ヒノキ間伐林分において発生したかかり木が残存立木間を通過する際の接触抵抗力

松 本 武^{*1,2}

ヒノキ間伐林分において、残存 2 立木間でかかり木になった場合の接触抵抗力を測定した。接触抵抗力の平均値は 1.0 kN であり、過密化した林分においては立木と立木との間で発生したかかり木の処理には大きな力が必要となることが明らかとなった。かかり木のサイズは接触抵抗力に影響せず、かかり木の角度は強く影響した。かかり木が通過する残存 2 立木の間隔は接触抵抗力に大きく影響し、残存 2 立木の間隔が狭くなるにつれ接触抵抗力はべき乗的に増加した。

キーワード：間伐，かかり木，接触抵抗力，立木間隔

Takeshi Matsumoto^{*1,2} (2010) The Resistance Force of Hung-up Trees Being Passed through the Crowns of Remaining Trees during Thinning of a *Chamaecyparis obtusa* Stand. J. Jpn. For. Soc. 92: 134–138. The resistance force was measured as hung-up trees were passed through the crowns of remaining trees in a *Chamaecyparis obtusa* stand. The average resistance force was 1.0 kN. A large force was needed to remove manually a tree hung up between two standing trees in an overcrowded thinning stand. The size of a hung-up tree did not have an effect on the resistance force, while leaning angle at which the tree was hung-up influenced the resistance force strongly. The distance between the remaining trees affected the resistance force, which increased exponentially as the distance between the remaining trees decreased.

Key words: hung-up tree, resistance force, stand distance, thinning

I. は じ め に

現在、我が国の林業労働死亡災害の 2/3 近くを占める伐木造材作業の中でも、かかり木に関連する災害事例が多い。一度かかり木の状態になると、その処理には非常な労力を必要とすることが多く（酒井ら，1988；石川，1990），その処理の際に不適切な処理をした結果災害につながった事例も少なくない。林業・木材製造業労働災害防止協会（2009）によれば、平成 12 年から平成 20 年までの 9 年間の林業労働死亡災害件数は 427 件であり、その内かかり木に関連する死亡災害事例は 82 件と全体の 19.2% を占めており、枝がらみに関連する災害事例 4 件を加えると 20.1% と全死亡災害の 2 割がかかり木に関連したものとなっている。この内訳をみるとかかり木の放置に起因する事例が 26 件、かかられている木の伐倒をはじめとする危険作業による事例が 39 件となっている。このように、かかり木の放置や、危険とされる作業を行う背景には前述したようにかかり木処理には多大な労力を要することが考えられる。また、過密化が進行した林分においては、伐倒木が隣接木（単木）の樹幹や樹冠にもたれかかるタイプのかかり木だけでなく、複数の隣接木の樹冠（枝）と伐倒木の樹冠（枝）とが絡み合うことにより倒伏しないかかり木も発生し、極端な場合には、チェーンソーによる一連の伐倒のための作業が完了しても隣接木の樹冠と伐倒木の樹冠が重なり合っているため伐倒木が傾かないケースも珍しくない。このように過密化した林分では立木の時点ですでにかかり木となっ

おり、伐採作業の安全化・効率化・省力化を図るためには、こうしたかかり木のメカニズムの解明や力学的特性を把握することが重要である。

これまで、かかり木の作業工程およびかかり木が生じる立木の干渉範囲（酒井ら，1988），伐倒前の先行枝払いがかかり木発生および作業効率に及ぼす影響（石川，1990），スギのモデル樹冠を用いて、伐採木が残存木の間を通り抜ける際の樹冠の接触抵抗力の測定例（森岡ら，1994），スギ若齢間伐林におけるかかり木処理に必要な力の測定例（立川・佐々木，2000），かかり木を牽引具によって処理する際の所要力の測定例（林業・木材製造業労働災害防止協会，2000）等の知見が得られている。しかしながら、前述したようにかかり木に起因する死亡災害の発生事例は多く、安全作業のためのかかり木処理の重要性についての普及啓発は行われている反面、学術的な立場からのアプローチはやはり少ないといわざるをえない。

本研究ではヒノキを対象に、過密化が進行しつつある林分における間伐作業時に発生するかかり木処理を念頭に置き、実際の林分において隣接する残存 2 立木の樹冠と伐倒木の樹冠の接触・重なり合いによって発生したかかり木を伐倒方向に引き倒し、その際に生じる接触抵抗力を測定し、かかり木の力学的特性について考察した。

