











表-3 試験体の質量（気乾状態）の減少率（%）  
（樹種グループごとの中央値）

グループ	海水散布あり					海水散布なし				
	暴露期間（年）					暴露期間（年）				
	0	0.26	0.77	1.51	2.00	0	1.01	2.02	2.80	
	測定年月日					測定年月日				
	2017 7/5 ~7	2017 12/8 ~19	2018 9/5 ~7	2019 7/30 ~8/2	2020 5/7, 14	2017 7/10 ~13	2018 7/20 ~25	2019 7/24 ~26	2020 5/22, 25	
針葉樹	0.00	0.99	-3.74	-2.34	2.86	0.00	5.11	7.21	5.29	
広葉樹 (熱帯材以外)	0.00	2.14	-0.99	4.57	13.96	0.00	4.98	8.08	6.73	
広葉樹 (熱帯材)	0.00	0.69	-3.98	-1.98	2.89	0.00	4.09	6.50	4.29	

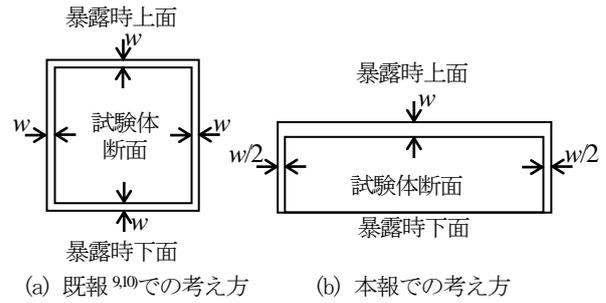


図-2 風化深さ w の考え方

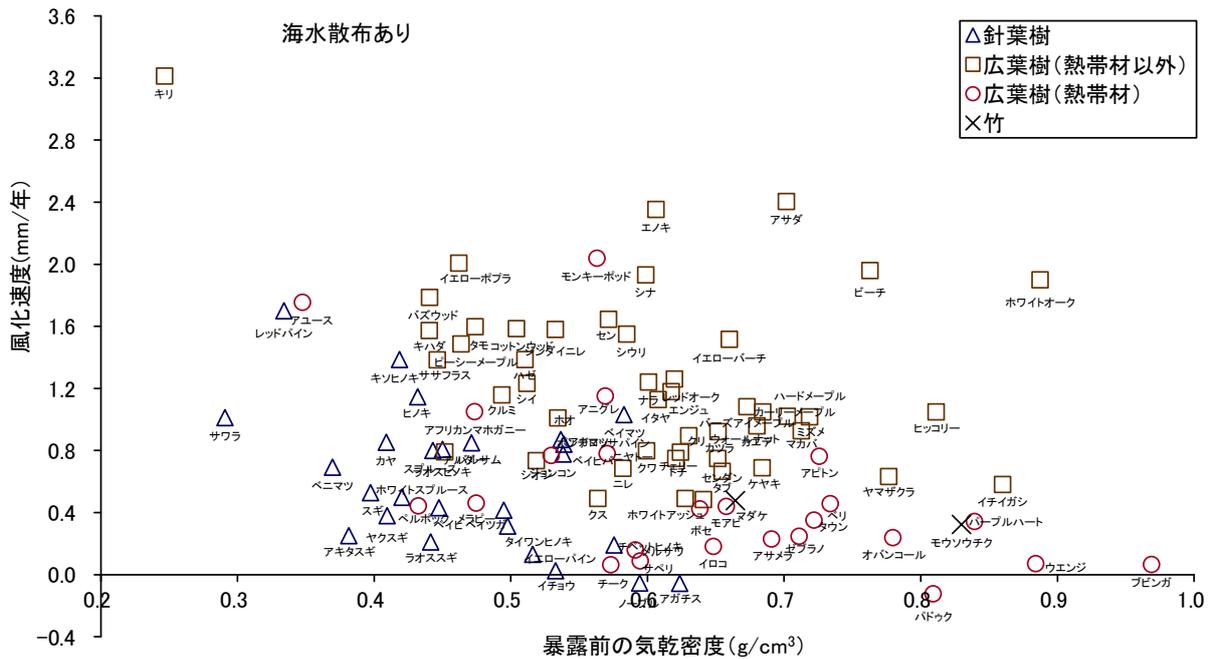


図-3 海水散布あり暴露試験体の風化速度

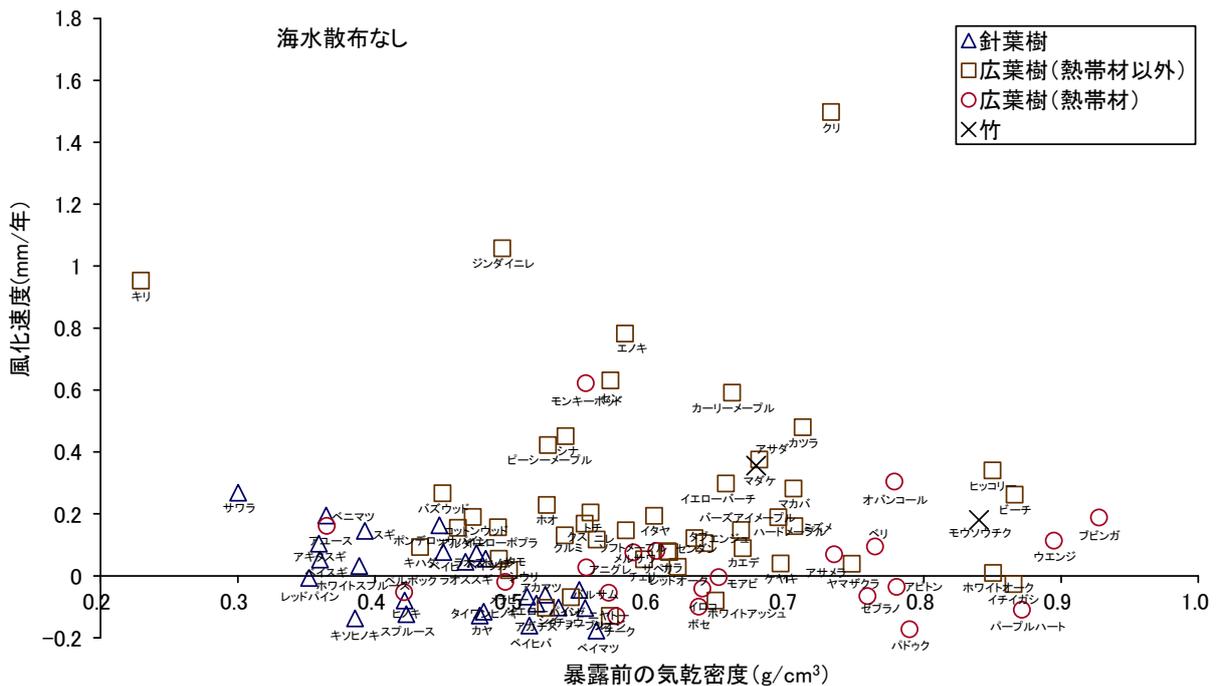


図-4 海水散布なし暴露試験体の風化速度

響についての既往研究<sup>12, 13)</sup>を踏まえて、本報では風化深さを上面で $w$ 、下面で $0$ 、側面で $w/2$ と仮定した(図-2(b))。

