

B- 1 1 地球温暖化の生物圏への影響、適応、脆弱性評価に関する研究

(3) 自然林・人工林の脆弱性評価と適応策に関する研究

④ 人工林生態系の脆弱性評価と適応策

独立行政法人 森林総合研究所

海外研究領域	松本陽介
九州支所森林生態系研究グループ (元、立地環境研究領域 養分環境研究室)	重永英年
東北支所 森林環境研究グループ	三浦 寛
研究管理官	埴田 宏

平成14～16年度合計予算額 17,703千円
(うち、平成16年度予算額 5,052千円)

〔要旨〕 水分ストレスに対する耐性が比較的低いとされるスギ林を対象に、年間を通じたスギ林の潜在的な水要求度を表す「スギ林蒸散降水比予測モデル」と土壌の利用可能な水容量を指標する「土壌水分変動予測モデル」を開発し、温暖化に伴うスギ人工林の脆弱性評価と適応策の検討を行った。

「スギ林蒸散降水比予測モデル」の開発研究において、スギ林の年間の水収支を蒸散降水比(年蒸散量/年降水量)によって広域的に評価し、温暖化に対して脆弱な地域を抽出するモデルを開発した。全国の二次メッシュ気候値からモデルを用いて計算されるスギ人工林の年蒸散量は400mmから800mmの値を示し、温度環境と密接な関係があることを見いだした。現在の気候データを用いた全国規模での計算で、蒸散降水比は0.14から0.67の範囲にあり、スギの広域的な衰退が報告されている関西・瀬戸内地域ならびに関東・甲信地方で高い値を示すメッシュが多く出現することを確認し、蒸散降水比が高いメッシュでは気候変動に対する脆弱なスギ人工林を抽出に有効であることを確かめた。気候変動シナリオに基づいた計算では、関東平野部などにおいて蒸散降水比が高い地域が拡大し、温暖化に対して脆弱な地域であることと評価した。

「土壌水分変動予測モデル」の開発研究においては、土壌水分特性曲線が土壌型により類型化されることを明らかにし、得られた代表的なパラメータを用いてモデルを作製した。モデルは、指数関数貯留型タンクモデルをベースに、過去に得られている278点の土壌水分特性曲線を解析し、この土壌型ごとの代表的な特性曲線に従った蒸散抑制アルゴリズムを組み込んだ。試算の結果、適潤性褐色森林土や黒色土では水分ストレスの発生が少なく、乾性ないし弱乾性褐色森林土および湿性褐色森林土では水分ストレスが発生しやすいことを、新たに明らかにした。これを国土数値情報の土壌データに適用して、土壌水分特性からみた潜在的な保水力マップを作成した。このマップから、瀬戸内から近畿地方、三河地方、および、九州北部と四国地方の沿岸部において、スギ林の水分ストレス発生の危険性が高いと評価した。

さらに、蒸散降水比による水分ストレスの発生予測、および土壌の保水力評価の結果と重ね合わせて検討した結果、以下のように脆弱な地域を評価した。降水量の低下、気温上昇な

どにより空気乾燥が進行し、スギの潜在的蒸散活動の抑制により衰退が懸念される地域として、長野盆地、甲府盆地、関東平野、福島盆地、および十和田湖東方の平野部（三本木原台地）などが、また、土壌の保水力が小さい地域、すなわち、一定の年降雨があっても、降雨間隔が延びるなど、干ばつ頻度が増せばスギ林の衰退が予想される地域は、三河地方、瀬戸内沿岸、および九州地方などであることを明らかにした。また、二つのモデルでスギ林の衰退が懸念されると評価された地域は、兵庫県、岡山県、および香川県など瀬戸内沿岸地域に認められた。さらに、脆弱な人工林を守るための適応策について検討した。

[キーワード] 温暖化、スギ、蒸散、脆弱性予測、土壌水分特性曲線

1. はじめに

IPCCの地球温暖化シナリオによれば、平均気温の上昇だけでなく降水量や降雨特性の変動も予想されている。降雨特性の変動は土壌水分環境に変化をもたらし、樹木の水利用環境の変化を通して植生分布に影響を及ぼすことが予想される。わが国の主要造林樹種であるスギは、水分要求度が高い樹種であることが知られ、湿潤な好適環境下では成長が早い。スギは建築用材としても優れているために、全国で約450万ha植栽され、わが国の森林面積の18%、人工林の約45%を占める。一方で、スギは乾燥に対する耐性が低いために、人工林の中でも水分環境の変動による影響をもっとも強く受ける可能性が高い。

戦後の拡大造林時期に急激に増加したスギ造林地では、九州地方を中心とする西南日本において、1960年代以降、壮齢林分においても乾燥害とみられるスギの枯損が報告されている¹⁾。また、近年、宮崎県ではスギ造林木の干害が増加する傾向にあり、気温上昇と降水パターンの変化が関係していることが示唆されている²⁾。さらに、関東平野、関西、瀬戸内地域でも衰退現象が観察されている³⁾。関東平野での衰退原因については、大気の乾燥化による水ストレスとの関係が指摘されている⁴⁾。また、土壌の保水能力が低い土地ほどスギが衰退していることが明らかにされている⁵⁾。

温暖化にともなう気候・気象環境の変化は、蒸散による水分消費、降水による水分供給および土壌による保水力の影響を介して、スギの水分バランスを変化させ、水ストレスの危険度を高めることが予想される。どのような地域で危険度が増すのか、また、どのような温暖化シナリオのもとで起こり得るのかを評価する必要がある。

2. 研究目的

スギは、わが国に分布する樹木のなかでも、健全な生育のためには大きな蒸散が必要、換言すれば、水要求度が極めて高いという性質を有している⁴⁾。したがって、潜在的な蒸散量を満たせる十分な降水が無い土地では、健全な成長が望むことが出来ず、衰退が始まることが予想されている^{4) 6)}。また、一定の年降水量があっても、温暖化に伴う降雨インターバルの長期化(=干ばつの多発化)が発生すれば、土壌の保水力が小さい土地ではスギ林の衰退が懸念される。

これらのため、本研究では、気候条件に規定される水分環境を蒸散降水比(年蒸散量/年降水量)によって広域的に評価し、温暖化に対して脆弱であるスギの植栽地域を予測すること

を第一の目的とする。葉のガス交換モデルを基にして温度等の環境条件からスギの蒸散量を計算するモデルを開発し、蒸散応答に関して野外で測定した樹液流速度との比較を行う（H14年度）。次に、二次メッシュ気候値からモデルを利用してスギ人工林の蒸散量を全国的に計算し、蒸散降水比の地域分布を明らかにする。蒸散降水比の地域分布とスギ衰退との関連、人工林に占めるスギの植栽割合との関係から、気候変動に対するスギ人工林の脆弱性を評価する指標としての蒸散降水比の有効性を検討する（H15年度）。気候変動シナリオに基づいて蒸散量と蒸散降水比を計算し、温暖化に対して脆弱であるスギの植栽地域を予測する（H16年度）。

一方、立地要因により決定される土壤の保水力は、無降水時における林木への水供給に大きく影響を及ぼす。したがって、土壤の保水容量や水分特性を反映する保水力マップを作製し、水ストレス発生の潜在的危険度を評価することを第二の目的とする。H14年度は既往の土壤水分特性データを収集してデータベース化し、土壤型による類型化を行う。H15年度は、土壤の保水力と水供給特性を明らかにするために、土壤水分変動予測モデルを作製する。土壤水分変動モデルは、既往のタンクモデルに土壤水分特性にもとづいた蒸散抑制アルゴリズムを組み込むことにより改良し、乾燥過程における土壤水分の減少特性を評価可能なものとする。H16年度は、土壤水分特性によって類型化した土壤タイプ毎に土壤水分変動モデルを適用し、国土数値情報の土壤区分に基づいて潜在的な保水力マップを作成した。また、ライシメータに植栽されたスギ成木を用いて降雨遮断乾燥試験を行い、土壤水分特性の違いがスギの水利用に及ぼす影響を検証する。

本研究の第一から得られるものは、その土地ごとの気候変動によるスギ林の脆弱性である。第二からはその土地の土壤が有している干害回避能力である。これらの成果をまとめて、全国レベルでのスギ人工林の脆弱性の評価を行い、さらに適応策を検討することを第三の目的とする。

