

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24710027

研究課題名(和文) 大気環境の変化が優良造林種グイマツ雑種F1の温暖化低減能力に与える影響

研究課題名(英文) Effects of changes in atmospheric environment on the mitigation capacity for global warming of hybrid larch F1

研究代表者

渡辺 誠 (Watanabe, Makoto)

東京農工大学・(連合)農学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50612256

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、重要な造林樹種であるグイマツ雑種F1を対象として、温暖化低減能力に対する人間活動に由来する大気環境の変化(大気CO<sub>2</sub>濃度の増加、対流圏オゾンおよび窒素沈着)の影響を調べた。大気CO<sub>2</sub>の増加によって、温暖化低減能力の指標である成長や光合成は増加したが、オゾンによってそれらが低下した。窒素沈着の影響は土壌条件によって異なった。以上の結果より、グイマツ雑種F1の温暖化低減能力を評価するには、人間活動に由来する大気環境の変化を考慮する必要があることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We studied the effects of human activity-induced changes in atmospheric environment (elevated CO<sub>2</sub>, nitrogen deposition and tropospheric ozone) on growth and photosynthesis of hybrid larch F1, which is an important afforestation tree species. We found enhancement of growth and photosynthetic activity under elevated CO<sub>2</sub>, whereas ozone induced negative impact on them. Effects of nitrogen deposition was highly depended on soil type. These results suggest that it is important to consider the change of atmospheric environment by human activity for evaluating the mitigation capacity of hybrid larch F1 against global warming.

研究分野：環境科学

キーワード：グイマツ雑種F1 高CO<sub>2</sub> オゾン 窒素沈着 温暖化低減

## 1. 研究開始当初の背景

(1) カラマツ属はユーラシア大陸と北アメリカ大陸の北方圏の広域に渡って優占しており、CO<sub>2</sub> 吸収を介して地球温暖化の低減に重要である。日本国内では、本州中部から北海道にニホンカラマツが移入され、主要造林樹種となったが、病獣害に弱いという問題があった。これを克服するために開発されたグイマツ雑種 F<sub>1</sub>(グイマツ×ニホンカラマツ)の精英樹は、成長が速く、先枯れ病や野鼠の食害に強い品種である。2008年7月に開催された北海道洞爺湖サミットの記念植樹に使用された事からも、北海道だけでなく世界的にも温暖化対策に期待が寄せられている樹種といえる。

(2) 再生可能な資源である森林バイオマスの積極的な利用は、温室効果ガス排出削減において重要な役割を果たす。一方、森林の成長過程においては、樹木による大気 CO<sub>2</sub> の吸収以外にも温室効果ガスの収支が存在する。そのため、森林バイオマス利用による温室効果ガス排出量削減を考えるにあたって、それら森林自体の温室効果ガス収支の把握は重要である。樹木は光合成によって獲得した炭素の一部を揮発性有機化合物(Volatile Organic Compounds, VOC)として大気に放出する。一方、森林土壌では CO<sub>2</sub> や亜酸化窒素の放出およびメタンの吸収が起こっている。したがって、森林の温暖化低減能力を適切に評価するには、樹木と生育土壌の両方において温室効果ガスの収支を解明しなくてはならない。

## 2. 研究の目的

本研究では、有望な造林樹種であるグイマツ雑種 F<sub>1</sub> の温暖化低減能力に対する高 CO<sub>2</sub>・高オゾン・高窒素沈着の影響を調べる。樹木の CO<sub>2</sub> 吸収および VOC 放出、そして土壌における温室効果ガスの収支を同時評価することにより、グイマツ雑種 F<sub>1</sub> 林の温暖化低減効果を多面的に解析する。さらに地理情報システムによって、現状および将来におけるグイマツ雑種 F<sub>1</sub> の温暖化低減能力の評価マップを作成する。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験的研究

