

表面流出水の水質変化とその特性について

佐藤 悟

(昭和61年10月31日受理)

Experimental Study on Water Quality of Surface Flow and its Characteristics

Satoru SATO

Most of recent literatures has pointed out the importance of surface flow component which plays a very active, responsive and significant role in the generation of storm runoff. So it is likely that the pollutant matters, discharged from this component, have direct qualitative effects upon the water quality of a river.

The water quality of surface flow seems to be influenced by a large number of factors, such as angle of inclination, nature of ground, existence of plants, rainfall intensity and so on. But each factors has very complicated phenomenon both experimentally and theoretically. Thus their accurate effect is not so clear.

This paper, based on a simplified field observation, investigates the fluctuation characteristics of the water quality of surface flow and rainfall, and indicates the relationship between the water quality and the surface discharge per unit width.

1. はじめに

河川のハイドログラフに与える流域内の地質¹⁾や植生²⁾等の影響について、最近になり様々な機会に多数の研究発表が行われ、その定量的な把握法が確立されつつある。この種の研究は、ハイドログラフを表面、中間さらに地下水流出等の各成分にわけ、それぞれの流出特性を仮定した後に合算し、流出モデルを構成するものが大部分であり、比較的良好な適合性を示す。このように河川の付帯施設を管理する上で必要な、量的な変化に関する研究は古いが、水利用の面からみた質的な変化についてはいまだ経験的、実験的なものも多く、その歴史も比較的新しい。

近年、貯水池といった閉鎖性水域での富栄養化、異臭味が問題となっている。これらの原因の1つは、流域内に存在する窒素、リンといった栄養塩が降雨により洗い流され、運びこまれるためであり、そのため河川の水質変化機構についても、十分考慮されるべき問題と思われる。

河川の水質問題にも水文の概念を用い、流域内の汚濁源、地質等の影響を加味した流出モデルの構成が考えられる。しかし現実問題として、水質項目により土壌との物理的、化学的さらには生物学的プロセスが異なることや、流出モデル中の諸式、パラメー

ターとの関連が不明であることから、現時点では水質のモデル化は困難と思われる。

雨水と土壌との接触によって生じる水質変化については、ハイドログラフを分離するために、土中水のトレーサーに硝酸態窒素を利用する可能性を検討したもの³⁾⁴⁾など、主に土壌へ浸透後の挙動についての研究例が多く、表面流となり流下する水の水質について言及したものは少ない。ここでは、従来重要視されることのなかった、河川水質に及ぼす表面流出の寄与の大きさを示すとともに、水質成分の流出モデル化の可能性を検討するために行った、現地実験による表面流出水の水質変化パターンについて、若干の考察を加えた。

2. 表面流出に関する概念

流域内の降雨は、降雨強度と土壌のもつ浸透能により、表面流出と中間、地下流出成分とに分配される。一部は河道面に直接降下するが、量としては無視できる。浸透能より小さな降雨は、一部が蒸発等で失われる他は大部分が浸透し、中間、さらには地下水流出を涵養する。浸透能を越える降雨は地表面を流れ、表面流出となる。またこの配分率は、流域内での不浸透部の存在や植性の相異のために一様とはならない。表面流出が、すべての地表面で均一に

表面流出水の水質変化とその特性について

生じるという仮定を支持する研究も少ない。地下水面が速やかに上昇する、河道近辺のごく限定された領域や、地表面に水みちを形成して生じるとするもの⁵⁾など、その流出形態に関する概念は多種多様である。このように表面流出に関する仮定は多いが、いずれの流出モデルにおいても、決して無視できない要素となる。

