

団地内キャニオン空間内における夏期の屋外温熱環境の実測

FIELD MEASUREMENT OF OUTDOOR THERMAL ENVIRONMENT WITH IN COURTYARD CANYON SPACE AROUND APARTMENT COMPLEX IN SUMMER

吉田伸治*, 村上周三**, 成田健一***, 高橋岳生****

大岡龍三*****, 持田 灯*****, 富永禎秀*****

Shinji YOSHIDA, Shuzo MURAKAMI, Ken-ichi NARITA, Takeo TAKAHASHI,
Ryozo OOKA, Akashi MOCHIDA and Yoshihide TOMINAGA

The authors have carried out the field measurement of outdoor thermal environment in summer in order to collect the measured data of outdoor thermal environment for evaluating the prediction accuracy of a method developed by the authors to assess the outdoor climate with the aid of CFD (Computational Fluid Dynamics). Spatial distributions of wind velocity, temperature, humidity and radiation are measured within courtyard canyon space around apartment complex located in Tokyo. The values of physical parameters which affect outdoor thermal environment, such as albedo, convective heat transfer, moisture availability, leaf area density and so on, are estimated from the results of this measurement. It is also clarified that the effects of tree planting on outdoor thermal and wind climates.

Key Words: Outdoor Thermal Environment, Field Measurement, Trees, Heat Transfer Coefficient, Heat budget on ground surface

屋外温熱環境、実測、樹木、対流熱伝達率、地表面熱収支

1. 序

都市化による屋外温熱環境の悪化に伴い、緑地や親水空間の配置、通風の確保等の環境調整手法を施した屋外空間設計の重要性が確認されつつある。このような屋外空間を改善するための各種計画の実効性を評価する場合、CFD（計算流体力学）を基本とした屋外温熱環境予測手法は有用であると期待されている。筆者らは既報^{(1),(2)}において、この屋外温熱環境予測手法のプロトタイプを提案している。この環境予測手法を実際の環境設計に応用するためには、解析領域内の地表面、建物外表面の被覆状況に関する種々のパラメータ（アルベド、蒸発効率等）について適切な条件設定を行う必要がある。また提案する環境予測手法の適用限界を把握するため、加えて更なる予測精度の向上を図るためには、実験・実測との比較による精度の確認に対して常に配慮すべきであり、この検証に利用可能な信頼性の高い測定データの蓄積が必要である。これらのデータを蓄積するための実測では、単に温湿度、風速等の時間平均値の測定のみでは不十分であり、顕熱放熱量、対流熱伝達率、潜熱放熱量、等の市街地内の熱、水蒸気輸送に関する諸量の測定が必要である。また、結果から温熱快適性の評価の精度を検証する上で必要な物理量（風速、温度、湿度、放射）全てを測定する必要もあるが、既往の実測^{(3),(4),(5)}ではその全てが測定されている例は極めて少ない。そこで、本研究では①夏期における市街地空間内の温熱環境の把握、②屋外温熱環境予測数値シミュレーションの精



(1)実測対象領域とその周辺



(2)実測対象領域の写真

図1 測定対象地域（東京都北区、赤羽台団地）

* 福井大学工学部 講師・博士(工学)
** 慶応義塾大学理工学部 教授・工博
*** 日本工業大学工学部建築学科 教授・工博
**** 東京大学生産技術研究所 技官
***** 東京大学生産技術研究所 助教授・博士(工学)
***** 東北大学大学院工学系研究科 助教授・工博
***** 新潟工科大学工学部建築学科 助教授・博士(工学)

Lecturer, Faculty of Engineering, Fukui University, Dr. Eng.
Prof., Faculty of Science and Technology, Keio University, Dr. Eng.
Prof., Nippon Institute of Technology, Dr. Eng.
Technical Officer, Institute of Industrial Science, University of Tokyo
Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Graduate School of Eng., Tohoku University, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Niigata Institute of Technology, Dr. Eng.

度の検証に用いる入力条件、比較のためのデータの取得、を目的とした実測を行った。

2. 実測概要

2.1 実測対象

東京都北区の赤羽台団地の1区画を対象とする。図1に対象領域周辺の地図並びに写真を示す。同団地の南東には高低差約12mの崖が存在しており、団地はこの崖の上に立地している。

2.2 実測期間ならびに測定方法

実測期間は平成11年8月2日(月)～8月6日(金) (注1)。測定項目の一覧を表1に示す。図1中実線枠内の実測対象領域(測定領域B)内の数点において風速、気温グローブ温度、相対湿度、地表面並びに地中温度の時間変化を測定した。図2に各測定点を示す。

また実測対象領域内の6点(図2△印、測定点⑤～⑩)において全天日射量を測定した。ここで、測定点⑦以外の測定点では、各々の近傍の樹木帯からの透過日射を測定しており、これらと測定点⑦(棟間中央、日照部)の全天日射量の比から、各樹木の樹冠の日射透過率 τ を測定し、これと樹冠部分の透過距離 l からその樹木帯の葉面積密度 F を推定した。また、実測時の上空の気象条件(風向・風速、気温、湿度、グローブ温度)を実測対象領域の南西にある7階建て団地棟(建物高さ21m)の屋上(図1の測定点A)で測定した。ここで風向、風速は3次元超音波風速温度計を長さ6mのポール上(地上から27m)に設置して測定した。他の物理量は団地棟屋上から1.5m高さ(地上から22.5m)で測定した。また、草地ならびにアスファルト舗装面の熱収支を測定した。草地面の熱収支に関しては、棟間

表1 測定項目一覧

No	測定位置及び方法	測定項目	測定点数	測定装置
1	測定点A (7階建団地棟屋上)	全天日射、下向き長波放射	1	全天日射計、赤外放射計
2		上空風向・風速及び乱流エネルギー注)	1	超音波風速温度計
3		上空温度・湿度注)	1	アスマン通風乾湿計
4		13-14号棟間の熱画像の連続測定	1	赤外線放射温度計
5	測定領域B (2つの団地棟、5階建の間)	熱画像の測定(移動+定点測定)	12	赤外線放射温度計
6		風向・風速の移動計測	21	発煙管、Tr式風速計
7		アスマン通風乾湿計による温湿度の測定	10	アスマン通風乾湿計
8		グローブ温度の測定	10	グローブ温度計(直径15cm)
9		超音波風速計による風向、風速測定	4	超音波風速温度計
10		樹冠下における日射量測定(定点+移動測定)	6	全天日射計
11		地表面温度 ・草地(日向1、緑陰1) ・舗装面(日向1、緑陰1)	4	熱電対(線径1.0mm)
12		草地面(日向)の熱収支 ① 下向き短波、上向き短波、下向き長波、正味放射 ② 地中温度 ③ 地中への熱伝導 ④ 表面近傍の温湿度 ⑤ 表面温度 ⑥ 渦相関法による顕熱 flux ⑦ シンチレーション法による顕熱 flux ⑧ 草地面蒸発散量(秤量法) ⑨ 水面蒸発量(秤量法、図3参照)	1	① 正味放射計、赤外放射計、アルベドメータ ② 熱電対(線径1.0mm) ③ 熱流板(深さ50mmと100mm) ④ サーミスタと容量型湿度計(通風シールド使用) ⑤ 本表(No.11)で測定(熱画像による検討も行う) ⑥ 超音波風速温度計 ⑦ シンチロメータ ⑧ 簡易ライシメータ:秤量法(電子天秤) ⑨ 秤量法(電子天秤)
13		アスファルト舗装面(日向)の熱収支 ① 地中温度 ② 地中への熱伝導 ③ 表面温度 ④ アルベド(一時的に測定)	1	① 熱電対(線径1.0mm) ② 熱流板(深さ15mm) ③ 本表(No.11)で測定 ④ アルベドメータ
14		建物のアルベドの測定(一時的に測定)	1	アルベドメータ

