

2：屋上におけるエネルギー・CO₂交換量の評価

担当：植山雅仁
実習場所：B11 棟・238 号室

1. 実習の目的

大気—陸面間のフラックスの一般的なデータ処理方法を学ぶと共に、計測したフラックスの物理的な意味を理解することを目的とする。また、計測期間中における大阪府立大学周辺のエネルギーと CO₂ 収支を明らかにする。

2. 熱収支の評価

2-1. 顕熱フラックス

屋上の屋根面における顕熱フラックス (H_{roof} , W m^{-2}) は、熱収支法を用いて以下のように合わされる。

$$H_{\text{roof}} = Rn_{\text{roof}} - G_{\text{roof}} - LE_{\text{roof}} \quad (1)$$

ここで、 Rn_{roof} は屋根面における純放射量 (W m^{-2})、 G_{roof} は屋根面における地中熱流量 (W m^{-2})、 LE_{roof} は屋根面における潜熱フラックス (W m^{-2}) を表す。

渦相関法により評価される都市群落スケールの顕熱フラックス (H) は以下のように表すことができる。

$$H = c_p \rho_a \overline{w'T_a'} \quad (2)$$

ここで、 c_p は空気の定圧比熱 ($1004 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1} = 1004 \text{ W s K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$)、 ρ_a は空気の密度 (kg m^{-3})、 $\overline{w'T_a'}$ は渦相関法により観測された温度フラックス ($^{\circ}\text{C m s}^{-1}$) を表す。標準大気圧下での空気の密度は以下のように表される。

$$\rho_a = \frac{1.293}{1 + 0.00367 \times T_a} \quad (3)$$

ここで T_a は気温 ($^{\circ}\text{C}$) を表す。

【作業 1】

温度フラックスから顕熱フラックスを計算せよ。建物方向から風が吹く場合は気流が乱れている可能性があるため、渦相関法によるフラックスの計算には、建物から吹いてくる場合の風向を除くようにせよ。都市群落スケールの顕熱フラックスと屋根面の顕熱フラックスの値がどのように異なり、またその違いはどのような理由で生じるか考えてみよ。

2-2. 潜熱フラックス

渦相関法により評価される都市群落スケールの潜熱フラックスは以下のように表すことができる。

$$LE = l \overline{w'q'} \quad (4)$$

ここで、 l は水の気化潜熱 ($2.50 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ (W s kg^{-1}) = $2.50 \times 10^3 \text{ J g}^{-1}$)、 q は混合比 (g kg^{-1})、 $\overline{w'q'}$ は渦相関法により観測された水蒸気フラックス ($\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) を表す。

【作業2】

水蒸気フラックスから潜熱フラックスを計算せよ。今回、オープンパス型分析計で計測された水蒸気フラックスの単位は、 $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ であることに注意して、4式を計算せよ。

3. CO₂フラックスと光合成・呼吸量

3-1. 陸面のCO₂収支

群落上で計測されるCO₂フラックス (F_c) は、光合成によって取り込まれる量と、呼吸によって放出される量、そして人為起源により放出される量との差である。

$$F_c = RE - GPP + A \quad (5)$$

ここで、 RE は生態系呼吸量(植物及び土壌微生物の呼吸の総和; Ecosystem Respiration)、 GPP は総一次生産量(光合成量; Gross Primary Productivity)、 A は人為起源放出(Anthropogenic Emission)を表す。負の F_c は陸面への吸収、正の F_c は陸面からの放出を表す。

3-2. 生態系呼吸量のモデル化

夜間には光合成が起こらないこと、夜間は車の交通量が少ないこと、また、植物・土壌微生物の呼吸が温度に依存する事を利用して、CO₂フラックスを光合成と呼吸に分離することが出来る。呼吸の温度依存に関しては、様々な定式がなされているが、最も簡単なもので以下の式が広く使用される。

$$RE = R_{\text{ref}} \times Q_{10}^{T/10} \quad (6)$$

R_{ref} は基準温度(この場合、0°C)のときの生態系呼吸量、 Q_{10} は呼吸の温度依存係数、 T は温度(気温や地温)を表す。気温などの温度に対する生態系呼吸量を定式化しておくこと、その式と日中の気温から日中の呼吸量を推定することが出来る。日中の呼吸量と観測されたCO₂フラックスから、3式により、日中の光合成量と人為排出量との総量を算定することができる。

