

東京都心部ビル屋上の気象観測に基づく熱環境の評価

吉 門 洋*・近 藤 裕 昭*・亀卦川 幸 浩**

要 旨

都市の熱環境とエネルギー消費構造の相互関係を解明し、改善の道を探るための統合数値モデルの開発・検証に有用なデータを得るため、東京都心のビル街の屋上で気象要素を測定した。超高層ビル街と近辺の大規模緑地縁辺部における1996年夏の観測では、ビル街の気温と緑地縁辺の裸地上の気温の対照的な変動が典型的にとらえられた。また、比較的均質な中高層ビル街で1998～99年に行った年間継続測定から、屋上面熱収支を主要項別に見積もることができた。四季の典型的な快晴日各1日における比較によれば、ビル表面の加熱による顕熱放出や壁体の蓄熱による午後から夜間にかけての再放熱は夏に格別大きいわけではなく、むしろ春の方が大きかった。熱収支残差として求めた表面の顕熱フラックスと、高さ2.5 mにおいて渦相関法で求めた顕熱フラックスとは、風速・乱流測定に理想的とは言えない屋上空間にもかかわらず、昼間の変動パターン・大きさとも基本的によく一致した。上向きの顕熱フラックスと(表面温-気温)の比 α は、通常観測された風の範囲内(概略 6 ms^{-1} 以下)では風速の一次関数となり、この関係を上記の数値モデルに用いて顕熱フラックスを見積もることの合理性について確証が得られた。

1. はじめに

近年、都市の高温化が及ぼす影響がさまざまな側面から問題とされ、その実態解明や対策が課題とされるようになった。関係する研究・技術分野は多岐にわたり、その各分野で数え切れない成果発表が行われているが、特に高温化と冷房によるエネルギー消費増大の悪循環に関心が持たれている。この関係を解明し、悪循環を緩和する方策を検討する手段として、著者らのグループは、①ビルや街路の性状を反映させて都市のビルキャノピー層の気象条件を求めるモデル、②ビル壁を貫通する熱や換気、ビル内のエネルギー消費・発熱と冷房効率を結びつけるモデル、を統合した高温化対策評価手法の開発を進めてきた(近藤・劉, 1998; 亀卦川ほか, 2001; Kondo and Kikegawa, 2003)。並行して、この統合モデルの検証に使えるデータを得るため、東京都心部のビル街で気象要素の測定を行っ

た。

都市での気象測定ではデータの空間的代表性の問題があり、観測結果を評価モデルに関連づけるには注意が必要である。すなわち、都市の気象条件は路上から屋上まで、また植栽配置等により一様でなく、建物形態や配置によっても異なり、都市の中心部と周辺部でも異なる。それらの空間構造やそれに伴う現象を詳細に表現できるモデルであれば、どのような場所の測定データであっても、対応するモデル空間の計算値と比較検証できるが、現状のモデル空間は単純化されているため直接比較はできない。そこで、比較検証を行うには何らかの観点が必要になる。例えば、

(1) 過去の例も含めた測定例の積み重ねの上に立って、データの代表性や分布特性に関するさまざまな規則性を抽出し、モデルによる再現を図る。

(2) 均質に近い都市構造での測定、あるいはリモートセンシング等により空間平均された測定データによりモデル化を図る。

(3) 都市構造のうちの局所的な部位にしぼった測定結果をモデルの各部位に活用し、総合化する。

諸都市におけるヒートアイランド発現の実証は概し

* 産業技術総合研究所環境管理研究部門。

** 富士総合研究所。

—2001年1月30日受領—

—2002年9月13日受理—

て(1)の観点で行われてきたと言えよう。しかし、定量的で精密なヒートアイランドの強弱などの議論は(1)の範囲では難しい。

最近では、神田ほか(2000a, b)により都市域の比較的均質な街区における接地境界層の熱構造を観測的・理論的に把握する試みがあるが、(2)の観点に立つものと考えられる。このような手法によって数百 m スケールを代表する都市気象の把握が容易になれば、系統的な理解の進展が期待される。

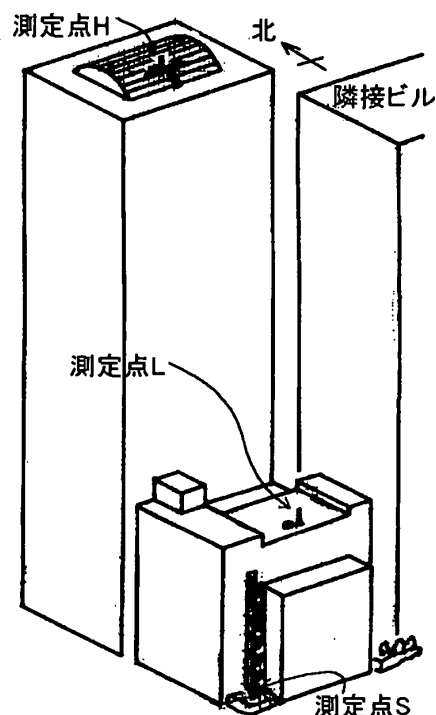
著者らのグループが行ってきた前述のモデルシステムの開発においては、個々のビルの周囲と内部の熱環境を対象とするため、(3)の観点を中心に測定を計画した。当初、東京新宿等で数回の短期観測をくり返した。しかし、短期局所的観測ゆえの断片的な特徴を把握するにとどまったきらいがあり、むしろ観点(1)のデータ蓄積に属するものとなったが、超高層ビル街の一典型である新宿の夏季の気温変動の特徴を紹介しておきたい(第2章)。その後、旧来の東京都心である大手町のオフィスビル屋上で16か月余りにわたる継続観測が実施できた。単一ビルにおける測定例とはいえ、都心ビル屋上の熱環境に関するまとまったデータとなり、ある程度系統的な解析を加えることが可能になった。その屋上面の熱収支の特徴を季節別に抽出して紹介し(第3章)、モデルの検証や同様の観測が行われる際の比較に供したい。さらに第4章では、屋上面の顕熱放出の特性を、上記の統合モデルにも用いた既存の式との比較で検証する。

2. 高層ビルと近辺の夏季の気温変動特性

2.1 観測概要

東京の新都心地区と呼ばれる新宿駅西側の超高層ビル街は30～50階前後のビルで構成されている。その街区の南寄り外縁部に位置する30階建相当のビル(工学院大学)で1996年7月下旬から8月上旬まで短期継続的な気象観測を実施した。測定場所として30階屋上(地上133 m)、およびこの高層棟の南に接する低層棟の8階屋上(同34 m)および外壁非常階段手摺(街路上約2 mの人工緑地上1.5 m)を利用し、気温その他を測定した(第1図参照)。

30階高層屋上は29階から吹抜け構造の天井桁組上での測定であり屋上面の直接の影響は小さいと考えられる。低層側は屋上面から2.5 mに温度計を設置し、また、放射温度計により屋上面温度を測った。ビルの南隣りは平地の駐車場が広がっているため、低層屋上で



