

広島県生口島における SiO₂ フラックスの空間分布特性

重枝 豊実^{*}・小野寺 真一^{*}・齋藤 光代^{**}・吉田 浩二^{**}・竹井 務^{**}・峯 孝樹^{*}

^{*}広島大学総合科学部

^{**}広島大学大学院生物圏科学研究科

Spatial distribution of SiO₂ flux in Ikuchijima Island, Hiroshima Prefecture.

Toyomitsu SHIGE-EDA^{*}, Shin-ichi ONODERA^{*}, Mitsuyo SAITO^{**}, Koji YOSHIDA^{**},
Tsutomu TAKEI^{**}, Takaki MINE^{*}

^{*}*Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University*

^{**}*Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University*

Abstract : To clarify topographic effects on dissolved SiO₂ flux produced by chemical weathering in a granitic mountainous catchment, stream discharge were measured and water samples were collected from fifteen streams in Ikuchijima Island, Seto Inland Sea. The results show that the dissolved SiO₂ flux is controlled by stream discharge, due to high amount of runoff compare to dissolved SiO₂ concentration. However dissolved SiO₂ flux of catchment was not affected by horizontal two - dimensional features, such as catchment area, alluvial fan area, and the catchment shape. On the other hand, streambed gradient of the catchment affects runoff and dissolved SiO₂ flux, but have no influence on dissolved SiO₂ concentration. Useful water convergence degree of the catchment was calculated by multiplication of the inversion of streambed gradient by prolate degree of catchment. The estimated water convergence degree shows good correlation with dissolved SiO₂ flux and runoff.

Keyword : *Spatial distribution, SiO₂ flux, Chemical weathering, Ikuchijima Island*

はじめに

近年、化石燃料の燃焼と森林伐採によって大気中の CO₂ 濃度が上昇し、それによって引き起こされる地球温暖化が進行しつつある。地球温暖化に対応するためには、大気中 CO₂ 濃度の経年変化を明らかにするとともに、海洋及び陸域の森林、岩石の化学的風化作用などによる炭素固定を広域で空間的に評価していくことが必要である。この中で岩石の化学的風化作用は、岩石が水、二酸化炭素などと化学反応する過程である(一國, 1989)。Moldan and Cermey(1994)、Likens and Borman(1995)、White(1995)らは、小流域の河川水において溶存成分フラックスを見積もり、流域の化学的風化速度を定量化している。しかし、化学的風化作用は、気候、母岩、生物活動、地形、時間という要因によって制御される(Hans, 1941)ため、多様な要因が存在する野外での化学的風化速度は、十

分に定量化されていない(福岡, 2003; 平山, 2003)。

一方、農業流域における肥料の多量散布は、流域内の溶存成分濃度を大きく変化させる(齋藤ら, 2002)。また、酸性雨等の環境問題も、化学的風化作用と密接な関係にある(Likens and Borman, 1995; Chenny, et al., 1994)。このような、流域における人為的作用(土地利用、酸性降水物など)は、流域の自然的作用(化学的風化作用など)とともに、河川水質に大きな影響を与える。人為的作用のある流域で水資源を持続的に利用していくためには、流域の多様性にともなう河川水質の変化を明らかにしていくことが必要である。特に、流域の特性を反映する河川水質の空間的変動特性は、同一流域における河川水質の時間変化に比べて十分に解明されているとはいえない(Semkin et al., 1994)。また、河川水質の降雨時における時間的変化は著しいが、いわゆる平水時における河川水質の時間的変化は、空間的変動に比べて明らかに小さい(Semkin et al., 1994)。そのため、平水時のある時点における河川水質の空間変動特性は、比較的普遍的な傾向を示すと考えられる。

本研究では、化学的風化作用に及ぼす要因の中で、特に水文過程に大きな影響を及ぼす地形の効果に注目した。そこで、本論では瀬戸内海沿岸の山地小河川流域において、地形的要因が流域の化学的風化作用に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。また、ここでは、花崗岩流域を対象としたため、主要溶存成分であるシリカ(SiO_2)を中心に議論し、各流域における気候、母岩の差異を小さくするために試験流域を瀬戸内海沿岸地域における同一島内に選定した。

