

以下是该 PDF 文件的全文中文翻译:

【第 1 页】

落叶松压缩木材的材料特性及针对腐朽的残余强度*

高桥 刚 1, 田中 康基 2, 富樫 严 3, 岩渊 义孝 1, 长泽 彻*4

Material Characteristics and Residual Strength for Decay of Compressed Wood Made of Japanese Larch

Tsuyoshi TAKAHASHI*1, Koki TANAKA, Iwao TOGASHI, Yoshitaka IWABUCHI and Tohru NAGASAWA

*1 钏路工业高等专门学校 〒084-0916 北海道钏路市大乐毛西 2-32-1

利用落叶松森林间伐产生的废材是一个亟待解决的严重问题。由于木材通过压缩相对容易地得到强化, 根据未来的发展, 压缩木材的许多用途可以期待。另一方面, 木材腐朽会损害木材, 并显著缩短木结构建筑的寿命。本研究旨在将压缩成型生产的压缩木材应用于木结构建筑。作为第一阶段, 获得了以下结论: 1) 通过软化 → 压缩 → 形状固定 → 干燥四个工序生产压缩木材。特别是, 形状固定的条件是 132 °C 蒸汽处理 70 分钟。2) 作为阐明压缩状况的有效指标, 发现”晚材率”比”密度”更优。3) 对压缩木材和非压缩木材进行了加速腐朽试验。然后, 对这些腐朽的木材进行单轴压缩加载。结果发现, 腐朽试验后, 压缩木材的压缩杨氏模量和压缩强度仍大于实木。就腐朽耐久性的残余强度而言, 压缩木材优于实木(非压缩木材)。

关键词: 日本落叶松, 压缩木材, 形状固定, 晚材, 残余强度, 腐朽耐久性

1. 绪言

木材自古以来就以接近自然的状态用作住宅用建材, 是一种价格低廉、比强度高、耐久性优异的材料。然而, 在湿润环境下, 若腐朽菌繁殖, 木材会因生物劣化而加速丧失原有强度。在这种状态下, 如果住宅遭受地震等强烈震动, 将导致倒塌等巨大灾害。例如, 在 2007 年能登半岛地震中, 也有许多倒塌住宅的建材中发现了腐朽痕迹, 这被认为是加剧灾害的一个因素 1)。容易想象, 在比能登半岛地震烈度更大的 1995 年阪神大地震和 2011 年东日本大地震中, 也发生了同样更大规模的灾害。如此, 这种生物劣化有时会大幅缩短木造建筑物的耐用年数。作为地震多发地区而知名的北海道根釧地区, 从湿润环境来看, 春夏的雾气、冬季的积雪和结冻等使得住宅用木材更容易受损, 也令人担忧腐朽等劣化。

关于木材腐朽的研究，例如阿部(2)通过促进腐朽试验对库页冷杉、落叶松等北海道产针叶树材的耐朽性进行了评价，已有许多报告。然而，这些研究大多是从生物学角度总结的(3),(4)，关注与腐朽导致强度降低之间关系的研究报告(5)~(7)很少。其中，铃木等人测量了木材腐朽导致强度降低的约两年时间变化，并基于结果构建了损伤的数学预测模型(5)。

顺便提及，钏根地区根据 1957 年的国有林生产力增强计划，种植了以落叶松、库页冷杉和虾夷云杉为主的针叶林，拥有多个广阔的造林群落，是森林资源丰富的地区。在众多树种中，生长迅速的落叶松是代表，规模也很大。根据最初的计划，基于当时的需求状况，预计坑木、桩用圆木、建筑用临时材料、农业用资材等将以原木形式被消费。然而，此后产业结构发生变化，木材以外的代用材料或廉价的海外木材资源开始满足国内需求，导致国产木材的使用量锐减，结果出现了成木未被制材，仅间伐材大量排出的状况。但是，由于 2011 年东日本大地震，今后木造住宅建设将正式化，为了满足这一国家级的大规模需求，强烈期望开发包括间伐材在内的落叶松材作为建材的有效利用方法，而且是具有附加价值、具有国际竞争力的国产建材。实际上，关于落叶松有效利用的研讨会在各地举行。例如，在“考虑落叶松材的生产与利用”中，介绍了落叶松的国际动态(6)并进行了讨论。

