



Title	北海道頓別川中流域の石灰岩地域における河川の流出特性
Author(s)	滝沢, 敦; TAKIZAWA, Atsushi; 中道, 陽文 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 60, 1-12
Issue Date	1997-03-31
DOI	https://doi.org/10.14943/gbhu.60.1
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/14245
Type	departmental bulletin paper
File Information	60_p1-12.pdf



北海道頓別川中流域の石灰岩地域における河川の流出特性

滝沢 敦*

北海道大学理学研究科地球物理学専攻

中道 陽文・浦上 晃一

北海道大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

(1997年1月23日受理)

Geochemical and Hydrological Characteristics of River Discharge in Karst Area in the Middle Reaches of the Tonbetsu River, Hokkaido

Atsushi TAKIZAWA*

Division of Geophysics, Graduate School of Science, Hokkaido University

Youbun NAKAMICHI and Koichi URAKAMI

Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

(Received January 23, 1997)

Geochemical and hydrological measurements were made in July and September 1993 in karst area in the middle reaches of the Tonbetsu river in the northern Hokkaido. Discharge and chemical constituents in river water were also observed in a tributary stream to investigate response of runoff to rainfall. River waters of small tributary streams in the karst area, particularly in droughty periods, are greatly enriched in Ca and HCO_3 compared to main stream waters, which suggests that baseflow of tributary streams are kept by discharge of groundwater dissolved limestone. Hydrograph observed in the tributary stream displays quick runoff in correspond to rainfalls. By separation of runoff components by using mass balance of HCO_3 , it is found that groundwater runoff quickly increases at beginning of rainfall and surface runoff remarkably increases when rainfall continues.

I. ま え が き

石灰岩地域では、石灰岩が炭酸ガスを含んだ水に溶けやすいため、石灰岩が地下水に溶食されて、節理または層理状の割れ目が発達し、地下に洞穴ができたり水路ができたりして特異な水系

*現在、日立製作所、国分工場

*Now at Hitachi, Ltd., Kokubu Works

網が形成される (Palmer, 1991). 地層内に発達した割れ目が通路となり降水が短時間に地下水面まで達するので, 石灰岩地域の井戸の水位や湧泉の湧出量が降雨時に急激な変化を示し (Dreiss, 1989; Shevenell, 1996), 河川が降雨に対して速い流出応答を示すことがある. また, 地下水は石灰岩から溶出した化学成分を多く含むが, 表面流出, 中間流出, 地下水流出など流出過程によって河川に流入する水の化学成分の濃度が異なるので, 降雨にともない河川水の化学成分の濃度や組成が変化する. このような河川の流出特性や降雨にともなう河川水の化学成分の変化を調べるために, 北海道北部の頓別川中流部の石灰岩が分布する地域において, 河川の流量, 河川水の水温や化学成分などを観測した. 観測は1993年7月および9月に行ったが, 7月6日から9日までの4日間には, 石灰岩が分布する地域の広い範囲にわたって流量や化学成分の測定を行って河川水の化学的特性を調べ, 9月21日から30日までの10日間には, 1つの小河川に着目して流量や化学成分の連続観測を行い, 降雨に対する河川の流出特性や化学成分の変化を調べた.

II. 調査流域

観測は, 北海道北部の頓別川の支流にあたる尻別川, 平賀内川および高の沢の3河川において行った (Fig. 1). これらの河川は, 流域面積がそれぞれ, 4.8 km², 13.0 km², 5.3 km²であり, 最上流部が標高約600 mで最下流部が約50 mであり, 東から西に向かってほぼ平行に流下している. 中流域には新第三紀中新世から鮮新世にかけての帆立貝やほっき貝を主成分とする石灰岩が分布する. 石灰岩の露頭や, 砂岩や礫岩をともなった石灰岩の地層が幅1.5~2 kmにわたって

