

「平成 23 年台風 12 号で発生した表層崩壊」に関する分析結果報告書

1. はじめに

紀伊半島大水害（平成 23 年台風 12 号災害）では奈良県南部を中心に多くの表層崩壊が発生した。奈良県ではこの災害を受けて「災害に強い森林づくり」に向けて、土砂災害防止機能の高い森林のあり方を検討している。今回、表層崩壊発生メカニズムや防止策を検討するための基礎資料として、表層崩壊発生箇所における森林の整備状況と地形を分析した。本報告書はその結果を取りまとめたものである。

2. 分析方法

分析は森林の整備状況と地形、そしてそれら因子の組み合わせで行った。用いた資料は表層崩壊地図、森林簿、森林計画図、および数値標高モデル 10m（10mDEM）で、分析作業は ArcGIS for Desktop 10.1 とその拡張機能である Spatial Analyst を使用した。

（1）崩壊地と整備状況の関係

はじめに、森林計画図から崩壊地内に含まれる林分を抽出し、面積を計測した。ついで、崩壊地の周囲に 50m のバッファを作成した。崩壊地を含むバッファの面積は崩壊地の 7.4 倍であった。以後、「バッファ」とは崩壊地を含むバッファ領域のことを指す。そして、森林計画図からバッファ内に含まれる林分を抽出し、面積を計測した。最後に、崩壊地内とバッファ内の整備状況別林分数と林分面積を比較した。なお、整備状況としては森林簿等に掲載されている「林種」、「樹種」、「齢級」、「間伐実施年度」の 4 つを分析対象とした。

（2）崩壊地と地形の関係

はじめに、10mDEM を使って傾斜角図と斜面方位図を作成した。つぎに、崩壊地図とバッファ図をベクターデータからラスターデータへ変換した。この際、セルの一边の長さは 10mDEM に揃えて 11.27m とした。したがって、1 セルの面積は約 127 m² となる。そして、ラスター化した崩壊地図とバッファ図に傾斜角図と斜面方位図をそれぞれ重ね合わせ、崩壊地内およびバッファ内の傾斜角図と斜面方位図を作成した。最後に、崩壊地内およびバッファ内における傾斜角および斜面方位ごとのセル数を計数し、崩壊地内とバッファ内とでセル数を比較した。

（3）因子の組み合わせ

「間伐実施齢級と間伐後経過年数」、「林種と傾斜角」、および「林種と斜面方位」の 3 つの組み合わせで分析を行った。「間伐実施齢級と間伐後経過年数」については、「（1）崩壊地と整備状況の関係」の作業で得た結果を利用した。また、「林種と傾斜角」および「林種と斜面方位」については次のように行った。はじめに、崩壊地内およびバッファ内に含まれる林分の林種をベクターデータからラスターデータへ変換した。この際、セルの一边の長さは傾斜角図と斜面方位図に揃えて 11.27m とした。つぎに、ラスター化した林種図に傾斜角図と斜面方位図をそれぞれ重ね合わせ、崩壊地内およびバッファ内の林種・傾斜角別分布図と林種・斜面方位別分布図を作成した。最後に、崩壊地内およびバッファ内における林種・傾斜角別および林種・斜面方位別のセル数を計数し、崩壊地内とバッファ内とでセル数を比較した。

3. 分析結果

(1) 崩壊地と整備状況の関係

1) 林種

バッファ内および崩壊地内における林種別林分数は表 1、林分面積は表 2 のとおりである。また、バッファ内および崩壊地内における林種別林分数割合は図 1、林分面積割合は図 2 のとおりである。林種別崩壊発生率は、林分数では伐採跡地と未立木地が、林分面積では未立木地が高い（表 1 および表 2）。伐採跡地の崩壊発生率が林分数では高いのに林分面積で高くないことは、面積の小さい伐採跡地で崩壊が発生したことを示している。一方、人工林と天然林における崩壊発生率は林分数、林分面積ともに天然林の方が高い（表 1 および表 2）。また、林種別林分割合は、林分数、林分面積ともに、人工林はバッファ内より崩壊地内の方が低いのに対し、天然林および未立木地はバッファ内より崩壊地内の方が高い（図 1 および図 2）。これらの結果から、人工林よりも天然林や未立木地の方が高い確率で崩壊が発生したことがわかる。なお、林分数、林分面積ともに竹林の崩壊発生率は最も低い（表 1 および表 2）。この傾向は、竹林における根系の表層土壌緊縛力は高いという経験的知見と合致している。

2) 樹種

バッファ内および崩壊地内における樹種別林分数は表 3、林分面積は表 4 のとおりである。また、バッファ内および崩壊地内における樹種別林分数割合は図 3、林分面積割合は図 4 のとおりである。バッファ内林分数が 10 に満たないカラマツ、コウヤマキ、ブナ、ケヤキ、焼跡、採草地を除けば、樹種別崩壊発生率は、林分数ではその他針葉樹、その他広葉樹、伐採跡地、工事跡、崩壊地、および土場が、林分面積では工事跡、崩壊地、および土場が高い（表 3 および表 4）。また、スギおよびヒノキにおける崩壊発生率は林分数、林分面積ともに全体の崩壊発生率よりも低い（表 3 および表 4）。一方、樹種別林分割合は、林分数、林分面積ともに、スギとヒノキはバッファ内より崩壊地内の方が低いのに対し、その他広葉樹と崩壊地はバッファ内より崩壊地内の方が高い（図 3 および図 4）。これらの結果から、スギやヒノキよりもその他広葉樹や崩壊地の方が高い確率で崩壊が発生したことがわかる。

3) 齢級

バッファ内および崩壊地内における齢級別林分数は表 5、林分面積は表 6 のとおりである。また、バッファ内および崩壊地内における齢級別林分数割合は図 5、林分面積割合は図 6 のとおりである。齢級別崩壊発生率は、林分数、林分面積ともに特筆すべき傾向は認められない（表 5 および表 6）。一方、齢級別林分割合は、林分数ではバッファ内と崩壊地内の割合は近似しているが、林分面積では 6 ～ 10 齢級はバッファ内より崩壊地内で小さく、11 ～ 20 齢級で大きい（図 5 および図 6）。このように、林分数と林分面積の傾向は若干異なるものの、林分面積における 11 ～ 20 齢級での崩壊発生率が他の齢級と比較して極端に大きい訳ではないことを勘案すれば、崩壊の発生と齢級の間には特筆すべき関係はないといえよう。

4) 間伐実施年度

バッファ内および崩壊地内における間伐実施年度別林分数は表 7、林分面積は表 8

のとおりである。また、バッファ内および崩壊地内における間伐実施年度別林分数割合は図 7、林分面積割合は図 8 のとおりである。間伐実施年度別崩壊発生率は、林分数、林分面積ともに特筆すべき傾向は認められない（表 7 および表 8）。一方、齢級別林分割合は、林分数、林分面積ともに、バッファ内と崩壊地内の割合は近似している（図 7 および図 8）。表層崩壊発生における間伐の影響は、「残存木の根系発達」あるいは「間伐木の根の腐朽」として現れると考えられるが、これらの結果は、実施された間伐が表層崩壊発生に影響を及ぼしていないことを示唆している。なお、間伐後の根系発達には間伐実施時の林齢が影響すると考えられるので、「(3) 因子の組み合わせ」で再度検討する。

5) 間伐実施・未実施

バッファ内および崩壊地内における間伐実施・未実施別林分数は表 9、林分面積は表 10 のとおりである。また、バッファ内および崩壊地内における間伐実施・未実施別林分数割合は図 9、林分面積割合は図 10 のとおりである。間伐実施林分と未実施林分における崩壊発生率は、林分数では間伐実施林分の方が高いが、林分面積では大差はない（表 9 および表 10）。一方、間伐実施・未実施別林分割合は、林分数、林分面積ともに、バッファ内と崩壊地内の割合は近似している（図 9 および図 10）。これらの結果は、前項（「4）間伐実施年度」）同様、実施された間伐が表層崩壊発生に影響を及ぼしていないことを示唆している。

(2) 崩壊地と地形の関係

1) 傾斜角

バッファ内および崩壊地内における傾斜角別セル数は表 11 のとおりである。また、バッファ内および崩壊地内における傾斜角別セル数割合は図 11 のとおりである。傾斜角別崩壊発生率は、緩傾斜地ほど高い（表 11）。一方、傾斜角別セル数割合は、バッファ内に比べて崩壊地内では $0 \sim 25^\circ$ の緩傾斜地の割合が高い（図 11）。これらの結果は緩傾斜地で崩壊が多く発生したことを示しているが、その原因としては、緩傾斜地の多くが斜面下部に位置し、斜面上部の崩壊に巻き込まれて堆積したものが含まれていることが考えられる。

