

C-2 酸性物質の生態系に与える影響に関する研究

(4) 山岳地帯における酸性降下物の樹木影響に関する研究

研究代表者 森林総合研究所 森林環境部 森林災害研究室 吉武 孝
林野庁森林総合研究所森林環境部
森林災害研究室 吉武 孝・島田和則・岡野通明

(平成5-7年度合計予算額 14,364千円)

(平成7年度予算額 4,741千円)

[要旨] 関東地方の高海拔山岳林におけるシラビソ・オオシラビソ等の常緑針葉樹の縞状枯損現象は、従来から自然現象のひとつとして考えられている。しかし、最近北関東及び、丹沢山系で顕在化しているダケカンバ・ミヤマハンノキ等の落葉広葉樹高木の樹木衰退現象は、酸性霧の影響による枯損現象ではないかと疑われている。我々は日光白根山及び日光男体山の海拔2,100m地点で雨水、霧水、樹幹流等の採取を、また海拔1,700m地点での雨水の採取を行い、pH、溶存成分等を分析した。1994年6月下旬から9月下旬までの夏季4ヶ月に男体山7合目には26Kg/ha以上の陰イオンが降下していることが明らかになった。さらに、2,100m地点で採取した霧水の中に、pH3.2、SO₄濃度66mg/l、NO₃濃度49mg/lの霧水が確認された。男体山ではダケカンバの葉が本来の黄葉期を経ず、早期に褐色に変色して落葉すること、樹冠上部にある枯死枝に凍傷痕の存在していること、地中流下水にはAlイオンのあること等の知見が得られた。

[キーワード] 奥日光・男体山・白根山・酸性霧・ダケカンバ

1. はじめに

栃木県奥日光にある白根山、男体山、太郎山等の海拔山岳地帯においてダケカンバやオオシラビソ等の集団または単木での枯損現象が認められる。一方、関東周辺に位置する赤城山や丹沢山系で極めて低いpH値の酸性霧の存在が確認されたこともあって、高海拔地域の森林衰退現象の原因が酸性霧による被害ではないかと言われている。しかし、この地域での酸性霧の有無や森林衰退の実態等についての研究はほとんど行われていなかった。

2. 研究目的

北関東周辺の高海拔地域の山岳林における酸性霧等の汚染物質の降下量を解明すると共に森林の被害状況の実態把握と原因解明のために本研究を行った。

3. 研究方法

ダケカンバの枯損現象が発現している白根山と男体山において酸性降下物の存在を解明するために降水(雨・霧)と土壌、ダケカンバの枝葉を採取して、成分を分析した。また、採取した雨・霧を使った暴露試験を行った。さらに、植物の異常現象の発現時期を把握するために、男体山でフェノロジーに関する調査を行った。

4. (1) 霧・雨・地中流下水・樹幹流の採取方法

霧の採取は2方式の方法で行った。純水で洗浄したガーゼで、底辺長30cm、高さ60cmの三角形のトラップを作り、雨避けのカバーと霧の貯蔵用の500mlのポリ瓶を付け、現地の樹木に紐で吊

るした。霧は白井工業社製の自動霧水採集装置を使用して、不定期に採取した。pHは採取直後に現地で測定した。

雨は林床の草本を刈り取って地面に穴を開け、直径18cmの漏斗を差し込んだ1ℓポリ瓶を林外、林内のそれぞれに2個ずつ設置した。採取水は月に2~4回回収した。

1993~'94年は高木枯損のある男体山の7合目で図1のような装置で雨を採取し、月に1~4回の間隔で回収した。

地中流下水は、男体山7合目の岩礫地において降雨後土壤中を通過して岩盤の隙間から滴下している滴を直径18cmの漏斗を差し込んだ500mmℓポリタンクで採集した。回収直後にpHを測定した。

男体山7合目においてダケカンバの樹幹流を採取した。樹幹流の採取は胸高位置に上辺を斜めに切り込んだ合成ウレタンラバーを巻き付け、1ヶ所に塩化ビニルのパイプを差込み、パイプの下端からビニルホースでアルミ箔で覆った20ℓポリタンクに導いた。ビニルホースの出口にはゴミ除け用のガーゼを取り付けた。ガーゼは樹幹流の回収の度に新品と交換した。

タンクに貯まった樹幹流の回収は、雨の採取と同時に行い、タンクは毎回交換した。なお、回収時には現地pHを測定した。

4. (2) 霧・雨・樹幹流・地中流下水の分析方法

霧・雨・樹幹流・地中流下水の各成分の分析方法は下記の方法で行った。

SO₄・NO₃・Cl : イオンクロマトグラフ及び高速液体クロマトグラフ法

NH₄ : インドフェノール青吸光光度法

Ca・Mg・Al : 原子吸光光度法

Na・K・Mg : 炎光光度法

N : 紫外線吸光光度法

4. (3) 男体山の土壌成分の採取方法及び分析方法

男体山の土壌分析を行うために、1995年に山頂付近のオオシラビソ・ダケカンバ混交林と、ダケカンバ枯損木の根元、7合目の樹幹流採取木根元、海拔1,700m、1,310m、1,27mのそれぞれの地点のダケカンバ健全林において、腐植質の下から20cmの深さまでの土壌を採取した。採取した試料はポリ袋に入れて持ち帰り、分析に供した。

4. (4) 土壌分析方法

土壌の成分分析は下記の方法で行った。

N : ケルダール法

Ca・Mg : 硝酸・過塩素酸分解法・原子吸光法

K : 硝酸・過塩素酸分解法・炎光光度法

P : 硝酸・過塩素酸分解法・バナドモリブデン酸法

4. (5) 男体山の樹木採取方法

試料の採取は1995年6月と10月の2回行った。試料は剪定ばさみまたは高枝切りはさみによって枝または葉を採取した。採取した枝葉はそのままポリ袋に入れ持ち帰った。

4. (6) 樹木分析方法

試料の処理は過塩素酸分解法で行った。各成分の分析は以下の方法で行った。

Ca・Mg・K：原子吸光光度法

N：ケルダール法

P：バナドモリブデン酸法

4. (7) ダケカンバに対する暴露試験方法

酸性霧がダケカンバの葉面に付着して生理的な異常を引き起こしていると仮定して、男体山の7合目で採取した雨、霧、樹幹流等を使用してダケカンバ苗木に対する暴露試験を行った。暴露試験は供試体をアクリル製ボックス(50*50*80cm)に入れ、1面に開けた穴から超音波加湿器で噴霧した。噴霧時間はタイマーで制御し、1日の噴霧時間は2~3時間とした。

