

# 大規模屋外模型都市実験による熱収支の検討

## THE ENERGY BALANCE DERIVED FROM COMPREHENSIVE OUTDOOR SCALE MODEL EXPERIMENT (COSMO)

河合徹<sup>1</sup>・神田学<sup>2</sup>  
Toru KAWAI and Manabu KANDA

<sup>1</sup>学生会員 工修 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 (〒182-0082 東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学 石川台4号館403号室)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京工業大学 理工学研究科国際開発工学専攻 ( 同上 )

Datasets of energy fluxes and surface temperature were obtained from Comprehensive Outdoor Scale Model Experiment (COSMO) in winter and spring-early summer. Daytime and daily total statistics of the ratio of heat storage ( $dQ_s$ ) to net all-wave radiation ( $Q^*$ ) were investigated. We obtained following major findings. i) Daytime ( $Q^* \geq 0$ )  $dQ_s/Q^*$  in winter were larger than those of spring-early summer. ii) Daytime  $dQ_s/Q^*$  was slightly dependent on wind velocity and decreased with increasing wind velocity. iii) Daily total  $dQ_s/Q^*$  was negative in winter and positive in summer, since daily total  $Q^*$  was positive regardless of seasons while daily total  $dQ_s$  was negative in winter and positive in summer. The value of daily total  $dQ_s$  was strongly related to net daily increment of surface temperature.

**Key Words :** Energy balance, Outdoor Scale Model Experiment

### 1. はじめに

地表面熱収支は局所的な気象形成を通じて境界層気象にも複層的に関連する根本的な検討課題であり、これまで様々な地表面条件下において観測が行われてきた(例えば, Oke, 1987<sup>1)</sup>, Amfield, 2003<sup>2)</sup>). しかしながら、観測の困難さ等の理由により、密集した都市部における熱収支の測定事例は少数であり、長期にわたる連続測定にいたっては久が原(大田区; Moriwaki and Kanda, 2004<sup>3)</sup>), パーゼル(Swiss; Christen and Vogt, 2004<sup>4)</sup>)で行われた2例に限られる。実都市における熱収支データベースが限られていることに加え、現地観測には以下に記す主要な問題点がある。

- i) 都市独特の気象形成(例えば夜間のヒートアイランド)と密接に関連し、極めて重要な熱収支項目である都市の貯熱量( $dQ_s$ )を直接測定する手段が無く、通常、2章に記す熱収支式の残差として見積もられる。この場合、熱収支式における $dQ_s$ 以外のフラックス測定に含まれる全ての誤差が見積もられた $dQ_s$ に含まれる。
- ii) 現地観測より得られた結果には幾何構造の非一様性、構成要素の多様性、植生の季節変化やオアシス効果等の要素が複雑に関与し、得られた結果の解釈が難しい。

正味放射量( $Q^*$ )に対する貯熱量 $dQ_s$ の比率は地表面パラメーター(熱物性値, 表面放射特性, 蒸発効率等)の変化による影響を受けづらく、最も普遍的な都市エネルギー分配の指標と考えられるが(Kawai et al., 2006<sup>5)</sup>), 上記した理由により、現地観測より得られたデータを用いて、 $dQ_s/Q^*$ の挙動を緻密に検討することは難しい。このため、例えば、 $dQ_s/Q^*$ と幾何構造との関係、季節性、風速等総観場の気象条件との関連性等は、現状では十分に把握されているわけではない(Grimmond and Oke, 1999<sup>6)</sup>).

2004年4月より筆者らは屋外に大規模模型都市を作成し、熱収支測定を含む気象観測を行っている(Comprehensive Outdoor Scale Model Experiment for Urban Climate: COSMO). COSMOは $dQ_s$ を直接測定できるという極めて大きな利点を持つ(3章)。これに加え、幾何構造、構成素材が制御された均質な領域で測定を行うことにより、得られた結果の解釈が行い易い。本論では、COSMOで直接測定された $dQ_s$ を用いて、 $dQ_s/Q^*$ の季節変化、及び上空風速との関連性を検討する(4章)。また、5章において、縮小模型都市実験において問題となりうる相似性に対する考察を行う。



