

山腹等における木製構造物の耐久性モニタリング調査

2005 年度～2009 年度

尾崎健一朗*1・鴨下直史・山本高也*1・大林育志

要 旨

治山工事で施工された残置型枠と柵工縦杭の劣化状況を継続的に調査するとともに、杭の強度試験と土壌が杭の劣化に与える影響を調査した。その結果、残置型枠はインサイジングを施した保存処理材で施工後 4 年経過後にほとんど劣化が進行していなかった。また、保存処理材は 3～6 年経過から部分的な劣化が認められたが、施工後 7 年目まで型枠の形状が大きく崩れるような劣化は認められなかった。一方、無処理材は施工後 2～3 年目から部分的な劣化が認められたが、施工後 4 年目まで型枠の形状が大きく崩れるような劣化は認められなかった。柵工縦杭は、無処理で施工後はほぼ 2 年目までに急激に曲げ強度が減少したが、スギの保存処理材では、施工後 4 年目まで大きな劣化は認められなかった。木材の劣化の速度や様式は、母材に由来する土壌の違いにより差が生じ、最も劣化が進行しやすい地際直下では土壌の粗孔隙量が多いほど劣化速度が大きかった。柵工等木材を地面に打ち込んで利用する際は、土壌条件の違いを考慮して保存処理の程度や点検・交換サイクルを決定する必要があると考えられた。

I はじめに

間伐材等木材の需要を拡大するためには、森林土木工事等外構材への利用を図る必要がある。しかし、木製構造物の耐用年数が明確でないことから、利用拡大の障害になっている。そこで、治山事業で施工された既設の木製構造物や、新規に施工される木製構造物の劣化状況を継続的に調査することにより、木材の耐久性を解明する。

II 方法

1. 残置型枠耐久性調査

(1) 既設施工地の実態調査

北設楽郡東栄町および豊根村で施工された残置型枠 10 箇所において、2005 年度から 2009 年度にかけて劣化状況を継続的に調査した（表-1、図-1）。型枠は、1 箇所を除いて直径 100 mm または

120 mm のスギ円柱加工材で施工され、CuAz 系薬剤による保存処理材（以下保存処理材）が用いられていた。調査は各年度の 10 月下旬以降に実施し、型枠の上部 3 段、中部 3 段、下部 3 段から合計 9～36 本の材を選び、1 本の材の 3～5 箇所でピロディン 6 J を 2 回ずつ打ち込み、2 回の打ち込み深さ（以下 Pr）を平均した。津島（2002）より健全なスギ円柱加工材の Pr が 30 mm を超えることは稀であることから、Pr が 30 mm 以上のときに劣化が進行していると判断した。また、2007 年度から 2009

表-1 残置型枠の既設施工地調査地

施工年度	町村	字	工種	方位	番号	保存処理
2002	東栄町	振草	家裏土留	北西	1	保存処理材
		振草	落石防護壁	南西	2	
2003	東栄町	三沢	家裏土留	南東	3	
		三沢	家裏土留	南西	4	
	豊根村	下田	家裏土留	東北東	5	
		振草	落石防護壁	南	6	
2004	東栄町	下田	山腹土留	南東	7	
		奈根	家裏土留	南	8	
		三輪	家裏土留	北西	9	
		三輪	家裏土留	南西	10	

Ken'ichiro OSAKI, Naofumi KAMOSHITA, Takaya YAMAMOTO, Yasuyuki OHBAYASHI: Durability of woody afforestation structures

本論文の一部は 2008 年度木材学会中部支部大会で発表した。

* 1 現新城設楽農林水産事務所

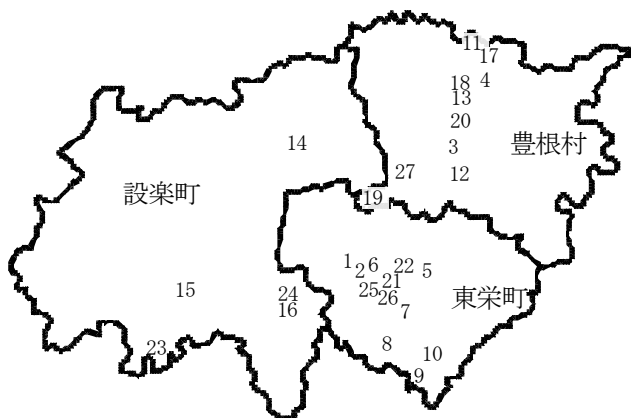


図-1 残置型枠の施工地位置

年度は表-2の雨宮(1963)の基準により、目視による被害度の評価を併せて行った。各被害段階の中間のものは0.5刻みとした。

表-2 目視による被害度

被害度	観察状態
0	健全
1	部分的に軽度の虫害または腐朽
2	全面的に軽度の虫害または腐朽
3	2の状態のうえに部分的にはげしい虫害または腐朽
4	全面的にはげしい虫害または腐朽
5	虫害または腐朽により形がくずれる

(2) 新規施工地のモニタリング調査

北設楽郡設楽町、東栄町および豊根村で施工された残置型枠17箇所において、2005年度から2009年度にかけて劣化状況を継続的に調査した(表-3, 図-1)。型枠は直径100mmスギ円柱加工材で施工され、施工地により保存処理の方法が異なり、インサイジングを施したCuAz系薬剤による保存処

表-3 残置型枠の新規施工地調査地

施工年度	町村	字	工種	方位	番号	保存処理	
2005	豊根村	三沢	家裏土留	南西	11	インサイジング	
		古真立	家裏土留	西北西	12		
		三沢	家裏土留	東南東	13		
		津具	家裏土留	南東	14		
		田内	家裏土留	東	15		
2006	豊根村	神田	家裏土留	西	16		
		三沢	家裏土留	西南西	17		
		三沢	家裏土留	東	18		
2005	東栄町	上黒川	家裏土留	南	19		無処理材
		三沢	家裏土留	南東	20		
		振草	落石防護壁	西南西	21		
2005	設楽町	振草	落石防護壁	南西	22		
		田峯	家裏土留	南西	23		
2006	東栄町	神田	家裏土留	西	24		
		振草	落石防護壁	南西	25		
		振草	落石防護壁	西南西	26		
2006	豊根村	上黒川	谷止	北東	27		

※調査地2は2007年度で調査を打ち切った。調査地24は円柱加工材でなく太鼓材を使用。

理材(以下インサイジング)、無処理材の2種類であった。調査方法は(1)と同様とした。

2. 木柵工耐久性調査

(1) 既設施工地の実態調査

新城市内で施工後3~6年が経過した柵工22箇所において、縦杭を1~2本ずつ抜き取り、曲げ強度試験を実施した(表-4, 図-2)。試験体は屋内で乾燥後、先付け部分を切断し、地際部分でPrを測定した。Prは劣化による表面の欠損分を加味した。曲げ試験は杭の地際部分を中央として、支点間距離800mm、荷重点間距離200mmの4点荷重で行った。曲げヤング係数と曲げ強度の計算にあたり、地際部分は劣化により断面が一部欠損していたため、杭の周縁が残存している他の部位から設置当初の寸法を推定した。供試した杭はスギ20本、ヒノキ24本で、対照として健全な丸太をそれぞれ3本ずつ加えた。杭の直径はスギが 93.9 ± 3.3 mm(平均 ± 1 s. e.)、ヒノキが 87.2 ± 2.7 mm(同)

表-4 柵工の既設施工地調査地

調査年度	施工年度	番号および字
2003	1	稲木, 2 稲木, 3 須長, 4 長篠, 5 副川
	2004	6 須長, 7 市川, 8 愛郷, 9 高松, 10 高松
2007	11	豊栄, 12 出沢, 13 吉川, 14 黄柳野
	2005	15 上吉田, 16 富栄, 17 木和田
2009	2006	18 菅沼, 19 田原
	2006	20 川路, 21 富栄, 22 四谷

