

研究解説

# 都市の熱代謝モデルの提案と東京都区部の熱環境評価

Proposal of Urban Thermal Metabolism Model and Evaluation of Thermal Environment in Tokyo

原山和也\*・大岡龍三\*\*・吉田伸治\*\*\*・村上周三\*\*\*\*

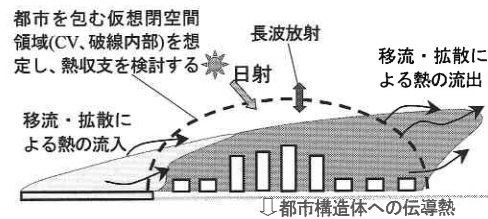
Kazuya HARAYAMA, Ryoza OOKA, Shinji YOSHIDA and Shuzo MURAKAMI

## 1. はじめに

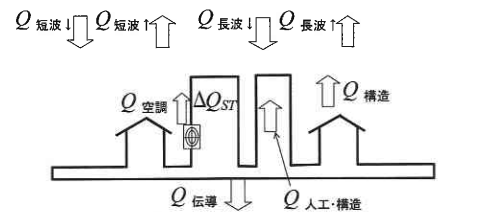
都市の温熱環境悪化に伴い、環境負荷を低減する都市計画が必要となっている。都市の温熱環境を適切に制御するためには、都市への流入熱、流出熱、発熱、蓄熱を考慮した都市域全体の熱収支を考えることが必要となる。本研究はこのような都市全体の熱収支（都市の熱代謝モデル<sup>文1)</sup>）をCFD解析による結果を用いて評価する手法を確立することを目的とする。本報では、都市の熱代謝モデルの概念を提示し、これを関東地方の局地気候解析に適用した東京都区部の熱環境評価を行う。ここでは、東京首都圏を中心に3段階の nested grid を設定した解析対象で東京都区部の熱環境を評価した内容を報告する。

## 2. 解析概要

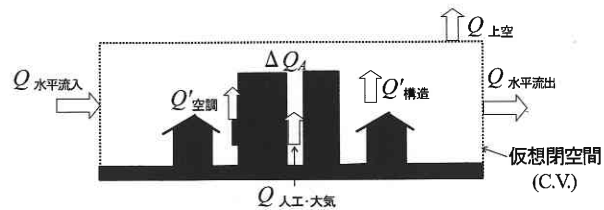
代謝とは、生物学的には動物の活動に伴う物質・エネルギーの変化と定義される。都市を一つの生命体として捉え、都市に出入りする物質・エネルギー収支を、都市の代謝になぞらえる考え方は、都市生態学の分野では1950年代頃から行われてきた。特に Boyden らによる香港における物質・エネルギー代謝の実態調査が有名である<sup>文2)</sup>。近年、下田らは都市における各種省エネルギー・省資源施策の有効性を検討するため、都市のエネルギー・物質のフローとその構造を明らかにすることの必要性を論じ、大阪府を対象に精緻なデータの積み上げを行っている<sup>文3)</sup>。問題を都市の熱環境とした場合、これらと同様の都市域内での熱に関するフローの概念も提案可能であり、かつその構造を詳しく理解することはヒートアイランド対策等を考える上で非常に重要である。都市を仮想の閉空間領域（コントロールボリューム、以下C.V.）と考えた場合に、そのC.V.内に流入する熱、発熱、蓄熱の収支を、ここでは都市の熱



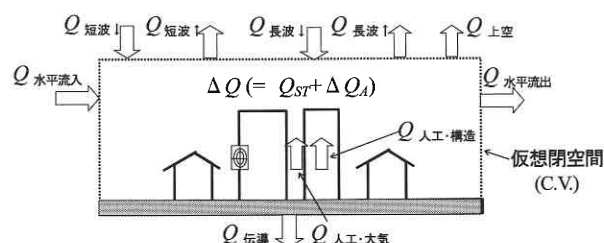
(1) 都市の熱代謝モデルの考え方



(2) 都市構造体（地盤を含む）の熱収支の構成要素



(3) 都市大気部の熱収支の構成要素



(4) 都市全体（構造体+大気）の熱収支の構成要素 (= (2) + (3))

