

A-5 紫外線増加が生物に与える影響の評価

(1) 紫外線増加が陸上植物に及ぼす影響の生化学的研究

① 紫外線増加が森林生態系に及ぼす影響の解明に関する研究

森林総合研究所森林環境部森林災害研究室 岡野通明・吉武 孝
茨城大学農学部 児玉 治・長谷川守文・松田真菜・平野篤史
神戸女子大学教養部・家政学部 橋本 徹・辻 英夫・米原良子
信州大学農学部 鈴木 純
千葉大学園芸学部 今 久・松岡延浩・岩見洋一・夏秋貴子

平成11～13年度予算額 19,550 千円
(うち、平成13年度予算 5,001 千円)

[要旨]

一般に、強いUV-B照射によっては樹木苗では生長阻害が引き起こされる。しかし、UV-Bがまったく与えられない環境下でも生長阻害が発現することや適度なUV-B付与によって樹木の生長が促進されることがいくつもの樹種で認められ、与えられるUV-Bの強度に対する植物の感受性の違いによって、有害であったり生長の昂進作用をもつことがあると示唆された。また、樹木では樹種別の反応を観察するには多様性に過ぎ、普遍的な反応曲線などを得るためには、他のストレス定量化手法の確立を待たなければならないと考えられた。さらに、実験室レベルだけでなく屋外の自然環境に近い条件でも、UV-B遮断によるヒノキの生長阻害が発生することを明らかにした。UV-B照射がない環境下で植物の成長阻害が発現する例証は、非常に稀である。

新たな紫外線指標物質として、kaempferol-3-*O*-(3',6'-*di-O-E-p*-coumaroyl)-*D*-glucopyranoside (KCCG)とkaempferol-3-*O*-(3'-*O-E-p*-coumaroyl)-(6''-*O-E-feruloyl*)-*D*-glucopyranoside (KCFG)を樹木のUV-Bストレス誘導化合物として同定した。UV-B照射によって誘導される化合物としては、本研究で初めて見出されたものである。これらの化合物の紫外線吸収スペクトルを測定した結果、UV-B領域を効果的に吸収することがわかり、UV-Bに対する防御物質となっている可能性が示唆された。

大気中の可視光線を減少させる物質と紫外線を減少させる物質に厳密には違いがあるが、紫外線に関する混濁度が大きいと視程は小さいという関係から、視程すなわち可視光線への影響は紫外線の透過へも影響していることが示された。紫外線の予測を行う場合、紫外線に関する混濁度を考慮する必要があるが、紫外線に関する混濁度の代わりに視程を使えば非常に簡便である。緯度別・高度別USR(日積算UV-B/日積算日射量)を求める式を提案し、ここで得られた式から日射量のメッシュ図を用いて日本全国の紫外線メッシュ図を作成した。

[キーワード] UV-B, 遺伝子損傷, 紫外線指標物質, 樹木ストレス, ハザードマップ

1. はじめに

極地方におけるオゾンホールや北半球高中緯度域におけるオゾン量の減少等が顕在化している。

オゾン層破壊によって引き起こされる紫外線量の増加は、植物等の生産、生長や増殖にも影響を及ぼすと予想されており、生態系に対する影響については、さらに調査研究の推進が求められている。

特に、陸域生態系で最も生物量の大きい森林生態系は紫外線に対しての感受性が高く、その影響を把握することが喫緊の課題となっている。

2. 研究目的

持続的な森林生態系を維持するための方策の検討に資する目的で、これまでに個々の生物から得られた研究成果をもとに森林生態系におけるオゾン層破壊によって影響を受けると予想される生態系遷移過程の変化を見積もる。併せて、森林生態系の主要樹木のストレス指標となる代謝産物の探索・分析・数値化や、天候別・高度別の紫外線ハザードの確立を行う。

また、森林を構成する主要樹種において紫外線抵抗性の反応の強さと遺伝子損傷量及び突然変異量の定量的関係を明らかにする目的で、太陽光紫外線の異なる地域で遺伝子損傷の蓄積量を比較し紫外線抵抗性反応の活性と遺伝子損傷の蓄積量の相関関係を調べる基礎的研究を行う。

3. 研究方法

(1) UV-B が森林植生に及ぼす生態学的影響

オゾン層破壊のシナリオに伴う妥当な紫外線増加量が森林の樹木や生態系に与えられた場合の影響を見積もるため、これまで実施した樹木へのUV-B照射試験の結果と、標高の高い山岳地で行った気象観測から得られた紫外線環境の結果等を合せて考察した。

①樹木幼苗のUV-B照射試験から得られた結果、特に照射強度に伴う生育量の変化に対して、乗鞍岳他の標高の高い山岳地における実際の紫外線環境（紫外線強度）はどのような影響を及ぼすか、検討を行った。このなかで、UV-Bによる光合成阻害について再度の測定を行って、紫外線による樹木の光合成阻害の発現を同定した。

②現在の環境紫外線強度のレベルにおいては、紫外線が増加すると樹木の生育には昂進作用をもたらす可能性があると考えられたので、亜高山にある森林を想定し、信州大学農学部(標高約800m)において、野外の圃場で生育するヒノキに対してUV-B遮断試験を行った。

③紫外線による樹木影響に関するハザードマップをチェーンアップするため、高度別の紫外線強度の分布について、さらに波長別の詳細な観測データが必要である。簡易な方法で全天の紫外線放射スペクトルを観測する分光器を茨城県筑波（森林総研：ほぼ海面高度）、長野県南箕輪（信州大学農学部：標高約800m）に設置し長期連続観測を実施した。無雪期には森林限界付近にさらに設置箇所を増やし、高山帯から海面高度付近までの紫外線放射スペクトルを比較し得るようにした。

(2) 紫外線増加による樹木のストレス指標代謝産物の探査と分析

これまで、各種のマツ科樹木およびブナにおいて、UV-B照射ストレスによって蓄積する二次代謝産物として、kaempferol-3-O-b-D-glucopyranoside (Fig.6)を同定しており、この化合物が森林生態系に対する紫外線ストレスを定量化する上での指標となりうることを明らかにしている。その研究の過程において、kaempferol-3-O-b-D-glucopyranoside以外にもUV-B照射によって蓄積が誘導される未同定の物質が存在することが示されていた (Fig.7)。本研究ではこの物質の同

定を行い、紫外線ストレスの指標化合物としての可能性を検討する。

①森林総合研究所内で生育しているアカエゾマツから枝を採取し約 10cm の長さに切り、水耕用ブロックに挿し、標準水耕液を用いた液耕で培養した。人工光人工気象室内において、以下の条件で UV-B 照射処理を行った。日長は明期 13 時間/暗期 11 時間に制御され、明期の 12 時間に UV-B を照射した。温度は明期 23℃/暗期 18℃に設定された。予措の期間は紫外線照射前 7 日間であり、紫外線照射は 14 日間継続した。UV-B 光源は UV-B313 ランプにセルロースアセテートフィルムを巻き 290nm 以下の波長をカットしたものとした。照射強度は 1.04 W/m²であった。

②UV-B 照射により蓄積が誘導される化合物の精製

UV-B 照射アカエゾマツ葉 100 g を 70% メタノールで抽出した。メタノールを減圧除去し、酢酸エチル抽出を行った。酢酸エチル相を減圧濃縮後、シリカゲルカラム (45×200 mm) に添加し、ヘキサン：酢酸エチル系の溶媒で溶出した。溶出液を逆相 HPLC で分析し、UV-B ストレス誘導化合物を含む画分を集めて減圧濃縮した。これを再びシリカゲルカラム (16×150 mm) に添加し、ヘキサン：酢酸エチル系で分離し、UV-B ストレス誘導化合物を含む画分を集めて減圧濃縮した。次に逆相 HPLC を用いて、以下の条件で繰り返し分取を行った。

カラムは Inertsil ODS-3 10 φ×250 mm を用いて、溶出溶媒は 0.1% ギ酸を含むアセトニトリル：水=4:6 とした。流速は 3.0 mL/min で、検出には UV 310 nm を試用した。カラム温度は 40℃であった。予備実験により、今回精製したストレス化合物は蛍光灯光下で分解あるいは異性化等が起こることが示唆されていたので、精製は極力遮光条件で行った。

(3) UV-B ストレス誘導化合物の単離・構造決定

この化合物の構造決定およびその他の UV-B ストレス誘導化合物の単離・構造決定を行うことを目的に研究を進めた。次に、これらの化合物が各種マツ科樹木において UV-B ストレスによって誘導されるかどうかの確認を行った。

