

法面被覆植物による酸性雨中和能の可能性

足立忠司*・沖 陽子*・永井明博*・中司昇吾**

Neutralization Effects of Acidity of Rain by Cover Plants on Slope Land

Tadashi ADACHI*, Yoko OKI*, Akihiro NAGAI* and Shogo NAKATSUKASA**

* Faculty of Environmental Science and Technology, Okayama University

** The Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University,
 3-1-1 Tsushima-naka, Okayama, 700-8530 Japan

Abstract

Neutralization effects of acidity of rain were examined by cover plants on slope land. Slope gradient was 10 degrees.

Cynodon dactylon Pers, *Dichondra repens* Forst and *Artemisia princeps* Pampan were selected as cover plants.

The pH value of rain less than pH 5.6 was observed 10 times among 13 times of sampling, and it was ranged from 4.39 to 5.92.

The main results of this experiment were as follows :

- ① The pH value of surface runoff increased than that of each rain. The average value of $[H^+]$ of surface runoff was a value from which 47% of $[H^+]$ of rain was subtracted. This means that cover plants have the neutralization effects of acid rain.
- ② The neutralization capability of acid rain was explained that cation leached from the leaf parts of cover plants has played the role of counteractive.
- ③ There was the difference in the pH value of surface runoff between *Artemisia princeps* and *Cynodon dactylon*. Therefore it was shown that the neutralization effects of acid rain of *Artemisia princeps* was larger than that of *Cynodon dactylon*.

Key words : cover plants, acid rain, neutralization effects, Electric Conductivity, Potassium ion, *Artemisia princeps* Pampan

1. はじめに

人口の増加とその活動の増大に伴う大気環境の変化と汚染に関する課題が急激に高まり、その対策が検討されている。しかし、増加の一途をたどる地球人口、向上する生活水準のために、エネルギー需要は今後も増加の一途をたどり、大気はさらに汚染されることが予測されている(水間, 1992; 環境省, 2002)。大気汚染の一つである酸性雨問題も、その発生源対策は遅々として進まず、その解決が困難な状況にある。そこで、筆者らは、酸性雨は依然として発生することを前提に、酸性雨が生態系

に及ぼす影響を軽減するためには、自然構成要素の浄化能に頼らざるを得ないという観点から、その浄化能を定量的に把握することを最終目的として研究を進めている。一方、土壌劣化の一因である土壌侵食の防止対策として、法面被覆植物の土壌侵食防止機能を検討しているが(Afandi *et al.*, 2002)、その際、地被状態によって法面を流下する表面流去水のpHが異なることを確認し、森林の酸性雨中和能(例えば大手ら, 1997)のみならず、法面被覆植物にも酸性雨のpH軽減機能が期待できるものと認識した。

そこで、本研究では、法面を流下する降雨の水質が、

* 岡山大学環境理工学部 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

** 岡山大学大学院自然科学研究科 〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1

キーワード: 法面被覆植物, 酸性雨, 中和能, 電気伝導度, カリウムイオン, ヨモギ

法面被覆植物の存在によって、どの程度緩和され、下流端に及ぼす影響が軽減されるかを検討した。この課題の検討に当たっては、最終的には、大気-植物-土壌系での物質循環を考えなければならないが、まず1降雨に対する法面被覆植物の反応挙動を現象論的に把握したものである。

2. 実験方法

2.1 実験場所と試験区

実験は、岡山県久米郡中央町に位置する日本植生株式会社傾斜圃場にて実施した。同圃場内に、図-1に示す試験区を5区開設し、4試験区は雑草を植栽した区（以下、植生区という）、他は対照区としての無植栽区（同、裸地区）とした。各試験区は、粘土質地上にマサ土を20 cm厚客土した傾斜10度の盛土法面であり、面積10 m²（幅2 m, 長さ5 m）である。また、各試験区はアクリル板で囲まれており、試験区外からの水の流入はない。

2.2 法面被覆植物

法面被覆植物としては、厳しい環境への適応力が高いと考えられ、かつ生活型の異なるギョウギシバ (*Cynodon dactylon* Pers), ダイコンドラ (*Dichondra repens* Forst) およびヨモギ (*Artemisia princeps* Pampan) の3草種を供試し、これらを1999年6月に植栽した（なお、1996

年植栽したギョウギシバ区も実験対象区とした）。2001年5月には、ギョウギシバとヨモギの植栽区の植生率は80%以上となったが、ダイコンドラ区は50%以下の植生率であったため、同年7月に再移植を行い80%程度に回復させた。しかし、6月上旬にはコメツツメクサ、さらにメヒシバやエノクログサなどの侵入雑草が多く発生したので、ダイコンドラ単一草種の試験区とは認められない。その他の植生区は単一草種区として考察できる。なお、各試験区は常に手による除草を行い地被状態を維持したが、同年9月4日に、地際から30 cm高に刈り込みを行った。

2.3 表面流去水ならびに降雨の採取

本実験で用いている表面流去水とは、法面の地表面を流下し、試験区下端に設置したアプローチ末端で直接採取した水であり、貯水槽から採水したものではない。アプローチ板は、マサ土表面下2 cm以浅にその先端を10 cm程度挿入しているが、観察結果から、アプローチ板上に流下してくる水は法面表面を流下する水が主であった。

降雨は試験区近傍で採取したが、この際、雨が降り始めてからの時間は考慮していない。雨が降り始めてからの経過時間によって降雨の酸性度は変化するが、試験区の大きさからみて降雨の採取とほぼ同時に表面流去水を採取し、比較をすることができると考えたからである。また、降雨のpHは降雨強度にも影響を受けるが、1降雨に対する法面被覆植物の反応を検討することを目的にするため、考察にはこの要因も考慮しなかった。

表面流去水および降雨は毎回約200 mLを採取した。実験期間は、2001年5月23日～11月3日であり、この間13回の各採水を実施した。なお、本稿での酸性雨概念は酸性降下物全てを含んで使用している。従って、無降雨期間の植物体への乾性沈着物量の相違が本実験結果のバラツキとなる。

