

〈資料〉

ストライカーピンの径を変化させた時のピロディンの貫入深さと材の破壊範囲

増田勝則

4条件の含水率に調整したスギ、ヒノキの健全材を用いて、ピロディンのストライカーピンの直径をφ2.5mmの他、3mmと4mmに変化させた時の貫入深さと木材組織の破壊範囲について検討した。その結果、スギ、ヒノキともに、すべての含水率条件でφ2.5mmのピンによる測定が、密度とピンの貫入深さの間の相関が高かった。木材組織の破壊の影響を回避するためのピンの貫入間隔は、繊維方向についてはスギの場合、φ2.5mmのピンで50mm、φ3mmで60mm、φ4mmで70mmであった。ヒノキの場合、φ2.5mmのピンで30mm、φ3mmで35mm、φ4mmで40mmであった。また接線方向についてはスギ、ヒノキとも10mm確保すればこの影響は回避できた。

1. はじめに

近年、スギ、ヒノキをはじめとする間伐材を土木構造物に使用する事例が数多く見られる。間伐材の利用を推進するためには、土木工事の設計者、発注者、管理者などに、構造物の耐用年数、メンテナンス方法、メンテナンス費用を加えたトータルコストなどの情報の提示が望まれる。そのため、構造物の耐久性を評価する試みが、各種の方法で行われている。なかでも、ピロディンは携帯や取り扱いが容易であり、測定対象木材の破壊範囲も小さいなどの理由から多くの調査で採用されている¹⁾。ピロディンは、φ2.5mmの金属製ストライカーピン(以下ピンと呼ぶ)を、6N・mのエネルギーで貫入させた時の深さから、測定対象物の劣化状況等の材質に関する情報を得る測定装置である。

本報告では、スギ、ヒノキの健全材を対象にして、以下の2点について検討した。

1) φ2.5mmより太いピンを装着したピロディンによる材質評価の可能性

ピロディンのピンの直径はφ2.5mmが標準であるが、スギの場合、健全な材であっても気乾状態で30mm前後の貫入深さを示すことも少なくない。これらの材が劣化を受けた場合、貫入深さはさらに増大するので、ピロディンの測定限界である40mmを超える場合も多い²⁾。そこで、φ2.5mm以外にφ3mmとφ4mmのピンを使用した測定について検討した。検討に際してはピンの貫入深さに影響を与えると予測される、木材の含水率と年輪数の2因子に着目した。

2) ピン貫入時の木材組織の破壊範囲

ピンの貫入は、一定の範囲で周囲の木材組織の破壊を伴う。測定時に木材組織の破壊範囲(以下破壊範囲という)が隣り合う測点どうしで重なり合った場合、後から

測定したピンの貫入深さは、先の測定の影響を受けると予測される。よって、樹種あるいは材質の変化に応じた破壊範囲を把握しておく必要がある。また、ピロディンに関する既往の報告に破壊範囲について検討したものはみられない。検討に際しては先と同様、上記3種類の直径のピンを用い、木材の含水率の影響に着目した。

2. 材料と方法

2.1 試験体の作製

スギの試験体は以下に示す方法で採取した。図1に示すように、辺材部分のみからなる正確に対面柁に木取りされた長さ1m、断面寸法が一辺35mmの角材を使用した。

直径の異なるピンでの材質評価の可能性についての検討(以下、ピン径評価試験という)は、図2に示すように

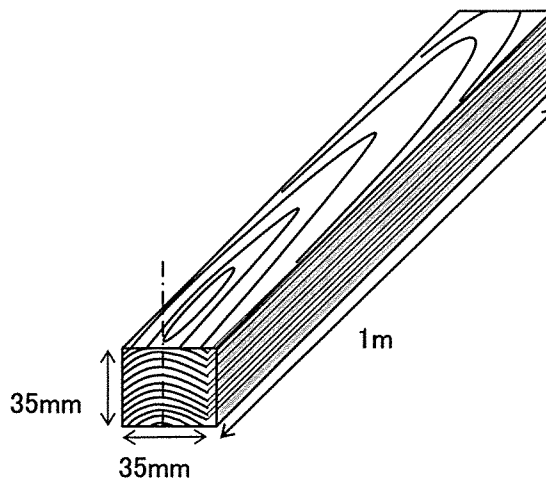


図1 スギの試験体採取した角材
(ヒノキの断面寸法は30mm×30mm)

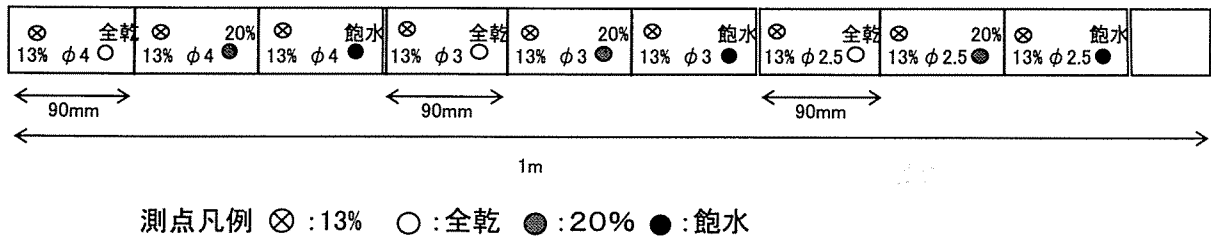


図2 ピン径の評価試験に供した試験体の角材からの採取方法
(全部で35本から採取し、1条件につき35体の試験体を得た。)

