

あて材の生因を探る
——特に針葉樹の圧縮あて材について——

島 地 謙*

Approaches to the Factors of Reaction Wood Induction
——Especially on the Compression Wood of Conifers——

Ken SHIMAJI*

樹木の幹が何らかの原因で傾くと、傾斜の上側と下側で形成層の活動にいちじるしい差が生じ、肥大生長に偏心がおこる。また、一般に斜めの位置をとる枝では上下方向に偏心肥大を示すのがふつうである。このようにして偏心肥大生長が促進された部分にはあて材と呼ばれる異常な組織がつくられる。

わが国ではあて(材)という言葉は昔から檣、陽疾などの字があてられ、現場のそま夫や製材業者の間で、地方によりいろいろな意味に用いられてきており、例えば¹⁾ ①傾斜地に生ずる立木の下部谷側に向える部(高知県)、②樹木の横断面中年輪の粗なる部(愛媛県南部)、③曲材の外部(大分県下毛郡)、④捩れ又は反れたる木(鹿児島県伊佐郡)、⑤角材にて心部入り又は性悪しき材にして割れ狂いの出るもの(群馬県碓氷)、⑥樹幹の生長不良の部分(栃木県塩谷郡)、⑦木材を挽きて固き部分、冬日の勝ち過ぎたるものをいう。立木の溪谷に面したる方の曲り材にはアテの存すること多し(名古屋)などのように不良な材を意味するほか、北陸や山陰では樹種名としてアスナロのことをアテと呼んでおり混乱をきたし易い。現在でも木材業者の間では晩材幅の広いものを「あてっぽい」と表現することが多く、また陽疾の字が示すように樹幹の日当りのよい側の材は、「あてっぽく」という説も各地にあるようである。

それはさておき、国際木材解剖学者連合(International Association of Wood Anatomists)の定義²⁾によれば、あて材(reaction wood)とは「幹や枝を元来の正しい位置に保持しようとするために、その正しい位置が乱された場合に、傾斜あるいは彎曲した幹および枝の部分にできる多少とも特異な解剖学的性質を示す木部」である。このようなあて材は針葉樹、広葉樹のいずれにもできるが、針葉樹のあて材は傾斜下側、すなわち一見圧縮側にできるので圧縮あて材(compression wood)(図1A)と呼ばれ、広葉樹のあて材は傾斜上側、すなわち一見引張り側にできるので引張あて材(tension wood)(図1B)と呼ばれる。

圧縮あて材は、肉眼的には濃暗褐色で早・晩材の区別が不明瞭なことが多い；顕微鏡で見ると仮道管の切口が丸味を持ち、細胞間げきが多い；仮道管の二次壁はS₃層を欠くがS₂層が厚く、大部分の樹種ではS₂層の内側にらせん状の裂目が現われる(イチョウ *Ginkgo*, イチイ *Taxus*, カヤ *Torreya*, イヌガヤ *Cephalotaxus* の諸属には現われない³⁾)；S₂層のフィブリル傾角が非常に大きい(45°前後)；生材の状態では切りはなすと軸方向に伸びる(つまり、樹幹内では圧縮状態にある)；乾燥すると軸方向の収縮が大きい；正常材にくらべて重くて、硬くて、もろい；正常材にくらべてリグニンが多くセルロースが少ない、などの特徴を持っている⁴⁾。

* 木材生物部門 (Research Section of Wood Biology)

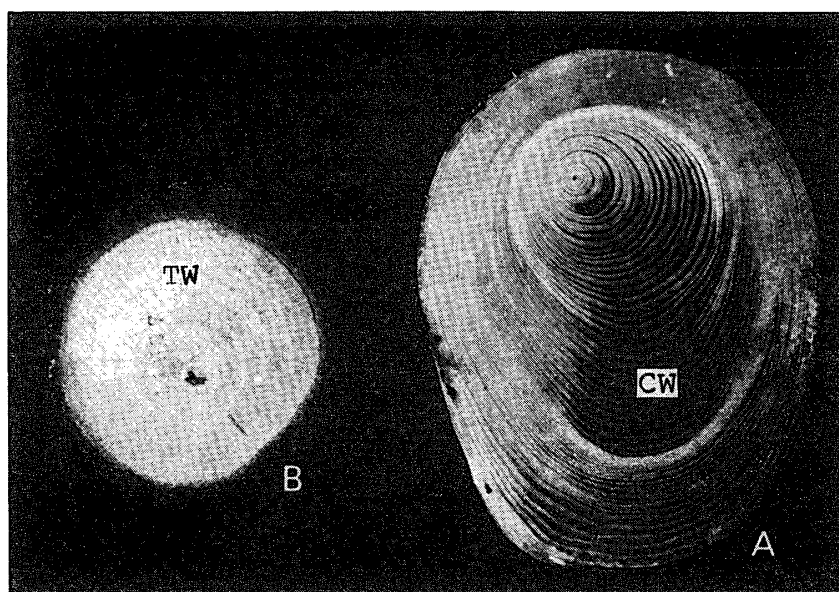


図1 傾斜した幹にできたあて材。(図の下方が傾斜の下側)

