

論文 (Original article)

異なる土性のライシメータに植栽されたスギ、 ヒノキ成木における降雨遮断による乾燥害症状

長倉淳子^{1)*}、重永英年²⁾、三浦覚¹⁾

Symptoms of drought stress following rainfall interception in sugi (*Cryptomeria japonica*) and hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) trees planted in lysimeters filled with soil of different textures

Junko NAGAKURA^{1)*}, Hidetoshi SHIGENAGA²⁾ and Satoru MIURA¹⁾

Abstract

To examine the symptoms of drought stress and determine the number of non-rainy days before the occurrence of such symptoms, we performed a drought experiment in which we intercepted rainfall to keep it from reaching 24-year-old sugi (*Cryptomeria japonica*) and hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) trees planted in lysimeters filled with clay loam or sandy loam. Drought treatment started on 29 July 2004. Soil drying progressed more rapidly in the sugi clay loam plot than in the sugi sandy loam plot. In the sugi clay loam drought plot, the soil water potential reached -80 kPa after 30 days of drought treatment, whereas the sugi sandy loam drought plot required 18 more days to reach this state. Among the treatments, drought symptoms were first observed in the sugi tree planted in clay loam, with trunk shrinkage and needle discoloration confirmed 48 and 79 days after the start of drought treatment, respectively. Needle discoloration started around the main shoot, although the tips remained green initially. The discolored area spread gradually, and the tip of the main shoot turned brown 100 days after the start of drought treatment. Trunk shrinkage of the sugi tree planted in sandy loam was detected 110 days after the start of drought treatment, and the whole crown turned reddish-brown due to low temperature before the needle discoloration caused by drought. The old needles of all hinoki trees became brown and defoliated in mid-November regardless of rainfall conditions. The hinoki planted in sandy loam that was denied rainfall exhibited far more brown needles, particularly on the lower branches, although the main shoot remained green. This experiment demonstrates that symptoms of drought stress in sugi and hinoki trees progress differently, and the number of non-rainy days before the occurrence of trunk shrinkage or needle discoloration varies depending on soil texture.

Key words: clay loam, drought, needle discoloration, sandy loam, water stress

要旨

スギならびにヒノキ個体で乾燥害の症状が発生し枯死に至る過程、および症状が発生するまでの無降水期間を明らかにするために、埴壌土または砂質壤土を充填したライシメータに植栽された24年生スギ、ヒノキを対象に、地表面への降雨を遮断する土壌乾燥処理を行なった。土壌乾燥処理は2004年7月29日に開始し、土壌乾燥の進行が最も早かったスギ埴壌土区では30日後に、最も遅かったスギ砂質壤土区でも48日後には土壌水分ポテンシャルが-80kPaに達していることが確認された。乾燥害症状は埴壌土に植栽されたスギで最も早く発生し、処理開始から48日後に幹の収縮、79日後に葉の変色が観察された。葉の変色は梢端付近の褐変から始まり、その時点では梢端は緑色だったが徐々に変色部位が広がり、100日後には梢端まで褐変が認められた。一方、砂質壤土に植栽されたスギでは処理開始から110日後まで幹の収縮がみられず、葉の変色は不明瞭なまま低温により樹冠全体が赤褐色になった。ヒノキは降雨遮断の有無に関わらず、11月中旬に旧葉が褐変し落葉した。降雨遮断した砂質壤土に植栽されたヒノキは、他の個体と比較して下枝を中心に褐変葉が多く観察された。これらの結果から、幹の収縮や葉の変色といった乾燥害症状が発生するまでの無降水期間は土壌によって異なること、葉の変色症状はスギとヒノキで進行の仕方が異なることが示唆された。

キーワード: 埴壌土、乾燥害、葉の変色、砂質壤土、水ストレス

原稿受付: 平成23年5月23日 Received 23 May 2011 原稿受理: 平成23年10月5日 Accepted 5 October 2011

1) 森林総合研究所立地環境研究領域 Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 森林総合研究所九州支所 Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

* 森林総合研究所立地環境研究領域 〒305-8687 茨城県つくば市松の里1 Department of Forest Site Environment, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI), 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki 305-8687, Japan, e-mail: kurya@ffpri.affrc.go.jp

1. はじめに

乾燥害は干害ともいい、土壤乾燥が原因で起こる植物の葉の変色や枯死を指す。土壤中の水分の不足により植物が吸水できなくなり、組織や細胞が脱水されることによって発生する。造林木では植栽直後から一齢級以内の幼齢木の被害が多い（柳沢ら、1980；久保山ら、2003）。スギ、ヒノキ幼齢木の乾燥害症状は、まず梢端の針葉が枯れ、樹冠上半部、樹冠全体へと枯れが進行していく。梢端枯れの時点で十分な降雨があれば枯死には至らない。中・壮齢林における乾燥害の報告は幼齢木に比べると少ないが、九州地方（小河、1996；讃井、1998b；西村・讃井、1999）、四国地方（加藤ら、1989）、関西地方（中川ら、1997）では少雨や無降水日の連続が原因と考えられるスギ、ヒノキ中・壮齢林の枯損が報告されている。また、全国の民有人工林気象災害の被害率によると、近年21年生以上の林分で乾燥害の発生が増加している（久保山ら、2003）。

温暖化にともない、日本でも気温の上昇や降水量、降水パターンの変化が予想されている（IPCC, 2007）。気温の上昇は蒸散を促進し、降水量の減少や無降水期間の長期化は土壤水分量の減少を招く。Shigenaga et al. (2005) は、気温が3℃上昇した場合、スギ人工林の蒸散量は8–18%増加するため、降水量が現在と変わらなければ水分環境が悪化し、スギが衰退する地域が広がる可能性を示している。主要な造林樹種であるスギとヒノキを比較すると、スギはヒノキよりも水消費量が多いため（Nagakura et al., 2004）、乾燥害はヒノキ林よりスギ林で発生しやすいことが予想される。実際、関東平野の都市近郊で広範囲に観察されるスギ人工林の衰退は、水ストレスに対する感受性が高いスギの樹種特性と近年の気温上昇の2つが主な原因と考えられている（Sakata, 1996., Shigenaga et al., 2005, Matsumoto et al., 2006）。したがって、温暖化が進行すれば中・壮齢林でもスギを中心に乾燥害発生の危険性が高くなる。また、土壤型を元に全国の土壤の保水容量を評価し、水ストレス発生危険度が高い地域を抽出した報告では、実際にスギ人工林の衰退のみられる地域のうち三河地方、瀬戸内地方が抽出されている（Matsumoto et al., 2006）。スギ林衰退の地域性には、保水容量が小さいという潜在的に水ストレスが発生しやすい土壤の性質が関与していることが予想される。土壤乾燥により樹木に乾燥害が発生するまでの期間および乾燥害の進行過程を知ることが、乾燥害の発生予測や早期発見の点で重要であるが、成木についての知見は少ない。本研究では、土壤の違いに着目しながら、土壤乾燥によるスギ、ヒノキ成木の枯死過程、および乾燥害が発生するまでの無降水期間を明らかにすることを目的とした。具体的には砂質壤土または埴壤土に植栽されたスギ、ヒノキ成木を対象に、降雨を遮断し

て無降水日の連続を再現する土壤乾燥試験を行った。

2. 材料と方法

試験地

森林総合研究所千代田試験地（茨城県かすみがうら市）内の平面ライシメータに植栽された24年生スギ、ヒノキ成木（2004年時点）を試験に用いた。ライシメータは1977年に2m間隔で4基を4列の計16基建設された（Fig. 1）。いずれのライシメータも壁厚20cmのコンクリート製で、縦×横×深さが2m×2m×1m、底部には排水穴があり、最下部20cmには排水用に砂利が敷かれている。各ライシメータの脇には、底部に排水穴を持つ塩化ビニルパイプ製のタンク（直径50cm）が埋設されている。これらのタンクはライシメータの排水穴とつながっており、タンクの水位を調節することによりライシメータの排水状態を調節することができる。北側8基には千代田試験地付近で採取した関東ローム層の下層土が、南側8基には千葉県第三紀層砂層の下層土が80cmの厚さで充填されている。それぞれの土性（土壤の粒径組成）は埴壤土（CL）と砂質壤土（SL）で、砂質壤土は埴壤土に比べて細孔隙（-50kPa以下の張力で水を保持する小さな孔隙）率が小さかった（的場ら、1995）。1980年に南端4基と北端4基にヒノキが、内側8基にスギが、1m間隔で1基につき4本植栽され、ライシメータの周囲にも同じ間隔でそれぞれの樹種が植栽された（10000本ha⁻¹）。植栽後2年間は施肥試験が行なわれた。その後は自己間引きにより本数が減少した他、1993年に水質試験のため一部の植栽木が伐採された（小野寺ら、1996）。2003年3月時点の本数密度は約4700本ha⁻¹で、植栽木が残っているライシメータは7基だった。

降雨遮断による土壤乾燥試験

本研究では、植栽木に残っている5基と無立木の2基の計7基のライシメータを使用した（Fig. 1）。植栽木が残っていても成長が著しく不良な1基と予備実験に使用した1基は使用しなかった。スギについては、砂質壤土と埴壤土の各1基に降雨を遮断する処理を行う乾燥区を設置し、埴壤土の1基に降雨遮断を行わない対照区を設置した。ヒノキについては、砂質壤土の1基に乾燥区を設置し、埴壤土の1基で対照区を設置した。これらに加えて、樹木がない場合の水損失を評価するために、無立木の砂質壤土と埴壤土各1基に対し降雨遮断を行う乾燥区を設置した。対照区については、樹木に水ストレスが発生するような土壤が強く乾燥した状態になることを防ぐため、夏季に数回土壤表面から散水を行なった。立木本数は、スギ砂質壤土乾燥区とスギ埴壤土乾燥区が1本、ヒノキ砂質壤土乾燥区は2本、スギ対照区は2本、ヒノキ対照区は3本であった。