表面流出成分のハイドログラフ中の比率を示すために、既存の手法で地下水流出成分とに分離したものが図-1である。図のハイドログラフは、秋田県中央部を流れる雄物川の椿川地点のもので、観測の時間ステップは1時間である。破線の結果は、流量減衰部を片対数にとり、その変曲点から表面流出の終了を仮定するもので、一般に簡易分離法⁶⁾とよぶ。実線はハイドログラフを周波数領域で数理的に分離する数値フィルター⁷⁾を用いたもので、今回の分離にはハイドログラフの自己相関構造より、表面流出成分の分離時間を21時間、減衰係数を4.5と定めた。双方の分離結果には、ある程度の差が認められるが、流出のピーク時には、表面流出成分が全流量の7~8割を占めている。また、この時期は大部分の水質の負荷量ピークと一致するため、河川の水質管理上からも重要である。

斜面上に発生する表面流は、本質的に開水路の流れと同じである。そのため、単純な流出モデルの構成には、流れの抵抗則として等流形式の表現を仮定する場合が多い。この表現も、流れの状態に応じて層流、マニング、シェジャーさらにはダルシー形式の4種に分類される。流出の形態が、表面流出水の水質変化に及ぼす影響と、実際の表面流出に最も適した表現形式について現時点では不明であるが、いずれ言及される問題と思われる。また、これら薄層流的な流れと異質な、水みちの存在についても考慮が必要であろう。

ここでは、表面流出現象に伴う流出形態の変化と、個々に取りあげ論じても非常に複雑な問題を解析するのは困難であると考え、極力単純化された山地斜面での表面流出水の水質分析結果を、現象論的にとりまとめることにした。しかし、このように単純化した場であっても、表面流出現象は多様な変化を示し、統一的な結論を得ることが困難な例も少なくなかった。そのため、今回は実験結果を解釈するためのモデル構成は行わず、結果に重点をおいた考察にとどめた。

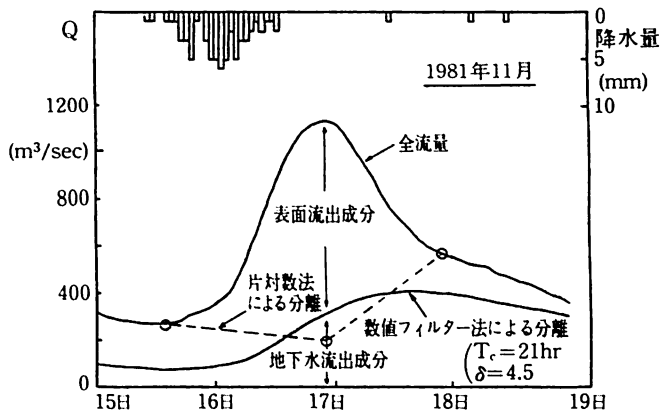


図1 流出成分の分離

3. 実験および分析方法

実験対象地は、仙台市郊外、管生の山林内にある旧碎石場跡地である。現地は様々な傾斜をもつ草地と裸地とが混在しており、土質は赤土に砂、礫が混合したものである。ここに幅2.2 m、流下方向長さ12 m にベニヤ板を打ち込み、内部で生じた表面流出水を採取する装置と、雨水採水装置を設けた。3組の装置は、それぞれ図-2に示した植生と傾斜をもつ斜面に設置した。

分析は一降雨が終了次第行い、すべて0.45 μmのミリポアフィルターで濾過したものを対象とした。そのため、分析項目はすべて溶解性のもので、塩素イオン、過マンガン酸カリウム消費量、pH、電気伝導率、硝酸性窒素、全リン化合物を主とし、その他アンモニア性窒素、リン酸イオン、Ca²⁺ Mg²⁺ Na⁺ K⁺ イオンについて行った。分析方法は、窒素、リン化合物にテクニコンオートアナライザーを用いた他は、上水試験法に準拠した。

また、雨水の詳細な水質変化を検討するために、現在本校で行っている雨水の分析結果も一部加えた。この雨水の採水には、降雨開始から10分間隔の採水を行うフラクションコレクターを用いており、降雨