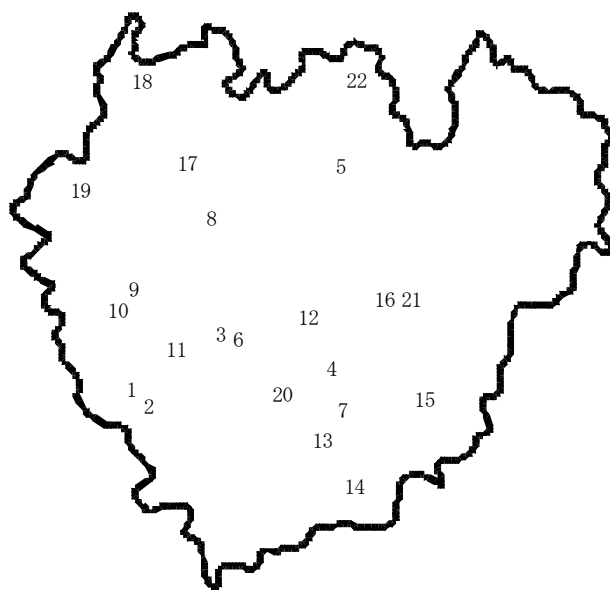


図-2 既設施工地の調査位置(新城市)

だった。

(2) 新規施工地のモニタリング調査

ア. 杭のモニタリング調査

新城市で 2005 年度と 2006 年度に施工された 9 箇所の柵工において、2005 年度から 2009 年度に劣化状況を継続的に調査した（表-5、図-3）。柵工はスギ・ヒノキ丸太からなり、5 箇所は CuAz 系薬剤による保存処理材と無処理材を併用、4 箇所は無処理材のみを使用していた。調査は各年度の 10 月下旬以降に実施し、縦杭について頂頭部から 10cm 下、地際部、地際から 50 cm 下の地中部の 3 箇所で Pr と被害度の測定を行った。Pr は各箇所で 3 点測定の前平均、被害度で各段階の中間のものは 0.5 刻みとした。

表-5 柵工の新規施工地

施工年度	施工地	母材	保存処理	樹種	記号
2005	鴨ヶ谷	石英閃緑岩	無	スギ・ヒノキ	A
	中島	片麻岩	無 有	スギ・ヒノキ スギ・ヒノキ	B
	豊島	豊川層群	無 有	スギ・ヒノキ スギ・ヒノキ	C
	豊栄	石英閃緑岩	無	スギ	D
	須長東	石英閃緑岩	無	スギ・ヒノキ	E
	須長西	石英閃緑岩	無	スギ・ヒノキ	F
2006	富栄	設楽層群	無 有	スギ スギ	G
	川路	緑色片岩	無 有	スギ・ヒノキ スギ	H
	四谷	設楽層群	無	スギ・ヒノキ	I
			有	スギ・ヒノキ	

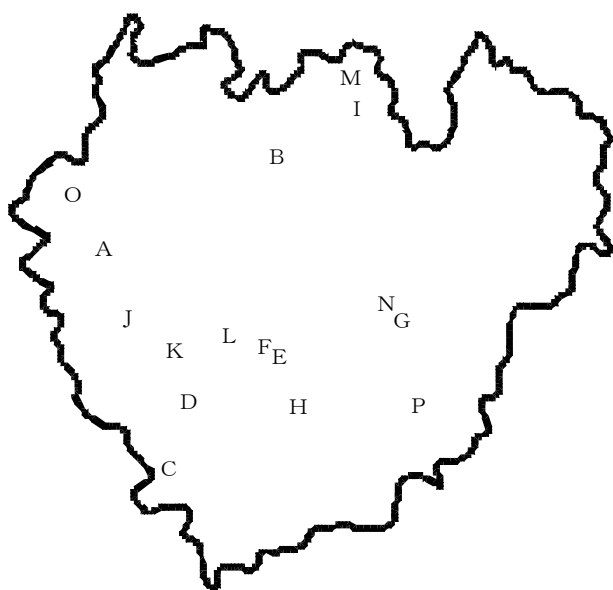


図-3 新規施工地及び土壌の調査位置（新城市）

イ. 土壌が木材の劣化に与える影響

新城市内で施工後 5 年経過した柵工施工地から母材別に 7 箇所を選び、2008 年 5 月から 7 月に調査を行った（表-6、図-3）。また、2009 年 5 月に 2. (2) ア. の調査地において同様の調査を行った。各施工地でスギ製の杭を 1～2 本抜き取り、地際から地上および地中方向へ 10 cm 刻みで鋸断し、105℃で 24 時間乾燥後、全乾密度を測定した。劣化により断面が欠損している部位の密度算出には、杭の周縁が残存している他の部位から設置当初の寸法を推定して用いた。地際と地中 50 cm の断面を観察し、劣化様式を次の 3 区分とした。

- A：褐色腐朽や虫害を受けているもの
- B：白色腐朽を受けているもの
- C：劣化がほとんど進行していないもの

土壌は国有林野土壌調査法に基づいて断面形態を調査するとともに、400 cc 採土円筒で表層から 1～15 cm 深の土壌を採取し、物理性の測定に供した。

表-6 土壌調査地

施工年度	施工地	母材	記号
2003	保永	石英閃緑岩	J
	豊栄	石英閃緑岩	K
	須長	石英閃緑岩	L
	四谷	設楽層群	M
	富栄	設楽層群	N
	田原	片麻岩	O
	上吉田	黒色片岩	P

III 結果と考察

1. 残置型杭耐久性調査

(1) 既設施工地の実態調査

施工地ごとの Pr 階級区分割合の推移を図-4 に示した。保存処理材では 3～6 年目から打ち込み深さの増加が目立ってくる箇所と、ほとんど劣化が認められない箇所があり、一定の傾向は認められなかった。一部の調査地で年ごとに値の変動が認められたが、気象条件による木材表面の状態の違いや、ピロディンによる測定に含まれる誤差に