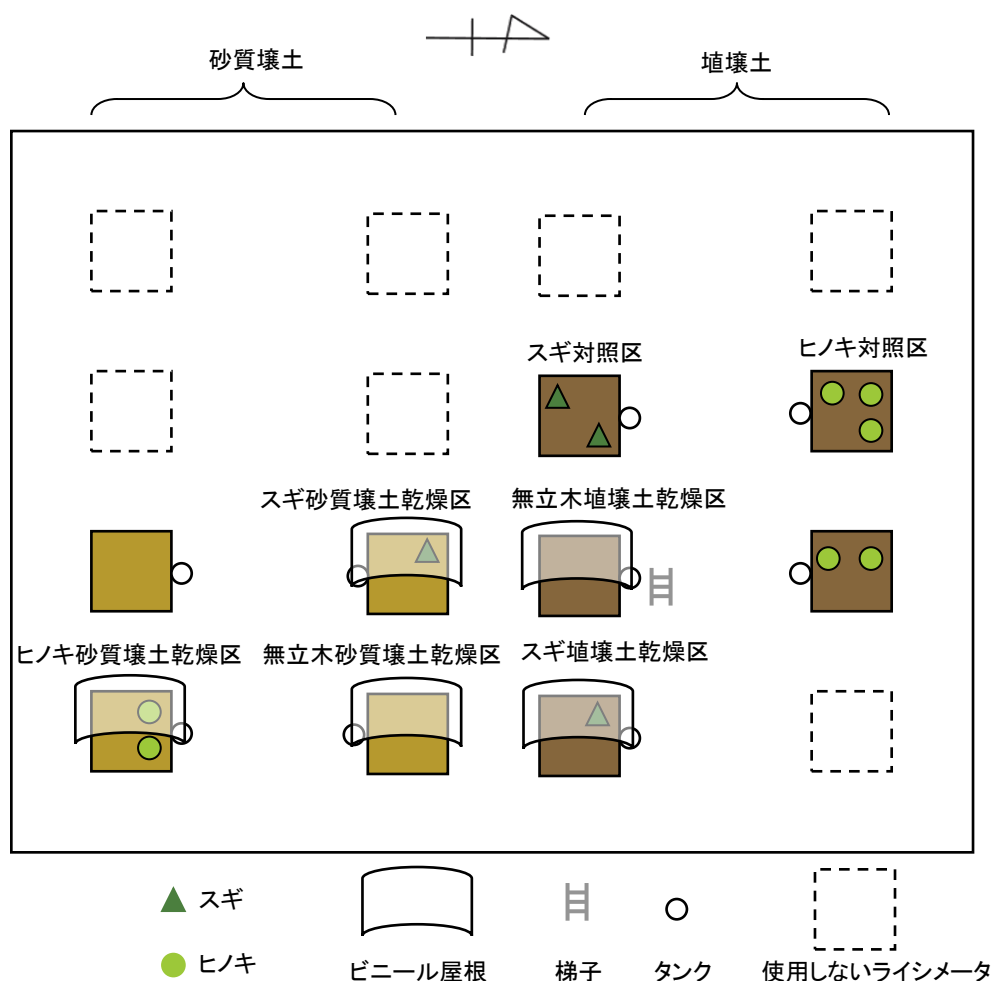


Fig. 1. 使用したライシメータの位置図
Schematic diagram of the lysimeter

2004 年 7 月に、ライシメータ内に入る降雨を遮断するため、乾燥区の地上高 1.5 – 2m にビニール製の屋根をかけ、側面には寒冷紗を垂らした (Photo 1)。同年 7 月 20 日に、試験に用いる 7 基のライシメータ全部について、脇のタンクの排水穴に栓をしてから徐々に注水して充填土壌を底部から浸水させて、数時間後栓を抜いて排水した。7 月 27 日に再度タンクに水を貯め、28 日にはタンクに水を足すとともに、1 基につき約 600L の水を土壌表面からホースで撒くことによって充填土壌全体を飽水させた後、29 日に栓を抜いて自然排水させ、土壌乾燥処理を開始した。

樹幹周囲長の測定と樹冠の観察

乾燥害の発生時期を確認するために、経時的に樹冠の観察と樹幹周囲長の測定を行った。樹幹周囲長は、目視だけでは判別しにくい乾燥害の発生時期を幹の収縮という点から明らかにすることと、試験に用いた個



Photo 1. 降雨遮断の様子 (ヒノキ砂質壤土乾燥区)
A drought experiment via rainfall interception
(hinoki sandy loam drought plot)

体が標準的な成長をしている個体であることを確認することを目的として測定した。樹冠の観察および写真撮影は、ライシメータ外のスギ1本に梯子を設置し、その上部から定期的に行なった。梯子からでは観察・撮影が困難な個体については、周辺道路や千代田試験地内タワー上から、フィールドスコープ(Field scope ED, Nikon)の接眼部に直結したデジタルカメラで望遠撮影した。樹幹周囲長は、平面ライシメータ敷地内のすべての立木に地上高1.2mの部位にバンドデンドロメータを設置して、経時的に測定した。測定は土壤乾燥処理を開始する前年の2003年3月4日に開始し、4月－9月の成長期には1－2週間に1回、それ以外の期間には2－4週間に1回の頻度で行った。スギ対照区の2本、ヒノキ対照区の1本のデンドロメータは2004年5月12日に付け直した。各個体の胸高直径はデンドロメータで測定した地上高1.2mの樹幹周囲長から求めた。胸高直径の増加率は2003年3月4日の値(初期値)に対する相対値として算出した(直径増加率 = (測定値－初期値) / 初期値 × 100 (%))。

伐倒調査

土壤乾燥処理の開始から1年経過した2005年8月に、使用したライシメータ内の立木をすべて伐倒・抜根し、幹、葉、枯葉、枝、枯枝、球果、根の部位別に分けた後、現場で生重量を測定した。地上部は伐倒後に樹高、胸高直径を測定し、根は吊した状態で幅と深さを測定した。幹は地上高0mと1.2mで切り、以降は2mごとに切りわけて生重量を測定した。対照区のスギについては、当年葉と旧葉に分け、針葉が付いていても形態的に枝の特徴の強いものは「緑枝」、針葉がほとんど見られない褐色の枝を「枝」とした。スギの当年葉と旧葉は地上高10.2－14.2mについて1m毎の層別に分けた。乾燥区の個体は、完全に枯れていたため、枯葉と枯枝をひとまとめにして測定した。根に付着した土は高圧ホースで水をかけて取り除いた。幹以外の各部位の一部は研究室に持ち帰って生重量を測定し、3日間75℃の乾燥機で乾燥させた後に重量を測定し、湿量基準の含水率を算出した。幹については高さ別に切り分けた丸太の下部から厚さ10cmの円盤をとり、5日間75℃の乾燥機で乾燥させた後に重量を測定し、含水比(乾量基準の含水率)を求めた。各部位の乾燥重量は、生重量に乾燥係数(1－含水率)を乗じて求めた。また、持ち帰った葉試料の一部を粉碎し、単位乾重あたりの窒素含有量をNCアナライザー(スミグラフNC22F、住化分析センター)により測定した。スギの葉は層別に採取したが、窒素含有量は加重平均して個体ごとの値として示した。ヒノキの葉は層別ではなく、各個体の陽樹冠から1サンプルを採取し窒素含有量の分析に供した。

土壤水分ポテンシャルの測定と気象データ

土壤水分ポテンシャルを直読式テンシオメータ(大起理化工業)で測定した。センサーは乾燥区では深度15、35、60cm、対照区では深度20cmに設置した。測定は2004年4月13日から開始した。土壤乾燥処理開始から土壤が測定限界まで乾燥するまでの期間は週1回、それ以外の期間は2-4週間に1回の頻度で測定した。テンシオメータは内部の水が凍結すると破損し測定不能となるため、同年12月17日に水を抜いて測定を中断し、2005年4月22日に測定を再開した。

2003年から2005年の月平均気温および月降水量については、千代田試験地に最も近いアメダス観測地点である土浦気象観測所のデータを利用した(<http://www.jma.go.jp/>)。

3. 結果

気象条件と土壤水分ポテンシャル

2004年は、前後の年と比較して2月と7月の気温が高く、1－2月および7－8月の降水量は少なかったが、2つの台風到来により10月の降水量が著しく多かった(Fig. 2)。

スギ埴壤土乾燥区は、植栽木が1本であったが他の乾燥区に比べて土壤乾燥の進行が早かった(Table 1)。各深度とも土壤乾燥速度はほぼ同じで、土壤乾燥処理開始から30日経過した8月27日には、各深度とも土壤水分ポテンシャルがテンシオメータの測定限界の-80kPaに達していることを確認した(Fig. 3a)。スギ砂質壤土乾燥区は、スギ埴壤土乾燥区と同様に植栽木は1本であったが、土壤乾燥の進行は特に深度60cmで遅く、各深度の土壤水分ポテンシャルが-80kPa以下になったことを確認したのは処理開始から48日経過した9月14日であった(Fig. 3b)。ヒノキ砂質壤土乾燥区で土壤水分ポテンシャルが-80kPaに達していることを確認したのは処理開始から36日後の9月2日だった(Fig. 3c)。

無立木の場合は、土壤乾燥の進行が遅く、土壤乾燥処理の開始から1年経過しても土壤水分ポテンシャルが-30kPa以下に低下することはなかった(Fig. 3d, 3e)。無立木の乾燥区では、土壤乾燥の進行は深度15cmにおいて最も早く、深度が深いほど遅かった。対照区は夏には散水を行なったため、最も乾燥した時でも土壤水分ポテンシャルは-40kPaで、土壤乾燥試験の期間中に土壤が強く乾燥することはなかった(Fig. 3f)。

葉の変色

土壤乾燥処理開始から50日経過した2004年9月16日の観察では、各乾燥区の樹冠に可視的な変化は認められなかった(Photo 2a, 3a, 4a)。土壤乾燥の進行が最も早かったスギ埴壤土乾燥区では、79日経過した

Table 1. 各症状が最初に観察された日（括弧内は土壤乾燥試験開始からの経過日数）
First day that each of the symptoms was observed. (In parentheses, the number of non-rainy days until the occurrence of symptoms of drought stress.)

