

伐採木樹冠が残存木樹冠の間を通過するときの 最大抵抗力と通過仕事

森岡 昇*・近藤 稔*・小木曾謙治**

要 旨

伐採に際し、伐倒木の樹冠が残存木の樹冠に妨げられて自由な動きができず、作業の障害となることが多い。この樹冠同士の接触の現象は複雑な仕組みをもち、またさまざまな条件因子の影響を受けている。例えばかかり木の発生頻度は、樹冠を構成する枝の形状、材質、伸長方向、小枝や葉の状態、そして立木密度など数多くの物理的因子に関係することが知られている。ここに挙げたような因子が、伐倒時の樹冠同士の接触と通過の過程にどのような影響を及ぼしているかを解析した。またこの解析結果に基づいて、樹冠接触時の最大抵抗力や通過に要する仕事を推定するための基本式を導いた。

樹冠接触時の抵抗力は、基本的には樹冠を構成する枝のたわみに伴って生ずるものである。そこで枝のたわみの抵抗力を基礎として最大抵抗力 F_m を求める式を提示した。

$$F_m = \eta(1 + \mu)f_{bm}$$

ここで η は枝と枝が接触するときの接触効率、 μ は接触摩擦係数、そして f_{bm} は接触区間における枝のたわみ抵抗力の合計の最大値である。

通過仕事 W_t も下のように同じ形式の式で表した。ただし w_{bt} は樹冠接触に関わる全ての枝のたわみ仕事の合計である。

$$W_t = \eta(1 + \mu)w_{bt}$$

キーワード：樹冠、間伐作業、かかり木、枝のたわみ、摩擦抵抗

1. 序 論

1-1. 研究の目的と意義

間伐や枝打ちなどの手入れが不十分な森林は、樹冠が込み合っていて、伐採に際しさまざまなトラブルを起こしやすい。通常のチェーンソーによる人力伐採においては処理の難しいかかり木を生じ、ツリーフェラやフェラバンチャなどを使用する機械伐採においても、密生した樹冠を押し分けて伐採木を倒すためには、やはり多くの時間とエネルギーを費やさなければならない。従って伐採作業を合理化するためには、この伐倒木が残存木の間を通り抜ける

*名古屋大学農学部森林資源利用学研究室

Laboratory of Forest Resources Utilization, School of Agricultural Sciences, Nagoya University, Nagoya 464-01, Japan.

**岐阜県庁

Gifu Prefecture Office, Gifu 500, Japan.

(受理：1996年11月25日)

ときの樹冠の接触抵抗力や通過仕事の大きさを知ることが大切であるが、残念ながらこの問題に関する研究は従来ほとんどなされていないのが実情である。筆者らのものを除けば、僅かにかかり木を引き起こしやすい森林の条件などが調べられているに過ぎない（酒井ら、1988；石川，1990）。

本研究は、樹冠の接触・通過過程を力学的に解明するとともに、最終的には樹冠の接触・通過時の最大抵抗力や通過に際してなされる仕事を推定するための算定式を導くことを目的としている。ただし今回は資料の不足もあり、具体的な数値を与える式までは作成することができず、抽象的・包括的な式を提示するとどまらざるを得なかった。従って本研究の主たる意義は、伐採作業に直ちに役立つような実用的情報を提供することよりも、接触・通過の機構の解明を一步進め、また条件因子との関係を式により整理して、今後の研究に資することの方にある。

1-2. 抵抗力や仕事を推定する上での問題点

筆者らはかつてスギの梢端部を用いて、樹冠の接触・通過のモデル実験を行なったことがある（森岡ら，1994）。固定した2本の梢端部（固定木と呼ぶ）の間を1本の梢端部（移動木と呼ぶ）を通過させ（図-1）、接触の開始から通過完了までの抵抗力の変化や仕事の累積具合、あるいは固定木と移動木の位置関係（図-2）によってこれらの値がどう変化するかなどを調べたのである。結果の一部を表-1に掲げる。

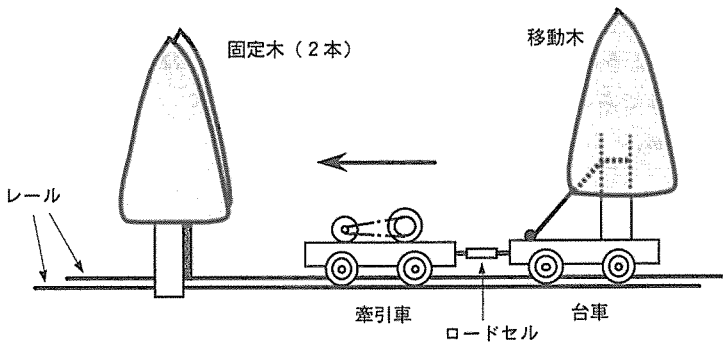
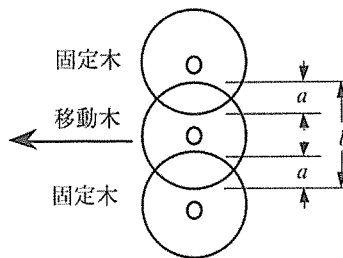


