

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 樹木の倒伏抵抗に寄与する根系の構造に関する研究
(Study on the contribution of root system architecture to overturning resistance of trees)

氏 名 藤堂 (何森) 千景

論 文 内 容 の 要 旨

日本は地震やそれに伴う津波の発生しやすい地域である。また台風や前線の停滞などにより大雨や集中豪雨がもたらされ、近年、国内の 1 時間あたり 50 mm 以上の大雨の年間発生回数は増加傾向にある。このような自然災害は、森林で土砂災害や大面積の倒木災害を引き起こす。このような災害に対して被害を可能な限り減らす減災の観点からも樹木の倒木化のメカニズムを解明する必要がある。

樹木の倒木や根返りに対する抵抗力 (倒伏抵抗力) は、立木の引き倒し試験で測定される引き倒しモーメントにより推定され、対象となる立木の材積、胸高幹直径 (DBH)、重量など地上部特性と関係性の強いことが明らかにされている。一方で、立木密度以外に同じ地上部特性をもつ樹木においても引き倒しモーメントが異なるなど地上部特性だけでは説明できない例がある。これらの場合、土壌の種類や水分など土壌条件や樹木の根系など地下部の構造が、引き倒しモーメントに関与していることが示唆される。樹木の根は、風などの物理的ストレスに対して構造を適応させることで、根返りに対する抵抗力を高める。このような根系構造の特性は、例えば土壌断面あたりの根断面積合計や、垂直根、水平根、斜出根といった根の成長方向による分類、根の本数や成長方向の傾きなどを用いて表現されてきた。しかし、野外に生育する樹木の根系構造と倒伏抵抗力との関係性および根系の寄与するメカニズムには未解明な点が多く、樹種や生育地で異なる根系構造の違いにより、それぞれの倒伏抵抗への寄与過程が異なることが推察される。

本研究の目的は、樹木の倒伏抵抗に根系構造がどのように寄与しているのかを明らかにすることとした。特に (i) 樹木の地上部特性と比較して水平根や垂直根など地下部の根系構造の違いが、倒伏抵抗にどのように寄与しているのか? (ii) 異なる根系構造をもつ樹種の間倒伏抵抗の差がどのように表れるのかを明らかにすることを具体的な目的とした。

2章では、国内の主要人工林樹種であるスギを対象として、根系構造のうち水平根の広がりに着目し、間伐が引き倒しモーメントに与える影響を明らかにすることを目的とした。間伐後17年経過した間伐区と無間伐の対照区を設定し、スギの引き倒しモーメントと水平根の広がり指標である根鉢半径を測定した。スギの材積を示す指標である樹高(H)×DBH²と引き倒しモーメントとの関係には強い正の相関が認められた。同じH×DBH²を持つスギでは間伐区の引き倒しモーメントが対照区に比べて有意に大きくなった。さらに間伐区の根鉢半径も有意に大きくなった。両区は同じ立地環境であり垂直根を示す指標に差が認められなかったことから、同じH×DBH²における引き倒しモーメントの両区間の差異には根鉢半径すなわち水平根の広がり関与していることが示唆された。

3章では、根系構造を構成する垂直根の深さと倒伏抵抗力の関係性を明らかにすることを目的とし、前半では垂直根の深さを示す簡易な指標の検討を行った。簡易な指標とは、樹木倒伏における回転中心の深さ(Dcp)である。垂直根の深さは根系の破壊的な掘り取りにより測定されるが、Dcpは引き倒し試験時の連続画像を解析することで推定可能である。対象樹種として日本の海岸林における主要樹種のクロマツを選択した。クロマツ対象木の引き倒しモーメントとDcpを計測した後、Dcpの値を検証するために根系全体の掘り取りにより垂直根の深さを計測した。その結果、Dcpと垂直根の深さの関係に有意な強い正の相関関係が認められ、Dcpが垂直根の深さを示す簡易な指標となることを明らかにした。

3章の後半では、津波による倒木被害が懸念されるクロマツ林において、垂直根の深さの倒伏抵抗力への寄与程度を明らかにすることを目的とした。調査林分として、クロマツの垂直根の異なる2林分、地下水位が高く汀線近くの海側クロマツ林(海側区)と、地下水位が低く汀線から離れたクロマツ林(陸側区)を設定した。引き倒しモーメントと重量モーメントの双方を考慮した倒伏モーメントと垂直根の深さ指標であるDcpとの関係性を検討した。両区の平均DBHに差はないものの、海側区の平均Hは陸側区のほぼ半分であった。倒伏モーメントとH×DBH²の関係に両区とも強い正の相関関係が認められたものの、両区の回帰直線に有意差は認められなかった。海側区ではHおよびH×DBH²の小さい個体が多く、倒伏モーメントの小さい個体が多かった。巨大地震で想定される津波水位やDBHを用いて算出された津波モーメントと両区の倒伏モーメントとを比較したところ、海側区では波高の低い津波でクロマツは倒伏することが予測された。一方、両区におけるクロマツの根鉢半径に有意差はないものの、陸側区のDcpは有意に大きかった。すなわち、海側区ではDcpおよび垂直根の深さが、高い地下水位のために浅くなり、倒伏抵抗力の小さい個体が多く存在した。本結果は、垂直根の深さにより樹木の倒伏抵抗が変化することを示唆した。

