

都市の水利用と水循環

亀 井 翼

1. はじめに

流域の水資源の状況と利水構造の様態は、地域と地域の間で、また同一地域においても時代と共に変遷して行く。従って、河川の水量・水質両面の状態が人の活動とのつながりでどのような形態をとっているか、またとってきたかをさまざまな時代と地域について系統的に把握することができれば、水資源管理、利水計画上の確固とした立場を持つことができる。さらに近年頻発する都市渇水に対する確な施策を明らかにすることが可能となる。本論では始めに①渇水に対する施策の諸例とその特徴を明らかにし、②さまざまな水代謝系の特性を検討したうえで③水需要の内容と水の由来に対する市民の意識を考慮しながら渇水の深刻度のレベルと対応する施策を明らかにしたい。最終的に適用すべき施策を決定するためには水質および水量の安全性を制約条件とし、建設、運転費用を最小にするシステムを求めることであるが今回は定性的な相对比较にとどめたい。

2. 渇水に対する施策例とその特徴

渇水に対する施策例としては図-1に示すような施策が考えられ、その特徴として表-1に示すようなものが挙げられる^{1,2,3)}。どのようなシステムを採用すべきかは地域の特性及び渇水の深刻度に

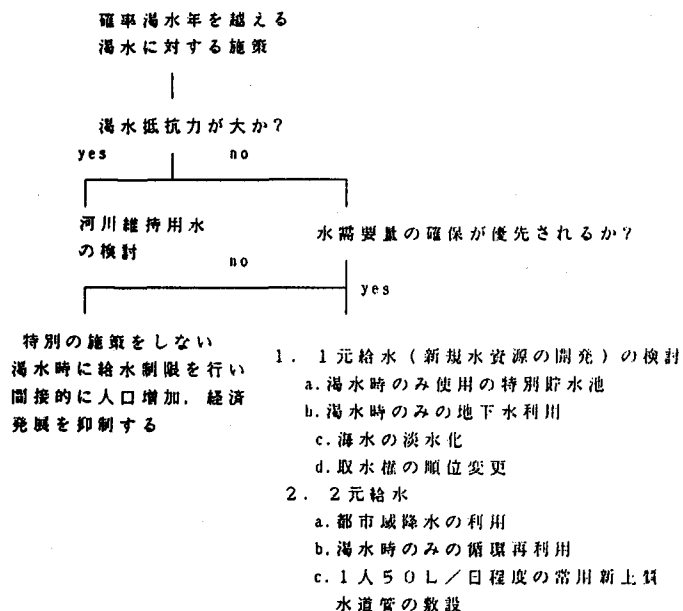


図-1 確率渇水年を越える渇水に対する施策

表－１ 渇水対応施策の特徴

渇水対応方法	長 所	短 所
特 別 貯 水 池	導水路敷設のみにより既設浄水場に直結できる	長期貯水による富栄養化等の水質劣化
地 下 水 利 用	同 上	下流部においては地下水汚染の問題
海 水 の 淡 水 化	有機物濃度は数ppm以下	3 万 ppm の無機塩類を削減するためのプラント建設，運転コスト
都 市 域 降 水 の 利 用	屋根集水の場合の水質は上水道水レベル。新規の屋外配水管の設置を要しない。雨水の下水管渠への流入負荷の削減	全必要水量の確保難
循環再利用水の利用と新上質水道	新規の水資源開発を必要としない 受水域への汚濁負荷の軽減 安全で美味しい水と渇水問題の解消	高度処理施設建設，運転，配管，敷設コストの増大 1 人50L / 日程度の配水管敷設，新上質水道使用の抑制
特別の施策をし	水以外の要因とのトレードオフにより都市人口，産業構造が決定される 高度に節水型の都市が形成される	既存産業の経済的被害の増大 市民生活の不便

よって異なる。このような方式を採用するに際して必要な水需要の内容と水の由来に対する市民の意識及び各水質交換プロセスにおける水質と水の安全性を検討してみたい。

3. 水需要の内容

全給水中に占める用途別比率は表－２のようである⁴⁾。表からは明らかなように上水質を要求しな

表－２ 水道水の用途別水量配分比と水質別用途分類

A 水 の 用 途	B 全給水中に占める 用途別比率	C 身体との接触程度 による分類	D その用途に使用 される水の性質	E 要求水質別水質			F 排出水の水質別水量		
				上質	中質	低質	上質	中質	低質
水 洗 便 所	10	42 身体には直接触 れない用途	流 送 力 13 溶解力(洗浄力) 77	—	—	10	—	—	10
散水・洗車・掃除	7			—	2	5	—	—	7
洗 濯	25			10	15	—	10	10	5
入 浴	35			5	30	—	25	10	—

いトイレット、散水用料の比率は20%弱程度となるので1人1日の給水量250 Lとして $250 \times 0.2 = 50 \text{ L}$ となる。この程度の不足水量であれば図-2に示すように夏期における降水量が140mm/月であれば、4人家族が住む一戸建の雨水集水可能な屋根の面積を80㎡として11.2㎡/月の雨水量が得られるので4人分の必要水量を(4人 $\times$ 50 L $\times$ 30=6㎡)雨水により賄うことが可能である⁵⁾。しかしながら居住区間がますます高層化し

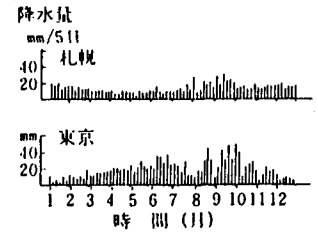


図-2 日本の年間降雨

1人当りの屋根集水面積が小さくなり、そのような集水方法の実施が難しく、かつ必要十分な水量を確保出来ない場合には前述のような再利用を考えざるを得ない。このような場合どのような用途にまで再利用水を用いることが出来るかが問題となる。

4. 再利用水の用途別使用意識

どの用途にまで再利用水を用いるかについては意見が分かれるところであるが表-3に示すように大阪市における意識調査の結果ではトイレット、洗車用水など人体との直接接触の少ない用途についてはそれほど大きな抵抗はないものと考えられる⁶⁾。原水からし尿排水を除き処理レベルを高めることにより再利用水に対する意識も変化するものと思われる。では都市下水を各種の水処理プロセスにより処理することによって得られる処理水質と用途別の要求水質はどの程度のレベルであろうか？

表-3 意識調査結果

		水洗トイレの水 (%) N	庭打や道路への水 (%) N	洗車の水 (%) N	洗たくの水 N (%)	そうじの水 N (%)	風呂の水 N (%)	標本数 (%)
計		87.6(255)	83.1(241)	65.9(191)	10.7(31)	29.3(85)	8.3(24)	100.0(290)
性別	男	91.7(132)	81.9(118)	65.3(94)	15.3(22)	31.9(46)	9.7(14)	100.0(144)
	女	84.2(123)	84.2(123)	66.4(97)	6.2(9)	26.7(39)	6.8(10)	100.0(141)