図-1. 樹冠通過のモデル実験



$$\text{樹冠の重なり率} = \frac{a}{b} \times 100 (\%)$$

図-2. 樹冠の位置関係を表す重なり率

表-1. モデル樹冠が接触・通過するときの最大抵抗力と通過仕事

固定木の間隔 (cm)	樹冠の重なり率 (%)	最大抵抗力 (kg)	通過仕事 (kg・m)
155	21	0.31	0.17
125	36	0.59	0.44
95	52	2.25	1.40
65	67	6.40	3.90

(注) 供試樹冠はスギの梢端部である。移動木、2本の固定木いづれの樹冠も、高さは約180cm、下部の直径は約100cmであった。

抵抗力の極大値が接触のかなり遅い時期に発生すること、固定木の間隔が狭くなるにつれ抵抗力や仕事が増加することなど、定性的にはほぼ予想された通りの結果が得られた。しかし表-1に示した抵抗力や仕事の数値それ自体は、モデルの枠内で意味があるに過ぎず、条件が大きく異なる実際の立木樹冠に拡大、ふえんするには無理があると判断された。従って何らかの他の方法で、立木樹冠についての数値を求めなければならないことがわかった。

まず考えられる方法は、実物の立木樹冠を対象として、モデルと同様の実験を行なうことである。しかしこの方法はきわめて大がかりな設備と労力を必要とし、またたとえできたとしてもそこで得られた数値は、実験木に近い条件の立木に当てはまるに過ぎない。多様な条件下にある一般の立木樹冠に適用できない点では、モデル実験の場合と同様である。

次に相関分析などの統計的手法によって、条件因子と関連づけて抵抗力や仕事を推定する方法が考えられる。しかしこの方法も、条件因子の数が非常に多いこと、そしてなによりも実際の立木についての抵抗力や仕事の実測値が決定的に不足していることから、すぐには実用化は期待できない。

1-3. 抵抗力、仕事の推定に関する基本的な考え方

以上の状況を踏まえて検討した結果、抵抗力や仕事の推定は、やはり樹冠の接触・通過のメカニズムの解析結果に基づき、主要な条件因子と関連づけて、力学的・分析的方法で行なうのが本筋だと判断した。ただし前述のように樹冠の接触・通過の機構は、樹冠を構成する枝の材質、形状、伸長方向そして小枝や葉の性質など数多くの因子に関係するので、その解析はなかなか難しい。そのうえ2つの樹冠の位置関係が少しずれると、図-3のように本来なら接触するはずの枝が接触しなくなるなどの不連続的な変化をする、つまり確率的に現象が生起する特性があり、問題を一層複雑化している。

現段階では、一般的な条件の下での抵抗力や仕事の値を、関係するすべての条件因子の関数として推定することは無理であり、いくつかの主要因子と抵抗力や仕事との関係、そして因子相互間の関係がある程度把握できればよい、との立場で研究を進めた。

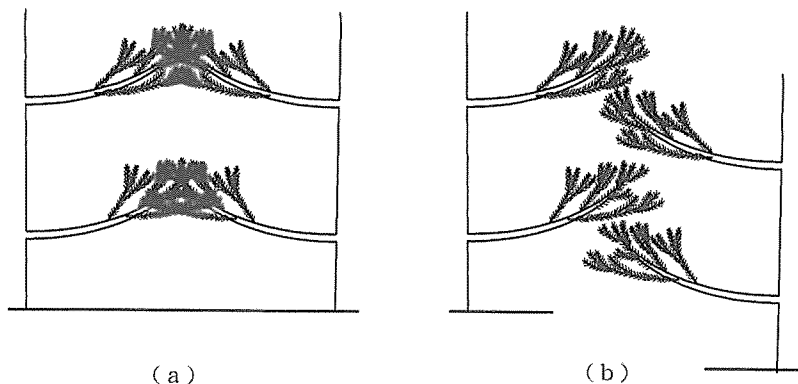


図-3. 固定木と移動木相互の位置がずれると接触の様相が変わることの説明図

2. 樹冠の接触・通過の仕組み—標準的パターンによる考察

2-1. 立木の伐倒と樹冠の接触・通過

伐倒木が倒れる方向の右か左，どちらか一方の側にしか残存木が存在しない場合は，伐倒木樹冠は残存木樹冠の上を転がりながら容易に滑り落ちるので，特に問題はない。ここで扱うのは，2本の残存木樹冠の間を伐倒木樹冠が通り抜けるときに起きる現象であり，前述の梢端部モデル実験と同じ状況と考えてよい。簡単のため，全く同大の2本の残存木(固定木)の間を，これも同大の伐倒木(移動木)が水平に通過してゆくときを想定する。

2-2. 接触・通過の仕組み

現象は左右同様に生ずるとしているから，ここでは左側の固定木と移動木の間を取り上げて考察する(図-4)。

まず一番外側に張り出している枝の先端部(葉や小枝の部分)同士の接触から始まる。移動木が進行するにつれて双方の枝はたわみ，このときに抵抗力(たわみ抵抗力と呼ぶ)が生じる。一方，接触部位も少しずつ枝の元の方へと位置を変えるが，このときに互いに接触している枝や葉の間に摩擦力が働くことになる。さらに移動が進めば接触部位は再び枝の先端に戻り，ついには互いの枝は離れて接触が終了する(図-4, 5)。一般に第1の枝の接触が終了するまでに，第2，第3の枝の接触が始まっているので，樹冠としての抵抗力はその時点で接触に関係しているすべての枝のたわみ抵抗力と摩擦力の合計になる。最後の枝の接触が終了した時点で，樹冠の通過が完了する。なお樹冠の通過に際してなされる仕事は，各枝がたわむときに吸収されるひずみエネルギーと，枝同士が滑りながら接触位置を変えるときになされる摩擦仕事の総和である。

