば良いかをケース・スタディを通じて説明する。

2. 水循環に関する研究

2.1 概要

従来、流域の水資源管理(以下では、水資源管理という話を、水利用計画の立案と流水管理を包含した概念として用いることにする)におけるコントロール指標としては、主に水の利用率(利水基準地点における確保流量)、利水安全度及び施設の規模(貯水容量など)が取上げられ、これらの関係について多くの議論がなされてきたといえる。しかしながら、近年の流域水利用の拡大・多様化に伴って、流域水循環機構に立脚した水管理の重要性がクローズアップされてきた。このような水資源管理を

扱い方は、従来に比較して次のように変化すると考えられる。

① 水の利用率→取水地点(複数)とその取水量並びに排水(還元)地点とその水量及び水質

② 利水安全度→水循環実態・水利用実態を踏まえた利水安全度、還元実態を取込んだ場合の水質に関する管理指標

このようなコントロール指標を用いて、水管理を進めるに当たっては、先ず、流域の水循環という場の中でこれらの指標がどのような性格を持ち、いかなる相互関係を有しているかを明確にしておく必要がある。このためには流域の水循環機構の把握・解明が基本課題となる。いままでにも、流域の水循環を把握するための数多くの努力がなされてきた。しかし、従来の調査・研究は、その時の社会・行政的要請を反映し河川流況・地下水といった流域水循環の1要素のみを取扱ったものが多かった。いま、必要とされるのは、個々の水循環要素ばかりではなく、これらの相互関係を含めた流域的視野からの水循環機構の把握である。そのためには従来の成果を整理し、流域水循環を総合的に捉えると共に、これらを表現あるいは再現する、流域の水循環モデルの検討を図る必要がある。同時に、水循環要素によっては、新たな観点から機構の解明、再検討を進めなければならない。

本章では、以上の観点に基づいて、流域水循環の把握とそれを表現、再現するための方法並びにモデルに関する検討を行った結果を述べる。2.2では、自然水と農業用水の循環機構に関する検討結果を、また、2.3では都市用水の循環機構に関する研究成果を取上げる。かんがい用水並びに都市用水の還元機構は、流域の水循環と水利用の接点を形成している。本研究会では、今後の水管理における用水還元の重要性を認識し種々の調査を行った。2.2、2.3においては、これらの成果についても報告する。さらに、本研究会では、流域特性に応じて様々な観点から多くの水循環モデルが検討された。2.4では、これらの水循環モデルの概略を整理する。

2.2 自然水循環に関する研究

2.2.1 調査・研究の目標と調査経過

本研究は従前から実施されてきた流況把握の現況技術水準をベースとして、自然流況の構成要因をさらに細分化(降雨・融雪、損失、表面流出、地下水流出、湧出・涵養、農水取水還元過程)し、流出機構を構成要因別に積上げることにより、人為的に各構成要因に何らかのインパクトを与えた場合、河川の流況との関係が計量的に関連づけられるような水循環要素モデルの作成を目的としている。特に昭和54年度には、自然水循環の把握は、水循環と水利用に関する研究の中において、その土台となるべき位置づけにあること、また、できるだけ多く事例を収集することにより、より良い解析手法の開発及び、

一般化をめざすため、今回、他の W. G. において検討されているケーススタディも含めて、各要素についての推定方法、結果、またそのケーススタディでの年間水収支についてのアンケート調査を実施し、その整理を行った。図-1はケーススタディ河川の年間水収支模式図を示す。この調査によって、各河川の地域特性やこれに対応した調査手法が明確にされると共に、調査上の問題点も浮きぼりにされたということが出来る。

この結果、各流域において自然水循環機構を正確に把握するためには、その流域の特性や必要時間スケール、空間スケール、また精度に応じて、新たな観測、解析を既往検討項目に加えることが必要となった。特に、流域ごとに地形・地質・気象などの自然条件が異なり、またその水利用状況が異なるため必要な検討項目やその手法は異なってくる。そこで、2.2.2では先ず、自然水循環機構上、重要な要素と考えられる以下の4項目について、ケーススタディ調査の検討結果をもとに、整理を試みた。

- ① 降水・流出
- ② 損失（蒸発散）
- ③ 農水
- ④ 地下水

このうち、①降水・流出、②損失については、既調査で問題となっていた項目について、今回の調査で、工夫、改善した点を中心に記述している。また③農水、④地下水については、従来の調査ではほとんど無視されていたか、または表面には現われず内面的に扱われていたもので、今回これらについて基本的な考え方や推定結果の例について記述した。なおこれらの項目は、水循環の考え方からいって、各項目ごと個々に分離して評価することはできないものであるが、ある程度の重複はやむを得ないものとして、あくまでも便宜的な整理を行ったものである。

表-1 調査対象河川

地	建	対象河川
北	海	石狩川
東	北	最上川
関	東	利根川
北	陸	信濃川
中	部	木曾川
近	畿	淀川
中	国	佐波川
四	国	重信川
九	州	筑後川

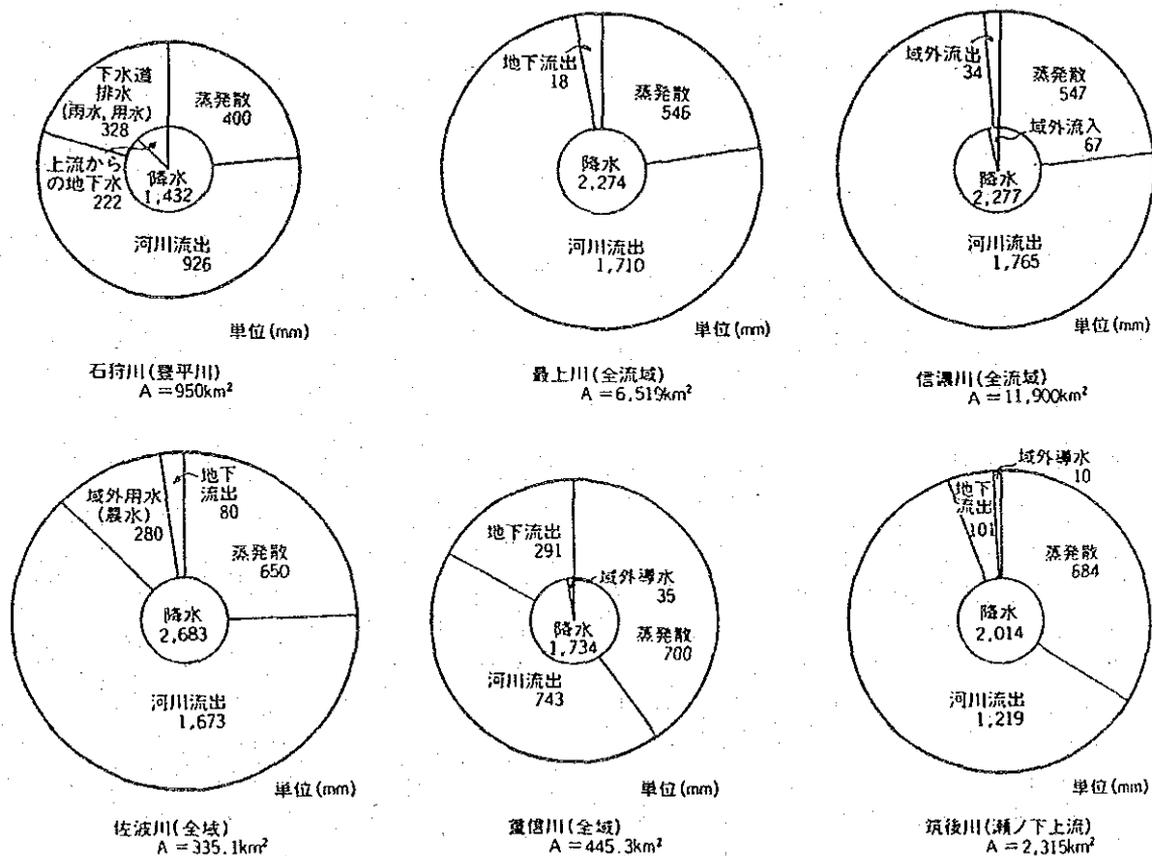


図-1 ケーススタディ河川の年間水収支例

2.2.2 調査結果の整理

(1) 降雨・流出

1) 降雨量

地点降雨量を分析し、面積雨量としての流域平均雨量を精度良く推定するために現在使用されている手法の主なものとして「単純平均法」、「ティーセン法」、「等雨量線法」などがあり、河川砂防技術基準(案)などにおいてその方法については記述されている。勿論、流域平均降雨量を精度良く把握するためには、各々の地点雨量を精度良く把握すること及び、その配置を適切に行うことが重要であるのはいうまでもない。

特に本研究での各地建ケーススタディ調査河川においては、全てティーセン法が用いられている。その結果、最上川及び佐波川の例を除いては、ほとんど問題は生じなかった。最上川及び佐波川ではティーセン法による流域平均雨量を用いて水収支解析を行った結果、年間最大30%程度の誤差が生じた。このため原因を検討した結果、雨量の高度分布の影響が一つの原因と考えられた。図-2~3は、各々佐波川、最上川流域における降水量と高度との関係を示したものである。また図-4には、降水量の高度補正法の一例を示した。

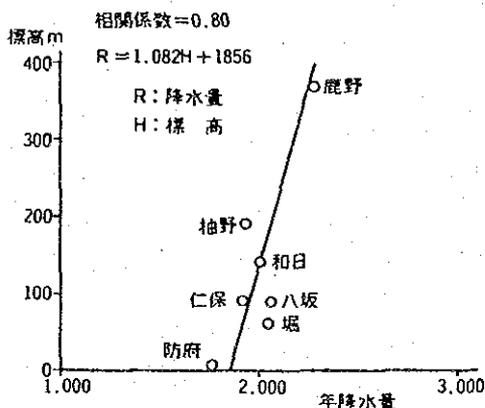


図-2 佐波川流域周辺の標高と年降水量

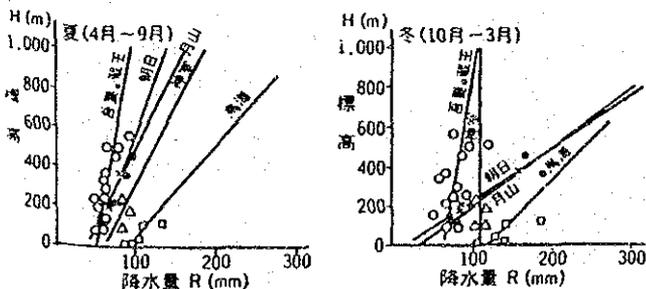


図-3 山系別季別雨量-標高相関図(最上川の例)

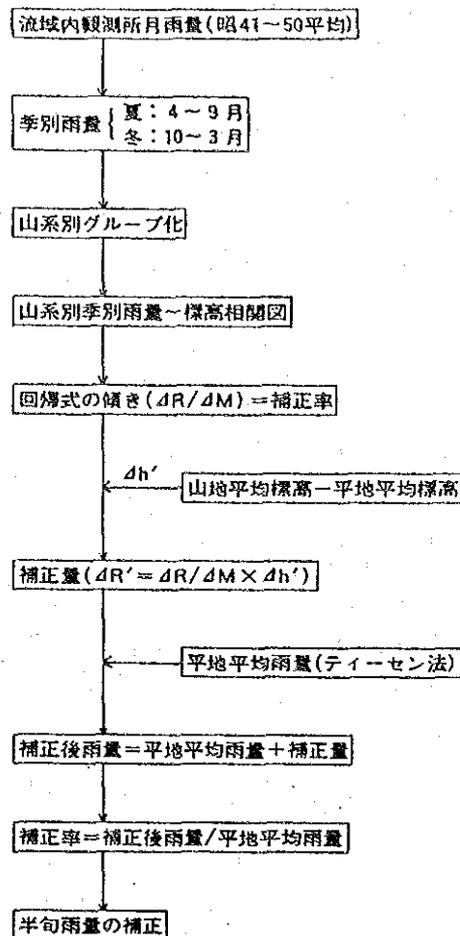


図-4 高度補正の手順(最上川の例)

