

第3章 冠雪害がスギ人工林の成林に与える影響、とくに林床における光環境の変化

第1節 冠雪害の発生要因と成林との関係

1. はじめに

冠雪害の発生形態には、標高や斜面方位など地形的要因、それと複合する密度管理方法の違い、品種による雪害抵抗性の違いが関係する(石井ら1980, 1981ab, 1983abc, 石川ら1987, 新田1988, 佐伯・杉山1965, 山口ら1982, 矢野1984)。ただし、冠雪害発生に関係する要因を個別の林分ではなく地域として評価した例(嘉戸ら1992, 嘉戸2001, 松田1988)は少なく、とくにスギ人工林の成林過程と冠雪害の発生の関係については詳細な検討がなされていない。

本節では、1981年、1985年、2001年の豪雪時に冠雪害を受けた15~30年生のスギ人工林で被害の実態を調べ、その発生要因を立地環境と林分構造に基づいて解析した。積雪地帯のスギ人工林の成林過程に、冠雪害がどのような影響を与えるかを考察した。

2. 調査地および調査方法

調査地は、石川県加賀地方を中心とした12市町村(金沢市;小松市;加賀市;河北郡:津幡町;石川郡:鶴来町,河内村,吉野谷村,鳥越村,尾口村,白峰村;能美郡:辰口町;江沼郡:山中町)の標高40~900mに成立する15~30年生のスギ人工林とした。調査の対象とした林分は、1981年・1985年・2001年に冠雪害を受けた84カ所と、その近隣で無被害ないし軽度な被害を受けた林分42カ所(対照区)である。なお、本数にして30%以上が倒伏または幹折れしている「激害」を受けた林分は34林分であった。

面積400m²を基準としたプロットを設定して、立木の密度・胸高直径・樹高・枝下高・根元曲がり(1.2mでの水平長)を測定し、冠雪害が生じた時の状況を倒木や折損木の形態から推定した。また、林齢・苗木の由来(実生・挿し木)・植栽密度について、造林台帳と現地調査により調べた。各調査地の標高・傾斜度・斜面方位・微地形(凸型・凹型・直斜・脚部)・土壌型を現地調査と地形図から求めた。

冠雪害の発生要因の解析は、各林分の現況(林齢・立木密度・平均胸高直径・平均樹高・平均形状比・平均枝下高・収量比数)に加え植栽密度・苗木の由来と成林時の立地環境(標高・方位・斜面傾斜度・土壌型・微地形)を説明変数とし、本数被害率を外的基準とする数量化I類によって行った。比較対照として、冠雪害が発生する以前に生じた自然間引きによる本数減少率も併せて解析した。

自然間引きによる本数減少率(%)は、冠雪害が発生する以前の立木本数を基に

(植栽密度-立木密度) / 植栽密度 × 100
で計算し、一方、冠雪害による本数被害率(%)は、

被害木本数 / 立木密度 × 100
で計算した。

3. 結果

1) 調査地域の積雪環境とスギ人工林の雪害

図3-1に、県内の気象観測所地点での過去30年間の最深積雪深データに基づいて、標高と平均最深積雪深の関係を示した。両者の関係から得られた回帰式から最深積雪深が100~250cmの「多雪

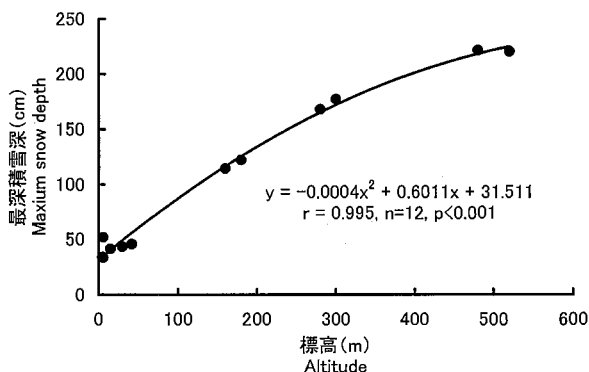


図3-1 石川県での過去30年間('69-'99)における標高と最深積雪深の関係
観測地点は、小松・白峰(2箇所)・鶴来・鳥越・吉野谷・尾口・金沢・宇ノ気・羽咋・富来・輪島の12地点。ただし、白峰の1箇所・鳥越・吉野谷・尾口は、'75-'86のデータである。

Fig. 3-1 Relationship between the altitude and the maximum snow depth during 30 years ('69-'99) in Ishikawa Prefecture. Observation site is 12: Komatsu, Shiramine (2 site), Tsurugi, Torigoe, Yoshinodani, Oguchi, Kanazawa, Unoke, Hakui, Togi and Wjima. One site of Shiramine, Torigoe, Yoshinodani and Oguchi are data from '75 to '86.

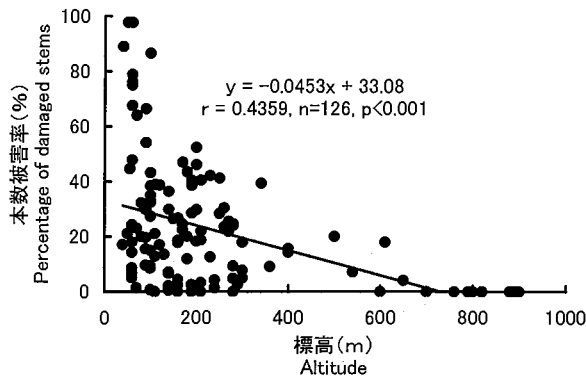


図3-2 標高と冠雪害による本数被害率の関係

Fig. 3-2 Relationship between the altitude and the percentage of trees damaged by snow accretion.