5. 各種の水処理プロセスによる到達水質と用途別要求水質

都市下水に含まれる懸濁性成分から溶解性成分まで各種の有機成分と無機

表－４ 不純物除去のための水処理プロセスの対応成分

対 応 分 プ ロ セ ス	有 機 物				無 機 物				
	粗懸濁性	コロイ ド 性	溶 解 性		粗懸濁性	コロイ ド 性	溶 解 性		
			生物易 分解性	生物難 分解性			易凝析性	イオン性	有機物と の合同体
好気性生物処理（活性汚泥法）	◎	○	◎	×	◎	○	○	×	×
凝集沈殿ろ過（鉄・アルミ凝集）	◎	◎	×	×	◎	◎	○	×	○
凝集沈殿ろ過（石灰凝集）	◎	◎	×	×	◎	◎	○	×	○
活性炭吸着	×	×	△	◎	×	×	×	×	○
逆浸透	×	×	○	◎	×	×	×	◎	○
イオン交換	×	×	×	×	×	×	×	◎	×
蒸留	×	×	△	△	×	×	○	◎	△

注：◎印は良好な除去が期待できるもの，○印はある程度の除去が期待できるもの，△印はわずかな除去しか期待できないもの，
×印は除去がほとんど期待できないもの。

表－５ 中水道の用水用途別要求水質

用途		風 呂 用 水	洗 濯 用 水	洗車・掃除用水	散 水 用 水	便 所 用 水
感 覚 的 項 目	濁 度（°）	5以下	15以下	15以下	15以下	30以下
	色 度（°）	5以下	10以下	20以下	30以下	50以下
	臭 気	加温して異臭を生じないこと	不快臭を感じないこと	不快臭を感じないこと	不快臭を感じないこと	不快臭を感じないこと

6. 上質水道システムの安全性と経済性

上質水道系——上質水道システムにおける飲用水量は先に述べたように高々1人1日50L程度であるので給水人口の規模にもよるが人為的な汚染のほとんどない河川の上流部の表流水または地下水を取水することが可能である。河川上流部の表流水の水質は晴天時、及び小降雨の場合図-3に示すように1cmセルを用いた紫外部260nmの吸光度(E_{260})が0.03程度であり、図-4、5に示すような原水の E_{260} と注入塩素量をパラメータとした TOX 、 THM 生成量のダイアグラムからみても TOX 、 THM の生成量は非常に低いことが判る。

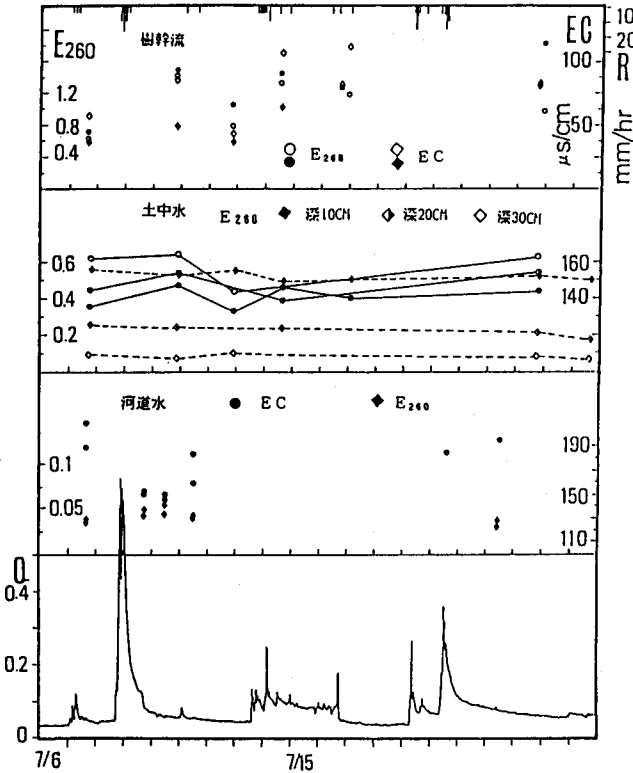


図-3 ハイドログラフと E 、 C 、 E_{260} (小降雨)

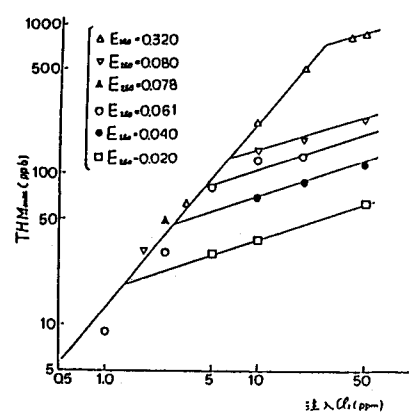


図-4 THM の最大生成量

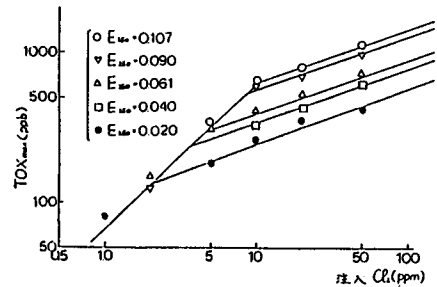


図-5 TOX の最大生成量

しかしながら、図-6に示すような大降雨(総雨量100mm程度以上の場合には E_{260} の多い表層部分(図-7参照)からの側方流も多くなるためハイドログラフのピーク直前付近で E_{260} の値が高くなる。したがって上質水道水源としては上流部における地下水(伏流水も含む)が望ましい⁷⁾。このような原水であれば濁質もきわめて低いので殺菌プロセスのみを適用すればよく、殺菌もクロラミンで十分であり処理施設建設費及び浄水コストも急速ろ過システムに比べ大幅に減少する。このような上質水道から供給される飲料水は味、臭い、安全性の点でトップレベルにある。配水管敷設にしても先に述べたように高々1人1日50L程度であるので小口径管で十分であり、クロラミンを用いているため、赤水等の問題も生

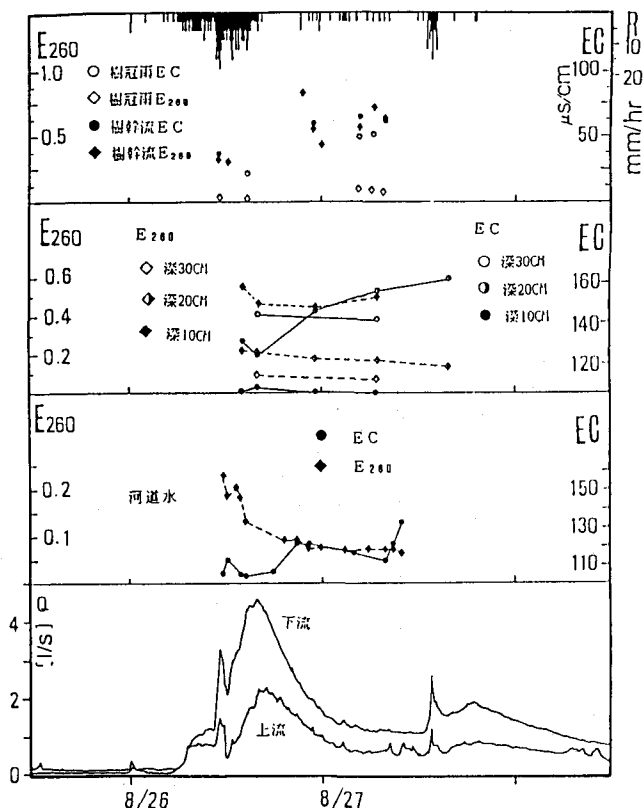


図-6 ハイドログラフと E. C, E_{260} (大降雨)