調査流域及び方法

調査地域は、広島県南東部の生口島(豊田郡瀬戸田町、因島市)である(図1)。生口島の年平均降水量は1100mm、年平均気温は15.6℃であり、温暖少雨型の気候となっている。島の総面積は

32.7km²、最高標高は472.3mである。本島では尾根が北東 - 南西方向に島の南側寄りに伸びているため、北側の流域では南側の流域より比較的流域面積が大きく、流域勾配が小さくなっている(表1)。流域の地形は上流が山地、中流から下流にかけて扇状地が共通してみられ、扇状地斜面を中心に果樹園が分布している。また、瀬戸内地域は花崗岩が広く分布しており、各流域の基盤地質はともに花崗岩である。花崗岩は、主として石英をはじめとする酸性のケイ酸塩鉱物により構成され、炭酸塩鉱物をほとんど含まない。

現地調査は、生口島内の15の小河川流域(図1)で行った。各流域の流域面積は0.2km² ~ 2.7km²であり、表1に各流域における流域面積、流下距離、流域最高標高、起伏比、扇状地勾配、山地勾配、扇状地面積、扇状地面積率、流

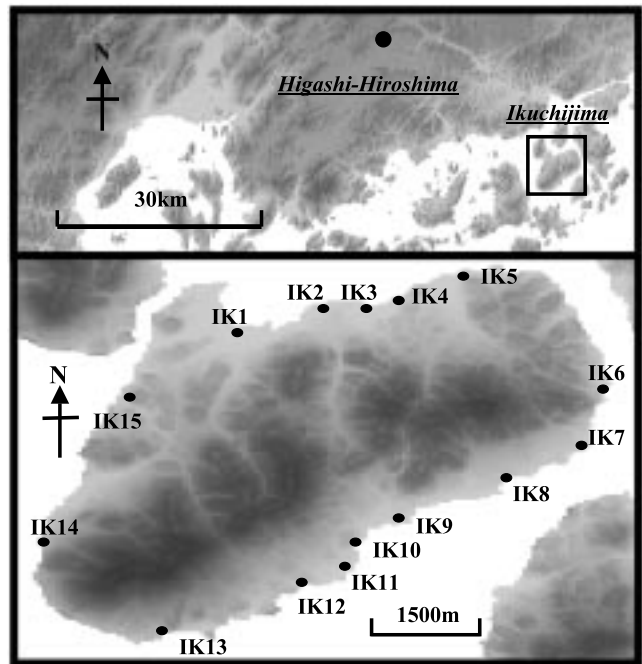


図1 調査流域概要

流域偏長度、流域集水度を示す。各流域の地形情報は、1/25000の数値地図を用いて求めた。ここで、流下距離は流域の河口から流域の最高標高に向かったの谷距離のことを示す。起伏比は流域の最高標高を流下距離で除して求めたもので、その流域の流域平均勾配の大小を示したものである。また、流域偏長度は流域形状を表わす指標として、提案し用いた。これは流域面積を流下距離の二乗で除した値として定義し、単位流下距離当たりの流域幅の比率を意味する。そのため、この値が小さいほど流域の形状が細くなる事を示す。河川集水度は、三次元的集水特性の指標として、提案し使用した。これは、三次元的な地下水の河川への流出量を示すものである。この指標を流域の起伏比の逆数と流域偏長度の積で定義した。この値が小さい流域ほど地下水の河川への集水が小さいと考えられる。

今回の調査では、化学的風化作用に及ぼす影響を明らかにすることを目的としたため、河川水が主に地下水流出からなる平水時の2003年6月7日に、各流域の最下流部で河川水の採水及び流量観測を行った。調査日の一週間前から降雨がない状態であった。また、季節的な気温の変動は、化学的風化作用に影響を及ぼす要因の一つであるが、試験流域を同一島内に設けたため、各流域ともその影響はほぼ同様であると考えられる。そのため、今回は各流域の季節にともなう河川水質の変化は考慮しないこととした。流量観測は、浮き子法で行った(Hewlett, 1964)。採水時には、pH、電気伝導度