図1 都市全体の熱収支（都市の熱代謝モデル）の概念図

\*東京大学生産技術研究所 人間・社会部門  
 \*\*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター  
 \*\*\*福井大学工学部  
 \*\*\*\*慶應義塾大学理工学部

表1 都市の熱代謝の評価式

## (1) 都市構造体の熱収支 (図1(2))

(都市構造体への流入を正)

$$\Delta Q_{ST} = Q_{短波\downarrow} + Q_{短波\uparrow} + Q_{長波\downarrow} + Q_{長波\uparrow} + Q_{伝導} + Q_{構造} + Q_{人工\cdot構造} + Q_{空調} \quad (1)$$

## (2) 都市大気部の熱収支 (図1(3))

(都市大気部への流入を正)

$$\Delta Q_A = Q'_{構造} + Q_{上空} + Q_{水平流入} + Q_{水平流出} + Q_{人工\cdot大気} + Q'_{空調} \quad (2)$$

## (3) 都市全体の熱収支 (図1(4))

(都市全体 (構造体+大気部) への流入を正)

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Delta Q_{ST} + \Delta Q_A \\ &= Q_{短波\downarrow} + Q_{短波\uparrow} + Q_{長波\downarrow} + Q_{長波\uparrow} \\ &\quad + Q_{伝導} + Q_{上空} + Q_{水平流入} + Q_{水平流出} \\ &\quad + Q_{人工\cdot構造} + Q_{人工\cdot大気} \end{aligned} \quad (3)$$

代謝モデルと呼ぶことにする (図1(1)). 但し, 物質やエネルギーのフローとは異なり, 都市域全体の熱のフローは殆ど実測不可能である. 一方著者らは, 局地気候モデルや, 対流・放射連成解析に基づく屋外環境予測手法を開発してきた<sup>文4-7</sup>. これらのシミュレーションによる解析結果を利用することにより, 都市域内の熱のフローを定量的に推定することが可能となる. 以下この都市の熱代謝の評価方法について簡単に説明する. 仮想閉空間 (C.V.) 内の地盤を含む都市構造体の熱収支は表1(1)式で表される (図1(2)). ここで表1中に示す熱収支の各項はエンタルピーで表されている. またC.V.内の大気部の熱収支は表1(2)式で表される (図1(3)). (1)式と(2)式を加えたものがC.V.全体の熱収支 (図1(4))となる. 次章ではこの都市全体の熱収支に基づいた熱環境評価を東京23区へ適用する.

## 3. 東京23区の熱環境評価への都市の熱代謝モデルの適用

## 3.1 解析対象

図2に示す関東地方を中心に, 北は東南北部, 西は中部地方までを含む領域 (480 km × 400 km) を対象とし, この領域内に表3に示す3段階の nested grid を設定した. 鉛直方向には3つの Grid 共に地表面から高度 9.6 km までの大気を不等間隔な 49 メッシュ (地表に接する大気側メッシュ幅 20 m) に分割している. また, 地表より地下は深さ 1 m までを不等間隔な 5 メッシュ (地中第1セル幅 5 mm) に分割している.

## 3.2 解析条件

解析は8月5日午前6時からスタートし, その後42時間の時間積分を行い, 8月6日0時 (計算開始18時間後) から8月7日0時 (計算開始42時間後) までの結果から都市の熱代謝を評価した. また上空の風向風速は南風 2 m/s (地上 9.6 km において) とした.

