

森林域からの溶存物質の降雨流出特性について

佐藤 悟

Study on Run-off Characteristics of Dissolved Matters from Small Forest Basin

Satoru SATO

(昭和 63 年 10 月 31 日受理)

Runoff characteristics of dissolved matters, from forest watershed, is very complicated question. This is due to the fact that the water quality is influenced with many factors, such as discharge, season, distribution of plants, the nature of the soil, topography and so on.

The Yunosato basin is situated in the north of Akita city, with an area of 4.5 km², almost all of which is with trees. This basin has so simplified condition that it is suitable for investigate the characteristics of water quality and the separation of runoff component. (Surface and ground-water flow)

As the result of the investigation of 1987, it is known that NO₃-N concentration increases as the discharge decrease, and that E.C., SiO₂, Na, Mg are inverse proportion to the discharge. And in this paper, the dissolution laws in the runoff system are investigated by means of the hydrologic inverse method.

1. はじめに

降雨による流出は、河川流量の変化と共に水質の変化をもたらす。この水質変化は降雨流出成分(表面、中間、地下水流出)発現場の情報を含むものであり、逆にこの降雨時の水質変化を用いて流出成分を分離する試みもなされている。¹⁾²⁾この種の研究では、トレーサーとして水温、同位体元素、電気伝導率、硝酸性窒素(NO₃-N)を用いるものが多く、これらトレーサーと数値フィルターとを併用する手法⁴⁾も提案されている。

森林域は集水域の中で最も面積が大きく、その流出負荷量は河川全体の大きな比率を占めるものと思われるが、立地する地形、地質、植性さらには水文や気象により物質の流出特性も異なるため、一般的な定量化はむずかしい⁴⁾。降雨終了後にみられる水質固有の流出パターンの相違は、ハイドログラフ通減時に大きな比重を占める中間流出成分、つまり土壌より浸出する物質濃度に原因がある。土壌中に均一に存在するもの、あるいは地表に偏在するものなど、物質固有の特徴的な存在形態も一つの原因となる。

このような森林域から流出する物質の流出特性を検討する目的で、太平山系湯の里川に森林試験流域を設定し、1987年9月から約2カ月間、降雨に伴う河川水質変化の観測を行なった。ここでは試験地の概要およびこれまでに得られた2,3の分析結果とその特徴、さらに採水の自動化の目的で試作された自動採水器と河川水位計の概要について報告する。

2. 調査流域の概要と分析方法

2・1 湯の里川流域

調査流域を図-1に示した。ここは太平山北西斜面に位置する湯の里川流域であり、採水点までの集水面積はおよそ4.5 km²である。標高は約100 mから450 mであり、植性はスギを主体とし若干の広葉樹が混在している。現在、上流の一部で伐採が行なわれている他に人家などは存在せず、自然汚濁負荷を観測するには好適な流域と思われる。湯の里川の平均的な流量は平水時でおよそ100 l/sec程度であり、水質的にも極めて清浄な河川である。流域内の土壌は黒ボクを主体とした柔軟性に富んだものであり、

森林域からの溶存物質の降雨流出特性について

典型的な森林内土壌の性格をもつ。

2・2 調査方法

降雨およびその後の河川水質変化を観測するため、降雨を感じ作動する自動採水器を現場に設置した。採水は降雨開始より1時間毎に行なわれ、装置の内部に格納された24本の1ℓポリビンに分注され、後日回収される。同時に降雨の生じた時刻を記録する。河川水位の測定には、常時15分毎の水位をメモリーに蓄える水位計を作製し、同装置内に設置した。回収されたメモリーは研究室内のパソコンに接続され、水位を読みとる。さらに水位流量曲線により流量を算出し、ハイドログラフを作製する。

2・3 分析方法

分析項目は中間流出成分のトレーサーとなりうる項目で、硝酸性窒素 (NO₃-N)、ケイ酸 (SiO₂)、電気伝導率 (E.C.)、ナトリウム (Na)、カルシウム (Ca)、マグネシウム (Mg)、カリウム (K) イオンを選んだ。分析方法は、NO₃-Nに感度の点から亜鉛還元法を用いた他はすべて上水試験方法に準拠した。試料は、採水後実験室において1μmのフィルターにより濾過され、その後速やかに分析に供した。

