(研　究　資　料)

風害木に現われたモメの樹幹内分布について

(Research materials)

The Distribution of Compression Failures in Trunk

Saburo Isaka

井　阪　三　郎(1)

わが国は世界の3暴風地区の1つであり，多かれ少なかれ，台風の被害を受けない年はないといつても過言ではない。

昭和 29 年9月 26～27 日に，北海道をおそつた台風が，森林資源にみぞうの被害を与えたことは，まだわれわれの記憶に新たなところである。

風は樹木の生活に対し，花粉の媒介，呼吸同化作用の促進，種子落下範囲の拡大等の良作用をなす反面土壌の乾燥，地温の低下，腐植質生成の阻害，過度の通発乾燥，動揺による芽および根の機械的損傷等の害を与え，わい性，偏心，ねん転，梢殺，樹冠偏奇等の悪結果をもたらす。さらにこの風が一たん樹木の耐力を超過して，作用した場合には，直接的には樹木の傾斜，根倒れ，折損，モメの発生（第 1，2，3，4図参照）等を生じ，個々の樹木を利用価値の少ないものにするばかりでなく，特にひどい場合には，風害木が施業案で予定していない時期および場所にでるので，利用価値の少ない時期に木材を市場に出さなければならなかつたり，搬出不能または困難な処にも被害を生じて，採算が取れなくなるほか，林地を破壊し，更新をさまたげるとともに，周囲の林にまで虫菌害，火災の害をひろげる形となり，その被害は，他の被害に比べ比較することのできないほど大きなものとなる。統計によれば，森林被害の2割は風害によるとされている[5]。

この報告ではモメの発生状況に主眼をおき，北海道層雲峡地区で風害の発生した現地を調査した一端を発表し，今後の風害に対する参考資料としたい。この調査にあたり，林野庁，旭川営林局，上川営林署，北海道林業指導所，および林業試験場木材部の皆様方に，種々と御協力いただいたことを，紙上をかりて深謝する。

1.　モメの発生原因および樹幹形

気象関係では風速の程度を現わすのに，煙や樹木の動きを用いている。

これは各樹木がそれぞれ風に対し適応しているから共通指標として用いることができるのであつて，ある樹木は風が吹いても揺れなかつたり，ある樹木は少しの風でも折れてしまつたりしたならば，このような指標としては不適当なわけである。樹木の発生の長い歴史の間に，種々の風害を受け，風に弱いものは

(1) 木材部木材材料科物理研究室長

第1表　気象庁風力階級表

風力階級	陸上における指標	地上10mにおける相当風速（m/sec）
0	静穏，煙はまつすぐに昇る	0～ 0.2
1	風向は煙がなびくのでわかるが，風見には感じない	0.3～ 1.5
2	顔に風を感ずる，木の葉が動く，風見も動き出す	1.6～ 3.3
3	木の葉や細い枝がたえず動く，軽い旗が開く	3.4～ 5.4
4	砂ぼこりがたち，紙片が舞いあがる。小枝が動く	5.5～ 7.9
5	葉のあるかん木がゆれはじめる。池や沼の水面に波がしらが立つ	8.0～10.7
6	大枝が動く，電線がなる，かさはさしにくい	10.8～13.8
7	樹木全体がゆれる。風に向つては歩きにくい	13.9～17.1
8	小枝がおれる。風に向つては歩けない	17.2～20.7
9	人家にわずかの損害がおこる（煙突が倒れ，かわらがはがれる）	20.8～24.4
10	陸地の内部ではめずらしい，樹木が根こそぎになる，人家に大損害がおこる	24.5～28.4
11	めつたにおこらない，広い範囲の破壊を伴う	28.5～32.6

子孫を残すにいたらないうちに死滅し，強いものだけが生活をつづけ，子孫を残すことができ，自然の中にとうたされてきたからである。

樹木は，互に生存競争をしており，他の樹木より少しでも高く伸び，陽光をより多く受け，自己の生存を安全なものにしようと努力している。しかしながら樹高のみ伸び，肥大成長が伴わなかつたとするならば，風力に抗しきれず，かえつて自己の生命を危くするものである。ゆえに生存競争に打ち勝たんとするならば，必要にしてかつ十分なる最小限度の肥大成長をなし，その余力により樹高成長をより多くし，他の樹木と競争していかなければならなくなる。このようにして樹木は後記のように，理論的にもうなずける程度にまで，一定の法則にかなつた幹形をしているわけである。

