

間伐後、枝は伸びずに林冠が閉鎖するわけ

—奥多摩スギ壮齡人工林における枝解析の事例—

A Case Study of Branch Analysis on the Mature Artificial Stands of *Cryptomeria Japonica* at Okutama, Tokyo -Why the Crown Closes in spite of the Branches Suppressing Elongation after Thinning-

元東京農業大学教授

佐藤 明 SATO Akira

はじめに

現在、世界各地で気候変動に伴う様々な被害発生が報じられている。こうした気候変動、地球温暖化防止対策に向けた森林における国際的な取り組みの1つとしてREDD+ (Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation Plus) があり、それは新たに森林を造成していくよりも既存の森林を活かして利用するほうが森林の有する機能をより効率的に活かせるといった認識 (CIFOR 2015) で展開されている。わが国でも2021年3月に森林の間伐等の実施の促進に関する特別措置法の一部を改正する法案が成立した。これは、人工林が4割近くを占める我が国の森林においても、間伐等適正な森林管理を行うことで温暖化防止に貢献するとして位置づけられている (林野庁 2020)。

東京農業大学奥多摩演習林 (以下、奥多摩演習林) では、森林が有する様々な機能についての検証としてスギ (*Cryptomeria japonica*) 人工林を対象に間伐程度を変えた試験区を設け、森林管理がもたらす生物多様性の保全 (石井ら 2006, 勝又ら 2008, 小野ら 2011, 小島ら 2013, 大久保ら 2014), 地球環境保全 (深江ら 2010, 阿部ら 2013), 土砂災害防止 / 土壌保全 (伊藤ら 2007, 小林ら 2010) や物質生産機能 (高橋ら 2008, 出

口ら 2012) 等への影響について調査研究を進めてきた。現在は間伐試験区をさらに拡大した形で展開させている。

本間伐試験区では、物質生産機能の面から間伐による林分構造の変化、特に本数間伐率で60%近くの強度間伐区を設けており、それらの間伐後、残存木がどのように成長するかを中心に卒論や修論のテーマとして取り組んできた。本報告は、残存木の樹冠の拡大に着目し、間伐後どのように枝葉が成長・変化していくのかをこれまで集積された測定データとともに新たな視点を交えて解析、取りまとめたものである。なお、本報告は出口・佐藤 (2013) の未発表論文の一部を出口の許可を得て引用していることをお断りしておく。

調査材料と調査方法

・試験地の概要

試験地のある奥多摩演習林は、経度139°4', 緯度35°49'で東京都西多摩郡奥多摩町に位置する。試験地より南西方向に4kmほど離れた小河内気象観測所における2001年から10年間の年平均気温は12.3°C, 年平均降水量は1,654mmであった。試験地の地質は母材が石灰岩、土壌は褐色森林土BD型が主体で、標高は700mから830mにわたる。試験地の平均斜度は30度から

35度、局所的には40度を超えるほどの急傾斜地にあり、試験地は全体的に東側に開いている。

試験地はスギ人工林で、2001年の間伐後、林内にヒノキ (*Chamaecyparis obtusa*)、オオバアサガラ (*Pterostyrax hispid*) の苗を植えこみ、複層林化を試みている。演習林周辺は1990年代終わりごろからニホンジカ (*Cervus nippon*) の密度が増え始め、林床植生も衰退し始めた。このため、それら樹下植栽木の保護もかねて試験区周囲には防鹿柵を設置した。この結果、試験区内の植生は柵外に比して本来に近い姿を維持している。

・調査方法及び調査林分の概要

間伐試験区は、樹齢40年超の壮齢のスギ人工林を対象として2001年に30m×30mの大きさを中心に4つの試験区を設定し、程度を変えた間伐を行った。試験区は、立木本数を基に間伐率を20%刻みとして弱度(20%)間伐、中度(40%)間伐、強度(60%)間伐の3つの間伐区と、無(0%)間伐区からなる。いずれの試験区も、設定以降、毎年試験区内の全ての立木の胸高直径を直径巻き尺で測定するとともに、適宜抽出した立木についてブルーメライス等の測高器を用いて樹高を測定し、樹高曲線から林分全体の樹高を推定した。