第1図 1996年夏季の高層ビル観測見取り図(東京・新宿)。

も、また低層南面の非常階段でも日照はかなり確保され、朝夕に他のビルの日陰になる時間が多少長いだけである。

これらと並行して約1.5 km離れた大規模緑地(新宿御苑)の北側外縁部の裸地でも気温(4 m ポール上)や地表面温度を測定した。

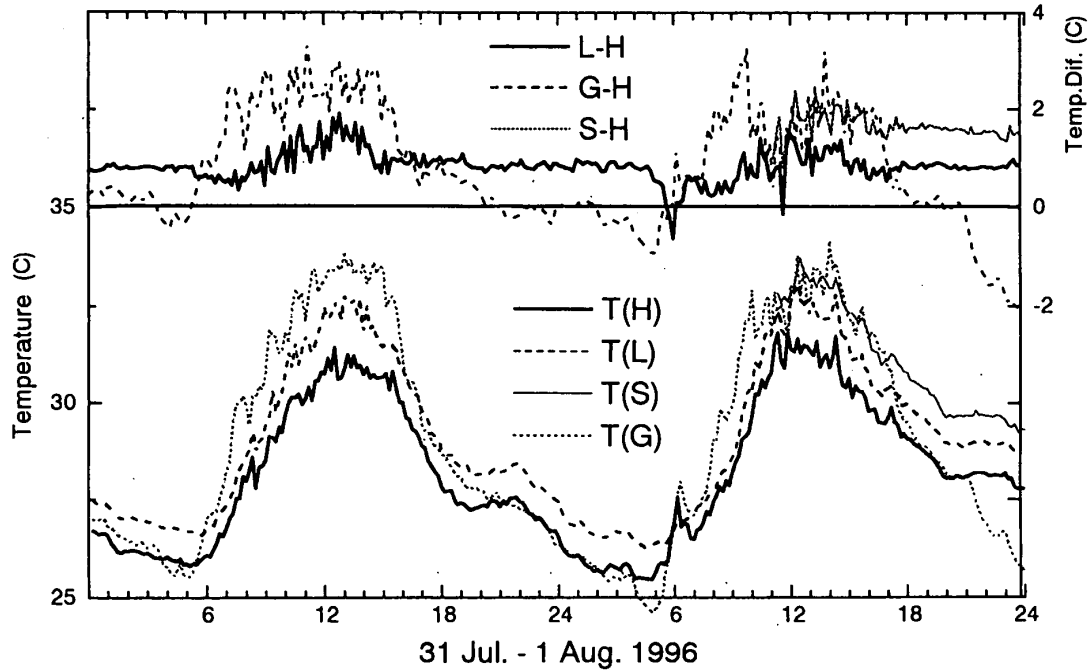
ここでは主にこれらの気温の分布と変動特性を比較し、ビル周辺の気温分布の特徴とビルの影響を把握する。全天日射計、赤外放射計、放射収支計を30階と8階の両屋上に置いたが、ここでは30階の赤外放射計データのみを用いる(第3図の下向き長波放射)。

2.2 気温の分布と変動

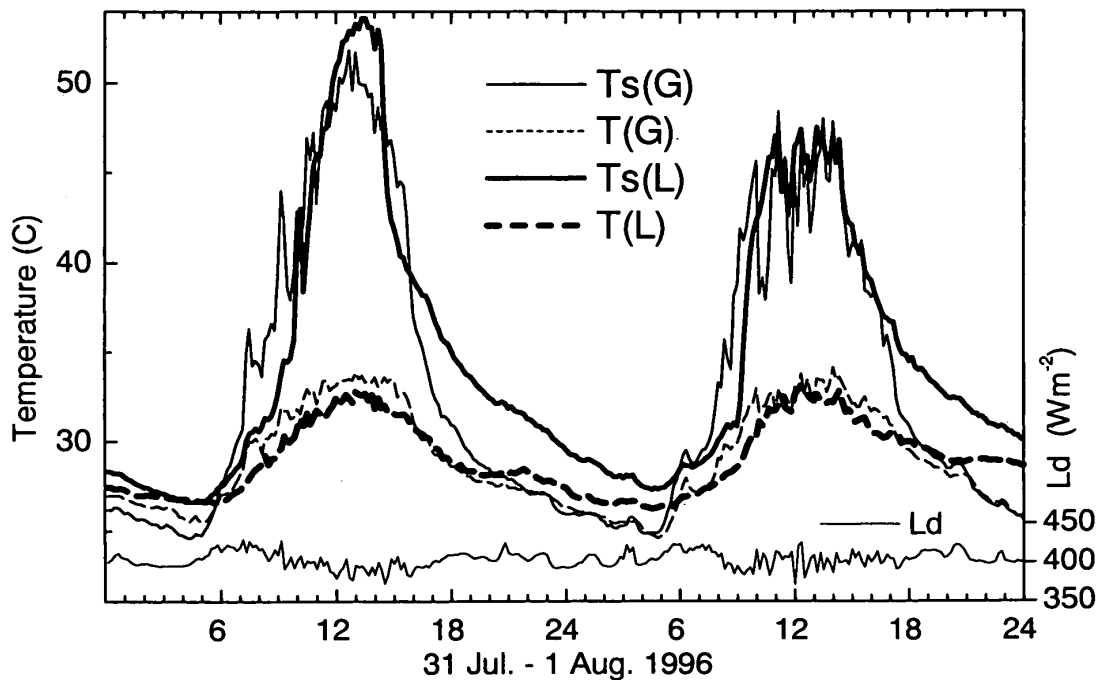
観測期間のうち、8月2日の夜以降は強い寒気の流入により天候不順となった。それ以前で比較的雲が少なく、データの欠測も少なかった7月31日と翌8月1日のデータに注目する。

高層屋上の測定位置は、前述のとおり屋上面の直接の影響をそれほど強く受けないと考えられる。無風ないしそれに近い微風時にはビル体の影響、それ以上の風速下では周囲のビル街の影響をも拾いつつ、ある程度広範囲の地上130 mの都市境界層の構造を反映するであろう。

低層屋上(L)の気温は、高層ビル街のキャノピー層の状況の一端を示し、特に屋上面の影響を強く受けて



第2図 東京・新宿の高層ビル周辺における夏季2日間の気温（下段）と気温差（上段、右目盛）。測定場所はビル高層屋上（H）、低層屋上（L）、街路近傍（S）および近隣地区裸地上（G）。



第3図 第2図と同じビル低層屋上（L）と裸地上（G）の気温 T ・表面温度 T_s 、および下向き長波放射 L_d （右目盛）。

いる。その様子を高層（H）との対比で見ると第2図のようになる。気温は屋上面・壁面の影響を受けながらも、高層と低層の高度差約100 m に対応してほぼ1°C の差を保ち、混合による等温位層が形成されているこ

とを示す。ただし、詳しく見ると夜間の気温差は1°C より小さくやや安定成層で、日出（04時50分ころ）後4時間ほどはさらに気温差の小さい安定成層になり、その後14時ごろまでは不規則に変動しつつも概して不

安定成層になっている。

地上 (S) のデータは第 2 図の第 2 日後半しかないが、低層屋上との間は高度差約 30 m で 0.7°C 程度の不安定成層をベースに、やはり正午前後は強い不安定成層が出現している。

これに対して裸地上 (G) の気温は、日中はビル街の地上と同等である一方、夜間はビル高層よりも低下する。これは気温が地表温度の低下によく追従した結果である。第 3 図に示すように、夜間のビル表面温度は裸地表面温度より数度も高く、もし裸地上の大気がビル街の影響を受けておれば、その気温が裸地表面温度にこれほど追従することは期待できない。実際、この場合の夜間の風速は 1 ms^{-1} に達しない程度の微風で、風向も南に広がる緑地から北側のビル街に向かっていた。

なお、裸地における夜間の短周期温度変動は、第 3 図に添付した下向き長波放射との対応から想像されるように、雲が通過すると下向き長波放射が増加して表面温度が上昇することによる。ただ、これは長波放射率を 1.0 と設定した放射温度計による裸地の表面温度であり、もしこの裸地の放射率を 0.95 だったとすれば、下向き長波放射が 30 Wm^{-2} 増加するとそれだけで見かけの表面温度上昇 0.24°C を与えてしまう。しかし、第 3 図では夜間の短周期変動の振幅は 0.8°C 程度に達しているうえ、その変動が気温にも伝搬していることから、表面温度変動が見かけのみではないことがわかる。また、これは長波放射が直接的に表面を温めるということではなく、① まず下向き長波放射の増加が正味の上向き放射を減少させ、表面の放射冷却を弱め、② その結果、放射冷却を補償していた地中から表面に向かう熱流が過剰になって表面温度が上昇する、という熱収支各項のバランス変化として説明できる。