3. 研究方法

(1) スギ人工林の潜在的水収支（スギ林蒸散降水比予測モデル）

1) 針葉のガス交換特性に基づいたスギ人工林蒸散速度の計算法

当年葉と旧葉の2区分からなる葉群を持ち、一年を通して一定の林分葉量（20ton ha⁻¹）を持つスギ人工林を想定した。当年葉量は5月から増加を開始し、10月に最大値の4ton ha⁻¹に達した後、一定値をとるものとした。樹冠は鉛直方向に等葉量からなる階層（n=40）をなし、各階層の相対照度は積算葉量と林分吸光係数（0.21ton ton⁻¹）からBeer-Lambert則により計算され、気温および相対湿度は外気と同値であるとした。各階層に位置する針葉の蒸散速度を、気温、相対湿度、光強度から、Farqharの生化学的光合成モデルとBallのコンダクタンス—光合成モデルを用いて求め、階層で積算することで林分蒸散速度を計算した。Farqharモデルのキーパラメータ（V_{cmax}、J_{max}、R_d）、Ballモデルの係数値については、スギ成木当年生針葉のガス交換速度の計測値を基に決定した。その他のパラメータについては文献値を利用した⁷⁾。

2) スギ成木の樹液流速度と気象条件から計算される林分蒸散量との関係

森林総合研究所千代田試験地（茨城県千代田町）に植栽されたスギ人工林（1980年植栽）内の3個体（樹高約15m、胸高直径約15cm）を対象として、2003年10月から2004年2月下旬の期間に樹液流速度の測定を行った。樹液流速度は、測定木の地上高1m位置の幹に埋設したTDP

プローブ (TDP-30、DYNAMAX) のニードル間温度差 (ΔT) を10分間隔で計測し、以下のGranier式により計算した。

$$K=(\Delta T_{\max}-\Delta T)/\Delta T \quad V(\text{cm hour}^{-1})=0.0119 \cdot K1.231 \cdot 3600$$

式中の ΔT_{\max} については、流速の計算を行う当日 (n) および翌日 (n+1) の2:00から5:00にかけて記録された ΔT (ΔT_{\max_n} 、 $\Delta T_{\max_{n+1}}$) を基準とした。解析には、 ΔT_{\max_n} と $\Delta T_{\max_{n+1}}$ との差が0.2℃未満にある測定日のデータを利用した。また、10分間の隣接する測定データ間で0.2℃を超える $|\Delta T|$ が観察された日はノイズとして除外した。試験林分に隣接する開放地で計測された10分間隔の気温、湿度、全天日射量から、1) で述べたモデルを利用して林分蒸散速度を計算し、液流速度との関係を調べた。

3) 全国の2次メッシュ気候値からのスギ人工林蒸散量と蒸散降水比の計算

2次メッシュ気候値は、気候統一シナリオVer.2(気象庁)をもとに2次メッシュ化を行った日本域2次メッシュバージョン暫定版(農環研作成)を利用した。2次メッシュの月別の最高、最低および平均気温から、気温の日変化(30分間隔)を各月別に算出した。全国の気象官署で観測された平均気温と蒸気圧(月別平年値)の関係を基に2次メッシュの月平均気温から蒸気圧を求め、気温の日変化から蒸気圧を一定と仮定して相対湿度の日変化を算出した。2次メッシュの中心位置と時刻から各月別に全天日射量と散乱日射量の日変化を計算によって求め、それぞれを各月の晴天または曇天区分の値とした。気温、相対湿度、光強度の日変化から1) で述べたモデルを利用して各月の晴天区分と曇天区分の日蒸散量を求めた。月の総日数のうち晴天区分とする日数の比率を分配係数とした。分配係数は、晴天区分の日日射量に月の総日数を乗じた値と分配係数との積、曇天区分の日日射量に月の総日数を乗じた値と(1-分配係数)との積との両者の和が、2次メッシュの月日射量と等しくなるように決定した。各区分で計算される月蒸散量を分配係数で加重平均して月蒸散量とした。各2次メッシュの蒸散降水比は年蒸散量と年降水量との比とした。

4) 蒸散降水比と人工林に占めるスギの植栽割合との関係

各2次メッシュにおける林種別面積は、1990年度林業センサスの市町村別林種別面積⁸⁾と1997年度国土数値情報の3次メッシュ別森林面積(国土交通省)から計算した。ある市町村に属する3次メッシュを対象として、国土数値情報から森林面積の総計を求め、3次メッシュ毎に総計に対する森林面積の比率を計算し、比率に基づいて市町村別林種別面積を各3次メッシュに配分した。配分の際には、同一市町村では林種別の割合は3次メッシュ間で不変とした。2次メッシュの林種別森林面積は3次メッシュの値を合算することによって得た。2次メッシュを蒸散降水比の値によって区分し、各区分で人工林の総面積に対するスギ、ヒノキおよびマツの割合に関する二次メッシュ値の平均を算出した。スギの造林適地は温量指数が65~70℃以上とされている⁹⁾ことから、温量指数が65未満の二次メッシュは解析から除外した。また、スギ人工林が存在しない二次メッシュについても同様に除外した。

5) 温暖化シナリオに基づく蒸散量の変化と脆弱な植栽地域の判定

日本域2次メッシュバージョン暫定版(農環研作成)における2081~2100年の気候値に基づき、3)と同様の方法で蒸散量と蒸散降水比を算出した。蒸散降水比の分布の変化から、温暖化に対して脆弱であるスギの植栽地域を予想した。

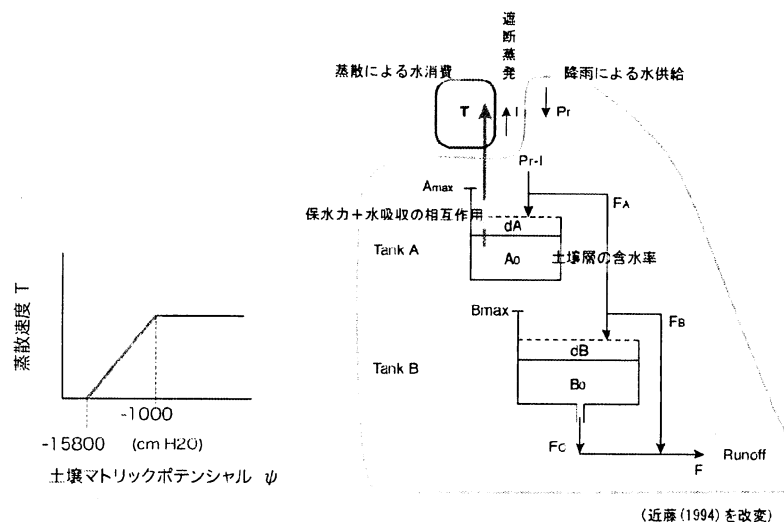


図1 土壤水分変動予測モデル(右)と蒸散抑制アルゴリズム(左)
オレンジ色の矢印と斜めの線で示された部分が、蒸散と土壤水分特性の相互作用を表現する。

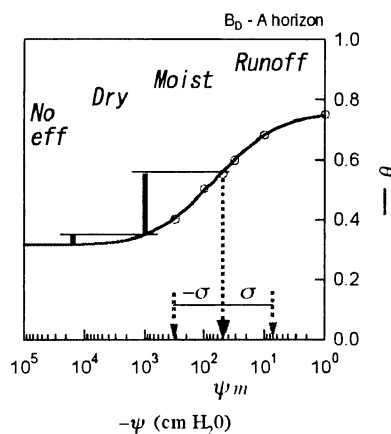


図2 対数正規分布モデル(Kosugi, 1994)による土壤水分特性曲線
(含水率 θ -マトリックポテンシャル ψ の関係)と蒸散抑制の模式図
Moist領域の水は植物が自由に利用できるが、Dry領域の水を利用するときには土壤の吸引圧のために蒸散に対する抵抗が大きくなる。Runoff ($-\psi < 50$ cm)、重力水の速やかな排水; Moist ($50\text{cm} < -\psi < 1000$ cm)、植物が容易に利用可能な土壤水; Dry ($1000\text{ cm} < -\psi < 15800$ cm)、蒸散抑制; No eff ($15800\text{ cm} < -\psi$)、蒸散に利用できない無効水分。

(2) スギ人工林土壌の保水力 (土壌水分変動予測モデル)

1) 土壌水分特性の類型化 (H14)

Kosugi¹⁰⁾は、スギ林土壌を対象に調査分析された真下の多数の採土円筒データ¹¹⁾を解析して、土壌水分特性に関する対数正規分布モデルを開発した。対数正規分布モデルは、簡明な4つのパラメータ (ϕ_m : メジアン孔隙径に対応する圧力水頭、 σ : 孔隙径分布の幅、 θ_s : 最大容水量含水率、 θ_r : 残留含水率) を用いて、土壌水分特性曲線をきわめてよく再現する。H14年度には、九州地方の131断面499試料の各種森林土壌の土壌水分特性曲線を描いて、土壌型による類型化の妥当性を検証した。その上で、土壌水分特性曲線の対数正規分布モデルを真下のデータ¹¹⁾に改めて適用し、278試料の4パラメータを決定し、土壌水分特性曲線の類型化を行った。

