

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24310004

研究課題名(和文) ギャップ・モザイク構造を考慮した成熟林の炭素吸収能力の再評価

研究課題名(英文) Evaluation of carbon dynamics in the old-growth forest in relation to stand structure

研究代表者

廣田 充 (HIROTA, Mitsuru)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：90391151

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：生態系としてのCO<sub>2</sub>吸収能力の有無が注目されている成熟林の炭素吸収能力を再評価するために、典型的な冷温帯ブナ成熟林(カヤノ平ブナ林、長野県)において土壌呼吸、土壌炭素蓄積、および樹木成長量等の炭素循環に関する主要な項目の広域多点調査を行った。その結果、成熟林内ではこれらの主要項目が場所によって大きく異なり、それらの大小は成熟林に特有の植生構造(林冠が開けていて幼樹等が多い場所、巨大な老齢樹がいて林冠が閉じている場所がモザイク状に分布する構造)の影響を受けていることを明らかにした。このことから、植生構造によって成熟林のCO<sub>2</sub>吸収能力が大きく変わりうることを示唆した。

研究成果の概要(英文)：Most forest ecosystems act as substantial sink for CO<sub>2</sub> from the atmosphere. Hence, there are many studies on carbon dynamics in forest ecosystem to quantify carbon pool and fluxes for precise estimation of contributions of forest ecosystems to climate change mitigation. In general, old-growth forests are traditionally viewed to be in carbon equilibrium. However, contrary to more than 40 years of conventional wisdom, a new analysis (Luyssaert et al. 2008) suggests that old growth forests are usually "carbon sinks". But the question is not yet decided. To fill the gap of knowledge on the contributions of the old-growth forests to climate change mitigation, we conducted a research program for evaluation of carbon dynamics in cool-temperate old-growth beech forests in Japan. Our results showed that carbon dynamics in the old-growth forest was affected by stand structure, and suggested that the carbon sink ability would be altered depend on the unique stand structure.

研究分野：生態系生態学

キーワード：炭素循環 成熟林 土壌呼吸 時空間変動 ギャップ・モザイク構造

## 1. 研究開始当初の背景

森林は、植物体や土壌中に大量の有機炭素を蓄積することから、海洋に次ぐ CO<sub>2</sub> 吸収源と考えられており、その炭素吸収機能が注目されている(京都議定書 1997)。古くから世界各国で森林の炭素吸収機能に関する研究が行われているものの、常に新しい知見が出されるなど(Yude et al., Science, 2011)、未だにその炭素吸収機能が解明されたとは言えない状況である。森林の炭素吸収機能の解明が困難な理由の一つに、遷移に伴う炭素吸収機能の変化が挙げられる (Goulden et al., GCB, 2011)。遷移に伴い炭素吸収機能は低下していき、成熟林(あるいは極相林)になると、光合成による CO<sub>2</sub> 吸収量と植物自身の呼吸や土壌有機物等の分解に伴う CO<sub>2</sub> 放出量が釣り合うために、CO<sub>2</sub> 吸収能力は無くなるとされている。このような遷移に伴う炭素吸収機能の変化、特に成熟林の炭素吸収機能が見かけ上ゼロになることは世界的な常識にもなっている(IPCC 2007)。しかし、成熟林を対象とした炭素吸収機能に関する研究例は少なく、この“常識”が実証されることもほとんどない。そのような中、“成熟林も CO<sub>2</sub> を吸収する”という報告が近年相次いでいる(Helen et al., Nature, 2009)。申請者が行った予備調査では、植生のギャップ・モザイク構造が顕著なブナ成熟林において、土壌呼吸の空間不均一性が高いことが分かった。この予備調査の結果も含めて我々は、成熟林で顕著なギャップ・モザイク構造が森林全体の炭素吸収機能を不均一なものにし、その結果として成熟林全体の炭素吸収機能はゼロにならないのではないかと考え、本課題を着想するに至った。