3. 自動観測装置の作製について

降雨出水時の河川水質変化は、流域の規模にもよるが極めて早くすすむ。そのため、データ解析に耐える結果を得るには少なくとも30分から1時間間隔での採水が望まれ、必然的に多大な努力を必要とする。さらに、対象とする流域もその性格から人の容易に入り込めない地点を選ぶことになり、移動のための困難もつきまとう。また、解析上欠くことのできない流量も測定は煩雑であり、採水と同様、器械による自動化が望まれる項目である。

以上をふまえ、今回は河川水の自動採水器と流量を推定するための水位計を作製した。以下にその詳



図1 湯の里川流域

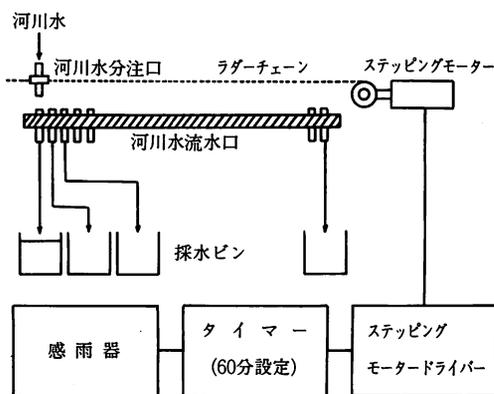


図2 自動採水器の概要

細について説明する。

3・1 自動採水器

一定時間間隔で河川水をポリビンに分注するため、本装置は図-2に示す基本構造をもつ。24本のポリビンは、それぞれビニル管によりおよそ2.5cm間隔で配列された河川水流入口に接続されている。河川水分注口は、ラダーチェーンとウォームギアを介し、ステッピングモーターに直結している。このステッピングモーターは、回転角1.8°の精度で動作を制御でき、本装置の構成では設定によりかなり厳密な分注口の移動量を規定できる。(約±0.01mm) 感雨器は、プラスチック板上にくし型に電極を配置したもので、雨滴による抵抗変化をつたえ、自動採水器を作動させる。タイマー回路は、64Hzのクロックモ

表1 設定時間の組み合わせ

ピン出力 秒数	設定時間(分)の組み合わせ				
	15	30	60	120	240
8	○				
16		○			
32			○		
64				○	
128					○
256	○				
512	○	○			
1024	○	○	○		
2048		○	○	○	
4098			○	○	○
8192				○	○
16384					○

ジュールを2個の集積回路(4040)で分周し、必要とする時間間隔の2倍の秒数となる任意の出力を、4本のゲートをもつAND回路(4012)に入力し、ステッピングモーター駆動回路への出力とする。表-1は、この手法により設定できる時間間隔の例であり、ピンの選択で広範囲にモーター駆動間隔を設定できる。ステッピングモーター駆動回路は、市販のパルスジェネレーターとドライバーを流用しており、1から9999ステップ(1/200回転から50回転)の制御を行なう。河川水分注口の移動する末端にはマイクロスイッチがおかれ、24本目の採水が終了した際の電源カットと、その時刻をきざむ時計のスイッチが入れられる。電源は12V28Ahの自動車用バッテリーであり、満充電でおよそ2週間の連続放置が可能である。装置全体は周囲に打ち込んだクイにより固定され、さらにベニヤ板によっておおわれている。構造には軽量アングルを使用し、縦40cm、横80cm、高さ60cmの形状である。

3・2 水位計

河川の流量測定法には様々のものがある。一般には、予め水位と流量との関係を検定し、以後は水位より流量を推定する。この両者の関係を示すものを水位流量曲線という。湯の里川で実施した検定結果を図-3に示す。適用範囲は60ℓ/secから500ℓ/secである。流速の測定には、水理実験用の小型プロペラ流速計を用い、実測の流水断面積から流量を算出した。

水位を数値として記録するために、図-4に示す構造の水位計と付属回路を作製した。ロータリーエンコーダーとは、先のステッピングモーターと逆の動きをするもので、回転角をパルス数に変換する動作を行なう。高さ1mの水位筒はコンクリートとクイによって河床に固定されている。下部には水の出