2) 降雪・融雪

降雪量の観測は、人家のない所や高度地域の観測は難しいのが現状である。降雪量は、年間の水収支とか流域内での水貯留量の検討などで水当量として把握することが必要で、流域平均値として求める場合には、積雪量の面的分布や積雪密度を知る必要がある。

また最近、衛星写真(ランド・サットデータ)による融雪調査の実用化の研究もなされている。

融雪流出については、積雪地域の雪解け洪水対策の他、水資源としても貴重であるため、その機構の解明が重要である。融雪流出については、今回、北海道開発局、東北地建、北陸地建などで調査が行われており、これらの例を表-2に示す。特に最上川(東北地建)や信濃川(北陸地建)の例はケーススタディ調査でも紹介されており、併せて参照されたい。

3) 流出

流出についての概念的な分類を行うと図-5のようになると考えられる。

山地については、地下水のほとんどが河道に流出することが多く、これは、基底流出分となる。また、山地内

表-2 融雪流出調査例

	調査地点	融雪量の推定	流出モデル	備考
石狩川	納内 (3,266 km ²) 橋本 (5,106 km ²) 月形橋 (8,231 km ²)	$Y = 0.202 X^2 + 3.060 X + 7.722$ Y: 日融雪量 (mm/日) X: 日平均気温 (°C)	単位関法 (Edson法)	
十勝川 (札内川)	南帯橋 (608 km ²)	融雪量積算値 = 中位 DH 積算値 × 融雪面積比 × 流出係数 (f _s) f _s : 0.39 (3月~4月) 0.48 (5月~7月)	貯留関数法	境: 河川の融雪流出に関する研究 (土木学会論文集) による方法を利用した。
最上川	全域 (7,040 km ²)	融雪可能量 = 融雪係数 × 有効気温 降雪量 = 降水量 × 降雪率 一冬融雪量 = 冬期累加降雪量 - 調査日積雪深 × 積雪密度 融雪係数 3~5 積雪 0.3	タンクモデル	米代川の調査例を利用 (流出モデルは貯留関数法)
信濃川 (魚野川)	堀ノ内 (1,357.7 km ²)	融雪量 $mT_i + (1/80) P_i T_i$ m: 融雪係数 (=6) $T_i = \alpha T_{max} + (1-\alpha) T_{min}$ T _{max} : 日最高気温 T _{min} : 日最低気温 α: おもみ係数 P _i : 降雨量	タンクモデル (貯留関数法)	高度の積雪量を考慮した

での地下水は調査は容易でなく、このため、今回の調査においてもほとんどの例がブラックボックス的な取扱いとなっている。

河道部 (平野部を含む) は一般に地下水量も豊富で利用も盛んである。したがって地下水と地表水の両面に亘ってその循環機構を把握する必要がある。これらは、山地からの流出水が河道を流下する中で、人為的な用水循環とも関連し、特に地下水については、その涵養機構・貯留構造などの解明が流出機構を把握する上でも必要となる。

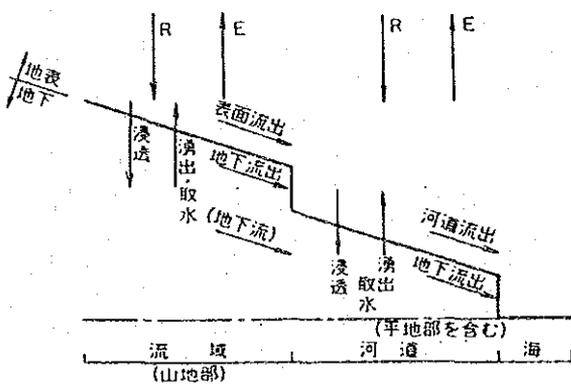


図-5 流出概念図

4) 低水流量観測について

流量の基準点は高水計画用に設置された地点が多く、低水管理用の基準点として適していない場合がある。いうまでもなく低水管理が必要となるのは河川流量が非常に小さくなる時であり、地下を伏流する流量が全体流出量に占める割合も高くなることも多い。したがって流量基準点としては、そういった伏流水が少なく、また、用水の取水などの影響が少ない地点への設置が望ましい。また、ダムの流入量についてもその精度をよく検討して利用すべきであろう。さらに、雨量データと併せて、流域内河川流量が適切に把握できるような低水流量観測網の長期的な整備計画を検討すべきであろう。

(2) 損失

1) 損失の概念

自然水循環で損失として考えられる要素は、蒸発散のみである。一般には、地下浸透も損失と考えられることが多いが、流域水循環を考える場合、地下水は重要な循環要素となり、地下浸透は地下水にとっては、逆に補給源となる。

蒸発散量の分類には次のようなものがある。

① 計器蒸発量 Pan による測定値、Pan の大きさには φ200 と φ1200 があり、これら測定値の関係は φ200 > φ1200 となる。

② 水面蒸発量 湖面などからの蒸発量はφ1200 Panの蒸発量の約0.7倍といわれている。

③ 可能蒸発散量 密に地表面をおおった丈の短い緑草地に十分な水を供給した場合での蒸発散量をいい、与えられた気象条件の下で蒸発し得る水量の上限を意味している。

④ 蒸発散量 一般流域からの蒸発量+蒸散量で今回の調査で必要とするものである。

これらを量的に比較すると一般に次のようになる。

計器蒸発量 > 水面蒸発量 > 可能蒸発散量 > 蒸発散量
蒸発散量の影響要因としては以下の項目が考えられる。

① 気象的要因 気温、湿度(水蒸気圧)、日射量、風速

② 地形的要因 高度、傾斜度、斜面方位

③ 地質、植生的要因 土壌水分、樹種、成熟度、繁茂度

2) 蒸発散の測定、推定方法

計器蒸発量から換算する方法と、経験式(ソーンズウェイト法、ペンマン法、ハーモンの公式など)による方法に大別される。ケース・スタディ結果よりまとめると、各モデル河川では表-3に示すような方法で行っている。また昭和39~44年度直枝指定課題「利水計画における流況把握の研究」の中の各主要水系の降水量、流出量を用いて、

損失量(蒸発散量+浸透量) = 降水量 - 流出量
と仮定した場合の値を参考として示す。

筑後川流域では、昭和40年代中頃までの計器蒸発量の実測値がある。この計器蒸発量と高度の関係についての検討を行ったが、高度~気温には相関がみられたものの、高度~蒸発量については、はっきりした相関関係がみられなかった(図-6参照)。

また計器蒸発量から流域平均蒸発散量を推定する方法として、次の二通りの検討を行った。

① 流域近傍1カ所の観測値を代表させ、高度補正を平地との換算比率を用いて行った場合。

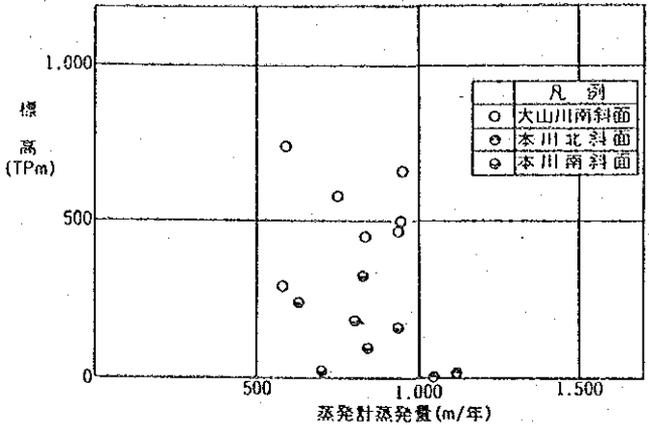


図-6 標高~蒸発量相関図(筑後川流域)

② 高度別に分散していると考えられる流域内数箇所の観測値をもとにティーセン分割により算出した蒸発散量。

この結果、流域平均蒸発散量は前者が約30mm/年少なくなった。

3) 今後の問題点

アンケート調査結果によれば、各モデル河川における年蒸発散量は、年降水量の20~40%と大きな割合を占めている。蒸発散量の推定方法は、経験式からの算出値、計器測定値からの換算値が主であるが、水収支解析からの推定値、損出量(降水量-流出量)からの推定値と併せて検討する必要がある。

(3) 農業用水(その還元量を主眼として)

1) 概要

かんがい区域内における水田用水の流れは、図-7に示すように流入水(河川水、降水、湧流水、地下水、溜池、湧水など)が連続かんがい、間断かんがい、循環かんがいといった用水方法により、水面蒸発や稲の葉面蒸発、地下浸透の損失と地区内における反復利用を行いながら流下し、河川へ直接還元するものと域外流出とがある。地下浸透した水も排水路への浸透により還元される

表-3 河川別蒸発散の測定あるいは推定の方法

地 建 名	モデル河川名	蒸発散の測定・推定方法	備 考	流域平均蒸発散量(mm/年)	昭41年直枝資料より損失量(mm/年)
北海道	石狩川	文献より一定量の蒸発散を与えたソーンズウェイトの公式	流域全体	390	-
東北	最上川	ソーンズウェイトの公式	山地、水田、水田以外に分類	546	-
北陸	信濃川	ハーモンの公式	水田、水田以外に分類	830	-
関東	利根川	文献より一定量の蒸発散を与えた	山地、平地に分類	629	738
中部	木曾川	計器蒸発量から金子良の換算式で換算	山地、平地、水田、水田以外の農地、人口集中地域に分類	604	576
中国	佐波川	ソーンズウェイトの公式	水田、水田以外に分類	650	-
四国	重信川	水収支式から逆算	山地、平地に分類	701	861
九州	筑後川	計器蒸発量から金子良の換算式で換算	水田、水田以外に分類	684	762

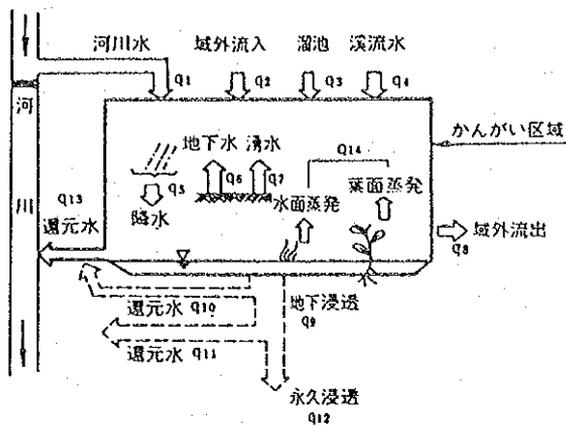


図-7 水田用水の機構概念図

ものと、長時間経過後に河川に還元するものと、永久浸透に分類される。

一般には、上記のような流れをしていると思われるが、かんがい区域内の地形、地質、用排水路網、水管理方法の違いにより、それぞれのかんがい区域ごとに検討が必要である。

2) 水田用水量

水田用水量は、稲の生育、水田の水管理方法などにより期別ごとに増減するものである。さらに地形、地質、用排水路網の違いによって、かんがい区域の単位面積当りの用水量は変わるので十分な検討が必要である。

(a) 純用水量

耕地内で消費される正味の用水量のことで、減水深に耕地面積を乗じて求められるが、減水深は水田1枚ずつの必要量を表わしているため、かんがい区域で反復利用されている場合は過大な値を与えられる恐れがあるので注意が必要である。

$$\text{純用水量} = \text{必要水量} = \text{減水深} \times \text{耕地面積}$$

$$\text{減水深} = \text{葉面蒸発量} + \text{水面蒸発量} + \text{浸透量}$$

(b) 粗用水量

純用水量に送水中の水路量と水管理水量を加えた用水量のことで取水地点、分水地点において、取水または、分水すべき水量を表わす。特に水利権の確定のために極めて重要なものである。図-8に示すように季節や用排

水路網状況によって異なる。

① 用排水路が分離されている場合

$$\text{粗用水量} = \text{純用水量} + \text{水路浸透量} + \text{水管理水量}$$

② 用排水路が一部または全部が兼用されている場合

$$\text{粗用水量} = \text{純用水量} - \text{地域内用水路からの反復利} \\ \text{用水量} + \text{水路浸透量} + \text{水管理水量}$$

(c) 河川依存量

河川依存量は、粗用水量から有効雨量と地区内利用可能水量を差し引いた用水量である。有効雨量は、降雨量のうち水田内に貯留され用水と同様に水田に利用される量で、利用サイドでは、日降水量5mm以上80mmまでの80%を有効雨量としてかんがい計画がたてられている。この有効雨量や地区内利用可能水量についても河川依存量と同様に河川還元するので調査の必要がある(図-8参照)。

