天然秋田スギ個体の肥大成長に 土壌深・土壌水分・光・隣接木との競争が与える影響

井上みずき^{*,1,3}・石川 雄一¹・星崎 和彦¹・高階 史章¹・松下 通也²・蒔田 明史¹

資源減少に伴い、天然スギ林では立木ごとの個体管理が重要となってきた。そこで、およそ 300 年生の天然秋田スギが生育する仁鮎水沢スギ植物群落保護林において、1-ha 調査区を設定し、2006 年と 2010 年に毎木調査を行い、スギの肥大成長速度を把握し、土壌深（A 層と AB 層の厚さの合計値）・土壌水分（体積土壌含水率）・光（樹冠の相対凹凸度）・隣接木との競争（立木周辺の他のスギ立木の胸高断面積（BA）合計密度）が成長速度へ及ぼす影響を明らかにした。スギの胸高直径（DBH）は 80.4 ± 25.3 （平均 $\pm$ SD）cm、DBH 成長速度は 0.18 ± 0.21 cm/year であった。観測された水分条件範囲の大部分で、土壌水分の増加に対し、DBH 成長速度は減少していると一般化線形モデルから推定された。本調査地では一部の立木が過湿状態に置かれている可能性があるが、土壌水分と連動する他の土壌養分の影響の可能性もあるので精査が必要である。さらに、隣接木の BA 合計密度が成長に負の影響を与える傾向にあったことから混み合った状態で隣接したスギと土壌水分以外の光や養分獲得の競争が起きている可能性もある。

キーワード：スギ、土壌水分、成長速度、個体間競争

Mizuki Inoue,^{*,1,3} Yuichi Ishikawa,¹ Kazuhiko Hoshizaki,¹ Fumiaki Takakai,¹ Michinari Matsushita,² Akifumi Makita¹ (2016) Effects of Soil Depth and Moisture, Light, and Neighborhood Competition on the Diameter Growth in an Old Growth Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica*) Stand, Akita, Japan. J Jpn For Soc 98: 101–107 Individual tree-based management in natural forests becomes more important in managing old growth Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) stands because of the decline of timber resources from natural forests. We set a 1-ha study plot in Nibuna-Mizusawa Forest Reserve, Akita, northern Japan, which mainly consisted of about 300-year-old Japanese cedars. The individual growth of tree diameter at breast height (DBH) was calculated using censuses in 2006 and 2010. The effects of soil depth (summed value of A and AB layers), soil moisture, light conditions of the tree crown (relative concavity and convexity levels against the surrounding), and neighborhood competition (indicated by sum of basal area of neighboring trees around each tree) were examined by generalized linear models. The mean DBH growth rate was 0.18 ± 0.21 cm/year. The DBH growth rate decreased with increasing soil moisture within most values for soil moisture we observed. The tendency in our results suggested that some cedars grew worse in damp soils, although other unknown soil factors associated with soil moisture (e.g. nutrients) should also be examined. The effect of the neighboring trees was marginally negative, suggesting competition for soil nutrient and/or light. The processes leading to the presented patterns were discussed.

Key words: *Cryptomeria japonica*, soil moisture, growth rate, intraspecific competition

I. は じ め に

スギ (*Cryptomeria japonica*) は日本固有の常緑性針葉樹であり、1,000 年以上といわれる長寿命が特徴の一つである。建築材等の用途で造林が行われ全国各地に人工林が存在する一方、日本列島の北は青森県の鱒ヶ沢から南は鹿児島県の屋久島まで天然林としても存在する（前田 1983）。天然スギ林の中でも、1,000 年以上の樹齢の立木も存在する屋久島の「屋久スギ」や樹齢 150～300 年に達する秋田の「天然秋田スギ」などは有名である。このうち、天然秋田スギは伝統工芸品である曲げわっぱなどに利用されており、秋田において欠かすことのできない資源である。しかし、第二次大戦中や戦後の伐採によってその資源量は大きく減少し（菅田 1980）、東北森林管理局管内では 2012 年