グイマツ雑種 F<sub>1</sub> に CO<sub>2</sub>・オゾン・窒素付加を行い、樹木の CO<sub>2</sub> 吸収と VOC 放出、植栽土壌の温室効果ガスの吸収および放出を測定した。対象個体として北海道大学札幌研究林の現有設備・サイトに植栽されたグイマツ雑種 F<sub>1</sub>(2012年当時3~6年生)を用いた。CO<sub>2</sub> とオゾンの付加は温室のような周辺の覆いによる artifact を排除できる設備である開放系ガス付加装置(図1)で行った。

各付加実験の概要は以下の通りである。

CO<sub>2</sub> 付加: 平成 22 年 5 月開始。CO<sub>2</sub> 濃度は対照区が約 380 ppm、高 CO<sub>2</sub> 区が 500 ppm

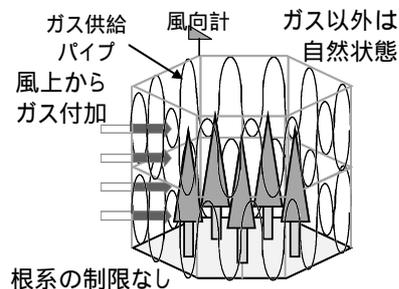


図1 開放系ガス付加装置の概略

オゾン付加: 平成 23 年度 6 月開始。オゾン濃度は無付加区(対照)が約 25 ppb (影響がないレベル)、オゾン区が 60 ppb  
窒素付加: 平成 20 年 5 月開始。処理区は無付加区と 50 kg N ha<sup>-1</sup> 年<sup>-1</sup> の窒素付加区

これらの実験において、樹体の光合成や成長といった CO<sub>2</sub> 吸収に関わる項目、揮発性有機化合物、土壌の温室効果ガス(CO<sub>2</sub>、メタン、亜酸化窒素)収支などの測定を行った。なお、揮発性有機化合物であるメタンの放出速度の測定を研究開始当初は検討していたが、ユーカリおよびアカシアをモデル植物としたメタン放出速度の事前評価の結果、メタン放出速度は必ずしも大きくない可能性が示唆されたため、グイマツ雑種 F<sub>1</sub> では測定を行わなかった。

### (2) 地理情報システムによる地図化

現在のカラマツ植林地(将来のグイマツ雑種 F<sub>1</sub> 植林地候補地)における CO<sub>2</sub> 濃度、オゾン濃度および窒素沈着量の現状・将来予測に関する測定・情報収集を行った。さらに(1)の実験的研究の結果のモデル化を行い、地理情報システムによってそれらを統合し、グイマツ雑種 F<sub>1</sub> の温暖化低減能力の評価マップを作成する予定であった。しかしグイマツ雑種 F<sub>1</sub> の光合成生産に対する環境変動の影響評価モデルを組み上げるには、残念ながら十分な量のデータセットが得られなかった。一方で比較対象として同様の研究を進めてきたブナおよびカバノキ属では十分なデータセットを得ることができたため、これらを対象としてベースとなるモデルの構築を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 高 CO<sub>2</sub> に対する応答

研究代表者らの先行研究(Watanabe et al. 2011, *Tree Physiology*)においては高 CO<sub>2</sub> 環境における光合成のダウンレギュレーション(光合成能力の低下現象)が認められていたが、開放系 CO<sub>2</sub> 付加設備で育成したグイマツ雑種 F<sub>1</sub> においては光合成のダウンレギュレーションは全く認められず、高 CO<sub>2</sub> による成長の促進作用が確認された。しかし一方で、根・幹・枝・葉といった植物器官に対する光合成産物の分配が変化し、高 CO<sub>2</sub> 環境では小さい

根、細長い幹、長い枝の樹形になった(図2)。この事は将来環境においてグイマツ雑種 F<sub>1</sub> は乾燥や風害・雪害の悪影響を受けやすくなる可能性を示している。