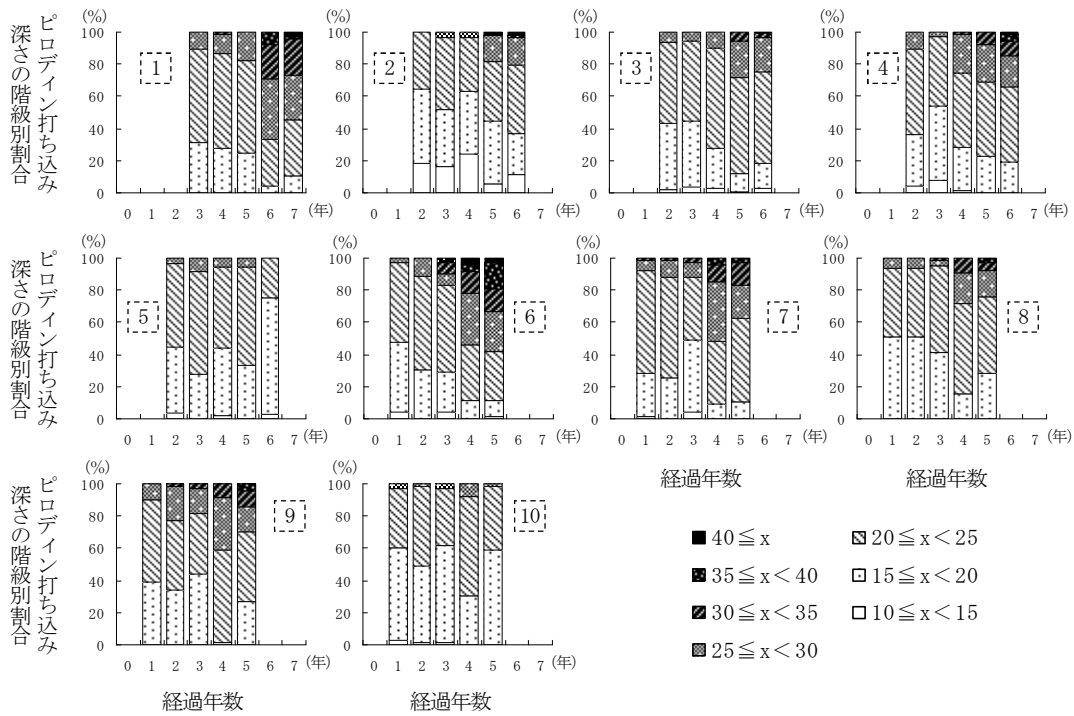


図-4 既設施工地におけるピロディン打ち込み深さ階級別割合の推移

よるものと考えられた。

上部・中部・下部の別の、Pr が 30 mm 以上の測定部位の割合を図-5、経過年別の被害度の出現割合を図-6に示した。保存処理材では2、4、7

など下部で劣化部位の多い箇所、1、6のように全体的に劣化が進行している箇所、8のように中部で劣化が進行している箇所などばらつきがあった。保存処理材では3年から7年経過のいずれに

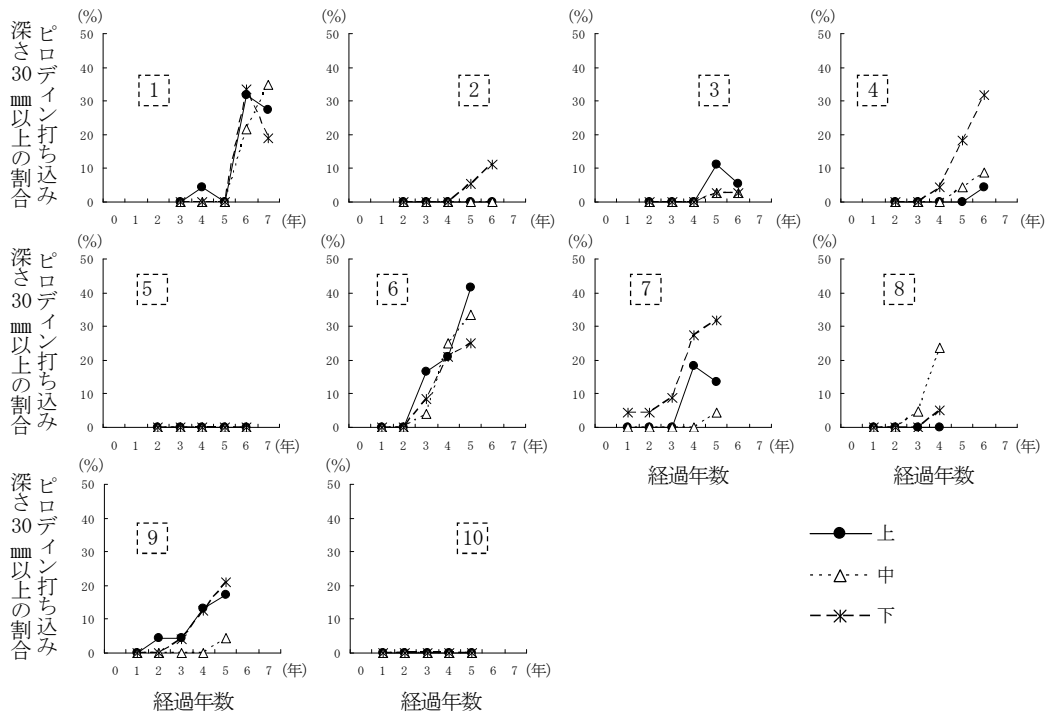
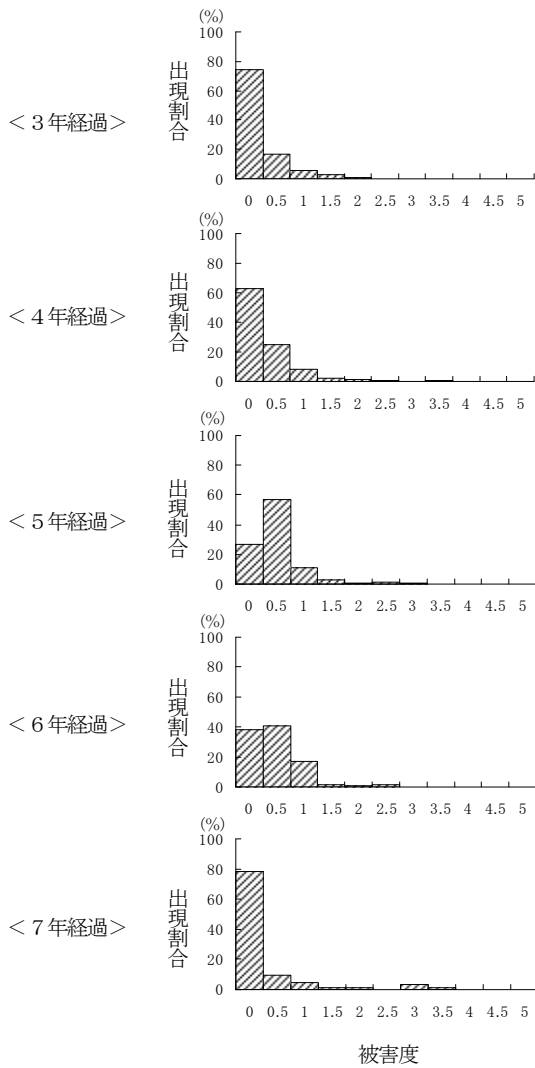


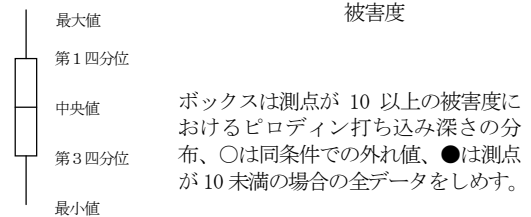
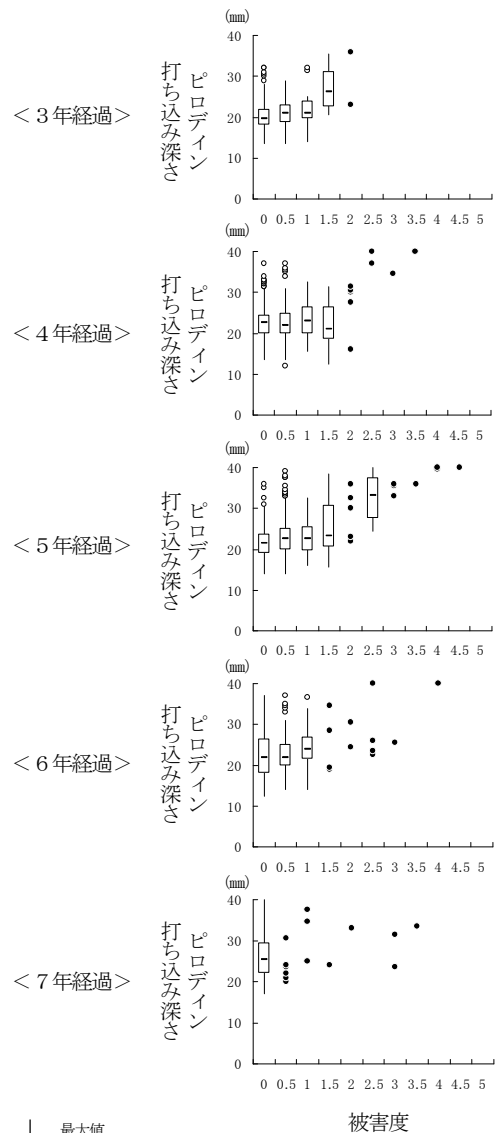
図-5 既設施工地における測定位置別に見たピロディン打ち込み深さ 30 mm 以上の割合の推移



