

都市気象・ビルエネルギー連成モデルを用いた 事務所街区内気温の数値シミュレーション

NUMERICAL SIMULATION OF AIR-TEMPERATURE AT OFFICE BUILDING
DISTRICT WITH INTERACTION MODEL BETWEEN URBAN HEAT-ISLAND
AND BUILDING ENERGY-CONSUMPTION

大橋唯太¹・平野勇二郎²・玄地裕³・近藤裕昭⁴・亀卦川幸浩⁵・吉門洋⁶
Yukitaka OHASHI, Yujiro HIRANO, Yutaka GENCHI, Hiroaki KONDO, Yukihiko KIKEGAWA
and Hiroshi YOSHIKADO

¹理博 (独) 産業技術総合研究所 LCA研究センター (〒305-8569 つくば市小野川16-1)

²正会員 工博 (独) 国立環境研究所 CGER 学振特別研究員 (〒305-8507 つくば市小野川16-2)

³工博 (独) 産業技術総合研究所 LCA研究センター (1に同じ)

⁴理博 (独) 産業技術総合研究所 環境管理研究部門大気環境評価研究グループ (1に同じ)

⁵工博 (株) 富士総合研究所 地球環境研究室 (〒101-8443 東京都千代田区神田錦町2-3)

⁶理博 (独) 産業技術総合研究所 化学物質リスク管理研究センター (1に同じ)

We investigated air-temperature diurnal variations within urban canopy layer, using a coupled model between the urban meteorology and building energy consumption. The main results obtained are as follows. The coupled model reproduces temperature fields during weekdays when a waste heat exists due to energy consumption and cooling needs in buildings, as well as during weekend. The waste heat causes a temperature rising of 1-2 °C during the weekdays at the Tokyo office area. However, the temperature rising strongly depends on weather conditions (e.g., solar radiation and wind speed); the temperature rising is small when the solar radiation flux and wind speed increase.

Key Words : *Urban canopy layer, Anthropogenic heat due to air conditioning operations, Numerical simulation, Distributional observation*

1. はじめに

都市域内の気温は、人工物による被覆やキャニオン形状といった街区構造だけでなく、自動車や空調室外機からの排熱の影響も強く受けている。特に、人工排熱量と気温との間には相互作用が存在しているため、街区内の気温変動を予測するためには、建物への熱負荷と冷房システムによる室外への除去熱量を計算する必要がある。それを可能とする都市気象・ビルエネルギー連成モデルが近年、近藤・劉 (1998)¹⁾と亀卦川ほか (2001)²⁾, Ashie et al. (2001)³⁾によって開発されている。これらのモデルは今後、ヒートアイランド対策や省エネルギー策の都市域内への導入や、都市計画などにおける熱環境予測の評価に広く利用されることが期待されている。その定量的評価をおこなうためにはモデルの計算精度に関する検証が必要であるが、このような連成モデル

は世界的にも希少であり、それが十分に検討されてきてはいない。街区内で起こる気温分布の非一様性から考えても、街区内の多数の地点で測定された地上気温との比較が必要であるが、そのような検討についてもされていない。そこで本研究では、実際の街区内の多地点で地上気温の測定を夏季に実施し、連成モデルによるシミュレーション結果との比較検討をおこなった。

環境省ヒートアイランド対策委員会の報告⁴⁾によれば、東京23区のうち事務所系ビルが支配する千代田区や中央区では、夏季において大気に供給される顕熱のうち50～60%は冷房排熱であることが指摘されており、他用途街区に比べても冷房排熱の気温上昇への寄与が大きい。従って、事務所系ビルが支配する数百メートル四方の街区を対象として、実測及び数値シミュレーションをおこなった。