5. 現地調査結果

調査場所の海拔高と樹木の枯損状況についての結果は表1に示すとおりである。以下に各山岳地における被害状況を説明する。

5. (1). 白根山

5. (1). ①凍害

白根山のダケカンバ林が図2のように一斉に枯死した現象が生じたのは1983年春であった。

長谷川¹⁾の報告によれば、1983年春の暖気によって耐凍性の低下したダケカンバは、その後の異常低温によって凍害が発生して、奥白根山の南東斜面一帯の枯死現象が発生したと述べている。我々の最初の調査は、この被害の発生後8年を経ていたため、枯死木の凍害発生の有無を確認するために、生存木の枝の生死の境界部分を解剖し、凍傷痕の有無を把握した。その結果、奥白根山の東斜面、五色山及び座禅山の南斜面でダケカンバ衰退木(梢端部の枝が枯死したもの)の枝に凍傷痕を確認する事ができた。

5. (1). ②風害

座禅山の北~東向き斜面では、オオシラビソ、シラビソの風倒被害跡地がある。また、奥白根の東向き斜面でもダケカンバの倒木が確認された。

5. (1). ③菌害

奥白根山の東斜面から座禅山にかけては、立ち枯れ木及び幹の上部と太枝の枯死したダケカンバの根元部分において、ナラタケ菌の根状菌糸束を高頻度で確認した。また、五色山と五色沼東岸の健全なダケカンバ林においても、外観上異常の認められない個体において、表土に近い位置にある根で腐朽しているものが確認された。

5. (1). ④虫害

1990年から毎年連続して五色沼の周囲のダケカンバ林約25ha(図3)において、初秋にハバチ(*Dineura vividorsata*)の食害が発生していることが明らかになった³⁾。このハバチの食害は、過去に1回北海道で報告例があるが、本州における被害事例としては1990年の我々の発見が最初であった。この虫害は1990年以降毎年発生していることから推定して、おそらく1990年以前からこの地域で発生していた可能性がある。

ハバチの被害はダケカンバの冬芽の形成がほぼ終了している、夏の終わりから初秋にかけての時期に発生しているため、ダケカンバは枯死することなく翌年も冬芽の展開伸長を行うことが出来る。このハバチの被害は、ダケカンバの葉のほとんど全てが激しく食害を受けるにもかかわらず、黄葉時期の葉を食害するために、大規模な範囲で被害が発生しても寄主のダケカンバは枯死しない。種の存続のために、寄主への影響の最も小さい時期をねらっての採餌行動と推定された。

5. (1). ⑤ 獣害

白根山山麓の天然林の針広混交林では、オオシラビソとシラビソの単木の枯死現象がよく見られる。図4は、管沼登山口のシラビソのニホンシカ（以下シカと称す。）による食害である。樹皮が環状に剥皮されていないと、食害を受けた後も生存を続けるが、全周剥皮されて翌年に枯死したものがあつた。この種の被害木は天然林の中に点在しており、根元部分の樹皮が剥皮されていることからシカの食害と判定できた。

5. (2) 男体山

男体山は山頂周辺の南西から南東斜面にかけてと、火口壁の北西向き斜面にダケカンバの枯損が著しい。単木の枯損木は、山麓から海拔2,000mまで男体山の全域において見ることができ、主として海拔1,500m以下ではウラジロモミ、それ以上ではダケカンバ、コメツガの高木であつた。

ウラジロモミは図5のように樹高1m程度から20mを越す高木まで調査した枯損木の全てにシカの食害が認められた。特に海拔1,400m付近の山麓南東斜面では天然性の稚樹が全て枯損していた。一方、ダケカンバは海拔2,000m以下では林冠から抜き出ている高木と、治山工事区域内の小尾根や林道端に残された高木の梢端部分に枯枝が見られた。シカの被害の発生した樹種は前述の2種の他、ナナカマド、ヤシオツツジ、カエデ、ミネザクラ、シラビソ、カラマツ等であつた。林床及び治山工事現場ではササ、イタドリ、緑化用草本植物等が被害を受けていた。

5. (2). ① 男体山7合目のダケカンバの衰退

図6は1992年7月から'95年の7月まで、4夏季の同一ダケカンバの状況である。1992年には梢端の一部分の枝が枯れている程度であつたが、'93年には主幹上部の枝の葉が矮小化し'94年に枯れてしまった。モニタリング開始から4年目で枯れた梢頭部分は、太枝と幹を残すだけとなつた。このように、男体山の斜面に単木的に残っているダケカンバ高木は、今も徐々に衰退しているものがあることが判明した。7合目のモニタリング対象木の梢端部分の枝を、1994年夏に数本採取して解剖した結果、どの枯死枝にも凍傷痕が確認され、枝の直接の枯死原因は、凍害であることが明らかになつた。

モニタリング対象木の下に更新している、樹高83cm~247cmのダケカンバ低木 10本に標識を付け、冬芽の展開伸長時期から落葉時期までの成長過程を3年間調査した結果、次のことが明らかになつた。

- ① 低木の開芽時期は高木より1週間~2週間早い。
- ② 秋期の正常な黄葉と異なる褐色の変色が顕在化する時期は毎年8月下旬から始まる。
- ③ 成長期に枯死する枝は無く、枝の枯死または衰弱は冬季に起きている。
- ④ 8月下旬以前の葉面の異常は、風害と虫害によるものである。
- ⑤ 各調査木は調査期間中に数本の細枝の枯死を除けば、著しい生育障害は生じなかつた。

枯死枝に凍傷痕の確認された樹種は、この他にミネザクラ、ミヤマハンノキ、コヨウラクツツジ、オオシラビソ、コメツガ等であった。

5. (2) ②シラビソ・オオシラビソの枯損

男体山の9合目以上の南東向き斜面上のオオシラビソ、シラビソ林には数本の小規模の縞枯れ現象がある。その中のひとつでは楕円形状に枯れたオオシラビソの群落があり、枯損域の一ヶ所に焼けこげた株が残っていた。枯死木には、すでに穿孔性害虫の侵入孔が確認されたが、一部の衰退木の梢頭には緑葉がついていた。この枯死群落は夏季に多く発生する夕立に伴う雷害によって枯れた可能性が高いと推定された。また、頂上から志津小屋方面へ200m行ったオオシラビソ、シラビソ群落に、幅5m、長さ9mの帯状の幹折れ被害が発生していたが、被害木は全て梢頭部で折れており、しかも、その折損部分は根元に落下していたことから雨水害が発生したものと推定された。

5. (3) 念仏平

念仏平は奥日光山岳地帯の中では最も規模の大きい縞枯れ現象が見られる。縞枯れの中心部分の林床には、オオシラビソ・ダケカンバの稚樹が群生している。しかし、稚樹の中にはシカの食害を受けているものが多い。

5. (4) 太郎山周辺

大真名子山、小真名子山、太郎山、山王帽子山は、山頂部に立ち枯れの樹木がある。吉野⁴⁾によれば、太郎山山頂のオオシラビソ・シラビソ混合林は縞枯れとして1966年に報告例があり、1971年の調査では太郎山南面の海拔2,160mのシラビソ・オオシラビソ混合林で、樹高6~7m、胸高直径10cmのうっ閉した樹林中、幅20mくらいの立ち枯れ部があり、地表は樹高0.5~1.0mの稚樹や低木・草本に覆われ、稚樹はオオシラビソ6：シラビソ3：トウヒ1の割合で、コメツガも所々にみられたと報告している。

