

## ブナが優占する冷温帯落葉広葉樹林における夏季の熱フラックスの変動特性

小坂泉<sup>1</sup>・松島克<sup>1</sup>・大庭流維<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、夏季の熱フラックスの変動特性を明らかにするため、5年間(2014年から2018年)において7月に実施した渦相関法に基づく顕熱および潜熱フラックス( $H$ および $\lambda E$ )のデータを比較した。その結果、2018年7月において月平均した気温および飽差は、他の年のものに比べて高くなった。2018年7月中旬までは日中の $\lambda E$ は $H$ を上回り、 $\lambda E/(H+\lambda E)$ は0.6~0.8の範囲で変動したが、2018年7月下旬において土壌含水率の低下に伴い、 $\lambda E$ が $H$ を下回り、 $\lambda E/(H+\lambda E)$ が著しく減少する傾向を示した。この期間では、気温および飽差が高かったにもかかわらず、土壌の乾燥が熱フラックスの変動に与える影響が顕著であった。

**キーワード:** 顕熱フラックス, 潜熱フラックス, 渦相関法, 土壌含水率, ブナ

**Variability in heat fluxes in summer in a cool-temperate deciduous broadleaf forest dominated by *Fagus crenata***

Izumi KOSAKA<sup>1</sup>, Suguru MATSUSHIMA<sup>1</sup>, Rui OBA, 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 heat fluxes in summer from a cool-temperate deciduous broadleaf forest dominated by *Fagus crenata*, the flux was measured continuously using the eddy covariance method at a tower located on the summit of Mt. Takahira (985 m a.s.l.) in Nihon University Forest, Gunma Prefecture, Japan. The sensible heat flux ( $H$ ) and latent heat flux ( $\lambda E$ ) in July from 2014–2018 were compared. The monthly average daytime air temperature and vapor pressure deficit in July were higher in 2018 than in 2014–2017. In the daytime, the  $\lambda E$  was greater than the  $H$ , and the  $\lambda E/(H+\lambda E)$  ranged from approximately 0.6–0.8 until the middle of July 2018. However, at the end of July 2018, the  $\lambda E$  was lower than the  $H$  and the  $\lambda E/(H+\lambda E)$  significantly declined with a decrease in the volumetric soil water content. The variability in the heat flux at this site was strongly influenced by the volumetric soil water content during the dry period of July 2018, under conditions of high air temperature and high vapor pressure deficit.

**Key-word:** sensible heat flux, latent heat flux, eddy covariance method, volumetric soil water content, *Fagus crenata*

## I はじめに

渦相関法による森林-大気間における熱、水および二酸化炭素の交換量の長期的なモニタリングは、温暖化などの気候変動に伴い年々変動する環境の変化(例えば、気温上昇や土壌干ばつ)に対する森林の蒸発散や光合成などの応答特性を評価する上で強力なツールの1つであると考えている。本研究対象である冷温帯落葉広葉樹林における優占樹種はブナ(*Fagus crenata*)であるが、松井ら(3)は気候変動に伴う気温上昇により本州のブナの分布確率が低下することを報告している。筆者らは、ブナが気候変動などの環境変化にどのように応答するかを現地観測に基づいて実証的に明らかにすることを念頭におき、群馬県北部に位置する日本大学水上演習林において渦相関

法によるフラックスの連続観測を実施している(2)。

本研究対象地における先行研究として、両川ら(4)は2高度の気温差および水蒸気圧差より算定されるボーエン比と、渦相関法で求められた顕熱および潜熱フラックス( $H$ および $\lambda E$ )より算定されるボーエン比が概ね一致することを示し、本試験地において渦相関法で得られた $H$ および $\lambda E$ は、比較的高い精度で測定されていることを報告している。朝倉ら(1)は、2018年7月中旬から下旬にかけて土壌水分の著しい低下に伴い森林から大気への二酸化炭素の交換量が増加することを示し、森林群落スケールでの光合成活性の低下を示唆する報告がなされているが、この時期に渦相関法で取得した熱フラックスについては議論していない。

