

# 都市における大気への熱流に関する研究（その1）

——内陸都市における熱流の測定解析——

小 宮 英 孝

## Research on Heat Fluxes to the Atmosphere in Urban Areas

——Observation of Heat Fluxes in Urban and Rural Areas of Inland City——

Hidetaka Komiya

### Abstract

Daily variations of sensible and latent heat fluxes were observed on the same days in summer and winter in various land uses such as urban area, residential area, and greenbelt area at the city of Utsunomiya by the eddy correlation method. Sensible heat fluxes in an urban area are approximately 40–100 W/m<sup>2</sup> larger than in a rural area and latent heat fluxes in an urban area are approximately 20–80 W/m<sup>2</sup> smaller than in a rural area. The average Bowen ratios in urban, residential, and greenbelt areas are 2.2, 1.3, and 0.7, respectively, in summer with those values becoming larger in winter.

### 概 要

市街地では人工廃熱量が多く、建造物のために緑地面積が減少していることから水分蒸発量が少ない。このため地表から大気への顕熱流は市街地では郊外に比べて大きく、都市特有の気候を形成していると考えられる。従って都市気候解明のために、都市内外の熱流を把握する必要がある。本研究は以上の観点から、渦相関法を用いて、都市の内外における顕熱流・潜熱流の違いを明らかにすることを目的として行ったものである。測定項目は、気流ならびに温湿度変動、純放射量、屋上スラブへの伝熱量で、1992年7月から1993年2月にわたり人口43万の都市において市街地、住宅地、緑地の3地域で行った。この結果、市街地における顕熱流は、住宅地、緑地に比べて40–100 W/m<sup>2</sup>多く、逆に潜熱流は20–80 W/m<sup>2</sup>少ないこと、顕熱流と潜熱流の比でみると、市街地、住宅地、緑地の順で大きく、夏季の場合には市街地で約2.2、住宅地で約1.3、緑地で約0.7となった。

## 1. はじめに

都市では緑地が少ないために自然界と異なる顕熱・潜熱の熱収支が存在し、郊外に比べて大気中に放散される顕熱が多い。また各種都市活動に伴うエネルギー消費は最終的に廃熱の形で大気に放散される。このため都市をおおう大気は暖められ、いわゆるヒートアイランド現象を形成する。この現象は、地球温暖化問題とはスケールは異なるが、緑や水のネットワーク化やエネルギーの有効利用により解決すべき重要な環境問題である。

都市のヒートアイランド現象の結果である温度分布に関する分析例は多いが、地表面熱流とヒートアイランドとの相互関係を明らかにしているものは少ない。すなわち人工廃熱や地表面熱収支に起因する市内外の熱流の相違および大気の拡散構造とヒートアイランドの関係を的確に把握し、さらに広い視野から総合的に都市の熱構造

を解明することが求められている。

これに対して、地表面熱流の解析手法はかなり大胆な仮定をした一次元熱伝導・伝達計算で、都市部においてはレスポンスファクター法や差分法を、緑地ではペンマン法、バルク法を用いたものが一般的である。それ故、むしろ平均的熱流を実測より求め、解析手法を検証すると共に熱拡散モデルの境界条件とし、都市熱環境の予測や緑地等の最適配置計画を行う方が適切であると考えられる。

熱流の測定方法は、ボーエン比法を主としたプロファイル法および渦相関法に大別され、ボーエン比法は森林での測定に使用されることが多い。渦相関法による顕熱流の測定例である、YapらのVancouver市の測定によると、市街地における顕熱流はおおむね純放射量の40～50%程度であり、夜間も上向き熱流であるとしてい

