

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1281**      March 2014

木材の海虫害とその防除法ならびに  
臨海部の気中での風化に関する実験

山田 昌郎

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. 序論 .....	4
2. 樹種と海中害 .....	4
2.1 実験方法 .....	4
2.2 実験結果 .....	6
3. 海中害と強度 .....	8
3.1 実験方法 .....	8
3.2 実験結果 .....	9
4. 海中害と防除 .....	10
4.1 メッシュ被覆 .....	10
4.2 熱処理 .....	12
4.3 低分子フェノール樹脂注入処理 .....	14
5. 土中での海中害 .....	16
5.1 実験方法 .....	16
5.2 実験結果 .....	17
6. 海上の気中での風化 .....	18
6.1 実験方法 .....	18
6.2 実験結果 .....	19
7. 結論 .....	21
謝辞 .....	21
参考文献 .....	21
付録 .....	23

# Experiments on Marine Borers' Attacks on Wood Materials, their Protective Methods and the Weathering in Coastal Atmospheres

Masao YAMADA\*

## Synopsis

Government policy aims at increasing the use of wood for public buildings recently in Japan. In case of the use of wood for port facilities, the main deterioration factors are marine borers such as teredo and limnoria for submerged members and weathering for non-submerged members. In this study, the difference of marine borers' attacks among wood species, the effect of the attacks on the strength of wood materials, the usefulness of some protective methods against marine borers and the attacks on the wood in sand were investigated by submergence tests in the seawater, and the difference of weathering properties among wood species was examined by exposure tests in coastal atmosphere.

The following results were obtained: (1)The submergence tests of 15 species of wood showed that *Kusunoki* (*Cinnamomum camphora*) and *Kaya* (*Torreya nucifera*) suffered smaller damages rather than other species. A correlation was found between the limnoria's attacks and the hardnesses or the specific gravities of wood materials. (2)The relationship between the weight losses and the strength reductions was common for all the species, shapes, sizes and durations of submergence, and the percentages of the strength reductions were larger than those of the weight losses. (3)The protective methods such as covering with polyethylene meshes (PE100 and PE150), heat treatment (237.5 degrees Celsius, 5 hours) and low-molecular phenol resin injection treatment could significantly reduce damages. (4)As the results of two-year submergence of wood blocks buried in sand, there was no marine borers' attachment on the wood surfaces covered by sand. (5)The results of the exposure tests in a coastal atmosphere with additional seawater spray showed that the weights, sizes and bending stiffnesses of hardwood decreased more rapidly than those of softwood.

**Key Words:** wood, durability, marine borer, teredo, limnoria, weathering

---

\* Senior Researcher, Coastal and Estuarine Environment Research Group, Coastal and Estuarine Environment Research Division  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5082 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:yamada-m89wm@pari.go.jp

# 木材の海虫害とその防除法ならびに 臨海部の気中での風化に関する実験

山田 昌郎\*

## 要 旨

公共建築物等への木材利用が現在政策的に推進されている。海域の施設への木材利用を図る場合には、木材の劣化要因として、海水中ではフナクイムシやキクイムシなどによる海虫害、海上では紫外線や海水飛沫などによる風化を考慮する必要がある。そこで本研究では、海虫害の樹種による差、海虫害の木材強度への影響、海虫害防除法の効果、土中での海虫害について海中浸漬実験で調べるとともに、臨海部における風化の樹種による差について気中暴露実験で調べた。

その結果、以下のことが明らかになった。(1)15 樹種の海虫害を比較したところ、クスノキとカヤの食害が比較的少なかった。キクイムシによる食害と、木材の硬さもしくは比重との間に相関関係が見られた。(2)樹種、形状、寸法、海水浸漬期間に関わらず、強度減少率と質量減少率の関係は一定であり、強度減少率の値は質量減少率の値に対して大きかった。(3)海虫害防除法として、ポリエチレンメッシュ (PE100 および PE150) による被覆、熱処理 (237.5°C, 5 時間)、および低分子フェノール樹脂注入処理は、無処理材に比べて食害を大幅に抑制した。(4)試験体を土砂に埋設して約 2 年間海中浸漬した結果では、土砂に覆われた木材への海虫の付着は生じなかった。(5)臨海部の気中で海水を散布して暴露した結果では、広葉樹材の方が針葉樹材よりも風化による質量・寸法・曲げ剛性の減少の進行が速かった。

キーワード：木材，耐久性，海虫類，フナクイムシ，キクイムシ，風化

---

\* 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究チーム 主任研究官  
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所  
電話：046-844-5082 Fax：046-844-1274 e-mail:yamada-m89wm@pari.go.jp

## 1. 序論

日本では戦後植林されたスギ、ヒノキ、カラマツなどの人工林が成長し、これらを木材として積極的に利用することが森林保全、水源涵養、二酸化炭素固定など環境面からも有益であることが広く認識されるようになってきた。国の政策も木材利用の抑制から促進へと180度転換し、2010年5月には「公共建築物等木材利用促進法」が施行され、国や地方公共団体が率先して木材利用を促進することが規定された。

このような政策に基づき、港湾・空港施設においても可能な限り木材利用を図ることが望まれる。陸域で木材を利用する場合には、木造建築物を対象にした技術が適用できる場合が多い。しかし海域で木材を利用する場合には、木材を劣化させる要因が陸域と異なる点に注意を要する。陸域で木材を加害する生物は、木材腐朽菌とシロアリである。これに対して海域では海虫類（木材穿孔性海生生物）（付録写真-A.1）が主な加害生物となる。

海虫類には貝類と甲殻類のものがある。貝類のフナクイムシ (*Teredo navalis*) と甲殻類のキクイムシ (*Limnoria lignorum*) が世界的に広く分布している。いずれも流木や沈木など海中の木を食べて栄養源とし、木の中で棲息している。木造船や木製栈橋の杭にも侵入して被害を及ぼすため、古くから様々な対策が試みられてきた（岡田(1958)、馬渡(1959)、Barnacle(1976)、Morrellら(1984)、寶田(1996)）。対策には海虫抵抗性があるとされる樹種の使用、薬剤の塗布や注入、銅板やモルタルや樹脂による被覆などがある。しかし、効果の持続性や安定性の不足、環境への悪影響、経済性の問題などがあり、決め手となるような防除法は未だ確立されていない。

筆者は国産材の海虫抵抗性について2000年から実験を行っている（山田(2003, 2006, 2010)）。その一環として今回国産材15樹種の耐海虫性を試験した。また、海虫害の木材強度への影響について、前報（山田(2010)）のデータを補足する実験を実施した。さらに、いくつかの海虫防除法の効果と、土中での海虫害について実験を行った。これらの結果を本資料の2~5章に述べる。

また、海水中での海虫害とは別に、気中では気象作用による風化（ウエザリング）が生じる。風化はリグニン（木材の主成分である直鎖状のセルロース分子が形成する微小繊維のまわりを充填して細胞壁を補強していると考えられている非晶質の芳香族系高分子化合物）が紫外線によって分解され、雨水などによって溶脱することにより、木材が少しずつやせていく現象である。陸域での風化については、Feistら(1978)、山本(1991)、矢田ら

(1995)により貴重な知見が得られているが、臨海部で海水飛沫を受けるような条件では、一般的な陸域と傾向が異なることも考えられる。そこで臨海部での風化について、暴露実験により2000年から調べている（山田(2003, 2006, 2010)）。現在までに得られたデータを基に、樹種による風化特性の相違について本資料の6章で述べる。

## 2. 樹種と海虫害

いくつかの外国産材は海虫害に対して抵抗性があるとされている。欧米の港湾で古くから用いられてきた樹種は、旧英領ギアナ（現ガイアナ）産のグリーンハートである。他には中南米産のイペやオーストラリア産のサイプレスパインなども海虫抵抗性を有するとされる。

国産材では、クスノキ、カヤ、コウヤマキなどが海虫害を受けにくいことが経験的に知られており、江戸時代までは船や汽水域の橋脚などに用いられていた。国産材の海中浸漬実験として、岡田ら(1958)による21樹種についての結果では、コウヤマキが最もフナクイムシ食害を受けにくかった。この実験ではクスノキ、カヤは用いられていない。石川(1947)、近藤ら(1958)、井上ら(1973)の実験では、それぞれ14, 4, 7樹種の国産材が海中浸漬されているが、対象樹種にクスノキ、カヤ、コウヤマキは含まれていない。

2008年に当所（港湾空港技術研究所）で筆者が国産材18樹種について実験した結果では、コウヤマキはフナクイムシ食害は少なかったもののキクイムシによる食害が激しく、フナクイムシ、キクイムシの両者の食害をともに受けにくかったのはイチョウとクスノキであった（山田(2010)）。この実験ではカヤは用いていない。そこで今回、2008年の実験結果の再現性の確認と、カヤなど2008年に用いなかった樹種についての評価を主な目的として実験を行った。

### 2.1 実験方法

#### (1) 実験施設の概要

木材の海水中への浸漬は、2008年の実験と同様に、当所の海水循環水槽において実施した。この水槽は当所の護岸沿いにある平面寸法4m×27mの水槽であり、水槽内には目の前の久里浜湾の海水がポンプで1日2回給排水され、水深が1.0~2.5mの範囲で変化する。このため干満帯に相当する条件と常時海水中に没する条件で実験を行うことができる。今回の実験は、2008年の実験と同様に、常時海水中に没する条件で実施した。

2005年2月~2013年9月に月2回海水循環水槽の海水温

を測定した結果を図-1に示す。

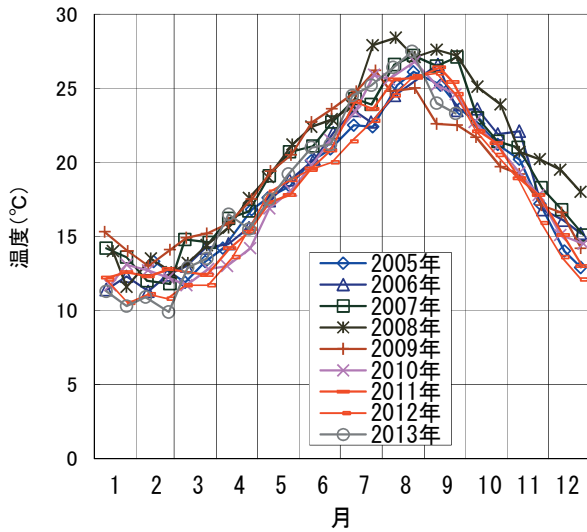


図-1 海水循環水槽の水温の測定結果

(2) 試験体

今回の実験の対象とした樹種を表-1に示す。2008年に実験した18樹種の中からサワラ、スギ、イチョウ、ヒノキ、ヒバ、クスノキを再度対象にし、新たな9樹種を加えて15樹種とした。いずれも木材市場で一般的に購入可能な樹種である。針葉樹材が5樹種、広葉樹材が9樹種である。イチョウは木材としての性質が針葉樹材に近く、針葉樹材として扱われることもあるが、植物学的にはどちらにも属しないとされている。

表-1 試験対象樹種

樹種	科	分類	60°C乾燥後の比重
キリ	ノウゼンカズラ	広葉樹	0.236
サワラ	ヒノキ	針葉樹	0.324
スギ	スギ	針葉樹	0.346
シナノキ	シナノキ	広葉樹	0.367
クルミ	クルミ	広葉樹	0.398
イチョウ	イチョウ	-	0.401
ホオノキ	モクレン	広葉樹	0.448
ヒノキ	ヒノキ	針葉樹	0.463
ヒバ	ヒノキ	針葉樹	0.491
クスノキ	クスノキ	広葉樹	0.495
トチノキ	トチノキ	広葉樹	0.501
カヤ	イチイ	針葉樹	0.511
カツラ	カツラ	広葉樹	0.532
カエデ	カエデ	広葉樹	0.717
サクラ	バラ	広葉樹	0.717

各樹種ごとに10個の試験体を用いた。試験体の断面寸法は約4cm角、繊維方向長さは約8cmとした。60°Cの定温

乾燥機で恒量となるまで乾燥した後の試験体の質量と寸法を測定し、比重を求めた。一般に木材の全乾質量は100~105°Cで乾燥して求めるが、菌類やシロアリに対する抵抗性を試験する際にはこれらの生物劣化を阻害する成分の揮発や変質を防ぐため60°C乾燥恒量を求める場合があり、今回この方法を用いた。

樹種ごとの比重の平均値を表-1に付記した。一般的に針葉樹材は広葉樹材よりも比重が小さく、2008年に用いた針葉樹材9樹種の比重はいずれも広葉樹材8樹種の比重よりも小さかったが、今回は比重が比較的小さい広葉樹材のキリ、シナノキや、比重が比較的大きい針葉樹材のカヤも対象とした。

また、60°C乾燥後の試験体の硬さを、デュロメータ硬さ計(タイプD)(写真-1)を用いて測定した。



写真-1 デュロメータ硬さ計(タイプD)

この硬さ計はJISによるゴムやプラスチックの硬さ試験に使用されているもので、木材の硬さ評価に応用できることが大谷(2001)により示されている。写真-1の硬さ計の下部にわずかに出ているのが見えるのが押針で、その直径は1.25mm、長さは2.5mm、先端形状は円錐形、先端角は30度である。この押針はスプリングで支持されており、押針先端を測定対象材料に突き刺すようにして硬さ計の底部を材料に密着させた時に押針が硬さ計の中に押し戻された長さで材料の硬さが評価される。材料が非常に軟らかい場合はほとんど抵抗なく押針が材料中に入り、硬さ計の指針は動かず硬さ0と評価され、逆にスプリング加圧力の最大値44.4N(≒4.53kgf)で押ししても押針が材料中にまったく入らずすべて硬さ計の中に押し戻されるような硬い材料では、指針が1回転して硬さ100と評価される。なお木材の硬さ試験方法としてJISでは、直径10mmの鋼球の圧入深さと圧入力から硬さを評価するブリネル硬さ試験方法を規定している。しかし今回の実験では、測定の簡便さと、キクイムシが木材の切削に用いる

