

## 六甲山系における植生が降雨による斜面崩壊リスクに及ぼす影響の調査 ～植生から防災へのアプローチ～

神戸大学附属中等教育学校  
黄 智霞

### 1. はじめに

六甲山系は、六甲変動による世界的に貴重な風化花崗岩土壌を持つことで有名である(岸野, 2014)。マサ化(粗粒な花崗岩が、構成鉱物の熱膨張率の差異により結合を失い、砂状に崩壊する物理的風化現象)した土壌は、大雨による斜面崩壊に極めて脆弱であり、そのために阪神大水害など大規模な災害が起こっている(六甲砂防事務所「六甲砂防事業概要」)。これに対し、地盤改良等のハードな対策だけでなく、植物を用いた身近な対策で斜面崩壊リスクを軽減したいと考えた。先行研究では六甲山系の人工林を対象とした研究は確認できたが、本研究が目的とする植生の持つ斜面崩壊(表面侵食と表層崩壊)の防止効果についての研究は確認できなかった。本研究の結果から六甲山の植生が持つ斜面安定化機能を解明し、樹種特性に基づく管理手法を提言した。併せて市民が活用可能な ICT による調査手法を示すことで、科学的根拠ある緑化啓発と実践的な地域防災活動への貢献を目指している。

### 2. 目的

六甲山系において、植生の同定と樹木の根系が持つ斜面安定化機能の定量的な評価を目的とする。特に、雨滴や流水で地表面の土壌が削り取られる表面侵食と大雨などにより斜面の地表付近にある土壌が崩れ落ち崩壊する表層崩壊のリスクの評価と樹種差及び断幹(幹を途中で切り立木の一部を残すこと)に着目して根系の物理的特性の解明を目指す。

本研究では、六甲山系特有の風化花崗岩土壌に対して植生根系と斜面安定性の関係を実証的に研究した点、クスノキ・ウバメガシが優占する斜面を対象に根系特性を調査した点は先行研究で不足している点を埋める新規性がある。また、先行研究で不明瞭であったクスノキ・ウバメガシの学術的知見を補う点、減災目的の植栽樹種選定の応用可能性の向上、環境負荷が小さい調査手法による環境保全と防災の両立に寄与できる点に研究意義がある。

### 3. 方法

調査地は六甲山系の南側に位置し、周辺の開発から免れ自然に近い植生が良好に保持されているため神戸大学附属中等教育学校内の斜面(総面積:507.5 m<sup>2</sup>)を選定した。本研究では、まず斜面の植生同定のために毎木調査を実施した。調査手法は環境省が示す一般的な方法に準拠し、胸高直径(地表面から 1.3m 地点の幹直径)  $\geq 3.0$ cm かつ樹高  $\geq 1.3$ m の全立木を対象に種名, 樹高, 胸高直径, 断幹の有無(断幹の高さも測定)、胸高直径  $\geq 10.0$ cm 個体は枝の広がり, 枝下高(最下枝の高さ)も記録した。簡易計測とするため LiDAR 機能を搭載した測量アプリ「mapry 林業」を併用した。本アプリの利用料について当初本助成金の充当を計画していたが高校生による研究利用ということで(株)マプリーのご厚意により無償で提供頂いた。

樹種, 胸高直径, 樹高から幹重量を導き、地上部-地下部重量比を推測しその樹木自体の安定性を推定した。本計算で使用する樹種ごとに決まる容積密度・BEF・T/R比は国立研究開発法人森林研究・整備機構のプログラム、北海道 HP、「日本国温室効果ガスインベントリ報告書」の数値を利用した。J. Poesen(2021)によれば枝下高の高さは雨滴衝撃の増大により表面侵食リスクが高くなり、枝の広がりや雨滴の遮断により表面侵食リスク低くなることに基づいて、枝の広がりや枝下高を用いて表面侵食を評価した。また、「mapry 林業」の精度検証のために系統誤差や比例誤差が分かる Bland-Altman 分析を用いた。

