

31. 砂漠地における緑化地帯の微気象改善効果の解析

Numerical Simulation of the Greenery Effect on the Micro-
meteorological Conditions in Desert Area

藤野 毅* ・ 浅枝 隆** ・ 和氣亜紀夫***

Takeshi FUJINO, Takashi ASAEDA, Akio WAKE

ABSTRACT ; The objective of the present study is to examine this possible mitigation of summer heat in the Kuwait City area by the Kuwait Greenery Project currently being formulated at the Kuwait Institute for Scientific Research (KISR). The method of analysis for the present study utilizes a three-dimensional meso-scale atmospheric model that is considered to be in the field of computational meteorology. The simulation predicts that the air temperature would be reduced by as much as 6 deg. for the greater green belt zone and about 3 deg. for the metropolitan zone. Because of the reduced air temperature and the presence of evapo-transpiration, relative humidity in the greenery could increase considerably.

Key Words; desert, irrigation, evapo-transpiration, Green-Belt

1. はじめに

これまでに、世界のいくつかの砂漠地において部分的に人工灌漑が行われ、実際に作物の生育が可能となっている。このような人工的な灌漑は、食糧を生産する新たな土地として注目されているが、微気象学の立場から見ると、現状の砂漠地における地表面の熱特性が改善されるため、灌漑の規模が大きなものであれば、特に夏季の酷暑が緩和されることが期待できる。本調査研究の目的は、クウェート科学研究所(KISR)で目下構想中のクウェート緑化プロジェクト(図1-1)がもたらす局地微気象の改善度を、計算気象学分野で最先端の3次元メソスケール大気モデルを利用して定量的に把握することにある。

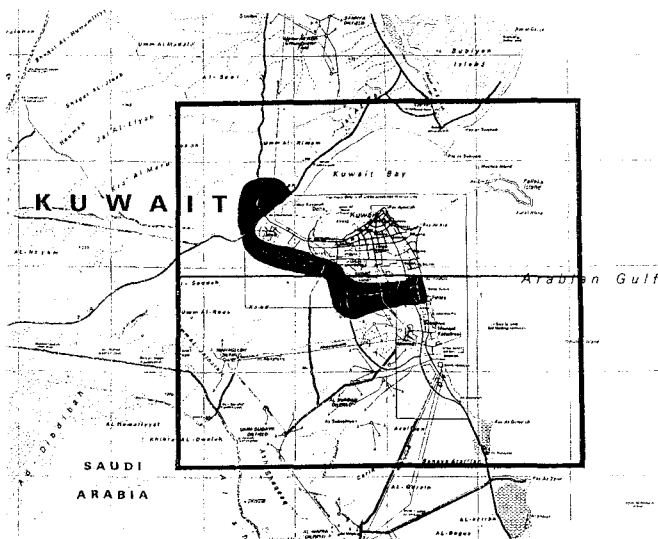


図1-1 グリーンベルト地帯と計算領域
(枠内; 100km×120km)

* 埼玉大学大学院 Graduate Student Saitama University

** 埼玉大学工学部 Saitama University

*** 清水建設技術研究所 Institute of Shimizu Co.Ltd.

2. 大気モデルと計算手法の概要

計算に用いた大気モデルの方程式系は、2次モーメントの乱流クロージャーモデルレベル2に即している(文献[3])。さらに地形、地表面の状態、および樹冠の影響も厳密に考慮した。土壌温度分布は地表面の熱収支から導かれた境界条件を用いた局所的1次元熱伝導方程式によって計算される。総合的には、本モデルは大気と土壌を連成した3次元非定常メソスケール気象モデルであり、その理論的な展開と考察については文献[5][6]を参照されたい。

