

## 1 はじめに

地球規模の温暖化は世界的に共通の関心事になっている。また、ヒートアイランド現象(都市の気温上昇)は年々深刻化している。ここ100年間で東京の気温は約3℃上昇したが、同期間の日本全体の気温上昇は約1℃であった<sup>1)</sup>。この傾向から東京地域の場合は、地球規模の長期的な気候変動に加えてヒートアイランドによる気温の変化が顕著に表れていることが強く示唆される。

気温は、建築や人の生活において基本的な環境要因であると言える。都市のヒートアイランド現象は地域の人口密度とのつながりが強いとされている<sup>2)</sup>。したがって、ヒートアイランド化でもたらされた気温の変化は都市の過密性を反映するものであり、そこに居住する人間に多大な影響を与える可能性がある。

図1に都市の気温上昇の要因を示す。まず、地表面被覆の影響が考えられる。東京23区の地表面の8割近くは建物、道路等の人工的な構造物で被覆されており、水面・公園等の自然要素による被覆割合は2割に満たない<sup>3)</sup>。アスファルト、コンクリートの表面温度は夏季の日中に50~60℃に上昇し夜間においても蓄熱効果で温度がなかなか下がらない性質がある。その結果、気温も上がってしまうのである。

2番目の要因は人工排熱である。国土交通省・環境省は、東京23区における建物、交通、事業所等から発生する人工排熱について時空間データベースを整備した<sup>4)</sup>。人工排熱の日集計値(8月平均を想定)を調べると東京23区全体で約2,000TJ/日であり、この値を東京8月の日射日総量値と比較すると、快晴日の1割、月平均日の2割に相当する。自然界では大気を暖める対流熱量は太陽放射のせいぜい1割程度<sup>5)</sup>であり、それを踏まえると都市の人工排熱は大変大きい熱源であると言える。また、人工排熱の中で建物からの発生量が最も大きく、全体の半分を占めていることも指摘されている。

もう1点は都市の風通しである。東京臨海部では屏風状の超高層ビル群が建設されており、環境影響が危惧されている<sup>6)</sup>が、高層建築物がもたらす風の変化が周辺の気温に及ぼす影響は十分解明されていないのが現状である。東京23区には建物が160万棟存在し、東京23区全体の面積の30%を占有している<sup>7)</sup>。建築物は自然地形と共に都市域の凹凸を形成しており、その形態を工夫して都市の風通し改善を図ることが必要である。

