

論文

スギ枝葉の抗力係数に及ぼす着雪の影響に関する風洞実験

勝島隆史^{1*}, 安達 聖², 南光一樹³, 竹内由香里¹

要 旨

強風を伴った湿雪の樹木への着雪により、樹木に作用する荷重が増加することで、幹折れや根返りなどの樹木の破壊が生じる。このような樹木の破壊を予測するためには、着雪と風により樹木に生じる荷重を考慮した構造解析が用いられる。しかし、樹木に生じる風荷重の測定例は少なく、風荷重の推定に必要な樹木の抗力係数への着雪の影響は不明である。本研究では、国内の主要な林業種であるスギにおける、抗力係数に及ぼす着雪の影響を明らかにするために、風洞実験を実施した。風洞装置内に実物のスギの枝葉を材料に用いたスギの枝葉のモデルを設置し、送風しながら湿雪を供給することにより人為的に着雪を生じさせた。そして、風速や着雪量などの実験条件に対する、スギ枝葉の抗力係数の変化を測定した。その結果、枝葉への着雪は、(1)着雪の発達により風向に対する垂直面への投影面積である垂直投影面積を増加させる効果、(2)流体抵抗を減じる効果、(3)風の作用により枝葉が湾曲することで生じる垂直投影面積の減少を阻害する効果をもたらすことが示唆された。これらの効果により、着雪前の無風時の受風面積を用いて求めたスギ枝葉の抗力係数は、着雪量により変化した。

キーワード：抗力係数、着雪、風洞実験、冠雪害、スギ

Key words : Drag coefficient, Snow accretion, Wind tunnel testing, Snow damage on trees, Japanese cedar

1. はじめに

樹木への着雪によって、幹折れや根返りなどの樹木の破壊が生じる（四手井，1954）。着雪による樹木の破壊によって生じる林業被害を、冠雪害と呼んでいる。冠雪害は台風による風害と並んで国内の林業における主要な気象災害の一つである。そのため、冠雪害の発生する可能性のある地域においては、冠雪害のリスクを考慮した森林施業や林業経営が必要である。

リスク評価にあたっては、過去の被害統計から

冠雪害の被害率が算定されている（久保山ら，2003）。また、リスクと間接的に関係する指標であるが、冠雪害の地域的な危険度を評価する手法として、冠雪害が起きやすい気象条件が出現する頻度を過去の気象データから算出する手法（佐伯・杉山，1965）や、過去の気象データから着雪量を推定し、被害の発生頻度を推定する手法（Gregow *et al.*, 2008）が提案されている。

これらよりも直接的な手法として、樹木の力学状態をモデル化して冠雪害の危険性を評価する手法が考えられる。冠雪害の発生は、着雪量のみならず、幹の細り（根元から梢までの太さの変化）などの樹木の力学的な耐性も関係する（澤田，1983；中谷ら，1984）。そのため、樹木の破壊を予測するには、構造解析を用いて樹木の力学状態を詳細に把握する必要がある。着雪や風の作用によって幹に生じる曲げ応力や根に生じる回転モーメントを計算することで、幹折れや根返りなどの

1 森林総合研究所森林防災研究領域十日町試験地

〒948-0013 新潟県十日町市川原町 614-9

2 防災科学技術研究所雪氷防災研究センター 新庄雪氷環境実験所

〒996-0091 山形県新庄市十日町 1400

3 森林総合研究所森林防災研究領域

〒305-8687 茨城県つくば市松の里 1

* 問合せ先：katusima@affrc.go.jp

樹木の破壊を推定する樹木力学モデルが提案されている (Peltola *et al.*, 1999). このような樹木力学モデルに基づいた冠雪害の危険性の評価は、地域が持つ潜在的な冠雪害のリスクの評価や、冠雪害の発生予測に対して、有効な手段になり得るものと期待される。

冠雪害が起きやすい気象条件として、高橋 (1952) は、風速が 3 ms^{-1} 以下で、気温が -3°C から 0°C の範囲での降雪と示した。このような弱風時の着雪の種類は、着雪の形状の特徴から冠雪と呼ばれている。また、強風を伴った湿雪の着雪によっても、冠雪害が起ることが知られている (新田ら, 1986; 後藤・新田, 1990)。後者については、着雪による荷重と風荷重が樹木に作用することが、樹木の破壊を引き起こす要因の一つとして考えられている (高橋・塩田, 1952)。そのため、様々な気象条件で発生する冠雪害の危険性を評価するには、着雪量のみならず風により生じる風荷重についても精度良く推定する必要がある。

樹木に生じる風荷重の算定にあたっては、ニュートンの抵抗法則に基づいて風速の2乗に比例する式を用いたモデルが使用され、樹木に適した抗力係数が設定される (Mayhed, 1973; Peltola *et al.*, 1999)。抗力係数は樹種により異なり、また、風速が大きいほど抗力係数が小さいことが知られている (例えば Mayhed, 1973; Kitagawa *et al.*, 2015; Koizumi *et al.*, 2016; Bakkers *et al.*, 2022)。国内の主要な林業種であるスギの抗力係数の測定事例としては、幹の振動の測定結果から導出した事例 (Shi-igai and Maruyama, 1988) や、伐倒したスギの梢端部をトラックの荷台に載せ、トラックを走行させることで直接的に測定した事例が挙げられる (Kitagawa *et al.*, 2015)。しかし、着雪した状態に対する抗力係数は、他の樹種を含めてもこれまで測定されておらず、既往の樹木力学モデルでは着雪のない状態の抗力係数が用いられている (Peltola *et al.*, 1999)。風によって樹幹に生じる変位量は、着雪により大きくなる可能性があることが指摘されており (新田ら, 1986)、着雪には抗力係数を増加させる効果があると推測されるものの、その効果の詳細については明らかになっていない。そのため、抗力係数に及ぼす着雪の影響を明らかにし、着雪量と風速に対する抗力係数

の関係を経験式として表すことができれば、樹木力学モデルに基づいた冠雪害の危険性の評価を、よりの確に実施できると考えられる。

本研究では、着雪がスギの抗力係数に及ぼす影響を示すことを目的とする。抗力係数の測定にあたっては、自然に成育する実際の樹木を対象とすることが理想的である。しかし、着雪による抗力係数を明らかにするには、着雪量と風荷重を同時に測定する必要がある。これを野外の実際の樹木で実現することは技術的に難しい。そこで、風洞装置を用いて抗力係数を測定することとし、風洞装置の断面の大きさによる制約から、実物のスギの枝葉を材料に用いたスギ枝葉のモデルを研究対象とした。風洞装置内に枝葉を設置し、送風しながら湿雪を供給することにより人為的に着雪を生じさせた。そして、風速や着雪量などの実験条件を変化させたときの、着雪した枝葉の抗力係数を測定した。

2. 手法

2.1 風洞実験

図1に、風洞装置を用いた抗力係数の実験の概要を示す。防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の低温室内に設置された風洞装置 (幅 1 m × 高さ 1 m × 長さ 14 m) を使用して実験を行った。実験中の低温室の室温は 1°C に設定した。着雪した枝葉を自立させることは困難であることから、葉が付いた状態の枝の先端部分を直径 10 mm 、長さ 510 mm の木製の支持棒に添わせて固定し、枝葉を垂直に立てた状態で風洞装置内に設置した。枝葉の長さを 300 mm 程度に切り、支持棒と枝葉の先端が概ね同じ位置となるようにして、枝葉の先端と中間、根元の合計3か所をナイロン結束バンドで支持棒に固定した。支持棒の先端に紐で作った輪をあらかじめ取り付けおき、先端にフックのアタッチメントを取り付けたフォースゲージ (アイコーエンジニアリング, RZ-5) に輪を引掛けて支持棒を吊るすことで、着雪と支持棒、枝葉を含めた質量を測定した。そして、実験前後での質量の増加量から、着雪の質量を求めた。