①UV-B 照射により蓄積が誘導される化合物の精製

ア. 植物試料

森林総合研究所内で生育しているアカエゾマツから枝を採取し、約 10cm の長さに切り、水耕用ブロックにさして、以下の条件で UV-B 照射処理を行った。

栽培期間：紫外線照射前 7 日間、紫外線照射 14 日間。

UV-B 光源：UV-B313 ランプにセルロースアセテートフィルムを巻いたもの UV-B 強度：1.04 W/m²)

日長：明期 13 時間/暗期 11 時間 (明期の 12 時間に UV-B 照射)

温度：明期 23℃/暗期 18℃

湿度：75±7%

イ. 精製方法

UV-B 照射アカエゾマツ葉 100 g を 70% メタノールで抽出した。メタノールを減圧除去し、酢酸エチル抽出を行った。酢酸エチル相を減圧濃縮後、シリカゲルカラム (45×200 mm) に添加し、ヘキサン：酢酸エチル系の溶媒で溶出した。溶出液を逆相 HPLC で分析し、UV-B ストレス誘導化合物を含む画分を集めて減圧濃縮した。これを再びシリカゲルカラム (16×150 mm) に添加し、ヘキサン：酢酸エチル系で分離し、UV-B ストレス誘導化合物を含む画分を集めて減圧

濃縮した。次に逆相 HPLC を用いて、以下の条件で繰り返し分取を行った。

カラム : Inertsil ODS-3 10 mm, i.d.×250 mm

溶出溶媒 : 0.1% ギ酸を含むアセトニトリル : 水=4:6

流速 : 3.0 mL/min 検出 : UV 310 nm カラム温度 : 40°C

上記の操作を 3 回繰り返して二種類の化合物を精製した。

②各種マツ科樹木における UV-B ストレス誘導化合物の定量

ア. 植物材料

アカマツ・エゾマツ・カラマツ・クロマツ・トウヒを用い、種子の大きさの違いによってアカマツ・カラマツ・クロマツの種子を各 300 粒、エゾマツ・トウヒの種子を各 400 粒プランターに播種し、UV-B 照射を 2 週間後に開始した。樹種によって成長に大きな差があったため、成長の早いクロマツは 1 つのプランターを半分に区切り一方を 7 週間で収穫し、もう一方を 13 週間で収穫した。アカマツ・カラマツは 9 週間、やや生育の遅いエゾマツ・トウヒは 13 週間で収穫した。UV-B 照射はアカエゾマツのときと同様の条件で行った。

イ. 定量方法

各樹種の葉部 5~10 g を液体窒素により凍結磨砕し、20 倍量の 70% メタノールで室温・暗所にて 24 時間静置抽出した。抽出後、吸引ろ過し、ろ液を 70% メタノールで 5 倍希釈し、定量用試料とした。これを下記の条件で LC/MS/MS に供し、UV-B ストレス誘導化合物の定量を行った。

カラム : Inertsil ODS-2 (2.1 mm, i.d.×150 mm)

溶媒 : 0.1% ギ酸を含むアセトニトリル:水=38:62 (KCCG, KCFG) または 20:80 (K3G)

流速 : 0.2 ml/min

イオン化法 : ターボイオンスプレーイオン化法ポジティブモード

MRM 質量数 : 447/284 (K3G), 739/284 (KCCG), 769/284 (KCFG)

(4) 緯度・高度別の紫外線量のメッシュ図の作成

①高度による紫外線の差異とその視程との関係

オゾン層の破壊に伴い、地上に到達する紫外線(UV-B)の増加が懸念されている。紫外線の増加は、森林生態系にも影響すると考えられる。森林生態系への影響評価のためには、緯度別・高度別の全国紫外線メッシュ図があると、各地における影響評価のさいに有用である。分担の目標はそのようなメッシュ図を作ることにおいているが、そのためには標高に伴う紫外線量の変化を明らかにしなければならない。1999 年度に赤城山と山麓等で行った観測に基づいて、2 高度の紫外線量の差がどの程度になるか、また、その差は視程とどのような関係になっているかについて解析した。

ア. 紫外線の観測は、赤城山の新坂平駐車場(標高 1450m)、赤城山の麓の前橋市下細井大正用水路土手(標高 100m)と松戸市千葉大学園芸学部観測圃場(標高 20m)で行った。以下、赤城山を高地、赤城山の麓と松戸を低地として表現する。

観測は 1999 年 4 月 30 日から 11 月 22 日の間に 8 日間行った (Table 1)。観測に用いた測器は、全天 UV-B 計 (MI-330 と KI-340、英弘精機) である。

約 1 時間毎に直径 10cm の遮光板を用い、センサー部から約 1m 離して陰を当て、散乱 UV-B を測定した。1 分毎の瞬間値が記録された。視程は地上気象観測原簿(東京、前橋)から得た。視程は 3 時間毎にしか記録されていないので、紫外線の観測と対応させるために、前後 1.5 時間

までをその視程とした。

②UV-B と日射量の比の変化について

上記では晴天日における全国 UV-B メッシュ図について検討してきたが、今年度は、曇天日等すべての日の平均状態を表す気候学的な紫外線メッシュ図作成のための計算式について検討した。UV-B の観測地点は非常に少ないので、UV-B の観測データから直接、気候図を作ることは非常に難しい。一方、日射観測は多くの地点で行われているので、日射量から UV-B を推定できれば日射量の観測密度と同じ程度に UV-B を評価できる。ここでは、UV-B と日射量の比（以下では、この比を USR と呼ぶ）がどのように変化するかについて検討した。

ア 気象庁は札幌、館野、鹿児島、那覇で UV-B と日射量を観測している。これらの地点について USR の季節変化をプロットすると正弦曲線で近似できることが予想される。そこで、USR の季節変化が次の正弦関数で表されると仮定する。

$$USR = A \sin(2\pi d/365 + P) + M \quad (1)$$

まず4地点のそれぞれについて最適な係数（振幅 A、位相 P、平均値 M）を求める。次に、求められた各係数を緯度の関数として表す。ここでは後述のように各係数を緯度の一次関数として表した。この式により平野部の USR が緯度と季節の関数として求められる。気候値として求めるには長期間の観測データを使用しなければならないが、ここでは検討段階なので、1998年だけのデータによって検討した。

標高の変化に伴い USR は変化すると考えられるが、高所の USR は気象庁データから得られない。高度に伴う USR の変化については、本課題において乗鞍岳(2876m)と筑波森林総合研究所(24m)の観測に基づいた検討を加えている。また、我々は晴天日に赤城山(1450m)と松戸(20m)で UV-B の観測を行っている。ここではそれらの中から乗鞍岳-筑波(1997年8,9,10月,1998年8,9,10月)と赤城山-松戸(1999年4月30日,10月24日,2000年3月3日,11月6日)のデータを用いて標高に伴う USR の変化について検討した。ここでは簡単のため平均値 M だけが標高の一次式で表されると仮定して求めた。

③紫外線メッシュ図の作成

森林生態系への B 領域紫外線(UV-B)の影響を日本全土について把握するために、UV-B メッシュ図が不可欠である。現在、UV-B 分布図として気象庁の等値線図があるが、UV-B メッシュ気候図は、現在、まだ作成されていない。そこで、日本国内4地点の日射量と UV-B 量の関係を求め、既存の日射量メッシュデータにそれらの関係を適応して、日積算 UV-B の 1km×1km の気候図を作成した。

ア UV-B 量を観測している国内4地点(札幌、館野、鹿児島、那覇)について、日積算 UV-B 量と日積算日射量の比(以下、UV-B/日射)を1日ずつ1991年～1997年について計算し、7年間の日別累年平均値を求める。そしてこの値に次の正弦関数をあてはめる。

$$R_i = A_i \sin(2\pi d/365 - P_i) + M_i$$

ここで R_i は UV-B/日射、A は振幅、P は位相(radian)、M は平均値、d は1月1日をはじめとした日数で、添字の i は札幌、館野、鹿児島、那覇のいずれかの地点を意味している。各地点について求められた A_i , P_i , M_i を緯度 ϕ (°) の 1 次関数として 1 つにまとめる。

$$R = A \sin(2\pi d/365 - P) + M$$

$$A = a_1 \phi + b_1, P = a_2 \phi + b_2, M = a_3 \phi + b_3$$

この結果、UV-B/日射を緯度と日数の関数として1つにまとめて表すことができる。

日積算日射量メッシュ図はグリーンエネルギー計画(農業環境技術研究所、1988)のなかで自然エネルギー賦存量図(日射量)として作成されている。この日積算日射量に上式の R を乗ずることにより、UV-B のメッシュデータが得られる。メッシュデータは GTOPO 30 から得られる日本全土に GRASS を用いて展開し、メッシュ図を作成した。