しかし生存期一代中には，ほとんど起きないであろうような，猛烈な暴風に会うと，ひとたまりもなく被害を受けてしまい，その地方の風にちようど適応したもののみが残ることになる。15号台風の場合でも北海道の測候所開設以来はじめての大台風であつたことも，うなずける。

樹木は日々の生活を維持するために葉はなるべく表面積を大きくし，しかも太陽の光線を十分に受けられる位置におかなければならない。しかし葉の表面積を大きくし，しかも太陽に当るようにすることは，必然的に風に対する抵抗が大きくなることである。風に対する抵抗が大きくなれば，幹や根はこれを支える必要が生じてくる。そのためには生活に不要な枝葉はなるべく落してしまい，必要最小限の葉のみを残し幹の形は最も体積が少なくて，同じ強さを保てる円断面が良く，根は地中深く入るか，四方八方に長く伸ばす必要がでてくる。

幹の一部に弱い処があると，そこは風による曲げの作用を最も多く受け，その作用で幹の風下は圧縮され，風上は引張られる。この圧縮された部分は成長を促進され，幹の他の部分より多く成長し，年輪幅が広くなる。このようにして他の部分と同じ抵抗力をもつまでは，その部分はより盛んな成長をつづけ，ついに他の部分と同じ抵抗力をもつに至る。そのために心材腐朽を受けている樹木はその部分が太く，とつくり形となり，枝のつけ根や，傷跡の部分はまきこみが行われている。特に風が一方からのみ吹きつける林縁や海岸では，針葉樹は主風の風下側に偏心成長し，傾斜した針葉樹では，その自重のため傾斜の下側に偏心成長することからもわかる。また同じ高さの樹木の場合には，樹冠の大きいものほど根元直径が大きくなければならないわけで，孤立木は梢殺になり，枝打ちの行われた木は完満になるわけである。

樹木が風圧を受けると，幹は曲るが，この曲りが木材の弾性限界内であれば，風がやむとまた元にもどる。この範囲をある程度過ぎると，材の最も弱い箇処に破損を生ずる。この点を過ぎてさらに力が加わるとついに幹は折れてしまう。この破損の状態をモメといい（第 2，3，4 図参照），曲げの内側の最も力の集中する形成層の部分からはじまり，材の中心に向つて広がるもので，風害以外にも，伐木の際のショックによつても生じ，木材の強度試験を行つた時の破損と同じ形に現われる（第 5 図参照）。風害を受けていないように見える立木においてすら幹の各処にモメを生じていることがあり，丸太としてはなんら被害木とは見えなくても，製材，加工をすると材に割れを生じ，かんな削りすると材面にキズを現わし，外観をそこなうほか，物理的，強度的性質をそこなつていることがある。

なお風速（V m/sec）と風圧（P kg/m^2）の間には，

$$P = 0.12V^2$$

なる関係があり，風圧と樹幹に生ずる応力とがほぼ比例するから，風速が少し増加しても，樹幹内応力の増加は非常に大きくなる。木材の曲げ試験において，破壊の際の荷重を 100 とすると比例限度は大略 70，圧縮側に破損（モメ）の入るのが大略 80 の割合であるとし，これを風速の関係で表わすと，84：89：100 となる。建築関係で最大風速 20 m/sec を越すと急激に被害が増加するといわれ[3]，立木の場合は立地的に実際の生立地の風速を測定したものが少ないので，はつきりしたことはわからないが，やはり 20 m/sec を越すと被害がではじめると考えられる[5]。そこで 20 m/sec までは材に異常を生じないと仮定すると（ちようど弾性限界と仮定する），21.2 m/sec でモメを生じ，永久ひずみが残り，23.8 m/sec で折損してしまうことになる。このように風速がほんの少し増加しても，今までなんら被害のなかつた林に，大被害を与えることがありうる。直径 40 cm のエゾマツは折損時，樹冠に 1～2 t の風圧を受ける計算になり，風の力は想像以上に大きいことがわかる。