表1は設定時の2001年から2013年までの間に、間伐および伐倒調査等を実施した年の毎木調査の

表1 調査林分の概況の変化

試験区	(間伐前)					現存量			(間伐後)		間伐率	
	立木本数	平均胸高直径	平均樹高	林分材積	胸高断面積合計	幹	枝	葉	立木本数	平均胸高直径	本数	断面積
2001年	(No/ha)	(cm)	(m)	(m ³ /ha)	(m ² /ha)	(ton/ha)	(ton/ha)	(ton/ha)	(No/ha)	(cm)	(%)	(%)
0%区	2300	18.8 ± 5.1	17.2	581.0	68.3	235.9	14.2	16.4	2300	18.8	0	0
20%区	2380	19.6 ± 4.8	17.5	675.8	75.1	193.7	25.4	14.2	1730	20.8	27	18
40%区	1370	23.8 ± 5.7	19	578.0	63.2	256.4	15.4	17.9	770	27.0	44	27
60%区	1390	23.7 ± 5.5	19.2	596.1	64.5	255.1	11.0	17.2	610	27.1	56	43
2007年												
0%区	2220	22.1 ± 5.6	19.4	836.9	90.7	296.9	15.8	14.3	2220	22.1	0	0
20%区	1690	21.9 ± 5.2	18.5	523.4	56.3	231.1	16.8	12.5	1310	23.0	22	16
40%区	730	29.9 ± 4.2	22.3	493.2	38.4	164.4	15.9	13.2	500	30.6	32	26
60%区	610	29.5 ± 7.3	23.4	484.4	37.3	160.9	10.8	7.1	450	30.9	26	15
2011年												
0%区	1750	22.9 ± 6.5	21.0	663.7	77.7	282.8	13.9	19.9				
20%区	1030	24.1 ± 5.5	21.7	401.0	49.4	180.8	8.2	14.3				
40%区	490	32.3 ± 5.8	23.7	442.3	46.0	170.5	12.7	14.5				
60%区	440	31.9 ± 7.8	23.7	374.2	39.1	134.4	10.8	10.1				
2013年												
0%区	1120	24.0 ± 5.7	24.4	551.1	59.3							
20%区	930	24.9 ± 5.4	21.9	536.2	55.4							
40%区	460	33.6 ± 5.6	25.8	504.5	48.5							
60%区	380	31.3 ± 8.9	24.8	385.3	37.0							

測定結果を示す（日下 2008 の修論，神田 2012，小林 2014 の卒論から引用し整理した）。

これらの林分は，試験区設定時の林分状況把握のため間伐前の 1999 年と，林冠が閉鎖し間伐が必要として行った 2007 年，さらにこれら間伐の影響を解析するため 2011 年に伐倒調査を行った。伐倒調査は，いずれも毎木調査後，胸高直径の分布状況に沿って大中小の個体を織り交ぜて 1999 年では 9 本，2007 年および 2011 年では各試験区とも大中小 5 本ずつ選んで行った。調査は，層別刈り取り法により 1m の層ごとに幹，枝葉に分けて重量を測定，乾重量の把握のためにそれぞれからサンプルを採取しその生重量を測定後，研究室に持ち帰り，熱風乾燥器にて絶乾状態にして乾重率を算出，各器官の乾重量を求めた。その後，各林分の幹，枝，葉の現存量は，伐倒供試木の胸高直径を二乗した値を基に各器官重との相対成長式を求め，林分内の立木の胸高直径をもとに現存量を推定した（表 1）。あわせて，伐倒供試木と林分内の生立木の断面積比推定により各層の器官の現存量を推定し各試験区の生産構造図を作成したが，ここでは略す。

2007 年時の葉現存量は，表 1 に示すように無間伐区でこれまで報告されたスギ閉鎖林に近い値（藤森 2003）を示した。着葉層は 2011 年の生産構造図で調べる限りいずれの試験区とも厚かった。しかし，最多葉量層は間伐の程度が大きくなるほど低い層位にある傾向が伺えた。なお，本報告では，最多葉量層をもとにそれ以上の樹冠部を樹冠上層，それ以下を樹冠下層として扱った。

図 1 は相対照度の年変化で，樹冠が拡大し林冠

が閉鎖していく状態を林内の明るさを目安に捉えたものである。相対照度は，照度計もしくは光量子センサーを用いて 25 点を基本に林内で測定，林外の明るさを 100 とする相対照度もしくは相対光強度を求めて，ともに相対照度として示した。

