アカマツ苗条の力学的性質に関する研究*

大 迫 靖 雄** 宮 川 秀 俊***

Study on Some Mechanical Properties of Japanese Red Pine Seedlings

by

Yasuo OHSAKO

(Faculty of Education, Kumamoto University, Kumamoto)

and Hidetoshi MIYAGAWA

(Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka)

In this study, we investigated some mechanical properties during growth of Japanese red pine (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.) seedlings in air-dry.

The results obtained are summarized as follows.

(1) The values of tensile strength for pine seedlings having different growing duration varied depending upon the growing duration, and the variation could be divided into two steps on the basis of the degree of growth of pine seedlings; in the early step, pine seedlings contained only primary xylem, and, in the late step, pine seedlings contained secondary xylem.

(2) The fracture surface by tension test differed depending upon the degree of growth for seedlings; at the early stage of growth, the fracture surface showed a simple fracture type at the cell wall in primary xylem, separation of intercellular layer, deformation in cell shape and *etc.*, and, at the late stage of growth, the fracture surface showed a complex fracture type at each layer of cell wall in secondary xylem but did not show any clear deformation of cell shape and separation of intercellular layer.

(3) Tensile relaxation tests were carried out on three pine seedlings having different growing duration. The difference in relaxation spectra among three seedlings could be shown by the position of maximum in the short-time range, and the position of the maximum seemed to be related to the growing of xylem tissue within seedlings.

(Received Sep. 28, 1976)

1 緒 言

筆者は以前から、木材の形成過程における物性の変化について検討を行ってきた。そしてこれらの研究の必要性についてはすでに述べている。さらに研究の方向として、二つの方法について検討を行っている。¹⁾①は木材の形成過程において発生する内部応力としての生長応力の測定とその応力の材質に及ぼす影響。²⁾②は木材の形成過程における木材そのものの力学的性質である。本報は後者の木部の形成過程における二、三の性質について述べることにする。

まずこのような研究を進めるにあたっては、木材の¹⁾形成初期の状態を知る必要があるので、かつて新生枝

あるいは新生幹等を使用して各々木部形成状態の異なる試片についての生材状態での力学的性質について検討を加えた。今回はその一環として苗圃に播種したアカマツの苗条について、一生長期を通してその形成状態を調べ、とくに木部の形成初期にあたる苗条が気乾の状態になったときの二、三の物性について述べ、木材の利用時での特性について考える一つのデータとしたい考える。

2 実 験

本実験に使用したアカマツの種子は昭和44年宮崎県えびの営林署満谷国有林で樹令 50~150 年のキシマアカマツから採種されたものである。

上記アカマツの種子を昭和48年2月23日熊本大学教育学部附属新南部農場温室内の箱 (40×60×16.2 cm, 土壌条件, 赤土, 黒土:ワラの堆肥=1:1) に184個播種した。このうち発芽した苗条について、発芽後20日から順次採集を行った。なお採集にあたっては、各

* 本報を「木材の形成と物性に関する研究 (第3報)」(Study on the Material Properties and the Formation of Wood, III) とする。

原稿受理 昭和51年9月28日

** 正 会 員 熊本大学教育学部 熊本市黒髪

*** 学生会員 九州大学農学部 福岡市箱崎

採集時期ではほぼ平均的な状態のものを複数採集するよう心がけた。採集した苗木は幹の長さを測定した後、ただちに FAA-I 液で細胞固定を行った。固定した苗木について幹部の中心部すなわち針葉のはえぎわ部分と根元の中心部および先端部について凍結装置を使用して横断面のミクロトーム切片を作成し、サフラニン、ライトグリーンの二重染色を行い永久プレパラートを作成した。ここで作成したプレパラートについては、のちに顕微鏡写真撮影を行い、径、径上の細胞数等の測定用に使用した。

つぎに断面のプレパラートを作成した苗木のうち発芽20日から217日までのものについて室内で自然乾燥を行った後、ショッパー式引張試験機を使用して引張強度を求めた。また発芽38日、93日、155日⁴⁾の苗木については、ロードセルを使用した引張装置を使用して応力緩和試験を行った。ここで行った力学的試験用の試片はいずれも、気乾状態にした後、端片での破壊およびすべり等を防ぐため、試片の長さは35mmとし両端を10mmずつ厚紙とエポキシ樹脂でかためた。なお応力緩和試験の初期ひずみは引張強度値の約20%の応力に対応するものとした。また室温は20℃±3℃、関係湿度70±5%内に入るように注意した。