3. 接触・通過に影響する因子とその作用

樹冠の接触・通過の現象は，樹冠を構成する枝のたわみとたわみ抵抗力の関係が一番の基本である。すなわち，たわみ抵抗力は接触抵抗力の大きな部分を占めているとともに，もう一つの成分である摩擦力も，やはり枝同士が押し付け合う力であるたわみ抵抗力に応じて大

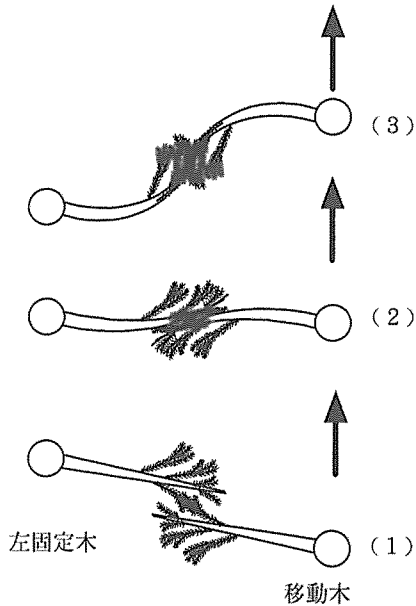


図-4. 移動木の進行に伴う枝の接触状態の変化

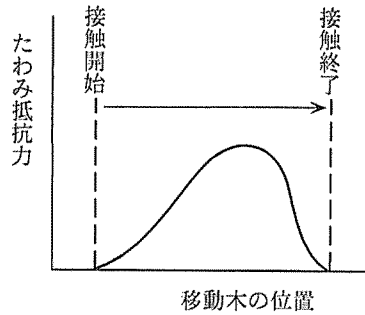


図-5. 移動木の位置とたわみ抵抗力の関係

きさが決まるものだからである。また通過仕事の方も、接触区間におけるたわみ抵抗力及び摩擦力の積分であるから、これもたわみ抵抗力が基になっている。以下、枝のたわみとの関連を常に念頭に置きながら、樹冠の接触・通過に影響する主な因子について、影響の仕方と問題点を検討することにする。

3-1. 枝の材質

わが国の主要造林樹種であるスギとヒノキについての調査結果によれば、これらの生きた枝は非常に柔軟性に富み、通常の荷重の範囲では曲がりはしても折れることはないと言われている（森岡ら，1995）。したがって樹冠の接触・通過現象を考えると、枝の力学的性質の中で、負荷（たわみ抵抗力）とたわみの関係を表す曲げヤング係数の方が、破壊強度よりも重要である。

他の条件が同じであれば、たわみ抵抗力はヤング係数に比例する。つまりヤング係数の大きい硬い枝をもつ樹冠は、接触時の抵抗が大きいことになる。樹種、枝の年齢、着生位置そして季節等とヤング係数の関係はある程度調べられている（ONWONA-AGYEMAN *et al.*, 1992, 1995）が、生育場所によってもヤング係数が相当異なることが考えられるので、現地での実測が必要なきときもあると考えられる。このためには筆者らによって開発された、生枝のヤング係数の現地測定法（ONWONA-AGYEMAN *et al.*, 1994）が、役立つであろう。

3-2. 枝の大きさと形状

枝の太さや長さそして形状が異なれば、たわみの大きさや形態、そしてたわみ抵抗力も当然に変化する。例えば移動木の進行に伴うたわみ抵抗力は、枝の太さによって図-6のような差を生ずる。なお抵抗力だけでなく、接触区間長の方も変わってくる。

図-6 は模式的に説明をしたものであるが、形状が単純な枝でたわみが小さい場合は、この関係曲線を理論的に求めることができる。例えば断面がほぼ円形で先にゆくにしたがって一様に太さが減ずる枝は、円錐片持梁とみなすことにより、たわみとたわみ抵抗力の関係を表す式が求められている (ONWONA-AGYEMAN *et al.*, 1994)。

より複雑な形状をした枝の場合も、実験を併用して理論を修正・補足すれば、近似的な関係式を導くことは可能である。これらの式に基づいて、必要な枝のたわみ抵抗力やたわみ仕事を計算することができる。

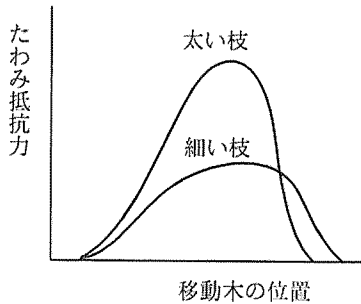


図-6. 枝の太さによるたわみ抵抗力曲線の変化 (太さ以外の条件が同じ場合)

3-3. 固定木と移動木の位置関係

2本の固定木の間隔は、きわめて大きな影響力をもつ因子である。間隔が広いと移動木、固定木相互の樹冠は、その外縁が僅かに接触するにとどまる。樹冠の中の個々の枝についてみても、枝の先の細いしなやかな部分が接触するだけであるから、たわみ抵抗力や仕事も当然小さい値をとる。逆に間隔が狭くなると、枝の太くて剛性の大きな部分が接触することになり、抵抗力、仕事ともに急激に増大する。固定木の間隔に応じて、固定木と移動木それぞれの枝のどの部分が接触することになるかを確かめ、抵抗力や仕事を計算しなければならない。