2001 年の間伐以降，数年で弱度，中度区では相対照度が 10%以下に，強度区では 17，18% に低下し，その後大きな変化のないまま推移した。林内の光環境は，林分内の樹冠量の増減と関係が深く（河原 1988），間伐処理や各種気象害等により樹冠量を制御，減少すれば，それに応じて明るくなる。そこで林内の光環境を改善するために 2007 年に間伐を実施し，これにより相対照度は上昇した。その後再度低下したが，2010 年 3 月に湿雪があり倒木や幹折れ，湾曲等の冠雪害が発生（宮丸 2011），その影響で相対照度は増加した。

間伐作業は，個体間競争を緩和し残存木の樹冠部に光を多く与え成長を促す行為である（佐藤 2009）が，そうした環境下で樹冠部を形成する枝葉の動態を調べた。2011 年の伐倒調査では，各供試木について，樹冠の 1m ごとの各層から順調に成長している枝 2 本を選んで供試枝とし，現場にて番号を付し，幹からの射出方向，幹との射出角度，生重量を測定した。それらは研究室に持ち帰り，幹からの枝を 1 次枝，そこから分岐した枝を 2 次枝とし（重永・川崎 2010），1 次枝の枝長，根元径，伸長量を測定後，1 次枝からの射出した 2 次枝の位置，射出方向，射出角度，枝長，伸びを測定した。さらに 1 次枝については，枝を枝元から 10cm ごとを基本に切断し，年輪解析を実施するため木口面を上砥石で読みやすく平滑にした後，ノギスを用いて芯から 4 方向の年輪幅を読み取り，肥大成長量を測定した。

調査結果と考察

1) 枝の長さや枝の出方

幹から射出する枝の長さを試験区間で比較したところ，無間伐区より間伐程度が強い試験区ほど長い傾向にあった。そこで，こうした枝が幹からどの方向に射出しているのかを明らかにするた

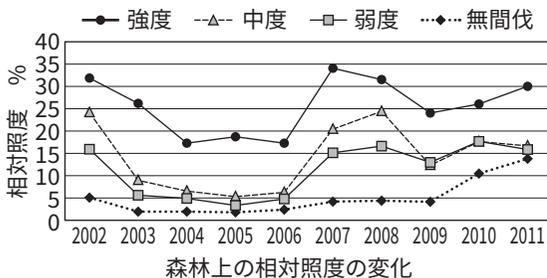


図 1 間伐試験区における林内光環境の年変化 (原図出口 2013)

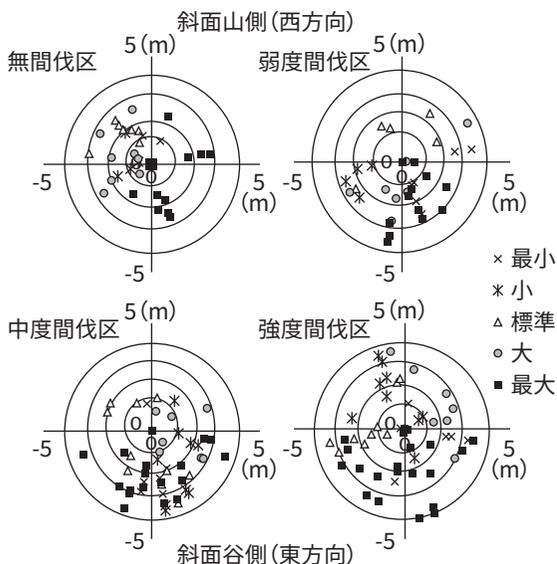


図2 間伐試験区の供試木5本における供試枝の射出方向と枝長
(原図出口 2013)

め、斜面上方を上にして供試枝の射出方向とそれらの枝が水平にあるとしたときの枝先端（枝長）の位置を天頂から下を見る形で描いたものが図2である。供試枝のみを対象に示しているので樹冠投影図に相当するものではないが、射出方向では斜面の谷側に向かって張り出す枝が多い傾向のあること、枝の長さは、枝の枯れ上りが影響してか間伐程度が強い区ほど大きい傾向にあることが知られる。