さらに引張強度値を求めた試片のうち発芽31日、217日のものについては走査型電子顕微鏡（日本電子製JSM-U3）を使用して引張破壊部の木部細胞、髄、樹皮についての破壊の状態を観察した。

3 実験結果および考察

3・1 苗木の生長

まず苗木の生長、とくに木部の形成状態をみるため、苗木の生長の時期的な変化をFig.1, 2に示す。Fig.1に示した幹の長さ、径の変化は、採集した試片の平均値として求めたものである。この結果伸長生長は発芽後60〜80日頃、すなわち5月中旬まで活発で以後わずかな伸長を示すにすぎない。Fig.1からは8月以後再度伸長量の増加が示されるがこれは秋のびによる。この伸長生長に対応する肥厚生長について発芽後の日数と肥厚による苗木の径の関係をFig.1に示す。こ

Fig. 1. The changes of length and diameter of seedlings with growing duration.

Fig. 2. The changes of diameter of pith and width of xylem with growing duration.

こで示す苗木の径は、実験の項でのべた苗木の中心部の断面の顕微鏡写真から測定したものである。したがって苗木の径の中には髄や樹皮が含まれている。本実験で測定した苗木は採集時期の苗木中平均の生長を示すものを対象とした。さらに木部形成の状態を詳細にみるため、Fig.2に髄の径、木部細胞の幅と発芽日数の関係を示す。この図から、木部細胞の増加状態をみると一次木部が形成された以降、6月中旬にあたる約100日まで、木部細胞の増加が停滞する。それ以後再び増加し、その増加状態は8月中旬にあたる約150日まで続くことが明らかとなった。さらにFig.1によって肥厚生長は伸長生長の停止時期から始まることが明らかとなった。また本実験の場合、苗木のため、樹木の新生幹、枝等とは生長状態が期間や時期等で異なるが、生長の傾向はほぼ同じであるといえよう。ただ細胞の数は9月上旬まで増えつづけており肥厚生長の終りにはまだ形成層近辺に未完成な細胞が含まれていることが示された。このような木部細胞の増加に対して、髄の径の大きさは、Fig.2で明かなように生長時期に関係なくほぼ一定しているといえよう。さらに各時期での木部細胞の状態について述べるため、本実験で使った試片のうち、発芽初期にあたる31日、肥厚生長のはじめにあたる93日、ほぼ肥厚生長の終る155日の各横断面の顕微鏡写真をFig.3(a)~(c)に示す。前述したように発芽約60日まではFig.3(a)に示すような一次木部のみが存在しており、肥厚生長のはじまる時期ではFig.3(b)に示されるようによく木部の最外層が環状に連なってくる。しかし、この時期では最外層の細胞はほとんど未完成である。これに対して肥厚生長の終りになるとFig.3(c)で明かなようにすでに多くの木部細胞が木化した状態を示し、その数も多いことを示している。

3・2 苗木の生長と力学的性質

発芽初期の苗木に対するいくつかの力学的性質については長谷川⁵⁾、角谷⁶⁾らによって報告されている。本報では、これらの報告とは生長時期の異なる発芽後20日

(a) 31 days after germination,
(b) 93 days, (c) 155 days.

Fig. 3. Micrograph of cross section of pine seedlings with three various stages of growth.

Fig. 4. The changes of tensile strength with growing duration.

から217日までの苗条について自然乾燥した気乾状態の試片について述べる。

まず各生長期での引張強度値を Fig. 4 に示す。ここで求めた値は木部細胞の他に髄、樹皮を含んだ総合的なもので、必ずしも木部細胞の形成状態のみについて述べていないが、前述のように髄は生長期でほとんど変化しないし、樹皮も大きな変化をしないとすれば、得られたデータは木部細胞の形成状態と関係づけて考えられる。Fig. 4 によると発芽後約50日までは引張強度値は急激に増加し、一時増加が停滞した後また増加する。この増加は晩材の形成がほぼ終了するまではほぼ同じ傾向で上昇する。この場合の発芽初期の強度値の変化は長谷川らによるヤング率の変化と類似した傾向を示している。そこでこれらの変化を苗条の木部の形成状態と関係づけて述べる。第一段階の発芽約50日までの強度値の急速な変化は、初期に形成される細胞の発達と関係し、Fig. 3 (a)に示すように一次木部の発達が影響を与えていることが推定され、このことは、一般に細胞数の増加率が減少し、はっきりした二次木部細胞の形成が現れる移行期にあたる発芽50~80日での引張強度値の変化率が小さいことと関係づけて考えるとより明白になるだろう。また発芽約90日以後は二次木部が形成され、肥厚生長が著しくなる時期で、引張強度値は増加を示す。この時期では木部細胞の数は以前に比較して急激に増加を示す。ただ細胞壁の成熟度は不十分で、とくに形成層近辺にはかなり木化未完成の細胞が存在することが、サフラニン、ライトグリーンの二重染色等から明らかとなった。しかし、二次木部細胞の形成により、引張強度は増加し、二次木部の占める割合が増加するにつれてその値はより増加する。しかしながら、その値の増加率は、発芽初期の一次木部細胞の形成時期による値の増加率より低い。この時期は肥厚生長期にあたり、未完成な木部細胞が多く含まれる時期とされており、⁸⁾⁹⁾ 苗条中に未完成な細胞が多く含まれているため、細胞の数の増加に比べて強度値が急増しないことが考えられる。

