

修士論文要旨
シンチレーション法を適用した熱収支解析と
芝地のクールアイランド効果について
Heat Balance Analysis using Scintillation Method
and the Effect of Cool Island on the Grassland

高知工科大学 大学院 工学研究科 基盤工学専攻
社会システム工学コース 1075074 森 進一郎

1. はじめに

近年、地球規模での環境問題が国際的に注目されるようになってきた。特に、地球温暖化に対しては、地球温暖化防止京都会議にて取り決められた、京都議定書により温室効果ガスの削減目標を具体的な数値で設定した(1997年開催, 2005年2月発行)。2004年12月現在、環境問題に対し地球規模での取り組みは多く行われている。しかし、地球温暖化・オゾン層の破壊・水質汚染・自然環境の破壊・急激な都市化による温暖化現象(以下: ヒートアイランド現象)などの環境問題は一向に解決せず、現況は悪化している。人間生産活動の結果として排出される汚染物質や自然破壊への対策は、その原因となる人間のライフスタイルのあり方や社会システムの変革が必要である。環境に配慮した、循環型社会を構築する必要性がますます高まっている。

上記の社会的な背景をふまえて、ヒートアイランド現象について研究を実施する。ヒートアイランド現象は、私たち人間が活動の中心としている都市部に起こる局地的な温暖化現象である。主な原因は、都市活動を急激に発展させた結果である。現在、ヒートアイランド対策の具体的な改善策・解決策の一貫として、クールアイランド効果(緑化等)についての検討がなされ、都市の熱環境が具体的に改善されることに大きな関心が集まっている。そんな中、クールアイランド効果についての熱環境緩和効果の評価に加えて環境改善効果(経済性)についての議論も研究の視野に入る段階に

なっている。

以上を研究の背景とし、本研究は、ヒートアイランド現象を緩和させる効果のある緑を用いて都市の熱環境を改善し、都市の熱環境を再生する為の緑化政策に貢献することを最終的な目的としている。都市の熱環境を改善することが都市環境を改善し、ひいては地球温暖化現象にも歯止めをかけるきっかけをつくることである。

研究は、都市緑化に最も多く用いられている芝地の熱環境の特性(以下: 熱収支)と都市の熱環境緩和効果を明らかにする。方法として、最近開発されたシンチロメータを利用したシンチレーション法を用いて芝地の3次元的な熱収支を把握し、熱環境緩和効果について解析を行う。次に、都市の熱環境緩和対策に芝地緑化を適用して、クールアイランド効果を生み出し、都市の熱環境を改善するための具体的なモデルプロジェクトを提案する。芝地緑化を都市の熱環境改善対策の一部に適用した場合の、環境改善効果(経済性)について予備的な検討を加える。

2. シンチレーション法について

熱収支観測に使用するシンチレーション法とは、大気が揺らぐことを利用して、顕熱フラックス(H)を測定する方法。測定の原理は、シンチロメータ(レーザー光を送受信する機器)を使い、大気中に2本の偏光の異なるレーザー光を照射し、受信機側で個々のレーザー光の強度変動を測定後、その共分散等から顕熱フラックスを算出す

る。特徴として、現在、一般に使用されている渦相関法による測定手段は、超音波風速温度計の測定スパン長、数 10cm の空間によって測定された、測定値より算出される顕熱フラックス (H) は、数 10cm 四方の空間平均値でしかないことになる。しかし、複雑な都市や植物キャノピーの熱収支を考える上では、その空間代表性が問題になる。その空間代表性の問題を解決する方法として、シンチレーション法は空間平均的な顕熱フラックス (H) を算出する新しい測定技術である。スパン長は数 100~数 1000m になる (本観測ではスパン長 50~250m の観測機器を使用)。同様の性能を得るのには約 100 台の渦相関法に使用する測定器を光経路上に設置することが必要になる。

シンチレーション法を用いた顕熱フラックス (H) 算出式を以下に示す。

$$H = -C_{pp} \rho_* T$$

$$C_T^2 (Kz)^{2/3} T_*^{-2} = 4\beta_1 \left\{ 1 - 7\frac{z}{L} + 75\left(\frac{z}{L}\right)^2 \right\}^{-1/3}$$

$$\varepsilon K z u_*^{-3} = \left(1 - 3\frac{z}{L} \right)^{-1} - \frac{z}{L}$$

ここで、H; 顕熱フラックス, Cp; 空気の定圧比熱, ρ; 空気の密度, u*; 摩擦速度, T*; 摩擦温度, CT; 温度の構造関数, K; カルマン定数 0.4, z; シンチロメータの地表面からの高さ, β1; Obukhov-Corrsin 定数 0.86, L; モニン-オブコフ長, ε; エネルギー消散率

その他の熱収支項目は以下の熱収支式よ

り求める。

$$Rn = H + LE + G$$

ここで、Rn; 正味放射量, H; 顕熱フラックス, LE; 潜熱フラックス, G; 地中熱流量

正味放射量・地中熱流量は、熱収支測定システムにより測定し、顕熱フラックス (H) はシンチレーション法により試算し、残りの潜熱フラックス (LE) は熱収支式から試算する。

3. 芝地の熱収支観測概要

シンチレーション法を使った現地観測の概要は、高知工科大学の 2 カ所の芝地において実施した。観測場所としては、校庭脇の両脇に樹木の植わった芝地において 2003 年 8 月, 2004 年 2 月の 2 度観測, 2004 年 8 月に大学本館前の一面芝地において観測を行った (図 3-1 参照)。図 3-2 に熱収支観測システム配置図を示す。

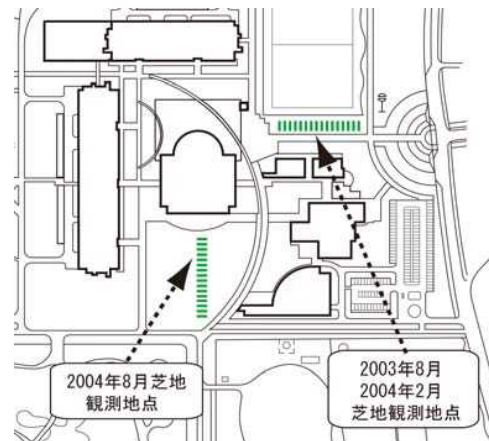


図 3-1 高知工科大学における観測地点

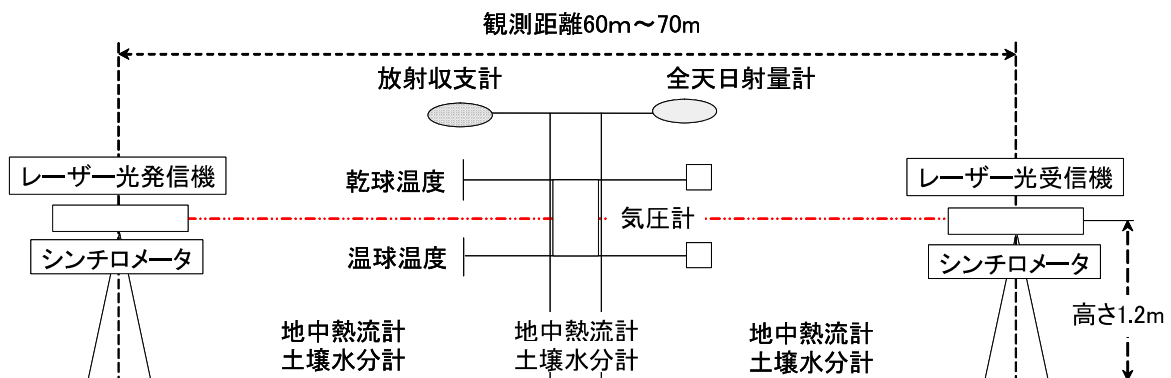


図 3-2 熱収支観測システム配置図

4. 観測結果と考察

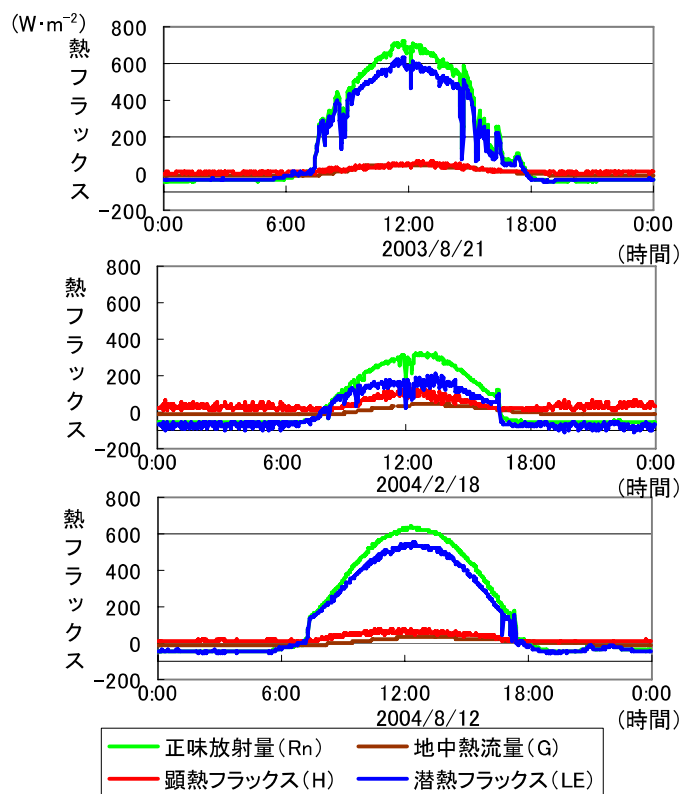


図 4-1 熱収支観測結果

シンチレーション法を使用した熱収支観測結果（それぞれ観測地点の1日の結果）を図 4-1 に示す。ここでは、大気冷却効果のある潜熱フラックス (LE) と顕熱フラックス (H) のみの結果を考察する。

両脇に樹木の植わった芝地において、夏期 (2003/8/21) と冬期 (2004/2/18) を比較した際、潜熱フラックス (LE) の1日のピーク時において、夏期 (1時間平均約 $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) は冬期平均 (1時間平均約 $160 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) の約 3.8 倍であった。顕熱フラックス (H) は、1日のピーク時において、冬期 (1時間平均約 $110 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) は夏期 (1時間平均約 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) の約 2.0 倍であった。

両脇に樹木の植わった芝地 (2003/8/21) と一面芝地 (2004/8/12) の潜熱フラックス (LE) は、1日のピーク時に両脇に樹木の植わった芝地 (1時間平均約 $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)、一

面芝生 (約 $540 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) になった。両観測地点とも1日のピーク時の潜熱フラックス (LE) は $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上と非常に大きい。顕熱フラックス (H) は両観測地点とも1日のピーク時、1時間平均約 $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 程度であり、潜熱フラックス (LE) に比べれば非常に少ない値を示している。

以上の観測結果についての考察をまとめると、芝地における夏期晴天の潜熱フラックス (LE) は非常に大きく芝地緑化をおこなう事で大きな大気の冷却効果を得ることが出来る。ただし、今回観測した芝地は、大学により非常に良く管理された育成環境にあり、恵まれた管理条件を考慮に入れてのことである。

5. 芝地を利用したヒートアイランド対策

現在、ヒートアイランド対策として 1). 人工排熱の低減, 2). 地表面被覆の改善, 3). 都市形態の改善, 4). ライフスタイルの改善の4つの大きな対策が行われている。本研究では、地表面被覆の改善によるヒートアイランド対策として、芝地緑化を行う。緑化政策として、公園、緑地や街路樹の整備、建物の屋上や壁面の緑化、敷地の緑化が上げられる。しかし、都市部では今後まとまった土地の取得が困難なことから公園、緑地や街路樹の整備は進んでいない。屋上緑化に関しては、2001年4月東京都は、改正自然保護条例を施行、敷地面積 1000 m^2 以上の民間建築物 (公共建築物は 250 m^2 以上) を新築する際、利用可能な屋上面積の2割以上の緑化を義務づけ、現在、自治体を中心に急速に緑化対策が進んでいる。

以上の現状を踏まえて、芝地緑化によるヒートアイランド対策として、学校教育施設における校庭緑化をモデルプロジェクトとして検討する。学校教育施設は地域に関係なく大きな偏りがなく設置されており、緑化に対する地域公平性が保たれる点も土地の取得が困難な都市においての存在意義は高く、新たなクールスポットの創出にも繋がる。また、文部科学省が中心になり実施

されている「環境を考慮した学校施設（エコスクール）の整備推進に関するパイロットモデル事業」の中でも校庭緑化については大きな期待が寄せられ整備が進んでいる（行政による補助制度も整備されている）。芝地による校庭緑化を行う都市として東京都（特別区）を選択する。その理由として東京の100年当たりの平均気温上昇は+3.0℃と他のどの都市よりも高く、ヒートアイランド対策が早急に必要である。学校教育施設の密度も高く芝地緑化の効果が大きいと考えられる。また、東京都特別区内の都市公園に限って言えば4.1%（約25.49 km²）で都民一人当たりの都市公園面積は、約3.13 m²/人と政令指定都市の中では最低である。

校庭の芝地化することによってのメリットは様々なことが期待されている。期待されている効果の中でデータとして実証されているものは少なく、経験的見地はある程度認識されているが定量的に把握はされていない。芝地による校庭緑化の代表的なモデルプロジェクトにおける熱環境緩和効果についての効果の検証を行う。

校庭芝生緑化の期待される効果

- 1). 熱環境緩和効果
- 2). 砂ぼこりの飛散防止
- 3). むかるみ防止
- 4). 生徒の怪我防止, 健康促進
- 5). 環境教育への貢献
- 6). 景観の向上
- 7). ゆとり空間の創出
- 8). 新たなコミュニティの創出 等…

6. 校庭緑化によるクールアイランド効果

東京都特別区（23区）の教育施設（幼稚園から高等学校）が約2700校存在し、約10 km²の校庭があると見積もられる（表6-1参照）。現在、東京都特別区にある都市公園の合計面積は約25.49 km²であり、校庭芝地緑化すると都市公園の面積の約40%に相当し、仮にすべての校庭を芝生緑化するこ

とが出来れば、土地取得の困難な、東京都特別区では大きな熱環境緩和効果を生むと考えられる。

表 6-1 特別区内の教育施設の校庭面積の試算結果

	園数	面積 (km ²)
幼稚園	792	0.48
	学校数	面積 (km ²)
小学校	907	3.58
中学校	555	2.58
高等学校	392	3.29
合計	2646	9.94

出所：東京都総務局統計部人口統計課学事統計係「2004年学校基本調査」より作成

特別区内の教育施設（幼稚園から高等学校）における最低限必要な校庭面積を試算した（学校法を元に）。校庭を芝地による校庭緑化した際の熱環境緩和効果（大気冷却効果）について試算する。

(1). 試算内容

校庭が芝生で緑化されていない場合とされた場合の大気温度の冷却効果として、緑から放出される蒸散による潜熱フラックス（LE）だけと仮定する。また、蒸散のエネルギーは大気冷却効果のみに用いられることと仮定する。

観測でえられた潜熱フラックス（LE）から蒸散量（E）を求める。求める蒸散量（E）は2004/8/12の潜熱フラックス（LE）と気温を用いて試算する。ただし、求めた蒸散量（E）は昼間（7:00～17:00）の蒸散量（E）の合計を夏期の代表した1日の芝地における蒸散量とする。以下に1時間の蒸散量を算出する式を以下に示す。

$$L = 2.50 \times 10^6 - 2400T$$

$$E = \frac{LE}{L} \times 60 \times 60$$

ここで、L：水の気化の潜熱（J・kg⁻¹）、T：気温（℃）、E：蒸散量（kg・m⁻²・s⁻¹=mm・s⁻¹）LE：潜熱フラックス（W・m⁻²=J・m⁻²・s⁻¹）

上記の式より、一面芝地の夏期の1日（7:00～17:00）の蒸散量は約165 mm・day⁻¹であった。

次に、表 6-1 で試算した芝地緑化する面積の蒸発潜熱を求める式を以下に示す。

$$AE = V \times E \times A$$

ここで、AE：蒸発潜熱 (cal・day⁻¹)、V：気温 30℃における水の気化熱 (583 cal・g⁻¹)
E：蒸散量 (mm・day⁻¹) A：芝地緑化した校庭面積 (km²)

上記の式より、一日の芝地緑化した校庭面積当たり約 9.7×10^{13} cal・day⁻¹ に達する。

最後に、特別区の面積と大気境界線の高さとした箱の中で、芝地の蒸発潜熱によって気温がどの程度変化するか以下の式を使い試算する。

$$T = \frac{AE}{Cp\rho \times A \times h}$$

ここで、AE：蒸発潜熱 (cal・day⁻¹)、Cp：空気の定圧比熱 (気温 30℃の空気の定圧比熱 0.24 cal・g⁻¹)、 ρ ：空気の密度 (気温 30℃、湿度 20%、気圧 1003hPaで空気の密度が 1.15 kg・m⁻³、2004/8/12 の観測データより)、A：東京都特別区面積 (km²) h：大気境界線の高さ T：気温変化量 (℃・day⁻¹)

上記の式より、特別区内の教育施設の校庭を芝地緑化した際の大気冷却効果は、1.13℃となる (大気境界線 500m)。最大約 1℃の大気冷却効果 (ポテンシャル) を校庭の芝地緑化することで得ることが出来る。また大気境界線の高さを変えた大気冷却効果について図 6-1 に示す。大気境界線の高さを高くすると気温低下が小さくなる。これは潜熱フラックス (LE) の影響が大気の厚さが大きくなるほど弱くなることを示している。

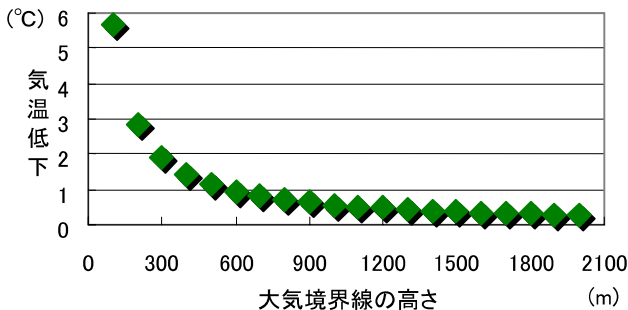


図 6-1 大気境界線の高さと気温低下の推移

(3). 考察

都市の熱環境緩和のための、緑化政策の整備が整い次第、できるだけ速やかに実行することが急務である。特別区内の教育施設への校庭芝地緑化の大気冷却効果は、大気境界線を 500m に仮定した場合、最大約 1℃の冷却効果 (ポテンシャル) を得ることが試算でき、このことから緑化政策を行うことはヒートアイランド対策としては大いに期待できると考えられる。

7. まとめ

本研究は、シンチレーション法を使用して、芝地の熱収支観測を行い、大気冷却効果のある潜熱フラックス (LE) を算出しその結果を、校庭緑化の可能性について検証してきた。結果として特別区内の校庭緑化をした場合、最大約 1℃の大気冷却効果 (ポテンシャル) を試算した。しかし、日本では研究・調査は進んではいるが、効果の検証レベルだけで、具体的な効果を考慮した政策は、対策段階であり国・地方自治体の積極的な政策の意思決定が待たれる。また、緑化を実施した地域が増えることで、緑化効果は大きくなり、更なる緑化が推進され相乗効果を生むと考えられる。

今後の問題と課題

- 1). 今後の問題点として、研究で使用したシンチレーション法を用いて長期的な観測が必要である。
- 2). 芝地だけでなく他の被覆・植生においてシンチレーション法での観測を加えることが必要である。
- 3). 従来の観測方法とシンチレーション法の観測結果の精度を含む比較検証が必要である。
- 4). 熱緩和効果の試算にも他の方法があり、それらとの比較も必要である。
- 5). 緑化による環境改善効果 (経済性) についても緑化事業の妥当性と有効性の検討を加える必要がある。

Abstract

Heat Balance Analysis using Scintillation Method
and the Effect of Cool Island on the Grassland

Kochi University of Technology
Graduate School of Engineering
Department of Engineering
Infrastructure System Engineering
1075074 Shinichiro MORI

Background:

Recently, the heat environmental problems such as global warming and the heat island phenomenon have been observed in various places. The heat island phenomenon is problematic for the urban life.

Purpose:

This research aims at improving the heat environment of the city by using greenery, which has the effect of decreasing the heat island phenomenon. The heat budget of grassland is observed that is used for urban greenery.

Method:

Recently, the heat budget of the grassland is observed by using the developed scintillation method. Based on the observation results, a greening policy using grassland is proposed. The green schoolyard at the school is considered as a model project. The schoolyards at the schools in Tokyo 23 districts are green. The effect of greening is evaluated from the decrease in temperature in the city.

Result:

The latent heat flux of the grassland is large compared with the sensible heat flux. The temperature of Tokyo 23 districts decreased at about 1°C when greening it by the grasslands. Urban planting leads to the temperature decrease.

Key words:

Grassland, Scintillation method, Greening schoolyard, latent heat flux, sensible heat flux