

比電気伝導度－接触時間特性を考慮した流出成分の分離

Separation of *New* and *Old* Waters Using Specific Conductance-Time of Contact Relationships of Flows

松林宇一郎*・ハ・マソ T. ヴェラスケス**・高木不折***

by Uichiro MATSUBAYASHI, German T. VELASQUEZ, Fusetu TAKAGI

The separation of flows using the geochemical tracer SC (specific conductance) has been utilized as a first step to determine the flow characteristics of a study basin. Through the utilization of a non-steady state equation of mass balance, the incorporation of the relative contributions of surface and sub-surface flows to the total flow, and the effect of long and SC varying rainfall, a physically based function of new rainwater was determined. Experiments were made to this effect and an actual rainfall event was used in separation of *new* and *old* rainwater. The result of the separation yielded contradictory results as compared to those using a non-chemical tracer.

Keywords: specific conductance, flow separation, tracer

1. まえがき

トレーサーによる流出水の分離は、流出過程のメカニズムを理解する上での有益な情報をもたらすものとしてこれまで、種々の方法が検討されてきた。その中の一つに比電気伝導度がある。電気伝導度は物質中の電気の伝わり易さを表すが、液体の場合は一定距離隔たった電気伝導度によって表すこれが比電気伝導度 SC である。これは、物理的には溶液中のイオンの存在によって生ずるが、単にその量だけではなく、イオンの種類、動き易さといった要因にも支配される。(Hem 1959) ところがこれらの特性を定量的に評価しイオンと比電気伝導度を関係づけることが難しいため、比電気伝導度と比較的明瞭な関係が認められる Dissolved Solid をトレーサーとして用いた研究が従来からさかんに行われてきた。(Hem 1959, Nakamura 1971, Pilgrim 1979) しかしながら、本来関係づけるべきイオンと SC の関係が明かでない以上、現時点では比電気伝導度をその値のある範囲内で直接トレーサーとして用いることが妥当であろう。

この様に仮定すると、流出成分の分離の基礎式は一般に流量とトレーサーの保存則である次式によって表される。

$$Q_n + Q_o = Q_t, \quad (1-a)$$

$$Q_n C_n + Q_o C_o = Q_t C_t, \quad (1-b)$$

ここに、Q、C はそれぞれ流出量とその比電気伝導度であり、添え字 n, o, t は順に新水（今回の雨によ

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科

** 名古屋大学大学院工学研究科 学生 土木工学専攻

*** 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

(〒464-01 名古屋市中千種区不老町)

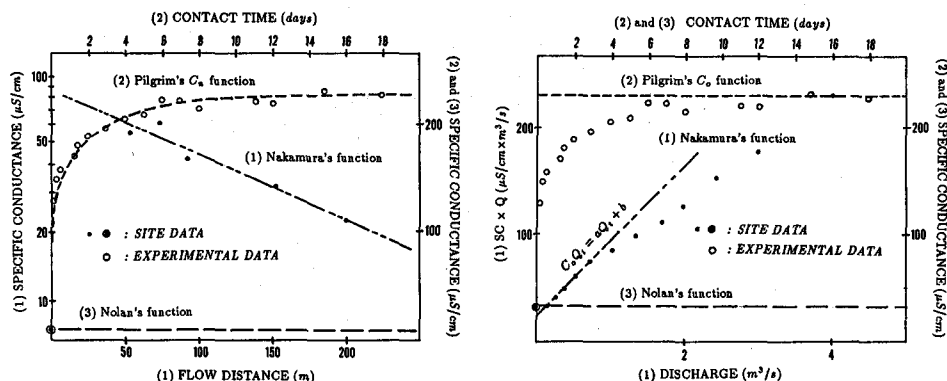


図-1 C_n 、 C_o の関数形（既往の研究）

る流出水）、古水（地中に貯留されていた以前の雨が流出したもの）、それらの混合されたものとして流出点に現れたものを意味している。これらの式を用いて流出成分の分離を行うに当たり、その取扱は研究者によってかなり異なっている。すなわち、 Q_n 、 Q_o を未知量とし Q_t 、 C_t は実測される量として扱われるが、 C_n と C_o はいくつかの方法によって表されている。NolanとHill(1990)は C_n 、 C_o をそれぞれ一定値とし、Nakamura(1971)は尾根からの距離により直線的に変化するとし、Pilgrim他(1979)は土壌との接触時間によって非線形関数で表した。図-1はそれらの関数形を示したものである。これら相互の相違はその決定法の違いによるが、この中でPilgrimによるものだけが非定常性を考慮しており、より物理的な関数となっている。なお、中村の関数は場所的に変化させているが時間的には変化させていない。