2.4 測定項目

降雨ならびに各試験区から採取した水は、5B濾紙で濾過した後、供試した。測定項目は、pH(H₂O)(HORIBA pH/ION METER F-23)と電気伝導度EC(HORIBA CONDUCTIVITY METER DS-14)であるが、さらにECの内容を検討するために、陽イオンとして、K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Zn²⁺, Fe²⁺を、陰イオンとして、SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻を測定した。陽イオンは、原子吸光光度計(HitachiZ-6100)、陰イオンはイオンクロマトグラフィー(HitachiD-7500)にて測定した。測定はいずれも3反復を行った。以下の図中の点はいずれも3反復の平均値である。

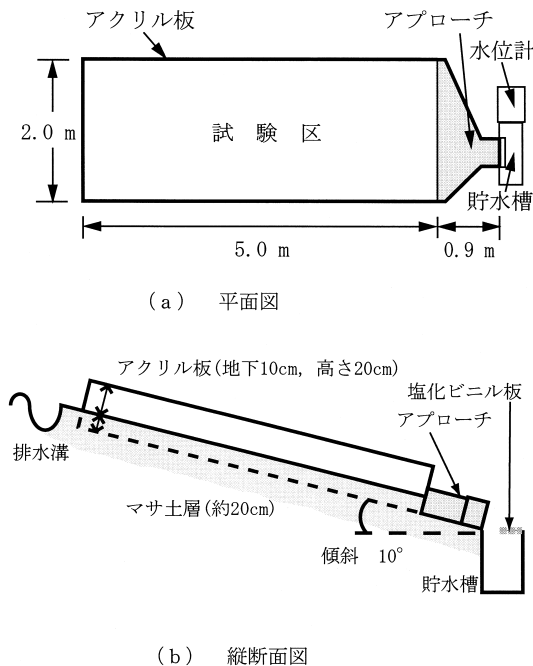


図-1 試験区の概要図

Fig. 1 Schematic illustration of experimental plot.

3. 降雨の特性

本実験期間中の降雨の特性として、降雨の pH と降雨中に含有される物質評価の指標となる EC との関係を図-2 に示した。降雨の pH は 4.39~5.92 の値が観測され、水素イオン濃度 ($[H^+]$) に換算し求めた平均値は pH 4.98 であった。我が国では pH 5.6 以下の降雨が酸性雨であるから、降雨の測定を行った 13 回のうち、酸性雨は 10 回観測された。また、降雨の pH には地域性があるが (安田, 1993)、本試験地の降雨は、わが国の降雨の pH 範囲であった。さらに、降雨の pH が 5.6 付近で EC は最小値を示し、pH の減少あるいは増大に伴って、その値は高くなる結果が示された。両者の関係を 2 次式で近似すると、この変曲点の pH は 5.46 ($R^2=0.9234$) と推定された。降雨の pH とその EC との関係において変曲点が存在することはすでに確認されているが (玉置, 1985)、その理由は明確ではない。

図-3 に、降雨の pH と含有陽イオンおよび含有陰イオンとの関係をイオン毎に示した。各陽・陰イオンとも図-2 と定性的傾向は同じであるが、図-3 (a) によると、降雨の pH の変動に対し、 $[Na^+]$ と $[K^+]$ の変化が著しい。測定陽イオン中、量的に多く、かつ大きく変動するのは、海塩由来である $[Na^+]$ であり、ついで $[K^+]$ ある。その他の陽イオンは降雨の pH が変化しても、著しい変化は示していない。また、図-3 (b) によると、 $[SO_4^{2-}]$ と $[Cl^-]$ の変化が著しい。 $[NO_3^-]$ は、降雨の pH が酸性雨境界で若干低下傾向を示すが、ほとんど変化を示していない。 $[SO_4^{2-}]$ は、降雨の pH が低いほど高い含有量を示している。このことから、本地域の酸性雨は、 $[NO_3^-]$ より $[SO_4^{2-}]$ の影響を受けていると考えられる。 Cl^- は Na^+ の対イオンとして $[Na^+]$ と同じ挙動変化を示し、酸性雨境界までは pH の上昇と共に減少

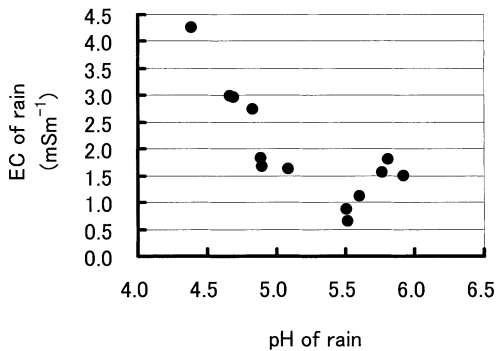
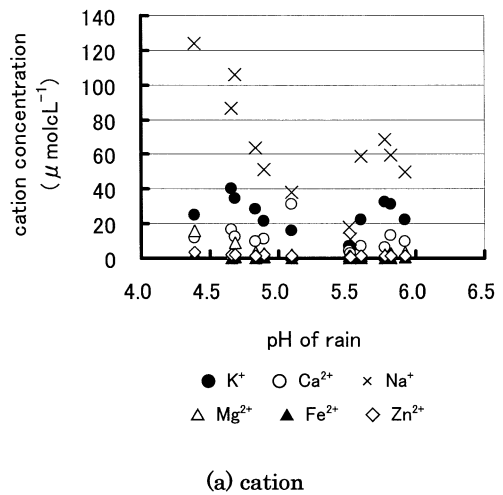


図-2 降雨の pH と EC

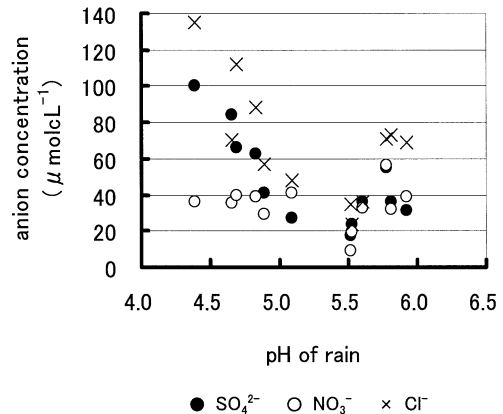
Fig. 2 Relations between pH and EC of rain.