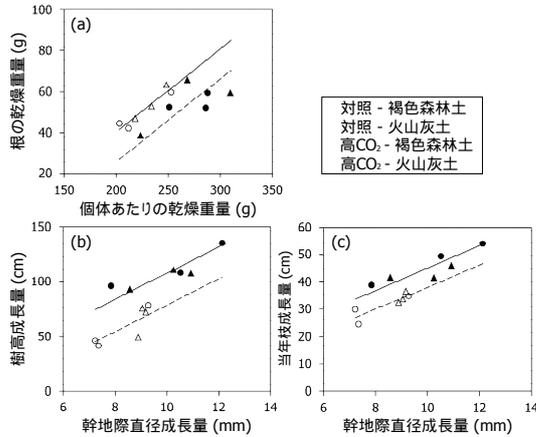


図2 高 CO<sub>2</sub> 環境で育成したグイマツ雑種 F<sub>1</sub> の成長特性。同じ個体乾燥重量で比較すると、高 CO<sub>2</sub> 環境のグイマツ雑種 F<sub>1</sub> の根は対照区と比べて小さい(a)。また、同じ幹の地際直径成長量で比較すると樹高成長や当年枝の成長が高 CO<sub>2</sub> 環境で促進されている(b, c)。

## (2) オゾンに対する応答

グイマツ雑種 F<sub>1</sub> と、その親であるグイマツおよびカラマツの成長および光合成に対するオゾンの影響を異なる大気 CO<sub>2</sub> 濃度条件下で比較した。グイマツおよびカラマツではオゾンの悪影響がほとんど認められなかったのに対して、グイマツ雑種 F<sub>1</sub> ではオゾンによる成長低下および光合成速度の低下が認められ、グイマツ雑種 F<sub>1</sub> は親種よりオゾン感受性が高いことが明らかになった。しかし一方で、高 CO<sub>2</sub> 条件下ではオゾンによる成長低下が緩和された。そのため、将来の高 CO<sub>2</sub> 環境ではグイマツ雑種 F<sub>1</sub> の炭素固定能力はオゾンの影響をあまり受けにくいことが示唆された。

## (3) 窒素負荷に対する応答

樹冠の発達したグイマツ雑種 F<sub>1</sub> の、樹冠上部と下部の光合成活性の比較を行った。樹冠下部の針葉は樹冠上部に比べて、気孔が開き気味だった。その結果、葉内の CO<sub>2</sub> 濃度を高く保つことができ、樹冠上部の針葉と同程度の光飽和の純光合成速度を実現していた。また、これらの光合成特性に土壌への窒素付加は影響を及ぼさない事が明らかになった。

さらに、窒素沈着の影響は、土壌環境によって異なる事が予想されたため、特殊土壌である蛇紋岩土壌においても、グイマツ雑種 F<sub>1</sub> に対する窒素付加の影響を調査した。その結果、蛇紋岩土壌では土壌への窒素付加によって針葉の光合成活性の低下および成長の低下が引き起こされることが明らかになった(図3)。

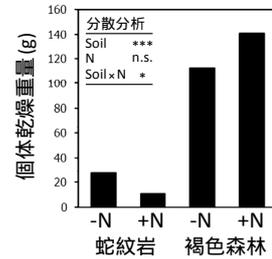


図3 蛇紋岩土壌および褐色森林土で育成したグイマツ雑種 F<sub>1</sub> の成長に対する土壌への窒素負荷の影響。二元配置分散分析より、土壌と窒素負荷の有意な複合影響が認められ、土壌環境によって窒素負荷の影響が異なる事が分かる。

## (4) 土壌の温室効果ガス収支への影響

グイマツ雑種 F<sub>1</sub> 群落土壌に対する窒素付加によって、土壌のメタン吸収速度の低下および亜酸化窒素放出速度の増加が引き起こされた。これらの結果は、将来の高 CO<sub>2</sub> および窒素沈着量の増加が森林の温室効果ガス収支に対して、負の影響をもたらす可能性を示している。