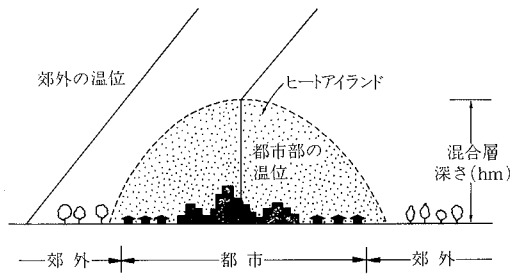


図-1 ヒートアイランドの断面図

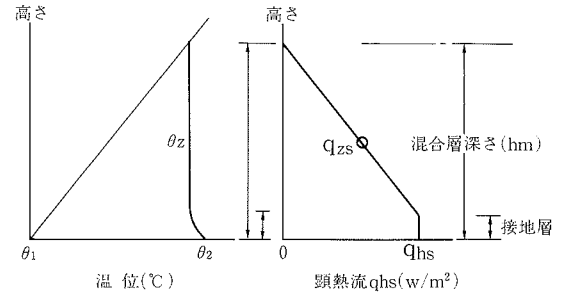


図-2 混合層モデル

る<sup>1)</sup>。さらに Oke らは渦相関法で顕熱流を求めた後ボーエン比法で潜熱流を得ている<sup>2)</sup>。Carlson らは一次元の境界層モデルを用いた理論計算と衛星による表面温度測定を組合せて、Los Angeles 市の顕熱流・潜熱流分布を求めている。岡ら<sup>3)</sup>は Tennekes および横山らの式を採用し、都市の内外において渦相関法により顕熱流を直接測定した。

本報告は、顕熱流のみならず潜熱流にも渦相関法を適用し市内外の土地利用形態別の顕熱流ならびに潜熱流を明らかにすることを目的として、人口43万人の宇都宮市において市街地、住宅地、緑地の3地域で、気流ならびに温湿度変動等の同時測定を行ったものである。

—記号—

- $C_p$  : 空気の定圧比熱 (Wh/kg°C)
- $C_v$  : 水蒸気の定圧比熱 (Wh/kg°C)
- $g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>)
- $H'$  : 絶対湿度変動 (kg/kg)
- HS : Free Convection 状態で  $q_{hs}$ , それ以外で  $q_{zs}$  を採用した顕熱流 (W/m<sup>2</sup>)
- HL : Free Convection 状態で  $q_{hl}$ , それ以外で  $q_{z1}$  を採用した潜熱流 (W/m<sup>2</sup>)
- $h_m$  : 混合層深さ (m)
- $Q_G$  : 屋上スラブへの伝導熱流 (W/m<sup>2</sup>)
- $q_{hs}$  : Constant Flux Layer 中の顕熱流 (W/m<sup>2</sup>)
- $q_{zs}$  : 測定点を通過する顕熱流 (W/m<sup>2</sup>)
- $q_{hl}$  : Constant Flux Layer 中の潜熱流 (W/m<sup>2</sup>)
- $q_{z1}$  : 測定点を通過する潜熱流 (W/m<sup>2</sup>)
- $R_n$  : 純放射量 (W/m<sup>2</sup>)
- $r$  : 0°Cにおける水蒸気の蒸発潜熱 (Wh/kg)
- $T'$  : 温度変動 (°C)
- $T_0$  : 絶対温度 (K)
- $t$  : 水蒸気の温度 (°C)
- $w'$  : 垂直方向の風速変動 (m/s)
- $Z$  : 高さ (m)
- $\alpha_f$  : 定数 (=0.4)
- $\gamma$  : 密度 (kg/m<sup>3</sup>)
- $\Delta T$  : ヒートアイランド強度 (°C)

## 2. 混合層理論

ヒートアイランドの断面を図-1に示す。ヒートアイ

ランドの影響が及ぶ高さを混合層深さとか高さと呼び、小都市では50 m前後、大都市では500 m以上にも達する。ヒートアイランドは夜間等、郊外の大気が安定した場合に最も顕著に現れる。これは都市の大気が都市表面からの熱供給により常に中立または不安定状態となっているために、郊外の安定大気との相違がヒートアイランド現象となって現れるためである。以上のような点から、都市上空の大気に対しては、混合層モデル(図-2)を用いることが適していると言える。