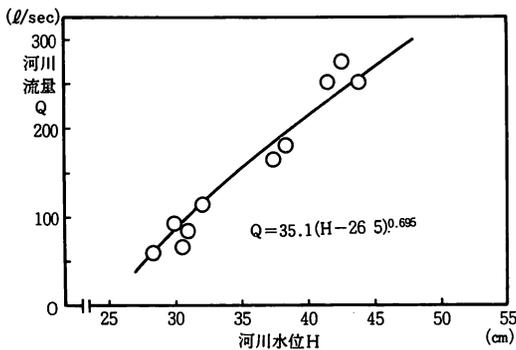


図3 水位流量曲線

入のための小穴があげられ、上部のロータリーエンコーダーには径30mmのプリーが接続されている。フロートの上下は、ロータリーエンコーダーを介しパルス数に変換される。この分解能は1.8°であり、プリーの径より約0.47mm精度でのフロートの上下を記録できる。パルスの出力は、自動採水器のタイマー回路を利用し、15分間隔の記録を行なう。パルス数は不揮発性の2個のスタティックラム(16Kbit×2)に蓄えられ、適時現場よりとりはずし、研究室内のパソコン(PC-9801)の外部スロットに接続された48bitパラレルインターフェースを介し、プログラム中に読み込まれる。スタティックラムは、乾電池により常時バックアップされ、不意にデータが消去することはない。書き込み可能なデータ数は約2000個程度であり、今回の15分間隔のサンプリングを行なった場合、連続約3週間の水位データを自動観測できる。回路本体は防湿の目的からプラスチック容器に密封され、河川中に立てられたロータリーエンコーダーと同軸ケーブルを用いて接続される。使用にあたっては、予め研究室で内容を消去したスタティックラムを現場で接続し、その時の水位を記録する。同時に回路のリセットを行ない、計測を開始するが、以後のメモリーの内容はリセットを行なった際の水位を基準としたパルス数となる。1パルス0.47mmとして以後の15分間隔の水位変化が推定される。同時に水位流量曲線より流量が算出され、ハイドログラフが完成する。

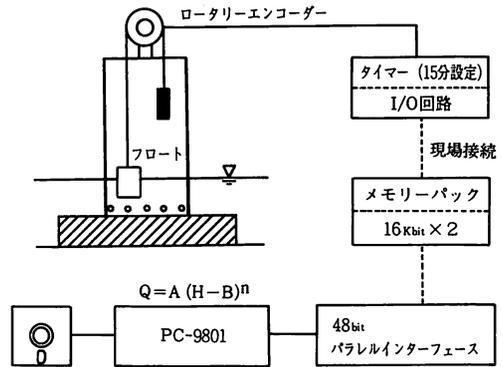


図4 水位計の概要

森林域からの溶存物質の降雨流出特性について

4. 結果および考察

4・1 水質変化のパターンについて

図-5, 6に, 1987年11月16日午後4時からの河川水質の経時変化を示した。採水間隔は1時間であり, 翌日の同時刻まで継続された。表-2は分析結果である。流量は17日の深夜に約360 l/secのピークをむかえ, 以後徐々に減じた。図より, NO₃-Nは流量の増加に対し希釈といった変化もみられず, 一定値を保ったままピーク流量をむかえ, その後は以前よりもむしろ高濃度を維持した。同じ出水に対し電気伝導率, ケイ酸, ナトリウム, マグネシウムなどは別種の流出パターンとなる。これらは流量変化と逆の相関をもち, 典型的な河川水の増加に伴う希釈作用を反映する。カリウムについては, ややNO₃-Nと似た変化となるが, 流量ピーク後の高濃度の流出は認められない。カルシウムについては, どちらのグループにも属さない特異なものであった。

河川水は, 様々な経路を経た水の集合体であり, そのため下流で観測される水質濃度は流出にいたるまでの特徴をあわせもったものである。水質により流出パターンが異なる現象はそのためであり, 河