原本，如上所述，落叶松被认为生长相对较快，但要充分发挥其性能，需要 40 年以上的树龄。在此期间，会生长出损害材料特性均匀性的节子，缺陷增加，这导致机械特性的偏差和强度降低。这种品质下降是实木材料的弱点。虽然胶合木有能克服这一点的制材，但通常价格是实木的两倍以上。

因此，我们关注通过木材压缩化或密实化来提高强度。迄今为止，已有若干关于压缩木材的研究报告(9)~(12)。例如，浅井等人(9)尝试在玻璃化转变温度以下进行压缩成型，研究了成型条件对强度和尺寸稳定性的影响。此外，大谷等人(10)使用复合律阐明了压缩量对压缩木材拉伸强度的影响，并从断口形态的观察结果评价了压缩量的影响。北守等人(12)也为了获得压缩木材结构用途所需的各种力学系数进行了广泛的实验，提供了设计信息。然而，这些研究大多以日本柳杉为对象，关于落叶松的探讨结果很少。此外，尚未发现针对压缩木材腐朽时强度劣化的研究实例。

基于以上背景，本研究以有效利用落叶松间伐材为出发点，着手开发旨在应用于木造建材等的、具有优异强度耐久性的压缩木材。作为其第一阶段，以以下三点为目的进行研究：

1. 压缩木材制法探讨；进行压缩形状固定化的条件探讨，确立相对简单且能可靠固定形状的制法。
2. 与机械强度相关性强的、适合表达压缩状态的指标探讨；木材是特性偏差大的材料，为了把握定性趋势需要大量试件。因此，探讨能相对容易地把握机械强度且相关性强的指标。
3. 压缩木材的耐朽性及腐朽后残余强度探讨；水分是木材腐朽的条件之一。通过明确压缩木材的吸水特性，探讨其在耐朽性方面的优势。此外，通过加速腐朽试验，明确充分腐朽的试件机械特性的残存率，探讨压缩木材的优势。

2. 压缩木材的制法与机械特性

2-1 材料试件与试验名称

本研究处理的材料是落叶松间伐材。但是，即使是间伐材，其直径也与成木几乎相等。试件从该材料中切割出来。试件尺寸及使用的试验名称如表 1 所示。此外，为了排除个体差异造成的偏差，这些试件均通过目视挑选无节和无裂纹的，每种准备 10 根。

表 1 试件尺寸及试验类型

类 试件尺寸 型 (mm)	试验类型
① 20×20×40	· 顺纹和横纹压缩 · 浸水后的尺寸回复
② 20×20×400	· 压缩木材和非压缩木材的吸水性 · 四点弯曲支撑 (JIS Z2113)
③ 5×5×15	· 加速腐朽 (JIS K1571) · 腐朽试件的顺纹压缩

2-2 压缩木材的制法

图 1 显示了表 1 Type①试件在(a)顺纹压缩或(b)横纹压缩时的行程与压缩应力。顺纹压缩是指沿纤维方向的压缩，横纹压缩是指与纤维垂直的方向，即原木半径方向的压缩。从图 1 的结果可知，顺纹压缩由于沿轴向推压高刚性的纤维，会产生较大的压缩应力，但在压缩应变为 2.4%时，纤维发生剪切断裂，压缩应力减小并断裂。另一方面，横纹压缩随着纤维间距变小，压缩应力增大。特别是，当压缩应变超过 30%时，压缩应力急剧增大。在本研究中，沿垂直于纤维的方向压缩以减小纤维间距、增大纤维密度的过程称为压缩化或密实化。

图 1 顺纹压缩和横纹压缩的应力-应变关系

(a) 压缩木材的制造工序

(b) 固定工具

图 2 压缩木材的制造工序及固定工具

压缩木材的制造方法示意图如图 2a)所示。制造工序由”软化”⇒”压缩”⇒”形状固定”⇒”干燥”四个工序(7)组成。最初的软化工序和接下来的压缩工序被称为干燥定型，是压缩木材的制造方法之一。首先，“软化工序”是吸水并通过加热进行软化的工序。软化条件的因子是重量含水率和加热条件两个，重量含水率条件设定为吸水至饱和状态或气干状态两种，而加热条件则通过反复试错，最终设定为 121℃×30 分钟加热或不加热。如表 2 所示，组合这些条件，进行了沿纤维垂直方向压缩的横纹压缩试验，求出了对压缩荷载的变形阻力，即横纹压缩杨氏模量。结果如表 2 最右列所示，Case 4 (重量含水率 60%，蒸汽温度 121℃×30 分钟)

