降雨に対する応答の速い河川水中の 溶存成分濃度変化について

鈴木 啓 助*

要 旨 商用電源の得られない流域で物質移動の研究が行なえるような、バッテリーを電源とし雨量計をセンサーに持つ、自動採水器および水文測定記録装置を製作した。本システムを多摩川水系の小流域に設置し観測を行なった結果、次のことが明らかになった。

水路にもたらされたわずかの降雨に対しても、流量や河川水温、河川水の電導度がすばやく応答する。谷頭平底における飽和域が拡大し、水路と連結すると流量の「ふたつめのピーク」が形成される。流出成分の分離結果から、「ひとつめのピーク」は、飽和地表流や浅い地中流によって形成され、「ふたつめのピーク」は降雨以前から地中に存在する水が、降雨の地下浸透によって押し出されて形成され则认为られる。

キーワード ハンドヘルドコンピュータ 自動採水器 流出成分分離 あたらしい水 ふるい水

I. はじめに

小流域での水循環とそれに伴う物質移動を解明する際には、降水量や河川流量などの水文量とともに、河川水中の溶存成分濃度を測定することが基本要件のひとつである。河川水中の溶存成分濃度の変化を、降水量や河川流量などの水文量と比較検討することにより、流域内部での物質の移動や流域から流域外へ流去する物質の量などが明らかになる。しかし、研究の対象となるような小流域では、ほとんどの場合商用電源を確保することが困難である。そのために、電池やゼンマイ駆動式の測定記録器による測定や、人間の手による測定によってデータを蓄積しなければならない。降水量や河川流量などの水文量の測定については、この方法でもある程度の成果をあげることができる。しかし、商用電源の得られない流域での物質移動の研究については、多くの場合人間の手に頼らざるを得ず、データ蓄積の大きな阻害要因

となっている。流域での物質移動を考える際の基本となる、河川水中の溶存物質濃度を測定するには、河川水の採水が不可欠である。低水時の採水は人間の手によってもある程度可能であるが、発生の予測が困難な洪水時の採水は、人間の手ではきわめて非能率的である。洪水発生に対応して採水を行なうような、電池式の野外用機器はこれまで開発されていない。ある一定時間ごとに採水できる自動採水器は市販されているが、降雨や流量の増加を感知する事ができないために、洪水時の採水をスタートさせるのはあくまでも人間である。

小流域における洪水の発生には、降水量の多寡とともに地中における水分量などが密接に関わっている。ある地点における降水の様子を事前に知ることさえ困難な現状では、洪水の発生を事前に予測し、河川水の採水を自動的にかつ確実にこなすことは、現在のところ不可能である。しかしながら、小流域の洪水時における河川水中の溶存物質濃度変化を調査することは、流域内における物質移動を考える際には必須の要件である。また、採水と同時に降

* 東京都立大学理学部地理学教室

水量や河川流量・水温や電導度などが、自動的に測定記録されることが必要である。

そこで、これらの目的を達成するために、バッテリーを電源とする水文測定記録装置と、その測定結果によって採水のスタートが可能な自動採水器を製作した。さらに、本装置を多摩川水系の小流域に設置し、観測を行なった結果、河川水中の溶存物質濃度変化が、降水に対してきわめて速く応答する現象を観測することができたので報告する。

II. 観測方法

1. 自動採水器および水文測定記録装置のシステム構成

自動採水器を制御することのできる水文測定記録装置の本体には、エプソン社のハンドヘルド・コン

ピュータ HC40 を使用した。HC40 は、DC6 V で駆動することができ、インターフェイスとして、プリンタ、オーディオ・カセット、RS232C などの他にカートリッジ・インターフェイスが装備されている。また、RAM カートリッジは、最大で 256 KB の容量まで増設可能である。OS は CP/M であるが CP/M 上の BASIC を標準装備しているので、プログラミングが容易である。さらに、次の実行時まで、電力消費を極力押さえるためのスリープ機能も装備されている。これらの点から、野外观測用に最適のコンピュータのひとつである。HC40 を用いた野外观測の例としては、奥田ほか (1986) の琵琶湖における波高の測定や中川 (1986) による気温の移動観測などがある。また、姉妹器である HC20 を用いて、蒲谷・真下 (1984) は流量に比例した量の水を採取す

第1図 バッテリーを電源とする水文測定記録装置および自動採水器の構成
Fig. 1 Outline of hydrological observation system

