

台風被害を受けたスギ，ヒノキ材の破壊形態と力学的性質

松村， 順司
九州大学農学部木材理学講座

小田， 一幸
九州大学農学部木材理学講座

高田， 清次
九州大学農学部木材理学講座

堤， 壽一
九州大学農学部木材理学講座

<https://doi.org/10.15017/23505>

出版情報：九州大学農学部学藝雑誌. 48 (1/2), pp.27-33, 1993-12. 九州大学農学部
バージョン：
権利関係：

台風被害を受けたスギ, ヒノキ材の 破壊形態と力学的性質

松村 順司・小田 一幸
高田 清次・堤 壽一

九州大学農学部木材理学講座
(1993年6月20日受理)

Relationship cell wall deformations and mechanical
properties of sugi and hinoki woods damaged by typhoon

Junji MATSUMURA, Kazuyuki ODA, Seiji TAKATA
and Juichi TSUTSUMI

Laboratory of Wood Science, Faculty of Agriculture,
Kyushu University 46-08, Fukuoka 812

緒 言

1991年9月, 北部九州に上陸した台風19号は多大な森林被害をもたらした。中でも, 林木が受けたダメージは質・量ともに著しく, 2年以上過ぎた今日でさえ復旧作業が完了していないのが実情である。

台風19号のような強大な風圧力を繰り返し受けつづけた林分では, 樹幹が曲げ荷重を受けるため, 樹幹の折損, 湾曲, 倒伏などの被害が見られる。このような被害木の樹幹には, もめ (macroscopic compression crease) などの損傷が広範囲にわたって観察される。また, 一見正常に見える残存立木も, 同様の風圧力を受けているため, 材内には上に述べた損傷を生じているものもある。したがって, このような損傷を持つ木材を利用するとき, 損傷が木材の力学的性質におよぼす影響を把握することが重要である。

ところで, 宮島 (1959) は, 台風被害にあったトドマツの小試験体で曲げ試験を行い, もめが比例限度, 強さ, ヤング率を低下させることを認めている。また, 太田ら (1977) は, もめを持つ脆心材の性質を調べ, 脆心材の引張強さ, 曲げ強さおよび衝撃曲げ吸収エネルギーが, 正常材に較べて著しく劣ることを認めている。このように, もめが木材の強さを低減させることは確かであるものの, 台風被害木の性質を把握するには, さらに多くのデータの蓄積を必要とするであろう。

以上のような背景を踏まえて, この研究では, 被害

木の力学的性質におよぼす損傷の影響を明らかにすることを目的としている。すなわち, 台風19号の被害を著しく受けたスギ, ヒノキを対象にして, 樹幹のもめ発生側ともめが認められない反対側で, 損傷の程度や状況を観察し, それらが木材のヤング率と強さに与える影響を検討した。

この研究を遂行するにあたり, 九州林産株式会社, 大分県玖珠町および九大粕屋演習林から試料の提供を受けた。ここに記して深く謝意を表する。

材料と方法

1. 試験木

研究に用いた試験木は台風被害を著しく受けたスギ, ヒノキ林分の湾曲木, 折損木と残存立木である。すなわち, 1992年4月から12月にかけて, ヒノキを大分県湯布院町の九州林産(株)社有林(54年生)と福岡県嘉穂町の民有林(35年生)で, スギのうち, 実生スギを福岡県嘉穂町の民有林(35年生)で, ヤブクグリを大分県玖珠町有林(33年生)と九大粕屋演習林(21年生)で, クモトオシを九大粕屋演習林(21年生)で, それぞれ2~3本ずつ伐倒した。なお, ヒノキと実生スギは直立な残存立木, ヤブクグリは湾曲木, クモトオシは折損木である。

2. 肉眼によるもめの観察

試験木の根本から1mないしは2m間隔で長さ30cmの丸太を採取した。丸太を剥皮したのち, それ

それぞれの丸太ごとに周囲長、および木部最外層におけるもめ発生領域の周囲方向長さを測定した。また、丸太を切断して木部最外層から内部へ放射方向のもめの深さを測定した。