4. 結果・考察

(1) UV-B が森林植生に及ぼす生態学的影響

人工気象室内に設置した紫外線照射装置を用いて、前のフェーズより樹木実生苗への UV-B 照射試験を行ってきた。樹木苗では一般に強い UV-B 照射による成長阻害が認められたが(UV-B+++ : 1.5w/m²)、UV-B の照射を受けない対照区(Ctrl : 0w/m²)でも成長量が減少することがあり、適度の UV-B を付与した区(UV-B+ : 0.3w/m², UV-B++ : 0.9w/m²)で増加する傾向を多数の樹種で確認した(Fig.1)。

文献調査等により、他の植物でも同様の結果が得られていることが明らかになった。UV-B 照射により引き起こされる成長阻害は感受性樹種であっても、過度の曝露を受けた場合にのみ発現すると思われる。樹種によりこの傾向は異なるが、紫外線増加シナリオによる将来の予想強度が樹木に対する阻害要因になる程度まで増加するか否かによって、紫外線影響が自然条件下で発現するかどうかを見極める必要があると考えられた。

乗鞍岳を中心に行った高山帯での紫外線観測によって得られた夏季の全天 B 領域紫外線日積算量の例(Fig.2)などから、夏季の晴天日には山岳地では著しく紫外線が強まっていることが定量的に示されている。

UV-B 実験に供試した樹種の生育では、上記のハンノキの乾物量に見られるような紫外線影響を呈した。これまでの照射試験の結果を総括し、模式的に示した(Fig.3)。高山帯での紫外線強度は、平均的な日では照射強度に換算すると A の領域であり、また晴天に恵まれた日では同様に B の領域となる。紫外線が低地より強い高山でさえ、平均的な夏季の日の B 領域日積算値は生育に対して促進的に作用する (A の領域)。一方、植物が夏の晴天に恵まれた日のような瞬間的に強い紫外線の影響を受けやすいと考えれば、阻害的に作用する (B の領域)。

この現象の検証のために、実際に自然光型人工気象室内で行われた紫外線の照射試験の結果を総括した(Fig.4)。X 軸は、供試植物に実際に照射した日積算 UV-B 量を自然光型人工気象室の屋外で観測された日積算日射量で除した無次元数であり、バックグラウンドの日射に含まれる UV-B の相対量を表す。Y 軸は樹木の各パーツが示す生長量(樹高生長、肥大生長、生物量増加など)を、最も生育の良かった個体を 1 として示した相対生長量で表す。

日射量の算定が人工気象室屋外の日射量を基準としているので、ガラス室による減衰を考慮すると実際に供試苗が受ける日射量はこれより少なくなる。もっとも紫外線が強くなる夏の快晴日に観測される UV-B 日積算量は概ね日射積算値の 1/1000 以下である。

その領域では日射に含まれる UV-B 量の変化によってそれほど相対生長量に影響はないように見受けられるが、相対的に照射 UV-B 量が増加すると相対生長量は著しく減少する傾向を示した。また UV-B 量が少なくなると若干の生長阻害を示す傾向にあると思われる。これは、これまでの

UV-B 照射試験の総括によって予測された樹木初期生長への紫外線量増加の影響と同様の傾向を示すと思われた。

紫外線量の条件は Fig.3 の A の領域であり、無処理で太陽光が直射する対照区と、ルミラーフィルムとセルロースアセテートフィルムを被覆した紫外線遮断処理区を設定している。樹木であるため年間の生育量を調査してから現存量の推移を見積もる必要があり、実験開始後 1 年を経た 2000 年春期に生育調査を実施した。目視では紫外線遮断区の生長阻害が認められている。Fig.5 に生育調査で収穫した各処理区の乾物重と生体重を示した。対照区と UV-B 透過区では各重量にほとんど差はないが、UV-B 遮断処理では減少している。特に乾物重の減少が大きい。実験室レベルだけでなく屋外の自然環境に近い条件で UV-B 遮断による生長阻害が発生することを示した例は非常に稀であると思われる。

(2) 紫外線増加による樹木のストレス指標代謝産物の探査と分析

①蓄積された UV-B ストレス化合物

分取を行った時の HPLC のクロマトグラムを Fig.7 に示した。UV-B 照射によって顕著な誘導が見られるピーク 1 と 2 について精製を行い、ピーク 1 については約 7 mg を得た。ピーク 2 については得られた精製物にピーク 1 がかなり混入していたため、さらなる精製が必要である。

②ピーク 1 精製物の性状解析

紫外・可視吸収スペクトルは Fig.8 に示したように 314 nm に極大吸収を示した。Kaempferol-3-O-b-D-glucopyranoside の極大吸収は 265 nm および 350 nm であり、314 nm は吸収の谷に当たる。このことから、kaempferol-3-O-b-D-glucopyranoside と今回精製したピーク 1 は相補的に UV-B 領域である 280-350 nm をカバーするスクリーンとして機能している可能性が示唆された。

ネガティブイオン化エレクトロスプレー法によるマススペクトルを Fig.9 に示した。[M-H]⁻と考えられるイオンが m/z 739.5 に観測された。

(3) UV-B ストレス誘導化合物の単離・構造決定

①UV-B ストレス誘導化合物の精製と同定

精製した二種類の化合物について、それぞれ質量分析スペクトル、各種 NMR スペクトルを測定した結果、kaempferol-3-O-(3",6"-di-O-E-p-coumaroyl)-D-glucopyranoside (KCCG) と kaempferol-3-O-(3"-O-E-p-coumaroyl)-(6"-O-E-feruloyl)-D-glucopyranoside (KCFG) であると同定された (Fig.11)。これらの化合物はマツ科樹木 *Pinus sylvestris* の成分としてすでに報告されているが、紫外線照射によって誘導される化合物としては本研究で初めて見出したものである。

これらの化合物の紫外線吸収スペクトルを測定した結果、UV-B 領域を効果的に吸収することがわかり、UV-B に対する効果的な防御物質となっている可能性が示唆された。

②各種マツ科樹木における UV-B ストレス誘導化合物の定量

Fig.12 に示したように実験に供したすべての樹種で UV-B 照射区の K3G、KCCG、KCFG が対照区よりも増加していた。これらのことから、K3G だけでなく KCCG、KCFG が UV-B ストレスの指標化合物となりうることが示された。

(4) 緯度・高度別の紫外線量のメッシュ図の作成

①Fig.13 は終日快晴であった 4 月 30 日の観測例である。高地の値が大きい、午前中には 2 地点の観測値の差は非常に小さく、午後にやや大きめになっているのがわかる。10 月 10 日は雲

量が6以上で、日積算値を得ることができなかったが、その他の7日間については数時間の快晴の状態があったので、雲の影響がないとした場合の日積算値を得ることができた。

この7日間の高地と低地の日積算全天 UV-B の変化を Fig.14 に示した。一番左の点は4月30日で、差が小さいが、春の多い場合、その差は $10\text{kJm}^{-2}\text{day}^{-1}$ 近くに達している。秋には、差が縮まっているが、高地と低地で $5\text{kJm}^{-2}\text{day}^{-1}$ 程度の差が出ている。

データが揃っている時間帯について、高地と低地の全天 UV-B の違いを次式で定義した減少率で評価した。

$$\text{減少率} = (\text{高地の全天 UV-B} - \text{低地の全天 UV-B}) / \text{高地の全天 UV-B}$$

この減少率は1分毎の観測値により求められるが、3時間毎の視程の観測と対応させるため、視程観測時刻の前後1.5時間の平均値を使用する。

このように求められた減少率と視程 (Table 2) の関係を Fig.15 に示した。減少率は太陽放射が通過する大気行路 (air mass) が長くなると大きくなると予想されるため、Fig.15 では太陽天頂角が15度から45度までと45度から75度までに分けて示している。Fig.15 から同じ視程では、太陽天頂角が大きい方が減少率が大きいことがわかる。

また、それぞれの太陽天頂角の範囲で、視程が大きくなるに従い減少率が小さくなることがわかる。可視光線を減少させる大気中の物質と紫外線を減少させる物質に厳密には違いがあるが、視程すなわち可視光線への影響は紫外線へも影響していることを示している。

直達紫外線量の予測に関し、紫外線に影響する混濁度と視程の関係について考察するため、離差率として次式を定義する。

$$\text{離差率} = (\text{混濁零の予測直達 UV-B} - \text{観測直達 UV-B}) / \text{混濁零の予測直達 UV-B}$$

