

木材への液体注入*

—ピットの構造と浸透性向上技術—

今村 祐嗣**

Impregnation of Liquid into Wood*

—Structure of pits and improvement technology of liquid penetration—

Yuji IMAMURA**

(平成7年8月31日受理)

1. はじめに

木材の性能向上あるいは機能性付与を目的とした複合化処理においては、すぐれた薬剤や処理方法が開発されたとしても、木材への薬剤等の注入工程がネックとなってその発展を阻んでいることが多い。例えば、最近増加している外構部材（エクステリアウッド）など、厳しい環境条件下で使用される材料においては、保存薬剤の効果以外に木材への浸透性の良し悪しによって、期待される耐久性能が影響されることが多いのはよく指摘されるところである（図1）。また、木材とプラスチックあるいは無機質との複合化処理などにおいても、まず問題となるのはモノマーや溶液などの処理液をいかに材中にムラなく迅速にかつ目的とする深さまで導入するかということであろう。

しかし、細胞壁で囲まれた小部屋の集合体である木材は、けっして注入の容易な材料ではない。したがって、薄い単板状のものに処理を施し、それを積層する手段が取られることが多い。たしかにエレメントを小さくして処理を行うのは、木質ボードの製造などを対象とする場合には有意義であり、今後の材料開発の手段としても有力な方策となろう。その一方で、比較的大きな断面の木材を自由に処理したいという要望も高い。木材への薬剤注入性能を向上させる目的は、材中での偏りをなくし均一化するとともに、難注入性の樹種であっても部材の内部深く薬剤を浸透させることにある（表1）。

さて、木材は壁で仕切られた多くの小部屋の集合体である。小部屋同士の間の壁にはピットと称される弁の備わった部分があり、樹木における樹液流動の通路となるとともに水分移動の調節弁の役割を果たしている。その形態は、広葉樹と針葉樹で、また細胞の種類毎に異なっているが、この通路すなわち『壁孔（ピット）』は、“木材細胞壁の二次壁が欠如し、壁孔壁を境界として隣接する二つの細胞が接している部分”と定義されている。樹液や水分移動の主たる経路である道管や仮道管では、壁孔壁がドーム状に覆わ

* 第50回木研公開講演会（平成7年5月19日、宇治市）において、『木に水を入れる』と題して講演

** 木質複合材料研究分野（Laboratory of Wood Composite）

Key Words: pit, liquid penetration, bacteria, compression, incision, laser, wood preservation, wood composite

表1 主な木の浸透性ランキング (心材)¹⁾

	針 葉 樹	広 葉 樹
良 好	ヒバ, サザンパイン, レッドウッド, ラジアータマツ	ヤチダモ, ケンバス, ゴムノキ
やや良好	アカマツ, スギ, ツガ, ベイツガ, テーダマツ	カバ, シオジ, イエローメランチ
困 難	エゾマツ, トドマツ, ヒノキ, ベイモミ, シトカスブルース	ブナ, ケヤキ, カブール
きわめて困難	カラマツ, ベイマツ, ベイスギ	クリ, ミズナラ, ホウソクノキ, レッドラワン, ジャラ

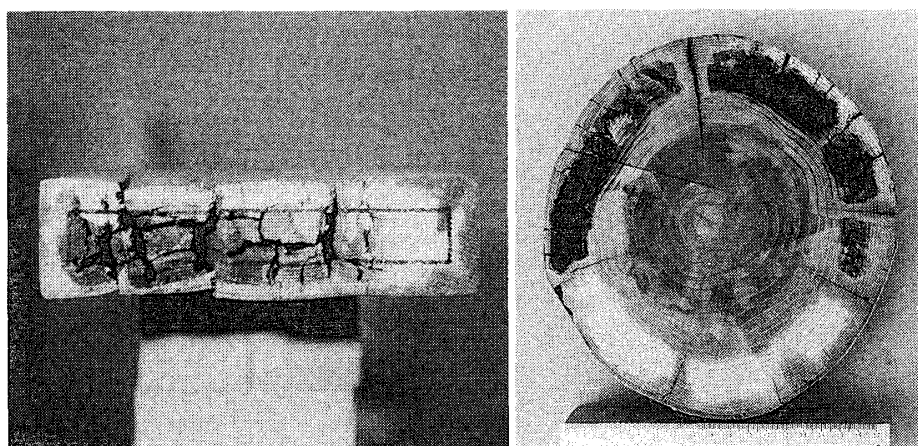


図1 防腐剤の未含浸部位の腐朽例 (矢田茂樹氏提供)
(CCA 処理したベイマツ材 (左) とスギ丸太 (右))

れているため有縁壁孔と呼ばれている。

われわれが木材を利用するという立場で考えてみると、このピットがきわめて大きな意味をもってくる。乾燥に伴う水分移動も各種の処理における注入工程でも、すべてこの“穴”のお世話になる必要がある。もちろん、細胞壁そのものを通過しての拡散移動も生じるが、より大きなオーダーで液体流動に寄与しているのはこのピットである。

針葉樹仮道管の場合、ドームの中では弁（トールス）がセルロースのフィブリルの紐で吊り下げられており、弁が中立の位置にあれば液体の移動はフィブリルの間隙を通して行われる。細胞中に液体がなくなるとその表面張力に引っ張られるように弁はドームの口の方に移動し、ちょうど閉じたバルブのように通路を閉鎖してしまう。

広葉樹材の有縁壁孔では、明瞭なトールス構造を欠いており、しかも密なフィブリル構造が存在しているため、針葉樹材の場合とは水分移動に果たす壁孔の役割は異なっている。また、広葉樹材では木材組織を構成する要素がより分化発達しているため、道管が仮道管や木繊維と異なり液体移動の主たる役割を果たす。したがって、木材への液体注入性の向上技術について論じる場合、この2者には共通するものがある一方で、別の論議を必要とする場合も多い。ここでは、用材として使用されることの多い針葉樹材を対象に、ピットの構造と液体注入性を向上させる技術について論じてみたい。

2. ピットのはたらき

2. 1 ピットの構造

ピットは、一つの細胞（仮道管）当たり数十～百数十個分布しており、その大部分は仮道管の先端部分の半径壁に集中し、主として上下方向に隣接する仮道管を連絡している（図2左）。バルブの口に相当する孔口の直径は早材で数ミクロン、晩材ではそれよりさらに小さい。個々のピットは、細胞壁がドーム型に盛り上がり中央部が開口したボーダー（壁孔縁）の部分と、その中にあってトールスと呼ばれる弁を備えたメンブレン（壁孔壁）からなっている（図2右）。メンブレンは円盤状のトールスと周辺のセルローズ・マイクロフィブリルの網目構造からなるマルゴの部分から構成されている。マルゴはトールスを吊り下げるように放射状に並んだマイクロフィブリル束と、それに交差して配列している細いマイクロフィブリルからなっている²⁾。

針葉樹仮道管のピットの基本的構造は上に述べた通りであるが、メンブレンの構造は樹種によって相違するところが大きい。一般的にマツ科のものは肥厚した明瞭なトールスをもち、その周辺表面にはトールスをマルゴから区切るように円周状配列のマイクロフィブリルが堆積している（図3 A）。一方その他の樹種においては、スギの例にみられるように、トールスのマイクロフィブリルはマルゴから延長したランダム構造を呈している（図3 B）。もちろん個々の樹種によって特有の形態に変異しており、ベイスギなどでは肥厚した形状でのトールスは明瞭には認めることはできない³⁾。さらに、マツ型のトールスの場合、マルゴのマイクロフィブリルの間隙はスギ型に比較して一般的に広い。

ところで、液体や物質流動に直接関与すると考えられるメンブレンのマルゴに存在する小孔の形状や寸法はどのようなであろうか。電子顕微鏡を用いた形態学的研究はもちろん、径の異なる粒子懸濁液を使用し、物理学的手法によっても検討されてきた。大越らによると、メンブレン小孔の形状はヒノキとスギの辺材およびそれぞれの早晩材間でほとんど差はなく、楕円に近い多角形から三角形にわたる多様なものを含むが、最も多く出現するのは長方形ないし菱形に近い多角形であった⁴⁾。

さらに、かれらは小孔の平均直径は0.04～0.13ミクロンの広い範囲にまたがり、そのうち流動に支配的に働くのは0.087ミクロン以上の孔径をもつもので、それらは一つのメンブレンあたり300～400個存在する