樹種	土壌	処理	個体 No.	土壤水分ポテンシャルが -80kPa まで低下	幹収縮	梢端付近の変色	梢端の変色	旧葉の褐変増加	樹冠全体の変色
スギ	埴壤土	乾燥区		2004/8/27 (30日)	2004/9/14 (48日)	2004/10/15 (79日)	2004/11/5 (100日)	—	※2005/4/22 (268日)
スギ	砂質壤土	乾燥区		2004/9/14 (48日)	2004/11/15 (110日)	※2005/4/22 (268日)	※2005/4/22 (268日)	—	※2005/4/22 (268日)
ヒノキ	砂質壤土	乾燥区	1	2004/9/2 (36日)	2004/10/1 (65日)	※2005/4/22 (268日)	※2005/4/22 (268日)	2004/11/18 (113日)	※2005/4/22 (268日)
ヒノキ	砂質壤土	乾燥区	2	2004/9/2 (36日)	2004/10/15 (79日)	※2005/4/22 (268日)	※2005/4/22 (268日)	2004/11/18 (113日)	※2005/4/22 (268日)

※ 低温により赤化した葉色が回復するまで、乾燥による変色が判別できなかった

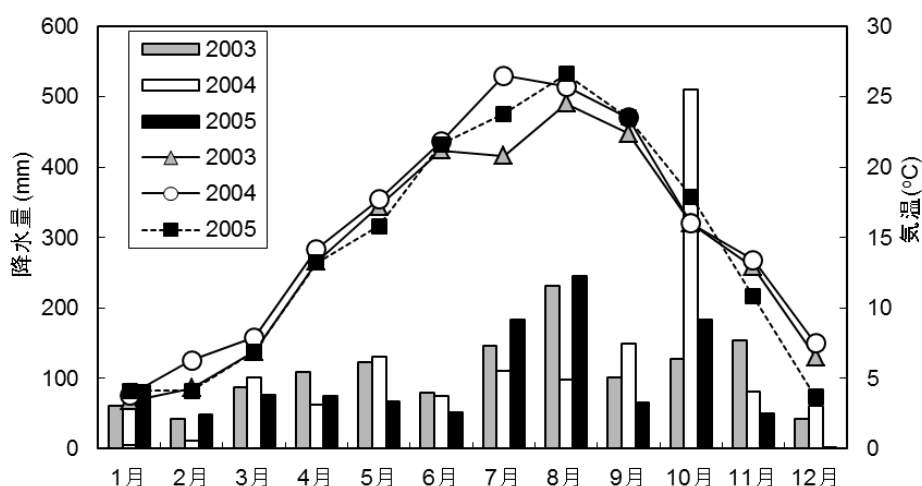


Fig. 2. 2003 – 2005 年の月降水量と月平均気温
Monthly mean precipitation and temperature between 2003 and 2005

2004 年 10 月 15 日の観察で、梢端（先端から約 1cm の部位）付近の葉が斑状に褐変していることを確認した (Photo 2b)。変色は梢端から始まったわけではなく、86 日経過した 10 月 22 日にも梢端には緑色がわずかに残っていた (Photo 2c)。100 日経過した 11 月 5 日の観察では、梢端まで褐変が認められた (Photo 2d)。一方、スギ砂質壤土乾燥区では、141 日経過した 12 月 16 日になっても樹冠に変色の兆候は観察されなかった (Photo 3b, 3c, 3d)。スギ砂質壤土乾燥区の樹冠の変色が確認されないまま (Photo 3e)、低温により乾燥区以外のスギも葉色がくすみはじめたことを 2005 年 1 月 11 日の観察で確認した (Photo 2g, 3e)。2 月には、乾燥処理の有無に関わらずすべてのスギで陽樹冠全体が赤褐色になり、土壤乾燥による葉の変色と区別できなくなった (Photo 2h, 3f)。

ヒノキは、土壤乾燥処理開始から 113 日経過した 11 月 18 日の観察で、乾燥処理の有無に関わらずすべての個体で下枝（樹冠の下半分）を中心に旧葉の褐変が確認された (Photo 4b)。ヒノキ砂質壤土乾燥区の個体では、対照区やライシメータ外の個体よりも褐色葉

が多く見受けられたが、梢端および梢端付近は緑色だった (Photo 4b, 4c)。141 日経過した 12 月 16 日には、周囲のヒノキは褐色葉の大部分が落葉し、樹体に残っている褐色葉は少なかったが、ヒノキ砂質壤土乾燥区では緑葉が少なく褐色葉が目立った (Photo 4d)。しかし、2005 年 1 月になっても梢端は変色していなかった (Photo 4e)。2 月になると、低温により乾燥処理の有無に関わらずすべてのヒノキで樹冠全体の色がくすみ黄褐色になった (Photo 4f)。ヒノキ砂質壤土乾燥区の個体では、下枝の葉はほとんど落葉したが、梢端の葉は褐変せず残存していた (Photo 4g)。3 月になっても樹冠全体の色がくすんでいたために梢端の褐変は不明瞭だった (Photo 4h)。

スギ、ヒノキともに乾燥区の個体における樹冠全体の褐変は、2005 年 4 月下旬に周囲の個体の葉色が回復してから明確になった (Photo 5a)。スギは砂質壤土乾燥区、埴壤土乾燥区ともに、陽樹冠は完全に枯死して赤褐色になり、陰樹冠も色がくすんだまま葉色は回復しなかった (Photo 5a, 5b, 5c)。ヒノキ砂質壤土乾燥区は下枝が枯れ上がり、梢端に葉が残っていたもの

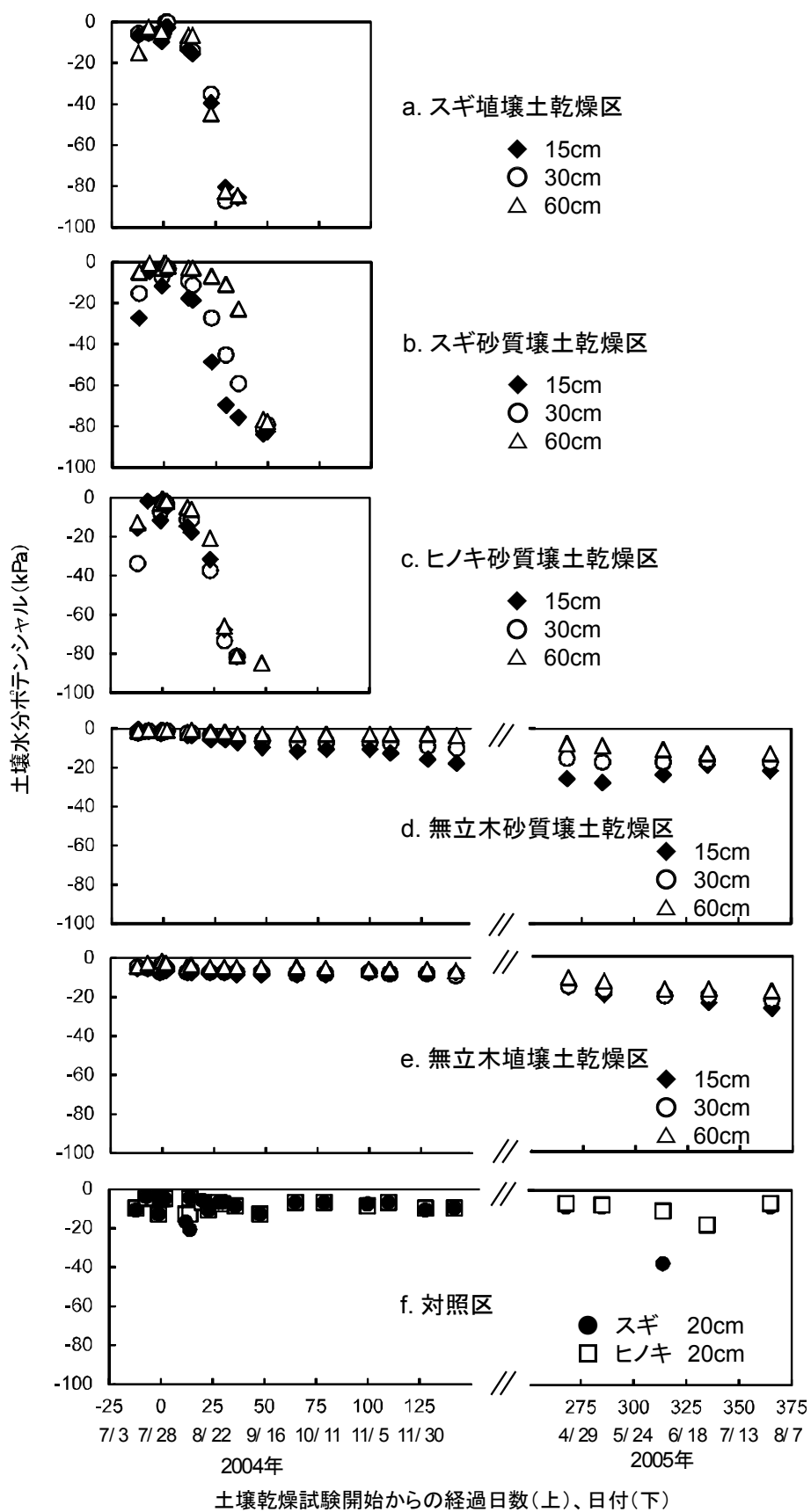


Fig. 3. 土壌水分状態の経時変化.
Changes in soil moisture conditions.