なお簡単のために、ここでは移動木が直立したまま水平に固定木の間を通過するものとして、議論を進めている。樹冠の抵抗力が特に問題となるような立木密度の高い森林においては、伐倒木があまり傾かないうちに固定木樹冠との接触が始まるので、この前提でも大きな誤差は出ないものと考えられる。

さらに細かい議論をすれば、移動木と固定木の高低差、あるいは2本の固定木間の高低差等の如何によって接触の状況が多少異なり、抵抗力や仕事にも差がでるはずである。ただし樹高が十分に高ければ、木と木間の高低差の影響は相対的に小さくなると考えられる。一般には、樹冠同士が同じ高さで接触するときに、抵抗力、仕事ともに最大となる。この同高の樹冠の接触を基準として標準的の数値を出しておき、もし上下にずれた接触を考慮する必要があるときは、後述する接触効率の概念を用いて修正するのが实际的であろう。

3-4. 枝の伸長方向

枝の伸長方向は、いわゆる斜上という高低方向と、四方へ伸びる水平方向の2つに分けて考えることができる。固定木と移動木の関係は相対的なものであるから、どちらの木の枝で

も同じわけであるが、ここでは固定木の枝の方で説明する。

3-4-1. 高低方向の伸長

枝の先端から樹幹への付着点までの距離 l で枝の長さを、また水平面からの枝の伸びる角度 α で高低方向を表す(図-7)。スギなどに著しい、枝先へゆくに従って上方へ湾曲する枝の曲がりも、類似したものとしてこの中に含めて考えることができる。同じ長さ l の枝であっても、高低角度が大きいときには水平方向への張り出しは $l \cos \alpha$ にとどまり、これに応じて移動木樹冠との接触度は浅くなる。いわば固定木の間隔が広がったと同様の効果を持つわけで、抵抗力や仕事も当然に小さくなることになる。

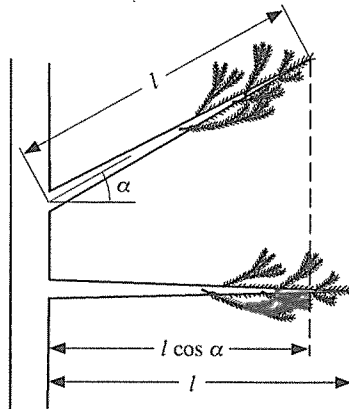


図-7. 高低方向の伸長角度と枝の横への広がり

なお斜めに伸びた枝と水平に伸びた枝では、力学的性質が多少異なることが考えられるが、筆者らの調べた範囲では、両者の間に有意な差はなかった。同様に多少の曲がりのある枝についても、ほとんど差が見られなかった (ONWONA-AGYEMAN *et al.*, 1995)。以上から判断して、形状がそれほど変わった枝でない限り、取り扱いを特に変えなくてもよいようである。

高低方向の伸長に関しては、もう一つ別の影響が存在する。すなわち図-8で見られるように、水平に伸びた枝は互いにすれ違いをしやすいが、斜めに伸びた枝はしっかりと接触する確率が高い。つまり枝の接触の効率に差があるということである。この接触効率に関しては、3-5. 以下でも触れる。

3-4-2. 水平方向の伸長

移動木の進行方向に垂直な方向を基準として、水平角度 θ を定める。移動木に向かう方向をプラス、反対に逃げる方向をマイナスとする(図-9)。角度 θ の絶対値が大になるに従って、 $l \cos \theta$ の割合で樹冠の接触する範囲が狭くなるのは高低角度のときと同様であるが、水平角度の場合は θ がプラスであるかマイナスであるかによって、接触の様相が大いに異なることに注意しなければならない。すなわち迎え角であるプラスのときは、枝はしっかりと噛み合っ外れにくく、また接触区間長も大きくなる(図-10)。その結果抵抗力と仕事は共に大きくなり、 θ が0のときの値を越える場合も多い。一方逃げ角であるマイナスのときは、枝は僅か

