

(1) 都市と自然系を連ねる 水システムの質の使い分け

QUALITATIVE CONSIDERATION TO DESIGN MULTIPLE
REGIONAL METABOLIC SYSTEM OF WATER
BY WAY OF WASTEWATER REUSE

丹保憲仁*

Norihito TAMBO*

ABSTRACT; In this paper, the author discusses a metabolic system of water through Sapporo city. Reuse of sewage treatment plant effluent by way of coagulation and sedimentation in a natural lake and its ground water recharge by way of a canal is proposed. By the system, natural water bodies in and down stream of the city will turn into high level recreational water front regions and dual water supply system without additional transmission system to ensure stable water supply for the future will come out. By this kind of multiple purpose system, expenses of advanced wastewater treatment could be rationalized.

KEYWORD; Regional metabolism, Water system, Multiple water use, Water reuse, Ecological water.

1. はじめに、

都市と自然系を通じた水の循環を、人と自然の生物の双方が何とか折り合いをつけるような形で造ることが、都市の水代謝システムを設計する際の今日的な課題である。人と自然の生物はそれぞれ水に対する質と量の要求を持っている。しかしながら、その要求は人の場合と自然の生物の場合では少し異なっている。植物や下等動物は水質を使い分けることができないから、環境における水の質と量への要求は分かち難い。それに対して、人は生理的な用途に対しては植物と同じように質と量を一体として扱うことになるが、その他のほとんどの用途では水質を使い分けることによって、必要な水量を適宜コントロールできる。

一方、地域における自然淡水の存在量は、太陽エネルギーによって駆動される大循環フラックスによってその上限が定まってくる。下等な動物や植物はこの限界をどうすることもできないが、人は水質の使い分けによって限られた大循環のフラックスを幾倍にも使うことができる。そのためには付加的なエネルギーが必要となる。太陽エネルギーによる循環を模して、化石エネルギーを集中使用し、局所高速循環系（例えば海水の淡水化）を作り、拡大する水需要をまかない続けることはさまざまな理由から難しい。人の水利用量が、大循環フラックスに迫ろうという時には、質を基準とした水の使い分けを規範として受け入れる社会システムを造らなければならぬ。さもないと現在でも早ければ数週間で循環している淡水を、人工エネルギーの集中使用でさらに加速して循環すれば良いということになり、都市代謝の入力側のシステムのみが拡大し、その結果生ずる排水量増大により自然環境の急速劣化が生じてしまう。

*北海道大学工学部衛生工学科、Department of Sanitary and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University

2. 水の用途と水質

水の利用は水質の利用である。その利用の仕方は、①水の大きな熱容量、多様な溶解力、比較的大きな密度による輸送媒体やエネルギー源としての利用といった比較的单目的の用途のものと、②生理・生態用水のような複合した状態で使用されるため、それら用途の内の最も清澄な質を要求されるものに大別することができよう。これらの水の用途と期待される水質状況を示すと図-1のようになる。これらの用途に必要な水質を、自然水との対比で概略理解するために、わが国の河川水と下水の水質のレベルを現用のBODによる環境基準の類型分類A～Eと、生物難分解性のフミン質等の有機物をも表現できるCODとの関係で示すと図-2のようである。ここでのA～Eは図-1の水質レベルにほぼ相当すると考えて良いであろう。現用の標準的な生物化学的下水処理法ではBOD10mg/ℓ、COD10mg/ℓ程度の水質となって河川へ放流される例が多いが、安定化が実用上充分のレベルに進み、固液分離を充分に行うと、BOD5mg/ℓ、COD6-7mg/ℓ程度の環境基準の類型C位のレベルに近付くことを示している。

