

都市域の屋上面と近郊草地面における熱収支の比較

張 一 平*・福岡 義 隆**・高 橋 日 出 男**

*広島大学大学院生物圏科学研究科・

**広島大学総合科学部自然環境研究講座

Comparison of Energy Balance between Rooftop Surface in Urban Area and Grass Plot Surface in Suburban Area

Yiping ZHANG*, Yoshitaka FUKUOKA** and Hideo TAKAHASHI**

* Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University and

** Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University

Abstract : Heat balance and radiation balance at the rooftop surface in urban area and the grass plot surface in suburban area of Hiroshima City were estimated on the basis of observation data in summer and winter. Difference in diurnal variation of energy balance between the rooftop surface and the grass plot surface was described preliminarily in this paper. As to the heat flux from the rooftop surface to the atmosphere, though the sensible heat flux is much larger than the latent heat flux in the afternoon, the latent heat flux is larger than the sensible heat flux in the morning. Therefore, the latent heat flux from the rooftop surface can not be disregarded. The sensible heat flux from the rooftop surface is larger than that from the grass plot surface during the daytime, which could cause higher temperature above the rooftop. Moreover, the heat flux into (daytime) / from (night) the inside of the building is larger than that into / from the soil of the grass plot especially in summer. This means that the heat storage of building is important for the energy balance of urban area in summer rather than in winter. Nighttime radiation cooling from the rooftop surface is stronger than that from the grass plot surface.

Keywords : energy balance, grass plot surface, latent heat flux, rooftop surface, sensible heat flux

はじめに

都市化の進展につれて人口の増大と集中に伴う建築物の高層・高密度化が進み、それとともに都市の気候が変化してきた。都市気候の成立要因を明らかにするためには都市の熱環境を把握することが必要であり、都市における熱・放射収支の実態調査はその第1段階である。

現代の都市では都市総表面積の大部分が人工的な表面によって占められている。これは道路面(地表面)、壁面および屋上面で構成されるが、道路面が都心域では建築物によって日陰になりやすいのに対して、屋上面は日陰になりやすく、その意味で屋上面は都市の第二の受熱面ともいわれる。高橋・福岡(未発表)は夏季日中の市街地におけるヒートアイランドの強度は地上付近よりも高度15~20mより上空で大きいことを見だし、その主要な熱源として屋上面を想定している。一方、成田ほか(1984)、成田・関根(1991)は屋上に設置した実験装置でアスファルト舗装面と裸地面とを比較し、アスファルト舗装面の熱収支特性、特に正味放射量の伝導熱流への配分比などを検討している。成田・松下(1992)は屋上の熱収支と風との関係を考察し、浦野・渡辺(1983)は屋上の熱収支観測によって、建築学の立場から建築物の熱収支特性を検討している。

さらに、建築物群の幾何的特性によっても放射収支は変化する。小林(1979)、朴(1987)は建築物の屋上とそれに近接するビル街空間(都市キャニオン)において放射収支の観測を行い、屋上面と地表面とでは長波放射量に関する相違が夜間に顕著であることを指摘した。その結果から、建築物による長波放射の吸収と再放出が都市キャニオン内気塊の保温に寄与し、それが夜間のヒートアイランド形成の主要な要因であるとしている。Fuggle & Oke(1976)やNunez & Oke(1976, 1977)は屋上面上で放射収支と熱収支を観測し、夜間における長波放射の鉛直方向の発散と冷却速度の関係を論じた。また、Yoshida & Tominaga(1991)は屋上と都市キャニオン内で放射収支と熱収支の観測をしている。これによると、夏季には都市キャニオン上面(Top)を通して出入りする熱フラックスは建築物の屋上面(Rooftop)におけるそれより終日かなり大きく、日中にはTop面における正味放射量の約50%であった。Yap & Oke(1974)が屋上面上の2高度において顕熱フラックスを直接測定した結果によると、日中には屋上面上の低所より高所の方が顕熱フラックスが大きくなっている。

以上の解析において、小林(1979)、朴(1989)、Fuggle & Oke(1976)およびNunez & Oke(1976, 1977)は夜間の長波放射量のみを取り上げており、日中の状態については論じられていない。一方、成田ほか(1984)、成田・関根(1991)、浦野・渡辺(1983)、およびYoshida & Tomijima(1991)は都市的表面からの潜熱フラックスをゼロと仮定し、顕熱フラックスを正味放射量と表面内部に向かう熱フラックスとの残差として求めているが、この仮定の妥当性については十分な吟味が必要である。また、Yap & Oke(1974)や成田・松下(1992)の観測は秋に行われたが、季節の違いによる差異は明らかにされていない。

前述のように都市表面の多くの部分は道路面や建築物の壁面、屋上面などによって構成されている。各表面における熱収支特性や各表面が都市大気に及ぼす影響などに関する解析は都市気候の成因を明らかにするうえで基礎となる。都市内外の地表面における熱収支解析は多数あり、例えば山下(1975)は都市内外の放射収支を論じ、都市の放射収支が周辺地域と比較して著しく異なることを述べている。Kalanda & Oke(1980)都市域の熱収支を測定し、Landsberg(1981)、Oke & McCaughey(1983)やCleugh & Oke(1986)は都市内外の地表面における熱収支を観測している。それらによると、都市内の舗装された地表面では郊外の裸地あるいは草地面に比べて顕熱フラックスや地中に向かう熱フラックスは増加し、潜熱フラックスは減少する。しかしながら都市の第二の受熱面とみなされる屋上面の熱収支については解析例が少なく、屋上面と郊外域の地表面における熱収支特性の差異やその季節性については明らかではない。

以上の点から、本研究では広島市の市街地における屋上面で夏季と冬季に熱収支を観測し、その際超音波風速温度計を用いて渦相関法により顕熱フラックスを求めた。これに基づいて屋上面の熱収支特性およびその季節による違いを検討し、近郊の草地面ににおける熱収支と比較することによ

て都市気候形成に対する屋上面の役割を考察することを目的とする。

観測方法

観測を行った地点を図1に示した。屋上面の観測はほぼ都市中心部に位置する広島大学旧総合科学部の上（地点A；高さ約17.5m）で行った。旧総合科学部の建物の北東側には近接してほぼ同高度の旧理学部の建物があるが（第2図）、南西側は比較的開けており200m以内に4階建て以上の建築物はない。半径500m以内における土地利用形態は、商業地であり2～4階建ての建築物が卓越している。一方、近郊草地面の観測は広島女子大学の研修所内の草地（地点B）で行った。草地の面積は約8000m²であり、そのほぼ中央で観測を行った。観測点の北東側には比高約100～200mの丘陵があり、また南側には2～5階建ての工場群があるが、観測点とは十分な距離があり、それらの影響は無視し得ると考えられる。

屋上面における観測の期間、要素および使用した測器を表1に示した。夏季の観測は1991年7月24日12時～25日18時（第1回）、1992年6月1日11時～5日17時（第2回）、および1992年8月27日13時～9月1日17時（第3回）に行った。第1回の観測期間中はほぼ晴天であり、解析には25日の資料を用いた。第2回の観測では3日の後半からやや雲量が増加してきたため、解析には2日の資料を用いた。第3回の観測では観測開始の前（8月23～25日）に降水があったが、観測を開始した27日から30日夕方までほぼ晴天であり、解析には28日の資料を使用した。冬季の観測は1991年12月10日15時～12月26日14時の期間に行ったが、そのうち快晴であった14日の

