

熱環境に対する都市空間構造の影響

Effects of urban spatial structure for thermal environment

岡 村 聖

OKAMURA Kiyoshi

Abstract : The urban canopy model could reproduce typical temporal change of heat fluxes in sunny days over urban canopy with and without vegetation. During consecutive sunny days, daytime sensible heat flux did not show rapid increase from day to day over the modeled urban canopy with vegetation. Analysis of the model simulation clearly indicated this was due to the vegetation's ability to subtract water in deep soil layer and to use it for evapo-transpiration. Another interesting feature found in the simulation with the vegetation case was that vegetation canopy forms cool island through development of relatively cool mixed layer with large turbulence, associated with drag and strong wind shear by vegetation, and small sensible heat flux from the canopy to upper layer.

Keywords : climate mitigation, numerical model, urban canopy

1. はじめに

気象モデルを用いて地域規模における流れ、気温等を予測する場合は、計算コストを削減するために土地利用の影響を簡略化したパラメータで扱うことが一般的である。熱環境の緩和等を考える場合には、土地利用計画においてこのような大きなスケールで考えないといけない特有の現象もあり、ある程度それらを明らかでないと考えている（例えば、Kitada and Okamura et al., 1998）。

また、気象モデルの応用として、モデルによって推定された流れ、温度、拡散場を用いた、数日間に渡る大気汚染物質の輸送・反応・沈着モデルのシミュレーションを中部地方全域について行い、航空機観測結果等との比較を通して、特にオゾンの挙動について検討も行った（例えば、Kitada and Okamura et al., 2000）。

一方、大都市の中心地域をカバーする都市規模では、植生や都市ビル群が存在する層（キャノピー層）が重要となる。この層では大気と地物の間で運動量・熱・水蒸気量などが直接的に交換されており、風速・気温・温度分布などは複雑になっている（近藤、1994）。

本論文では、高さ方向への分布を持った植生及び都市建造物群が様々な割合で混在する場合の熱、運動量、水蒸気輸送への影響を、筆者が開発した数値モデルを用いて調査することを目的とする。また、高さの異なる植物群の種々の割合での導入が、都市の高温化の緩和にどの程度有効であるかも検討する。

2. 気象モデル

数値モデルの詳細については、Okamura and Kitada (1998) に述べられている。モデルには、サブグリッド

スケールの土地利用として、住宅、ビル、道路、草地、高木、低木、水田、河川等の水面、計 8 種類の地表面被覆率が考慮されている。また、植生や建物の L A I、植物の土壌水分利用可能性、建物の壁体への蓄熱効果、太陽高度の変化、キャノピー層内の短波、長波放射応答等も考慮されている。

図 1 はメソスケール気象モデルで扱う計算領域の例である。図 1 a は地域規模、ここでは、名古屋を含む中部地方を対象とした、数百 km 四方の領域を示す。このスケールの気象現象としては、海陸風や山谷風、ヒートアイランド現象、各地の特有の地形に応じて吹く局地風などがある。これら比較的大きなスケールの現象は土地利用の影響を簡略化したパラメータで扱ったモデルでも、予測可能である。

図 1 b は、本論文で対象とする都市規模、ここでは、名古屋を想定した 20 km 四方程度の領域を示す。はじめに述べたように、このスケールでは、植生や都市ビル群が存在する層（キャノピー層）が重要となる。層内の複雑な風速・気温・温度分布を予測するためには、キャノピー内に鉛直構造を持つ気象モデルが必要となる。これまでに報告されたモデルとしては、植生に対して、Yamada (1982)、神田ほか (1997)、都市キャノピーに対して、Uno et al. (1989)、近藤ほか (1998)、等がある。これらのモデルは植生、都市両キャノピーどちらか一方に注目しているため、都市への植生導入効果を定量的には調べていない。他に開発されたモデルとの主な違いは、筆者のモデルは都市キャノピーと同時に、高度分布を持つ植生の蒸散機能による気候緩和効果をモデル内で扱っている点にある。また、本キャノピーモデルは、図 1 a

