



Title	風衝地に生育する樹木の樹幹形態・構造の変化
Author(s)	相内, 泰三; AIUCHI, Taizo
Citation	北海道大學農學部 演習林研究報告, 40(4), 741-751
Issue Date	1983-09
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/21102
Type	departmental bulletin paper
File Information	40(4)_P741-751.pdf



風衝地に生育する樹木の 樹幹形態・構造の変化*

相内 泰三**

The Morphological and Anatomical Modifications of the Tree Trunk Exposed to Strong Wind*

By

Taizo AIUCHI**

目 次

1. 序 言	741
2. 試料と方法	742
3. 観 察 結 果	743
3.1 樹幹とその内部構造の肉眼的特徴	743
3.2 樹幹の内部構造の顕微鏡的特徴	744
3.3 細胞壁の変化	744
4. 考 察	745
5. 結 言	749
文 献	749
Summary	750
写 真 説 明	750
写 真	

1. 序 言

一般に、樹木が植物でありながら他の草本植物と形態的に明らかに異なる点の一つに高くそびえることがあげられ、高いものでは100 mを超える場合がある。言いかえれば、樹木は自然の産んだ巨大な構造物の一つである。

今日、樹木が具現する巨大な形態は、その生長に及ぼしてきた環境因子のなかの力学的条件、すなわち自重、風圧、雪圧などの外力の作用と密接に関係しているように思える。古くに、METZGER¹⁾は樹木の発達について力学的な立場から説明している。すなわち、樹木はその生長過程で自然界の種々の力学的作用を受けるため、それに対して最も安定した形態をとると

* 1983年2月28日受理 Received February 28, 1983.

** 北海道大学農学部木材理学教室

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

いうことである。また、JACOBS²⁾は試験林を用いて樹木の発達に及ぼす風の影響について広く調査・実験した。彼はそのなかで、風の作用を数年間除いた樹木を後に自然状態に解除した結果、これらの供試木が長く安定状態を維持できなかったことを報告している。この事実はMETZGERの仮説を強くうらづける根拠の一つとなっている。

さらに、自然界では台風、地すべり、なだれなどの突発的な外力により樹木がそのバランスを崩すこともしばしば起こる。しかし、このような予期せぬ外因に対しても樹木は、極端な場合には倒伏し枯死するが、その構造形態を変形あるいは補強して対処していることを我々はよくみる。例えば、地すべりあるいはなだれによって樹木が傾斜した際には、あて材の形成により回復しようとする^{3),4)}。また、山岳および海岸などの強風地帯に生育する樹木は、その樹幹を主風の方へ曲げて偏倚生長しながら耐えている⁵⁾ことなどである。

以上に述べてきたように、樹木は力のバランスという点では、自然の状態下では最も合理的な形態・構造をとると考えられ、また力学的条件における環境の変化に対しては、種々の方策とかなり柔軟な対応を示す能力を有していると思われる。

そこで本研究では、樹木の生長に及ぼす環境因子の力学的条件の一つである風(風圧)の外力としての作用に注目し、強風地帯に生育する天然生樹木の形態・構造について巨視的および微視的レベルから観察し、その結果を力学的な観点から若干考察した。

本研究を進める過程で、終始適切な御指導を頂いた、北海道大学農学部林産学科木材理学教室の石田茂雄教授、深沢和三助教授に謹んで感謝の意を表します。また、本報告のとりまとめに際し多くの御助言・教示を頂いた木材理学教室の各位に深く感謝します。

なお、本報告の一部は第13回日本木材学会北海道支部大会(1981年11月、札幌)および第32回日本木材学会大会(1982年4月、福岡)において口頭発表した。

2. 試料と方法

供試木として、えりも岬の突端に近い東洋の牧草地内に生育していたカシワ(*Quercus dentata*)を1本採取した。この供試木は樹齢約90年、樹高約2m、胸高直径9cmの典型的な風衝木である(Photo 1)。

