

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25450201

研究課題名(和文) 気候変動にともなう多雪地ブナ林の動態と炭素固定量の変化

研究課題名(英文) Variation of Beech Forest Dynamics and Carbon Sequestration in a Heavy Snow Region due to Climate Change

研究代表者

石田 祐宣 (ISHIDA, Sachinobu)

弘前大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60292140

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：微気象観測によるブナ林炭素収支の定量評価の高精度化を実現するため、これまで森林群落上で測定しているCO<sub>2</sub>フラックスに加え、連続測定により群落内のCO<sub>2</sub>貯留効果を評価した。その結果、冬季のCO<sub>2</sub>貯留量が大きく、年間炭素収支へのCO<sub>2</sub>貯留の寄与は1割程度あり無視できなかった。加えてインターバルカメラの連続撮影や地温の連続測定による積雪期間の検知を行った。ブナの優占するプロットは傾斜地が多いため消雪が早く、他樹種に先駆けて開葉していることを確認した。また、ブナは消雪期間が長いと実生や稚樹の生存率が低下する傾向にあった。

研究成果の概要(英文)：To evaluate carbon budget of the beech forest by micrometeorological method with high accuracy, we held CO<sub>2</sub> profile observations under the forest canopy in addition to CO<sub>2</sub> flux observations on the canopy. CO<sub>2</sub> storage under the canopy in winter was significantly large and contributed 10% of annual carbon budget. Besides, we held consecutive photographing by time-lapse camera and soil temperatures measurements for phenology and snowmelt observations. In the beech dominant plot, snowmelt was earlier than other plots and leaf-emergence was also earlier than other species. Survival rates for beech seedlings and saplings decreased significantly as snowmelt duration increased.

研究分野：気象学

キーワード：多雪地ブナ林 気候変動 炭素収支 林内貯留

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 人間活動に起因する CO<sub>2</sub> など温室効果ガスの急激な増加は地球熱収支のバランスを崩し、地球温暖化に拍車を掛けている。温室効果ガスの削減は全地球規模で待ったなしの課題である。他方、陸域の森林による CO<sub>2</sub> 吸収量を正しく評価することも重要であり、多くの国・地域において森林の炭素固定量の観測が行われてきた。2007 年に IPCC が公表した第 4 次報告書では、生長が著しい森林は、光合成による CO<sub>2</sub> の吸収量 (GPP) が生態系の呼吸量 (RE) を上回るため、CO<sub>2</sub> のシンク (吸収源) の役割を果たすものと認定している。一方老齢化した森林は樹木の生長が鈍化するため、CO<sub>2</sub> の吸収源としてカウントされていない。この推測に反し、最近では老齢の樹木による炭素固定能力はあまり落ちていないとする研究成果が出始めている。たとえば、Luyssaert *et al.* (2008) は文献や観測に基づいたデータベースなどの分析から老齢の森林も CO<sub>2</sub> シンクであることを示した。世界の 30% を超える植生地が天然林であり、古くからある天然林も北半球の北方や温帯に多く残っており、これらだけでも年間 1.3Gt の炭素を固定すると推定している。

本研究サイトは白神山地の世界自然遺産に隣接し、樹齢 100 年を超えるブナが多く残る老齢林であるが、2008 年から開始した微気象学的手法による炭素収支観測の初期的結果から、明らかに年間純生態系生産量 (NEP) が正 (CO<sub>2</sub> シンク) であること、夏期 (8 月) は高温であるほど NEP が小さくなることがわかってきている。特に後者は、温暖化によりブナ林の炭素固定能力が低下することを示唆するが、観測の更なる蓄積と精度向上が課題になっている。また、本サイトは多雪地帯で 1 年のうち 5 ヶ月が積雪に覆われる。積雪は根圏を低温から保護する一方で土壌呼吸を促進する可能性もある。また、積雪期間は森林生態系のフェノロジー (生物季節) を決定する。ゆえに無雪期と積雪期の炭素収支が気候変動によりどの程度影響を受けるか、観測事実に基づきモデル化することは炭素収支の将来予測に極めて重要である。

(2) 多雪地帯で積雪期間が長い気候条件下では、高木はブナが優占する。将来気候の温暖化に伴って東北地方の日本海側は最深積雪が大幅に減少すると予測されており (Inoue & Yokoyama, 2003)、その結果積雪期間が劇的に短くなる可能性が高い。このような環境下では、高木種はブナから他樹種に置き換わることが十分考えられる。Matsui *et al.* (2009) は気候モデルによって予測された将来の気温・降水量の条件から、東北・北陸地方の低標高地ではブナの生育適域が縮小し、変わってミズナラの生育適域が拡大すると予測している。しかし、山岳域の積雪データは少なく、積雪環境の変動は予測条件に加味されていないので (田中ほか, 2012)、今

