

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25292092

研究課題名(和文) 高CO<sub>2</sub>環境下におけるスギのCO<sub>2</sub>吸収機能および材形成へのオゾン影響の解明研究課題名(英文) Effects of ozone exposure on photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake and wood formation of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) seedlings grown under elevated CO<sub>2</sub>

研究代表者

北尾 光俊 (Kitao, Mitsutoshi)

国立研究開発法人 森林総合研究所・植物生態研究領域・室長

研究者番号：60353661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：開放型二酸化炭素オゾン暴露装置内に植栽したスギ6品種のクローン苗を対象として、高CO<sub>2</sub>ならびに高オゾン環境が成長、光合成特性および材形成に与える影響を調べた。二生育期間の高CO<sub>2</sub>・オゾン処理によりスギ6品種の根を含めた乾物成長量はオゾンにより増加する結果となった。ガス交換測定により光合成特性を調べた結果、生育環境のCO<sub>2</sub>濃度で測定した光飽和の光合成速度は高CO<sub>2</sub>処理区で高い値を示したが、光合成能力の指標であるルビスコ活性は高CO<sub>2</sub>処理により低下した。処理2年目に形成された木部の容積密度は、クローン間での差異が大きい一方で、高CO<sub>2</sub>および高オゾン処理による影響は認められなかった。

研究成果の概要(英文)：To evaluate the physiological and morphological responses in clones of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) to the future atmospheric environment, we investigated the effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> concentrations on growth, photosynthesis and wood property in the seedlings of 6 clones of Japanese cedar grown under a free-air fumigation system. Total biomass including root biomass increased under elevated O<sub>3</sub> across the 6 clones. Light-saturated photosynthetic rates measured under the growth CO<sub>2</sub> conditions were significantly higher in the elevated-CO<sub>2</sub>-grown plants than the ambient-CO<sub>2</sub>-grown plants despite of O<sub>3</sub> treatments. However, the maximum rates of Rubisco carboxylation decreased in the plants grown under elevated CO<sub>2</sub>. There were no significant effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on the density of wood, suggesting that both treatments might have little influence on the wood quality of Japanese cedar clones.

研究分野：樹木生理学

キーワード：高CO<sub>2</sub> 高オゾン スギ品種 光合成 幹材質

## 1. 研究開始当初の背景

地球温暖化の原因となる温室効果ガスである CO<sub>2</sub> 濃度は年々上昇を続けている。高 CO<sub>2</sub> 条件を野外で再現する開放型 CO<sub>2</sub> 付加装置 (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE)) を用いた研究により、CO<sub>2</sub> 濃度の上昇は植物の光合成を促進し、成長を増加させることが報告されている。しかしながら、高 CO<sub>2</sub> 環境に対する反応は樹木、牧草、穀物などの植物群により大きく異なるだけでなく、樹木の中でも大きな樹種間・品種間差が存在する。

現在、高 CO<sub>2</sub> との複合ストレスで最も重要視されているのは大気汚染物質であるオゾンの影響である。なぜなら、オゾンは化石燃料の燃焼により生じる窒素酸化物を前駆体としており、CO<sub>2</sub> 濃度の上昇とオゾン濃度の上昇は平行して進行すると考えられるからである。

CO<sub>2</sub> 濃度の上昇は植物の光合成を促進する一方、オゾン濃度の上昇は光合成を阻害する。そのため、オゾンはそれ自体が温室効果ガスとして働くが、オゾンの増加により地球上の植物の CO<sub>2</sub> 吸収量が抑えられることで、温暖化をさらに加速する可能性が示唆されている。

我が国が位置する東アジア地域は急速な経済成長にとともに、将来的にオゾン濃度が急激に上昇するオゾン汚染のホットスポットとなることが予測されている。スギは我が国の主要な造林樹種として、林業における木材生産および CO<sub>2</sub> 吸収源として最も重要な樹種であるにもかかわらず、スギを対象とした野外の CO<sub>2</sub> およびオゾンの暴露試験はこれまでに存在しない。将来環境における CO<sub>2</sub> 削減機能の評価のため、高 CO<sub>2</sub>・高オゾンがスギの炭素固定能に及ぼす影響の解明が喫緊の課題である。

## 2. 研究の目的

従来の高 CO<sub>2</sub> の研究は人工気象室においてポット苗を用いたものが主流であった。ポット苗を用いる場合は根の成長が制限されるために、野外に生育するものと反応が異なることが指摘されている。そのため、開放型 CO<sub>2</sub> 付加施設である FACE やオープントップチャンバーを用いて地面に直植した樹木を使つての研究が進められている。我が国においては、樹木を対象とした FACE として唯一北海道大学の施設が稼働しているが、CO<sub>2</sub> 単独の付加施設である上、寒冷地に位置することからスギは実験対象となっていない。我が国の林業において、スギは主要な林業樹種であり、温室効果ガス削減のために林木育種センターによる「炭素固定能力の高い品種」の開発が進められている。将来環境におけるスギの温室効果ガス削減機能の評価するために、野外条件におけるスギ品種の光合成特性及び光合成産物の分配に関する高 CO<sub>2</sub>・オゾン