曲げ載荷時の試験体の含水率として、室温と湿度から平衡含水率図表<sup>14)</sup>によって求めた値を用い、含水率変化1%当たりのヤング係数の変化を2%<sup>15)</sup>と仮定して、荷重変位曲線の回帰直線の勾配を含水率15%での値に補正した。なお、実験施設内の湿度を測定していなかったため、湿度の値として曲げ載荷試験日の気象庁による横浜での日平均湿度の値を用いた。

以上のように求めた風化速度を図-3, 4に示す。針葉樹(△)、広葉樹(熱帯材以外)(□)、広葉樹(熱帯材)(○)の各グループを比較すると、海水散布あり・なしともに、広葉樹(熱帯材以外)のグループは、他のグループより全体的に風化速度が大きい傾向があるように見える。各グループの風化速度の中央値を表-4に示した。表-5には、含水率による曲げ剛性の補正を行わない場合の値を示す。補正により、散布ありで0.07(mm/年)程度増加し、散布なしで0.05(mm/年)程度減少した。今後、暴露を継続するとともに、実験施設内外の温度・湿度と木材の含水率・ヤング係数の関係を調べることにより、補正方法をさらに検討したい。

参考までに、既報<sup>9,10)</sup>の実験結果(針葉樹4種と広葉樹(熱帯材以外)6種の約6年間の暴露実験から求めた風化速度の中央値)を表-6に示した。なお前記の図-2のように既報<sup>9,10)</sup>と本報の風化深さの定義が異なるので、本報の定義に合わせて既報<sup>9,10)</sup>の風化速度を2倍した値の中央値を示した。試験体の寸法等が今回と異なるが、散布ありでの広葉樹(熱帯材以外)の値は今回の値と類似していた。