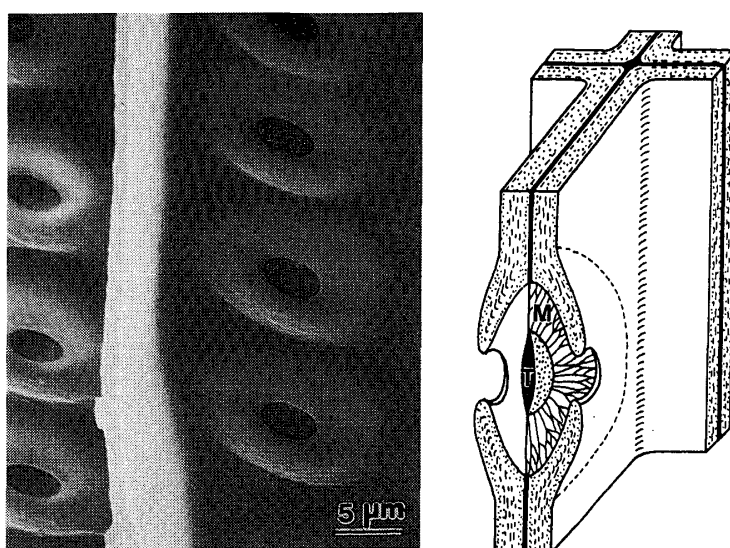


図2 スギのピット（有縁壁孔）とピットの模式図
（T：トールス，M：マルゴ）

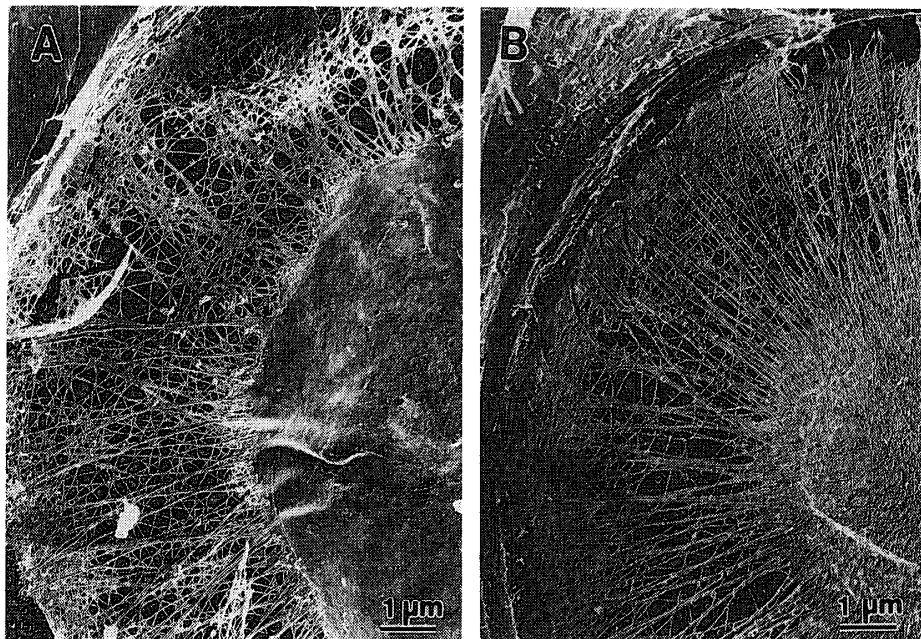


図3 アカマツ(A)およびスギ(B)のピット(有縁壁孔)のメンブレン

と推定している。したがって、もし微粒子化したものを木材に注入しようとしても、小孔の最大径以上の粒子は最初のメンブレンに出くわすとそこで止まってしまう、それ以下の径のものでも徐々に小さい小孔にトラップされマルゴを閉鎖していくため、木材内部への移動は困難となる(図4)。

もちろん、メンブレンの構造は一定したものではなく、材内部位によっても相違する。一般的にいて、早材の小孔径は晩材のそれよりも大きい⁵⁾(ただし、晩材ではメンブレンそのものが厚いため壁孔閉鎖を生じる移動が起こりにくく、流動はむしろ早材より容易であると考えられている)。また、樹齢を経るに従い小孔は拡大していくといわれている。年齢によって孔径が広がるのは、樹体内における樹液の流動によってメンブレンが移動し、それによって小孔の形や大きさが影響されるためであろうか。

さらに、心材になると種々の心材物質がメンブレンに付着するため、間隙をより小さくしてくるに違いない。この心材仮道管のメンブレンに付着する物質は、いわゆる抽出成分とリグニン様物質である。その代表的樹種はベイスギであり、心材ではアスピレーションによって閉鎖している状態のピットはむしろ少ないが、逆にマルゴのフィブリル間が心材物質でびっしりと埋められている。極端な場合は、ピットのドームの中全体が充填されていることもある。小林の研究によると、ベイスギ材の乾燥に際してしばしば出現する落ち込みには、この充填現象も寄与しているらしい⁶⁾。ベイスギピットの充填物質は、熱水や有機溶剤の抽出操作で除去される部分も多いが、それでも取れない部分がありリグニン様の物質が沈着していると考えられている。

また、スギにおいても、屋久杉や春日杉という樹齢が数百年以上の老齢材では、細胞の内腔やピットのドームの中は心材物質で被覆あるいは充填されている(図5)。老齢材の場合、こういった物質は銘木特有の木香の元になるものであるが、一方、市場価値の低い黒心材においても同様にピットが充填されているようすが観察される。一般に黒心材は乾燥性が悪いといわれているが、その原因はこのあたりにもあるのではないだろうか。

2. 2 壁孔閉鎖(ピット・アスピレーション)

生育状態にある辺材では樹液流動が活発に行われているため、大半のピットではツールスがほぼ中立状態にあると考えてよい。しかし、心材では生きた樹木であってもほとんどのピットでは穴が閉鎖(ピット・

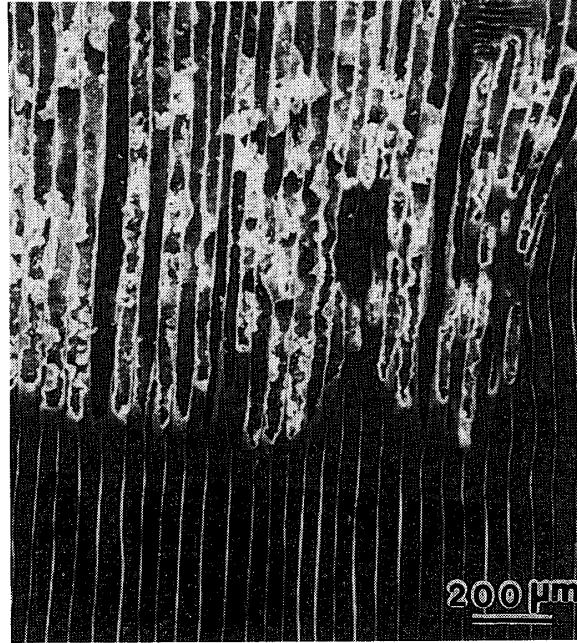


図4 スギ材の表層近くの細胞にのみ沈着した無機物

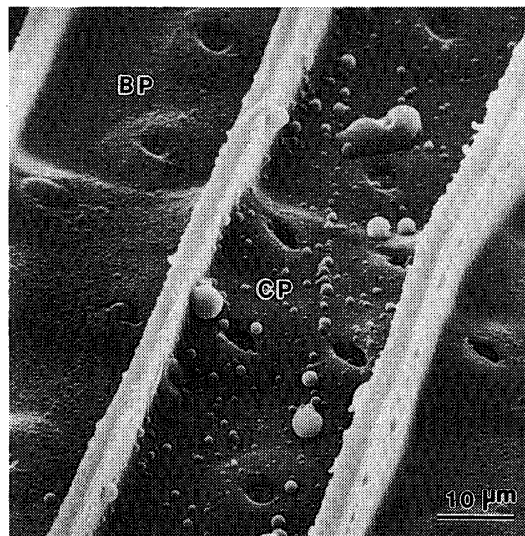


図5 老齢スギの仮道管内腔に沈着した内容物
(BP は有縁壁孔, CP は分野壁孔)

アスピレーション) している。ラジアータパインについて閉鎖しているピットの割合を詳細に観察した結果では、早材の場合、辺材で10～30%，心材では約90%，晩材の場合では辺材で0～10%，心材では約20%であったと報告されている⁷⁾。また特殊な乾燥法，例えば凍結乾燥法とか溶媒置換法を採用しない限り，乾燥した木材ではほとんどのピットに閉鎖が生じていると考えてよい。

トールズが移動して孔口をふさぐ壁孔閉鎖についての古典的解釈は、本来生材においては中央にあったトールズが、水分の蒸発につれて片方の面が空気層になり、残った方の水の表面張力に引っ張られて移動し、ドームの口を閉鎖してしまう現象とされている。壁孔閉鎖を起こさせるためには、トールズを孔口まで移

動させるのに十分な表面張力を木材中の液体が備えていること、移動できるほどメンブレンが柔軟であること、メンブレンとボーダーとが密着した際離れない結合があること、の3つの条件が必要となる。

したがって、晩材のメンブレンは早材よりも厚くかつマイクロフィブリルも密に存在しているため、移動させる力に対して抵抗力が高く閉鎖を起しにくいのは前述した通りである。また、水をアルコールやアセトンで置換して乾燥すると、これらの液体の表面張力が水の半分以下であるため、閉鎖するピットの割合が低下する。移動後のメンブレンとボーダーとの結合、すなわち水素結合も壁孔閉鎖の現象面では重要で、木材にアセチル化などの化学修飾を施すと、水を最終の蒸発液体にして乾燥しても閉鎖したピットの数急減する⁸⁹⁾。

しかし、通常の方法によって木材を水から乾燥した場合、ほとんどのピットは閉鎖していると考えてよく、しかも乾燥状態にある期間が長いほど閉鎖を解くのはますます困難になってくる。心材は辺材よりも注入性が悪いのは、心材物質の沈着など心材化にともなう理由以外に結合力が增加することも寄与していると考えられる。

また、物質の沈着による壁孔閉鎖の状態が樹種によって相違するほか、組織構造的な違いの影響も認められる。すなわち、トールスが孔口をふさいだ壁孔閉鎖にあるベイマツとベイツガのピットを比べてみると、ベイマツの場合トールスはぴっちりどームにくっついているが、ベイツガではどーム内側の壁表面にイボ状層が存在するため完全なシール状態にはなっていない。