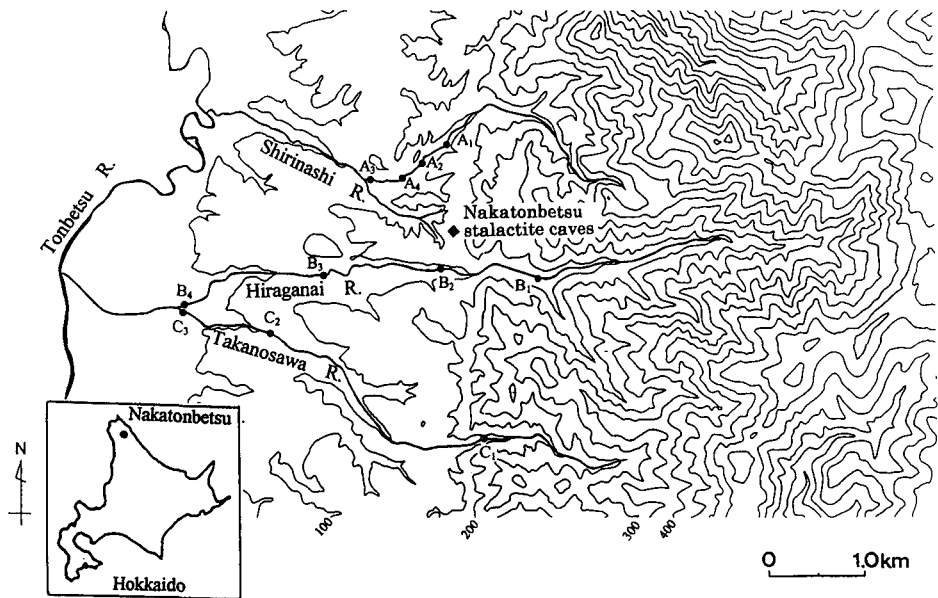


Fig. 1. Study area in the middle reaches of the Tonbetsu river in the northern Hokkaido and measurement sites where discharge and chemical constituents in river water were measured in July 1993.

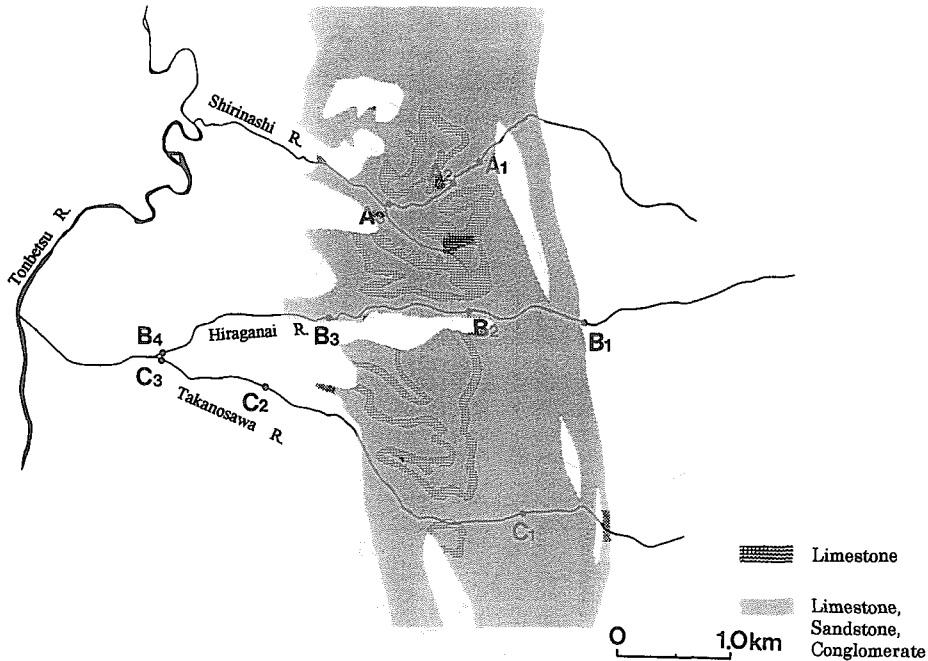


Fig. 2. Horizontal distribution of limestone in the study area.

南北方向に各河川を横断するように帯状に分布している (Fig. 2)。しかし、その上流域はジュラ紀から白亜紀にかけての粘板岩やチャートを主体とする地層が卓越しており、石灰岩はほとんど分布していない(小山内ら, 1963; 松下ら, 1937)。尻無川の小さな支流の最上流部, 山腹斜面の標高約 120 m 付近に中頓別鍾乳洞があり, 付近には小規模の鍾乳洞やドリーネが点在し, 石灰岩地域特有の地形がみられる。鍾乳洞の内部には 2ヶ所に窪みに浅く水がたまった池があるが, これらにつながった水路は存在していない。

III. 河川水の化学的特性

1993年7月6日から9日までの4日間に, 3河川の本流の10地点(Fig. 1), これらの河川に流入する小さな沢沿いの15ヶ所の地点 (Figs. 3, 4) において, 河川の流量, 水温, 電気伝導度, 化学成分の濃度などの測定を行った。測定結果は Table 2 にまとめている。調査地域の南東およそ 3 km の中頓別市街で気象観測が行われているが, 降水量の観測結果によると, 1993年5月の月降水量は 59 mm, 6月の月降水量は 67 mm であり, 降水量がかなり少ない。また, 6月25日から27日までに 23 mm の降雨があった後は7月15日まで降雨がなく, 測定期間中は流域がかなりの渇水状態にあったと推察される。

Table 1 は 3 河川の本流の 10 地点で測定した流量と, 流域面積および比流量を示したものである。Fig. 2 に示すように, 平賀内川の測点 B4, 高の沢の測点 C2 および C3 は石灰岩が分布する地域からやや下流に, 平賀内川の測点 B1 は石灰岩が分布する地域の上端部にある。平賀内川は他の