図-1 1/5 モデルの概観

表-1 測定項目の一覧

測定項目	測器 (型)	測定場所 (ZH)	測定周波数 (Hz)
風速3成分・気温	超音波風速計 (Kaijo, TR90-AH)	[i] 2	50
H <sub>2</sub> O 濃度	H <sub>2</sub> O/CO <sub>2</sub> Open-path analyzer (Licor, LI7500)	[i] 2	20
放射収支	放射収支計 (EKO, MR40)	[i] 3	1
地中伝導熱 表面温度	熱流板 (Captec, HF-300T)	[ii] -	1
コンクリート枡 内部温度	熱電対 (Type E, φ0.32mm)	[ii] 0.5	1

## 2. 都市熱収支

都市熱収支は、通常地中温層を下端、鉛直方向のフラックスが一定とみなせる高度を上端とするコントロールボリュームを想定し、このボリュームにおける熱収支として定義される (Oke, 1987<sup>7)</sup>). 水文過程 (降雨, 流出, 結露等) による熱的影響を考慮しないと、都市熱収支は式(2a) で表される。

$$Q^* + Q_F = dQ_s + Q_H + Q_E + dQ_A \quad (2a)$$

ここに、 $Q^*$  ( $W m^{-2}$ ) は正味放射量、 $Q_F$  ( $W m^{-2}$ ) は人工廃熱、 $dQ_s$  ( $W m^{-2}$ ) はコントロールボリュームにおける貯熱量、 $Q_H$  ( $W m^{-2}$ ) は顕熱輸送量、 $Q_E$  ( $W m^{-2}$ ) は潜熱輸送量、 $dQ_A$  ( $W m^{-2}$ ) は正味の移流熱フラックスを表す。本実験では3章で示す様に人間活動の無い均質なモデル領域において、十分に発達した内部境界層内で測定を行うため、式(2a) において  $Q_F$ ,  $dQ_A$  を無視する。

## 3. 屋外模型都市実験

埼玉県日本工業大学の敷地内 (39°04'N, 139°07'E) に大規模屋外模型都市を作成した (図-1)。建物高さは典型的な低層住宅の建物高さ (7.3 m; Moriwaki and Kanda,

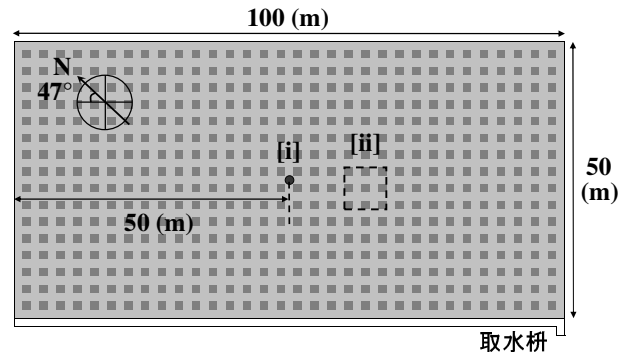


図-2 1/5 モデルの平面図

2004<sup>3)</sup> の約1/5である (以降 1/5 モデルと記す)。模型都市構成素材は一律同素材のコンクリートであり、表面は同色のペンキで塗装されている。建物と見なすコンクリート枡は一辺が 1.5 m の立方体であり、壁面厚さは一律 0.1 m である。コンクリート枡は 50 x 100 m の基板上に整列に配置されており、建蔽率は 0.25 である。サイトの主流風向を考慮し、街路 (長手) 方向は南北方向から測り反時計回りに 47° となっている。