図一六 既設施工地における被害度の出現割合

においても測点の8割以上が被害度1未満であるものの、被害度2から3.5がいくらか認められる状態だった。これらの要因として、保存処理材では保存剤の浸潤が不十分であった部分が存在したために部分的に劣化が進行したことが考えられた。

図一七に、被害度とPrの対応がある測点について、両者の関係を経過年別に示した。被害度が大きい測点では、Prも大きい傾向が認められた。一方、被害度が1未満の測点では打ち込み深さの分布の中心は20mm台前半にあるものの、35mm程度の最大値や、30mm台の多くの外れ値が認められた。低い被害度・高いPrは4年目以降で比較的多く観察された。このことから、表面上は健全であって



図一七 既設施工地における被害度とピロディン打ち込み深さの関係

も、内部で劣化が進行している場合があることが示唆された。また、保存処理材で保存剤が奥深くまで十分に浸潤せず効果が表面近くにとどまったことが推察された。以上のことから、保存処理剤は4年程度で劣化の進行が進む場合があり、さらに長期的に供用することで健全な部分と劣化部分との差が大きくなると考えられた。

(2) 新規施工地のモニタリング調査

施工地ごとのPr階級区分割合の推移を図-8に示した。インサイジングでは、Pr 30 mm以上は最長の4年経過後でほとんど認められなかった。無処理材では、施工後2～3年からPrが増加してくる傾向が認められ、全ての箇所では35 mm以上が出現するなど、全体として劣化が進行していた。一部の調査地で年ごとに値の変動が認められた。これは気象条件による木材表面の状態の違いや、ピロデインによる測定に含まれる誤差によるものと考えられた。

上部・中部・下部の別の、Prが30 mm以上の測定

部位の割合を図-9、経過年別の被害度の出現割合を図-10に示した。インサイジングでは、劣化部位の増加傾向は認められなかった。無処理材では21、22、26で全体的に劣化が進行していたが、その他は様でなかった。インサイジングは4年経過後で表面の劣化がほとんど劣化が進行していなかった。一方、無処理材は施工後2年目まで8割以上が1未満と軽微であったが、その後は4年目にかけて表面での劣化が全体的に進行していた。この要因として、無処理材ではいずれの部位でも劣化の可能性があること、インサイジングでは前処理により保存剤が全体に浸潤したため劣化が進