表面の熱収支に関しては、第 3 章でビル屋上面のそれを詳しく解析する。

2.3 新宿観測結果の考察

前節の結果からは以下のような考察ができよう。第 2 図の気温差の時間変化から、日出後の数時間には高層の方が顕著な加熱があり、正午前後には低層の加熱の方が顕著になることがわかる。朝方の高層の加熱は、低層ではまだ日射の入らないビルや街路が多いのに比べ、高層の屋上や外壁に十分な日射がある結果であろう。なお、高層ビルでは屋上付近から大きな人工熱を放出している例が多く、それもビル内の活動が始まる朝方に特に大きいことも、高層での気温上昇に影響し

ている可能性がある。正午前後にはビル低層や街路にも日射が入り、その表面積は高層ビルの高層部のみの表面積に比べて大きいことにより顕著な昇温となる。また、風速が日中は増大するため、高層では風による冷却効果が相対的に大きく働くことも推定される。

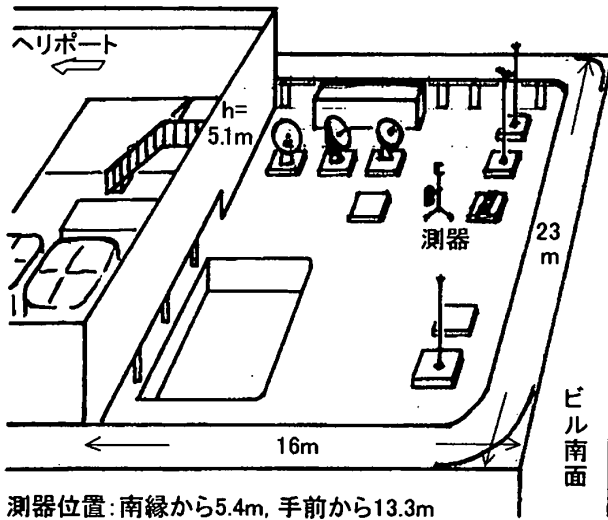
新宿の超高層ビル街の一角で測定した気温・表面温度の二、三の特徴と解釈について述べたが、しかしここで得たデータの範囲で低層・高層データ相互の関係の厳密な解析を行ったり、そのモデルシミュレーションに進むことはできない。この観測場所を均質な街区と見なすことにはやや無理があり、高層の気温等のデータと結びつくのは同じビルの下層の放射・熱特性や乱流などのデータではなく、footprint とか source area と呼ばれる区域から運ばれる特性である (Horst and Weil, 1992; Schmid, 1994)。また、前節では緑地周辺の裸地上気温も参照したが、これも近隣区域とはいえ異なる環境の特性を示すものであり、系統的にビル街のデータと結びつけることができない。これらの総体の系統的な解析やモデル化に対応するためには、三次元的な街区構造を考慮したさらに詳細な観測配置が必要である。

それに対して、序章に述べたビル・キャノピー統合モデルで指向していたのは局所的で均質に近い街区の想定であった。そのことを踏まえつつ、本章に示したような定性的な測定事実と推定を一步進めて定量的に確かなものにするためには、高層であれ低層であれ、それを構成する要素をなす個々の表面上の局所的な熱収支を解明することが先決であり、それも種々の気象のもとで野外測定されるデータのばらつきを統計的に処理できるほど長期にわたる測定が望まれる。しかも、ビル内外の熱環境とエネルギーシステムを結びつけるモデルの検証が目的であれば、特定のビル表面にしばった測定が有効であろう。そのような意図で次章に述べる長期測定を行った。

3. 屋上面の熱収支

3.1 観測概要

旧来の東京都心である東京駅周辺のうち、特にその西側の丸の内・大手町地区には大規模なビルが多い。その中心部のオフィスビル屋上で、1998 年 8 月 1 日から 1999 年 12 月 9 日まで 16 か月余りにわたる継続的な気象観測が実施できた。ビルは地上 24 階建てで屋上面の地上高さは 100 m、ただし屋上の半分以上は半吹き抜け型の非常用ヘリポートにおおわれている。その南側



第4図 1998～99年のビル屋上観測見取り図（東京・大手町）。

第1表 測定項目・測器（1998～99年，東京大手町）。

機材・測器	場所その他
三脚付自立式2.5 m ポール 3次元超音波風速計 (98年12月から)	屋上南部中央 2.5 m ポール先端
気温湿度計 放射温度計（表面温度）	2.5 m ポールの1.5 m 高 同上変換器箱
全天日射計 赤外放射計	屋上基台上 同上
記録計用キャビネット データロガー 打点記録計 2台	ヘリポート下 キャビネット内 同上

の開けた屋上の中央部に測器類を設置した（第4図）。周囲は同規模のビルと6～10階建程度の低層ビルが存在しているが、低層ビルも敷地面積は広いものが多く、街区は整然としている。

測定項目は途中で一部変更したが、1998年12月7日以降について下向き赤外放射・全天日射・気温と湿度（高さ1.5 m）・表面温度・風向風速と乱流（高さ2.5 m）が得られた（第1表）。乱流は10 Hz で、それ以外のデータは10分間隔で収録した。

あわせて同ビルにおけるエネルギー消費データの収集も行い、気象条件との関連を解析したが（亀卦川ほか（2001）参照）、詳細は別の機会に報告したい。ここでは屋上の気象データから屋上面の熱収支の変動を評価し、屋上面を通しての蓄熱・放熱の実態把握を試みる。日射を受けるビル外壁面も屋上面と基本的な差異はないと考えられるので、これによってビル壁体の蓄熱効果の解明が期待できる。

第2表 屋上面下の壁体構造の設定。

層	材質	厚さ (cm)	熱容量 ρc ($\text{Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$)	熱伝導率 λ ($\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$)
外壁	コンクリート	13.3	1.93×10^6	1.39
中層	断熱材	5.32	0.06×10^6	0.04
中壁	コンクリート	2.66	1.93×10^6	1.39

内壁面温度 26°Cまたは16°C固定。

3.2 熱収支の算定方法

1) 各項の算定方法

ビル屋上面の熱収支を次のように表す。

$$S_{net} + L_{net} = G + (H + LE) \quad (1)$$

左辺第1項から順に正味短波放射、正味長波放射、ビル壁内への伝導熱フラックス、大気への顕熱および潜熱フラックスであり、左辺は屋上面への下向き入射を正、右辺は屋上面から熱が逃げる方向を正としてある。 G は下向き、 H や LE は上向きが正である。

(1) 式の各項を次のようにして算定する。

① 屋上面のアルベド (A) として一定値を仮定し、測定された全天日射量 S_{obs} に $(1-A)$ を掛けて、

$$S_{net} = S_{obs} (1-A) \quad (2)$$

A の値についてはこの節の3) で議論する。

② 測定された長波入射量から屋上面の長波放射量 σT_s^4 を差し引いて、

$$L_{net} = L_{obs} - \sigma T_s^4 \quad (3)$$

ここで、 $\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ 、 T_s は測定された屋上面温度 (K) である。 T_s の測定において屋上面の射出率は1としたが、この設定の誤差に伴う L_{net} の誤差は熱収支算定の精度を低下させるほどではない。精度に関する議論はこの節の3) で行う。

