

C-4 酸性・酸化性物質に係る陸域生態系の衰退減少の定量的解析に関する研究

(7) ダケカンバの衰退とオゾン等環境要因との関係の解析

独立行政法人国立環境研究所

国際室

馮 延文(EFF)・清水英幸・大田伸之

[協力機関] 東京農工大学農学部

伊豆田猛

平成 12～13 年度合計予算額 3, 145 千円
(うち、平成 13 年度予算額 1, 645 千円)

[要旨] 奥日光の前白根山周辺ではダケカンバの衰退が観察されているが、その原因は解明されていない。本研究では、前白根山の南東斜面のダケカンバ衰退地と北西斜面の非衰退地に調査区を設定し、ダケカンバの衰退度や生長に関する毎木調査、簡易オゾン測定計によるオゾン濃度の計測や、気象・土壤環境の計測を行い、以下のことが明らかとなった。①南東斜面では完全な健全木のダケカンバが認められなかったが、北西斜面では健全木が優先し、ほぼ 70%を占めた。ダケカンバの樹高と胸高直径は、南東斜面では各々 4.4m、4.1cm で、相関関係は認められず、北西斜面では各々 4.6m、5.0cm で、正の相関関係が認められた。これらから計算した南東斜面のダケカンバの樹幹体積は北西斜面のそのほぼ 60%であった。立木密度は南東斜面で 300 本/ha、北西斜面で 1500 本/ha であり、ダケカンバの生長状態は著しく異なっていた。②両斜面における土壤溶液の平均 pH はどちらも 5.7 前後、EC も 40～45mS・cm⁻¹ であり、顕著な差は認められなかった。また、両斜面における硝酸、塩酸、硫酸、アンモニウムの各イオン濃度の比較では定常的な差は認められなかった。両斜面の表層/下層土壤および植物葉における Ca、Mg、K、Na などの水溶性/交換性元素濃度の計測から、南東斜面における植物衰退にはこれらの植物必須元素の欠乏が原因ではないことが示唆された。また、両斜面の表層/下層土壤における Mn、Al の水溶性/交換性元素濃度は検出限界以下であり、影響はないと考えられた。なお、北西斜面に比べ、南東斜面の土壤の方が無機化可能な有機態窒素量は少ないことが示唆された。③北西斜面に比べ、南東斜面の日平均気温は高く、気温の日較差も大きく、また、日平均大気飽差も高かった。また、北西斜面より南東斜面の方が、土壤含水率は有意に低かった。これらから、南東斜面のダケカンバ衰退地では大気や土壤が乾燥していることが示唆された。④オゾン濃度に関しては、春 6 月には最大となり、次第に濃度が低下している傾向が認められ、両斜面でその季節変動パターンは一致した。しかし、北西斜面と比べると、南東斜面のオゾン濃度は若干ではあるが有意に高く、短期的には南東斜面のダケカンバは北西斜面のそれより、高濃度オゾンに暴露されている可能性が示唆された。⑤本野外調査や暴露実験の結果から、前白根山南東斜面のダケカンバの衰退には、オゾンや水ストレス等が複合して影響している可能性が大きいと思われた。

[キーワード] 奥日光、オゾン、水分環境、ダケカンバ、毎木調査

1. はじめに

森林衰退は現在世界規模で観察される深刻な環境問題の一つである。森林衰退の原因は数多く挙げられているが、中でも大気汚染物質であるオゾンはアメリカとヨーロッパで主要な原因の一

つと考えられている。また、土壌の水分/養分状態等の環境要因も森林衰退の原因である可能性が指摘されている。奥日光地域でもダケカンバ等の顕著な森林衰退が報告され、また同地域では高濃度のオゾンも計測されているが(畠山と村野 1996)¹⁾、森林衰退とオゾンを含む大気環境や気象・土壌環境等の要因との関係は明らかではない。

東アジア地域における酸性・酸化性物質の濃度は近年増加傾向にあり、酸性・酸化性物質に係わる東アジア酸性雨モニタリングネットワーク(EANET)の構築が始まっている。このような中で、オゾンをはじめとする酸性・酸化性物質や水分環境等の環境要因の植物への影響を定量的に解析し、森林衰退の原因を解明するための野外調査・研究が急がれている。さらに、本研究で開発される研究手法等を、近年酸性・酸性化物質が増加する傾向が認められる東アジア地域等へ可能な限り早急に適用することも必要である。

地球環境研究総合推進費 C4 課題では、環境要因の陸域生態系に及ぼす影響の定量的解析について多方面からの研究が推進されているが、本サブ課題ではそれらの研究と連携し、奥日光共同調査地域におけるダケカンバの衰退とオゾン等の環境要因との関係について解析する。

2. 研究目的

本研究では、前白根山頂の南東斜面と北西斜面のダケカンバ林に、樹木と環境に関する調査区(20m × 20m のコドラート)を設定し、以下の継続調査を実施し、ダケカンバの樹木衰退と環境要因との関係を解析し、奥日光地域における森林衰退の原因解明に資するデータを提供する。具体的には、①両調査区においてダケカンバの胸高直径(DBH)、樹高、立木密度等に関する毎木調査を実施し、比較検討する。②両調査区における土壌の水分・pH・化学成分などの土壌環境や気温・大気飽差等の気象環境等を計測し、比較検討する。③両調査区でパッシブ・サンプラーによるオゾン濃度を継続的に計測し、比較検討する。④これらの環境要因と樹木衰退との関係について解析する。

3. 研究方法

(1) 野外植生調査地域

本研究では、奥日光前白根山頂(2377m)付近に調査区を設置し、植生調査を実施した(図 1)。

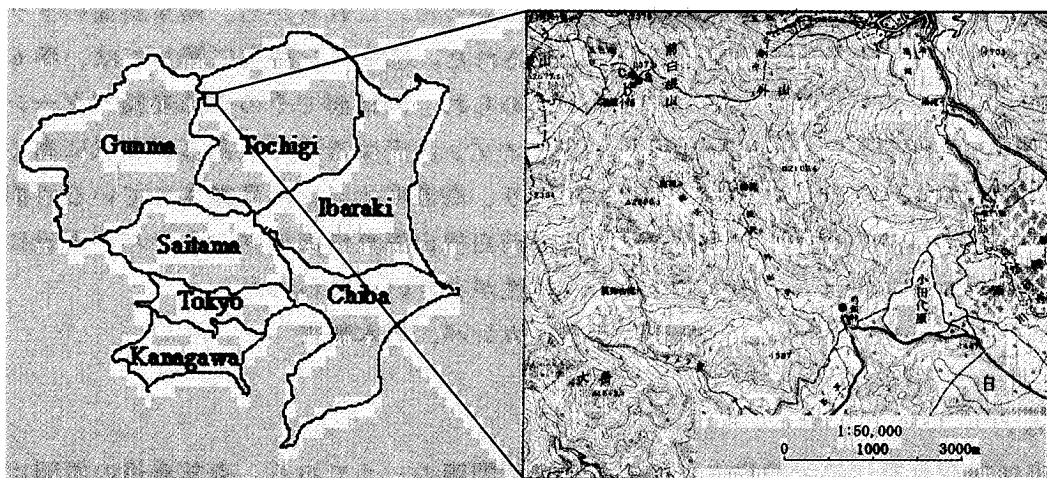
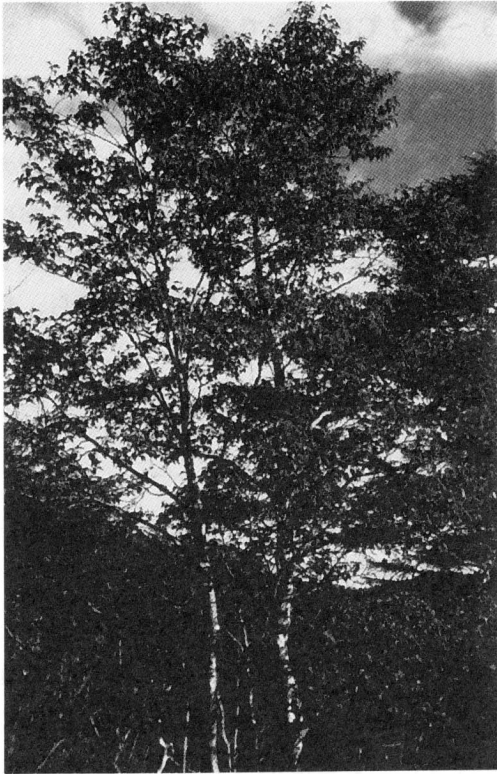
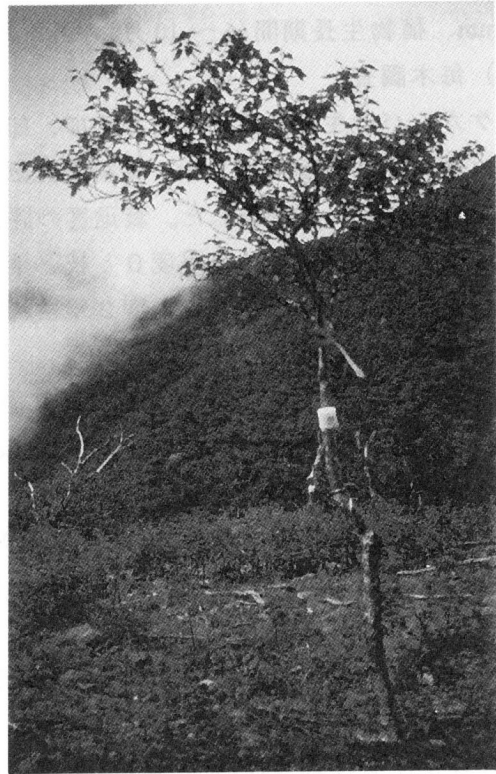