生立木でモメを生じたときには，その後はそのモメの付近は最も抵抗力が弱くなるので，その部分にはアテのような異常成長ができ，他の部分と同一抵抗力になるまで異常成長をつづける（第 6 図参照）。今回の調査にあたつても，材の相当中心に近い内部にモメを発見し，その後の 2，3 年輪は，アテがかつた異常成長をなし，さらにその後約 40 年輪は他の部分と変りない成長をしているものを実見した（第 7 図参照）。これから判断すると四十数年前に，この地に軽微な風害があつたことが推察される。また昭和 29 年の風害後昭和 30 年の調査まで生きていた樹木では，モメのある部分はほとんど最後の 1 年輪が異常成長していたことも確かめ得た（第 8 図参照）。逆に年輪を調査することによりモメを発見することができ，過去の風害や，枝打等を想像することができることは興味深いことである。

つぎに材料力学的に樹幹形および根の抵抗力を検討して見ることにする。

(1) 樹冠内の場合

梢端よりｘなる距離における幹の単位長さ当りの枝葉が受ける風圧をｙとし，ｘ，ｙ間に，

$$y^2 = px^r$$

なる関係があるとすれば，梢端よりｘなる距離にある断面までの荷重の合計Wは

$$W = \frac{2\sqrt{p}}{r+2} x^{\frac{r+2}{2}}$$

モーメントは

$$M = \frac{4\sqrt{p}}{(r+2)(r+4)} x^{\frac{r+4}{2}}$$

となる。幹が円形で，各位置とも同一抵抗を有するためには，f を内応力，Z を断面係数とすると

$$M = f \cdot Z$$

なる式が成り立たなければならない。ゆえに樹冠内にては，樹幹直径を d とすると，

$$\frac{4\sqrt{p}}{(r+2)(r+4)} x^{\frac{r+4}{2}} = f\frac{\pi}{32} d^3$$

となり，これより樹幹の直径を求めると，

$$d = \left\{\frac{128\sqrt{p}}{(r+2)(r+4)f\pi}\right\}^{\frac{1}{3}} x^{\frac{r+4}{6}} = A x^{\frac{r+4}{6}}$$

となり，樹冠の形と樹幹の形との間には

$r = 0$（矩形）のとき　　$d = A x^{\frac{2}{3}}$

$r = 1$（放物線形）　　$d = A x^{\frac{5}{6}}$

$r = 2$（三角形）　　$d = A x$

なる関係がでてくる。また樹冠に加わる風圧の重心と樹冠最低部との距離 $\bar{x}$ は

$$\bar{x} = \frac{2}{r+4} x$$

となる。

(2) 樹冠外の場合

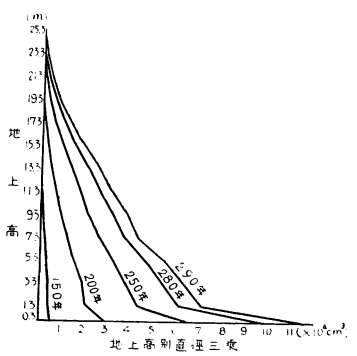
樹冠外の場合は，風圧の重心に集中荷重を受ける片持梁と考えられるので，樹冠の長さを X とすれば，樹冠内の場合と同様の考え方で，

$$\left(x - \frac{r+2}{r+4}X\right)\frac{2\sqrt{p}}{r+2} X^{\frac{r+2}{2}} = f\frac{\pi}{32} d^3$$

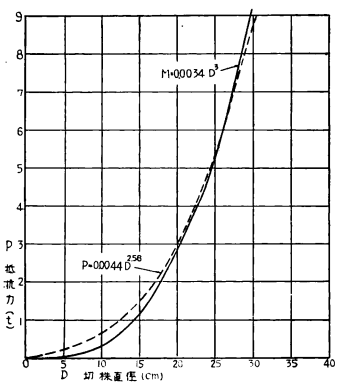
となり，x と d のみが変数であるから，樹冠外では x と d^3 とは直線的関係にあり，各地上高における直径の 3 乗が直線となり，その直線は樹冠の風圧の重心に交わるべきであることがわかる[1]（第 9 図）。