3. 顕微鏡による損傷の観察

一般に、もめは樹幹の片側に集中して発生しているため、樹幹をもめ発生側（もめ側）とその反対側に分けた。さらに、もめ側を肉眼的にもめが認められる部位と認められない部位とに分け、それぞれの木部外周部から、1試験木につき数個ずつの顕微鏡観察用の試験片を切り出した。所定の処理のあと、接線面と放射面について、損傷の有無や状態を走査型電子顕微鏡と偏向顕微鏡で観察した。

4. 曲げ試験

樹幹のもめ側と反対側について、それぞれの木部外周部分から、節などの欠点が含まれないように、次のA～Cの3種類の曲げ試験片（Fig. 1）をつくった。

Type A：反対側からの試験片

Type B：中央部（荷重点）に、もめが存在する試験片

Type C：もめ側で、肉眼的にもめが認められない部位から得た試験片

試験片の寸法は、ヒノキでは放射方向に幅2.3cm、接線方向に厚さ1.4cm、軸方向に長さ26cm、スギでは放射方向に幅2.0cm、接線方向に厚さ1.5cm、軸方向に長さ24cmである。試験片を水中に浸漬し吸水状態

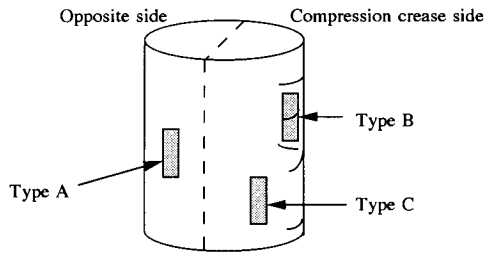


Fig. 1. Location of specimens used for mechanical tests.

にしたあと、放射面に中央集中荷重を加え、曲げヤング率と曲げ強さを測定した。

5. 縦圧縮試験

曲げ試験と同様に、樹幹をもめ側と反対側に分け、それぞれの木部外周部分から、もめ以外の欠点が含まれないように、次のA～Cの3種類の縦圧縮試験片をつくった。

Type A：反対側からの試験片

Type B：中央部に、もめを持つ試験片

Type C：もめ側で、肉眼的にもめが認められない部位から得た試験片

試験片の寸法は、ヒノキでは断面が2.3cm×1.4cm、長さが6cm、スギでは断面が2cm×2cm、長さが6cmである。曲げ試験と同様に、吸水状態で試験を行い、圧縮ヤング率と圧縮強さを求めた。なお、ひずみの測定は鏡式ひずみ計を用いて試験片中央部で行われた。

結果と考察

1. 樹幹内のもめの発生状況

Fig. 2およびFig. 3に、ヒノキと実生スギの樹幹周囲長に占めるもめ発生領域の割合、および木部最外層からのもめの深さを、樹幹方向の推移として示している。図からわかるように、ヒノキと実生スギの樹幹には、風下側を中心に広範囲にわたってもめの存在が確認され、もめは根元付近から樹高の約2/3の高さまでの範囲に分布し、もめ発生の程度は地上から樹高の1/4～1/3付近で大きい。また、クモトオシでは、折損箇所から上部についてはわからないが、下部ではヒノキや実生スギと同様に、もめは樹幹の片側に集中して現れ、折損箇所を中心に根元付近まで分布していた。なお、これらの測定結果は又木らの報告（1992）と類似している。

他方、ヤブクグリでは、乾燥すると不明瞭になるものの、生材時には白色状の斑点（白色斑）が多数認められた。しかし、試験木が湾曲しているにもかかわらず、肉眼的に明らかにもめは確認されなかった。この理由はわからないが、品種特性と考えることもできる。すなわち、一般に、アヤスギやヤブクグリなどの品種ではヤング率が小さく、クモトオシ、ヒノデおよびウラセバルなどの品種ではヤング率が大きい（小田ら、1990）。そして、台風による被害の形態は、アヤスギとヤブクグリでは幹曲がりや倒伏が主体であるが、クモトオシ、ヒノデおよびウラセバルでは折損が主体になり、しかもアヤスギとヤブクグリに明確なもめは認められないとする報告もある（大分林試、1991）。したがって、遺伝的要因に起因する材の性質ないしは細胞壁の性質が、樹幹の損傷の形態や程度に強く関与していると推測することもできる。