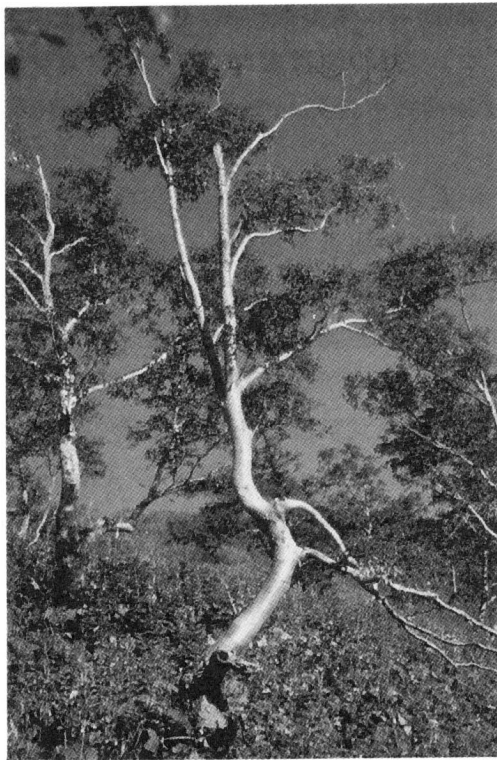
図 1. 奥日光野外調査区の位置。●各調査区(a・b：南東斜面衰退区、c：北西斜面非衰退区)



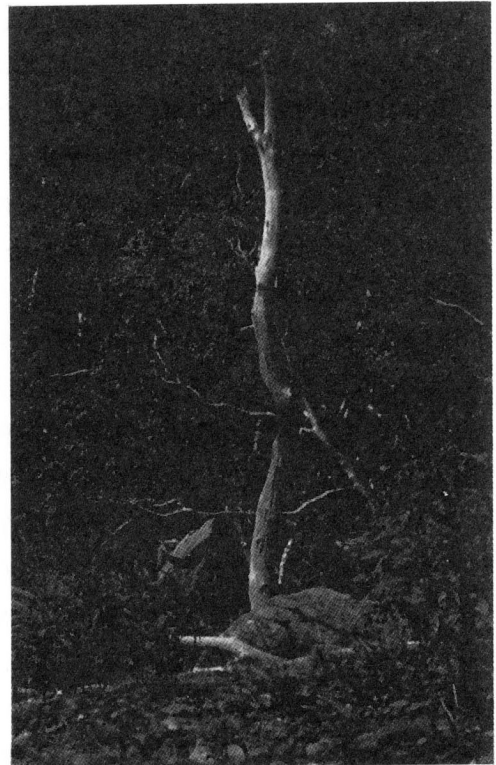
衰退度0 (健全)



衰退度1



衰退度2



衰退度3 (枯死)

写真1. ダケカンバの衰退度評価(「衰退度測定項目および評価基準」²⁾の枝葉の密度を基準).

なお、植生調査現場の南東約 3.5km に位置する国立環境研究所奥日光環境観測所(海拔 1450m)では気象データを計測している。1988 年 1 月～ 1990 年 12 月のデータによると、年平均降水量は 1722mm、植物生長期(6～10 月)の月平均気温は 8.3～18.7℃の範囲であった。

(2) 毎木調査

ダケカンバの生長を評価するために、前白根山頂付近のダケカンバを主とする森林の南東斜面に 2 カ所、北西斜面に 1 カ所、継続調査区(20m × 20m)を設置し、調査区に存在する全樹木の衰退度を目視によって評価した。衰退度の評価は、「衰退度測定項目および評価基準」²⁾における枝葉の密度を基準として、衰退度 0 : 枝と葉の密度のバランスがとれている健全木、衰退度 1 : 枝に対して葉量がやや疎ら、衰退度 2 : 枯れ枝が多く葉の発生が少なく葉量が著しく疎ら、衰退度 3 : 枯死木、とした(写真 1)。

また、各々の調査区で全樹木の胸高直径 : DBH(土壌面から 1.3m)と樹高を計測し、以下の式を用いて、各樹木の樹幹体積を計算した(Leege & Murphy, 2000)³⁾。

$$V = 1/2 A_b \times h$$

ここで、 V は樹幹体積、 $A_b = \pi r^2$ は胸高断面積($r = DBH/2$)、 h は樹高である。立木密度は、各調査区のダケカンバの本数を数えて、それを調査区の面積で割って求めた。

(3) 土壌環境調査

南東斜面と北西斜面において衰退度を代表する樹木を 8 個体ずつ選定し、傾斜に対して垂直方向に樹幹から 1m 離れた地点において、土壌表面から深さ 30 cm の土中に土壌溶液採取器(DIK-8391 : 大起理化工業株式会社)を設置し、土壌溶液の採取を行った。土壌溶液の採取は、2001 年 6 月 19 日、24 日、7 月 12 日、14 日、27 日、8 月 19 日、9 月 5 日、23 日、29 日、10 月 16 日、28 日に行った。土壌溶液の pH、電気伝導度(EC)は、ガラス電極(D-12 : 堀場製作所)を用い、土壌溶液中の硝酸イオン(NO_3^-)、塩化物イオン(Cl^-)および硫酸イオン(SO_4^{2-})の濃度は、イオンクロマトグラフィ(IC7000 : 横河電機)を用いて測定した。なお、土壌溶液中のアンモニウムイオン(NH_4^+)は、インドフェノール法(都筑 : 1994)⁴⁾で測定した。

2000 年 10 月 23 日と 2001 年 8 月 19 日に両調査区で採取した土壌の水溶性、交換性元素、全炭素(C)および全窒素(N)濃度を測定した。各調査区で 6 個体の樹木を選定し、傾斜に対して垂直方向に樹幹から 1m 離れた地点において、リター除去後の表層土壌と表層から 20cm 下層の土壌(下層土壌)を採取した。なお、両調査地ともに土壌の種類は褐色森林土であった。採取した土壌を風乾し、2mm メッシュのふるいにかけて風乾細土 6g を 50ml 用ポリプロピレン製バイアルに入れ、脱イオン水 30ml を加えて 1 時間攪拌し、懸濁液のろ過試料液を用いて土壌の水溶性元素濃度の測定を行った。また、交換性元素の測定には、風乾細土 0.25g に 0.05M の CH_3COONH_4 、0.0114M の $SrCl_2$ 溶液 50ml を加え、1 時間攪拌し、ろ過したものを試料液とした。Ca、Mg、K、Na、Mn および Al 濃度を、原子吸光度計(AA670/GV-6、島津製作所)を用いて測定した。また、分析試料中の全炭素(C)および全窒素(N)濃度を CN コーダー(MT-500, Yanako)を用いて測定した。