## (5) 実験的研究のモデル化

ブナおよびカバノキ属3種(ダケカンバ・ウダイカンバ・シラカンバ)の葉群光合成生産に対するオゾンおよび高 CO<sub>2</sub> の影響評価モデルをそれぞれ構築し、1 成長期に渡る葉群の CO<sub>2</sub> 収支を算出した。その結果、樹冠位置の違いに伴うオゾン感受性の違い(ブナでは樹冠上部の葉がオゾンの悪影響を受けやすい)や呼吸速度に対する影響(オゾン・高 CO<sub>2</sub> いずれの処理でも呼吸速度が増加)を葉群光合成生産モデルに組み込む必要性が明らかになった(図4)。本科研費による研究期間は終了したが、構築したモデルのグイマツ雑種 F<sub>1</sub> への適用に今後取り組む。

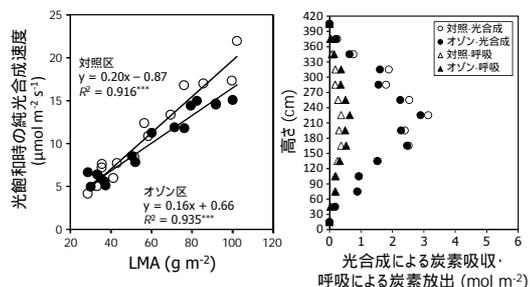


図4 葉面積当たりの葉重量(LMA)と光飽和時の純光合成速度の関係(左)と葉群光合成・呼吸量の垂直分布の推定結果(右)。本結果はブナで得られた結果である。左図において、LMA が大きい葉は樹冠上部に位置しており、それらの葉においてオゾンによる光合成速度の低下が引き起こされていることが分かる。右図からも、光合成による炭素吸収の低下や呼吸による炭素放出の増加が、樹冠上部の葉において顕著であることが分かる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 10 件)

1. Hoshika, Y., Katata, G., Deushi, M., Watanabe, M., Koike, T. and Paoletti, E. Ozone-induced stomatal sluggishness changes carbon and water balance of temperate deciduous forests. *Scientific Reports*, 査読有, Vol. 5(9871), 2015, 1-8. DOI: 10.1038/srep09871
2. Wang, X., Qu, L., Mao, Q., Watanabe, M., Hoshika, Y., Koyama, A., Kawaguchi, K., Tamai, Y. and Koike, T. Ectomycorrhizal colonization and growth of the hybrid larch F<sub>1</sub> under elevated O<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>. *Environmental Pollution*, 査読有, Vol. 197, 2015, 116-126. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.11.031
3. Mao, Q., Watanabe, M., Makoto, K., Kita, K. and Koike, T. High nitrogen deposition may enhance growth of the new hybrid larch F<sub>1</sub> growing at two phosphorus levels. *Landscape and Ecological Engineering*, 査読有, Vol. 10, No. 1, 2014, 1-8. DOI: 10.1007/s11355-012-0207-2
4. Watanabe, M., Hoshika, Y., Inada, N. and Koike, T. Canopy carbon budget of Siebold's beech (*Fagus crenata*) sapling under free air ozone exposure. *Environmental Pollution*, 査読有, Vol. 184, 2014, 682-689. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.04.018
5. Watanabe, M., Mao, Q., Novriyanti, E., Kita, K., Takagi, K., Satoh, F. and Koike, T. Elevated CO<sub>2</sub> enhances the growth of hybrid larch F<sub>1</sub> (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) seedlings and changes its biomass allocation. *Trees*, 査読有, Vol. 27, No. 6, 2013, 1647-1655. DOI: 10.1007/s00468-013-0912-y
6. Hoshika, Y., Watanabe, M., Inada, N. and Koike, T. Model-based analysis of avoidance of ozone stress by stomatal closure in Siebold's beech (*Fagus crenata*). *Annals of Botany*, 査読有, Vol. 112, 2013, 1149-1158. DOI: 10.1093/aob/mct166
7. Watanabe, M., Hoshika, Y., Inada, N., Wang, X., Mao, Q. and Koike, T. Photosynthetic traits of Siebold's beech and oak saplings grown under free air ozone exposure in northern Japan. *Environmental Pollution*, 査読有, Vol. 174, 2013, 50-56. DOI: 10.1016/j.envpol.2012.11.006
8. Watanabe, M., Ryu, K., Kita, K., Takagi, K. and Koike, T. Effects of nitrogen load on the growth and photosynthesis of hybrid larch F<sub>1</sub> (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) grown on serpentine soil. *Environmental and Experimental Botany*, 査読有, Vol. 83, 2012, 73-81. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2012.04.011
9. Mao, Q., Watanabe, M., Imori, M., Kim, YS., Kita, K. and Koike, T. Photosynthesis and nitrogen allocation in needles in the sun and shade crowns of hybrid larch saplings: effect of nitrogen application. *Photosynthetica*, 査読有, Vol. 50, No. 3, 2012, 422-428. DOI: 10.1007/s11099-012-0049-z
10. Koike, T., Mao, Q., Inada, N., Kawaguchi, K., Hoshika, Y., Kita, K. and Watanabe, M. Growth and photosynthetic responses of cuttings of a hybrid larch (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) to elevated ozone and/or carbon dioxide. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 査読有, Vol. 6, No. 2, 2012, 104-110. DOI: 10.5572/ajae.2012.6.2.104