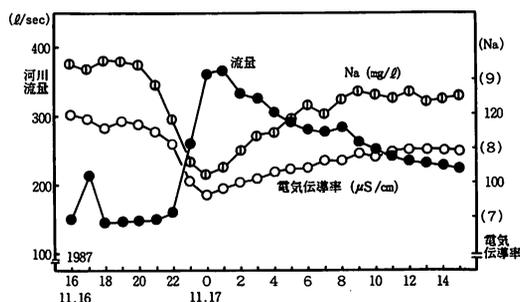


図5 河川水質の経時変化

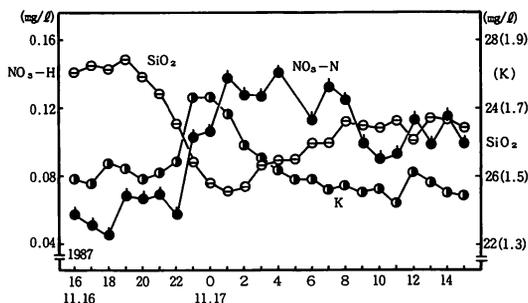


図6 河川水質の経時変化

表2 1987年11月16日出水時の河川水質変化

採水日時	流量	NO ₃ -N	SiO ₂	電気伝導率	Na	K	Mg	Ca
日 時	l/sec	mg/l	mg/l	μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
16 16	143	0.057	26.0	120	9.25	1.49	3.26	9.27
17	213	0.051	26.5	119	9.20	1.48	3.32	8.28
18	138	0.045	26.3	116	9.30	1.54	3.27	8.93
19	140	0.078	26.8	118	9.31	1.52	3.27	9.73
20	142	0.067	25.8	117	9.24	1.49	3.32	10.5
21	146	0.069	24.7	115	8.95	1.51	3.25	10.6
22	163	0.057	23.1	111	8.44	1.54	3.16	10.8
23	260	0.103	20.8	100	7.94	1.73	2.68	9.43
17 0	358	0.106	19.6	96	7.64	1.73	2.60	9.41
1	361	0.137	19.1	98	7.75	1.68	2.62	8.52
2	334	0.127	19.4	100	7.99	1.59	2.66	8.00
3	324	0.126	20.6	101	8.21	1.55	2.69	7.51
4	306	0.140	20.9	103	8.26	1.52	2.74	7.41
5	290	0.165	21.0	103	8.38	1.49	2.70	7.31
6	278	0.113	21.9	104	8.65	1.49	2.77	7.33
7	275	0.132	21.9	106	8.54	1.46	2.81	8.14
8	277	0.124	23.2	106	8.73	1.47	2.75	9.29
9	263	0.099	22.9	108	8.85	1.45	2.88	9.07
10	252	0.086	22.8	107	8.80	1.46	2.84	9.41
11	243	0.093	23.3	108	8.75	1.42	2.87	9.38
12	237	0.112	22.1	109	8.86	1.51	2.85	9.04
13	232	0.099	23.4	109	8.71	1.48	2.89	8.38
14	227	0.115	23.5	109	8.73	1.45	2.87	7.79
15	224	0.098	22.8	109	8.78	1.44	2.93	8.82

川を構成する水の起源や、その経路を推定する際、水質は大きな手がかりを与える可能性をもつ。

NO₃-Nは窒素化合物の中で最も安定な最終分解生成物質である。流域内に滞積した落葉や生物の遺体などは微生物により分解され、有機態窒素(Org-N)、アンモニア性窒素(NH₄-N)、亜硝酸性窒素(NO₂-N)をへてNO₃-Nとなる。またNO₃-Nは陰イオン物質であるため土壌への吸着も少なく、降雨により容易に洗い出され河川水とともに流下する。これらの特徴は、NO₃-Nが土中を経由した水、いわゆる中間流出成分のトレーサーとして利用できることを示す。また、NO₃-Nの生成には微生物が関与しており、季節による流域内の生物活性の指標ともなりうる。一般に、有機物の分解は温度が10°C上昇すればその分解速度が2倍になることが知られている。窒素についていえば、有機態窒素からアンモニア性窒素への無機化であり、ひき続いて硝化作用によりNO₃-Nへと変化する。現在、他の季節との比較はできないが、いずれNO₃-Nの情報のもつ意味について検討を行なう予定である。

図一7、8は、同様に11月12日の午後3時からの水質変化である。流量は夕方頃に約250 l/secまで増加し、その後急速に減少した。NO₃-Nは先ほどより顕著ではないが、流量ピーク後の濃度増加は明らかである。他の項目もほぼ同様な傾向を示した。