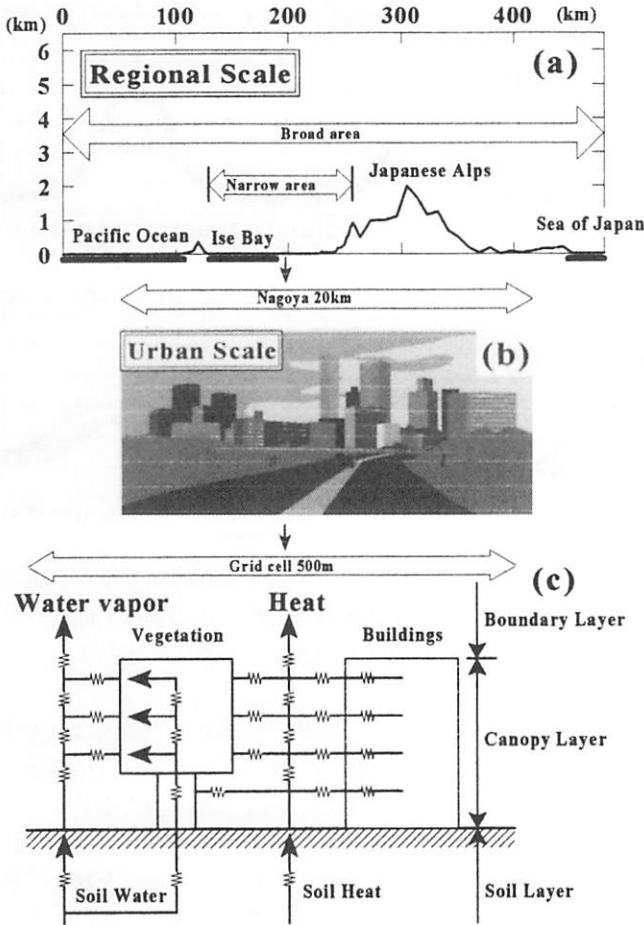


図1：メソスケール気象モデルで扱う計算領域の例；(a)地域スケール、(b)都市スケール、(c)キャノピーモデルの概略

の様な大領域に対しても適用可能である。図1cはモデル化された都市キャノピー層の概略を示す。

3. シミュレーションケース

各シミュレーションでは、植生、建物およびその混合体キャノピーが、大気境界層およびキャノピー層内の温度、比湿、流れに与える影響に注目し、植生の被覆率 (η_P) および建物の被覆率 (η_U) をシミュレーションの重要なパラメータとして変化させた。バックグラウンドの流れとして、秒速10mの地衡風を設定した。以下に、設定されたシミュレーションケースを示す。

表1は植生あるいは建物が独立して存在するケースであり、各キャノピー特有の現象を調べるためのケースである。

表2は植生および建物が混在したケースであり、都市部への植生導入による気候緩和効果に注目したケースである。

表3は建物の蓄熱効果に注目したケースである。最近の建築物の多くは建物の壁面や屋上面に断熱材を導入し、空調機を用いた室内熱環境を有利にしている。建物に熱フラックスが入りにくくなれば、その分大気を暖める顕熱フラックスが増え、夏季の大気熱環境にとってはマイ

ナスに働くことが予想される。このことを調べるために、建物内の熱容量を50%にカットしたケースと逆に50%増やしたケースおよび建物の表面から2.4~9.8cmに断熱材を入れたケースを設定し、このことを調べる。

表4は人工廃熱の影響に注目したケースである。都市域高温化の要因の一つとして人工廃熱が考えられるが、建物のように鉛直方向に複雑な空間構造を持つ場合、排出される高さによって熱環境に与える影響は異なることが予想される。人工廃熱を地上付近(4m)から排出したケースと建物の屋上面(20m)から排出したケースを考え、その影響を知ることを目的としたケースである。ここで、使用された人工廃熱データは、Kitada et. al.

(1998) で使用された濃尾平野のデータを参考とし、日中 $60Wm^{-2}$ 、夜間 $20Wm^{-2}$ とした。人工廃熱は、例えば、東京駅付近で日中 $110Wm^{-2}$ 程度と見積もられている(近藤, 1998)。

図2に植生キャノピーの葉面積密度とLAIを示す。LAIとは単位面積上にある葉の総面積のことで、たとえばLAI=4は $1m^2$ の地面の上にある葉の総量が片面面積で $4m^2$ あることを示す。森林キャノピーの葉面積指数LAIは典型的に $5(m^2/m^2)$ であり(気象庁予報部, 1989)、実際の観測値としては、たとえば、岐阜県高山での7月下旬から8月下旬に樹下の笹藪の上で3.5~4(山本ほか, 1996)、同じく高山の冷温帯落葉林で4.2(山本ほか, 1997)等の報告がある。本研究では、Yamada(1982)が採用した4.8(葉の部分以外も含めて5.3)を用いた。

表1：植生あるいは建物が単体で存在する場合

	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7
η_P	0	0.6	0.3	0.1	0	0	0
η_U	0	0	0	0	0.6	0.3	0.1

表2：植生と建物が混合体で存在する場合

	C 21	C 22	C 23	C 24	C 25
η_P	0.3	0.1	0.6	0.3	0.1
η_U	0.3	0.6	0.3	0.3	0.3

表3：建物の蓄熱効果に注目した場合

	建物の熱容量を50%削減			建物の熱容量を50%増			断熱材使用		
	C 41	C 42	C 43	C 44	C 45	C 46	C 47	C 48	C 49
η_U	0.6	0.3	0.1	0.6	0.3	0.1	0.6	0.3	0.1

表4：人工廃熱の影響に注目した場合

	地上付近から廃熱			建物の屋上から廃熱		
	C 61	C 62	C 63	C 64	C 65	C 66
η_U	0.6	0.3	0.1	0.6	0.3	0.1

