

二つの花崗岩山地小流域におけるミネラルの 収支についての報告

加 藤 博 之・福 嶋 義 宏

Mineral budgets of the two small catchments in granite region

Hiroyuki KATO and Yoshihiro FUKUSHIMA

目	次
要 旨.....	115
はじめに.....	115
第1章 実験方法.....	116
1 実験流域	116
2 実験方法	117
第2章 結果と考察.....	117
1 降水量・流出量	116
2 溶存ミネラルの濃度	117
3 ミネラルの収支	118
引用文献.....	122
Résumé	123

要 旨

1. 前報^Dに引き続いて、花崗岩山地の二つの小流域についてミネラルの収支の点から、1972年4月より、1973年3月までの一年間、比較をおこなった。実験期間中、二流域の降水、および流出水について、五種のミネラルの分析、定量をおこない、この流域の移入量、移出量とした。実験流域は、前報におなじ桐生流域と川向流域である。

2. 実験期間中、降水量について、桐生では 1811.0mm、川向では 1693.0mm となり、流出量は、桐生 1478.8mm、川向 920.9mm、となった。

流出率で桐生の値が例年値より高かった。

3. 溶存ミネラル成分のうち、それぞれの流域の溪流水に含まれるミネラルの濃度は、二流域で、平均値では、大きな差はみとめられなかったが、一般に桐生の方が、変動幅は、川向より大きかった。溪流水のミネラル濃度の季節変化は、桐生では多くのミネラルで様子がはっきりしなかったが、川向では変動幅が小さく、夏期に濃度が高くなり、冬期・春期にかけて低くなるようであった。また二流域で、増水直後に Na の濃度の低下、Mg に濃度の上昇がみられた。

4. 収支計算の結果、桐生で P 以外のミネラルで支出が収入をうわまわったが、川向では P と Ca で収入が大きく、K, Na では支出がうわまわり、Mg は、ほぼ、収入・支出がつりあった。二流域で各ミネラルの収入量は、ほぼ同じであると思えるのに、全体として、桐生の支出が川向のその約 2 倍になった。

は じ め に

山地小流域を水の動きに着目して、一つの単位としてみると、そこに水の動きにともなった物

質の動き、すなわち物質の循環現象がみられる。また、植生の発達などにより、流域の様相が変化するにつれて、水の動きにも複雑な過程がみられるようになる。同時に、それにともなう物質循環の様子も非常に変化してくるであろうと思われる。

流域内のミネラルの循環の経路には、いろいろなものが考えられる。すなわち、降水による移入について、Throughfall, Stemflow など水が直接ミネラルを運搬する過程や、植物、特に樹木等による土壌からの吸収、生長による生物体への集積、Litterfall による土壌への還元などや、土壌層での Litter の土壌生物群による分解・溶脱・吸着など土壌の生物的・物理的・化学的過程による移動、さらに土壌を通過する地下水流による移動などがあげられる。また母岩からは、化学風化されたミネラルが土壌層中に加えられ、これらのものが溪流となって流域から流亡していく。

これらの非常に入りくんだ多くの過程の結果は、流域内の水収支が正確に測定されるなら、化学風化量は直接測定できないが、降水と溪流水中のミネラル量を測定することにより流域の物質収支としてあらわされることになる。それゆえ物質収支は、流域中をミネラルが通った精算であるとも考えられる。

著者らは、現在まで同じ花崗岩を母材とし互いに近接した二つの流域について種々の点から比較調査をすすめてきた^D。この報告は、以上の点から、水収支にともなうミネラルの収支という側面について、この二つの流域で実験をおこなったものである。

本実験をとりまとめるにあたり、四手井綱英教授、堤利夫助教授、武居有恒教授には、当初より、適切な助言と御指導を賜わってきた。

また、川向試験地の試料の採取にあたって、並々ならぬ労をいただいた北川さん御一家、

川向データを快く提供して下さった近畿地方建設局琵琶湖工事事務所の関係者の方々、ならびに常によりき助言と援助をいただいた京都大学農学部森林生態学研究室、砂防工学研究の皆様に心から感謝する次第である。