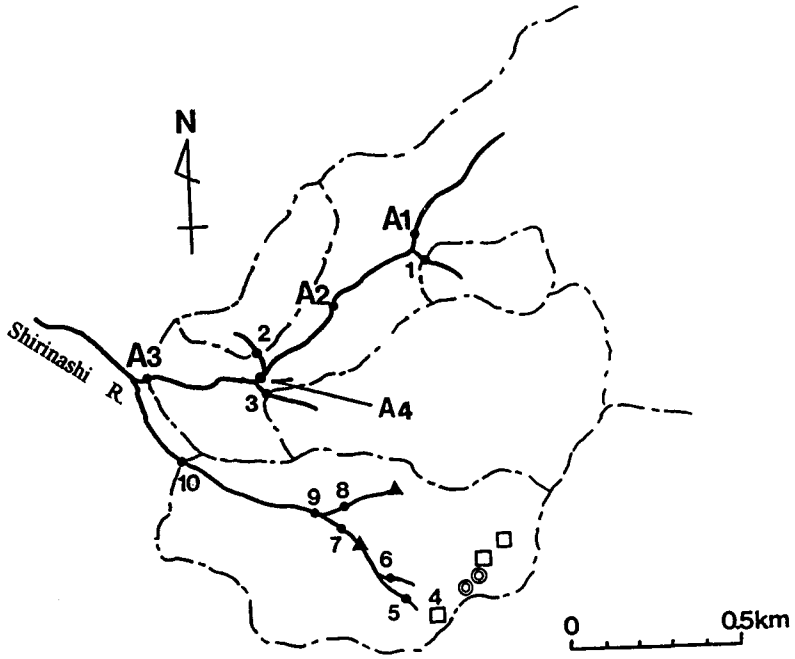


Fig. 3. Measurement sites in tributary streams of the Shirinashi river. At the sites A4 and 3, changes in discharge and chemical constituents of river water were measured in September 1993. Locations of stalactite caves(□) and sinkholes(◎) are also shown in the figure.

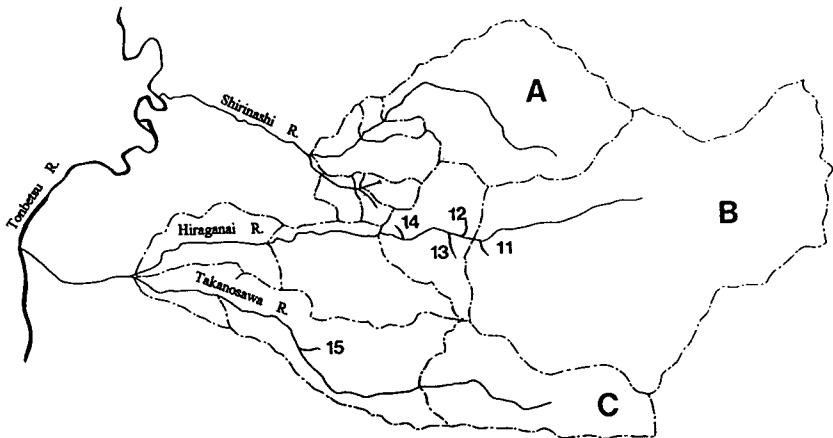


Fig. 4. Measurement sites in tributary streams of the Hiraganai and Takanosawa rivers.

Table 1. River discharge and specific discharge, measured in July 1993.

Site	Discharge (l/s)	Area (km ²)	Specific discharge (l/s · km ²)
(Shirinasi river)			
A1	36.6	3.39	10.80
A2	40.6	3.64	11.15
A3	40.2	4.29	9.37
(Hiraganai river)			
B1	197.4	6.85	28.78
B2	186.5	10.35	18.02
B3	193.6	11.98	16.16
B4	203.7	12.99	15.68
(Takanosawa river)			
C1	27.7	2.20	12.59
C2	34.1	4.59	7.42
C3	35.9	5.21	7.01

Table 2. River discharge, water temperature, conductivity and major constituents in river waters, measured in July 1993.

Site	Discharge (l/s)	Temperature (°C)	Conductivity (μ S/cm)	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	SO ₄ ⁻
A1	36.6	15.0	53.7	5.72	4.51	1.51	5.86	16.27	2.00
A2	40.6	15.3	69.2	7.20	5.90	0.74	7.19	20.99	2.56
A3	40.2	16.4	80.2	7.35	8.95	2.31	7.18	28.19	3.12
B1	197.4	16.3	78.4	5.82	8.83	2.13	5.76	28.15	2.92
B2	186.5	13.1	73.8	5.90	9.35	2.32	5.71	28.96	2.90
B3	193.6	14.3	81.6	6.69	9.75	2.59	5.87	30.76	3.06
B4	203.7	19.0	76.1	5.21	9.57	2.36	4.99	29.59	2.78
C1	27.7	13.3	83.3	6.98	7.99	3.03	5.65	31.27	3.10
C2	34.1	16.6	102.2	7.42	10.20	4.15	6.00	39.52	3.54
C3	35.9	18.6	100.1	7.35	10.07	4.25	6.05	39.21	3.76
1	0.6	13.0	192.0	7.43	35.73	3.29	6.55	91.43	2.44
2	0.6	13.1							
3	3.1	13.9	238.0	8.15	45.96	4.87	6.70	119.88	2.75
4		7.2	160.4	8.78	28.62	2.28	8.17	72.13	2.71
5	1.1	13.0	234.0	6.89	50.30	1.96	6.24	116.99	3.12
6	1.0	9.8	205.0	6.57	41.32	2.57	7.64	98.08	2.92
7	2.9	15.2	217.5	7.43	45.56	2.52	7.19	107.21	3.52
8	1.4	19.2	213.0	7.05	45.99	2.88	6.84	109.81	2.02
9	3.8	19.0	218.5	6.98	45.16	2.73	7.16	106.58	3.03
10	4.6	17.6	201.6	7.09	43.08	3.59	7.03	104.83	3.55
11	1.6	15.2	132.2	6.75	9.77	10.24	6.70	57.54	2.98
12	0.7	14.9	98.0	8.61	8.69	4.22	7.89	35.72	2.78
13	0.3	15.0	112.8	7.14	13.69	4.44	6.97	45.47	3.18
14		14.5		7.46	62.00	1.59	8.32		3.15
15	6.8	13.0	133.1	7.93	16.45	5.29	7.20	55.42	4.14