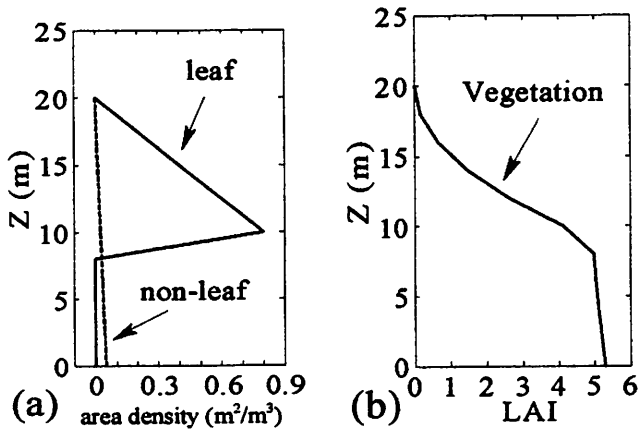


図2：植生キャノピーの概念図；(a)植生の表面積密度，(b) LAI (Leaf Area Index)。

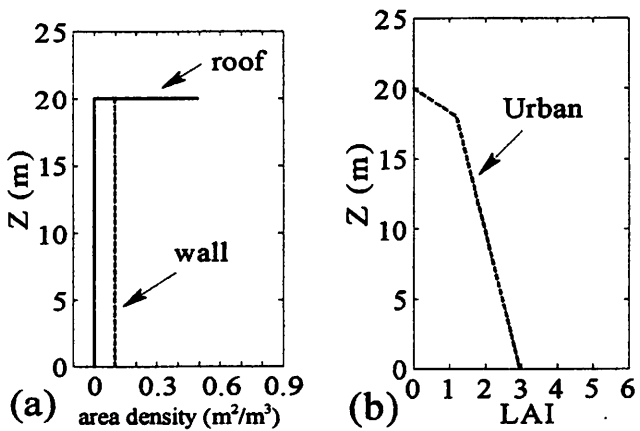


図3：建物キャノピーの概念図；(a)屋上面と側壁面の表面積密度，(b) LAI (単位面積上にあるビル表面の総面積)。

図3に建物キャノピーの屋上面と側壁面の表面積密度および LAI を示す。一階当たりの高さが4 m、屋根面積20×20m²の5階建て直方体のビル群が南向きに配置された場合を想定した。本研究では、便宜的に、単位面積上にあるビル表面の総面積のことも LAI と呼ぶ。

4. シミュレーション結果と考察

4.1 キャノピー層からの熱フラックス

地表面特性が上空大気への顕熱および潜熱フラックスをどう変えるかは、大気境界層の時間変化に影響し、ひいては局地的な流れを励起する元となる。図4 aは、このフラックスの日変化のケース間による違いを見るために、高度20m (C2からC7の条件では、ちょうどキャノピー層の上端のレベルに位置する) での各ケースの顕熱フラックスを2日分プロットしたものである。図中、正の符号は大気上空へのフラックスをあらわす。

日中、1日目よりも2日目の顕熱フラックスの方が概して大きい。図4 bに示す潜熱フラックスはほぼ逆の変

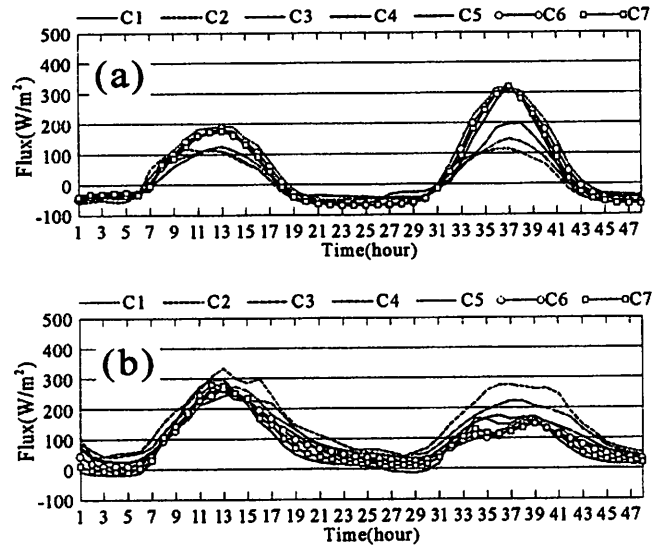


図4：C1からC7のケースに対する(a)顕熱フラックスと (b) 潜熱フラックスの日変化。正の値は上向きフラックス、負の値は下向きフラックスを表わす。

化を示すから、2日目の顕熱フラックスの増大は、土壌の水分量の減少により潜熱フラックスが2日目に減少した分を補償するように生じていることが伺える。

2日目の顕熱フラックスの日最大値はC1、C5、C6、およびC7ではほぼ一致していて、ピークを挟んで建物の占有率が高いほどフラックスが大きい。特に、夕方この傾向が顕著で、C1は18時には顕熱フラックスが逆向きになるが、C5は20時まで正のフラックスを示す。建物が南向きに配置されている場合、建物表面への太陽放射量は屋上面では正午、東向き壁面で8時、西向き壁面では16時にそれぞれピークをもつが、南向き壁面では正午ごろ太陽天頂角が小さくなるためこれが減少する。このため裸地のケースと比べ一日のトータル量としては建物があるケースのほうが顕熱フラックスは大きくなるが、そのピーク値に大きな違いは見られなかった。また、建物が存在する場合に午後の遅くまで正の顕熱フラックスを示すのは、日中にわたって建物に貯えられた熱が、建物表面での放射冷却を遅らせたためと考えられる。

一方、植生が存在するC2からC4のケースでは、2日目における急激な潜熱フラックスの減少は見られず (図4 b)、したがって顕熱フラックスの増加もない (図4 a)。この傾向は、地表の植被率が高いC2 (60%) でもっとも顕著である。降水がないという条件は、すべてのケースで共通であるから、植生がある場合に2日目でも潜熱フラックスが落ちないことは、土中のより深いところから植物が水分を吸い上げ気中に供給していることを意味する。実際、図5 bに示すように、深部 (13.86 cm) ではC2からC4ケースの含水率がC5からC7ケースのそれに比べて低くなっている。一方、浅い所 (図5 a : 1.28cm) では逆に植生のあるケースの方が、含水率が高くなっている。

