

針葉樹材と広葉樹材の密度および硬さと 海生キクイムシ食害の関係

山田 昌郎¹・森 満範²

¹正会員 港湾空港技術研究所 沿岸環境研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: yamada-m89wm@pari.go.jp

²非会員 北海道立総合研究機構 森林研究本部 林産試験場 (〒071-0198 旭川市西神楽 1 線 10 号)

E-mail: mori-mitsunori@hro.or.jp

木材を海洋で合理的に利用するには、木材特性から海虫食害度を予測する必要がある。その一段階として本研究では、市販の無処理木材見本を用いて、木材の密度および硬さと、キクイムシ食害による質量減少率および食害速度との関係を検討した。久里浜湾(神奈川県)の海水中に木材見本 100 個(針葉樹 27 個, 広葉樹 73 個)を浸漬し、観察と曲げ剛性測定を毎月行い、浸漬 8 か月後に回収した。フナクイムシ食害を受けなかった 73 個の見本について、気乾密度、気乾硬さ、湿潤硬さと、質量減少率および曲げ剛性減少率から求めたキクイムシ食害速度との回帰分析を行った結果、統計的に有意な相関が認められた。説明変数として、湿潤硬さの寄与率が最も高かった。密度または硬さが同程度の場合、広葉樹材より針葉樹材の方が、質量減少率とキクイムシ食害速度の予測値が有意に高かった。

Key Words: *Limnoria, density, hardness, coniferous wood, broadleaf wood*

1. はじめに

木材が海水中で生物による食害を受けることは、流木、木造船、木製棧橋などの観察を通じて、古くから知られてきた^{1,2)}。木材に穿孔する海生生物(海虫類)は、貝類と甲殻類に大別され、貝類ではフナクイムシ(*shipworm, Teredo*)、甲殻類ではキクイムシ(*Limnoria*)が主に木材に加害する。海虫類に関する生物学的な研究³⁻⁹⁾や、海虫害の防除に関する研究¹⁰⁻¹⁴⁾は、これまでも多く行われてきた。

海虫害防除方法としては、被覆、薬剤注入、熱帯産などの天然高耐久樹種の使用、木材の改質などが用いられてきた。これらは、効果、経済性、環境性などの点で一長一短がある。かつては薬剤注入が主流であったが、海洋環境への影響を予防する観点から規制が強化される傾向にある。樹脂による被覆・改質等も、マイクロプラスチックによる海洋汚染問題の顕在化に伴い、今後規制強化が予想される。熱処理¹³⁾は環境面では優れているが、強度の低下のおそれや、経済性に課題がある。

魚食文化があり沿岸漁業や養殖が営まれる日本では特に、海虫害防除における海洋環境への安全性は重要である。また現在日本では森林保全の観点から間伐材などの

木材利用が促進されている。このため、用途によっては食害を受けることをあらかじめ考慮した上で無処理材を用いるという選択肢も検討に値する。ただし、日本には国産材、輸入材ともに相当多くの種類の木材が流通しており、無処理材の海洋利用に当たっては、樹種による海虫害の相違を考慮した方が合理的である。

無処理材の海虫害の比較実験は、これまでも実施されてきた¹⁴⁻¹⁹⁾。その中でキクイムシ食害と木材の密度等の特性との関係を調べた研究例として、Cragg ら¹⁸⁾と山田^{14,19)}の研究がある。Cragg ら¹⁸⁾は、11 樹種(針葉樹 1 種, 広葉樹 10 種)についてキクイムシのふんの数と木材の硬さの間に負の相関があることを示している。山田^{14,19)}は、18 樹種(針葉樹 10 種, 広葉樹 8 種)¹⁹⁾と 15 樹種(針葉樹 6 種, 広葉樹 9 種)¹⁴⁾について、密度または硬さが増すとキクイムシ食害が少なくなる傾向を散布図で示している。

キクイムシ食害に影響する要因としては、木材の密度、硬さ、樹種、年輪幅、晩材率、繊維傾斜角度、樹齢、原木の生育環境、板材の採取位置、心材率、乾燥履歴、使用する海域のキクイムシの活性、水温、塩分、干出時間、水深などが考えられる。これらの量的・質的変数の食害への影響の大きさ(寄与率)、変数間の相関、測定・判

別の容易性と確実性を考慮して、変数を適切に選択して組み合わせた予測式があると、実用上有益である。このような予測式を提案するための一段階として本研究では、測定・判別の容易性と確実性が高くキクイムシ食害への影響が比較的大きいと考えられることから、密度、硬さ、針葉樹/広葉樹に着目して、食害との関係を検討することにした。

針葉樹/広葉樹とキクイムシ食害の関係について、山田¹⁹⁾は広葉樹より針葉樹がキクイムシ食害を受けやすいとしている。しかし、山田¹⁹⁾の実験では広葉樹の密度および硬さが針葉樹より大きかったため、密度または硬さが同程度であっても広葉樹より針葉樹がキクイムシ食害を受けやすいかは不明であった。本研究ではこの点について検討する。

さらに食害の評価指標として、山田^{14, 19)}は質量減少率を用いたが、本研究ではこれに加えて曲げ剛性減少率から求めたキクイムシ食害速度を用い、指標としての有効性を検討することにした。質量減少率は試験体を乾燥させなければ求められないのに対し、曲げ剛性は湿潤状態で非破壊的に同一試験体に対して繰り返し測定できる利点がある。また、質量より曲げ剛性の方が強度的な性能の劣化指標として適切と考えられる。このため本研究での検討項目に加えた。

2. 実験方法

(1) 木材見本

福岡県にある有限会社高田製材所から、2016年12月に木材見本100枚セット(厚12mm×幅135mm×長180mm, 4面プレナー加工仕上げ, 国産材40枚と輸入材60枚)を購入し、約半年間室内の気中に置いた後、各板から竹挽き鋸で幅36mm材3枚を切り出し、うち1枚(厚12mm×幅36mm×長180mm)を今回の実験に用いた。木材見本の名称を、主な実験結果とともに表-1に示した。本研究では、木材見本について樹種鑑定は行っていないので、本報で用いる木材の名称は市販木材の実用上の呼び名であり、植物学上の樹種名とは異なる場合がある。

キクイムシ食害に影響すると考えられる変数のうち、植物学上の樹種、樹齢、原木の生育環境、板材の採取位置、乾燥履歴、年輪幅、晩材率、繊維傾斜角度等は、本研究での実験要因としていないため調べていない。辺材/心材については、目視で判別できる範囲では大部分が心材とみなされたが、心材と辺材の色の差が少なく目視では判別困難な樹種もあるため、辺材が混入している可能性がある。

木材見本の呼び名と植物分類学上の樹種名が異なっても、針葉樹/広葉樹には影響しないと仮定して、針

葉樹/広葉樹は本研究での検討要因とした。なお、イチヨウは植物学的には針葉樹/広葉樹のいずれにも属しないとされるが、木材としては通常針葉樹として扱われているため、今回も針葉樹に区分した。