以上木部形成による引張強度の変化について述べたが、引張試験によって破壊した未成熟な木部細胞と木化した木部細胞の破壊状態について検討を加える。Fig. 5 (a), (b)に発芽31日の苗条で一次木部のみが存在するものと、発芽217日で木部細胞の木化が進んだ苗条の細胞壁の破壊状態の走査型顕微鏡による結果を示す。

まず Fig. 5 (a)に示した発芽31日の破壊型をみると、この時点では一次木部のみが存在しており、細胞壁はきわめて薄く、細胞間層は分離している状態がみられる。また細胞壁の破壊面も、荷重方向にほぼ直角で、単純な切り口を示しており、細胞壁が未完成で弱いため、細胞の形状が変化していることが明らかとなった。

(a) Primary xylem at 31 days after germination (b) Secondary xylem at 217 days
Fig. 5. Scanning electromicrography of fracture in cell wall by tension test.

これに対して、Fig. 5 (b)に示した多くの二次木部細胞が形成された発芽 217 日の細胞壁の破壊は、この時点では木化も進み、細胞壁も完成されたものが多いため、形成層のごく近辺の細胞を除けば、この図で示されるように、細胞壁の各層での破壊が示され、かなり複雑な破壊の型を示している。さらに前者に比較して細胞壁も強固であるため、髄、形成層近辺等の一部を除いては、細胞の形状変化や細胞間層の分離等は明白でない。以上両者の細胞の破壊のちがいを述べたが、髄、樹皮の破壊は両者共著しい差は示さなかった。これらの結果から、この二者の外力に対する抵抗は細胞壁の状態で異なることが推定される。すなわち引張強度値の生長時期における変化が、苗木の断面に含まれる細胞壁の状態、とくにその種類と完成度によることが破壊の型からも推定できる。勿論、苗木の場合、髄、樹皮、木部を分離して測定することが困難なため、細胞の成熟度と、力学的なデータを厳密に結びつけるにはさらに実験方法等詳細な検討が必要であろう。

引張強度と細胞の形成状態について述べた結果、力学的な性質は細胞壁の状態によって影響を受けることが推定できた。そこでこれらの影響を受けると考えられる応力緩和スペクトルを求めるため、木部の形成状態が異なる苗木に対する引張りによる応力緩和試験を行い、その結果を Fig. 6 に示す。図中発芽38日の苗木は、木部細胞は発達していず、断面には一次木部が存在している。また樹皮、髄の占める割合が非常に大きい。発芽93日のものは、木部細胞が半径方向に平均18個含まれている。しかし、細胞壁自身の木化は不完全で、周囲に連なる最外層の木部細胞はほとんど未成熟である。これに対して、発芽 155 日のものは二次木部も発達しており、苗木の径そのものもかなり大きな値を示

Fig. 6. Stress relaxation spectra, $H(\log \lambda)$, of pine seedlings in various stage of growth. The arrows in figure show a position of maximum.

