

萱葺き屋根の劣化と高耐久化

福田 清 春*

Deterioration and Increasing Durability of Thatched Roof

Kiyoharu KIYOHARU

(平成12年8月31日受理)

1. はじめに

心に深く描かれる風景を心象風景という。年齢によってかなりの違いがあると思うが、この心象風景を彩る重要な構成要素として、緑に囲まれた萱葺き屋根を持つ農村の民家を思い描き、多くの日本人が郷愁と懐かしさの中に、心の安らぎを感じている。『……野原ノ松ノ林ノ陰ノ、小サナ萱葺キノ小屋ニイテ……』魅力ある住居である。しかし今日、萱葺き屋根を持つ民家が建てられることは、生活様式の変化や火災に対する非防災性の故に、観光を目的とした京都府の美山町や岐阜県の飛騨地区等を除いてほとんどなく、民家建築における萱葺き屋根の役割は、歴史的にすでに終わったと言えよう。

一方、伊勢神宮に代表される様に、歴史的且つ文化財的な建築物である神社や寺院、古民家の展示施設¹⁾では時々葺き替えが行われ、今後も長く萱葺き屋根が維持され続けるものと思われる。経験的には人が住まない建築物ほど劣化が早いと思われることから、屋根を含めてこれらの建築物の維持管理や高耐久化には十分な注意がはらわれているに違いない。

萱葺き屋根の高耐久化を図る場合、①屋根の構造自体を劣化し難くする、②屋根を劣化し難い環境に置く、③屋根材料に高耐久化処理を施す等が考えられよう。しかし、文化財的建築物の場合、構造や建設地の変更が困難であり、①や②の方策を取り難い。ここでは、萱葺き屋根の劣化と高耐久化に関して、特に伊勢神宮の第61回遷宮に関連して行われた劣化の実態調査、屋根材料としての萱の劣化、腐朽および萱への高耐久化処理法等について述べる。

2. 古記録や修理記録に見る伊勢神宮萱葺き屋根の耐久性

萱葺き屋根の耐久性や高耐久化に関して行われた研究例は極めて少ない。ところで、萱葺きは最も古い屋根の形態であり、耐久性に関しても古記録等で記載があるものと思われるが、一般にそれらを目にすることはほとんどなく、わずかに伊勢神宮の遷宮に関連した記録を見いだすことが出来るくらいである。そこでまず、伊勢神宮に関連した古記録²⁻⁵⁾や修理記録から見た萱葺きの耐久性について見てみよう。

* 木質環境研究部門客員教授 (平成11年～12年) (Division of Wood-Environment Science, Visiting Professor 1999-2000)

東京農工大学農学部環境資源科学科 (Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology)

Keywords : 萱葺き屋根, 伊勢神宮, 劣化, 腐朽, 高耐久化

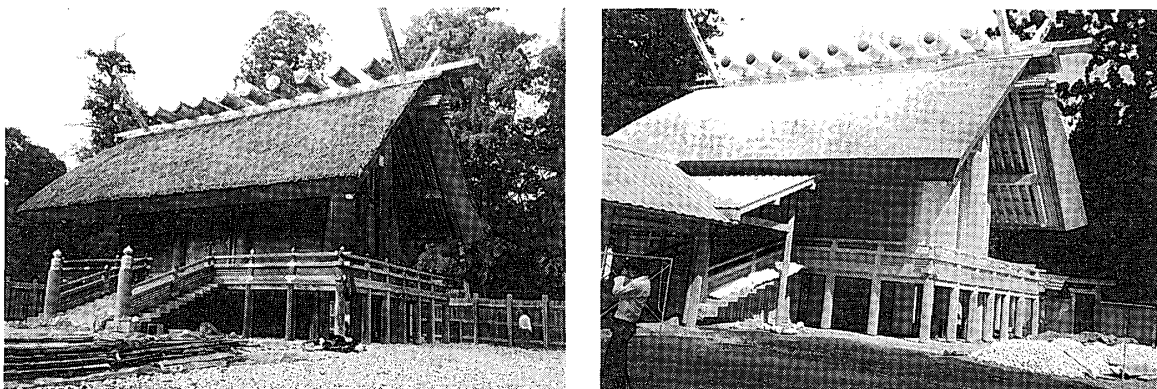


図1 第61回遷宮を前にして解体中の外宮正殿（右）と建設中の新正殿（左）

伊勢神宮は、内・外両宮、別宮14社、摂社43社、末社42社より成る神社群で⁶⁾、社殿屋根の多くは、萱葺きである。萱の本来の意味は屋根を葺く草の総称であり、一般には『茅』の字が当てられるが、神宮の屋根にはもっぱらススキ (*Miscanthus sinensis* Andersson) が使用され、元々は誤用であった『萱』の字が使用されている⁷⁾。また、伊勢神宮は690年以來、式年遷宮として途中長期の中断はあるものの、ほぼ20年の間隔で社殿の建て替えを行ってきた。この20年という間隔について、一説には社殿建築や種々宝物品等を作製する技術の伝承に都合が良いこととともに、掘っ立て素木造り社殿の低い耐久性によるとされる⁸⁾。建築後20年も経過すると、社殿は劣化し、美観が損なわれ、神殿としての威厳が保てなくなる (図1)。

とりわけ萱葺き屋根で劣化は著しく、神宮遷宮記によると^{2,5)}、過去には次の式年遷宮を待たずに全面改修することすら少なくなかった。例えば、1190年の内宮遷宮後、1197年には正殿について『萱葺三分一朽損、南面差檜皮半分抜落……』の記述が見られ、東西宝殿やその他多くの御門屋根でも同様に朽損の記述があり、仮遷宮 (建物の損傷等により次の遷宮を待たずにやむを得ず行われる) として建て替えざるを得なかったという。さらに1247年内宮遷宮後の1254年にも萱葺きの修理のため仮遷宮を行わざるを得なかったこと、1268年遷宮後の1276年、1285年遷宮後の1297年、1323年遷宮後の1330年にも同様に、萱葺き屋根の劣化も一因となって仮遷宮せざるを得なかったこと等の記述がある。これらの古記録から、伊勢神宮においては萱葺きの寿命が遷宮と遷宮の間隔ほどには長くないことが伺える。このため明治期以降、萱葺き屋根の劣化による屋内への雨漏り防止のため、多くの社殿で厚い板屋根を造り、その上に萱葺きが載せられるようになったという。

第60回遷宮 (主に内外宮正殿関係は1973年、別宮関係は1974年) 以来、神宮の建物を管理する神宮司庁所属の山田工作所では、各社殿の萱葺き屋根について、小修繕、修繕、葺き替えの規模別に修理記録をつけている。小修繕と修繕は、手の届く範囲で行う差し萱による修理であり、両者の規模の差異はそう明瞭ではない。葺き替えは屋根に足場を掛けて行う部分的あるいは全面的な修理であり、社殿の性格によっては屋根上に登れないため、実施不可能な社殿も多い。そこで、この修理記録を基に規模を考慮せずに遷宮後初めて修理するに至った年数と社殿の数を調べると、修理は遷宮による新築後4年目 (伊佐奈岐宮、土宮、月夜見宮、風宮の4棟) から始まり、5年目では8棟 (御稻御倉、外宮東・西宝殿、同外玉垣南御門、同四丈殿、同外幣殿、多賀宮、風日祈宮) で実施されている (図2)。6年目ではさらに7棟 (内宮外幣殿、内宮正殿、外宮東宝殿、月読宮、月読荒御魂宮、伊佐奈弥宮、倭姫宮) の修理が加わる。10年間でさらに、同一屋根で複数回の修理が行われ、のべ35棟の萱葺き屋根が修理を受けている。例えば、外宮の外玉垣南門では、1978年と1982年に小修繕を行い、さらに1984年には葺き替えを行っており、風宮では1973年と1982年に小修繕を行い、1986年に修繕を行っている。また、内宮四丈