大あごが1mmに満たないサイズであることを考慮し、デュロメータ硬さ計で硬さを評価した。試験体ごとに、各側面(4cm×8cmの面)につき1点(計4点)と、木口面(4cm×4cmの面)1点で硬さを測定した。

各樹種の試験体10個中5個、15樹種計75個の試験体を、ポリエチレン製の薄型メッシュコンテナ(外寸70.8cm×46.0cm×8.3cm)に結び付けて、2010年6月17日に海水に浸漬した。海水中では試験体の長手方向が水平になるように設置した。また同日、対照用として各樹種3個の試験体を水道水中に浸漬し、残りの試験体(各樹種2個)は実験室内の気中で保管した。

設置から5か月半後の2010年12月1日、2日に海水中から試験体を回収し、質量の測定と圧縮強度試験を行った。圧縮载荷には油圧式万能試験機を用いた。水道水中と気中の試験体については、12月1~3日に質量、寸法、硬さ、圧縮強度の測定を行った。その後、全試験体を103℃で3日間乾燥し、質量を測定した。気中試験体の60℃と103℃での乾燥質量の比を用いて、海水中と水道水中試験体の浸漬前の60℃乾燥質量から103℃乾燥質量を推定し、この値を基にして質量減少率を求めた。

海水中に浸漬した試験体については、乾燥質量測定後、長手方向2cm間隔の3断面で切断し、切断面をスケールとともに写真撮影した。この写真の画像データから、ピクセル数を計数するソフトウェアを用いてフナクイムシの穿孔面積を推定した。3断面の穿孔面積推定値の平均値を、浸漬前の初期断面積で割って、フナクイムシ食害面積率とした。

## 2.2 実験結果

付録の写真-A.2に、海水浸漬した試験体の乾燥後の側面と切断面の例を示す。側面に細かく削られたような跡が付いているのが、クイムシによる食害である。側面に散見される白色のものは、フナクイムシが木の内部に形成した石灰質の棲管であり、クイムシの食害が進んだ結果表面に露出したものである。フナクイムシは木に侵入した後、貝殻をドリルのように回転させながら木の繊維方向に穿孔する習性があるので、繊維直交方向の切断面では孔道はほぼ円形である。

側面の状況や切断面の周囲が削られている状況から、クイムシ食害の激しさについて樹種別に比較すると、キリ、サワラ、スギ、イチョウ、ヒノキ、ヒバでは断面形状が丸みを帯びるほど食害され、シナノキ、クルミ、ホオノキ、トチノキ、カヤ、カツラでは断面形状は辛うじて正方形を保っているがかなりの食害を受けており、

クスノキ、カエデ、サクラは食害をあまり受けていない。一方フナクイムシ食害については、キリ、シナノキ、クルミ、イチョウ、ホオノキ、ヒバ、トチノキ、カツラ、カエデ、サクラでは切断面全面がほぼ余すところなく穿孔され、スギ、サワラ、ヒノキでは穿孔がやや少なく、クスノキ、カヤではさらに少ないように見える。

図-2に海水浸漬試験体の乾燥質量の減少率(樹種ごとの平均値)を示した。水道水浸漬試験体でも約6か月の浸漬の後では、浸漬前よりも乾燥質量が若干減少していた。この減少率はクスノキで約7%とやや大きかったが、他の樹種では0~3%であった。これは木材に含まれる水溶性の成分の溶脱によるものと考えられる。この溶脱による質量減少が水道水中と海水中で同様に生じると仮定して、海水浸漬試験体の質量減少率から水道水浸漬試験体の樹種別の質量減少率を差し引いた値を、海虫害による質量減少率とした。図-2から、今回対象とした15樹種の中では、クスノキとカヤの質量減少率が平均20%以下で、他の樹種の質量がいずれも平均約50%前後減少した中では比較的小さかった。

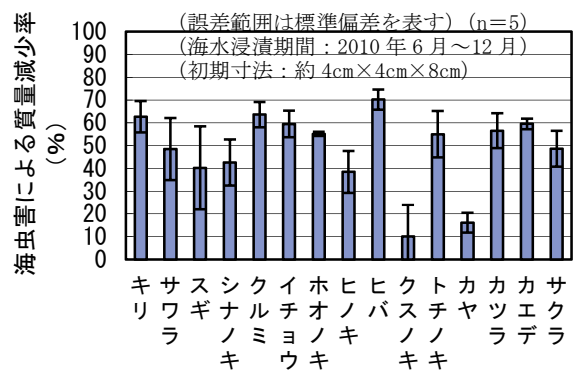


図-2 海虫害による質量減少率

図-3にフナクイムシ食害面積率を示す。これの求め方については2.1で述べた。この求め方により生じることが考えられる誤差には、(1)フナクイムシの孔道を円で置き換えるときに生じる誤差、(2)フナクイムシ食害が激しくなると切断した際に孔道の境界がわかりにくくなるために生じる誤差、(3)クイムシ食害が進んで外周部が消失した場合その外周部に孔道が存在していたとしても計上できないことにより生じる誤差、などがある。図-3によると、カヤが最小で、次いでサワラ、ヒノキ、スギ、クスノキが少ない。ただしヒノキ、スギ、クスノキでは、ばらつきがやや大きかった。

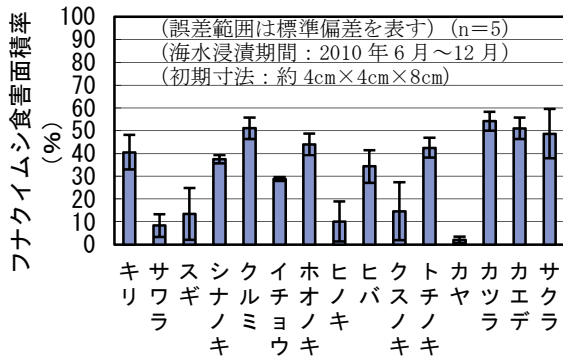


図-3 フナクイムシ食害面積率

図-4にキクイムシによる食害体積減少率推定値を示した。この値は、質量減少率からフナクイムシ食害面積率を差し引いて求めた。これは以下の仮定による；(1)質量減少率=体積減少率, (2)フナクイムシ食害面積率=フナクイムシによる体積減少率, (3)キクイムシによる体積減少率=体積減少率-フナクイムシによる体積減少率。ここで仮定(2)では、断面に見られるフナクイムシの穿孔が試験体の長手方向に一樣に続いているような状態を想定しており、実際には試験体両端部にフナクイムシ食害がないことを考慮するとフナクイムシ体積減少率をやや過大評価している可能性がある。図-4でクスノキの値が負になっているのはこのためかもしれない。このように定量的な値としては精度に問題があるが、樹種ごとの食害傾向の差の指標にはなると考えた。図-3と図-4を比較すると、キクイムシによる体積減少率がフナクイムシ食害面積率よりも大きかったのは、サワラ、スギ、イチヨウ、ヒノキ、ヒバ、カヤで、針葉樹材（+イチヨウ）であった。

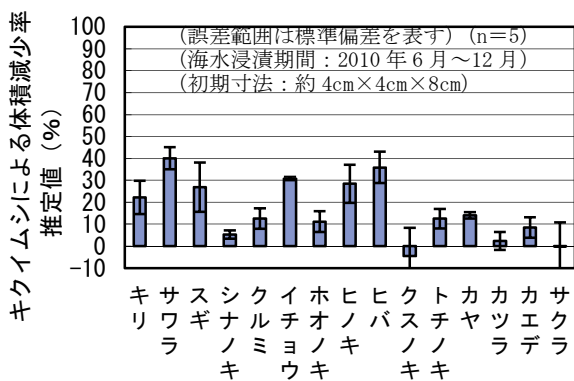


図-4 キクイムシによる食害体積減少率推定値

図-5にデュロメータによる硬さ測定結果を示す。一般に木材の強度的な性質は、全乾状態（含水率0%）で最高であり、吸湿すると細胞壁が水分子と結合することにより低下するが、繊維飽和点と呼ばれる含水率約30%に達すると細胞壁が水分子で飽和するため低下が収束し一定となる。繊維飽和点を超えて木材に吸収された水は細胞

内腔に存在し、強度的性質には関与しない。日本の一般的な大気中で平衡状態に達した気乾状態の木材の含水率は15%前後とされている。今回の試験体の含水率の樹種別平均値は、気乾状態（気中に6か月間保管後）では13.0%（キリ）～16.5%（クスノキ）、湿潤状態（水道水中に6か月間浸漬後）では105%（サクラ）～290%（キリ）であった。図-5に示すように、いずれの樹種でも気乾状態に比べて湿潤状態では硬さが低下し、その割合（湿潤/気乾）は0.74（スギ）～0.86（クスノキ）であった。

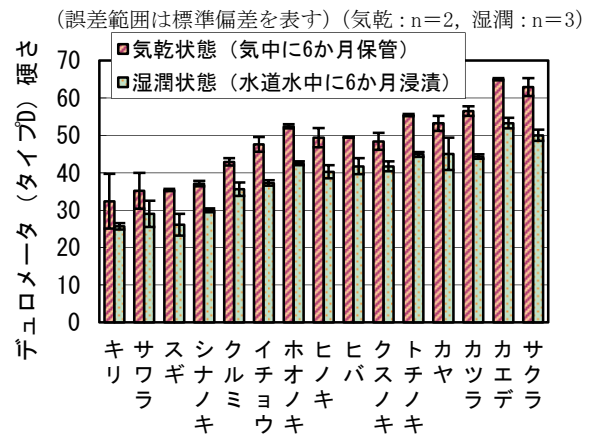


図-5 デュロメータによる硬さ測定結果

図-6に湿潤状態でのデュロメータ硬さとキクイムシによる食害体積率推定値の関係を示す。2008年の結果と同様に、今回の結果でも硬さが増すとキクイムシ食害が少なくなる傾向が見られた。図-7に比重とデュロメータ硬さの関係を示す。大谷(2001)が示しているように、両者には強い相関が見られる。このため、図-8のように比重とキクイムシ食害の関係を表しても、図-6とほぼ同様の図となる。

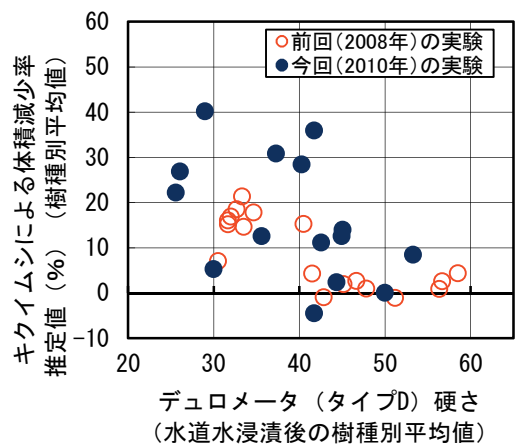


図-6 デュロメータ硬さとキクイムシ食害の関係



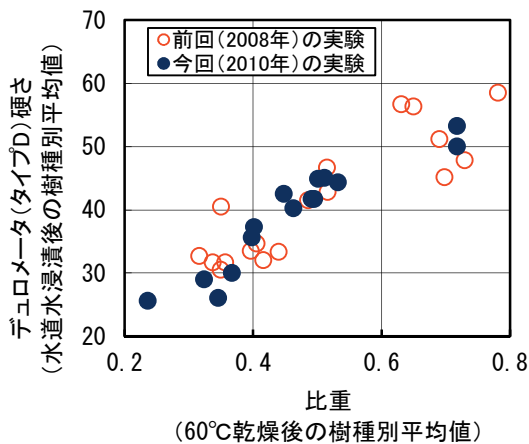


図-7 比重とデュロメータ硬さの関係

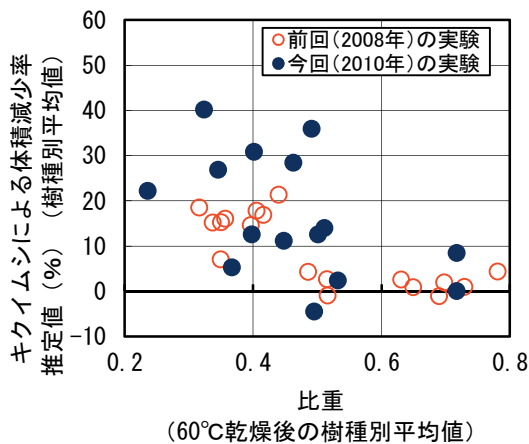


図-8 比重とキクイムシ食害の関係

図-9に圧縮強度試験結果を示す。各樹種について気中2個、水道水中3個、海水中5個の試験体の圧縮強度の平均値と標準偏差を示している。圧縮強度は一般に（圧縮破壊時の荷重／試験体断面積）として求められる。圧縮破壊といっても木材の場合はコンクリートのように脆性破壊して荷重が急減するわけではなく、局部座屈が始まり荷重が一定値を保ったまま変形が進行する。この座屈開始時の荷重を分子として用い、分母には実験の最初に60℃で乾燥して測定した寸法による初期断面積を用いた。湿潤状態での圧縮強度の気乾状態に対する低下率は、デュロメータ硬さの低下率よりも大きく、その割合（湿潤／気乾）は0.50（クルミ）～0.73（クスノキ）であった。海水浸漬した試験体のほとんどはごく小さな荷重で座屈開始した。