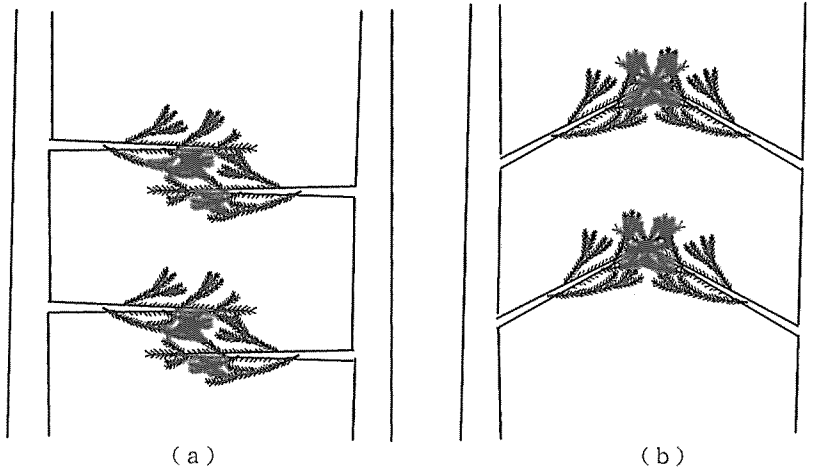


図-8. 高低の伸長方向により接触の効率が変化することの説明図

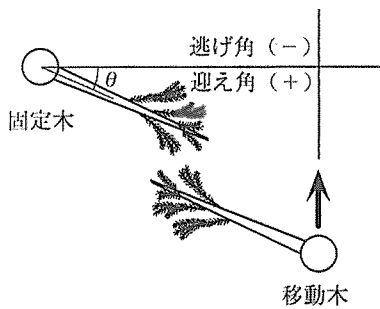


図-9. 水平方向の伸長角度

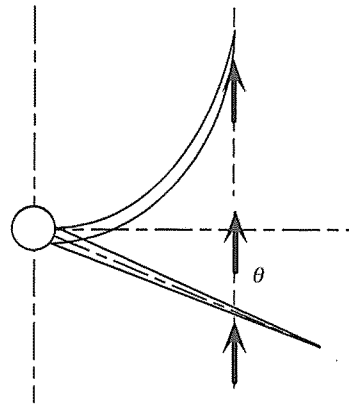


図-10. 迎え角で伸びている枝の接触・通過状況

にたわむだけで簡単にそれてしまい、抵抗力も仕事も小さい値にとどまる。

迎え角が特に大きい場合は、枝が極端に強く曲げられるところがあり、理論的な解析は難しい。ただし実際問題としては、角度が大きな枝は横への張り出しが小さくて接触に至らない場合が多く、樹冠全体に大きな影響を与えることはあまりない。さらに必要とあれば、実験により近似値を求めることもできる。

なお一例として、水平角度 θ を変えて抵抗力を測定した実験結果を図-11 に示す。樹冠の重なり率(図-2 参照)が小さいときは、枝の抵抗力は全体として小さく、かつその値も水平角 0 度付近で最大となるが、重なり率が大きくなるに従って抵抗力が増加するとともに、そのピークが迎え角側に移行することがわかる。

3-5. 枝の粗密度

枝の密度が極端に低いときを考えてみる。この場合は移動木の枝が固定木の枝の間を、全く接触することなくすり抜ける可能性もないわけではない。そのようなときは枝が樹冠の接

触範囲の中に存在していても、接触の効率が0であるから、たわみ抵抗力は発生しないことになる。

一方密度が高くなると、抵抗力の源である枝の数自体が増えるとともに、接触に関する枝の比率、すなわち接触効率の方も共に上昇する(図-12)から、樹冠全体の抵抗力は急速に増大することになる。密度の影響は、接触に関わる枝の数とともに、接触効率の観点からも評価しなければならないことがわかる。

3-6. 葉や小枝の形状と性質

主枝から分岐する小枝や、小枝に着生している葉の影響の仕方には2通りある。

一つは枝の密度と同じように、主枝が自由に通り抜ける空間を狭め、接触効率を高める効果である。葉や小枝が密に、かつ広い範囲に分布しているほど接触効率は高まり、葉や小枝を通じて主枝にかかる力もそれに応じて大きくなる。

もう一つは接触摩擦に及ぼす影響である。例えばスギはしなやかな曲線的総状をなした葉や小枝を持つのに対し、ヒノキは硬い小枝が直線的に側方へ張出している。互いの枝が接触

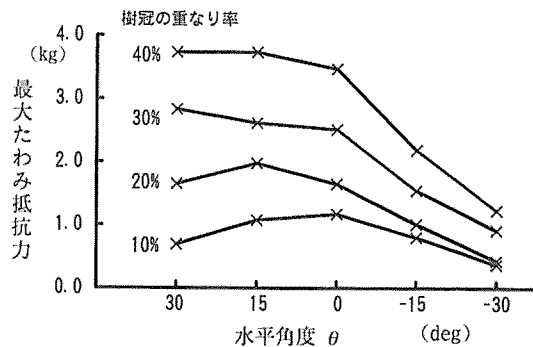


図-11. 枝の水平方向の伸長角度と最大たわみ抵抗力の関係
(元直径 2.2 cm, 長さ 138 cm のスギ枝の例)

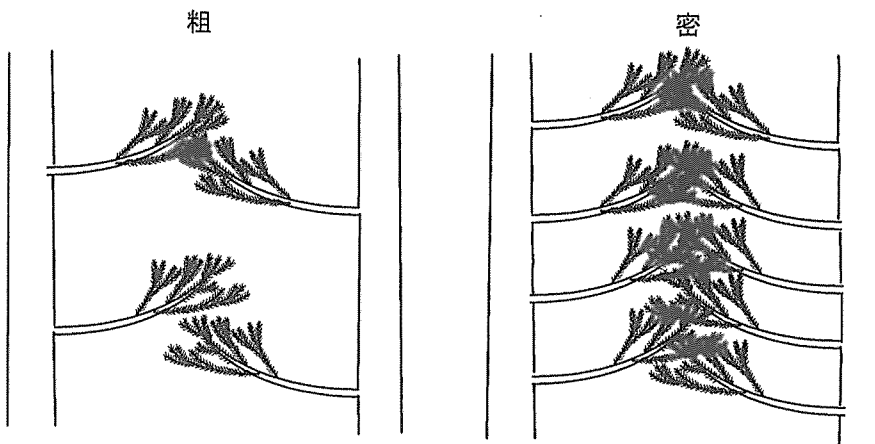


図-12. 密度が高くなると接触する枝の数が増加するとともに、接触の効率が高くなることの説明図

した場合、スギはすり抜けやすく、ヒノキはからまりやすいといえる。実際に筆者らが実施した枝同士の接触実験においても、図-13に見られるように、ヒノキの方が枝葉のからまりに伴う波形の局部的変化が大きくなっており、抵抗力を増大する効果を読み取れる。一つひとつの枝の接触についてみれば、小枝の太さや張り出し度合い等の如何によって、さまざまな接触形態があるわけであるが、樹冠全体としてみれば、この「からまり具合」は、摩擦係数として統一して表すのが適当と思われる。