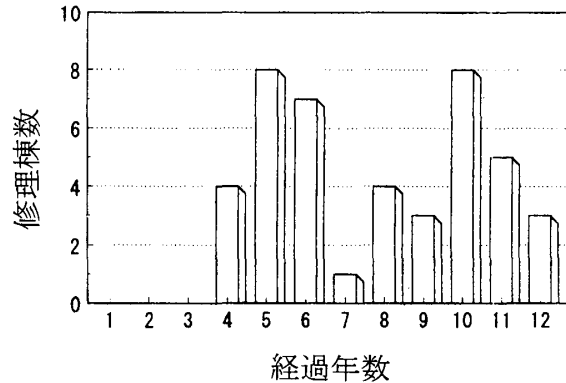


図2 第60回遷宮（1973年（別宮1974年））以降の経過年数と修理棟数

殿では1981年と1984年にそれぞれ北面と南面の葺き替えを行っている。

以上の古記録や修理記録から見た伊勢神宮における萱葺きは、新築後4～5年で小規模な修理が必要となるが、これらの修理を繰り返したとしても、次回の遷宮を待たずに葺き替えざるを得ない場合もあり、遷宮から遷宮までの20年間修理せずに維持することは困難であるといえる。特に神の宿という性格上、屋根へ登ることが出来ない大規模に修理することが不可能な社殿も多く、その場合は20年間朽ちるにまかせることとなる。

なお萱葺き屋根の寿命について、太田は古建築が平均25年で葺き替えを行っているという伊原の報告を紹介するとともに、積雪地方ではこれより短い十数年で葺き替えが行われていることを推定している⁹⁾。また、古民家展示施設に対するアンケート調査によると、小規模修繕（軒等の差し萱程度）では葺き替え後4～7年で実施される場合が最も多く、中規模（部分的葺き替え）では、4～7年と7～10年、大規模（屋根半分以上に及ぶ葺き替え）では15～20年が最も多い¹⁰⁾。

3. 萱葺き屋根劣化の様子

ここでは、61回遷宮（内外宮正殿で1993年）を前にして行った主に肉眼観察に基づく劣化の様子について述べる^{11,12)}。調査した社殿等は御園の農場倉庫を除いて、全て鬱蒼とした森林に囲まれており、雨水などで一度濡れると乾燥し難い環境下にあり、また神宮の立地が比較的高温多雨な気候条件であることとあまって、萱葺き屋根は劣化し易くなっている（図3）。そのため屋根上には萱の劣化で生じた土壌化した層が存在しており、周辺から飛来した孢子や種子等に由来するコケ、シダ、草本、樹木の繁茂が認められ、他に土壌中に生息する微小動物も多種見られる^{13,14)}。これらの中にはヤマトシロアリ、ササラダニやミミズ等、萱を食害し土壌化に関与すると考えられるものも少なくない。

劣化した屋根の断面を見ると、褐色に変色し一部土壌化した層が厚さ10～20cm程度堆積し、その下側に淡黄褐色で光沢を持つ外見上未劣化の層が存在し、両者の境界は比較的明瞭である（図4）。褐色に変色した層では、表層部はほとんど完全に萱組織が破壊され土壌化しているが、内部へ行くに従い、萱組織の分解の程度は低くなり、特に桿部は、潰れながらも残存するものが多く見られる。しかし、その場合でも殆どが髓部分を欠く。J.J. Kirbyらは、イギリスの16棟の葺き屋根の劣化を調べた結果、生物の生育が認められず風化にさらされる外層と、微生物や無脊椎動物のすみかになっている中層および微生物が生息する内層からなる3層構造を認めている¹⁵⁾。伊勢神宮の場合、このJ.J. Kirbyらの結果と異なるが、これは萱が劣化すると最終的には水と炭酸ガスおよび腐植土になるが、日当たりの良い屋根では腐植化しほぼ完全に土壌化した部分が風などで飛ばされ屋根に堆積しないのに対して、日当たりの悪い屋根では厚く堆積することによるものと考えられる。外宮御饗殿屋根について、褐色に腐

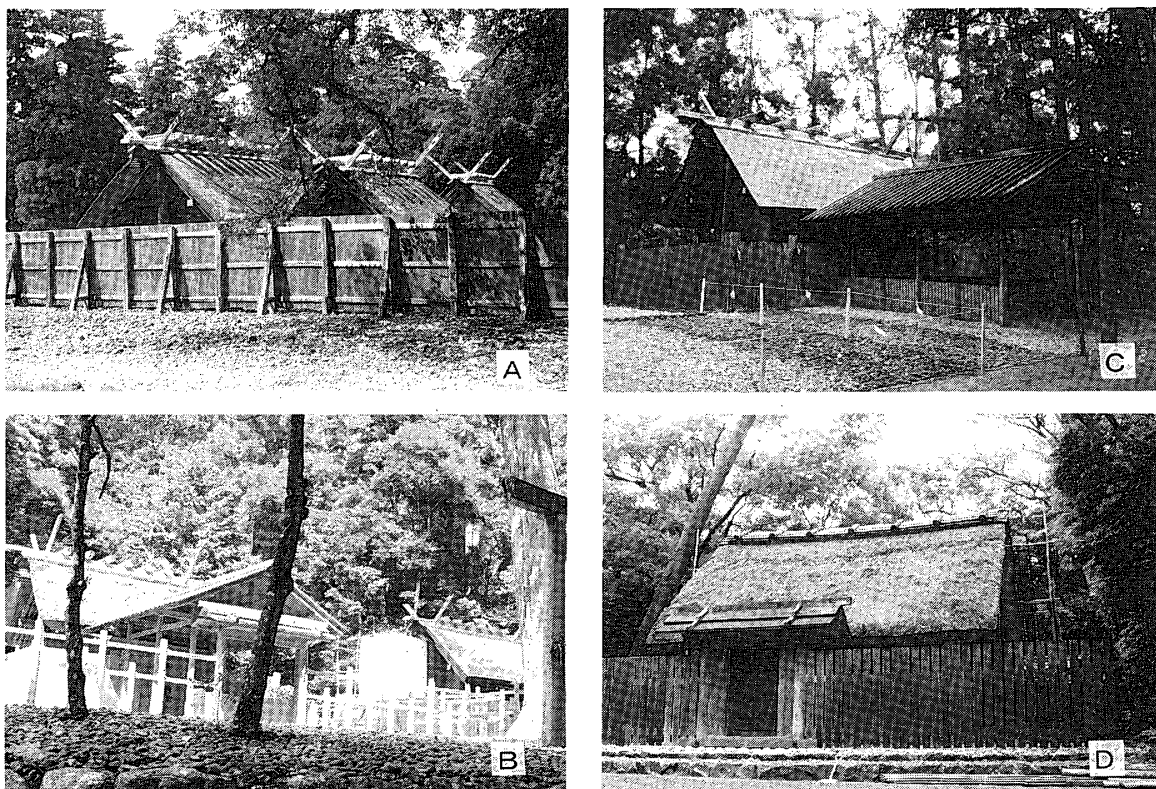


図3 樹木に囲まれた諸社殿。A：内宮正殿域，B：滝原宮，C：外宮風宮，D：御塩殿



図4 表層が土壌化した萱葺き

植・土壌化した部分とその下側で健全に見える部分の含水率は、それぞれ83%と21%であった。この様に両者間の著しい含水率の差異は、外宮御饌殿や四丈殿の萱葺きでも認められる。

また、軒を下から見上げると、所々にV字型に黒く変色した部分が見られる(図5)。この黒変部の厚さは様々であるが、軒先から15~20cmであることが比較的多い。一般古民家や寺院の多くの萱葺きでは、この様な激しい黒変は認められないことが多い(図6)。これは、①一般の萱葺き屋根の軒先付近では多くの場合、スギ等の樹皮が葺き込まれていること(図7)、②樹皮の下側まで雨水が浸透し難いこと、および③軒の裏側の屋根厚さ方向と地表面との角度がほぼ平行で、雨水が軒先部分で厚さ方向に深く浸透し難いこと等によるものである。なお、萱の黒変は雨水が浸透し、微生物、特に菌類が生育して萱を変色させることによって生ずるものであり、やがて腐朽し脱落して行く前兆である。

