

スギ根系が抱きかかえている土壌の量はどれくらい?

台風21号が地上に残した根鉢の解体

誌名	水利科学
ISSN	00394858
著者名	谷川, 東子 池野, 英利 藤堂, 千景 山瀬, 敬太郎 大橋, 瑞江 岡本, 透 溝口, 岳男 中尾, 勝洋 金子, 真司 鳥居, 厚志 稲垣, 善之 中西, 麻美 平野, 恭弘
発行元	水利科学研究所
巻/号	65巻6号
巻号補足	
掲載ページ	p. 1-14
発行年月	2022年2月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター

Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



スギ根系が抱きかかえている土壌の量はどれくらい？ ——台風21号が地上に残した根鉢の解体——

谷	川	東	子	池	野	英	利
藤	堂	千	景	山	瀬	敬	太郎
大	橋	瑞	江	岡	本		透
溝	口	岳	男	中	尾	勝	洋
金	子	真	司	鳥	居	厚	志
稲	垣	善	之	中	西	麻	美
平	野	恭	弘				

目 次

1. 台風倒木の発生
2. 根鉢解体——どれくらいのバイオマスの根が、
どれくらいの土を抱きかかえているのか？——
3. 堅い土壌で育つ樹木の根鉢は、深根性・浅根性を
問わず相似形
4. 2度目の襲撃には弱い
5. おわりに

谷川：名古屋大学大学院生命農学研究科，森林総合研究所関西支所
池野：福知山公立大学情報学部
藤堂・山瀬：兵庫県立農林水産技術総合センター
大橋：兵庫県立大学環境人間学部
岡本・溝口・中尾・金子・鳥居：森林総合研究所関西支所
稲垣：森林総合研究所四国支所
中西：京都大学フィールド科学教育研究センター
平野：名古屋大学大学院環境学研究科

書きおろし図8以外の図は springer の転載許可を得ている

要旨

根鉢は、根返りに抵抗する根系の強度（root anchorage）に重要な役割を果たしているが、その質量の実測値は世界でも稀少である。また、樹木地上部との相対成長指標を用いて根鉢の質量を推定することが多いが、その妥当性を確認した研究はほとんどない。本稿は、樹木の根が自身のバイオマスよりも劇的に重い土壌を保持していることを初めて定量的に示した研究である“A quantitative evaluation of soil mass held by tree roots”（Tanikawa et al., 2021）を解説する。

本研究では、2018年の台風21号が残したスギ倒木の根鉢7枚を根と土壌に分け、その質量を直接測定した。根鉢の乾重は251～3,070kgであり、そのうち8%を根が、92%を土壌が占めていた。根鉢に保持された土壌の質量は、地下部も考慮した樹木個体バイオマスの2.8倍に相当した。地下部／地上部のバイオマス比は0.26であったのに対し、地下部に根鉢土壌を加算した地下部重量は地上部重量に比べはるかに大きく、3.9倍に相当した。根系には、その質量の13倍に相当する土壌が保持されていた。このように高い土壌の質量は、樹木地上部の重みを支え、根返りを防ぐために機能していると推察された。胸高直径（DBH）などの地上部の相対成長指標は、根鉢質量をよく表わしていること、樹木の成長に伴う根系発達により、根は効率よく土壌を保持できるようになることも示された。

キーワード：樹木の倒伏耐性、風害、根鉢、根返り、根系強度、減災

1. 台風倒木の発生

2018年8月28日に発生した台風21号（Jebi）は、9月4日にサファ・シンプソン・ハリケーン・ウィンド・スケール（Saffir-Simpson hurricane wind scale）のカテゴリー3を維持したまま近畿地方に上陸した（Takabatake et al., 2018）。室戸岬では最大風速48.2m/s、最大瞬間風速55.3m/s、関西空港では最大風速46.5m/s、最大瞬間風速58.1m/sなど四国地方や近畿地方では猛烈な風を観測し、多くの場所で観測史上第1位を記録した（気象庁, 2018）。京都市内でも、戦後最大の瞬間風速39.4m/sが観測された（京都地方気象台, 2018）。Courtts（1986）の計算によると、胸高直径（DBH: Diameter of Breast