表1 各流域における地形情報(流域面積、流下距離、流域最高標高、起伏比、扇状地勾配、山地勾配、扇状地面積、扇状地面積率、流域偏長度、河川集水度)

Sampling point	Catchment area(ha)	Longitudinal distance(km)	Catchment altitude(km)	Streambed gradient	Alluvial fan gradient	Mountain land gradient	Alluvial fan area(ha)	Alluvial fan ratio	Prolate degree of catchment	Water convergence degree of catchment
IK1	247.84	3.15	0.40	0.13	0.04	0.24	71.00	0.29	0.25	1.97
IK2	245.00	3.20	0.40	0.13	0.05	0.38	75.42	0.31	0.24	1.91
IK3	54.60	142.	0.22	0.15	0.06	0.44	29.30	0.54	0.27	1.75
IK4	28.08	1.53	0.28	0.18	0.04	0.29	14.02	0.50	0.12	0.66
IK5	266.00	2.75	0.41	0.15	0.06	0.38	98.18	0.37	0.35	2.38
IK6	30.95	1.28	0.22	0.17	0.09	0.46	7.48	0.24	0.19	1.10
IK7	33.06	1.30	0.35	0.27	0.09	0.58	8.39	0.25	0.20	0.73
IK8	44.72	1.34	0.41	0.30	0.12	0.58	20.71	0.46	0.25	0.82
IK9	108.50	1.98	0.37	0.19	0.09	0.61	40.10	0.37	0.28	1.48
IK10	39.68	1.38	0.37	0.27	0.12	0.51	23.57	0.59	0.21	0.78
IK11	39.68	1.65	0.39	0.24	0.09	0.55	22.08	0.56	0.15	0.62
IK12	20.03	1.14	0.17	0.15	0.09	0.44	16.33	0.82	0.15	1.03
IK13	52.27	1.31	0.45	0.34	0.19	0.56	18.13	0.35	0.30	0.90
IK14	77.22	1.89	0.45	0.24	0.14	0.38	17.18	0.22	0.22	0.92
IK15	45.33	1.23	0.10	0.08	0.03	0.28	17.31	0.38	0.30	3.70

Catchment area:流域面積

Catchment altitude:流域最高標高

Alluvial fan gradient:扇状地勾配

Alluvial fan area:扇状地面積

Prolate degree of catchment:流域偏長度***

Longitudinal distance:流下距離*

Streambed gradient:起伏比**

Mountain land gradient:山地勾配

Alluvial fan ratio:扇状地面積率

Water convergence degree of catchment:流域集水度****

*:流域の河口から最高標高に向かったの谷距離

** :流域の平均勾配

***:流域形状を表わす指標として提案し用いた

****:三次元的集水特性の指標として提案し用いた

(EC)、水温を測定した。採水したサンプルは実験室に持ちかえり、0.20 μm メンブレンフィルターで濾過したのち、ICP発光分析装置を用いてSi濃度を測定した。また、 SiO_2 には粒子状 SiO_2 と溶存 SiO_2 とが存在するが、濾過後の試料を用いていることからここで定量したSi濃度はほぼ溶存態であると仮定した。すなわち、化学的風化作用の際に溶出した SiO_2 であると考えられる。このため、以下本論中では、 SiO_2 を溶存 SiO_2 として扱うものとする。