【作業3】

夜間の CO₂ 放出速度と気温（或いは地表面温度）との関係式を導け。ここでは日射量が 5 W m² 以下の時を夜間のデータとして取り扱うこととする。明確な温度依存関数が得られた場合、6 式の Q₁₀ 及び R_{ref} を算出せよ。Excel の指数近似から得られる係数から Q₁₀ を算出するには、以下の関係を用いる。

$$Q_{10}^{\frac{T}{10}} = e^{\frac{T}{10} \ln Q_{10}} \quad (7)$$

$$e^{aT} = e^{\frac{T}{10} \ln Q_{10}} \quad (8)$$

$$Q_{10} = \exp(10 \times a)$$

ここで、a は Excel による指数関数の経験係数を表す（図 1 の場合は、0.0431）。

夜間の CO₂ 放出速度と気温の間に明確な関係が得られた場合、気温から推定した RE と観測された CO₂ フラックスを 7 式に代入し、(A - GPP) を算出せよ。図 1 に示されるような明確な関係が得られない場合は、観測された夜間の CO₂ 放出量は、生物起源でなく人為起源の放出の寄与が大きい可能性がある。この場合は、CO₂ 放出速度と気温との関係について、人為起源の放出があるものとした考察を加えよ。

3-3. 平均日変化パターンを用いた欠測補間

フラックスや気象データは、雨天などの悪条件や測器のトラブルなどにより、欠測が生じる。観測データを用いて日平均や日積算、また年間積算値を計算するためには、これらの欠測を補完する必要がある。欠測データの補完方法には、さまざまな手法が存在するが、今回は、平均日変化法を用いた補完法を Excel で実行する手法を学ぶ。

【作業4】

測定されたデータのうち、純放射量、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量、CO₂ フラックス、生態系呼吸量、(A - GPP) の平均日変化パターンを作成せよ。また、日変化パターンを使って、これらのフラックスの欠測補間を行え。

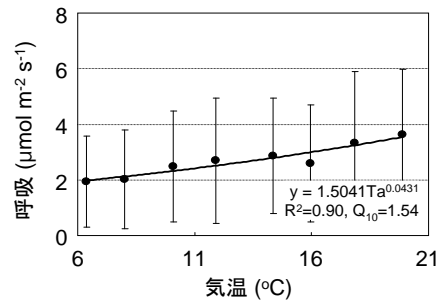


図 1 夜間の CO₂ フラックスと気温の関係
(期間：2014.10.30 - 2014.11.28)

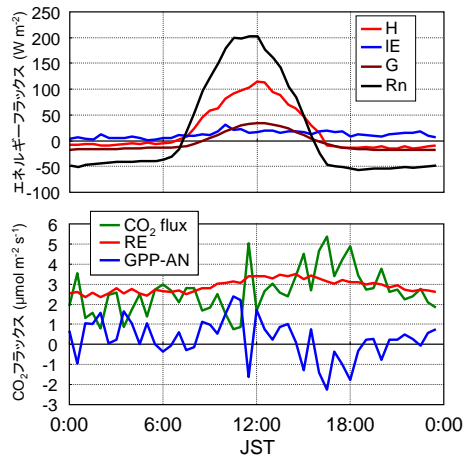


図 2 フラックスの平均日変化パターン
(期間：2014.10.30 - 2014.11.28)

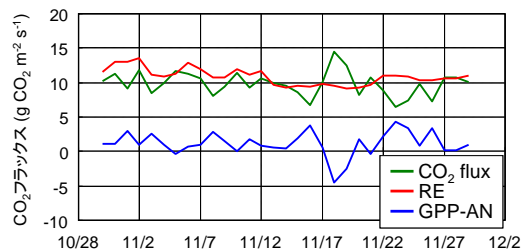


図 3 CO₂ フラックス及び、フラックス積算値の季節変化

3-4. 日積算値の算出とエネルギーと CO₂ 収支の評価

【作業 5】

欠測補完された 30 分値の純放射量、顕熱フラックス、潜熱フラックス、地中熱流量、CO₂ フラックス、生態系呼吸量、(A-GPP) を日積算し、それらの季節変化を示せ。この時、フラックスの単位を、($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) から ($\text{g CO}_2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$) に変換せよ。エネルギーフラックスの単位は、(W m^{-2}) から ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) に変換せよ。ジュール (J) はエネルギーの単位であり、ワット (W) は仕事率 ($1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1}$) の単位である。

図 3 と同様の平均日変化を表すグラフを、気温、地表面温度などについて作図し、観測されたフラックスがどのような要因によって変化したかについて考察せよ。図 4 と同様の積算値のグラフを CO₂ フラックスについても作成せよ。

都市域の CO₂ フラックスは人間活動によって変化していることが考えられる。人間活動が高いと思われる平日と低いと思われる週末で CO₂ フラックスに違いがないかを考察せよ。

