

短 報

南日本太平洋側の山地小流域における降水に伴う増水時の渓流水の成分濃度の変化

高木正博^{*1}・野上寛五郎¹・仲川泰則²

高木正博・野上寛五郎・仲川泰則：南日本太平洋側の山地小流域における降水に伴う増水時の渓流水の成分濃度の変化
 日林誌 86: 279~282, 2004 南日本太平洋側の温暖多雨な気候と急峻な地形が山地小流域の降水に伴う増水時の渓流水の無機成分濃度の変動パターンに及ぼす影響を把握するために、宮崎平野の西端の丘陵地帯に位置する面積 2.4 ha の針葉樹人工林小流域において、1 年間にわたり 12 の増水イベントの観測を行った。その結果、1) 季節、降水量、先行降雨指数および増水前流量に依存しない増水時の EC, pH, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, および Cl⁻ の減少と NO₃⁻ の増加、2) 夏期の増水時の硝酸濃度の顕著な上昇、3) 明瞭なフラッシング、の 3 点が特徴として明らかになった。1 点目は急峻な地形による卓越しやすい土壌水の影響が、2 点目は国内でも著しいこの地域の夏期の高温と多雨の影響が表れていると推測された。
 キーワード：渓流水、山地小流域、硝酸、増水、フラッシング

Takagi, M., Nogami, K., and Nakagawa, Y.: Storm Solute Behavior of a Small Forested Catchment in Southern Kyushu. *J. Jpn. For. Soc.* 86: 279~282, 2004 Storm solute behavior of a small forested catchment with steep hillslopes and abundant rainfall in summer was investigated in hilly country of southern Kyushu. Inorganic ion concentrations for twelve storm events were analyzed for a year. The stream water chemistry of this catchment was characterized by: 1) independent increase or decrease pattern of storm solute concentrations on season, rainfall, discharge before precipitation and antecedent precipitation index; 2) remarkable nitrate concentration rise at flooding in summer; 3) marked flushing effects. These characteristics are probably due to predominant soil water during the events and abundant rainfall and higher temperature in summer.

Key words: flushing effects, forested catchment, nitrate, storm solute

I. はじめに

日本でも近年、森林流域の窒素飽和現象が観測されたことを背景に、降水や気温の季節変化、急峻な地形、および風化しやすい基岩などの日本特有の要因が森林生態系の物質循環に及ぼす影響を定量化し、明らかにする必要性が指摘されている (Mitchell *et al.*, 1997; Ohte *et al.*, 2001)。窒素飽和の指標である硝酸に限らず、渓流水の溶存成分の濃度は降水による供給と土壌中における物質収支の結果として決定されている。土壌中における物質収支は、降水による洗脱、有機物や結晶鉱物の分解、腐植との置換、および生物による吸収などが動的にバランスすることで決定されている。土壌における各成分の動的バランスおよびその空間分布は、気候の他に植生、母材および地形などの影響を受けている。その結果、降水に伴う増水時の各成分の増減パターンは、降水が直接および間接に土壌を通過して溪流に供給されるために、観測対象流域特有の各成分の空間的分布と流出過程を反映したものになる (Duysings *et al.*, 1983; Ávila *et al.*, 1992; Ohruai and Mitchell, 1999; Hangan *et al.*, 2001)。

宮崎大学農学部附属田野演習林 (現・附属自然共生フィールド科学教育研究センター田野フィールド) は南日本太平洋側の国内でも温暖で降水量の多い、特に夏期に降

水が多くほぼ無降雪の地域に位置する。地形的には標高差は小さいものの斜度は急である。これらの特徴が降水時の渓流水のイオン濃度の変動パターンに及ぼす影響を把握するために、田野演習林内の針葉樹人工林小流域において 1 年間に観測された 12 の増水イベントについて、無機成分濃度の増減パターンを解析した。