II. 材 料 と 方 法

実験は岐阜県立森林文化アカデミー演習林内の 44 年生のヒノキ林分（2003 年 12 月）および 40 年生のヒノキ林

* 連絡先著者（Corresponding author）E-mail: tmatsu@cc.tuat.ac.jp

¹ 岐阜県立森林文化アカデミー 〒501-3714 美濃市曾代 88（Gifu Academy of Forest Science and Culture, 88 Sodai, Mino 501-3714, Japan）

² 現勤務先：東京農工大学大学院農学研究院 〒183-8509 府中市幸町 3-5-8（Institute of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology, 3-5-8, Saiwai-cho, Fuchu 183-8509, Japan）

（2009 年 11 月 12 日受付；2010 年 1 月 9 日受理）

図-1. 実験方法の概要

分（2004年12月）で行った。いずれの林分も林地傾斜は40度であった。実験では伐倒木が残存2立木の樹冠と樹冠との間を通過する際の牽引力 T を測定した。実験には2本の立木間に伐倒した際に必ずかかり木が発生すると予想される伐倒木および隣接2立木を対象として選定した。選定した伐倒木とそれが通過する残存2立木については胸高直径、樹高、樹冠直径、枝下高、および立木間の距離を測定した。伐倒方向は残存2立木の間々に定め、チェーンソーによる受口・追口作成後、倒伏を開始し、残存2立木間で停止した時点を伐倒木がかかり木となった状態とした。そのときのかかり木の角度として、伐倒前の状態からの、すなわち鉛直方向に対する傾き θ を、また接触位置高さとしてかかり木の元口から接触位置までの樹幹沿いの距離 H を測定した。次に図-1に示すように、あらかじめ伐倒方向上の立木に固定したワイヤロープをかり木の地上1.2mの地点に取り付けた滑車に通し、さらに伐倒方向上の立木の地上1.2mの位置に設置した滑車を介して安全地点に設置したウインチ（手動ウインチまたはエンジンウインチ）を用いてかかり木が残存木間を通過し終わるまで牽引し、ロードセルにより牽引張力を測定し、かかり木が外れる瞬間（直前）の指示器に示される値を最大抵抗力として読み取った。ほとんどの場合かかり木が外れる直前に最大値を示したが、最大値を示して以降、値が減少した時点でかかり木が外れた場合もあり、その場合は最大値を最大抵抗力とした。また、今回は滑車の回転抵抗については無視できるものとした。ワイヤロープの設置高については手押し等の人力での処理を想定して胸高位置の1.2mとした。今回の実験ではすべてのかかり木が外れるまでの間は伐根上で元口を支点とした回転運動を行った。その後、かかり木が外れてから地面に倒伏するまでの間に伐根から切り離された場合もかなりあったが、それぞれの伐倒木との対応が可能な形でのデータ採取は行わなかった。28本の伐倒木を選定し実験を行い28本すべてがかかり木となった。

III. 結果と考察

表-1に測定結果を示す。なお、表中の重量、および重心位置については3本の試料木の計測結果から推定した。ワイヤロープの牽引力は最大6.9kN、最少0.6kN、平均3.8kNであった。この結果はスギ小径木（平均胸高直径11cm、平均樹高8.7m）でのかかり木の伐倒方向への引き倒し実験（立川・佐々木、2000）の平均値1kN、本実験と同様のサイズのスギ林分（平均胸高直径23cm、平均樹高15m）での梢端方向（0~44度）への牽引による計測結果（林業・木材製造業労働災害防止協会、2000）の平均値2.3kN（筆者によるグラフからの概算読取值）よりも大きな値を示した。これらの既往の成果はいずれも樹種はスギであり、単木にかかった伐倒木を処理しているのに対し、本研究はヒノキが対象であることと、残存2立木間の樹冠へのかかり木のため胸高位置での牽引による処理にはより大きな力を必要とした結果であると考えられる。伐倒時に隣接木と枝がからみ、伐倒木が倒れない場合、手押し等の人力のみでの処理には非常な困難を伴うことが示された。

図-2に伐倒木の重量と牽引力との関係を示す。図からも明らかなように重量と牽引力との間に明確な相関関係は認められず（ $r=0.096$, $p>0.1$ ）、かかり木の重量による牽引力の違いは確認できなかった。これまでに隣接木（単