る装置を開発している。

本装置のシステム構成を第1図に示す。HC40からの信号・データの入出力は、ユニバーサル・カートリッジを用いて行なった。また、データの蓄積は容量128KBの外部RAMディスクで行なった。測定記録を行なった項目は、降水量(0.2mm転倒升式)、河川流量(60度三角堰の水位測定による)、気温、水温(3点)、地下水位(2点)、河川水の電導度である。水位の測定は圧力センサーで、気温と水温の測定はサーミスタ温度計で、電導度の測定はセントラル科学のUC33型電導度計を用いて行なった。電導度は、UC33型電導度計で25℃に換算された結果が電圧出力される。水位と電導度はセンサーから直接DC電圧値が得られ、降水量はセンサーからパルスを電圧積算しその積算電圧を測定する。

各センサーからの電圧値は、チャンネル・セレクターを通して、ADコンバーターで12bitのデジタル信号に変換される。そして、このデジタル信号がパラレルI/OインターフェイスによってHC40に取り込まれ、外部RAMディスクに記録される。チャンネル・セレクター、12bit・ADコンバーター、パラレルI/Oインターフェイスはコントロールボックスに格納されている。12bit・ADコンバーターによると、各センサーの測定範囲が4,096分割されたデジタル・データとして記録される。つまり、温度の測定範囲を40℃とすれば、約0.01℃刻みで記録されることになる。

各センサーからデータの読み込みと、自動採水器の制御を同一のプログラム上で実行することができるから、各水文量の測定値に基づき、自動採水器を

第2図 観測流域とセンサーの位置

N: 60度三角堰, Ta: 気温, T1~T3: 水温, W1~W6: 地下水位 (W1~W2: 圧力センサー, W3~W6: リンチャー式)

Fig.2 Experimental watershed

作動させることができる。プログラムの煩雑さを厭わなければ無数の条件設定が可能となる。ここでは、ある一定時間の降水量が設定値を超えた場合に採水を開始するようにプログラミングした。小流域の洪水時における河川水中の溶存成分濃度変化を捉える際には、流量増加以前の濃度も知る必要がある。そのため、河川の水位や電導度が変化したことを検知した後に、採水を開始したのでは遅くなる。ほとんどの降雨流出では、降雨後河川流量が増加するまで若干の時間の遅れがあるから、降雨をトリガーとして採水を開始すれば、流量増加直前の河川水を採取することが可能となる。降水量を測定する時間間隔は自由に設定できるが、ここでは10分とした。雨量計の転倒升が10分間に2回以上転倒（降雨強度0.4 mm/10 min 以上）した際に採水を開始し、以後1時間間隔で採水するようにした。雨量計の転倒升が10分間に2回以上転倒して自動採水器が稼働した後、雨の降り方がどのようになるかは予測ができない。そのため、その後降雨がなく、流量も変化しないにもかかわらず採水を続けることがある。

2. 観測対象流域

本装置の設置流域は、多摩川水系大田川の最源流域（流域面積0.0231 km²）である。各センサーの配置を第2図に示す。降水量（0.2 mm 転倒升）のセンサーは、流域出口より下流の樹木の影響の無い地点に設置した。流量測定のための、60度三角堰を設置した流域出口付近にプレハブの物置を設置し、その内部にHC40、コントロール・ボックス、自動採水器、バッテリーを収納した。さらに、本装置の他に、W3～W6地点では、リチャード式水位計（大田計器製）により地下水位を自記測定した。また、流量観測堰には減水位計（池田計器製）を設置し、雨量センサーには雨量記録器（池田計器製）を並列に接続し、流量・雨量データのバックアップを取った。

III. 観 察 結 果

1. 流量・水温・電導度の変化

観測結果として、1988年8月10日から11日にかけての台風10号の影響による降雨流出について報告する。当日は、九州・四国沖に停滞した台風10号の影響により太平洋側一帯で大雨となり、各地で災害が発生した。