結果と考察

1. 小河川流域の SiO_2 濃度及びフラックスの変動

各流域における河川水の SiO_2 濃度、単位流域面積当たりの河川流量、単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスを、それぞれ図2a、b、c、に示す。 SiO_2 フラックスとは、流域の河川流量に河川水の SiO_2 濃度を掛けて算出した負荷量のことである。ここで、流域IK3、5は河川水のECから判断して海水が混合していると考えられるが、ECから推定される海水の寄与率は0.1%未満であることから、定量した河川水の SiO_2 濃度に及ぼす海水による希釈の影響は考慮しなかった。また、今回の試料は平水時に採水したものであり、流域内の地下水とほぼ同成分の基底流出と定義される(Hewlett, 1964)。基底流出とは、一般に流域内に供給された降水うち、地下水流出として徐々に河川に供給される流出成分である(樞根, 1980)。そのため、ここで算出した単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスは、各流域における化学的風化作用の大きさを示す指標であるといえる。単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスはIK5、15で大きく、一方IK7、8、9、10、11、13で小さくなっている。また、各流域における単位流域面積当たりの河川流量の変動は、 SiO_2 濃度に比べて大きい。すなわち、流域の地下水中では、ある程度反応が平衡に達するため、濃度がある程度一樣になるのに対し、単位流域面積当たりの流量は、地形に応じて大きく変化することを意味する。

また、図3aに単位流域面積当たりの河川流量と単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスとの関係を、図3bに河川水の SiO_2 濃度と単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスとの関係を示す。本流域においては、単位流域面積当たりの流量が増加すると単位流域面積当たりのフラックスも増加するという明確な正の相関がみられる。一方、河川水の SiO_2 濃度と単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスとの関係では、単位流域面積当たりの河川流

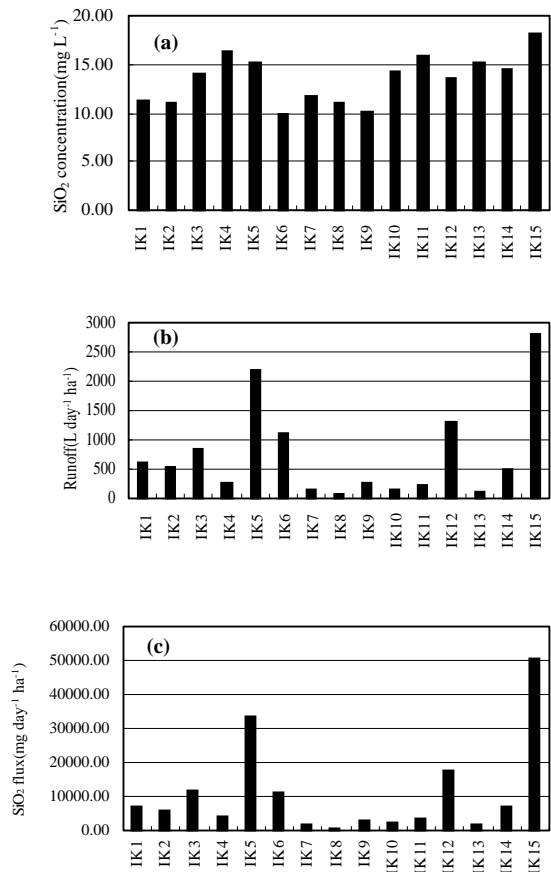


図2 (a)各流域における河川水の SiO_2 濃度
(b)各流域における単位流域面積当たりの河川流量
(c)各流域における単位流域面積当たりの SiO_2 フラックス

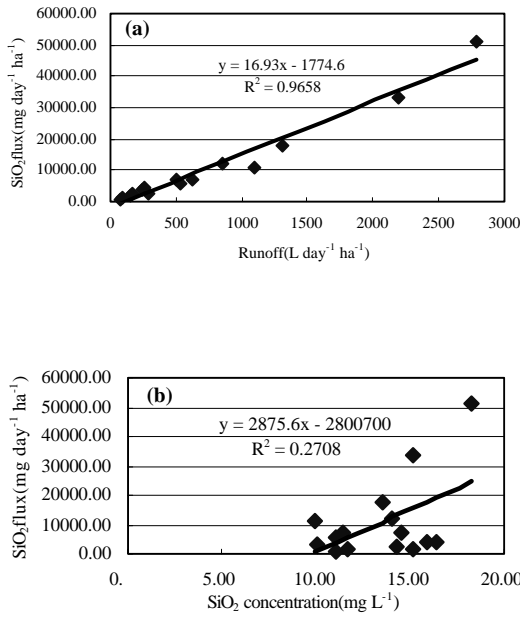


図3 (a)単位流域面積当たりの河川流量と単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスとの関係
(b)河川水の SiO₂ 濃度と単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスとの関係