福田：萱葺き屋根の劣化と高耐久化

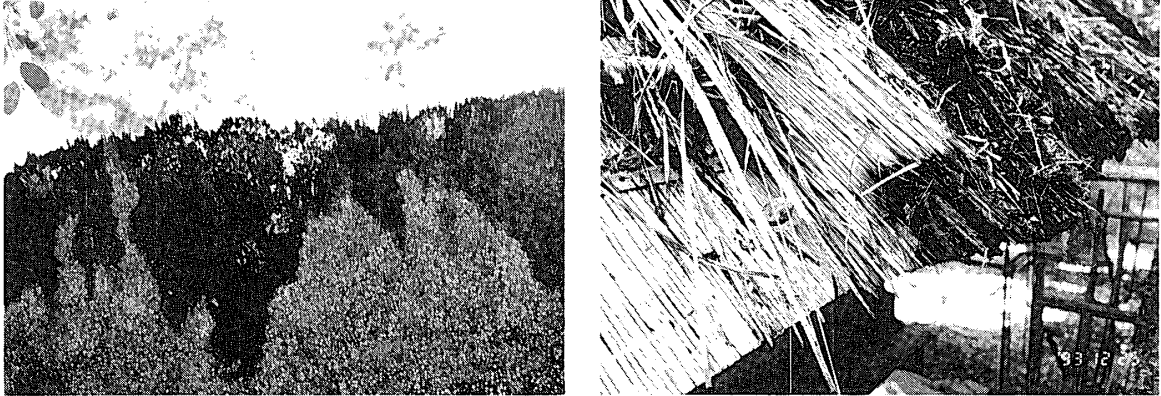


図5 軒下から見た黒変部分（右）とその断面（左）

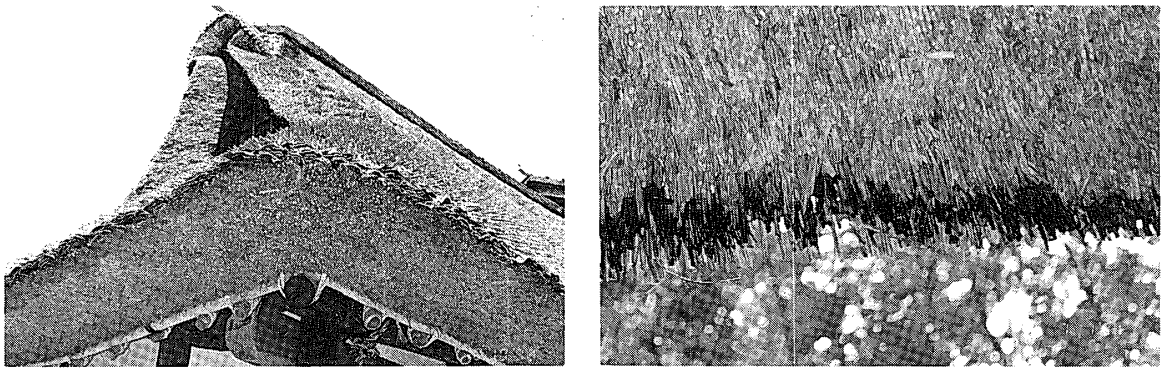


図6 軒下から見た古民家萱葺き（右）と黒色に劣化する部分（左）

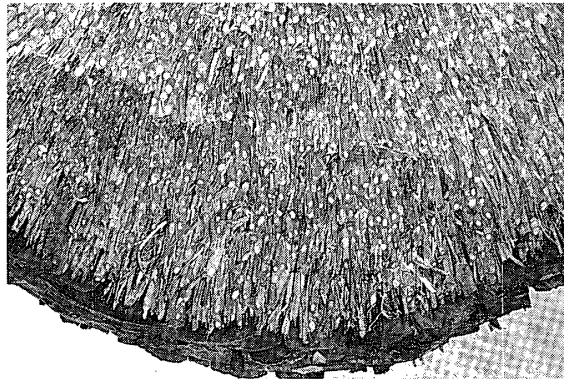


図7 軒下から見た古民家萱葺きのスギ皮挿入

多くの社殿で北側部分は森林帯に接しており日当たりが悪く南側部分より劣化が激しい。例えば、内宮外幣殿の場合、1973年の建設当初には軒厚 57.6 cm (1.9尺) で葺かれていたが、1993年4月19日の時点でこの屋根の軒を端から端まで 50 cm 間隔で、さらに上下方向を 1 m 間隔で測定すると、南側で平均 35.6 cm、北側で平均 23.9 cm にまで厚さは減少していた。更に同外幣殿の北面では、萱を下で固定している竹にまで土壌化がおよぶ箇所も多く認められた。東西方向では共通する傾向は見られず、屋根上に樹木の張り出しがあるか否かにより劣化程度は影響を受けた。例えば西側に樹林帯を持つ内宮御稻御倉や外宮土宮、御園農園倉庫では西側が、東側に樹林帯を持つ外宮風宮や御塩殿では東側の劣化

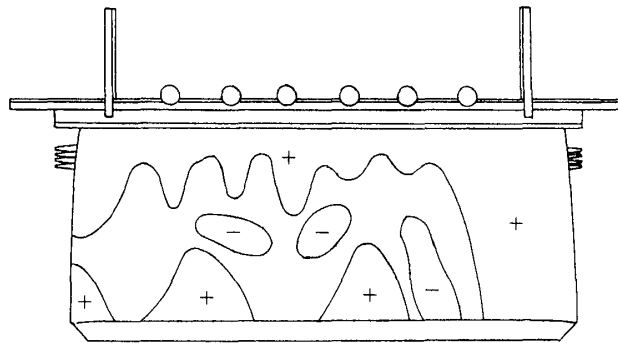


図8 内宮外幣殿における屋根の凹(-)凸(+)

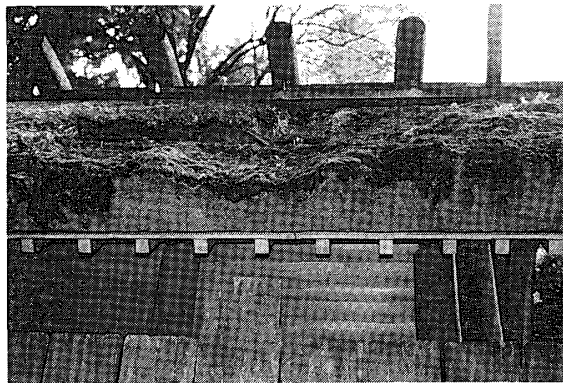


図9 外宮四丈殿修理部分とその周辺部分の劣化

が激しかった。

なお、多くの社殿で屋根の劣化は全面に一樣におよぶのではなく、端から端まで波を打った様になっている(図8)。この盛り上がった部分の上方には鯉木がある場合が多く、鯉木の庇効果によって雨水の降り懸かりが抑制され周辺部分よりも劣化し難いことにより凸部が生ずるのであろう。また、多くの社殿では前述の様に過去に修理されている場合が多いが、この修理によってかえって周辺の未修理部分が激しく劣化する。修理するとその部分だけが盛り上がり、周辺の低くなった未修理部分へ雨水が流れ込み易くなり、とくに修理箇所と接する部分で一層劣化を促進するからである(図9)。

4. 萱劣化原因としての菌類と菌類による萱分解(腐朽)の様子

4.1 菌類について

劣化した屋根から採取した萱茎の表面や内部には菌類の侵入が多く見られる(図10)。菌類の菌糸には隔壁を持つがクランプが存在しないものも多く、萱葺き劣化の主原因微生物は不完全菌類や子の菌類であることが分かる。また、クランプを持つ担子菌類の菌糸も少数ではあるが存在し、劣化の一因となっている。表1に諸殿舎屋根より採取した腐朽萱から分離される菌類を示す¹²⁾。外宮四丈殿では、不完全菌類に属する *Trichoderma* sp., *Gliocladium* sp., *Cladosporium* sp., *Sporothrix* sp., *Periconia* sp., が高頻度で分離されている。これらのうち *Trichoderma* sp., *Gliocladium* sp., *Cladosporium* sp. は、主要な土壌生息菌類であり、腐生的生活を行っていることが知られている¹⁶⁾。これらの他に担子菌も分離されている。また、内宮御幣殿でも外宮四丈殿におけると同様、*Trichoderma* sp., *Gliocladium* sp., *Cladosporium* sp. が高頻度で分離され、他に *Penicillium* sp. も高頻度で分離されている。この *Penicillium* sp. もまた土壌中で腐生的生活を営む代表的な菌類である。また、子の菌類の *Chaetomium* sp. も高頻度で分離され

