

## ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林における 夏季の気温低下が CO<sub>2</sub> フラックスに与える影響

大庭流維<sup>1</sup>・小坂泉<sup>2</sup>・金井亮磨<sup>2</sup>・風間廉大<sup>2</sup>・坂田祐樹<sup>2</sup>・星野龍光<sup>2</sup>・瀧澤英紀<sup>2</sup>・阿部和時<sup>2</sup>

1 日本大学大学院生物資源科学研究科

2 日本大学生物資源科学科

**要旨:** ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林を対象に、夏季の気温低下が日中 (10~14 時) の CO<sub>2</sub> フラックスに与える影響を明らかにするため、2014 年から 2020 年にかけて渦相関法による CO<sub>2</sub> フラックスの連続観測を日本大学水上演習林で実施した。その結果、光合成有効放射量 (*PAR*) が 600  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以上で、気温が 20°C 以上の場合、CO<sub>2</sub> フラックスは負値を示し、*PAR* が 600  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  未満で、気温が 20°C 未満の場合、CO<sub>2</sub> フラックスは正值を示すデータが多かった。*PAR* を 400  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  以上で、600  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  未満に限定した場合、気温と CO<sub>2</sub> フラックスに比較的明瞭な関係がみられたことから、この条件下において CO<sub>2</sub> フラックスは気温の影響を比較的強く受けることが示唆された。  
**キーワード:** CO<sub>2</sub> フラックス、気温、光合成有効放射量、渦相関法、ブナ

### Effects of low summer air temperatures on CO<sub>2</sub> flux in a cool-temperate, *Fagus crenata*-dominated deciduous broadleaf forest

Rui OBA<sup>1</sup>, Izumi KOSAKA<sup>2</sup>, Ryoma KANAI<sup>2</sup>, Rendai KAZAMA<sup>2</sup>,

Yuki SAKATA<sup>2</sup>, Tatsuaki HOSHINO<sup>2</sup>, Hideki TAKIZAWA<sup>2</sup> and Kazutoki ABE<sup>2</sup>

Graduate school of Bioresource Sciences, Nihon University, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, Japan 1

College of Bioresource Sciences, Nihon University, Fujisawa, Kanagawa 252-0880, Japan 2

**Abstract:** We investigated the effects of low summer air temperatures on daytime (10:00–14:00) CO<sub>2</sub> flux in a cool-temperate deciduous broadleaf forest dominated by *Fagus crenata*. Flux was measured continuously in July 2014–2020 at a tower located on the summit of Mount Takahira (985 m a.s.l.) in the Nihon University Forest (Minakami-machi, Tone-gun, Gunma Prefecture, Japan). Midday CO<sub>2</sub> flux was negative under high photosynthetically active radiation (*PAR*;  $\geq 600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) and high air temperatures (*Ta*;  $\geq 20^\circ\text{C}$ ), and positive under low *PAR* ( $< 600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) and low *Ta* ( $< 20^\circ\text{C}$ ). A clear relationship between *Ta* and CO<sub>2</sub> flux was exhibited under relatively low *PAR* ( $400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \leq \text{PAR} < 600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), suggesting that CO<sub>2</sub> flux at the site is strongly influenced by *Ta*.

**Key-word:** CO<sub>2</sub> flux, air temperature, photosynthetically active radiation, eddy covariance method, *Fagus crenata*

#### I はじめに

森林と大気間の CO<sub>2</sub> 交換量 (CO<sub>2</sub> フラックス) の長期モニタリングは、森林が気候変動に対してどのように応答するかを評価する上で重要である。筆者らは、気候変動に伴う環境変化に対するブナの応答特性を実証的に評価するために、ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林を対象として、群馬県北部に位置する日本大学水上演習林内の高平山山頂 (標高 985 m) に建設された観測塔を用いて、渦相関法による CO<sub>2</sub> フラックスの連続観測を実施している (2, 4)。

既往研究において気温上昇が森林の分布 (3) や炭素収支 (5) に与える影響について報告がなされている一方で、気温低下がそれらに与える影響を議論した研究事例は少ないが、大庭ら (4) は、本研究対象地において展葉が終了した 7 月に光強度と気温が低い気象条件では、森林から大気へ CO<sub>2</sub> を放出する割合が高いことを報告している。気象庁によれば 2020 年 7 月の西・東日本の気温は平年より低かったことが報告され (1), 本試験地においても 2020 年 7 月の気温は過去のものに比べ低く、日中の気温が 20°C 以下となる日が多くみられた。2020 年 7 月のよ