混合層モデルにおいては、一般に  $q_{zs}$  は CFL (Constant Flux Layer) 中は一定であるが、CFL上端から高さとともに減少し、混合層上端で0になるとされている<sup>6)</sup>(図-2)。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はなく、その高さを通る顕熱流である。測定点を通過する顕熱流  $q_{zs}$  は、(1)式により算出できる。

$$q_{zs} = 3,600 C_p \gamma \overline{w'T'} \quad \dots\dots\dots(1)$$

一方 CFL 中において、地表から大気に放散される顕熱流  $q_{hs}$  は、Tennekes<sup>4)</sup> および横山、蒲生ら<sup>5)</sup> より(2)式により算出することができる。

$$q_{hs} = 3,600 \alpha_f C_p \gamma \sqrt{w'^2} \sqrt{T'^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

但し、(2)式は、Free Convection 状態にある混合層中における垂直方向の風速変動と気温変動の RMS 値を表す(3)式と(4)式の積から求められたものである。

$$\sqrt{w'^2} = C_w \left\{ \frac{q_{hs}/3,600}{C_p \gamma} \right\}^{1/3} \left\{ \frac{gh_m}{T_0} \right\}^{1/3} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\sqrt{T'^2} = C_T \left\{ \frac{q_{hs}/3,600}{C_p \gamma} \right\}^{2/3} \left\{ \frac{gh_m}{T_0} \right\}^{-1/3} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここにおいて、

$$\alpha_f = 1/C_w C_T \quad C_w = 0.6, \quad C_T = 4.2$$

同様にある測定点を通過する潜熱流  $q_{z1}$  は、(5)式により算出できる。

$$q_{z1} = 3,600(r + C_v t) \gamma \overline{w'H'} \quad \dots\dots\dots(5)$$

さらに CFL 中において、地表から大気に放散される潜熱流  $q_{hl}$  は、(6)式により算出できる。

$$q_{hl} = 3,600 \alpha_f (r + C_v t) \gamma \sqrt{w'^2} \sqrt{H'^2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

本報告では、顕熱流 HS として Free Convection 状態で  $q_{hs}$  を、それ以外で  $q_{zs}$  を用いた。また同様の方法で  $q_{hl}$ ,  $q_{z1}$  から求めた潜熱流を HL とした。



写真-1 測定地域の航空写真

### 3. 測定概要

#### 3.1 測定地域および測定期間

測定地域は栃木県宇都宮市（人口43万人）の市街地、住宅地（郊外）および緑地（田園）である。写真-1に、各地域の測定点を含む全域の航空写真を示す。地形は市内外とも平坦である。市街地は4～9階の商業建築、事務所ビル、集合住宅が密集している。住宅地は主として低層木造住宅地域であり、公園、学校等が点在している。緑地は畑地に雑木林が点在している。

測定は、1992年7月から1993年2月まで断続的に行われたが、上記測定点3カ所の同時測定が行えた夏季8/22, 23, 27日、冬季2/26, 27, 28日のデータを各季の代表とした。なお、夏季、冬季共におおむね晴天日のデータが得られた。

#### 3.2 測定装置および測定方法

回転軸を持つ三脚に2方向超音波風速計、高感度極細K型（クロメル・アルメル）熱電対（ $\phi 0.1\text{ mm}$ ）および高分子抵抗型湿度計を取り付け、垂直方向風速および温・湿度を測定した。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。湿度測定に用いたセンサーの湿度検出範囲は20～95% RH、湿度検出精度は $\pm 3\%$  RH、30～80% RH変化に対する80%応答は、吸湿時28秒、放出時32秒であり（以上25°Cにおけるカタログデータによる）、相対湿度から絶対湿度を算出し湿度変動を求めた。以上の測定装置を図-3に示す。