A. アカマツの圧縮あて材 (CW)

B. クヌギの引張あて材 (TW)

これに対して引張あて材は、肉眼的には白っぽく見えることが多い；木繊維の二次壁は S_3 層を欠き、 S_2 層の最内層にほとんどセルロースのみからなる G 層と呼ばれる特殊な層が発達する；G 層のフィブリル傾角はほとんど 0° で軸に平行である；生材の状態で切りはなすと軸方向に縮む（つまり、樹幹内では引張状態にある）；乾燥すると軸方向、接線方向の収縮が異常に大きい；鋸断面が毛羽立ち、鉋削も困難である；正常材にくらべてリグニンが少なくセルロースが多い、などの特徴を示す⁴⁾。

圧縮あて材、引張あて材いずれにせよ、このようにあて材は正常材にくらべて組織構造上の違いのみならず、物理的・化学的性質も非常に異なっているので、あて材を含んだ材を製材した場合に狂いや割れ、強度の低下、工作上的の困難などいろいろ難点が生じるので、人間にとっては木材の利用上大きな欠点とされている。

しかし、一方樹木自身にとっては、あて材の形成というものは非常に重要な意味のある生理活動なのである。そもそも植物の茎というものは一般に自分が支えている葉に日光がよく当るようにするために、重力にさからって上向きに伸びてゆく性質がある。これを負の重力屈性（nega-geotropism）（背地性ともいう）というが、草本植物では伸長しつつある茎の組織全体が上側と下側で伸長生長に差を生じ、上向きに伸長の方角を変えることによって背地性を発現するわけであるが、樹木の場合には二次木部形成後の茎（幹や枝）はもはや伸長できない。そこで、樹木は樹幹や枝の片側にあて材を形成することにより、あて材組織の部分だけが伸長（針葉樹圧縮あて材）あるいは収縮（広葉樹引張あて材）することによって幹や枝にクリープ的な屈曲をおこさせる仕組みであって、あて材の形成というものは大量の二次木部を持ち、もはや伸長生長ができなくなった部分の幹や枝に背地性運動を引きおこすための極めて巧妙な仕組みなのである。

このようなあて材の生成の要因や機能を探る努力はすでに 100 年におよぶ歴史を持っているにもかかわらず、まだまだ不明なところが多く、今後の研究に待つところが大きいのであるが、今回は針葉樹の圧縮あて材を中心に、その成因を探るためにどんなことがおこなわれ、どんなことがわかってきたかということの太すじを紹介してみたい（以下、単にあて材という場合には総て圧縮あて材を意味する）。

1. 圧縮あて材についての最初の記載

圧縮あて材についての科学的な記載は、Schacht⁵⁾ が 1862年にブラジルマツ (*Araucaria angustifolia*) の材組織の記載のなかで、枝の下側に壁の厚い細胞の帯があることを報告したのが最初であるとするのが従来の常識であった⁶⁾。ところが、最近 Schacht より 2 年早く 1860年に、Sanio⁷⁾がドイツトウヒ (*Picea abies*) の枝の圧縮あて材について Schacht よりもはるかに詳しい記載をおこなっていた事実が Timell⁸⁾ によって発掘された。図 2 が 1860年の報告にのせられている Sanio の図であるが、その報告のなかで Sanio は 1) 水平の枝の下側に偏心肥大に伴って、濃赤褐色のリグニンに富むと考えられる組織がつくられること 2) その組織の横断面を顕微鏡で見ると、仮道管の断面が丸く、細胞間げきに富むこと、3) 仮道管は極めて

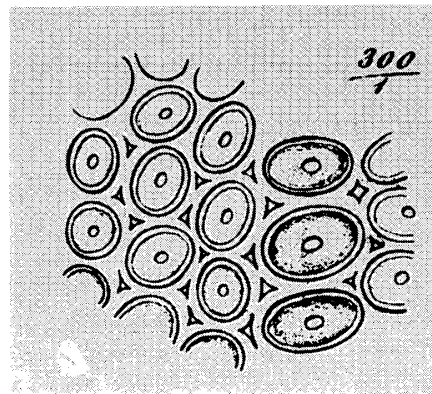


図2 Sanio (1860) によるドイツトウヒの枝の圧縮あて材横断面の写生図

厚い二次壁を持ち、その最外層は一次壁と同程度に木化が強いこと、などを記載している。このように圧縮あて材の組織についての基本的なことがすでに 120 年前に記載されていたということ、さらにはいかに情報伝達の悪い時代とはいえ、人の注意をひかずに埋もれてしまい、これだけの組織学的知見が一般に認識されるようになる 20 世紀初頭^{9~11)}などまでに 40 年もかかったということは驚きである。

2. 圧縮あて材誘導要因の探求

圧縮あて材についての形態学的、あるいは物理的・化学的性質に関する記載的な知見が少しずつ深まるのと並行して、そのような圧縮あて材ができる原因についても 1880 年代から多くの人達が興味を持ち、圧縮あて材を人為的・強制的につくらせることによって、あて材形成の要因を探ろうとする試みが、物理的手段、生化学的手段の両面から数多く繰り返されてきた。

2.1. 物理的手段

圧縮あて材形成を誘導する要因としては、自然状態でのあて材の存在部位の観察から、当初より①栄養の偏り、②光の偏り、③風の作用などによる樹幹のゆれ、④軸方向の圧縮、などが想定されていた^{6,12)}が、19 世紀の末以来これらの考え方を検証するための実験が、Hartig (1896)⁹⁾ を始めとして多くの研究者によって、同じようなことが色々の樹種を用いて繰り返しおこなわれてきた。そういう人達の研究結果のうち、まず物理的手段による結果を総合すると、①林縁木などのような樹冠の偏りのひどい樹木についてあて材の分布を調べたり、枝打ちあるいは葉むしりを極端に偏らせることによって幹あるいは枝に栄養の偏りをおこさせても、偏心肥大はもたらずが栄養の偏りが原因と考えられるあて材は誘導できないこと^{9,10,13~16)}など、②傾けた若い幹に対して光照射の方向を偏らせたり、光を全く遮断したりして育ててもあて材は常に傾斜下側に