図3は、供試枝において幹とで作る射出角と枝の伸長状態をもとに側面的な図として描いたものである。ここでは強度区と無間伐区の5本の供試木中最大の個体のみを例示したが、強度区で枝張りは大きく無間伐区で小さい傾向が伺える。しかし、全供試木を対象に比較しても、枝張りはそれぞれの供試木が有する個性が目立ち、枝張りの大きさと間伐強度の違いや個体の大きさとの間に傾向的な差異を見出すには至らなかった。

2) 枝の伸び

間伐後、図1に示すように次第に林冠は閉鎖していく。図4は2011年6月に伐倒、その時期はまだ枝は伸長途上にあるのため、前年の2010年

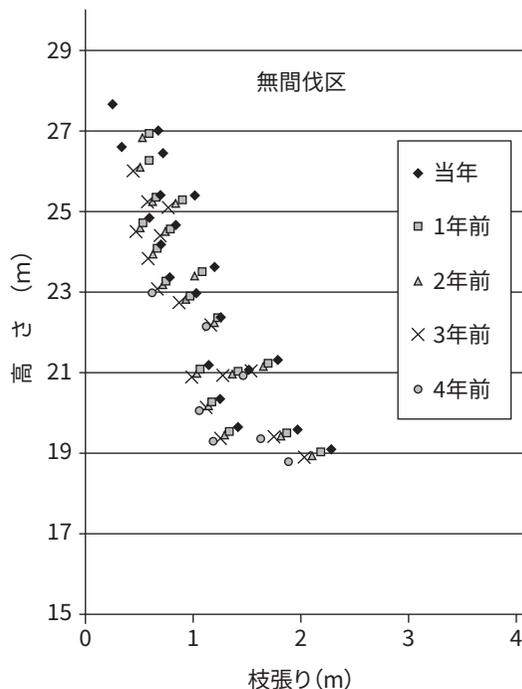
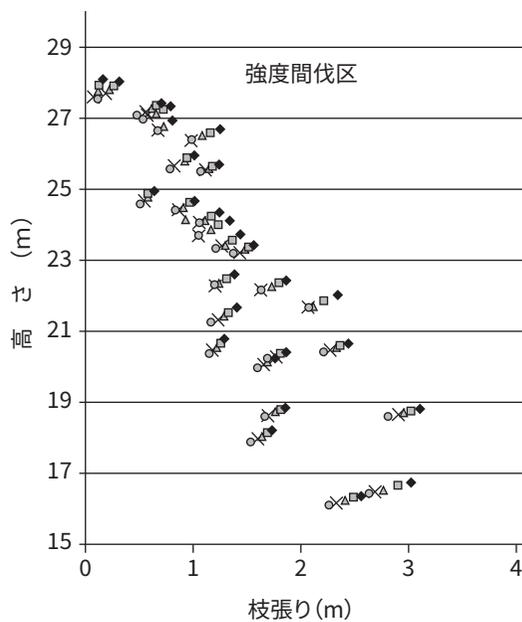


図3 強度間伐区と無間伐区における最大クラスの供試木の樹冠の推移
(原図出口 2013)

時の伸長量を対象に試験区間で比較した。その結果、一次枝の伸長成長量は無間伐区のほうが間伐区より有意に高かった。無間伐区で間伐区より枝の伸びが大きい傾向にあることは、奥多摩のスギ林分を対象に枝の伸長を解析した日下（2008）、

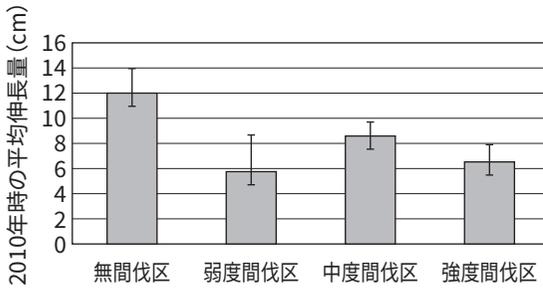


図4 間伐試験区における1次枝の2010年時の平均伸長量

*バーは標準偏差。カッコ内は試料数:無間伐区(57), 弱度区(86), 中度区(83), 強度区(78)。弱度と強度の間伐区間のみ平均値に有意差なし, 他では5%の水準で有意差あり。