次に表層崩壊の防止効果を評価するために根の掘り取り・引き抜き調査を行った。対象樹木は毎木調査より明らかになった優占種のクスノキ・ウバメガシの断幹の有無で区分した各 2 本ずつとした。掘り取り範囲は林野庁の一般的手法に準拠し、斜面への攪乱を抑えるため山瀬ほか(2011)を参考に幹中心から斜面下方向に中心角 60°, 半径 1m, 深さ 30cm の扇形領域を調査範囲と設定し、次の諸項目を記録した。対象範囲の根の位置・根直径、引き抜き抵抗、根長距離、直線距離、変位量。

写真 1 掘り取り範囲



この調査を行ったのは、根の引き抜き試験が根の摩擦特性と引張強度を分離して評価するためには不可欠であるためである(M. Schwarz et al. 2010)。

斜面安定解析において根の補強効果は、全ての根が同時に最大強度を発揮すると仮定した Wu モデルで評価されてきた(T. H. Wu, 1979)が、実際に根の破断は個体ごとに異なる変位量で発生する確率的現象で、Wu モデルは補強効果を過大評価する傾向がある(島田, 2021)。本研究は根の破断確率を考慮した Weibull 生存関数を用いた「RBMw モデル(Root Bundle Model with Weibull survival function)」(M. Schwarz et al. 2013)を適用し、根の破断確率を Weibull 分布で標準化し、根系全体(Bundle)の補強強度を算出した。

4. 結果

調査対象の樹木は合計 150 本で、その結果は以下に示す。これを活用し、まず調査目的である植生同定を行った。神戸大学高比良響先生のもと分析の結果、植生がクスノキ群落であること、構成種については鳥散布種が比較的多く、孤立した都市の森らしいと結論付けた。

表1 毎木調査の結果(一部抜粋)

種名	本数	樹高(m) (平均)	胸高直径 (cm)(平均)	幹材積 (m <sup>3</sup> )(平均)	乾重量 (t)(平均)	地上部重 量(t)(平均)	地下部重 量(t)(平均)	本数の 割合	分類
ネズミモチ	57	4.9	5.8	0.010	0.006	0.007	0.029	0.38	常広
クスノキ	20	13.3	32.6	0.569	0.558	0.781	3.003	0.13	常広
ヒサカキ	12	3.7	5.7	0.007	0.004	0.005	0.021	0.08	常広
エノキ	9	9.9	19.4	0.243	0.150	0.209	0.804	0.06	落広
ウバメガシ	9	8.4	18.0	0.131	0.140	0.208	0.799	0.06	常広
トベラ	7	5.4	8.5	0.023	0.014	0.018	0.068	0.05	常広
ムクノキ	7	6.3	11.7	0.139	0.086	0.119	0.459	0.05	落広
アラカシ	6	8.2	12.4	0.076	0.075	0.110	0.424	0.04	常広
イヌビワ	5	4.5	11.7	0.006	0.003	0.004	0.017	0.03	落広
サザンカ	3	5.8	10.0	0.034	0.021	0.026	0.102	0.02	常広
ヤブニッケイ	2	8.6	11.3	0.046	0.029	0.036	0.139	0.01	常広

表 1 の分類欄から広葉樹林と分かる。一般的に胸高直径が小さい樹木は斜面補強強度が小さいことが知られているので、胸高直径が 10cm 以上の樹木に限りさらに分析を行った。

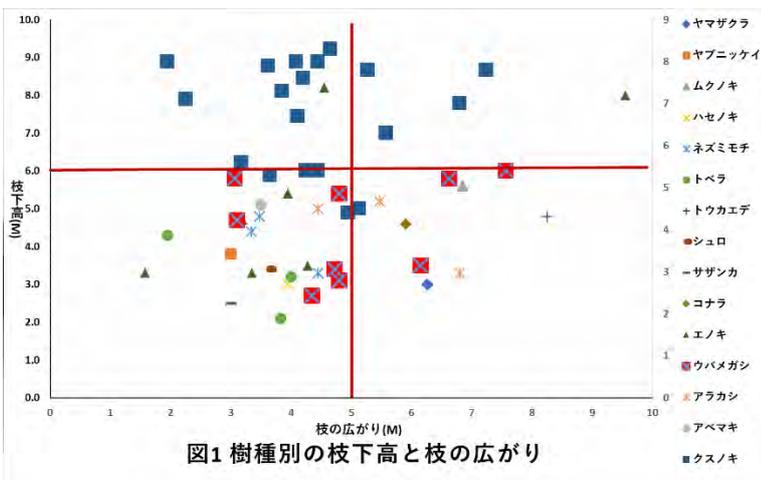
(注：常広は常緑広葉樹, 落広は落葉広葉樹を示す)