応答の解明が必要である。そこで、本研究課題では、森林総合研究所が保有する日本で唯一の開放型 CO<sub>2</sub>・オゾン暴露装置により、将来予測されている高 CO<sub>2</sub>・高オゾン環境を野外条件で再現し、スギ品種の光合成による CO<sub>2</sub> 吸収機能および、材形成に関わる光合成産物の分配への影響を解明することを目的とした。

## 3. 研究の方法

森林総合研究所実験林苗畑に設置した開放型 CO<sub>2</sub>・オゾン暴露装置では、2.5 (幅) × 2.5 (奥行) × 2 m (高さ) のフレームの周囲に設置したチューブから CO<sub>2</sub> およびオゾンを供給し、高 CO<sub>2</sub>・高オゾン環境を再現した。制御条件は、通常大気 (CO<sub>2</sub> 濃度約 380 ppm、平均オゾン濃度約 30 ppb、以下 control とする) に対して、高 CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> 濃度約 550 ppm、以下 eCO<sub>2</sub> とする)、高オゾン (通常大気 of 2 倍に設定、生育期間中の平均オゾン濃度約 50 ppb、以下 eO<sub>3</sub> とする) および高 CO<sub>2</sub>+オゾン (以下 e(CO<sub>2</sub>+O<sub>3</sub>) とする) の 4 処理区を設けた。暴露装置内の土壌に直接植栽することが可能であるため、ポット苗実験と異なり、根の成長を制限しない状態での付加試験が行えることが特徴である。各処理に対してフレーム 3 基で繰り返しとした。

供試木として、スギ精鋭樹の二年生挿し木苗を用いた。対象とした精鋭樹は、筑波 1、上都賀 5、上都賀 7、郷台 1、天竜 11、下高井 13 の 6 クローンである (表 1)。これらを各チャンバーに 1 本ずつ植栽した。暴露処理は 4 月より開始し、成長期間である同年 10 月まで行った。冬季は暴露処理を停止し、翌年 4 月から 10 月まで 2 年目の暴露処理を行った。

表 1 スギ 6 クローンの成長特性

| 名称     | 読み    | 出身県 | 幹重量<br>の大きさ<br>の品種 | 10 年次<br>樹高<br>(m) |
|--------|-------|-----|--------------------|--------------------|
| 下高井 13 | しもたかい | 長野県 | ○                  | 5                  |
| 上都賀 5  | かみつが  | 栃木県 | ○                  | 4                  |
| 上都賀 7  | かみつが  | 栃木県 | ○                  | 4                  |
| 筑波 1   | つくば   | 茨城県 |                    | 3                  |
| 郷台 1   | ごうだい  | 千葉県 |                    | 3                  |
| 天竜 11  | てんりゅう | 静岡県 |                    | 2                  |

2 年目 7 月に、暴露装置内で水切りした当年生シュートを実験室に持ち帰り、光合成蒸散測定装置 (LI-6400、Li-Cor、USA) を用いて光合成ガス交換測定を行った。測定時の光強度は 1500 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> とした。測定時の CO<sub>2</sub> 濃度は CO<sub>2</sub> 処理濃度である 380、550 ppm に加えて、200、100 ppm での測定を行い、ルビスコの最大カルボキシレーション速度 (V<sub>c,max</sub>) を推定した。測定後のシュートは投影面積と乾燥重量を測定した。

2 生育期間処理を行った個体は、2014 年

秋に刈取り、堀取りを行い、地上部、地下部に分けて乾燥重量を測定した。

幹材質の指標として容積密度の測定を行った。2014年に形成された主軸の元口部分より1 cm長程度の小片を採取した。樹皮を取り除き、蒸留水に浸漬して脱気して飽水状態にした後、置換法で体積を測定した。その後70 °Cのオーブンで2日以上乾燥させて重量を測定し、これらより容積密度を求めた。

#### 4. 研究成果

##### (1) 高 CO<sub>2</sub>・オゾンが成長に及ぼす影響

成長量の指標として、根も含めた個体の全乾物重を用いた。2生育期間処理を行った結果、6クローン全体としては、高 CO<sub>2</sub>によるスギ苗木の成長量への影響は認められなかった。一方、オゾン処理により部分的であるが、成長量が増加する傾向がみられた(図1、 $p=0.0845$ )。オゾンとクローン間には相互作用が認められた( $p<0.01$ )。クローンごとの成長量の反応を調べると、成長量の大きい下高井13ではオゾンにより有意に成長が促進された。筑波1では部分的に( $p=0.0873$ )オゾンによる成長促進が認められた。一方、郷台1では高 CO<sub>2</sub>単独区でのみ成長促進が認められたが、上都賀7では高 CO<sub>2</sub>処理により部分的に成長が低下する結果となった(図1)。高オゾンにより成長が促進される現象は、ミズナラ、コナラを高 CO<sub>2</sub>・オゾン環境で生育させた実験においても報告されている。