处理的横纹压缩杨氏模量最小，因此判断该条件最容易加工，将其作为本研究中的软化条件。

表 2 软化处理条件及结果

案例	含水率 (%)	蒸汽处理条件	横纹压缩杨氏模量 (MPa)
1	10-26	无	7
2	10	121°C × 0.5 小时	224
3	60-218	无	60
4	60	121°C × 0.5 小时	189

接下来的”压缩工序”是压缩经过软化工序的材料的工序。用于压缩的钢制自制夹具的外观照片如图 2b)所示。该夹具使用 3 根 M20 螺栓，通过钢制垫片同时均匀压缩 2 根试件材料，并用侧向导轨约束试件宽度方向的膨胀变形。在设计夹具时，进行了结构分析，确认了夹具相对于紧固荷载具有足够的刚性。压缩方向为相对于板纹面垂直于纤维的方向。表示压缩程度的指标压缩率 CR 按式(1)定义。

$$CR(\%) = \frac{t_1 - t_2}{t_1} \times 100 \quad (1)$$

这里，t1 是压缩前厚度，t2 是压缩后厚度。之后，在保持压缩夹具的状态下，用约 60°C 的热风强制干燥试件木材。

接下来的”形状固定化工序”是防止压缩木材因水分等回复到压缩前尺寸的重要工序。目前报道的形状固定方法有热处理(13),(14)、化学处理(15)或高温高压蒸汽(16)等方法，从中选择了处理时间短、对强度负面影响较小的高温高压蒸汽处理法。就形状固定而言，据说用 180~200°C 的蒸汽处理几分钟是好的(14)，但另一方面也有报道称木材的残余强度会降低(9)。因此，对于压缩率 50%的木材试件（以下简称 50%压缩材），该压缩率被认为是即使压缩也不会发生组织崩塌的上限(12)，将饱和蒸汽温度设定在稍低的 132°C，尝试了保持时间为 40、55、70、85、100 分钟五种条件下的形状固定化处理。这个 132°C 的温度，是从木材湿润状态下的玻璃化转变温度 (80°C~250°C) 中，考虑保持时间，通过反复试错设定的，但比其他研究(17),(16)中看到的温度低，易于操作。

之后，将这些试件在 20°C 的纯水中浸泡 24 小时，测量了尺寸回复率。尺寸回复率 RD 的定义如式(2)所示。

$$RD(\%) = \frac{t_3 - t_2}{t_1 - t_2} \times 100 \quad (2)$$

这里，t1、t2 如上所述分别是压缩前、压缩后的试件厚度，t3 是压缩后试件在水中浸泡规定时间后的厚度。这里，规定时间为 24 小时。由式(2)，RD 值越小，表

明即使吸水尺寸也难以回复，可以判断形状固定成功。最后的”干燥工序”通过自然干燥，使材料保持在气干状态。

图 3 是用 132℃蒸汽进行形状固定的试件在水中浸泡 24 小时后的尺寸回复率结果。在任何保持时间下，尺寸回复率都在 10~8%左右，处理时间差异没有发现显著差异。其中，处理时间在 70 分钟以上时，尺寸回复率几乎可控制在 8%左右，因此，本研究将 132℃、70 分钟的蒸汽处理时间作为形状固定的热处理条件。

图 4 是实木即非压缩材与 50%压缩材的断面微观组织照片。这是针对切割成约 0.1mm 厚的试样，使用显微镜(SH130PC, 松电舍制)，以 1500 倍观察倍率、130 万像素拍摄的。压缩木材因厚度方向被压缩，导管被压溃，材料密度变高。与非压缩材相比，明显处于水分难以进入导管部分的状态。

图 3 浸水试验后的尺寸回复率

(a) 非压缩材 (CR 0%) (b) 压缩材 (CR 50%)

图 4 微观组织照片 (非压缩材 vs 压缩材)