Photo 1で明らかのように、供試木の樹幹は複雑に曲げられているので、これをまず曲がっている部分と直線の部分に大別した(Fig. 1)。さらに樹幹を樹軸に対して垂直に適宜円板に分割した。これらの円板の横断面における木部の肥大生長の状態を肉眼および実体顕微鏡で観察し、写真撮影を行った。

次に、先に分割した各円板から小片を切り出し、それらから15 μ m厚の木口面切片を常法どおり作製した。これらの切片で(1)引張あて材の存在・分布および(2)木口面における細胞の形態的特徴を光学顕微鏡で調べた。なお、(1)の場合は切片を1%クロラゾールブラックE(70%アルコールに溶かす)で染色した。この結果、ゼラチン層を含む繊維は黒色に染められ、

他の細胞と明瞭に区別される。(2)の場合は切片をサフラニンで染色し、検鏡した。

また、機械的支持を担う木部繊維の細胞壁の形態的变化を調べるため、力学的作用を大きく受ける曲がり部の円板から観察試料を得て、走査電子顕微鏡(SEM, JSM-2型)で観察した。SEM観察試料は、小片をカミソリの刃で裂開し、その裂開面を金蒸着して観察に供した。なお、ここで扱う細胞壁の形態变化の観察には、試料作製中に生じ易い人工的な変形に注意しなければならない。そこで、本実験では切断法ではなく裂開法により試料を作製した。この方法を選んだ理由は、まずナイフによる試料への二次的作用を相当防げること、次に細胞壁の内部構造をよく露出させることができることからである。

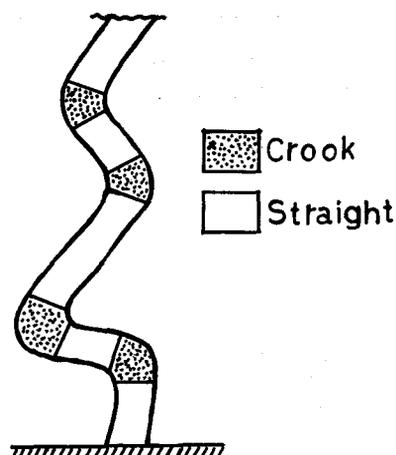


Fig. 1. Division of the stem.

3. 観察結果

3.1 樹幹とその内部構造の肉眼的特徴

えりも岬における月別の風の程度を Table 1⁶⁾ に示す。この表から、冬期間だけではなく、樹木の生長期間中においてもかなりの強風が吹いていることがわかる。このような継続的な強風により、樹木は通常のように真直に伸びることはできず、その幹は曲げられかつ傾きながら立ち上がっている (Photo 1)。また、このような海岸付近に生育する樹木に共通した樹幹のねじれ (Photo 1-B, 矢印) も顕著に生じている。

Table 1. The conditions of winds in Cape Erimo⁶⁾

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
The average of wind velocity (m/s)	12.1	11.0	9.9	9.2	8.7	7.9	7.5	6.9	8.2	9.2	10.9	12.5
*High wind day (days)	28.6	24.6	25.5	25.1	24.9	19.8	18.1	17.0	21.1	24.3	26.5	29.2

* more than 10 m/s.

Photo 2~9 に樹幹の各部位 (Photo 10) における断面を示す。樹幹の各曲がり部では、断面の肥大生長は風下側へ増大し、その結果、偏心生長を生じている (Photo 2~5, 8, 9)。この偏心生長は樹幹の最初および二番目の曲がり部において極めて著しく、その断面は長円またはだ円状を呈している (Photo 2~5)。例えば、Photo 4 に示す円板についてみると、最初の15年間はほぼ同心円状の肥大生長をしているが、それ以降の13年間 (同心円の外側) は風下側へ著しく肥大生長している。さらにこの円板上の長径に沿って、風上側と風下側のみかけの生長量