樹幹の存在は、大気の運動量・熱量の変動に影響を与える。まず運動量に対しては、樹冠による風の全抵抗力は水平方向の圧力差に等しいという仮定に基づき、基本方程式中に次の項が加わる(文献[7])。

$$\frac{\partial p}{\partial x_i} = C_d a(z) U_i |U_i| \quad (1)$$

ここで、 p は圧力、 U は風速、 C_d は抵抗係数、 $a(z)$ は葉面積密度を示す。

次に、熱量の変動に対しては、樹幹内の放射吸収による加熱、葉面からの顕熱および蒸散作用がある。これらは、熱エネルギーの方程式中に次の項が加わる。

$$\frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial R_N(z)}{\partial z} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial z} [(R_{Ntop} - H_{ftop} - lE_{ftop}) \exp(-kL(z))] \quad (2)$$

$$H_{ftop} = -\rho C_p u_* t_* \quad (3)$$

$$lE_{ftop} = -\rho l u_* q_* \quad (4)$$

ここで、 $R_N(z)$ は各高さにおける正味放射量、 R_{Ntop} 、 H_{ftop} 、 lE_{ftop} はそれぞれ樹幹頂部における正味放射量、顕熱フラックス、潜熱フラックス、 k は減衰係数、 $L(z)$ は葉面積指数、 ρC_p は空気熱容量を示す。

樹幹部と樹幹上近傍の大気間の摩擦速度、摩擦温度、および摩擦比湿の見積りは境界層相似則に基づき、次式で表される。

$$u_* = \kappa (U_{f1}^2 + V_{f1}^2)^{1/2} \left[\ln \frac{z_{f1} - d}{z_0} - \Psi_{mf} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$t_* = \frac{\kappa}{P_r} (\Theta_{f1} - \Theta_{f0}) \left[\ln \frac{z_{f1} - d}{z_{0t}} - \Psi_{hf} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$q_* = \frac{k}{P_r} (q_{f1} - q_{f0}) \left[\ln \frac{z_{f1} - d}{z_{0t}} - \Psi_{hf} \right]^{-1} \quad (7)$$

ここで、 Θ は温位、 q は比湿、 z_{f0} および z_{f1} はそれぞれ樹幹内部および近傍上空の計算上の格子点高さ、 $d \equiv 0.7h$ は地面修正量で、 h は樹幹の高さ、 P_r は乱流プラントル数、 κ はカルマン定数、 z_0 と z_{0t} は運動量と温度の粗度長、 ϕ は大気安定度による補正項を示す(文献[4])。樹幹の葉面の比湿は直接得られないため、葉面と大気の比湿の差を β 法により見積もった(文献[2])。

$$q_{f1} - q_{f0} = \beta_f (q_{f1} - q_c) \quad (8)$$

ここで、 β_f は蒸発能、 q_c は樹幹温度における飽和混合比で、これは次式で表される。

$$q_c = \frac{0.622e_{sat}(\Theta_{f0})}{P - 0.378e_{sat}(\Theta_{f0})} \quad (9)$$

ここで、Pは大気圧を示し、 Θ_{f0} は樹幹群内の気温で代表させた。

芝地からの蒸発散の見積も、樹幹の場合と同様に β 法を用いた。これら β の値は、一日の合計蒸散量を先に設定し、時間変動を伴う計算蒸散量の一日の積分値と一致するように調整して求めた。本計算では、クウェート市街地における芝地では40%の緑化率と平均4 mm/dayの蒸散を、グリーンベルトの樹幹部からは5 mm/day、樹冠下の地面からは1 mm/dayの蒸散をそれぞれ想定した。その他の緑化関連の入力パラメーターを表2-1に示す。

表2-1 緑化関連のパラメーター

・大緑化地帯（グリーンベルト）	
植樹の種類	中木（例えばProsopis juliflora）
植樹のピッチ	： 中心上 6 m
樹冠高さ	： 10 m
樹冠のアルベド	： 0.1
樹冠内部の遮光率	： 72 %
・市街緑化地域	
緑化のタイプ	： 芝生、灌木混合
緑化の割合	： 40 %
植生アルベド	： 0.2