## 2. 研究の目的

本課題の目的は、空間不均一性が高く、樹齢の多様化や空間的多層化が顕著な成熟林の炭素吸収機能の把握である。この目的を達成するために、本研究は次の3つのサブテーマを設定して実施した。

(1) 植生構造の記述：林冠木のみならずササ群落を含む下層植生の正確な把握。特にギャップ・モザイク構造の正確な記述

(2) 樹木の成長量と多点計測による各 CO<sub>2</sub> フラックス(CO<sub>2</sub> 吸収速度と CO<sub>2</sub> 放出速度)の把握

(3) 多点計測による炭素プール(枯死部を含む)とその質的特性的把握

## 3. 研究の方法

研究計画当初は、本州の中部山岳地域に位置する4つの成熟林を対象にする予定であったが、予算状況を鑑みて1つの成熟林(長野県木島平村カヤノ平ブナ成熟林)のみを調査地にすることにした。カヤノ平ブナ成熟林では、環境省モニタリングサイト 1000 に登録されており、固定調査区(100m x 100m)で 2005

年から毎年植生調査やリターフォールの調査が行われている( Ida, 2013)。この調査区において下層植生も含む植生調査を行うことで、調査区の植生構造を把握する。植生調査と合わせて全天写真を用いて、調査区全体の林冠の開き具合(開空度)を把握する。次に、1haの調査区をサブプロット(10m x 10m, 計100個)に分割し、サブプロット毎に炭素循環の主な項目(炭素プールとその質的特性、CO<sub>2</sub> フラックス、樹木の成長量等)の測定を行う。この中でも生態系からの CO<sub>2</sub> 放出のなかで半分程度を占めるとされる土壌呼吸について、調査区内の空間変動のみならず、時間変動についても自動開閉チャンバーを用いて把握していく。

## 4. 研究成果

(1) 植生構造、樹木の成長量、枯死木量、ブナ種子生産の空間不均一性

カヤノ平固定調査区の植生調査の結果、優占種は *Fagus crenata*(ブナ)であり、胸高直径 5cm 以上の樹木の個体数が 251 本あり、全個体数の 25.5%に相当していた。ブナの胸高直径は平均で  $27.4 \pm 25.2$ cm、最大 106.7cm、最小 5cm と、大小様々な個体が存在していた。さらに、林冠層(樹高 10m 以上)で優占するだけでなく、下層(樹高 5m 以下)にも幼樹が多く存在していた。下層の幼樹の多く(128 個体中 110 個体)は、他の樹木に被陰されていたが、下層の幼樹の約一割(128 個体中 18 個体)は、明るい光環境のもとに存在していた( Ida, 2013)。このことから、固定調査区では、林冠木が存在しないために明るい林床が形成されており、明瞭なギャップ・モザイク構造が存在することが明らかとなった。同時に下層植生についても調査した結果、樹高 5m 以下の低木類は、林床が明るいギャップ周辺に集中的に存在する一方、ササ群落は、調査区内で空間不均一性はみられたものの、ギャップ・モザイク構造とは明確な関係が見られなかった。

優占種であるブナについて、胸高直径から地上部バイオマスを推定し、地上部バイオマス増加量推定、およびその空間不均一性について調べた。2007 年から 2012 年のブナ胸高直径を基に小見山ら(2011)の相対成長式を用いて、各個体の地上部バイオマスを推定した。さらに、2012 年と 2007 年の地上部バイオマスの差から 5 年間での地上部成長量を算出した。調査地内のブナの 5 年間成長量は、最大で 525.0 kg、正のうち最小で 0.11 kg であった。次に、コンピュータ上で、調査地内の 10m 格子点 81 箇所を中央に持つ 10m 四方の方形区を設定し、各方形区内に含まれるブナの本数および、枠内に含まれるブナの 5 年成長量の合計 ( $\text{kg a}^{-1} 5\text{yrs}^{-1}$ ) を算出した。81 枠中 26 枠は 100m<sup>2</sup> あたりにブナを 1 本も含まず、100 m<sup>2</sup> あたりのブナの最大本数は 12 本であった。ブナ 5 年成長量の最大値は 818.2、最小値は 1 ( $\text{kg a}^{-1} 5\text{yrs}^{-1}$ ) と、ブナ地