し、酸性雨境界をすぎると濃度は再び上昇している。

実験期間中の降雨の $[Cl^-]/[Na^+]$ 値は平均的に 1.21 で、海水中の同比 1.17 に近い値であった。また、藤田 (1990) の提唱する非海塩由来の $[SO_4^{2-}]$ を計算すると、本降雨は 60~88% であった。従って、本地区の降雨は、瀬戸内海からの海塩の影響を受けている降雨と判断された。さらに、降雨の pH を支配するのは非海塩由来の $[SO_4^{2-}]$ であるとの説があるが (柴田ら, 1994)、いまだ降雨の酸性化の機構は解明されていないので、本報では、総 $[SO_4^{2-}]$ として扱った。



(a) cation



(b) anion

図-3 降雨の pH と陽イオンならびに陰イオン

Fig. 3 Relations between pH and cations or anions of rain.

4. 法面被覆植物による降雨の酸性度軽減効果

4.1 植生区における表面流去水の pH 挙動

図-4 (a) に、降雨の pH と植生区における表面流去水の pH との関係を示した。図中の斜直線 (実線) は、降雨と表面流去水の pH が 1 : 1 の関係を示しているが、ほとんどの測点はこの直線より上側にある。このことは、植生区における表面流去水の pH は、降雨のそれより上昇していることを意味しており、法面被覆植物の存在により、降雨の酸性度が軽減・緩和され、酸性雨緩衝能が存在することを示唆している。

図-4 (b) は、この表面流去水の pH を水素イオン濃度 ($[H^+]$) に換算し、降雨の $[H^+]$ との比として表示した結果である。図中には、降雨の $[H^+]$ と表面流去水の $[H^+]$ とが同じ値を示す直線 (実線) を示している (比較したイオン種が異なる以下の図においても、同じ内容を示す直線を表示している)。これによると、比値は 0.1~

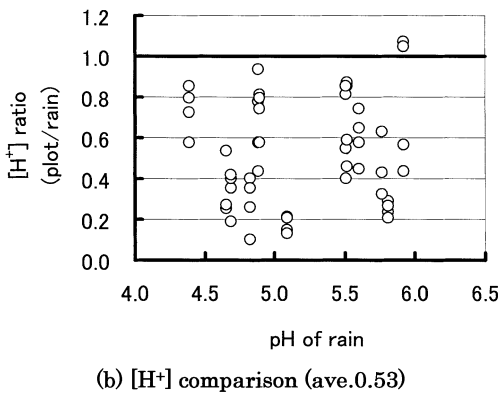
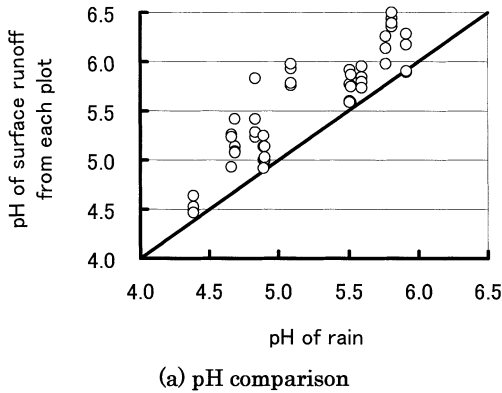


図-4 降雨と植生区表面流去水の pH ならびに $[H^+]$ 比
Fig. 4 The pH or $[H^+]$ comparison between rain and surface runoff from cover plant plots.

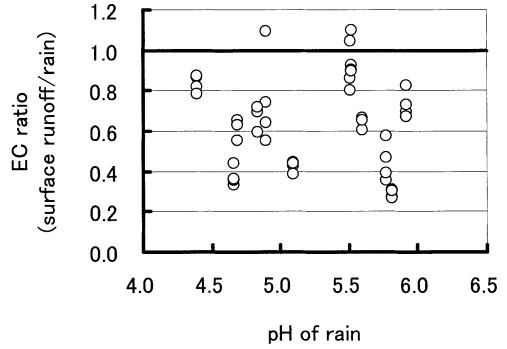


図-5 植生区表面流去水と降雨の EC 比

Fig. 5 EC ratio of rain to surface runoff from cover plant plots (ave. 0.64).

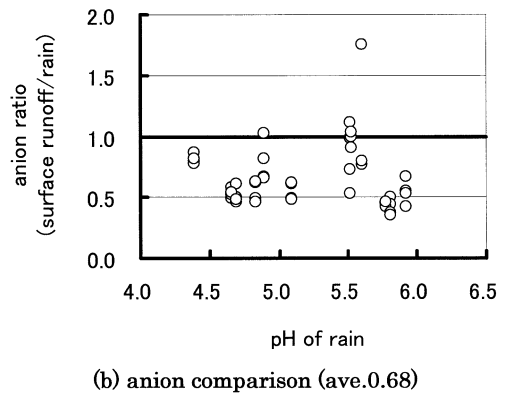
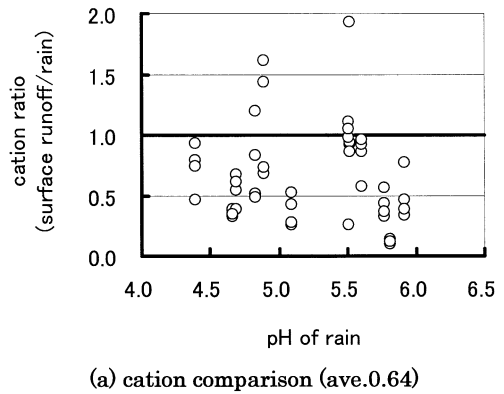


図-6 植生区表面流去水と降雨の塩基ならびに陰イオン濃度比

Fig. 6 Ion concentration ratio of rain to surface runoff from cover plant plots.