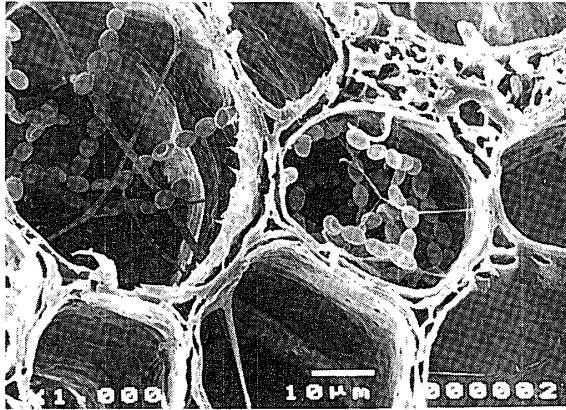


図10 腐朽萱葺き内部に侵入している菌類

表1 腐朽萱より高頻度で分離される菌類一覧

<p><i>Absidia</i> sp., <i>Acrodontium</i> sp., Basidiomycete fungi, <i>Chaetomium</i> sp., <i>Chalara</i> sp., <i>Cladosporium</i> sp., <i>Edmundmasonia</i> sp., <i>Fusarium</i> sp., <i>Glocladium</i> sp., <i>Gomphonella</i> sp., <i>Helicospore</i> sp., <i>Helminthosporium</i> sp., <i>Merulius tremellosus</i>, <i>Mortierella</i> sp., <i>Nodulisporium</i> sp., <i>Oidiodendron</i> sp., <i>Periconia</i> sp., <i>Penicillium</i> sp., <i>Phialophora</i> sp., <i>Pleomorphic fungi</i>, <i>Phytophthora</i> sp., <i>Sporothrix</i> sp., <i>Sporidesmium</i> sp., <i>Schizophyllum commune</i>, <i>Trichoderma</i> sp.</p>
--

たが、この *Chaetomium* sp. は木質化した植物細胞壁に空洞形成型軟腐朽をひきおこすことで知られている。さらに、内宮四丈殿屋根には白色腐朽菌として知られる担子菌のスエヒロタケ (*Schizophyllum commune*) やシワタケ (*Merulius tremellosus*) の子実体も出現している。萱葺き屋根の劣化に関する微生物について研究した例は少ないが、関連するものとして、V.P. Sreedharan らはコナツヤシ葺き屋根の劣化に関する微生物について報告している¹⁷⁾。それによると、不完全菌類に属する *Aspergillus niger*, *Asp. tamarii*, *Penicillium citrinum*, *Pestalotiopsis palmarum*, *Botryodiplodia theobromae* が分離され、*Asp. niger* と *P. citrinum* が葉の引張強度を減少させ、他は柔細胞を劣化させている。これらの菌類は、伊勢神宮の萱葺きで分離された菌類とは異なるが、いずれも土壌生息性の腐生菌類であり、萱を含めた草葺き屋根の劣化には土壌由来の腐生菌類が関与しているといえる。

4.2 萱の腐朽が進行する様子

屋根葺きには、ススキの茎、葉・葉鞘、穂が用いられる。萱は屋根上で切り口を下に、穂先を上にして葺かれるため、柔らかく劣化し易い先端部分は常に屋根内部に深く位置し劣化を受け難くなっている。特に伊勢神宮の屋根表面は、化粧のためきれいに刈り整えられており、外部からは主に刈り込んだ切り口が見える。したがって、降水時に雨水が流れるのは、表面に露出する切り口面やそれに近接する葉鞘の表面部分である。雨水の浸透は先の含水率の測定や褐色化の範囲を考慮すると、屋根表面より凡そ 20 cm 程度になる。屋根に浸透した雨水が地上へ落下する際に、軒厚の方向と地表との角度が平行ではないために、雨水は重力によって軒厚方向に深く浸透する。屋根の葺き方の微妙な差異によって、雨水の浸透程度に差が生じるがこれが前述のV字型黒変発生の原因である。

葉鞘を観察すると表面が凹凸の構造になっている。肉眼的に劣化程度の異なる萱の観察から劣化進行の様子を判断すると、①屋根表面の切り口付近に位置する葉鞘の凹部分に土ほこりが付着し、雨水によって土ほこりから菌糸が伸びる、②やがて菌糸は周辺の葉鞘組織を分解し、自身の栄養としながら生育を続ける、③その結果、菌糸は葉鞘中に沈み込む様に分解を進行させる¹²⁾。葉鞘が分解されると茎表面が露出する。茎表面では、鋸歯状の細長い表皮細胞が互いに連なり、これらの細胞の間に気孔と短い小さな細胞が存在している。気孔は空気や水蒸気の通路であるが、微生物の侵入経路にはなり難い。比較的軽度に腐朽した萱では、葉鞘が分解除去された茎の表面部分では著しい菌糸の付着がみられるが、隣接する内側の柔細胞等の内腔では菌糸が存在しない場合も多い。一方、屋根表面に露出する切り口付近では、道管や柔細胞等の内腔で菌糸の旺盛な侵入がみられる¹²⁾。これは、菌糸の茎内部への侵入が、表面からよりはむしろ切り口から長さ方向へ旺盛に生ずることを意味する。茎の横断面において、髄を除く比較的周辺部分には維管束部分が存在し、維管束は道管や師管、繊維細胞で構成されてい