この装置を市街地では集合住宅屋上（測定高さ20

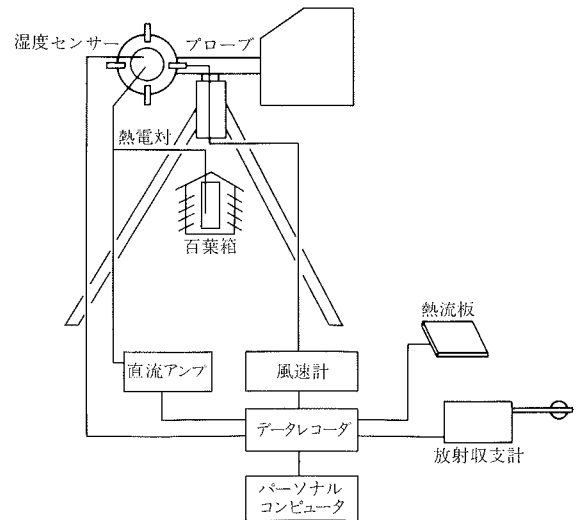


図-3 測定装置

m)、住宅地では大学工学部建築棟屋上（測定高さ25 m）、緑地では小学校校舎屋上（測定高さ17.5 m）に設置し、垂直方向風速および温・湿度を12秒間隔で測定し、データレコーダに記録した。熱流分析の評価時間は10分間とし30分間の平均値を用いた。計測時間間隔の決定に際しては、事前に0.1秒間隔の計測を行い、12秒間隔のサンプリングでも渦相関法で求められる熱流の平均値の誤差は3パーセント前後であることを確認した。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流を記録した。但し緑地の測定点である小学校校舎には、放射収支計を設置していないので、大学での測定値を用いた。