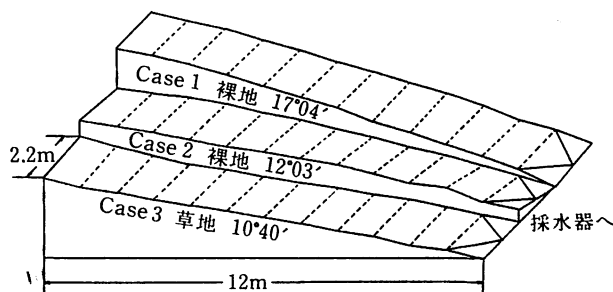


図2 斜面の条件

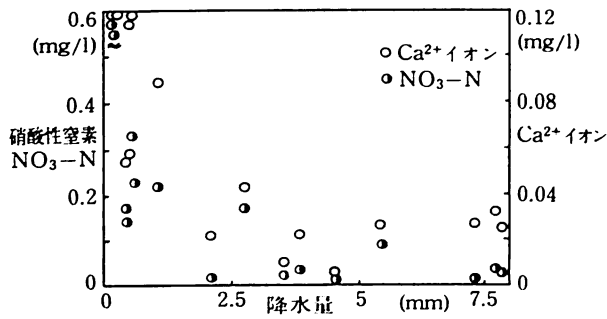


図3 降水量に対する雨水水質変化

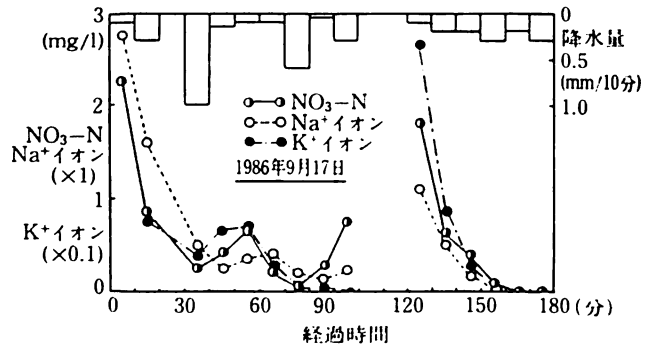


図4 雨水水質の経時変化

強度，時間経過の影響について考察ができる。

4. 結果および考案

4.1 雨水の水質

雨水成分の起源としては海洋起源，あるいは大陸起源のエアロゾルの他，大気中に存在する気体成分があげられる。⁸⁾ 近年の工業の発展は，元来雨水中にごくわずかしかなかった成分の増加をひきおこしているが，特に硫酸塩，硝酸塩といった例に著しい。この中でも特に硝酸塩による負荷の増大は，閉鎖性水域の水質管理上からも憂うべき問題である。

図-3に，全降水量に対するCa²⁺イオンと硝酸性窒素の平均濃度変化を示した。降水量が少ない程，各平均濃度は高くなるが，これは主として雨水による洗い流し効果と思われる。図-4は，10分間の降水量と，Na⁺イオン，K⁺イオンおよび硝酸性窒素濃度の経時変化を示したものであるが，各成分とも降雨初期に極めて濃度が高く，時間の経過とともに次第に濃度が低下する様子が見られる。また，この図では明瞭とならないが，強い降雨強度の場合は相対的に低濃度となる例が多かった。この他，図ではわずかに20分後に再開した初期降雨にも濃度のピークが現れているが，この現象の理解には雨水による洗い出し効果に加え，風向，雨雲の変化等，様々な要因の把握が必要と思われる。

従来からの河川水質に関する研究において，特に水質のモデル化を検討したものの多くは，雨水の水質として蒸留水，もしくはそれと同等の扱いがされるものが大部分であった。雨水は，時として平均的な河川の水質値よりも高い負荷をもたらす他，極めて大きな幅で変化する。そのため，不浸透部の多い流域では雨水そのものの河川水質への影響について，十分な理解が必要と思われる。