地帯」は標高120m以上～620m未満の範囲に存在する。この多雪地帯をはさんで、標高120m未満を「少雪地帯」、標高620m以上を「豪雪地帯」と呼ぶことにする。なお、暖温帯と冷温帯の境界に当たる、標高400mの最深積雪深は208cmであった。

標高と冠雪害の本数被害率の関係を求めたところ（図3-2）、標高の上昇とともに被害率は減少する傾向にあり（ $p < 0.001$ ）、標高700m以上では冠雪害はみられなかった。400m以下の低標高域では、被害率が高い林分が多かった反面、無被害の林分もみられるなど、林分間で被害の程度に変動があった。

つぎに、雪圧の影響をみるため、標高と樹幹の根元曲がり水平長の関係を調べた（図3-3）。標高100mの平均根元曲がり水平長は22.1cmで、標高800m時の103.2cmの21.4%であった。また、

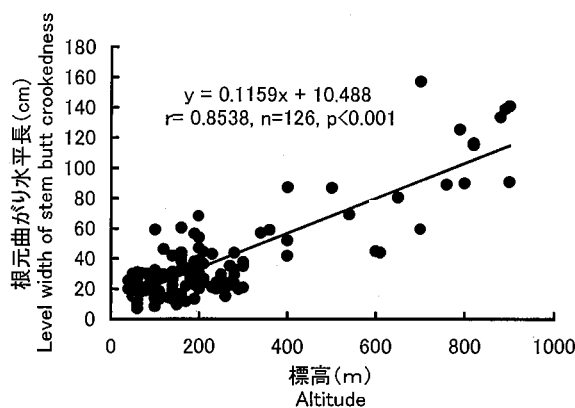


図3-3 標高と根元曲がりの関係

根元曲がり水平長は地上1.2mの高さで測定。

Fig. 3-3 Relationship between the altitude and the level width of stem butt crookedness. Level width of the crookedness degree was measured at 1.2 m above ground.

標高400mの平均の根元曲がり水平長は56.8cmで、標高100m時の257.0%、標高800m時の55.0%であった。このように、標高の上昇とともに根元曲がりが大きくなる傾向が認められる（ $p < 0.001$ ）。

2) 冠雪害がスギの成林に及ぼす影響

自然間引きによる本数減少率と冠雪害による本数被害率を外的基準にし、14の調査項目をアイテムとする数量化I類による解析を行った（表3-1, 3-2）。

解析の結果、本数被害率の重相関係数は0.751であったのに対し、本数減少率の重相関係数は0.938であった。

自然間引きによる本数減少率に関係の深かった要因は、植栽密度・立木密度・平均胸高直径・収量比数の順となり、これらいずれの要因も偏相関係数は高く、スコアのレンジも大きかった。植栽密度と平均胸高直径のいずれもカテゴリーの増加とともにスコアが増加した。立木密度と収量比数は、カテゴリーの増加とともにスコアがマイナスになった。植栽密度は、2001本/ha以上でスコアがプラスになった。植栽密度と立木密度の関係は図3-4のとおりである。回帰直線の傾きは0.6212で、植栽密度が高いほど本数減少が多くなる傾向を示した（ $p < 0.001$ ）。また、平均胸高直径は、21.1cm以上でスコアがプラスになった。これらの要因について、平均樹高・微地形・斜面傾斜度・土壌型などの偏相関係数が高く、スコアのレンジも大きかった（表3-1）。

一方、冠雪害による本数被害率に関係が深かった要因は、平均形状比・平均胸高直径・収量比数・標高の順となり、これらの偏相関係数は高く、ス

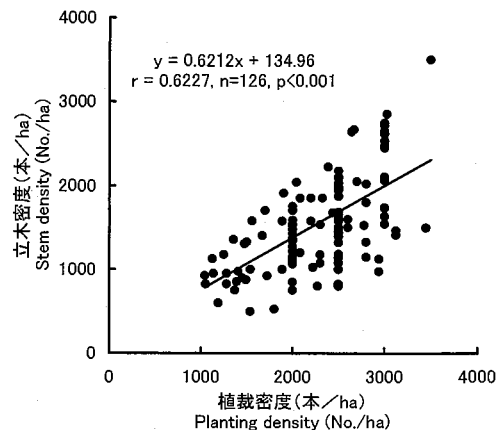


図3-4 植栽密度と冠雪被害時の立木密度の関係

Fig. 3-4 Relationship between the planting density and the stem density just before snow accretion damage

表 3-1 数量化I類によるスギ人工林 (15~30年生) での自然間引きによる本数減少率の推定

Table 3-1 Estimation of the percentage of reduction of stems caused by the self-thinning in Sugi (*Cryptomeria japonica*) plantations (15-30 years old) based on Quantitation I.

アイテム Item	カテゴリー Categories	サンプル数 No. of samples	本数減少率の推定 Estimation of percentage of reduction of stems		
			スコア Score	レンジ Range	偏相関係数 Par. cor. coefficient
林齢 (年) Age (yr)	1. ~20	31	0.867		0.148
	2. 21~25	36	-1.753	2.620	
	3. 26~	59	0.614		
苗木由来 Nursery stock	1. 実生 Seedling	104	-0.135	0.773	0.042
	2. 挿し木 Cutting	22	0.638		
標高 (m) Altitude	1. ~100	41	-1.706	4.046	0.212
	2. 101~200	40	-0.598		
	3. 201~300	24	0.593		
	4. 301~	21	2.340		
方位 Direction	1. N	36	0.482	4.334	0.223
	2. E	29	-2.665		
	3. S	30	1.669		
	4. W	31	0.318		
斜面傾斜度 (°) Inclination	1. ~10	17	-3.287	5.417	0.261
	2. 10~20	31	-1.687		
	3. 21~30	44	0.813		
	4. 31~	34	2.130		
土壌型 Soil type	1. B _b	114	-0.488	5.122	0.165
	2. B _b (d), B _c , B _n	12	4.634		
微地形 Micro -topography	1. 凸型 Projection	10	-6.181	7.151	0.239
	2. 直斜 Uniformity	50	-0.042		
	3. 凹型 Dent	29	0.967		
	4. 脚部 Leg	37	0.970		
植栽密度 (本/ha) Planting density (No./ha)	1. ~1500	17	-30.984	46.991	0.870
	2. 1501~2000	37	-5.589		
	3. 2001~2500	37	5.038		
	4. 2501~3000	30	16.007		
	5. 3001~	5	13.379		
立木密度 (本/ha) Stem density (No./ha)	1. ~1000	25	18.242	42.578	0.803
	2. 1001~1500	40	7.361		
	3. 1501~2000	38	-7.975		
	4. 2001~2500	12	-14.980		
	5. 2501~	11	-24.336		
平均胸高直径 (cm) DBH	1. ~16.0	28	-11.499	23.026	0.553
	2. 16.1~21.0	43	-1.377		
	3. 21.1~26.0	46	6.031		
	4. 26.1~	9	11.527		
平均樹高 (m) H	1. ~11.0	33	-1.830	6.964	0.264
	2. 11.1~16.0	67	-1.091		
	3. 16.0~	26	5.134		
平均形状比 (cm/m×100) H/DBH	1. ~60	30	-1.375	3.471	0.133
	2. 61~70	58	-0.378		
	3. 71~80	25	1.436		
	4. 81~	13	2.096		
平均枝下高 (m) BH	1. ~4.0	25	-0.527	1.006	0.057
	2. 4.1~8.0	59	0.479		
	3. 8.1~	42	-0.359		
収量比数 (m³/m³) Yield index	1. ~0.5	20	8.769	18.604	0.520
	2. 0.51~0.6	27	6.502		
	3. 0.61~0.7	35	-3.332		
	4. 0.71~0.8	29	-2.992		
	5. 0.81~	15	-9.836		
定数 Constant			31.167		
重相関係数 Multiple correlation coefficient					0.9375