(3) 根の引抜抵抗

伐根抵抗力 P（t）と切株直径 D（cm）との関係は，ヒノキに関する実験においては



第 9 図　各地上高における直径の 3 乗
（アカエゾマツ 290 年生）



第 10 図　切株の直径と引抜抵抗力の関係

$$P = 0.00144\, d^{2.56}$$

で示された[3]。しかしこの実験値を

$$P = 0.00034\, d^{3}$$

で示しても，この実験の範囲内では良く適合するので（第10図参照），この式を使つて考えてみると，根の抵抗は，切株の直径の3乗に比例していることがわかる。一方(2)で説明したごとく，木材の破壊強度が同一であるとすると，根元に受けるモーメントは，根元直径の3乗に比例してくる。この2つを組み合わせると，伐根抵抗と根の風により受けるモーメントは比例することになる。このようなことを証明するために行われた実験でないために，数字が一致するかどうかは不明であるが，少なくも風に対する幹の抵抗力と根の抵抗力とが比例するであろうことを想像するに難くない。現に従来の風害木の調査を調べてみると，雨で地盤がゆるんでいる時に根倒れが多く，幹に腐れが入つている場合には，その部分から折れ，普通の場合は折れと，根倒れが両方はいつてくることからも推察することができる。

2. 15号台風の概要

昭和29年9月25日3時には石垣島，26日3時には九州南部に上陸，中部地方をかすめ，日本海を北上し，北海道の西半をおびやかし，27日3時すぎに稚内を通過，オホーツク海にぬけた。

各地の最大風速は第2表のとおりであるが，特に神威みさきでは10分間の平均最大風速 63 *m*，1時間半の総平均風速 50 *m* に達し，その他平均最大風速 40 *m* を越したところが多かつた。

第2表 各地の最大風速

地名	最大風速 *m/sec*	風向	地名	最大風速 *m/sec*	風向	地名	最大風速 *m/sec*	風向
函館	25.8	南	苫小牧	31.8	南	留萌	35.2	南西
江差	36.1	西南西	倶知安	34.1	南々西	旭川	19.4	南々西
室蘭	37.2	南	札幌	18.8	南々東	稚内	23.9	北
寿都	42.0	南々東	岩見沢	31.4	南々西	帯広	14.2	西

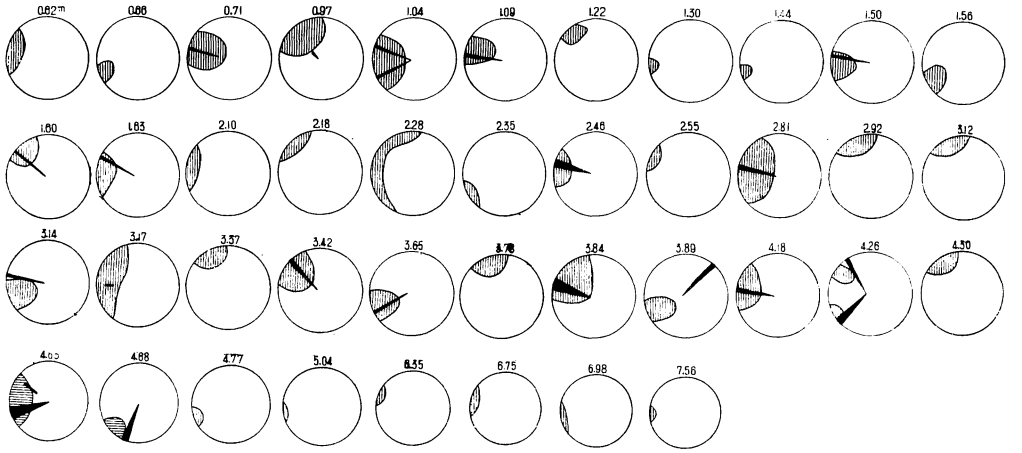
この台風により，北海道は5,700万石の被害を受けた。これは北海道の森林伐採量の2年分に，蓄積の3%に相当している。