に伐採による天然秋田スギの供給が停止となった。

貴重な天然スギ林の維持・管理を行う上で、天然秋田スギの肥大成長量とそのばらつきの把握やそれらに影響を与える環境要因に関する知見は欠かせない。これまでの研究から天然秋田スギでは樹齢が 150 年や 200 年を超え高齢になっても肥大成長し、材積が増加することが知られている（西園ら 2006；澤田ら 2007）。供給停止となった天然秋田スギにかわる高級材を人工林で生産していくためには、サイズや齢に留意するだけでなく、天然林と似た木目となるような成長過程を持つ立木を見極める必要があり、林分レベルではなく単木レベルでの成長量や成長規定要因の把握が必要不可欠であろう。しかしながら、同一林分内の単木の成長のばらつきに影響を与える環境要因の抽出に関する研究はあまり行われてこなかった。

*連絡先著者（Corresponding author）E-mail: mizuki@chs.nihon-u.ac.jp

¹ 秋田県立大学生物資源科学部 〒010-0195 秋田県秋田市下新城中野（Faculty of Bioresource Sciences, Akita Prefectural University, Shimoshin-jo-Nakano, Akita, Akita 010-0195, Japan）

² 国立研究開発法人森林総合研究所林木育種センター 〒319-1301 茨城県日立市十王町伊師 3809-1（Forest Tree Breeding Center, Forestry and Forest Products Research Institute, Jyoutyoushi-Ishi, Hitachi, Ibaraki 319-1301, Japan）

³ 現在：日本大学文理学部 〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40（College of Humanities and Sciences, Nihon University, 3-25-40 Sakurajosui, Setagaya-ku, Tokyo 156-8550, Japan）
（2015 年 6 月 14 日受付、2016 年 3 月 4 日受理）

植物にとって、光・土壌養分・土壌水分は成長する上で、欠かすことのできない資源である。なかでも、スギは一般に降水量の多い地域に天然分布し、日本の造林木の中では水分および土壌養分の要求度が高く、耐陰性はヒノキに比べて低いとされる（堤 1994）。70 年生のスギ人工林を調べた例では、水ストレスが樹高成長の規定要因として大きく、水ストレスの要因として、土壌の水分状態・土層の厚さ・樹高などがあげられている（丹下 1995）。林分内の立木の成長量のばらつきには、こうした土壌水分および土壌養分、光といった資源量に加え、それらをめぐって競争する近傍の競争相手の存在も考慮すべきである（Beger *et al.* 2004；Masaki *et al.* 2006）。天然秋田スギ、高齢の秋田造林スギでは間伐後に肥大成長速度が大きくなることが知られており（西園ら 2006；大住ら 2000）、高齢になっても隣接木の被圧や隣接木との土壌養分・水分をめぐる局所的な競争がスギの成長に影響を与えると予測される。その中でも、光は上から降り注ぐために大きな樹木が小さな樹木を被圧し、被圧木の成長が阻害されるという一方向的な影響が生じやすく（Ogawa and Hagiwara 2003）、ある樹冠とその周囲の樹冠の相対的な高さが樹木の成長に重要な影響を与える可能性がある。

そこで、本研究ではおよそ 300 年生の天然秋田スギが生育している仁鮎水沢スギ植物群落保護林において、スギ単木ごとの肥大成長速度とそのばらつきを把握した上で、土壌深・土壌水分、光、および隣接木との競争といった環境要因が肥大成長速度へ及ぼす影響を明らかにし、天然秋田スギの個体管理を行う上で重要と考えられる要因の抽出を行った。

II. 調査地・調査方法

調査地は、秋田県内に設置されている 8 カ所のスギ植物群落保護林のうちの一つ、仁鮎水沢スギ植物群落保護林（18.46 ha, 40°4'N, 140°15'E, 標高 170~250 m）である（東北森林管理局 2001）。地質は新第三系鮮新統の小比内層であり、土壌は褐色森林土である。最寄りの鷹巣気象観測所（40°13'N, 140°22'E, 標高 29 m）の 2006~2010 年の年平均気温は 10.7℃、年降水量は 1,699 mm であり、積雪期間は 4 カ月に及ぶ。保護林内には樹高日本一の「きみまち杉（樹高 58 m）」が存在する。保護林内の平均樹高は 47.2 ± 5.4 （平均 $\pm$ SD）m、平均胸高直径（DBH）は 85.4 ± 21.8 （平均 $\pm$ SD）cm、林分蓄積が $1,970 \text{ m}^3/\text{ha}$ である（星崎ら 2002）。

