東京都心及び郊外における拡散係数

都市における大気拡散係数に関する測定 (その2)

EDDY DIFFUSIVITIES IN URBAN AND RURAL AREA IN TOKYO

Observations of eddy diffusivities in urban area Part 2

横尾昇剛*, 小宮英孝**, 岡建雄***

Noriyoshi YOKOO, Hidetaka KOMIYA and Tatsuo OKA

Daily variations of sensible heat fluxes and vertical eddy diffusivities were obtained in summer and autumn in Tokyo. Observing sites were at 17m and 46m in height above the surface in center of Tokyo and at 6m and 14m in height above the surface in residential area.

Vertical eddy diffusivities, D_z were measured with two different methods, which are the measurement with autocorrelation function and the measurement derived with relationship between heat flux and temperature difference between z_1 and z_2 in height. The values of D_z at higher places and lower places are equal. Daily variations of D_z in urban area are $1.0 \sim 2.0 \text{ (m}^2/\text{s)}$ and in rural area are $0.1 \sim 1.0 \text{ (m}^2/\text{s)}$.

keywords : eddy diffusivity, sensible heat flux, urban, heat island, eddy correlation method, land uses
拡散係数、顕熱流、都市、ヒートアイランド、渦相関法、土地利用

1. はじめに

市内外の顕熱流と潜熱流の相違により市街地では都市特有の気候を形成していると考えられる。ヒートアイランドの温度分布に関する報告や熱流の測定に関する報告は多い^{1)~6)}。筆者らは東京の市内外、宇都宮の市内外において渦相関法を用いて顕熱流を直接測定し、顕熱流、潜熱流は純放射量との関係で表現でき、市街地の顕熱流は郊外に比べて $40 \sim 100 \text{ (W/m}^2\text{)}$ 程大きく、夜間も上向き流であるという結論を得た^{7)~10)}。

市内外の顕熱流、潜熱流の差がヒートアイランドをもたらす主要因と考えているが、熱流とヒートアイランド強度の相関を求めるには鉛直方向の大気拡散係数の実態把握が必要である。拡散係数に関する研究は、接地境界層内において比較的多くなされている^{11)~21)}。都市域の測定として、Taylor¹²⁾ は、パリのエッフェル塔と気象局の気温の資料から、熱伝導方程式の解を用いて鉛直方向の拡散係数を月別に求めている。郊外の測定として、藤谷¹³⁾ は Taylor と同様な手法を用いて筑波研究学園都市に設置されている気象観測塔(高さ 213 m)で観測された気温を用いて季節別、高さ別に拡散係数を算出している。拡散係数は $1 \sim 10 \text{ m}^2/\text{s}$ 程度であるとしている。筆者らは前報(その1)において、小都市(宇都宮市)における市内外の大気鉛直方向の拡散係数を測定により求めた。宇都宮市

の市街地及び住宅地において高層、低層で計4地点で測定を行い、大気鉛直方向の拡散係数は $0.1 \sim 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ という結果を得た²⁷⁾。

本研究では前報と同様に、熱流と拡散係数の関係に着目し、渦相関法と傾度法を用いて拡散係数を求める方法を用いた。また同時に、風速の自己相関関数からも拡散係数も求めた。

本報告は東京都心部(千代田区神田)における高層部(地上46 m)と低層部(地上17 m)および東京郊外(清瀬市)における高層部(地上14 m)、低層部(地上6 m)の各地点で顕熱流と拡散係数の測定を行い、拡散係数の分布を明らかにすることを目的としている。測定は、1997年の7月~10月にかけて断続的に、各地域における顕熱流、拡散係数の日変動を把握した。

2. 測定の概要

測定場所は、東京都心部及び郊外である。都心部の測定地域の航空写真を写真1、郊外の測定地域の航空写真を写真2に示す。都心部における測定は東京都神田にある事務所ビル屋上(測定高さ47 m、17 m)で行った。周囲には6~15階建ての商業建築、事務所ビル、集合住宅が密集している(写真1)。郊外における測定は、東京都清瀬市にある研究所の研究棟屋上(測定高さ14 m、6 m)で行った。周囲は主として低層木造住宅地域であり、畑、雑木林な

* 宇都宮大学工学部建設学科 助手・修士(工学)

** 大林組技術研究所 主任研究員・工博

*** 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., M. Eng.

Chief Research Eng., Technical Research Institute Obayashi Corporation, Dr. Eng. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