1.07 と、採水日によって大きく異なるが、平均値は 0.53 で、降雨の $[H^+]$ の 47% が減じられていた。

4.2 植生区における表面流去水のイオン挙動

4.2.1 電気伝導度 EC の挙動

図-5 に、植生区における表面流去水の EC と降雨のそれとの比を降雨の pH との関係で示しているが、大半の比値は直線より下側に位置しており、表面流去水の含有イオン量は、降雨中のそれより減少するという結果を得た。このことは、降雨に含有されるイオンが植物体に吸着されたことを示唆している。表面流去水の EC は降雨のそれと比較して、1.1~0.27 倍、平均は 0.64 倍であり、36% の減少であった。

4.2.2 陽イオンと陰イオンの挙動

図-5 は、本研究で測定していないイオンも含む含有イオンの総体を表す EC で検討した結果であるので、測定対象とした各陽・陰イオン挙動を検討した。

まず、植生区の表面流去水中に含有される測定イオン濃度の総計と降雨のそれとの比を降雨の pH との関係で

表し、図-6 (a) には陽イオン中の塩基濃度比を、(b) は陰イオン濃度比を示した。これらによると、植生区の表面流去水の塩基濃度ならびに陰イオン濃度とも降雨の塩基濃度および陰イオン濃度より低くなる結果が得られた。表面流去水と降雨の塩基濃度比ならびに陰イオン濃度比の平均はそれぞれ 0.64, 0.68 であった。

次に、植生区における表面流去水に含有されるイオン毎の挙動を検討した。図-7 に、表面流去水の各陽イオン濃度と対応する降雨中の陽イオン濃度との比を、図-8 には同様に各陰イオン濃度比を降雨の pH との関係で示した。

まず、陽イオンの挙動では、 $[K^+]$ (比平均 0.94)、 $[Ca^{2+}]$ (比平均 0.71) および $[Na^+]$ (比平均 0.45) は降雨中の同イオン濃度より減じていた。それに対し、 $[Mg^{2+}]$ は比平均 1.23 であり、降雨の同イオン濃度より増加していた。図-6 (a) において、植生区の表面流去水の塩基濃度総計は降雨中のそれより低下するという結果が得られたが、イオン毎にみると、降雨より植生区の方が多く含有

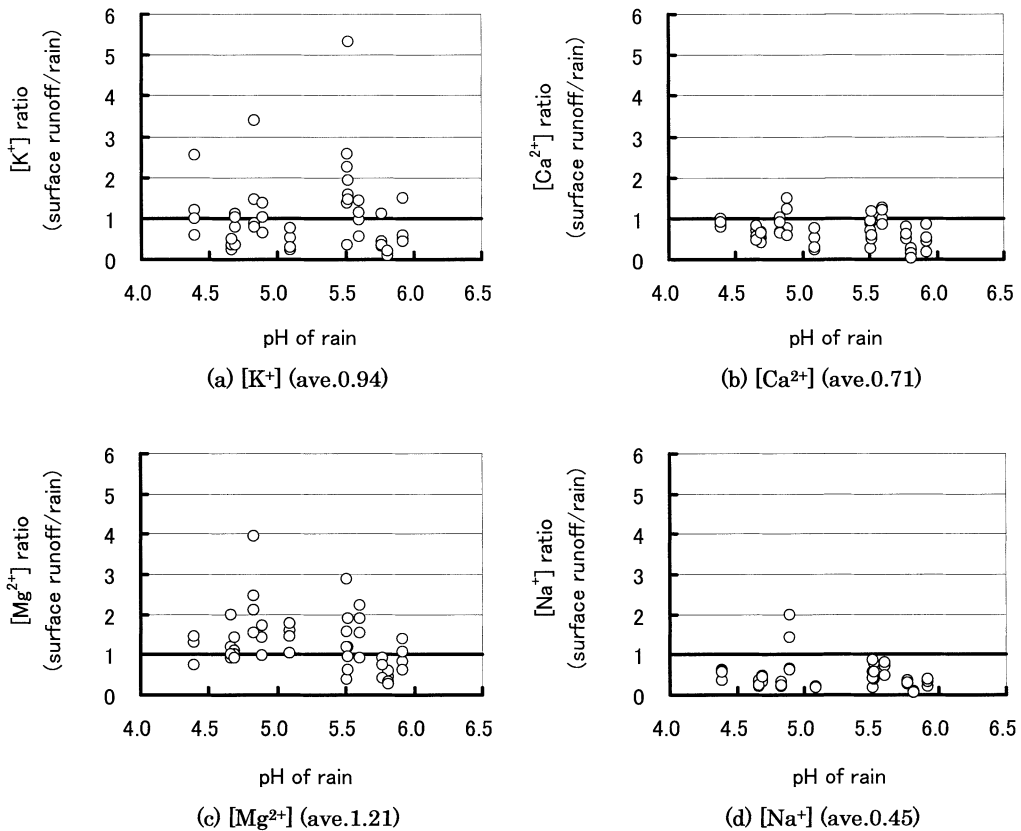


図-7 植生区表面流去水と降雨の陽イオン濃度比

Fig. 7 Cation concentration ratio of rain to surface runoff from cover plant plots.