しかし、実際の問題に適用する場合には3節で詳述する接触時間効果、流下経路の相違、多峰降雨などを考慮した C_n や C_o の評価法が望まれている。

2. 対象流域

対象とした流域は、愛知県犬山市の名古屋大学地震観測所付近にある流域面積6400 m^2 の小流域である。図-2に流域の地形を示す。この流域の地質は主に古(中)生代のフート、頁岩層より成り、砂岩を一部介在する。岩盤の上部は風化しており、割れ目が多く、表土が薄く覆っている。表層土の厚さは尾根部で約0.3m、河道付近では崩積土が1mから1.5m堆積している。表土は尾根部でかなり小岩片を含むが、河道付近ではシルト質となる。この流域は高さ5m~10mの樹木に全体を覆われており、尾根付近では背の低い雑木やサザン類の群生がみられ、河道付近は広葉樹が密生している。本研究で行った水文観測は、三角堰による流量と自記雨量計による降雨量の測定ならびに出水時における降雨水、流出水に含まれるSC値の測定である。

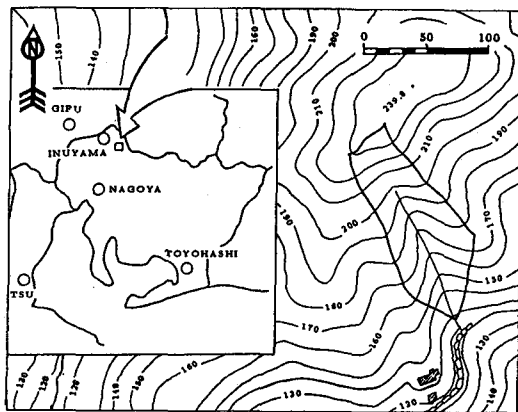


図-2 流域の地形

3. 比電気伝導度の変化特性

3.1 ウォッシングと接触時間の効果

流出場での比電気伝導度を見るとラグランジュ的立場とオイラー的立場の2つがある。視点を土壌の一点に固定しオイラー的に見ると、雨水は土粒子（粘土）表面に付着している溶解塩と飽和状態の高濃度のイオンを取り込み流出するため初期にSCは大きい、しだいにイオン層の厚さが薄くなりイオンと土粒子との吸引力が強くなってゆくの土粒子からはなれにくくなり、SC値は低下してゆく。これは「ウォッシン

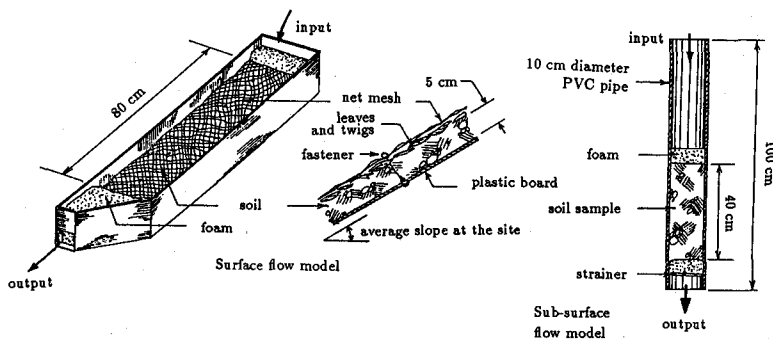


図-3 実験装置（左：地表流、右：地中流）

グ過程」ということができる。ウォッシングは上流から低SC値の水の給水がある間続き、供給されなくなると土壌と水との接触につれて次第にSC値は増加してゆく。

一方、流域のある点に落ちた雨水をラグランジュ的に追いかけると、雨水が流下につれて土壌と接触してイオンを新たに取り込むため、SC値は時間の経過につれて非線形に増加する。これら2つはその見方の相違によるものであり現象あるいはメカニズムそのものは同一である。

