

粗放的に管理された岩手県内スギ人工林の込み合い度と直径分布特性

國崎 貴嗣*

Variation in the degree of crowding and stem diameter distribution for dense plantations of Sugi
(*Cryptomeria japonica* D. Don) in Iwate Prefecture

Takashi KUNISAKI*

1. はじめに

日本全国で、粗放的に管理された過密な人工林が増加しており、2011年度現在、31県で独自課税（森林環境税）による森林整備事業が推進されている（林野庁、2012）。過密人工林では下層植生が衰退し、水土保全機能（大原、2007）や生物多様性保全機能（長池、2000）などを含む生態系機能が低下しやすい。それゆえ、下層植生を繁茂させ、人工林の生態系機能を改善する観点から、過密人工林における強度間伐は重要である（Seiwa *et al.* 2012）。

岩手県は、2006年度から「いわての森林づくり県民税」（以下、県民税とする）を徴収し、公益上重要で緊急に整備する必要がある森林（ほとんどが針葉樹人工林）を、将来、針広混交林へ誘導するため、強度間伐（混交林誘導伐）を実施している。県民税による強度間伐は「いわて環境の森整備事業」（以下、環境の森整備事業とする）と呼ばれ、県民税で推進される事業予算の約95%を占める、主要な事業である。環境の森整備事業を含む県民税推進事業については、県内の外部有識者と一般公募の県民計10名から構成される「いわての森林づくり県民税事業評価委員会」（以下、委員会とする）が企画審査や事後評価などを実施している。環境の森整備事業に関しては、委員会が施工候補地の書類審査をおこなうとともに、一部の施工地については、施工後の現況を確認し、岩手県林業技術センターによる固定標準地のモニタリング調査結果を検証している。このように、委員会による審査・評価はPDCAサイクルの中で定期

Received February 28, 2013

Accepted May 13, 2013

* 岩手大学環境科学系

的に実施されている。しかし、年間1500ha前後という膨大な施工候補地を委員会事務局（以下、事務局とする）が選定し、それを委員会が短期間に書類審査するため、個々の施工候補地については、林齢、林分面積、過去の育林履歴、林内景観写真といった情報が提示される程度である。このため、委員会により現地視察された施工地や固定標準地の設置された施工地など、委員会承認の一部施工地を除くと、本数密度や林分胸高断面積といった林分構成値や胸高直径階別度数分布（以下、直径分布）は、委員会や事務局により詳細に確認されていない。林分構成値や直径分布は、過密人工林の現況を適正に評価する上で有用である（南雲・箕輪, 1990; Burkhardt and Tomé, 2012）。より多くの施工地を対象に、林分構成値や直径分布を定量的に解析すれば、環境の森整備事業の意義をより深く確認できるとともに、今後の強度間伐のあり方を検討するための有益な判断材料を提供できるだろう。

環境の森整備事業の施工候補地は、岩手県職員が森林所有者と直接交渉する県営方式と、森林組合等の林業事業体や市町村が森林所有者と交渉し、集約化する補助方式で確保される。現在では、施工候補地のほとんどが補助方式により確保されている。補助方式では、施工候補地を岩手県に申請するにあたり、林分ごとに面積0.01haの標準地を数個設定し、胸高直径と樹高の毎木調査データを収集・提出することが求められている。こうした標準地（以下、暫定標準地とする）のデータについては、委員会での審査書類を作成するために事務局が利用するに止まっている。しかし、0.01haとは言え、毎木調査データがあれば、林分構成値や直径分布を確認することができる。

環境の森整備事業施工地のスギ人工林を対象に、暫定標準地データを用いて、込み合い度を推定するとともに、直径分布から林分構造特性を明らかにするのが本研究の目的である。暫定標準地における込み合い度と林分構造の特性から、環境の森整備事業の意義と今後の林分管理について若干の考察をおこなった。

II. 資料と方法

1. 資料

本研究で用いた資料は、環境の森整備事業施工地におけるスギ人工林の0.01ha暫定標準地502個のデータ（表-1）、岩手大学農学部附属寒冷フィールドサイエンス教育研究センター（以下、FSCとする）におけるスギ若齢林固定試験地データ（表-2）、およびYamakura (1984)に掲載されたスギ人工林83林分における胸高直径の変動係数データである。

環境の森整備事業施工地におけるスギ人工林の暫定標準地データは、2010年度に承認された環境の森整備事業施工地の基礎資料の一部にあたる。施工地の基礎資料のうち、森林所有者の氏名等、データ解析に必要な情報を除いて、各施工地の樹種、林齢、林分面積、平均傾斜、および標準地内の林木の胸高直径と樹高のデータを、岩手県農林水産部林業振興課から紙媒体

表一 1 いわて環境の森整備事業施工地における0.01ha暫定標準地 (n=502) の概要

林齢 (年)	平均直径 (cm)	本数密度 (本/ha)	林分胸高断面積 (m ² /ha)
14-55	11.3-28.0	1400-4400	27.6-140.1
37	19.7	2444	79.4

上段は最小値と最大値, 下段は平均値を示す。

表一 2 FSCにおけるスギ若齢林固定試験地の概要

調査区	調査面積 (ha)	調査開始時				直近の調査時			
		林 齢 (年)	平均直径 (cm)	本数密度 (本/ha)	断面積 (m ² /ha)	林 齢 (年)	平均直径 (cm)	本数密度 (本/ha)	断面積 (m ² /ha)
無間伐 1	0.052	12	10.9	2654	25.3	27	19.1	2288	69.3
無間伐 2	0.073	12	9.1	2877	19.9	27	18.6	2356	68.4
無間伐 3	0.054	12	7.8	3370	17.2	27	17.0	3111	74.6
間 伐	0.125	12	12.4	3229	40.6	27	23.6	1803	80.9