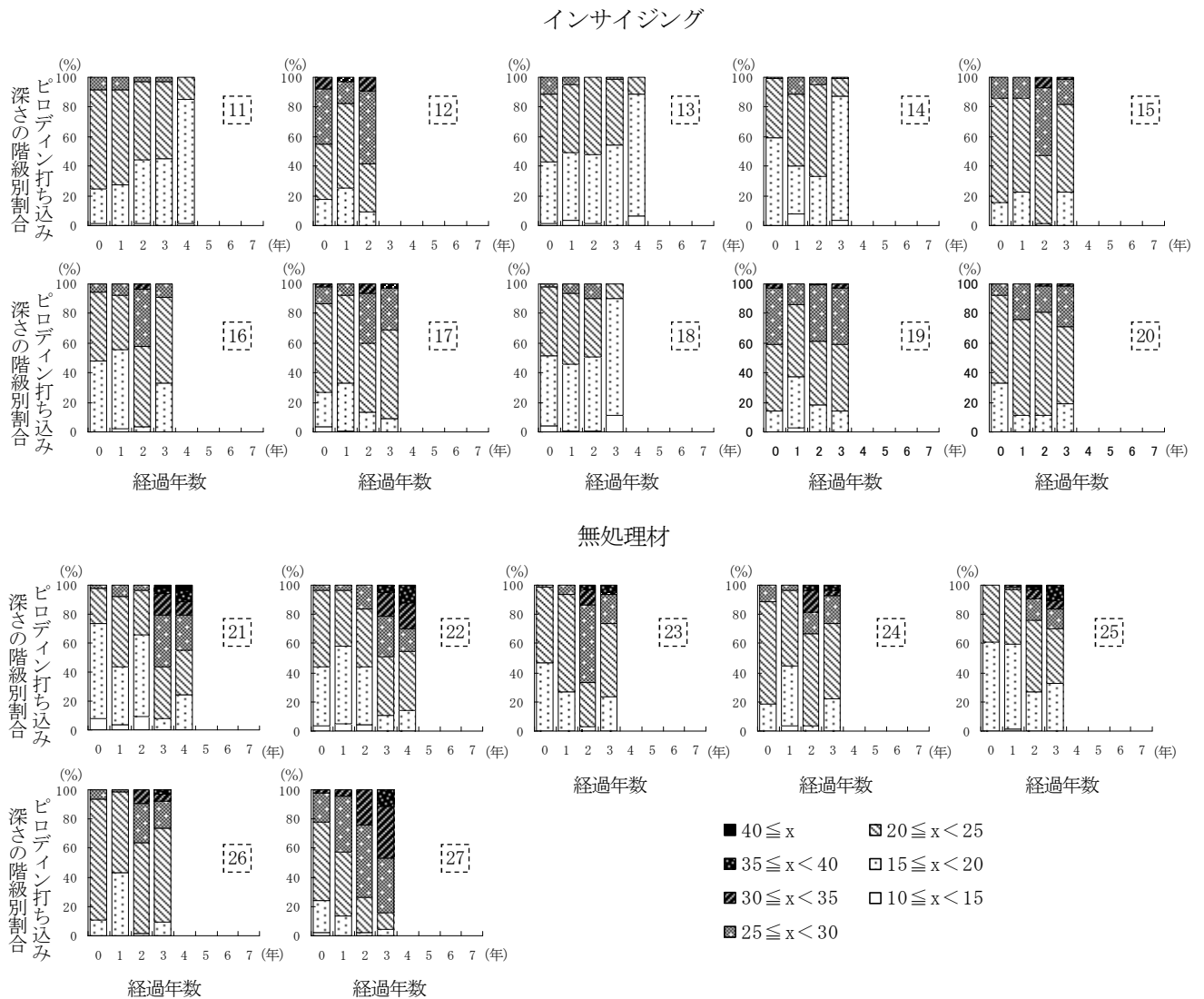


図-8 新規施工地のピロデイン打ち込み深さ階級別割合の推移

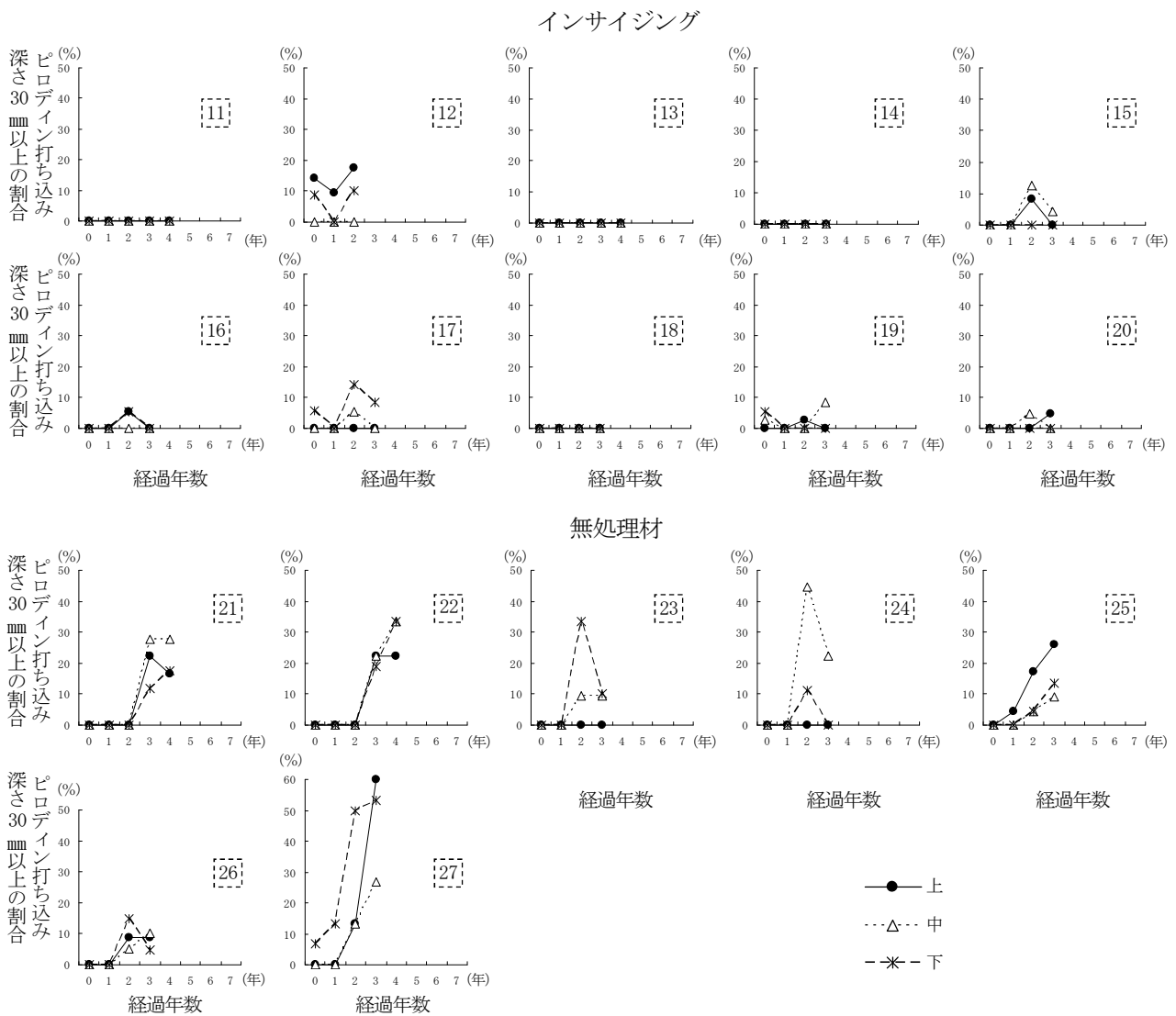


図-9 新規施工地における測定位置別にみたピロディン打ち込み深さ 30mm 以上の割合

行しなかったことが考えられた。

被害度と Pr の対応がある測点について、両者の関係を経過年別に図-11 に示した。(1)と同様に、被害度が大きい測点では Pr も大きい傾向が認められ、被害度が 1 未満の測点では打ち込み深さの分布の中心は 20 mm 台前半にあるものの、35 mm 程度の最大値や、30 mm 台の多くの外れ値が認められた。低い被害度・高い Pr は無処理材の 3 年目で比較的多く観察された。このことから、表面上は健全であっても、内部で劣化が進行している場合があることが示唆された。また、無処理材では表層が乾燥しやすく腐朽菌の成育に不適であったために劣

化の進行が内部から始まったことが推察された。

以上のことから、残置型枠は一部で表面の劣化が進行しており、保存処理の方法によってその様相が異なることが明らかとなった。ただし、今回調査を行った範囲では、形状が大きく崩れるような劣化を起こしているものは認められなかった。「南から南西向き・落石防護柵」で全体的に劣化が進行しやすいことが推察された。これらの調査地は日光を遮るものがほとんど無く日当たりが良い条件にあり、劣化が進行しやすい要因として腐朽菌が生育できる温度条件の期間が長くなることや、乾湿の繰り返しが激しいことによる干割れの

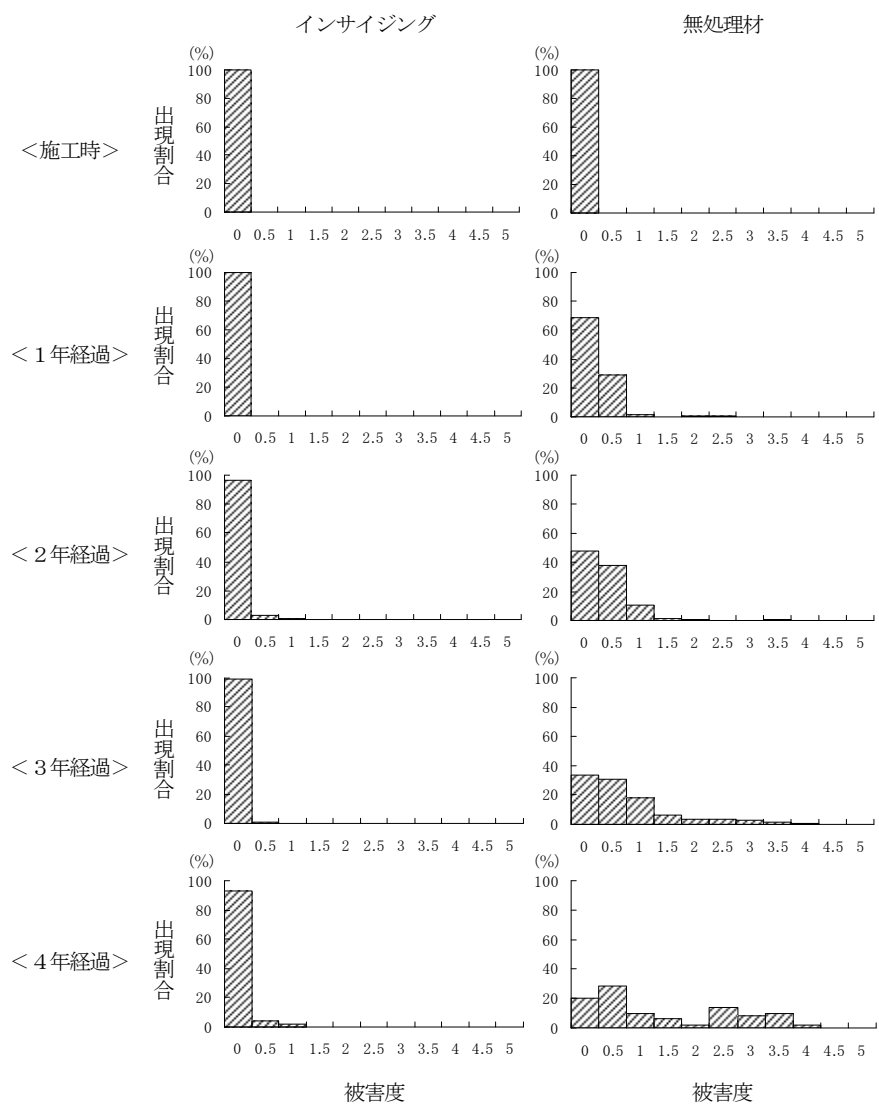


図-10 新規施工地における被害度の出現割合

ため水分が滞留しやすいこと、さらに保存処理材においては干割れにより保存剤の未浸潤部分が露出しやすかったことが考えられた。

今回の劣化調査で用いた方法は、いずれも最大で表側半分程度までを測定範囲としている。しかしながら、型枠は端部の木口を観察すると、裏側半分の辺材部が含水率の高い状態にあることがしばしば観察されたため（写真-1）、乾燥しがちな表側よりも腐朽菌等の生育環境として良好で、劣化は裏側から進行する場合もあると考えられた。したがって、一見して健全と見られる型枠でも内部の劣化に注意する必要がある。