またその被害地区は，大きく分けると，大雪山群を中心として，さらにこれより西北にのびた地帯と，もう1つは樽前山を中心として，東北部にのびた地帯であつた。測候所の観測値から見ると，中央高地帯は暴風継続時間も少なく，最大風速もさほど上つていないが，これらは平地の観測値であつて，風速は一般に高さの対数乗に比例して増加するものであつて，石狩川上流は 1,000 *m* 以上の高度をもつており，現にその中流に位する上川森林治水試験地では，27日1時に最大風速 26.7 *m* を記録しており（第3表），瞬間風速は平均最大風速の 1.5 倍と考えられるところから推せば，瞬間風速は上川町付近で 40 *m*，さらに奥地の上流林分では 60 *m* 以上にのぼつたものと想像される。

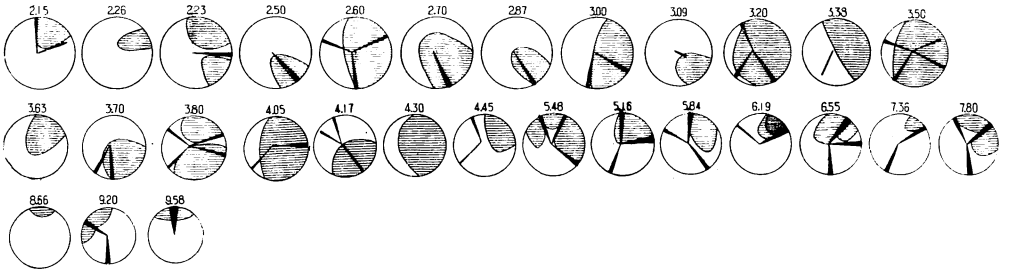
また樽前山を中心とする地帯は，火山灰地帯であり，地盤がゆるく，根返り木が多くでたためと思われる[4]。

このように15号台風は，西部を除き，ほとんど全道にわたり被害を与えたが，そのなかでも最も被害の大きかつた上川営林署管内の調査をする機会を得たので，北海道全般を論ずるにはあまりにも資料が少

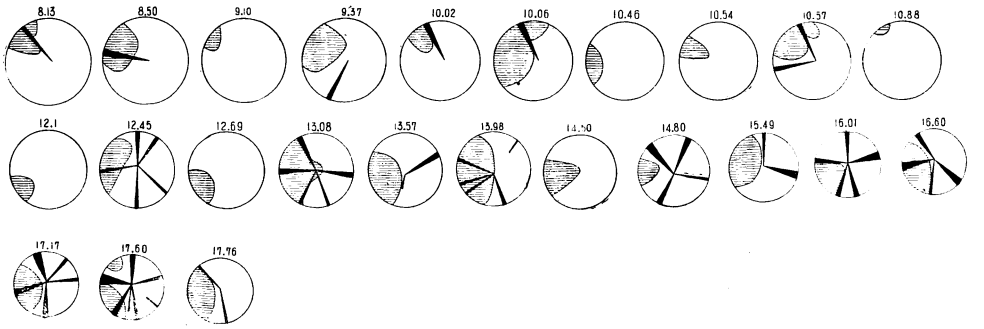
内応力を，内部は圧縮内応力を受けている[7]うえに，さらに風圧による外応力を受けたためと，節の弾性係数が小さいために節のあるところはひずみが節の上下に集中するため，および節の周囲の繊維が彎曲して応力の方向と平行していないために弱いこと等が原因であると考えられる。