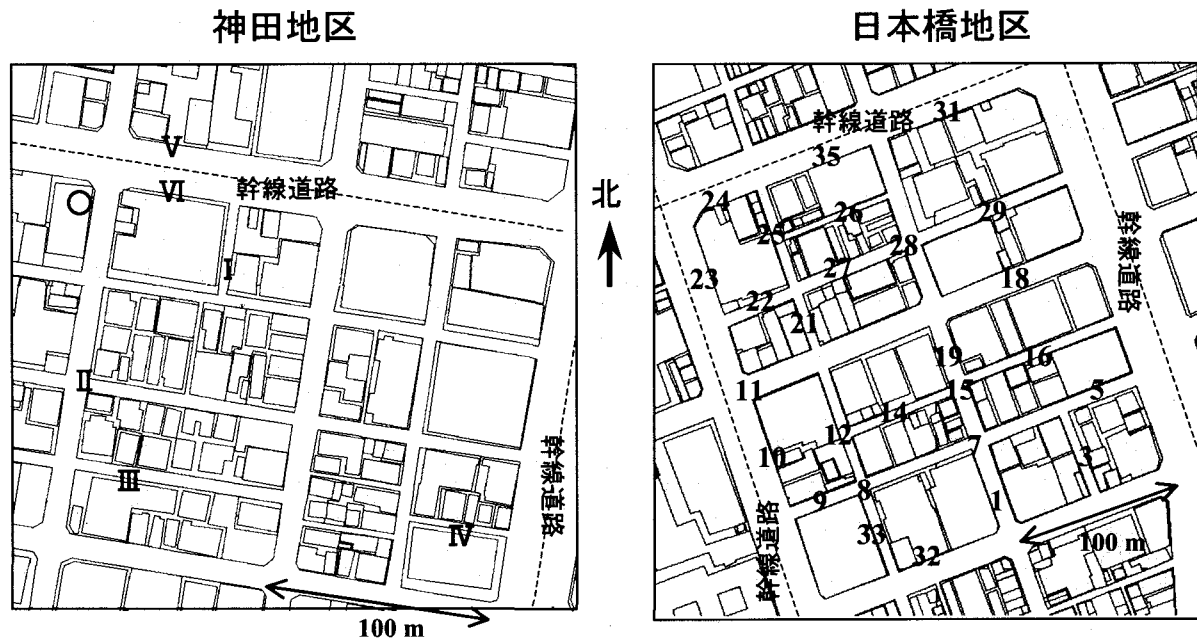


図-1 観測対象街区と気温測定地点

2. 事務所街区内での多地点気温測定

(1) 観測対象街区

事務所系ビルが主要を占める東京都千代田区神田、中央区日本橋の2街区で、2002年の平日期間7月29～30日、休日期間8月10～11日に地上気温の多地点観測を実施した。観測対象街区と気温測定地点を図-1に示す。対象街区の範囲は、神田街区が東西方向約200m、南北方向約180m、日本橋街区は東西方向約200m、南北方向約250mである。神田街区で計6地点、日本橋街区では計27地点の気温測定ポイントを設定した。神田街区から南に約300m、日本橋からは西に約1kmの地点には、東京管区気象台(AMeDAS大手町)が存在する。

(2) 観測方法

測定には、携帯型温度測定器(ティーアンドディー社製)を用いた。日射による測定器の直接加熱を避けるために、自作の強制通風管を装着した状態で地上気温の測定をおこなった。なお、測定器はアスマン式通風温度計との比較によって、日射による加熱の影響は小さく、議論のうえでは十分な精度であることを確認している。神田街区では30分毎(正時と正時半)に、6地点ではほぼ同時に1分間(サンプリング間隔10秒)の固定観測をおこなった。したがって、解析には1分間の平均値を用いる。また、同地点においては、放射温度計(ホリバ社製)を用いた路面温度の測定もおこなった。一方、日本橋街区では測定地点を多く設けているため、自転車を使った移動測定を正時に開始し、27地点での気温測定を20～30分要しておこなった(サンプリング間隔5秒)。各地点で

測定される時間は20～30秒程度であり、その平均値を解析に用いた。各地点で測定された気温は、その測定時刻がばらばらであるので、正時への補正を線形内挿によっておこなっている。正時への補正方法としては、固定観測点で測定された気温の時間変化率を用いる方法⁵⁾もある。街区の気温変化率は、街区構造、自動車通過率、日射や移流の様子によって観測地点ごとに異なると考えられたために、時間の補正方法として、上述の観測地点ごとに線形内挿する方法を採用した。