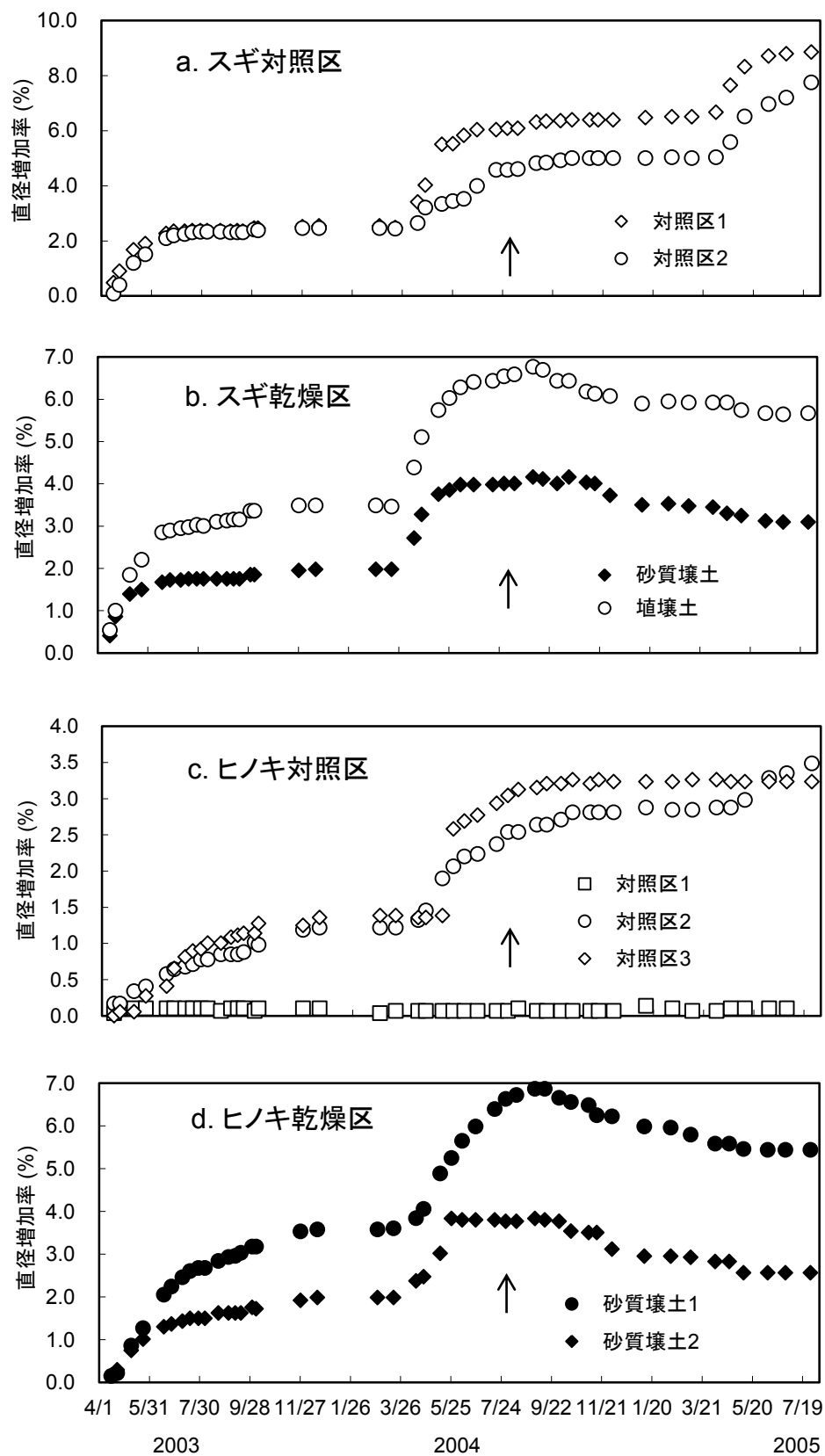


Fig. 4. 直径増加率の変化 (矢印は土壌乾燥試験の開始を表す)
Changes in diameter (arrows indicate the start of drought treatment).

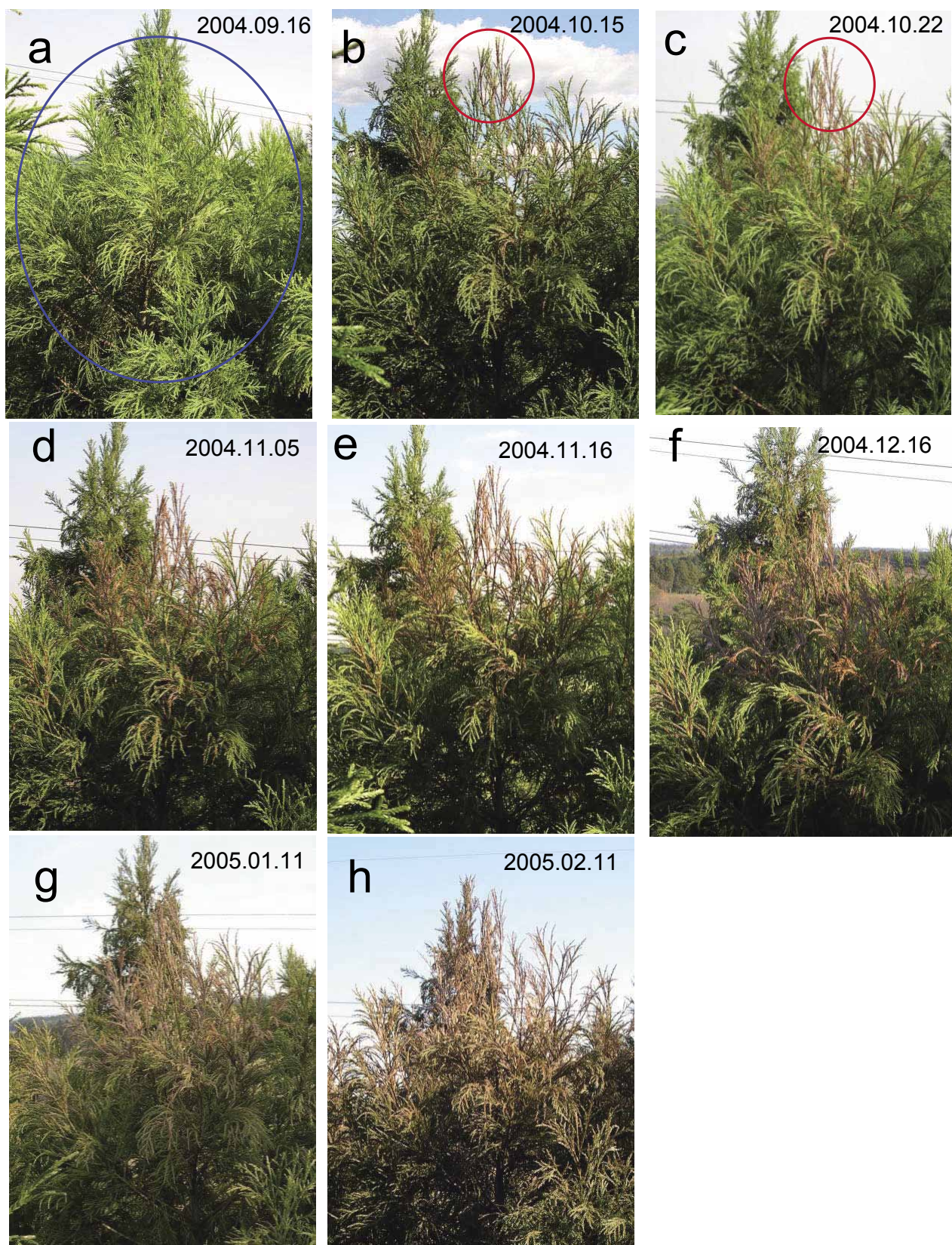


Photo 2. スギ植壌土乾燥区の樹冠部の変化
 a: 青丸で囲んだ個体が試験木, b, c: 赤丸で囲んだ部位に緑色が残っている
 Changes in the crown of the *sugi* tree in the clay loam drought plot.
 a: The blue circle indicates the target tree; b, c: The main shoot tip remained green (red circle)

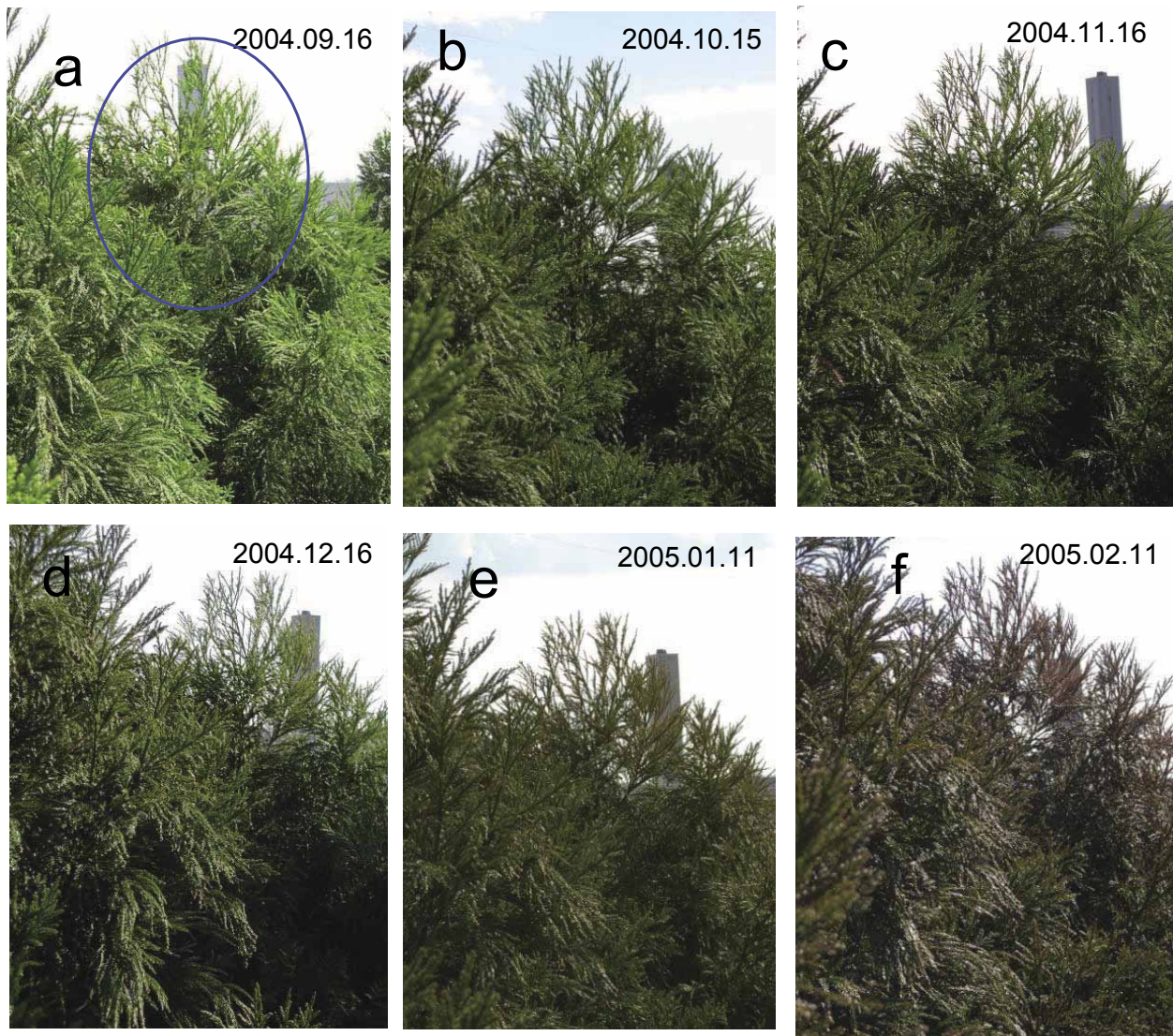


Photo 3. スギ砂質壤土乾燥区の樹冠部の変化 a: 青丸で囲んだ個体が試験木
Changes in the crown of the *sugi* tree in the sandy loam drought plot. a: The blue circle indicates the target tree