2001 年 6 月 9 日、18 日、7 月 12 日、27 日、8 月 16 日、9 月 5 日、23 日、29 日に、土壌含水率の測定を行った。両調査区で 6～12 個体の樹木を選定し、傾斜に対して垂直方向に樹幹から 1m 離れた地点の表層から 30cm 下層の土壌を採取し、ポリエチレン袋に入れて密封し、クーラーボックスに入れて研究室に持ち帰った。採取した土壌試料から小石や根屑を取り除き、よく混合し、あらかじめ重量を測っておいた秤量ビンに 10g の湿潤土壌を測りとり、105～110℃で 24 時間乾

燥し、乾燥土壌重を測定した。なお、土壌含水率は、以下の式から算出した。

$$\text{土壌含水率(\%)} = ((\text{Sw} - \text{Sd}) / \text{Sd}) \times 100$$

ここで、Sw は湿潤土壌重(g)、Sd は乾燥土壌重(g)である。

(4) 気象環境調査(気温・大気飽差の測定)

両調査地において、2001年6月8日～10月27日にかけて、乾湿球の温度記録計(TR-52:T&D)2機と温湿度記録計(TR-72S:T&D)1機を設置し、気温と相対湿度の測定を行った。データの集積は、専用のデータロガー(TR-50C:T&D)を用い、5分間隔で行い、その平均値を各調査地の気温とした。日平均気温、最高気温、最低気温、日較差(最高気温-最低気温)を算出した。また、温湿度計によって得られた気温と相対湿度のデータから、飽和水蒸気圧と水蒸気圧を、各々 Goff-Gratch の式および Angot の式を用いて算出し、以下の式に基づいて大気飽差を計算した。

$$\text{大気飽差} = \text{es} - \text{e}$$

ここで、es は乾球温度に対する飽和水蒸気圧(hPa)、e は水蒸気圧(hPa)である。

(5) オゾン濃度の計測

アメリカとヨーロッパでは既にパッシブサンプラーが環境監視目的に使用されている。パッシブサンプラーは、主に大気汚染物質の拡散と反応物質との接触を応用しており、ある期間の汚染物質の平均値を計測できる。連続分析装置のような詳細な濃度変動は記録できないが、AC電源が不要なので、辺境地域や高山での環境監視には理想的である。本研究ではオガワ製のパッシブサンプラーを採用した。これはテフロン製であり、円筒形で、外径19mm、長さ30mm、重量10gである。直径14.5mmの2つのろ紙に亜硝酸塩溶液を含浸させて、サンプラーに空気が入るように穴をあけたエンド・キャップを両端に取り付けてある。大気中のオゾンが亜硝酸塩と反応すると硝酸塩が生成され、これを測定することによりオゾン濃度を算出する。雨水中の硝酸塩がサンプルを汚染しないようにサンプラーをレインシールドの中に置いた。2001年6月8日から10月11日にかけて、両斜面に各6個のオゾンサンプラー(オゾン濃度に関しては各サンプラー毎に2試料が得られる)を設置し、1～2週間毎にサンプラーを回収し、研究室に戻ってからイオンクロマトグラフィ(Dionex シリーズ 4500i)を用いて、硝酸濃度を分析し、オゾン濃度を算出した。

4. 結果・考察

(1) ダケカンバの生育状況および衰退状況

南東斜面では胸高直径は2～4cmのダケカンバが多いが、北西斜面では4～6cmのダケカンバが多かった(表1)。南東斜面と北西斜面におけるダケカンバの樹高と胸高直径の平均値は各々4.4m/4.1cm、4.6m/5.1cmであった(表2)。南東斜面では樹高と胸高直径の間に相

表1. ダケカンバの胸高直径と衰退度の分布

	衰退度	DBH(cm)						
		0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14
南東斜面	衰退度0(健全)	0	0	0	0	0	0	0
	衰退度1	0	2.5	0.5	2	0	0	0
	衰退度2	0	0.5	0	0.5	0.5	0	0
	衰退度3(枯死)	0.5	2	0	0	1	0	0
本/400m ²		0.5	5	0.5	2.5	1.5	0	0
北西斜面	衰退度0(健全)	2	8	28	11	3	1	1
	衰退度1	1	2	0	0	1	0	0
	衰退度2	0	0	0	0	0	0	0
	衰退度3(枯死)	3	11	4	0	0	0	0
本/400m ²		6	21	32	11	4	1	1

関関係は認められなかったが、北西斜面では認められた($r^2=0.862$)。また、南東斜面におけるダケカンバの樹幹体積は北西斜面のその約 60%であった。立木密度は、南東斜面と北西斜面では各々約 160 本/ha, 1450 本/ha であった(表 2)。

表 2. 両調査区におけるダケカンバの生育状態

	樹高 h (m)	胸高直径 DBH (cm)	樹幹体積 v^3 (dm ³)	立木密度 (本/400m ²)
南東斜面	4.4	4.1	2.9	6.5
北西斜面	4.6	5.1	4.7	58

ダケカンバの衰退状況を「酸性雨調査法」の「衰退度測定項目及び評価基準」を参考して、目視により衰退度 0～3 までの評価を行った(表 1、図 2)。南東斜面では衰退度 0 の健全なダケカンバは認められず、衰退度 1 のダケカンバが約 50%を示している。これに対して、北西斜面では衰退度 0 の健全なダケカンバが優先して、約 70%を占めた。これらの結果から両斜面ではダケカンバの生育状況および衰退状況が著しく異なっていることが確認された。

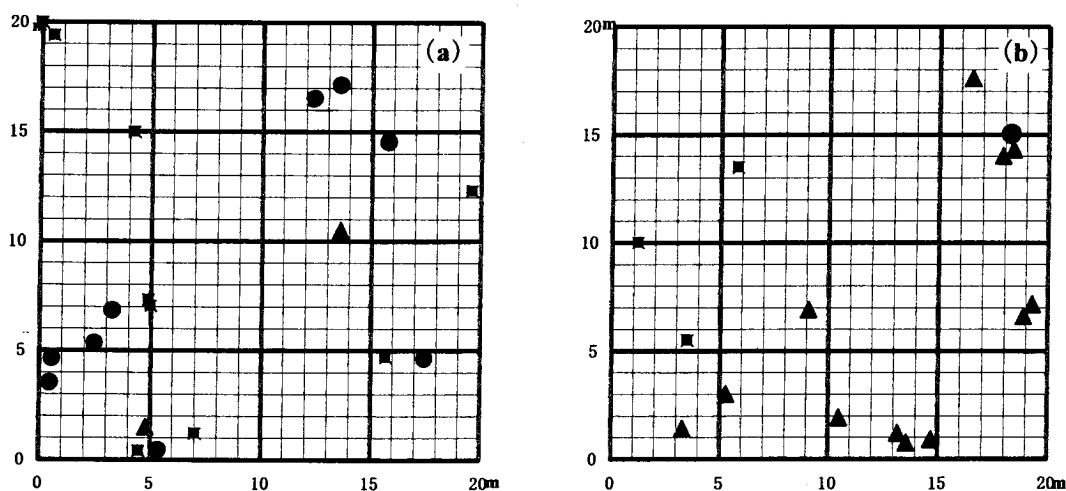


図 2. 前白根山南東斜面(a)(b)と北西斜面(c)における調査区内のダケカンバの衰退度分布 (◆: 衰退度 0、▲: 衰退度 1、●: 衰退度 2 ■: 衰退度 3)

(2) 土壌の化学特性

多くの森林研究では、樹木生長の差異は主に立木密度や種々の環境に起因するとされている。本研究では、前白根山頂の 2 地域の間には樹木生長に関して顕著な違いが観察された。この原因の可能性の一つには養分状態等の土壌の化学特性があげられる。

2001 年における両調査区の土壌溶液の組成の季節変化を図 3 に示す。両調査区とも土壌溶液の pH は年間を通してほぼ一定の値を示し、有意差は認められなかった(図 3-a)。北西斜面の土壌溶液の電気伝導度(EC)は、6月 23 日から 8月 19 日まで増加し、それ以降は 9月 29 日まで低下したが、南東斜面の EC は 6月 23 日から 7月 14 日まで増加し、7月 27 日から 9月 29 日まで低下した(図 3-b)。しか