量と単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスとの関係ほど明瞭な相関はみられない。これは、単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスに対して、河川水の SiO₂ 濃度よりも単位流域面積当たりの河川流量が大きく影響していることを示す。

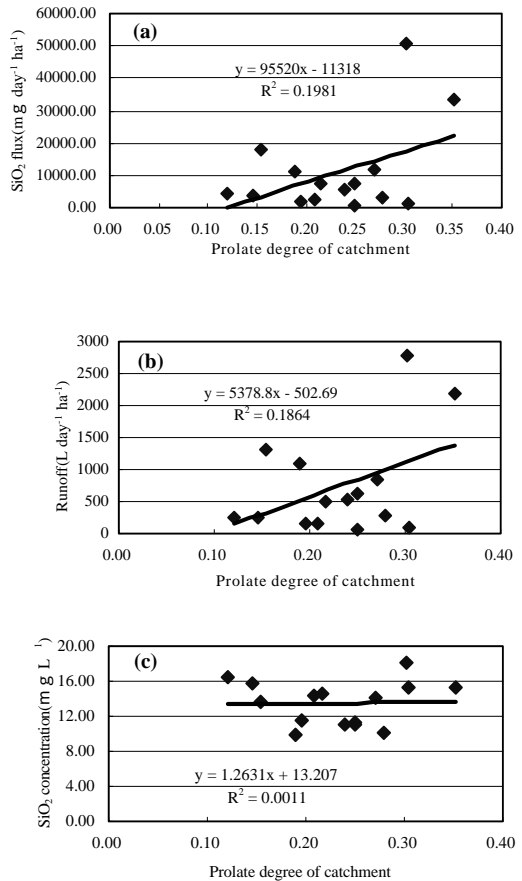


図4 (a)流域偏長度と単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスとの関係
(b)流域偏長度と単位流域面積当たりの河川流量との関係
(c)流域偏長度と河川水の SiO₂ 濃度との関係

2. 流域の SiO₂ フラックスと平面二次元地形要因との関係

ここでは、流域の化学的風化作用に及ぼす平面二次元地形要因の影響を検討する。特に、平面二次元的要因としては、流域面積、扇状地面積率、流域形状について議論する。扇状地面積率は、流域面積に対する扇状地面積の割合であり、また、流域形状を表わす指標として流域偏長度を用いた。ただし、流域面積、及び扇状地面積率は、単位流域面積当たりの SiO₂ フラックス、河川水の SiO₂ 濃度、及び単位流域面積当たりの河川流量との関係との相関がいずれも低く ($R^2=0.004 \sim 0.095$)、明瞭な相関関係は認められなかった。図 4a、b、c に、それぞれ流域偏長度と単位流域面積当たりの SiO₂ フラックス、単位流域面積当たりの河川流量、河川水の SiO₂ 濃度との関係を示す。図 4a より流域偏長度が大きくなるとともに単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスも大きくなる流域と、流域偏長度は大きいけど単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスが小さいままの流域が存在することがわかる。また、同じく流域形状度と単位流域面積当たりの河川流量との関係(図4b)においても同様の2パターンの流域が混在しているようにみられる。しかしながら、流域偏長度と河川水の SiO₂ 濃度には図 4a、

bで見られた傾向は無く、また相関係数も見られない(図4 c)。このことから、流域偏長度は化学風化作用の強度に大きな影響を及ぼさないと考えられる。以上のことから、流域における化学的風化作用は、流域面積、扇状地面積率、流域形状という平面二次元的な地形特性では評価できないことが確認できた。