1988年8月10日と11日の観測結果を第3図に示す。対象流域では、8月4日早朝に0.2 mmの降雨を記録した後、しばらく晴天が続いた。そして、8月10日4時20分から30分にかけての10分間に1.2 mmの降雨があり、その後断続的に降雨が記録され、10日の日雨量は40.8 mmになった。11日には早朝と夜半にまとまった降水があり、日雨量110.4 mmに達した。10日6時までの10分間に4.4 mm、11時10分までの10分間に5.8 mm、17時30分までの10分間に2.6 mm、23時までの10分間に2.4 mmの比較的強い降雨が記録されているが、それに対応するように河川流量も一時的に増加している。気温とはほとんど同じと考えられる雨の温度が、T1の河川水温よりも高いために、降雨にともなって河川水温も一時的に上昇する様子が測定されている。また、降雨による流量の増加や水温の上昇に対して、電導度は降雨にともない急激に減少し速やかに復帰している。ちなみに、降雨の電導度は平均して約5 μ S/cmである。これらの降雨に対しては地下水位に変化がみられず、水路以外には飽和域が形成されていない。そのため、流量、河川水温、電導度の降雨に対する速やかな応答は、水路にもたらされた降雨の直接流出によるものであろう。いずれにしても、降雨に対して流量や河川水温、電導度がきわめてすばやく応答する様子を観測することができた。おおまかには、電導度と溶存しているイオン量は比例していると考えられるので、河川水中の溶存成分濃度は降雨に対して速やかに変動しているといえる。

第3図 1988年8月10～11日の流量、河川水の電導度(λ_{25})、地下水位、気温、水温および降水量の変化

Fig. 3 Changes in stream discharge, conductivity (λ_{25}) of stream water, groundwater level, air and water temperature and precipitation during the storm of Aug. 10~11, 1988

その後、11日未明からの降雨は6時以降強くなり、8時までの2時間で47.8 mmが記録された。10分間最大雨量は6時50分までの10分間の6.4 mmである。この降雨により流量が急激に増加し、水温の上昇と電導度の減少が記録されている。さらに、上流の谷頭平底の地下水位が6時以降上昇を始め、W6とW5では14時以降地表面に達し、飽和域を形成している。W4では、8時までの降雨後水位が比較的安定しているが、W6とW5での水位の上昇に遅れて、14時以降再び上昇し16時以降地表面に達し、飽和域がW4まで拡大している。無降水時にみられるこの地下水位の上昇は、降雨の土壌中での降下浸透によるものではなく、上流からの地下水堆の移動によるものと考えられる。

W4まで飽和域が拡大し、水路と飽和域が繋がった後の16時30分から再び流量が増加している。再び降雨の観測されるのが17時20分以降であるから、この増加は、谷頭平底に形成された地下水堆の下流方向への移動によって形成される「ふたつめのピーク」(日原・鈴木, 1988)である。この「ふたつめのピーク」に対応して、それまでT1より温度の低いT2の水温が、T1の水温と一致するようになるのは興味深い。つまり、「ふたつめのピーク」形成時には、T1とT2における水体が同じ履歴を持っていると考えることができる。

17時20分以降再びまとまった降雨があり、12日0時まで37.6 mmが記録されている。この降雨による流量の増加により、本装置の水位センサーから過大の電圧が入力されたために、記録が19時30分までで途切れている。そのため、19時30分以降のデータはアナログ記録計による流量を示した。11日早朝の降雨量よりも夜半の方が少ないにもかかわらず、流量が格段に多くなっているのは、飽和域の形成と流量とが密接に関わっているからである。つまり、11日早朝には地下水位も低く、谷頭平底に飽和域が形成されておらず、降雨のほとんどが地中への

降下浸透に配分される。そのために、水路以外にもたらされた降雨の流出への変換は、速やかにはなされない。一方、午後からは地下水位も上昇し、16時以降には谷頭平底の飽和域も水路と連結したために、夜半の降雨の多くが速やかに河川流量を形成することができたのである。

2. 河川水中の溶存成分濃度変化

8月10日4時20分から30分までの10分間に1.2 mmの降雨が記録され、それがトリガーとなり本装置の自動採水器によって河川水が1時間間隔で採取された。採取された河川水を実験室に持ち帰り、1 μm のフィルターで濾過後電導度を測定し、 HCO_3^- 濃度は滴定法、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 濃度はイオンクロマトグラフ(Dionex-2020i/SP)によって測定した。分析結果を第4図に示す。電導度は10分間隔の測定記録結果(実線)と試水の分析結果(記号)を一緒に示すが、両者の値の一致はきわめて良い(相関係数0.963)、1時間間隔の採水では、必ずしもピークを捉えることができないことがわかる。各成分の濃度変化をみると、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- の濃度は、電導度と相関係数0.96以上の高い相関で変化する。 HCO_3^- 濃度は電導度との相関が若干弱く、相関係数0.896である。 NO_3^- と SO_4^{2-} 濃度は他の成分とは異なる変化をしている。11日朝の流量増加時には $\text{NO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 濃度ともに減少しているが、10日の断続的な降雨流出時には SO_4^{2-} 濃度はわずかに増加している。一方、 NO_3^- 濃度は他の成分に比して減少の度合いが大きい。 $\text{NO}_3^- \cdot \text{SO}_4^{2-}$ 濃度変化については今後検討を加える必要がある。しかし、他の成分については、降雨中の濃度が河川水中の濃度に比して低濃度であるために、降雨流出時に河川水中の濃度が減少するものと考えられる。

