

I はじめに

扇状地河川流域における水循環系のなかで、低水流出と地下水流出との関係は、表流水が地下に浸透し、地下水を涵養する場合と、自由地下水が表流水を涵養する場合、とに大別される。前者の機構については、自由地下水面と表流水面とのポテンシャルが 'Influent' の状態にあるものとして、後者は 'Effluent' であるものとして知られている。一般には、河川とは本来水を集めて流れる。しかし、例外としては砂漠地帯の河川と扇状地を流れる河川では、表流水が地下にもぐる伏流現象が良く知られている。日本の河川の多くは山地から平野部に移り変わる接点で扇状地を形成し、そこには都市が開かれている場合が多い。扇状地河川に顕著な伏流現象に着目し、河川表流水が地下に浸透後、深層地下水の涵養源になると判断して低水流量収支を検討した例は、多摩川を例に、主に地理学者、水文地質学者によって行われた〔佐々木、等(1958)、蔵田、等(1964, 1965)〕。新藤、等(1967)は多摩川流域の水収支を検討するなかから、多摩地区においては1966年時点で被圧地下水揚水量(Q_d)が61万 m^3 /日に対し、地下水補給量(Q_r)は自由地下水系から被圧地下水に転化する垂直方向の漏水涵養量として44万 m^3 /日と、多摩川から伏流水により被圧地下水に転化する水平方向涵養量13万 m^3 /日の合計57万 m^3 /日であり、 $Q_r - Q_d = -4$ 万 m^3 /日の補給量不足のため年間平均-4mの地下水位低下を引きおこしていると結論した。ここでの伏流水に対する考え方は佐々木、蔵田等の考え方をひきつぎ、天候の安定した低〜渇水期に多摩川の流量と、支流からの流入量や取水量を実測し、各測定区間ごとの収支流量を検討してその不足量(伏設量)の合計をもって、深層地下水への転化量とした。昭和40年以降、多摩川の水質汚濁が顕著化し、流域下水道計画ともあいまって、汚濁物質(BOD)収支、河川の自浄作用の評価という水域環境の問題として、低水解析が検討されるようになった〔東京都公害研究所(1969)、東京都下水道局(1973)、松長(1974)〕。水質汚濁機構解明にあっても、汚濁物質の量的収支関係において、伏流水とともに表流水系から地下水系へ汚濁物質が転化するものと仮定すれば、多摩川にきわめて大きな浄化能力が存在することになる。この是非をめぐる議論の結果、伏流水の機構とその量的な収支関係の解明が、地下水資源のみならず水域環境の問題にとっても基本的かつ重要な課題になることが明らかになった。本論では多摩川中流域における低水管理の基本的な前提となる低水流出の特性を、水収支という観点から物質収支的な方法論をもとに解析することを目的とした。

II 伏流水の収支

図-1は多摩川中流域における流量、水質観測地点を示し、L1~L8は本流、 $\ell 1 \sim \ell 24$ は支流・排水路・用水路、 K_m は河口からの距離を示している。表-1は流量、BOD、 Cl^- 負荷量、流速時間の実測結果と区間ごとの自浄係数(K)を示した。この資料は東京都公害研究所水質部が1969年10月23日に実施した同時観測結果にもとずいている。測定方法は各所で相当量の下水が流入し、流量・水質ともに時間単位の変動を示すが、ほぼ一日周期の変化をくり返すため、2時間間隔での24時間同時測定としている。

2.1 流量収支 図-2のは平〜豊水時での流量収支を示した。実線が各測定地点の実測流量、点線が各区間における収支計算流量である。収支計算流量が実測流量を上まわる場合は、この区間で流量が自然減少していることを示し、逆の場合は湧出水の還元を受け流量が自然増加していることを示している。減少する場合を伏設、増加する場合は還元と定義すれば、図中下向きの矢印が伏設量を、上向き矢印が還元量を示している。各所で著しい伏設・還元傾向を示し、伏設量の合計は228.9万 m^3 /日、還元量は168.4万 m^3 /日に達する。日野橋と二子橋間での流域面積が約350 Km^2 であるから、還元量を周辺の地下水系から基底流出涵養によるものと単純に考えれば、比湧出涵養量は48万 m^3 /日/100 Km^2 に達し、さらにこの伏設量がすべて

