HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	鬼首片山地獄の硫気孔原植生の群落立地要因
Author(s)	香山, 雅純; 野村, 睦; 佐藤, 冬樹; 小泉, 武栄
Citation	北海道大学農学部 演習林研究報告, 57(2), 71-94
Issue Date	2000-09
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/21463
Type	bulletin (article)
File Information	57(2)_P71-94.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

鬼首片山地獄の硫気孔原植生の群落立地要因

香山　雅純[1]　野村　睦[2]　佐藤　冬樹[2]　小泉　武栄[3]

Characteristics of the vegetation on the solfatara at "Katayama-jigoku" in the northern Japan

by

Masazumi KAYAMA[1], Mutsumi NOMURA[2], Fuyuki SATOH[3] and Take'ei KOIZUMI[4]

要　旨

火山地帯に位置する硫気孔原は，硫化水素，二酸化硫黄といった有毒ガスが常時放出されている場所である。そこに成立する植生は，低pH，高濃度のアルミニウムといった過酷な環境にさらされている。本研究は，硫気孔原に見られる植生の立地に関して，地形要素，植物の根系の状態，および土壌の化学性を検討した。本研究の調査は，宮城県玉造郡鳴子町にある片山地獄で行った。調査項目として，地形図および植物生育下の土壌断面図を作成したほか，pH，硫酸，アルミニウムなどの化学分析を行った。現地調査の結果から，チャツボミゴケおよびヤマタヌキランは谷部に分布し，イオウゴケを伴うヤマタヌキランや，ススキ，ツツジ科の低木は尾根・斜面部に分布する傾向を示した。地形によって植生が異なる原因として，谷部では降雨とともに硫酸が集積することから低いpHが維持され，チャツボミゴケおよびヤマタヌキランしか生育できないことが推察される。一方，尾根・斜面部では硫酸の流出とともにヤマタヌキランが長期間生育することで腐食が蓄積される。この結果，pHが上昇し，他の植物が生育可能な状態に改善されたことが考えられる。

キーワード：硫気孔原植生，pH，アルミニウム，硫酸，地形

2000年2月29日受理．Received February 29, 2000.

1：北海道大学大学院農学研究科環境資源学専攻，札幌市北区北9条西9丁目，060-0809
Department of Environmental and Natural Resources Science, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita 9 Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, 060-0809

2：北海道大学天塩地方演習林，天塩郡幌延町問寒別，098-2943
Teshio Experimental Forest, The University Forests, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Toikanbetsu, Horonobe-cho, 098-2943

3：北海道大学雨龍地方演習林，名寄市徳田250，096-0071
Uryu Experimental Forest, The University Forests, Faculty of Agriculture, Hokkaido University, 250 Tokuda, Nayoro, 096-0071

4：東京学芸大学地理学教室，東京都小金井市貫井北町4－1－1，184-0015
Department of Geography, Tokyo Gakugei University, 4-1-1, Nukuikitamachi, Koganei, 184-0015

目　　次

Ⅰ　はじめに
Ⅱ　調査地域の概要
Ⅲ　調査方法
Ⅳ　調査結果
Ⅳ－i　調査地域の微地形
Ⅳ－ii　調査地域の植生状態
Ⅳ－iii　堆積物の断面の状態
Ⅳ－iv　土壌の化学分析結果
Ⅴ　考察
Ⅴ－i　環境条件と植生の関係
Ⅴ－ii　各植生パッチの成立条件
Ⅵ　総合考察
謝　　辞
参考文献
Summary

Ⅰ　はじめに

火山国と呼ばれている日本には，多くの火山地帯が存在している。火山地帯の中には，ごく弱い火山活動である噴気活動が絶えず続いている場所が存在する。この場所は噴気孔と呼ばれ，噴出されるガスの成分の違いで硫気孔・水蒸気噴気孔・炭酸孔と分類されている。硫気孔では，有毒ガスである硫化水素や亜硫酸ガスを多く含む火山ガスが噴出されている。火山ガスの影響を常に受ける地域に成立する植生は硫気孔原植生と呼ばれ，特殊な景観を有している。硫気孔原植生は，1920年頃から，構成種を明らかにするために，植物社会学的立場から全国にわたって報告されてきた[9]。吉岡[22]は八甲田の硫気孔原で行った研究により，土壌酸性度が植生分布に関与していると報告した。以後，土壌酸性度と植生とを関連づけた研究が行われた[7),8),11),18),19),23]。また，土壌成分を細かく分析し，その成分の違いから植生分布を規定する要因を見いだそうとした研究も多い[8),11),12),23]。これらの研究から，硫気孔の最前部の土壌では，pHが極めて低く，植物の生育に必要なカチオンをほとんど含まない貧栄養状態になっていることが指摘された。植生の特徴として，主に東北の硫気孔原を中心に生育し，硫気孔の周辺で最前線に出現するカヤツリグサ科の高等植物であるヤマタヌキラン（*Carex angustisquama*）は厳しい環境状態で硫気孔の最前部に生育する植物であることが分かった。そして，硫気孔の中心部から裸地・ヤマタヌキラン群落・ススキ群落・低木群落と同心円状に植生が変化していくことが観察されている[7]。

これらの土壌を中心とした研究では，硫気孔原植生と土壌酸性度・土壌成分とを関連づけている。しかし，植生と土壌成分との因果関係や，因果関係をもとに硫気孔原植生がいかにして形成されたかという原因についてはまだ不明な点が多い。この原因について，ヤマタヌキラン，もしくはヤマタヌキランと同様に硫気孔の最前部に生育するヒメスゲ（*Carex oxyandra*）が定着，成長していく過程を地下茎（ラミート）を調べることで解析した研究例がある[17),18]。

また，土壌酸性度を重視した研究例が多いが，硫気孔原土壌のように極端に低い値を除いてpH自体にはあまり植物の生育に対する阻害要因がなく，むしろpHが5以下に低下することにより溶出してくるアルミニウムイオンの植物への阻害作用が大きいとされている[10),15]。硫気孔原に生育する植物はアルミニウム耐性が高く[20]，硫気孔原に分布するススキも，高いアルミニウム耐性が実験によって確かめられた[2),4),20]。

以上のことをふまえて，アルミニウムがpHの低い硫気孔原に集積されているかを検討するため，過去の研究において硫気孔原の土壌分析が行われたが，これらの分析結果は矛盾した内容であった。具体的には，硫気孔原の中心部から遠ざかるにつれてアルミニウムの濃度が高くなるとした研究[12),23]と，低くなるとした研究例[8),9]が存在する。佐藤・山根[13]では，土壌の母材の風化程度を指摘していたが，厳しい溶脱条件下にある硫気孔原土壌では，母材の影響以外の要因も考えられる。

そこで，本研究では，裸地から硫気孔原植生がどのように形成されていくのかを，地形的要素を含めて検討することで明らかにすることを目的とした。さらに，地形や植生に対して土壌の化学成分がどのように関わってくるのかを考察する。加えて，アルミニウムは植物の生育を規定する要因の一つであるだけでなく，土壌の風化程度の指標とすること

もできる。この，アルミニウムの土壌中における存在状態を測定し，硫気孔原植生形成における役割を検証することを最終的な目的とした。

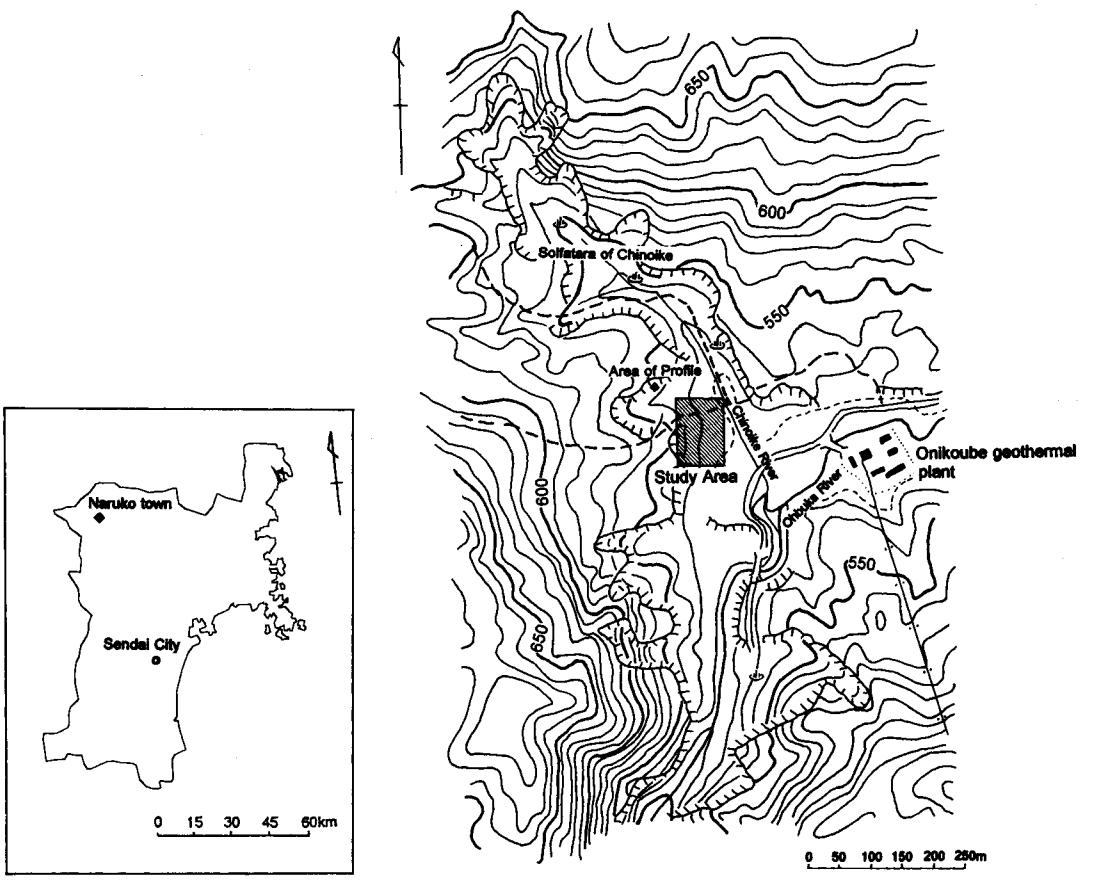
II　調査地域の概要

調査地域のある宮城県玉造郡鳴子町鬼首地区一帯には，荒雄岳を中心とした大きなカルデラが形成されている[6]。その中にある片山地獄は，荒雄岳の南東の山麓にあり，標高500～700 m の地域に存在する硫気孔原である。近くには荒湯地獄と呼ばれる硫気孔原も存在している。双方とも，1960 年頃まで硫黄の採取が行われていた。現在では，片山地獄には鬼首地熱発電所（電源開発株式会社）が建設されている。

Fig. 1 は，調査地域の含まれる片山地獄の地形図を示す。地形図中の斜線で示した調査地域は，片山地獄の他の地域と比べて傾斜が緩く，植生のパッチが広範囲に点在した。また，調査地域は地熱発電所の敷地外にあり，あまり人為的な攪乱を受けずに，自然状態のままで植生が残されていた。一方，地熱発電所の敷地内は，発電所の建設に際しかなり植生が破壊された。

調査地域内は，現在では硫気孔の活動は停止している。調査地域の堆積物は，温泉変質作用[6]により白脱化しており，風化残滓と呼ばれている。この堆積物は，現在も硫気孔が活発に活動している調査地よりも北部にある血の池地獄（Photo. 1）の堆積物と類似しており，調査地一帯でも過去に硫気孔が活動していたことが示唆される。

菅原[14]の報告によると，片山地獄一帯はブナ帯に相当するがブナは硫気孔の周囲 500 m には少な



The map of Miyagi Pref.　　The topographical map of "Onikoube", Naruko town

Fig. 1. Location of the study area.