で提供して頂いた。標準地調査は、岩手県内の林業事業者職員により実施され、胸高直径は2 cm単位で、樹高は1 m単位で測定されていた。解析に先立ちデータを点検したところ、樹高については、胸高直径に関係なく同一樹高が記されていたり、形状比が50未満などと極端に低くなるような樹高が記されている標準地が散見された。これらのことから、樹高測定値の正確度が調査者によって著しく異なると考えられる。一方、人工林の林齢については森林簿データから正確に把握できる (白石, 1995)。また、胸高直径データは輪尺や直径巻尺を用いた直接測定で得られ、間接測定に基づく樹高に比べると測定者の違いによる測定誤差が小さく、測定値の正確度は高い。そのため、本研究では、値の正確度が高いと考えられる林齢と胸高直径をデータ解析に使用した。

FSCにおける若齢林固定試験地の植栽密度は3500本/haである。下刈り・除伐後、林齢12年時 (1997年) に無間伐区と間伐区が設定された。間伐区では、林齢14年時に本数間伐率21%、19年時に本数間伐率26%の下層間伐が実施されている。胸高直径の毎木調査については、林齢12年時から27年時まで毎年実施されている。これら若齢林固定試験地データについては、暫定標準地における込み合い度や胸高直径の歪度の特徴を明らかにするための対照として用いた。

Yamakura (1984) に掲載されたスギ人工林83林分における胸高直径の変動係数データ (平均25.5%, 最小9.7%, 最大46.4%) については、暫定標準地における変動係数の特徴を明らかにするための対照として用いた。

2. データ解析

暫定標準地における込み合い度の全体的特徴を把握するため、林齢と本数密度との関係、林

齢と林分胸高断面積との関係、および胸高断面積平均直径と本数密度との関係を調べた。比較基準として、林齢と本数密度との関係については、岩手県林業水産部(1979)におけるスギ無間伐林(地位2等、植栽密度3500本/ha)の本数密度減少曲線を用いた。林齢と林分胸高断面積との関係については、FSCにおける若齢林固定試験地(無間伐区)のデータ、および田中(1991)が各地の林分収穫表に基づき推定した、理論的な最大林分胸高断面積の平均値を比較基準とした。胸高断面積平均直径と本数密度との関係については、Nishizono and Tanaka(2012)が秋田県のスギ無間伐林データに基づき推定したReineke曲線を最多密度曲線として用いた。その結果、暫定標準地データには、後述するように、理論的にあり得ないような過密林分データが多数含まれていた。事務局の担当職員に確認したところ、標準地面積については0.01haとして林業事業体職員に指導しているものの、標準地調査における周縁木(標準地の境界線に触れる林木)の取り扱いについて、統一的な指導をしていないとのことであった。林業事業体職員からすれば、過密人工林整備にかかる事業地確保のための標準地調査であり、周縁木の取り扱いに関する指導を受けていなければ、標準地の周縁に少しでもかかる林木も測定対象に含める可能性が考えられる(白石, 1995)。そこで、図-1に示すような考え方で、標準地面積を一律に補正した。まず、「スギ林の植栽密度は3500本/haである」、「正方植えである」という2つの仮定を設け、3500本/haから平均林木間距離を算出すると1.69mである。次に、「標準地の周縁に少しでもかかる林木もすべて測定対象に含む」という仮定を設けると、図-1にあるように、標準地の一辺あたり最高7本の林木が測定対象になる(標準地内では最高49本の林木が測定対象になる)。ここで、正しい本数密度を算出するには、細田ら(2012)が指摘するように、標準地の境界線が、近隣する2本の林木の間(最外部の林木から0.845m外側の位置)を通るようにすべきである。以上を踏まえて、標準地の一辺の長さを補正すると、11.83m(=0.845m+1.69m×6+0.845m)となり、補正された標準地面積は0.014haとなる。そこで、すべての暫定標準地の面積を0.014haとして、本数密度および林分胸高断面積を算出した。

暫定標準地の込み合い度を定量的に評価するため、暫定標準地面積の補正前後において、暫

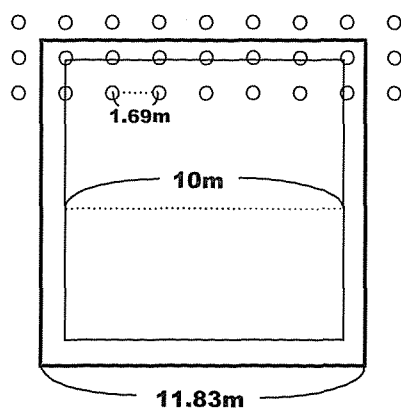


図-1 暫定標準地の面積補正の考え方

白丸は立木の位置(一部のみ表示)を、細線の正方形は一辺10mの標準地を示す。太線の正方形は、3つの仮定(植栽密度は3500本/haである。正方植えされる。一辺10mの正方形標準地の周縁に少しでもかかる林木も測定対象とした。)に基づき、正味の一辺の長さを11.83m(標準地面積0.014ha)とみなして補正した標準地を示す。