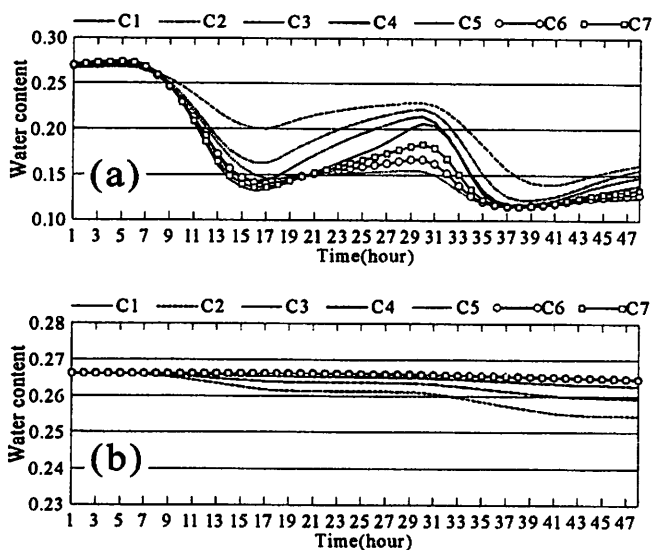


図5：土壌水分の日変化：(a)深さ1.28cm、(b)深さ13.86cmである。

この原因の一つは葉群の遮断効果により太陽放射量が減少し、地面からの直接蒸発が抑えられたためである。図6は地表面における熱収支を示す。1日目は表層土壌水分が十分に満たされているので、大気側の蒸発要求に対して(a)C1、(b)C2、(c)C5ともに順調に潜熱フラックスを放出している。夜間は表層からの蒸発が抑えられるので土壌下層からの毛管張力による水分移動が有効になるが、移動速度は遅いため1日目の蒸発量を補うほど十分には補給されない。結果として、(a)では、2日目の10時に、(c)では9時に表層水分の蒸発抑制が働らき、潜熱がフラックスが減少し、顕熱フラックスが増大する。(b)では地表面に届く太陽放射が葉群によるさえぎりにより小さいこと、植生による蒸散が盛んなこと、植生の大きなLAIのため地表風速が小さいことなどにより、地表面からの直接蒸発要求が小さい。(c)もキャノピーの存在のため地表面に到達する放射量は(a)より小さいが、建物の蓄熱効果のためキャノピー内の温度が高いこと、キャノピーの存在のため大気が乱れていることなどで、夜間でも約 50Wm^{-2} の潜熱が放出され続けたため表層の乾燥化が進み、翌日の早い段階で蒸発が抑制されたことが示唆される。

夏季の耐え難い高温化の原因となる顕熱フラックスを減少する手段の一つとして、植生の導入が考えられる。しかし、植生の導入がこの顕熱フラックスの減少に、定量的にどの程度の役割を果たすのかはあまりよく知られていない。このことを評価するために、建物の被覆率が60%のC5と、これに対してそれぞれ30%および10%の植生を導入したC21、C22の各ケースにおける顕熱フラックスの日変化パターンを図7に示す。図7aは顕熱フラックスの減少に植生の導入が大きな効果を持つことを示唆する。例えば、10% (C22) の植生の導入は2日目の顕熱フラックスの最大値を約23%カットしている(317

Wm^{-2} から 244Wm^{-2})。この顕熱フラックスの減少に応じて潜熱フラックスが増加していることが、図7bからわかる。10%の植生の導入が23%の顕熱を減らすという非線型性の理由は、植生の導入による地表面の占有面積は10%であるが、その上空には図2に示す葉面積が対応しており、効率よく太陽放射量を潜熱フラックスに変換し

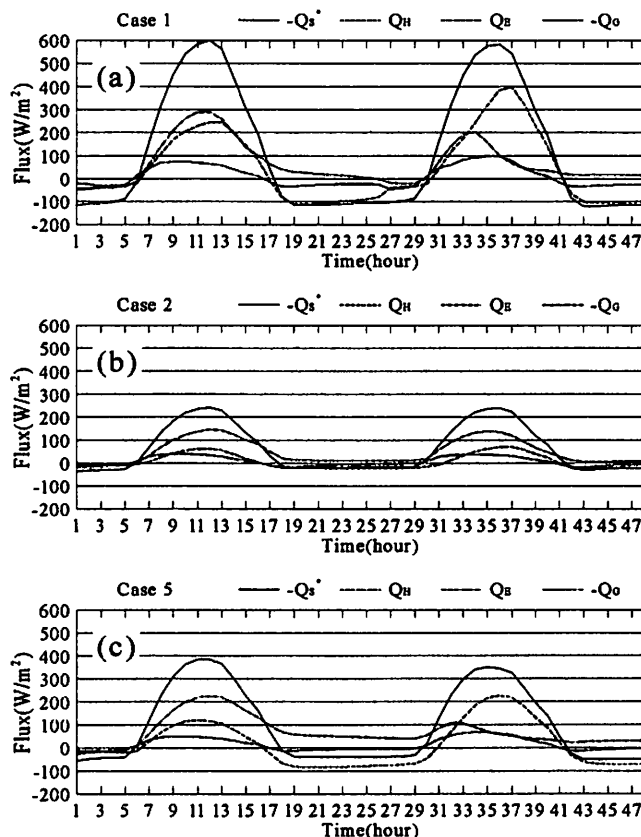


図6：地表面の熱収支：(a)C1 (裸地)、(b)C2 (森林60%)、および(c)C5 (建物60%)。- Q_s^* は正味放射量、 Q_H は顕熱フラックス、 Q_E は潜熱フラックス、および- Q_G は地中へ向かう熱フラックスを示す。