1C411

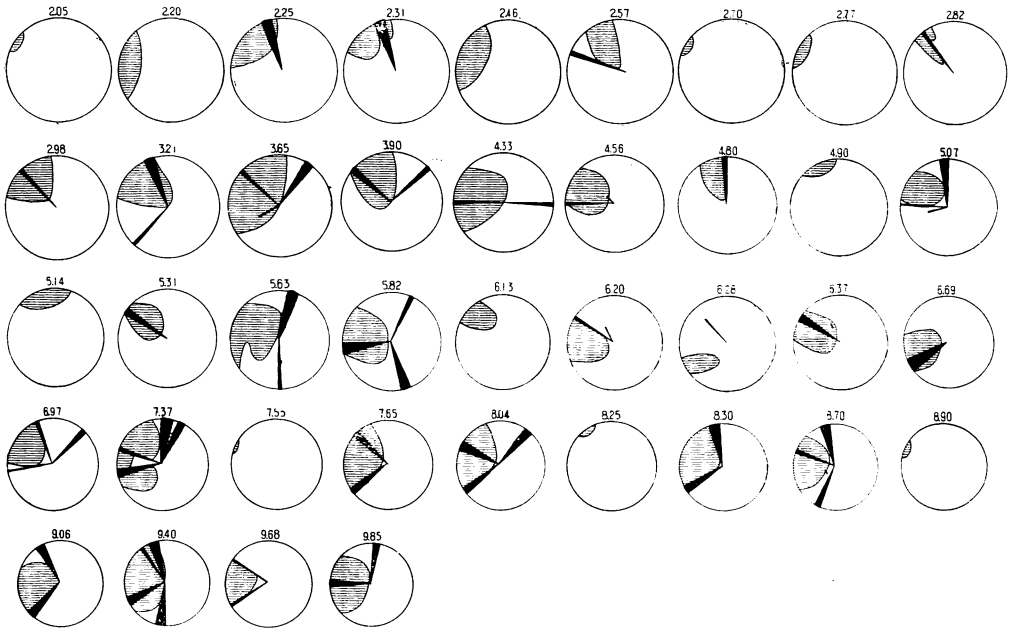


1A521



2 A 25

第 13 図—1　モメの水平的広がり
（数字は地上高 m を示し，黒い部分は節を示す）

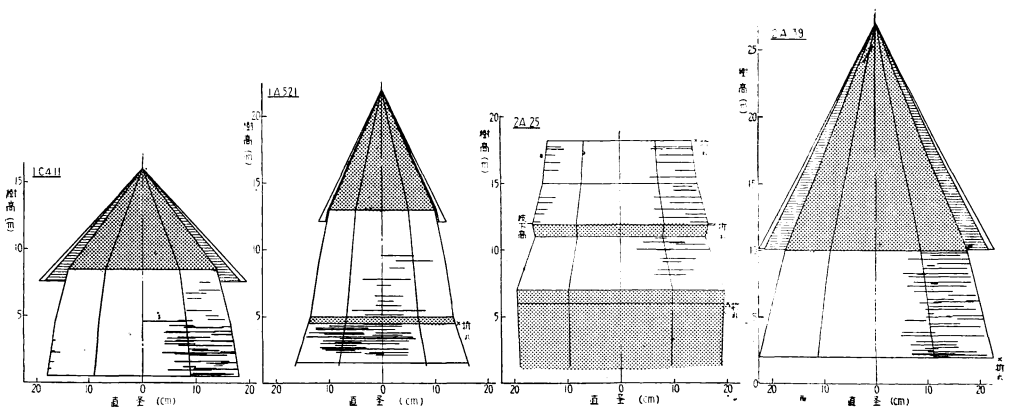


2 A 39

第 13 図—2　モメの水平的広がり
（数字は地上高 m を示し，黒い部分は節を示す）

7.　モメの生じた位置の方位

調査木全部に関しては東北の方向に倒れたものが大部分で，モメの生じた方位もこの方向が大部分であつたが[2]，試験木の 4 本に関してはあまり明りような関係は現われていない（第 14 図）。これは局地的な風向，樹冠の偏奇，周囲立木の影響等があり，転倒の際のねじれや転倒後の回転等により，調査が不正確になつたことも原因の一つと考えられる。しかしながら 1 試験木ごとに調べてみると，モメの発生方向は一定方向に集結しており，前述の考え方からこの方向が実際の風下方向であつたとみなすのが順当であると考えられる。