後積雪および積雪期間が減少した場合に、ブナとミズナラとの競争関係がどのような影響を受けるか未解明である。本研究サイトは、老齢のブナが多く残る林分であるが過去に択伐の記録があり、毎木調査によりミズナラだけでなくホオノキが多く混在することがわかっている。ホオノキはブナと好む温度環境は似ているが、ブナ・ミズナラよりも耐陰性が低く積雪圧に弱い (Homma, 2001)。このような環境は樹種間の競争関係を見る上で大変貴重である。

## 2. 研究の目的

(1) 日本の低標高で多雪地である白神山地において老齢ブナ林の純生態系生産量 (NEP) が年毎にどの程度差異を生じるのか評価するため、観測を高精度化することが本研究第一の目的である。

(2) 気候変動のうちとりわけ積雪環境の変化がブナと他樹種 (本研究では、ホオノキとミズナラ) の成長量ひいては競争関係に与える影響を明らかにすることが本研究第二の目的である。

## 3. 研究の方法

本研究の観測サイトは、白神山地の世界遺産核心地域の北側で、南から北へ流れる赤石川の中流域、標高 345m に位置し、胸高直径が約 80cm の老齢のブナ林が広がっている。30 年前の択伐後のギャップに侵入したと思われるホオノキやミズナラの林冠木も多く見られる。地滑りの多い白神山地の複雑な地形の中では比較的緩やかな斜面で、付近の平均斜度は約 15 度である。現場付近に商用電源が無いため太陽電池パネルとバッテリーにより微気象観測用電源を確保している。積雪 (根雪) の期間は 12 月～4 月の 5 ヶ月間で、最深積雪深は 2～3m に達する。

(1) NEP の高精度測定：上記サイトにおいて 34m のタワーを設置し林冠上で NEP の測定を行っているが、独立に測定されている熱収支各項の間にインバランスが生じていたため、インバランス率で CO<sub>2</sub> フラックスを補正していた。そこで、熱収支インバランスの原因を追究し改善するため、①林冠下の気温・湿度のプロファイルおよび樹幹の温度を継続的に測定し、林内の顕熱・潜熱・樹幹貯熱を評価した。②また、同様に林冠下の CO<sub>2</sub> プロファイルを測定し、これまで考慮していなかった林内の CO<sub>2</sub> 貯留量を測定した。

(2) 積雪環境がブナと他樹種に与える影響：①ブナ、ホオノキ、ミズナラが比較的優占するミニプロットを選定し、積雪環境の差異を確認するため、地温の連続測定を行った。積雪期間は地温がほぼ一定になることを利用し、積雪期間の分布を把握した。②上記 3 樹種を確認できるよう、タワー林冠

上にインターバルカメラを設置し、連続的に撮影を行うことで樹種ごとのフェノロジーを観察した。

③樹種ごとの成長量(=炭素固定量)を胸高直径と樹高のアロメトリーから見積もるために、既に調査したブナ以外のミズナラとホオノキの樹高曲線を求めた。

#### 4. 研究成果

上記の調査により以下のような成果が得られた。

##### (1) NEP の高精度測定 :

①林内貯熱の評価: 顕熱・潜熱貯熱とも、林内の大気が安定でかつ日射のある朝7~9時の時間帯に顕著な正のピークとなった。貯熱が負となる時間帯は、顕熱が夕方17~19時であったことに対して潜熱ははっきりしなかった。樹幹貯熱は樹幹温度が上昇する朝方にゆるやかな正のピークがあり、夕方以降負となった。全貯熱の季節変化としては葉が少なく日射がある程度ある春(3~4月)と秋(10~11月)に貯熱量が大きく、全貯熱量の正のピークで $60\text{Wm}^{-2}$ 、負のピークで $30\text{Wm}^{-2}$ を超え、貯熱を考慮すると熱収支のインバランス率が10%以上改善した。一方で植生活動が活発である5~9月は貯熱量が相対的に少なく、貯熱を考慮しても熱収支のインバランスは改善されなかった。

