

外力下における木材の形成とその物性*

長谷川庸作**・山田 正**・角谷和男**

Yousaku HASEGAWA**, Tadashi YAMADA** and Kazuo SUMIYA** : Formation of Wood under Restraint and Properties of the Wood.

1. 緒 言

スギの苗木に一定たわみを与えた時、それを保つに要する外力の経時変化と、その過程で形成された木部の赤外スペクトルについて前報¹⁾で述べた。一般に形成層始原細胞が分裂し細胞壁が木質化する過程で樹木に歪を与えた場合、木質化の完了した木部による応力緩和現象の外に樹木が不正常な状態から復帰しようとする植物体固有の動き（例えば屈地性、屈光性など）を生じさせる木部の形成に伴う力学的な応答を生ずることが期待される。

WARDROP は *Eucalyptus* の若木についてこのような現象を見出し、かつ、その復帰が、いわゆる引張あてを生ずる側の強い収縮によつて生ずること、あてはこの復帰を生じさせるのに必要と思われる部分にのみ分布することを指摘した²⁾。

樹幹が曲げられた場合、針葉樹においてはその下側に、広葉樹においてはその上側にあてを生ずるが、あての特性は既往の諸研究によつて明らかのように正常材のそれに比して著しく異なっている。WARDROP は前に述べた幹の屈向はあてによつてひきおこされると結論しているが³⁾、その過程は先に示したような異なる性質を有する物質の添加に伴う新たな応力発生過程といえる。すなわち針葉樹のあての部分では、正常な部分に比してリグニンが多いとされ、セルロースによる骨格構造とこのすきまに入りこむマトリックス成分としてのリグニン形成の過程と関連した特異な力の状態を考えることができる。これを化学レオロジー的な現象とみなすと、従来の化学レオロジーが取扱った問題はゴムなどの物質が均一に変化してゆく時の架橋、切断に伴う緩和現象に関するものが主であるが⁴⁾、不均一構造の形成が関与する時には、木材表面に塗布した樹脂層硬化過程に生ずる物理化学的な内部応力発生のような負の応力緩和現象が現われ⁵⁾、先に示したあてなどの発生に伴う生物学的な応力発生過程と類似しており、不均一な物質が生物的に構成されてゆくこのような過程の解析は将来のレオロジーの一分野として重要性を有しているといえる。

なお、草本植物の負の屈地性は、傾いた茎の下側の生長速度が早いことから説明されているが、木本植物ことに広葉樹においては傾いた幹の上側に偏心生長する。つまり上側での生長速度が早く屈地性はこのことでは説明できない。また、針葉樹のあての仮道管の微細構造において、S₂層にらせん状の割れ目があるが、この成因が物理的原因によるものであるとすれば、それは屈地性と関連してくることも考えられる。WARDROP らはこの割れ目がセルロースラメ

* 一部を日本木材学会第19回大会（1969年7月、札幌）木材形成に関するシンポジウムで発表

** 木材物理部門 (Division of Wood Physics)

ラのマイクロフィブリルに直角方向の収縮によつて生ずることを示したが⁶⁾, CASPERSON らはこの割れ目は, セルロースの沈着が一定間隔で中断されることによつて生ずる, つまりラメラの沈着に一定の選択性のあることを示した⁷⁾。この点について CÔTÉ らは, 最初の段階ではマイクロフィブリルに直角方向で収縮がおこり, ついで選択的なラメラの沈着が行なわれることを示している⁸⁾。

一方, 木材形成に関連したレオロジー現象の一つに, いわゆる生長応力に伴う変形があげられる。その分布の典型的なものは BOYD⁹⁾, KÜBLER¹⁰⁾, 渡辺¹¹⁾ らによつて示されているように, 軸方向の髓の付近で圧縮, 外周部で引張に現われる。樹幹内にこのような生長応力が生ずる原因について BOYD は細胞分化の際にセルロースと他のマトリックスとの相互作用により軸方向の収縮および横方向の伸長が行なわれると考えた¹²⁾。また, WATANABE はリグニンが重合する時にマイクロフィブリル間の空隙に入りこんで不可逆的な膨潤をひきおこすとし, 細胞が軸方向に伸長するか, 収縮するかはマイクロフィブリルの傾角および膜層構造によつて決定されるとしている¹³⁾。このような生長応力の研究は, 前述の特異な負の応力緩和現象の解明にあずかるもので, それには, 細胞壁の合成の経時的变化についても考察を必要とする。例えば BOBÁK らは, ポプラの細胞壁の電子顕微鏡による観察からセルロースは午前12時から午後6時までの間に沈着し, リグニンは午前0時から午前4時までの間に沈着すること, したがつてラメラはセルロースの多い部分とリグニンの多い部分から成ることを示した¹⁴⁾。細胞壁構成成分の集合状態や重合の過程を知るためには, このような変化に敏感な粘弾性的特性の研究も将来必要であると考えられる。

本報においては, 以上のような観点から, 一定歪を与えられた樹木の力学的な応答と, それを生じさせた部分の二, 三の物性との対応から負の屈地性を生じさせる原因, およびあて材生成の原因についての考察を行なつた。

実験にあたり住友林業株式会社近江試験地および京都市北区杉阪, 山本氏所有の林地を使用させて頂いた。ここに謹んで同社研究室の荻本博, 西田滋両氏, および山本徳次郎氏の御厚意に深甚の謝意を表する。また当所リグニン部門の方々には多大な御協力を頂いた。ここに深く感謝する。

2. 実 験

2.1 曲げ

供試木は, 京都大学宇治構内, 滋賀県志賀町北小松, および京都市北区杉阪の山林に成育する3~5年生のスギ (*Cryptomeria japonica* D. DON) および京都大学宇治構内に成育する2年生のポプラ (*Populus nigra* L. var. *italica* KOEHNE) を用いた。

曲げたわみは, もとの幹の方向に直角になるところまで与えることとし, Fig. 1 (a) に示すように水平の位置まで行なつたもの, 同図 (b) のように最初に樹幹を水平の位置にしておいて, 鉛直の方向に曲げたもの, および同図 (c) のように, 水平面内で曲げを行なつたものの三種類について実験した。いずれの場合も幹の先端に近い方の支点にバネ秤で負荷し, この支点を離れるに要する力をもつてたわみを保持するに要する力として経時的に読みとつた。

Fig. 1 (a) の固定方法による実験は負荷時期の影響を調べるために北小松におけるスギを春

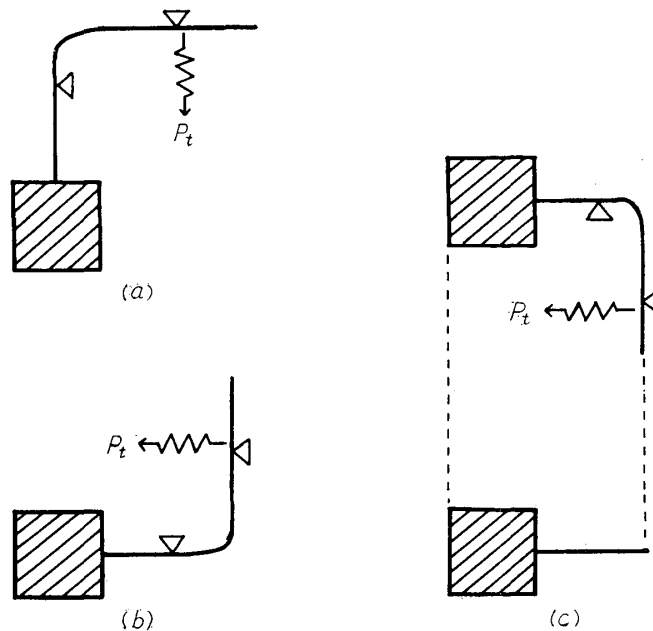


Fig. 1 Diagrammatic representation of the experiments for a constant deflection.