写真-1 残置型枠の端部

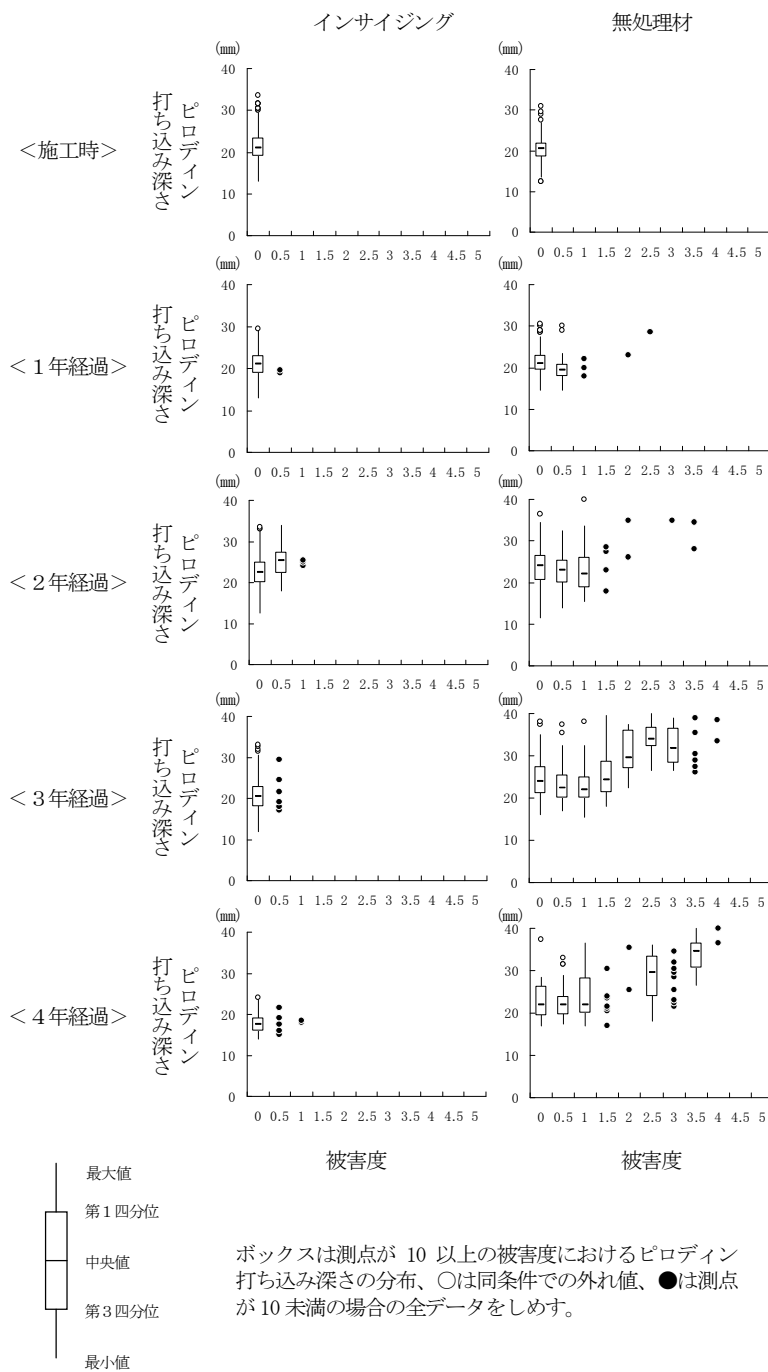


図-11 新規施工地における被害度とピロディン打ち込み深さの関係

2. 柵工調査

(1) 既設施工地の実態調査

杭の地際部におけるPrと杭の曲げ強度の関係を図-12、施工後の経過年数と杭の曲げ強度の関係を図-13に示した。スギ、ヒノキともにPrが増加するにしたがい曲げ強度は小さくなる傾向が認め

られた。また、曲げ強度は劣化の初期に著しく減少していた。さらに、スギ、ヒノキのいずれも時間の経過とともに曲げ強度が小さくなる傾向が認められた。ただし、施工後1年と2年は調査結果がないため、この期間に曲げ強度が減少する経過を直接知ることはできなかった。これらのことか

ら、無処理の丸太杭ではPrが高い値を示さなくとも、最長で3年後には曲げ強度が著しく減少すると考えられた。

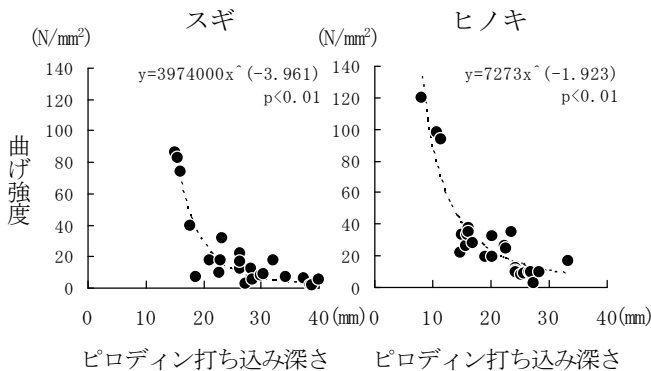


図-12 地際部におけるピロディン打ち込み深さと杭の曲げ強度の関係

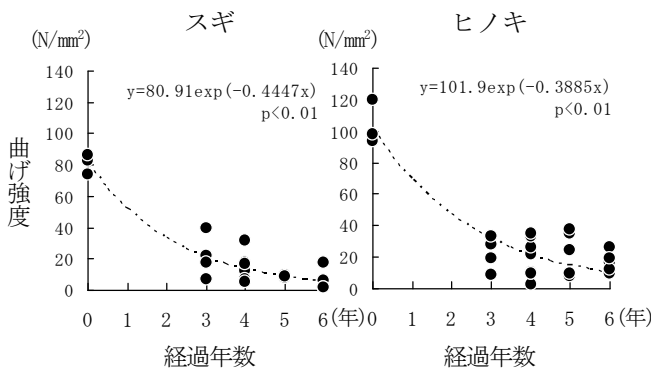


図-13 経過年数と杭の曲げ強度の関係

(2) 新規施工地のモニタリング調査

ア. 杭のモニタリング調査

スギおよびヒノキ製杭のPrの推移を図-14に示した。スギでは無処理材の頂部において、施工後1～2年程度でPrの増加は緩やかだったが、地際部においては急激に増加しており、劣化が施工後間もない段階で進行していた。地中部においては、施工後まもなくから劣化が進行したのから川路のように3年経過後でもほとんど劣化が進行していないものまでばらつきが大きかった。一方、保存処理材では頂部と地中部で4年経過後でも劣化がほとんど進行していなかった。地際部では豊島や富栄でPrが緩やかに増加していたが、最大でも4年経過後の豊島で約28mmだった。ヒノキでは無

処理材の頂部で、全体にスギと似たような傾向を示したが、Prの増加が緩やかで、特に豊島はほとんどPrが増加しなかった。地際部は1～2年目で頂部よりもPrの増加が大きかったが、頂部と同様にスギより小さかった。地中部もスギと同様だったが、Prの増加は小さかった。保存処理材についてはスギとほぼ同様の傾向で、地際部でPrがやや増加していた。2(1)において、施工後1～2年での曲げ強度の減少過程が不明であったが、地際部における施工後2年までのPr増加量はスギ製杭で3年以降より大きく、ヒノキ製杭では3年以降とほぼ同等であったことと、Prと曲げ強度の関係において初期の曲げ強度減少が著しかったことから、特に施工後1～2年の間に曲げ強度の減少が大きく、短期間で曲げ強度は大きく減少すると推察された。