2. 3 ピットの形成

上述のような構造をもつピット、とくにメンブレンはどのようにして形成されるのであろうか。

細胞が伸長成長していく過程でつくられる一次壁の形成が終わると、細胞の形は定まり続いて二次壁の堆積が始まる。一次壁の形成が終了した段階で将来ピットになる領域はすでに円形に区切られており、しかも中央のトールスとその周囲のマルゴの区分ができています。さらにマルゴには放射状に配列したマイクロフィブリルの存在さへうかがうことができる。マルゴの部分は非セルロース様物質で密に充填されているが、充填物質を化学的に除去してみると、放射状に並んだマイクロフィブリル束とそれに交差する細いマイクロフィブリルで構成され、完成されたメンブレンと同等の仕組みを、この段階ですでに認めることができる⁹⁾。さらにトールスの部分では、ペクチンが蓄積されているのが認められる。

マルゴにおけるマイクロフィブリル束の放射状配列については、かつては、元来網目状配列として形成されたマイクロフィブリルがトールスの孔口への移動により引っ張られ、二次的に再配列したものと考えられていたことがある。しかし、先程述べた観察結果からわかるように、トールスの移動が行われ得ない分化段階ですでにマルゴに放射状に配列したマイクロフィブリルがみられる。したがってこの放射状配列は、生きている細胞の壁形成機能によってもたらされたものであり、マイクロフィブリルの二次的再配列によることは考えがたい。

このように、細胞壁の形成段階のきわめて初期に、将来のバルブ機能を果たすべく形態形成を行っている。仮道管壁のピットの領域にトールスとそれから伸びる放射状のマイクロフィブリルの形成が行われるのは、木材細胞に本来備わった働きと考えられ、放射組織細胞との間にあって、バルブによる閉鎖という現象の生じない分野のピットにもそれを観察することができる。

その後、メンブレンは複数のヘミセルロース成分で充填されたまま、二次壁最内層の壁層形成が終了する段階までを経過し、原形質が自己分解した後はじめて除去され、マルゴは網目状の隙間構造を呈する(図6)。道管などの通導組織において、細胞壁の形成直後にまだ木化していない壁部分(せん孔など)で非セルロース性の多糖類が消失するのは、植物細胞に一般的にみられる現象とされているが、ピットの開孔現象もこの一つと考えられる¹⁰⁾。

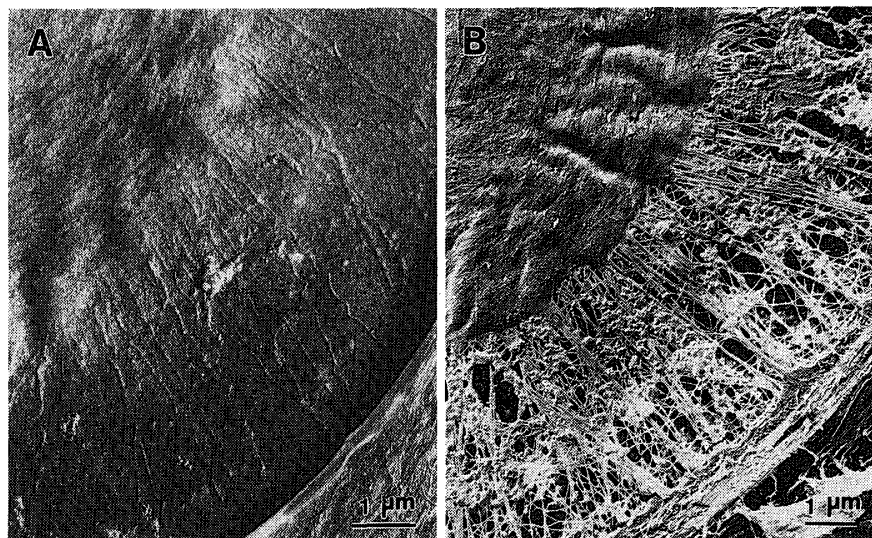


図6 形成段階にあるアカマツのピット（有縁壁孔）のメンブレン（マルゴのミクロフィブリルが充填された段階（A）および充填物質が分解されている途上（B）を示す）

3 浸透性改良のための前処理技術

3.1 生物的处理

(1) 菌類による処理

腐朽菌に木材が侵されると、菌糸は木材細胞壁を貫通して内部へと侵入し、とくにピットを縫うように細胞から細胞へと伸びていっている（図7）。隣の細胞へ侵入する際、細胞壁に新たに穴（穿孔—ボアホールと呼ばれる）を開けるより、木材に本来備わった穴を利用する方が腐朽菌にとっても格段に有利なのであろう。とくに辺材では仮道管壁孔のトールスに存在するリグニン量が少ないためか、セルロースを主体的に分解する褐色腐朽菌でも、トールスの真ん中に穴を開けたり、メンブレン全体を分解してしまっていることがしばしば観察される。

木材を劣化させずにピットを貫通するような菌類があれば、強度を下げないで浸透性を向上させることができる。木材の浸透性の向上に腐朽菌を用いた研究は、腐朽力がそれほど強くない変色菌の *Trichoderma* を用いたのが最初であり¹¹⁾、サザンパインの辺材の浸透性が良くなることが示され、その後ベイマツ、スプルースあるいはアスペンなどで試みられた¹²⁾。しかし、*Trichoderma* だけを作用させた場合、浸透性改良の効果はそれほど認められなかった。その理由はこの菌の場合、軸方向組織細胞へはあまり侵入せず、放射組織細胞のみ貫通していくためにあるらしい。そこで、*Trichoderma* だけでなく、*Gliocladium fusarium* や *Chaetomium* などの腐朽菌と一緒に木材に作用させる研究も行われた¹³⁾。

辺材部においては、メンブレンはセルロースとペクチンが主要な構成成分であり、いくつかの樹種においてポリフェノール類が存在するとしても、一般的ではない。しかし、心材の仮道管相互間におけるピットのトールスは、全般的にポリフェノールを含みさらにリグニンも存在することが指摘されている¹⁴⁾。したがって、*Phanerochaete chrysosporium* のようなリグニン分解菌を用いると、心材においても浸透性が向上するといわれている¹⁵⁾。さらには、セルロースとポリフェノールの両者を分解できる腐朽菌であればより効率的であろうということで、心材への注入処理の前処理として試みられたことがある¹⁶⁾。

もし的確にピットを攻撃できる菌が見付かれれば、孢子懸濁液に木材を浸漬して注入性向上の前処理にすることも可能であり、さらに心材など浸透性の悪い部分の処理においては、あらかじめ木材表面にインサ

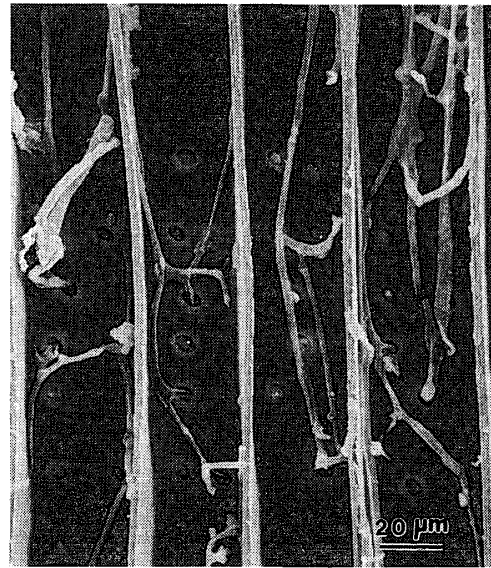


図7 スギ材仮道管のピットに選択的に侵入した
腐朽菌系 (オオウズラタケ)

イジングを施しておいて、刺傷内部に胞子を入れて処理時間の短縮をはかることも考えられる¹⁵⁾。

わが国でこのような処理を試みた例では、人為的に木材に腐朽菌を接種して木材組織を侵し、モノマーの浸透を促進させてプラスチックとの複合体である WPC を調製した試みがある¹⁷⁾。しかし、腐朽菌を採用する場合は、処理の程度のコントロールが難しく、また一般的に注入性の困難な樹種あるいは部位ほど腐朽菌にとっても分解が容易でないことが多い。

(2) バクテリアによる処理

薬液の浸透経路になるピットの部分のみ生物的に分解しようという試みは、長期間水中に貯木した木材の乾燥性が向上し、顕微鏡で観察してみるとピットの部分にバクテリア (細菌類) が集まって穴を開けていることから着目されたものである¹⁸⁻²²⁾。水中に漬けてあった木材では、細菌類は仮道管相互間の、あるいは放射系細胞との間にある分野のピットに集まる傾向がある。細菌類はそれ自身の力で移動する能力をそれほどもっているわけではないが、水の木材中への浸透にともなって細胞の中へ、ピットのところへと移動していくと考えられている²³⁾。

どのような種類の細菌がピットの開口に関与しているのか、どういう様式で分解が進行するのか、最適な活動条件は何か、などについて多くの研究が行われてきた。マツについては *Bacillus polymyxa*²⁴⁾ が、スプルースについては *Bacillus subtilis* と *Flavobacterium pectinovorum*¹⁵⁾ が、ピットへの主要な攻撃細菌であることが報告されている。また、ある種の針葉樹材については、*Clostridium omelianskii* が分解細菌として同定されている²⁵⁾。これら細菌類の分解の作用は、アミラーゼ、キシラナーゼ、ペクチナーゼという酵素が分泌されることによると考えられている²⁶⁾。小林らも長期間貯木した池の水から *Pseudomonas* 1 種と *Staphylococcus* 6 種を分離し、乾燥性の促進や注入性の向上に有効的であったと報告している (図8)²³⁾。