し、有意差は9月29日以外には認められなかった。両調査区の土壤溶液の硝酸イオン濃度(NO_3^-)は、6月19日から7月14日にかけて上昇した(図3-c)。北西斜面ではその後はほぼ一定の値で推移し、9月5日から29日にかけて緩やかに低下したが、南東斜面では7月27日から9月5日にかけてほぼ0にまで低下した(図3-c)。有意差が認められたのは9月5日と23日のみであった。両調査区の土壤溶液のアンモニウムイオン濃度(NH_4^+)は、6月19日から6月24日にかけて上昇したが、7月12~14日にかけて急激に低下した(図3-f)。北西斜面の NH_4^+ 濃度は、その後ほぼ一定の値で推移し、9月5日から10月28日まで

緩やかに低下したのに対し、南東斜面のそれは7月14日から9月5日にかけてほぼ0にまで低下した(図3-f)。このため、南東斜面の土壤溶液の NH_4^+ 濃度は、6月23日、7月14日および9月5日において北西斜面のそれに比べて有意に低かった(図3-f)。北西斜面に比べ南東斜面の土壤溶液の塩化物イオン(Cl^-)濃度は高い値を示す傾向が認められたが、7月12日、27日および9月29日でのみ有意であった(図3-d)。両調査区における土壤溶液の硫酸イオン(SO_4^{2-})は、6月23日から7月14日にかけて急激に上昇した後、7月27日にかけて急激に低下した(図3-e)。南東斜面の SO_4^{2-} は、6月19日、23日において、北西斜面のそれに比べて有意に低かったが、9月29日および10月16日においては有意に高く(図3-e)、一定の傾向は認められなかった。

2000年10月23日および2001年8月19日に両調査区のダケカンバの根元周辺から採取した表層土壌のC濃度、N濃度およびC/N比を図4に示す。2000年および2001年において、北西斜面に比べ南東斜面における表層土壌のC濃度(図4-a)、N濃度(図4-b)、C/N比(図4-c)ともに有意

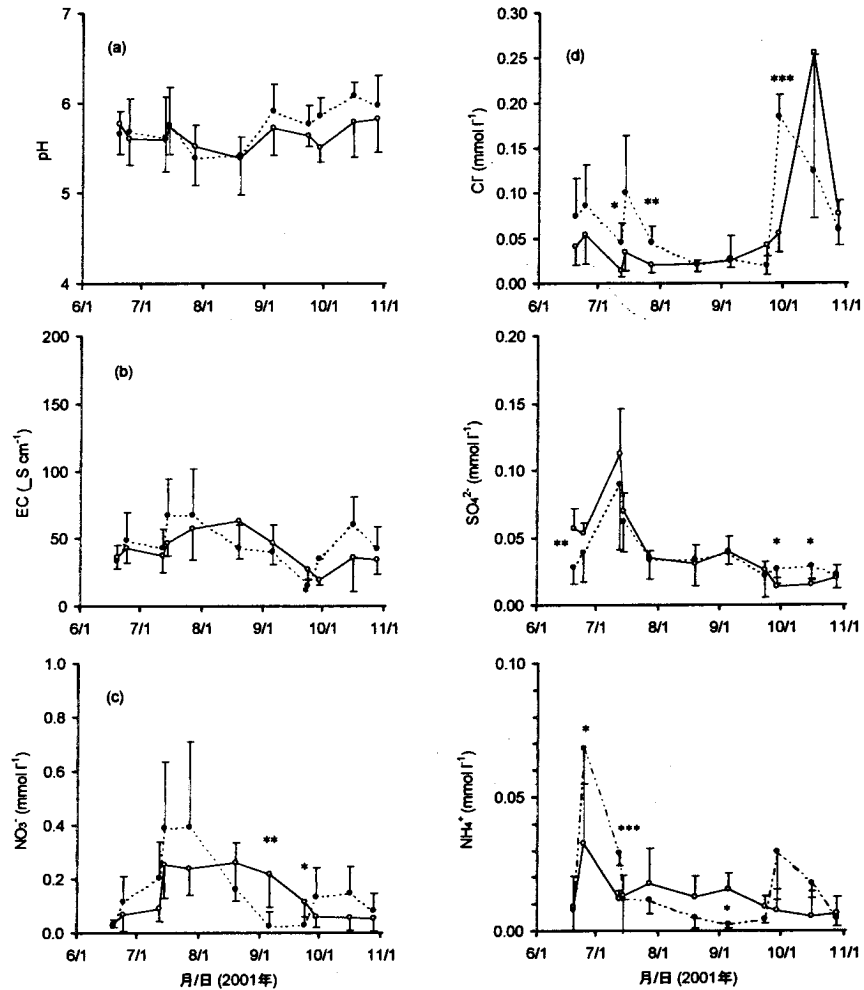


図3. 2001年におけるダケカンバの根元周辺から採取した土壤溶液の組成の季節変化。図中の各シンボルは、4~8地点の平均値(±標準偏差)。前白根山の北西斜面(○)と南東斜面(●)との間で有意差検定を実施(* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001)。

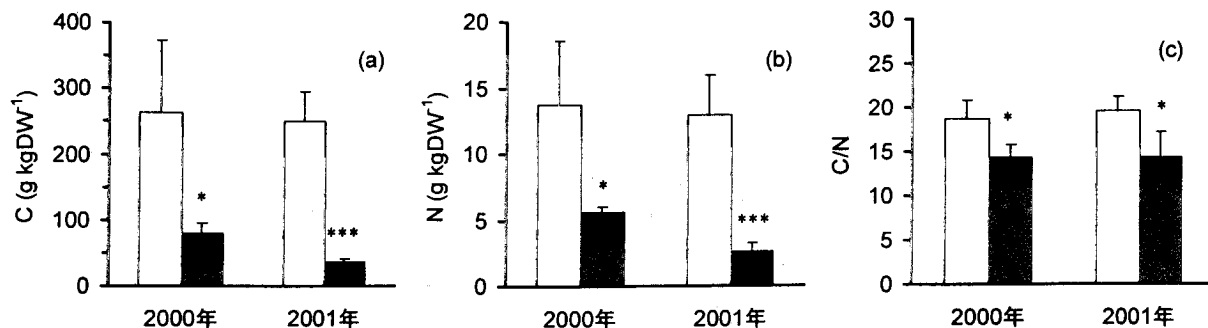


図 4. 2000 年 10 月 23 日および 2001 年 8 月 19 日におけるダケカンバ根元周辺で採取した表層土壌の炭素(C)濃度、窒素(N)濃度および C/N 比. 4 地点の平均値(±標準偏差). 前白根山の北西斜面(□)と南東斜面(■)とで有意差検定を実施(* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001).

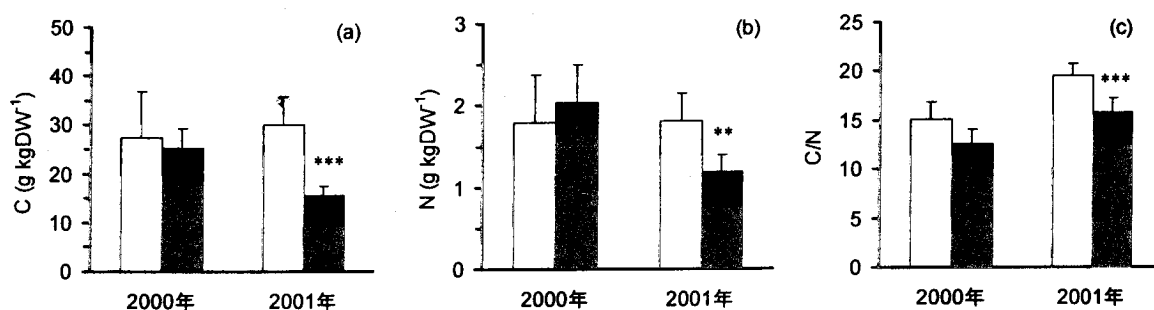


図 5. 2000 年 10 月 23 日および 2001 年 8 月 19 日におけるダケカンバ根元周辺で採取した下層土壌の炭素(C)濃度、窒素(N)濃度および C/N 比. 4 地点の平均値(±標準偏差). 前白根山の北西斜面(□)と南東斜面(■)とで有意差検定を実施(* p < 0.05, ** p < 0.01, *** p < 0.001).

