

都市域における下向長波放射量の移動観測

Moving observation of downward long-wave radiation in and around Tokyo

成田 健一

Ken-ichi NARITA

要旨:都市化によるヒートアイランド形成要因の一つである長波放射場の変化の実態把握を目的として、東京とその周辺域を対象に下向き長波放射量の移動観測を実施した。精密赤外放射計2台を使用し、1台を自動車のルーフに固定して移動観測に使用し、もう1台は固定点においてバックグラウンドの変化を記録した。観測は、都市域と郊外との差異の把握を目的としたマクロな都市域縦横断移動観測と、建物による遮蔽の効果を主眼とした新宿駅周辺のミクロな移動観測の2種類を実施した。その結果、都心と郊外の差異や街路の建て込み状態の違いによる差異など十分に把握しうることが確認でき、局所的な分布の差異は最大で約70W/m²に達していること、その変化はおおむね天空率の違いで説明できることなどが明らかとなった。

キーワード: 都市気候 街路空間 放射冷却 長波放射 天空率 熱収支

Abstract: In order to identify the change of long-wave radiation field in and around built-up area, two kinds of moving observations about downward long-wave radiation were conducted in Tokyo Metropolitan area during winter calm clear night. Generally, downward long-wave radiation in urban area is larger than that of rural area. Its difference amounts to 70W/m². The large variation is also revealed within urban area, which is mainly due to the difference of sky view factor along the measuring street.

Key Words: urban climate, street canyon, radiative cooling, long-wave radiation, sky view factor, heat budget

はじめに

都市化によるヒートアイランドの形成要因の一つとして、都市域における長波放射場の変化が挙げられる。一つには、大気に含まれる汚染物質や高温化した都市大気そのものが下向きの長波放射を増大させる。また、都市の建物は地表面の上向きの開放度を小さくし、都市キャニオン内の正味の長波放射量の損失を妨げる。このような観点から、街路空間の長波放射量を測定したり、天空率と気温の関係を解析した研究例はいくつか存在するが、下向き長波放射量(以下 L と表示)の分布を測定した報告は非常に限られており、わずかに Oke and Fuggle (1972) が 1970 年に Montreal で測定した例と、Aida and Yaji (1979) が 1976 年に東京で測定した例があるのみである。これらは、 L の都市内外の差異を検出することを目的に、建物影響を避けるため高架の高速道路を使用して行われた。その結果、都市域での L の増大は、都市域での気温の上昇により説明可能で、大気の混濁によるのではなくヒートアイランドの副次的影響であると結論された。

一方、建物影響に関しては Nunez and Oke (1976) や小林 (1979) の報告があり、街路空間では屋上面よりも放射冷却が抑えられていることを明らかにした。また Oke (1981) や朴(1987)は、天空率の変化による L の増加が夜間のヒートアイランド形成の要因として重要であると指摘した。都市熱環境のモデル化という観点からは、放射による熱フラックスの取り扱い是对流による顕熱フラックスなどに比べ比較的容易であるとされ、各種のモデル化や検証実験 (Voogt and Oke 1991) が報告されている。また、近年は GIS を利用して街路空間の詳細な放射計算を行うモデルも報告されている(例えば、Iino and Hoyano 1995)。しかしながら、実際の街路を形成している多種多様な構成材料の放射率や拡散率(完全拡散からのゆがみ)など放射特性に関するデータは必ずしも十分ではない。

そこで本報では、東京とその周辺域を対象に移動観測による L の分布測定を試み、建物影響を含めた市街地における平均値的な L の実態把握と、天空率による変化について考察した。

1. 実測の概要

使用した測器は、英弘精機の精密赤外放射計(MS-201)で、 $3\mu\text{m}$ 以上の波長域のみを透過する特殊コーティングされたシリコンドーム内の受熱板の温度と基準点との温度差を、熱電堆によって電圧に変換するというものである。今回はこの放射計2台を使用し、1台は自動車のループに固定して移動観測に使用し、もう1台は定点においてバックグラウンドの変化を記録した。なお、自動車にはアルミ製の二重筒+遮蔽板からなるシェルタ内にサーミスタ温度計と容量型湿度計を装着し、温湿度の移動観測も同時に行った。データのサンプリング間隔はLは1秒、温湿度は10秒とした。測定位置と時刻との対応関係は、測定しながらの地図への記録と連続記録したビデオ画像を用いて行った。

観測は、都市域と郊外との差異の把握を目的としたマクロな都市域縦横断移動観測と、建物による遮蔽の効果を主眼とした新宿駅周辺のミクロな移動観測の2種類を計画した。観測日はいずれも晴天日の静穏な夜間とし、前者は1997年12月12~13日・1999年6月16~17日・9月27~28日の3回、後者は1997年12月19日・1999年10月28日・12月6日の3回実施した。なお、赤外放射計の応答速度は15秒(1-1/e追従)であるため、天空率との対応関係を考察するミクロ観測では定点を決めて1分間停車しての測定とした。一方マクロ観測では、数分間の区間平均値を求めて分布図を作成した。観測時間帯はマクロ観測が22時~4時(途中1時間の休憩を含む)、ミクロ観測は23時~2時前後である。なお高架下・トンネル等を走行した区間のデータは注意深く除いてある。

なお、MS-201はドーム温度補正ができないタイプであるため、温度補正ができる同社のMS-202を用いて較正を行った。図1は、MS-202の出力を真値として求めた、使用測器の感度常数の時間変化である。日中は日射の影響を受けて変動しているが、夜間の値は比較的安定している。以下の解析では、このようにして求めた夜間の感度常数の平均値を用いた。

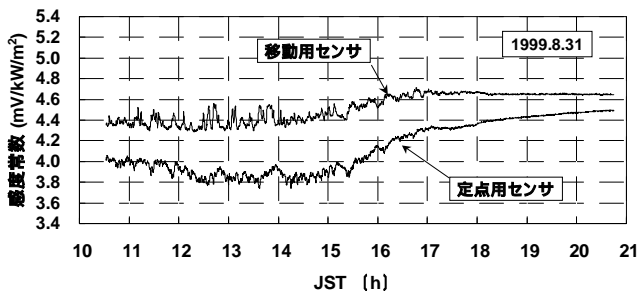


図1. 赤外放射計の感度常数の検定

2. 実測結果

(1) 都市域と郊外の比較(マクロ観測)

測定ルートを図2に示す。ベースマップは1997年4月14日のランドサット衛星画像で、最尤法を用いた土地被覆分類図である。測定コースは、日工大がある埼玉県宮代町をスタート地点とし、赤羽~王子~池袋~九段~丸の内~五反田から川崎に至る南北のルートと江戸川区から両国~九段~新宿~荻窪を経由して東伏見へ至る東西ルートを組み合わせ、さらに浦和から大宮へ至るさいたま市の中心部を通り白岡へぬけるという経路を設定した。定点は、江東区の木場公園の駐車場とした。

図6に実測結果を示す。気温については、観測エリア周辺の5地点のアメダスデータの気温変化平均値を用いて、午前1時の値に時刻補正した結果を示している。都心と郊外の気温差は、夏季よりも冬季に大きくなっており、6月では最大4、9月では6、12月では8程度となっている。Lの変化は郊外から都心に向かうに従って増加しており、全体として気温の変化パターンとよく一致している。なお、定点におけるのL変化は、6月はやや大きかったものの他の2回は非常に安定した変化を示している。都市内部でも局所的な変化は大きく、最低値を示すのは皇居周辺(皇居外苑・内堀通)である。局所的な変化幅は最大 70W/m^2 に達している。さいたま市の中心部については、冬季は欠測のため不明であるが、9月の測定では周辺部より $30\sim 40\text{W/m}^2$ 大きくなっており、気温の上昇は比較的小さいが、Lは都心部に匹敵する変化量となっている。