でき、光の偏りもあて材誘導の原因とはならないこと¹⁷⁻¹⁹⁾など、③風の作用に似せた幹のゆさぶりも形成層活動を刺激し肥大生長は促進するが、あて材を誘導することはできないこと^{9,10,14,20)}などはほとんどすべての人達によって確かめられた。④一方針葉樹のあて材が古くから *compression wood* と呼ばれてきたことからもうかがえるように、軸方向の圧縮があて材形成の原因であるとする考え方は非常に根強いものがあり、これを確かめるための実験も数多くおこなわれてきた。しかし、例えば、水平に倒した幹や枝を自重による曲げが生じないように支え、軸方向の圧縮を取り去ってやっても、矢張り下側にあて材がつくられることが明らかにされる^{9,10,19-22)}など、*「圧縮」* 説に対しても疑いを持つ人も多かった。*「圧縮」* 説に対してもっとも決定的打撃を与えたかに見えたのは Ewart and Mason Jones (1996)¹⁸⁾の実験である。彼らはヒノキ属 (*Chamaecyparis*) 2種、マツ属 (*Pinus*) 2種の若い垂直の幹をループ状に曲げて固定したまま育てたところ、ループの内側全周に圧縮が働いているにもかかわらず、圧縮とは無関係にループの上半分、下半分とも下側、つまり重力の方向にあて材が形成されることを示した (図3A)。幹や枝をループ状固定を含めて色々な角度に拘束する実験はその後も多くの人によって繰り返されている^{17,23,24)}などが、特に Jaccard (1938)²³⁾は幹のループ状固定の実験において、上述 Ewart ら¹⁸⁾と同様のあて材形成をみたループを上半分ずつに切りはなしたところ、上半分は広がり下半分は狭まること、すなわちいずれの場合もあて材形成側が伸びることを明らかにした (図3B)。つまり、ループの外周部は当初は明らかに引張状態にあったにもかかわらず、特に下半分においてはあて材が形成されてゆく過程で圧縮状態に変わることを、圧縮は結果であって原因ではないことを明らかにした。さらに Sinnot (1952)²⁴⁾は幹をいろいろな角度に曲げてあて材を作らせた結果 (図4はその一例) を総合し、幹の軸が垂直から傾くと、彎曲の凹凸とは無関係に最短距離を通過して垂直にもどすために最も適当な部分にあて材を作ってその部分を伸ばそうとするのだと考えた。

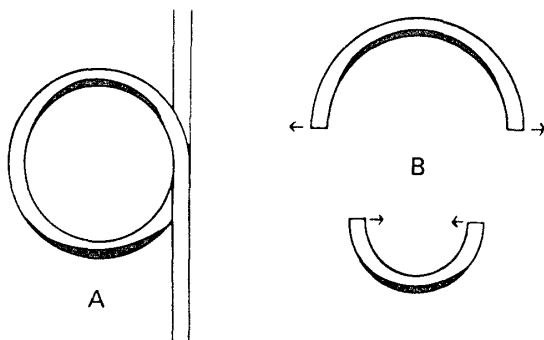


図3 A. 針葉樹の幹のループ状固定により生ずるあて材の分布模式図
B. ループを上下半分に切りはなした際の現象 (Jaccard, 1938)

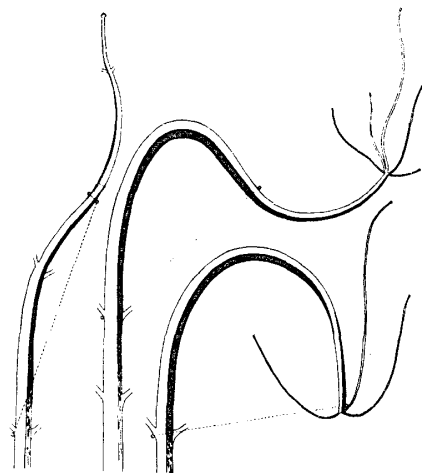


図4 針葉樹の幹をいろいろな角度に曲げた際に生ずるあて材の分布模式図。 (Sinnot, 1952)

一方、1920年頃から幹のあて材の形成量は幹の傾きの程度、すなわち重力の方向が幹の軸方向から移動する程度に関係するということが多くの研究者から示され^{12,14,25-27)}、特に Hartmann (1942)²⁷⁾や尾中 (1949)¹²⁾らはあて材の形成量は垂直からの傾斜角の正弦値に比例するとした。これはあて材の形成量が樹軸の横断方向に働く重力の分力の大きさに依存することを意味する。

また、これとは別に苗木を水平の回転台の縁に置いて遠心力をかけながら育てると、幹の遠心側にあて材がつくられるとともに、幹が求心側に傾くということも1940年頃から1950年代にかけて数人の人達が確かめ

ている^{16,28,29)}など。さらに、クリノスタットを用いて苗木を水平に倒した状態のまま幹軸を中心に回転させ、無重力類似状態で育てると、その幹には水平位置にもかかわらずあて材の形成が見られないことを確かめた人達もいる^{19,30)}(図5)。