に低かった。同時期の下層土壌の C 濃度、N 濃度および C/N 比を図 5 に示す。2000 年においては両調査区における下層土壌の C 濃度(図 5-a)、N 濃度(図 5-b)、C/N 比(図 5-c)に有意差は認められなかったが、2001 年の調査では北西斜面に比べ南東斜面の下層土壌のこれらの数値は有意に低かった。

2000 年 10 月 23 日および 2001 年 8 月 19 日に両調査地のダケカンバの根元周辺から採取した表層土壌の水溶性および交換性元素濃度を表 3 に示す。2000 年の調査ではすべての項目で有意差は認められなかったが、2001 年では、北西斜面に比べ南東斜面の表層土壌の水溶性 K 濃度および交換性 Mg 濃度と K 濃度が有意に低かった。同時期の下層土壌の水溶性および交換性元素濃度を表 4 に示す。2000 年の調査ではすべての項目で有意差は認められなかったが、2001 年では、北西斜面に比べ南東斜面の下層土壌の水溶性 Ca 濃度および Mg 濃度が有意に低かった。なお、両調査区の表層土壌および下層土壌において、水溶性および交換性の Mn 濃度と Al 濃度は検出限界以下であり、これらの重金属の影響は少ないものと思われた。

(3) 気象環境(気温・大気飽差)調査および土壌含水率

2001 年 6 月 8 日から 10 月 27 日までの両調査区の日平均気温、日最高気温、日最低気温および日較差の季節変化を図 6 に示す。両調査区ともに、日平均気温は 6 月から 7 月中旬まで上昇し、8 月中旬まで一定の範囲で増減を繰り返し、9 月上旬にかけて低下したが、中旬に急激に上昇し、

表 3. 2000 年 10 月 23 日および 2001 年 8 月 19 日におけるダケカンバ根元
周辺で採取した表層土壌の水溶性元素と交換性元素濃度

	2000年		2001年	
	北西斜面	南東斜面	北西斜面	南東斜面
水溶性元素濃度(meq 100 g dry soil ⁻¹)				
Ca	0.0632 ± 0.017	0.0519 ± 0.034	0.0649 ± 0.028	0.0834 ± 0.022
Mg	0.0215 ± 0.004	0.0151 ± 0.010	0.0437 ± 0.008	0.0309 ± 0.019
K	0.0934 ± 0.035	0.0873 ± 0.039	0.1391 ± 0.036	0.0609 ± 0.022 *
Na	0.1136 ± 0.067	0.0629 ± 0.039	0.0648 ± 0.046	0.0277 ± 0.014
交換性元素濃度(meq 100 g dry soil ⁻¹)				
Ca	6.213 ± 0.773	4.34 ± 1.593	6.609 ± 0.216	1.043 ± 0.631
Mg	2.504 ± 1.343	1.06 ± 0.274	1.634 ± 0.594	0.483 ± 0.166 *
K	0.806 ± 0.266	1.05 ± 0.666	0.822 ± 0.264	0.389 ± 0.087 *
Na	1.599 ± 0.309	0.94 ± 0.525	1.424 ± 1.143	0.993 ± 0.384

表中の数値は 4 地点の平均値±標準偏差。北西斜面と南東斜面との有意差検定(* p < 0.05)。

表 4. 2000 年 10 月 23 日および 2001 年 8 月 19 日におけるダケカンバ根元
周辺で採取した下層土壌の水溶性元素と交換性元素濃度

	2000年		2001年	
	北西斜面	南東斜面	北西斜面	南東斜面
水溶性元素濃度(meq 100 g dry soil ⁻¹)				
Ca	0.0294 ± 0.002	0.0289 ± 0.002	0.0546 ± 0.006	0.0338 ± 0.008 *
Mg	0.0104 ± 0.002	0.0079 ± 0.002	0.0180 ± 0.004	0.0122 ± 0.003 *
K	0.0366 ± 0.014	0.0275 ± 0.008	0.0540 ± 0.012	0.0446 ± 0.017
Na	0.0341 ± 0.006	0.0337 ± 0.002	0.0371 ± 0.016	0.0276 ± 0.010
交換性元素濃度(meq 100 g dry soil ⁻¹)				
Ca	1.712 ± 0.929	1.814 ± 1.436	1.168 ± 0.924	0.681 ± 0.203
Mg	0.273 ± 0.045	0.339 ± 0.058	0.301 ± 0.144	0.250 ± 0.127
K	0.226 ± 0.159	0.359 ± 0.157	0.425 ± 0.445	0.200 ± 0.157
Na	0.496 ± 0.597	0.926 ± 0.493	1.292 ± 1.467	0.393 ± 0.220

表中の数値は 4 地点の平均値±標準偏差。北西斜面と南東斜面との有意差検定(* p < 0.05)。

その後は 10 月下旬まで再び低下する傾向を示した(図 6-a)。南東斜面の日最高気温は 7 月および 8 月に高い値を示す傾向にあったが(図 6-b)、日最低気温は両調査区で差は見られなかった(図 6-d)。このため、南東斜面における気温の日較差は、7 月中旬から 8 月中旬まで、北西斜面のそれより高い傾向を示した(図 6-c)。なお、9 月 22 日に日最低気温が-5℃という異常低温を両調査区で記録した(図 6-d)。2001 年 6 月から 10 月までの両調査区の月平均気温と日較差の月平均値を図 7 に示す。月平均気温は、両調査区ともに 6 月から 7 月にかけて上昇し、8 月以降は低下した(図 7-a)。本調査期間においては、北西斜面に比べ南東斜面の方が常に高温を示したが、有意差は認められなかった。また、衰退地の日較差の月平均値は、北西斜面に比べ南東斜面の方が常に高い傾向を示し、8 月、9 月および 10 月において有意差が認められた(図 7-b)。

両調査区における日平均大気飽差と日最大大気飽差の季節変化を図 8 に示す。北西斜面に比べ南東斜面の日平均大気飽差は、2001 年 6 月 8 日から 10 月 1 日までの測定期間を通じて高い値を