表2 図1, 表1の記号表

$\Delta Q_{ST}$ : 都市構造体への蓄熱量
$Q_{短波\downarrow}$ : 下向き短波放射 (日射)
$Q_{短波\uparrow}$ : 上向き短波放射 (反射日射)
$Q_{長波\downarrow}$ : 下向き長波放射 (大気放射)
$Q_{長波\uparrow}$ : 上向き長波放射
$Q_{伝導}$ : 地中への伝導熱
$Q_{構造}$ : 大気部から対流熱・物質伝達により構造体・地盤表面へ流入するエンタルピー (= $-Q'_{構造}$ )
$Q_{人工\cdot構造}$ : 人工排熱のうち構造体に吸収される成分
$Q_{空調}$ : 大気部から空調室外機を通じて構造体に流入するエンタルピー (= $-Q'_{空調}$ )
$\Delta Q_A$ : 大気部への蓄熱量
$Q'_{構造}$ : 構造体・地盤表面から対流熱・物質伝達により大気部へ流入するエンタルピー (= $-Q_{構造}$ )
$Q_{上空}$ : 大気部上端から移流・拡散により流入するエンタルピー
$Q_{人工\cdot大気}$ : 人工排熱のうち大気部に吸収される成分
$Q_{水平流入}$ : 水平方向への移流・拡散によるエンタルピーの流入
$Q_{水平流出}$ : 水平方向への移流・拡散によるエンタルピーの流出
$Q'_{空調}$ : 構造体から空調室外機を通じて大気部へ流入するエンタルピー (= $-Q_{空調}$ )
$\Delta Q$ : 都市全体 (構造体+大気部) への蓄熱量

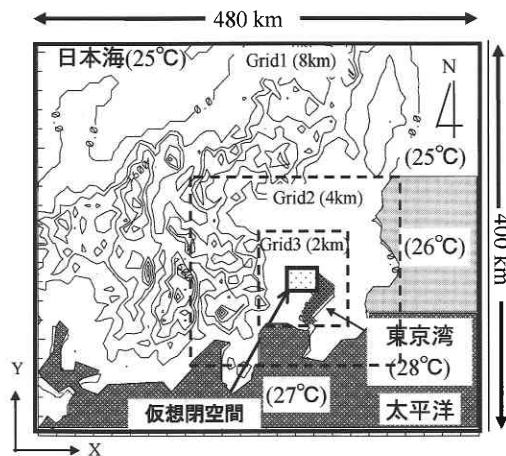


図2 解析対象

表3 計算領域, メッシュ分割数, メッシュ幅

	計算領域 (x[km] × y[km] × z[km])	メッシュ分割	水平方向 メッシュ幅 [km]
Grid1	480 × 400 × 9.6	60 × 50 × 49	8
Grid2	232 × 200 × 9.6	58 × 50 × 49	4
Grid3	96 × 96 × 9.6	48 × 48 × 49	2

数値気候モデルには Mellor-Yamada モデルのレベル 2.5<sup>文8-10</sup> を利用した. 地形の起伏を考慮するため鉛直方向

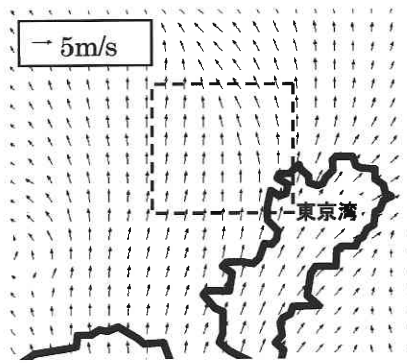


図3 風速ベクトルの水平分布  
(Grid3, 地上10m, 8月6日15:00)  
(点線内は仮想閉空間(地上から高さ40mまで))



図4 地表面温度分布 (Grid3, 8月6日15:00)  
※図中の灰色の領域は34°C以上の領域を示す

については地形に沿った境界適合格子を採用しているため、各方程式について鉛直方向のみ座標変換を施したものを使用している。また、実際の解析に際しては著者らが開発した Software Platform<sup>文11)</sup> のメソスケール解析機能を使用した。都市の熱収支を評価する仮想閉空間 C.V. は、東京23区をほぼ含む 30 km (東西) × 28 km (南北) の領域とした (図2参照, 水平面積  $8.4 \times 10^8 \text{ m}^2$ , 大気鉛直高さ方向 80 m, 地中方向 1 m)。また、本解析では都市大気部における移流による熱の流出入を算出するための基準値については仮想閉空間内の各時刻の平均気温と平均絶対湿度をそれぞれ顕熱と潜熱の基準値とした。その他の条件は文献5, 7を参照されたい。