直達紫外線量の予測が正しく行われているとした場合、離差率は紫外線についての混濁度の影響を表している。10月9日の直達紫外線量が得られた時間について離差率を計算し、視程との関係を示したのが Fig.16 である。直達 UV-B が測定された時刻について、その時刻に近い視程の値を使って表している。この日の場合、視程は午前10時 (午前9時の値を使用) には20kmあったが、14時 (15時の値を使用) には10kmになっている。11時、13時の視程は12時の値を使っている。一方、離差率は午前10時から時間とともに大きくなっている。すなわち、視程が小さくなると離差率が大きくなる関係を示している。離差率が大きいと言うことは混濁度の影響が大きいと言うことであるから、紫外線に関する混濁度が大きいと視程は小さいという関係を示している。観測の7例についてもこのような関係が見られた。

紫外線の予測を行う場合、紫外線に関する混濁度を考慮する必要があるが、これに関する資料は少ない。紫外線に関する混濁度の代わりに視程を使えば非常に便利であるといえる。ここではそれらの間に関係があることを見い出したが、視程より、より客観性のあるデータによって紫外線を予測するのが好ましい。

②札幌、館野、鹿児島、那覇の日積算 UV-B 量と日積算日射量の比 (USR) の季節変化を日別にプロットした (札幌と館野の例が Fig.18 の点である)。これらの USR に適合する正弦曲線を4

地点についてそれぞれ求めた。得られた各地点の平均値 M、振幅 A、位相 P を緯度 (θ) に関して表すと、Fig.17 a,b,c のようになる。振幅については、少しバラツキがあり、さらに検討する必要があるように思われるが、ここでは3つの係数とも緯度の一次式で表すことにする。一次回帰式で表した時の x 係数と定数を Table3 に示した。観測値から得られた USR と (1) 式の振幅、位相、平均値を緯度の一次式で表したとき得られる結果 (札幌と館野の例) を Fig.18 にそれぞれ点と曲線で示した。正弦曲線は観測値のほぼ中央を通っており、上式で良く表されることがわかる。鹿児島、那覇についてもほぼ同程度に適合している。

乗鞍岳と赤城山等の観測値から求められた USR の値を標高について表した (Fig.19)。図中の各直線は同月あるいは同日に観測された低地と高地の2地点の値を結んだものである。USR の値は天頂角が小さいとき大きくなるため、8月、9月、10月と季節が進むに従い USR の値は小さくなる傾向がある。また、曇天日より晴天日に USR は小さくなる傾向があるため、晴天日のデータである赤城山-松戸の値は小さくなっている。各線の上下の散らばりは、このように季節や天気によるものである。1999年4月30日と10月24日の場合、標高に伴う USR の値はあまり変わっていない。これらの日の9時、12時、15時の3回の視程の平均はそれぞれ27kmと33kmで、空気が特に澄んでいたため、標高に伴う変化が小さかったと思われる。2000年3月3日と11月6日は下層大気が濁っていたため、標高に伴う変化が大きくなったようである。これら赤城山-松戸の4例を除き、乗鞍の6例の平均を採用すると USR の増加率はおよそ $7.94 \times 10^{-8} \text{m}^{-1}$ となる。晴天日の赤城山-松戸の値から見て、気候的におよそこの程度の割合で標高に伴い、USR が増加していると考えられる。

③4地点の日別累年平均 UV-B/日射の年変化を Fig.20 a,b,c,d に◇印で示した。Fig.20 の点に正弦曲線をあてはめた結果を実線で示した。各地点で得られた正弦曲線の各係数の値と緯度 ϕ ($^{\circ}$) の関係を Fig.21 a,b,c に、それぞれ□印で示した。緯度に対する直線回帰の結果は、

$$A = 0.0167 \times 10^{-3} \phi - 0.1928 \times 10^{-3}$$

$$P = 0.0168 \phi + 1.167$$

$$M = -0.0313 \times 10^{-3} \phi + 2.206 \times 10^{-3}$$

となった。この結果は Fig.21 にそれぞれ直線で示されている。Fig.22 に日積算 UV-B の年平均値の1kmメッシュ図を示した。Fig.3を見ると、緯度の高い地域よりも緯度の低い地域の方ほど日積算 UV-B 量が大きくなっていること、本州中部では地形の影響を受けて他の地点と比較して全体的に日積算 UV-B 量の分布が複雑になっている等が分かる。UV-B メッシュ図は日積算 UV-B の月平均値として、各月についても作成した。

このようなメッシュ図を森林生態系等に重ね合わせることにより、気候学的な UV-B 影響を評価することが可能になるものと思われる。

5. 本研究により得られた成果

UV-B が森林植生に及ぼす生態学的影響について、人工気象室内に設置した紫外線照射装置を用いて、樹木実生苗への UV-B 照射試験を行った結果、一般に強い UV-B 照射による成長阻害が認められたほか、UV-B の照射を受けない対照区でも成長量が減少することや適度の UV-B を付与した区で増加する傾向があることを多数の樹種で確認した。

実験室レベルだけでなく屋外の自然環境に近い条件で UV-B 遮断による生長阻害が発生するこ

とを示した。

紫外線増加による樹木のストレス指標代謝産物の探査・分析を行った結果、UV-B ストレス誘導化合物として、kaempferol-3-O-(3",6"-di-O-E-p-coumaroyl)-D-glucopyranoside (KCCG)と kaempferol-3-O-(3"-O-E-p-coumaroyl)-(6"-O-E-feruloyl)-D-glucopyranoside (KCFG)を同定した。これらの化合物はマツ科樹木 *Pinus sylvestris* の成分としてすでに報告されているが、紫外線照射によって誘導される化合物としては本研究で初めて見出したものである。

緯度・高度別の紫外線量のメッシュ図の作成について、紫外線に関する混濁度の代わりに視程を使って、緯度別・高度別USR(日積算UV-B/日積算日射量)を求める式を提案し、ここで得られた式から日射量のメッシュ図を用いて日本全国の紫外線メッシュ図を作成した。

[国際共同研究等の状況]

なし

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上発表

- ①青島史子・岡野通明・今久・吉武孝：第110回日林学術講，P1057-1058(1999)
「標高の異なる2地点でのB領域紫外線量の観測」
- ②岡野通明・今久・大谷義一・青島史子・吉武孝：IGEシリーズ紫外線と植物,p79-p94(2000)
「森林植生をめぐる紫外線環境について」
- ③今久・青島史子・松岡延浩・岡野通明：日本農業気象学会1999年度全国大会講演要旨,p42-p43(1999)
「快晴時の全国メッシュUV-B分布図の試作」
- ④岡野通明：森林の環境100不思議，(社)日本林業技術協会編，p58-59(1999)
「紫外線が増加すると……」
- ⑤岡野通明、今久、大谷義一、青島史子、吉武孝：植物と紫外線UVB,IGEシリーズ27:79-94(公刊図書)「森林植生をめぐる紫外線環境について」

(2) 口頭発表

- ①岡野通明・青島史子・今久・吉武孝：第110回日本林学会(1999)
「標高の異なる2地点でのB領域紫外線量の観測」
- ②岡野通明：東北大学遺伝生態研究センターワークショップ講演(1999)
「森林植生をめぐる紫外線環境について」
- ③今久・青島史子・松岡延浩・岡野通明：日本農業気象学会1999年度全国大会(1999)
「快晴時の全国メッシュUV-B分布図の試作」
- ④本雄介、今久、松岡延浩：日本農業気象学会2000年度全国大会(2000)
「標高の異なる2地点のUV-B量の差と視程の関係」(要旨印刷済みp402-403.)
- ⑤Michiaki Okano, Osamu Kodama, Morifumi Hasegawa, Hisashi Kon, Nobuhiro Matsuoka, Tohru Hashimoto, Jun Suzuki, Takashi Yoshitake : IGE Symposium 2000 "Vegetation and UV-B", Sendai, Japan,2000

- “Effects of Enhanced UV-B Radiation on Forest Vegetation”(アブストラクト印刷済み)
- ⑥ Michiaki Okano, Hisashi Kon, Fumiko Aoshima, Takashi Yoshitake, Jun Suzuki : IGE Symposium 2000 “Vegetation and UV-B”, Sendai, Japan, 2000
- “Measurement and Estimation of Irradiant UV-B in Alpine Zone” (アブストラクト印刷済み)
- ④ 平野篤史, 松田真菜, 長谷川守文, 岡野通明, 児玉治 : 日本農芸化学会 2001 年度大会(2001)
「UV-B 照射により樹木に蓄積する二次代謝産物の解析」
- ⑧ 今 久, 松岡延浩, 岡野通明 : 農業環境工学関連 4 学会合同大会(2001)
「日射に対する UV-B の割合について」(要旨印刷済み)