第1章 実験方法

1. 実験流域

実験流域は前報で報告した二流域で、滋賀県大津市上田上桐生町の桐生試験流域、新免町の川向試験流域である。以下、両流域を桐生、川向と代表させてよぶ。なお桐生は流域面積 5.99ha。草津川となって琵琶湖にそそぎ、川向は流域面積、2.66ha で大戸川となって瀬田川に流入している。実験期間は1972年4月から1973年3月までの一カ年である。その他の流域の状況については前報に詳しいが、概略のみを述べると、両流域とも母岩は深層風化を受けた花崗岩から成り、ともに古くからの砂防造林地である。両流域は、アカマツ、クロマツの植栽がすすんでいるが、その様相は二流域でかなり異っている。桐生においては、古くからおこなわれた砂防造林がよく成功しており、森林の発達状態は良好で土壌層は厚い。一方、川向では、昭和に入ってから何度も造林、山腹工がおこなわれたにもかかわらず、いまだに荒廃山地の観を持ち、樹木および土壌有機物層の発達も未熟である。

2. 実験方法

降水量の測定は二流域とも今までの測定結果から一点の測定で代表した。流出量は流域最下流の基岩上に設けられた V ノッチ型の量水せきで水位を自動継続記録し、水位一流量曲線より時間ごとの流量を総計してもとめた。

また流域内において冬期には凍結、夏期には、伏流が一部でみられたが、いずれも観測期間中、量水ぜきにはみられず、観測には支障がなかった。降水の分析試料は、降水測定地点のごく近くで 200×10cm の塩ビ製の角樋を受け口とする装置をもちいて降水をポリボトルに貯水して使用した。流出水は V ノッチの越流水を試料とした。なお降水のサンプルは二流域がごく近接した距離にあり、降水量もほぼ同じであるとみなせるので、降水の水質に関しては一点で代表させて良いと考えられたため試料の濃度の分析は桐生についてのみおこなった。降水、流出水のサンプリングはほぼ週一回おこない。分析試料としたが、降水にかぎり、量が少ないときは、一カ月単位にまとめて測定した。分析は、Mg, Ca, K, Na, P, についておこなった。分析方法は前報に同様である。

第2章 結果と考察

1. 降水量、流出量

実験期間中の降水量および流出量を Table 1 に示す。水年は、降水量が少なく土壌水分変動の小さい期間に区切りを設けるのが通例であるが、実験の主目的が年間収支にある点と季節配分等の考慮の点から、4月から3月までおこなった。両流域の降水量は、現在までの結果から年間、約 1800mm 前後であるので実験期間中の降水量は、やや低目ながら、平均とは、そう大きな差はなかった。また流出率を計算してみると桐生で81.7%、川向で54.4%となった。前報では、桐生で70%前後、川向55%前後となっていたので、桐生の流出率がかなり高くなっているが、この原因については、詳しくはわかっていない。P—D の値、すなわち蒸発散量 (I+E) も当然、川向の方が桐生の2倍以上も大きくなっている。なお、実験期間中、降水量が少ないため、流出量が降水量をうわまわる月が桐生で三カ月、川向で一カ月あった。このような現象は水文観測上に往々みられるが、桐生の方が多く、川向が少ないのは、桐生の地下水貯留能が川向より大きく長期にわたって地下水流出がみられることによるのであろう。

2. 溶存ミネラルの濃度

i) 降水中のミネラルの濃度

天然水中の溶存ミネラルのうち降水にふくまれる濃度は、一般に非常に小さい。通常、上空から地上にもたらされる経路には降水中に溶存した状態のものと、ドライ・フォールアウトとよばれる乾性の、ちり状降下物質の二つに分けられるが、ここで測定したものは、両者をふくめた、普通、総降雨 (bulk precipitation) とよばれるものである。Table 2 に降水中のミネラルの濃度の算術平均値を示す。降水中のミネラルの多くは、海水に起源をもつものが多いが、最近では都市近郊の工場煤煙等の影響によるものなど、人為的な要因もかなり増えているので

Table 1. Monthly runoff (D) and precipitation (P) in Kiryu and Kawamukai Experimental Catchment. (mm)

Month	Kiryu		Kawamukai	
	P	D	P	D
1972				
4	149.5	149.1	147.0	88.3
5	117.5	98.5	109.0	56.8
6	225.5	130.6	208.0	99.1
7	419.5	361.8	428.5	296.5
8	147.0	95.1	103.5	37.4
9	243.0	179.9	239.0	107.1
10	57.5	59.6	48.5	24.5
11	109.5	75.3	103.5	36.0
12	64.5	54.5	58.0	21.9
1973				
1	170.5	123.5	149.5	73.8
2	85.0	87.6	83.0	50.6
3	22.0	63.3	15.5	28.9
Total	1811.0	1478.8	1693.0	920.9
P—D	332.2		772.1	
D/P	81.7(%)		54.4(%)	