水道水浸漬試験体の圧縮強度の樹種別平均値 ( $f_{Fa}$ ) と、海水浸漬した各試験体の圧縮強度 ( $f_S$ ) から、各試験体の海虫害による圧縮強度減少率を  $\{(f_{Fa} - f_S) / f_{Fa}\} \times 100$  (%) として求め、その樹種別平均値と標準偏差を図-10に示し

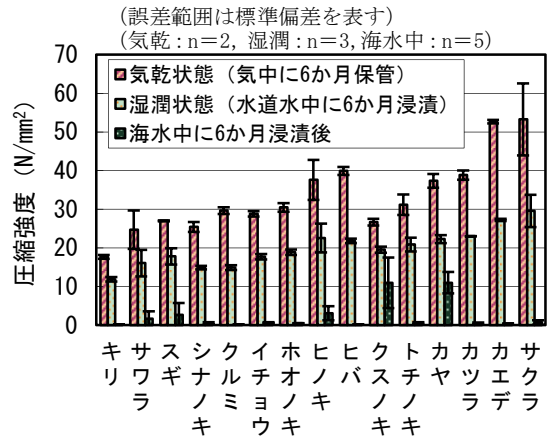


図-9 15樹種試験体の圧縮強度

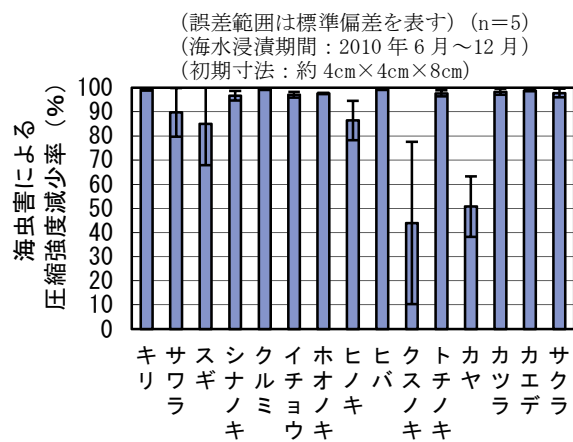


図-10 海虫害による圧縮強度減少率

た。クスノキとカヤでは平均減少率が50%程度であった。ただしクスノキでは標準偏差が大きかった。スギ、ヒノキ、サワラで平均減少率は85～90%であり、その他の樹種では97～99%であった。

### 3. 海虫害と強度

前章の実験では、海虫害によって木材の圧縮強度が著しく低下することが示唆された。海虫害と強度の関係について筆者は2009年に実験を行ったが、その樹種はスギのみで、形状、寸法、海水浸漬期間も1種類のみであった（山田(2010)）。そこで今回、樹種、形状、寸法、海水浸漬期間を変化させて、圧縮強度試験と曲げ強度試験を実施し、海虫害による質量減少率と強度減少率の関係について調べることにした。なお、海水浸漬に用いた施設と浸漬方法は前章に述べたとおりである。

#### 3.1 実験方法

- (1) 試験体
  - a) 角柱圧縮試験体

2009年の実験では4cm角で圧縮載荷方向の長さが8cmの試験体を用いた。今回は、形状の影響を検討するため、4cm角で長さが4cm, 8cm, 12cmの試験体を用いた。樹種はスギで、60℃乾燥後の比重は0.30~0.38であった。各長さにつき6個の試験体を海水に浸漬した。また各試験体の対照試験体を水道水中と室内の気中で保管した。海水浸漬は2回に分けて半数ずつ、2010年6月28日と8月23日に行った。回収は2010年10月19日に行った。すなわち浸漬期間は約2か月と約4か月である。

#### b) 円柱圧縮試験体

直径10cm, 長さ20cmのカラマツ円柱加工材を用いた。60℃乾燥後の比重は0.44~0.51であった。9個の試験体を海水に浸漬し、対照試験体を水道水中と室内の気中に設置した。海水浸漬は3回に分けて3個ずつ、2010年7月28日, 8月30日, 9月29日に行った。回収は2010年12月7日に行った。すなわち浸漬期間は約2, 3, 4か月である。

#### c) 4cm角曲げ試験体

4cm角で長さ32cmの試験体を用いた。樹種はスギ, ヒノキ, ナラである。60℃乾燥後の比重は、スギ0.23~0.39, ヒノキ0.41~0.53, ナラ0.56~0.75であった。各樹種9個の試験体を海水に浸漬し、対照試験体を水道水中と室内の気中に設置した。海水浸漬は3回に分けて各樹種3個ずつ、2010年6月21日, 7月22日, 8月23日に行った。回収は2010年10月14~18日に行った。すなわち浸漬期間は約2, 3, 4か月である。

#### d) 2cm角曲げ試験体

2cm角で長さ30cmの試験体を用いた。樹種はスギである。60℃乾燥後の比重は0.28~0.35であった。6個の試験体を海水に浸漬し、対照試験体を水道水中に設置した。海水浸漬は2010年8月23日に行った。回収は2010年10月21日に行った。すなわち浸漬期間は約2か月である。

### (2) 載荷実験

試験体を回収後、質量を測定し、載荷実験を行った。圧縮載荷、曲げ載荷ともに油圧式万能試験機を用いた。圧縮強度および強度減少率の求め方は、前章で述べたとおりである。

曲げ載荷実験は4点載荷で行った。載荷点間隔は10cmとした。支点間隔は4cm角試験体では26cm, 2cm角試験体では28cmとした。曲げ強度は一般に(最大曲げモーメント/断面係数)で求められるが、この分母として実験の最初に60℃で乾燥して測定した寸法による初期断面係数を用いた。載荷実験後、試験体を103℃で乾燥して質量を計測し、前章で述べたように質量減少率を求めた。

## 3.2 実験結果

図-11と図-12に、海虫害による質量減少率と圧縮強度および曲げ強度減少率の関係を示す。

図-11には3.1で述べた試験体の他に、前章で述べた15樹種試験体の結果と、2009年に行ったスギ角柱4cm×4cm×8cm試験体7個の結果と、次章で述べる直径5cm長さ10cmの円柱試験体の結果をあわせて示した。圧縮・曲げ強度減少率とともに、質量減少率の値に対して大きかった。質量減少率約20%で強度減少率は約60%に達し、質量減少率約40%では強度減少率はほとんど90%を超えていた。樹種、形状、寸法の影響は特に見られなかった。

興味深いのは、陸域での主要な生物劣化要因である木材腐朽菌を対象にした既往の研究(福田ら(1974))での質量減少率と曲げ強度減少率の関係と、今回の結果とがよく似ていることである。強度低下が腐朽に対して非常に敏感である理由として福田らは、木材細胞壁を構成するセルロース鎖が腐朽菌によって分解されている途中の

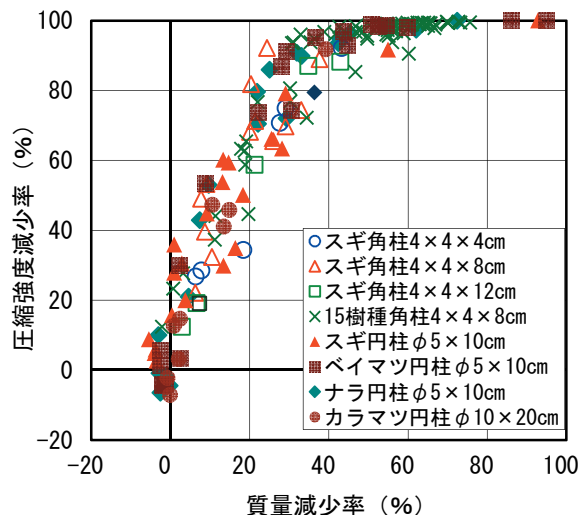


図-11 海虫害による質量減少率と圧縮強度減少率

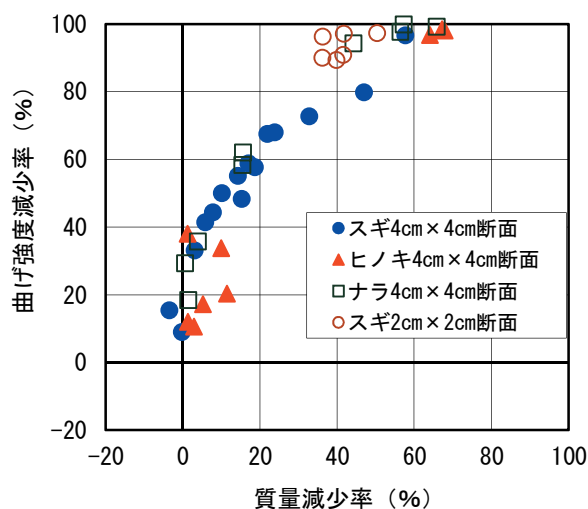


図-12 海虫害による質量減少率と曲げ強度減少率

段階では質量は減少しないが強度は大きく低下するためと考えている。海虫害の場合にも、質量が減少せずに強度が低下する段階が存在するのかもしれない。

また別の解釈として、海虫害の偏在が影響しているかもしれない。質量減少率が試験体の平均的な海虫害の程度を表すのに対して、強度減少率は局所的な損傷に大きな影響を受けるので、海虫害が偏在しているほど強度減少率/質量減少率が大きくなると考えられる。これらの解釈の妥当性の検証は、今後の課題としたい。

#### 4. 海虫害の防除

前章で述べたように、海虫害は木材強度に及ぼす影響が大きい。このため、栈橋の杭のように海水中で強度部材として木材を使用する場合には、海虫害の防除が必要となる。本章では、木材を目の細かい網（メッシュ）で包むことによる新たな海虫防除法と、陸域で既に実用化されている熱処理と低分子フェノール樹脂注入処理の海虫害に対する防除効果について検討した。

##### 4.1 メッシュ被覆

栈橋の木杭や汽水域の木製橋脚を海虫害から防除するために金属や樹脂で被覆する工法は、欧米などでこれまでも用いられている。これらの工法では木材と不透水性の被覆材を接着するのに対し、今回検討した方法では、メッシュ状の被覆材を用い、木材と被覆材は接着しない。フナクイムシは受精後20～30日間海水中を遊泳しつつ成長し、直径約0.3mmのペディベリジャー幼生（pediveliger larva）期に達すると木材への付着、穿孔が可能になる（角田ら（1979））。またクイムシは、幅1mm、長さ3mm程度の成体が遊泳して木材に付着し穿孔を開始する。このような海虫類の大きさよりも目の細かいメッシュで被覆すれば、海虫類が木材に付着できないのではないかと予想した。

##### (1) 実験方法

###### a) 使用したメッシュ

ポリエチレン（PE）製のメッシュを使用した。メッシュの目の細かさが異なる6種類の製品を用いた。その目開きを表-2に示す。メッシュ名称のPEの後の数字は1インチ当たりの目の数を表す。実体顕微鏡（倍率：100倍）でメッシュを観察したところ、メッシュの目開きは長方形であり、その長辺と短辺の長さを顕微鏡のスケール（最小目盛0.01mm）で実測した値を表に付記した。

表-2 メッシュの目開き

メッシュ名称	目開き (mm)		
	カタログ値	実測値	
		長辺	短辺
PE30	0.760	0.80	0.75
PE40	0.526	0.54	0.50
PE50	0.407	0.40	0.38
PE70	0.292	0.30	0.26
PE100	0.224	0.25	0.16
PE150	0.143	0.15	0.12

###### b) 使用した木材

木材として、スギ、ベイマツ、ナラの直径5cmの円柱材を用いた。1本の円柱材から長さ10cmの円柱試験体を13個切り出し、うち7個を海水浸漬用とし、他の6個を対照試験体としたものを1組とし、各樹種につき3組の試験体を用意した。海水浸漬用7個の内6個を、目開きの異なるメッシュで被覆し、他の1個は無被覆とした。浸漬前にあらかじめ気乾状態で試験体の質量と寸法を測定した。気乾比重はスギ0.36～0.39、ベイマツ0.61～0.71、ナラ0.68～0.86であった。

###### c) 被覆方法

木材の側面、木口面（端面）ともに、1層のメッシュで被覆した。側面には10cm×17.5cm、木口面には8cm×8cmにカットしたメッシュを用いた。輪ゴム（オーバンド No. 170、折径6cm、切幅3mm）を5本（中央1本、両端各2本）使用してメッシュを木材に定着した（付録の写真-A.3）。メッシュ以外の条件をなるべく同じにするため、無被覆の試験体にも輪ゴムを同様に巻いた。

###### d) 浸漬・回収

浸漬方法は、前章までに述べた実験と同様である。2010年7月8～13日に海水浸漬した。各樹種とも、2010年12月6日、2011年4月19日、2011年11月4日に、1組ずつ回収した。したがって浸漬期間は約5, 9, 16か月である。対照試験体は水道水中と室内の気中に半数ずつ保管した。

###### e) 海虫害の評価

海水浸漬後回収した試験体からメッシュを取り外し、質量を測定後、圧縮載荷試験を行った。載荷方法と圧縮強度の求め方は前章までと同様である。対照試験体についても同様に測定した。

その後、各試験体の103℃乾燥質量を測定した。気中保管試験体の気乾質量と103℃乾燥質量の比を用いて、各試験体の浸漬前の気乾質量から浸漬前の103℃乾燥質量を推定し、質量減少率を計算した。また、海中浸漬試験体については、中間とその両側2.5cmの計3断面で試験体を切断し、内部の食害状況を観察した。