定標準地の密度階別割合を求めた。密度階として、超過密、過密、密、中庸の4段階に区分した。超過密は最多密度曲線を越えた状態、過密は自己間引きによる枯死が発生する状態、密は胸高直径のばらつき（変動係数）が増大し始める状態、中庸は林木間競争が弱い、もしくはない状態である。SDI (Stand Density Index) に基づき、超過密を $SDI \geq 1641$ 本/ha、過密を $1093 \text{本/ha} \leq SDI < 1641 \text{本/ha}$ 、密を $930 \text{本/ha} \leq SDI < 1093 \text{本/ha}$ 、中庸を $SDI < 930 \text{本/ha}$ とした（國崎，2013）。SDI（本/ha）については、以下の計算式で算出した（Burkhardt and Tomé, 2012）。

$$SDI = N \times (D_q / 25)^{1.486}$$

ただし、 N はha当たり本数密度（本/ha）、 D_q は胸高断面平均直径（cm）である。なお、べき乗係数1.486は、Nishizono and Tanaka（2012）による秋田県のスギ無間伐林に基づく推定値である。これらの密度階を、より一般的な密度管理指標である相対幹距 Sr に換算すると、超過密は $Sr \leq 10.4\%$ 、過密は $10.4\% < Sr \leq 15.4\%$ 、密は $15.4\% < Sr \leq 17.0\%$ 、中庸は $Sr > 17.0\%$ に対応する（國崎，2013）。また、密度階別の林齢の違いをHolm法に基づく多重比較により検定した。

暫定標準地における直径分布の全体的特徴を把握するため、直径分布の非対称性と不均質性を調べた。非対称性の指標として歪度を、不均質性の指標として変動係数を用いた（國崎，2001）。そして、暫定標準地データと他のデータとの間で、歪度や変動係数に差があるかを調べるため、独立2群のt検定（等分散でない場合にはWelchのt検定）をおこなった。

暫定標準地の直径分布に影響する因子を明らかにするため、線形モデルに基づく重回帰分析をおこなった。歪度と変動係数を応答変数、林分胸高断面積 BA 、胸高断面平均直径 D_q 、林齢、平均胸高直径と最小胸高直径の差 $\bar{D} - D_{\min}$ 、最大胸高直径と平均胸高直径の差 $D_{\max} - \bar{D}$ の5つを説明変数とし、AICが最小となる線形モデルを最良モデルとして選択し、その標準偏回帰係数を調べた。なお、 D_q 、 $\bar{D} - D_{\min}$ 、 $D_{\max} - \bar{D}$ は、それぞれ直径分布の位置、左裾の長さ、右裾の長さを表すため（國崎，2001）、歪度や変動係数との相関関係が想定される。そのため、これら以外の説明変数である BA や林齢が歪度や変動係数と関係しているかを重視した。

III. 結果と考察

1. 標準地面積の補正の必要性和その効果

補正前における林齢と本数密度、林分胸高断面積との関係を図-2に示す。本数密度については、比較基準である無間伐林の本数密度減少曲線（岩手県林業水産部，1979）よりも明らかに高い本数密度を示す暫定標準地が多かった。このことから、多くの暫定標準地では植栽密度が3500本/ha以上であるか、もしくは過大推定になっている可能性が考えられる。

林分胸高断面積については、若齢無間伐林の固定試験地データの散布図分布域よりも上側に

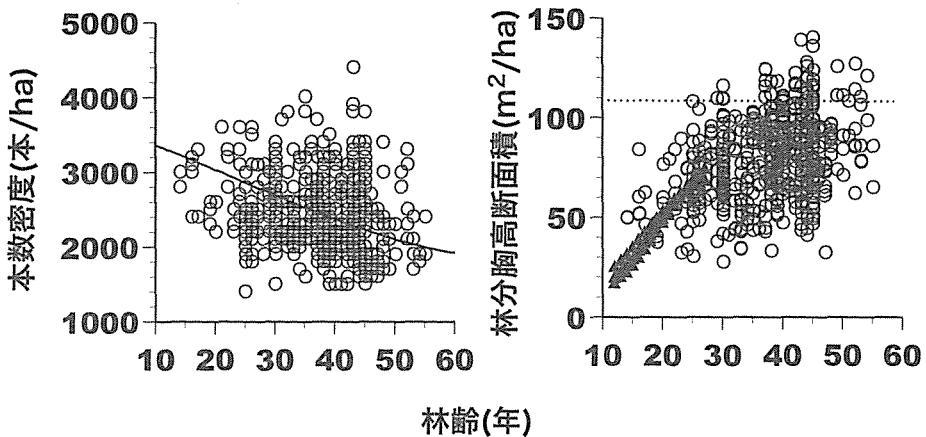


図-2 補正前における林齢と本数密度，林分胸高断面積との関係

白丸は暫定標準地データを示す。本数密度における実線は、岩手県林業水産部(1979)で推定された植栽密度3500本/haの無間伐林(地位2等)の本数密度減少曲線である。林分胸高断面積における黒三角は若齢無間伐林固定試験地データを、点線は理論的な最大林分胸高断面積の平均値(田中, 1991)を示す。