どが点在している（写真2）。地形は、各測定場所とも平坦である。測定は、都心部が7月1日～9月11日、郊外が9月17日～10月20日の間に断続的に行った。本報告では、各測定期間中に連続して24時間のデータが確保できた日のデータを用いた。都心部では2日間、郊外では3日間のデータの平均値を用いた。その他の日は天候が不順であったり、機器の不調により断片的にしかデータを確保することができなかった。測定日及びその日の気象状況を表1、表2に示す。都心部の測定は夏季、郊外の測定は秋季に行われた。各測定日の天候は概ね晴れで、日中風は主に南方向から吹いていた。測定方法は、回転軸を持つ固定台に2方向超音波風速計、K型熱電対（ $\phi 0.1$ mm）をとりつけ、水平方向、垂直方向の風速、温度変動を記録した。温度変動は、基準温度を百葉箱中の厚さ5 mmの鉄筒の中の温度とし、その温度との差を温度変動として記録した。

筆者らは、顕熱流の測定において測定間隔を0.1秒と12秒で比較し、その誤差は3%前後であるという結果が得られており⁷⁾、本測定では測定間隔を1秒として行った。上下方向の温度差は、AMeDASデータの気温測定で採用されている通風筒付白金測温抵抗式温度計

--- 記号 ---

- C_p : 空気の定圧比熱 (Wh/kg $^{\circ}$ C)
 D_z : 垂直方向の拡散係数 (m²/s)
 D_{za} : 自己相関関数から求められる拡散係数 (m²/s)
 D_{zh} : 熱流から求められる拡散係数 (m²/s)
 Q_g : 屋上スラブへの伝熱量 (W/m²)
 q_z : 測定点を通過する顕熱流 (W/m²)
 q_h : Constant Flux Layer 中の顕熱流 (W/m²)
 H : 1秒間あたりに測定点を通過する顕熱流 ($H = q_z / 3600$)
 $R(\tau)$: 自己相関関数
 R_n : 純放射量 (W/m²)
 T' : 温度変動 ($^{\circ}$ C)
 W' : 垂直方向の風速変動 (m/s)
 ΔT : 垂直方向の温度差 ($^{\circ}$ C)
 ΔZ : 高度差 (m)
 α_f : 定数 (= 0.4)
 γ : 密度 (kg/m³)

図1 測定機器の概要

写真1 測定地域の航空写真（都心部）

写真2 測定地域の航空写真（郊外）

写真3 測定機器

表 1 . 測定概要

	都心		郊外	
	測定高さ	対象データ	測定高さ	対象データ
高層	4.6 m	9/1, 2	1.4 m	10/9, 10, 11
低層	1.7 m	9/1, 2	6 m	10/16, 18, 19

表 2 . 測定日の気象状況

対象日		気象条件					
		天候	平均気温	最高気温	最低気温	平均風速	風向
9/1(月)	夏季	晴	28.2	31.1	26.1	3.3	S
9/2(火)		晴	28.7	32.2	26.1	4.1	S
10/ 9(木)	秋季	晴時々曇	16.C	20.3	11.9	1.9	S S E
10/10(金)		晴時々曇	18.7	24.3	14.6	1.5	S
10/11(土)		晴	18.2	24.6	11.5	2.5	S W
10/16(木)	秋季	晴	16.6	20.8	11.4	2.C	S S E
10/18(土)		晴	16.2	24.5	8.8	0.8	S W
10/19(日)		曇時々晴	17.C	22.2	11.4	1.8	S E

(Yokogawa Weather 製) を用いて測定した。温度計感部の絶対温度測定時の精度は JIS A 級 ($0.15+0.002 t$) °C 以内。但し、今回の測定では、温度差測定のため基準とする温度計を定め、各温度計ごとに器差補正を行い、所定の精度を確保した。この温度計を測定台に上下に 1.0 m 離してとりつけ測定を行った。測定間隔は 1 分である。その他、放射収支計により純放射量、熱流板により屋上スラブへの伝導熱量を記録した。測定点のスラブ面からの高さは、事前の測定で測定台の高さと位置を変化させ測定したところ、屋上面から 4.0 m 以上離し、かつ屋上面の風上方向の端に設置した場合、建物の影響を受けずに安定したデータが得られたことから図 1 のような高さとした。測定機器は、一台の測定台に超音波風速計を取り付け、もう一台に通風筒付温度計を取り付け測定した (図 1、写真 3)。測定台は、屋上面の最南端に設置した。この装置を市街地では 9 階建て事務所ビルのペントハウス屋上 (測定高さ 4.6 m)、低い測定点では 4 階建て事務所ビルのペントハウス屋上 (測定高さ 1.7 m) に設置した。郊外の住宅地では、高い測定点は 3 階建て研究棟屋上 (測定高さ 1.4 m)、低い測定点は、1 階建て実験建物の屋上 (測定高さ 6 m) に設置しデータを記録した。測定は一回につき 24 時間の連続測定を行った。