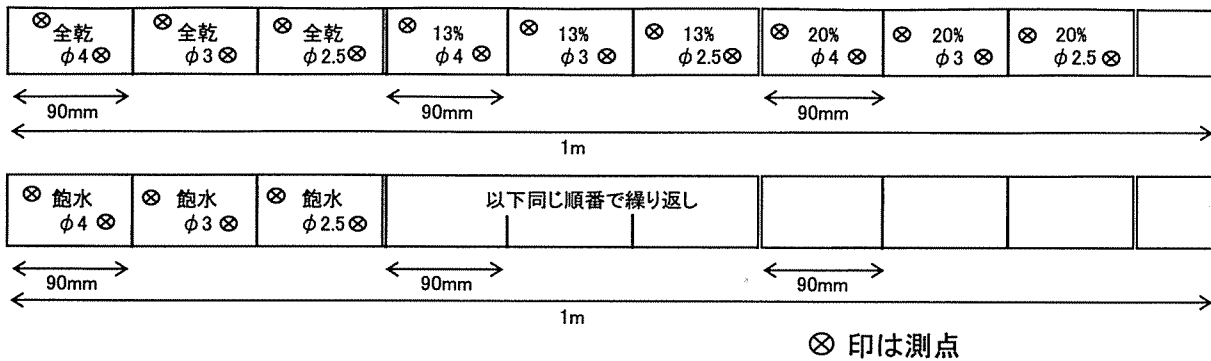


図3 材の破壊範囲の検討に供した試験体の角材からの採取方法
(全部で8本から採取し、1条件につき6体の試験体を得た。)

角材1本から、3種類のピン径ごとに、13%・全乾、13%・20%、13%・飽水の順番で、長さ90mmの試験体を9体採取した。全部で35本の角材から1条件につき35体、合計で315体の試験体を採取した。

破壊範囲の検討に供する試験体は、図3に示すように1本の角材から、長さ90mmの試験体を9体採取した。全部で8本の角材から72体の試験体を得た。1条件につき6体ある試験体から、5体を繊維方向の破壊範囲、残る1体を接線方向の破壊範囲の試験に供した。

ヒノキの試験体については刃材部分のみの採取が困難なこと、ピンの貫入深さがスギに比較して浅いと予測されたことから、断面寸法は30mmとして、スギと同様の方法によって採取した。このうち、ピン径評価試験に供する試験体を採取する角材の数は16本とした。

2.2 試験体の含水率の調整

今回設定した条件と試験体の含水率と密度を表1に示す。含水率は、全乾状態、13%、20%、飽水状態の4条件とした。各含水率の試験体は以下の方法で調整した。

1)全乾状態

試験体を105℃の温度条件で48時間乾燥させ、全乾重量を測定した。密閉された容器内で室温付近まで冷却した後、実験に供した。

2)含水率13%

試験に供した角材は通気が確保された倉庫に長期間保管されていたことから、含水率は平衡状態にあるとみなした。この角材から試験体を採取した後、全試験体について重量と寸法を測定し、気乾密度(以下密度という)を求めた。この時の含水率は約13%であった。また、木口面における10mm当たりの年輪数を測定した。ピン径評価試験における材の密度はこの値を使用した。

3)含水率20%

温度20℃、相対湿度87%(平衡含水率20%)に設定した恒温恒湿器(エスベック株式会社製)内で重量が一定になるまで試験体を調湿し、実験に供した。

4)飽水状態

減圧加圧装置を使用して試験体に水を注入した後、重量を測定した。株式会社ヤスジマ製減圧加圧装置を使用し、注入条件は10kPaで1時間減圧、その後1.2MPaで2時間加圧とした。

2.3 ピロディンによる測定方法

測定は、図4に示すスイスproceq社製ピロディン6Jにφ2.5mm、φ3mm、φ4mmのピンを装着して行った。測定面は木表の板目面とし、補助用具をピロディン本体に添えてピンの貫入方向が板目面と垂直になるよう確保し

表 1 設定した条件と試験に供した試験体の含水率と密度

ピンの直径		含水率		密度(g/cm ³)	
mm		%	平均値	分布範囲	
φ 2.5	全乾	スギ	—	0.33	0.28~0.38
		ヒノキ	—	0.49	0.43~0.60
	13%	スギ	12.6	0.33	0.28~0.38
		ヒノキ	13.5	0.49	0.42~0.60
	20%	スギ	20.6	0.32	0.28~0.38
		ヒノキ	19.9	0.49	0.42~0.62
	飽水	スギ	297.7	0.32	0.28~0.38
		ヒノキ	168.8	0.49	0.42~0.58
φ 3	全乾	スギ	—	0.33	0.28~0.38
		ヒノキ	—	0.49	0.42~0.58
	13%	スギ	12.6	0.33	0.28~0.38
		ヒノキ	13.5	0.49	0.42~0.61
	20%	スギ	20.8	0.33	0.28~0.38
		ヒノキ	20.0	0.49	0.42~0.57
	飽水	スギ	291.4	0.33	0.28~0.38
		ヒノキ	171.2	0.49	0.42~0.58
φ 4	全乾	スギ	—	0.33	0.28~0.38
		ヒノキ	—	0.49	0.40~0.57
	13%	スギ	12.7	0.33	0.28~0.38
		ヒノキ	13.5	0.49	0.40~0.62
	20%	スギ	20.8	0.33	0.28~0.38
		ヒノキ	19.9	0.49	0.41~0.57
	飽水	スギ	290.3	0.33	0.28~0.38
		ヒノキ	172.3	0.49	0.42~0.62

た。

2.3.1 ピン径評価試験

ピン径評価試験の方法を図5に示す。測点は試験体1体につき2箇所設定した。全試験体について、含水率13%の時点で、2箇所うちの一点を測定した。その後、各試験体を所定の含水率に調整して、残る一点にピンを貫入し、各含水率における測定値とした。この測定を3種類のピン径で行い、各試験体の全乾重量を先に示した方法で計測し、含水率を求めた。