II. 試験地と方法

観測は宮崎大学田野演習林内の面積が 2.4 ha の小流域で行った。この小流域はヒノキ壮齢林 (60%) とスギ中齢林 (40%) からなり、標高は 170~220 m、基岩は四万十層群砂岩頁岩細互層、土壌タイプは B_{D(d)} である。谷底面の流路幅は 0.5 m~1.5 m、下部谷壁の斜度は約 40 度であり、土壌厚は 30 cm 程度である。平年の降水量は暖かい時期に多い。10 年間の平均では年降水量 2,876 mm のうち、月平均気温が 19°C 以上の 5~10 月の半年間にその 77% の降水があった。

採水は流域の出口に設置された量水堰で 2000 年 10 月から 1 年間行った (図-1)。採水には自動採水器 (ISCO model 3700 C) を用い、直射日光を避けるために物置内に収納し、また夏期にはブロックアスを本体に入れることにより温度上昇を防いだ。原則として降水前から降水後まで稼働させた。採水間隔は降り始めから 24 時間は 1 時

* 連絡・別刷請求先 (Corresponding author) E-mail: mtakagi@cc.miyazaki-u.ac.jp

¹ (独) 宮崎大学農学部 (889-1702 宮崎県宮崎郡田野町乙 11300)

Faculty of Agriculture, Miyazaki University, 11300 Otsu, Tano-cho, Miyazaki 889-1702, Japan.

² (独) 北海道大学北方生物圏フィールド科学センター (096-0071 名寄市字徳田 250)

Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, 250 Tokuda, Nayoro 096-0071, Japan.

(2004 年 3 月 23 日受付; 2004 年 6 月 30 日受理)

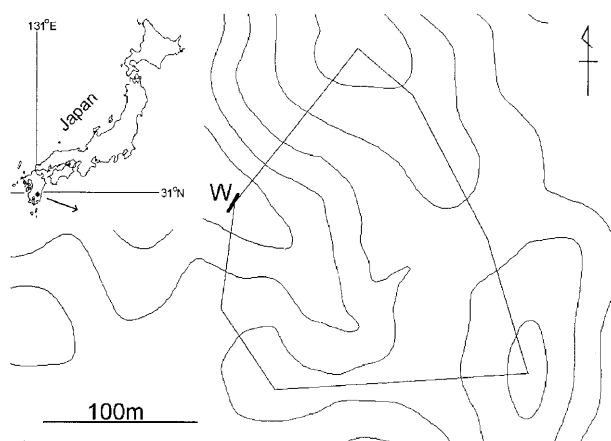


Fig. 1. Location and contour map of studied watershed.

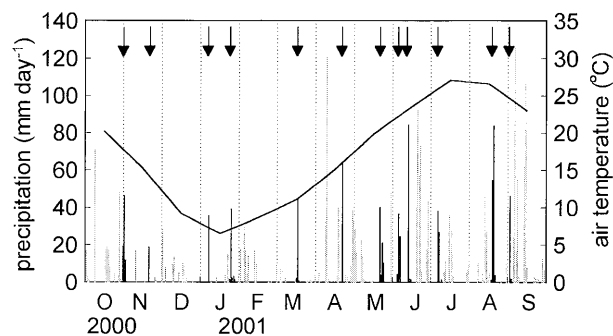


Fig. 2. Daily precipitation and monthly average temperature of air during study period.

The daily precipitation of sampled events are black bars and indicated by allows. Gray bars are daily precipitations that were not sampled.

Table 1. Summary of sampled events.

No.	Event	Year	Month/day	P_t	P_m	Q_t	Q_m	API7	n
1	001031	2000	10/31~11/04	76.5	14.5	0.26	0.89	18	21
2	001120	2000	11/20~22	18.0	5.0	0.21	0.29	0	13
3	010107	2001	01/07~09	35.0	8.5	0.12	0.42	0	11
4	010124	2001	01/24~28	45.0	4.0	0.10	0.34	11	19
5	010316	2001	03/16~18	46.5	9.0	0.10	0.42	2	14
6	010421	2001	04/21~22	63.0	9.0	0.10	0.29	14	20
7	010521	2001	05/21~27	74.5	7.0	0.32	0.53	0	22
8	010604	2001	06/04~08	61.5	17.5	0.22	0.87	10	19
9	010613	2001	06/13~17	86.5	27.5	0.21	2.03	4	29
10	010706	2001	07/06~12	71.0	24.5	0.39	1.50	0	20
11	010818	2001	08/18~24	141.5	14.0	0.14	1.23	23	18
12	010902	2001	09/02~05	47.5	5.5	0.17	0.40	4	16