2. 顕微鏡レベルの損傷

木材に圧縮荷重が加わり、肉眼的な破壊に至る過程には、種々の微視的な破壊が発生する（Kucera and

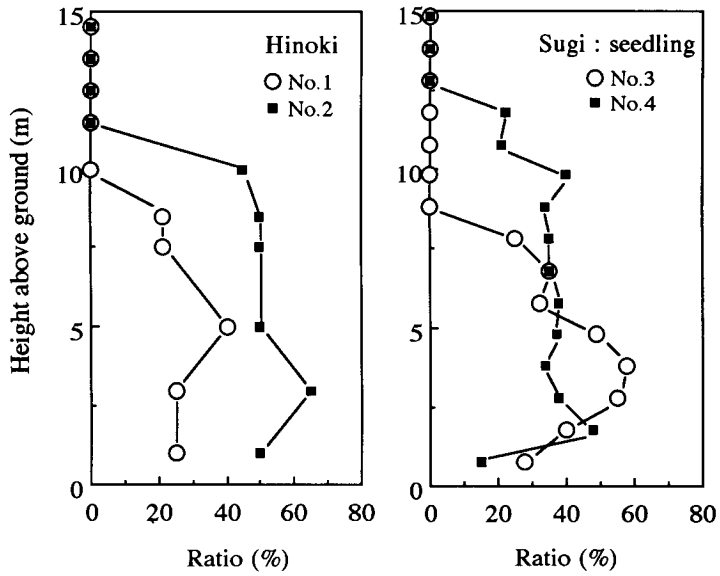


Fig. 2. Ratio of tangential length of macroscopic compression creases to stem circumference at given height.

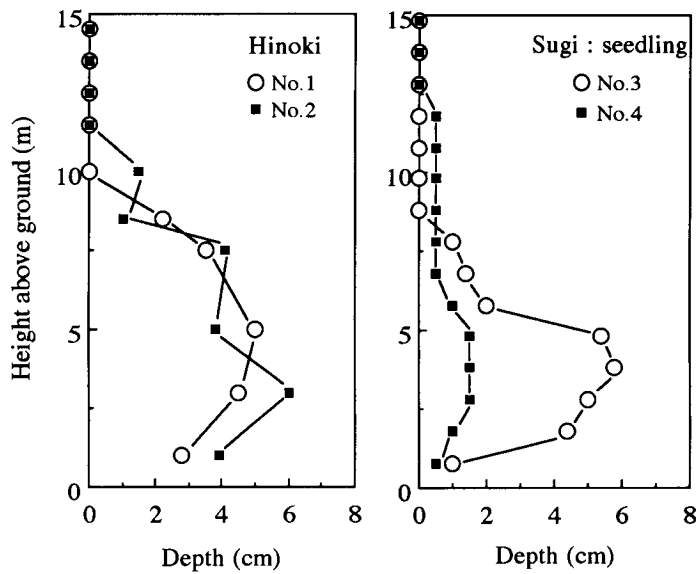


Fig. 3. Radial depth of macroscopic compression creases from the cambium of stem at given height.



Fig. 4. SEM micrograph of microscopic compression creases in seedling sugi wood.



Fig. 5. SEM micrograph of slip plane in sugi (yabukuguri) wood.

