

自然教育園における熱・水蒸気・ 二酸化炭素フラックスの季節変化

菅原広史¹・清水昭吾²・成田健一³・三上岳彦⁴・萩原信介⁵

Seasonal variation of heat, vapor and CO₂ flux in the Institute for Nature Study

Hirofumi Sugawara¹, Shogo Shimizu², Ken-ichi Narita³,
Takehiko Mikami⁴ and Shinsuke Hagiwara⁵

はじめに

都市内に存在する公園緑地は、夏季のヒートアイランド（都市温暖化）を緩和する冷熱源として働く（成田ら、2004）。この事実は緑化を進める上で引き合いにされるが、都市計画としての緑地は夏季のみでなく年間を通してその価値が評価されるべきである。また一方で生態系という視点から見れば、都市内の緑地は周辺市街地からの熱や汚染物質の影響を受けている。したがって人為影響の少ない郊外の森林とは違った熱・水バランス、あるいは大気との二酸化炭素交換が行われているはずである。特に植生と大気との二酸化炭素交換は、植生の活性度によって吸収か放出に大きく変化するため、やはり年間を通じた検討が必要である。

しかしながら、都市内の緑地について熱輸送などの微気象学的な測定を、通年を通して行った研究はごく数例（例えば小栗・檜山、2002）しかない。そこで本研究では自然教育園で2009年から2010年にかけて行った通年観測の結果を報告する。

測定

2009年夏季より園中央のタワーにおいて乱流計測を行っている。タワー先端（地上20m、樹冠上約8m）の位置に超音波風速計（Kaijo SAT-540）およびオープンパスガス分析計（Licor LI-7500）を設置し、10Hzでの計測を実施中である。ガス分析計は標準ガスを用いた校正を半年に1回行い、測定精度の維持に努めた。乱流計測値から渦相関法を用いて各種輸送量（フラックス）を算出する際には、超音波風速計に対する横風補正、トランデューサ後流補正、地形性鉛直流補正、大気密度変動に

¹防衛大学校, National Defense Academy

²首都大学東京, Tokyo Metropolitan University

³日本工業大学, Nippon Institute of Technology

⁴帝京大学, Teikyo University

⁵国立科学博物館附属自然教育園, Institute for Nature Study, National Museum of Nature and Science

対する web 補正等を行い 30 分平均値を算出した。

また、タワー先端では正味放射量 (Kipp&Zonen CNR-1) による上・下方向の日射量および赤外放射量の測定を行った。さらに林床付近では二酸化炭素濃度 (VAISALA GMP343) および下向き日射量 (Kipp&Zonen CM3, 1ヶ所) も測定している。樹冠上での上向きおよび下向き日射量の比から樹冠での日射反射率(アルベード)を、樹冠上と林床での日射量の比から植生層の日射透過率を算出した。

熱, 二酸化炭素フラックスの季節変化

図 1 に気象概況として気温, 樹冠表面温度, 風速 (樹冠上) の日平均値と, 日積算降水量 (東京管区气象台) を示した。プロットが無い部分は測器の不具合で欠測の期間である。2010 年夏季は全国的に猛暑であったが 8 月の月平均気温は 2009 年が 26.9℃ に対して 2010 年は 30.9℃ であった。これは東京管区气象台 (大手町) の地上気温の推移 (2009 年が 26.6℃, 2010 年は 29.6℃) よりも若干大きい。樹冠表面温度は総じて気温とほぼ同程度か若干低温であり, その傾向には明確な季節変化は見られない。ここに示した樹冠表面温度は上向き赤外放射量から射出率を 1 として算出した値であり, タワー付近の平均的な樹冠温度を表していると考えられる。