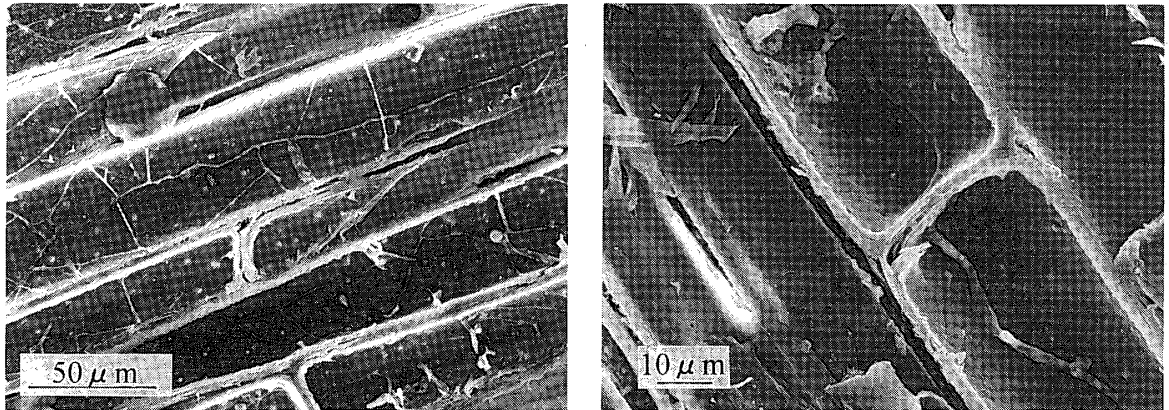


図11 腐朽萱茎の柔細胞内腔で生育する菌糸2例

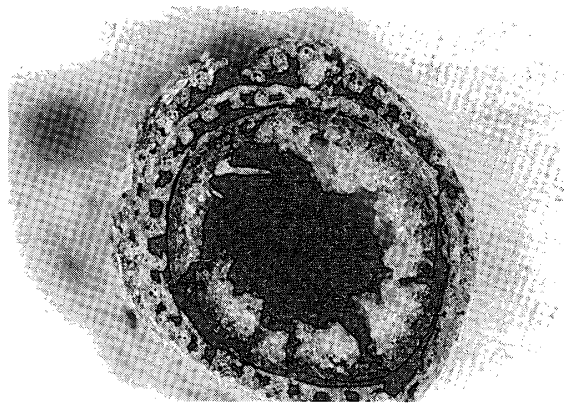


図12 腐朽に伴い髓部分が分解され中空となった茎断面

る。維管束を取り囲む組織は全て柔細胞であるが、茎の表層部近くで維管束周辺の柔細胞には比較的厚い細胞壁が存在し、一方髓部分の柔細胞は薄い細胞壁を持つ。茎を構成する各細胞の存在比を顕微鏡写真上でそれぞれが占める面積比から求めると、表皮細胞5%，維管束8%，柔細胞87%である¹⁸⁾。道管や篩管は水分や養分の通路であり、刈り取った後には、茎内部への微生物蔓延にとって重要な通路となる。柔細胞間には小円形の壁孔が連絡孔として開いており、これもまた微生物の蔓延経路となる。各組織における微生物侵入の程度は、道管で最も高く、次いで髓中央部分の柔細胞、周辺部分の柔細胞、繊維細胞の順であり、微生物侵入の難易は横断面における内腔面積の大小と関連するものと判断できる。内腔に進入した菌糸は、主に萱の長さ方向に蔓延する(図11)。菌糸は萱組織中の細胞壁上に点々と存在する壁孔を通ったり、細胞壁を貫通し、隣接細胞内腔へ侵入して行く。菌糸の蔓延によって維管束部分の道管の役割は大きく、細胞壁上に多数配置されている楕円形の孔状部分(穿孔板)を通して、隣接道管へと菌糸は障害を受けず容易に蔓延する。菌糸は蔓延するとともに各種萱組織の細胞壁を分解する。その際、分解は髓部分で最も激しく、劣化の進行した屋根やV字黒変部では、中空に髓部が欠落する場合が多い(図12)。

髓部の比較的薄い細胞壁を持つ柔細胞を低倍率で観察すると、細胞壁の一部が所々で失われ穴が開いている(図13)。この穴は内腔に接した菌糸がその周囲の細胞壁を侵食する様に分解することで生ずる。細胞壁は菌分解の進行と共に薄くなりやがて消失して行く。細胞内腔に侵入した菌糸が自身と接する柔細胞壁を分解して腐朽を進行させるこの様式は、木材腐朽における白色腐朽およびエロージョン型の軟腐朽に類似するものである。葉や葉鞘の場合、前述の如く主に表面の窪みに付着した土埃より菌糸が伸

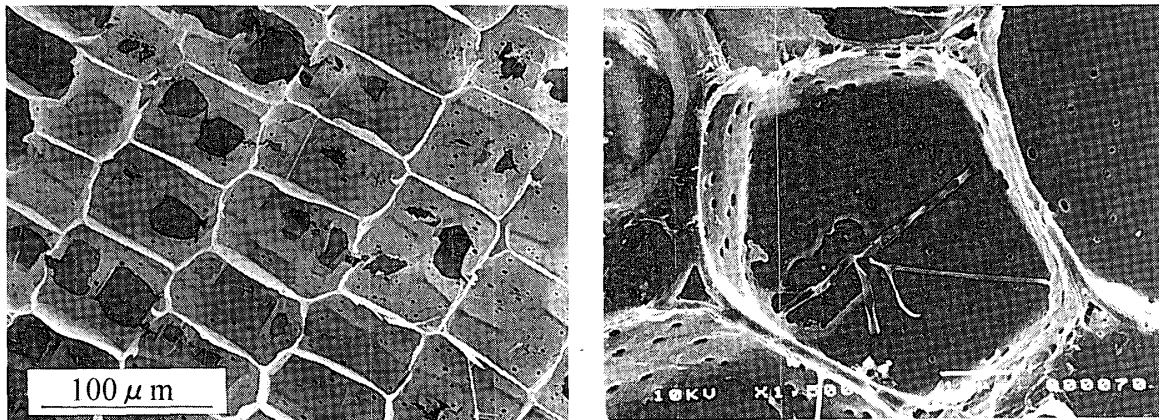


図13 腐朽による柔細胞分解の様子

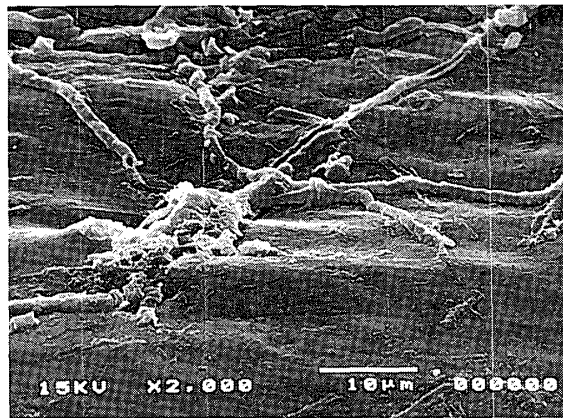


図14 葉鞘表面の窪みに付着した土埃から伸びた菌糸

び、表面が侵食される様に分解する（図14）。

一方、比較的厚い細胞壁を持つ維管束部分の繊維細胞や桿部の柔細胞では、侵食型の分解も見られるが、他に細胞壁中の空洞形成型分解も見られる。腐朽度の低い試料では空洞は小さく数も少ないが、腐朽が進行した試料では空洞は大きくなり数も増し、この空洞内部には菌糸が存在することが多い。この分解様式は木材のキャビティ型軟腐朽と類似するものであり、空洞は細胞壁中のセルロースマイクロフィブリルの配列に添って形成される。

5. 腐朽の進行と萱の物理的性質変化および腐朽度の推定法

萱が劣化しているか否かは肉眼観察でも比較的明瞭に判別出来る。しかし、劣化の程度を数量化することは困難である。また、萱の高耐久化を図る上で、種々処理によりどの程度菌類による分解され難くなったか。つまり腐朽され難くなったかを判断することが必要になる。このためには腐朽度を如何に測定するかが重要となる。ここでは、腐朽の進行に伴う萱の物理的変化を測定することで腐朽度を推定する可能性について述べる。

山田工作所貯蔵の未腐朽萱について、体積 (V) と質量 (W) 間には $W=0.25V-0.0024$ の関係が存在している (図15)¹⁹⁾。ところで、萱の茎は、侵食型および空洞形成型の2様式で菌分解を受けるが、髓部が失われ潰れるまでは外見上の形状や寸法変化はほとんどない¹⁹⁾。これは、腐朽によって茎の密度が減少することを意味する。そこでこの関係式を用いれば、屋根葺きに用いた当初の萱質量が不明で

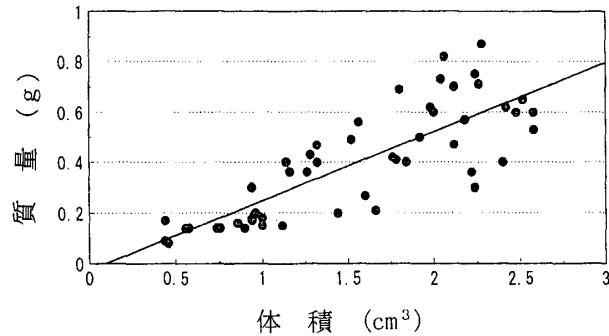


図15 未腐朽萱茎における質量 (W) と体積 (V) の関係。 $W=0.25V-0.004$ ($r=0.83$: 99%水準で有意)