図-3, 4で×で示した竹材については、海水散布ありでは広葉樹(熱帯材)グループに近いように見えるが、海水散布なしでは、マダケの風化速度がやや大きく、広葉樹(熱帯材以外)グループに近いように見える。

各樹種ごとの風化速度については、同一樹種内の個体差や個体内の位置による差が大きいと考えられるので、評価するためにはさらに多くの実験結果の蓄積が必要である。

今回、辺材を含む試験体が、針葉樹4樹種(サワラ、レッドパイン、アカマツ、ポンテロッサパイン)、広葉樹(熱帯材以外)4樹種(バズウッド、エノキ(散布なしのみ)、カーリーメープル、イチイガシ)、広葉樹(熱帯材)1樹種(ペルボック)あった。心材は疎水性が高いため辺材より風化量は少ない傾向がある<sup>16)</sup>ことから、これらの試験体では心材を用いた場合より風化速度が大きい可能性がある。ただしこれらの樹種を除外したとしても、3グループの風化速度の傾向への影響は小さいと考えられる。

なお、風化深さを評価する方法として、既往研究では、

表-4 各グループの風化速度 (mm/年) の中央値 (含水率による曲げ剛性の補正あり)

グループ	海水散布あり	海水散布なし
針葉樹	0.611	-0.045
広葉樹 (熱帯材以外)	1.107	0.151
広葉樹 (熱帯材)	0.389	-0.012

表-5 各グループの風化速度 (mm/年) の中央値 (含水率による曲げ剛性の補正なし)

グループ	海水散布あり	海水散布なし
針葉樹	0.541	0.014
広葉樹 (熱帯材以外)	1.038	0.198
広葉樹 (熱帯材)	0.319	0.020

表-6 既報<sup>9,10)</sup>の風化速度 (mm/年) の中央値 (含水率による曲げ剛性の補正なし)

グループ	海水散布あり	海水散布なし
針葉樹	0.395	0.197
広葉樹 (熱帯材以外)	1.210	0.243

表-7 板目試験体を除いた場合の各グループの風化速度 (mm/年) の中央値 (含水率による曲げ剛性の補正あり)

グループ	海水散布あり	海水散布なし
針葉樹	0.638	-0.053
広葉樹 (熱帯材以外)	1.115	0.140
広葉樹 (熱帯材)	0.352	-0.012

(1)実際に屋外で長期間使用された看板<sup>1)</sup>や下見板<sup>17)</sup>の厚さ減少量の測定、(2)試験体の一部をアルミ板で被覆して促進風化試験<sup>23)</sup>または野外暴露<sup>4,13)</sup>を行ない、被覆部と未被覆部の高低差を顕微鏡下で測定、(3)暴露した試験体表層の化学組成分析<sup>8)</sup>、(4)暴露した木材薄片の質量減少の測定<sup>12)</sup>、(5)暴露した試験体の曲げ試験<sup>7,18,21)</sup>、圧縮試験<sup>22)</sup>、縦振動試験<sup>23)</sup>等の方法が採られており、本研究の方法は(5)に属する。

(2)の方法は局所的な高低差が測定できるので、早材と晩材でそれぞれ風化深さが評価されるのに対し、(5)の方法では早晩材を合わせた平均的な風化深さを評価しており、早材と晩材の風化速度の差によって生じる目やせは評価していない。ウッドデッキ、ベンチ、手すりなど、人が直接接触する用途では、平均的な寸法減少よりも目やせによって耐用年数が決まる可能性があり、早晩材の密度差を考慮して樹種を選択する必要がある。

また、風化により生じる変色や割れについても、本研究では評価していないが、土木用材でも景観が重視される用途では変色の検討が必要であり、ウッドデッキ等で

は木口面から伸びる材面割れ<sup>24)</sup>の評価も重要である。

なお、(5)の方法では、板目木取りで早材が表面の大部分を占めている場合に風化速度が大きく評価される可能性が考えられる。そこで、板目木取りの試験体を除いて各グループの風化速度の中央値を求めた(表-7)。表-4の値から多少増減したが、3グループの風化速度の傾向への板目材除去の影響はほとんど認められなかった。