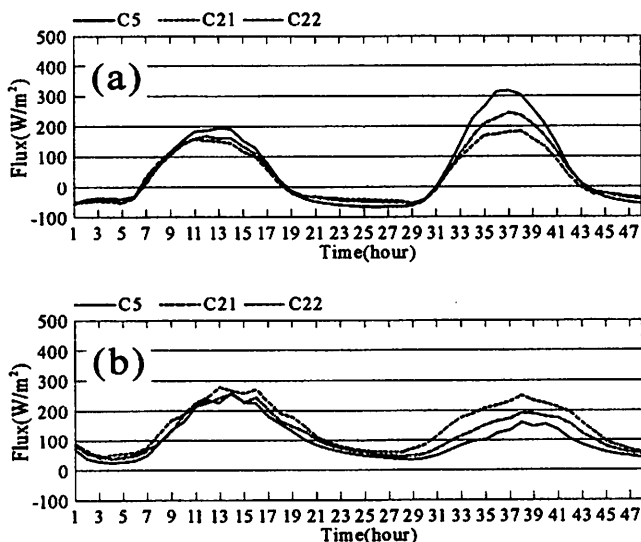


図7：図4と同様、ただしC5、C21およびC22。

たためであると、考えられる。

4. 2 建物の蓄熱効果

最近の建築物の多くは建物の壁面や屋上面に断熱材を導入し、空調機を用いた室内熱環境を有利にしている。建物に熱フラックスが入りにくくなれば、その分大気を暖める顕熱フラックスが増え、夏季の大気熱環境にとってはマイナスに働くことが予想される。このことを調べるために、建物内の熱容量を50%にカットしたケースと逆に50%増やしたケースおよび建物表面から2.4~9.8cmに断熱材を入れたケースについて調べる。図8は、図4と同様に、キャノピートップにおける顕熱および潜熱フラックスを、C5（コンクリート）、C41（C5の熱容量を50%削減）、C44（C5を50%増幅）、および(d)C47（C5で2.4~9.8cmに断熱材を適用）に対してプロットしたものである。2日目の顕熱フラックスのピークはC44、C5、C41、C47の順に並び、それぞれ、288、317、368、386 Wm^{-2} の順に並ぶ。C5を基準にすると顕熱フラックスは、C44は9%削減され、C41とC47は、それぞれ、16%および22%増幅されたことになる。建物の表面付近に断熱材を使用したC47は、コンクリートの熱容量を50%削減するよりも大気を加熱する効果があった。

一方、2日目の潜熱フラックスはすべてのケースでほぼ160 Wm^{-2} で一致し、これらケースの場合大気を加熱する鍵は建物表面の熱バランスが握っているといえる。なお、1日目の潜熱フラックスのピークが顕熱フラックスのピークと同じ順に並ぶのは、先述したように、1日目は土壤水分が豊富なため地表面からの蒸発は制御されることなく続き、大気が加熱されたほうが成層効果により蒸発に有利に働いたためと考えられる。建物表面がもっとも加熱される最上階での熱バランスを図9に示す。建物へ向かう熱フラックスのピークは設定したコンクリートの熱容量の違いに応じて、C47、C41、C5、C44の順に並び、それぞれ、63、94、158、204 Wm^{-2} である。熱バランスにより、顕熱フラックスはこれとは逆に、C44、C5、C41、C47に並び、201、234、274、300 Wm^{-2} である。一方、夜間に建物から大気へ向かう熱フラックスは日中貯えた熱量に応じて、ふたたび表面が加熱されるまで放出されている。ただ、断熱材を使用したC47は夜10時頃を境にほぼ0となる。これは、建物表面と断熱材の間の薄いコンクリート層だけにしか熱が蓄えられないため、この薄い層自身は高温になるが、蓄えられた熱量は少なく、その日のうちに蓄えた熱を解消してしまうことを意味する。

4. 3 人工廃熱の影響

都市域が高温化する要因の一つとして人工廃熱が考えられるが、建物のように鉛直方向に複雑な空間構造を持つ場合、排出される高さによって熱環境に与える影響は異なることが予想される。人工廃熱のないケース(C5)