本論で用いた観測データに対応する測定項目を表-1に記す。サイト中心部に設置した鉄塔 (図-2 [i]) の  $ZH = 3$  において放射収支を測定した。ここに、 $Z$  は基盤からの高度、 $H$  はコンクリート枡の高さを表す。放射収支計では下向き、上向きの短波放射 ( $K_{\downarrow}$ ,  $K_{\uparrow}$ )、及び長波放射 ( $L_{\downarrow}$ ,  $L_{\uparrow}$ ) の4成分を測定した。同じ鉄塔 (図-2 [i]) の  $ZH = 2$  に小型超音波風速計、 $H_2O$  濃度計を設置し、風速 3 成分、気温、 $H_2O$  濃度を高周波で測定した。30 x 30 cm サイズの薄型 (0.4 mm) 熱流板を、単位領域表面 (屋根面, 床面, 4鉛直壁面) を覆うように計 164 枚貼り付け、地中伝導熱を測定した。熱流板表面は表面放射特性を周囲とそろえるために同色のペンキで塗装されている。熱流板を用いて測定される地中伝導熱は空気による貯熱を無視すると、式(2a) の  $dQ_s$  とみなすことができる。熱流板による  $dQ_s$  の直接測定は本観測システムにおける最も大きな利点である。実都市における  $dQ_s$  の直接測定は極めて困難であり、通常、式(2a) における残差として見積もられる。この場合、渦相関法によって見積もられる乱流フラックス ( $Q_H + Q_E$ ) が真値を過小評価する所謂エネルギーインバランス (SEI; Kanda et al., 2004<sup>8)</sup>) による誤差、正味の移流熱フラックス、及び人工廃熱の見積もりに含まれる誤差が  $dQ_s$  に含まれる。実際、COSMOでも顕著な SEI が観測されている (Kanda et al., 2006<sup>9)</sup>)。本論で用いる  $dQ_s$  にはこの様な誤差が含まれていない。また、熱流板では表面温度も測定される。

## 4. 観測結果と考察

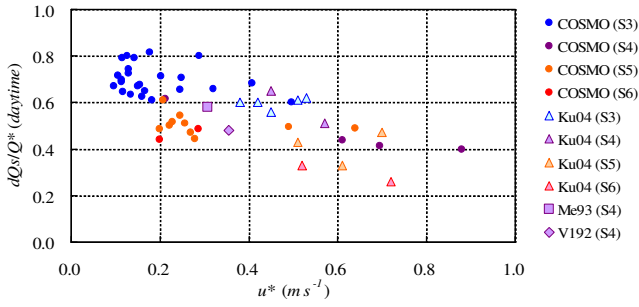


図-3  $dQ_s/Q^*$ (daytime) と  $u^*$  の関係

貯熱量 ( $dQ_s$ ) の正味放射量 ( $Q^*$ ) に対する比率を熱収支の指標とし、日中 ( $dQ_s/Q^*$  (daytime)), 日積算統計値 ( $dQ_s/Q^*$  (daily total)) に対して考察を行う。本論では一律、 $Q^*$  が正となる時間帯を "日中 (daytime)" と定義する。解析対象日は、観測期間 2005年11月1日 - 12月14日、及び 2006年3月31日 - 6月1日で日照率 60 % 以上の計 40 日間である。ここで、日照率は "日照時間/日中時間" で定義し、日照時間はCOSMOサイトより 8 km 離れた久喜気象観測所のデータを参照した。

### (1) 季節分類の定義

本論では以下に示す様に季節分類を行う。 $dQ_s/Q^*$  (daytime) に対しては、南中高度別に分類する。すなわち、南中高度を  $15^\circ$  毎に分類し ( $0^\circ - 90^\circ$ ), 高度の低い方から順に S1 - S6 と定義する。COSMOサイトでは 10月17日 - 2月26日が S3, 2月27日 - 4月6日, 9月8日 - 10月16日が S4, 4月7日 - 5月26日, 7月19日 - 9月7日が S5, 5月27日 - 7月18日が S6 に分類される。 $dQ_s/Q^*$  (daily total) に対しては冬至, 春分, 夏至, 秋分を中心とし、冬季, 春季, 夏季, 秋季に 4 等分する。すなわち、11月8日 - 2月12日が冬季, 2月13日 - 5月8日が春季, 5月9日 - 8月7日が夏季, 8月8日 - 11月7日が秋季に分類される。