Height) 15.3cm のシトカトウヒ (*Picea sitchensis*) を根返りさせるには13m/s, DBH が18.5~26.7cm の場合は14~17m/s という風速が必要である。樹木を倒すために必要な風速は樹種によって異なるだろうが、台風21号の風速は、この地域で多くの樹木を引き倒すのにおそらく十分であったと考えられる。この台風による林野関係の被害総額は、44億円に達した（農林水産省、2019）。

京都市にある森林総合研究所関西支所構内の人工林・二次林でも、大量の倒木が発生した。樹木は折れ重なるように倒れていたため、その観察のために林内を歩こうにも、倒木によじ登り、また滑り降り、あるいはくぐり、という方法でしか先に進めない有様であった。その中で印象的であったのは、ぽこぽこと地上に姿を現した、それまで樹木を支えていたに違いない根鉢の集団であった。

根鉢（図1）は根系とそれが抱え込んでいる土壌の複合体のことで、英語では root-soil plate という。Root anchorage の主な要因は、根の構造、土壌のせん断抵抗力、根鉢の形状や質量などが挙げられ、樹木の根系型により各要因の重要度が変化する。Mattheck et al. (2015) は、薄く水平に広がる根系をもつ樹木をコンテナに植栽された樹木にたとえ、コンテナに土壌が大量に入っていれば、その重さで樹木は風に対して抵抗力をもつ、つまり薄い根系の樹木では、その倒伏耐性に根鉢がもつ重みがよく貢献すると説明している。



図1 2018年9月4日に上陸した台風21号が地上に残したスギ風倒木の根鉢（Tanikawa et al., 2021を改変）

2. 根鉢解体——どれくらいのバイオマスの根が、どれくらいの土を抱きかかえているのか？——

根鉢の重さを測った研究は知る限り、我々の他に1件（Coutts, 1986）しかない。一般的には、根鉢の上がったあとにできた土壌の穴の大きさを計測し、土壌の比重をかけて推定する、あるいは地上部の相対成長指標（DBH など）から推定するといった間接推定法が採られている。しかし、実際に DBH などが根鉢の重量と関係しているのかを検証した研究はなく、見過ごされていた課題であったといえる。

谷川が根鉢調査をしていると、実験林内の作業や見回りをしている檜山氏・小林氏（森林総研関西支所・地域連携推進室）が通りすがりに手伝ってくれることが度々あった。根鉢の重さを直接測りたいが、手を出しあぐねていたある日、檜山氏がスギ根鉢をチェーンブロックに吊り上げてくれた。そこでその下にコンテナボックスを敷き詰め、すこしずつ根を切り刻みながら、根に付着している土をバールなどで落とし、土を受け止めたコンテナやビニールシートを運び、秤に載せる、を繰り返し、なんとか2個体の解体と質量計測に成功した。地域連携推進室の近口氏、田中氏も応援に来てくれた。3個体目を吊り上げようとしたとき、前の2個体よりすこしだけ大きな根鉢ではあったそれは持ち上がらず、重機でないとこれ以上のサイズは持ち上がらないだろうと話し合った。

後日、「重機を使って倒木の森を整理することになった。ついでには根鉢調査に重機が使いたければ使ってもよい」と檜山氏を通じ地域連携推進室から連絡があった。年度末迫る2019年3月13-14日にかけて、5個体のスギ根鉢を解体した。樹木根の減災機能を研究する共同研究者たち（共著者のほかに、兵庫県立大学・岡本祐樹氏と後藤和明氏）の応援により、図2、3のような大掛かりな解体作業の末、以下の4点を明らかにした：

- 1）根は自分の質量の13倍もの質量の土壌を抱きかかえている（図4a）
- 2）樹木個体全体の質量より、根鉢に含まれる土壌の質量のほうが大きい（図4b）
- 3）地上部に対する地下部の重量比は、根鉢の土壌を考慮しなければ（根のみならば）0.26と地上部のほうが重いが、土壌を考慮すると3.9倍になり、地下部のほうが劇的に重くなる（図5）。