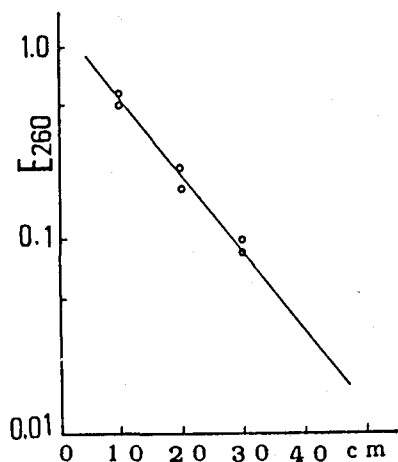


図-7 土中水の E_{260}

雑用水道系——通常は現用では上水道水として飲用にも用いられている水道水を風呂用水を含む雑用水として用いるのに何等の問題も生じないであろう。大渴水の場合、仮に100%都市下水を雑用水道に用いる場合について考えてみよう。雑用水道に用いる再利用水は2次処理水を原水とした凝集沈澱ろ過水とする。この場合、問題となるのは風呂、洗濯用水として用いる際の病原菌汚染である。これはオゾン処理により通常の塩素処理では抵抗性のあるウイルス類を不活性化し、さらに塩素を添加して残留効果を発揮させることにより解決できる。

下水再利用水は上質水道水に比べ電気伝導度が大きいため配管現場でも容易に検知することが出来、クロスコネクションは起こり得ない。下水2次処理水及びそのオゾン処理水と塩素処理水の変異原性は通常の添加レベルと反応時間では認められていない。2次処理水の凝集処理水、その活性炭吸着処理水も急性毒性はもちろん変異原性も認められないので殺菌処理さえ十分であれば万が一の誤飲も大きな問題とはならない。繰り返し使用によって問題となる水質は活性炭処理でも除去できない NO_3 などの無機塩類の蓄積である。通常の水道水の電気伝導度は高々 $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ であり1回の水利用で約 $300 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度増加するので緊急時には $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 程度のレベルまで風呂、洗濯用水として用いられるとすると約3回の循環再利用が可能となる。

しかしながら大渴水でも100%下水2次処理水に頼ることは有り得ないし、前述のように市民意識としては下水の高度処理水といえども風呂、洗濯用水として使用することを躊躇する現状では都市洪水防止にも効果のある雨水滞水池あるいは2次処理水の受水池（札幌市では茨戸湖）を渇水時に取水、導水するのが現実的な対応であろう。

ここまでの検討は都市の水需要のみに観点を置いた究極的な議論であった。丹保らの論文を引用して次節で河川流量と河川主要水質を都市水系の構造と重ねて論じてみよう⁸⁾。このような検討は、まず①地域の水の大循環フラックスが与えられ、②都市地域の水の質量の要求が知られ、③それに対応する水代謝系（用水、利用、非出系）の型を定めると、後は必然的に④河川の利用可能な容量限界が量と質の両面から定まってくる。この場合⑤同じ形態の用排水構造を用いた場合でも、河川の形状や海との関係に応じて容量の限界が異なってくる。

そこで次に我国の平均的な状況を想定して、都市水代謝が流域に定まる際の構造を概観することから検討を始めることとしたい。

7. 一過型総括水代謝系による場合

現在用いられている最も一般的な場合である。①上下水道、農業用排水、工業用廃水がそれぞれ相互に干渉しないで成立し得るのが理想形で、それぞれのシステムがその用途内の最良質の水質を確保することができることを成立の前提としている。②水資源開発の主体はダム貯留などによる流出の時間平均化と広域化による水資源密度と利水密度の空間的平均化による。③上下流関係が明確で、水質汚濁の問題は下流の放流地先に集中する。④代謝系運用の主指標は系の通過水量（利水量）である。⑤水代謝系の構成は単様で総括的なため経済性が高いが、環境に及ぼす影響は複雑になる。等のさまざまな特徴があげられる。この類型の代謝系の成立要件を、上下流の条件から見ると図-8のようになる。類型1 aは「利水量制約」と称すべき型で、水代謝に必要な利水量を得るに十分な集水域が得られるかどうかの問題となる場合である。下流における排水による水質汚濁は広い海洋や大河川への

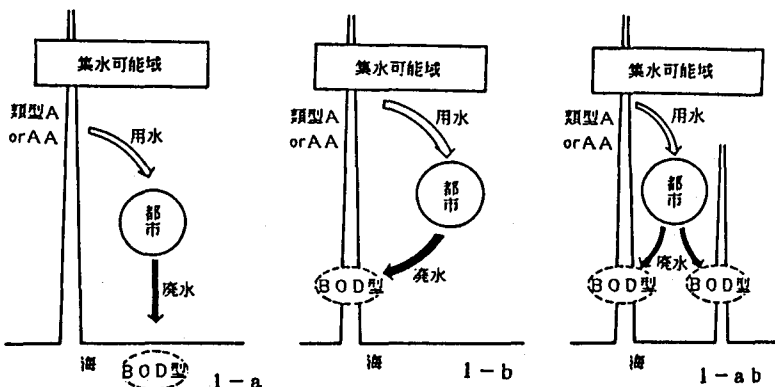


図-8 一過型水代謝系

希釈放出によるか、または極めて高度の廃水処理によって解決される場合である。現在の上下水道のような代謝系による水利用が同一河川に収まっている場合、下流放流点の水質汚濁の問題が利水可能量の上限を決めることになる。このような場合を類型1 b「受水域水質制約」型とする。幸い下流に大河川や隣接して並流する河川がある場合、汚濁負荷を分散して利水限度をあげるような場合(類型1 ab)も少なくない。

7.1 利水量制約型

(水資源賦存高)

わが国の国土総面積377(千km²)に平年では1788mm/年の降水があり総降水量は6749億m³/年となる。この内約600mmが蒸発散等で失うとされている。渇水年に利用し得る水資源としての賦存高は883mm/年、流出量にして3338億m³/年程度と考えられている。これを単位面積当たりの日流出量に直すと、賦存量が日量に換算して0.24cmであり、2.4ℓ/m²/日といった水資源を考える最も基本的な数値をうる。

(水利用量)