- (a) Stem bent horizontally and allowed to recover.
 - (b) Stem bent to upright to keep the apex remained vertical.
 - (c) Stem bent in the horizontal plane.
- The force, P_t , was measured by a spring balance.

材形成期の1968年5月10日より12本，杉阪におけるスギを夏材形成末期の1968年8月21日より15本，宇治におけるスギを休止期の1968年12月30日より11本，またポプラは1969年6月11日より5本実験を行なった。なお，杉阪においては，対照として同一株より萌芽したスギ4本を間欠的に水平に曲げるに要する力も測定した。

Fig. 1 (b)の固定方法による実験は宇治のスギ5本およびポプラ5本を用い1969年6月11日より，また Fig. 1 (c)の固定方法による実験は北小松のスギ4本を用いて1969年6月20日よりはじめた。

2.2 IR スペクトル

Fig. 1 (a)のスギの実験において最初に与えたたわみによる最大曲点の付近に形成されたあての部分とこの反対側の部分，および対照木の今年度生長部分からそれぞれ 200 mesh の木粉を作り，KBr 錠剤法で赤外分光計（日本分光製 DS 402G 型）を用いて $4000\sim 650\text{ cm}^{-1}$ の赤外スペクトルを測定した。

2.3 X線回折

Fig. 1 (a)のスギおよびポプラの実験で荷重の復帰が充分に行なわれたものから，与えられたたわみによる最大曲点で厚さ 0.5 mm の板目試片を，あての見られる方とこの反対側から切り出し試料とした。

X線回折像は，理学電機製ロータユニット RU-3 型と，ラウエカメラを用いて求めた。試料間隔は 5 cm，出力は 40 kV，40 mA で Cu-K α 線を用いて 20°C，相対湿度45%の室内で撮影した。

2.4 リグニンの分布

あての部分のリグニン含量を同一樹幹の反対側と比較するため次の実験を行なった。

試料は、Fig. 1 (a)のスギおよびポプラの実験で荷重の復帰が充分に行なわれたものから、与えられたたわみによる最大曲点を長さ約 2 cm に玉切りし、あての見える方向、およびこの反対側からマイクロームにより厚さ 20μ の板目切片を連続的に得てこれを炉乾し、約10枚ずつ (3~6 mg) 一回の測定に使用した。

リグニンの定量は JOHNSON らの方法¹⁵⁾ を若干修正し、次のように行なった。まず試料を秤量しアセチルブロミド酢酸溶液 (1:3, v/v) 2 cc を入れた栓つき試験管に入れ 70°C の湯浴中に45分保持する。この間約10分毎に試験管を軽く振るようにする。これを 15°C に冷却後 2 N水酸化ナトリウム溶液 1.8 cc および酢酸 10 cc を入れた 50 cc メスフラスコ中に移して攪拌する。さらに 7.5M 塩酸ヒドロキシルアミン溶液 0.2 cc を加えて攪拌、冷却した後酢酸を加えて 50 cc とし日立 124 型ダブルビーム分光光度計で、スギについては $280\text{ m}\mu$ 、ポプラについては $278\text{ m}\mu$ の波長における紫外線吸収強度からリグニン量を算定した。この際、別途にあらかじめ Klason リグニン量を定量した木粉によって検量線を作製した。

3. 実 験 結 果

3.1 曲げ

Fig. 1 (a)の固定方法を用いて行なったスギの実験結果のうち1968年5月よりのものを Fig. 2 に、1968年8月からのものを Fig. 3 に、1968年12月からのものを Fig. 4 に、それぞれ代表的なものの荷重変化を示す。いずれの時期に開始したものも最初ゆるやかに荷重は緩和するが、新たな細胞の増殖に伴い荷重の復帰が始まる。この復帰は細胞増殖が行なわれない時期においては見られないし、いつたん復帰しだしてから休止期を迎えた場合に生ずる復帰は著しいものではなかった。

同じ固定方法を用いたポプラの1969年6月からの実験結果を Fig. 5 に示す。これもスギと同様の荷重変化の過程を示している。

しかしこれらの荷重復帰の過程には同時に直径の肥大がおこっているのものでその効果を補正し

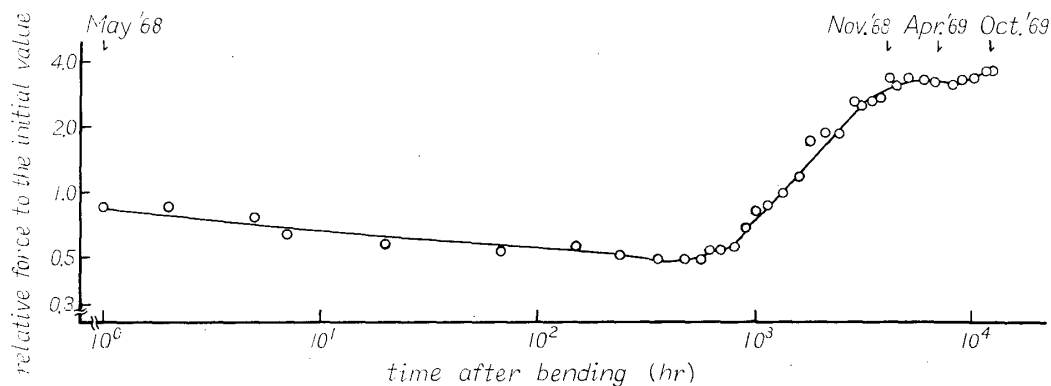


Fig. 2 The relative force required to keep the stem of SUGI tree to the right angle by the method (a) in Fig. 1. The experiment was begun from the season of early wood formation, May 10, 1968.

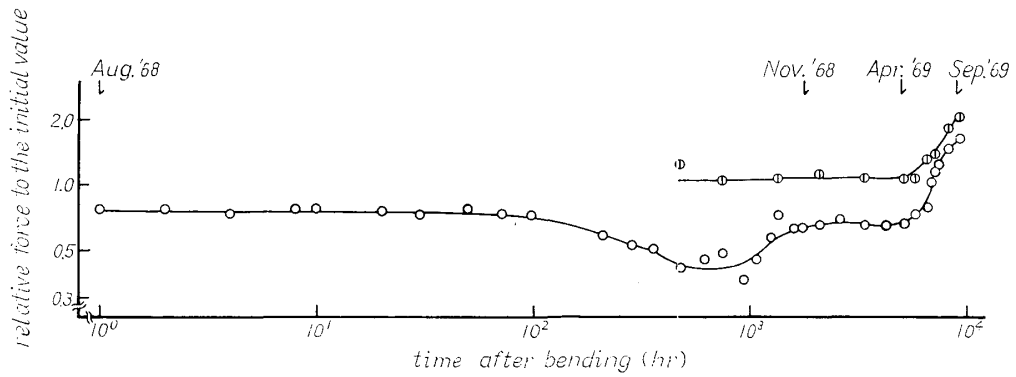


Fig. 3 The relative force required to keep the stem of SUGI tree to the right angle by the method (a) in Fig. 1. The experiment was begun from the season of the end of growing season, Aug. 21, 1968.