を肉眼的に測定すると、後者は前者の約3倍となる。一方、これらと比べて樹幹上方の曲がり部では、偏心の程度は軽くなっている (Photo 8, 9)。

また、Photo 3~7は樹幹の二番目の曲がり部から直線部にかけての、断面における肥大生長の状態変化を示している。それは偏心肥大生長から同心円状生長へ移行している。直線部においては、若干のゆらぎはあるが、ほぼ同心円状の肥大生長を示している (Photo 7)。

3.2 樹幹の内部構造の顕微鏡的特徴

引張あて材はゼラチン繊維の出現にもとづいて、鋸断した横断面で絹糸状光沢という肉眼的特徴を示すと言われている⁷⁾。本実験でも生材時に樹幹を鋸断した際に、円板の横断面に絹糸状光沢 (例えば、Photo 4, 6~8 など) が認められた。そこで、ここではこの絹糸状光沢部が正確に引張あて材に該当しているかを、またその分布を調べた。さらにこれと並行して、樹幹の曲がり部の肥大生長の著しい部分における細胞の木口面での形態も調べた。

円板上で認められた絹糸状光沢部には、Photo 11 に一例として示すように、ゼラチン繊維 (黒く染められている細胞) の分布が認められた。あて材の分布について樹幹を通して調べた結果を Fig. 2 に示す。この図で明らかなように、ゼラチン繊維は樹幹の上側に存在し、その分布範囲は狭い。

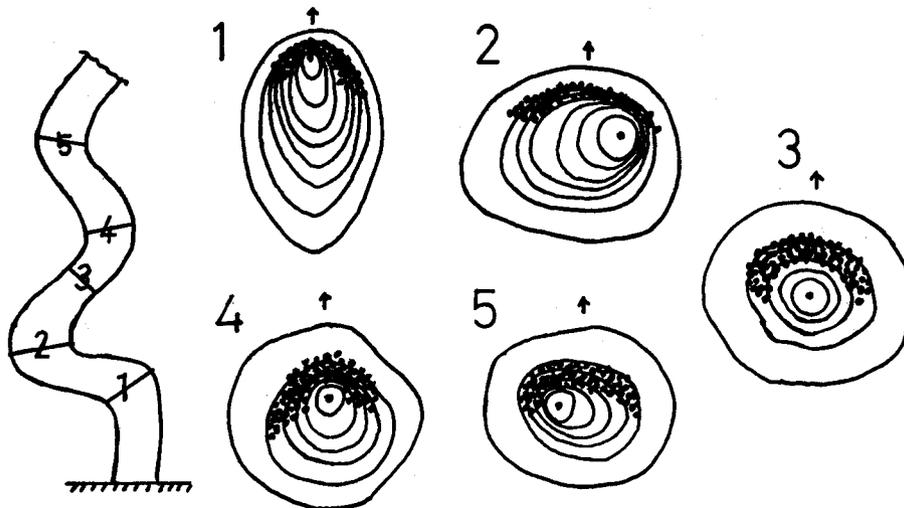


Fig. 2. Distribution of gelatinous fibres in the sections through the stem (Dark zone). Number on stem corresponds with number of cross section. arrows: the upper side of the stem.

Photo 12 は曲がり部における著しい肥大生長部の木口面での状態を示す。この部分にはゼラチン繊維は認められなかった。また、細胞壁の非常に厚い木部繊維が多くみられた。

3.3 細胞壁の変化

広葉樹において、樹体の支持機能を担う木部繊維が、その発達過程で応力下 (この場合は樹幹が外力として受ける風圧に起因するもの) にある場合、木部繊維自体にどのような構造変