3) 減水深

減水深は、水田用水量を決定する基本となるばかりでなく、一部が地下涵養されるので十分な調査検討が必要である。この値は湛水深の減少量に相当し、次のように表わされる。

$$\text{減水深} = \text{蒸発散量} (\text{株間水面蒸発量} + \text{葉面蒸発量}) \\ + \text{浸透量} (\text{降下浸透量} + \text{アゼ浸透量})$$

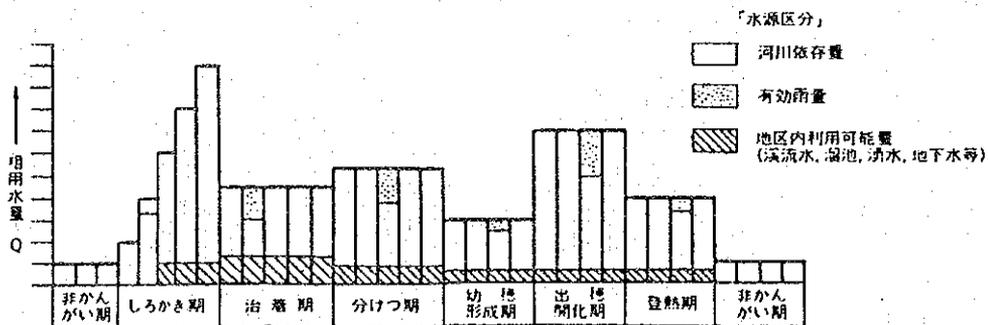
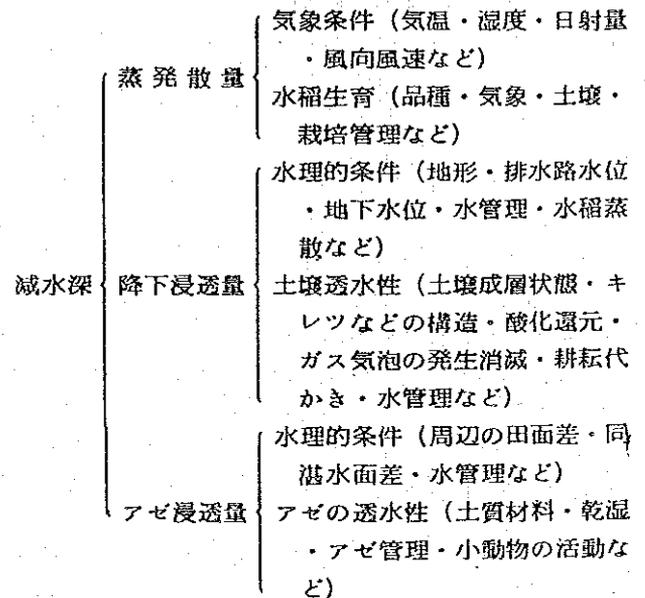


図-8 ○○かんがい区域の粗用水量図

4) 還元量

農水の還元量は、河川などから取水されたかんがい区域の粗用水量が水田において使用された後に再び河川に還元される水量である。

(a) 還元率

還元率は次のように定義される。ただし記号は、図-7に示したものをを用いている。

$$\text{還元率} = \frac{\text{流出量}}{\text{流入量}} = \frac{(q_8 + q_{11})}{(q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 + q_7)}$$

上式から、一定かんがい区域においては、消費水量はほぼ一定であるので、還元率は流入量の増加と共に大きくなるべきものであるが、適正取水量の範囲では、ほとんど、一定と考えて良い(図-9参照)。なお、各取水施設の流入量が明確に把握されていない場合、粗用水量のうち、いくら河川に還元するかを表わすため、計画値としての還元率を設定することもある。

(b) 還元量の調査方法について

還元量調査に当っては、調査対象のかんがい区域の全域における用排水系統を詳細に調査し、流入・流出の測定点を選定する必要がある。また、かんがい区域の粗用水量を正確に把握することが重要である。

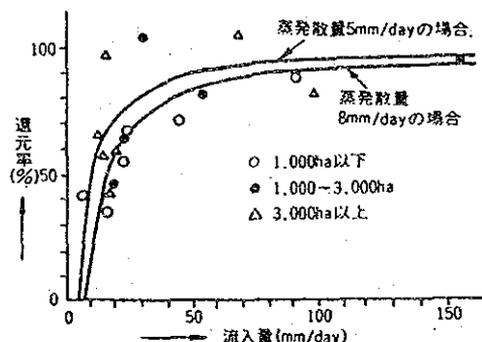


図-9 流入量と還元率の関係
〔「水田管理と圃場整備」(地球出版、1972)より抜粋〕

現地での測定に当っては、かんがい区域における流入量(河川水、降水、渓流水、溜池、湧水など)と流出量を洩れなく測定しなければならない。

また、影響を与え得ると考えられる各種要因(土性・地形・地下水位・暗渠排水の有無・用排水路の整備状況・減反・面積の減少など)についても調査を行い把握しておく必要がある。還元率は、期別(代かき期、普通期など)の変化があるのは当然であるが、それ以外にバラツキが大きいのは、降雨によるものが多いので、このような場合には、半旬ごとに求める等の配慮が必要である。流入・流出量の観測精度についても十分注意をしなければならない。

5) 還元量調査の実施例

これまで、建設省によって行われた主な農水還元調査例を表-4に示す。しかしこれらの調査はそれぞれ目的が異なるため、調査方法に違いがみられる。これらの調査方法を大別すると次の四つに分類することができる。

(a) 全流域で推定する方法

農業用水路系統が流域全体にまたがっているため、降雨流出も含めた全流域の水収支から還元率を求める方法である。すなわち、本川下流流量、用水取水量、本支川流量を測定し、下式より求める。

$$\text{還元率} = \frac{\text{本川下流流量} - \text{本支川総流入量}}{\text{用水取水量}}$$

対象面積が広くなるため、地下水を経由した還元水まで測定が可能である。しかしながら、本支川総流入量の換算に当って、残流域の取扱い方や流量観測精度によっては誤差が大きくなる可能性がある。

(b) 用水路系統別に推定する方法

この方法が最も一般的で実用的な方法と考えられる。一つの用水路系統を上流~下流まで一括して扱い、その取水量とその区域からの流出量を求めて次式で推定する。

$$\text{還元率} = \frac{\text{流出量}}{\text{用水取水量}}$$

表-4 農業用水還元量調査例

調査河川	位置	かんがい面積 (ha)	調査地区数	調査期間	調査方法
石狩川	篠津・空知	790, 2210	18, 13	昭.53.8, 昭.54.7	(c)
最上川	大堰地区他	1860	3	昭.51.5~昭.51.9他	(b)
信濃川	中流部	980	1	昭.52.8~昭.53.9	(b)
荒川	左岸	900	1	昭.51.4~昭.55.3	(b)
木曾川	阿木川	227	1	昭.45.7~昭.46.2	(a)
木津川	名張	172	4	昭.53.7~昭.53.8	(c)
円山川	出石川	177	9	昭.51.8~昭.51.11	(b)
紀ノ川	下流部	1315	2	昭.48.7~昭.50.9	(d)
肱川	野村・小田川	41, 122	3, 4	昭.48.6 昭.53.7~昭.53.9	(b)
筑後川	中流部	2587	16	(昭.32~昭.35の資料)	(d)
大分川	下流部	1055	1	昭.52.8~昭.53.9	(b)

なお、降雨時には、用水取水量に降雨を加える。この方法についての数河川での測定結果を図-10に示す。これらの結果をみる限り、流域ごとにかかなりのバラツキがみられるが、還元率は肱川を除いては、平均的にほぼ50%と考えて良い。

(c) かんがいブロック別に推定する方法

用水路系統別をさらに細分して、用水系統内での再利用状況をも含めて調査する方法である。各々の還元率があるまま、河川への還元率とはならないが、用水の取水形態や用水系統の違いによる還元率への影響について明確にすることができる（ブロックを統合して用水系統ごとに整理を行えば(b)と同じ結果が得られる）。

(d) その他

今回の調査の中で(a)~(c)のどれにも該当しない例である。筑後川及び紀ノ川の2ケースがこれにあたる。調査方法の詳細は省略するが、どちらも、観測項目を簡略化し、別途解析により、これを補っており、(a)~(c)に比較し、その結果や精度に若干の難点がある。

(4) 地下水

地下水を流域の水循環機構の中で捉えた場合、その流れは図-11に示すように模式的に表わすことができる。

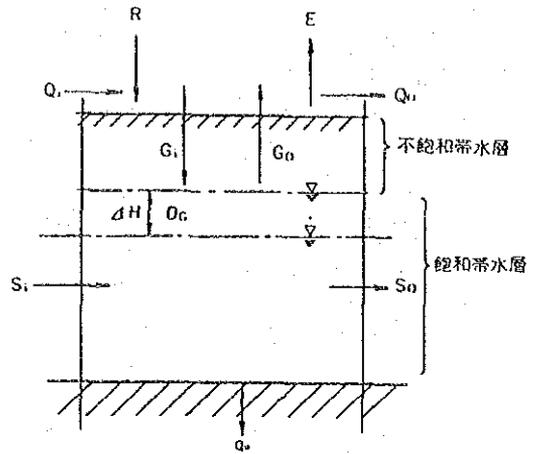


図-11 水循環模式図

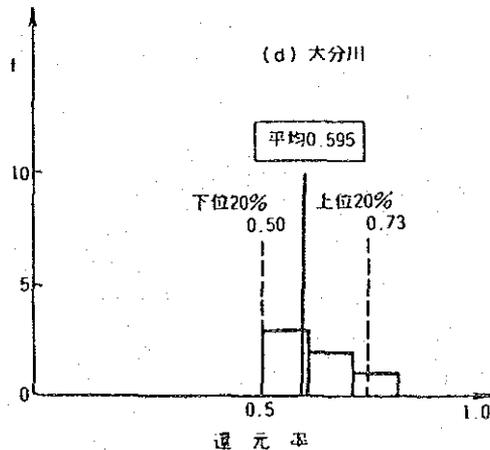
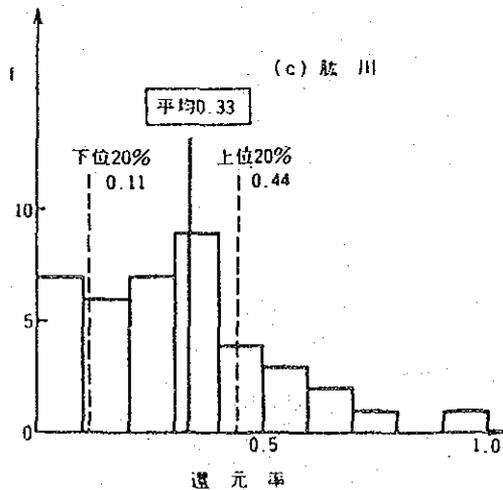
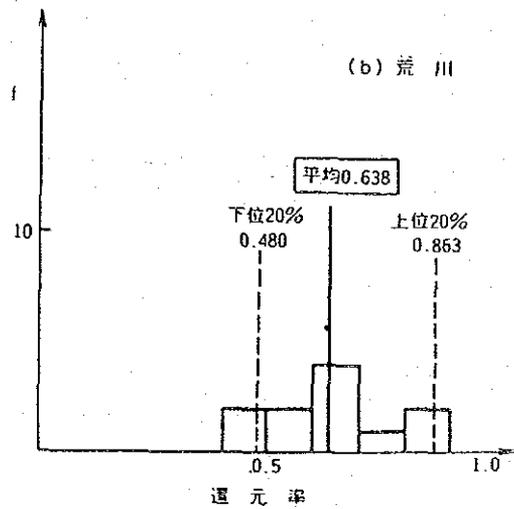
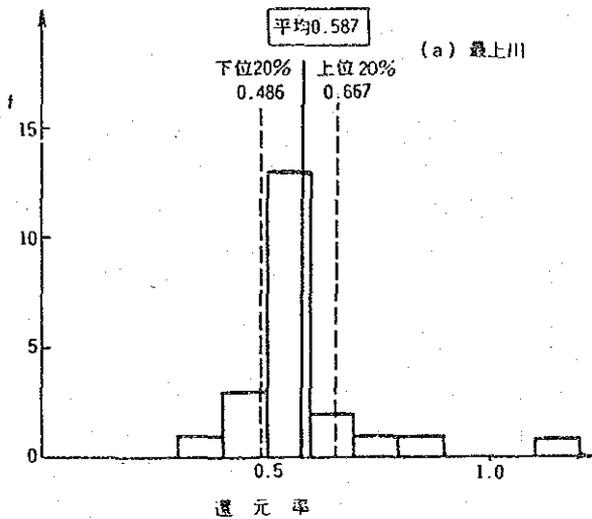