無処理材と保存処理材の両方が使用された調査地について、保存処理の有無別にスギおよびヒノキ製杭のPrを図-15に示した。頂部では施工後2、3年目、地際部では1年目以降、保存処理材が無処理材よりも小さかった。地中部では明瞭な違いが認められたのは2年目のみだったが、おおむね保存処理材が無処理材を下回った。ヒノキでは全体に無処理材が保存処理材を上回ったものの、有意な違いは認められなかった。これらのことから、スギでは施工後1年後から保存処理の効果が発揮されていると考えられた。また、ヒノキは一般にスギより高い耐久性を有することから、保存処理の効果が明瞭に現れなかったものと考えられた。ただし、4年目で無処理材と保存処理材の違いは3年目よりも大きくなっており、これ以降に違いが表れる可能性は多分にあると推察された。

イ. 土壌が木材の劣化に与える影響調査

杭の密度を部位別に図-16に示した。調査地ごとにばらつきがあったものの、全体としては地際直下で最も材の密度が小さく、劣化が進行してい

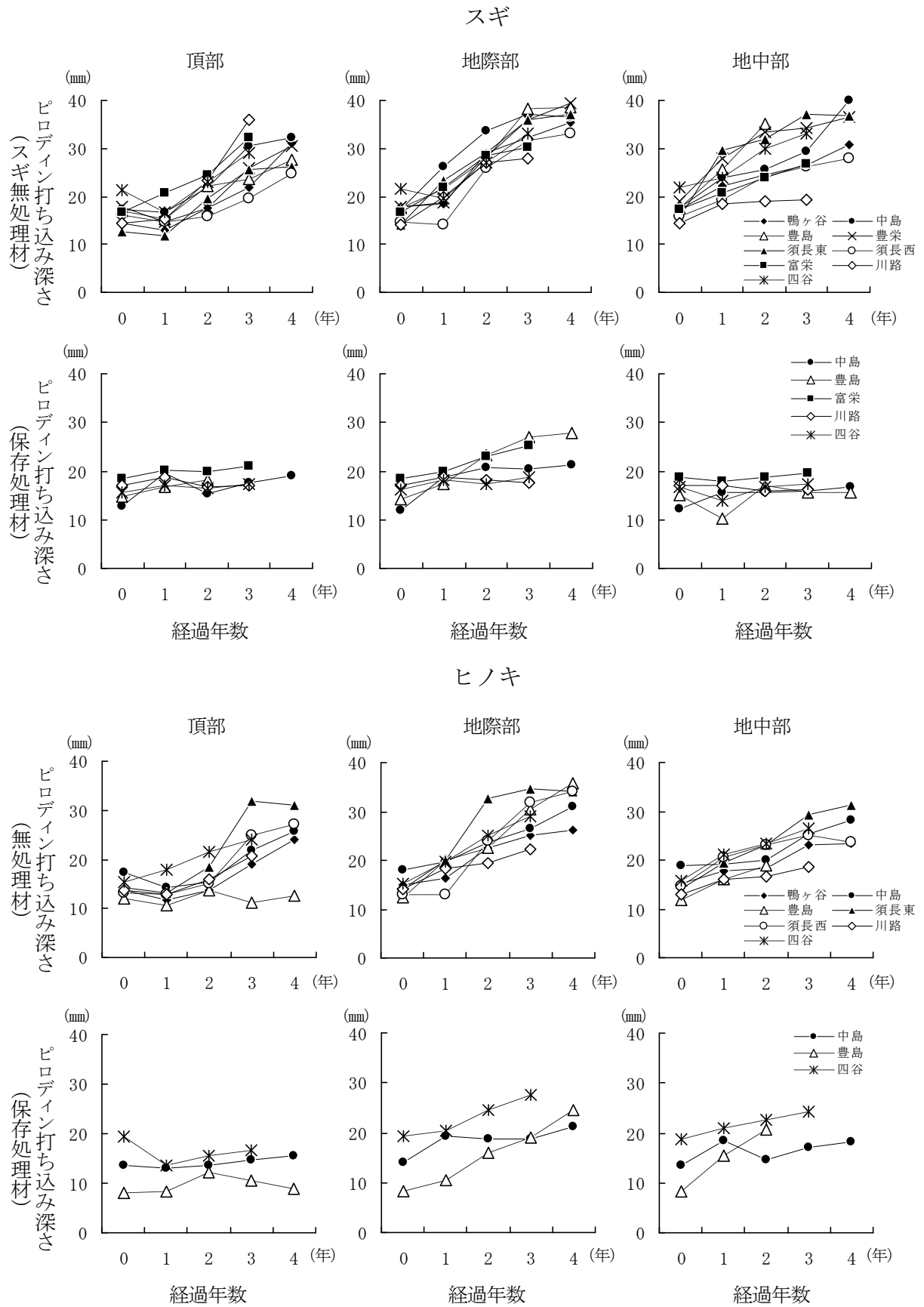
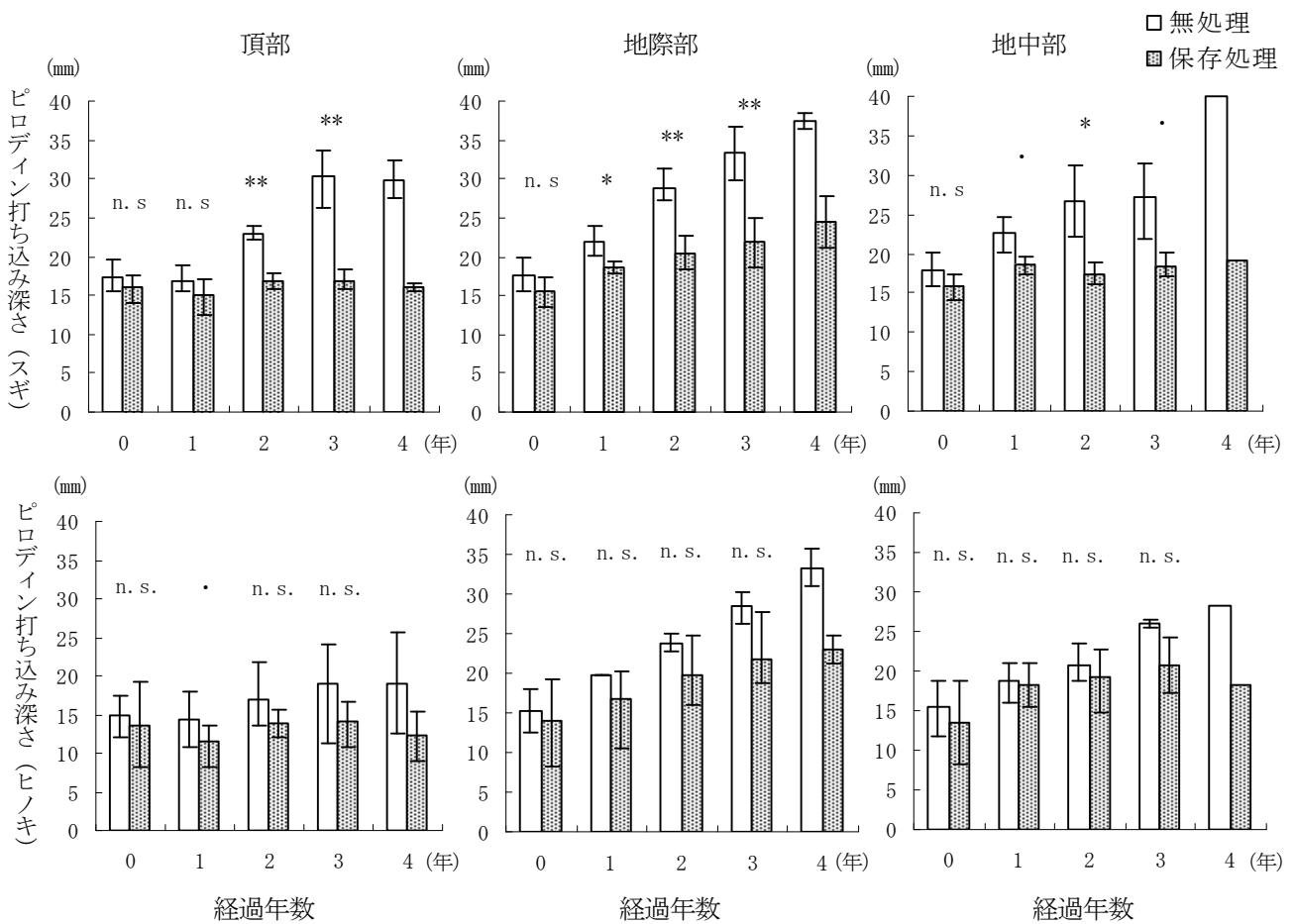
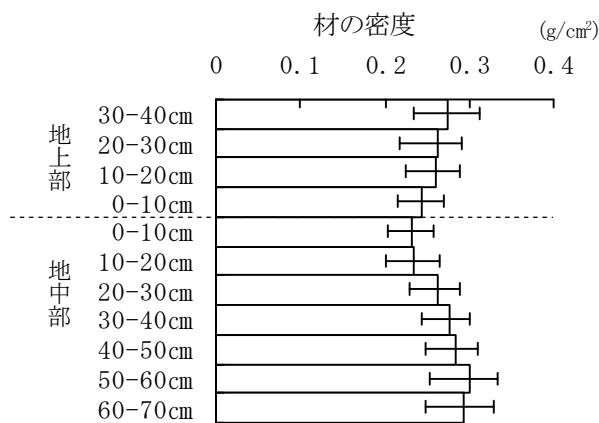