○ : constant deflection continued
 ① : intermittent bending

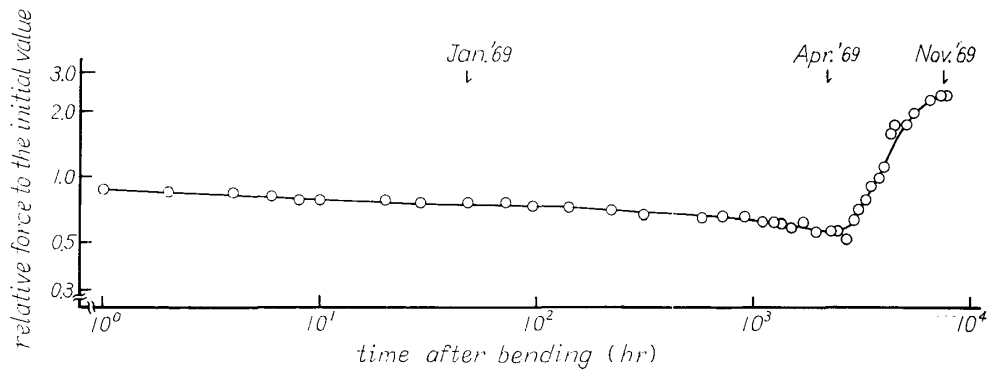


Fig. 4 The relative force required to keep the stem of SUGI tree to the right angle by the method (a) in Fig. 1. The experiment was begun from the resting season, Dec. 30, 1968.

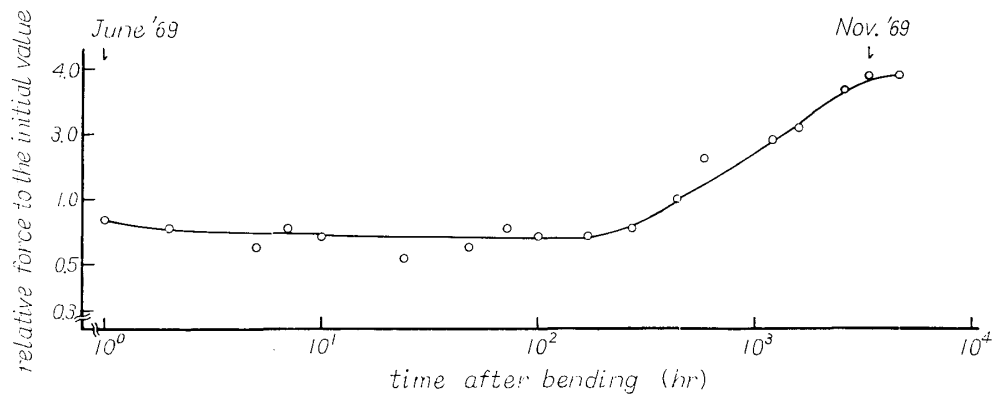


Fig. 5 The relative force required to keep the stem of poplar tree to the right angle by the method (a) in Fig. 1. The experiment was begun from the season of early wood formation, June 22, 1969.

たものが Fig. 6~9 である。これらの図は次式より求めたものである。

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_0} = \frac{P_t}{P_0} \left(\frac{D_0}{D_t} \right)^3 \quad \dots\dots\dots ①$$

ここに P_0 , D_0 はそれぞれ実験開始時の荷重, 上下の支点の直径の平均を示しており, P_t , D_t は時間 t における荷重, 上下の支点の直径の平均をそれぞれ示している。 σ_t/σ_0 は直径の

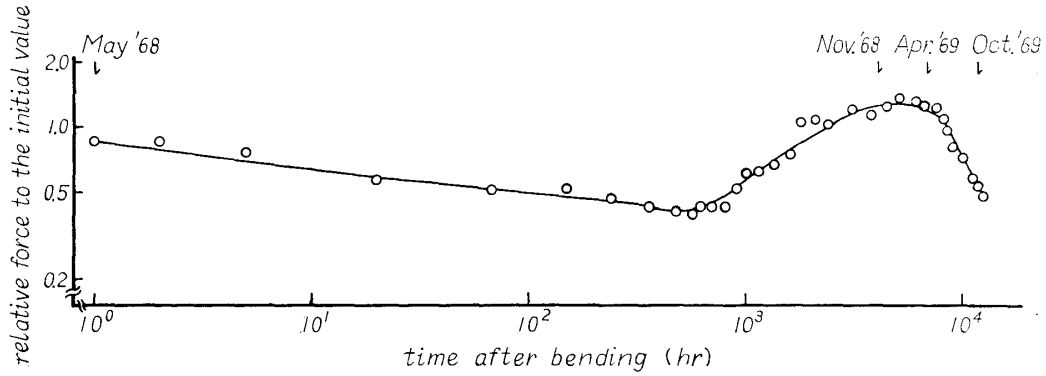


Fig. 6 The relative force with compensation of diameter growth calculated by the equation ① from Fig. 2.

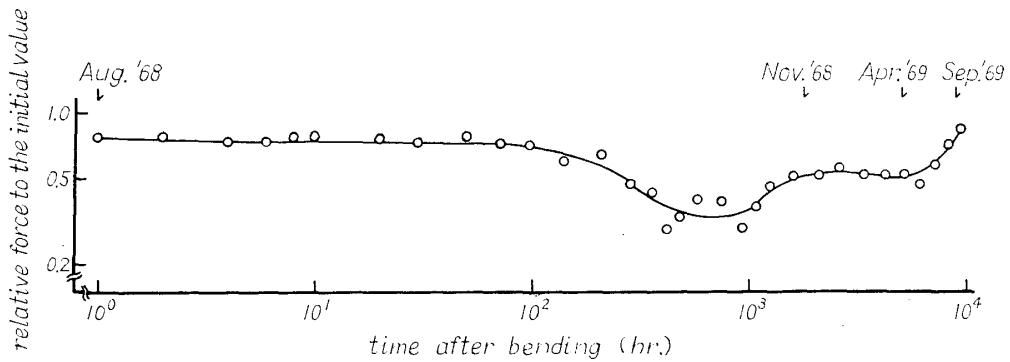


Fig. 7 The relative force with compensation of diameter growth calculated by the equation ① from Fig. 3.

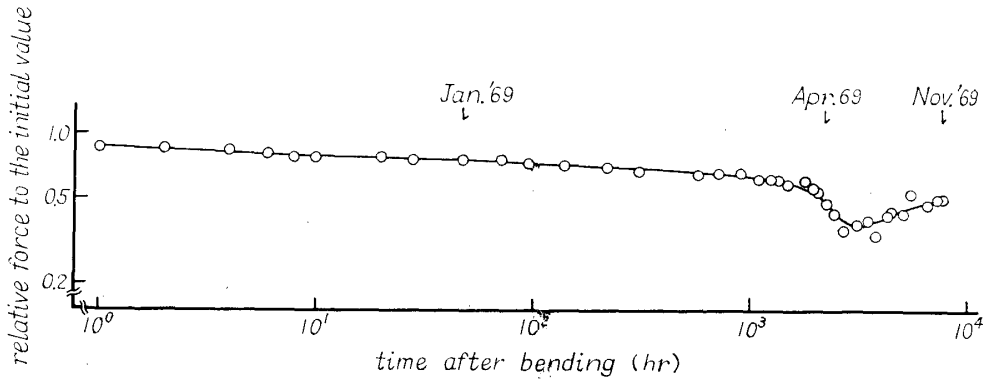


Fig. 8 The relative force with compensation of diameter growth calculated by the equation ① from Fig. 4.