### 3.3 流れ場、温度場の性状

解析結果の例として計算開始から33時間後の8月6日15:00におけるGrid3の地上10mの風速ベクトル分布を図3に示す。既往の観測結果<sup>文12)</sup>に見られる関東平野への海風の流入がよく再現されており、風速は2~5 m/s程度の値となる。図4に図3と同じ領域における地表面温度分布を示す。仮想閉空間として設定する東京23区付近は34°C

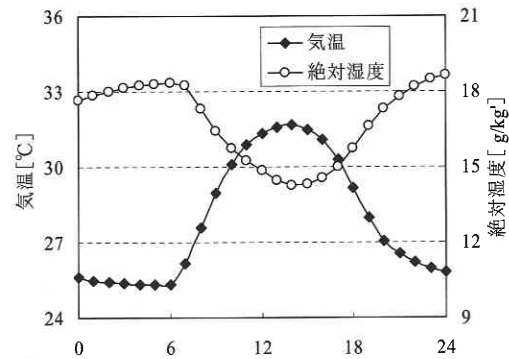


図5 気温・絶対湿度の時間変化  
(仮想閉空間内の平均値, 8月6日)

程度の高温域となる。また、仮想閉空間における気温、絶対湿度の1時間毎の空間平均値の時間変化を図5に示す。一日を通じて気温は25~32°C, 絶対湿度は14~19 g/kg程度の値で推移する。夜間において絶対湿度が大きくなる傾向がある。

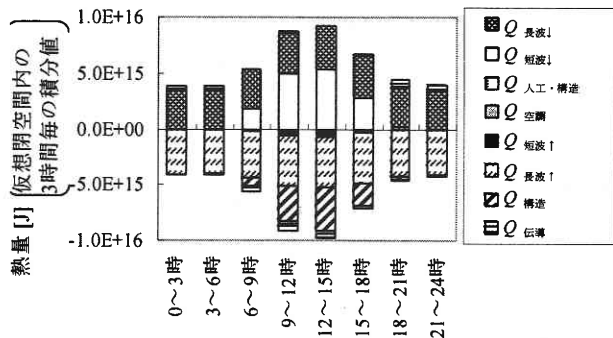
### 3.4 都市全体の熱収支

図6(1)に都市構造体の熱収支の各項目のうち蓄熱分を除いたものの時間変化を、また図6(2)に都市大気部の熱収支の各項目のうち蓄熱分を除いたものの時間変化を示す<sup>注1)</sup>。また、図6(1), 図6(2)の結果を総合した都市の構造体と大気部の蓄熱量の時間変化を図7に示す。表4は図7の値についての日積算値である。

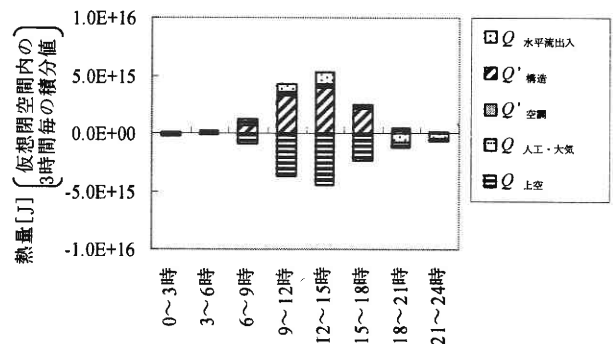
構造体 (図6(1)) については、太陽からの日射 ( $Q_{\text{短波}\downarrow}$ ) 及び大気放射 ( $Q_{\text{長波}\downarrow}$ ) が流入熱の大半を占め、これに対して構造体からの長波放射 ( $Q_{\text{長波}\uparrow}$ ) と構造体から大気への対流による熱放散 ( $Q_{\text{構造}}$ ) により多くの部分を放出している。