3 . 熱流と拡散係数の算定

3-1 顕熱流の算定

一般に q_z は C F L (Constant Flux Layer) 中では一定であるが、C F L 上端から高さと共に減少し、混合層上端では 0 になるとされている。従ってある高さで測定された $C_p \gamma \overline{W' T'}$ は地表から大気に放散される顕熱流でなくその高さを通過する顕熱流である。測定点を通過する顕熱流は (1) 式により算出できる。

$$q_z = 3600 C_p \gamma \overline{W' T'} \quad \dots \dots (1)$$

C F L 中において、地表から大気に放散される顕熱流は、Tennekes および横山、蒲生らにより (2) 式により算出することができる。

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

3-2 拡散係数の算定

拡散係数を算定するに当たり次の二つの方法によって拡散係数を求めた。

① 風速の自己相関関数から求められる拡散係数

垂直方向の拡散係数 D_{za} は、 W' を用いて次式で表現される。

$$D_{za} = \overline{W'^2} \int_0^{T_1} R(\tau) d\tau \quad \dots \dots (3)$$

$R(\tau)$: w' の自己相関関数

(但し、 T_1 は $R(\tau)$ が初めて負になるまでの時間)

② 熱流と温度差から求められる拡散係数

顕熱流 H は、2 高度での気温差 ΔT と拡散係数 D_z により次式から求められる。

$$H = D_z C_p \gamma \frac{\Delta T}{\Delta Z} \quad \dots \dots (4)$$

また測定点を通過する顕熱流は (1) 式より

$$H = C_p \gamma \overline{W' T'} \quad \dots \dots (5)$$

(但し $H = q_z / 3600$)

(5) 式より顕熱流を求め、この顕熱流と同時に測定された温度差 ΔT 、高度差 ΔZ を用いて (4) 式により拡散係数を算出した。

q_z は評価時間と共に増大するが、評価時間が 5 分以上になると概ね一定値に近づく⁸⁾¹¹⁾²⁷⁾ことから熱流 q_z 、自己相関関数 $R(\tau)$ 算出のための評価時間については 300 秒として算出した。各々の方法で 300 秒ごとに拡散係数 D_z を算出し、1 時間ごとに平均した顕熱流 q_z 、拡散係数 D_z を代表値とした。

図 2 . 顕熱流と純放射量との関係 (都心)

図 3 . 顕熱流と純放射量との関係 (郊外)

図4. 上下の温度差の日変動 (都心)

図5. 上下の温度差の日変動 (郊外)

図6. 拡散係数の比較 (都心)

図7. 拡散係数の比較 (郊外)

式(1)(2)から求められる熱流は、混合層内の水平一様性を前提とした熱流である。竹内ら²³⁾、近藤²⁴⁾によると、内部境界層の上面までの高さはフェッチ(風が走る距離)の1/100の桁であり、風上に向かって45°の範囲である。本実測において測定ポイントを高さ40mとすると、このフェッチの距離は4.0kmとなり、ここで捉えている熱流は4.0kmの範囲におけるおおよそ風上方向に対して45°の範囲の平均的な熱流であると考えられる。測定点は近隣の影響を強く受け、遠方になるほどその影響の度合いは小さくなるので、測定場所の選定にあたっては、全方位にわたり同様な土地利用となる場所を選定する必要があり、これらの点を考慮し、測定場所を選定した。

4. 測定結果

4-1 顕熱流の測定結果

図2、図3に東京都心部と東京郊外における顕熱流と純放射量の関係を示す。顕熱流 q_z の純放射量 R_n に対する割合は、午前中に小さく、午後大きい値となっている。日中の顕熱流 q_z の値は純放射量 R_n に対し都心部高層では28%程度、都心部低層では32%程度となっている。郊外高層では16%、郊外低層では27%程度の値となっている。

4-2 温度差

図4、図5に都心、郊外で測定された高度差1.0mの上下の温度差の日変動を示す。日中の顕熱流が大きい場合、温度差は増大し、高層部は最大で0.06°C、低層部は0.14°C程度に達する。顕熱流が小さくなる夜間は温度差は0.01°C前後と非常に小さくなる。