Event name, duration, total precipitation (P_t : mm), maximum precipitation intensity (P_m : mm h⁻¹), discharge before precipitation (Q_t : mm h⁻¹), maximum discharge (Q_m : mm h⁻¹), antecedent precipitation index for seven days (API7), and number of sample (n) of each event.

間ごと、それ以降は降水の状況に応じて2時間、4時間もしくは6時間ごとに設定した。セットした24本の採水用ボトル総てに採水が終わらなくても適宜ボトルは回収し、試験室に持ち帰った直後にpHと電気伝導率(EC)を測定した。残りのサンプルはイオン濃度分析まで冷凍保存した。分析するサンプルはイベント終了後に流量とECの変化を考慮して決定した。ナトリウム(Na⁺)、カリウム(K⁺)、カルシウム(Ca²⁺)、マグネシウム(Mg²⁺)、塩素(Cl⁻)、硝酸(NO₃⁻)、硫酸(SO₄²⁻)の各イオンの濃度をイオンクロマトグラフィー(島津製作所LC-10A)を用いて測定した。なおアンモニウムイオンは濃度が分析限界値以下のことが多かったので解析から除外した。比流量(mm h⁻¹)は90度Vノッチの量水堰の越流水深を圧力式自記水位計(KADEC-MIZU)を用いて測定し、水位-流量換算式により換算した。降水量は量水堰から1.1 km離れた気象観測装置で測定した。

III. 結果と考察

12の増水イベントの降水量は測定期間中の総降雨量2,791 mmのうちの27%であった(図-2)。本研究の測定期間においても、平年どおり冬期の降水量が少なく総降雨

量の31%、夏期に多く69%であった。冬期の降水は総降水量、最大降水強度も小さかった(表-1)。冬期の各イベントは降水開始前比流量が小さかった。ただし先行7日間の先行降雨指数(対象とするイベントまでの日数で最近ほど重くなるように加重した降水量)は夏期でも小さいイベントがあった。

1. 増水時の成分濃度の増減パターン

流量のピークは降水のピークとほとんどのイベントで一致していた。しかし、各成分濃度は流量のピーク後も継続して増加もしくは低下していた。Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、およびCl⁻は流量増加時に常に濃度が低下した。Mg²⁺とCa²⁺は流量との相関が総てのイベントにおいて、Na⁺とCl⁻は多くのイベントで流量との相関が有意であった(表-2)。SO₄²⁻も流量増加時に濃度が低下したが、流量との相関が有意だったイベントは少なかった。また、ECは総てのイベントにおいて、pHは1イベントを除いて、流量と有意な負の相関を示した。一方、NO₃⁻は流量増加時に常に濃度が上昇した。K⁺は明瞭な傾向が認められなかった。

流量の増加時には季節、降水量、降水強度、先行降雨指数、増水前流量によらず、EC、pH、Na⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、

Table 2. Correlation coefficients between water discharge and ion concentrations of each event.

Event	EC	pH	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
001031	-0.95	ns	-0.59	ns	-0.94	-0.93	-0.89	0.53	ns
001120	-0.76	-0.75	-0.72	0.66	-0.76	-0.67	ns	0.57	ns
010107	-0.66	-0.80	-0.72	ns	-0.66	-0.65	ns	ns	ns
010124	-0.86	-0.79	-0.98	0.50	-0.82	-0.79	-0.60	0.58	-0.63
010316	-0.89	-0.91	-0.94	ns	-0.85	-0.86	-0.89	0.63	-0.69
010421	-0.63	-0.60	-0.55	-0.64	-0.61	-0.54	-0.45	0.51	-0.45
010521	-0.77	-0.58	-0.87	ns	-0.70	-0.57	-0.77	0.45	-0.42
010604	-0.83	-0.82	-0.79	ns	-0.81	-0.75	-0.80	ns	ns
010613	-0.86	-0.89	-0.71	ns	-0.83	-0.83	-0.83	0.79	ns
010706	-0.78	-0.84	-0.92	0.74	-0.74	-0.78	-0.75	0.46	ns
010818	-0.62	-0.72	ns	ns	-0.70	-0.71	ns	0.74	ns
010902	-0.88	-0.62	-0.91	ns	-0.85	-0.77	-0.81	0.49	ns