大気部 (図6(2)) については、日中においては水平方向の流入熱と流出熱の和 ( $Q_{\text{水平流入}} + Q_{\text{水平流出}}$ ) と構造体 ( $Q'_{\text{構造}}$ ) からの流入熱を鉛直方向への移流・拡散 ( $Q_{\text{上空}}$ ) により放出しているのに対し、夜間においては各要素の値も小さく、熱の流出入が少ない安定した状態となる。また、図5に示す気温の時間変化においては14時頃ピークを迎え温度が徐々に低下するのに対し、図6(2)では夕方においても大気部への熱の流入が流出を上回る ( $\Delta Q_A$  が正, 図7参照) 時間帯が見られ、両者の傾向に相違が見られる。これはこの時間帯の大気部への蓄熱は多くが潜熱によるものである。この点は次節以降で考察する。16時から夜間においては、絶対湿度の上昇による大気への潜熱蓄積がある一方で気温が低下することにより大気への顕熱蓄積は負となり、全体としての夜間における大気へのエンタルピーの蓄積量は非常に小さくなる (図7)。

都市構造体・地盤の熱収支 ( $\Delta Q_{ST}$ ) については早朝から午前中 (6~12時) を除いて負の値を示し、日積算値



(1) 構造体の熱収支 (構造体への流入を正)



(2) 大気部の熱収支 (大気部への流入を正)

図6 都市構造体及び大気部の熱収支の時間変化 (8月6日)

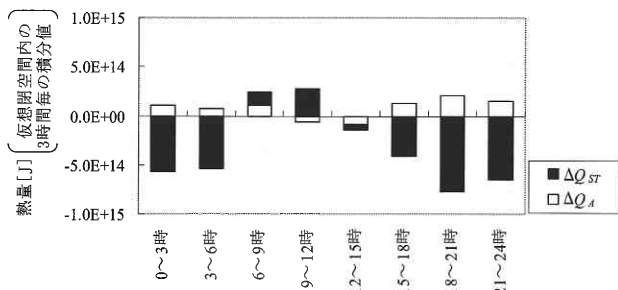


図7 都市全体 (構造体+大気部) の熱収支の時間変化 (8月6日)

表4 都市全体 (構造体+大気部) の熱収支 (仮想閉空間内の8月6日の日積算値)

$\Delta Q$ [J]	$\Delta Q_{sr}$ [J]	$\Delta Q_A$ [J]
$-2.15 \times 10^{15}$	$-2.80 \times 10^{15}$	$0.64 \times 10^{15}$

も負 ( $-2.80 \times 10^{15}$  [J]) となる。大気部 ( $\Delta Q_A$ ) については日中全般に正の値を示し、日積算値も正 ( $0.64 \times 10^{15}$  [J]) となる。両者を総合した都市全体の蓄熱量 ( $\Delta Q$ ) については、 $\Delta Q_{sr}$  の値の影響で、日積算値が負の値 ( $-2.15 \times 10^{15}$  [J]) を示し、仮想閉空間 (C.V.) からの放熱の方が大きいという結果となった。これは、解析時期が夏至を

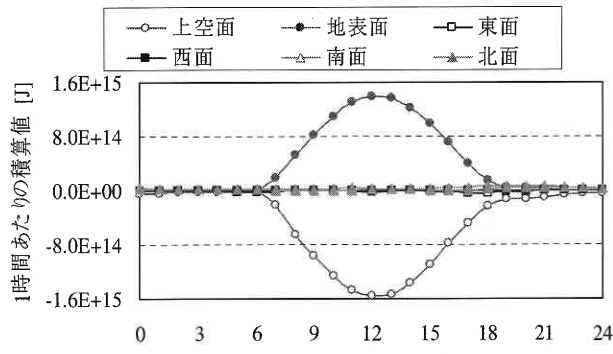
過ぎた8月初旬という太陽高度が低くなり始める時期であることが原因ではあるが、構造体・地盤部分の仮想閉空間の設定の仕方にも依存すると考えられる。この点は今後更なる検討を行う予定である。

