



Title	トドマツ水食い材の水分移動に関する研究：樹液成分と壁孔閉鎖
Author(s)	石井, 哲男; ISHII, Tetsuo; 深沢, 和三 他
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 44(4), 1277-1305
Issue Date	1987-08
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/21250">https://hdl.handle.net/2115/21250</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	44(4)_P1277-1305.pdf



## トドマツ水食い材の水分移動に関する研究

— 樹液成分と壁孔閉鎖 —

石井哲男\* 深沢和三\*

Sap Constituents and Pit Closures Connected with Water Penetration  
in the Wetwood of *Abies sachalinensis* Masters

By

Tetsuo ISHII\* and Kazumi FUKAZAWA\*

## 要 旨

トドマツの水食い材の発生プロセスの解明を目標として、有縁壁孔のSEM観察、材片と樹液の無機分析、樹液の有機成分の分析をおこなった。水食い材中には閉鎖の不完全な壁孔が見られたが、このような壁孔は心材中にも存在していた。水食い材を含む心材部内で水分量の多いところほど灰分量が多かった。この水分の増加に伴う灰分の増加の割合が圧搾によって得た樹液の灰分含量に一致した。圧搾樹液のTLCの分析の結果、心材と水食い材で液中の有機成分に差はなかった。これらの結果はトドマツの水食い材の水分が単なる雨水の浸入や細菌の活動によってもたらされたものではないことを示している。考えられる可能性として、浸透圧による辺材からの水分移動があげられる。分析の結果水分の移動を引き起こすような浸透圧の差が存在していることが推定されたが、具体的なメカニズムの解明は今後の検討にまたざるを得ない。

キーワード： トドマツ，水食い材，壁孔閉鎖，無機質，浸透圧。

## 目 次

1. 緒 言	1278
2. 供試木及び実験方法	1282
2-1 供試木	1282

1987年2月28日受理 Received February 28, 1987.

\* 北海道大学農学部林産学科木材理学講座

Laboratory of Wood Physics, Faculty of Agriculture, Hokkaido University.

2-2	灰分および金属元素の定量	1282
2-2-1	小試験片の灰分の分析	1282
2-2-2	圧搾樹液の無機質の分析	1283
2-3	圧搾樹液の溶存有機質の分析	1283
2-4	走査電子顕微鏡による有縁壁孔の観察	1284
3.	結 果	1285
3-1	灰分量及び金属イオンの分析	1285
3-2	樹液の有機組成	1290
3-3	有縁壁孔の閉鎖率	1291
4.	考 察	1293
4-1	無機成分	1293
4-2	樹液中の有機成分	1297
4-3	走査電子顕微鏡による観察	1298
4-4	水食い材形成のメカニズム	1299
5.	結 論	1301
	引用文献	1301
	Summary	1303
	Explanation of Photographs	1304
	Photographs	1305

## 1. 結 言

近年、トドマツ造林木の水食い材の多発が大きな問題となっている<sup>27,28,29)</sup>。水食い材とは、通常は辺材より低い含水率の心材を持つと考えられる樹種において、何らかの原因で心材中に生ずる高含水率の材部である<sup>19)</sup>。トドマツの水食い材は凍裂の原因となることが知られている<sup>17,20)</sup>。また水食い材は乾燥が遅く、乾燥ムラや乾燥割れが生じやすいために、人工乾燥には特別のプログラムを必要としコストがかさむことになる。さらに発達した水食い材には、立木の段階から無数の微小な割れがあり強度の低下がはなはだしいことから、水食い材の存在は軽視しえない欠点とみなされている。しかし、軽度の水食い材については、強度上大きな問題はないという報告もある<sup>27)</sup>。

このトドマツの水食い材の発生については、現象そのものの理解がまだ不十分であり水食い材発生の原因も、形成のメカニズムもいまだ明らかにされていない。トドマツなどにみられる水食い材に対し、ハルニレ、ヤチダモなどの心材のように常に高い含水率を持つ場合には多湿心材と呼ばれている<sup>49)</sup>。英語の wetwood はこの二つを区別せず一般に高い含水率を持つ心材に対して用いられている。

ハルニレの多湿心材やある種の wetwood はその樹種の心材の通常の状態であると考えられている<sup>18,34)</sup>。これに対して *Abies alba* の wetwood は乾いた心材に囲まれて存在し、その形成は心材形成とは独立したプロセスであると報告されている<sup>1)</sup>。ギリシャ産の雑種のモミ (*Abies cephalonica* × *Abies alba*) では辺材を除くすべてが wetwood だが、PASSIALIS と TSOUMIS<sup>32)</sup>

は、この樹種では水分の減少をとまなう心材形成に直ちに引き続いて辺材からの水の移動による水食い材形成がおこると述べている。

欧米では多くの樹種の wetwood が研究の対象となっているが、トドマツと同じ *Abies* に属する樹種には wetwood をもつものが多い。これらの wetwood の発生の原因についてはいくつかの説があり一致を見ていない。最初に wetwood の用語を用いた LAGERBERG<sup>24)</sup>や、カナダのケベック産の *Abies balsamea* の wetwood を研究した ETHERIDGE と MORIN<sup>8)</sup>は樹皮の外傷や節の不完全な癒合のために雨水が浸入したものとしている。BAUCH ら<sup>1)</sup>は *Abies alba* の wetwood において、多数の細菌と細菌の活動による発酵産物の蓄積を見いだしたが、これを雨水とともに節から入った細菌が水食い材の水分に助けられて繁殖したものと述べている。しかし、COUTTS と RISHBETH<sup>4)</sup>は grand fir の樹幹にせん孔して木材腐朽菌 *Fomes annosus* を接種することにより雨水の浸入なしに wetwood が生ずることを確かめた。

広葉樹のなかでは *Ulmus* や *Populus* に wetwood をもつものが多い。これらの樹種の wetwood は細菌の活動によって生ずるといわれている<sup>37,41)</sup>。*Salix*, *Ulmus*, *Populus* などの樹種で細菌の接種などにより人工的に wetwood が作られた<sup>3,5,6,38)</sup>。SCHINK と WARD<sup>36)</sup>はこのような広葉樹の wetwood と *Abies* の wetwood の外見の違いを、細菌が利用できる基質の違いや嫌気性細菌に影響を与える材の酸素透過性の差によるとしている。しかし WILCOX と SCHLINK<sup>47)</sup>による white fir の観察では大量の細菌の存在にもかかわらず、wetwood の発生への寄与を示す兆候はなかった。PASSIALIS と TSOUMIS<sup>32)</sup>の観察では wetwood 中に細菌の存在は認められなかった。COUTTS と RISHBETH<sup>4)</sup>は grand fir に塩化第二銀を注入して無菌的に wetwood をつくることに成功した。

また WORRALL と PARMETER<sup>48)</sup>は無機塩類の集積により増加した浸透圧を原動力として、white fir の心材中に辺材の水分が入りこみ wetwood を生ずるとし、その際の水の経路として放射柔細胞を想定している。

北村<sup>22)</sup>はトドマツの水食い材をその位置によって枝水食いと根水食いに分けているが、これは水食い材の過剰な水分を物理的なメカニズムによって外部から侵入したものとす LAGERBERG<sup>24)</sup>の見解に基づくものである。これに対し滝沢ら<sup>39)</sup>は水食い材を辺材の一部が心材中にとり残されたものとしている。また、石田<sup>18)</sup>は「一応、LAGERBERG と同様な理解に立っている」と述べている。このように水食い材の形成機構を巡って様々な説があり、これを解決していくためには可能な限り多くの知見を総合して検討していくことが必要である。

沢田<sup>33)</sup>はトドマツの水食い材の観察をおこない、胸高以上に発生するすべての水食い材が節につながっていることを確認した<sup>17,24)</sup>。木口面における水食い材の出現頻度は辺材の内縁から髓にいたる中間位置にもっとも高く、水食い材の発生領域と辺材の間には乾燥域が存在していた。グラブきした板の材面の観察によって、上下に長く伸びた水食い材の先端は辺材とはなれた位置で心材中に消えているのが確かめられた。沢田<sup>33)</sup>は BAUCH ら<sup>1)</sup>, ETHERIDGE と

MORIN<sup>8)</sup>の説に基づいて、水食い材の水分を節から侵入した雨水によるものとしているが、

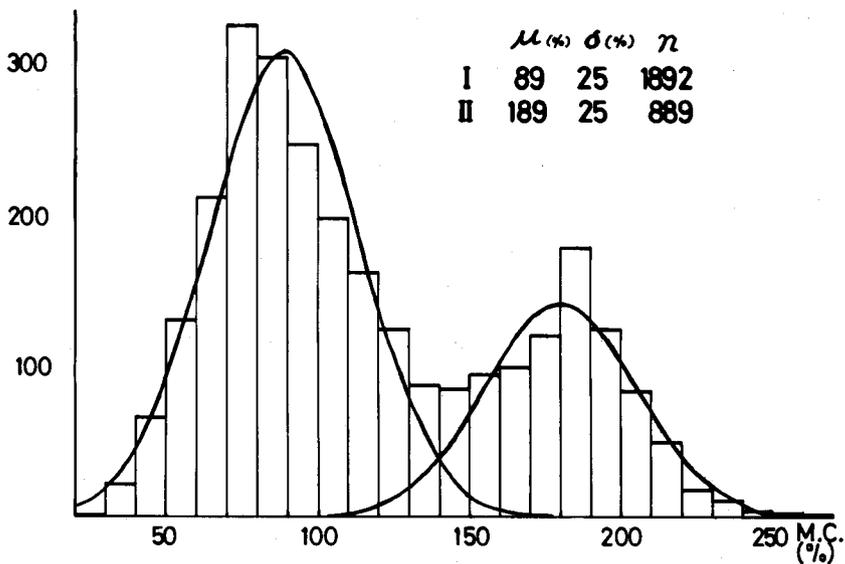


Fig. 1. Histogram of the moisture content of the wood blocks of Tomakomai sample tree.