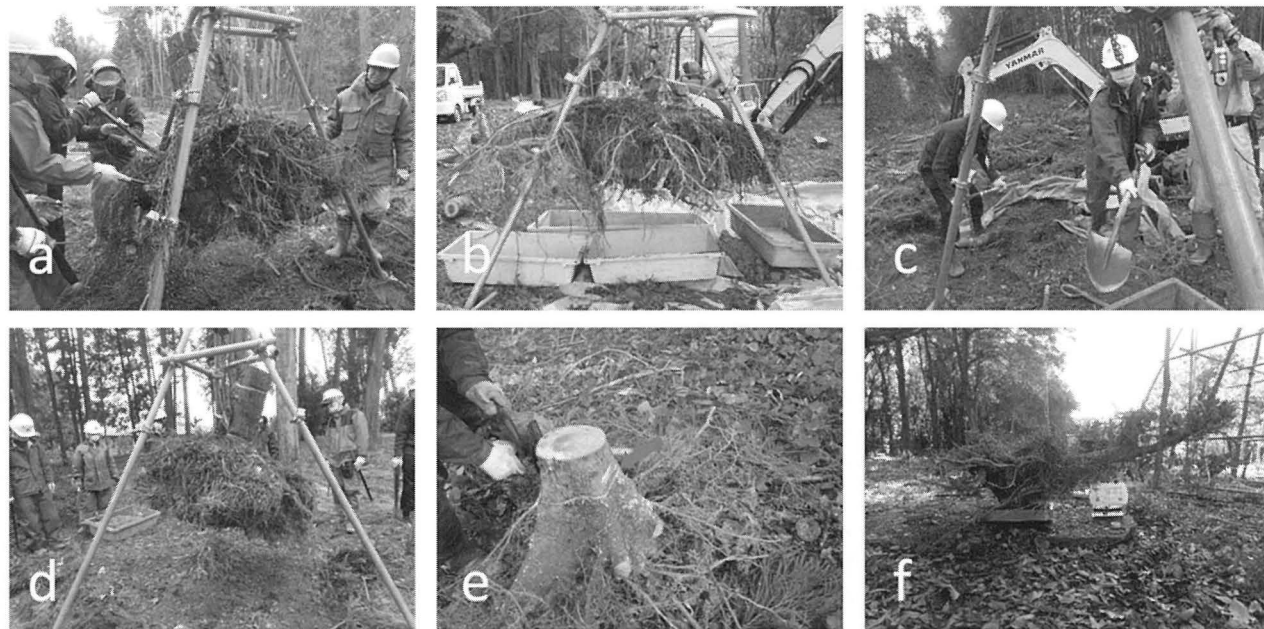


図2 根鉢の解体（スギ個体 ID. C2以外）（Tanikawa et al., 2021を改変）

(a-c) ワイヤロープまたはベルトスリングを備えた重機のアーム，またはチェンブロックとワイヤロープを備えた三脚に，根鉢を吊り上げた。根鉢の土壌は，バール，つるはし，ハンマー，シャベル，ドライバーなどを使用して落とした。落とした土壌をコンテナやビニールシートで受け止めた。(d) 根は時折チェーンソーを使用して，徐々に切り離した。(e) 土壌をすべて取り除き切り株状態になった根を，あらかじめ印をつけておいた地表面位置で地上（幹）と地下（根）に分けた。(f) 解体で得られた根と土壌の生重を，ロードセルまたは天秤を用いてただちに測定した。