### 3.5 大気部の各面におけるエンタルピー顕熱、潜熱の流出入

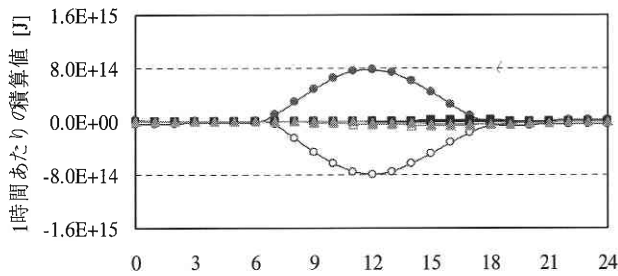
前節では仮想閉空間 (C.V.) に対する全熱収支の検討を行った。本節ではそのうちの顕熱と潜熱に着目し、仮想閉空間 (C.V.) の大気部各面における流出入についての検討を行う。図8(1)に各面におけるエンタルピー (顕熱+潜熱) の流出入、図8(2)に各面における顕熱の流出入、図8(3)に各面における潜熱の流出入のそれぞれ1時間毎の積算値を示す。

地表面 (●) においてはエンタルピー、顕熱、潜熱とも日中の流入が多い。これは日の出とともに地表面温度が上昇し、午後になると徐々に温度が低下するためである。しかし、その最大値はエンタルピーと顕熱では12時であるものの、潜熱では13時で1時間遅れる。その地表面からの流入に対応するように、上空 (○) からは顕熱や潜熱が流出している。しかし、こちらはエンタルピー、顕熱、潜熱の全てが12時に最大となる。また本解析では流れ場の形成に関東平野へ流入する海風が大きく影響しているため、南面 (▲), 北面 (◆) において、熱の流出入が活発となる。

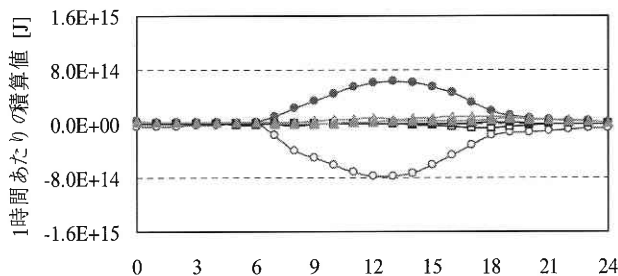
図9に各方向 (南北, 東西, 鉛直) のエンタルピー (図9(1)), 顕熱 (図9(2)), 潜熱 (図9(3)) の流出入の時間変化を示す。顕熱については、日の出から12時ごろまでは建物からの放熱 (×) を南北方向 (▲) に若干量放熱しているが、大部分は放熱できずに仮想閉空間内に蓄熱している。12時を過ぎる頃から鉛直方向 (○) へも放熱し、気温が低下する要因となっている。一方、潜熱については南北方向 (▲) からの流入が1日を通して見られ (図9(3)), 特に日中に大きな値となっている。これは水蒸気を多く含む海風を示しており、湿度上昇に寄与すると考えられる。しかし、解析結果では一般に海風が活発となり最も潜熱が流入すると考えられる正午から16時位の時間帯において、絶対湿度があまり増加しない (図5)。その原因として鉛直方向 (○) の流出入が影響していると考えられる。つまり、午前中に絶対湿度が低下する要因は、不安定成層による都市上空との間の活発な移流拡散により水蒸気が仮想閉空間 (C.V.) から上空へ流出しているためである。一方、夕方16時以降から夜間においては、大気が安定化するため上空からの移流拡散による水蒸気の流出が抑えられ、仮想閉空間内に滞留し、絶対湿度の値が増加する (図5)。また、わずかではあるが図8(3)に示す南面 (▲) からの潜熱の流入量に若干の増加が見られる。これも夕方の絶対湿度上昇に影響しているものと考えられる。