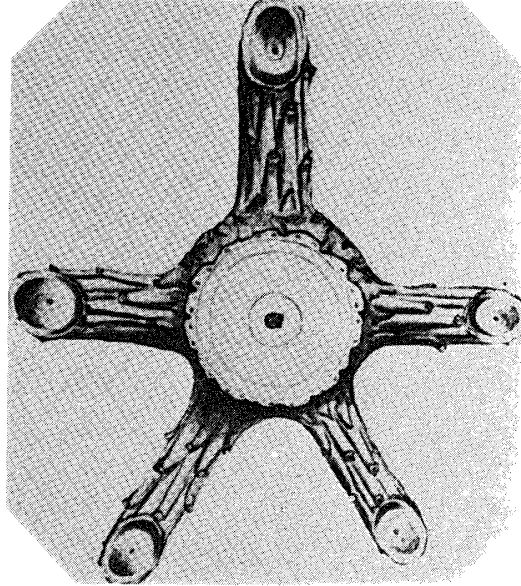


図5 針葉樹の苗を無重力類似状態で育てると幹にはあて材を生ぜず、すべての枝の腹側(向軸側)にあて材が生じて背側(背軸側)に屈曲する。(Münch, 1938)

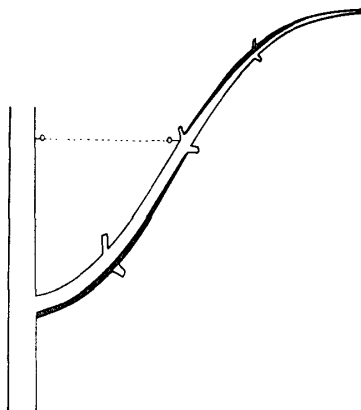


図6 針葉樹の枝を上方に引上げた際に生ずるあて材の分布模式図。(Jaccard, 1935)

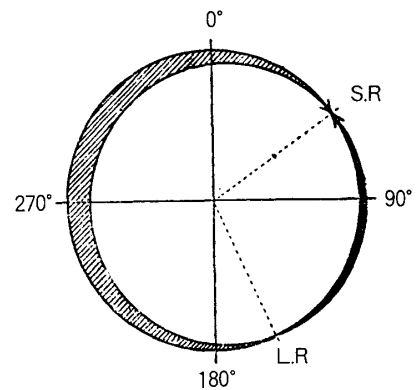


図7 重力の方向に対する枝軸の角度とあて材形成の関係模式図。矢の方向は枝軸に現われる屈曲方向、黒色部はあて材が背側(背軸側)に生ずる位置、斜線部は同じく腹側(向軸側)に生ずる位置を示す。矢の太さはあて材の形成程度を現わし、S.R., L.R. はあて材を形成せず、枝軸の屈曲も現われない位置。(尾中, 1949)

このように、少なくとも幹の場合には重力ないしそれに代る遠心力のような慣性的な力が軸と違った方向に働けば、その力に対して反対方向への屈曲を起こさせるようにあて材が形成されることが明らかにされ、幹の場合はあて材誘導の物理的要因は重力であるということに現在ではほぼ異論がなくなっている。

しかし、枝の場合はもっと複雑であって、例えば、枝を上方に引張り上げて枝角を小さくしてやると枝の上側にあて材が形成され(図6)、枝を押し下げようとすることは多くの実験によって確かめられており^{16,17,24,27)}など、このことは前述の背地性運動と矛盾する。さらに Münch (1938)³⁰⁾ は前述の無重力類似状態で苗を育てた実験で、枝は無重力下ではすべて向軸側(形態学的上側)にあて材を形成し、幹と枝との角度を広げようとすることを示した(図5)。また尾中(1935)¹⁷⁾ は幹を傾けることによってある枝が垂直になるようにし、重力の方向がその枝の軸方向と一致するようにした場合も、その枝の向軸側にあて材ができることを報告している。すなわち、枝の場合は重力とは無関係にあて材ができる場合がある。Münch³⁰⁾ や尾中¹⁷⁾ は、樹木の枝には葉などと同様に生理的な背腹性(dorsiventrality)があり、枝軸の方向に関係なく上偏生長(epinasty)を示す傾向があるのであって、樹木の場合はあて材をつくって上偏生長的屈曲をおこなうのだと説明した。さらに尾中^{12,17)} は枝の角度をいろいろ変えてあて材をつくらせ、枝の角度とあて材のできる量および位置の関係を調べ、枝には上偏生長性と背地性が釣合う角度(50°~60°と150°~160°)があることを示し、両者のバランスがくずれると弱い方にあて材をつくってバランスをとろうとした(図7)。このようなバランスのとれた位置があることは多くの研究者が認めており⁶⁾ (樹種によっても研究者によってもバランスのとれる角度は多少異なる)、このような位置を Little³¹⁾ は equilibrium position と名づけている。

また、尾中¹²⁾ はこのような考え方ができるのは枝の背腹の方向と重力の方向が一致している場合であって、枝の背腹の方向が重力の方向とずれている場合には、上偏生長性と背地性の合力の大きさと方向に対応してあて材がつくられるという考え方を示した(図8)。このことは他の人達によっても確かめられ、特に180°、つまり枝が裏返しになった場合に両者の合力が最大となり、あて材の形成量が最も多いということは誰もが認めるところである^{6,24,32)}。

しかし、枝のあて材誘導の要因はこれだけでは説明できないとする人達もあり、例えば Sinnott²⁴⁾, Wilson and Archer³²⁾ らは、equilibrium position に位置している枝をその枝角のままで横方向のループ状に固