(2) 海水浸漬前の測定

気乾状態の木材見本の寸法をノギスで0.1mmまで測り、質量を電子天びんで0.01gまで測り、気乾状態での密度(単位体積質量)を求めた。

硬さの測定には、JIS K 7215にプラスチックの硬さ試験機として規格化されているデュロメータ硬さ計(写真-1)を用いた。この硬さ計は、一定の力(44.4N)で材料に押し込んだ針の貫入量(0~2.5mm)を材料の硬さ(100~0)として表すもので、針の形状としてはタイプD(直径1.25mm, 先端部は角度30度の円錐形)を用いた。デュロメータ硬さ計タイプDの測定値は、HDDを付けてHDD 56のように表示することがJIS K 7215に規定されている。この硬さ計で木材の硬さが簡便に測定できることは、大谷²⁰⁾により示されている。今回は各木材見本の36mm×180mmの面の表裏各5点計10点でHDDを測定して平均値を求めた。早材と晩材の差が明瞭なスギなどの樹種では、キクイムシが早材を選択的に食害することを考慮して、早材部に硬さ計の針を刺して測定した。

木材見本の36mm×180mmの表裏面の写真を撮影後、水道水に浸漬した。3~12日間浸漬して、質量の値から木材見本の乾量基準含水率が繊維飽和点(約30%)を超えたとみなして、湿潤状態での硬さを気乾状態と同様の方法で測定した。なお、この操作では特に高密度材で内部まで均一に繊維飽和点以上の湿潤状態になったか不明であるが、硬さを測定する表面付近では繊維飽和点を超えていた可能性が高い。また、曲げ剛性への影響は木材内部より表面付近の弾性係数の方が大きいので、内部に繊維飽和点未満の含水率の部分が残っていても、試験結



写真-1 デュロメータ硬さ計

表-1 木材見本の密度・硬さと浸漬8か月後の質量減少・食害

	木材見本の名称 (市販木材の実用上の呼び名であり、植物学上の樹種名とは異なる場合がある。)	気乾密度 ρ (g/cm ³)	気乾硬さ HDDd	湿潤硬さ HDDm	質量減少率(%)	食害状況	
						キクイムシ	フナクイムシ
針葉樹材	サワラ	0.296	37.9	28.0	59.8	4	0
	アキタスギ	0.352	42.7	30.2	63.4	4	0
	ベイスギ	0.362	42.9	32.0	60.4	4	0
	レッドパイン	0.362	39.2	26.3	78.9	4	3
	スギ	0.366	39.0	30.3	34.2	4	0
	ベニマツ	0.371	36.5	26.0	49.8	4	0
	ヒノキ	0.410	39.0	33.1	61.8	4	2
	キソヒノキ	0.413	45.4	37.2	71.6	4	2
	ホワイトスプルー	0.424	34.9	26.8	73.8	4	0
	ベイツガ	0.427	40.7	31.9	81.4	4	0
	カヤ	0.433	49.6	39.0	39.4	4	0
	ヤクスギ	0.436	45.1	33.5	20.7	3	0
	ラオススギ	0.436	46.7	40.3	37.9	4	0
	スプルー	0.452	45.0	33.3	55.4	4	0
	ベイヒ	0.452	47.2	36.3	51.3	4	2
	ボンデローサパイン	0.464	44.4	34.0	61.8	4	0
	タイワンヒノキ	0.502	52.8	40.4	40.8	4	0
	ラオスヒノキ	0.502	48.8	37.9	45.7	4	0
	イチョウ	0.515	53.5	44.4	15.5	4	0
	バルサム	0.539	48.0	35.9	55.5	4	2
	イエローパイン	0.548	42.3	32.0	30.1	4	0
	ベイヒバ	0.548	55.4	42.7	65.1	4	0
	アカマツ	0.553	42.4	34.3	31.5	4	0
	ベイマツ	0.557	48.2	39.9	37.2	4	0
	ノーブル	0.571	50.9	43.3	48.1	4	3
	チベットヒノキ	0.588	57.5	46.6	24.4	4	0
	アガチス	0.601	59.4	46.9	27.0	4	0
	広葉樹材	キリ	0.262	34.9	29.9	59.9	4
アユース		0.351	42.4	34.7	-2.3	1	0
ベルボック		0.405	44.1	37.1	-0.1	0	0
キハダ		0.426	51.9	37.4	41.6	4	0
ササfras		0.445	50.1	40.6	7.4	3	0
アルダー		0.454	50.3	37.3	20.5	3	0
クルミ		0.458	48.5	39.3	10.0	3	0
アフリカンマホガニー		0.460	51.9	41.4	19.5	4	2
イエローポプラ		0.465	47.0	36.1	38.7	4	0
コットンウッド		0.470	50.9	38.4	40.9	4	0
バスウッド		0.472	38.4	28.0	27.8	3	4
タモ		0.473	53.1	44.4	9.1	3	3
ピーシーメープル		0.477	50.9	35.6	33.3	4	1
メラビー		0.498	51.9	47.9	0.6	0	0
シイ		0.506	43.8	43.7	4.6	3	0
ジンダイニレ		0.514	54.2	39.7	58.6	4	0
ホオ		0.523	55.2	43.0	6.0	3	0
シオジ		0.526	55.4	45.9	16.7	3	0
ジョンコン		0.541	55.1	42.5	0.4	2	0
ソフトメープル		0.543	56.1	44.7	26.0	3	3
ハゼ		0.543	57.0	43.6	-7.6	3	0
モンキーポッド		0.547	48.3	48.5	0.8	1	0
セン		0.552	53.9	38.9	39.3	4	3
シウリ		0.556	54.8	42.5	18.0	3	4
ニヤトー		0.569	56.0	46.5	-0.2	2	0
エノキ		0.575	58.4	45.0	16.9	3	0
クス		0.575	51.3	46.8	6.7	1	0
ニレ		0.577	58.9	45.9	18.3	3	1
メルサウ	0.587	46.6	42.4	2.9	1	0	
エンジュ	0.587	55.3	45.3	30.9	4	1	
チーク	0.592	53.1	49.5	3.2	2	0	