表-1. 計測結果

伐倒木	DBH (cm)	樹高 (m)	枝下高 (m)	重心位置 (m)	重量 (kN)	接触位 置高さ (m)	かかり木 の角度 (度)	牽引力 (kN)
1	12.4	14.5	9.5	6.0	1.0	10.0	10	1.9
2	12.4	14.5	9.5	6.0	1.0	6.6	24	4.4
3	17.0	14.5	9.2	6.0	1.8	9.5	3	2.5
4	17.0	14.5	9.2	6.0	1.8	8.4	25	4.2
5	14.5	10.6	7.4	4.3	0.9	10.0	20	6.9
6	14.0	14.5	9.2	5.9	1.2	12.2	21	6.7
7	14.0	13.7	9.0	5.6	1.2	11.3	11	2.4
8	14.0	13.7	9.0	5.6	1.2	9.1	40	2.3
9	12.0	14.8	9.5	6.1	1.1	8.3	18	0.7
10	12.0	14.8	9.5	6.1	1.1	6.6	44	5.7
11	17.8	13.8	9.0	5.6	1.9	8.4	25	4.4
12	17.8	13.8	9.0	5.6	1.9	7.9	42	6.5
13	16.0	16.4	11.0	6.7	1.8	8.0	11	2.9
14	16.0	16.4	11.0	6.7	1.8	7.5	42	4.6
15	13.0	14.5	9.5	6.0	1.1	8.1	12	3.8
16	13.0	14.5	9.5	6.0	1.1	7.5	42	5.7
17	13.0	13.5	8.9	5.5	1.0	7.8	10	0.6
18	13.0	13.5	8.9	5.5	1.2	8.1	32	4.5
19	17.0	15.0	9.8	6.2	1.9	8.4	18	2.1
20	17.0	15.0	9.8	6.2	1.9	8.0	34	3.2
21	17.0	15.0	9.8	6.2	1.9	6.5	53	2.8
22	17.0	15.0	9.8	6.2	1.9	8.3	27	2.9
23	17.0	15.0	9.8	6.2	1.9	7.0	48	2.4
24	19.0	17.7	10.2	7.3	2.0	5.6	13	6.0
25	24.0	20.1	11.1	8.2	3.7	14.2	8	5.9
26	19.0	18.2	10.9	7.5	2.1	7.8	13	4.9
27	24.0	17.8	7.0	7.3	3.9	27.4	5	3.1
28	24.0	17.8	10.0	7.3	3.2	12.0	9	3.9
平均	16.2	15.1	9.5	6.2	1.7	9.3	23.6	3.8

図-2. かかり木の重量と牽引力 T との関係

図-3. かかり木に作用する力

H_T , かかり木の樹高 (m); H , 元口から接触位置までの距離 (m); h , 元口から重心位置までの距離 (m); θ , かかり木の角度 (度); W , かかり木の自重 (kN); T , かかり木を倒す牽引力 (kN); T_r , 牽引力 T の樹幹に直角方向の成分 (kN); F_A , 接触位置で生じる接触抵抗力 (kN); α , 林地傾斜 (度)。

木) へのかかり木を処理する際に、伐倒予定方向に引き倒す際に必要な力とかかり木の重量との間には明確な関係は認められず、同じ重量でも接触状態や枝・樹冠のたわみによって生じる抵抗力に大きなばらつきがあることが指摘されている (立川・佐々木, 2000)。今回の実験では隣接2立木の樹冠へのかかり木を伐倒予定方向に引き倒しており、先の知見と同じくかかり木の重量よりも枝・樹冠の接触状態やたわみの影響が大きいのと考えられる。以下ではこの接触位置における樹冠による接触抵抗力と接触状態について検討した。

図-3にかかり木に作用する力を示す。かかり木を倒伏させようとするモーメントはウィンチの牽引によるモーメント M_T 、およびかかり木の自重による転倒モーメント M_W でありそれぞれ次式で示される。

$$M_T = 1.2T \cos(\theta - \alpha) \quad (1)$$

$$M_W = hW \sin \theta \quad (2)$$

一方、接触位置で生じる倒伏に抵抗するモーメント M_R は (3) 式によって示される。

$$M_R = HF_A \quad (3)$$

モーメントの釣り合いから、かかり木が残存2立木の樹冠を通過する際に発生する接触抵抗力 F_A は (1), (2), (3) 式から次式によって計算できる。

$$F_A = \{1.2T \cos(\theta - \alpha) + hW \sin \theta\} / H \quad (4)$$

(4) 式によって得られた接触抵抗力 F_A の平均値は 1.00 kN, 最小値は 0.20 kN, 最大値は 1.92 kN であった。また、この接触抵抗力 F_A は牽引力 T と同様にかかり木の重量との間に相関関係は認められなかった ($r=0.189$, $p>0.1$)。 (4) 式を T について解くと (5) 式が得られる。