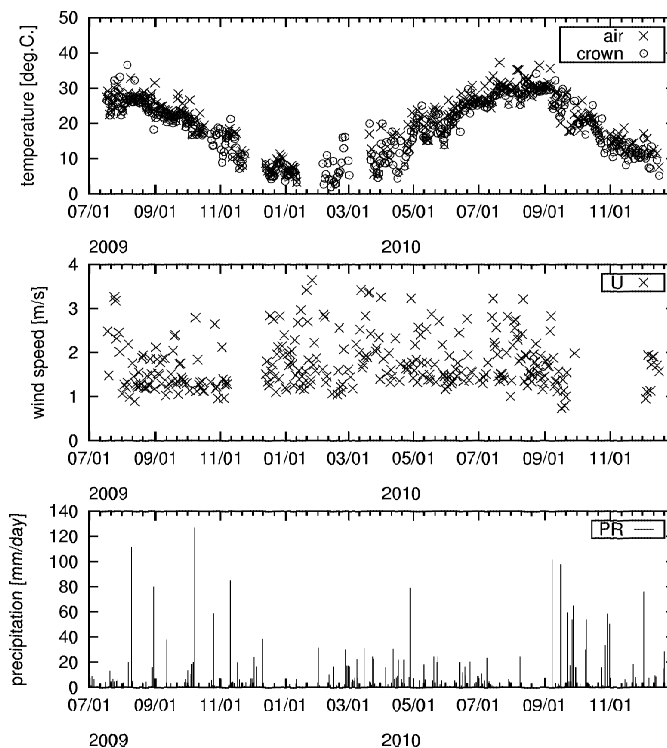


図 1 測定期間中の気象概況。気温, 樹冠表面温度, 風速の日平均値, および日積算降水量について示した。樹冠表面温度は上向き長波放射量から算出した値。

図2には顕熱 (H)・潜熱フラックス (LE), 正味放射量 ($Rnet$) について日平均値を示した。ただし、6時間以上の降水があった日および機材の不調による欠測期間は除いている。日平均顕熱フラックスがマイナス (大気を冷却) となっている日が夏期を中心に見られるが、これは日中が曇天で夜間が晴天の場合であった。次章で示すように夏期日中の顕熱フラックスはそれほど大きくないため、日平均値もマイナスとなりうる。

冬から春にかけて正味放射量の増加に伴い3月頃から顕熱フラックスが増加する。潜熱フラックスは遅れて5月頃月頃より増加するが、これは展葉に伴うものと考えられる。後に示すアルベードのデータ (図4) から4、5月に展葉が盛んであることがわかる。

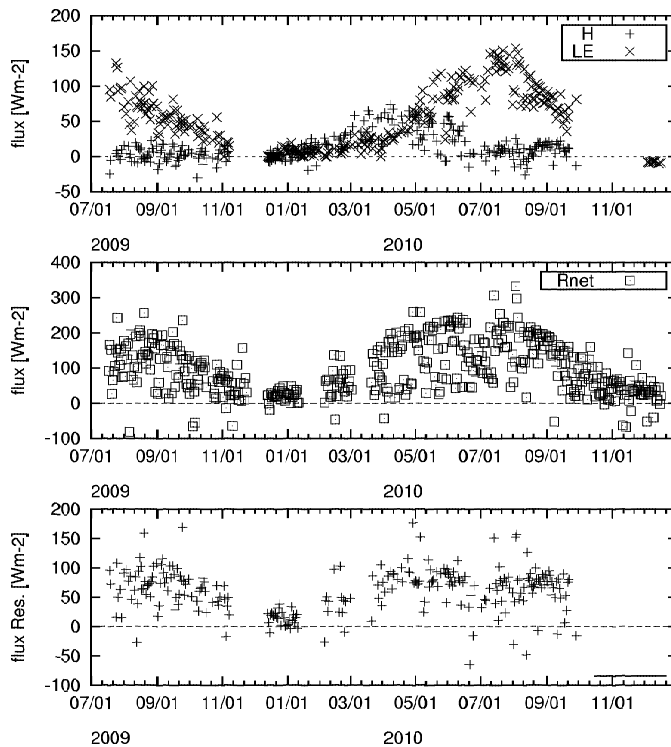


図2 熱フラックスの季節変化. 顕熱 (H), 潜熱 (LE), 正味放射フラックス ($Rnet$) の日平均値および日平均値を元に算出した熱収支残差 ($Rnet-H-LE$) を示した.