2) 斜面方位

バッファ内および崩壊地内における斜面方位別セル数は表 12 のとおりである。また、バッファ内および崩壊地内における斜面方位別セル数割合は図 12 のとおりである。斜面方位別崩壊発生率は、北西～北東斜面で高く、南～南西斜面で低い（表 12）。一方、斜面方位別セル数割合は、バッファ内では東～南斜面の割合が高いが、崩壊地内では北東～南東斜面の割合が高く、南～西斜面の割合が低い（図 12）。これらの結果は、今回の崩壊が北斜面を中心に高い確率で発生していることを示しており、「北斜面に多く発生した」という深層崩壊の傾向と類似している。

(3) 因子の組み合わせ

1) 間伐時齢級・間伐後経過年数と崩壊発生率

間伐時齢級・間伐後経過年数別崩壊発生率は表 13 のとおりである。間伐時齢級と間伐後経過年数の関係としては、「間伐後の時間経過に伴って崩壊しにくくなる」、あるいは「間伐後数年間は崩壊しやすいがその後崩壊しにくくなる」、そしてその傾

向は「間伐後の成長回復が早いと思われる若齢ないし壮齢時に間伐された林分で顕著」といった結果が期待されるが、そのような傾向は認められない。この結果は、前項（「4）間伐実施年度」や「5）間伐実施・未実施」）でも述べたとおり、実施された間伐が表層崩壊発生に影響を及ぼしていないことを示唆している。表層土壌緊縛力に及ぼす間伐の効果については、「間伐後何年で表層土壌緊縛力が発達するのか」、「20～30%程度の下層間伐で表層土壌緊縛力を向上させることができるのか」、「そもそも間伐によって土壌緊縛力は本当に高くなるのか」、「間伐による低下と間伐による発達で相殺されるのではないか」、といった疑問を今後明らかにしなければならない。

2) 林種・傾斜角と崩壊発生率

林種・傾斜角別崩壊発生率は表 14 のとおりである。すべての傾斜角において崩壊発生率は未立木地が大きく、また、天然林は人工林よりも大きい。傾斜角との関係としては、人工林や天然林では急傾斜地で崩壊発生率が低いのに対し、未立木地ではいずれの傾斜角でも崩壊発生率が高いが、その原因としては、緩傾斜地の多くが斜面下部に位置し、斜面上部の崩壊に巻き込まれて堆積したものが含まれていることが考えられる。

3) 林種・斜面方位と崩壊発生率

林種・斜面方位別崩壊発生率は表 15 のとおりである。人工林、天然林、未立木地では北向き斜面での発生率が高い。とりわけ未立木地における北向き斜面の崩壊発生率は 40% を超えており、崩壊が発生しやすい林種・地形として挙げることができよう。

4. 要約

- (1) 人工林よりも天然林や未立木地の方が高い確率で崩壊が発生した。
- (2) 竹林の崩壊発生率は低かった。
- (3) スギやヒノキよりもその他広葉樹や崩壊地の方が高い確率で崩壊が発生した。
- (4) 崩壊の発生と齢級の間の特筆すべき関係は見られなかった。
- (5) 崩壊の発生と間伐後経過年数・間伐の有無の間に関係は認められなかった。
- (6) 崩壊は緩傾斜地で多く発生した。
- (7) 崩壊は北斜面を中心に発生した。
- (8) 北向き斜面の未立木地で崩壊が多く発生した。

表1 林種別林分数

林種	バッファ内 林分数	崩壊地内 林分数	崩壊発生率 (%)
人工林	6165	2529	41.0
天然林	2606	1316	50.5
伐採跡地	17	10	58.8
竹林	27	7	25.9
未立木地	667	402	60.3
全体	9482	4264	45.0

注) 崩壊発生率 = 崩壊地内林分数 ÷ バッファ内林分数 × 100

表2 林種別林分面積

林種	バッファ内 林分面積 (ha)	崩壊地内 林分面積 (ha)	崩壊 発生率 (%)
人工林	2190.031	216.432	9.9
天然林	1754.132	228.514	13.0
伐採跡地	10.742	1.073	10.0
竹林	1.305	0.101	7.7
未立木地	163.671	56.055	34.2
全体	4119.881	502.175	12.2

注) 崩壊発生率 = 崩壊地内林分面積 ÷ バッファ内林分面積 × 100

表3 樹種別林分数

樹種	バッファ内 林分数	崩壊地内 林分数	崩壊発生率 (%)
スギ	4573	1949	42.6
ヒノキ	1531	553	36.1
マツ	91	26	28.6
カラマツ	4	2	50.0
モミ、ツガ	89	42	47.2
コウヤマキ	2	2	100.0
その他針葉樹	39	27	69.2
クヌギ	12	6	50.0
ブナ	2	1	50.0
ケヤキ	2	1	50.0
その他広葉樹	2426	1236	50.9
伐採跡地	17	10	58.8
竹林	27	7	25.9
工事跡	41	21	51.2
崩壊地	577	356	61.7
焼跡	2	2	100.0
土場	14	8	57.1
採草地	9	3	33.3
原野	14	6	42.9
その他	10	6	60.0
全体	9482	4264	45.0

注) 崩壊発生率 = 崩壊地内林分数 ÷ バッファ内林分数 × 100

表4 樹種別林分面積

樹種	バッファ内 林分面積 (ha)	崩壊地内 林分面積 (ha)	崩壊 発生率 (%)
スギ	1748.544	184.268	10.5
ヒノキ	423.307	30.089	7.1
マツ	21.664	1.856	8.6
カラマツ	2.122	0.217	10.2
モミ、ツガ	91.092	9.467	10.4
コウヤマキ	0.822	0.026	3.1
その他針葉樹	78.194	10.017	12.8
クヌギ	2.384	0.381	16.0
ブナ	2.243	0.319	14.2
ケヤキ	0.333	0.003	0.9
その他広葉樹	1573.460	208.303	13.2
伐採跡地	10.742	1.073	10.0
竹林	1.305	0.101	7.7
工事跡	9.423	2.456	26.1
崩壊地	134.996	51.140	37.9
焼跡	2.295	0.168	7.3
土場	3.745	0.875	23.4
採草地	1.320	0.092	7.0
原野	10.623	1.202	11.3
その他	1.269	0.122	9.6
全体	4119.881	502.175	12.2

注) 崩壊発生率 = 崩壊地内林分面積 ÷ バッファ内林分面積 × 100

表5 齡級別林分数

齡級	バッファ内 林分数	崩壊地内 林分数	崩壊発生率 (%)
1～5齡級	815	419	51.4
6～10齡級	3767	1613	42.8
11～15齡級	2735	1110	40.6
16～20齡級	1089	509	46.7
21～25齡級	229	118	51.5
26～30齡級	65	38	58.5
31～35齡級	32	20	62.5
36～40齡級	31	14	45.2
41～45齡級	7	3	42.9
46～50齡級	1	1	100.0
全体	8771	3845	43.8

注) 崩壊発生率 = 崩壊地内林分数 ÷ バッファ内林分数 × 100

表6 齡級別林分面積

齡級	バッファ内 林分面積 (ha)	崩壊地内 林分面積 (ha)	崩壊 発生率 (%)
1～5齡級	486.678	49.961	10.3
6～10齡級	1721.004	170.479	9.9
11～15齡級	863.710	105.047	12.2
16～20齡級	538.561	78.975	14.7
21～25齡級	208.051	25.725	12.4
26～30齡級	57.335	5.561	9.7
31～35齡級	54.130	8.527	15.8
36～40齡級	12.131	0.461	3.8
41～45齡級	1.849	0.158	8.5
46～50齡級	0.715	0.051	7.2
全体	3944.164	444.946	11.3

注) 崩壊発生率 = 崩壊地内林分面積 ÷ バッファ内林分面積 × 100

表7 間伐実施年度別間伐林分数

間伐実施年度	バッファ内 間伐林分数	崩壊地内 間伐林分数	崩壊発生率 (%)
12年度	21	10	47.6
13年度	42	18	42.9
14年度	122	60	49.2
15年度	118	52	44.1
16年度	19	10	52.6
17年度	99	39	39.4
18年度	195	87	44.6
19年度	86	38	44.2
20年度	118	49	41.5
21年度	198	90	45.5
22年度	141	63	44.7
全体	1159	516	44.5

注) 崩壊発生率 = 崩壊地内林分数 ÷ バッファ内林分数 × 100

表8 間伐実施年度別間伐林分面積

間伐実施年度	バッファ内 間伐林分面積 (ha)	崩壊地内 間伐林分面積 (ha)	崩壊 発生率 (%)
12年度	5.373	0.558	10.4
13年度	12.351	1.870	15.1
14年度	77.061	7.282	9.4
15年度	54.057	6.573	12.2
16年度	11.756	1.513	12.9
17年度	39.345	4.228	10.7
18年度	91.499	8.055	8.8
19年度	42.352	2.969	7.0
20年度	55.223	5.366	9.7
21年度	92.531	8.808	9.5
22年度	64.463	6.514	10.1
全体	546.010	53.736	9.8