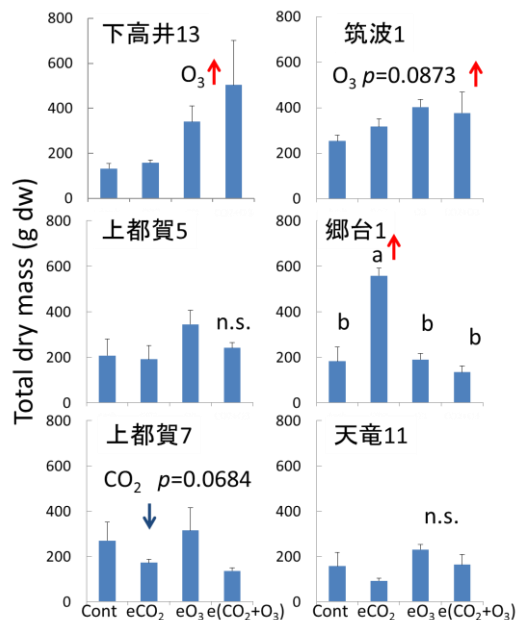


図1 高 CO<sub>2</sub>・オゾンがスギ6クローンの成長量に及ぼす影響。成長量の指標として、根の重量を含めた総乾重量 (Total dry mass) を用いた。

地上部：地下部比への高 CO<sub>2</sub>・オゾンの影響を調べた結果、6クローン全体としては、高 CO<sub>2</sub>処理によって地上部の割合が低下する傾向が見られた(図2、 $p<0.01$ )。高 CO<sub>2</sub>

は地上部：地下部比に直接影響は与えないが、成長の促進による土壌養分の不足により、結果として地下部への分配が多くなり、地上部：地下部比が低下することが知られている。本研究において、高 CO<sub>2</sub>処理で地上部：地下部比が低下した原因として、土壌養分の不足が考えられる。

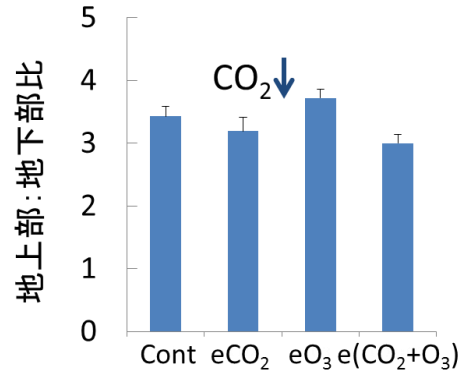


図2 高 CO<sub>2</sub>・オゾンがスギ6クローンの地上部：地下部比に与える影響。データは6クローンすべての処理区ごとの平均値である。

##### (2) 高 CO<sub>2</sub>・オゾンが光合成に及ぼす影響

生育環境下での光合成の指標として、それぞれの生育 CO<sub>2</sub>濃度で光飽和の光合成速度を測定した。高 CO<sub>2</sub>処理区で生育し、高 CO<sub>2</sub>条件(550 ppm)で測定したクローンの光飽和光合成速度は、通常大気で生育し、通常大気条件(380 ppm)で測定したクローンより高くなる傾向が見られた(図3、 $p<0.01$ )。

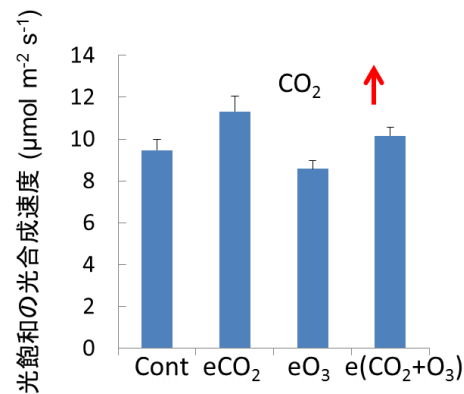


図3 高 CO<sub>2</sub>・オゾンが光飽和の光合成速度に及ぼす影響。光合成速度は光強度 1500 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>の下、それぞれの個体が生育する CO<sub>2</sub>濃度で測定した。