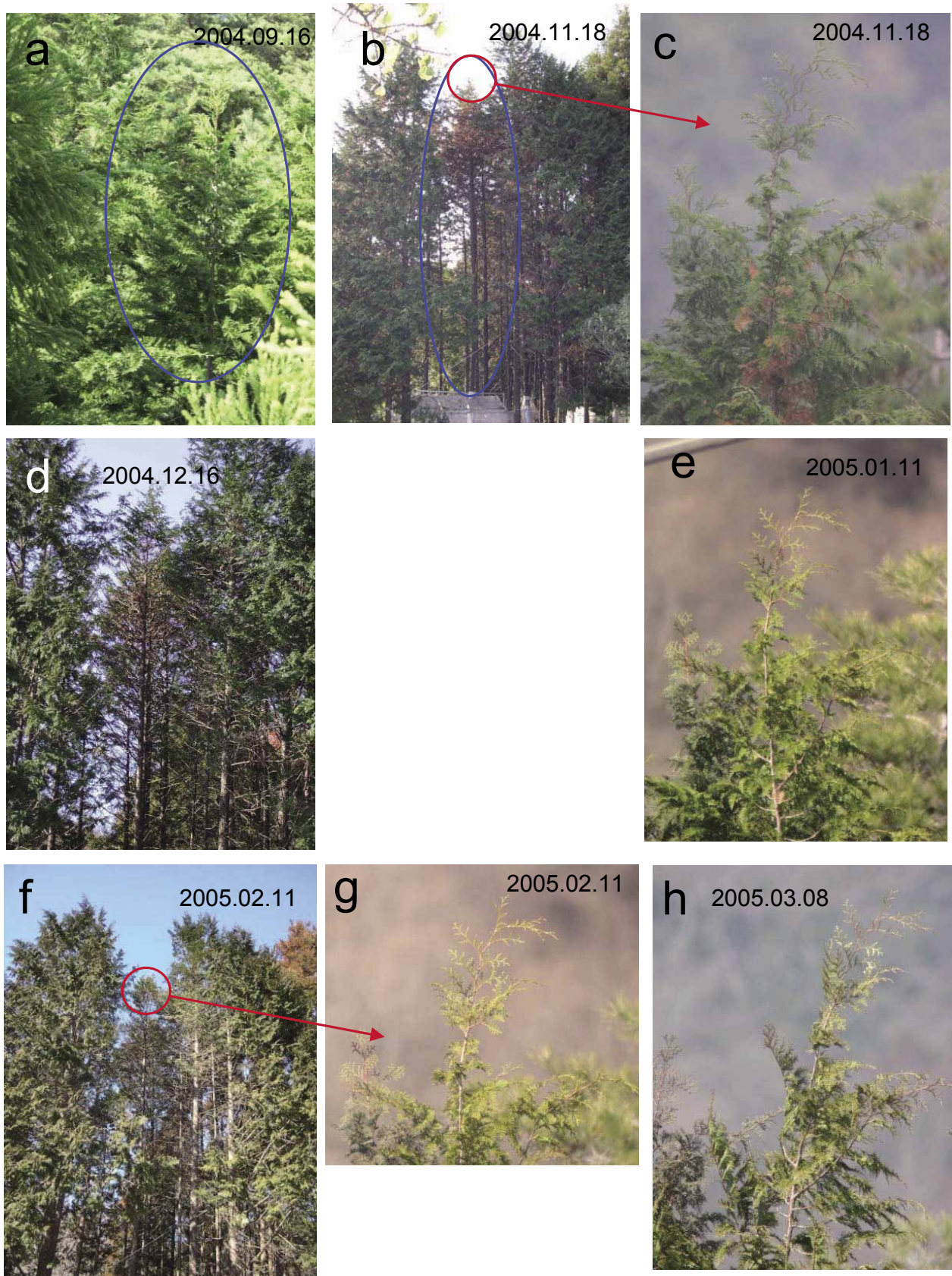


Photo 4. ヒノキ砂質壤土乾燥区の樹冠部の変化 a, b: 青丸で囲んだ個体が試験木
Changes in the crown of the *hinoki* tree in the sandy loam drought plot. a, b: The blue circle indicates the target tree

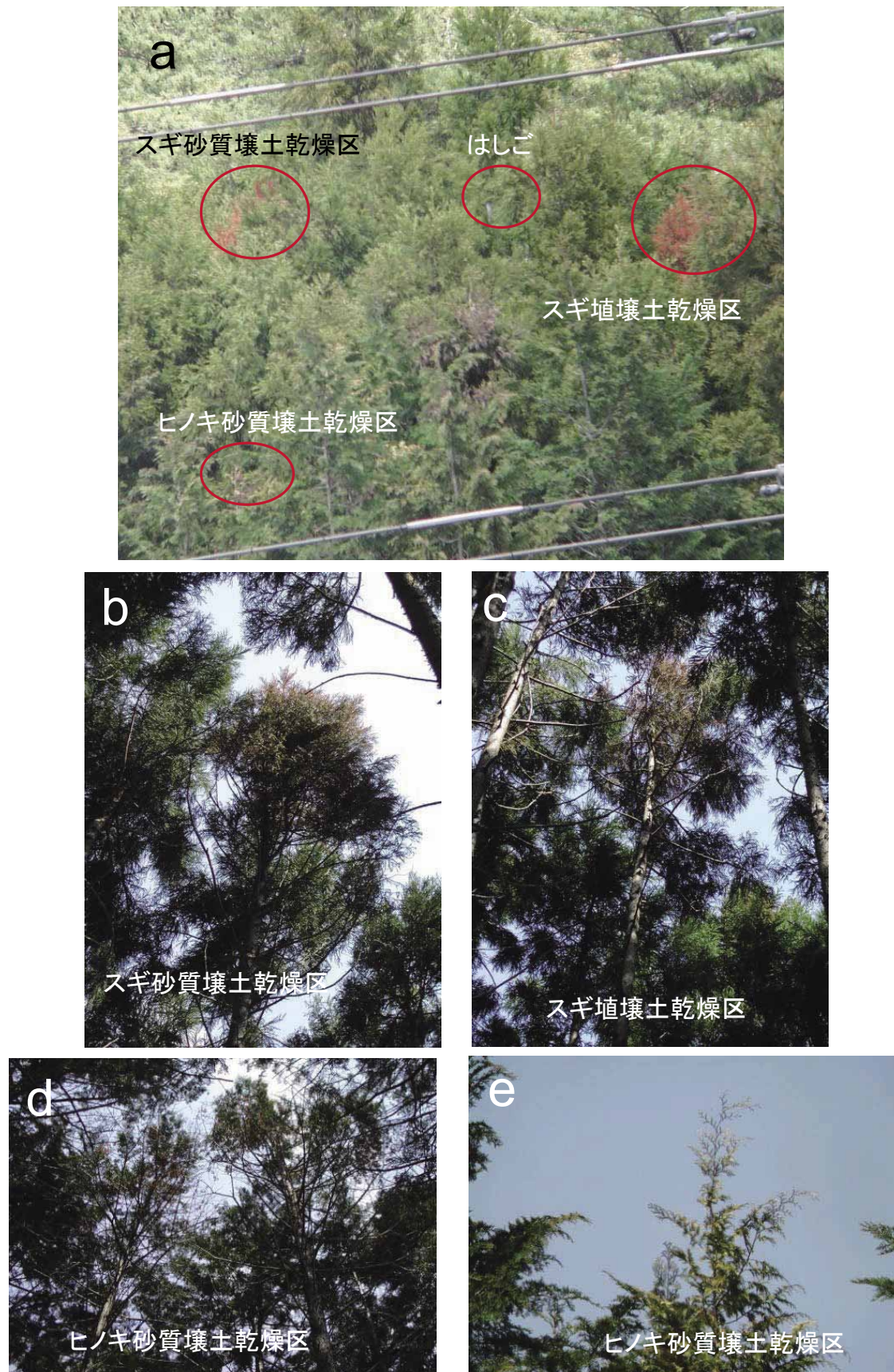


Photo 5. 2005 年 4 月 22 日の様子 . a. 遠景, b. スギ砂質壤土乾燥区, c. スギ埴土乾燥区, d. ヒノキ砂質壤土乾燥区, e. ヒノキ砂質壤土乾燥区の梢端 .
 April 22, 2005. a. Distant view, b. *sugi* sandy loam drought plot, c. *sugi* clay loam drought plot, d. *hinoki* sandy loam drought plot, e. the tip of the main shoot in the *hinoki* sandy loam drought plot.

