

## 学位論文題名

## Long-term evaluation on the effect of anthropogenic disturbances to the carbon budget of cool-temperate mixed forests in northern Hokkaido, Japan

(人為起源の攪乱が北海道北部冷温帯混交林の炭素循環に及ぼす影響に関する長期評価)

## 学位論文内容の要旨

Forest disturbances act as principal drivers of the ecosystem carbon budget yet their impact is not well-understood. The cool-temperate forests of northern Japan did not escape to have experienced such disturbances. One of its mixed forests, which had been a weak carbon sink (net ecosystem  $\text{CO}_2$  exchange [NEE] =  $-0.44 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ), was disturbed by clear-cutting and was replaced with a hybrid larch (*Larix gmelinii*  $\times$  *L. kaempferi*) plantation. To predict the impact of this disturbance on the ecosystem's carbon budget, a 9.5 yr (2001–2010) eddy covariance measurements of  $\text{CO}_2$  fluxes and biomass observation of each ecosystem component were done. When the trees were clear-cut in 2003, the ecosystem abruptly became a large carbon source and the net carbon emission within the 7 years after clearcutting (2003–2009) reached  $14.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$  but by 2010, the ecosystem had regained its status as a carbon sink again (NEE =  $-0.49 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) and it was estimated that it will take 8–34 yr to fully recover all of the  $\text{CO}_2$  that was emitted after the disturbance.

Huge amount of carbon emissions after the clearcutting was contributed largely by soil respiration and it is said that soil respiration is a very temperature-sensitive flux, hence, will most likely be affected by global warming (another form of anthropogenic disturbance). Thus, additional study investigating the effect of experimental soil warming on the soil heterotrophic respiration rate and its temperature sensitivity was conducted in an area with high substrate availability. This was done using an automated chamber system. Soil temperature was elevated by  $3^\circ\text{C}$  at 5 cm depth using overhead infrared heaters and continuously measured hourly soil heterotrophic respiration rates for 5 years (2007–2011). Results showed soil warming enhanced heterotrophic respiration by 80% ( $6.64 \pm 2.17 \mu\text{mol C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) for warmed chambers as compared to the unwarmed control treatment ( $3.68 \pm 0.93 \mu\text{mol C m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Soil warming likewise enhances temperature sensitivity  $Q_{10}$  ( $3.1 \pm 0.09$  and  $3.3 \pm 0.07$ , control and warming plots, respectively). These results suggest that global warming will enhance not only the heterotrophic respiration rate itself but also its  $Q_{10}$  in forests with high substrate availability and without severe water stress.

Through the soil warming experiment, the impact of global warming to soil heterotrophic respiration was predicted but evaluating the impact of changing climate to the soil carbon input in the form of litterfall was not accounted for. Thus, another study examining the response of litterfall rate to the changing climatic patterns was conducted. Correlation analysis between the annual litterfall rates in five forest sites and the full growing season as well as seasonal climatic variables (solar radiation, air temperature, and rainfall) was performed during the 16-year period (1996–2011). Accumulated spring temperature, the number of windy days, day of snow disappearance and of leaf expansion were also included in the analysis. Results showed that early snowmelt and leaf expansion caused by warm spring did not directly link to the enhancement of the annual litterfall rate. Instead, spring (from March to May) solar radiation has positively correlated with the annual litterfall rate at three mixed forests. This implies that global warming nor the changing rainfall patterns do not necessarily affect annual litterfall production in these forests, at least within the range observed during the study period (a difference of 1.8°C between the minimum and maximum growing season average air temperature and a difference of 647 mm between the minimum and maximum growing season total precipitation). Therefore it is assumed that the additional soil carbon input will not help in the accumulation of more soil carbon stock in a future warmer climate because of a non-increasing litter production with global warming.

Thus, clearcutting as a forest harvesting option must be taken with caution as it generates large soil CO<sub>2</sub> emissions that can be aggravated by global warming and a continuing depletion of soil substrate supply would be most likely because of a non-positive response of litterfall with global warming.

