

B-11 地球温暖化による生物圏の脆弱性の評価に関する研究

(3) 森林生態系の脆弱性評価に関する研究

④ 人工林生態系の脆弱性評価

独立行政法人森林総合研究所

海外森林研究領域	海外森林資源保全研究室	松本陽介
四国支所		埴田 宏
立地環境研究領域	養分環境研究室	重永英年・溝口岳男・長倉淳子
立地環境研究領域	土壌特性研究室	吉永秀一郎
立地環境研究領域	土壌資源評価研究室	伊藤江利子・大貫靖浩
立地環境研究領域	チーム	赤間亮夫・
植物生態研究領域	樹木生理研究室	上村 章・原山尚徳・石田 厚
森林昆虫研究領域	昆虫生態研究室	井上大成
森林昆虫研究領域	チーム	大河内勇
関西支所		藤田和幸・上田明良・浦野忠久
東北支所		志知幸治

平成 11～13 年度合計予算額 24,124 千円

(うち、平成 13 年度予算額 6,469 千円)

[要旨]

わが国の森林の約 40%に相当する約 1,000 万 ha はスギ・ヒノキ等の単純一斉林造林地である。これらの林は生物多様性が低いため生態系としての自律機能に乏しく、気候変動、病虫害等による影響を受けやすいことが危惧されている。本研究では、スギ林衰退の原因が高温ストレスと乾燥（水分）ストレスであるとの作業仮説をたて、気候変動シナリオにもとづいた 100 年後のスギ林環境を予測し、スギ衰退危険度マップを作成することを目的とした。そのため、以下の 5 つの個別研究を行った。スギカミキリの飼育実験の結果、産卵に日長は影響しないため温暖化影響は温度だけで可能なことを明らかにした。また、マツノマダラカミキリの生息可能地域の予測を行った結果、100 年後にはオホーツク海沿岸まで北上する可能性が示めされた。関東平野で樹木衰退調査を行った結果、空気が乾燥する土地で土壌の保水能力の低い土地ほどスギが衰退していることを明らかにした。さらに、スギ針葉の光合成・蒸散速度を定量的に評価し、高温域では光合成速度の低下が大きいこと、温度の上昇に対応して蒸散による水分消費量が増大することを明らかにした。いっぽう、世界農林業センサス、環境庁植生図、林野ニタリング事業の調査データを用いたスギ林分布の標準メッシュデータを作成し、局地気候変化シナリオデータと、本研究で得られた成果を用いて、全国のスギ林について 100 年後の衰退程度を推定した。その結果、スギの非適地面積は現在約 1%であるが、100 年後には約 10%に増加すると推定された。

[キーワード] スギ人工林、地球温暖化、樹木衰退、脆弱性、水ストレス

1. はじめに

わが国の森林の約40%はスギ・ヒノキ等の人工林である。これらの単一斉林は生物多様性が低いこと、気候変動、病虫害等による影響を受けやすいと言われている。事実、ほとんどが人工林または樹木の種類数が少ない半自然林からなるヨーロッパの森林では、26%の地点で気象害が、23%に虫害が、17%に病害が発生し、ナラ類やトウヒの枯損を引き起こしていることがEUの森林健康度モニタリング調査で明らかにされている²⁾。

わが国のスギカミキリの被害発生に関しては、従来から雨量と被害量の関係が言及されていて、初期幼虫の頃の雨量が多いとヤニにまかれて死亡する率が高まり、被害を抑えている可能性が指摘されている^{3),8),17)}。また、マツ林に激甚な被害を与えるマツノザイセンチュウ病被害は現在北上中であるが、高標高地帯、本州の最北端地域、および北海道にはいまだ発生していない。しかし、温暖化によって微害地域の被害激化とともに、未被害地域での被害発生が懸念されている。

また、関東平野のスギ枯れが1974年時点で確認され、その後1986年、1990年時点での調査が行われ、いずれも1974年時点よりも衰退が進行していると報告されている。その原因に関しては、これまでのところ大別して2説が提唱されている。その一つは、オキシダントなどの大気汚染の二次汚染説である。二つ目は水ストレス説である。前者は広義の酸性降下物原因説であり、後者は関東平野の気候がスギの本来の生育適地環境では無くなってきているという考え方で気候変動原因説である。この水ストレス説の根拠は、①スギは酸性雨や大気汚染に比較的強いこと。②関東平野での大気汚染が1970年代前半頃から比べて改善しつつあるにも関わらずスギ衰退が進行していること。③スギは関東平野に生育する主要な樹木のなかで最も水要求度の高い樹種であること。④関東平野では降水量の減少傾向および空気湿度の低下傾向が観測され、スギの水ストレスを促進する乾燥化が進行していることである。

気候変動原因説がスギ生育不良の原因であれば、温暖化によって今後九州南部などでもスギ林の衰退が生じる可能性があり、現在、森林の大半がスギ林となっている同地域にとって大きな問題となる。より高温の奄美、沖縄地方ではスギの生育が不良で、他に適切な経済樹種が見当たらないため、自然林であるスダジイ林の伐採を行わざるを得ず、自然環境保全を困難にする大きな要因になっている。

2. 研究目的

本研究の目的は、温暖化にともなうスギカミキリ、マツノマダラカミキリなど昆虫被害の進行を評価・予測すること、およびわが国で観察されているスギ衰退が発生する主要原因を高温ストレス説と乾燥（水分）ストレス説の2つの見方で検討すると共に、温暖化にともなうスギ衰退・成長減退を気候変動シナリオにもとづき予測し、スギ林衰退危険度マップを作成することである。

そこで、以下の5点を個別目的とした。①スギカミキリの孵化日を予測するための産卵活動に及ぼす日長影響の検討と2090年の気候予測からスギカミキリによる被害の予測。②病原のマツノザイセンチュウの媒介者であるマツノマダラカミキリの気温に対する反応特性から、今後保護すべきマツ林への材線虫病被害拡大の可能性を検討し危険地域マップを作成。③関東地方の平野部全域を対象として、現時点でのスギ衰退の現状把握と水ストレスに関与する土壌条件および気象条件との関連の解明。④スギの光合成速度と蒸散速度に及ぼす温度影響の解明。および、⑤各種データの収集と標準メッシュ・データの整備を行い、作業仮説である、1)高い気温はスギの光合

成能力を低下させ、林分成長を減退させる、2) 生育のための水分不足がスギの健全性を著しく損ねる、を検証し、「日本付近における局地気候変化シナリオデータ」を用いて梢端枯れ等の衰退が生じる可能性のある場所を検討しマップ化すること。

3. 研究方法

(1) 昆虫被害影響

① スギカミキリの発生

スギカミキリの産卵時期と、日長との関係を調べるため、つくば市内の被害林から 2000 年 2 月 17 日に網室に持ち込んだ被害材から脱出した成虫を、雌雄ペアにして 20℃の恒温条件下で飼育した。日長条件として、LD11.5:12.5~LD15:9 まで、30 分刻みに 8 つの条件を設定して、死亡までの産卵数を 2~3 日ごとに計数し、産卵活動に対する日長の影響を調べた。

スギカミキリの成虫の休眠覚醒は小林 (1984) によれば 2 月下旬、富樫²¹⁾によれば 12 月中旬である。ここでは 1 月には休眠覚醒していると仮定した。成虫脱出までの発育零点および有効積算温量は、小林⁷⁾のデータを再計算した。卵の発育ゼロ点及び有効積算温量は北島⁶⁾を用いた。全国の気象データは AMeDAS から得た。スギカミキリの調査の盛んであった 1980 年代の 10 年間のデータを用いた。