$$T = (HF_A - hW \sin \theta) / 1.2 \cos(\theta - \alpha) \quad (5)$$

(5) 式は F_A を一定としたとき、かかり木の傾き θ が増加すると牽引力 T は減少することを示している。図-4にかかり木の角度と牽引力 T 、かかり木の自重による転倒モーメント M_W 、および接触抵抗力 F_A との関係を示す。かかり木の角度 θ が増加しても牽引力 T は減少せず、両者の間には明確な関係は認められなかった ($r=0.182$, $p>0.1$)。一方、かかり木の角度 θ とかかり木の自重による転倒モーメント M_W との間には強い相関関係が認められ ($r=0.804$, $p<0.01$)、また接触抵抗力 F_A との間にも強い相関関係が認められた ($r=0.768$, $p<0.01$)。これは、かかり木の角度 θ が大きくなると (2) 式のかかり木の自重による転倒モーメント M_W が増加し、これが接触位置で生じる接触抵抗力 F_A に大きく影響することを示している。

図-4. かかり木の角度 θ と牽引力 T 、かかり木の自重による転倒モーメント M_W 、および接触抵抗力 F_A との関係

表-2. 森岡ら (1994) によるモデル実験の結果と実物大立木の場合の推定値

	残存 2 立木間隔 (m)	最大抵抗力 (N)
実験結果	1.55	3.0
	1.25	5.8
	0.95	22.1
	0.65	62.7
実物大の推定値	5.2	33.3
	4.2	64.7
	3.2	245.0
	2.2	696.8

図-5. かかり木が通過する残存 2 立木の間隔と牽引力 T との関係

図-6. かかり木が通過する残存 2 立木間隔と接触抵抗力 F_A との関係

スギの梢端部を用いた樹冠の接触・通過のモデル実験例 (森岡ら, 1994) では, 立木間隔が狭くなると通過立木の最大抵抗力がべき乗的に大きくなることが指摘されており, 実験結果から, 樹冠直径 3.3 m, 樹冠高 6 m の実物大立木の場合の立木間隔ごとの接触抵抗力が推定されている (表-2)。図-5 はかかり木が通過する残存 2 立木間の立木間隔と牽引力 T との関係について今回の測定結果と森岡ら (1994) の推定値を示したものである。図中の実線は今回の結果から得られた回帰曲線であり, 2 立木の間隔が小さくなるにつれ, そこを通過させるのに必要な牽引力 T が大きくなる関係にあった ($R^2=0.274$, $p<0.01$)。図-5 をみると森岡ら (1994) の推定値は今回の測定結果 (平均樹冠直径 3.7 m) と比べるとやや過小に思われる。測定対象がスギとヒノキという樹種の違い, 樹冠部のモデルと実物大との違い, 等さまざまな原因が考えられ, モデルを実際の立木に敷衍するには無理があるとの判断もある (森岡ら, 1996) が, 今回の計測では比較的広い立木間隔でのデータがないこともあり, 表-2 の推定値と今回の結果を合わせて得られた立木間隔と牽引力 T との回帰曲線が図-5 の点線である ($R^2=0.407$, $p<0.01$)。

図-6 はかかり木が通過する残存 2 立木間の間隔と樹冠で生じる接触抵抗力 F_A との関係を示したものである。図-5 と同様に残存 2 立木間隔と接触抵抗力 F_A との間には有意な相関関係が認められ, 得られた回帰式の決定係数 R^2 は今回の測定結果のみでは 0.293 ($p<0.01$) であり, 森岡ら (1994) の推定値を含めた場合は 0.492 ($p<0.01$) であった。

図-5, 6 の回帰式を用いて, 2 本の立木の間に伐倒した際の立木間隔および林分密度ごとの胸高位置 (元口から 1.2 m) における牽引力 T および接触抵抗力 F_A を推定したものが表-3 である。データの蓄積が少ない現状ではあり, 実際のかかり木処理にはさまざまな方法が想定されるが, 手押しや, 人力でのロープを用いた牽引, ウィンチなどを用いて伐倒方向へ倒そうとする場合の林分状態によるかかり木処理の難易やかかり木器具等に求められる牽引能力等については一定の指針を提示し得たのではないかと考えられる。

次に, 立木間隔以上に影響が大きいと考えられるかか

表-3. 林分状態による牽引力 T および接触抵抗力 F_A の推定

立木間隔 (m)	林分密度 (本/ha)	推定牽引力 (kN)	推定接触抵抗力 (kN)
2	2500	4.42	1.09
2.5	1600	2.42	0.67
3	1111	1.48	0.45
3.5	816	0.97	0.32
4	625	0.68	0.24
4.5	494	0.49	0.19
5	400	0.37	0.15