化が生じるのかを調べるため、SEMを用いて詳細な観察を行った。

そこで、まず木部繊維の二次壁外層(S1)における形態的变化について述べる。Photo 13は裂開の際に内側の二次壁内層(S3)と二次壁中層(S2)がともに剝離したために、内表面上でS1層を露出させている木部繊維である。ほぼ横巻きのフィブリル配向に直交した壁層の折りたたみ(矢印)が、繊維の長軸方向に走向しているのが認められる。Photo 14にもPhoto 13と同様の壁層の折りたたみ(矢印)がみられるが、この場合はそれが部分的に出現している。Photo 15では壁層が数回連続して折りたたまれている。この場合も壁層はフィブリル配向に直交して折りたたまれている。さらに、この内表面上の壁層が剝離した部分(Photo 15, 矢印)においても、壁層の折りたたみがみられる。Photo 16はこれまでの壁層の折りたたみとは異なる形態を示す。フィブリルの束が屈曲することによりこぶ状の小さな隆起を生じ、さらにそれらが数珠状に連なっているのが認められる。

このような木部繊維のS1層における形態的变化を、細胞の外側から観察した例をPhoto 17と18に示す。壁層の折りたたみが繊維の長軸方向に走向しているのが明らかに認められる(Photo 17, 矢印)。Photo 18では、壁層の折りたたみ(矢印)が繊維の長軸方向に対して斜めに走向しているのが認められる。これは細胞の内こう側から観察されたもの(Photo 19)と良く対応している。

次にS1層に隣接し、その内側に堆積するS2層における形態的变化について述べる。Photo 20は隣接する3本の木部繊維の内表面上の形態を示す。中央の木部繊維にはS1層における壁層の折りたたみ(矢印)がみられる。これに対して、両端の木部繊維にはS2層がみられ、そこにはS1層にみるような壁層の変形は認められない。Photo 21は木部繊維の外側にあるS1層が剝離し、細胞の外側からS2層を偶然観察できたものである。これがS2層を示すことは、多くの広葉樹の木部繊維におけるS2層のフィブリル配向が常にZ方向に巻いている⁸⁾ということから明らかである。S2層のフィブリル配向に直交する微細な隆起(矢印)がみられる(Photo 21)。なお、フィブリル配向に沿った壁層の分離は、試料作製の際に生じたものであろう。Photo 22はS1層に近接するS2層を細胞の内こう側から観察したものであるが、そのフィブリル配向に直交する微細な隆起(矢印)が認められる。これに対して、S2層における内側(細胞の内こう側)の部分およびS3層には、壁層の変形は認められなかった。

木部繊維以外では道管壁について調べたのでこれを述べる。Photo 23は道管壁の内表面を示す。木部繊維壁とは異なり、壁層には変形は認められない。Photo 24は木口面切片の光学顕微鏡写真であるが、道管壁の押し潰れはみられない。

4. 考 察

本研究の供試木採取地であるえりも岬は、我が国有数の強風地帯であり、またTable 1に示されるように、冬期のみならず樹木の生長期においても強風が継続的に吹くところである。

従って、この供試木 (Photo 1) の示す樹幹形態は、風の機械的作用 (生長期間における風圧の作用) および生理的作用 (例えば、風上側での低温と乾燥など) の総合的結果とみなされる。特に、風の機械的作用が樹幹の形態・構造に大きな影響を及ぼすことはまちがいない。

自然条件の下では、樹体は風により曲げ、衝撃、振動、ねじりといった種々の力学的作用を複合的に受けると考えられる。本実験の供試木は、それが最終的に具現している形態と採取地における主風の方向から判断して、主として曲げおよびねじりの両作用を直接的に受けながら生長してきたものといえる。

供試木の樹幹の内部構造に関する肉眼のおよび光学顕微鏡的観察から、次のような特徴が認められた。

(1) 樹幹断面をみると、曲がり部では風下側へ著しい偏心肥大生長を、直線部ではほぼ同心円状の肥大生長をそれぞれ示していた。

(2) 樹幹の各曲がり部の断面における偏心生長は、樹幹の下方で著しく、その上方では程度の軽いものであった。

(3) セラチン繊維は樹幹の上側に狭く分布し、曲がり部の著しい肥大生長部にはみられなかった。

以下に、これらについて考察する。一方向からの風を受ける針葉樹材の樹幹基部で、風下側へ肥大生長が促進されて結果として偏心生長を生じていることは、これまで多くの研究者^{2), 9~11)}によって指摘されてきた。さらに、この肥大生長の著しい部分に圧縮あて材が形成されることも報告されている^{9~11)}。一方、広葉樹についての報告は少ない。GESSNER¹²⁾は、広葉樹の場合は風上側に肥大生長が促進されるとともに、そこに引張あて材を形成すると述べている。これは本研究で得られた結果とは一致しない。