(2) 実験結果

表-3と表-4にキクイムシとフナクイムシによる食害状況、図-13~15に質量減少率、図-16~18に圧縮強度減少率、付録の写真-A.4~6に切断面を示す。各浸漬期間とともに、多少の例外はあるが概ね無被覆が最も激しく食害され、メッシュの目が細くなるほど食害が少なくなり、質量減少率と圧縮強度減少率が小さくなる傾向が見られた。特にPE100ないしPE150で被覆した試験体のフナクイムシ食害については、浸漬9か月のPE100被覆スギで1個の穿孔が見られただけであった。キクイムシ食害については、浸漬16か月のPE100被覆スギで全面的な食害が見られ、浸漬9か月のPE150被覆スギと浸漬16か月のPE150被覆ベイマツ・ナラでは部分的な食害が生じた。その結果、スギでは圧縮強度低下も見られた。

これらの結果から、メッシュ被覆は海虫害を軽減する効果があり、特に目開きが0.25mm×0.16mmのPE100やそれより細かいPE150で被覆した場合には16か月までフナクイムシ食害をほぼ防ぐことができた。このためナラのように硬さ（比重）の大きい広葉樹材でフナクイムシがキクイムシよりも主な加害要因となる樹種では有効であろう。一方、PE100ないしPE150で被覆したスギ試験体で、強度低下を生じるキクイムシ食害を受けたものがあつた。今回、直径50mm（円周157mm）の円柱試験体側面に長さ170mmのメッシュを巻いたので、メッシュの重なりは幅18mmしかなく、ここからキクイムシが侵入したのかもしれない。また、側面のメッシュと端部のメッシュの重なり部分の隙間から侵入した可能性もある。スギなどキクイムシが主な加害要因となる樹種では、キクイムシの侵入を防ぐように、メッシュの取り付け方法を改良する必要がある。

表-3 キクイムシ食害状況  
(×：全面食害，△：部分食害，○：食害なし)

樹種	浸漬期間	被覆に用いた PE メッシュ						
		無	PE 30	PE 40	PE 50	PE 70	PE 100	PE 150
スギ	5 か月	×	×	△	○	○	○	○
	9 か月	×	×	×	△	○	○	△
	16 か月	×	×	×	×	△	×	○
ベイマツ	5 か月	×	△	△	△	○	○	○
	9 か月	×	×	×	△	○	○	○
	16 か月	×	×	×	×	△	○	△
ナラ	5 か月	△	△	△	○	○	○	○
	9 か月	△	△	△	○	○	○	○
	16 か月	×	×	×	×	△	○	△

表-4 フナクイムシ食害状況  
(×：全面食害，△：部分食害，○：食害なし)

樹種	浸漬期間	被覆に用いた PE メッシュ						
		無	PE 30	PE 40	PE 50	PE 70	PE 100	PE 150
スギ	5 か月	△	△	△	△	△	○	○
	9 か月	△	△	△	△	△	△	○
	16 か月	△	△	○	△	○	○	○
ベイマツ	5 か月	×	×	×	△	△	○	○
	9 か月	×	×	×	×	×	○	○
	16 か月	×	×	×	△	△	○	○
ナラ	5 か月	×	×	×	×	△	○	○
	9 か月	×	×	△	△	×	○	○
	16 か月	×	×	×	△	△	○	○

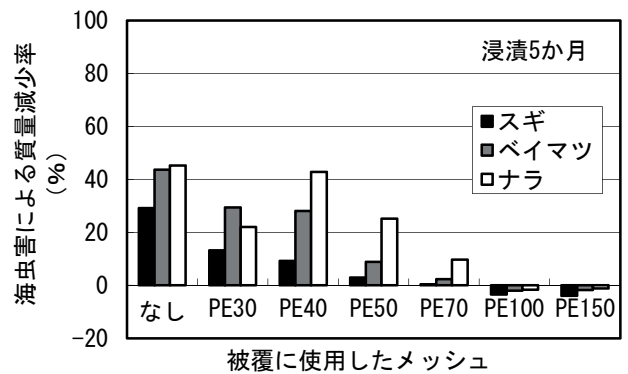


図-13 被覆に使用したメッシュおよび樹種と海虫害による質量減少率（浸漬期間 5 か月）

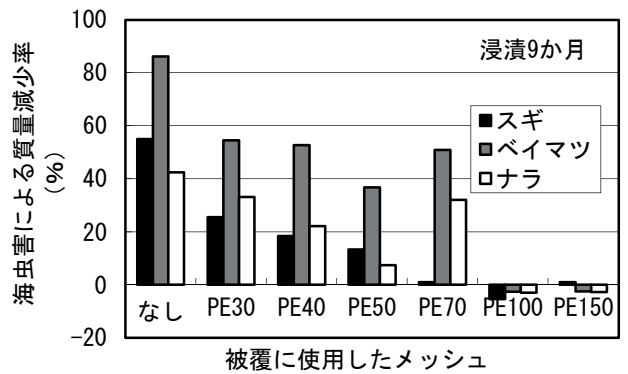


図-14 被覆に使用したメッシュおよび樹種と海虫害による質量減少率（浸漬期間 9 か月）

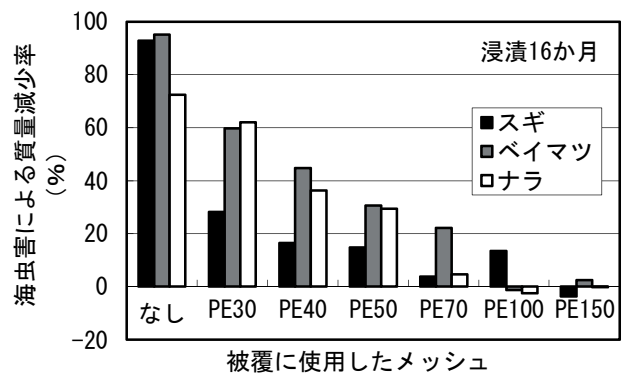


図-15 被覆に使用したメッシュおよび樹種と海虫害による質量減少率（浸漬期間 16 か月）

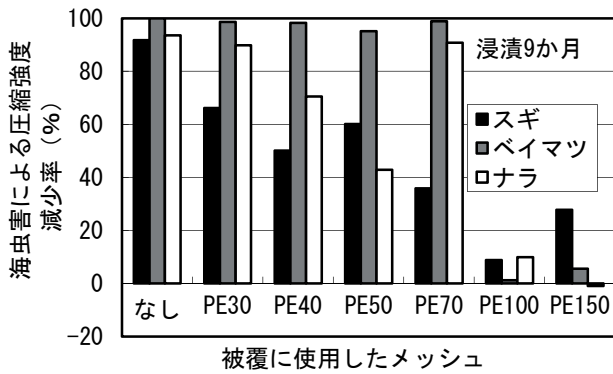


図-17 被覆に使用したメッシュおよび樹種と海虫害による圧縮強度減少率（浸漬期間 9 か月）

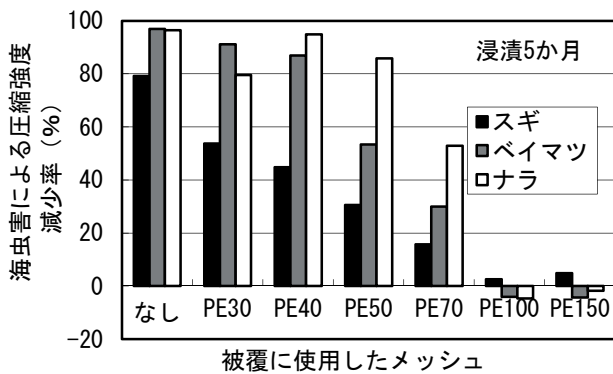


図-16 被覆に使用したメッシュおよび樹種と海虫害による圧縮強度減少率（浸漬期間 5 か月）

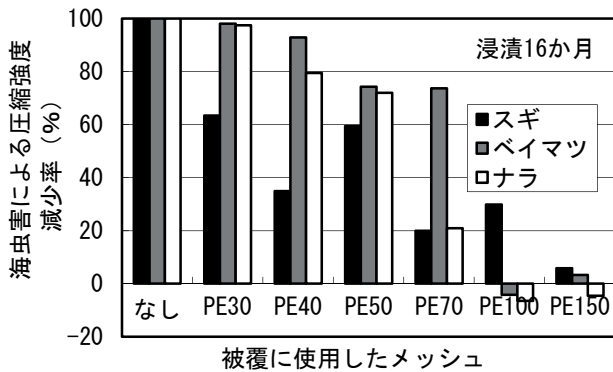


図-18 被覆に使用したメッシュおよび樹種と海虫害による圧縮強度減少率（浸漬期間 16 か月）

#### 4.2 熱処理

木材を200℃前後の温度で加熱することにより、木材細胞壁のセルロースに質的な変化が生じ、腐朽菌やシロアリに対する抵抗性が付与されることが確認されている（桃原(2005), 森田ら(2009), 酒井ら(2012)）。熱処理の工程の異なるいくつかの製品が、建築物の外装材などに実用化されている。本研究ではフィンランドで開発され

た熱処理技術であるサーモウッド処理を対象に、海虫類に対する抵抗性について実験した。

##### (1) 実験方法

サーモウッド処理は、日本では越井木材工業（株）によりスギなどの国産材への応用技術が確立され、同社により処理材が製造・販売されている。今回使用した試験体も同社から入手した。樹種はスギである。

サーモウッド処理は、以下の3工程から成る。工程1では、100～120℃で材を含水率2～3%まで乾燥させる。工程2では、急激に温度を上げ、規定温度に達してから規定時間保持する。工程3では、水スプレーで材を冷却するとともに、含水率8～9%程度に調湿する。処理はすべて常圧、水蒸気存在下で行われる。

今回の試験体では、工程2の規定温度と規定時間を表-5のように変化させている。1枚の4m材から500mmの材を切り出し、表-5のそれぞれの処理を行い、各処理材からT20mm×R20mm×L100mmのサイズに切り出したものである。ここで、Tは年輪接線方向、Rは放射方向（年輪直角方向）、Lは長手方向（繊維方向）を表す。各処理条件の試験体数を10個とした。

表-5 試験片の処理温度と処理時間

処理温度 (℃)	処理時間 (時間)
無処理	無処理
185	1
195	1.5
210	2
220	2.5
230	3
237.5	5

試験体の60℃乾燥質量を測定した後、2008年6月23日に、前述の方法で海水に浸漬した。その後は1年ごとに、各処理条件について3個の試験体を回収し、観察と60℃乾燥質量の測定を行った。

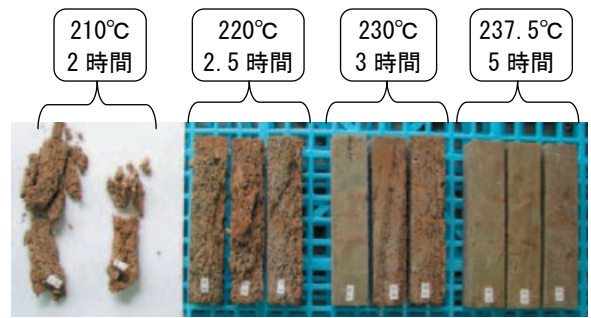
##### (2) 実験結果

浸漬1年で回収した試験体の外観を写真-2に示す。回収予定の試験体内、無処理材と185℃処理材は消失し、195℃処理材は1個のみ残存し、他は3個とも残存していた。残存した試験体のキクイムシによる食害は、処理温度と処理時間が増すほど軽減される傾向が見られた。195℃、210℃処理材が全面的に激しい食害を受けたのに対し、220℃処理材では主に柁目面と木口面の晩材が食害を受けた。（柁目面は年輪直角方向の切断面、板目面は年輪平行方向の切断面、木口面は繊維直角方向の切断面を表す。また、晩材は年輪の色の濃い層であり、逆に色の薄い層

は早材と呼ばれる。) 230℃処理材では局所的に晩材が食害を受けた。晩材は早材よりも密度が高く硬いため、通常はキクイムシは早材を先に食害するが、これと逆の傾向が見られた。熱処理の効果が早材部の耐海虫性を晩材部よりも高めたことが推測され興味深い結果である。この原因の解明は今後の課題である。

浸漬2年で回収した試験体の外観を写真-3に示す。195℃以下の処理材は消失していた。210℃処理材は1個消失し、残存した2個も形が大きくくずれていた。220℃と230℃処理材は、浸漬1年のものより食害が進行していた。