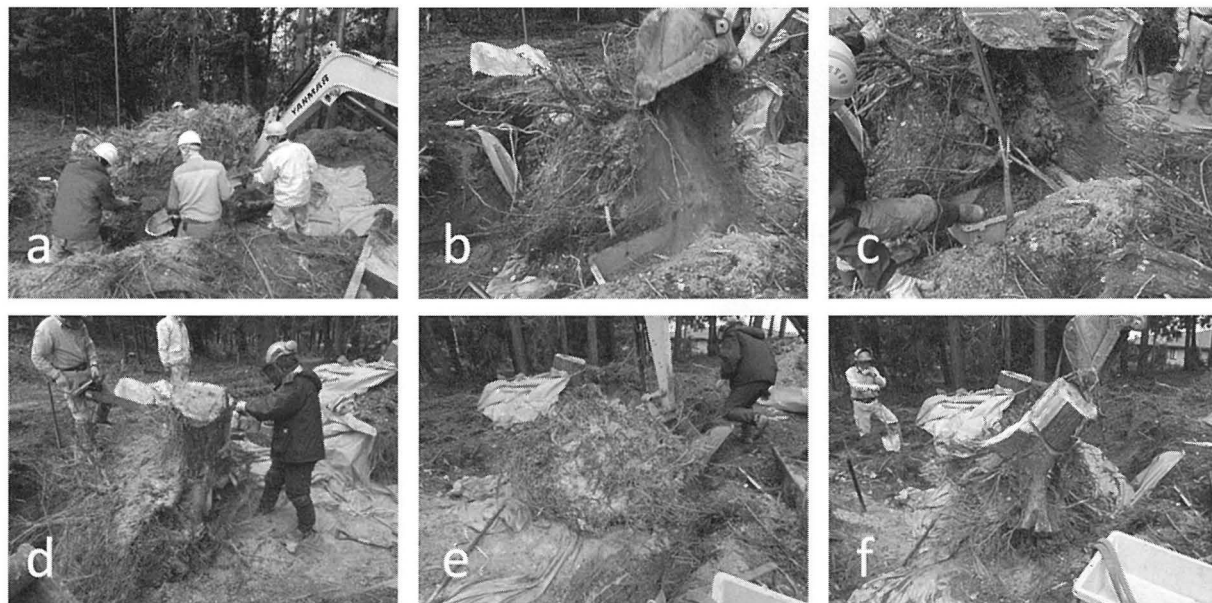


図3 スギ個体 ID. C2の解体 (Tanikawa et al., 2021を改変)

(a)重すぎて重機のアームにさえ吊り下げることができなかった個体C2は、根鉢周囲の地面に溝を作り、根鉢から溝の底に敷き詰めたビニールシートまたはコンテナに向けて土壌を落とした。(b)しっかりと付着した土は、重機のバケットで軽く揺すったり叩いたりして取り除いた。(c)根と土壌は別々に集められた。(d-f)終盤はビニールシート上で、チェーンソーで根鉢を細分化し、土と根に分ける作業を繰り返した。

土壌をすべて取り除き切り株状態になった根を、あらかじめ印をつけておいた地表面位置で地上(幹)と地下(根)に分けた。解体で得られた根と土壌の生重を、ロードセルまたは天秤を用いてただちに測定した。

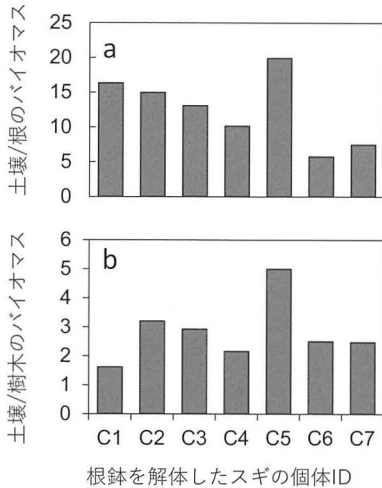


図4 スギ7個体の根鉢における、根系 (a) と樹木全体 (b) に対する土壌の重量比 (Tanikawa et al., 2021を改変)

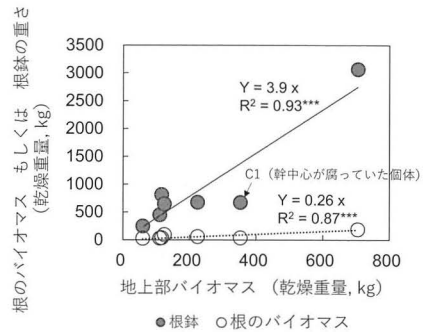


図5 スギ7個体の地上部バイオマスと、根バイオマスもしくは根鉢の重さとの関係 (Tanikawa et al., 2021を改変)

