

## 斜面に植栽したスギ幼齢木の成長と水分, 養分の違いの関係

山本哲裕\*1・浅野友子\*2・堀田紀文\*1・鈴木雅一\*1

### Relationship between growth of young *Cryptomeria japonica* on a mountain slope and spatial differences of moisture and nutrients

Tetsuhiro YAMAMOTO\*1, Yuko ASANO\*2, Norifumi HOTTA\*1  
and Masakazu SUZUKI\*1

#### 1. 背景および目的

日本の国土の約7割は森林であり(国土交通省, 2007), そのほとんどは山地に存在する。しかし現在, 木材価格の低下などによって間伐などの管理が不足し, 森林の荒廃が防災の観点から問題となっている。また, 森林の二酸化炭素の吸収, 貯蔵機能にも注目が集まり, 持続的な木材生産と二酸化炭素の吸収, 貯蔵機能を両立させる必要に迫られるなど, 森林管理について様々な課題が生じている(林野庁, 2003)。森林資源や森林の持つ公益的機能を持続的に利用することを可能にするためには, 幼齢林から壮齢林までの幅広い林齢の人工林において樹木の成長を精度よく予測できることが非常に重要であると考えられる。そのためには各成長段階において成長を律速する環境要因やメカニズムを明らかにする必要がある。

一つの斜面に同時期に同じ遺伝子を持つスギを植栽した場合でも, その成長量には著しい差を生じ, 尾根では小さく, 谷付近ほど大きくなっていくことはよく知られている。山地林においては, 斜面部位によって気温, 湿度, 日射量, 風速, 土壤水分, 土壤養分など多くの環境に違いが現れることから(塚本, 1998), 成長の違いを生む主要因を明らかにすることは難しい課題であるが, その原因を明らかにするために様々な研究が行われてきた。

その結果, スギの成長量に差が生じる原因は, 特に成長に欠かせない水分や主要な養分である窒素に尾根から谷への傾斜方向に偏りがあることや(丹下ら, 1989), 樹高成長がよい個体ほど葉中の窒素やリン酸の含有量が高くなる傾向があり, 窒素やリン酸が成長を制約している可能性が示唆される場合もあるが, 林齢や調査地によっては明瞭な関係を示さない場合もあること(原田, 1970; 伊藤ら, 1972)などが報告されている。また, 土壤については有効土壤の厚さが斜面部位によって異なり, 土層が薄いかまたは浅い位置に不透水層を持つ土壤断面の場所では樹高成長が若い林齢から頭打ちになること(中村, 1943), 透水性のよい土壤が深くまであるほど40年生時の樹高(地位指数)が大きくなること(真下, 1960), 土壤のpH(H<sub>2</sub>O)が乾燥時でも6より高い場所では尾根と谷付近で幼齢期のスギの成長量に差が生じず, 土壤のpH(H<sub>2</sub>O)が6よ

\*1 東京大学大学院農学生命科学研究科森林科学専攻森林理水及び砂防工学研究室 (〒113-8657 文京区弥生 1-1-1)

Laboratory of Forest Hydrology and Erosion Control Engineering, Department of Forest Science, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

\*2 東京大学大学院農学生命科学研究科附属科学の森教育研究センター (〒113-8657 文京区弥生 1-1-1)

The University Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

り低いと尾根と谷付近で成長量に差が生じること（丹下ら，1989）などが報告されている。

以上のように、調査地や林齢によってスギの成長差を生じさせる原因は異なると考えられるが、これまで多くの研究は成木や苗木を対象に行われてきており、幼齢木を対象とした研究は少ないのが現状である。

植生を皆伐してスギを植栽してから樹冠が閉鎖するまでの期間は、根系も未発達であるので土層厚の影響も少ない時期であると考えられる。また、幼齢木は葉量を急速に増加させながら成長する時期にあり、脱落器官からの窒素の転流や根などにおける窒素の蓄積も少なく、葉量の増加が成長を規定する要因となるので、葉量の増加に見合うだけの窒素などの養分の供給が土壤からなされるかどうかは成長に大きく影響すると考えられる。養分の中でも特に窒素は光合成を行うのに必要であるクロロフィルや酵素をはじめとした、様々なタンパク質の原料であるアミノ酸の合成に必須である。植物は主に無機態の窒素を利用することから土壤中の硝酸態やアンモニア態の無機態窒素量は成長に大きく関わると考えられる。また、10年生以下の造林木では葉内窒素濃度が高いほど年樹高成長量が大きくなる傾向があることが認められている（丹下，1995）。

水分は呼吸や光合成、さらには蒸散を行うために必要であるので植物の生存に必須であり、樹木の中で特に湿潤な立地を好むと考えられるスギにとっては、重要であると考えられる。しかし、温暖湿潤な地域では水分不足が直接的に尾根のスギの成長を抑制しているとの報告はあまり見られない。蒸散量が多い場合、行っている光合成量も多いとは必ずしも言えないが、3、4年生のスギ林ではむしろ尾根で蒸散の開始時刻が早く、終了時刻が遅いので蒸散継続時間が長かったと考えられること（梶谷ら，2005）や、19年生のスギ林で斜面位置によって蒸散量に差がないと考えられること（丹下，1987）などが報告されており、尾根のスギの蒸散が谷付近に比べて抑制されている様子は必ずしも観測されていない。

また、水分は土壤中の窒素の移動や利用可能な無機態窒素養分の主な供給源である有機物の分解、無機化速度にも大きく影響を及ぼしていると考えられている（徳地，1996）。実際にスギ林の土壤における無機態窒素は、乾燥しやすい尾根では硝化が進まないためアンモニア態で存在する割合が高く、湿潤であることが多い谷付近に近づくにつれて硝化が進みやすくなるので硝酸態の割合が高くなること（HIROBE *et al.*, 1999；徳地，1996）、無機化速度は乾燥しやすい尾根に比べて湿潤であることが多い谷付近で速いこと（戸田ら，1998）が示されている。これらは、窒素の形態変化の異なる段階に関わる微生物群が、それぞれに適した水分条件を持っていることによると考えられる（OHTE *et al.*, 1997）。しかし、窒素の斜面上の位置の違いと同時に斜面における地中の水分の傾斜方向の違いや移動の実態を把握し、水分が斜面におけるスギの成長の違いや、利用可能な無機態窒素養分の違いに与える影響を実証的に示した研究は少なく、斜面を連続的に詳細に調べた研究はほとんどない。

