

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1397 March 2022

各種木材の耐海虫性および耐風化性に関する実験

山田 昌郎

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 実験方法	4
2.1 試験体	4
2.2 浸漬・暴露方法	6
2.3 測定・評価方法	7
3. 実験結果と考察	8
3.1 耐海虫性	8
3.2 耐風化性	13
4. 結論	16
5. おわりに	16
謝辞	16
参考文献	16

Experiments on Resistance of Various Wood Materials against Marine Borers and Weathering

Masao YAMADA*

Synopsis

Wood is a material formed from water and carbon dioxide by solar energy, and its use is expected to expand in the transition to a sound material-cycle society. Wood used in the seawater as piers of a jetty, etc. is damaged by marine borers, and wood used outdoors as windbreak fences, etc. is gradually weathered. The purpose of this study is to investigate the resistance of various wood materials against marine borers and weathering.

In the experiments, various wood samples were installed in the seawater circulation pool, seawater shower field and air exposure field in the laboratory, and the dry mass or bending rigidity was measured regularly to evaluate the deterioration. As a result, the marine borer resistance of untreated wood differed depending on the wood species, and some samples were remaining after the seawater immersion period of 12 years, but no wood species were undamaged. Some heat-treated wood samples were undamaged after 13 years of immersion in the seawater, and acetylated wood samples were undamaged after 2 and a half years of immersion. Carbon fiber sheet-coated wood samples maintained the flexural rigidities of 50% or more of the initial values at 15 years of immersion. Measurement results of 100 untreated wood species exposed in the air with seawater spray for 3 years and exposed in the air without seawater spray for 4 years showed larger decreases in mass and flexural rigidity of non-tropical broadleaf wood than those of conifer and tropical broadleaf wood.

Key Words: wood, durability, marine borer, weathering

* Senior Researcher, Coastal and Estuarine Environment Research Group, Coastal and Estuarine Environment Research Division
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5046 Fax : +81-46-844-1274 e-mail:yamada-m89wm@p.mpat.go.jp

各種木材の耐海虫性および耐風化性に関する実験

山田 昌郎*

要 旨

木材は太陽エネルギーにより水と二酸化炭素から形成される材料であり、循環型社会への移行においてその利用拡大が期待されている。木材を栈橋の橋脚のように海中で使用する場合、海虫類（穿孔性海生生物, marine borer）が劣化要因となる。また、木材を防風柵などに用いる場合、風化（weathering）が生じる。本研究は、各種の木材の海虫類と風化に対する抵抗性を調べることを目的として実施した。

実験では、各種の木材試料を研究所内の海水循環水槽と海水シャワー場および大気暴露場に設置し、定期的に乾燥質量または曲げ剛性を測定して劣化状況を評価した。その結果、無処理木材の耐海虫性は樹種により異なり、海水浸漬期間 12 年の時点で一部の樹種は試料が残存していたが、無被害の樹種はなかった。一部の熱処理材は海水浸漬 13 年時点で無被害、アセチル化処理木材は浸漬 2 年半の時点で無被害であった。炭素繊維シート被覆木材は浸漬 15 年時点で初期値の 50%以上の曲げ剛性を維持していた。100 樹種の無処理木材の気中暴露（海水散布あり）3 年、および気中暴露（海水散布なし）4 年での測定結果では、熱帯産以外の広葉樹の風化による質量と曲げ剛性の減少率が、針葉樹および熱帯産広葉樹より大きい傾向が見られた。

キーワード：木材，耐久性，海虫類，風化

* 沿岸環境研究領域 沿岸環境研究グループ 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：046-844-5046 Fax：046-844-1274 e-mail:yamada-m89wm@p.mpat.go.jp

1. はじめに

木材は太陽エネルギーにより水と二酸化炭素から形成される材料であり、循環型社会への移行においてその利用拡大が期待されている。2010年に施行され2021年に改正された木材利用促進法は、国及び地方公共団体に、木材を利用した工作物の設置の促進に必要な技術的助言や情報提供等を求めている。国土交通省は木材利用推進状況を2010年以降毎年ホームページ上に公表しており、2019年度の港湾事業区分での木材使用量は946.6m³、その主な用途は仮設材、建屋材、看板等であった。

木材を栈橋の橋脚のように海中で使用する場合、海虫類（穿孔性海生生物）が劣化要因となる。主な海虫類は、二枚貝類のフナクイムシ（図-1）と甲殻類のキクイムシ（図-2）である。

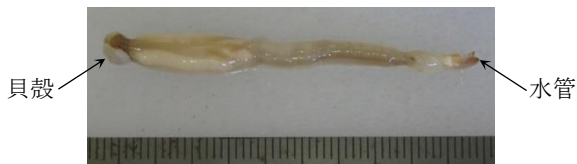


図-1 フナクイムシ

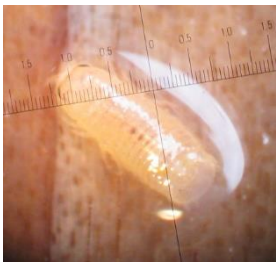


図-2 キクイムシ（体長約3mm）

フナクイムシは体長約0.3mmの幼生が海水中を遊泳して木材に付着後、貝殻を回転させて木材に穿孔する。穿孔を開始した穴から水管を出して海水の摂取と排泄を行なうとともに、貝殻で切削した木材を口から摂取し消化する。貝殻で穿孔した穴の断面は円形である（図-3）。



図-3 フナクイムシ食害を受けたブナ 4cm 角材の切断面（海水浸漬6か月）

キクイムシも、木材を食料及び巣として利用している。キクイムシの巣は木の表面付近に形成され、外観から食

害が確認できる（図-4）。

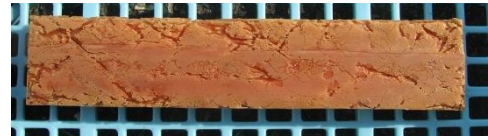


図-4 キクイムシ食害を受けたサワラ材（36mm×180mm、海水浸漬3か月）

一方、木材を防風柵のように紫外線と降雨を受ける気中で使用する場合、風化が劣化要因となる。風化は紫外線によって木材の主要成分の一つであるリグニンが分解され、降雨等によって溶出する現象である。なお、杭の地際（じぎわ）部や住宅の土台等で、雨水が蒸発しにくく木材中の酸素と水分（淡水）の条件が木材腐朽菌類やシロアリ類にとって好適となる環境では、これらの生物が劣化要因となる。

筆者はこれまで、木材の港湾・海洋利用において重要な海虫類による食害、および比較的研究例が少ない風化に関して実験を継続し、その結果を港空研資料（山田2003, 2006, 2010, 2014）等で報告してきた。本稿では前報（山田2014）以後の実験の結果を以下に報告する。

2. 実験方法

2.1 試験体

(1) 無処理木材

a) ウッドデッキ材10樹種

木材は樹種によって異なる生物劣化抵抗性を有し、この抵抗性は主に木材の心材に蓄積されている成分に起因している。腐朽菌とシロアリに対して抵抗性が高く、ウッドデッキ材として使用実績がある輸入材のうち10樹種（表-1）のサンプルを入手し、2007年1月に海水浸漬を開始した。

表-1 ウッドデッキ材10樹種

樹種	産地	寸法(mm)			密度(g/cm ³)
		厚	幅	長	
レッドシダー	C	38.0	88.6	136	0.38
サイプレス	A	19.9	89.8	136	0.66
メルバウ	I	20.5	103.1	97	0.68
アマレラン	B	29.5	102.0	137	0.78
ジャラ	A	19.1	82.5	137	0.85
セラガンバツ	I	19.7	100.5	99	0.92
イエローバラウ	M	17.0	85.6	137	0.96
ウリン	I	19.3	98.0	147	0.97
イペ	B	19.0	101.0	137	1.04
アマゾナス	B	19.5	100.7	137	1.08

注) C: カナダ, A: オーストラリア, I: インドネシア, B: ブラジル, M: マレーシア。寸法と密度は103℃乾燥後の値。

b) 100樹種（国産材40樹種，輸入材60樹種）

福岡にあるT製材所から表-2の100樹種のサンプル板（厚12mm×幅135mm×長180mm）を入手し，幅が約36mmとなるように切断して各樹種3個の試験体とし，海水浸漬と気中暴露（海水散布あり・なし）に用いた．海水浸漬は2017年6月，気中暴露は同年7月に開始した．海水浸漬を2018年2月に終了した時点で海虫害がほとんどなかった15樹種については，試験体切断後の端材（幅約24mm）を試験体として2018年10月から海水に浸漬した．