表 3-2 数量化 I 類によるスギ人工林 (15~30 年生) での冠雪害による本数被害率の推定

Table 3-2 Estimation of the percentage of reduction of stems caused by the snow accretion damage in Sugi (*Cryptomeria japonica*) plantations (15-30 years old) based on Quantitation I.

アイテム Item	カテゴリー Categories	サンプル数 No. of samples	本数減少率の推定 Estimation of percentage of reduction of stems		
			スコア Score	レンジ Range	偏相関係数 Par. cor. coefficient
林齢 (年) Age (yr)	1. ~20	31	-1.108	3.389	0.088
	2. 21~25	36	2.282		
	3. 26~	59	-0.810		
苗木由来 Nursery stock	1. 実生 Seedling	104	-1.345	7.703	0.179
	2. 挿し木 Cutting	22	6.358		
標高 (m) Altitude	1. ~100	41	5.879	12.445	0.264
	2. 101~200	40	0.879		
	3. 201~300	24	-5.563		
	4. 301~	21	-6.566		
方位 Direction	1. N	36	2.816	6.653	0.158
	2. E	29	1.043		
	3. S	30	-3.837		
	4. W	31	-0.532		
斜面傾斜度 (°) Inclination	1. ~10	17	-3.133	11.501	0.278
	2. 10~20	31	-6.414		
	3. 21~30	44	5.087		
	4. 31~	34	0.831		
土壌型 Soil type	1. B _D	114	0.084	0.882	0.013
	2. B _D (d), B _C , B _A	12	-0.798		
微地形 Micro -topography	1. 凸型 Projection	10	-1.001	3.056	0.075
	2. 直斜 Uniformity	50	0.743		
	3. 凹型 Dent	29	1.302		
	4. 脚部 Leg	37	-1.754		
植栽密度 (本/ha) Planting density (No./ha)	1. ~1500	17	1.637	6.600	0.107
	2. 1501~2000	37	0.562		
	3. 2001~2500	37	-1.822		
	4. 2501~3000	30	1.454		
	5. 3001~	5	-4.963		
立木密度 (本/ha) Stem density (No./ha)	1. ~1000	25	-2.825	9.812	0.144
	2. 1001~1500	40	-2.390		
	3. 1501~2000	38	1.627		
	4. 2001~2500	12	2.261		
	5. 2501~	11	6.987		
平均胸高直径 (cm) DBH	1. ~16.0	28	-15.227	25.605	0.325
	2. 16.1~21.0	43	3.583		
	3. 21.1~26.0	46	3.479		
	4. 26.1~	9	10.378		
平均樹高 (m) H	1. ~11.0	33	0.022	5.437	0.122
	2. 11.1~16.0	67	-1.569		
	3. 16.0~	26	3.868		
平均形状比 (cm/m×100) H/DBH	1. ~60	30	1.583	25.093	0.391
	2. 61~70	58	-0.277		
	3. 71~80	25	-9.129		
	4. 81~	13	15.964		
平均枝下高 (m) BH	1. ~4.0	25	3.581	7.132	0.125
	2. 4.1~8.0	59	1.053		
	3. 8.1~	42	-3.551		
収量比数 (m³/m³) Yield index	1. ~0.5	20	-5.444	15.163	0.283
	2. 0.51~0.6	27	-1.653		
	3. 0.61~0.7	35	-5.607		
	4. 0.71~0.8	29	7.118		
	5. 0.81~	15	9.556		
定数 Constant			22.470		
重相関係数 Multiple correlation coefficient					0.7506

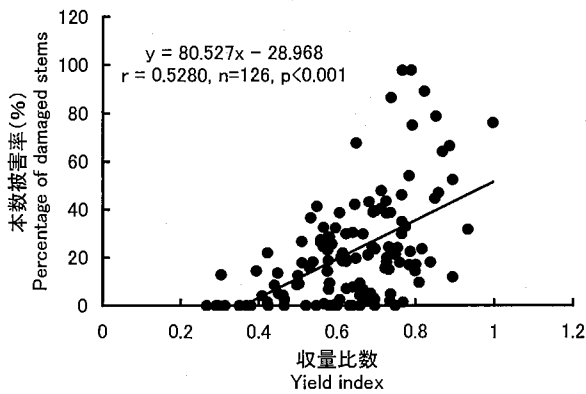


図 3-5 収量比数と冠雪害による本数被害率の関係

Fig. 3-5 Relationship between the yield index and the percentage of stems damaged by snow accretion.

コアのレンジが大きかった。平均形状比は81以上、収量比数は0.71以上、平均胸高直径は16.1cm以上、でスコアがプラスになった。収量比数と冠雪害の被害率の関係は図3-5のとおりである。収量比数の増加とともに被害率が増加した ($p < 0.001$)。標高は、200m以下でスコアがプラスとなった。これらの要因について、斜面傾斜度・立木密度・苗木由来・平均枝下高などの偏相関係数が高く、スコアのレンジも大きかった(表3-2)。しかし、土壌型や微地形はスコアのレンジも小さく、偏相関係数も低かった。

スコアのプラス値から判断して、冠雪害が発生しやすい立地環境は、標高200m以下・斜面傾斜度 21° 以上・方位北向きで、土壌型 B_D 型・微地形凹型であった(表3-2)。それに対し、自然間引きによる本数減少率が高い環境は、標高301m以上・斜面傾斜度 31° 以上・方位南向きで、土壌型 $B_D(d)$, B_C , B_B 型・微地形脚部という結果となった(表3-1)。

4. 考察

400m以下の低標高地域で冠雪害による本数被害率が高い(図3-2)。とくに、標高200m以下は冠雪害が最も発生しやすい標高域である(表3-2)。この結果は、北陸地方での冠雪害の発生率が標高400m以下で高いという松田(1988)の結果と一致する。そのうえ、低標高地域では本数被害率の場所による変動が大きという傾向がみられた。このことは、標高以外にも本数被害率に強く関係する要因が存在することを意味している。