4) 樹木地上部の相対成長指標は根鉢の重さや体積の指標になる (図6)。

ただし一次線形式よりべき乗式の当てはまりが良い。また根鉢のべき乗数は根のそれよりも大きく、樹木は成長に伴って根鉢を加速的に拡大させている。

以上をまとめると、①樹木は自身のバイオマスの1/4ほどしかない根を使って、自身よりも劇的に重い土壌を保持し、地上部を支えている。②樹木が大きくなると、根系が土壌を保持する能力は上がり、少ない根でたくさんの土壌を抱きかかえることができるようになる、という樹木の生き方が見えてくる。

なお、上述の1), 2), 3) は定常状態を想定して根鉢のヒンジ側 (風下側で、土壌に埋まっている部分) を数学的に復元して考慮に入れ、4) は風倒時を想定してヒンジ側は考慮に入っていない。

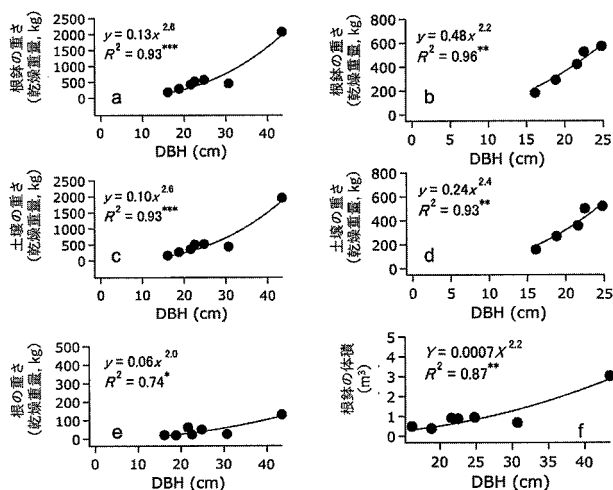


図6 スギ7個体における、地上部相対成長指標 (DBH) と根鉢の重さおよび体積との関係 (Tanikawa et al., 2021を改変)

(a, c, e, f), 全試料; (b, d) 幹が腐っていた個体(C1)と一番大きい個体(C2)を削除

*, **, *** はそれぞれ危険率 $p < 0.05$, 0.01 , 0.001 を示す。一次回帰式はここには示されていないが、図のべき乗式のほうが当てはまりが良かった。

3. 堅い土壌で育つ樹木の根鉢は、深根性・浅根性を問わず相似形

根鉢は重量だけでなく、そのカタチも樹木の倒伏耐性を考える上で重要な要素である。海外では根鉢半径と DBH の関係を示す研究があり、その関係性は「土塊を閉じ込めるための強固な柵として機能する根」の投影面積が樹木地上部から予測できることを意味している。例えば深根性樹木であるフランスカイガンショウ (*Pinus pinaster*) の根鉢半径は $2.2 \times \text{DBH}$ に相当する (Danjon et al., 2005)。本研究では、深根性のスギでも根鉢半径は $4.1 \times \text{DBH}$ と係数が大きく、水平方向に広がる根鉢を持っていることが確認された。これは深根性のスギでも、硬い土壌層がある場合、垂下根が十分に発達できずに水平に広がる根系に変化し、そのような場合には根鉢もまた水平方向に大きくなるためと考

えられた。実際に調査地の土壌は、根の伸長を妨げるほど硬かった。深根性樹木であっても、浅い層に根が深く伸びられない原因（地下水や硬い層）があると、根は深さ方向へ発達せず水平方向への発達が卓越し、そのような根系のカタチに応じて根鉢のカタチも変化することについては先行研究がある（Hirano et al., 2018; Ray and Nicoll, 1998）。Todo et al. (2019) は、地下水位が高い森林で垂下根の代わりに水平根を発達させたクロマツは、本来もつ深根性を発揮したクロマツに比べ、同じ DBH ならば倒伏耐性が低いことを示している。