保護林における天然スギ林の成立過程は定かではない。一般に、現存する天然秋田スギの林分は、ある程度、人が手を加えることによって成立したと考えられている（岩崎 1939）。400 年前に佐竹藩は留山制度をつくり天然スギの保護を行った。この制度により、スギ・ヒバなどの針葉樹はすべて官用に供され、農民の伐採は禁じられた。一方、農民には自家用燃料や商売用薪炭などの利用目的で広葉樹の伐採が認められていた。こうした長年の広葉樹伐採と日

図-1. 仁鮎水沢スギ植物群落保護林の地形図と 1-ha (200 m×50 m) 調査区の位置 (a)、1-ha 調査区の 3 次元地形図 (b)
Topography of Nibuna-Mizusawa Forest Reserve and the position of 1-ha study plot (a) and a 3D topography of the plot (b).

本海側のスギの伏条性（積雪で親木の下枝が地面に触れて根をつけ、別の独立した木になる性質）により、スギが優占したと考えられている（岩崎 1939）。

2006 年に保護林内に 1 ha (200 m×50 m) の調査区（図-1(a)）が設定された。この調査区はモニタリングサイト 1000（環境省生物多様性センター 2006）の毎木調査地の準コアサイトとして設定された（Ishihara *et al.* 2011）。この調査区は 10 m×10 m のサブプロット 100 個に分割されていて（図-1(b)）、格子点の杭の XYZ 座標が得られている。

1. 調査方法

1-ha 調査区において胸高周囲 15 cm 以上の全樹木を対象に 2006 年 10 月と 2010 年 9 月に毎木調査を行った。周囲長の測定箇所はペンキでマーキングを施し、2006 年と 2010 年で計測箇所が同一となるように留意した。周囲長から胸高直径（DBH）に換算した。解析では DBH 5 cm 以上のスギのみを対象とした。2006 年、2010 年の両年に直径が測定されたスギは 159 本であり、その間に新規加入したスギはなく、死亡は 1 本（幹折れによる）であった。解析では死亡したスギは除外した。コンパスで簡易測量を行い、全スギ立木の位置座標（X, Y, Z）を得た。

隣接木との競争については、Masaki *et al.* (2006) にない、対象のスギの半径 8 m 以内にあるスギの胸高断面

積 (BA) 合計密度を算出した。この計算方法では、対象の立木より大きな立木の影響だけではなく、小さな立木の影響もあると仮定される。本調査地はスギ以外の全樹木の優占度が林分の BA 合計の 3% に達しないため、スギ立木のみで BA 合計密度を計算した。調査区の外枠から 8 m 以内に含まれるスギについては調査区外のスギの情報がないため、隣接木の BA 合計密度推定の対象から除外した。

体積土壌含水率の測定は、晴天が 2 日続いた後の 2010 年 10 月 8 日に各杭脇の表層 (0~6 cm) について、ADR 土壌水分計 DIK-311A (大起理化工業社製) と Theta Probe type ML2x (DELTA-T DEVICES 社製) を用いて行った。スギの各個体位置における体積土壌含水率は、対象となるスギ位置の座標から最近傍の 4 点の各杭脇における体積土壌含水率から逆距離加重法 (Inverse Distance Weighting, IDW) にて推定した。スギの根が存在する地点は表層 6 cm より深いと考えられるが、地表と地下 30 cm 程度の水分状態には相関がある (Kunisaki *et al.* 2005)。本研究では多点での計測が必要であったことから、計測の容易な表層についてのみ、体積土壌含水率を測定した。従来、スギ造林木の成長の良否をきめる地位指数推定要因の一つとして A 層の厚さが使用されている (林野庁 1965)。本研究では、スギの根圏土壌の土壌養分・水分の垂直方向の利用しやすさの指標として A 層と AB 層の厚さの合計値を土壌深として考慮することとし、検土杖により各杭脇において土壌深を測定した。スギの各個体位置における土壌深は、体積土壌含水率と同様に IDW にて推定した。