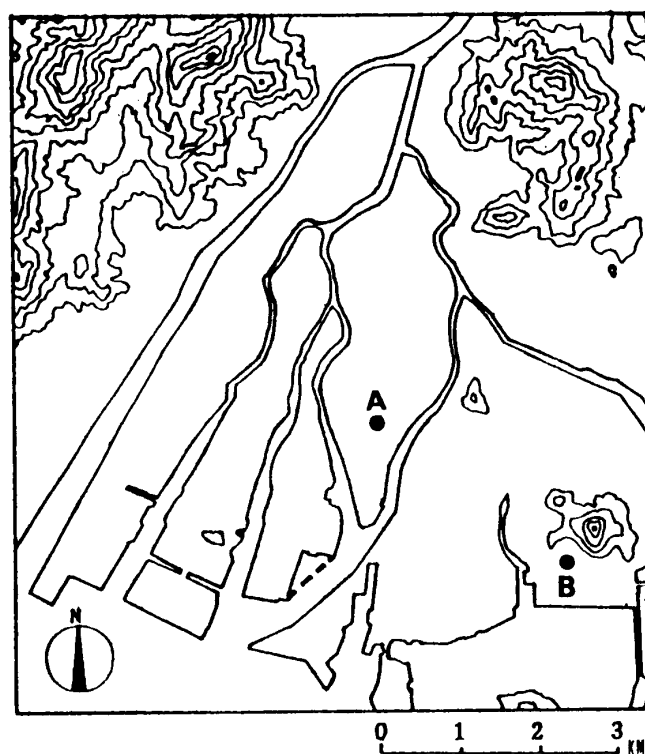


図1. 観測地点の位置

地点A：屋上面の熱収支観測地点

地点B：近郊草地面の熱収支の観測地点

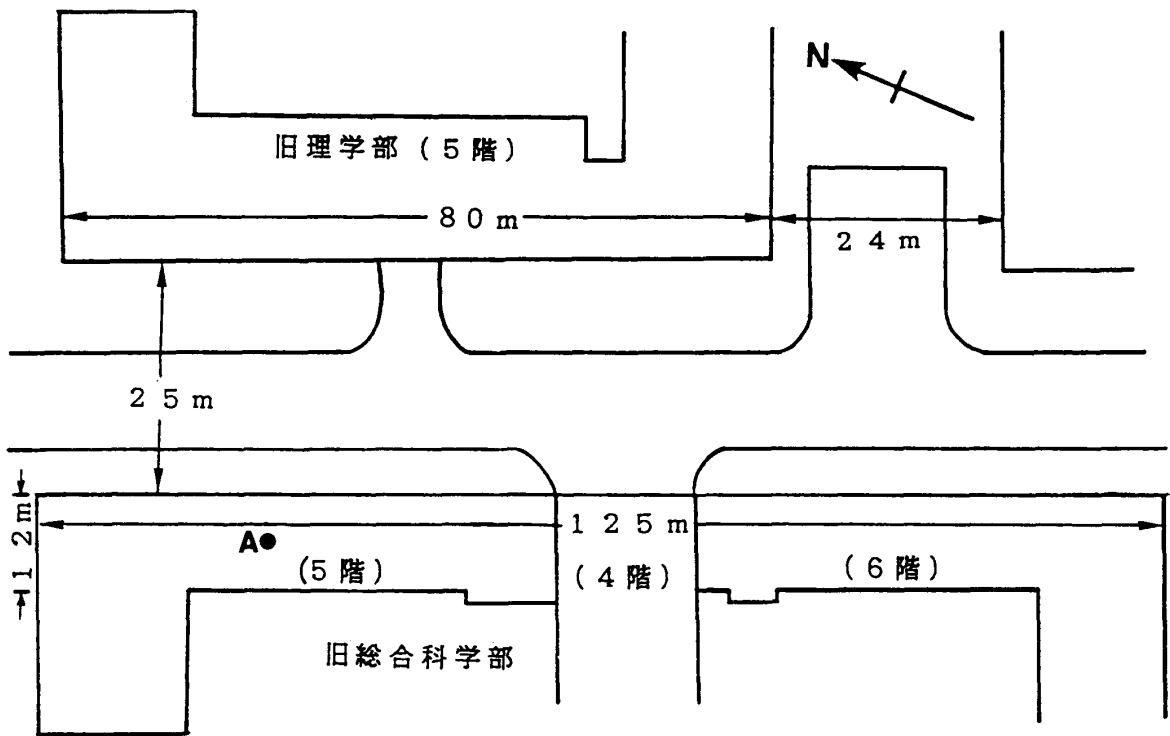


図2. 屋上面の熱収支観測地点 (旧総合科学部) 付近の概要

資料を用いて解析を行った。

屋上面における観測は、鉄製アングルで作成した観測塔を屋上面に設置し、そこに以下に述べる測器を取り付けて行った。日射量・反射量は屋上面から1.5mの高度に設置したアルベドメータ (英弘精機社製、MR-22型) あるいはバイメタル日射計 (いすゞ製作所製)、農試電試型日射計 (中堅測温研究所製) を用いて測定した。正味放射量については防風型正味放射計 (英弘精機社製、CN-11型) を屋上面から1.0mの高度に設置して測定した。屋上面から建築物内部に向かう熱フラックスはCN-81型熱流板 (英弘精機社製) を屋上のコンクリートタイルの下 (屋上面から約0.06mの深さ) に挿入して測定した。以上の項目については10分ごとの値を自記記録させた。

顕熱フラックス H [$W \cdot m^{-2}$] は超音波風速温度計 (海上電機社製、WA(T)-395型) を屋上面上1.5mの高度に設置して、風速の3成分 (U, V, W) と温度を毎正時からの10分間について6000回測定し、(1)式に示す渦相関法によって求めた。

$$H = C_p \rho \overline{W' \theta'} \quad (1)$$

ここで、 C_p [$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$] と ρ [$kg \cdot m^{-3}$] はそれぞれ空気の定圧比熱と密度で、 W' [$m \cdot s^{-1}$] は風速鉛直成分の時間平均からの偏差、 θ' [K] は気温の時間平均からの偏差であり、バーは10分間の時間平均を意味する。

乾・湿球温度については表1に示した高度でサーミスタ温度センサ (夏季第1回と冬季の観測ではコーナシステム社製、その他の観測では宝工業製を使用) を用いて測定を行った。その際、日中の日射による加熱と夜間の放射による冷却を避けるためにセンサ部はファンで強制通風させたアルミ製の管内 (直径約7cm; 以下、通風管と称する) に納めた。また、風速は三杯式風速計 (牧野応用測器) を用い、表1に示した高度で測定した。