浸漬3年で回収した試験体の外観を写真-4に示す。210℃以下の処理材は消失していた。220℃と230℃処理材の状況は、浸漬2年のものと同様であった。237.5℃処理材は、いずれの浸漬期間でも、いくつか小さな孔が見られたのみで、外観上はほとんど食害を受けていなかった。



a) 板目面

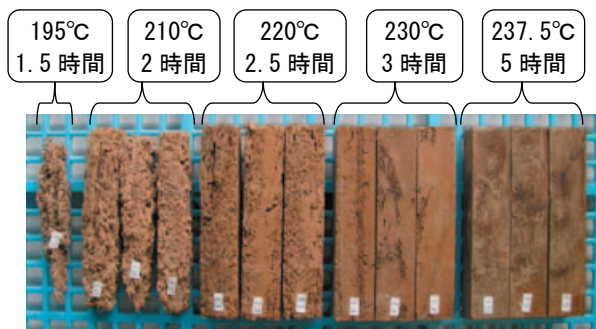


b) 柁目面



c) 木口面

写真-3 海中浸漬2年の熱処理材試験体(乾燥後)



a) 板目面

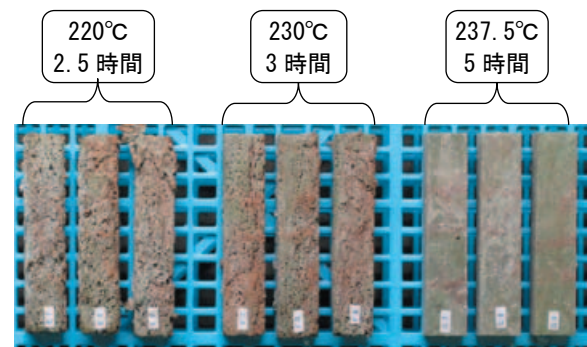


b) 柁目面



c) 木口面

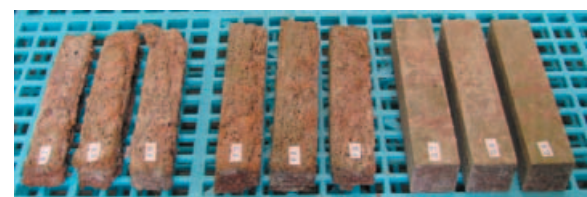
写真-2 海中浸漬1年の熱処理材試験体(乾燥後)



a) 板目面



b) 柁目面



c) 木口面

写真-4 海中浸漬3年の熱処理材試験体(乾燥後)

図-19に、海水浸漬前後での60℃乾燥質量の減少率を示す。237.5℃処理材で質量減少率が負の値となっているのは、食害による質量減少がほとんどなく、逆に塩分等の浸入により質量増加が生じたものと思われる。消失はしなかったもののキクイムシ食害を受けた220℃、230℃処理材の質量減少率（3個の平均値）は、浸漬3年でそれぞれ69%、44%に達していた。

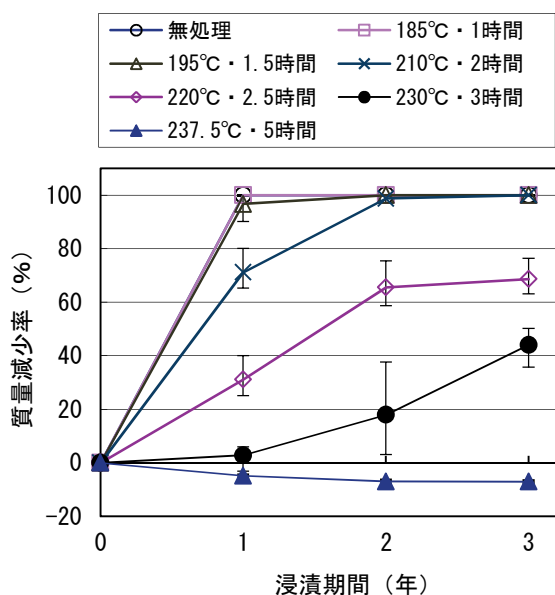


図-19 海水に浸漬した熱処理材試験体の乾燥質量減少率  
(n=3, 誤差範囲は最大・最小値)

浸漬2年および3年の220℃、230℃処理材については、内部のフナクイムシ食害の有無を確認するため、2cm間隔で切断した。切断面の一例を写真-5に示す。他の試験体においても内部にフナクイムシ特有の円形の穿孔は見られなかった。すなわち220℃、230℃処理材の食害はキクイムシのみによって生じていた。237.5℃処理材については、質量減少が生じていないことから、内部にフナクイムシ食害は生じていないと推測される。210℃以下の処理材については、フナクイムシ食害の有無は不明である。220℃以上の処理材では、今回はフナクイムシ食害が生じなかったものの、2章で述べたようにスギは比較的フナクイムシ食害を受けにくい樹種であり、フナクイムシ食害

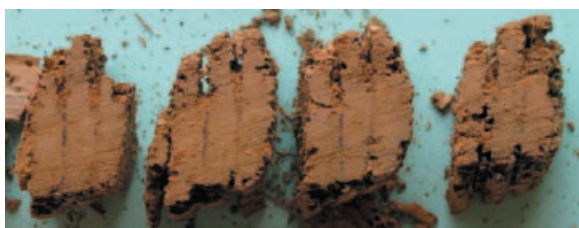


写真-5 海水浸漬2年後の220℃処理材の切断面

を受けやすい樹種については別途実験する必要がある。

熱処理材の陸域の野外での耐久性について酒井らは、熱処理により化学的に変化した細胞壁構成成分の長期的安定性と、その経年変化による吸湿性・耐朽性・耐蟻性等の経年変化が今後の検討課題であると述べている（酒井ら(2012)）。耐海虫性に関しても、浸漬3年まで有効であった237.5℃処理の効果の長期的な持続性については今後の課題である。237.5℃処理試験体については、回収し乾燥質量を測定した後、再び海中に戻しているため、現在まで未回収の1個と合わせて10個の試験体の浸漬を継続中である。2013年7月8日（浸漬期間5年）に外観を観察した限りでは食害は進展しておらず、今後も観察を継続する予定である。

#### 4.3 低分子フェノール樹脂注入処理

陸域で最も腐朽や蟻害を受けやすい環境は土に接する用途であり、こうした用途にはクレオソート油やCCA（クロム・銅・ヒ素化合物）を加圧注入した木材が従来用いられてきた。また米国では栈橋の杭の海虫対策として、これらの薬剤を陸域用よりも多量に注入した針葉樹材が用いられてきた。しかし近年環境規制の強化により、発がん性物質を含む従来のクレオソート油や重金属を含むCCAの使用が困難になった。このためこれらの代替となる薬剤の開発が行われており、陸域では使用されつつあるが、その耐海虫効果は不明である。

薬剤を加圧注入した木材を海中浸漬すると薬剤の一部は海水中に溶脱する。これに対して、液状の樹脂を木材細胞壁に浸透させた後で熱硬化させることにより耐久性を向上させる取り組みが1990年頃から行われてきた。こうした化学加工木材では、海水中への溶脱がないという点では薬剤処理木材よりも生態系への悪影響の危険性が軽減されると考えられる。

こうした化学加工に用いる樹脂として、分子量が約500以下のフェノール樹脂を用いると木材細胞壁中に浸透することが京都大学の今村らにより明らかにされた（Ryuら(1993), 今村ら(2006)）。続いて九州大学の樋口らは、福岡県、九州木材工業（株）との共同研究により、未反応フェノールと重合体の少ない低分子量の中性樹脂「エコアコール」を開発し、この樹脂が従来品の半分の使用量で同等以上の寸法安定効果を持つことを示した（樋口ら(2002)）。九州木材工業（株）はエコアコールの木材への注入処理工程を確立し、処理材をエコアコールウッドという製品名で現在販売している。

エコアコールウッドの防腐・防蟻試験や屋外暴露試験はこれまでも行われている（内倉(2010)）が、耐海虫

試験は行われていなかった。この製品の海中利用の可能性を調べるため、海水への浸漬実験を行うことにした。

(1) 実験方法

九州木材工業（株）から2003年2月に購入したエコアコードウッド（樹種：スギ）の角材（寸法：42mm角×長さ405mm）を試験体として用いた。比較用の無処理試験体としては、別途購入したスギ角材（寸法：40mm角×長さ400mm）を用いた。

海水浸漬に用いた水槽は前述のとおりであるが、この実験では水槽内で常時海水中に没する位置の他に、干満帯にも試験体を設置した。干満帯は水槽の底から1.0～2.5mの高さで1日2回干出する。既往の知見では、干満帯は常時海水中よりも海虫害を受けやすいとする説が有力である。これは栈橋の杭で、干満帯の部分が集中的に食害されて細くくびれたり折れたりする経験に依拠している。その要因としては、干満帯で海虫の付着が生じやすいことや、海虫害を受けた木杭の表層部分が波の作用などで剥離しやすいことが挙げられる。

処理、無処理の試験体を各3個、2004年3月15日に干満帯に設置し、同17日に海水中に設置した。設置前にかじめ各試験体について曲げ試験を行った。試験方法は、支点間隔を30cm、载荷点間隔を10cmとした4点曲げ载荷とし、荷重200kgf（1.96kN）のときの試験体のたわみを計測した（写真-6）。試験体設置後、毎年3月または4月に試験体を一旦回収して、設置前と同様の方法で载荷・計測を行っている。直近では2013年4月23日に、設置後約9年での载荷・計測を行った。

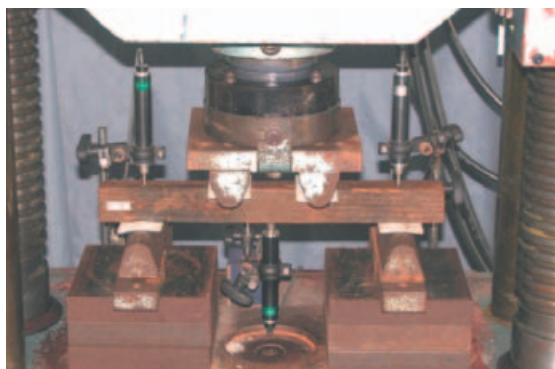


写真-6 低分子フェノール樹脂処理試験体の曲げ载荷試験状況

上記と別に、処理、無処理各1個を海水中に2005年6月17日に浸漬し、約5か月後の11月9日に端部から4cmの位置で切断し断面を観察した。その後浸漬を再開した処理材を2011年4月20日に回収し、長さ8cm×3個に切断して湿潤状態で圧縮強度試験した。同時にそれまで未使用で室内の気中に保管していた処理材から長さ8cmの試験体を6個

作成し、湿潤状態、気乾状態各3個の圧縮強度試験を行い、海水浸漬試験体の圧縮強度と比較した。

(2) 実験結果

写真-7に、2005年6月～11月の約5か月海中浸漬した処理材と無処理材の切断面を示す。無処理材にフナクイムシの穿孔とキクイムシによる周囲の損傷が見られるのに対し、処理材は食害されていなかった。

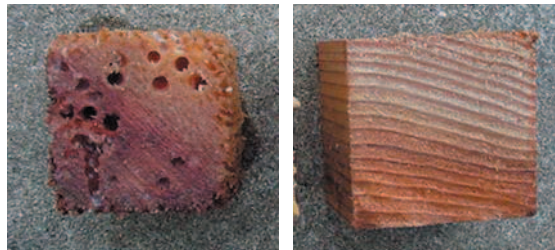


写真-7 海水浸漬5か月の無処理スギ材（左）と低分子フェノール樹脂処理材（右）

2004年に設置した試験体について、曲げ試験結果から試験体の剛性を評価し、設置前の値に対する比を図-20に

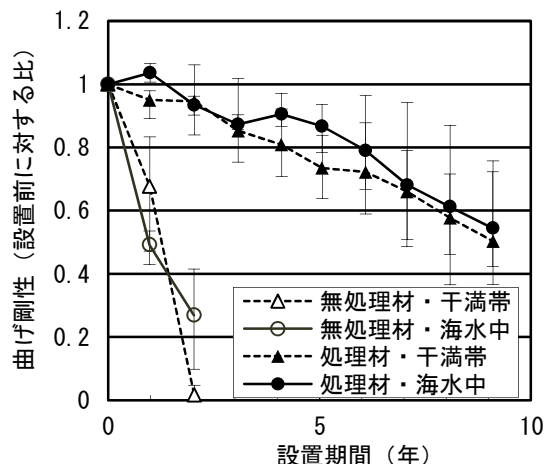


図-20 低分子フェノール樹脂処理材と無処理材の曲げ载荷試験結果 (n=3, 誤差範囲は最大・最小値)

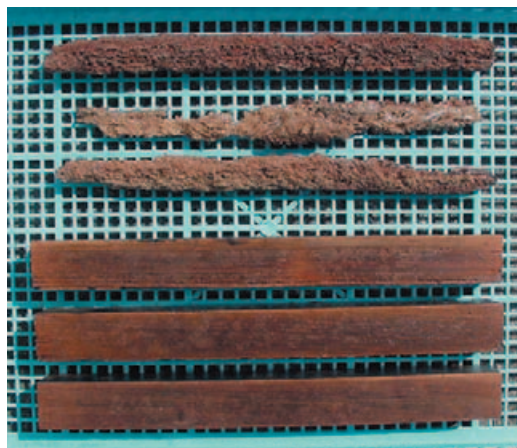


写真-8 干満帯設置2年後の試験体 (上3個：無処理材, 下3個：低分子フェノール樹脂処理材)



示した。剛性は、所定の荷重（200kgf）を与えたときの試験体のたわみの値を用いて評価した。ただし干満帯に2年間設置した無処理材では食害が激しく3個中1個は折れており（写真-8の上から2個目）、他の2個も200kgfの載荷は不可能であったため、載荷できた荷重の範囲でたわみを測定した。

図-20に見られるように、無処理材では干満帯、海水中ともに食害による剛性低下が進み、干満帯では2年で剛性がほぼ0となり、海水中試験体も3年目には食害のため剛性が評価できなかった。処理材の剛性も徐々に低下している。写真-9～12のように、処理材表面にはキクイムシによる食害が見られる。設置後9年の時点でキクイムシ食害はまだ全面的に広がってはいないが、部分的にはやや深く食害されている。剛性低下はキクイムシ食害によるものと考えられる。



写真-9 海水浸漬2年後の低分子フェノール樹脂処理試験体の端部



写真-10 干満帯設置4年後の低分子フェノール樹脂処理試験体の端部



写真-11 干満帯設置8年後の低分子フェノール樹脂処理試験体の側面



写真-12 海水浸漬8年後の低分子フェノール樹脂処理試験体の側面

図-20の剛性を各3個の試験体の平均値で比較すると、干満帯で無処理材の1年目の値に処理材の7年目の値が対応し、海水中では無処理材の1年目の値に処理材は9年目でまだ達していない。このように処理材では海虫害による剛性低下が大幅に抑制されている。