図2の最下段には熱収支各項の日平均値から得られた残差項 ($Rnet-H-LE$) を示す。樹体や地中の貯熱量が季節変化する成分はごく僅かであるので、この残差項は本来ゼロとなるべきであるが、大きく正の値をとっている。渦相関法による輸送量の測定を過小評価することが知られており (例えば Pannin et al., 1998; 神田ら, 2002) インバランス問題と呼ばれている。図2の残差は正味放射量と同様の季節変化をしていること考えるとインバランス問題が生じている可能性がある。一方で、図3に示す風速と残差項の相関図では既往研究 (例えば神田ら, 2002) で見られているような風速依存性は見られないこと、図3に示したインバランス率は既往研究での値 (大きくても0.3程度) と比べて大きいことから、別の理由 (例えば市街地からの水平移流など) によるとも考えられる。

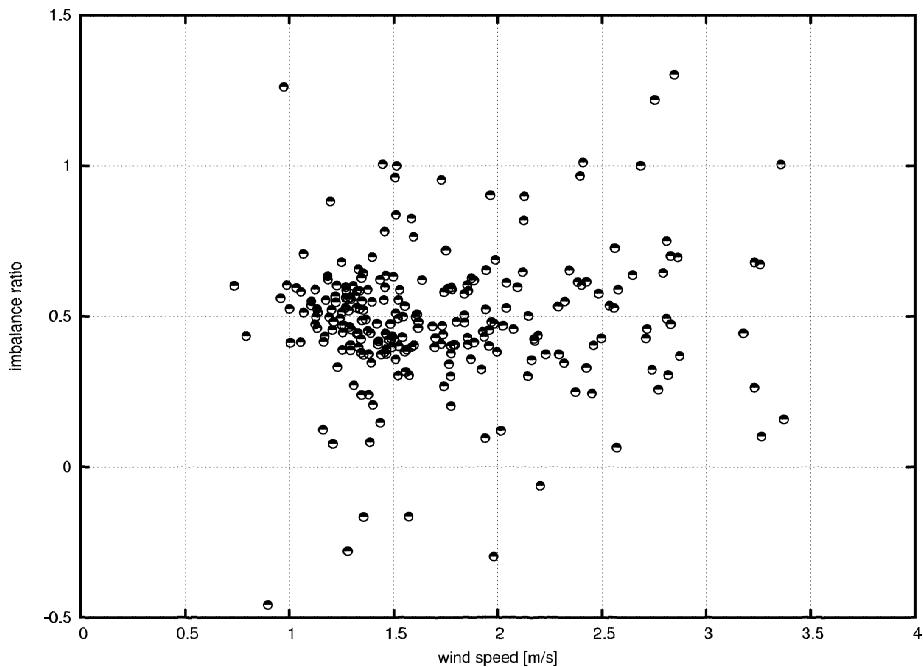


図3 樹冠上風速と熱収支残差の割合 ($R_{net-H-LE} / R_{net}$) の関係.

次に二酸化炭素の輸送量について検討する。図4は二酸化炭素濃度(樹冠上および林床)、二酸化炭素フラックス、アルベード、日射透過率の日平均値を示したものである。アルベードと日射透過率からは植生層の着葉状態が読み取れる。アルベードは植生層上部の着葉状態に強く依存し、日射透過率は全層トータルでの着葉状態により決まる。図4から、植生上層の落葉は10月頃から始まるが、林床植生が落葉するのは1月ごろと読み取れる。一方、展葉は4月頃である。樹冠での二酸化炭素フラックスはこの着葉状態に対応して季節変化しており、夏期(6月)には最大で $30\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ の吸収が見られる。ただし、この値は乱流計測で得られたものであるため、先のインバランス問題と同様に過小評価されている可能性がある。冬期には数 $\text{mgCO}_2/\text{m}^2/\text{day}$ 程度の放出が見られる。

一方で、二酸化炭素濃度を見ると1年を通して林床の方が高濃度である。これには、土壌呼吸による二酸化炭素放出と、園外の自動車交通などからの移流が考えられる。図5には移動観測により得られた園内の二酸化炭素濃度分布を示した。1台の濃度計による移動観測で、タワー下林床での常時測定値を用いて時刻補正を施してある。西側の高速道路沿いでは園内とほぼ同程度の濃度であり、夏季の連続測定でも同様の傾向であった。測定地点が比較的開けた場所であるため、上空への拡散が盛んなことに起因すると考えられる。一方、園南側の道路付近では特に高濃度となっている。これも連続測定で同様の傾向が見られている。