い。ブナの代わりに，針葉樹のキタゴヨウや広葉樹のノリウツギ・ヤマウルシ・リョウブなどが存在している。このキタゴヨウ林は硫気孔原特有のものであると記述している。そして，硫気孔の中心から，裸地→ヤマタヌキラン群落→ススキーイオウゴケ群落→低木林→キタゴヨウ林→ブナ林と同心円上に移行していると考察している。佐藤ほか[13]は，片山地獄の土壌は東北地方各地に存在する硫気孔原土壌と同様に，強酸性・貧栄養の不良土壌であり，激しい浸食・溶脱条件下だが，植物によってこれらから保護されている，と報告している。

III　調査方法

調査地域全体の地形状態を把握するため，調査地の三角測量を行い，地形図を作成した。さらに，植生の分布状況を明らかにするため，地形図が完成した後に，調査地内に生育する植物の分布を現地調査により地形図上に落とし，植生図を作成した。また，測量データと現地観察をもとに，地形分類図を作成した。

次に，主にヤマタヌキランが生育している地点の土壌を観察するため，ヤマタヌキランが生息するパッチの下層を掘り，土壌の状態を観察した。そして，観察をもとに柱状図を作成した。

上記の作業が終了した後，裸地の堆積物・植生の土壌がどのくらい酸性度が強いか，また地形に対して酸性度が異なるかを明らかにするため，pH 値を計測した。裸地や各植生の代表的な位置の土壌を地下 10 cm のところから採取した後に，原土に 1：2.5 の割合で，蒸留水を加えて攪拌した後に 30 分間静置し，その上澄液をガラス電極法で測定した。測定した結果より，植生図・地形分類図との対応を検討した。

pH 値の測定後，化学成分のなかで，特に植生分布を規定する要因とされる硫酸イオン濃度・可溶性アルミニウム濃度がどのくらいであるか，また地形による濃度の違いが認められるかを検証した。地下 10 cm のところから採取した原土に 10 倍量の 1 規定の KCl を加え攪拌して 30 分後に濾過をし，土壌抽出液として用いた[10]。硫酸イオンに関しては，硫酸バリウム比濁法を用いた簡易測定法を，アルミニウムに関しては ICP 発光法[3]で測定した。

このほかに，裸地の堆積物や植生の土壌特性を把握するため，土性・含水率・有機物としての炭素量を分析した。含水率は，表土の部分の堆積物・土壌を採取し，風乾させる前と後との重量比より算出した。また，この風乾細土を用いて土性の分析を行った。炭素量は，同様の風乾細土を用いてガスクロマトグラフィーで分析を行った。なお，2 つのサンプルについては，CN コーダーによる検量線法にて分析を行った。

IV　調査結果

IV－i　調査地域の微地形

調査地域は，南東部を最下部とする「すり鉢」状の地形を示していた（Fig. 2）。調査地内では，ほぼ標高 531 m のラインを境に傾斜が急になっていた。また，調査地西側には谷頭凹地があり，そこから東に向けて水が流れており，谷頭凹地周辺は傾斜が急であった。調査地の北東には，比高が 4 m ほどのマウンドも存在し，角礫が堆積していた。調査地全体では粘土質の堆積物で覆われていたが，南部の谷には，比較的礫が多く堆積していた。

この調査地の中心部から南側にかけての地域では，植生は疎らなパッチ状の分布をしていた。この地域を取り囲むように，植生が密に分布している群落が存在していた。そこで，本研究では，植生が主にパッチを形成し，裸地が広く分布している地域をAの地域，植生が発達し，主に群落を形成している地域をBの地域と定義した。Aの地域とBの地域の堆積物を比較したところ，Aの地域の裸地の中でも，土色が黄褐色を呈し，土性が埴壌土を示した地域が存在した。この裸地の堆積物は，Bの地域の堆積物と類似していることから，Bの地域に含めた。これらの結果をふまえ，Fig. 2 に示すような実線でAの地域とBの地域を区分した。

IV－ii　調査地域の植生状態

調査地域の植生を，Fig. 2 に示す。Aの地域に広がる各パッチと，Bの地域に広がる各群落は，以下に記載した特徴がみられた。

Aの地域（Photo. 2）…この地域内は，主に灰白色の堆積物からなり，黒色の基盤がむき出しの地域や硫黄の存在のために黄色を呈している地域も存在した。黒色や黄色の地域では現在もほとんど植物は生育していなかった。これらの地域以外の灰白色の堆

Notes

- Bare ground
- Patch of *Jungermannia thermarun*
- Patch of *Carex angustisquama*
- Community of *C. angustisquama* - *J. thermarun*
- Patch of *C. angustisquama* - *Cladonia theiophila*
- Community of *C. angustisquama* - *C. theiophila*
- Community of *Miscanthus sinensis* - shrub (*Ericaceae*)
- Community of *Pinus parviflora*
- Patches mentioned profile of soil
- The area distributed seedlings of *C. angustisquama*

Fig. 2. The map of vegetation in the study area.

積物の地域に，植生のパッチが認められた。この調査では，直径10 cm以上の植分は，すべてパッチととらえて植生図に記載した。まず，このパッチを以下の3種類のパッチに分類した。

1．チャツボミゴケ（*Jungermannia thermarun*, Photo. 3）のみを構成種としているパッチ（チャツボミゴケパッチと呼ぶ）

このパッチは，Aの地域の中で水流のある場所を中心に分布していた。そこに分布している硫気孔原固有種に相当する苔類であるチャツボミゴケは，緑色をしており生育状態は良好であった。この場所以外の斜面上に発達するパッチは，前者と比べて生育状態が悪く，灰白色の堆積物の上に黒色の植物体が網状に張り付いた状態で成立していた。

2．ヤマタヌキラン（Photo. 4）のみか，ヤマタヌキランと下層にチャツボミゴケのみを伴うパッチ（ヤマタヌキランパッチと呼ぶ）

ヤマタヌキランパッチでは，ほとんどのパッチで下層にチャツボミゴケが生育しており，ヤマタヌキランが単独で生育しているパッチはごくわずかであった。Aの地域の南側を中心に数多く分布していた。

3．ヤマタヌキランと，下層にイオウゴケ（*Cladonia theiophila*, Photo. 5）を伴うパッチ（ヤマタヌキラン・イオウゴケパッチと呼ぶ）

このパッチは，ヤマタヌキランのほか，イオウゴケと呼ばれる地衣も生育していた。このほかに，ウラジロヨウラク，サラサドウダン，ハナヒリノキといったツツジ科の木本や，ススキを伴っていることが多かった。これらの木本の樹高は20 cmほどであった。このパッチに生育していたヤマタヌキランはヤマタヌキランのみのパッチと比べて生育状態が悪く，立ち枯れているものも見受けられた。

次に，Aの地域に分布しているすべてのパッチが地形分類上どの地域に分布しているか，またどの標高に分布しているかを検証した。はじめに，調査地域内を尾根・斜面部と谷部に分類した（Fig. 3）。その後，植生図より各地形面ごとのパッチの面積を算出した（Fig. 4）。

グラフの結果より，以下のことが明らかになった。チャツボミゴケパッチは，谷部に生育するパッチのほうがより広い面積を示した。ヤマタヌキランパッチは，尾根・斜面部と谷部に生育するパッチの面積に，あまり差はみられなかった。ヤマタヌキラン・イオウゴケパッチは，谷部よりも尾根・斜面部のほうに広くパッチが生育していた。

一方，Aの地域の面積を標高別に算出した（Fig. 5）。全体としては尾根・斜面部と谷部の面積比は約2：1の割合となった。標高別に見ると，尾根・斜面部の面積は標高が上がってもあまり減少は見られない。しかし，529 m以下では面積が急激に減少する傾向が見られた。谷部の面積は，標高が上がるにつれて減少した。529 m以下では，面積自体は減少するが，全面積に対する割合としては増加していた。

そしてこの面積と，3種類のパッチの面積より各標高別の植被率を算出した（Fig. 6）。

1．チャツボミゴケパッチ

比較的標高の低い地域を中心に分布しており，その多くは谷部に存在した。528 m～530 mの谷部には特に高い植被率を示した。

2．ヤマタヌキランパッチ

比較的標高の低い地域を中心に分布していた。尾根・斜面部と谷部を比較して，総面積では有意な差はみられなかったが，植被率で比較したところ，谷部のほうが尾根・斜面部よりも相対的に広く分布していることが分かった。

3．ヤマタヌキラン・イオウゴケパッチ

標高の高い地域から低い地域まで広く分布していた。その多くは尾根・斜面部に分布していた。そのなかで，532 m以上の比較的標高の高い地域での分布は，他の2種のパッチと比べると高い植被率を示した。

Bの地域（Photo. 6）…この地域では，Aの地域と違い，黄色ないし黄褐色の土壌を伴う地域がほとんどであった。植生ではススキを主な構成種としている地域が広範囲を占めていた。この地域でいくつかの群落が存在していた。

4．ヤマタヌキラン・チャツボミゴケ群落

ヤマタヌキランと，下層にチャツボミゴケを伴う群落であった。Bの地域の中でも谷底部に相当する地域に分布していた。

5．ヤマタヌキラン・イオウゴケ群落

ヤマタヌキランのほか，下層にイオウゴケも広く分布していた。このほかの構成種としてススキ，ウラジロヨウラク，サラサドウダン，ハナヒリノキ（Photo. 7）などが出現した。ツツジ科の木本はせいぜい30 cmほどの樹高であった。