地球温暖化のシナリオは Center for Climate System Research (CCSR), Japan Model name: CCSR-98) によった。2090 年と 2000 年の値の差を求めた。AMeDAS データの 1980 年代と 2000 年までの変化は無いものと仮定し、1980 年代の各年のデータに 2000 年から 2090 年への変化を加算した。温度は単純に加算しただけであるが、降水量は、実際の降水量に比例して配分した。実際には降水頻度も変化することが予測されるが、ここでは変化しないものと仮定した。これらの関係を用いて 10 年分の成虫脱出日、孵化日、孵化後 20 日間の降水量を計算した。

② マツノマダラカミキリの分布拡大

マツ材線虫病が発生するための条件を検討する資料として、1) マツノマダラカミキリの成長と成虫行動の気温との関係、2) 現状の気温分布、3) 温暖化予測 (農業環境技術研究所による 2 次メッシュデータを標高補正して再構成)、および 4) 現在のマツ林の分布 (3 次メッシュおよび自然環境情報 GIS) の 4 つを重ね合わせて、2 次メッシュ上で危険地域を検討した。

(2) スギ林の衰退調査

関東地方、紀伊半島南部、南九州、南西諸島でスギ衰退の現地調査を行った。その上で、スギ衰退が進行している関東地方平野部において、東京都、神奈川県、埼玉県、群馬県、栃木県、茨城県、および千葉県にまたがる関東地方の平野部 (標高約 250m 以下) において行った。樹木衰退調査は、広域調査とスギ林固定調査地調査の 2 種類を行い、土壌調査はスギ林固定調査地のうち東京都および神奈川県を除いた固定試験地において行った。

① 広域調査

県道および市町村道といった交通量の少ない道路を選び、車で移動しながら、原則的に 10 個体以上で構成される森林や列状植栽林を対象に行った。調査項目は、樹種、樹高、衰退度、および緯度・経度である。衰退度は科学技術庁の樹木活力指標の評価基準などを参考にし、0~3 の 4 段階とし、それぞれの林分の平均衰退度 (孤立木の場合はその個体の衰退度) を判定した。

樹高測定は、レーザー式樹高測定器 (LEDHA-100、Jenoptic、ドイツ) を併用した比較目測法である。緯度・経度の測定は Global Positioning System (Gorira、三洋電機) を用いた。得られたデータは、標準地域メッシュ・システムの 3 次メッシュを 25 メッシュ統合した統合メッシュ (概ね 5km 弱 x 5km 強の広さ、第 2 次メッシュの 4 分割メッシュに相当) 単位に整理し、図化した。

② スギ林固定試験地調査

樹木の蒸散速度に密接な関係がある空気の乾燥度を計算するために必要な空気湿度を観測している地方気象台が、関東地方には東京、横浜、熊谷、秩父、前橋、宇都宮、水戸、銚子、勝浦、館山、および千葉の 11 ヶ所ある。空気乾燥度とスギ林衰退度の関係解析のために、これらの気象台を中心に半径約 10km 以内のスギ林をそれぞれ 4 ヶ所程度選びスギ固定調査地とした。

測定項目は、樹種、衰退度、樹高、および胸高直径で、個体ごとに測定を行った。衰退度の判定は広域調査と同様である。樹高の測定は前述のレーザー式樹高測定器を、胸高直径は林尺をそれぞれ用いた。大気の水蒸気飽差は、前記の各地方気象台において観測された日最高空気温度および日最低空気相対湿度の 1990 年～1995 年の値を用いて日単位で計算し、年平均値を求めた。

③ 土壌調査

スギ林固定試験地のうち 34 ヶ所において、検土杖を用いて土壌母材、堆積様式および土性を判定し、地形図等を用いて堆積様式を判定した。また、100ml の円筒試料を採取して容積重 (0-8cm, 8-16cm) および孔隙率を計測した。さらに、貫入式土壌硬度計 (大起理化工業, DIK-5520) を用いて有効土層深を測定した。

(3) スギの高温ストレス環境影響

森林総合研究所千代田試験地に生育するスギ成木 (23 年生、樹高約 16m、胸高直径約 21cm) を対象とし、陽樹冠部に着生する当年生針葉のガス交換速度を測定し、気温の季節変化に対する光合成速度、蒸散速度の応答を調べた。また、成木切り枝および苗木を材料として、実験室でのガス交換速度の測定を行い、既存の光合成モデルを適用することで、温度に対する光合成速度、蒸散速度の応答を定量的に評価した。

(4) スギ林衰退危険予測地図

1990 年の世界農林業センサス、環境庁植生図等を使用して、わが国のスギ林、ヒノキ林、マツ林の標準メッシュ分布データを整備した。成長量については、林野庁酸性雨等森林被害モニタリング事業の第一期調査データより、スギの地位指数と気候条件の関係を検討し、日本全体の衰退予測マップを作成した。

気候の将来予測値は、Center for Climate Research Studies (CCSR)、Japan の CCSR CGCM モデルをもとに農業環境技術研究所が作成した「日本付近における局地気候変化シナリオデータ (二次メッシュ)、NIGG2090 JP.dat」 (以下、局地シナリオ) を用いた。これによれば、例えば、2090～2099 年の関東平野の年平均気温は 3.1℃上昇、年降水量が 1,440mm から約 1.5 倍になる。

作業仮説として、①高い気温はスギの光合成能力を低下させ、林分成長を減退させる、②生育のための水分不足がスギの健全性を著しく損ねる、という 2 点を検証し、現地調査により、梢端枯れ等の衰退が生じたスギが該当条件下に発生しているかどうかを検討した。

4. 結果・考察

(1) 昆虫被害影響

① スギカミキリの発生

総産卵数、雌成虫の寿命、雌が産卵していた期間のいずれも日長時間の変化に伴う一定の傾向はなかった(表-1)。従って、温度のみを考慮することとした。小林⁷⁾のデータを再計算して得られた成虫の脱出のための発育零点は4.26℃、有効積算温量は221日度であり、これを予測に用いた。

スギカミキリの被害は降水量が少ないと被害が大きい傾向があるが、現在の気象データから孵化後20日間の降水量を計算すると関東以西の西日本では日本海側と瀬戸内海沿岸などを除くと100mm以上の地点が多く、東北以北では100mm以下の地点が多かった。スギカミキリの被害は青森から鹿児島まで報告があるものの、東北地方が特に被害が著しいという報告はない。従って現在の気象で、東北地方では孵化後の降水量が少なかったが、他の理由で被害の増大が防がれていると考えられる。西日本では、日本海側と瀬戸内海沿岸で降水量が少なく、被害分布と一致するという小林・柴田⁸⁾の見解と一致した結果が得られたことになる。

2090年には東北以北では降水量が増え、関東以西では降水量が減ると予測されていて、スギカミキリの被害が拡大する可能性がある。一方、東北以北では降水量が増大するが、現在降水量が少ないにも関わらず著しい発生が生じていない原因が不明のため、東北地方のスギカミキリ被害の変化は現在のところ予測は不可能である。

表1 20℃における各日長条件下でのスギカミキリ雌成虫の産卵数、寿命、産卵期間

日長 (時間)	n	産卵数(個/個体)		寿命(日)		産卵期間(日)	
		平均	(SD)	平均	(SD)	平均	(SD)
11.5	8	107	(39)	20.3	(8.4)	11.8	(5.0)
12.0	9	119	(51)	18.5	(5.5)	12.2	(4.4)
12.5	9	144	(60)	23.2	(9.1)	15.2	(6.5)
13.0	7	118	(41)	21.6	(8.0)	14.7	(7.7)
13.5	8	157	(44)	24.6	(9.6)	14.4	(8.2)
14.0	7	123	(43)	24.9	(3.8)	13.1	(3.2)
14.5	7	112	(36)	24.6	(10.2)	13.6	(9.2)
15.0	7	140	(83)	23.2	(8.3)	11.4	(3.5)