山王帽子山では、シラビソ・コメツガ等の風倒被害地と推定される場所が、また、三岳では空中写真から風倒被害地が確認された。

男体山と太郎山の間地域は、過去に大面積の伐採が行われており、伐採当時に残されていたダケカンバ高木に梢端枯れが多く見られた。

5. (5) 鶏頂山周辺

鶏頂山と釈迦岳にはダケカンバ、コメツガ、クロベ等の立ち枯れが見られ、特に鶏頂山では、風害跡地とその周囲の天然林にダケカンバやコメツガ等の立ち枯れ木や梢端枯死木があった。この風害跡地の地表にはコメツガ、ダケカンバ、ヒバ等の稚樹が更新していた。1991年7月の調査時点に、ここのダケカンバの樹高 2m程度の低木の葉面に、直径2~3mmの褐色の斑点が多数確認された。

5. (6) 赤城山

赤城山は1990年の調査時点で、地蔵岳を中心としてダケカンバ、ミズナラ、等の立ち枯れ、梢端枯れの被害木が、また北面道路終点付近の尾根にカラマツの立ち枯れがあった。シラカンバの

中にはスス病に類似した樹肌のものがあり、その葉の葉縁部に褐色の変色部が認められるものがあった。その後1994年に再調査したときに、被害の進行の著しい箇所は確認できなかった。

赤城山の樹木被害については、地元の人のお話では1982年に春先の雹と夏の台風の影響によって樹木が枯れ始めたこと、スキー場周辺のダケカンバに塩害またはナラタケ菌の被害が発生しているという指摘がある。また、観光道路に沿った森林の一部で、シラカンバを目立たせるために、他の樹種を伐採して、日当たりが強くなり、林床が乾燥してナラタケ病が蔓延した影響もあると言われている。

5. (7) 奥鬼怒・尾瀬

奥鬼怒林道沿いの尾根部分には針葉樹の小規模な風害跡地が散在しており、尾瀬の鳩待ち峠ではダケカンバの梢端枯れが散見された。手白沢温泉周辺は健全な天然林で覆われており、森林衰退現象は確認できなかった。

5. (8) 霧降高原

霧降高原の六方沢橋付近では、道路沿いの法面上の斜面のダケカンバ低木が群状に枯れていたほか、六方沢左岸の尾根部にダケカンバの枯死した場所があった。

5. (9) 八方ヶ原

海拔1,278mの八方ヶ原のレンゲツツジ群落内では、ダケカンバの孤立木が立ち枯れていたが、それぞれの枯死木はレンゲツツジを繁殖させるという、観光上の理由から根元部分が環状剥皮されていた。また、霜害の発生が多いために観光資源のレンゲツツジには凍害による枯死木が多発していた。

5. (10) 白根山のダケカンバ年輪解析

白根山の奥白根では1983年の春にダケカンバの純林が一斉に枯死している。枯死木の分布している高度は、弥陀ヶ池周辺の海拔2,260m付近から始まり、座禅山と奥白根の海拔2,300m以上の南東向き斜面には特に枯死木が多い。

弥陀ヶ池から五色沼への登山道沿い、及び五色山から前白根山への尾根筋で採取したダケカンバ生存木の成長錐による年輪解析の結果、樹齢が270年以上のものがあること、年輪成長には5～20年間隔で増減があること等が明らかになった。一斉枯死現象のあった1983年は図7(1)、(2)の両方とも年輪成長は前年よりも増加していた。

また、図7(1)は1940年以降3回の年輪成長減少期があり、1983年以降数年間成長が停滞していた。一方図7(2)は1940年以降4回の成長減少期があったものの、1983年以降数年間は大きな成長停滞は起きていなかった。

ダケカンバの樹高は海拔高度が高いところほど低い、弥陀ヶ池から奥白根山東斜面では、樹高、胸高直径の大小に関わらず枯死木が発生していた。このことから、白根山のダケカンバ林の枯死現象が、寿命による一斉枯死とは考えられなかった。

6. 成分分析結果

6. (1) 霧・雨・の成分分析結果

白根山と男体山の1992年～1994年までの降水（霧・雨）の採取量と成分分析結果は表2～7に示した。

白根山と男体山では樹木の成長期にpH5.0未満の酸性雨が降下していることが明らかになった。

1992年にガーゼトラップで採取した霧水は雨よりも酸性度が高かった（表1）。樹木の葉は、春の開芽から秋の落葉期までの数カ月の期間内に、乾性・湿性の酸性降下物が付着する。そして、葉面上では付着した汚染物質が霧や雨によって蓄積または洗脱される現象の繰り返しが起きている²⁾と考えられる。ガーゼで捕らえられた採取水はこのような樹木の葉の状態に類似した条件下のpH値を示していると推定された。

長梅雨で雨の多かった1993年の7月中旬～9月中旬までの男体山7合目の雨量は、'94年の同じ時期の雨量の1.5倍あった。一方、pHは雨量の少なかった1994年の方が低い値であった。雨の成分濃度では雨量の少なかった1994年の方が'93年よりも高い値であった。1993年の7月～9月までの3カ月に男体山7合目に降下した推定陰イオン量は17.7kg/haで、'94年は26kg/haであった。雨環境から見れば、雨量が少なく陰イオンの降下量の多かった、1994年の方が'93年より植物にとっては厳しい環境であったと思われる。しかし、1994年は6月～10月までの気温が平年より高かったために樹木の生育期間は'93年よりも長く、また、降雨量も乾燥害を招くほど少ないものではなかった。

男体山の海拔1,700mと7合目(2,100m)地点での1994年の雨量を比較すると、採取期間によっては片方が他方よりも約2倍多いときがあった。このように、男体山の夏季の雨量は、極めて局地的に変化していると思われた。

男体山の霧の成分では、1994年7月15日のものが最も酸性度が高く、SO₄、NO₃、Clの各陰イオン濃度も最も高かった。

6. (2) 樹幹流の成分分析結果

男体山7合目のダケカンバの樹幹流は多雨の1993年には20ℓのポリタンクが溢れることがあったが、小雨の'94は溢れたことはなかった。

男体山の斜面上のダケカンバは鉛直に立っていることが少なく、幹を流下した樹幹流が幹の途中から落下することがある。そのために、幹の根元に流下する樹幹流の量は個体差の多いことが判明した。すなわち、乾性・湿性の酸性降下物を含んだ樹幹流が根元に負荷される樹木と根元には負荷されない樹木のあることが明らかになり、仮に汚染物質を含んだ樹幹流が流下するとしても、立地や樹幹の形状の違いによって、根元に負荷される酸性降下物の量に差のあることが分かった。さらに、斜面方位、周辺の樹木との位置関係で微妙に風当たりが変わるため、10mの距離しか離れていない樹木でも、樹幹流の量と成分に差の出ることが分かった。