ホワイトアッシュ	0.596	57.6	49.6	1.0	3	1
アニグレ	0.600	55.9	45.6	3.2	1	0
イタヤ	0.604	60.7	45.8	12.2	3	0
シナ	0.606	50.5	38.3	5.6	3	0
クワ	0.608	62.1	48.8	30.3	4	0
サペリ	0.618	60.2	53.7	1.2	0	0
イロコ	0.620	57.8	51.3	1.3	3	0
センダン	0.627	62.0	54.5	2.5	3	1
レッドオーク	0.630	61.5	51.7	25.6	3	0
トチ	0.631	60.7	46.1	12.9	3	2
ウォルナット	0.639	60.1	50.8	4.6	2	0
チェリー	0.647	63.5	51.5	2.8	2	3
ナラ	0.655	59.4	48.5	19.5	3	3
ボセ	0.656	58.2	50.9	5.7	1	0
イエローバーチ	0.657	60.8	43.9	10.2	3	0
マカバ	0.669	60.0	45.4	17.2	3	1
カツラ	0.676	64.7	52.2	2.3	3	0
バーズアイメープル	0.676	63.3	48.3	10.1	3	2
ゼブラノ	0.677	60.0	49.5	4.5	3	0
クリ	0.678	60.3	47.4	4.3	2	0
ケヤキ	0.682	64.9	55.7	3.0	2	0
カエデ	0.685	65.2	54.3	8.4	3	0
カーリーメープル	0.688	64.6	51.6	21.8	3	0
モアビ	0.688	57.4	51.6	2.0	0	0
アサダ	0.695	64.8	54.8	7.5	3	0
タウン	0.698	58.9	46.7	2.6	2	1
ハードメープル	0.704	62.4	50.5	4.4	3	0
アサメラ	0.713	64.7	58.5	2.3	0	0
タブ	0.714	58.9	50.8	8.6	3	0
ミズメ	0.719	62.7	49.7	15.6	3	0
ヤマザクラ	0.742	68.1	59.9	5.9	3	0
アピトン	0.742	62.6	52.5	3.2	2	0
ビーチ	0.744	60.8	44.4	30.4	4	3
ベリ	0.758	60.9	56.7	4.3	1	0
バドック	0.801	68.8	63.9	3.5	0	0
オバンコール	0.811	67.2	61.1	1.7	0	0
ヒッコリー	0.848	70.1	61.5	3.6	2	0
イチイガシ	0.851	67.0	56.0	7.2	3	2
パープルハート	0.858	71.4	63.8	5.8	2	2
ウエンジ	0.870	72.2	63.9	-0.4	0	0
ホワイトオーク	0.914	69.8	54.2	12.3	3	0
ブピンガ	0.966	72.0	62.0	3.9	3	2

果に及ぼす影響は軽微と考えられる。とはいえ、高密度材の曲げ剛性に海水浸漬後の内部の含水率増加が影響する可能性はあるため、なるべく長期間浸漬後に初期値を計測した方が望ましい。

曲げ剛性の測定では、36mm×180mmの面に載荷する3点曲げ載荷（支点間隔150mm）を行い（写真-2）、弾性



写真-2 曲げ載荷の状況

範囲での荷重変位曲線を求めた。载荷には、ねじ式一軸試験機（東京試験機製小型卓上試験機リトルセンサーLSC-1/30-2）を使用した。载荷点および支点のめり込みを軽減するため、载荷点および支点と木材見本の間に厚さ3mmのテフロンシートを挿入した。クロスヘッドの変位速度を2mm/分とし、変位増分0.02mm毎に変位と荷重をデータロガーで計測した。クロスヘッド変位2mmまで载荷して除荷した。変位1.5mm～2mmの範囲の荷重と変位の値を用いて、荷重変位曲線の勾配を求めた。

(3) 海水浸漬

薄型メッシュコンテナ（写真-3、外寸708mm×460mm×83mm、ポリエチレン製）6個に木材見本を15～18個ずつに分けて結束した。木材見本の配置は乱数を用いて無作為に決定した。コンテナに重しのステンレス棒（直径20mm、長さ400mm）と、吊り下げ用のロープを取り付けて、2017年6月28日に港湾空港技術研究所内の海水循環水槽（写真-4）内に設置した。この水槽はコンクリートや鋼材などの長期耐久性試験に使用している施設で、久里浜湾の海水を1日2回取水・排水し、水深を1.0～2.5mの範囲で変化させて干満を再現している。今回の木材見本はいずれも常時海中となる位置に設置した。

毎月下旬にコンテナを引き上げ、湿潤状態での木材見本の質量測定、曲げ载荷、写真撮影、食害痕の観察を行



写真-3 木材見本を結束したコンテナ



写真-4 海水循環水槽

い、コンテナ内での配置を乱数を用いて無作為に換えて浸漬を継続した。

なお、8月18日から30日まで、他実験の都合で水槽の海水がすべて排水されたので、この間は室内の容器にコンテナを入れ、海水を常時注水して木材見本を海中で保管した。

(4) 海水浸漬後の測定

2018年2月下旬の測定をもって浸漬を終了し、木材見本を103℃で約1週間乾燥させた。次に約1か月間室内の気中に置いた後、質量を測定した。この質量を海水浸漬後の気乾質量とし、海水浸漬前の気乾質量を基準にして質量減少率を求めた。

また、木材見本内部のフナクイムシ食害の有無を確認するため、木材見本を20mm間隔で切断し、切断面の写真を撮影した。

3. 実験結果および考察

(1) 硬さ測定結果

以下、気乾状態での密度（単位体積質量）を ρ 、気乾状態でのデュロメータタイプD硬さをHDDd、湿潤状態でのデュロメータタイプD硬さをHDDmと記す。

全木材見本についての ρ とHDDdの回帰式（図-1）は、大谷²⁰⁾による回帰式とやや異なっている。この相違の原因として、今回高密度の木材の割合が大谷の実験よりやや多かった（たとえば $\rho > 0.7\text{g/cm}^3$ の木材が今回100種類中16種類あり、大谷の45種類中4種類に比べて多い）こと、今回早材部で測定したこと、針を押し込んでから読み取りまでの時間の違い（今回：0秒、大谷：10秒）などが考えられる。

ρ とHDDdの回帰式（図-2）には、針葉樹と広葉樹に

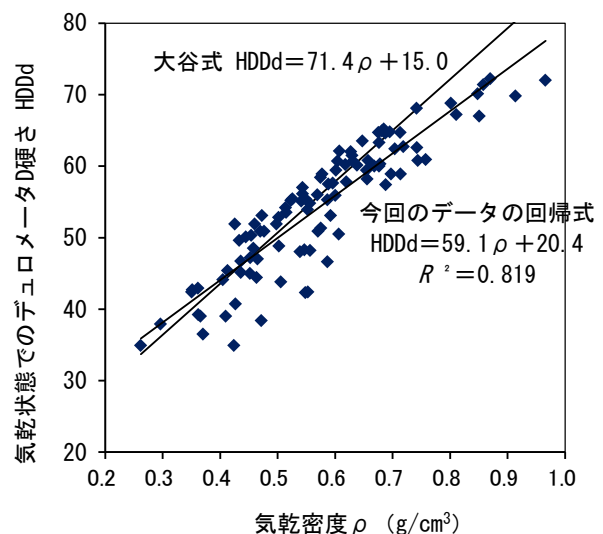


図-1 全木材見本の ρ とHDDdの関係

統計上の有意差があった ($p=0.001$)。大谷は針葉樹と広葉樹が同一直線上にあるとしている。今回早材と晩材の差が明瞭なスギなどの針葉樹では早材部で測定したこ