2) 土壌水分変動予測モデル (H15)

H15年度には、土壌水分変動予測モデルを作成した。モデルのベースとして、指数関数型貯留量のタンクモデル¹²⁾を採用し、これに土壌水分特性曲線にしたがった蒸散抑制アルゴリズムを組み込んで改良した(図1)。土壌水分特性曲線は、前述の対数正規分布モデル(Kosugi、1994)で与えた(図2)。改良したモデルは、以下の特徴をもつ。土壌層(1m)と風化層(2.5m)の2層を持ちいずれも均質、土壌層の水貯留量は有効容水量(圃場容水量含水率 θ_f -残留含水率 θ_r)の範囲で変動、スギの蒸散速度は土壌マトリックポテンシャル(ϕ)が $-1,000 \text{ cm H}_2\text{O}$ で低下し始め、 $\phi = -15,800 \text{ cm H}_2\text{O}$ で停止する(図1)、降雨時の過剰の土壌水分は降雨の1日後には圃場容水量まで減少する。

3) スギ成木の降雨遮断乾燥試験 (H16)

土壌水分特性の違いとスギの水利用の関係を野外で検証するために、森林総研・千代田試験地の平面ライシメータにおいて、降雨遮断乾燥試験を行った。平面ライシメータは、 $18 \times 24 \text{ m}$ の敷地にタテヨコ深さ $2 \times 2 \times 1 \text{ m}$ のコンクリート製マスが16基設置され、第三紀層の山砂(山砂区)と関東ロームB層(ローム区)が左右8基ずつに充填されている。1980年に中央部にスギ、両脇にヒノキの配置で $10,000 \text{ 本/ha}$ の密度で苗木が植栽された。2002年10月時点の立木密度は $3,200 \text{ 本/ha}$ で、林冠は閉鎖し供試木は林冠に達していた。降雨遮断乾燥試験には、山砂区とローム区のライシメータ内に残存していたスギ各1本(山砂区: 樹高 12.8 m 、胸高直径 13.9 cm 、ローム区: 同 13.6 m 、同 13.2 cm)を用いた。2004年2月から7月の間は、供試木には十分な水を与えた。7月29日にライシメータ全体を飽水させた後、地上 2 m の高さにビニール製の屋根を掛けて降雨遮断した。観測期間中は、深度別にADR水分計で含水率を、テンシオメータで土壌マトリックポテンシャルを10分間隔で自記記録した。降雨遮断開始後は、樹冠の葉の状態を観察した。

4) 潜在的保水力マップ (H16)

平16年度には、土壌水分特性に基づいて区分した4つの土壌類型に対して、土壌水分変動予測モデルを適用し、水ストレス発生危険度を評価した。モデルは、水分特性曲線以外の条件を一定にして、宮崎県串間の20年間(1981-2000)のアメダス降水量データを与えて試算した。モデル上の土壌層のマトリックポテンシャル ϕ が $-1,000 \sim -15,800 \text{ cm H}_2\text{O}$ の範囲にあるときは水ストレスが発生していると定義し、土壌類型毎の年平均水ストレス発生日数を算出した。また、4区分した土壌類型毎に、水分特性曲線から水分ポテンシャルが $-50.1 \sim 1,580 \text{ cm H}_2\text{O}$

に相当する孔隙率を算出し、これを各土壌類型に対する保水力の指標（有効保水容量）とした。潜在的保水力マップは、国土数値情報の土壌区分に基づいて3次メッシュ毎に与えた有効保水容量を2次メッシュ単位で平均して土壌スコアを算出して描いた。ただし、北海道は、褐色森林土の図示単位が他の都府県と大きく異なることから作図対象から除外した。