標高以外の要因で本数被害率に関係が深かった

のは、平均形状比・平均胸高直径・収量比数であった(表3-2)。平均形状比と収量比数は、冠雪害発生に関係深い要因として、過去の研究(富山県:嘉戸ら1992, 嘉戸2001; 福井県:松田1988; 石川県:三代1982; 島根県:石井ら1983abc; 岐阜県:山口ら1982)でも検討されており、平均形状比70以上、収量比数0.7以上の管理粗放な林分で、冠雪害による本数被害率が高いとされている。今回の結果でも、平均形状比・収量比数ともに値の増加が本数被害率を高める要因であった(表3-2)。収量比数と本数被害率は有意な正の相関関係を持ち(図3-5)、収量比数0.71以上で急激にスコアが大きくなった(表3-2)。この収量比数を立木密度に換算すると、30年生時に1,500本/haの密度を越える林分がこれに当たる。また、平均胸高直径が大きくなると被害率が高まる(表3-2)のは、幹の肥大成長が旺盛な林分ほど個体間で込み合いが強くなり、そこで冠雪害が発生しやすいものと考えられる。

自然間引きによる本数減少率でも、収量比数や平均胸高直径の偏相関係数が比較的高いものの、それ以上に植栽密度や立木密度の偏相関係数が高かった(表3-1)。このことから、自然間引きによる本数の減少は、植栽初期から密度依存的に起こっていることが考えられる(図3-4)。

一方、地形要因の解析からは、自然間引きによる本数減少率は高標高域で高いほか、南向きの凹型の急傾斜地や $B_D(d)$ ・ B_C ・ B_B 型の土壌で高かった(表3-1)。この原因として、標高の上昇に伴い積雪深が増加し(図3-1)、強い雪圧を受けていること(図3-3)や、南側斜面や凹型地形は雪の吹き溜まりになりやすく、急傾斜地は雪崩など雪のグライドの影響を強く受けること(岩坪・新田1987)、土壌がスギ造林木に不適なため成長不良となることなどが考えられる。これに対し、冠雪害による本数被害率は標高と斜面傾斜度で偏相関係数が高かった。斜面傾斜度の大きい場所は、冠雪害による根倒れが生じやすいことが指摘されている(嘉戸ら1992)。しかし、方位、土壌型、微地形などの立地環境要因は、自然間引きによる本数減少率の場合ほど強い影響を及ぼしていなかった(表3-2)。このことは、冠雪害が立地環境要因よりも林分管理に関する要因に強く影響されていることを示唆している。自然間引きと冠雪害で、発生要因がまったく異なることが

表3-3 調査したスギ人工林の概要

Table 3-3 Age, density, mean tree height (H), mean diameter at breast height (DBH), and the number of gaps and the gap size of Sugi (*Cryptomeria japonica*) plantation at examination site.

林齢 (年) Age (yr)	本数 (本/ha) Density (stems/ha)	平均樹高 H (m)	平均胸高直径 DBH (cm)	測定したギャップ (Gap)	
				箇所数 No.	面積 (m ²) Area
24	1,520	12.8	25.1	7	27.0
		10.3~18.2			4.0~110.0
30	1,330	21.7	29.2	7	64.0
		19.0~25.1			4.2~314.0
52	590	25.2	32.6	11	100.3
		22.1~32.9			5.5~424.3
74	350	30.1	48.4	8	73.9
		24.4~34.9			6.1~250.0

平均樹高および測定したギャップの面積は、平均 (上段)/範囲 (下段) で示す。
H and gap area are shown by "Average/range (max. - min.)"

興味深い。

暖温帯と冷温帯の境界に当たる標高400mでは、冠雪害の被害率も根元曲がり量も標高100mと標高800mのほぼ中間的な値を示した (図3-2, 3-3)。冠雪害は暖温帯地域に特有な雪害であり、冷温帯地域では雪圧による初期からの造林木の消失が起きやすい。高標高域は雪圧を受けて徐々に林分密度が低くなり、低標高域は冠雪害により林分密度が突然減少するという違いとなつてあらわれる。冠雪害は、自然間引きによる本数減少に比較して、立地条件や植栽密度よりも林分管理の影響を強く受けている。密度管理がなされず、過密になった林分や、極端に強度な枝打ちにより形状比が高くなった林分は冠雪害発生の可能性が高いことがわかる。

以上のように、低標高域での本数被害率のばらつきが大きかったのは、林分によって管理状態が異なるためと考えられる。除間伐や枝打ちを適切に行わずに放置状態となった林分は、とくに危険であることがわかった。

第2節 冠雪害によって生じた林冠ギャップの規模と光環境の変化

1. はじめに

閉鎖した森林で、上層木が枯死すると林冠に空隙が生じる。この空隙は「ギャップ」あるいは「林冠ギャップ」と呼ばれ、林木の更新に重要な役割を果たすことが指摘されている (Nakashizuka 1984, 中静・山本 1987, Runkle

1981, Whitmore 1982)。これは、ギャップの形成によって、光環境・地表の温度・土壤水分などで閉鎖林冠下とは異なった環境が創り出される (森澤ら 1993, 中静・山本 1987, Ochiai *et al.* 1994) ためである。

冠雪害によって、林冠にギャップが形成される。この冠雪害は、林分によって様々な規模で生じ、単木レベルの被害から集団的に樹木群が倒伏する場合までがある (図3-2, 石井ら 1983ac, 松田 1988)。このように、ギャップの面積は一定でないために、冠雪害後の林内の光環境は被害の規模により大きく異なることが予想される。閉鎖林冠を持つ人工林に関しては、平均相対照度やその頻度分布について多くの研究例がある (玉井・四手井 1972, 安藤 1983ab, 林野庁 1996)。しかし、ギャップに注目してスギ人工林で光環境を調べた研究例は少ない (小島・石塚 1998)。また、樹高とギャップ面積の違いがもたらす光環境についての情報が少ない。

