

# 都市における熱的環境に関する研究 (その8)

——市内外の顕熱流の測定——

岡 建 雄

## Research on Thermal Environments in Urban Areas (Part 8)

—Observations of Sensible Heat Fluxes in Urban and Rural Areas—

Tatsuo Oka

### Abstract

Thermal and diffusive structures of an urban atmosphere are described in this paper, the results of measurements of sensible heat fluxes inside and outside of the urban area. Eddy diffusivities are approximately proportional to wind speeds and invariable in the vertical direction. Eddy diffusivities in the urban area are five times greater than in the rural area. The sensible heat fluxes in the urban and rural areas are both linearly related to net radiations. Sensible heat fluxes in the urban area are usually of upward flow and 60-100W/m<sup>2</sup> larger compared with those in the rural area.

### 概 要

市内外で顕熱流を測定し、比較することによって都市大気の熱構造、拡散構造を調査したものである。拡散係数は概ね風速に正比例しており、市内外共にその高度変化は小さく、市内の拡散係数は市外に比べて5倍程度大きい。市内外の顕熱流はいずれも純放射量と直線的な関係を示しており、市内の顕熱流は市外に比べて60~100W/m<sup>2</sup>程度大きい。また市内の顕熱流は上向きで都市大気は常に不安定である。

### 1. はじめに

市街地では人工熱排出が大きく、緑地面積の減少から水分蒸発量が少ない。このため地表から大気に顕熱として与えられる熱量は郊外に比べて市街地の方が大きく、都市気候の形成や都市大気熱構造に大きな影響を与えていると考えられる。

本報告は市内外の顕熱流を測定し、比較することによって、市内外で大気に放散される顕熱量を明らかにすることを目的としたものである。一般に発達している混合層中では、風速変動や温度変動の高度変化は小さく、流速は10 m以下のConstant Flux Layer (CFL)を除くと高さと共に減少し、混合層上端で零になるとされている。本報告ではこの点を重視し、市内外において低層及び高層の2点で測定を行ない、顕熱流に関する一応の結論を得ることができたので報告するものである。

—記 号—

$C_p$ : 比熱 (Wh/kg°C)

$D_z$ : 垂直方向の拡散係数 (m<sup>2</sup>/s)

$q_h$ : CFL中の顕熱流 (W/m<sup>2</sup>)

$q_z$ : 測定点を通過する顕熱流 (W/m<sup>2</sup>)

$R(\tau)$ : 自己相関関数

$R_n$ : 純放射量 (W/m<sup>2</sup>)

$T'$ : 温度変動 (°C)

$u', w'$ : 水平, 垂直方向の風速変動 (m/s)

$V_m$ : 平均風速 (m/s)

$Z$ : 高さ (m)

$Z_0$ : 粗度定数 (m)

$\alpha_f$ : 定数

$\gamma$ : 比重量 (kg/m<sup>3</sup>)

### 2. 測定地域と測定装置

#### 2.1. 測定地域

測定地域は写真—1, 2に示される東京都心部(測定高さ17 m及び46 m)と郊外(測定高さ5 m及び14 m)である。地形は市内外共に平坦である。市内は4~9階

の建築が密集しており、市外は畑地、雑木林、低層集合住宅が散在している。測定は冬季及び夏季に行ない、計8ケースの測定結果を得た。

## 2.2. 測定装置

風向計先端に付けられた2方向超音波風速計と高感度熱電対により風速及び温度を測定し、データレコーダに記録した(図一1)。この測定装置を市内の高い測定点では9階建事務所建築のペントハウス屋上(Z=46m)に設置し、低い測定点では4階建事務所建築のペントハウス屋上(Z=17m)に設置した。市外の高い測定点は4階建集合住宅の屋上(Z=14m)、低い測定点は1階建駐車庫の屋上(Z=5m)である。

データレコーダに記録したデータを0.1秒のローパスフィルタを通してAD変換し、解析には0.12秒間隔のデータを使用した。1回の測定で連続43分間の測定を行い、1ケースにつき25時間前後のデータを収録した。全測定では計179時間の記録を得た。

この他、熱流板による地中伝熱量、放射収支計による純放射量、日射量、気温等を連続記録した。

## 3. 測定結果

### 3.1. 地中伝熱量

地中伝熱量は地表の状態により大きく異なり、草原は小さく、裸地は大きい。ここでは屋上スラブ上で地中伝熱量の測定を行なった。日中の地中伝熱量は市内で純放射量の35%程度、市外で25%程度である。夜間の地中伝熱量は市内外共に純放射量の50%から100%程度である。

### 3.2. 地表粗度

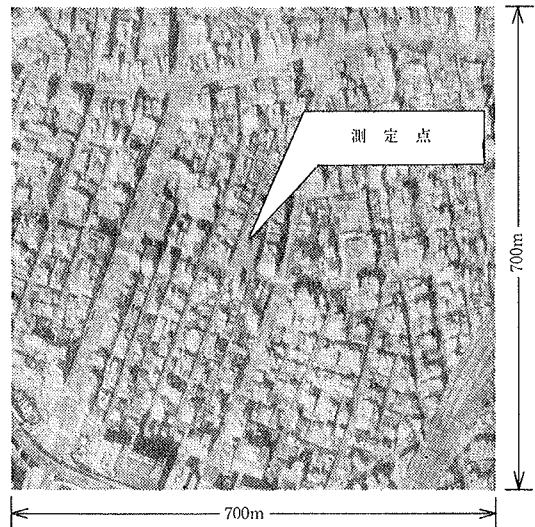
風速や拡散に大きな影響を与える地表粗度  $Z_0$  は市内外で大きく異っている。観測された風速変動から Lumley の式を用いて  $Z_0$  を算出すると、市内の  $Z_0$  は3.4m、市外は0.41mであった。東京タワーで測定された従来の報告によると  $Z_0$  は1.6~3mである。本報告の値がこれより大きいのは測定地域周辺に中、高層建築が密集しているためと考えられる。

### 3.3. 拡散係数

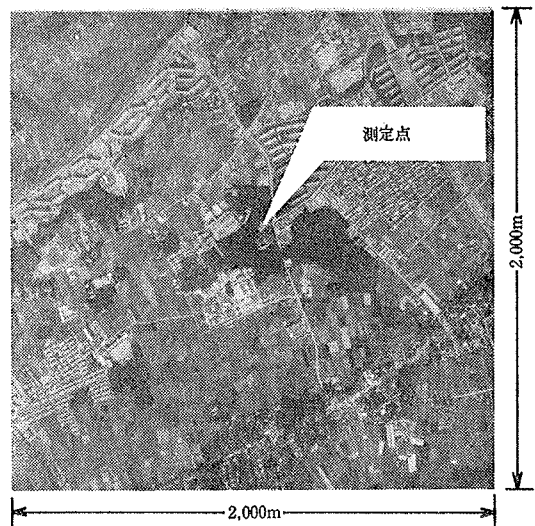
垂直方向の拡散係数  $D_z$  は風速変動  $w'$  を用いて次式で表現できる。

$$D_z = \overline{w'^2} \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(1)$$

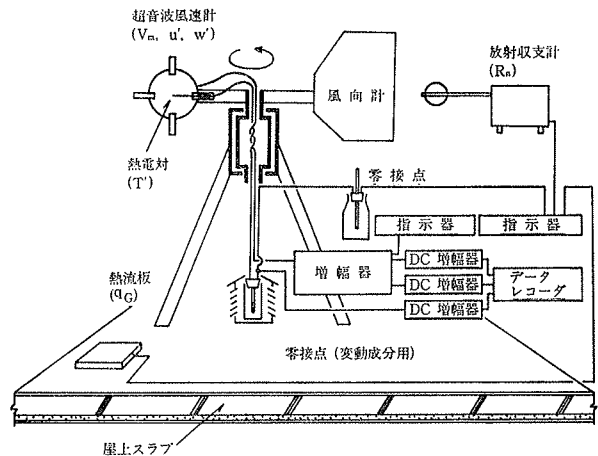
本報告では  $R(\tau)$  算出の評価時間を201秒として、43分間の平均値を  $D_z$  とした。図一2は市内外の  $D_z$  と平均風速  $V_m$  の関係を示したものである。 $D_z$  は大略  $V_m$  に正比例していると言えるが、日中顕熱流が大きい場合に  $D_z/V_m$  が大きくなる傾向がある。これは大気が、Windless Convection の状態となり、 $D_z$  が風速ではな