② マツノマダラカミキリの分布拡大

既往研究(定温実験室内)から、マツノマダラカミキリの発育速度と気温の関係、発育零点が明らかにされている。そこで、現在マツ材線虫病の被害地域と本種の分布がほぼ合致するとして、マツ材線虫病の被害地域の気温特性が明らかにできると考えた。よく使われる竹谷ら²⁰⁾の指数は発育零点というパラメータが入っていることから、まずは本種の発育時期である5~10月の平均

気温、成虫が繁殖行動を行う時期の7～8月の平均気温について検討した。現在の被害分布は5～10月の平均気温18.3℃を越え、かつ7,8月の平均気温22.3℃を越える地域とほぼ合致することがわかった。とりわけ5～10月の平均気温18.3℃のラインは被害最前線とおおむね一致することから、これを将来の被害発生の閾値とした。

なお、本種が生活する枯れた樹幹内は、日射を受けなければ百葉箱内で観測される気温の変動であるが、直射光があたると真冬でも30℃を越える温度になる。気象データとして長年記録されている日最高・最低、日平均気温、あるいは月平均気温とでは正確な検討は不可能であるが、ここでは、大まかな検討を行う。

上の気温条件を満足する地域（現状、および予測値に基づく将来）をマップ化して、図-1に示した。現在のマツ材線虫病被害の北方最前線である東北地方にも広大なマツ林が存在するが、実質的な問題となるのは、被害が人間活動に支障をきたす林への拡大である。その点で、防風、防砂の目的で人間の手によって海岸に植栽されたクロマツ林は最も注目に値する。

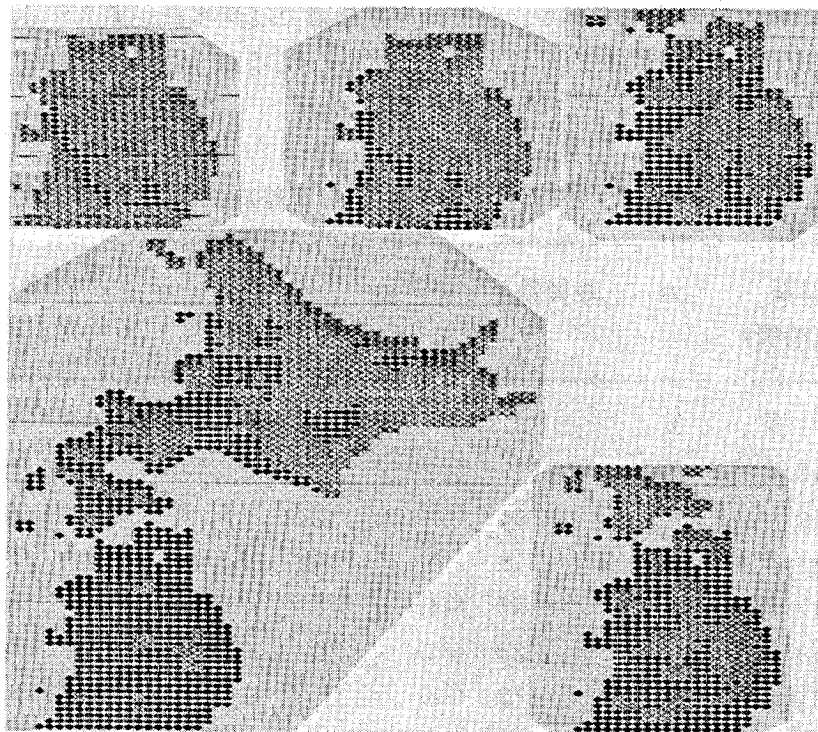


図-1 マツノマダラカミキリの現在の生息最前線（左上、黒シンボルより南部から被害が北上している）、現在の気温での生息可能地（中上）、21～30年後の生息可能地（右上）、51～60年後の生息可能地（右下）、および、91～100年後の生息可能地

5月～10月の平均気温が18.3℃以上で、かつ7月～8月の平均気温が22.2℃以上の地域を2次メッシュで示した。

未被害地域では、青森県北部の日本海側、太平洋側それぞれ大規模なクロマツ林がひろがっており、北海道南部の海岸クロマツ林にも存在する。図に明らかのように、91-100年後には北海道の植栽クロマツ林もマツノマダラカミキリが安定的に生息できる気温条件が整うと予想される。現在マツ林は存在していないが、オホーツク沿岸の一部地域でも生息条件が満たされると予測された。

東北地方で現在のクロマツ林分布域について21-30年後の気温変化からみた被害予測を行ったところ、平野部の海岸林では、日本海側、太平洋側ともに被害が発生可能な気温条件であった。現在は青森、大船渡、八戸は被害がなく、平年値も6ヶ月平均の被害発生閾値18.3℃を下回っているが、この3カ所では21-30年後に被害が起こる気温レベルに達することが予測された。しかし、現在の温度(1998-2000年の3年間平均)では、青森と大船渡では生息可能温度に達しており、八戸でも生息閾値に近い気温となっている。したがって、温度環境では東北地方でのマツノマダラカミキリの分布拡大(北上)は可能な状況といえる。分布拡大を制限している要因、たとえばマツ林が連続的に分布していない、あるいは、幼虫や蛹が入った材木が持ち込まれないなどのことが維持できなければ、マツ枯れ被害の拡大の可能性は高いと思われる。

(2) スギ林の衰退調査

① 関東平野における森林・樹木衰退の現状(広域調査)

広域調査によってスギ林の衰退がほかの樹種に比べ顕著であることが認められた。次いで、“その他の常緑針葉樹”、ヒノキ、イチヨウ、ケヤキ、常緑広葉樹の順に衰退の程度が高いことが明らかになった。また、メタセコイア、ヒマラヤスギおよび”その他落葉広葉樹”においては、現在のところ衰退の程度は極めて軽微であった。

これまでの報告¹²⁾、¹³⁾では、スギとケヤキ以外の樹種の衰退はあまり顕著でないと報告されてきたが、関東平野における樹木衰退は1999年～2001年現在において、ヒノキおよびその他の針葉樹でも顕在化していた。

図-2に関東平野における樹高15m以上の大きいサイズのスギの衰退状況を示す。スギ衰退の顕著な地域は利根川に沿った帯状地帯であった。また、従来の報告では、スギ衰退の程度が低いとされていた宇都宮市周辺、水戸市周辺、霞ヶ浦南部、および千葉市周辺において、中程度の衰退が認められた。過去の調査ではスギ林の存在が確認されていた場所でも、今回の現地調査で確認出来なかった事例も多く、市街化が進んでいる地域ではスギ林自体が消失しつつあった。

② スギの衰退と空気乾燥

当初の予想に反して空気乾燥とスギ衰退の関係は必ずしも高くなかった。空気乾燥は植物の蒸散を促進し水ストレスを増大させる水消費に関する重要な要因であるが、水ストレスは根系発達程度や土壌水保持容量などの水供給要因と水消費要因のバランスで規定されているためと考えられる。

年平均水蒸気飽差が13hPa前後と比較的空氣が乾燥している場所でも健全なスギが存在していたことから、水供給が十分な生育基盤であれば衰退は生じないことが示された。いっぽう、空氣があまり乾燥していない土地でも、水供給が不十分な生育基盤であれば衰退しやすいことも考えられた。

③ スギの衰退と土壌の理学的性

スギの衰退度は砂土が卓越する低標高地で高く、火山灰や堆積岩を母材とする埴壤土が卓越する台地および丘陵地で低い傾向が認められた。土壌の容積重および孔隙率はスギ衰退度と関係が認められ、表層土壌の物理的性質がスギ衰退に影響を与えていた。また、表層土壌の堅密度の影響は有効土層深の深さによって緩和されることが判った。これらの結果、強度のスギ衰退は、土壌層が浅く、堅密な土壌で発生していることが明らかになった。