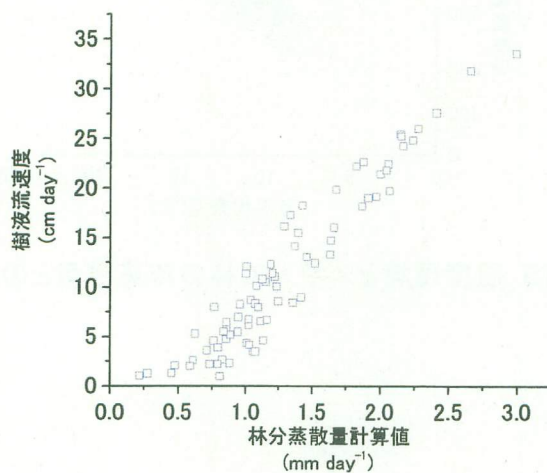


図3 モデルによって計算される仮想林分の日蒸散量と樹液流速度との関係

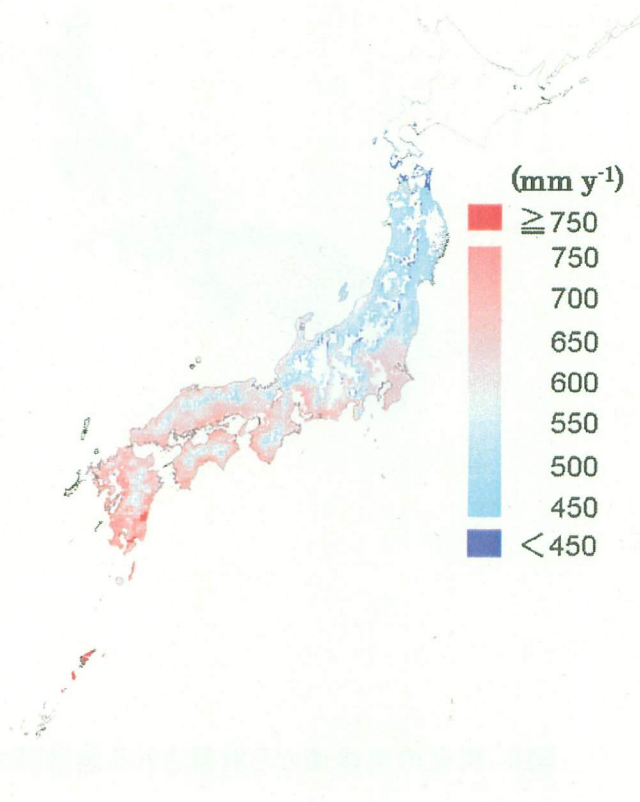


図4 現在の気候値から計算されるスギ人工林の年蒸散量

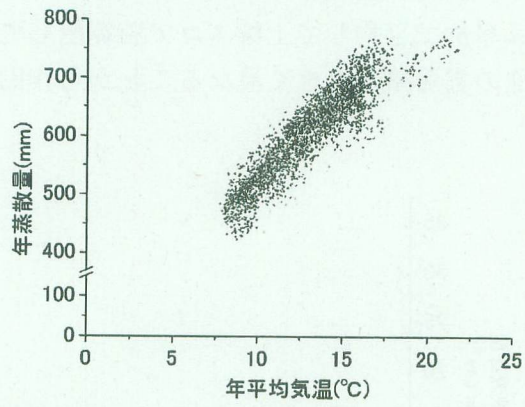


図5 温度環境とスギ人工林の年蒸散量との関係

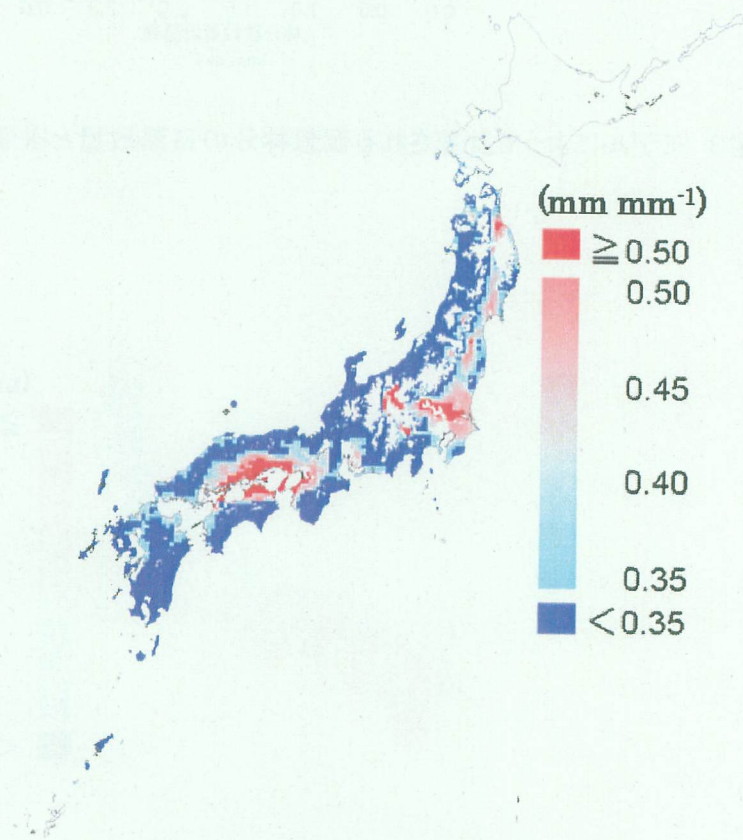


図6 現在の気候値から計算される蒸散降水比

4. 結果・考察

(1) スギ人工林の潜在的な水収支（スギ林蒸散降水比予測モデル）

1) 気象環境の変動に対するスギの蒸散応答

樹液流速は日の出に数時間遅れて上昇を開始し、気温、空気飽差が最大となる日中に最高値を示し、日没の数時間後にほぼ停止するという日変化を示した。日樹液流速は、秋から冬にかけての気温、空気飽差の低下に対応して減少し、また、降雨日、曇天日には低い値をとった。気温、湿度、日射の観測値からモデルを用いて計算した仮想林分の蒸散速度は、樹液流速の観測値と2時間程度のずれがみられた。しかし、両者の日変化パターンは概ね一致していた。日樹液流速が低い日には日蒸散量が相対的に高めに計算される傾向があるが、両者の相関は高かった ($R^2=0.87$ 、図3)。針葉のガス交換特性を基にしたモデルは、気象環境の変動に対する蒸散応答の予測に有効であると考えられた。

2) 全国の2次メッシュ気候値から計算されるスギ人工林の蒸散量

モデルを利用して現在の二次メッシュ気候値から計算されるスギ人工林の年蒸散量は、400mmから800mmの範囲にあった（図4）。千葉県下でのスギ人工林で、ヒートパルス法を用いた樹液流速の測定から蒸散量を推定した事例^{1,3)}では、年蒸散量は610mmから760mmであった。蒸散量は林分葉量の影響を受けるため直接的な比較は難しいが、蒸散量が林分葉量に比例すると仮定すると、上記の事例では葉量 $20t\ ha^{-1}$ あたりの値は約500mm弱となる。本研究で対応する二次メッシュでの蒸散量は620mmと高く算出されるが、計算において降雨時の葉の濡れによる蒸散の停止を考慮していないことなどが理由として考えられる。年平均気温と年蒸散量とはほぼ直線関係にあった（図5）。年蒸散量の全国平均値で除することで標準化した蒸散量 (y) と年平均気温 (x) との単回帰式は $y=0.042x+0.45$ ($R^2=0.83$) となった。近藤ら^{1,4)}は全国の66地点の気象官署の気象データから熱収支法を用いて日本の森林の蒸散量を300mmから800mmと推定している。この場合には、標準化した蒸散量 (y) と年平均気温との単回帰式は $y=0.041x+0.48$ ($R^2=0.81$) となり、回帰係数によって示される温度環境に対する蒸散量の変化は本結果と概ね一致していた。地理的な差異に起因する年平均気温で $1^{\circ}C$ の温度環境の違いは、平均的には約4%程度の蒸散量の変化をもたらすことが予想される。

3) 蒸散降水比の地域性とスギの植栽割合との関係

現在の年蒸散量と年降水量を用いた現在の蒸散降水比は0.14から0.67の範囲にあり、関西・瀬戸内地域、関東・甲信地方で高い値を示すメッシュが多く出現した（図6）。両地方では、社寺林等で広域的なスギ衰退現象が観察されている³⁾。また、関東では群馬県、埼玉県利根川沿いで蒸散降水比が高いが、この地域は関東平野のなかで衰退が著しいことが報告されている⁶⁾。人工林面積に占めるスギの割合は蒸散降水比が高いメッシュで低下する傾向にあり、マツの植栽割合はスギとは逆の変化を示した（図7）。一般的に、山腹斜面では斜面下部から上部にかけて土壌の水分環境が不良となることから、水分に対して要求度の高いスギは斜面下部に植栽され、中部にはヒノキ、上部にはマツといった乾燥耐性の樹種間差に対応して植え分けが行われる。図7で示された関係は、降水による水分供給に対して水分消費量が多く、水分ストレスの危険度が潜在的に高い地域では、人工造林の際にスギの代わりに耐乾性が高いマツが植栽樹種として選択されてきたことを示唆する。これらの結果から、気候条件に規定される水分環境はスギの生育に影響を及ぼす要因であり、蒸散降水比は気候