2.3.2 破壊範囲の検討

破壊範囲の測定方法を図6に示す。各含水率に調整した試験体を、3種類の径のピロディンによって、2カ所測定した。測定後、各試験体の含水率を算出した。

繊維方向の破壊範囲の検討に供した試験体は、丸鋸を使用して、木口面と平行に繊維方向に1mm幅ずつ鋸断した。この操作をピンの貫入孔に向かって繰り返し行い、

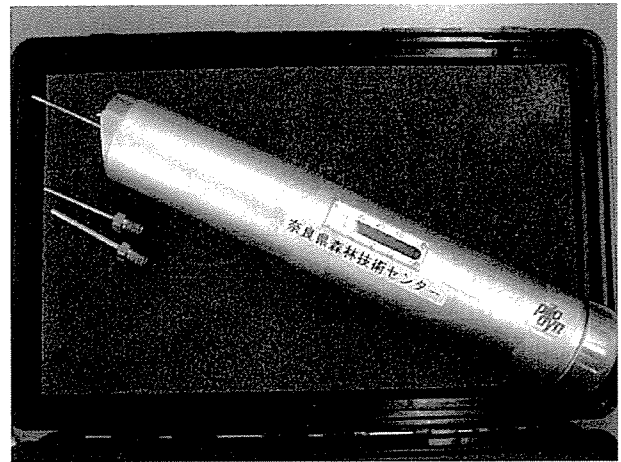


図4 ピロディン6J
(装着されたピンはφ2.5mm、手前からφ4mmとφ3mm)

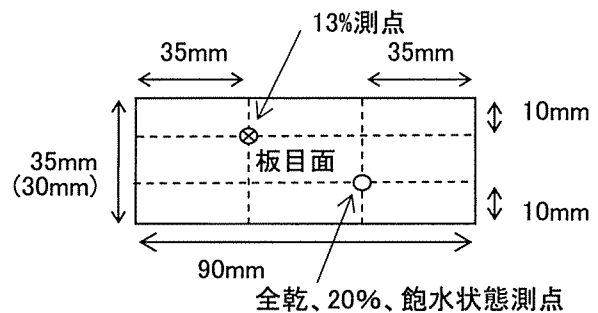
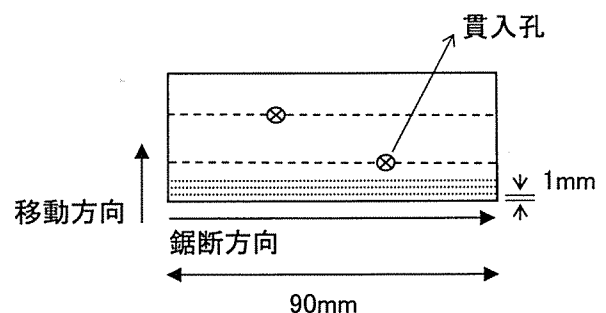
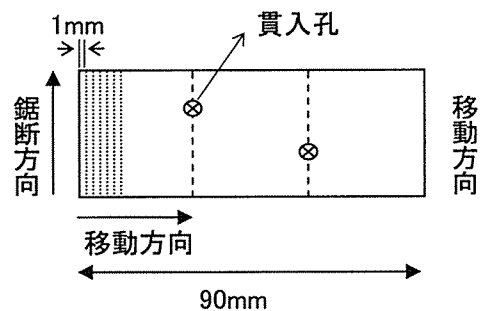


図5 ピン径の評価試験に供した試験体の測点の位置
(30mmはヒノキの断面寸法)