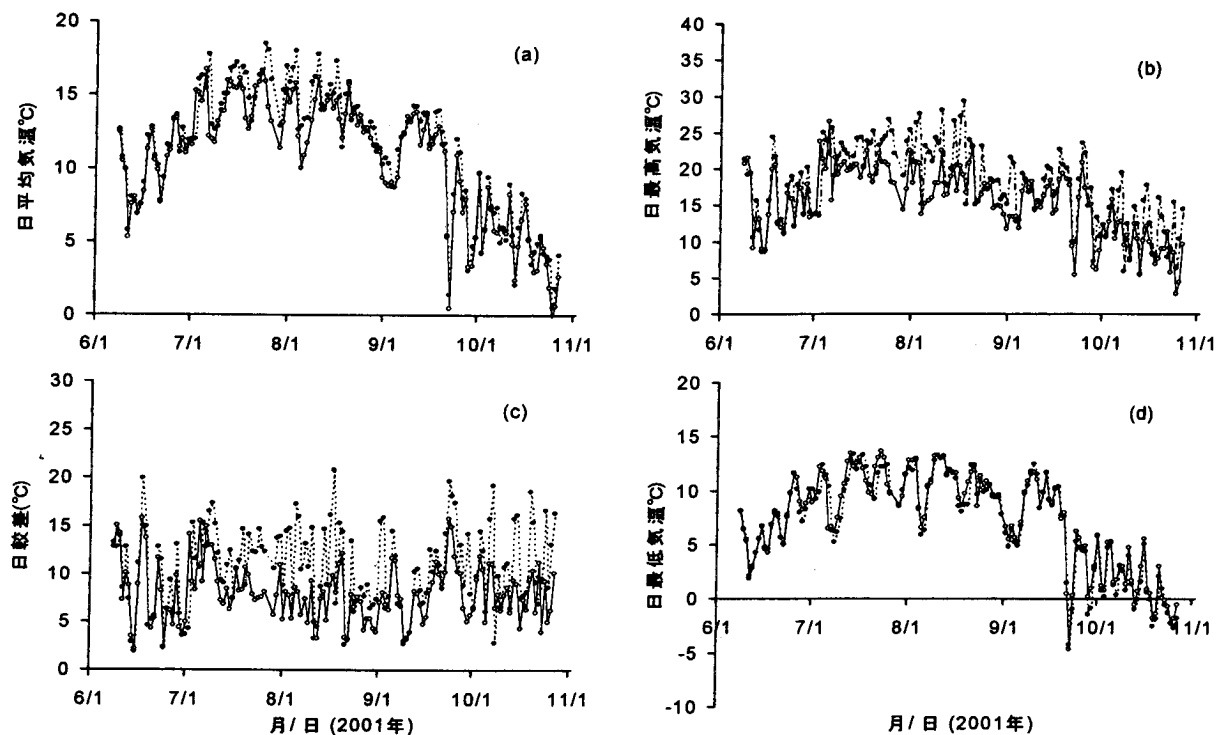


図 6. 2001 年における前白根山の北西斜面(○)と南東斜面(●)の日平均気温、日地最高気温、日最低気温および日較差の季節変化。

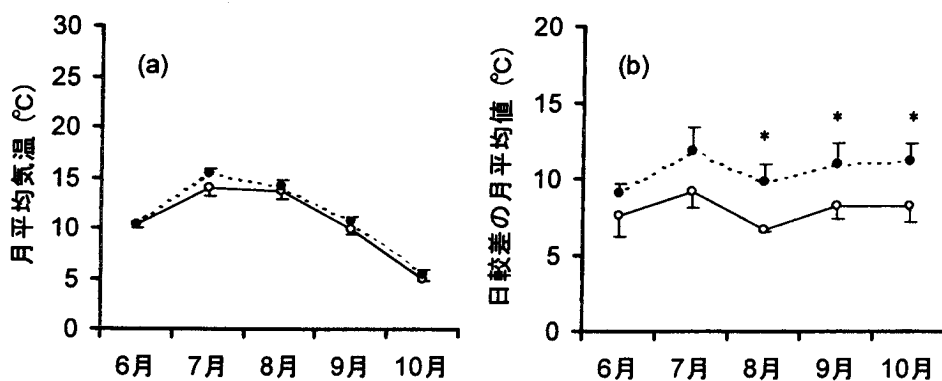


図 7. 2001 年における前白根山の北西斜面(○)と南東斜面(●)の月平均気温と日較差の月平均値の季節変化。図中の各シンボルは 2～3 地点の平均値(±標準偏差)。前白根山の北西斜面(○)と南東斜面(●)との間で有意差検定を実施(* $p < 0.05$)。

示し、測定期間平均で 0.9hPa 高かった(図 8-a)。また、日最大大気飽差も常に高い値を示し、平均で 3.5hPa 高かった(図 8-b)。特に、7月上旬から8月中旬までの期間において顕著であった。

2001年7月2日から8月20日までの期間における気温と大気飽差の平均日変化を図9に示す。北西斜面では、気温と大気飽差は同様な日変化を示し、日最高気温と日最大大気飽差は12～13時の間に観測された。これに対して、南東斜面では、気温が日の出と共に上昇し、9時頃最大となり、15時頃まで高い状態を維持した。大気飽差も9時頃に最大になり、その後は減少した。いずれにせよ、南東斜面における日中の気温と大気飽差は、北西斜面の値より高かったが、日没

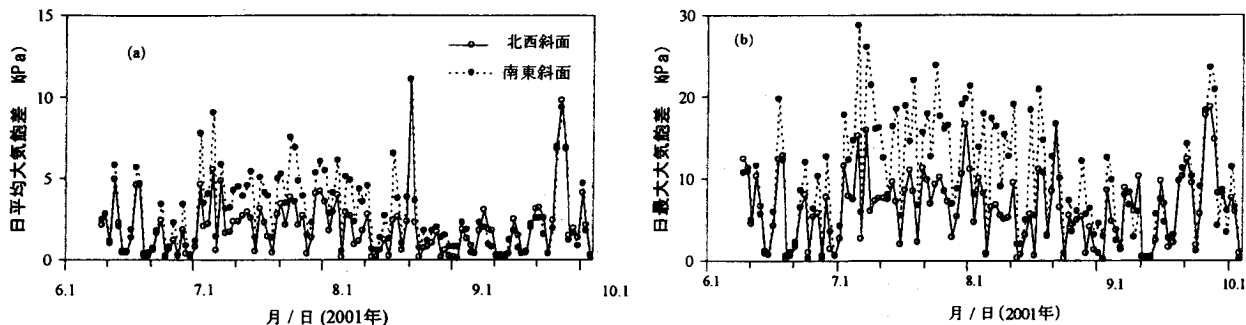


図 8. 2001 年における前白根山の北西斜面(○)と南東斜面(●)における日平均大気飽差(a)と日最大大気飽差(b)の季節変化.

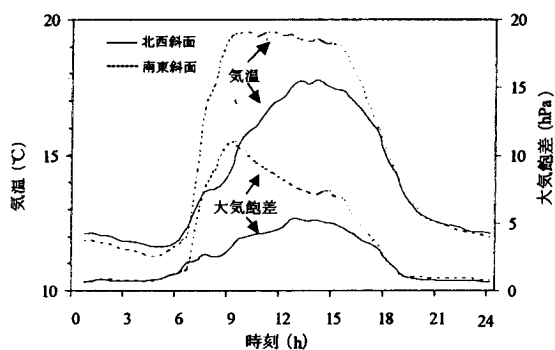


図 9. 乾燥期間中(2001 年 7/2 ~ 8/20)における前白根山の北西斜面と南東斜面の大気飽差と気温の平均日変化. 実線(—)は北西斜面, 破線(---)は南東斜面.

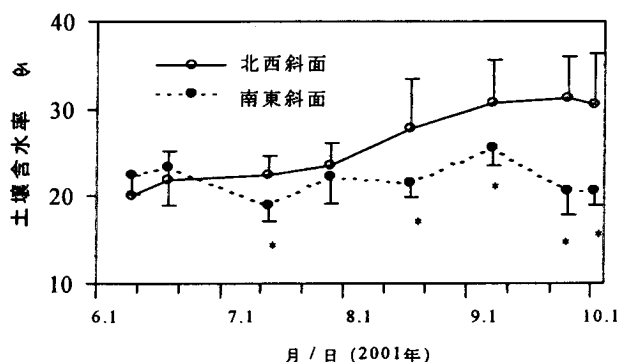


図 10. 前白根山の北西斜面と南東斜面の土壌含水率の季節変化. 図中の各シンボルは 6 ~ 12 個体の平均値(±標準偏差). 北西斜面(○)と南東斜面(●)との間で有意差検定を実施(* $p < 0.05$).

後は両調査区におけるこれらの差は小さかった。以上より、北西斜面に比べ南東斜面では、日中早い時間帯から大気が高温・乾燥化する傾向があると思われた。

両調査区における土壌含水率の季節変化を図 10 に示す。北西斜面の土壌含水率は、2001 年 6 月 9 日から 7 月 27 日までの期間ほぼ一定の値を示し、7 月 27 日から 9 月 29 日にかけて上昇し、約 30%に達した。これに対して、南東斜面の土壌含水率は 20 ~ 25%の範囲で推移した。7 月以降、北西斜面に比べ南東斜面における土壌含水率は低い傾向にあり、7 月 12 日、8 月 16 日、9 月 5 日、23 日、29 日においては有意差が認められた。

(4) オゾン濃度

国立環境研究所の奥日光環境観測所(図 1)で連続計測している限りでは、二酸化硫黄や窒素酸化物等の大気汚染物質の濃度は検出限界程度であり、ほとんど植生への影響はないものと思われた。しかし、オゾンについては 1450m 程度の標高の同観測所でもかなりの高濃度が計測されており(国立環境研究所 1991)⁹⁾、より標高の高い奥日光前白根山の南東斜面(ダケカンバ衰退地)と北西斜面(非衰退地)でのオゾン濃度の絶対値とそれらの両斜面での差について、パッシブサンプラーを用いた計測を実施した。

2001年6月8日から10月11日にかけての南東斜面および北西斜面でのオゾン濃度は、平均して各々 36ppb、32ppb であった。また、同時期の前白根山南東麓(標高 1460 m)にある国立環境研究所奥日光環境観測所で連続計測された平均オゾン濃度は 26ppb であった(なお、図 11 ではパッシブサンプラーの各設置期間に合わせた平均値を算出して示した)。図 11 に示されるように、これらの地域では、時期的にかなりの濃度変動が認められるものの、全体的にオゾン濃度は高い。また、両斜面ではオゾン濃度の季節変動パターンはほぼ一致しており、春 6 月には最大となり、その後、夏にかけて次第に濃度が低下している傾向が見られる。この傾向は奥日光環境観測所において記録されたオゾン濃度の変動パターンとも一致している。観測所で記録されたオゾンの濃度の平均値は 26ppb であるが、連続計測された記録から、瞬間値では 100ppb を超えていることが判っている。オゾン平均濃度は、全体的に前白根山南東斜面>北西斜面>環境観測所であるので、ダケカンバの衰退地域では瞬間値が 100ppb を超えるオゾンに曝露された可能性は高い。