される陽イオンも存在した。

また、図-8 (a), (b) に示した植生区の表面流去水に含有される $[\text{SO}_4^{2-}]$ と $[\text{NO}_3^-]$ は、降雨中の同イオン濃度に対しそれぞれ 0.88, 0.91 と低下していた。このことはまた、降雨中のこれら陰イオンも植物体に吸収される可能性が高いことを示唆している。同図 (c) に示す表面流去水の $[\text{Cl}^-]$ は、降雨中の同濃度に対し 0.40 と著しく低い値を示していた。

以上のイオン挙動から、酸性雨軽減効果は、酸性雨に

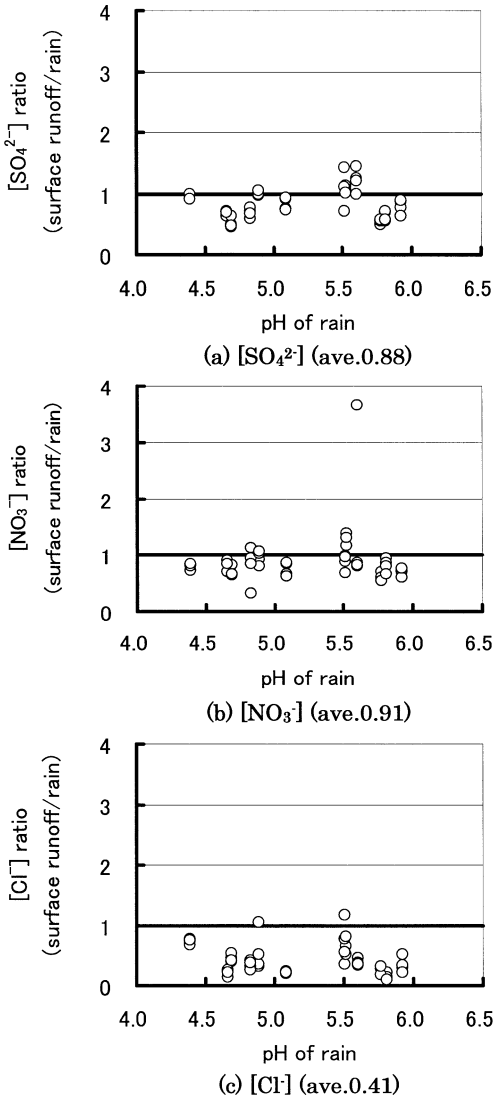


図-8 植生区表面流去水と降雨の陰イオン濃度比
 Fig. 8 Anion concentration ratio of rain to surface runoff from cover plant plots.

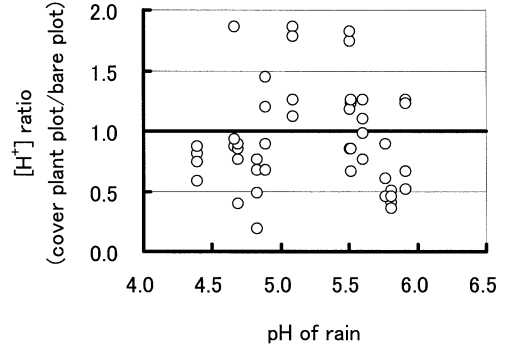


図-9 裸地区と植生区の $[\text{H}^+]$ 比
 Fig. 9 Comparison of $[\text{H}^+]$ ratio of surface runoff between bare plot and cover plant plot (ave. 0.93).

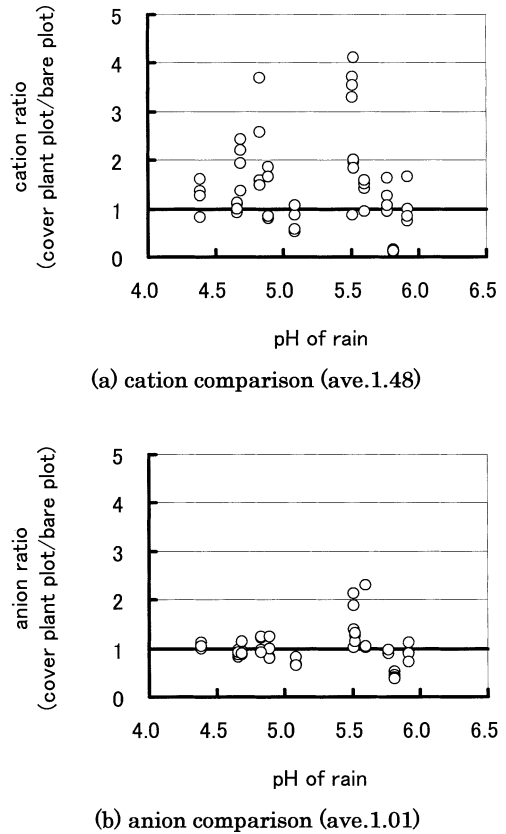


図-10 植生区と裸地区の塩基ならびに陰イオン濃度比
 Fig. 10 Comparison of cation and anion concentration ratio of surface runoff between bare plot and cover plant plot.

よる植物体からのイオンの溶脱と降雨中の含有イオンが植物体に吸着・保持される現象が関与しているものと考えられ、主に植物の葉部におけるイオンの溶脱と吸着に起因していると推察された。葉部のイオンの溶脱・吸着に関する検討は別途報告するが、作物の葉部が降雨に触れると、葉部のクチクラ層から各種イオンが溶脱することが認められており（木村，1978），pH の異なる酸性雨によって、溶脱されるイオン種や量が異なることも推察された。

草本植物による酸性雨中和能の検討はほとんど無く、ササについて報告されているのみであるが（Takamatsuら，1997），本研究において、草本植物の酸性雨中和能の可能性は大であることが示唆され、法面を流下する酸性雨の酸性度の緩和・軽減効果が存在することが明らかとなった。

5. 植生区と裸地区における降雨の酸性度軽減比較

図-9 に植生区と裸地区の表面流去水の [H⁺] 比を降

雨の pH との関係で示している。

1 降雨毎の変動は大きく、比值は 0.19~1.86 であったが、裸地区の表面流去水の [H⁺] に比べて、植生区の表面流去水の [H⁺] は低い場合が多いという結果が得られた。同比平均は 0.93 であり、植生の存在により、裸地区の [H⁺] より 7% 減少していた。しかし一方、この定量的評価は、土壤の緩衝能を無視できず、酸中和能を考える際には、土壤-植生系としてとらえる必要があることを意味している。