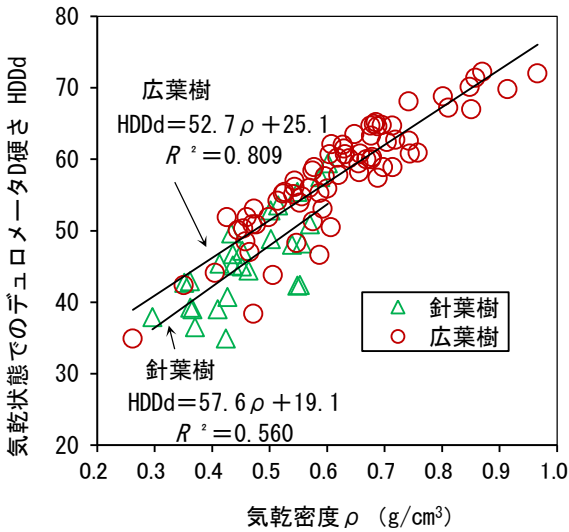


図-2 針葉樹と広葉樹の ρ と HDDd の関係

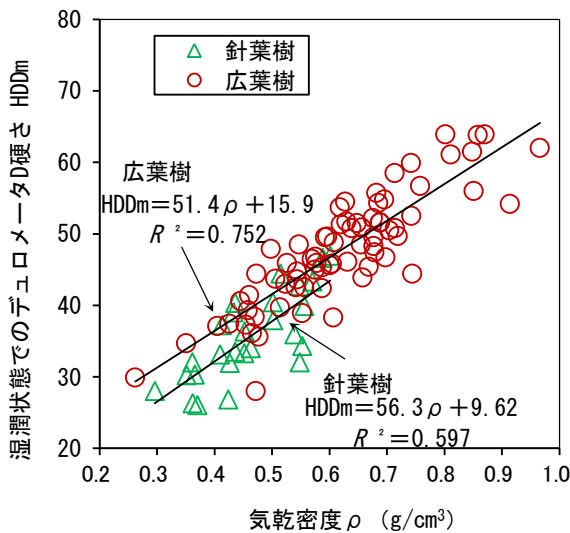


図-3 針葉樹と広葉樹の ρ と HDDm の関係

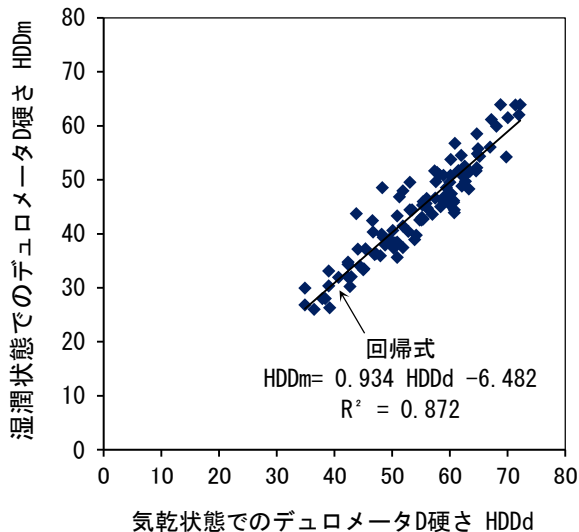


図-4 全木材見本の HDDd と HDDm の関係

とにより、早晚材の区別に無関係に測定した場合よりも、針葉樹の HDDd が低めの値となっている可能性がある。

ρ と HDDm の回帰式 (図-3) についても同様に、針葉樹と広葉樹に有意差があった ($p=0.001$)。

HDDd と HDDm の関係については、針葉樹と広葉樹に有意差はなかった ($p=0.375 > 0.05$: 有意水準 5%) ため、全木材見本についての回帰式を示した (図-4)。結合水の増加に伴って低下する他の力学的性質と同様に、HDD についてもほとんどの木材見本で $HDDm < HDDd$ となり、全 100 種類の $HDDm/HDDd$ の平均値は 0.812 であった。

(2) 海虫害の状況

海水浸漬1か月の時点ですでに 25 種類の木材見本の側面 (12mm×180mm の面) にキクイムシ (写真-5) の食害痕が見られ、3 か月では 25 種類の 36mm×180mm の面に食害痕が見られた (写真-6)。キクイムシの食害度を 0 ~ 4 の 5 段階で評価した結果、キクイムシの食害は海水浸漬期間とともに進展し (表-2)、8 か月で浸漬を終了



写真-5 巣穴から出てきていたキクイムシ

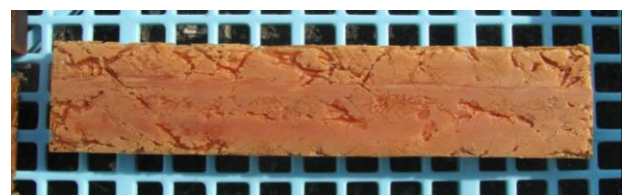


写真-6 キクイムシの食害痕 (サワラ 浸漬3か月)

表-2 キクイムシ食害の目視評価の該当木材見本数

評価	海水浸漬期間 (月)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	75	46	24	18	15	13	13	8
1	5	11	13	9	5	6	3	7
2	20	42	38	19	22	15	13	11
3	0	0	18	33	35	37	40	37
4	0	0	7	21	23	29	31	37

0: 食害なし
 1: 側面 (12mm×180mm の面) に 1 か所食害の疑い
 2: 側面に 2 か所以上明らかな食害あり
 3: 36mm×180mm の面にも部分的に食害あり
 4: 36mm×180mm の面に全面的に食害あり

した時点で、ほとんどの針葉樹が評価4であった(表-1)。なお、今回側面が先に食害されたため、表-2のように側面と36mm×180mmの面を分けて評価したが、なぜ側面が先に食害されたのかは不明である。

キクイムシが表面付近を食害することによって、木材内部にフナクイムシが形成した石灰管が露出した木材見本はキソヒノキ(写真-7)、ノーブル、シウリのみであったが、浸漬終了後に切断した結果、27種類の木材見本にフナクイムシの穿孔が確認された。穿孔が一断面のみに見られたものから、ほとんど全ての断面にわたったものまでを、1~4で評価して表-1に示した。各評価段

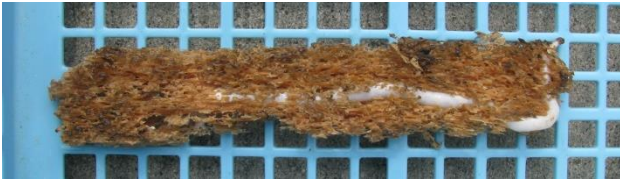


写真-7 キソヒノキ 浸漬8か月 (キクイムシ食害が進んでフナクイムシの石灰管が露出している)

評価	写真	木材種
1		タウン
2		パープルハート
3		ナラ
4		バズウッド

写真-8 切断面のフナクイムシ穿孔

階の切断面の例を写真-8に示す。

6月から半年以上浸漬してフナクイムシ食害がこの程度にとどまったのは、過去約20年のこの水槽での木材浸漬結果からの予想に反して、異例の少なさであった。当初の計画では、毎月測定する湿潤質量の減少と目視評価をキクイムシ食害の指標とし、曲げ剛性の減少をキクイムシとフナクイムシの両者による食害の指標として、両者の食害と木材特性の関係を考察する予定であったが、フナクイムシ食害が予想外に少なかったため、本稿ではフナクイムシ食害のなかった73種類について、気乾質量減少率および曲げ剛性減少率をキクイムシ食害の指標として、木材特性との関係を考察することにした。