深層地下水に転化すると
仮定すれば、多摩川の伏
流水は被圧地下水系に対
し巨大な涵養源となる。

2.2 BOD 負荷量収 支と Cl^- 負荷量収支

伏没・還元機構とその
量的収支関係をとらえ
るためには、アイソト
プなどの、トレーサーに
よる物質収支を検討すべ
きであるが、各所で用水
取水がなされている多摩
川では現実にはその調査
は無理である。そこで水
質汚濁の進行している表
流水の汚濁物質濃度が地
下水と比較して相対的に
大きな点に注目し、BOD
と Cl^- による表流水系
と地下水系の物質収支に
図-1 多摩川流域図

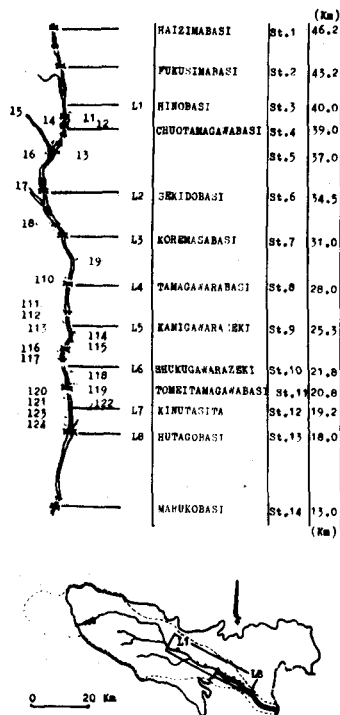


表-1 測定結果

	Q	BOD	Cl ⁻	t	K ₁	K ₂	K ₃
L1	556	2090	8209	0.010			
L2	45.0	720	1259	0.014			
L3	35.0	770	812	0.068	5.9	4.0	
L4	25.0	417	417	0.003			
L5	70.0	700	1827	0.003			
L6	500	2500	10918	0.003			
L7	20.0	100	600	0.042			
L8	1226	5394	20330	0.023			
L9	80.0	560	1656	0.088			
L10	85.0	374	1400	0.028	-2.3	0.3	1.0 0.8
L11	1752	7700	28931	0.022			
L12	110	1100	3087	0.050			
L13	1252	6761	21135	0.070			
L14	8.6	92	(301)				
L15	110	684	(2040)	0.005	-6.2	1.2	
L16	50.7	289	(851)				
L17	59.6	954	1410	0.010			
L18	1948	11100	41824	0.007			
L19	38.4	292	1739	0.049			
L20	38.9	345	(1360)	0.125			
L21	7.8	156	282	0.085			
L22	85.0	561	(2040)	0.021			
L23	695	4600	16708	0.007			
L24	0.9	32	(32)	0.014			
L25	62.2	410	821	0.007			
L26	8.0	152	1670	0.007	-3.3	3.3	1.6 0.3
L27	4.5	17	18	0.007			
L28	52.7	187	761	0.014			
L29	845	5100	20865	0.020			
L30	193	1660	5510	0.003			
L31	2.6	24	86	0.003	5.6	0.1	
L32	747	4700	18024				