河川に比べて流域面積が大きく、河川流量が多くなっている。また、測点 B4 では、B1 に比べ、流域面積が 2 倍近くにもなっているが、流量がほとんど増加していない。尻無川や高の沢でも同様の傾向を示し、下流の測点で流量があまり増えていない。渇水期には河川流量は主として地下水流出によって維持されているが、流量観測の結果は地下水の流出量が少ないことを意味し、他の石灰岩地域でも観測されているように、地下水が速く流出し渇水期には流出量が極めて少なくなること示唆している。

化学反応：



が生じ、石灰岩炭酸ガスを含む水に溶けやすいため (Ford and Williams, 1989)、地下水が石灰岩を溶解し地下水中の Ca や CO_3 の濃度が増加する。Table 2 および Fig. 5 にみられるように、石灰岩が分布する地域の沢水は、他の地域の沢水や本流の河川水に比べて、Ca 含有量および HCO_3 含有量が非常に多くなっている。しかし、Na, Cl, SO_4 などの他の成分はほとんど変化していないので、上述の化学反応が生じ、地下水が石灰岩をかなり溶出していると考えられる。また、化学成分の組成比 (Figs. 6, 7) をみると、石灰岩が分布する地域の沢水は陽イオン、陰イオンとも狭い範囲に集中しており、沢水は主に沢に流出した地下水であると判断される。測点 4 は鍾乳洞内の池の溜まり水についての分析結果であるが、濃度と組成比がともに沢水と本流の河川水の中間の値を示している。鍾乳洞は沢から比高およそ 30 m の山腹斜面にあり、池の水は地表から浸透した水が地下水面付近に溜まったものと考えられ、化学成分濃度から、池の水が石灰岩を十分に

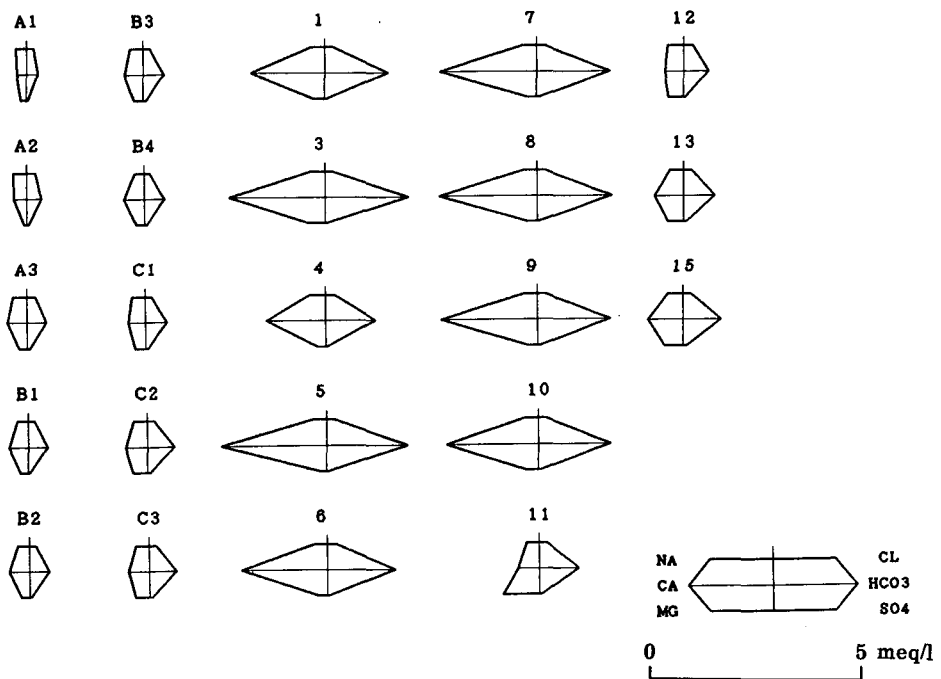


Fig. 5. Hexa-diagram of major ions in river waters, measured in July 1993.