前述のように、電導度の連続記録によれば、降雨に対する河川水中の溶存成分濃度の変化は速やかであると考えられる。そのために、1時間間隔の採水では、すべての溶存成分の濃度変化を知るのに十分で

第4図 1988年8月10～11日の流量，河川水の電導度(λ_{25})，河川水中の主要成分濃度および降水量の変化

Fig. 4 Changes in stream discharge, conductivity (λ_{25}) of stream water, precipitation and concentrations of major ions in stream water

はない。しかし、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 HCO_3^- についてはその濃度と電導度との相関がきわめて高いので、電導度の測定記録結果によって濃度変化の様子を把握することが可能である。電導度と各溶存成分濃度との関係は、降雨前の流域の条件や降雨中の濃度によって降雨ごとに変動するから、降雨流出ごとにチェックする必要がある。そのための降雨流出時の採水は、第4図の結果によれば1時間間隔でも十

分であろう。

IV. 溶存成分濃度による流出成分の分離

降雨に対して河川流量と電導度が速やかに応答することを前述した。さらに、一部の溶存成分濃度は電導度ときわめて高い相関を示すことも明らかになった。これらの結果を用いて、溶存成分濃度変化から流出成分の分離を試みる。

第5図 降水量、河川水中の Mg^{2+} 濃度変化と流出成分分離結果

Fig. 5 Magnesium concentration in stream water and precipitation; and hydrograph separation

溶存成分の中で最も電導度と高い相関を示すのが Mg^{2+} 濃度である。 Mg^{2+} 濃度と電導度との相関係数は 0.982 である。第 5 図の中段に電導度の連続記録結果から回帰式によって求めた Mg^{2+} の濃度変化を示す。図中の×印は自動採水器によって採取された試水の Mg^{2+} 濃度であるが、両者の一致の良いことがわかる。溶存成分濃度変化による流出成分の分離法は鈴木・小林(1987)と同様に、水と化学成分についての質量保存則に基づいている。つまり「ふるい水」と「あたらしい水」それぞれの水の量と化学成分量の和が、河川水の流量と化学成分量に等しいと仮定して連立方程式を解く方法である。「ふるい水」の Mg^{2+} 濃度は降雨前の河川水中の濃度 3.66 mg/l を用い、「あたらしい水」の濃度は降水中の濃度 0.03 mg/l を用いる。

流出成分の分離結果を第 5 図の下段に示す。8 月 10 日中の断続的な降雨に対して「あたらしい水」が明瞭に解析されている。同時に「ふるい水」の流量にも一時的な増加がみられるのは、流域下流部の水路近傍の谷底地下水の流出による効果であろう。11 日早朝のまとまった降雨に対しては、「あたらしい水」の割合が比較的大きくなっている。河川流量に占める「あたらしい水」の割合が最大になるのは、11 日 6 時 40 分の約 60% である。「ふるい水」はそれに遅れて緩やかに増加し、8 時 30 分にピークに達する。降雨は 8 時 10 分に終了するが、その後もしばらくは「あたらしい水」の流出が続く。「ふたつめのピーク」にむかって流量が増加を始める 16 時 30 分頃からは「あたらしい水」の流量が少なくなり、河川流量の多くが「ふるい水」によって涵養されていることがわかる。11 日朝から午後にかけての減水時には、「あたらしい水」の流出がみられることと対照的である。つまり、「ひとつめのピーク」は飽和地表流や浅い地中流によって形成されるのに対して、「ふたつめのピーク」は降雨以前から地中に存在する地中水が、降雨の地下浸透によって押し出されて形成さ

れることを示唆するものである。

10 日中の降雨に対する「あたらしい水」の流出は、水路への直接降雨によるものと考えられるが、「あたらしい水」の流出高と降水量から水路の飽和域面積を算出すると、40~90 m^2 となる。これは、日原・鈴木(1988)が示した水路のみの飽和域面積と整合する。同様に 11 日朝の飽和域面積を求めると約 240 m^2 となり、第 3 図の地下水位の上昇からもわかるように、水路が上流へ伸長し飽和域が拡大していることを示す。