4・2 成分分離AR法(逆探法)による水質の溶出則の検討について

観測された流量時系列を、数値フィルターにより地下水、中間および表面流出成分に分離することが可能である。この手法の詳細については文献¹⁾を参照願いたい。この手法をすすめて、流域内に降ったであろう降雨時系列を逆に推定し、さらには洪水予測を行なうものが成分分離AR法²⁾であり、日野、長谷部によって提案された。その手順の概略を以下に示す。

- (1) ハイドログラフの片対数プロットより、成分分離のための諸定数を決定する。
- (2) ハイドログラフを片側作用の数値フィルターにより表面、中間および地下水流出成分に分離する。
- (3) 各成分のAR係数(自己回帰係数)をYule-Walker法、Burg法により決定する。
- (4) AR過程をMA過程に変換し、単位図を作製し、決定された諸定数の妥当性を検討する。
- (5) 得られたAR係数を用い、平滑化最小二乗法により降雨時系列を逆推定する。

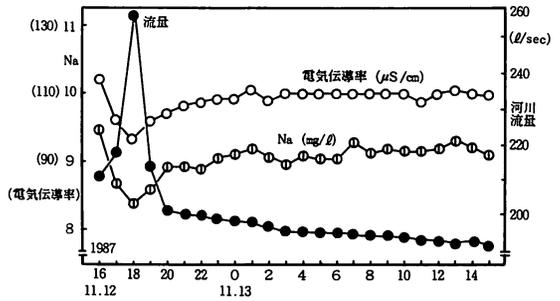


図7 河川水質の経時変化

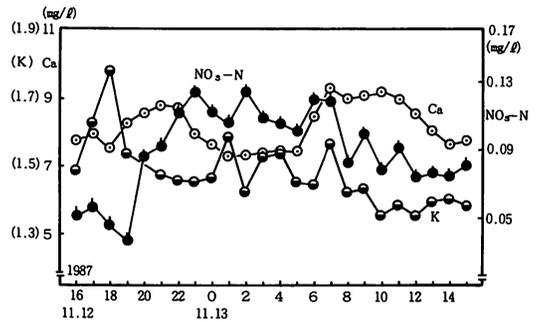


図8 河川水質の経時変化

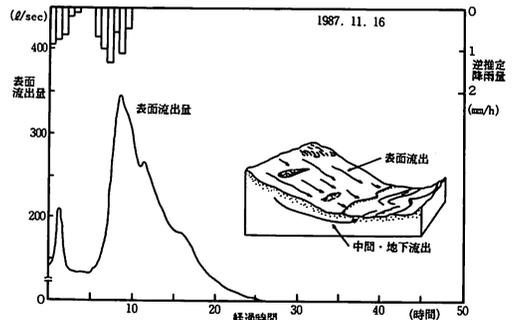


図9 成分分離AR法による推定結果

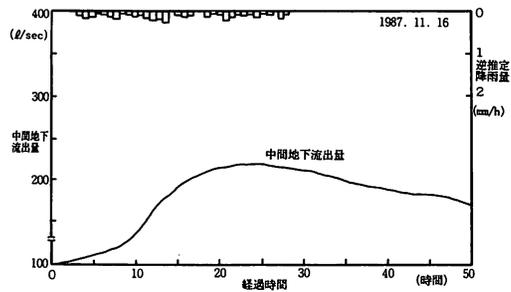


図10 成分分離AR法による推定結果

森林域からの溶存物質の降雨流出特性について

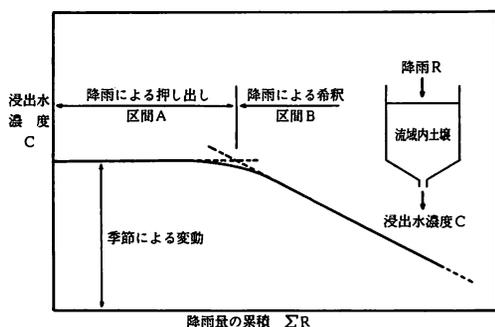


図11 水質変化の模式図

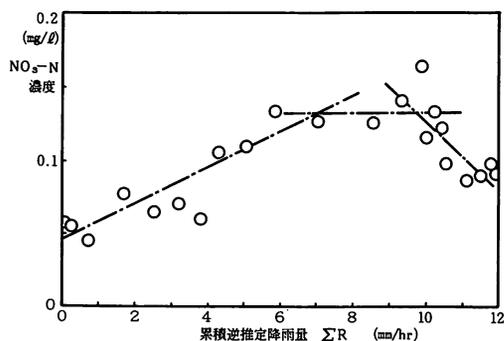


図12 逆推定降雨量と河川水質の関係

(6) 推定された降雨時系列よりヒドログラフを再現し、現実のものと比較する。

(7) 任意の降雨時系列から洪水を再現する。

この手法を用い、11月16日のヒドログラフより、図9、10の分離および降雨時系列の逆推定結果を得た。中間、地下水流出成分が、図-5中のNO₃-N濃度変化と酷似する様子がわかる。

土壌から物質が溶出し、河川水となる機構（溶出則）には温度、土壌の特質、物質の種類、さらには溶媒となる水が大きく係わるものと想像される。流域を一つの大きな容器と考え、溶媒となる水を降雨と仮定できるならば、存在量の限られた物質の流出パターンは、模式的に図-11に示す形になるものと想像される。図では、縦軸に溶出する水質濃度をとり、横軸には中間、地下流出成分への降雨量を累積したものを与えた。区間Aは、土壌中に存在する物質が降雨により押し出され、一定の値を保つ状態であり、この長さは流域の大きさ、土壌の保水能などにより変化する。またこの濃度レベルも、物質が微生物活動によって生産されるものであれば、季節変化に伴い変動する可能性をもつ。つぎにみられる減少区間Bは、物質の存在量の不足に伴い、降雨により希釈される様子が現れたものである。