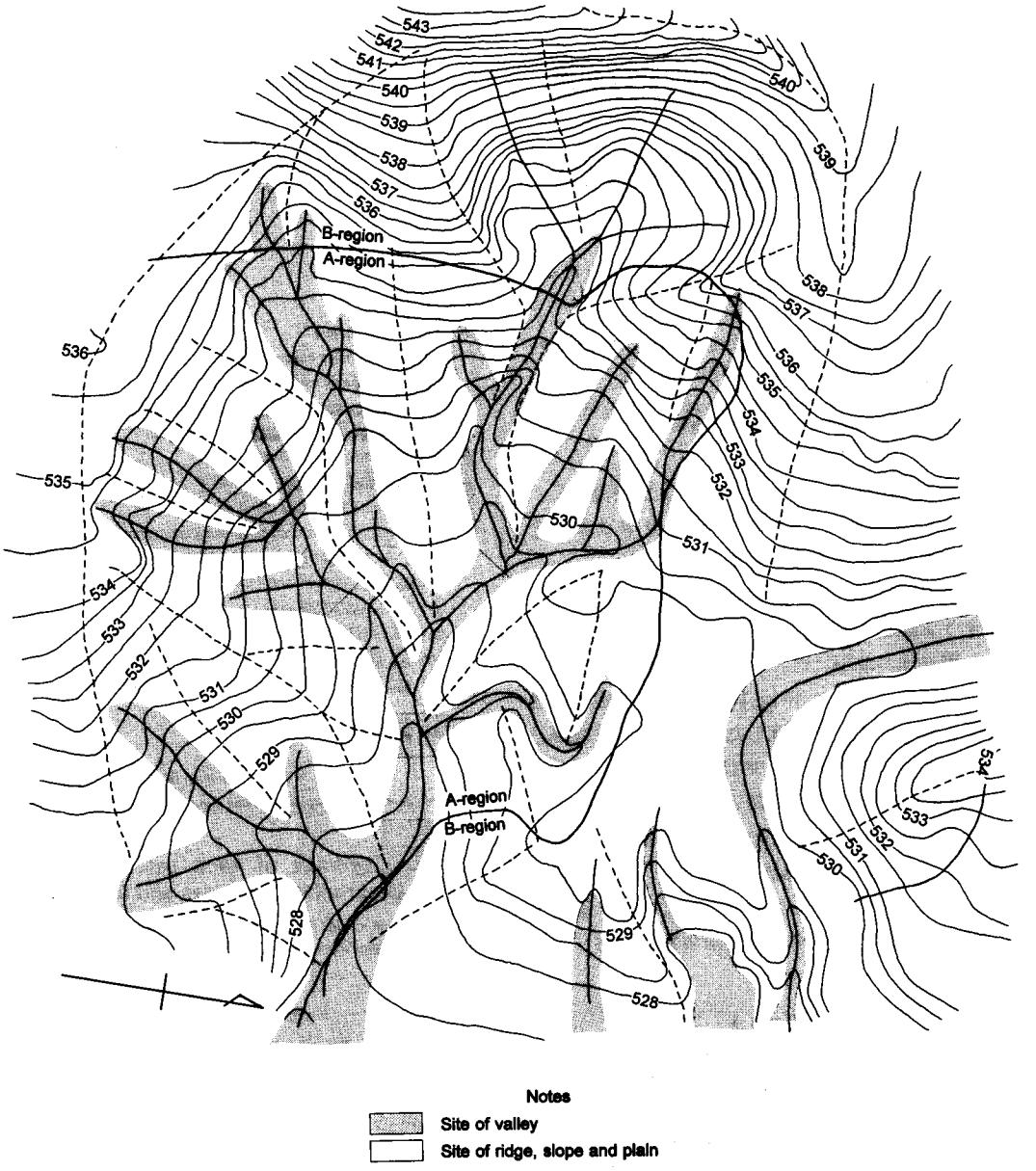


Fig. 3. The map of classification of geographical features in the study area.

6．ススキ・低木群落

この群落では，ススキを主な構成種とし，ススキの生育する下層にイオウゴケを伴っていた。このほかの構成種としてウラジロヨウラク，サラサドウダン，ハナヒリノキが観察された。ヤマタヌキランも存在してはいるが，ヤマタヌキランのみの群落と比べ，分布が疎らであった。ツツジ科の木本は 50 cm ほどの樹高のものが多かった。西側に存在する凹地ではホオノキも出現していた。北東側の地域ではそのほかにリョウブ，ヤマウルシも生育していた。

7．キタゴヨウ群落

この群落は調査地域の北西部にかけて分布して

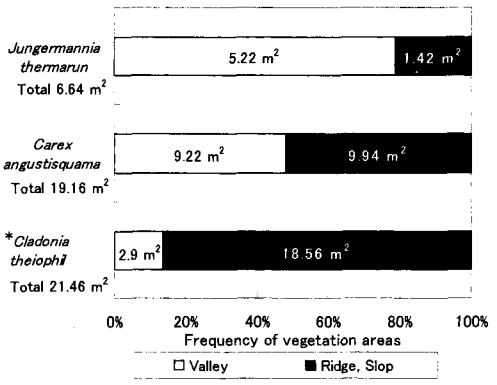


Fig. 4. The ratio of area of each patches, separated geographical features.

("* *Cladonia theiophila*" means patch of *Carex angustisquama-Cladonia theiophila*)

いた。主に樹高が3～5mのキタゴヨウが優占し，1mほどのウラジロヨウラク，サラサドウダンといった木本やススキも生育していた。

Bの地域では，主に水の流れがある谷部にヤマタヌキラン群落があり，その両脇に低木群落が存在した。調査地の北部には，より顕著に植生の違いがみられた地域があった(Fig. 1)ので，この地域の地形断面と植生模式図を作成した(Fig. 7)。谷底部には，ヤマタヌキランとチャツボミゴケが分布していた。谷底部の両岸には，樹高70cmほどのツツジ科の低木が生育していた。このさらに外側になると，北側では，30cmほどの低い樹高のツツジ科の低木が存在し，イオウゴケも多く分布していた。南側では，樹高3mほどのキタゴヨウが生育しており，樹高1mとかなり高いツツジ科の低木も生育していた。

さらに，ヤマタヌキランの実生がどのような場所に存在したか，ということにも着目し，観察を行った。その結果，ヤマタヌキランの実生は主にチャツボミゴケ上に定着していることが分かった。一方で，Fig. 2の点線で囲んだ裸地の地域には，特にコケの上でなくても実生が存在していた。そのほかには，

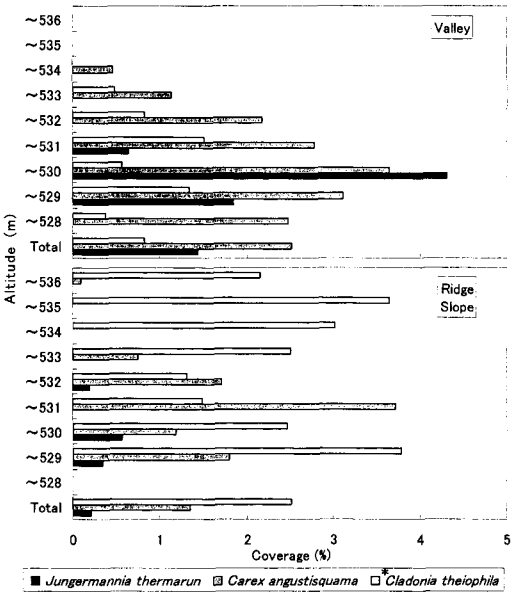


Fig. 6. Coverage of each patches, separated geographical features and altitude.

("* *Cladonia theiophila*" means patch of *Carex angustisquama-Cladonia theiophila*)

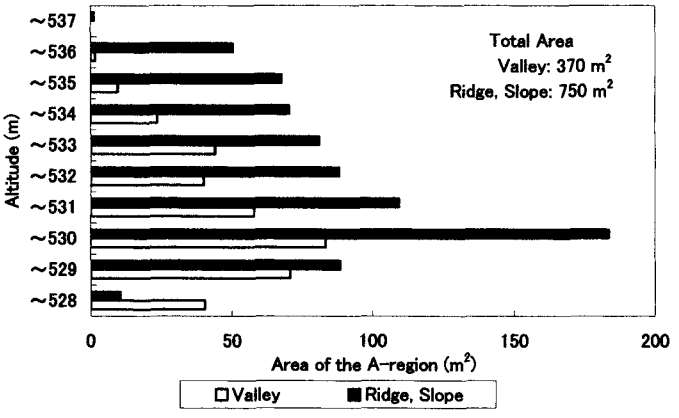


Fig. 5. The gross area of the A-region respective, separated geographical features and altitude.

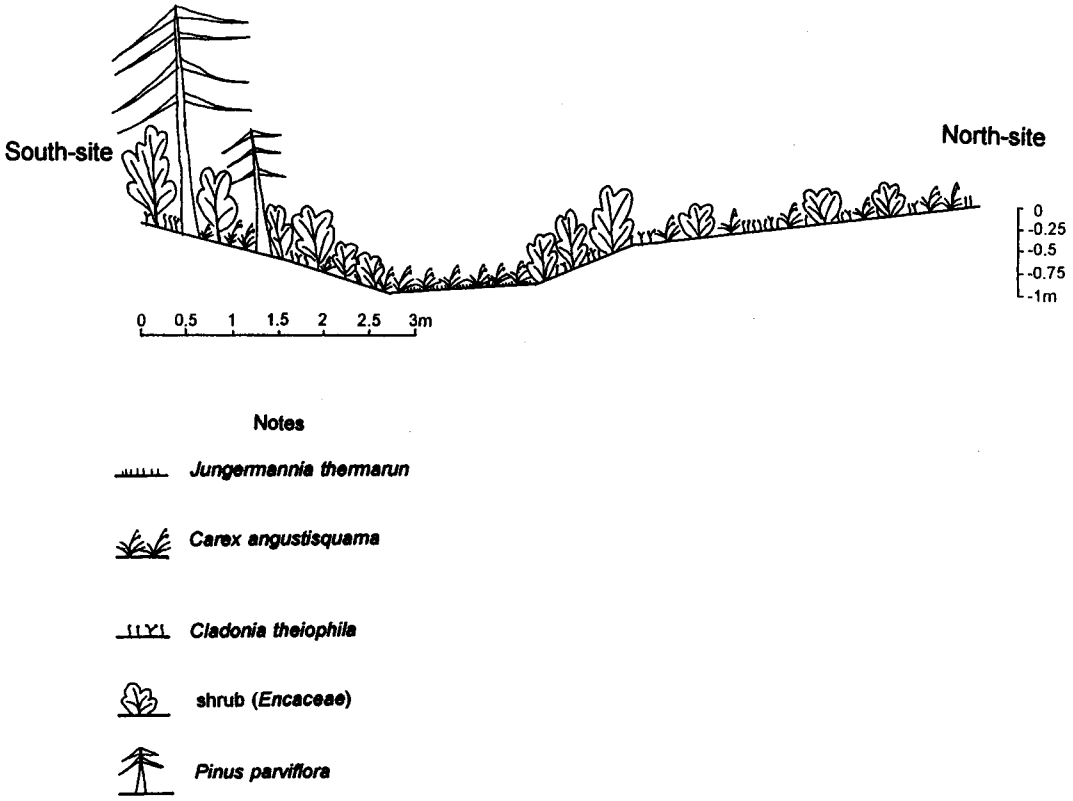


Fig. 7. Profile view of landform and vegetation.