風上側に比べて風下側へ著しく肥大生長が促進される原因については、種々の観点から推察できる。例えば、生理学的⁵⁾には、風上側では低温と乾燥により形成層活動が低くなるためと、また力学的¹³⁾には、生長期間に組織に歪 (応力) を与えると、組織は刺激を受けて著しく発達するためなどと推察される。この他にも多くのことが考えられるが、ここでは風圧という力学的な条件に対する樹幹の対応という観点から考察してみる。風は樹幹に対して、実際には曲げとねじりを同時に作用させると思われるが、この場合は曲げ

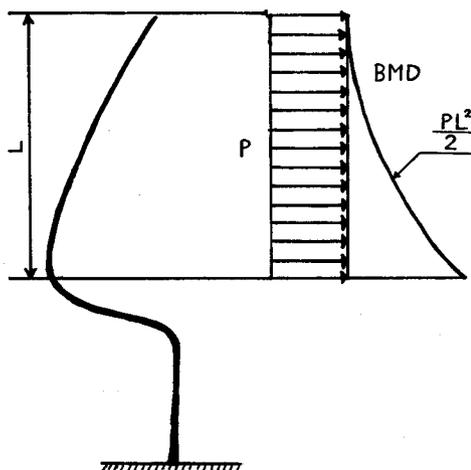


Fig. 3. The diagram of bending-moment of the stem subjected to wind load. P: a uniform load.

の作用のみを考慮する。いま、二番目の曲がり部から主幹が伸びている生長過程を考えたならば、風(水平力)によって樹幹に生じる曲げモーメントの分布は、一様分布荷重を受ける片持梁と仮定して、近似的に Fig. 3 のようになるであろう。観察された樹幹断面での肥大生長の状態変化(Photo 3~7)は、この結果と明らかに対応していると思われる。すなわち、樹幹の生長過程において幹が細い場合はその高い可とう性により風圧を和らげることができるが、肥大生長とともにある程度幹が太くなるとその可とう性は減少し、幹は風圧に対する抵抗性を強化しなければならないだろう。従って、大きな曲げモーメントを受ける曲がり部において、その断面が結果として風下側の方向に長径をもつ楕円形になるのは合理的に思える。このような形状の極端な例は、樹幹の最初の曲がり部の断面(Photo 2)にみられた。しかし、上述のことは形状のみを問題にただけであり不十分である。さらに、形状と組織の状態または細胞の変化の両方を考慮して考えるべきであろう。そうすればこの特異的な形状のもつより本質的な意味を理解できるように思える。

樹幹の各曲がり部の断面で偏心生長が樹幹の上方とその下方で異なるのは、樹木全体の生長過程でみた場合に、下方が樹木の生長過程において不安定期、すなわち力学的条件の厳しい時期であったのに対して、上方がすでに基礎ができた後の安定期に相当することによるものであろう。

一般に広葉樹は傾斜した幹や枝の上側に肥大生長の促進された部分、すなわち引張あて材を形成する¹⁴⁾。本研究においても供試木の樹幹は傾斜しながら生長しているため、樹幹の上側に引張あて材の特徴の一つであるゼラチン繊維が分布していた。しかし、このあて材の分布状態(狭く分布)は一般にみられるものとは違っていた。このゼラチン繊維の存在が単なる重力刺激に起因するものか、または力学的刺激と関係するものかはここでは不明である。今後検討すべき課題である。