ではそのように硬い土壌に生育している多くの樹種は、深根性や浅根性という樹木本来が持つ根系の属性にかかわらず、同じような直径や深さの根鉢を持つのだろうか？ 台風被害地において、幾重にも重なって倒れた樹木の根鉢は、他個体の幹を上に乗せて崩れているので、すべての根鉢のカタチは記録できなかったが、直径や深さが維持されていた状態の良い根鉢を 6 樹種 30 本見つけることができた。そこで実験補助員の協力を得て、その直径や厚みを計測した。その結果、DBH に応じて（樹木が大きくなると）、根鉢の直径や厚みは大きくなるが、その拡大率は深根性樹種であろうと中間型であろうと、浅根性樹種とほぼ同じである——つまり、どの根鉢も樹種を問わず相似形である——ことが明らかになった（図 7）。Lundström et al. (2007) は、根鉢の形状は深さ方向に細くなる楕円錐を示すと述べているが、関西支所では垂下根が発達しないために、ディスク形であった。

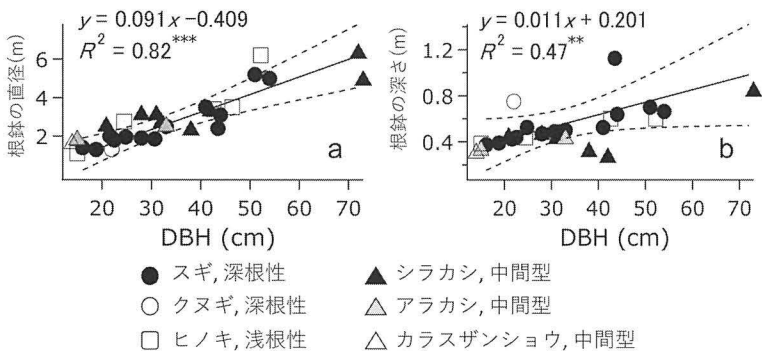


図 7 6 樹種における根鉢の直径(a)あるいは深さ(b)と地上部相対成長指標 (DBH) との関係 (Tanikawa et al., 2021 を改変)

4. 2度目の襲撃には弱い

台風21号は図8のような経路を通り、まさに京都の上空を通過した。その日、関西支所にいた研究者たちから「午前から強い風が吹いていたが、午後2時過ぎ、台風が目を通った後に木が倒れた」と証言が寄せられていた。倒木の森を歩くと樹木は一見、ばらばらな方向に倒れているように見えたが、念のため解体した根鉢7個体のスギについて、倒れた方向を測定し（図9左）、AMeDASの風向、風速のデータと照合した（図9右）。台風が目が京都市を通過する14時10～30分ごろに急に風向が逆になり、そのときにその日の最大瞬間風速に達したことから、14時30分までを1度目の襲撃、その後を2度目の襲撃と定義した。スギの倒れた方向は2度目の襲撃方向と7本中6本が一致した。このことから「樹木は左右など二方向に揺らされることに弱く、倒れる可能性が高くなる」ということが推察された。「1方向からの攻撃の後、反対側からもう一度攻撃されると致命的」、このことは、生物なら種を問わず当てはまるのではないだろうか。