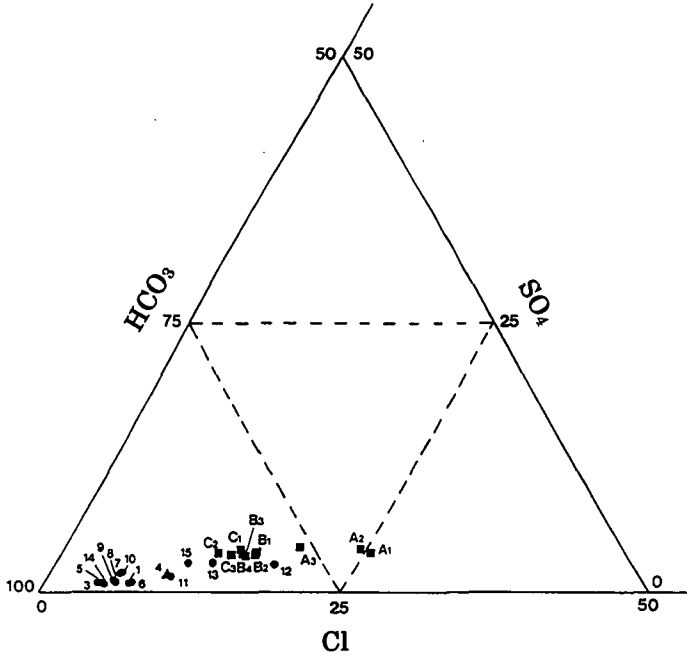


Fig. 6. Tri-linear diagram of major cations in river waters sampled in July 1993.

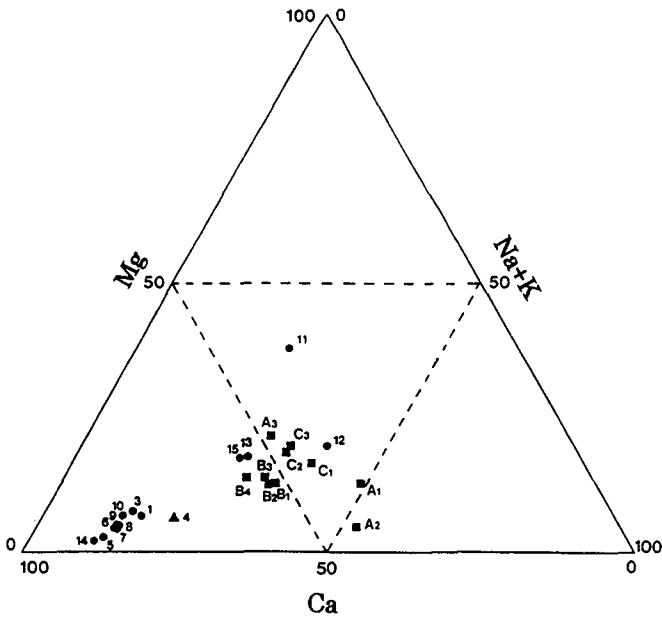


Fig. 7. Tri-linear diagram of major anions in river waters sampled in July 1993.

溶解してなくて、まだ石灰岩と化学的な平衡に達していないと解釈される。

本流の河川は石灰岩が分布する地域を流下すると、高濃度の沢水が流入するので、3河川とも下流に向かうにしたがって河川水の化学成分濃度が増加している。流量とCa含有量を用いてCa

の取支から測点間に流入する水の Ca 含有量を求めてみると、A1~A3 間で 34.3 mg/l, B1~B4 間で 22.5 mg/l とかなり大きな値となるが、石灰岩が分布しない地域では、B3~B4 間で 10.1 mg/l, C2~C3 間で 7.6 mg/l であり、非常に小さな値となった。

IV. 降雨に対する河川の流出特性

測点 3 および A4 において、1993 年 9 月 21 日から 30 日までの 10 日間にわたって、降水量、河川流量、河川水温および河水の化学成分の観測を行った。測点 3 は中頓別鍾乳洞の西側の支流に設けた測点で、尻無川との合流点付近にある。測点 A4 は合流点のやや上流、尻無川本流に設けた測点である。すでに述べたように、中頓別市街で観測された降水量は 5 月が 59 mm, 6 月が 67 mm であり、降水量がかなり少なかった。7 月は降水量がさらに少なく月降水量がわずか 11 mm にすぎない。8 月と 9 月は降水量がやや多く、それぞれ 141 mm, 120 mm であった。9 月では、1 日に 26 mm の降雨があった後は 15 日までほとんど降雨がなく、16 日から 20 日までの 5 日間に 30 mm (日降水量は 4~10 mm) の降雨が観測されているが、観測を開始する前は比較的雨が少なく、流域はかなりの渇水状態にあったものと想像される。

Fig. 8 は、測点 3 において観測された時間降水量、水温および流量の変化を示したものである。降水量は合流点下流の堤防上で観測した。また、河川水位と断続的に測定した流量を用いて、それぞれの測点での水位流量曲線を求め、水位から流量を求めた。図をみると、支流の流量は降雨に対して敏感に応答して増減していることがわかる。特に、9 月 24 日および 30 日に短時間に集