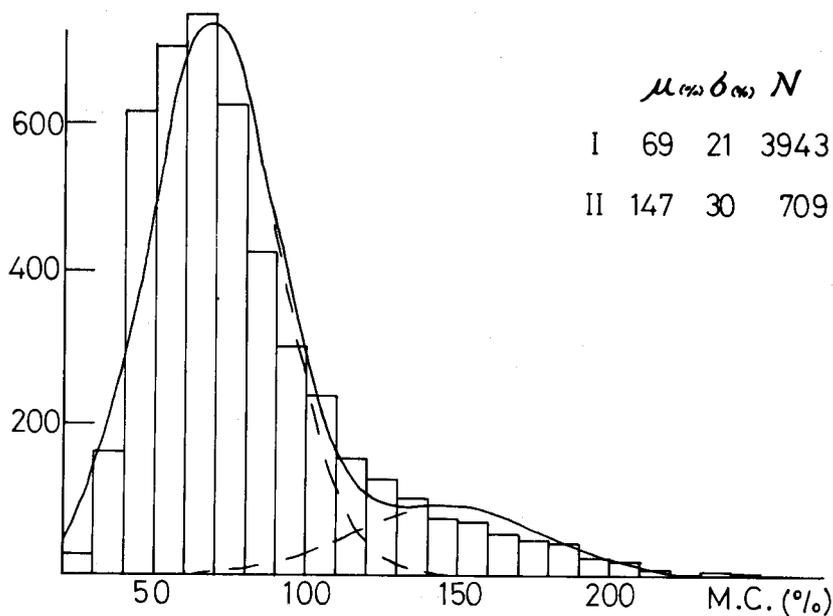


Fig. 2. Histogram of the moisture content of the wood blocks. (Quoted from ISHII, 1984)

BAUCHら<sup>1)</sup>, ETHERIDGEら<sup>8)</sup>が述べたような節の直下への水分の集中は認められず、むしろ上方に水分が偏る傾向すら認められた。

筆者の一人(石井)はこの沢田<sup>33)</sup>の研究を引き継ぎながら、トドマツの立木の樹幹内の含水率分布の調査を行った<sup>4)</sup>。この研究の結果、1—2 cm角程度の大きさの試験片で測定した心材部内の含水率は60—90%と130—180%の二ヶ所にピークを持つ分布を示していた。この二つの集団の境界は100—140%のところにあった(Figs. 1,2)。このことから、このサイズの試験片はほぼ120%程度の含水率を境に心材と水食い材の試験片に分けることが可能であると判断された。本研究の一部において、この知見に基づいて心材と水食い材の灰分含有量を比較している。

本研究においてはさらに組織学的な観察にくわえて、化学的な手法を導入することにより水食い材の形成機構の一端を解明することを目的とした。特に水食い材中に過剰に存在する水分に着目し、この水の起源を追求するために前述のものと同様の試験片によって無機成分の分析をおこなった。この結果をもとにWORRALLとPARMETER<sup>46)</sup>の述べた浸透ポテンシャル(浸透圧の差)による水分集積の可能性について検討した。さらに辺材と水食い材の樹液中の無機および有機成分を分析した。液中の有機物は、水の浸透ポテンシャルに寄与する他、水食い材形成過程における生物学的化学的な変化の痕跡をのこしていることが期待された。化合物の同定までは行えなかったが、得られた範囲の知見をSHIGOら<sup>35)</sup>, SCHINKら<sup>36)</sup>などの細菌説から予想される結果と比較、検討した。このようにして水分中の溶存成分の分布と組成によって水分集積の機構を推論するとともに、水分移動の通路となると考えられる仮道管間の有縁壁孔の走査電子顕微鏡による観察を行った。針葉樹の早材仮道管の有縁壁孔は心材化とともに閉鎖すると考えられているが<sup>1,31,39)</sup>、すべての壁孔が閉鎖した仮道管では新たな水の侵入は困難である。しかしトドマツの水食い材中の有縁壁孔についてあい反する報告があるため<sup>22,39)</sup>、実際に観察をおこなった上で壁孔閉鎖という組織構造上の条件が水分の集積に与える影響を検討した。また、観察の際認められた細菌についてもその意義を考察した。

この論文においては、未解決の問題を内包している正常心材という用語の使用を避けることにした。また、水食い材および多湿心材に対して乾燥心材とすることも考えられたが、木材の利用における乾燥との混同の恐れがあるため、立木中で一般的に正常と考えられている低含水率の心材をあえて単に心材という言葉で表現した。生活細胞を含んでいない材部を表すためには心材部の術語を用いた。

なお、SEM観察の御指導を得た大谷諄助教授、試料採取などでお世話になった今川一志助手をはじめ北海道大学農学部林産学科木材理学講座の諸氏、そして無機質の分析に御配慮と助言をして下さった北海道大学演習林の氏家雅男教授、TLCについての便宜や貴重な御意見をいただいた香山彊教授、寺沢実助教授に心より御礼申しあげる。

## 2. 供試木および実験方法

### 2-1. 供試木

研究に用いた供試木は、北海道大学苫小牧地方演習林と同桧山地方演習林産のトドマツ (*Abies sachalinensis* Masters) 各1本である。

苫小牧演習林138林班からは、伐採時の断面を見てわずかに水食い材が認められたものを選んで供試木とし、樹高12.0 m、胸高直径220 mm、枝下高2.3 m、年輪数42のトドマツ1本を玉切りした。この供試木は玉切り面では僅かにスポット状の水食い材を一つ含むだけであったが、樹幹基部から先端にかけて断続的に水食い材を含んでいた。丸太の断面において水食い材の占める割合は地上高により違っていたが、0%から30%程度であった。

現地はトドマツの一斉造林地が昭和56年の風害により大規模な被害を受けた場所で、当該供試木も、この風害の影響で昭和57年夏から傾斜し始め、11月に倒れるにいたったものである。翌58年3月2日に現地で長さ1 mの丸太にして凍結した状態のまま札幌に輸送、ポリエチレンの袋に密封して冷凍保管し、随時実験に使用した。

この供試木は、風倒木であるが、実際に木が倒れたのは、樹木の休眠期に入った後であり、その後は樹幹内が凍結した状態で冬を越しているため、材の組織や材中の樹液の状態には大きな影響はなかったものと推定される。また、玉切りの際の肉眼的観察でも含水率の低下はないものと思われた。

土壌は火山礫の未熟土(Im)、地形はほぼ平坦で、伐採時には立木もまばらであったが、風害以前にはうっ閉していたものと思われる。

また、昭和59年9月6日には桧山地方演習林4林班から、樹高11.9 m、胸高直径193 mm、枝下高4.9 m、年輪数26のトドマツ1本を採取した。

林況はうっ閉度10の一斉林で、杉人工林と林道の間幅約10 mの帯状に植栽されていたものの中から、凍裂などがなく外見状水食い材の少ないと思われるものを選んで供試木とした。地勢は山の中腹にあたる20°の傾斜地、土壌は褐色森林土(B<sub>b</sub>)で苫小牧に比べて肥沃であると思われる。

この供試木からは、現地で灰分分析用の試験片(地上高0.3 m)と圧搾樹液(地上高0.5 m)を採取した外、樹幹の地上高1 mから地上高2 mまでの部分を丸太にして札幌に輸送し、ポリエチレンの袋に密閉して冷凍庫に保管し、随時、試験片や圧搾樹液の試料に用いた。

本研究においては、心材と水食い材の比較を重視したため、心材の大半が水食い材で占められるような個体は避け、むしろ水食い材の発達程度の低いものを選んで供試木とした。これは、腐朽などの影響を避けて水食い材そのものの性質を検討しようとしたためでもある。

### 2-2. 灰分および金属元素の定量

#### 2-2-1. 小試験片の灰分の分析

苫小牧産トドマツ供試木の地上高 0.2 m, 2.8 m, 6.8 m および 8.2 m の 4 ヶ所よりおよそ 8 cm 厚の円板を採取した。各円板の木口面上に直径方向に沿って連続させて 1 × 1 cm の正方形を描き、これに沿って割断して、1 × 1 × 8 cm の試験片 (それぞれ 22 個, 17 個, 13 個, 11 個) を調製し含水率を測定した。各試験片は振動式ミルで完全に粉碎した後、電気炉 (田中科学製 Softemp-IIF) を用いて 600°C, 6 hrs で灰化し、放冷後秤量して灰分量 (無機物) を測定した。さらに灰分の一部を 1% の希塩酸に溶かして、原子吸光分光光度計 (SEIKO 製 SAS-721) により原子吸光法で K, Ca, Mg および Na 等を定量した。これから計算により試験片の絶乾重量あたりの灰分量および各金属量を求めた。

一方、松山産の供試木も、地上高 0.3 m および 1.4 m より得た円板について同様にして試験片を調製し灰分および金属含量を測定した。

### 2-2-2. 圧搾樹液の無機質の分析

松山供試木の高さ 0.5 m および 5.5 m の部位について、伐採後に円板をナタで 5 cm 角程度に割断し、万力を用いてこの材片を機械的に圧搾し辺材および水食い材部から樹液を採取した。このさい心材の材片についても圧搾を試みたが、この方法では心材からの樹液を得ることはできなかった。

この樹液を札幌に持ち帰って、pH を測定したのち徐々に加熱し水分がほぼなくなってから 105°C で完全に乾燥させてから固形分量を測定、さらに灰化して秤量した。原子吸光法による測定も同様に行って、樹液の重量当りの灰分量および金属量を算出した。地上高 1.4 m の円板についても試験片を調製した残りの材から樹液を採取して同様に分析した。また、地上高 2.2 m からも樹液を採取した。

### 2-3. 圧搾樹液の溶存有機質の分析

苫小牧供試木の地上高 2.2 m から、辺材および水食い材のブロックを割り取り、アムスラ一型強度試験機を転用して圧搾し樹液を採取した。この圧搾樹液をロータリーエバポレーターを用いて 40—50°C で減圧濃縮した。得られた濃縮液を下記条件で薄層クロマトグラフィー (TLC) によって展開した。

同じく地上高 4.8 m から、辺材、心材および水食い材のブロックを、圧縮断面が約 20 cm<sup>2</sup> になるように調製し、同様にして加重 5 t まで圧搾した。辺材および水食い材では加重約 1 t から、心材では 3—4 t から樹液の浸出が観察された。圧搾した材片の平均含水率は、辺材、心材、水食い材でそれぞれ 202%, 79%, 141% で、圧搾した残渣ではそれぞれ 51%, 48%, 58% であった。水食い材で他より残渣の水分が多いのは節の影響と思われ、従ってこの方法では約 50% を越えて存在する水分が採集可能であると考えられる。なお目安ではあるが、最終的な圧縮加重は 250 kg/cm<sup>2</sup> (5 t/20 cm<sup>2</sup>) であったと考えられる。

