

学 位 論 文 題 名

高 CO₂環境下におけるカラマツ属の成長，年輪構造
および光合成特性に関する研究

学位論文内容の要旨

大気中CO₂濃度の上昇により気温が上昇し，生態系に大規模な変動が起こることが危惧されている。植物は光合成によってCO₂を固定する。特に樹木は長期間生育することや，CO₂濃度上昇に伴う光合成速度の増加が顕著なC₃植物であることなどから，大気中CO₂濃度上昇に対する樹木および森林の緩衝機能が期待される。これまでも高CO₂に対する樹木の生理反応に関する多くの報告があるが，高CO₂下で樹木内に固定されるCO₂の実質量を評価するためには，高CO₂下における光合成活性の変化と樹幹の成長量の変化との関連性を解析する必要がある。また，将来の高CO₂環境下における木材の材質の変動を予測するためにも，樹幹の成長や木部細胞の形態形成の変化を明らかにする必要がある。しかしながら，高CO₂下で形成される樹幹木部の組織構造変化に関する知見は極めて少ない。また，高CO₂に対する生理・成長反応は種の特性や土壤栄養塩量に依存するため，樹種や供給される栄養塩量の違いを考慮する必要があるが，これらの要因が樹木の成長や年輪構造に与える影響については知見が十分ではない。

そこで本研究では，北半球で広大な森林を形成するカラマツ属を供試木とし，以下の実験を行い，カラマツ属の高CO₂および栄養塩量に対する成長，年輪構造および光合成特性を解析した。まず，（1）日本産カラマツ（*Larix kaempferi*）の2年生苗木を異なるCO₂濃度（360 vpmまたは720 vpm）および異なる栄養塩条件（High Nutrient (N) またはLow N）を組み合わせた4条件下で約100日間生育させ，樹幹成長量，年輪構造および光合成活性の高CO₂に対する反応性を評価した。次に，（2）1生育期間における光合成活性と形成層活動の経時変化への高CO₂処理の影響を評価した。さらに，（3）3生育期間の高CO₂処理を行うことで長期間の高CO₂処理が年輪構造におよぼす影響を評価した。最後に，（4）同属種のシベリア産カラマツ（*Larix sibirica*）の2年生苗木に1生育期間の環境処理を行い，成長および年輪構造の変化を解析し，カラマツ属に共通した高CO₂に対する反応特性を考察した。本研究で得られた結果は以下に要約される。

（1）日本産カラマツ苗木における約100日間の環境処理の結果，通常CO₂下に比べて高CO₂下で樹高は小さく，樹幹地際部の樹幹直径は大きかった。このことは，高CO₂に対して頂端分裂組織と形成層細胞の反応が異なることを示している。樹幹形状への高CO₂への影響はHigh N下でより顕著であった。一方，樹幹直径²×樹高（D²H）や，個葉光合成速度×葉乾重量×比葉面積

（SLA）（全物質生産量，Total A_{growth}）にCO₂処理の影響は認められなかった。光合成を測定した時点における年輪幅，細胞数，細胞壁率，細胞壁厚にCO₂処理の影響は認められなかった。

一方、放射方向の細胞径が通常CO₂下に比べて高CO₂下で大きかった。細胞径の処理間の違いはルーメン径の変化に依存した。高CO₂ + High N下で年輪形成初期に細胞径の比較的大きな細胞が形成された個体が認められ、高CO₂による年輪構造の変化の可能性が示された。以上の結果より、処理開始後約100日目の時点では高CO₂による物質生産の促進は認められないが、高CO₂下において樹幹形状および年輪構造が変化する可能性が示された。また、高CO₂の影響は十分な栄養塩下でより顕著になることが明らかになった。

(2) 環境処理開始後約30, 50, 90 および110日目のTotal A_{growth}は、通常CO₂下に比べて高CO₂下で常に大きい傾向にあったが、高CO₂による物質生産の促進効果は経時的に減少した。樹幹形状にCO₂処理の影響は認められなかったが、処理開始早期の相対肥大成長率が通常CO₂下に比べて高CO₂下で大きかった。Total A_{growth}と各相対成長率との間に有意な相関関係が認められたことから、高CO₂による物質生産量の変化は、成長速度に影響することが明らかになった。一次壁拡大帯の細胞数は、30日目には通常CO₂下に比べて高CO₂下で多い傾向であったのに対し、90～110日目には通常CO₂下に比べて高CO₂下で少ない傾向を示した。生育CO₂濃度の違いによって細胞分裂や分化の経時変化のパターンが変化するといえる。以上の結果より、高CO₂濃度によって細胞分裂の頻度が増加し、肥大成長の経時変化のパターンに影響を与えることが明らかになった。