3. 流域のSiO₂フラックスと流域地形勾配との関係

次に流域勾配と化学的風化作用との関係を検討する。図5a、b、cにそれぞれ起伏比と単位流域面積当たりのSiO₂フラックス、単位流域面積当たりの河川流量、河川水のSiO₂濃度との関係を示す。図5aから、急勾配な流域では単位流域面積当たりのSiO₂フラックスが小さく、一方、緩勾配の流域ほど単位流域面積当たりのSiO₂フラックスが大きい傾向にあり、単位流域面積当たりのSiO₂フラックスと起伏比が負の相関を示すことが読み取れる。また、図5bから、起伏比が大きい流域ほど単位流域面積当たりの河川流量が小さく、起伏比が小さい流域ほど単位流域面積当たりの河川流量が大きいという傾向が表れている。これは、各流域における地下水涵養量や下流における地下水流出域の大小などにも影響されると思われるが、これらの結果から、比較的起伏比が小さい流域は、起伏比が大きい流域に比べて、地下水が河川に流出しやすい流域形態をなしていると考えられる。また、起伏比の大小は地下水の河川への流出量を決定するとともに、地下水の移動経路を決定する要因にもなっていると考えられる。すなわち、起伏比の小さい流域においては、土壌水・地下水の移動速度が小さく、長く鉱物と接触し化学的風化作用の影響をより強く受けるため、地下水のSiO₂濃度が大きくなると考えられる。このことから、流域の起伏比の大きさは各流域の化学風化作用の大きさに影響を与えたと考えられる。しかしながら、図5cより、河川水のSiO₂濃度と起伏比の間には、明確な相関関係がみられない。このことは、河川水のSiO₂濃度の形成において重要となる水-岩石の接触時間の指標として、流域の平均的勾配を意味する起伏比より、山地斜面または扇状地といった流域の部分的な勾配が有効である可能性が示唆される。

そこで図6a、bにそれぞれ扇状地勾配、山地勾配と河川水のSiO₂濃度との関係を示す。しかしながら、図6a、bではともに明瞭な関係はみられなかった。すなわち、流域における河川水のSiO₂濃

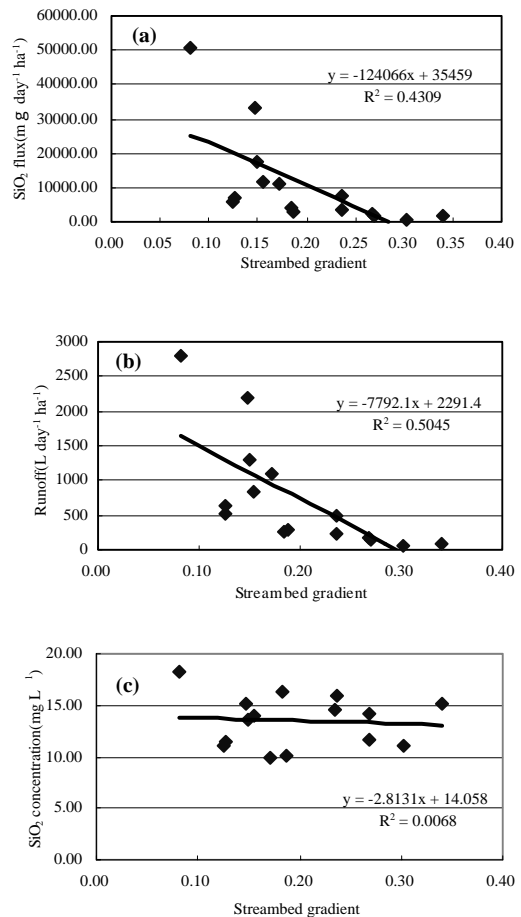


図5 (a)起伏比と単位流域面積当たりのSiO₂フラックスとの関係
(b)起伏比と単位流域面積当たりの河川流量との関係
(c)起伏比と河川水のSiO₂濃度との関係