日本の総人口1.2億人を基準として昭和50年度に1人当たり平均1日どのくらいの水を使用しているかを略算してみる。

・生活用水：全国総量 123億m³/年，1人1日量 280ℓ

・工業用水(原水取水)：全国総量 183億m³/年，1人1日量 415ℓ

(再生水を含む全使用量)：全国総量 480億m³/年，1人1日量 1,100ℓ

・農業用水：全国総量 570億m³/年(通年平均)，1人1日量 1,301ℓ

(5か月の灌がい期に集中 1人1日量 3,100ℓ)

したがって、河川等から取水する全用水量は 876億m³/年，2m³/人/日となる。工業用水に多量に使用される再生水の297億m³/年を加えると、全用水量は1173億m³/年，2.7m³/人/日の大きな数値となる。水系を健全な状態で維持するためには後述するように河川の自流としてかなりの量を加えねばならない。

(完全平均時の必要水源地域面積)

流出ダム等で100%平均化し、大広域利水によって全国の水資源と需給要を完全に均一化するという、現在の水資源開発・利水方法の極限の状態を考えた場合に、1人当たりどのくらいの流域面積を持っていれば良いかを考える。

150日間に集中して使用するとすると1581.8%（平均的水使用）となり、農業用水・工業用水は並列に使われているのではなく、カスケード化した直列部分を多く持っている所以この値はゆるめられる。一方、流出量の空間と時間にわたる100%平均化などは望むべくもない。

（ダム開発による場合の実態的な必要水源地域面積）

現実問題として流出量の平均化をどの程度まで期待出来るかを概観するために全国の代表的な河川について、平均流量/渇水流量、平均流量/最小流量の比を求めると表－6のようである。かなりダム開発が進んでいる流域、上流に大きな湖を持っている流域、さらには火山体や厚い森林被覆を持つ流域等、上流での貯留によって流出の時間的平均化が限度近くまで進んでいると考えられる場合、渇水流量：平均流量の比はほぼ1：2－2.5といった辺りの数値をとるようである。そこで、時間平均化の実用的な到達点を平均流量対渇水流出量の比が2.5程度と考えることとする。各用水の平均的な必要水源面積に2.5をかけるとダム開発により到達できそうな実態的な平均水源地域面積の各用水についての必要量が生活用水の291.8m²/人、工業用水の432.3m²/人、農業用水の593.8m²/人（150日集中時3229.3m²/人）のように求まる。

表－6 諸河川の流況流量比

	平均流量 / 渇水流量 (m ³ /sec) / (m ³ /sec)	平均流量 / 最小流量 (m ³ /sec) / (m ³ /sec)	備 考
石狩川（江別）	458/145＝ 3.16	45.8/71＝ 6.45	ダムなし ダムなし、火山体
沙流川（平取）	48.1/8.96＝ 5.36	41.8/4.19＝ 9.97	
釧路川（開運）	24.1/15.9＝ 3.50	24.1/13.9＝ 1.70	
北上川（狐禅寺）	326.6/93.3＝ 3.50	326.6/69.9＝ 4.67	
荒川（寄井）	27.3/5.27＝ 5.18	27.3/3.26＝ 8.37	上流で水道・灌がい用水
利根川（栗橋）	205.9/60.5＝ 3.40	205.9/40.3＝ 5.10	
多摩川（多摩川原橋）	23.9/7.1＝ 3.37	23.9/15.13＝ 4.66	
相模川（寒川）	31.24/2.85＝ 11.80	31.2/1.68＝ 18.50	
富士川（魚秋沢）	54.		

これらを総括すると、水利用を並列的に行なった場合に、ダム開発で到達できそうな必要水源地域面積の値として、平均的に1317.9㎡/人、灌がい水を150日に集中させると3953.4㎡/人となる。日本人が1人当たりの持っている土地面積は、377千km²/1.2億人=3141.2㎡/人であるから、農業用水を平均的に使用した場合で国土面積の30%程度が水源地域として必要となる。農業用水を季節的に使用すれば国土面積を全て用いても水源地域の面積は不足になってしまうのが現状である。したがって、どうしても用途間の繰返し水利用が必要になってくる。このことは水質の変化を念頭においた水代謝システムの構成が河川の水利用上不可欠のものであることを意味する。

7.2 放流地先水質制約型

(環境基準を規程する汚染の第1主成分としての生物分解性有機物)

『水質汚濁に係る環境基準(昭46. 12, 環境庁)』の河川環境保全に関わる主要示標として、溶存酸素量(DO)と生物化学的酸素要求量(BOD)がある。

河水を取水し、利用し、また河川へ戻すといった一過型の水代謝系で水質問題が生ずるとすれば、それはまず廃水が河川や沿岸に排出されたときに、排出地先近傍に局所的に生ずる高濃度成分に由来する害である。その代表的な現象が、空気中には20%強もありながら水中には僅か10 ppm(0.0001%)しか溶けることができぬのに、水中に普遍的な好気性生物の生存の基となっている溶存酸素(DO)の不足である。水中に溶存酸素不足が生ずると、好気性(aerobic)の生態系に悪影響が生じ、極限では嫌気性(anaerobic)となって、好気性の一般水棲生物群が潰滅してしまうことから、酸素不足(OD)概念に基いて水質の劣化を評価しようということが始まる。そこで、酸素要求を誘起する水中の諸成分による酸素消費量と空中からの酸素補給(re-aeration)の間の平衡を考えて水中の溶存酸素濃度レベルをある値以上に保とうと考えることが従来型の水代謝系の汚染制御に最初に現われた考え方である。

Streeter と Phelps によって確立された式-1, 図-9 に示されるような酸素不足曲線(oxygen sag curve)がこの現象の基礎的な表現である。

$$dD/dt = K_1L - K_2D \tag{1}$$

ここで、D:飽和値からの酸素不足量, L:水中のBOD(生物化学的酸素要求量), K₁:脱酸素速度係数, K₂:再曝気速度係数

れるとし、式-2の左辺のように反応に関与した有機物とO₂の量比が一定である、とすると式-3の関係が成立する。

$$d(\text{有機物}) / dt = (\text{定数}) d(\text{必要酸素量}) / dt \tag{3}$$

したがって、水中で微生物によって酸化される有機物量を対応する酸素量で表現し、流水中の酸素の収支と結ぼうと考え、しかも多種多様な生物分解性の有機物量を酸素という簡単な無機物量で置き換えるという巧みな単純化・示標化をやったのけ、BOD試験という簡単な検出法によって定量化を果たす。

Streeter-Phelpsの基本的な概念は流水の局所的な溶存酸素不足が水環境劣化の最も顕著な場合であるということによっている。しかしながら、我が国のように河川が急流で再曝気係数K₂が非常に大きな水環境では、酸素不足量が直接問題になることは、感潮部を除いて殆どない。また、我が国では大きな感潮河口部を持つ河は必ずしも多くない。そのために、我が国ではBOD値を生物分解性有機物濃度そのものの総括示標として扱い、酸素収支の概念外で論議が進んで行くこととなる。環境基準の類型AA、A、BなどのBODレベルが1、2、3 ppmといった数値はこのことを如実に物語っている。