(1) エンタルピー

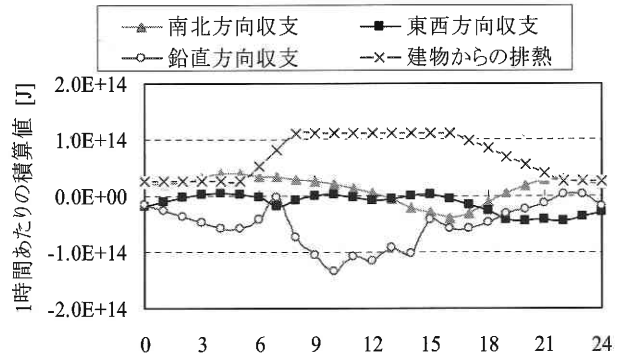


(2) 顕熱

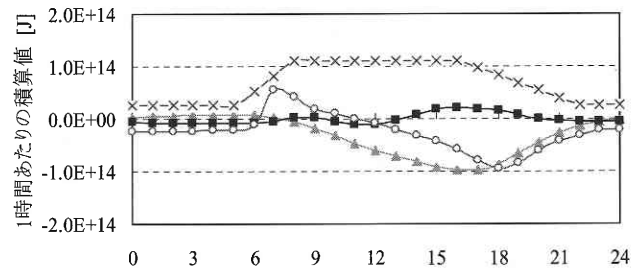


(3) 潜熱

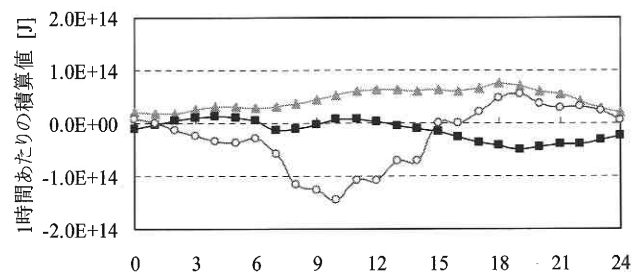
図8 仮想閉空間の大気部各方向からの熱の流入出の時間変化 [J] (正値が仮想閉空間に対する流入)



(1) エンタルピー



(2) 顕熱



(3) 潜熱

図9 大気部へ各軸方向(南北, 東西, 鉛直)への熱の流入出の時間変化 [J] (正値が仮想閉空間に対する流入)

### 3.6 大気部の代表的時刻における熱量の流入出

図10に代表的な時刻として、深夜の2時(図10(1)), 午前の8時(図10(2)), 午後の14時(図10(3))の3時刻のそれぞれ顕熱と潜熱の流入出の1時間毎の積算値を示す。深夜は全体的に流入出が少なく安定した状態である。午前になると上述したように上空との移流拡散のため潜熱の流出が確認できる。午後になると南北方向, 鉛直方向への熱の流入出が活発となり, 東面や西面に比べると非常に大きな値となる。また, 表5に図10と同じ時刻の各方向の熱量の流入出を示す。午前は南北方向から潜熱, 鉛直方向から顕熱が流入し, それが鉛直方向に潜熱として流出し

ているため絶対湿度が低下している。また, 気温が一番高くなる14時では鉛直方向, 南北方向の熱の流入出量が多くなる。

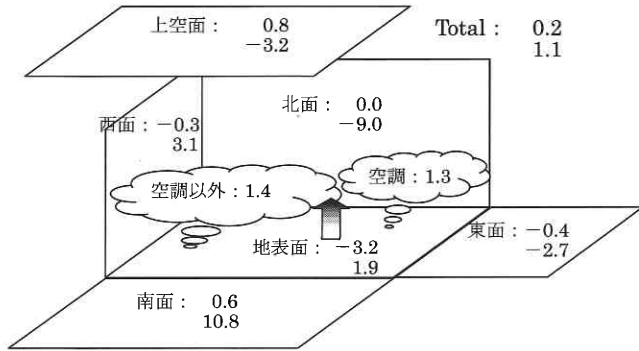
### 4. ま と め

- (1) 都市全体の3次元熱収支を考慮した都市の熱代謝モデルの概念を提案した。
- (2) 都市の熱代謝モデルを用いて東京都区部の8月上旬の熱環境評価を行った。本解析では解析時期等の影響で都市全体の蓄熱 $\Delta Q$ の日積算値が負となり, 仮想閉空間内から熱を放出している結果となった。
- (3) 今後は解析時期, 構造体・地盤部分の仮想閉空間の設