このようにして得た圧搾樹液を 40—45°C で、ロータリーエバポレーターで減圧濃縮した。この際留去の能率化のため共沸溶媒としてエタノールを加えながら濃縮をおこなった。辺材お

よび水食い材から得た濃縮液の一部(約20 ml)を105°Cで乾固して、放冷、秤量した後、60°Cで灰化した。残りの試料はTLCに用いた。確認のため、この試料はそれぞれの展開溶媒について2度ずつ展開した。

TLCは、10×20 cmまたは5×20 cmのガラス板にワコーゲルB 10を25 μmの厚さに作層し加熱活性化して用いた。使用した展開溶媒は、クロロホルム-酢酸-水(7:6:1, v/v)、トルエン-ギ酸-ギ酸エチル(5:1:4, v/v, SG-III)、アセトン-酢酸エチル-水(10:10:1, v/v, AEaW)の3種である。展開は、スポットの位置から溶媒の先端までが約10 cmをめどにしておこない、実際の展開時間は30分から2時間であった。

発色のため糖分析用の溶媒で展開したものには、バニリンの酢酸飽和溶液と50%硫酸との等量混合液を吹きつけ、105°Cで加熱した。SG-IIIおよびAEaWで展開したものは、ジアゾスルファニル酸(DSA)を10%炭酸ナトリウム水溶液に溶いて吹きつけ、色を見た後、硫酸を吹きつけて105°Cで加熱した。

#### 2-4. 走査電子顕微鏡による有縁壁孔の観察

苫小牧産供試木の地上高3.9 m付近の部位から2枚の円板を採取し、木口面における水食い材の分布をスケッチした後、割断して、辺材、心材、水食い材の試験片を調製した。試料中の水の溶媒置換を充分に行うために、試験片の大きさは柎目の断面を5-7 mm角程度にとどめた。この際、凍結時の材色によって心材と水食い材を区別したが、色が濃く見える部分は100-150%以上の含水率を持つことを確認している<sup>14)</sup>。これを直ちに50%エタノール中に浸漬、24時間ごとに順次70%、90%、100%のエタノールと交換し、液を交換しながら100%エタノール中で7日間おいて、試料中の水分が完全にエタノールと置換した後、空气中で乾燥させた。

このような溶媒置換法による乾燥は、乾燥過程での表面張力による試料の破壊や変形を大幅に軽減できることが知られており、木材の有縁壁孔の観察においても有効性が確かめられている<sup>9,40)</sup>。

さらにカミソリで厚さ0.5-1 mmに割断して、柎目の割断面を観察面とし、電子顕微鏡用の試料台に電導性塗料を用いて固定、真空中で炭素と金による二重蒸着をおこなった。蒸着には高真空蒸着装置(日本電子製JEE-5 B)を使用した。観察は走査電子顕微鏡(日本電子製JSM-35 CF II)を使用し、加速電圧15 kVで、試料を電子線に対して70-90°の範囲で傾けておこなった。観察は主に早材仮道管の有縁壁孔対についておこない、とくにこれらの壁孔壁の閉鎖、不閉鎖に注目した。

観察結果の数値化を目的として、試料から適宜選んだ領域について壁孔壁の閉鎖、不閉鎖を判断できる程度の倍率(印画紙上で750倍)で撮影し、連続写真を作成した。

なお、予備実験として同じ供試木の地上高1.8 mの部位から得た試料を、自然乾燥、アルコール置換、アセトン置換、臨界点乾燥によって乾燥させて観察した。

## 3. 結 果

## 3-1. 灰分量および金属イオンの分析

含水率はいずれも辺材で140—190%、心材部で40—190%であった。石井<sup>14)</sup>の研究結果に基づき心材部において120%以上の含水率を持つ試験片を水食い材とした。

苫小牧の供試木では、地上から高いほど灰分量が多かった。すなわち、地上高2.8 m以上から得た試料では、水食い材の灰分含量が最も高く、心材の灰分含量がこれに次ぎ、辺材ではもっとも低かったが、地上高0.2 mではこの傾向は見られない。直径方向の分布を Figs. 3-5 に示す。地上6.8 mでは水食い材における水分量が最大の部位で灰分量も1.03%と最大になっていた。この地上高では水食い材および心材を通じて水分量の増減と灰分量の増減が一致していた。これに対して地上高0.2 mでは含水率の最も高い位置でも灰分量にきわだった変化は見られず、髓付近および辺材の最も外側で最大の灰分量が見られた。地上高2.8 mでは両者の中間的な変動が見られた。辺材、心材、水食い材に類別して灰分量の平均を見ると、辺材では地上高に関係なく全体に低い灰分量であるのに対し、水食い材では高い地上高からの試料で灰分量が特に多い (Table 1)。松山の供試木の地上高0.3 m および1.4 m では比較的灰分量は多く、苫小牧供試木の6.8 m と同様に水分量の多い試験片ほど灰分量も多い傾向が見られた。

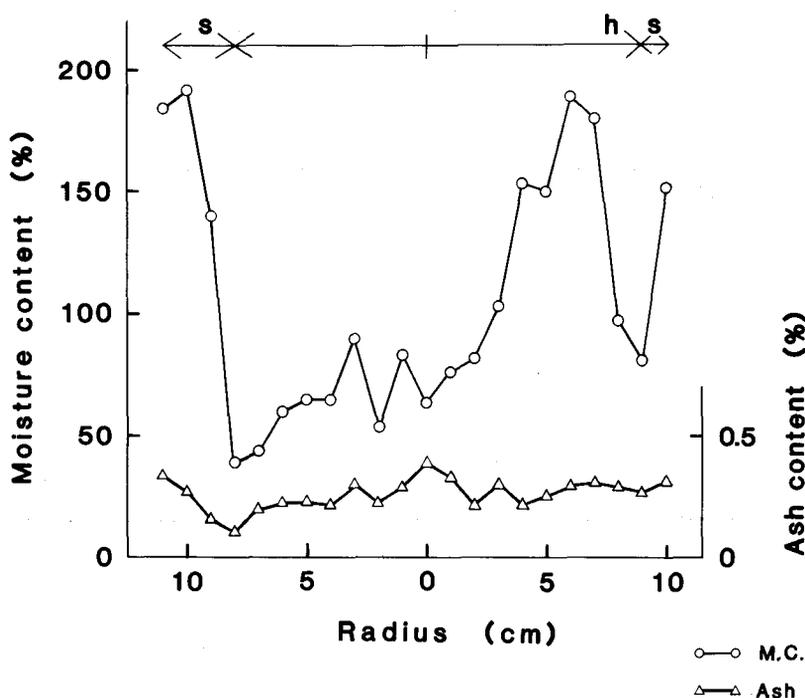


Fig. 3. Radial variations of ash and moisture content (Tomakomai: 0.2m height).

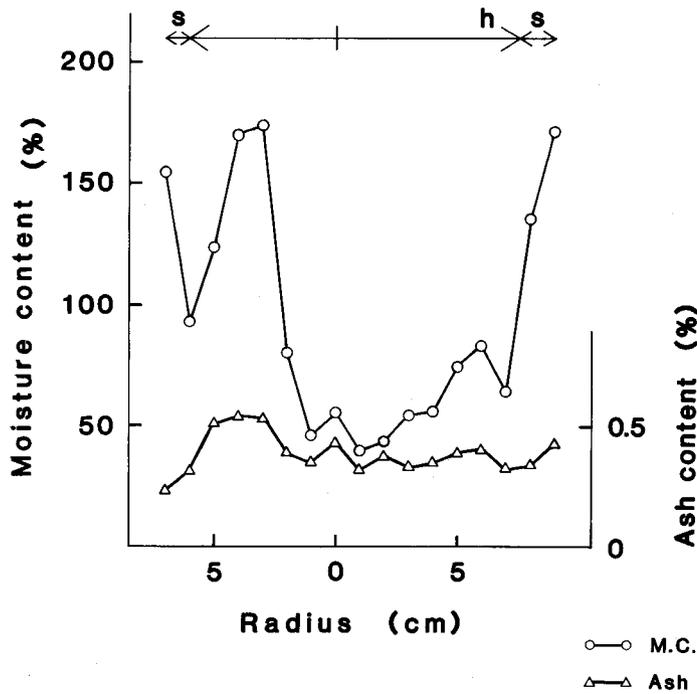


Fig. 4. Radial variations of ash and moisture content (Tomakomai: 2.8m height).

Table 1. Average values of ash content of wood blocks (%)

Tomakomai	s	h	w
0.2 m	0.24	0.25	0.27
2.8 m	0.29	0.36	0.52
6.8 m	0.39	0.61	0.92
8.2 m	0.31	0.54	
Hiyama	s	h	w
0.3 m	0.35	0.55	0.85
1.4 m	0.36	0.55	0.85

s : sapwood  
 h : heartwood  
 w : wetwood

金属含量は、すべての部位、地上高でKの量が圧倒的に多く、Ca, Mg, Naの順にこれに次いだ。絶乾量に対する重量パーセントではK, Ca, Mgは辺材に比べて心材中の存在量が多い。Kは特に水食い材中にきわだって多かった (Figs. 9, 10, Table 2)。苫小牧の6.8 mのデータを

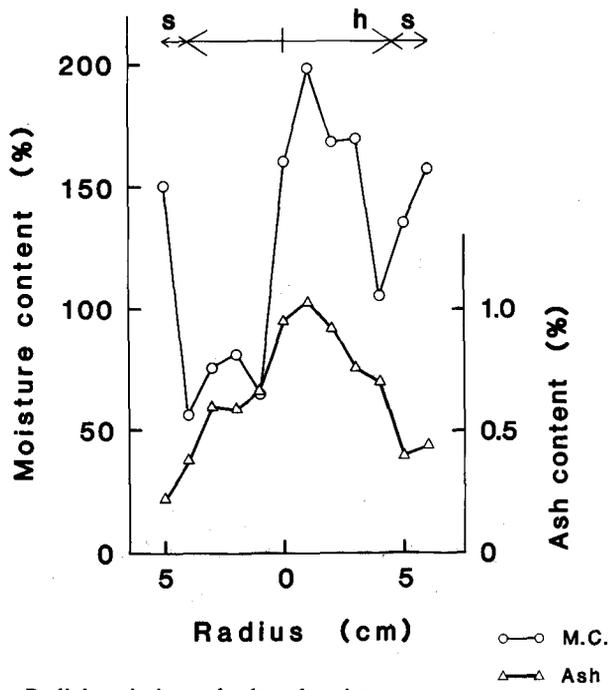


Fig. 5. Radial variations of ash and moisture content (Tomakomai: 6.8m height).