図-12は、実際の河川のNO₃-N濃度について検討したものである。縦軸に河川水質濃度をとったが、ゆるやかなスロープで上昇した後、ほぼ一定と思われる区間が現れ、後に急速に減少する結果が得られた。はじめのスロープは、図-11の模式図では説明されなかったものであるが、これは実際の河川にみられる流量の変動の影響を無視したためである。土壌から浸出する量が一定であれば、流量ピーク後の水量の減少が、河川で得られる水質濃度をしだいに大きくすることは明確である。

仮定された模式図と、一部ではあれこのように実測を基に計算された結果と合致したことは、とりもなおさず大きな流域から流れ出る河川も、つきつめれば一つの小さなカラムとしてある程度考えることができることを示している。現在のところ、この他に解析可能なデータが不足しており、総括的な考察はできないが、いずれ検討する予定である。

5. おわりに

河川水質の溶出則については未だ不明な点が多い。現地観測と数理的な手法を組みあわせ、抽象的ではあるがその検討の可能性が示唆された。現在、この考えをすすめるため、同流域内のより小さな河川を限定し、データの蓄積を行なっている。

最後に、自動採水器ならびに水位計の作製、および解析に御指導をいただいた東北大学工学部土木工学科佐藤敦久教授、および後藤光亀講師に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 竹内邦良, 坂本康, 本郷善彦, “NO₃-N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
- 2) 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
- 3) 海老瀬潜一, 村岡浩爾, 佐藤達也, “降雨流出解析における水質水文学的アプローチ”, 第28回水理講演会論文集, pp 547 ~ 552, 1984年2月
- 4) 日野幹雄, 長谷部正彦, “地球化学的手法と逆

- 探法を併用した流出系の成分溶出法則の推定について”,土木学会論文報告集,第319号,pp87～96,1982年3月
- 5) 平田健正,村岡浩爾,“山地小流域における溶存物質の降雨流出特性について”,第30回水理講演会論文集,pp43～48,1986年2月
- 6) 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,pp271～280,1986年5月
- 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,pp43～56,1980年8月
- 8) 長谷部正彦,日野幹雄,“流量時系列のみによる降雨時系列,流域の流出特性および流出分離の推定について”,第23回水理講演会論文集,pp193～198,1979年2月
- 9) 日野幹雄,長谷部正彦,“水文学流出解析”,森北出版,1985年