写真一1 市内の測定地域 (東京, 神田)



写真一2 市外の測定地域 (東京, 清瀬)



図一1 測定装置概要

く熱対流に支配されるためと考えられる。また市内 1.7 m の高さで測定された  $D_z$  と  $V_m$  の相関はそれ程高くない。これは  $V_m$  が全体的に小さい上に、周囲の高層建築の影響を受けるためと考えられる。

市内外で低い測定点と高い測定点における  $D_z/V_m$  の値を比較すると同程度の値となっており、混合層中では  $D_z$  の高度変化は小さいとする提案に合致している。一方、 $D_z/V_m$  に関して夏季、冬季の差異は小さく、Windless Convection の状態を除けば  $D_z$  と  $V_m$  の関係は大略次式で表現でき、市内の  $D_z$  は市外に比べて 5 倍程度大きいという結果が得られた。

$$D_z(\text{urban}) = 0.7V_m \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$D_z(\text{rural}) = 0.15V_m \quad \dots\dots\dots(3)$$

3.4. 顕熱流  $q_z$  の測定

測定点を通過する  $q_z$  は次式で表現される。

$$q_z = 3600C_p\gamma\sqrt{w'^2}\sqrt{T'^2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

一般に  $q_z$  は CFL 中では一定で、CFL 上端から高さと共に減少し、混合層上端で零になるとされている。混合層高さは数十 m から数 km の範囲を変動するので、ある高さで測定された  $q_z$  は必ずしも CFL 中の  $q_z$  に等しいとは言えない。

図-3 は市内外における  $q_z$  の測定結果である。低い測定点 (市内 17 m, 市外 5 m) の結果は CFL 中の  $q_z$  に近いと考えられ、純放射量  $R_n$  と大略直線的な関係を示している。高い測定点 (市内 46 m, 市外 14 m) の  $q_z/R_n$  の値は測定点に比べて小さく、ばらつきも大きい。これは測定点が CFL より高く、混合層高さが変動しているためと考えられる。図-3 によると市内の熱流が下向きになることはなく、都市大気は常に不安定である。

図-4 は市内外の低い測定点における顕熱流の日変化を示したものである。市内では日中の  $q_z$  は  $R_n$  の 50% 程度、市外は 25~30% 程度の値を示している。一般に  $q_z/R_n$  の値は午前中小さく、午後大きい。これは Yap 等の報告でも指摘されており、地中伝熱量、すなわち建物や道路等の熱容量の影響と考えられ、快晴日に顕著な現象である。

4. 市内外の顕熱流  $q_h$

高さ 10 m から 100 m の大気は Free Convection Layer と呼ばれ、熱流が上向きの場合 Free Convection の状態になるとされている。 $q_h$  を CFL 中の顕熱流とすれば、Tennekes は Free Convection に適する式として (5) 式を提案し、実測結果から  $\alpha_f$  を 0.4 と与えている。

$$q_h = 3600\alpha_f C_p \gamma \sqrt{w'^2} \sqrt{T'^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

混合層中の  $\sqrt{w'^2}$ ,  $\sqrt{T'^2}$  の高度変化は小さいと考えられるので、(5) 式から CFL 中の顕熱流  $q_h$  を算出できる。市内外における低い測定点での結果は CFL 中の  $q_z$  に近いと考えて、(5) 式による  $q_h$  と低い測定点の  $q_z$  を比較した。本測定結果から  $\alpha_f$  を求めると概ね 0.3 が適当であり、 $\alpha_f$  を 0.3 とした場合の比較を図-5 に示す。これは Tennekes の 0.4 に比べて幾分小さい結果となっている。

$\alpha_f$  を 0.3 として市内外における高い測定点での結果から  $q_h$  を算出し、 $R_n$  と比較したのが図-6 である。明らかに市内外で  $q_h$  に差異が認められ、市内は市外に比べて 60~100 W/m<sup>2</sup> 程度顕熱流が大きい。また  $q_h$  と  $R_n$  の関係は市内外共に直線的である。市外の  $q_h$  は  $R_n$  と大略正比例の関係となっており、 $R_n$  の 20~25% 程度の