**表2 胸高直径10cm以上の樹木の結果(一部抜粋)**

樹種	本数	樹高 (m)(平均)	胸高直径 (cm)(平均)	枝の広がり (cm)(上下)(平均)	枝の広がり (cm)(水平)(平均)	枝下高 (m)(平均)
クスノキ	19	13.7	34.0	468	565	6.8
ウバメガシ	9	8.4	18.0	531	473	4.5
エノキ	6	12.3	26.6	488	475	5.5
トベラ	3	6.4	12.9	338	313	3.2
ネズミモチ	3	5.8	11.3	379	372	4.2
アラカシ	3	10.6	17.1	648	467	4.5
ムクノキ	2	14.0	27.4	595	680	7.1
サザンカ	2	7.1	13.0	395	343	2.6

表2から優占種はクスノキとウバメガシと判明し、根の掘り取り・引き抜き調査の対象樹木を決定した。断幹の有無を記録した42本の樹木のうち、断幹なしが15本、断幹ありが27本で、断幹がされていた樹木の割合は約62%だった。

また、断幹の有無による表面侵食のリスクの変化についてt検定を行ったところ、ウバメガシで断幹あり群と断幹なし群で枝下高に有意差があり、断幹により枝下高が低くなる影響を与えることが分かった。(なし:5.13m, あり:3.20m, t=2.86, p=0.024)



赤線は合計150本の枝の広がりや枝下高の平均を示す。(枝の広がり:4.56m, 枝下高:5.21m) クスノキは平均と比較して全体的に枝下高が高いため相対的に表面侵食リスクが高いと推定でき、ウバメガシは平均と比較して全体的に枝下高が低いため相対的に表面侵食リスクが低いと推定できる。枝の広がりについては、樹種別の特徴は見られなかった。

**表3 外れ値除外前後における測定精度の比較**

	全データ(n=150)	外れ値除外後(n=142)
平均誤差	0.692666667	1.272535
平均絶対誤差	5.754	4.585211
二乗平均平方根誤差	8.607543203	3.520963
誤差標準偏差	8.608370335	5.773848

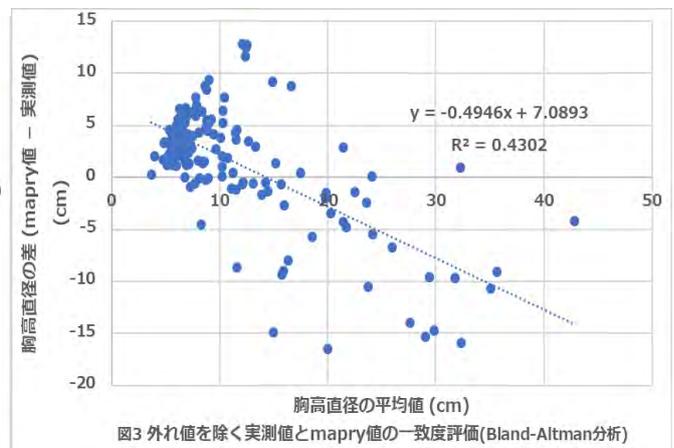
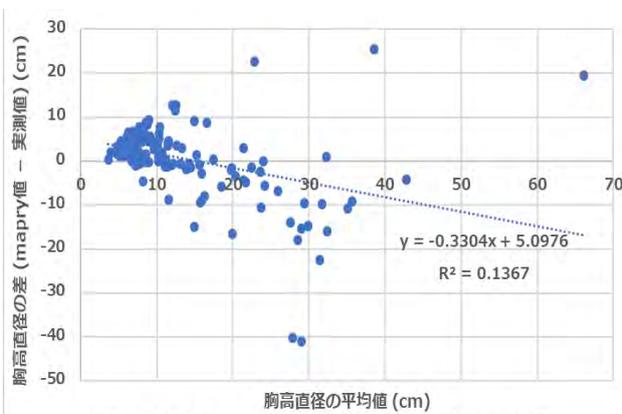