スギ樹冠がどの程度光を受け取りやすいかという指標として、対象となるスギの樹冠と周囲との凹凸を相対的に評価した。まず 2010 年 10 月 19 日に仁鮎上空で撮影した 1/10,000 縮尺の空中写真を精密オルソ補正し、空中写真分析ソフトウェアの MATCH-T (inpho 社製) を用いて、このオルソ画像に林冠の等高線 (1 m 間隔) を描いた。次に、対象木の樹冠縁からおおよそ 2 m 以内にある立木の樹冠 (もしくは空隙) との相対的な凹凸度を等高線から判定した。その際、隣接した立木のうち最も高い立木の樹冠に比べ、対象木の樹冠が +4 m より凸である場合または隣接木が無い場合を「凸 (convexity)」, +4 m 以下かつ -3 m より大きい場合は「平坦 (flat)」, -7 m より大きく -3 m 以下の凹の場合を「浅い凹 (shallow concavity)」, -7 m 以下の凹または被圧され写真から読み取れない場合を「深い凹 (deep concavity)」とした。

2. 解析

説明変数に環境要因 (体積土壌含水率, 土壌深, 隣接木の BA 合計密度, 樹冠の相対凹凸度) を当てはめスギの DBH 成長速度を一般化線形モデル (GLM) により説明するモデル式を構築した。調査区の外枠から 8 m 以内に隣接するスギを除外したため、調査区内の 159 本のスギのうち、モデル式の構築に用いたスギは 92 本であった。ただし、肥大成長に影響を与える内的要因として 2006 年時の DBH も説明変数に加えた。体積土壌含水率, 土壌深, 隣接

木の BA 合計密度, 樹冠の相対凹凸度, 2006 年時の DBH について多重共線性は無視できる程度 (分散拡大係数 = 1.08~2.50) であった。体積土壌含水率, 土壌深, 隣接木の BA 合計密度, 2006 年時の DBH については影響が直線的でない可能性があったため、二次項を含めた。樹冠の相対凹凸度は順位のあるカテゴリカル変数 (Hutcheson 2011) として扱った。誤差分散を正規分布と仮定した。モデル選択の際には環境要因と内的要因の全組み合わせ (511 通り) の中から赤池情報量基準 (AIC) の最も小さいものを最良モデルとして採用した。ただし、結果には飽和モデルも示した。最良モデルについては標準偏回帰係数も示した。

III. 結 果

1. 胸高直径 (DBH) および DBH 成長速度

2010 年時の DBH は 80.4 ± 25.3 (平均 $\pm$ SD) cm であり、DBH が 70 cm 以上のスギは調査地全域に分布していた (図-2(a))。DBH 成長速度は $-0.52 \sim 1.04$ (mean = 0.18) cm/year であり、0.5 cm/year 以下の成長速度であったスギが 94% であった (図-3)。また、ゼロ成長またはマイナス成長を示したスギが 16 本 (10%) あった。成長速度が 0.5 cm/year より大きいスギの分布は X 座標が 0~70 m の範囲にほぼ集中していた (図-2(b))。

2. 環境要因

スギの根元における体積土壌含水率は 0.42 ± 0.06 (平均 $\pm$ SD) m^3/m^3 であった。スギの根元における土壌深は 22.5 ± 6.8 (平均 $\pm$ SD) cm であった。体積土壌含水率は調査区の X 座標が 30~60 m 付近で低く、ほかの場所ではおおむね高かった (図-2(c))。地形図 (図-1(b)) と重ね合わせると、体積土壌含水率が低い場所は概ね尾根にあたり、体積土壌含水率が高い場所は谷であった。土壌深は、深い場所と浅い場所が混在していた (図-2(d))。樹冠の相対的な凹凸度の評価「凸」に属するスギが全体 ($n=159$) の 53.5% であった。特に、調査区の X 座標が 0~60 m 付近のスギは評価「凸」に属していた (図-2(d))。隣接木の胸高断面積 (BA) 合計密度は $2.0 \pm 0.8 \text{ m}^2/64 \pi \text{ m}^2$ (平均 $\pm$ SD, $n=92$) ($99.5 \pm 39.8 \text{ m}^2/\text{ha}$ 相当) となり、最も高いもので $4.1 \text{ m}^2/64 \pi \text{ m}^2$ ($204.0 \text{ m}^2/\text{ha}$ 相当) であった。