(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、成果の広報・普及に努める。

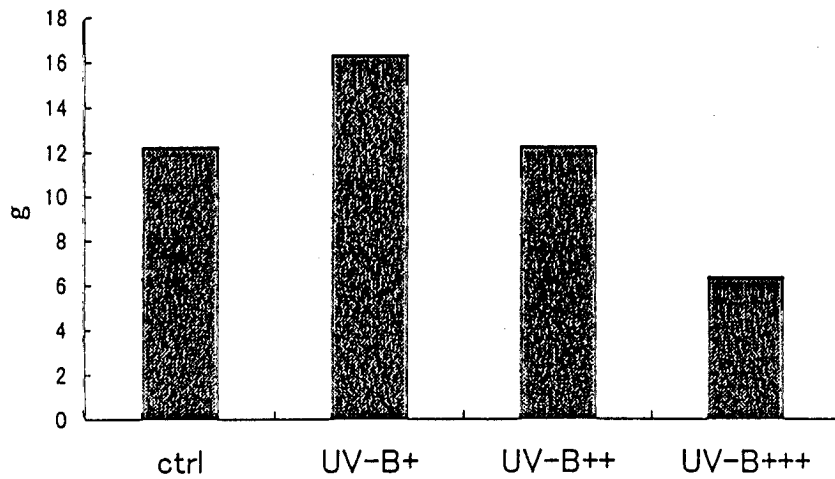


Fig. 1 自然光型人工気象室でのUV-B照射実験における樹木の乾物生産量の変化の例 (ハンノキ実生)

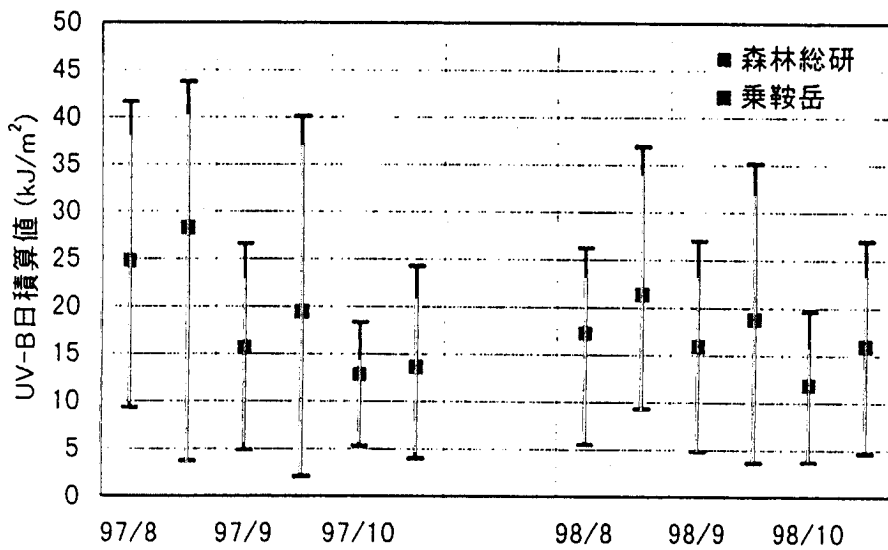


Fig. 2 年月別の全天UV-B日積算量の月最大値 (上端)、月平均値 (マーカー)、月最小値 (下端)

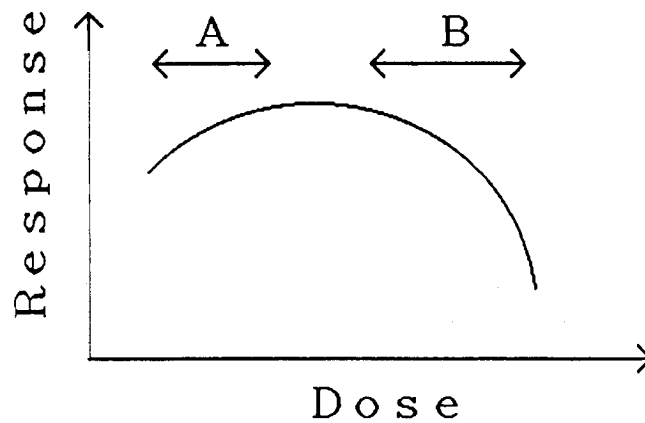


Fig. 3 UV-B照射量と樹木の生育量との関係の模式図
乗鞍岳山頂付近における平均的な夏の日のUV-B日積算値(A)と、夏の月間最高のUV-B日積算値(B)の範囲を示した

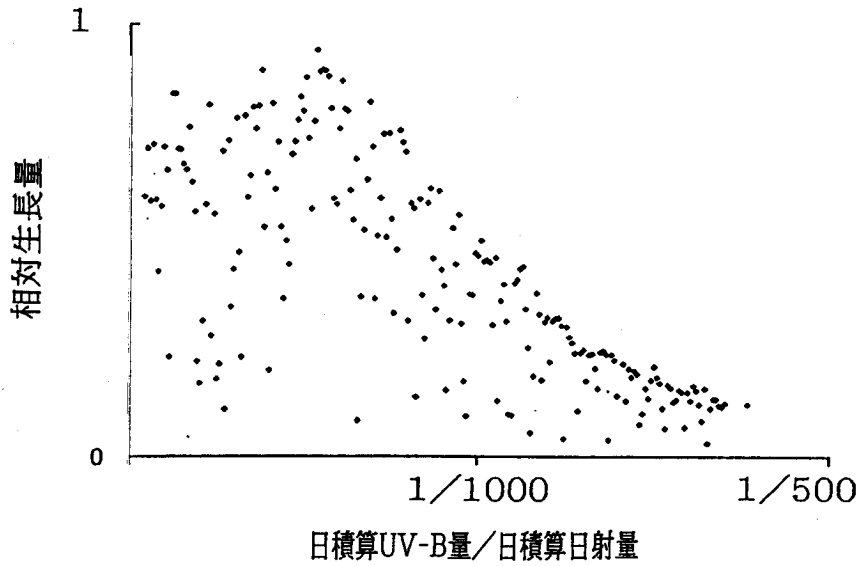


Fig 4 自然光型人工気象室内のUV-Bの相対照射強度が生長量に及ぼす影響
 (日射量は屋外の日射量を用いた。UV-B量は照射強度の実測ならびに照射時間から換算した。人工気象室には太陽光由来のUV-Bは照射されない。)