上部バイオマスの成長量は、サブプロット間で大きく異なることが分かった。このブナ地上部バイオマス成長量とブナの密度には有意な相関は確認出来なかった。一方、開空度が大きい林床が明るい地点ほど、ブナを除く低木の胸高断面積の成長率が高いことが明らかとなった。この結果から、森林の炭素吸収量の相当量を占める地上部バイオマス成長量の空間不均一性は非常に大きく、かつその空間不均一性は、ギャップ・モザイク構造に依存する可能性が示唆された。

ブナには、5~7年に一度成り年がありその間はほとんど結実しない凶作や並作が続く「成り年現象」が知られており、これらは、ブナ林の植生構造にも影響を与える。そこで本研究でもブナ種子生産と実生分布と光環境についても調査を行った。その結果、ブナの豊作が2011年に、並作が2015年であった。健全堅果の生産量は2013年が131.7個/m<sup>2</sup>、36.3個/m<sup>2</sup>であった。一方、2010年と2012年はいずれも健全堅果は0個/m<sup>2</sup>で、凶作年となっていた。さらに、下層植生の分布や実生の生育に与える積雪影響を検討するため、残雪量と林分構造の関連性を調べた。その結果、閉鎖林冠下ほど林冠ギャップに比べて残雪が少ないことが示唆された。これは樹幹周囲で融雪が早く進む「根開き」の効果の大きさが高木の密度に依存するためと推察される。このことから、残雪分布の空間不均一性には、ブナ成熟林分のギャップ・モザイク構造が関与していると考えられた。さらに、林冠木の樹冠下とギャップ下のそれぞれに連続撮影カメラを設置し雪解け日を観測したところ、ギャップ区の方が6日早く雪融けが完了して地表面が出てきた。年間の半分以上を積雪下で過ごす林床植物にとって、ギャップ・モザイク植生構造は、生育期間の長さを決定する重要な一要素である可能性が示唆された。以上から冷温帯に属する本調査地の重要な気候的特徴である積雪は、当然炭素循環にも多大な影響を与えると考えられる。今回明らかとなった積雪量および積雪期間に空間不均一性と炭素循環の関係性を解明することは、次に解決すべき研究テーマの一つである。

森林に特有の大型枯死木 (Coarse Woody Debris, 以下 CWD) は、炭素プールとして重要である。本調査地において枯死木調査 (腐朽段階, サイズ, 密度) を行った結果、CWDとして7.6 Mg C ha<sup>-1</sup>存在しており、生木として存在する炭素プール (85.3 Mg C ha<sup>-1</sup>) の約9%程度相当であることが分かった。これは、他地域の冷温帯成熟林のCWDの炭素プール量 (2.2~32.7 Mg C ha<sup>-1</sup>) と比べると、その範囲内であった。また調査区内のCWDは、ギャップ・モザイク構造と密に関わっており、ギャップ周辺では多く存在することが明らかになった。CWDとしての炭素プール量から判断すると、CWD分解に伴うCO<sub>2</sub>放出フラックスはそれほど大きく無いことが予想されるが、これについては今後の

研究で明らかにしていく予定である。

### (2) 土壌有機物の量的・質的特性

固定調査区内の9つの地点から表層土壌を採取し、土壌有機物 (Soil Organic Carbon, 以下 SOC) を測定した結果、その空間的不均一性が非常に高く、特に開空度が閉じている非ギャップ区 SOC量が大きくなる傾向がみられた。さらに今回の調査区のSOC量の平均値は、世界の成熟林の平均SOC量と比べると、約2.3倍も高いことも分かった。このように開空度とSOC量に関係が見られたことから、開空度が大きいギャップ区と林冠が閉じている非ギャップ区を開空度から抽出して、リター量とSOCの質的評価を行った。1haプロット内10地点 (ギャップ区:3地点, 非ギャップ区:7地点) において、リター量やSOCの質を評価した。その結果、リター量は両者で有意差は認められなかったが、非ギャップ区のSOCは、より難分解性の質的特性を示した。