乾雪による冠雪では、風速 1 ms^{-1} 以上のときに冠雪が風により落下する (高橋, 1952)。その

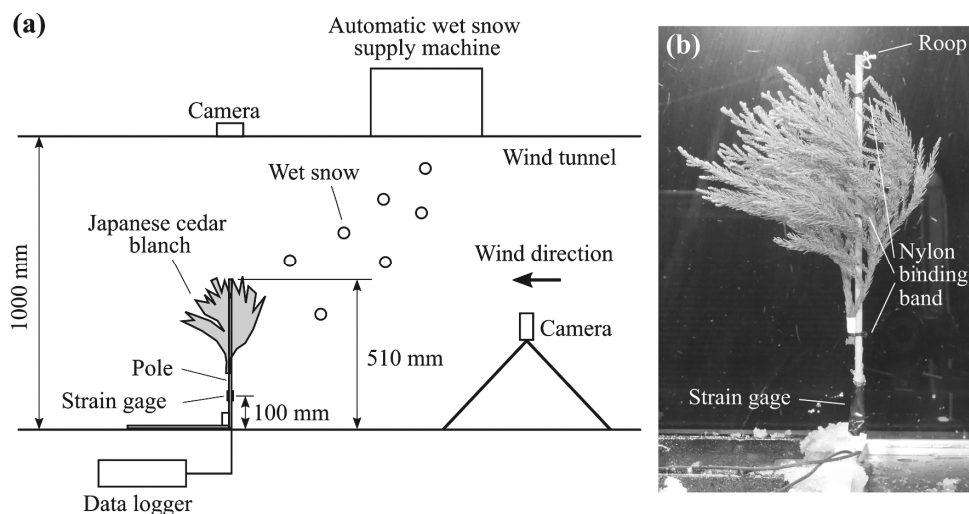


図 1 風洞装置を用いた抗力係数の実験の概念図。(a) 全体の概念図、(b) 支持棒に枝葉を取り付けた状態の写真。

ため、乾雪による冠雪は抗力係数の実験に適していない。そこで本研究では、風による落下が生じにくいとされる湿雪の着雪を対象とした。風洞装置を風速 9 ms^{-1} で稼働させた状態で、枝葉の風上側の風洞装置上部の開口部から、目の開きが 10 mm のふるいを用いた湿雪供給装置 (佐藤ら, 2017) により湿雪を自動で供給し、湿雪を枝葉に衝突させることで枝葉に人為的に着雪させた。

湿雪は、樹枝状結晶の人工雪に 0°C の水を加え、できる限り水が全体にいきわたるように雪べらを用いて攪拌し、樹枝状の形状がなくなるまで濡れ雪変態させることで作成した。湿雪の含水率をできる限り同一とするために、作成した湿雪のうち毛管上昇による浸み上りにより間隙が飽和し、一定の含水率となっていることが想定される箇所 (Coléou and Lesaffre, 1998) の雪のみを使用した。風洞に投入前の湿雪試料の含水率は、熱量式含水率計 (河島ら, 1996) により計測した。

湿雪を 3 kg ずつ順次投入し、累積投入量 W が $0, 3, 6, 9 \text{ kg}$ の計 4 段階において風荷重を測定した。投入量の段階毎に、風洞装置内の風速を段階的に上昇させ、それぞれの風速における風荷重を測定した。新田ら (1986) では、風速 3 ms^{-1} から 7 ms^{-1} のときに強風を伴った湿雪の着雪が起こりやすく、風速 10 ms^{-1} から 15 ms^{-1} の強風により樹木の被害が生じることを示している。こ

の指摘に基づき、実験で使用する風速を $3, 6, 9, 12, 15 \text{ ms}^{-1}$ の計 5 段階とした。風速は、風洞装置内の風上側の風洞断面の中心付近に設置されたピトー管により測定した。1 回の実験は、風洞に 1 本の枝葉を立てて実施し、実験ごとに枝葉を取り替えて計 5 回行なった。なお、支持棒は全ての実験で同一の物を使用した。

実験では、新潟県十日町市にある森林総合研究所十日町試験地の構内に生育するスギから採取した枝の先端部を使用した。使用した枝葉の投影面積を表 1 に示す。各投影面積は、着雪前の無風時の状態を示している。カメラを風洞内の風上側に、枝葉の上部に 1 台ずつ設置し、実験中の枝葉を撮影した。風上側から撮影した画像を用いて風向に対する垂直面への投影面積である垂直投影面積 A_V を、上部から撮影した画像を用いて水平面への投影面積である水平投影面積 A_H を測定した。垂直投影面積については全ての実験条件に対して測定し、風速や着雪量による垂直投影面積の変化を求めた。水平投影面積は、着雪前の無風時の場合のみ測定した。垂直投影面積の測定例を図 2 に示す。図 2 では、表 1 に示した No.1 の枝葉の風速 0 ms^{-1} における累積投入量 0 kg と 9 kg の場合を示している。投影面積は、カメラで撮影した画像から、画像処理ソフトウェア ImageJ (Abramoff et al., 2004) を用いて測定した。ImageJ を用いて

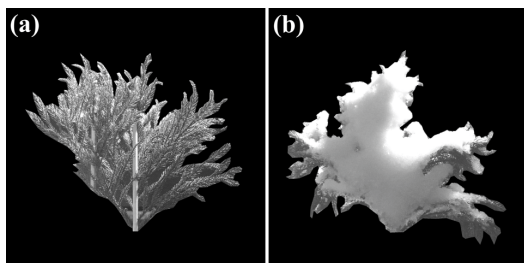


図 2 スギ枝葉の垂直投影面積の測定例。葉の周囲を目視によりデジタイジングし、切り抜き処理をした内側の面積を測定した。(a) 着雪前の状態, (b) 着雪後の状態 (着雪量 22.8mm)。

表 1 実験で使用したスギ枝葉の投影面積。 A_V は垂直投影面積, A_H は水平投影面積を示す。

No.	$A_V(\text{m}^2)$	$A_H(\text{m}^2)$
1	0.0551	0.0534
2	0.0477	0.0457
3	0.0555	0.0568
4	0.0424	0.0345
5	0.0502	0.0529

葉の周囲を目視によりデジタイジングし、切り抜き処理をした内側の面積を、枝葉の投影面積として測定した。このとき葉と葉に囲まれた隙間の面積も、枝葉の投影面積に含めた。

着雪量 I は、測定した着雪の質量を、表 1 に示した着雪前の水平投影面積 A_H で除し、枝の単位面積あたりの水当量 (mm) として表した。風荷重は、枝葉を固定した支持棒に生じる曲げひずみ量を測定することで求めた。具体的には、支持棒の風上側および風下側の両面に 1 枚ずつ、計 2 枚のひずみゲージ (共和電業, KFG-5-120-C1-5, ゲージ長 5 mm, 線膨張係数 5) を接着し、熱ひずみや引張圧縮ひずみを相殺できるブリッジ回路への接続方法である 2 アクティブゲージ法 (高橋・河井, 2014) を用いて、接着箇所の曲げひずみ量を測定した。ひずみ量は、サンプリング間隔 4 秒で 2 分間測定し (共和電業, UCAM-60B), それらの平均値を求めた。実験で使用した支持棒におけるひずみ量と曲げモーメントの関係を示す検量線をあらかじめ作成した (図 3)。この検量線を用いて、測定したひずみ量から曲げモーメントに変換した。検量線を作成する際の曲げモーメントは、

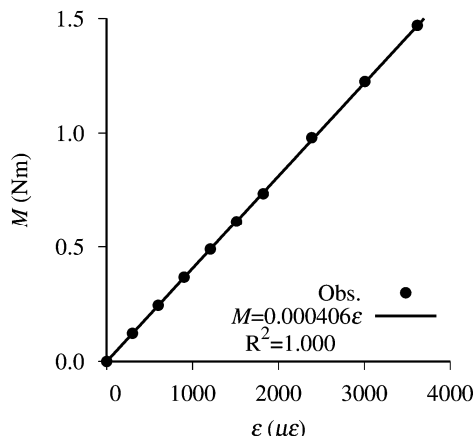


図 3 ひずみ量 ε と曲げモーメント M の関係。黒丸は測定値、直線は、ひずみ量から曲げモーメントを求めるための検量線を示す。

水平にした支持棒の根元を固定して片持ち梁の状態にして、ひずみゲージから支持棒の先端方向に 250 mm の位置に分銅を吊るすことで生じさせた。

垂直面に投影した枝葉の重心位置を風荷重の風心位置と仮定し、ひずみゲージと風心位置との距離を用いて、測定した曲げモーメントを風荷重に変換した。風荷重の作用によって生じる枝葉の重心位置の水平方向への偏心は、無視できるほど小さいと仮定して、計算では考慮しなかった。風心位置は、風洞装置内に設置したカメラで撮影した画像から、ImageJ を用いて全ての枝の全ての実験条件に対して測定した。