### (2) 日中積算値

#### a) キャノピー熱収支

図-3に  $dQ_s/Q^*$  (daytime) と上空風速との関係を示す。ここで、風速の高度変化を考慮し、横軸には  $Z/H=2$  で測定された摩擦速度 ( $u^*$ ) を用いた。図中にはCOSMOより得られた結果に加え、植生の極めて少ない 2 都市で測定された結果 (Me93, V192), 及び久が原 (大田区) で通年測定された結果 (Ku04; Moriwaki and Kanda, 2004<sup>3)</sup>) が併せてプロットされている。Me93はメキシコ (Mexico;  $19^\circ 25' N$ ,  $99^\circ 10' W$ ;  $\lambda_p = 0.55$ ,  $\lambda_c = 1.75$ ,  $\lambda_v = 0.01$ ) で冬季晴天日 (7日間) に測定された結果 (Oke et al., 1999<sup>10)</sup>) であり、V192はバンクーバー (Canada;  $49^\circ 16' N$ ,  $123^\circ 06' W$ ;  $\lambda_p = 0.51$ ,  $\lambda_c = 1.39$ ,  $\lambda_v = 0.04$ ) で夏季晴天日 (13日間) に測定された結果 (Grimmond and Oke, 1999<sup>6)</sup>) である。ここで、 $\lambda_p$  は建蔽率、 $\lambda_v$  は植生面

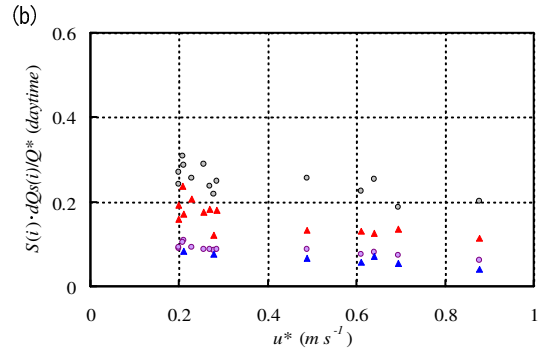
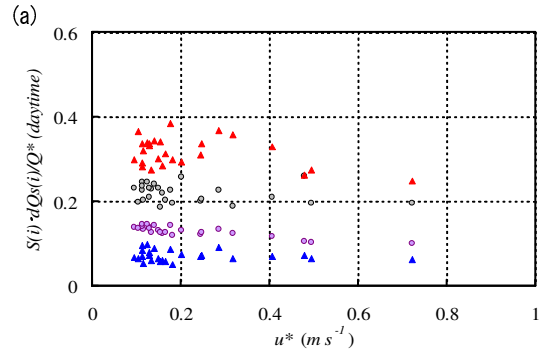


図-4  $dQ_s/Q^*$ (daytime) に対する構成面別の寄与分と  $u^*$  の関係 (a) S3, (b) S4, S5, S6

積比率を表す。 $\lambda_c$  は水平敷地面面積に対する全表面積の比率を表し、地表面 3 次元性の指標とされる。COSMOでは  $\lambda_c = 2$  である。Me93, V192はそれぞれ現地における冬季、及び夏季に測定された結果であるが、南中高度は共に S4 に分類される。Ku04 ( $\lambda_p = 0.326$ ,  $\lambda_c = 2.8$ ,  $\lambda_v = 0.206$ ) は月平均値 (日照率80%以上) である。Ku04に対しては 11 - 2月を S3, 3, 10月を S4, 4 - 5, 8月を S5, 6 - 7月を S6 と分類した。

図-3に示した結果より、まず、COSMOより得られた  $dQ_s/Q^*$  (daytime) は夏季に比べて冬季に大幅に増加している。低南中高度日 (S3) の  $dQ_s/Q^*$  (daytime) は既往の現地観測結果 (都市, 郊外) と比べて非常に大きく (Grimmond and Oke, 1999<sup>6)</sup>), 0.8 程度に達する。このような季節性に加えて、 $dQ_s/Q^*$  (daytime) は  $u^*$  に依存する。風速の増加に伴い乱流輸送が促進され、貯熱量が減少することは容易に予測されるが、1物理要素 (風速) が複雑なフィードバックが作用する非線形システム (熱収支) にどの程度影響するか、又は有意に影響を及ぼすかは不明確とされている (Grimmond and Oke, 1999<sup>6)</sup>)。図-3より、COSMOより得られた同季節分類の  $dQ_s/Q^*$  (daytime) は  $u^*$  の増加に伴い減少するが、程度は小さい。各現地観測より得られた  $dQ_s/Q^*$  (daytime) は異なる幾何構造、植生比率の元得られた結果であるが、COSMOより得られた結果と定量的に一致している。また、植生の変化等により厳密には各季節で同じ地表面条件とならないが、Ku04ではCOSMOと同様な季節性が見られ、定性的にも一致している。