そこで本研究では、本試験地において渦相関法により取得した2014年から2018年における夏季の熱フラックスデータを比較することで、2018年の7月における $H$ および $\lambda E$ の変動特性を明らかにすることを目的とした。

## II 材料と方法

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。

演習林内の最高標高地点(標高: 985 m)である高平山山頂に建設された6 m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、気温およびH<sub>2</sub>O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 $H$ および $\lambda E$ 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(2)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た。観測塔の頂上に放射収支計(NR01, Hukseflux)を設置し、上向き・下向き短波放射量および上向き・下向

き長波放射量の4成分の測定値を用いて純放射量( $R_n$ )を算出した。これらの測定については、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。本研究における解析期間は、2014年、2015年、2016年、2017年および2018年の7月1日から7月31日とした。

## III 結果と考察

1. 熱フラックスの日変化 図-1は、2014年から2018年の7月において月平均したa) 気温( $T_a$ ), b) 飽差( $VPD$ ), c)  $R_n$ , d)  $H$ およびe)  $\lambda E$ の日変化を示し、各項目によって凡例の印を変えて表示した。図中の実線は、2014年から2018年の5年間で月平均したものを示す。図-1 a1)~a5)において、2018年の月平均気温は他の年のものより高く、日中(9~15時)のピーク時で25°Cを上回り、5年間の平均値との差が大きい。図-1 b1)~b5)では、日中における2018年の月平均飽差は10 hPaを上回り、他の年のものより高く、5年間の平均値よりも大きい。図-1 c1)

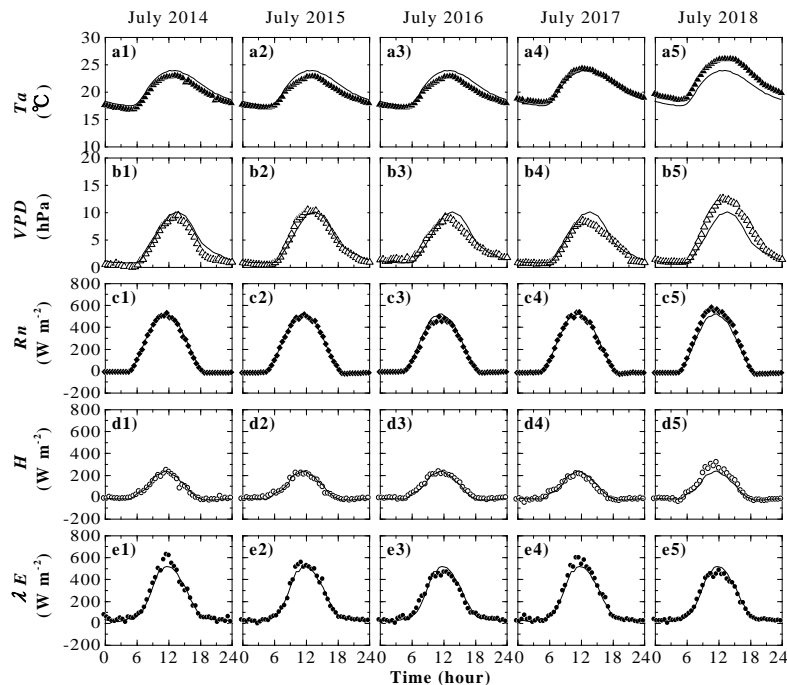


図-1. 2014年から2018年の7月において月平均した a) 気温( $T_a$ ), b) 飽差( $VPD$ ), c) 純放射量( $R_n$ ), d) 顕熱フラックス( $H$ )および e) 潜熱フラックス( $\lambda E$ )の日変化

Fig. 1 Monthly diurnal time courses of average 30-min (a) air temperature ( $T_a$ ; black triangles), (b) vapor pressure deficit ( $VPD$ ; white triangles), (c) net radiation ( $R_n$ ; diamonds), (d) sensible heat flux ( $H$ ; white circles), and (e) latent heat flux ( $\lambda E$ ; black circles) in July 2014, 2015, 2016, 2017, and 2018. Lines represent average diurnal time courses of these 5 years.