図-10 還元率の実測例 (調査方法(b)による)

これより、地下水収支に着目して作成すると次のようになる。

$$(G_1 - G_0) + (S_1 - S_0) - q_0 - D_0 = 0 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、R：降水量、Q：表面流量、E：蒸発散量、
G₁：浸透量、G₀：地表への移動量、取水量や湧出量、
q₀：深層への浸透量、D₀：地下水貯留量、S₁：地下水流入量、S₀：地下水流出量

1) 浸透量 (涵養量) (G₁)

浸透とは、地表面が、不飽和帯を透過し、飽和帯 (帯水層) へ達する過程を示すが、水循環的には降雨や用水 (時に農水) からの浸透である流域浸透と河川からの浸透である河川浸透に分けられる。

今回の研究による浸透量の算定事例を表-5 に示したが、流域の水循環機構の中で巨視的に捉えられた事例が多く、また、算定方法及び算定結果には、かなりの差がみられる。

(a) 流域浸透

このうち、流域の浸透については、最上川流域において宅地と水田の試験地を設けて流入・流出水量を詳細に測定することにより、その収支から浸透量を求めた事例がある。

これによると宅地地区での浸透量は平均値4.4 mm/日であり、6~8月に多く、1~2月に少ない結果となっ

た。また、水田による非かんがい期浸透量は平均2.0 mm/日であり、かんがい期浸透量は平均21.0 mm/日で蒸発散量を含めた減水深は25 mm/日であるが、この減水深、すなわち消費水量は、総流入量に左右され、その関係は図-12に示すようになる。

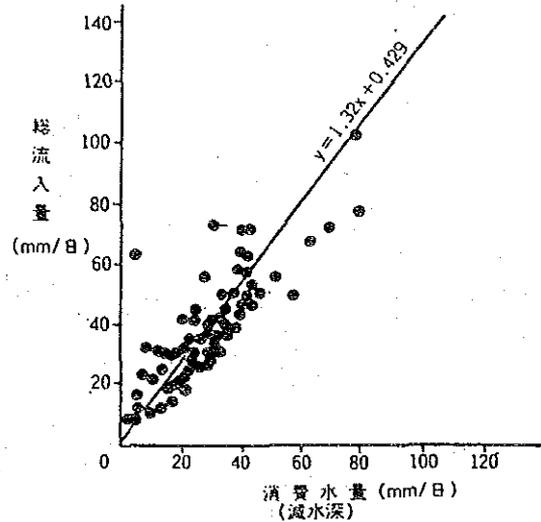


図-12 総流入量-消費水量の関係 (最上川の例)

表-5 浸透量算定事例

水系名	分類	算定方法	単位	流域浸透量			河道浸透量
				流域	宅地	水田	
重信川	水収支解析	流域宅地は表流水収支、水田は減水深実測 河川は同時流量観測結果の水収支より算定	mm/日		0.7 (6.5)		0.52 (0.07)
最上川	水収支解析	試験地内における流入出量の収支より算定	〃	-	4.4	2.0 (21.0)	-
佐波川	水理解析	ダルシー則により算定	〃	-	0.01~0.3		-
淀川	水理解析	自由地下水の運動方程式より算定	〃	-		7.0	28.0
瑛後川	水収支解析	表流水収支により算定	〃	-	0.2	(9.8)	-

(b) 河川浸透 (湧出)

河川は、浸透 (伏設) 湧出をたえず反復しており、定量的に把握することは非常に難しい。今回の研究では、同時流量観測結果の収支から求めた事例があるが、流量観測精度によって、必ずしも良い結果が得られるとは限らない。したがって河川水と地下水を長期間観測することにより、その連動関係から水理的なチェックを行う必要がある。

(c) 浸透の降雨及び地下水位による変化

一方、浸透量は、地下水位の変動や降雨量によって影響を受けることが考えられる。降雨とその関係について

は、先に述べた総流入量 (図-12) 及び、年総雨量 (図-13) の間で高い相関関係が得られた。

2) 地下水貯留 (D₀)

地下水貯留とは、地下水が滞水層中に滞留される状態を指す。地下水貯留量の変化は、累年の水収支を考える場合は無視することができるが、単年の (日々、月々) な水収支では無視することはできない。地下水の貯留変化量は滞水層規模が明らかな場合、地下水位の変化から次式により求めることができる。

$$D_0 = P_a \times A \times \Delta H \dots\dots\dots(2)$$

ただし、P_a：有効間隙率、A：滞水層面積、ΔH：地

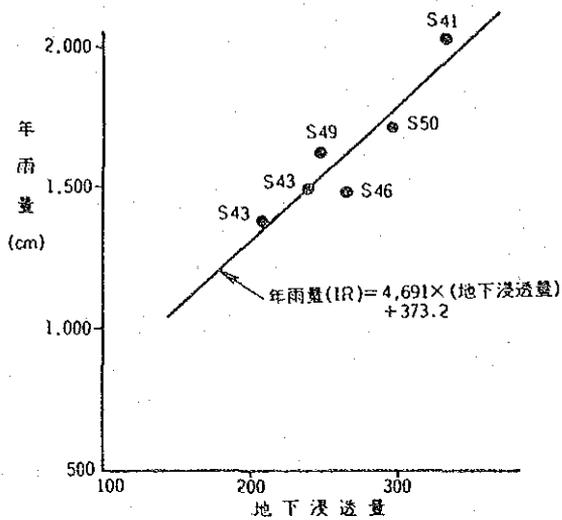


図-13 地下浸透量 (G₀) と年雨量 (ΣR) の関係図 (重信川の例)

下水位変化量

3) 地下流出量 (S₀)

地下流出量は、対象地域の滞水層から地表に現われず地下水のまま流下する量である。

今回のケーススタディ河川の中から地下収支によって算定した結果と、別途ダルシー則によって算定した二事例を表-6~7に示した。

表-6 地下水流動量比較表 (重信川)

(単位 m³/日)

ブロック	ダルシー則	収支計算 (タンクモデル)
I (下流)	1.80	1.70
II (中流)	1.20	1.24
III (上流)	1.01	0.93

表-7 地下水流動量比較表 (最上川)

(単位 m³/s)

ダルシー則		収支計算 (タンクモデル)	
地区名	流動量	タンク名	流動量
村山盆地 (浅層)	0.3	吾妻山系	0.3
	0.7		0.3
米沢市周辺 (浅層)	1.0	山地系	0.7
	0.8		0.7
山形盆地 (浅層)	1.0	蔵王山系	1.3
新庄周辺 (浅層)	0.3	神室山系	0.5
	0.4		0.3

4) 地下水シミュレーションについて

以上の検討は、いわばマクロ的な調査手法であるが、地下水の保全、利用計画などを流域水循環の中で考える際は、地下水の面的挙動まで評価する必要がある。この時、地下水シミュレーションは有効な解析手段である。しかし解析を行う場合には、流域全体の自然水循環の調査結果と整合するような入力条件・境界条件を設定しなければならない。地下水シミュレーションの基本式 (不圧平面二次元モデル) は、次式で示される。

$$P_a \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = K \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (H-Z) \frac{\partial H}{\partial x} \right\} + K \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (H-Z) \frac{\partial H}{\partial y} \right\} + W \dots\dots\dots(3)$$

ただし、P_a:有効間隙率、K:透水係数、H:地下水位、Z:滞水層盤標高、W:揚水量 (負の場合は涵養量) を示す。

上式は、差分法や有限要素法によって数値解析されることが多い。

今回、ケーススタディ調査河川での地下水シミュレーション調査事例を表-8に示す。

表-8 地下水シミュレーション解析調査事例

(ケーススタディ河川)

河川名	調査地域	手法	
最上川	須川流域	●タンクモデルによるマクロ的評価	ケーススタディ参照
信濃川	長岡地区	●タンクモデルによるマクロ的評価 ●平面二次元モデル (差分法)	ケーススタディ参照 (記載はタンクモデルのみ)
重信川	全域	●タンクモデルによるマクロ的評価 ●平面二次元モデル (有限要素法)	記載はタンクモデルのみ
筑後川	中流部	●平面二次元モデル (差分法)	ケーススタディ参照

2.2.3 まとめ

自然水循環の各要因 (降雨流出、損失、農水、地下水) は、従来においても、断片的には調査がなされていたが、流域水循環上整合性があり、また、統一された調査方法であったとはいえない。

このため、本研究会では、流域水循環の立場から各調査事例について整理を行い、その手法、精度、問題点を明らかにした。これは初めてのこころみでもあり、調査例が少なく、手法にも地域性があり、相互比較は、容易ではなかった。しかし、ケーススタディ河川において、それぞれ各要素の推定・モデル化に工夫がみられ、今回の整理は、今後、同様な調査を行うに当たって参考になる

と考えられる。最後に各水循環要素についての今後の課題を簡単に整理しておく。

(1) 降雨・流出

この要因については、従来から数多くの調査・研究がなされてきており、手法の基準化や問題点は比較的明らかにされている。特に流域水循環の把握の上からは、降雨の高度分布の捉え方、融雪流出などが特に検討課題として重要であることが認識された。

(2) 損 失

流域水循環の中では、蒸発散のみが損失となる。蒸発散量は自然水循環の中では大きなウェイトを占め、特に西日本地方では年間蒸発散量は降雨量の30~40%を占める。また、この量は気象的要因によって決まり、地域ごとに一定値に近い値をとることが知られる。しかし、日蒸発散量など短期的な値を求める方法は明確にされておらず、今後の課題である。

(3) 農 水

農水還元は、今後水利用が高度化していく中で重要な調査項目の一つである。しかしこれまで、調査例が少なく、また調査の方法も十分定まっていないのが実状である。特に、今回の調査例から推測すると、還元率は30~100%で大きなバラツキがみられる。このバラツキは、観測誤差以外に調査範囲、時期、地形、地質、用水形態などによる差異も含まれる。今後は、統一した調査方法により観測データの集積を図り、精度の高い値や各種要因による分類を図っていく必要がある。

(4) 地 下 水

地下水は従来の低水調査の中ではブラックボックス的に取扱われており、計量的にはほとんど解明されていなかった。しかし、流域水循環の中では一つの要因として位置づけられ、地表水、地下水の一体的な調査により、双

方の調査精度が高められ、また地下水保全及び利用の立場からはその賦存量・涵養量の定量的把握が必要となる。しかし地下水涵養量などは、調査の過程から、誤差の寄せ集めになるケースがあり、現地観測などを数多く行うことにより、その精度を高めていく必要がある。

2.3 都市用水循環に関する研究

2.3.1 調査・研究の目標と作業経過

流域における水利用は、人間の社会経済的な活動の発展と共に、地域的特性を受入れながらその形態を変え、水循環過程をも変化させつつある。特に、都市部では人口、産業の集中に伴って上・下水道施設が普及し、河川とは別系統の流水、すなわち人工的な流水網が出現しており、この量的ウェイトが年々大きくなりつつある。また、この人工的な流水網を経て都市から排水される多量の汚濁負荷により、河川水質が水量と共に変化し、流域内の水循環過程において、河川を媒介とした都市用水循環系統の影響が、「水量・水質の消費」という側面からの問題として顕在化してきている。

本研究会では、以上の問題意識を背景として、都市における人工的な水循環過程（用水循環）の実態を把握し、都市地域の水循環に内在している一般的特性を明らかにすることを目的として調査を進めた。特に、用水循環系における都市用水の還元量（率）の実態を明確にすることに力点をおいた。