変動に対するスギ人工林の脆弱性を評価する指標として有効であると考えられる。

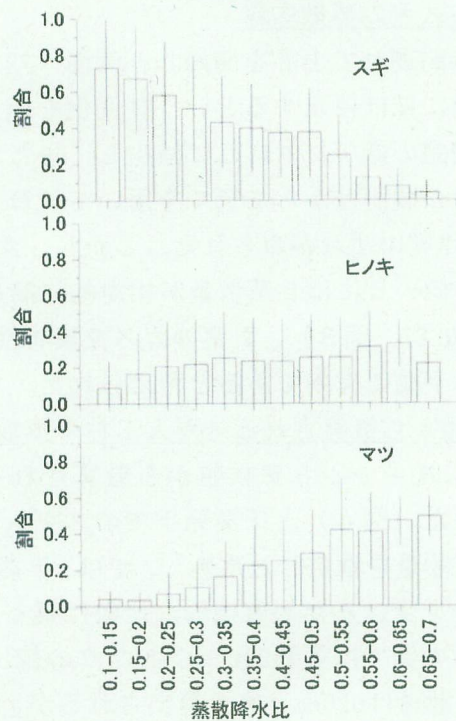


図7 次メッシュの蒸散降水比と人工林面積に占める樹種割合

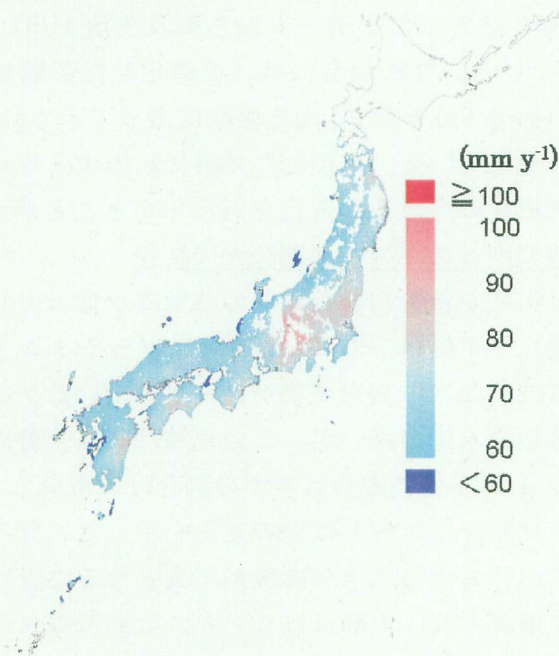


図8 気候シナリオ(2081-2100)から計算されるスギ人工林の蒸散増加量

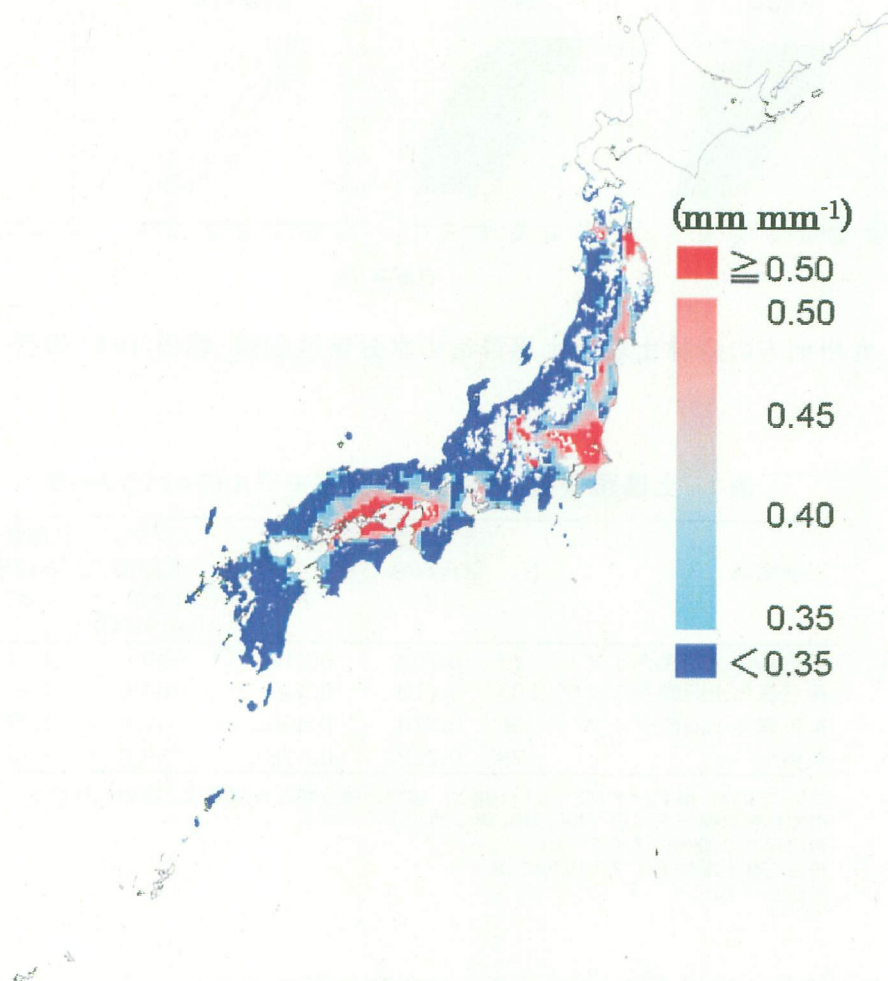


図9 気候シナリオ(2081-2100)から計算される蒸散降水比

4) 蒸散降水比から判定した温暖化に対して脆弱なスギの植栽地域

気候統一シナリオによれば、スギ人工林が存在している地域では、2081年から2100年の時期には年平均気温は2.2℃から3.2℃の範囲で上昇する。本シナリオに基づいた場合、モデルによって計算される年蒸散量は現在の値に比べて50mmから100mm程度増加する(図8)。年降水量は平均して約150mmの増加となるが、700mm以上の増加、200mm程度の減少を示す地域がみられる。蒸散降水比は、降水量の増加が大きい中国地方の瀬戸内側、九州北部で低下するが、九州中南部の太平洋岸、関東平野、青森県北部などでは上昇する。スギの生育に不適な気候条件の閾値を蒸散降水比で0.5とした場合、温暖化によって、東北地方の一部と関東平野の広範囲で閾値以上のメッシュがあらたに出現する(図6、図9)。関東平野部では、温暖化の進行によって生じる水分環境の悪化が、現在発生しているスギの衰退をさらに加速させる可能性が示唆される。閾値以上の二次メッシュに生育するスギ人工林面積は、現在の気候条件では23,953ha、温暖化シナリオでは42,805haと計算され、後者は全国のスギ人工林面積の約1%に相当する。

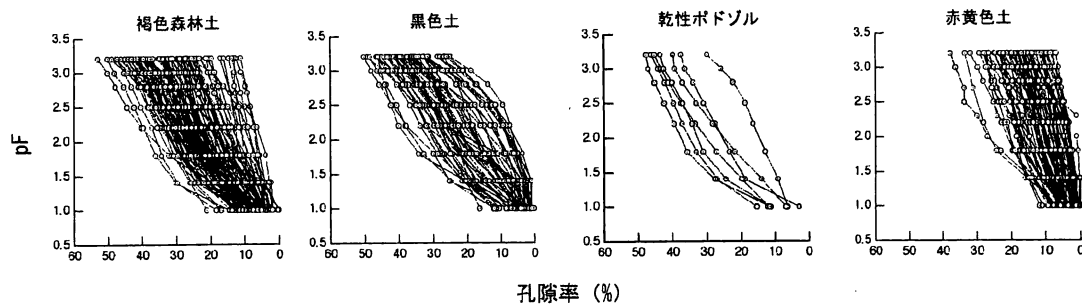


図10 九州地方の森林土壌の土壌群毎の水分特性曲線(堀田(1997)のデータから作図)

表1 土壌類型毎の対数正規分布モデルの4パラメータ

土壌類型	N	最大容水	残留含水	メジアン	孔隙径分
		量含水率 θ_s	率 θ_r	孔隙径 ψ_m (cm H ₂ O)	布の幅 σ
褐色森林土乾性タイプ	47	0.752	0.317	-43.6	1.21
褐色森林土適潤性タイプ	103	0.710	0.542	-84.6	1.41
褐色森林土湿性タイプ	50	0.770	0.450	-47.6	1.37
黒色土	78	0.722	0.578	-59.6	1.17

解析に用いた原データは、真下(1960)。林野土壌分類との対応は、次のとおり；
 褐色森林土乾性タイプ：BA, BB, BC, BD(d)
 褐色森林土適潤性タイプ：BJ
 褐色森林土湿性タイプ：BDwとBE
 黒色土：BI

(2) スギ人工林土壌の保水力(土壌水分変動予測モデル)

1) 土壌水分特性の類型化

国土数値情報(自然地形メッシュ G01-56M、土地利用メッシュ L03-62M)¹⁵⁾による土壌区分と森林面積から算出すると、日本の森林に出現する主な土壌群は、褐色森林土(69%)、黒ボク土(13%)、ポドゾル(4%)、赤黄色土(2%)である。このうち、スギは主として適潤性ないし湿性の褐色森林土と黒色土に植栽されている。これらの主要な土壌群を対象に、九州地方で収集された131断面499試料の土壌水分特性曲線¹⁶⁾をデータベース化し図化した(図10)。土壌水分特性曲線の形状には土壌群毎の傾向が認められた。褐色森林土および黒色土は、pF1.0~3.2まで全体にわたって曲線の傾きが緩やかで、含水率の変化に対して水分ポテンシャルが徐々に変化している。しかし、褐色森林土の中には水分特性曲線の傾きが緩やかなものと急なものが混在している。それに比べて、赤黄色土は全体に傾きが急であり、含水率のわずかな変化に対して水分ポテンシャルが急激に変化している。ポドゾルは、低水分ポテンシャルの領域では傾きが緩やかであるが、pF1.5~1.8前後を境に傾きが急になる。土壌群ごとに類型化した堀田(1997)の土壌水分特性データは、真下(1960)が土壌構造で類型化したものと同様な傾向を示しており、褐色森林土群については土壌型の違いによって、その他は土壌群の違いによって、土壌水分特性を類型化できることが示唆された。そこで、全

孔隙率のデータを備えて、対数正規分布モデルの適用が可能な真下¹¹⁾の112断面278点の円筒解析データに対して θ_s 、 θ_r 、 ϕ_m 、 σ の4パラメータを決定した。このうち ϕ_m と σ を変数としてパーティション分析 (JMP 5.1 ソフトウェア、SAS Institute, NC, USA) を繰り返して、次の4つの土壌タイプに類型化した：褐色森林土乾性タイプ、褐色森林土適潤性タイプ、褐色森林土湿性タイプ、黒色土 (表1)。

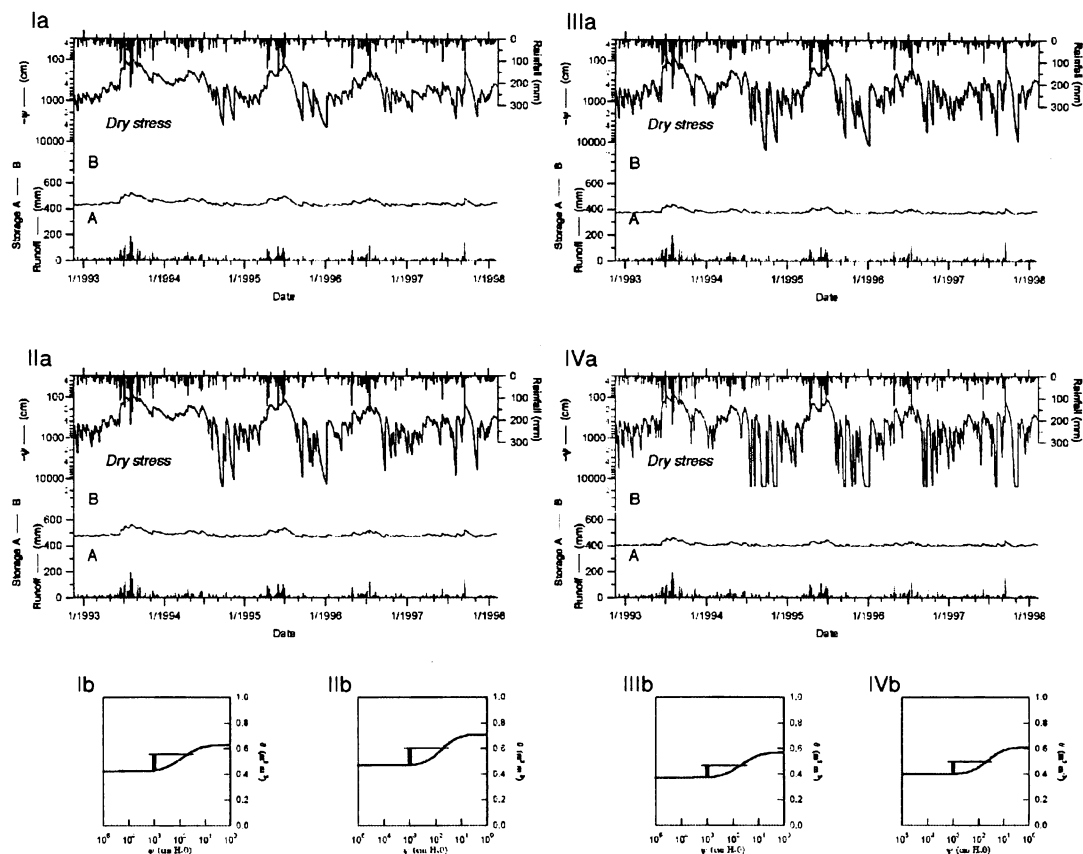


図11 土壌類型毎に得られた水分特性曲線パラメータの平均値を用いて解析した水分変動の予測結果 (Ia~IVa) と土壌水分特性曲線 (Ib~IVb)