出口(2012)の報告ですでに明らかにされている。

図5は無間伐区と強度区での2次枝の平均伸長量の年変化を示したものである。今回の2次枝の調査では測定枝数が多いほか調査項目が多すぎて測定に手間取り, 時間の経過とともに供試枝の枝葉部分が乾燥して摩擦欠落が生じ, 測定を諦めざるを得ない状況が出現した。そうしたことから強度区では5本の供試木の中で大と最小クラスの2個体しか解析できなかった。そこで対比しやすいように無間伐区においても大と最小クラスの2個体を選んで比較した。その結果, 図5から明らかのように2次枝の成長でも1次枝と同じように無間伐区で伸びが良い傾向にあった。

以上のように間伐後, 間伐区での枝の伸びは小さい, それは1次枝の先端だけでなく2次枝のそれでも認められた。このような生育状態にあると, 間伐区の枝の先端付近は寸詰まり的な形状を示す

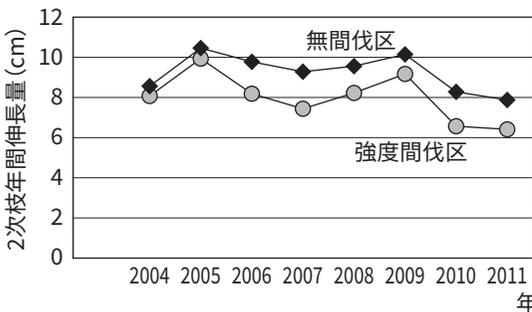


図5 無間伐区と強度間伐区における2次枝の平均伸長量の年変化

と考えられる。さらに間伐後, 樹冠が拡がるとすれば, 枝先端付近で2次枝が1次枝の外側に張り出すといった現象が生じた場合でも樹冠拡大と認められると考えた。

そこで1次枝の先端と2次枝の先端の位置関係を側面図にまとめたものが図6である。強度区の供試木中, 大クラスの個体を対象にした供試枝の側面図では, 1次枝先端付近を2次枝のそれが取り巻く様子がみられ, 2次枝の先端の一部は1次枝のその外側に位置した。一方, 無間伐区の大クラスの枝では1次枝の先端が枝として最外側に位置するものが多かった。さらに2次枝の1次枝から射出した位置をみると, いずれの供試木とも樹冠上層に位置する供試枝で, 枝の根元側に分枝位置があり, 2次枝の枝長は強度区の供試枝で長

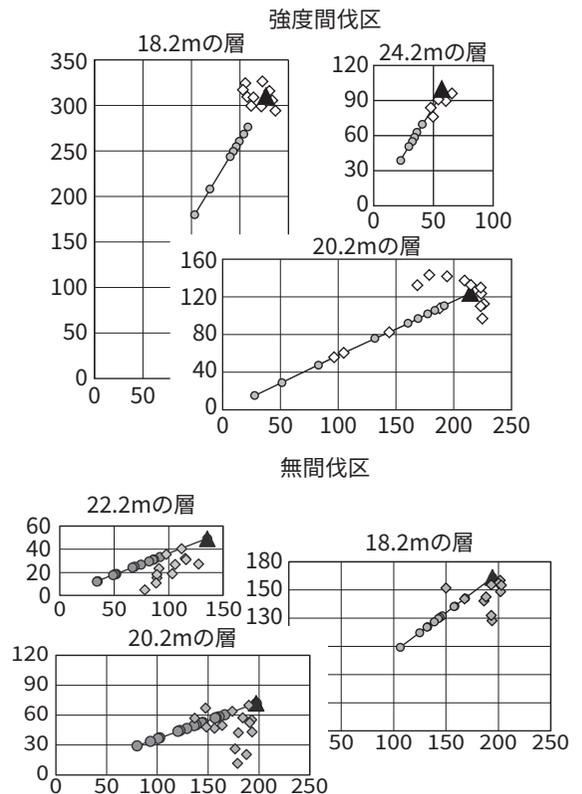


図6 強度間伐区, 無間伐区の供試木大クラスの供試枝における1次枝, 2次枝の先端部の位置関係を示す側面図

(原図出口2013。2次枝の射出角等を加味して作図した側面図)
*縦軸: 枝元から上方向, 横軸: 枝元から水平方向, 単位: cm, ▲: 1次枝の先端位置, ◇: 2次枝の先端位置, ●: 2次枝が1次枝から射出した分岐点