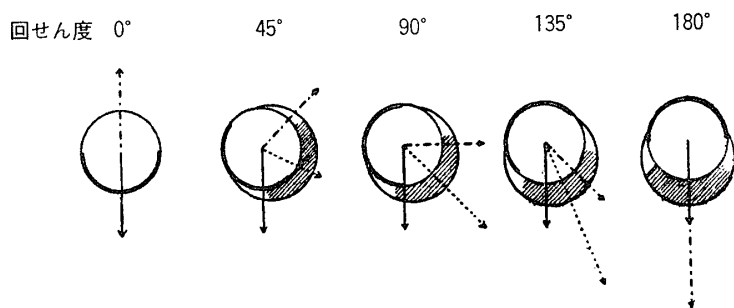


図8 枝の回せんにともなうあて材形成状態模式図。
円の太い線は背軸側を示す。斜線はあて材の形成側とその程度を示す。

- 背地性的屈曲をおこすために必要なあて材形成の方向と程度。
- 上偏生長的屈曲をおこすために必要なあて材形成の方向と程度。
- 両者の合力方向とあて材形成の程度。

(尾中, 1949)

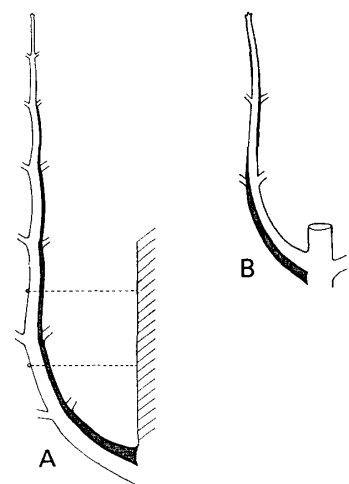


図9 枝における上偏生長性のそう失。

A. 年齢の高い枝の先端

B. 主軸頂端の切除

(Sinnott, 1952)

定してやると、ループの内側全周に沿って枝の横腹にあて材が形成されるという実験結果を示し、枝の場合は圧縮も要因の一つとなる可能性を否定できないとしている。さらに複雑なことに、Sinnott²⁴⁾ は年齢の高い枝を垂直位置に拘束すると、枝の先の方ほどあて材の形成が弱くなり、上偏生長性を失って垂直方向に伸長し始めることを示した（図9A）。また、マツ類の主軸の頂端を切除すると直下の輪生枝のうちの優勢な1本が上偏生長性を全く失い、主軸に代って立上ることはよく知られているが、Sinnott²⁴⁾ はそのような側枝の立上りは傾けた幹の立上りと同じように、下側での多量のあて材形成によっておこなわれることを明らかにした（図9B）。頂端を切除しても、代りに IAA (indol-3-acetic acid) を頂端に与えれば側枝の立上りはおこらず上偏生長を保つこともよく知られており、枝の上偏生長は主軸茎頂からのホルモン指令によると考えられるが、Sinnott²⁴⁾ は主軸茎頂から遠距離にある 高齢枝の先端での枝性の消失も茎頂からのホルモン指令が届かなくなったためではないかとしている。

2.2. 生化学的手殿

草本植物が背地性あるいは上偏生長を示すときは、いずれも傾斜上側と下側でオーキシンの濃度に偏りがあることは古くから知られている¹²⁾。一方、オーキシンは樹木の形成層活動をコントロールするということを示唆する事実も無数に知られている³³⁾。勿論、オーキシン以外のホルモン類（アンチオーキシン、ジベレリン、サイトカイニン、エチレンなど）も形成層活動や細胞分化・器官分化の上で重要であることも知られているが、いずれもオーキシンと組み合わされた時にその働きを発揮するもので、最も重要かつ基本的なものはオーキシンと考えられる^{6,33)}。

そこで、樹木があて材をつくって背地性的屈曲や上偏生長の屈曲をおこすのも形成層帯 and/or 分化帯内にオーキシンの上下側による偏りが生じることに起因するのではないかと予想するのは当然である。そのよ

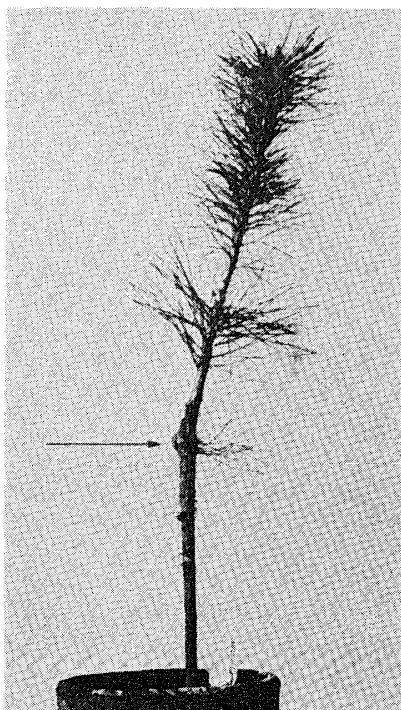


図10 幹の片側に合成オーキシンを塗布したラディアータマツの苗。塗布部にあて材が作られ、幹の屈曲がおこった。
(Wershing et al., 1942)