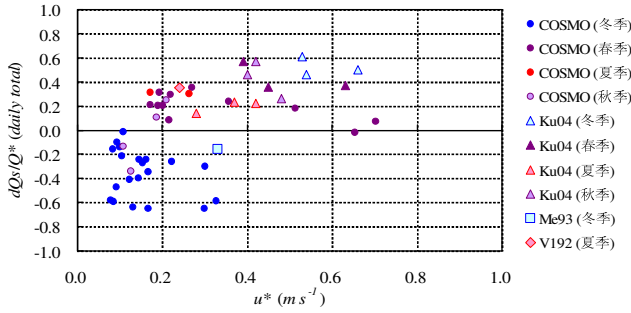


図-5  $dQs/Q^*$  (daily total) と  $u^*$  の関係

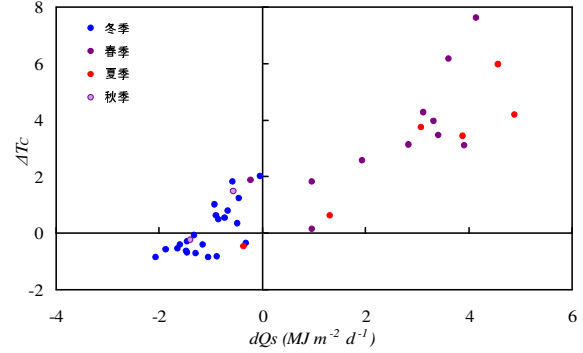


図-6  $dQs$  の日積算値と  $T_c$  の日増加分 ( $\Delta T_c$ ) の関係

#### b) $dQs/Q^*$ (daytime) に対する構成面別の寄与

$dQs/Q^*$  (daytime) は構成面  $i$  で測定された地中伝導熱 ( $dQs(i) (W m^2)$ ) を用い、式(4a) より算出されている。

$$\frac{dQs}{Q^*} (daytime) = \frac{\int_{daytime} dQs dt}{\int_{daytime} Q^* dt}$$

$$= \sum_{i=1}^{imax} \left\{ S(i) \frac{\int_{daytime} dQs(i) dt}{\int_{daytime} Q^* dt} \right\} = \sum_{i=1}^{imax} \left\{ S(i) \frac{dQs(i)}{Q^*} (daytime) \right\} \quad (4a)$$

ここに、 $imax$ ,  $S(i)$  はそれぞれ構成面  $i$  の総数、無次元面積を表す。  $S(i)$  は式(4b) で表される。

$$S(i) = A(i) / A_{tot} \quad (4b)$$

ここに、 $A(i) (m^2)$  は構成面  $i$  の面積、 $A_{tot} (m^2)$  は単位領域の水平面積 ( $m^2$ ) を表す。

本項では構成面  $i$  を屋根面 (*Roof*)、床面 (*Floor*)、及び日中主に日向面となるSE, SW方向に面した鉛直壁面 (*SLwall*)、日中主に日陰面となるSE, SW方向に面した鉛直壁面 (*SAwall*) とし、 $dQs/Q^*$  (daytime) に対するこれらの構成面別の寄与を検討した。図-4に  $S(i) \cdot dQs(i)/Q^*$  (daytime) と  $u^*$  の関係を示す。図-4(a)はS3の結果、図-4(b)はS4-S6の結果を表す。まず、 $dQs/Q^*$  (daytime) に若干見られた  $u^*$  依存性は  $S(i) \cdot dQs(i)/Q^*$  (daytime) に対しても同様に現れている。  $S(i) \cdot dQs(i)/Q^*$  (daytime) の  $u^*$  依存性に対する面別の大きな差異は見られない。一方、 $dQs/Q^*$  (daytime) に対する構成面別の寄与に対しては明確な季節変化が見られる。*Roof*, *Floor*, *SAwall* の  $S(i) \cdot dQs(i)/Q^*$  (daytime) は図-4(a), (b)で大きく変化しないが*SLwall*の  $S(i) \cdot dQs(i)/Q^*$  (daytime) は低太陽高度日 (図-4(a)) の値に対し、高太陽高度日 (図-4(b)) では大きく減少する。これは、太陽高度が増加するにつれて日向鉛直壁面への短波放射入射角は逆に減少するためであると考えられる。