細菌によるピットの開口を考える上で問題となるのは、腐朽菌による場合と同様、辺材の注入性向上には寄与するが、心材では効果が発現しにくいという点であろう。シトカスプルースのように、辺材であっても注入性の悪い材ではこの手法でも有用であるが、一般的な実用性という点では心材部分でも攻撃できる細菌でないと意味がない。細菌類による処理で心材の注入性を向上させたという報告もみられるが²⁷⁾、もしこれが可能でありしかも処理時間が比較的短縮できれば、実用的方法として興味深い。細菌類の木材中への移動に立木注入法を適用した小林らの研究も処理時間の短縮をねらったもので、細菌類を含んだ液

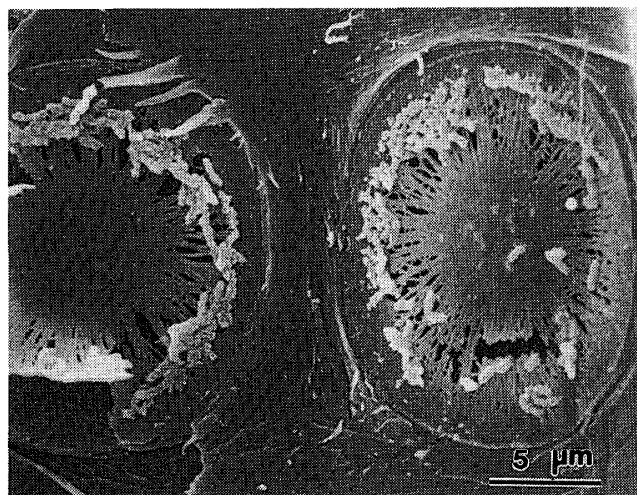


図8 水中貯木したスギ辺材のピットメンブレンにみられる
バクテリア²³⁾

を立木の根元から吸い上げさせ、その後伐採して放置した後、効果の発現を期待している²³⁾。

細菌類のうち木材の分解に関係するのは、主に真正細菌と放線菌であり、水中貯木材におけるピットの分解以外では経済的重要性に乏しかったため、木材保存の立場からはあまり研究の対象にはならなかった。しかし、近年、土中の細菌類による木材劣化が注目され、劣化形態の観察や菌株の分離実験が積極的に行われるようになってきた²⁸⁾。ピットの分解以外に、トンネリングバクテリアのように細胞壁の内腔側から穴を開け、それがしばしばリグニンが高密度で沈着している細胞間層にまで及んでいるような特徴的な細胞壁の分解様式が報告されている²⁹⁾。しかし、単離細菌の単独での木材分解力は一般的に弱く、また、人工培地による培養実験の成功例も乏しいことから細菌類による木材成分の分解についてはまだ十分解明されていない³⁰⁾。

(3) 酵素処理

微生物による分解を人工的に発展させようとして、各種の酵素処理も試みられてきた³¹⁻³⁵⁾。とくに、ペクチナーゼで処理するとトールスの消失、ヘミセルラーゼではトールスの部分的な分解が、セルラーゼではマルゴのミクロフィブリルの喪失と一部トールスが崩壊するのが認められる(図9)。もちろん、樹種によっても酵素作用の受けやすさに相違があり、前述の水中貯木の場合と同様マツ属のものは比較的分解されやすいが、それに比べてトウヒやツガのなかま、あるいはベイマツなどは酵素処理が困難であるとされている。

ペクチナーゼ処理でトールスが分解されるのは、先に述べたようにその部分がペクチン質に富んでいるため、蒸煮処理の後に酵素で処理するとさらに効率的であるといわれている。酵素処理はミクロ的にみると確かにメンブレンの分解に働いているが、効率性という点からは長い処理時間が要求される上、最適条件の設定が容易ではない。酵素を複合的には働かせたり、あるいは超音波を作用させて酵素の作用効果を向上させる試みも行われているが³⁴⁾、寸法の大きな試料の場合はより困難である。さらに、酵素処理が有効であるのは辺材だけであって、心材にはそのままでは効果が小さい。これは、上述したように心材化にともなってリグニンやポリフェノール類がトールスに沈着し、酵素の作用が阻害されるため、なにがしかの前処理を施さないと酵素の分解作用は発現されにくい。

このような生物的な助けを利用する手段は、学術面では興味の深いところであるが、現時点での実用化という観点からみると、壁孔部分を選択的かつ効率的に分解する“ピット・イーター”としての微生物が見い出されないかぎり、汎用技術として確立するのは困難といわざるを得ない。



図9 ペクチナーゼ処理により分解されたトールス

3. 2 化学的処理

従来、木材の注入性向上に化学的処理を用いる背景にある原理は、ピットに沈着している物質を抽出することと、化学的に分解しようということであろう。

心材部分で注入効率が悪くなる大きな要因は、ピットメンブレンへの心材成分の沈着であり、溶剤を用いてこれらを溶かし出す試みが行われてきた。しかしながら、溶剤が高価であること、処理に長い時間がかかるということから実用という面では可能性に乏しかった。

また、WPCの製造に際して、抽出成分や充填物質を取り除く方法として、木材をあらかじめ漂白剤を含んだpH10以上のカセイソーダ水溶液に常温で浸漬後、界面活性剤で処理し、さらに中和によってヤニ成分を除去したうえで、モノマーを注入して含浸率を向上させる方法、界面活性剤溶液で木材を煮沸して樹脂分を抽出除去する方法などが提案されている¹⁷⁾。

化学的に分解しようという試みは、亜塩素酸ソーダ、パルプ蒸解液、あるいはその他の酸や塩基を用いて試みられてきた。しかし、いずれも木材自身の劣化が付随して生じる結果になっている。したがって、いかに木材の強度低下を抑えて、かつピットの部分だけを分解するかがポイントとなる。3.2%のオゾンを含む酸素ガスを、ベイスギ材に繰り返して加圧注入すると、メンブレンや細胞内腔に付着した充填物質が除去され、浸透性が向上したと報告されている³⁶⁾。しかし、この処理においても細胞壁そのものの劣化がかなり激しいものになってしまう。

そのほか、酸性下で鉄を触媒にして酸化反応をおこさせ、メンブレンを分解しようという試みや³⁷⁾、加熱したアンモニウムオキサレートでペクチンを分解除去する実験が報告されている³⁸⁾。

3. 3 物理的処理

(1) 圧縮処理

前節で述べた浸透性の改良は、充填物質を分解除去し壁孔閉鎖を解放しようとするものであるが、一方では、メンブレンを物理的に破壊することによって、浸透性を改良する試みもある。

例えば、生材を厚さの約10%程度圧縮し、乾燥後注入すると、圧縮しない材の2～3倍の吸収量がみられたといわれている³⁹⁾。その理由は、トールスに圧縮によって亀裂が入り、通導しやすくなったためと推定されている。こういった取り組みは、もともと木材乾燥を容易に行うための前処理法として検討されてきたもので、カバの生材を一定の間隔にセットしたローラーの間を通して変形を与えると、高温の乾燥スケジュールでも乾燥障害なしに仕上げることもできたという報告もみられる。この理由は、道管の壁孔

壁に無数のスリットが形成されたため、水の通導性が向上したことに起因するという。しかし、15%の変形を付与した場合でも、効果の出現は樹種によっても異なり、アマビリスモミやベイツガ、ベイマツ（コーストタイプ）では有効であったが、ロジポールバインやホワイトスプルス、ベイマツ（内陸タイプ）ではそれ程でもなかったとされている⁴⁰⁾。

ところで、ロータリー単板が各種の処理に際して、きわめて浸透させやすいことはしばしば体験されるところであるが、逆にこれを利用して人為的に通導経路となる“裏割れ”を作ることも考えられても良いであろう。例えば、新しい木質材料のエLEMENTとして注目されているゼファーの製造方法も、この観点から取り上げて興味あると考えられる。しかし、細胞壁に著しい亀裂を発生させ、注入効率を向上させ注入ムラを改善する方法は、木材の強度低下を引き起こすため、用途的には限定されたものにならざるを得ない。

最近、飯田らは、マイクロ波加熱した木材の圧縮変形を利用した液体注入法を考案している^{41,42)}。すなわち、飽水材をサランラップで包み、マイクロ波をそれに照射して加熱し、繊維軸に横方向から圧縮変形を与えて固定し、ただちに注入液中に漬けて圧縮固定を解除し液の注入を促進させた（図10）。注入性が向上した理由は、液中での変形復元力と材内温度の急上昇による水分移動にともなう液の吸引力、ならびに壁孔部分のマイクロクラックの発生であると考察している。水分非定常下の加熱では、永久変形なしに大きな変形を与えることができ、これがこの手法の特徴ある点であろう。図11は、長さの異なるカラマツの生材をマイクロ波で加熱し、40%の圧縮率まで横圧縮した後、そのまま乾燥し変形を固定したセット試験体を、一方は水中にそのまま漬けて吸水させ、他方は通常の方法で加圧注入した結果である。とくに加圧注入の場合、無処理木材の約3倍近くの注入量が達成され、しかも試験体が長くなってもほぼその値は変わらなかった。これは、木口からだけでなく側面からの浸透も促進された可能性を示すものと考えられ、注目される点である。