したがって我が国の河川環境の一般的な評価式は、原理的な式-1ではなく、式-2の左辺そのものを扱う式-3の表現となる。

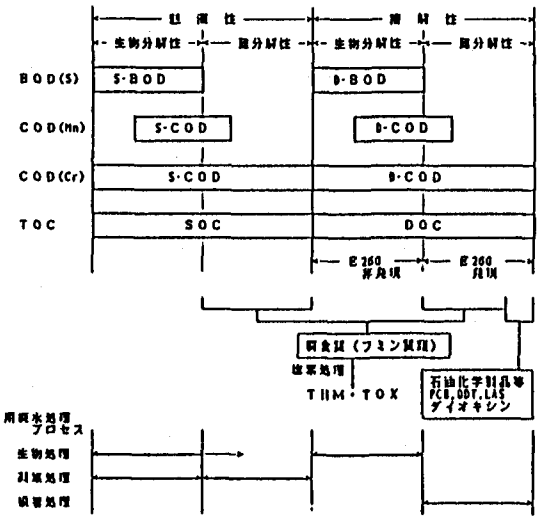
$$dL / dt = - K_1 L \tag{4}$$

ここで、K₁ : BOD減少係数

このような式は単なる生物分解性の有機物が液濃度の一次反応で減少することを示す最も単純な動力学表現である。このような酸素不足の概念（oxygen deficit）とかかわりのない有機成分の減衰を示すのであれば、何も酸素当量表現での有機物質示標群でTOCに対応するのが、化学的酸素消費量（chemical oxygen demand COD）で式-3の関係から示される全酸素要求量（total oxygen demand, TOD）に近いものとして

重クロム酸CODが世界各国で用いられている。我が国では旧来の過マンガン酸カリウムCODを用いて環境基準の湖沼・海洋等における有機物量を酸素消費量として示そうとしているが、図-10に模式的に描くように総有機量を表現し得ず、重クロム酸CODと異なって収支を論ずる基礎指標となり難く我が国の水環境評価指標の最大の弱点となっている。

（環境基準に規定される利水秩序）



飲料水の取水は BOD 1 ppm という環境基準の類型 AA の水域で行なわれるのが最も好ましく、悪くても BOD 3 ppm の類型 B でありたいとされる。この場合、 BOD が、本来持っていた河川水に酸素不足を来す危険に対する指標という意味はほとんど消滅してしまって、含まれる有機物量の大小を示すことが主たる目的となっている。このようなことを他の類型と繋いで考えると、水利用の上下流関係は図-11のような形態で一般的に想定されていると考えて良いであろう。上流側の条件は水質的には環境基準 AA または A の最上質の水資源を考え、排出側の条件として、下流の用途に応じて、B, C, D, E といったより低質の水利用を想定した類型を考えている。類型 B のみが都市用水としての繰り返し利用を考えている。湖沼や海での水質基準値としては BOD の代わりに COD が用いられている。その間の関係を建設省の水質年報の年間平均値と、札幌市の下水処理場や北海道の諸河川における筆者等の測定値を用いてプロットしたものが図-12である。類型を異にする河川では必ずしも一定の水質特性を示さないことに気付く。下水は BOD が百数十 ppm もあり COD/BOD の比が 0.5 位であるが、処理を経ることによって COD/BOD 比が 1 に近くなって来る。荒川、淀川などの COD/BOD 比はほぼ 1.2-1.25 程度であり、下水処理水も最終的にはこのレベルに漸近する。河川における自浄作用によって得られた値も同じ比であり、 $COD/BOD = 1.2-1.25$ といった水質が都市（生活）廃水型の自然系における一つの安定状態と見て良いであろう。それに対して極めて長時間の生物分解を経た有機物はフミン質類となる。日高・大雪の山間水（類型 AA）や石狩川水（類型 AA または A）などに見られる COD/BOD 比が 5 をこえる様な生物難分解性の有機物群である。

（放流側の水質類型に応じた必要水源地面積）

都市の下流側で今一度都都市が取水したりサケが遡上できるような河川を想定した環境基準の類型 B, 上質の工業用水を考えた類型 C, 農業用水や低質の工業用水として何とか使えればよいと

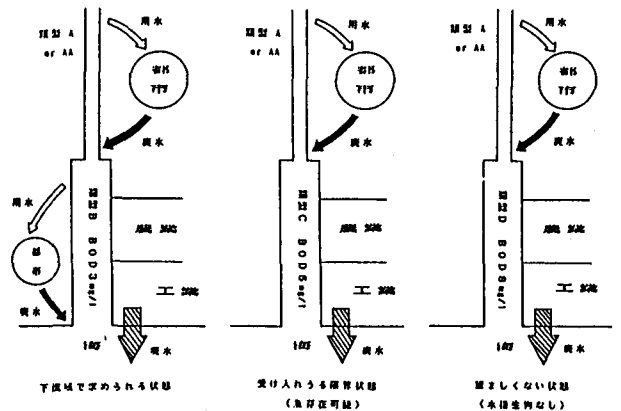
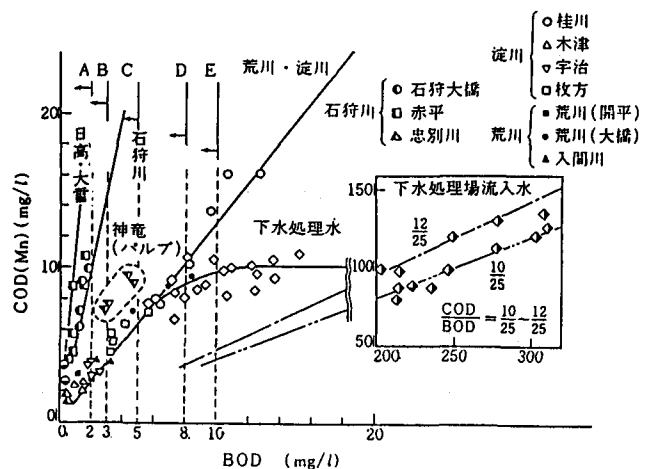


図-11 放流点水質制約型



いった類型 D の三種類の条件を考えて見る。

表－7 は生活廃水中に含まれて排出される代謝廃成分量を 1 人 1 日原単位としてまとめたものである。これらの項目中の 1 人 1 日 BOD 排出量 50 g を用いて、人間活動を支える用水量と水域の水質との関係を考えて見ることとする。

表－7 一人一日原単位

計算の過程を表－8 の欄を埋めて行く形で記述すると次のようになる。a) 受水域が許容する BOD 濃度は環境基準の類型 B, C, D に応じてそれぞれ 3, 5, 8 mg/ℓ である。b) 前節に求めたように日本人 1 人当たりの平均生活用水は 280 ℓ/人/日であり、c) 1 人 1 日

項 目	全 量	し尿より	雑排水より
BOD (5)	50 g	18 g	32 g
COD	27 g	10 g	17 g
SS	38 g	20 g	18 g
T.N	12 g	9 g	3 g
T.P	1.8 g	0.9 g	0.9 g