Table 2, The mineral concentration contained in rainwater. (mg / liter)

	MEAN	MAX.	MIN.
Mg	0.17	0.68	0.02
Ca	0.35	2.26	0.06
K	0.38	1.05	0.12
Na	0.40	1.56	0.10
P	0.054	0.272	0.010

Table 3, The mineral concentration contained in stream water of Kiryu and Kawamukai Experimental Catchment. (mg / liter) (Kr ; Kiryu, Kw ; Kawamukai)

		MEAN	MAX.	MIN.
Mg	Kr	0.18	0.67	0.08
	Kw	0.15	0.40	0.04
Ca	Kr	0.64	1.30	0.24
	Kw	0.40	0.67	0.16
K	Kr	0.73	1.44	0.28
	Kw	0.72	0.90	0.54
Na	Kr	4.81	6.00	2.24
	Kw	3.89	5.60	1.60
P	Kr	0.026	0.087	0.005
	Kw	0.024	0.142	0.003

大きなちがいがあから、ミネラルの濃度の変動も二流域で差を生むであろうと推測される。二流域について濃度の季節変化をみてみると、まずみとめられるのは、桐生で、Na、Pを除く三つのミネラルについて一回ごとの測定での変動幅が大きいことである。これにくらべて川向ではこの三つのミネラルについて年間の変動はより小さい。

ミネラルごとに年間の変動をみてみると、

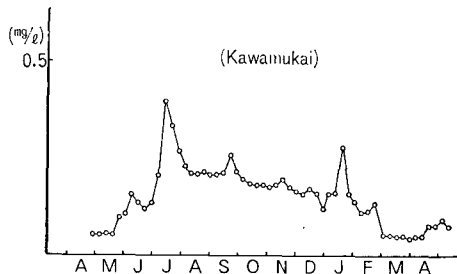
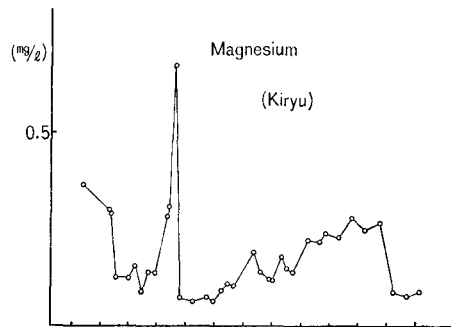
(1) マグネシウム……7月に両流域とも高い値を示しているが、4月と5月頃は桐生の方が高く、川向は低い。また秋から冬期・春へと夏期に濃度の高かった川向の溪流が徐々に濃度を減少させてゆくのに対して、桐生では逆に上昇していくのがはっきりしている。

はないかと考えられる。降水中のミネラルの濃度の変動は観測地点上の性格や降水をもたらす低気圧の種類等、種々のものが考えられる。そのほかに当然ながら、溶媒としての降水量の多少によってもミネラルの濃度は変わるから、これらの評価づけは、長期間にわたる観測と各地域の地理条件などが考慮されたデータからでしかおこなわれ得ないと思われる。現在までのところ、降水中の物質濃度の変動については、降水量と濃度の間に双曲線関係がみとめられることが $\text{NH}_4\text{—N}$, P について報告されている。

ii) 溪流水中のミネラルの濃度

溪流水中のミネラルの濃度は、降水が、植物・動物相を通過し、さらに地下の土壌層深くまで入りこんできた結果であるので、流域の性質をあらわすうえで、降水よりも重要である。溪流水にふくまれるミネラルの濃度の算術平均値を Table 3 に示した。前報において両流域の性格上に相違がみとめられたが、溪流水にふくまれるミネラルの平均濃度に、やや差があるとみることができるのは、カルシウムとナトリウムで、それも大きな差とはいえず、カリウム、リンなどでは、ほぼ差がないように思われる。そこで二・三の点について溪流水の濃度を二流域で比較対照しながら調べてみよう。