2-3 压缩木材的弯曲杨氏模量

通过 2-1 所述的压缩木材制法，对不同压缩率的试件（表 1, Type②）进行的弯曲试验结果如图 5 所示。图中的黑色圆点表示压缩材，白色圆点表示非压缩材即实木。n 数至少为 5，图中的实线表示平均值。随着压缩率增高，弯曲杨氏模量呈增加趋势。例如，50%压缩材压缩前的素材尺寸是压缩后的 2 倍，弯曲杨氏模量也几乎同样约为 2 倍。这是由于木材中所含的纤维密度也增加了一倍。另外，当压缩率达到 60%左右时，细胞壁会发生破坏¹²⁾，弯曲杨氏模量降低，因此以 50%为上限。压缩比与弯曲杨氏模量的相关系数为 $R^2=0.6381$ ，数值较低，因此即使压缩率相同，源自各个试件的偏差因素的影响也会导致弯曲杨氏模量产生差异。因此，必须增加 n 数才能明确确定性趋势。

图 5 依赖于压缩率的弯曲杨氏模量

图 6 依赖于密度的弯曲杨氏模量

另一方面，图 6 是将图 5 的横轴从压缩比换为密度，显示其与弯曲杨氏模量的关系。如图中相关系数 $R^2=0.8379$ 所示，采用密度作为指标，可以整理与弯曲杨氏模量的关系。然而，仅凭密度，无法推测例如纤维组织对弯曲杨氏模量等机械特性的影响。

因此，我们关注影响木材机械强度的纤维密度，调查纤维密度高的晚材与强度之间的相关性。图 7 是拍摄试件断面的照片，可以看出分为颜色浅的部分和深的部分。颜色浅的部分称为早材部，在夏季形成，由于生长快，空隙多，所以颜色浅。而颜色深的部分称为晚材部，在冬季形成，生长缓慢，结果纤维密度高，颜色深。晚材的密度约为早材的 2.4 倍。纤维原本是支配机械性质的最大因素，因此断面内含有更多高纤维密度晚材的材料，其机械强度应该也更高。观察图 7，晚材和早

材明显到可以用肉眼区分，但晚材宽度不一定恒定，也可见到边界模糊的地方。因此，直接测量晚材宽度并将其作为特性值，在误差方面并不理想。因此，尝试通过木材断面的图像处理，设定 RGB 值的阈值，对颜色进行二值化，区分早材和晚材。图 8 是图 7 以 RGB 值 80 进行二值化的结果，黑色为晚材，白色为早材。自动按颜色计数该图像数据中包含的总像素数，求出黑色像素占总体的比例，即晚材部面积占整个断面的比例。将其定义为晚材率。

图 9 显示了如图 7 那样断面所含晚材和早材层数相同的试件，对该图的上下方向即板纹面施加四点弯曲荷载时的弯曲杨氏模量与晚材率的关系，与图 6 的不同之处在于横轴从密度换成了晚材率。如图 9 的相关系数 $R^2=0.8528$ 所示，比使用密度的图 6 的 $R^2=0.8379$ 相关性略高。由此可知，晚材是决定木材机械强度的重要因素，通过图像处理直接求出该值的本方法是有效的。对于 RGB 值的阈值设定，在通常室内照明下，尝试了 75 到 80 之间的多个值，未发现相关系数有显著差异，可知能够得到偏差小且稳定的结果。

图 7 早材和晚材的定义

图 8 早材和晚材的二值化表示

图 9 晚材率与弯曲杨氏模量的关系

3. 压缩材的耐朽性

木材腐朽需要菌类繁殖的四个条件：氧气、养分、水分和温度，必须满足所有这些腐朽条件才能腐朽。此外，即使所有腐朽条件都满足，耐受菌类繁殖的能力，即耐朽性，也取决于条件。这里，在四个腐朽条件中，探讨最容易采取措施的吸水性，并进一步探讨压缩木材在腐朽后残余强度方面的优势。