### (3) 土壌呼吸の特性

調査区における土壌呼吸速度の空間不均一性を把握するため、多点・同時計測に適しているアルカリ吸収法を用いて調査区内の計121地点で2012年から2013年の無雪期間に計測を行った。その結果、調査区の土壌呼吸速度の変動係数は、0.25~0.28程度であった。これは土壌呼吸の空間不均一性を論じた先行研究の空間変動よりも若干大きい程度であり、調査区の土壌呼吸の空間不均一性は、やや大きいことが分かった。調査区の土壌呼吸の空間不均一性について、地温、土壌水分、土壌有機物含量、開空度との関係を調べた。その結果、土壌呼吸は、開空度が大きいほど、つまりギャップほど土壌呼吸が小さくなる傾向がみられた。また、土壌水分が40~50%前後の地点で土壌呼吸が大きくなり、その前後の土壌水分の際には小さくなる傾向がみられた。さらに、土壌水分と開空度には強い正の相関が見られたことから、調査区内の土壌呼吸の大小は、開空度によって決定される土壌水分によって制御されている可能性が高いことが分かった。

開空度が大きいギャップ区と林冠が閉じた非ギャップ区で、土壌呼吸速度の日変化パターンとその制限要因を明らかにするために、本科研費を用いて開発した自動開閉式チャンバーを用いて詳細な計測を行った。その結果、林床が明るいギャップ区では、土壌温度が低いにも関わらず日の出から数時間で上昇しピークに達することが明らかになった。一方、非ギャップ区の土壌呼吸は、土壌温度の上昇とともに増加し、土壌温度が低下するとともに減少することが明らかとなった。ギャップ区で土壌温度が上昇するまえに土壌呼吸速度が増加し始めてピークに達する要因を検証したところ、林床植物が受ける光強度が主な要因であることが明らかとな

った。本研究の観測結果から、林床植物に光が当たり始めるとともに、林床植物が光合成と蒸散を盛んに行うようになり、それに連動する形で林床植物の根呼吸速度や代謝が盛んになることで、土壌呼吸速度が上昇するという仮説を立てた。今後は、この仮説の検証するために、室内実験も平行して行う予定である。尚、この研究成果は、西村らが第62回日本生態学会全国大会(2015年3月)で発表し、ポスター賞を受賞した。

このように、本研究によって、調査を行ったブナ成熟林では、林冠木のギャップ・モザイク植生構造が明瞭であり、その結果として樹木の成長量、土壌炭素蓄積量と質的特性、枯死木としての炭素蓄積量、および土壌呼吸量の空間不均一性が非常に大きいことが明らかになった。このように炭素循環に関わる各要素の空間不均一性が大きいと、成熟林の生態系炭素吸収量(生態系純生産, NEP)が正になる可能性がある。しかしNEPの正負やその大小を明らかにするには、炭素循環に関する各項目、特に樹木と下層植生による光合成と土壌呼吸以外で生態系から系外に流出する炭素量を定量化することが重要である。さらに、「成り年現象」に代表されるように、成熟林の成長や繁殖は、年変動が大きい可能性が高い。つまりNEPの年変動が大きい可能性もあり、継続調査も非常に重要であると考えられる。

#### 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7件)

Ohtsuka T, Shizu Y, Hirota M, Yashiro Y, Shugang J, Limura Y, Koizumi H (2014) Role of coarse woody debris in the carbon cycle of Takayama forest, central Japan. *Ecological Research* 29: 91-101. 【査読有り】