それぞれ直径30 cmほどのパッチとパッチの間の10 cmほどの隙間の裸地にも存在した。

Ⅳ－iii　堆積物の断面の状態

ヤマタヌキランが存在しているパッチの下層の堆積物がどのような状態になっているかを知るために，以下の条件に相当する3つのパッチの断面を記載した。

1．ヤマタヌキランのみが生育しているパッチ

2．ヤマタヌキランと下部にチャツボミゴケを伴うパッチ

3．ヤマタヌキランと下部にチャツボミゴケ・イオウゴケを伴うパッチ

これら3つのパッチは，Fig. 2の◆印で示した地域で断面をとった（Fig. 8）。この堆積物は，以下の基準でⅠ層とⅡ層に分類した。

Ⅰ層…黄褐色を呈している。若干の腐植とヤマタヌキランの植物遺体を含んでいる。

Ⅱ層…灰白色を呈している。風化残滓であり，容易に崩れる白色の礫を含んでいる。

その結果，次のことが分かった。

1．ヤマタヌキランのみが生育しているパッチ

このパッチは調査地内でもチャツボミゴケを伴わない，数少ないパッチの1つであった。谷から少し離れた尾根の上に存在していた。上部から3 cmのところまではⅠ層であり，そこから10 cmほどがⅡ層であった。Ⅰ層では根や地下茎の密度が高く，ヤマタヌキランの遺体が堆積していた。Ⅱ層では，直径が3～5 cmの白色の礫が存在していた。この礫は，他のパッチのものと比べてまだ変質が進んでいないようであった。この層にもヤマタヌキランの根の侵入がみられた。

2．ヤマタヌキランと下部にチャツボミゴケを伴うパッチ

このパッチは谷沿いに位置し，下部にチャツボミゴケを伴っていた。1と同様に上部から3 cmのところまではⅠ層であり，そこから16 cmほどがⅡ層であった。Ⅰ層では根や地下茎が縦横に張り巡ら

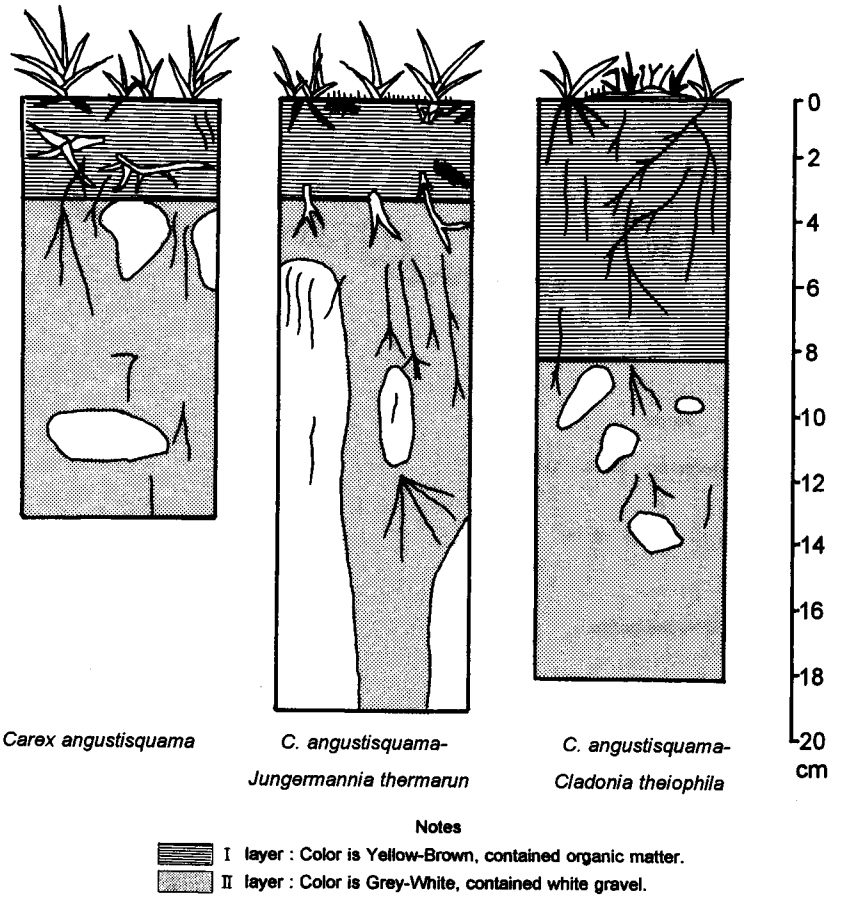


Fig. 8. Soil profiles under each patches.

されていた。II層では，母岩と思われる白色の礫が存在し，1節のパッチと比べて軟質であった。また，この礫の中にも根の侵入がみられ，全体の根の侵入量は1節のパッチよりも多く観察された。

3．ヤマタヌキランと下部にチャツボミゴケ，イオウゴケを伴うパッチ

このパッチは，1節や2節のパッチと比べて3m以上も比高の高いところに位置している。ヤマタヌキランの下部にはチャツボミゴケのほかイオウゴケも存在していた。しかし，ヤマタヌキランの生育状態はあまりよくなく，「立ち枯れ」を呈していた。上部から8cmのところまではI層，そこから10cmほどがII層と区分された。I層では，1節や2節のパッチと比べると腐植を含んだ層が厚く，クッション状になっていた。また，ヤマタヌキランの個体数が多くなかったのに対し，根茎の密度は1節や2節のパッチと同様に高かった。しかし，地下茎はかなり少なくなっていた。II層では，直径2～4cmの礫が存在していたが，あまり量は多くなかった。また，根の量も1節や2節のパッチと比べてかなり少なかった。

IV－iv 土壌の化学分析結果

調査地内の土壌や裸地の堆積物，水について，pHの測定，土壌抽出液による硫酸イオン・アルミニウム濃度の測定，そして土性・土壌含水率・有機炭素量を測定した。この実験では，Fig. 9に示す地点から土壌・水のサンプルを採取した。これらの分析の全結果を，Table. 1に示す。

A…Aの地域に相当する地域で，裸地，チャツボミゴケパッチ，ヤマタヌキランパッチ，およびヤマタ

Fig. 9. Sampled points (numbers enclosed with square) in the study area.

ヌキラン・イオウゴケパッチの4つの状態を化学・土壌成分を測定するため，6つのサンプルをベルト状に採取した（サンプル1～6に相当）。この中で，pH値・硫酸イオン濃度・アルミニウム濃度・含水率・有機炭素量の5つの項目をグラフに示した（Fig. 10）。

pH値は，サンプル3のヤマタヌキラン・イオウゴケパッチが約3.0と最も高い値を示した。一方サンプル2の裸地が，約2.3と最も低い値を示した。サンプル2では600 mgを越える高い濃度の硫酸イオンを検出した。サンプル6のヤマタヌキランパッチでも100 mgを超える濃度を検出したが，その他のサンプルでは微量しか検出されなかった。アルミニウム濃度は，サンプル3が200 mgに近い高い値を示したが，その他のサンプルでは低い値しか検出されなかった。土性を調べたところ，すべてのサンプルで粘土含有量が高い埴土に相当した。含水率は，植生の存在しないサンプル2で300 gを下回る低い値を示した。そのほかのサンプルでは違いが認められなかった。有機炭素量は，サンプル3が10.00 gを

Table 1. Chemical analysis of soil of the study site

		Composed Plant species	pH	SO_4^{2-} (mg·kg^{-1})	Al (mg·kg^{-1})	Soil type	Soil color	Moisture (g·kg^{-1})	C (g·kg^{-1})
A-region	1	Ca, J	2.65	21	56.1	C	5 Y 7/2	345	3.24
	2	B	2.27	640	112	C	10 Y 6/1	296	1.08
	3	Ca, Cl, E, J	3.15	0	190	C	2.5 Y 5/2	403	12.23
	4	J	3.03	2.0	49.7	C	5 Y 7/2	373	5.99
	5	B	2.65	30	77.1	C	5 Y 7/2	322	1.26
(A)	6	Ca, J	2.55	102	133	C	2.5 Y 5/4	350	7.46
B-region	7	Ca, J	2.77	60	140	C	2.5 Y 6/3	338	9.25
	8	M	3.40	3.0	212	CL	2.5 Y 6/4	235	8.33
	9	B	3.32	0.5	225	CL	2.5 Y 7/6	227	2.76
	10	Ca, Cl, E	2.85	22	191	C	2.5 Y 5/2	247	6.36
	11	Ca, M	2.95	38	134	CL	2.5 Y 6/4	240	3.98
(B)	12	B	2.34	120	72.8	C	N 3/0	241	0.89
Profile	13	Ca, Cl, E	3.28	2.0	140	C	2.5 Y 5/2	221	9.07
	14	E, Ca, Cl	3.32	1.0	126	C	2.5 Y 3/2	331	4.62
	15	Ca, J	2.80	34	128	C	2.5 Y 5/2	365	9.69
	16	E, Ca, Cl	3.52	2.3	248	C	2.5 Y 5/2	244	8.39
(C)	17	E, P, Ca, Cl	3.39	20	218	C	10 YR 5/4	268	13.71
D	18	River water	2.62	3,850	211	—	—	—	—
E	19	B (sulfur)	1.32	710	—	S	7.5 Y 8/3	—	—
F	20	+J	2.56	500	—	C	2.5 Y 7/4	400	5.55
	21	−J	2.08	475	—	C	2.5 Y 7/1	332	n.d.
G	22	Ca seedling	2.12	105	—	C	2.5 Y 6/3	266	3.26

Composed plants
B…Bare ground
Ca…*Carex angustisquama*
J…*Jungermannia thermarun*
Cl…*Cladonia theiophila*
E…shrub (*Ericaceae*)
M…*Mischanthus sinensis*
P…*Pinus parviflora*