い傾向を示している。しかし、寸詰まり的な状態はこの図だけでは捉えることはできなかった。

1次枝、2次枝の先端の位置関係から2次枝の外側への張り出し具合を整理すると、最大でも強度区で30cmほど、無間伐区で10cmほどとないわけではないが、2次枝の張り出しが樹冠拡大に関与する度合いは大きいとは言にくい。

3) 生枝の重量, 着葉乾重量

枝長は間伐程度が強い区ほど長い傾向にあることから、枝長と生枝（葉を含む）重量との間どのような関係があるかを強度区と無間伐区を対象に整理した（図7）。枝長と枝の重さとの関係には試験区間で差異は見られなかったが、無間伐区では枝長が長くないため、生枝重量が8kgを超えるような枝は見られなかった。

図8は、供試木1本あたりの生枝（葉を含む）重量を試験区間で比較したものである。生枝重量は、いずれの試験区とも変動幅は大きいですが、平均値、中央値とも無間伐区と弱度区で低く、中度区と強度区で高い傾向が認められた。

光合成による物質生産量は着葉量の多寡に関係するとされる。図9は強度区と無間伐区の供試枝を対象にした葉乾重量と2010年時の枝の材積成長量との関係を示す。両試験区とも葉量が増せば枝の材積成長量も同じような増え方で成長する傾向にあった。しかしながら、葉量の少ない傾向にある無間伐区では、枝の材積成長量も低いものにならざるを得なかった。

表2は、試験地間における供試枝あたりの葉乾

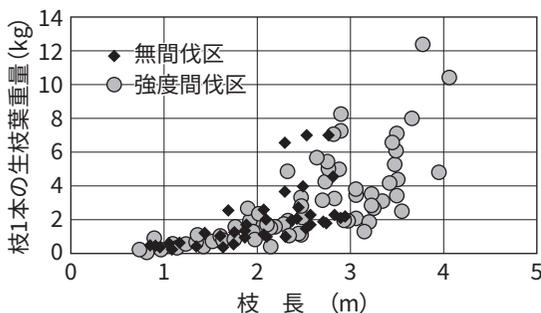


図7 強度間伐区と無間伐区における供試枝の枝長と生枝葉重量の関係

(原図出口 2013)

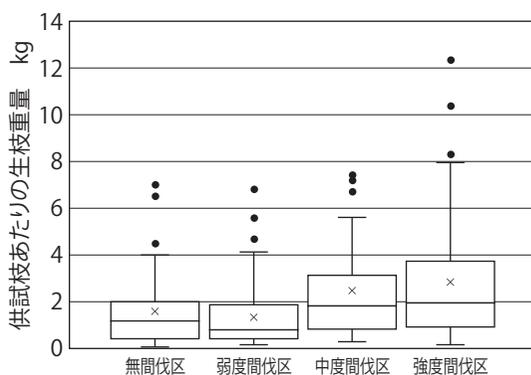


図8 試験地間における供試枝あたりの生枝（葉を含む）重量

(x印：平均値、縦バー上方：最大値、下方：最小値、箱の上バー：全体の3/4位、中バー：中央値(2/4)、下バー：全体の1/4位、黒小点：はずれ値)

* Steel-Dwass 検定により無間伐区と弱度区間、中度区と強度区間には平均値に有意差なし、他は5%の水準で有意差あり。

重量を示したものである。図8の結果と同様、葉乾重量でも中度、強度区で弱度、無間伐区より高く、5%水準で有意な差が認められた。こうした傾向は、樹冠上層の平均葉乾重量に限って比較しても変わりなく、間伐の程度が強いほど1枝あたりの着葉量は増していく傾向にあるといえる。

4) 樹冠の拡大

これらの結果から、間伐後、枝の伸びは間伐区のほうが無間伐区より抑えられる（図3）ものの、着葉量は中度、強度区で多く（表2）、それに伴

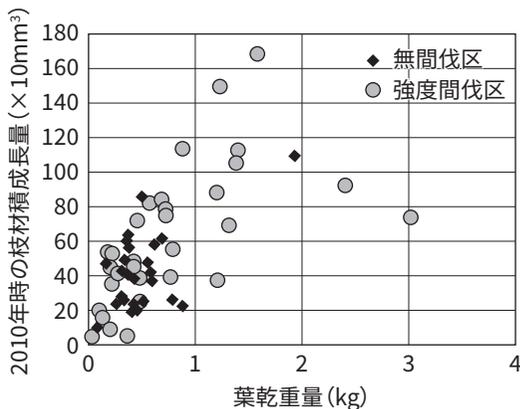


図9 強度間伐区と無間伐区における葉乾重量と2010年時の枝の材積成長量の関係

表2 供試枝あたりの平均葉乾重量 (kg)