3. 更正と検証

本研究では、具体的にどの程度の微気象緩和が見積もられるかを判定することが目的であるため、まずはじめに、大規模緑化が実現していない現状の微気象を再現することを試みた。そこで、典型的な夏季の気象条件を表わしている1992年8月1日のクウェート空港の毎時観測記録を基に入力パラメーターを微調整し、現地微気象の日変化の再現性を調べた。その結果を図3-1(a)-(c)に示す。入力パラメーターの更正によって、いずれの計算値も観測値をよく再現していることがわかる。図3-2は、同日のクウェート上空の鉛直温位分布の計算結果を示す。現在、クウェート上空の高層観測データは入手されていないので、参考として図中に点線で示したサウジアラビアのリアド上空で観測された、1987年8月、3時および15時の月間平均値（文献[4]）と比較を行った。計算結果は中東砂漠地域の夏季の典型的な温位分布をよく再現している。

4. 緑化による微気象緩和効果

4.1 気温・風の水平分布

次に、緑化プロジェクト後のシミュレーションを行った。全体像を表すシミュレーション結果として、4×4kmの第1段階メッシュにより緑化プロ

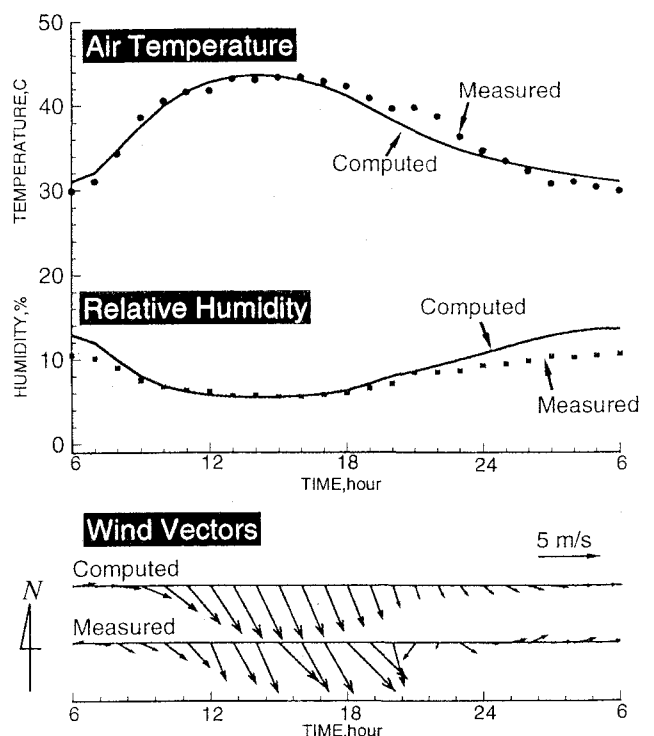


図3-1(上から)(a)気温、(b)湿度、(c)風向風速

ジェクトが行われた場合における15時の気温および風向・風速の水平分布図を図4－1に示す。それぞれ気温は高さ3 m、風は高さ10mでの値を示している。また、これらをより精度良く表したものとして、都市周辺部を対象とする第3段階の1×1kmのメッシュによる15時の結果を図4－2(a)(b)に示す。現状では、海岸から2 kmないし3 km内陸に入ると気温はすでに42度に達し、それより内陸に位置する空港は44度以上になる。この時では全体として北西方向から5 m/s以上の強い風が吹いており、北西のクウェート湾からの涼しい空気は空港方面に運ばれる。しかし、その湾からの涼しい風は温度の高い陸地上で急速に暖められ、この風が都市域全体を涼しくする効果はほとんどない。これに対し、緑化プロジェクトが行われた場合では、都市域全体で気温の低下が認められる(但し、空港は滑走路等舗装部分が多いため緑化を考慮していない)。これより、都市中心部では3度、大緑地帯域では5度程度それぞれ下がった。また大緑地帯域では、樹木が密に存在するために風に抵抗が生じ、風速が下がった。

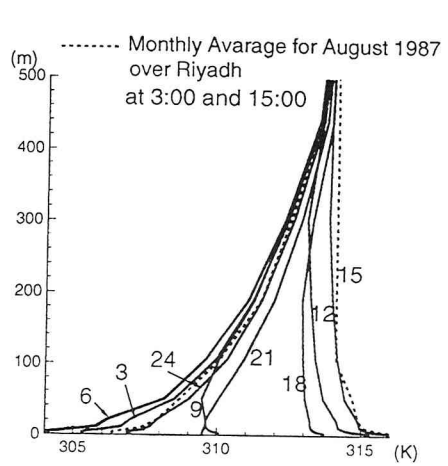


図3－2 鉛直温度分布

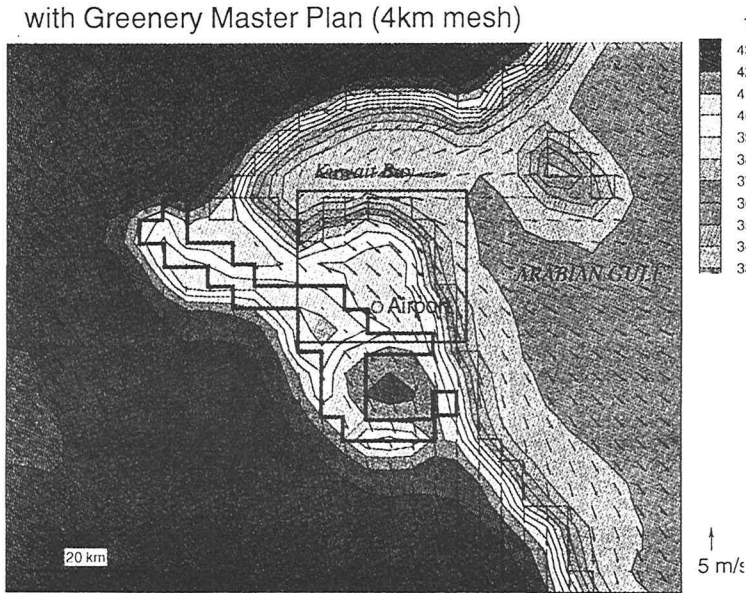
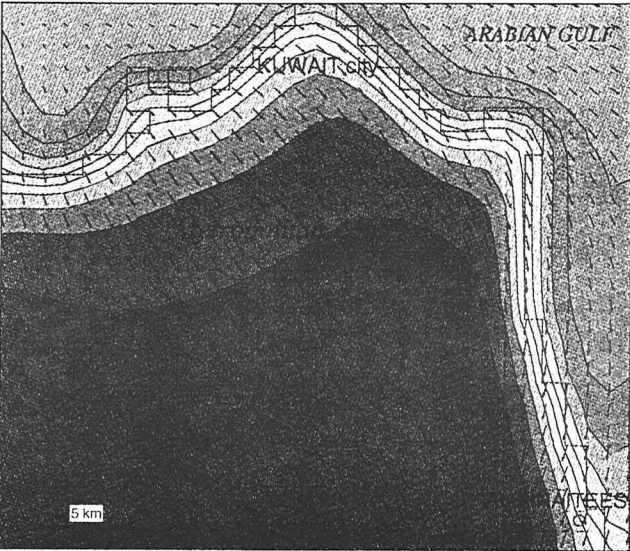


図4－1 気温・風向風速分布(4kmメッシュ15:00)

without Greenery Master Plan (1km mesh)



with Greenery Master Plan (1km mesh)

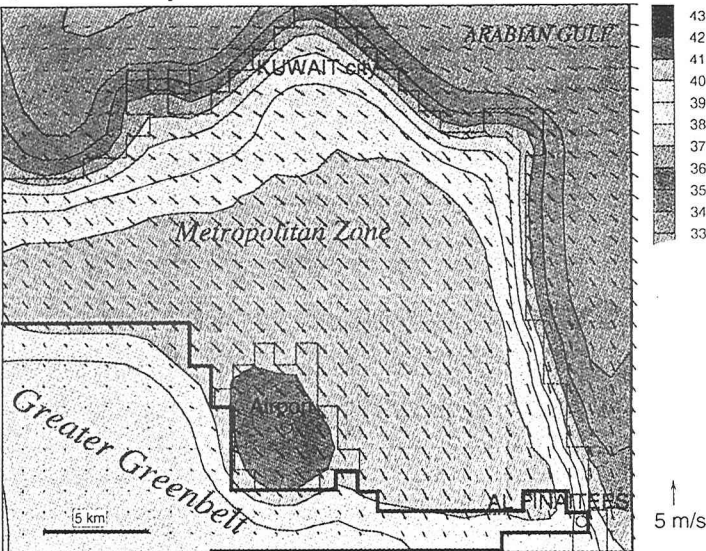


図4－2 気温・風向風速分布(1kmメッシュ15:00) (a)現状(左) (b)緑化プロジェクト後(右)

4. 2 地表面の熱収支

図4-3 (a)-(c)に、砂漠面、芝地面、および樹冠の下の芝地面における熱収支を示す。まず、現状の砂漠面においては、地面で受ける正味放射エネルギーは、地中における水分蒸発がないために、明け方ではこれがそのまま地中に熱として伝わり、地中の温度を上昇させる。その後高くなった地表面からは、顕熱輸送として乱流によって熱が奪われ、その結果大気は加熱される。その規模は最大 $300\text{W}/\text{m}^2$ 程度にも達する。夜間は地中に貯えられた熱が長波放射の収支とバランスし、大気を冷却する。次に、芝地面では明け方のみ地中に熱が伝わるが、その後地表面で受ける放射エネルギーの大部分は地中や葉面内の水分の気化熱として消費される。従って、顕熱輸送と地中への伝導熱は小さくなり、大気加熱への寄与も小さくなる。最後に、大緑地帯の樹冠の下の草地では、日中地面に到達する日射量の約8割が、樹冠上部での反射と樹冠内部での吸収によって減衰するため、正味放射エネルギーは最大 $150\text{W}/\text{m}^2$ 程度になる。従って、日中地表面の熱収支に大きな日変化はなく、さらに夜間も緑地帯によって放射冷却が妨げられる。従って、気温の日変化に与える影響も最も小さくなる。

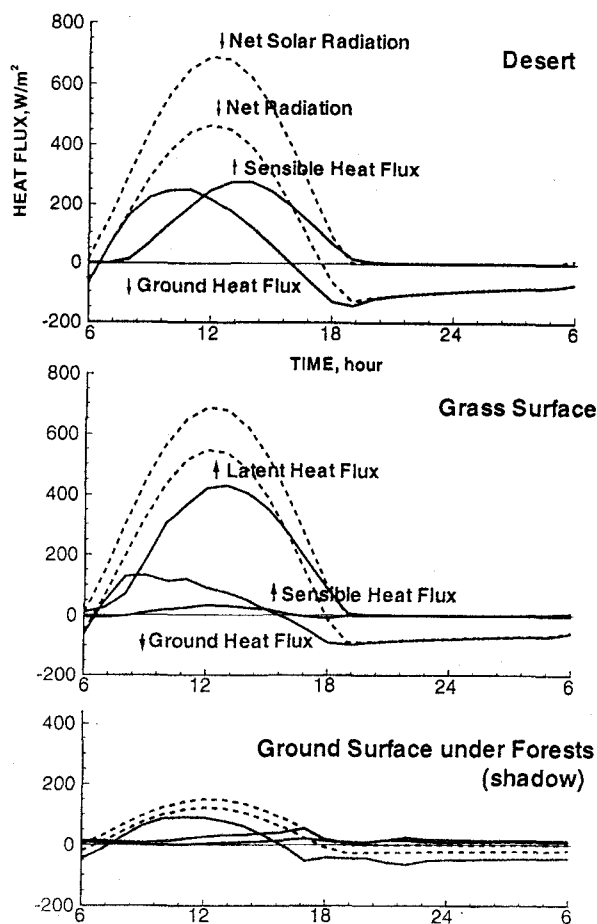


図4-3 地表面熱収支(a)砂漠, (b)芝地, (c)森林下

4. 3 大緑地帯域の気温

緑地帯の地表付近の気温に与える影響について、緑地がない状態、灌漑を行わず植林のみを行い、葉面からの蒸散が生じないとした場合、および灌漑によって蒸散の生ずる緑地帯を設置した場合の地表付近の気温分布の比較を行った。その結果を図4-4に示す。まず蒸散のない樹幹の場合では、日中では地表面から樹冠が広がり始める高さ5mまで気温の低下が生じていることが確認できる。しかしそれより高いところでは、緑地帯がない砂漠面上とほとんど同じ分布を持つことが示された。この場合の緑地帯の効果は、地面に到達する日射を減衰させる働きによって地表近傍においては気温の低減が図れたものの、その分樹冠内に吸収された日射はそのまま樹冠内の大気を加熱し、樹冠上では現状と相違がなくなる。一方、蒸散の生ずる緑地帯では気温が大きく低下した。樹幹の陰によって地表面温度が下がるだけでなく蒸散の効果によって緑地内の大気は冷却

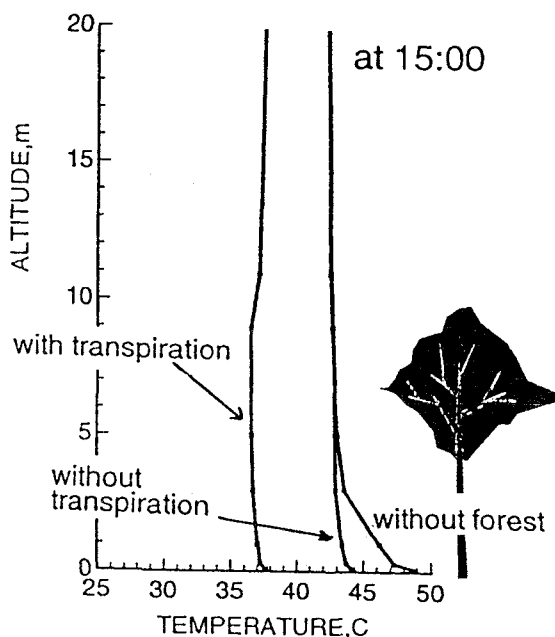


図4-4 接地層内の気温分布 15:00

される。今回の仮定で用いられた大緑地帯による気温緩和効果は最大6度にも達した。

5. まとめ

最後に図5-1(a), (b)に、砂漠、芝地、および緑地帯下の芝地における気温と相対湿度の日変化をそれぞれ示す。まず気温については、芝地面上では潜熱輸送の効果により、また、緑地帯内部の気温は日陰の効果と葉面からの蒸散作用による緑地帯外部の気温低下によって1日を通して砂漠面上よりもはるかに低くなる。次に、相対湿度の変化については、現状を示す砂漠面上では地面からの水分の供給がないために、気温が最も低くなる午前6時が最も高くなる。しかし、芝地や緑地帯内では午後11時頃に最大となる。これは、鉛直温度分布図で見られたように、午後6時をすぎた頃から大気は強い安定成層が出来はじめ、まだその頃は潜熱輸送が生じているために芝地および緑地帯から供給された水蒸気が地表付近の大気中に閉じ込められたからである。昼間は芝地および緑地帯からの潜熱輸送が盛んになり、実際には多量の水蒸気が大気に放出されるが、昼間の大気は地表面付近で不安定状態になるため、水蒸気は上空に拡散され、地表近くの相対湿度はあまり上がらず、砂漠面上と比べて気温が低くなる分だけ高くなった。