図-7. かかり木と立木位置の平面図

a, 立木 A のかかり木側枝張り長 (m); b, 立木 B のかかり木側枝張り長 (m); c, かかり木の樹冠直径 (m); d, 立木 AB 間の距離 (m)。

り木と残存 2 立木のそれぞれの樹冠との重なり具合について検討した。モデル実験 (森岡ら, 1994) にならい, 図-7 に示すかかり木と立木との位置関係から樹冠の重なり率 R_C を算出した。

$$R_C = \{d - (a + b)\} / c \quad (6)$$

この R_C と牽引力 T および接触抵抗力 F_A との関係を示したものが図-8 である。なお, 図-7 中の a , b , c はそれぞれの方向の最大幅を用いた。今回実験した 28 本の内, 樹冠直径が残存立木間隔より小さかった伐倒木はわずか 5 本であり, 残存 2 立木同士の樹冠が重なり合っていたものは 20 組と, 過密化が進みうつ閉状態の林分といえる。今回の計測では樹幹の重なり率 R_C と牽引力 T および接触抵抗力 F_A との間には有意な相関性はみられなかった (T :

図-8. 樹冠の重なり率 R_C と牽引力 T および接触抵抗力 F_A との関係

$R^2=0.038$, $p>0.1$; $F_A: R^2=0.099$, $p>0.1$). 森岡ら (1994) の推定値では樹幹の重なり率と牽引力との間にはべき乗関係がみられ、樹冠の重なり率は0.42~1.34であった。今回の計測では樹幹の重なり率が1.04~1.88であり、森岡ら (1994) の重なり率の最大値付近から連続していた。そこで、さまざまな条件の違いはあるが、本研究では計測できなかった樹幹の重なり率が小さい場合も含めて全体的な傾向を把握するために、森岡らの推定値と今回の結果を含めて得られた回帰曲線が図-8中の点線である ($T: R^2=0.627$, $p<0.01$; $F_A: R^2=0.584$, $p<0.01$)。残存2立木の間隔と牽引力および接触抵抗力との間には今回の実験データだけでも有意な関係が認められたが、樹冠の重なり率と牽引力および接触抵抗力との間については今回の実験結果だけでは有意な関係は認められず、森岡ら (1994) の成果を追加することによってべき乗関係が示された。図-8は直感的には理解しやすいが、より正確な検討にはヒノキ林分において樹冠の重なり率が小さい状態での実験が不可欠である。また、図-9に示すように、かかり木の角度 θ とかかり木の接触位置、すなわち残存立木のかかられている高さによって、図-7に示した立木の樹冠投影面と、実際に通過する樹冠断面は異なってくることで、最も重要と思われる通過する際に接触する樹冠部の体積については今回の実験では検討できなかったため今後の検討課題としたい。

図-9. 樹冠の通過様式

IV. おわりに

過密化し樹冠がうっ閉しつつある林分においては、伐倒開始以前から隣接木との枝がらみが発生し、その間を縫って伐倒木を通過する際の抵抗力は、きわめて大きなものとなることが明らかとなった。残存立木間隔がより小さい条件、樹冠の重なり率が今回より低い条件でのデータの蓄積が必要とされるが、林分の状態から伐倒作業の難易の定量的把握の可能性が示唆された。我が国の地形条件では今後もしばらくは人力伐倒作業が継続すると思われるが、過密化した林分において隣接する2立木間で発生したかかり木については人力での処理は容易ではない。こうした林分での間伐作業では持ち運びに負担にならない程度の軽量の牽引器具 (牽引能力5kN程度) の携行や列状間伐の採用によるかかり木処理の労力の低減、もしくはかかり木自体の発生の抑制が重要となる。また、地形・土質条件が許すならば、現在推進されている高密路網整備と機械の組み合わせによる作業方式は、作業効率面のみならず、かかり木処理への機械の利用が容易になるため労働負担および労働災害の低減には有効であろう。

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) かり木における樹冠の接触抵抗力. 日林論 105: 631-632.
- 森岡 昇・近藤 稔・小木曾謙治 (1996) 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. 名大演報 15: 69-83.
- 林業・木材製造業労働災害防止協会 (2000) 林業作業及び木材加工用機械の安全対策についての調査研究. 123 pp, 林業労働災害防止協会.
- 林業・木材製造業労働災害防止協会 (2009) 災害発生状況. 林業・木材製造業労働災害防止協会 HP (<http://www.rinsaibou.or.jp/index.html>). 2009年10月20日参照.
- 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.
- 立川史郎・佐々木康 (2000) スギ若齢間伐におけるかり木処理方法に関する検討. 森科学誌 15: 25-32.