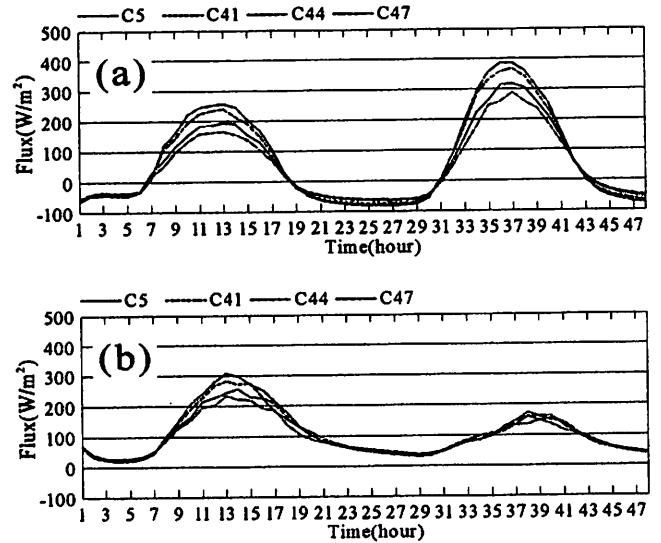


図8：図4と同様、ただしC5、C41、C44、およびC47。

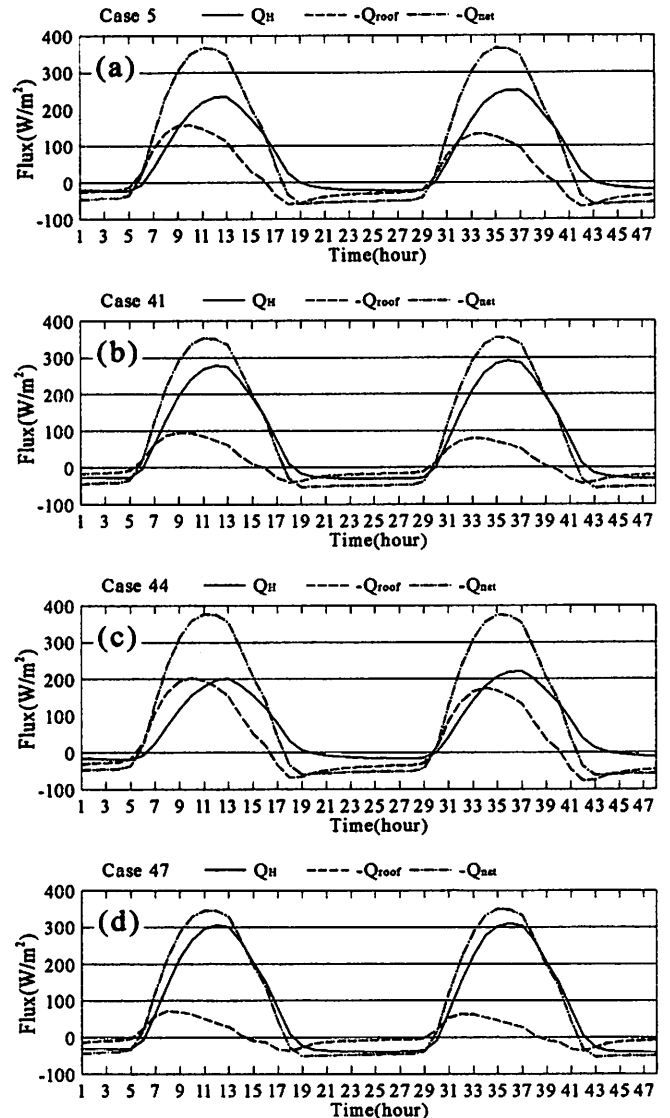


図9：最上階での熱バランス：C5、C41、C44、およびC47。Q_Hは顕熱フラックス、-Q_{roof}は建物へ向かう熱フラックスおよび-Q_{net}は正味放射量を示す。

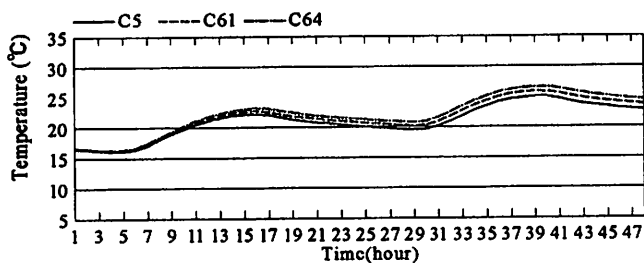


図10：地上2 mにおける温度の日変化：C 5、(b)C61、および(c)C64。

と人工廃熱を地上付近（4 m）から排出したケース（C 61）および建物の屋上面（20m）から排出したケース（C 64）における地上2 mにおける温度の日変化を図10に示す。

日最高気温は、C 5、C61、C64の順に並び、それぞれ、25.0、25.8、26.5℃であった。人工廃熱がないC 5との差はC61が0.8℃、C64が1.5℃であり、建物がある場合の人工廃熱による高温化の影響は大きい。また、人工廃熱を4 mから屋上に移動した場合0.7℃気温が下がった。廃熱源の屋上への移動は地上気温の高温化の抑止にかなり有効であるといえる。

4. 4 大気境界層の性状に及ぼす影響

4. 1で、地表を覆うキャノピーの違いにより、キャノピー層から上空大気に向かう顕熱・潜熱フラックスに大きな違いがあることが示された。この違いが温位の鉛直分布にどう関わっているかを図11 aおよび12 aに示す。図11 aは14時における温位の鉛直分布であり、図12 aは下層部分の拡大図である。図は、まず、ケース間で混合層の高さおよび層内の温位に大きな違いがあることを示唆する。混合層の温位（地上950mにおいて）がもっとも高いのは、建物キャノピーが6割を占める場合（C 5）で22.5℃、基本ケース（C 1）が21.7℃、もっとも低いのが、植生キャノピー6割の場合（C 2）で20.2℃であり最高と最低で2.3℃の差がある。この最高と最低の間で各ケースの混合層の代表温位は、図4 aに示されている各ケースにおける日中の顕熱フラックスの大きさと同じ順に並ぶ。裸地の場合（C 1：基本ケース）にくらべ、建物を建てれば温位が上がり、植生を導入すれば温位が下がることを明瞭に示している。

混合層高度の場合には、温位そのものの場合とは少し傾向が異なる。すなわち、混合層高度がもっとも高いのが建物キャノピーの場合（C 5：1800m）であることは同じであるが、次に植生キャノピーのケースが続く（C 2：1600m程度）、一番低いのが、基本ケース（C 1：約1400 m）となっている。すなわち、基本ケースの場合、混合層内の温位は、植生の場合（C 2からC 4）より大きいですが、混合層高度は植生ケースよりも低いことを意味する。実は、次の乱れの運動エネルギー（TKE：Total Kinetic Energy）の鉛直分布（図11 b）との対比が示すように、

混合層高度はTKEの鉛直分布と良い対応を示す。このTKE方程式の各項寄与分布（図13 a-C 1；図13 b-C 2；図13 c-C 5）が、TKE鉛直分布（図11 b）の形成、したがって、混合層の形成に関するケース間の違いを明らかにしている。図14は下層部分の拡大図を示す。すなわち、C 2（植生60%）の場合、TKEの浮力生成項は、三つのケース（C 1、C 2、C 5）で一番小さいが、植生の大きなLAIに基づく流れに対する抗力とシアーによるTKE生成項が一番大きく、これが温位は低いが混合層高度は高いという状態を維持している。ケースC 5（建物60%）では、建物の屋根、側壁の加熱に基づく浮力生成項が極めて大きく、大きなTKE値と高い混合層高度の形成に寄与している。基本ケースC 1（裸地）では、TKEの浮力生成項はC 5にくらべて小さいがC 2よりは大きい。ただし、キャノピー層を持たない小さなラフネスレングスのためにシアー生成項が地面の近くに押し付けられ、C 2やC 5に比べてこの項がはるかに小さいことが、C 1の場合の混合層成長を妨げている。

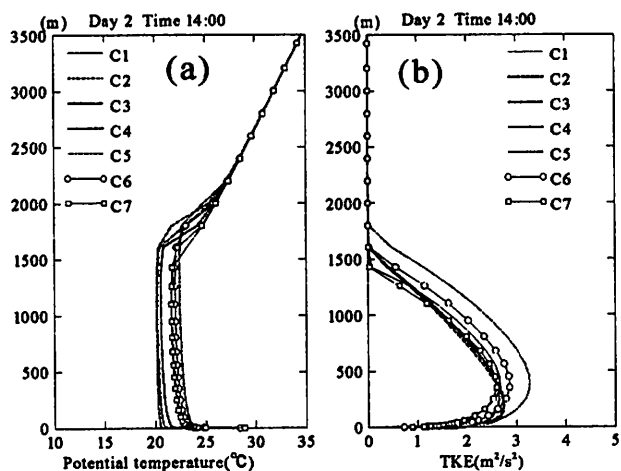


図11：1400 L S Tでの(a)温位、(b)乱流運動エネルギー（TKE）の鉛直分布。

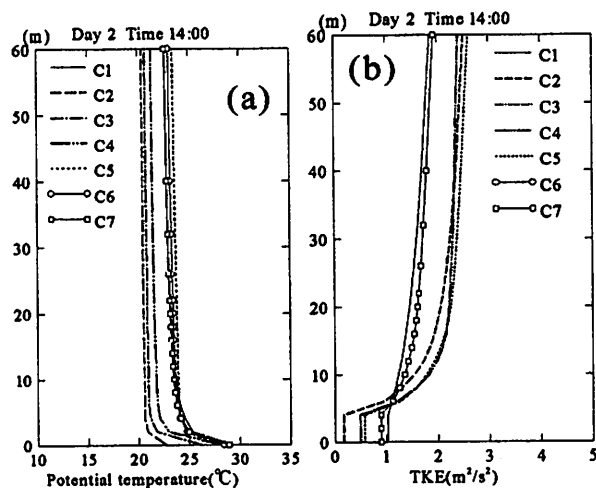


図12：図11と同様、ただしキャノピー部分の拡大図。

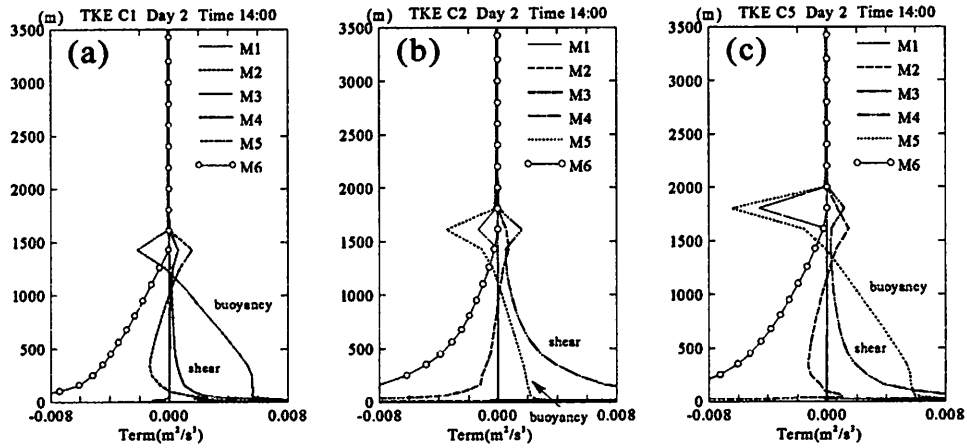


図13：1400LSTにおける(a)C1、(b)C2、(c)C5に対するTKE方程式各項の鉛直分布。M1は時間変化項、M2は乱流拡散項、M3はDragによる生成項、M4はシアア生成項、M5は浮力生成項、M6は散逸速度である。