分布する暫定標準地が散見された(図-2)。若齢無間伐林の固定試験地データについては、林分密度管理図調製用に収集された岩手県スギ林データ(岩手県林業水産部, 1979)の上限付近に重なることが確認されていることから(國崎, 2013)、過大推定でないならば、暫定標準地データの一部は、植栽密度3500本/haの無間伐林をはるかに上回る超過密状態にあることを意味する。また、田中(1991)が推定した理論的な最大林分胸高断面積の平均値($106.7\text{m}^2/\text{ha}$)を超える暫定標準地も見受けられた(図-2)。寺崎ら(1968)は、林分材積成長が鈍化または停滞する基準として林分胸高断面積 $60\text{m}^2/\text{ha}$ 前後を指摘している。つまり、 $60\text{m}^2/\text{ha}$ 以上であれば過密であることを意味する。林分密度管理図調製用に収集された岩手県スギ林データ(岩手県林業水産部, 1979)における林分胸高断面積の最大値は $86.9\text{m}^2/\text{ha}$ であり、理論的な最大林分胸高断面積の平均(田中, 1991)よりも明らかに低かった。これら林分胸高断面積に関する既往の知見を踏まえると、暫定標準地データについては、植栽密度に関係なく、過大推定になっている可能性が高い。

補正前における胸高断面積平均直径と本数密度との関係を図-3に示す。過半数の暫定標準地において、Nishizono and Tanaka(2012)が推定した最多密度曲線よりも本数密度が高かった(図-3)。この最多密度曲線は、秋田県という異なる地域におけるスギ無間伐林データに基づいて推定されているものの、若齢無間伐林固定試験地データの軌跡がこの最多密度曲線にほぼ沿っていることを確認した(國崎, 未発表)。このため、Nishizono and Tanaka(2012)の最多密度曲線はスギ無間伐林の最多密度を適確に表現できていると考えられる。ゆえに、暫

定標準地データの過半数が過大推定になっていると考えられる。

前章（図-1）で説明した方法により補正した後における胸高断面積平均直径と本数密度、および林齢と林分胸高断面積との関係を図-4に示す。補正後においても、最多密度を上回る本数密度を示した暫定標準地は8.6%存在した（表-3）。また、林分胸高断面積についても、若齢無間伐林固定試験地データの散布図分布域よりも上側に分布する暫定標準地がわずかながら見受けられた。しかし、若齢無間伐林固定試験地の林分胸高断面積データは、一部を除いた暫定標準地の上限付近に重なった。このように、今回の補正方法には問題はあるものの、極端

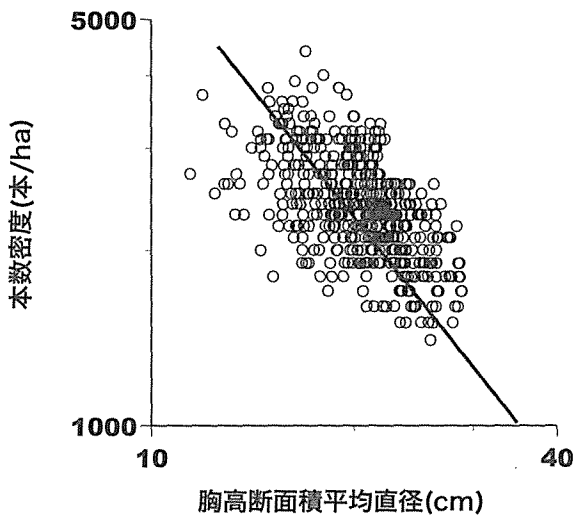


図-3 補正前における胸高断面積平均直径と本数密度との関係

白丸は暫定標準地を、実線は、Nishizono and Tanaka (2012)で推定された秋田県スギ無間伐林の最多密度曲線である。

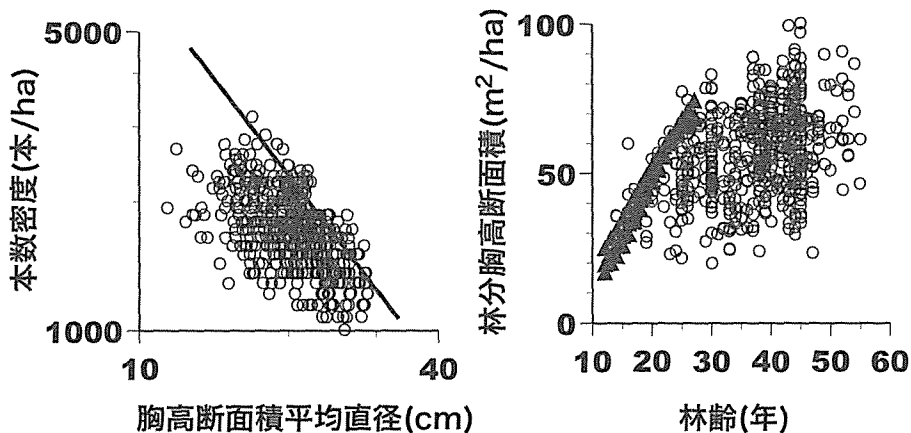


図-4 補正後における胸高断面積平均直径と本数密度、および林齢と林分胸高断面積との関係

白丸は補正後の暫定標準地データ、実線は最多密度曲線、黒三角は若齢無間伐林固定試験地データを示す。

表一 3 補正前後における暫定標準地の密度階別割合 (%)

	補正前	補正後
超過密 (SDI \geq 1641)	64.5	8.6
過密 (1093 \leq SDI<1641)	32.1	65.3
密 (930 \leq SDI<1093)	2.4	16.1
中庸 (SDI<930)	1.0	10.0

相対幹距Sr (%) に換算すると、超過密、過密、密、中庸はそれぞれ Sr \leq 10.4, 10.4<Sr \leq 15.4, 15.4<Sr \leq 17.0, Sr>17.0に対応する。