3. DBH 成長速度と環境要因および内的要因の関係

土壌深と DBH 成長速度には相関が認められなかった ($r = -0.15$, $p = 0.90$; 図-4) が、2006 年時の DBH ($r = -0.14$, $p = 0.08$)、体積土壌含水率 ($r = -0.15$, $p = 0.05$) と DBH 成長速度にはわずかに負の相関が認められた。隣接木の BA 合計密度と DBH 成長速度には負の相関が認められた ($r = -0.27$, $p < 0.01$)。一般化線形飽和モデルでは、体積土壌含水率が成長速度にわずかに影響を与えていたが、それ以外の要因の影響は認められなかった (表-1)。AIC によって選択された最良モデルでは体積土壌含水率と隣接木の BA 合計密度の効果が選択された (表-1)。体積土壌含水率の二乗項の標準偏回帰係数の絶対値 (0.037) は隣接木の BA 合計密度の標準偏回帰係数の絶対値

図-2. 2010 年時の立木の DBH の空間分布 (a), DBH 成長速度の空間分布 (b), 体積土壌含水率の空間分布 (c), 土壌深の空間分布 (d), 樹冠の相対凹凸度 (e)

Spatial patterns of DBH in 2010 (a), DBH growth rate (b), volumetric soil water content (c), soil depth (d), and relative concavity and convexity levels against the surrounding (e).

(0.029) よりも大きかった。また DBH 成長速度に対する体積土壌含水率の影響は下に凸な曲線関係を示した。すなわち、隣接木の BA 合計密度に関わらず DBH 成長速度の予測値は体積土壌含水率 $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^3$ で極小値を持ち、この $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 前後で体積土壌含水率の増加に対し、減少傾向から弱い増加傾向に転じるパターンが検出された (図-5)。DBH 成長速度に対する隣接木の影響は単調減少傾向であった。

VI. 考 察

1. スギの胸高直径 (DBH) 成長速度

奈良県吉野地方のスギ人工林 (229 年生, 平均樹高 49.7

m) では, DBH が 105.5 ± 13.7 (平均 $\pm$ SD) cm であった (竹内 2005) のに対し, およそ 300 年生といわれる仁鮎水沢スギ植物群落保護林 (平均樹高は 47.2 m) 内の本調査区のスギ立木の DBH は 80.4 ± 25.3 (平均 $\pm$ SD) cm であり, やや細かった。同じ保護林内で行われた過去の研究 (星崎ら 2002) でも 85.4 ± 21.8 (平均 $\pm$ SD) cm であり矛盾はない。本調査地の DBH 成長速度は 0.18 ± 0.21 (平均 $\pm$ SD) cm/year (図-3) であり, さきほど示した奈良県吉野地方のスギ人工林での値 (0.34 ± 0.08 cm/year, 竹内 2005) と比較すると, 本調査地では平均成長速度はやや低く, 立木間のばらつきがより大きかった。他の地域で行われた秋田天然スギの調査 (200 年生以降は $0.20 \sim 0.30$ cm/

図-3. DBH 成長速度の頻度分布
Histogram of DBH growth rate.

図-4. 2006 年時の DBH ($n=159$), 体積土壌含水率 ($n=159$), 土壌深 ($n=159$), 局所 BA 合計密度 ($n=92$), 樹冠の相対凹凸度 ($n=159$) と DBH 成長速度の関係

Pairwise relationships between DBH in 2010, volumetric soil water content, soil depth, sum of basal area of neighboring trees, and relative concavity and convexity levels against the surrounding and DBH growth rates.

図-5. 最良モデルから推定された DBH 成長速度の予測値
Predicted DBH growth rates as a function of volumetric soil water content and basal area of neighboring trees, based on the best GLM.

