

灌漑緑化による砂漠域の微気象改善効果に関する検討

The effect of the irrigation on the modification of micro-meteorological condition in desert area

藤野 毅*・和氣亜紀夫**・浅枝 隆***

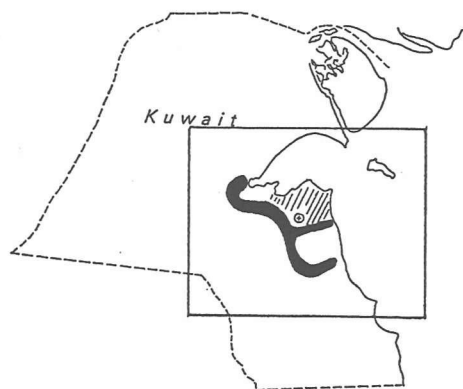
Takeshi FUJINO, Akio WAKE and Takashi ASaeda

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

Key Words; desert, green-belt, numerical simulation, meso-scale atmospheric model

1. はじめに

都市のヒートアイランド現象をはじめとする最近の熱環境学の研究によれば、地表面の被覆状態は局地気象を決定する大きな要因の1つである^{1,2,4)}。すなわち、強い日射のもとでの表面被覆物は地中水分の蒸発散を阻害し、高温になった地表面からの多量の顕熱輸送と赤外放射により大気加熱に寄与する。一方、逆に自然の砂漠地域で大規模な植林と緑化が実現すれば、地表面の熱特性が改善され、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)がもたらす局地微気象の改善度を、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。



(黒部分：グリーンベルト、斜線部分：都市域、印：空港、および枠は計算領域を示す。)

図-1 緑化プロジェクトの概要

2. 大気モデルの概要

大気モデルは Mellor and Yamada(1974)による2次モーメント乱流クロージャーモデルレベル 2.5を用いた(Appendix参照)。ここで、樹木群内の大気の運動・放射特性の評価はYamada(1982)に基づいている。また、樹木群および地表面からの蒸発散の影響は β 法⁵⁾により評価した。図-1に示された100×120kmの計算領域は、

* 埼玉大学大学院 Graduate Student Saitama University

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

*** 埼玉大学工学部 Saitama University

水平面では重複した3段階のメッシュ分割(4×4, 2×2, 1×1km)から成る「ネステッドグリッド」システムによって離散化し、メソスケール効果を反映させながら重点領域の分解能を向上させることを可能にした。垂直方向には、4000mまでの26ノードから成る不等間隔メッシュで分割し、地中温度計算についても、地下1.5mの13ノードから成る不等分割を適用した。

3. 現状の再現

まずはじめに、モデルの検証として大規模緑化が実現していない現状の微気象の再現を試みた。この場合の土地利用は、すべて砂漠と仮定した。夏季のこの地域の気象はほとんどの日が快晴であり、北西の風が卓越する。この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を微調整し、現地微気象の日変化の再現性を調べた。現地時間の朝6時から49時間、同じ気象条件が2日間続くものとしてシミュレーションを行い、最初の24時間の計算結果は初期条件の不正確さによる悪影響を避けるために除外した。図-2(a)-(c)は、空港における気温、相対湿度、および風向・風速の観測値とシミュレーション結果の比較を示す。入力パラメータの調整によって、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は、同日のクウェート上空の鉛直温度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ため、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²⁾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度分布をよく再現している。