V. ま と め

ハンドヘルド・コンピュータ HC40 を用いた、バッテリーを電源とする水文測定記録装置と、その測定結果によって採水のスタートが可能な自動採水器を製作した。本装置の稼働結果は良好であるが、急激な増水に対処し得るようなセンサー類の設置と、過大な入力電圧にも対応できるようにリミッターを取り付けるなどの処置が必要である。さらには、湿度の変化による結露や、低温によるバッテリー電圧の低下など今後に残された課題もある。しかしながら、初期の目的をある程度達成するような装置を試作することができた。

本装置による観測例を報告したが、その連続記録結果と、採取された試水の分析結果から次のことが明らかとなった。

- ① 水路にもたらされたわずかの降雨に対しても、流量や河川水温、河川水の電導度はきわめてすばやく応答する。
- ② 谷頭平底における飽和域が拡大し、水路と連結すると「ふたつめのピーク」が形成される。
- ③ 観測当日の河川水の電導度と河川水中の Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- 濃度とは、きわめて高い相関を示す。
- ④ 電導度と最も相関の高い Mg^{2+} 濃度を用いて流出成分の分離を行なった結果、河川流量変化の各

ステージにおける「あたらしい水」と「ふるい水」の役割が示唆され、「ひとつめのピーク」は飽和地表流や浅い地中流によって形成され、「ふたつめのピーク」は降雨以前から地中に存在する地中水が降雨の地下浸透によって押し出されて形成され则认为される。

⑤ 「あたらしい水」の流出高と降水量から水路の飽和域面積を算出すると、降雨に伴って飽和域が拡大していることがわかる。

今後は、商用電源の得られない実験流域において、水文量の自動測定・記録と洪水時の河川水の採取が効率よく行えるように、本装置にさらに改良を加える必要がある。

謝 辞

本装置の試作にあたっては、京都大学防災研究所の横山康二氏に多大のお世話をいただきました。また、一部の観測には野尻昌利氏(当時都立大学生)の手を煩わしました。ここに記して感謝の意を表します。

(1990年12月14日受理)

なおこの研究には、とうきゅう環境浄化財団研究助成金(研究代表者:鈴木啓助)と文部省科学研究費補助金・奨励研究(A)(課題番号:01780289)の一部を使用しました。本稿の骨子は1989年東北地理学会秋季大会で発表しました。

文 献

- 日原高志・鈴木啓助(1988):丘陵地源流域における降雨による流量のふたつのピークについて.地理学評論, 61(Ser. A), 804~815.
- 蒲谷 肇・真下育久(1984):ハンドヘルドコンピュータを利用した量水ダムの水位計測と養分流出量測定のための自動採水.日本林学会論文集, 95, 261~262.
- 中川清隆(1986):ハンドヘルドコンピュータによるデジタル気象データ野外収録システムの開発.地理, 31, 56~69.
- 奥田節夫・横山康二・西 勝也・熊谷道夫(1986):湖底堆積物の再移動に関する研究—その1.観測の手法と観測例.京都大学防災研究所年報, 第29号B-1, 341~353.
- 鈴木啓助・小林大二(1987):森林小流域における融雪流出の形成機構.地理学評論, 60(Ser. A), 707~724.

Chemical Changes of Stream Water During a Storm Event in a Small Watershed

Keisuke SUZUKI*

A hydrological observation system is developed using a handheld-computer HC-40 and a storage battery. Handheld-computer has a 128 KB RAM disk in which measured data can be stored. The system has a water sampler and samples of stream water are automatically collected. Start time of the water sampler can be set by the measured data; i.e. intensity of precipitation or water level.

An example of the observation is also presented. The results of the observation are summarized as follows;

1. Stream discharge, water temperature and conductivity of stream water quickly respond to precipitation.
2. The second peak discharge is observed when the saturated area expand at the head floor and connect with the head of channelway.
3. The hydrograph is separated into "old water" and "new water" by combining a water-

mass balance with Mg^{2+} mass balance relations. The first peak discharge is considered to be composed of saturated overland flow and subsurface flow generated around the channelway. The source of second peak discharge is suggested to be groundwater accumulated at the head floor.

* Department of Geography, Tokyo Metropolitan University