

## 別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

## 主 論 文 の 要 旨

論文題目 ヒノキ人工林における細根系の次数分類を用いた形態特性の変動  
(Variation in morphological traits of fine root systems determined by  
branch order-based classification in *Chamaecyparis obtusa* artificial forests)

氏 名 土居 龍成

## 論 文 内 容 の 要 旨

直径 2 mm 以下の根として定義される樹木細根は、土壌の養水分を吸収し樹幹に輸送する機能を持ち、土壌劣化など環境変動に対し変動する感受性の高い器官である。細根は生産枯死を繰り返すことで土壌に炭素を供給するため、森林生態系の炭素循環に寄与し、森林生態系の純一次生産 (NPP) における細根の寄与率は 33% も占めるといわれる。細根の NPP を算出するために必要な細根量や細根生産量に関し、世界中でデータが蓄積されてきた。既存研究では直径 2 mm 以下の根をすべて同じ 1 つの枠組みとする直径階級分類が用いられてきたが、近年、寿命の短い吸収機能を持つ吸収根と寿命の長い輸送機能を持つ輸送根に分ける機能分類が細根の NPP の精度を高めることが指摘された。しかし細根の機能分類は、全ての根について細根横断面の解剖学的な観察が必要で実用的な分類法ではない。このため直径階級分類よりも機能を反映した細根の分岐位置を考慮した次数分類を用いる方法が国際的に主流になりつつある。次数分類とは根端を 1 次根、1 次根と 1 次根が交わる基部側の根を 2 次根などとして分類する方法である。しかし、次数分類を用いた研究では 1 次根から 3 次根などを対象にしたものが多く、根端の 1 次根から細根定義の直径 2 mm に至るまでの細根系についてはあまり行われていない。また各樹種で 1 つの調査地を対象とした研究が多く、複数調査地すなわち降水量や気温などの環境条件や、酸性化や養分状態を反映する土壌などの林分条件といった森林の調査地間の違いによる樹木細根の次数形態特性について、樹種内の変動性を明らかにした研究は国際的にも限られている。

本研究は国内主要人工林樹種であるヒノキを対象とした。本研究の目的は (1) 細根の定義である末端根から直径 2 mm に至るまでの細根系全体の次数形態特性を

明らかにすること、(2) 細根系の次数形態特性が土壤酸性化など環境変動の感受性の指標となりうるかを明らかにすることの2点とした。

調査地は東海地方の林野庁酸性雨等森林被害モニタリング事業で設置された7つのヒノキ林とした。これらの調査地では土壤や細根特性が明らかにされてきた。1990年代と2010年代に酸性度など土壤化学特性を比較し、20年間でいずれの調査地でも、ヒノキの土壤酸性度は、ほぼ変化しないか酸性化した傾向であることが指摘されている。7つの調査地で実施されたヒノキ細根に関する先行研究で、ヒノキ細根量、根の形態指標で重量あたりの根長を示す比根長 SRL、細根呼吸速度について、土壤の酸性化程度を示す酸緩衝能の違いによる差は検出されていない。

3章では、ヒノキにおいて根端から直径2 mmに至る細根系全体の次数別形態特性を明らかにすることを目的として、ヒノキ3林分において土壤表層に生育する根端から直径2 mmに至るまでの無傷な細根系を丁寧に採取し次数分類を行った。その結果、12個の細根系から16351個の個根に解剖された。直径2 mmまでの細根系の最大次数は5次根から7次根であり、1次根から3次根および1次根から5次根が平均直径0.5 mm以下および1 mm以下の根であった。1次根から4次根の平均直径、2次根と3次根の根長は3林分間で有意に異なっていた。また、1次根から3次根の低次根の平均直径およびSRLには土壤無機態窒素濃度との間に負および正の相関が認められたが、4次根から6次根の高次根のSRLには土壤炭素濃度と正の相関が示された。本結果は、既存の直径階級別の細根量データに次数形態特性を適用することを可能とし、直径0.5 mm以下の細根量は1次根から3次根の根と対応することを示唆した。また、ヒノキ細根における次数別形態特性の種内変動を明らかにし、直径2 mm以下の細根系の低次根と高次根は、いずれも周囲の土壤条件と密接に関連していることが示唆された。

4章では、ヒノキ樹幹から水平距離に応じた細根系の次数別形態特性の変動性を明らかにすることを目的として、幸田ヒノキ林において樹幹から水平距離1 mおよび3 m地点における直径2 mm以下の細根系を採取し、根端から4次根に至るまでの細根系の次数分類を行った。その結果、各次数別の平均直径と根長に水平距離間で有意差は示されなかったが、水平距離1 m地点では細根系が3 m地点よりも小さくなる傾向にあった。各次数の分岐数を示す分岐比  $R_b$  は水平距離の違いで有意差は認められなかった。一方、根長あたりの分岐数を示す分岐頻度  $BI$  は水平距離1 m地点で3 m地点よりも大きい傾向にあり、1次根と2次根間、3次根と4次根間において水平距離の違いで有意差が認められた。水平距離別の1次根から4次根までの細根系の模式図より、水平距離1 m地点の細根系では3 m地点よりも分岐頻度  $BI$  は大きいことを視覚的に示した。本結果から同じ林分内のヒノキ細根系において樹幹からの水平距離の違いにより、1次根から4次根までの細根系を構成して