Ohtsuka T, Negishi M, Sugita K, Limura Y, Hirota M (2013) Carbon cycling and sequestration in a Japanese red pine (*Pinus densiflora*) forest on lava flow of Mt Fuji. *Ecological Research* 28: 855-867. 【査読有り】

Ida H. (2013) Forest structure in a beech (*Fagus crenata* Blume) stand on a 1-ha permanent plot for the Monitoring Sites 1000 Project in Kayanodaira, central Japanese snowbelt. 志賀自然教育研究施設研究業績, 50: 33-40. 【査読有り】

Limura Y, Hirota M, Ida H, Ohtsuka T. (2013) Comparison of quantity and quality of soil organic carbon between matured and gap areas in an old-growth beech forest. *Journal of Geography* 122: 723-732. 【査読有り】

飯村康夫、廣田充、井田秀行、大塚俊之 (2013) 志賀高原カヤノ平ブナ成熟林における土壌有機物の特徴。志賀自然教育研究施設研究業績 49: 1-5. 【査読有り】  
廣田充、八代裕一郎、飯村康夫、志津庸子、大塚俊之、井田秀行 (2011) 志賀高原カヤノ平ブナ林における炭素循環モニタリング。時空間的に不均一な土壌呼吸量の測定法の検討。志賀自然教育研究施設研究業績 48: 9-14. 【査読有り】  
西村貴皓 (2014) 冷温帯ブナ成熟林のギャップ-モザイク構造に着目した土壌呼吸の研究。筑波大学大学院生命環境科学研究科生物科学専攻修士論文(修士(理学)取得)【査読無し】

#### [学会発表](計19件)

Shimada, Y., Nishimura, T., Cui, J. & Hirota, M. Survival of Beech (*Fagus crenata*) Seedlings in the Old-growth Beech Forest Affected by Light Condition in Relation to Stand Structure. The 8th Japan-China-Korea Graduate Student Forum, Sep. 2015, Tsukuba, Japan.

Hirota, M., Nishimura, T., Limura, Y., Ida, H. Evaluation of carbon dynamics in cool-temperate old-growth forest in relation to stand structure: present and future perspectives International Workshop "Monitoring of Forest Ecosystems: Where Do We Stand?" (2013) The University of Tokyo, Tokyo, Japan  
廣田充・早川恵里奈・飯村康夫・大塚俊之・井田秀行 (2012) 「中部山岳地域の3つの成熟林における炭素貯留の場としての粗大有機物(Coarse Woody Debris)」地球環境再生プログラム-2012年度年次研究報告会, 高山市, 12月13日。

西村貴皓・飯村康夫・井田秀行・廣田充 「成熟林では林冠構造によって土壌呼吸の日変化の制御要因が異なる - カヤノ平ブナ林における研究 - 」日本生態学会第62回全国大会, 鹿児島大学, 鹿児島市, 2015年3月19日。

西村貴皓・飯村康夫・井田秀行・廣田充 「成熟林では林冠構造によって土壌呼吸の日変化の制御要因が異なる - カヤノ平ブナ林における研究 - 」地球環境再生プログラム-2014年度年次研究報告会, 上伊那郡南箕輪村, 2014年12月12日。  
濱崎賢・井田秀行・廣田充 「長野県における古民家の現状と古材の強度特性に関する研究」地球環境再生プログラム-2014年度年次研究報告会, 上伊那郡南箕輪村, 2014年12月12日。