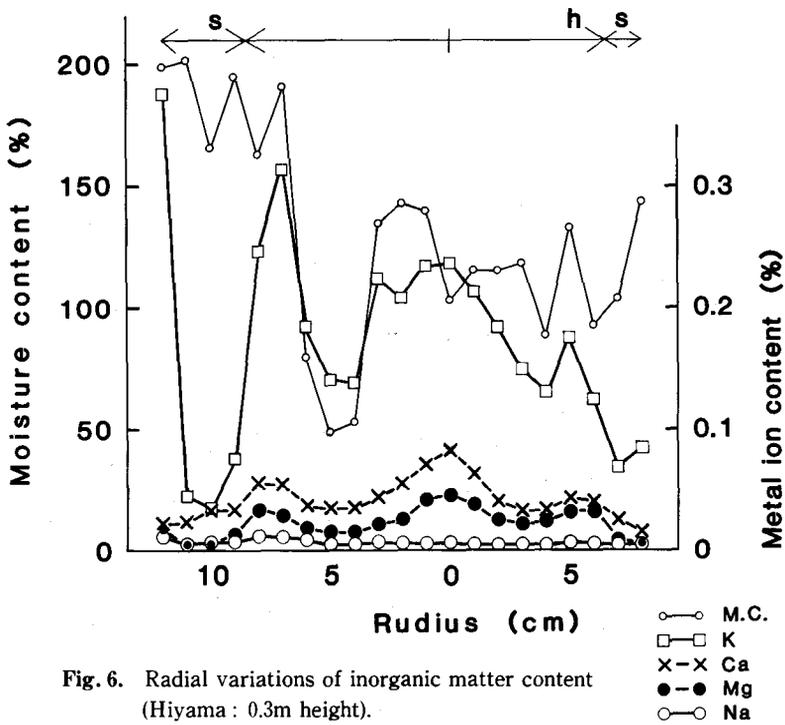


Fig. 6. Radial variations of inorganic matter content (Hiyama: 0.3m height).

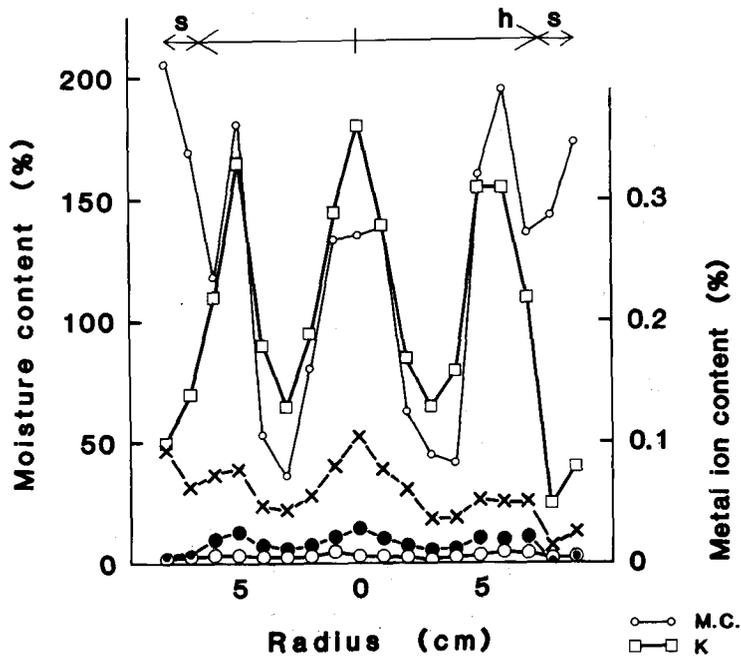


Fig. 7. Radial variations of inorganic matter content (Hiyama : 1.4m height).

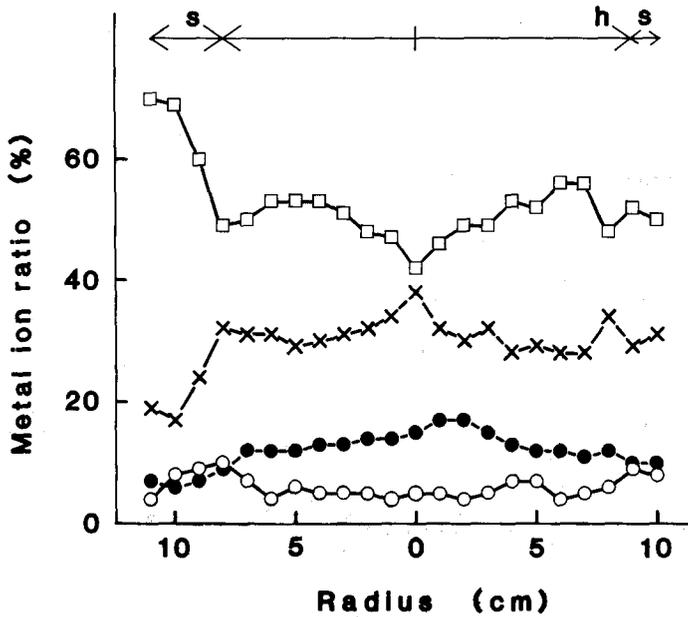


Fig. 8. Radial variations of metal cation percentage (Tomakomai : 0.2m height, marks are the same with Figs. 6, 7).

Table 2. Average cation contents of wood blocks (ppm)

Tomakomai		Ka	Ca	Mg	Na
0.2 m	s	490	200	60	70
	h	450	290	120	50
	w	570	300	130	60
2.8 m	s	690	170	80	70
	h	900	330	110	40
	w	1,560	390	160	50
6.8 m	s	910	260	110	80
	h	1,450	700	200	80
	w	2,330	900	310	60
8.2 m	s	800	320	80	60
	h	1,500	560	140	80
Hiyama					
0.3 m	s	620	270	80	70
	h	1,450	370	140	70
	w	2,350	540	220	90
1.4 m	s	900	500	70	50
	h	1,800	490	50	60
	w	2,800	710	60	80

s : sapwood  
h : heartwood  
w : wetwood

もとに金属量と灰分量とを比較すると、4金属( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ )の質量の合計が灰分の30—50%になる。さらにこれを炭酸塩( $K_2CO_3$ ,  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ ,  $Na_2CO_3$ )の質量に換算すると灰分量の60—90%にあたっている。したがって、残りの10—40%に相当する分の、何らかの他の物質が灰分中にふくまれている。この他、桧山の供試木について、Fe, Mnの定量をおこなったが、存在量はわずかであった。

髓の付近では、含水率の増加がみられない場合でも他の辺材より多くの灰分量を含んでいた(Figs. 3-5)。Ca, Mgは特に髓付近に多く存在する傾向がみられた(Figs. 6, 7)。金属イオンによる水平分布の違いを見るため、Fig. 8に4イオンの合計に対する各イオンの比率を示す。髓付近および両側の移行材付近の計3ヶ所でCaの割合が顕著に高くなっている。

桧山演習林産の供試木による圧搾樹液の分析では、Table 3のように、無機物、金属イオンともに、辺材の数倍から数十倍の濃度が水食い材中より得た樹液において確認された。金属イオン量はK, Ca, Mg, Naの順であった。Mgについては水食い材中に辺材の10—40倍の溶存

量があり、極めて特徴的であった。この表に地上高 5.5 m の水食い材のデータがないのは、この場所に万力を用いて樹液を搾れるほどに発達した水食い材がなかったためである。地上高による違いはみられなかった。

現地(桧山演習林)で採取した樹液については pH を測定したが、辺材、水食い材ともに中性 (pH 5.9—6.2) であり、辺材でとくに目立った傾向の違いはみられなかった (Table 3)。なお、採取した樹液の比重は辺材、心材ともに 1.00 (桧山 0.5 m) であった。

Table 3. Inorganic contents of expressed sap of the tree from Hiyama (ppm)

	Org.	Inorg.	K	Ca	Mg	Na	pH
0.5 m s	1,000	300	83	10	3	4	5.94
0.5 m w	7,500	3,500	1,155	217	119	24	5.98
w/s	8	12	14	22	40	6	
1.4 m s	1,600	600	184	33	6	9	
1.4 m w	4,600	3,000	1,017	197	75	20	
w/s	3	5	5	7	12	2	
2.2 m w	2,800	931	218	73	18		
5.5 m s	1,600	300	75	8	3	2	6.20

s : sapwood

w : wetwood

### 3-2. 樹液の有機組成

苫小牧供試木の地上高 4.8 m の樹液は、辺材で固形分 0.3%、灰分 0.1%、水食い材で固形分 1.2%、灰分 0.3% であった。地上高 2.2 m の樹液の試料 (辺材、水食い材) は TLC 上で辺材、水食い材それぞれ約 20 のスポットを確認した。そのうち数個のスポットは両者に共通のものであった。辺材では糖および配糖体と思われる位置に、水食い材では比較的極性の小さい物質と思われる位置に多くのスポットがあらわれた。この際、フェノール性水酸基による呈色反応は確認できなかった。

地上高 4.8 m の試料 (辺材、心材、水食い材) の TLC による展開の結果、辺材と他では明らかな違いが見られたが、心材と水食い材では差がなかった。辺材では R<sub>f</sub> 値から見て糖類または配糖体と思われる位置に、心材および水食い材ではアグリコンと思われる位置に多くのスポットが確認された。三者に共通するスポットも見られる (Table 4)。辺材と水食い材とを比較すると、一方でみられたスポットが他方では痕跡程度見られる例が多かったのに対し、心材と水食い材ではスポットの大きさも色も完全に一致した。また、それぞれ 2, 3 のスポットで DSA による呈色反応 (フェノール性水酸基の存在に基づく) が認められた。