そこで2000年にスギとヒノキを植栽した千葉演習林袋山沢水文試験地内の長さ約70 m、標高差5 mほどの小規模な斜面を対象として次のことを目的として研究を行った。

- ① 山地斜面でスギの成長量の違いの実態を明らかにした上で、その斜面において、地中の水分と土壤中の全窒素濃度と溶存無機態窒素濃度がどのように斜面上の位置によって違っているのかを明らかにする。
- ② ①で明らかになった水分や溶存無機態窒素の斜面上の位置による違いと幼齢スギの成長量との関係から、水と窒素が斜面に沿った幼齢スギの成長の違いに与える影響について考察する。

## II. 調査流域の概要

東京大学大学院農学生命科学研究科附属千葉演習林袋山沢流域は、北緯 35°12'8" 東経 140°06'23" に位置する (図-1)。袋山沢流域より約 200 m 離れた新田観測所で計測された 2000 年から 2007 年の年平均気温は 14.2 °C、年降水量の平均値は 2390 mm であった。地質は飯島・池谷 (1976) の調査により新第三紀層三浦層群豊岡層清澄砂岩層に分類され、基岩は砂岩勝ち凝灰岩・泥岩互層である。B 流域は 1999 年に皆伐され、2000 年 2 月～4 月にスギとヒノキが植栽されている。調査を行った 2005 年当時は 6 成長期が経過した幼齢造林地となっていた。

袋山沢流域の B 流域内に調査プロットを設定した (図-1a)。図-1b に示すような斜面である。調査プロット内には樹木としてはスギのみが生育している。

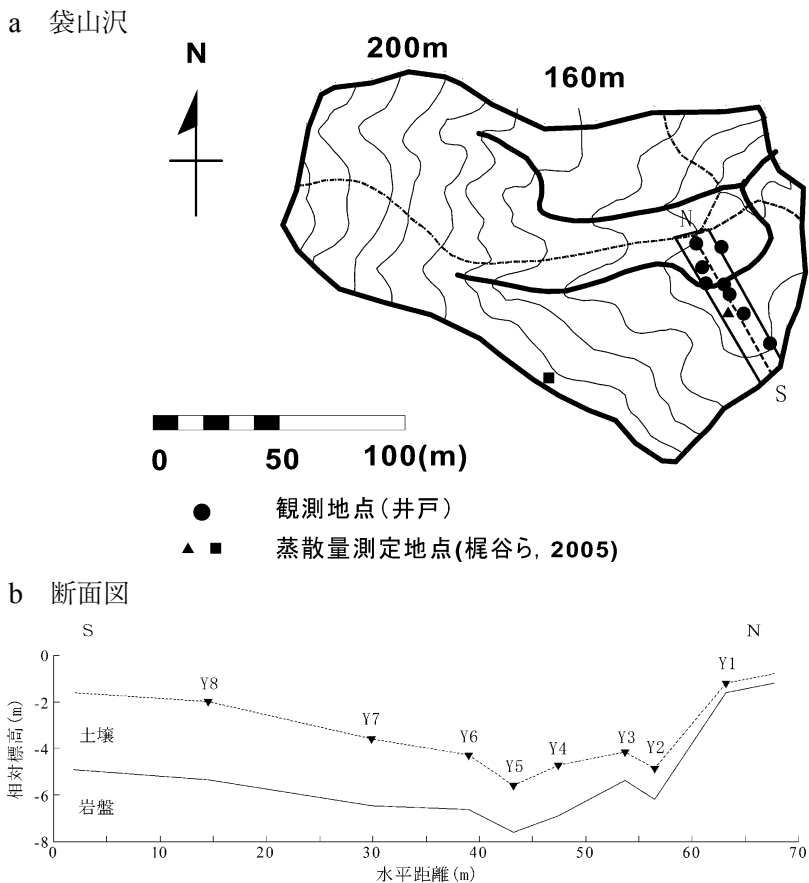


図-1 (a) 袋山沢流域の地形図と調査プロットの位置  
 (b) 調査プロットの地表面地形と基岩地形と観測井戸の位置  
 調査プロットを破線 N - S で切り、各井戸の標高と基岩までの距離を土壤厚として破線に投影した断面図。Y1～Y8は観測地点を示す。

Fig. 1. Topography of the Fukuroyamasawa experimental watershed and the location of the study plot (a), the cross section of the study plot and the location of the wells for observation (b)

土層厚は、斜面調査用簡易貫入試験機（株式会社筑波丸東）を用いて測定し Nc 値 30 を土層と岩盤の境界としたところ（白木ら，1999），試験を行ったほとんどの箇所で，土層と岩盤との境界は明瞭に区別できた。Nc 値 30 とは，5 kg のおもりを 50 cm の高さから落とした時の打撃でコーンを貫入させた時，コーンが 10 cm 進むのに 30 回の打撃を必要とする硬度である。調査プロットの土壌の厚さは 50 cm から 500 cm である。

### Ⅲ. 方 法

#### 1. スギの樹高と成長

Y2 地点の周囲を除く，10 m×70 m の調査プロット内のスギの全個体（135 本）を対象に，2005 年の成長が停止していると考えられる 12 月後半に樹高と地際直径を調査した。Y2 地点の周囲で調査を行ったのは 2006 年と 2007 年のみであったので，2005 年の樹高と地際直径は，2006 年の年間成長量を 2006 年の樹高と地際直径から引いた推定値である。

#### 2. 水分の斜面部位による違い

斜面の各地点における水の集まりやすさや，地表の水分状態を明らかにするために飽和地下水帯の発生頻度と表層土壌の体積含水率（ $\theta$ ）の斜面上の位置による違いを調べた。