4.2 表面流出水の水質

地表面に達した降雨は，一部が蒸発する他は大部分が土壌との接触を行い流下する。土壌表層の浸透性を越えた降雨は，地表面に極く薄い流れを形成する。この際，条件によっては水みちをつくる。降雨初期の蒸発散，土壌への初期浸透により失われる量を除いた降雨を有効降雨というが，この値は地表面の性状により大きく変化する。図-5に，降水量と今回の表面流出量の関係を示したが，各斜面で表面流出の生じる降水量が異なる。この量を図から推定すると，傾斜17°，裸地のCase 1で約3mm，傾斜12°，同じく裸地のCase 2で約2.5mm，さらに傾斜10°，草地のCase 3で約3.5mmとなる。この結果は，比較的汚濁された降雨初期の雨水が，直接表面流出とならないことを示す。しかし，住宅地といった地表面の大部分を，浸透能のないアスファルト等が占める地域では，初期降雨の影響についても十分に配慮されるべきと思われる。

河川の水質は，流量の増減に伴い大きく変化する。⁹⁾ 出水時に，濁度といった浮遊性物質が増加する現象を，すべて表面流出成分に求めるには，河床付近で

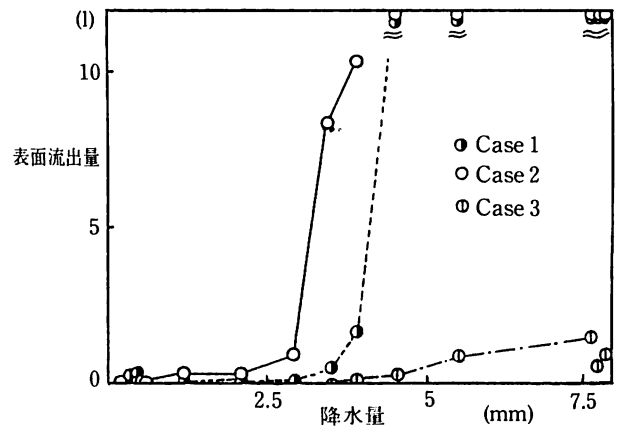


図5 降水量と表面流出量

表面流出水の水質変化とその特性について

の掃流力の増加によるまきあげの影響等を無視するわけにはいかず、不合理である。そのため、表面流出成分の河川水質への寄与を推察するには、溶解性物質が好都合と思われる。雨水と表面流出水の平均水質をそれぞれ対比させ、図-6に示した。図中の破線は、双方共に等濃度となる部分である。表面流出水の硝酸性窒素濃度変化の特徴としては、傾斜のゆるやかな Case 2 が、比較的急峻な Case 1 よりもきわだった低濃度の流出を示すことであった。傾斜の変化が、水質に及ぼす影響については、他の水質項目においても同様な例が多かった。一般に、土壌中には大量の硝酸塩が存在するが、陰イオン物質であるために、降雨によって比較的容易に流出、排除される。しかし、長期にわたる乾燥状態は、土壌中に偏的な水分移動をもたらし、その結果表層に過多の硝酸塩集積することが報告されている¹⁰⁾。傾斜の急峻な Case 2 では、逆に高濃度の流出となったが、傾斜の相異がこのような塩類集積の生じる地表面上での雨水の流下形態に影響を及ぼし、さらには水質変化にも特徴を与えたものと思われる。また、傾斜は速やかに地表面に現れる早い中間流の生成にも寄与しているため、表面流出成分中の土壌浸透水の比率の相異が、水質に反映したことも考えられる。アンモニア性窒素は、大部分の土壌に特異

的に吸着される他、微生物に容易に分解される物質である。Case 2 では、雨水中の大部分の成分が土壌中に吸着され、流下することがわかるが、Case 1 では先の硝酸性窒素と同様な傾向を示した。傾斜のもつ水質変換、輸送効果についての考察には、さらに多くの観測が必要と考えられる。溶解性の過マンガン酸カリウム消費量では、すべての例で雨水の値を越えるものとなった。Case 毎の相違も認められず、値も極めて高濃度である。この値は、水中の分解可能な有機物量の指標であるが、傾斜の影響は特に受けないようである。電気伝導率では、若干Case 2 が低い値を示す他は、これといった傾向は現れない。Ca²⁺イオン、Mg²⁺イオンも土壌と吸脱着を行う物質である。Case 2 において、雨水よりも低い流出が生じ、土壌に吸着されることがわかる。