③ G は、この節の2) に述べる壁体内温度分布のシミュレーションの結果から、

$$G = \lambda \frac{T_s - T_1}{\Delta x} \quad (4)$$

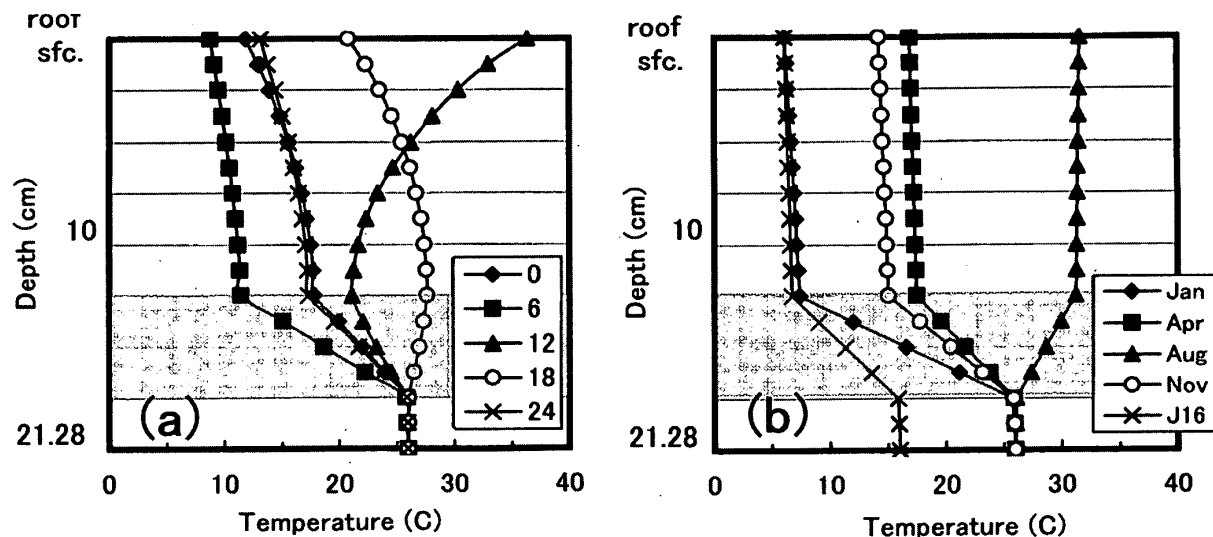
により推定した。 λ は熱伝導率、 T_1 は表面直下の格子の温度、 Δx は深さ方向の格子の刻み幅である。

④ 熱収支式 (1) の残差として $(H + LE)$ を求める。すなわち、

$$(H + LE) = S_{net} + L_{net} - G \quad (5)$$

この方法はいわば「間接法」であり、(顕熱 H + 潜熱 LE) の内訳は算定できないが、雨天時とそのあと屋上面が乾くまでの時間を除けば LE は無視できる。

この他に「直接法」として、超音波風速温度計 (SAT) の測定値から渦相関法により顕熱輸送 H_{SAT} が求めら



第5図 計算されたビル屋上壁体断面温度分布。(a) 1999年4月15日の日変化。(b) 同年1, 4, 8, 11月の平均値。内壁面(図の底辺)温度は26°C固定。1月のみ比較のため16°C固定の場合(J16)を示す。

れる。これも平均化時間10分で、10分ごとに算出した。平均化時間は通常30分程度とされるが、ここでは屋上の測定スペースがさほど広くはなく、構造物も存在するため、短く区切りながら連続的に算定して変動を見た。また、この場所では平均鉛直流はゼロにはならないが、その平均値を考慮せず水平面を基準として H_{SAT} を計算した。この算定において屋上縁辺の吹き上げ風や屋上構造を考慮しないことの影響は結果を見て判定することになる。

ちなみに SAT による鉛直流は水平風速の約5分の1(南風では上向き、北風では下向き)で、この傾きは概して風速の大きさには依存しない。

2) 屋根壁体温度のシミュレーション

屋上面下の壁体構造は第2表のように設定した。各層の厚さは設計図による厳密な値ではないが、次節3)に示す感度解析から、概括的な想定が許容されることがわかる。厚さ総計21.28 cmを各1.33 cmの16層に分割し、熱伝導式(6)、(7)を差分化して前進差分陰解法で時間増分10分で1998年11月1日から1999年12月10日の観測終了時まで数値積分した。

$$\rho C \frac{\Delta T_i}{\Delta t} = \frac{G_i - G_{i+1}}{\Delta x} \quad (6)$$

$$G_i = \lambda \frac{T_{i-1} - T_i}{\Delta x} \quad (7)$$

$$(i = 1, \dots, 16)$$

ここで、 T_0 が測定された屋上の表面温度 T_s 、 T_{16} が内壁面温度に対応する。

3) パラメータ設定値の影響と結果の精度

前節に述べた方法で屋上面熱収支を算定したとき、仮に設定した諸パラメータの値が変わると結果がどれほど影響を受けるか検討する。

① 屋上面のアルベド

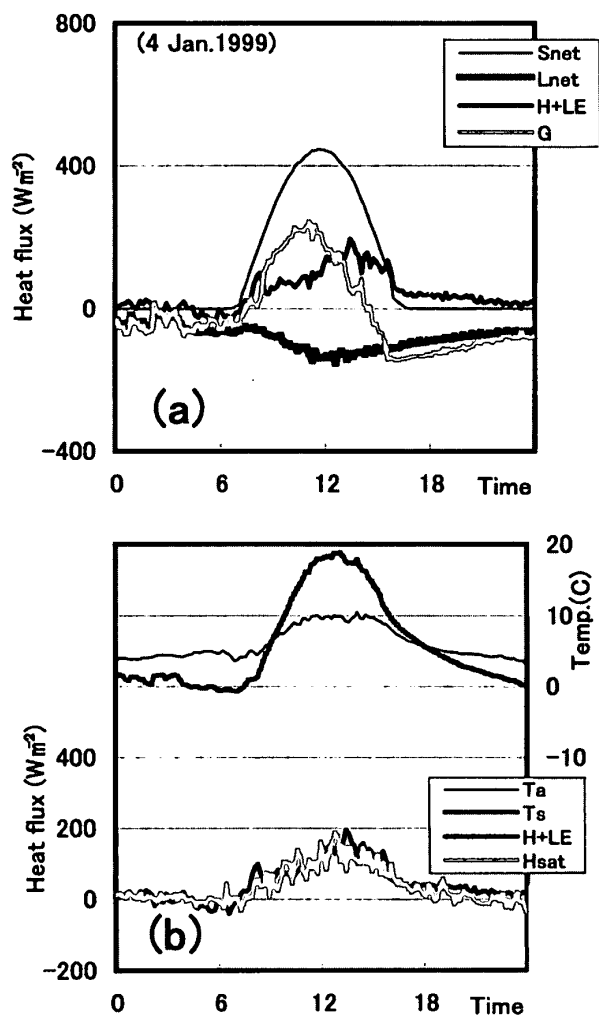
Aの精密な現地測定はできなかったが、目安として2台の日射計を用いた測定では0.18~0.20前後と推定された。

Aをモデルのパラメータと考え、結果に与える感度を考察してみよう。0.18~0.22の範囲の一定値を仮定すると、その値によって式(2)の S_{net} が中央値から $\pm 2.5\%$ 変化するが、 L_{net} と G は影響を受けないので、 S_{net} の変化はそのまま式(5)で $(H + LE)$ に反映する。晴天日の昼間はほぼ $LE = 0$ と見なせ、 H は一般に S_{net} の30~40%に達するため、Aの設定値によるHの変化の割合は相対的に小さい。それでもこの想定ではHの誤差が最大8%程度(S_{net} の30%に対する2.5%)となるが、その誤差は結果にランダムな不正確さを与えるものではなく、系統的なずれの誤差として表れる。以下では $A = 0.2$ を採用した。