以上から気温低減のため、まず行うべき対策は都市で発生する熱量を減らすことである。都市で発生する熱には地表面被覆からの放熱と

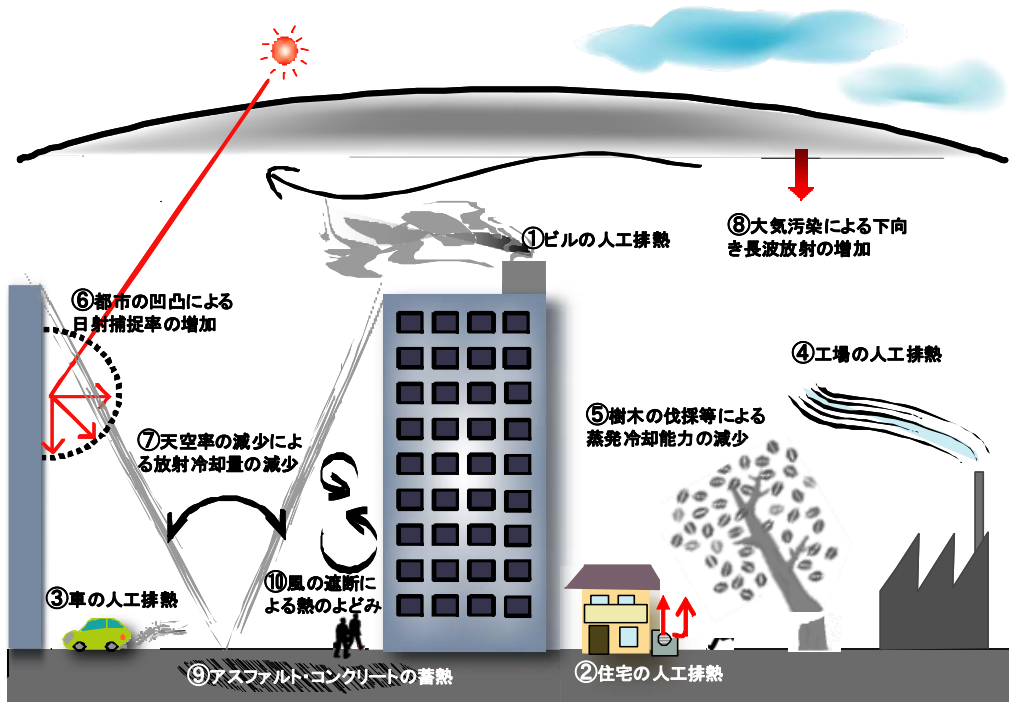


図1 都市が高温化する要因

人工排熱があり、これらの削減を図る必要がある。これまで、緑化や高反射仕上げ等による表面温度の低減<sup>8)9)</sup>や室外機への水散霧による顕熱抑制<sup>10)</sup>など様々な発生熱源対策が講じられてきた。個々の対策の推進は極めて重要かつ有効であるが、ヒートアイランド現象が生じる都市スケールとの乖離が大きく、対策効果のリアリティを得ることは難しい。

発生した熱を都市空間で澱ませないこと、風通しを良くすることも重要な視点である。発生熱源対策が個々の建材や機器の問題であるのに対して、風通しの評価においては大気側を含めて解析のスケールを拡げて考える必要がある。都市を俯瞰すると、都市で発生した熱を上空へ効率良く放散させる都市構造が求められる。日本の大都市の多くは沿岸部に位置しており、海陸風循環が発生するのでその冷熱ポテンシャルを活用することも有効であると考えられる<sup>11)</sup>。しかし、都市の上空を流れる風と同時に、河川や街路、建物等の都市の複雑な隙間を流れる風をマイクロに再現する解析は実質困難であった。

都市域には建物、樹木等が複雑に配置されており、都市空間内およびその上空で熱や運動量の輸送が行われている。都市の構成要素は様々なスケールを有しており、全ての構成要素を一律に取り扱うことは計算機能力の制約から不可能である。そこで、全ての構成要素を直接解像することはあきらめ、メッシュ単位で粗視化する行為が通常必要になる。メッシュ幅や解析領域の大きさは目的によるため、それに応じてモデル化が必要である。

数値モデルには大きく、メソスケールモデル<sup>12)13)14)15)16)</sup>、キャノピーモデル<sup>17)18)19)20)21)</sup>、CFD (Computational Fluid Dynamics; 数値流体力学)<sup>22)23)24)25)</sup>の3つが存在する。これらの数値モデルのメッシュ解像度、解析領域のスケール(水平方向)を整理したのが図2である。本研究資料では、現実の建物配置・形状を解像する計算方法をCFDと呼ぶ。CFDは市街地の風環境予測において有効な手法の一つであり、様々な適用事例が見られる<sup>26)</sup>が、広域スケールの問題へはほとんど適用されていないのが現状である。メソスケールモデルはメッシュ解像度が粗いが広域を取り扱いやすく、キャノピーモデル

は上記モデルの中間のスケールを取り扱うのに適している。メソスケールモデルやキャノピーモデルは原理上、街区の内部を細かく分析するのには向いていない<sup>27)</sup>。だから、図中にメッシュ解像度 10m 付近で実用上、“gap”(隙間)があるとして区別している。この“gap”(隙間)の克服に向けて、CFDの解析領域の拡張、メソスケールモデルなどの異種モデルとのネスティング(入れ子式に大小を結合すること)が考えられる。後者については数多くの研究事例が見られる<sup>28)</sup>ので、本稿では広域CFD解析の可能性について述べる。