そのために、まず、都市地域の取排水システムの類型化を行い、水量、水質の変化について一般的検討を行った。次に、都市形態別（マクロ的）及び下水道整備地区、未整備地区別（ミクロ的）に、還元量についての詳細な調査検討を実施した。作業経過を表-9に示す。

2.3.2 用水循環における一般的特性の検討

(1) 都市用水の取・排水システムの類型化

表-9 用水循環に関する検討経緯

年 度	調 査 内 容
52	<ul style="list-style-type: none"> 上水道及び農業用水路などの取排水路網の実態調査として、淀川中・下流域について1/50,000~1/10,000の取排水路網図を作成した。また都市用水の取排水システムの一般的特性についての検討並びに、同流域の下水道整備地区、未整備地区において、上水の還元量の実測調査を実施した（近畿地建）。 関東地域で下水道整備の進んでいる11都市でパイロット地区を選定し、水供給量及び排水量を把握するために、上・下水道に関する資料の収集、整備を行った（関東地建）。
53	<ul style="list-style-type: none"> 淀川流域の下水道整備地区及び混合地区17団地を選定し、上水の還元量調査を実施することにより、団地タイプ別の還元率について調査した（近畿地建）。 都市における水循環機構のモデル化について検討すると共に、用水循環系における還元量（率）の定義付けを行った。さらに、前年度に選定された11都市パイロット地区について、都市形態と還元率との関係について検討した（関東地建）。
54	<ul style="list-style-type: none"> 都市用水の還元量（率）に寄与する影響要因とその影響度を把握し、還元量（率）と水利用形態及び取排水系統との関係について検討した（近畿地建）。 都市用水の還元率を推定するために、詳細な資料の入手できた4都市について、地下水の下水道管などへの浸透機構などを分析し、還元量を推定した（関東地建）。

都市用水の大規模な取排水システムについては、図-14に示すような8パターンに類型化することができると考えられる。

タイプAからタイプEの各取・排水システムは、既に多くの流域で実在している形態であり、歴史的にみると、水利利用率の向上と共に、Aを経てBあるいはC、DあるいはEへと移行していく場合が多い。タイプB~Dは水質にはできる限り手を加えない（水質の積極的な利用ではない）“水量消費”型のシステムとみることができる。また、タイプF~Hについても、いくつかの流域でこの形態に移行する計画が進行しつつある。タイプF~Hは積極的に水質を回復させながら水利用を行う“水質の消費と復元”型のシステムと考えられる。

また、各取・排水システムにおける河川の水量、水質を模式化して示した、図-14からもわかるように、都市用水の取・排水システムにおいては、水量と水質の間に密接な関係があり、水利用による水量消費の他に、水循環においては、水循環過程における水量消費問題が無視し得ないものとなる。

(2) 都市用水循環における還元量(率)の定義

1) 都市用水循環モデル

ここでは、流域の総合的水管理を行う際に、必要となる都市用水循環を定量的に表現するために、都市用水循環機構のモデル化について検討した。

一般に、都市用水の循環機構は、給水機構、水使用機構に分けて把握することができる。これらの過程を模式化して表現すると図-15のようになる。このようにして表現される水循環機構は、以下に示す6要素により構成されている。

- ① 公共用水域 (河川、ダム、地下水など) ……(水供給機構)
- ② 取水から給水までの施設 (上水道、工業用水道など)
- ③ 使用用途 (家庭、営業、工場など) ……(水使用機構)
- ④ 排水施設 (下水道管、処理場など) ……(排水機構)
- ⑤ 蒸発散、地下浸透など
- ⑥ その他 (導水や上記のもの以外の要素)

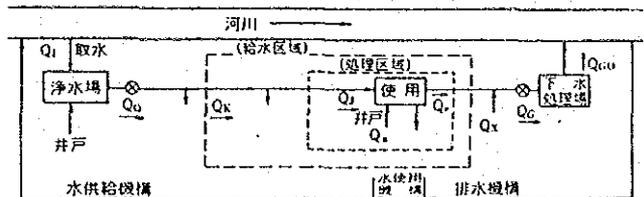


図-15 都市用水循環機構模式図(下水道整備地区)

名称	A.循環 利用型 (伝統型)	B.流域 下水道型	C.広域 水道型	D.広域水道 流域 下水道型	E.2元給水 循環利用型	F.2元給水 再生利用型 (I)	G.2元給水 再生利用型 (II)	H.2元給水 再生利用型 (III)
取排水システム 類型化								
流量変化								
水質変化								

図-14 都市用水の取・排水システムの類型化

各要素間の都市用水の移動について定量的に把握して、還元量(率)を求めることが本調査の目的である。

図-15に示される各記号の定義を以下に示す。

- Q₀: 給水区域への給水量
- Q₀: 使用直後の排水量
- Q_x: 有効水量
- Q_x: 下水道への地下水などの浸透量
(地下水・降雨など)
- Q_J: 下水処理区域内給水使用量
- Q_#: 下水処理区域内井戸水使用量
- Q₀: 下水処理場流入量
- Q₁: 河川からの取水量
- Q₀₀: 下水処理場排水量
- Q_{J0}: Q_J + Q_#

2) 還元量(率)の定義

用水循環における還元量(率)を考える場合、河川管理上及び利水計画上は、取水されたものがどの程度排水されるかという河川を軸とした水収支が重要な問題となる。すなわち水循環における還元量を定量的に把握するために、河川のどの地点で、どの位の水量が取水され、還元されるかを把握しておく必要がある。

用水循環での還元量は、河川など公共水域から取水された水が給水され、使用され、排水される過程を通しての損失水量を把握することにより規定される。用水循環機構における各過程での損失水量を種々の統計資料並びに実態調査から試算した。現実には、様々な要因によって各過程における損失水量は変化するが、以下にそれらの概算値を示す。

(a) 取水から給水に至る過程 (Q₁ ~ Q₀)

河川からの取水量と給水量との関係についてみると、井戸などの別系統からの取水を取除けば取水量より給水量が小さい値を示すのが一般的である。これは、取水、導水による損失と浄水場での損失があるためである。

これらの損失水量は、施設の老朽化などによって多少異なるものの、ほぼ一定値となっていることが多い。

取水・導水による損失率:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\text{取水量} - \text{浄水量}}{\text{取水量}} \times 100 \approx 4\% \\ & \text{浄水場での損失率} \\ & \frac{\text{浄水量} - \text{給水量}}{\text{浄水量}} \times 100 \approx 3\% \end{aligned} \right\} \frac{Q_0}{Q_1} \approx 0.93$$

(b) 給水から水使用に至る過程

(Q₀ → Q_x → Q_J, Q_#)

給配水過程における損失は、無効水量として捉えらる。これは、漏水とメーター不感水量からなる。このうち漏水は、管継手の不備や老朽化により生じ、管路長、管口径、管内圧などとも関係すると考えられる。給水量に対する無効水量の割合は15~18%であり、年々減少の

傾向を示している。

給配水過程での損失: $\frac{\text{無効水量}}{\text{給水量}} \times 100 \approx 15 \sim 18\%$

$$\frac{Q_x}{Q_0} \approx 0.82 \sim 0.85$$

水供給機構と排水機構における水量の変化を同一レベルで把握するためには、下水処理区域内の上水使用量と給水区域全体の有効水量との関係を調査する必要がある。したがって、対象地域の状況によって異なるので一般的な記述は不可能である(Q_x - Q_J)。同様に、この過程においては、下水処理区域内での地下水の使用量を把握する必要がある。なお、地下水使用量は、河川等公共水域への還元量を大きくし、損失とは逆に作用する(Q_#)。

(c) 下水処理区域内使用から下水管排水までの過程 (Q_{J0} → Q₀)

水使用機構での用途は、大別して家庭用、工業用、営業用とに分けられる。

家庭用水では、食料用、料理用並びに散水用の水はそのほとんどが下水管に排水されない。これらを考慮して、使用水量に対する排水量の割合を文献、実態調査などより求めると、55~95%の幅を持った値が得られた。これは、洗濯水が雨水管より排水され、把握されないなどの理由による。

$$\frac{Q_0}{Q_{J0}} \approx 0.55 \sim 0.95 \text{ (家庭用水)}$$

営業用水の損失水量の実測値は、その業種の複雑さのためもあって、一般的な値を求めるのが難しい。一例として、スーパーマーケットでの調査事例によれば、次のような値が得られている。

$$\frac{Q_0}{Q_{J0}} \approx 0.80 \sim 0.95 \text{ (営業用水)}$$

工業用水における損失は、主としてボイラー用水と原料用水であり、業種及び工業規模により大幅に異なるが、おおむね0~20%となっている。

$$\frac{Q_0}{Q_{J0}} \approx 0.8 \sim 1.0 \text{ (工業用水)}$$

(d) 排水から下水処理場に至る過程 (Q₀ → Q₀₀)

下水管継手の不備などによる雨水並びに地下水の浸透によって、一般に Q₀ < Q₀₀ の関係となっている。

(e) 下水処理場から河川など公共水域に至る過程 (Q₀₀ ~ Q₀₀)

下水処理場での損失水量は、沈砂池などの蒸発散と処理過程による汚濁負荷量の除去などによるものであり、見かけ上8%程度となっている。

$$\frac{Q_{00}}{Q_0} \approx 0.92$$

都市用水循環における還元量(率)の考え方としては、以上の五つの構成要素を踏まえて、次の二通りの見方が

ら検討できる。

A) 河川など公共水域への排水量を重視した場合

$$\alpha_a = Q_{co} / Q_1$$

B) 河川など公共水域から取水量を重視した場合

$$\alpha_b = \{Q_{co} - (Q_s + Q_x)\} / Q_1$$

本調査においては、河川管理上及び利水計画策定上都合の良い、すなわち、計画に組込める還元水量に着目した還元率（B案）について検討した。

なお、実測データが少なく、解析上非常に難しい水使用機構における損失水量を把握して、 $Q_e / (Q_1 + Q_s)$ を“純排水率”と仮称し、この水量消費過程（純排水率）の解明、把握を中心に検討を進めた。

3) 還元量（率）の調査方法

都市用水の還元量調査においては、上水道・工業用水道・下水道に関する取・排水システムを把握し、その取・排水システムにおける重要なチェックポイントで、水量・水質の測定あるいは推定を行う。

以下にその際の手順について述べる。

(a) 取・排水システム調査

取・排水システム調査の概要を図-16に示す。取・排水システム調査に当たっては、上水道配管図などの既存の資料から、上水道配管図、下水道配管図などの個別の系統ごとにシステム図を作成する。また、必要な場合には、現地調査を行って、下水道未整備地区の排水機構や、水使用機構における井戸水の利用実態などを把握する。さらに、地下水位図などを参考にして、排水機構における地下水の浸透流入量を、降雨との関係を考慮して検討することが望ましい。次に個別の系統についてのシステムを重ね合わせて、対象流域の総合的な水循環システム図を作成する。

(b) 用水循環におけるチェックポイントとデータ収集

取・排水システムにおける水量・水質調査の主要なチェックポイントは、流量観測所や浄水場、下水処理場といった定常的に測定されているところが望ましい。重要

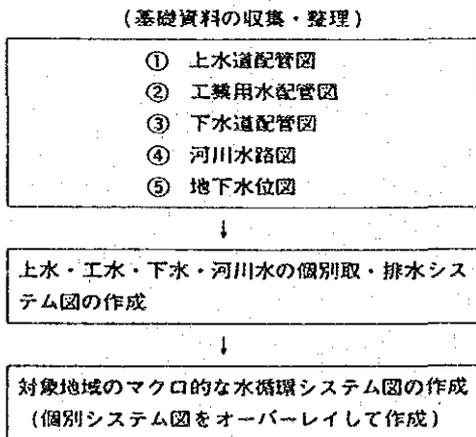


図-16 取・排水システム調査フローチャート

な地点でありながらデータの得られていない場合には、同時流量観測などを行うことにより、流量の損失や地下水の湧水などを同時に求めることも考えられる。水質汚濁についてもほぼ流量調査と同等であり、チェックポイントにおける実測値に適合するように流達率モデルで各地点の水質を推定することも考えられる。