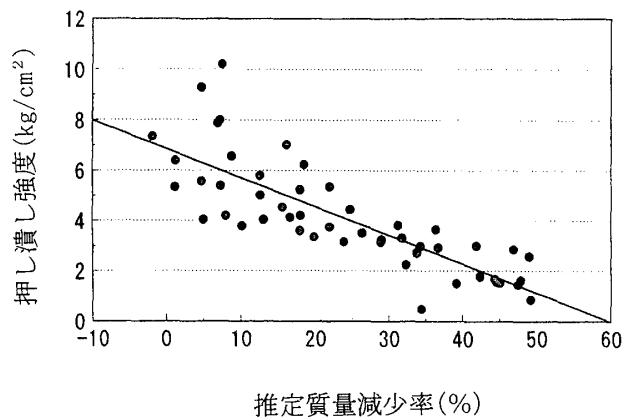


図16 腐朽萱茎における押し潰し強度 (S) と推定質量減少率 (WL) の関係。 $S=-0.11WL+6.87$ ($r=0.81$: 99%水準で有意)

も、腐朽後の茎の寸法を測定し体積を調べることで、屋根を葺いた当初の単位体積当たりの茎質量が推定出来る。従って、腐朽後の茎の単位体積当たりの質量を測定すれば、当初の推定質量との差から腐朽後の質量減少を推定出来ることが分かり、萱葺き材料の腐朽度の測定が可能となる。そこで、遷宮直前の腐朽した屋根において、表面部分が褐色に変色しているが、潰れておらず形状を保っている茎を採取し、その質量減少の推定値を求めると、結果は0～50%の範囲で変動していた¹⁹⁾。これらより、萱が屋根上で腐朽し土壌化する過程で、外観的形状を保つのは質量減少50%程度までであるといえよう。

また、屋根全体の外観や形状を保つために、茎の強度、特に押し潰す力に対する強度が重要である。ほぼ同一直径の萱茎について、腐朽度の異なる試料の押し潰し荷重を測定すると、腐朽の進行と共に荷重は低下する。この押し潰し強度から、コンクリート円柱の引張強度測定法 (JIS A1113-1993) に準じて破壊強度 (S) を求め、推定質量減少 (WL) と関係づけると $S=-0.11WL+6.87$ の関係が認められる (図16)¹⁹⁾。この式より、押しつぶし荷重の測定によっても腐朽の程度が簡便に推定出来る。そこで、どの程度腐朽したら修理が行われてきたのかを、推定質量減少や押し潰し強度と関連づけてみると、御塩殿、滝原宮、御園農園倉庫において葺き替え修理が行われた折りに採取した直径 5 mm 程度の腐朽萱の場合、いずれの場合においても、推定質量減少30～40%、押しつぶし強度 2～3 kgf/cm² 程度に萱が腐朽すると修理が行われて来たことが概略的にいえる。

6. 化学的性質変化

一般に、植物遺体中の炭素対窒素の存在比率 (C/N 比) は、微生物による分解速度に大きな影響を及

福田：萱葺き屋根の劣化と高耐久化

ほし、 C/N 比が低いほど分解速度は大きくなる傾向を持つ²⁰⁾。未腐朽と腐朽萱間の C/N 比には大きな差があり、腐朽によって C/N 比は $1/3 \sim 1/5$ に減少する。また、腐朽萱においては、腐朽度が増すほどに C/N 比は減少する傾向がある (図17)¹⁹⁾。なお、屋根に付着した埃や微小動物などの遺体が窒素の供給源である。

未腐朽萱と腐朽萱の化学組成 (表2) をみると、アルコール・ベンゼン抽出物を除く抽出物含量は腐朽萱の方が幾分多く、萱が菌分解を受け構成成分が低分子化したり、菌類の代謝産物が残存部分に蓄積し、その結果水やアルカリへの可溶性が増す¹⁹⁾ のであろう。

また、腐朽萱は未腐朽萱に比べ、セルロースやヘミセルロース分に乏しく、リグニン分に若干富む¹⁹⁾。これは、腐朽によって生ずる菌分解が主に萱の多糖類部分で生ずることを意味する。さらに、ホロセルロースを構成する糖類について、セルロースを主とするグルカンとヘミセルロースに由来するキシランの存在比 (G/X 比) は、腐朽によって大きくなり、ヘミセルロースがセルロースよりも幾分菌

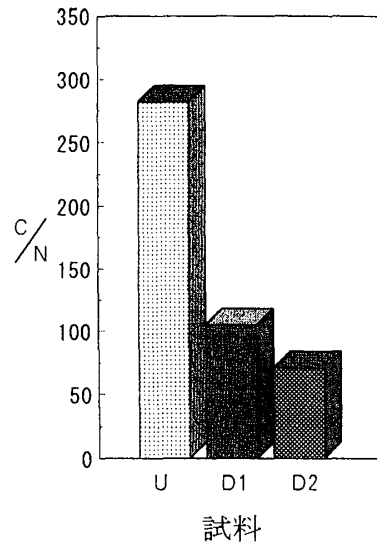


図17 腐朽による萱 C/N 比の変化。U：未腐朽，D1：推定質量減少率0～35%，D2：推定質量減少率35～50%

表2 腐朽・未腐朽萱の化学組成

	未腐朽萱	腐朽萱
各種抽出物		
冷水	3.4%	3.7%
1%アルカリ	37.5%	47.6%
アルコール・ベンゼン	1.3%	1.2%
ホロセルロース		
含量	80.2%	72.3%
グルカン/キシラン	1.5	1.8
結晶化度	49.4%	43.8%
リグニン		
含量	21.3%	28.2%
ニトロベンゼン酸化生成物え P : V : S 比	0.64 : 1.00 : 0.97	0.33 : 1.00 : 1.03

P : V : S ; p ヒドロキシベンツアルデヒド対バニリン対シリンガアルデヒドの取量比

分解を受け易いことが分かる。ホロセルロースの結晶化度は、未腐朽部分より腐朽部で若干低く、セルロース部分も菌分解を受ける。

未腐朽および腐朽萱をニトロベンゼン酸化分解し、生成する芳香族アルデヒドを測定すると、p-hydroxyl 核は腐朽リグニンにおいて少なく、他の2種芳香核はほぼ同量存在する¹⁹⁾。これは、リグニン中の p-hydroxyl 核を生ずる構造が優先的に菌分解されることを示している。この p-hydroxyl 核の起源として、萱と類縁なサトウキビ、竹、イナワラでは、リグニン中でエステル結合して存在する p-coumaric acid が考えられている^{21, 22)}。萱の場合も同様にリグニン中にエステル結合して存在する p-coumaric acid 部分が分解され易いのであろう。

7. 萱の防腐処理性

萱葺きが劣化したら葺き替えを行えば良いが、様々な事情から葺き替えを実施し難い建築物も多い。これら建築物の萱葺き屋根を経済的に高耐久化するには、防腐薬剤処理が重要となる。しかし、防腐効果に優れている薬剤であっても、萱組織中に浸透し定着しなければ用いることは出来ない。それ故に、萱に防腐薬剤処理を施す場合、薬剤の選択と共に処理法が問題となる。ここでは萱に防腐薬剤等を処理する際の方法について述べる。

7.1 萱組織内部への液体浸透と浸漬処理²³⁾

萱の茎では横断面のほぼ87%を柔細胞が占めることから、保存処理はまずこの柔細胞に薬剤を浸透・定着させねばならず、溶媒を十分に組織内部へ浸透させることが必要となる。しかし、萱葺き屋根は昔から火災に弱いことが知られているように、経済性と防火上の配慮から、溶媒は安価で火災の危険性の全くない水を使用する水溶性薬剤が望ましい。

染料を溶かした水溶液に茎小片試料を浸漬し、茎内部を縦断して調べると、維管束の道管部分へ染料は容易に浸透するが、維管束周辺の柔細胞や髄部分の柔細胞へはほとんど浸透しない(図18)。また、茎を切断した両端部分をシールして浸漬すると茎内部への浸透はほとんど生じない。これより、①茎断面の主要部分を構成する柔細胞の内部へ水溶液は短時間で浸透し難いこと、②茎表面に存在する気孔は水溶液の浸透経路としてほとんど機能しないこと、③維管束の道管部分へ浸透した水溶液は周辺の柔細胞に拡散し難いことが明らかである。したがって、浸漬法による処理はほとんど効果がないといえよう。なお、萱と組織構造が類似しているタケ類においても、維管束部分の道管では液体が容易に浸透しても、その他の部分ではほとんど浸透しないことが知られている²⁴⁾。