接線方向破壊範囲試験体



繊維方向破壊範囲試験体

図6 材の破壊範囲の検討における測定方法

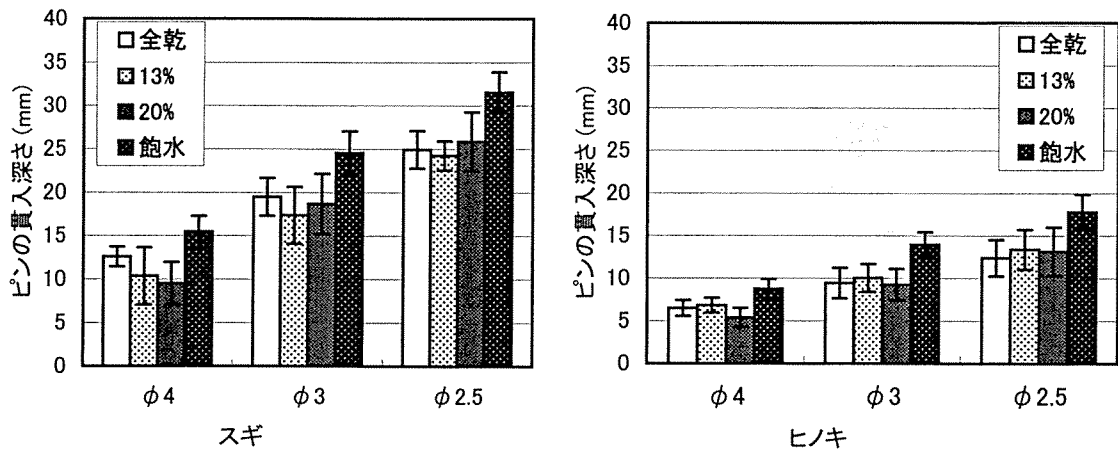


図7 各条件のピン貫入深さの平均値

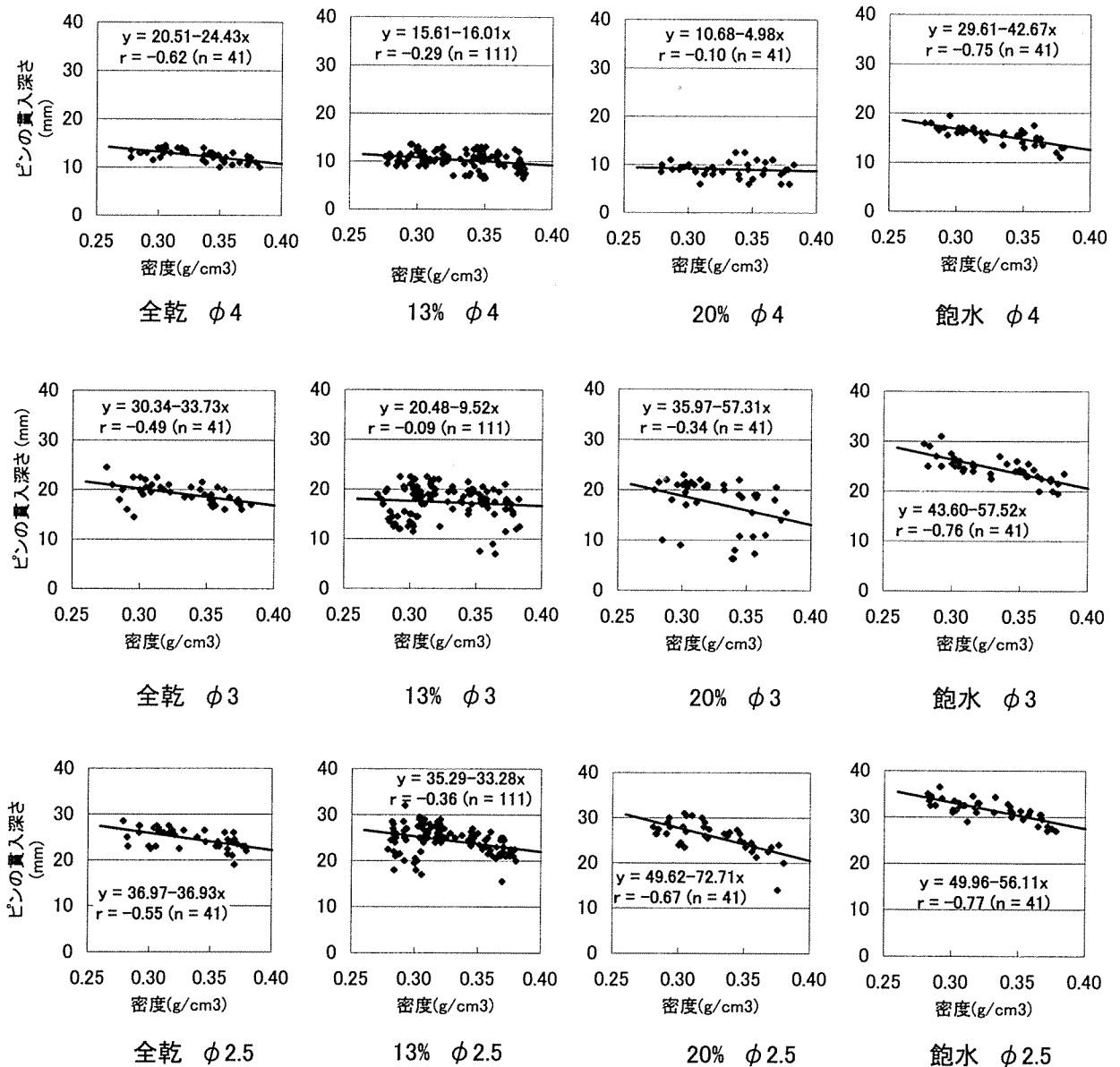


図8 ピンの直径とスギ材の含水率を変化させて測定したピンの貫入深さと密度の相関関係

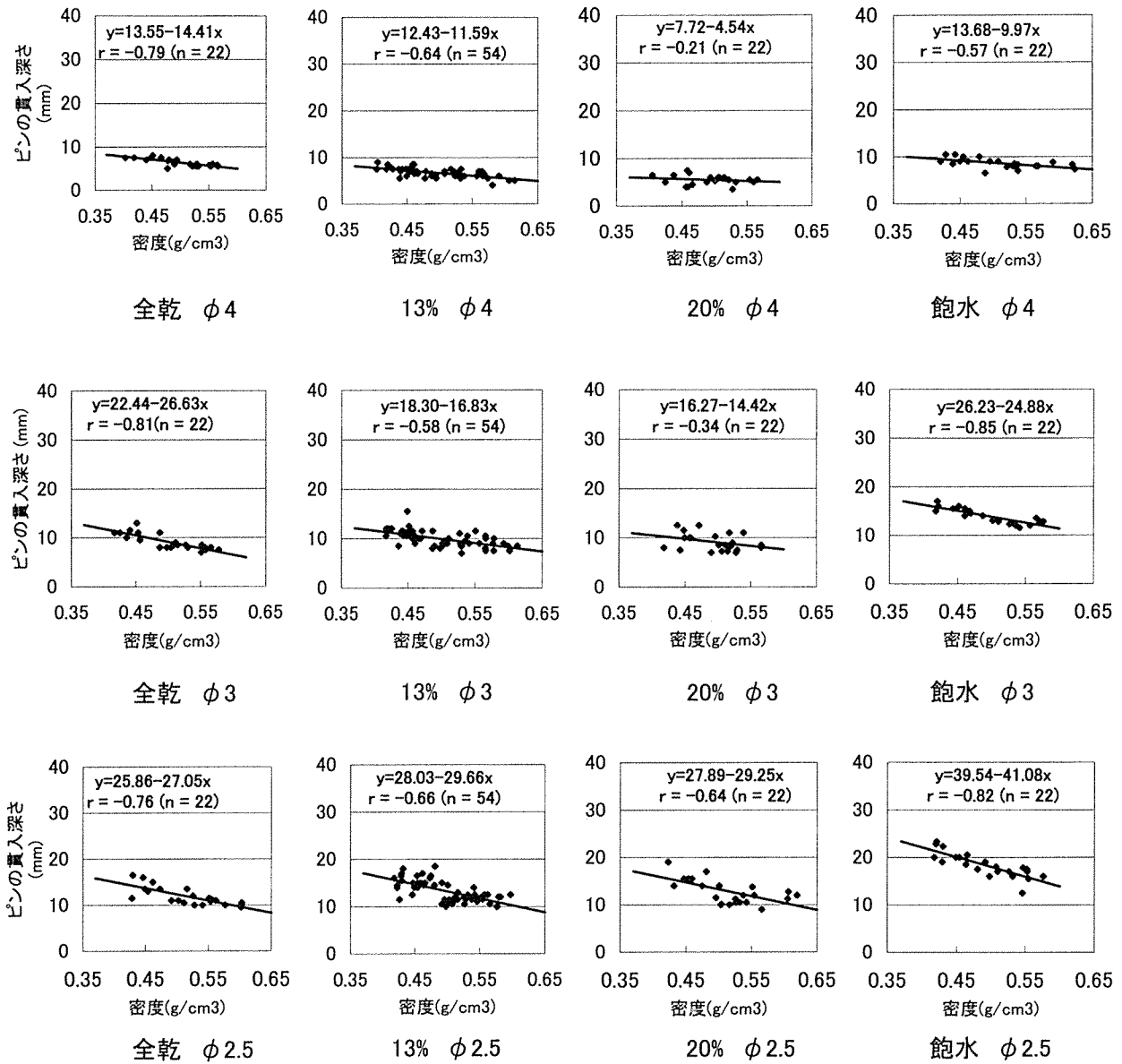


図9 ピンの直径とヒノキ材の含水率を変化させて測定したピンの貫入深さと密度の相関関係

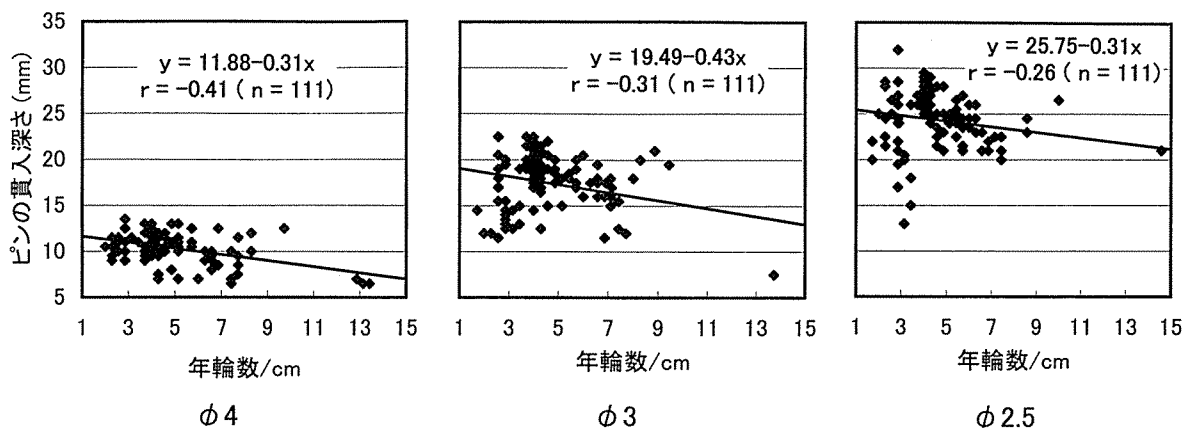


図10 含水率13%のスギ材における年輪数がピン貫入深さに及ぼす影響

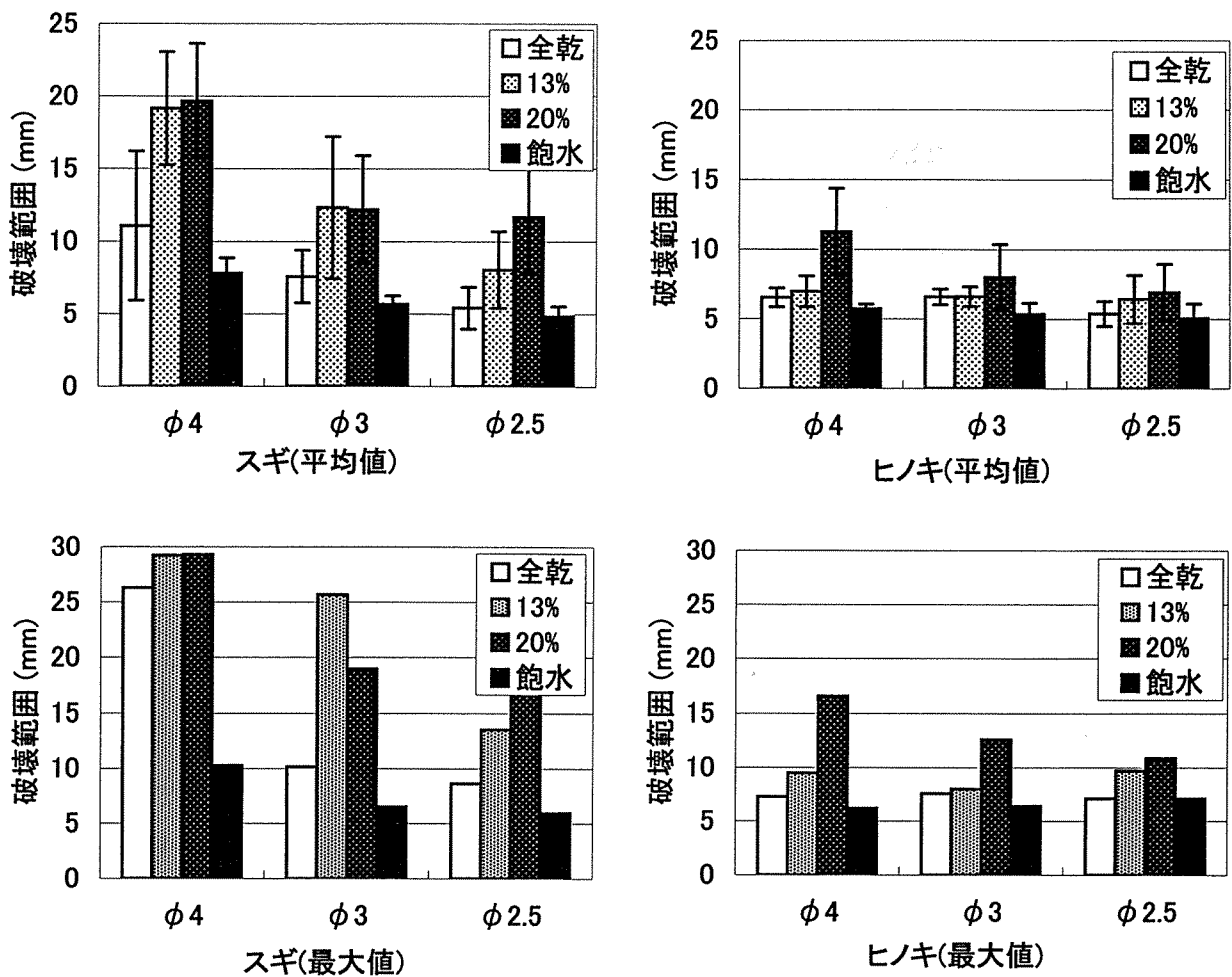


図11 ピンの貫入によるスギとヒノキの材の破壊範囲（繊維方向）

鋸断1回ごとに木口面(切断面)を目視により確認した。ピン貫入による木材組織の破壊が出現した時点の木口面からピン貫入孔までの距離を測定して繊維方向の破壊範囲とした。接線方向の破壊範囲の測定もこの方法に準じた。

2.4 評価方法

ピロディンはピン貫入深さが材の密度と高い相関を示す³⁾ことを前提として、材質の劣化度の推定に利用されている。このことから、ピン径評価試験におけるピン径の評価は、ピン径ごとに材の密度とピン貫入深さとの相関を求め、その高さを指標とした。評価対象とした測定値は、ピン径評価試験と破壊範囲の検討で得られた測定値の両方を合わせた。