注) 崩壊発生率 = 崩壊地内林分面積 ÷ バッファ内林分面積 × 100

表9 間伐実施・未実施別林分数

	バッファ内 林分数	崩壊地内 林分数	崩壊発生率 (%)
実施	1159	516	44.5
未実施	5006	2013	40.2
全体	6165	2529	41.0

注) 崩壊発生率 = 崩壊地内林分数 ÷ バッファ内林分数 × 100

表10 間伐実施・未実施別林分面積

	バッファ内 林分面積 (ha)	崩壊地内 林分面積 (ha)	崩壊発生率 (%)
実施	546.010	53.736	9.8
未実施	1644.021	162.696	9.9
全体	2190.031	216.432	9.9

注) 崩壊発生率 = 崩壊地内林分面積 ÷ バッファ内林分面積 × 100

表11 傾斜角別セル(11m×11m/個)数

傾斜角	バッファ内セル数	崩壊地内セル数	崩壊発生率(%)
0度以上5度未満	5794	2118	36.6
5度以上10度未満	7898	2794	35.4
10度以上15度未満	11143	3026	27.2
15度以上20度未満	16641	3439	20.7
20度以上25度未満	24714	4092	16.6
25度以上30度未満	36967	5081	13.7
30度以上35度未満	53173	6533	12.3
35度以上40度未満	67543	7409	11.0
40度以上45度未満	64113	6862	10.7
45度以上	68863	7289	10.6
全体	356849	48643	13.6

注)崩壊発生率＝崩壊地内セル数÷バッファ内セル数×100

表12 斜面方位別セル(11m×11m/個)数

斜面方位	バッファ内セル数	崩壊地内セル数	崩壊発生率(%)
北	37770	5911	15.6
北東	44211	7046	15.9
東	53219	7943	14.9
南東	52957	6921	13.1
南	50135	5366	10.7
南西	40168	4442	11.1
西	42026	5395	12.8
北西	36363	5619	15.5
全体	356849	48643	13.6

注)崩壊発生率＝崩壊地内セル数÷バッファ内セル数×100

表13 間伐時齡級・間伐後經過年数別崩壊発生率

間伐後 經過年数	間伐時齡級			
	1～4	5～8	9～12	13～
1	61.1	34.7	45.0	53.8
2	16.7	54.1	44.3	46.2
3	12.5	49.2	37.2	25.0
4	33.3	41.9	44.4	75.0
5	65.2	41.9	36.2	57.1
6	71.4	38.1	32.5	71.4
7	66.7	50.0	33.3	0.0
8	45.0	46.7	21.4	71.4
9	60.7	47.8	40.0	50.0
10	0.0	34.8	46.2	100.0
11		42.9	50.0	50.0

表14 林種・傾斜角別崩壊発生率

傾斜角	林種				
	人工林	天然林	伐採跡地	竹林	未立木地
0～5度	21.6	29.8	0.0		32.9
5～10度	23.9	31.6	0.0	20.0	51.4
10～15度	19.8	27.5	0.0	0.0	43.2
15～20度	15.1	21.7	10.5	0.0	37.9
20～25度	12.5	18.0	14.3	0.0	34.1
25～30度	10.1	15.2	12.0	25.0	36.4
30～35度	9.2	14.0	12.6	18.8	33.1
35～40度	8.4	12.1	7.4	8.3	32.1
40～45度	8.4	11.1	11.1	0.0	31.9
45度以上	7.9	9.8	9.4	0.0	35.2

表15 林種・斜面方位別崩壊発生率

斜面方位	林種				
	人工林	天然林	伐採跡地	竹林	未立木地
北	12.4	15.8	9.0	0.0	41.6
北東	12.8	15.5	20.2	22.2	46.0
東	10.9	13.9	23.8	28.6	37.2
南東	9.5	11.9	11.9	0.0	27.7
南	8.2	9.2	4.6	3.8	24.4
南西	8.6	9.9	1.5	0.0	29.3
西	7.9	13.4	7.1	0.0	29.6
北西	9.2	16.8	5.9	33.3	42.7

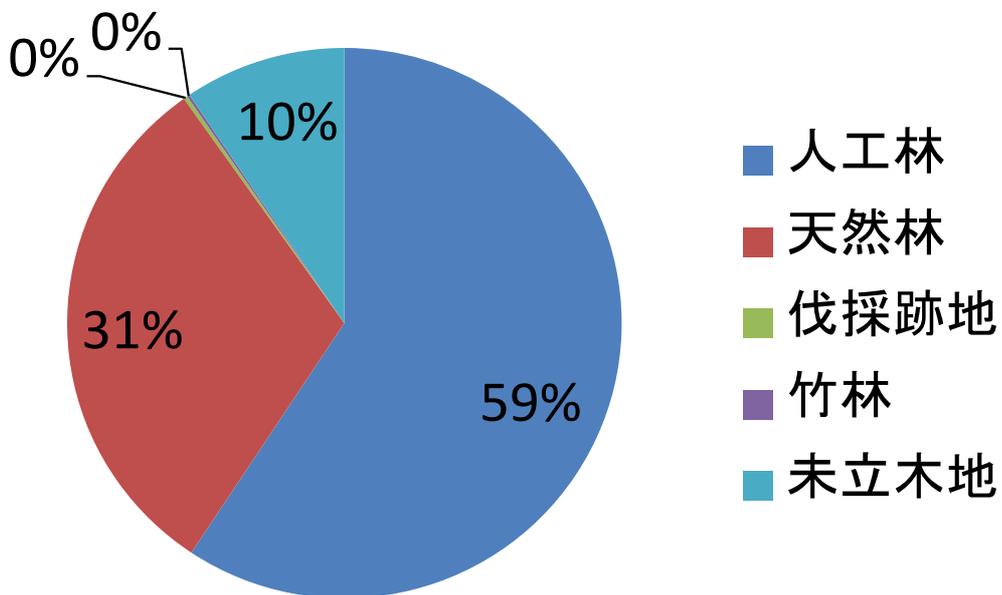
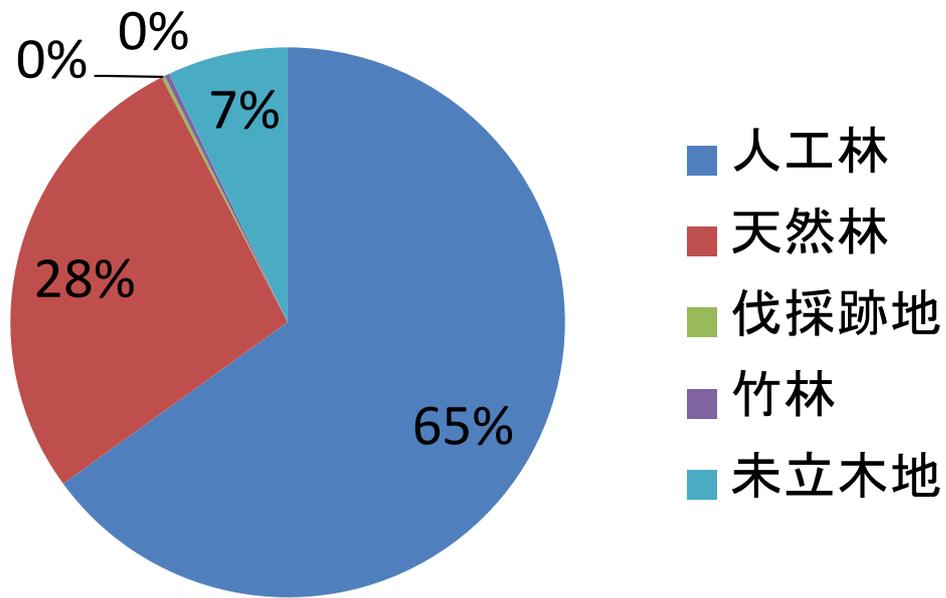