地下水位の計測は調査プロット内の Y1～Y8 の計 8 地点で行った（図-1）。地下水位計測のため，約 20 cm おきに 4 方向から穴を開けた内径 6 cm の塩化ビニルのパイプを岩盤まで挿し込み（ただし Y5 は岩盤までは到達していない），その中に下から 1 m までは 6 cm，それ以上は 10 cm おきにカップをつけた金属の棒を挿し込んだ最高水位計兼地下水採水用井戸（以下，井戸）を設置した。地下水位が上がればカップに水が入り，下がってもカップには水が残るので前回観測時からのおおよその最高水位の計測と，最高水位時の水の採取も行える。井戸の深さは Y1 が 50 cm，Y2 が 166 cm，Y3 が 150 cm，Y4 が 270 cm，Y5 が 250 cm，Y6 が 290 cm，Y7 が 360 cm，Y8 が 420 cm である。この井戸を用いて 1～2 週間に 1 回，2005 年 7 月から 2006 年 3 月まで，前回観測時からの最高水位と観測時の水位を測定した。飽和地下水帯の発生率は，飽和地下水帯の発生回数を観測回数で割ったものである。

また，井戸周辺の表層土壌の体積含水率（ $\theta$ ）を TDR 式土壌水分計（DIK-311A 株式会社大起理化工業）を用いて，各地点で 3 回測定し，得られた値を平均してその井戸周辺の表層土壌の  $\theta$  とした。観測は 2005 年 7 月から 11 月まで毎月，2007 年 3 月と 4 月の計 7 回行った。

#### 3. スギの葉内窒素濃度と土壌中の窒素濃度の斜面部位による違い

##### 1) 葉内窒素濃度

植物は葉の部分が他の器官と比べ，その植物の栄養状態をよりよく表すものと考えられており（仁王，1987），個体の葉量が大きく増加する成長段階において，当年葉の窒素濃度はその年にその林木が吸収した窒素量を反映していると考えられる（植田，1997）。また，同じ千葉演習林内のスギの幼齢林で，葉内窒素濃度が高いほど樹高成長がよい傾向があることも報告されている（丹下，1995）。そこで 2005 年 11 月末に各観測地点にもっとも近いスギ 3 本から日当たりがよい当年葉を採取して持ち帰り，80 °C で約 100 時間乾燥させたあとに，乳鉢などを用いて微粉砕し

てNCSアナライザー（NA1500 CARLO-ERBA社）を用いて乾式燃焼法により全窒素量を測定した。また、Y7の試料採取木で1本、優勢木が見られるほかは試料採取木の樹高差は小さかった。

## 2) 土壌中の窒素濃度

土壌中の窒素濃度（全窒素、溶存無機態窒素）の斜面上の位置による違いを明らかにするために、地下水と地表近くの土壌水の無機態窒素濃度と各深度の土壌の全窒素濃度を調査した。スギはアンモニア態窒素と硝酸態窒素の両方を吸収して利用することがよく知られているが、苗木を水耕栽培して窒素源として硝酸アンモニウムを与えた場合、硝酸イオンを吸収する割合はヒノキやアカマツに比べると著しく大きいことが示唆されている（真田・塘，1978）。一般に土壌粒子は負電荷を帯びており、土壌粒子に吸着されている $\text{NH}_4^+$ については地下水と土壌水では評価できていない。この点についてはさらに検討する必要がある。

地下水は前述の最高水位計のカップに入った水をすべての深さから均等に採取し持ち帰り、 $0.2\ \mu\text{m}$ のフィルターで濾過した後、イオンクロマトグラフ（LC-10A 株式会社島津製作所）で $\text{NH}_4^+$ と $\text{NO}_3^-$ の濃度を測定した。この水試料の採取は地下水位の計測と同様に1～2週間に1回、2005年7月から2006年3月まで行った。

ただし、地下水の発生頻度が低い地点の地下水は、鉛直方向に浸透してくる雨水が主に寄与していると考えられるが、恒常的にある地下水や発生頻度が高い地点に発生した地下水は鉛直方向のみでなく、側方から流れてくる地下水も寄与していると考えられる（ASANO *et al.*, 2002）。したがって、そのような地点においては、地下水中の溶存無機態窒素は必ずしも直上の土壌の養分条件を反映しているとは限らない。

土壌水はY3、Y4、Y5とY6の中間地点、Y7、Y8の合計5地点の地表面から20 cmの深度に受水部の大きさが16 cm×25 cmのテンションフリーライシメーターを挿して採取し、地下水と同じ方法で $\text{NH}_4^+$ と $\text{NO}_3^-$ の濃度を測定した。この方法で採取した土壌水は、地表から鉛直に浸透してくる雨水である。ただしデータは2006年以降取得しているが、テンションフリーライシメーターを設置した直後は設置によるかく乱の影響で各イオンの濃度のばらつきが大きかったので、使用するデータは2007年のもののみとした。

土壌水や発生頻度が低い地点に発生した地下水中の無機態窒素濃度は、微生物による有機物の分解によって生成した無機態窒素のうち、植物などによって吸収されなかった無機態窒素であると考えられる。つまり、植物などが必要とする窒素量に対して、無機態窒素の生成量が十分ある場合は過剰に生成された無機態窒素が溶脱するため土壌水中の無機態窒素濃度は高くなるが、必要量に対して生成量が不足している場合、土壌水中に無機態窒素はほとんど含まれないと考えられるので、その地点の土壌の養分条件を反映していると考えられる。

土壌の全炭素と全窒素は2005年6月に、Y1～Y3、Y5～Y8の計7地点の土壌を0～10、20～30、50～60 cmの深度別に採取して持ち帰り、風乾させた後に根などを取り除きながら乳鉢などを用いて微粉碎して、NCSアナライザーで全窒素量と全炭素量を測定し、C/N比を計算した。

## IV. 結 果

### 1. 調査プロット内のスギの成長の違い

スギを植栽してから6成長期間が経過した2005年12月時点で、平均樹高は尾根付近で約4 m、谷付近で約6 mと尾根から谷に向かって次第に高くなり、平均地際直径は尾根付近で約6 cm、谷付近では約12 cmと尾根から谷に向かって次第に太くなった（図-2）。伸長成長、肥大成長とも谷部のほうが大きいことから材積成長量や重量成長量も谷部のほうが大きいことが分かった。