なお、横圧縮に際して、ピットの部分が選択的に破壊されるのは、この部分でセルロース・マイクロフィブリルが特異な配向をしていることに起因し、メンブレンおよび壁孔縁周辺は細胞壁の変異点として破壊

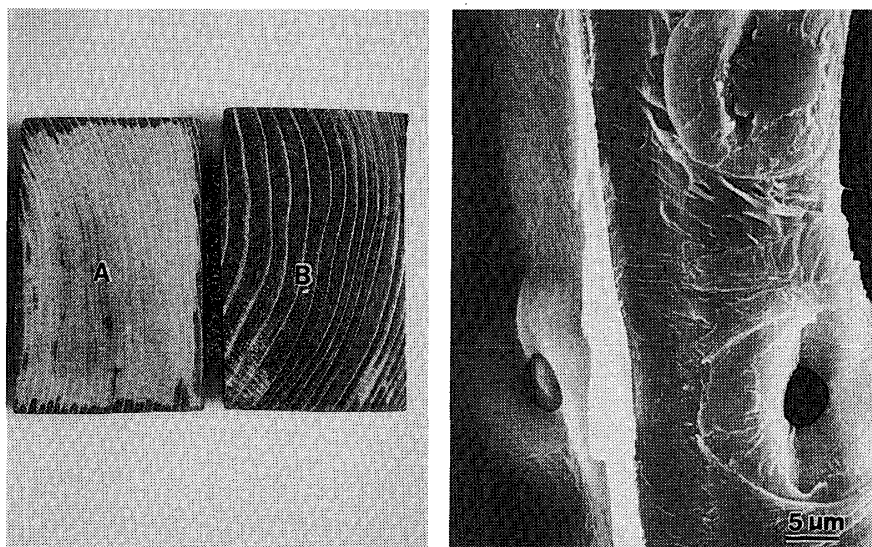
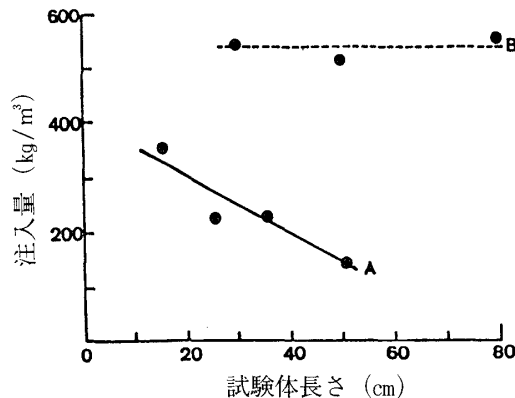


図10 左：無処理（A）および圧縮処理（B）の後に染色液を加圧注入した長さ1 m材の中央付近の木口面のようす（スギ心材）

右：圧縮処理後に水を注入して回復させたスギ心材の壁孔部分（メンブレンの破壊のようす）⁴³⁾

図11 圧縮処理したカラマツ心材への注入量⁴²⁾

(A : 自由浸透, B : 加圧注入)

現象にかかわるためと考えられている。しかし、ミクロな破壊様式は負荷時の温度条件によっても影響を受け、一定ではないという見解もある⁴⁴⁾。

(2) 凍結処理

寒冷地の場合、生きている樹木あるいは土場に置かれた木材は、しばしば凍結現象を生じて凍裂することがある。乾燥の前処理法として人為的に凍結処理を施してみると、その後の乾燥工程において木材の収縮や落ち込みが減少すると指摘されている⁴⁵⁾。木材中の水分を凍結させると、氷に変化することによる体積膨張と結晶成長によって細胞壁が物理的影響を受けるということであろう。

ベイツガ材を凍結と融解の繰り返し状態に置くと、壁孔閉鎖したトールスが緩んだり、トールスが壁孔口から移動したようすが観察されたという⁴⁶⁾。細胞壁が変形作用を受ける原因は、細胞内腔における氷の形成であり、凍結温度が低いほどかつ繰り返しサイクルが多いほどその作用は大きいと考察されている。もちろん処理前の木材含水率は高いほど効果的であるが、この報告では顕著な影響は木口からそれほど内部にまでは及ばなかったとしている。

(3) 熱および蒸煮を利用した処理

150～200℃の雰囲気下で、高含水率の木材を加熱処理することにより、浸透性が改良されるという研究がある⁴⁷⁾。この報告によれば、丸太の辺材に近い心材では著しく透過性が改善されるが、樹心に近い心材ではその効果は認められなかったとしている。改良効果は、処理後半における材内での蒸気圧傾斜による道管内の樹脂様隔壁の軟化および破壊によるものと推定されている。

一方、蒸煮処理は、材温の上昇、高含水率域の脱水、含水率の均一化、多脂材からの脱脂などを目的に、乾燥効率を上げるために行われているが⁴⁸⁾、これが木材の浸透性向上の処理法としても有効なのは以前から指摘されてきた。蒸煮処理によって、放射柔組織の細胞壁が内部に落ち込み、その結果細胞間道が数多く形成され、浸透性向上に寄与したという報告もみられる⁴⁹⁾。沢辺は、耐圧容器内で100～150℃の雰囲気中でベイマツ、カラマツという難注入性木材の生材を蒸煮処理したところ、乾燥の促進と注入性の向上が認められたが、ある程度の変色や強度劣化は避けられなかったとしている⁵⁰⁾。

また、最近、スチームインジェクションが厚物ボードの製造に試みられ、ボード内部を短時間で高温にして接着製板する技術が開発されている。この高温蒸気噴射は、木材組成にも変化をもたらし、浸透性の向上にも寄与するのではということに関心が払われている。水蒸気処理による木材構成成分への影響は、リグニンおよびヘミセルロースの低分子化とセルロースからの分離と推定されている⁵¹⁾。生材をスチームングすると、乾燥速度が向上するといわれているが、これは壁孔閉鎖が減少するとともに、ある種の沈着成分も除去されるためと考えられている。しかし、一定の樹種のみ効果が現れるという報告もあり、また、

蒸煮温度、木材の初期含水率、比重などに支配されるところも大きいと考えられる。

加熱水蒸気処理によるピット部分の軟化と圧力差による破壊を利用して、浸透性の改善を目的として考案されたのが低圧水蒸気爆砕処理で、長時間加熱による材質劣化を抑制するために、加熱水蒸気による短時間の加熱の後、瞬間的に大気圧に戻し、その際の圧力差を壁孔破壊に繰り返し利用しようとしたものである。これらの処理法では、短時間で行えるほか、熱源として木材工業では常設のボイラーが利用できる長所や、薬剤注入と同一の圧力容器を共用できる可能性があるが、実大材では材内のばらつきに留意すべきであると指摘されている⁵²⁾。

以上述べてきた、浸透性向上のための生物的、化学的、物理的処理にかかわる因子を取りまとめて図12に示した。

3. 4 刺傷処理

(1) 従来型インサイジングの改良

一般的に繊維方向と他の方向の浸透性の比は100～10,000倍にも達する。したがって、浸透しやすい小さな木口面を人工的に木材の表面に作って浸透促進させるのも一つの手段であろう。この考え方から実用的に用いられているのが、インサイジング加工である。

従来のインサイジングは、円筒系のドラムにナイフ型あるいはノミ型の刃をセットし、このドラムを上と左右に取り付け、この中に角材を通して1㎡あたり3,000～5,000個の刺傷を、ちどり型あるいは並列に施すローラー型インサイジングである。また、丸太の加工用にはディスクタイプのインサイジング機械も開発されている。

インサイジングによる浸潤領域は、刃物の形状や圧入深さによって変化するが、幅6.5mm、厚さ1mmの刃物でロッジポールパイン材にインサイジングを行った場合は、一つの刃物あたり幅1.7mm、軸方向長さ20mmであったという。

刃型の改良や木材の繊維に対する刺傷方向を工夫することによって浸透長が改善されることから、インサイジングの密度分布を低下させるなどの検討も行われている。刃物を用いる従来型のインサイジングに再検討を加え、繊維方向に刃物を傾斜させてインサイジングを行う方法は、軸方向に一定の角度で傾斜させて刺傷し、一つの刃物が切断する繊維切断幅を広げて浸透効果を向上させようという方法である。中村の研究によると、刃物の圧入力や薬液の浸透効果を考慮した場合、刃先の傾斜角は30～45度が最適であるとしている⁵³⁾。送材方式や刃物の特性など検討すべき課題は残されているが、強度と表面性状の低下を抑

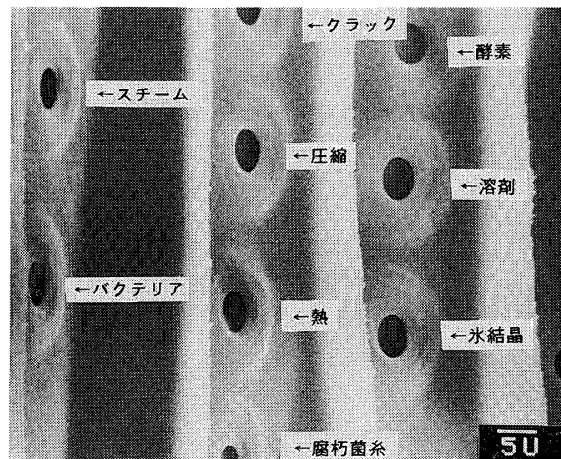


図12 ピット攻撃の戦略

えられれば実用化の待たれる手法であろう。

しかし、従来型のインサイジング方法は、比較的堅牢で安価である半面、木材表面にかなり明瞭な刺傷の跡がつき、外観的にもまた強度低下への配慮からも新しい改良方式の開発が望まれてきた⁵⁴⁾。