～c5)において、各年の月平均した  $Rn$  のピーク値は  $500 \sim 600 \text{ W m}^{-2}$  の範囲にあり、年による違いはあまり見られないが、2018年のものは5年間の平均値よりやや大きい。図-1 d1)～d5)において、2014年から2017年の月平均した  $H$  のピーク値は  $200 \text{ W m}^{-2}$  程度であるが、2018年のものはそれらに比べ大きく、5年間の平均値よりやや大きい。図-1 e1)～e5)において、月平均した  $\lambda E$  のピーク値については、2014年および2017年では  $600 \text{ W m}^{-2}$  程度で大きい、2016年および2018年では  $500 \text{ W m}^{-2}$  を下回り、他の年のものに比べやや小さい。

図-2は、図-1で示した各年の7月における a)  $Ta$ , b)  $VPD$ , c)  $Rn$ , d)  $H$  および e)  $\lambda E$  の月平均値から2014年から2018年の5年間で月平均したものの差し引き、その差を縦棒で示したものである。図-2 a1)～a5)では、2014年、2015年および2016年の  $\Delta Ta$  は常に負値であり、5年間の月平均気温に比べ  $1^\circ\text{C}$  程度低い。2017年および2018年の  $\Delta Ta$  は正值を示し、特に2018年の日中の  $\Delta Ta$  は、5年間の月平均気温に比べ  $2^\circ\text{C}$  前後高くなり、5年間で最も高かったと考えられる。図-2 b1)～b5)では、2014年、2015年および2017年の午後  $\Delta VPD$  が負値である場合が多く、大気乾燥の程度は小さいと考えられる。2018年の  $\Delta VPD$  は常に正值を示し、2018年では大気が比較的乾燥していたと考えられる。図-2 c1)～c5)に

おける  $\Delta Rn$  については、2018年では  $50 \text{ W m}^{-2}$  前後の正值である場合が多くみられ、他の年ではあまりみられないことから、本試験地において森林が受ける  $Rn$  は、他の年より2018年でやや大きかったと考えられる。図-2 d1)～d5)において、2018年の  $\Delta H$  は日中で  $50 \text{ W m}^{-2}$  前後の正值である場合が多くみられ、他の年のものよりやや大きかった。2018年の  $\Delta H$  の分布形状は2018年の  $\Delta Rn$  のものと類似している。図-2 e1)～e5)において、2014年、2015年および2017年の日中の  $\Delta \lambda E$  は正值(最大で  $108 \text{ W m}^{-2}$ )となり、2016年および2018年のものは負値(最小で  $-92 \text{ W m}^{-2}$ )となった。これらの結果から、気温、飽差および  $Rn$  が5年間で最も高い2018年において、 $Rn$  の  $H$  への配分比率は他の年のものに比べ大きくなり、 $Rn$  の  $\lambda E$  への配分比率は他の年のものに比べ小さくなったことを示唆する。

**2. 熱フラックスの経時変化** 図-3は、2014年から2018年の7月1日から7月31日における a) 日降水量( $P$ )および日平均土壌含水率( $\theta$ )、日中(10～14時)平均した b)  $Ta$  と  $VPD$ , c)  $H$  と  $\lambda E$  および d)  $\lambda E/(H+\lambda E)$  の経時変化を示す。図-3 a1)～a5)において、2014年、2015年、2016年、2017年および2018年7月の積算降水量は、それぞれ  $204.5 \text{ mm}$ ,  $237.5 \text{ mm}$ ,  $98.5 \text{ mm}$ ,  $287.5 \text{ mm}$ , および  $94.5 \text{ mm}$  であった。2016年および2018年の積算降水量は  $100 \text{ mm}$