Soil type
C…Crey
CL…Crey-Loam
S…Sand

越える高い値を示したほかは，低い値を示した。

B…Bの地域に相当する地域で，裸地・ヤマタヌキラン群落・ヤマタヌキラン，イオウゴケ群落・ススキ，低木群落の4つの状態の化学・土壌成分を検討するために，6つのサンプルを比較的狭い範囲の，西側の凹地部分のそれぞれ代表的な群落から採取した（サンプル7～12に相当）。

pH値は，サンプル8に相当するススキが生育する箇所や，9に相当する急傾斜の裸地で3.3以上の高い値を示した。一方，サンプル12に相当する凹地状の裸地ではpHも約2.3と低い値を示した。硫酸イオン濃度は，サンプル12では100 mgを超える濃度を検出したが，そのほかのサンプルでは低濃度を示した。アルミニウム濃度は，サンプル8や9で200 mgを越える高い値を検出したが，サンプル12は低い値を示した。土性を調べたところ，サンプル8，9，11の土壌からは，やや粘土成分の少ない(40～50%)埴壌土であった。それ以外のサンプルは埴土に相当した。含水率は，サンプル7のヤマタヌキラン・チャツボミゴケ群落のみが300 gを越える高い値を示したが，そのほかのサンプルは250 g以下の低い値を示した。有機炭素量は，サンプル7や8が全サンプルで比較したとき，やや高い値となった。それ以外のサンプルでは，炭素量は低い値であった。

C…断面図を作成した地域（Fig. 1）の5種類の植分の土壌状態を比較するため，それぞれ5つのサンプルを採取した（サンプル13～17に相当）。この中で，Fig. 10と同様の5つの測定項目をグラフに表した（Fig. 11）。

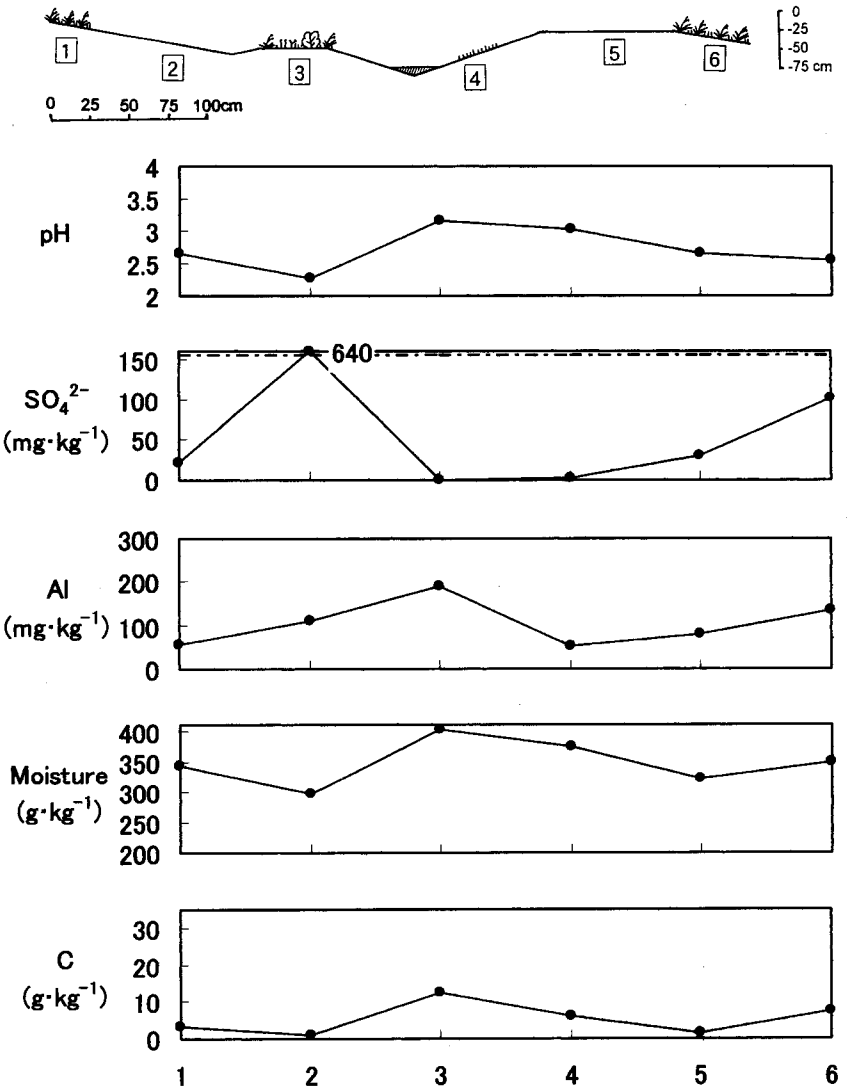


Fig. 10. Sampled points in the A-region, and graphs of chemical constituent of soil.

pH 値は，サンプル 15 のヤマタヌキランとチャツボミゴケが分布している地域のみが低く，他の植生では pH が 3 以上という高い値を示した。硫酸イオン濃度では，サンプル 15 のみ微量検出されたが，他の地域ではほとんど検出されなかった。アルミニウム濃度では，断面図の南側に当たるサンプル 16・17 で 200 mg を越える高い濃度を検出した。土性はすべてのサンプルが埴土に相当した。含水率は，サンプル 15 が最も高い値を示した。有機炭素量は，5 個のサンプルとも 8.00 g を越えており，全サンプルで比較するとやや高い量を示していた。特にサンプル 14 のツツジ科の低木が優占する地域で 3 %を越える高い値を検出した。

D…調査地内の川の化学成分を調べるために，サンプルを採取した（サンプル 18 に相当）。その結果，pH は 2.6 ほどのやや低い値を示した。また，4,000 mg に近い非常に高濃度の硫酸イオンと，200 mg を越えるやや高い濃度のアルミニウムを検出した。

E…硫黄の析出により黄色化している堆積物がどのくらい酸性が強いかを測定するため，サンプルを採取した（サンプル 19 に相当）。その結果，pH は 1.5 を下回る非常に低い値を示した。硫酸イオン濃度も

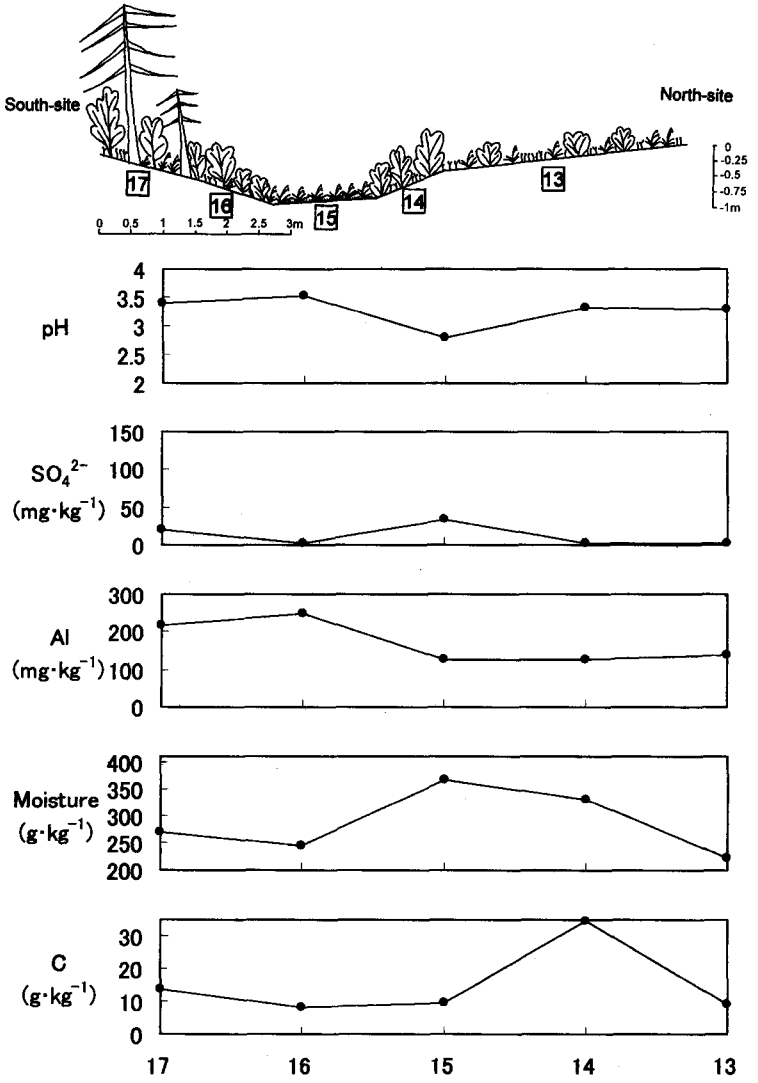


Fig. 11. Sampled points in the area of profile, and graphs of chemical constituent of soil.

700 mg を越える高い濃度を検出した。また，土性を調べた結果，粘土成分をほとんど含まない（5％以下），砂土であった。

F…チャツボミゴケのたくさん分布しているパッチの土壌と，このパッチのすぐ対岸のコケが分布していない裸地の堆積物との化学成分の違いを比較するため，それぞれサンプルを採取した（サンプル20・21に相当）。その結果，チャツボミゴケパッチの土壌のほうが，pH 値・含水率が高く，有機炭素量も多いことが分かった。硫酸イオン濃度には大きな差はみられなかった。土性は双方とも埴土に相当した。

G…実生が成長するための化学・土壌条件を検討するため，Fig. 2 の点線で囲んだヤマタヌキランの実生が分布する地域から，サンプルを採取した（サン

プル22に相当)。結果から，pH値は約2.1とかなり低い値を示した。硫酸イオンも100 mgほどの量を検出した。この地域は礫が目立っていたが，土性は埴土に相当した。含水率や，有機炭素量は，植生の存在する土壌と比べると低い値を示した。

また，ヤマタヌキラン優占群落，ヤマタヌキラン・イオウゴケ群落，ススキ・低木群落の化学分析結果の平均値をとり，群落間のデータに対してt検定を行った(Table. 2)。その結果，以下のことが分かった。

pH値では，3種類の群落間に有意差が認められた。ヤマタヌキラン・チャツボミゴケ群落の土壌では，pHが平均2.7と最も低い値となった。ヤマタヌキラン・イオウゴケ群落では，これより若干高く，pHは平均3.1ほどであった。ススキ・低木群落では，この中では最も高く平均3.4となった。

硫酸イオン濃度では，ヤマタヌキラン優占群落とヤマタヌキラン・イオウゴケ群落，ヤマタヌキラン優占群落とススキ・低木群落の間で有意差が認められた。ヤマタヌキラン優占群落では，平均54 mgほどの微量の硫酸イオンを検出した。しかし，そのほかの群落では，ほとんど硫酸イオンを検出していないという結果となった。

アルミニウム濃度を比較すると，ヤマタヌキラン優占群落とヤマタヌキラン・イオウゴケ群落，ヤマタヌキラン優占群落とススキ・低木群落の間で有意差が認められた。ヤマタヌキラン優占群落の土壌は，平均110 mgほどの比較的低い濃度であった。一方，ヤマタヌキラン・イオウゴケ群落の土壌（平均170 mg)，ススキ・低木群落の土壌（平均200 mg）からはやや高濃度のアルミニウムを検出した。

このほか，微地形に対して化学成分の違いがみられるか調べた。まず，サンプル1～12を採取した位置と，図3の地形分類図とを対比させた。次に，サンプルごとに尾根･斜面部に相当するサンプルと，谷部に相当するサンプルに分類した。そして，pH値・硫酸イオン濃度・アルミニウム濃度の3つの項目を平均し，t検定を行った(Table. 3)。この結果から，Aの地域からは，地形に対するデータの有意差は認められなかった。Bの地域，または12サンプル全体を比較した結果では，3つの項目に有意差が認められた（全体で比較したときの硫酸イオン濃度を除く)。谷部のほうがpH値が低い値を示し，硫酸イオン濃度は高い値を示した。一方，尾根・斜面部のほうがアルミニウム濃度は高い値を示した。

V 考　　察

V－i 環境条件と植生の関係

1．地形と植生との対応

調査地の中で，Aの地域に相当する地域では，チャツボミゴケパッチ，ヤマタヌキランパッチ，ヤマタヌキラン・イオウゴケパッチの3種類のパッチが分布していた。これらのパッチの地形単位で比較してみると，チャツボミゴケパッチ，ヤマタヌキランパッチは，主に谷部に相当する地域に分布し，ヤマタヌキラン・イオウゴケパッチは，主に谷部以外の尾根・斜面上に分布していることが分かる。地形は降水時の雨水の挙動に関係する[5]。したがって，チャツボミゴケパッチ，ヤマタヌキランパッチは，主に水の集積しやすい，比較的湿潤な地域に成立し，ヤマタヌキラン・イオウゴケパッチは，主に乾燥し

Table 2. Average of chemical constituent of each communities.