4.3 単位幅流量との関係

流出系における表面流は、地表面流と河道流の2つに分類されるが、こうした流れにおいては抵抗則が重要となる。河道流については、マンギの抵抗則が成り立つことがよく知られているが、地表面流については様々な問題がある。

Palmer¹¹⁾は、植物被覆斜面上の流れの粗度係数 n 値が、条件によって3つの型に分類されること

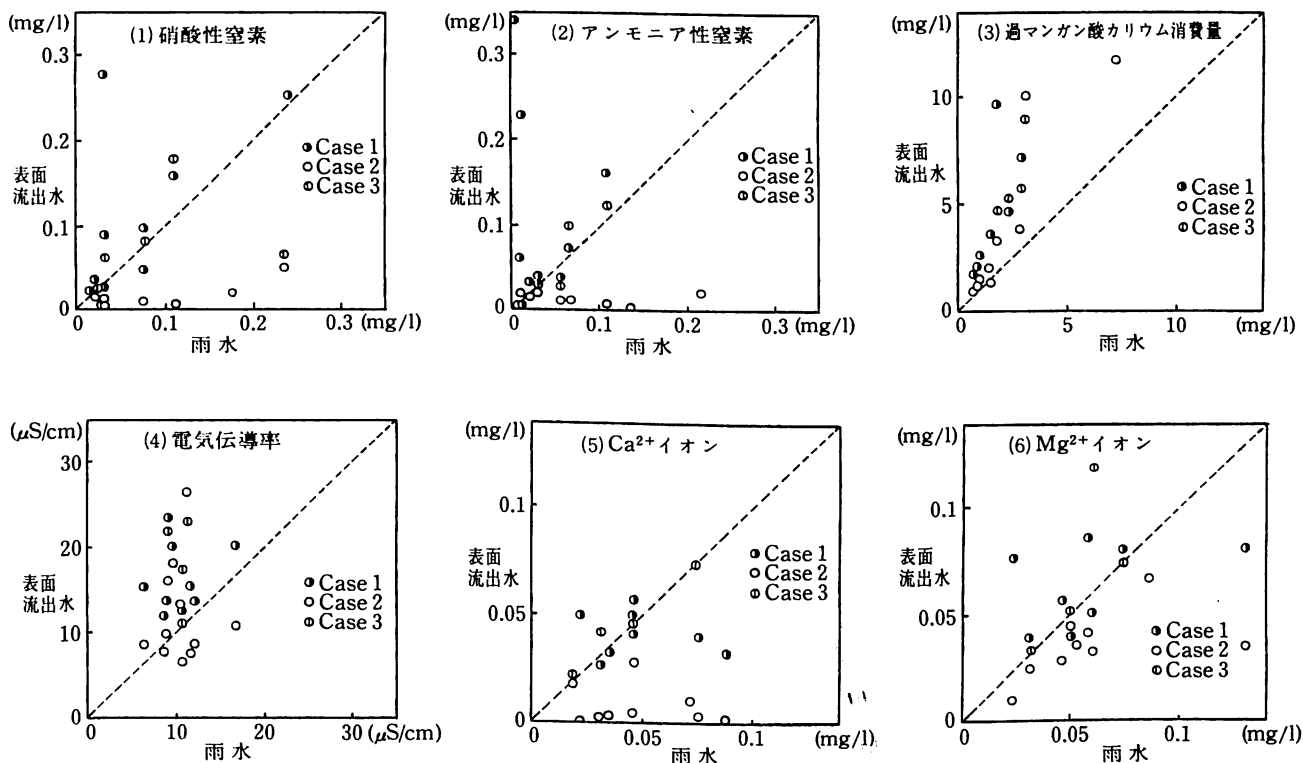


図6 表面流出水の水質変化

を示した。また、高棹¹²⁾らは人工的な斜面にそれぞれグラスウール、砂をしきつめ、傾斜をそれぞれ15°55′、斜面長7.5～4.2 mとし、実験的にn値を決定し、いずれの場合にもマンングの抵抗則が成り立つことを示した。これらの結果より、今回はすべての形態の地表流にマンングの抵抗則が成立するものと仮定し、水質との関係について考察を行った。