以上のことから、最近の男体山のダケカンバの単木的な枯損に酸性降下物を含んだ樹幹流が何らかの影響を与えていると仮定したとき、健全木と衰退木が隣接して存在する理由のひとつと推定された。

樹幹流の成分濃度は1993年は図8に示したようにどの成分も2mg/l未満であった。各成分とも7月～9月にかけて、濃度が高くなっていることが分かった。空梅雨の1994年は図9のようにMg以外の成分は6月下旬～7月上旬に濃度が高かった。特に、Caは雨の少なかった時期に濃度が高かった。

6. (3) 地中流下水の分析結果

男体山7合目の岩の隙間から滴下している滴を採取して雨と比較したのが図10である。地中流下水の成分量の多い順は $K > Mg > N > K > Al$ であった。採集時期が異なっているが、Alイオンの場合は濃度の小さい雨と比べて地中流下水は約10倍多かった。今回採集した地中流下水のAlイオン濃度が樹木の根系に対してどのような影響を与えているかは不明だが、雨に含まれる成分量より地中流下水の方が多かったことから、男体山7合目の岩礫地においては、地中からAlが溶出していることが明らかになった。

7. 土壌成分分析結果

男体山で1995年に採取した土壌の成分分析結果は図11のようであった。土壌1（オオシラビソ根元）・2（ダケカンバ根元）・3（ダケカンバ枯死木根元）は山頂付近、4～5（7合目衰退木、海拔2,100m）・6（海拔1,700m）・7（海拔1,310m）・8（海拔1,270m）はそれぞれの海拔高度における採取土である。

成分の中で海拔高度の低下に伴い減少したものはNであった。逆に低高度ほど濃度が高かったものはCaであった。P濃度は全般的に低かったが、低海拔高度の方が低めであった。

海拔高2,100mの7合目以上は、1,700m以下の場所よりNが多く、Caの少ない成分環境であることが分かった。

8. 樹木成分分析結果

枝の成分分析の結果は図12に示したとおりである。衰退木の多い7合目以上の場所のオオシラビソ・ダケカンバの枝の成分は海拔1,700m以下の健全なダケカンバの枝に比べて各成分量が低濃度であった。特に、山頂部分(1, 2, 3)のオオシラビソとダケカンバは他の場所の枝に比べて相対的にCa濃度が低かった。山頂部と7合目(4, 5, 5*)を比較した場合、Ca以外の成分は7合目の方が低かった。海拔1,700m以下(6, 7, 8)の場所の枝は、NとCaが多かった。また、健全林のなかでは、N濃度は高度と共に低下してCaは逆に濃度が上昇した。採取場所6, 7, 8では、10月に試料を採集したために、葉から枝への栄養分の転流が始まっていたと推定される。

図13は採取場所別の枝の5成分(Mg・Ca・K・P・N)別の割合を示している。採取場所1～5*までは6月の採取であり、6～8は10月の採取であった。そのためか、Mgの含有割合が1～5*と6～8で大きく異なっていた。すなわち、落葉初期の6～8は、Mgの割合が大きく、開芽伸長直後の4・5及び未開芽の2は少なかった。CaはMgとは逆に10月採取の枝で急減していた。7合目は山頂、1,700m以下の場所に比べて、Mg・K・P・Nの各成分が少なかった。

山頂部のダケカンバ健全木(2)と枯死木(3)の成分比を比較すると、Ca以外は枯死木が健全木より少なくなっていた。また、7合目の衰退木の生枝と枯死木の成分比には差がなかった。

9. 暴露試験結果

ダケカンバの葉面に霧粒が付着していくと、第一段階では図14のように葉面に無数の微小水滴が付着して行くが、それぞれの水滴は徐々に結合して大きくなり、葉脈に沿って移動し始める。やがて、水滴の重量に耐えきれずに葉先が下垂してくる。(ただし、枝の伸長条件から水滴が付

着しても葉先が下垂せず葉の付け根側に水滴の集中する場合も観察された。) 葉面の水滴は徐々に拡大しながら葉縁または葉先に集中していく。このため、1枚の葉の表面における霧粒の付着時間は、葉先や葉縁部分が他の部分より長くなる。また、葉の裏面は、常に風下を向くため霧粒が付着しにくいことがわかった。

冬芽は葉の展開と同時に葉の付け根部分で成長していくが、暴露試験による霧粒の集中は冬芽の基部で生じていなかった。

ダケカンバ苗木に対する暴露試験の結果、葉面に変色が発生する過程は図15のように、葉の日齢の高いものから順に変色が発達していくのが一般的であった。

男体山、白根山のダケカンバや林床植生の葉も同様に、葉の日齢の高いものから変色が始まっており、暴露時間の長さすなわち酸性物質の負荷量の累積と、変色の発現には関係のあることが示唆された。

暴露開始後5日目(のべ15.5時間暴露)に葉先に茶色の変色が発生し、8日目(のべ22.5時間暴露)に2枚目の葉先の変色と1枚目の変色箇所の拡大が確認された。試験開始後29日目(のべ59.5時間暴露)には、1枚目の変色葉の葉縁の一部に、また、第1、第2葉脈間の部分に薄茶色の変色が発生していた。しかしながら、3~4枚目までの葉は暴露18日後(のべ39.75時間暴露)に表面の光沢の低下と、葉面の硬化、ざらつきを認めたものの、試験期間中の新たに生じた変色は確認できなかった。

男体山の雨の暴露試験で最初に落葉が観察されたのは、試験開始後25日目であった。この時点では対照区の純水暴露区の苗木には異常が生じていなかった。

純水暴露区のダケカンバの黄色葉の落下が発生したのは試験開始34日目であった。カンバ類は夏季の成長期に日齢の高い葉を落葉させるため、対照区の苗木の落葉は正常な現象であったと推定した。

毎年8月下旬頃から始まる男体山のダケカンバの葉の変色現象は、本来の黄葉と違って、図17、18のような形態である。正常な葉は、葉色が薄黄緑から黄色へ変色していくが、男体山では緑からすぐに褐色になる。しかも、変色の形状は図のように微小斑点や、葉縁部分の褐色化が特長である。

10. 総合考察

関東の北部から西部にかけての山岳地域において、植物の葉面の露や河川、湖沼の水のpHを測定した結果、pH5.0以下の酸性のものが多く確認された。

低pHの観測値が得られた場所で必ずしも森林衰退現象が見られたわけではないが、その中で、天然林の高木の集団あるいは単木の枯死現象が広域に及んでいる奥日光山岳地帯では、酸性雨あるいは酸性霧が降っていることが明らかになった。特に、白根山と男体山の海拔2,000m以上の場所では、ダケカンバ林の衰退現象が確認され、しかもそこには酸性の霧または雨が降下していることが明らかになった。