K₁ Self-purification coefficient

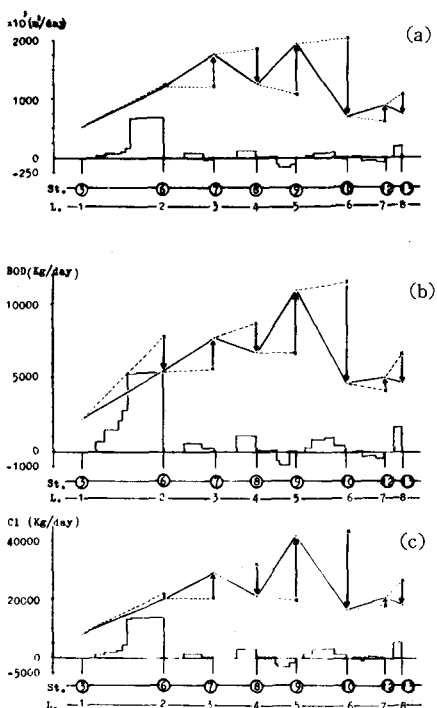


図-2 (a)流量収支図, (b) BOD 負荷収
支図, (c) Cl^- 負荷収支図

た。図-3は伏没・還元機構を模式化し、表-3はその分類を示した。伏没区間では地下水浸透型・伏流流出型による流量減少、還元区間では地下水涵養型・伏流涵養型による流量増加と考えられる。伏流流出と伏流涵養は物理的に同じものを示し、伏没する場合を流出型、この伏流水が下流で再び還元水に転化する場合を還元型とよんだ。これらの機構のなかで地下水浸透型による深層地下水への浸透量の定量的な評価が地下水資源の評価に、伏流流出・伏流還元型の評価が水質汚濁機構の解明に、重要な意味をもつ。

IV 伏流機構と汚濁物質の挙動

伏没水が伏流する間に質的にはどのような変化を受けるのであろうか。多摩川が急流砂利河川であるから、伏流水は砂礫のなかを浸透している。この伏流の過程で有機物は無機化され、いわゆる自然浄化を受けることになる。この伏流を利用した自然浄化システムは、L6-L7間にある砦浄水場では埋設暗渠による伏流水取水として有効に働いている。図-4に砦浄水場の埋設暗渠取水の概要を図式化した。図-5は表流水と原水（表流水が6mの砂礫層を伏流水として浸透した後、埋設暗渠によりポンプアップされた水）の水質を比較したもので、点線が表流水、実線が原水を示している。 Cl^- と SO_4 は化学的に安定な物質のため、伏流による変化はほとんどないが、有機物質は $KMnO_4$ とDOの変化からみて酸化され無機物質に変化することが推定される。興味深い変化は NH_4-N がDOを消費することによって酸化され、 NO_2-N に変化していることである。さらに夏に浄化率（酸化率）が低く冬に高い結果は、微生物作用が温度が高いほど活発であることに矛盾するが、この理由は取水量の差によるものと思われる。夏期の取水量が冬期の約4倍であることは、同時に伏流水の浸透速度が4倍であることを示し、伏流水の水温が比較的安定で一定していることを考え合せれば、伏流による自浄効果は伏流水の滞留時間にほぼ比例することが推察される。Ⅱ章で Cl^- の収支を検討したが Cl^- は伏流することに

表-2 日野橋（L1）、二子橋（L8）間の合計収支流量および負荷量

	流 量	BOD負荷量	濃 度	Cl^- 負荷量	濃 度
	$\times 10^3 m^3/日$	$Kg/日$	p p m	$Kg/日$	p p m
流 入 量	+ 1 1 4 7.7	+ 1 0 9 9.9	9.6	+ 3 2 7 8.4	2 8.6
取 水 量	- 4 3 5.6	- 2 5 0.5	5.7	- 7 9 1.3	1 8.3
流入収支量	+ 7 1 2.1	+ 8 4 9.4		+ 2 4 8 7.1	
伏 没 量	- 2 2 8 9.0	- 1 3 1 6.6	5.8	- 4 9 2 9.2	2 1.5
還 元 量	+ 1 6 8 4.0	+ 7 2 8.2	3.9	+ 3 2 6 1.4	1 9.4

表-3 伏没・還元機構の分類

地下水浸透型	(IG)	被圧地下水浸透型	(IGA)	伏没水が被圧地下水に転化
		自由地下水浸透型	(IGF)	伏没水が自由地下水に転化
伏流流出型	(ID)	トンネル型	(IDT)	伏没水が河床の下をくぐるかたちで伏流する
		バイパス型	(IDB)	伏没水が旧河道などを通して本流と平行しながら伏流する
伏流還元型	(ER)	トンネル型	(ERT)	IDTが還元水に転化
		バイパス型	(ERB)	IDBが還元水に転化
地下水涵養型	(EG)	自由地下水涵養型	(EGF)	自由地下水により表流水が涵養される