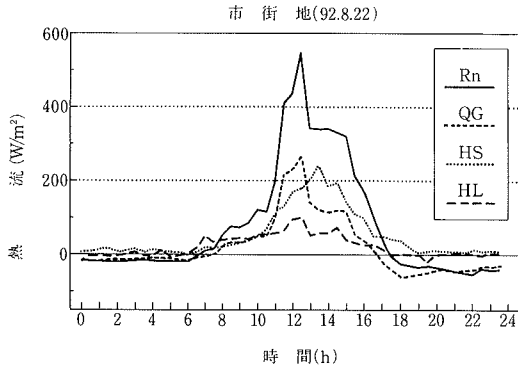


図-4(a) 夏季市街地における熱流日変動

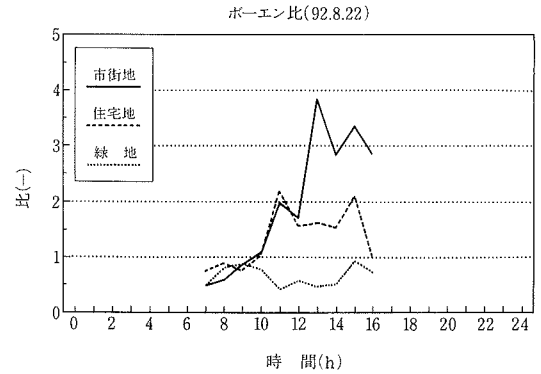


図-5 夏季のボーエン比の日変動

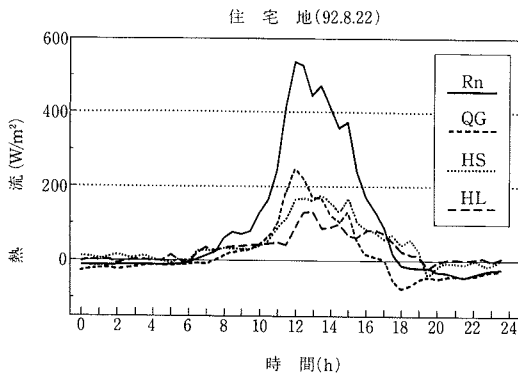


図-4(b) 夏季住宅地における熱流日変動

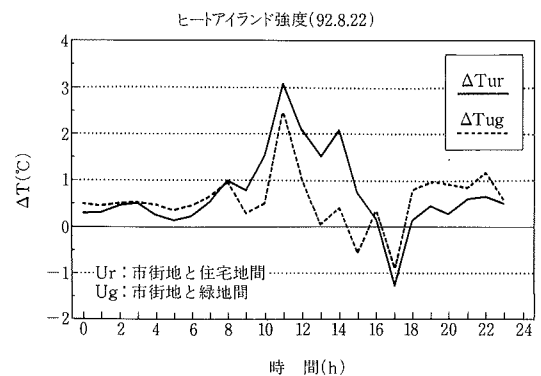


図-6 夏季ヒートアイランド強度の日変動

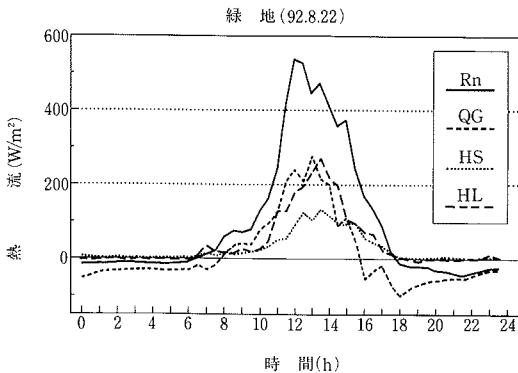


図-4(c) 夏季緑地における熱流日変動

#### 4. 各季熱流の測定結果

夏季における市街地、住宅地ならびに緑地の熱流（純放射、屋上スラブへの伝導熱流、顕熱流、潜熱流）量の日変動を図-4(a), (b), (c)に示す。市街地においては、屋上スラブへの伝導熱流が午前中多く午後減少する。このような傾向は文献<sup>9)</sup>にも指摘されている。一方これに対応して顕熱流は午前中少なく午後増加する傾向が見られる。顕熱流のピークは240 (W/m<sup>2</sup>) で午後1時頃出現し、夜間においても20 (W/m<sup>2</sup>) 前後で熱流は上向きである。これに対して、日中の潜熱流は顕熱流の約半分70~90 (W/m<sup>2</sup>) 程度で、あまり明確な変動は見られず、夜間はほぼゼロとなる。

住宅地・緑地では市街地と比較して、顕熱流の割合が

少なくなり潜熱流の割合が増す。住宅地の日中の顕熱流は80~160 (W/m<sup>2</sup>)、潜熱流は50~120 (W/m<sup>2</sup>) である。緑地の日中の顕熱流は40~120 (W/m<sup>2</sup>)、潜熱流は80~220 (W/m<sup>2</sup>) であり、潜熱流が顕熱流の約2倍となる。これに伴い顕熱流の日変動が小さくなり潜熱流の日変動が見られる。特に緑地においては、午後2時頃ピークが出現する。これは、同時刻頃に葉温が最高になり、植物からの蒸発潜熱もピークとなる Ripley ら<sup>9)</sup>の測定結果とも一致している。

市街地、住宅地ならびに緑地のボーエン比(顕熱流/潜熱流)の日変動を図-5に示す。本報告のボーエン比とは、温度と湿度の垂直勾配の比から求めたものではなく、渦相関法で求めた顕熱流と潜熱流の熱量比として直接算出したものである。但し夜間は熱流の絶対値が小さくかつ正負が反転する場合もあり、安定した値が得られなかったため日中だけの値を示している。ボーエン比は、市街地、住宅地、緑地の順に大きい。市街地のボーエン比は、1~3.8、住宅地は1~2、緑地は0.5~0.9である。Oke<sup>9)</sup>が文献を整理したデータによると夏季日中の値は、市街地は0.5~4 かそれ以上、郊外(住宅地)は0.25~2.5、田園(緑地)は0.1~1.5であり、本測定結果はこれらの範囲内にある。また、市街地のボーエン比は、朝方小さいが、正午頃から午後にかけて大きくなる。一方住宅地、緑地では比較的安定した値であった。これらの傾向は、ボーエン比の値は若干異なるものの、他の季節でも見られた。