(3) 観測期間中の天気概況

7月29～30日(以降、平日観測と呼称)、8月10～11日(以降、休日観測と呼称)とも、日本列島は太平洋高気圧に覆われており、おおむね天候に恵まれた。7月29～30日の観測期間の中で、29日午前中は比較的雲が多かったが、午後から翌30日までは晴天状態であった。一方、8月10～11日は、ほぼ快晴の状態が継続した。平日観測では午前9～10時に海陸風の交替が見られたが、休日観測ではそれが見られなかった。夜間は両期間とも南西風となっており、風速は休日の方が大きかった。平日観測は午前中の雲の影響で、一日を通して休日観測に比べて気温は低めであった。

3. 連成モデルによるシミュレーションの概要

(1) モデル構成

使用したモデルは、既述の近藤・劉(1998)¹⁾と亀井川ほか(2001)²⁾によって開発された都市気象・ビルエネルギー連成モデルである。図-2にモデルの概略図を示

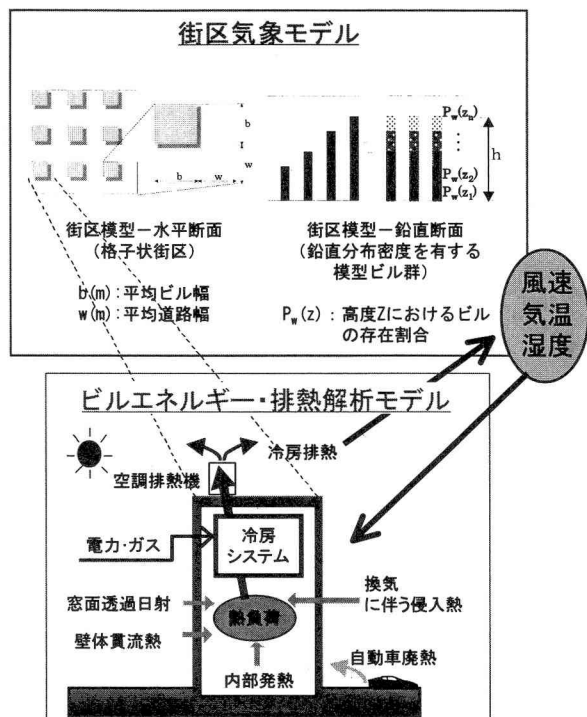


図-2 都市気象・ビルエネルギー連成モデルの模式図

す。このモデルは、街区気象モデル（以降、CMと呼称）とビルエネルギー・排熱解析モデル（以降、BEMと呼称）で構成されており、CMで気象場の変動を、BEMによって冷房排熱量の変動を予測する。

CMは数百メートルの街区スケール気象の表現を目的としており、都市キャノピー層内を鉛直方向に解像化したモデルである。このモデルでは、1格子内に同一の大きさを持った直方体ビルが整形配列しており、鉛直方向には高度毎にビルの存在密度が考慮されている。各気象要素は鉛直1次元にしか計算されないが、放射環境を3次元的に扱うことによって、屋上・東西南北の各壁面と路面の表面温度や顕熱輸送が計算される。表面の顕熱輸送量はユルゲスの式⁶⁾、大気の流れ拡散係数はGamboの式⁷⁾がそれぞれ採用されている。

BEMでは、建物を1つのボックスとして取り扱うことで室内の熱収支計算がおこなわれる。ここでは、窓面からの透過日射、壁体からの貫流熱、換気に伴う熱の流入、照明やOA機器、人体からの発熱量を求めることによって建物内への（顕熱潜熱それぞれに対しての）熱負荷を計算する。室内の冷房運転によって、その熱負荷と消費された電力やガスエネルギーは、排熱として外気へと除去される。この除去排熱が、CMで計算される気温・湿度の場に反映されることになる。このモデルの検証は、実際のビル室内温度と冷房負荷処理量の変動の比較や、日最大電力需要の気温感応度の比較に関しておこなわれている¹⁾。

表-1 街区気象モデルにおけるパラメータ設定^{1),2)}

	アルベド	熱伝導率 ($W m^{-1} K^{-1}$)	体積熱容量 $\times 10^6$ ($J m^{-3} K^{-1}$)
道路	上層 (アスファルト)	0.1	0.73
	下層 (土壌)	—	1.00
ビル	壁 (コンクリート)	0.2	2.28
	断熱材 (ポリエチレン発泡板、 室内側厚さ5cm)	—	0.04
	窓 (側壁面の30%)	0.4	—

表-2 ビルエネルギー・排熱解析モデルにおけるパラメータ設定^{1),2)}

パラメータ	設定値
冷房設定温度	26.0 °C
冷房設定相対湿度	50.0 %
冷房時間帯	9~18 時 (8時より予冷運転)
熱源構成比	空冷式(顕熱排熱) 6: 水冷式(潜熱排熱) 4
排熱源位置	屋上
延床面積に占める冷房面積の割合	60.0 %
外気導入量	平日 5.0 $m^3/(m^2 \cdot h)$ 休日 3.0 $m^3/(m^2 \cdot h)$
在室人員1人当たりの占有床面積	5.0 $m^2/人$
人体発熱量	顕熱 47.0 W/人 潜熱 55.0 W/人
窓面の日射透過率	0.3 (ブラインドを想定)
単位建物容積当たりの空気熱容量	$2.0 \times 10^4 J/(m^3 \cdot K)$ (家具、書類等の熱容量を含む)

(2) 計算条件

計算は、初期値の影響をできるだけ回避するために、比較対象日の2日前(7月27日、8月8日)からおこなった。CMの計算には、図-1の○印で示された神田街区内ビルの屋上(高さ約35m)で観測期間中に測定された天空からの短波・長波放射量、東京管区气象台で測定された気象要素の時間変化率を上端境界条件として与えた。観測街区の形状を示すビル幅、道路幅、ビル密度の鉛直分布は、東京都GIS(地理情報システム)データの第4次メッシュレベルでの平均値を用いた。ビル壁面や路面の物性値に関する設定は、事務所系ビルで一般的なものを与えている(表-1)。

BEMでの各種パラメータの設定を表-2に示す。冷房は平日日中のみの運転とし、ビル屋上からの顕熱、潜熱排出(空冷式6、水冷式4の熱源機器構成比)とした。主要幹線道路沿いで自動車排熱の気温上昇への寄与が、日本橋街区を対象とした移動観測から確認されたが、観測地点のほとんどが位置する街区の内側では自動車排熱の影響を無視することができたため⁸⁾、計算において自動車排熱は考慮していない。

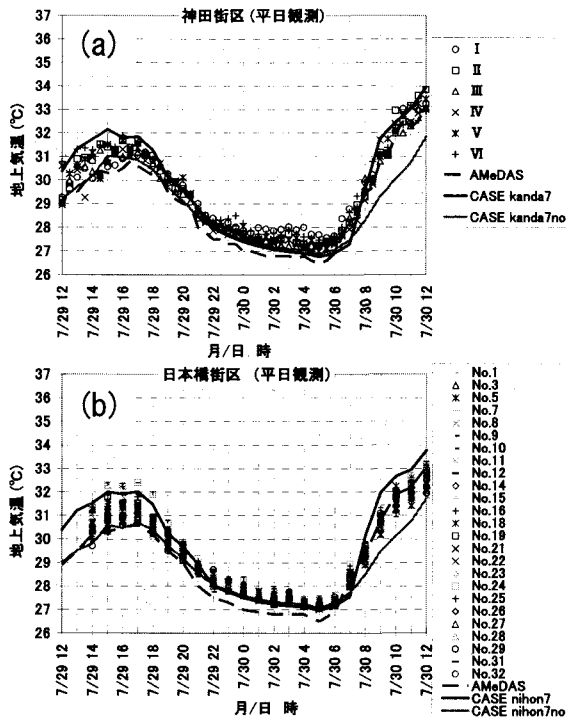


図-3 平日観測期間中の(a)神田街区、(b)日本橋街区での観測結果(マーカー)と計算結果(実線)。濃い実線がビルの冷房負荷と排熱を考慮した場合、薄い実線はそれらを考慮しない場合の計算結果。破線はAMeDAS大手町での観測値を示す。