第 14 図　モメの生じた方位と垂直的分布（陰影部は未調査）

8.　モメの地上高別の分布

前述のごとく立木が生育期間中に風圧に対し樹幹の各部とも同一抵抗力をもつていると考えると，モメは当然樹幹の各部分に平均的に現われるべきことになる。4 試験木の地上高別の分布は第 3，14 図のごとくであり，1A521 を除き予期したとおり一様であつた。1A521 に関しても，平常は風圧を受けていない樹冠の下部が，周囲の樹木の倒壊により新たに風圧を受け，風圧の中心がさがつたことにより，樹幹の下の方に応力が集中したとも考えられる。

以上の結果を逆に考えてみると，台風が林木の実大強度試験を大々的に行つたようなもので，樹幹の各部とも同一抵抗力をもつていたことの証明となり，その際の風の状態がわかればはなはだ興味深い結果が得られるのであるが，ちようどこの近辺に測候所がなく，風力が不明であつたうえ，被害があまりひどかつたので風害を受けた木の風害前の様子を知るのに不十分であつたことは残念である。

文　　献

1）井阪三郎：Metzger の法則に就て，帝室林野局，北海道林業試験場彙報，4，(1943)

2）林業試験場木材部調査：未発表

3）藤林　誠・本多三雄・辻　隆道：ヒノキの抜根に関する試験，林業技術シリーズ，8，(1950)

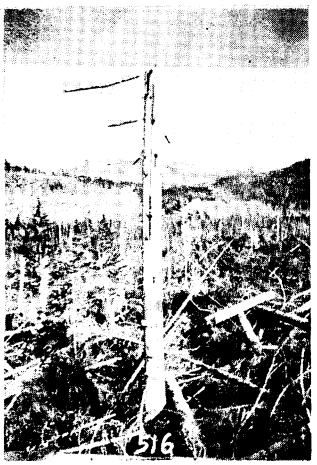
4）寺田喜助：風災 5700 万石，林業解説シリーズ，72，(1955)

5）玉手三棄寿：森林の風害，林業技術シリーズ，15，(1950)

6）Trendelenburg: Das Holz als Rohstoff. (1938)

7）渡辺治人：樹幹の内応力に就て，日本林学会誌，24，3，(1942)

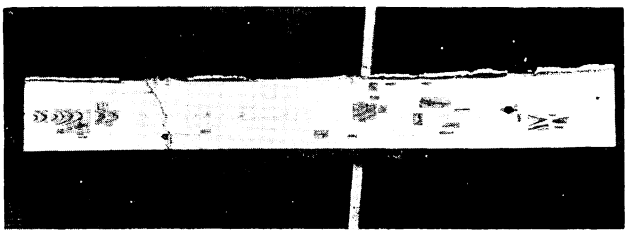
8）亀井　勇：自然風を対象とせる構造物の風圧力に関する研究(1)，建築研究報告，16，17，(1955)