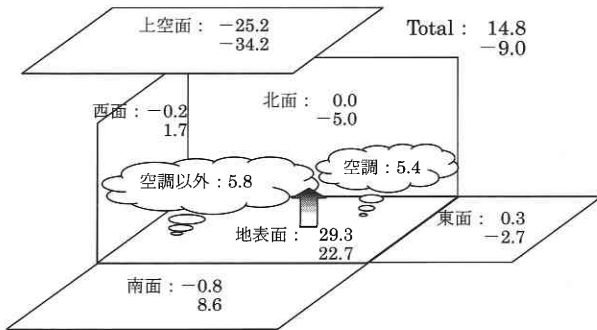
表5 大気部の各方向の熱量の流入出 [ $\times 10^{13}$ ]

	2時		8時		14時	
	顕熱	潜熱	顕熱	潜熱	顕熱	潜熱
上下	-2.4	-1.3	4.1	-11.5	-3.2	-7.2
南北	0.6	1.8	-0.6	3.6	-8.2	6.1
東西	-0.7	0.4	0.2	-1.0	0.9	-1.0

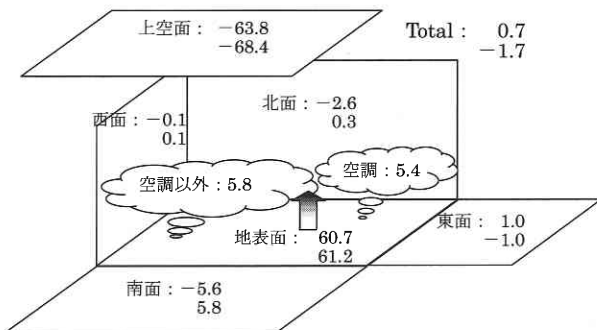
(網掛け部は流入出が  $5.0 \times 10^{13}$ J 以上の部分)



(1) 2時 (深夜)



(2) 8時 (午前)



(3) 14時 (午後)

図10 大気部の代表的時刻における顕熱と潜熱の流入出 [ $\times 10^{13}$ ]  
(正值が仮想閉空間に対する流入) (上段: 顕熱, 下段: 潜熱)

定範囲等に着目した更なる検討を行う予定である。

注

- 1) 図6(1)は構造体への流入を正, 流出を負, また図6(2)は大気部への流入を正, 流出を負としている。また, 図7については,  $\Delta Q_{gr}$ は図6(1)と,  $\Delta Q_A$ は図6(2)と対応した正負を示す。

(2002年11月11日受理)

参 考 文 献

- 1) 大岡, 吉田, 原山, 村上, 持田, 建築学会大会学術講演梗概集D1, 901-902, 2002.8
- 2) S. Boyden, S. Millar *et al.*, Australian National University Press., 1981
- 3) 下田, 井上, 高原, 水野, 建築学会大会学術講演梗概集D1, 723-724, 2000.9
- 4) 吉田, 村上, 持田, 大岡他, 建築学会計画系論文集, 529号, 77-84, 2000.3
- 5) 金, 村上, 持田, 大岡, 吉田, 建築学会計画系論文集, 534号, 83-88, 2000.8
- 6) 持田, 村上, 金他, 建築学会大会学術講演梗概集D1, 1099-1102, 2000.9
- 7) 吉田, 大岡, 村上他, 生産研究, VOL.5 4, NO. 1・2, 79-83, 2002.1
- 8) 桑形, 近藤, 天気, 55-59, 1990.3