表面流出水の水質を決定する要因には様々なものがある。植性、土質、傾斜さらには降雨強度など、個々においての詳細な検討が必要と思われるが、ここでは地表面での単位幅流量との関係について考察を加える。いま抵抗則として等流形式の表現が利用できるものとして、水深hと単位幅流量qとの関係を次のように仮定する。

$$h = k \cdot q^p \quad (1)$$

ここにk、pは定数であって、流れがマンングの抵抗則に従うものとする

抗則に従うものとする

$$k = (n / \sqrt{s})^p \quad (2)$$

ここにn：マンングの粗度係数、s：水路床勾配、 $p=3/5$ が与えられる。¹³⁾ (1)式を利用するために、表面流出水深hを決定する必要が生じる。hについては実測のデータがなく、また現実に測定を試みても現地では非常な困難が伴うことから、今回は概存の資料から推定を行った。h値と深い関係をもつものとして、降水量、降雨強度さらには土壤の浸透能があげられる。ここでは、比較的データ数が多く、かつ土壤特性の相似したCase 1、2について考察を行うため、土壤の浸透能は同一と仮定した。降雨強度については、実測の資料がないことから、降水量とhとが比例するものとし、次式を仮定した。

$$h = C \cdot R \quad (3)$$

ここに、C：定数、R：降水量(mm)

また、粗度係数n値については、石原らの実験結果を参考に $0.02 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{sec}$ と仮定した。

表面流出水の水質変化に関する研究は少ないが、著者らが河川下流で観測した水質値を、数値フィルターを用いて表面流出成分に分離した結果によると、この水質変化を決定する要因として表面流出量を選