I: 褐色森林土適潤性タイプ、II: 黒色土、III: 褐色森林土湿性タイプ、IV: 褐色森林土乾性タイプ、Ia~IVaの各グラフは、上から降水量(mm)、土壌水分ポテンシャル ψ (cm H₂O)、タンクA貯留量(mm)、タンクB貯留量(mm)、流出量(mm)。1981~2000年の宮崎県串間アメダスデータ適用のうち、1993~1997年を表示。

表2 土壌類型毎の水ストレス年間発生予測日数と有効保水容量

土壌類型	N	水ストレス($\psi_s < -1000\text{cm}$)			有効保水容量 $\theta_f - \theta_r$
		年間発生予測日数			
		平均	最小	最大	
褐色森林土乾性タイプ	47	92	27	147	0.092
褐色森林土適潤性タイプ	103	55	8	110	0.136
褐色森林土湿性タイプ	50	81	26	129	0.096
黒色土	78	64	13	114	0.132

2) 土壌水分変動予測モデル

モデル上の土壌水分の変動は、土壌類型毎に明瞭な違いが認められた(図11)。土壌類型毎の水ストレス発生日数を有効保水容量とともに表2に示す。水ストレス発生日数が最も多いのは褐色森林土乾性タイプで、次いで、褐色森林土湿性タイプ、黒色土、褐色森林土適潤性タイプの順であった。予想に反して、褐色森林土湿性タイプは、褐色森林土適潤性タイプや黒色土よりも水分ストレスが発生しやすい結果となった。褐色森林土湿性タイプの有効保水容量は0.096であり、適潤性タイプの0.136や黒色土の0.132よりも著しく小さい。この原因は、褐色森林土湿性タイプは、降雨直後に重力排水で急速に水分が流出した後に残る植物が容易に利用可能な水分量は意外と少なく、無降雨期間が続くと水ストレスが発生しやすいためであると考えられた。また、宮崎県および愛媛県で乾燥によるスギ衰退の発生地域を平成14~15年に現地踏査した際にも、斜面下部から谷底にあたる褐色森林土湿性タイプが分布する部位でスギの立ち枯れが散見され、以上のような見方を裏付ける現象が観察された。表2に示したモデルで試算した水ストレス発生日数の大小関係は、土壌水分特性曲線から算出した有効保水容量の大小関係と、ちょうど逆の関係を示した(表2)。そこで、有効保水容量は土壌の潜在的な保水力の指標として有効であると判断し、これを用いて全国マップを描くこととした。

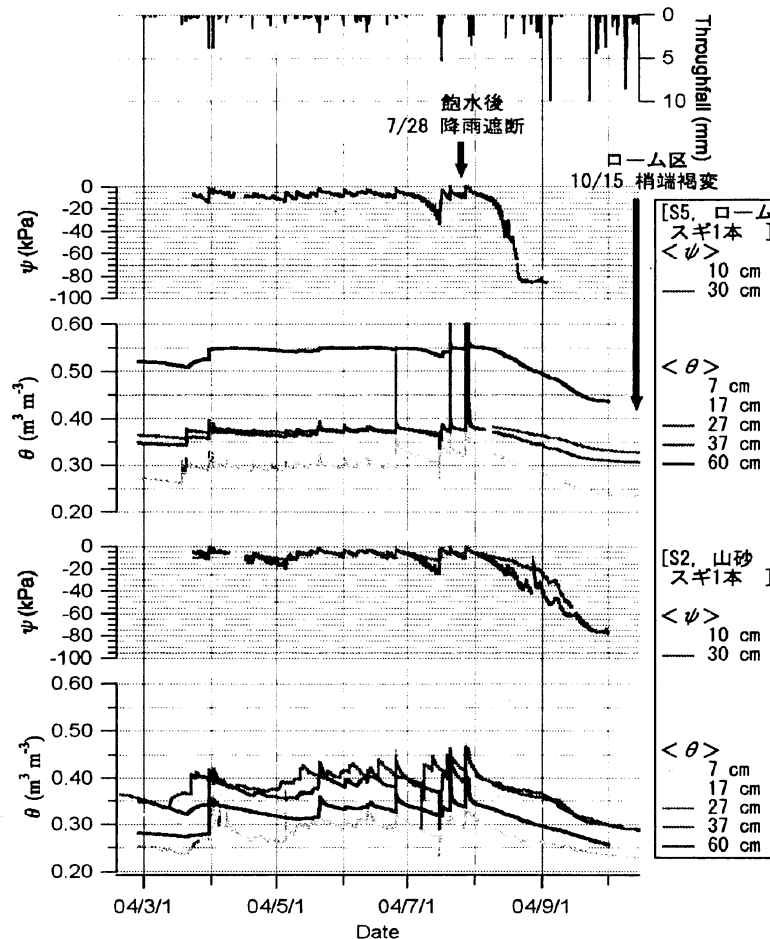


図12 火山灰ローム土と山砂土を充填したライシメータに植栽されたスギ成木の降雨遮断乾燥試験にともなう土壌水分の変動



図13 スギ成木に対する降雨遮断開始(7/28)後の梢端の変化
 上段がローム区、下段が山砂区。左から、9/16、10/15、11/16、12/17。ローム区では10/15には褐変が認められ、11/16には梢端部分全体が褐色になった。

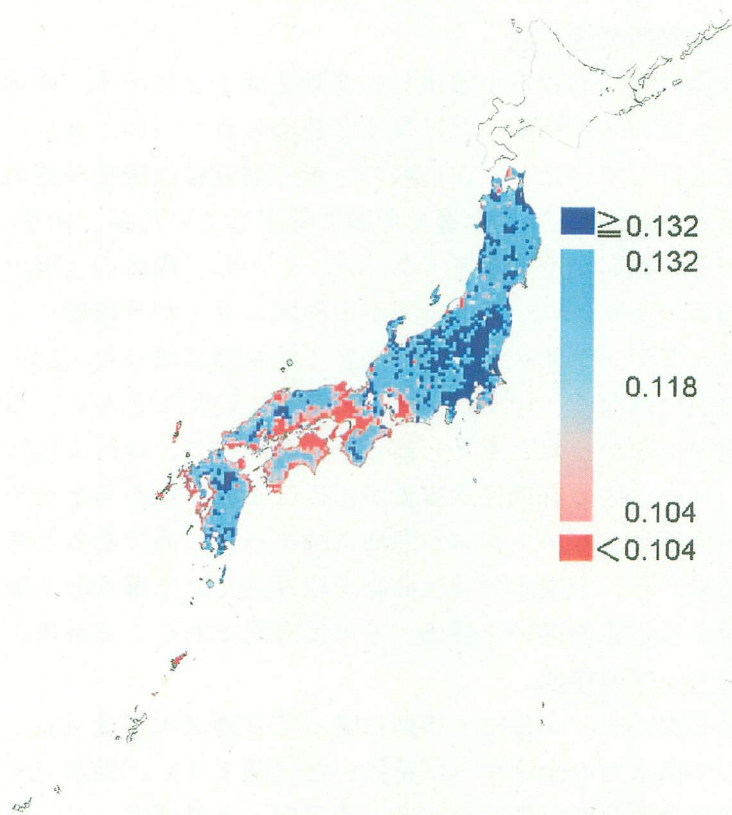


図14 土壤水分特性に基づいて4つに類型化した主要な森林土壤の潜在的保水力マップ
 青色が濃いほど保水力が大きく、赤色が濃いほど保水力が小さいことを示す。



図15 各土壌類型が優占する3次メッシュが2次メッシュの
森林土壌面積の50%以上を占める区画の分布図

左から、褐色森林土乾性タイプ、褐色森林土湿性タイプ、黒色土、褐色森林土適潤性タイプ。

3) スギ成木の降雨遮断乾燥試験

降雨遮断成木乾燥試験における土壌水分の変動を図12に示す。降雨遮断開始78日後の10月15日には、ローム区のスギ梢端にだけ褐変が認められた(図13)。12月17日にはローム区の褐変はさらに進行していたが、山砂区のスギの樹冠には変化が認められなかった。土壌の含水率は、両区とも9月末までは全層で急激に低下していたが、10月に入ると低下速度が弱まり、ローム区でその傾向がやや顕著であった。しかし、両区の土壌マトリックポテンシャルの違いはより顕著であり、ローム区の方が山砂区より1か月程度早く低下しており、8月下旬には -80kPa に達してテンシオメータでは測定不能状態になった(図12)。両区のスギのサイズには大きな違いはなく、いずれも林冠に達していたことから、蒸散によるスギの水消費速度に大きな違いはなかったと考えられる。したがって、ローム区においてのみ梢端枯れが発生したのは、ローム区の有効保水容量が山砂区より少なかったために、短期間に土壌水分ポテンシャルが低下し、水ストレスが急激に強まったためであると考えられた。このスギ成木乾燥試験の結果から、土壌水分特性曲線を組み込んだ土壌水分変動予測モデルは、スギの水ストレスに対する応答の違いを評価するのに有用であることが確かめられた。