何れの過程も土壌と水の間のイオン濃度が平衡状態へと漸近的に遷移するため生ずる。この遷移速度は流れにおける混合の程度、土壌の特性、並びに雨水と土壌のイオン濃度等の要因によって変わり、それゆえ、これは斜面での雨水の流下経路によって大きく異なるであろう。そこで、本研究では雨水（新水）の比電気伝導度すなわち C_e の時間変化を流出特性の異なる表面流出と地中を経由する流出に分けて取り扱う。

3・2 表面流と地中流のSC-接触時間関係の実験的決定

SCと接触時間関係（以下“SC-tc関係”と略称する）を表面流と地中流について明らかにするために、現地斜面の表層とその下層から採取した土壌を用いて実験を行った。図-3の左側は表面流についての実験装置を示している。水路は矩形で長さ1mで、約5cmの厚さに表層土壌が敷き詰められている。水路の勾配は現地斜面の代表的勾配を用いた。実験は上流端から水を供給し、斜面の下端で集めてそのSC値と水温をHand Held 比電気伝導度計と棒温度計により計測した。SC値は25℃に換算して示した。また、イオンの種類を確認するためpH値も測定した。水の供給の仕方は、ウォッシング過程の実験については新しい水を供給しつづけ（連続給水）、接触時間による変化の実験では下流端で集めた水を上流から繰り返し用い給水した（繰り返し給水）。接触時間の効果の実験では、さきに連続給水しウォッシングの程度の異なるいくつかの状態を初期状態として繰り返し給水で実験した。繰り返し回数は最低40回、時間にして20分以上行った。

一方、地中流の実験は現地斜面での浸透流をなるべく模すように、図-3の右側のカラム浸透装置を用いて行った。用いた塩ビパイプの直径は10cm、現地土壌を充填した長さは40cmである。土は、現地の土壌の密度となるべく一致させるため少しづつ詰め一様に締め固めた。この装置の場合もウォッシング過程の実験と、接触時間効果の実験をそれぞれ連続給水、繰り返し給水によって行った。地中流の実験は排水時間が長く排水完了の確認が出来ないので一定の間隔で繰り返し給水を行った。

なお、今回の実験では、繰り返し給水では実際の雨を集めて用い、連続給水では多量の水が必要となるので市水と蒸留水を混合し雨水と同一の比電気伝導度となるように調整して用いた。

3・3 実験結果

図-4（a）と（b）はそれぞれ表面流と地中流に対する接触時間効果の実験結果SC-tc関係を示したものである。図-4（a）の最上段の一連のプロット(1)は $54\mu\text{S}/\text{cm}$ の雨水相当水を連続給水し流出水のSC値が流入水と一致（平衡状態）するのを確認した後、繰り返し給水に切り替えた接触時間効果の実験結果であり、繰り返しの開始時刻を時間原点としてプロットしている。中段(2)は(1)の実験により装置内の水がほぼ平衡（ $70\mu\text{S}/\text{cm}$ ）に達した時点で $24\mu\text{S}/\text{cm}$ の低濃度の水を繰り返し給水し、接触時間効果を見た実験である。下

段(3)のプロットは(2)の実験の後 $24\mu\text{S}/\text{cm}$ の水を連続給水し平衡状態を確認した後、繰り返し実験に切り替えた結果である。(1)と(3)はSC値は異なるが連続給水による平衡状態から繰り返し給水に切り替えた実験であり、興味深い点は2つに曲線が濃度差の分だけ平衡移動した形になっていることである。また、(2)と(3)の違いは供給水は同一で平衡に達した初期の水の濃度が異なる場合で(3)と比べ(2)は(1)の曲線に接近している。これらからわかるようにある濃度の給水に対して初期の水の平衡濃度が違う場合(2)(3)を補間・補外してSC- t_c 関係を曲線族として表すことが出来る。図中の破線はその一例を示したものである。図-4 (b)は地中流に関するSC- t_c 関係についての同様な実験結果である。なお、この場合は(1)の過程は無く連続給水の結果を初期状態としている。

3・4 実流域の観測点の C_n 値の推定

分離式(1)は流量観測点における流量を新水と古水に分離するものであり、新水、古水とも観測点における濃度を用いなければならない。ところが、前節で述べたように水は流出過程で土壌と接触しそのSC値を変えてゆく。従って、分離式を正しく用いるためには新水・古水、特に土壌との接触によるSC値の変動が大きい新水の C_n を正しく推定する必要がある。いま、時刻 t_0 で降雨があったとする。