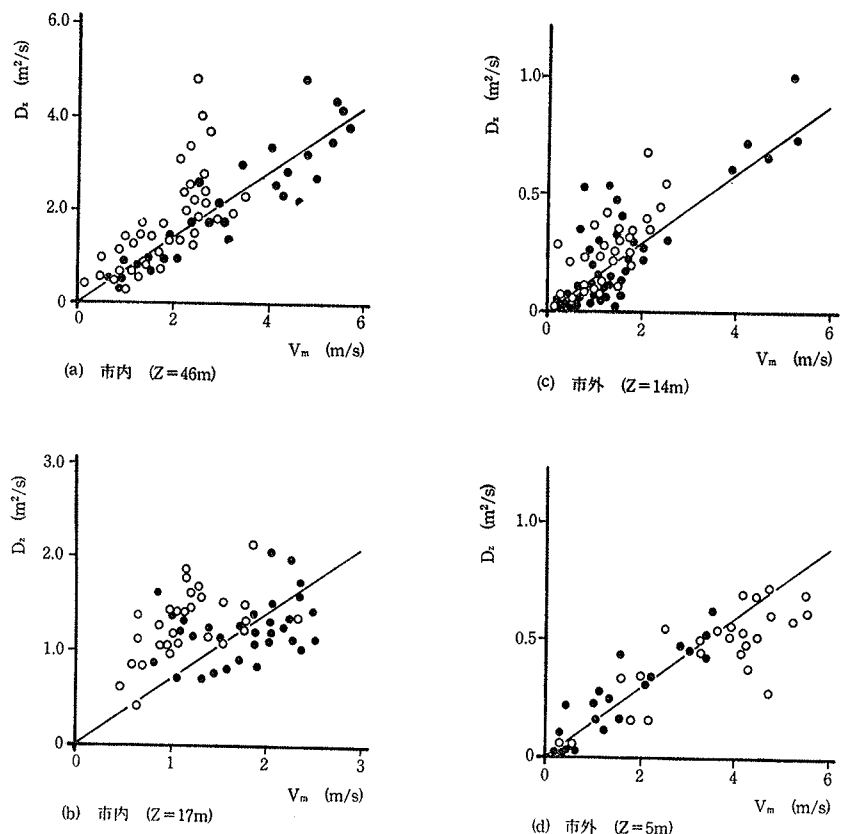


図-2 市内外における拡散係数と風速の関係 (○夏季, ●冬季)

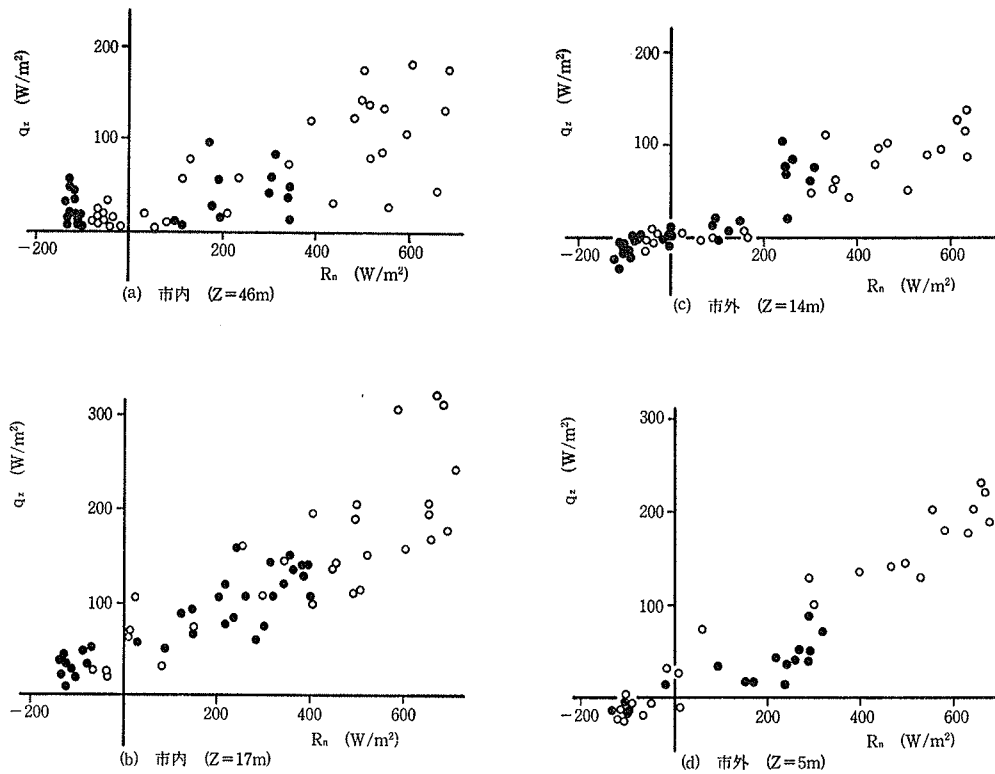


図-3 市内外における顕熱流  $q_z$  と純放射量  $R_n$  の関係  
(○夏季, ●冬季)

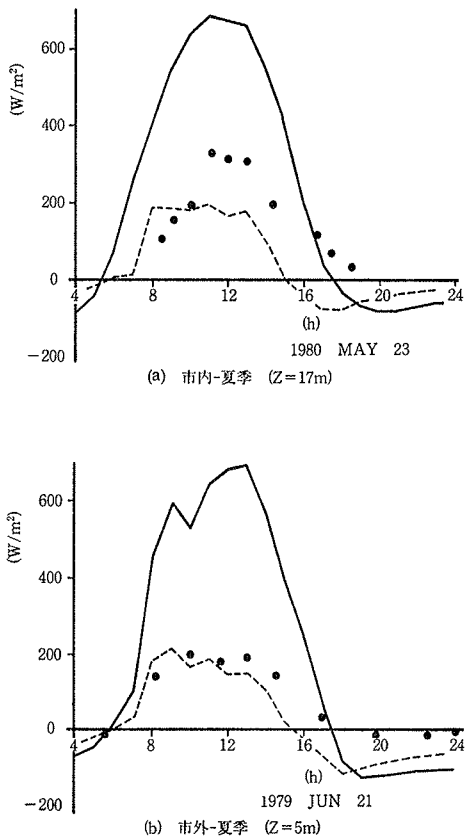


図-4 市内外における顕熱流  $q_z$  の日変化  
(●顕熱流, —純放射量, ……地中伝熱量)

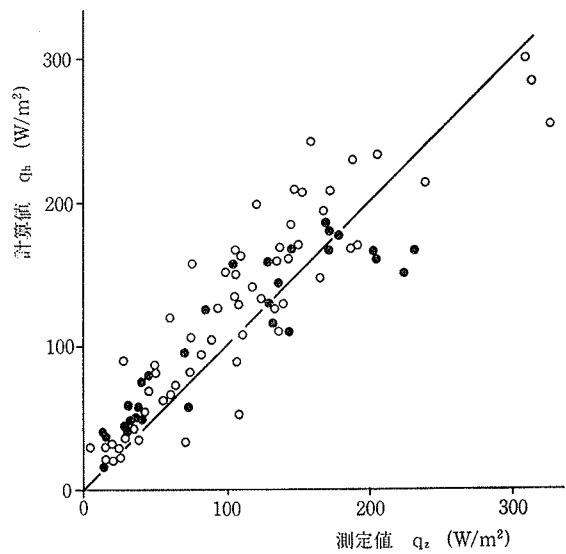


図-5 市内外で測定された顕熱流  $q_z$  と計算された顕熱流  $q_h$  の比較  
( $\alpha_f=0.3$ , ○市内 ( $Z=17m$ ), ●市外 ( $Z=5m$ ))

値となっている。

図-7は低い測定点での結果から  $q_h$  を算出し、 $R_n$  と比較したものである。図-6, 図-7に示される  $R_n$  と  $q_h$  の関係は概ね一致しているが、市外の低い測定点での結果は高い測定点に比べて幾分大きい。これは市外の