Aida and Yajiは、東京周辺での観測から、都心と郊外で約 18W/m^2 のLの差があったと報告し、この差は約8のヒートアイランド強度で説明が可能であると述べている。今回の12月の測定では、ヒートアイランド強度はほぼ同じであり、 70W/m^2 の変化のうち約 20W/m^2 程度がヒートアイランド効果と仮定すると、残りの約 50W/m^2 が建物による効果と推定される。しかしながら、皇居付近のLは、宮代町の水田地帯や湾岸の荒川河口部、荒川中流の秋が瀬橋付近など、郊外のオープンなエリアとほぼ同じ値を示しており、上記の推定とは矛盾する結果となっている。いづれにしても、都心部のヒートアイランド現象に、皇居が大きく影響していることは間違いないといえる。

(2) 街路の幾何学形状の影響(ミクロ観測)

次に、新宿駅周辺を対象に行ったミクロ観測について述べる。測定ルートを図3に示す。定点は新宿中央公園



図2．広域(マクロ)観測のルート図

- 水面
- 樹林
- 芝
- 畑
- 水田
- 裸地
- 住宅地
- 市街地



図4．マイクロ観測の天空写真
(上：地点79，下：地点91)



図3．新宿駅周辺(マイクロ観測)の測定ポイント

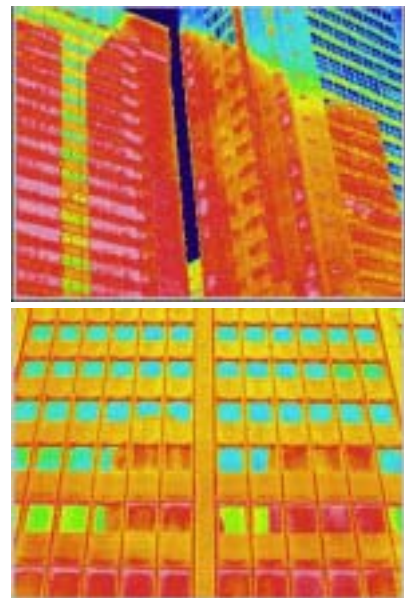


図5．熱画像での映り込み現象
(高層ビルの壁面に対向面の建物像が映り込んでいる例)

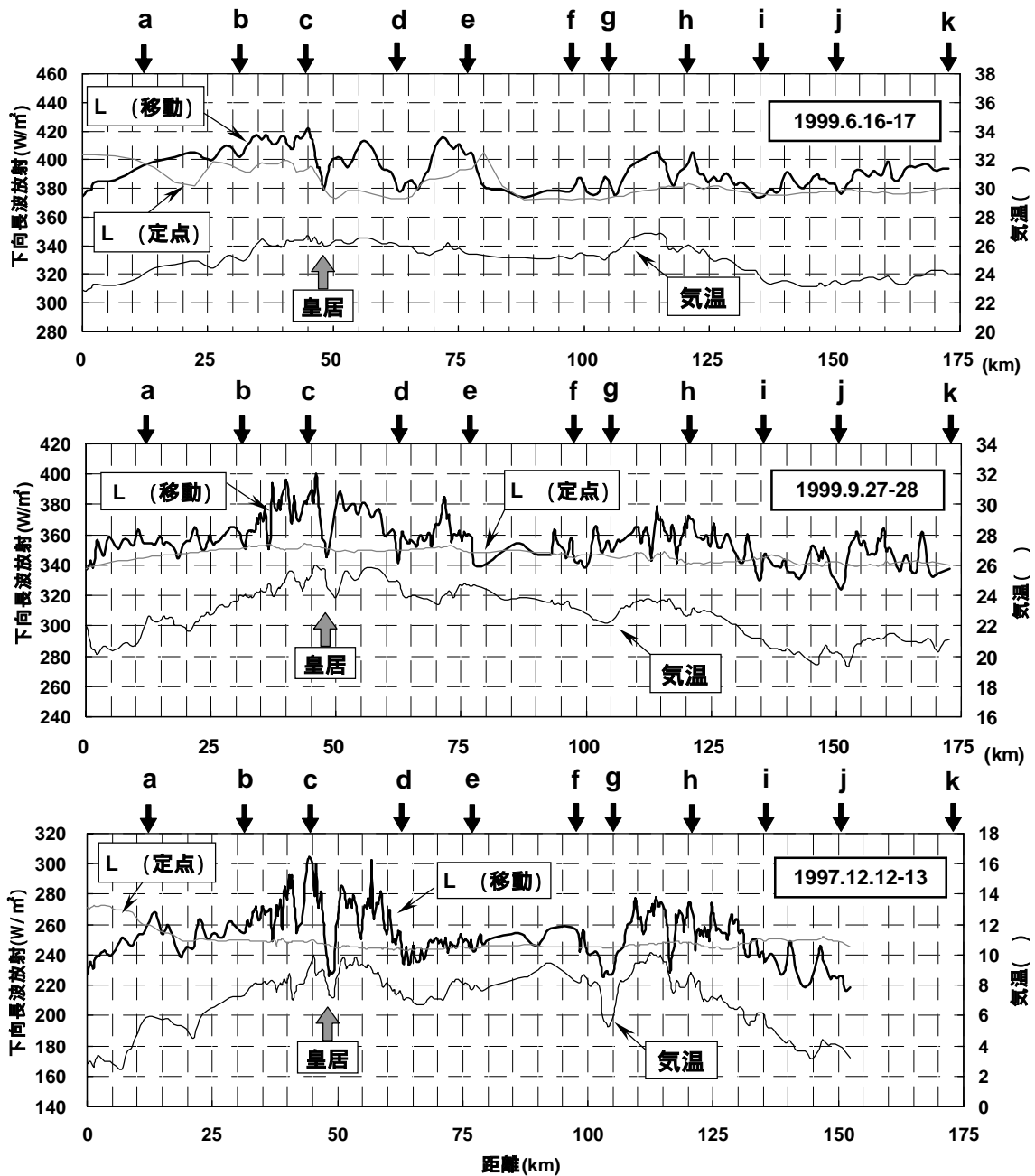


図6 . 広域測定の観測結果 (a~kの矢印は図2のルートマップの位置に対応している)

- a: 岩槻 I.C.、b: 新荒川大橋 (国道 122 号) c: 飯田橋、d: 丸子橋 (中原街道)
- e: 羽田空港、f: 葛西 (湾岸道路 - 環状 7 号) g: 一之江 (環状 7 号 - 国道 14 号)
- h: 新宿 (青梅街道) i: 東伏見 (西東京市) j: 秋が瀬橋 (志木街道) k: 白岡

内のオープンスペースとした。図3において白丸で示した奇数番号のポイントでは1分間停車しての測定とした。この50地点については、後日天空写真を撮影し、天空率を算出した。使用したレンズは等距離射影 (フィッシュアイニッコールオート8mm・F2.8)である。測定結果を図7に示す。ここでは地点番号を横軸にとって示している。1997年の結果では、西口の新都心で高層建物との位置関係で局所的に約40W/m²の変動が見られる。最低値

は、西口駐車場付近[地点79]で現れており、一方最高値は東口伊勢丹デパートの北側、高さ40m程度の建物に挟まれた幅員が約5mの路地[地点91]で現れており、その差は約70W/m²に達している。両地点の天空写真を図4に示す。水平距離でわずか約100m離れた靖国通の交差点[地点83]とも約50W/m²の差異があった。なお、70W/m²という放射量の差は、輝度温度 (半球方向のMRT) に換算すると約16の差異に相当する。