いる根数や分岐様式は変わらないものの、根長あたりの根端数である分岐頻度 BI を変化させることで、土壤養分の獲得戦略を変えている可能性が示された。

5章では、土壤酸性化に対するヒノキ細根系の次数別形態特性の変動性を明らかにすることを目的として、酸緩衝能が高い土壤と低い土壤に生育するヒノキ7林分において、無傷な1次根から4次根までの210の細根系を採取し、次数分類を行った。その結果、210の細根系は16657個根に解剖された。酸緩衝能の低い土壤における1次根から4次根の平均直径は酸緩衝能の高い土壤より有意に小さく、1次根から4次根の比根長 SRL は有意に高かった。1次根から3次根の総個根数は、酸緩衝能の高い土壤よりも低い土壤で有意に多かった。酸緩衝能の高低で次数別の平均直径、根長、分岐比 Rb を用いて作成した模式図より、酸性化が進んだ酸緩衝能の低い土壤では細く長く個根の多い細根系が生産されることが示された。酸緩衝能の低い土壤には Ca や Mg など塩基養分が少ないため、養分獲得効率の高い、細くて長い比根長 SRL の高い細根系であることが示唆された。野外の森林土壤条件、すなわち異なる土壤環境下における細根次数形態特性の反応を報告した研究は国際的に非常に少ないが、本章は土壤酸性化の指標である酸緩衝能について、異なる酸緩衝能を示す土壤に生育する樹木細根への影響を、次数分類を用いることで検出した最初の研究である。このことは、次数形態特性が土壤酸性化の樹木への影響の指標となる可能性を示唆した。

6章では、日本の主要な人工林樹種であるスギとヒノキについて、1次根から4次根までの細根系の次数別形態特性における樹種間差を明らかにすることを目的とした。東海地方ヒノキ7林分と中部関西地方のスギ4林分について、1次根から4次根までの無傷な細根系の次数別形態特性を解析し、樹種間で比較した。本章では、樹種ごとに1つの細根系あたりの直径階級別の総根長割合を算出した。その結果、ヒノキの1次根と2次根の平均直径はスギと比べて有意に小さく、1次根から4次根の平均根長、乾重においてヒノキがスギよりも大きかった。1次根から4次根までの細根系の模式図より、ヒノキ細根系はスギ細根系よりも1次根と2次根の直径が小さく、1次根と2次根間の分岐比が小さく、1次根から4次根の根長が大きいことが視覚的に示された。また、1つの細根系内における直径階級別の総根長において、ヒノキでは直径 0.3-0.4 mm の階級、スギでは直径 0.3-0.4 mm および 0.5-0.6 mm の階級を持つ総根長が長く、その多くは1次根であった。これらのことから4次根までの1つの細根系あたりで比較すると、ヒノキではスギと比べて根長が長いこと、土壤資源への接触表面積を大きくしていることが示唆された。ヒノキはスギと対照的に土壤中の養水分が不足しがちな山林の斜面中部から上部に植栽されることから、根長を伸ばし養水分を効率よく探索可能な形態としていることが示唆された。

7章では、3章から6章の結果を総括し、本結果の応用方法の提案や今後の課題をまとめた。本研究では、細根の定義である直径2 mmに至るまでのヒノキ細根系が最大7次根まで含まれ、1次根から3次根の低次根と4次根以上の高次根で関係性がみられる土壤特性が異なることから、根端から直径2 mmに至る細根系内の機能の違いが示唆された。また、樹幹からの水平距離や土壤酸緩衝能、土壤無機態窒素濃度の違いによる1次根から4次根までのヒノキ細根系の次数形態特性の変動性の結果から、次数分類を用いた形態特性は、土壤環境要因の変動に伴う細根形態の変動を検出することができる感受性指標となる可能性を示した。樹種間の比較においてヒノキがスギよりも養水分の不足する土壤に適応した形態をもつことを示唆した。これらの結果についていずれも定量的な次数形態特性から再構築する細根系の模式図を示すことで視覚的な理解を定性的に示すことを可能とした。さらに森林生態系の炭素循環への寄与率を示すための細根NPPの算出方法として、細根系の次数分類による直径階級別の総根長と次数別比根長SRLから推定される直径階級別総根乾重を用いる手法を提案し、吸収と輸送の異なる細根機能を付加する意味で、これまでの細根NPPの算出よりも精度を高める可能性を示した。今後の課題として、ヒノキでは吸収根と輸送根の効率的な判別法や、直径階級別細根データについて次数形態特性を用いたさらなる利用法、細根ターンオーバー評価の研究進展があげられた。本研究より様々な樹種における細根の次数形態特性の解明が、吸収や輸送という細根のもつ基礎的な機能から、森林における炭素動態評価の精度向上に貢献できる可能性が示された。