今後の水循環の観測システムとしては、排水管への地下水の浸透を考え、地下水の流動の把握のための面的な観測点の拡大と、都市からの排水の昼夜の変動の大きさを考慮した観測時間、時期の設定についても検討する必要がある。また、都市の下水道整備地区においては、保水機能の低下による降雨の急激な流出と共に、下水道網の整備によって地下水が地表へ人工的に還元される場合が見受けられる。特に、下水道への地下水の浸透量を推定する場合には、都市面積に占める浸透面積の割合、下水道管渠網密度、地下水位と下水道管の深さ、下水道管の老朽度などの定量的な把握が必要であり、これらの問題を解決していくことが今後の課題の一つであると思われる。地下水の影響を明確にした上で還元量を把握するには、地下水の浸透が少ないと考えられる前期無降雨期間の長い時を選んで調査する必要があると思われる。

2.3.3 還元量（率）調査の成果

(1) 下水道整備地区・未整備地区別還元量調査（近畿地建）

都市用水の中で生活用水（上水）の還元量を把握するため、下水道の整備地区及び未整備地区を一地域ずつ取上げ調査を試みた。対象地域、期間を表-10に示す。

以下、調査の方法とその結果を概述する。

1) 調査方法

(イ)流域内調査……各対象地区ごとに、その地区内の人口、家族構成、世帯数さらに合場川流域においては職種別事業所、公共施設などの項目について調査した。

(ロ)給水量調査……合場川流域及び西野山団地内の1戸建住宅団地においては、地区内からいくつかの世帯（一般家庭）、事業所などを抽出し、各戸に設置されている水道メーターを検針した。また、西野山団地内の高層住宅団地については、中心部にある給水塔の親メーターを検針することによって給水使用量を把握した。

検針方法は次の通りである。

- ① 定期調査（毎日15時～16時の間に検針）
- ② 連続調査（24時間を1時間ピッチで検針）

さらに全対象地域について、地域全体の年間給水量の実態を把握するため、水道局資料をもとに2カ月ごとの水道使用量を調査した。

(ハ)流量観測、排水量調査……合場川流域については、地域内の5カ所に流量観測所を設け、2時間ピッチで24時間連続観測（10時～翌日10時）を行った。観測日は、原則として流量が安定している晴天日とし、かつ、都市

表-10 下水道整備地区・未整備地区別還元量(率)調査概要表

区分	記号	調査地区名	面積(km ²)	人口(千人)	調査期間	還元率(%)	摘要
未整備地区	(I)	(山科川左支川) 合場川、日野川流域	1.50	12.1	①昭和52年2月~3月	① 166*	* 給水量に対応した還元率 ** 純排水率
		A 流域	0.96	1.7		①' 64*	
		B 流域	0.19	1.3	②昭和52年8月~9月	② 145*	
		C 流域	0.35	9.1		②' 66*	
整備地区	(II)	(京都市山科区) 西野山団地					
		一戸建住宅		2.6	昭和52年7月~8月	66**	
		高層住宅		1.9	昭和52年7月~8月	53**	
備考	未整備地区は、特に地下水の影響が大と考えられるので水使用が皆無に近い午前2時~4時の流況を基底流量として①、②を修正したのが①'②'である。なお、ここでの還元率は給水使用に対する還元率である。						

戸動を考慮して曜日が均等化するように配慮した。

団地地区については、当該地区の下水処理場へ流入する雑排水量を、年間給水量調査に対応して2ヵ月ごとに集計した。

2) 調査結果

以上の調査による還元率(あるいは純排水率)の推定結果は表-10の通りである。また、合場川流域における還元量の時間変化、及び、西野山団地における純排水率の時間変化、日変化を図-17~18に示す。

これらの結果を取りまとめると、以下の事項が指摘できよう。

① 下水道未整備地区では河川水量における地下水、伏流水が占めるウエイトが高く、また、A、B、Cブロックにおいて還元率にかなりのバラツキがある。これは各流域の土地利用実態及び地下水流動形態の相違によるものと考えられる。

② 西野山団地での調査結果は、一戸建住宅地区では未整備地区に近い純排水率を示し、また、高層住宅地区では洗濯水が雨水管に排水されているなどの事情により、純排水率が小さい値を示している。このことから、還元率の算定に当っては、水利用形態などの事前把握が重要であることがわかる。

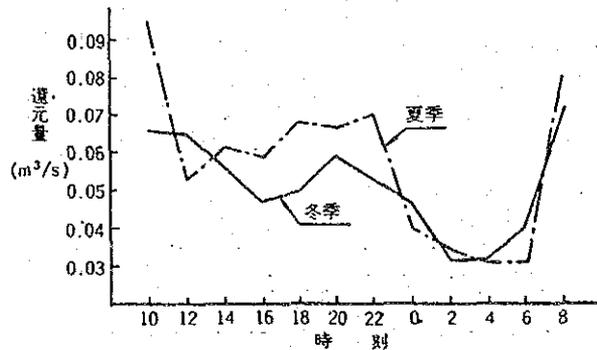


図-17 還元量時間平均変化図(合場川流域)

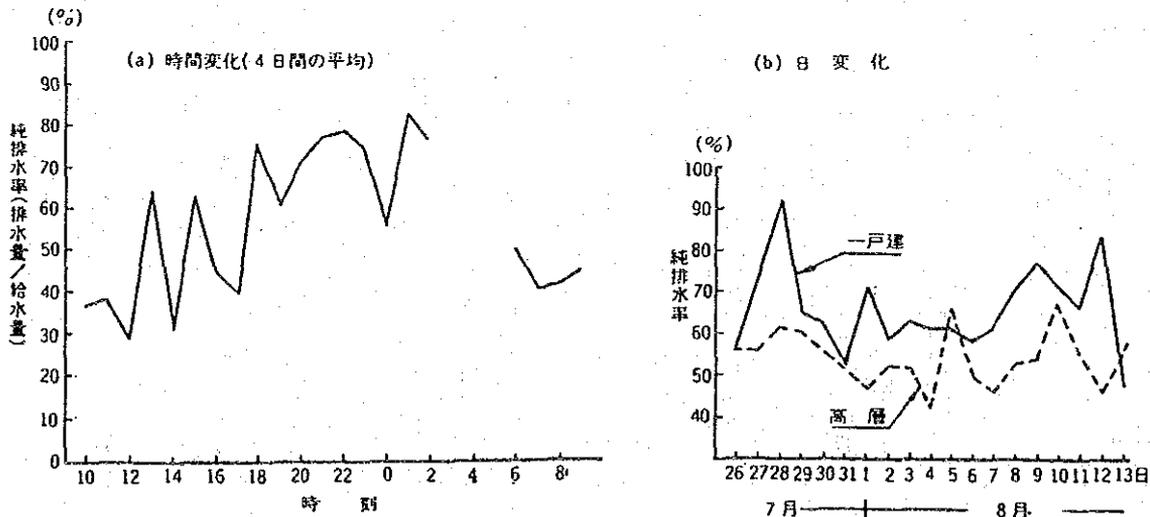


図-18 純排水率の経時変化(西野山団地)

③ 団地のタイプと純排水率との関係については、昭和53年度淀川流域の17団地について同様の手法（使用量は水道メーターで検針し、排水量は下水処理場流入量より算定）による実態調査を実施したが、団地タイプと純排水率の間には、はっきりした相関は認められなかった（表-11参照）。この調査では純排水率が100%を超える団地がかなりあった。これは団地内の下水処理場流入量の中に降水、地下水などが混入していたものと考えられるが、流量測定法、排水方法にも不明な点があるため、本結果の信頼性は余り良くないと思われる。

(2) 都市形態別還元量調査（関東地建）

都市形態別の還元量を把握するために、表-12に示す11都市を選定し、一般都市と住宅団地都市に区分して、還元量調査の一環として純排水量調査を実施した。

1) 調査対象都市の概要

調査対象都市の概要は表-13に示す通りである。また、各都市における配水量、使用水量、処理水量の関係を図-19~21に示す。

2) 純排水量のモデル化

ここでは、純排水量を下水処理区域内使用量（井戸水使用量も含む）と下水処理場流入量より、マクロ的に検討することにした。処理場へは、処理区域内の使用水の排水と地下水などが流入しているために、図-22に示す

考え方のもとで純排水量を推定することにした。

このうち、処理区域内使用水量 Q_{ie} 及び下水道への地下水流入量 Q_x の推定方法は次の通りである。

① 処理区域内使用水量 Q_{ie} （上水 + 井戸水）

$$Q_{ie} = \epsilon \cdot \frac{q_{ie}}{q_k} \cdot \frac{P_s}{P_k} Q_0$$

ここで、 Q_0 ：給水区域内への浄水場からの配水量

ϵ ：有効率

q_k, q_{ie} ：給水区域内及び処理区域内使用水量原単位

P_k, P_s ：給水区域及び処理区域の人口

② 下水道への地下水流入量 Q_x は、角屋らの補給能モデルによって推定する。

3) 純排水率の算定手順

純排水率は、上記のモデルを用いて試行錯誤により推定した。すなわち、先ず、純排水率を仮定した上で、処理区域内の使用水量から純排水量を求めると共に、補給能モデルより推定した地下水流入量を加え下水処理場流入量 $\sum Q_c$ を推算する。この値が、標本抽出期間内の実測処理場流入量 $\sum Q_c$ に一致するまで、以上のプロセスを繰返す。

表-11 淀川流域17団地における純排水率調査

団地名	管団名	人口(人)	純排水率(%)	敷地面積(m ²)	道路面積(m ²)	裸地芝面積(m ²)	地形	建造年月	低中高層別	摘要	
宮田	住宅公団	11,354	111	194,876	33,939	103,850	平地	昭.46.7	中層	中層：4~6階建 高層：8~12階建 ④ 4カ月平均 ⑥ 6カ月平均 ⑧ 8カ月平均 参考：中登美団地4カ年経年変化	
玉川橋	〃	4,767	109	113,443	19,370	44,610	平地	昭.45.4	中層		
桜丘	〃	1,850	103	37,694	7,033	19,338	平地	昭.46.9	中層		
積尊寺	〃	1,626	140④	106,209	21,968	48,476	平地	昭.52.3	中層(高層)		
中登美	〃	10,110	95	249,536	33,645	56,134	丘陵	昭.44.6	中層(低層)		
平城	〃	9,086	110	(130,624) 1,379,000	(18,860)	(48,446)	丘陵	昭.48.7	中層一戸建		
石山	〃	1,489	99	27,921	4,937	12,513	丘陵	昭.45.12	中層		
山科	〃	944	104⑧	7,294	0	0	平地	昭.47.7	高層		
醍醐石田	〃	4,778	100⑧	98,796	13,937	46,647	平地	昭.50.3	高層(中層)		
久御山	〃	2,108	97⑥	105,226	28,188	51,758	平地	昭.50.8	中層		
小栗栖北	〃	3,825	100⑧	83,904	11,319	39,252	平地	昭.49.11	中層		
府管小栗栖	京都府管	6,631	106	96,164	30,163	32,012	丘陵	昭.47.5	中層	年度	純排水率
〃西大久保	〃	7,178	133	174,033	39,310	85,318	平地	昭.49.8	中層	49	94%
〃田辺	〃	4,526	90	49,551	11,830	14,488	平地	昭.44.7	中層	50	87
市管醍醐南	京都市管	1,680	83⑥	37,632	7,235	19,010	丘陵	昭.46.11	中層	51	97
〃小栗栖	〃	2,269	141	52,043	10,314	22,769	平地	昭.50.3	中層	52	95
〃醍醐中山	〃	3,125	87⑥	74,301	16,095	35,401	丘陵	昭.50.8	中層	平均	93