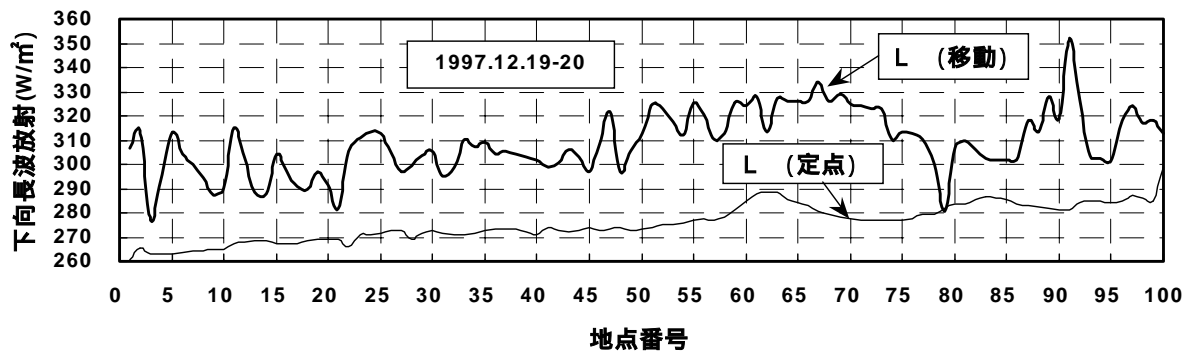
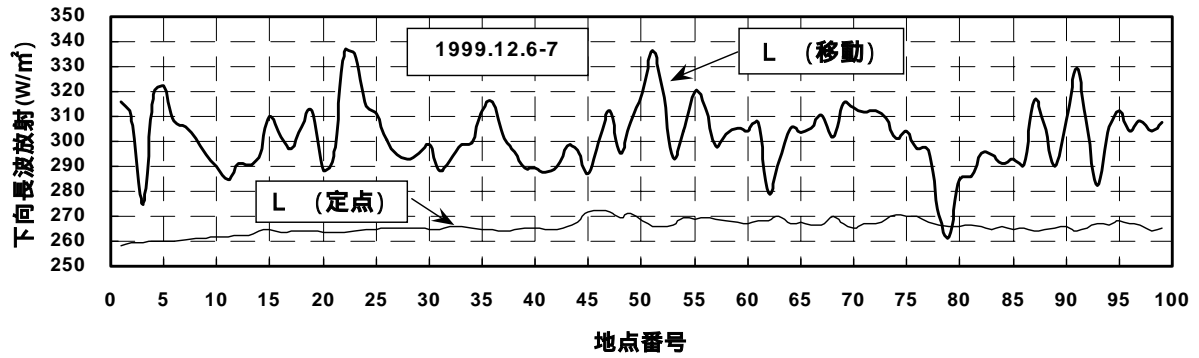
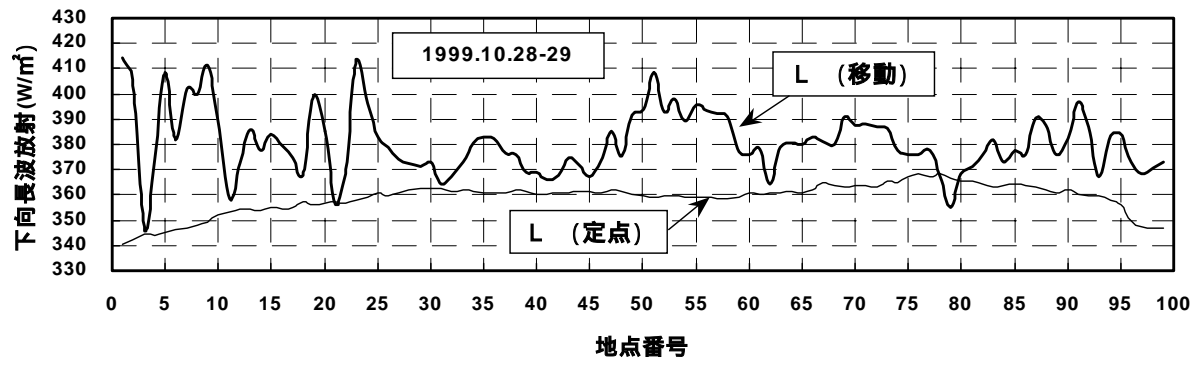


図7. ミク口観測における測定結果

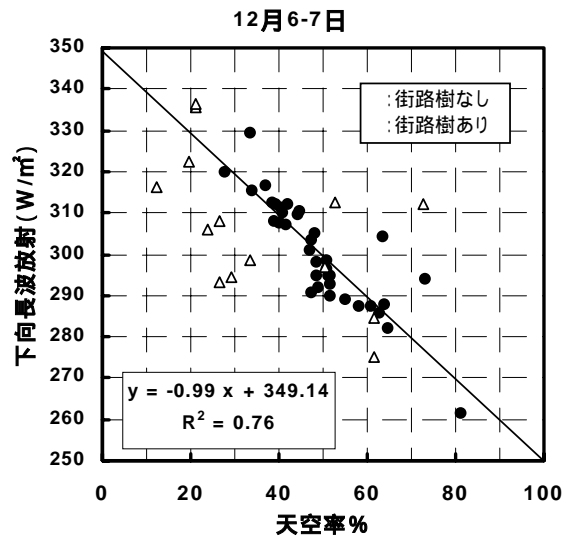
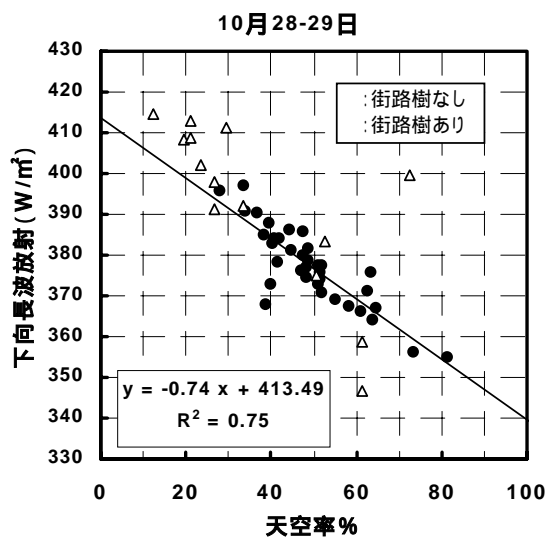


図8. 下向長波放射量と天空率の関係

他の2回は地点ごとの傾向は多少異なるが、変化の幅はほぼ同様である。停車測定地点と天空写真撮影位置の対応関係が確認できた1999年の2回について、 L と天空率の関係を示したのが図8である。天空率と L は非常に良い対応関係を示すが、多少のばらつきも見られる。

この原因の一つとして、図5に示すような「映り込み」の効果が考えられる。街路を形成する建物壁面には、ガラス面をはじめメタル系の外装材など、赤外放射に対して鏡面反射を起こすものが少なくない。このような映り込みが起こっている場合の街路内での放射環境の模式図を表したのが図9である。建物壁面の上部は対面の空が映り込んでおり、その部分からの放射は壁面温度(T_{wall})の放射と天空(T_{sky})からの放射との壁面放射率に依じた比率の和で表されると仮定する。もし、壁面の放射率が非常に小さい場合、建物上部からの放射は天空部分の値に近くなり、建物高さで決まる幾何学的な天空率よりも、見かけ上大きな天空率をもつことになる。

図10は、このような映り込みの効果による L の変化を2次元街路の中央について算定したものである。ここでは天空からの放射は等方的とみなし、図8の12月の結果から天空放射を 250 W/m^2 、壁面からの放射を 350 W/m^2 (左右両軸の切片の値)と仮定した。街路の縦横比 L/H が1の街路では壁面の放射率が1の場合と0の場合で 40 W/m^2 程度の差が生じる。この効果は街路縦横比が0.8程度で最大となる。

まとめ

精密赤外放射計を用いた下向き長波放射量分布の測定を

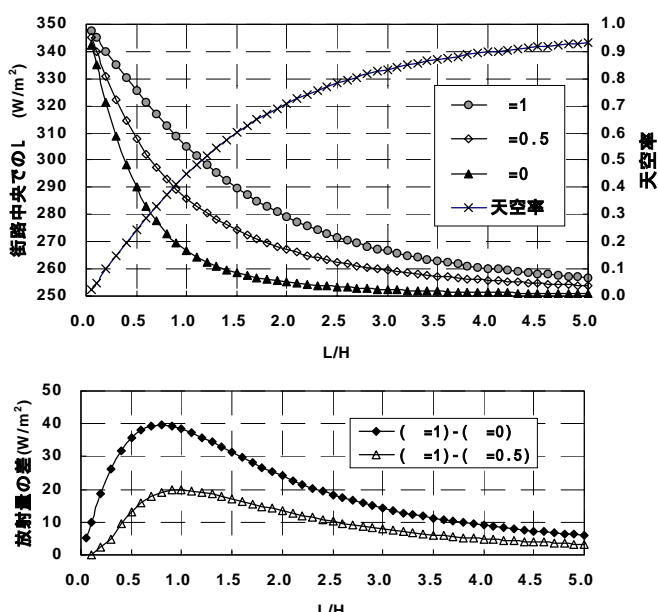


図10. 映り込みを考慮した街路の放射量の変化 (壁面の放射率と街路形状による変化)

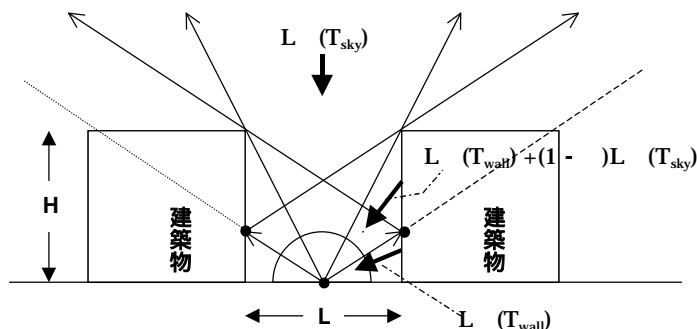


図9. 映り込みが起こる場合の街路中心における放射環境

を試みた。その結果、都心と郊外の差異や街路の建て込み状態の違いによる差異など十分に把握しうることが確認でき、局所的な分布の差異は最大で約 70 W/m^2 に達していることが明らかとなった。また、街路空間の下向き長波放射量の分布は、天空率の分布と非常に良く一致した。

街路の放射環境は、建物壁面の放射率が1でないことに起因する映り込みの効果を受け、単に幾何学的な街路縦横比のみならず、壁面の放射率によっても左右される。

謝辞

本研究においては、安藤循次・篠原雄一郎の両名をはじめ、多くの日工大卒業生の協力を得た。また、衛星画像の解析は中山康孝君によるものである。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Aida M. and Yaji M. (1979) Observations of atmospheric downward radiation in the Tokyo area, *Boundary-Layer Meteorology*, 16, 453-465.
- 2) Iino A. and Hoyano A. (1995) Development of a Method to Predict the Heat Island Potential Using Remote Sensing and GIS Data, *Energy and Buildings*, 23, 199-205.
- 3) 小林 守 (1979) 都市の地表面と屋上面における長波放射収支の比較観測, *地理学評論*, 52, 251-260
- 4) Nunez M. and Oke T.R. (1976) Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere Within an urban canyon, *Boundary-Layer Meteorology*, 10, 121-135.
- 5) Oke T.R. and Fuggle R.F. (1972) Comparison of urban/rural counter and net radiation at night, *Boundary-Layer Meteorology*, 2, 290-308.
- 6) Oke T.R. (1981) Canyon geometry and the nocturnal urban heat island : Comparison of scale model and field observations, *J. Climatology*, 1, 237-254.
- 7) 朴 恵淑 (1987) ヒートアイランドの形成要因としての都市キャニオンの天空比と夜間の長波放射収支, *天気*, 34, 579-587
- 8) Voogt J.A. and Oke T.R. (1991) Validation of an urban canyon radiation model for nocturnal long-wave fluxes, *Boundary-Layer Meteorology*, 54, 347-361.