図2, 図3に示しているように全データ (n=150) の決定係数は低かったが (R<sup>2</sup>=0.14)、

Bland-Altman 分析に基づき外れ値 8 点を除外すると決定係数は 0.43 に向上した。表 3 から全体としてはわずかな過大評価(+0.69cm)だったが、ばらつき(8.61cm)は大きかった。特筆すべきは 10cm 以下の小径木は過大評価される一方、10cm 以上の樹木は過小評価される傾向が見られた点である。以上より、本アプリは 10cm 以下の若齢林では過大評価のリスクが高いが、10cm 以上の樹木では、過小に出る特性を考慮すれば利用の余地があると考える。

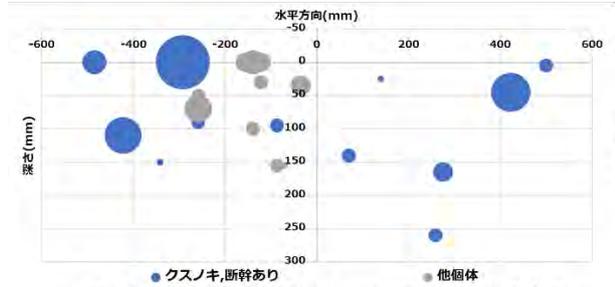


図4 クスノキ(胸高直径22.4cm)断幹あり 根の分布図

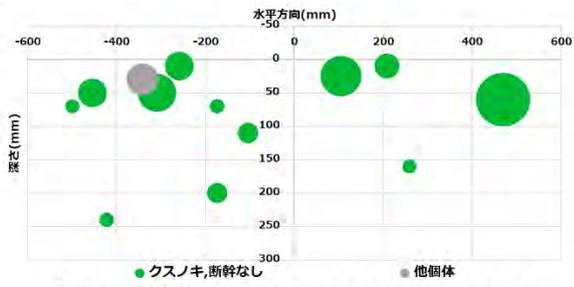


図5 クスノキ(胸高直径20.3cm)断幹なし 根の分布図

注: 根の分布図の円の大きさは根の太さに比例して表示

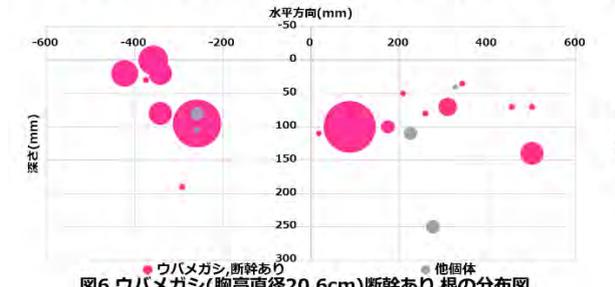


図6 ウバメガシ(胸高直径20.6cm)断幹あり 根の分布図

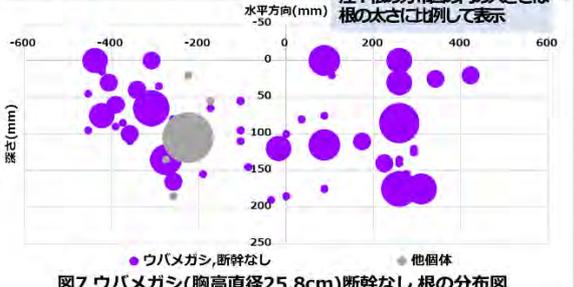


図7 ウバメガシ(胸高直径25.8cm)断幹なし 根の分布図

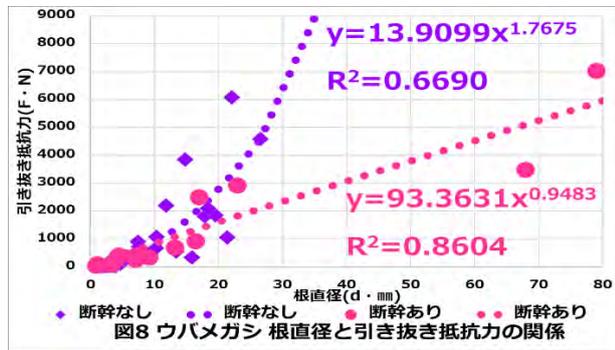


図8 ウバメガシ 根直径と引き抜き抵抗力の関係

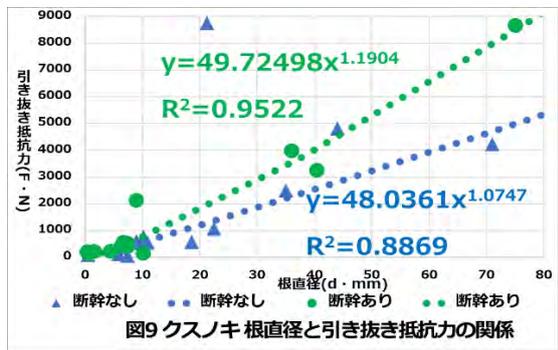


図9 クスノキ 根直径と引き抜き抵抗力の関係

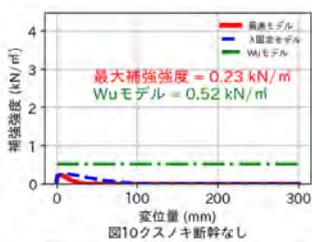


図10クスノキ断幹なし

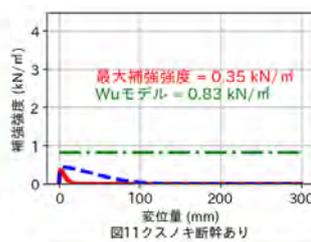


図11クスノキ断幹あり

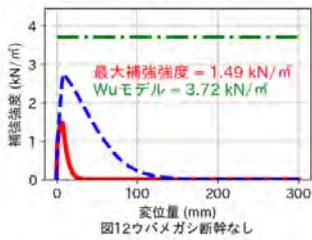


図12ウバメガシ断幹なし

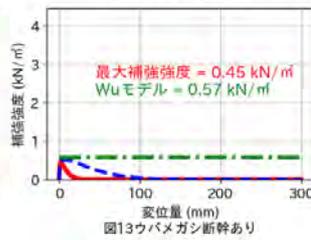


図13ウバメガシ断幹あり