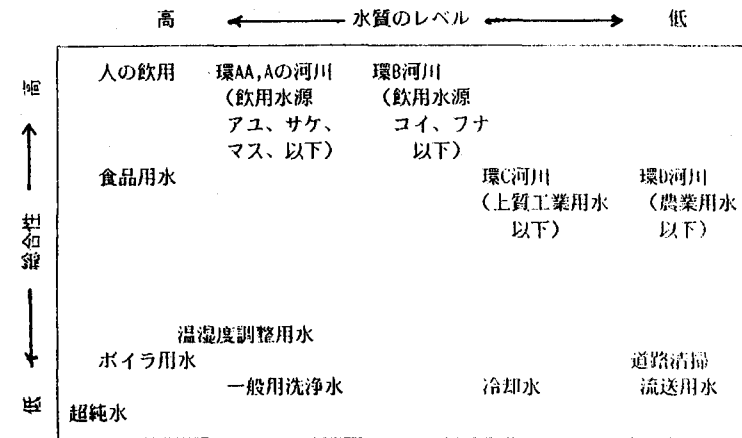


図-1 水の用途に応じた水質レベルと総合性の概念図

くことを示している。

そこで上述のような水用途と河川水質の概略のレベルを考えて、自然水系と都市それぞれの空間が要求する「水質レベル」と「水利用の総合性」とその流域の持つ「水の大循環フラックスの限界」に、その都市・地域が持つ「経済力（エネルギー使用可能量）の限界」を考えて、どのような型の水代謝系が考えられるかを、札幌市と同市の水代謝を支える豊平川を例にして次に検討してみよう。

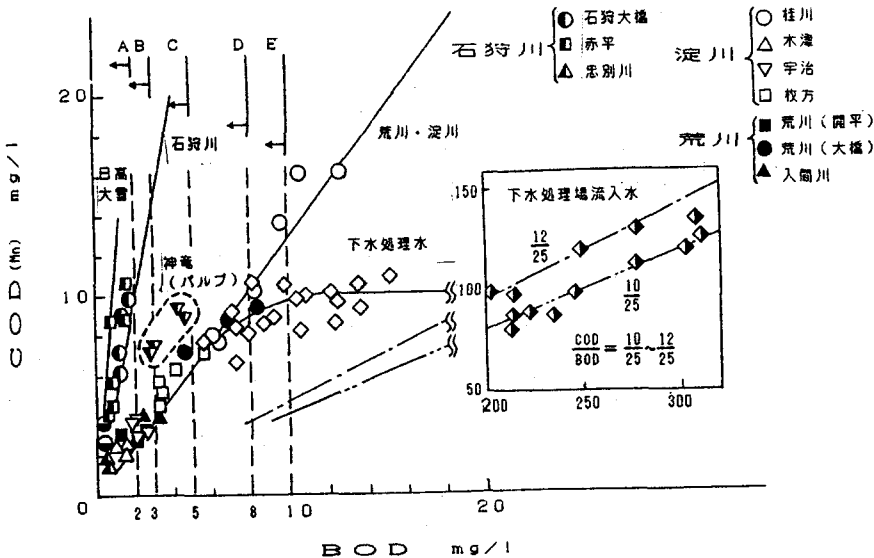


図-2 自然水域のBODとCOD

3. 豊平川水系と札幌市の現況

図-3は豊平川に依存する札幌市の水代謝の水量水質の1985年頃の概略である。札幌市の人口はこの時点で約150万人で、大きな工業用の水利用が無いので都市用水量の原単位は1人1日当り350ℓ程度で、他の大都市に比べて3/4程度の低い値を示す。流域がすべて札幌市域に含まれ、水源地帯にはほとん

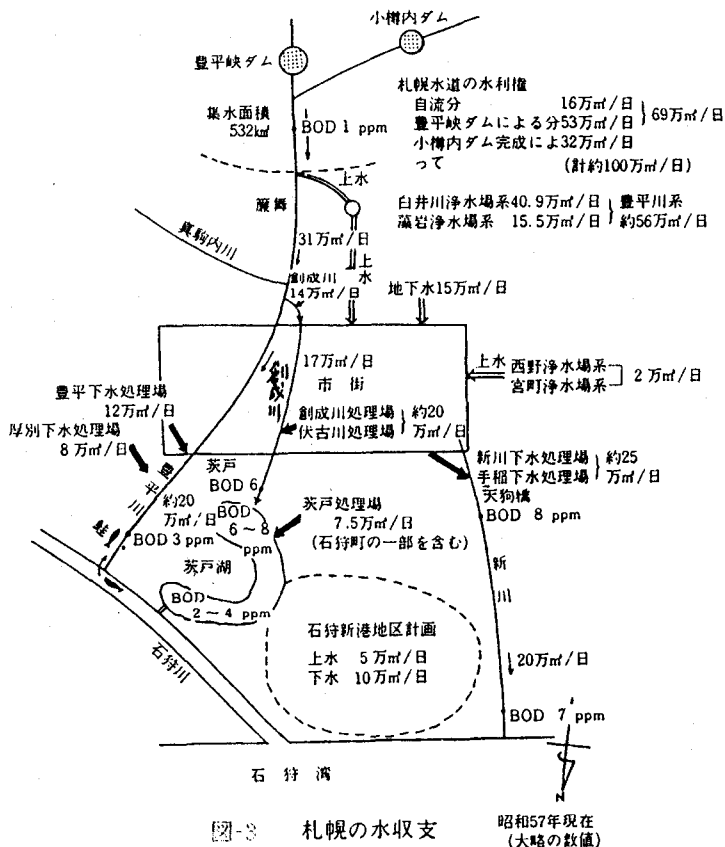


図-3 札幌の水収支

昭和57年現在
(大略の数値)