樹幹を構成する細胞(ここでは木部繊維と道管のみ)の壁の形態的变化について認められた特徴は次のとおりである。

- (1) S1層に壁層の折りたたみまたはこぶ状の隆起がみられた。
- (2) S2層内では、その外側の壁層にフィブリル配向に直交する隆起がみられたが、内側の壁層には変形はみられなかった。
- (3) S3層には変形はみられなかった。
- (4) 道管壁には変形はみられなかった。

以下にこれらについて考察する。先にも述べたように、風は樹幹に対して曲げとねじりを同時に作用させるが、前者の曲げの場合は樹幹を構成する細胞に引張または圧縮を与えることになり、後者のねじりの場合はそれにせん断を与えることになる。木部繊維および道管壁のSEM観察から、壁の引張破壊は認められなかった。また、木部繊維壁に変形は認められたが、この変形は縦方向に圧縮されたときに生じる壁の変形^{15),16)}とは明らかに異なる。これらのこ

とから、木部繊維壁のS1層およびS2層にみられた変形は、曲げによるものではなくねじりの作用によるものと考えられる。

そこで、細胞がその発達過程においてねじり応力を受ける場合の挙動を調べるため、Fig. 4のモデルについて考えた。モデルは近似的に円形断面の中空構造とした。いま、細胞壁が一次壁(P)+S1まで形成された段階で考えると、壁厚は非常に薄いのでこのモデルを薄肉管のねじりの問題¹⁷⁾として取り扱える。従って、壁が非常に薄いことおよびマイクロフィブリルが引張りに対しては強く圧縮に対しては弱いことから、Fig. 4(B)に示す圧縮により壁は座屈を起こすであろう。この結果、ほぼ横巻きのフィブリル配向をもつS1層は、Photo 13~15, 17, 18に示されるような座屈を生じる。逆に、このような現象は細胞がねじりの影響を強く受けていることを示唆する。次にS1層の内側にS2層が堆積するが、その初期の段階では、まだ壁はそれほど厚くないため座屈を生じると予想される。この場合S1層に隣接するS2層も座屈を生じ、そのフィブリル配向に直交する微細な隆起(Photo 21, 22)を生じる。しかし、壁層が順次内側へ堆積し、それに伴って壁が厚肉化すると、細胞壁の座屈はもう起こらない。木部繊維壁のS3層およびS2層の内側(内こう側)で、S1層にみられた壁の座屈による変形が認められないのはこのためであろう。なお、1つの細胞が分化してから二次壁形成を完了するまでの時間についての知見は少ないが、SKENE¹⁸⁾の仮道管について調べた結果では3~4週間となっている。これは上述の壁形成過程に起こる細胞壁の変形を可能にするのに十分な時間である。

先にはP段階での壁の挙動について述べなかったが、P段階での細胞壁は表面生長のための膨圧による引張り状態¹⁹⁾によりその形状を保っていると考えられる。また、S1層における壁の局所的な変形は、それにより歪を吸収し、細胞全体の破壊を防止しているように思える。

木部繊維壁のS1層には著しい変形が認められるのに対し、道管壁には顕著な変形が認められなかった。この理由として、まずねじりに対しては中空円筒の場合に直径の大きいほど有効である(木部繊維の直径に比べて道管のそれは極めて大である)こと、および道管は通道機能をもつため、それは水圧という内圧を有していることなどが考えられる。

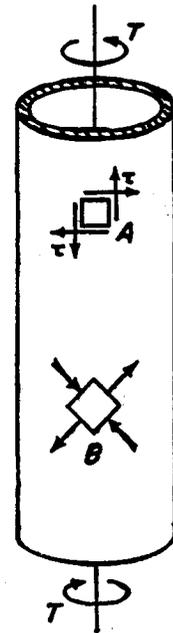


Fig. 4. A cylindrical thin-walled tube under torsion.

- A: shearing stresses.
B: tension and compression caused by shear.