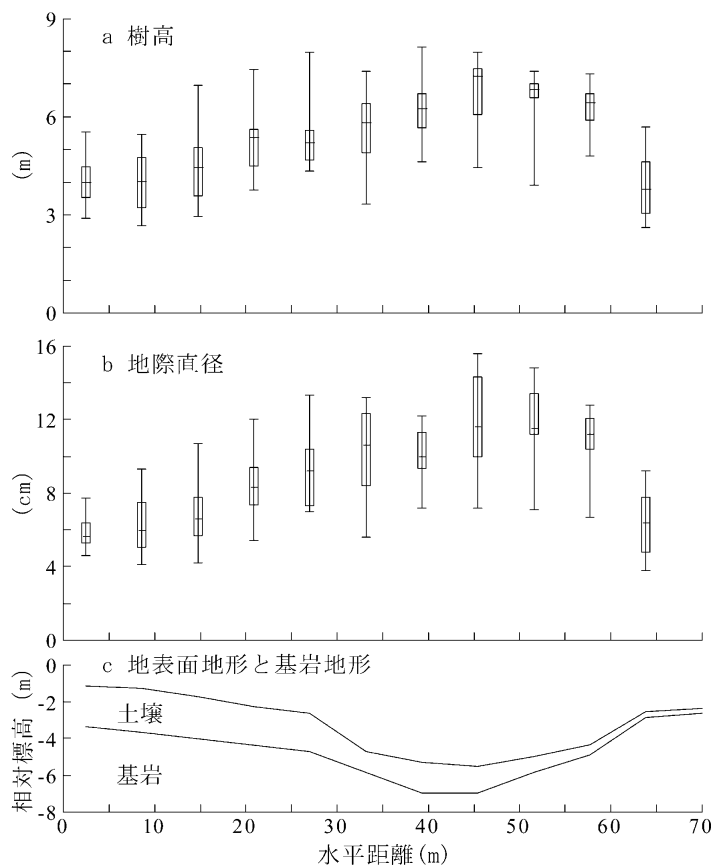


図-2 (a) 樹高の分布 (b) 地際直径の分布 (c) 調査プロットの地表面地形と基岩地形  
調査プロット内を南北方向に7mおきの区画に分け、それぞれの区画内に存在するスギの樹高、地際直径を示す。縦棒は最大値と最小値、箱は75%値と25%値、箱の中の横棒は中間値を表している。地表面地形はそれぞれの区画内に存在するスギの標高の平均値を地表面の標高とし、基岩地形はプロット内に井戸が存在した場合、その深さを土層厚として地表面の標高から引いて決めた。各区画に存在したスギは5本～15本だった。

Fig. 2. The difference of tree height (a), the difference of tree diameter at ground level (b) and the cross section of the study plot (c)

## 2. 土壌水分条件の斜面上の位置による違いと樹高の関係

表層土壌の体積含水率 ( $\theta$ ) の観測は7回行ったが、その中には観測前の1~2週間は降雨がなかったときもあれば、降雨の翌日行った場合もあり、様々な先行降雨、季節条件のものを測定できた(図-3 a)。それにもかかわらずY5では5回の観測を通じて40%以下になることがなく常に湿潤であり、Y1では常に30%以下であり他に比べて乾燥していた。それ以外の地点では平均値は35.7~41.8%でほぼ同じ値に分布しており、有意な差は見られなかったが、Y7、Y8は他に比べて変動の幅が大きい傾向があった。

地下水位の観測の結果、ほぼ斜面部位に対応して飽和地下水帯が発生することが明らかとなった(図-3 b)。Y3、Y4、Y5では観測時には常に飽和地下水帯があった。Y6、Y7では平水時には飽和地下水帯はないが、降雨があると頻繁に飽和地下水帯が発生し、Y2、Y8では大きな降雨後にだけ飽和地下水帯が発生した。一方で、Y1では観測期間中一度も飽和地下水帯が発生しなかった。

## 3. 葉内や土壌の窒素濃度の斜面部位による違いと樹高の関係

Y2、Y3、Y4、Y5、Y6のスギの葉内窒素濃度は平均で1.44~1.48%、Y1、Y7、Y8のスギの葉内窒素濃度は平均1.16~1.23%と、谷部で葉内窒素濃度が平均的に高いという結果が得られた(図-4)。ただし、隣りあうスギでも葉の窒素濃度は0.2~0.4%程度異なるなど、個体ごとのばらつきは大きく、同じ地点に生育するスギの樹高と葉内窒素濃度との間には関係は見られなかった。

地下水中の無機態窒素濃度の平均値はY4で32  $\mu\text{mol/L}$ と特に高く、その次はY3で31  $\mu\text{mol/L}$ 、Y5で28  $\mu\text{mol/L}$ と高く、Y6~Y8では21~22  $\mu\text{mol/L}$ と特に差がなく、Y2では7  $\mu\text{mol/L}$ と低い

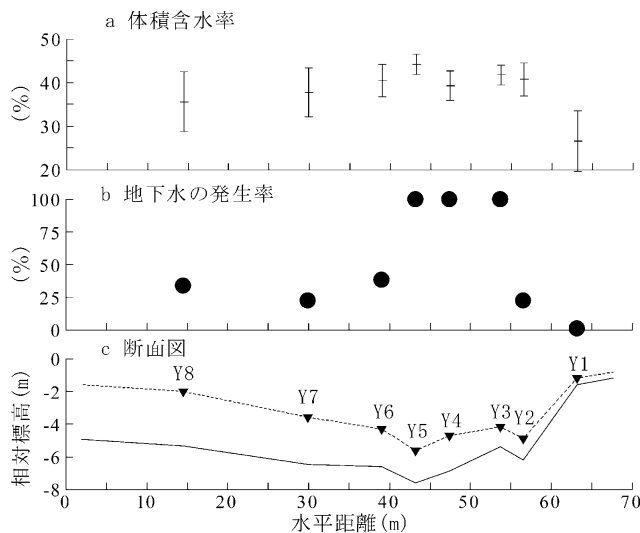


図-3 (a) 体積含水率 (b) 地下水の発生率 (c) 調査プロットの断面図  
 体積含水率は平均値と標準偏差を示す。地下水の発生率は、地下水位の発生回数を観測回数で割ったものである。