3-1 吸水速度

吸水特性试验的试件形状为表 1 Type②，使用了非压缩材（压缩率 0%）、30%压缩材和 50%压缩材。试验方法为：密封除端面以外的面，将试件浸入水中，使水分仅从端面吸收。图 10 比较了一周后不同压缩率试件的重量含水率。由此图可知，非压缩材的重量含水率约为 35%，而压缩率 30%和 50%的试件分别略高于 30%和略低于 25%，比非压缩材分别减少了约 14%以上和 28%以上。压缩率越高，重量含水率越低的原因，如图 4 所示，是因为压缩木材时导管被压溃，变得难以吸收水分。顺便提及，重量含水率中包含的水分是组织中的结合水和导管中的自由水，木材腐朽菌以自由水为养分繁殖。表示结合水界限的纤维饱和点大约为 30%，因此如果重量含水率小于该值，腐朽菌将难以繁殖。这就是为什么重量含水率 30%^⑤被设定为腐朽条件的基准值。当然，如果继续浸水，两者重量含水率都会增加，但在设想使用压缩木材的一般木造住宅中，认为连续一周浸水的情况极为罕见。如此，压缩木材的吸水速度明显比非压缩材慢，很可能不满足作为腐朽条件之一的重量含水率基准。这样，从图 10 的结果来看，压缩木材在难以满足腐朽条件方面比非压缩材有利。

图 10 1 周浸水试验结果

3-2 加速腐朽试验

由于腐朽是进展速度缓慢的现象，因此进行了参照 JIS K 1571（木材防腐剂的性能试验方法及性能基准）的加速腐朽试验。试件形状为表 1 的 Type③，材料为落叶松间伐材，针对非压缩材（未处理材；压缩率 0%）和压缩木材（压缩率 30%，50%）三种类型，各准备了 9 个试件。腐朽菌采用对针叶树造成巨大损害的褐色腐朽菌——奥氏蜜环菌 MAFF 420001（JIS K 1571 指定菌 FFPRI 0509）。具体的试验方法是，在 200ml 玻璃培养瓶中分注 30ml PDA 培养基后，接种奥氏蜜环菌，在温度 25℃ 下预培养 9 天，在生长出的菌丛上放置经过灭菌处理的试件，在相同温度下暴露 12 周后，求出重量减少率。腐朽后强度试验方法：对腐朽试件按图 1 的示意图(a)所示沿纤维方向进行压缩，测定压缩杨氏模量和压缩破坏强度。

图 11 是加速腐朽试验中暴露 12 周后装有试件的培养瓶的外观照片。瓶底培养基上的白色棉状物质是奥氏蜜环菌的菌丝体，旺盛生长的气生菌丝完全覆盖了试件，因此无法确认试件。因此，无法从外观上判断因压缩率不同而导致的腐朽状态差异。图 12 显示了(a)非压缩材腐朽试验前即健全状态、(b)非压缩材腐朽试验后、(c)50%压缩材腐朽试验后的各试件。与图(a)所示的腐朽前试件相比，图(b)、(c)所示的腐朽后试件变色为褐色，外观上可以看出变瘦。可以认为，这是因为腐朽菌主要分解了细胞壁，导致变细。接下来，比较腐朽试验后的图(b)非压缩材和图(c)50%压缩材，变色方式和外形没有太大差异。但是，仔细观察表面，发现(c)50%压缩材比(b)非压缩材的表面损伤更显著，特别是(b)非压缩材，如图中箭头所示，可以确认有几条与纤维方向垂直即宽度方向的大裂纹。这种表面性状也见于其他非压缩材试件。

图 13 中，(a)图是与前面图 4(a)相同的图，即非压缩材试件腐朽试验前的微观组织，对应图 12(a)的组织。另一方面，(b)图显示的是同样非压缩材腐朽试验后的微观组织，对应图 12(b)。比较腐朽前后的组织，腐朽前的图 13(a)显示多边形细胞规则排列，细胞壁也厚。而图 13(b)的腐朽后组织中，细胞形状的规则性丧失，形状崩塌，细胞尺寸也大致不到健全材的一半。这表明，细胞壁被腐朽菌分解，导致细胞壁变薄、瘦弱，结果试件重量减少，外形尺寸也变小。