な過大推定を解消できていると考えられるから、以下では補正後のデータに基づき、暫定標準地における込み合い度を評価した。

2. 暫定標準地の込み合い度

補正後における暫定標準地の密度階別割合を表一 3 に示す。超過密と過密を合計すると 73.9%であることから、全体の 7 割以上において、自己間引きが発生する密度階に達していた。密も含めると、全体の 9 割において林木間競合が生じている密度階に達していた。一方、中庸は 10.0%であった。暫定標準地データを一律に (面積0.014haとして) 補正したため、周縁木を適正に判断した標準地調査のデータについては、密度が過小推定になっている。このため、中庸の密度階割合は過大推定になっているはずである。それゆえ、密とは言えない暫定標準地の割合は、過大に見積もっても 1 割に過ぎないといえる。以上を踏まえると、緊急に整備する必要があると位置づけられている施工候補地は、込み合い度の点から適正に選定されていたと考えられる。

自己間引きが発生する密度階 (以下、過密以上とする) と密、中庸との間で、林齢に差があるか検定したところ、過密以上と密、過密以上と中庸との間で有意差が認められた (Holm法, $P<0.05$)。過密以上 (林齢の平均38.8年) に比べて、密 (同33.8年), 中庸 (同33.5年) は平均で 5 年若かった。スギ若齢林の成長は壮齢、高齢林に比べて旺盛であり、5 年間無間伐のまま放置すれば、さらに込んだ状態に移行する (岩手県林業水産部, 1979)。このように、中庸林分には成長が旺盛で過密化しやすい若齢林が相対的に多いことから、森林所有者自ら間伐する見込みのない中庸林分を施工候補地として選定したのは、大きな問題ではないと考えられる。

3. 歪度からみた暫定標準地の林分構造

暫定標準地における胸高直径の歪度を表一 4 に示す。暫定標準地と若齢林固定試験地の歪度を比較したところ、有意差は認められなかった (Welchのt検定, $P=0.094$)。林冠閉鎖前後を含む若齢林固定試験地の歪度は、-0.53から0.64 (平均 \pm 標準偏差は0.172 \pm 0.228) であり、これは歪度に関する既往の報告 (田中, 1983; 白石, 1985a; 國崎, 1998) が示す値の範囲 (-0.6

表一 4 暫定標準地における胸高直径の歪度と変動係数

	平均±標準偏差	最小値	第1四分位	第3四分位	最大値
歪度	0.234±0.510	-1.430	-0.097	0.537	2.309
変動係数(%)	27.9±8.6	7.9	22.0	33.3	63.3

表一 5 胸高直径の歪度と変動係数を応答変数とする線形モデルの標準偏回帰係数

応答変数	説明変数					adjusted r^2
	BA	D_q	age	$\bar{D} - D_{\min}$	$D_{\max} - \bar{D}$	
歪度		0.0596		-0.7205	0.9508	0.79
変動係数	-0.1666	-0.4510	0.1528	0.4221	0.6706	0.80

BAは林分胸高断面積, D_q は胸高断面積平均直径, ageは林齢, \bar{D} は平均胸高直径, D_{\min} は最小胸高直径, D_{\max} は最大胸高直径を示す。

から0.8) とほぼ一致していた。このような一般的な値を示す若齢林固定試験地の歪度との間に有意差が認められなかったことから、暫定標準地における歪度の平均は一般的な水準にあると考えられる。

ただし、最小値や最大値については、一般的な値の範囲から外れていた(表一4)。歪度が負で、かつその絶対値が大きいことは、劣勢木が集団として形成され、直径分布の左裾が長いことを意味する(田中, 1983)。7割以上の暫定標準地は自己間引きが生じる密度階に達していることから(表一3)、林木間競争の激化で劣勢木集団が形成されている林分も少なからず存在すると推察される。一方で、歪度が正で、かつその絶対値が大きいことは、劣勢木が多数枯死するとともに、暴れ木のような突出木が集団として形成され、直径分布の右裾が長いことを意味する。歪度が大きな林分では、自己間引きが激化することで、劣勢木が枯死するとともに、全体的に胸高直径成長が抑制されていると推察される。その一方で、樹高の高い突出木については周囲の林木との競争を回避し、引き続き旺盛な胸高直径成長を継続しているものと推察される。

歪度を応答変数とした線形モデルの標準偏回帰係数を表一5に示す。最良モデルの説明変数は、胸高断面積平均直径 D_q 、平均胸高直径と最小胸高直径の差 $\bar{D} - D_{\min}$ 、最大胸高直径と平均胸高直径の差 $D_{\max} - \bar{D}$ の3つであった。このうち、標準偏回帰係数の絶対値が大きいのは $D_{\max} - \bar{D}$ と $\bar{D} - D_{\min}$ であり、暫定標準地における直径分布の非対称性は左裾や右裾の長さにより、ほぼ説明できるといえる。それに対し、 D_q の標準偏回帰係数の絶対値は0.06と小さく、極めて弱い関係であった(図一5)。歪度は直径分布の位置(平均胸高直径や D_q など)に左右されにくい指標であることから(國崎, 2001)、 D_q における標準偏回帰係数の絶対値が低かったことは妥当な結果であろう。

線形モデル選択により、林齢は歪度の説明変数として含まれなかった(表一5)。既往の研究では、スギ人工林の直径分布の歪度は、若齢時(林冠閉鎖前後)に大きくばらつくものの、