ピンの貫入深さに及ぼす年輪数の影響は、各試験体の10mm当たりの年輪数を算出し、ピン貫入深さとの相関を求めた。結果を材の密度に対するピン貫入深さの相関の高さと比較した。

3. 結果

3.1 ピン径評価試験

3.1.1 各ピン径における貫入深さ

図7に示すとおり、ピンの貫入深さはスギの方が深かった。スギ、ヒノキともピンの径が大きくなるとともに浅くなった。含水率別にみると、スギ、ヒノキとも飽水状態で最も深くなった。スギでは、単に含水率の増大とともに深くなるのではなく、全乾状態の深さよりも含水率13%と20%の条件(以下ここでは、これら2つの含水率を合わせて気乾領域と呼ぶ)で浅くなり、飽水状態で再び深くなる傾向を示した。この傾向はφ3mmとφ4mmで顕著であった。Tukeyの多重比較による検定の結果、φ3mmとφ4mmともに、気乾領域の条件は全乾および飽水条件に対し1%で有意差が認められた。φ2.5mmではこの傾向は認められず、飽水条件だけが他の3つの含水率条件に対し、1%で有意差があった。

ヒノキでは、すべてのピン径で飽水条件だけが他の3

つの含水率条件に対し、1%で有意差があった。

3.1.2 各ピン径における貫入深さと密度の相関

スギの結果を図8に、ヒノキを図9に示す。また、各条件の相関係数を表2に示す。