Communities		Sum of samples	pH	SO_4^{2-} ($mg \cdot kg^{-1}$)	Al ($mg \cdot kg^{-1}$)
Carex angustisquama-Jungermannia thermarun	(A)	5	2.74	51	118
Carex angustisquama-Cladonia theiophila	(B)	3	3.09	8.0	174
Mischanthus sinensis-Shurb (*Ericaceae*)	(C)	4	3.41	6.6	201
Significant test (T-test)	A－B		＊＊	＊	＊
	A－C		＊＊＊＊	＊＊	＊＊
	B－C		＊＊	NS	NS

Significant level ＊…$p<0.1$ ＊＊…$p<0.05$ ＊＊＊…$p<0.01$ ＊＊＊＊…$p<0.001$

Table 3. Average of chemical constituent for geographical features.

Classification of geographical features		Sample no.	pH	SO_4^{2-} (mg·kg^{-1})	Al (mg·kg^{-1})
A-region	Valley	1, 2, 4, 6	2.63	191	87.7
	Ridge·Slope	3, 5	2.90	15	136
Significant test			NS	NS	NS
B-region	Valley	7, 12	2.56	90	106
	Ridge·Slope	8, 9, 10, 11	3.13	16	191
Significant test			*	**	*
Total	Valley	1, 2, 4, 6, 7, 12	2.60	158	93.9
	Ridge·Slope	3, 5, 8, 9, 10, 11	3.05	16	172
Significant test			**	NS	***

Significant level *…$p<0.1$ **…$p<0.05$ ***…$p<0.01$ ****…$p<0.001$

やすい地域に成立すると考えられる。

2．堆積物と植生との対応

堆積物の断面の状態では，ヤマタヌキランのみのパッチや，ヤマタヌキランと下層にチャツボミゴケを伴うパッチと比べて，ヤマタヌキランと下層にイオウゴケを伴うパッチの方が腐植の多くみられるⅠ層が厚く堆積していた。このことから，ヤマタヌキランと下部にイオウゴケを伴うパッチは，ヤマタヌキランのみのパッチ，ヤマタヌキランとチャツボミゴケのパッチよりも形成された時期が古く，地表が安定である。そして，長時間存続することによって多くのリターが蓄積されたと考えられる。

3．pH と植生との関係

片山地獄の植生と土壌 pH の対応を検討した。ヤマタヌキラン・チャツボミゴケ群落が分布している地域の酸性度は，平均2.7であった。しかし，裸地でも2.5を越える pH の値を示すところも存在した。さらに，ヤマタヌキランの実生が分布していた地域でも pH 値は約2.1と低い値を示した。従って裸地とヤマタヌキラン群落とが明確に pH だけで区分できるとは言い難い。

ヤマタヌキラン・イオウゴケ群落では，ヤマタヌキラン・チャツボミゴケ群落と比べて若干高い pH であった。pH と群落の成立要因について，実際にイオウゴケを培養し，植物体の乾重量を計測することで pH の生理的最適域が明らかにされている[21]。この研究によると，イオウゴケは，pH 値が4のときに最もよい生育状態を示し，pH 値が2ではほとんど生育できないことが解明された。また，各地の火山地帯に生育するイオウゴケの下部土壌の pH を計測したところ，最も低い値が2.7である[2]ことから，イオウゴケが生育するのには，少なくとも pH 値が2.7以上である必要があり，これ以下のチャツボミゴケやヤマタヌキランが生育できる範囲では生育できないということができる。つまり，ヤマタヌキラン・イオウゴケ群落は pH によって分布が規定されると考えられる。

そのほかのススキやツツジ科の低木が優占する地域や，キタゴヨウの生育している地域では，pH は3.3～3.6の値を示している。この地域は硫気孔の影響をあまり受けていない地域とされるため，pH 値も高い値を示していると考えられる。

4．硫酸イオンと植生との関係

硫酸イオン濃度の測定結果から，Aの地域の谷部の裸地から高濃度の硫酸イオンを検出した。また，断面図の谷底部や，谷部に存在するヤマタヌキラン・チャツボミゴケ群落からも，微量ながら硫酸イオンが検出された。さらに，調査地内の川からも多量の硫酸イオンが検出された。反対に，Bの地域等に成立しているススキや低木の群落では，ほとんど硫酸イオンが検出されなかった。このことは，地形条件と密接に関わっていると考えられる。つまり，硫酸イオン濃度が高くなった谷部に相当する裸地やヤマタヌキラン・チャツボミゴケ群落では，周りの裸地の部分に蓄積されていた硫酸が降水時に洗い流され，その洗い流された硫酸が谷部に集積したと考えられる。このことは，Table. 3の結果からも明らかである。一方，尾根・斜面部に相当するススキ・低木群落では，硫酸は降水時に洗い流されたために

ほとんど検出しないものと考えられる。

また，pH 値のデータと併せて考察すると，谷部の pH 値は尾根・斜面部より低い値を示している。この結果は，谷部で集積する硫酸によるものと考えられる。さらに，Fig. 12 で pH と硫酸イオン濃度の相関を調べたところ，pH が 2.5 付近より低いサンプルでは，硫酸イオン濃度が急激に高くなっていた。つまり，pH 値が 2.5 以下の堆積物では，硫酸の存在によって低い pH が維持されていると考えられる。

5．アルミニウムと植生との関係

谷部に相当するの裸地の部分やヤマタヌキラン群落などではそれほどアルミニウム濃度は高くなかった。一方，尾根・斜面部に相当するススキやツツジ科の低木が優占する地域や，キタゴヨウの生育している地域ではかなりアルミニウムの濃度は高くなった。これらの結果をまとめた Table. 2 から判断すると，pH が高くなると，アルミニウム濃度も同様に高くなっていることが分かる。このことから，アルミニウム濃度は，pH 値と密接に関係があると考えられる。この関係を考察するために，pH とアルミニウム濃度との相関図を作成した（Fig. 12）。このグラフより，pH が低いほど，アルミニウム濃度も減少していることが分かる。これは YOSHIOKA et al.[23]，佐藤・山根[12] の結果と同様である。つまり，アルミニウムは低い pH の影響を受けて溶脱したと考えら

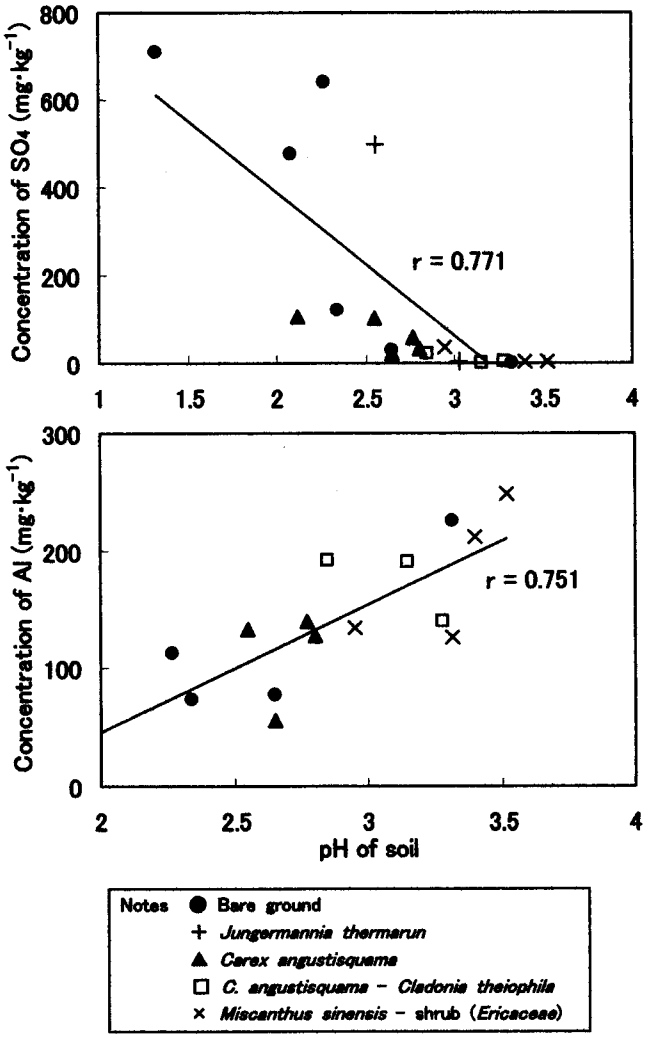


Fig. 12. The relationship between pH and Sulfuric acid (upper figure) or Al (lower figure).