図 4-7 が示すようにクスノキは断幹あり・断幹なし共に根の本数は 14 本で差がなく、ウバメガシは断幹ありが 21 本、断幹なしが 62 本で約 3 倍の差があった。図 8, 図 9 よりに根の引き抜き抵抗力は、根直径に対しべき乗関数に沿って根が太くなると加速度的に抵抗力が増す( $R^2 > 0.6$ )。特にウバメガシの断幹個体では、健全個体に比べて同一直径に対する抵抗力が著しく低下していた。これらの結果から断幹による地上部の損傷が地下部の根に影響を及ぼすと考察する。

図 10-13 に Wu モデルおよび RBMw モデルによる変位-補強強度曲線を示す。根の一律破断を仮定する Wu モデルは変位に関わらず一定の最大値を示すため、 $0.52\sim 3.72\text{kN/m}^2$  という高い値を示した。一方 RBMw モデルは、変位の増加に伴い最大補強強度に達した後、根の順次破断により急速に低下する挙動を示した。RBMw による最大強度は  $0.23\sim 1.39\text{kN/m}^2$  となり、Wu モデルの値の約  $2/5$  であった。 $\lambda$  固定モデルでは、RBMw モデルと比較して延性的な挙動が再現された。本調査でこのような興味深い結果が示されたので、今後はこの研究課題に継続して取り組み、さらに調査のサンプル数を増やし、研究発展に寄与することを展望する。

## 5. 考察

本研究で得られた知見は、六甲山系と共生する神戸市において、以下の 3 点の側面から緑に関する普及・啓発および実践的な環境防災活動に寄与できると考える。

### 1. 「防災機能を持つ緑」の科学的根拠の提示と樹種選定への応用：

本研究により、六甲山系に生育するクスノキとウバメガシが持つ表面侵食および表層崩壊を抑制する斜面安定化機能が定量的に明らかになった。特に RBMw モデルを用いた解析により、クスノキは断幹を行っても根系の補強強度が維持・向上されやすく、防災機能の持続性が高いことが示された。ウバメガシは、断幹なしの場合非常に大きい補強強度を持つことが分かった。これは、神戸市が推進する「災害に強い森づくり」において、「どの木を残し、どの木を植えるべきか」という植栽管理の意思決定に科学的な根拠を与えるものである。神戸市民やボランティア団体が行う植樹・育樹活動においてクスノキを「防災樹種」として推奨することやウバメガシについて断幹作業を行わないなど減災を意識した緑化活動の普及に役立つ知見である。