Table 4. Organic components of the sap separated by TLC

*		high ←Rf→ low									
2.2m	s	○		○	○	○	○	○	○	○	○
4.8m	s				○	○	○	○			○
4.8m	s	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2.2m	w		○		○		○		○	○	
4.8m	w		○	○	○		○				○
4.8m	w		○	○	○		○				○
AEaW		high ←Rf→ low									
2.2m	s			○		○	○	○		○	
4.8m	s			○		○	○	○	○	○	
4.8m	s					○		○	○		
2.2m	w	○	○	○		○	○				
4.8m	w		○	○		○		○	○	○	
4.8m	w		○	○		○					
SG-III		high ←Rf→ low									
2.2m	s		○	○		○	○		○	○	○
4.8m	s			○		○	○		○		
4.8m	s						○		○		
2.2m	w	○	○	○	○	○	○		○		○
4.8m	w	○	○	○	○	○			○		
4.8m	w			○	○	○		○	○		○

\* : Chloroform - Acetic acid - Water

AEaW : Aceton - Ethyl acetate - Water

SG-III : Toluene - Formic acid - Ethyl formate

辺材から得た樹液は口に含むとかすかな甘味があったが、水食い材の樹液は強い渋味と苦味があり、樹脂に似たにおいがあった。また、いずれも腐敗臭や酢酸臭は感じられなかった。

### 3-3. 有縁壁孔の閉鎖率

予備実験の結果、自然乾燥の試料は水分蒸発時の表面張力の効果によってすべての壁孔が閉鎖していたが、他の方法による試料では閉鎖している壁孔や不閉鎖の壁孔があり、特に方法による違いは認められなかった。今回使用した写真の一部 (Photos. 1, 3, 7 : アルコール置換乾燥) は予備実験の際のものである。

辺材の有縁壁孔対は不閉鎖のものが多く観察されたが (Photo. 1), 半ば閉じかけたように見えるものも多く (Photo. 2), 閉鎖している壁孔も少数見られた。閉鎖した壁孔対は心材に最も多く見られたが (Photo. 3), 心材中には閉鎖の不完全な壁孔もこれらに劣らず多く (Photo. 4), 中にはほとんど開放しているものもあった (Photo. 5)。水食い材には閉鎖したもの (Photo.

6) や不閉鎖のもの、中間的なもの (Photo. 7) など様々である。辺・心材、水食い材を通して、壁孔の閉鎖、不閉鎖には様々な程度のもものが混在していた。

以上の結果から、壁孔室中での壁孔壁の状態を閉鎖の程度により区分すると以下のとおりである。タイプのIは壁孔のトールス、マルゴの全部または大半が壁孔縁から離れているもの (Photos. 1,5), タイプIIはマルゴの大半が壁孔縁に付着しているが、トールスの周囲にすきまがあるもの (Photos. 2,4,7), タイプIIIはトールス、マルゴ共に壁孔縁に密着しているもの (Photos. 3,6)である。この連続写真で見られた壁孔のタイプ分けをしたのが Table 5である。辺材についてはタイプIおよびIIが、心材についてはIIIおよびIIが、水食い材についてはタイプIIが多く見られた。タイプIIは壁孔縁に付着したトールスのごく一部にすきまのあるものや、タイプIに近いもの、さらにその中間的なものを含んでいるため、全般に比率が高い。しかし、隣接する仮道管の壁孔でも別のタイプである場合がしばしば見られた。同じ心材中または水食い材中でも試験片ごとにタイプ別の出現率が異なっていた (Table 5)。繊維方向に沿って追った例では、一つの仮道管の細胞壁には、同じタイプの壁孔が多く見られた。

このことは、細胞内の気泡の成長にともなって、表面張力によって壁孔の閉鎖が起こるとするZIMMERMANN<sup>50)</sup>のモデルと合致している。また仮道管の一連の壁孔壁はすべて同じ側の壁孔縁に寄っている場合が多かった。

一部の心材および水食い材のトールス上に細菌と思われる物体が多く観察された (Photo. 4)。これらは特定の仮道管の一連の壁孔に限って見られ、それらの形態は WILCOX ら<sup>47)</sup>の観察

Table 5. Number of pits of each type

Sample	Region	I	II	III
A	s	7	12	
B	s	14	8	
C	s	33	21	10
D	h		19	72
E	h	1	10	24
F	h	2	56	12
G	w	16	38	11
H	w	1	26	
I	w		22	6
J	w	1	19	4
K	w	8	25	

s : sapwood

h : heartwood

w : wetwood

Type-I : fully open pits

Type-II : partially open pits

Type-III : aspirated pits

した細菌に似ていた。しかし GREAVES<sup>11)</sup>が報告しているような細菌の活動の影響で壁孔縁の崩壊した壁孔は今回の観察では発見されなかった。試料作成時の機械的損傷と思われるものを除いては、壁孔縁や壁孔壁に異常なものは認められなかった。

#### 4. 考 察

##### 4-1. 無機成分

苫小牧の供試木の心材部の含水率と灰分含量は、Fig. 9 のように、地上高ごとに含水率と灰分量が関連していることがわかる。地上高が高いものほど灰分が多く、また含水率の増加にもなう灰分量の増加も大きかった。無機物の含量を陽イオンごとにみてもそれぞれ含水率との間に相関が認められる。特に K は含水率との関係が明瞭であった (Fig. 10)。

桧山試料の心材部についても、灰分量および K の存在量と含水率に強い相関が見られた。そこで、回帰直線を含水率 30% (繊維飽和点) に外挿したときの値が細胞壁中の沈着量を、直線の傾きによって含水率とともに増加する量が液中溶存量を、示しているものと仮定し樹液の無機物濃度を推定した。地上高ごとにもとめた、回帰直線の式  $Y=a+bX$  に対し  $b$  の値をこの

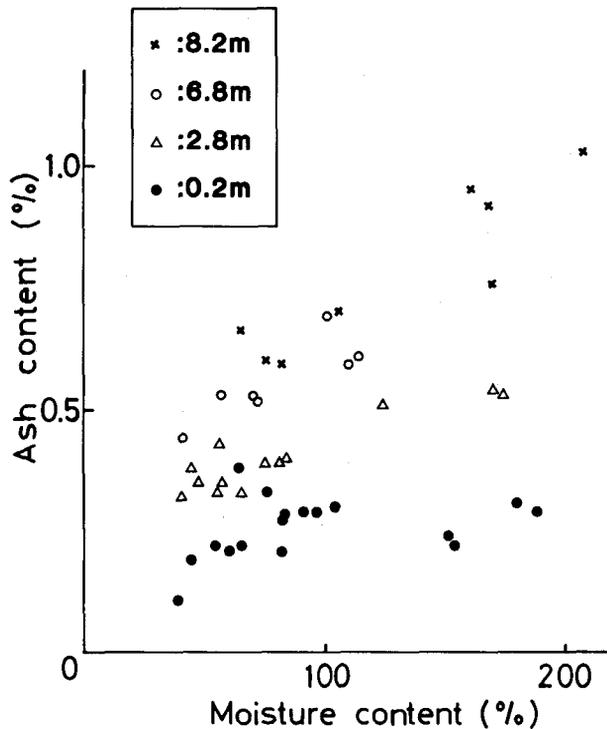


Fig. 9. Relation between ash content and moisture content of heartwood and wetwood (Tree from Tomakomai).

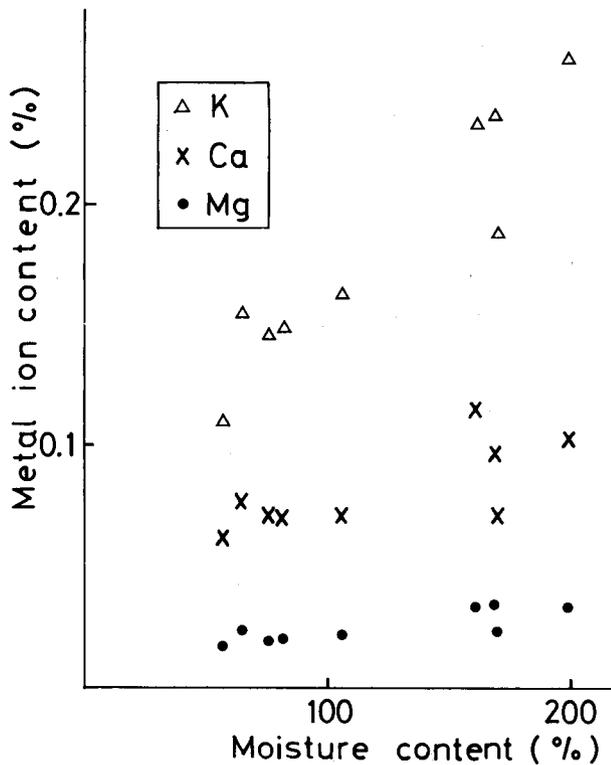


Fig. 10. Relation between metal cation content and moisture content of heartwood and wetwood (Tomakomai: 6.8m height).

地上高において水食い材中の水分に溶けている無機質の推定濃度とした。水食い材から搾った溶液の組成が、地上高0.5 (0.3) mおよび地上高1.4 mのそれぞれで、このようにして材片の分析結果から算出された推定液中濃度とよい一致をした (Table 6)。この一致によってこの方法による溶存量の推定が有効であると判断し、苫小牧試料についても回帰係数に基づいて水食い材中の樹液中の無機質の濃度を算出した (Table 7)。苫小牧供試木中の灰分量と K, Ca, Mg の推定液中濃度は、いずれも地上高の順に増加している。桧山の供試木では、低い地上高から得た樹液にもかかわらず高濃度の灰分を含んでおり、地上高の差 (0.3 m と 1.4 m) による違いが顕著ではない。この樹液中濃度および推定液中濃度は、いずれも、辺材の樹液中濃度よりもかなり高い値になっている。

通常雨水にはわずかな量の Na, Ca, Mg などが溶けているが、K はほとんど含まれていない<sup>51)</sup>。これに対し樹木が根によって土壌から吸収する水分には樹木に必要な K や Ca などのイオンが含まれていることが知られている。水食い材中の水分に K や Ca が多かったということから見て水食い材の水は単に雨水が侵入したものとは考えにくい。また苫小牧演習林は塩害の

Table 6. Ash and mineral contents of the sap in heartwood (Hiyama)

Sample	Ash	K	Ca	Mg	Na
0.3 m *	3,500	1,155	217	119	24
0.5 m **	3,600	1,092	167	101	3
***	1.03	0.95	0.77	0.85	1.35
****	0.76	0.8	0.44	0.45	0.6
1.4 m *	3,000	1,017	197	75	20
1.4 m **	3,500	1,292	185	85	27
***	1.17	1.27	0.94	1.13	1.35
****	0.88	0.9	0.52	0.83	0.78

\* : Measured contents

\*\* : Calculated contents by the relation of moisture and inorganic contents

\*\*\* : Rate of calculated/measured contents

\*\*\*\* : Coefficient of correlation between moisture and inorganic contents

Table 7. Ash and cation contents of the sap in wetwood calculated by the regression equation (Tomakomai)

Height	Ash	K	Ca	Mg	Na
0.2 m *	960	164	36	19	5
**	0.36	0.67	0.19	0.22	0.19
2.8 m *	1,560	629	52	38	10
**	0.92	0.89	0.36	0.7	0.47
6.8 m *	3,190	871	251	103	—
**	0.92	0.93	0.74	0.84	-0.59
8.2 m *	2,360	638	473	86	—
**	0.84	0.82	0.64	0.77	-0.05

\* : Calculated values by the regression equation of moisture and inorganic contents of wood blocks (ppm).