②林内 $\text{CO}_2$ 貯留の評価: 図1に例として林冠が閉じた8月の $\text{CO}_2$ 貯留量の日変化を示す。傾向としては、顕熱貯熱と同様であるがフラックスが逆向きであるため符号が異なり、夜間の貯留が朝方に解消されていた。葉のある時期(5~10月)では、他の月も同様の傾向で1日積算すると $\text{CO}_2$ 貯留は0となるが、樹冠上で測定されている光合成による $\text{CO}_2$ 吸収量と呼吸による $\text{CO}_2$ 放出量がそれぞれ1割程度過小評価されていることがわかった。その結果、葉のある時期におけるNEPの値は林冠上で測定された値とほぼ同じであった。一方で、葉の無い期間(11~4月)は光合成活動が行われないため、NEPの過大評価( $\text{CO}_2$ 放出量の過小評価)となっていた。2014年6月~2015年5月までのNEPは、 $\text{CO}_2$ 貯留非考慮で $1.39 \times 10^3 \text{gCO}_2\text{m}^{-2}$ であったが、貯留を考慮すると $1.25 \times 10^3 \text{gCO}_2\text{m}^{-2}$ となり、年間を通すと貯留を考慮しないことで1割程度NEPを過大評価しており、年間NEPを評価する上で冬季の貯留は有意に影響があることがわかった。

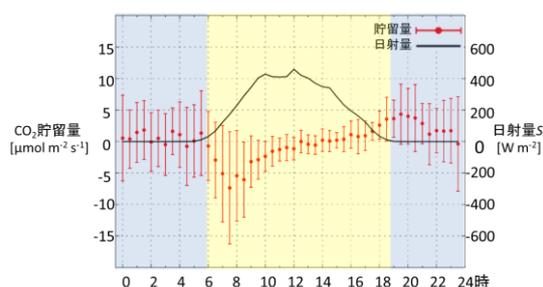


図1  $\text{CO}_2$ 貯留量の日変化(2014年8月平均値)

(2) 積雪環境がブナと他樹種に与える影響:

①各樹種の積雪期間: 図2に2015年開葉時期前後の各ミニプロットにおける地温変化を示す。 $0^\circ\text{C}$ 前後で日変化しない状況は積雪があることを意味する。この図より、ブナのミニプロットは他のミニプロットに比べ平均5日程度消雪が早くなっていることがわかった。2014年も同様の傾向であり、ブナは傾斜地に多く分布しているため消雪が早かったものと思われる。ブナプロットの地温は消雪直後にすぐ高温になるが、1週間程度で地温の振幅が小さくなり、展葉の進捗が速いことが示唆された。逆にホオノキやミズナラプロットは消雪後、2週間以上最高地温がブナよりも高くなっていた。また、ブナの実生と稚樹の開葉期から秋までの生存率は、林冠木の開葉から消雪までの期間が長いほど有意に減少する傾向が認められ、さらにこれらの実生・稚樹の生存率は開葉までの期間が長い個体ほど減少する傾向も認められた。この結果は消雪遅延がブナ実生と稚樹の生存率を減少させる重要な要因となっていることを示唆し、今後気候変動によりシーズン毎の積雪量の変動が大きくなった場合、ブナ実生と稚樹の生存率の変動も大きく影響を受ける可能性がある。

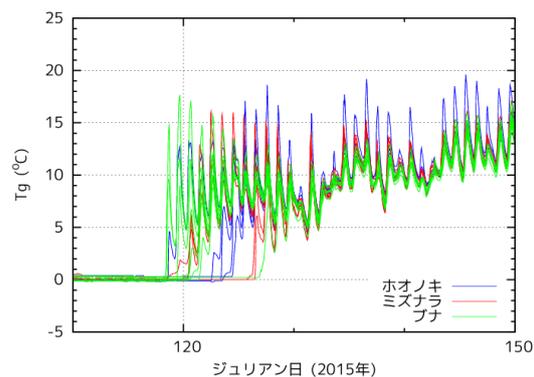


図2 開葉前後の各ミニプロットにおける地温

②各樹種のフェノロジー: 地上高34mに設置したインターバルカメラの画像から、各樹種の開葉時期を確認したところ、地温観測の結果と調和的であった。すなわち、ブナプロットでは他樹種プロットに先駆けて消雪し、ブナの開葉速度が他樹種よりも格段に速いことが観察できた。

③各樹種の樹高曲線: 図3中の実線は毎木調査のデータから得られた、ブナ、ホオノキ、ミズナラの林冠木の樹高曲線である。小径木(若齢時)でホオノキとミズナラは似たような樹高曲線となった一方で、ホオノキはで形状比(樹高÷胸高直径)が大きい傾向が見られた。ブナやミズナラに比べホオノキは耐陰性が高くないため、ホオノキの形状比が光環境を反映している可能性があり、アロメトリーに基づき成長量を見積もる際に注意が必要である。

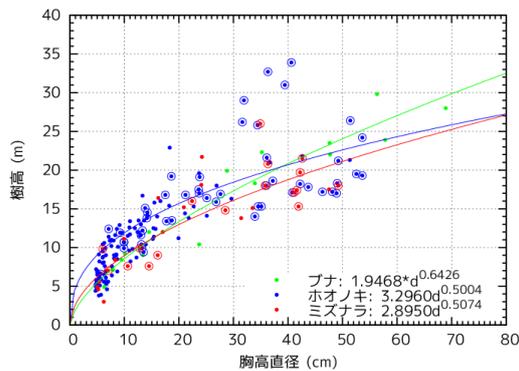


図3 ブナ、ホオノキ、ミズナラの樹高曲線  
(二重マークは林冠木)

<引用文献>

- ① Luysaert, S., *et al.*, Old-growth forests as global carbon sinks, *Nature*, 455 巻, 2008, 213-215.
- ② Inoue, S., and Yokoyama, K., Estimates of snowfall depth, maximum snow depth, and snow pack environments under global warming in Japan from five sets of predicted data, 59 巻, 2003, 227-236.
- ③ Matsui, T., *et al.*, Evaluation of habitat sustainability and vulnerability for beech (*Fagus crenata*) forests under 110 hypothetical climatic change scenarios in Japan, 12 巻, 328-339.
- ④ 田中信行ほか、2. 植物の分布を規定する気候要因の特定および気候変化に伴う生育地の移動予測、*天気*, 59 巻, 681-686.
- ⑤ Homma, K., Effects of Snowfall on the Species Composition and Population Structure of Siebold's Beech (*Fagus crenata* Blume) Forest in Echigo Mountains, Central Japan, *Res. Bull. Niigata Univ. For.*, 34 巻, 1-16.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① Ishida, S., General meteorological conditions of the Shirakami Natural Science Park, 2015, SHIRAKAMI-SANCHI, 査読無, 5 巻, 2016, 1-9, <http://www.hirosaki-u.ac.jp/shirakami/publication.html>
- ② 石田祐宣, 清水健太, 佐藤咲季, 児玉安正, 田邊真輝, 丹波澄雄, ひろだい白神レーダがとらえた津軽地方の冬季降水、東北の雪と生活、査読無、30 巻、2015、99-101、<http://www.seppyo.org/~tohoku/journal.htm>

③ Ishida, S., General meteorological conditions of the Shirakami Natural Science Park, 2014, SHIRAKAMI-SANCHI, 査読無, 4 巻, 2015, 1-8, <http://www.hirosaki-u.ac.jp/shirakami/publication.html>

④ 鳥丸猛, 成田真智子, 井頭千明, 石田祐宣, 伊藤大雄, 赤田辰治, 高倉森とサンスケ沢におけるブナの開花年次変動と気象要因および立地条件との相関解析、*白神研究*、査読有、10 巻、2015、12-21、<http://www.hirosaki-u.ac.jp/hupress/category/books/teiki/%E7%99%BD%E7%A5%9E%E7%A0%94%E7%A9%B6>

⑤ Ishida, S., General meteorological conditions of the Shirakami Natural Science Park, 2013, SHIRAKAMI-SANCHI, 査読無, 3 巻, 2014, 6-13, <http://www.hirosaki-u.ac.jp/shirakami/publication.html>

[学会発表] (計16件)

- ① 石田祐宣, 伊藤大雄, 白神山地における地上気象観測の現状、*白神研究会第13回研究報告会*、2016年4月23日、弘前大学(青森県・弘前市)
- ② 齊藤司, 石田祐宣, 伊藤大雄, 群落内 CO<sub>2</sub> 貯留を考慮した白神山地ブナ林の炭素収支、*日本農業気象学会 2016 年全国大会*、2016年3月15日、岡山大学(岡山県・岡山市) ※優秀ポスター賞受賞
- ③ 梁乃申, 寺本宗正, 石田祐宣, 高木健太郎, 平野高司, 高木正博, 中根周歩, 荒巻能史, アジア地域におけるチャンパー観測ネットワークの活用による森林土壌 CO<sub>2</sub> フラックスの定量評価、*農業環境工学関連5学会 2015 年合同大会*、2015年9月17日、岩手大学(岩手県・盛岡市)
- ④ Ishida, K., Hayakawa, R., and Hiramatsu, S., Effects of snowmelt timing on survival of beech saplings (*Fagus crenata*) in snowy mountains of northern Japan, *ESA 100th annual meeting & exposition*, 2015年8月10日、Baltimore (U. S. A.)
- ⑤ 石田祐宣, 清水健太, 佐藤咲季, 児玉安正, 田邊真輝, 丹波澄雄, ひろだい白神レーダがとらえた津軽地方の冬季降水、2015年度日本雪氷学会東北支部大会、2015年5月16日、日本大学工学部(福島県・郡山市)
- ⑥ 石田清, 早川玲奈, 積雪の多寡によって変わるブナの生態: 多雪山地における林冠フェノロジーと実生の生存パターン、第126

回日本森林学会大会、2015年3月28日、北海道大学（北海道・札幌市）

- ⑦石田清、ブナの開葉に要する積算温量の場所間変異：降霜と積雪の影響、第62回日本生態学会大会、2015年3月19日、鹿児島大学（鹿児島県・鹿児島市）
- ⑧寺本宗正、梁乃申、石田祐宣、曾継業、矢野沙季、白神山地ミズナラ林における土壌呼吸に対する温暖化の影響、日本農業気象学会2015年全国大会、2015年3月19日、文部科学省研究交流センター（茨城県・つくば市）
- ⑨伊藤大雄、石田祐宣、石田清、白神山地ブナ林の顕熱、潜熱ならびに樹幹貯熱量の実態と群落上熱収支への影響、日本農業気象学会2015年全国大会、2015年3月19日、文部科学省研究交流センター（茨城県・つくば市）
- ⑩齊藤司、石田祐宣、伊藤大雄、ブナ林の葉群が群落内CO<sub>2</sub>貯留の鉛直分布に与える影響、日本農業気象学会2015年全国大会、2015年3月19日、文部科学省研究交流センター（茨城県・つくば市）
- ⑪戒信宏、萬和明、中北英一、山口弘誠、田中賢治、高瀬恵次、石田祐宣、福池孝記、落葉広葉樹林における水蒸気・CO<sub>2</sub>フラックス観測、水文・水資源学会2014年度研究発表会、2014年9月26日、宮崎グリーンスフィア壺番館（宮崎県・宮崎市）
- ⑫石田祐宣、伊藤大雄、徳永真央、蓮沼洋志、白神山地の降水・積雪と蒸発散の特性、白神研究会第11回研究報告会、2014年4月12日、弘前大学（青森県・弘前市）
- ⑬石田祐宣、伊藤大雄、石田清、庄司優、高橋啓太、田上晃央、白神山地の気象特性と水・炭素の出入りを解明する3. 光合成/呼吸による炭素の出入りとブナ樹の炭素蓄積、白神山地世界自然遺産登録20周年記念シンポジウム・白神山地を学びなおす、2013年11月24日、弘前大学（青森県・弘前市）
- ⑭石田祐宣、伊藤大雄、徳永真央、蓮沼洋志、白神山地の気象特性と水・炭素の出入りを解明する2. 積雪量、降水量と蒸発散量、白神山地世界自然遺産登録20周年記念シンポジウム・白神山地を学びなおす、2013年11月24日、弘前大学（青森県・弘前市）
- ⑮石田祐宣、伊藤大雄、石田清、白神山地の気象特性と水・炭素の出入りを解明する1. 弘前大学による気象観測ならびに生態調査の概要、白神山地世界自然遺産登録20

周年記念シンポジウム・白神山地を学びなおす、2013年11月24日、弘前大学（青森県・弘前市）

- ⑯石田祐宣、田上晃央、伊藤大雄、石田清、白神山地ブナ林における熱・水・CO<sub>2</sub>フラックスの観測、日本気象学会2013年度秋季大会、2013年11月21日、仙台国際会議場（宮城県・仙台市）

〔その他〕

弘前大学白神自然観察園の気象状況  
[http://www.st.hirosaki-u.ac.jp/~earth\\_m etlab/aws.html](http://www.st.hirosaki-u.ac.jp/~earth_m etlab/aws.html)

本研究の調査サイトから約10km南東に離れた地点においても一般気象観測を行っており、リアルタイムでデータの公開を行っている。本研究調査サイトを含め気候値も公開している。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

石田 祐宣 (ISHIDA, Sachinobu)  
弘前大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：60292140

### (2) 研究分担者

伊藤 大雄 (ITO, Daiyu)  
弘前大学・農学生命科学部・准教授  
研究者番号：00333716

石田 清 (ISHIDA, Kiyoshi)  
弘前大学・農学生命科学部・准教授  
研究者番号：10343790