表-2 100樹種（国産材40樹種，輸入材60樹種）

国産材	針葉樹	アカマツ，アキタスギ，イチョウ，カヤ，キソヒノキ，サワラ，スギ，ヒノキ，ヤクスギ
	広葉樹	アサダ，イタヤ，イチイガシ，エノキ，エンジュ，カエデ，カツラ，キハダ，キリ，クス，クリ，クヰミ，クワ，ケヤキ，シイ，シウリ，シオジ，シナ，ジンダイニレ，セン，センダン，タブ，タモ，トチ，ナラ，ニレ，ハゼ，ホオ，マカバ，ミズメ，ヤマザクラ
輸入材	針葉樹	アガチス，イエローパイン，スプルース，タイワンヒノキ，チベットヒノキ，ノブル，バルサム，ベイスギ，ベイツガ，ベイヒ，ベイヒバ，ベイマツ，ベニマツ，ホワイトスプルース，ボンデロッサパイン，ラオススギ，ラオスヒノキ，レッドパイン
	熱帯産広葉樹	アサメラ，アニグレ，アピトン，アフリカンマホガニー，アユース，イロコ，ウエンジ，オバンコール，サペリ，ジョンコン，ゼブラノ，タウン，チーク，ニヤトー，パープルハート，パドック，ブビンガ，ベリ，ペルポック，ボセ，メラピー，メルサワ，モアビ，モンキーポッド
	広葉樹（熱帯材以外）	アルダー，イエローバーチ，イエローポプラ，ウォールナット，カーリーメープル，コットンウッド，ササfras，ソフトメープル，チェリー，バズアイメープル，ハードメープル，バスウッド，ピーシーメープル，ビーチ，ヒッコリー，ホワイトアッシュ，ホワイトオーク，レッドオーク

注) イチョウは植物学的には針葉樹と広葉樹のどちらにも属さないが，木材としては通常針葉樹として扱われる．

c) 81樹種（国産材35樹種，輸入材46樹種）

書籍（藤原2012）として発行されていた81樹種（表-3）の木材サンプル板（厚9mm×幅60mm×長130mm）を入手し，2018年9月に海水に浸漬した．2019年1月に浸漬を終了し

た時点で海虫害がほとんどなかった16樹種については，同年5月に浸漬を再開した．

表-3 81樹種（国産材35樹種，輸入材46樹種）

国産材	針葉樹	イチョウ，エゾマツ，カラマツ，キソヒノキ，サワラ，スギ（赤身），スギ（白太），トガ，ネズコ，ヒノキ，マキ，ヨシノスギ
	広葉樹	アサダ，エンジュ，オニグルミ，カエデ，カシ，カツラ，カバ，キハダ，キリ，クス，クリ，ケヤキ，サワグルミ，シナ，セン，タモ，トチ，ナラ，ニレ，ブナ，ホオ，マカバ，ヤマザクラ
輸入材	針葉樹	アガチス，イエローパイン，ウンスギ，オウシュウアカマツ，サイプレス，スプルース，セコイア，ピーラー，ベイスギ，ベイツガ，ベイヒ，ベイヒバ，ベイマツ，ホワイトウッド
	熱帯産広葉樹	アサメラ，アピトン，イペ，ウエンジ，ウリン，カリン，クィーラ，コクタン，ゴム，シルバーハート，チーク，ニヤトー，パオロサ，パドック，ブビンガ，マコレ，マホガニー，メラピー，モアビ，ラミン，ラワン
	広葉樹（熱帯材以外）	アッシュ，アルダー，イエローポプラ，ウォールナット，チェリー，バーチ，ビーチ，ホワイトオーク，メープル，ヨーロッパンオーク，レッドオーク

(2) 熱処理材

a) 水蒸気雰囲気下での熱処理材

水蒸気雰囲気下で180～240℃で木材を処理するサーモウッド処理は，1990年代にフィンランドで開発された技術で，日本には2006年に越井木材工業（株）によって導入された（森田2018）．同社から2008年6月に表-4のような7種類のサンプル（厚20mm×幅20mm×長100mm，樹種：スギ）各10個を入手し，60℃乾燥質量を測定後，海水浸漬を開始した．

表-4 水蒸気雰囲気下熱処理試験体の種類

シリーズ	規定温度（℃）	規定時間（時間）
A	無処理	無処理
B	185	1
C	195	1.5
D	210	2
E	220	2.5
F	230	3
G	237.5	5

なおサーモウッド処理は，工程1：100～120℃で材を含水率2～3%まで乾燥，工程2：急激に温度を上げ規定温度に達してから規定時間保持，工程3：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，の3工程から成る。表-4の規定時間は，工程2で規定温度が保持される時間である。

b) 窒素雰囲気下での熱処理材

窒素雰囲気下で木材を熱処理するエステックウッド処理技術は，1990年代に宮城県と地元企業が共同開発した（佐藤2004）。この処理材を販売している江間忠木材（株）から，2010年11月に表-5のような4種類のサンプル（厚20mm×幅20mm×長100mm，樹種：スギ）各12個を入手し，60℃乾燥質量を測定後，2011年5月に海水浸漬を開始した。

表-5 窒素雰囲気下熱処理試験体の種類

シリーズ	規定温度 (℃)	処理時間 (時間)
A	無処理	無処理
B	200	36
C	220	24
D	220	36

注) 処理時間は釜入れ開始から終了までの時間

(3) アセチル化処理木材

アセチル化処理は，木材を無水酢酸（酢酸2分子が脱水縮合したもの）と反応させて，木材中の水酸基（-OH）をアセチル基（-COCH₃）で置き換える処理である。当所（港空研）では2018年度から，国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所（森林総研）との共同研究「木材・プラスチック複合材（WPC）等木質材料の海洋環境における利用可能性の探索」を実施しており，この中でアセチル化処理木材についても検討している。

従来のアセチル化処理法である液相法および気相法と，森林総研で開発中の超臨界二酸化炭素中での処理（超臨界法）によって森林総研でアセチル化処理された試験体（厚20mm×幅20mm×長100mm，樹種：スギ）を，対照用の無処理試験体とともに海水に浸漬した。試験体は森林総研での測定用と港空研での測定用に各種類3個作成し，森林総研用試験体は2019年2月，港空研用試験体は同年5月に海水浸漬を開始した。森林総研用試験体は3か月ごとに回収して質量等が測定され，その結果は別途報告されている（松永ら2020, 2021, 2022）。本稿では港空研用試験体の浸漬2年半までの状況について述べる。

(4) 被覆木材

スギ材（厚40mm×幅40mm×長400mm）9個を横須賀にあるS材木店から入手し，3個に炭素繊維シートをエポキシ樹脂で接着し，他の3個にはエポキシ樹脂を塗布し，残りの3個は無被覆で，2004年3月に海水浸漬を開始した。

炭素繊維シートとしては，鉄筋コンクリート橋脚の補強等に用いられるグラノックTUクロスST-200を使用した。これは炭素繊維を一方向に並べて織り込んだシートであ

り，繊維目付は200g/m²，設計厚さは0.111mmである。エポキシ樹脂としては，硬化剤として変性脂肪族ポリアミンを主剤：硬化剤＝2：1（重量比）で使用するアルプロンCFコートを使用した。

エポキシ樹脂塗布による質量増加量を測定した結果，試験体側面で0.055g/cm²，木口面で0.070g/cm²であった。炭素繊維シート被覆試験体では，エポキシ樹脂を下塗りしたあと，試験体各面の寸法に合わせてカットした炭素繊維シートを置いて脱泡ローラーにより気泡を除去した。質量増加量は0.10g/cm²程度であり，繊維目付が0.02g/cm²であることから樹脂塗布量は0.08g/cm²程度であり，コンクリート補強工事での塗布量の目安0.06g/cm²をやや上回る程度であった。なおコンクリートへの塗布の場合，一般的にプライマーおよびパテによる表面処理が施工されるが，今回の試験では表面処理なしで木材に直接エポキシ樹脂を塗布した。

2.2 浸漬・暴露方法

海水浸漬は当所の海水循環水槽で実施した。この水槽には12時間を1周期としてポンプにより海水が給水・排水されており，水深が最低1.0m～最高2.5mの範囲で変化する。本稿で述べる試験体はいずれも最低水位以下に設置した。なお，海水循環水槽の改修工事のため，熱処理材試験体は2014年5月から2016年1月まで当所の干潟実験施設で海水浸漬し，ウッドデッキ材10樹種と被覆木材試験体は2014年5月から2016年5月まで海水浸漬を中断し，当所の大型構造実験施設内で気中に保管した。

試験体はポリエチレン製のメッシュコンテナ（サンテナーB#20，外寸70.8cm×46.0cm×8.3cm）に，ひずみゲージ用リード線（塩化ビニル被覆銅線）またはポリプロピレンのひもで結び付けて固定した。浮力によってコンテナが浮上しないように，各コンテナに1～4kg程度の鋼材（ステンレス丸棒，鋼製ナット等）を重しとして結び付けた。またコンテナの垂下・引き上げ作業用に，ポリ