図1 林種別林分数割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

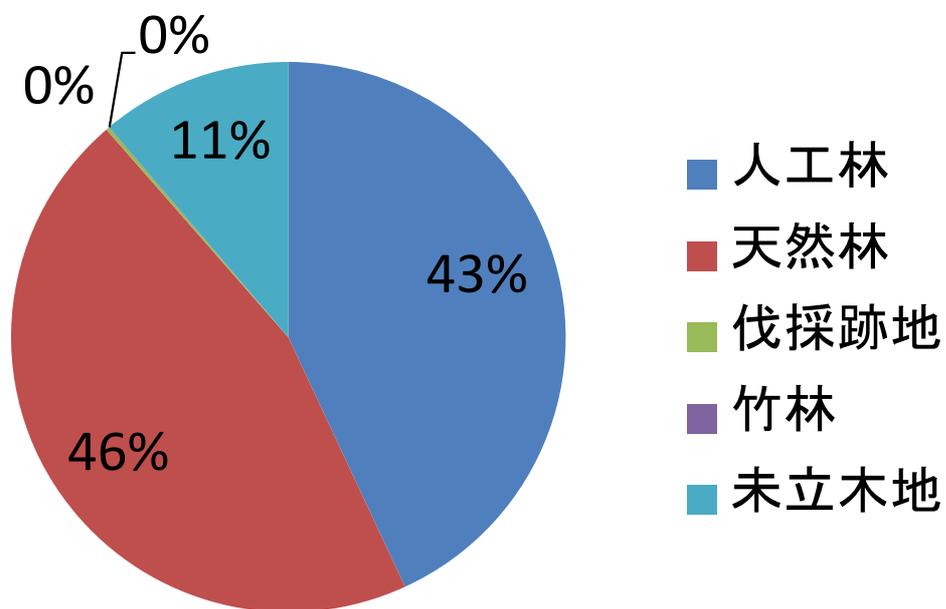
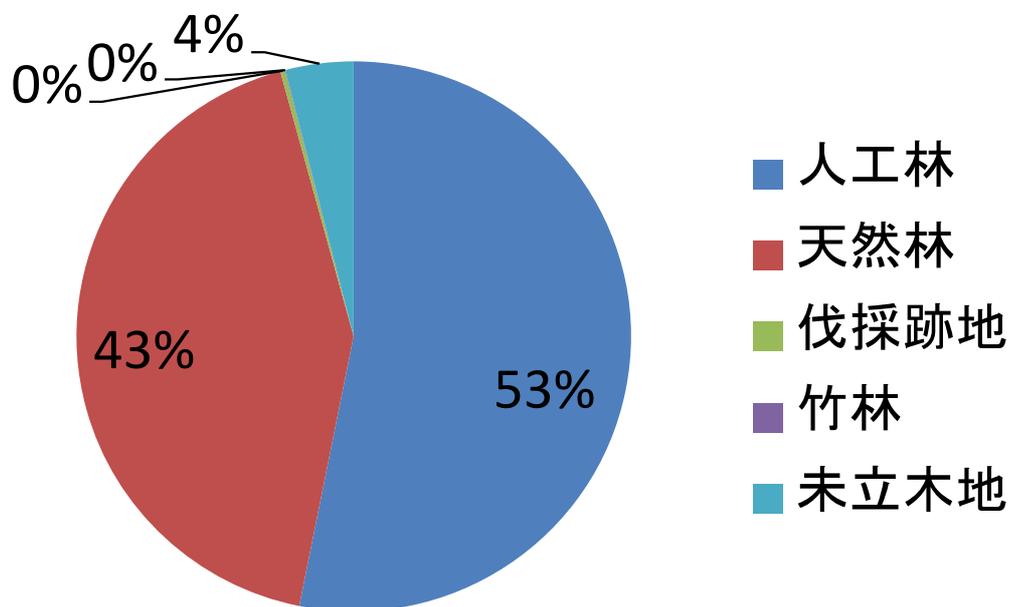


図2 林種別林分面積割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

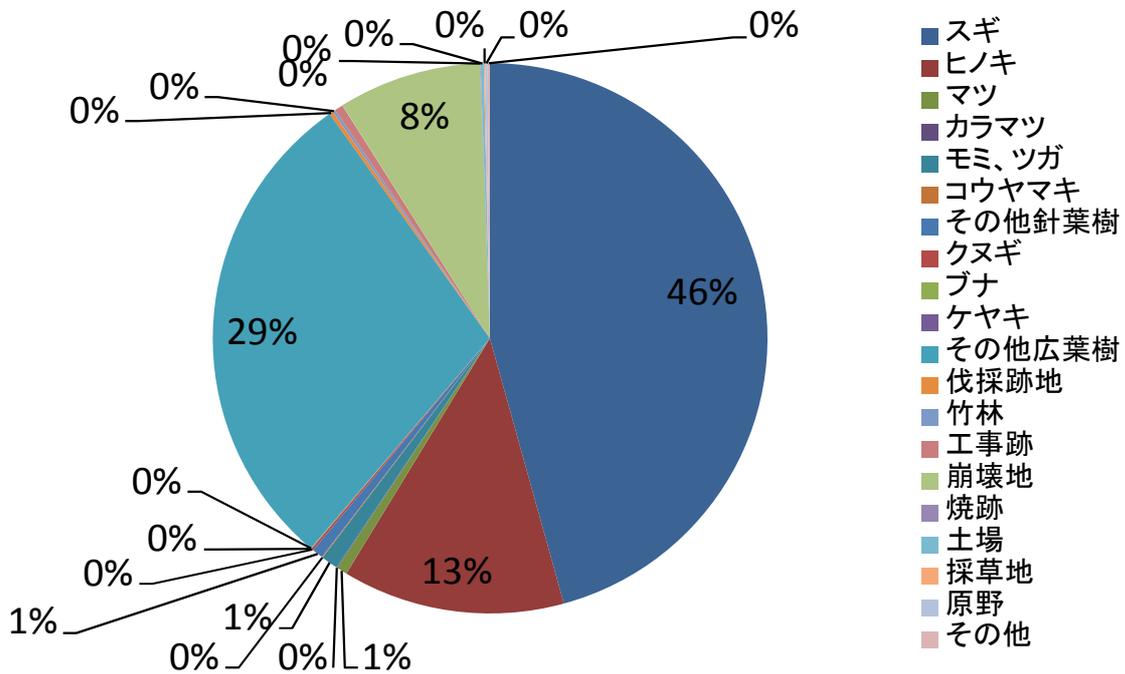
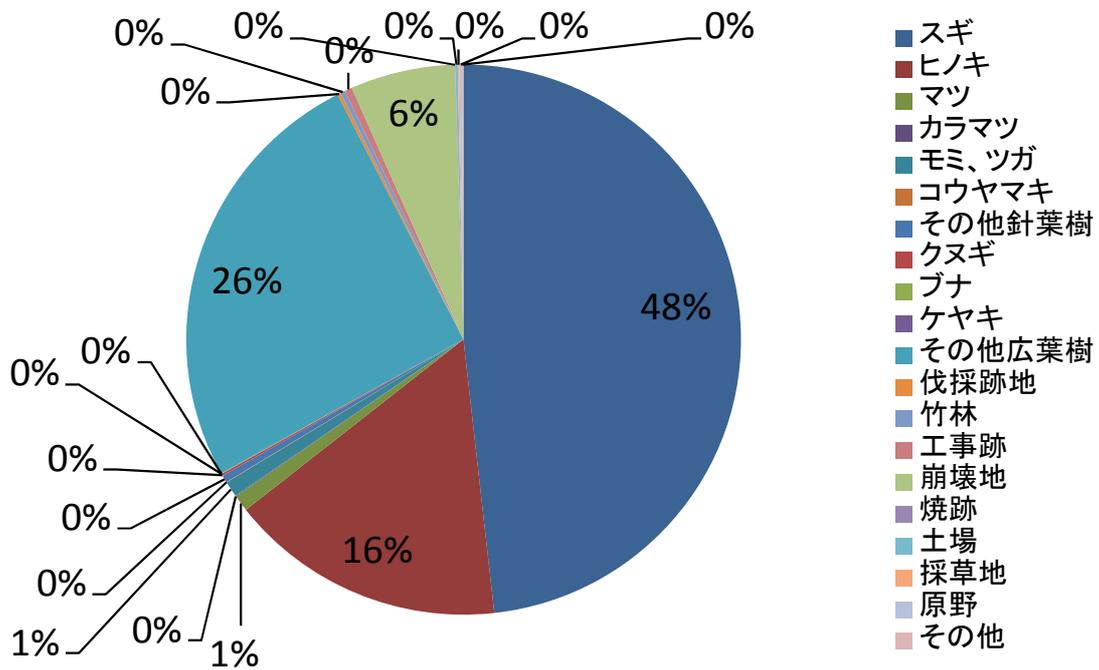