2.2 抗力係数の解析

樹冠に作用する風荷重 F (N) は、物体に作用する風荷重を表すニュートンの抵抗法則と同様に下記の式により表される (Mayhead, 1973)。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A U^2 \quad (1)$$

このとき、 C_D は風に対する樹冠の抗力係数、 ρ は空気密度 (kgm^{-3})、 A は受風面の垂直投影面積 (m^2)、 U は風速 (ms^{-1}) をそれぞれ示す。ただし、樹冠への風の作用により、枝葉が湾曲することで垂直投影面積は減少することが知られている (Gardiner *et al.*, 2000; Bakkers *et al.*, 2022)。そのため、式 (1) を用いて風荷重と風速から抗力係数を求めるには、風による垂直投影面積の変化を考慮する必要がある。しかしながら、実際の森林

内の樹冠の風による垂直投影面積の変化を把握することは困難であることから、既往研究においては、樹冠を三角錐と仮定して求めた垂直投影面積 (Mayhead, 1973) や、無風時の垂直投影面積 (Kitagawa *et al.*, 2015) を用いることで、便宜的に抗力係数が求められている。本研究では、抗力係数に及ぼす風速の影響を評価するために、垂直投影面積を風速によらず一定と仮定して算出した抗力係数 $C_{Dstatic}$ と、風による垂直投影面積の変化を考慮して算出した抗力係数 $C_{Ddynamic}$ の 2 種類を算出し、各累積投入量・風速ごとに両者の値を比較した。 $C_{Dstatic}$ は、式 (1) から下記の式 (2) のように表される。実験中の風洞内の風上側の風速 U と、測定した風荷重 F から、式 (2) により抗力係数 $C_{Dstatic}$ を求めた。

$$C_{Dstatic} = \frac{F}{0.5\rho A_0 U^2} \quad (2)$$

A_0 は受風面の垂直投影面積である。垂直投影面積を風速によらず一定とし、表 1 に示した着雪前の無風時に測定した各枝葉の垂直投影面積 A_V を投影面積 A_0 として使用した。このとき ρ は気温 1℃の空気密度として 1.29 kgm^{-3} を使用した。一方、 $C_{Dstatic}$ と比較するために、風による垂直投影面積の減少を考慮し、各実験条件の垂直投影面積 $A(U, I)$ を使用して求めた抗力係数 $C_{Ddynamic}$ を、下記の式 (3) を用いて求めた。

$$C_{Ddynamic} = \frac{F}{0.5\rho A(U, I) U^2} \quad (3)$$

2.3 風速に対する抗力係数の変化の解析

垂直投影面積が風速の増加に伴い減少する式 (Gardiner *et al.*, 2000) に基づいて、以下の式 (4) に示す風速と抗力係数との関係式が提案されている (Kitagawa *et al.*, 2015; Bakkers *et al.*, 2022)。

$$C_D = C_{D0} \left(\frac{U}{U_0} \right)^n \quad (4)$$

U_0 は樹木の風に対する応答として抗力係数や垂直投影面積の減少が始まる風速、 C_{D0} は風速 U_0 における抗力係数、 n は冪指数をそれぞれ示している。実験で得られた各枝の各累積投入量における抗力係数 $C_{Dstatic}$ と風速の関係に対して、Marquardt-

Levenberg 法に基づいて非線形回帰により式 (4) の係数 C_{D0} および n を求めた。このときの U_0 は、測定した垂直投影面積および抗力係数の風速に対する傾向に基づいて決定した。そして、 C_{D0} および n の着雪量 I に対する関係を求めた。

3. 結果

3.1 垂直投影面積の変化

図 4 に、風速に対する、受風面の垂直投影面積の関係を示す。図では、無風時の垂直投影面積 A_0 に対する、各実験条件における垂直投影面積 A の比 A/A_0 を、累積投入量 W ごとに示した。各累積投入量 W における着雪量 I は、3 kg のときに $7.5 \pm 1.8 \text{ mm}$ 、6 kg では $15.1 \pm 2.5 \text{ mm}$ 、9 kg では $20.5 \pm 4.6 \text{ mm}$ であり、累積投入量の増加により着雪量も増加した。風洞に投入前の湿雪試料の含水率は、枝葉毎に 3 回、合計 15 回計測し、重量含水率で $28.4 \pm 2.7\%$ であった。

図 4 より、風速 0 ms^{-1} の場合の A/A_0 の平均値は、累積投入量が 3 kg および 6 kg の場合には 1.00 であったが、累積投入量が 9 kg の場合には 1.04 と、累積投入量の増加とともに、わずかであるが増加した。 A/A_0 は、いずれの累積投入量においても、風速 0 ms^{-1} と 3 ms^{-1} とで顕著な変化は見られなかった。風速 6 ms^{-1} 以上の場合には、風速の増加に伴って A/A_0 が減少する傾向があった。風速 15 ms^{-1} における A/A_0 の風速 0 ms^{-1} に対する減少量は、累積投入量が 0 kg のときに 0.33 であり、他の累積投入量と比較して最も大きかった。また、この減少量は累積投入量 3 kg では 0.13、6 kg では 0.080、9 kg では 0.075 と、累積投入量の増加により減少量が小さくなる傾向があった。

3.2 着雪と風による枝葉の形状変化

図 5 に風上側、また図 6 に真上側から撮影した実験中の枝葉の様子を例を示す。累積投入量が 0 kg (着雪量 $I=0 \text{ mm}$) のときには、風上側から見た枝葉は、風速が大きいきほど、葉の先端部分が風下側に湾曲することで、垂直投影面積が減少する振る舞いが見られた (図 5 上段)。また、葉の先端部分が風により振動している様子が見られた。このときの枝葉を真上から見た場合、風速を増加させるにつれて風上側の葉が変形して風下