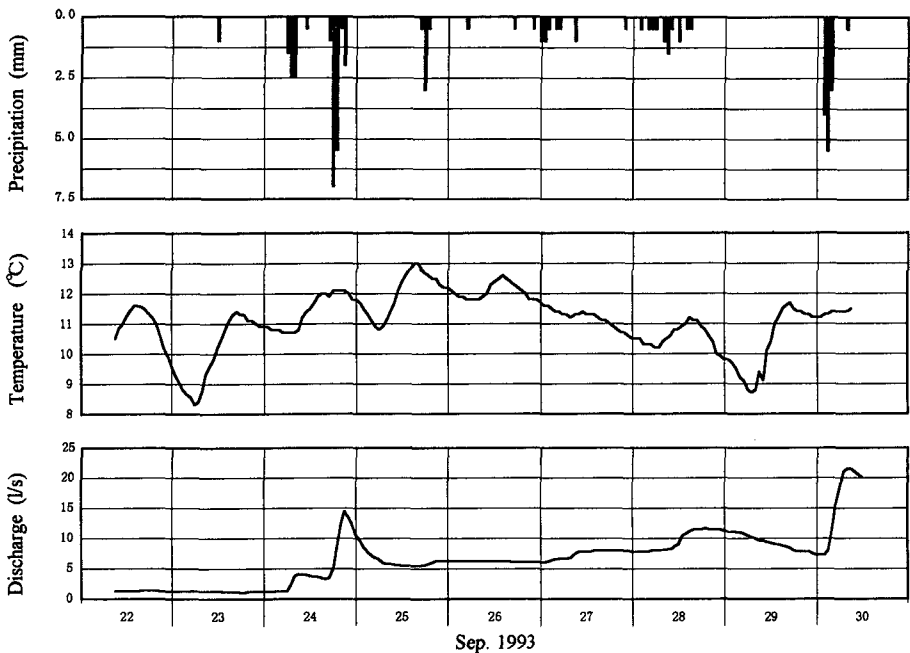


Fig. 8. Precipitation, water temperature, and hydrograph at the site 3, measured during the period from 22 to 30 on September, 1993.

中した強い降雨があったが(時間降水量はそれぞれ最大で7 mm, 5.5 mm), 降雨とともに流量が急増し降雨が終わると急激に減衰している。ピークの位置から、流量は降雨に対して約2時間の遅れが認められる。22日から23日にかけては、ほとんど降雨がなく、流量が非常に少なくほぼ一定の値となっている。流量の最低値は1.2 l/sであり、23日21時に観測されている。このとき、河川水のCa含有量は48.62 mg/lであり、 HCO_3 含有量は129.69 mg/lであった。これららの値は、7月の測定結果と比較すると、それぞれ2.66 mg/l, 9.81 mg/l高く、河川流量のうち地下水流出の占める割合が7月の観測時より多いと判断される。また、25日から28日までの間は、弱い降雨が断続的にあり、流量が比較的高いレベルで維持されている。測点A4で観測された尻無川本流の流量変化をみると、Fig. 9に示されるように、支流と同様に降雨にตอบสนองして流量が増加しているが、支流より流量の変化が遅れ、9月24日の集中的な降雨の際には、降雨に対して流量のピークが約4時間遅れている。また、測点3および測点A4において、最大で3℃程度の河川水温の日変化が観測されているが、これは気温や日射量の変化、夜間の放射冷却の違いによるものである。

Fig. 10に、9月23日から25日にかけて測点3で観測された河川流量、河川水のCa含有量および HCO_3 含有量の変化を示した。Ca含有量、 HCO_3 含有量はいずれも河川流量の増加とともに減少している。すでに述べたように、渇水時には河川流量は主として地下水流出によって維持されているが、降雨時には表面流出や中間流出など表層を通して河川に流出する水があり、石灰岩地域では、これらの化学成分濃度が地下水に比べて低いので、測点3で観測されたように、河川水の化学成分濃度が変化する。図には示していないが、Caや HCO_3 の含有量のほかに、Na, Mg,