度の形成には、流域地形勾配による水 - 岩石の接触時間だけでなく、各流域の土層の厚さによる接触時間、生物活動、果樹園における施肥の影響など各流域の地形情報からでは得られない多様な要因が複雑に関与していると考えられた。以上のことから、起伏比で表わされる流域の平均勾配は、流域内での地下水流出量の指標となり、勾配が急になるほど河川流量は低下し、結果として単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスも小さくなったことが確認できた。一方、流域の化学的風化作用の強度を示す河川水の SiO₂ 濃度は、流域の地形勾配だけではなく、多様な要因により複雑に関与し決定されることが示唆された。

4. 河川流域の SiO₂ フラックスと三次元的地形要因との関係

前節では、各流域における平面二次元地形特性、地形勾配特性と流域における SiO₂ フラックスとの関係について、二次元的要因により寄与される河川流量に強く影響を受けることが確認された。そこで、今節では各流域における三次元地形特性が流域における単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスに及ぼす影響について議論する。ここでは、三次元的集水特性の指標として、河川集水度を提案し使用した。二次元地形特性では、起伏比が小さくなるほど河川への地下水流出量が増加する。すなわち、河川の集水度が増加することになる。よって、集水度は起伏比の逆数に比例する。また、平面二次元的特徴である流域の流域偏長度が大きくなると流域の流下距離に対する幅の比率も大きくなるため河川網が発達し、集水度も増加することになる。この指標を流域の起伏比の逆数と流域偏長度の積で定義した。図7a,bにそれぞれ河川集水度と単位流域面積あたりの河川流量、単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスとの関係を示す。図7a から河川集水度と単位流域面積当たりの河川流量との間には明瞭な相関関係がみられる。また、この相関関係は、図5 b、図6 a、bにおける各二次元的地形要因と単位流域面積当たりの河川流量との関係よりも明確である。このことから、流域の地下水は三次元的集水特性が大きい