スギではφ2.5mmのピンは、13%の含水率でやや低い相関を示したが、他の含水率では相関が高かった。また、13%の含水率であっても他の2種類のピン径より相関は高かった。特に20%と飽水の含水率条件では高い相関を示した。回帰直線の傾きについてもφ2.5mmのピンは、他のピン径より大きい傾向にあった。一方、φ3mm、φ4mmのピンは、全乾または飽水の含水率条件で高い相関を示したが、気乾領域では、相関は低い傾向にあり、ほとんど相関がない、あるいは弱い相関にとどまった。

ヒノキの相関は、ほとんどの条件でスギより高かった。スギと同様に、φ2.5mmのピン径はいずれの含水率においても高い相関を示した。一方、φ3mm、φ4mmのピン径は20%の含水率条件で、ほとんど相関がない、あるいは

弱い相関にとどまった。回帰直線の傾きについても、φ2.5mmのピン径が最も大きく、ピン径が大きくなるにつれて小さくなった。

3.1.3 ピンの貫入深さに及ぼす年輪数の影響

結果の一例として、含水率13%のスギ材における年輪数がピンの貫入深さに及ぼす影響を図10に示す。また、全条件について求めたピン貫入深さと年輪数の間の相関係数を表3に示す。スギ、ヒノキともに、年輪数がピンの貫入深さに及ぼす影響は密度を独立変数とした場合より低かった。また、ヒノキよりもスギにおいて両者の相関は高かった。含水率およびピン径の変化が両者の相関に及ぼす影響は、各条件とも一定の傾向は認められなかった。