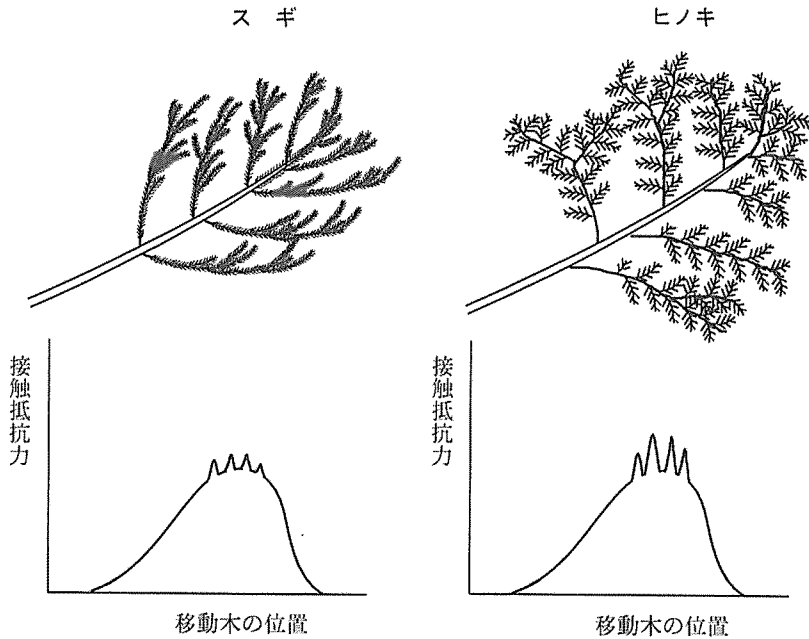


図-13. 小枝の形態の差が枝の接触抵抗力に及ぼす影響の説明図

4. 樹冠の接触・通過時の最大抵抗力と通過仕事を推定するための基本式

4-1. 基本式についての考え方

これまで述べてきたように、条件因子の値を代入すれば直ちに抵抗力や仕事が計算できるような実用的レベルの式は、現在のところは作成不可能である。ここでは、各因子をそれぞれ独立した変数として式中に導入することはせず、影響の仕方が似た因子はいくつかまとめて取り扱う、いわば包括的な表現の式として構成した。もちろん、どのような因子が接触・通過現象に本質的に重要なのか、また因子相互の関係はどのような形であるのか、などの基本的な事柄は明示できるように配慮した。

なおこれまでの議論の進め方と同じく、1本の移動木が移動木と同形同大の2本の固定木の中間を、水平に通過してゆくことを前提として式を導いている。状況が異なる場合については、係数を変えるなどして修正を施す方針をとった。

4-2. 基本式の提示

樹冠の接触・通過現象は、1本1本の枝のたわみとたわみ抵抗力の関係が基本である。従っ

て式もたわみ抵抗力を中心として、次のように構成した。なお F_m は樹冠の接触最大抵抗力、 η は接触効率、 μ は摩擦係数、そして f_{bm} は各枝のたわみ抵抗力の合計の最大値である。

$$F_m = \eta(1 + \mu)f_{bm} \quad (1)$$

摩擦抵抗力はたわみによる押し付け力に応じて変化する。一応近似的に比例関係にあるものとして、たわみ抵抗力に摩擦係数 μ を乗じて表した。

f_{bm} は接触する枝が、すべて逃げることなくしっかりと噛み合ったときの値である。実際には枝はすべてが100%しっかりと噛み合うわけではないので、接触効率 η を乗じて修正し、標準の値を算出するようにした。

同じ考え方で通過仕事 W_i を次のように表した。

$$W_i = \eta(1 + \mu)w_{bt} \quad (2)$$

式中の w_{bt} は、接触に関係するすべての枝について、噛み合いが完全なときのたわみ仕事を求め、それらをすべて合計したものである。 w_{bt} に摩擦係数を乗じて摩擦仕事を算出し、さらにたわみ、摩擦両仕事の合計に接触効率を乗じて、標準の仕事に修正するようにした。

4-3. 式を構成する要素の説明

式を構成する f_{bm} 、 w_{bt} 、 μ 、 η について、さらに補足的な説明を加える。

4-3-1. たわみ抵抗力の合計の最大値 f_{bm}

これまでと同様、移動木の進行方向左側の固定木について説明する。

図-14のように接触範囲にある枝(この場合は枝1～枝5)が、すべて完全に噛み合う接触をするものとする。図-15のように各枝のたわみ抵抗力曲線(1～5)を重ね合わせると、接触範囲内の総たわみ抵抗力曲線が得られ、その最大値が f'_{bm} である。右の固定木も左側と全く同じ状況にあるとの前提であるから、移動木通過時の最大抵抗力 f_{bm} は、 f'_{bm} を2倍することによって与えられる。