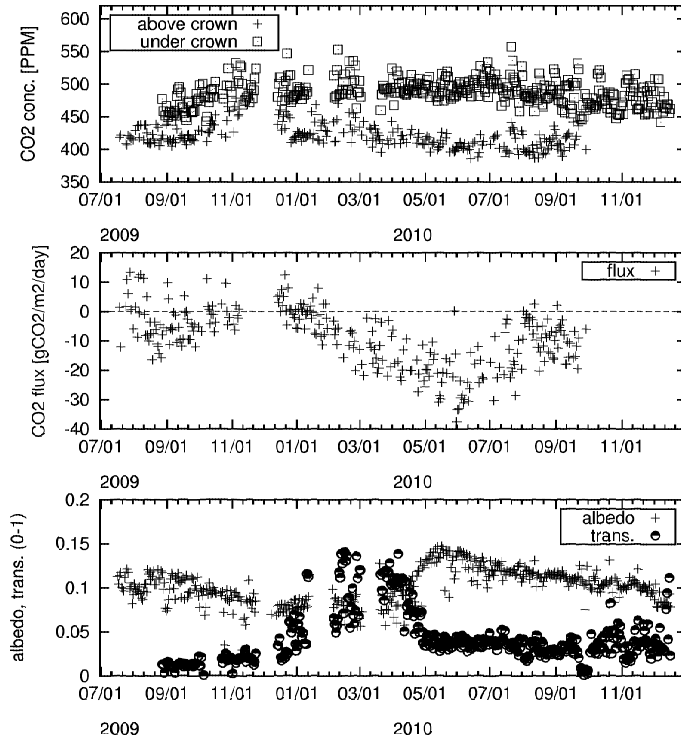


図4 二酸化炭素濃度（樹冠上，林床）および二酸化炭素フラックス（樹冠上）の季節変化。最下段には樹冠上でのアルベドおよび日射透過率も示した。いずれも日平均値。フラックスは樹冠から上空への上向き輸送（放出）を正，下向き輸送（吸収）を負とした。

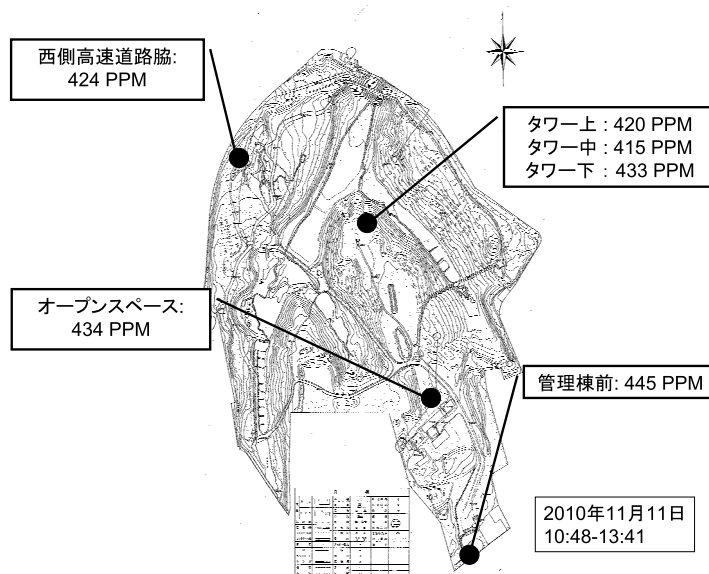


図5 園内の二酸化炭素濃度分布。2010年11月11日10:48-13:41。濃度計（VAISALA GMP343）による移動観測の結果。

潜熱, 二酸化炭素フラックスの日変化

図6には熱フラックスの月別の時別平均値を示した。この図から潜熱フラックスについていくつかの興味深い点を読み取れる。ひとつ目は夏期夜間の値が正であり蒸発が生じていることである。この時の顕熱フラックスは負であるため、蒸発を生じさせるための熱の一部は大気から下向き顕熱として得ていることがわかる。二つ目は冬期の潜熱フラックスが昼夜通してほぼゼロとなっていることである。次に述べる二酸化炭素フラックスの明確な日変化とは対照的であることから、これは土壤の含水量が低下することが影響していると考えられる。三つ目は潜熱フラックスのピークが午後に見られることである。樹種あるいは水分ストレスの程度によっては、午後に蒸発が小さくなるいわゆる昼寝現象が存在する。昼寝現象は植生が過剰な蒸発を抑制するために気孔を閉じる現象であるので、同時に二酸化炭素吸収も減少する。図6および次に示す二酸化炭素輸送量では昼寝現象に伴うと考えられる輸送量の減少は見られていない。