うな予想のもとに、あて材形成とオーキシンの関係を検討するための試みが、上述の物理的手段による実験と並行して1940年代から多くの研究者により繰り返されてきた。

最も直接的な手段としては、合成オーキシンを外生的に形成層に与えることであるが、このような実験の世界で最初の試みとして、尾中³⁴⁾は直立した幹の片側に高濃度の合成オーキシンを塗布し、塗布部下方にわずかの区間ではあるがあて材が形成されること、そしてその結果幹が反対側に屈曲することを認めた。このような尾中の結果はその後続々と多くの人達によって確かめられている^{35~38)}など (図10)。さらに、このように片側のみにオーキシンを与えた結果では、オーキシンの偏りが原因であるのかあるいは絶対濃度が原因であるのか不明であるが、これに対して、頂芽を切除した後芽の代りに高濃度の合成オーキシンを与えると、全周にわたってあて材ができることも確かめられた^{33,38)}。このように、合成オーキシンを外生的に高濃度で与えればあて材が誘導されることは確かであり、またオーキシンの片側への偏りがなくても、濃度が異常に高くなれば全周にでもできることも明らかになった。しかし、外生的に与えた合成オーキシンではなくて、樹木自身がつくる内生オーキシンの異常な増加が果して本当にあて材形成の原因なのだろうかという疑問が残る。

内生オーキシンに関して、傾斜した幹の上側と下側のオーキシン活性を直接測ったのも尾中³⁹⁾が世界で最初である。尾中は水平にして育てた幹の上側・下側それぞれの組織からオーキシンを寒天中に拡散させ、アベナテストにより上側にくらべて下側のオーキシン活性が2~4倍高いことを認めた。またNecesity³⁷⁾はあて材をつくりつつある枝の切口からカルスをつくらせたところ、カルスの生産量が枝の下側で多いことを認め、下側のオーキシン活性が高いとした。その他、ペーパークロマトグラフィーで傾斜上側・下側を比較して同じような結果を得た例もある⁴⁰⁾。しかし、これらの結果はいずれもあて材をつくりつつある傾斜下側にオーキシン活性が高かったという、いわば状況証拠にすぎない。

これに対して、Westing⁶⁾、Blum⁴⁰⁾らはアンチオーキシンの働きを持つTIBA (2,3,5-Triiodobenzoic acid) を枝の下側に塗布することによって、下側で活性が高いといわれる内生オーキシンの働きを阻害してやることを試み、TIBA塗布部では局部的にあて材の形成が阻害されることを示した。このようなアンチオーキシンの用いた実験は、あて材形成へのオーキシンの関与をいわば裏から確かめたことになる。

一方、1960年頃から植物生長制御物質の合成を進めていたメルク製薬会社の研究室で、1964年に新しいタイプの生長制御物質 (fluoren-9-carboxylic acids とそれらの誘導体) が合成され、モルファクチン類 (morphactins = *morphologically active substances*) と名づけられた⁴¹⁾。モルファクチンは植物の生長に対していろいろな作用をおよぼすことがわかったが、なかでも植物の重力屈性や屈光性を乱す性質を持つことや、オーキシンの輸送阻害 (オーキシンの求基的な流れはせき止めるが、オーキシンの作用そのものは阻害しない) をすることなどが知られた^{41,42)}。1970年代に入り、このモルファクチンを直立した幹の周囲に塗布すると、塗布部から上方の全周に肥大生長の促進がみられるとともに、その部分にあて材が形成されることがみいだされ^{43~45)}、これはオーキシンの求基的な流れがせき止められた結果、流れの上流部 (塗布部上方) のオーキシン濃度が高まったためであろうと解釈された。筆者らはモルファクチンを用いて同様の結果を再確認⁴⁷⁾するとともに、もしその解釈が正しいとすれば、モルファクチン以外のオーキシン輸送阻害剤を用いても同じ結果が得られるはずであると考え、オーキシン輸送阻害剤として早くから知られていた⁴⁸⁾ NPA (1-N-Naphthyl-phthalamic acid) をスギおよびカラマツの直立した幹の全周に塗布したところ、モルファクチンの場合と全く同様の結果を得た (図11)^{47,49)}。筆者らはさらに、幹をしばらく傾斜させて傾斜下側にあて材をつくらせた後、傾斜させたまま幹の周囲にモルファクチンの塗布をおこなったところ、塗布部より上方では肥大生長の促進とあて材の形成が、傾斜の下側のみならず傾斜の上側まで全周にわたって見られ (図12A)、塗布部より下方ではモルファクチン塗布時点まで続いていた傾斜下側のあて材形成さえも阻害されること (図12B) を見いだした^{47,50,51)}。ほぼ同様の結果はNPA塗布によっても得られた⁴⁷⁾。これ