### (3) リグニンの構造の影響について

針葉樹のリグニンがほぼグアイアシル単位(図-5(a))から成るグアイアシルリグニン(Gリグニン)であるのに対し、広葉樹では針葉樹より進化した結果、シリングル単位(図-5(b))から成るシリングルリグニン(Sリグニン)を多く含むことが知られている<sup>25,26)</sup>。芳香核C5位がオープンであるグアイアシル単位は、C5位でのカップリングにより分岐構造が形成されるため、S、G両単位から成る広葉樹リグニンに対し、もっぱらG単位から成る針葉樹リグニンは分岐度が高く、構造的にリジッドである<sup>27)</sup>。

また、呉<sup>28)</sup>が熱帯から冷温帯までの101樹種のS、Gリグニンの分布を調べた結果では、熱帯から冷温帯への生育気候の変化に従って、Sリグニンの比率が多くなっていく傾向が認められている。

今回の実験結果の原因として、広葉樹(熱帯材以外)に多く含まれるSリグニンが風化により分解しやすいことが考えられる。Sリグニンが腐朽菌によって分解しやすいことは、既往研究で示されている<sup>29,30)</sup>。風化速度についても、木材密度とともにSリグニンの比率を考慮することで、より適切に予測できる可能性があると考えられる。

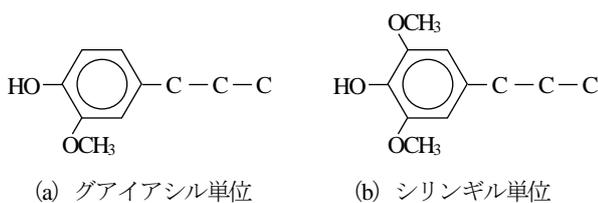


図-5 リグニンの基本単位

## 4. 結論

臨海部で、約100樹種の木材試験体の暴露実験を行なった。その結果、海水散布あり・なしのいずれにおいても、広葉樹(熱帯材以外)のグループの風化速度が、針葉樹及び広葉樹(熱帯材)のグループより大きい傾向が見られた。

## 参考文献

- 1) Browne, F.L.: Wood siding left to weather naturally, *The Southern lumberman*, Vol.201, pp.141-143, 1960.
- 2) Feist, W.C. and Mraz, E.A.: Comparison of outdoor and accelerated weathering of unprotected softwoods, *Forest Products Journal*, Vol.28, No.3, pp.38-43, 1978.
- 3) Sell, J. and Feist, W.C.: Role of density in the erosion of wood during weathering, *Forest Products Journal*, Vol.36, No.3, pp.57-60, 1986.
- 4) Williams, R.S., Knaebe, M.T., Sotos, P.G. and Feist, W.C.: Erosion rates of wood during natural weathering. Part 1. Effects of grain angle and surface texture, *Wood and Fiber Science*, Vol.33, No.1, pp.31-42, 2001.
- 5) 片岡厚: 木材の気象劣化と表面保護—気象劣化のメカニズム—, *木材保存*, Vol.43, No.2, pp.58-68, 2017.
- 6) Kataoka, Y., Kiguchi, M., Fujiwara, T. and Evans, P.D.: The effects of within-species and between-species variation in wood density on the photodegradation depth profiles of sugi (*Cryptomeria japonica*) and hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), *Journal of Wood Science*, Vol.51, No.5, pp.531-536, 2005.
- 7) Wang, S.Y.: 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, 1990.
- 8) Sudiyani, Y., Tsujiyama, S., Imamura, Y., Takahashi, M., Minato, K. and Kajita, H.: Chemical characteristics of surfaces of hardwood and softwood deteriorated by weathering, *Journal of Wood Science*, Vol.45, No.4, pp.348-353, 1999.
- 9) 山田昌郎, 森満範: 針葉樹材と広葉樹材の臨海部での風化速度, *土木学会第67回年次学術講演会講演概要集 CD-ROM, CS12-006*, 2012.
- 10) 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.
- 11) 山田昌郎, 森満範: 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, *木材利用研究論文報告集 17*, pp.66-76, 2018.
- 12) Evans, P.D.: Effect of angle of exposure on the weathering of wood surfaces, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.24, No.1, pp.81-87, 1989.
- 13) Williams, R.S., Knaebe, M., Evans, J.W. and Feist, W.C.: 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, 2001.
- 14) 森林総合研究所監修: 木材工業ハンドブック, 改訂4版, p.115, 丸善出版, 2004.
- 15) 伏谷賢美ほか: 木材の物理, 三版, p.109, 文永堂出版, 1991.
- 16) 日本木材保存協会: 木材保存学入門 改訂4版, p.92, 2018.
- 17) 山本幸一: スギ下見板のウエザリング, *木材工業*, Vol.46, No.2, pp.78-80, 1991.
- 18) 平井信二, 大熊幹章: 屋外暴露による外装用合板の強度低減, *木材工業*, Vol.23, No.6, pp.267-269, 1968.
- 19) 吉田弥明, 田口崇: 屋外暴露合板の曲げ強度性能(第1報) 強度低減現象の解析, *木材学会誌*, Vol.23, No.11, pp.547-551, 1977.