この現象を検討するために、図-10 に植生区の表面流去水に含有される塩基総量ならびに陰イオン総量と裸地区における同イオン総量比を示した。これらによると、塩基イオンの同比は 1.48 であり、裸地区より植生区の方がその表面流去水に多く陽イオンが含まれており、この現象からも植物体から溶脱している可能性が示唆された。また、陰イオンに関しては、同比 1.01 であり、両者に大きな差は認められなかった。

さらに、各イオン毎の挙動を検討するために、図-11

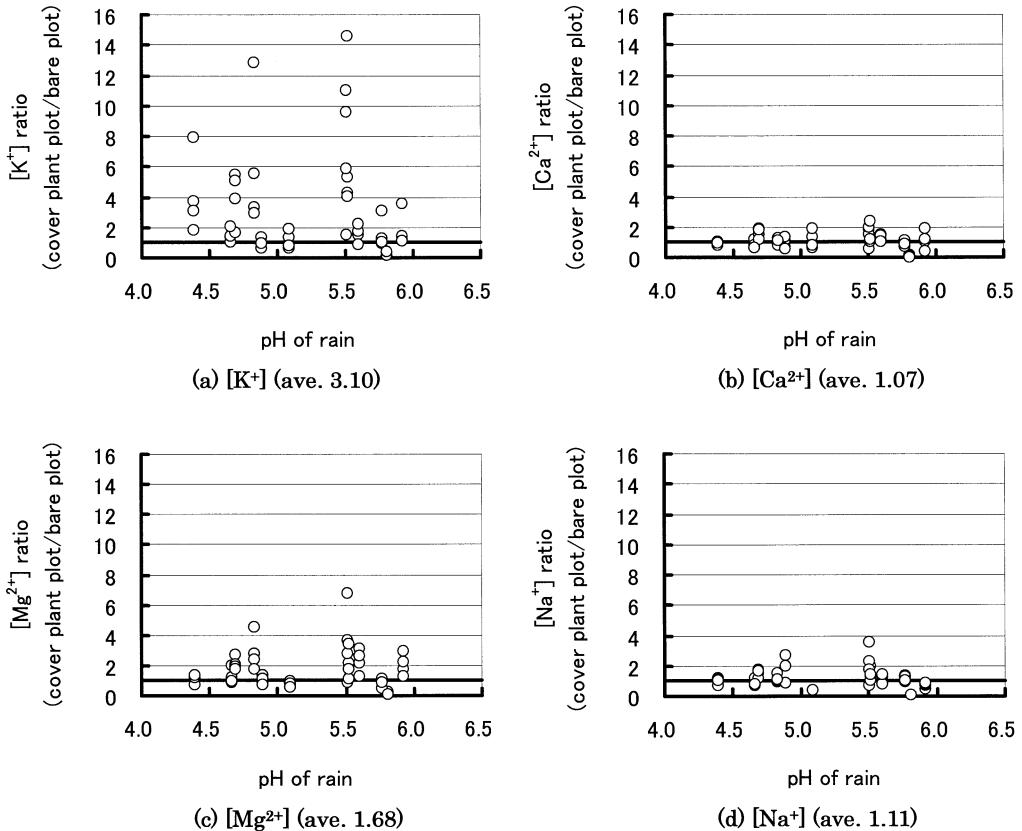


図-11 植生区と裸地区からの表面流去水中の陽イオン濃度比較

Fig. 11 Comparison of cation concentration ratio of surface runoff between bare plot and cover plant plot.

に、植生区と裸地区における表面流去水中の各塩基比を、図-12には同様に各陰イオン比を降雨のpHとの関係で示した。図-11によると、植生区と裸地区における表面流去水の $[Ca^{2+}]$ および $[Na^+]$ の含有量比の平均はそれぞれ1.07, 1.11であり、両者に大差はないが、 $[K^+]$ と $[Mg^{2+}]$ は同比3.10, 1.68と植生区が高く、とくに $[K^+]$ は裸地区の表面流去水に比べて、植生区のそ

れに著しく多く含有されていた。図-12の陰イオンの場合には、塩化物イオンは植生区が裸地区より若干高いが(同比1.15), $[SO_4^{2-}]$ と $[NO_3^-]$ はそれぞれ0.94, 1.01と両者に大差はない。

同年12月に、60cm厚までの土壌断面調査を実施し、降雨および表面流去水と同項目の測定を行い、酸性雨の土壌への影響も検討したが、この結果は別途報告する。ただ、同時期における地表0~5cm厚の裸地区のpHは5.80であったが、植生区においてはpH 6.11~6.29であったことを付記しておく。このことは降雨が植物体に触れてから落下すると土壌の酸性化が緩和されることを意味している。

6. 草種間の酸性度軽減効果比較

草種間の相違は植栽時期の相違や被覆率の相違など影響する他の要因が関係するので、植栽時期が同一のヨモギ区とギョウギンバ区における表面流去水の $[H^+]$ の比較を行い、図-13に示した。これによると、ヨモギ区における表面流去水の $[H^+]$ がギョウギンバ区の $[H^+]$ より小さい場合が多いことが認められた。すなわち、ヨモギ区の表面流去水の $[H^+]$ はギョウギンバ区のそれに比べて、1.86~0.25倍と変動は大きい、平均値は0.89と11%減少であり、ヨモギとギョウギンバでは、ヨモギの方が酸性雨の酸性度軽減効果がたとえと結論できた。

この現象を検討するために、ヨモギ区とギョウギンバ区の表面流去水に含有されるイオン毎の比として、図-14に塩基濃度比、図-15には陰イオン濃度比を降雨のpHとの関係で示した。これらによると、 $[Ca^{2+}]$ と $[Na^+]$ 、さらに $[SO_4^{2-}]$ と $[NO_3^-]$ においては両者に大