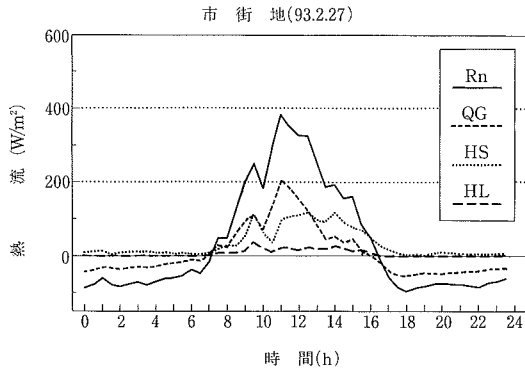


図-7(a) 冬季市街地における熱流日変動

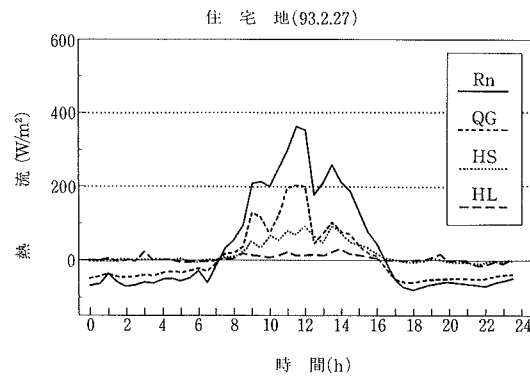


図-7(b) 冬季住宅地における熱流日変動

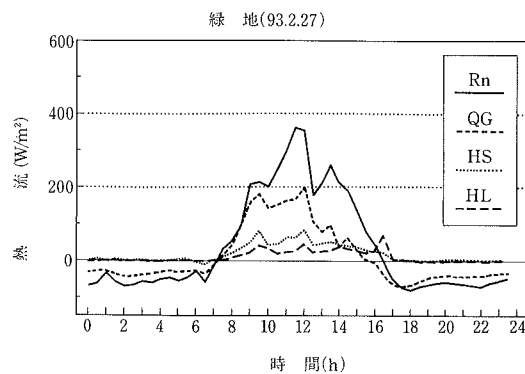


図-7(c) 冬季緑地における熱流日変動

ヒートアイランド強度 (市内外の温度差) の日変動を図-6に示す。夜間の市内外の温度差は0.5~1°C程度、日中は1~3°C程度である。同日の場合には日中にピークが発生するが、気象条件によっては快晴日でも終日変化の少ない場合もあり、市内外の顕熱流差との直接的な相関は今回の測定では見られなかった。

冬季における市街地、住宅地ならびに緑地の熱流 (純放射、屋上スラブへの伝導熱流、顕熱流、潜熱流) 量の日変動を、図-7(a), (b), (c)に示す。冬季の熱流構成と夏季の熱流構成とを比較すると、純放射量が約2/3になったのに対応して、市街地、住宅地、緑地それぞれに対して最大顕熱量は100, 75, 50 (W/m²) 程度、最大潜熱量は25, 35, 50 (W/m²) 程度と減少している。

表-1に夏季、冬季の平均日積算熱流を示す。平均日

表-1 夏季・冬季の日積算熱流

Wh/daym²			
季節	市街地	住宅地	緑地
夏季			
Rn	2,020 (100%)	2,580 (100%)	2,580 (100%)
QG	560 (28%)	500 (19%)	480 (19%)
HS	1,500 (75%)	1,310 (51%)	880 (34%)
HL	620 (31%)	980 (38%)	1,200 (46%)
ΔQ	-660 (-33%)	-210 (-8%)	20 (1%)
冬季			
Rn	750 (100%)	850 (100%)	850 (100%)
QG	240 (32%)	180 (21%)	220 (26%)
HS	790 (105%)	530 (62%)	390 (46%)
HL	190 (26%)	240 (28%)	240 (28%)
ΔQ	-470 (63%)	-100 (-12%)	0 (0%)

とは、Chingら<sup>2)</sup>、Okeら<sup>4),9)</sup>がデータ処理に際して複数の日の同時刻の熱流を平均して求めているものを示す。本報告もこれにならって、各季毎に前記の3日間のデータから求めた。地中伝導熱流として屋上スラブへの伝導熱流を用いているので、同表のQ<sub>G</sub>は必ずしも該当地域の値を代表としているものではない。ΔQはR<sub>n</sub>から(Q<sub>G</sub>+HS+HL)を引いた値であり、市街地の値は夏季27.5 (W/m²)、冬季19.7 (W/m²)となるが、この値には人工廃熱量、屋上スラブへの伝導熱流Q<sub>G</sub>と地域平均地盤伝熱量との差が含まれることになる。