している。これらの三つの木部形成状態の異なる苗木の緩和スペクトルを示した。この三者共、長時間側で大きな値を示す流動の傾向を示す。このことは角谷らの発芽初期での苗木の結果と類似した結果を示すといえよう。しかしながら、角谷らの結果は発芽日数の短いものがより短時間側で流動が現れることを示しており、この場合の結果とは一致しない。勿論、同じ苗木に対するデータでも前述したように、本報の場合すではっきりして細胞が存在しており、角谷らや長谷川らの結果は発芽 1 週間、4 週間等のもので木化の状態は異なるうえに、本実験で使用した苗木は気乾状態のものであるので、例えば、発芽38日の苗木のように含まれる細胞や髄、樹皮等が類似したものでも生材状態のものとは異なることが考えられ、必ずしも一致した結果は期待できない。さらに応力緩和スペクトル曲線は長時間側での流動を示す前に各苗木とも小さな極大値を示している。このような極大値の存在は正常な新生幹にもみられるもので、この極大値の現れる緩和時間が生長時期

によって異なる。すなわち発芽日数が少い発芽38日の場合は、この極大値がかなり長時間側にあるのに対して、生長が進むにつれてより短時間側に移動している。そして、二次木部が存在する発芽日数93日、155日の両者間にはあまり時間的な差は示されていない。この傾向は細胞壁の成熟度を考え、短時間側での応力緩和とスペクトルの変化は結晶化度に関係しているとした長谷川⁵⁾らの結果等と関係づけて考えると、Fig. 3 (a)に示したように発芽38日の苗条は、まだ細胞壁は薄く、主として一次木部で木化も未完成であるのは勿論、細胞壁も未成熟であるため、外力に対して、細胞壁は勿論細胞の形状も変化することや、未木化による細胞間のすべり等も考えられ、それらのことが応力緩和とスペクトル曲線に影響を与えることが推定されるのに対して、発芽93日、155日の苗条は二次木部を含み、細胞壁の結晶化度も若干増加したことが考えられる。また発芽38日のものに比較して細胞間の結合力も大きいいため、外力に対しては細胞の形状を変化するのではなく、細胞壁そのものの変化が主力を占めることが考えられる。このように一次木部のみ存在している場合と二次木部を含むものでは、変形の機構が異なることが考えられるので、当然応力緩和とスペクトル曲線に変化が生じることが推定できる。しかし、二次木部が存在しても発芽93日と155日では木化の程度、細胞壁の成熟度、木部細胞の数などかなり異っており、それらのことが、この極大値の差として現れたと思われる。ただ苗条の場合、前述したように、木部細胞の他に、髓、樹皮等が含まれるので、必ずしも木部細胞の状態のみが現象として現れないため、以後これらの点も考慮してより詳細な研究が必要であろう。

4 結 論

アカマツ苗条の一生長期の生長過程を測定し、生長状態とそれに伴う力学的性質の変化について、次のような結論が得られた。

- (1) 苗条の生長過程を観察した結果、伸長生長、一次木部細胞の形成、二次木部細胞の形成等組織の発達が段階的に行われる傾向がみられた。
- (2) 苗条の引張強度は、木部細胞の形成につれて上

昇する。しかし、一生長期についてみると、一次木部細胞の形成時期と二次木部の形成時期で異った上昇傾向が示された。

- (3) 生長過程の異なる各苗条の引張試験によって破壊された、木部細胞の破壊形態は生長初期の一次木部細胞、生長後期の二次木部細胞でかなり異った傾向を示すことが明らかとなった。

- (4) 三段階の生長過程の異なる苗条に対する応力緩和とスペクトル曲線は、いずれの場合も小さな極大値をもち、その極大値の出現する位置が、苗条の生長状態で異り、木部細胞の種類や成熟度と関連するよう思われた。

終りに、走査型電子顕微鏡測定にあたり種々の便宜をはかっていただいた京都大学農学部野淵正氏に深謝いたします。

(昭和49年4月1日 第24回日本木材学会大会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば、大迫靖雄，加藤英郎，第22回日本木材学会大会研究発表要旨集，2 (1972)。
- 2) 大迫靖雄，熊本大学教育学部紀要，第25号，自然科学編，5 (1976)。
- 3) 大迫靖雄，木材の生長応力，山田正編，木材の固有応力に関する研究，昭和48年度文部省科学研究費総合研究B研究報告書，5 (1974)。
- 4) 大迫靖雄，材料，24，849 (1975)。
- 5) Hasegawa, Y., and T. Yamada, Mokuzai Gakkaishi, 20, 98 (1974)。
- 6) Hasegawa, Y., K. Sumiya, and T. Yamada, Wood Research, No. 56, 7 (1974)。
- 7) Sumiya, K., and T. Yamada, Wood Research, No. 56, 13 (1974)。
- 8) Kozlowski, T. T., Growth and Development of Trees, Vol. II (1971) Academic Press, New York, London
- 9) 島地 謙，須藤彰司，原田 浩，“木材の組織”(1976) 森北出版
- 10) 例えば，Stuart, H. A., Die Physik der Hochpolymeren, Band IV (1956) Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg