

⑤ 植生群落上におけるボーエン比

菅原 広史*

Bowen ratio above forest canopy

Hirofumi Sugawara*

はじめに

都市域では、地球温暖化に加えて都市温暖化という局所的な気候変動がみられる。都市域は人間の生活の場であることから、この2種類の温暖化に対して適切な適応策をとる必要がある。自然教育園のような都市緑地は夏季の暑熱環境を緩和する機能がいくつかある。そのうちの 하나가、林床において人間の体感温度を低温に保つ良好（冷涼）な環境が形成されることである。これは植物の葉による日射遮蔽と、葉自体もそれほど高温にならないことが原因である。後者の葉が高温とならないのは蒸発潜熱の効果と顕熱輸送係数が大きい（大気へ熱を逃がしやすい）ことによる。

蒸発散の効果はボーエン比を用いて表すことができる。ボーエン比 B は顕熱輸送量 H と潜熱輸送量 LE の比である。

$$B = \frac{H}{LE} \quad (1)$$

日中の葉面は日射等のエネルギーを受け、それを顕熱輸送量、潜熱輸送量、葉の貯熱量 G 、赤外放射量 σT_s^4 に分配する。すなわち式で表現すれば、

$$R_{in} = H + LE + G + \sigma T_s^4 \quad (2)$$

$$R_{in} = (1 - \alpha)S + L \quad (3)$$

となる。ここで S は日射量、 L は大気放射量、 α は葉面の日射反射率、 T_s は表面温度、 σ はステファンボルツマン定数である。 R_{in} が正味で葉に入射する放射エネルギーとなる。葉は受けとった R_{in} を式 (2) の右辺の各項に分配することで熱のバランスをとっている。ボーエン比はこの分配の状態を端的に表現するパラメータである。本報告では自然教育園の樹冠上で測定したボーエン比について

*防衛大学校, National Defense Academy

報告する。

ここでボーエン比がどのような要素に影響されるのかを検討する。顕・潜熱輸送量を以下の式でパラメライズする。

$$H = c_p \rho C_H U (T_s - T_a) \quad (4)$$

$$\ell E = \ell \rho \beta C_H U (q_{sat}(T_s) - q_a) \quad (5)$$

c_p および ρ はそれぞれ空気の定圧比熱と密度, C_H は顕熱輸送係数, U は風速, T_a は気温である。 ℓ は蒸発潜熱, β は葉面の湿潤度 (0-1, 1 が完全湿潤面), $q_{sat}(T_s)$ は温度 T_s での飽和水蒸気量, q_a は空気の水蒸気量である。これら 2 式を式 (1) に代入して

$$B = \frac{c_p}{\ell} \frac{1}{\beta} \frac{(T_s - T_a)}{(q_{sat}(T_s) - q_a)} \quad (6)$$

$q_{sat}(T_s)$ を気温 T_a のまわりでテイラー展開して 1 次の項まで残すと

$$B = \frac{c_p}{\ell} \frac{1}{\beta} \frac{1}{\frac{dq_{sat}(T_a)}{dT} + (1-h) \frac{q_{sat}(T_a)}{T_s - T_a}} \quad (7)$$

h は相対湿度 (0-1) である。式 (7) よりボーエン比は植生側のパラメータである湿潤度 β に依存することがわかる。また気象条件としては $\frac{dq_{sat}}{dT}$ を介して気温に依存する。これはボーエン比の気温依存性と呼ばれる。さらに相対湿度, および表面温度と気温の差 (したがって, 日射量や風速) にも依存する。

測定および計算手法

園中央のタワー (地上 20m, 樹冠上約 6m) において乱流計測をおこなった。超音波風速計 (期間前半はソニック社の SAT-540, 後半は GILL 社の windmaster) により風速と音仮温度, オープンパスガス分析計 (LICOR, LI-7500) により水蒸気量を, いずれも 10Hz で測定した。この乱流計測は 2009 年より行っており, 本研究では 2018 年夏季までの 9 年間のデータを解析する。乱流データから渦相関法を用いて顕・潜熱輸送量を求めた。その際, 超音波風速計に対する横風補正, 地形性鉛直流補正, 大気密度変動に対する web 補正等を行っている。

結 果

図 1 にボーエン比, 顕熱輸送量, 潜熱輸送量の季節変化を示す。輸送量は 30 分ごとの計測値であり, ボーエン比は日中 (9-15 時) 平均の輸送量から求めた値を示した。顕熱輸送量は春季に大きく, 潜熱輸送量は夏季に大きい季節変化を示している。これは植生の展葉落葉および日射量の季節変化によるものである。これら輸送量の比であるボーエン比は夏季に小さい値をとる一方で, 冬季はその値に

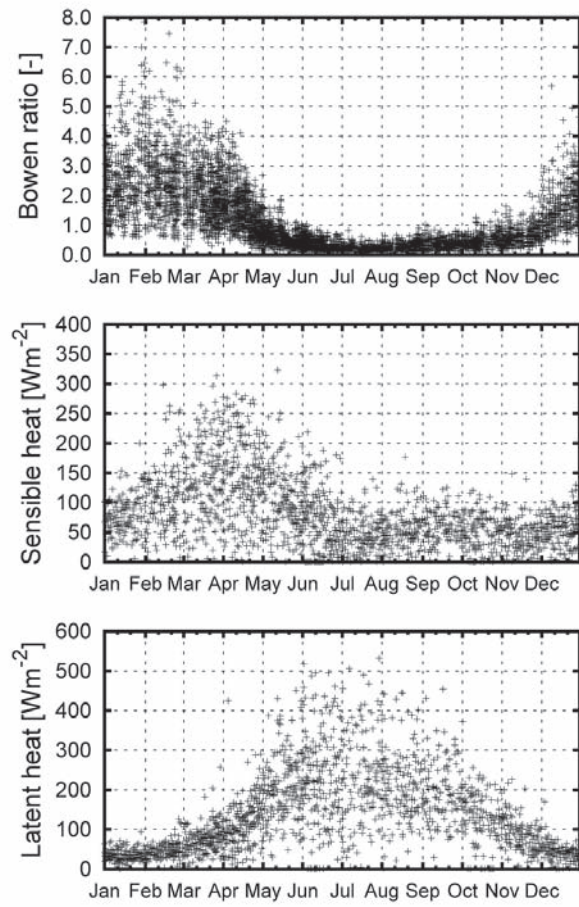


図1 樹冠上でのボーエン比，顕熱輸送量，潜熱輸送量の季節変化. 9年間の計測値. ボーエン比は日中平均の輸送量からもとめた. 輸送量は夜間も含めて30分ごとの値を示した.

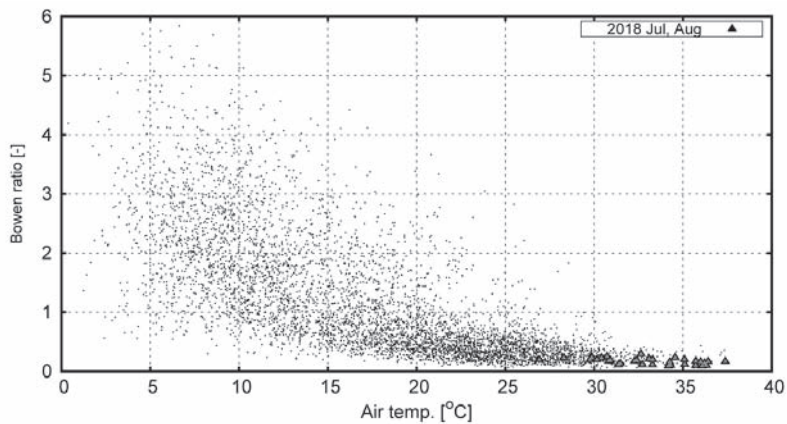


図2 気温とボーエン比の関係. 2018年7, 8月のマークを変えて示した.

幅がある。

図2には気温とボーエン比の関係を示した。高温時にはボーエン比が小さい値をとっており、これがボーエン比の気温依存性とよばれる特徴である。なお、図には記録的猛暑であった2018年7、8月のプロットをマークを変えて示している。2018年のボーエン比は他の年とほとんど変わらない値をとっている。これは猛暑下においても植物の蒸発に必要な土壌水分が豊富な状態であったことを示している。

ボーエン比の応用

夏季日中に林床が低温なのは、第1に葉による日射遮蔽の影響である。一方、日射を遮蔽するという点ではテントのような人工的な膜や構造物も同じである。しかし通常の人工構造物は蒸発散を行わず、また面積も大きいため、その表面は葉よりも高温となる。したがって、人工構造物の下での体感温度は、林床におけるものよりも高温となる。表面温度が面積に依存するのは顕熱輸送係数が物体の水平スケールに依存するからである (Sakai, et al., 2012)。

では、葉表面が低温なのは、蒸発散の効果と面積の効果どちらがより強く影響しているのであろうか？ テントと植物の葉について表面温度の違いを考察する。表面温度 T_s と気温 T_a の差 $\delta T (= T_s - T_a)$ は以下の式より求めることができる。式 (1) に式 (4), (5) を代入して

$$\delta T = \frac{R_{in} - \sigma T_a^4}{c_p \rho C_H U \left(1 + \frac{1}{B}\right) + 4\sigma T_a^3} \quad (8)$$

ここで貯熱量は葉の体積が小さいことを考慮してゼロとした。式 (8) より表面温度 T_s を求める。テントは一辺が数 m の大きさであるとし、その表面における乱流熱輸送係数 $C_H U$ を 0.01 m/s とする (風速 2 m/s を想定)。葉の熱輸送係数は菅原・近藤 (2017) を参照して 0.05 m/s とした。葉のボーエン

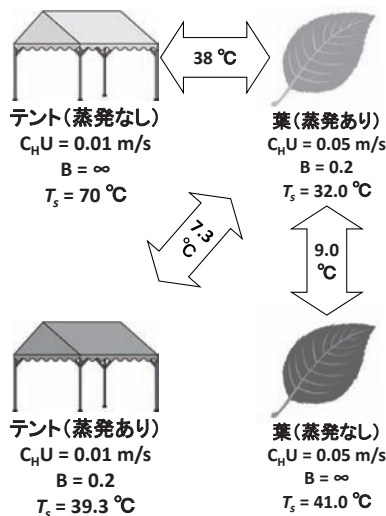


図3 テントと葉の表面温度の比較 (計算結果)。

比については図2を参照し、夏季の平均的な値である0.2とした。また葉の日射反射率 α は自然教育園での実測値にもとづき0.12とした。気象条件については、日射量 S は 900Wm^{-2} 、大気放射量 L は 420Wm^{-2} （いずれも自然教育園における7、8月の平均値）、気温 30°C とした。

結果を図3に模式的に示す。まず現実の状態ではテントと葉では表面温度が 38°C 異なる。これに対して仮想的に設定した蒸発のあるテント（ボーエン比は現実の葉と同じ0.2）、および蒸発のない葉は、現実の葉との温度差がそれぞれ 7.3°C 、 9.0°C である。蒸発の効果が面積の効果よりもいくぶん大きいことがわかる。ただし、 7.3°C と 9.0°C を足し合わせても現実の葉とテントの温度差 38°C には届かない。これは蒸発と面積の効果が温度差に対して相乗的に、かついずれも非線形的に影響しているためである。

要 旨

自然教育園の植生群落において、9年間にわたりボーエン比を測定した。ボーエン比は夏に低く（0.2程度）、冬に大きい（4程度）季節変化を示した。計測したボーエン比を用いてシミュレーションをしたところ、葉がテント（人工膜）よりも低温なのは蒸発散の効果と面積の効果いずれもが影響していることがわかった。

Summary

Bowen ratio over plant canopy was evaluated based on 9 years eddy covariance data. Bowen ratio showed clear seasonal variation, where lower Bowen ratio (ca. 0.2) in summer and higher (ca. 4) in winter. Simulation were taken for surface temperature at leaf and artificial fabric. The results showed that lower surface temperature at leaf was due to evapotranspiration and scale effects.

引 用 文 献

- Sakai, S., and Coauthors 2012. Sierpinski's forest: New technology of cool roof with fractal shapes. Energy Build. 55 : 28-34.
- 菅原広史, 近藤純正. 2017. 植生群落上における顕熱輸送係数. 自然教育園報告, 48 : 17-23.