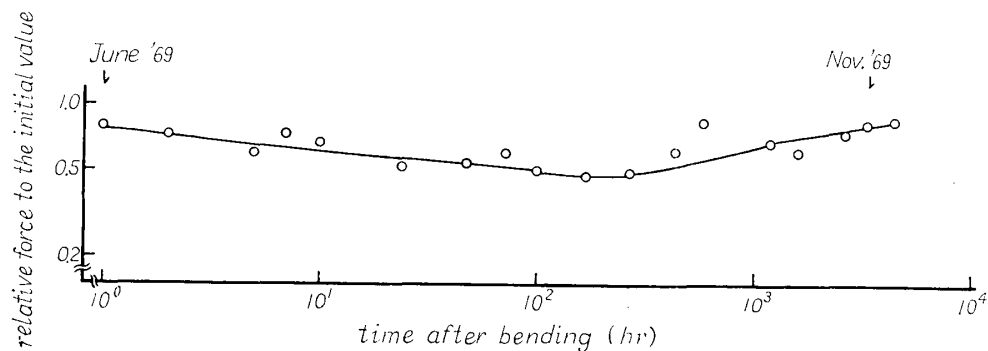


Fig. 9 The relative force with compensation of diameter growth calculated by the equation ① from Fig. 5.

肥大を考慮した力の変化を示す。

これらを見るといずれの場合もかなり負の応力緩和が生じていることがわかる。しかしFig. 6に見られるように2年目を迎えたものは正の緩和を続けている。

次に、Fig. 1 (b) および (c) の固定方法を用いたスギの実験結果を Fig. 10, 11 にそれぞれ示す。また比較のために Fig. 1 (a) の固定方法を用いて同時に行なつたスギの実験結果を Fig. 12 に示す。これらは、いずれも①式を用いて補正されている。

これらを見ると (a) の固定方法では先述の負の緩和が生じているが、この開始時期とほぼ一致して (b) の固定方法の時には急激な正の緩和を生じている。ポプラで行なつた (b) の固定方法による結果を Fig. 13 に示すが、この結果と (a) の固定方法で同時に実験した Fig. 9 を比較しても同じことがいえる。他方、スギで行なつた (c) の結果はほぼ直線的な正の緩和しか示していない。

今、(a), (b), (c) の固定方法を用いたスギの実験によるあての発生状況とその横断面の写真によつて Photo. 1~3 にそれぞれ示す。これらによるとあては必ず傾いた幹の下側に発

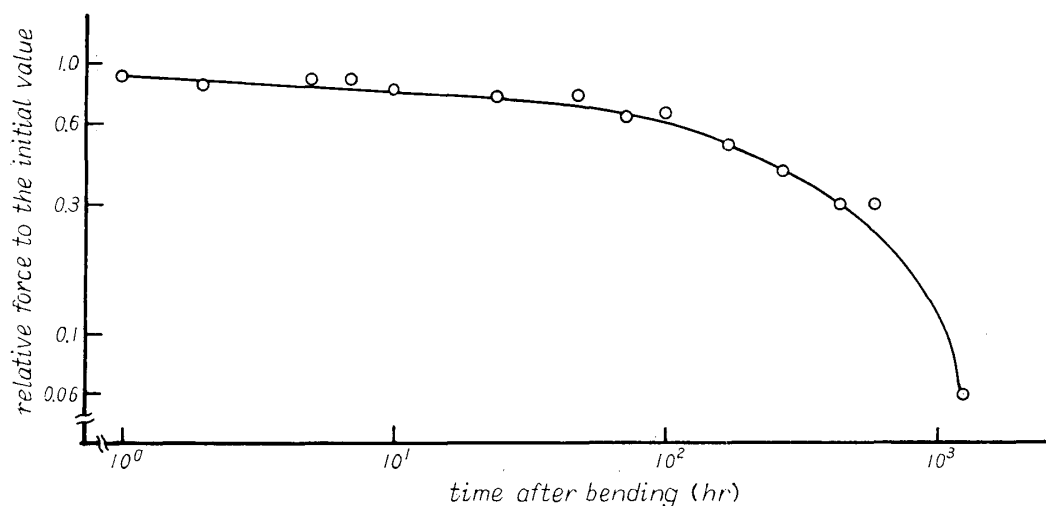


Fig. 10 The relative force required to keep the stem of SUGI tree to the right angle by the method (b) in Fig. 1 compensated by the equation ①. The experiment was began from June 11, 1969.

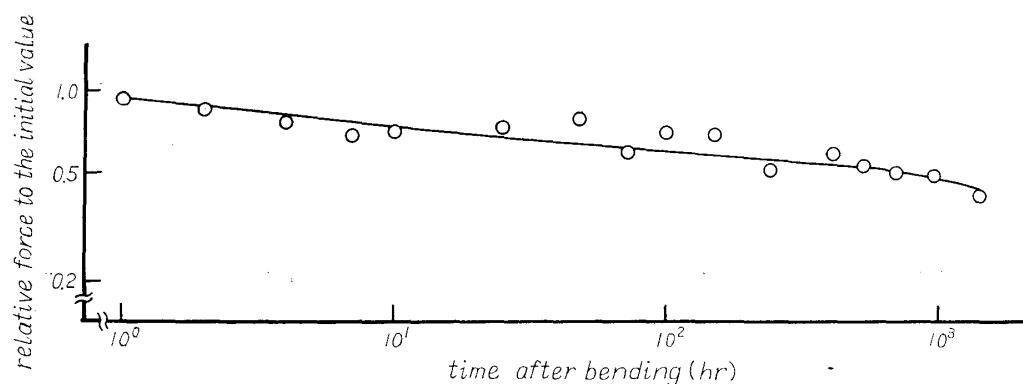


Fig. 11 The relative force required to keep the stem of SUGI tree to the right angle by the method (c) in Fig. 1 compensated by the equation ①. The experiment was began from June 20, 1969.

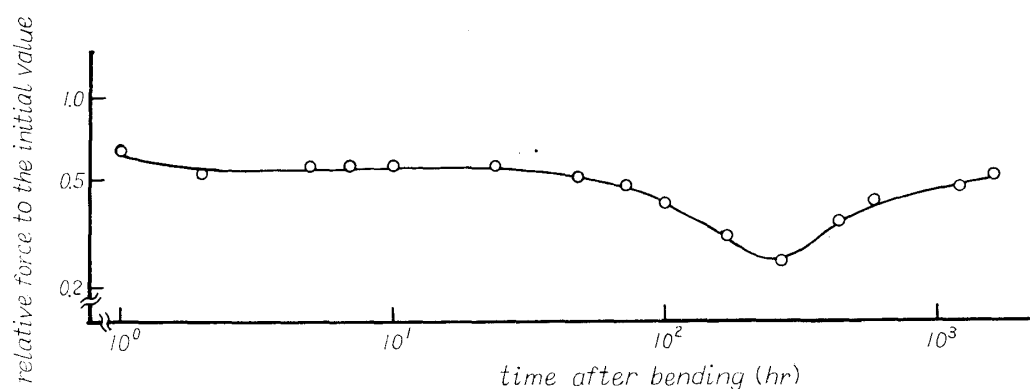


Fig. 12 The relative force required to keep the stem of SUGI tree to the right angle by the method (a) in Fig. 1 compensated by the equation ①. The experiment was began from June 11, 1969.