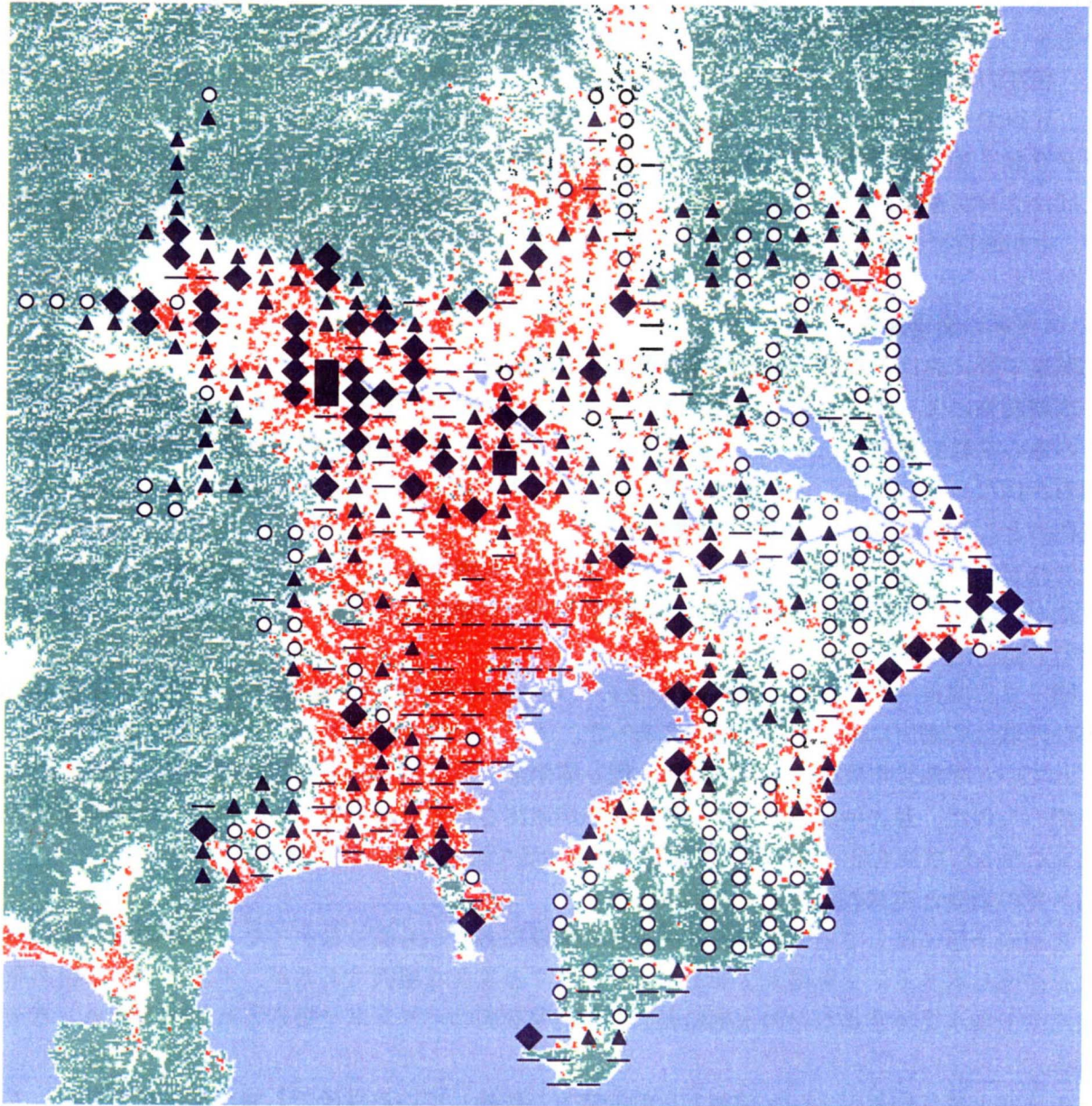


図-2 関東地方平野部におけるスギ衰退状況

樹高15m以上のスギ林の衰退状況を2次メッシュの1/4メッシュ単位で示した。
 ○：健全・ほぼ健全、▲：弱度衰退、◆：中度衰退、■：強度衰退、-：樹高15m以上のスギが未確認。

④スギの衰退に関する多変量解析

スギ衰退度を被説明変量とし、雨量係数、大気水蒸気飽差、土壌母材、表層土壌の容積重、土壌深、堆積様式、地形、および周囲の土地利用などを説明変量とする数量化Ⅰ類による多変量解析を行った結果、説明変量のさまざまな組み合わせによって偏相関係数 0.61~0.75 の結果が得られ、空気が乾燥し土壌の堅密な土地ほどスギが衰退していることが明らかになった。

(3)スギの高温ストレス環境影響

Farquhar モデルと Ball モデルにより、温度、湿度、光強度、窒素含有率、CO₂ 濃度から光合成速度、蒸散速度を求めることができる。本モデルをスギ針葉に適用して計算された、温度および湿度と光合成速度、蒸散速度との関係（針葉窒素含有率 14mg gDW⁻¹、光強度 1,000μmol m⁻² s⁻¹、CO₂ 濃度 360ppm）を図-3 に示す。光合成速度の最適温度は 25℃ 付近に存在し、高温域での低下は低温域に比べて大きい^{15), 16)}。また、空気湿度の低下は気孔開度を減少させることで、光合成速度の低下を引き起こす。蒸散速度は 35℃ 付近までは温度の上昇にともない急激に増加する。

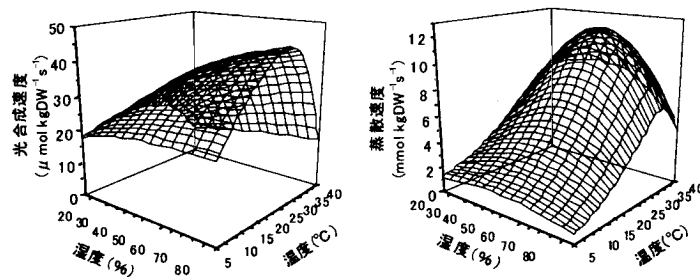


図-3 温度、湿度に対するスギ針葉の光合成、蒸散速度の応答

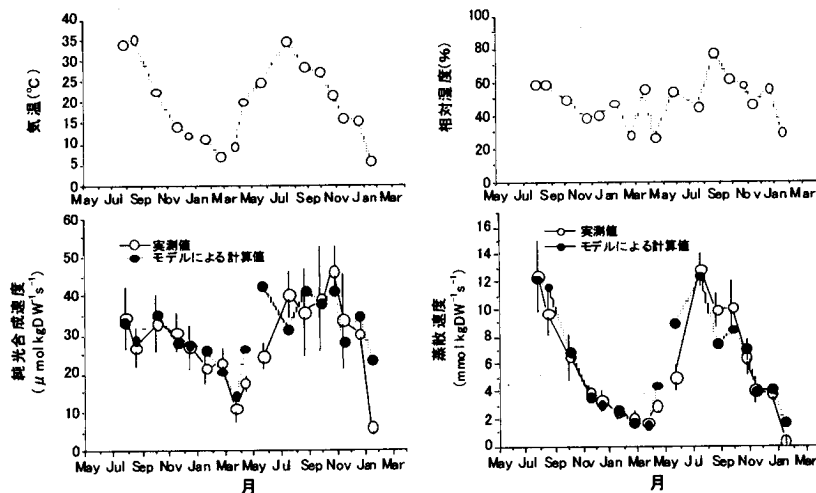


図-4 スギ成木針葉の光合成速度、蒸散速度の季節変化

図-4に成木針葉の光合成速度、蒸散速度の季節変化を、測定時の気温および相対湿度とあわせて示す。光合成速度は夏期から秋期にかけて高い値を示し、冬期の低温環境下では低い値をとった。蒸散速度は気温の変化に対応して変化し、高温のため空気飽差が増大する夏期に最大値を示した。モデルによる計算値も実測値と同様の変化を示した。