ど人家がなく、良好な森林に覆われており、また流域に農業用水利用がほとんど無いという極めて特徴的な都市である。さらにまた、河川生態系の回復運動のさきがけともなった「鮭よ帰れ（カムバック・サーモン）」運動の発祥地であり、市が豊平川に開基以来はぐくまれてきたあかしとして、「サケ」が大きな意味を持っている。

水道による水利用総量は1日55万m³になる。これに15~20万m³/日の都心部での井戸水の利用が加わる。これらの水が、都市で使用され、下水となって、下流の創成川（灰戸湖）、豊平川本流、新川へほぼ1/3ずつの20~30万m³ずつ生物化学的下水処理を経て放流される。新川の流量はほとんど下水処理場放流水より成り、BODは7~8mg/lで推移している（類

型D）。創成川（灰戸湖）も、下流部と灰戸湖の水質を下水処理場の放流水質が決めることとなり、発寒川などの小河川の流入を受けて8~7 mg/l程度の水質となっている。それに対して豊平川本流は、30万m³/日程度の自流に20万m³程度の下水処理水を受けるのみで、BODが3~4 mg/l程度に止まっている。また札幌市の下水処理は市域についてほぼ完成しているので、豊平川本流の市街地を貫流する部分と市の中心部を流れる人口河川の創成川はBODが1mg/l程度の極めて清澄な状況を保っている。下水道の布設と下水処理場の整備がほぼ完成に近づいた1980年代に入って、「サケ」が石狩川本流から、豊平川へと遡上できるようになり、「カムバック・サーモン」というかけ声をかけることが可能になり、市民に夢をもたらしことになった。

豊平川の流域面積は約900km²であり、市水道の集水面積が約500km²であるから、札幌市内を上下水道を主とする都市水代謝施設で流下する水量と、下流の残留域の水量比は1対1程度にすぎない。したがって、札幌市内を貫流する豊平川本流と人口河川である創成川の水は、渇水期や低水期には、ミスマイ取水下流の残留域の水と藻岩発電所の戻り水10~20万m³/日の僅かな量となってしまう。しかし、水質は下水道に保護されてBOD1mg/lの良好なレベルを保っている。市街地の下流で下水処理水と共に2~3の支流が流入するので、石狩川本流に合する間の10kmあまりはBODが3~4mg/lとなるが水量は再び40~50万m³/日に回復する。「サケ」はこのような状態にある石狩川下流の10km余りを経て、札幌市内のBOD1mg/l程度の水質を持つ豊平川に帰るようになる。河川はコンクリート護岸と沈床で固められ、河川敷は人工運動場と化して、遡上してきた「サケ」が産卵・フ化しうるにはほど遠い状態であるから、自然回復のための新しい技術と人口と保護施設が上流に必要となる。

上述のように一応は「サケ」が帰ることのできるような水質に本流が戻ったことは、札幌市の下流の派川

表-1 必要な集水域の平均的な大きさ

	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	一人一日発生 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)		
G	<u>〔用水+希釈水〕受水域(E)</u> <u>〔用水〕受水域(B)</u>	3.0	1.8	1.1
H	河川流量/都市用水量	2.0/1	0.8/1	0.1/1
I	必要 集 水 域	用水条件 300 m ³ /人 (平均水量/湯水量=2.5 の場合)		
J		900 m ³ /人	540 m ³ /人	330 m ³ /人
K		農業用水 1,300 m ³ /人 (必要 BOD: 8mg/l 以下)		
L		工業用水 600 m ³ /人 (必要 BOD: 5mg/l 以下)		

量280 l/人/日とBOD排出量50g/人/日を原単位として用い、必要な水道水をうるためと類型BCDの下流水質をうるために必要な市民1人当りの集水面積とそれから得られる水量を示したものである。