一方、ダケカンバ・シラビソ・オオシラビソ等の衰退の激しい樹種の被害原因として、凍害、雨氷害、雷害、風害等の気象害とシカ、ハバチの食害、ナラタケ菌による被害、観光目的の人為的な巻き枯らし等様々な原因が指摘された。

その中で、明確な原因の分からない現象として、毎年夏の終わり頃に男体山で発現するダケカ

ンバ葉の異常な褐色斑現象がある。変色葉の生じたダケカンバには、正常な冬芽が形成されており、この成長後期の異常変色葉はダケカンバにとって急性的な悪影響を及ぼしてはいないようである。しかし、男体山では、海拔高が高くなるほど図19のように土壌pHが低く、特に7合目以上はpHが4.0未満の場所があり、海拔2,100mの7合目で確認された土壌中のAlイオンの溶出が、普遍的に発生している可能性もある。

男体山の山頂及び7合目の土壌中のN成分が海拔1,700m以下より多いことは、寒冷な気候下で有機物の分解が遅いことと、霧と雨に含まれている硝酸態窒素の降下の影響と考えられる。さらに、樹幹流成分は樹木の生育期間の後半(8月以降)に多くなる傾向があり、酸性降水物として負荷されるN成分は、季節的には夏から秋にかけて累積していくと思われる。これまでの調査結果では男体山の7合目以上は、土壌の栄養条件としては、N成分が他の成分より数倍多い環境であると言える。

ダケカンバとオオシラビソの葉の成分分析では表8のような結果が得られており、7合目のダケカンバ衰退木の葉のN・K成分は多いことが分かった。

仮に、本来秋期に始まる、葉の中に蓄えられた栄養分の幹への転流が、8月の早期異常変色が原因で十分に進行しないうちに落葉しているとすれば、慢性的な枝の栄養不足状態が生じていることも考えられる。あるいは、霧・雨によるN成分の負荷による樹木のN過多に起因する秋伸び現象が有るとすれば、寒冷地を好むダケカンバが、十分な耐凍性を持つことなく越冬して、冬季の過酷な低温によって凍害にかかっている可能性もある。

いずれにしても、男体山の海拔2,000m以上にあるダケカンバを主とした樹種では、様々な環境要因の複合作用で現在も衰退しているものがあることが分かった。

11. 本研究により得られた成果

- ①北関東山岳地帯の海拔2,000m以上の森林にpH5.0以下の酸性の霧と雨が降っていることが明らかになった。
- ②男体山の7合目で採取した霧水を付着させたアサガオの花弁で変色(脱色作用)が生じた。
- ③樹幹流は夏から秋にかけて各成分の累積量が増える。
- ④男体山7合目に夏季に降下する陰イオン量は17.7kg/ha(1993年)、26kg/ha(1994年)であった。
- ⑤雨後の地表流下水には、雨の約10倍のアルミイオンが含まれていた。
- ⑥ダケカンバの樹幹流の成分濃度は個体差が大きい。
- ⑦男体山の7合目(海拔2,100m)以上では土壌pHが4.0以下の場所があった。
- ⑧高木の衰退枯死現象の原因は、場所によって異なっており、自然現象として生じる縞枯れによるオオシラビソ・シラビソの衰退は、念仏平と男体山に見られる。白根山と男体山の枯死したダケカンバ、ミネザクラ、ミヤマハンノキには、凍傷痕が認められた。雷害、雨氷害と推定されるオオシラビソ・シラビソの被害が男体山9合目以上で発生していた。奥日光全域でニホンシカによる樹木の皮剥被害が起きている。
- ⑨男体山のダケカンバの変色落葉は8月の下旬に始まる。
- ⑩白根山の五色沼周辺のダケカンバ林では毎年8月下旬からハバチの食害が起きている。

12. おわりに

栃木県日光市の奥日光山岳地帯において、酸性降水物と森林衰退の関係について調査を行った。

本研究プロジェクトの期間内に、奥日光山岳地帯における、酸性降下物と森林衰退の因果関係を得るまでに至らなかったが、男体山の海拔2,100m以上の所の土壌環境が、樹木にとって好ましくない環境にあることが明になった。

本研究を推進するに当たり、試験地の提供でご便宜を賜った日光二荒山神社及び治山工事運搬路の使用の許可を頂いた林野庁宇都宮森林管理センターに対し感謝申し上げます。また、分析業務でお世話になった日本肥糧検定協会と茨城大学農学部土壌植物栄養学教室の浅見輝男教授、久保田正重教授、吉田晴美さん、武田早織さんに厚く御礼申し上げます。最後に、本研究の資料のとりまとめに際し多大の協力を頂いた土屋良子さんと柏木利喜子さんに対して心より感謝申し上げます。

13. 引用文献

- 1) 長谷川順一：日本の生物3, p25~28, 1989
- 2) 木村和義：作物にとって雨とは何か、濡れの生態学, 農文協, pp197, 1989
- 3) 吉武 孝他：北関東山岳林における樹木枯損について, 103回日林論, p249~251
- 4) 吉野みどり：日本の亜高山帯林におけるしまがれ現象の分布, 今西錦司博士古希記念論文集, 中央公論社, p183~202, 1974

表1 海拔高と樹木の枯損状況

海拔高	場所	枯損の状況
2578m	白根山	シラビソ・林シラビソ (鹿の食害・風害) ダケカンパ (群状立ち枯れ・梢端枯死・凍害・フナケ菌害・風害)
2484	男体山	ダケカンパ (群状立ち枯れ・梢端枯死・凍害・フナケ菌害・風害・鹿の食害) シラビソ・林シラビソ (雨水害・凍害・鹿の食害・縞枯れ・フナケ菌害・風害) カラジロミ (鹿の食害)
2375	大真名子山	ダケカンパ (立ち枯れ・梢端枯死・風害)
2367	太郎山	シラビソ・林シラビソ (縞枯れ)
2323	小真名子山	ダケカンパ・林シラビソ (立ち枯れ・梢端枯死・風害・縞枯れ)
2085	山王帽子山	針葉樹・風害
1795	釈迦岳	ダケカンパ (立ち枯れ・風害)
1765	鶏頂山	コナラ・ダケカンパ・ヒメ (群状立ち枯れ・梢端枯死・風害)
1674	赤城山	ダケカンパ・ミズナラ (立ち枯れ・梢端枯死・風害・環状剥皮・フナケ菌害)
1600	鳩待峠	ダケカンパ (梢端枯死)
1500	霧降高原	ダケカンパ (立ち枯れ)
1278	八方ヶ原	ダケカンパ (立ち枯れ・環状剥皮)

表2 霧水及び雨水のpH及び溶存成分濃度 (mg/l)