以上の結果より、高温環境は光合成生産の低下を引き起こすとともに、蒸散による水分消費量を増大させることで潜在的な水分ストレスの危険性を高める可能性があると考えられる。

(4) スギ林衰退危険予測地図

気候温暖化がスギの生育に及ぼす影響について、2つの仮説のいずれも考慮すべきものと判断された。まず、高温影響として、根岸^{15,16)}が示したように、本研究による実験によっても温度-光合成曲線で、高温による光合成量の低下が明瞭に示された。

図-5にスギ林の年平均気温と地位指数の関係を示した。地位指数(40年生時の樹高、バイオマス生産力の指標)は林野庁酸性雨等森林被害モニタリング事業による全国のスギ林調査データから計算したが、その上限は低温および高温側で顕著に減少している。温暖化影響を検討する際に問題とすべき温度は、年平均気温で約18°C、温量示数では150前後と考えられる。

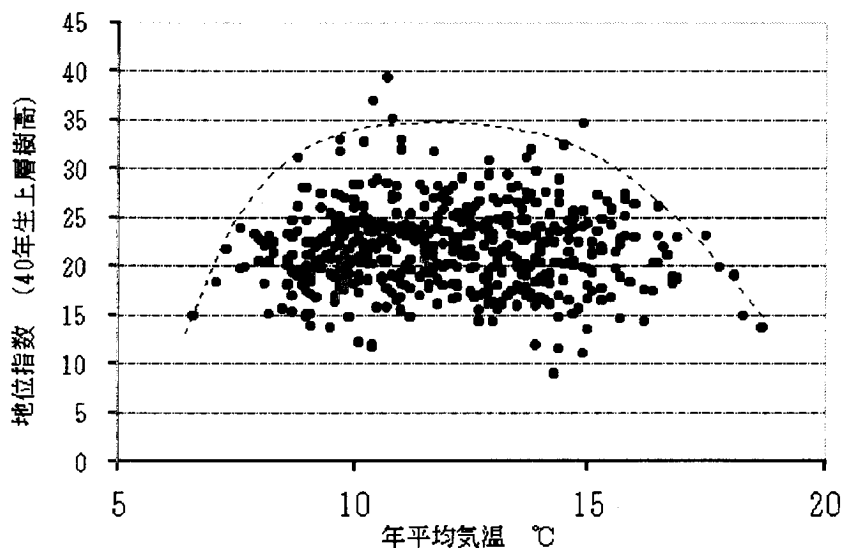


図-5 スギ林の年平均気温と地位指数

生育のための水分不足がスギの健全性を著しく損ねる可能性については、高齢スギ個体の梢端枯れが多発する北関東、瀬戸内東部は顕著な寡雨地帯であること。同地域における1970年代以降の梢端枯れ進行を説明できる環境要因は雨量の減少と最低気温の上昇による乾燥化が主要因であって、耐乾性の乏しいスギに大きな水ストレスが生じているためとされている^{12),13)}。また、千葉県でスギの樹勢の衰えの分布を調査した青沼¹⁾は水分環境の良くない台地上のスギが高齢になると著しく衰退すること、灌がよいによって樹勢回復したことを示した。また、雨量係数(年平均降水量mm/年平均気温°C)が100~110を下回る地域ではスギの生育が不良であることも報告^{10),11)}されている。

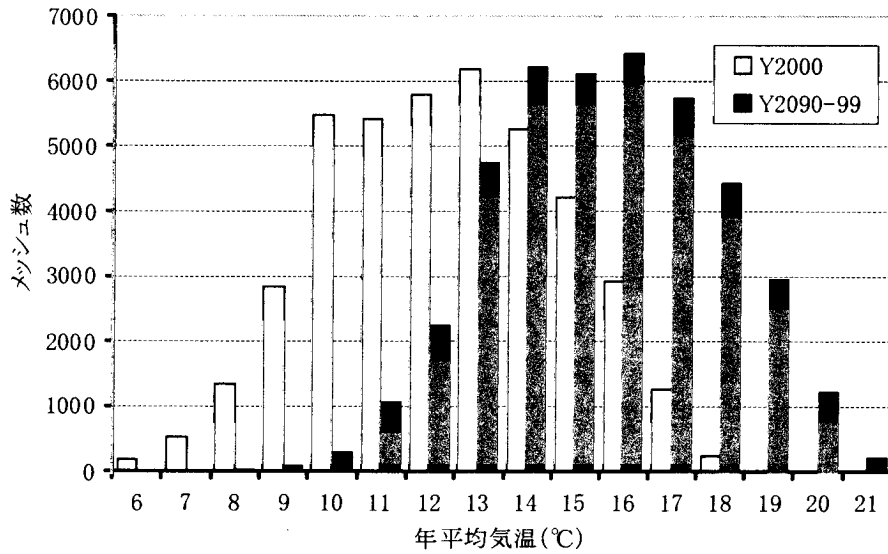


図-6 現在のスギ林の年平均気温と2090-2099年における予測年平均気温の分布
 予測シナリオ：CCSR および CGCM

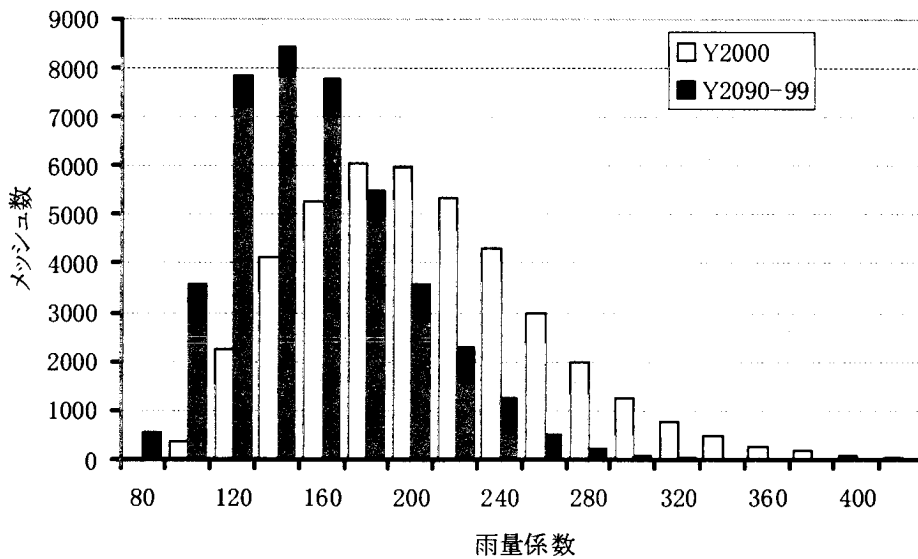


図-7 現在のスギ林の雨量係数と2090-2099年における予測雨量係数の分布
 雨量係数(RI)：年降雨量/年平均気温。ここでの雨量係数は予測シナリオ CCSR および CGCM の降雨量の70%値を用いて計算した。

スギの衰退が報告されている上記2地方における雨量係数を見ると、85以下の地点が少なくない。この地域は本来スギ林が造成されるべき場所ではないものの、社寺等の特別な場所に限ってスギが植えられ、手厚く保護されてきたものが、高齢になり近年の乾燥化の影響によって衰退が顕著になったと考えられる。

現在、高温域の林分でスギの成長量が低下しているか否かについては、判断できるデータが得られていない。土壌の物理・化学性など、局所的な立地条件の影響が大きく、地域的な高温障害の存在は確定できなかった。南西諸島、南九州でのスギ林調査結果によると、郷土樹種との競争を克服できた場所ではスギ林が生育できており、樹高は土壌条件と常風の影響を受けていたが梢端枯れは、台地上の樹群など、特殊な場所に限定されている。