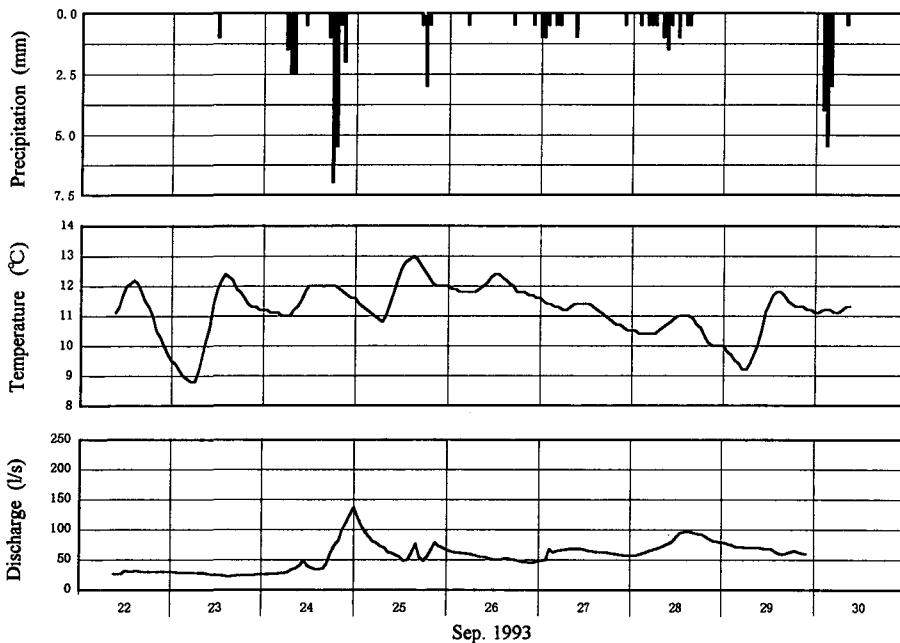


Fig. 9. Precipitation, water temperature, and hydrograph at the site A4, measured during the period from 22 to 29 on September, 1993.

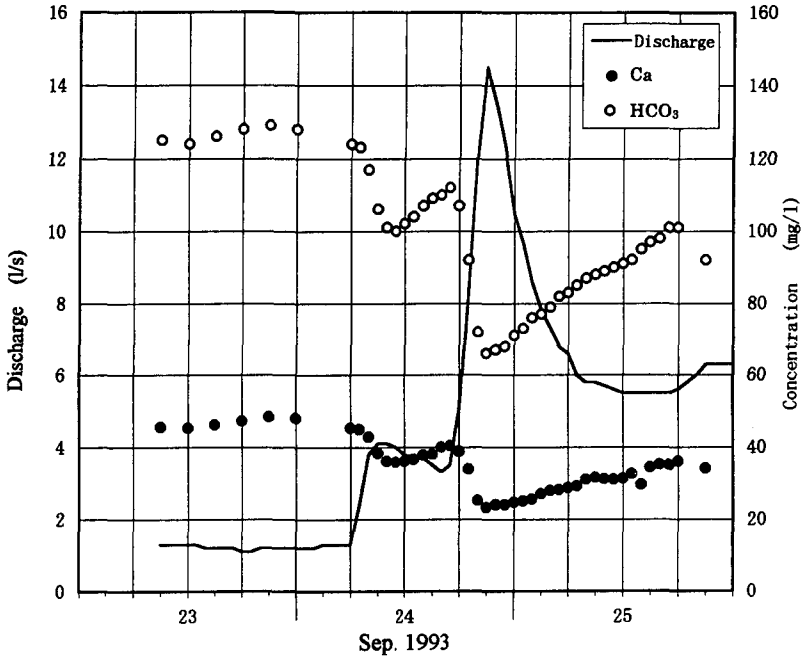


Fig. 10. Hydrograph and changes in concentrations of Ca and HCO_3 in river waters, measured at the site 3 during the period from 23 to 25 on September, 1993.

Cl, SO_4 の含有量を測定した。しかし、これらの4成分にはほとんど変化がなく、降雨時にもほぼ一定の値を示した。

上述のように流出経路によって河川に流出する水の化学成分の濃度が異なるので、河川水の化学成分の変化から地下水流出量を求めることができる (Pinder and Jones, 1969 ; Dincer et al., 1970)。中間流出は表層の浅い部分を通る水であり、これを表面流出に含めることとし、表面流出と地下水流出の流出量をそれぞれ Q_s 、 Q_g とし、河川の流量を Q とすると、

$$Q = Q_s + Q_g \quad (2)$$

となる。また、注目する化学成分について、表面流出する水の濃度を C_s 、地下水の濃度を C_g 、川水の濃度を C とすると、化学成分の収支から、

$$QC = Q_s C_s + Q_g C_g \quad (3)$$

となる。これらの式から地下水流出量が

$$Q_g = \frac{C - C_s}{C_g - C_s} Q \quad (4)$$

と求まる。

化学成分として HCO_3 を用い、Fig. 10 に示した観測結果から地下水流出量と表面流出量を求めた。地下水の HCO_3 含有量には流量が最低となったときの川水の値：129.69 mg/l を用い、表面流出する水は、地表面や表層に薄く分布する腐植土層内を通る水であり石灰岩を溶解した水を

ほとんど含まないと考え、その HCO_3 含有量は石灰岩が分布する地域の上流端の測点 B1 で7月に観測された値：28.19 mg/l に等しいとして、(4)式を用いて、地下水流出量を計算した。計算結果は Fig. 11 に示してある。地下水流出は雨が降り始めると急激に増加するが、その後の変化は緩やかであり、流量のピーク時の流出量も少なく雨が降り終わった後の減衰も緩やかになっている。これに対して、表面流出は急激な変化を示し、降雨初期に流出量が少ないが、強い雨が長く続くと流出量が急増し降雨終了後には急激に減衰している。恐らく、これは、石灰岩が溶食されて石灰岩層内に節理状の割れ目ができていて、降水がそれを通して急速に地下水面まで達し、斜面上流部の地下水面が上昇するため、河川付近の流出口との圧力差が大きくなって川へ地下水が押し出されて、降雨初期に地下水流出量が急増するが、強い雨が長く続くと表層が水に飽和されて降水が表層をより多く流れるようになり、表面流出量が急増するものと思われる。Fig. 10 にみられるように、9月29日には降雨がなく流量が緩やかに減衰しており、地下水流出量の緩やかな減衰が続いていることを示唆している。