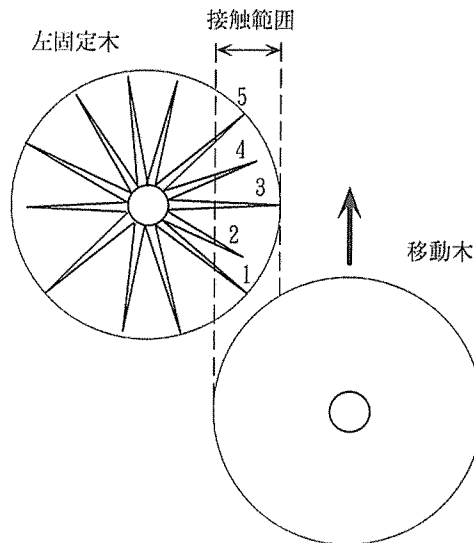
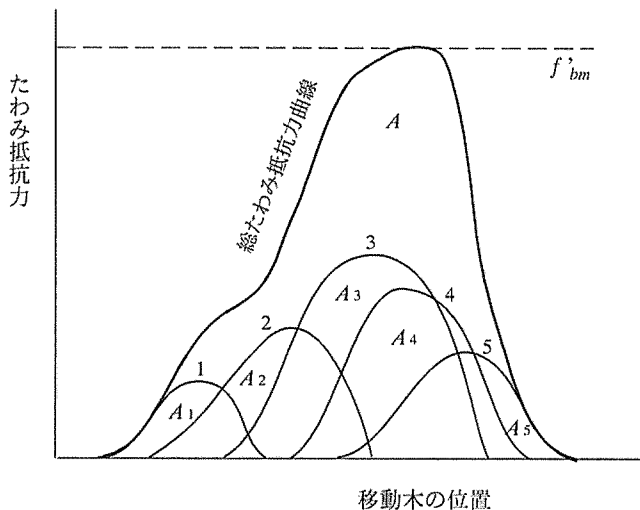


図-14. 接触に関わる枝 (1～5の枝)



$$A = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5$$

図-15. 枝のたわみ抵抗力曲線から、樹冠の最大たわみ抵抗力と通過仕事を求める手順の説明図

一般に接触範囲内に存在する枝は多数あるが、抵抗力に強い影響を与えるのは、水平角 θ があまり大きくなくて、かつ太い枝数本に限られるのが普通である。このような枝に重点を置いて、たわみ抵抗力を求めればよい。

4-3-2. たわみ仕事の合計値 w_{bt}

これも左固定木について調べてみる。それぞれの枝のたわみ仕事は、たわみ抵抗力曲線と横軸に囲まれた区域の面積（ここでは $A_1 \sim A_5$ ）である。左固定木樹冠のなす全たわみ仕事 w'_{bt} は、全部の枝の仕事の合計であるから、 $A_1 \sim A_5$ の合計値 A として求められる。移動木樹冠の左側でも同様な仕事が行なわれ、さらに移動木の右側および右固定木の樹冠でも同様の仕事が行なわれるから、 w_{bt} は w'_{bt} を4倍して求めることができる。

4-3-3. 摩擦係数 μ

葉や小枝あるいは枝の主幹自体が、互いに摺動しながら位置を変えるときに摩擦力が働く。この摩擦力を求めるための係数である。摩擦係数は主に葉や小枝の状態によって決まることは明らかであるが、理論的な解析は難しく、実験によって値を決めなければならない。立木全体を対象とした実験は難しいが、樹冠の一部を採取して、部分的に摩擦係数を測定することは可能であろう。

なお厳密に言えば、最大抵抗力を計算するときの摩擦係数と、仕事を計算するときの摩擦係数は、多少値が異なることが考えられる。なぜなら最大抵抗力の場合は樹冠通過時のある1時点における摩擦係数であり、仕事の場合は通過過程の平均的な摩擦係数であるからである。これは次の接触効率に関しても同じことが言える。ただし問題をあまり複雑にしないことと、またここでは理論的な考察が主体であることなどから、特に両者を区別しないことにした。

4-3-4. 接触効率 η

接触範囲にある枝のうち、互いに接触する枝についてのみ抵抗力や仕事が発生する。またこれらの値は、接触の深浅の程度によっても変化する。このような接触の度合を接触効率として表す。接触範囲にあるすべての枝が完全に噛み合う接触をするとき接触効率は1であり、どの枝も接触することなくすれ違って通り抜けるときは0である。完全に噛み合う枝と全く接触しない枝の数の比率、あるいは接触する枝の噛み合いの程度などによって、接触効率が決まる。

接触効率は枝の着生密度と葉や小枝の状態が大きく影響する。接触効率も摩擦係数と同様、主として実験によって値を定めねばならない。なお最大抵抗力と通過仕事の両者に適用する際の区別についても、摩擦係数と同じ取り扱いとした。

4-4. 式の適用に関する問題

資料の蓄積が十分に進んだ段階に達したとき、式をどのように利用するかについて考察してみたい。やや先走りの感もあるが、今後の研究の方向や資料の収集の目標を定めるのに、参考になると思われるからである。

式の適用に際しまず注意すべき点は、個々の立木事例を対象としての適用はあまり意味がないことである。例えば、ある特定の伐倒木を特定の残存木の間倒すことを想定して抵抗力等を計算してみても、伐倒木が途中で僅かに回転するだけで条件は大きく変わってしまい、予想通りの事態には必ずしもならないからである。