(3) 質量減少率と気乾密度、気乾・湿潤硬さとの関係

フナクイムシ食害が生じなかった73種類について、キクイムシ食害の指標として気乾質量減少率を目的変数 y とし、説明変数 x を ρ , HDDd, HDDmとして、線形回帰式と分数関数回帰式を求めた(図-5~7)。いずれの x にも y との間に有意な相関が認められた。寄与率 R^2 は HDDm

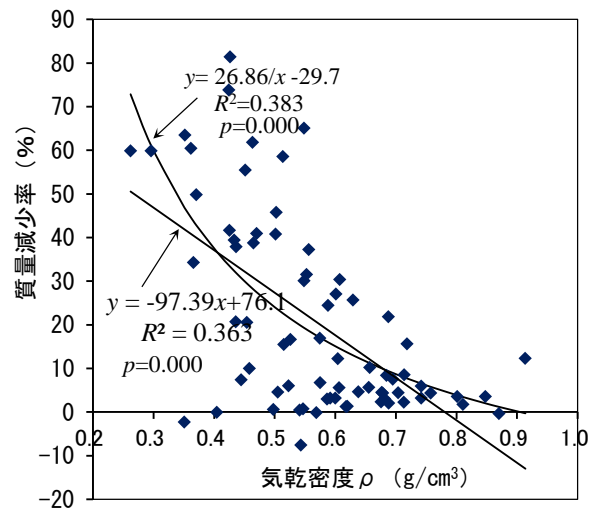


図-5 キクイムシ食害による質量減少率と ρ の関係

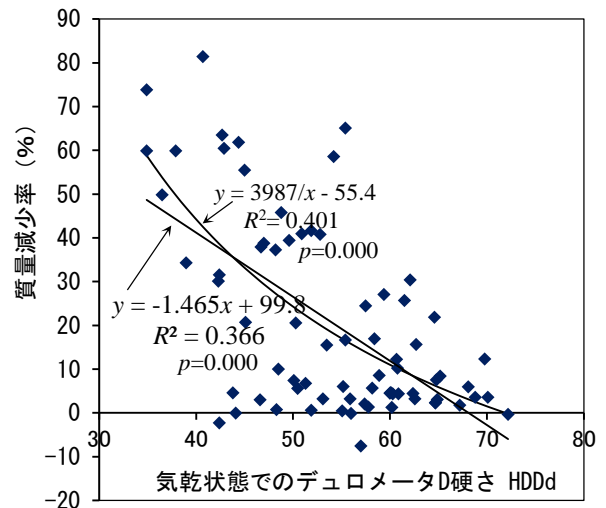


図-6 キクイムシ食害による質量減少率と HDDd の関係

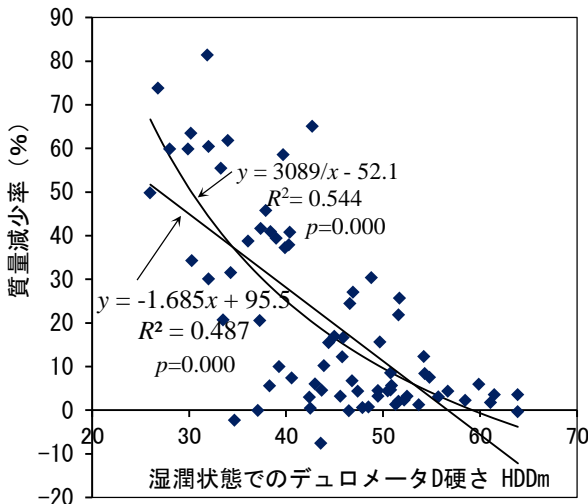
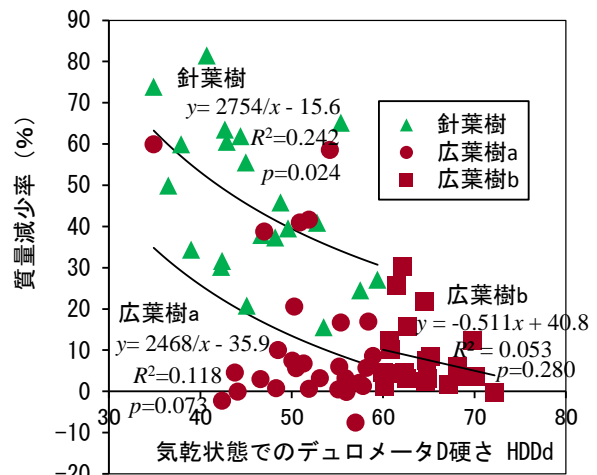


図-7 キクイムシ食害による質量減少率とHDDmの関係

が最も高く、説明変数として優れていた。これは、キクイムシが接触する木材が海中で湿潤状態にあることから自然な結果と考えられる。

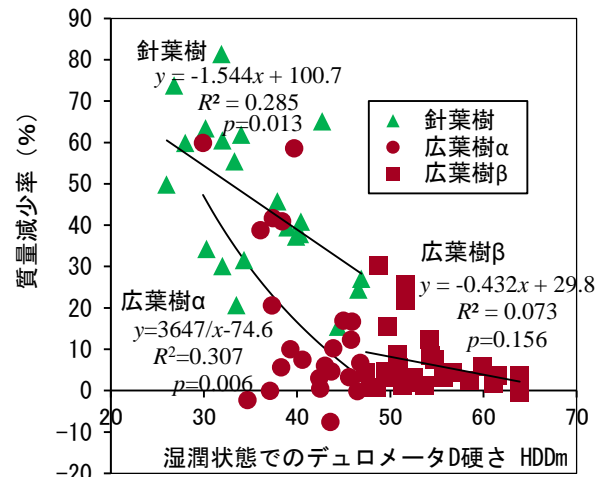
次に、密度または硬さが同程度の場合に、木材が針葉樹か広葉樹かによって質量減少率に有意な差があるか検討した。今回の針葉樹の ρ 、HDDd、HDDmの最大値はそれぞれ $0.601(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、59.4、46.9であったので、これらを境に広葉樹をAとB、aとb、 α と β に分けた。そして針葉樹と広葉樹A,a, α とを区別して解析した場合と区別せずに解析した場合の分散比を求めた。その結果、区別することの有意性が確認された。図-8~10に、針葉樹、広葉樹A,a, α 、広葉樹B,b, β のそれぞれについての、 ρ 、HDDd、HDDmと質量減少率の回帰式を示す。なお回帰式としては、線形と分数関数のどちらか(R^2 の大きい方)を示した。

図-8~10で針葉樹の回帰曲線は広葉樹A,a, α の回帰曲線より上にある。すなわち、密度および硬さから回帰式を用いて予測される質量減少率の値は、針葉樹>広葉樹A,a, α となった。それぞれの回帰式の p の値は、針葉樹ではいずれも $p < 0.05$ 、広葉樹A,a, α では x がHDDdのとき



(広葉樹 a : HDDd ≤ 59.4, 広葉樹 b : HDDd > 59.4)