(2) 針式インサイジング

インサイジングの新しい手法として、刺針インサイジングやレーザ光インサイジング等の技術開発が、難注入材であるスプルースなどの蓄積の大きいカナダで研究が進められ、その後同様な問題を抱えるヨーロッパ諸国やわが国でも関心が払われてきた⁵⁵⁾。試みられている刺針インサイジングは、直径0.6mm位の針を用い、1 m²あたり10,000~30,000の密度で刺針を施したもので、外観的にはほとんど目立たない。

直径0.68mmの針をスプルース材に深さ9.5mmまで差し込み、CCA 防腐剤を加圧注入した場合の浸潤領域は、材表面から9mmの位置で幅2.5mm、軸方向14mmであった。浸透領域と組織破壊度の比較を顕微鏡的に行うと、刃物インサイジングに比べ刺針では、強度低下を低く抑えてかつ満足すべき浸潤度が得られたと報告されている⁵⁶⁾。現在実用化に向けて機械装置の開発が進められ、針の堅牢性、刺針機構(例えば、1本ずつ独立した針を使用し、節などに当たった場合は逃げられる構造にするなど)、材の送り速度、価格などの点について検討が加えられている。

(3) レーザインサイジング

レーザ光インサイジングの研究は、1981年スイスで始まったが、その後カナダで炭酸ガスレーザ装置を用いた研究が進められた^{57,58)}。含水率12%のベイマツで、10mm穿孔するのに必要なレーザ照射条件は125W-0.03秒、42mm材を打ち抜くには250W-0.8秒のエネルギー・照射パルス条件が必要という結果が報告されている。また、1,300W レーザを用いた別の研究では、15mm穿孔するのには0.008~0.01秒で十分であり、この際の木材表面の傷の大きさは直径0.8mm程度であるという。

レーザ光を用いた穿孔では投射されるシングルビームによるため、それに適した木材表面での刺傷パターンが工夫されている。例えば、一定方向に供試材を送りながら、ジグザグパターンになるよう材幅の半分ずつビーム照射して、浸潤領域としては全面を覆うよう考案されたパターンである⁵⁷⁾。

わが国でも東京農工大学の服部らが精力的に研究を進めており、木材(ベイツガ、ベイマツ)に照射する実験では、20" レンズの焦点位置の条件で、1,700W-0.2秒照射で直径3.5mmで深さ100mmの貫通穴が、320W-1秒照射で直径1.5mmで深さ50mmの穴が開いたとしている。また、かれらの研究によると、横断面でみた繊維方向の浸潤長は、機械インサイジングの場合と同程度かそれ以上であったとしている⁵⁹⁾。ただ、通常の加圧注入を行った場合でも、繊維に直角方向では数ミリにしか達しないため、穴自身の大きさも浸潤幅に大きく影響すると指摘している(図13)。

先の Kropf の研究においては、集成材用のラミナの側面に深さ15mmの穴を開けても、曲げ強度の低下はラミナの段階で15~20%、集成後では5~10%にとどまるとしている。一方、服部らの部分圧縮強度試験の結果においては、インサイジング密度が4万個/m²を超えると強度低下が明らかに認められ、インサイジング面に加圧するより側面に力がかかる方がやや強度低下が大きかったと報告している⁵⁹⁾。

レーザインサイジングの最大の特徴は、機械インサイジングに比べて穴の直径の50倍程度と、はるかに深くインサイジングできる点にあるが、材料表面に茶褐色のこげ跡ができ切削しても消えないため、表面の美観が問われる用途においては、部材の見付け面以外に加工するなどの工夫が必要であろう。また、機械の物理的損傷が少なく、非接触で穿孔できることも特徴であるが、このことから機械インサイジングが困難な丸太の加工に適用され十分な薬剤浸透性も達成されている⁶⁰⁾。

現在、服部らはレーザインサイジングを通常の防腐薬剤の注入に応用する以外に、アセチル化やホルマール化などの液相あるいは気相の化学修飾処理に展開したり、さらには、部材の表面層など限られた箇所への樹脂注入などへ試みている⁶¹⁾。

(4) その他

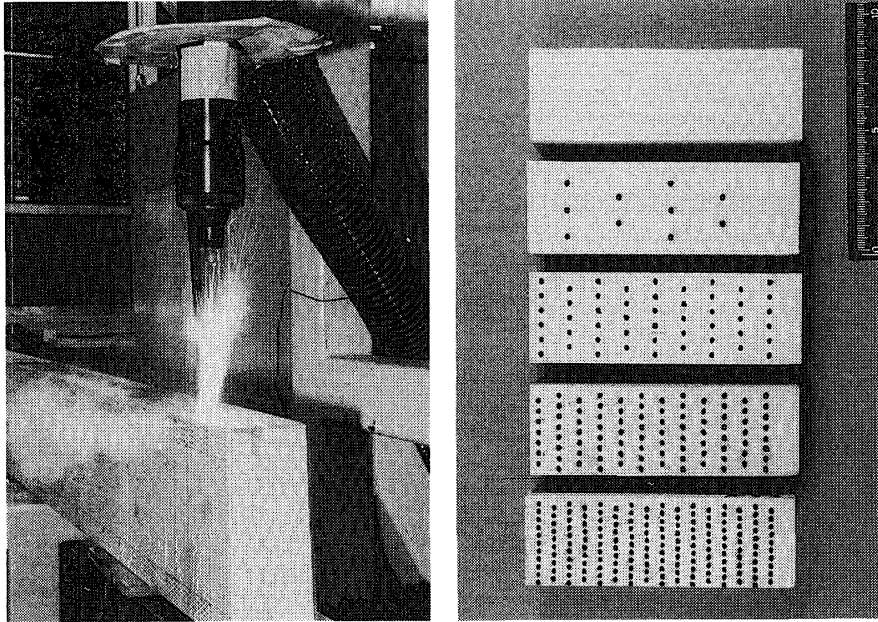


図13 レーザによるインサイジング状況(左：出力1,500W,パルス幅400ms)と
穴密度を変えたインサイジング例(右)(服部順昭氏提供)

上述した以外の方法としては、木質材料の切断など一部の木材加工にすでに応用されている高圧水流による切断技術をインサイジングに利用しようとする、ウォーター・ジェット・インサイジングがある。水の代わりに注入しようとする薬液を用いれば、木材表面に細かい傷をつけて同時に薬液注入ができる可能性がある^{62,63)}。この方法が成功すると、密閉タンクは必要とせず、連続的に処理ができるほか、木材の一部だけに薬剤を注入することも可能であるなど他の方法にはない利点を有している。この高圧噴射インサイジングは、まだ実験的段階であるが、材表面の損傷を防ぐため、金属ディスクを通したり、あるいは木材を防腐剤の液中に沈めて噴射することによりかなりの浸潤度が得られるともいわれている。しかし樹種による影響や圧力条件などまだ検討の余地が多い。

また、井上らは、木材の方向によって浸透性が著しく異なることを利用して、15cmのインターバルで所定深さに溝を加工し、表面から一定深さだけ水を注入して希望の水分傾斜を与え、木材表面層のみを圧密化することに成功している⁶⁴⁾。これなどは、木材の浸透現象をうまく使ったユニークな発想であろう。

4. 処理エレメントの矮小化

薬液の注入処理に際し、処理対象となる木材の寸法を小さくすることは、上述の各種技術とは発想を全く異にするものの、目的とするところにおいて共通する点がある。すなわち、寸法の小さいエレメントを処理対象にする場合、処理液の注入や反応後の液の回収が容易であり、かつ反応を均一に行うことができる。また、化学処理においては反応の前後で木材を乾燥することが多いが、エレメントが小さいとこれもまた容易であり、さらに含浸・処理・乾燥工程を連続したシステムに組むことが可能となる⁶⁵⁾。

エレメントを小さくして処理を行い、性能を付与する手段が最大に適用できるのは木質材料であろう。最近、大断面集成材が大型建造物や橋梁の構造部材として使用されることが増えてきたが、高い耐久性を与えるため内部まで防腐処理する必要がある場合、あらかじめラミナに薬剤を含浸処理しておき積層することが行われる(図14)。集成材のラミナでも厚さ的に十分な含浸ができない場合はインサイジングが採用されるが、エレメントの厚さがより薄くなったLVLの単板では含浸処理が容易となる。単板の場合は裏割

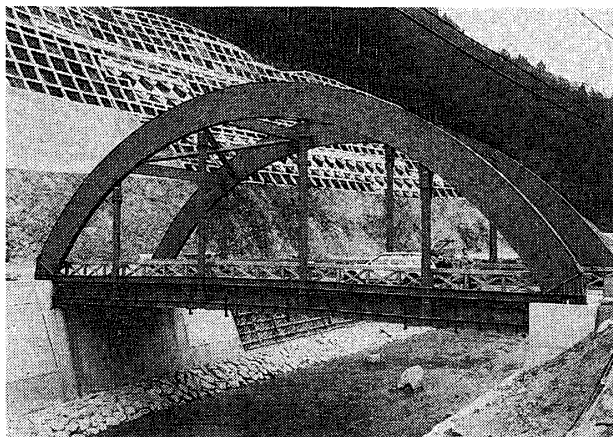


図14 防腐剤(AAC)を加圧注入したヒノキラミナを積層した集成材をアーチ材に用いた木造一等橋(奈良県黒滝村、栗飯戸橋、宮武 敦氏提供)