4章前半では、倒伏抵抗力に関連する根特性を3次元根系構造のデータから取得するため、3次元レーザスキャナで取得した根系の点群データから、根の3次元位置座標と直径で示される根のポイントデータを容易に得るための新たな手法を提案すること、さらにこの根のポイントデータを手動計測から算出された根特性値と比較し精度を検証することとした。3次元レーザスキャナは、樹木地上部へ適用されているものの、根系構造にはほとんど用いられてない。3次元レーザスキャナで根系は根の表面を表す点群データとして取得されるため、直径や長さなど根特性値を直接抽出することはできない。神経細胞形態の構造解析ために開発されたフリーソフトウェア **neuTube** を使用して、根系の点群データを根のポイントデータに変換し3次元構造を復元する方法を提案した。また3次元レーザスキャナ計測と手動計測法について、それぞれ復元された3次元根系構造を検証するため、根のポイントデータ、根の細り、幹中心からの水平及び深さ距離別の根断面積合計について比較した。その結果、本提案法によりそれぞれ両法で取得されたデータから復元された3次元根系構造、根特性である根のポイントデータおよび細りは良く類似し、ほぼ同様な精度が得られることが明らかとなった。幹中心からの距離別の根断面積合計は、幹中心からの水平距離が600 mm以上離れると2つの計測法で良く合致した。一方で、幹に近い距離の根断面積合計が計測法により異なった。これは、3次元レーザスキャナのレーザ光が幹付近内の根に届かず、幹近くの混みあった根の点群データが得られないためと推察された。

4章後半では、上記で提案された3次元根系構造データと引き倒しモーメントとの関係性について明らかにすることを目的とした。対象樹種は、根系構造の違いから斜出根型のスギ、水平根型のケヤキ、垂直根型のクロマツとした。3樹種の試験木について引き倒し試験を行い、その後、根系全体を掘り取り、手動計測により根系構造データを取得し、根特性を算出した。その結果、3樹種の掘り取りデータから復元された3次元根系構造は、樹種特性を示すそれぞれの根系型を良く反映していた。斜出根型のスギでは引き倒しモーメントと根鉢周囲の根断面積合計や垂直根の体積との間に強い相関が認められた。垂直根型のクロマツでは引き倒しモーメントと垂直根の体積の間に、個体数の少なさのため有意ではないものの正の相関が認められた。水平根型を示したケヤキでは引き倒しモーメントと垂直根の特性に相関は認められないものの、幹中心から1000 mmまでの水平根の体積との間に強い相関が認められた。これらの結果から、引き倒しモーメントに寄与する根系の部位が根系構造によって異なること、すなわち根系の倒伏抵抗に寄与するプロセスも異なることが明らかになった。

5章では、2章から4章までの内容を総括し、樹木の3次元根系構造と倒伏抵抗の関係性および今後の根系構造データ取得法における課題をまとめた。

樹木の根系構造は樹種によって異なる根系型をもち、その生育する環境に適応し変化する。斜出根型をもつスギでは、4章の結果から水平根および垂直根が双方とも倒伏抵抗に寄与するが、2章の結果から間伐による森林管理では水平根の成長が促進されることで倒伏抵抗を高めることが示唆された。垂直根型を持つクロマツでは、3章と4章の結果から垂直根の寄与すなわち深い垂直根ほど倒伏抵抗が高まるが、高い地下水位により垂直根の成長できない生育環境下では、クロマツは水平根型に根系構造を適応する可塑性を示していた。このような水平根型のクロマツでも、波高の低い津波に対しては垂直根型のクロマツと同じ程度の倒伏抵抗を持つことが明らかとなった。水平根型を持つケヤキでは、4章の結果から垂直根とは関係なく、水平根を土壌と緊縛し一体化させた根鉢を大きく作り上げることで倒伏抵抗を高めることが示唆された。

本研究では、実際に掘り取られた樹木個体根系から手動計測などにより取得された根系構造のデータを用いて3次元根系構造を復元し、さらに新たに提案した方法で根特性を抽出することで、倒伏抵抗に寄与する根系構造の特性を異なる根系型の3樹種で明らかにした。今後の課題として、効率的および非破壊的な根系構造のデータ取得法の発展や根系構造の倒伏抵抗へ寄与する詳細な過程の解明が、様々な根系型を持つ樹種で明らかにされる必要性を指摘した。本研究で解明された樹木の根系構造と倒伏抵抗に関する知見は、水平根の広がりをも促進する間伐施業や垂直根の伸長を促進する盛り土施業など、減災を念頭に置いた持続可能な森林管理のための整備提案に貢献できるであろう。