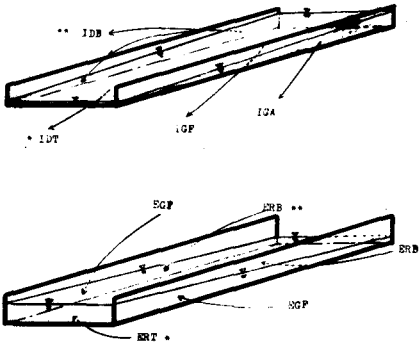


図-3 伏没・還元機構モデル

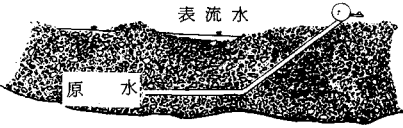


図-4 埋設暗渠による伏流水取水

よって化学的に変化を受けないことから判断して、トレーサーとしての評価が可能である。さらに表流水と地下水の Cl^- 濃度の大きな差を利用して、湧出地下水量を算定する方法を次章で検討する。BODの収支を検討することは、同時に

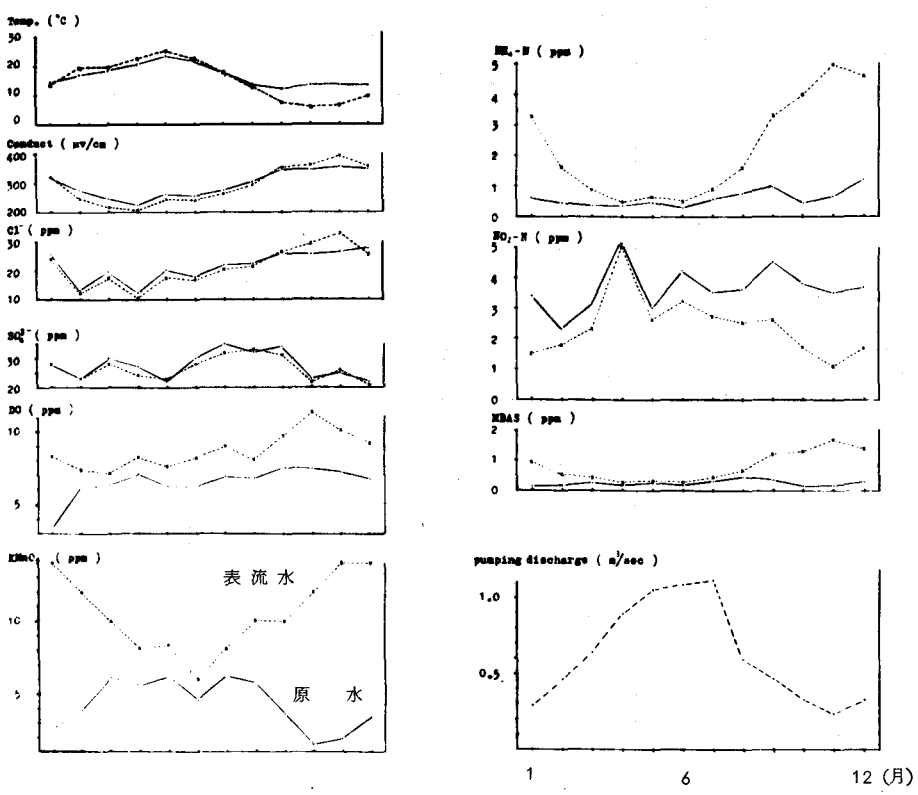


図-5 砧上浄水場での埋設暗渠伏流水取水における表流水と原水の水質比較 (都水道局 資料より)

伏流による
自浄作用を

評価できる。表-2に示した伏没量と還元量の Cl^- 濃度がほぼ等しいことは、伏流水の大部分が再び下流で還元水に転化していることを示すものであろう。このとき還元水のBOD濃度が3.9ppmに減少していることから、伏流の過程で若干の自然浄化を受けているものと思われる。