Fig. 3. The difference of volumetric water content of surface soil (a), the frequency of saturated groundwater generation per the number of observation (b) and the cross section of the study plot (c)

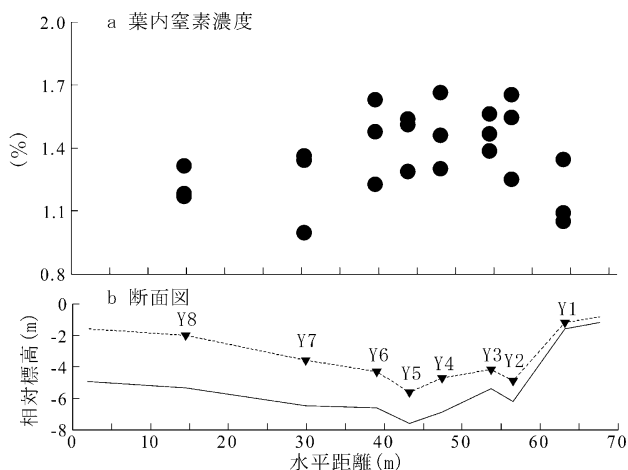


図-4 (a) 当年葉の葉内窒素濃度 (b) 調査プロットの断面図  
 Fig. 4. The difference in the concentration of nitrogen in current-year leaves (a), cross section of the study plot (b)

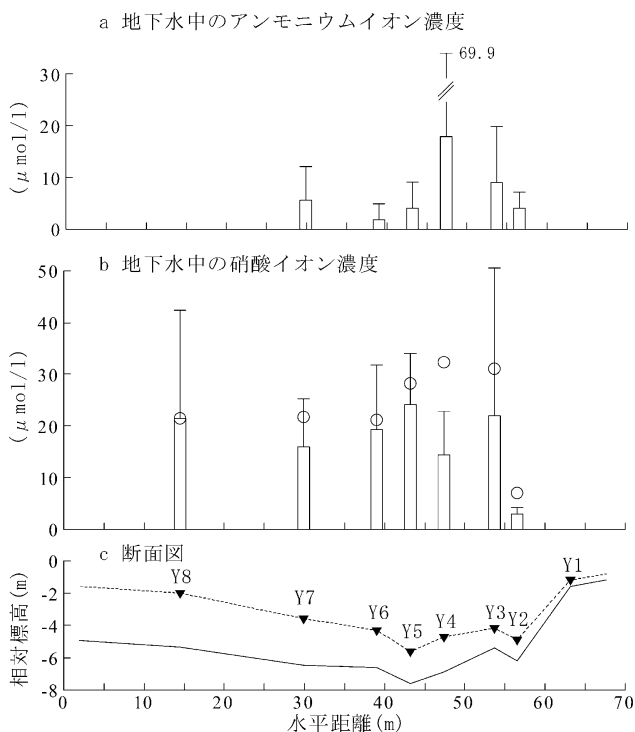


図-5 地下水中の (a) アンモニウムイオン濃度と (b) 硝酸イオン濃度 (c) 調査プロットの断面図  
 箱の上端が平均値、縦棒は標準偏差、(b) 中の○はアンモニウムイオン濃度の平均値と硝酸イオン濃度の平均値の合計を表わす。

Fig. 5. The difference in the concentration of  $\text{NH}_4^+$  (a) and  $\text{NO}_3^-$  (b) in the ground water and the cross section of the study plot (c)



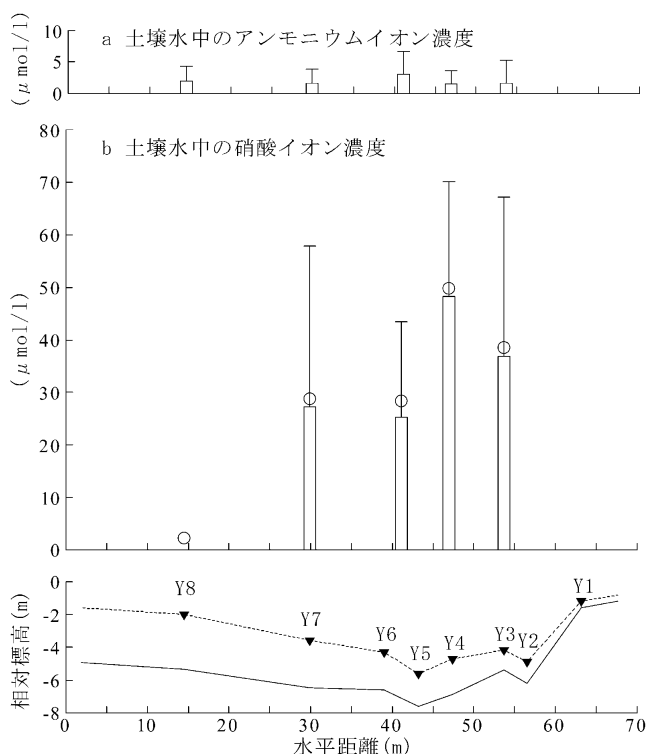


図-6 土壌水中の (a) アンモニウムイオン濃度と (b) 硝酸イオン濃度 (c) 調査プロットの断面図箱の上端が平均値、縦棒は標準偏差、(b) 中の○はアンモニウムイオン濃度の平均値と硝酸イオン濃度の平均値の合計を表わす。

Fig. 6. The difference in the concentration of  $\text{NH}_4^+$  (a) and  $\text{NO}_3^-$  (b) in the soil water the and cross section of the study plot (c)

という結果が得られた(図-5)。 $\text{NO}_3^-$ 濃度の平均値はY3～Y8では16～24  $\mu\text{mol/L}$ と高く、Y2では3  $\mu\text{mol/L}$ と低かった。また、 $\text{NH}_4^+$ 濃度の平均値はY3とY4でそれぞれ9  $\mu\text{mol/L}$ 、18  $\mu\text{mol/L}$ と高く、Y2、Y5～Y7では2～6  $\mu\text{mol/L}$ と低い値が検出されたが、Y8では観測期間中は一度も検出されなかった。