札幌市民150万人でいえば、下水処理におけるBOD除去率を95%と仮定した時に、下流の水質をBOD3mg/lにするためには、1350km²の水源面積が必要ことになる。全流域で900km²であり、水道取水点で500km²しか集水域の無い豊平川では、本流外の2つの派川である創成川下流と新川の2つをBOD8mg/l程度という類型Dの下水処理水放流用河川というべきものにして、漸く「カムバック・サーモン」を含む水代謝が成立していることとなる。1972年の冬季オリンピックを機として、創成川沿に南北を縦貫する幹線道路が作られ、市内では極めて少なくなってしまった河川の一つである創成川も、交通の流れで人家と隔てられてしまっている。そのためか人工河川である創成川の豊平川からの取水口は流量をしばってしまい昔は2m³/S (30万m³/日) も流れていたものが近年では0.5m³/S (7万m³/日) 位の少量となり、下水処理水が放流される点より上流側は、川としての趣が無くなり、下水処理場に近付くあたりは、コンクリート渠化してしまった。多くのメム(アイヌ語で泉)が豊かな小川を数多く作っていた札幌扇状地の面影は全くなくなってしまっている。

4. 豊平水系の外挿的将来

豊平川で取水する水道原水量が80万m³/日をこえるようになると、札幌市の水代謝は豊平川水系に依存する限界に至り、他流域を考えざるを得なくなる。人口が200~220万人の段階で札幌はこの状況を迎えることになろう。200~220万人の市民が今と同じような水利用をし、豊平川の本流下流部の水質を3mg/l程度に保とうとすると、今のままでは創成川下流(茨戸湖)や新川の水質はBOD10mg/l前後となりドブ川化し始める。最低限砂濾過池を下水処理場沈殿池の後に付して固液分離の向上を計り、活性汚泥体にとり込まれたBODを河川に放流しないようにする必要がある。

都市人口の増加分は、創成川下流から茨戸湖周辺にも向い、今世紀末にはこの地帯は確実に住宅化する。また新川沿にも多くの住宅が立ち並び始めている。そうすると、現在豊平川本流の「カムバックサーモン」

等を下水放流路そのものに近いBOD8mg/lのレベルに置いて、本流への負荷を軽減することによって、BOD3mg/lを豊平川下流部に保ち得たからである。河川の許容水質レベルを中、低質に使い分けをし、自浄力を海にゆだねた事による。

一本の河川で、上水道の取水と下水道の排出を行ったとしたら、都市の水代謝(上下水道経由)水量と自然河川に残っている水量がどの位の比で代謝と自然系の平衡が成立するかを示したのが表-1である。この表は日本人の平均的家庭用水使用

の蔭になって、下水放流水路に甘んじている新川や、本流の水量を減じないために取水量を減じてこれまた下水放流路化している創成川の水質を、今のような類型Bといったレベルに放置しておくわけにはいかない。類型B～Cのレベルへの改善と、生態系の回復、市民のリクリエーションへの場としての河川の親水的用途への改質の要求が高まって来るであろう。

このような状況に対応する方法として、2つの流れがありうる。その第一は水利用の形態をそのままにして、排水の高度処理で対応しようとする方法であり、その第二は、現在の水利用を考え直して、新しいシステムに組替えて行こうとするものである。

今のままの上下水道系でこのような状態を迎え、猶かつ豊平川本流を類型Bの 3mg/L レベルに保ち、多くのレジャー・リクリエーション施設が集中し始めようとしている創成川下流と茨戸湖の水質を類型Bまで改善しようとするれば、人口の増加が各排水区で比例的に生ずるとして、豊平川系と創成川系でそれぞれ、処理場の処理残留率を $3/4$ 、 $\frac{1}{2}$ ～ $\frac{1}{4}$ × $\frac{1}{2}$ × $\frac{1}{4}$ ～ $\frac{1}{8}$ に減じなければならないことになる。新川系においても少なくとも基準C位のレベルは必要になるので、現在に比して処理残率を $\frac{1}{2}$ × $\frac{1}{2}$ ＝ $\frac{1}{4}$ 程度に減ずる必要がある。BOD負荷を現在の $3/4$ ～ $1/2$ 程度に減ずることは、現在の下水処理の生物化学処理にきちっとした砂濾過プロセスを付加することによって比較的簡単にクリアできるが、リクリエーション用までを想定すると $1/4$ 程度までのカットを考えなければならない。創成川、茨戸系の約 40万m^3 に達するであろう排水については、凝集沈澱までを含めた処理が必要となるであろう。このようにして、生物処理に加えて、凝集沈澱・濾過や殺菌の高度処理を創成川・茨戸系について行えば、市民は創成川、茨戸において、直接人体に触れるレベルのリクリエーションができ、フナ・コイはもとより、更に清水を求める魚の棲息も可能となる。