の、葉色は冬に黄褐色に変色したまま回復しなかった (Photo 5d, 5e)。2005 年 8 月の伐倒時には、乾燥区のスギ、ヒノキは枯死しており、スギの葉は赤褐色になり大部分が林床に落ち、ヒノキの樹冠上半部には赤褐色の葉が残っていたが下枝にはほとんど葉が残っていなかった。スギ乾燥区の枯死針葉上には黒色の菌体が多く見られたが、本菌は病原性が弱く、衰弱した葉に繁殖するフォーマ葉枯病菌 (*Phoma cryptomeriae*) だった (森林総研, 窪野高德, 私信)。

幹の収縮

土壤乾燥試験の前年 (2003 年) には、ライシメータ内外の被圧されていないスギ、ヒノキの多くは 4 月上旬に直径が増加しはじめ、6 月下旬まで急激に増加した (Fig. 4a, 4b, 4c, 4d)。7 月以降は成長速度が緩やかになるものの 12 月まで増加を継続した。

土壤乾燥試験を行った 2004 年にスギが肥大成長を開始したのは前年と同様に 4 月上旬だった。スギ対照区の 2 本のうち 1 本は 6 月下旬、もう 1 本は 7 月上旬まで急激に直径が増加し、その後は 8 月中旬–9 月上旬にやや大きく増加した以外は 10 月下旬まで緩やかな増加が続いた (Fig. 4a)。ライシメータ外のスギの多くも 6 月下旬まで急激に直径が増加して、その後 10 月下旬まで緩やかに増加し続けた (データ省略)。乾燥区以外のスギは 2005 年 4 月上旬に肥大成長を再開した。スギ乾燥区では砂質壤土、埴壤土ともに、6 月上旬まで直径が急激に増加し、その後は増加が緩やかになった。土壤乾燥処理開始 (7 月 28 日) 後もスギ乾燥区の肥大成長は約 1 ケ月続き、8 月中旬–9 月上旬には対照区と同様にやや大きく直径が増加した (Fig. 4b)。スギ埴壤土乾燥区では 9 月 14 日、スギ砂質壤土乾燥区では 11 月 15 日に直径の減少が確認され、2005 年春に直径が増加することはなく、2005 年 8 月に伐倒するまで直径は減少し続けた (Fig. 4b)。

2004 年にヒノキが肥大成長を開始したのも、スギと同様に 4 月上旬だった。ヒノキ対照区 3 本のうち被圧されていた 1 本 (対照区 1) は、2003–2005 年の間、ほとんど肥大成長しなかったが、他の 2 本の肥大成長は 10 月下旬まで続いた (Fig. 4c)。ヒノキ砂質壤土乾燥区の 2 本のうち樹高の高い個体 (砂質壤土 1) は、土壤乾燥処理開始後も 9 月中旬まで大きく肥大成長し続け、10 月 1 日以降は直径の減少が確認された (Fig. 4d)。やや被圧されていた個体 (砂質壤土 2) の肥大成長は 5 月下旬でほぼ停止したが、10 月 15 日まで直径の減少は確認されなかった (Fig. 4d)。ヒノキ砂質壤土乾燥区では 2005 年春に直径が増加することはなく、2005 年 8 月に伐倒するまで直径は減少し続けた (Fig. 4d)。

土壤乾燥試験終了時 (2005 年 8 月 2–3 日) における葉の含水率は、対照区のスギは 0.61 g g^{-1} と 0.63

g g^{-1} であったが、乾燥区のスギでは砂質壤土、埴壤土ともに 0.14 g g^{-1} と大きく減少していた。ヒノキの葉の含水率は対照区では $0.48 - 0.66 \text{ g g}^{-1}$ であったが、乾燥区では 2 本とも 0.22 g g^{-1} とやはり大きく減少していた (Fig. 5)。地上高別に採取した円盤の含水比は、乾燥区のスギは $0.14 - 0.30 \text{ g g}^{-1}$ 、乾燥区のヒノキは $0.21 - 0.30 \text{ g g}^{-1}$ で、スギの幹は梢端に近いほど含水比が低い傾向がみられた (Fig. 6)。対照区の円盤の含水比は、スギは $0.52 - 0.66 \text{ g g}^{-1}$ 、ヒノキは $0.32 - 0.54 \text{ g g}^{-1}$ で、スギはヒノキよりも幹の含水比が高かった (Fig. 6)。葉、円盤試料採取時には、対照区の土壌は深度 20cm で土壌水分ポテンシャルが -10kPa と充分湿っていた (Fig. 3f)。

個体サイズ

乾燥区のスギを埴壤土と砂質壤土と比較すると、胸高直径はそれぞれ 13.2cm と 13.1cm 、樹高はそれぞれ 14.3m と 14.2m でほぼ等しかった (Table 2)。根を埴壤土と砂質壤土と比較すると、幅はそれぞれ 215cm と 175cm 、深さはそれぞれ 110cm と 95cm 、乾重はそれぞれ 11.6kg と 9.5kg で (Table 2)、砂質壤土より埴壤土で大きかった (Photo 6a)。埴壤土では深さ 50–80cm 深に細根が密生していた (Photo 6c)。砂質壤土では深さ 40–70cm 深にところどころ細根が密な部分があるものの細根量が埴壤土に比べて少なかった (Photo 6b)。スギ対照区も埴壤土であり、乾燥区のスギと同様に細根が密生していた。

対照区のスギ 2 本は、胸高直径は 12.1cm と 12.6cm 、樹高は 14.1m と 13.9m で、乾燥区の個体に比べてやや小さかった (Table 2)。対照区の 1 個体あたりの葉量は、スギは $4.4 - 4.7 \text{ kg}$ (当年葉と旧葉の合計)、ヒノキは $0.9 - 1.9 \text{ kg}$ であり、スギの葉量はヒノキの 2.5–5 倍あった。スギの葉量全体に占める当年葉の割合は約 2 割だった。ヒノキ対照区の 3 本のうち 2003–2005 年にほとんど肥大成長しなかった個体 (Fig. 4c) は、個体乾重が 26.1 kg で、他の 2 本 (37.2 kg および 51.6 kg) に比べて小さかった。T/R 比 (地上部と地下部の乾重比) は、スギは 5.1–5.6、ヒノキは 6.3–8.0 で、地下部への乾物分配はスギよりヒノキで小さかった (Table 2)。

スギの葉の窒素含量は当年葉で $12.8 - 14.0 \text{ mg g}^{-1}$ 、旧葉は 9.0 mg g^{-1} で当年葉は旧葉に比べて窒素含有量が高かった (Table 3)。ヒノキの葉の窒素含有量は $10.7 - 12.8 \text{ mg g}^{-1}$ だった。

4. 考察

本研究ではライシメータという根の発達が制限される環境で生育した個体を利用したため、乾物分配、肥大成長、葉の窒素含有量を文献値と比較したが、乾物分配以外に大きく異なる点はなかった。T/R 比は、平

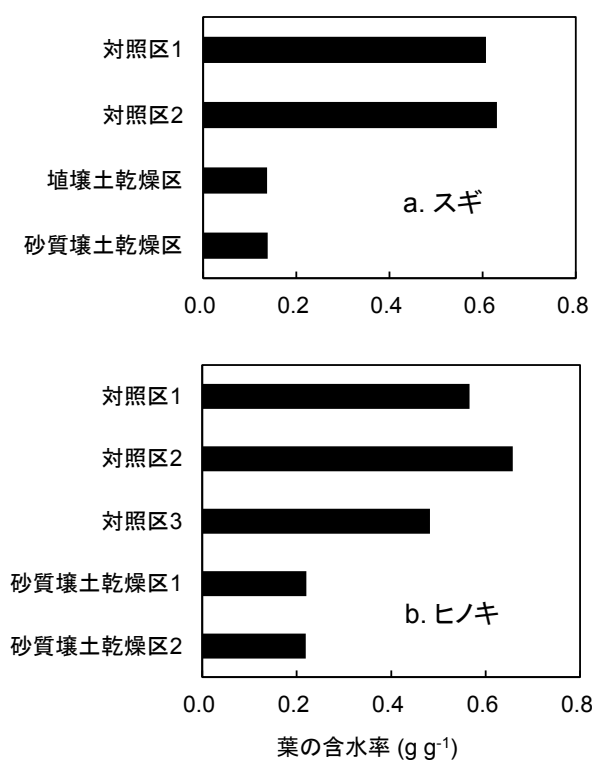


Fig. 5. 2005 年 8 月の葉の含水率
Needle water content in August 2005.

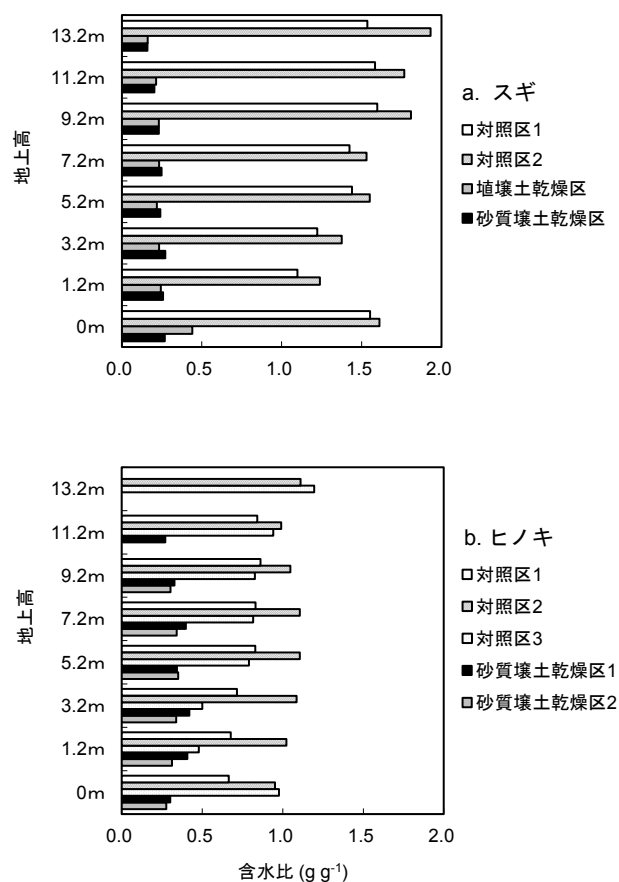


Fig. 6. 2005 年 8 月の円盤の含水比
Water content of a tree disk in August 2005.

Table 2. スギ、ヒノキの立木サイズと各部位乾燥重量
Size and dry weight of each component of the sample trees.