〔学会発表〕(計 16 件)

1. Hoshika, Y., Watanabe, M., Carriero, G., Koike, T. and Paoletti, E. Stomatal conductance modeling for assessing ozone impacts on deciduous trees. 28th ICP Vegetation Task Force Meeting, 2015年2月4日, ローマ(イタリア).
2. Watanabe, M., Kitaoka, S., Eguchi, N., Watanabe, Y., Satomura, T., Takagi, K., Satoh, F. and Koike, T. Photosynthetic responses of Siebold's beech seedlings to change of light condition under elevated CO<sub>2</sub>. The 9th APGC Symposium "Plants and the Changing Environment", 2014年6月9日, モントレー(アメリカ).
3. Koike, T., Hoshika, Y., Watanabe, M., Satoh, F. and Izuta, T. Steady state and dynamic gas exchange responses to free air O<sub>3</sub> exposure in sensitive or tolerant trees. The 9th APGC Symposium "Plants and the Changing Environment", 2014年6月9日, モントレー(アメリカ).
4. Watanabe, M., Hoshika, Y., Inada, N., Mao, QZ. and Koike, T. Photosynthetic responses of Siebold's beech (*Fagus crenata*) saplings to ozone: consideration of within-canopy light gradient. International conference on ozone and plants, 2014年5月21日, 北京(中国).
5. Kam, D-G, Watanabe, M., Shi, C., Mao, QZ., Wang, XN., Kita, K. and Koike, T. Effects of O<sub>3</sub> on the growth of Japanese larch (*Larix kaempferi*) and Hybrid larch F<sub>1</sub> (*Larix gmelinii* var. *japonica* × *L. kaempferi*) grown under different nitrogen concentration. International conference on ozone and plants, 2014年5月19日, 北京(中国).
6. Watanabe, M., Hoshika, Y. and Koike, T. Photosynthetic responses of Monarch birch seedlings to differing timings of free air ozone fumigation. International conference