第1図　風害による折損部
（死枝との関連性）

第2図　丸太の表面における
モメの状態
（節との関連性に注意）

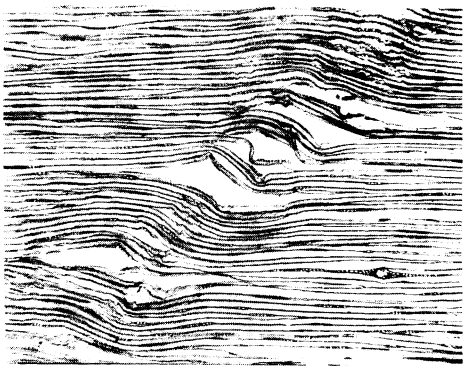
第3図—b　モメの分布
（節との関連性）



第3図—a　材面に現われたモメ（節との関連性に注意）

第3図—c　死節とモメ

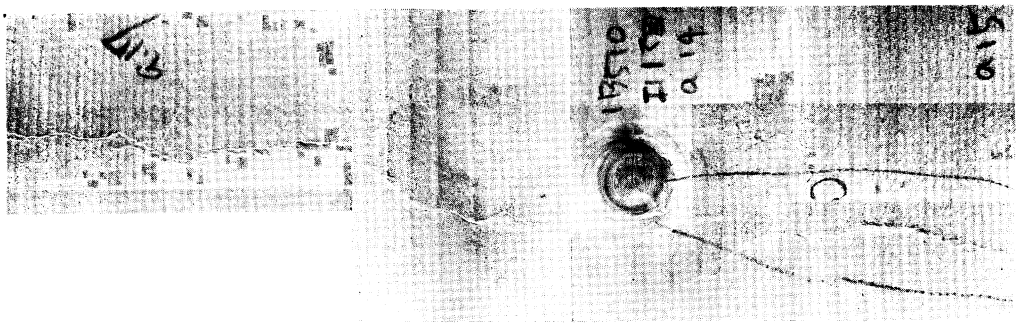
まさ目面　射出線の部分にモメが生じやすい
（紋孔がつぶれている）



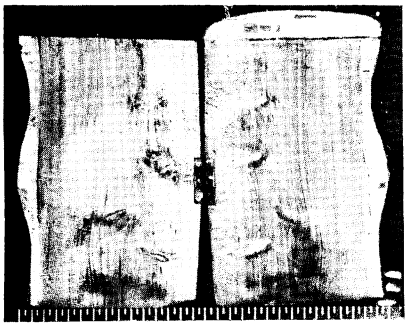
板目面　モメの線が繊維に対し約45°に傾いている
（射出線と関連している）

同上拡大（紋孔がつぶれている）

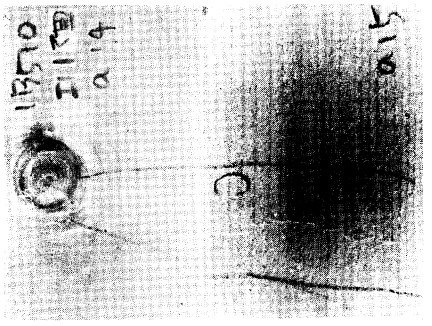
第4図　モメの顕微鏡写真（繊維の破壊している状態を示す）（小林技官撮影）



第5図—b　同上試験体の強度試験後のモメの変化
左方は強度試験によりできた破損部分　（右方はモメ）

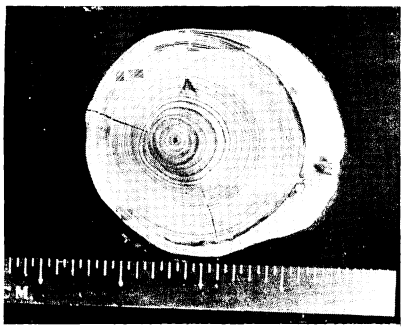


モメのできた部分は次年度から異常成長が
見られる　（半径面）（スギ）

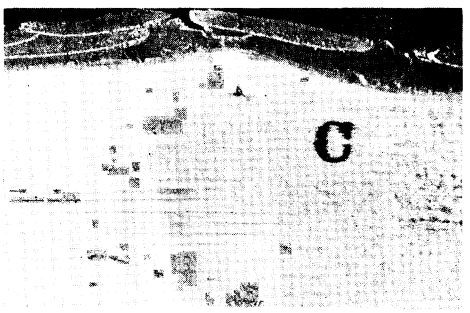


第5図—a　風害木の強度試験前のモメの状態

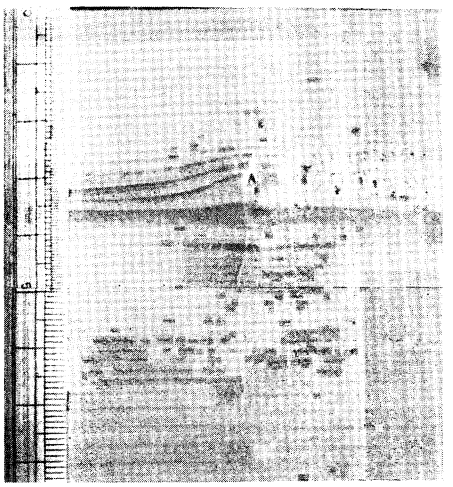
第5図　風害によるモメと強度試験による破損



同上　（木口面）（スギ）
第6図　モメのできた部分に次年度から生じた
異常成長　（防災部保管標本）



第8図　モメの部分の風害次年度の異常成長
（エゾ）



第7図　40 数年前のモメとその後の成長状況
被害の次年度はアテが出ており異常成長が
つづいている