3.2 破壊範囲の検討

3.2.1 破壊範囲

繊維方向の結果を図11に示す。スギの破壊範囲はすべての条件でヒノキの破壊範囲を上回った。

表2 各条件におけるピン貫入深さと密度の相関係数

ピンの直径 mm	含水率 %		相関係数
φ 2.5	全乾	スギ	-0.55
		ヒノキ	-0.76
	13%	スギ	-0.36
		ヒノキ	-0.66
	20%	スギ	-0.67
		ヒノキ	-0.64
飽水	スギ	-0.77	
	ヒノキ	-0.82	
φ 3	全乾	スギ	-0.49
		ヒノキ	-0.81
	13%	スギ	-0.09
		ヒノキ	-0.58
	20%	スギ	-0.34
		ヒノキ	-0.34
飽水	スギ	-0.76	
	ヒノキ	-0.85	
φ 4	全乾	スギ	-0.62
		ヒノキ	-0.79
	13%	スギ	-0.29
		ヒノキ	-0.64
	20%	スギ	-0.10
		ヒノキ	-0.21
飽水	スギ	-0.75	
	ヒノキ	-0.57	

表3 各条件におけるピン貫入深さと年輪数の相関係数

ピンの直径 mm	含水率 %		相関係数
φ 2.5	全乾	スギ	-0.27
		ヒノキ	-0.34
	13%	スギ	-0.26
		ヒノキ	-0.20
	20%	スギ	-0.73
		ヒノキ	-0.20
飽水	スギ	-0.57	
		-0.20	
φ 3	全乾	スギ	-0.26
		ヒノキ	-0.10
	13%	スギ	-0.31
		ヒノキ	-0.17
	20%	スギ	-0.72
		ヒノキ	-0.13
飽水	スギ	-0.51	
	ヒノキ	-0.38	
φ 4	全乾	スギ	-0.32
		ヒノキ	-0.52
	13%	スギ	-0.42
		ヒノキ	-0.34
	20%	スギ	-0.09
		ヒノキ	-0.72
飽水	スギ	-0.46	
	ヒノキ	-0.18	



図12 スギ柱目面における木材組織の破壊形態

平均値についてみると、スギの場合、破壊範囲はすべての含水率条件で、ピンの直径が大きくなるにつれ大きくなった。特に $\phi 4\text{mm}$ は他の条件に比べ大きかった。ヒノキも同様の傾向であったが、含水率20%の条件を除き、その差はごくわずかであった。

含水率の違いによる破壊範囲は、スギの場合、気乾領域において全乾および飽水状態より特に大きく、2倍前後の値を示した。ヒノキは各ピン径とも含水率20%の条件が最も破壊範囲が大きかった。また、スギと同様に $\phi 4\text{mm}$ のピン径において他の含水率との差が大きかった。その他の条件はスギほど顕著な差は認められなかった。

最大値についても、スギ、ヒノキとも平均値とほぼ同様の傾向であった。各ピン径における最大の値は、スギの場合、気乾領域で出現し、 $\phi 2.5\text{mm}$ で17.0mm、 $\phi 3\text{mm}$ で25.7mm、 $\phi 4\text{mm}$ で29.3mmであった。ヒノキの場合はいずれのピン径においても、含水率20%の条件において最大となり、それぞれ $\phi 2.5\text{mm}$ で10.9mm、 $\phi 3\text{mm}$ で12.6mm、 $\phi 4\text{mm}$ で16.6mmであった。

接線方向の結果は、スギ、ヒノキとも全ての条件において1mm以下であった。

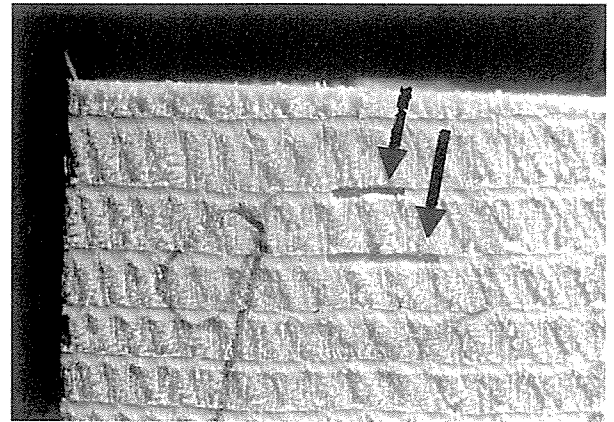


図13 スギ木口切断面に出現した晩材部の陥没
(貫入部から28mm付近)

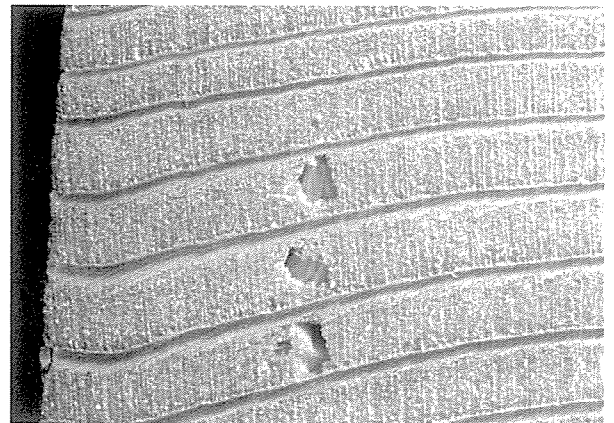


図14 スギ木口切断面に出現した早材部の陥没
(貫入部から3mm付近)