図-21に気乾状態、水道水浸漬による湿潤状態、海中6年浸漬後の圧縮強度試験結果を示す。各状態での強度の平均値の比は、(湿潤/気乾)が0.69、(海中/湿潤)が0.84であった。海中6年浸漬後の試験体は表面にキクイムシ食害を受けていたが、圧縮強度は湿潤状態試験体に対して16%の低下にとどまっていた。

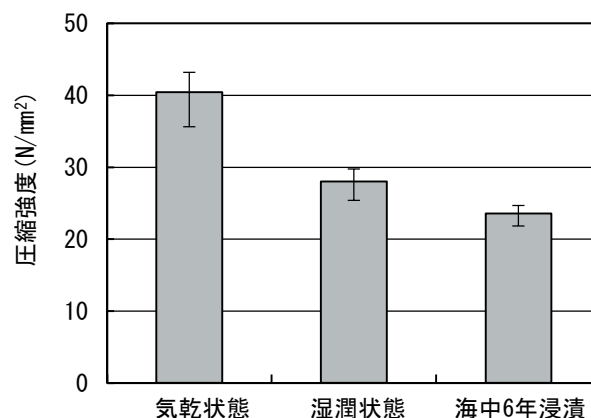


図-21 低分子フェノール樹脂処理材の圧縮強度 (n=3, 誤差範囲は最大・最小値)

## 5. 土中での海虫害

前章までに、海虫害の特性と防除法に関して述べた。この章では、栈橋の杭のように下部が海底地盤中に埋設される場合に、土中部分にも海虫害が生じるのか、簡単な実験を行って検討した。

### 5.1 実験方法

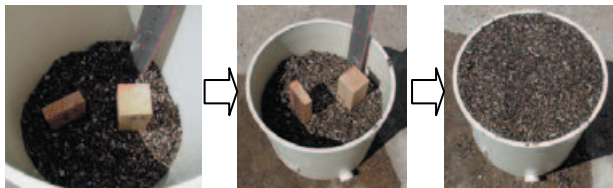
#### (1) 使用材料

試験体として、スギ材（4cm×4cm×8cm材2個と4cm×4cm×30cm材3個）と、バイマツ材（2cm×5cm×8cm材2個）を

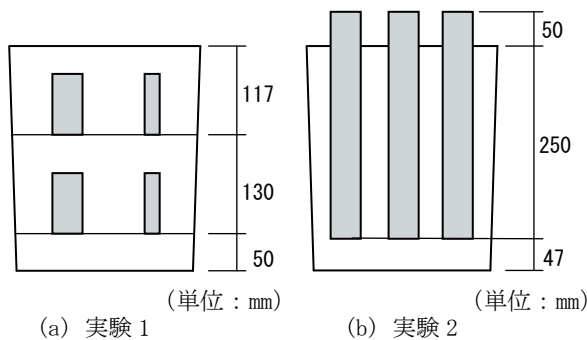
用いた。試験体の103℃乾燥質量を測定した。土砂としては、神奈川県横須賀市長瀬の久里浜海岸で採取した貝殻混り砂を用いた。土砂を入れる容器には、上径が256mm、下径が234mm、高さが297mmで、内径23mmの排水口を有する容器を用いた。

(2) 実験1 (完全に土中に埋めるケース) の方法

容器の下部に高さ50mmまで土を入れたあと、長さ8cmのスギとベイマツの試験体を各1個、繊維方向を鉛直にして置き、高さ180mmまで土を入れたあと、同様の試験体を置き、容器の上端まで土を入れた (写真-13, 図-22(a))。



下段試験体設置 上段試験体設置 砂充填完了  
写真-13 土中試験体設置状況 (実験1)



(a) 実験1 (b) 実験2  
図-22 容器内の試験体高さ

上段の試験体の土被りは4cm弱である。この容器をバケツに入れて、前述の海水循環水槽内に、常時海水中となるように浸漬した。2007年5月21日に、土砂採取から浸漬までを行った。2年後の2009年5月27日に、試験体のみ回収し、土砂の入った容器は水槽内に残し、実験2に使用した。試験体の回収直後の質量と103℃乾燥質量を測定した。

(3) 実験2 (試験体上部が海水と接するケース) の方法

長さ30cmのスギ試験体3個を、下部25cmが土中に埋まるように (図-22(b)) 容器の土中に押し込み、試験体の上端まで常時海水中に没するように浸漬した。2009年8月7日に試験体を設置し、2年9か月後の2012年5月1日に回収した。試験体の回収直後の質量と103℃乾燥質量を測定し、2cm間隔で切断して内部の食害状況を観察した。

5.2 実験結果

(1) 実験1 (完全に土中に埋めるケース) の結果

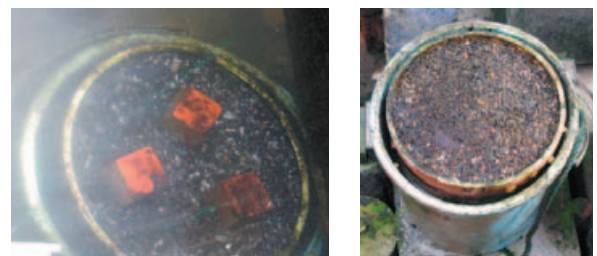
いずれの試験体表面にも、キクイムシ食害は見られなかった。質量測定結果を表-6に示す。回収直後の含水率はスギで223.8~259.7%、ベイマツで117.0~121.9%に達していた。すなわち土中に浸透した海水は試験体中にも十分に浸透していた。試験体の103℃乾燥質量は、浸漬前よりも増加していたことから、食害による質量減少は生じていない。(質量増加は海水中の塩分等の浸入によるものであろう。) この実験水槽で同時期に土砂に埋設せずに浸漬した木材にはフナクイムシとキクイムシによる食害が生じたことから、海水中にはフナクイムシの幼生や食害中の木材から出て遊泳するキクイムシが存在したが、土中埋設木材試験体には到達できなかったと考えられる。

表-6 土中埋設試験体の質量測定結果 (実験1)

試験体	埋設前	土中埋設・海水浸漬2年後			
	103℃乾燥質量 A (g)	回収直後の湿潤質量 B (g)	103℃乾燥質量 C (g)	回収直後の含水率 D (%)	乾燥質量増加率 E (%)
スギ (下段)	39.03	134.94	41.67	223.8	6.76
スギ (上段)	35.09	136.34	37.90	259.7	8.01
ベイマツ (下段)	32.74	71.93	33.14	117.0	1.22
ベイマツ (上段)	32.01	71.54	32.24	121.9	0.72

$$D = \{(B-C)/C\} \times 100, E = \{(C-A)/A\} \times 100$$

(2) 実験2 (試験体上部が海水と接するケース) の結果  
海水中に出ていた試験体上部が海虫によって食い尽くされ、回収時には試験体が土に覆われた状態になっていた (写真-14)。写真-15に示すように、海水中に出ていた上部5cmの部分が消失して試験体が短くなっていた。上端



(a) 設置直後 (b) 回収時  
写真-14 実験2の試験体の状況

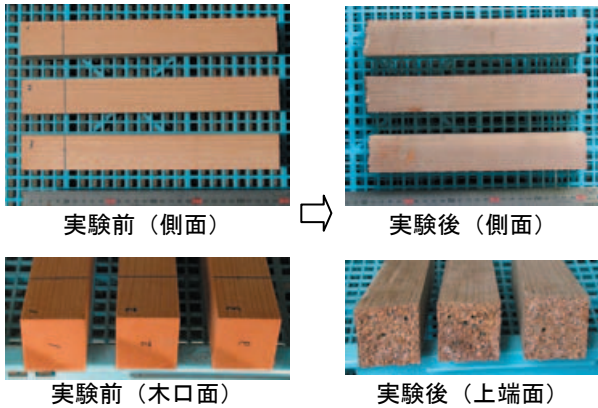


写真-15 実験前後の試験体の外観 (実験 2)

面には全面的にキクイムシ食害痕が見られ、フナクイムシによる穿孔もいくつか見られた。しかし土中に埋まっていた側面と下端面には食害が見られなかった。

試験体を2cm間隔で切断した断面を写真-16に示す。フナクイムシは、試験体最下部(土砂表面から23~25cm)まで穿孔したものが1個体、土砂表面から9cm前後まで穿孔したものが2個体、同5cm前後までが3個体、3cm前後までが1個体で、他は土砂表面から1cm前後までで止まったことが分かる。フナクイムシは尾部を穿孔の起点付近に残したまま頭部の貝殻で木を掘り進んでいくので、その体長は孔道の長さには等しい。尾部のある試験体上部5cmの部分がキクイムシ食害によって破壊されたことで死に至った個体もあったと推測される。2章で述べたように、カエデ、サクラなど比較的硬い広葉樹材では、キクイムシ食害をほとんど受けずに木材内部がフナクイムシによって激しく食害される傾向があるので、もしスギではなくこうした樹種をこの実験に用いていけば、フナクイムシによる食害はもっと激しかったと推測される。ただその場合でも、土砂で覆われた側面からの穿孔開始がない以上、食害が及ぶ深さが限られるであろう。すなわち土砂表面からの深さがフナクイムシの個体長の上限よりも深い部分には食害が生じないと推測される。



↑ 上端 (土砂表面高さ) ↑ 最下部  
写真-16 上部5cmを海中に出して土中に埋めた試験体の2cm間隔切断面 (設置期間2年9か月)

## 6. 海上の気中での風化

前章までは、海虫害に関して述べた。海虫は海生の貝類と甲殻類であり、常時海面上にある木材には棲息しない。したがってこのような位置にある木材の劣化要因は、基本的に陸域と共通である。ただし塩分を含む海洋飛沫を受けるような環境では、腐朽菌やシロアリなど陸域での一般的な加害生物の活動が抑制されると考えられるので、物理的な劣化要因である風化の重要性が相対的に高い。そこで木材の海洋飛沫帯での暴露実験を行い、風化特性について検討した。

### 6.1 実験方法

#### (1) 実験1 (2000年に開始した実験)

##### a) 試験体

樹種として、針葉樹のスギ、コウヤマキと、広葉樹のクリを用いた。寸法は4cm角で長さ40cm、試験体数はスギ9個、コウヤマキ10個、クリ10個であった。

##### b) 暴露方法

前述の海中浸漬に用いたものと同じポリエチレン製の薄型メッシュコンテナに試験体をひもで結び付けて、コンテナを当所の海水シャワー場(写真-17)に水平に設置した。海水シャワー場は主に鉄筋コンクリートや鋼材の腐食(塩害)・防食の実験に用いられている施設であり、1日に2回、各約4時間、海水がスプリンクラーで散布される。散布量を雨量計で実測したところ、毎時100mm前後であった。設置は2000年6月22日~7月10日に行った。なお、2002年10月1日に施設が台風の被害を受け、その後修復工事が完了するまでの1年間は、海水シャワーが停止していた。



写真-17 海水シャワー場

##### c) 測定方法

設置後、1か月、2か月、4か月、8か月、1年、2年、4年、5年、8年、10年、12年で観察・計測を行った。計測項目は質量、寸法、曲げ荷重によるたわみとした。曲げ荷重の支点間隔は30cm、荷重点間隔は10cmとした。荷重荷重

は200kgf (1.96kN) とした。

(2) 実験2 (2007年に開始した実験)

a) 試験体

樹種は、針葉樹のスギ、ヒノキ、マツ、カラマツと広葉樹のクリ、クスノキ、ブナ、ケヤキ、ナラ、カシとした(表-7)。寸法は2cm角で長さ38cm、試験体数は各樹種とも6個である。

表-7 試験対象樹種 (実験 2)

樹種	科	分類	気乾比重
スギ	スギ	針葉樹	0.42
ヒノキ	ヒノキ	針葉樹	0.49
マツ	マツ	針葉樹	0.51
カラマツ	マツ	針葉樹	0.88
クリ	ブナ	広葉樹	0.49
クスノキ	クスノキ	広葉樹	0.59
ブナ	ブナ	広葉樹	0.78
ケヤキ	ニレ	広葉樹	0.72
ナラ	ブナ	広葉樹	0.78
カシ	ブナ	広葉樹	0.94

b) 暴露方法

実験1と同じようにコンテナを用いて、海水シャワー場と、海水シャワー場に隣接し海水散布のない場所に、各樹種3個ずつの試験体を2007年10月25日に設置した。

c) 測定方法

設置後、2年、4年、6年で観察・計測を行った。試験体の含水状態を暴露前と同様にするため、計測前約1か月間、室内の気中で試験体を保管した後、質量の計測と曲げ載荷を行った。曲げ載荷では、支点間隔34cm、載荷点間隔10cmとし、所定のたわみに達した時の荷重を測定した。所定のたわみは、カラマツでは0.75mm、カシでは0.9mm、他の樹種では1mmとした。

## 6.2 実験結果

(1) 実験1 (2000年に開始した実験)

写真-18に暴露12年での試験体の外観を示す。腐朽や虫害の形跡はなく、風化による寸法の減少が見られた。目やせ(年輪に沿った凹凸)のため、精度の高い寸法計測はできなかったが、可能な限り平均的な寸法を求めた結果としては、暴露10年での長手方向(繊維方向)の寸法減少が、スギ:19mm、コウヤマキ:9mm、クリ:30mm程度、横方向(軸直角方向)の寸法減少が、スギ:5mm、コウヤマキ:5mm、クリ:10mm程度であった。