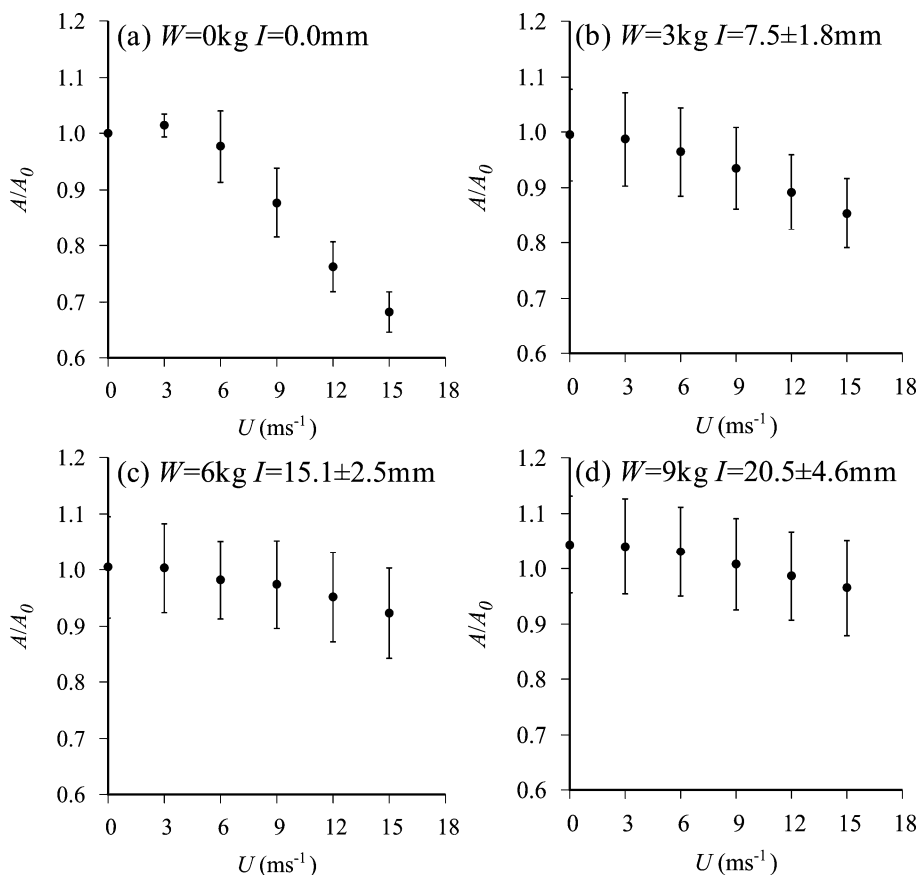


図 4 各累積投入量 W における、無風時の垂直投影面積 A_0 に対する垂直投影面積 A の比 A/A_0 の、風速 U との関係。黒丸は平均値、誤差範囲は標準偏差を示している。(a) 累積投入量 0kg, (b) 3kg, (c) 6kg, (d) 9kg における測定結果を示す。

側に湾曲し、全体として流線型の形状への変化する様子が見られた (図 6 上段)。

累積投入量が 3kg ($I=7.1\text{mm}$) の場合には、風上側から見た枝葉では、個々の葉を覆うように着雪が生じていた (図 5 中段)。累積投入量が 6kg ($I=15.5\text{mm}$) の場合には、隣り合う葉同士の隙間を埋めるように着雪が生じており、葉同士が一体となり着雪が枝葉の全体を覆う状態になることで 1 つの大きな塊の着雪体を形成していた (図 5 下段)。累積投入量が 3kg および 6kg では、風速を増加させたときの枝葉や着雪の形状の変化は、累積投入量が 0kg のときほど顕著ではなかった。このときの枝葉を真上から見た場合、無風時においても葉が風下側に湾曲した形状を維持しており、風速を大きくしても、形状に顕著な変

化は見られなかった (図 6 中段および下段)。着雪は主に葉の前面に形成しており、風下側にある葉の先端部には着雪は生じていなかった。

3.3 抗力係数の変化

図 7 に、各累積投入量における、風速に対する抗力係数の関係を示す。図では、垂直投影面積を風速によらず一定として求めた抗力係数 $C_{Dstatic}$ と、風による垂直投影面積の減少を考慮した抗力係数 $C_{Ddynamic}$ を示した。まず $C_{Dstatic}$ について、風速 3ms^{-1} のときには、累積投入量が 0kg の $C_{Dstatic}$ の平均値は 0.78 と最も大きく、累積投入量が 3kg および 6kg の場合は 0.69 と最も低く、9kg の場合は 0.72 であった。累積投入量の増加により、 $C_{Dstatic}$ が減少したのちに増加する傾向があった。また、いずれの累積投入量においても、

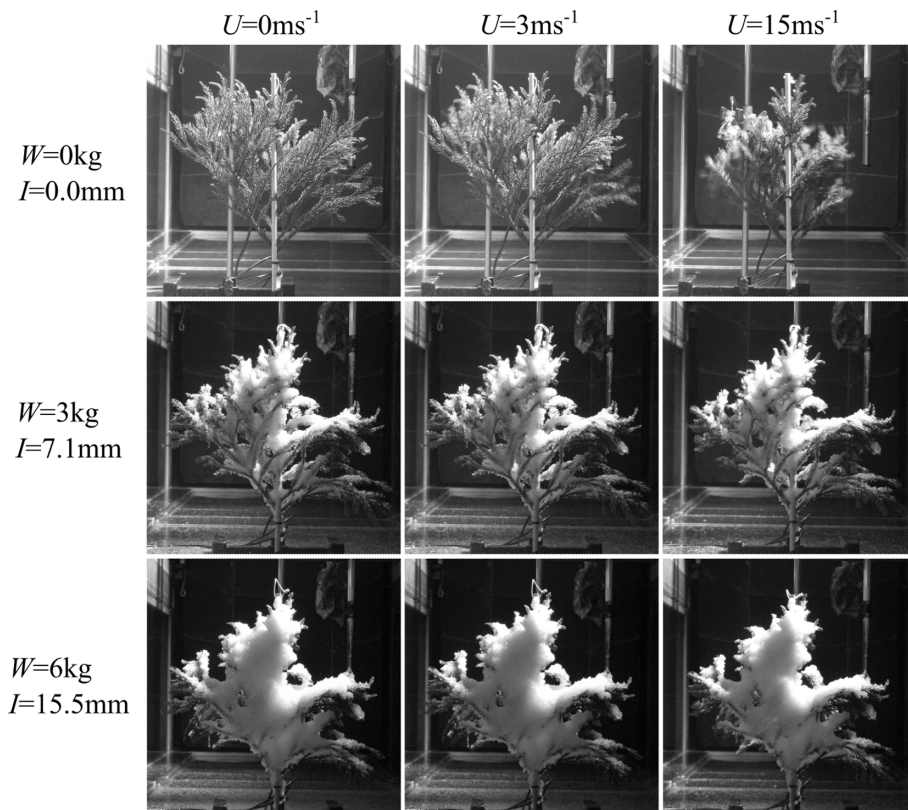


図 5 風上側から撮影した実験中の枝葉の様子例. (上段) 累積投入量 $W=0\text{kg}$, 着雪量 $I=0.0\text{mm}$, (中段) $W=3\text{kg}$, $I=7.1\text{mm}$, (下段) $W=6\text{kg}$, $I=15.5\text{mm}$, (左) 風速 $U=0\text{ms}^{-1}$, (中) $U=3\text{ms}^{-1}$, (右) $U=15\text{ms}^{-1}$, を示す.

風速の増加とともに $C_{Dstatic}$ は減少する傾向があった. 風速 15ms^{-1} における風速 3ms^{-1} に対する $C_{Dstatic}$ の減少量は, 累積投入量が 0kg のときに 0.34 であり, A/A_0 の減少量と同様に, 他の累積投入量と比較して最も大きかった. また, この減少量は累積投入量 3kg では 0.12 , 6kg では 0.098 , 9kg では 0.083 と, 累積投入量の増加により減少量が小さくなる傾向があった.

また図 7 より, $C_{Dstatic}$ と $C_{Ddynamic}$ を比較すると, 風速 9ms^{-1} 以上では, $C_{Dstatic}$ は $C_{Ddynamic}$ よりも小さく, 風速の増加に伴って, それらの差が大きくなる傾向にあった. 風速 15ms^{-1} の場合の, $C_{Dstatic}$ と $C_{Ddynamic}$ との差は, 累積投入量が 0kg では 0.2 , 累積投入量 3kg では 0.096 , 6kg では 0.048 , 9kg では 0.020 と, 累積投入量の増加により差が減少する傾向があった. 風速 6ms^{-1} 以下では, いずれの累積投入量においても, $C_{Dstatic}$,

$C_{Ddynamic}$ とともに減少しており, それらの減少量は同程度であった. 風速 3ms^{-1} の場合, 累積投入量 6kg と 9kg において, $C_{Dstatic}$ は $C_{Ddynamic}$ よりも大きかった.