	本数	平均葉乾重量	分散	有意差 検定
無間伐区	57	0.361	0.1292	a
弱度間伐区	86	0.274	0.0590	a
中度間伐区	83	0.568	0.1600	b
強度間伐区	78	0.646	0.3065	b

* Steel-Dwass 検定により ab 間に 5% の水準で有意差あり。

い枝の材積成長量もこれらの間伐区で増す傾向(図8)にあると判断される。このため、こうした間伐区では間伐した後、葉を含めた生枝の重量は増していく(図7)ことが明らかになった。

出口(2013)は、幹についた状態の枝について枝先近くに0.5ℓの水の入ったペットボトルを吊下げて負荷をかけ、その後の変化を調べた。その結果、枝先端部は弧を描くように角度を広げ枝が外に張り出す形になることを見出した。

このことは、間伐により光を得た枝葉は葉を増やし枝全体が成長し、自重を増す。これにより枝に負荷がかかり斜出していた枝は角度を広げ下がっていき張り出す格好となって樹冠を広げる。さらに間伐の程度が強いほど枝長は長い傾向にあることから、間伐区の枝で張り出し分は大きくなり、樹冠は広がることになる。このように実際は枝は伸びていないにも関わらず、定説通り間伐後の樹冠は拡大、林冠は閉鎖していくことになる。

今回、間伐区で伸長が抑制される傾向を示したが、その理由に間伐によって樹冠部の多くの枝葉に強い光が当たるようになり水ストレス等の影響を受けやすくなったため(佐藤1993)か、光環境が好転したことにより光を求めて枝を伸ばす必要性が薄らいだことなど、いくつかの要因があげられる。

おわりに

今回の調査結果は、間伐や複層林の造成といった森林の管理方式に影響を与えることはない。そ

れは、間伐により林内の光環境は改善され、残存木の成長とともに樹冠が拡大していくことになり、これまでの森林取り扱い方法をそのまま活かせる、適用できるからである。

林冠閉鎖の度合いについてはこれまでの測定手法を用いるにしろ、UAVあるいは全天写真を利用するにしろ、測定・解析の際に枝の伸長状態まで気にされることは多くなかった。そうしたこともあり樹冠の拡大は、間伐により光環境が好転し、それに伴い枝が伸びて拡大するとみなされてきた。

しかし、今回のスギ林分では、そうした傾向は見出せなかった。では、何故、間伐後、樹冠は拡大するのか。今回の枝葉の成長解析から、それは、間伐後、枝葉が成長し、自重を増すことによって枝が下がり、枝が張り出すことに基づく現象と結論付けるに至った。この現象が奥多摩のスギ林だけのものなのか、他の林分でも見られるものなのか、今後の更なる調査検証をお願いしたい。

<謝辞>

60%の強度間伐区を含めた本試験地は、東京農業大学河原輝彦元教授の指導の下で設けられ、調査研究が始まった。その後、奥多摩演習林の管理を担っておられた菅原泉元教授による調査指導が続き、この間、多くの造林学研究室の学生、院生が演習林での調査、解析に関わった。この場を借りて諸氏に謝辞を申し上げる。

また、このような機会を設けてくださった成城大学櫻井一彦前教授および成城大学社会イノベーション学部の関係者の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 阿部有希子・佐藤明・菅原泉・梁乃申・寺本宗政(2013) 奥多摩演習林におけるスギ人工林での皆伐前後の土壌呼吸速度の変化 関東森林研究 64 (2):293-296
- Angelsen.A.,Brockhaus.M.,Sunderlin.W.D. and Verchot.L.V. (eds) 藤間剛(監訳)(2015) REDD+を解析する 課題と選択肢 CIFOR/森林総合研究所 426pp
- 千葉幸弘(2009) 間伐に伴う林冠再開鎖までの所要年数 関東森林研究 60:149-150
- 出口謙一・菅原泉・上原巖・佐藤明(2012) 奥多摩のスギ人工林における強度な林冠疎開後の樹冠成長の推移 関東森林研究 64 (2):17-20