#### (2) 日積算値

図-5に  $dQs/Q^*$  (daily total) と  $u^*$  の関係を示す。図-3

同様、Me93, V192, Ku04よりえられた  $dQs/Q^*$  (daily total) の値が図中にプロットされている。Ku04 に対しては 11 - 1月を冬季、2 - 4月を春季、5 - 7月を夏季、8 - 10月を秋季と分類した。

図-5に示した結果よりCOSMOより得られた  $dQs/Q^*$  (daily total) は冬季に負となり、春季 - 夏季に正となる。他の現地観測より得られている結果同様 (Grimmond and Oke, 1999<sup>6)</sup>), COSMOで得られた  $Q^*$  の日積算値は季節を問わず正となる。このため、 $dQs/Q^*$  (daily total) の符号は  $dQs$  の日積算値 ( $dQs$  (daily total) ( $MJ m^2 d^{-1}$ )) の符号と一致する。一方、 $dQs$  (daily total) の日積算値は式(4c)により正味の日単位表面温度増分 ( $\Delta T (K)$ ) と関連付けられる。

$$c\rho \cdot V_{eff} \frac{\Delta T}{\Delta t} = dQs (daily total) \cdot A_{tot} \quad (4c)$$

ここに、 $cp (MJ m^3 K)$  は構成素材 (コンクリート) の体積熱容量、 $\Delta t = 1 (d)$  であり、 $V_{eff} (m^3)$  は日サイクルで熱的に関与する体積を表す。図-6にCOSMOより得られた  $dQs$  (daily total) と面積重み付け平均表面温度 ( $T_c$ ; Voogt and Oke, 1997<sup>11)</sup>) の正味の日増分 ( $\Delta T_c$ ) の関係を表す。 $dQs$  (daily total) は  $\Delta T_c$  と概ね線形に対応しており、式(4c)と整合している。ここで、モデル構成素材の体積熱容量を式(4c)に用いた場合、図-6より  $V_{eff} / A_{tot}$  はおよそ0.33 ( $m$ ) と見積もれる。これらの結果より、 $dQs/Q^*$  (daily total) の季節性は  $\Delta T_c$  と密接に関連していることが分かる。また、 $\Delta T_c$  は総観場気温の正味の日増分と連動していると考えられる。このため、 $dQs/Q^*$  (daily total) の季節性は総観場の温度変動に強く関連していると考えられる。また、同季節分類の  $dQs/Q^*$  (daily total) には日中と異なり明確な  $u^*$  依存性は見られない。日中は乱流輸送量の寄与が大きい、夜間は非常に小さくなる。このため、 $dQs/Q^*$  (daily total) には  $u^*$  依存性が明確に現れなくなるものと考えられる。日積算の  $dQs$  は日中積算値に比べて非常に小さく、式(2a)の残差より  $dQs$  を見積もる場合、 $dQs/Q^*$  (daily total) は他の熱収支項に含まれるわずかな誤差の影響を受けやすい。このため、現状ではCOSMOより得られた結果と現地観測より得られ