図-5 海水浸漬状況（水位が最も下がった状態）

エチレン製のロープをコンテナに結び付けた。

気中暴露は海水循環水槽に隣接する海水シャワー暴露試験場と、それに隣接するシャワーのない区画（海上大気暴露試験場）で実施した。海水シャワー暴露試験場では1日に2回、海水循環水槽から排水される海水が散布される。1回当たりの散水時間は約3～4時間、散水量は約0.5 m³/m²である。海水浸漬用と同じメッシュコンテナに、ひずみゲージ用リード線で試験体を固定し、コンクリート面上に高さ4cm程度の角材等を置いた上に設置した。



図-6 海水シャワー暴露試験場



図-7 海上大気暴露試験場

2.3 測定・評価方法

質量減少率は、浸漬・暴露開始前の質量を基準として、浸漬・暴露開始後減少した質量を百分率で表した。ウッドデッキ材試験体では103℃乾燥質量、100樹種と81樹種試験体では気乾質量、81樹種中16樹種の再浸漬試験体では103℃乾燥質量、熱処理材試験体では60℃乾燥質量を用いた。乾燥温度が試験体種類により異なっているのは、高温での乾燥が耐海虫性等に影響を及ぼすおそれがある一方、気乾質量は湿度の影響が大きく浸漬・暴露の前で同一条件とすることが難しいため、現在のところ試行錯誤中であることによる。

無処理木材100樹種の試験体については、ねじ式一軸試

験機を用い、被覆木材試験体については油圧式万能試験機を用いて、浸漬・暴露前後で弾性範囲で曲げ荷重し、荷重と変位を測定した（図-8,9）。100樹種試験体では支点間隔150mmで中央集中荷重、被覆木材試験体では支点間隔300mmで3等分点荷重とした。荷重点と支点でのめり込み変形の影響を軽減するためにテフロンシート（厚さ3mm）を使用した。



図-8 100 樹種試験体の曲げ荷重状況



図-9 被覆木材試験体の曲げ荷重状況

100樹種試験体では、試験機のカロスヘッドの変位速度を2mm/分とし、0.5秒ごとに荷重と変位を測定し、変位2mmまで荷重して除荷した。変位1.5mmから2mmまでの荷重時の荷重と変位の値から、回帰直線の勾配を求めた。暴露前後での荷重変位勾配の値から、暴露前の値を基準として減少率を求め、これを曲げ剛性減少率とした。

被覆木材試験体では5kgf/秒程度の荷重速度で200kgf（1.96kN）まで荷重したときのたわみ（支点間中央での試験体下面の鉛直変位から両支点での試験体上面の鉛直変位の平均値を引いた値）を測定した。海水浸漬前の200kgf荷重時のたわみを、浸漬後の200kgf荷重時のたわみで割った値を、正規化曲げ剛性とした。ただし劣化が進行して、200kgfを荷重すると試験体が破壊すると予想される場合は、200kgf未満の荷重（100kgf等）を荷重してたわみを測定し、荷重と変位の比を一定と仮定して200kgfでのたわみに換算した。また、支点間隔/試験体高さが約7.5と小さいため、たわみへのせん断変形の影響が無視できないが（せん断弾性係数を曲げ弾性係数の1/15として試算すると、たわみに占める曲げ変形とせん断変形の割

合は約4:1), 本研究では曲げ弾性係数の測定が目的ではなく, 試験体内部を含む劣化の評価が目的なので, せん断変形が多く含まれていても評価指標となると考えた。

3. 実験結果と考察

3.1 耐海虫性

(1) 無処理木材

a) ウッドデッキ材10樹種

レッドシダーは1年目までに激しくキクイムシ食害を受けて1年で浸漬を終了し, メルバウ, ウリン, ジャラは浸漬2年で質量減少が大きかったため切断したところ内部にフナクイムシ穿孔が確認された(以上の結果は既報(山田2010)). その後2年ごとに103℃乾燥質量を測定したところ, 各試験体とも質量減少率は増加し, 直近の浸漬12年での測定時点では, 最も質量減少率が小さいイエローバラウで約30%であった(図-10). なお図-10の横軸の海水浸漬期間は, 海水循環水槽の改修工事と測定のための浸漬中断期間を除いた, 海水循環水槽内で浸漬した時間の合計である. 浸漬期間6年と8年の間に水槽工事のため2年間浸漬を中断し室内の気中で保管したが, 質量減少率の増加傾向には大きな影響がなかった。

海水浸漬12年の時点で, 残存している6試験体を103℃乾燥する前に室内で海水に数日間浸漬して観察したところ,

アマレランの表面に多数のキクイムシが出てきた他, イペとイエローバラウではフナクイムシの水管と排出された木屑が見られ, 内部がフナクイムシに食害されていたことが確認された。

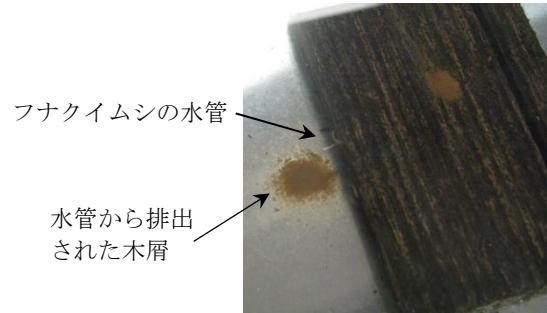


図-11 イエローバラウ試験体(海水浸漬12年時点で室内で海水に4日間浸漬したところ)

b) 100樹種(国産材40樹種, 輸入材60樹種)

100樹種試験体の海水浸漬8か月での質量減少率およびキクイムシとフナクイムシによる被害度を表-6に示す. キクイムシ被害度は試験体外観の目視により, 0(被害なし)~4(全面的に食害発生)の5段階で評価した. フナクイムシ被害度は, 乾燥後の試験体を2cm間隔で切断し, 断面に占めるフナクイムシ穿孔の面積率 α (%)を評価し, $\alpha=0$ のとき0, $0<\alpha\leq 1$ のとき1, $1<\alpha\leq 5$ のとき2, $5<\alpha\leq 15$ のとき3, $15<\alpha$ のとき4とした。

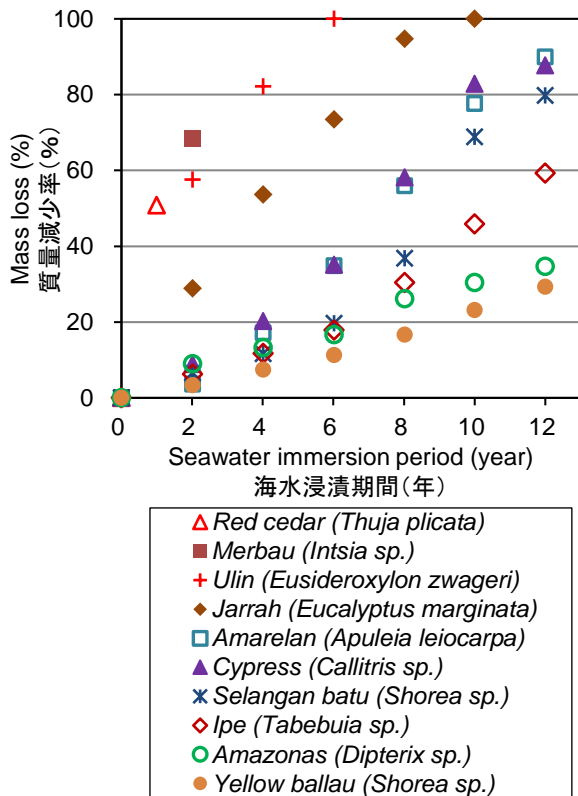


図-10 ウッドデッキ材10樹種の質量減少率

表-6 100樹種試験体の海水8か月浸漬結果

樹種	質量減少率 (%)	被害度	
		キクイムシ	フナクイムシ
国産材・針葉樹			
アカマツ	31.5	4	0
アキタスギ	63.4	4	0
イチョウ	15.5	4	0
カヤ	39.4	4	0
キソヒノキ	71.6	4	2
サワラ	59.8	4	0
スギ	34.2	4	0
ヒノキ	61.8	4	2
ヤクスギ	20.7	3	0
国産材・広葉樹			
アサダ	7.5	3	0
イタヤ	12.2	3	0
イチイガシ	7.2	3	2
エノキ	16.9	3	0
エンジュ	30.9	4	1
カエデ	8.4	3	0
カツラ	2.3	3	0
キハダ	41.6	4	0
キリ	59.9	4	0
クス	6.7	1	0
クリ	4.3	2	0