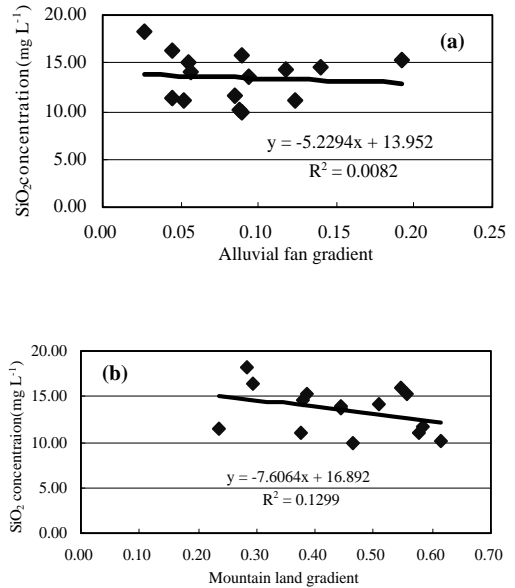


図6 (a)扇状地勾配と河川水の SiO₂ 濃度との関係
(b)山地勾配と河川水の SiO₂ 濃度との関係

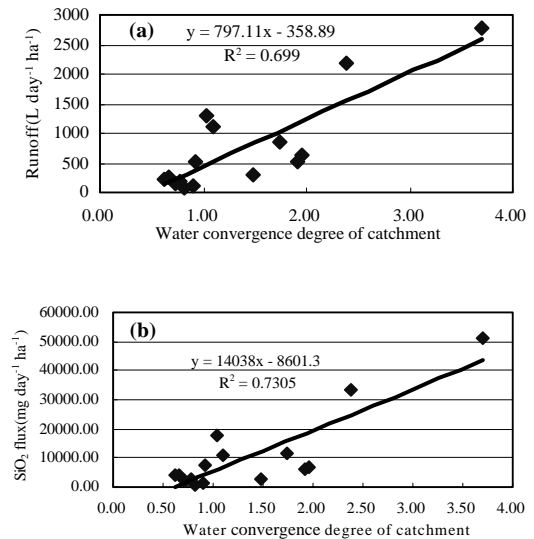


図7 (a)河川集水度と単位流域面積当たりの河川流量との関係
(b)河川集水度と単位流域面積当たりの SiO₂ フラックスとの関係

流域において、より河川に流出することがわかる。さらに、図 7b から河川集水度が大きい流域ほど単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスが大きく、河川集水度が小さい流域ほど単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスが小さくなるという相関関係がみられる。このことは、流域の三次元的集水特性が大きいと、その流域の河川流量が増加し、化学的風化作用の強度が大きくなることを示す。また、この相関関係は河川流量と同様に、各二次元地形要因との関係よりも明確である。なお、河川集水度と河川水の SiO_2 濃度との間には相関はみられないことから、この指標は滞留時間を説明するものではないと考えられる。

まとめ

本研究では、瀬戸内海沿岸地域の花崗岩山地小流域において、流域の化学的風化作用に及ぼす地形の影響を明らかにすることを目的とした。ここでは、15 の小流域で河川水の採水及び流量観測、採取した水試料の溶存 SiO_2 濃度を定量した。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 気温、降水量などの気候条件、および母岩が同じである小流域においては、単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスと、単位流域面積当たりの河川流量との間に明瞭な相関関係がみられたことから、単位流域面積当たりの河川流量は、流域の単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスにもっとも強く影響を与えると考えられる。
- 2) 流域面積、扇状地面積、流域形状に代表される平面二次元的な特性は、単位流域面積当たりの SiO_2 フラックスとの間に相関がみられなかったことから、化学的風化作用の強度には直接的には影響を与えていないと考えられる。
- 3) 流域全体の平均的な勾配を示す起伏比は、河川への地下水流出の指標となりうるが、滞留時間、すなわち、河川水の SiO_2 濃度の指標とはなりえない。これは、流域における河川水の SiO_2 濃度が多様な要因により決定されていることを示唆する。そのため、季節変化による河川水の SiO_2 濃度の変動も考慮にいれる必要がある。
- 4) 化学的風化作用に最も影響を与えうる単位流域面積当たりの河川流量は、起伏比との逆数と流域偏長度の積で表わされる流域形態における三次元的集水特性と最も明確な相関を示した。

謝 辞

本研究を行うにあたり、採水、流量観測、現地調査にご協力いただいた学生実習参加者に深く感謝致します。なお、本研究は文部科学省科学研究費基盤 A (代表:福岡正人) を使用して行った研究の一部である。

引用文献

- 福岡正人 (2003) 山地流域の水文地質環境と物質循環, 地球惑星合同シンポジウム.
Hans, J. (1941) Factors of Soil Formation, McGraw-Hill Book Company, New York, 281pp.
Hewlett, J. D. (1964) Principles of Forest Hydrology. The University of Georgia Press Athens, Georgia 30602.
平山恭之 (2003) 室温・大気圧下の弱酸性溶液中におけるカリ長石の溶解速度, 地球惑星合同シンポジウム.
一國雅巳 (1989) ケイ酸塩の風化とその生成物. 土の化学 2 章, 季刊化学総説 No.4, 6-18.

榎根勇 (1980) 水文学 . 自然地理学講座 3, 大明堂 . 272pp.

Likens, G. E. and Bormman, F. H. (1995) Biogeochemistry of a Forested Ecosystem (2nd ed.). Springer-Verlag, New York, 159p.

Moldan, B. and Cerny, J. (1994) Biogeochemistry in small catchments. John Wiley & Sons, Chichester. 419pp.

齋藤 光代・小野寺 真一・竹井 務・西宗 直之 (2002) 瀬戸内海沿岸小河川における硝酸性窒素負荷量 - 果樹園面積・溜池・扇状地の効果 - , 広島大学総合科学部紀要 第 28 巻, 77-84.

Semkin, R. G. et al., (1994) Hydrochemical Methods and Relationships for Study of Stream Output From Small Catchment. Biogeochemistry of Small Catchments Chapter 7. John Wiley & Sons, 163-187.

White, A. F. (1995) Chemical weathering rates of silicate minerals, Reviews in Mineralogy, 31, 407-461.