表-1. 応答変数を DBH 成長速度とした一般化線形モデルによる係数推定

Estimated parameters for DBH grow rates, based on the GLMs.		
Explanatory variable	Full model	Best model
(DBH in 2006) ²	0.000	
DBH in 2006	0.002	
(Soil water content) ²	0.122 ⁺	12.2(0.037)*
Soil water content	-0.104 ⁺	-10.43(0.005)*
(Soil depth) ²	0.000	
Soil depth	0.009	
(Basal area of neighboring trees) ²	0.011	
Basal area of neighboring trees	-0.084	-0.0354(-0.029) ⁺
RCCS deep vs. shallow concavity	-0.065	
RCCS shallow concavity vs. flat	-0.011	
RCCS flat vs. convexity	-0.005	

RCCL, Relative concavity and convexity levels against the surrounding. ⁺ $p < 0.1$, * $p < 0.05$. Standard partial regression coefficient of the best model in parentheses.

year, 澤田ら 2007) とは大きく異ならなかった。

2006 年時の DBH と DBH 成長速度には、わずかに負の相関が認められた ($r = -0.14$, $p = 0.08$; 図-4)。しかし、DBH 成長速度に対する最良モデルでは DBH は採択されなかった。104 年生の秋田スギ人工林データの解析では、DBH は肥大成長に正の効果を持つものの、高齢になるにつれて、DBH に対する肥大成長への正の効果は弱くなっていくことが示されている (Matsushita *et al.* 2015)。200 年生を超える立木が多い本調査地では DBH という内的要因よりもむしろ環境要因が肥大成長により強い影響を与えているのかもしれない。

2. スギの成長と環境要因の関係

DBH 成長速度に対する最良モデルでは、本調査地の秋田天然スギの肥大成長には体積土壌含水率と隣接木の BA

合計密度が影響を与えており、特にその標準偏回帰係数の絶対値の比較から DBH 成長速度には体積土壌含水率がより強く影響したと考えられた (表-1)。スギは水分要求性が高く (堤 1994; Nagakura *et al.* 2004), 造林する際には水分条件の良い立地に植栽されることが多い。したがって、一般には、体積土壌含水率が高いほど DBH 成長速度は増加すると予測される。しかし、今回の解析結果は従来の知見と異なり、調査地で観測された水分条件範囲の大部分で、土壌水分の増加に対し、DBH 成長速度は減少していた。土壌が過湿状態であると根圏の酸素欠乏をまねく場合がある (Kozłowski 1984) ことから、本調査地の土壌水分条件はスギの肥大成長にとってやや過湿であった可能性がある。ただし、体積土壌含水率の効果は単調な負の影響ではなかった。体積土壌含水率の増加に伴う DBH 成長速度の変化は体積土壌含水率が $0.43 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 前後を境に減少傾向から弱い増加傾向に転じたことから、過湿が原因であるとは早急には結論できないだろう。今後、より乾燥した場所を含む広い幅の土壌水分条件に対して、根圏の酸素の状態とともに厳密に検証されるべきであろう。また、本研究で扱わなかった環境要因による可能性も検討すべきかもしれない。本調査地では、土壌水分は尾根で低く、谷で高かった (図-1(b), 2(c))。こうした空間異質性は土壌水分以外の環境要因でも報告されており、たとえば、無機化窒素の形態も斜面の位置 (土壌の乾燥状態) によって異なっている (Tokuchi *et al.* 1999; Hirobe *et al.* 1999)。したがって、土壌水分条件そのものよりも、相関する無機化窒素の形態などの空間分布パターンが肥大成長に影響した可能性もある。今後、土壌水分条件だけでなく、土壌環境要因のさらなる精査を進め、他の天然秋田スギ林を含め、各地の天然スギ林でも同様の傾向にあるのかを調査していく必要があるだろう。