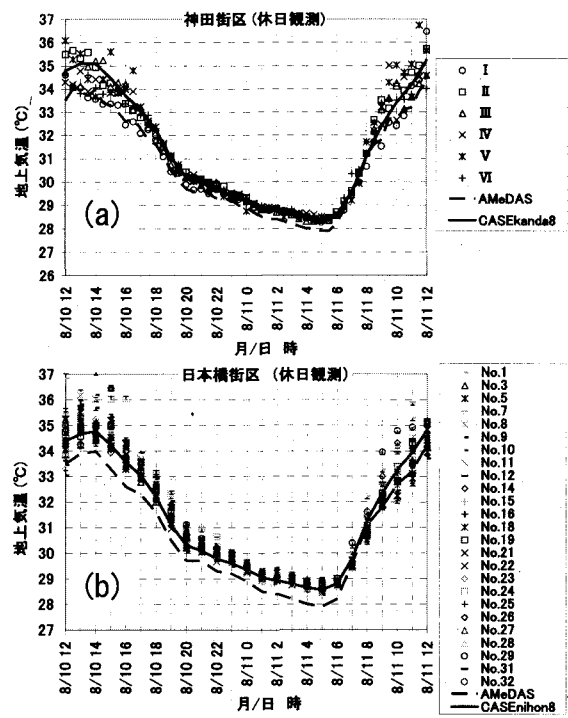


図-4 図-3と同じ。ただし休日観測期間中の結果。休日のため、実線はビルの冷房負荷と排熱を考慮しない計算結果である。

平日観測期間を対象としたシミュレーションでは、ビル内の冷房負荷と外気への排熱を考慮した計算(CMとBEMの連成計算)をおこなった。一方の休日観測期間は、お盆休暇の前半に相当しているために、大部分のビルで人は存在せず空調システムも停止していたことが予想される。従って、休日観測期間を対象としたシミュレーションでは、ビル内の冷房負荷と外気への排熱を考慮しない計算(BEMを連成させずに街区気象モデル単独での計算)をおこなった。

4. 実測結果とシミュレーション結果の比較

平日観測と休日観測の期間に神田・日本橋それぞれの街区で測定された地上気温と、モデルによって計算された地上気温の時間変化を図-3と図-4に示す。両街区で観測された地上気温(マーカー)は、両観測期間ともAMeDAS気温(破線)に比べて日中は最大で3°C、夜は最大1°C高いことがわかる。平日観測期間のモデル計算で、冷房負荷・排熱を考慮しない場合(図-3の薄い実線であるCASE kanda7noとCASE nihon7no)には、日中はAMeDAS気温と同じか、もしくは低めに気温が予測されている。しかし冷房負荷・排熱を考慮した場合には

(図-3の濃い実線であるCASE kanda7とCASE nihon7)、街区内で実測された気温に近づくことがわかる。一方、冷房負荷・排熱を考慮しない休日観測期間の計算(図-4)では、実測された街区気温のばらつきの間を通るように予測されている。このように、夏季平日の事務所街区では冷房排熱による気温上昇は無視できず、街区内の気温の予測にはビル内でのエネルギー消費とそれに伴う冷房排熱をモデル化し、街区気象場との相互作用を考慮した計算が必要であると言える。

また、図-1の神田街区ビル屋上35m高度で測定された気温とモデルによって計算された同高度での気温を比較してみても、かなり良い一致が見られている(図-5)。仮に平日観測期間において冷房負荷・排熱を考慮しない場合には、日中に観測値と計算値の間に大きな乖離が現れる。この高度ではビル屋上が全体のうちの約13%しか存在しておらず、他の高度の屋上から排出された大部分の冷房排熱が乱流拡散で運ばれてくることによって温度上昇が生じているものと考えられる。路面温度に関して、モデル計算値は神田街区6箇所の実測平均値を、平日・休日観測両期間ともよく再現できていた(図省略)。これらの比較から、本研究で用いた連成モデルは、都市キャノピー層内の温度構造とその日変化をよく再現できていると言える。

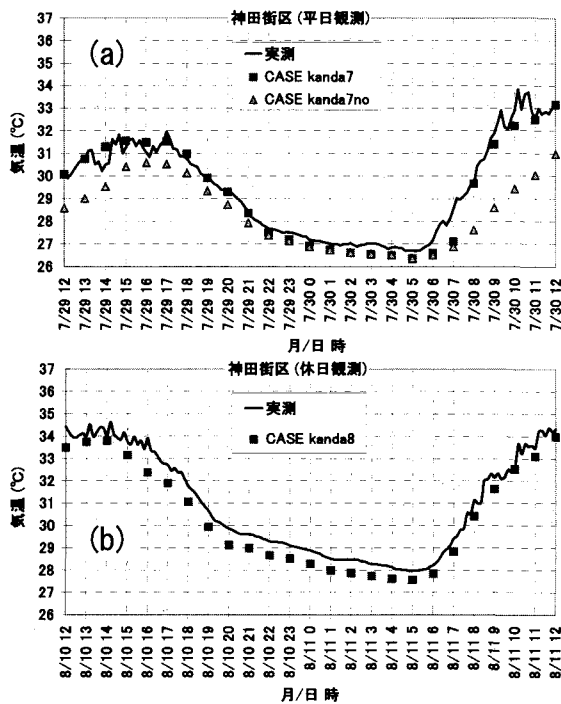


図-5 (a)平日・(b)休日観測期間中の高度35mでの気温の観測結果(実線)と計算結果(マーカー)。(a)の四角のマーカーが冷房負荷・排熱を考慮した場合、三角のマーカーはそれらを考慮しない場合の計算結果。(b)の四角のマーカーは休日のため、冷房負荷・排熱を考慮しない場合の計算結果。

5. 気象条件の変化に伴う冷房排熱の気温への影響変化

図-3で見られるように、平日観測期間の冷房排熱による日中の気温上昇は、モデル計算から約1~2°C程度と推定できる。しかしこれはこの日に限って言えることであり、排熱による温度上昇の程度は、風速や日射量といった気象条件に大きく左右されることが予想される。このことは、気温上昇をもたらす冷房排熱のポテンシャルを理解する上で重要な要素と言える。図-6に、観測期間を含む2002年梅雨明け以降の夏季気象条件(地上風速、日積算日射量、地衡風風速)の変化を示す。2002年は例年よりも真夏日が多く猛暑の年と言えるが、それでもAMeDAS大手町で全期間中(43日)の31%(13日)は曇りが支配する天候であった。図-6を見てもわかるように、同じ夏季であっても1日の日射量、風速が日によって大きく異なっている。そこで、とり得る気象条件の範囲内で冷房排熱による気温上昇がどの程度変化するか検討をおこなった。

気象条件として、日射量と風速の増減を評価の対象とした。平日観測期間中は曇天で、日射量、風速ともに夏

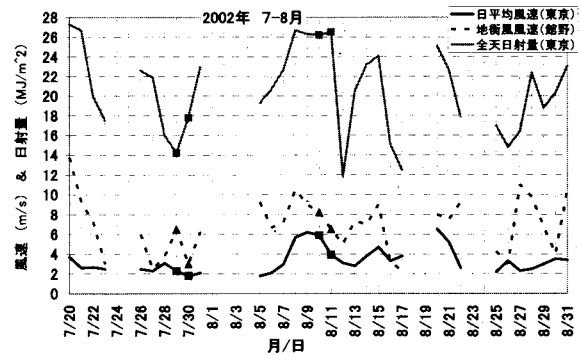


図-6 2002年梅雨明け以降夏季(7月20日~8月31日)における日平均地上風速、日積算全天日射量(東京管区気象台)、日平均地衡風風速(館野;700hPa高度での3, 9, 15, 21時の平均値)の推移。降雨のあった日を除く。マーカーが観測期間中の値を示している。

季の中で最低に近い。この期間を曇天弱風日と定義して、晴天弱風日、曇天強風日、晴天強風日の3つの気象条件を想定したシミュレーションをおこない、冷房排熱の気温への影響の変化を検討した。晴天条件には休日観測期間に測定された日射量をモデル計算に用いた。モデル上端境界の風速は700hPa高度の地衡風風速から推定しており、平日観測期間中は約5m/sであった。2002年梅雨明け以降夏季の同高度の最大風速は約14m/sとなっており(図-6参照)、これを強風日とした。