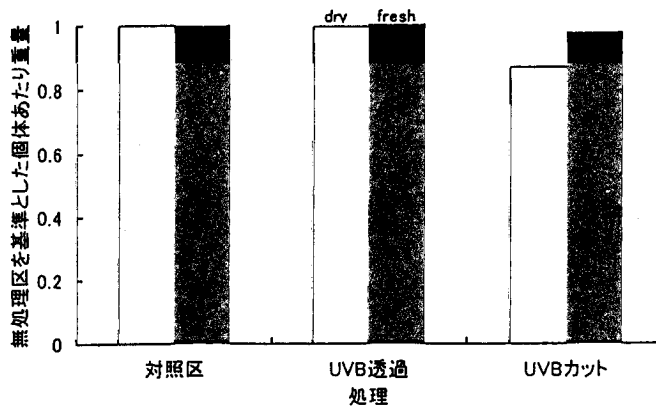


Fig. 5 信州大学農学部圃場で行われているヒノキ苗への紫外線遮断実験(1999年春から2000年春)の結果

対照区は無遮光、UVB透過区はセルロースアセテートフィルム、UVB遮断区ではルミラーフィルムで被覆した。

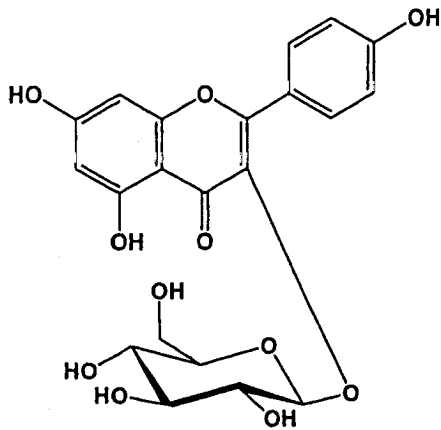


Fig. 6 kaempferol-3-O-beta-D-glucopyranoside

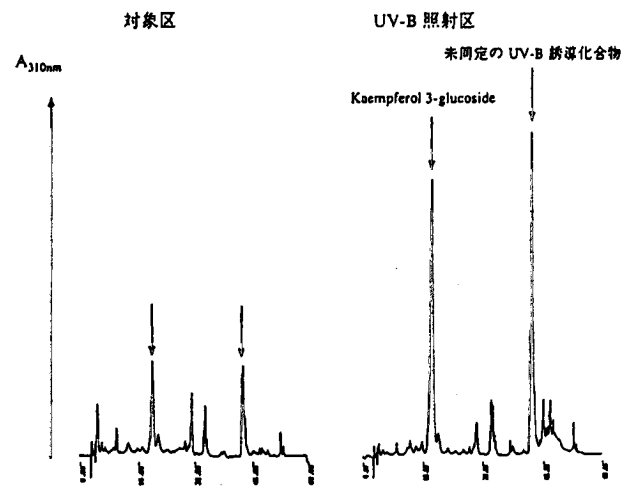


Fig. 7 カラマツ抽出液の逆相クロマト HPLC プロファイル

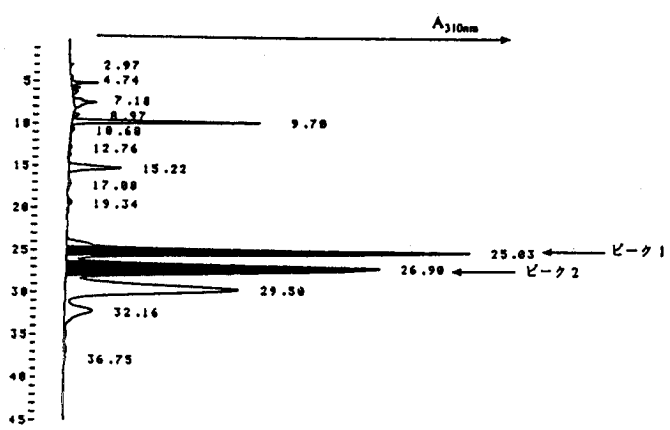


Fig. 8 アカエゾマツ中の UV-B 誘導化合物の逆相 HPLC による精製

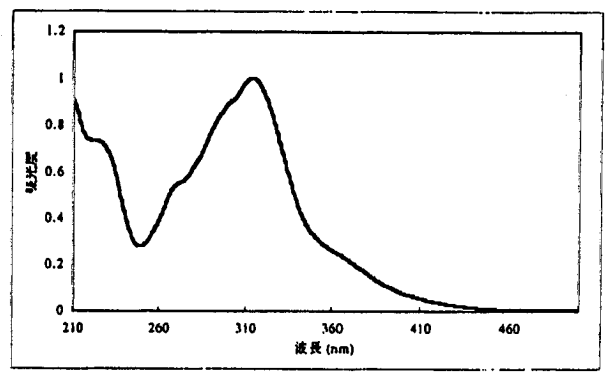


Fig. 9 HPLC 精製後のピーク 1 の紫外外部吸収スペクトル (20ppm メタノール溶液)

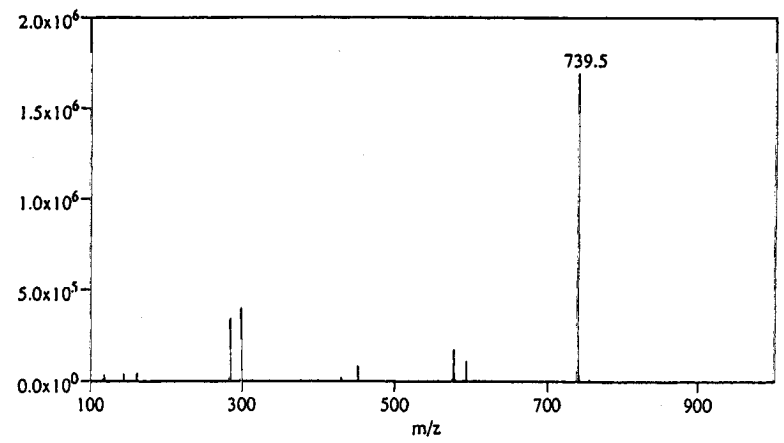


Fig. 10 HPLC 精製後のピーク 1 のマススペクトル (エレクトロスプレーイオン化法、ネガティブモード)

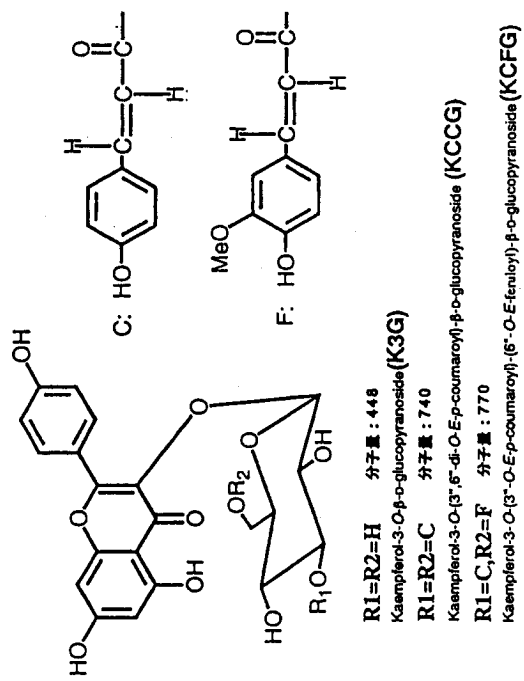


Fig 11 UV-Bストレス誘導化合物の構造

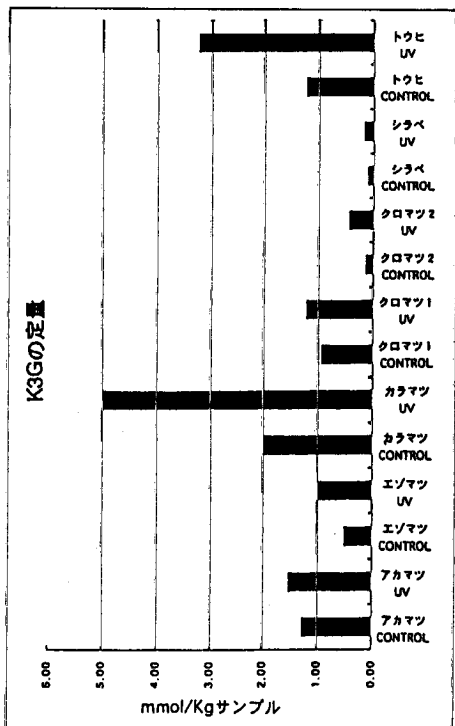
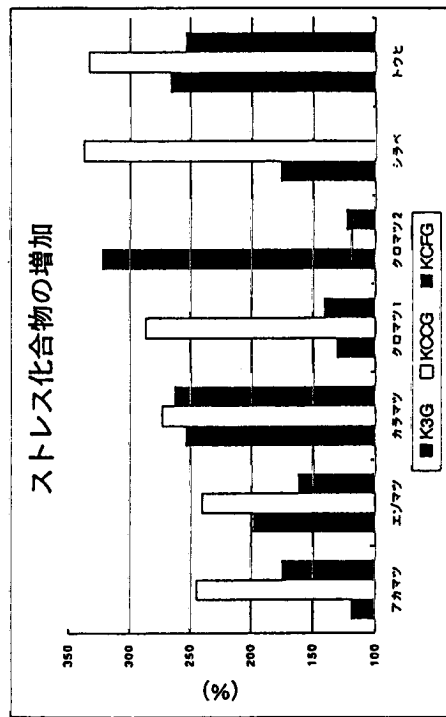
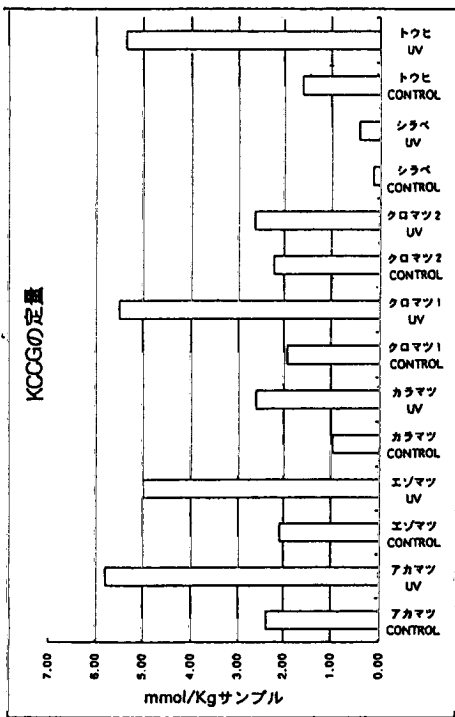


Fig. 12 各種マツ科樹木におけるUV-Bストレス誘導化合物の定量結果

Table 1 UV-B、日射の観測時間

観測日	観測時間		
	山頂	川沿い	圃場
1999.4.30	8:30-17:30		8:30-17:30
5.9	9:30-10:00	8:30-9:00	
	11:30-12:00	10:30-11:00	
5.23	8:30-14:30		9:00-16:00
6.12	10:00-15:00	8:50-9:20	7:00-16:30
		15:50-16:05	
10.9	8:30-15:30	7:40-15:30	
10.10	7:30-15:40	7:00-16:40	
10.24	9:30-12:00	7:40-8:50	
		12:50-14:50	
11.22	10:00-12:00	8:45-9:30	
		12:30-14:00	