表－8 様々な制約条件下での必要集水面積

	条 件	類 型 B	類 型 C	類 型 D
A	受水域許容 BOD (5) 濃度	3 mg/ℓ	5 mg/ℓ	8 mg/ℓ
B	1 人 1 日 生活 用 水 量	280 ℓ/人/day		
C	1 人 1 日 発生 BOD (5)	50 g/人/day		
D	下 水 濃 度 (=C/B)	178 mg/ℓ		
E	受水域が必要とする希釈水量 (直接)	16,667 ℓ/人/day	10,000 ℓ/人/day	6,250 ℓ/人/day
F	下水処理除去率 95% とした時の必要希釈水量	833 ℓ/人/day	500 ℓ/人/day	313 ℓ/人/day
		処理下水濃度 (178×0.05=9 mg/ℓ)		

日から6250ℓ/人/日となる。この値は用水量280ℓ/人/日に対して極端に大きな数値であり、自然河川にこれだけの希釈水（したがってその集水面積）を求めることは不可能である。そこで一般には下水処理を行なって河川へのBOD負荷を減ずる努力を加える。f) 最も普通に用いられる下水処理法は活性汚泥法などの生的処理であり、平均して95%程度のBOD負荷を汚泥化または無機化する。従って平均的な処理下水のBOD濃度は、 $178\text{mg}/\ell \times 0.05 = 9\text{mg}/\ell$ となる。この水が放流されて類型基準B、C、Dの河川水質レベルを満たすためには、それぞれ883-313ℓ/人/日の水量が川にならなければならない。g) すなわち[用水+希釈水=河川水]と[用水=排水]の流量比が類型基準B、C、Dに対して各々3.0、1.8、1.1倍となる。このことは、h) 河川に残しておかねばならぬ水量と都市が用水として用い得る水量の比が類型B、C、Dでそれぞれ2:1、0.8:1、0.1:1でなければならないことを意味する。したがって、用水量よりも2倍も大きな河川残流量が存在しないと現在の上下水道系を持つ都市代謝では、下流で類型Bを保持できず、Cの場合ですら都市用水とほぼ同量の水が河道に残っていなければならないことになる。

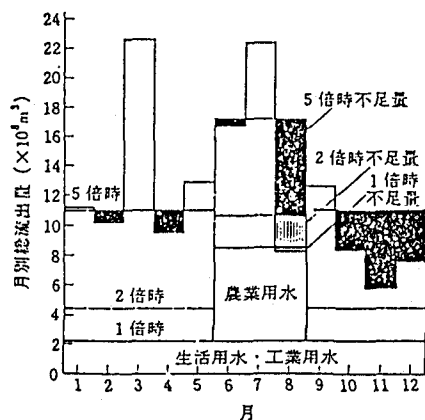
流域の水計画ではこのような水を得るためにどれだけの取水面積と貯留が必要かを考えることになる。前節にも述べたように、i) ダム等の築造により流出の時間的平均化を十分に行なった場合の用水量取得のために必要な集水面積が1人当たり300m²/人であった。これに対して、j) 下流側の水質を類型基準B、C、Dに保とうとすると、それぞれ900、540、330m²/人の集水域の面積が必要となり、水資源取得のための流域の大きさを支配するのは必要な都市用水量ではなくて、下流の水質条件であることを示す。このことは、日本での水資源問題が用水量を確保できるかどうかという点からの渇水流量の問題であったのに対し、繰り返し水利用を常とする欧米諸国では水質の劣化がさきに問題となって、水資源問題が即ち水質保全問題であることと特徴的な対比を示す理由である。河水よりもより大きな希釈水量を取れる沿岸（海）や河口付近に廃水を放出することが、我が国で多くの場合可能であったことがこの差となった。

前節にも述べたように、全ての用水を並列で取水し排出したのでは1人当たり必要な取水面積を確保し難い。したがって、生活用水と農業、工業用水の間での繰り返し利用が必然的に存在してくることになる。k) 農業用水として1人当たり必要な集水域は1300m²/人、工業用水としては600m²/人であることを考えると、流域が農業と都市との組み合わせであるならばなんとか類型基準Bが保持できそうである。このことは逆に、現在程度の処理能力を持った下水道を用いている都市では、流域に農業が全国平均的な規模で存在していて始めて類型Bといったほぼ好ましいレベル

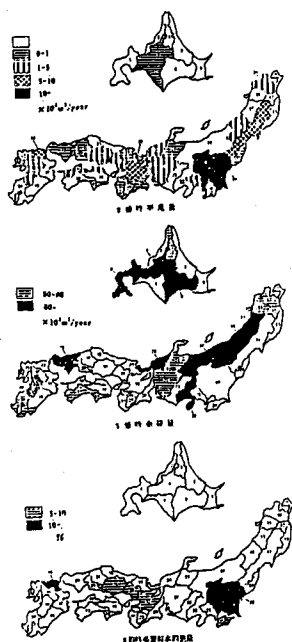
昭和30年—41年間の10個の年の流出量を建設省流量年表から求めてその流域を考える基礎となる流出量とした。10個の年の内最も流出量の少ない計画にとって危険な年の、流域の月別総流出量を求めた。昭和42年度の厚生省編水道統計、通産省工業統計により生活用水、工業用水量を算出した。また農業用水については水田用水を中心に考え、年間の灌がい用水が6、7、8月の90日に集中（前節までは一応150日としてある）して均一に使用されるとして計算した。農業センサスから各流域の水稲収穫面積を求め、日減水深を全国一律に20mmとして田面降水量（「日本の気候」の月別降水量分布図より算出）を差し引いた値をかけ合わせて必要水量とした。

次に、一過型で都市地域水代謝を続けて行くことのできる限界が昭和42年度の水利用に対してどの位利水量が増大した場合であるかを推算する。計算の過程として次の3項目を用いる。①生活用廃水の供給と排除のシステムは現用上下水道系により、量的な拡大のみがある。②工業・産業用水は回収率を高めつつ増大するが、一過型の利用率は生活用水の増加率とほぼ等しい割合で進行する。③農業用水量の増加は無い。

地域別の余剰・不足は、流出の平均化を実際にはある程度以上行なえないことから、時間的なものに強く支配され、豊水年・渇水年、そして各年の季節・月に



図一13 淀川・大和川 (No. 32) 流域、昭和41年水収支図



よってさまざまに異なる。そこで、ここでは前述の10個の年の各月について余剰・不足を調べ上げて、最も危険なものをとりあげた。推算の例を淀川・大和川流域の昭和41年の流出パターンについて昭和42年の利水量と比較して過不足を各月について示すと図-13のようである。

昭和42年度の利水量を基準として、都市・工業用水のみが2倍、5倍と増加した場合について算出した。全国の50流域について不足量、余裕量、および必要調整量を2倍、5倍時について示したものが図-14および15である。昭和59年時点の我が国の水利用総量から推して、ほぼこの図の2倍時の状態に我が国はある。図-16は昭和54-58年の5か年における上水道の渇水被害の発生状況を示す図であり、図-14で、見られた状態での水量不足の発現例である。