3.4 計測結果に基づいた抗力係数の経験式

次に, 式 (4) に基づいた風速に対する抗力係数の変化の解析結果を示す. 式 (4) では, 解析に際して, 樹木の風に対する応答として抗力係数や垂直投影面積の減少が始まる風速である U_0 を決める必要がある. 垂直投影面積については, 図 4 より風速 3ms^{-1} 以下で風速によらず一定となっていた. 一方, 抗力係数については, 図 7 より今回の実験で用いた風速の範囲では, 風速によらず一定となる傾向はみられなかった. 風速 3ms^{-1} 以下での風速に対する抗力係数の振る舞いは不明であるが, 垂直投影面積の振る舞いと同様であると仮定し, 本研究では $U_0 = 3\text{ms}^{-1}$ を採用し, 解

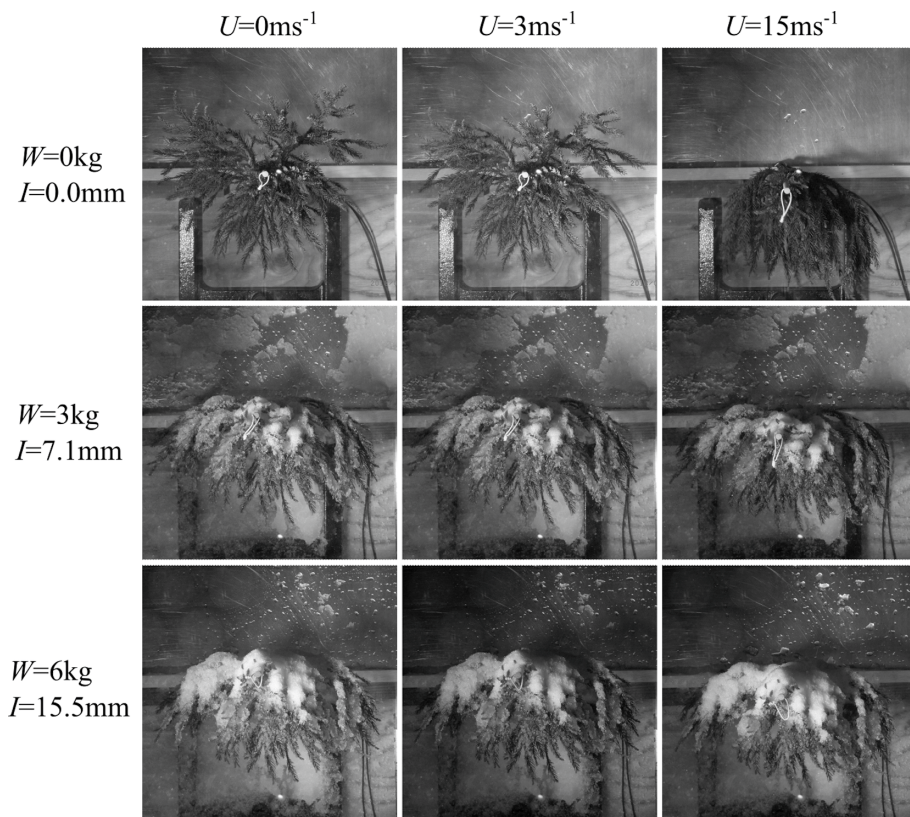


図6 真上側から撮影した実験中の枝葉の様子. 写真の上側が, 風上側を示す. (上段) 累積投入量 $W=0$ kg, 着雪量 $I=0.0$ mm, (中段) $W=3$ kg, $I=7.1$ mm, (下段) $W=6$ kg, $I=15.5$ mm, (左) 風速 $U=0$ ms $^{-1}$, (中) $U=3$ ms $^{-1}$, (右) $U=15$ ms $^{-1}$, を示す.

析を行った.

このようにして求めた, 式(4)における C_{D0} および n の着雪量 I に対する関係を図8に示す. 図8より, 風速 3 ms $^{-1}$ ときの抗力係数に対応する C_{D0} は, 着雪量が 0 mm のときに最も大きく, 着雪量の増加とともに減少したのちに増加する傾向が見られた. また, 風速に対する抗力係数の減少に関する係数である n は, 着雪量が 0 mm のときに最も小さく, 着雪量 10 mm 以上では概ね一定であった. これらの傾向に基づき, 測定した着雪量に対する C_{D0} および n を用いて, 下記の予測式を得た.

$$C_{D0} = 0.00087I^2 - 0.022I + 0.80 \quad (5)$$

$$n = -0.88 - 0.25e^{-0.36I} \quad (6)$$

次の図9に, C_{D0} , n および C_D の測定値と予測

値を比較したものを示す. 各着雪量に対する C_{D0} を式(5)により, n を式(6)により予測し, これらを用いて風速に対する抗力係数 C_D を式(4)により予測した. 図中に, 相関係数 r と二乗平均平方根誤差 (Root Mean Squared Error: RMSE) をあわせて示した.

図中に示すように, C_{D0} では $r=0.60$, $RMSE=0.077$, n では $r=0.88$, $RMSE=0.057$, C_D では $r=0.69$, $RMSE=0.078$ であった. ただし, n の測定値は散布図の対角線上の二か所にまとまって分布しており, この影響を受けて高い r が評価されている.

図10に, 式(4), (5) および (6) により予測した, 各着雪量における風速に対する抗力係数の関係を示す. 図中の着雪量 12.6 mm は, 式(5)に示される C_{D0} が極小値をとる着雪量を示している. 各着雪量の C_{D0} の大小関係は, 風速によって異

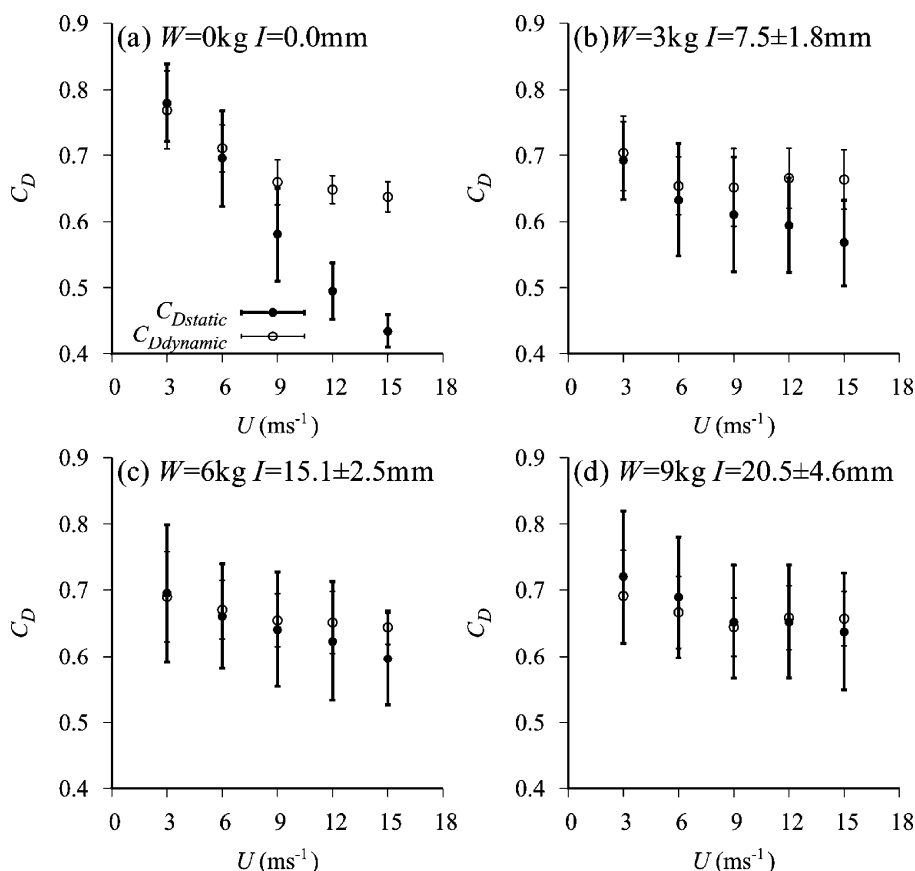


図 7 各累積投入量 W における、風速 U に対する抗力係数 C_D の関係。黒丸は垂直投影面積を風速によらず一定として求めた抗力係数 $C_{Dstatic}$ 。白丸は風による垂直投影面積の減少を考慮した抗力係数 $C_{Ddynamic}$ 。丸は平均値、誤差範囲は標準偏差を示している。(a) 累積投入量 $W=0\text{kg}$, (b) 3kg , (c) 6kg , (d) 9kg における測定結果を示す。