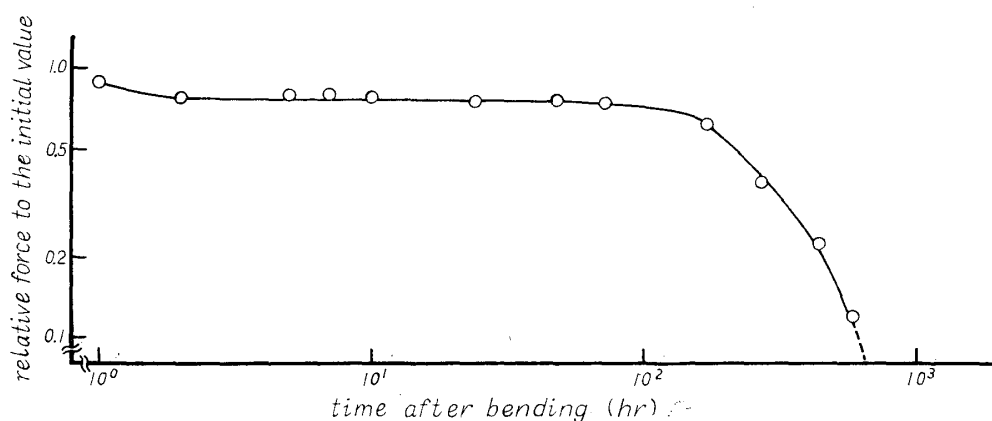


Fig. 13 The relative force required to keep the stem of poplar tree to the right angle by the method (b) in Fig. 1 compensated by the equation ①. The experiment was began from June 11, 1969.

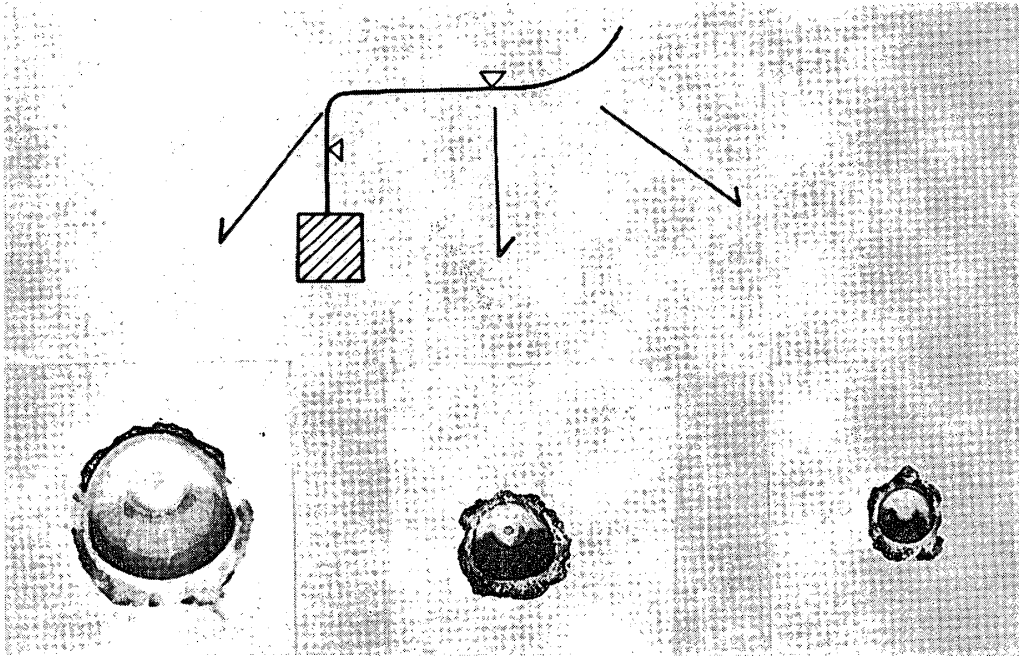


Photo. 1 The cross figures of the stem of SUGI tree bent with the method (a) in Fig. 1. The dark portion indicates the compression wood. The arrows indicate the sampling position. The direction of gravitational force is parallel to the side edge of this page.

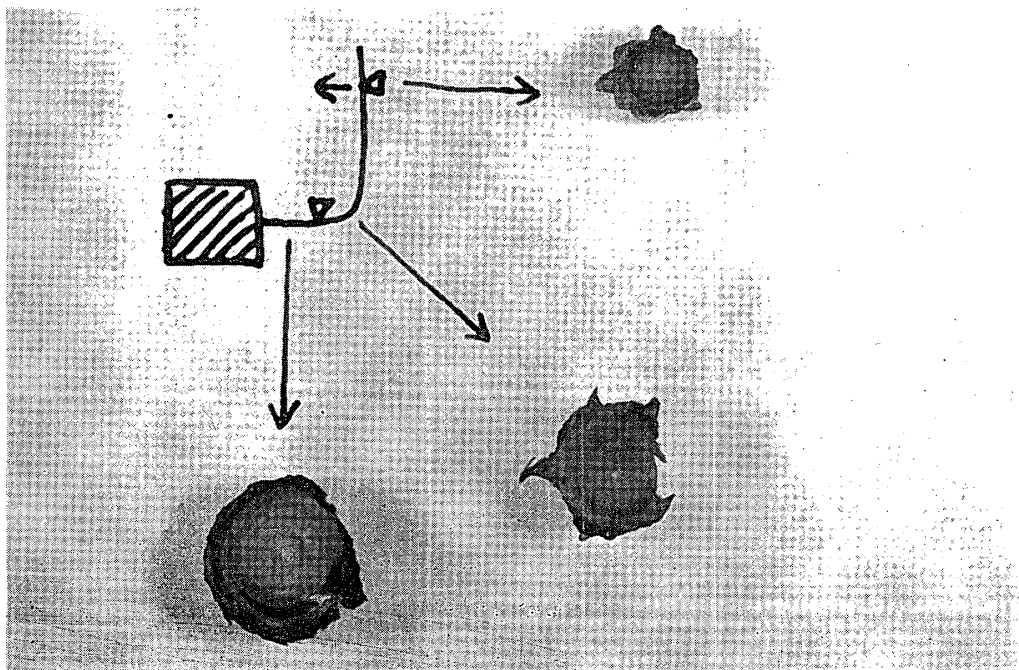


Photo. 2 The cross figures of the stem of SUGI tree bent with the method (b) in Fig. 1. The dark portion indicates the compression wood. The arrows indicate the sampling position. The direction of the gravitational force is parallel to the side edge of this page.

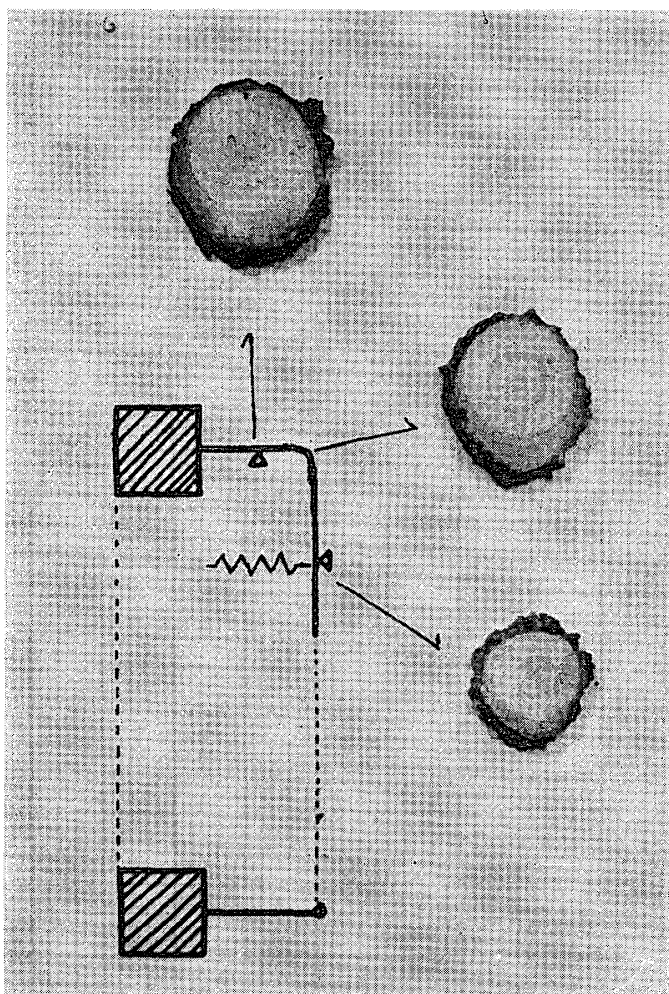


Photo. 3 The cross figures of the stem of SUGI tree bent with the method (c) in Fig. 1. The dark portion indicates the compression wood. The arrows indicate the sampling position. The direction of the gravitational force is parallel to the side edge of this page.