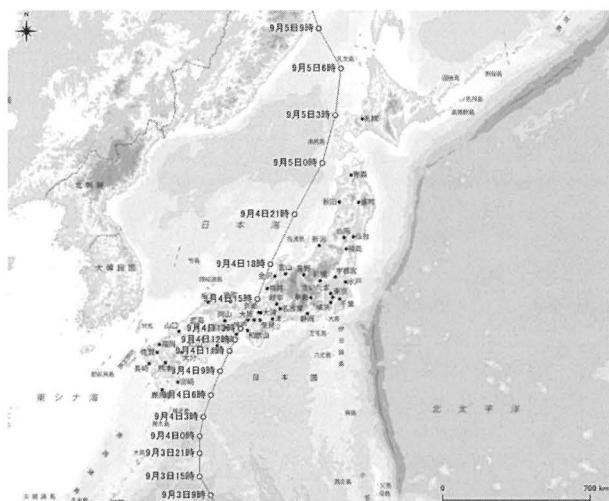


図8 2018年台風21号の経路（地理院タイルに2018年台風21号の経路を追記して作成）

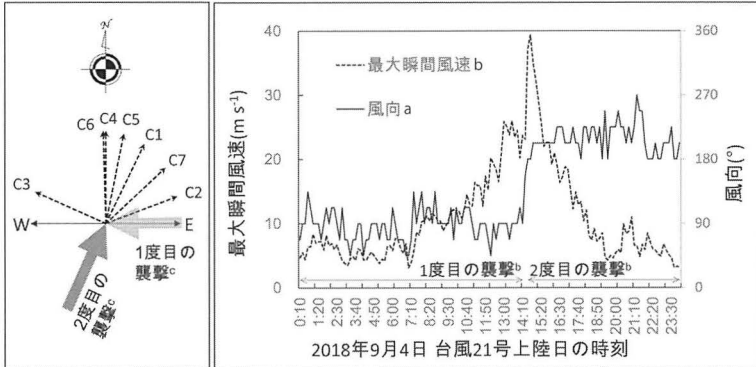


図9 スギが倒れた方向（左図），2018年9月4日 台風21号上陸日の京都気象台における最大瞬間風速と風向の10分ごとの変化（右図，気象庁 AMeDAS データ）（Tanikawa et al., 2021を改変）

^a 風向は北を0として22.5°刻みの16方位で示した（第2軸）。^b 14:30ごろ，風向は急激に変化し，同時にその日の最大瞬間風速を記録した。そこで00:00～14:30の風を1度目の襲撃，14:30～24:00の風を2度目の襲撃と定義した。^c 陰影で示した矢印は，1度目の襲撃を平均した風向，2回目目の襲撃を平均した風向である。

5. おわりに

もし関西支所の土壌が垂下根の発達を妨げない程度に柔らかいものであったなら，スギ・クヌギ・シラカシなどは本来の深根性・中間型特徴を発揮し，根鉢は楕円錐形であっただろう。垂下根が発達する根系では，根鉢の「重さ」より「底面で発生する土壌のせん断抵抗力」が root anchorage に寄与すると考えられている。これは，土壌が堅いか柔らかいかによって根鉢は anchorage への貢献の仕方を変えるという器用さをもっていることを意味している。ただし，砂のように粒子間のつながりの希薄な土壌では，垂下根があっても土壌のせん断抵抗力はそれほど大きくならないと考えられるので，土壌の質とそこで成長する根系の発達よりは，根鉢の効果に影響を与える。そのようにパターン化できるだけの科学的データは不足しているので，21号のような台風はもう来ないことを祈るが，もし倒木が発生したら，やはり根鉢の調査事例を増やすことが必要だと考えられる。

また風上側に分布する根の引き抜き抵抗力は、root anchorage に大きく貢献すると考えられており、解体したスギ根鉢から空中に突き出していた根の性質も調査している（しかし、その貢献度の推定に関しては難航している）。我々は、①地上部相対成長指標により根鉢の輪郭を推定し、②根を地表から映す技術である地中レーダを用いて輪郭周辺の根の情報を取得し、③それらの情報を根の引き抜き抵抗力に変換し、根鉢の重力とともに積み上げて root anchorage を推定することで、樹木の倒伏耐性の評価を非破壊で行いたいと考えている。地中レーダを用いたこのような試みについては、水利科学374号（谷川ら、2020）を参照してほしい。

謝辞

倒木整理を根鉢調査後に調整する・重機の使用を認めるなど数々の便宜をはかり、この調査を遂行させてくださった森林総合研究所関西支所地域連携推進室の高橋幸三（元）室長・檜山真司氏・小林宏忠氏に深謝いたします。また根鉢調査にご参加くださった近口貞介氏・田中まゆみ氏・島田喜子氏・山本由加利氏・JIYOUNG AN 氏（関西支所）・岡本祐樹氏・後藤和明氏（兵庫県立大学）、台風当日の土壌含水率データをご提供くださった高梨聡氏（関西支所）、土壌の分析を補助してくださった土居龍成氏・西村滯氏・吉田巖氏（名古屋大学）、Root anchorage について議論してくださった野口宏典氏・南光一樹氏（森林総研本所）、樹木形状について議論してくださった隅田明洋教授（京都府立大学）・肘井直樹教授（名古屋大学）に厚く御礼申し上げます。また3月中旬、研究室転出・自宅転居・転校の直前にもかかわらず根鉢解体作業を許してくださった関西支所土壌研究室の皆様と家族に、深くお詫びと感謝を申し上げます。本研究は、日本学術振興会の科研費（no. JP20H03040, JP20H03028）、および文部科学省科学技術振興調整費の女性研究者研究活動支援プログラムの支援を受けて実施しました。