- 20) Okkonen, E.A. and River, B.H.: Outdoor aging of wood-based panels and correlation with laboratory aging: Part 2, *Forest Products Journal*, Vol.46, No.3, pp.68-74, 1996.
- 21) 信田聡: ウッドデッキに求められる性能と耐久性, 木材保存, Vol.27, No.1, pp.2-10, 2001.
- 22) Jankowska, A. and Kozakiewicz, P.: Comparison of outdoor and artificial weathering using compressive properties, *Wood Research*, Vol.59, No.2, pp.245-252, 2014.
- 23) 渡井純, 星川健史, 池田潔彦: 設置後 15 年経過した多様な防腐処理を施したデッキボードの屋外耐久性及び非破壊強度測定法の評価, 静岡県農林技術研究所研究報告第 9 号, pp.49-57, 2016.
- 24) 渡辺憲, 信田聡: ウッドデッキ材の木口面年輪傾角が材面割れ発生に及ぼす影響, 木材工業, Vol.62, No.9, pp.410-413, 2007.
- 25) 原口隆英ほか: 木材の化学, 文永堂出版, pp.111-112, 1985.
- 26) 樋口隆昌: 広葉樹リグニンの化学, 木材研究資料, Vol.7, pp.1-17, 1973.
- 27) 船岡正光: 植物資源由来の高分子材料ーリグノフェノール, 材料, Vol.56, No.12, pp.1189-1193, 2007.
- 28) 呉晋: 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, 1993.
- 29) Leightley, L.E.: The use of  $^{13}\text{C}$  CP/MAS NMR in the chemical identification of decayed and undecayed, tropical timber species, IRG/WP 1224, International Research Group on Wood Protection, 1984.
- 30) Faix, O., Mozuch, M.D. and Kirk, T.K.: Degradation of gymnosperm (guaiacyl) vs. angiosperm (syringyl/guaiacyl) lignins by *Phanerochaete chrysosporium*, *Holzforschung*, Vol.39, Issue 4, pp.203-208, 1985.
- 31) Hedges, J.I., Blanchette, R.A., Weliky, K. and Devol, A.H.: Effects of fungal degradation on the CuO oxidation products of lignin: A controlled laboratory study, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 52, Issue 11, pp.2717-2726, 1988.
- 32) Syaffi, W., Yoshimoto, T., Samejima, M.: The effect of lignin structure on decay resistance of some tropical woods, 東京大学農学部演習林報告, Vol.80, pp.69-77, 1988.
- 33) 善本知孝: 木材耐朽性における化学成分の効用, 木材保存, Vol.15, No.2, pp.53-61, 1989.
- 34) del Río, J.C., Speranza, M., Gutiérrez, A., Martínez, M.J. and Martínez, A.T.: Lignin attack during eucalypt wood decay by selected basidiomycetes: a Py-GC/MS study, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol.64, Issue 2, pp.421-431, 2002.
- 35) Choi, J.W., Choi, D.H., Ahn, S.H., Lee, S.S., Kim, M.K., Meier, D., Faix, O. and Scott, G.M.: Characterization of trembling aspen wood (*Populus tremuloides* L.) degraded with the white rot fungus *Ceriporiopsis subvermispora* and MWLs isolated thereof, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol.64, Issue 5, pp.415-422, 2006.

(Received October 16, 2020)

(Accepted January 31, 2021)

## STUDY ON THE WEATHERING RATES OF WOOD BY EXPOSURE TESTS AT A COASTAL ZONE

Masao YAMADA and Mitsunori MORI

While it is usually thought that weathering of hardwood is slower than that of softwood, because weathering rate of wood is in inverse proportion to the density of wood, there are previous studies showing the contrary tendency. In this study, the weathering rates of softwood and hardwood were studied by open-air exposure of about 100 species of wood. Test samples (12mm by 36mm by 180mm) were set at a coastal zone with or without seawater spray of about 3 hours twice a day, and the weathering rates were evaluated from the relation between the exposure periods and the bending rigidities of the test samples. The results showed that the weathering rates of the group of hardwood (except tropical wood) were generally greater than those of the groups of softwood and hardwood (tropical wood).