注) 上空風向・風速(No.2)は、7階建て団地棟屋上に設置した6mのポールの上で測定した(地上から27m)。一方、温度・湿度(No.3)は、7階建て団地棟屋上の屋上面より1.5mの高さ(地上から高さ22.5m)で測定。

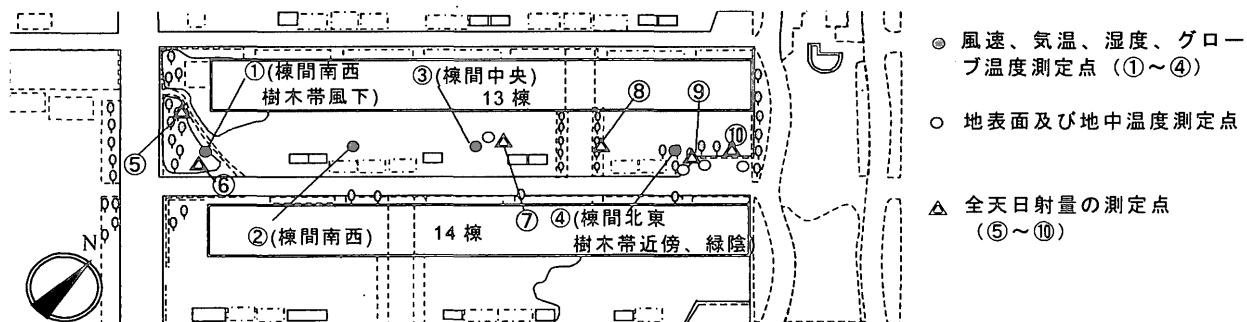


図2 実測対象領域(測定領域B)の測定ポイント

中央 (図2、測定点③付近) において、放射 (下向き短波放射、上向き短波放射、下向き長波放射、正味放射) の測定と秤量法による蒸発散量の測定、および熱流板の埋設による地中伝導熱流を測定した。草地面蒸発散量の測定には、土壌の表層厚さ 10cm を攪乱せずに切り取ってアクリル製の容器 (33cm 角) に移し、元の場所に周囲と同化するように埋設した簡易ライシメータを用いた。この容器全体の重さを 1 時間毎に電子天秤で測定し、その重量変化から蒸発散量を算出した (秤量法)。10cm という土層厚は熱収支解析の観点からは決して十分ではないが、現地の土層厚さ自体が 15cm 程度しかなかったため 10cm とした。土層試料の作成は測定開始前日の 8 月 2 日に行っており、数日間の水分移動の把握に対しては概ね問題ないと思われる。この土層試料の重量変化測定位置の横に水面容器を設置し、こちらの重量変化も同時に測定し、両者の差から蒸発効率 β を求めた。なお、後述するように本研究では β の算出において草地面と水面の物質伝達率は等しいと仮定している。この仮定の妥当性、すなわち両者の表面粗度の違いが蒸発効率に与える影響は無視し得ることを確認する目的で、水面に人工草を設置したモデルも別途用意し、水面のみの場合と比較検討した。水面用容器の直径は約 250mm 深さ 85mm で、人工草は金魚鉢に用いられる合成樹脂製のもの数種を用い、周囲の草丈・密度と同化させた (図3)。使用した天秤は 0.1g 精度、各測定試料の重量変化は 10~50g/h のオーダーであった。アスファルト舗装面については、直径 10cm のコア抜きを現場で行い、表面から 1.5cm の位置で切断し、熱流板と熱電対を挟んだ後再び同所に埋設した。舗装面の厚さは約 5cm で、切断面の隙間はストレートアスファルトを溶かして充填し接着した。なお、参考として、住棟間の草地上でシンチロメータによる顕熱 flux の測定を試みた。パス方向は住棟に平行とし、パス間距離 58m、高度は 2.3m とした。

2.3 気象条件

図4 (1) に測定点 A 並びに団地棟間の中央 (測定点⑦) において測定した全天日射量の時間変化を示す。実測中、8 月 3 日、4 日は晴天であったが、4 日深夜から 5 日早朝まで大雨となり、5 日は曇天であった。屋上 (測定点 A) では、日射量は晴天であった 8 月 3 日、4 日において正午前後に 900W/m^2 を超える値を示し、曇天であった 8 月 5 日においても正午前後に 800W/m^2 程度の値となった。また、図には示さぬが、下向き長波放射量は実測期間を通じ $400\sim 450\text{W/m}^2$ 程度の値を示した。図4 (2) に測定点 A において測定した 8 月 4 日における上空の風向・風速の時間変化 (10 分間平均) ^{*)} を、また図4 (3) に上空の気温、グローブ温度、相対湿度の時間変化を示す。風向は南から南東を示し、測定全般を通じて大変安定しており、風速は平均値で 3.0m/s 程度の値となった (図4 (2))。気温は最高約 35°C であり、グローブ温度は 14 時位が最も高く、 48°C 程度まで上昇する (図4 (3))。相対湿度については、最低 55% 程度の値となる (図4 (3))。

3. 実測結果

3.1 実測対象内における樹木の葉面積密度の推定

樹木の植栽は夏期の暑熱環境緩和のために利用される代表的な手法の一つである。筆者らは、この植栽の効果を、文献 1 に示す環境評価手法のサブモデルとして組み込み、植栽が夏期の温熱環境に及ぼす影響を検討している^{*)}。この樹木モデルにおいて、樹木の葉面積密度は樹木の植栽による放射減衰、流体力学的抵抗、の評価に係わる重

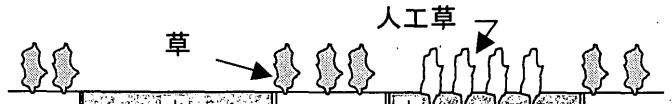


図3 水面蒸発量測定器 (左: 水面のみ、右: 人工草付き)

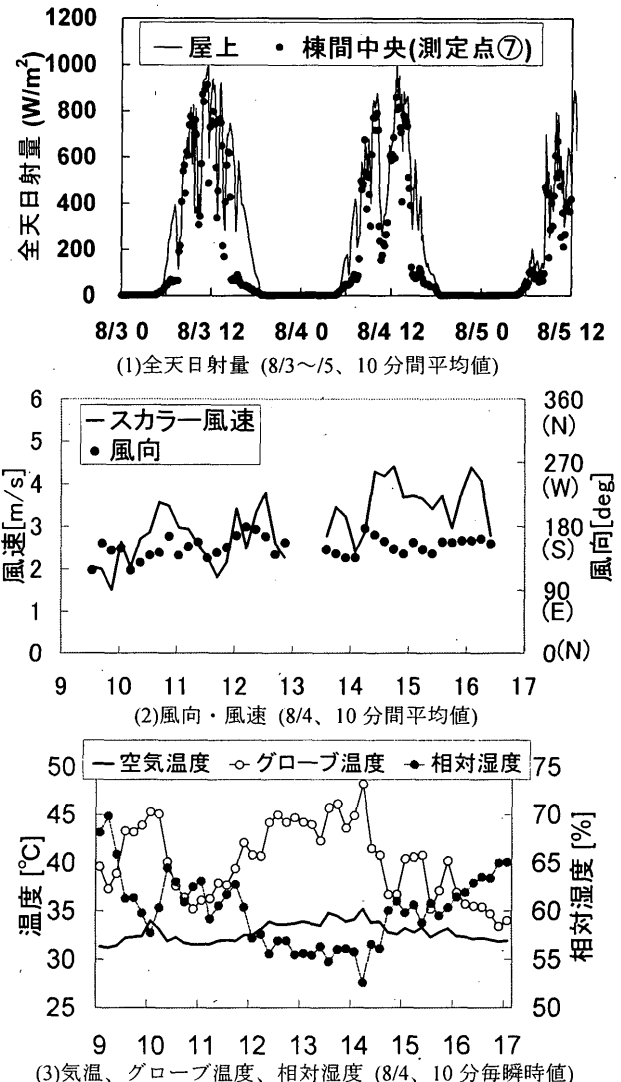


図4 上空の気象条件

要なパラメータである。しかし、この葉面積密度については過去に十分な測定データが存在しないのが現状である。本実測では、ニセアカシア、サザンカ、ソヨゴ等の樹種により構成される樹木帯の緑陰で測定した樹冠からの透過日射を用いて樹冠の日射透過率 τ を推定し、これと放射に関する消散係数 k' 、日射が透過する樹冠部分の長さ l を用いて樹木帯を構成する樹種の樹冠部分の葉面積密度 F を推定した。

ここでは、図2に示す棟間中央の測定点⑦において全天日射量の定点測定を行い、これと同時にもう 1 台別の全天日射計を図2中の緑陰の測定点⑤、⑥、⑧、⑨、⑩の 5 ポイント (図2中△印) を順に移動し、全天日射量を測定した。次に、各測定点の日射量の 10 分間平均値を求め、これを樹冠からの透過日射量とした。これと測定点⑦で同時刻に測定された全天日射量の値 (図4 (1) ●) との比を求めて、これを樹冠の日射透過率 τ とした。ここで得られた τ と、消散係数 k' 、日

表2 葉面積密度 F の測定結果

測定点	日射透過率τの平均値[-]	樹冠部分通過距離ℓの平均値[m]	葉面積密度Fの平均値 [m ² /m ³]	周辺に繁茂する主な樹種
⑤	0.16	2.5	1.3	ニセアカシア, サザンカ
⑧	0.12	1.9	2.0	ソヨゴ
⑨	0.17	3.2	1.0	ニセアカシア
⑩	0.10	3.7	1.1	ニセアカシア

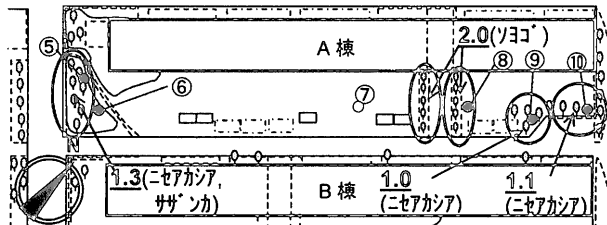


図5 実測対象内各樹木の葉面積密度 F の推定値 [m²/m³]
(図中の括弧内の樹種名: 対象領域内の主な樹種名)

射が透過する樹冠部分の長さℓを、Uchijima より提案された樹冠の日射透過率τと葉面積密度 F との関係式 (1)式²⁷⁾から導出された (2) 式に代入して葉面積密度 F の推定値を算出した。

$$\tau = \exp(-k'F\ell) \quad (1)$$

$$F = -\ln(\tau)/(k'\ell) \quad (2)$$

τ: 樹冠の日射透過率 [-]

k': 消散係数(=0.6²⁸⁾) [-]

F: 樹冠の葉面積密度 [m²/m³]

ℓ: 日射が透過する樹冠部分の長さ[m]。ℓは測定日時における太陽位置と実測当時の樹冠の写真より推定した値を用いた。

表2は各測定点近傍における樹木の葉面積密度 F の推定値 (8月4, 5日の午前、午後 (計4回) の測定結果の平均値)である。また、実測対象領域内での F の分布を図5に示す²³⁾。本測定では最低1.0 [m²/m³]から最高2.0 [m²/m³]という葉面積密度の値が得られた。また、本測定で対象とした樹木帯は 80~90%程度の日射を遮蔽しており、夏期の暑熱環境緩和効果が高いことが確かめられる。次節ではこの様な樹木帯が周辺環境に与える影響を風速、気温、湿度等の測定結果から詳しく検討する。

3.2 樹木周辺の温熱環境

1) 風向・風速 (図6.7)

図6に8月4日の日中の団地棟間 (高さ1.5m) の3つの測定点 (図2に示す測定点①, ③, ④) の風向、風速の10分間平均値の時間変化を示す。また、14時から15時の間、測定点①と測定点③における1分間の時系列データから算出した乱流エネルギーの時間変動を図7に示す²⁴⁾。風向は上空風が南~南東 (図4(2)) を示すのに対し、団地棟間の風向は西~北西を示す (図6(1))。また測定点①は樹木帯の風下にあり、測定点③は2棟間の芝生の上で周囲に障害物はない。測定点④は側方に樹木帯があるが、本実測における棟間の風向(西~北西)の場合、樹木の影響は比較的小さい。各測定点の結果を比較すると、住棟間を長軸方向 (南西→北東) に横切る風がまず通過する団地棟南西の樹木帯の風下に配置した測定点①では他の測定点に比べて風向変動が激しい (図6(1))。また、測定点①の風速は約0.2~0.8m/sの値を示し (図6(2))、1.2m/s~2.8m/sとなる測定点③に比べて小さい値となっており、樹木の風速低減効果がよく現れている。乱流エネルギーについて見ると、樹木帯の風下にある測定点①の乱流エネルギーは、測定点③の乱流エネルギーよりも大きな値を示す時間帯が多くなり、

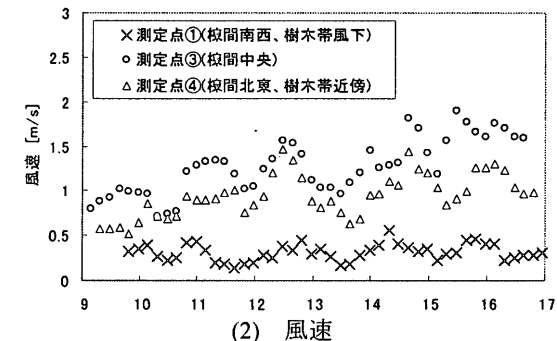
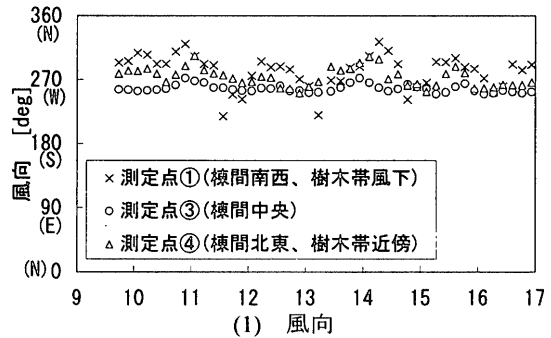


図6 団地棟間の風向・風速の時間変化 (8月4日、高さ1.5m、10分間平均値)

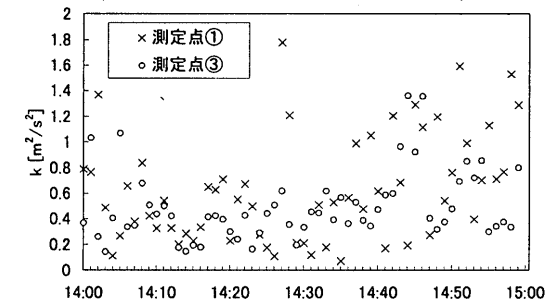


図7 乱流エネルギーの時間変化 (8/4 14:00~15:00)

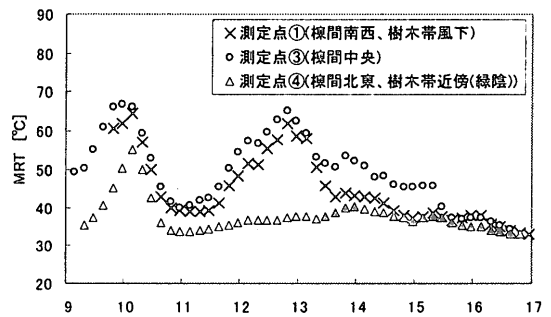


図8 MRTの時間変化 (8/4、高さ1.5m)

樹木の影響による乱流エネルギーの増加が確認される。

2) MRT (図8)

MRTの高さ1.5mの時間変化を図8に示す。このMRTは図6で示した各測定点 (①, ③, ④) での風速 (10分間平均値)、グローブ温度、気温 (共に10分毎の瞬時値) を用いて算出した²⁵⁾。緑陰となる測定点④では樹木の日射遮蔽効果により他の2つの測定点に比べ1~30°C程度MRTが低い。棟間南西の樹木帯近傍の測定点①では13時頃までは棟間中央の測定点③と同様の変化を示すが13時30分頃より南西の樹木帯の影に入るため急激にMRTが低下する。また、測定点③では15時頃より団地棟A棟の影に入るにつれてMRTが低下をはじ

め、16 時位には各測定点共、40℃程度の値となる。なお、10 時～13 時位まで、低い値を示すのはこの間、1 時的に曇ったためである。

3) 気温 (図 9)

図 8 と同じ測定点における気温の時間変化を図 9 に示す。各測定点共に最低 30.5℃、最高 34.5℃程度の値を示しており、測定点③において全般に高い値を示しており、緑陰となる測定点④に対して 2℃程度の温度差の生じる時間帯も見られる。

4) 相対湿度 (図 10)

相対湿度の時間変化 (10 分毎の瞬時値) を図 10 に示す。最も気温の上昇する 13 時 30 分位においても 60%程度の相対湿度の値を示しており、全般に高湿度な分布となる。測定点④は樹木帯からの水蒸気発生、並びに気温低下による飽和水蒸気圧の低下、の 2 つの影響により樹木周辺以外に比べ全般に高い値となる。

5) SET* (図 11)

図 11 に SET*の時間変化を示す^{註 6)}。各測定点ともに 30℃以上の高い SET*を示しており、夏期の屋外環境が劣悪であることが確認される^{註 7)}。特に樹木帯風下の測定点①では SET*が 35~48℃程度の高い値を示し、棟間中央の測定点③に比べ全般に 5℃程度 SET*が高い。測定点①と測定点③は、日射、温湿度等の条件は両者でそれほど大差がないにも関わらずこの様な差異が生じているのは、測定点①近傍の樹木帯による風速低減効果が大きいためと考えられる。

3.3 草地面の熱収支とこれに関わるパラメータ値の同定

本節では団地棟間中央 (図 2 測定点③近傍) において測定した草地面の熱収支並びにこれに関わるパラメータとしてアルベド並びに蒸発効率の値を同定した結果を示す。

1) アルベド (図 12)

草地面における上向き全天日射量と下向き全天日射量の値の比から草地面のアルベドを推定した。その結果を図 12 に示す。測定期間全般を通じて 0.15~0.2 程度の値を示し、時間ごとの大きな変化は無い。

2) 蒸発効率 (図 13~図 15)

次に秤量法より求めた蒸発(散)量 E を基に草地面の蒸発効率 β を推定した。ここでは、蒸発(散)量 E と表面温度および空気側の温湿度から求まる絶対湿度差 ΔX から、 $E/\Delta X$ を水面と草地面について算出し、水面の蒸発効率 β を 1、湿気伝達率 α_w は水面も草地面も等しいと仮定し、 $E/\Delta X$ の両者の比から草地面の β を算出した。

$$E = \beta \cdot \alpha_w \cdot \Delta X \quad (3)$$

$$\Delta X = (X_s - X_a) \quad (4)$$

X_s : 表面温度に対する飽和絶対湿度、 X_a : 空気の絶対湿度

ここでは空気側の温湿度は草地上 42cm において、日射遮蔽板を取り付けた通風二重筒 (アルミ製) の内部にサーミスタ温度計と容量型湿度計を装着して測定している。通風速度は約 4m/s である。

以上のようなプロセスによる α_w と β の推定では、 X_s の計算に必要な表面温度が結果の精度に大きく影響する。特に草地面に関しては、上向き長波放射に寄与する表面温度と、地表面からの顕熱放射量および潜熱放射量の算出に用いる表面温度が異なるという可能性もあり、厳密には表面温度の定義により α_w と β の値が異なってくる。ここでは、文献 1 に示す予測手法において表面温度の使い分けがなされていないことを考慮し、表面温度はひとつの値とみなした扱いをしている。測定法に関しては、草地における表面温度の不均一性

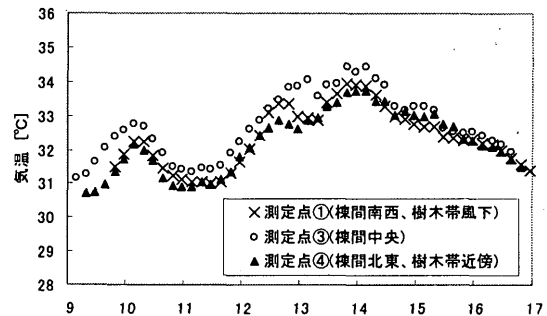


図 9 気温の時間変化(8/4、高さ 1.5m)

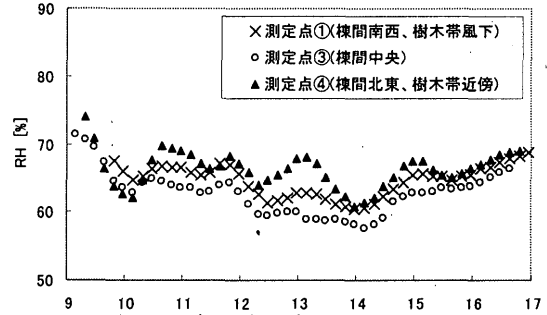


図 10 相対湿度の時間変化 (8/4、高さ 1.5m)

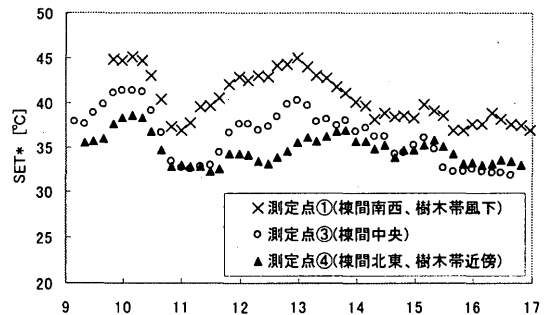


図 11 SET*の時間変化 (8/4、高さ 1.5m)

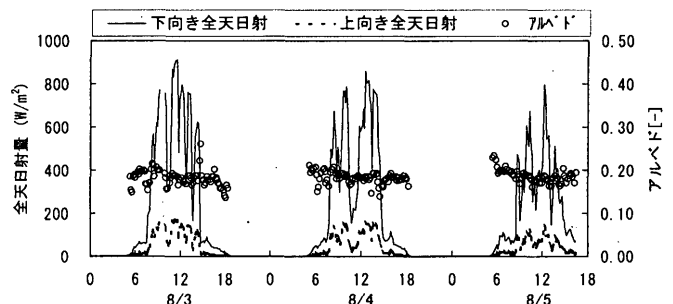


図 12 団地棟間中央の草地面のアルベドの時間変化

を考慮し、空間平均が求まる熱画像の平均値を基本とした。ただし熱画像による温度は絶対値に問題があるため、画角内に別途用意した小水槽の水温をサーミスタ温度計で直接測定し更正した。なお、人工草付水槽に関しては人工草 (樹脂製) を周囲の草地の配置密度、草丈に対応するように比較的高密度に配置したため、蒸発面である水面部分が熱画像では殆ど見えないため、スポット型の放射温度計を併用した。

図 13 に各試料面についての $E/\Delta X$ 、また図 14 に草地面の β の時間変化を各々示す。図 14 の 2 種類の値は、草地の β を算出する際に基準とする水面の値として「水面のみ」を使用したか「人工草付」を使用したかを意味している。降雨前 2 日間の β の平均は 0.47 となり^{註 8)}、また

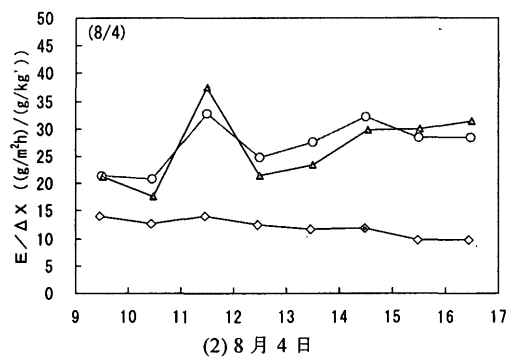
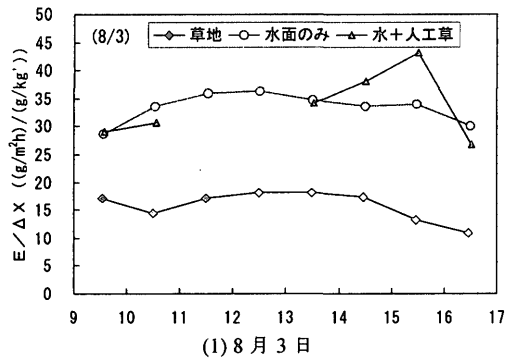


図 13 草地面・水面における $E/\Delta X$ の時間変化 (E : 蒸散量、 ΔX : 水面、草地面と空気中の絶対湿度差)

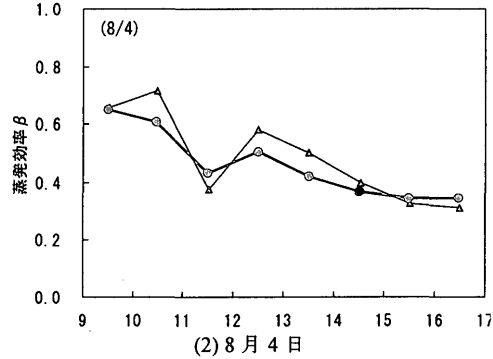
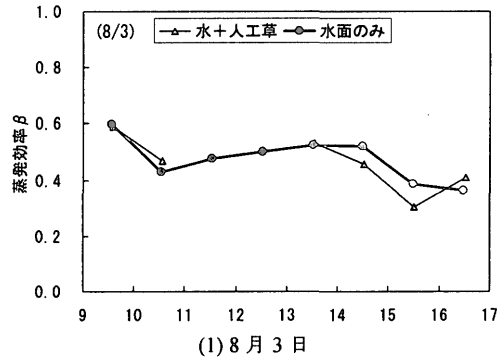


図 14 草地面の蒸発効率 β の時間変化

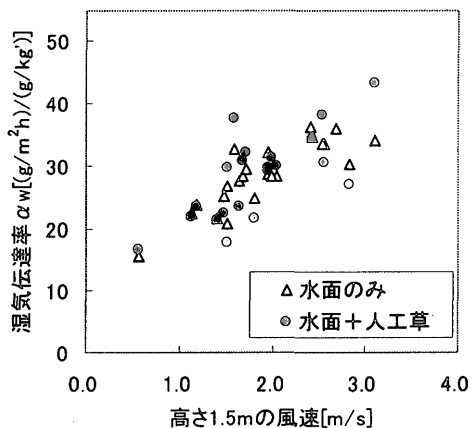


図 15 湿気伝達率 α_w と風速の関係

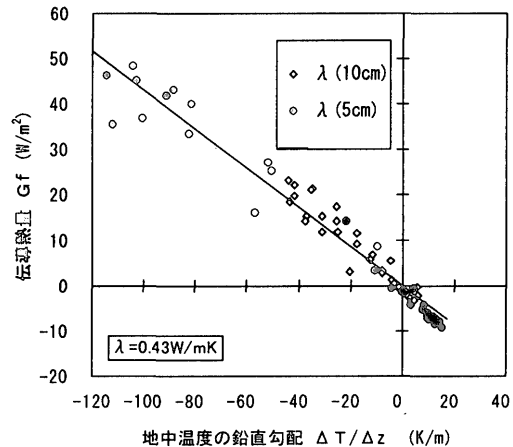


図 16 土層の熱伝導率 λ の算定

人工草を設置した効果は結果的に非常にわずかで、水面上の気流性状は今回の測定状況では周囲の草地と同等と見なせる結果となった。

このときの湿気伝達率 α_w と高さ 1.5m の風速との関係を示したのが図 15 である。本測定では風速と α_w との間に非常にきれいな対応関係が得られた。人工草付の水面は、ややばらつきが大きくなったが、これはスポット型の放射温度計の測定精度が原因と思われる。

3) 土層の熱伝導率並びに熱容量 (図 16、17)

図 16 は熱流板により測定した地中への伝導熱流 G_f と地温勾配 $\Delta T/\Delta z$ から土層の熱伝導率 λ を算定した結果である。深さ 5cm における G_f は 0cm と 10cm の地温による $\Delta T/\Delta z$ に対して、深さ 10cm における G_f は 5cm と 15cm の地温による $\Delta T/\Delta z$ に対してプロットした^{註9)}。本測定では $\lambda = 0.43 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ という値となった。また、深さ 5cm と 10cm における G_f の差から求めた 5~10cm 層の蓄熱量 ΔS と同層の温度の時間変化から土層の熱容量 ρC_p を算定した結果を図 17 に示す。ここでは、地層全体の平均温度を上下境界 (5cm と 10cm) における地温の平均値で近似しているため、実際の地温プロファイルとのずれから昇温時には過大評価、

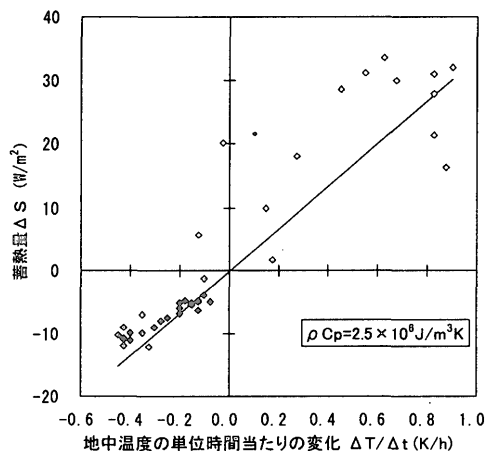


図 17 土層の熱容量 ρC_p の算定

降温時には過小評価となる。対象土層が 5cm とやや厚いため、その影響が無視できず相関はやや悪くなっているが、 $\rho Cp=2.5 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ という値が得られた。土壌の熱物性値は土質によりかなりの幅はあるが、一般には熱伝導率 λ が乾燥土で 0.3・湿潤土で 2.0 $[\text{W/m} \cdot \text{K}]$ 程度、一方熱容量 ρCp は乾燥土で 1.3・湿潤土で 3.0 $[\times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}]$ 程度とされている^{*)}。本実測で得られた値は、 λ がかなり乾燥した土壌、 ρCp はやや湿潤な土壌に相当する値であるが、いずれもほぼ妥当な結果と言える。実測終了後、秤量した草地表面サンプルの土壌を 110°C で 7 日間乾燥させ乾燥重量を測定し、それをもとに測定期間中の土壌の含水比を求めた。降雨があった 4 日深夜までは、含水比は漸減しており、3 日午前で 0.36、4 日夕方で 0.28、降雨後の 5 日午前は 0.54 であった。

4) 草地面の熱収支 (図 18、19)

図 18 に 8 月 4 日の草地面から深さ 5cm までの厚さ 5cm の土層の熱収支を示す。ここで、 R_n は土層への流入を正、流出を負としており、他のフラックス (H 、 LE 、 G) は、土層からの放熱を正、吸熱を負としている。

$$R_n = H + LE + G \quad (5)$$

$$G = G_f + \Delta S \quad (6)$$

R_n : 正味放射量, H : 顕熱 flux, LE : 潜熱 flux

ここでは、 R_n は正味放射計による実測値、 LE は秤量法による蒸発散量の実測値から求めた値である。 G_f は深さ 5cm の熱流の実測値、 ΔS は表面からの G_f の測定深さ 5cm までの土層の蓄熱量 (図 17 で求めた土層の熱容量 ρCp を用いて表層 5cm の地温の時間変化から算出) で、両者の和が表面の地中伝導熱流 G となる。

また、図 19 は草地面における顕熱 flux H についてその推定方法の違いによる差異を検討した結果である。ここでは、①(5)式の熱収支項の残差として求まる顕熱 flux ($R_n - LE - G$)、②1.5m 高さの超音波風速温度計による渦相関法 $H(e.c.)$ 、③シンチロメータによる値 $H(scn)$ 、④文献 1 に示す温熱環境予測手法における潜熱放散量の取り扱いで仮定しているルイス則を用いて図 15 に示す湿気伝達率から算定される対流熱伝達率と(表面温度-気温)との積から求めた値 $H(Le)$ 、の 4 つを比較している。ルイス則は、シュミット数 Sc とプラントル数 Pr の比で定義されるルイス数 $Le (= Sc/Pr)$ を用いて、 $\alpha_c / Cp = \alpha_w (Le)^n$ のように表わせる。ただし Cp は湿り空気の比熱である。本報では $(Le)^n = 0.86$ とした^{注 10)}。どの方法による顕熱が妥当であるかの判断は難しいが、以下の諸点は指摘できる。図 18 によれば、蓄熱項 ΔS が日射の変動と対応していない。これは 5cm という深さの地温変化を用いているため時間後れの影響が現れた結果である。このような誤差を小さくするためには、 G_f の評価深度をできるだけ浅くすることが得策であるが、今回は高密度な根系の存在のため 5cm とするのが限界であった。結果として、熱収支残差による顕熱 ($R_n - LE - G$) は午前中、 R_n の変動と対応していない。1.5m 高さの超音波風速計による渦相関法は、草地面のスケールを考慮すると空間代表性に難があると判断される。従って、後述する周囲のアスファルト舗装面からの顕熱を拾い、過大評価となると予想される。以上の諸点から、本測定においてはルイス則による顕熱が最も信頼できると考えるのが妥当と思われる。なお、他の 3 つの方法の中でルイス則による算定値と最も良く一致したのは、シンチレーション法による顕熱という結果となった。シンチレーション法は、原理的にパス間の空間平均 flux が求まる利点はあるが、計算に使用している経験式の適用限界など、今後検討すべき点が残されている。

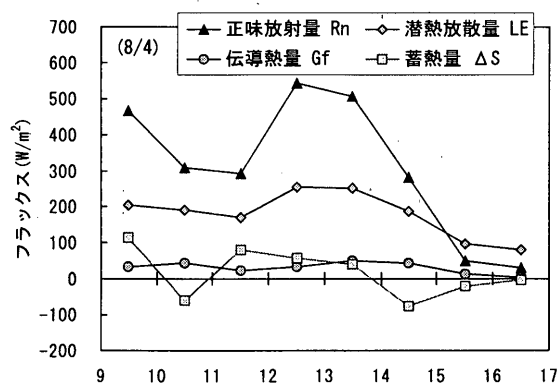


図 18 草地面の熱収支

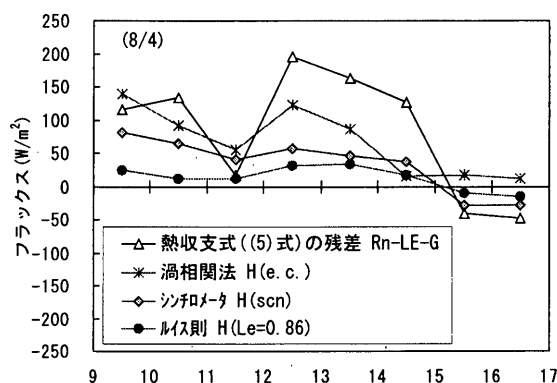


図 19 測定方法の違いによる草地面の顕熱フラックス H の差異

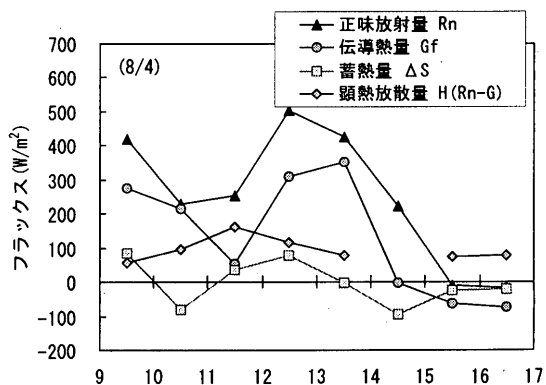


図 20 アスファルト舗装面の熱収支

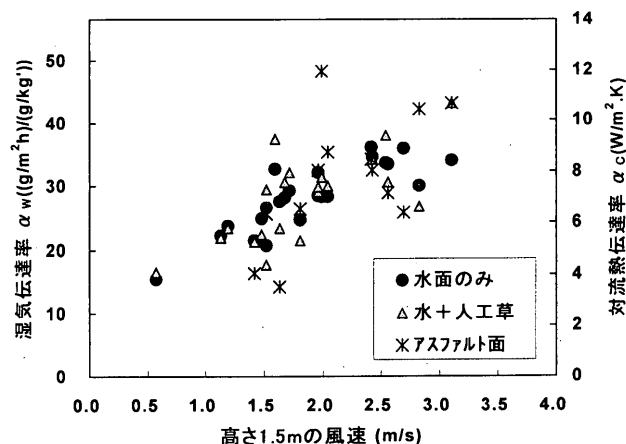


図 21 対流熱伝達率 α_c と風速の関係

3.4 アスファルト舗装面の熱収支

図 20 に 8 月 4 日のアスファルト舗装面 (表面 ~ 1.5cm 層) の熱収支結果を示す。下向短波・下向長波は草地と同様とし、表面温度実測値から求めた上向長波(放射率 0.97 を仮定)、さらにアルベドの実測値 0.09 を用いて正味放射量 R_n を推定した。また、アスファルト層の熱容量 ($2.3 \times 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$) と温度時間変化から蓄熱量 ΔS (表面 ~ 1.5cm 層) を算出し、深さ 1.5cm における熱流の実測値 G_f との和から G を求め、潜熱 $LE = 0$ を仮定し、 G と R_n の差から顕熱 H を推定した。アスファルト舗装面では G の寄与が大きく、 H は最大でも 200 W/m^2 に達していない。この H と温度差(表面温度 - 気温)から対流熱伝達率 α_c を求め、風速との関係を示したのが図 21 である。ここでは図 15 で示した草地の α_w と風速の関係を重ねて再掲した。左右の縦軸目盛はルイス則による湿気伝達率 α_w と熱伝達率 α_c の対応関係を表わしている。このように、まったく独立に求めた α_w と α_c がほぼ一致したことから、本実測の測定精度の高さが確認された。

4. まとめ

- (1) 団地棟間を対象として、夏季の晴天時における温熱環境の測定を行った。
- (2) 各樹木 (ニセアカシア、サザンカ、ソヨゴ等) の日射透過率を測定し、これをもとに葉面積密度を推定した。今回の測定では、葉面積密度は $1.0 \text{ m}^2/\text{m}^3 \sim 2.0 \text{ m}^2/\text{m}^3$ の値が得られた。
- (3) 樹木周辺の温熱環境の測定より、樹木の風速減衰効果、日射遮蔽効果が夏季の温熱環境形成に大きく寄与していることが確認された。
- (4) 数値解析による温熱環境予測を行う上で必要となる各種温熱環境パラメータについて、かなりの精度で測定することができた。草地面の蒸発効率は 0.47、対流熱伝達率は $6 \sim 11 \text{ W/m}^2\text{K}$ 程度、アスファルト舗装面のアルベドは 0.09 という結果が得られた。

謝辞 本研究は、建築研究所を中心に組織された「屋外空間の熱環境設計研究委員会 (坊垣和明 委員長)」の「開発地区の熱環境評価 WG (村上周三 主査)」並びに日本学術振興会の未来開拓学術研究推進事業研究プロジェクトの「高温多湿気候に適応する高密度住区モデルの開発 (研究代表 村上周三)」の一環として行ったものである。また、本実測を行うにあたり、東京大学大学院林立也氏、原山和也氏、東京電力 北原靖子氏 (実測当時 東京大学大学院生)、建築研究所 足永靖信氏をはじめとする方よりご協力を得た。また、都市基盤整備公団をはじめとする関係諸団体、各位に記して深甚なる謝意を表します。

注1) 筆者らは本論文で示す実測と同様の実測を 1 年前の 1998 年 8 月にも行っている^{9,10)}。その際は天候不順並びに熱電対の断線をはじめとする各種測定機器の故障により十分な測定結果が得られなかった。

注2) 今回、消散係数は樹種に関係無く 0.6 (樹種: マツ) とした。本来、この値は樹木に繁茂する葉の傾きに応じて適切な値を与える必要があるが、これに関する測定データは非常に少なく、推定が難しかったため本実測では一定値を用いた。内嶋²⁷⁾によると、消散係数の値は鉛直方向に細長い葉によって覆われた植生の消散係数は 0.4 程度の値を示し、逆に水平方向に広がった葉で覆われた植生の消散係数の値は 1.0 に近い値を示すと記述がある。このパラメータの取り扱いについては今後詳しい検討を行う予定である。

注3) 測定点⑦は設置位置が十分木陰の中に入っておらず、透過日射を精度良く測定できなかったため、表 2、図 5 に示す結果から除外している。

注4) 本研究では、平均風速、乱流エネルギーを算出する際の平均化時間の最適値について予備検討を行った。ここでは、平均化時間を 1 分、5 分、10 分とした場合の風向、風速、乱流エネルギーの差を検討した (超音波風速計のサンプリング間隔は 50ms (1 秒間に 20 回))。風向、風速は、平均化時間が長くなるにつれ、細かな変動が見られなくなり、平均化時間 5 分と 10 分ではそれほど大きな差は見られない結果となった。一方、乱流エネルギーは平均化時間によってその傾向が異なり、平均化時間が長くなるほど値が増加する傾向が見られた。これは、平均化時間を長くとると、風向変動の影響のために、乱流変動とは異なるメカニズムから生じる速度の変動成分の影響

を受けるためと考えられる。以上の検討を基に本論文では、風向、風速については 10 分間平均値を、乱流エネルギーについては 1 分間の時系列データに基づく値を示している。但し、キャニオン空間内の比較的乱れの強い領域においては、平均化時間 1 分の結果と 10 分の結果には大きな違いは見られなかった。

注5) MRT の算出式¹¹⁾を以下に示す。ここで(8)式は直径 15cm の球に対する対流熱伝達率を表している。

$$MRT = T_g + \frac{\alpha_c}{\alpha_R} (T_g - T_o) \quad (7)$$

$$\alpha_c = 0.172 [2 + 0.3(10000v)^{0.566}] \quad (8)$$

$$\alpha_R = 5.12 \quad (9)$$

ここで、 T_g : グローブ温度 [°C]、 α_c : 対流熱伝達率 [$\text{W/m}^2\text{K}$]、 α_R : 放射熱伝達率 [$\text{W/m}^2\text{K}$]、 v : 風速 [m/s]

注6) 着衣量を 0.5clo (半袖シャツとズボンの着衣状態に対応)、人体の代謝量を 1.5Met (ゆっくりとした歩行と立位静止時の中間) と仮定。人体の平均対流熱伝達率の算出には Mitchel の式を用いた。

注7) 今回算出した SET* は、黒体のグローブ球のグローブ温度を用いて算出しているため、放射温度を過大に評価している。このため、実際の人体の温熱感覚を高温側へ評価していると考えられる。

注8) 98 年の実測においても平均 0.49 [-] の値を示しており、本論文に示す結果と近い値である。

注9) 本実測において草地の地中温度は深さ 0cm、5cm、10cm、15cm の 4 点で測定し、また伝導熱流は深さ 5cm、10cm の 2 点でのみ測定していた。図 16 において深さ 5cm における温度勾配を深さ 0cm と 10cm の温度から算出しているが、深さ 5cm 程度までの地表近傍では地中温度の勾配が 1 日を通じて大きく変化する領域であるため、ここで示す勾配の評価が十分な精度が得られていないとも考えられる。これについては今後詳しく検討する予定である。

注10) 多くの実験式では $n \approx 2/3$ であり、標準状態の空気では $Le = 0.86$ 、従って $(Le)^n = 0.89$ となる。一方、尾崎らの実験¹²⁾ では $(Le)^n = 0.83$ 、また内田¹³⁾ によれば $(Le)^n = 0.82$ と報告されている。これらを考慮し、本報では $(Le)^n = 0.86$ とした。文献 1 に示す温熱環境予測手法でもこの関係を用いている。

参考文献

- 1) 吉田伸治, 村上周三, 持田灯, 大岡龍三, 富永禎秀, 金相礎, 対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析に基づく緑化の効果の分析, 日本建築学会計画系論文集, 第 529 号, pp77-84, 2000.3
- 2) 吉田伸治, 大岡龍三, 持田灯, 富永禎秀, 村上周三, 樹木モデルを組み込んだ対流・放射・湿気輸送連成解析による樹木の屋外温熱環境緩和効果の検討, 日本建築学会計画系論文集, 536 号, pp87-94, 2000.10
- 3) 清田誠良, 成田健一, 吉原俊朗, 戸田訓弘, 中山昌尚, 野々村善民, 市街地における街路空間の気流性状に関する研究, 広島市の東西街路における実測, 日本建築学会計画系論文集, 512 号, pp61-66, 1998.10
- 4) 高偉俊, 三浦昌生, 尾島俊雄, 東京江東区における緑地, 河川のクールアイランド形成のための実態調査研究 都市環境における緑地オープンスペースによる熱的効果 (その 2), 日本建築学会計画系論文集, 456 号, pp75-83, 1994.2
- 5) 萩島理, 片山忠久, 林徹夫, 谷本潤, 街路樹のある街路の温熱環境予測 (その 1) 樹木の放射温度分布に関する実測, 日本建築学会計画系論文集, 516 号, pp79-85, 1999.2
- 6) 佐々木澄, 持田灯, 吉田伸治, 村上周三, 吉野博, 佐藤洋, 団地棟間の中庭空間における夏季晴天時の温熱環境実測, 日本建築学会東北支部, pp321-324, 2000.6
- 7) Uchijima, Z., On Characteristics of Heat Balance of Water Layer under Paddy Plant Cover, Bull. Nat. Inst. Agric. Sci., Vol. A, pp243-263, 1961
- 8) Yamada, T. A Numerical Model Study of Turbulence Airflow in and above a Forest Canopy, J. Meteorol. Soc. Japan 60, pp439-454, 1982
- 9) 近藤純正・編著、『水環境の気象学』, 朝倉書店, pp152, 1994
- 10) 村上周三, 高橋岳生, 大岡龍三, 成田健一, 吉田伸治, 磐田靖子, 小林泰, 足永靖信, 持田灯, 富永禎秀, 対流・放射・湿気連成解析による屋外環境共生空間の研究 (その 6), 団地内キャニオン空間における夏季の温熱環境の実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (環境 1), pp897-898, 1999.9
- 11) 菅原正則, 本間博文, 梅干野晃, 飯野由香里, 夏季の自然通風時における住居平面と住まい方の室内気候への影響に関する調査研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 57 号, pp117-127, 1995.2
- 12) 尾崎明仁, 渡辺俊行, 龍有, 長谷川敬一郎他, 建物外表面の熱・水分伝達に関する実験的研究一風洞実験による水平試料面上の熱・水分伝達について一, 日本建築学会計画系論文集, 第 407 号, pp11-24, 1990.2
- 13) 内田秀雄, 湿り空気と冷却塔, 葦華房, pp83, 1963

(2001年2月9日原稿受理, 2001年10月16日採用決定)