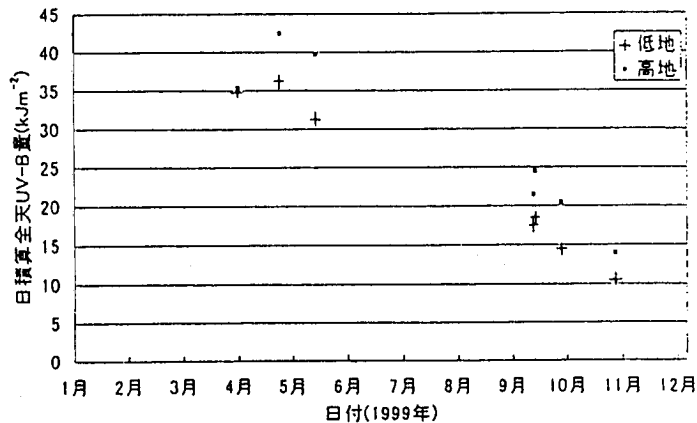


Fig. 14 全天 UV-B の季節変化。高地は赤城山、低地は赤城山の麓または松戸。

Table 2

視程の時間変化(気象庁 地上気象観測原簿より)
川沿いの場合は前橋の、圃場の場合は東京の
観測原簿を使用した。

観測日	視程(km)			
	9時	12時	15時	18時
1999.4.30	40	20	20	10
5.9	8	7	7	5
5.23	3.8	4	5	6
6.12	3.8	6	15	15
10.9	20	15	10	12
10.10	10	15	15	8
10.24	40	40	20	20
11.22	30	20	20	10

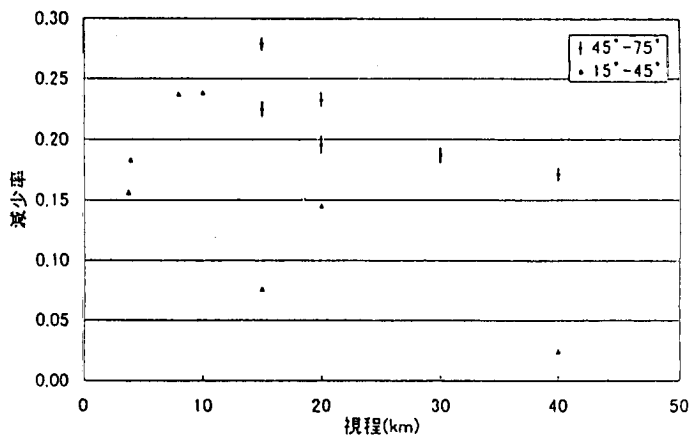


Fig. 15 減少率(本文参照)と視程の関係。太陽天頂角 15 度から 45 度までと 45 度から 75 度までに分けて示した。

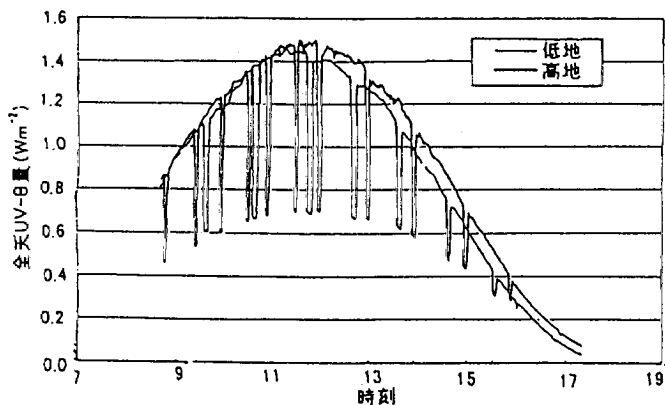


Fig. 13 1999 年 4 月 30 日の赤城山(高地)と松戸(低地)の全天 UV-B の時間変化。棒状に下がっているところで散乱紫外線を測定している。

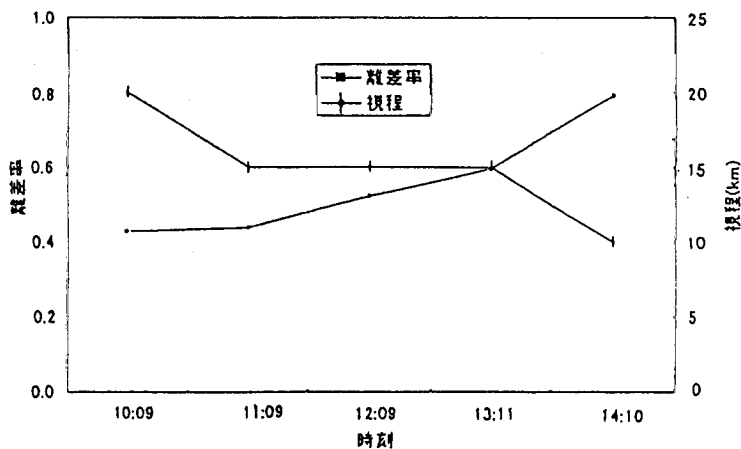


Fig. 16 離差率(本文参照)と視程の時間変化。1999 年 10 月 9 日の例。

Table 3 振幅(A)、位相(P)、平均値(M)を緯度
(θ) の一次関数で表したときの係数の値。

	緯度 (θ) の係数	定数項
振幅 (A)	0.0000183	-0.000240
位相 (P)	-0.01801	-1.104
平均 (M)	-0.0000376	0.00243

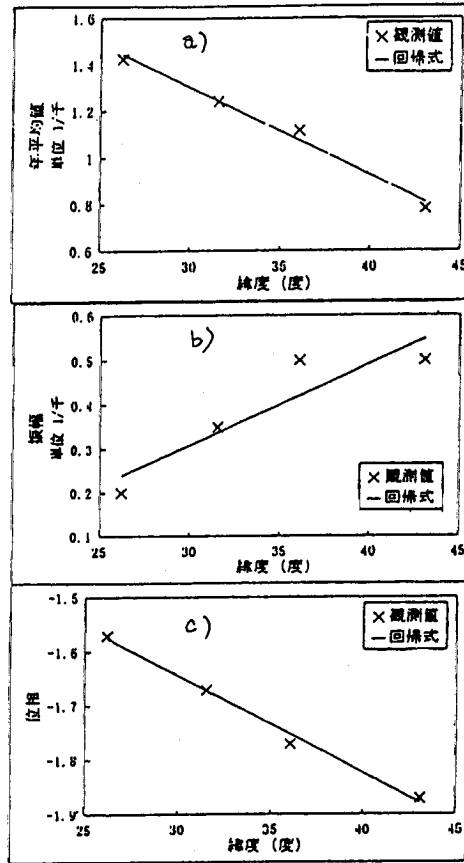


Fig. 17 4地点のUSRを(1)式で表したときの各地点の緯度に対する a) 平均値 M, a) 振幅 A, c) 位相 P (直線は回帰直線)