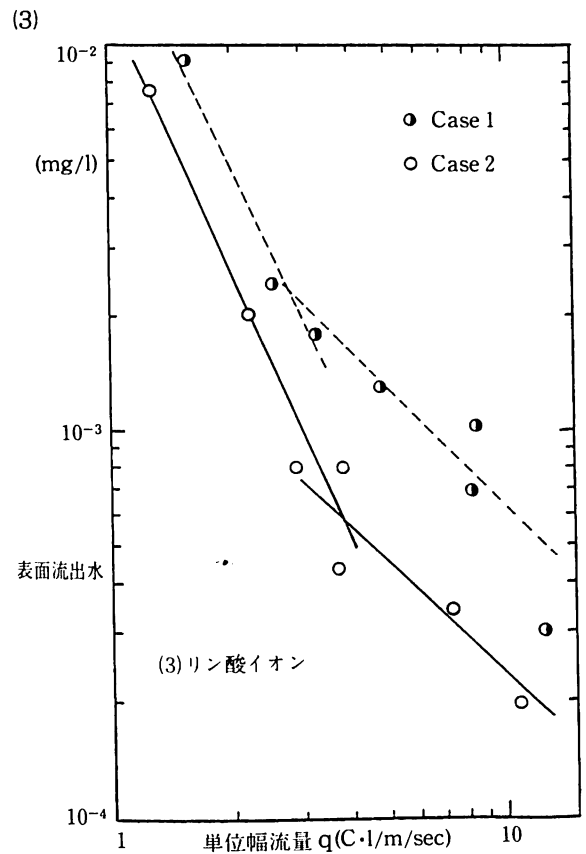
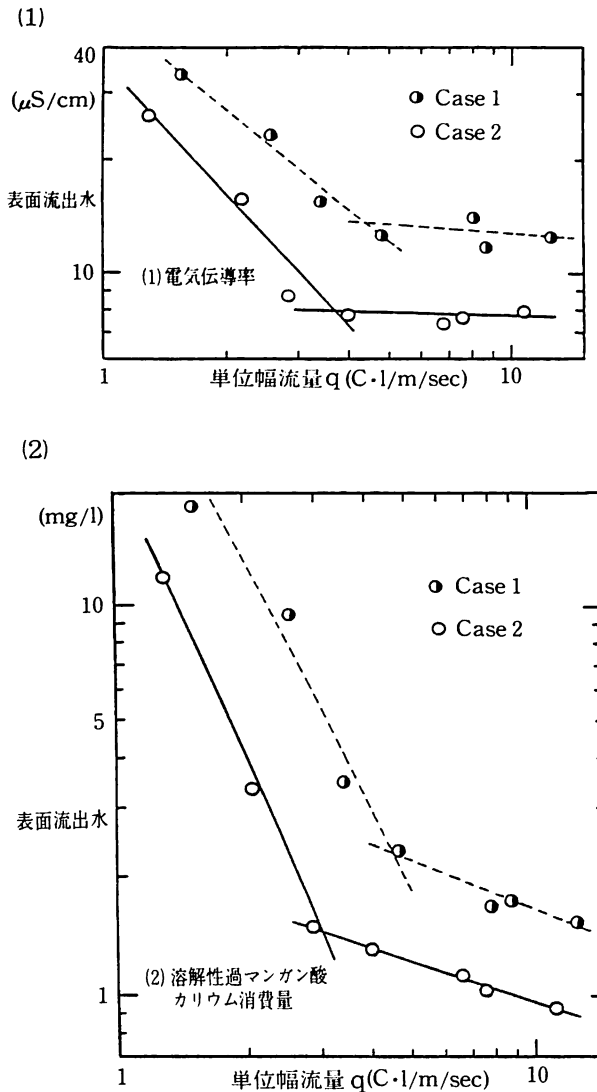


図7 単位幅流量との関係

表面流出水の水質変化とその特性について

択した場合、次の3式が良好な適合性をもつことを示した。¹⁴⁾

$$C_s = A \cdot Q_s^B \quad (4)$$

$$C_s = A + B / Q_s \quad (5)$$

$$C_s = C + A \cdot Q_s^B \quad (6)$$

ここに、 C_s ：表面流出水の水質，

Q_s ：表面流出量，

A, B, C：定数

また、この研究の中で、各式中の定数が水質項目、季節さらには年度によっても異なることを示し、水質の表面流出現象が極めて複雑であることも示唆した。

表面流出量と概念は若干異なるが、(1)式より算出された単位幅流量 q と、表面流出水の水質との関係を図-7に示した。一部の水質では、分析の誤差あるいは単に単位幅流量のみを変数とする仮定の誤りのためか、考察の困難な例もみられた。電気伝導率と過マンガン酸カリウム消費量の図では、双方ともほぼ q が4~5 ($C \cdot \ell / m / sec$)を境に、変曲点をもつ様子がわかる。これは、比較的 q の小さな領域では地表面の洗い出し効果が水質を決定するが、 q の増加に伴い、ある時点からは雨水そのものの希釈効果が卓越することを示すものと思われる。リン酸イオンについても、ばらつきが大きいものの、同様な傾向の直線となった。また、傾斜の異なるCase1と2とでは、初期損失雨量の相違、あるいは同じ値の粗度係数を仮定した誤りのためか、変化パターンこそ相似したが若干傾向の異なるものとなった。以上、このように両対数上で直線をなす両者の関係は、とりまなおさず先の(4)~(6)式の仮定を一部支持するものである。しかし、表面流出水の水質を左右する要因には、その他にも流路長、土質等多種多様であり、単に単位幅流量だけの考察では十分とは思われない。これらについては、今後の課題とするつもりである。