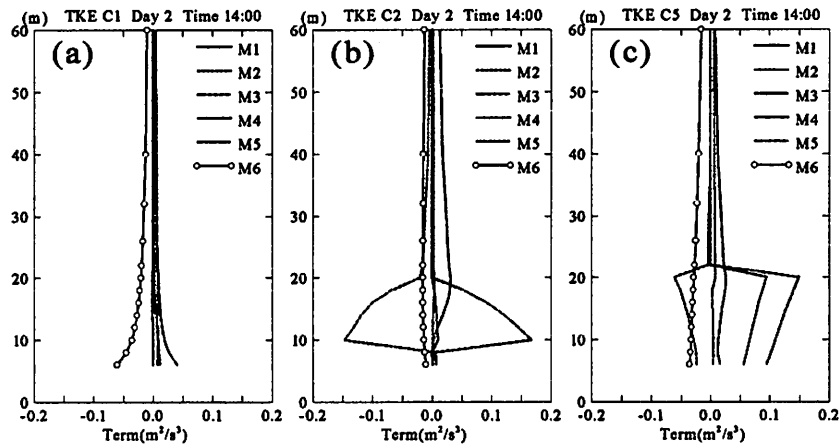


図14：図13と同様、ただし下層部分の拡大図。

5. まとめ

高さ方向への分布を持った植生及び都市建造物群が様々な割合で混在する場合の熱、運動量、水蒸気輸送への影響を、筆者が開発した数値モデルを用いて調べた。モデルには、植物や建物の高度変化、植物の土壌水分利用可能性、建物の壁体への蓄熱効果、太陽高度の変化、キャノピーの短波、長波放射に対する応答が考慮されている。

モデルシミュレーションにより、以下の結果を得た。

- (1) 晴天日が継続する場合、建築物の占有率が大きい条件では日を追って顕熱流束が増し、日最高気温が上がった。これには建物自身が放出する顕熱フラックスだけでなく、日中建物壁体内に蓄えられた熱による夜間高温化の影響も大きい。この高温化のため、夜間でも表層の乾燥化が続き、表層水分の不足により、翌日の潜熱フラックスが抑制され顕熱フラックスが増大した。
- (2) 植生群の導入は高温化の緩和に有効であった。これは深い土壌中の水分を根から吸収して蒸散に利用できること、葉による日射の遮断効果が、表層水分の急激

な減少を抑えたことによる。例えば、建物が6割占有している場合、10%の植生の導入は23%顕熱フラックスを抑えた。

- (3) 典型的な断熱材の使用による大気の高温化は、コンクリートの熱容量を50%減らした場合より大きく、10%の植生導入が削減したフラックス量とほぼ一致した。
- (4) 人工廃熱を建物屋上で排出した場合、低所で排出するよりも地上気温の上昇を半分抑えた。
- (5) 境界層内の温位分布は地表を覆うキャノピーの種類によってかなり違った。植生キャノピーの場合はTKEの生成に対してその大きなLAIに基づくシアア生成項の寄与が大きいため、低温で背の高い混合層が発達した。建物キャノピーの場合は、建物表面の加熱に基づく浮力生成項の寄与が大きく、さらに、裸地に比べシアア生成項も大きいため、高温で背の高い混合層が発達した。

本論文で行った典型的な都市および植生キャノピーを

想定したシミュレーションでは定性的に妥当な結果を示した。今後、現実の土地利用を考慮したシミュレーションを行い、省エネルギー都市空間構造に関するシナリオ作成及びモデルシミュレーションによる考察を行いたいと考えている。建物の高さ分布、植生、水面の配置等をパラメータとして、都市空間構造の違いが、どのように都市大気のベンチレーションの良くし、最高気温分布、熱帯夜分布を改善するかを調べていく予定である。

参考文献

- 神田学、森脇亮、横山仁、浜田崇、1997：明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価（2）森林環境気象モデルによるシミュレーション、「天気」、44、723-731.
- 気象庁予報部、1989：力学的長期予報をめざして、「数値予報課報告・別冊第35号」1-73.
- Kitada, T., K. Okamura, and S. Tanaka, 1998 : Effects of topography and urbanization on local winds and thermal environment in nohbi plain, coastal region of central Japan, *J. Appl. Meteor.*, **37**, 1026-1046.
- Kitada, T., K. Okamura, H. Nakanishi, and H. Mori, 2000 : Production and transport of ozone in local flows over central Japan- Comparison of numerical calculation with airborne observation-, *Air Pollution Modeling and its Application XIII*, 95-106.
- 近藤裕昭、劉發華、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.
- 近藤純正編、1994：『水環境の気象学』、朝倉書店、350pp.
- Okamura, K., and T. Kitada, 1998 : Study on the sub-grid scale modeling of urban canopy, consisting of buildings and vegetation, for use in meso-scale meteorological simulation, *Proceedings International Conference on Air Pollution Modeling and Simulation*, **1**, p275/1-8.
- Uno, I., H. Ueda and S. Wakamatsu, 1989 : Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer, *Boundary-Layer Meteor.*, **49**, 77-98.
- Yamada, T, 1982 : A numerical model study of turbulent air flow in and above a forest canopy, *J. of the Meteor. Soc. of Japan*, **60**, 439-454.
- 山本晋、村山昌平、近藤裕昭、1996：森林と大気間の二酸化炭素フラックスの観測、「資源と環境」、5、15-25.
- 山本晋、1997：植生と大気間の二酸化炭素交換量の観測、「N