- on ozone and plants, 2014年5月19日, 北京(中国).
7. 渡辺 誠, 星加康智, 稲田直輝, 小池孝良. ブナ幼木の葉群光合成に与える開放系オゾン暴露の影響. 第125回日本森林学会大会, 2014年3月29日, 大宮ソニックシティ(埼玉県さいたま市).
  8. Watanabe, M., Hoshika, Y., Wang, XN., Mao, QZ., Inada, N., Sakikawa, T. and Koike, T. Free air ozone fumigation study on deciduous broad-leaves tree species in northern Japan. International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2014), 2014年3月19日, 北海道大学(北海道札幌市).
  9. 渡辺 誠, 原 悠子, 伊藤寛剛, 及川聞多, 毛 巧芝, 王 曉娜, 渡辺陽子, 船田 良, 高木健太郎, 佐藤冬樹, 小池孝良. 開放系大気CO<sub>2</sub>増加に対するカバノキ属3種の成長・光合成応答. 第61回日本生態学会広島大会, 2014年3月18日, 広島国際会議場(広島県広島市).
  10. Wang, XN., Mao, QZ., Qu, LY., Kawaguchi, K., Watanabe, M., Hoshika, Y., Koyama, A. and Koike, T. Ectomycorrhizal richness and growth of hybrid larch F<sub>1</sub> under elevated O<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>. International Conference “Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution - Unifying research and evidence across northern and southern hemispheres” 2013年9月6日, イルナス(ブラジル).
  11. Mao, QZ., Watanabe, M., Hoshika, Y., Kita, K. and Koike, T. Photosynthetic responses of three kinds of larch seedlings raised under free air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE). International Conference “Vegetation Response to Climate Change and Air Pollution - Unifying research and evidence across northern and southern hemispheres”. 2013年9月4日, イルナス(ブラジル).
  12. 川口光倫, 渡辺 誠, 小池孝良. グイマツ雑種F<sub>1</sub>におけるオゾンと二酸化炭素濃度上昇への応答. 第124回日本森林学会大会, 2013年3月26日, 岩手大学(岩手県盛岡市).
  13. 渡辺 誠, 原 悠子, 伊藤寛剛, 高木 健太郎, 佐藤 冬樹, 小池孝良. 高CO<sub>2</sub>環境で生育したカバノキ属3種の葉群光合成. 第60回日本生態学会大会, 2013年3月7日, 静岡県コンベンションアーツセンター(静岡県静岡市).
  14. Mao, QZ., Watanabe, M., Wang, XN., Koyama, A., Kita, K. and Koike, T. Effects of nitrogen deposition combined with phosphorus deficiency on fine-root growth of three larch species. 8th Symposium of the International Society of Root Research, 2012年6月28日, ダンディー(イギリス).
  15. Wang, XN., Mao, QZ., Qu, LY., Tamai, Y., Yamakawa, R., Watanabe, M., Kita, K. and

Koike, T. Biodiversity of ectomycorrhiza types with high nitrogen deposition on three larch species grown under two phosphorous levels. 8th Symposium of the International Society of Root Research, 2012年6月28日, ダンディー(イギリス).

16. Watanabe, M., Hoshika, Y., Inada, N., Wang, X., Mao, Q. and Koike, T. Photosynthetic traits of *Fagus crenata* and *Quercus crispula* sapling grown under free air ozone exposure. International conference ‘Biological Reactions of Forests to Climate Change and Air Pollution’, 2012年5月22日, カウナス(リトアニア).

〔図書〕(計1件)

1. Koike, T., Watanabe, M., Hoshika, Y., Kitao, M., Matsumura, H., Funada, R. and Izuta, T., Elsevier, Climate change, air pollution and global challenges: understanding and perspectives from forest research (Matyssek, R., Clarke, N., Cudlin, P., Mikkelsen, T.N., Tuovinen, J.-P., Wieser, G., Paoletti, E., eds.), 2013, 371-390.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 出願年月日:  
 国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
 発明者:  
 権利者:  
 種類:  
 番号:  
 出願年月日:  
 取得年月日:  
 国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等  
<https://sites.google.com/site/rhylec/home>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 誠 (WATANABE, Makoto)  
 東京農工大学・大学院農学研究院・准教授  
 研究者番号: 50612256

(2) 研究協力者

小池 孝良 (KOIKE, Takayoshi)  
 北海道大学・大学院農学研究院・教授  
 研究者番号: 10270919