樹種	土壌	処理	個体 No.	DBH* cm	樹高 m	根幅 cm	根の深さ cm	当年葉 kg	旧葉 kg	緑枝 kg	枝 kg	球果 kg	枯葉+枯枝 kg	幹 kg	根 kg	地上部 kg	個体 kg	T/R kg kg ⁻¹
スギ	埴壌土	対照区	1	12.1	14.1	163	140	0.9	3.5	0.3	1.4	0.17	0.03	34.2	7.3	40.6	47.8	5.6
スギ	埴壌土	対照区	2	12.6	13.9	190	110	0.8	3.9	0.4	1.9	0.38	0.00	34.0	8.1	41.4	49.5	5.1
ヒノキ	埴壌土	対照区	1	9.3	13.1	140	70	0.9	-	-	0.6	0.01	0.7	21.1	2.9	23.2	26.1	8.0
ヒノキ	埴壌土	対照区	2	9.6	14.2	130	120	1.9	-	-	1.4	0.06	1.7	28.7	5.3	33.8	39.2	6.3
ヒノキ	埴壌土	対照区	3	12.1	14.2	140	80	1.5	-	-	1.0	0.18	2.5	35.9	5.5	41.1	46.6	7.5
スギ	埴壌土	乾燥区		13.2	14.3	215	110	-	-	-	-	-	5.2	44.1	11.6	49.3	60.9	4.2
スギ	砂質壤土	乾燥区		13.1	14.2	175	95	-	-	-	-	-	6.2	42.0	9.5	48.2	57.7	5.1
ヒノキ	砂質壤土	乾燥区	1	14.2	12.9	130	82	-	-	-	-	-	5.1	39.8	6.7	44.9	51.6	6.7
ヒノキ	砂質壤土	乾燥区	2	10.2	11.8	140	80	-	-	-	-	-	6.5	26.7	3.9	33.3	37.2	8.6

*DBHは土壌乾燥試験直前の2004年7月の測定値。他は2005年8月の測定値であるため、乾燥区の個体は枯死している。

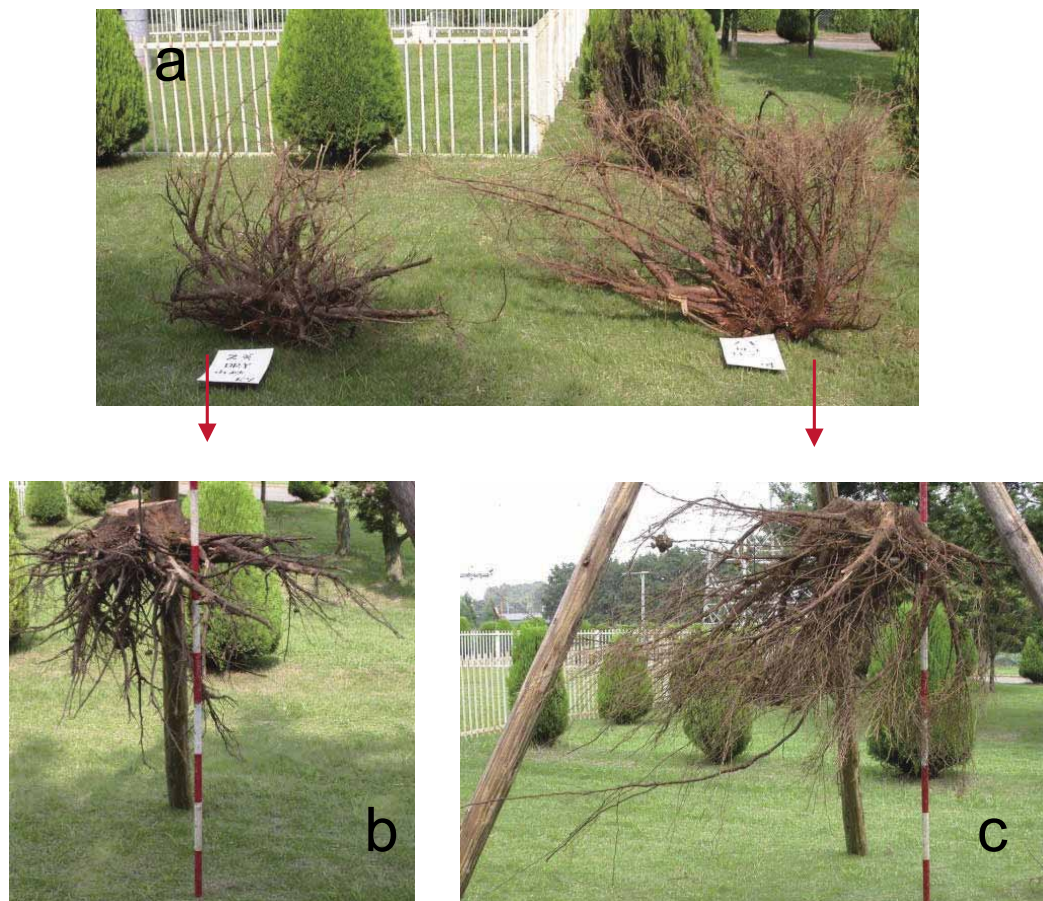


Photo 6. a. 砂質壤土乾燥区（左）と埴壤土乾燥区（右）のスギの根, b. 砂質壤土乾燥区のスギの根, c. 埴壤土乾燥区のスギの根.
 a. Roots of *sugi* trees in drought plots (left: sandy loam plot, right: clay loam plot), b. Roots of the *sugi* tree in the sandy loam drought plot, c. Roots of the *sugi* tree in the clay loam drought plot.

Table 3. 伐倒時の葉の窒素含有量
 Nitrogen content of needles in August 2005.

樹種	土壌	処理	個体 No.	部位	窒素含有量 (mg g ⁻¹)
スギ	埴壤土	対照区	1	当年葉	12.8
				旧葉	9.0
スギ	埴壤土	対照区	2	当年葉	14.0
				旧葉	9.0
ヒノキ	埴壤土	対照区	1	葉	12.8
ヒノキ	埴壤土	対照区	2	葉	10.7
ヒノキ	埴壤土	対照区	3	葉	12.8

均直径 35cm 以下の林のスギで約 3.5、ヒノキで 3.2 と報告されているのに対し（坂口ら, 1983）、ライシメータ内のスギの T/R は 5 以上、ヒノキは 6 以上と高く（Table 2）、ライシメータ内の個体は地下部への乾物分配が少ない特徴があった。スギ、ヒノキの肥大成長の季節変化は、森林総合研究所苗畑（茨城県つくば市）のスギおよび千代田試験地のヒノキについて 2 成長期にわたって詳細に調べられている（山下ら, 2006）。この報告によれば、スギの周囲長増加は 4 月上旬に始まり、6 月下旬まで成長速度が大きく、10 - 11 月まで増加が続き、ヒノキの周囲長増加は 3 月末に始まり、6 月下旬まで成長速度が大きく、11 月まで増加が続く。本研究に用いたスギとヒノキも、被圧されていた個体を除けば、2003 - 2005 年の対照区、および土壤乾燥試験前の乾燥区ではほぼ同様の肥大成長パターンがみられた（Fig. 4）。日本におけるスギ針葉窒素含有量の平均値は 14.0 mg g⁻¹ であるが（重永ら, 2008）、ライシメータ内のスギ当年葉の窒素含有量は 12.8 mg g⁻¹ と 14.0 mg g⁻¹ であり（Table 3）、スギ成木の当年葉と

して平均的な値であった。ヒノキの葉の窒素含有量は $10.7 - 12.8 \text{ mg g}^{-1}$ であり (Table 3)、Inagaki et. al (2010) が 17 カ所のヒノキ林で調べた葉の窒素含有量の平均値 10.2 mg g^{-1} よりやや高かった。したがって、本研究で用いたライシメータ内のスギ、ヒノキは地上部と地下部への乾物分配はライシメータの影響を受けていたものの、肥大成長のパターンや葉の窒素含有量の点においては特殊な個体ではなかったといえる。

土壌乾燥の進行にともない、スギ、ヒノキともにまず幹の収縮が確認され、遅れて葉の変色が観察された (Table 1)。幹直径は、蒸散の盛んな日中に減少し、夜間に回復する日変化をするが、水分が欠乏すると細胞の肥大や分裂が抑制され回復しなくなる (Abe et al., 2003)。乾燥区の個体で観察された幹直径の経日的な減少は、蒸散によって減少した幹直径の回復が土壌乾燥のため阻害された結果だと考えられる。幹直径の変化は、土壌乾燥に起因する葉の変色や枯死といった可視被害や蒸散の停止に先だって生じる特徴といえる。

スギの乾燥区においては、砂質壤土に比べて埴壤土で土壌水分ポテンシャルの低下が早く進行し、幹の直径減少や葉の変色が早期に観察された。土壌水分ポテンシャルの低下速度は、土壌からの水分損失量 (土壌含水率の低下) だけでなく、土壌の孔隙組成に由来する水分特性によって決まる。降雨遮断を行った乾燥区において土壌含水率の低下する経路は、①土壌表面からの蒸発、②樹木の蒸散、③底部からの流出、の3つである。埴壤土と砂質壤土の無立木乾燥区では土壌水分ポテンシャルの低下が少なかったことから (Fig. 3d, 3e)、土壌表面からの蒸発量や底部からの流出量は少なかったと推定できる。個体あたりの蒸散量は、単位葉量あたりの蒸散量と個体葉量との積として求められる。丹下 (1987) が立地条件の異なる 19 年生スギ林において蒸散量を測定した結果、年蒸散量の大小は葉量と関係が深く、単位葉量あたりの年蒸散量には立地条件による大きな違いがなかった。したがって、単位葉量あたりの蒸散量は埴壤土と砂質壤土で大きな違いはなかったと推定される。葉量は胸高直径と高い相関関係にあることが知られており (丹下ら, 1990; 橋本・玉泉, 1995)、砂質壤土乾燥区と埴壤土乾燥区のスギは胸高直径がほぼ等しかった (Table 3)。しかし、直径増加率が砂質壤土より埴壤土で大きく (Fig. 4b)、60cm 深での土壌水分ポテンシャルの低下速度も埴壤土で大きかったことから (Fig. 3a, b)、スギの蒸散による土壌からの水分損失量は砂質壤土乾燥区より埴壤土乾燥区で大きかったと考えられる。

土壌の含水率と水分ポテンシャルとの関係は孔隙組成が異なると変化することが知られ、埴壤土は砂質壤土に比べて、含水率の低下に対する土壌水分ポテンシャルの低下が大きいという特性を持つ (波多野, 1997)。したがって、スギ砂質壤土乾燥区に比べ

てスギ埴壤土乾燥区で土壌水分ポテンシャルの低下が早く進行した原因には、蒸散量の違いだけでなく、土壌の水分特性の差異も関与していると考えられる。埴壤土のスギは砂質壤土のスギより根が発達していたが (Table 3、Photo 6a)、土壌水分ポテンシャルの低下が早い土壌で生育したために水ストレスを受けやすく、根の成長が促進された結果かもしれない (Gregory, 2006)。ヒノキでは、乾燥区の土壌は砂質壤土であり、対照区の土壌は埴壤土である。上述したように、埴壤土は砂質壤土に比べ土壌水分ポテンシャルが低下しやすいが、対照区で土壌乾燥試験中に土壌が強く乾燥することはなかったことから (Fig. 3f)、乾燥害症状を明らかにすることが目的である本試験の結果にはほとんど影響しなかったと考えられる。