Only statistically significant coefficients ($p < 0.05$) are presented. ns indicate that the coefficient was not statistically significant.

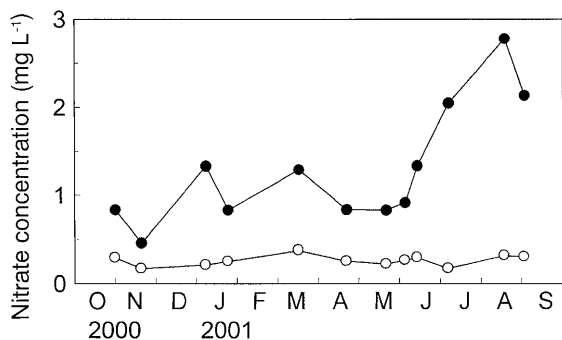


Fig. 3. Seasonal courses of initial (○) and maximum (●) nitrate ion concentration of events.

および Cl⁻ はほぼ常に減少し、NO₃⁻ は増加した。このことから、本観測流域では増水時には、降水量や降水強度といった降水のパターン、もしくは先行降雨指数や増水前流量といった増水前の状況によらず、土壌水の流出水に占める割合が大きいと推察される。多くの研究で、増水時に濃度が増加する成分は土壌水（直接流出水・新しい水）に高濃度に含まれており、一方低下する成分は地下水（基底流出水・古い水）に高濃度に含まれていると指摘されている (Duysings *et al.*, 1983; Ávila *et al.*, 1992; Ohruai and Mitchell, 1999)。基底流出水に高濃度に含まれている Mg²⁺、Ca²⁺ などの基岩の風化由来の成分は、降水時には希釈されるために流出水で濃度が低下すると考えられている。したがって、本観測流域において増水時に常に Mg²⁺、Ca²⁺ が希釈されたこと、また土壌に多く含まれているといわれている NO₃⁻ 濃度が常に上昇したことは、増水時に土壌水の寄与が常に大きいと考えられる。流量のピークが降水のピークとほぼ一致していることも、供給から流出までのタイムラグの小さい河道降雨や地表面流出過程の割合が高く、流出水の溶存元素濃度への土壌水の寄与が大きいことを示していると考えられる。

2. 硝酸イオン濃度の季節変化

硝酸イオンの増水前の濃度は年間を通してほぼ一定であり、0.2 mg L⁻¹ から 0.4 mg L⁻¹ の範囲であった。一方、イベント中の NO₃⁻ の最高濃度には季節依存性が認められ

夏期に高かった。秋期から春期にかけては 1.5 mg L⁻¹ 以下であったが、夏期のイベント 010706, 010818, および 010902 では 2.0 mg L⁻¹ 以上であった (図-3)。

増水時の NO₃⁻ 濃度が夏から秋にかけて高いことは日本の溪流の特徴とされ (Mitchell *et al.*, 1997), 多くの観測例が報告されている (Ohte *et al.*, 2001)。Shibata *et al.* (2001) は、本観測流域を含む国内の 18 の山地溪流水の硝酸濃度に関する報告をしている。それによると、平水時の本観測流域の値は日本国内の山地溪流水としては低い方であった。一方、夏期の増水時については北海道雨竜、千葉県袋山沢および新潟県佐渡の値が示されており、今回新たに得られた本観測流域の値は、これら 3 流域のうち濃度の高い 2 流域とほぼ同じであった。すなわち、夏期の平水時と増水時の硝酸濃度の差が、本観測流域は国内でも大きい流域といえる。Ohte *et al.* (2001) は、欧米と比較して、日本の山地溪流において夏期の高い硝酸濃度をもたらす要因は高い窒素無機化速度と多い降水量だとしている。日本国内でも特に夏期の高温と多雨が著しい南日本太平洋側に位置する本観測流域では、この二つの要因が顕著に現れることによって、平水時と増水時の大きな濃度差がもたらされたと考えられる。

