

大気中 CO₂濃度増加に伴う冷温帯落葉樹木の 炭素固定能力の変化に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、大気中の二酸化炭素濃度([CO₂])の上昇とそれに伴う地球温暖化が全球レベルでの社会問題となっている。森林は大気中の CO₂ を吸収し長期間貯留する機能を持つため、変動環境下での森林の CO₂ の貯留量変化を明らかにすることは、森林に於ける CO₂ 管理を行うための重要な資料となり得る。しかし、地球温暖化はさまざまな無機環境変化を引き起こすため、将来環境下での森林の応答を予測することは非常に難しい。先ず一つ一つの環境変化に対する応答を解明することが必要だと考えられる。そこで本研究では地球レベルで増加している大気中の[CO₂]に焦点を置く。そして、温暖化の影響が顕著とされる冷温帯地域の森林を対象とする。高 CO₂ 環境に対する冷温帯樹木の生理生態特性の変化を解明し、冷温帯林の CO₂ 貯留量の変化を予想することを目的とした。

本研究では、CO₂ 付加を自然に近い条件下で実施できる Free Air CO₂ Enrichment (FACE ; 開放系大気 CO₂ 増加)装置を用いた(北海道大学札幌研究林実験苗畑に設置)。なお、本 FACE は樹木を対象とするアジアで唯一の施設である。FACE 内の [CO₂]は 2040 年頃を想定して 500ppm とした(対照区+130ppm)。また、高 CO₂ 処理による植物の反応は土壌栄養条件によって異なるため、FACE 内の土壌を半分に区切り、片方を日本に広く分布している富栄養の褐色森林土、もう一方を北海道に一般的で貧栄養の火山灰土壌とした。対象樹種は、我が国の冷温帯地域に広く分布する落葉樹 11 種(遷移前期種: シラカンバ、ウダイカンバ、ケヤマハンノキ、カラマツ、遷移中期種: ミズナラ、ヤチダモ、ハルニレ、ハリギリ、遷移後期種: ブナ、シナノキ、イタヤカエデ)とした。2003 年春に 2 年生苗木を FACE 内に植栽し、2003 年 6 月から 2007 年 7 月まで CO₂ 付加を実施した。

樹木による CO₂ の固定は主に葉での光合成活動によって行われるため、まず個葉の光合成の変化に着目した(3 章)。高 CO₂ 環境への光合成応答は、種ごとの窒素利用特性の違いによって異なった。窒素を十分に得ることができ、各光合成系に適切に窒素を配分することができれば、光合成速度が継続的に増加することが認められた。しかし、十分に窒素を獲得できなかったり、窒素を各光合成系へ適切に配分できなかったりすると、光合成能力の低下が起こりやすく、光合成速度は期待するほど高くないことが解った。全般に、褐色森林土に比べて火山灰土壌では高 CO₂ 処理をしても光合成速度があまり増加しないことが示唆された。

炭素貯留に関する樹木の働きは、同化した炭素を非同化器官へ長期間蓄積すること、すなわち樹幹の成長もあげられる。[CO₂]上昇に伴う樹木の炭素貯留量の変化を評価するためには、樹幹の成長特性の変化を解明する必要がある。そこで 4 章では、長期間炭素を貯蔵することができる地上部の成長応答(樹幹成長の変化)に着目した。5 年間の調査の結果、高 CO₂ 環境下で生育する冷温帯落葉樹の樹幹成長の促進効果は、貧栄養の火山灰土壌下や、CO₂ の付加期間が長いと認められなくなることが解った。また、高 CO₂ 処理により伸長成