以上で、シミュレーションにより、大規模緑化マスタープランによる微気象緩和効果は極めて有効である結果が示された。本シミュレーション結果は灌漑と蒸発散に関する仮定がきわめて理想的に作用した場合ではあるものの、あらゆる面で有益な土地と化することがいえる。

【参考文献】

- [1] Gamo, M.; Free Convective Atmospheric Boundary Layer over Desert Areas, Pollution Control, National Institute for Resources and Environment, MITI, Vol.27, No.1, 47-54, 1992.
- [2] Kondo, J., Saigusa, N., and Sato, T.; A Parametarization of evaporation from bare soil surfaces, J. Atmos. Sci., Vol.31, 1806-1971, 1974.
- [3] Mellor, G. L. and Yamada, T.; A hierarchy of turbulent-closure models for planetary boundary layer, J. Atmospheric Science, Vol. 31, 1806-1971, 1974.
- [4] Panofsky, H. A.; Determination of Stress from Wind and Temperature Measurements, Quart. J. Roy. Meteor. soc., Vol.23, 495-502, 1963.
- [5] Yamada, T.; The Critical Richardson Number and the Ratio of the Eddy Transport Coefficients Obtained from a Turbulence Closure Model, J. Atmos. Sci., Vol. 32, 926-933, 1975.
- [6] Yamada, T.; Simulation of Nocturnal Drainage Flows by a q2l Turbulence Closure Model, J. Atmos. Sci., Vol. 40, 91-106, 1983.
- [7] Wilson, N.R. and R. H. Shaw ; A Higher Order Closure Model for Canopy Flow, J. Appl. Meteor., Vol.16, 1197-1205, 1977.

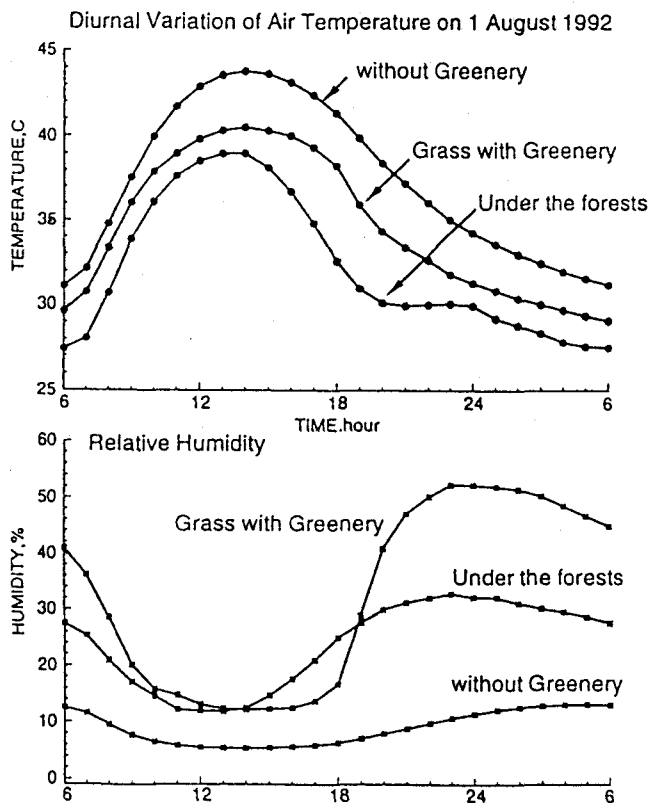


図5-1 (a)気温(上)、(b)相対湿度(下)の日変化