本節では、平均樹高の異なる4カ所のスギ人工林で、散光相対照度と光量子束密度を測定し、ギャップ面積やギャップ内の方角の違いによる光環境の差異について考察した。

2. 調査地および調査方法

調査地は、石川県林業試験場内にある24~74年生の4カ所のスギ人工林とした (表3-3)。標高160~200mの西向きの緩斜面 (傾斜10°以下) にあり、それぞれの林分の本数密度は1,520本/

haから350本/haの範囲であった。また、平均樹高とその範囲は、それぞれ12.8m (10.3~18.2m)、21.7m (19.0~25.1m)、25.2m (22.1~32.9m)、30.1m (24.4~34.9m)であった。30年生、52年生、74年生の平均樹高は、24年生の平均樹高のそれぞれ1.70倍、1.97倍、2.35倍であった。

それぞれの林分毎に7から11カ所のギャップ(4.0~424.3m²)を選択し、面積を測定した。

ギャップおよびギャップに面している立木の樹冠下を含めた拡張ギャップ(Runkle 1982)で散光相対照度を2000年6月30日の曇天時に測定した(図3-6)。散光相対照度は、ギャップの中心から2m置きに東西南北に測点を設定して、地上高50cmに、デジタル照度計(ミノルタ社, T-1H)を設置して測定した(図3-6)。図3-7に、散光相対照度を測定した平均樹高の異なる4カ所の林分で、110m²以上の面積のギャップ平面図を示した。ギャップの形状は、楕円形から円形に近いものまでがあった。

また、ギャップ内で直射光を含めた光の影響を把握するため、24年生(平均樹高12.8m-ギャップ

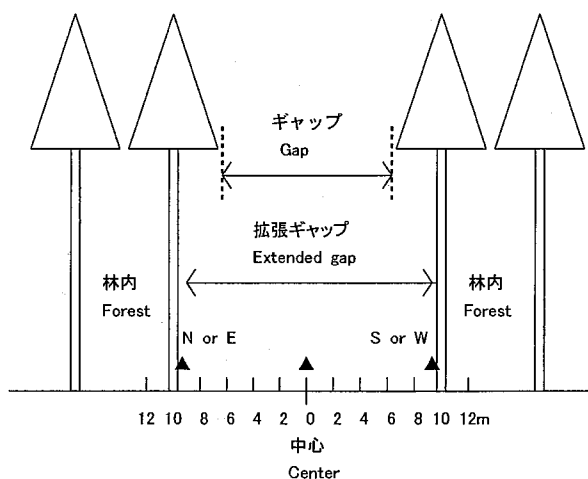


図3-6 ギャップおよび拡張ギャップの定義と光環境の測定位置
光量子束密度は、▲の場所にセンサーを設置して測定。散光相対照度は、中心より2m置きに4方位方向で測定(拡張ギャップより外側の林内まで測定)。

Fig. 3-6 Definition of the gap and the extended gap, and the measurement point for the light environment. Photon flux density was measured in the center and at the edge of gap (▲). Relative diffused light intensity was measured at 2 m interval from the center of the gap in four directions (north, east, south and west), until the inside of the forest.

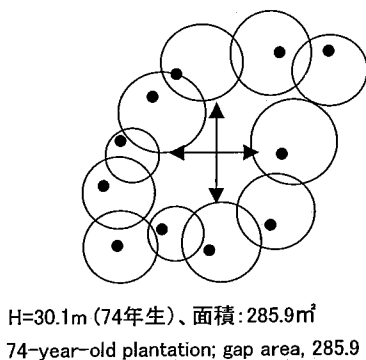
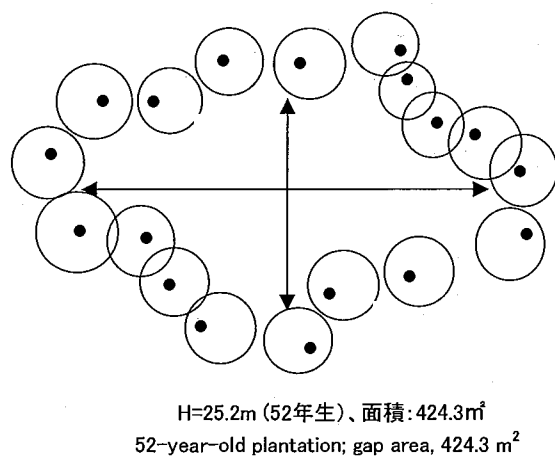
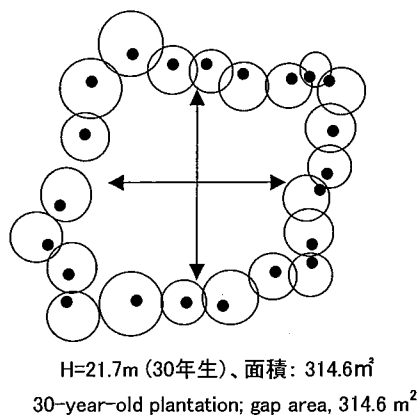
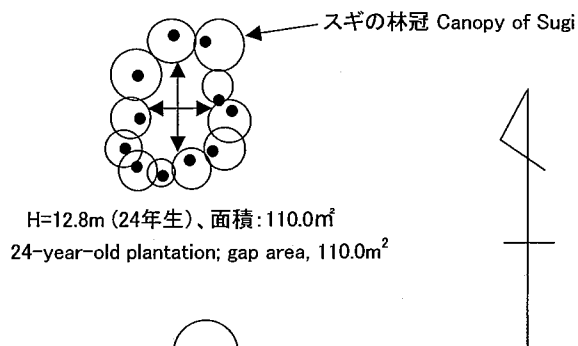


図3-7 スギ人工林における林冠ギャップの形状
矢印は、散光相対照度の測定方向を示す。

Fig. 3-7 Shape of the canopy gap in Sugi (*Cryptomeria japonica*) plantations. The relative diffused light intensity was measured along the arrow line.