図-14 ピロディン打ち込み深さ平均値の推移



棒は平均値、誤差線はブートストラップ法により 10000 回抽出した標本に基づく 95%信頼区間をしめす。各経過年の上の印は対応のある t 検定の結果をしめす (n. s. : $p > 0.01$, . : $p < 0.1$, * : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$)。該当する調査地が 3 点未満の項では信頼区間の推定あるいは検定をおこなわなかった。

図-15 無処理材、保存処理材別のピロディン打ち込み深さの推移



各経過年で 3 地点以上のデータがある部位について、棒は平均値、誤差線はブートストラップ法により 10,000 回抽出した標本に基づく 95%信頼区間をしめす。

図-16 杭の部位別密度

ることが認められた。この部位の劣化速度に影響を与える土壌物理性として、粗孔隙量、細孔隙量、採取時含水量（細土）、採取時含水量（容積）が予想された（表-7）。そこで、杭の 0~10 cm 深の材密度を応答変数、施工後の経過年数および表-7 の土壌物理性を説明変数として重回帰式を作成し、AIC を基準として変数選択を行った。その結果、次式を得た。

表-7 0-10 cm 深の材密度と土壌物理性の値

	最小	中央値	最大
0-10cm 深の材密度	0.09	0.23	0.37
細孔隙量 (%)	17.03	26.23	37.00
粗孔隙量 (%)	3.13	27.14	38.89
採取時含水率 (細土)	24.86	39.67	68.82
採取時含水率 (容積)	18.32	30.41	40.45

$$D = 0.589837 - 0.063880y - 0.003759CP$$

D : 材密度、y : 経過年数、CP : 粗孔隙量

上式より、表-7の範囲内では材密度は経過年数の増加にしたがって低下するとともに、土壌の粗孔隙量が多いほど低下することから、粗孔隙量の多い土壌ほど劣化の進行速度が速いことが認められた。粗孔隙量は土壌の通気性に影響することから、通気性の良好な土壌において好気性生物の活動が活発になり、劣化の進行速度が速いことが推察された。

母材別の細孔隙量と粗孔隙量を図-17に示した。石英閃緑岩や片麻岩では細孔隙量が少なく、粗孔隙量が多く、設楽層群ではその逆の傾向が認められた。調査地点は1つのみであるが、第四紀豊川層群では石英閃緑岩および片麻岩と同様の傾向で、黒色片岩は細孔隙量、粗孔隙量ともに少なかった。緑色片岩は中間的な位置づけで明確な傾向は認められなかった。これら母材別の特徴は、森林土壌における母材と孔隙量の関係とよく類似しており、柵工施工地においても土壌は母材の影響を強く受

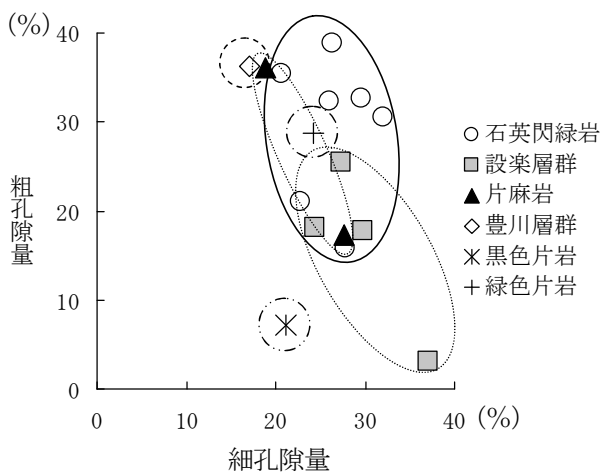


図-17 施工地ごとの細孔隙量と粗孔隙量

けていることが示唆された。

地際と地中50cm深における杭断面の区分を表-

表-8 杭の劣化区分

母材	経過年	地際			地中50cm		
		A型	B型	C型	A型	B型	C型
石英閃緑岩	5	○			○		
		○			○		○
		○			○		△
		○			○		
		○			○		
	4	○			(○)	(△)	
		○			○		
		○			○		
		○			○		
		○			○		
設楽層群	5	○			△		○
		○			△		○
		○			(○)		
		○			△		△
		○			△		△
	3	○			○		
		○			○		
		○			○		
		○			○		
		○			○		
片麻岩	5	○			△		○
		○			△		○
	4	○			(○)		
		○			(○)		
黒色片岩	5	○	○	△	△	○	○
		○	○			○	△
緑色片岩	3	○					○
		○					○
豊川層群	4	○			○		

○は主な区分、△は部分的に認められた区分をしめす。()は50cm以浅のみ観察可能だった資料の参考値。

8に示した。地際ではほぼ全ての調査地でA型を示した。一方、地中では一部で母材ごとに特徴が認められ、石英閃緑岩の調査地ではA型が多く、設楽層群ではB型やC型が多かった。また、黒色片岩や緑色片岩など三波川帯の変成岩類ではC型が多かった。これらのことから、地中50cm深の木材の劣化様式には母材が影響していることが示唆された。

以上のことから、母材に由来する土壌の違いにより、木材の劣化の速度や様式に差が生じたと推察された。柵工等木材を地面に打ち込んで利用する際は、土壌条件の違いを考慮した保存処理の程度や点検・交換サイクルを決定する必要があると考えられた。

引用文献

- 雨宮昭二 (1963) 浅川実験林苗畑の杭試験 (1) 杭の被害程度を評価する方法. 林業試験場研究報告 150 : 143-156.
- 津島俊治 (2002) ピロディン打込み深さに影響を

与える諸要因. 九州森林研究 55 : 192-195.