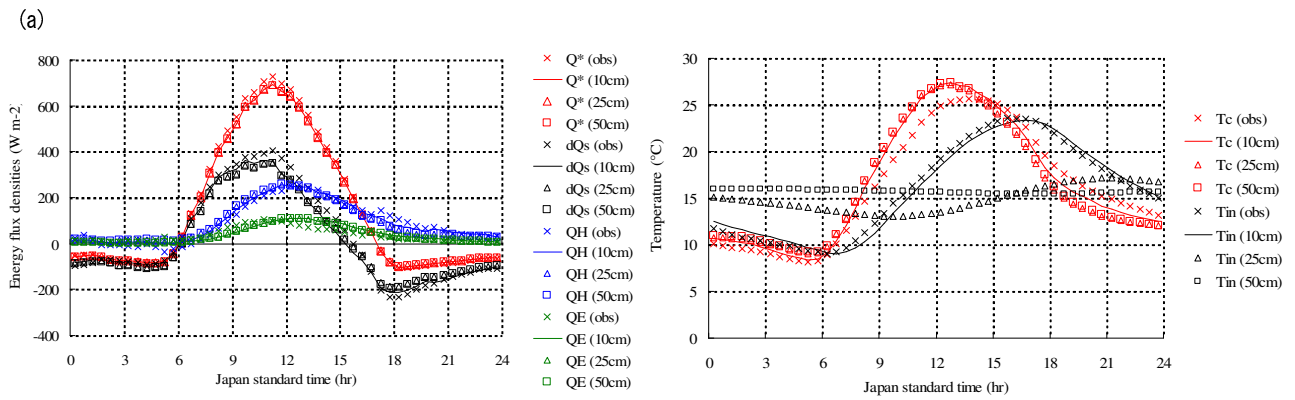


図-7 SUMMを用いた壁面厚さに対する感度分析 (a) 熱収支 (S4, S5; 4日間), (b)  $T_c, T_{in}$  (S4, S5; 4日間)

た結果の詳細な比較、考察は難しいが、冬季に測定されたMe93の値は負、夏季に測定されたV192の値は正となっておりCOSMOで得られた結果と定性的に一致している。一方、Ku04の  $dQs/Q^*$  (daily total) は通年正であり、特に冬季はCOSMOで得られた値より大きな値となっている。

## 5. 相似性に対する考察

物理的相似性としては i) 放射, ii) 乱流, iii) 熱慣性があり、熱収支の検討を行う際に最も問題となるのは iii) 熱慣性の相似性である。縮小模型都市を用いて熱収支実験を行う場合、建物質を単位敷地面あたりの値に換算した値 ( $m_c$  ( $kg / m^2$ )), 及び日サイクルで熱収支に影響を及ぼすアクティブな層厚が熱慣性相似性の指標とされる (Pearlmutter et al., 2004<sup>12</sup>)。ここで、実都市の  $m_c$  はおよそ  $700$  ( $kg / m^2$ ), 典型的な低層住宅の”壁面部分体積 / 建物全体積”の値 (CVF) は  $0.16$  とされる (Tso et al., 1990<sup>13</sup>)。CVF =  $0.16$ , 建物高さ  $7.3$  (m) (Moriwaki and Kanda, 2004<sup>3</sup>) を仮定すると、典型的な低層住宅の平均壁面厚を  $25$  (cm) と見積もることができる。1/5 モデルの CVF は  $0.3$  であり、幾何学的に実都市を縮小した場合に比べて壁面厚は厚いが、熱慣性相似性の指標となる壁面厚,  $m_c$  がそれぞれ  $10$  (cm),  $267$  ( $kg / m^2$ ) となり実都市と異なる。このため、熱慣性の相似性を満たしていない可能性がある。そこで、本節では筆者らが2005年度に提案した都市エネルギーバランスモデル SUMM<sup>14</sup>)を用いて壁面厚が熱収支、及び外表面温度 ( $T_c$ ) に及ぼす感度を検討した。パラメーター設定の詳細は Kawai et al. (2006)<sup>5</sup>) を参照されたい。解析は良好なモデル検証結果が得られている強風日 ( $u^* > 0.3$ ) を選別し、 $Q^*$  の大きくなるS4, S5に分類される晴天日4日間に対して行った。図-7に壁面厚  $10$  (cm; 1/5 モデル),  $25$  (cm;  $m_c = 557$  ( $kg / m^2$ )),  $50$  (cm;  $m_c = 826$  ( $kg / m^2$ )) とした場合の熱収支、外表面温度 ( $T_c$ ), 及びコンクリート柵内部温度 ( $T_{in}$ ) の解析結果を示す。壁面厚  $25$  (cm) は典型的な

低層住宅の平均壁面厚であり、 $50$  (cm) は壁面厚,  $m_c$  ともに実都市より大きい場合を想定している。各結果は選別した4日間のアンサンブル平均値であり、図中には参照値として観測値がプロットされている。

図-7に示した結果より、壁面厚が厚くなるにつれて  $T_{in}$  は大きく変化し、日変動が小さくなっている。一方、壁面厚  $10$  (cm),  $25$  (cm) の熱収支,  $T_c$  は大きく変わらず、 $25$  (cm),  $50$  (cm) ではほぼ違いが見られない。これは、日サイクルで熱収支,  $T_c$  に対しアクティブに影響を及ぼす層が表面下  $10$  (cm) 程度の浅層に限られており、これより深層の影響は極めて小さいことを意味している。以上の結果より、1/5 モデルは実スケールに対して熱慣性の相似性がほぼ満たされていると判断できる。