V Cl^- 負荷収支シミュレーション

汚濁の進んでいる表流水中の Cl^- に着目すれば、伏没区間では物理的に負荷量が減少する。地下水浸透型の伏流水であれば負荷は表流水系から抜け出るが、伏流流出型であれば下流の還元区間ではほぼそのまものかたちで湧出し、負荷量は増大することになる。地下水涵養型の還元区間であれば、収支流量は増大するが負荷量の増加率は小さく、地下水による希釈作用により表流水の濃度は低下する。これらの事実を相互に関連づけて、伏流水の浸透(IG)、流出(ID)、還元(ER)成分と、地下水涵養(EG)成分の量的収支関係を算定する方法について考察する。

還元区間の一例として、関戸橋-是政橋間での Cl^- 収支を検討する。還元区間では地下水と伏流水による涵養量が考えられるが、前者を $x \times 10^3 m^3/日$ 、後者を $y \times 10^3 m^3/日$ とすれば、流量収支から

$$x + y = 1752 - (1226 + 80 - 85) = 531 \quad (\text{単位: } 10^3 m^3/日) \quad \dots\dots\dots (1)$$

このとき地下水の平均 Cl^- 濃度が7.0ppm(後述)、伏流還元型の湧出伏流水の Cl^- 濃度は、L2上流における本流の濃度に等しいことから、16.5ppmであるから、負荷収支を検討すると、

$$7.0x + 16.5y = 28931 - (20330 + 1656 - 1400) = 8345 \quad (\text{単位: Kg/日}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

(1), (2)式を解けば $x=44$, $y=487$ となり、この区間では自由地下水系からの涵養量が8%、伏流水による涵養量が92%と推定される。次にL2-L3間での涵養源は、その大部分がL2上流からの伏流水によっているとの結果になったので、伏没区間の一例としてL1-L2間での収支について検討する。図-2(a)と