4-3 顕熱流と拡散係数

東京都心部および東京郊外で測定された熱流量(純放射量、屋上スラブへの伝導熱流、顕熱流)の日変動を図8～図11に示す。顕熱流 q_z 、 q_h は午前7時頃から増大しはじめ、ピークは正午～午後2時頃出現している。 q_z のピークの値は、都心部高層が120(W/m²)、低層が167(W/m²)、郊外高層が67(W/m²)、低層が70(W/m²)である。東京都心においては、今回の測定では q_z は下向きになることはなく、測定時の都市大気は常に不安定または中立の状態である。東京郊外においては、高層部と低層部とで測定時期がずれているため、高層部の測定では大気が不安定もしくは中立であるが、低層部の測定では夜間に q_z が下向きになり、大気は夜間安定状態であった。

風速の自己相関関数から拡散係数 D_{za} を求めて顕熱流と温度差から拡散係数 D_{zh} を求め、その比較を図6、図7に示す。また拡散係数の日変動を図12～図15に示す。拡散係数も顕熱流同様に午前7時頃から増大しはじめ、正午前後にピークに達する。東京都心低層部では、拡散係数の値にばらつきが大きく、夜間においても大きな値を示しているが、これは周辺部の建物や風の影響を受けていると考えられる。東京都心の高層部及び低層部の最大値は2.4(m²/s)である。東京郊外の拡散係数の最大値は高層部が1.1(m²/s)、低層部が0.8(m²/s)であり、夜間は0.1～0.4(m²/s)程度の値で推移し、変化は小さい。

図16、図17に地表から大気に放散される顕熱流 q_h と拡散係数 D_z の関係を示す。都心部及び郊外において拡散係数 D_z は、顕熱流 q_h が100(W/m²)程度までは q_h と共に増加する。顕熱

図 8 . 都心部高層の熱流日変動

図 1 2 . 都心部高層の拡散係数日変動

図 9 . 都心部低層の熱流日変動

図 1 3 . 都心部低層の拡散係数日変動

図 1 0 . 郊外高層の熱流日変動

図 1 4 . 郊外高層の拡散係数日変動

図 1 1 . 郊外低層の熱流日変動

図 1 5 . 郊外低層の拡散係数日変動

図 16 . 顕熱流 q_h と拡散係数 D_z の関係 (都心部)

図 17 . 顕熱流 q_h と拡散係数 D_z の関係 (郊外)

図 18 . 東京都心部及び郊外における拡散係数

図 19 . 宇都宮市都心部及び住宅地における拡散係数

流 q_h が $100 \text{ (W/m}^2\text{)}$ 以上では、都心部の拡散係数 D_z は q_h が増加しても変わらず、概ね一定の値となる。

図 18 に東京都心及び郊外における拡散係数を図 19 に宇都宮市都心部及び住宅地における拡散係数を示す。拡散係数 D_z は $D_z h$ と $D_z a$ を平均した値である。宇都宮市における拡散係数の値は 1996 年の初夏に測定した前報 (その 1) のデータである。

混合層理論に従えば、日中では拡散係数は、高さ方向に変化しないことになり、本報告においてもそうした結果を念頭にした測定を行った。測定結果から見ると、拡散係数の値は都心部及び郊外では高さ方向にほぼ同様の値となった。

5. まとめ

東京都心部の高層及び低層、郊外の高層及び低層において、顕熱流の日変動、拡散係数の上下方向の分布及び日変動の実態を把握した。本研究の結論を以下に示す。

- 1) 安定した気象条件下では、風速の自己相関関数から求めた拡散係数と顕熱流と温度差から求めた拡散係数は概ね一致している。
- 2) 都心部の高層 (地上 4.6 m)、低層 (地上 1.7 m) それぞれの地点で測定された拡散係数は、ほぼ同様の値となった。

- 3) 郊外の高層 (地上 1.4 m)、低層 (地上 6 m) それぞれの地点で測定された拡散係数は、ほぼ同様の値となった。

- 4) 本気象条件下では、拡散係数の値は概ね東京都心部で $1.0 \sim 2.0 \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、東京郊外で $0.1 \sim 1.0 \text{ (m}^2/\text{s)}$ あった。

謝辞

本研究を行うに当たり測定場所をご提供下さった方々、測定に参加してくれた宇都宮大学の原 正憲君、戸田訓弘君、近藤雅史君、二宮正昭君に深謝いたします。

参考文献

- 1) Black, T.A. : Psychrometric Apparatus for Bowen-Ratio Determination over Forest, Boundary-Layer Meteorol, 2, pp.246-254, 1971
- 2) Davies, J.A., Allen, C.D. : Equilibrium, Potential and Actual Evaporation from Cropped Surfaces in Southern Ontario, J. Applied Meteorol., Vol.12, pp.649-657, 1973, 6
- 3) 山本 普他 2 名 : 飛行機による乱流フラックスの観測 (その 3) 日本気象学会春季大会講演予稿集, 1974

- 4) Yap,D., Oke, T.R.:Sensible Heat Fluxes over an Urban Area-
Vancouver, B.C., J.Applied Meteor., Vol.13, pp.880-890, 1974.12
- 5) Oke, T.R., Cleugh, H.A. : Urban heat storage derived as
energy balance residuals, Boundary Layer Meteor.,39,
pp.233-245,1987
- 6) Tennekes, H.:Free Convection in the Turbulent Ekman Layer
of the Atmosphere, J.Atmos.Sci., Vol.27, 1970
- 7) 小宮英孝、岡 建雄他 1 名：都市の内外における熱流の測定、
日本建築学会計画系論文報告集、第 453 号、pp37-44,1993.11
- 8) 岡 建雄：市街化空間の熱的環境に関する研究 その 6
市内外における顕熱流の測定、日本建築学会論文報告集、第 301 号、
pp.131-137、1981.3
- 9) 岡 建雄、不破徹生：市街化空間の熱的環境に関する研究
その 7 地方都市における顕熱流の測定、
日本建築学会計画系論文報告集、第 427 号、pp.21-28、1991.9
- 10) 小宮英孝、岡 建雄他 3 名：都心と東京湾における地表面上の熱
流の測定、日本建築学会計画系論文報告集 第 463 号、pp.65-73 1994.9
- 11) 気象研大気境界層グループ：顕熱乱流輸送量の高度変化について
(I) 日本気象学会秋季大会講演予稿集、p.32、1977
- 12) G.I.TAYLOR,M.A.:Phenomena Connected with Turbulence
in the Lower Atmosphere,Proc.Roy.Soc., pp137-155, 1917
- 13) 藤谷徳之助：大気境界層における温度拡散係数の季節変化につい
て、天気、pp.31-37、1983.12
- 14) O' Brien JJ.: A note on the vertical structure of the eddy
exchange coefficient in the planetary boundary layer,
J.Atmos.Sci., 27, pp.1213-1215, 1970
- 15) Pielke.R.A. : A three -dimentional numerical model of the
sea breeze over south Florida, Mon.Wer.Rev, 102, pp.115-139,
1974
- 16) Clarke.R.H. : Observational Studies in the atmospheric
boundary layer, Quart.J.R.Met.Soc., 96, pp.91-114, 1970
- 17) Lettau.H. : A Re-examination of the "Leipzig WindProfile"
considering some relations between wind and turbulence in
the friction layer, Tellus, 2, pp.125-129, 1950
- 18) Yokoyama, O., Gamo, M., Yamamoto,S.: On the Turbulence
Quantities in the Atmospheric Mixing Layer, J.Met.Soci.Jpn.,
Vol.55, 1977.4
- 19) 横山長之：大気境界層の拡散に関する構造、気象研究ノート、
pp.318-328,1975
- 20) Gamo, M. , Yokoyama, O. :Structure of the Atmospheric
Boundary Layer Derived from Airbone Measurements of the
Energy Dissipation Rate ϵ , J.Met. Soci. Jpn, pp.241-258,1976
- 21) Lumley, J.L., Panofsky, H.A. :The Structure of Atmospheric
Turbulence, Interscience Publishers,1964
- 22) 横山長之他 2 名：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、p.12,1976
- 23) 竹内清秀、近藤純正：大気科学講座 I、地表に近い大気、
東京大学出版会、1981
- 24) 近藤純正：水環境の気象学、朝倉書店、1994
- 25) J.C.カイマル：微細気象学、技報堂出版、1993
- 26) 平岡正勝、田中幹也：移動現象論、朝倉書店、1975
- 27) 横尾昇剛：都市における大気の拡散係数に関する測定（その 1）
小都市における市内外の拡散係数、日本建築学会計画系論文集、
第 501 号、pp.85-91、1997.11

(1998年1月9日原稿受理、1998年6月22日採用決定)