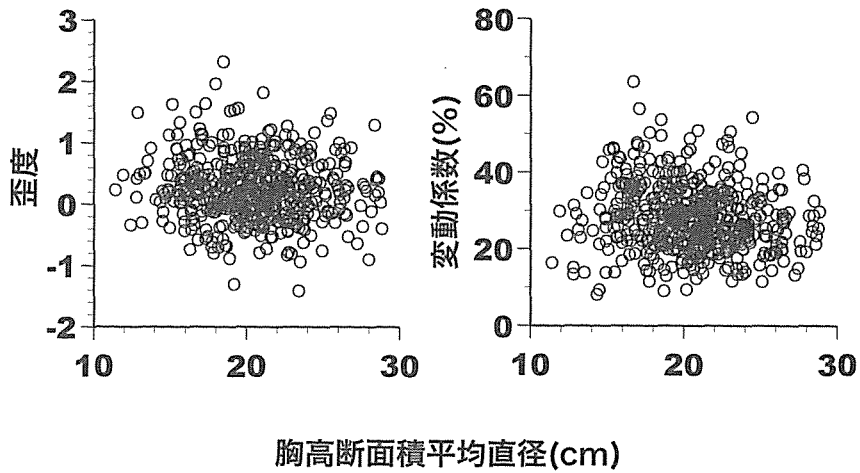


図-5 胸高断面積平均直径と歪度，変動係数との関係

林齢とともに増加すると言われている（木梨，1978，1979；柿原・木梨，1986）。この知見が一般則ならば，林齢と歪度との間に正の関係が認められても良いはずである。暫定標準地において林齢が説明変数に含まれなかったのは，長期間間伐されていない，もしくは無間伐のためと考えられる。木梨らの研究（木梨，1978，1979；柿原・木梨，1986）では，一部に無間伐林が含まれるものの，下層間伐が実施された林分を解析の主対象にしている。下層間伐により劣勢木が伐倒され，生存木の最小胸高直径が高くなると，歪度は，間伐前のそれに比べ，増加する（白石，1985a）。1980年前後の日本では，下層間伐が定期的に行われている林分が一般的だったので，若齢期から壮齢期にかけて下層間伐が実施された林分を含めて解析した結果，歪度が林齢とともに増加すると結論したのであろう。一方，本研究で対象とした暫定標準地の9割は林木間競争が生じている密度階にあり（表-3），最低でも10年以上間伐されておらず，かつその多くは無間伐林である。こうした林分が主体であれば，先述したような劣勢木集団が形成された林分（歪度が負の林分）や自己間引きの激化で劣勢木集団が多数枯死した林分（歪度が正の林分）が混在するため，若齢期から壮齢期にかけて歪度が負から正まで大きくばらつくことになる。実際， D_b が20cm以上と比較的高い範囲でも，歪度は負から正まで大きくばらついている（図-5）。このように，長期間間伐されていない，もしくは無間伐であることが暫定標準地における歪度を大きくばらつかせ，その結果，歪度と林齢との間に正の関係が認められなかったと考えられる。

線形モデル選択により，林分胸高断面積BAも歪度の説明変数として含まれなかった（表-5）。無間伐林におけるBAは密度管理指標として使用できるため（國崎，2013），暫定標準地では，歪度のばらつきに対する密度の影響を検出できなかったことになる。一般に，密度が高いと成長に伴い歪度は増加するとともに，自己間引きにより枯死が発生しても歪度は増加する（白石，

1985a)。しかし、自己間引きが激化し、多数の枯死木が発生すると、歪度は減少する（國崎，1998）。つまり、自己間引きの程度によって、歪度の増減傾向は変化する。こうした増減傾向については時系列データならば検出できるものの、暫定標準地データでは検出が困難である。これらのことから、BAが高く、密な状態であっても、暫定標準地における歪度のばらつきは大きくなり、BAが歪度の説明変数として含まれなかったと推察される。

4. 変動係数からみた暫定標準地の林分構造

暫定標準地とYamakura（1984）に掲載されたスギ人工林83林分の変動係数を比較したところ、暫定標準地の変動係数が有意に高かった（t検定， $P < 0.05$ ）。Yamakura（1984）のデータは変動係数の一般的な値の範囲を示していることから（國崎，2001），暫定標準地では胸高直径の不均質性が高い林分が多く含まれていると考えられる（表-4）。このことは、先述した歪度の絶対値が高い暫定標準地の存在からも確認され、胸高直径の不均質性の高さには林木間競合や自己間引きが影響していると推察される。

変動係数を応答変数とする最良モデルの説明変数として、用いた5つすべてが選択された（表-5）。このうち、標準偏回帰係数の絶対値が最も大きいのは $D_{\max} - \bar{D}$ であった。 $D_{\max} - \bar{D}$ が大きくなれば、胸高直径の標準偏差は大きくなりやすいことに加え、変動係数は直径分布の右裾に対する感度が高いことから（國崎，2001），この結果は妥当である。次いで標準偏回帰係数の絶対値が大きかったのは D_q と $\bar{D} - D_{\min}$ であった。変動係数は標準偏差を平均で除して算出されるため、標準偏差が同じならば、平均が高いほど変動係数は低くなる。平均胸高直径と胸高断面積平均直径は極めて高い正の相関（ $r = 0.99$ ）を示すため、 D_q の標準偏回帰係数の符号が負になったのも妥当である。 $\bar{D} - D_{\min}$ が大きくなれば、胸高直径の標準偏差は大きくなりやすいため、 $\bar{D} - D_{\min}$ の標準偏回帰係数の符号が正になったのも妥当である。