最新の温暖化予測（CCSR、CGCM など）によると（図-6、7）、高温化と同時に雨量の増加が見込まれている。このため、降水量を加味した将来予測では、スギの衰退が生じるという結果に結びつかない。実際に、梢端枯れが生じるためには、急激な乾燥化や、干ばつの発生が生じることが条件となる。

図-8に現在のスギ林の分布地における雨量係数（RI）を示した。現在は、RIが80未満（赤色）の土地にスギの分布はないが、九州の北部、瀬戸内地方、大阪、名古屋、本州中部の山岳地域、関東平野、新潟平野、八幡平や北上山地、北海道のほぼ全域などではRIが80~110（黄色）もしくはスギ林の分布なし（白色）である。なお、スギはわが国の最主要造林樹種で、その大半は人工林であるため、分布していない土地では、適地でないため植栽されていない。

図-9に90~100後の雨量係数（RI）を示した。予測にあたり、約100年間で発生する旱魃を想定して、局地シナリオによる予測値の70%の降水量をRIの計算に用いた。RIが110を下回る地域（黄色と赤色）は成長量の低下や衰退が発生する可能性のある地域であり、80を下回る地域（赤色）では顕著な衰退が発生する可能性が高いと考えられる。

図-8および9に示した結果から、現在のスギの非適地面積はスギ林面積の約1%であるが、100年後には約10%に増加すると推定された。これは約50万haのスギ林が温暖化影響を受けることになり、地力維持のみならず、水・土防災上の問題が生じることが予想される。

ここで、森林統計による風害、干害など異常気象を主原因とする森林被害のうち、雪害、凍害は減少傾向にあるが、風害と干害は増加傾向にある。讚井¹⁸⁾によると、宮崎県内では、10年間にスギ林の中・壮齢木が枯損する被害が6回発生している。これには、気温の上昇、降雨パターンの変化、南海型気候の特性が関与することが示唆される。日降水量15mm以下の日数が夏季に25日以上、秋~冬季に60日以上継続すると被害が発生するという。また、干害がスギの暗色枝枯病の発生にも関与している。このような集団枯損は、関東⁴⁾、近畿¹⁴⁾、四国⁹⁾でも発生した。今後とも増加すると考えられる。

寒風害は冬季の降水量が少ない年に多く発生する。佐々木・岡上¹⁹⁾は1月の平均積雪深が50cm以下で、平均気温が0℃以下の地域を寒風害発生予想地帯とし、太平洋側に危険地域が多いことを示した。56豪雪の福島県での事例のように、少雪地帯で稀に発生した湿雪は極めて大きな被害をもたらした⁵⁾ので、温暖化は冠雪害の危険性を増大する可能性がある。北陸4県の雪害面積は、雪の多い年より、雪が少ない年に多い傾向があり、寒い冬に建造物に対する雪害の発生が多いのと対照的である。雪の多い年には森林が積雪に守られるため寒風害が少ないためと、暖かい年の積雪は湿雪で比較的軽く被害面積が広がるためと考えられている²²⁾。

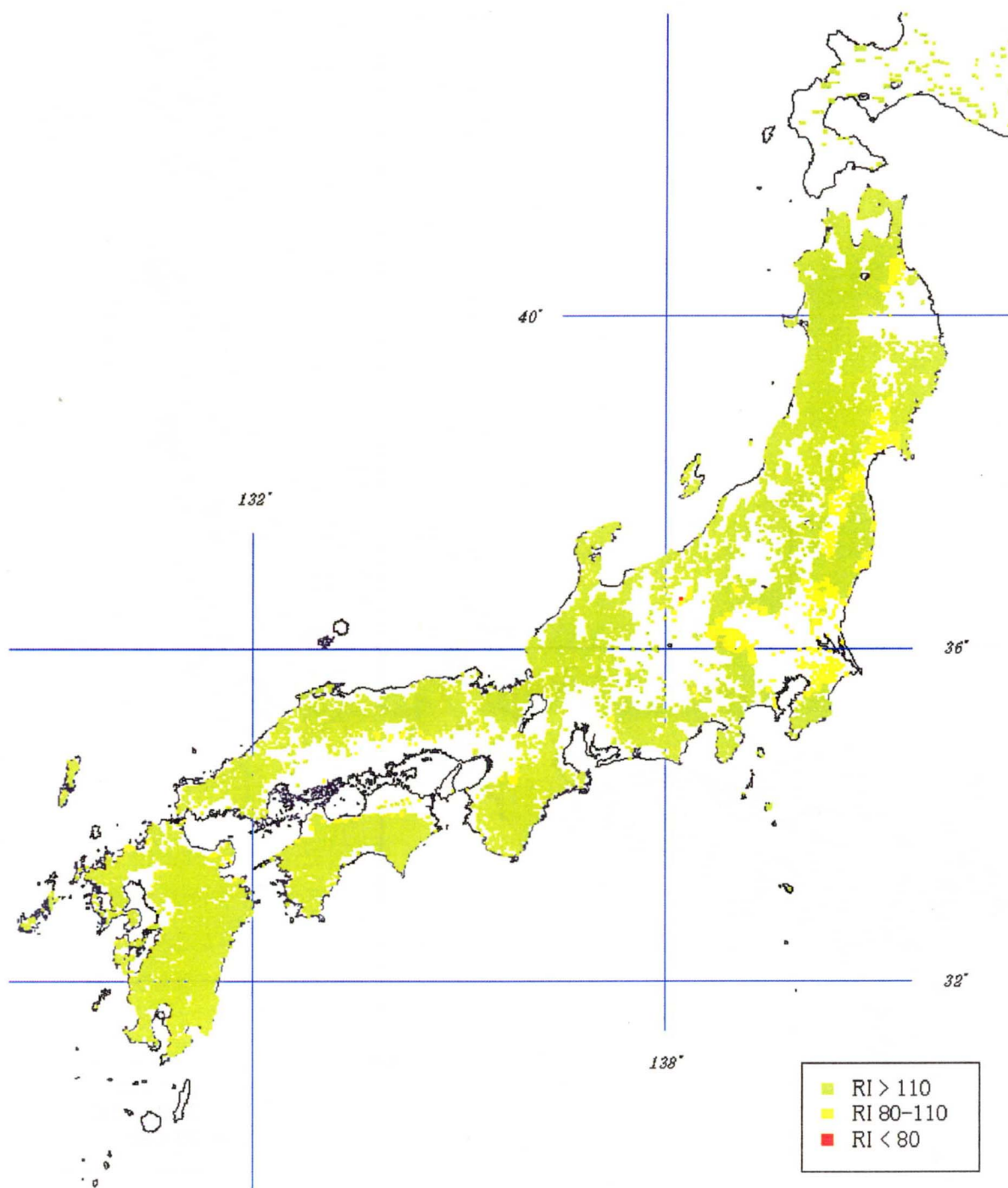


図-8 現在のスギ林の分布と雨量係数 (RI)