採取日	霧 水				雨 水			
	pH	Cl	SO ₄ -S	NO ₃ -N	pH	Cl	SO ₄ -S	NO ₃ -N
7/15	5.24	8.87	6.77	6.68	4.84	0.3	0.97	0.37
7/22	5.09	4.09	4.5	2.2	6.18	0.37	0.62	-
7/29	3.47	14.49	11.87	20.3	4.63	0.71	1.98	0.99
8/7	3.51	4.27	3.94	6.42	5.8	0.57	1.07	0.39
8/19	4.43	1.82	1.74	0.9	4.93	0.69	0.83	0.41
8/26	4.18	6.23	2.95	2.99	4.77	1.86	1.39	0.97
平均	4.34	6.64	5.30	6.58	5.19	0.75	1.14	0.63

白根山 (健全部)

採取日	霧 水				雨 水			
	pH	Cl	SO ₄ -S	NO ₃ -N	pH	Cl	SO ₄ -S	NO ₃ -N
7/29	3.43	25.75	35.40	33.11	4.64	0.87	2.67	0.95
8/7	3.62	7.18	10.97	7.43	4.82	0.47	1.13	0.39
8/19	4.25	1.31	1.13	0.80	4.79	0.57	0.75	0.34
8/26	3.39	19.28	7.52	11.50	4.88	1.10	0.62	1.12
平均	3.67	13.38	13.76	13.21	4.78	0.75	1.29	0.70

白根山 (枯損部)

採取日	霧 水				雨 水			
	pH	Cl	SO ₄ -S	NO ₃ -N	pH	Cl	SO ₄ -S	NO ₃ -N
7/29	3.70	11.98	13.73	10.33	5.65	0.70	1.06	0.47
8/7	3.91	3.23	4.55	4.01	4.88	0.31	0.86	0.28
8/19	4.05	4.22	1.79	2.61	5.15	0.27	0.51	-
8/26	4.01	4.60	2.63	2.73	5.03	0.94	1.01	0.58
平均	3.92	6.01	5.68	4.92	5.18	0.56	0.86	0.44

表3 男体山の雨のPHと雨量 (1993年)

場 所	7合目 (海拔2,100m)	
	pH	雨量mm
7月13日~7月27日	5.31	240.7
7月27日~8月10日	4.23	186.3
8月10日~8月19日	5.10	109.4
8月19日~9月7日	5.19	307.4
9月7日~9月14日	5.41	83.8
9月14日~10月6日	4.94	156.2
10月6日~10月15日	5.83	61.7
平均値	5.14	
累積雨量		1,145.5

表4 男体山の雨のPHと雨量 (1994年)

場 所	海拔1,700m地点		7合目 (海拔2,100m)	
	pH	雨量mm	pH	雨量mm
6月21日~29日	5.03	24.4	4.82	19.0
6月29日~7月8日	6.41	3.1	4.55	6.3
7月8日~15日	4.92	20.7	4.58	19.2
7月15日~22日	4.74	71.1	4.72	75.0
7月22日~28日	4.76	31.6	4.26	22.1
7月28日~8月8日	5.34	56.4	6.07	70.1
8月8日~17日	4.00	62.6	4.69	103.3
8月17日~23日	5.10	208.0	5.38	185.3
8月23日~30日	4.79	36.8	4.92	17.1
8月30日~9月7日	4.90	30.3	5.50	24.7
9月7日~13日	4.34	91.2	4.48	108.0
平均値	4.93	57.8	4.90	59.1

表5 男体山7合目(2,100m)の雨の成分濃度 (mg/l) (1993)

	7月		8月		9月		10月	
	13~27	27~10	10~19	19~7	7~14	14~6	6~15日	
SO ₄	0.26	0.48	0.63	0.58	0.59	0.34	0.24	
NO ₃	0.56	0.85	0.67	0.44	0.44	0.55	0.59	
Cl	1.08	0.46	0.27	0.30	0.49	0.45	0.24	
NH ₄	0.10	0.04	0.09	0.07	0.01	0.02	0.03	
Ca	0.15	0.41	0.18	0.13	0.15	0.17	0.10	
Na	0.63	0.38	0.32	0.29	0.43	0.32	0.37	
K	0.84	0.79	0.15	0.13	0.12	0.13	0.13	

表6 男体山7合目の雨の成分濃度 (mg/l) (1994)

	6月		7月	
	21~29	29~8	8~15	15~22日
SO ₄	2.20	3.10	1.40	1.10
NO ₃	1.40	1.60	1.20	1.40
Cl	0.53	0.46	0.07	0.09
NH ₄	0.28	0.01	0.17	0.36
Ca	6.10	6.60	3.70	8.90
Na	0.80	0.70	0.30	0.40
K	0.30	0.60	0.20	0.10

表7 男体山の霧の成分濃度 (mg/l)

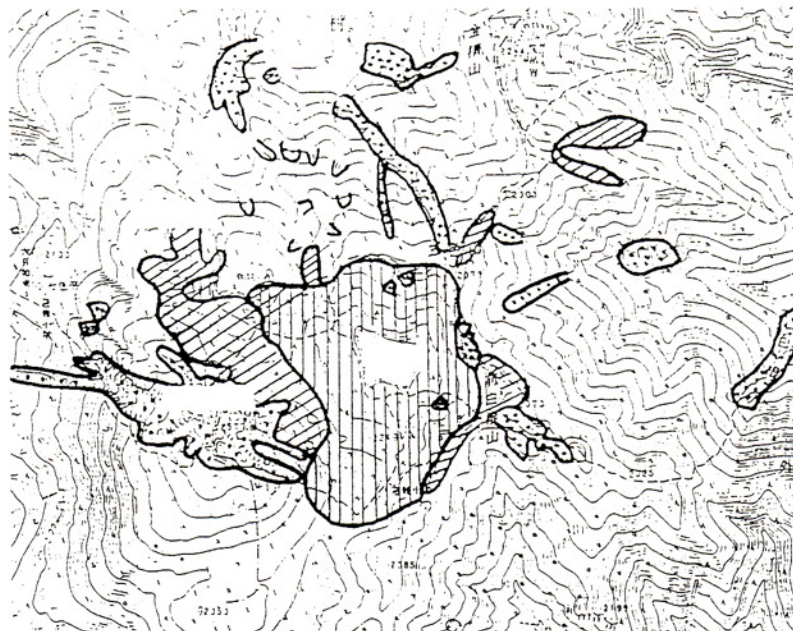
	pH	SO ₄	NO ₃	Cl	NH ₄	Ca	Na	K	μg
'93.8.19	4.2	2.63	1.18	0.98	0.24	0.74	0.4	0.19	-
'94.6.21	5.6	0.8	1.6	2.2	0.07	5.9	3.4	26.7	2.4
'94.7.15	3.3	66.0	49.0	5.6	19.4	8.6	2.8	1.1	3.0

表8 男体山の樹木葉の成分 (mg/100g)