(c)から収支流量 $-500\text{ m}^3/\text{日}$ に対して、 $-3512\text{ Kg}/\text{日}$ もの大量の Cl^- が抜けていることは不思議である。この原因はL1-L2間が、5 Kmと長すぎるため、伏没と還元の2サイクルが同時に存在しているためであろう。区間のほぼ中間点で負荷量の大きな浅川($\ell 5$)が流入するが、河川の水利機構はこの上流側で地下水の還元を受け、下流側で伏没するため、両者が相殺しあって収支流量としては $-5000\text{ m}^3/\text{日}$ ときわめて小さな値を示し、一方、収支負荷量は大きく減少する結果になったものと思われる。このように周辺の地下水系との関係を考慮した上で、収支区間を伏没、還元の一サイクルに調和すべく決定することが最も基本的な問題点である。他の収支区間についても、水利機構を正しく反映した収支区間であるかについては検討の余地は残るが、1.2~3.5 Kmと比較的細かく測定区間を取ったため、ほぼ調和した収支区間と考えられる。さて伏没区間では、IG型とID型の伏没が考えられるが、両者を量的に区別することが難しいので、とりあえず両者を合計した伏没量 $y'\text{ m}^3/\text{日}$ として議論を進める。L1-L2区間では下流側の伏没と同時に、上流側では地下涵養を受けているから、その涵養量を $x'\text{ m}^3/\text{日}$ とすれば、収支流量は、 $x' - y' = 5 \dots\dots (3)$ 収支負荷量は、 $7.0 x' - 1.65 y' = -3512 \dots\dots (4)$ となり、(3)、(4)式を解いて、 $x' = 381$ 、 $y' = 386$ となる。上流の伏没水が下流で還元水に転化する関係から、 y と y' はほぼ等しくなる必要がある。しかし計算からは、 $y - y' = 1.01$ の誤差が出る。この原因は、図-5から Cl^- に関しては伏流することによって逆に若干ではあるが負荷量増加が認められ、この負荷増加を認めれば誤差は修正される。次に地下水の平均 Cl^- 濃度を 7.0 ppm としたが、この平均値が小さすぎることに一因が求められる。そこで、 $y = y'$ となるよう $y' = 487$ と固定して、逆に地下水濃度と地下水涵養量をそれぞれ $a\text{ ppm}$ 、 $z' \times 10^3\text{ m}^3/\text{日}$ と未知数に置き換えシミュレートすると、 $z' - 487 = -5 \dots\dots (5)$ $a \times z' - 1.65 \times 487 = -3512 \dots\dots (6)$ 、(5)、(6)式を解いて、 $z = 482 \times 10^3\text{ m}^3/\text{日}$ 、 $a = 9.4\text{ ppm}$ となる。自由地下水の Cl^- 濃度が5~10 ppm範囲内にはあるが、地域差も認められ、平均値として 7.0 ppm を仮定したための誤差は考慮する必要がある。L1付近の地下水 Cl^- 濃度が比較的高く、最大 11.5 ppm が測定されていることから、 $a = 9.4\text{ ppm}$ は多少問題はあるにせよ、図-5にみられた Cl^- 負荷増加を考慮すれば、 $7.0 \sim 9.4\text{ ppm}$ の間のほぼ妥当な濃度に落ちつくものと考えられる。伏没、還元水の濃度から流量をシミュレートすると同時に、流量から水質をシミュレートすることも可能であり、両者を相互にフィードバックさせながら考える必要がある。このシミュレーションでは地下水浸透型の伏没量が、被圧地下水系と自由地下水系への両成分を合計したものとして計算されている。さらに自由地下水系への転化後、帯水層に貯留される成分と考えることが難しい。つまり、一時的に貯留されたとしても、被圧地下水系や表流水系に再流動する可能性が大きく、この点が正確に把握できないことを考慮に入れる必要がある。この点に関しては、水質からのシミュレーションの限界を考慮しつつ、自由地下水系のポランシアル変動による流出シミュレーションから直接地下水流出量を計算する手法を考慮すべきである。

図-6は、伏流水が旧流路に構造的な支配を受けている例を示した。明治15年当時の河道の上に現在の河道を投射したが、現河道の両岸は現在宅地化さ

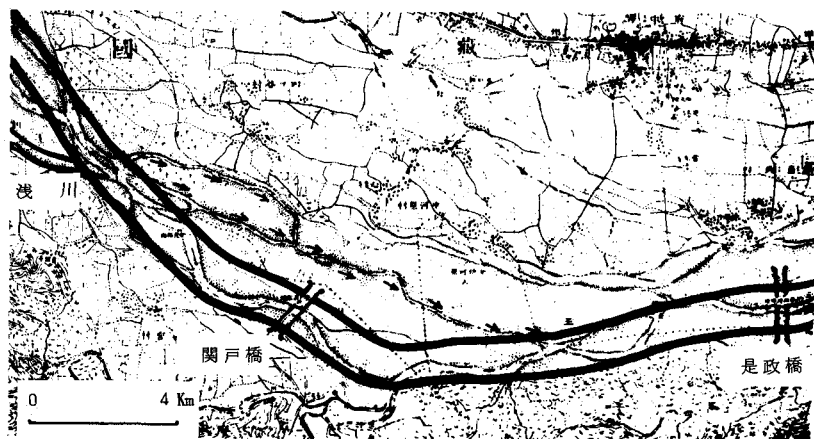


図-6 関戸橋、是政橋周辺の旧河道と現河道の比較(明治15年迅速図)

れ、その上からでは旧河道の位置はわからない。この古地図では浅川合流点付近より左岸側をバイパスのように流れる旧河道が存在している。さきほど述べた浅川下流側での伏流機構は、合流点付近で大量に伏没した表流水が、このバイパスを迂回するように伏流し、下流は政橋の上で再び本流にぶつかるかたちで湧出する。IDB型・ERB型が卓越する機構であることが推定される。このバイパス型では伏流速度が大きいため、伏流による自浄作用はあまり期待できない。