図-23に、曲げ載荷によって求めた曲げ剛性を、設置前の値に対する比で示した。広葉樹のクリの剛性が、針葉樹2樹種よりも速く低下した。なお、クリの試験体のうち2個が、風化により割れたため暴露10年以降曲げ載荷できなかった。このため、暴露10年と12年のクリの値は、



スギ



コウヤマキ



クリ

写真-18 海水シャワー場設置 12 年後の試験体 (初期寸法: 4cm×4cm×40cm)

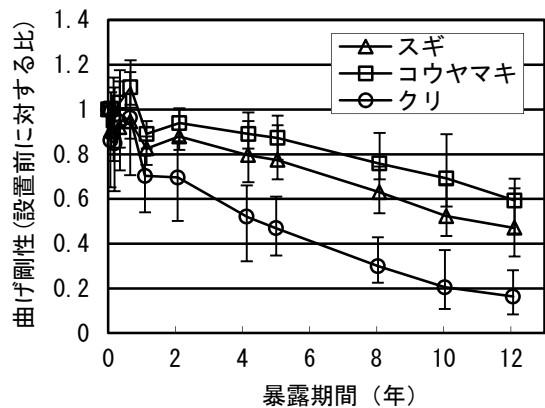


図-23 海水シャワー場設置試験体の曲げ剛性 (誤差範囲は最大・最小値を表す) (初期寸法: 4cm×4cm×40cm)

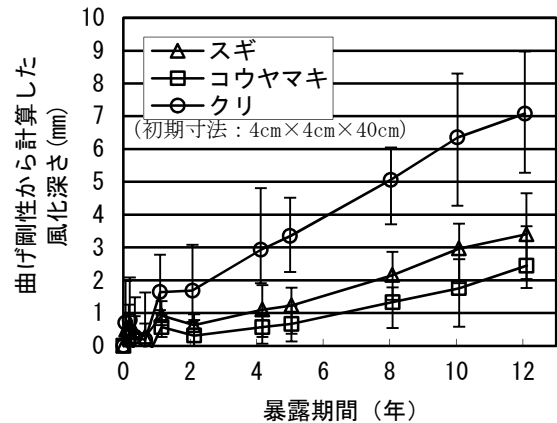


図-24 海水シャワー場設置試験体の曲げ剛性から計算した風化深さ (誤差範囲は最大・最小値を表す)

この2個を除いた平均値である。

曲げ剛性から求めた風化深さを図-24に示した。一般に、断面形状が正方形の部材では、曲げ剛性は断面の辺長の4乗に比例する。したがって暴露前に対する曲げ剛性の比の1/4乗を、暴露前に対する辺長の比とした。(1-辺長の比)×初期寸法=辺長減少量とした。辺長減少

量は表裏2面から同じ深さまで風化した結果であると仮定して、辺長減少量÷2=風化深さとした。図-24の風化深さの暴露10年での平均値はクリ:約6mm, スギ:約3mm, コウヤマキ:約2mmであった。

(2) 実験2 (2007年に開始した実験)

付録の写真-A. 7に、設置直後と設置6年後の試験体の外観を示す。海水散布のない条件では寸法減少は顕著でないが、散布のある条件では特に広葉樹材で寸法減少が見られた。

図-25に、海水散布のある条件での、気乾質量の減少率を示した。各樹種3個の試験体の結果をプロットし、原点を通る回帰直線を求めた。広葉樹材6樹種の回帰直線の勾配が針葉樹材4樹種の勾配より大きかった。また、広葉樹材の中ではクスノキの勾配がやや小さく、針葉樹材の勾配に近い。

図-26には、同じ試験体について、実験1と同様の方法で風化深さを求めた結果を示した。この回帰直線の勾配も質量減少率と同様に、広葉樹材で大きかった。

図-27には、海水散布なし、ありのそれぞれについて、風化速度(風化深さと暴露期間の回帰直線の勾配)の樹種ごとの平均値と、気乾比重の関係を示した。海水散布なしでは、広葉樹材(○)と針葉樹材(△)の違いは判然としないが、海水散布ありでは広葉樹材(●)が針葉樹材(▲)よりかなり大きかった。

陸域では、比重が大きい樹種ほど風化速度は小さいと一般に考えられている。これは、風化によって木材の質量が減少する速度が樹種によらず一定であるとする、比重が大きいほど質量当たりの体積が小さいので、体積が減少する速度は小さくなるからである。今回の実験結

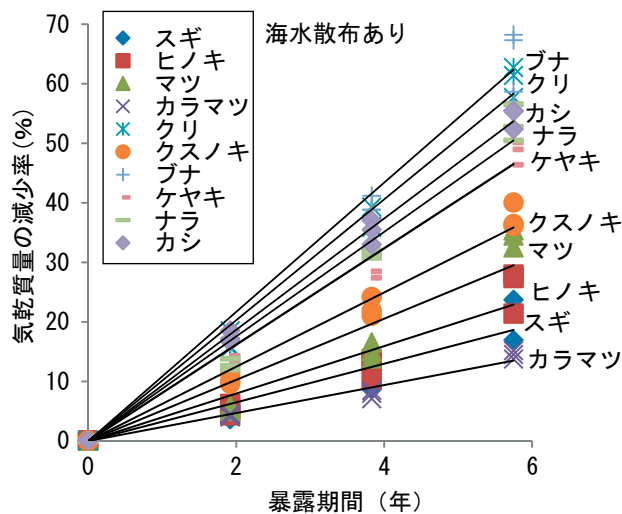


図-25 海水シャワー場設置試験体の気乾質量の減少率 (n=3) (初期寸法: 2cm×2cm×38cm)

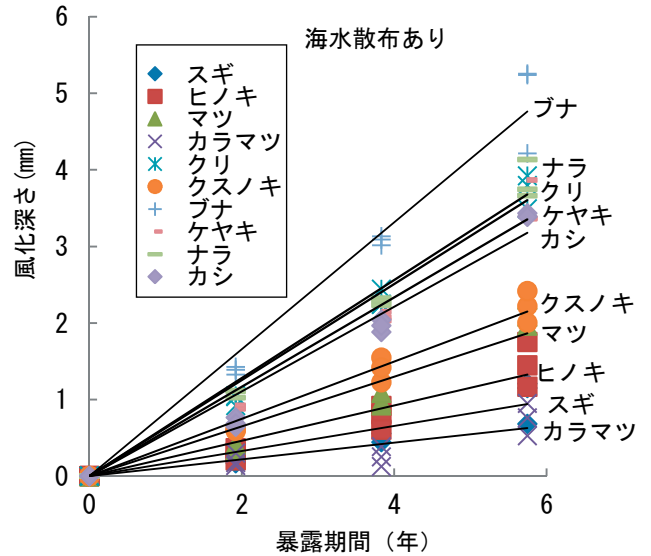


図-26 海水シャワー場設置試験体の曲げ剛性から計算した風化深さ (n=3) (初期寸法: 2cm×2cm×38cm)

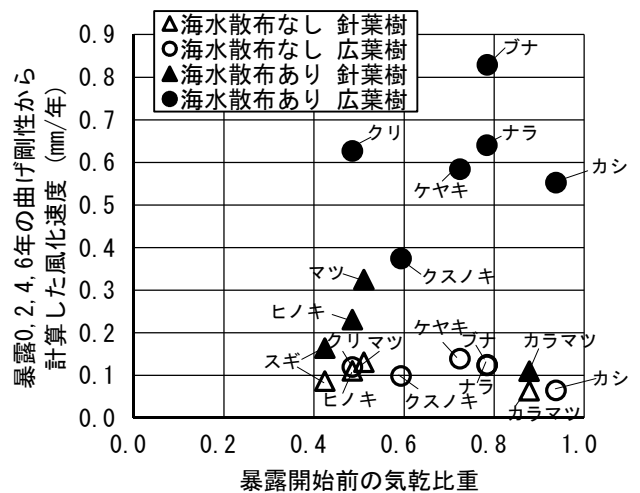


図-27 気乾比重と風化速度

果はこれと異なり、海水散布がある場合には、比重によらず広葉樹材では針葉樹材よりも風化速度が大きかった。

ただし既往の研究の中にも今回の結果と同じ傾向を示した例がある。それは、針葉樹材のスギと広葉樹材の albizzia (モルッカネム) を、紫外線照射と水噴射による促進劣化、および降雨ありまたはなしでの1年間の屋外暴露で劣化させた後、表層を化学分析したもので、水噴射や降雨がある場合、リグニンの減少は、スギよりも albizzia の方が著しかったことが示されている (Sudiyaniら(1999))。今回の結果はこの研究例と同様に、水によるリグニンの溶脱作用が大きい環境で、広葉樹材の風化が針葉樹材よりも速く進む可能性を示していた。

散水が広葉樹材の風化を促進する効果について、より定量的に検証するために、散水強度を変化させて実験を

行うことが考えられる。海水シャワー場の周縁部も含む数か所に雨量計を置いて実測した結果、散水量を0～150mm/hの範囲で段階的に変化させて実験することが可能であることがわかったので、今後こうした実験も実施したいと考えている。

## 7. 結論

木材の海虫害に関して、樹種による差、強度への影響、防除対策の効果、土中での食害の有無を、海中浸漬実験によって調べた。また、臨海部での風化の樹種による差を、暴露実験によって調べた。主な結論を以下に列挙する。

- ① 木材15樹種を2010年6月から12月まで海中に浸漬した結果では、クスノキとカヤの食害が比較的少なかった。スギ、サワラ、ヒノキは、フナクイムシによる食害が比較的少なく、主にクイムシに食害された。クイムシによる食害と、木材の硬さもしくは比重との間に相関関係が見られた。
- ② 樹種、形状、寸法、海水浸漬期間を変えて、海虫害を受けた試験体の圧縮強度試験と曲げ強度試験を行った結果では、これらの要因に関わらず強度減少率と質量減少率の関係は一定であり、強度減少率の値は質量減少率の値に対して大きかった。
- ③ 海虫防除法として、ポリエチレンメッシュで木材を被覆して16か月間海中に浸漬した結果では、PE100およびPE150メッシュ被覆により海虫害をほぼ防ぐことができた。処理条件を変えた熱処理材を3年間海中に浸漬した結果、237.5℃で5時間処理した試験体ではほとんど海虫害が生じなかった。低分子フェノール樹脂注入処理材を9年間海中に浸漬した結果、クイムシによる食害は徐々に進行したが、無処理材に比べて食害は大幅に抑制されていた。
- ④ 試験体を土砂に埋設して約2年間海中に浸漬した結果では、土砂に覆われた木材への海虫の付着は生じず、食害は海水と接する試験体上部から侵入したフナクイムシの個体長の範囲に限られていた。
- ⑤ 木材3樹種を12年間、および10樹種を6年間、臨海部の気中で海水を散布して暴露した結果では、広葉樹材の方が針葉樹材よりも風化による質量・寸法・曲げ剛性の減少の進行が速かった。

また今後の課題としては、以下のような項目がある。

- ・フナクイムシ食害が少ない樹種について、その要因の解明。

- ・クイムシ食害と木材の硬さもしくは比重の関係についてのデータ収集。
- ・強度減少率が質量減少率に対して大きくなる原因の考察。
- ・メッシュの定着方法の改良、および他の素材のメッシュでの防除効果の試験。
- ・熱処理材と低分子フェノール樹脂注入処理材の耐海虫性について、効果の持続性・安定性の確認。
- ・広葉樹材と針葉樹材の風化進行速度について、海水散布量を変化させた実験の実施。

(2013年11月8日受付)

## 謝辞

本研究を取りまとめるに当たり、海洋・水工部門ならびに公表審査委員会の皆様から貴重なご意見をいただきました。本研究の一部は農林水産省実用技術開発事業の助成(課題名:フロンティア環境における間伐材利用技術の開発)を受けて実施しました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 石川進六(1947):木材に及ぼす海蝕害と防舷材に就て, 港湾, Vol. 24, No. 2, pp. 31-41.
- 井上衛, 雨宮昭二(1973):各種木材の海虫食害試験, 木材工業, Vol. 28, No. 12, pp. 564-566.
- 今村祐嗣(2006):ノンコンベンショナルな木材の保存処理, 木材工業技術短信, Vol. 24, No. 1, pp. 1-12.
- 内倉清隆(2010):低分子フェノール樹脂処理木材(エコアコールウッド)の開発,(社)日本木材保存協会第26回年次大会研究発表論文集, pp. 64-71.
- 大谷忠(2001):デュロメータ硬さ計を用いた木材の表面硬さ特性と早晚材密度計測への応用可能性, 木材工業, Vol. 56 No. 7, pp. 317-322.
- 岡田要(1958)編:木船木材蝕害とその防除, 日本学術振興会, 375p.
- 岡田要, 佐々木信男(1958):フナクイムシの諸種木材に対する食害について,「木船木材蝕害とその防除」(岡田要編), 日本学術振興会, pp. 192-196.
- 近藤泰夫・石井文雄(1958):南洋産木材の耐蝕害性に関する研究,「木船木材蝕害とその防除」(岡田要編), 日本学術振興会, pp. 183-191.
- 酒井温子, 佐藤敬之, 金沢吉昭(2012):窒素雰囲気下で熱処理された木材の野外耐久性, 木材保存, Vol. 38, No. 3, 111-116.
- 寶田直之助(1996):16世紀17世紀の帆船—慶長遣欧使節船の復元に因んで—(その14), Techno Marine日本造