- 出口謙一・佐藤明 (2013) 枝伸長成長は林冠閉鎖に寄与するかー奥多摩のスギ人工林における間伐後の樹冠の拡大要因の解明ー関東森林学会口頭発表
- 出口謙一 (2013) スギ人工林における間伐強度の違いが樹冠を構成する枝の伸長成長に与える影響 東京農工大学修士論文
- 深江麻利子・鷲巣皓次朗・梁乃申・佐藤明 (2010) 森林管理による踏圧の変化が土壌呼吸に及ぼす影響 関東森林研究 61:163-167
- 藤森隆郎 (2003) 新たな森林管理 持続可能な社会に向けて 全国林業普及協会 428pp
- 石井徹尚・河原輝彦 (2006) 造林地における林相の境界からの距離とアカネズミ、ヒメネズミの種構成変化 東農大農学集報 51 (1):8-13
- 伊藤万里絵・菅原泉・河原輝彦 (2007) 間伐が土壌流亡に及ぼす影響 関東森林研究 58:113-116
- 梶原幹弘 (1975) スギ同齢林における樹冠の形態と量に関する研究 (I) 樹冠形, 日林誌, 57 (12): 425-431
- 神田祐季 (2012) 間伐強度の異なるスギ林分における炭素固定量の相違 平成 23 年度東京農工大学造林学研究室卒業論文
- 勝又達也・菅原泉・上原巖・佐藤明 (2008) 針葉樹人工林と広葉樹二次林における野ネズミ 2 種の生息地選択 関東森林研究 59:243-246
- 河原輝彦 (1988) 複層林誘導のための林内照度のコントロール, 森林立地 XXX (1): 10-13
- 小林理志・佐藤明・菅原泉・上原巖・館紗矢香・荒井さやか・浅井孝太 (2010) 間伐率が異なる 4 林分における林内降雨と土壌流亡 関東森林研究 61:183-186
- 小林理子 (2014) スギ人工林におけるオオバアサガラの樹冠雨滴の衝撃力と表層土の流亡量との関係性 平成 25 年度東京農工大学造林学研究室卒業論文
- 小島裕貴, 佐藤明・菅原泉・上原巖 (2013) 針葉樹林および広葉樹林における野ネズミの行動とミズナラ稚樹の発生消長 関東森林研究 63 (2) 69-72
- 日下慶 (2008) スギ, ヒノキ林における枝と樹幹の成長解析からみる間伐強度が異なる残存木に与える影響 東京農工大学修士論文
- 右田千春・千葉幸弘 (2010) コナラ林冠におけるクラスター構造 関東森林研究 61:123-124
- 宮丸栄士 (2011) 奥多摩演習林における間伐率の違いによる気象害の発生状況 平成 22 年度東京農工大学造林学研究室卒業論文
- 大久保佑馬・秋元真奈・佐藤明・菅原泉・新井一司・会田秀樹・加藤綾奈 (2014) 奥多摩演習林におけるニホンジカの糞消失要因の解明 関東森林研究 65 (1):61-64
- 小野晃一, 勝又達也, 菅原泉, 上原巖, 佐藤明 (2011) 奥多摩における針葉樹人工林と広葉樹二次林での野ネズミ類個体群動態 東農大農学集報 56 (6): 60 ~ 67
- 林野庁 (2020) <https://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/R2hakusyo/attach/pdf/zenbun-64.pdf>
- 齊藤哲・川崎達郎 (2011) スギ 1 次枝の分枝角度の特徴 関東森林研究 62: 99-102
- 寄元道徳・平山貴美子 (2002) スギ若木のモジュールの形態, 構造および動態, 森林研究, 74: 53-58
- 佐藤明 (1993) 林内におけるトドマツ稚幼樹の水分状態と成長に関する研究 東京大学博士論文
- 佐藤明 (2009) 森林大百科事典 12.2.3 「間伐 (種内競争の制御)」朝倉書店 333
- 重永英年・川崎達郎 (2010) スギ人工林における林冠疎開後の枝の伸長と樹冠の発達 九州森林研究 63: 67-70
- 高橋幸弘・菅原泉・上原巖・佐藤明 (2008) 異なる光環境下に植栽したオオバアサガラ (*Pterostyrax hispida* SIEB.et Zucc.) の生育 関東森林研究 59:191-194