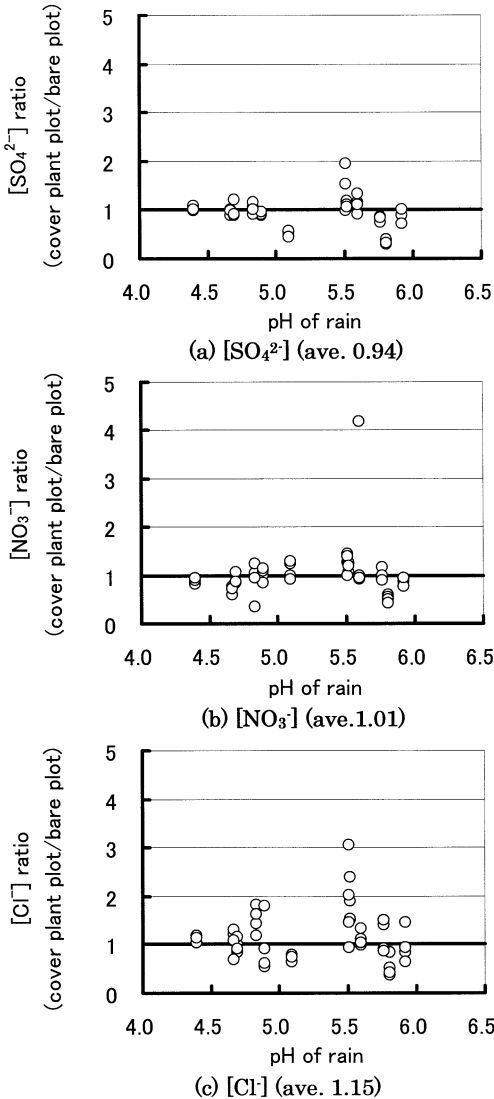


図-12 植生区と裸地区からの表面流去水中の陰イオン濃度比

Fig. 12 Comparison of anion concentration ratio of surface runoff between bare plot and cover plant plot.

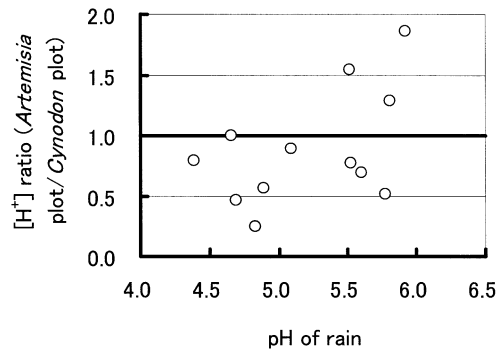


図-13 ヨモギ区とギョウギンバ区における表面流去水の $[H^+]$ 比

Fig. 13 The $[H^+]$ ratio comparison of surface runoff between *Artemisia* plot and *Cynodon* plot (ave. 0.59).

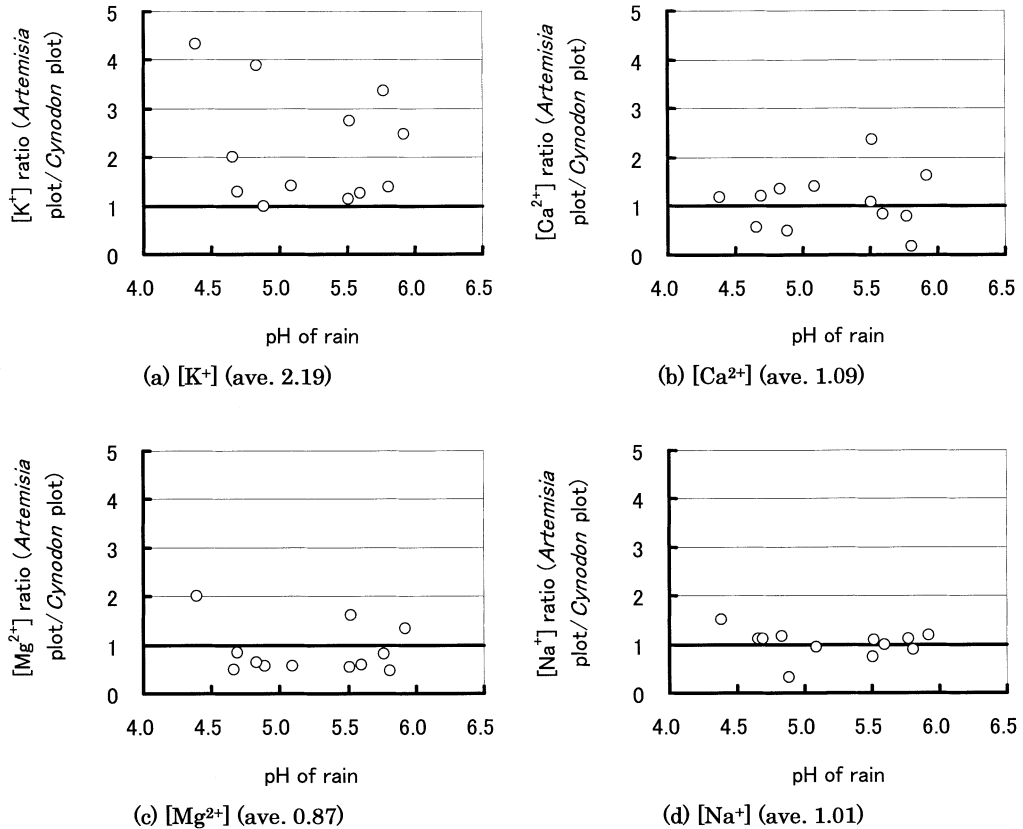


図-14 ヨモギ区とギョウギシバ区における表面流去水中の陽イオン濃度比

Fig. 14 Comparison of cation concentration ratio of surface runoff between *Artemisia* plot and *Cynodon* plot.