図3 樹種別林分数割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

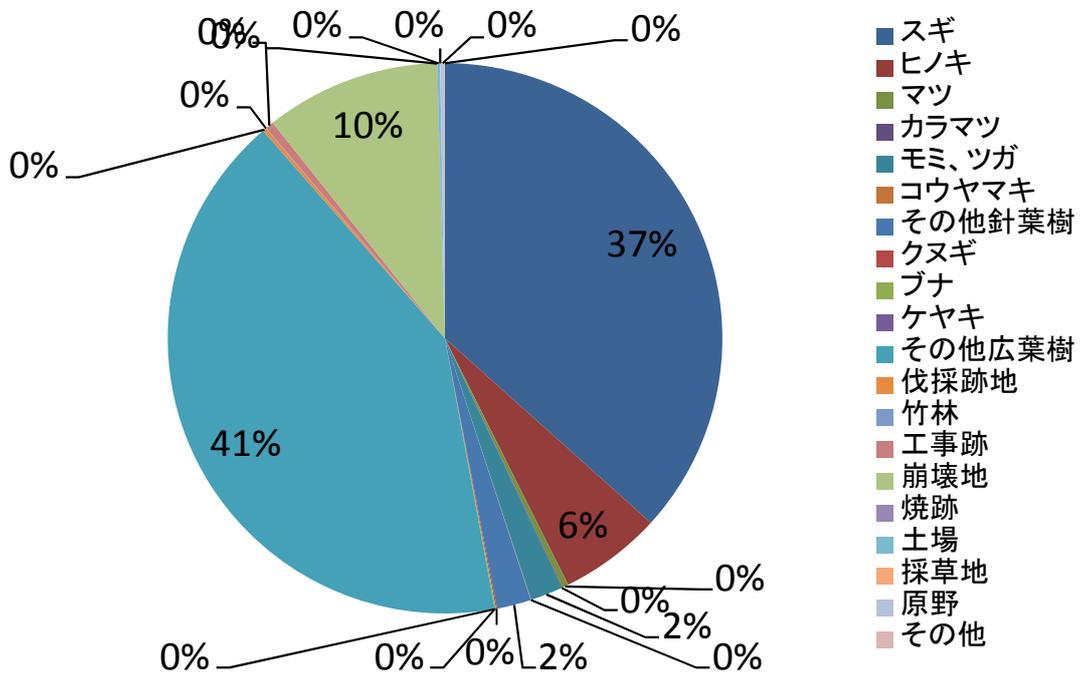
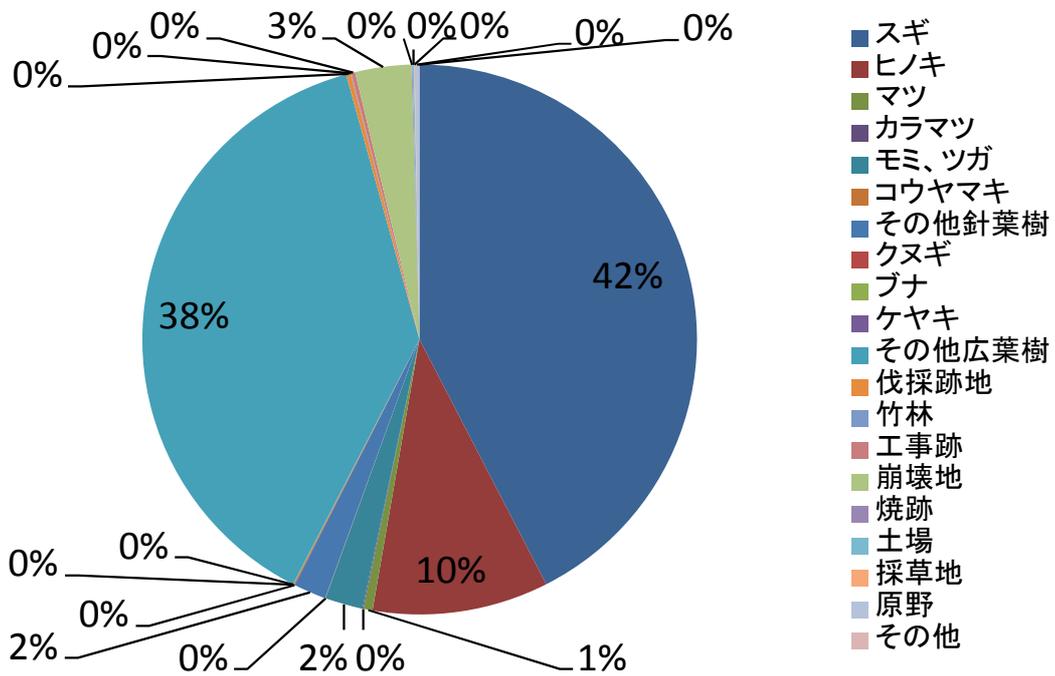


図4 樹種別林分面積割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

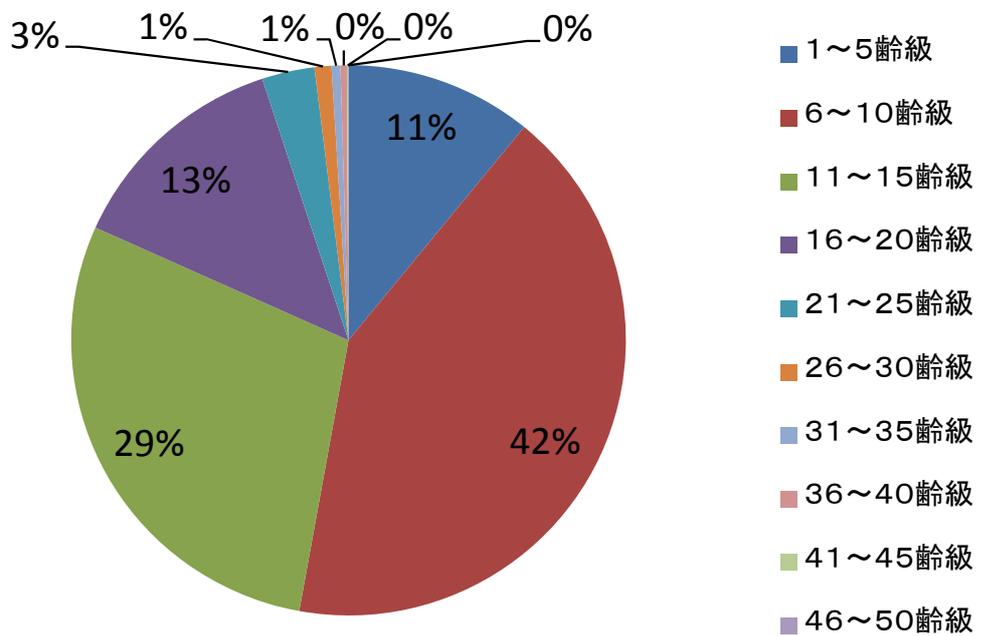
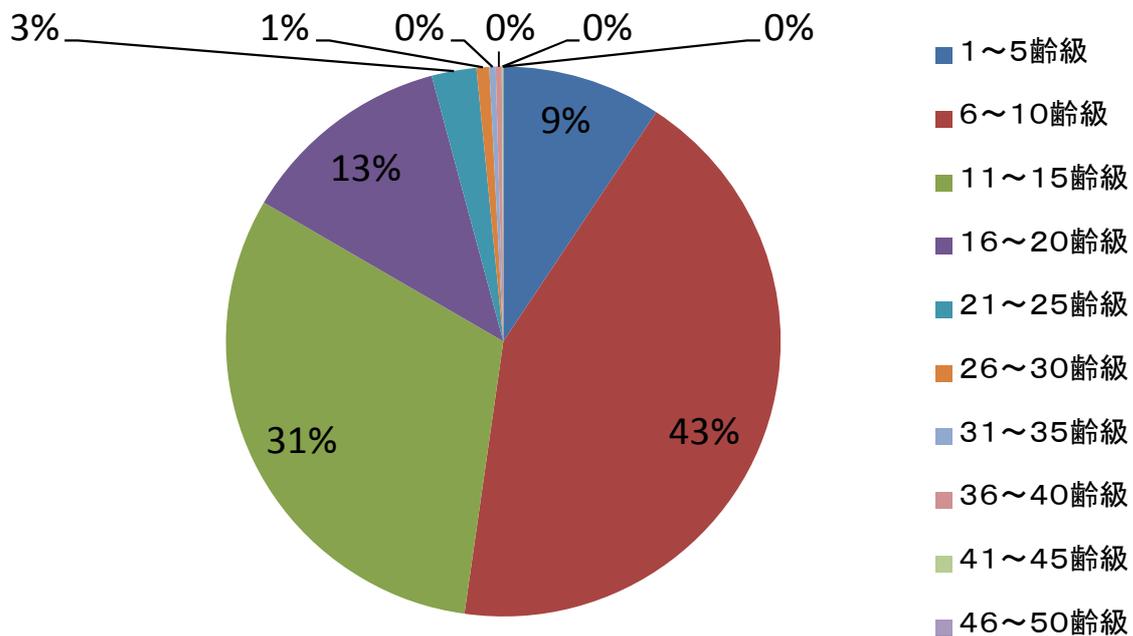