れる。また，低いアルミニウム濃度の土壌では，緩衝力が機能せず，水素イオンを中和することができないことも考えられる。

しかし，調査地の河川水からもススキ・低木群落などと同様の高い濃度のアルミニウムを検出している。これは，周りの裸地から溶脱されたアルミニウムが集積・濃縮し，河川中のアルミニウム濃度が高くなったためと考えられる。

過去の研究例で結果のばらつきがでたのは，地形の影響が強く反映されているものと考えられる。つまり，裸地が凹地状で水を集積しやすい環境であれば，アルミニウムイオン濃度は高くなる。一方で，裸地が斜面上にあり，洗脱状態であれば，アルミニウムイオンは溶脱して濃度が低くなると考えられるからである。このことについて，佐藤・山根[12]では，火山灰の混入等土壌の母材の影響を考慮しているが，微地形の違いがアルミニウム濃度に影響を及ぼしていることを考慮しなければならないだろう。

これらの結果から，硫気孔原の植物は，アルミニウムに対して耐性が高く，高いアルミニウム濃度の土壌においても容易に侵入できるものと考えられる。しかし，Fig. 12では，ヤマタヌキラン・チャツボミゴケ群落よりヤマタヌキラン・イオウゴケ群落の方が可溶性アルミニウム濃度が高くなっていることが分かる。また，観察の結果からみても，ヤマタヌキラン・イオウゴケ群落のヤマタヌキランはヤマタヌキラン群落のものより生育状態はよくなかった。このことから，ヤマタヌキランのみが高い可溶性アルミニウム濃度のために生育が阻害された可能性が示唆される。

V－ii　各植生パッチの成立条件

1．裸地の存続条件

調査地内の裸地の中で，植物が全く存在していなかった地域は，硫黄の析出した裸地や，黒い岩盤が露出した地域であった。硫黄の析出した地域では，pH値がきわめて低く，かつ高い硫酸濃度を示した。これらは，植物が定着するするのには過酷な条件と考えられる。過去の研究例をみても，酸性土壌に生育するヤマタヌキランが存在する最も低いpH値は2.0が最低である[23]。このことから，pHが2.0以下は植物が定着できない環境であると判断できる。また，裸地では急傾斜で，侵食を受けやすい不安定な地域が多い。そのために，植物が定着できないのだろう。

2．チャツボミゴケパッチの成立条件

チャツボミゴケの存在するところは，主として谷沿いやヤマタヌキランの生育している下層であった。谷部では，水が集積してくることから，尾根・斜面部と比較して，相対的に湿潤であると考えられる。また，ヤマタヌキラン・チャツボミゴケ群落の下部の土壌の含水率は，周囲の裸地と比較しても高い値を示したことからも，チャツボミゴケは水分条件の良好な地域に成立しやすいと考えられる。

pH値では，チャツボミゴケパッチと近辺の裸地との比較で，チャツボミゴケパッチのほうが高い値を示した。一方で，有機炭素量もチャツボミゴケパッチのほうが高い値を示している。有機炭素量は，腐植量と密接な関係にあることから，pH値はチャツボミゴケが侵入した後に長期間存続し，多量の腐植がカチオンを吸着することで上昇したものと考えられる。そのため，pHが2.0を低下するような低い値でない限り，パッチの成立には関わらない。

つまり，極端にpHの低くない湿潤な地域なら，チャツボミゴケが侵入できる環境であるといえる。

3．ヤマタヌキランパッチの成立条件

まず，ヤマタヌキランの実生が定着する条件を考えてみたい。まず，ヤマタヌキランの種子は，7月下旬頃に散布され，実生が発芽するのは8月初旬であることが知られている[17]。ヤマタヌキランの実生は，チャツボミゴケの上部，Fig. 2のなかの点線で囲んだ裸地の部分，パッチとパッチとの間といった，様々なところで観察された。これらは，埴土と呼ばれる粘土含有量の多い堆積物であるほかは，pH値や水分条件などに共通した要素が見いだせなかった。したがって，土壌の化学成分だけではヤマタヌキランの実生が定着し，群落が成立できる条件が説明できない。このため，種子が定着する上でその場所に存続できる条件があるのではないかと推測できる。例えば，コケの上部であれば，植物体の隙間に種子が入り，降水時に種子が流されにくい条件となることが推測できる。点線の裸地の部分は平坦な地形であり，礫も多く存在することから，礫と礫との間は種子が流されにくい環境になると判断できる。最後に，植生のパッチは，周囲の裸地よりも数cmほど高くなっている。そのため，パッチとパッチの間

では，降水時に水の流れがパッチの両側にさけて通るものと考えられる。従って，種子は降水で流されにくいと推測できる。以上のような環境であれば，種子散布より約1ヶ月の間種子の定着が可能となり，発芽するものと推測できる。

次に，地形的要因について検討してみる。ヤマタヌキランが比較的谷部に多く分布しているのは，コケが谷部に多く分布していることや，周囲から運ばれた礫が堆積しやすい環境であるからだろう。また，種子の定着は，尾根・斜面部でも可能であることから，これらの地域でも生育可能なのであろう。そして，その後実生が成長し，パッチへと成長していくには，前述のようにpHが2.0を低下するような低い値でないことを条件とすることができる。

4．ヤマタヌキラン・イオウゴケパッチの成立条件

まず，ヤマタヌキランパッチ中に，イオウゴケが侵入するためには，始めにヤマタヌキランが侵入した頃よりもpH値が2.7以上に上昇する必要がある。そのため，ヤマタヌキランパッチが長期間存続し，腐植を多く蓄積し，カチオンを多く吸着する必要がある。しかし，断面図の中の谷底部のように，ヤマタヌキラン・チャツボミゴケ群落が成立している地域も存在する。この地域では，有機炭素量はヤマタヌキラン・イオウゴケ群落と同様に多い値を示していた。つまり，この地域のヤマタヌキランも長期間群落が存続していたことが示唆される。その一方で，この地域の土壌はpH値は低く，硫酸イオンも微量ながら検出している。断面図を作成した地域からは，谷底部の両岸に相当する主にツツジ科の低木が存在する地域の土壌から，ほとんど硫酸イオンを検出されていない。また，pHの値が相対的に高い。このことから，降水時にこの地域に存在した硫酸が洗い流されて谷部に集積する。その結果，腐植が蓄積されてもpH値は低い値を維持して，ヤマタヌキラン以外のほかの植物が生育できない環境下であることが考えられる。

以上のことから，ヤマタヌキラン・イオウゴケパッチは，硫酸が集積しpHが低く保たれる谷部には成立しにくいものと考えられる。それ以外の尾根・斜面部では，土壌が腐植の蓄積と硫酸の流脱によってpHが上昇した。これによってイオウゴケやツツジ科の低木が侵入し，ヤマタヌキラン・イオウゴケ群落が成立していくと考えられる。

5．ススキ・低木群落の成立条件

主にBの地域に分布しているススキ・低木群落の成立している地点の土壌では，構成している土壌の化学成分の分析より，硫酸イオン濃度が低く，可溶性アルミニウム濃度が高くなった。これらの地域の土壌は，高いアルミニウム濃度により，水素イオンを緩衝し，pHの低下を防いでいることが考えられる。さらに，ススキでは高いアルミニウム耐性を持つ[2),4),20)]ことから，ススキ・低木群落は，pH，アルミニウム濃度とも高い場所に成立すると考えられる。

Ⅵ　総合考察

従来の硫気孔原に関する研究では，硫気孔原に分布している植物を群落に区分し，その群落構成種の土壌の化学分析に終始した内容がほとんどであった。先行研究では硫気孔の中心部から植生が同心円上に変化するとの記述が多かった。しかし，調査地域を微地形スケールで測量し，パッチの分布や化学分析結果を各地形面ごとに検討した本研究では，植生は同心円上の変化をせずに地形に反映されていたことが解明された。

これまで考察で述べられた植生の成立に関する環境条件を考慮し，各植生同士の相互関係を検討した(Fig. 13)。まず，裸地に最初に成立する植生として，チャツボミゴケとヤマタヌキランが挙げられる。これら二つの植物は，片山地獄ではまず最初に侵入してくる植物ととらえることができる。この中でも，チャツボミゴケパッチは，主に谷部に，ヤマタヌキランパッチは種子が定着できる環境下(比較的谷部)に成立する。

次に，イオウゴケやツツジ科の低木は，硫酸の集積によりpHが低く保たれる谷部には侵入は難しい。そのため，これらの地域ではチャツボミゴケやヤマタヌキランがそのまま存続することになる。一方，尾根・斜面部では，硫酸が流失する環境下である。そのため，尾根・斜面部で成長したヤマタヌキランパッチは，土壌が長期間の植生の存続によって腐植が蓄積され，それとともにカチオンが多く吸着される。その結果pHが上昇し，イオウゴケやツツジ科の低木でも生育できる環境となり，ヤマタヌキラン・イオウゴケパッチが成立する。

このようなパッチが成立すると，アルミニウム

の溶脱が抑えられ，濃度が高くなる。このために，ヤマタヌキランの生育は悪化し，やがてツツジ科の低木群落が形成されていくものと考えられる。

これとは別に，ススキの存在する群落は，Aの地域でもアルミニウムを多く含み，pHが高い土壌のところであれば，ススキが侵入し，群落が形成されることも考えられる。また，キタゴヨウの存在する群落に関しては，調査地の中で硫気孔の影響を受けないところに成立している。しかし，Aの地域内でも実生が定着，成長しているキタゴヨウの稚樹を観察しており，これらが長い年月をかけて成長すれば，キタゴヨウ群落が形成されることが考えられる。

今後の課題としては，ヤマタヌキランの種子が定着，存続できる条件の解明がある。このほかには，実際に種子またはそれに近いものを散布し，降水時の挙動を調べ，種子定着に関して微地形の違いによる傾向があるか否か，といった実験を試みる必要があると考えられる。そして，実生が発芽，定着した後に，パッチへと成長していく状況を経年的に調査することも重要であろう。さらに，パッチが成長する過程の中で，ヤマタヌキランのパッチの成長するスピードは，きわめて遅い。実際には，ヤマタヌキランが直径10 cmほどのパッチに成長するには，10年のオーダーの時間がかかると考えられる。そのため，ヤマタヌキランのパッチが成長する大きさにも，限界があることも示唆される。このことを考えると，数年単位では調査地域の植生に変化が見られるとは断言できないのが現状である。以上のことを考慮し，違った視点からヤマタヌキランパッチの成長プロセスを解明する必要がある。

謝　辞

本研究は，北海道大学農学部附属演習林の笹賀一郎・小池孝良氏をはじめとして，東京学芸大学地球環境科学教室の小川潔氏，および山形大学理学部生物学教室の辻村東國氏，東京農工大学農学研究科の増澤直氏など，多数の御助言を頂きました。深く感謝をいたします。

現地調査では，東京学芸大学地理学教室自然史ゼミの皆様から多大な御援助や御助言を頂きました。化学分析に際し，北海道大学雨龍地方演習林，東京学芸大学，東京農工大学の皆様には多大なる御支援を頂きました。本研究の一部は文部省科学研究費の支援を得ました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

(1) GLIME, J. M., and IWATSUKI, Z. (1990): Niche Characteristics of *Cladonia* Lichens Associated with Vents in Japan. Ecological Research 5, 131-141