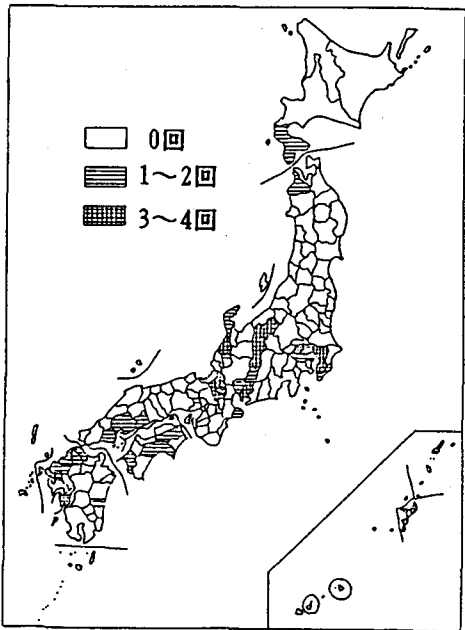


図-16 昭和54～58年における水道の渇水被害

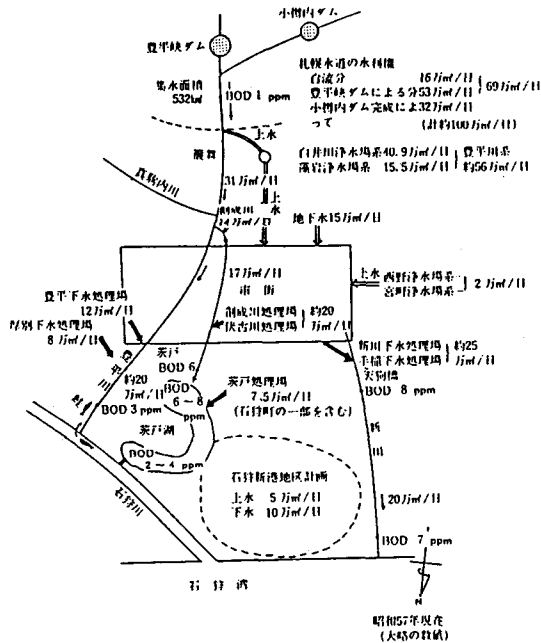


図-17 豊平川流域の水収支と水質

7.4 札幌市における一過型水利用の豊平川流域への収りの例

図-17は札幌市域を流下する水の経過とその量の概略を模式的に示し、河川の水質の現状を低水時の平均的なBOD値について示したものである。一本の豊平川によって成り立つ150万都市で、水源のすべてを自己の市域の内に収め得ている世界でも稀な大都市である。このことが、札幌の水代謝を健全で、信頼し得るものとしている。

札幌には極端に水を使う

地面積が必要となる。

札幌市水道が豊平川から取水している簾舞地点よりも上流の流域面積は530km²で、ダムを作り豊水期の水の貯留を進め、1人当り300m³位の水源面積で、350ℓ/日の水を常時得られるようになったとすると、170万人位の市民が水道のサービスを受けられることになる。札幌の人口が、150万人を超えたことを考えると、その創成以来、ほとんど豊平川のみにとってきた札幌の水システムが大きな転機を迎えつつあることに気がつく。

低水時には、簾舞地点における札幌市水道の取水によって豊平川本流の水量は僅かになり、下流で流入する真駒内川や発電所からの戻り水などによって、札幌市街地にかかる地点で1日約30万m³の水が河道を流れていることになる。札幌市内を上下水道系によって流下する水量が1日56万m³位であるから、上下水道経由対河道の水量比は、1対0.54という割合になる。このような比率では、都市内に降った雨に由来する河川流量を加えても、札幌市の下流で鮭の遡上に必要とされる類型BのBOD 3 ppmといった水質値を通常の下水処理を用いてはえられない。それなのに札幌市で豊平川に鮭を呼び戻そうという運動が今の時点で有り得ることは何であろうか。

それは、豊平川から取水され、下水となった水の半分以上が、豊平川本流以外の水系の並列河川に放流され、札幌市が使った水の僅か1/3以下の20万m³程度の排水だけが豊平川の下流部へ処理放出され、本流に残っている水によって希釈され、石狩川に合流する付近でBODの値が3 ppm程度の清浄を保ち得ていることによる。また、下水はすべて下水管内を通るので、豊平川の中流部はBODが1 ppmといった清浄を保ち得ていることになる。その代わり豊平川の派川（人工河川）の創成川の流入する茨戸湖や並流する新川は、自己の持つ流量に比して過大な下水放流量を受け、下水処理水の水質によってその水質がほとんど規定される。この状況は明確に意識されているか否かは別として、河川を用途別に使い分けていることになる。したがって、今の上下水道システムと川の組み合わせで、豊平川に鮭を呼ぶことは、新川や茨戸川には鮭を呼べないこととほぼ同義になる。図－8－abで示される類型に札幌市はあり、下流水域の水質別の使い分けをして海と連がり、水代謝をなんとか必要な量と質のレベルに収めていることになる。

豊平川の水は、現在建設中の定山溪ダムの完成によって、日量100万m³位まで供給可能になり、1人当たりの水利用量を増さなければ200万人以上の市民の水道をまかなうことができる。市民1人当たりの用水取得のための水源面積

8. 繰り返し利用を考えた総括水代謝系の場合

前節で述べたように、日本の実情としては都市水代謝系が流域に単独に存在しているのは例外的な場合で、農業または工業との繰り返し利用を常態として考えると良いであろう。一般に大きな用水量を必要とする工業は臨海部に存在していることを考えて、ここでは農業と都市の存在を図-18のように考えてみることにしよう。

繰り返し利用を持つ系では、上下水と農業・工業用排（廃）水の輸送系の形態はほぼ一過型の場合と同様であり、ダム開発はほぼ満度まで行なわれている。このような系では、①繰り返し水利用回数（再生）を増加して水資源の量的な必要を満たすのであるから、水資源確保は水処理・（水質変換）能力の強化・多様化によって果たされる。②この場合は対象になる水質因子は *BOD*、*SS* といった一過型の中心成分に止り得ず、繰り返し利用や貯留によって蓄積してくる富栄養化現象を生ずる窒素（*N*）、リン（*P*）などの無機成分や難生物分解性有機物群（フミン質など）が問題になって来る。③上下流関係を複雑になって来て一過型のように簡単な類型分類や制御が出来なくなる。