このとき観測点のごく近傍に降った雨水は直ちに流出しほぼ降雨と近いSC値をもつ。つぎに時刻 t ($> t_0$)に流出してきた新水は、流出速度を v とすると観測

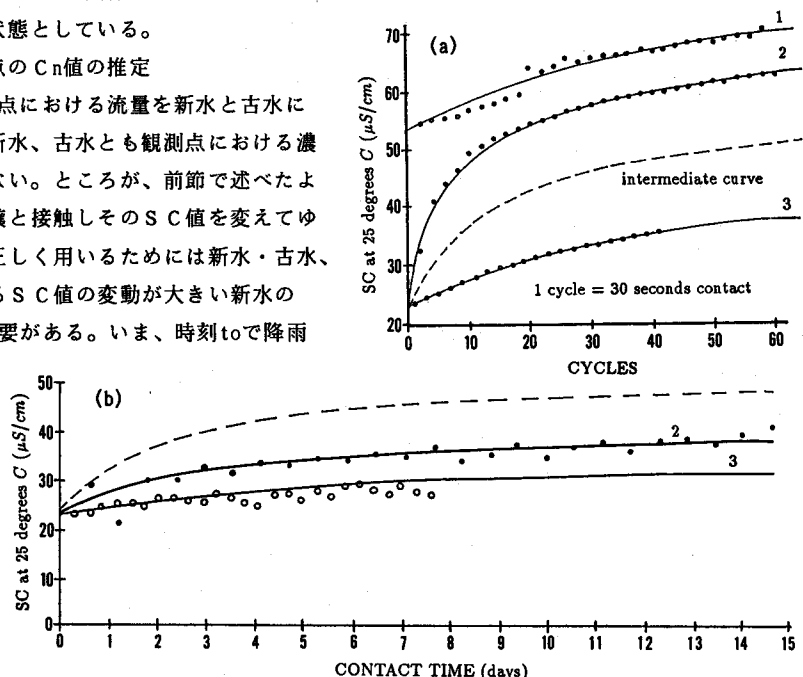


図-4 SC- t_c 関係 (a):地表流、(b):地中流)

点から $(t-t_0)/v$ だけ上流に降った雨であるが、そのSC値の変化が接触時間のみの関数であるとすれば位置や速度を知らなくとも、SC- t_c 曲線の $t_c = t - t_0$ での値で与えられる。すなわち、 $t = t_0$ に降った雨水の C_n の変化は $t = t_0$ を原点とするSC- t_c 曲線そのものに等しい。これが C_n 推定の基本原理である。

ところで、実際にこれを適用するにはさらに2つの点を考慮にいれなければならない。一つは雨水の流出形態による C_n 値の相違であり、もう一つは降雨が単峰でなく長期間続く場合への適用である。まず、第一の点については、大きく地表流と地中流に分類される。両者の分離法としてここではHorton型の地表流を考える。実際には地表流も流下の過程で浸透したり、地中流もReturn Flowとして地表に現れたりするが、ここでは簡単のためこれらを無視することにする。さきに説明した C_n 推定の基本原理をこれら地表流と地中流に適用すると両者は互いに独立であるから、各々の C_n を $C_n^s(t)$ 、 $C_n^{ss}(t)$ とすると、これらは降雨の時刻を原点とするSC- t_c 関係そのものとなる。分離式を適用するには C_n は $C_n^s(t)$ 、 $C_n^{ss}(t)$ を平均した $C_n(t)$ を求める必要があるが、これは両者の雨量によるのが妥当であろう。すなわち、降雨 R のうち地表流成分 R^s と地中流成分 R^{ss} はHorton型地表流の仮定により次式で与えられる。

$$R^s = \begin{cases} R-A & ; R \geq A \\ 0 & ; R < A \end{cases} \quad R^{ss} = \begin{cases} A & ; R \geq A \\ R & ; R < A \end{cases} \quad (2)$$

ここに A は地中への浸透を意味している。本来は、降雨遮断や凹地貯留等も A に含まれるが、簡単のためこのように仮定する。以上のように考えると、地表流と、地中流を合成した $C_n(t)$ は次式で与えられる。

$$C_n(t) = C_n^s(t) * (R^s/R) + C_n^{ss}(t) * (R^{ss}/R), \quad (3)$$

なお、地表流のように流出が速い成分については t が最長流達時間より長くなると対応する降雨が存在しないので $C_n^s(t) = 0$ としなければならない。図-5 はその計算を模式的に示したものである。