4) 潜在的保水力マップの作成

国土数値情報の三次メッシュ毎に土壌型に従って有効保水容量(表2)を与え、二次メッシュ単位で平均して保水力の全国マップを描いた(図14)。保水力の面からスギの成長に対する水ストレス発生危険度が高い地域は、瀬戸内・近畿地方、三河地方や九州北部・四国地方の沿岸部などの西南日本に集中していた。これは、中部・関東から東北地方や、西南日本でも内陸の山間地には褐色森林土適潤性タイプや黒色土が広く分布するのに対して、西南日本の沿岸部には乾性タイプの褐色森林土が多く分布していることに起因する(図15)。土壌の潜在的な保水力に関するこのような解析結果は、西南日本を中心に多くの乾燥害が発生していること^{2) 3)}と整合性がある。一方、これまでスギ衰退が報告されている^{5) 6)}関東

地方については、土壌の保水力の解析からは水ストレスの発生危険度が高い地域として抽出されなかった。その理由として、本研究で解析した蒸散降水比や大気の乾燥化⁴⁾などで指摘されるように、関東地方のスギ衰退は降水量が少ないことによる気象要因が主たる要因となっていることが考えられる。これに対して、気候統一シナリオにもとづいた蒸散降水比の将来予測では、瀬戸内から九州地方にかけては降水量が増加するために、水分環境はむしろ改善すると評価された。しかし、総降水量が増加しても仮に降雨が集中して降雨発生間隔が長くなれば、多量の降水は重力水として速やかに流出して土壌中に貯えられず、スギが利用可能な水分は増えない。このような土壌の保水特性を考慮すれば、降水量変化の影響はスギの水利用とのダイナミックな解析による評価が不可欠であり、そのためには、水ストレスを予測するモデルについても、蒸散降水比予測モデルと土壌水分変動予測モデルを一体化する必要がある。また、ここに示した保水力マップの解析では土壌深を1mで一定と仮定している。土壌深に関する全国レベルのインベントリーデータが整備されていないために、このような仮定のもとで解析した。しかし、土壌の深さは有効保水容量に大きな影響を及ぼす重要な因子であり、土壌の保水力評価の信頼性を向上させるためには、全国的な土壌深データの整備が必要である。

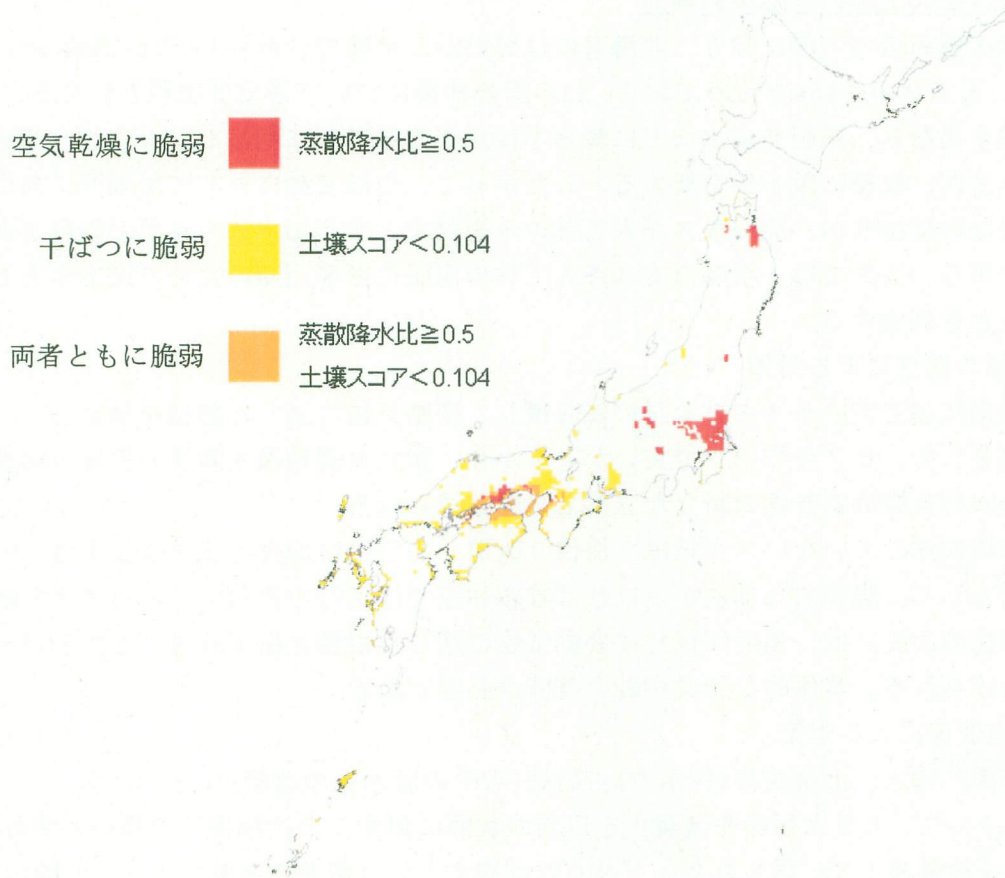


図16 蒸散降水比および土壌スコアからみた脆弱な地域

(3) スギ人工林の脆弱予測地域とその対策に関する考察

1) 全国レベルでのスギ人工林の脆弱性の評価

図16にスギ林蒸散降水比予測モデルおよび土壌水分変動予測モデルにより脆弱と判定された地域を図示する。長野盆地、甲府盆地、関東平野、福島盆地、および十和田湖東方の平野部（三本木原台地）などにおいて、蒸散降水比による評価により脆弱な地域と判定された。これらの地域は中部地方以北に位置している。これらの地域では、降水量の低下、気温上昇などで空気乾燥の進行だけでスギ林の衰退が懸念される地域と考えられる。

有効利用可能な水の土壌における保水力が小さい（土壌スコアの小さい）地域、すなわち、一定の年降雨があっても、降雨間隔が延びるなど、干ばつ頻度が増せばスギ林の衰退が予想される地域は、三河地方、瀬戸内沿岸、および九州地方など、西日本に多く認められた。

さらに、二つのモデルでスギ林の衰退が懸念されると評価された地域は、兵庫県、岡山県、および香川県など瀬戸内沿岸地域に認められた。この一帯は、スギ林の不適地とされる雨量係数100以下（雨量係数：年降水量/年平均気温）^{9) 11)}の土地で、森林土壌学や造林学ではスギの植林をしてはいけないと教えている地域である。また、わが国の数世紀以上におよぶ人工林造成の経験からも、この地域はスギを植えてもうまく育たないことは経験的に古くから認識されており、スギを用いた林業が無い地域でもある。

2) 脆弱なスギ人工林の適応策の検討

スギ林は函館周辺の一部を除き、北海道には無いが、全国で合計約450万ha植栽され、森林面積の18%、人工林の約45%を占めており、わが国の林業において最重要樹種といえる。また、林業は農業と異なり、施肥や灌水などに頼らずに自然力を有効に利用しながら行う粗放な産業である。また、収穫に数十年を要する。したがって、気候変動に対して短期間に対応することが出来ないばかりか、脆弱なスギ人工林のみを対象とする灌水にも自ずと限界がある。