図 11 では、南東斜面と北西斜面のオゾン濃度の有意差検定を行っている。北西斜面に比べダケカンバが衰退している南東斜面では、有意に高濃度のオゾンに曝露されていることが明らかとなった。これは各期間の平均値であるので、瞬間的には、両斜面のオゾン濃度は相当異なっている可能性が推測される。両斜面におけるオゾン濃度の連続計測とその比較が必要であろう。

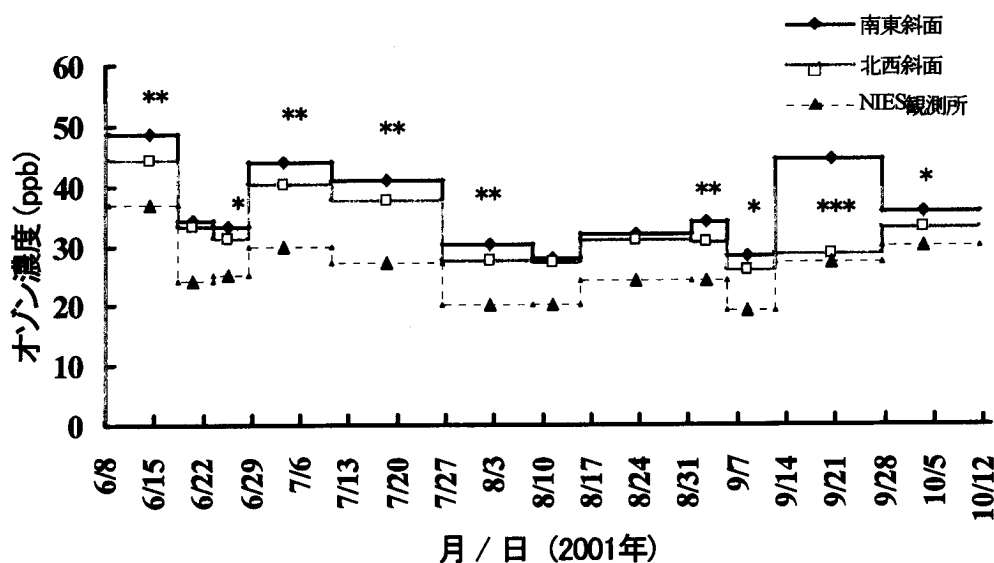


図 11. 2001 年 6 ~ 11 月における前白根山の南東斜面(◆)と北西斜面(□)および奥日光環境観測所(▲)での平均オゾン濃度の季節変化. 前白根山の北西斜面(◆)と南東斜面(□)とで有意差検定を実施(* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$).

(5) 総合的考察

ダケカンバの衰退地域である南東斜面の土壌における植物必須元素(Ca、Mg、K など)の水溶性および交換性元素濃度は、非衰退地域である北西斜面のそれらと同じか低い傾向にあったが(表 3、表 4)、同時期に測定した南東斜面のダケカンバ葉の Ca、Mg、K 濃度などは、北西斜面のそれらと比べてむしろ高い値が得られており(別記; サブ 3 報告)、非衰退地域と比べ衰退地域のダ

ケカンバの生育が悪かったのは、これらの植物必須元素の欠乏が原因ではないことが示唆された。同様に、土壌中の pH に関しては両調査区において有意差がなく、また、土壌酸性化によって溶出されると考えられている Al、Mn などの有害重金属類の濃度は検出限界以下であった。これらの結果に基づくと、南東斜面におけるダケカンバの衰退を、土壌の酸性化や必須元素等の栄養条件の悪化で説明するのは不可能であると結論される。

N は植物にとって多量必須元素であり、葉の N の多くは光合成系タンパク質に含まれている。植物は土壌中の N を主に硝酸イオンの形で吸収するが、2001 年においてダケカンバの枝葉が生長した 6～7 月の期間における南東斜面の土壌溶液の硝酸イオン濃度は、北西斜面のそれに比べて高い傾向を示しており(図 3-c)、ダケカンバの当年シュート葉の全 N 含量の低下は(別記; サブ 3 報告)、土壌中の N が欠乏したためではないと考えられる。しかし、8 月以降、南東斜面における土壌溶液の硝酸イオン濃度は極めて低く、ダケカンバは N 欠乏状態であった可能性がある。2001 年 6～7 月にかけて、両調査区における土壌溶液の硝酸イオン濃度は急激に上昇した。この時期に日平均気温は上昇する傾向を示し、地温も上昇したと考えられる。地温の上昇によって土壌微生物の硝化作用が活発になり、無機態窒素量が増加したと思われる(戸田 2000)⁶⁾。一方、2001 年 7～9 月にかけて、南東斜面における土壌溶液の硝酸イオン濃度は急激に低下し、北西斜面のそれに比べて低い傾向を示した(図 3-c)。硝酸イオンは陰イオンで粘土粒子への吸着力が弱く、土壌水中に存在しているため降雨などによって流亡しやすい。南東斜面のダケカンバの立木密度は非衰退地に比べて低いため(表 2)、雨などによる土壌養分の流亡が大きかったと考えられる。前白根山においては 8 月 22 日と 9 月 10～11 日の雨量は 100mm を超えており(未発表)、この時期の雨によって、南東斜面における土壌溶液の硝酸イオン濃度が低下した可能性がある。また、南東斜面では土壌の全 N 含量、特に下層土壌における無機化可能な有機態窒素量が北西斜面に比べて少ないことによって(図 4、図 5)、微生物が硝酸イオンを新たに作る事が出来ず、早期に土壌溶液の硝酸イオンが枯渇、欠乏した可能性がある。

前白根山のダケカンバの一斉枯死が観察されたのは 1983 年であるため(長谷川 1993)⁷⁾、表層土壌中の N の多くはダケカンバの一斉枯死後に蓄積されたものであると考えられる。2001 年 8 月 19 日に採取した南東斜面の表層土壌の N 濃度と C/N 比は、北西斜面のそれらに比べて有意に低かった(図 5)。森林土壌においては、落葉落枝が林床に還元される窒素の主要な源である。南東斜面は北西斜面より立木密度が低く、そこに生育するダケカンバの葉量も比較的少ないため、落葉落枝の供給量は圧倒的に少ない。植物が利用する窒素供給源は A₀ 層の有機物由来が大部分であるから、南東斜面の土壌においては将来的に窒素が不足する可能性が高い。

2001 年 6 月から 10 月にかけて、南東斜面の日平均気温、日最高気温および日較差は北西斜面のそれらに比べて高い傾向を示した(図 6)。南東斜面は当然日射が強いと考えられ、また、立木密度も圧倒的に低いため(表 2)、林冠の閉鎖度は北西斜面のそれに比べて低い。両調査地において日平均気温、日最高気温および日較差の差が生じた理由は、斜面方位の差異による日射量の違いと林冠閉鎖度の違いが複合的に影響したためであると考えられる。

2001 年の調査期間を通じて、南東斜面の日平均気温と日平均大気飽差は、北西斜面のそれらに比べて高い傾向にあったが(図 6-a, 図 8-a)、これは、日最高気温と日最大大気飽差が高いことによるものであった(図 6-b, 図 8-b)。したがって、南東斜面においては、北西斜面に比べて大気が高温・乾燥化していることが明らかになった。特に、2001 年 7 月上旬から 8 月中旬までの

期間において、南東斜面における大気の高温・乾燥化は著しいが、降雨の影響を受けて調査区間の差は減少すると考えられる。7月上旬から8月中旬までの期間における北西斜面の日最大大気飽差は気温の上昇と共に正午過ぎに観測されたが、南東斜面においては午前中に高い値を観測し、その後は減少した(図9)。南東斜面の方が太陽光に早く照らされるが、夏期には午後になると南東から霧が発生し、大気飽差が低下することが考えられる。