(3) 3生育期の処理終了後、樹高およびD²Hが通常CO₂下に比べて高CO₂下で小さかった。これは栄養塩要求性が高CO₂で変化したためと考えられる。樹幹直径は、処理1年目に通常CO₂下に比べて高CO₂下で増加したが、2, 3年目にはCO₂処理間の差は認められなかった。このため、樹幹形状が高CO₂処理によって変化した。この高CO₂下での形状変化はHigh N条件で顕著であった。根と地上部の乾重量比は高CO₂下で通常CO₂下に比べて増加したことから、光合成産物の各器官への分配が高CO₂処理で変化したといえる。高CO₂によって処理2, 3年目に形成された年輪幅は通常CO₂下に比べて狭い傾向にあった。細胞径が処理1年目において通常CO₂下に比べて高CO₂下で大きかったが、処理3年目には細胞形態へのCO₂処理の影響は認められなかった。以上の結果より、長期の高CO₂処理によって、樹幹形状が変化することが明らかになった。また、長期間生育させた場合、高CO₂処理によって必ずしも樹幹成長が促進されないことが示された。さらに、年輪構造への長期の高CO₂処理の影響はほとんど認められないことが明らかになった。

(4) 1生育期の処理終了時のシベリア産カラマツにおいては、樹高にCO₂処理間の違いは認められなかったが、樹幹直径は通常CO₂下に比べて高CO₂下で大きくなる傾向にあったことから、高CO₂下で日本産カラマツと同様に樹幹形状が変化した。シベリア産カラマツは両CO₂処理下で伸長成長率が一時的に低下した期間があり、その間は栄養塩の欠乏が起これにくいと考えられる。従って、シベリア産カラマツにおいては、日本産カラマツで認められた様な高CO₂下における伸長成長の抑制が起これなかったと考えられる。年輪幅は、通常CO₂下に比べて高CO₂下で広い傾向にあった。細胞壁率および細胞形態はCO₂処理間で変化しなかったが、年輪境界付近における細胞径が通常CO₂下に比べて高CO₂下で大きい傾向にあり、CO₂濃度の違いにより年輪構造が変動する可能性が示唆された。

以上の結果より、高CO₂処理の伸長成長への影響は種特性に依存する。一方、肥大成長は高CO₂処理によって促進される傾向がある。年輪構造は、1生育期間の高CO₂処理下では変化するが、長期間の処理では変化しないことが示された。さらに、高CO₂処理による物質生産量の増加は、材積の増加に直接は結びつかないことが明らかになった。本研究においてカラマツ属の高CO₂に

対する成長反応が個体および組織レベルで明らかになった。この知見により高CO₂環境下でのカラマツ属の炭素固定能の推定に大きく寄与すると考える。

学位論文審査の要旨

主査	教授	藤川清三
副査	教授	寺澤実
副査	教授	小池孝良
副査	助教授	船田良

学位論文題名

高 CO₂環境下におけるカラマツ属の成長，年輪構造 および光合成特性に関する研究

本研究は180ページ、6章からなる和文論文で、他に4編の参考論文が添えられている。

大気中 CO₂ 濃度の上昇による地球温暖化問題の解決のため、森林の CO₂ 吸収・固定能が期待されている。高 CO₂ 下で樹木に固定される CO₂ の実質量を評価するためには、高 CO₂ 下での樹幹の成長量や木部細胞の形態の変化を明らかにし、光合成活性の変化との関連性を解析する必要がある。しかしながら、高 CO₂ 下で形成される樹幹木部の組織構造変化に関する知見は少ない。また、種の特性和や土壌栄養塩量の違いが高 CO₂ 下における樹木の成長や年輪構造に与える影響についても知見が十分ではない。本研究では日本産およびシベリア産カラマツ苗木を供試木とし、CO₂ 濃度処理 (360 vpm と 720 vpm) と栄養塩量処理 (High N (Nutrient) と Low N) 下において1生育期間生育させた場合の樹幹成長量や年輪構造の変化を評価した。ついで、同環境処理下で3生育期間生育させた日本産カラマツの樹幹成長量や年輪構造の変化を評価した。さらに、日本産カラマツの光合成活性の経時変化を解析し、樹幹成長との関連性を評価した。