### 5. 純放射量、顕熱流ならびに潜熱流相互間の関係

夏季と冬季の顕熱流HSと純放射量R<sub>n</sub>との関係を図-8(a), (b)に示す。但し本章では、各季の平均日の熱流の値を用いている。各測定地域において顕熱流HSと純放射量R<sub>n</sub>の間にはおおむね直線的な関係がある。市街地のHSは他の地域に比べ、夏季では40~100 (W/m²)、冬季では25~50 (W/m²) 大きい。顕熱流/純放射量の値は市街地、住宅地、緑地の順に大きく、夏季日中の値は市街地で0.55~0.48、住宅地で0.38、緑地で0.24である。冬季日中の値は市街地で0.50~0.35、住宅地で0.28、緑地で0.20である。

潜熱流と純放射量との関係を図-9(a), (b)に示す。各測定地域において潜熱流HLと純放射量R<sub>n</sub>の間にはばらつきはあるものの直線的な関係がある。市街地のHLは他の地域と比較して、夏季では20~80 (W/m²)、冬季では0~20 (W/m²) 少ない。潜熱流/純放射量の値は、緑地、住宅地、市街地の順に大きく、夏季の値は緑地で0.38、住宅地で0.28、市街地で0.2である。さらに冬季には0.14~0.11となり純放射量R<sub>n</sub>に対する割合も地域別差異も少なくなる。

顕熱流と潜熱流との関係を図-10(a), (b)に示す。各測定地域において、顕熱流と潜熱流間には、直線的な関係がある。顕熱流/潜熱流の値は、市街地、住宅地、緑地の順に大きく、夏季の値は市街地で2.2、住宅地では1.3、緑地では0.7である。同一の順序で、冬季は3.3, 1.5, 1.5

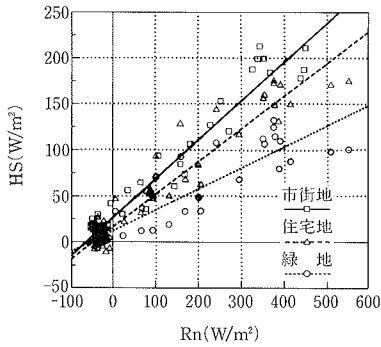


図-8(a) HSとR<sub>n</sub>との関係 (夏季)

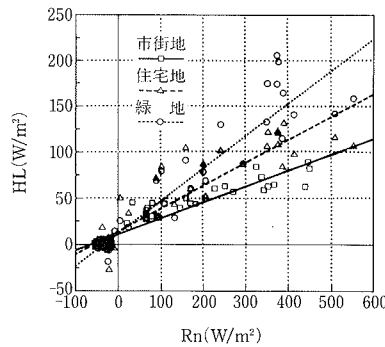


図-9(a) HLとR<sub>n</sub>との関係 (夏季)

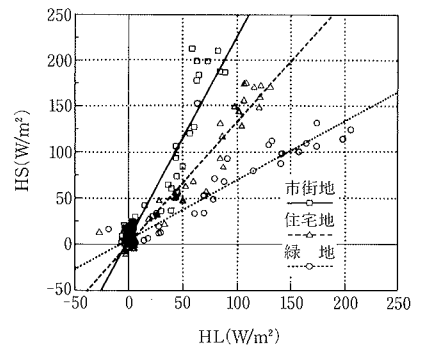


図-10(a) HSとHLとの関係 (夏季)

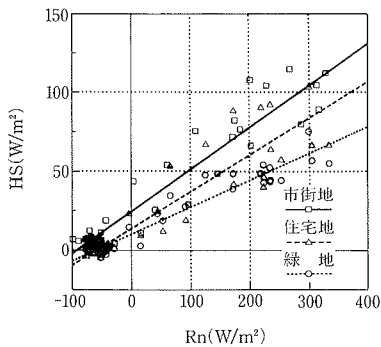


図-8(b) HSとR<sub>n</sub>との関係 (冬季)