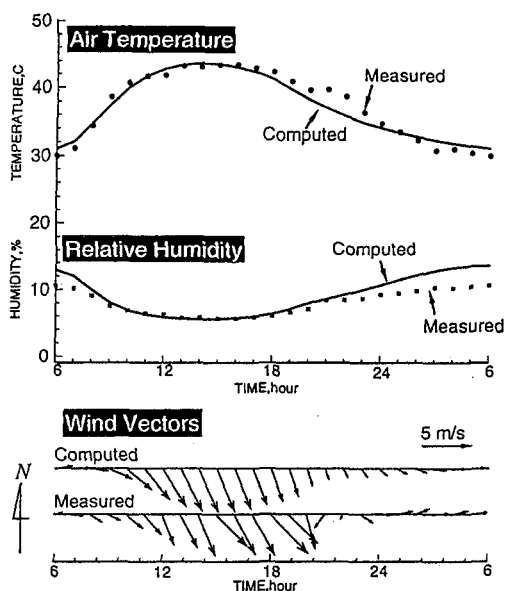


図-2 (上から)(a)気温、(b)湿度、(c)風向・風速

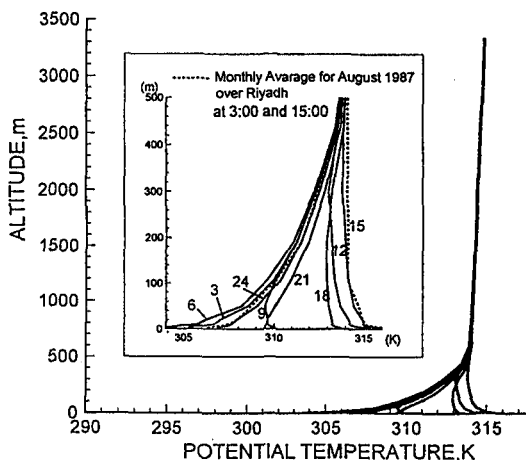


図-3 鉛直温度分布

4. 緑化による微気象緩和効果

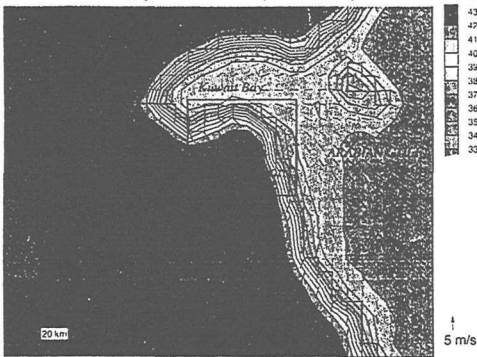
4.1 気温・風の水平分布

次に、再現のためのモデルの検証を進展させ、緑化プロジェクトによる微気象緩和のシミュレーションを行った。表-1に、最新のマスタープランに基づいた緑化関連の入力パラメータを示す(Appendix参照)。計算ではグリーンベルトの樹木群はキャノピーモデルを、市街地緑化は地表面粗度による取扱いをそれぞれ行った。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現状と緑化プロジェクトが行われた場合について、15時の気温および風向・風速の水平分布図を図-4(a), (b)に示す。それぞれ気温は高さ3m、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-5(a), (b)に示す。それぞれ緑化プロジェクトが行われたほうが、その地域の気温は低くなることが示された。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(空港は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。

表-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%
樹冠からの日蒸散量	： 5 mm/day
樹冠下地面からの日蒸発量	： 1 mm/day
・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
植生からの日蒸発散量	： 4 mm/day

Ground level Temperature and Wind fields at 15:00 without Greenery Master Plan (4km mesh)



Ground level Temperature and Wind field at 15:00 with Greenery Master Plan (4km mesh)

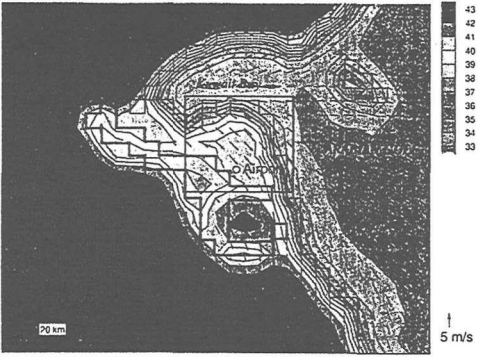
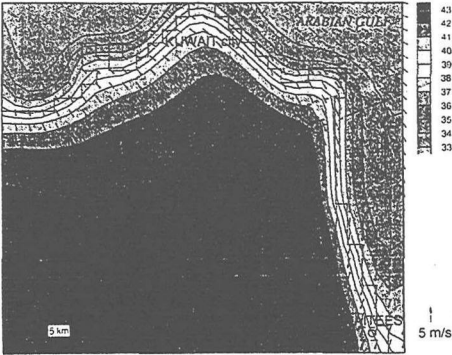


図-4 気温・風向風速分布(4kmメッシュ15:00) (a)現状(左) (b)緑化プロジェクト後(右)

without Greenery Master Plan (1km mesh)



with Greenery Master Plan (1km mesh)

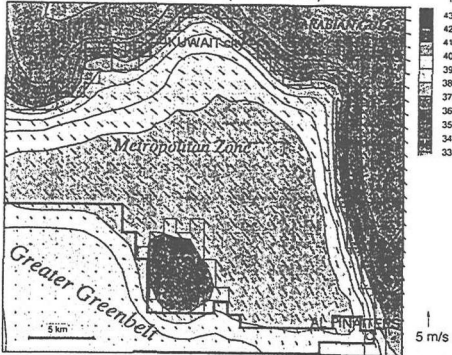


図-5 気温・風向風速分布(1kmメッシュ15:00) (a)現状(左) (b)緑化プロジェクト後(右)

4. 2 地表面の熱収支

図-6 (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、地中への伝導熱と顕熱輸送のみに分けられる。これらは、明け方では正味放射エネルギーはそのまま地中に熱として伝わり、地中の温度が上昇する。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 300W/m^2 程度に達する。夜間は地中に貯えられた熱が放射冷却の形で奪われ、接地層の大気を冷却する。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 150W/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。

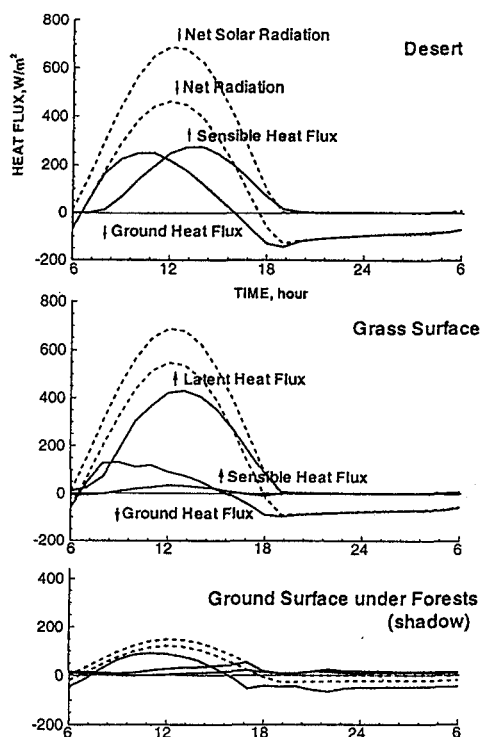


図-6 地表面熱収支 (a)砂漠, (b)芝地, (c)樹冠下

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、緑地がない場合、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。日中での比較を図-7に示す。まず蒸散のない緑地帯については、地表面から樹冠が広がりはじめる高さ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が、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樹冠の陰によって地表面温度が下がるだけでなく、蒸散の効果により緑地帯内の大気は冷却される。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度にまで達した。

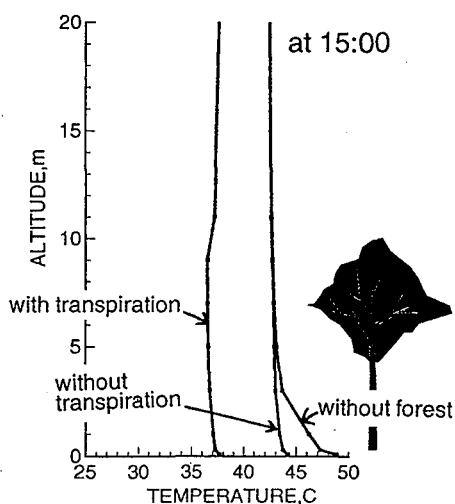


図-7 接地層内の気温分布

5. おわりに

最後にまとめとして、図-8 (a), (b)に、砂漠面、芝地面、および緑地帯下の芝地面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、鉛直温位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。しかし、昼間の大気は地表付近で不安定状態になるため、水蒸気は上空に拡散される。従って、芝地や緑地帯近傍では水蒸気量そのものは増加しているものの、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、灌漑と蒸発散に関する仮定が理想的に作用した場合に極めて有効である結果が示された。但し本結果は、物理的な要因についてのみに触れており樹冠や芝地の生物的要因については深く言及していないため、今後はこれらを評価する必要がある。

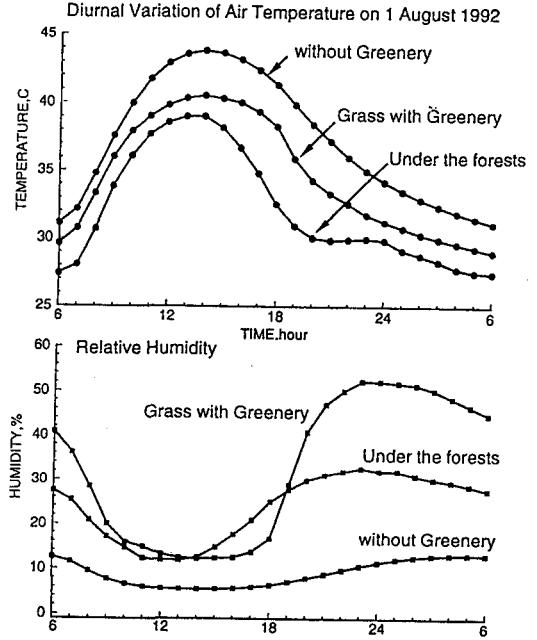


図-8 (a)気温(上)、(b)相対湿度(下)の日変化

APPENDIX

・基礎方程式

方程式は静水圧、Businessq近似を仮定した。

記述は非直交座標系に変換した形を表す。

運動方程式：

$$\frac{DU}{Dt} = f(V - V_g) - \eta C_{da}(z)U |U| + g \frac{H - z^*}{H} \left(1 - \frac{(\Theta_v)}{\Theta_s} \right) \frac{\partial z_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{xy} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{H}{H - z_g} \frac{\partial}{\partial z^*} (-\bar{uw}) \quad (1)$$

$$\frac{DV}{Dt} = -f(U - U_g) - \eta C_{da}(z)V |V| + g \frac{H - z^*}{H} \left(1 - \frac{(\Theta_v)}{\Theta_s} \right) \frac{\partial z_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xy} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{H}{H - z_g} \frac{\partial}{\partial z^*} (-\bar{vw}) \quad (2)$$

連続式：

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W^*}{\partial z^*} - \frac{1}{H - z_g} \left(U \frac{\partial z_x}{\partial x} + V \frac{\partial z_x}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

$$W^* \equiv \frac{H}{H - z_g} W + \frac{z^* - H}{H - z_g} \left(U \frac{\partial z_x}{\partial x} + V \frac{\partial z_x}{\partial y} \right)$$

内部エネルギー方程式：

$$\frac{D\Delta\Theta}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \Delta\Theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \Delta\Theta}{\partial y} \right) + \frac{H}{H - z_g} \left[\frac{\partial}{\partial z^*} (-\bar{w\theta}) + \frac{1 - \eta}{\rho C_p} \frac{\partial R_{Nz}}{\partial z^*} + \frac{\eta}{\rho C_p} \frac{\partial R_{Nz}}{\partial z^*} - W \frac{\partial \Theta_v}{\partial z^*} \right] \quad (4)$$

混合比保存方程式：

$$\frac{DQ_v}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial Q_v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial Q_v}{\partial y} \right) + \frac{H}{H - z_g} \frac{\partial}{\partial z^*} (-\bar{wq_v}) \quad (5)$$

乱流エネルギー方程式：

$$\frac{D}{Dt} \left(\frac{q^2}{2} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{2} \right) \right] + \left(\frac{H}{H - z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left[q l S_v \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\frac{q^2}{2} \right) \right] - \frac{H}{H - z_g} \left(\bar{uw} \frac{\partial U}{\partial z^*} + \bar{vw} \frac{\partial V}{\partial z^*} \right) + \beta_g \bar{w\theta_v} - \frac{q^3}{B_1 l} + \eta C_{da}(z) [|U|^3 + |V|^3]$$

$$q^2 = \bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2$$

乱流フラックス：

$$(\bar{uw}, \bar{vw}) = -l q \bar{S}_M \left[\frac{\partial U}{\partial x^*}, \frac{\partial V}{\partial x^*} \right] \quad (7)$$

$$(\bar{w\theta}, \bar{wq_v}) = -\alpha l q \bar{S}_M \left[\frac{\partial \Theta}{\partial x^*}, \frac{\partial Q_v}{\partial x^*} \right] \quad (8)$$

U, V, W : x, y, z 方向の風速成分、 Θ_v : 仮温位、 $\langle \Theta_v \rangle$: 仮温位の平均値、 $\Delta \Theta_v$: 温位の変位、 Q_v : 混合比、 f : コリオリパラメーター、 U_g, V_g : 地衡風成分、 η : キヤノピーの占有率、 C_d : 抵抗係数、 $\alpha(z)$: 葉面積密度、 K_x, K_{xy}, K_y : 水平方向の拡散係数、 g : 重力加速度、 β : 体積膨張係数、 ρC_p : 空気熱容量、 R_N : 放射収支、 R_{Np} : キヤノピー内放射収支、 z^* : 座標変換後の鉛直座標、 z_g : 標高、 $\bar{H}$: 座標変換後の計算領域上限、 H : 直交座標系での計算領域上限、 l : 渦長さ、 α : 乱流プラントル数、 $\bar{S}_M$: 安定関数、 B_1, S_1 : 経験定数、全微分記号 $\frac{D(\cdot)}{Dt} \equiv \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} + U \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} + V \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} + W \frac{\partial(\cdot)}{\partial z}$

・植生モデルの適用性について

本研究で取り上げた樹木は砂漠でも生息可能な種類の 1 例である。それは水分供給が少ないために、生理作用として樹木からの蒸発散を極力抑えるため生息可能なものであり、実際に水分の供給により生理過程がどのように変化するかは不明である。しかし、逆に十分な水分供給があれば現状の砂漠では適さない他種の樹木でも生育可能になるとも言えるし、樹木自身の効果で平均気温が下がれば可能性はより高くなるであろう。従って、本モデルの信頼度は植生の生理作用についても詳しく検討しない限り明らかにされない。しかし、周囲の物理条件および植生の物理条件は満たされているため、モデルは気候緩和の定量化の指標にはなる。

・緑化のパラメーターについて

樹木の遮光率は、日射を表面で 10% 反射し、内部で残りの 80% を吸収する仮定に基づく。内部での日射の減衰は指数的に生じ、葉面密度の関数である⁹⁾。緑化の割合はグリーンベルトで 100% ($\eta = 1$)、市街地で 40% ($\eta = 0.4$) を計画。蒸発散量はそれぞれの計画値になるように β 値をチューニングした。これらは可能蒸発散量を越えた値ではない ($\beta = 0.3 \sim 0.4$)。

・灌漑、緑化の現状について

現地から得ている情報によると、夏季の芝地へ散水量はおおよそ 10mm/day であり、これらは 1 日の間で 8 割程度は蒸発する。従って、このような散水を大規模に行うことが可能ならば計算結果は実現不可能な値ではない。ここでコストの問題が生ずることは言うまでもなく、実際の灌漑について、その効率化を検討する必要がある。

参考文献

- [1] Asaeda T. and Fujino T. : Heat flux and Heat storage Properties of the Paved ground, Japan Soc. Hydrol & Water Resour., Vol. 5, No. 4, 3-7, 1992.
- [2] Asaeda T., Kitahara M., Fujino T., and Wake A. : Analysis of atmospheric heating process over heated pavements, Hydr., Coastal, and Env. Eng., JSCE, No. 467, 11-23, 1993.
- [3] 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.
- [4] Kimura F. and Takahashi S. : The effects of land use and anthropogenic heating on the surface in the Tokyo metropolitan area, Atmospheric Environment, Vol. 25B, No. 2, 155-164, 1991.
- [5] Kondo, J. and Saigusa, N., and Sato, T. : A parameterization of evaporation from bare soil surface, Applied Meteorology, Vol. 29, 383-387, 1990.
- [6] Mellor, G.L. and Yamada, T. : A hierarchy of turbulent-closure models for planetary boundary layer, Atmospheric Science, Vol. 31, 1806-1971, 1974.
- [7] Yamada, T. : The Critical Richardson Number and the Ratio of the Eddy Transport Coefficients Obtained from a Turbulence Closure Model, Atmospheric Science, Vol. 32, 926-933, 1975.
- [8] Yamada, T. : A Numerical Model Study of Turbulent airflow In and Above a Forest Canopy, Meteorological society of Japan, Vol. 60, 439-454, 1982.