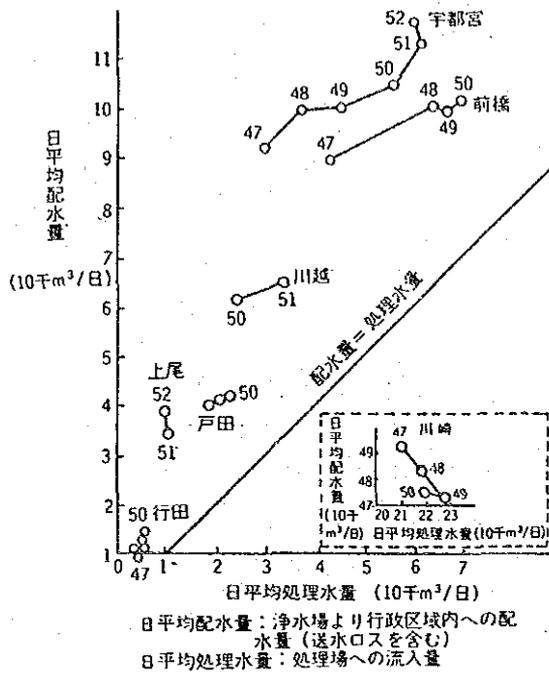


図-19 一般都市の配水量～処理水量（数字は年度を示す）

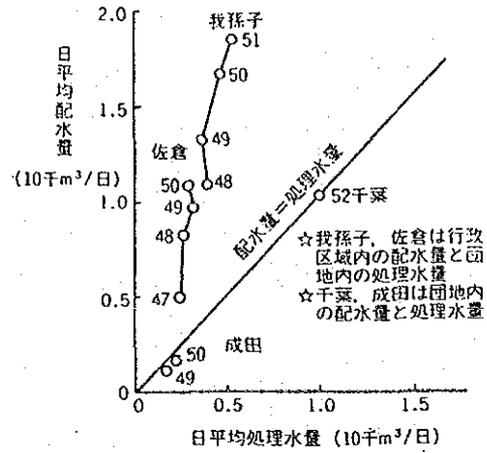


図-20 団地都市の配水量～処理水量

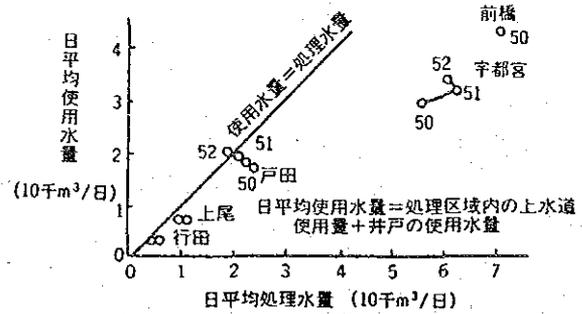


図-21 処理区域内使用水量～処理水量（数字は年度を示す）

表-12 各都市の下水道普及状況表

都市名	処理区域			DIDからみた下水道普及率		分合流方式	
	処理人口 (千人)	処理面積 (km ²)	人口密度 (千人/km ²)	処理区域面積 / DID面積 (%)	処理人口 / DID人口 (%)		
一般都市	宇都宮	73	8.0	9.2	21	32	合流 (一部分流)
	行田	14	1.9	7.2	45	51	合流
	川越	85	9.2	9.3	46	58	合流 (一部分流)
	上尾	7	1.0	7.0	13	9	分流
	戸田	19	2.6	7.3	28	32	合流
	川崎	272	15.4	17.7	17	27	合流、分流
	前橋	98	9.1	10.8	36	71	合流 (一部分流)
住宅団地都市	成田 (成田ニュータウン)	54	4.9	11.0	95	45	分流
	我孫子 (湖北台団地)	14	1.4	10.0	20	30	分流
	佐倉 (角栄団地)	15	0.8	18.8	24	36	分流
	千葉 ((千城台) 団地)	33	2.8	11.8	43	51	分流

していないものが多い。そこで、従来の個々の水循環要素に対応したモデルを組み合わせ、あるいは改良することにより、流域全体の自然水及び用水を併せた水循環機構を、各々の利用目的に応じて面的、時間的に必要とする精度で把握、表現できるような水循環モデルの作成を試みた。

本研究会においては、当初水循環モデル W. G. を設置し、汎用性のある水循環モデルの作成を目指し調査、研究を進めた。この立場は、流域の水循環と水利用の関係を表現（シミュレート）できる水循環モデルの構築を主目標とするものである。これに対して、流域の自然水あるいは用水の循環機構を流域全体として、かつ整合のとれた精度で的確に把握するための一手段として、水循環モデルの作成が不可欠となる場合が少なくない。そのため、後述するように、いくつかの地建などにおいて、対象とする流域特性や作成・使用目的に応じて種々の水循環モデルが作成されることになった。

水循環モデルの全体構造は、その用途や流域特性のみならず主眼とする水循環要素及び取扱う時間的・空間的スケールによりかなり異なっている。しかし、水循環モデルを構成する降雨流出、地下水流動などのサブ・モデルには共通したものが少なくない。そこで、各流域で検討された水循環モデルの特長や構造の整理を試みた。

2.4.2 水循環モデルの具備すべき機能

水循環モデルの使われ方は次の3ケースに大別できる。

- ① 流域の水循環をよりの確に把握する上での何らかの知見を得ようとするもの。
- ② 流域の水利用と水循環の相互影響をシミュレートしようとするもの。
- ③ さらに、ある評価基準のもとで適切な水循環、水利用のコントロール方法を探ろうとするもの。

水循環モデルがこれらの役目を果たすためには、次のような機能を備えている必要がある。

先ず、水循環モデルの具備すべき第一の機能は、流域内の水の動きを面的かつ時系列的に表現できることである。降水として流域にもたらされた水は、洪水として地表及び土壌表層を経て河道に到達したり、あるいは流域に貯留されたりする。河川水は、その流下の途上においてダムなどにより貯留されたり、用水として取水利用される。なお、流域の利用排水は再び河川に還元する場合もある。また地表の水は地下へ浸透し地下水として滞留したり、蒸発散として大気中に失われる。地下水は、人為的に汲上げられ利用され、あるいは地下水流出となり、再び河川に湧出することもある。このように複雑かつ多様な流域内の水の動きを、必要とする空間的・時間的スケールで表現できることが、最も基本的な機能である。

上記の機能が得られたならば、次に要求される機能は、水循環に人為的操作を加えた場合に、流域の水の動きの

変化を面的かつ時系列的に表現できることである。すなわち、流域内の一地域（一地点）における水利用あるいは水制御が、河川水、地下水などの水循環に及ぼすインパクト、さらには、水循環機構を媒介として、他の地域（地点）の水利用に及ぼす影響を定量的に表現できなければならない。ここで人為的操作については、水資源管理における二つの側面、すなわち、計画論的な観点からと流水管理上の観点とから考える必要がある。前者については、流況調整施設の増設や運用の変更、及び用水循環の合理化（取排水量の変更、取排水システムの整理・統合・分散）により流域内の水資源の効率的利用を計画する場合に、その計画を実行した場合に結果として生ずるであろう流況を予測、表現できることが要求される。後者については、渇水が予想される場合などにおいて、流況調整施設により流況を調整したり、渇水調整などにより利水形態に変化を加えたりした時に、その結果として起こるであろう流況を表現できることが必要となる。

この機能と併せて、水管理におけるコントロール指標（利水基準地点流量、取水量など）に対して、制御可能な施設の制御量を面的、時系列的に決定可能であることが望ましい。これが、水循環モデルが具備すべき第3の機能である。

さらに可能であるならば、水利用に伴う便益、費用（被害を含む）など他の目的関数と連立させることにより、水循環のコントロール方法の最適化を図ることができるとが現時点における最終的な目標と考えられる。

流域の水利用は、その高度化に伴い、単に水量消費ばかりでなく水質の消費という様相を強く呈してきている。今後の水管理に当っては、水量、水質両面からの水循環の管理が重要な課題となる。そのため、水循環モデルにおいては、水質に関しても水量と同様に上述のような機能を有する必要がある。すなわち、第1に流域内の水質、汚濁負荷の分布・変化を面的・時系列に表現することが可能であること、第2には水利用行為による流域内の水質環境へのインパクトを面的、時系列的に表現できることが望まれる。さらには、水利用の最適化を検討するに当たっても、各基準地点などの水質・汚濁負荷量を制約条件などの形で取込めることが要求される。

2.4.3 各種の水循環モデルの特長

本研究会においては、7地建などにおいて水循環モデルの作成が試みられた。これらのモデルは、その作成目的並びに対象とする流域の特性を反映して、それぞれ異なった構造を有している。以下ではこれらの特長を概述する。

表-14には、各地建などが水循環モデルの作成を試みた目的及び重点的に把握、表現しようとした水循環要素などを取りまとめたものである。これらの水循環モデルは、流域全体の水循環機構の解明とその面的、時系列的

な表現を主目的としたものが多いが、さらには、水循環モデルを用いて流域の合理的な水利用形態を検討しようとする試みもなされている。水循環モデルの時間スケールをみると、淀川流域を対象としたモデルは、分割流域(本モデルではブロックと呼んでいる)内及び分割流域間の年間単位の水収支を扱っている。それ以外の水循環モデルは1日から半旬単位で流域の水の動きを捉えようとしており、中でも地下水流動の表現に力点を置いたものが少なくない。水循環モデルによるシミュレーション結果を流域内の水収支(分割流域内及び分割流域間の水循環要素相互の水の受渡し)として静的に表現するために、水資源連関表を用いている例も見受けられる。

次に、各水循環モデルの構造の概略を表-15に整理した。水循環モデルの構築、作成に当たっては以下の項目に対して十分な検討が必要となる。

(1) 流域の分割……流域の地形・水文特性、用排水系統、水需要の分布、行政区画さらには各種の基礎資料の得やすさなどを考慮して行われる。分割された流域の大きさは40～500km²と様々である。これらは、ブロック、ユニットなどとも呼ばれる。流域分割の一例を図-23に示す。

(2) 分割流域内において取上げる水循環要素とその取扱い方法……分割流域内の水循環要素としては、降水、蒸発散、河川、地下水、流域貯留、上水道、下水道、家庭用水、業務用水、工業用水、農業用水などが挙げられる。これらの要素の取扱いは、対象流域の特性及び水循環モデルの作成目的により変化する。さらには、各要素間の水の移動の表現方法も様々であるが、特に、降水から流域貯留・河川・地下水への変換を表現する降雨流出機構、及び地下水流動機構の取扱い方法、モデル表現方

表-14 水循環モデルの概要

地 建 等	対 象 流 域	モ デ ル 作 成 の 目 的 な ど	主眼とする水循環要素	時間スケール
北海道開発局	石狩川水系空知川流域 2,573 km ²	低水管理を目標として、人為的操作を行った後の河道任意地点での流況を表現しようとした。	農業用水	1日
東北地建	最上川流域両羽橋基準地点上流 6,519.4 km ²	最上川流域においては、将来の水需給の逼迫が予想され、表流水、地下水を含めた流域の総合的な水資源開発と水利用計画の策定が急務となっている。そのため、流域の自然水と水利用機構を考慮した面的、時系列的な水収支を表現できる水循環モデルを検討した。	流域平均降水量 農業用水還元量 地下水流動量 融雪量	半旬
北陸地建	信濃川流域 (小千谷～大河津) 816.9 km ²	適正な利水計画の策定及び効率的な流水管理を図る上での基本的情報となる流域内の自然水・用排水の循環量、河道基準地点流況、河道水収支、さらには基準地点の水質時系列などが一定の精度で推定可能であるようなモデルの作成をめざした。	低水流出量 融雪流出量 地下水流動量 農業用水還元量(率)	1日(洪水時には1時間単位)
近畿地建	淀川流域(琵琶湖流域、宇陀川流域を除く)	流域内の水の流動及び水質変化が、自然法則と種々の社会的要因によって規定されているものと考え、淀川流域をブロック分割した上で水循環要素ごとに水資源連関表により、ブロック内あるいはブロック間の水の移動(負荷の移動)を表現し、淀川水系の水循環機構を解明する。	用水循環(家庭、業務、工業、農業)	1年
中国地建	佐波川流域(佐波川ダム流域を除く) 357.7 km ²	佐波川総合水管理計画の一環として地下水を含めた水系全体の水の流動を、単位流域ごとに精度よく把握できるモデルを開発し、水管理に役立てる。	地下水流動量 河川流量	1日
四国地建	重信川流域 445.3 km ²	重信川は表流水の利用が高度化しているため、表流水と地下水の関係を含めた水利用の可能性の検討を図る。	地下水位	半旬
九州地建	筑後川流域 (皮明～瀬ノ下) 875 km ²	流域の降雨から流出に至る自然水の循環機構を明確にし、降雨と流域の特性を人力することにより、水資源連関表を用いて、流域内の水の移動を年単位～日単位で表現できるようなモデルを検討し、河川の取水・還元・地下水を含めた水管理計画及び水利行政を行うための基礎資料を得る。	地下水流動量	1日