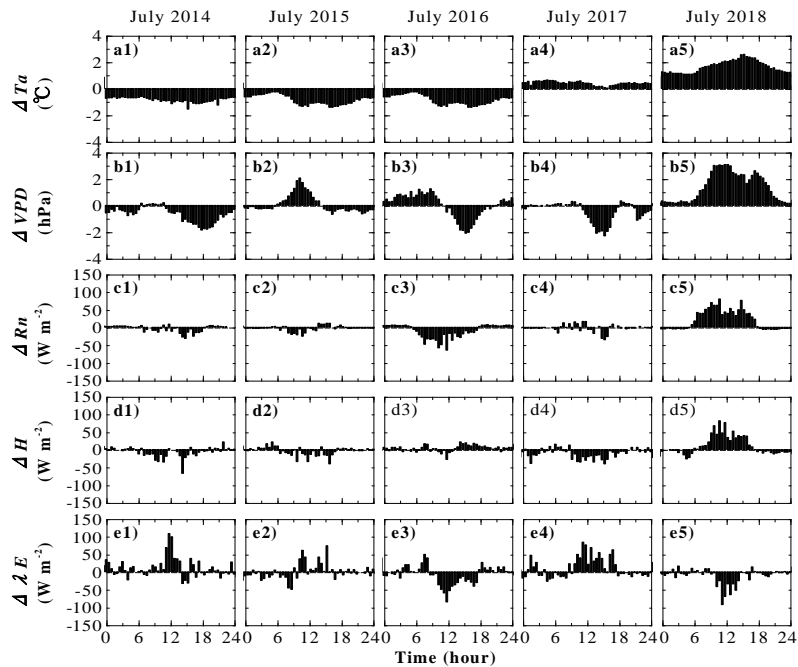


図-2. 図-1で示した各年の7月において月平均した a) 気温( $Ta$ ), b) 飽差( $VPD$ ), c) 純放射量( $Rn$ ), d) 顕熱フラックス( $H$ )および e) 潜熱フラックス( $\lambda E$ )と2014年から2018年の5年間で月平均したものの差

Fig. 2 Difference ( $\Delta$ ) between a monthly average value of a variable for a given year and the monthly average value of the variable from 2014 to 2018. (a) Air temperature ( $Ta$ ), (b) vapor pressure deficit ( $VPD$ ), (c) net radiation ( $Rn$ ), (d) sensible heat flux ( $H$ ), and (e) latent heat flux ( $\lambda E$ ) during the observation period, the month of July from 2014–2018.

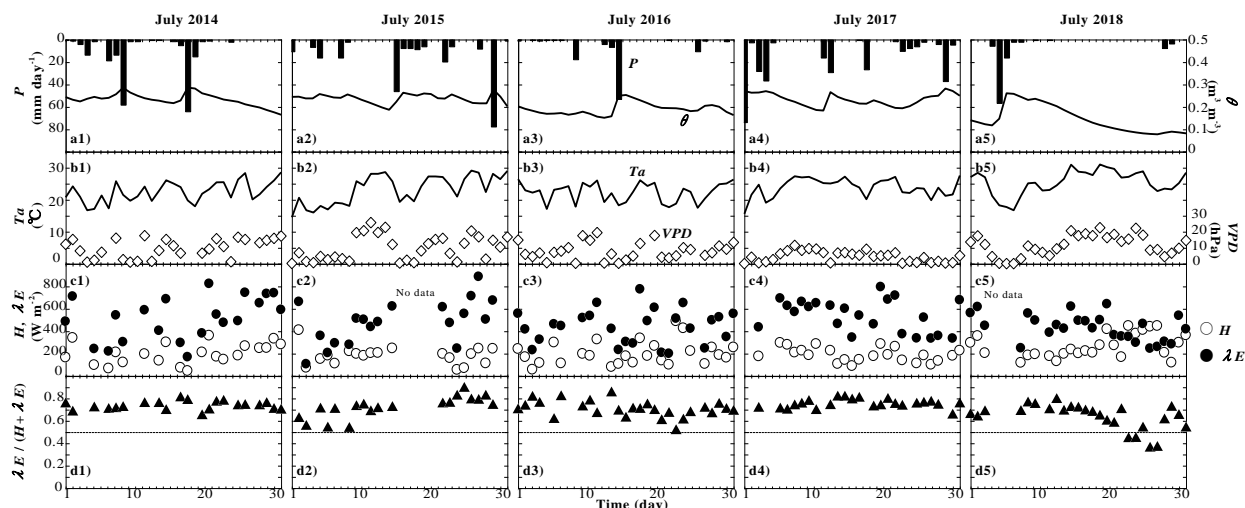


図-3. 2014年から2018年の7月における **a)** 日降水量( $P$ )および日平均土壌含水率( $\theta$ ), 日中(10~14時)平均した **b)** 気温( $T_a$ ) および飽差( $VPD$ ), **c)** 顕熱( $H$ )および潜熱( $\lambda E$ )フラックスおよび **d)**  $\lambda E / (H + \lambda E)$ の経時変化