溪流水の通過してくる生物相は、四季の変化をもっているから、結果として、ここを通過する際に、降水はその影響を受けるにちがいない。そして二流域で生物相の状態に



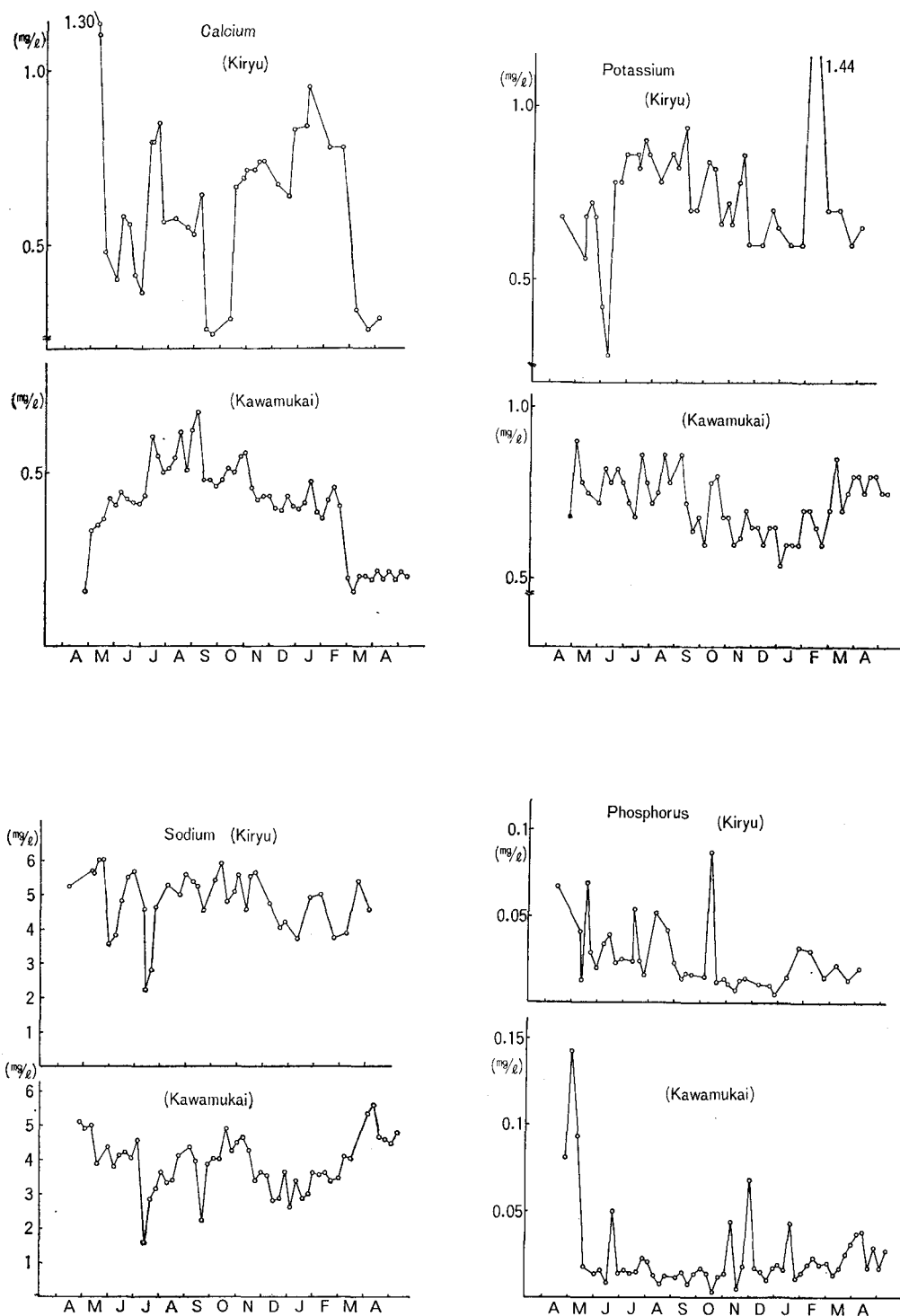


Fig. 1. Seasonal variation of a mineral concentration in stream water of Kiryu and Kawamukai.