この例からもわかるように、一つひとつの事例では樹冠の接触・通過現象のばらつきは大きいけれども、森林全体としてみれば、通過の難易さ（通過時の抵抗力や仕事の大きさ）は、森林の状態により大きな差があることは歴然としている。かかり木を例にとれば、条件の悪い森林ではかかり木処理のための時間が伐採作業時間の50%以上を占めることさえある（酒井ら、1988）一方で、かかり木がほとんど発生しない森林も多い。すなわち伐採能率には森林の状態により2倍もの開きが出ることになる。

ある程度の広がりをもつ森林を対象として問題を考えるのであれば、標準的な樹冠条件をもつ立木と立木の配置のモデルを定め、そのモデルの条件下で標準的な抵抗力や仕事の値を推定すれば、ある程度役に立つ数値が得られると考える。標準値のほかにレンジを表示すれば一層適切であろう。

最後に推定の精度の問題について考察する。樹冠の接触・通過現象の複雑さから、抵抗力や仕事は概数のレベルの精度でしか求め得ないと予想される。しかし森林の状態が異なれば、推定の精度レベルをはるかに超える大きな数値の差を生むと考えられるから、概数としてでも把握できれば十分に有力な情報となり得るのである。

5. 結 論

樹冠の接触・通過現象を、主な影響因子との関連から力学的に検討し、接触・通過現象の基本が、樹冠を構成する枝のたわみとたわみに伴う抵抗力の関係にあることを示した。また接触・通過時の最大抵抗力と通過仕事を、この関係を核とする基本式で表した。この式により、主要因子の影響の仕方と因子相互の関係が整理されたと考える。

式を作成する過程で、研究や資料の整備が不十分な箇所が明らかになった。摩擦係数や接触効率に関する分野は、ほとんど未開拓といえる。

欧米諸国に比べ、わが国には密植した人工造林地が多い。そのうえ択伐や間伐などの、非皆伐施業の比重がますます高くなることが予想される。伐採の際に生じる樹冠の接触・通過の問題は、今後一層重要な課題となるであろう。問題整理によって判明した検討不十分な分野に、特に重点を置いて研究を進めるべきである。なお雪や風などの外部荷重に対して、隣接する樹冠が互いに支持しあって抵抗する効果、あるいは逆に共倒れを起こす危険性などを評価・判定するためにも、樹冠の接触・通過の機構を解明することには、大きな意義があると思われる。

おわりに、研究を実施するに当たり多大のご便宜とご協力を賜った、名古屋大学農学部附属稲武演習林の教職員の皆様に、心より感謝の意を表する。なお本研究の一部は、平成8年度文部省科学研究費補助金(08660183)の援助を得て実施した。

引用文献

- 石川知明(1990) 間伐材の伐木造材作業における伐倒前枝払いと伐倒後枝払いとの作業比較。101 回日林論：679-680。
- 森岡 昇・近藤 稔・オンウォナ アジマン シアウ・今井規子(1994) かかり木における樹冠の接触抵抗力。105 回日林論：631-632。
- 森岡 昇・オンウォナ アジマン シアウ・近藤 稔(1995) 林木生枝の冬季硬化と雪折れの可能性—スギ造林木の場合。43 回日林中支論：141-144。
- ONWONA-AGYEMAN, S., MORIOKA, N., KITAGAWA, K. and KONDO, M. (1992) Estimating the bending strength of branches in a plantation forest. Proc. Soc. American Foresters 1992 National Convention : 517-518.
- ONWONA-AGYEMAN, S., MORIOKA, N., KITAGAWA, K. and KONDO, M. (1994) A quicker and non-destructive field method for estimating the strength of living branches in a plantation forest. J. Jpn. For. Soc. 76 : 321-328.
- ONWONA-AGYEMAN, S., MORIOKA, N., KONDO, M. and KITAGAWA, K. (1995) Seasonal changes in the Modulus of Elasticity of living branches of three coniferous species. Ecol. Res. 10 : 199-206.
- 酒井秀夫・伊藤幸也・石原 猛(1988) チェーンソーによる間伐木の伐木造材作業。日林誌 70 : 1-10。

The maximum resisting force and work done by a cut tree crown passing through the crown of standing trees

Noboru MORIOKA, Minoru KONDO and Kenji KOGISO

The frequency of occurrence of tree hang-ups depends on physical characteristics such as the size, length, quality, and inclination of branches as well as the nature of branchlets and leaves. By analyzing the influence of these factors on the crown contact-phenomenon, we introduced the formulas to estimate the maximum resisting force and work done when a cut tree crown passes through the crown of standing trees.

Since the resisting force is essentially and mainly based on the bending force of each branch, the maximum resisting force F_m is derived from the branch bending force as

$$F_m = \eta(1 + \mu)f_{bm}$$

where f_{bm} is the maximum force which will be caused by bent branches during the crown contact, and η and μ are the branch contact efficiency and frictional coefficient between two crowns, respectively. In the same manner, the work done W_t can be expressed as

$$W_t = \eta(1 + \mu)w_{bt}$$

where w_{bt} is the total bending work of all branches involved in the contact.

Keywords : tree crown, thinning operation, tree hang-up, branch deflection, frictional resistance