なっていた。抗力係数が最も大きい着雪量は、風速 3.1 ms^{-1} 未満では着雪量 0.0 mm 、風速 3.1 ms^{-1} 以上では着雪量 25.0 mm であった。また、抗力係数が最も小さい着雪量は、風速 6.5 ms^{-1} 未満では着雪量 12.6 mm 、風速 6.5 ms^{-1} 以上では着雪量 0.0 mm であった。

4. 考察

4.1 着雪の垂直投影面積への影響

図 4 より、風速 0 ms^{-1} のときの垂直投影面積は、着雪量が多いほど増加する傾向があった。着雪量が少ない場合には、個々の葉を覆うように着雪が生じており、また、累積投入量および着雪量が多い場合には、隣り合う葉同士の隙間を埋め、着雪が枝葉の全体を覆う状態になっていた。

そのため、着雪量の増加は、無風状態の垂直投影面積を増加させる効果があると示唆される。

風速 6 ms^{-1} 以上の場合には、累積投入量および着雪量が多いほど、風速に対する垂直投影面積の減少が小さくなる傾向が見られた。先行研究によると、樹木の枝葉は弾性体であり、風の作用により枝葉が湾曲し、垂直投影面積が減少することが示されている (Gardiner *et al.*, 2000; Bakkers *et al.*, 2022)。本研究で実施した実験においても、風によって葉の先端部分が風下側に湾曲することで、垂直投影面積が減少することが確認された。したがって、風速の増加による垂直投影面積の減少は、主に風による葉の湾曲のためだと考えられる。また実験結果より、累積投入量および着雪量が多いときには、風速に対する枝葉や着雪の形

状や垂直投影面積の変化はわずかであることが分かった。風による枝葉の湾曲は、柔軟な枝葉の可変性により生じる。枝葉への多量の着雪により、

この可変性が減ぜられ、風による変形が阻害されることで、結果として風速の増加による垂直投影面積の減少が小さくなったと考えられる。

以上のことから、着雪による垂直投影面積への影響として、着雪体の面積の付加による垂直投影面積の増加と、着雪で風による枝葉の変形が阻害されることによって風による垂直投影面積の減少効果の減少の、2種類の影響があることが明らかになった。

4.2 風速の変化による $C_{Dstatic}$ と $C_{Ddynamic}$ の変化

図7より、実験により得られた抗力係数は、累積投入量および着雪量が大きいほど、風速に対す

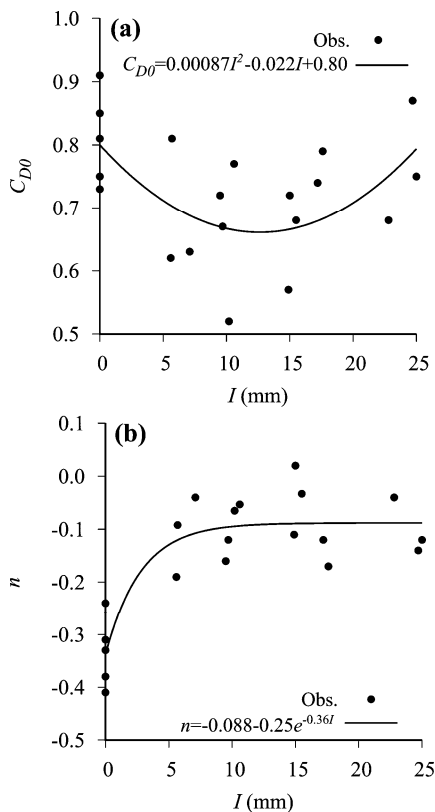


図8 $U_0 = 3 \text{ ms}^{-1}$ としたときの着雪量 I に対する (a) C_{D0} , (b) n の関係。

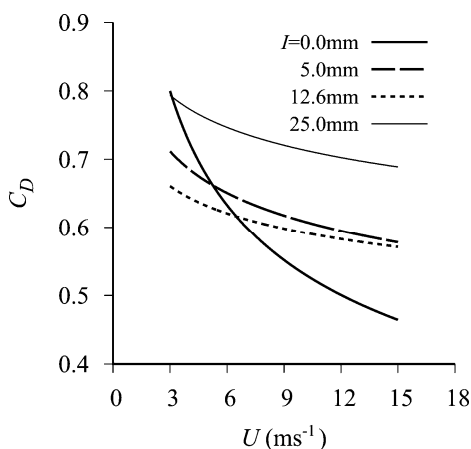


図10 各着雪量 I における風速 U に対する、式(4), (5)および(6)により予測した抗力係数 C_D の関係。

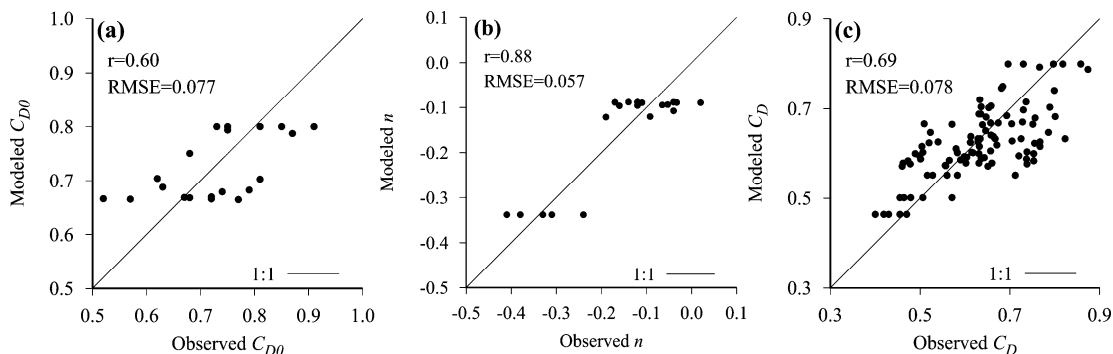


図9 各変数の測定値と予測値の関係。(a) C_{D0} , (b) n , (c) C_D を、それぞれ示す。実線は傾きが1:1の線を示す。図中に、相関係数 r と RMSE をあわせて示した。各着雪量に対する C_{D0} を式(5)により、 n を式(6)により予測し、これらを用いて抗力係数 C_D を式(4)により予測した。

る抗力係数の減少が小さくなる傾向があった。このような傾向は、風速に対する垂直投影面積の変化の傾向と同様であった。また、風速 9ms^{-1} 以上では、垂直投影面積を風速によらず一定として求めた抗力係数 $C_{Dstatic}$ と、風による垂直投影面積の減少を考慮した抗力係数 $C_{Ddynamic}$ の差は、風速の増加に伴って大きくなる傾向があった。このとき、累積投入量および着雪量が小さいほど、 $C_{Dstatic}$ と $C_{Ddynamic}$ の差は大きい傾向があった。風による垂直投影面積の変化により、見かけ上、 $C_{Dstatic}$ は変化する。風速に対する垂直投影面積の減少は、風速 6ms^{-1} 以上で見られており、特に累積投入量および着雪量が少ない条件ほど、垂直投影面積は減少していた。これらのことから、風速 9ms^{-1} 以上における風速に対する抗力係数の減少は、垂直投影面積の変化に起因した見かけ上の変化が主な要因と考えられる。一方で、風速 6ms^{-1} 以下においても、いずれの累積投入量においても、風速の増加による抗力係数の減少が見られた。この風速の範囲では、風速に対する垂直投影面積の変化は小さく、 $C_{Ddynamic}$ も同様に減少していたことから、抗力係数の減少は実質的な減少を示している。