藤巻素直・西村貴皓・廣田充 「冷温帯アカマツ林とアカマツ-ミズナラ混交林における土壌呼吸速度の比較」地球環境再生プログラム-2014年度年次研究報告会,

上伊那郡南箕輪村 2014年12月12日・  
西村貴皓・飯村康夫・井田秀行・廣田充  
「植生構造に着目した冷温帯ブナ成熟林  
における土壌呼吸とその空間変動」日本  
生態学会第61回全国大会, 広島国際会議  
場(広島市), 2014年3月・  
西村貴皓・飯村康夫・井田秀行・廣田充  
「冷温帯ブナ成熟林における土壌呼吸速  
度の温度依存性の推定」地球環境再生プ  
ログラム-2013年度年次研究報告会, 上  
田市菅平高原, 2013年11月22日・  
西村貴皓・飯村康夫・井田秀行・廣田充  
「冷温帯ブナ成熟林の炭素循環: 土壌呼  
吸の空間的不均一性とその要因につい  
て」第11回環境研究シンポジウム, 2013  
年11月, 一橋大学(東京都)  
西村貴皓・飯村康夫・井田秀行・廣田充  
「冷温帯ブナ成熟林における土壌呼吸の  
季節変化」日本生態学会第60回全国大会,  
グランシップ静岡 静岡市 2013年3月・  
西村貴皓・飯村康夫・井田秀行・廣田充  
(2012): 冷温帯成熟林における空間的不  
均一性に着目した土壌呼吸・中部山岳地  
域の環境変動の解明から環境資源再生を  
めざす大学間連携事業-地球環境再生プ  
ログラム-2012年度年次研究報告会, 高  
山市, 12月13日・  
山浦攻・井田秀行「ブナのマस्टィング  
と葉フェノロジーの関係」日本生態学会  
第63回全国大会, 仙台国際センター, 仙  
台市, 2016年3月21日・  
山浦攻・井田秀行「ブナは開花した個体  
としない個体で葉のフェノロジーが異なる」  
信州生態研究会平成27年度研究発表会,  
信州大学教育学部, 長野市, 2015年  
12月19日・  
山浦攻・井田秀行「多雪地ブナ林におけ  
る樹木個体群の展葉フェノロジーと残雪  
の関係」日本生態学会第62回全国大会,  
鹿児島大, 鹿児島市, 2015年3月・  
飯村康夫・廣田充・井田秀行・大塚義之  
「ブナ成熟林における成熟林エリアとギャ  
ップエリアの土壌炭素量および質の比較」  
日本地球惑星連合大会, 幕張, 2013  
年5月・  
飯村康夫・廣田充・井田秀行・大塚俊之  
「極相ブナ林のギャップ構造が土壌圏有  
機物分解に及ぼす影響」日本土壌肥料学  
会, 鳥取市, 2012年・  
飯村康夫・廣田充・井田秀行・大塚俊之  
「ブナ成熟林における土壌圏有機物分  
解: ギャップモザイク構造を考慮して」  
日本地球惑星連合大会, 幕張, 2012年5  
月・  
飯村康夫・大塚俊之・廣田充・井田秀行  
(2012): 中部山岳地域における土壌炭素  
動態研究 カヤノ平ブナ成熟林の場合  
中部山岳地域の環境変動の解明から環境  
資源再生をめざす大学間連携事業-地球  
環境再生プログラム-2012年度年次研

究報告会, 高山市, 12月13日・

〔図書〕

(計1件)

廣田充(分担執筆)「温暖化に貢献しうる  
ブナ林」 森林環境 2015: 進行する気候  
変動と森林~私たちはどう適応するか.  
森林文化協会 pp.48-58.

〔その他〕

ホームページ等

本課題の目的と得られた成果の一部を研究  
代表者の研究室ホームページ ([http://  
www.tee-hirotalab.com/](http://www.tee-hirotalab.com/)) で公表している。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

廣田 充 (HIROTA, Mitsuru)  
筑波大学・生命環境系・准教授  
研究者番号: 90391151

### (2) 研究分担者

井田 秀行 (IDA, Hideyuki)  
信州大学・学術研究院教育学系・准教授  
研究者番号: 70324217  
飯村 康夫 (IIMURA, Yasuo)  
滋賀県立大学・環境科学部・助教  
研究者番号: 80599093

### (3) 連携研究者

( )  
研究者番号: