

日射を考慮した都市空間の熱環境評価に関する研究

Study on Thermal Environment Validation Affected by Solar Radiation in Urban Street Canyon

山田 昇 *1
Noboru YAMADA

齋藤 武雄 *2
Takeo S. SAITOH

Abstract

In contrast to interior thermal comfort for humans in residential and office buildings, urban outdoor thermal comfort is significantly affected by intense thermal radiation coming from surfaces of buildings and other structures, as well as solar radiation during the summer months. This paper describes the assessment of thermal environment strongly affected by solar radiation in an urban street canyon in summer. Computer simulations for a radiant environment in an urban street canyon including solar radiation are conducted, and the results of simulations are discussed. Three-dimensional radiation model of urban street canyon is used for these simulations. The simulation results show that the characteristics of radiant environment in an urban street canyon.

キーワード: 直達日射, 散乱日射, 都市温暖化, ヒートアイランド, 熱環境, 都市ストリートキャニオン, 熱放射, 人体モデル, 熱的快適性

Key Words: Direct Solar Radiation, Diffuse Solar Radiation, Urban Heat Island, Urban Warming, Thermal Environment, Urban Street Canyon, Thermal Radiation, Human Body Model, Thermal Comfort.

1. 緒言

近年, 東京などの大都市では, エネルギー消費量の増大や地表面性状の改変などによる都市温暖化 (Urban heat island, or Urban warming) が顕在化しており, 都市空間における熱環境の悪化が懸念されている。図1は, 東京消防庁管轄における夏期の日最高気温の月平均値と熱中症急患数の関係を表しており, 両者には相関関係があることがわかる。とくに2001年は猛暑であり, 628人の急患が発生している。熱中症の要因としては, 気温だけではなく, 湿度, 風速, 日射などの熱放射が影響をおよぼしているものと考えられる。とくに都市の街路空間 (ストリートキャニオン) では, コンクリートやアスファルトといった建築材料による表面被覆材の改変によって, 人体が日射を伴う強い熱放射に晒される可能性が屋内に比べて格段に高く, 加熱された建物・道路からの熱放射, 日射反射, 相互放射等の影響は, 屋内とは全く性質を異にしているものと考えられる。

このような都市街路空間における人体への熱放射環境に関しては, 建築学の分野で多くの研究がなされている。例として, 山口ら⁽¹⁾は, 放射環境の実測を行い, 被験者皮膚温

の測定を行っている。また, 片山ら⁽²⁾は, 街路空間の放射温度分布, 風速分布を調査し, 熱環境指標による評価を行っている。鄭ら⁽³⁾は, 都市街路および開放空間における熱放射が人体におよぼす影響について報告している。さらに, 浅野ら⁽⁴⁾は, 熱放射環境の計測手法として3次元熱画像システムを開発している。しかしながら, これまでの研究では, 夏期の街路空間での日射を伴う人体への放射フラックスの強度や指向性などの特性については未だ明確になっていない。

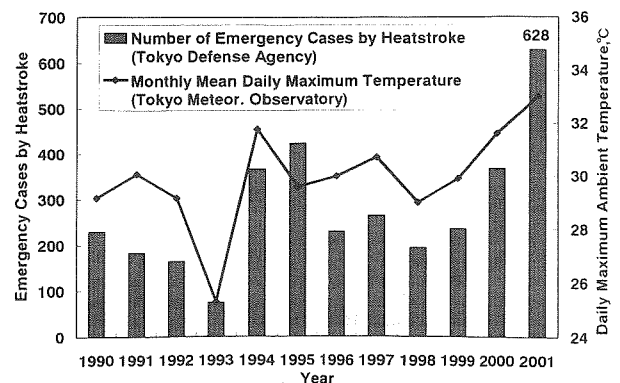


Fig.1 Relationship between daily maximum ambient temperature and number of emergency cases by heatstroke during summer in Tokyo

*1 東北大学工学部助手 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)
e-mail: noboru@cc.mech.tohoku.ac.jp

*2 東北大学工学部教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)
(原稿受付: 2002年1月28日)

本報では、3次元ストリートキャニオンモデル(Street canyon model)による放射環境のシミュレーションを行って、都市3次元空間における人体への日射をはじめとする放射フラックスの強さ、および不均一性について解明し、都市の熱的な不快感の一因が特異な放射環境にあることを指摘する。

2. 都市3次元空間の日射を含む放射環境シミュレーション

2.1 3次元ストリートキャニオンモデル

まず、東京都新宿区の平均階数(2.8階)および幅員別道路面積のデータ⁽⁵⁾を参考にして図2に示すような典型的な3次元ストリートキャニオンモデルを考えた。

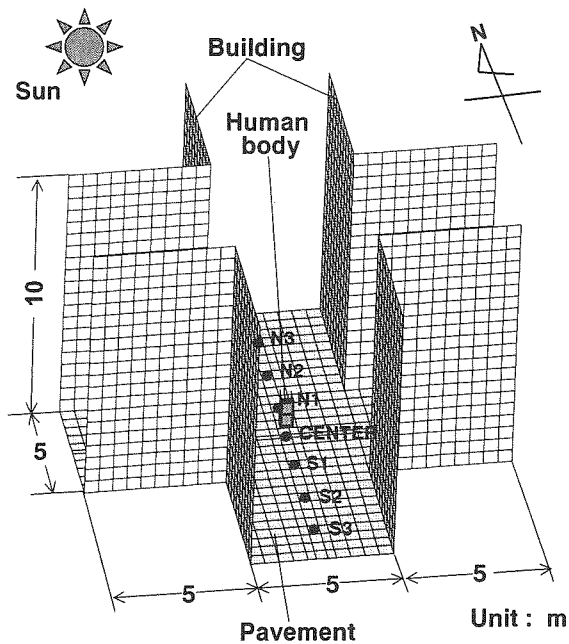


Fig.2 Three-dimensional urban street canyon model

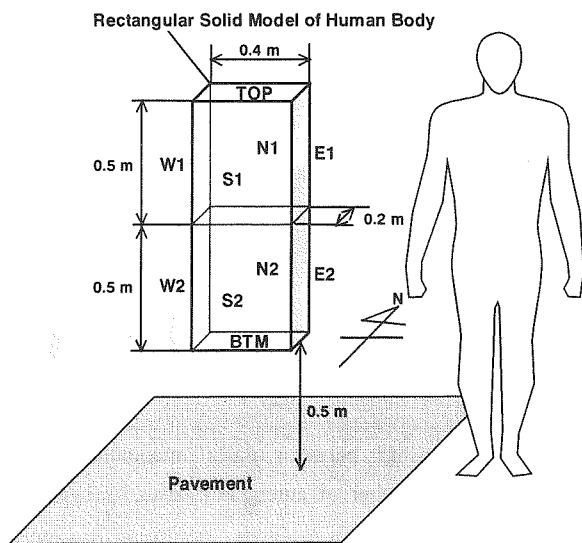


Fig.3 Rectangular solid as a model of human body

水平スケールは15 m×15 mで、建物の鉛直スケールは3階建てを想定した10 m、道路の幅員は5mである。これは新宿区において最も舗装面積の多い道路が幅員5.5m未満のものであるというデータに基づく。このモデル中で人体は図3の人体モデル図に示すように0.4 m×0.2 m×1.0 m(モデル表面積:1.36 m², 日本人の平均値は1.7m²)の立方体に近似できるものとし、計10面の部位から構成されている。人体モデルは、図2の各地点(N3, N2, N1, CENTER, S1, S2, S3)のいずれかに位置するものとする。人体と環境との間の放射熱交換の計算、平均放射温度の算出評価などのためには、人体に対する形態係数が必要である。人体を直方体モデルで近似する手法についてはHorikoshi and Kobayashi⁽⁶⁾による報告があり、その妥当性が評価されている。将来的に、より人体形状に近づけることも可能である。このモデルにおける面要素は建物、道路、天空面、人体の全部で3612面である。

2.2 シミュレーション手法

東京での夏期の典型的な気象条件を想定し、ストリートキャニオンモデルに置かれた人体モデル各部位への放射フラックスを数値シミュレーションにより求める。放射伝熱解析に関しては、モンテカルロ法⁽⁷⁾による形態係数算出法を採用した。まず、各面要素における熱収支式を解くことによって表面温度を算出する。建物の窓や起伏などの影響は無視し、各表面は一様であると仮定した。その際、表1に示すように路面はアスファルト、壁面はコンクリートの代表的な物性値を設定した。各分割面の表面温度が決定した後、人体モデルに対する熱放射場を解析する。人体を含んだ熱放射に関する相互反射解析法に関して、鄭ら⁽³⁾は閉空間および屋外空間での2次元の相互反射解析を行うため、Net Radiation法⁽⁸⁾を用いて人体を含んだ相互放射を考慮した平均放射温度を求めている。本研究では、鄭らの手法を応用し、3次元空間に拡張した。図4に本シミュレーションのフローチャートを示す。

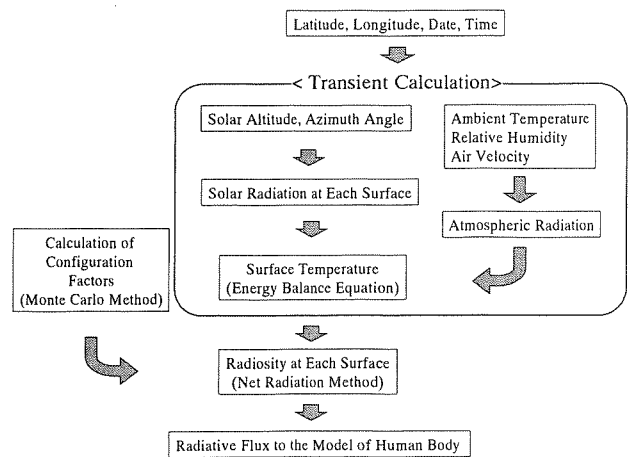


Fig.4 Flow chart of the present simulation

Table 1 Thermophysical properties for the present simulation

	Thermal conductivity λ W/(m·K)	Thermal diffusivity a mm ² /s	Convection heat transfer coefficient $\rho_a c_p C_H U$ W/(m ² ·K)
Concrete (Building)	1.5	0.66	18.5
Asphalt (Pavement)	0.74	0.38	18.5
Soil layer	0.9	0.26	-

Table 2 Long-wave emittance and albedo of building, pavement and human body

Plane element	Long-wave emittance	Albedo (Reflectance)
Building	0.90	0.4
Pavement	0.90	0.2
Human body	0.98	0.29

Table 3 Conditions used for the present simulation

City for Simulation	Tokyo (Lat. 35° 41' N, Long. 139° 46' E)
Date and time	14:00, July 27, 1999
Weather	Fine (Cloudiness : 0)
Direct solar radiation at 14:00	855 W/m ²
Diffuse solar radiation at 14:00	284 W/m ²
Ambient temperature	33 °C
Relative humidity	70 %
Air velocity	0.1 m/s
Total surface area of the model of human body	1.36* m ²

* Average value of the Japanese is about 1.7 m²

(1) 建物および路面における熱収支 ストリートキャニオンモデル中における面要素*i*の表面温度は、次式に示す熱収支式によって求める。

$$S_i + Q_{ai} + Q_{si} = Q_{ei} + G_i + H_i \quad (1)$$

ここで、 S_i は日射量、 Q_{ai} は大気放射量、 Q_{si} はキャニオンモデルの他の面要素から受ける熱放射量である。また、 Q_{ei} は自身の赤外放射量、 G_i は建物および路面内部への熱伝導量、 H_i は表面での対流による熱輸送量である。これら各項は以下の式によって求める(記号表参照)。

$$S_i = \alpha_{si} (I + D) \quad (2)$$

$$Q_{ai} = F_{sky} \alpha_{Li} \varepsilon_{sky} \sigma T_a^4 \quad (3)$$

$$Q_{si} = \alpha_{Li} \left(\sum_{j=1}^n F_{ij} \varepsilon_j \sigma T_j^4 \right) \quad (4)$$

ここで、快晴時(雲量0)のときの大気平均放射率 ε_{sky} は、

Berdahl and Martin⁽⁹⁾の実験式より、露点温度 T_{dp} より以下のよう求められる。

$$\varepsilon_{sky} = 0.711 + 0.56 \times 10^{-2} T_{dp} + 0.73 \times 10^{-4} T_{dp}^2 \quad (5)$$

$$Q_{ei} = \varepsilon_i \sigma T_i^4 \quad (6)$$

$$G_i = \lambda \frac{T_i - T_{inside}}{dz} \quad (7)$$

ここで、建物および路面内部への熱伝導は、1次元熱伝導方程式によって解く。

$$\frac{\partial T_{inside}}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_{inside}}{\partial z^2} \quad (8)$$

建物のコンクリート層および道路のアスファルト層の厚さは、それぞれ、0.3mおよび0.2mとし、アスファルト層下の土壌の厚さは0.3mとした。コンクリート層内側および土壌側での T_{inside} の境界温度は、それぞれ25℃および30℃とした⁽¹⁰⁾。さらに、対流による熱輸送量は次式によって求めた。

$$H_i = \rho_a c_p C_H (T_i - T_a) U \quad (9)$$

ここで、 $\rho_a c_p C_H U$ は対流熱伝達率と等価であり、表1に示す値とした。なお、放射量の算出については、表2に示す放射率および日射反射率を用いた。以上により、夏期の午後2時の表面温度を得るために、計算開始時刻は午前6時に設定し、3日目の午後2時までの計算を行うことによって、建物および路面における蓄熱効果を考慮している。

(2) NET RADIATION法による熱放射場解析 ストリートキャニオンモデルにおいては、建物形状によって天空が区画されている。その面を反射率、吸収率ともに0で、放射率、透過率1の面と考え、これを仮想天空面と呼ぶことにし、建物と仮想天空面で囲まれた仮想的な閉空間を仮定することによって、放射場の解析を行う。以下のようにNet Radiation法を用いて相互反射を考慮し、(a)長波長放射と(b)日射について経路別に算定を行い、最終的に人体モデル各部位への放射フラックス、部分平均放射温度 MRT_m 、さらに平均放射温度 MRT (Mean radiant temperature)を評価する。

(a) 長波長放射 大気には上下温度分布があるが、天空を黒体とみなしたときの温度は、次式から求められる。これより、天空面からの長波長放射量が求まる⁽¹¹⁾。

$$T_{sky} = \sqrt[4]{\varepsilon_{sky} T_a} \quad (10)$$

次に、分割面の長波長射度(Long-wave radiosity), すなわち反射分を含む全放射エネルギー流束 R_{Li} は次式で表される。上式より、形態係数と表2に示すような放射率、放射率を用いれば、各分割面の長波長射度が得られる。

$$R_{Li} = \rho_{Li} \left(\sum_{j=1}^n F_{ij} R_{Lj} \right) + \varepsilon_i \sigma T_i^4 \quad (11)$$

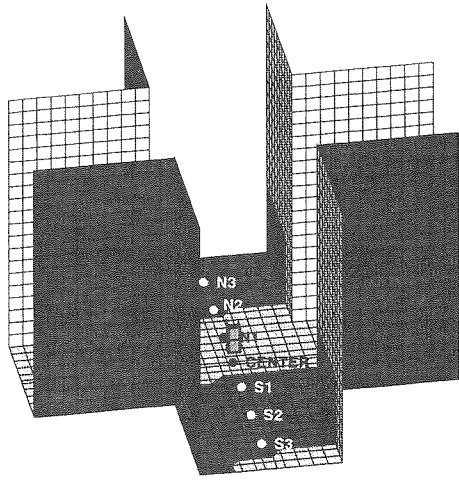


Fig.5 Shade distribution at 14:00

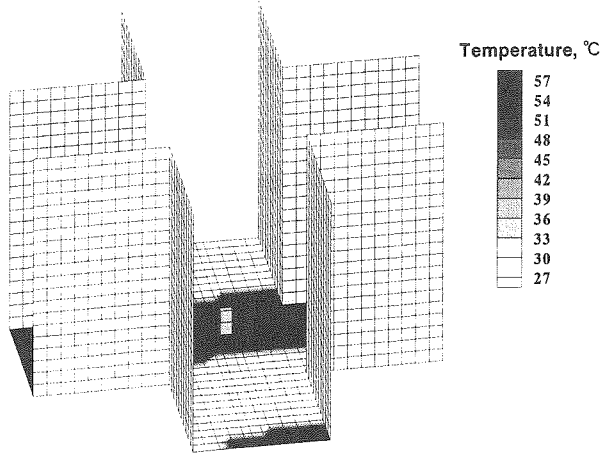


Fig.6 Temperature distribution at 14:00

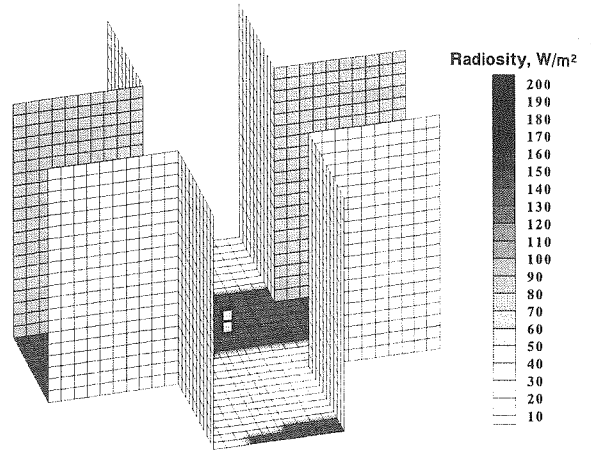


Fig.7 Short-wave radiosity distribution

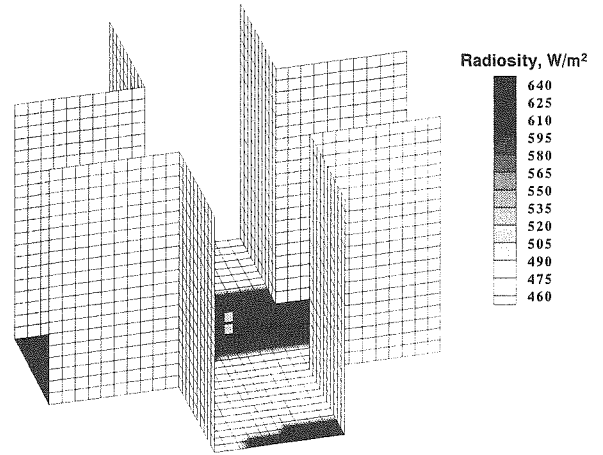


Fig.8 Long-wave radiosity distribution

(b) 日射 各分割面へ入射する直達日射量と拡散日射量から、長波長の場合と同様に、次式が成立する。ここで天空面の短波長射度(Short-wave radiosity)は、拡散日射量に等しい。

$$R_{Si} = \rho_{Si} \left(\sum_{j=1}^n F_{ij} R_{Sj} \right) + \rho_{Si} J_i \quad (12)$$

(c) 放射フラックス, 部分平均温度, 放射不均一度 以上より、長波長放射による射度, 短波長放射による射度, さらに直接人体モデルの面に当たる直達日射量から人体モデル各部位への放射フラックスが次式により求まる。

$$R_m = \alpha_{Lm} \left(\sum_{i=1}^n F_{mi} R_{Li} \right) + \alpha_{Sm} \left(\sum_{i=1}^n F_{mi} R_{Si} + J_m \right) \quad (13)$$

これより、人体モデル各部位への平均放射温度 MRT_m が次式により求まる。なお、平均放射温度は、人体と周囲面との間の放射エネルギー交換量と同じ量の放射熱交換を行う仮想的な等温黒体閉空間の温度と定義されている。

$$MRT_m = \left(\frac{R_m}{\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (14)$$

人体モデル全体としての平均放射温度 MRT は MRT_m の面積積み平均として次式により求める。

$$MRT = \frac{\sum_{m=1}^{10} MRT_m A_m}{A_{total}} \quad (15)$$

2.3 シミュレーション結果

表3にシミュレーションの条件を示した。対象都市は東京で、日時は7月27日の午後2時(中央標準時)である。日陰および表面温度分布を図5および図6に示した。地点CENTERおよびN1が日向、その他の地点が日陰になっている。最高表面温度は直達日射の当たる路面で58.8℃、最低温度は日陰の壁面で25.4℃となった。また、このときの各分割面からの短波長および長波長射度を図7および図8に示す。いずれも直達日射の当たる路面からの射度が大きい。長波長放射射度は短波長すなわち日射反射分の射度に比べて約3倍以上大きい。

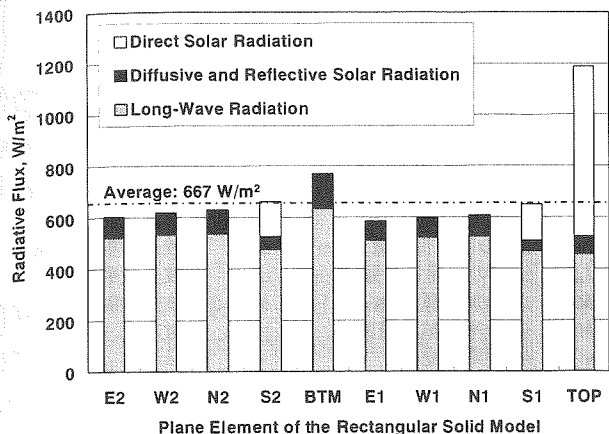


Fig.9 Radiative flux at each elements of the human body (CENTER point)

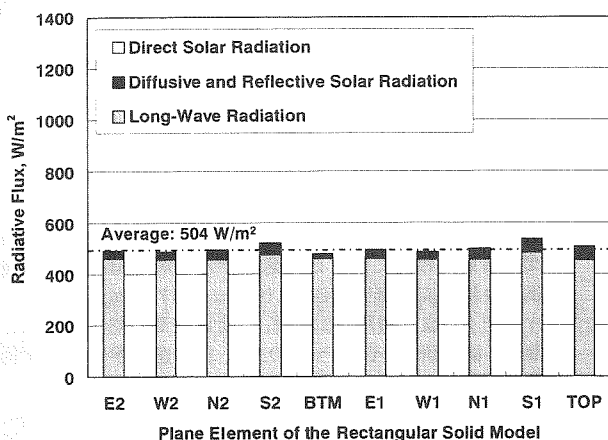


Fig.10 Radiative flux at each elements of the human body (N3 point)

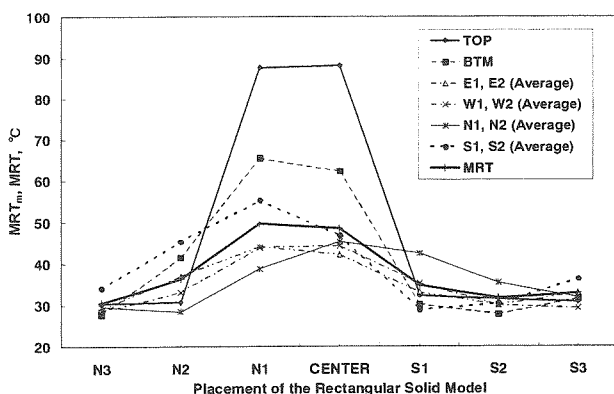


Fig.11 Variation of the MRT (mean radiant temperature) when the human body moves from the point N3 to S3

図9および図10には人体モデル各部位への周囲からの熱放射フラックスを示す。図9は人体モデルが地点CENTERにある場合の結果で、このとき人体は直達日射を受けている。これに対して図10は地点N3における結果であり、人体モデルは建物の日陰に入っている。これらを比較すると、直達日射が当たる地点CENTERでは、地点N3よりも人体モデル各部位への放射フラックスが大きい。とくに直達日射が当たる

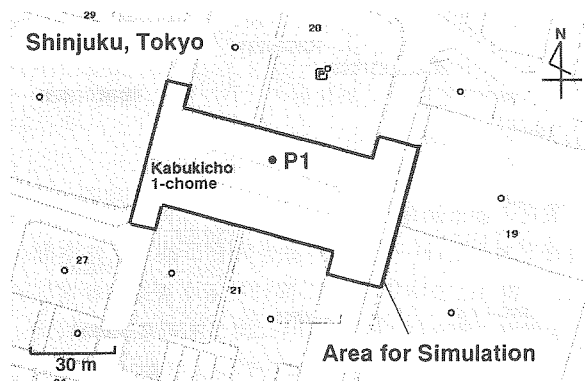


Fig.12 Horizontal map of the selected actual urban area (Kabukicho, Shinjuku, Tokyo)

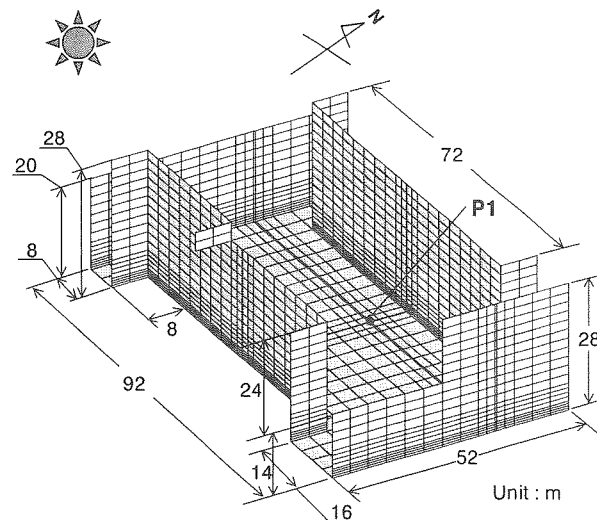


Fig.13 Urban street canyon model for actual urban area

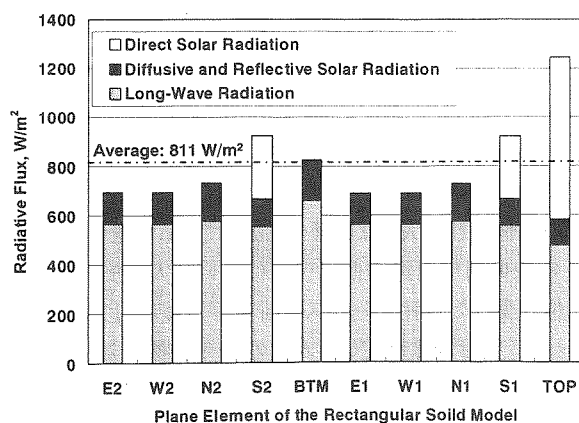


Fig.14 Radiative flux at each plane element of the model of human body at P1 point (sunny place)

S1, S2面とTOP面は、強い影響を受けていることがわかる。BTM面は直達日射は当たらないが、路面からの長波長放射および日射反射の影響が強い。各部位における放射フラックスを面積平均すると、地点CENTERで667W/m²、地点N3で504W/m²となる。次に、図11にストリートキャニオンモデル各地点における場所別の平均放射温度MRTおよび各部位での部分平均放射温度MRTmの変化を示す。これは、人体モ

デルが図2の地点N3からS3まで移動したときに受ける放射環境に対応している。これより、このストリートキャニオン中を移動する人体は、短時間に熱放射の大きな変化(強度, 不均一性)に晒されることがわかる。

2.4 実在の都市街路空間への適用

最後に本シミュレーション手法を実在の都市街路空間へ適用した場合について述べる。図12に示す東京都新宿区の一部を対象に新たにストリートキャニオンモデルを作成した。このモデルを図13に示す。人体モデルは午後2時において日向となるP1地点に配置した。前述のシミュレーションと同じ条件で人体モデルへの放射フラックスを算出した結果を図14に示す。各部位の面積平均値は811W/m²となり、前述の図9と比較して144W/m²増加している。この主な原因としては、前述の典型的なモデルに比べて、建物および路面の総面積が約20倍に増加していることが挙げられる。とくに、人体モデル各部位と形態係数の比較的大きい壁面および路面で、かつ直達日射の当たる面の面積が増加しているため、長波長放射フラックスは人体モデルの面積平均で52W/m²増加している。また、反射日射による短波長放射フラックスが57W/m²増加している。さらに太陽と人体モデル各部位との位置関係により人体への直達日射量が35W/m²増加しており、合計で144W/m²の増加となっている。

3. 結言

本論文では、日射を考慮した都市空間における放射環境のシミュレーションを行って、以下の知見を得た

- 1) 都市街路空間において、人体は直達日射と日射によって高温になった壁面および路面表面からの放射の影響を強く受けることを定量的に明らかにした。
- 2) さらに、キャニオン中を移動する人体は、強い不均一性の放射に晒されることが明らかとなり、このことが人体の熱的快適性に大きな影響を及ぼしている可能性がある。
- 3) 実在の都市街路空間モデルにおいて人体モデル各部位が受けた放射フラックスの面積平均値は811W/m²となった。30分間を想定した人間の生命危機に対する限界放射照度は、約2380W/m²と報告されており⁽¹²⁾、都市空間での夏期の放射量の増加は、今後の対策が必要と考えられる。
- 4) 本論文の今後の課題としては、人体モデルをより人体形状に近似させ計算精度を向上させること、ならびに都市空間における指向性放射環境を実測により検証することなどが挙げられる。

記号表

a	: 温度拡散係数, m ² /s	R_{Li}	: i での長波長射度, W/m ²
A_m	: 要素 m の表面積, m ²	R_{Si}	: i での短波長射度, W/m ²
A_{total}	: 人体モデル表面積, m ²	S_i	: 日射量, W/m ²

c_p	: 定圧比熱, J/(kg·K)	t	: 時間, s
C_H	: バルク係数	T_a	: 気温, K
D	: 拡散日射量, W/m ²	T_{dp}	: 露点温度, K
F_{mi}	: m と i の形態係数	T_{sky}	: 天空温度(黒体近似), K
F_{ij}	: i と j の形態係数	T_i	: 要素 i の表面温度, K
F_{sky}	: sky と i の形態係数	T_{inside}	: 建物・路面内部温度, K
G_i	: 熱伝導量, W/m ²	U	: 日平均風速, m/s
H_i	: 対流熱交換量, W/m ²	x, y, z	: 軸
l	: 直達日射量, W/m ²	α_{Lm}	: 長波長放射吸収率
J_i	: i での直達日射量, W/m ²	α_{Sm}	: 短波長放射吸収率
J_m	: m での直達日射量, W/m ²	α_{Li}	: 長波長放射吸収率
MRT	: 平均放射温度, K	α_{Si}	: 短波長放射吸収率
MRT_m	: 部分平均放射温度, K	ϵ	: 放射率
n	: 面要素の総数	λ	: 熱伝導率
Q_{ai}	: 大気放射量, W/m ²	ρ_a	: 空気の密度, kg/m ³
Q_{ei}	: 赤外放射量, W/m ²	ρ_{Li}	: 長波長放射反射率
Q_{si}	: 周囲面要素からの放射量, W/m ²	ρ_{Si}	: 短波長放射反射率
R_m	: m での放射流束, W/m ²	σ	: Stefan-Boltzmann定数, W/(m ² ·K ⁴)

添え字

a	: 空気	m	: 人体モデル面要素
i	: 壁面・路面要素	S	: 空気の密度
j	: 壁面・路面要素	sky	: 天空
L	: 長波長放射		

参考文献

- (1) 山口賢次郎, 堀越哲美, ほか2名“建築外部環境と人体との間の輻射熱授受に関する実験的研究”, 昭和51年度日本建築学会関東支部研究報告集(1976), pp.173-176.
- (2) 片山忠久, 塩月義隆, ほか5名, “街路空間の熱環境分布に関する調査研究(その1~その3)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D環境工学(1991), pp.1479-1484.
- (3) 鄭相元, 堀越哲美, ほか3名, “都市の街路および開放空間における熱放射環境が人体に及ぼす影響,” 日本建築学会計画系論文集, No.493 (1997), pp.77-84.
- (4) 浅野耕一, 梅干野晃, ほか2名“建築外部空間における熱環境解析のための3次元熱画像の作成方法に関する研究”, 日本建築学会計画系論文集, 第508号(1998), pp.35-41.
- (5) 東京都総務局統計部統計課, “東京都統計年鑑1994~1998”, 東京都
- (6) Horikoshi, T. and Kobayashi, Y., “Configuration Factors Between a Rectangular Solid as a Model of the Human Body and Rectangular Planes, for Evaluation of The Influence of Thermal Radiation on the Human Body, (I). Calculation of Configuration Factors for the Rectangular Solids,” Trans. of Architectural Institute of Japan, No. 253, March, (1977), pp.91-102.
- (7) Yang, W. J., Taniguchi, H. and Kudo, K., “Radiative Heat Transfer by the Monte Carlo Method, Advances in Heat Transfer Series 27,” Academic Press (1995).
- (8) Siegel, R. and Howell, J. R., “Thermal Radiation Heat Transfer, 2nd edition,” McGraw-Hill (1980).
- (9) Berdahl, P. and Martin, M., “Emmissivity of Clear Skies.” Solar Energy, Vol.32 (1984), pp.663-664.
- (10) 尾島俊雄, 森山正和, “地域環境アセスメントにおける地表面熱収支理論の応用研究 第2報 地表面熱収支の計算法と実測”, 日本建築学会論文報告集 第265号(1978), pp.93-103.
- (11) 宿谷昌則, “数値計算で学ぶ光と熱の建築環境学”, 丸善(1993)
- (12) 自治省消防庁消防研究所, “大震災時における地域防災活動拠点の安全性確保に関する研究報告書 消防研究所研究資料第44号 (1999), pp.35-40.
- (13) 齋藤武雄, “ヒートアイランド,” 講談社(1997).