広域CFD解析には2つの視点がある。一つは、学術的興味に関するものである。図3に1km四方領域における風、気温の分布を示す。メソスケールモデルを用いる場合であればこの領域は1kmメッシュで代表されることになる。しかし、実際には数多くの建物、道路がこの地区には存在しており、土地利用、起伏について相当のばらつきが存在する。もし、これらの複雑な3次元形状を考慮して広域の計算を実施したら、都市境界層にどのような現象が見られるのか。これが第一の視点である。

第二の視点は都市設計への応用である。図3を細かく見ると蛇行する河川に沿って風が流れていることがわかる。しかし、蛇行のコーナー部分では風が直進し、そのまま市街地に流入している。そのような場所の気温はその他の市街地に比べて1℃程度低い。そういった低温域は河川の周辺にたくさん見られる。広域のCFD

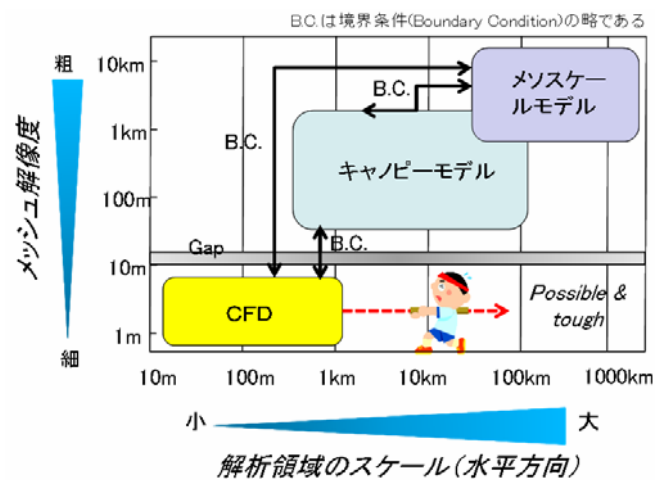


図2 ヒートアイランドの数値モデル

解析から得られる情報は、パッシブ冷却効果を都市デザインに取り入れる上でとても重要である。

メッシュの高解像度化と十分な解析領域の確保は、数値解析に携わる研究者が慢性的に抱える要望であったが、そのためには高性能なスーパーコンピュータの活用が不可欠であると言える。独立行政法人海洋研究開発機構が運用する大規模なベクトル並列型スーパーコンピュータ、「地球シミュレータ」は、主記憶容量と演算処理速度において運用開始時点（2002年3月）で世界最大の規模と能力を持つ設備であり、広く外部研究機関にもその利活用が図られている。このため、独立行政法人建築研究所では、2004年度から2008年度まで一般公募利用として「地球シミュレータ」を活用して研究を進めてきたところであり、本成果は「地球シミュレータ」に負うところが大きであった。

なお、「地球シミュレータ」とは、640台のスーパーコンピュータおよび付帯設備から構成され、主記憶容量は10テラバイト、演算処理速度は40テラフロップス（テラフロップスとは、コンピュータの処理速度を表す単位の一つで、1秒間に1兆回の浮動小数点数演算（実数計算）を実行できることを意味する）である。2009年3月より新システム（主記憶容量：20テラバイト、演算処理速度：131テラフロップス）の運用を開始しており、2009年度には「地球シミュレータ」の一般公募利用として、地球科学分野16件（地球温暖化、マントル、宇宙等）、先進・創出分野9件（ゲノム、原子力等）が実施されている。「地球シミュレータ」は、10～20kmメッシュによる全球解析<sup>29)30)</sup>を可能とし、気候変動に関する政府間パネルの2007年ノーベル平和賞受賞に貢献するなど、気候変動予測において大きな役割を果たしている。