	N	P	K	Mg	Ca
頂上杉ツレビツ健全	750	80	430	69	680
7合目ダケカンバ衰退	2660	462	1260	187	590
ダケカンバ健全(1700m)	1600	76	813	180	819
ダケカンバ健全(1310m)	1580	72	916	157	974
ダケカンバ健全(1270m)	1570	76	1090	107	1240



図1 雨採集装置



ダケカンバ枯損域
 ハバチ被害域
 崩壊地

図3 ハバチの食害範囲(白根山)



図2 ダケカンバ枯損状況(白根山)



図4 シラビツのシカ食害木(白根山)



図5 ウラジロモミのシカ食害(男体山)



図6 男体山7合目のダケカンバの衰退

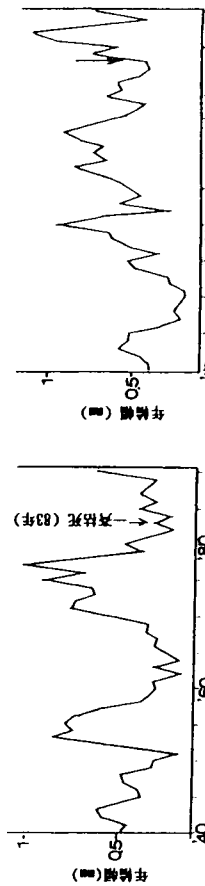


図7 日光白根山のダケカンパの年成長(1)



図7 日光白根山のダケカンパの年成長(2)

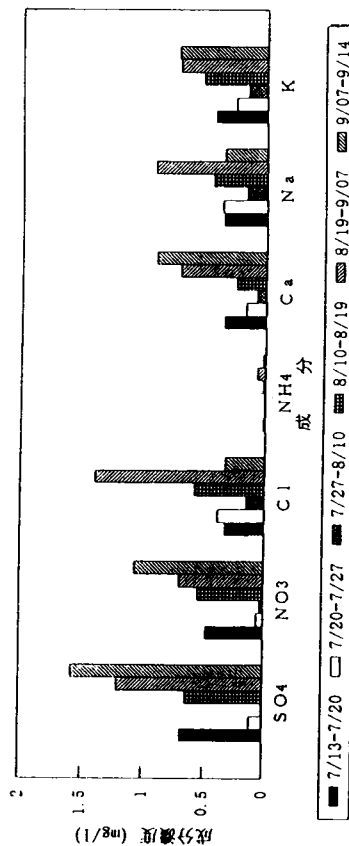


図8 男体山7合目の樹幹流成分 (mg/l) (1993年)

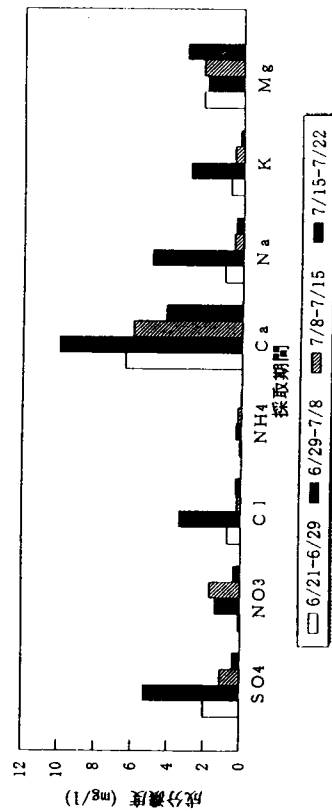


図9 男体山7合目の樹幹流成分 (mg/l) (1994年)