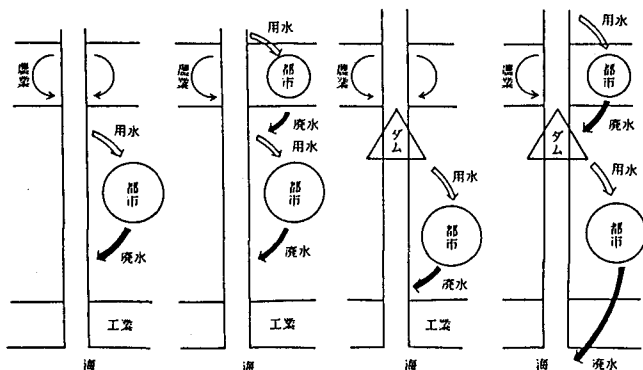


図-18 繰り返し利水の系

8.1 繰り返し系で問題となる有機物の挙動

繰り返し水利用を行なう系で問題となる有機物を大別して考えると、①従来より水系の有機物の主指標と考えられていた *BOD*、*SS* 成分が繰り返しにより累加して、下流水質が重畳的に悪化してくる問題と、②従来ほとんど問題とされてこなかった生物代謝廃成分であるフミン質などの難生物分解性有機成分や農薬などの微量の石油化学製品の存在である。

生物難分解性有機物の変化の多くは物理化学的プロセス（凝集，吸着など）により行なわれる。しかも，それらの成分の挙動が問題になる高密度の水利用地域では，その場合は自然系よりはむしろ処理系である。そして，懸濁成分は在来の処理系ではほとんど完全に処理できる。ただ自然系，特に湖沼系の中での生物作用を含む循環の場合に問題となる。

筆者等は溶解性有機物の全体を，その寸法と（ $TOC/E260$ ）比（ここで， $E260$ は紫外部260 nmの1 cmセルにおける吸収）の2つのみを指標として少数のグループに分類し，環境や処理系の挙動と関連づけ，生物難分解性有機物をも含めた水質制御のための総合的な指標として提案した。

成分寸法測定のため，ゲルクロマトグラフィによる見掛け分子量分布を用いる。セファデックスゲル $G15$ or $G25$ をカラム管に充填し，カラム上端に試料を添加し，水などの溶媒を流し続けると，このような移動相に随伴する溶質成分のうちで，ゲル粒子内に拡散進入できないような高分子（ゲル細孔より寸法の大きい溶質）が最初にカラムから押し出され，以後主として溶質の大きさの順に押し出される。この場合ゲルとの親和性もまた押し出し順を遅らせる方向に作用する（図-20参照）。 $K_d = 0$ で表わされる成分はゲル粒子内に拡散進入し得ない分子量の大きな成分で， $K_d = 1$ の場合は，その成分がゲル粒子内に完全に拡散進入できる分子量の小さな成分である。 $K_d > 1$ の成分はゲルとの親和性の高い成分であり，筆者らは0.1 N， NH_4OH の第2段の押し出しで定量化する。

ゲルカラムから押し出されてくる成分を検出する主項目として物質収支のとれる溶解性全有機炭素量（ DOC ）を選ぶ。さらに，迅速に測定を行い，その結果から処理性に関する有用な情報を取り出し得る，紫外部波長260 nmにおける吸光度を用いる。260 nmにおける吸光度（ $E260$ ）は無機成分の妨害をほとんど受けることなく不飽和結合を有する有機物を低濃度領域において測定し得る。 $E260$ を示す有機物は生物難分解性として扱い得る。

このような測定を行うことによって， DOC の内容を $E260$ を発現する DOC と $E260$ を発現しない DOC の2つの成分に分割することが可能である。このことは，水中の溶存性有機物の量的に大部分のものが紫外部260 nmに吸収を持つものと，そうでないものの疑似2成分系として扱い得るということである。この場合の

性汚泥法や自然浄化的な種々の方法）で生成する $E260$ 発現成分の量を実験によって求めたところ、炭素量で初期の生物分解性成分（基質）の 3.5～6 % 程度の腐植質が生ずることが明らかとなった。前者が BOD で示される水中の有機第一主成分で、後者が第二主成分である。

図-20は都市水代謝系の中で総合的にみて、最も複雑な構成を持っている下水の模式的なゲルクロマトグラムである。このようなク

ロマトグラムによる水の状態の表現は分子量の大小別のグループ（グループ番号 i ，または K_d 値）とそのグループの（ $DOC/E260$ ）比でなされる。例えば、①林地よりの基底流出水： $i=2, 4, 6$ で $DOC/E260 < 50$ 。②地表滞留時間の長い泥炭地水：①のグループに $i=1$ ， $DOC/E260 \approx 30$ のグループが加わる。③地下水：図に示したように、さらに $i=3$ ， $DOC/E260 \gg 100 \sim 500$ といったグループが加わり、 $i=1$ の $DOC/E260$ が 100 に近づく。

図-20に示すような下水を生物処理すると、 $E260$ 発現性の有機物（ BOD 成分）は消滅して、各分子量グループ共 $DOC/E260$ 比が 30～50 の成分のみが残る。これがフミン質類であり、有機物の第 2 主成分である。この内第 1 画群（高分子）成分として表われてくるのがフミン酸類であり、 $TOC/E260$ 比が ≈ 30 と低く、第 2 画群以下には $DOC/E260 \approx 50$ の成分が表われフルボ酸類と考えられる。微量汚染成分である石油化学製品（ PCB ， DDT ，フェノール…など）は、水押し出しグループには出現せず、 $0.1\text{ NH}_4\text{OH}$ グループにのみ第二主成分の一部と混在して出現する。

このようなゲルクロマトグラムによる水質表現によって、環境中に存在する有機物の 95%～99% の存在状態を、除去率 90～99% 程度がせいぜいである現在の諸処理プロセスや自浄作用と対応づけて、実用的に十分な精度で挙動を評価し、諸プロセスを評価する場合の基礎とすることができる。

上述のような手法を用いて各種の処理プロセスの評価を行うと生物、凝集、吸着のいずれのプロセスでも除去し得ない成分がイオン性の無機成分であり循環再利用により蓄積していく成分である。従って風呂、洗濯用水の許容無機イオン成分濃度によって循環再利用の回数も決め

く水の安全性を確立し、周期的な渇水から逃れる有力な施策の1つであることを定性的に示した。

参 考 文 献

- 1) 末石富太郎：水資源危機，日経新書，1978
- 2) 丹保憲仁：都市・地域水代謝システムの構造と容量，水道協会誌，497号，p. 16，1976
- 3) 丹保憲仁：水道の未来像，水道協会誌，540号，p. 65，1979
- 4) 丹保憲仁：下水処理と水資源，土木学会誌，6月号，p. 33，1979
- 5) 山本莊毅，高橋 裕：図説水文学，共立出版，p. 7，1987
- 6) 玉井義弘，木村久彦：都市排水の再生利用に関する研究，水資源に関するシンポジウム，p. 254，1977
- 7) 亀井 翼，丹保憲仁，洪 延芳，山田 正：紫外部 E_{260} と電導率 E ， C からみた流出解析，土木学会北海道支部論文報告書，44号，p. 367，1988
- 8) 丹保憲仁・亀井 翼：流域都市の水利用の形態と河川の様態，p. 569，比較河川学の研究，1987