土壌水中の無機態窒素濃度の平均値はY4で50  $\mu\text{mol/L}$ 、Y3で39  $\mu\text{mol/L}$ 、Y7で29  $\mu\text{mol/L}$ 、Y5とY6の中間地点で28  $\mu\text{mol/L}$ と高く、Y8で2  $\mu\text{mol/L}$ と低かった(図-6)。 $\text{NO}_3^-$ 濃度の平均値はY8以外では25～48  $\mu\text{mol/L}$ と高かったが、Y8では観測期間中は一度も検出されなかった。また、 $\text{NH}_4^+$ 濃度の平均値は1～2  $\mu\text{mol/L}$ と $\text{NO}_3^-$ 濃度に比べて非常に低かった。

土壌中の全窒素量は深さによって異なり、0～10 cmで0.30～0.55%であるが、20～30 cmで0.17～0.32%、50～60 cmで0.03～0.20%と深くなるほど低くなった(図-7b)。一方で斜面の位置による違いは顕著でなかった。C/N比は深さによって異なり、0～10 cmで10～18であるが、20～30 cmで7～13、50～60 cmで3～13と深くなるほど小さくなった。また、斜面上の位置による違いは顕著でなかった(図-7c)。

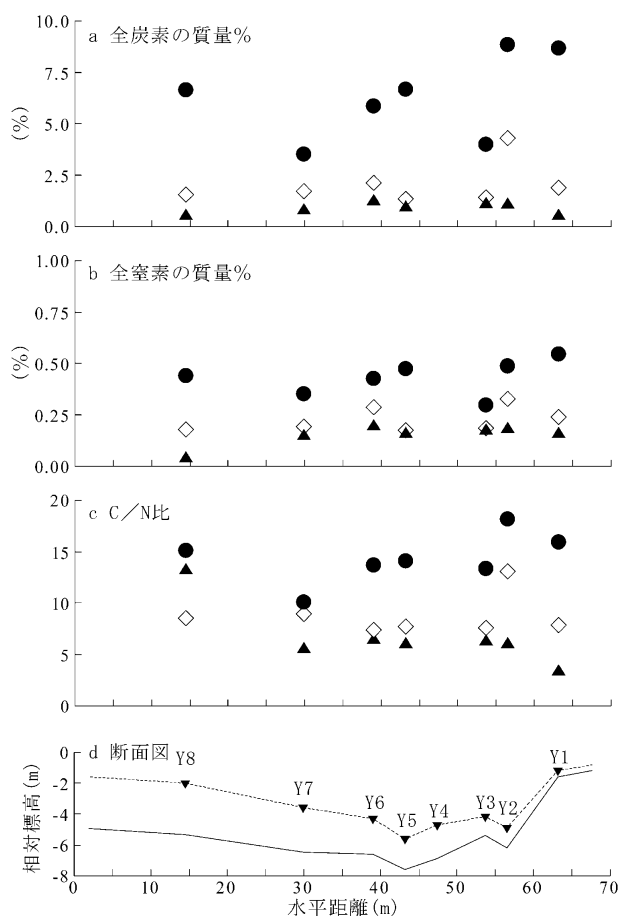


図-7 土壌の各深度における (a) 全炭素の質量% (b) 全窒素の質量% (c) C/N比 (d) 調査プロットの断面図

シンボルは●が深さ0~10cm, ◇が深さ20~30cm, ▲が深さ50~60cmを表わす。

Fig. 7. The difference in the total carbon content (a), total nitrogen content (b), and C/N ratio (c) of the soil at each depth and the cross section of the study plot (d)

表-1 各観測地点における平均樹高と各観測項目の相関係数 $r$ と有意水準 $p$

Table 1. The results of regression analyses between average tree height and each of the observed items at each observation point. Regression coefficient ( $r$ ) and significance level ( $p$ ) are shown.

観測項目	$r$	$p$	サンプル数
表層土壌の体積含水率	0.84	0.01	8
地下水の発生率	0.71	0.05	8
地下水中の無機態窒素濃度	0.53	0.17	8
土壌水中の無機態窒素濃度	0.89	0.04	5
葉内窒素濃度	0.84	0.01	8

立地条件のうち、斜面に沿って変化し、スギの成長に影響を与えていると考えられる、表層土壌の体積含水率と飽和地下水帯の発生率、地下水中の無機態窒素濃度、土壤水中の無機態窒素濃度、葉内窒素濃度と樹高との相関を求めた(表-1)。その結果、特に表層土壌の体積含水率と地下水の発生頻度、土壤水中の無機態窒素濃度、葉内窒素濃度と樹高との間に有意な正の相関が見られた( $r > 0.7$ ,  $p \leq 0.05$ )。

## V. 考 察

今回観測を行った比較的小規模な斜面でも、スギの成長量は尾根から谷に向かって次第に増大し、尾根に比べて谷付近で樹高で1.5倍、地際直径で2倍近く大きかった。

プロット内の土壌は、他の地点に比べて極端に薄いY1地点でも約50 cmあったので、植えてから6成長期間が経過したスギの成長の斜面上の位置による違いに土層厚が与える影響は小さいと考えられる。

一方で、表層土壌の体積含水率と飽和地下水帯の発生率は、どちらも尾根でもっとも低く、谷にむかって次第に増加する傾向があり、土壤水や地下水に溶存している植物にとって利用可能な無機態窒素濃度は尾根に比べ谷付近で大きかったことから、水分と無機態窒素養分の両方、あるいはそのどちらかが、この約6年生の幼齢スギの斜面上の位置による成長の違いに大きく影響を及ぼしている可能性が高いと考えられる(表-1)。詳細に見ると、表層土壌の体積含水率は、常に乾燥している尾根と、常に湿潤な谷底の1地点があり、それ以外の地点では平均値に大きな差がなかったが、尾根に近づくにつれ乾湿の変動幅が大きくなる傾向があった。飽和地下水帯の発生率は、全く発生しない尾根から谷にむかって、年に数回、大雨の時のみ発生する地点、雨が降ればほぼ毎回発生する地点があり、谷付近では無降雨時も常に地下水があった。また、表層土壌の全窒素量やC/N比は斜面上の位置による違いが明瞭でなかった。