輸入材・針葉樹	クルミ	10.0	3	0	
	クワ	30.3	4	0	
	ケヤキ	3.0	2	0	
	シイ	4.6	3	0	
	シウリ	18.0	3	4	
	シオジ	16.7	3	0	
	シナ	5.6	3	0	
	ジンダイニレ	58.6	4	0	
	セン	39.3	4	3	
	センダン	2.5	3	1	
	タブ	8.6	3	0	
	タモ	9.1	3	3	
	トチ	12.9	3	2	
	ナラ	19.5	3	3	
	ニレ	18.3	3	1	
	ハゼ	-7.6	3	0	
	ホオ	6.0	3	0	
	マカバ	17.2	3	1	
	ミズメ	15.6	3	0	
	ヤマザクラ	5.9	3	0	
輸入材・広葉樹 (熱帯材以外)	アガチス	27.0	4	0	
	イエローパイン	30.1	4	0	
	スプルー	55.4	4	0	
	タイワンヒノキ	40.8	4	0	
	チベットヒノキ	24.4	4	0	
	ノーブル	48.1	4	2	
	バルサム	55.5	4	2	
	ベイスギ	60.4	4	0	
	ベイツガ	81.4	4	0	
	ベイヒ	51.3	4	2	
	ベイヒバ	65.1	4	0	
	ベイマツ	37.2	4	0	
	ベニマツ	49.8	4	0	
	ホワイトスプルー	73.8	4	0	
	ポンデロッサパイン	61.8	4	0	
	ラオススギ	37.9	4	0	
	ラオスヒノキ	45.7	4	0	
	レッドパイン	78.9	4	2	
	輸入材・広葉樹 (熱帯材)	アサメラ	2.3	0	0
		アニグレ	3.2	1	0
アピトン		3.2	2	0	
アフリカンマホガニー		19.5	4	2	
アユース		-2.3	1	0	
イロコ		1.3	3	0	
ウエンジ		-0.4	0	0	
オバンコール		1.7	0	0	
サペリ		1.2	0	0	
ジョンコン		0.4	2	0	
ゼブラノ		4.5	3	0	
タウン		2.6	2	1	
チーク		3.2	2	0	
ニヤトー		-0.2	2	0	
パープルハート		5.8	2	2	
パドック		3.5	0	0	
ブビンガ		3.9	3	1	
ベリ		4.3	1	0	

輸入材・広葉樹 (熱帯材以外)	ペルボック	-0.1	0	0
	ボセ	5.7	1	0
	メラピー	0.6	0	0
	メルサワ	2.9	1	0
	モアビ	2.0	0	0
	モンキーポッド	0.8	1	0
	アルダー	20.5	3	0
	イエローバーチ	10.2	3	0
	イエローポプラ	38.7	4	0
	ウォールナット	4.6	2	0
	カーリーメープル	21.8	3	0
	コットンウッド	40.9	4	0
	ササfras	7.4	3	0
	ソフトメープル	26.0	3	3
	チェリー	2.8	2	3
	バズアイメープル	10.1	3	1
	ハードメープル	4.4	3	0
	バスウッド	27.8	3	3
	ピーシーメープル	33.3	4	1
	ビーチ	30.4	4	3
ヒッコリー	3.6	2	0	
ホワイトアッシュ	1.0	3	1	
ホワイトオーク	12.3	3	0	
レッドオーク	25.6	3	0	

これらの試験体を浸漬した2017年6月～2018年2月はフナクイムシの活動度が低く、食害は主にキクイムシによって生じた。キクイムシ・フナクイムシの被害度がともに1以下であった15樹種について、未使用の端材（幅約24mm）を2018年10月に海水浸漬し、1年ごとに曲げ剛性を

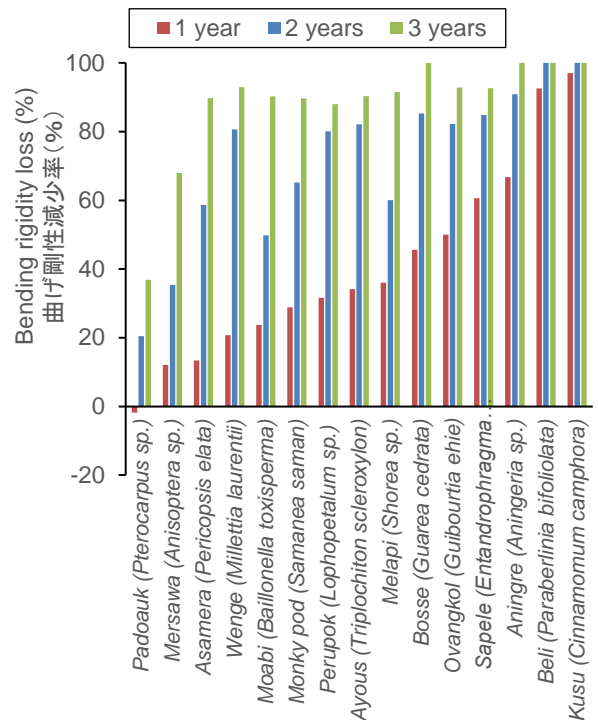


図-12 無処理木材 15 樹種の海水浸漬後 3 年目までの曲げ剛性減少率

測定した。直近の浸漬3年での曲げ剛性減少率は、最小のパドックで約40%に達しており、いずれの樹種も食害を受けていると考えられる(図-12)。

c) 81樹種(国産材35樹種, 輸入材46樹種)

81樹種試験体の海水浸漬4か月での質量減少率および前項と同様に評価したキクイムシとフナクイムシによる被害度を表-7に示す。

表-7 81 樹種試験体の海水4 か月浸漬結果

	樹種	質量減少率 (%)	被害度		
			キクイムシ	フナクイムシ	
国産材・針葉樹	イチョウ	48.3	4	3	
	エゾマツ	85.0	4	4	
	カラマツ	92.5	4	4	
	キソヒノキ	98.2	4	4	
	サワラ	54.7	4	0	
	スギ(赤身)	75.8	4	1	
	スギ(白太)	85.8	4	4	
	トガ	51.9	4	3	
	ネズコ	72.9	4	4	
	ヒノキ	82.8	4	4	
	マキ	86.6	4	0	
	ヨシノスギ	68.6	4	4	
	国産材・広葉樹	アサダ	54.4	3	4
		エンジュ	39.5	3	4
オニグルミ		24.1	3	4	
カエデ		39.4	3	4	
カシ		34.7	2	4	
カツラ		37.5	3	4	
カバ		38.7	3	4	
キハダ		53.1	3	4	
キリ		48.1	4	3	
クス		12.1	2	3	
クリ		38.9	4	3	
ケヤキ		14.2	0	2	
サワグルミ		52.6	3	4	
シナ		18.0	3	4	
セン		27.5	3	4	
タモ		40.9	3	3	
トチ		53.4	3	4	
ナラ		35.8	3	3	
ニレ		62.5	4	4	
ブナ		42.1	2	4	
ホオ		23.5	3	3	
マカバ		41.6	3	4	
ヤマザクラ		44.3	3	4	
輸入材・針葉樹		アガチス	66.5	4	4
	イエローパイン	60.4	4	4	
	ウンスギ	90.1	4	4	
	オウシュウアカマツ	83.6	4	4	
	サイプレス	5.1	0	0	
	スプルー	78.3	4	4	
	セコイア	31.9	3	0	

輸入材・広葉樹(熱帯材)	ピーラー	77.1	4	4
	ベイスギ	77.9	4	4
	ベイツガ	83.9	4	4
	ベイヒ	68.9	4	4
	ベイヒバ	70.8	4	4
	ベイマツ	71.4	4	4
	ホワイトウッド	85.7	4	4
	アサメラ	0.8	0	0
	アピトン	5.3	0	0
	イペ	7.0	0	0
	ウエンジ	2.2	0	0
	ウリン	7.6	0	0
	カリ	6.9	0	0
	クィーラ	5.9	1	1
	コクタン	6.9	0	0
	ゴム	9.7	3	3
	シルバーハート	0.5	1	0
	チーク	3.8	2	0
	ニヤト	5.3	1	0
パオロサ	7.1	0	0	
パドック	5.4	0	0	
ブビンガ	21.9	3	4	
マコレ	2.7	0	0	
マホガニー	28.8	3	4	
メラピー	0.7	2	0	
モアビ	5.8	0	0	
ラミン	6.3	2	2	
ラワン	6.7	0	1	
輸入材・広葉樹(熱帯材以外)	アッシュ	16.4	3	3
	アルダー	50.3	3	4
	イエローポプラ	54.6	4	3
	ウォルナット	27.6	3	4
	チェリー	40.9	3	4
	バーチ	35.6	3	4
	ビーチ	35.1	3	4
	ホワイトオーク	34.9	3	3
	メープル	42.8	3	4
	ヨーロッパンオーク	11.7	3	3
	レッドオーク	38.9	3	4

これらの試験体を浸漬した2018年9月～2019年1月は、フナクイムシの活動度が高く、熱帯材以外のほとんどの樹種で著しいフナクイムシ食害が生じた。キクイムシ・フナクイムシの被害度がともに1以下であった16樹種について、フナクイムシ穿孔面積評価のために2cm間隔で6片に切断した後の試験体の再浸漬を行なった。再浸漬前に各片の103℃乾燥質量を測定し、2019年5月に再浸漬した。2020年1月、2021年1月、2021年12月に各樹種3片の103℃乾燥質量を測定し、3片の平均値を図-13に示した。なお他の3片は浸漬を中断せずに継続している。