うな夏季の気温低下が森林群落スケールでの光合成活性にどのような影響を与えるか実証的に明らかにすることは、今後の気候変動に伴う森林の炭素動態をモデル化する上で有益な情報になると考えている。

そこで本研究では、冷夏における森林と大気間の  $\text{CO}_2$  フラックスの変動特性を明らかにすることを念頭におき、ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林を対象に、 $\text{CO}_2$  フラックスの変動の主要因である  $PAR$  (Photosynthetically Active Radiation ; 光合成有効放射量) を5つの階級に分類することで、光強度の違いが  $\text{CO}_2$  フラックスの変動に与える影響を最小限にしたうえで、2014年から2020年の7月の日中における気温と  $\text{CO}_2$  フラックスの関係について調べた。

## II 材料と方法

**1. 調査地** 群馬県利根郡みなかみ町の日本大学水上演習林(36°48'N, 139°02'E, 標高 650-985 m)にて、観測を実施している。観測地にはブナ(*F. crenata*)が優占しており、その他の樹種としてミズナラ(*Quercus crispula*)およびコナラ(*Quercus serrata*)などの平均樹高 15 m 程度の落葉広葉樹林が混在している。山頂周辺の地形は斜面勾配が急な円錐形を呈し、山頂付近の樹木の高さは 2 m 程度であるため、山頂に高さ 6 m の気象観測塔を設置し樹冠上における気象観測を実施している(2)。

**2.  $\text{CO}_2$  フラックスおよび一般気象の測定**  $\text{CO}_2$  フラックス( $F_c$ )は 6 m の観測塔の先端に水平・東向きに設置された Open-path 型ガスアナライザー(EC150, Campbell)および超音波風速温度計(CSAT3, Campbell)により、10 Hz で出力される3次元風速、気温、 $\text{H}_2\text{O}$  および  $\text{CO}_2$  濃度のデータをデータロガー(CR1000, Campbell)に記録させ、渦相関法により算出した。 $F_c$ の平均化時間は30分とした。詳細なフラックスの算定や解析方法については小坂ら(2)を参照されたい。

気温( $T_a$ )は高さ 6 m の観測塔に設置された温湿度センサー(HMP155, Vaisala)を用いて計測し、 $PAR$  は観測塔の頂上に設置された光量子センサー(PQS-1, Kipp & Zonen)により計測し、10秒毎に出力されるデータを10分平均した値をデータロガー(CR1000, Campbell)に記録させた。土壌含水率の計測では、TDR 土壌水分センサー(CS616, Campbell)を深度 10 cm に設置し、30分毎の瞬間値をデータロガー(CR1000, Campbell)に記録させた。降水量は高平山山頂から北へ直線距離でおおよそ 6 km 離れた藤原 AMeDAS (36°52'N, 139°04'E, 標高 700 m)のデータを使用した。解析期間は、2014年から2020年の7月1日から7月31日である。

## III 結果と考察

### 1. 一般気象および $\text{CO}_2$ フラックスの経時変化

図-1は、2014年、2015年、2016年、2017年、2018年、2019年および2020年の7月における a) 日積算降水量( $P$ )および日平均土壌含水率( $\theta$ )、10時~14時のデータを平均した b) 日中  $PAR$  ( $PAR_{\text{daytime}}$ )、c) 日中気温( $T_{a\text{daytime}}$ )、d) 日中  $\text{CO}_2$  フラックス( $F_{c\text{daytime}}$ )の経時変化を示す。

図-1 a)で示された2014~2020年7月の降雨について、7年間の平均積算降水量は 190 mm であった。各年の7月の積算降水量は、2017年の 287.5 mm で最も多く、2018年の 94 mm で最も少なかった。 $\theta$ の変動については、7年間において  $0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  付近でみられることから、土壌が比較的湿潤な状態であったと考えられるが、2018年では  $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  付近まで減少し、 $\theta$ の著しい減少がみられた(4)。図-1 b)で示された2014~2020年7月の  $PAR_{\text{daytime}}$  の平均値は約  $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であった。2014年および2016年の  $PAR_{\text{daytime}}$  の変動は大きく、 $PAR_{\text{daytime}}$  が  $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以下となる日もみられた(図-1 b1)および b3)参照)。2019年の  $PAR_{\text{daytime}}$  は、7月前半に  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  を下回る日が多くみられ(図-1 b6)参照)、2020年の  $PAR_{\text{daytime}}$  は、7月14日および17日に  $500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  を下回った(図-1 b7)参照)。図-1 c)で示された2014~2020年7月の  $T_{a\text{daytime}}$  の平均値は約  $22.7^\circ\text{C}$  であった。図-1 c3)において、2016年の  $T_{a\text{daytime}}$  は  $20^\circ\text{C}$  以下に低下する日が見られた。図-1 c6)における2019年の  $T_{a\text{daytime}}$  は7月5日から11日にかけて低下し、図-1 c7)における2020年の  $T_{a\text{daytime}}$  は概ね  $20^\circ\text{C}$  付近で変動し、7月14日および17日では  $20^\circ\text{C}$  を下回った。

図-1 d2), d3)および d7)における2015年、2017年および2020年の  $F_{c\text{daytime}}$  は、負値のデータが多く、2020年では  $PAR_{\text{daytime}}$  および  $T_{a\text{daytime}}$  が低下した7月14日および17日に正值を示すデータがみられた。2014年および2019年の  $F_{c\text{daytime}}$  の変動は大きく、負値と正值を示すデータがみられた(図-1 d1)および d6)参照)。2016年および2018年の  $F_{c\text{daytime}}$  は、7月前半では負値を、後半では正值を示した(図-1 d3)および d5)参照)。

**2.  $\text{CO}_2$  フラックスと気温の関係** 図示しないが、2014年から2020年の7月の日中(10時~14時)における  $F_c$  と  $PAR$  の関係について、 $PAR$  が  $0\sim 1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  の範囲では、下向き  $F_c$  は増加するが、 $PAR$  が  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上では、その傾向はあまりみられない。この傾向は7年間のデータに共通していた。本研究では、 $PAR$  の違いが  $F_c$  の変動に与える影響を最小限にするため、図-2 a1)~a5)に2014年から2020年の7月の日中(10時~14時)において  $PAR$  の範囲を限定した 1)  $F_c$  と  $T_a$  の関係を示

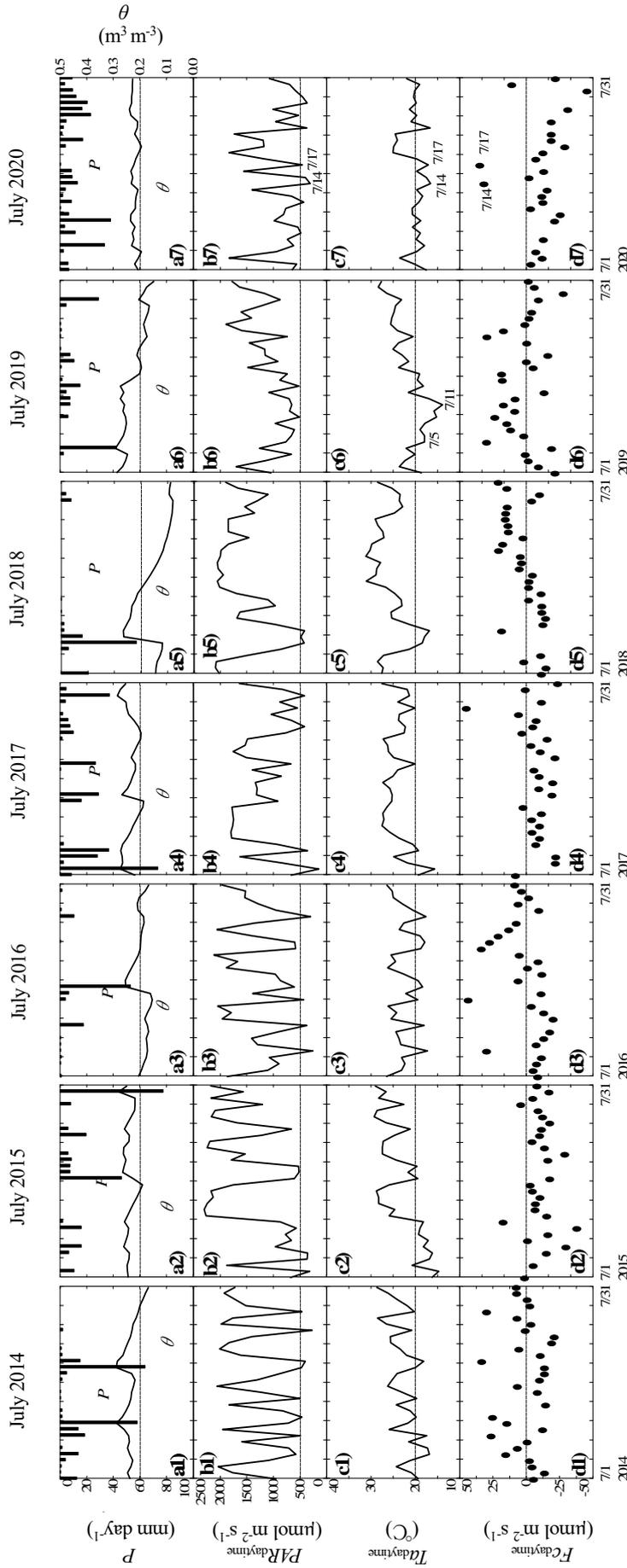


図-1. 1) 2014年, 2) 2015年, 3) 2016年, 4) 2017年, 5) 2018年, 6) 2019年および7) 2020年の7月における a) 日降水量( $P$ )および日平均土壌含水率( $\theta$ ), 10時~14時で平均した b) 日中光合成有効放射量( $PAR_{daytime}$ ), c) 日中気温( $T_{air, daytime}$ ), d) 日中 $CO_2$ フラックス( $F_{C, daytime}$ )の経時変化

Fig. 1 Time series of (a) daily precipitation ( $P$ , bars, left-hand scale) and daily mean volumetric soil water content at 10 cm depth ( $\theta$ , lines, right-hand scale), daytime (10:00–14:00) averaged (b) photosynthetically active radiation ( $PAR_{daytime}$ ), (c) air temperature ( $T_{air, daytime}$ ), (d)  $CO_2$  flux ( $F_{C, daytime}$ ) during the observation period (July 2014–2020).

し、図-2 b1)~b5)に相対的な  $F_c$  の頻度分布を示す。図-2 b1)~b5)の凡例は  $T_a$  によって色分けして表示した。大庭ら(4)によれば、 $\theta$  が  $0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  以上であれば、 $F_c$  の変動に与える影響は少ないことが報告されているため、図中のデータは  $\theta$  が  $0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  以上のものを使用した。

$PAR$  を  $0 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上で、 $400 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  未満に限定した図-2 a1)および b1)において、 $T_a$  が  $20^\circ\text{C}$  未満のデータが多く、図中で示されたデータの約 89 %の  $F_c$  は正值を示した。 $PAR$  を  $400 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上で、 $600 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  未満に限定した図-2 a2)および b2)において、 $T_a$  が

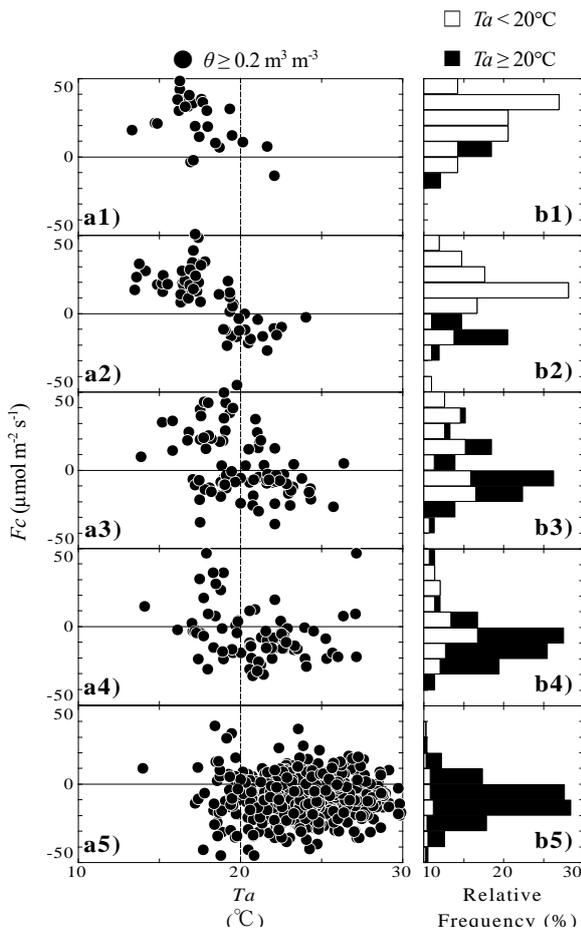


図-2. 2014年~2020年7月の日中(10時~14時)において  $PAR$  の範囲を限定した a)  $\text{CO}_2$  フラックス( $F_c$ )と気温( $T_a$ )の関係および b) 相対的な  $F_c$  の頻度分布

Fig. 2 Relationship between daytime (10:00–14:00) (a)  $\text{CO}_2$  flux ( $F_c$ ) and air temperature ( $T_a$ ), and (b) relative frequency distributions of  $F_c$ . Circles represent half-hourly data collected in July 2014–2020. Data are shown by photosynthetically active radiation ( $PAR$ ) level: (1)  $PAR < 400 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , (2)  $400 \leq PAR < 600 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , (3)  $600 \leq PAR < 800 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , (4)  $800 \leq PAR < 1000 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , and (5)  $PAR \geq 1000 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

$20^\circ\text{C}$  未満である場合、多くの  $F_c$  が正值を示し、 $T_a$  が  $20^\circ\text{C}$  以上のデータの多くは負値を示した。 $T_a$  が  $20^\circ\text{C}$  付近を境にして、 $F_c$  の正值と負値が比較的明瞭に分かれて分布するようにみとれる。このことは、図示された気象条件において本試験地の  $F_c$  は、 $T_a$  の影響を比較的強く受けることが考えられる。 $PAR$  を  $600 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上で、 $800 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  未満に限定した図-2 a3)および b3)において、図-2 a3)で示された  $F_c$  と  $T_a$  の関係は、図-2 a2)で示されたものに比べばらつきが大きい、 $T_a$  が  $20^\circ\text{C}$  以上では、 $F_c$  の多くのデータは負値を示した。 $PAR$  を  $800 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上で、 $1000 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  未満に限定した図-2 a4)および b4)において、 $F_c$  と  $T_a$  の関係は不明瞭であり、 $T_a$  よらず、 $F_c$  は負値を示すデータが多くみられた。 $PAR$  を  $1000 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上に限定した図-2 a5)および b5)において、 $T_a$  が  $20^\circ\text{C}$  以上のデータが多く、図中で示されたデータの約 82 %の  $F_c$  は負値を示した。

以上より、2014~2020年7月において土壌水分が  $F_c$  に与える影響を少なくした条件( $\theta \geq 0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ )で、 $PAR$  が  $600 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上で、 $T_a$  が  $20^\circ\text{C}$  以上である場合、 $F_c$  は負値を示すデータが多く、大気から森林へ  $\text{CO}_2$  を吸収する傾向がみられた。 $PAR$  が  $600 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  未満で、 $T_a$  が  $20^\circ\text{C}$  未満の場合、 $F_c$  は正值を示すデータが多く、森林から大気へ  $\text{CO}_2$  を放出する傾向がみられた。 $PAR$  を  $400 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  以上で、 $600 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  未満に限定した条件において、 $F_c$  は  $T_a$  の影響を比較的強く受けることが示唆された。

#### 引用文献

- (1) 気象庁. <https://www.jma.go.jp/jma/press/2008/03a/tenko2007.html> (2020年10月16日参照)
- (2) 小坂泉・野中翔平・大塚羽純・関崎良美・田口裕也・清水伸大・瀧澤英紀・阿部和時 (2016) 冷温帯落葉広葉樹林における渦相関法によるフラックスの連続観測. 関東森林研究 67(1): 77-80
- (3) 松井哲哉・田中信行・八木橋勉・小南裕志・津山幾太郎・高橋潔 (2009) 温暖化にともなうブナ林の適域の変化予測と影響評価. 地球環境 14(2): 165-174
- (4) 大庭流維・小坂泉・塩崎義彦・牛田丞亮・和田光・瀧澤英紀・阿部和時 (2020) 気象条件の違いが冷温帯落葉広葉樹林における展葉後の  $\text{CO}_2$  フラックスの変動に与える影響—2017年, 2018年および2019年のデータ比較—. 関東森林研究 71(1): 125-128
- (5) 斎藤琢・永井信・村岡裕由 (2014) 陸域生態系の炭素収支の現状診断と将来予測—リモートセンシングの利用—. 日本生態学会誌 64: 243-252