つぎに、長期間の降雨に関する C_n の求め方については、Pilgrim 他(1979)は一連の降雨をその重心に集中させて単一の降雨として取り扱っているが、多峰形降雨、さらに降雨の SC 値が変動する場合には適用が難しい。この点を解決するため、ここでは各降雨が違いに独立に挙動すると仮定し、重ね合わせの方法を用いて次式のように連続的な降雨に対する合成された $C_n^c(t)$ を与えた。

$$C_n^c(t) = \frac{\int_0^t C_n(t-\tau)R(\tau)d\tau}{\int_0^t R(\tau)d\tau} \quad (4)$$

ここに、 $C_n(\tau)$ は(3)式で与えられる合成された C_n である。この式は各時刻の降雨が流量観測点に到達したときに持っている SC 値を降雨量の重みを掛けて平均したものである。図-6 にその様子を模式的に示した。

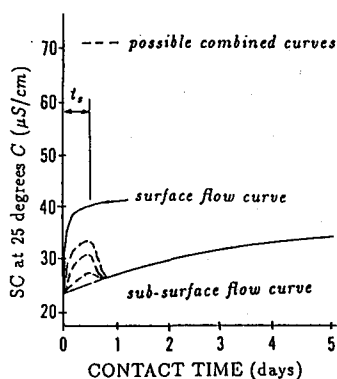


図-5 地表・地中流の C_n の合成の説明図

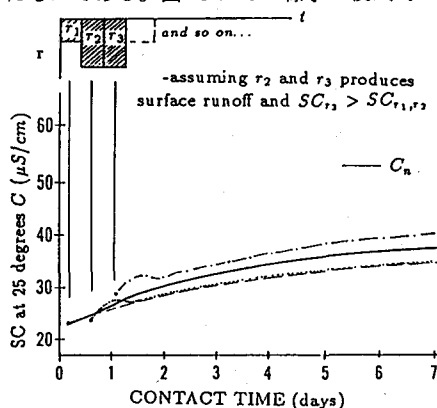


図-6 連続降雨の C_n の合成の説明図

4. 犬山試験流域への適用と考察

実流域への適用例として、犬山試験流域における1990年10月31日午後から11月1日にかけての17mmの降雨による比較的小さな出水を解析した。この出水の降雨強度は、本流域で行った冠水型浸透能試験による最終浸透能2160mm/h と比べて極めて小さいので表面流出は生じないと考えられ地中流のみによる計算を行っている。

図-7 は観測データと解析結果をまとめて示したものである。実測流量を下段に実線で、流出水の SC 値を中段に実線で、降雨を上段に棒グラフで示した。まず、 C_n についてはこの出水の前に十分な無降雨期間があり地中水はほぼ平均化されて流出してきていると考え降雨開始直前の流出水の SC 値 $54 \mu S/cm$ を用いた。又、 C_n 値はほぼ平衡に達していると考え出水中一定とした。一方、 C_n については既に述べたように $SC-t$ 曲線は土壌の条件のよって変り無数の曲線群の中から適当なものを選ぶ必要がある。しかしながら、土壌の条件すなわち、土粒子の表面に存在するイオンの多寡を推定する方法は今のところなく。また、降雨の SC 値が、 $24 \mu S/cm$ であり、偶然実験での設定値と同一であったこと、ならびに降雨量が少くウォッシング過程が十分でないと考えられることから $SC-t$ 曲線として、実験結果のうち図-4 (b) の上側の実線を用いることにした。

分離の結果を図-7 に破線で示した。破線の下側が古水、破線と実線にはさまれた部分が新水の成分である。なお、同図には比較のため C_n を降雨の値 $24 \mu S/cm$ で一定とした結果も一点鎖線で示している。図から流出の前半は古水が多く、後半に新水が多くなっていることが分る。又、 $C_n = 24 \mu S/cm$ と一定にした場合と比べると低減部において新水の割合が増加している。このことは、地中流の降雨による押し出しの流れが卓越することを示唆している。又、古水と新水の比率は10/30 13:30～11/1 24:00の期間で平均すると古水25.3%に