図-13より、ウリンとパドックの質量減少率が比較的小さいものの増加傾向にある。またウリンは前述のウッドデッキ材10樹種の中では3番目に早く消失した樹種であ

り，耐海虫性に関して個体差または樹体内の位置による差が大きいと考えられる。

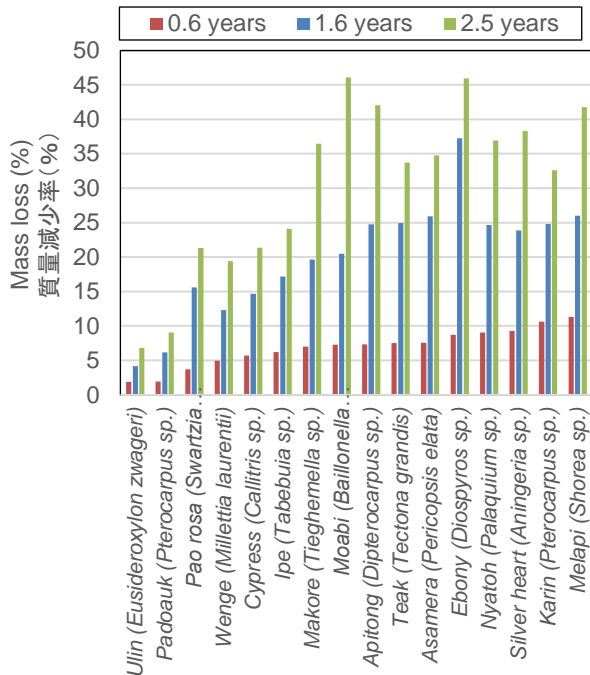


図-13 無処理木材 16 樹種の海水再浸漬後 2.5 年までの質量減少率

(2) 熱処理材

a) 水蒸気雰囲気下での熱処理材

2008年6月に7種類各10個の試験体を海水浸漬し，浸漬1年目に各種類のNo.1～3，2年目にNo.4～6，3年目にNo.7～9の60℃乾燥質量を測定した（図-14）．測定後の試験体

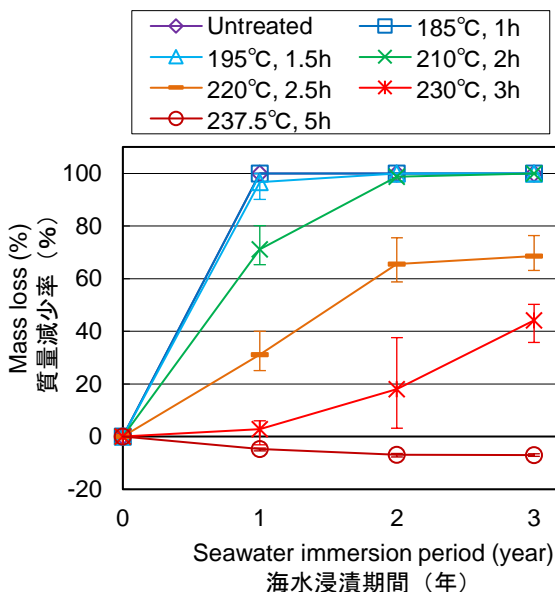


図-14 水蒸気雰囲気下での熱処理材の海水浸漬 3 年までの質量減少率 (n=3, 誤差範囲は最大・最小値)

は海中に戻して浸漬を継続した。

海水浸漬3年の時点で残存していた3種類の試験体のNo.7～9の外観を図-15に示す。237.5℃5h処理材ではほとんどキクイムシ食害痕がなく，海水の塩分等の浸入によって質量が増加した（以上の結果は既報（山田2014））。



図-15 水蒸気雰囲気下での熱処理材（海水浸漬 3 年）左から，220℃2.5h，230℃3h，237.5℃5h 各 3 個

その後，浸漬4～7年目は写真撮影のみ行ない，浸漬8年目から237.5℃5h処理材の質量測定を再開した．浸漬8年目はNo.1～3，9年目はNo.4～6，10年目はNo.7～9，11年目はNo.1～3，と順次測定し，直近では13年目の測定を行なった（図-16, 17）．なお220℃2.5h処理材は6年目，230℃3h処理材は12年目までにほぼ消失した。

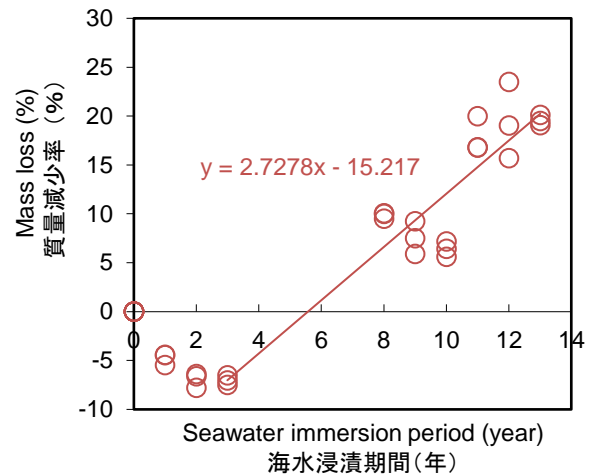


図-16 水蒸気雰囲気下での熱処理材（237.5℃5h）の海水浸漬 13 年目までの質量減少率（回帰式は浸漬 3 年と 8～13 年の値から求めた。）



図-17 水蒸気雰囲気下での熱処理材（237.5℃5h）海水浸漬 13 年後の試験体 No. 7～9

浸漬13年で237.5℃5h処理材には約20%の質量減少が生じたが、表面にキクイムシ食害はほとんど見られなかった。230℃以下で処理した試験体では、晩材（年輪の濃色部分）が早材よりもキクイムシ食害を受けており（図-15）、これは熱処理によるヘミセルロースの分解等の変化が晩材では早材より生じにくいと考えられるが、237.5℃で処理した試験体では晩材よりも早材に落ち込みが生じており（図-17）、キクイムシ食害ではなく風化によるものと考えられる。試験体は水面下にあったが水深が浅いため紫外線によるリグニンの分解が生じたと考えられる。なお、試験体内部のフナクイムシ食害の有無については確認していない。

b) 窒素雰囲気下での熱処理材

2011年5月に海水浸漬後、1年ごとに各種類3個の試験体の60℃乾燥質量を測定後、海中に戻して浸漬を継続した。直近の浸漬10年での測定までの質量減少率を図-18に示す。無処理材は1年目までに消失した。処理材は浸漬3年まではいずれも質量減少率が0未満であったが、その後200℃36h処理材と220℃24h処理材では質量減少率が徐々に増加した。浸漬10年では220℃24h処理材で約60%、

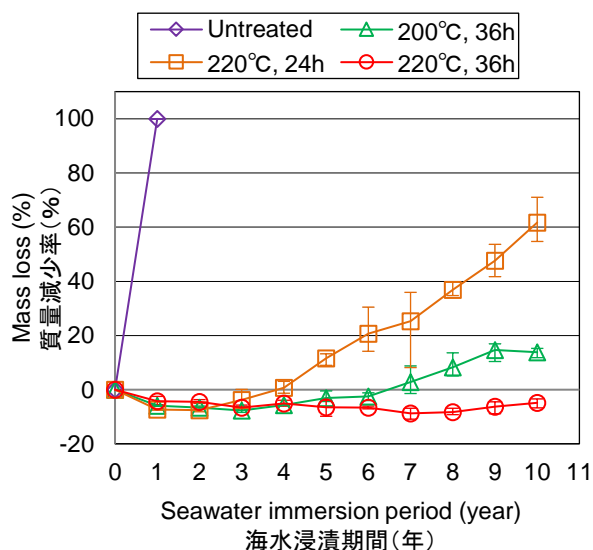


図-18 窒素雰囲気下での熱処理材の海水浸漬10年までの質量減少率 (n=3, 誤差範囲は最大・最小値)



図-19 窒素雰囲気下での熱処理材（海水浸漬10年）
左から、200℃36h, 220℃24h, 220℃36h各3個

200℃36h処理材で約14%の質量減少が生じ、220℃36h処理材では質量減少率が0未満であった。

図-19に浸漬10年での試験体の外観を示す。220℃24h処理材は浸漬1年で数か所見られたキクイムシ食害がその後年々顕著になり、浸漬10年では晩材が特に食害され、体積がかなり減少していた。200℃36h処理材では晩材が一部食害されていた。220℃36h処理材ではキクイムシの食害痕はわずかであった。220℃24h処理は試験的に処理時間を短くしたものであり、立ち上げ時間が短いため材内部まで220℃に到達していなかった可能性が高い。なおこの試験体の処理当時の温度管理は缶内温度を基本としていたが、現在は材中温度と缶内温度で管理・制御されて220℃36h処理材が生産されている。

(3) アセチル化処理木材

2019年5月に港空研用試験体を海水浸漬後、1か月ごとに写真撮影し、6か月ごとに湿潤状態での各面の観察を行なった。無処理材は3か月後にはキクイムシの激しい食害を受け、フナクイムシの石灰管が表出しており、浸漬5か月後までに消失した。一方アセチル化処理木材は、直近の浸漬2.5年での観察ではキクイムシ食害をほとんど受けていなかった（図-20）。

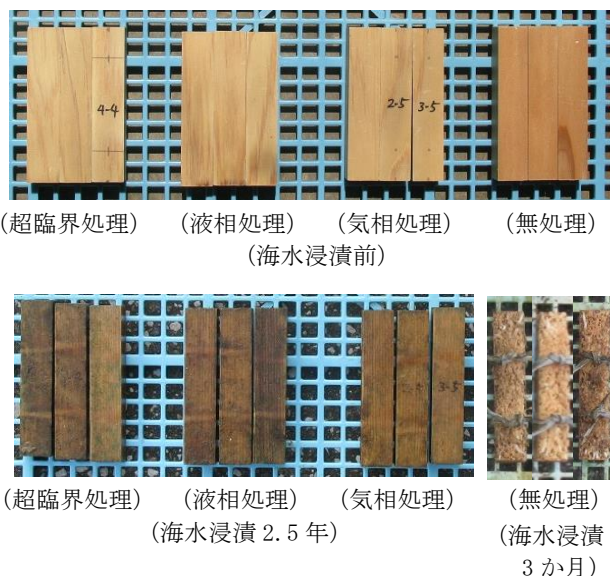


図-20 海水浸漬前後のアセチル化処理木材と無処理材

なお、港空研用試験体については乾燥質量測定や曲げ試験を行っていないので、試験体内部のフナクイムシ食害の有無は不明であるが、森林総研用試験体については3か月ごとに乾燥質量を測定しており、浸漬1年で浸漬を終了した時点ではいずれのアセチル化処理法でも乾燥質量減少率は0未満であった（松永2020）。また2020年6月からは新たな森林総研用試験体（厚4mm×幅25mm×長90mm、

樹種：スギ)が浸漬され、3か月ごとに曲げ試験が行なわれており、直近の浸漬1年での試験ではいずれの処理法でも浸漬前とほぼ同程度の曲げ弾性率が維持されていた(松永2022)。これらの結果から、浸漬1年まではフナクイムシ食害を受けていないと考えられる。

(4) 被覆木材

2004年3月に試験体を海水浸漬後、1年ごとに湿潤状態で曲げ剛性を測定し、浸漬を継続した。図-21に各試験体の正規化曲げ剛性(浸漬前の曲げ剛性を1とした値)を示す。NC(無被覆)試験体は浸漬1年で曲げ剛性が半減し、3年目までに激しい食害を受け(図-22)、曲げ剛性測定が困難になったため浸漬を終了した。

EP(エポキシ樹脂塗布)試験体は浸漬4年目に端部に食害が生じ、5年目以降、端部の食害が激しくなるとともに曲げ剛性が大きく低下した。その後、端部の樹脂が剥離しフナクイムシの石灰管が確認された(図-23左)。10年目には曲げ剛性測定が困難になり、浸漬を終了した。

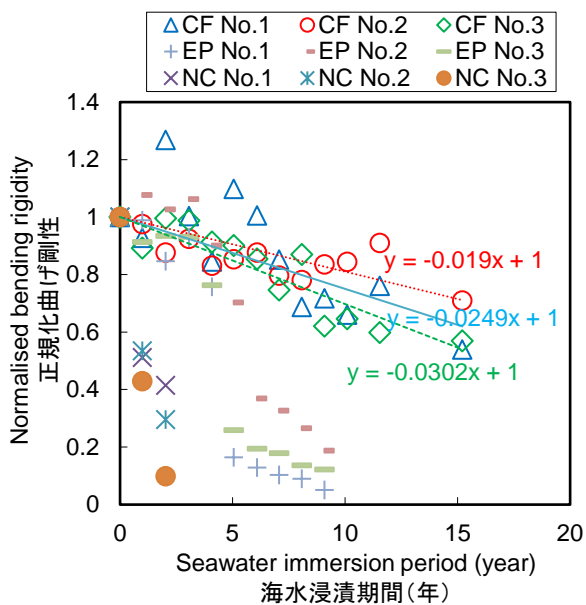


図-21 CF(炭素繊維シート被覆), EP(エポキシ樹脂塗布), NC(無被覆)各試験体の曲げ試験結果



(海水浸漬前) (海水浸漬3年後)

図-22 海水浸漬前後の試験体 左からCF(炭素繊維シート被覆), EP(エポキシ樹脂塗布), NC(無被覆)

CF(炭素繊維シート被覆)は直近の浸漬15年での測定まで食害や被覆の剥離が確認されていない(図-23右)。曲げ剛性は低下傾向にあるが、浸漬15年時点で初期の50%以上を維持していた(図-21)。



(海水浸漬8年のEP) (海水浸漬15年のCF)

図-23 海水浸漬後の試験体の端部

3.2 耐風化性

2017年7月に100樹種試験体の気中暴露を開始した後、海水シャワー場の試験体は通算暴露期間0.26年, 0.77年, 1.51年, 2.00年, 3.00年の時点でいったん大型構造実験施設内(空調なし)に回収し、約2か月間屋内で自然乾燥後、質量と曲げ剛性を測定し、暴露を再開した。この他に通算暴露期間1.70年の時点で、台風によるシャワー施設損壊のため暴露を中断し、2か月間屋内で保管した。これらの中断期間を除いた通算暴露期間3.00年での測定(2021年9月実施)が直近の測定である。

また海水シャワーのない区画の試験体は2017年7月に設置後、約1年ごとに質量と曲げ剛性を測定し、当日中に暴露を再開した。この区画では雨天時と降雨後数時間以外は試験体は気乾状態と考えられるため、屋内での自然乾燥は行なわず、大型構造実験施設内に搬入後数時間以内に測定した。直近の測定は暴露期間3.94年で2021年7月に実施した。

直近の測定での、質量減少率と曲げ剛性減少率を、表-8と図-24~27に示す。図-24~27では、横軸に試験体の暴露前の気乾密度をとり、針葉樹、広葉樹(熱帯材)、広葉樹(熱帯材以外)を異なるマーカーで示した。これらの結果では、海水散布あり・なしともに、広葉樹(熱帯材以外)の質量・曲げ剛性の減少率が比較的大きい傾向が見られる。

米国の1980年代の既往研究では、針葉樹4種(サザンパイン, ベイスギ, セコイア, ベイマツ)と広葉樹(熱帯材以外)6種(ホワイトオーク, レッドオーク, メープル, バスウッド, イエローポプラ, イエローバーチ)の室内人工風化試験で、広葉樹の浸食速度が針葉樹の早材(年輪の薄色部分)より小さく針葉樹の晩材(年輪の濃色部分)と同程度であった(Feistら1984)。

一方, Wang(1990)による針葉樹6種, 熱帯産広葉樹1種, 広葉樹(熱帯材以外)10種の、台湾での7年間の屋外暴露

表-8 100 樹種試験体の気中暴露試験結果

樹種	海水散布あり 暴露 3 年		海水散布なし 暴露 4 年	
	質量減少率 (%)	曲げ剛性減少率 (%)	質量減少率 (%)	曲げ剛性減少率 (%)
アカマツ	19.2	60.1	11.9	9.9
アキタスギ	9.0	37.8	13.3	15.7
イチョウ	4.9	14.6	9.5	1.6
カヤ	9.4	44.1	11.1	11.8
キソヒノキ	12.3	38.2	10.6	12.4
サワラ	15.5	42.2	13.1	35.7
スギ	6.9	33.2	10.9	19.5
ヒノキ	11.0	41.5	11.3	16.5
ヤクスギ	3.5	27.0	—*1	—*1
アサダ	29.0	67.9	31.5	59.6
イタヤ	30.7	67.4	19.8	39.8
イチイガシ	13.9	47.2	13.3	16.0
エノキ	51.3	93.0	26.2	46.1
エンジュ	29.0	69.1	9.3	20.4
カエデ	25.3	54.2	14.6	41.4
カツラ	19.2	49.0	14.0	53.9
キハダ	36.0	87.5	14.3	31.2
キリ	69.8	98.8	27.1	70.9
クス	21.5	33.7	17.2	35.8
クリ	22.2	61.8	15.1	—*2
クルミ	29.8	79.4	11.5	23.2
クワ	19.9	56.4	—*1	—*1
ケヤキ	23.8	63.2	10.5	19.6
シイ	23.3	55.9	9.2	17.3
シウリ	29.4	85.6	11.2	19.4
シオジ	21.2	70.2	10.2	16.2
シナ	44.5	88.6	17.9	66.4
ジンダイニレ	34.6	86.9	47.2	77.0
セン	43.9	83.1	27.6	63.9
センダン	13.8	54.1	8.2	21.9
タブ	19.5	51.3	8.9	18.2
タモ	34.9	88.5	13.7	25.3
トチ	23.9	75.7	18.6	35.2
ナラ	27.7	82.0	11.4	28.6
ニレ	23.0	60.8	14.2	32.5
ハゼ	21.5	53.9	9.9	19.2
ホオ	27.1	67.2	12.6	26.4
マカバ	25.0	63.3	10.2	31.3
ミズメ	26.8	69.5	12.3	38.0
ヤマザクラ	14.3	35.1	6.9	3.3
アガチス	2.4	15.8	9.0	9.4
イエローパイン	6.9	23.3	8.3	9.4
スプルー	11.2	46.7	11.6	10.8
タイワンヒノキ	5.6	23.1	8.7	13.0
チベットヒノキ	3.5	14.7	—*1	—*1
ノーブル	1.8	11.8	12.5	15.3
バルサム	10.4	44.5	10.6	23.0
ベイスギ	—*1	—*1	9.4	22.2
ベイツガ	10.7	32.3	10.5	28.2

バイヒ	10.6	48.4	8.4	14.1
バイヒバ	8.2	29.8	8.1	10.3
ベイマツ	4.8	18.6	7.6	1.3
ベニマツ	20.9	68.0	11.3	20.2
ホワイトスプルー	11.5	47.3	12.2	19.6
ポンデロッサパイン	12.7	55.8	24.2	63.3
ラオススギ	4.7	17.7	11.3	17.0
ラオスヒノキ	11.2	47.7	10.8	17.5
レッドパイン	31.8	85.0	16.0	19.2
アサメラ	3.6	10.8	8.5	16.7
アニグレ	22.6	55.3	15.0	24.3
アピトン	9.2	26.4	8.7	13.5
アフリカンマホガニー	20.9	68.3	—*1	—*1
アユース	19.8	65.7	19.1	32.8
イロコ	5.8	24.9	10.2	18.1
ウエンジ	1.0	8.1	5.3	13.0
オバンコール	8.1	33.3	5.7	10.6
サペリ	10.1	33.8	16.1	26.4
ジョンコン	18.5	51.2	—*1	—*1
ゼブラノ	8.8	36.2	6.9	4.4
タウン	10.6	22.0	9.1	4.1
チーク	9.4	17.5	10.8	17.5
ニヤトー	21.2	71.3	14.5	23.5
パープルハート	9.2	27.8	6.6	-8.0
パドック	0.5	-0.8	6.9	2.1
ブビンガ	4.3	13.4	5.7	15.6
ベリ	9.7	37.2	6.0	6.6
ペルポック	17.7	52.6	14.9	27.8
ボセ	12.5	36.5	13.6	11.7
メラピー	13.7	44.5	8.5	20.0
メルサワ	6.1	21.9	7.6	9.9
モアビ	12.5	28.0	10.4	7.3
モンキーポッド	16.3	70.4	14.1	56.8
アルダー	37.9	87.0	29.2	50.5
イエローバーチ	38.2	77.4	21.3	51.1
イエローポプラ	39.4	83.5	12.6	30.9
ウォールナット	22.3	51.3	10.7	13.4
カーリーメープル	24.4	64.9	16.8	33.8
コットンウッド	39.8	88.9	21.4	42.8
ササフラ	35.5	89.9	15.7	38.0
ソフトメープル	—*1	—*1	24.3	50.0
チェリー	22.7	61.4	9.4	27.1
バーズアイメープル	34.4	79.2	21.7	38.4
ハードメープル	28.1	66.1	22.1	42.7
バスウッド	47.8	91.9	24.1	43.2
ピーシーメープル	40.9	90.4	32.5	52.9
ビーチ	35.0	75.9	19.2	48.9
ヒッコリー	28.0	65.9	15.4	48.3
ホワイトアッシュ	20.0	42.6	11.8	24.9
ホワイトオーク	18.0	43.0	9.8	23.6
レッドオーク	29.2	76.8	12.7	22.1

注) *1: 2017 年 10 月の台風 21 号で護岸を越えた海水により、コンテナが約 100m 漂流した際に、結束線から外れ行方不明。
*2: 割れのため曲げ載荷できなかった。

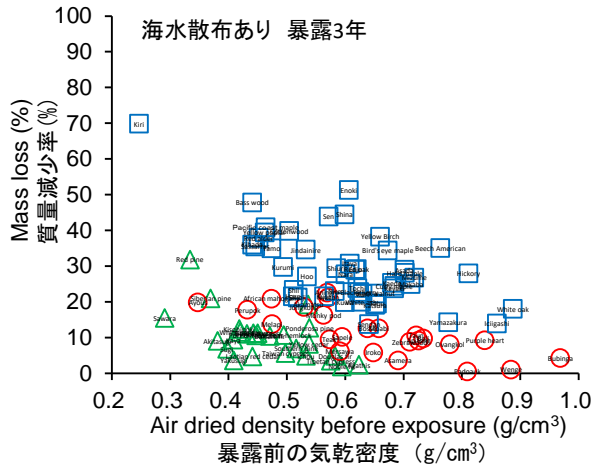
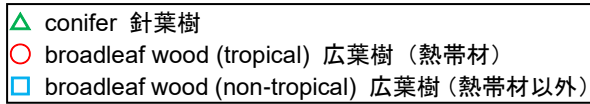


図-24 無処理木材の気中暴露 (海水散布あり) 3年後の質量減少率

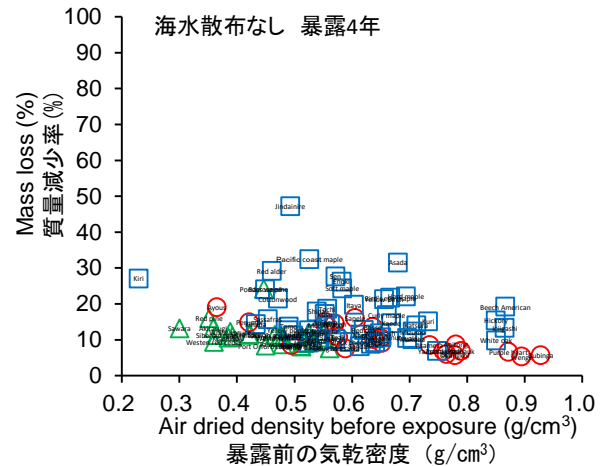
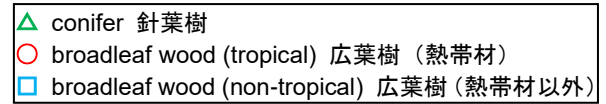


図-26 無処理木材の気中暴露 (海水散布なし) 4年後の質量減少率

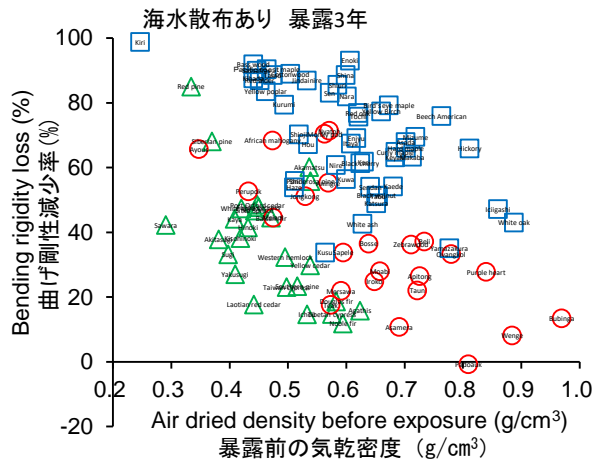


図-25 無処理木材の気中暴露 (海水散布あり) 3年後の曲げ剛性減少率

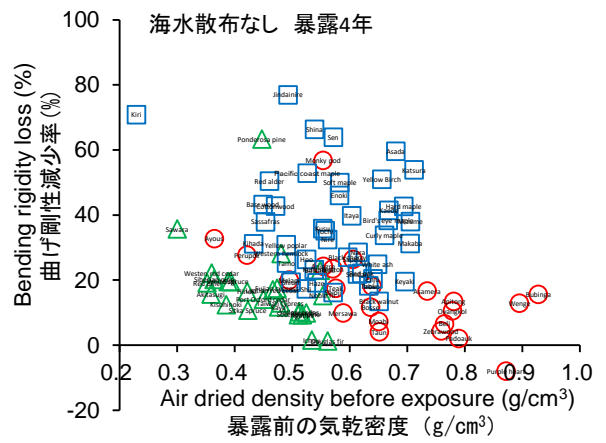


図-27 無処理木材の気中暴露 (海水散布なし) 4年後の曲げ剛性減少率

試験では、広葉樹 (熱帯材以外) の曲げ剛性減少率が比較的大きかった。Sudiyaniら (1999) による密度のほぼ等しい2種 (針葉樹のスギと熱帯産広葉樹のalbizzia) の、室内人工風化試験および京都での1年間の屋外暴露試験では、albizziaの方がリグニン含有率の減少が大きかった。Williamsら (2001a) の米国での14年間の屋外暴露試験 (針葉樹4種、広葉樹 (熱帯材以外) 1種)、およびWilliamsら (2001b) の米国での10年間の屋外暴露試験 (針葉樹4種、広葉樹 (熱帯材以外) 2種) では、広葉樹 (熱帯材以外) の方が針葉樹より風化による浸食速度が大きいことが示唆されている。

筆者の既報 (山田2014) の6年間の屋外暴露試験 (海水散布あり・なし、針葉樹4種、広葉樹 (熱帯材以外) 6種) では、海水散布ありで広葉樹 (熱帯材以外) の風化速度

が針葉樹より大きかったが、海水散布なしでは違いが判然としなかった。この既報の試験では厚さ20mmの試験体を用いたのに対し、今回は厚さ12mmの試験体を用いたため、海水散布なしで4年間の暴露でも広葉樹 (熱帯材以外) と針葉樹の質量・曲げ剛性減少率の違いが確認できた。

なお図-24~27で、針葉樹、広葉樹 (熱帯材)、広葉樹 (熱帯材以外) の各グループ別に見ると、暴露前の気乾密度と質量・曲げ剛性減少率に負の相関が認められるが、これは一般的な傾向である。紫外線によるリグニンの分解しやすさが同じ木材どうしであれば、密度が大きい (= 細胞壁が厚く空隙が少ない) ほど同じ厚さの木材が消失するまでの時間が長い (= 寸法減少が遅い)。したがって一定期間での体積減少率 (= 質量減少率) および曲げ剛性減少率が小さい。

今回の結果では、同一の密度の木材を比較した場合に、例外はあるが概ね質量・曲げ剛性減少率が針葉樹<広葉樹(熱帯材)<広葉樹(熱帯材以外)となっているので、紫外線によるリグニンの分解しやすさがこの順番で大きくなっていることが考えられる。リグニンを構成する基本単位にはグアイアシル(G)単位とシリリングル(S)単位があり、広葉樹のリグニンがS単位を多く含むのに対し、針葉樹のリグニンはもっぱらG単位から成り構造的にリジッドであるとされる(船岡2007)。また広葉樹101樹種の分析結果(呉1993)では、熱帯から冷温帯への生育気候の変化に伴いS/Gが大きくなる傾向が認められている。これらのことから、S/Gは針葉樹<広葉樹(熱帯材)<広葉樹(熱帯材以外)となる傾向があり、それが紫外線によるリグニン分解速度に影響している可能性が考えられる。

現在は木材の風化による浸食速度について、前述のFeistら(1984)の試験結果等に基づき、針葉樹で100年間に5~10mm、広葉樹で2~5mmなどの値が示されている(Sellら1986)。今回の結果などを見ると、広葉樹については熱帯材と熱帯材以外で異なり、熱帯材以外の広葉樹の場合は針葉樹より風化が速いと想定した方がよい可能性がある。

なお、今回の結果で曲げ剛性減少率が0未満になっている試験体があるが、これは荷重変位勾配の減少が小さく、測定誤差の範囲内であったためと考えられる。試験体の暴露は現在も継続しており、より長期間の暴露後の測定結果をいずれ報告したい。

4. 結論

各種の木材試料を研究所内の海水循環水槽と海水シャワー場および大気暴露場に設置し、定期的に乾燥質量または曲げ剛性を測定して劣化状況を評価した。その結果、無処理木材の耐海虫性は樹種により異なり、海水浸漬期間12年の時点で一部の樹種は試料が残存していたが、無被害の樹種はなかった。一部の熱処理材は海水浸漬13年時点で無被害、アセチル化処理木材は浸漬2年半の時点で無被害であった。炭素繊維シート被覆木材は浸漬15年時点で初期値の50%以上の曲げ剛性を維持していた。100樹種の無処理木材の気中暴露(海水散布あり)3年、および気中暴露(海水散布なし)4年での測定結果では、熱帯材以外の広葉樹の風化による質量と曲げ剛性の減少率が、針葉樹および熱帯産広葉樹より大きい傾向が見られた。

5. おわりに

無処理木材の耐海虫性(特にフナクイムシ抵抗性)には、樹木の辺材よりも心材に多く蓄積される抽出成分やシリカなどの灰分の寄与が考えられるが、これらの成分には樹種による差の他に、個体差や樹体内の位置による差がある。個体差や位置による差を含めて樹種ごとの耐海虫性の情報を提供するためには、生育環境や樹体内の位置の異なる多数のサンプルを試験する必要がある。現状では無作為に入手した1ケース~数ケース/樹種のサンプルを試験した段階であり、今後、個体差や樹体内の位置による差も含めて検討していきたい。

熱処理材、アセチル化処理木材については、現状で有望な結果が出ており、今後海水浸漬を継続して、より長期の耐海虫性を確認したい。

耐海虫性については、干出時間の影響や、食害の強度への影響に関しても現在実験中であり、今後報告したい。また、フナクイムシとキクイムシの活動度の季節変動と年変動についても、今後実験により定量化したい。

耐風化性については、本稿で述べた試験体の他、別途入手した木材および竹材についても現在暴露を継続している。室内と屋外での淡水浸漬、海水散布あり・なしの間で試験体を移動させて散布期間を要因とする実験、2枚重ねた試験体を暴露し上層と下層の風化速度を比較する実験なども開始したので、これらの測定結果もいずれ報告したい。

(2022年2月1日受付)

謝辞

本研究の中で、アセチル化処理木材に関する実験は、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所との共同研究「木材・プラスチック複合材(WPC)等木質材料の海洋環境における利用可能性の探索」の中で実施しているものです。関係各位に感謝の意を表します。

また、本研究の公表にあたり、公表審査委員の和田匡央特別研究主幹から、加筆すべき点について助言をいただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 呉晋(1993): 広葉樹細胞壁におけるGS-リグニン分布の不均一性, 北海道大学農学部邦文紀要, Vol. 18, No. 3, pp. 219-268.
- 佐藤敬之(2004): 熱処理による木材の耐久性向上に関する技術開発, 木材保存, Vol. 30, No. 6, pp. 269-272.
- 藤原昭夫監修(2012): 建築知識版 最高の木材ムク板見本, エクスナレッジ.
- 船岡正光(2007): 植物資源由来の高分子材料ーリグノフ

- エノール, 材料, Vol.56, No.12, pp.1189-1193.
- 松永正弘, 山田昌郎, 石川敦子, 小林正彦, 神林徹, 片岡厚(2020): 超臨界法及び従来法でアセチル化した木材の海洋環境暴露試験—暴露1年間の変化—, 日本木材保存協会第36回年次大会研究発表論文集, pp.20-21.
- 松永正弘, 山田昌郎, 石川敦子, 小林正彦, 神林徹(2021): 6ヶ月間の海洋環境暴露による化学改質木材の強度変化, 日本木材保存協会第37回年次大会研究発表論文集, pp.12-13.
- 松永正弘, 山田昌郎, 小林正彦, 神林徹, 石川敦子(2022): 各種処理法でアセチル化したスギ材の海洋暴露評価, 木材保存 (投稿中).
- 森田珠生(2018): サーモウッド処理木材, 木材保存, Vol.44, No.3, pp.146-147.
- 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.
- 山田昌郎(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, 港湾空港技術研究所資料, No.1281, 24p.
- Feist, W. C. and Hon, D. N.-S.(1984): Chemistry of weathering and protection. In: Rowell, R. (Ed.): The chemistry of solid wood, American Chemical Society, Washington, D. C., pp.401-451.
- Sell, J. and Feist, W. C.(1986): Role of density in the erosion of wood during weathering, Forest Products Journal, Vol.36, No.3, pp.57-60.
- 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, No.4, pp.348-353.
- Wang, S. Y.(1990): Reduction of mechanical properties of seventeen Taiwan native-wood species subjected to a seven-year exposure in an outdoor environment, Mokuzai Gakkaishi, Vol.36, No.1, pp.69-77.
- Williams, R. S., Knaebe, M. T., Feist, W. C.(2001a): Erosion rates of wood during natural weathering, Part 2, Earlywood and latewood erosion rates, Wood and Fiber Science, Vol.33, No.1, pp.43-49.
- Williams, R. S., Knaebe, M. T., Evans, J. W., Feist, W. C. (2001b): Erosion rates of wood during natural weathering, Part 3, Effect of exposure angle on erosion rate, Wood and Fiber Science, Vol.33, No.1, pp.50-57.

港湾空港技術研究所資料 No.1397

2022.3

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 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/>

Copyright © (2021) by MPAT

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

この資料は、海上・港湾・航空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、複写は海上・港湾・航空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。