5. 結 言

樹木がその生育環境下における力学的条件に対してどのように対応しているかを、主として樹幹の内部構造の巨視的ならびに微視的観察より明らかにした。すなわち、力学的環境条件として風(風圧)に注目して強風地帯であるえりも岬に天然に生育している樹木(カンワ)を取り上げ、その樹幹の内部構造について肉眼的から走査電子顕微鏡レベルにわたって観察し、次のような特徴を指摘した。

- (1) 樹幹断面をみると、それは結果的に外力条件に対応した構造形態を示していた。
- (2) 構成細胞はその発達過程で受ける歪(応力)を柔軟に吸収していた。

しかし、これらは結果としての現象を明らかにしたにとどまり、樹木自身の自然界の外力に対する適応過程、あるいは合理的設計に対する解明にはまだ多くの検討が必要である。

文 献

- 1) METZGER, K.: Stem form development of forest trees. (by LARSON, P. R). Forest Sci. Monogr. 5, 1963. を参照.
- 2) JACOBS, M. R.: The effect of wind sway on the form and development of *Pinus radiata* D. Don. Aust. J. Bot. 2, 1954.
- 3) 東 三郎・藤原滉一郎・新谷 融・村井延雄: 樹木年代学からみた地すべり地の推移. 北大演報, 28, 1971.
- 4) 若林隆三: 北海道の林地におけるナダレの研究(独文). 北大演報, 28, 1971.
- 5) DAUBENMIRE, R. F.: Plants and Environment. John Wiley & Sons, New York. pp. 267, 1974.
- 6) 小川紀一郎: 強風地帯の海岸林造成に関する研究. 北大農, 修論, 1982.
- 7) 重松頼生: ブナおよびミズナラ引張あて材の肉眼的特徴とその顕微鏡的性質. 信州大学演報, 12, 1975.
- 8) MEYLAN, B. A. and BUTTERFIELD, B. G.: Helical orientation of the microfibrils in tracheids, fibers and vessels. Wood Sci. Technol. 12, 1978.
- 9) LARSON, P. R.: Stem form development of forest trees. Forest Sci. Monogr. 5, 1963.
- 10) LARSON, P. R.: Stem form of young *Larix* as influenced by wind and pruning. Forest Sci. 11, 1965.
- 11) BANNAN, M. W. and BINDRA, M.: The influence of wind on ring width and cell length in conifer stems. Can. J. Bot. 48, 1970.
- 12) GESSNER, F.: Die mechanischen Wirkungen auf das Pflanzenwachstum. In Handbuch der Pflanzenphysiologie (W. RUHLAND, ed). 16, Springer-Verlag, Berlin. 1961.
- 13) KELLOGG, R. M. and STEUCEK, G. L.: Mechanical stimulation and xylem production in Douglas-fir. Forest Sci. 26, 1980.
- 14) 島地 謙・須藤彰司・原田 浩: 木材の組織. 森北出版(株), pp. 216, 1976.
- 15) SCURFIELD, G., SILVA, S. R., WOLD, M. B.: Failure of wood under load applied parallel to grain: A study using scanning electron microscopy. Micron 3, 1972.
- 16) KUCERA, L. J. and BARISKA, M.: On the fracture morphology in wood. Wood Sci. Technol. 16, 1982.
- 17) TIMOSHENKO, S. and YOUNG, D. H.: Elements of Strength of Materials. (前澤成一郎訳) (株)コロナ社, pp. 90, 1964.

- 18) SKENE, D. S.: The period of time taken by cambial derivatives to grow and differentiate into tracheids in *Pinus radiata*. Ann. Bot. 33, 1969.
- 19) PRESTON, R. D.: The Physical Biology of Plant Cell Wall. Chapman and Hall, London, pp. 383, 1974.

Summary

The morphological and anatomical modifications of a tree trunk (*Quercus dentata*) exposed to strong wind were examined with the naked eye, an optical microscope and a scanning electron microscope. The observed results are as follows.