図-9 キクイムシ食害による質量減少率とHDDdの関係



(広葉樹 α : HDDm ≤ 46.9, 広葉樹 β : HDDm > 46.9)

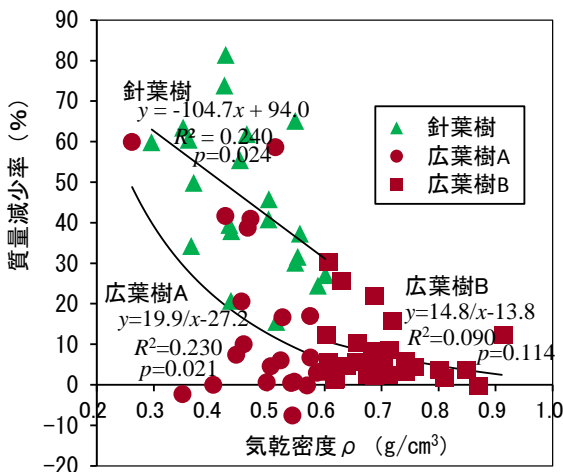
図-10 キクイムシ食害による質量減少率とHDDmの関係

以外は $p < 0.05$ となり、有意水準5%で有意な相関があった。広葉樹B,b, β ではいずれも $p > 0.05$ となり、有意水準5%で有意な相関がなかった。

(4) 曲げ剛性減少率

曲げ剛性はヤング係数 E と断面2次モーメント I の積 EI である。また長方形断面では $I = bh^3/12$ である(b :断面幅, h :断面高さ)。今回は水道水に浸漬して繊維飽和点を越えた状態とみなして曲げ剛性の初期値を測定しているため、その後の海水浸漬期間を通じて E は一定と仮定し、曲げ剛性減少率を食害による I の減少率に等しいと仮定する。仮想的な食害深さを r とし、木材見本の各表面から深さ r までの木材が消滅したとすると、 I は $(b-2r)(h-2r)^3/12$ となり(b :断面幅の初期値, h :断面高さの初期値)、 I の初期値からの減少率は $\{1 - (b-2r)(h-2r)^3/(bh^3)\} \times 100$ (%)と表せる。

フナクイムシ食害が生じなかった73個の木材見本について、海水浸漬8か月後の曲げ剛性の、初期値からの減



(広葉樹 A : $\rho \leq 0.601$, 広葉樹 B : $\rho > 0.601$)

図-8 キクイムシ食害による質量減少率と ρ の関係

少率から、上記のように仮想的な食害深さ r を求めた。さらにこの r を用いて木材見本の仮想的な体積を $(b-2r)(h-2r)(l-2r)$ で表した (l : 木材見本長さの初期値)。そして体積減少率を、 $\{1-(b-2r)(h-2r)(l-2r)/(bhl)\} \times 100$ (%) と表した。また、体積減少率は、気乾質量減少率に等しいと仮定した。図-11 には、こうして求めた気乾質量減少率を横軸とし、質量測定値からの気乾質量減少率を縦軸として表した。

図-11 では $R^2=0.943$ となり相関係数は非常に高かった。曲げ剛性からの計算値の方が実測による値よりも大きめの値となっているのは、海水浸漬後の気乾質量に生物の遺骸や海水中の塩分などが含まれることや、食害で木材繊維が切断されると質量よりも曲げ剛性に大きく影響することなどによると推測される。

図-12~17 にフナクイムシ食害が生じなかった 73 個の木材見本について、毎月の曲げ剛性測定値からクイムシ

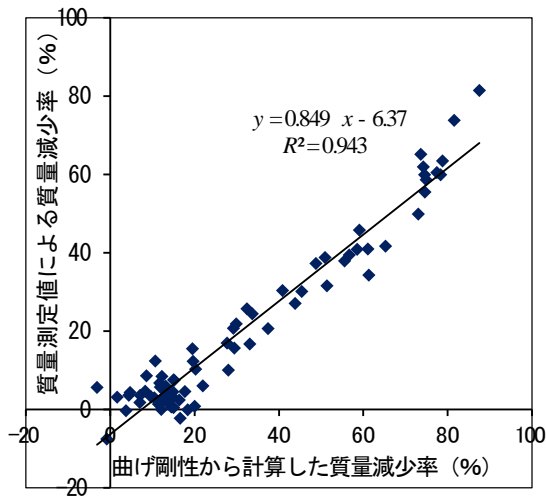


図-11 曲げ剛性から計算した質量減少率と質量測定値による質量減少率の関係 (海水浸漬 8 か月)