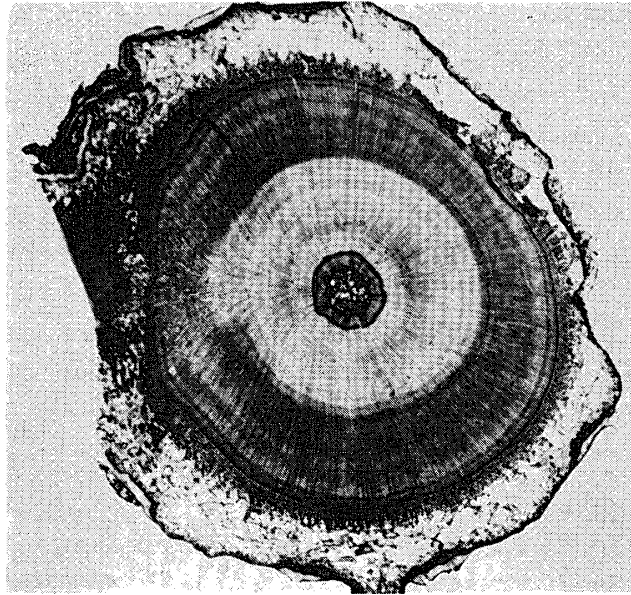


図11 スギ直立苗の幹の全周に NPA を塗布すると、塗布部上方で全周にわたっていちじるしいあて材が形成された。

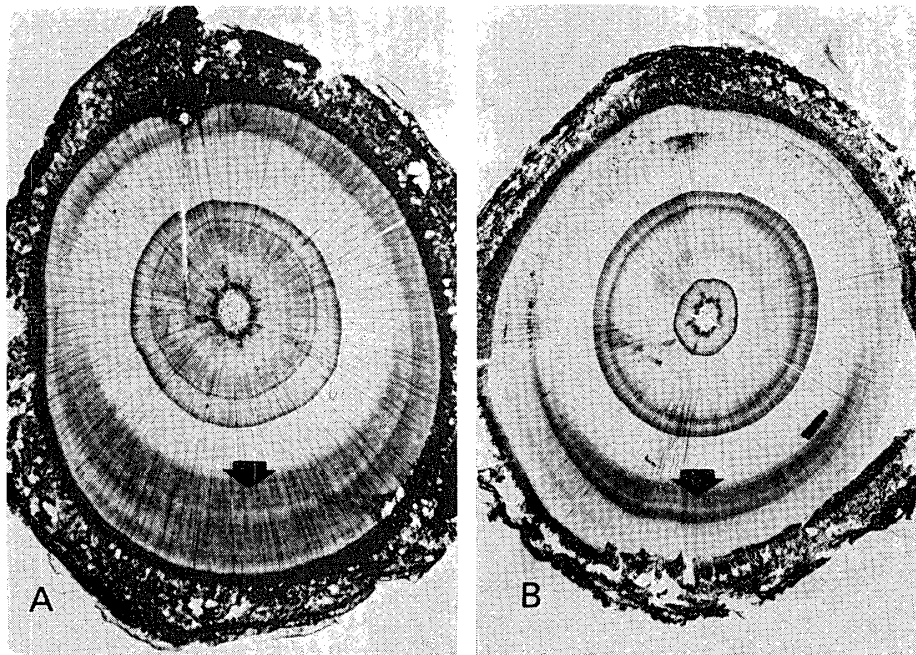


図12 スギ傾斜木へのモルファクチン塗布の効果。A, Bとも図の下方が傾斜下側。矢印の三ヶ月形濃色部は傾斜後モルファクチン塗布時点までに形成されたあて材。

- A. 塗布部より上方では全周にあて材が形成された。
- B. 塗布部より下方ではあて材形成が阻害された。

らの結果から一つ疑うとすれば、モルファクチン自身あるいは NPA 自身が上の方へ昇って行ってあて材形成を刺激したのではないかということであるが、そのためにはモルファクチンなり NPA が求頂的な一方通行をするということがなければおこり得ない。しかし両者ともそのような性質はないことがはっきりしており^{41,48)}、矢張りこれらの結果は求基的な内生オーキシンの流れがせき止められた結果上流部のオーキシン濃度が上昇してあて材がつくられたものと考えられる。

このようなことから、筆者らは形成層帯 and/or 分化帯におけるオーキシンの異常な高濃度化が針葉樹の圧縮あて材誘導の必要かつ十分な条件であると考えている。

以上、いろいろ針葉樹圧縮あて材の生因を探るために現在までおこなわれてきたことを極めて大ざっぱに述べてきたのであるが、あて材についての組織形態学的、あるいは物理的・化学的性質や、その形成過程についての記載的な研究に関しては、近年の非常に高度化された機器や手法の発達によって着実に進んできているように思われるのに対して、あて材の生因ということになると未だに靴の上からかゆいところを搔いているような感をまぬがれないのであって、いわば現在一つの壁にぶつかっているように思われる。

その壁というのは、①前半で述べたように物理的要因が重力だとすれば、重力の方向が移動したことを樹木の幹や枝がどうやって感知するのか、またその感知のメカニズムと特定部位にオーキシンが集中するメカニズムとはどう関連するのか；あるいは②オーキシンには求基的移动の他に側方移動をおこなうことがあるのか、あるとすれば求基的移动のメカニズムと同じなのか違うのか（求基的移动のメカニズムさえもまだよくわかっていない）；さらには③背地性屈曲と上偏生長的屈曲をおこすためのあて材形成がいずれもオーキシンの側方移動によるとすれば、背側あるいは腹側への正反対の移動のメカニズムは同じなのか、また背側・腹側いずれの方向に側方輸送するのかを決めるメカニズムは何なのか—などなど、いろいろ空想的推論を含めて仮説が出されているとはいえ、いわば植物生理学一般の問題として十分に解明されていない問題が山積しているのであって、あて材の生因というものをさらに深く探ろうとするならば、どうしても生物物理、生化学、細胞学、植物生理などの分野の研究者が力を合わせなければこの壁は突破できないと思うのである。