れが液体の浸透をさらに助長することになる。

しかし、エレメントの処理で留意しなければならないのは、含浸した薬剤のその後の接着性への影響である。一般的に有機系の薬剤に比べて無機系のそれは接着阻害を引き起こすことが多いといわれている⁶⁶⁾。

パーティクルやファイバーなど、エレメントの寸法がより小さくなれば、浸透はさらに容易になる。図15は、梶田により提案された低分子フェノール樹脂を含浸して、耐水強度と寸法安定性を向上させ、かつ生物劣化にも抵抗性を備えた、高性能パーティクルボードを製造する新しいシステムを示したものである⁶⁷⁾。Aはパーティクルの樹脂水溶液中への浸漬処理、Bはスプレーによる吹き付け処理、Cは接着剤中に低分子量の樹脂を混合して一緒に噴霧する処理である。Cはいわば防腐薬剤の接着剤混合法と対比できる方法で、含浸用樹脂だけ木材中へ浸透させようとするものである。いずれの方法によっても、高い性能がボードに付与できたとしている。

5. 注入方法

木材への液体注入性向上において、もう一つ重要なのは注入方法の工夫であろう。この総説の主旨が浸透性向上のための木材の前処理技術にあるため、注入方法については概略にとどめるが、主に防腐・防虫に関連する分野で行われてきた技術を中心にして述べていくことにする。

従来の加圧注入法は、いわゆる古典的方式であるベセル、ルーピング、ローリーという減圧、加圧条件の組み合わせによって分類される注入法を継承して適用し、処理薬剤の種類、処理木材の用途、樹種によって使い分けが行われてきている。しかし、処理時間の短縮や処理性あるいは薬剤の均一な浸透という点では改善が求められている。

改良型注入方法の一つである複式真空処理法は、真空にして木材に薬液を十分吸収させた後、薬液を戻し、さらにその後再び真空にして過剰の液を木材から回収する方法で、吸収量を調節することができる⁶⁸⁾。

乾式処理(溶媒回収処理法)においては、薬剤を含んだ非水系の溶媒が木材中に注入されるが、次の段階として溶媒のみ回収される。このため処理後の乾燥工程が省け、したがって水分移動に伴う寸法変化が引き起こされることがなく、最終製品での処理が可能となるばかりでなく、木材への浸透性もかなり良い。

従来検討されてきた使用溶剤別のタイプには、液化ガスによる方法とメチレンクロライドを用いるものがある。前者はセロン法あるいはドリロン法といわれるもので、通常の温度、圧力条件下ではガス状であるが、加圧下では液状になる液化ガスをキャリアーとして用いる。メチレンクロライド等を使用溶媒とす

今村：木材への液体注入

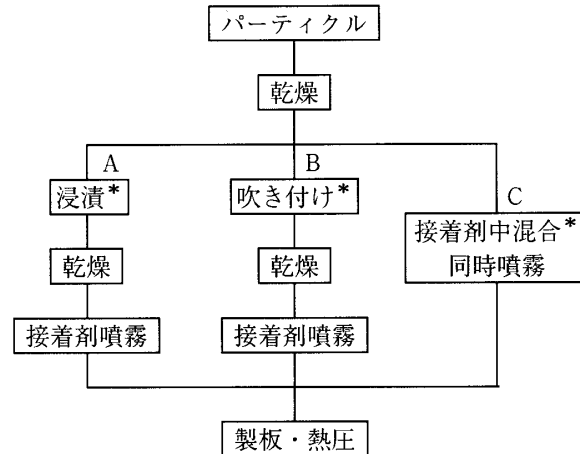


図15 フェノール樹脂処理パーティクルボードの製造工程スキーム⁶⁷⁾
(*は低分子樹脂の含浸工程)

る方法はクリーン法ともいわれ、加圧して防腐剤を含んだ溶媒を木材中に注入した後、蒸気あるいは加熱空気を吹き込んで溶媒を回収する方法である。

わが国では、昭和57年に初めての処理装置が完成し、その後実用レベルでの工場生産が開始されている⁶⁹⁾。木材は気乾状態あるいは含水率を40%以下にして注薬缶に収容され、注入は従来の方法とおなじで、通常減圧で行うが必要があれば加圧を併用する。溶媒の回収は、凝縮法、圧縮法、活性炭素吸着法などの手法で行われる。この処理に用いられる薬剤は特に限定されるものでなく、使用溶媒との相溶性と目的に合わせて選択される。また、溶媒は、毒性が低いこと、薬剤注入後の回収率が高いこと、薬剤を所定量溶解できること、引火・燃焼性がきわめて低いこと等の条件を満たす必要がある。かつて使用されたフロンはコントロールしやすい溶媒であるが、オゾンの破壊作用があるため使用には問題がある。それに代わり、北海道林産試験場等では塩素あるいはフッ素系溶媒であるトリクロロエタン、トリクロロモノフルオロメタン等が検討されたことがある⁷⁰⁾。

加減圧交替法、OSPあるいはOPMと呼ばれるこの方法は、加圧と減圧を交互に繰り返すことによって、生材でも乾燥材でも内部深くまで処理液を浸透させようという方法である。すなわち、常圧でリテンションタイムをとらないのがこの方法の特徴で、加圧から減圧、減圧から加圧への操作を数回あるいは数百回繰り返す(図16)。また、ニュージーランドでは、加圧と大気圧とのサイクル繰り返し法を開発し、APMと呼んでいる。

いずれにせよ、この方法の利点は、難注入性で断面の大きな木材の処理を可能にするという点よりむしろ、生材の処理ができるということにあるが、スプルースへのCCA防腐剤の注入においては、最適な処理性を得る木材含水率は100~120%であったという⁷²⁾。

最近、加減圧交替法による注入処理に、高圧力を作用させる試みが行われている。すなわち、通常の加圧注入では10kg/cm²以上の力をかけると、木部組織にコラップスが生じることが多いが、サイクル毎に圧力を上昇させたり、高圧力でも単位時間あたりのサイクル数をふやして、コラップスを防いでかつ注水量を増加させることができたと報告されている⁷³⁾。

ところで本来、樹木における樹液の蒸散量は莫大な量で、夏では1日に数百リットル以上の樹液が根から葉へ移動するといわれている。この現象を利用して、伐採直後の丸太の元口にキャップを固着して薬液を注入する樹液交替法は前世紀から行われてきた。いわゆるブッシュリー法である。長い丸太の処理が可能な方法であるが、キャップの装填に手間を要したり、注入に時間がかかりすぎるのが欠点であった。最

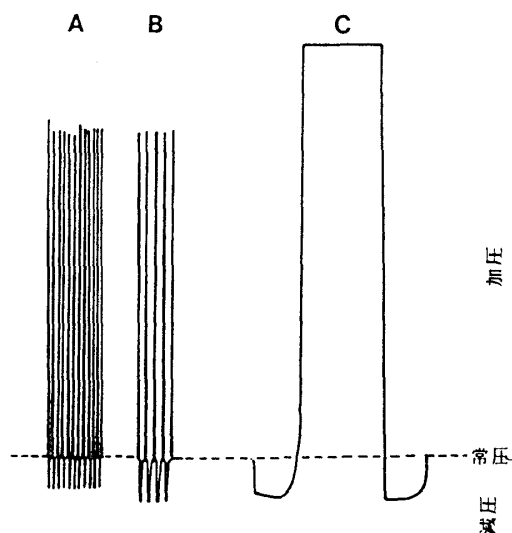


図16 OPM における圧力チャート⁷¹⁾
(減圧加圧の保持時間が0秒 (A), 3秒 (B)
および通常のベセル法 (C))

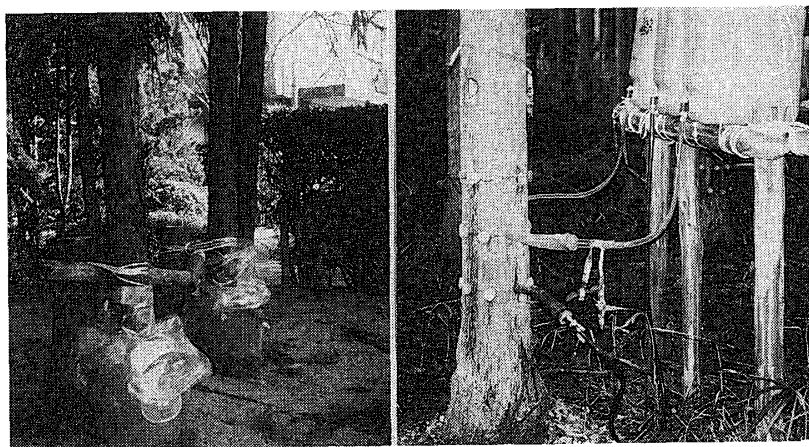


図17 元口浸せき法 (左) ならびに穿孔法 (右) による立木注入のようす
(飯田生穂氏提供)