表-15 水循環モデルの構造

対象河川	石狩川	最上川	信濃川	淀川	佐波川	重は川	筑後川
モデルの概略	流域水循環を節点と有向辺からなるネットワーク上の水の流れとして表現する。	低水解析用タンクモデルを発展させた複合タンク・モデル	流域を小流域(ユニット)に分割、ユニット内(11要素)ユニット間の(6要素)の相互作用を把握して水循環を表現	対象流域を河川流域データ、市町村データなどのとり易さを考慮して9小流域(ブロック)に分割	山地地帯とそれ以外の水田を含む地帯に分け、さらには流域特性、水文特性に基づいて全体を10小流域に分割	複合タンク・モデル	低水流出モデル、用排水循環モデル、地下水流動モデルを統合。用排水循環モデルはユニット内・間の水の受渡しを表現。
流域分割方法	流域の地形・水文特性、用水循環機構、流量観測網などを考慮して分割	地形、現況水利用及び還元・地下水域、流域、流量資料の整備状況により12小流域に分割	用排水系統、水浴の地域分布、地域外からの導水網と受益地の分布などを考慮して19小流域に分割	対象流域を河川流域データ、市町村データなどのとり易さを考慮して9小流域(ブロック)に分割	山地地帯とそれ以外の水田を含む地帯に分け、さらには流域特性、水文特性に基づいて全体を10小流域に分割	複合(並列多重)タンク・モデル	水文界、用排水系統水需要分布データ収集の容易さを考慮した上で、水文界により12小流域に分割
各水循環要素の取扱	降雨流出	貯留関数法	貯留関数法(融雪を考慮)	貯留関数法(融雪を考慮)	3段直列タンク・モデル	各種のタンク・モデルにおいて考慮	貯留関数法
	河道流下	有向辺上の水の流れとして表現	河道タンクにより表現	同 上	河道タンクとして表現	河道タンクとして表現	ユニット間の水の受渡しの一つとして表現
	地下水流動	—	浅層、深層の2段タンクで表現	同 上	同 上	2段のタンク・モデルで表現	平面二次元流モデルによる。
	農業用水	ネットワーク上の水の流れとして表現	還元率を考慮した水田タンク・モデルにより表現	ユニット内の水の受渡しの一つとして表現	同 上	水田、水路に相当するタンクにより表現	用排水循環モデルの中で表現
	都市用水	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上	同 上
小流域間の水の移動の表現	同 上	河道タンク、深層地下水タンク間の水の移動として表現	ユニット間の水の受渡し(水路河道など)として表現	ブロック間の水の受渡しとして表現	タンク間の水の移動の一形態として表現	タンク間の水の移動の一形態として表現	ユニット間の水の受渡しとして表現
水質	考慮	—	一定負荷量として考慮	考慮	—	—	—

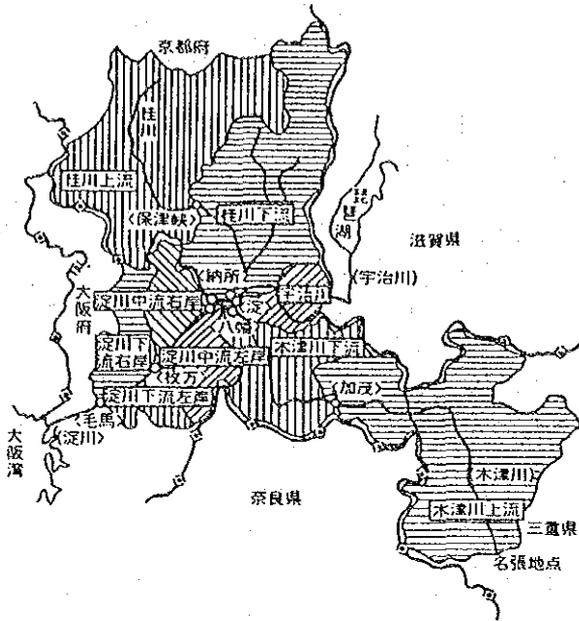


図-23 流域分割の一例 (淀川流域)

法の検討が重要な課題となる。

(3) 分割流域間の水の移動を示す水循環要素とその表現方法……分割流域間の水移動を表現する水循環要素としては、河川、地下水、上水道、下水道、工業、農業、導水が考えられる。これらの要素における水の移動の表現は、要素間の直接的な水の受渡し（ここでは、一要素から他要素への水の移動において量的な変化、並びに時間遅れが生じない場合をいう）として表わされることが多い。しかし、地下水による水移動においては、時間的な遅れを考え、タンク・モデルやダルシー則に基づいた表現方法が用いられる。

(4) 水の移動における時間遅れの取扱い方法……降雨流出や地下水流動などにおける（流域）貯留に伴う時間遅れは、降雨流出、地下水流動のサブ・モデルに内部化されることが多い。河道や水路などを通じての分割流域間の水移動に伴う時間的な遅れは、それを取扱う空間的・時間的スケールを考慮した上で無視されることが少なくない。

これらの諸要件を踏まえて作成された水循環モデルの基本的な構造は、次の3種類に大別される。

(1) ユニット・タイプの水循環モデル……対象流域をいくつかの小流域（ここでは、ユニットと呼んでいる）に分割し、流域内の水（あるいは負荷量）の流れを、全てユニット内、及びユニット間の水循環要素（水の受渡し要素と呼んでいる）間の水の受渡しとして表現する方法である。この水の受渡しを表現するに当たっては、降雨流出モデルや、地下水流動モデルなどのサブ・モデルを組込んだり、あるいは水循環要素間の直接的な水の受渡しとして取扱っている。信濃川並びに筑後川流域の水循

環モデルがこのタイプにあたる。図-24には、信濃川流域のモデルにおける各ユニット内の水循環要素と要素間の水の移動の表現例を示した。このタイプのモデルにおいては、種々の水循環サブ・モデルを組込める自由度が比較的高く、既応の調査・研究成果を取込んだモデル化が可能である。例えば、信濃川、筑後川の水循環モデルにおいては、降雨流出を貯留関数法により、また地下水流動をタンクあるいは平面二次元流モデルによって表現している。

(2) タンク・タイプの水循環モデル……対象流域をいくつかの小流域に分割すると共に、各々の小流域内の降雨流出、地下水流動、農水還元、貯留などの水の動きを、全てタンクにおける水の貯留及びタンク間の水の移動として表現する。これらのタンク群を組み合わせることによって、流域全体の水循環を表わそうとするものである。最上川、佐波川、重信川流域を対象とした水循環モデルがこれに属する。一例として、重信川流域の水循環モデルの概念図を図-25に示す。このタイプの水循環モデルは、流域水循環機構を全てタンクによって表わそうとするものであるから、モデルの構造のイメージが掴み易く、理解が比較的容易であると思われる。しかし、水循環モデルのパラメータは、ほとんどタンク孔に関する定数という同種のものであり、またその数も多い。そのため、これらパラメータ群の合理的な決定方法の確立が今後の検討課題といえる。

(3) ネットワーク・タイプの水循環モデル……流域を、自然水流出部分流域、農業用水・都市用水利用地区、取排水地点、流況調整施設、流量観測地点などを節点とし、また河道・水路などを有向辺とする一種のネットワークとしてモデル化し、流域の水循環をこのネットワーク上の水の流れとして表現しようとするものである。この時、水の動きは連続式や運動式によって規定される。石狩川流域の水循環モデルがこれに相当する。淀川流域の水循環モデルは、各小流域内の水の移動の取扱い方はユニット・タイプに近いといえるが、流域全体としてみた場合にはネットワーク・タイプの変形とみなすことができる。

このタイプの水循環モデルは、モデルの構造上、流域の複雑な水循環機構を忠実に表現するには限界があると思われる。しかし、水循環を数式表示することができるため、他の目的関数と組み合わせることにより、流域水循環の最適なコントロール方法を求めることが可能となる。図-26には、ネットワーク・タイプの水循環モデルの一例の概略図と、そのモデルを用いて流域の総水不足量を最小とするようなダム群の貯水量時系列を求めた結果の一例を示す。

水循環モデルを検討するに当たっては、これら各タイプの特長を考慮しながら、流域の水循環の特性とモデルの利用目的に応じたモデル作りを進める必要がある。

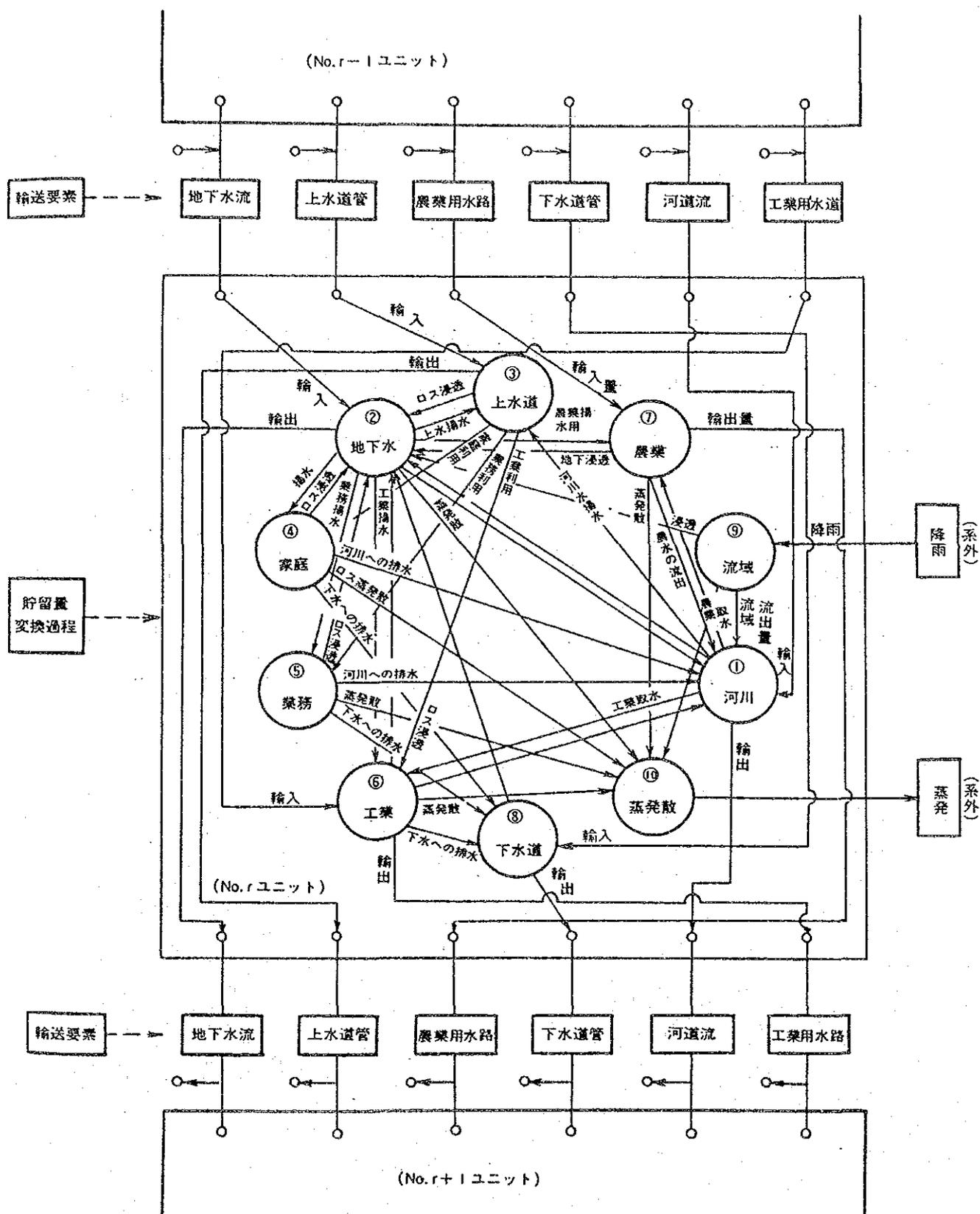


図-24 ユニット内の水循環要素 (信濃川)