秋の落葉期に樹冠を通過した降水のミネラルの濃度が高くなる現象がKについてみとめられていること、秋の落葉の結果、堆積したリター層が分解を受けて、溶脱されていくこと等の過程を考えた場合、川向よりは桐生の方がこういった一連の作用を受けやすいと思われる。溪流水を、降水が生物相、土壤層を通過してきた結果としてミネラルの循環を考える場合、こういった説明もすることができるであろう。また川向の溪流水の濃度が夏期・冬期と低くなる現象については、生物相よりも土壤層、特に母岩の風化の果たす役割などが大きいのではないかと考えられる。川向のMg濃度の変化のピークの一週間前ぐらいに必ず50mm前後の降雨のあることが観察されたことから、表土の流亡によるミネラルの移動も考えられるが、いずれにしても、マグネシウムの濃度の変動の説明には推測の域をでていない。

(2) カルシウム……川向の方は、変動はMgより大きい、変化の様子は似たような形を示し、夏期に高かった濃度が秋期～冬期～春期にかけて徐々に減少している。一方、桐生の方は、変動幅が大きすぎて季節変化らしいものは、まったくみとめられない。

(3) カリウム……いずれの流域でも変動のパターンはつかみにくい。ただ、両流域で8月ないし9月に高い値が多くあらわれ、冬期にかけて減少していくという傾向はみとめられそうである。このことからKについては、大体の年間変動のパターンを考えると両流域で大きな差はないように思える。

(4) ナトリウム……年間変動パターンに両流域で規則性があるとは判断できない。ただMgの場合と逆に急激に濃度が落ち込んでいる時期が存在し、この時期はかなり多量の降雨があった時期と一致するので、降水による希釈現象が起きたものであろうと推測される。ただNaにだけこの現象が特異的にみられることについては現在の知識では説明できないが、Naがもっとも溶脱を受ける速度が速いことに関連があるものと思われる。

(5) リン……両流域とも年間の大きな変動はみいだせない。年間を通じて桐生で0.01ppm前後、川向で0.01～0.02ppmの低い濃度であり、時おりあらわれる数個のピークは両流域で時期的に一致せず、降水以外に原因をもつものとしか考えられない。リンは土壤母材からの供給は少ないと考えられるうえ、生物相、土壤層での循環も複雑であると考えられているので、これらの結果からは何も推測することはできない。

以上の点をまとめてみると、両流域の溪流のミネラルの濃度について比較的、差をみいだせると思われるのは、Mg, Ca, Kについて桐生の方が、年間の変動幅がより大きく、年間変動パターンがよりつかみにくいということと、Mgの濃度の差にみられる程度のものしか得られなかった。

天然水中のミネラルの濃度は、また、天然水の水量にも大きく影響されるであろう。Likensらは、溪流水からの流亡養分量の測定にあたって、溪流水の水量とNaの濃度の間に負の相関関係をみだし、K, Caについては一定の傾向はなく、Mgは流量に関係なくほぼ一定値をとることを報告している。また、Johnsonらはこれらの流量と濃度の関係に希釈・濃縮モデルをつくって水質を検討している。今回の両流域の溪流のミネラル濃度と流量(mm/day)の間には、いずれのミネラルにおいても、両者の間に明瞭な関係はみいだせなかった。岩坪らも、日流量と濃度の間にはきいた関係はみいだしていない。しかし、先に述べたように、Mg濃度のピーク、Na濃度の減少などは、流量との関係があるのではないかとと思われるのでこの問題に関しては、日流量以外の水量指標をもちいて、細かい観測をおこなわねばならないと思う。

3. ミネラルの収支

溶存ミネラルの濃度に、得られた水量を乗じて、降水からの移入量・溪流水による移出量として収支計算をおこなった。その結果をTable 4に、また月ごとの移入・移出の配分をFig. 2に

示した。溪流からのミネラルの流亡量は、月ごとにみると、全体として溪流水量に大きく影響されるようであった。特に K, Na はなどの、イオン化傾向が大きく、溶脱速度の速いミネラルは、ほとんど水量によって流亡量を決定されるといえる。(Fig. 3) したがって Fig. 3 にみるように月ごとの流出量から考えた場合、K, Na 濃度の変動パターンは年間を通じて、ほとんど流量に依存しない変動であり、ほぼ一定値のまわりにちらばる変動であるとみることができる。つまり、濃度の季節変化が明瞭でないのは、K, Na のもつこの性質があるためではないかと考えられる。

Table 4. Mineral budget in Kiryu and Kawamukai Experimental Catchment. (kg / ha·year)

		Mg	Ca	K	Na	P
Kiryu	Input	1.9	5.0	5.2	4.7	0.9
	Output	3.3	10.6	11.2	62.5	0.5
Kawamukai	Input	1.8	4.8	5.2	4.6	0.9
	Output	1.9	4.1	6.7	34.0	0.3