近, 立木注入が染色を目的に熱心に取り組まれている⁷⁴⁾。この場合, 樹種によって染色される領域あるいはパターンが特異的であり, 針葉樹は大体辺材部のみが染色されるが, 広葉樹では辺材部だけ染まるものや, 辺材部だけでなく心材部も染色されるもの, 縞状になるものなど変化に富んでおり, 工芸材料として関心がもたれている。

6. おわりに

木材の複合化処理に付随して必要な工程となる含浸処理に関連して, 浸透経路となるピットの構造と浸透性向上に試みられている手法を前処理技術を中心に概観してきた。もちろん, すべての方策について拾いあげたものではなく, ここで言及していないものの中には, 今後の技術開発に有力な可能性を秘めているものもあろう。

また, 浸透促進剤の添加など注入剤の修飾技術や含浸度評価技術もこれに関連したものとして重要にな

ろう。特に後者は、供試木材の表面からどの程度内部まで入っているかというマクロな評価と、細胞あるいは細胞壁の段階での分布を分析するミクロな評価とに分かれるが、処理レベルの設定と製品の品質管理の上ばかりでなく、性能発現のしくみの面からも大切な点である。

浸透や注入の問題は、木材研究の古くて新しい代表的な課題であり、複合化処理の技術開発にはきわめてかかわりの深い命題である。それぞれの研究の立場からの積極的な取り組みが行われ、画期的な進歩が達成できるよう期待したい。

文 献

- 1) “木材保存学入門” 一社日本木材保存協会編, 1992年より抜粋
- 2) 原田 浩, 今村祐嗣: 電子顕微鏡, 13, 41 (1978)
- 3) Krahmer, R.L. and Côté, W.A.Jr.: *Tappi*, 46(1), 42 (1963)
- 4) 大越 誠: 京都大学学位論文 (1982)
- 5) Thomas, R.J.: *Wood & Fiber*, 1, 110 (1969)
- 6) 小林好紀: 京都大学学位論文 (1986)
- 7) Jinxing, L.: *IAWA Bulletin*, 10, 53 (1989)
- 8) Thomas, R.J. and Kringstad, K.P.: *Holzforsch.*, 25, 143 (1971)
- 9) Imamura, Y. and Harada, H.: *Wood Sci. Technol.*, 7, 189 (1973)
- 10) Imamura, Y., Harada, H. and Saiki, H.: *Wood Sci. Technol.*, 8, 243 (1974)
- 11) Panek, E.: *For. Prod. J.*, 7(4), 124 (1957)
- 12) Schulz, G.: *For. Prod. J.*, 6(2), 77 (1956)
- 13) Erickson, H.D. and Defreitas, A.R.: *For. Prod. J.*, 21(4), 53 (1971)
- 14) Bauch, J. and Berndt, H.: *Wood Sci. Technol.*, 7, 6 (1973)
- 15) Nicholas, D.D.: *Amer. Chem. Soc. Sympo. Ser.*, No.43, 33 (1977)
- 16) Greaves, H. and Barnacle, J.E.: *For. Prod. J.*, 20(8), 47 (1970)
- 17) 野橋健三: 木材工業, 42, 402 (1987)
- 18) Goulet, M.M. et al.: DEUB Univ. Laval, Note technique, No.2 (1968)
- 19) Unligil, H.H.: *For. Prod. J.*, 22(9), 92 (1972)
- 20) Liese, W. and Greaves, H.: In “Biological Transformation of Wood by Microorganisms”, ed. by W.Liese, p.74, 1975
- 21) Banks, W.B. and Dearling, T.B.: *Mater. und Organism.*, 8, 39 (1973)
- 22) 小林好紀, 今村祐嗣: 第40回日本木材学会大会要旨集, p.84 (1990)
- 23) Kobayashi, Y., Iida, I., Imamura, Y. and Watanabe, U.: IUFRO XX World Congress, S.5.04-06 Wood Drying Document, 1995
- 24) Ellwood, E.L. and Ecklund, B.A.: *For. Prod. J.*, 9(9), 283 (1959)
- 25) Karnop, G.: *Mater. und Organism.*, 7, 189 (1972)
- 26) Fogarty, W.M. and Ward, O.P.: *Wood Sci. Technol.*, 5, 6 (1971)
- 27) Greaves, H.: *Holzforsch.*, 24, 6 (1970)
- 28) 長島陽子, 福田清春, 原口隆英: 木材学会誌, 34, 1012 (1988)
- 29) 高橋旨象: 木材研究・資料, No.22, 19 (1986)
- 30) 鮫島正浩: 木材保存, 14, 64 (1988)
- 31) Nicholas, D.D. and Thomas, R.J.: *Proc. Amer. Wood-Preservers' Assoc.*, p.64, 1968
- 32) Johnson, B.R. and Gjovik, L.R.: *ibid.*, p.66, 1970
- 33) Meyer, R.W.: *Wood Sci.*, 6, 220 (1974)
- 34) 中戸莞二: 昭和59年度文部省科学研究費補助金成果報告書 (58480061) 1985
- 35) 大越 誠, 徳田 充, 佐道 健: 木材学会誌, 33, 347 (1987)
- 36) Lantican, D.M., Côté, W.A.Jr. and C.Skaar: *I & EC Prod. Res. Develop.*, 4(2), 66 (1965)
- 37) Emery, J.A. and Schroeder, H.A.: *Wood Sci. Technol.*, 8, 90 (1970)
- 38) Tschernitz, J.L.: *For. Prod. J.*, 23(3), 30 (1973)
- 39) Nicholas, D.D.: In “Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatment, Vol. 2”, Syracuse Univ. Press, p.325, 1973
- 40) Cooper, P.A.: *For. Prod. J.*, 23(7), 51 (1973)

- 41) 飯田生穂, 高山知香子, 宮川 修, 今村祐嗣: 木材学会誌, 38, 233 (1992)
- 42) 飯田生穂, 今村祐嗣, 柏 直樹, 中村嘉明: 木材保存, 18, 31 (1992)
- 43) Iida, I. and Imamura, Y.: *The Int. Res. Group on Wood Preserv.*, Document No. IRG/WP/93-40014 (1993)
- 44) Koran, Z.: *Tappi*, 50, 60 (1967)
- 45) Cooper, P.A., Erickson, R.W. and Haygreen, J.G.: *For. Prod. J.*, 20(1), 30 (1970)
- 46) Erickson, H.D. and Chen, Y.-H.: *Wood and Fiber*, 5, 312 (1974)
- 47) 金川 靖, 奥山 剛, 服部芳明: 木材学会誌, 34, 479 (1988)
- 48) 寺沢 真, 小林拓治郎: 木材工業, 29, 327 (1974)
- 49) Bamber, R.K. and Johnstone, R.S.: *J. Inst. Wood Sci.*, 4(3), 21 (1968)
- 50) 沢辺 攻: 日本木材学会生物劣化研究会シンポジウム要旨集, p.32, 1993
- 51) 棚橋光彦: 日本木材学会レオロジー講演会要旨集, p.15, 1990
- 52) 金川 靖: 木材工業, 48, 212 (1993)
- 53) 中村嘉明: 木材学会誌, 34, 618 (1988)
- 54) 柏崎清作: 木材保存, 14, 71 (1988)
- 55) Ruddick, J.N.R.: *Holz als Roh- und Werkst.*, 44, 109 (1986)
- 56) Keith, C.T. and Chauret, G.: *Wood and Fiber Sci.*, 20, 197 (1988)
- 57) Kropf, F.W.: *Incision Workshop-Proceedings*, Forintek, Vancouver, p.1, 1987
- 58) Ruddick, J.N.R.: *ibid*, p.23, 1987
- 59) 喜多山 繁: “レーザーサイジング法の開発”, 平成4年度文部省科学研究費補助金成果報告書 (02402049), 1993
- 60) 服部順昭, 安藤恵介, 喜多山 繁, 中村嘉明: 木材学会誌, 40, 1381 (1994)
- 61) 安藤恵介ほか: 第40回日本木材学会年次大会要旨集, p.440 (1995)
- 62) Jewell, R.A. et al.: *Incision Workshop-Proceedings*, Forintek, Vancouver, p.15, 1987
- 63) Behr, E.A.: *J. Inst. Wood Sci.*, 5(5), 24 (1971)
- 64) Inoue, M., Norimoto, M., Otuka, Y. and T. Yamada: *Mokuzai Gakkaishi*, 36, 969 (1990)
- 65) 今村祐嗣: 木材工業, 44, 634 (1989)
- 66) 中村嘉明: 第8回日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集, p.40, 1990
- 67) 梶田 熙: 木材学会誌, 35, 406 (1989)
- 68) Van Acker J., Stevens, M. and Rustenburg, Gb.: *The Int. Res. Group on Wood Preserv.*, Document IRG/WP/3613 (1990)
- 69) 岩崎克己: 木材保存, 26, 60 (1985)
- 70) 土居修一ほか: “木製開口部材の防腐処理技術の開発”, 中企庁技術開発補助事業テキスト, 1987
- 71) 井上 衛: 木材保存, 16, 200 (1990)
- 72) Peek, R.D.: *The Int. Res. Group on Wood Preserv.*, Document No. IRG/WP/3449 (1987)
- 73) Hosli, J.P. and Ruddick, J.N.R.: *The Int. Res. Group on Wood Preserv.*, Document No. IRG/WP/3471 (1988)
- 74) 飯田生穂: 木材保存, 16, 30 (1990)