生している。また Photo. 2 に見られるように鉛直になつた部分にはあては発生していないから、あての発生は屈地性と何らかの関連を有していることを示している。このことは直線的な正の緩和しか示さなかつた (c) の固定方法の場合、あては曲げの方向に対し直角方向にしか発生していない (Photo. 3) ことから明らかである。

3.2 IR スペクトル

KBr 錠剤法によつて得られたあてとその反対側、および対照材の IR スペクトルのうち $1700\sim 1400\text{ cm}^{-1}$ のものを Fig. 14 に示す。これによると 1595 cm^{-1} のリグニンの芳香核に帰属せられている¹⁶⁾バンドの吸収があての部分で相対的に大きい。また $810, 870\text{ cm}^{-1}$ のグルコマンナンに帰属するとされている¹⁶⁾バンドの吸収が小さいという傾向も見られたが、これらはいずれも化学的成分のあてと正常材間の違いを示すものである。なお、先に切片によつて得られた 1060 および 1030 cm^{-1} の吸収帯の変化¹⁾は、KBr 錠剤法によればさほど明らかでなく、今後の検討を要する。

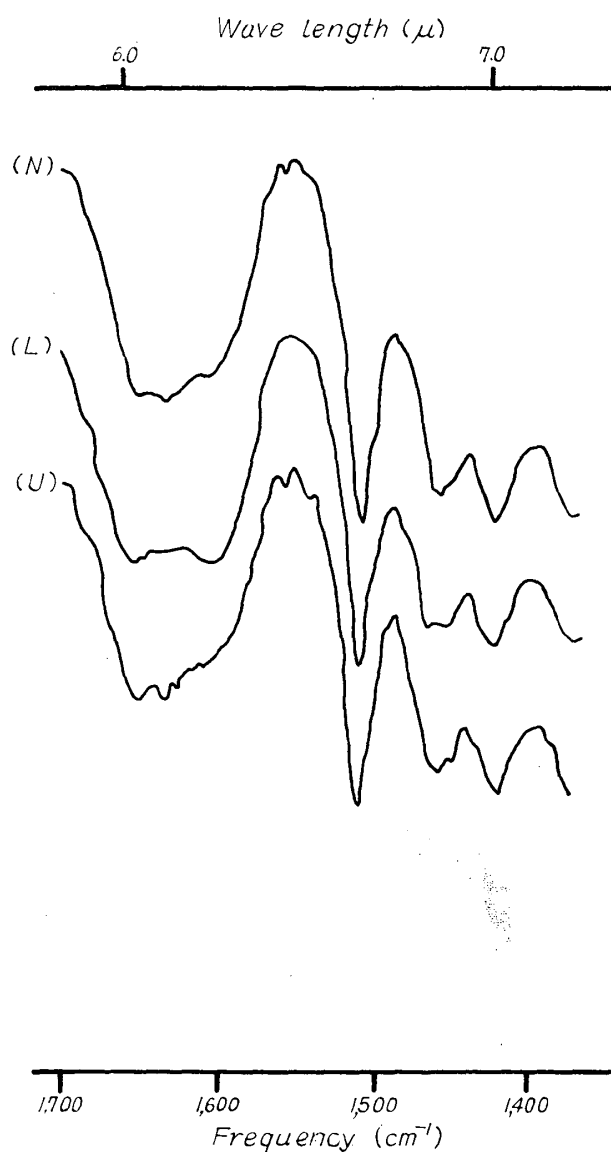


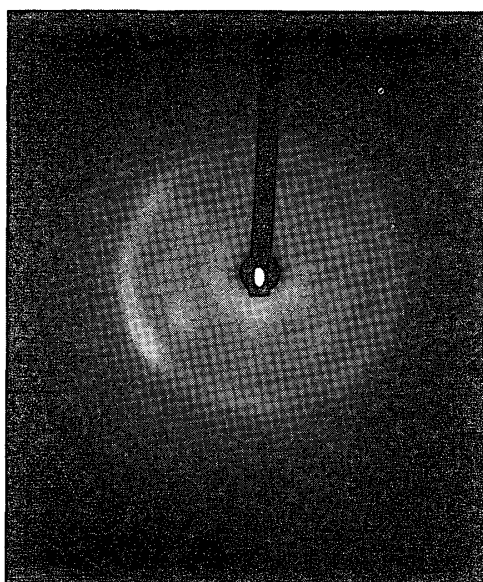
Fig. 14 Examples of infrared spectra of the xylem of SUGI trees formed during restraint by the method (a) in Fig. 1. They were measured by KBr pellet method.
(N) : Normal wood
(L) : Lower side of the bent stem
(Compression wood)
(U) : Upper side of the bent stem

これよりあておよび正常材構成成分の原子間力および原子間の振動様式の違いについてくわしい知見は得られないが、あとにのべるようにセルロースとこれを取りまくマトリックスの存在形態についてさらに解明してゆく必要がある。

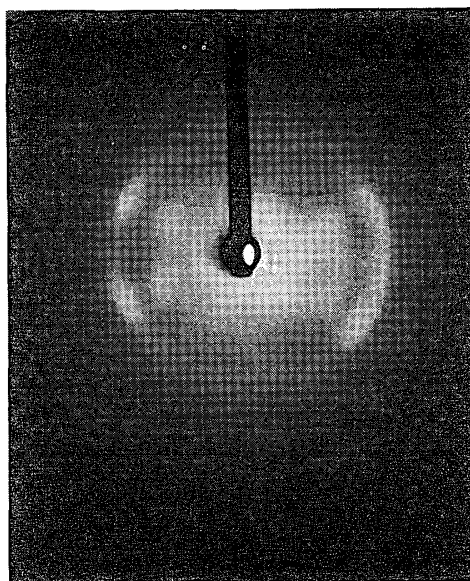
3.3 X線回折像

曲げられた幹の下側および上側に形成された部分の X線回折像をスギについては Photo. 4 の (A), (B) に、ポプラについては Photo. 5 の (A), (B) にそれぞれ示す。

スギの場合、あての形成されている下側において、赤道をへだてた 002 面の回折像の間隔が、上側に形成された部分のそれに比して大きい。このことは、あての部分では反対側に比してミセル傾角が大きいことを示している。またあての部分では子午線上にもぼんやりした回折像が見られる。WARDROP はこれについてミセル傾角が大きくなった場合に子午線をへだてた 2 つの 002 面の回折像が互いに重なり合ったためだとしている¹⁷⁾が、あての場合には S_1 層が

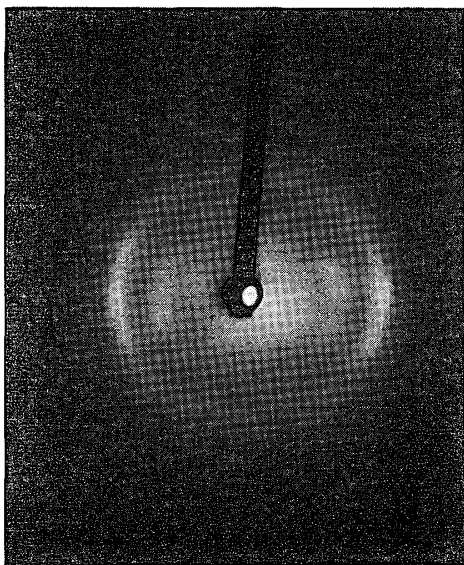


(A)