二次メッシュ単位で示した。緑色：RIが110以上、黄色：80～110、赤色：80未満、白色：現在スギの分布なし。

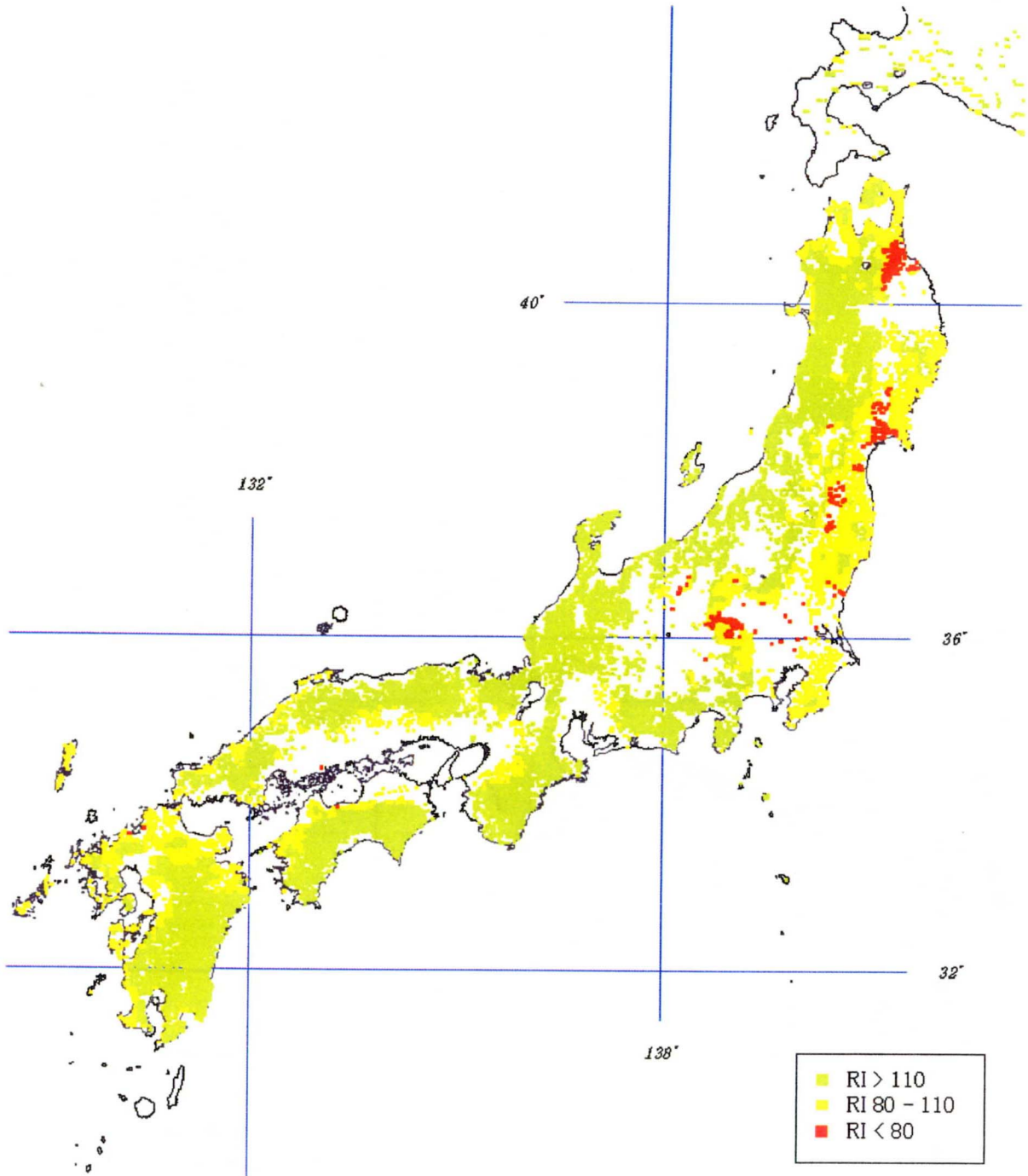


図-9 90-100年後のスギ林の分布と雨量係数 (RI)

二次メッシュ単位で示した。緑色：RIが110以上、黄色：80～110、赤色：80未満、白色：現在スギの分布なし。

今後、樹木の衰退・成長には局所的な土壌条件の影響が最も大きいので、気候条件の違いの影響をみるためにはさらに多くの地点データを解析する必要がある。将来予測については、平均的な数値の変化だけではなく、季節変化や、無降雨期間の推定値が必要である。

5. 本研究により得られた成果

- (1) スギやマツの森林害虫の繁殖は主に温度に規定されることを明らかにし、マツでは温暖化にともない100年後にはオホーツク海沿岸まで北上する可能性が危惧されることを指摘した。
- (2) 関東平野で顕在化している樹木衰退の現状調査を行った結果、スギが最も衰退症状を示していること、およびスギは空気が乾燥しやすく土壌保水力の低い土地ほど衰退していることを明らかにした。
- (3) スギ針葉の光合成・蒸散速度を定量的に評価し、高温域では光合成速度の低下が大きいこと、温度の上昇に対応して蒸散による水分消費量が增大することを明らかにした。
- (4) 世界農林業センサス、環境庁植生図、林野ニタリング事業の調査データを用いたスギ林分布の標準メッシュ・データを作成し、局地気候変化シナリオデータと、本研究で得られた成果を用いて、全国でスギ林が100年後に衰退する程度を推定した結果、スギの非適地面積は現在約1%であるが、100年後には約10%に増加し、スギ林は温暖化の影響を強く受ける可能性を指摘した。

6. 引用文献

- 1) 青沼和夫、1993：再考 山武林業、pp.151、グリーン企画、東京。
- 2) EC-UN/ECE, 1997：Forest Condition in Europe, Results of the 1996 crown condition survey, 1997 Technical Report. 112pp. & Annex I-IV. EC-UN/CEC, Brussels
- 3) 萩原幸弘・小河誠司、1970：九州におけるスギのはちかみ発生事例とその分布特性、森林防疫, 19(5):118-121
- 4) 岩井宏寿・渡辺昭夫、1977：九十九里平野で発生した異常乾燥によるスギの被害、千葉県林業試験場研究報告, 1, 7-19.
- 5) 平川 昇、1982：福島県における豪雪被害と今後の林業技術を考える、山林, (1182), 23-31.
- 6) 北島 博、1993：スギカミキリ卵の孵化に与える湿度の影響と温度と卵機能との関係、44回日林関東支論, 127-128
- 7) 小林一三、1984：スギカミキリとヒメスギカミキリ成虫の休眠と材からの脱出の温度条件、95回日林論, 491-492
- 8) 小林一三・柴田叡式、1985：スギカミキリの被害と防除法、わかりやすい林業研究解説シリーズ, (77):1-82
- 9) 正木幹人、1985：高知県下に発生したスギ・ヒノキ集団枯損の原因調査、森林防疫, 34, 104-111.
- 10) 真下育久、1970：林木の成長に関与する環境因子の重要度、森林立地, 6(2), 29-31. :
- 11) 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, pp. 123, 全国林業改良普及協会, 東京
- 12) 松本陽介、丸山 温、森川 靖、1992 a：スギの水分生理特性と関東平野における近年の

- 気象変動一樹木の衰退現象に関連して一. 森林立地 34(1)、2-13
- 13) 松本陽介・丸山温・森川靖・井上敏雄、1992b: 関東平野におけるスギの衰退要因、森林立地、34(2)、85-97
 - 14) 中川仁男・池田武文・高畑義啓、1997: 1994年の滋賀県におけるスギ・ヒノキ人工林の集団枯損被害について、森林防疫、46, 3, 7-13.
 - 15) 根岸賢一郎、1966: アカマツ、スギ、ヒノキ1年生ナエのCO₂同化、呼吸、生長、東大演習林報告(62):1-115. (英文)
 - 16) Negishi, K.、1977: Seasonal changes in rate of photosynthesis and growth of *Pinus densiflora*, *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtuse* seedlings in their second vegetation season. Bicentenary Celebration of C. P. Thunberg's Visit to Japan, Royal Swedish Embassy & Botanical Society of Japan, Tokyo, 77-89.
 - 17) 野淵輝・楨原寛・藤田和幸、1987: スギカミキリの樹体内での発育と死亡率 II, 98 回日林論, 471-472
 - 18) 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
 - 19) 佐々木長儀・岡上正夫、1965: スギの寒風害発生危険地域画定の一つの試み, 林業技術, (285), 11-14.
 - 20) 竹谷昭彦・奥田素男・細田隆治、1975: マツの激害型枯損木の発生環境—温量からの解析—、日林誌 57 169-175.
 - 21) Togashi, Katsumi, 1987: Diapause termination in the adult *criptomeria* bark borer, *Semanotus japonicus* (Coleoptera: Cerambycidae), Kontyu, 55:169-175
 - 22) 吉野正敏、1999: エル・ニーニョ年とラ・ニーニョ年における自然災害・農業水産生産, 日本農業気象学会北陸支部会誌, 24, 30-33.