ブ面積25.9m²)、30年生(平均樹高21.7m-ギャップ面積38.0m²)、74年生(平均樹高25.2m-ギャップ面積64.8m²)のギャップで春季(2000年4月25日~5月6日)における光量子束密度(PPFD)の日変化を調べた。3カ所とも、ギャップ形状は楕円形に近かった。測定は、光量子センサー(ブリード社, PAR-01)と自動データ記録装置(コーナシステム社, KADEC-US6)を用いた。光量子センサーは、ギャップの中心と拡張ギャップ(図3-6)の最外側の4方位に設置し、高さは地上50cmとした。データの記録は、6時から18時の間に10分間隔とし、瞬間値を記録した。

3. 結果

1) ギャップ面積と散光相対照度の関係

図3-8は、平均樹高別のギャップ面積とその中心の散光相対照度(地上部50cm)の関係を示している。どの林分においても、両者の間に有意な相関関係($p < 0.01$)が得られ、両対数による直線で近似された。ギャップ面積が1.0m²の林分の林床相対照度は、4林分とも4%前後と推定された。平均樹高が低いほど、直線の傾きが大きく、ギャップの増加にともなう散光相対照度の上昇率が高くなった。

図3-9は、ギャップの中心から林内までの散光相対照度の分布を4方向について示している。

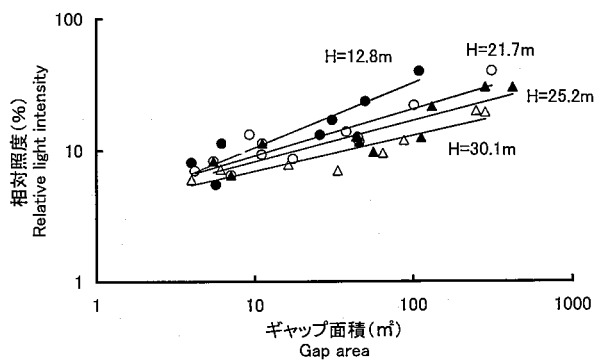


図3-8 平均樹高別のギャップ面積とギャップ中心の散光相対照度の関係

Fig. 3-8 Relationship between the gap area and the relative diffused light intensity at the center of the gap in the stands with various tree heights (H).

- : H=12.8m (24年生 24 years old)
 $y = 3.8039x^{0.4579}$, $n=7$, $r=0.915$, $p < 0.01$
- : H=21.7m (30年生 30 years old)
 $y = 4.0333x^{0.3539}$, $n=7$, $r=0.903$, $p < 0.001$
- ▲ : H=25.2m (52年生 52 years old)
 $y = 4.0157x^{0.3113}$, $n=11$, $r=0.889$, $p < 0.001$
- △ : H=30.1m (74年生 74 years old)
 $y = 3.7457x^{0.2392}$, $n=11$, $r=0.921$, $p < 0.001$

面積7.1m²以下のギャップでは、林内とギャップでの相対照度の差はほとんどみられなかった。面積25.9m²以上のギャップでは、面積が大きくなるにつれて、ギャップの中心に近づくほど顕著に相対照度は高くなる傾向を示した。また、樹高の低い林分のギャップほど、林内からギャップの中心に向かうにしたがって、相対照度の上昇率が高くなる傾向があった。

面積110.0m²以上のギャップでは、外周の形状の違いが相対照度の傾度に影響して、N-S間とW-E間で中心から林内への移動による相対照度の減少パターンに違いがみられた(図3-9)。一例を挙げると、平均樹高25.2mで424.3m²のギャップは、W-Eに長径を持つ形状であった(図3-7)。このギャップでは、N-S方向よりもW-E方向の方が常に高い相対照度を示している。ギャップの形状からして、常にW-E方向に太陽光が入射することを反映しているのであろう(図3-9)。

2) ギャップ内の方位による光量子束密度(PPFD)の違い

3つの調査地(図3-10~12)で、春季(4月25日~5月6日)における方位別のPPFDの日変化を晴天時にギャップ内で調べた。どの林分でも、PPFDは、6時から10時ごろまで徐々に増加した後、太陽が南中する頃に最大値となり、15時に低下した後、徐々に減少するパターンを示した。観測日が完全な快晴ではなかったために、どの林分でも、雲にさえぎられた時にPPFDが低下し、前述のパターンは断続的な形を示した。とくに、5月6日の晴れ時々曇りの日にはPPFDの変動が顕著であった。

方位によるPPFDの違いをみると、平均樹高に関係なくギャップの北側が高く、逆に南側が低くなる傾向があった(図3-10~12)。

平均樹高12.8mの林分(図3-10)では、北側は11時半から15時まで継続して高いPPFD値を示したのに対し、東側は12時前後に、西側は11時と13時前後に、中心は14時前後に一時的にピークがみられた。また、南側は10時半と14時半に、他の方位に比べて低いPPFDのピークがあった。PPFDの1日の平均は北側(418.4 $\mu\text{E}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ /day)が最も高く、最も低かった南側(35.3 $\mu\text{E}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ /day)の11.8倍であった。日中(11時から13時)の平均では北側が南側の51.4倍となった。

平均樹高21.7mの林分(図3-11)では、北側は10時半から12時までの間と12時半前後および13時に高いPPFD値を示したのに対し、南側は10時と13時半に、東側は12時に、西側は11時と12時半に一時的にピークが存在した。また、中心は9時前と12時と13時に他の方位に比べPPFDの低いピークが存在した。PPFDの1日の平均は北側(212.4 $\mu\text{E}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}/\text{day}$)が最も高く、最も低かった中心部(60.7 $\mu\text{E}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}/\text{day}$)の3.5倍であった。日中(11時から13時)の平均では南側が最も低く、北側がその14.3倍となった。

平均樹高30.1mの林分(図3-12)では、北側は9時半と11時と12時から12時半の間に高いPPFD値を示したのに対し、中心部は8時と9時半と10時過ぎに、東側は11時前と12時前と13時半に、西側は9時過ぎと13時前に一時的にPPFDの

ピークがみられた。しかし、南側では明確なピークはみられなかった。PPFDの1日の平均は北側(127.4 $\mu\text{E}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}/\text{day}$)が最も高く、最も低かった南側(49.8 $\mu\text{E}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}/\text{day}$)の2.6倍であった。日中(11時から13時)の平均では北側が南側の6倍となった。

4. 考察

平均樹高の異なる4カ所のスギ人工林において、ギャップ内の散光相対照度を測定した結果、ギャップ面積と相対照度間に正の相関関係が認められた(図3-8)。ギャップ下にある林床の光環境は、ブナ等の落葉広葉樹林(Canham 1988, 加藤・小見山 1999, Nakashizuka 1985, Poulson and Platt 1989, Yoshida et al. 1998)、ヒノキ人工林(谷口 1999)、スギ人工林(小島・石塚