表1. 屋上面における観測の要素、期間および使用した測器

期間	July 25, 1991	Dec. 14, 1991	June 2, 1992	Aug. 28, 1992
要素	0:00-18:00	0:00-23:00	0:00-23:00	0:00-23:00
Q (日射量)	アルベドメータ	アルベドメータ	バイメタル日射計	バイメタル日射計
Qa (反射量)	アルベドメータ	アルベドメータ	農試電試型日射計	農試電試型日射計
Rn (正味放射量)	防風型正味放射計 CN-11型	防風型正味放射計 CN-11型	防風型正味放射計 CN-11型	防風型正味放射計 CN-11型
G (建物内部に向かう熱フラックス)	CN-81型熱流板	CN-81型熱流板	CN-81型熱流板	CN-81型熱流板
H (顕熱フラックス)	超音波風速温度計 WA(T)-395型	超音波風速温度計 WA(T)-395型	超音波風速温度計 WA(T)-395型	超音波風速温度計 WA(T)-395型
風速	三杯風速計 1.5m	三杯風速計 0.58m, 1.5m, 3.0m, 4.0m, 6.0m	三杯風速計 0.58m, 1.0m, 1.73m, 3.0m, 5.2m	三杯風速計 0.58m, 1.0m, 1.73m, 3.0m, 5.2m, 10.0m
温度	サーミスタ温度計 1.5m, 3.0m	サーミスタ温度計 0.5m, 1.5m, 3.0m	サーミスタ温度計 0.58m, 1.0m*, 1.73m, 3.0m*, 5.2m	サーミスタ温度計 0.58m, 1.0m*, 1.73m, 3.0m*, 5.2m, 10.00m

*は湿球温度の測定高度

近郊の草地面における観測では、1990年6月下旬から1991年2月上旬まで継続的に30分間隔で測定された資料のうち、夏季と冬季の代表として終日快晴であった1990年7月20日(夏季)と12月5日(冬季)のデータを用いた。観測はアルベドメータ(英弘精機社製、MR-22型)を1.5mの高度に設置して日射量と反射量を、防風型正味放射計(英弘精機社製、CN-11型)を1.5mの高度に設置して正味放射量を測定した。また、C-81型熱流板(英弘精機社製)を地表面下約0.03mの深さに埋設して地中に向かう熱フラックスを測定した。さらに通風管に納めたサーミスタ温度センサ(コーナシステム社製)を用いて測定された高度0.3mおよび2.0mの乾・湿球温度を使用した。また、三杯式風速計(牧野応用測器)で測定された高度0.3mおよび2.0mにおける風速を使用した。

なお、解析には屋上面・近郊草地面ともに器差補正等を施した1時間間隔のデータを用いた。

熱収支各項の算出方法

熱収支は次の式によって表現される。

$$R_n = H + LE + G \quad (2)$$

ここで、 R_n は正味放射量、 H は顕熱フラックス、 LE は潜熱フラックスで、 G は建築物内部(または地中)に向かう熱フラックス $[W \cdot m^{-2}]$ である。なお、以下の議論ではこれらの記号をそれぞれの略称として用いる。また、必要に応じてフラックスの上向き、下向きを \uparrow 、 \downarrow で表現した。

本研究では R_n および G を直接測定しており、屋上面については H を超音波風速温度計のデータを用いて(1)式によって計算した。一方、近郊草地面では H は以下の式から傾度法(Oke, 1978)によって算定した。

$$H = -\rho C_p K (T_2 - T_1) / \ln(Z_2/Z_1) \quad (3)$$

$$K = \kappa^2 (U_2 - U_1) \phi (R_i) / \ln(Z_2/Z_1) \quad (4)$$

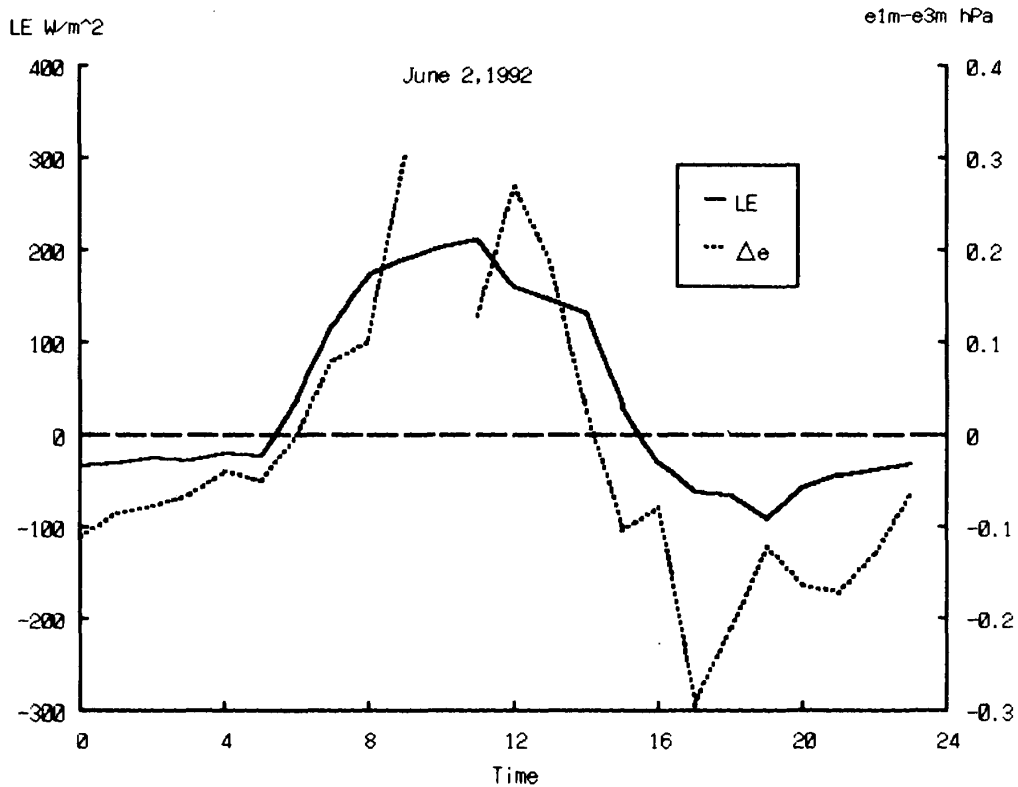


図3. 残差として得られたLE [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]と水蒸気圧鉛直傾度 ($e_{1\text{m}} - e_{3\text{m}}$) [hPa]の時間変化
(1992年6月2日)

10時については高度1mにおける湿球温度が得られず欠測となっている。

$$\phi(\text{Ri}) = (1 - 5\text{Ri})^2 \quad \text{Ri} > 0 \quad (5)$$

$$\phi(\text{Ri}) = (1 - 16\text{Ri})^{3/4} \quad \text{Ri} < 0 \quad (6)$$

$$\text{Ri} = \frac{9.8Z(\text{T}_2 - \text{T}_1)(\ln(Z_2/Z_1))}{(\text{T} + 273.15)(\text{U}_2 - \text{U}_1)^2} \quad (7)$$

$$Z = (Z_1 Z_2)^{1/2} \quad (8)$$

$$\text{T} = (\text{T}_1 + \text{T}_2) / 2 \quad (9)$$

ここで、 K は(4)式から求められる係数である。 Ri はリチャードソン数であり、 κ はカルマン定数でここでは $\kappa = 0.4$ とした。 T_1 と T_2 は高度1 (0.3m)と高度2 (2.0m)の気温[$^{\circ}\text{C}$]で、 T は高度1と高度2における気温の相加平均値である。 U_1 と U_2 は高度1と高度2の風速であり、 Z は2高度の相乗平均値である。 $\phi(\text{Ri})$ はリチャードソン数 Ri を変数とする安定度関数であり、(5)と(6)式から求められる。以上の Rn 、 G および H より LE を(2)式の残差項($\text{LE} = \text{Rn} - \text{H} - \text{G}$)として求めた。