この場合に、各処理場が高度処理プロセスを個々に持つことが出来れば良いが、費用の点はともかく、用地の点で現在ではほとんど不可能に近い。そこで、リクリエーション用途の増大するであろう創成川系については処理系の新しい強化方法を考えなければならないであろう。もし、創成川、茨戸湖の水質が類型Bまで改善できれば、茨戸湖は 3000万m^3 にも達する貯留能力を水代謝系の中で活用しようと共に直ちに下流の石狩港新港工業地帯の水源となりうる。

5. 自然系と連れた水の再利用の評価

人口が $200\sim 220$ 万人に達する札幌では、市の中心部を流下する創成川（茨戸湖）系では、豊平川本流の「カムバック・サーモン」の可能な状態の保持と並んで、市民のリクリエーション等の親水的な用途の保持のために凝集沈澱、砂濾過、殺菌までを行う水の高度処理が必要であろうと予想した。この時、創成川、茨戸湖系で扱われる水量は、札幌市の中心部をほとんど含む $45\text{万m}^3/\text{日}$ 位となるであろう。水道より $30\text{万m}^3/\text{日}$ 地下水より $15\text{万m}^3/\text{日}$ といった数値が予想される。

$45\text{万m}^3/\text{日}$ の水利用が、オフィス街と住宅地区でどのような配分によって行われているかは明確でないが、過去の報告から直接的に身体に触れない、便所用水、洗濯用水、一般洗浄用水、温湿調整用水、冷却水などの用途の水を全用水量 30% 程度は見込むことが出来そうである。そして、このレベルの用水の原水は、 800mg/L 程度の類型Bレベルの水で良いこととなり、生態系におけるほとんどの水利用を可能にする水質レベルとして受け入れられるものであろう。

増加する人の飲用や直接人体に接触する用途の水 $35\text{万m}^3/\text{日}$ を水道に依存し、 $15\text{万m}^3/\text{日}$ を再生水を原水とすることとしてはどうであろうか。もし、再生水の水質が良好であれば $50\sim 60\%$ 位の用途を再生水に当てることができ、創成川、伏古両処理場の水のほとんどが再生利用されることとなる。

従来の再生利用の考え方は、給水系を地域規模かビル毎に行うことが中心であった。ここでは、給水系の2元化を配水系を持たない方法で自然を介して行うことを考える。そして、それに加えて再利用を伴う2元化が、自然生態系をより清浄な水質レベルで平衡させ、人々のより高度のリクリエーションの利用をも共に計ろうとする。

その中心をなすものが、創成川上流部への高度処理水の逆流導水と創成川等を利用した地下水かん養である。さらには市内に網の目のようにはりめぐらされている道路側溝の底部の浸透化とそれらの側溝への高度処理水の連続的供給流下可能化による札幌扇状地全域での地下水かん養である。

札幌扇状地の地下水かん養は現在ほとんど豊平川から行われており、その主体は、創成川が派川する前後それぞれ3km程度の合計6km程度の区間で渇水期で25万 m^3 /日程度が見込まれるという。第一滞水層の地下水位は地表面下数メートルの所にあると言われている。北大構内で、理学部陸水学教室の中尾欣四郎教授等が行った観測によると扇状地末端の水位が日曜日の揚水量減の影響を受けて、2日遅れて5cm程度回復することを示している。札幌扇状地の面積を15 km^2 と仮定すると、5cmの水位上昇は土の空隙率を30%程度として水量22.5万 m^3 /日といった値となつてほぼ前述の諸数値と合う。そしてさらにこのことは、札幌扇状地において、しかるべき水頭を与えてできるだけ多くの点から垂直かん養すれば、20万 m^3 /日程度の地下水利用を今心配されている地盤沈下の問題なしに恒常的に行えようである。幸いなことに、札幌市扇状地は透水性が良く、地表面勾配が1/300~1/500となっており、扇状地上流部まで導水してやれば、以下重力で広く下流に流れる。必要に応じて中流部で補水してもよい。