4.3 着雪の抗力係数への影響

図 8 より、風速 3ms^{-1} のときの抗力係数に対応する C_{D0} は、着雪量が 0mm のときに大きく、着雪量の増加とともに減少し、着雪量 12.6mm 以上からは着雪量の増加とともに増加する傾向が見られた。まず着雪量 12.6mm 以上のときに、着雪量の増加によって C_{D0} が増加した要因を考察する。図 4 より、風速 0ms^{-1} のときの垂直投影面積は、着雪量の増加によりわずかながら増加しており、風速 0ms^{-1} と 3ms^{-1} とで垂直投影面積に差が生じなかった。また図 7 より、累積投入量 6kg と 9kg において、風速 3ms^{-1} のときの $C_{Dstatic}$ は $C_{Ddynamic}$ よりも大きな値となっていた。これらは、着雪量の増加により垂直投影面積が増加し、それに伴い $C_{Dstatic}$ が $C_{Ddynamic}$ よりも大きくなったことを示している。そのため、着雪量 12.6mm 以上での着雪量の増加に伴う C_{D0} の増加は、着雪体の面積の付加による垂直投影面積の増加が要因として考えられる。

次に、着雪量 12.6mm 未満のときに、着雪量の

増加によって C_{D0} が減少した要因を考察する。図 4 より、風速 0ms^{-1} のときの垂直投影面積は、累積投入量 0kg と 3kg で変化はなく、抗力係数の減少は垂直投影面積の変化による見かけ上のもではなく、実質的な減少に相当する。物体に生じる流体抵抗は、物体の形状に起因した圧力抵抗と、物体表面の粗度に起因した摩擦抵抗が関係する（例えば今井, 1970）。図 5 に示したように、例えば着雪量が 7.1mm のときには、個々の葉を覆うように着雪しており、着雪は葉の表面の凹凸を減じているように見える。このことは、摩擦抵抗を減じる効果として働く。また、図 6 では、着雪後に風上側の枝が風下側へと曲がり、流線型へと変化していた。このことは、圧力抵抗を減じる効果として働く。よって、着雪量の増加によって C_{D0} が減少した要因として、着雪により流体抵抗が減少したことが考えられる。ただし、着雪により摩擦抵抗や圧力抵抗がどのように変化するかを明らかにするには詳細な測定が必要であり、今後の課題として残る。

また、風速に対する抗力係数の減少に関する係数である n は、着雪量が 0mm のときに最も小さく、着雪量 10mm 以上では概ね一定であった。また、風速に対する垂直投影面積の減少は、着雪前のときに最も大きく、累積投入量の増加とともに減少しており、この傾向は抗力係数における傾向と一致している。そのため、着雪が生じることで枝葉の可変性が減少し、風速の増加による垂直投影面積の減少が小さくなることで、結果として風速の増加による抗力係数の減少が小さくなったものと思われる。

これらをまとめると、枝葉への着雪は、(1) 着雪の発達により垂直投影面積を増加させる効果、(2) 流体抵抗を減じる効果、(3) 風の作用により枝葉が湾曲することで生じる垂直投影面積の減少を阻害する効果の、3 つの効果を生じさせるようである。これらの 3 つの効果により、着雪前の無風時の垂直投影面積を用いて求めた抗力係数は、着雪量により変化するものと示唆される。

4.4 既往研究で得られた抗力係数との比較

本研究では、風洞装置を用いて枝葉に人為的な着雪を生じさせて、着雪した枝葉の抗力係数を測定した。ここでは、風洞実験により得られた枝葉

の抗力係数と、実スケールの樹木の抗力係数の違いについて考察する。そもそもスギの抗力係数を測定した事例そのものが数少ないが、実スケールのスギの樹木を用いて抗力係数を測定した例として Kitagawa *et al.* (2015) の研究がある。Kitagawa *et al.* (2015) の研究では、スギの木の先端部分を切り、樹冠の高さ方向の長さである樹冠長を 2 m 程度となるように枝を切り落としたものをトラックの荷台に載せ、一定速度でトラックを走行させて抗力係数を測定した。その結果、風速 10 ms^{-1} のときの抗力係数は、平均値は 0.30、標準偏差は 0.09 であった。これに対して本研究の場合では、着雪がない状態の風速 10 ms^{-1} のときの抗力係数は、式 (4)、(5) および (6) に従って求めると 0.53 であり、今回得られた抗力係数は Kitagawa *et al.* (2015) による結果と比較して 1.8 倍大きい値であった。今回、風洞装置の断面の大きさによる制約から枝葉を測定の対象とし、また、着雪した枝葉を自立させることは困難であることから、木製の支持棒に枝葉を添わせて固定した。これによって枝葉の高さ方向の可変性が失われており、風による垂直投影面積の減少を抑制した可能性が高い。このことは、風による抗力係数の減少を抑制する効果として働くと考えられる。よって、風速 10 ms^{-1} のときの抗力係数が Kitagawa *et al.* (2015) による結果よりも大きくなったのは、測定のために枝葉を支持棒に固定したことが原因で生じたものと思われる。これらのことから本研究で得られた式 (6) に示される風速に対する抗力係数の減少に関係する係数 n は、実際の自然の樹木のものよりも過大評価されている可能性がある。また、小さな試験体を用いた風洞実験による抗力係数は、実サイズの樹木の抗力係数よりも大きい可能性が指摘されている (Koizumi *et al.*, 2010)。更に実験の制約上、測定対象に対する風の方向を 1 つの方向に固定したが、風の当たる方向によっては抗力係数が変化する可能性がある。これらのことから、今回得られた抗力係数そのものは、あくまで実物のスギ枝葉を材料として用いたスギ枝葉のモデルの、風洞実験により得られた抗力係数とすべきである。

4.5 自然の樹木への着雪との違い

実験では、累積投入量および着雪量の増加に

よって垂直投影面積が増加したが、その増加量はわずかであった。強風を伴った着雪の過去の観察事例によると、着雪は樹冠側面の風上側に直角に発達することを示しており (長井, 1982)、強風を伴った自然の樹木への着雪においても垂直投影面積の増加は限定的である可能性が高い。本研究における人為的な着雪は、過去の観察事例による着雪の形状や発達の特徴が類似している。そのため、今回得られた抗力係数の風速や着雪量に対する傾向は、実際の樹木への強風を伴った着雪を概ね表しているものと考ええる。また、今回は着雪量を枝の単位面積あたりの水当量で表した。着雪による垂直投影面積の増加は、着雪の高さ方向への成長によるものであると仮定すると、垂直投影面積の増加は水当量のみならず、着雪体の密度にも関係すると想定される。着雪の密度は、新積雪の密度に関係する (高木, 1966) ことから、着雪が抗力係数に及ぼす影響は、着雪の発生時の降雪の気象条件にも関係するであろう。特に弱風時の着雪である冠雪では、着雪の密度は小さく、着雪は高さ方向に成長することから、垂直投影面積の顕著な増加が生じる。このような着雪の種類に対して、今回得られた抗力係数の経験式を適応することは適切ではない。

今回の実験では、過去の森林被害の気象状況に基づいて、強風を伴った湿雪の着雪を想定した。しかし、風洞装置を用いた人為的な着雪では、着雪の密度を変化させることは難しく、着雪の密度が抗力係数に与える影響を示すことは困難であった。また、着雪した枝葉を自立させるために支持棒に固定して測定を実施する必要があった。そのため、今回得られた抗力係数の経験式を樹木力学モデルに取り入れて、冠雪害の危険性を評価するには、広範な気象条件における着雪が抗力係数に及ぼす影響を明らかにする必要があるとともに、実際の森林内の樹木の樹冠全体に生じる風荷重の推定に対する今回得られた経験式の適用可能性について、今後、検証する必要がある。

5. まとめ

本研究では、国内の主要な林業種であるスギの抗力係数に及ぼす着雪の影響を明らかにするために、風洞実験を実施した。風洞装置内に実物のス

ギの枝葉を材料に用いたスギの枝葉のモデルを設置し、送風しながら湿雪を供給することにより人為的に着雪を生じさせた。そして、風速や着雪量などの実験条件を変化させたときの、着雪した枝葉の抗力係数の変化を測定した。その結果、