ところで、 H と気温の鉛直傾度が(3)式で記述される関係にあるのと同様に、 LE の大きさも水蒸気量の鉛直傾度に関わっており、 C 両者は対応関係にあるはずである。そこで、屋上面において残差として求められた LE と、高度1mと3mの水蒸気圧[hPa]の差 ($e_{3\text{m}} - e_{1\text{m}}$)の時系列を1992年6月2日の事例について図3に示した。これによると、水蒸気圧の鉛直傾度の変化にはほぼ対応して LE が増減している。そこで、上記の方法から残差として求めた LE を一応妥当な値とみなして以下の議論を行うことにする。

結果と考察

1. 熱収支各項の時間変化

まず、 R_n についてみると屋上面（図4a～d）では日中において夏季冬季ともに下向き（正の値）で、日射量 Q の時間変化にはほぼ対応して変化しており、正午に最大となる。近郊草地面（図4e, f）と比べると、日中の $R_n \downarrow$ は夏季冬季ともに屋上面より近郊草地面の方がわずかに大きい。夏季（図4a～c, e）と冬季（図4d, f）それぞれのグループ内ではほぼ同様の値を示しており、屋上面と近郊草地面との比較を同等の日射によるエネルギー入力条件下で行うことができる。

夜間には屋上面、近郊草地面ともに R_n は上向き（負の値）である。 $R_n \uparrow$ は屋上面では夏季冬季とも日没頃に大きく、夕方から朝に向かってしだいに小さくなる。これに対して近郊草地面における $R_n \uparrow$ は夜間を通じてほぼ一定の大きさであり、屋上面の $R_n \uparrow$ と比べて小さい。夜間には短波放射を無視できるので、 $R_n \uparrow$ は長波放射によっているとみなせる。したがって、夜間には屋上面の放射冷却が近郊草地面より強いといえる。このことは小林（1979）および朴（1987）が述べた地表面の放射冷却量は屋上面の4.5～6.5割程度であるという結果と一致している。

屋上面や草地面における G はその方向（正負）により熱の蓄積（正の値： $G \downarrow$ ）と放出（負の値： $G \uparrow$ ）を意味する。図4によると、日中には夏季冬季ともに屋上面の G は建築物内部に向かっており、蓄熱を示している。特に夏季において $G \downarrow$ が大きく、10時ごろに最大値が現れており、このことはYap & Oke（1974）や成田ほか（1984）、成田・関根（1991）の観測結果と一致している。冬季にはやや遅れて午後に $G \downarrow$ の最大値が出現している。また、観測前に降水があった1992年8月28日の場合（図4b）には $G \downarrow$ が他の夏季の場合と比べて小さい。

夏季において先行する降水がない場合に、日中屋上面の $G \downarrow$ は近郊草地面における $G \downarrow$ より大きく、特に午前中に両者の差が大きくなる。これに対して冬季には両者の差は小さい。すなわち、蓄熱の効果は近郊草地より建築物の方が大きく、特に午前中に大きいことになる。夜間にはすべての場合において $G \uparrow$ であり、日中に蓄えられた熱が表面から放出されていることを示している。その大きさは夏季には近郊草地面より屋上面の方が大きい。冬季にはほぼ同程度である。このように夜間には建築物内部や地中から $G \uparrow$ として放出され、 $R_n \uparrow$ に寄与しているとみなされるが、 $G \uparrow$ は近郊草地面より屋上面の方が大きい。

つぎに、 H と LE の日変化を図5に示した。この図において注目されることは屋上面では日中に先行する降水があった図5bの場合を除いて、夏季冬季とも $H \uparrow$ と $LE \uparrow$ の極大が現れる時刻が異なり、両者の日変化の位相が異なることである。すなわち、日の出以降の午前中において $LE \uparrow$ は $H \uparrow$ より大きく、正午前に最大値が現れている。これに対して、 $H \uparrow$ は午前中緩やかに増大し、午後（12時～14時）に最大値が現れ、それ以降 $H \uparrow$ の方が $LE \uparrow$ より大きくなる。また、夏季冬季（図5aと図5d）ともに15時ごろに $LE \uparrow$ はゼロになり、その後に $LE \downarrow$ に転じている。これに対して、近郊草地面では夏季日中には $LE \uparrow$ が $H \uparrow$ に比べて常に大きく、冬季には一時的に $LE \uparrow$ より $H \uparrow$ の方が大きくなっているが、ほとんどの時間帯において $H \uparrow$ の方が大きい。また、屋上面において認められた $H \uparrow$ と $LE \uparrow$ の日変化に関する位相の違いは近郊草地面では認められない。

日没前後以降には、屋上面上・近郊草地面上の夏季冬季ともに H 、 LE は小さい。このとき LE は下向きとなる傾向があり、特に屋上面における夏季日没前後の時間帯においてそれが顕著である。このことは、日中に潜熱として水蒸気を放出した屋上面構成物が再び水蒸気を取り込んでいることを示していると考えられる。また、観測前に降水があり、屋上面が濡れていた1992年8月28日の場合には、他の夏季の事例と H 、 LE の日変化が異なっている。すなわち、日中の $LE \uparrow$ は近郊草

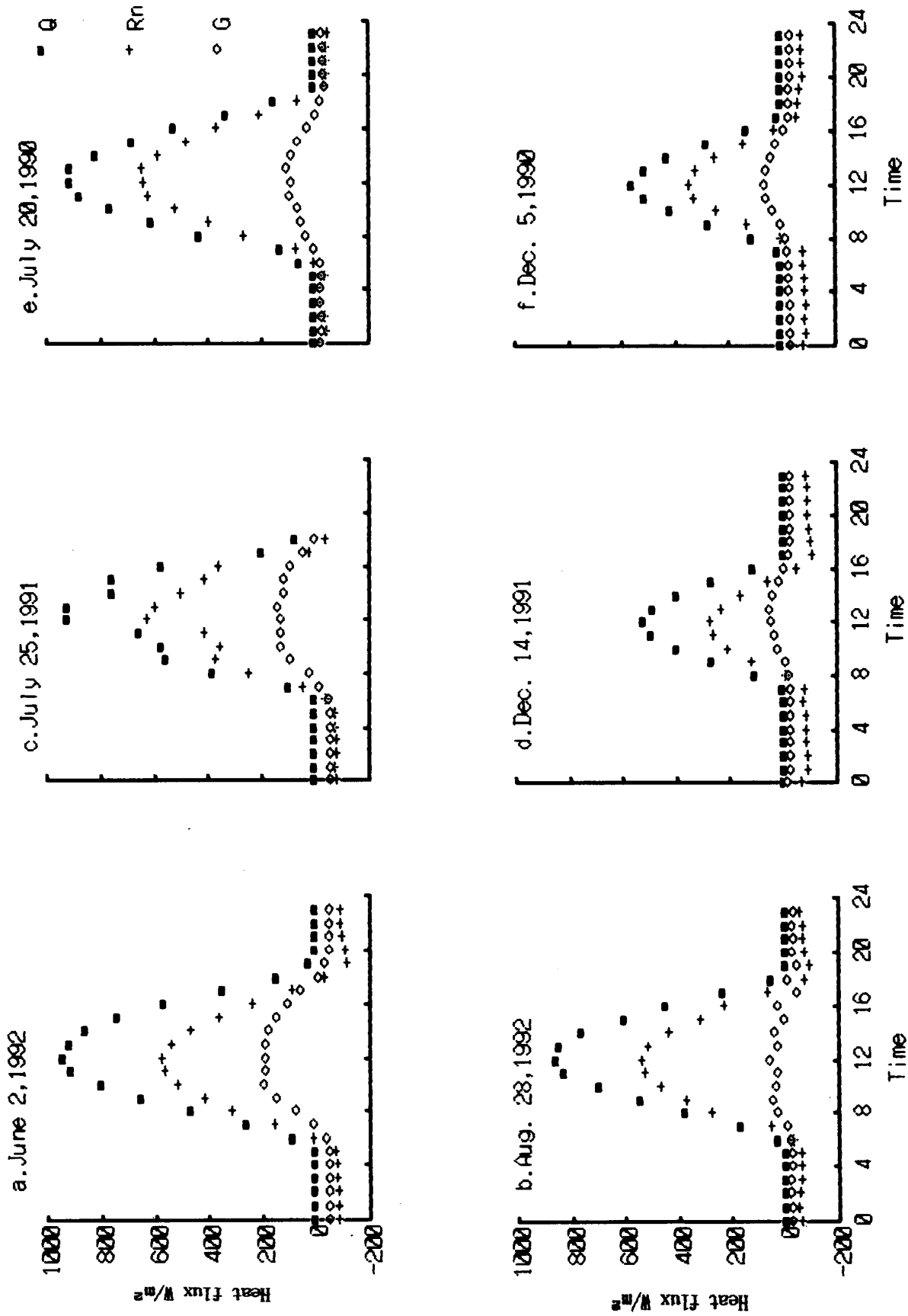


図4. 日射量 (Q)、正味放射量 (Rn) および建築物内 (地中) に向かう熱フラックス (G) の日変化

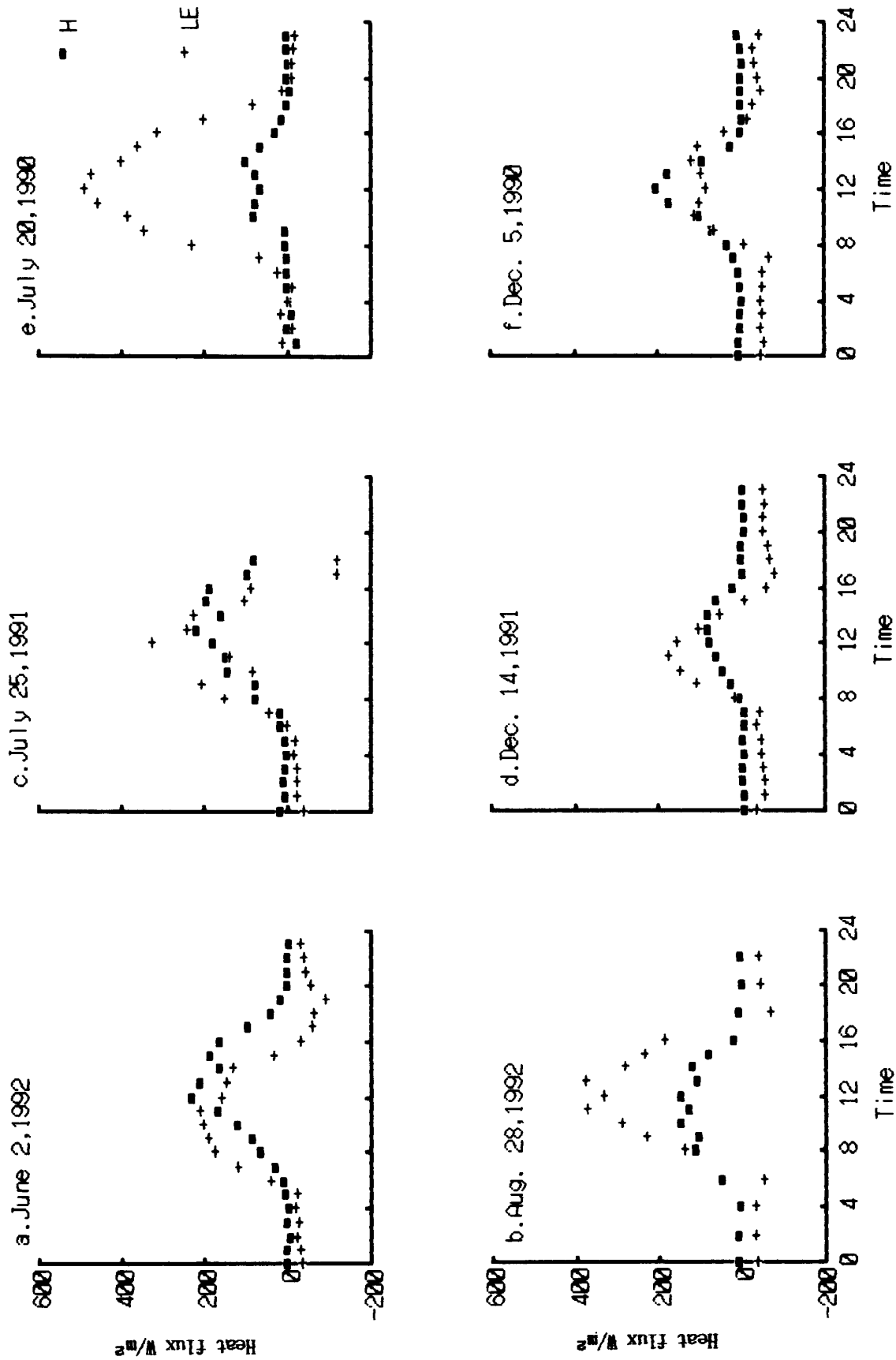


図5. 正味放射量 (Rn)、顕熱フラックス (H) および潜熱フラックス (LE) の日変化

資料の日付については図中に示した

地面と同程度に大きく、 $H \uparrow$ の最大値は他の夏季の場合と比べてやや小さい。さらに、 $H \uparrow$ の増加は午前中のかなり早い時期に起こっており、他の夏季の事例近郊草地面の場合と異なっている。これは建築物内部に向かう $G \downarrow$ (図4b)が他の夏季の事例と比べて小さいことから、屋上面が濡れた状態になることによってアルベドが変化し、それに伴って放射・熱収支特性が乾燥条件下と異なったことによると考えられる。

つぎに、 R_n の大きさが異なる夏季と冬季における熱収支特性を比較するために、 R_n の各熱フラックス項への配分率を算出した。屋上面と近郊草地面について夏季冬季の快晴日中における R_n の H への配分率 (H/R_n) と LE への配分率 (LE/R_n) (いずれも百分率で示す) に関する時間変化を図6に示す。

夏季の屋上面 (図6a) においては午前中に LE への配分率が大きく、早朝には約80%が R_n から配分されており、一方 H への配分率は約20%である。その後、 LE への配分率は減少し、 H への配分率が増加する。これは、屋上面では草地面のように表面への水分補給がなされないため、表面から蒸発可能な水分量が減少したことによると考えられる。午後になると両者の大小関係は逆転し、 H への配分率が LE への配分率を上回る。屋上面では冬季 (図6b) においても H/R_n と LE/R_n の時間変化は夏季と類似しており、日中には H/R_n は時間とともに増加し、 LE/R_n は減少している。両者の大きさがほぼ同じになる時刻は夏と比べ2時間程度遅れているが、屋上面では R_n の H と LE への配分率に関する時間変化は季節による差異が小さいといえる。

一方、近郊草地面では夏季 (図6c) において蒸発散が盛んであり、日中を通じて LE への配分率が大きく、 H への配分率は小さい。また、日中の時間帯において両者とも変動幅は大きくない。これに対して、冬季 (図6d) には近郊草地面において日中に H/R_n の方が LE/R_n より大きくなり、12時には約60%が H に配分され、約20%が LE に配分されている。このような夏季と冬季の差異は、草地面において冬季には植生がなくなりアルベドが変化すること、また地中の水分量などが変化することなどに起因すると思われる。しかし、正午を中心とした時間帯に H への配分率が最大になり、 LE への配分率が極小になることは夏季と冬季で共通している。このように、 H 、 LE への配分率に関して正午を境として午前と午後とで対称となる近郊草地面と非対称である屋上面とは対照的であり、特に近郊草地面で常に H への配分率が小さい夏季において、屋上面と近郊草地面との時間変化に関する違いがきわだっているといえる。

以上のことから、 H と LE への配分率の時間変化について屋上面と近郊草地面では異なっており、また、屋上面においても夏季冬季ともに LE を無視できず、屋上面上の熱収支を考える上で興味深い日変化をしていることがわかった。

2. 時間帯で積分した熱収支各項の比較

以上では屋上面と近郊草地面における熱収支の時間変化に差異があることを指摘した。その差異は日中の午前 (夏季は7~12時で冬季は8~12時) と午後 (夏季は13~18時で冬季は13~16時) との比較において顕著であることから、以下ではそれらの時間帯および夜間 (夏季は19~6時で冬季は17~7時) における平均状態を各時間帯における熱フラックスの積分値をもとに表現し、屋上面と近郊草地面における熱収支を模式的に示す (図7)。図7には積分された R_n およびその各熱収支項への配分率と方向を示した。

2.a 午前と午後について ($R_n \downarrow$ の場合)

夏季の屋上面では午前中において $R_n \downarrow$ の約30%が $H \uparrow$ として大気中に放出され、その比率は近郊草地面 (約10%) よりも大きい。また、屋上面では $R_n \downarrow$ の約40%が $LE \uparrow$ に配分されるが、こ

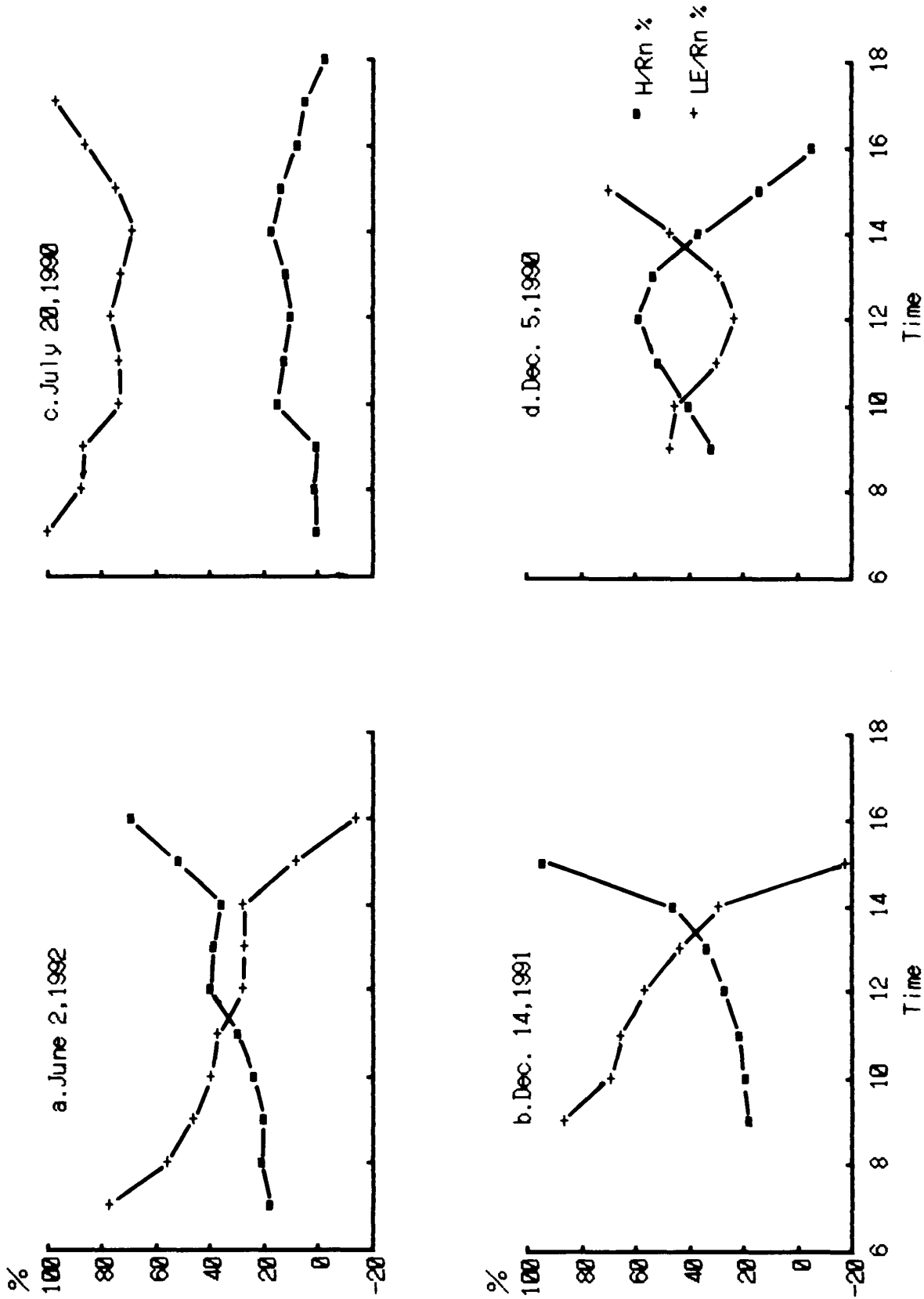


図6. 正味放射量 (Rn) の顕熱フラックスへの配分率 (H/Rn) と潜熱フラックスへの配分率 (LE/Rn)