Bariska, 1982)。したがって、次に問題になるのは、もめが肉眼的に認められなかった樹幹や部位の材が正常であるか否かであろう。そこで、もめが認められる試験木では、もめ発生側で正常にみえる部位とその反対側、ヤブクグリ試験木では白色斑側とその反対側について顕微鏡観察を行った。

この結果、ヒノキ、実生スギおよびクモトオシのもめ側では、正常にみえる部位から得た試料の大半で Wilkins (1986) が提案する用語の thrust line, slip plane, microscopic compression crease などの損傷が、仮道管の接線壁と放射壁の両方に多数観察された。つまり、もめ側では目視で認められる規模のもめのほかに、顕微鏡レベルの損傷が存在し、その損傷はもめの発生部域よりもさらに広範囲に分布していることが明らかになった。これらの損傷（以下便宜的にしわという）のうち、数細胞にわたってみられるしわを Fig. 4 に示している。

また、ヤブクグリの白色斑側では、Fig. 4 のような大きな損傷は観察されなかったが、thrust line ないしは slip plane が確認された (Fig. 5)。また仮道管壁には、縦じわのようにみえる細かい線も認められた。

他方、樹幹のもめ側および白色斑側の反対側でも、もめ側と同様に繰り返し曲げ荷重を受けているので、何らかの損傷が予測されたが、反対側には明らかな損傷を見いだすことはできなかった。

3. 荷重-たわみ（応力-ひずみ）曲線

上の観察結果から、試験片 A は一応無欠点試験片、試験片 B は肉眼的なもめをもつ試験片、試験片 C は顕微鏡レベルのしわをもつ試験片とみなすことができる。このことを踏まえて強度試験を行った結果、曲げ試験および縦圧縮試験で得られた荷重-たわみ（応力-ひずみ）曲線において、試験片 A は比例限度荷重（応力）以下では単一の直線を示したが、試験片 B の多くは Fig. 6 や Fig. 7 に示すようなパターンを、試験片 C では主に Fig. 7 のパターンを示した。すなわち、Fig. 6 は明確な直線関係がみられないまま上に凸を描いて丸くなるパターン、Fig. 7 は 2 つの直線域が見られるパターンである。このことから、もめやしわをもつ試験片では、試験片の横断面の全部あるいは一部がすでに圧縮破壊を起こしているために、低荷重域での荷重とたわみ（応力とひずみ）の関係は単一の直線にならないであろうと推測された。

したがって、試験片 B, C のヤング率を求めることは困難であった。そこで、便宜上、Fig. 7 のパターンの場合は 1 番目の傾きを採用してヤング率を算出し、Fig. 6 のパターンの場合は最初の 3～4 点のプロットに回帰直線をあてはめて傾きを求めることにした。このため、もめ側の試験片のヤング率は過大評価されることになるかもしれない。

4. 力学的性質におよぼすもめとしわの影響

曲げ試験の結果を Table 1 に、圧縮試験の結果を Table 2 に、試験片のタイプ別に示している。Table 1 をみると、反対側 A の平均値に対するもめ側 B, C

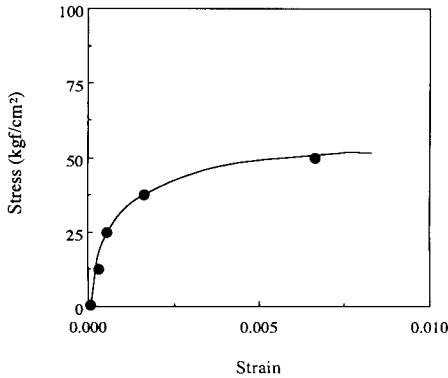


Fig. 6. An example of S-S curve in the specimens of type B including macroscopic compression creases.

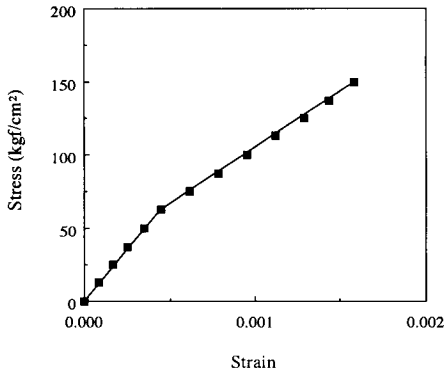


Fig. 7. An example of S-S curve in the specimens of type C including macroscopic compression creases.