枝葉への着雪は、(1) 着雪の発達により風向に対する垂直面への投影面積である垂直投影面積を増加させる効果、(2) 流体抵抗を減じる効果、(3) 風の作用により枝葉が湾曲することで生じる垂直投影面積の減少を阻害する効果をもたらすことが示唆された。これらの効果により、着雪前の無風時の垂直投影面積を用いて求めた抗力係数は、着雪量により変化した。また、実験により得られた結果に基づき、着雪量と風速を変数とする抗力係数の経験式を提案した。ただし、今回得られた抗力係数の経験式を樹木力学モデルに取り入れて、冠雪害の危険性を評価するには、広範な気象条件における着雪が抗力係数に及ぼす影響を明らかにする必要があるとともに、実際の森林内の樹木の樹冠全体に生じる風荷重の推定に対する今回得られた経験式の適用可能性について、今後、検証する必要がある。

謝 辞

本研究は森林総合研究所所内委託課題「森林気象害のリスク評価手法に関する研究」として実施され、森林総合研究所森林保険センターから資金提供を受けました。実験の実施にあたり、防災科学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験所の大川元造氏、富樫数馬氏、鈴木紘一氏から協力を受けました。2名の匿名査読者からは多数の貴重なコメントを頂きました。ここに記して感謝申し上げます。

文 献

- Abramoff, M.D., Magalhaes, P.J. and Ram, S.J. (2004): Image Processing with ImageJ". *Biophotonics International*, **11** (7), 36-42.
- Bakkers, C. C. A., Angelou, N. and Dellwik, E. (2022): Drag coefficient and frontal area of a solitary mature tree. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **220**, 104854, doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104854.
- Coléou, C. and Lesaffre, B. (1998): Irreducible water saturation in snow: Experimental results in a cold laboratory. *Annals of Glaciology*, **26**, 64-68, doi.org/10.3189/1998AoG26-1-64-68.
- Gardiner, B., Peltola, H. and Kellomäki, S. (2000): Comparison of two models for predicting the critical wind speeds required to damage coniferous trees. *Ecol. Modell.*, **129** (1), 1-23, doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00220-9.
- Gregow, H., Venäläinen, A., Peltola, H., Kellomäki, S. and Schultz, D. (2008): Temporal and spatial occurrence of strong winds and large snow load amounts in Finland during 1961-2000. *Silva Fennica*, **42** (4), 515-534, doi.org/10.14214/sf.231.
- 後藤義明, 新田隆三 (1990): 強風雪により激害を受けたスギ人工林の被害要因の解析. 日本林学会誌, **72**, 406-414.
- 今井 功 (1970): 流体力学. 岩波書店, 東京, 254 pp.
- 河島克久, 遠藤 徹, 竹内由香里 (1996): 熱量式による簡易積雪含水率計の試作. 防災科学技術研究所研究報告, **57**, 71-75.
- Kitagawa, K., Iwama, S., Fukui, S., Sunaoka, Y., Yazawa, H., Usami, A., Naramoto, M., Uchida, T., Saito, S. and Mizunaga, H. (2015): Effects of components of the leaf area distribution on drag relations for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa*. *Eur. J. Forest Res.*, **134**, 403-414, doi.org/10.1007/s10342-014-0859-6.
- Koizumi, A., Motoyama, J., Sawata, K., Sasaki, Y. and Hirai, T. (2010): Evaluation of drag coefficients of poplar-tree crowns by a field test method. *J. Wood Sci.*, **56**, 189-193, doi.org/10.1007/s10086-009-1091-8.
- Koizumi, A., Shimizu, M., Sasaki, Y. and Hirai, T. (2016): In site drag coefficient measurements for rooftop trees. *J. Wood Sci.*, **62**, 363-369, doi.org/10.1007/s10086-016-1556-5.
- 久保山裕史, 鄭 羅軍, 岡 裕泰 (2003): 主要な森林気象災害の林齢別被害率の推定と考察. 日本林学会誌, **85** (3), 191-198, doi.org/10.11519/jjfs1953.85.3_191.
- Mayhead, G.J. (1973): Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agric. Meteorol.*, **12**, 123-130, doi.org/10.1016/0002-1571(73)90013-7.
- 長井真隆 (1982): 56 豪雪 (1980-1981 年) における屋敷林のスギ異常着雪害と気象条件. 富山市科学文化センター研究報告, **4**, 5-15.
- 中谷 浩, 嘉戸昭夫, 平 英彰, 飯島康男, 澤田 稔 (1984): スギ造林木の冠雪荷重による樹幹の変形と耐力. 木材学会誌, **30** (11), 886-893.
- 新田隆三, 大関義男, 庭野昭二, 松田正宏 (1986): 雪の物性からみた冠雪発達に及ぼす風速の効果. 97 回日本林学会大会発表論文集, 385-386.
- Peltola, H., Kellomäki, S., Väisänen, H., Ikonen, H., and Ikonen, V.P. (1999): A mechanistic model for assessing the risk of wind and snow damage to single trees and stands of

- Scots pine, Norway spruce, and birch. *Can. J. For. Res.*, **29**, 647–661, doi.org/10.1139/x99-029.
- 佐伯正夫, 杉山利治 (1965): 林木の冠雪害危険地域. 林業試験場研究報告, **172**, 117–137.
- 佐藤研吾, 富樫数馬, 阿部 修 (2017): 着雪実験のための湿雪供給方法の自動化に向けて. 東北の雪と生活, **32**, 60–62.
- 澤田 稔 (1983): 風および冠雪による針葉樹幹の変形—円断面単テーパ片持ちばりとしての解析—. 林業試験場北海道支場研究資料, **128**, 1–18.
- 四手井綱英 (1954): 雪圧による林木の雪害. 林業試験場研究報告, **73**, 1–89.
- Shi-igai, H. and Maruyama, T. (1988): Measurement of wind drag forces on trees. *Natural Disaster Science*, **10** (2), 25–33.
- 高木子平 (1966): 石打における電線着雪の観測. 雪氷, **28** (1), 1–7.
- 高橋喜平 (1952): スギの冠雪に就いて. 冠雪の研究 (第 1 報). 林業試験場研究報告, **54**, 140–148.
- 高橋喜平, 塩田 勇 (1952): 昭和 24 年 2 月 14 日山口県阿武郡川上村に発生したスギ造林地の風雪害調査報告. 林業試験集報, **62**, 1–36.
- 高橋 貴, 河井正安 (2014): ひずみゲージによるひずみ測定入門. 東京, 大成社, 163 pp.
- Shi-igai, H. and Maruyama, T. (1988): Measurement of wind

Wind tunnel testing of the snow accretion effect on the drag coefficient of Japanese cedar branches and leaves

Takafumi KATSUSHIMA^{1*}, Satoru ADACHI², Kazuki NANKO³ and Yukari TAKEUCHI¹

¹Tohkamachi Experimental Station, Forestry and Forest Products Research Institute, 614-9, Kawaharacho, Tokamachi, Niigata 948-0013

²Shinjo Cryosperic Environment Laboratory, Snow and Ice Research Center, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 1400, Tohkamachi, Shinjoshi, Yamagata 996-0091

³Department of Disaster Prevention, Meteorology and Hydrology, Forestry and Forest Products Research Institute, 1, Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687

*Corresponding author: katusima@affrc.go.jp

Abstract: The increased loads acting on a tree due to wet snow accretion and strong winds cause snow damage to trees, such as stem and branch breakage and uprooting. A structural analysis is employed to predict the initiation of snow damage due to snow accretion, thereby taking into account the loads caused by snow and wind. However, few studies have measured wind loads on trees, and the effect of snow accretion on the drag coefficient is unknown. In this study, wind tunnel testing was conducted to clarify the effect of snow accretion on the drag coefficient of Japanese cedar, which is a major forestry species in Japan. A model of cedar branches and leaves, made from actual material, was placed in a wind tunnel, and snow accretion was artificially generated by supplying wet snow into the wind tunnel while blowing air. The changes in the drag coefficient for different experimental conditions, such as wind speed and the amount of accreted snow, were measured. The results showed that snow accretion had three types of effects: (1) increasing the projection area due to the snow itself, (2) reducing drag force, and (3) inhibiting the decrease in projection area caused by the curvature of the branches and leaves due to wind action. These effects changed the drag coefficient.

(2022 年 8 月 3 日受付, 2023 年 1 月 12 日受理, 討論期限 2023 年 9 月 15 日)