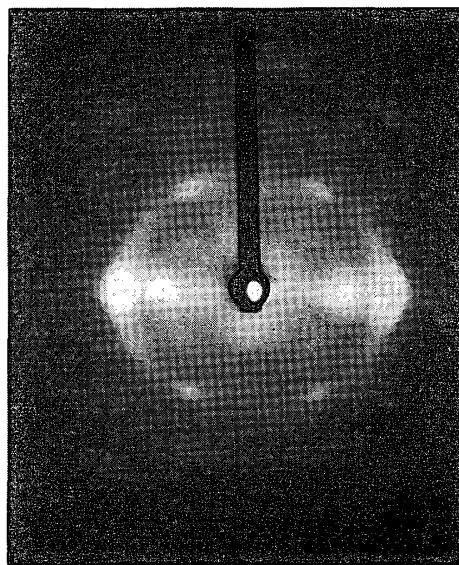


(B)

Photo. 4 The X-ray diagram of the xylem of SUGI tree formed during the experiment (a) in Fig. 1. (A) and (B) indicate the lower and upper side of the portion of the maximum curvature between two supports, respectively. Compression wood was apparent along the lower side.



(A)



(B)

Photo. 5 The X-ray diagram of the xylem of poplar tree formed during the experiment (a) in Fig. 1. (A) and (B) indicate the lower and upper side of the portion of the maximum curvature between two supports, respectively. Tension wood was apparent along the upper side.

かなり厚いためその部分のミセルの横方向の配向を示していると考えられることもできる。

次にポプラの場合、あての形成されている上側の部分では赤道上に 002, 101, $10\bar{1}$ 面の回折像がはつきり現われるほか 021 面の回折像もはつきり現われ、反対側に形成された部分に比して対照的である。このことは、ポプラのあての部分のミセル傾角は反対側に比して小さくかつ結晶の配向が良くなっていることを示すものである。

3.4 リグニンの分布

Table 1 に見られるようにスギのあての部分ではリグニン含量が反対側に比して大きく、ポプラではその逆の傾向が見られる。連続的なくわしい分布については実験精度の点からはつきりしない。しかし IR スペクトルにおいても曲げられた幹の下側は上側にくらべてリグニンの多い木部が形成されることは確かであり、屈地性とリグニン分布には何らかの関連があるといえる。

Table 1 Lignin content (%) of the xylem formed at the portion of the maximum curvature between two supports in Fig. 1 (a).

	SUGI	poplar
Upper side	24	13
Lower side	46	28

4. 考 察

(a)の固定方法で行なつた実験結果より、負の緩和現象の生ずること、負の緩和は屈地性によつて生ずること、そして屈地性はあての発生と関連することが確認された。

短時間側に見られる正の緩和現象は、既に形成されていた木部によるものであつて、一般的な材の応力緩和と考えてよい。これを生材の飽水状態における緩和現象と比較して見るとほぼ直線的である点で一致している。その後、負の緩和の過程が生ずるが、この開始時期は KENNEDY らが jack pine などを用いて調べた形成層で分化した細胞の二次膜肥厚と木質化の行なわれる時期¹⁸⁾とはほぼ一致している。たわみを与えられたまま冬を越した場合、荷重の新たな負の緩和が開始されるのは4月ごろからであるが (Fig. 2~4)、スギについての既往の報告¹⁹⁾では、形成層活動は3月ごろから開始されていて両者に約1カ月の差が見られることとなる。また、前報¹⁾で報告したように負の緩和の未だ現われていない試料にもあての部分が既にいくらかは生じている。つまり前述の正の緩和機構との相剋が見かけの負の緩和が開始される以前に行なわれており、負の緩和が正の緩和に対して相対的に大きくなつた時に初めて見かけの負の緩和が生ずると考えられる。

(b)の固定方法の時に見られる正の急激な緩和の開始時期は (a)の固定方法の時に見られる負の緩和の開始時期とはほぼ一致しているが、これは前述のような二要素の相剋ではなく屈向が正の緩和をさらにおしすすめるためであろう。

また (c)の固定方法では、おおむね直線的な正の緩和しか観察されないが、これは屈向を生じさせる部分の形成される方向が曲げの方向と直交しており、前述の異常な緩和は屈向に関連するものであることがさらに確認された。なお、間けつ的に水平の位置まで曲げるに要する力の測定結果と連続的な測定結果との差、および (a), (b), (c)の曲げ方による測定結果との差については今後の検討を待ちたい。

しかしこの負の緩和は2年目に入るとどの場合もあまり顕著には現われず、肥大を考慮した

時は逆に正の緩和さえ示している (Fig. 6)。これは一つの平衡位置を得た後の植物体の順応過程と考えられる。その機構については将来考察することとし、ここではとりあえず一年目に生ずる負の緩和現象について考察する。

負の緩和と密に関連する屈地性が生ずるには、傾いた幹の下側あるいは上側に軸方向の引張または圧縮を生じさせる必要がある。先に述べた WATANABE の軸方向の生長応力発生の仮定¹³⁾が正しいとすれば、この実験で確かめられたように傾いた幹の下側では上側に比してフィブリル傾角は大きいから下側で相対的な伸びの発生が期待される。同時にスギのあてでは上の実験結果が示すようにリグニンが非常に多く、膨潤に大いに役立っていると考えられる。またポプラのあてではリグニンがかなり少ない。PERKITNY らのいうように、木材のセルロースとマトリックス成分の関係がスプリングと、これをややひきのばしながら固めるパラフィンの関係におきかえられる²⁰⁾としたら、膨潤、固定の役割りをするリグニンの少ないポプラのあての部分は反対側に比してひずみやすく、反対側がリグニンによる膨潤をおこして軸方向に伸びる時には、縮みを生ずるであろう。この実験ではリグニン量の分布だけを確認しているがリグニン重合の過程や、マイクロフィブリル間における存在様式および重合形式、分子構造の違いなどを屈向性との関連で調べる必要がある。

外的な刺激のない場合には最大伸長方向に配向する藻類のマイクロフィブリルは、物理的、化学的刺激によつてその最大伸長方向に直角に配向することを GREEN は見出し、フィブリル配向の機構を力学的観点からだけでは説明できないとしている²¹⁾。また cotton などについての ROELOFSEN と HOUWINK による multinet-theory では細胞の伸長する方向にマイクロフィブリルが配向してゆくことを見出している^{22,23)}。これらから屈向をおこさせる力は細胞分化、伸展の段階では生じ得なく、木化の段階でリグニンなどのマトリックス成分がマイクロフィブリルを膨潤させることによつて生ずると考えてよい。ちなみに、針葉樹のあて材仮道管に見られるらせん状の割れ目は、リグニンの重合がやや進んでいる S_2 層の外側ののびによつて S_2 層内側のリグニンの重合が不十分で固化していないところでマイクロフィブリル間の割れ目が発生することによつても考えられる。

マイクロフィブリルの配向を決定する物理的要因はこの実験からは明らかにされないが、少なくともその傾角は屈向を生じさせるためには、合目的的に分布しているといえる。同時に肥大生長に伴つてフィブリル傾角が小さくなることについては樹幹および樹冠の年々増加する重量を支えてゆくために必要なことと考えられる。このような反応は単純に力学的に推測しえない問題であるが、細胞壁合成の過程を粘弾性の考え方を用いて生化学的、生物物理学的解明を行なう必要がある。