# 学位論文審査の要旨

主 査	准教授	高 木 健太郎
副 査	名誉教授	笹 賀一郎
副 査	教 授	佐 藤 冬 樹
副 査	教 授	柴 田 英 昭
副 査	室 長	三 枝 信 子 (国立環境研究所地球環境研究センター)

## 学 位 論 文 題 名

### Long-term evaluation on the effect of anthropogenic disturbances to the carbon budget of cool-temperate mixed forests in northern Hokkaido, Japan

(人為起源の攪乱が北海道北部冷温帯混交林の炭素循環に及ぼす影響に関する長期評価)

森林の攪乱は、生態系の炭素の循環に大きな影響を与えられているが、その定量的な評価は十分に行われていない。申請者は森林伐採や温暖化といった人為的な攪乱が森林生態系の炭素循環に与える影響について、北海道北部の針広混交林における長期観測結果に基づいて明らかにし、その複合影響について考察を行った。申請論文の構成は、以下の通りであった。

#### 1 章「序論」

#### 2 章「森林伐採が生態系の二酸化炭素収支に与える影響について」

#### 3 章「温暖化が森林土壌からの二酸化炭素放出に与える影響について」

#### 4 章「気候変動が森林の落葉・落枝量に与える影響について」

#### 5 章「総合討論」

申請者は、1 章において申請論文の構成とそれらのつながりについて、丁寧な説明を行った。2 章の森林伐採が生態系の二酸化炭素収支に与える影響について、微気象長期観測データを解析することにより定量的に明らかにした。重要な結論としては、「北海道北部の針広混交林における森林伐採は、二酸化炭素の吸収源である森林を、大量の放出源へと変化させること」、また「一旦二酸化炭素の放出源となった森林が再度吸収源へとなるために7年を要したこと」、「放出源であった期間に放出した二酸化炭素の総量を、その生態系自身が回収するためには、今後さらに8－34年必用となること」であった。この章において、伐採後に、主に土壌が二酸化炭素の大きな放出源となることも明らかにした。

3 章では、温暖化がおこる場合、土壌炭素が十分に蓄積されている森林において、どの程度二酸化炭素の放出が活発となるかについて、5年間の実験的観測により明らかにした。この章の重要な結論は、「土壌に有機物が豊富に蓄積されている森林において、地温を3℃上昇させた場合、土壌の微生物による有機物の分解および二酸化炭素の放出量が、対象区よりも平均80%増加すること」、「5年の実験期間において、この増加率に減少傾向は認められないこと」であった。3章の結果より、土壌に有機物が豊富に蓄積している森林では、温

暖化環境下で、より多くの二酸化炭素の放出が継続しておきることを明らかにした一方で、次の疑問を設定した。「気温の上昇により、土壌からは多くの二酸化炭素を放出するが、土壌への炭素の蓄積速度も気温上昇により増加する場合は土壌の炭素収支は変化しない可能性も残されている。土壌への炭素蓄積の主な経路である落葉・落枝量は気候変動にどのように応答するのか」。

この疑問を明らかにするために、4章において16年におよぶ森林の落葉・落枝量の変動データと様々な環境要因との相関を解析し、年間の落葉・落枝量に与える環境要因について考察を行った。その結果、針広混交林においては、春先の日射量のみ、その年の落葉・落枝量を増加させる効果が認められたが、気温や降水量を含む他の環境要因の変動とその年の落葉・落枝量との間に相関は認められなかった。このことから、気温上昇による落葉・落枝量の増加が、土壌炭素の減少を抑制する効果は期待できないことを考察した。2－4章の結果と考察より、最終章において、森林伐採に伴い予測される土壌炭素の減少は、気温上昇が伴う場合、その減少傾向を促進させる可能性が高いこと、またこの減少を抑制する効果として、温暖化環境下における落葉・落枝量の増加は見込めないことを考察した。以上の公開発表の後、論文内容に関する質問・意見が寄せられ、これらの質問・意見に対して学位申請者は概ね適切な説明を行った。

以上のとおり、申請者は人為起源の攪乱が北海道北部の混交林の炭素循環に及ぼす影響について、長期観測・実験データに基づいて定量的な評価を行い、多くの新たな知見を得た。これらの知見は、今後の北方林の炭素管理に貢献するところ大なるものがある。よって、申請者は博士（環境科学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。