日積算値・日平均値の計算には、Excel の OFFSET 関数を用いよ。

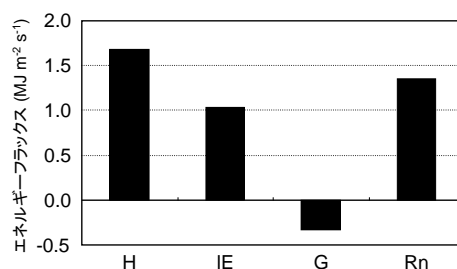


図 4 エネルギーフラックスの積算値
(2014.10.30 – 2011.11.28)

3-5. フラックスフットプリント

渦相関法で計測されるフラックスの空間代表性は、一般に風上方向に測定高度の 10 倍程度とされている。測定されたフラックスに対して、どの場所がどの程度寄与しているかはフラックスフットプリントとよばれ、さまざまな理論で見積もることができる。風上方向にフラックスフットプリントを積分することで、観測値に寄与した空間 (ソースエリア) を特定することができる。例えば、図 5 は各風向について観測されたフラックスに対して 80% の寄与を与えたソースエリアの距離 (フェッチ) を表す。渦相関法によるフラックスを解釈する際は、観測されたフラックスがどのような空間を代表しているかに注意した考察をする必要がある。

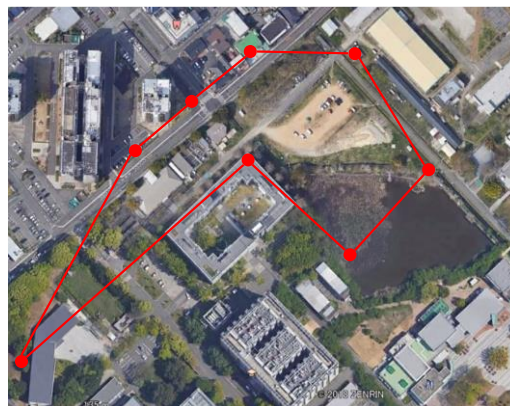


図 5 観測期間 (2019.11.09 – 2019.12.16) 中の各風向に対する 80% ソースエリアを代表するフェッチの中央値。建物側からの風向の際は欠測するため描写していない。GoogleMap の上に赤点でフェッチを描写した。

4. 課題

上記の解析を図示して、結果を客観的に述べ、その結果が表すことや問題点などを考察せよ。解析については、上記以外の内容を盛り込んでもよい。レポートの最後には、この実験から得られた結果を自分なりに総括し、結論としてまとめよ。レポートの体裁は以下のようにすることが望ましい。

タイトル (自分なりに今回の実習に研究タイトルをつける)

1. はじめに (実験の目的、科学的仮説の設定など)
2. 手法
 - 2-1. 観測場所の概要
 - 2-2. 測定方法
3. 結果および考察
 - * レポートに含める図表やテーマは各自の興味に基づいたものでよい。
例えば、以下の点を踏まえた考察をしてみると内容が深まる可能性がある。
 - * 風向や曜日に分けて解析・考察する。
 - * 観測された各種フラックスが、どのような環境要因で日変化、季節変化しているかを解析・考察する。
 - * 得られた結果や解析が、どのような意味を持っているかを解析せよ。
4. 結論 : はじめにで提示した、目的に対してどのような結論が得られたかを述べる。
5. 感想
6. 引用・参考文献

レポートは、本手引書のような体裁で、綺麗に図表をレイアウトしてください。図表の書き方については、生物学実習の適引き所を参照してください。レポートの提出は、1月9日17時とする。E-Mailを使用してPDFファイルでの提出でもよい。

都市域でのフラックス観測の解析・考察については、下記の当研究グループの成果論文などを参考にしてもよい。

Ando T. and Ueyama, M. 2017. Surface energy exchange in a dense urban built-up area based on two-year eddy covariance measurements in Sakai, Japan, *Urban Climate*, 19, 155-169.

Ueyama, M., and Ando T. 2016. Diurnal, weekly, seasonal and spatial variabilities in carbon dioxide flux in different urban landscapes in Sakai, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 14727-14740.

◆ 今回使用する EXCEL 関数の一覧

- Average : 選択したセルの平均値を計算
- Stdev : 選択したセルの標準偏差を計算
- Sum : 選択したセルの合計を計算
- IF : 条件分岐
- Exp : 指数計算
- AverageIf : 条件にあうデータの平均値を計算
- IsError : 対象セルが異常値であるかを判別
- Offset : 指定したセルを選択
- Weekday : 日付から曜日を計算