\*\* : Coefficient of correlation between moisture and inorganic contents.

発生のみられる地域であり、もし水食い材中の水分が雨水であれば、桧山の供試木に比べて Na が多く含まれるはずであるが、実際にはそのような差は認められなかった。

片寄<sup>21)</sup>の研究によれば、水食い材の発生率は遺伝形質よりも立地条件に左右されている。この際、同じ採種園の中でも土壌や微地形による影響が大きいことが確かめられている。また土壌中の水分が降雨後長く留まるような場所に水食い材の発生が多い。これらを考え合わせても水食い材の発生率は土壌から根に供給される水の状態によって支配されていると見るのが妥当であろう。水食い材の発生を雨水の侵入によるものとした沢田<sup>23)</sup>も、ごく近接した地点からの供

試木で水食い材の発生状況に大きな違いがあることを認めている。

今回の研究で、水食い材中の水が、通常枝水食いと呼ばれているものも含めて、雨水に直接の起源を持つものでないという結果を得たことはこれに一致している。

一般に樹幹内での無機質元素の濃度は、樹皮で最も高く辺材がこれに次ぐ。LAMBERT<sup>25)</sup>は New South Wales の約 90 樹種を分析して、大半の樹種ですべての元素が心材より辺材に多いことを見いだした。これに対し変色した含水率の高い材では灰分量の増加が見られるが、これは一般に炭酸カルシウムである。HEART<sup>12)</sup>は *Robinia pseudoacacia* の変色材において辺材の 61% 増の K, 168% 増の Mg を見いだした。同様のパターンが *Macura pomifera* にも観察された。PASSIALIS<sup>32)</sup>はギリシア産の雑種の *Abies* の有色の wetwood において辺材の約 2 倍の灰分量と 4 倍の K を報告している。また *Abies alba* の wetwood には心材の 2—10 倍の K および Ca が存在している<sup>49)</sup>。

含水率と灰分含量の相関に基づく推定濃度が、圧搾によって得た樹液の濃度と一致したことは、これらの推定値および測定値が実際の樹幹内での水分中の陽イオン濃度を正確に反映していることの証拠である。従って木片の灰分測定で示された心材と水食い材の灰分量の差 (Fig. 11) は樹液中の溶存量 (Fig. 12) の差を反映したものであることが確かめられた。さらに推定液中濃度の算出に用いた回帰曲線の近くに幅広い含水率の試料がならんだことは同一地上高においては水食い材を含む心材部内の樹液濃度はほぼ一定していることを示唆している。

以上のことからトドマツの水食い材中の溶存成分は有機質、無機質とも辺材の数倍の量が

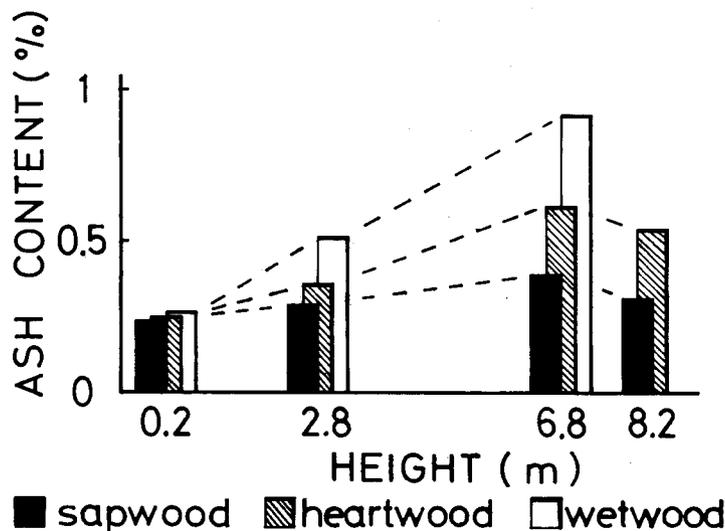


Fig. 11. Ash content of wood blocks (Tomakomai sample tree).

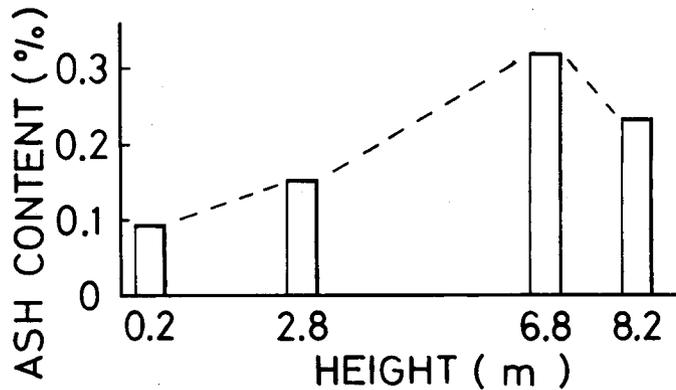


Fig. 12. Ash content of sap calculated from the regression equation between ash and moisture content (Tomakomai sample tree).

存在し、辺材よりもかなり浸透圧の高い状態になっていると思われる。従って WORRALL<sup>48)</sup>の言うように浸透ポテンシャルの差が水分の集積を引き起こす原動力になるという考え方も可能である。

#### 4-2. 樹液中の有機成分

いわゆる心材成分には芳香環をもったものが多く、それらの存在は心材中での微生物の繁殖をおさえる効果をもつと言われている。ETHERIDGEら<sup>7,8)</sup>は balsam fir の心材中の抽出成分によって多くの種類の真菌の活動がおさえられることを示した。

TLCによる展開の結果は、地上高2.2 mと4.8 mで、また同一のサンプルでも必ずしも一致していないが、これは展開時の条件の差によるものと思われる。従って、個々の溶存成分を同定していく上ではかなり問題が残るが、辺材と水食い材の樹液成分の傾向の違いを検討することはできるだろう。糖分析用の展開溶媒で辺材抽出物を展開した際多数見られたスポット (Rf 0.1—0.5) は単糖類または二糖類と思われる。このことは樹木の生理からみても自然である。いわゆる心材物質はおもにフェノール化合物であることから、心材及び水食い材に DSA により発色する成分が多く見られたこともうなずける。

SCHINKとWARD<sup>36)</sup>は過去の wetwood に関する研究を整理して、タイプの異なる wetwood がバクテリアの活動により材中の環境が変化していく一連の過程として理解しうることを示した。これによれば主として嫌気性細菌<sup>37)</sup>の活動に伴い、フェノール類、炭水化物などの抽出成分、ついでペクチンが消費され、酢酸をはじめとする脂肪酸類やアルコール類などが蓄積される。また気相中では酸素が消費され、二酸化炭素、次にメタン、最後に水素が蓄積される。この過程を通じて水分の集積が進行し、液性は中性から最初は酸性化し、やがて再び中性を経てアルカリ性になる。また SHIGOとHILLIS<sup>35)</sup>は高含水率の変色した材の形成を、傷への反応と

しての抽出物の形成、バクテリアによる抽出物の消費、腐朽菌の繁殖、の三段階に分けている。この三つの段階はそれぞれ、特徴的な抽出成分の増加、発酵産物の蓄積、細胞壁成分の破壊によって特徴づけることができる。

しかしトドマツ水食い材中の有機溶存成分は、細菌の活動による発酵産物ではなく、樹体の生合成によって作られた本来の物質であると判断した。その理由は、もしも水食い材中に嫌気性細菌による発酵産物が蓄積しているのであれば、心材と水食い材の樹液の成分は違っているはずであるが、実際には両者の TLC 上で確認された成分は完全に一致したことである。また、主要な発酵産物である酢酸およびエタノールは、試料採取時に匂いで判断した限りでは含まれていなかった。pH がほぼ中性でかつ辺材と水食い材で一致したことも(桧山供試木)これを裏づけている。

#### 4-3. 走査電子顕微鏡による観察

今回の観察で、心材中に閉鎖の不完全な壁孔がきわめて多く見られたことは注目に値する (Fig. 13)。なぜなら、このような閉鎖の不完全な壁孔は水食い材形成において想定されるよう

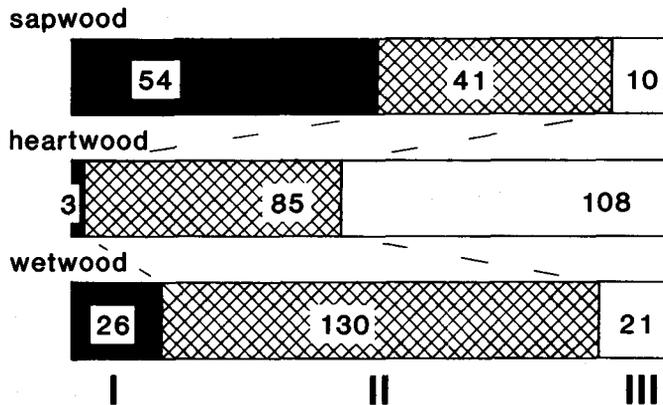


Fig. 13. Rate and number of pits of each type  
 I ; fully open pits  
 II ; partially open or loosely closed pits  
 III ; aspirated pits

なゆっくりした水の浸入に対しては有効な障壁とは成り得ないと考えられるからである。この点について直接比較できる他樹種の資料はないが、NOBUCHI と HARADA<sup>31)</sup>が光学顕微鏡で観察したスギの心材の閉鎖した壁孔対のすべてが本研究で分類したタイプIIIに相当するならば、トドマツの心材における壁孔閉鎖の不完全さが水食い材の生じやすい原因になっている可能性がある。