の平均値は、曲げヤング率で 42~62%と 65~92%、曲げ強さで 56~72%と 90~92%を示している。また、Table 2 では、試験片 A に対する試験片 B、C の平均値は、圧縮ヤング率で 18~42%と 41~82%、圧縮強さで 77%と 84~90%である。すなわち、試験片 B では、ヤング率は試験片 A の 18~62%、強さは 56~77%を示し、両者とも正常材に比べて明らかに低い。また、もめが認められない試験片 C でも、ヤング率は試験片 A の 41~92%、強さは 84~92%であり、比重の影響を考慮しても、両者の値は正常材よりも小さい。

このように、目視でもめが認められない部位でも、ヤング率と強さが低下しており、この部位には顕微鏡レベルのしわが存在しているので、そのようなしわでさえも木材の力学的性質に影響をおよぼすことが明らかになった。

なお、2つの表を概観すると、もめやしわは強さよりもヤング率に大きな影響を与えている。しかし、宮島 (1959) は、逆にトドマツで曲げヤング率よりも曲げ比例限度と曲げ強さに大きな影響を認めている。したがって、もめやしわがヤング率と強さのどちらに強く影響するかは、樹種や品種、損傷の程度によって異なるのかもしれない。

また、ヤング率と強さの両方で、一般に、反対側 A よりもめ側 B、C で変動係数が大きい。これは試験片 B ではもめの程度が、試験片 C ではしわの程度がそれぞれの試験片によって異なるためと考える。つまり、試験片 B には、大きなもめを持つものや目視でかろうじて認められるもめを持つものが含まれ、試験片 C には、顕微鏡的に大きなしわを持つものもあれば無欠点材に近い試験片も存在するためと推測される。

Table 1. Mechanical properties in bending of hinoki and sugi woods.

Species	Type A			Type B			Type C		
	r	Eb	σ_b	r	Eb	σ_b	r	Eb	σ_b
Hinoki	0.39 (0.02)	115 (16)	567 (41)	0.40 (0.03)	48 (16)	406 (118)	0.39 (0.02)	75 (31)	522 (140)
Sugi (Kumotohshi)	0.32 (0.02)	84 (10)	449 (37)	0.30 (0.01)	52 (20)	253 (117)	0.30 (0.01)	77 (11)	402 (36)
Sugi (Yabukuguri)	0.31 (0.02)	52 (7)	404 (30)				0.30 (0.01)	40 (4)	371 (23)

() : Standard deviation.

r : Basic density (g/cm^3).

Eb : Modulus of elasticity in bending ($\times 10^3 kgf/cm^2$).

σ_b : Modulus of rupture (kgf/cm^2).

Table 2. Mechanical properties in compression of hinoki and sugi woods.

Species	Type A			Type B			Type C		
	r	Ec	σ_c	r	Ec	σ_c	r	Ec	σ_c
Hinoki	0.40 (0.03)	100 (21)	205 (25)	0.36 (0.01)	42 (21)	157 (18)	0.36 (0.01)	82 (15)	173 (7)
Sugi (Kumotohshi)	0.31 (0.02)	85 (15)	202 (19)	0.29 (0.02)	15 (9)	155 (22)	0.29 (0.01)	69 (21)	178 (15)
Sugi (Yabukuguri)	0.32 (0.02)	32 (10)	160 (24)				0.31 (0.02)	13 (5)	144 (18)

() : Standard deviation.

Ec : Modulus of elasticity in compression ($\times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$).

σ_c : Compressive strength (kgf/cm^2).