- 船学会誌, 第808号, pp. 745-752.
- 角田邦夫, 西本孝一(1979): 海面貯木場におけるフナクイムシの食害と防除 (2) —フナクイムシの生活史と飼育技術—, 木材工業, Vol. 34, No. 12, pp. 540-542.
- 樋口光夫(2002): 第1回市川賞受賞者紹介 国産スギ間伐材の有効利用を目的とした高耐久性木材 (エコアコールウッド) の開発, 木材工業, Vol. 57, No. 8, p. 362.
- 福田清春・原口隆英(1974): かつ色腐朽材と白色腐朽材の差異について (第2報), 東京農工大学農学部演習林報告第11号, pp. 25-29.
- 馬渡静夫(1959): 海虫の被害とその防除, 木材工業, Vol. 14, No. 8, pp. 359-363.
- 桃原郁夫(2005): 熱処理と耐久性, 木材保存, Vol. 31, No. 1, pp. 3-11.
- 森田珠生, 荘保伸一, 山口秋生, 今村祐嗣, 桃原郁夫(2009): 熱処理木材の耐朽性, 耐蟻性について, 日本木材保存協会第25回年次大会論文集, pp. 2-7.
- 矢田茂樹, 田村健(1995): 屋外暴露による木材表層部劣化の組織学的研究, 木材学会誌, Vol. 41, No. 11, pp. 1035-1042.
- 山田昌郎(2003): 無処理木材および木粉プラスチック複合材の海洋環境での耐久性試験, 港湾空港技術研究所資料, No. 1045, 20p.
- 山田昌郎(2006): 無処理木材および木粉プラスチック複合材の海洋環境での耐久性試験 (その2), 港湾空港技術研究所資料, No. 1117, 20p.
- 山田昌郎(2010): 無処理木材の東京湾沿岸での海虫類食害ならびに気中での物理的劣化に関する実験, 港湾空港技術研究所資料, No. 1208, 16p.
- 山本幸一(1991): スギ下見板のウエザリング, 木材工業, Vol. 46, No. 2, pp. 78-80.
- Barnacle J. E.(1976): Wood and its preservation in the sea - a resume, Proceedings of the 4th International Congress on Marine Corrosion and Fouling, Juan-les-Prins, France, pp.57-66.
- Feist, W. C. and Mraz, E. A.(1978): Comparison of outdoor and accelerated weathering of unprotected softwoods, Forest Products Journal, Vol.28, No.3, pp. 38-43.
- Morrell, J. J., Helsing, G. G., Graham, R. D.(1984): Marine wood maintenance manual: A guide for proper use of Douglas-fir in marine exposures, Forest Research Laboratory, Oregon State University, Research Bulletin 48, 62p.
- Ryu, J. Y., Imamura, Y., Takahashi, M., Kajita, H.(1993): Effects of molecular weight and some other properties of resins on the biological resistance of phenolic resin treated wood, Mokuzai Gakkaishi, Vol.39, No.4, pp.486-492.
- Sudiyani, Y., Tsujiyama, S., Imamura, Y., Takahashi, M., Minato, K., Kajita, H.(1999): Chemical characteristics of surfaces of hardwood and softwood deteriorated by weathering, Journal of Wood Science, Vol.45, pp.348-353.

付録

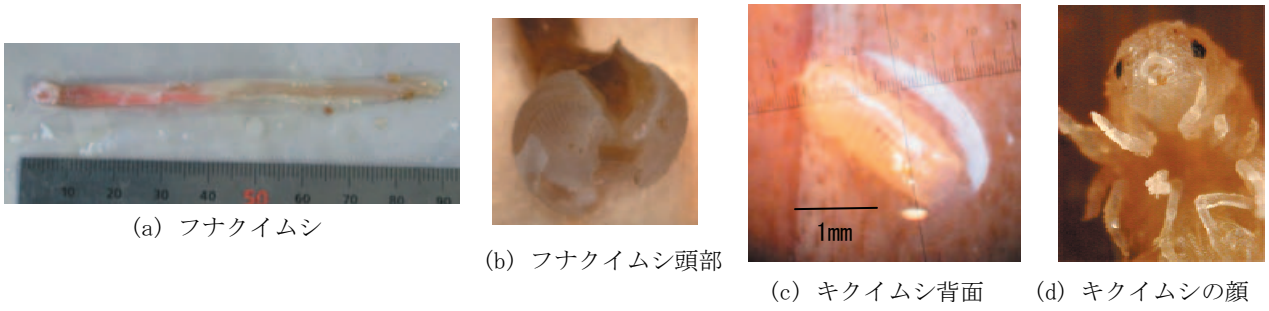


写真-A.1 海虫類

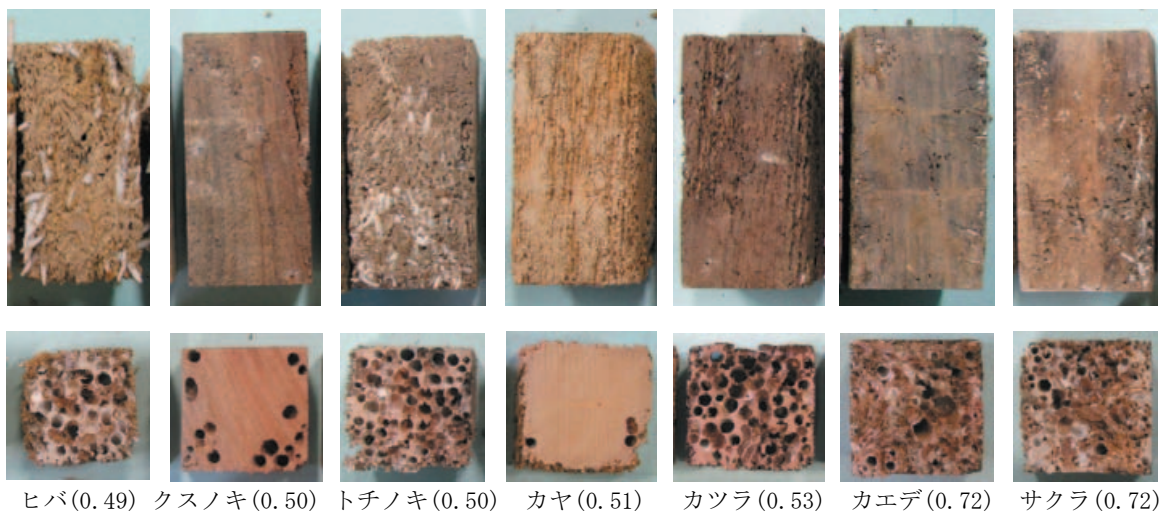
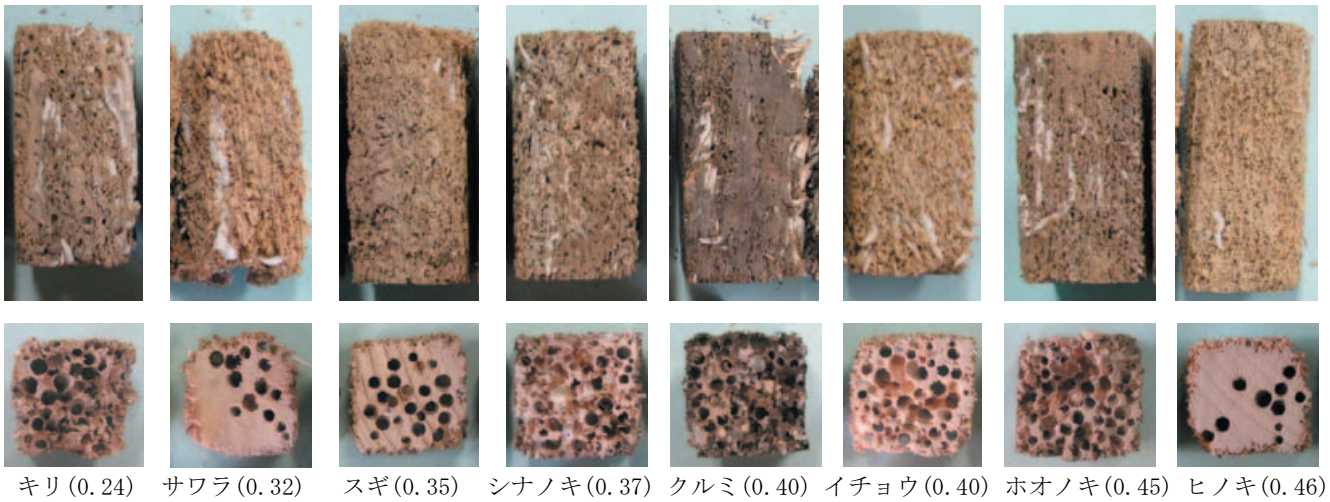


写真-A.2 海虫害を受けた15樹種の木材試験体(乾燥後)の側面と切断面

( )内は浸漬前の60℃乾燥比重, 海水浸漬期間: 2010年6月~12月, 初期寸法: 約4cm×4cm×8cm





写真-A.3 メッシュ被覆  
試験体の一例  
(スギ, PE100 被覆)

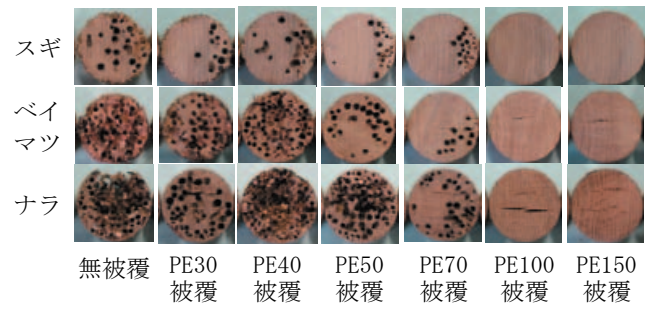


写真-A.4 メッシュ被覆実験の試験体切断面 (浸漬5か月)

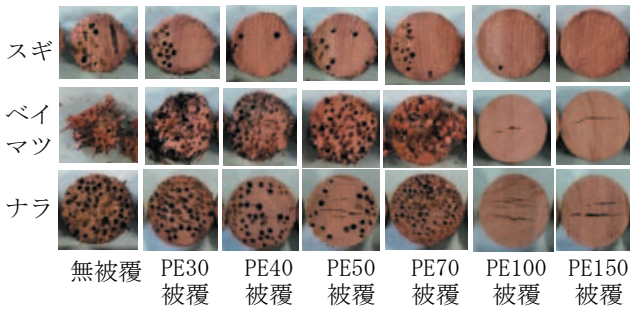


写真-A.5 メッシュ被覆実験の試験体切断面 (浸漬9か月)

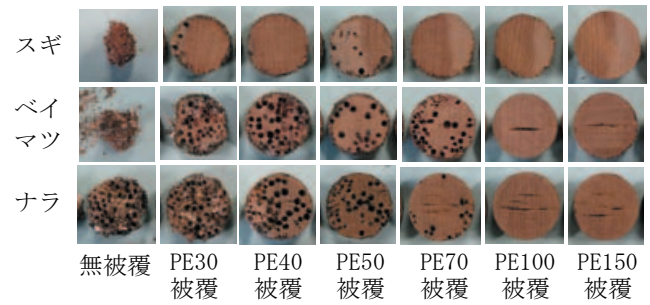
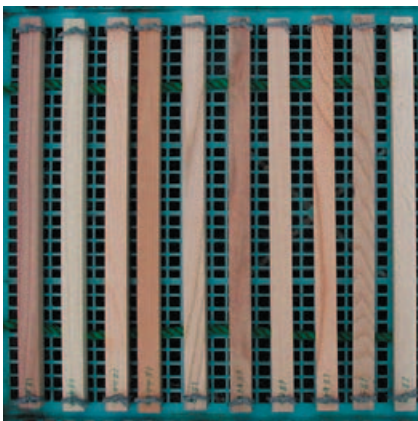
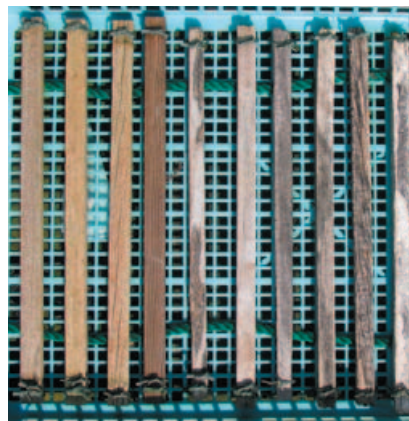


写真-A.6 メッシュ被覆実験の試験体切断面 (浸漬16か月)



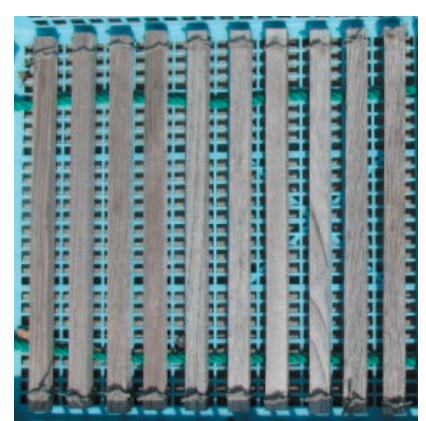
スギ ヒノキ マツ カラマツ クリ クスノキ ブナ ケヤキ ナラ カシ

(a) 設置直後



スギ ヒノキ マツ カラマツ クリ クスノキ ブナ ケヤキ ナラ カシ

(b) 設置6年後 (海水散布あり)



スギ ヒノキ マツ カラマツ クリ クスノキ ブナ ケヤキ ナラ カシ

(c) 設置6年後 (海水散布なし)

写真-A.7 臨海部気中暴露試験体

港湾空港技術研究所資料 No.1281

2014. 3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2014) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています