

## ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林における

春季から夏季の CO<sub>2</sub> フラックスの変動特性—2017 年と 2018 年の比較—朝倉健介<sup>1</sup>・小坂泉<sup>1</sup>・島田悠暉<sup>1</sup>・宮浦琴美<sup>1</sup>・古旗果波<sup>1</sup>・瀧澤英紀<sup>1</sup>・阿部和時<sup>1</sup>

1 日本大学生物資源科学部

**要旨:** ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林において、2018 年 1~7 月の CO<sub>2</sub> フラックスと 2017 年のものを比較することで、2018 年の高温と乾燥が CO<sub>2</sub> フラックスの変動に与える影響を評価するため、日本大学水上演習林で渦相関相によるフラックス観測を実施した。その結果、2018 年 3 月の平均気温は 2017 年のものより高く、2018 年の下向き CO<sub>2</sub> フラックスが増加する時期は、2017 年のものに比べ 3 週間程度早かった。2018 年 6~7 月の CO<sub>2</sub> フラックスの変動幅は、2017 年のものに比べ大きく、2018 年 7 月中旬から下旬にかけて上向き CO<sub>2</sub> フラックスが増加した。2018 年 6~7 月の CO<sub>2</sub> フラックスの変動は、土壌含水率が 0.1~0.15 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> に限定された乾燥条件では、飽差の影響を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, 飽差, 土壌含水率, 渦相関法, ブナ

**Variability in CO<sub>2</sub> flux from spring to summer in a cool-temperate deciduous broadleaf forest dominated by *Fagus crenata* -A comparison between 2017 and 2018-**

Kensuke ASAKURA<sup>1</sup>, Izumi KOSAKA<sup>1</sup>, Yuuki SHIMADA<sup>1</sup>, Kotomi MIYAURA<sup>1</sup>,  
Kamami FURUHATA<sup>1</sup>, Hideki TAKIZAWA<sup>1</sup> and Kazutoki ABE<sup>1</sup>

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

**Abstract:** To investigate the variability in CO<sub>2</sub> flux in January–July in 2017 and 2018 from a cool-temperate deciduous broadleaf forest dominated by *Fagus crenata*, the flux was measured continuously at a tower located on the summit of Mt. Takahira (985 m a.s.l.), in Nihon University Forest, Gunma Prefecture, Japan. The mean temperature was higher in March 2018 than in 2017. An increase in the downward CO<sub>2</sub> flux occurred 3 weeks earlier in 2018 than it did in 2017. The range in the variation of CO<sub>2</sub> flux from June to July was larger in 2018 than in 2017, and the positive values of daytime CO<sub>2</sub> flux increased from the middle to the end of July in 2018. Variability in the CO<sub>2</sub> flux was closely related to the volumetric soil water content ( $\theta$ ) during the dry year of 2018, and it was strongly influenced by the vapor pressure deficit under dry ( $0.1 \leq \theta < 0.15$ ) and light-saturated (photosynthetically active radiation  $> 1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) conditions at this site.

**Key-word:** CO<sub>2</sub> flux, Vapor pressure deficit, Volumetric soil water content, eddy covariance method, *Fagus crenata*

## I はじめに

温暖化などの気候変動が陸域生態系に与える影響を評価する上で、陸地の 3 割を占める森林と大気間の CO<sub>2</sub> 交換量を把握することは重要であり、空間の平均的な CO<sub>2</sub> フラックス(単位時間・単位面積あたりの CO<sub>2</sub> 吸収・放出量)を精度高く測定できる渦相関法による連続測定が、世界各地で普及している(例えば、1)。筆者らは、将来分布確率が低下することが報告されている(4)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最高標高地点(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(3)。

2018 年 7 月において、太平洋高気圧と上層のチベット高気圧が日本付近に張り出し続けたため、埼玉県熊谷市において 7 月 23 日の気温が 41.1°C を記録する等、日本各地で 40°C を超える気温が観測された(2)。このような気象条件下において本試験地での CO<sub>2</sub> フラックスの変動特性を評価することは、ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林が気候変動等による環境変化に対してどのように応答するかを検討する際に、有益な情報になると考える。

そこで本研究では、本試験地における 2018 年の CO<sub>2</sub> フラックスの変動特性を明らかにするため、2018 年の 1 月から 7 月において実施した渦相関法による CO<sub>2</sub> フラックスの測定データを前年度の 2017 年のものと比較した。

## II 材料と方法

**1. 調査地** 観測地は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)で、優占樹種はブナ(*F. crenata*)であり、その他の樹種としてミズナラ(*Quercus crispula*)などの落葉広葉樹が混在した平均樹高 15 m 程度の 50~60 年生の二次林であるが、山頂周辺の地形は斜面勾配が急な円錐形を呈し、山頂付近の樹高は 2 m 程度であるため、6 m の観測塔の上端での高さは山頂周辺にある樹木の樹高よりも高くなる。

**2. 調査項目** 山頂の観測塔の先端に 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)を水平・東向きに設置し、10Hz で出力される 3 次元風速、気温、H<sub>2</sub>O および CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> フラックスを算出した。フラックスの平均化時間は 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(3)を参照されたい。

観測塔の 6 m の高さに温湿度センサー(HMP155, Vaisala)を用いて気温と湿度を計測し、観測塔の頂上に光量子センサー(PQS-1, Kipp & Zonen)を設置し、全天光合成有効放射量(PAR)を計測し、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。土壌含水率および地温の計測では TDR

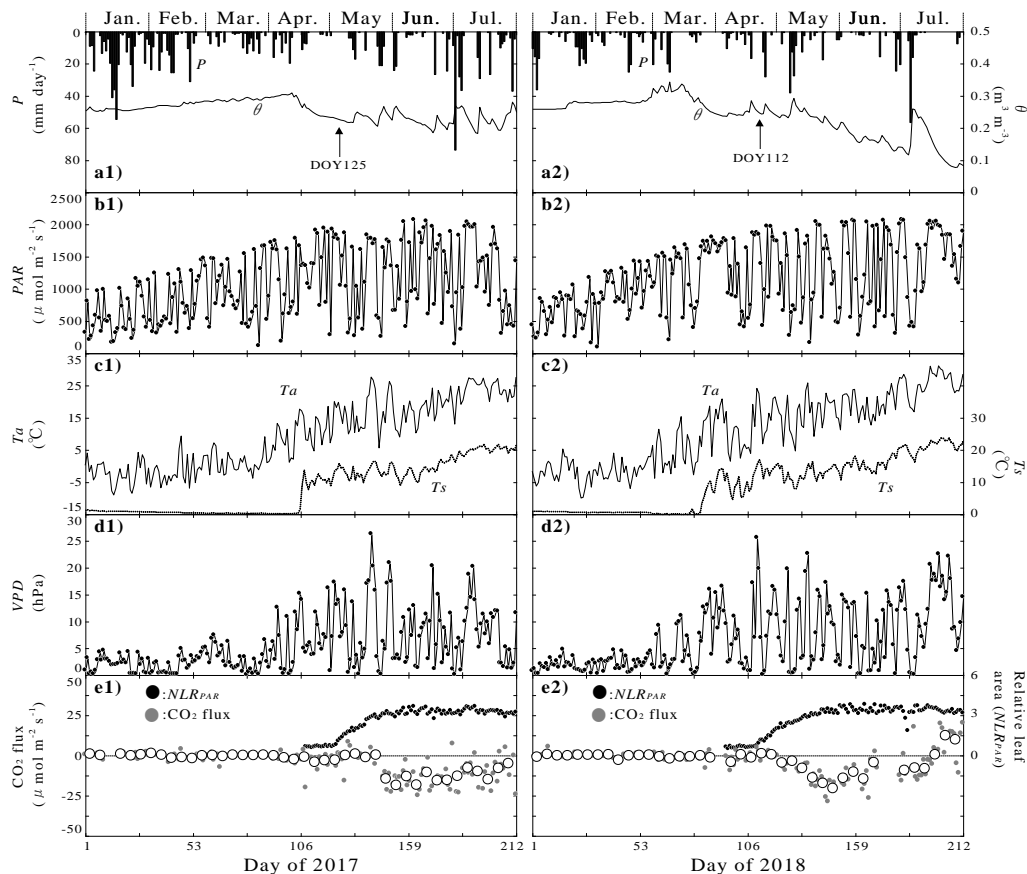


図-1. 1)2017年および2)2018年の1月から7月における a)日降水量(P)および日平均土壌含水率( $\theta$ ), 日中(10時~14時)平均した b)光合成有効放射量(PAR), c)気温( $T_a$ )および地温( $T_s$ ), d)飽差(VPD), e)CO<sub>2</sub> フラックスおよび相対的な葉面積( $NLR_{PAR}$ )の季節変化

Fig.1 Seasonal changes in (a) daily precipitation ( $P$ ; bars, left scale) and daily mean volumetric soil water content at a depth of 10 cm ( $\theta$ ; lines, right scale), midday (1000–1400 h) averaged (b) photosynthetically active radiation (PAR), (c) air temperature ( $T_a$ ; solid lines, left scale), and soil temperature ( $T_s$ ; dashed lines, right scale), (d) vapor pressure deficit (VPD), and (e) CO<sub>2</sub> fluxes (gray circles are midday mean values and white circles are the mean values over 5 days, left scale) and daily negative logarithmic values of the ratio of PAR on the forest floor to that above the canopy [ $-\ln(PAR/PARe)$ ;  $NLR_{PAR}$ ] (black circles, right scale).

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。山頂の観測塔から水平距離で南西へ 200 m 程度離れた地点に、高さ 1 m 程度の L 字アングルの先端に光量子センサー (PAR02N, Prede) を設置し、林床光合成有効放射量 (PAR) を計測した。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(LR5041, Hioki)に記録させた。林床に設置した光量子センサーについては、積雪による影響を受けるため、展葉前に再設置した。本研究では、 $PAR_i$  に対する  $PAR_t$  の比である負の対数値( $NLR_{PAR}$ )を相対的な葉面積と定義し、次式で算定した。

$$NLR_{PAR} = -\ln\left(\frac{PAR_t}{PAR_i}\right) \quad (1)$$

降水量は高平山山頂から北へ直線距離でおよそ 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、2017 年および 2018 年の 1 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 CO<sub>2</sub> フラックスの季節変化** 図-1 は、2017 年および 2018 年の 1 月から 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( $\theta$ ), 日中(10 時~14 時)平均した b) 光合成有効放射量( $PAR$ ), c) 気温( $T_a$ ) および地温( $T_s$ ), d) 飽差( $VPD$ ), e) CO<sub>2</sub> フラックスおよび相対的な葉面積( $NLR_{PAR}$ )の季節変化を示す。

図-1 a1) および a2) において、積雪期である 2017 年および 2018 年の 1 月から 2 月の積算降水量は、それぞれ 576 mm および 273 mm であり、2017 年において 2018 年の 2 倍以上の積雪があったと考えられる。2017 年において  $\theta$  は 0.2~0.3 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> の範囲で変動し、土壌は比較的湿潤であるが、2018 年では 7 月 13 日から 7 月 27 日まで無降雨となり、 $\theta$  が 0.1 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> 以下まで低下し、土壌が乾燥していたことを示す (図-1 a2) 参照)。

図-1 b1) および b2) では、両年における  $PAR$  の最大値は 1 月から 4 月にかけて緩やかに増加し、5 月以降では 2,000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  程度となった。2018 年 7 月の  $PAR$  は 1,500~2,000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  である場合が多く、2017 年比べて高い日が多かった。

図-1 c1) および c2) において、実線は気温、点線は地温を示す。2018 年 3 月の気温は、2017 年と比べ 5°C 以上になる場合が多かった。地温が 0°C 付近から急激に上昇する日を消雪日と仮定すると、2017 年では 4 月 16 日、2018 年では 3 月 25 日となり、2018 年は 2017 年より積雪が少なく、消雪日が早かったと考えられる。

図-1 d1) および d2) における飽差の変動は、両年とも 1 月から 3 月では小さいが、4 月以降では大きくなった。6 月以降の飽差については、2017 年よりも 2018 年で 15hPa 以上を示す場合が多く、特に 7 月ではその傾向が顕著にみられ、2017 年よりも 2018 年で大気がやや乾燥していたと考えられる。

図-1 e1) および e2) において、黒色丸印は  $NLR_{PAR}$ 、灰色丸印は日中 CO<sub>2</sub> フラックス、白色丸印は日中 CO<sub>2</sub> フラックスの 5 日平均値を示す。 $NLR_{PAR}$  については、2017 年では DOY 125、2018 年では DOY 112 から増加する傾向がみられ、このタイミングで開葉したことを示す。大気から森林への CO<sub>2</sub> 吸収量を示す下向き CO<sub>2</sub> フラックスは、2017 年では DOY 143、2018 年では DOY 123 以降で増加する傾向がみられた。開葉と CO<sub>2</sub> フラックスのタイミングの差は、2018 年よりも 2017 年で大きい。この要因として、開葉直後の  $\theta$  が 2018 年よりも 2017 年で低いことから、乾燥条件の違いを反映した可能性があると考えられる。展葉終了後の 6 月以降の CO<sub>2</sub> フラックスの変動幅は、2017 年よりも 2018 年で大きい傾向がみられ、特に 2018 年 7 月下旬において CO<sub>2</sub> フラックスは正值を示し、森林から大気へ CO<sub>2</sub> を放出していることが示された。

**2. CO<sub>2</sub> フラックスと PAR の関係** 展葉後の CO<sub>2</sub> フラックスの変動要因について解析するため、図-2 に 2017

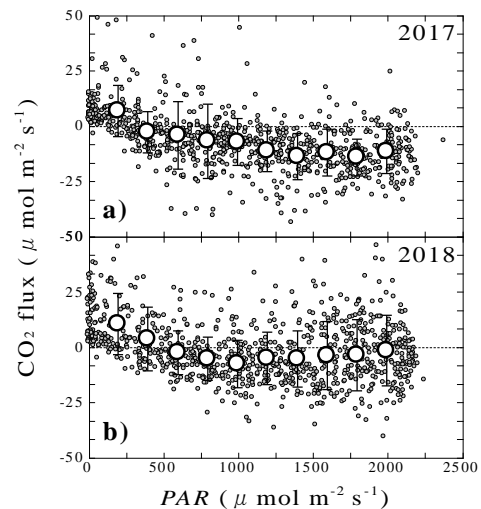


図-2. a) 2017 年および b) 2018 年の 6 月から 7 月における CO<sub>2</sub> フラックスと光合成有効放射量 ( $PAR$ ) の関係

Fig.2 Relationship between CO<sub>2</sub> flux and photosynthetically active radiation ( $PAR$ ). Gray circles are half-hourly data for June–July in (a) 2017 and (b) 2018. White circles are the mean values divided into the  $PAR$  values every 200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , and vertical bars represent the standard deviation.

年および 2018 年の 6 月から 7 月における CO<sub>2</sub> フラックスと PAR の関係を示す。図-2 における黒丸は、PAR が 100~2,100 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> の範囲で 200 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 毎に区分けした場合の CO<sub>2</sub> フラックスの平均値を示し、エラーバーはその標準偏差を示す。図-2 a) および b) において、両年とも PAR が 0~1,000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> の範囲では、下向き CO<sub>2</sub> フラックスは緩やかに増加する傾向がみられるが、PAR が 1,000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 以上では、その傾向があまりみられない。このことから、PAR が 1,000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 以上の場合では、光環境が CO<sub>2</sub> フラックスの変動に与える影響は少ないと考えられる。しかし図-2 b) において、PAR が 1,000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 以上の場合で、CO<sub>2</sub> フラックスに大きなばらつきがみられる。

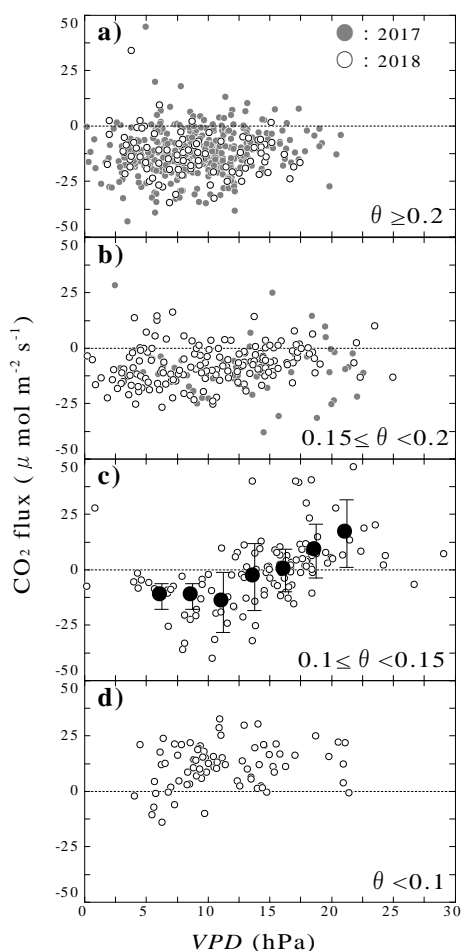


図-3. 2017 年および 2018 年の 6 月から 7 月における CO<sub>2</sub> フラックスと飽差 (VPD) の関係  
 Fig.3 Relationship between CO<sub>2</sub> flux and vapor pressure deficit (VPD) under light-saturated conditions (PAR > 1000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) in June–July 2017 (gray circles) and 2018 (white circles). Data are classified according to the volumetric soil water content ( $\theta$ ).

**3. CO<sub>2</sub> フラックスと飽差の関係** 図-3 は、2017 年および 2018 年の 6 月から 7 月における CO<sub>2</sub> フラックスと飽差の関係を示し、 $\theta$  によって分類されたものであり、灰色丸印は 2017 年、白色丸印は 2018 年のデータを示す。PAR が CO<sub>2</sub> フラックスに与える影響を除くため、PAR が 1,000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 以上のデータを用いた。

図-3 a) では  $\theta$  が 0.2 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> 以上で、土壌が比較的湿潤であるため、2017 年および 2018 年の CO<sub>2</sub> フラックスは概ね負値を示し、その割合は両年ともに図-3 a) で示されたデータの 93% を占めた。 $\theta$  を 0.15~0.2 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> に限定した図-3 b) では、図-3 a) と同様に飽差によらず CO<sub>2</sub> フラックスは 0 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 以下に多くみられた。 $\theta$  を 0.1~0.15 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> に限定した図-3 c) に関しては、飽差が 5.0~22.5 hPa の範囲で 2.5 hPa 毎に区分けした場合の CO<sub>2</sub> フラックスの平均値を黒色丸印で示し、エラーバーはその標準偏差を示す。図-3 c) で示されたデータにばらつきが認められるが、飽差が 10~20 hPa の範囲において、下向き CO<sub>2</sub> フラックスから上向き CO<sub>2</sub> フラックスへ変化するように見てとれる。このことは、本試験地における CO<sub>2</sub> フラックスの変動は、PAR が 1,000 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 以上で、比較的土壌が乾燥している  $\theta$  が 0.1~0.15 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> の条件では、飽差の影響を比較的強く受けることが示唆される。 $\theta$  を 0.1 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> 未満に限定した図-3 d) では、図中で示されたデータの 89% の CO<sub>2</sub> フラックスが正值を示した。土壌が極度に乾燥した状態では、飽差の CO<sub>2</sub> フラックスに対する影響は小さくなった。但し、図-3 c) および d) で示されたデータは 2018 年のみ生じているため、今後もデータを蓄積し、飽差が CO<sub>2</sub> フラックスの変動に与える影響を検証する必要があると考えている。

#### 引用文献

- (1) Baldocchi, D. D. (2003) Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Bio.* 9: 479-492
- (2) 気象庁. オンライン  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rankall>  
 (2018 年 10 月 31 日参照)
- (3) 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
- (4) 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. *地球科学* 14(2): 165-174