$D_{\max} - \bar{D}$ 、 D_q 、 $\bar{D} - D_{\min}$ に比べて、標準偏回帰係数の絶対値は小さいものの、林齢とBAも変動係数の説明変数として含まれた（表-5）。既往の研究では、スギ人工林の直径分布の変動係数は、林冠閉鎖直後まで減少するものの（國崎，1998，2013），その後、林齢とともに緩やかに増加すると言われている（白石，1985b；國崎，2001）。林齢の標準偏回帰係数の符号は正であり、既往の知見と一致した。一方、密度が変動係数に及ぼす影響に関しては、高密度であるほど変動係数は高くなると言われている（國崎，2001）。ただし、この知見は植栽密度の試験区間や地位級の異なる林分間での比較に基づくものであり、試験区間や林分間で平均胸高直径が異なる（高密度試験区や地位級の林分ほど平均胸高直径が低い）ことから、この知見を本研究の結果に単純に適用することはできない。別の知見として、自己間引きの程度に関係なく、枯死木が発生している時期に変動係数は減少する（國崎，1998）。暫定標準地の7割以上において、自己間引きが生じる密度階に達していることから（表-3），本研究の線形モデルのように、同一林齢、同一 D_q で比較した場合、よりBAの高い暫定標準地では自己間引きが激化し、

劣勢木が枯死する結果、変動係数が低くなると推測される。

5. 環境の森整備事業実施後の林分管理

本研究では、胸高断面積平均直径と本数密度との関係に基づき、暫定標準地の7割以上において自己間引きが生じる密度階に達しており、全体の9割において林木間競合が生じている密度階に達していると推定した。加えて、胸高直径の歪度と変動係数の解析から、暫定標準地における直径分布は、自己間引きが発生している状態を反映していた。枯死木の発生を抑制するとともに、林内光環境を改善し、下層植生の繁茂を確実にするためには、明らかに強度間伐が必要である。

環境の森整備事業では、本数間伐率50%前後の強度な下層間伐が実施されている。これにより、劣勢木集団が伐倒されるため、歪度は増加し、変動係数は減少する。間伐されているスギ人工林では、林齢とともに歪度が高くなるとともに（木梨, 1978, 1979）、変動係数は10~40%の範囲に収まるようになる（國崎, 2001）。ゆえに、環境の森整備事業の実施直後には、暫定標準地の林分構造は間伐林のそれに近づくと考えられる。

ただし、環境の森整備事業による強度間伐だけでは、針広混交林に誘導するのは困難である。林内光環境に対する間伐効果については、約5年しか持続しないことが岩手県林業技術センターによるモニタリング調査で明らかにされている（岩手県林業技術センター, 未発表）。これは、環境の森整備事業の設計段階では十分と想定されていた間伐率が、実際には針広混交林に誘導できるほど、十分に高くなかったためである。本数間伐率50%前後の下層間伐は、胸高断面積間伐率（以下、断面積率とする）で20~40%に相当する（岩手県林業技術センター, 未発表）。暫定標準地における補正後の林分胸高断面積の平均は56.7m²/haであり、間伐後には、断面積率20%で45.4m²/ha、断面積率30%で39.7m²/ha、断面積率40%で34.0m²/haに減少する。そして、これらの値は若齢無間伐林の場合、相対幹距でそれぞれ15.5%, 16.9%, 18.7%に相当する（國崎, 2013）。つまり、断面積率40%であれば中庸の密度階に達するものの、断面積率20~30%では密までしか改善されず、林木間競合は、環境の森整備事業後にも持続することを意味する。

針広混交林を目標林型として、環境の森整備事業施工地を引き続き育成するには、環境の森整備事業における本数間伐率をさらに高めるか、もしくは追加の間伐を実施する必要がある。スギ人工林の生態系機能を改善するには、本数間伐率67%の間伐の実施が推奨されている（Seiwa *et al.*, 2012）。それゆえ、前者として、環境の森整備事業における本数間伐率50%前後（40~60%）という基準をさらに高めることは、公益林としての機能改善の観点からは妥当である。しかし、岩手県職員や林業事業者職員との意見交換の中で、こうした超強度な間伐については森林所有者の承諾を得にくいことが指摘されている。また、形状比が高く、かつ偏樹冠を持つ残存木を大きく疎開させた場合、風雪害を受けやすくなることも危惧される（高橋, 1977）。

さらに、県民税における事業予算と施工地面積（年間1500ha）との関係もあることから、仮に制度設計を変更するならば、慎重な検討が必要である。

一方で、森林・林業再生プランに基づき、森林計画制度や森林整備事業のあり方も変更され、林業事業体では施業の集約化をさらに推進することが期待されている（林野庁，2012）。補助方式により環境の森整備事業が実施された施工地については、今後、政府の森林整備事業（森林管理・環境保全直接支払制度）を活用しながら、地域の林業事業体が引き続き集約化を図りつつ、整備に関わっていくことも重要であろう。