創成川は豊平川本流との分流点から、扇状地を外れるまでにほぼ6km程流下する。可倒堰を用いて水位を1m程度上昇させる。透水係数を 10^{-2}cm/sec （細砂）と仮定し、地下水面を地表下4m（現在よりかん養で若干上昇する）とし扇状地の勾配とほぼ等しい勾配で流下すると仮定すれば、流速はほぼ2m/日程度となり、6kmの水深1.5mの創成川での自然かん養量は2万 m^3 /日程度となる。もし、創成川沿の各ビルや街区で積極的に第一滞水層の水を汲み上げることと考え、それらの井戸までの距離を平均1000mとし、井戸水位低下を10mとすると、10万 m^3 /日の水が汲み上げられることとなる。そこで、創成川沿の積極的井戸揚水によるビル街へのかん養と、市内に散在する中島公園、道庁、植物園、円山公園、北大構内などの池や枯川への導水と市内側溝の透水化工事などで、上流へ導水して流入させた再生下水をビルや家庭用の井戸で汲み上げる配水系なしの2元配水が可能となる。出来るところでは側溝をも小川化してコイ、フナの生息する状態を作り出すことが出来れば、昭和初期にあった小川の回復をとまなうすばらしい事となる。またこれらの水路の幹線は融雪流送溝として働くかもしれない。

さて、このようにして、札幌の各ビルや家庭は身体に直接触れない用途の全用水量の1/3程度を自家用井戸を積極的に使う地下水かん養再生下水によってまかなえそうな状況となってきた。そこで次にはどのようにして、どのような水質レベルの下水再生水をこれらのかん養系に供給すれば良いかという点を考えて見る。

創成川、茨戸湖におけるリクリエーション用水として人が接触できる程度の水を考え、コイ、フナなどの魚が清澄な流水の中で育つことをも考えると、下水を生物処理し砂濾過で十分に固液分離して、BOD発現物質を数 mg/l 以下にした後、創成川、茨戸湖での貯留や道路側溝、雨水渠の流下に際して、微生物の発生による目づまりを生じないようにさらに微細なコロイドとリンをも除去することを考えて凝集沈澱を施すことが望まれる。砂濾過を凝集沈澱前にするか後にするかは判断の分かれる処である。

創成川、伏古両下水処理場合わせて35~40万 m^3 /日の下水に、凝集剤として鉄塩を加えて凝集を行う。鉄塩は沈澱後、土の成分と同じものであることから、アルミニウムのように自然系で違和感を持たないし、屑鉄を用いて硫酸を加え現場できわめて安価に製造することが出来る。生成したフロックの沈降速度を0.3 cm/min 程度とすると沈澱に必要な水面積（理想状態）は1000 m^2 程度となり、茨戸湖の上流湖盆の盲腸部の僅か100m程度（湖幅200m）を沈澱池として用いるだけで、凝集沈澱分離ができることになる。2池を作り、汚泥の池干しを交互に行つて汚泥処理ができる。

生成した凝集脱リン沈澱水を引出し、40万 m^3 の内20万 m^3 を逆送ポンプで、創成川や札幌扇状地の上流まで送る。大降雨時にはすべてこれらのポンプを止め、さらに流量の増加時には可倒堰を倒して水の疎通を計る。このようにして、札幌市は新しいダムを作ることなく、地下水位の低下を心配することなく、扇状地の地下水を使うことが出来るようになり、創成川に清水が戻り、茨戸湖は史上初めて清澄な湖となりうる。このよ

うにして類型基準Bを広域で達することが出来るようになり、茨戸湖を経由しての「カムバック・サーモン」も期待出来るようになる。市民は井戸ポンプの利用で、市中のビル共々、比較的安い雑用水と緊急時の水を入手することができるようになる。

但し、このシステムの欠陥は、地下水脈が再生水によってかん養されることとなるため、札幌市中心部での地下水質が若干低下するおそれのあることである。殺菌によって細菌的な心配はないのであるから、問題は若干増加するフミン質類と塩類濃度であろうが、ほとんど心配するレベルにはならないであろう。ロスアンジェルス水道の原水の1/3が下水処理水のかん養水であることに比べれば問題はないであろう。上質水は水道で配られている。地下水位は若干高くなり、市内の植物への影響もよい、このような用水化をすると、下水高度処理の投資についても市民の理解を得られるようになるだろう。

参考文献

- 1) 札幌市教育委員会編 さっぽろ文庫24 札幌と水、昭和58.3
- 2) 同上 さっぽろ文庫44 川の風景、昭和63.3