3. フラッシング効果

降水開始直後かつ流量ピーク前に、いくつかの成分の濃度が上昇したイベントが認められた。例えばイベント 001031, 010521, 010604, および 010818 においては、Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, および SO₄²⁻ の濃度が降水開始直後すなわち流量増加が始まって直後に顕著に上昇した (図-4)。これらのイベントの増水前の EC は、濃度上昇が顕著に認められなかったイベントに較べると低く、10 mS m⁻¹ 未満であった。この四つのイベントの増水前の EC はそれぞれ 8.5 mS m⁻¹, 9.9 mS m⁻¹, 8.9 mS m⁻¹, および 8.2 mS m⁻¹ であったのに対して、その他のイベントでは 010421 を除き 10 mS m⁻¹ 以上であった。Mg²⁺ でも同様に、濃度上昇が顕著に認められたこれら 4 イベントの増水前濃度は 3.5 mg L⁻¹ 未満であったのに対して、認められなかったイベントは 010421 を除きこの値以上であった。また Ca²⁺ でもこの 4 イベントで濃度上昇が認め

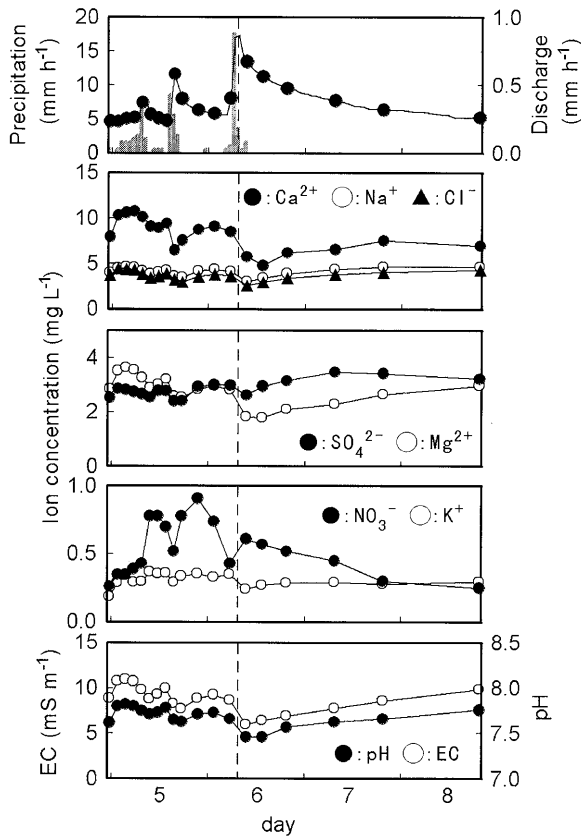


Fig. 4. Precipitation and discharge per hour, time courses of ion concentrations, pH and EC of the event No. 8 (010604).

Closed circles on discharge line in upper panel indicate times of sampling.

られ閾値は 10 mg L^{-1} であった。

この流量増加初期の濃度上昇はフラッシング効果といわれる (Walling and Foster, 1975). Ávila *et al.* (1992) は 4 ha の森林流域において Na^+ , Ca^{2+} , および Mg^{2+} のフラッシングを観測し, その原因として無降水期間に河道付近に蓄積した成分が降水開始時に放出されるからだとした。Duysings *et al.* (1983) は 11 ha の起伏の小さい落葉広葉樹に覆われた低地において Na^+ , Cl^- , および Mg^{2+} のフラッシングを観測し, その原因として土壌や樹冠に蓄積したこれらの成分が急激に放出されるからだとした。Hangen *et al.* (2001) は 9 ha の森林流域において K^+ のフラッシングを観測し, その原因として谷底の限られた範囲で発生する saturation over land flow を指摘し, 観測流域では三つの流出過程が考えられるとした。Mulholland *et al.* (1990) は流量増加の程度が小さいイベントの方がフラッシング効果が顕著であると指摘した。しかし本研究では総降水量が大きいイベントでも観測された。