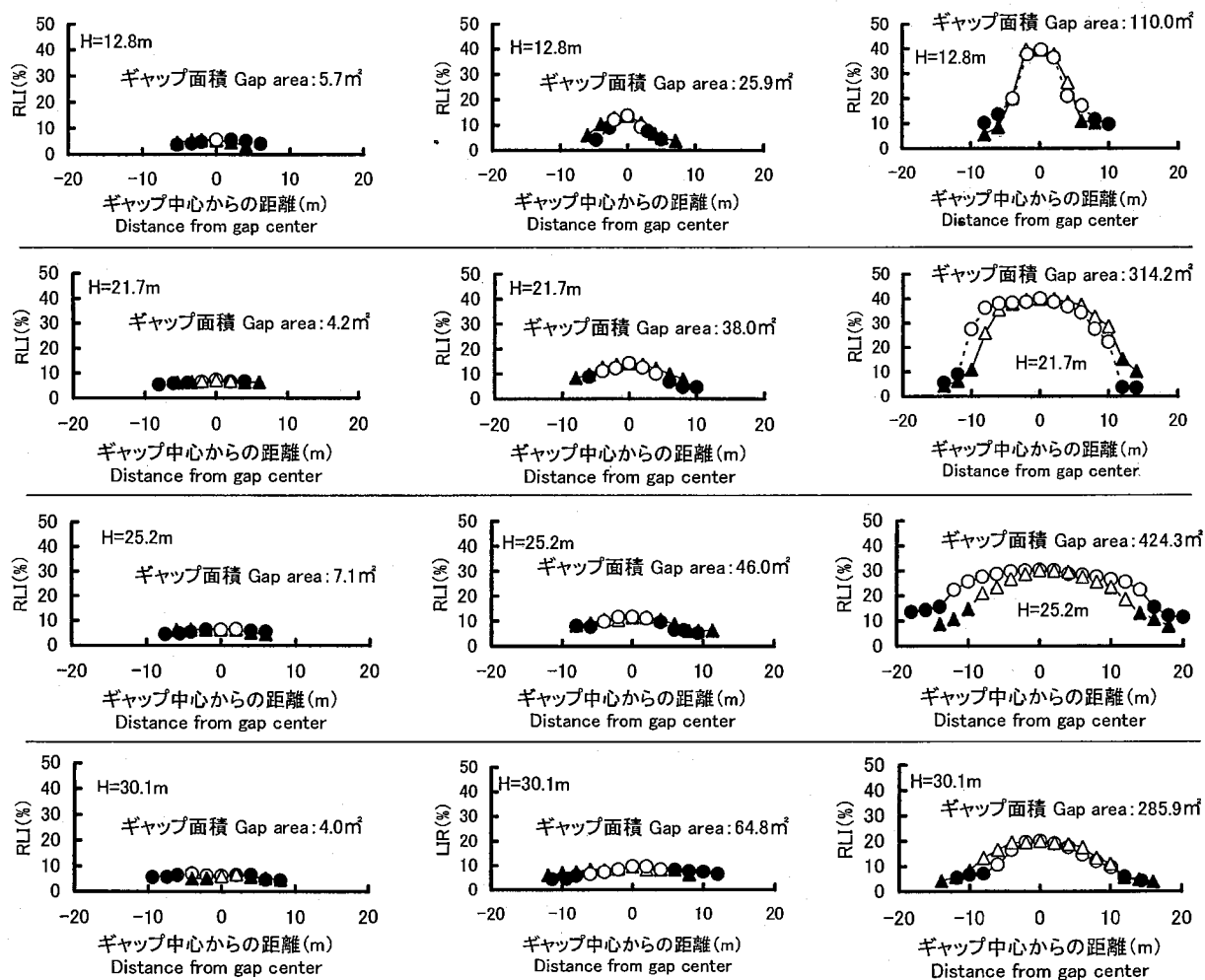


図3-9 樹高およびギャップ面積の違いとギャップ内の方位別散光相対照度(RLI)の変化
 ▲: N(-側)~S(+側), ●: W(-側)~E(+側), 白抜きはギャップ内を示す。

Fig. 3-9 Relative diffused light intensities at different distances from the gap center in the direction to north (N), east (E), south (S) and west (W). Triangles: N side (-) and S side (+). Circles: W side (-) and E side (+). Open symbols: within the gap. Closed symbols: outside the gap. H=12.8m (24 years old), H=21.7 (30 years old), H=25.2m (52 years old), H=30.1m (74 years old).

1998)、クロマツ人工林 (川崎・橋詰 1996) など
で調べられ、ギャップ下の林床は面積の増加と
ともに高いレベルの光環境下に置かれるという結果
が報告されている。

本研究の結果から、同じギャップ面積でも平均
樹高の低い林分ほど散光相対照度が高い値を示す
ことがわかった (図 3-8)。これは、ギャップ
の散光相対照度は、林床と林冠部の距離が短くなる
ほど高くなる (Nakashizuka 1985) ことから、
相対的に樹高の低い林分は、同じ面積のギャップ
でも明るい光環境を持つためである。陽樹が陰樹
の物質生産を上回るには、30%以上の散光相対照
度が得られるギャップ面積が必要 (Monsi and
Oshima 1955) とされる。図 3-8 のギャップ
面積と相対照度の関係式から、中心で30%以上の
相対照度が確保できるギャップ面積を計算すると、
樹高12.8mでは90.9m²必要であったのに対し、樹
高30.1mでは1047.2m²必要と計算された。このこ
とより、同じ面積のギャップでも平均樹高の低い
林分ほど相対的に明るい光環境条件を得られるこ
とが明らかとなった。

面積の大きなギャップで、ギャップ形状の影響
により方位別の散光相対照度の分布パターンに違
いがみられるものの、どのギャップでも中心部ほ
ど高く林内に近づくほど減少する傾向が認められ
た (図 3-9)。これは、ブナ天然林 (Nakashizuka 1985)、ヒノキ人工林 (谷口

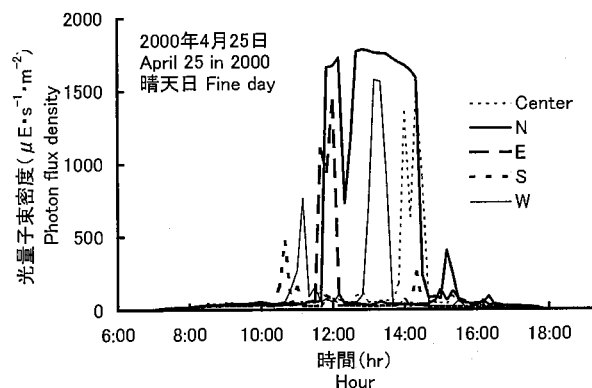


図 3-10 方位別にみた光量子束密度の日変化 (10分
間隔)
H=12.8m (24年生) のスギ人工林内のギャ
ップ (25.9m²)。

Fig. 3-10 Diurnal fluctuation (10 min interval) of
the photon flux density at the center and north, east, south and west edge
of the gap (25.9m²) in 24-year-old Sugi
(*Cryptomeria japonica*) plantation (H=12.8m).