5. まとめ

今回は、現地での実測データを基に、表面流出水の水質変化について考察を行った。また、雨水そのものの水質について若干の検討を行い、二、三の知見を得た。以上の結果を要約すると次の様になる。

(1) 表面流出成分は、河川の規模、流域の特性等により異なるが、流量ピーク時に非常に大きな比率を占める。そのため、河川の水質問題を検討する際は、表面流出成分そのものの水質につ

いても十分考慮されるべきと思われる。

- (2) 雨水の水質は、降雨強度といった条件により大きく変化する。また、降雨の初期と後期においても性格は異なり、水素の経時変化も認められる。
- (3) 雨水の水質は、項目により河川の平均濃度を越える場合があるため、特に不浸透部の多い流域では、河川の水質管理上からも無視できないものと思われる。
- (4) 表面流出水の水質は、傾斜、植生により大きく変化する。雨水そのものの水質と比較しても、水質を変換する程度は地表の条件により異なり、特に今回は傾斜の効果が著しかった。
- (5) 表面流出水の水質変化を、地表面上の単位幅流量で説明すると、一部の水質において両者は両対数上で変曲点をもつ直線関係となる。このことは、河川下流で得られた水質を数値フィルターで分離し、表面流出成分の水質変化を表面流出量で推定した結果と一部合致する。
- (6) 表面流出水の水質変化には、他にも多くの要因が関係すると思われ、この検討については今後の課題とするつもりである。

本実験を行うにあたり終始適切な御指導をいただいた東北大学工学部佐藤敦久教授に深甚なる謝意を表わすとともに、多大な御協力をお願いした東北大学工学部土木工学科水道研究室の技官ならびに学生の皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) たとえば、高橋裕・安藤義久・有賀茂：山地河川流域の直接流出特性とそれに対する土地条件の効果，第26回水理講演会論文集，pp.197~203，1982年2月
- 2) たとえば、日野幹雄・藤田光一・出雲秀治：表層土壌中の水分移動特性とその特性に及ぼす植生の効果，第27回水理講演会論文集，pp.415~418，1983年2月
- 3) 海老瀬潜一・村岡浩爾・大坪国順：降雨流出成分の水質による分離，第26回水理講演会論文集，pp. 279~284，1982年2月
- 4) 竹内邦良・坂本康・本郷善彦： NO_3^- を用いた流出成分分離と他の方法による分離結果の比較，第28回水理講演会論文集，pp.557~565，1984年2月
- 5) Michael G. Sklash and Robert N.

- Farvolden : The Role of Groundwater in Storm Runoff, Journal of Hydrology, Vol. 43, pp. 45~65, 1979
- 6) 土木学会編：水理公式集 pp.115, 1971年
 - 7) 日野幹雄・長谷部正彦：流量時系列のみによる流出解析について，土木学会論文報告集，第300号，pp. 43~56, 1980年8月
 - 8) 角皆静男：雨水の分析，講談社
 - 9) 羽田守夫：雄物川の水質の変動特性とそのモデル化，土木学会論文報告集，第265号，pp.73~81, 1977年9月
 - 10) 飯塚文男・佐久間敏雄・岡島秀夫：減率乾燥過程における水の移動と硝酸イオンの移動・集積，日本土壤肥料学雑誌，第54巻，第1号，pp. 1~8, 1982年
 - 11) Palmer, V.J. : Retardance Coefficient for Low Flow in Channels Lined with Vegetation, Trans. AGU, 1946
 - 12) 高棹琢馬・岸本貞夫：雨水流出の実験的研究，京大防災研究所年報，第4号，1961年
 - 13) 吉野文雄：現地実験による表面流出の研究，土木学会論文報告集，第330号，pp. 59~68, 1983年2月
 - 14) 佐藤悟・羽田守夫・松本順一郎・佐藤敦久：数値フィルターによる河川水質の成分分離とその特性について，土木学会論文報告集，第369号，pp. 271~280. 1986年5月