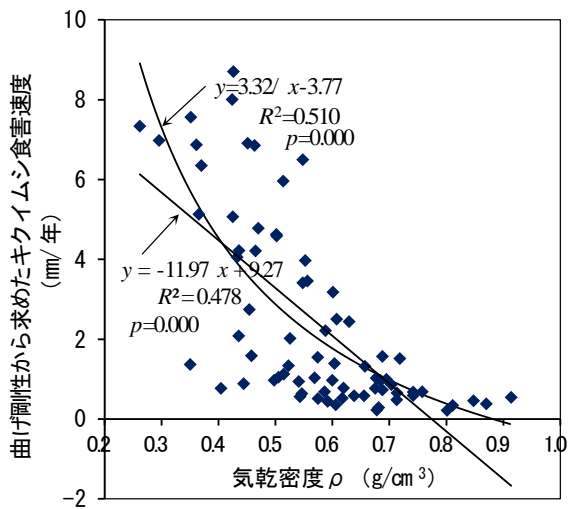


図-12 曲げ剛性から求めたクイムシ食害速度と ρ の関係

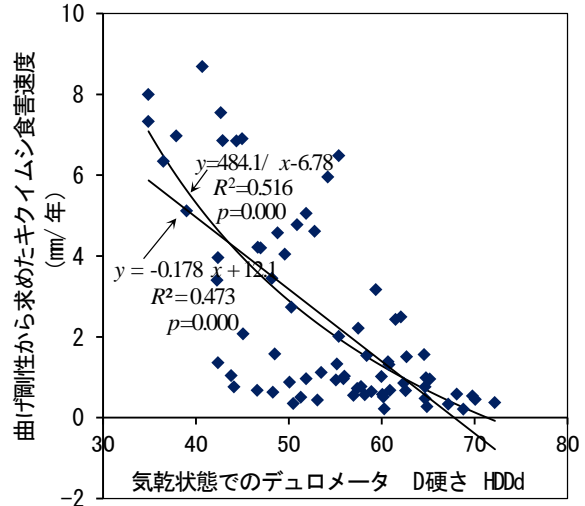


図-13 曲げ剛性から求めたクイムシ食害速度と HDDd の関係

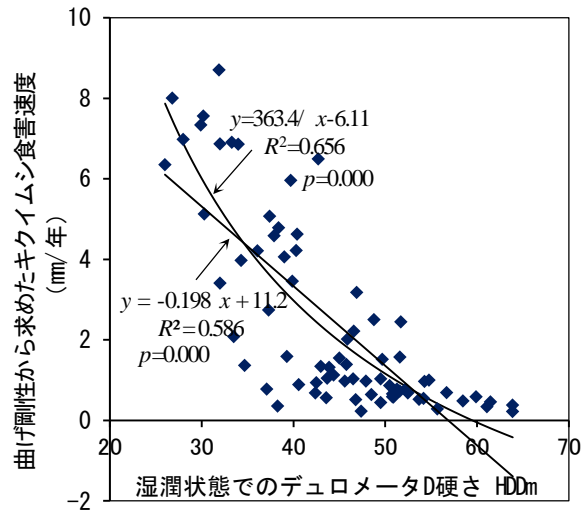


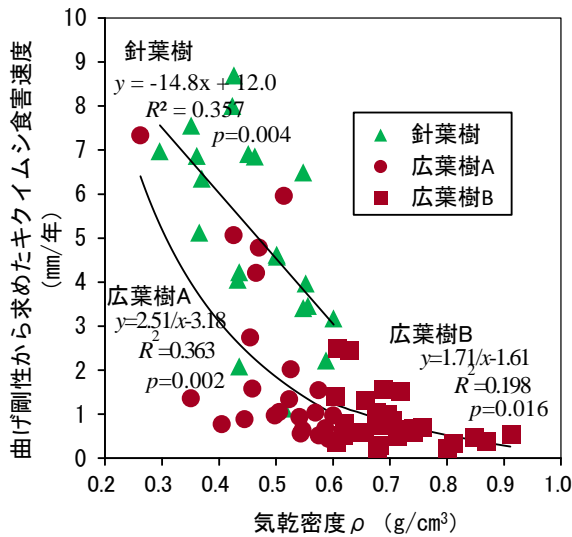
図-14 曲げ剛性から求めたクイムシ食害速度と HDDm の関係

シによる仮想的な食害深さを求めて、経過月数との回帰直線の傾きを求め、これを 1 か月あたりの食害深さ増加量とし、これを 12 倍した値を 1 年あたりの食害深さ増加量 (食害速度) として縦軸にとり、横軸に ρ , HDDd, HDDm をとって示した。このうち図-15~17 は、針葉樹、広葉樹 A,a, α , 広葉樹 B,b, β に分けて解析した結果を示す。

図-12~14 を、前項の図-5~7 と比較すると、図-12~14 の R^2 が、それぞれ対応する図-5~7 との R^2 よりも大きい。HDDm を説明変数 x とし、回帰曲線を $y=363.4/x-6.11$ とした場合の寄与率は 0.656 に達した。

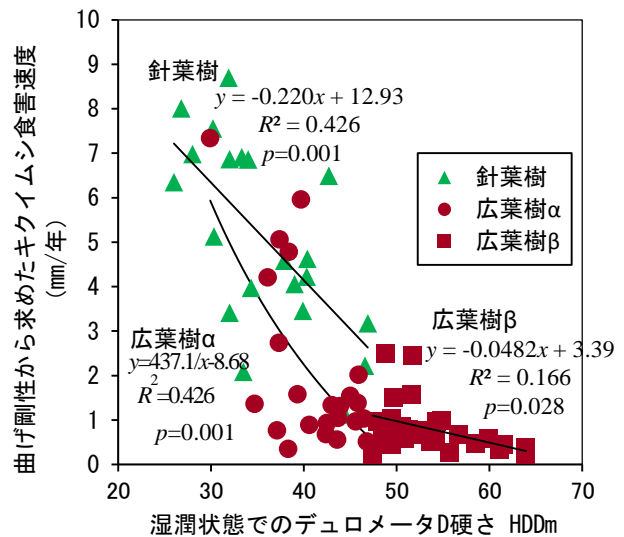
図-15~17 を、前項の図-8~10 と比較した場合も同様に、 R^2 の値が大きくなり、 p の値は小さくなった。図-8~10 では広葉樹 B,b, β で $p > 0.05$ であったが、図-15, 17 では広葉樹 B, β で $p < 0.05$ となり、有意水準を 5% とすると有意と判定された。

質量減少率 (%) は木材の初期寸法によるため、小試



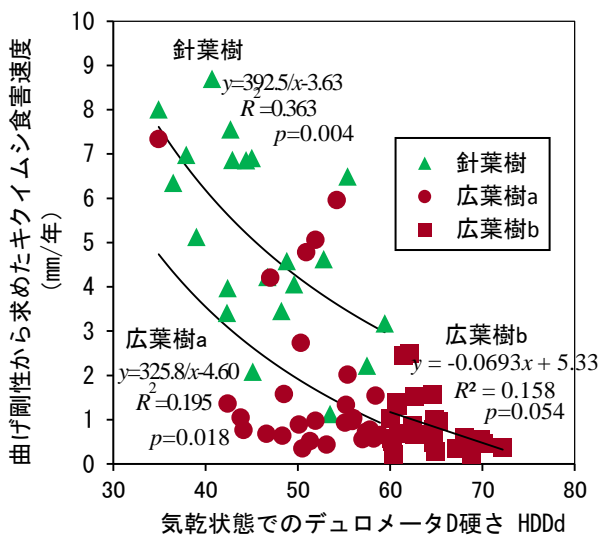
(広葉樹 A : $\rho \leq 0.601$, 広葉樹 B : $\rho > 0.601$)

図-15 曲げ剛性から求めたキクイムシ食害速度と ρ の関係



(広葉樹 α : $HDDm \leq 46.9$, 広葉樹 β : $HDDm > 46.9$)

図-17 曲げ剛性から求めたキクイムシ食害速度と HDDm の関係



(広葉樹 a : $HDDd \leq 59.4$, 広葉樹 b : $HDDd > 59.4$)

図-16 曲げ剛性から求めたキクイムシ食害速度と HDDd の関係

キクイムシ抵抗性試験法を用いた11樹種の無処理材の試験結果を報告している。新たな試験法とは、2.4mm×4.5mm×20mmの試験体を1個体のキクイムシとともに4mlの海水に入れて、キクイムシのふんの数を3日ごとに15日間調べて、1日当たりのふんの数で食害を評価する方法である。樹種はエクアドル産バルサ、英国産のヨーロッパアカマツとポプラの他、熱帯産広葉樹8樹種で、各樹種12個ずつの試験体を用い、木材の硬さは、直径0.15mmのピンを1.2mm押し込むときの最大荷重をピン表面積当たりの値(N/mm²)で評価している。

その結果、1日当たりのふんの数の平方根 y と硬さの自然対数 x に有意な負の相関がみられた ($y = 21.7 - 3.02x$, $R^2 = 0.58$, $p < 0.0005$) が、高密度 ($\rho > 0.63\text{g/cm}^3$) の7樹種のみで解析すると有意ではなかった ($p = 0.46$)。この傾向は今回の実験結果と概ね共通している。針葉樹はヨーロッパアカマツ1樹種のみであるため、針葉樹と広葉樹の差については論じられていない。この点は今回の実験で新たに示すことができた。