本研究を遂行するにあたり、岩手県農林水産部林業振興課には、環境の森整備事業施工地（2010年度）の基礎資料の一部を提供して頂いた。ここに深甚の謝意を表する。

引用文献

- Burkhart, H. E. and Tome, M. (2012) Modeling forest trees and stands. 457pp, Springer, New York.
- 細田和男・高橋與明・北原文章（2012）標準地法における調査区の大きさと形状の再検討. 日本森林学会誌 91:105-111.
- 岩手県林業水産部（1979）岩手県スギ人工林 林分密度に関する基礎調査書. 63pp, 岩手県.
- 柿原道喜・木梨謙吉（1986）品種，林齢，地域の違いがスギ人工林の直径分布に及ぼす影響. 林業統計研究会誌 11:62-69.
- 木梨謙吉（1978）人工林の直径分布について（Ⅰ）ワイブル分布のパラメーターと林齢. 日本林学会大会論文集 89:59-60.
- 木梨謙吉（1979）人工林の直径分布について（Ⅱ）ワイブル分布のパラメーターと林齢・直径・本数との関係. 日本林学会大会論文集 90:95-96.
- 國崎貴嗣（1998）若い針葉樹同齢単純林の直径分布の動態. 岩手大学農学部演習林報告 29:11-25.
- 國崎貴嗣（2001）樹木同齢単純林における胸高直径分布とその動態—針葉樹を中心として—. 森林計画学会誌 35:31-45.
- 國崎貴嗣（2013）粗放的に管理されたスギ若齢人工林の簡便な密度管理指標の探索. 岩手大学農学部演習林報告 44:1-18.
- 長池卓男（2000）人工林生態系における植物種多様性. 日本林学会誌 82:407-416.
- 南雲秀次郎・箕輪光博（1990）測樹学. 243pp, 地球社, 東京.
- Nishizono, T. and Tanaka, K. (2012) Does the relationship between quadratic mean diameter and stem density in old thinned and unthinned *Cryptomeria japonica* forests

- deviate from a power function? Journal of Forest Planning 18 : 45-56.
- 大原偉樹 (2007) スギ人工林の間伐にともなう林床植生の変化と水土保全機能に関する研究の必要性. 森林総合研究所研究報告 6 (通号403) : 127-134.
- 林野庁 編 (2012) 森林・林業白書 平成24年版. 208pp, 農林統計協会, 東京.
- Seiwa, K, Etoh, Y., Hisita, M., Masaka, K., Imaji, A., Ueno, N., Hasegawa, Y., Konno, M., Kanno, H. and Kimura, M. (2012) Role of thinning intensity in hardwood recruitment and diversity in a conifer, *Cryptomeria japonica* plantation: A 5-year demographic study. Forest Ecology and Management 269 : 177-187.
- 白石則彦 (1985a) 同齢単純林における直径分布の解析とその生長予測への応用 (I) 歪度変化の動向とそのメカニズム. 日本林学会誌 67 : 133-140.
- 白石則彦 (1985b) 同齢単純林における直径分布の解析とその生長予測への応用 (II) 直径分散の変化について. 日本林学会誌 67 : 305-310.
- 白石則彦 (1995) よりよい森林情報管理システムを目指して一次期森林資源調査システム開発調査より一. 森林計画学会誌 25 : 83-95.
- 高橋啓二 (1977) 造林地の冠雪害とその対策. 47pp, 日本林業技術協会, 東京.
- 田中和博 (1983) 林齢に伴う直径分布型および樹高分布型の変化に関する一考察. 日本林学会誌 65 : 473-476.
- 田中和博 (1991) 各成長段階における最大林分断面積の推定. 森林計画学会誌 16 : 99-124.
- 寺崎康正・小坂淳一・金豊太郎 (1968) スギ人工林施業の要点. 52pp, 林業科学技術振興所, 東京.
- Yamakura, T. (1984) Effect of tree density on the DBH distribution in *Cryptomeria japonica* plantations : Frequency distribution of individual weight, stem diameter and height in plant stands (VII). Japanese Journal of Ecology 34 : 299-309.

要 旨

本研究では、いわて環境の森整備事業施工地のスギ人工林を対象に、502個の暫定標準地データをを用いて込み合い度を推定するとともに、直径分布から林分構造特性を明らかにした。林分胸高断面積や本数密度の解析から、暫定標準地の過半数でha当たりの林分構成値が過大推定になっていると考えられた。3つの仮定に基づき、標準地面積を補正した結果、全体の7割以上において自己間引きが発生する密度階に、全体の9割において林木間競合が生じている密度階に達していると推定された。中庸な密度階は全体の1割を占めるに止まった。その平均林齢も、自己間引きが発生する密度階のそれに比べて5年若く、旺盛な成長により、今後、急速に過密化していくと推察された。胸高直径の歪度と変動係数の解析から、暫定標準地における直

径分布は、自己間引きが発生している状態を反映していた。枯死木の発生を抑制するとともに、林内光環境を改善し、下層植生の繁茂を確実にするためには、明らかに強度間伐が必要である。いわて環境の森整備事業の実施直後には、暫定標準地の林分構造は一般的な間伐林のそれに近づくと考えられる。ただし、当該事業による強度間伐だけでは、針広混交林に誘導するのは困難である。これは、当該事業の設計段階では十分と想定されていた間伐率が、実際には針広混交林に誘導できるほど、十分に高くなかったためである。胸高断面積間伐率に基づき机上計算した結果、胸高断面積間伐率が40%であれば、中庸の密度階に達するものの、胸高断面積間伐率20~30%では、林木間競合は当該事業後も持続すると推定された。針広混交林を目標林型として、当該事業施工地を引き続き育成するには、当該事業実施後に、追加の間伐を実施する必要がある。森林・林業再生プランに基づき、森林計画制度や森林整備事業のあり方も変更され、林業事業体では施業の集約化をさらに推進することが期待されている。当該事業施工地については、今後、政府の森林整備事業を活用しながら、地域の林業事業体が引き続き集約化を図りつつ、整備に関わっていくことも重要であろう。