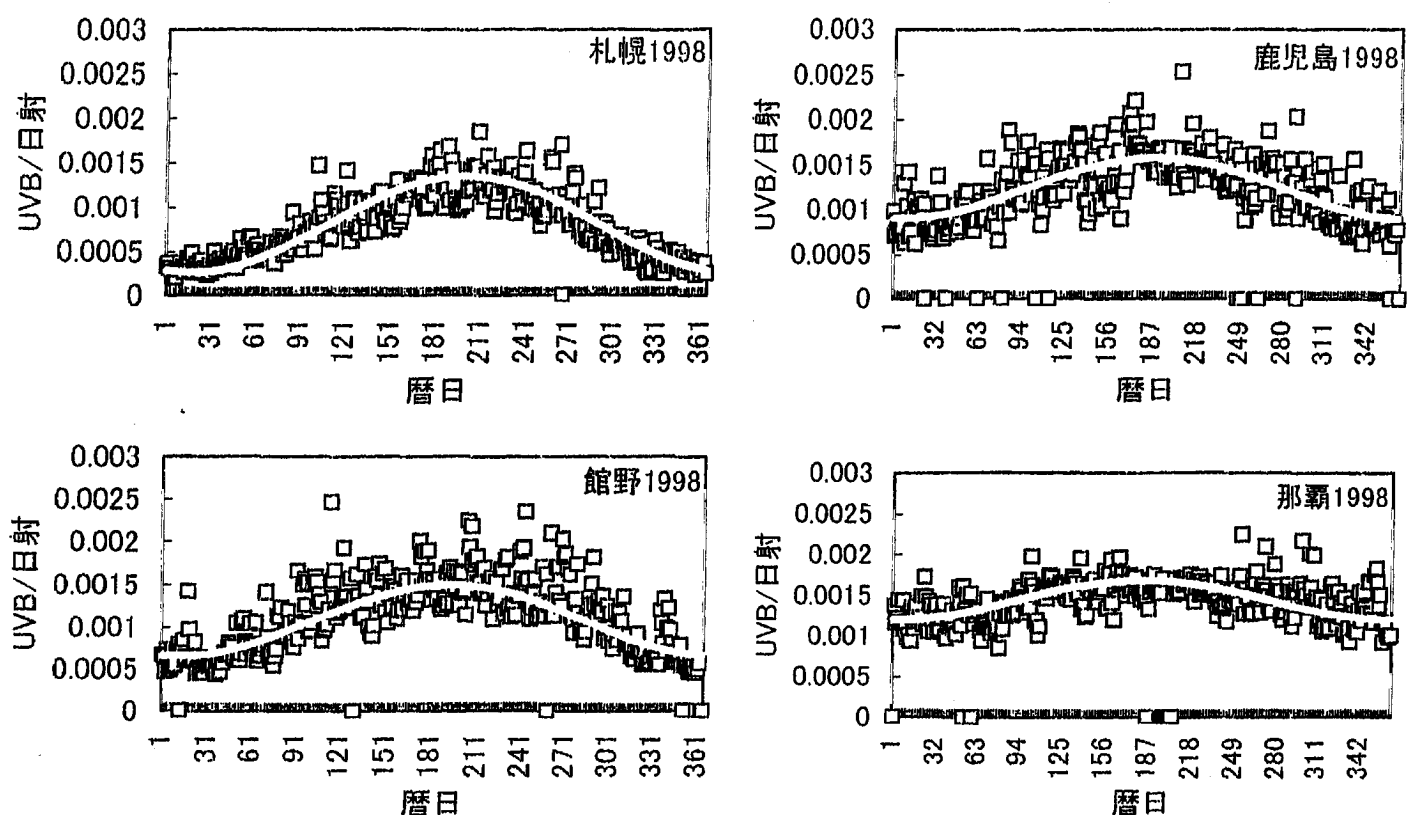


Fig. 18 日積算値から得られた UV-B/日射量 (USR) の季節変化と 4 地点の観測値から推定された式 (1) の結果 (正弦曲線)。

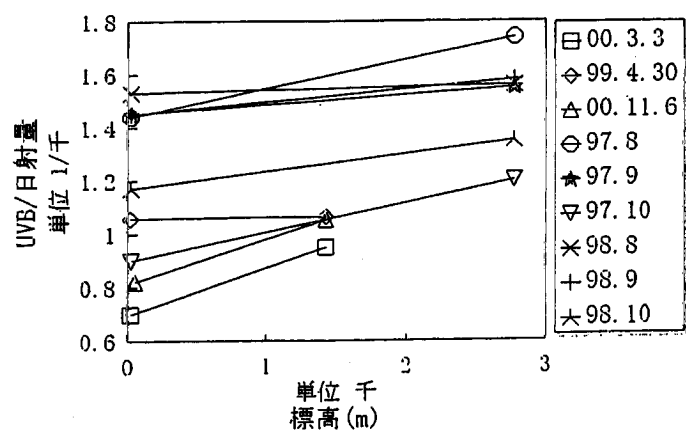


Fig. 19 標高の違いによる UV-B/日射量の変化。1997 年と 1998 年の結果は乗鞍岳と森林総合研究所の月平均値 (青島: 1999)、1999 年と 2000 年の結果は赤城山と松戸の日積算値による。

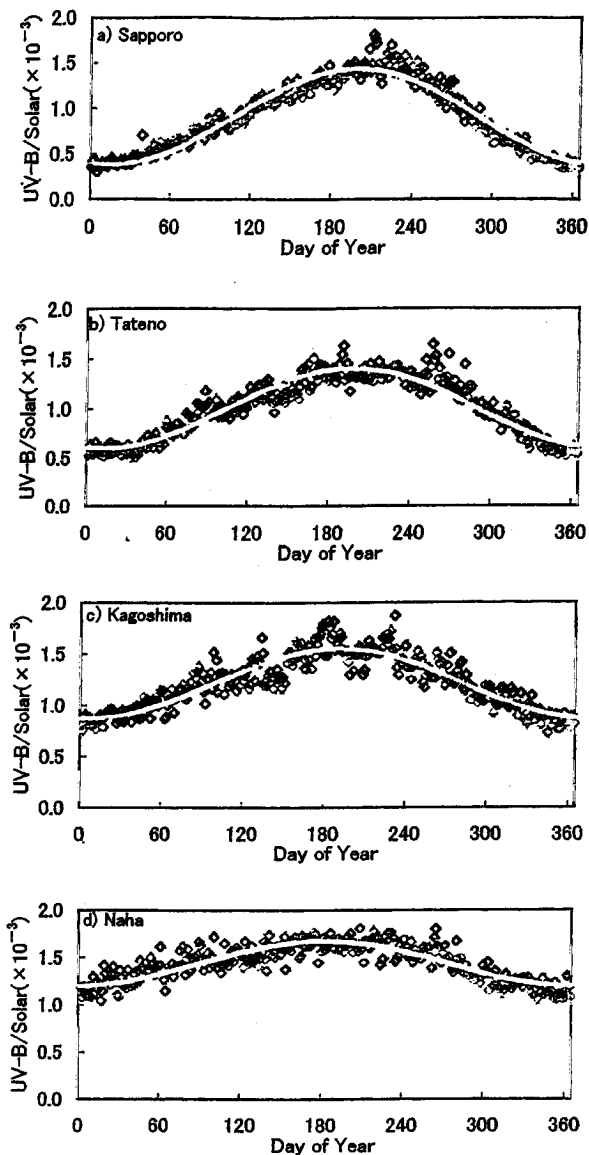


Fig. 20 日別累年平均 UV-B/日射の年変化と最適正弦曲線。

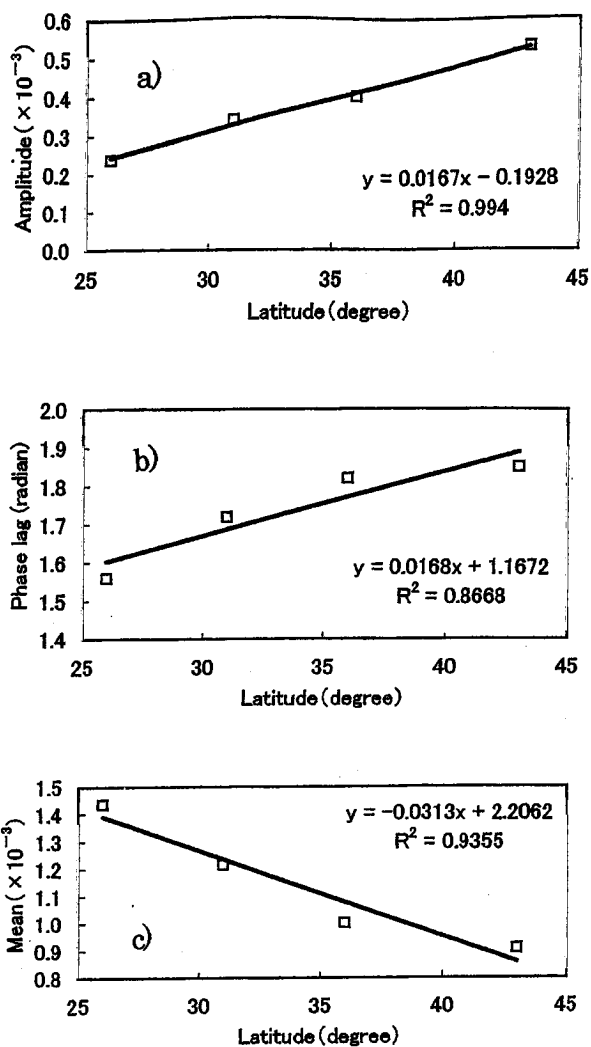


Fig. 21 4地点の正弦曲線の各係数と緯度との関係、実線は一次回帰直線、

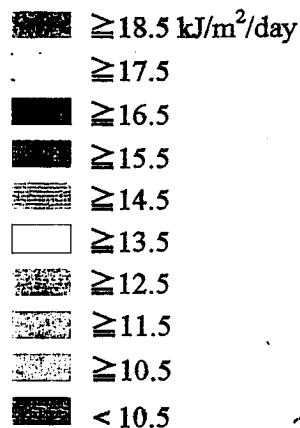


Fig. 22 日積算 UV-B の累年平均値の 1 km メッシュ図