1999)、スギ人工林 (小島・石塚 1998)、クロマ
ツ人工林 (川崎・橋詰 1996) で報告された結果
と一致する。また、林内に対しギャップの中心の
照度増加率は、平均樹高が低く面積が大きいギャ
ップほど顕著であった (図 3-9)。

ただし、面積7m²以下の単木的なギャップでは、
樹高にかかわらず、ギャップ内の相対照度は周辺
の林内のそれとほぼ同じ値を示した。スギは、ケ
ヤキなどの広葉樹に比べ、単木当たりの樹冠面積

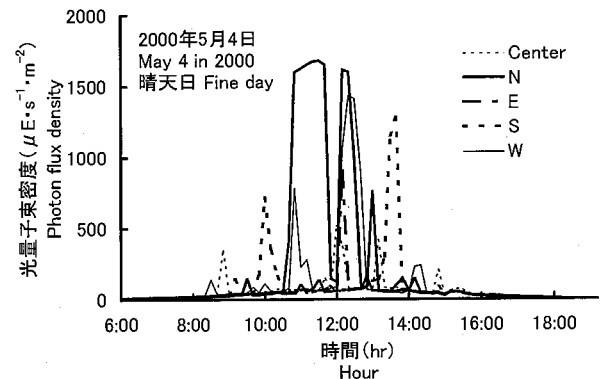


図 3-11 方位別にみた光量子束密度の日変化 (10分
間隔)
H=21.7m (30年生) のスギ人工林のギャ
ップ (38.0m²)。

Fig. 3-11 Diurnal fluctuation (10 min interval) of
the photon flux density at the center and north, east, south and west edge
of the gap (38.0m²) in 30-year-old Sugi
(*Cryptomeria japonica*) plantation (H=21.7m).

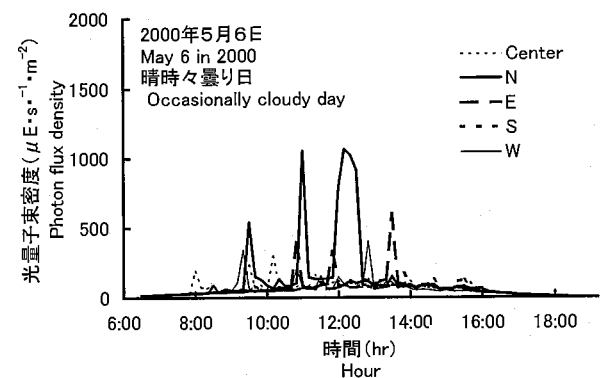


図 3-12 方位別にみた光量子束密度の日変化 (10分
間隔)
H=30.1m (74年生) のスギ人工林のギャ
ップ (64.8m²)。

Fig. 3-12 Diurnal fluctuation (10 min interval) of
the photon flux density at the center and north, east, south and west edge
of the gap (64.8m²) in 74-year-old Sugi
(*Cryptomeria japonica*) plantation (H=30.1m).

が小さく、胸高直径が増加しても樹冠が拡張しない傾向がある（小谷 2001a）。しかも、スギ人工林は一斉に植栽されている場合が多く、構成木の樹冠面積や樹高が均一化している。これから考えて、単木的に生じる面積 7 m^2 以下の冠雪害は、林床の散光環境を大きく変えるものではない。

ギャップ内の林床で、散光成分と直射成分を含む光量子束密度には方位による差が認められ、ギャップの北側にある場所で、この光量子束密度が比較的長時間継続して高い値を示した。これは、当地ではほとんどの場合太陽光が南側から入射するためである。Canham (1988) は、ギャップ内に入射する散光と直射光に関係するGLI (Gap light index) が北側に偏った分布を持つことを示した。さらに、南北方向に長径を持つギャップは東西方向に長径を持つギャップよりも太陽光が入射しやすい (Poulson and Platt 1989) ことから、直射成分を含む光量子束密度はギャップの形状によっても影響を受けることが考えられる。

林床における光量子束密度の強弱は、散光と直射光の成分が加わって決定される。図 3-10~12 にみられるように、光量子束密度の日変化は断続的で、いくつかの強いピークを持っている。このパターンから、直射成分が日変化パターンに大きな影響を与えていることが考えられる。完全な曇天下で散光を主に測定した場合（図 3-8, 3-9）とは異なり、太陽の直射光が連続的に照射すると、比較的小さい面積のギャップでも数時間にわたり光量子束密度が増大する（図 3-10, Tamai 1976）。同じ形状のギャップでは直射光が入射する時間は、大面積のギャップほど長く、小面積のギャップでは短い。したがって、直射光を含む光量子束密度も、大きな面積のギャップで、生育する植物に多くの光エネルギーを与えるものと考えられる。

ただし、強度の直射光が連続すると、植物には光合成障害 (Koike 1988)、高温や乾燥による成長抑制 (Cornelissen 1996, Gray and Spies 1996, 橋詰 1983, 1985, 水井 1985, 高原 1986) が生じることも知られている。直射光でも、面積の小さなギャップが創り出す短時間の断続的照射は、植物の成長に有害とはならないであろう。前述のように、 25.9 m^2 の面積のギャップ内でも、数時間の直射光の入射が観測されたことを考えると、小面積のギャップの北側に位置する個体にとって、

直射光は重要な光環境であると考えられる。

以上のことより、スギ人工林に生じた林冠ギャップでは、ギャップ面積が大きいほど明るい光環境がもたらされる。とくに、直射光の入射が光環境の変化に強い影響を与え、ギャップの北側の位置で光量子束密度が高くなる。また、平均樹高が低い林分ほど高い入射を受ける。このような特徴は、とくに強光を成長に利用する陽性樹種の侵入と関係を持つと考えられる。

冠雪害は、15~30年生の林分で発生しやすい (松田 1988)。また、一度冠雪害を受けた林分は、次の冠雪害によってさらに枯死木が増し、ギャップを拡大し易い (石井ら 1983a)。このような、若齢期に冠雪害が発生した林分では、林床の光環境が一転して明るくなることが予想される。老齢林分で形成されたギャップよりも、植物の生育に好適な光環境条件を与えることが考えられる。