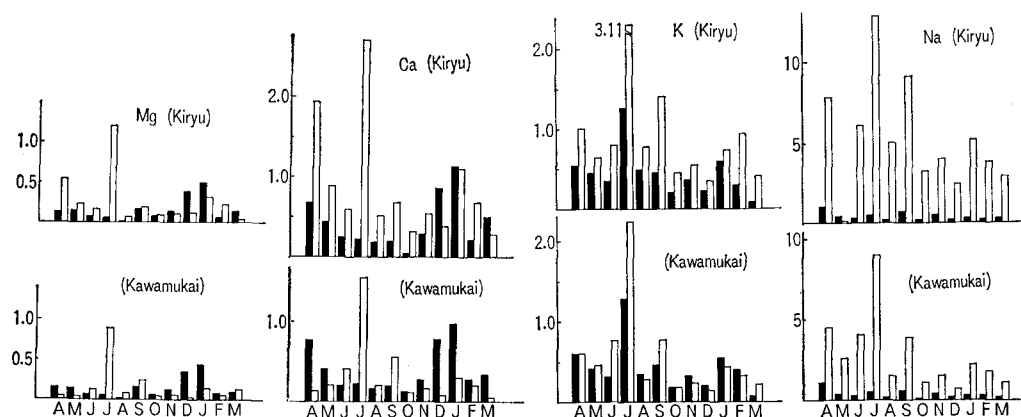


Fig. 2. Monthly distribution of input and output of minerals (kg / ha·month)

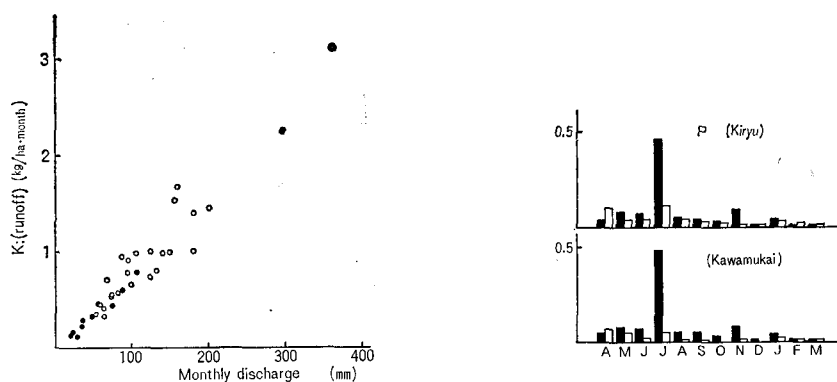


Fig. 3. The relationship between monthly stream discharge and mineral runoff.
($\bullet$: Kw, $\circ$: Kr)

K, Na にくらべて, Mg, Ca, P では, 正の相関が流出水量とにみられるが, K, Na ほど一方的に流亡量がきまるわけではないようである。Mg, Ca, P の流亡量はまた, 濃度とも同様の関係をもつからである。このため, これらのミネラルの流亡量に関係する要因は, 他にも, もとめねばならないと思われる。

前報²⁾で, 土壤層での移動養分量を報告したが, 土壤層では, $K > Ca > Mg > Na > P$ の順で移動量が小さくなった。今回, 両流域では Na が非常に多く流出した。もともと生物相における Na の存在する割合は他にくらべて小さいので, これは土壤層中を通過するあいだに加速度的に移動水に可溶化してきたためと考えられる。つぎに Table 4 に示された収支の差について考察してみよう。移入量は, ほぼ二流域で同じとみて, 溪流からの流亡量をくらべてみると桐生の移出は, いずれも川向のそれをうまわわっている。Na では移出は, 桐生で移入の15倍であるが, 川向では7.5倍であり, 他のミネラルも川向の流亡量が桐生の40~60%とほぼ半分前後である。桐生では P 以外はすべて, 収入より支出が多いが, 川向では, 支出の多いと思われるのは, K と Na のみで, Mg, Ca はほぼ収入と支出がバランスしているように思える。流域生態系として健康な状態にあると思える桐生と, いわゆる脊悪地の典型ともみられる川向で, ミネラルの収支にこのような差がでたことについて考えると, まず流亡量に与える影響が大きいものに水量をあげることができる。流出率に差がある結果, 流亡ミネラル量に差がでてくとも考えられる。しかしながら, 成林した流域と脊悪林地流域の差が流出率の差にどのように関連するかという点が今までのところ, これらの流域について結論づけられていない。今回の実験では, 降水による移入がほぼ二流域で同程度であるのに, 脊悪林地で移出が少なく, 成林地で多くなるという結果になった。いいかえると, 成林地である桐生の方が年々, 失なうミネラルは多いということになる。