図5 齡級別林分数割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

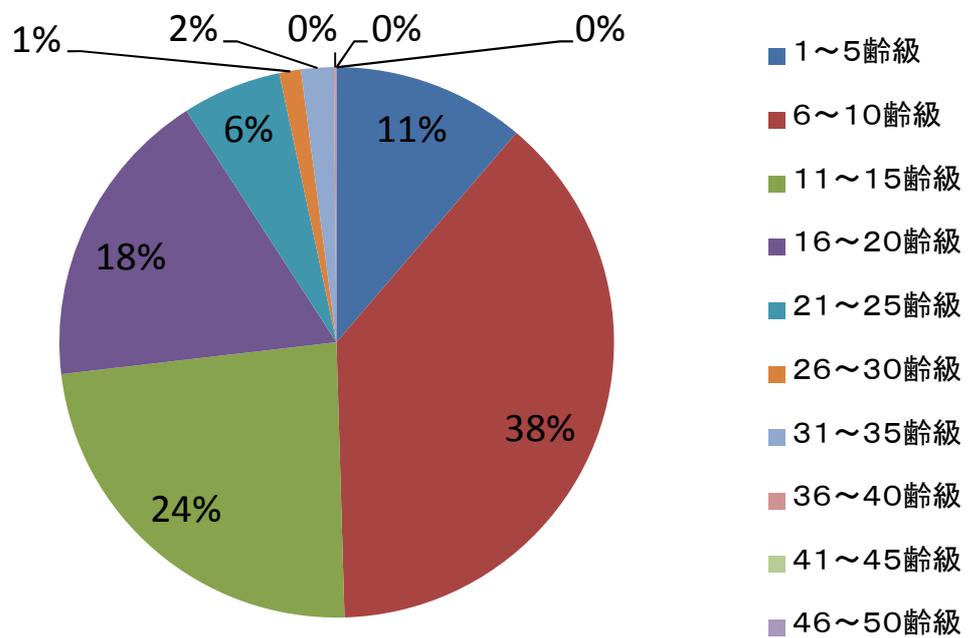
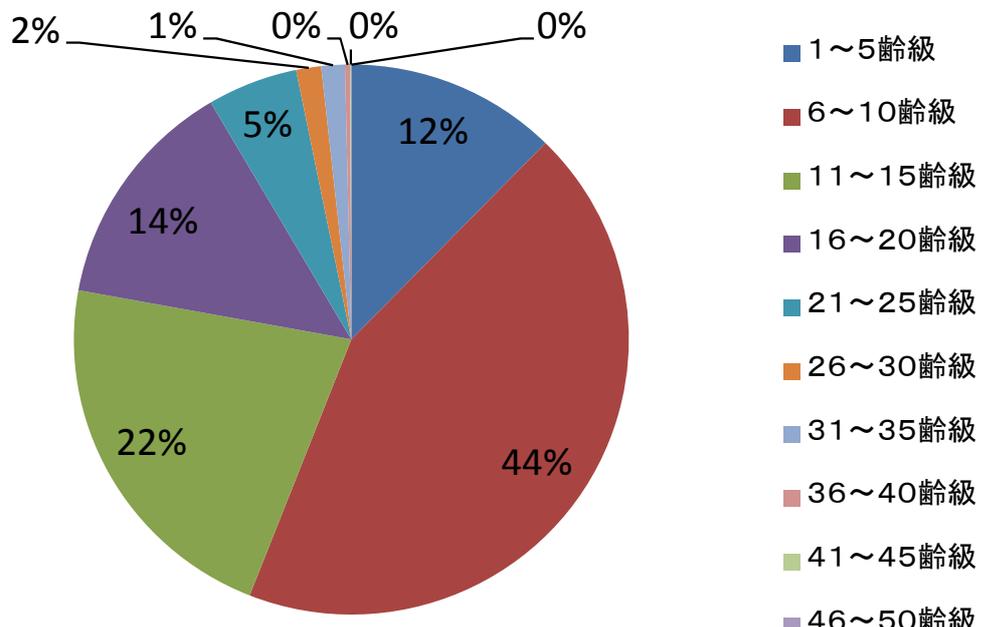


図6 齡級別林分面積割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

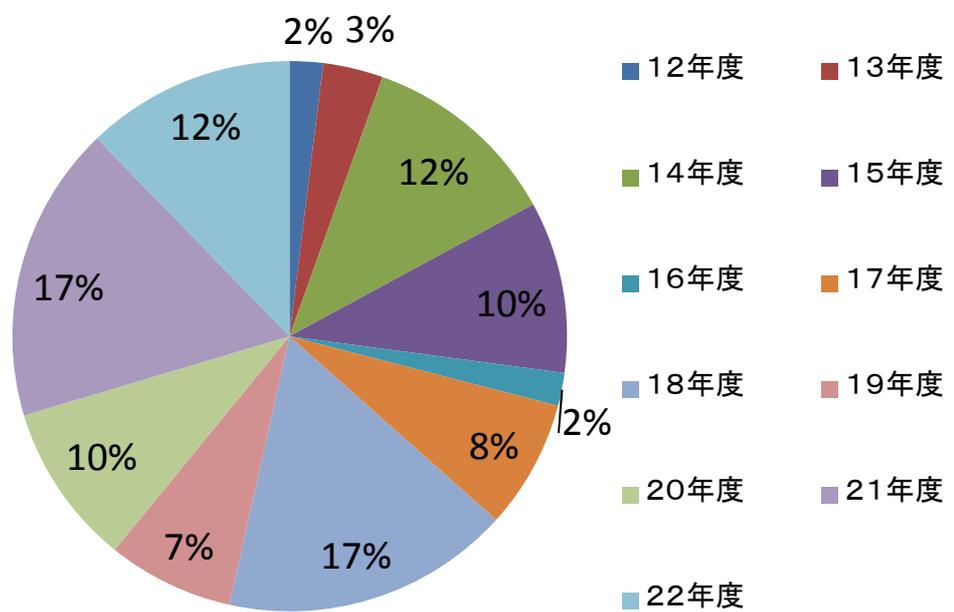
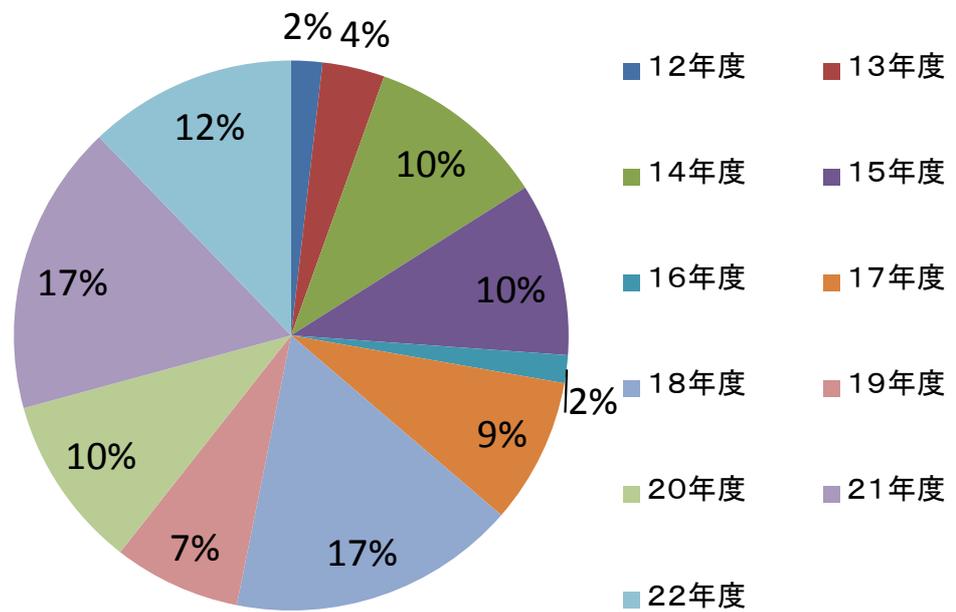