一方で、光合成の能力を示す指標であるルビスコの最大カルボキシレーション速度( $V_{c,max}$ )は、高 CO<sub>2</sub>処理によって低下した(図4、 $p<0.001$ )。このことは、高 CO<sub>2</sub>処理区において光合成のダウンレギュレーションが生じていることを示唆している。オゾン処理による影響は、光飽和光合成速度にも、 $V_{c,max}$ にも認められなかった。一般には、オゾンによって光合成活性は低下することが

知られており、本研究の結果は、スギがオゾンに対して生理的に強い耐性を持つことを示唆するものである。

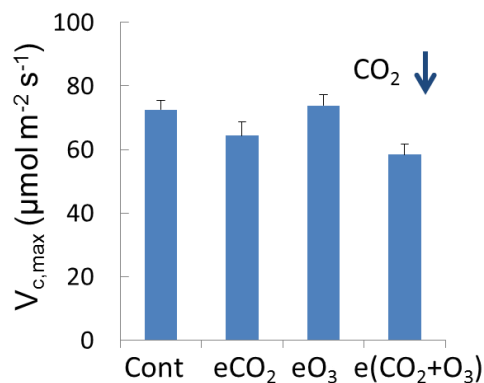


図4 高CO<sub>2</sub>・オゾンがルビスコ活性 (V<sub>c,max</sub>) に及ぼす影響。

### (3) 高CO<sub>2</sub>・オゾンが材質に及ぼす影響

処理2年目に形成された木部の容積密度は、クローン間での差異が大きい一方で、クローン内での処理による差異は認められなかった。従って、苗木の時点におけるスギ容積密度はクローンによって規定され、高CO<sub>2</sub>およびオゾンが材質に与える影響は小さいと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4件)

- ①北尾光俊、飛驒剛、江口則和、飛田博順、宇都木玄、上村章、北岡哲、小池孝良、Light compensation points in shade-grown seedlings of deciduous broadleaf tree species with different successional traits under elevated CO<sub>2</sub>, Plant Biology, 査読有、Vol. 18, 2016, pp. 22-27, doi:10.1111/plb.12400
- ②北尾光俊、矢崎健一、武津英太郎、飛田博順、小松雅史、丸山温、小池孝良、Mesophyll conductance in leaves of Japanese white birch (*Betula platyphylla* var. *japonica*) seedlings grown under elevated CO<sub>2</sub> concentration and low N availability, Physiologia Plantarum, 査読有、Vol. 155, 2015, pp. 435-445, doi:10.1111/ppl.12335
- ③北尾光俊、小松雅史、矢崎健一、北岡哲、飛田博順、Growth overcompensation against O<sub>3</sub> exposure in two Japanese oak species, *Quercus mongolica* var. *crispula* and *Quercus serrata*, grown under elevated CO<sub>2</sub>, Environmental Pollution, 査読有、Vol. 206, 2015, pp. 133-141

doi:10.1016/j.envpol.2015.06.034

- ④矢崎健一、飛田博順、北岡哲、平岡裕一郎、北尾光俊、高CO<sub>2</sub>および高オゾン環境下におけるスギ精英樹クローン6品種の幹成長、関東森林研究、査読有、66巻、2015、pp. 163-166

〔学会発表〕(計 4件)

- ①矢崎健一、飛田博順、平岡裕一郎、小笠真由美、北尾光俊、高CO<sub>2</sub>および高オゾン環境下で生育したスギ精英樹苗木の成長と容積密度の変化、日本木材学会大会、2016年3月27日、名古屋大学
- ②北尾光俊、矢崎健一、北岡哲、飛田博順、平岡裕一郎、二酸化炭素とオゾン濃度の増加がスギ6品種の光合成と成長に与える影響、第126回日本森林学会大会、2015年3月27日、北海道大学
- ③飛田博順、小松雅史、矢崎健一、北岡哲、北尾光俊、Effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on photosynthesis and biomass allocation in tree seedlings native to Japan, 9th Air Pollution & Global Change Symposium, 2014年6月10日、Asilomar Conference Grounds, USA
- ④飛田博順、小松雅史、矢崎健一、北岡哲、北尾光俊、高CO<sub>2</sub>・オゾン環境が樹木の成長に与える影響、第125回日本森林学会大会、2014年3月29日、大宮ソニックスティ

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

北尾 光俊 (KITAO Mitsutoshi)  
国立研究開発法人森林総合研究所・植物生態研究領域・室長  
研究者番号：60353661

### (2) 研究分担者

飛田 博順 (TOBITA Hiroyuki)  
国立研究開発法人森林総合研究所・植物生態研究領域・主任研究員  
研究者番号：10353781

矢崎 健一 (YAZAKI Kenichi)  
国立研究開発法人森林総合研究所・植物生態研究領域・主任研究員  
研究者番号：30353890

平岡 裕一郎 (HIRAOKA Yuichiro)  
国立研究開発法人森林総合研究所・林木育種センター・室長  
研究者番号：50370862