さらに、クモトオシ B およびヤブクグリ C は、Table 2 では著しく低い圧縮ヤング率を示しているが、Table 1 の曲げヤング率はさほど低下していない。これは、曲げ試験と圧縮試験とでは、同一の樹種・品種でも試験木が異なることに加えて、試験木間で損傷の程度に相違があるためである。このために、力学的性質におよぼすもめやしわの影響を、Table 1 と Table 2 との間で比較することはできない。

ところで、台風被害木のすべてが強度低下を示すとは限らない。Table 1 と Table 2 の結果は、肉眼的に明らかな損傷をもつ試験木から製作した小試験体の場合であり、実大材の場合にはまた違った結果になることに留意すべきである。しかし、もめが木材のヤング率や強さを低下させることは確かなので、構造部材としての台風被害木の利用には、細心の注意が必要であろう。

要 約

台風 19 号の被害を著しく受けたスギ、ヒノキの折損木、湾曲木および残存立木を対象に、損傷の発生状況を観察し、ついで小試験体を用いて曲げ試験と縦圧縮試験を行った。

1) スギでは品種間でもめの発生状況に差異がみられるものの、ヒノキ、スギとも肉眼的にもめが認められるとき、多くの場合、もめは樹幹の片側に集中して発生し、根元付近から樹高の約 2/3 の高さまで分布していた。また、もめの程度は樹高の約 1/4~1/3 の高さで著しかった。

2) ヒノキ、スギとも樹幹のもめ側・白色斑側では、一見正常に見える部位にも仮道管壁に顕微鏡レベルの損傷(しわ)が確認された。

3) もめの存在は木材の力学的性質を低下させることが実験的に明らかになった。また、もめほど著しくはないが、顕微鏡レベルのしわもヤング率と強さに影響をおよぼすことがわかった。

4) 肉眼的な規模のもめや顕微鏡レベルのしわが木材中に存在するとき、低荷重域での荷重とたわみ(応力とひずみ)の関係は、単一の直線関係にならない場合が多かった。

文 献

- Kucera, L. J. and M. Bariska 1982 On the fracture morphology in wood. *Wood Sci. Technol.*, **16**: 241-259
- 又木義博・藤本登留・河辺純一・藤元義安 1992 九州における 1991 年台風 19 号被害木の材質調査、42 回木材学会大会発表要旨, p. 538
- 宮島 寛 1959 風害木のモメについて、北大演報, **20**(1): 198-211
- 大分県林業試験場 1991 被害木の材質調査、大分林試だより, **38**: 4
- 太田正光・岡野 健 1977 脆心材の力学的生活に関する研究、木材学会誌, **23**(1): 1-9
- 小田一幸・渡部演一・堤 壽一 1990 構造部材を意識したスギ 12 品種の木材性質、九大演報, **62**: 115-122
- Wilkins, A. P. 1986 The nomenclature of cell wall deformations. *Wood Sci. Technol.*, **20**: 97-109

Summary

The purpose of this study is to clarify the effect of compression creases on mechanical properties of woods damaged by typhoon. Sugi (*Cryptomeria japonica*) trees from seedling and two cultivars (kumotohshi and yabukuguri) and hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) trees were examined in this study.

The results were summarized as follows ;

1) Macroscopic compression creases were occurred in the stem of seedling sugi and cv. kumotohshi and hinoki, and in many cases concentrated on one side of the stem. These were distributed up to $2/3$ height of the tree from the ground level and marked at $1/4$ to $1/3$ height (Fig. 2 and Fig. 3). In addition to macroscopic compression creases, microscopic fractures were distributed widely in the tracheid cell walls in the compression crease side of the stem (Fig. 4).

2) White-colored spots were observed on the under side surface of cv. yabukuguri stem bended by typhoon. Trust-lines and slip planes were found in the tracheid cell walls in the under side of the stem (Fig. 5).

3) It was experimentally clear that mechanical properties of small specimens were influenced markedly because of macroscopic compression creases and also affected by microscopic fractures but not as remarkably as macroscopic compression creases (Table 1 and Table 2).

4) In most cases load-deflection or stress-strain curves in the specimens including macroscopic compression creases or microscopic fractures did not show simple line in the range of low load (Fig. 6 and Fig. 7).