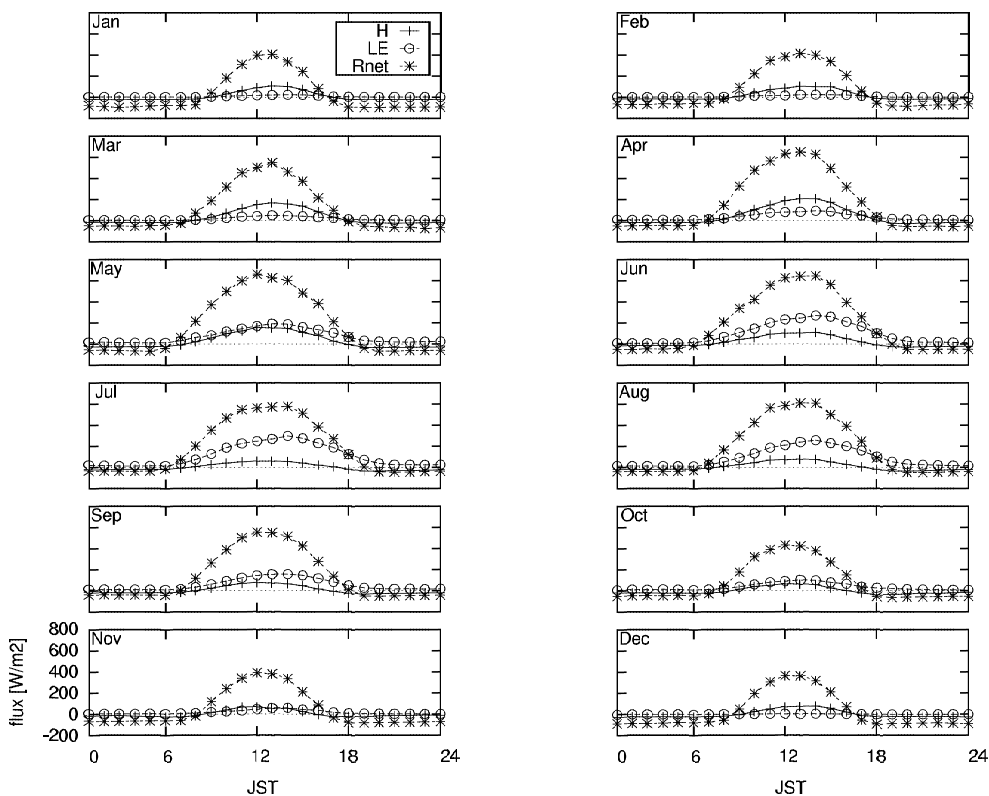


図6 熱フラックスの月ごとの時別平均値。顕熱 (H), 潜熱 (LE), 正味放射フラックス (Rnet) について示した。

次に二酸化炭素フラックスの日変化について検討する。図7には二酸化炭素フラックスの時別平均値を下向き日射量と合わせて示した。冬期には日変化の振幅が小さくなるが、それでも日中に下向き輸送(吸収)が見られている。日中の吸収のピークは1年を通しておおよそ日射量のピークと同期し