引用文献

- Coutts MP (1986) Components of tree stability in sitka spruce on peaty gley soil, *Forestry* 59: 173-197. <https://doi.org/10.1093/forestry/59.2.173>
- Danjon F, Fourcaud T, Bert D (2005) Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytol* 168:387-400.

- <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01497.x>
- Hirano Y, Todo C, Yamase K, Tanikawa T, Dannoura M, Ohashi M, Doi R, Wada R, Ikeno H (2018) Quantification of the contrasting root systems of *Pinus thunbergii* in soils with different groundwater levels in a coastal forest in Japan. *Plant Soil* 426: 327–337. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3630-9>
- 気象庁 (2018) 台風第21号による暴風・高潮等.
https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2018/20180911/jyun_sokuji20180903-0905.pdf (2021年4月18日閲覧)
- 気象庁 AMeDAS 各種データ・資料
<https://www.jma.go.jp/jma/menu/menureport.html> (2021年4月18日閲覧)
- 気象庁 (2018) 2018年台風第21号 JEBI (1821) 位置表.
<http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/typhoon/T1821.pdf> (2021年4月20日閲覧)
- 京都地方気象台 (2018)
<https://www.jma-net.go.jp/kyoto/data/kishousokuhou2018T21.pdf>. (2020年2月20日閲覧)
- Lundström T, Jonas T, Stöckli V, Ammann W (2007) Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, RSP geometry and root growth orientation. *Tree Physiol* 27:1217–1227. 10. 1093/treephys/27. 9. 1217
- Mattheck C, Bethge K, Weber K (2015) The body language of trees. Encyclopedia of visual tree assessment, 1st ed. Karlsruhe Institute of Technology, Germany.
- 農林水産省 (2019) 平成30年台風第21号に関する情報.
<https://www.maff.go.jp/j/saigai/typhoon/20180904.html> (2021年4月18日閲覧)
- Ray D, Nicoll BC (1998) The effect of soil water-table depth on root-plate development and stability of Sitka spruce, *Forestry* 71:169–182.
<https://doi.org/10.1093/forestry/71.2.169>
- Takabatake T, Mäll M, Esteban M, Nakamura R, Kyaw TO, Ishii H, Valdez JJ, Nishida Y, Noya F, Shibayama T (2018) Field survey of 2018 Typhoon Jebi in Japan: Lessons for disaster risk management. *Geosci* 8:412.
<https://doi.org/10.3390/geosciences8110412>
- Tanikawa T, Ikeno H, Todo C, Yamase K, Ohashi M, Okamoto T, Mizoguchi T, Nakao K, Kaneko S, Torii A, Inagaki Y, Nakanishi A, Hirano Y. (2021) A quantitative evaluation of soil mass held by tree roots. *Trees* 35, 527–541. DOI 10.1007/s00468-020-02054-y
- 谷川東子・山瀬敬太郎・藤堂千景・池野英利・大橋瑞江・檀浦正子・金澤洋一・平野恭弘. (2020) 地中レーダがもつ樹木の根系可視力を減災に生かす試み. 水利科学374,

87-112.

Todo C, Tokoro C, Yamase K, Tanikawa T, Ohashi M, Ikeno H, Dannoura M, Miyatani K, Doi R, Hirano Y (2019) Stability of *Pinus thunbergii* between two contrasting stands at differing distances from the coastline. *For Ecol Manage* 431:44-53.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.05.040>

(原稿受付2021年 4 月30日, 原稿受理2021年 5 月27日)