4. 結論

本研究では、市販の無処理木材見本100種類(針葉樹27種類, 広葉樹73種類)を、2017年6月から久里浜湾(神奈川県)の海水中に8か月間浸漬した。フナクイムシ食害が生じた27種類を除く73種類(針葉樹21種類, 広葉樹52種類)について、木材の気乾密度, 気乾硬さ, 湿潤硬さと、質量減少率および曲げ剛性から求めたキクイムシ食害速度の関係を解析した。その結果、下記のような結論を得た。

- (1) 木材の気乾密度, 気乾硬さ, 湿潤硬さと質量減少率

験体での値を実大材に直接使用できないのに対し、上記の食害速度(mm/年)は直接使用でき、実用上有利と考えられる。ただし、フナクイムシのように木材内部に穿孔する種類の食害には適用できない。また、今回のように6月から2月までの8か月間の浸漬から求めた値を、mm/年で表して長期間のキクイムシ食害予測に用いてよいのかという問題がある。今回用いた厚さ約12mmの木材見本では、海水浸漬8か月後の曲げ剛性減少率が最大のベイツガで99.59%に達していた。長期間の浸漬によって食害速度を求めるには、より厚い試験体を用いる必要がある。

(5) Craggら¹⁸⁾の結果との比較

英国ポーツマス大学のCraggら¹⁸⁾は、新たに開発した

およびキクイムシ食害速度との間には統計的に有意な相関が認められた。説明変数としては、湿潤硬さの寄与率が最も高かった。

- (2) 密度および硬さが同程度の針葉樹と広葉樹では、針葉樹の方が質量減少率およびキクイムシ食害速度の予測値が有意に高かった。
- (3) 曲げ剛性減少率から求めたキクイムシ食害速度は、キクイムシ食害の指標として有効と考えられる。

5. おわりに

広葉樹より針葉樹の方がキクイムシ食害を受けやすいことは既往の研究でも指摘されていたが、密度および硬さが同程度であっても両者の食害度に差があるのかについては不明であった。本研究ではこの点について明らかにすることができた。ただし、針葉樹、広葉樹の中でも食害度のばらつきがあり、この原因についてさらに検討が必要である。

今回は木材の密度、硬さを実験要因とし、植物学的な樹種、原木の生育環境、樹齢、板材の採取位置、心材率、乾燥履歴、繊維傾斜角度、年輪幅、晩材率、使用する海域のキクイムシの活性、水温、塩分、干出時間、水深等については実験要因としなかった。今後これらを要因とした実験を行ってキクイムシ食害度への影響を評価し、必要に応じてキクイムシ食害度予測式の説明変数として用いることにより、予測精度を高めていくことが課題である。

また、今回フナクイムシ食害を受けた27種類の木材見本については本稿では実験データを活用できなかったが、今後データを分析するとともに、新たな実験によりフナクイムシ食害度の予測技術を開発することも重要な課題と考えている。

謝辞: 本研究について第17回木材利用研究発表会にて口頭発表した際に、森林総合研究所の桃原郁夫氏と軽部正彦氏、ならびに飛鳥建設(株)の沼田淳紀氏から頂いたご質問を参考にして、講演概要に加筆修正して本稿を作成しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Smeaton, J: The report of John Smeaton, Engineer, upon the state of the Bridlington piers, with the most proper means of preserving the same from the destruction of the worm, etc., 1778.
- 2) 廣井勇: 再訂築港, 丸善, 1913.
- 3) Calman, W.T.: Marine boring animals - injurious to sub-

- merged structures, Second edition, revised by Crawford, G.I., British Museum (Natural History), Economic Series, No.10, 1936.
- 4) 岩佐正夫: フナクイムシに関する動物学的研究—総合抄録一, 木船木材蝕害とその防除, 日本学術振興会, pp.1-42, 1958.
- 5) 椎野季雄: 穿孔性甲殻類概説, 木船木材蝕害とその防除, 日本学術振興会, pp.135-152, 1958.
- 6) 椎野季雄: 日本産木材穿孔性海産甲殻類, 木船木材蝕害とその防除, 日本学術振興会, pp.153-161, 1958.
- 7) Tsunoda, K., Nishimoto, K.: Distribution of the Terebridae along the coasts of Japan, with a review of all named forms from Japan, *Mokuzai Gakkaishi*, Vol.24, No.2, pp.127-134, 1978.
- 8) Cragg, S.M., Pitman A.J., Henderson S.M.: Developments in the understanding of the biology of marine wood boring crustaceans and in methods of controlling them, *International Biodeterioration & Biodegradation*, Vol.43, No.4, pp.197-205, 1999.
- 9) 布村昇, 下村通誉: 日本産等脚目甲殻類の分類(17) キクイムシ亜目, *海洋と生物* 202, Vol.34, No.5, pp.488-496, 2012.
- 10) 馬渡静夫, 香川忠夫: 木船虫害防除に関する研究, 木船木材蝕害とその防除, 日本学術振興会, pp.287-300, 1958.
- 11) Barnacle J. E.: 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, 1976.
- 12) 森満範, 宮内輝久, 三浦真由己, 長野行紘, 新井野憲昭, 白石徹治: 保存処理木材の海中における性能—海虫抵抗性および薬剤残存量—, 第51回日本木材学会大会研究発表要旨集, p.427, 2001.
- 13) 山田昌郎: サーモウッド処理スギ材の耐海虫性, 木材保存, Vol.38, No.6, pp.255-258, 2012.
- 14) 山田昌郎: 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, 2014.
- 15) 石川進六: 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, 1947.
- 16) 岡田要, 佐々木信男: 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, 日本学術振興会, pp.192-196, 1958.
- 17) 井上衛, 雨宮昭二: 各種木材の海虫食害試験, 木材工業, Vol.28, No.12, pp.564-566, 1973.
- 18) Cragg, S. M., Danjon, C., Mansfield-Williams H.: Contribution of hardness to the natural resistance of a range of wood species to attack by the marine borer *Limnoria*, *Holzforschung*, Vol.61, No.2, pp.201-206, 2007.
- 19) 山田昌郎: 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, 2010.
- 20) 大谷忠: 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, 2001.

(2018.8.31 受付)

RELATIONSHIP BETWEEN DAMAGE BY MARINE BORER LIMNORIA AND DENSITY AND HARDNESS OF CONIFEROUS AND BROADLEAF WOOD

Masao YAMADA and Mitsunori MORI

Predicting marine borer damage from properties of wood is necessary to use wood in the sea rationally. As a step toward the predicting formula, we investigated the relationship between density and hardness of wood and weight and bending rigidity loss ratios by limnoria. A hundred commercial non-treated wood samples (27 samples of coniferous wood and 73 samples of broadleaf wood) were soaked in seawater of Kurihama Bay (Kanagawa Prefecture) from June 2017 to February 2018. Regression analyses were made with x (air-dry density, air-dry hardness, moist hardness) and y (weight and bending rigidity loss ratios which stand for the degree of damage by limnoria) for the 73 samples which were not subjected to boring by teredo. The results showed significant correlation between x and y , and the contribution ratio was highest when x was moist hardness. The predicted values of the weight and bending rigidity loss ratios of coniferous wood were significantly larger than those of broadleaf wood if their density or hardness were equal.