長を盛んに行うようになる種が多いこと、種間競争が顕著な状況でも成長を促進できるようになる種があることも判明した。

非同化器官である幹の炭素貯留を評価するためには、樹幹のサイズ変化だけでは不十分である。例えば、同じサイズの樹幹でも空隙の多い材では炭素貯留量が小さいというように、樹幹の質によっても CO_2 あるいは炭素量の炭素貯留量は異なる。つまり、樹幹内部構造の変化を明らかにすることが重要である。そこで 5 章では、材質に影響を与え得る樹幹内の道管構造（水分通道構造）に着目し、高 CO_2 処理による変化と、水分通道構造と深い関わりのある水利用特性（蒸散速度など）の変化を調べた。一般に高 CO_2 環境下では気孔が閉じ気味になり、蒸散速度が低下するが、本研究でも高 CO_2 処理による長期・継続的な水消費量の低下が認められた。また、個葉スケール、シュートスケール、個体スケールのいずれでも、総道管面積の低下が認められた。長期間の高 CO_2 処理によって、道管を流れる流速、流量の継続的な低下が起こり、その結果、新たに作られる水分通道構造に変化が生じたと考えられる。将来、大気中の $[\text{CO}_2]$ が上昇すると、このような水利用特性と水分通道構造の応答によって、樹幹の質が変化していく可能性が示唆された。3 章から 5 章の結果から、高 CO_2 環境下では冷温帯樹木の炭素固定量に変化が生じる可能性が高いことが示唆された。

では、樹木および群落内の CO_2 固定量は高 CO_2 環境下でどの程度変化するのであろうか。どの種に炭素固定量の著しい促進が認められるのか。6 章ではこれらの点に着目した。2007 年 7 月に実験サイト内の樹木を全種数本ずつ伐採し、現存量推定式を作成して実験サイト内全個体の地上部重量（同化器官重量、非同化器官重量）を推定した。そして、各樹木および群落の CO_2 貯留量を算出することで、 CO_2 上昇に伴う冷温帯林の CO_2 貯留量の変化を評価した。群落全体としての変化に着目すると、高 CO_2 処理によって褐色森林土でのみ CO_2 貯留量が増加した。高 CO_2 処理による影響がこのように土壤栄養依存であるという結果は、光合成の結果（3 章）や樹幹成長量の結果（4 章）と同様であった。すなわち、冷温帯林での炭素貯留量の増加は、富栄養条件下でのみ期待できる可能性が考えられた。次に種ごとの反応に着目すると、高 CO_2 処理によって著しく CO_2 貯留量が増加した種は、褐色森林土でシラカンバとハルニレであり、火山灰土壌ではハルニレのみであった。将来予測される高 CO_2 環境下ではこれら 2 種の CO_2 貯留が顕著になると考えられる。特にシラカンバは冷温帯地域の主に攪乱地に広く分布する種であるため、将来予測される高 CO_2 環境下では非常に重要な種である可能性が示唆された。

本研究により、東アジア冷温帯落葉樹林における高 CO_2 環境下での二酸化炭素の貯留量変化に関する知見が得られた。ここで、東アジア冷温帯落葉樹林の特徴を評価するため、他の地域で行われている FACE 実験の結果と比較した。各地域の FACE データをまとめると、世界規模（ただし温帯～冷温帯林のみ）での樹木地上部非同化器官への CO_2 蓄積量は、高 CO_2 環境下でおよそ 28% 増加する可能性が示唆された。本研究の結果では、群落スケールでみると、褐色森林土で 35% の増加し、火山灰土壌ではほとんど変化しなかった。以上の結果から、高 CO_2 環境下での東アジア冷温帯地域における代表的な落葉樹林の CO_2 貯留量は、褐色森林土で大きくなることが予想され、この増加は世界的に見ても大きいことが分かった。今後は、将来予測される環境下での森林の応答を精度高く評価するためにも、地上部・地下部の応答、土壤呼吸さらに $[\text{CO}_2]$ の増加と他の環境問題（気温の上昇、窒素沈着の増加、大気汚染物質の増加など）や病虫害等生物間相互作用との複合的な応答を解明することが必要と考えられる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 小 池 孝 良

副 査 教 授 笹 賀 一郎

副 査 教 授 平 野 高 司

副 査 准教授 澁 谷 正 人

副 査 教 授 船 田 良 (東京農工大学)

学 位 論 文 題 名

大気中 CO₂濃度増加に伴う冷温帯落葉樹木の 炭素固定能力の変化に関する研究

本研究は、総ページ 225 ページの和文論文で 8 章から構成され、図は 44 枚、表は 34 枚、引用文献の数は 197 である。他に参考論文 6 編が添えられている。

近年、大気中の二酸化炭素濃度([CO₂])の上昇とそれに伴う地球温暖化が全球レベルでの社会問題となっている。森林は大気中の CO₂ を同化し長期間貯留する機能を持つため、変動環境下での森林の CO₂ 固定能力(同化+貯留特性)変化を明らかにすることは、森林における CO₂ 管理を行うための重要な資料となり得る。本研究では高 CO₂ 環境に対する本邦冷温帯樹木の生理生態特性の変化を解明し、そこでの CO₂ 固定能力の変化を評価することを目的とした。