本研究は「地球シミュレータ」を都市環境問題に初めて活用し、建物周辺から都市スケールに至る熱環境を高解像度で予測する大規模数値解析技術の開発に取り組むものである。東京23区全域を水平5mメッシュで詳細に解像した大規模数値解析を実施した結果について紹介を行うと共に、都市形態と熱環境の関係を考察する。なお、本研究資料で述べる、計算プログラムの最適化や計算の実行は旧システム上で

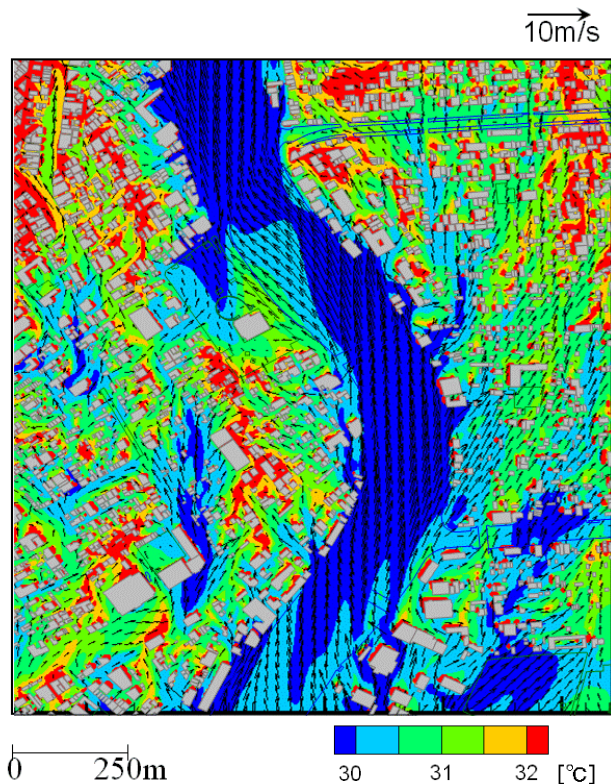


図3 隅田川周辺の気温と風（地上10m）

実施された。

本研究資料で使用する記号について表1にまとめる。

表 1 本研究資料で使用する記号一覧

記号	意味	単位
$a$	葉面積密度 ( $a=1.5$ )	$m^2/m^3$
$a_c$	葉の吸収率	—
$B_C$	固定部分のメモリ量	GB
$C_d$	樹冠の抵抗係数 ( $C_d=0.20$ )	—
$C_g$	土壌の比熱	J/kg/K
$C_p$	混合空気の定圧比熱 ( $= (1-q)C_{p,a} + qC_{p,v}$ )	J/kg/K
$C_{p,a}$	乾燥空気の定圧比熱	J/kg/K
$C_{p,v}$	水蒸気の定圧比熱	J/kg/K
$C_{p\epsilon 1}$	$\epsilon$ 方程式の樹木抵抗項に係る補正係数 ( $C_{p\epsilon 1}=1.8$ )	—
$C_{q3}$	モデル定数 ( $C_{q3}=0.25$ )	—
$C_{\epsilon 1}$	モデル定数 ( $C_{\epsilon 1}=1.44$ )	—
$C_{\epsilon 2}$	モデル定数 ( $C_{\epsilon 2}=1.92$ )	—
$C_{\epsilon 3}$	モデル定数 ( $C_{\epsilon 3}=1.44$ )	—
$C_{\theta 3}$	モデル定数 ( $C_{\theta 3}=0.25$ )	—
$C_{\mu}$	モデル定数 ( $C_{\mu}=0.09$ )	—
$D$	拡散係数	kg/m/s
$e$	水蒸気圧	mmHg
$E$	蒸発潜熱	W/m <sup>2</sup>
$E_r$	並列化効率	—
$e_s$	日射ベクトル	—
$e_{sat}$	飽和蒸気圧	Pa
$f$	Coriolis パラメータ ( $= 2\Omega \sin \phi$ )	1/s
$F$	葉の配置関数	—

$F_{ci}$	コリオリ力	$\text{kg/m}^2/\text{s}^2$
$F_i$	抗力	$\text{m/s}^2$
$F_k$	樹木モデルの $k$ 、 $\varepsilon$ 輸送方程式の付加項	$\text{m}^2/\text{s}^3$
$F_L$	蒸発潜熱	$\text{W/m}^3$
$F_S$	対流顕熱	$\text{W/m}^3$
$g_i$	加速度	$\text{m/s}^2$
$G$	伝導熱流	$\text{W/m}^2$
$G_f$	流体の有効占有率	—
$G_j$ (具体的には $G_x, G_y, G_z$ )	座標系第 $j$ 軸に垂直な計算セル界面における面開口率 ( $G_x$ : $x$ 軸に垂直、 $G_y$ : $y$ 軸に垂直、 $G_z$ : $z$ 軸に垂直)	—
$G_k$	浮力による乱流エネルギー $k$ の生産項	$\text{Pa/s}$
$G_s$	流体の面積占有率	—
$G_v$	計算セルにおける流体の体積占有率	—
$h$	熱伝達係数	$\text{W/m}^2/\text{K}$
$H$	対流顕熱	$\text{W/m}^2$
$H_B$	建物高さ	$\text{m}$
$H_B'$	判定当該メッシュにおける地上からの建物の高さ	$\text{m}$
$h_c$	解析セルの厚み (高さ方向)	$\text{m}$
$h_p$	壁面から壁面第 1 定義点までの距離	$\text{m}$
$h_q$	物質伝達係数 ( $= h/C_p$ )	$\text{kg/m}^2/\text{s}$
$h_S$	太陽高度	$\text{rad.}$
$I_0$	太陽定数	$\text{W/m}^2$
$k$	乱流エネルギー	$\text{m}^2/\text{s}^2$
$K$	運動エネルギー	$\text{m}^2/\text{s}^2$
$\hat{K}$	平均流の運動エネルギー	$\text{m}^2/\text{s}^2$

$k_p$	壁面第 1 定義点の乱流エネルギー	$\text{m}^2/\text{s}^2$
$k_1$	消散係数	—
$L$	水の蒸発潜熱	$\text{J}/\text{kg}$
$L(x)$	放射エネルギー	$\text{W}/\text{m}^2$
$L_a \downarrow$	大気放射量	$\text{W}/\text{m}^2$
$\ell_m$	距離	$\text{m}$
$L_s \uparrow$	地表面からの長波放射量	$\text{W}/\text{m}^2$
$m$	メモリ量	$\text{GB}$
$m_r$	1 プロセス数当たりのメモリ量	$\text{GB}/\text{個}$
$M_s$ (具体的に は $M_a, M_v$ )	大気成分 $s$ の分子量 ( $M_a$ : 乾燥空気、 $M_v$ : 水蒸気)	$\text{kg}/\text{mol}$
$N$	観測データ数	個
$N_p$	プロセッサ数	個
$N_V$	ベクトルプロセッサによる高速化係数	—
$N_x$	$x$ 軸方向の領域分割数	個
$N_y$	$y$ 軸方向の領域分割数	個
$N_z$	$z$ 軸方向の領域分割数	個
$p$	圧力	$\text{Pa}$
$P$	Exner 関数	—
$p_a$	乾燥空気の分圧	$\text{Pa}$
$P_k$	平均速度勾配による乱流エネルギー $k$ の生産項	$\text{Pa}/\text{s}$
$Pr_T$	乱流 Prandtl 数 ( $Pr_T=0.9$ )	—
$P_S$	大気透過率	—
$p_v$	水蒸気分圧	$\text{Pa}$
$p_0$	基準圧力	$\text{Pa}$

$q$	比湿	kg/kg
$q_{G,sat}$	地表面飽和比湿	kg/kg
$Q_L$	人工排熱(潜熱)	W/m <sup>3</sup>
$q_m$ (具体的には $q_R, q_W, q_G, q_c$ )	表面比湿 ( $q_R$ : 建物屋上、 $q_W$ : 建物壁面、 $q_G$ : 地表面、 $q_c$ : 葉)	kg/kg
$Q_{RG}$	建物の屋上面および地表面からの排熱量	W / m <sup>3</sup>
$\tilde{Q}_{RG,i}$	当該解析セルの建物の屋上面および地表面からの排熱のうちセル i に分配される排熱量	W
$Q_S$	人工排熱(顕熱)	W/m <sup>3</sup>
$Q_W$	建物の壁面からの排熱量	W / m <sup>3</sup>
$\tilde{Q}_{W,i}$	当該解析セルの建物の壁面からの排熱のうちセル i に分配される排熱量	W
$\tilde{Q}_{o,i}$	当該解析セルの建物の屋上面、壁面および地表面からの排熱のうちセル i に分配される排熱量	W
$r$	実質的な格子幅の比	—
$R$	混合空気の気体定数 ( $= (1-q)R_a + qR_v$ )	J/kg/K
$R_a$	乾燥空気の気体定数 ( $= R_o/M_a$ )	J/kg/K
$r_c$	葉の反射率	—
$R_{RG,k}$	当該解析セルの固体部分を考慮した、建物の屋上面および地表面からの余剰排熱が周辺セル k+1 (直上) に分配される割合	—
$R_v$	水蒸気の気体定数 ( $= R_o/M_v$ )	J/kg/K
$R_{W,ij}$	当該解析セルの固体部分を考慮した、建物の壁面からの余剰排熱が周辺セル i±1、j±1 (水平方向) に分配される割合	—
$R_o$	普遍気体定数	J/mol/K
$R_{o,ijk}$	当該解析セルの建物の屋上面、壁面および地表面からの排熱が周辺セル i±1、j±1 (水平方向) および k+1 (直上) に分配される割合	—
$R_\tau$	乱流時間スケールの比 ( $R_\tau=0.8$ )	—
$S$	解析領域	km <sup>2</sup>
$\mathbf{S}$	面素ベクトル	—
$Sc$	Schmidt 数 ( $Sc=0.5$ )	—
$Sc_T$	乱流 Schmidt 数 ( $Sc_T=0.9$ )	—

$S_d$	法線面直達日射量	$W/m^2$
$S_d \downarrow$	直達日射量	$W/m^2$
$S_g \downarrow$	全天日射量	$W/m^2$
$S_m$ (具体的には $S_R, S_W, S_G, S_\ell$ )	表面積 ( $S_R$ : 建物屋上、 $S_W$ : 建物壁面、 $S_G$ : 地表 面、 $S_\ell$ : 葉)	$m^2$
$S_n \downarrow$	正味全天日射量	$W/m^2$
$S_s \downarrow$	天空日射量	$W/m^2$
$t$	時間	s
$T$	気温	K
$T_g$	土壌温度	K
$T_m$ (具体的には $T_R, T_W, T_G, T_c$ )	表面温度 ( $T_R$ : 建物屋上、 $T_W$ : 建物壁面、 $T_G$ : 地 表面、 $T_c$ : 葉)	K
$T_{SCALAOR}$	スカラプロセッサの総計算時間	s
$T_{SINGLE}$	シングルプロセッサによる総計算時間	s
$T_{PARALLEL}$	複数のプロセッサによる総計算時間	s
$T_{VECTOR}$	ベクトルプロセッサの総計算時間	s
$U$	スカラー風速、 $U = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$	m/s
$u_b$	CFD 解析領域の上端における風速の境界条件	m/s
$u_j$	風速第 $j$ 成分	m/s
$u_p$	壁面第 1 定義点の壁面接線方向速度	m/s
$u^*$	摩擦速度	m/s
$V$	解析セルの体積	$m^3$
$V_c$	体積容量	$m^3$