資料の日付については図中に示した

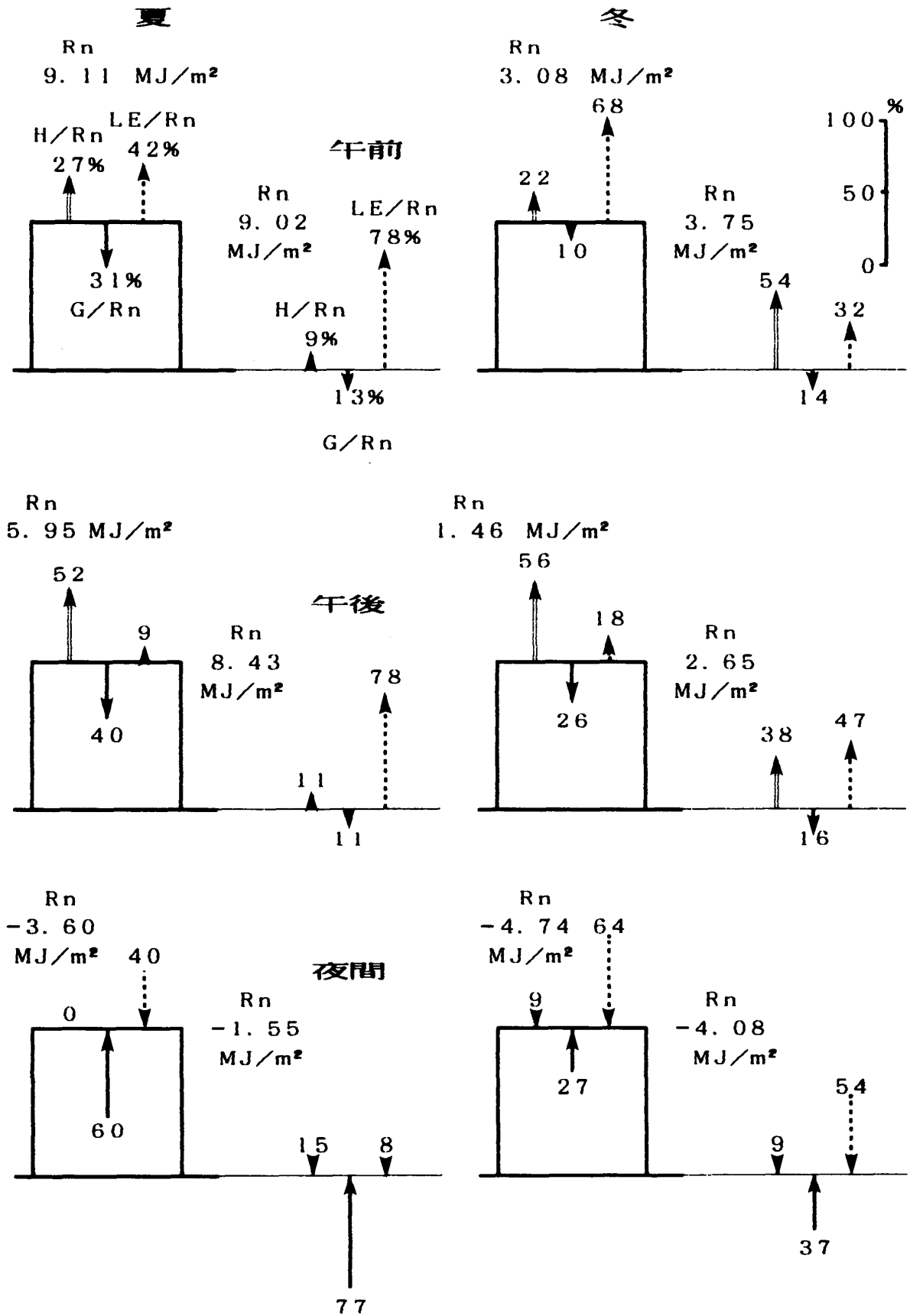


図7. 屋上面と近郊草地面における止味放射量(Rn)の各熱収支項への配分率 (午前、午後および夜間における積分値について)

れは近郊草地面（約80%）と比べてその比率は半分程度である。午後には屋上面での $H \uparrow$ への配分率はかなり大きく、 $Rn \downarrow$ の50%以上がそれに配分されていることになり、近郊草地面（約10%）の5倍近くの比率となる。これに対して $LE \uparrow$ への配分率は約10%であり、近郊草地面における $LE \uparrow$ への配分率（約80%）と比べるとかなり小さい。

冬季の屋上面では午前中において $Rn \downarrow$ のうち20%強が $H \uparrow$ に配分されるが、これは夏季の場合と同程度比率で、冬季の近郊草地面における $H \uparrow$ への配分率（50%強）の半分以下である。また、屋上面では午前中に $LE \uparrow$ に配分される比率は夏季の場合より大きく約70%であり、近郊草地面（約30%）の2倍以上の比率である。午後には屋上面では $H \uparrow$ への配分率は大きくなり（50～60%）近郊草地面における $H \uparrow$ への配分率（約40%）より10～20%大きく、夏季の屋上面と同程度の比率となる。このとき $LE \uparrow$ への配分率は夏季の場合の約2倍になるが、近郊草地面（50%弱）に比べるとかなり小さい。

このように H と LE への配分率について、屋上面における午前と午後の違いは大きいですが、夏季と冬季の差は大きいとはいえない。一方、屋上と近郊との差は午前・午後とも大きく、夏季と冬季の違いも認められた。このような季節による差異は近郊草地面において植生などの地表面状態が変化したことによると考えられる。

Rn の G への配分率（ G/Rn ）については、夏季の午前・午後ともに約30～40%（ $G \downarrow$ として）であり、成田ほか（1984）が行った屋上でアスファルトに関する観測結果とほぼ一致している。近郊草地面においては $G \downarrow$ への配分率は夏季冬季の午前・午後とも10%強であり、冬季の午前を除き屋上面における $G \downarrow$ への配分率の方がかなり大きい。以上のことは日中に建築物が蓄熱しており、その効果は夏季に大きく、冬季の特に午前中には小さいことを示している。

2.b 夜間について（ $Rn \uparrow$ の場合）

夏季の夜間には屋上面上の H はほぼゼロであり、 $Rn \uparrow$ （長波放射）はその約40%が $LE \downarrow$ に、約60%が $G \uparrow$ によってもたらされている。冬季夜間の屋上面では $Rn \uparrow$ のうち約10%が $H \downarrow$ 、60%強が $LE \downarrow$ に、また30%弱が $G \uparrow$ によって構成されている。近郊草地面の場合、夏季夜間における $Rn \uparrow$ はその多くの部分（80%弱）を $G \uparrow$ によっている。冬季夜間には $LE \downarrow$ による寄与が最も大きく50%強であり、 $G \uparrow$ が40%弱と小さくなっている。つまり、屋上面については夜間において夏季冬季とも $G \uparrow$ と $LE \downarrow$ が $Rn \uparrow$ （この場合上向きの長波放射）とほぼ釣り合っている。しかしその内訳をみると、夏季には建築物内部から $G \uparrow$ による寄与が大きいものに対して、冬季には $LE \downarrow$ による寄与が大きい。また、冬季夜間には近郊草地面と屋上面との差異は小さい。さらに $Rn \uparrow$ は特に夏季において近郊草地面より屋上面の方が大きく、このことは夜間の放射冷却が草地面より屋上面において強いことを意味しており、小林（1979）や朴（1987）の指摘と一致している。