石田と藤川<sup>16)</sup>はトドマツの有縁壁孔の観察を行い、辺材では不閉鎖の早材仮道管が心材ではほとんど閉鎖していることを見いだした。水食い材中の早材仮道管の壁孔については滝沢<sup>39)</sup>

らが閉鎖していないと述べているのに対し、閉鎖していると述べた文献もある<sup>22)</sup>。*Abies concolor*の含水率の高い心材部の有縁壁孔は、固く閉鎖した一部を除いては、ゆるく閉鎖しており水分の浸入が可能である<sup>47)</sup>。滝沢らは水食い材を辺材の一部が取り残されたものとしているが、筆者らの観察では枝の基部を除いてはすべての水食い材は辺材から離れて存在していた。従って、心材化によって含水率が低くなった後に再び水分の蓄積がおこるものと考えられるが、その際心材内での壁孔閉鎖の局所的な違いによって、完全に閉鎖していない壁孔の多い部分から順に水の浸入がおこり、スポット状の水食い材が生ずるのかも知れない。しかし、他の要因による水分蓄積が壁孔の再開をひきおこすという考え方も可能である。

また、今回の研究では早材仮道管のみの観察しか行っていないが、トドマツの晩材仮道管の壁孔は心材においても開いたままであることが知られており<sup>16)</sup>、水食い材中でもやはり開いているものと思われる。このことは沢田<sup>33)</sup>も指摘しているような水食い材の晩材部への先行的な拡大とも符合しているのである。

WILCOXとSCHLINK<sup>47)</sup>は、*Abies alba*の乾燥速度が辺材よりも遅いことを材の透過性の変化によるものと述べている。PASSIALISとTSOUMIS<sup>32)</sup>はwetwoodの透水性の低さを抽出物の多さと壁孔の閉鎖によるとしている。沢田<sup>33)</sup>はトドマツの水食い材は、辺材および心材に比べて著しく乾燥が遅いことを観察しているが、今回の観察によって水食い材中には無機成分が多いことがその一因となっていることが明かとなった。SHIGOとHILLIS<sup>35)</sup>はwetwoodやdiscolored woodの形成に心材とは組成の違った抽出成分の増加を重視していることから、何らかの抽出物の影響によって乾燥が妨げられているのかも知れない。さらに辺材に比べて壁孔の閉鎖率が高いことも関係しているだろう。

#### 4-4. 水食い材形成のメカニズム

GREAVES<sup>11)</sup>はある種の細菌が木材の有縁壁孔や木部柔細胞を破壊することを見いだした。細菌がwetwoodの形成をひきおこすと考えられている理由のひとつは、細菌による壁孔や柔細胞の破壊によって水分の浸入の通路が作られると考えられるからである<sup>26,45)</sup>。しかし、このような破壊の痕跡は*Abies alba*では見られなかった<sup>45)</sup>。また、沢田<sup>33)</sup>のトドマツの観察では、菌糸の見られた節の基部でのみ壁孔の破壊が観察され、その他の心材と水食い材では組織構造に何ら違いが見いだされなかった。

本研究においては水食い材に若干の細菌が認められたが、水食い材形成への関与の徴候はなく、おそらく偶発的なものであろう。

トドマツの移行材はほとんど自由水のない状態(M.C.30—50%)になっているので<sup>14)</sup>、辺材の水分と水食い材中は容易に混じり合わないものと判断した。今回の研究で確認された辺材と水食い材の溶存成分の組成と濃度の違いはこれを裏づけるものである。

これに対し、水食い材を含む心材中では無機物の濃度に一致が見られた。このことから、心材内の樹液は絶えず流動し、互いに混ざり合っていると考えられることも可能である。この

ような仮説にたった場合、水食い材がスポット状あるいはすじ状に出現する機構が問題になる。SEM 観察によって認められた壁孔閉鎖の違いが水食い材形成に先立って存在していればこの問いに対する答えになるだろう。つまり、壁孔の閉鎖が不完全な材部から先に水分が流入することでこのような水分分布になるわけである。

他方、氏家<sup>42)</sup>はトドマツの低含水率の心材が材内の気体の圧力によって維持されているという所説を提案している。この説によれば、節などの樹液の開放部からガスが抜けることにより樹液の流入が起こり、水食い材ができるということである。水食い材と枝節との関係が説明できる点がメリットであろう。つまり、この場合は LAGERBERG<sup>24)</sup>の見解とは逆に節部が気体成分の脱出口となることにより、その周辺に水食い材中の水分が集められることになる。しかし、水食い材中で確認された高濃度の樹液がどのようにして作られるかが説明されなければならない。氏家<sup>42)</sup>は苫小牧の供試木の水食い材中の樹液の無機物の濃度の分布を、心材部内でのゆっくりした樹液の上昇に伴い水分が水蒸気となって枝節を通じて失われるという濃縮機構によって解釈した。

水食い材中の樹液の無機成分濃度の均一性については、先に存在している無機物量にあわせて水分の流入が起こると考えることもできる。この場合は、水に溶けた状態で存在している無機質が容易に移動しないことが仮定されている。この過程の妥当性については組織の微視的な透過性など不明な点が多く明確な判断ができる段階にない。もしも、材内に水溶性無機質の移動を妨げるものがなければ水分量も無機質も均一な分布になるであろうが、無機物の移動が阻止されていて水分のみが可動な状態になっていればこれによる浸透ポテンシャルの差によって水の高無機物領域への集中が起こることが予想される。既に述べたように辺材と水食い材の間には浸透ポテンシャルの格差も溶存成分の移動に対する障壁も存在しているので、これによる水の辺材からの流入は十分に考えられるが、以上の仮説に立てば心材内部での水分分布もこれと同じ機構で作られることになる。

FUKAZAWA et al.<sup>10)</sup>は樹木の葉から辺材への無機質の再回収を指摘した LAMBERT<sup>24)</sup>に基づいて、回収された無機物の心材への集積が水食い材形成の原因ではないかと考えている。また、トドマツの心材形成の際に樹皮または形成層から無機物を運び込むポンプが存在している可能性があり、これにより運ばれた無機物量の差によってまだら状の水食い材ができるのではないかと考えられる。傷によってできるある種の変色材に無機物の増加が見られる<sup>2)</sup>ことから節の開口部に傷害への反応としての無機物の集積が起こるという見地から水食い材と節との関連を説明できるかも知れない。このような仮説は、節との関連から直ちに水食い材を雨水の浸入とする見解に修正を求めるものとなろう。

## 5. 結 論

今回の研究で得られた様々な知見を総合して考えると、心材中の無機成分による浸透圧が水食い材発生の原動力となっているように思われる。

この際、壁孔の閉鎖の不完全な部分にまず水分が浸入するのであろう。バクテリアは水食い材ができた後に繁殖して壁孔を壊し、水食い材の拡大に寄与するのであろう。

もっとも、無機成分を水食い材形成の原動力とみる考えには移行材の乾いた領域を横切って水分が移動する経路や、水分に先だって無機質が集積するメカニズムなど未解決の問題が多いが、雨水の浸透や細菌の活動に否定的な結果が得られた現時点ではもっとも有望な仮説だと言えるだろう。もとより水食い材の水分量の増加はおろか心材形成時の含水率の低下のメカニズムすら明かではない現状である。今後は心材そのものの形成機構と関連させながら研究をすすめる必要があろう。

## 引用文献

- 1) BAUCH, J.; Höll, W.; ENDEWARD, R.: Some aspects of wetwood formation in fir: *Holzforschung*, **29** (6), 198-205 (1975)
- 2) BLANCHARD, R. O.; SMITH, D.; SHIGO, A. L.; SAFFORD, L. O.: Effects of soil-applied potassium on cation distribution around wounds in red maple: *Can. J. For. Res.*, **8**, 228-231 (1978)
- 3) CARTER, J. C.: Wetwood of elms: *Bulletin of the Illinois Natural History Survey*, **23** (4), 401-443 (1945) (WARD, J. C.; ZEIKUS, J. G.: Bacteriological, chemical and physical properties of wetwood in living trees: *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft*, **131**, 133-165, Sept (1980))
- 4) COUTTS, M. P.; RISHBETH, J.: The formation of wetwood in Grand fir: *European J. For. Path.*, **7** (1), 13-22 (1977)
- 5) DAY, W. R.: The watermark disease of the cricket-bat willow (*Salix caerulea*): *Oxford Forestry Memoirs*, **3**, 30p, Oxford Univ. Press (1924) (WARD, J. C.; ZEIKUS, J. G.: Bacteriological, chemical and physical properties of wetwood in living trees: *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft*, **131**, 133-165, Sept (1980))
- 6) DOWSON, W. J.: *Bacterium salicis* Day. The cause of the watermark disease of the cricket-bat willow: *The Annals of Applied Biology* **XXIV** (3), 528-544 (1937) (WARD, J. C.; ZEIKUS, J. G.: Bacteriological, chemical and physical properties of wetwood in living trees: *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft*, **131**, 133-165, Sept (1980))
- 7) ETHERIDGE, D. E.: Selective action of fungus-inhibitory properties of balsam fir heartwood: *Can. J. Bot.*, **40**, 1459-1463 (1962)
- 8) ETHERIDGE, D. E.; MORIN, L. A.: Wetwood formation in balsam fir: *Can. J. Bot.*, **40**, 1335-1345 (1962)
- 9) 藤川清三: トドマツ仮道管の有縁膜孔の形態に関する研究; 走査型電子顕微鏡による膜孔膜の形態と膜孔閉鎖, 8-9, 12-15: 北海道大学卒業論文 (1969)
- 10) FUKAZAWA, K.; UJIE, M.; LEE KI-YEONG; ISHII, T.: Inorganic constituents in wood in relation to wetwood and crystal formation: *Proc. Symp. For. Prod. Res. International-Achiev. and the future*.