しかしながら、ここでは、現時点でスギ人工林の温暖化影響回避のための適応策として考えられることを列挙する。

(1) 植栽樹種の変更による対策

①利用伐期に達しているスギ林を早めに収穫し、変動気候に適した樹種を植える。

問題点として、ヒノキやマツで良いかどうか？ 新たな適地適木基準の整備が必要で、日本の木材資源供給計画の新たな立案も必要と思われる。

②利用伐期に達していないスギ林は、捨伐り改植、あるいは保育方法を改良する。

問題点として、経費的な補助が無ければ零細林家では実行できないことが考えられる。保育方法の改良には、強度間伐林に変動気候に適した樹種を樹下植栽することが一例としてあげられる。具体的な作業指針の整備が必要である。

(2) 生育環境改善による対策

①人工降雨、灌水、土壌改善(保水力)、施肥(若干の吸水力の改善)などを行う。

問題点として、大気大循環や温暖化を以前の状態に戻すことは現実的で無いとすれば、林業収益を度外視して、限られたスギ林だけは残すという思想で実施する。この際にも、現在の樹木医の経験・知識・技術だけでは不十分で、新たにより高度な技術的指針の策定が必要と考えられる。

5. 本研究により得られた成果

気候条件に規定される水分環境はスギの生育に影響を及ぼす要因であり、蒸散降水比は気候変化に対するスギ人工林の脆弱性を評価する指標として有効であることを示した。気候変動のシナリオに基づいたモデル計算では、関東平野部などで蒸散降水比が高い地域が拡大し、これら地域に植栽されているスギは温暖化による潜在的な水収支から衰退が進行すると評価した。

土壌の水分特性曲線は、土壌群や土壌型によって類型化が可能であり、類型化された土壌水分特性曲線から有効保水容量を推定して、潜在的な保水力マップを作成した。保水力マップや土壌水分変動予測モデルの解析結果から、土壌水分特性曲線は、保水力と乾燥過程におけるスギの水利用に強い影響を及ぼすことを明らかにした。

以上の成果により、スギの蒸散による水利用と土壌保水力を評価し、温暖化によるスギ衰退の危険性を評価し、脆弱な地域を示した。さらに、考えられる適応策を提示した。

6. 引用文献

- 1) 小河誠司(1996) 九州地方におけるスギ・ヒノキの乾燥被害(干害). 森林防疫45(4)、2-9.
- 2) 讚井孝義(1998) 宮崎県においてスギ造林木の干害をもたらした気象要因. 樹木医学研究 2、65-78.
- 3) 梨本真ら(1992) 関東甲信・瀬戸内地方におけるスギの衰退現象. 森林立地32、70-78.
- 4) 松本陽介ら(1992) スギの水分生理特性と関東平野における近年の気象変動- 樹木の衰退現象に関連して-. 森林立地34、2-13.
- 5) 伊藤江利子ら(2002) 関東地方におけるスギ林衰退と土壌要因. 森林立地44(2)、37-43.
- 6) 松本陽介ら(2002) 関東平野における樹木衰退の1999~2001年の状況. 森林立地44、53-62.
- 7) Shigenaga, H. *et al.* (2005) The Potential Effect of Climate Change on the Transpiration of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Plantations in Japan.、Journal of Agricultural Meteorology60(5)、451-456
- 8) 農林水産省統計情報部(1992) 1990年世界農林業センサス林業編
- 9) 真下育久(1983) スギ人工林の成長と環境, 坂口勝美監修「新版 スギのすべて」、99-123、全林協
- 10) Kosugi, K. (1994) Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. Water Resour. Res. 30, 891-901.
- 11) 真下育久 (1960) 森林土壌の理学的性質とスギ・ヒノキの成長に関する研究. 林野土壌調査報告11、182pp、農林省林業試験場.
- 12) 近藤純正ら(1994) 森林流域貯留水量の蒸発散抑制の考察. 水文・水資源学会誌7、402-410.
- 13) 丹下健(1987) 19年生スギ人工林の斜面上部、中部、下部における年蒸散量の推定、東大演報76、177-196
- 14) 近藤純正ら(1992) 日本の水文気象(3)-森林における蒸発散量-、水文・水資源学会誌5、8-18
- 15) 国土交通省, 国土数値情報ダウンロードサービス、<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>
- 16) 堀田庸 (1997) 森林土壌及び流域の保水容量に関する研究. 京都大学学位論文、177pp.

7. 国際共同研究等の状況

なし

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<学術誌（査読あり）>

- ① 伊藤江利子・吉永秀一郎・大貫靖浩・志知幸治・松本陽介・埜田 宏：森林立地、44、2、37-44（2002）
「関東平野におけるスギ林衰退と土壌要因」
- ② 松本陽介・小池信哉・河原崎里子・上村 章・原山尚徳・伊藤江利子・吉永秀一郎・大貫靖浩・志知幸治・奥田史郎・石田 厚・埜田 宏：森林立地、44、2、53-62（2002）
「関東平野における樹木衰退の1999年～2001年の状況」
- ③ 小澤徹三・松本陽介・丹下 健・八木久義・長谷川秀三：森林立地、44、2、45-52（2002）
「高速道路緑化における樹木活力調査手法の現状と望まれる要件」
- ④ 田中 格・松本陽介：日本生態学会誌、52、3、323-329（2002）
「光環境の変化に伴う落葉広葉樹10樹種の個葉の解剖学的構造の変化」
- ⑤ Miura, S., Hirai, K., Yamada, T.: Journal of Forest Research, 7:201-211(2002)
“Transport rates of surface materials on steep forested slopes induced by raindrop splash erosion.”
- ⑥ Miura, S., Yoshinaga, S., Yamada, T.: Journal of Forest Research, 8:27-35(2003)
“Protective effect of floor cover against soil erosion on steep slopes forested with *Chamaecyparis obtusa* (hinoki) and other species.”
- ⑦ Uemura Akira, Ishida Atsushi, D. J. Tobias, Koike Nobuya, and Matsumoto Yoosuke : Trees, Springer-Verlag, 18, 452-459(2004)
“Linkage between seasonal gas exchange and hydraulic acclimation in the top canopy leaves of *Fagus* trees in a *mesic* forest in Japan”
- ⑧ Shigenaga, H., Matsumoto, Y., Taoda, H., and Takahashi, M. : Journal of Agricultural Meteorology, 60, 5, 451-456(2005)
“The Potential Effect of Climate Change on the Transpiration of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Plantations in Japan.”

<学術誌（査読なし）>

- ① 松本陽介：林業技術、727、12-15（2002）
「森林のCO₂収支」
- ② 三浦 覚・岡部宏秋：「森林の多面的機能」解説シリーズ第17回、森林総合研究所所報、474号、 p.3(2004)
「土壌生産力維持機能。」

(2) 口頭発表

- ① 田中永晴・三浦覚・森貞和仁・Effendi, S.・太田誠一：第113回日本林学会(2002)
「土壌の物理性から見たインドネシア熱帯雨林の土壌水分変動特性」
- ② 重永英年・長倉淳子・高橋正通・赤間亮夫：第114回日本林学会大会(2003)
「日本におけるスギ針葉の窒素含有率」
- ③ Miura, S : Proceedings of the International Symposium, 25 Years of Assessment of Erosion, 331-332. (2003)
“Dominant erosion processes under humid temperate forests in Japan and its appropriate assessment unit.”
- ④ 重永英年・三浦覚・長倉淳子・高橋正通：日本林学会大会学術講演集、111:672(2004)
「気象環境に対するスギ樹液流速の応答」
- ⑤ Shigenaga, H., Matsumoto, Y., Taoda, H., and Takahashi, M. : International Symposium on Food Production and Environmental Conservation in the Face of Global Environmental Deterioration, 28-29(2004)
“The Potential Effect of Climate Change on the Transpiration of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) Plantations in Japan.”
- ⑥ 三浦覚・重永英年：日本林学会大会学術講演集、115:545(2004)
「ADR土壌水分計による含水率変化の高分解能測定」

(3) 特許出願

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

日本農業気象学会等による国際シンポジウム「地球環境劣化における食糧生産と環境保全に関する国際シンポジウム、International Symposium on Food Production and Environmental Conservation in the Face of Global Environmental Deterioration (FPEC)」において、森林総合研究所共催の特別セッション「地球温暖化が森林生態系におよぼす影響予測、Impact Assessment of Global Warming on Forest Ecosystems」を2004年9月7～11日に福岡国際会議場で開催した。

この特別セッションの講演者は、森林総研の経費で招聘した L. R. Iverson (Northeastern Research Station, USDA Forest Service)、K. F. Cao (Yunnan Botanical Gardens)、および、推進費による森林総研担当課題「自然林・人工林の脆弱性評価と適応策に関する研究」の担当者4名である。セッション会場は常時60～70名の参加者で埋まり、温暖化研究について熱心な議論が行われた。なお、当日の演題は農業気象学会誌” Journal of Agricultural Meteorology” に査読を受けて掲載された。

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

国有林および民有林の森林施業計画の策定指針として貢献を想定している。