图 11 使用奥氏蜜环菌在 25℃ 下进行 12 周加速腐朽试验的概览

图 12 25℃ 下 12 周腐朽试验前后试件外观概览

图 13 CR0%非压缩材试件在 12 周腐朽试验前后褐色腐朽木材细胞的微观结构

作为腐朽试验的结果，图 14 显示了不同压缩率试件在气干状态下的腐朽质量减少率。这些数据显示了平均值和偏差的大小。观察此结果，在重量减少率方面，压缩比不同的三种条件处于相同水平，未确认到木材压缩化的效果。另外，促进腐朽试验 JIS K 1571 中规定的试验有效性为”未处理材对奥氏蜜环菌的质量减少率在

30%以上”，图 14 中 CR0%非压缩对照材的重量减少率略高于 60%，因此可以认为加速腐朽试验环境是适当的。

图 15 显示了针对非压缩（对照材）、30%压缩材、50%压缩材三种落叶松试件，奥氏蜜环菌腐朽前后的顺纹压缩试验结果。图中的白色柱状图表示腐朽试验前即健全试件的值，黑色柱状图表示腐朽试验后的值。图(a)压缩杨氏模量、图(b)压缩强度，无论是压缩材还是非压缩材，腐朽后的值均显著低于腐朽前。由此可以说，腐朽导致的压缩杨氏模量和压缩强度的降低，在维持木造结构物的强度耐久性方面是一个大问题。图 15(a)、(b)中的折线表示残存率。残存率是指腐朽后的值除以腐朽前的值计算出的比例，残存率越高，意味着腐朽导致的机械强度降低越小。观察非压缩材的残存率，图(a)压缩杨氏模量约为 17%，图(b)压缩强度最多只有 9%。相比之下，50%压缩材的残存率，压缩杨氏模量约为 35%，压缩强度约为 16%，约为非压缩材的两倍。虽然腐朽导致木材强度降低，但压缩材的残余强度明显高于非压缩材，因此压缩木材在耐朽性方面的优势是明显的。

推测其原因，图 12(b)所示的非压缩材腐朽后试件表面，如图中箭头所示，观察到许多切断纵向纤维的宽度方向裂纹，表面劣化也很显著。而图 12(c)所示的 50%压缩材的劣化和裂纹明显较少。

表面劣化的原因是褐色腐朽菌奥氏蜜环菌选择性地代谢木材成分中的纤维素，导致纤维素链断裂。结果，在与木材纤维方向垂直的方向上产生许多裂纹，材料变成褐色(17)。由于木材的机械强度强烈依赖于纤维密度，可以推测这种表面裂纹状况的差异导致了机械特性的差异。具体来说，当轴向压缩荷载作用时，中空结构的纤维被压溃，产生局部弯曲。可以认为，在非压缩材中常见的宽度方向深裂纹助长了这种弯曲。无论如何，仅从图 14 所示的重量减少率结果，很难推定腐朽导致材料机械强度降低的趋势。

另外，观察图 15(a)压缩杨氏模量和(b)压缩强度的各自残存率受压缩率的影响，发现(a)压缩杨氏模量的残存率随压缩率增大而增加，但(b)压缩强度的残存率在压缩率 30%以后不再增加，呈饱和状态。杨氏模量依赖于整体刚度，而压缩强度依赖于局部强度，但要解释两者趋势的差异目前仍很困难，将在今后进行探讨。

图 14 腐朽导致的压缩木材重量减少率

图 15 腐朽试验后压缩荷载作用下机械特性的残存率

4. 结论

本报告探讨了落叶松压缩木材的制造方法以及压缩木材的耐朽性和腐朽后的残余强度。结果得出以下结论：

- (1) 通过软化→压缩→形状固定→干燥四个工序制造了压缩木材。形状固定化工序可以通过 132℃、70 分钟的蒸汽处理实现固定。

- (2) 将木材断面中纤维密度高的区域——晚材部分所占的比例定义为晚材率，调查了该指标与各种机械特性的相关性，得到了比压缩率或密度的相关系数更高的值。由此，由于木材的机械强度与纤维密度有很强的因果关系，将纤维密度高的晚材率作为指标是有效的。
- (3) 关于压缩木材的耐朽性，由于压缩木材的导管被压溃，吸水速度慢，很可能不满足腐朽条件。其次，用腐朽试验后试件的重量减少率进行评价时，未确认到压缩木材的优势。然而，对于腐朽后试件的压缩杨氏模量和压缩强度的残存率，压缩材约为非压缩材的两倍，因此其优势是明显的。