隣接木の BA 合計密度については 94 年生の秋田スギ人工林 (Masaki *et al.* 2006) と同様に、隣接木の BA 合計密度が高いほど成長速度が小さくなる傾向にあった (表-1, 図-5)。Masaki *et al.* (2006) は、隣接木の BA 合計密度が高い、つまり混み合った状態では、土壌や光といった資源を獲得するため、隣接した立木と競争が起きていると考えている。しかし、本調査地は過湿である可能性があり、そうした立地条件では、土壌水分獲得のための立木間競争は考えにくい。さらに、体積土壌含水率と隣接木の BA 合計密度に多重共線性が発生していなかったことから、隣接木の BA 合計密度は体積土壌含水率とは独立に DBH 成長速度に影響していたと考えられる。したがって、本調査地での隣接木の BA 合計密度による影響は、土壌養分や光など土壌水分以外の要因に起因しているものと想定される。土壌深は局所的に厚いところがあり、空間異質性が認められたが (図-2(d)), 成長速度に対する最適モデルでは採択されなかった。スギの根圏土壌の土壌養分・水分の垂直方向の利用しやすさの指標として、簡便に多地点で取得可能な土壌深を利用したが、先に述べたように無機態窒素の存在

割合の空間異質性などを考慮していく必要があるかもしれない。光条件の指標としての樹冠の相対凹凸度も採択されなかった。樹冠の相対凹凸度は、大きい樹木が小さい樹木を一方向的に被圧し、小さい樹木の成長が阻害されることを想定していた。一方、隣接木の BA 合計密度は双方向性 (大きい樹木が小さい樹木に影響を与え、小さい樹木も大きい樹木に影響を与える) を仮定した計算方法 (Masaki *et al.* 2006) を用いた。トウヒ属では被陰の影響が双方向であるとの報告 (Kikuzawa and Umeki 1995) もあり、こうした影響の及ぶ範囲の想定が光要因の不採択につながったかもしれない。その場合、光環境としては相対的な高さ関係では不十分で、樹冠全体の被陰の程度を考慮すべきかもしれない。または、Matsushita *et al.* (2015) のように、成長速度に対する光条件の違いを計算機集約的な手法によって明らかにしていくこともできるかもしれない。今後、こうした計算モデルに土壌要因の効果を明示的に取り込むことができれば、光と土壌中の資源をめぐる競争が成長に与える効果をより良い精度で推定できるだろう。

本研究では、単木ごとの肥大成長量を把握した上で、複数の環境要因と自身の直径が肥大成長に与える影響を検討した。その結果、肥大成長規定要因として土壌水分と隣接するスギ立木間の競争が重要である可能性を示した。こうした知見は、天然スギ林の維持・管理を行う上で重要であるだけでなく、天然秋田スギに替わる高級材の生産技術の開発に生かすことができるだろう。現在、日本各地でスギ人工林の長伐期化が進められている。本研究結果も踏まえながら、天然スギ林に近い環境条件を持つ人工林地で単木ごとの適切な管理を行い、天然林に似た木目を持つ大径材を生産していく技術の早期確立が望まれる。

東北森林管理局・能代市教育委員会には調査許可を頂いた。技術士事務所 森林航測研究所 板垣恒夫氏、共立航空撮影株式会社のみなさん、フォテクのみなさんには空中写真の撮影・精密オルソ化作業に協力して頂いた。本調査地の設置は澤田智志氏および旧秋田営林局の調査のおかげである。また、取りまとめには高田克彦氏に貴重な意見を頂いた。査読者にも大変貴重なご指摘を頂いた。心より感謝申し上げる。

引用文献

- Berger U, Hildenbrandt H, Grimm V (2004) Age-related decline in forest production: Modeling the effects of growth limitation, neighborhood competition and self-thinning. *J Ecol* 92: 846-853
- Hirobe M, Tokuchi N, Iwatsubo G (1999) Spatial variability of soil nitrogen transformation patterns along a forest slope in a *Cryptomeria japonica* D. Don plantation. *European J Soil Biol* 34: 23-131
- 菅田 稔 (1980) 秋田スギ. 林業技術 454: 26-28
- 星崎和彦・蒔田明史・澤田智志・佐藤賢一・小林一三 (2002) 樹齢 250 年でもまだ太る！—天然秋田スギ林 20 年間の動態—。日林講 113: 545
- Hutchesson GD (2011) Categorical explanatory variables. *J Model Manag* 6: Iss 2
- Ishihara MI, Suzuki SN, Nakamura M, Enoki T, Fujiwara A, Hiura T, Hoshino D, Homma K, Hoshizaki K, Ida H, Ishida K, Itoh A, Kaneko T, Kubota K, Kuraji K, Kuramoto S, Makita A, Masaki T,