3.2.2 木材組織の破壊形態

柱目面に出現した木材組織の破壊形態を図12に示す。材はピンの貫入により、近傍の組織が圧潰されるとともに、周辺部の組織が貫入部に向かい引き寄せられている。この時、スギではしばしば早晩材の境界部で亀裂が発生した。また、この破壊形態は遠くまで及ぶ傾向にあった。図13に示すように、破壊が木口面に達した場合、木口面には晩材部の陥没が出現した。このことから晩材部分が早材部分よりも相対的に強く引き寄せられると判断できた。木口面に出現した全ての破壊部分は、板目面の貫入孔と同じく、試験体の側面(柱目面)から10mm付近の位置にあった。これらの破壊形態は、スギ材が破壊された際によく見られる早晩材の境界部で発生する割裂破壊と類似していた。図14および図15に示すように、貫入部に近い箇所ではスギ、ヒノキとも早材部にも破壊が見られた。

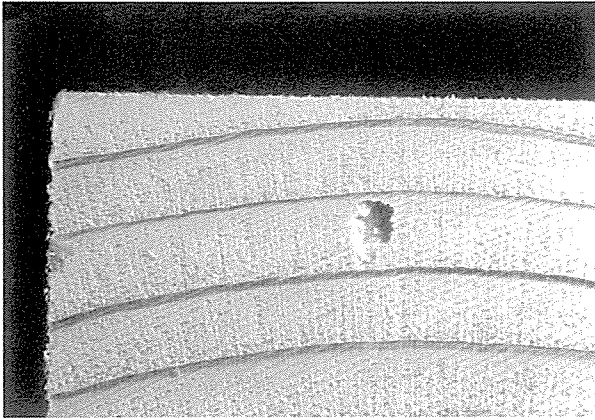


図15 ヒノキ木口切断面に出現した早材部の陥没
(貫入部から4mm付近)

4. 考察

図11に示したとおり、スギの場合、気乾領域において、繊維方向の破壊範囲が他の2条件より特に大きかった。また、ピン貫入深さの平均値については、図7に示したとおり、気乾領域では、他の2条件より低い値を示した。また、表2に示したとおり、気乾領域では各ピン径とも密度との相関が低下した。これら結果を木材組織の破壊形態とともに相互に関連づけて考察すると、以下のように結果を説明できる。すなわち、ピン先端による木材組織の破壊によって、貫入先端部では圧縮応力が発生する。図12に示したとおり、貫入部の周辺では、貫入部に向かい木材組織(特にスギの場合、晩材部)が引き寄せられることによって、繊維方向に組織相互のせん断応力と引張り応力が発生する。全てのピン径で、気乾領域において繊維方向の破壊範囲が他の2条件に比べ特に大きくなっていることから、この含水率の付近では、ピンの貫入深さに対し、貫入先端部の圧縮応力に加え、繊維方向の木材組織相互のせん断応力あるいは引張り応力が大きく影響していると推察された。これら材内部に発生する応力はピンの貫入力に対する反作用であることから、この含水率付近では他の条件より貫入深さの平均値も低下した。また、この含水率付近における相関の低下は繊維方向での木材組織の破壊範囲のばらつきによるものと考えられた。

一方、ヒノキも同様の破壊は発生するが、その割合はごく小さく、ピン貫入による破壊範囲もスギに比べて小さかった。よって、繊維方向のせん断応力、あるいは引張り応力の影響も小さく、相対的に密度の影響を大きく受けるピン先端部の圧縮応力の影響が大きくなるため、ピン貫入深さと密度との相関も高くなったと思われる。ま

た、年輪数がピンの貫入深さに及ぼす影響の検討において、ヒノキよりスギの相関が高かったことも上記事象と整合した。

5. まとめ

5.1 ピン径の評価

ピン径評価試験の結果、各含水率を通じ、スギ、ヒノキともに最もピンの貫入深さが密度と高い相関を示したピンの直径は、 $\phi 2.5\text{mm}$ であった。各ピン径とも全乾と飽水の含水率条件においては、ピンの貫入深さは密度と高い相関を示した。しかし、気乾領域では密度との相関は低下した。特に $\phi 3\text{mm}$ と $\phi 4\text{mm}$ については、スギの場合、気乾領域では相関が認められない条件もあった。これらは、 $\phi 2.5\text{mm}$ のピン径が標準とされていることを裏付ける結果であった。気乾状態から30%付近の含水率は、現場において間伐材を測定する際、高い頻度で出現する領域である。これを考慮すると、 $\phi 2.5\text{mm}$ より太いピン径を使用しての測定はさらに検討の余地が残る結果であった。

5.2 破壊範囲

最大値の結果から、隣接した測定のパイン貫入による測定値への影響を回避するためのピンの間隔は、繊維方向については10mmあまりの余裕をみて、スギの場合 $\phi 2.5\text{mm}$ のピンで50mm、 $\phi 3\text{mm}$ は60mm、 $\phi 4\text{mm}$ のピンは70mmと考えられた。同様に、ヒノキの場合 $\phi 2.5\text{mm}$ のピンで30mm、 $\phi 3\text{mm}$ は35mm、 $\phi 4\text{mm}$ のピンは40mmであった。接線方向についてはスギ、ヒノキとも10mm確保すれば測定値への影響を避けることが可能であった。

今回は測定の基準となるデータを得る目的で、健全材について検討した。腐朽など、劣化が進行した木材組織の破壊形態は健全材と大きく異なることが予測される。以降、劣化が進行した材についても、これらピン径による測定の可能性を検討したい。

引用文献

- 1) たとえば、町田初男、茂木のり恵、伊藤英敏：落石防護柵の緩衝材に使用されている針葉樹間伐材丸太の劣化調査.木材保存.29(6),253-258(2003)
- 2) 井戸聖富、糸川隆康、藤井義久、藤平真紀子、伊藤貴文、奥田晴啓、岩本頼子：木製構造物の劣化調査.(社)日本木材保存協会第20回記念次大会研究発表論文集.7-12(2004)
- 3) 森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果8「ス

木材の革新的高速乾燥システムの開発J.21-24 (2006)

(2007年1月11日受理)