[国際共同研究等の状況]

東欧における衰退森林の原因解明および対策立案に関する基礎的研究を JICA を通じて行った。タトラ国立公園(スロバキア共和国)の欧州トウヒを主体とした天然林および人工林の衰退が進行しており、EU、ポーランド、および米国の研究機関からはオゾンなどの大気汚染ガスが衰退原因ではないかとの見地から調査研究が行われているが、いまだ結論を得ていない。

これに対して、本研究メンバーである埴田宏(1999年秋)および松本陽介(2000年秋、2001年秋)が現地調査を行った結果、初夏の降水量の激減や北海方面からの強風頻度の増加など気象変化、すなわち温暖化による気候変化が大きく関与している可能性が高いことを指摘した。

これまでのところ、スロバキア共和国土地利用省森林局タトラ国立公園事務所附属研究センターに2001年3月に1名、秋に2名の研究者が現地調査にでかけ、また、2000年秋、2002年春に現地研究者の招聘を行うなど、相互の密接な研究情報交換を行った。

[研究成果の発表状況]

(1) 誌上发表(学術誌・書籍)

- ① 松本陽介、田中格、小菅進吉、丹原哲夫、上村章、重永英年、石田厚、奥田史郎、丸山温、

- 森川靖：森林立地、41、2、113-121 (1999)
「日本産広葉樹 41 樹種の当年生陽葉における最大ガス交換速度のスクリーニング」
- ② 松本陽介：森林の環境 100 不思議、74-75、東京書籍、東京 (1999)
「変わりゆく上高地」
- ③ 松本陽介：森林の環境 100 不思議、104-105、東京書籍、東京 (1999)
「乱高下して高値基調」
- ④ 松本陽介：森林立地調査法、森林立地調査法編集委員会編、284pp、博友社、東京、65-67 (1999)
「光合成速度」
- ⑤ 埴田 宏：森林の環境 100 不思議、148-149、東京書籍、東京 (1999)
「消えていく白砂青松」
- ⑥ 埴田 宏：森林の環境 100 不思議、10-11、東京書籍、東京 (1999)
「時を越えた風」
- ⑦ 上村 章：森林の環境 100 不思議、92-93、東京書籍、東京 (1999)
「洗濯物の乾きやすさ」
- ⑧ A. Uemura, A. Ishida, T. Nakano, I. Terashima, H. Tanabe, and Y. Matsumoto: Tree Physiology, 20, 945-951 (2000)
“Acclimation of leaf characteristics of *Fagus* species to previous-year and current-year solar irradiances”
- ⑨ 藤田和幸：JPC2、地球温暖化の日本への影響 2000 (地球温暖化問題検討委員会影響評価ワーキンググループ編)、2.25-2.28 (2001)
「森林昆虫への影響」
- ⑩ 藤田和幸：日本の松の緑を守る No. 74、(社)日本の松の緑を守る会、(2001)
「地球温暖化によってマツ材線虫病被害地域は拡大するか」
- ⑪ 藤田和幸：森林総合研究所関西支所研究情報 61、(2001)
「地球温暖化予測を地域から眺める」
- ⑫ A. Ishida, T. Nakano, A. Uemura, N. Yamashita, H. Tanabe, and N. Koike: Tree Physiology, 21, 497-504 (2001)
“Light-use properties of two sun-adapted dwarf shrubs with contrasting canopy structures”
- ⑬ 松本陽介、野田 巖：森林立地、43、2、59-73 (2001)
「中央ヨーロッパの山地・山岳林の現状」
- ⑭ 松本陽介 (共著)：(日本林業技術協会編、共著). 丸善、東京、1,250pp (2001)
「森林・林業百科事典」
- ⑮ 松本陽介 (共著)：日本緑化センター、東京、511pp (2001)
「最新・樹木医の手引き」
- ⑯ 松本陽介：海外研究業務報告(2000年)、森林総合研究所、36-40 (2001)
「スロバキア共和国タトラ国立公園における森林の環境影響評価。」
- ⑰ 埴田 宏：地球温暖化問題検討委員会影響評価ワーキンググループ、地球温暖化の日本

への影響 2001、2、21-25(2001)

「人工林への影響」

- ⑱ 埜田 宏：地球温暖化問題検討委員会影響評価ワーキンググループ、地球温暖化の日本への影響 2001、3、31-37(2001)

「林業への影響」

- ⑲ Y. Matsumoto, and Y. Maruyama : Diversity and Interaction in a temperate forest community, Ogawa Forest Reserve of Japan. (Ecological Studies 158), Springer Tokyo, 201-213 (2002)

“Gas exchange characteristics of major tree species in Ogawa Forest Reserve”

- ⑳ Nakashizuka, T., Matsumoto, Y. (Eds): Ecological Studies 158, Springer, Tokyo, 319pp, (2002)

“Diversity and Interaction in a Temperature Forest Community: Ogawa Forest Reserve, Japan”

- (21) I. Terashima, K. Kimura, K. Sone, K. Noguchi, A. Ishida, A. Uemura, and Y. Matsumoto : Diversity and Interaction in a temperate forest community. Ogawa Forest Reserve of Japan., (Ecological Studies 158), Springer Tokyo, 187-200(2002)

“Differential analyses of the effects of the light environment on development of deciduous trees: Basic studies for tree growth modeling”

- (22) 松本陽介、小池信哉、河原崎里子、上村 章、原山尚徳、奥田史郎、斉藤隆実、石田 厚、埜田 宏：森林立地、44、2、(印刷中)

「関東平野における樹木衰退の現状」

- (23) 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、(印刷中)

「関東平野におけるスギ林衰退と土壌要因」

(2) 口頭発表

- ① 重永英年、長倉淳子、赤間亮夫：第 111 回日本林学会大会 (2000)

「高温と空気乾燥がスギの光合成速度に及ぼす影響」(学術講演集印刷済み、p430)

- ② 重永英年、長倉淳子、赤間亮夫：第 112 回日本林学会大会 (2001)

「スギ成木針葉の光合成特性におよぼす温度の影響、」(学術講演集印刷済み、p344)

- ③ 大河内勇、井上大成：第 113 回日本林学会大会講演要旨集 (2002)

「地球温暖化はスギカミキリ被害を変えるか？」(学術講演集印刷中)

- ④ 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：第 49 回日本生態学会 (2002)「関東平野におけるスギ林衰退と土壌要因」(講演要旨集印刷済み、p213)

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

- ①読売新聞(京都版)と京都新聞(2001年6月28日、6月27日の第30回松林(海岸林)保護育成シンポジウム(京都府宮津市)の講演に関する取材に基づく紹介)
- ②京都新聞朝刊(2001年10月12日、10月9日の気候ネットワーク(NPO)の集会で話題提供する内容に対する事前取材に基づく紹介)
- ③NHK総合テレビ(2002年4月29日月曜日 PM10:00以降11:00前の6分程度、番組名:ニュース10、スギの温暖化影響を温暖化影響予測マップを使って紹介した。また、スギの衰退の例としてつくば市の一の矢神社の衰退したスギを紹介した。)

(6) その他成果の普及、政策的な寄与・貢献について

今後、森林総合研究所の広報などを通じ、成果の広報・普及に努める。また、各種学会や一般普及誌などへの発表や投稿に努める。