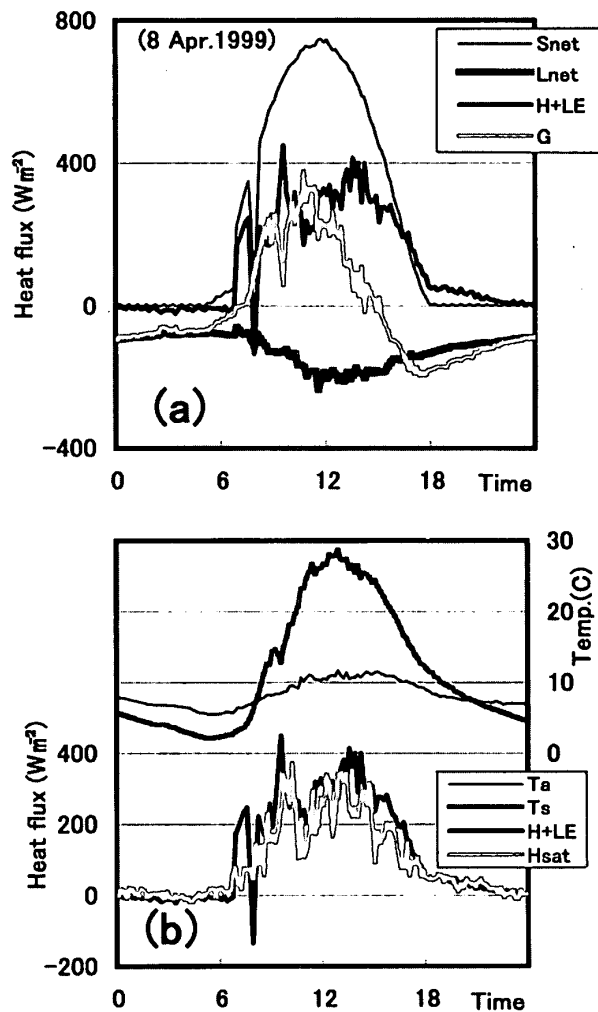
付言すれば、本章における熱収支各項の算定の精度は、このAの精度や前述(この節の1)②)の射出率の非厳密性に支配されている。上述のように S_{net} の2.5%とすると最大20 $W m^{-2}$ 程度であり、逆に言えばそれが本解析の目標精度である。

② 内壁面温度

26°C固定とした計算で得られる壁体断面温度分布の



第6図 (a) 快晴日1999年1月4日のビル屋上面の熱収支各項の日変動, (b) 顕熱項 H の直接法 H_{SAT} との比較, および気温 T_a と屋上面温度 T_s .



第7図 第6図と同じ。ただし同年4月8日。

3.3 熱収支の算定結果

1) 熱収支各項の季節別バランス

1999年の四季の快晴日を選び, それぞれの熱収支各項を第6図～第9図の上段に示す。

(a) 1月4日は北日本を除き冬型が緩んだ穏やかな好天日,

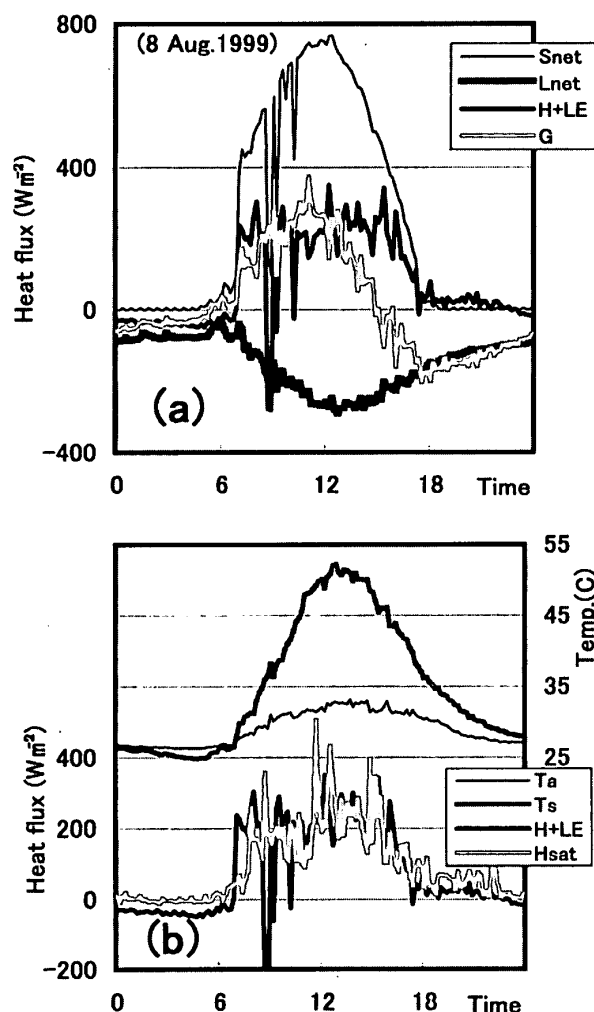
(b) 4月8日はやや冷え込んだ移動性高気圧の接近日,

(c) 8月8日は東から伸びる太平洋高気圧におおわれた日,

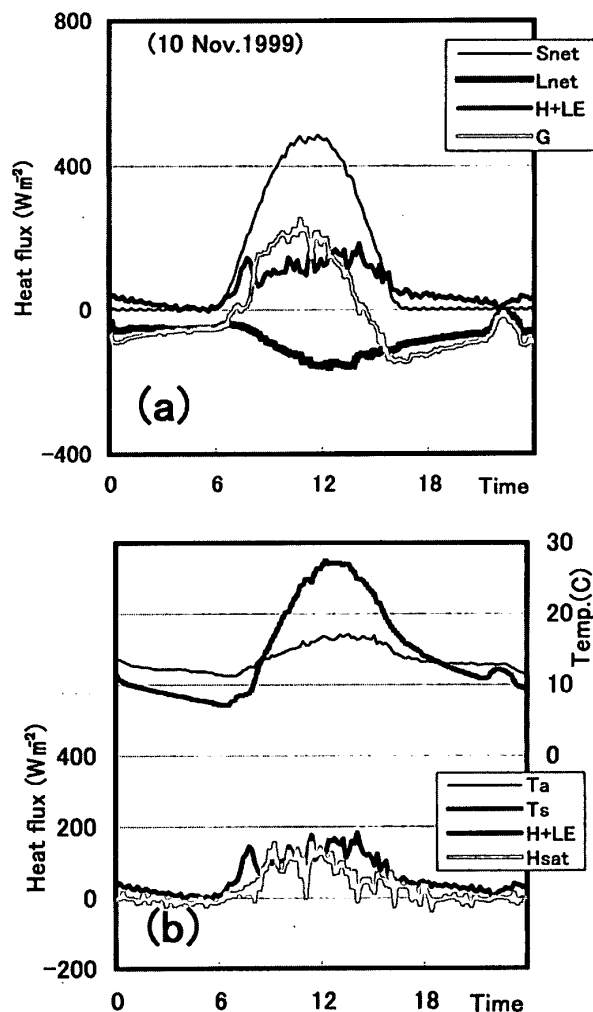
(d) 11月10日は移動性高気圧が通過した日であった。

図の縦軸の正方向は, S_{net} と L_{net} は下向き, G も下向き (ビル内向き) を表し, $H (+LE)$ は上向き (大気加熱) を意味する。ここに示した好天日では $LE = 0$ と見なせる。日射に支配される S_{net} の大きさや持続時間には各季節の特徴が表れている。 L_{net} はどの季節も負

例を第5図 a, b に示す。4月15日を例として (a) 実測屋上面温度変動に伴う日変化を見ると, 外壁層内の大きな変動は中間断熱層の大きな温度勾配で吸収され, 内壁層内の変動は極めて小さいことがわかる。月別平均 (b) で見た年変化でも, 大きな温度勾配が中間断熱層に集中し, 外壁層内の温度分布が内壁層の温度に引きずられている兆候はほとんど見られない。実際に1月について内壁面温度を16°Cに設定した結果も示すように, 外壁層内温度, 特に外壁面直下の温度勾配に対して, 内壁面温度の10°C程度の変化はほとんど影響しないと考えてよい。このシミュレーションで評価したいのは外壁面直下の温度勾配から得られる伝導熱フラックスのみであるから, 内壁面温度が昼夜や季節によってどのように制御されているかは考慮せず, 年間26°C固定でシミュレーションした結果を採用する。