差はなく、また、 $[Mg^{2+}]$ はヨモギ区の方が減じているが、 $[K^+]$ はヨモギ区の表面流去水に 2.19 倍多く含有される結果を得た。このことから、酸性雨に触れることにより、ギョウギシバよりヨモギの方がより多くの K^+ を溶出することが示唆された。図-4において、降雨の $[H^+]$ の 90% が減じられていた例はヨモギ区において観察され、降雨の pH 4.83 が表面流去水の pH 5.83 に緩和されていた例であった。

7. ま と め

昨今の環境問題解決には時間が必要である。そのため、環境問題の原因が解消されるまでの間は、人間活動の増大に伴う環境問題の緩和に、自然の有する浄化・緩和能をその許容範囲内で活用せざるを得ないという観点から、法面被覆植物による酸性雨中和能の可能性を検討した。その結果、酸性雨対策として、自然の構成要素の有効活用が可能であることが示唆された。すなわち、岡山県北部に位置する中央町では、13 回の採水の内、酸性

雨が 10 回観測されたが、この酸性雨が、法面被覆植物表面を流下することにより、以下の現象が確認できた。

- ① 降雨の pH は上昇・改善され、植生区の $[H^+]$ は降雨のそれより 47% 減じられた。
- ② 植生区の EC は降雨のそれより低下し、かつ含有各種イオン濃度の大半は減少した。
- ③ 植生区と裸地区を比較すると、植生区においては、葉部のクチクラ層から各種イオンが溶出することが示唆された。とくに、 $[K^+]$ の溶出が著しいことが確認できた。
- ④ 酸性雨緩和能には、草種により相違があることが示唆され、本供試草種間では、ヨモギの効果が最大であることが認められた。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、試験圃場を貸与下さった日本植生株式会社に御礼申し上げます。また、実験・調査を手伝ってくれた岡山大学環境理工学部土壌圏管理学分

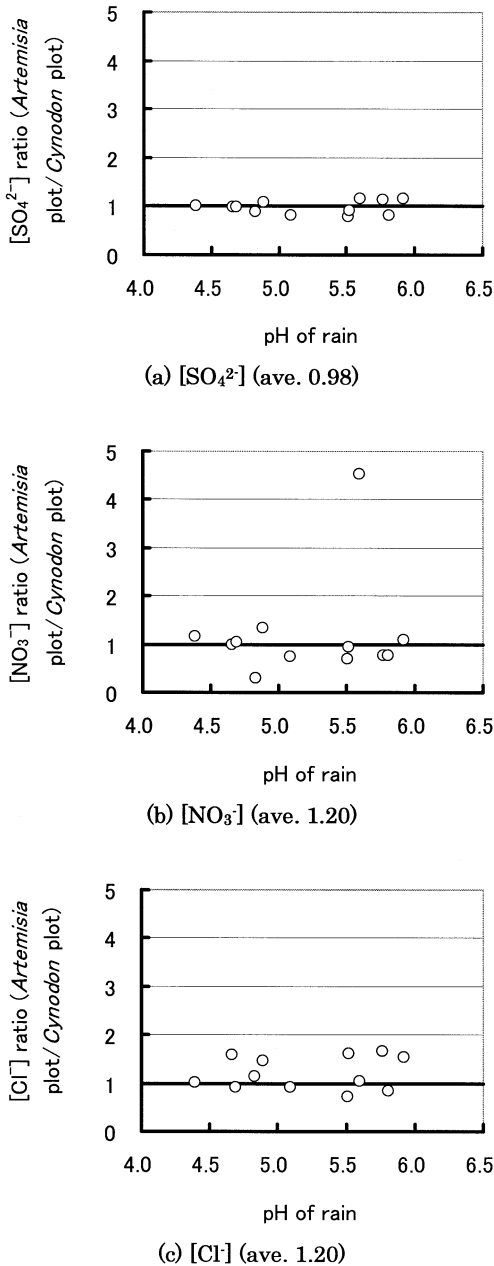


図-15 ヨモギ区とギョウギシバ区における表面流去水中の陰イオン濃度比

Fig. 15 Comparison of anion concentration ratio of surface runoff between *Artemisia* plot and *Cynodon* plot.

野ならびに植生管理学分野の学生諸氏に記して謝意を表す。

引用文献

水間 豊 (1992):『農業・農村を衰退させてよいか』, 日学双書, 15, p. 39, 日本学術協力財団.

環境省編 (2002):『平成 14 年版 環境白書』, p. 108.

Afandi, T., Manik, K., Rosadi, B., Utomo, M., Senge, M., Adachi, T. and Oki, Y. (2002): Soil Erosion under Coffee Trees with Different Weed Managements in Humid Tropical Hilly Area of Lampung, South Sumatra, Indonesia, *J. Jpn.Soc.Soil Phys.*, **91**: 3-14.

Afandi, T., Rosadi, B., Maryanto, Nurarifani, Utomo, M., Senge, M. and Adachi, T. (2002): Sediment Yield from Various Land Use Practices in a Hilly Tropical Area of Lampung Region, South Sumatra, Indonesia, *J. Jpn. Soc. Soil Phys.*, **91**: 25-38.

大手信人, 徳地直子 (1997): 森林流域における酸緩衝機構の空間的多様性: 花崗岩小流域における緩衝過程の鉛直分布, *水文・水資源学会誌*, **10** (5): 463-476.

安田 洋 (1993):「解説 酸性雨 1 どんな雨が降っているのか」, *土肥誌*, **64** (4): 448-455.

玉置元則 (1985): 我が国の雨水の化学的性状, *環境技術*, **14** (2): 132-146.

藤田慎一 (1990): 九州北西海域における硫黄化合物の濃度と沈着量, *大気汚染学会誌*, **25**: 155-162.

柴田英昭・佐久間敏雄 (1994): 苫小牧北西の森林地帯における酸性降下物, *土肥誌*, **65** (3): 313-320.

T. Takamatsu, Kohno, T., Ishida, K., Sase, H., Yoshida, T. and Morishita, T. (1997): Role of the dwarf bamboo (*Sssa*) community in retaining basic cations in soil and preventing soil acidification in mountainous areas of Japan, *Plant and Soil*, **192**: 167-179.

木村和義 (1978): 雨と植物リーチングを中心として一, *農業気象*, **34** (1): 23-30.

受稿年月日: 2004 年 9 月 28 日

受理年月日: 2005 年 2 月 1 日