ている。一方、放出のピークは夕方に見られており、これは土壌呼吸量が温度と正の相関を持つことによると考えられる。

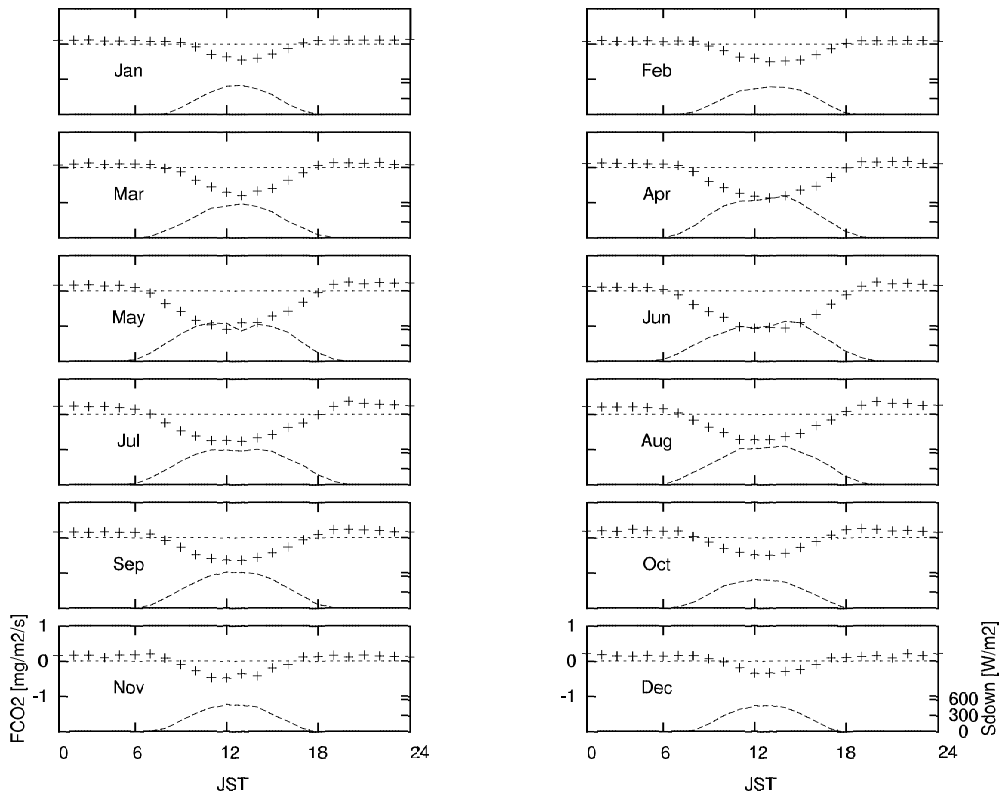


図7 二酸化炭素フラックス (FCO_2) の月ごとの時別平均値. 右軸には日射量 (S_{down}) についても示した.

要 旨

自然教育園の森林樹冠上において、熱、水蒸気、二酸化炭素の輸送量を1年半にわたって計測し、その日変化、季節変化を明らかにした。植生による二酸化炭素吸収は着葉状態に応じて季節変化し6月に最大となる。ただし、林床は土壌呼吸に起因すると考えられる高濃度の状態にあった。顕熱フラックスは3月頃から増加し、潜熱フラックスは約2ヶ月遅れて増加が始まる。夏季には夜でも蒸発が見られ、また日中の昼寝現象は見られないなど、植生の活性が高いことが示唆された。

Summary

Air - vegetation exchange of heat, vapor and CO_2 in the Institute for Nature Study was investigated. Through year observation since 2009 revealed the diurnal and seasonal variation of turbulent fluxes. Intake of CO_2 by vegetation varied synchronously with leaf status and had

maximum in June. Soil respiration made higher concentration of CO₂ at the forest floor than that above tree crown. Sensible heat flux started to increase in March followed by latent heat flux with two months delay. High activity of plant was seen in the nocturnal evaporation.

引用文献

- 神田学, 渡辺力, マルコス・オリバー・レッツエル, ジークフリード・ラッシュ. 2002. LESによる熱収支インバランス問題に対する検討(第1報) 大気境界層スケールの対流構造の影響. 水文・水資源学会誌, 15: 243-252.
- 成田健一, 三上岳彦, 菅原広史, 本條 毅, 木村圭司, 桑田直也. 2004. 新宿御苑におけるクールアイランドと冷気のにじみ出し現象. 地理学評論, 77(6): 403-420.
- 小栗秀之, 檜山哲哉. 2002. 都市二次林における CO₂・熱フラックスの季節変化. 水文・水資源学会誌, 15: 264-278.
- Panin, G.N., Tetzlaff, G., Raabe, A. 1998. Inhomogeneity of the land surface and problems in the parameterization of surface fluxes in natural conditions. *Theor. Appl. Climatol.* 60: 163-178.
- Twine, T.E., Kustas, W., Norman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J., Wesley, M.L. 2000. Correcting eddy covariance flux underestimates over a grassland, *Agric. For. Meteorol.*, 103: 279-300.