本研究では、CO₂ 付加を自然に近い条件下で実施できる Free Air CO₂ Enrichment(FACE)装置を用いた(北海道大学札幌研究林実験苗畑に設置)。FACE 内の [CO₂]は 2040 年頃を想定して 500ppmv とした(対照区+130ppmv; 対照区約 370ppm)。また、FACE 内土壌を半分に区切り、片面を本邦に一般的な富栄養の褐色森林土、もう片面を北海道に特徴ある貧栄養の火山灰土壌とした。対象樹種は、光要求性に特徴のある落葉樹 11 種(光要求性のシラカンバ、ウダイカンバ、ケヤマハンノキ、カラマツ、中間のミズナラ、ヤチダモ、ハルニレ、ハリギリ、耐陰性のブナ、シナノキ、イタヤカエデ)とした。2003 年春に 2 年生苗木を FACE 内に植栽し、2003 年 6 月から 2007 年 7 月まで CO₂ 付加を実施した。

樹木による CO₂ 同化は葉の光合成活動によって行われるため、まず個葉の光合成の変化に着目した。全般に、褐色森林土に比べ、火山灰土壌では高 CO₂ 処理をしても光合成速度があまり増加しないことが示唆された。

CO₂ 固定に関する樹木の働きは、同化した CO₂ を非同化器官へ長期間貯留す

ること、すなわち樹幹の成長として把握した。高 CO₂ 環境下で生育する冷温帯落葉樹の樹幹成長の促進効果は、貧栄養の火山灰土壌下や、CO₂ の付加期間が3年目から認められなくなった。

非同化器官である幹の CO₂ 貯留を評価するためには、材質の変化を明らかにすることが重要である。そこで、材質に影響を与え得る樹幹内の道管構造（水分通道構造）に着目し、高 CO₂ 処理による変化と、水分通道構造と深い関わりのある水分通道機能（蒸散速度など）の変化を調べた。高 CO₂ 処理によって水分通道機能および総道管面積の低下が認められた。長期間の高 CO₂ 処理によって、道管の流量の継続的な低下が起こり、その結果、木部ばかりでなく葉柄部に明瞭であったが、新たに作られる水分通道構造に変化が生じたと考えられる。

東アジア冷温帯落葉林の特徴を評価するためには、高 CO₂ 環境下で各樹木の CO₂ 貯留量がどの程度変化するか明らかにすることが必要である。そこで各樹木および群落の CO₂ 貯留量を算出して、CO₂ 上昇に伴う冷温帯林の CO₂ 貯留量の変化を評価した。群落全体としての変化に着目すると、高 CO₂ 処理によって褐色森林土でのみ CO₂ 貯留量が増加した。種ごとの反応に着目すると、高 CO₂ 処理によって CO₂ 貯留量が増加した種はシラカンバとハルニレであった。

本研究により、北海道の冷温帯落葉樹林における高 CO₂ 環境下での CO₂ 固定機能変化に関する知見が得られた。ここで、北海道を代表地として東アジア冷温帯落葉樹林の特徴を評価するため、他地域で行われている FACE 実験の結果と比較した。各地域の FACE データをまとめると、地上部非同化器官重量の高 CO₂ 処理による増加率は+28%であった（温帯～冷温帯林の世界平均）。また、札幌 FACE における高 CO₂ 処理による変化は褐色森林土でのみ認められ、その増加率は+35%であった。以上の結果から、高 CO₂ 環境下での東アジア冷温帯地域における代表的な落葉樹林の CO₂ 貯留量は、褐色森林土において世界平均と同等に増加することが見込まれる。今後は、将来予測される環境下での森林の CO₂ 固定能力を精度高く評価するためにも、土壌呼吸など介して根や土壌生態系の応答を解明することが必要だと考えられる。

本研究では、CO₂ 濃度上昇の影響を個葉から個体、群落スケール別に評価することで、各樹木の生理生態的な応答を詳細に解明することができた。また、冷温帯を構成する代表的樹種の将来環境下での保全管理に関する指針を与えた。得られた成果は学術的に貴重なものであり、その応用のための基礎資料としても高く評価される。よって審査員一同は、江口則和が博士（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。