Fig. 3 Time series of **(a)** daily precipitation ( $P$ ; bars, left scale) and daily mean volumetric soil water content at a depth of 10 cm ( $\theta$ ; solid lines, right scale), **(b)** midday (10:00–14:00) average air temperature ( $T_a$ ; solid lines, left scale) and vapor pressure deficit ( $VPD$ ; diamonds, right scale), **(c)** sensible heat flux ( $H$ ; white circles) and latent heat flux ( $\lambda E$ ; black circles), and **(d)** the ratio of the latent heat flux to the sum of the sensible heat flux and the latent heat flux [ $\lambda E / (H + \lambda E)$ ] (triangles).

以下となり、他の年のものに比べ5割以下と少なかった。このことは、図-2 e3)および e5)において、2016年および2018年の $\Delta \lambda E$ が負値を示した要因の1つであると考えられる。各年の $\theta$ は $0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ の前後の範囲で変動しているが、2018年7月下旬では $\theta$ が $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 以下まで低下し、土壌が乾燥した状態であった。図-3 b1)~b5)における $T_a$ は $20^\circ\text{C}$ 以上のデータが多くみられるが、2018年の無降雨期間の $T_a$ および $VPD$ は、それぞれ $30^\circ\text{C}$ および $20 \text{ hPa}$ 前後を示し、他の年に比べ高い日が多かった。

図-3 c1)~c5)において、白丸は $H$ 、黒丸は $\lambda E$ を示す。 $H$ および $\lambda E$ の変動は大きいものの、2014年から2017年では $\lambda E$ が $H$ を上回っているが、2018年7月下旬において $H$ が $\lambda E$ を上回るデータがみられた。図-3 d1)~d5)において、各年の $\lambda E / (H + \lambda E)$ は概ね $0.6 \sim 0.8$ の範囲に分布し、渦相関法で得られた熱フラックスに対する $\lambda E$ の占める割合が6~8割程度であることを示す。但し、無降雨期間である2018年7月中旬から下旬にかけて $\lambda E / (H + \lambda E)$ が $0.8$ から $0.4$ へ減少する傾向がみられた。2014年から2018年の7月1日から7月31日の日中(10~14時)において実蒸発散量の推定式であるPenman-Monteith式中の空気力学的抵抗( $r_a$ )および群落抵抗( $r_c$ )の平均値を求めると、それぞれ $8.8$ および $61.2 \text{ s m}^{-1}$ となったが、無降雨期間後半の $r_a$ および $r_c$ の平均値は、それぞれ $4.5$ および $122.0 \text{ s m}^{-1}$ となった。これらのことから、無降雨期間後半において気温および飽差が高かったにも

かわらず、土壌水分の減少に伴う $r_c$ の増加(群落レベルでの気孔開度の低下)により蒸散が抑制されたと考えられる。特に無降雨期間後半では、土壌の乾燥が熱フラックスの変動に与える影響が顕著になり、熱フラックスに対する $\lambda E$ の占める割合が4割程度まで低下したと考えられる。

#### 引用文献

- (1) 朝倉健介・小坂泉・島田悠暉・宮浦琴美・古旗果波・瀧澤英紀・阿部和時 (2019) 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 $\text{CO}_2$ フラックスの変動特性—2017年と2018年の比較—。関東森林研究 70(2): 印刷中
- (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
- (4) 両川光流・小坂泉・大越亮介・黒澤理沙・鎌田真友・高田名津海・村田真純・瀧澤英紀・阿部和時 (2018) 山岳域の冷温帯落葉広葉樹林における熱収支と風向の関連性。関東森林研究 69(1): 63-66