対し新水74.7%である。本流域ではすでに $\delta^{18}\text{O}$ を用いた分離を1989年の9月のデータを用いて行っているが、これによると、古水と新水の割合はおおよそ60%、40%であり今回の結果とは逆の傾向を示している。1989年の例では降水は64mmとかなり多く、新水の成分が相対的に多いはずであり今回の結果との対応は不合理である。この点に関してNolan(1990)は、 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、K、SC、 SiO_4 等のトレーサーを用いて成分分離を行い比較している。SCについての取り扱いは本研究と比べて厳密ではないが、その結果 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ と比べてK、SC等の化学的トレーサーを用いた場合には化学反応などにより、とくに低減部での信頼性が低いと述べており、本研究の結果も含めてその取り扱いにさらに検討すべき点が残されている。

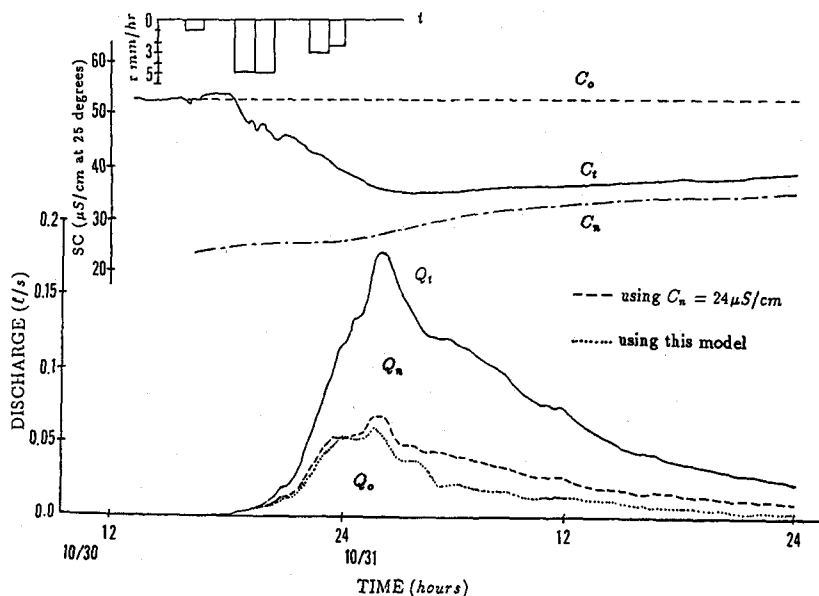


図-7 流出成分の分離結果 (1990年10月31日-11月1日)

5. 結論

流出水の比電気伝導度による新水と古水の分離は、Pilgrimをはじめとして多くの研究者によって研究されてきた。しかし、降雨を時間・空間的に集中させるなどの取り扱いのため、流出立ち上がり部分の分離が不可能であったり長期の降雨に対する適用が困難であったりした。また、比電気伝導度(SC)－接触時間(t_c)関係の実験的評価の例も多くない。本研究ではこうした点に鑑み、地表流、地中流といった流出形態の相違、長期間の連続降雨に対する C_n の評価法を提案し、また、SC- t_c 関係についても、地表流と地中流に分け現実に即した実験を行いその変動特性を明らかにした。その結果、土壌の条件に応じた曲線群で表されることを見いだしたが、実際の適用においてどの曲線を選ぶかは、土壌の状態の把握が困難であるため今後の課題として残された。

参考文献

1. Hem, J.D., Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water, *Water Supply Paper 1473*, U.S. Geological Survey, Washington, D.C., 1959.
2. Nakamura, R., Run-off analysis by electrical conductance of water, *Journal of Hydrology*, 14, 197-212, 1971.
3. Nolan, K.M. and B.R. Hill, Storm-run-off generation in the Permanente creek drainage basin, West central California - an example of flood-wave effects on run-off composition, *Journal of Hydrology*, 113, 343-367, 1990.
4. Pilgrim, D.H., D.D. Huff and T.D. Steele, Use of specific conductance and contact time relations for separating flow components in storm run-off, *Water Resources Research*, 15, 329-339, 1979.
5. Takeuchi, K., Y. Sakamoto and Y. Hongo, Discharge characteristics of NO_3^- for the analysis of basinwide circulation of water and environmental pollutants in a small river basin, *Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering*, Vol. 2, No. 1, 73-85, 1984.