## 6. 結論

大規模模型都市を作成し、冬季、春 - 初夏に熱収支測定を行った。本論では植生、人工排熱の季節変化を含まない制御された条件下において、都市熱収支に季節性、風速依存性が見られることを示し、以下に記す主要な結論が得られた。

i)  $dQs/Q^*$  (daytime) は  $u^*$  の増加に伴いわずかに減少する。ii)  $dQs/Q^*$  (daytime) は夏季に比べて冬季に大幅に増加する。 $dQs/Q^*$  (daytime) に対する日向鉛直壁面の寄与分は明確な季節依存性を持ち、南中高度の減少 (壁面への入射角の増加) に伴い大幅に増加する。iii) 現地観測より得られた  $dQs/Q^*$  (daytime) はCOSMOより得られた結果と定量的、定性的に一致する。iv) COSMOより得られた  $dQs/Q^*$  (daily total) は冬季に負、春季 - 夏季に正となる。 $Q^*$  の日積算値は季節を問わず正であり、 $dQs$  の日積算値は表面温度の正味の日増分と線形に対応する。したがって、この様な  $dQs/Q^*$  (daily total) の季節性は表面温度の変動 (総観場の温度変動) と密接に対応している。

謝辞：本研究は科学技術振興事業団戦略的推進事業 (代

表：神田学)，および科学研究費補助金（特別研究員奨励費；課題番号 17・08354）による財政的援助を受けた。また、本実験を遂行するにあたり、日本工業大学成田健一教授、及び九州大学萩島理助教授より有益な意見を頂いた。ここに謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) Oke TR. 1988. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*. **12**: 471-508.
- 2) Arnfield AJ. 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water and the urban heat island. *International Journal of Climatology*. **23**: 1-26.
- 3) Moriwaki R. and Kanda M. 2004. Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor and CO<sub>2</sub> over a suburban area. *Journal of Applied Meteorology*. **43**: 1700-1710.
- 4) Christen A, Vogt R. 2004. Energy and radiation balance of a central European city. *International Journal of Climatology*. **24**: 1395-1421.
- 5) Kawai T, Kanda M, Narita K, Hagishima A. 2006. Evaluation of simple urban energy balance model for mesoscale simulation (SUMM) with comprehensive outdoor scale model experiment for urban climate (COSMO). *International Journal of Climatology*. (submitted)
- 6) Grimmond CSB, Oke TR. 1999. Heat storage in urban areas: local-scale observations and evaluation of a simple model. *Journal of Applied Meteorology* **38**: 922-940.
- 7) Oke TR. 1987. *Boundary Layer Climates*, 2nd edn. Routledge: New York.
- 8) Kanda M, Inagaki A, OZ Marcus, S Raasch, Watanabe T. 2004. LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes. *Boundary Layer Meteorology* **110**: 381-404.
- 9) Kanda M, Kawai T, Narita K, Hagishima A, and Moriwaki R. 2006. A comprehensive outdoor scale model experiment for urban climate. *6th International Conference on Urban Climate, 12-16 June 2006 Goteborg, Sweden*, 270-273.
- 10) Oke TR, Spronken-Smith RA, Jauregui E, Grimmond CSB. 1999. The energy balance of central Mexico City during the dry season. *Atmospheric Environment* **33**: 3919-3930.
- 11) Voogt JA, Oke TR. 1997. Complete surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology* **36**: 1117-1132.
- 12) Pearlmutter D, Berliner P, Shaviv E. 2005. Evaluation of urban surface energy fluxes using an open-air scale model. *Journal of Applied Meteorology*. **44**: 532-545.
- 13) 河合 徹, 金賀 将彦, 神田 学. 2005. 3次元簡易都市キャノピーモデルの構築と屋外縮小模型都市を用いた実験. 土木学会水工学論文集. **49**: 349-354.
- 14) Tso CP, Chan BK, Hashim AH. 1990. An improvement to the basic energy balance model for urban thermal environment analysis. *Energy and Buildings*. **14**: 143-152.

(2006.9.30受付)