対象とした斜面では平均樹高の高い地点では葉内窒素濃度が高かったことから、斜面上の位置による成長の違いに無機態窒素養分の場所による違いが、影響を及ぼしている可能性が高いと考えられる。これは千葉演習林内で葉内窒素濃度とスギ幼齢木の樹高の違いの関係を調べた既存の研究(丹下, 1995)とも調和的であった。土壌の全窒素量やC/N比は斜面に沿った違いや樹高との関係は明瞭ではなかったが、土壤水中の無機態窒素濃度は斜面に沿って変化し、平均樹高との間に明瞭な正の相関が見られた(表-1)。このことから有機態窒素量には斜面上の位置による違いは小さいが、特に土壌の浅い層に存在するスギが利用可能な無機態窒素養分量の斜面上の位置による違いが、スギの成長の違いに大きく関わっている可能性が高いと考えられる。その一方で地下水中の無機態窒素濃度と平均樹高にそれほど強い相関は見られなかった。この理由としては、土壌の水分条件によって窒素の形態変化が異なり、さらには地下水中で生じる窒素の形態変化の過程も異なること(OHTE *et al.*, 1997)などが影響していると考えられる。また、観測期間中にY8地点では3回しか地下水を採取できず、そのうち1回が他2回と比べ非常に高い濃度の $\text{NO}_3^-$  (44  $\mu\text{mol/L}$ ) が測定されたことなども影響していると考えられる。この濃度は本観測期間中で全観測地点において最も高い。

地表付近に存在する水分の斜面上の位置による違いは、スギの成長に直接的に影響を与えている可能性と、土壤中の微生物の活性に影響を与えることを通じて、スギの成長に間接的に影響を与えている可能性があると考えられる。スギにとって利用可能な無機態窒素養分は、微生物によ

る有機物の分解過程で生成され、有機物の分解速度には水分条件と、土壤に供給されるリターなどの有機物の質が深く関わるということが明らかにされている(徳地, 1996; OHTE *et al.*, 1997; HIROBE *et al.*, 1999; 廣部, 2003)。土壤水や地下水に含まれる無機態窒素は、土壤中で生成した無機態窒素のうち、植物などによって吸収されなかった無機態窒素であるので、土壤水や地下水に含まれる無機態窒素濃度が高いことから、その場所の有機物の分解速度が大きいとは必ずしも言えない。しかし、観測を行った斜面においては、成長がよく葉内窒素濃度も高い、つまり無機態窒素を十分に吸収したと考えられるスギが多い場所で、土壤水に含まれる無機態窒素濃度が高いので、スギの窒素の要求量に対して供給量が十分であることが示唆される。そのような場所は水分条件を表す表層土壤の体積含水率や飽和地下水帯の発生率が大きい地点であった。このことから、対象とした斜面では地中の水分が多い谷付近で、無機態窒素を生成する微生物の活動がより活性化したため、利用可能な無機態窒素養分が多くなったと考えられる。

一方で、調査を行った斜面では、有機物の分解の程度の指標とされているC/N比は、斜面上の位置による違いや平均樹高との関係は明瞭ではなかった。その理由の一つとして、斜面ではリターや土壤は移動すると考えられ、谷付近では斜面上方から供給されるものが多いので、尾根と谷付近でC/N比を比べても違いが現れにくかった可能性がある。また、層位別ではなく、深度別に土壤を採取したので、例えば0~10 cmの土壤においては、湿潤な地点に比べて、乾燥している地点では腐植が浸透しにくくA層が薄い可能性もあり、そのような乾燥している地点ではB層も採取されて、C/N比が過小評価された可能性などもあるので、これらについてはさらに検討を行う必要がある。

表-2 土壤水と地下水中のNO<sub>3</sub><sup>-</sup>とNH<sub>4</sub><sup>+</sup>の平均値と標準偏差  
Table 2. The average concentration and the standard deviation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> in the soil water and the ground water.

観測地点	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (μmol/L)		NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μmol/L)		サンプル数
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
土壤水					
Y3	46	33	1	4	16
Y4	48	22	2	2	5
Y5, Y6	32	19	2	2	9
Y7	38	35	1	2	6
Y8	0	0	2	2	6
地下水					
Y1	—	—	—	—	0
Y2	3	1	4	3	3
Y3	22	29	9	10	6
Y4	33	76	17	51	13
Y5	24	10	4	5	7
Y6	19	12	2	3	7
Y7	16	9	6	6	3
Y8	21	21	0	0	3

## VI. 結 論

調査を行った小規模な斜面において、スギの成長量は尾根から谷に向かって次第に増加していた。地中の水分は尾根で少なく、谷に向かって次第に増加する傾向があった。土壌中の全窒素は斜面上の位置による違いが明瞭でなかったが、土壌水や地下水中の溶存無機態窒素濃度は尾根に比べ谷付近で大きかった。

したがって本研究で対象とした斜面では、水分と窒素養分の両方、あるいはそのどちらかが、幼齢スギの斜面部位による成長量の違いに大きく影響を及ぼしていると考えられる。また、水分は無機態窒素を生成する微生物の活動に影響を与えるという、間接的な面からもスギの成長の違いに影響を与えている可能性があると考えられる。つまり、尾根部では水分不足により、無機態窒素を生成する微生物の活動が抑制され、その結果、土壌中の利用可能な無機態窒素養分の量に差が生じたと考えられる。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、東京大学千葉演習林の教員、技術職員の方々には観測を開始、継続する上で協力していただいた。また、丹下健教授、益守眞也講師をはじめ造林学研究室の方々には分析機を使わせて頂いた上に、貴重な意見を頂いた。そして、小田智基博士を始め、観測に協力して下さった森林理水及び砂防工学研究室の方々に感謝の意を表す。なお、本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金(若手研究B:17780117, 基盤研究B:17380088)の助成を受けて行った。