実験上の問題としては、曲げたわみを与える時の支持の方法、および、たわみの曲率を一定に保つ方法に更に改善の余地があり、今後の課題である。

5. 摘 要

木材形成過程をレオロジー、特に化学レオロジー的観点より追求するため、スギおよびポプラの幹を直角に曲げ、このたわみを一定に保つに要する力の経時的測定を行ない、この変化の過程で形成された部分の分子構造の変化を赤外スペクトルで、結晶構造を X線回折像で、また

リグニン含量の分布を組織片のアセチルブロミド溶液の紫外線吸収強度でそれぞれ調べ、曲げの過程で生ずる異常な緩和現象を屈地性との関連において考察した。

得られた結果は次の通りである。

1. 鉛直面内における曲げの場合 (Fig. 1 (a), (b)), たわみが与えられて一年以内でしかも形成層活動期には、力は直径の肥大を考慮しても異常な緩和現象、すなわち幹が水平の位置まで曲げられた場合には負の緩和が、幹が水平の位置から鉛直の位置まで曲げられた場合には急激な正の緩和がそれぞれ生ずる。

負の緩和は、休止期には生ぜず、見かけの力は停滞する。2年目には直径の肥大を考慮した場合、力は正の緩和を示す。

2. この異常な緩和現象は幹の屈向によつておこる。屈向はアテの発生と関連するがその過程は次のように考えられる。

すなわち、リグニンが重合する時には、セルロースマイクロフィブリルを膨潤させる。X線回折像から明らかなように、マイクロフィブリル傾角の相対的に大きい木部は傾いた幹の下側に現われるから、前述の膨潤による細胞の伸びは幹の下側で大きい。また、リグニン分布の結果から明らかなように、リグニン量も傾いた幹の下側で相対的に多いから前述の膨潤も下側で大きい。赤外吸収に見られるごとく木部の分子構造からはこの点について明らかにできないが、マトリックス成分合成の過程、およびその存在形態の違いが屈向の過程に果たしている役割りは大きい。

また針葉樹のあて材仮道管に見られるらせん状の割れ目は、前記の屈向の過程で二次膜中層の外側の伸びによつて内側が引張られて生じたとき考えられる。

3. 前記の異常な緩和現象は細胞の分化、伸展のあと、すなわち木化の過程で生じる。

Summary

The process of wood formation under restraint has been studied with some physical techniques, especially rheological techniques. The analysis of this process is considered to be a new branch of rheology in which the heterogeneous structure caused by a biological excitation plays a principal role.

Many growing stems of young SUGI (*Cryptomeria japonica* D. Don) and poplar (*Populus nigra* L. var. *italica* KOEHNE) trees were bent and kept into the right angle in three types as indicated in Fig. 1 from the growing season, the end of growing season and the resting season. And the load required to keep the stem to the right angle was measured with spring balances.

In the bending type (a) of Fig. 1, the relative force relaxed slowly and then it recovered in the growing season, even if the values were compensated by the diameter growth (Figs. 2~9). The negative relaxation seemed to take place during secondary wall formation and lignification. In the resting season the relative force kept a constant value. And in the growing season of second year, the force recovered slowly again and when these values were compensated with diameter growth, the force did not

recover (Figs. 2, 6). In the bending type (b) of Fig. 1, the relative force relaxed rapidly at the time when the negative relaxation took place in the type (a) (Figs. 10, 12). In the bending type (c) of Fig. 1, these abnormal relaxations did not appear (Fig. 11).

These abnormal relaxations of the force were caused by the geotropic recovery of the stems. And the recovery was related to the reaction wood formation (Photos. 1~3).

The xylem formed under these restraints was studied as to the molecular structure by the infrared spectra in the range $4000\sim 650\text{ cm}^{-1}$, the microfibrillar angle and crystal structure by the X-ray diagram and the lignin contents by JOHNSON's technique¹⁵⁾.

The microfibrillar angle of the lower side of a leaning stem was flatter than the upper side (Photos. 4, 5), and the lignin content at the lower side was always greater than the upper side (Table 1, Fig. 14).

From these data the cause of geotropic recovery were discussed in relation to the formation of reaction wood. If we assume that the cellulose microfibrils are swelled by the formation of lignin into inter-microfibrillar spaces, as WATANABE¹³⁾ suggested, this swelling effect along the lower side of the bent stem will be greater than along the upper side. Then elongation on the lower side of the stem will occur. But the force required for geotropic recovery of woody stem will not be ascribed to only these facts. The differences of the processes of polymerization of matrix substances, the interaction of the matrix and cellulose framework, and so on, between the upper and lower side of the bent stem should be discussed in future.

引 用 文 献

- 1) 角谷和男, 長谷川庸作, 山田 正, 木材研究, No. 46, 10 (1969).
- 2) WARDROP, A. B., Australian J. Bot., 4, 152 (1956).
- 3) WARDROP, A. B., The Formation of Wood in Forest Trees, (ed. by M. H. ZIMMERMAN) p. 405, Academic Press, N. Y. (1964).
- 4) 例えば TOBOLSKY, A. V., Properties and Structure of Polymers, John Wiley & Sons, Inc., N. Y. (1960).
- 5) 則元 京, 高原省吾, 山田 正, 木材研究, No. 36, 23 (1965).
- 6) WARDROP, A. B. and G. W. DAVIS, Australian J. Bot., 12, 24 (1964).
- 7) CASPERSON, G. and A. ZINSSER, Holz als Roh- und Werkstoff, 23, 49 (1965).
- 8) CÔTÉ, W. A. JR., N. P. KUTSCHA and T. E. TIMELL, Holzforschung, 22, 138 (1968).
- 9) BOYD, J. D., Aust. J. Sci. Res., Ser. B, Biol. Sci., 3, 270 (1950).
- 10) KÜBLER, H., Holz als Roh- und Werkstoff, 17, 77 (1959).
- 11) 渡辺治人, 日林誌, 24, 135 (1942).
- 12) BOYD, J. D., Aust. J. Sci. Res., Ser. B, Biol. Sci., 3, 294 (1950).
- 13) WATANABE, H., 九大農演習林報, No. 41, 169 (1967).
- 14) BOBÁK, M. and V. NEČESANÝ, Biologia Plantarum, 9, 195 (1967).
- 15) JOHNSON, D. B., W. E. MOORE and C. C. ZANK, Tappi, 44, 793 (1961).
- 16) MARCHESSAULT, R. H., Wood Chemistry, I. U. P. A. C., Proceedings of the Wood Chemistry Symposium, Montréal, Canada p. 107, 1961, Butterworths, London (1962).
- 17) WARDROP, A. B., Holzforschung, 8, 12 (1954).

- 18) KENNEDY, R. W. and L. FARRAR, Cellular Ultrastructure of Woody Plants (ed. by W. A. Côté, Jr.) p. 419, Syracuse Univ. Press, N. Y. (1965).
- 19) 伊東隆夫, 林 昭三, 貴島恒夫, 木材研究, No. 45, 23 (1968).
- 20) PERKITNY, T. and L. HELIŃSKA, Holz als Roh- und Werkstoff, **19**, 259 (1961).
- 21) GREEN, P. B., Cytodifferentiation and Macromolecular Synthesis, (ed. by M. LOCKE) p. 274, Academic Press, N. Y. (1963).
- 22) ROELOFSEN, P. A. and A. L. HOUWINK, Acta Botanica Neerlandica, **2**, 218 (1953).
- 23) HOUWINK, A. L. and R. A. ROELOFSON, Acta Botanica Neerlandica, **3**, 385(1954).