- CSIR, Pretoria, Rep. South Africa. (1985)
- 11) GREAVES, H.: Micromorphology of the bacterial attack of wood: *Wood Sci. and Technol.*, **3** (2), 150-166 (1969)
  - 12) HEART, J. H.: Formation of discolored sapwood in three species of heartwoods: *Mich. Agr. Exp. Sta. Quart. Bull.*, **48**, 101-116 (1965)
  - (SHIGO, A. L.; HILLIS, W. E.: Heartwood, discolored wood and microorganism in living trees: *Annual Review of Phytopathology*, **11**, 197-222 (1973)
  - 13) HUBBES, M.; ETHERIDGE, D. E.: A chemical basis for selection of heartwood fungi in balsam fir: *Can. J. Bot.*, **43**, 181-183 (1965)
  - 14) 石井哲男: トドマツ生立木の樹幹内の含水率分布: 北海道大学卒業論文 (1983)
  - 15) 石田茂雄: トドマツ樹幹の凍裂の発生機構, 特にその水食い材との関連について: 北大演研報, **22** (2), 275-374 (1963)
  - 16) 石田茂雄; 藤川清三: 走査型電子顕微鏡による木材細胞の膜孔に関する研究: 第2報, トドマツ立木における仮道管の有縁壁孔膜の形態: 北大演研報, **27** (2), 355-372 (1970)
  - 17) 石田茂雄: 木材の欠点の二, 三について: 北方林業, **35** (1), 3-6 (1983)
  - 18) 石田茂雄: 木材の欠点の二, 三について-2-: 北方林業, **35** (2), 13-16 (1983)
  - 19) 石田茂雄: "木材の科学1, 木材の構造": 原田浩; 佐伯浩編, 203-205, 文永堂 (1985)
  - 20) 石田茂雄: "トドマツの凍裂": 79-89, 北方林業会 (1986)
  - 21) 片寄藤: トドマツ精英樹クロンの特性: 容積密度数および含水率: 林学会北海道支部講演集, **33**, 95-97 (1984)
  - 22) 北村義重: 水食い材の性質に就いて: 北海道林試時報, **27**, (1941)
  - 23) 熊沢喜久雄; 西沢直子: "植物の養分吸収", 東京大学出版会 (1976)
  - 24) LAGERBERG, T.: Barrtädens Vattvet: *Svensk Skogsvårdsföreningens Tidskr.*, **33** (1935)
  - 25) LAMBERT, M. J.: Inorganic contents in wood and bark of New South Wales forest tree species: *Forestry Commission of N. S. W. Research Note*, **45** (1981)
  - 26) LUTZ, J. F.; DUNCAN, C. G.; Scheffer, T. C.: Some effects of bacterial action on rotary-cut southern pine veneer: *Forest Products J.*, **16** (8), 23-28 (1966)
  - 27) 宮島寛: トドマツ造林木の材質と利用: 第1報, 恵庭産トドマツの生成と基礎材質: 北大演研報, **37** (3), 789-817 (1980)
  - 28) 宮島寛: トドマツ造林木の材質と利用: 第2報, 厚賀産トドマツの生長と基礎材質: 北大演研報, **38** (3), 305-321 (1981)
  - 29) 宮島寛: トドマツ造林木の材質と利用: 第3報, 白老産および上芦別産トドマツの生長と基礎材質: 北大演研報, **39** (2), 191-212 (1982)
  - 30) MUMDOCH, C. W.; BIERMAN, C. J.; CAMPARA, R. J.: Pressure and composition of intrastem gases produced in wetwood of American elm: *Plant Disease*, **67** (1), 74-76 (1983)
  - 31) NOBUCHI, T.; HARADA, H.: Physiological features of the 'white zone' of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don)-cytological structure and moisture content: *Mokuzai Gakkaishi*, **29** (12), 824-832 (1983)
  - 32) PASSIALIS, C.; TSOMIS, G.: Characteristics of discoloured and wetwood in fir: *IWA Bull. n. s.*, **5** (2) 111-120 (1984)
  - 33) 沢田哲則: トドマツ人工林木における水食い材の発生およびその形態: 北海道大学卒業論文 (1982)
  - 34) 島池謙; 須藤彰司; 原田浩: "木材の組織", 102-103, 230, 森北出版 (1976)
  - 35) SHIGO, A. L.; HILLIS, W. E.: Heartwood, discolored wood and microorganism in living trees: *Annual Review of Phytopathology*, **11**, 179-222 (1973)
  - 36) SCHINK, B.; WARD, J. C.: Microaerobic and anaerobic bacterial activities involved in formation of wetwood and discoloured wood: *IWA Bull. n. s.*, **5** (2), 105-109 (1984)

- 37) SCHINK, B.; WARD, J. C.; ZEIKUS, J. G.: Microbiology of wetwood; Importance of pectin degradation and *Clostridium* species in living trees. : *Appl. Environm. Microbiol.*, **42** (3), 526-532 (1981)
- 38) SELISKAR, C. E.: "Some investigations on the wetwood diseases of American elm and Lombardy poplar", *Ph. D. Thesis. Cornell Univ.*, 137p (1950)  
(WARD, J. C.; ZEIKUS, J. G.: Bacteriological, chemical and Physical properties of wetwood in living trees: *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft*, **131**, 133-165, Sept (1980))
- 39) 滝沢忠昭; 川口信隆; 高橋政治; 山本宏: トドマツ水食い材の観察: 林産試月報, (7), 6-11 (1976)
- 40) THOMAS, R. J.; NICOLAS, D. D.: Pit membrane structure in loblolly pine as influenced by solvent exchange drying: *For. Prod. J.*, **16** (3), 53-56 (1966)
- 41) TIEDEMANN, G.; BAUCH, J.; BOCK, E.: Occurrence and significance of bacteria in living trees of *Populus nigra* L.: *European. J. For. Path.*, **7**, 364-374 (1977)
- 42) 氏家雅男: 無機物からみたトドマツ水食い材発生の一考察: 北大演習林試験年報, 48-49 (1984)
- 43) WARD, J. C.; ZEIKUS, J. G.: Bacteriological, chemical and physical properties of wetwood in living trees: *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft*, **131**, 133-165, Sept (1980))
- 44) WILCOX, W. W.: Some physical and mechanical properties of wetwood in white fir: *For. Prod. J.*, **18** (12), 27-31 (1968)
- 45) WILCOX, W. W.: Anatomical change in wood cell walls attacked by fungi and bacteria: *Botanical Review*, **36** (1), 1-28 (1970)
- 46) WILCOX, W. W.; PONG, W. Y.: The effects of height, radial portion and wetwood on white fir wood properties: *Wood and Fiber*, **3** (1), 47-55 (1971)
- 47) WILCOX, W. W.; SCHLINK, C. G. R.: Absorptivity and structure as related to wetwood in white fir: *Wood and Fiber*, **2** (4), 373-379 (1971)
- 48) WORRALL, J. J.; PARMETER, J. R. Jr.: Formation and properties of wetwood in white fir: *Physiology and Biochemistry*, **72** (9) 1209-1212 (1982)
- 49) 矢沢亀吉; 石田茂雄; 宮島寛: 数種広葉樹の多湿心材に就いて (第1報): 木材学会誌, **11** (3), 71-76 (1965)
- 50) ZIMMERMANN, M. H.: "Xylem Structure and Ascent of Sap", 54-59 Springer-Verlag (1983)
- 51) Г. В. ВОЙТКЕВИЧ; В. В. ЗАКРУТКИН  
(岸本文男訳): "地球化学原論", 201-205, 現代工学社 (1983)

### Summary

Most trees of *Abies sachalinensis* Masters have some irregular wetwood in the heartwood of the trunks. The wetwood causes frost crack and many small cracks formed in it may decrease the strength of the wood.

To understand the process of the wetwood formation, studies were carried out: Opening and closing of bordered pit pairs of earlywood tracheids were surveyed by the scanning electron microscopy. Ashes in the wood blocks and the sap squeezed from the green wood blocks were analyzed by the atomic absorption spectrophotometer. And organic contents of the sap were analyzed by the thin layer chromatography.

The results are as follows: Most of pit pairs in the sapwood are opened. In the heartwood, about a half of the pit pairs is aspirated, but many of the other pit pairs are half opened. On the contrary, almost all the pit pairs in the wetwood are not aspirated even under half opened

conditions.

In the heartwood and the wetwood, there are close correlations between ash and moisture contents. At several heights of the trunk, ash content in the sap was calculated from its content of the wood blocks by the use of the regression equation between ash and moisture contents. These estimations are agreed well with the ash content found in the expressed sap. The ash content of the sap in the wetwood is much higher than that in the sapwood.

Organic constituents of the expressed sap from wetwood are identical with those from the heartwood. On the contrary, the organic matters of the saps from the sapwood are different from those of the other wood, though these sap contains several components in common.

Because most of the pit pairs are not aspirated in wetwood, moisture can penetrate into these region. Even the heartwood, which has some inaspirated pit pairs, becomes to the wetwood under some conditions. But it can also be considered that the moisture penetration caused the opening of pit pairs.

The result of the analysis of the organic matter in the expressed sap shows that bacterial activity is not the main cause of wetwood formation, at least in the primary stage of the wetwood, in which the external frost crack does not occur yet.

It can be assumed from the analytical results of the solution in the sap that the osmotic potential in the wetwood is much lower than that in the sapwood. Then it seems that the moisture is increased by osmotic potential, although the process and the mechanism on the increase of moisture are not exactly elucidated.

### Explanation of Photographs

Every photograph shows a membrane of the bordered pit pair of *Abies sachalinensis* Masters. Samples were dried of solvent exchange method and coated double with C and Au. (scale bars; 1 $\mu$ m)

- Photo. 1** A typical bordered pit membrane of earlywood tracheid in sapwood. Pit membrane opens completely. And it has fine strings running radially from the torus to the marginal zone.
- Photo. 2** A half aspirated pit membrane of the earlywood tracheid in the sapwood. The margo is partially aspirated on the pit border.
- Photo. 3** An aspirated pit of earlywood tracheid, which is often seemed in heartwood. The torus and the margo is completely aspirated on pit border.
- Photo. 4** A half aspirated pit of earlywood tracheid in heartwood. On the surface of torus, some bacteria-like objects are observed.
- Photo. 5** A mostly open pit of the earlywood tracheid in heartwood. Most of the margo strings are seen above the pit border.
- Photo. 6** An aspirated pit of the earlywood tracheid in wetwood. No margo string can be seen.
- Photo. 7** A partially opened pit of earlywood tracheid of wetwood. The margin of torus dose not adhered on the pit border.