## 要 旨

斜面に一斉に植栽されたスギの斜面上の位置による成長の違いと、その違いを生む主要因やメカニズムを明らかにすることは重要である。千葉演習林袋山沢水文試験地内の小規模な斜面に植栽されたスギ幼齢木を対象として、スギの成長量の違いを明らかにした上で、地中の水分と土壌中の窒素がどのように斜面上の位置によって違っているのかを明らかにし、それらの関係について考察することを目的として研究を行った。スギの成長量は尾根から谷に向かって次第に増加していた。表層土壌の体積含水率は尾根よりも谷付近で大きい傾向があり、飽和地下水帯は谷に近いほど発生しやすかった。葉内窒素濃度、地下水中の無機態窒素濃度、土壌水中の無機態窒素濃度は尾根よりも谷付近で高い傾向があったが、土壌の全窒素量とC/N比は斜面上の位置による違いは顕著ではなかった。無機態窒素は土壌中の微生物による有機物の分解によって生成されるので、斜面上の位置による水分量の違いが微生物の活性に違いを生じさせ、無機態窒素濃度に影響することから、土壌水分条件が直接的に、また無機態窒素濃度を介して間接的に幼齢スギの斜面上の位置による成長量の違いに影響を及ぼしている可能性がある。

**キーワード：** 幼齢スギ・成長・地中の水分量の違い・土壌中の窒素養分の違い・斜面

## 引用文献

- ASANO, Y., UCHIDA, T. and OHTE, N. (2002) Residence times and flow paths of water in steep unchannelled catchments, Tanakami, Japan, *Journal of Hydrology* 261:173-192.
- 原田洸 (1970) スギの成長と養分含有量およびこれに及ぼす施肥の効果に関する研究, 林試研報 230: 1-104.
- HIROBE, M., TOKUCHI, N. and IWATSUBO, G. (1999) Spatial variability of soil nitrogen transformation patterns along a forest slope in a *Cryptomeria japonica* D. Don plantation. *European Journal of Soil Biology* 34:123-131.
- 廣部宗 (2003) 森林生態系内における窒素循環の空間的異質性, 環境科学会誌 16 (3): 227-232.
- 飯島東・池谷仙之 (1976) 千葉演習林の地質, 演習林, (通号 20): 1-38.
- 伊藤忠夫・植田正幸・宮内宏 (1972) 茨城県の森林立地区分 (II) 林齢, 地位, 立地区によるスギ養分濃度の変動について, 日林誌 54: 74-79.
- 梶谷宜弘・堀田紀文・小松光・久米朋宣・鈴木雅一 (2005) 斜面上部・下部に生育するスギ幼齢木の蒸散日変化パターンの差異, 日林誌 87 (1): 63-72.
- 国土交通省/編 (2007) 土地白書 平成 19 年版. 205pp, 国立印刷局.
- 真下育久 (1960) 森林土壌の理化学的性質とスギ, ヒノキの成長に関する研究, 林土調報 11: 1-182.
- 中村得太郎 (1943) 千葉県演習林におけるスギ植栽林の生長過程と土壌の形態学的性質との関係, 東大演報 32: 1-70
- 仁王以智夫 (1987) 生長と無機養分. (樹木の生長と環境, 畑野健一・佐々木恵彦編著, 養賢堂, 東京). 331-360.
- OHTE, N., TOKUCHI, N. and SUZUKI, M. (1997) An in situ lysimeter experiment on soil moisture influence on inorganic nitrogen discharge from forest soil. *Journal of Hydrology* 195:78-98.
- 林野庁 (2003) 地球温暖化防止吸収源対策の推進のための国民支援に関する研究会, 中間報告.
- 真田勝・塘隆男 (1978) スギ, ヒノキ, アカマツの苗木が生育中期に吸収する窒素の実態, 日林誌 60 (11): 423-425.
- 白木克繁・劉若剛・唐鎌勇・執印康裕・太田猛彦 (1999): 東京大学農学部附属千葉演習林袋山水文試験地の水収支解析, 東大演報 102: 71-86.
- 丹下健 (1995): スギ造林木の成長に関する生態生理学的研究, 東大演報 93: 65-145.
- 丹下健・松本陽介・真下育久・佐倉詔夫 (1989) 斜面に生育するスギ造林木の樹高生長経過—東京大学千葉演習林における斜面上部, 中部, 下部間での比較—, 東大演報 81: 39-51.
- 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.
- 戸田浩人・杉崎浩史・生原喜久雄 (1998) 森林の A<sub>0</sub> 層における窒素無機化・有機化速度への含水比の影響, 日林誌 80 (4): 262-269.
- 徳地直子 (1996) 竜王山森林試験地の斜面上の異なる位置における窒素循環機構, 京大演報 68: 9-24.
- 塚本良則 (1998) 森林・水・土の保全—湿潤変動帯の水文地形学—. 138pp., 朝倉書店, 東京.
- 植田敦 (1997) p H の異なるスギ若齢林土壌の窒素無機化特性, 東京大学卒業論文, 25pp.

(2008年9月12日受付)

(2009年9月14日受理)

### Summary

It is important to clarify the major environmental factors and mechanisms that determine the growth of *Cryptomeria japonica* planted on mountain slopes. We investigated the growth of young *C. japonica*, the spatial differences and temporal changes of soil moisture and inorganic nitrogen concentrations in soils along the slope and then considered the relationship between the growth of young *C. japonica* and the differences in moisture and nitrogen of soils in the Fukuroyamasawa experimental watershed. The growth of *C. japonica* was faster on the valley bottom than on the ridge. Volumetric water content of the surface soil was higher and saturated groundwater occurred more frequently near the valley bottom. The average concentrations of nitrogen in current-year leaves and the inorganic nitrogen in soil water and groundwater were higher at the valley bottom; while there were no significant differences in total nitrogen concentration and soil C / N ratio for different positions on the slope. Inorganic nitrogen is generated from organic matter by microorganisms and the soil moisture regime affects microbial activity. The spatial difference in the soil moisture regime along a slope should affect the growth of young *C. japonica* directly and indirectly by affecting soil the nitrogen mineralization activity of microorganisms.

**Key words:** young *Cryptomeria japonica*, difference of moisture in soil, difference of nitrogen nutrient in soil, slope