3. 1日を通じた G の収支

これまで述べてきたように、 G は日中には下向き（蓄熱）であり、夜間には上向き（放熱）となる。しかし、 $G \downarrow$ と $G \uparrow$ の収支は必ずしも1日の間でバランスせず、夏季にアスファルト層では $G \downarrow$ が $G \uparrow$ を上回っていることを成田ほか（1984）は指摘している。そこで、1日を通じて積分した G の値を夏季・冬季および屋上面・近郊草地面について求め（表2）、 G の収支を検討した。これによると、屋上面・草地面ともに1日の間で夏季には $G \downarrow$ が、冬季には値は小さいが $G \uparrow$ がより卓越していることがわかる。すなわち、日変化より時間スケールの大きい季節変化として建築物や土壌層は夏季にはしだいにその内部に熱を蓄え（建築物の方がその割合が大きい）、逆に冬季には徐々に熱を放出していることが示唆される。ただし、本解析は夏季冬季1例ずつの晴天日におけ

表2. 1日を通じて積分したGの値

数値の正、負はそれぞれGが1日の積分値として下向き、上向きであることを示す。

	夏 季	冬 季
屋 上 面	3.04	-0.59
草 地 面	0.91	-0.56

単位：MJ・m²

る事例解析であるため、様々な天候の場合を含めてさらに継続的に調査を行うことが必要である。

お わ り に

都市中心部の屋上面と近郊の草地面における夏季・冬季の熱収支を実測データにより解析した結果、以下のことが示された。

- 1) 屋上面では顕熱フラックスと潜熱フラックスの日変化に関する位相が異なり、上向きの潜熱フラックスは午前中に大きく、上向きの顕熱フラックスは午後に大きくなる。屋上面においても潜熱フラックスは夏季冬季ともに無視できない大きさである。
- 2) 近郊草地面と比べ、屋上面では夏季において常に顕熱フラックスが大きく、潜熱フラックスは小さい。このことは夏季の日中において屋上面上の気温が高くなる要因のひとつと考えられる。また、近郊草地面と屋上面における潜熱フラックスの日変化は異なっており、これは屋上面では地表面と同様な水分の補給がなされないためと考えられる。
- 3) 屋上面において建築物内部から出入りする熱フラックスは草地面において地中から出入りする熱フラックスに比べて日中も夜間も大きく、それは冬季よりも夏季に顕著である。このことは熱収支に関する建築物の蓄熱効果が冬季よりも夏季において重要であることを意味している。また、夜間には上向きの正味放射量は屋上面の方が近郊草地面より大きく、屋上面の方が草地面よりも放射冷却を強く受けていることがわかった。

本観測では観測の便宜上建築物内（地中）へ向かう熱量を屋上面ではコンクリートタイルの下（深度0.06m）で、草地面では深度0.03mで測定しており、地表面と測定深度との間における蓄熱量を考慮していない。これによる誤差は残差項である潜熱フラックスの大きさに直接的に波及する。観測を行った屋上面におけるコンクリートタイルの蓄熱量は明らかではないが、成田ほか（1984）によりアスファルトブロックを用いて行われた実験では、夏季日中において表面から深度0.05m間で最大50～100W・m²の蓄熱が、夕刻には最大50W・m²程度の放熱が見積もられている。日中の蓄熱量が100W・m²であったとしても屋上面上における潜熱フラックスの大きさは100W・m²を越え、無視できない大きさではあるが、残差として求めた潜熱フラックスにはこのような誤差が含まれている可能性がある。今後、この点も含めて屋上面における熱・放射フラックスを精度良く求め、周辺大気に与える建築物の影響を明らかにしていくことが都市気候の解明にとって必要と考えられる。

謝 辞

近郊草地面における観測データを提供された広島大学総合科学部助教授開発一郎先生と大学院生坂井紀之氏（現在気象協会）、観測器材をお貸し下さった広島大学工学部助教授成田健一先生および

び観測に参加された広島大学総合科学部学生諸氏に感謝いたします。なお、本研究は日産科学振興財団研究助成金（代表福岡義隆）の一部を使用して行われた。

文 献

- Cleugh, H. A. & Oke, T. R. (1986) : Suburban-rural energy balance comparisons in summer for Vancouver, B. C. *Boundary-Layer Meteor.*, 36, 351-369.
- Fuggle, R. F. & Oke, T. R. (1976) : Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere (I) Above roof-level. *Boundary-Layer Meteor.*, 10, 113-120.
- Kalanda, B. D. & Oke, T.R.(1980): Suburban energy balance estimates for Vancouver, B. C. using the bowen ration-energy balance approach. *J. Appl. Meteor.*, 19, 791-802.
- 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.
- Landsberg, H. E. (1981) : *The urban climate*, Academic Press, New York, 275pp.
- 成田健一・関根 毅 (1991) : アスファルト舗装面の表面温度と熱収支の解析—試験地表面による土壌面との長期比較観測—. *地理学評論*, 64, 125-137.
- 成田健一・松下嘉宏 (1992) : 建築物屋上面の熱収支と風環境に関する実測研究 (その1). *日本建築学会中国支部研究報告集*, 17, 165-168.
- 成田健一・関根 毅・徳岡利一 (1984) : 都市地表面物質の熱特性—アスファルト舗装面における熱収支の研究. *地理学評論*, 57A, 639-651.
- Nunez, M. & Oke, T. R. (1976) : Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere (II) Above an urban canyon. *Boundary-Layer Meteor.*, 10, 121-135.
- Nunez, M. & Oke, T. R. (1977) : The energy balance of an urban canyon. *J. Appl. Meteor.*, 16, 11-19.
- Oke, T. R. (1978) : *Boundary Layer Climates*. Methuen, London, 372pp.
- Oke, T. R. & McCaughey, J. H. (1983) : Suburban-rural energy balance comparisons for Vancouver, B. C. : An Extreme Case ? *Boundary-Layer Meteor.*, 26, 337-354.
- 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.
- 高橋日出男・福岡義隆 (未発表) : 都市域における風速の鉛直分布とヒートアイランドの立体構造。
- 浦野良美・渡辺俊行 : 水平屋根スラブの外表面顕熱収支測定と伝熱応答解析。日本建築学会論文報告集, 325, 93-103.
- 山下脩二 (1975) : 都市の放射収支に関する一考察. *地理学評論*, 40, 731-741.
- Yap, D. & Oke, T. R. (1974) : Sensible heat fluxes an urban area Vancourve, B. C. *J. Appl. Meteor.*, 13, 880-890.
- Yoshida, A., Tominaga, K. & Watatani, S. (1991) : Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season. *Urban Climate, Planning & Building*, 1, 417-423.