(1) The trunk of the tree was strongly influenced by high wind during the growing season (Photo 1).

(2) In the crooks of the stem, the cross sections of the tree trunk show eccentricity of development around the pith. In these sections, growth rings are narrower on the windward side and wider on the leeward side (Photo 2-5, 8, 9).

(3) In the cross sections of the trunk, gelatinous fibres were detected on the upper side of the stem as shown in Fig. 2.

(4) The folded lamellae of S1 were observed on the inner surface (Photo 13-15). The buckling of S1 wall layer was clearly detected as observed from the outer side of the cell (Photo 17, 18).

(5) The fine thickenings of S2 wall layer due to buckling were detected from both outer and lumen sides of the cell (Photo 21, 22).

(6) In vessels wall, no change was observed (Photo 24).

These macroscopical and microscopical features were discussed using simple models.

Explanation of photographs

Photo 1. *Quercus dentata* on the coast of Cape Erimo (Hidaka in Hokkaido), showing the altered form of the trunk influenced by strong wind. (A) the stem form as seen from the leeward side. (B) arrows show the crooks in the stem.

* Photo 2-9: WS: windward side, LS: leeward side.
Sign of cross section corresponds with sign on stem (Photo 10).

Photo 2. The marked eccentric growth rings in the stem cross section (a-a').

Photo 3. The eccentric growth rings in the stem cross section (b-b'). Rings are narrower on the WS and wider on the LS.

Photo 4. The eccentric growth rings in the stem cross section (c-c'). Rings are narrower on the WS and wider on the LS. Arrow show the development of reaction wood on the upper side of the stem.

Photo 5. The eccentric growth rings in the stem cross section (d-d'). Similar to Photo 4.

Photo 6. The stem cross section (e-e'). Arrows show the development of reaction wood on the upper side of the stem.

- Photo 7.** The stem cross section (f-f'). Arrows show the development of reaction wood on the upper side of the stem.
- Photo 8.** The slightly eccentric growth rings in the stem cross section (g-g'). Arrow shows the development of reaction wood on the upper side of the stem.
- Photo 9.** The slightly eccentric growth rings in the stem cross section (h-h').
- Photo 10.** Sign on the divided stem.
- Photo 11.** Transverse sections of gelatinous fibres (black zone) stained with chlorazol black E.
- Photo 12.** Transverse section of fibres, showing the increase in the proportion of thick-walled fibres.
- * Photo 13-23: Scanning electron micrographs of the cut-open fibres.
 †: the direction of fibre axis.
- Photo 13.** The folded lamellae (arrow) of S1 are seen on the internal surface. ×3500 †
- Photo 14.** Similar to Photo 13. But some folded lamellae (arrow) of S1 are seen on the internal surface. ×5600 †
- Photo 15.** The lamellae of S1 are sharply bent in the form of a "Z". Another lamellae (arrow) underlying this are also folded. ×7800 †
- Photo 16.** The lamellae of S1 are sharply bent in the form of a kink. ×5600 †
- Photo 17.** The buckling of the S1 wall (arrow). ×1750
- Photo 18.** Similar to Photo 17. The buckling (arrow) occurs obliquely to the cell axis. ×1750
- Photo 19.** The folded lamellae running obliquely to the cell axis on the internal surface. ×1750 †
- Photo 20.** The S1 and S2 are seen on the internal surface. Only the S1 wall is folded (central fibre, arrow) ×1750 †
- Photo 21.** Slight wall thickenings (arrows) crossing the microfibril orientation of the S2 wall layer. ×1750 †
- Photo 22.** Slight wall thickenings (arrows) similar to Photo 21, as observed from the lumen side of the cell. ×5600 †
- Photo 23.** No changes on the internal surface of the vessel wall (V). ×350 †
- Photo 24.** Optical micrograph of the transverse section of *Quercus dentata*.
 V: vessel.