引用文献

- 1) 大日本山林会編：林業辞典 (1933)
- 2) 日本木材学会：木材誌, **21** (9), A1 (1975)
- 3) YOSHIZAWA, N., T. ITOH, K. SHIMAJI: 宇大演報, No. 18, 45 (1982)
- 4) 島地 謙, 須藤彰司, 原田 浩: 木材の組織, 森北出版, 216 (1976)
- 5) SCHACHT, H.: Bot. Zeit., **20**, 409 (1862)
- 6) WESTING, A.H.: Bot. Rev., **31**, 381 (1965)
- 7) SANIO, C.: Bot. Zeit., **18**, 193, 201, 209 (1860)
- 8) TIMELL, T.E.: IAWA Bull. n.s., **1**, 147 (1980)
- 9) HARTIG, R.: Forstl.-Naturwiss. Z., **5**, 96, 157 (1896)
- 10) HARTIG, R.: Cbl. ges. Forstw., **25**, 251 (1899)
- 11) SONNTAG, P.: Jarb. wiss. Bot., **39**, 71 (1904)
- 12) 尾中文彦: 木材研究, No. 1, 1 (1949)
- 13) 尾中文彦: 京大演報, No. 18, 1 (1950)
- 14) BURNS, G.P.: Vermont Univ. Agr. Exp. Sta., Bull. No. 219, 1 (1920), ex. 6)
- 15) BEHRE, C.E.: J. For., **23**, 504 (1925)
- 16) JACCARD, P.: Ber. schweiz. bot. Ges., **49**, 135 (1935)
- 17) 尾中文彦: 日林誌, **17**, 880 (1935)
- 18) EWART, A.J., A.J. MASON-JONES: Ann. Bot., **20**, 201 (1906)
- 19) WHITE, J.: Proc. Roy. Soc. Victoria, N.S., **20**, 109 (1908), ex 6)
- 20) JACCARD, P.: Fondation Schnyder von Wartensee, Zurich, 200 pp (1919), ex 6)
- 21) MORK, E.: Tidsskr. Skogbr., **36**, 1 (1928), ex 6)
- 22) HALLER, B.: Tartu Ulikooli Metsaosaakonna Toimetused, **24**, 223 (1935)

- 23) JACCARD, P.: Ber. schweiz. bot. Ges., **48**, 491 (1938)
- 24) SINNOT, E.W.: Amer. J. Bot., **39**, 69 (1952)
- 25) PILLOW, M.Y., R.F. LUXFORD: U.S.D.A., Tech. Bull. No. 546, 1 (1937)
- 26) SPURR, S.H., R.B. FRIEND: J. For., **39**, 1005 (1941)
- 27) HARTMANN, F.: Statistische Wuchsgesetz bei Nadel- und Laubbaumen, Springer Verlag (1942) ex 6)
- 28) JACCARD, P.: Ber. schweiz. bot. Ges., **50**, 279 (1940)
- 29) SCOTT, D.R.M., S.B. PRESTON: For. Sci., **1**, 178 (1955)
- 30) MÜNCH, E.: Jahrb. wiss. Bot., **86**, 581 (1938)
- 31) LITTLE, C.H.A.: PhD thesis, Yale Univ. (1967) ex 32)
- 32) WILSON, B.F., R.R. ARCHER: Ann. Rev. Plant Physiol., **28**, 33 (1977)
- 33) 島地 謙：木材研究資料, No. 13, 35 (1979)
- 34) 尾中文彦：日林誌, **22**, 573 (1940)
- 35) WERSHING, H.F., I.W. BAILEY: J. For., **40**, 411 (1942)
- 36) NECESANY, V.: Phytion, **11**, 117 (1958)
- 36) FRASER, D.A.: Nature, **164**, 542 (1949)
- 37) NECESANY, V.: Phytion, **11**, 117 (1958)
- 38) LARON, P.R.: In Kozlowski, T.T. (ed) Tree Growth, Ronald Press, 97 (1962)
- 39) 尾中文彦：日林誌, **24**, 341 (1942)
- 40) BLUM, W.: Ber. schweiz. bot. Ges., **80**, 225 (1971)
- 41) SCHNEIDER, G.: Naturwissenschaften, **51**, 416 (1964)
- 42) SCHNEIDER, G.: Ann. Rev. Plant Physiol., **21**, 499 (1970)
- 43) SMOLINSKI, M., M. SANIEWSKI, J. PIENIAZEK: Bull. Acad. Polon. Sci., er. Sci. Biol., **20**, 431 (1972)
- 44) SMOLINSKI, M., J. PIENIAZEK, M. SANIEWSKI: Trans. 3rd Symp. Accum. Transloc. Nutri. Regul. Plant Org., 553 (1973)
- 45) PHELPS, J.E., M. SANIEWSKI, M. SMOLINSKI, J. PIENIAZEK, E.A. MCGINNES, Jr.: Wood and Fib., **6**, 13 (1974)
- 46) PHELPS, J.E., E.A. MCGINNES, Jr., M. SMOLINSKI, M. SANIEWSKI, J. PIENIAZEK: Wood and Fib., **8**, 223 (1977)
- 47) 山口和穂, 伊東隆夫, 島地謙：第29回日本木材学会大会研究発表要旨, 77 (1979)
- 48) MORGAN, D.G., H. SODING: Planta, **52**, 235 (1958)
- 49) YAMAGUCHI, K., T. ITOH, K. SHIMAJI: Wood Sci. Technol., **14**, 181 (1980)
- 50) 山口和穂, 伊東隆夫, 島地謙：第31回日本木材学会大会研究発表要旨集, 62 (1981)
- 51) YAMAGUCHI, K., K. SHIMAJI, T. ITOH: Wood Sci. Technol., **17**, 81 (1983)