L3-L4, L4-L5, L5-L6, L6-L7, L7-L8, 各区分についても同様な Cl^- 負荷収支を検討し、図-7にまとめた。

VI 地下水涵養源としての伏流水

図-7において、射線部が伏流流出量(+)と伏流還元量(+)を、空白部が地下水涵養量(+)と地下水浸透量(-)を示す。図から明らかなようにL1'-L2, L3-L4区間では、伏没水が下流でほぼ全量還元水に転化している。L5-L6間では132万 m^3 /日の伏没水のうち98%が地下水系へ転化し、伏流現象のすさまじさを示しているが、水文地質学的な条件と宿河原堰周辺の水利機構を考慮すれば、伏没水の大部分は自由地下水系へ転化しているものと思われる。湧水～低水時におけるこの区間の水収支量を検討すると、伏没量はごくわずかである。このことは流量が増加し堰の水位が上昇することにより、その水頭差に比例して伏流量が増加するため、その大部分が自由地下水系に対する伏没量と考えられる。さきの多摩川宿河原堰堤防決壊の内生的メカニズムとして、堰周辺の伏流水によるバイピング現象が重要な意味をもつことも憂慮される。このシミュレーションで良い結果が得られなかったL4-L5間について、無理に流量収支を合わせると、図のごとく湧出地下水の Cl^- を50ppmに仮定しなければならない。この区間で収支流量増に対する負荷量増があまりに大きすぎるためであるが、第一に考えられる原因としては、支流の Cl^- 濃度の実測値がないため、仮定値を使用した(表-1カッコ部)ことによるものと考えられる。以上の結果をふまえるならば、厳密な数値としては多少の問題が残るとしても、伏流水からの被圧地下水への転化量はごくわずかなものといえよう。多摩川流域での被圧地下水の涵養源は、その大部分が自由地下水系から被圧縮水層に向い、垂直方向の漏水涵養によるものと考えられる。

VII 伏没・還元機構と自浄作用

伏流機構と水質汚濁機構(自浄作用)の関係については各所で述べてきたので、ここでは各収支区間毎のBOD負荷収支シミュレーションによる自浄係数 k の評価を行った。BODが一次反応で減少するものと仮定して、 $Lx = L_0 e^{-kt}$ (Lx : 未知負荷量, L_0 : 初期負荷量, t : 流達時間, k : 自浄係数) なる関係式をもとに k を算出すると、L1～L8各区分での実測負荷量をもとに計算した k 値は、伏没区間では正値に、還元区間では負値になり、伏没・還元機構に基本的な支配を受けていることがわかる。さらに興味深い点は、収支計算区間のとり方で k 値が大きく異なることである。表-1にこれらの結果を示した。

この調査研究にあたっては東京大学高橋裕教授および玉井信行助教授から多くの示唆をいただき、東京都公害研究所水質部古井戸良雄氏からは貴重な助言ばかりではなく数多くの資料を提供していただいた。現地調査などで多くの協力をいただいた東京大学大学院前田諭、安川歩両氏、明星大学渡辺孝司氏、と全面的な研究遂行と整理に尽力いただいた東京都港湾局松長享平氏に、記して感謝の意を表します。

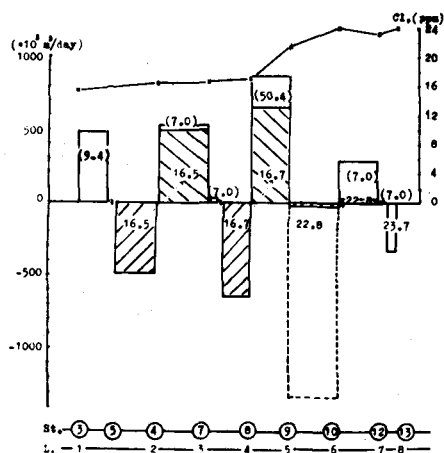


図-7 Cl^- 負荷収支シミュレーションによる流量収支と Cl^- 濃度(ppm)