$W_1$	中間の変数、 $W_1 = \left(\frac{u^*}{l_m}\right)^2 + \frac{1}{Pr_T} \frac{g_i}{\tilde{\theta}} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_i} + \frac{1}{Sc_T} \frac{g_i}{W_1} \frac{\partial \tilde{q}}{\partial x_i}$	$1/s^2$
$W_2$	中間の変数、 $\frac{1}{W_2} = \frac{1}{\tilde{R}} \left( \frac{R_o}{M_v} - \frac{R_o}{M_a} \right)$	—
$W_3$	中間の変数、 $W_3 = \frac{1}{Pr_T} \frac{g_i}{\tilde{\theta}} \frac{\partial \tilde{\theta}}{\partial x_i} + \frac{1}{Sc_T} \frac{g_i}{W_1} \frac{\partial \tilde{q}}{\partial x_i}$	$1/s^2$
$x$	$x$ 座標	m
$X$	世界測地系座標（南北方向）	m
$x_j$	座標系第 $j$ 軸	m
$x_n$	壁面鉛直方向の座標	m
$y$	$y$ 座標	m
$Y$	世界測地系座標（東西方向）	m
$Y_s$	気体成分 $s$ の質量分率	kg/kg
$z$	$z$ 座標	m
$z_b$	CFD 解析領域の上端の高さ	m
$z_B$	土壌の不易層深さ	m
$Z_S$	判定当該解析メッシュの日射到達地上高さ	m
$\alpha$	アルベド	—
$\alpha_g$	熱拡散係数	$m^2/s$
$\alpha_r$	並列化率	—
$\beta$	蒸発効率	—
$\beta_F$	比例部分のメモリ量	GB
$\beta_r$	ベクトル化率	—
$\gamma$	時角	rad.
$\delta$	赤緯	rad.
$\delta_{ij}$	ディラックのデルタ関数	—
$\varepsilon$	乱流エネルギー散逸率	$m^2/s^3$
$\varepsilon_c$	葉の射出率	—
$\varepsilon_G$	地面の射出率	—

$\varepsilon_{ijk}$	エディントンのイプシロン	—
$\varepsilon_0$	収束判定のための微小数	—
E	経験定数 (E=9.0)	—
$\zeta$	物理量	
$\eta$	熱伝導係数等の補正值	—
$\theta$	温位	K
$\theta_s$	仰角	rad.
$\kappa$	カルマン定数	—
$\lambda$	混合空気の熱伝導係数	W/m/K
$\lambda_g$	土壌の熱伝導係数	W/m/K
$\lambda_T$	混合空気の乱流熱伝導係数	W/m/K
$\mu$	混合空気の粘性係数	Pa·s
$\mu_T$	乱流粘性係数	Pa·s
$\nu$	動粘性係数	m <sup>2</sup> /s
$\xi$	物理量	
$\xi_N$	同一と見なされる実験条件で繰り返し観測を行ったときに得られる $N$ 個の物理量 $\xi$ の観測データ	
$\xi'$	物理量 $\xi$ のアンサンブル平均からの変動	
$\xi''$	物理量 $\xi$ の Favre 平均からの変動	
$\overline{\xi}$	物理量 $\xi$ のアンサンブル平均	
$\tilde{\xi}$	物理量 $\xi$ の Favre 平均	
$\xi_0$	物理量 $\xi$ の発生量	
$\rho$	混合空気の密度	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_a$	乾燥空気の密度	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_g$	土壌の密度	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_v$	水蒸気の密度	kg/m <sup>3</sup>

$\sigma$	ステファンボルツマン定数 ( $\sigma_k=5.67 \times 10^{-8}$ )	W/m <sup>2</sup> /K <sup>4</sup>
$\sigma_k$	モデル定数 ( $\sigma_k=1.0$ )	—
$\sigma_q$	モデル定数 ( $\sigma_q=0.5$ )	—
$\sigma_\varepsilon$	モデル定数 ( $\sigma_\varepsilon=1.3$ )	—
$\sigma_\theta$	モデル定数 ( $\sigma_\theta=0.5$ )	—
$\tau$	透過率	—
$\phi$	計算対象区域の緯度	rad.
$\phi_s$	方位角	rad.
$\psi$	天頂角	rad.
$\Omega$	地球の自転角速度	rad./s