第8図 第6図と同じ。ただし同年8月8日。



第9図 第6図と同じ。ただし同年11月10日。

で、特に表面温度が高い夏季の日中に上向き放射が大きく、正午ごろに S_{net} の40%近くを逃がしている。残りの熱が下向きの G による壁体加熱と H による大気加熱に消費される。しかし、季節によらず15時には日射の減少により表面温度が低下して、むしろ壁体内部の方が高温になるため、 G が負（上向き）に転じ、そのまま夜間にかけて負の L_{net} による表面からの熱放散を補償することとなる。これがビル壁体の蓄熱効果として表面温度の低下を遅らせ、夜遅くまで H を上向き（大気加熱）に維持する働きをしている。なお、秋（第9図）の22時ごろ一時的に L_{net} と G がゼロに近づいたのは雲の影響と考えられる。

各項の日積算値を求めたのが第3表である。選んだのが各季節の快晴日の典型ではあっても、日射量も熱収支各項も日を追って変化する中では、表中の数値を各季節の典型と考えるのは必ずしも適当ではない。しかし、 L_{net}/S_{net} の割合が冬に最も大きいこと、 H/S_{net}

が春に大きいこと等の特徴に気付く。前者は、冬は日射が弱いのに、その加熱の4分の3が長波の放射過剰による冷却で逃げてしまうことを意味する。後者は、日射が冬の2倍にもなる春に、その加熱の2分の1が大気に移動することを意味する。

G は正午前を中心に壁内部に向かい、夕方を中心に壁内部から表面に向かうため、日積算値は各季節とも比較的小さい。小さいながら、夏に日積算値が正であるのは平均的に壁体を通して熱がビル内に流入していることを示し、他の季節は逆にビルから外向きに熱が逃がっている。一日のうちで G が正（内向き）となる朝から15時ごろまでの時間帯のみで積算したのが G_+ である。それは夏に最も大きく、日射がそれだけビル壁体の加熱に使われることを意味するが、その一部は前述のようにビル内に流入してしまうため、壁体の蓄熱が再び外面に放熱される量 G_- ($\equiv G - G_+$) は夏でも秋や冬と大差なく、むしろそれは春に大きい。これは、

第3表 四季別典型快晴日 (1999年) 屋上面熱収支各項の日積算値 (MJm^{-2}).

	S_{net}	L_{net}	G	$H (+LE)$	G_+/G_-	L_{net}/S_{net}	G/S_{net}	H/S_{net}
冬 (Jan. 4)	9.5	-6.9	-1.4	3.9	3.3/-4.7	-73%	-14%	41%
春 (Apr. 8)	19.6	-10.6	-1.2	10.2	4.7/-5.9	-54	-6	52
夏 (Aug. 8)	20.4	-12.7	1.0	6.7	5.6/-4.6	-62	5	33
秋 (Nov. 10)	11.0	-7.0	-1.1	5.2	3.6/-4.7	-63	-10	47

注1) $S_{net} + L_{net} = G + (H + LE)$: 左辺は入射がプラス, 右辺は表面から逃げる向きがプラス.

注2) G_+ : G が壁内部に向かう朝から15時ころまでの積算値. $G_- = G - G_+$.

第4表 四季各1か月平均 (1999年) 屋上面熱収支各項の日積算値 (MJm^{-2}).

	S_{net}	L_{net}	G	$H (+LE)$	L_{net}/S_{net}	G/S_{net}	H/S_{net}
冬 (Jan.)	8.1	-5.9	-1.2	3.4	-73%	-14%	42%
春 (Apr.)	11.4	-6.6	-0.5	5.3	-58	-4	47
夏 (Aug.)	14.1	-8.6	0.3	5.2	-61	2	37
秋 (Nov.)	7.3	-4.3	-0.8	3.8	-59	-11	52

注1) 11月のみは1~9日, 20日が欠測のため除外し, 20日平均とした.

冷暖房を伴う室内温度と比較した外気温が夏には高く, 春にはかなり低い事実を見れば意外なことではない.

以上の事実はあくまでも各季節から快晴日各1日を拾い出して比較した結果であり, 季節平均ではない. そこで各典型日を含む1か月の平均を求めてみた (第4表). 典型快晴日に比べて S_{net} が減ることに応じて各項とも小さくなるが, それらの比率は典型快晴日と基本的に一致する.

念のため, 内壁面温度を 26°C に固定したことの影響について述べておきたい. 例えば, 春の内壁面温度は現実には 26°C より低いとすると, 壁体を通じたビル外への放熱 (G とか G_- , 符号は負) は本算定結果より小さくなる. しかし, 内壁面温度を 16°C に固定した場合でも, 26°C 固定の場合に比べて表3中の単位で G は0.6, G_- は0.4減る (0に近づく) だけであり, 夏よりも春の方が放熱が大きい等の事実は変わらない. なお, この単位 ($\text{MJm}^{-2}\text{day}^{-1}$) で1.0は 11.6 Wm^{-2} であり, 前述した本解析の許容誤差 20 Wm^{-2} に比較すると厳密な議論であるが, 季節差には系統誤差が影響しないうえ G の評価は他項と独立である故にそれが可能である.

2) 屋上の顕熱フラックス

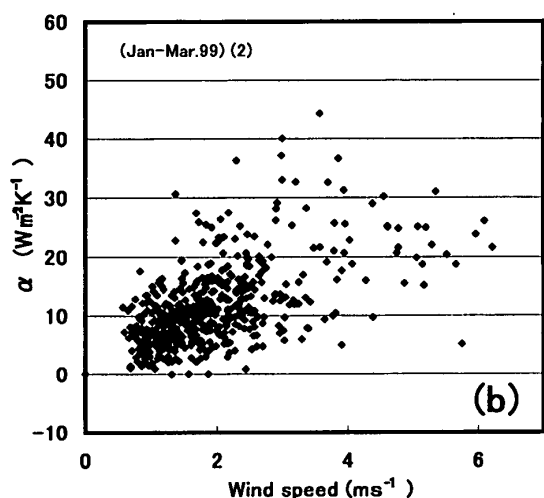
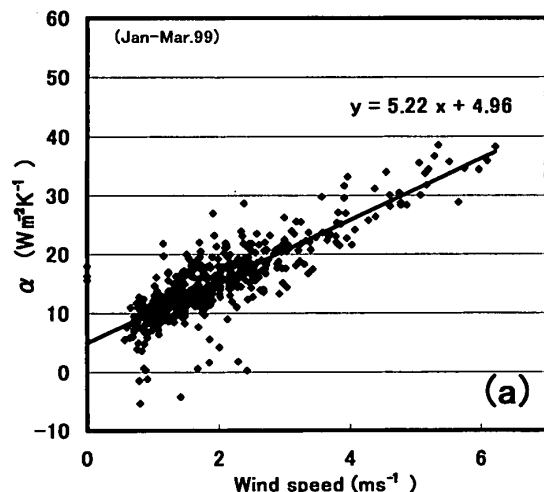
顕熱フラックス H を第6図~第9図の下段にも示し, 直接法による H_{SAT} と比較する. H は屋上面の熱収支の残差として (間接法) 得られたのに対し, H_{SAT} は2.5 m 高度に対応するものであるが, 両者は基本的に

よく一致する. 夜間は両者ともほぼゼロになるが, ただ夏季の H のみは深夜から明け方にかけては負値 (下向き) になっている. 気温が表面温度より高いため熱伝達が下向きでも異常ではない. しかし, 他の季節には夜間の気温が大幅に表面温度を上回っているにもかかわらず H もゼロに近いことを考え合わせると, 特に夏季の夜間のみ H の負値が目立つ理由はない. 先に目標精度は 20 Wm^{-2} と述べたが (3.2節の3)), 残差法では他項の誤差が集積されるため, ここではたまたま 40 Wm^{-2} 程度の誤差を伴っているとも解釈される.