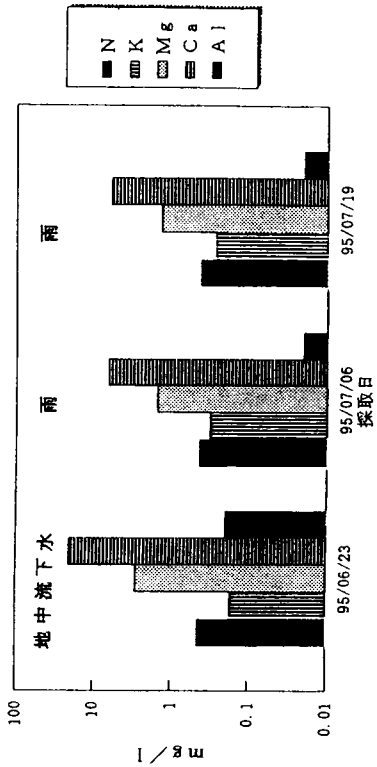


図10 地中流下水の成分

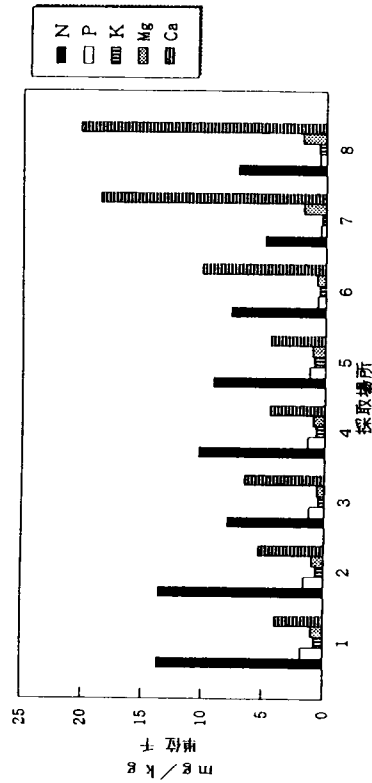


図11 男体山の土壌成分

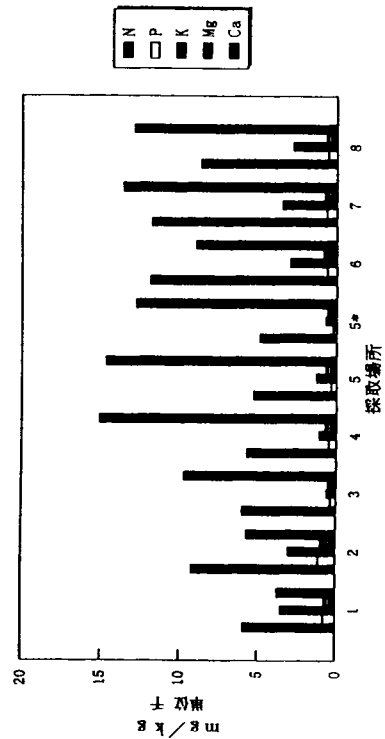


図12 樹木の枝の成分分析

1:山頂林内トビ 2:山頂ダケカンパ'健全 3:山頂ダケカンパ'枯死
4:5:7合目ダケカンパ'衰退 5*:7合目枯死木 6-7-8:1,700m以下の健全木

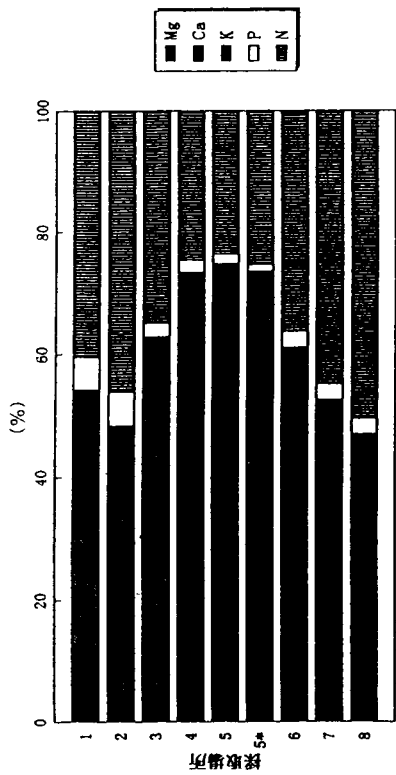


図13 男体山の樹木成分の成分比

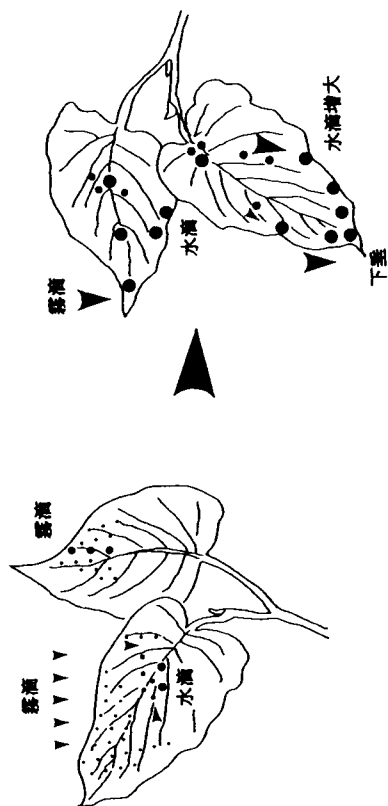


図14 ダケカンパの葉への霧滴の付着過程

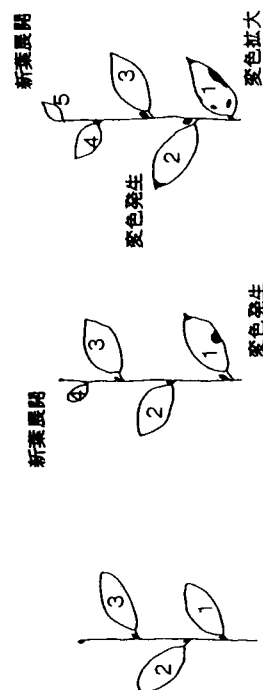


図15 ダケカンパの葉の変色過程

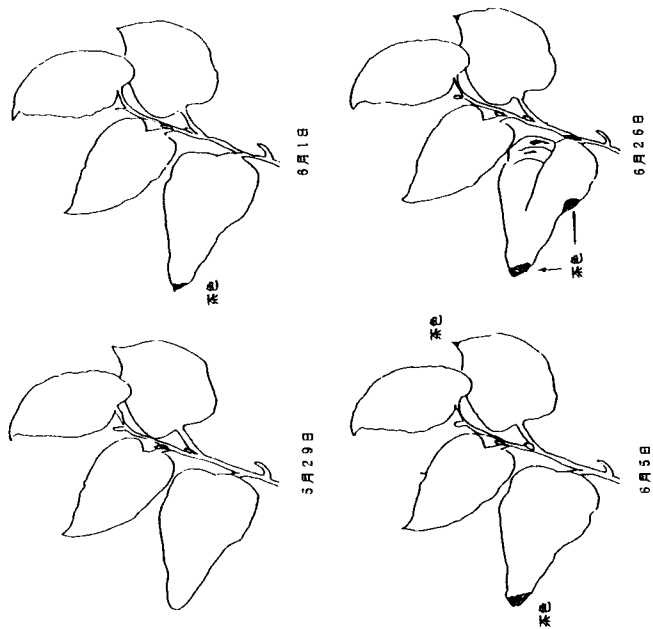


図16 男体山の雨の暴量によるダケカンパの葉色の経時変化

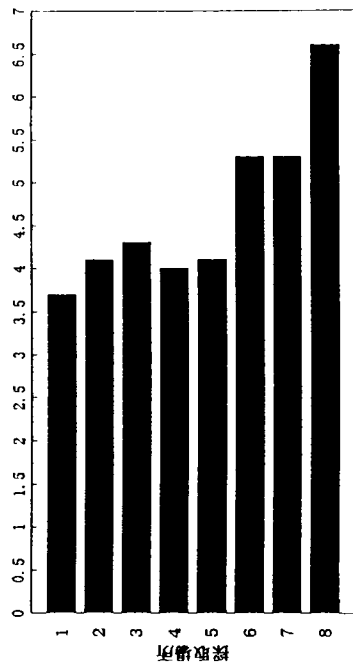


図19 男体山の土壌pH

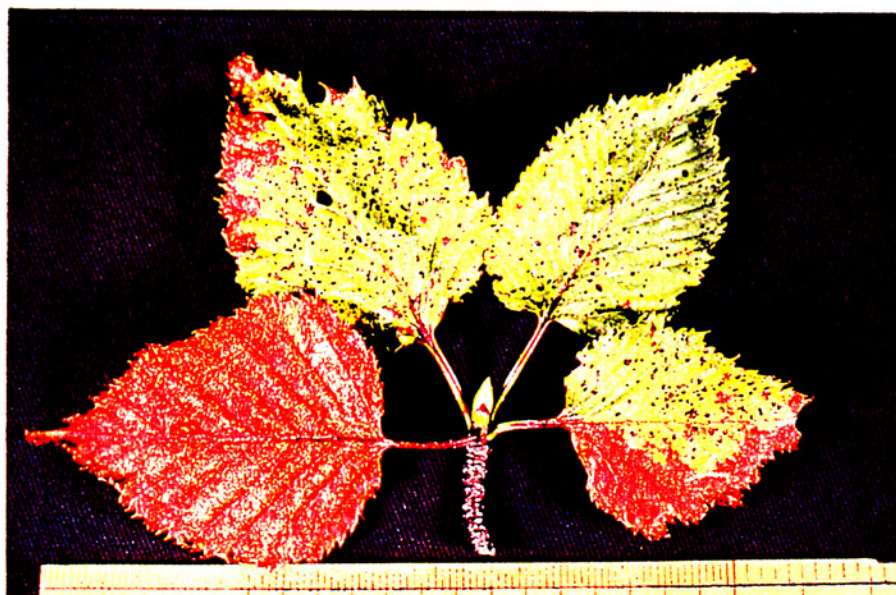


図 17 男体山のダケカンバの変色葉 (7合目・高木)



図 18 男体山のダケカンバの変色葉 (7合目・低木)