図7 間伐実施年度別林分数割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

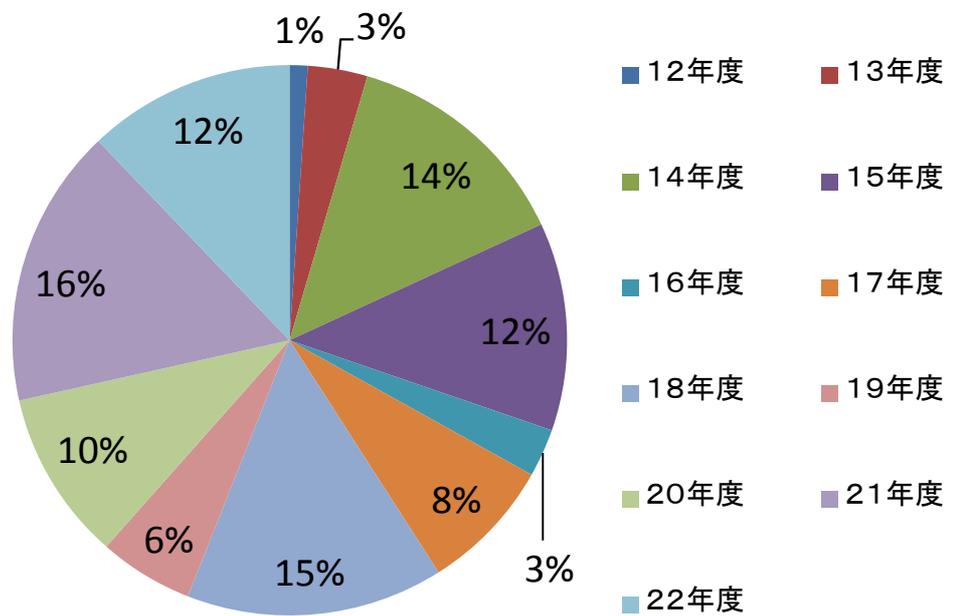
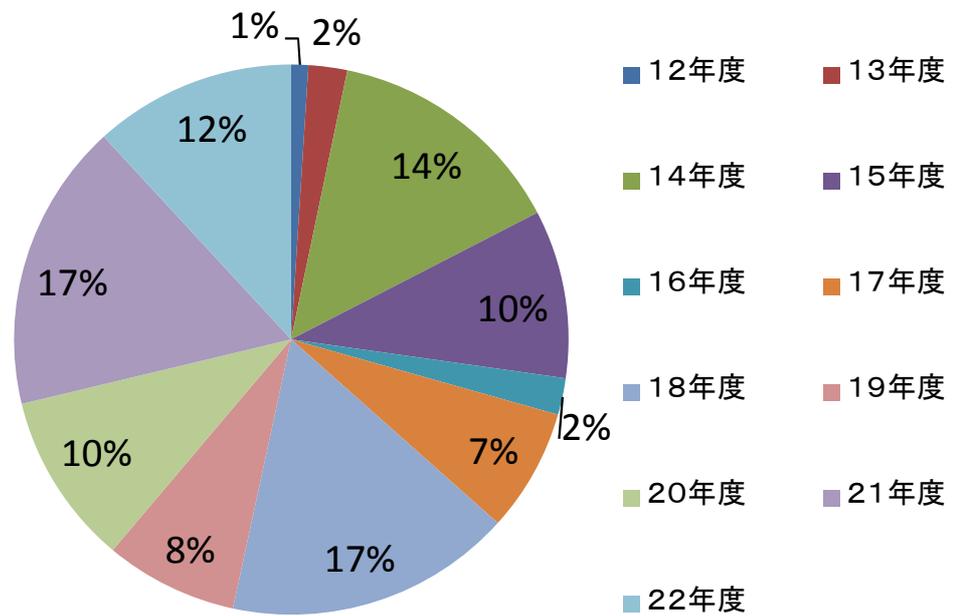


図8 間伐実施年度別林分面積割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

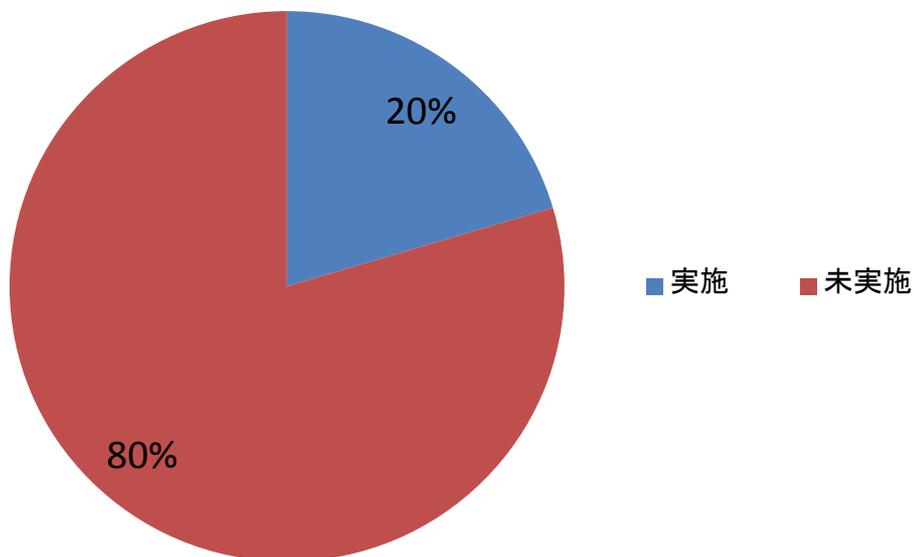
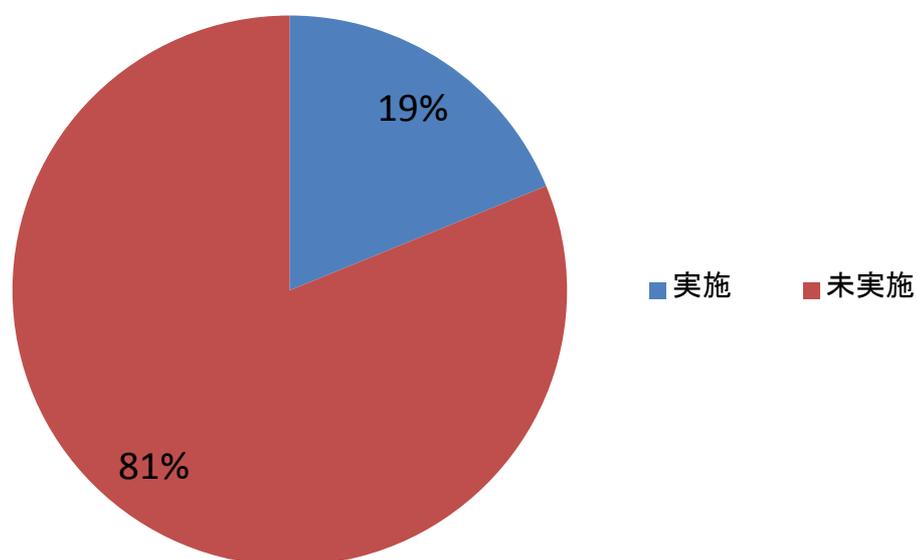


図9 間伐実施・未実施別林分数割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

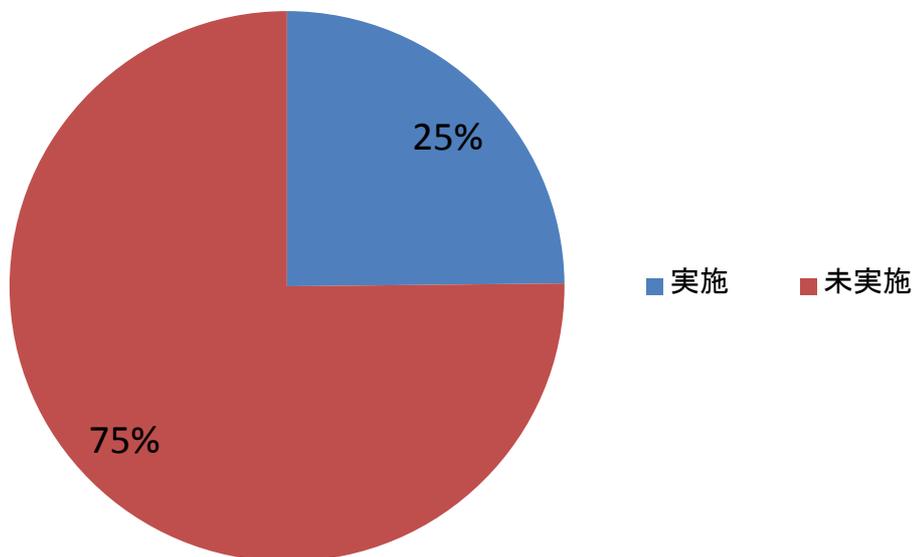
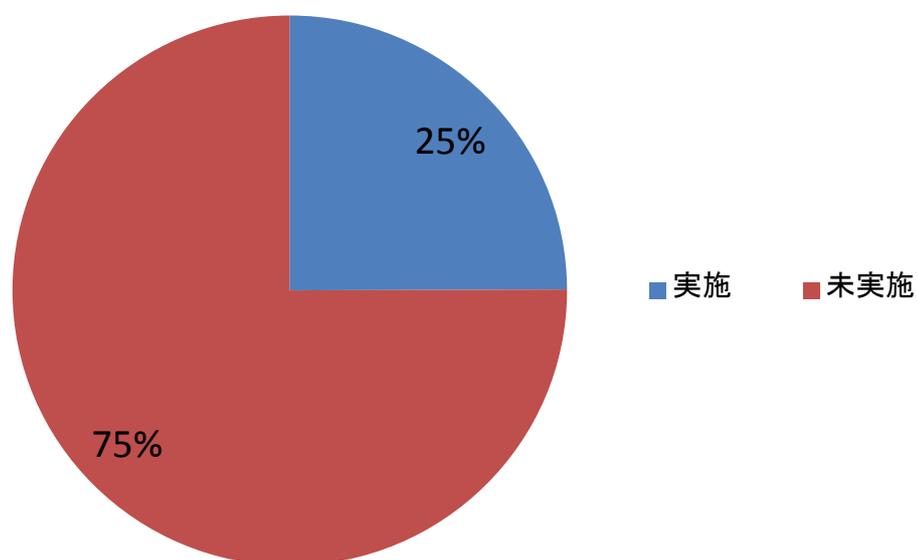