另外，本研究是在 2010 年度 NOSTEC 财团”研究开发助成事业”创新创出研究支援事业启动补助金制度的支持下得以实施的。整理编号 H22 S-4-1

参考文献

- (1) 2007 年能登半岛地震被害调查报告书 第 11 章 建筑物被害, p. 281-301.
<http://www.jsce.or.jp/report/42/files/11.pdf> (参照日 2012 年 6 月 4 日)
- (2) 阿部豊, “北海道产针叶树材的耐朽性”, 林业指导所研究报告 第 1 号, 3 月(1952)
- (3) Togashi, I., K. Itoh, S. Giusi, and A. Harada, “Fungal contamination of fruiting houses for the sawdust-based cultivation of *Lentinus edodes* in Hokkaido and the effects of benomyl on *Trichoderma* spp. Growth”, *Journal of the Japan Wood Research Society*, 42, (1996), pp. 1258-1263.
- (4) Togashi, I., K. Itoh, S. Giusi, and A. Harada, “Distribution of airborne fungi in fruiting houses for the sawdust-based cultivation of *Lentinus edodes*”, *Journal of the Hokkaido Forest Products Research Institute*, 11, (1997), pp. 1-4.
- (5) 铃木大隆, 北谷幸惠, 岩前笃, 永井久也, 小南和也, 坂本雄三, “稳态条件下各种木材含水率与腐朽的关系 - 木质系建筑材料中腐朽现象的定量化与损伤数学预测模型的研究(第 1 报)-”, *日本建筑学会环境系论文集*, Vol. 73, No. 627 (2008), pp. 591-597
- (6) 藤泽伸光, 远藤芳洋, “木材的腐朽与力学特性”, *土木学会第 60 届年度学术演讲会*(2005), pp. 561-562
- (7) 后藤崇志, 富川康之, 中山茂生, 古野毅, “腐朽处理木材的超声波传播速度及部分压缩强度的变化 - 超声波传播速度降低与残余强度的关系-”, *木材学会志* Vol. 57, No. 6 (2011), pp. 359-369.
- (8) 高田克彦, “落叶松材质研究的国际动向”, *组织与材质研究会, 2009 年春季研讨会* “考虑落叶松材的生产与利用” (2009), pp. 16-17
- (9) 浅井将之, 西村尚, “加工条件对压缩木材弯曲强度的影响”, *日本机械学会论文集 A 编*, Vol. 67, No. 654 (2001), pp. 267-272
- (10) 大谷忠, 久保岛吉贵, 松下清, “压缩量对压缩木材拉伸强度特性的影响与断口形态”, *木材学会志*, Vol. 51, No. 3 (2005), pp. 189-195

- (11) 井上靖之, 阿部真理, 竹内修, 藤盛啓治, “压缩木材的基础研究及其产品应用: 杉间伐材有效利用的研究(3)”, 设计学研究. 研究发表大会概要集, Vol. 45, (1998), pp. 266-267
- (12) 北守显久, 郑基浩, 森拓郎, 小松幸平, “压缩木材力学性质的压缩率依赖性”, 木材学会志, Vol. 56, No. 2 (2010), pp. 67-78
- (13) 饭田生穗, 则元京, 今村祐嗣, “压缩定型的水分·热回复”, 木材学会志, Vol. 3, No. 5 (1984), pp. 354-358
- (14) 井上雅文, 门河伦子, 西尾治郎, 则元京二, “利用木材中水分的水热处理对压缩变形的永久固定”, 木材研究, 资料第 29 号(1993), pp. 54-61
- (15) 井上雅文, 则元京, 大冢康史, “山田正软质针叶树材的表层密实化处理(第 2 报)酚醛树脂初期缩合物对压缩木材的固定及处理材的若干物性”, 木材学会志, Vol. 37, No. 3 (1991), pp. 227-233
- (16) 伊藤洋一, 棚桥光彦, 河合祐和, 重松干二, 筱田善彦, “[资料]高压水蒸气处理对木材的压缩成型及其应用”, 岐阜大农研报(60)(1995), pp. 121-127
- (17) 社团法人日本木材保存协会编, 1·3 腐朽材的特征·诊断法, 木材保存(1982), pp. 50-61, 文教出版