1 生育期間終了時の日本産カラマツでは、通常 CO₂ 下に比べて高 CO₂ 下で樹高が小さく、地際部の樹幹直径が大きかった。しかし、樹幹直径²×樹高 (D²H) に CO₂ 処理間の差は認められなかった。一方シベリア産カラマツでは、樹高に CO₂ 処理間の差は認められなかったが、高 CO₂ 下で樹幹直径が大きく、従って、D²H が大きい傾向にあった。すなわち、両樹種とも高 CO₂ 下で樹幹の形状が変化した。これは High N 下でより顕著であった。3 生育期間終了時の日本産カラマツでは、樹幹直径に CO₂ 処理間の差は認められなかったが、高 CO₂ 下で樹高および D²H が小さかった。また、高 CO₂ 下における樹高の抑制は High N 下で顕著であった。以上の結果より、十分な栄養塩下において短期間の高 CO₂ 処理でカラマツ属の肥大成長は促進されるが、材積の変化は種の伸長成長特性に依存するといえる。一方、長期間の高 CO₂ 処理では樹幹成長が抑制される傾向にあることが明らかになった。

1 生育期間における日本産カラマツの樹幹直径や D^2H の相対成長率は、通常 CO_2 下と比べて成長期間前期では高 CO_2 下で大きかったが、後期には高 CO_2 下で小さかった。この相対成長率の変化は、一次壁帯（形成層と細胞拡大帯）の細胞数の経時変化のパターンが CO_2 処理間で異なることに対応している。また、High N 処理でシュートの秋伸びが認められ、秋伸び後の樹高の相対成長率は通常 CO_2 下と比べて高 CO_2 下で小さかった。以上の結果より、高 CO_2 処理により樹幹の成長パターンが変化するといえる。

年輪幅、細胞壁率、仮道管細胞数、細胞壁厚については、両樹種とも CO_2 処理間の違いは認められなかった。一方日本産カラマツにおいて、通常 CO_2 下と比べて高 CO_2 下で放射方向の仮道管径が大きく、また両樹種とも成長期間初期に形成された仮道管径が高 CO_2 下で大きい傾向がみられた。しかしながら3 生育期間生育させた日本産カラマツでは、年輪構造に CO_2 処理間の違いは認められなかった。従って、短期間の高 CO_2 処理によって年輪構造が変化する可能性があるものの、長期間の高 CO_2 環境下では材質はほとんど変化しないといえる。

1 生育期間高 CO_2 下で生育した個葉の光合成反応に高 CO_2 への順化が認められた。しかし、生育環境下での個葉の光合成速度 (A_{growth}) は、通常 CO_2 下と比べて高 CO_2 下で常に大きい傾向にあった。一方、樹冠全体の物質生産量 (= 比葉面積 \times 葉乾重量 $\times A_{growth}$) の高 CO_2 下での増加は顕著でなかった。これは比葉面積が通常 CO_2 下と比べて高 CO_2 下で小さいことによる。従って、高 CO_2 下での日本産カラマツの CO_2 吸収量は大きく増加しないといえる。また、成長期間前期において、物質生産量と樹幹の成長速度との間に正の相関関係が認められたことから、高 CO_2 による光合成活性の変化は樹幹の成長速度への影響を介して、成長量に影響を及ぼすと考えられる。

本研究の結果より、高 CO_2 のカラマツ属の伸長成長への影響は種特性に依存するが、肥大成長は高 CO_2 処理によって変化しない、あるいは促進される傾向にあるといえるが、この変化には十分な栄養塩が必要である。また、1 生育期間など短期間の高 CO_2 処理で年輪構造が変化する傾向にあるが、長期間の高 CO_2 処理では変化は認められなくなり、高 CO_2 下において材質はほとんど変化しないといえる。さらに、高 CO_2 下での物質生産量の増加は顕著ではなく、また高 CO_2 下における樹幹の CO_2 固定能の増加は起こらないことが明らかになった。本研究により、将来の高 CO_2 環境下における森林の固定能の変化をより詳細に評価するための新しい知見が得られたと考える。

よって審査員一同は、矢崎健一が博士（農学）の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。