図10 間伐実施・未実施別林分面積割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

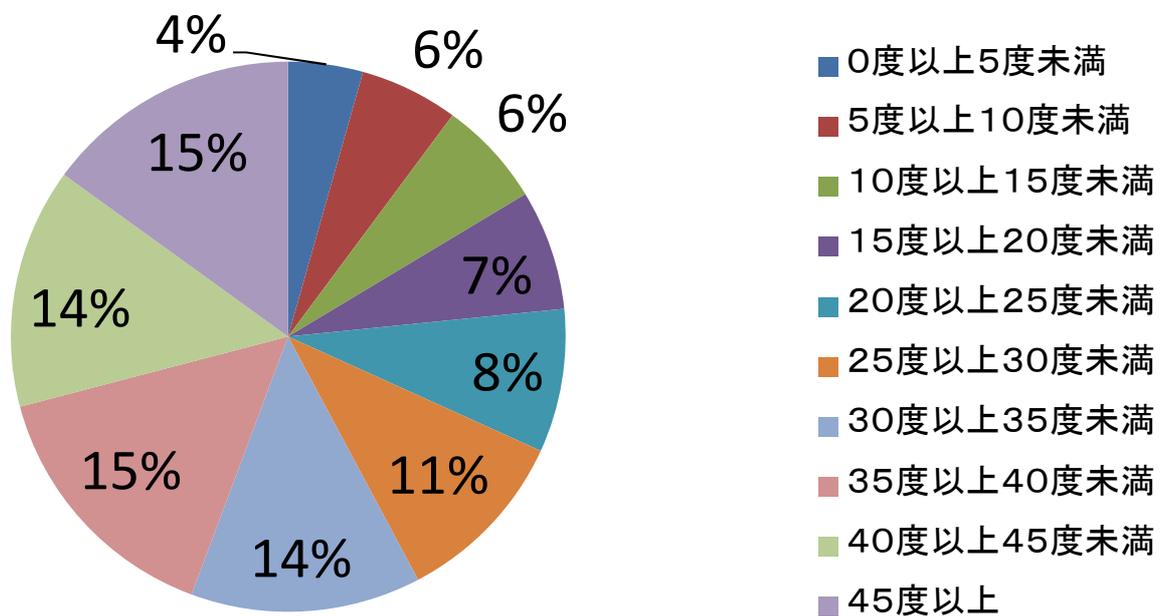
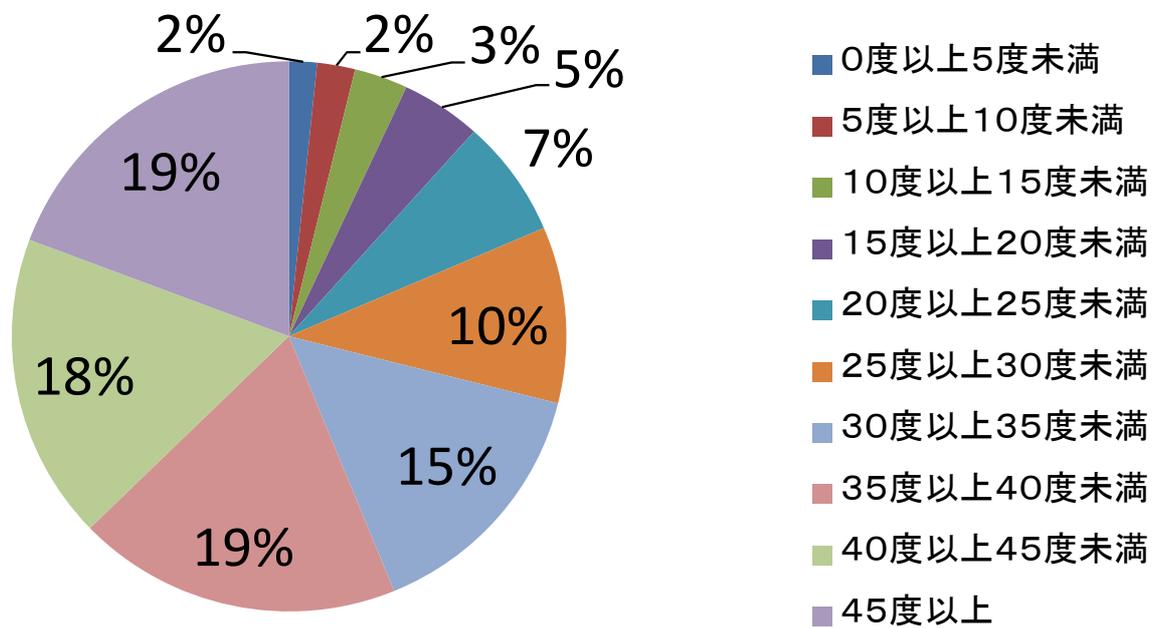


図11 傾斜角別セル数割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)

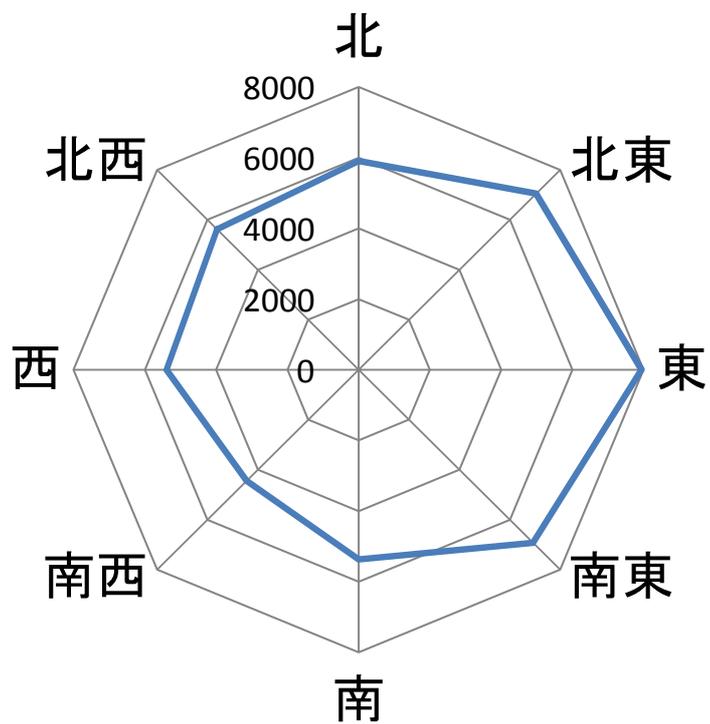
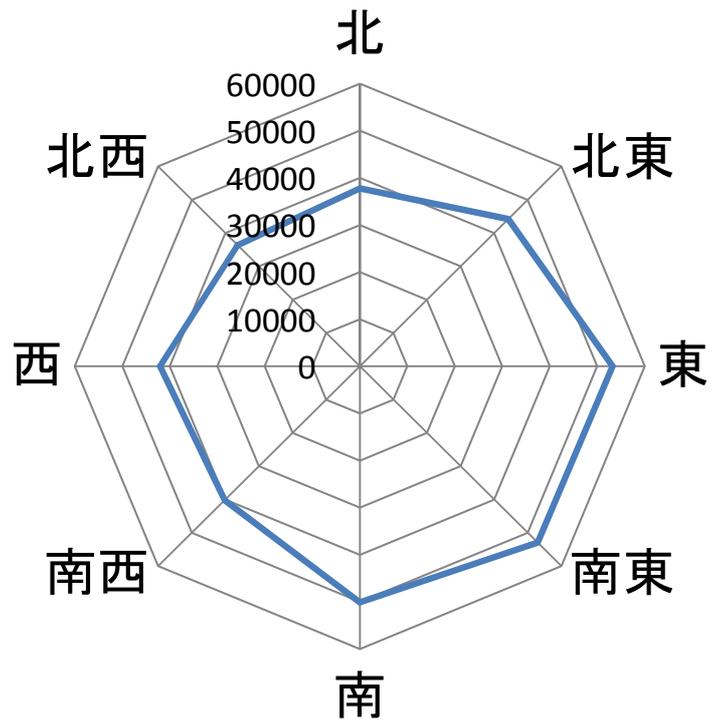


図12 斜面方位別セル数割合
(上:バッファ内、下:崩壊地内)