V. ま と め

1993年7月に、北海道北部の頓別川中流域の石灰岩が分布する地域において、河川流量や河川

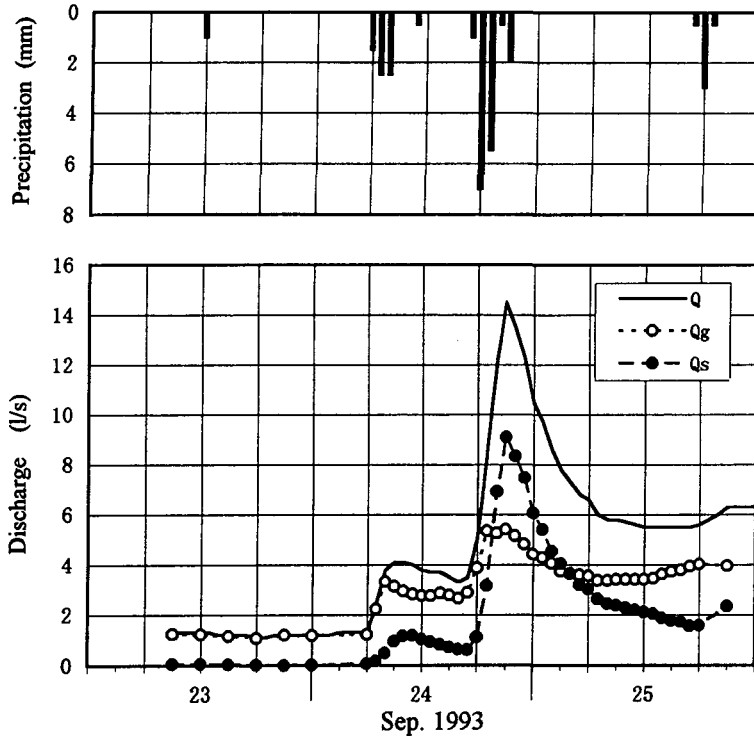


Fig. 11. Groundwater runoff and surface runoff at the site 3, calculated by using mass balance of HCO_3 . Q : total discharge, Q_g : groundwater runoff, Q_s : surface runoff.

水の化学成分などを測定し、河川の化学的特性を調べた。また、9月には、1つの小流域に着目して10日間の連続観測を行い、降雨に対する河川の流出特性を調べた。その結果、渇水時には沢水のCa含有量とHCO₃含有量が本流の河川水に比べて非常に多いが、Na, Mg, Cl, SO₄の含有量には大差がなく、地下水が石灰岩をかなり溶食し続けていることが明らかになった。また、降雨にともなって河川流量、川水のCa含有量およびHCO₃含有量が大きく変化することが観測された。HCO₃含有量を用いて地下水流出と表面流出を区分した結果、地下水流出は強い降雨の初期に急激に増加するが、その後の変化は比較的緩やかであり、雨が降り終わった後も緩やかに減衰することが明らかになった。これは石灰岩地域の特異な水系網と密接な関係があり、石灰岩の溶食により生じた節理状の割れ目が通路となり、地下に浸透した降水がす速く地下水面に達するため、降雨に対して敏感に応答して河川流量が急速に増加するものと考えられる。

文 献

- Dincer, T., B.R. Florkowski, T. Martinec and E. Tongiorgi, 1970. Snowmelt runoff from measurements of tritium and oxygen-18. *Water Resour. Res.*, **6**, 110-124.
- Dreis, S.J., 1989. Regional scale transport in a karst aquifer : 1. Component separation of spring flow hydrographs. *Water Resour. Res.*, **25**, 117-125.
- Ford, D. and P. W. Williams, 1989. *Karst geomorphology and hydrology*. Unwin Hyman, 601pp.
- 松下勝秀・小山内 熙・石山昭三・中村耕二, 1967. 5万分の1地質図幅及び同説明書「浜頓別」。北海道開発庁, 45 pp.
- 小山内 熙・三谷勝利・石山昭三・松下勝秀, 1963. 5万分の1地質図幅及び同説明書「中頓別」。北海道開発庁, 58 pp.
- Palmer, A. N., 1991. Origin and Morphology of limestone caves. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **103**, 1-21.
- Pinder, G. F. and J. F. Jones, 1969. Determination of the groundwater component of peak discharge from the chemistry of total runoff. *Water Resour. Res.*, **5**, 438-445.
- Shevenell, L., 1996. Analysis of well hydrographs in a karst aquifer : Estimates of specific yields and continuum transmissivities. *Jour. Hydrol.*, **174**, 331-355.
- Shireley, J. P., 1989. Regional scale transport in karst aquifer : 1. Component separation of spring flow hydrographs. *Water Resour. Res.*, **25**, 117-125.