北西斜面の林床は蘚苔類に覆われているのに対し、南東斜面の林床は一年生の草本植物で覆われていることから、南東斜面に比べて北西斜面の土壌は降雨による水分を吸収しやすく、林床からの蒸発散も少なく、保水能力が高いことが推測される。2001年7月12日における南東斜面の土壌は、7月上旬から降雨のない日が続いたことで、乾燥が進み(図10)、北西斜面に比べて乾燥していた。また、2001年8月中旬から9月中旬までの期間における比較的高い降雨により、8月中旬以降は保水能力の高い北西斜面において保水量が増加したことで、南東斜面の土壌含水率が北西斜面のそれに比べて低くなったと考えられる。

このような水分環境がダケカンバの生長に影響を与えるかどうかを調べるために、2年生のダケカンバ苗を環境制御室内で育成し、水ストレス0($1.0 < pF < 1.8$: 含水量 36 ~ 40%)、水ストレス1($1.8 < pF < 2.5$: 含水量 24 ~ 29%)、水ストレス2($3.0 > pF > 2.5$: 含水量 13 ~ 21%)の各処理を行った結果、各器官および個体の乾重に水ストレスの影響が認められており($p < 0.05$)、奥日光前白根山の南東斜面での土壌水分状態が現地に生育するダケカンバに影響を与えている可能性が示唆された(別記; サブ3報告)。今後、現地でも長期的な土壌水分の計測が必要であろう。

2001年の6~10月の期間の大気汚染状況に関しては、奥日光前白根山周辺では特にオゾン濃度が高く(平均 30 ~ 50ppb)、かつ、北西斜面に比べ南東斜面の方が有意に高かった。このレベルのオゾンはダケカンバにどのような影響を及ぼすかを把握するために、平均濃度 50ppb(最大濃度 100ppb、最少濃度 20ppb)の暴露実験を環境制御室内で行った結果、ダケカンバ2年生の苗木の葉、茎、根および個体の乾重に対して有意なオゾンの抑制効果が認められ、オゾンがダケカンバの生長に悪影響を及ぼしている可能性が示された(別記; サブ3報告)。

なお、北西斜面に比べ南東斜面のダケカンバの方が黄化・落葉の開始が早かったことが報告されている(別記; サブ3報告)。日平均気温がある閾値を下回ると黄化が起こるが、8月中旬から9月上旬にかけて両調査区における日平均気温はほぼ同様な値で推移したため(図7-a)、日平均気温の低下だけで9月5日以前の南東斜面のダケカンバの黄化・落葉の開始を説明することは出来ない。したがって、ダケカンバの早期黄化・落葉には、気温以外の環境要因が関係していることが考えられる。これにも上述したような水分環境やオゾン濃度が関係している可能性もあり、今後、より長期的なオゾン等環境要因の連続計測や継続的な樹木生育調査、また、より詳細な環境制御実験などにより、このような樹木の衰退原因を解明できるものと思われる。

5. 本研究により得られた成果

奥日光地域の南東斜面、北西斜面での毎木調査により、ダケカンバの生育状態が著しく異なっていることが明らかとなった。同地域の土壌、気象、大気等の環境要因を計測した結果、南東斜面におけるダケカンバの衰退を土壌の酸性化やイオン濃度等の栄養条件の悪化で説明することには無理があった。一方、窒素欠乏、大気の高温乾燥化、土壌含水率の低下による水ストレス、そして大気汚染物質オゾンの比較的高濃度な曝露などが、前白根山南東斜面に生育するダケカンバ

の衰退に影響を及ぼしている可能性が示唆された。今後も、より長期的な土壌含水量やオゾン等環境要因の連続計測や継続的な樹木生育調査、また、より詳細な環境制御実験などにより、このような樹木の衰退原因を解明できるものと思われる。本研究で実施した調査項目等は今後もアジア地域の森林衰退等を検討する際にも必要であり、有用な調査事例になるものと思われる。

6. 引用文献

- 1) 畠山史郎, 野村健太郎 (1996) 奥日光前白根山における高濃度オゾンの観測. 大気環境学会誌 31 (2), 102-110.
- 2) 酸性雨調査法研究会 (1993) 酸性雨調査法. ぎょうせい, 東京, pp.427.
- 3) Lissa, M. L. and Peter, G. M. (2000) Growth of the non-native *Pinus nigra* in four habitats on the sand dunes of Lake Michigan. Forest Ecology and Management. 126, 191-200.
- 4) 都筑俊文 (1994) 水の分析. 化学同人, 253-256.
- 5) 国立環境研究所 (1991) 奥日光地域の環境と生物. F-29-'91/NIES, pp.163.
- 6) 戸田浩人 (2000) 森林土壌における窒素無機化特性に関する研究. 森林環境資源科学, 38, 1-95.
- 7) 長谷川順一 (1993) 日光の森はなぜ枯れるのか. フロラ栃木, 2, 6-11.

[国際共同研究等の状況]

本研究は、地球環境研究総合推進費の国際交流研究制度 (Eco-Fronteer Fellowship Program) により実施されたものである。また、本研究の実施に際しては、EANET の活動を視野に入れ、アジア地域への展開を考えながら方法論等を検討した。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表 (学術誌・書籍)

- ① 伊豆田猛, 松村秀幸, 河野吉久, 清水英幸 : 大気環境学会誌, 36(2), 60-77 (2001) 「樹木に対するオゾンの影響に関する実験的研究」
- ② 伊豆田猛, 松村秀幸, 河野吉久, 清水英幸 : 大気環境学会誌, 36(3), 137-155 (2001) 「樹木に対する酸性降下物の影響に関する実験的研究」
- ③ L.D. Emberson, M.R. Ashmore, F. Murray, J.C.I. Kuylenstierna, K.E. Percy, T. Izuta, Y. Zheng, H. Shimizu, B.H. Sheu, C.P. Lui, M. Agrawal, A. Wahid, N.M. Abdel-Latif, M. van Tienhoven, L.I. de Bauel, M. Domingos : Water, Air, Soil Pollut., 130, 107-118 (2001) “Impacts of air pollutants on vegetation in developing countries”
- ④ Y. Zheng, H. Shimizu, J.D. Barnes : New Phytologist, 155, 67-78 (2002) “Limitations to CO₂ assimilation in ozone-exposed leaves of *Plantago major*”
- ⑤ 田村俊樹, 米倉哲志, 中路達郎, 清水英幸, 馮延文, 伊豆田猛 : 大気環境学会誌, (2002)印刷中. 「前白根山周辺におけるダケカンバの生育状況、葉内成分および生育土壌に関する調査」
- ⑥ Y. Feng, N. Ogura, Z. Feng, F. Zhang, H. Shimizu : Water, Air, and Soil Pollution (投稿中) “The concentrations and sources of fluoride in atmospheric depositions in Beijing, China”

(2) 口頭発表

- ① Y. Feng, N. Ogura, Z. Feng and Y. Huang: Acid rain 2000, 6th International Conference on Acidic Deposition, Tsukuba, Japan (2000) “A study on chemical characteristics of atmospheric deposition and element budgets at forest catchment area in Beijing suburb”
- ② 馮延文, 清水英幸: 環境科学会 2001 年会 (2001) 「ダケカンバの生長に及ぼすオゾンと水ストレスの単独/複合影響」
- ③ 馮延文, 大田伸之, 田村俊樹, 伊豆田猛, 清水英幸: 第 42 回大気環境学会 (2001) 「奥日光前白根山周辺におけるダケカンバ衰退に関する調査. 1. ダケカンバの衰退現状とオゾン濃度」
- ④ 田村俊樹, 馮延文, 清水英幸, 伊豆田猛: 第 42 回大気環境学会 (2001) 「奥日光前白根山周辺におけるダケカンバ衰退に関する調査. 2. ダケカンバのフェノロジー特性と葉内成分および土壌化学性」
- ⑤ 馮延文, 清水英幸: 環境科学会 2002 年会 (2002) 「ダケカンバの生長および光合成に及ぼすオゾンと水ストレスの単独/複合影響」
- ⑥ 田村俊樹, 河辺喬, 富永健吾, 太田純史, 馮延文, 清水英幸, 伊豆田猛: 第 43 回大気環境学会 (2002) 「奥日光前白根山周辺の森林衰退地におけるダケカンバの成長特性」

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

今後、本研究で得られた手法や成果を国際会議等で広く公表するとともに、EANET などと連携し、アジア地域での研究の推進に役立てるように、その広報・普及に努める。