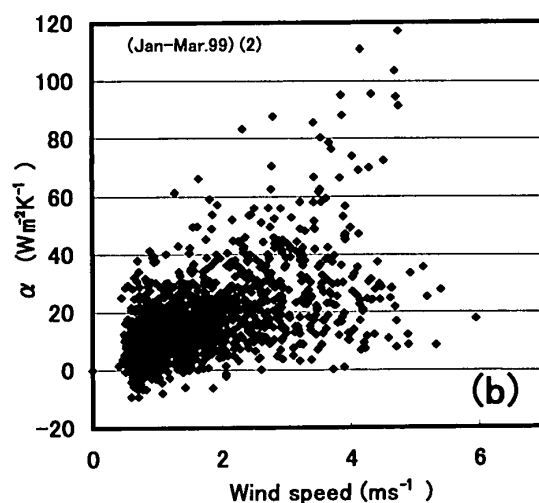
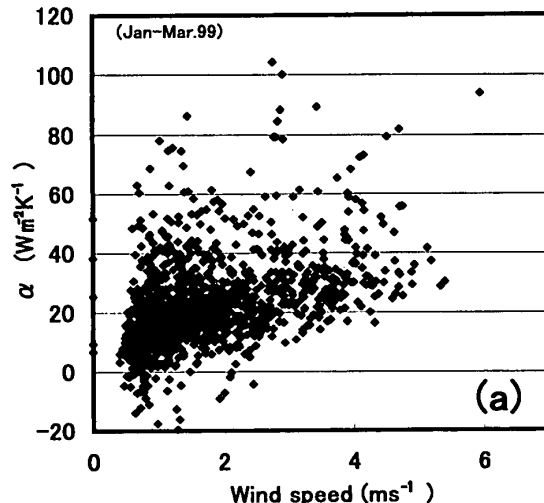
一方, 直接法 (渦相関法) も, 間接法の H との対応を見るのであれば, 屋上面の上の水平一様な境界層で鉛直流の平均値がゼロとなるような場所で測定するのが理想的であり, 3.2節の1) の最後に述べたように屋上縁辺の鉛直流等が影響している H_{SAT} がどれほど参考にし得るものかわからなかった. しかし, 間接法と直接法による時間変化の様相がほぼ一致することから, 速断はできないが, 両者とも評価位置の違いにそれほど関係せずビル屋上の測定点周りの顕熱フラックスの特性を把握し得ていると言えよう.

4. 顕熱フラックスの評価法

ビル表面からの顕熱フラックスが屋外熱環境に及ぼす影響が問題となるのは, 夏季晴天時の昼間など, 主に顕熱フラックスが上向き, より一般的に言えば, 気温以上に加熱されたビル表面から大気に向かうときで



第10図 (a)屋上高さ2.5 mの風速 U と $\alpha = H/(T_s - T_a)$ の関係, (b) U と $H_{SAT}/(T_s - T_a)$ の関係. ただし $T_s - T_a > 10$ (K) の場合.



第11図 第10図と同じ. ただし $2 < T_s - T_a \leq 5$ (K) の場合.

あろう. そのような状況における顕熱評価法に Jurges の式 (例えば田中ほか (1993) 参照) があり, 特別に風速が大きくない条件 ($\leq 5 \text{ ms}^{-1}$) では次のように表される.

$$H = \alpha (T_s - T_a), \quad \alpha = 5.8 + 4.0U \quad (8)$$

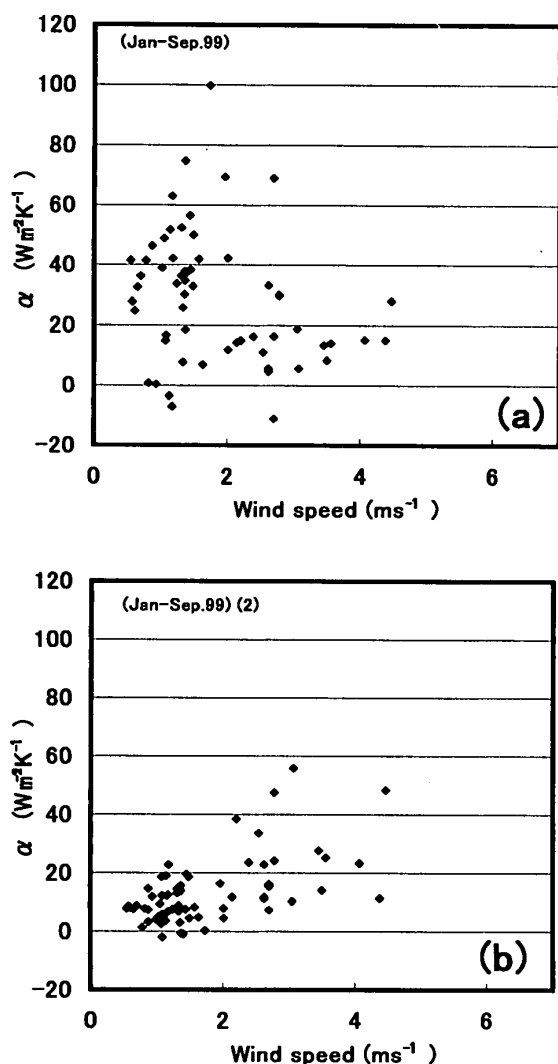
この式は, H が表面温度 T_s と気温 T_a の差に比例する, という平明な推論に基づき, また $\alpha (\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1})$ は風洞実験によりその基本風速 $U (\text{ms}^{-1})$ の一次関数として係数が与えられている. U と α の直線関係は野外測定でも知られている. 例えば吉田ほか (1989) はビル外壁の鉛直面で良好な一次関係を得ている. 前章で算定された H あるいは H_{SAT} がこの種の式をどのように満たすかに関心が持たれる.

式 (8) と同様の結果が得られたとしても目新しい事実とは言えないが, それを確認することにより前章の

H の算定法の検証ともなり, この種の式を顕熱フラックス評価に用いることの補強にもなる. というのも, 今日では境界層の構造は専ら Monin-Obukhov 則で表現されるが, 立体構造を持つビルの各表面上に Monin-Obukhov 則を適用することには困難が感じられるからである.

そこで, $0 < T_s - T_a \leq 2$ (K, 以下同じ), $2 < T_s - T_a \leq 5$, $5 < T_s - T_a \leq 10$, $10 < T_s - T_a$ の場合に分けて U と $\alpha (= H/(T_s - T_a)$ または $H_{SAT}/(T_s - T_a))$ の関係を調べた. $T_s \leq T_a$ の場合は除外した. U には SAT の10分平均値を用いた.

間接法で求めた $H + LE$ のうち, 大まかに $LE > 0$ の場合を除去するため, 約600 m離れた東京アメダスの降水量データに時間雨量 1 mm 以上の記録のある場合はその1時間とそれに続く1時間は除外した. 1時間では必ずしも屋上面が乾燥せず, $LE > 0$ の場合も混



第12図 第11図と同じ。ただし降雨後2～3時間のみ。

入する可能性はあろう。しかし、屋上面が未乾燥の状態では $T_s \gg T_a$ となることは頻繁には起きないと考え、まず $10 < T_s - T_a$ の場合に注目していくこととする。ちなみに、降雨後1時間以降も屋上面が未乾燥の可能性が残る2～3時間目のデータの分析結果について後にふれる。

データ期間としては、諸測定データが完備していた1999年1月から9月まで、10分単位の全有効データを解析に用いた。10月以降は赤外放射計や風速計の欠測期間が交錯したので除外した。また、9か月間を一括するとデータ数が余りに膨大になるため、3か月ごとに区切って解析したが、季節により大きな差異はなかったため、以下では1～3月の結果のみを示す。

第10図の上段に明瞭に見られるように、 U と α の間には確かに直線関係があり、この場合

$$\alpha = 5.0 + 5.2U \quad (9)$$

と表せる。 $T_s - T_a$ が α の算出式の分母となるため、当然ながら $T_s - T_a$ が小さくなるとその誤差が大きく反映し(第11図)、関係は不明瞭になるが、概して同じ式(9)の直線に乗っている。

第11図と同じ条件で、降雨後2～3時間のみを抽出したのが第12図である。ただし該当するデータが少ないため、期間は1～3月から1～9月に拡張した。間接法の H に対する α はばらつきが大きく、降雨後2～3時間では屋上面が乾ききらないために LE の無視が誤差の一因となっている可能性を示している。

第10図に戻ると、間接法の H を用いた上段(a)に比べ、直接法の H_{SAT} を用いた下段(b)では、 U の増大につれてばらつきが増す。前節の末尾では H と H_{SAT} の様相がほぼ一致することに注目したが、 α の性質として見ればこのような差異が目立つ。これは、 H が屋上面での評価であるのに対して、 H_{SAT} は高さ2.5 mの乱流からの評価であるため、 U が大きくなるとともに H_{SAT} の footprint が屋上面の範囲に収まらなくなるためであろう。横風方向だけでなく、屋上縁辺でビル壁に当たって吹き上げる鉛直流の影響も拾っていると考えられる。また、 H_{SAT} ばかりでなく、SATで測定された U 自体もビル縁辺や背後の屋上構造物の影響を受ける。

にもかかわらず、通常出現した風速の範囲において、 H および H_{SAT} に関してともにほぼ式(9)の関係が認められることは興味深い。それは、① 多少の係数値の違いを除けば基本的に Jürges 式が成り立つということであり、② 10分刻みという短時間の評価では $H = H_{SAT}$ が十分に成り立たないにしても、前章の最後部分に述べたように、各季節と日変化の様相は H でも H_{SAT} でも同様にとらえられたことに通じる。

ビル屋上構造の影響を定量的に表現するのは難しいが、この測定場所に関する限りはその影響のもとでも、 H の評価位置(屋上面)と H_{SAT} のそれ(高さ2.5 m)の間に constant-flux 層の概念を見いだせると言えよう。また Jürges 式中に用いる U の測定位置として、この場所での測定高さ2.5 mは高過ぎず、許容限度内であったと言えよう。逆にもっと低高度での測定であれば、2.5 m との間の風速比に応じて Jürges 式の係数が変わることになる。風速比が成層の安定度により変化すれば Jürges 式の係数値も保たれないことになるが、Jürges 式にはもともとそこまでの厳密性は期待できない。先に述べた本解析の目標精度 20 W m^{-2} 程度の議論でなら可能ということである。

5. まとめ

東京都心の二地区にそれぞれ位置するビル屋上において気象要素を観測した。そこから解析された熱環境特性のいくつかを紹介した。付随的にビル街に囲まれた大規模緑地周辺の裸地上のデータにもふれた。主な特徴をまとめると以下になる。

1) 新宿の高層ビル街での夏季の観測から、地上から30階相当(地上133 m)までの気温分布は昼間は変動しながらも概して不安定成層となり、夜間はほぼ等温位になることがわかった。これは、近隣の緑地周辺の裸地で昼間はビル街の地上と同等に昇温するにもかかわらず、夜間は地表の放射冷却により安定成層が形成されるのと対照的であり、ビル街の放射冷却の弱さと鉛直混合の効果がうかがわれる。

2) 丸の内・大手町地区の中高層ビル街での継続的観測から、屋上面熱収支を見積もった。特に、四季の快晴日を選び、潜熱フラックスを含まない熱収支各項の日変化と日積算値に注目した。ビル表面の加熱による顕熱放出や壁体の蓄熱による午後から夜間の再放熱は夏に格別大きくはなく、むしろ春の方が大きいほどである。しかし、夏季はもともと気温が高いところにそれらが加わるために、都市高温への影響は大きいと言えよう。

3) 屋上面の顕熱フラックスを熱収支残差として求める間接法と、高さ2.5 mでの測定からの渦相関法(直接法)の結果を比較した。両者の各季節の昼間の変動パターンや大きさは基本的によく一致した。

4) 表面温度が気温より高いとき、顕熱フラックスとその温度差の比 α は風速の一次関数となり、多少の係数値の違いはあるがJurgesの式が成り立つことがわかった。直接法では、風速の増大とともに、表面温度以外は離れた場所の影響やビル縁辺から吹き上げてくる風の影響を含むためばらつきが大きくなる。しかし、通常観測された風の範囲内(概略 6 ms^{-1} 以下)では基本的にJurgesの方法による顕熱フラックスの見積もりが可能であり、そこで必要となる風速値は、周囲の広さにもよるが、屋上2.5 m高さの測定によるも

のでも許容範囲内と見なせた。

謝 辞

本稿の査読者の方々から多くの点で貴重な示唆をいただき、解析・検討を深めることができました。厚く御礼申し上げます。

工学院大学をはじめ観測場所を提供し諸便宜をおはかりいただいた関係機関担当者各位に心よりの謝意を表します。

参 考 文 献

- Horst, T. W. and J. C. Weil, 1992: Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer, *Bound. Layer Meteor.*, **59**, 279-296.
- 神田 学, 森脇 亮, 鈴木 譲, マティアスロート, ティムオーク, 2000a: 住宅街の接地境界層における乱流フラックスの実測—シンチロメーターの利用—, *天気*, **47**, 453-462.
- 神田 学, 森脇 亮, 鈴木 譲, マティアスロート, ティムオーク, 2000b: 都市の接地境界層における乱流相似関数について, *天気*, **47**, 493-501.
- 亀卦川幸浩, 玄地 裕, 吉門 洋, 近藤裕昭, 2001: 建築物空調エネルギー需要への影響を考慮した都市高温化対策評価手法の開発, *エネルギー・資源*, **22**, 235-240.
- 近藤裕昭, 劉 発華, 1998: 1次元都市キャノピーモデルによる都市の熱環境に関する研究, *大気環境学会誌*, **33**, 179-192.
- Kondo, H. and Y. Kikegawa, 2003: Temperature variation in the urban canopy with anthropogenic energy use, *Pure Appl. Geophys.*, (in press).
- Schmid, H. P., 1994: Source areas for scalars and scalar fluxes, *Bound. Layer Meteor.*, **67**, 293-318.
- 田中俊六, 武田 仁, 足立哲夫, 土屋喬雄, 1993: 最新建築環境工学(改訂版), 井上書院, 301 pp.
- 吉田篤正, 綿谷 茂, 赤松 勝, 1989: 都市キャニオンにおける伝熱特性に関する研究(屋外環境表面の対流熱輸送), 第26回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **1**, 103-105.

Thermal Environment of Building Roofs Based on Measurements in the Central Areas of Tokyo

Hiroshi YOSHIKADO*, Hiroaki KONDO** and Yukihiro KIKEGAWA***

* (*Corresponding author*) *Department of Environmental Control, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 16-1, Onogawa, Tsukuba, 305-8569, Japan.*

** *Department of Environmental Control, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.*

*** *Fuji Research Institute Corporation.*

(Received 30 January 2001 ; Accepted 13 September 2002)

Abstract

In order to obtain validation data for a model system describing the relationship between urban energy system and thermal environment, meteorological properties were measured on the roof of buildings in the central areas of Tokyo. From a series of measurement in the skyscrapers quarter and its neighborhood, typical contrast was found in air temperature variations in the building canopy layer and above a bare soil corner of a garden. From another series of measurement performed in the old city for more than one year, four major factors of heat budget were evaluated for the roof surface of a building of 24 stories --- net short-wave and long-wave radiations, total turbulent sensible and latent heat fluxes, and heat conduction through the wall. Comparison of these factors on four cloudless days selected from different seasons, when the latent heat flux could be neglected, indicated that the heat transfer from the surface to the ambient air was rather larger in April than in August. General coincidence was found between the sensible heat flux (H) evaluated for the surface as the residual term and that measured by the eddy correlation method at the 2.5 m height, while the condition of wind measurement was unsatisfactory because of the rooftop structures. The heat transfer coefficient, defined as the ratio of upward H under unstable condition and the temperature difference between the surface and the air, could be represented as a linear function of the mean wind speed.