(2) 堀江秀樹・根本正之 (1990)：ススキの生育に対する土壌pHとアルミニウムの影響．雑草研究35, 292-295

(3) JIS－K 0102 (1993)：工業排水試験方法．233-237

(4) 香山雅純 (1999)：ススキとオギのアルミニウム耐性に関する比較研究．72 pp. 東京農工大学修士論文

(5) 町田　貞 (1984)：地形学．404 pp. 大明堂

(6) 村山　磐 (1973)：火山の活動と地形．310 pp. 大明堂

(7) 内藤俊彦・菅原亀悦・飯泉　茂・山根一郎 (1970)：宮城県鳴子町潟沼周辺の植生と土壌．日生態会誌20, 198-203

(8) 内藤俊彦 (1972)：八幡平藤七温泉周辺の硫気孔原の植生と土壌．十和田八幡平国立公園後生掛地区地熱発電所計画に伴う学術調査報告，69-77

(9) 根来健一郎 (1943)：硫気孔原の研究．生物学の進歩I，151-193　東京共立出版

(10) 三枝正彦 (1991)：低pH土壌における作物の生育．植物有害Alと下層土エダフォロジー．日本土壌肥料学雑誌62，451-459

(11) 斎藤員郎・河合洋子・阿部　均 (1976)：蔵王山硫気孔原植生の生態学的研究．山形大学紀要(自然科学) 9，91-111

(12) 佐藤　孜・山根一郎 (1969)：東北地方の硫気孔原土壌に関する研究．東北大学農研報21，133-162

(13) 佐藤　孜・佐藤和夫・山根一郎 (1974)：片山地獄の土壌について．鬼首地熱発電所自然復帰基礎調査，14-25

(14) 菅原亀悦 (1974)：片山地獄地域の植生．鬼首地熱発電所自然復帰基礎調査，2-13

(15) 田中　明編 (1984)：酸性土壌とその農業利用-特に熱帯における現状と将来－．310 pp. 博友社

(16) TSUJIMURA, A. (1979): The arrangement of the vegetation of solfataras according to pH value of soils. Ecological Review 19, 59-65

(17) 辻村東國 (1982)：硫気孔原植物ヤマタヌキランの生態学的研究　Iコロニー形成．日生態会誌32, 213-218

(18) TSUJIMURA, A. (1987): The Ecology of *Carex oxyandra* II The Behavior of Seedings and Tillers.

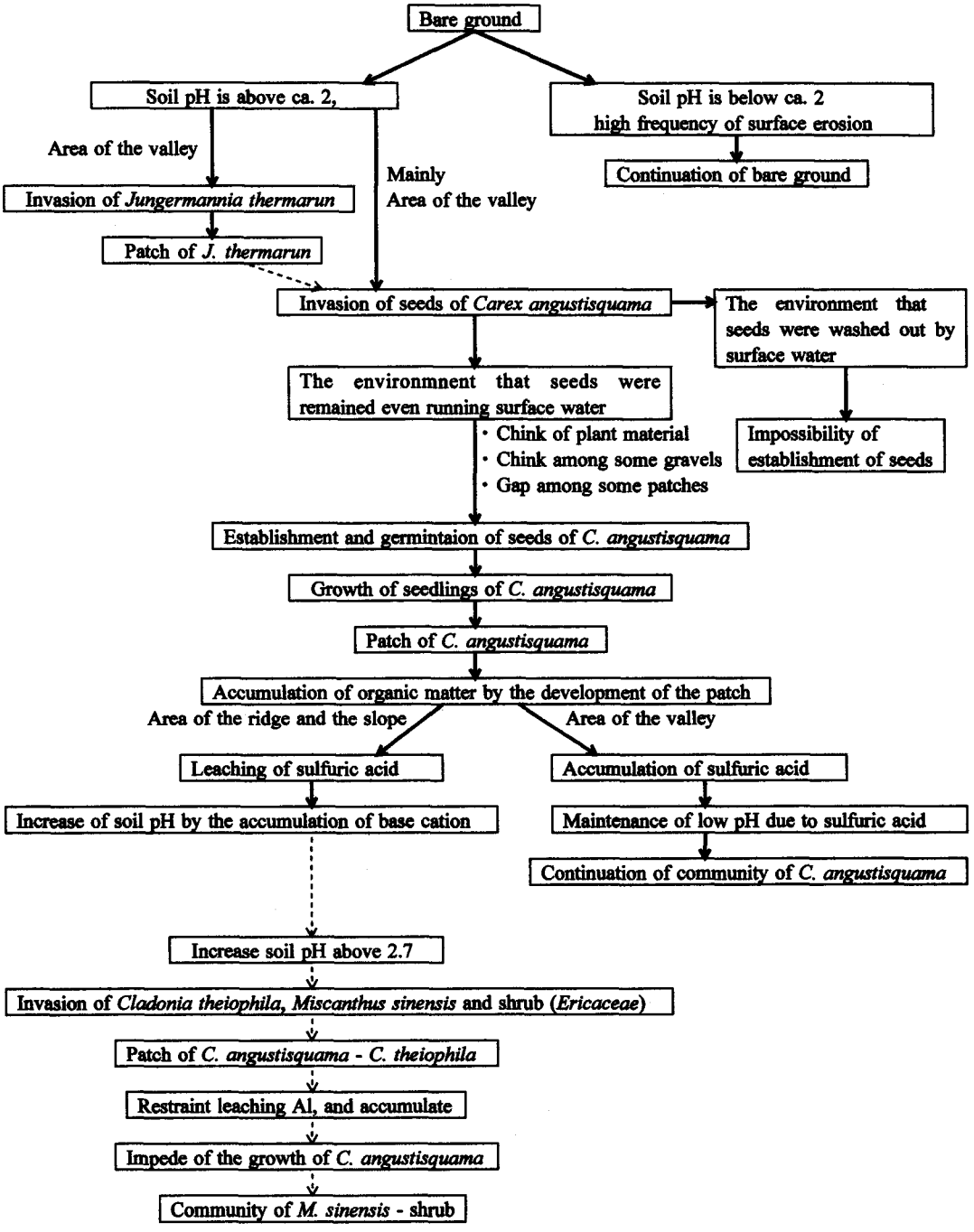


Fig. 13. The mutual relationship among each vegetations.

Ecological Research 2, 279-288
(19) 吉田 稔・若松善彦 (1991)：岩手県藤七温泉付近の硫気孔原の土壌pHと植生．日本土壌肥料学雑誌 62, 434
(20) YOSHII, Y. (1937): Aluminium Requirments of Solfatara-plants. Botanical Magazine 51, 262-270
(21) 吉村 庸・黒川禎子・中野武登・山本好和 (1987)：イオウゴケの組織培養とその生育におよぼす水素イオンの影響．高知学園短期大学紀要 18, 335-343
(22) 吉岡邦二 (1951)：八甲田山における硫気孔原植物群落．生態学会報 1, 48-52
(23) YOSHIOKA, K., SAITO, K. and TACHIBANA, H. (1965): Solfata vegetation at Osoreyama. Ecological Review 16, 137-151

Summary

Solfatara is usually found in volcanic regions, where the poisonous gases hydrogen sulfide and sulfur dioxide seep from vents. The vegetation at such sites suffers from the severe environmental conditions, such as low pH and a high concentration of aluminum, and the vegetation tends to be of a specific type. We analyzed solfatara vegetation with reference to geographical features, root condition of plants, and chemical characteristics of the soil at a site in northern Japan.

The study area was the solfatara of "Katayama-jigoku" (N38°49', E140°41'), located in Naruko, Miyagi Prefecture, Japan. To prepare a map of the vegetation, we first drew a contour map by triangulation. A soil profile was made to monitor root conditions of *Carex angustisquama*. We analyzed the chemical properties of soil in each plant community, focusing on pH, moisture content, and concentrations of sulfuric acid, Al, and C.

According to a preliminary survey, the study field could be divided two vegetational conditions. Bare ground and patches dotted with vegetation (A-region) were distributed among a plant community dominated by perennial plants (B-region). Plants in the A-region were classified in terms of three types of patch: (1) patches of *Jungermannia thermarun*; (2) patches of *Carex angustisquama*; and (3) patches of *Carex angustisquama* and *Cladonia theiophila*. These species were endemic to the solfatara region. Patches designated (1) and (2) were distributed in the valley. By contrast, patches designated (3) were distributed on the ridge and the slope. From the soil profile, the layer of organic matter was thicker under patches of *Carex angustisquama* and *Cladonia theiophila* than under patches of only *Carex angustisquama*. In the B-region, there were plant communities of *Carex angustisquama* or of *Miscanthus sinensis* and shrub (*Ericaceae*). The communities of *Carex angustisquama* were located in the valley while *Miscanthus sinensis* and shrub were distributed on the ridge and the slope. The soil on which *Carex angustisquama* grew had the lowest pH and the highest concentration of sulfuric acid among the plant communities. The pH and concentration of Al in the valley site were lower than on the ridge or the slope.

Jungermannia thermarun and *Carex angustisquama* might be the only plant species that could grow in the valley where the pH was low level below 2.7 due to sulfuric acid. By contrast, on the ridge and the slope, sulfuric acid might have been was leached away and the pH might have increased, with the accumulation of organic derived from *Carex angustisquama*. Acid soil might be improved by the presence of *Carex angustisquama*, which allows further invasion by other species.

Key words: solfatara vegetation, pH, aluminum, sulfuric acid, geographical features

Photo 2. A view of the A-region

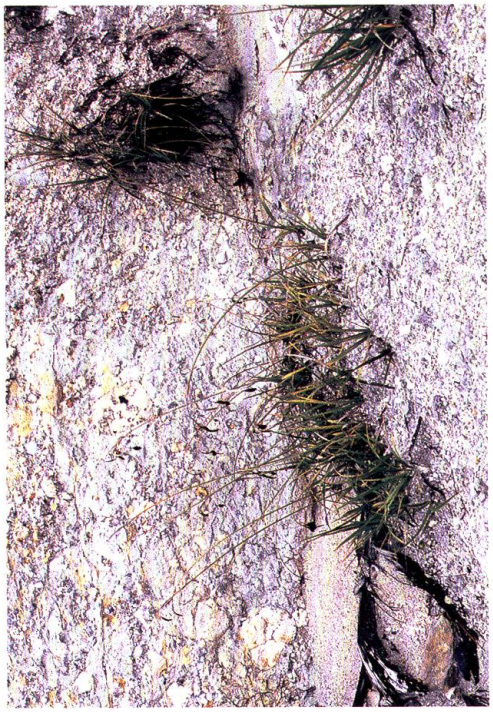


Photo 4. *Carex angustisquama* in the study area

Photo 1. A vent in the solfatara of "chinoike"

Photo 3. *Jungermannia thermarum* in the study area

Photo 6. A view of the B-region

Photo 5. *Cladonia theiophila* in the study area

Photo 7. Shrubs (*Ericaceae*: *Leucothoe grayana*, *Enkianthus campanulatus and Menziesia multiflora*) in the study area