### 2. 里山や森林管理における具体的な指針の提供：

市民団体等による里山保全活動では、景観の確保や樹木更新のために伐採や断幹が行われることが多い。しかし、本研究の結果、ウバメガシにおいては断幹が根系の物理的強度を著しく低下させ、斜面安定性を損なうリスクがあることが判明した。この結果は、すべての木を「一律に」管理するのではなく、樹種特性に応じた適切な剪定・管理が必要であるという新たな視点を普及させるものである。例えば、「急傾斜地のウバメガシは強度維持のために断幹を避ける」といった具体的な管理マニュアルの策定や、市民への技術指導において重要な指針となり得る。

### 3. ICT 活用による市民参加型調査の可能性拡大：

本研究では、高校生が主体となり iPhone の LiDAR 機能搭載アプリ「mapry 林業」を用いることで、専門家でなくとも一定の精度で森林資源情報を取得できることを実証した。これは、高価な測量機器を持たない市民団体や学校教育現場でも、森林のモニタリングが可能であることを示唆している。緑の管理に DX（デジタルトランスフォーメーション）を取り入れることで、より多くの市民が身近な緑の調査・保全活動に参加できる土壌を作り、次世代の環境人材育成にも繋がるという点で、大きな普及・啓発効果が期待できる。

以上のことから、本研究は六甲山系の緑が持つ防災機能を可視化し、それを守り育てるための具体的な管理手法と「市民」が参加できる調査手法を提案するものであり、安全で豊かな神戸の緑環境の創出に貢献するものである。

## 6. 引用文献、参考文献

1. 岸野 翔, 六甲山にみる治山事業に関する研究—本多静六による植林計画を通じて—, 「神戸市緑の普及・啓発に寄与する調査・研究支援助成報告書 (2014)」, 2014.
2. 国土交通省 近畿地方整備局 六甲砂防事務所, 「六甲砂防事業概要-これからの六甲山を考える。」, pp. 7, 8, 13, 14.
3. 環境省 自然環境局 生物多様性センター, モニタリングサイト 1000-「コアサイト設定・毎木調査マニュアル」.
4. 森林立地学会 60 周年記念事業, 測定項目を見る「樹木の成長と森林バイオマス」, 2019.
5. 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所:「幹材積計算プログラム」.
6. 北海道ホームページ, 北海道水産林務部:「樹種別の気乾密度の値の例」.
7. 国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス, 「日本国温室効果ガスインベントリ報告書 (NID)」, 2025.
8. J. Poesen, S3 Surface erosion and vegetation ,Keynote lecture at SBEE 2021, 21-25 June 2021, Bern, Switzerland.
9. Bland JM, Altman DG. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. The Lancet. 1986; 327(8476): 307-310.
10. 林野庁, 水源の森をつくり育てる「森林の根系による表層崩壊防止機能について」, 2023.
11. 山瀬敬太郎, 伊東康人, 栃本大介, 藤堂千景, 日本生態学会第 58 回全国大会ポスター「スギ人工林の間伐が水平根分布に与える影響」, 2011.
12. T. H. Wu, W. P. McKinnell, D. N. Swanston, Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska, Canadian Geotechnical Journal, 1979, Volume16, Number1.
13. 島田博匡, RBMw を用いたスギ・ヒノキ人工林の水平根による補強強度の推定, 日本緑化工学会誌, 2021, 47 巻, 1 号, pp. 15-20.
14. M. Schwarz, F. Giadrossich, D. Cohen, Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function, Hydrol. Earth Syst. Sci., 2013, 17, pp. 4367-4377.
15. M. Schwarz et al, Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115, F4.
16. 日本地すべり学会, 『斜面防災危険度評価ガイドブック編集委員会, 斜面防災危険度評価ガイドブック-斜面と地すべりの読み解き方-』, 朝倉書店, 2021.
17. 堀大才, 絵でわかるシリーズ『新版絵でわかる樹木の知識』, 講談社, 2023.
18. 苅住昇, 『森林の根系特性と構造 バイオマス算定に向けた基礎解析』, 鹿島出版会, 2015.