本研究では, フラッシング効果は増水前の EC および Mg^{2+} と Ca^{2+} の濃度との関連が示唆された。EC が 10 mS m^{-1} より大きいときにはフラッシング効果がまれであったことから, フラッシング効果をもたらす水は Mg^{2+} と

Ca^{2+} を高濃度を含んでいるために EC が高く, 増水前の渓流水がこれらのイオンに富んだものであれば, この水が混合しても検出できなかった可能性が考えられる。しかし本研究ではこのフラッシング効果をもたらす水を直接測定はしておらず, メカニズムの解明は今後の課題である。

IV. ま と め

本観測流域における降水に伴う増水時の渓流水の無機成分濃度の特徴は, 以下の3点にまとめられる: 1) 季節, 降水量, 降水強度, 先行降雨指数および増水前流量に依存しない増水時の EC, pH, Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , および Cl^- の減少と NO_3^- の増加, 2) 南日本太平洋側の国内でも著しい夏期の高湿と多雨によってもたらされている増水時の硝酸濃度の顕著な上昇, 3) 明瞭なフラッシング。1点目は土壌水の卓越しやすい急峻な地形の影響が, 2点目は気候の影響が表れた特徴と考えられる。3点目も含めて, これらのメカニズムを明らかにするためには, EMMA などの手法を用いて各流出過程の流出水への寄与を定量化する必要があると考える。また同時に, 様々な気候, 地形の条件下にある山地流域の増水イベントを広域で比較することが, 日本国内の森林生態系における物質循環を明らかにするために重要であると考えられる。

本研究は野上が文部省科学研究費補助金 (11356005) を受けて行われた。

引用文献

- Ávila, A., Pinol, J., Rod, F., and Neal, C. (1992) Storm solute behavior in a montane Mediterranean forested catchment. *J. Hydrol.* 140: 143-161.
- Duysings, J.J.H.M., Verstraten, J.M., and Bruynzeel, L. (1983) The identification of runoff sources of a forested lowland catchment: A chemical and statistical approach. *J. Hydrol.* 64: 357-375.
- Hangen, E., Lindenlaub, M., Leibundgut, C., and von Wilpert, K. (2001) Investigating mechanisms of stormflow generation by natural tracers and hydrometric data: A small catchment study in the Black Forest, Germany. *Hydrol. Process.* 15: 183-199.
- Mitchell, M.J., Iwatsubo, G., Ohru, K., and Nakagawa, Y. (1997) Nitrogen saturation in Japanese forests: and evaluation. *For. Ecol. Manage.* 97: 39-51.
- Mulholland, P., Wilson, G., and Jardine, P. (1990) Hydrogeochemical response of a forested watershed to storms: Effects of preferential flow along shallow and deep pathways. *Water Resour. Res.* 26: 3021-3036.
- Shibata, H., Kuraji, K., Toda, H., and Sasa, K. (2001) Regional comparison of nitrogen export to Japanese forest streams. *The Scientific World* 1: 572-580.
- Ohte, N., Tokuchi, N., Shibata, H., Tsujimura, M., Tanaka, T., and Mitchell, M.J. (2001) Hydrogeochemistry of forest ecosystems in Japan: Major themes and research issues. *Hydrol. Process.* 15: 1771-1789.
- Ohru, K. and Mitchell, M.J. (1999) Hydrological flow paths controlling stream chemistry in Japanese forested watersheds. *Hydrol. Process.* 13: 877-888.
- Walling, D.E. and Foster, I.D.L. (1975) Variations in the natural chemical concentration of river water during flood flows, and the lag effect: Some further comments. *J. Hydrol.* 26: 237-244.