- Namikawa K, Niiyama K, Noguchi M, Nomiya H, Ohkubo T, Saito S, Sakai T, Sakimoto M, Sakio H, Shibano H, Sugita H, Suzuki M, Takashima A, Tanaka N, Tashiro N, Tokuchi N, Yakushima Forest Environment Conservation C, Yoshida T, Yoshida Y (2011) Forest stand structure, composition, and dynamics in 34 sites over Japan. *Ecol Res* 26: 1007–1008
- 岩崎直人 (1939) 秋田縣能代川上地方に於ける杉林の成立並更新に関する研究. 興林會 468–498
- 環境省生物多様性センター (2006) モニタリングサイト 1000 <http://www.biodic.go.jp/moni1000/index.html> (参照 2015–8–19)
- Kikuzawa K, Umeki K (1995) Effect of canopy structure on degree of asymmetry of competition in two forest stands in northern Japan. *Ann Bot* 77: 565–571
- Kozlowski TT (1984) Plant responses to flooding of soil. *BioScience* 34: 162–167
- Kunisaki T, Satoh K, Itoh H (2005) Application of time domain reflectometry for assessing horizontal variation in mean soil-surface water content in a *Cryptomeria japonica* D. Don plantation. *Bull Iwate Univ For* 36: 1–10
- 前田禎三 (1983) 分布と資源. (スギのすべて. 坂口勝美監修, 全国林業改良普及協会). 10–11
- Masaki T, Mori S, Kajimoto T, Hitsuma G, Sawata S, Mori M, Osumi K, Sakurai S, Seki T (2006) Long-term growth analysis of Japanese cedar tree in plantation: neighborhood competition and persistence of initial growth deviations. *J For Res* 11: 217–225
- Matsushita M, Takata K, Hitsuma G, Yagihashi T, Noguchi M, Shibata M, Masaki T (2015) A novel growth model evaluating age-size effect on long-term trends in tree growth. *Funct Ecol* 29: 1250–1259
- Nagakura J, Shigenaga H, Akama A, Takahashi M (2004) Growth and transpiration of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) and Hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*) seedlings in response to soil water content. *Tree Physiol* 24: 1203–1208
- 西園朋広・澤田智志・栗屋善雄 (2006) 秋田地方における高齢天然スギ林の林分構造と成長推移. 日林誌 88: 8–14
- Ogawa K, Hagiwara A (2003) Self-thinning and size variation in a sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation. *Forest Ecol Manag* 174: 413–421.
- 大住克博・森麻須夫・桜井尚武・斎藤勝郎・佐藤昭敏・関剛 (2000) 秋田地方で記録された高齢なスギ人工林の成長経過. 日林誌 82: 179–187
- 林野庁 (1965) 地位指数調査要領, 40 林野計第 239 号. 国有林野間連通達集〈経営編〉. 林野弘済会, 181–202
- 澤田智志・西園朋広・栗屋善雄・野堀嘉弘 (2007) 秋田スギ天然林を構成する個体の成長解析. 日林誌 89: 200–207
- 竹内郁雄 (2005) スギ高齢人工林における胸高直径成長と林分材積成長. 日林誌 87: 394–401
- 丹下 健 (1995) スギ造林木の成長に関する生態生理学的研究. 東大農演報 93: 65–145
- 東北森林管理局 (2001) 仁鮎水沢スギ植物群落保護林学術調査報告書
- Tokuchi N, Takeda H, Yoshida K, Iwatsubo G (1999) Topographical variations in a plant-soil system along a slope on Mt Ryuoh, Japan. *Ecol Res* 14: 361–369
- 堤 利夫 (1994) 現代の林学 10 造林学. 文永堂出版, 5–10