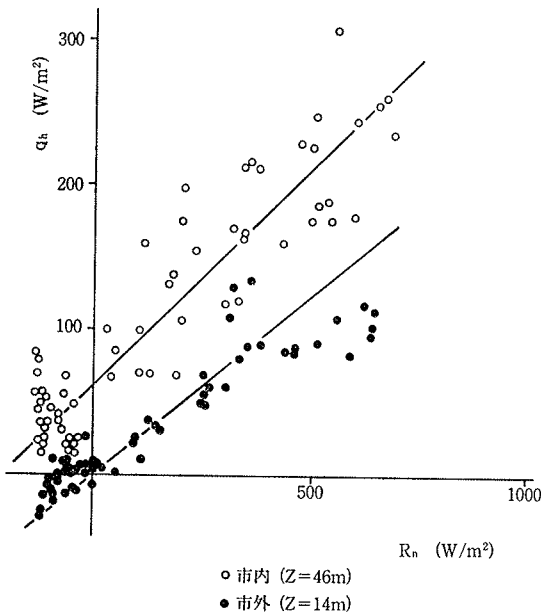


図-6 市内外における顕熱流  $q_h$  と純放射量  $R_n$  の比較  
(市内  $Z=46m$ , 市外  $Z=14m$ )

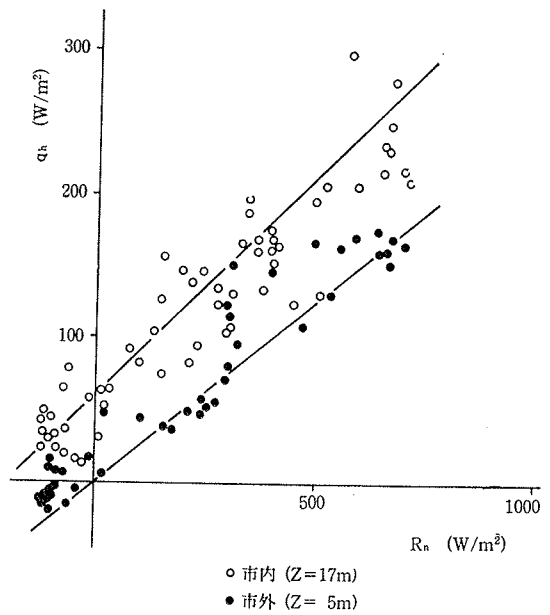


図-7 市内外における顕熱流  $q_h$  と純放射量  $R_n$  の比較  
(市内  $Z=17m$ , 市外  $Z=5m$ )

高い測定点は雑木林に囲まれているのに対し、低い測定点は広大な畑地や駐車場に面しており、その影響が現れたためと考えられる。また  $R_n$  に対する  $q_h$  は高い測定点に比べて低い測定点の方がばらつきが大きい。

図-6, 7 から本測定地点における  $q_h$  と  $R_n$  の関係は大略次式で表現できると言えよう。

$$q_h(\text{urban}) = 0.3R_n + 60 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$q_h(\text{rural}) = 0.25R_n \quad \dots\dots\dots(7)$$

(6)式, (7)式で表現される  $q_h$  と  $R_n$  の関係は図-3に示される市内外の低い測定点での  $q_z$  と  $R_n$  の関係と概ね一致している。

### 5. 結論

本報告は市内外で顕熱流を測定することによって都市の熱的影響を調査したものである。要約すると、

- (1) 拡散係数  $D_z$  は概ね風速に比例して増大しており、

その高度変化は小さい。市内の  $D_z$  は市外に比べて5倍程度大きい。

(2) 市内外の顕熱流  $q_h$  は純放射量  $R_n$  と概ね直線的な関係を示している。市内の  $q_h$  は市外に比べて、60~100  $W/m^2$  程度大きく、市内の熱流は常に上向きである。市外の  $q_h$  は  $R_n$  と大略正比例しており、 $R_n$  の20~25%程度の値を示す。

### 参考文献

- 1) 横山長之, 他: 混合層中における乱流変動量について, 日本気象学会秋季大会講演予稿集, (1976)
- 2) Lumley, 他: The Structure of Atmospheric Turbulence, Interscience Publishers, (1964)
- 3) Tennekes: Free Convection in the Turbulent Ekman Layer of the Atmosphere, J. Atm. Sci., Vol. 27, (Oct. 1970)