収入より多い支出を補うためには, より多くの母岩の化学風化による養分量の付加を想定しなければならない。つまり, 母岩の未分解ミネラルの分解過程が速くなければならない。このことは, 土壤化の進行速度が速いことも意味している。しかし, このことからすぐに川向流域の化学風化量が少ないということにはならない。また, 風化による移入経路以外に系内での内部循環を考えてみた場合, 土壤-植物体という移動経路の速度が早く, この経路から可溶性ミネラルが系外に脱落したとも考えられるが, いずれにしても, これらの議論は, 今回の結果からは推測の域を出ないので, 改めて考察したいと思う。

引用文献

- 1) 福嶋義宏 加藤博之, 松本 潔, 西村武二: 花崗岩山地の2つの小流域について (地形, 植生, 水収支, 流出減水曲線からみた特性): 京大演報, **43**, 193—226 (1972)
- 2) 加藤博之, 福嶋義宏: 林地における流出水中の養分量について: 京大演報 **45**, 85—98 (1973)
- 3) 丸山明雄, 岩坪五郎, 堤 利夫: 森林内外の降水中の養分量について (第I報): 京大演報 **35**, 25—39 (1965)
- 4) 西村武二: 山地小流域における養分物質の動き: 日林誌 **55**, 323—333 (1973)
- 5) 河原輝彦, 岩坪五郎, 西村武二, 堤 利夫: カンレンボク 模型林分における 物質の動き: 日林誌 **50**, 125—135 (1968)
- 6) G. E. Likens, et al.; The calcium, magnesium, potassium and sodium budgets for a small forested ecosystem: Ecology **48**, 772—785 (1967)
- 7) N. M. Johnson et al.; A working model for the variation of stream water chemistry at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire: Water Resources Research, **5**, 1353—1363 (1969)
- 8) 岩坪五郎, 堤 利夫: 森林内外の降水中の養分量について (Ⅲ) 流亡水中の養分量について: 京大演報 **40**, 140—156 (1968)

Résumé

1. The mineral budgets of two small catchments in granite region at Kiryu and Kawamukai Experimental catchments located in Otsu city, Shiga Prefecture were analyzed during the period of April 1972—March 1973. The catchments are characterized by similarities of climatic conditions, edaphic substrates of bedrock and the differences of vegetational development.

2. During this one year period, the precipitation inputs were 1811.0 and 1693.0mm at Kiryu and Kawamukai catchments. The runoff outputs were 1478.8mm at Kiryu and 920.9mm at Kawamukai. The runoff ratio was considerable larger than the past at Kiryu. Samples of precipitation and runoff water were taken for mineral components analyses.

3. The average concentration of mineral contents in precipitation were Mg : 0.17 ; Ca : 0.35 ; K : 0.38 ; Na : 0.48 P : 0.954 ; (mg / l), and in runoff were Mg : 0.18, 0.15 ; Ca : 0.64, 0.40 ; K : 0.73, 0.72 ; Na : 4.81, 3.89 ; P : 0.926, 0.024, for Kiryu and Kawamukai respectively. The mineral contents in stream water were comparatively similar in both catchments, but during the experimental period, the average concentration of mineral contents were found variable throughout the season and there were no specific trends.

4. The budget of dissolved minerals was calculated from determination of input and output. In both catchments, the annual mineral inputs were, Mg : 1.9, 1.8 ; Ca : 5.0, 4.8 K : 5.2, 5.2 ; Na : 4.7, 4.6 ; P : 0.5, 0.3 and annual outputs were Mg : 3.3, 1.9 ; Ca : 10.6, 4.1 ; K : 11.2, 6.7 ; Na : 62.5, 34.0 ; P : 0.5, 0.3 ; kg / ha for Kiryu and Kawamukai respectively. The annual outputs of potassium and sodium were strongly influenced by the amount of runoff from each catchment. In all outputs, the Kiryu catchment gave larger amounts than Kawamukai which may suggest that the former ecosystem is better than the latter in term of mineral budgets.