土壌乾燥による可視被害は、スギは梢端付近の葉の変色から、ヒノキは下枝を中心とした旧葉の褐変増加から進行した。これまでに乾燥害によってスギ、ヒノキ苗木が頂端部の葉から枯れ下がることが報告されているが (柳沢ら, 1980)、最初に変色するのが梢端ではないことには言及していない。スギ埴壤土乾燥区、スギ砂質壤土乾燥区ともに、梢端付近の地上高 13.2m で採取した円盤の含水比が最も低く (Fig. 6a)、スギの幹の中では梢端付近が強い乾燥を受けたことを反映していると考えられる。ヒノキは常緑性の樹木だが、通常 10 月から 12 月に集中して落葉する (Inagaki et. al, 2010; 三浦, 2000; Yamashita et. al, 2004)。本研究でもヒノキは 11 月から旧葉が褐変した後に落葉したが、乾燥区のヒノキは周囲の個体よりも旧葉の褐変が多くみられた。乾燥区のヒノキの褐変葉には、季節的に変色した以外に、水ストレスにより着葉したまま枯れたものが含まれていると考えられる。ヒノキ成木の乾燥害については、初期は梢端の葉が白っぽく変色し、進行すると梢端だけあるいは樹冠の上半分が茶褐色に変色した、との報告 (加藤ら, 1989) がある一方で、梢端に被害がでた後、樹冠の下部から上部へ、枝の基部から枝先に症状が進行していった、という報告もある (久林, 1996)。本研究でヒノキの可視被害が旧葉の褐変の増加から進行したのは、落葉時期と重なったことが影響している可能性もあり、さらなる事例の蓄積が重要と考えられる。

これまでの乾燥害の報告と比べて、本研究では降雨遮断により無降水状態になってから葉の変色発生までに要した期間が長かった。スギ、ヒノキの幼齢木造林地で乾燥害が発生する目安は、乾燥しやすい立地では夏期で 30 日以上、冬期では 40 日以上の無降水日の連続だといわれている。小河 (1996) は半旬 (5 日間) 雨量が 10mm 以下の期間が夏期で 6 半旬、冬期で 8 半旬以上連続することも乾燥害発生目安となることを指摘している。スギ、ヒノキ成木については、宮崎県で中・壮齢林に乾燥害が発生した年の気象データを分

析した結果、夏期は幼齢木と同様に 30 日前後、成長休止期には 100 日前後の無降水日（20mm 以下の少雨を含む）の連続で発生したことが報告されている（讃井、1996）。しかし、本研究では最も早く葉の変色が確認されたスギ埴壌土乾燥区でも土壌乾燥処理開始から 79 日を要し、スギ砂質埴壌土乾燥区では明瞭に葉の変色を確認できたのは土壌乾燥処理開始から約 8 ヶ月経った 2005 年 4 月であった。この原因のひとつとして、土壌乾燥試験を行った 2004 年は降雨遮断を開始した直後の 8 月の平均気温が 25.7℃と宮崎県の例に比べて低く、乾燥害が発生しにくい条件だったことが挙げられる（Fig. 2）。宮崎県の中・壮齢林乾燥害は、土壌の保水性の高い地域では無降水日の連続だけでは被害が出ず、7－8 月の平均気温が平年より 1℃以上高い年（7 月：26.9℃、8 月：27.2℃）に発生している（讃井、1998a）。また、樹冠への降雨は遮断されていなかったことも症状の進行が遅かった原因のひとつに挙げられる。町村（2008）によれば、降雨中には葉面から吸水が発生し、その量は降雨遮断量の 1/3 と見積もられている。降雨時に葉面から吸水することによって乾燥区の個体の水ストレスが軽減された可能性がある。他にも、本研究は土壌を十分飽水させてから開始したこと、ライシメータの土壌は石礫をほとんど含まないため土壌の保水容量が比較的大きかったこと等も、葉の変色が発生するまでに長期間を要した原因と考えられる。

本研究では無降水日の連続を実験的に再現することによって、スギ、ヒノキ成木について、土壌への水分供給を停止してから 48－110 日後に樹幹が収縮し、遅れて葉の変色症状が発生することを示した。スギの乾燥害症状は砂質埴壌土より埴壌土で早く発生しており、土壌の性質によって乾燥害の発生時期が異なることが示唆された。今後は乾燥害の発生した地域について土壌の保水力および水分特性に関する解析を進めることが、成木の乾燥害発生の原因を理解する上で重要と考えられる。

5. 謝辞

試験地の設営では趙炳薫氏、木村英雄氏に、伐倒・抜根調査では金子真司氏、小林政広氏、平井敬三氏、山下香菜氏、木村英雄氏、軽部勲夫氏にご協力いただいた。また、窪野高德氏にはスギ針葉上の菌の同定をしていただいた。本研究は環境省地球環境保全試験研究費「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」により行われ、研究の一部に独立行政法人森林総合研究所エンカレッジモデルによる研究支援を受けた。

6. 引用文献

Abe, H., Nakai, T., Utsumi, Y. and Kagawa, A. (2003) Temporal water deficit and wood formation in

Cryptomeria japonica. Tree Physiology, 23, 859-863.

Gregory, P. (2006) Plant roots: growth, activity and interaction with soils, Blackwell, 318pp.

波多野隆介 (1997) 7.4 土壌の水分保持曲線, 久馬一剛編「最新土壌学」, 朝倉書店, 104.

Inagaki, Y., Okuda, S., Sakai, A., Nakanishi, A., Shibata, S., and Fukata, H. (2010) Leaf-litter nitrogen concentration in hinoki cypress forests in relation to the time of leaf fall under different climatic conditions in Japan. Ecol Res, 25, 429-438.

IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Cambridge University Press, 996pp.

加藤正樹・岩川雄幸・竹内郁雄・峰尾一彦・佐々木紀 (1989) 1989 年高知県で発生したヒノキの立ち枯れについて, 森林総合研究所 四国情報, 2.

気象庁 (2011) <http://www.jma.go.jp/>, (参照 2011-04-27).

久林高市 (1996) 1994 年に長崎県に発生した干害の状況, 日林九支研論集, 49, 97-98.

久保山裕史・鄭 躍軍・岡 裕泰 (2003) 主要な森林気象災害の林齢別被害率の推定と考察, 日本森林学会誌, 85, 191-198.

蜂屋欣二 (1983) 物質生産, 坂口勝美監修「新版 スギのすべて」, 78-87.

橋本良二・玉泉幸一郎 (1995) スギ林における林冠の発達過程と個体の器官成長様式, 日本林会誌, 77, 153-162.

町村 尚 (2008) 樹液逆流－生態系水循環を見直す, 大垣一成・江頭靖幸・渡會仁・松村道雄・中辻啓二編著「みず学への誘い」, 大阪大学出版, 251-261.

松井光瑤・樫山徳治・土井恭次 (1969) スギ林の気象災害とその防除法, 坂口勝美監修「スギのすべて」, 288-300.

Matsumoto, Y., Shigenaga, H., Miura, S., Nagakura, J. and Taoda, H. (2006) Mapping of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) forests vulnerable to global warming in Japan. Global Environmental Research, 10, 181-188.

松本陽介・重永英年・三浦 覚・長倉淳子・埴田 宏 (2006) 温暖化に対するスギ人工林の脆弱性マップ, 地球環境, 11, 43-48.

的場節子・小林政広・加藤正樹・小林繁男 (1995) ライシメータ土壌の変化 (I) 土壌の物理性, 日林論, 106, 215-217.

三浦 覚 (2000) 表層土壌における雨滴侵食保護の視点からみた林床被覆の定義とこれに基づく林床被

- 覆率の実態評価, 日林誌, 82, 132-140.
- Nagakura, J., Shigenaga, H., Akama, A. and Takahashi, M. (2004) Growth and transpiration of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) seedlings in response to soil water content. *Tree Physiology*, 24, 1203-1208.
- 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, 7-13.
- 西村五月・讃井孝義 (1999) 1995 年に宮崎県で起こったスギ人工林の干ばつ被害, 森林立地学会誌, 41, 93-102.
- 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, 2-9.
- 小野寺真一・小林政広・加藤正樹 (1996) ライシメーターの流出水質に及ぼす 13 年生ヒノキ林の伐採の影響, ハイドロロジー, 26, 181-194.
- Sakata, M. (1996) Evaluation of possible causes for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) based on elemental composition and $\delta^{13}\text{C}$ of needles. *Environ. Sci. Technol.*, 30, 2376-2381.
- 讃井孝義 (1996) 南九州における中・壮齢造林木の干害, 山林, 1346, 48-58.
- 讃井孝義 (1998a) 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.
- 讃井孝義 (1998b) 1994 年に発生した九州地域の干害, 森林防疫, 47, 2-9.
- Shigenaga, H., Mastumoto, Y., Taoda, H. and Takahashi, M. (2005) The potential effects of climate change on the transpiration of Sugi (*Cryptomeria japonica*) plantations in Japan. *J. Agric. Meteorol.*, 60, 451-456.
- 重永英年・高橋正通・長倉淳子・赤間亮夫 (2008) 日本におけるスギ針葉窒素含有量の空間変動, 日本森林学会誌, 90, 182-189.
- 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, 東大演習林報告, 76, 177-196.
- 丹下 健・鈴木 誠・鈴木 保 (1990) 立地条件の異なる 83 年生スギ人工林の枝および葉現存量, 日本生態学会誌, 40, 79-186.
- 山下香菜・岡田直紀・加茂皓一 (2006) ワイヤデンドロメータによる樹木肥大成長の測定 バンドデンドロメータおよび刺針法との比較, 木材学会誌, 52, 8-18.
- Yamashita, T., Kasuya, N., Nishimura, S., and Takeda, H. (2004) Comparison of two coniferous plantations in central Japan with respect to forest productivity, growth phenology and soil nitrogen dynamics. *Forest Ecology and Management*, 200, 215-226.
- 柳沢聡雄・岡上正夫・大山浪雄・坂上幸雄・高橋邦秀 (1980) 造林地の干害とその対策, わかりやすい林業研究解説シリーズ, 65, 1-70.