7.2 毛細管現象を利用した浸透法²³⁾

茎の下端を溶媒に漬けて浸透時間を長くすると、極性溶媒である水溶液の場合、処理開始10日後でも浸透高さは平均 20 cm に達しないが、非極性溶媒である灯油の場合、処理10日後に浸透高さは 70 cm 程度に達する(図19)。萱葺きにとって最も劣化し易い環境にあると思われる伊勢神宮の場合、屋根上には劣化して土壌化した部分が 10~20 cm 堆積していること、屋根葺き時に化粧のため表層部分を刈り込むことを考慮すると、薬剤の浸透部分は茎下端より 50 cm 程度は必要である。従って水溶液の場合、毛細管現象を利用した浸透法によって処理することは不可能となる。一方非極性溶媒の場合、このような障害はなく、萱茎への浸透は比較的容易である。従って、灯油など非極性溶媒を用いた毛細管浸透法は、火災に対する対策が十分であれば、特殊な設備を必要とせず、萱の防腐処理法として有効であるといえよう。

7.3 温冷浴法²³⁾

水溶液の浸透性を増加させるために、木材では簡易な開槽式温冷浴法が行われる。これは液体中で木

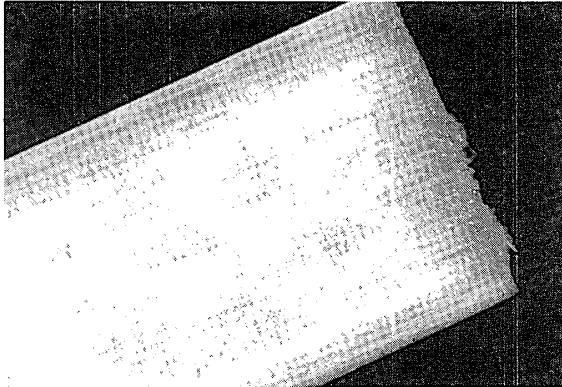


図18 萱葺内への水溶液浸透の様子

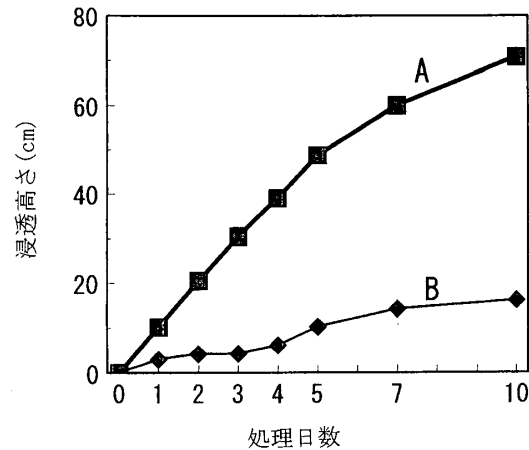


図19 毛細管浸透法による液体の浸透。
A：灯油，B：水溶液

材を加熱し、内部の空気を膨潤させ木材外に排出させた後、冷却し空気が収縮する際の吸引力を利用して液体の浸透を図るものである。この方法を萱に適用した場合、加熱時間2時間程度まで上昇するが、その後加熱時間を長くしても浸透深さはさほど増加しない。従って、常温で浸漬する場合に比べてかなりの浸透性改良が認められるが、先に示した理由で処理は下端から凡そ50cm程度必要であることを考えると、水溶液の開槽式温冷浴法による処理もまた、萱に薬剤を浸透させるために利用出来ない。なお木材の場合、水溶液の浸透促進のために、界面活性剤の添加が有効であるが²⁵⁾、萱では効果がほとんど認められない。

7.4 減圧注入法²³⁾

試験片を水溶液に沈め減圧にして浸透を図る場合、減圧しない場合に比べかなり浸透量は増加する。その際、維管束を除くと、髓の中央部分では桿部に接する周辺部分より浸透が容易である。また、周辺部分は長時間減圧状態に置いても相当な部分が未浸透状態で残る。これは茎中の空隙部分に存在する空気が減圧処理では排除し難いことを意味する。減圧下に茎の空隙内部に存在する空気が排除される様子を鈴木が竹に用いた方法²⁶⁾を応用して調べると、減圧40分程度では空隙内部に存在する空気の約15%が排出されずに残る。当然、この空気の残存部分では周辺よりも圧力が高く水溶液の浸透が妨げられる。減圧下での放置時間をさらに延長させると空気排出量は増加するが、実用的ではなくなる。これらを考慮すると、減圧下での注入処理には実用性がないといえる。

7.5 加圧注入法²³⁾

萱を加圧注入装置に入れ、水溶液に沈めた後、20 mmHg (2666 Pa) の減圧下に30分放置し、その後加圧注入を行うと、7 kg/cm² (68.6×10⁴ Pa)、90分の処理で良好な浸透が得られる。加圧注入の処理条件は十分に検討されているとは言い難いが、水溶液を萱茎に注入するには、この加圧注入法によらねばならないことは明らかである。

7.6 化学修飾と高耐久化²⁷⁾

防腐薬剤の使用には施工時の屋根葺き職人に対する安全性、完成後の環境汚染など解決すべき問題も少なくない。防腐薬剤に頼らない方法として、萱の化学組成を変えて腐朽し難くする方法が考えられる。すでに木材では、エステル化やエーテル化などの化学修飾とそれに基づく高耐久化が検討されている^{28,29)}。

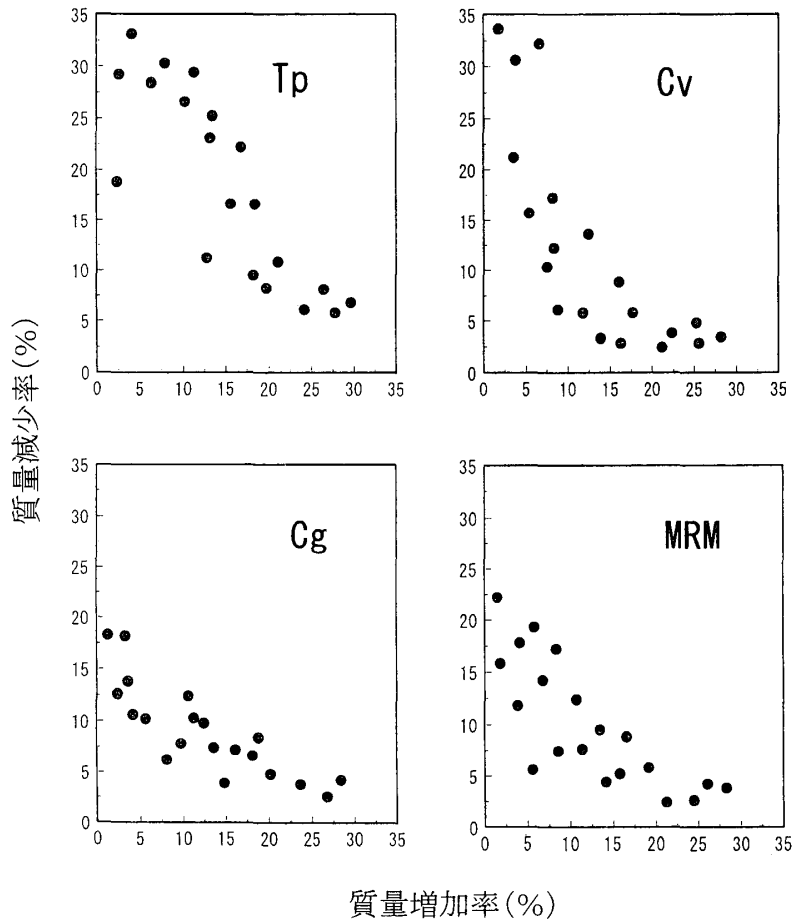


図20 萱のアセチル化程度と菌類による分解の関係。Tp: オオウズラタケ, Cv: カワラタケ, Cg: ケトミウム, MRM: 腐朽萱分離菌類

萱をアセチル化すると、アセチル化の程度が増加するほど各種菌類に対する抵抗性は向上する (図20)。木材の褐色腐朽菌類に対して効果に乏しいが、萱葺き屋根劣化の原因は軟腐朽や白色腐朽であることから判断すると、20%程度質量が増加するようにアセチル化処理を施すと、萱はほとんど腐朽しなくなる。