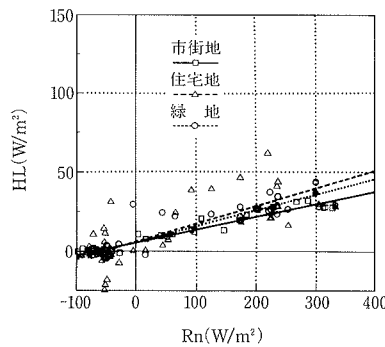


図-9(b) HLとR<sub>n</sub>との関係 (冬季)

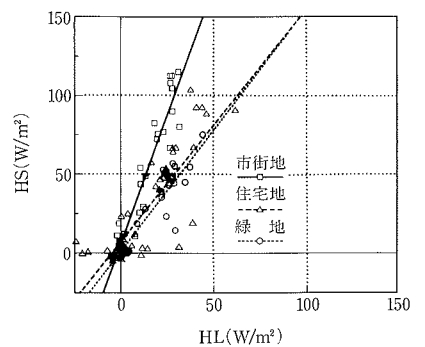


図-10(b) HSとHLとの関係 (冬季)

となる。この数値は平均的なボーエン比を示していることになる。市街地では熱流の値が小さい朝方ほど顕熱流/潜熱流の値すなわちボーエン比が小さくなる傾向が示されている。

## 6. 結論

1992年7月から1993年2月まで、都市の内外において、顕熱流・潜熱流の測定を行った。結論を以下に要約する。

- ① 市街地の顕熱流は、住宅地、緑地に比較して40~100 W/m<sup>2</sup>多く、潜熱流は20~80 W/m<sup>2</sup>少ない。
- ② 顕熱流/純放射量の値は、市街地、住宅地、緑地の順に大きく、夏季日中の値は市街地で0.55~0.48、住宅地で0.38、緑地で0.24である。冬季日中の値は市街地で0.50~0.35、住宅地で0.28、緑地で0.20である。
- ③ 潜熱量/純放射量の値は、緑地、住宅地、市街地の順に大きく、夏季の値は緑地で0.38、住宅地で0.28、市街地で0.2である。さらに冬季には純放射量R<sub>n</sub>に対する割合も土地利用形態による違いも少なくなる。
- ④ 顕熱流/潜熱流の値は、市街地、住宅地、緑地、の順に大きく、夏季においては市街地で約2.2、住宅地で約1.3、緑地で約0.7であり、冬季には増加する傾向がある。

以上のような基礎データを得た。今後は、水域やウォーターフロントにおけるデータも蓄積すると共に、これらのデータを、都市の熱環境予測に役立てていく予定である。

## 謝 辞

なお本研究は、宇都宮大学岡研究室と共同で行ったものである。関係各位の御指導、御協力に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) Yap, D. et al.: Sensible heat Fluxes over an Urban Area-Vancouver, B. C., J. App. Meteor., Vol. 13, p. 880~890, (1974)
- 2) Oke, T. R. et al.: Urban heat storage derived as energy balance residuals, B.-Layer Meteor., 39, p. 233~245, (1987)
- 3) 岡 建雄他: 市街化空間の熱的環境に関する研究 (その7), 日本建築学会論文報告集, p. 21~27, No. 427, (1991)
- 4) Tennekes, H.: Free Convection in the Turbulent Ekman Layer of the Atmosphere, J. Atm. Sci., Vol. 27, p. 1027~1034, (1970)
- 5) Yokoyama, O. et al.: On the Turbulence Quantities in the Atmospheric Mixing Layer, J. of Meteor. Soc. of Japan, Vol. 55, p. 182~192, (1977)
- 6) Ripley, E. et al.: Energy and mass exchange of a native grassland in saskatchewan, Heat and Mass Transfer in the Biosphere Part1, p. 311~325, (1975)
- 7) Oke, T. R.: The energetic basis of the urban heat island, Quar. J. of the Royal Meteor. Sci., Vol.108, p. 1~24, (1982)