木材腐朽菌類がエステル結合を切断するエステラーゼを持つこと³⁰⁾、セルロースアセテートが微生物分解を受けること³¹⁾、微生物によるエーテル結合切断に関する報告が少ないことなどより、アセチル化よりはエーテル化の方が高耐久化に適していると思われる。しかし、エーテル化がアセチル化よりも特に高耐久化に効果があるという実験結果は得られていない²⁷⁾。

8. お わ り に

萱葺き屋根の劣化と高耐久化のための処理法について述べてきたが、萱葺きの劣化を防止するための薬剤についても若干の研究がなされている。検討の対象となったのは多くの市販木材防腐剤や過去に防腐剤として使用実績がある化学物質である^{11,32)}。これらから、ヒドロキシアミン系、有機ヨード系、4級アンモニウム塩系等数種の防腐薬剤を選び、毛細管浸透法や加圧注入法、表面処理法等で処理を行った萱を用いて実大暴露試験体を作成し、現在暴露試験途中である (図21)。これらの結果は、いずれ別

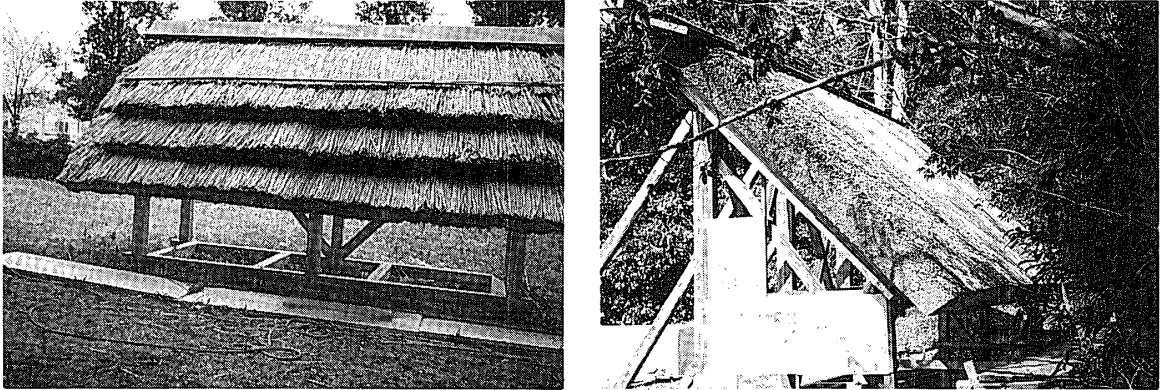


図21 建築研究所内設置（右）および山田工作所内設置（左）暴露試験体

途報告する予定である。

ところで、江戸期三河地方の代表的な農書、百姓伝記によると農民の家は萱で葺くのが良く、腐ったら作物の肥料にせよと書かれている³³⁾。これは農家において、萱葺き屋根は葺き替えさえ行えば朽ちても良く、むしろ堆肥として積極的に農業生産に役立つことを意味するものであり、今日建築廃材の処分困っていることと好対照である。防腐薬剤の使用は、安全性や環境汚染について慎重に行うべきであるが、萱葺きはすでに一般民家の屋根としては使命が終わっており心配はない。しかし、神社、寺院、展示用古民家の場合、萱葺き職人が減少する中で萱葺き屋根を維持管理し続けねばならないことも多い。この様な場合、防腐薬剤の使用も必要となろう。もともと防腐剤は、使用することで得られる利益と損なわれる損害とを秤にかけて、利益が多いときに用いられるものである。萱葺き屋根の保存や高耐久化について、木材保存関係の研究者・技術者の関心と努力を期待したい。

文 献

- 1) 大野 敏：“民家村の旅”，(株) INAX, pp. 47 (1993)
- 2) 神宮司序編：“神宮遷宮記巻一”，神宮式年造営序, pp. 1-720 (1992)
- 3) 神宮司序編：“神宮遷宮記巻二”，神宮式年造営序, pp. 1-650 (1992)
- 4) 神宮司序編：“神宮遷宮記巻三”，神宮式年造営序, pp. 1-619 (1992)
- 5) 神宮司序編：“神宮遷宮記巻四”，神宮式年造営序, pp. 1-712 (1992)
- 6) 松前 建：歴史読本, **38**, 38-47 (1993)
- 7) 日本大辞典刊行会編：“日本国語大事典 5 巻”，小学館, pp. 161 (1973)
- 8) 矢野健一：“伊勢神宮の衣食住”，東京書籍, pp. 221-225 (1992)
- 9) 太田博太郎：“伊勢神宮”，上山春平編，人文書院, pp. 27-281 (1993)
- 10) 福田清春，大塚 毅，今泉勝吉：木材保存, **21**, 119-25 (1995)
- 11) (社)建築研究振興協会：“萱葺き屋根の耐久性能向上技術に関する調査研究”，1990-1993の各年度報告書（神宮司序宛）
- 12) 福田清春，野中裕司，大塚 毅，今泉勝吉，原口隆英：防菌防黴誌, **25**, 3-9 (1997)
- 13) 矢頭献一，山下善平：科学朝日, **35**(7), 111-115 (1975)
- 14) 福田清春，野中裕史：木材保存, **20**, 257-260 (1994)
- 15) J.J.H. KIRBY and A.D.M. RAYNER: *International Biodeterioration*, **25**, 21-26 (1989)
- 16) 宇田川俊一，椿 啓介：“菌類図鑑 (上)”，講談社サイエンティック, pp. 37-46 (1978)
- 17) U.P. SREEDHARAN *et al.*: *International Biodeterioration*, **24**, 75-79 (1988)
- 18) 福田清春，菱川裕香子：木材学会誌, **42**, 693-697 (1996)
- 19) 福田清春，大塚 毅，今泉勝吉，原口隆英：防菌防黴誌, **25**, 11-16 (1997)
- 20) 藤田賢二：“コンポスト化技術”，技報堂, p. 69 (1993)
- 21) 樋口隆昌，木村長治，川村一次：木材学会誌, **12**, 173-178 (1966)

- 22) 進藤晴夫, 楯塚昭三 : 土壤肥料学会誌, **49**, 165-166 (1978)
- 23) 福田清春, 原口隆英 : 防菌防黴誌, **25**, 513-518 (1997)
- 24) W.P.K. FINDLAY : *Preservation of Timber in the Tropics*, Martinus Nijhoff/DR.W. Junk Publishers, p. 236-244 (1985)
- 25) 矢田茂樹, 梅原勝雄 : 木材工業, **39**, 371-375 (1984)
- 26) 鈴木 寧 : 東京大学農学部演習林報告, No. **43**, 151-157 (1952)
- 27) 福田清春, 原口隆英 : 防菌防黴誌, **25**, 567-572 (1997)
- 28) 今村祐嗣, 西本孝一 : 木材誌, **33**, 25-30 (1987)
- 29) V.C. MALLARI, K. FUKUDA and N. MOROHOSHI : *Bulletin of the Experiment Forest, Tokyo Univ. of Agric. and Tech.*, No. **27**, 17-26 (1990)
- 30) S. TUJIYAMA and N. NAKAO : *Mycoscience*, **37**, 289-294 (1996)
- 31) C.M. BUCHANAN, R.M. GARDNER and R.J. KOMARECK : *J. of Applied Polymer Sci.*, **47**, 1709-1719 (1993)
- 32) K. FUKUDA : *The International Reserach Group on Wood Preservation*, Document No. : IRG/WP/1490, 1-16 (1991)
- 33) 山田龍雄, 飯沼二郎, 岡 光夫, 守田志郎編 : “日本農学全集第16卷, 百姓伝記卷一-卷七”, 農文協, pp. 237 (1979).