表-3は、各気象条件でのシミュレーションで得られた、冷房負荷・排熱を考慮した場合と考慮しない場合の地上気温の差をまとめたものである。表からわかるように、日射量が大きいと日中の冷房排熱の気温上昇への寄与が小さくなる傾向が見られる。これは、日射量が多い晴天日には対流混合層がよく発達することで排熱が高くにまで拡散され、混合層高度の低い曇天日に比べて大気加熱が抑えられるためと考えられる。この物理過程は午前と午後の冷房排熱による気温上昇度の違いにも当てはまり、混合層が高くまで発達している午後の方がその気温上昇が小さくなっている。

一方で、曇天日にほとんど気温差が現れなかった夜間は、晴天日になるとBEMを連成させない方が気温が高くなっている。すなわち、夜間には冷房排熱が存在していないにもかかわらず、気温に差が生じている。図-7に、曇天弱風日(濃い線)と晴天弱風日(薄い線)の計算においてBEMを連成させた場合と連成させない場合のビル表面から大気カラムに供給される顕熱フラックスの差を示す。図からわかるように、曇天日の夜間は大気に供給される顕熱フラックスは冷房負荷・排熱の考慮の有無でほとんど差がないのに対して、晴天日には冷房負荷・排熱を考慮しないほうが大気に供給される顕熱が40W/m²近くも増加している。日中、曇天日より晴天日のほうがビルは日射による加熱の影響を受け、冷房負荷・排熱

表-3 冷房負荷・排熱の考慮の有無によって生じる地上気温の差（連成有・連成無；神田街区での結果）。網掛けが基準計算（今まで述べてきた平日計算）の結果。矢印は基準計算の結果に対しての絶対値の増減（0.2℃以上増加は↑；0.2℃以上減少は↓）を示している。

	風速小 (平日観測の条件)		風速大 (2002年夏季の最大条件)
	日射量小 (曇天日である平日観測の実測値を使用)	午後日中平均 (29日12-17時)	+1.13℃
	夜間平均 (29日22時-30日5時)	-0.08℃	-0.11℃
	午前日中平均 (30日8-12時)	+2.08℃	+0.82℃ ↓
日射量大 (快晴日である休日観測の実測値を使用)	午後日中平均 (29日12-17時)	+0.54℃ ↓	+0.56℃ ↓
	夜間平均 (29日22時-30日5時)	-0.31℃ ↑	-0.29℃ ↑
	午前日中平均 (30日8-12時)	+0.88℃ ↓	+0.62℃ ↓

を考慮しない場合には冷房運転がないため室内を含めたビル内の温度が上昇する。その結果、夜間の放熱が目立って大きくなったと考えられる。

風速による寄与は日射に比べると小さいが、風速が大きくなると総じて日中の排熱による気温上昇を1℃未満に抑える効果を持つことが表-3からわかる。

これらの結果から、日中は風が弱く日射量が小さい気象条件ほど冷房排熱による気温上昇が現われやすく、今回対象の神田街区では最大で2℃程度の上昇が予想される。逆に、風が強く日射量が大きい気象条件は最も排熱の影響が小さくなり、0.5℃程度の上昇となることが明らかとなった。

6. まとめ

都市気象・ビルエネルギー連成モデルを用いて、事務所街区を対象とした冷房排熱に伴う気温変化のシミュレーションをおこなった。その結果を以下にまとめる。

1. ビル内でのエネルギー消費やそれに伴う冷房排熱が存在する平日期間（2002年7月29～30日）、それらが存在しない休日期間（同8月10～11日）の両方に対して、連成モデルは実測気温をよく再現することができた。従って、この連成モデルが今後、街区内熱環境の定量的な予測や評価に十分有効であることが言える。
2. シミュレーションから、平日観測期間中の冷房排熱による日中の気温上昇は1～2℃程度であったものと推定された。ただし、排熱の気温上昇への寄与度は気象条件（日射量、風速）に大きく依存しており、日射量、風速が大きくなる（晴天条件、強風条件）と排熱の影響が抑えられる（本シミュレーションでは0.5℃程度の気温上昇）ことが明らかとなった。

従来の都市気候・熱環境の研究では、そのほとんどが好

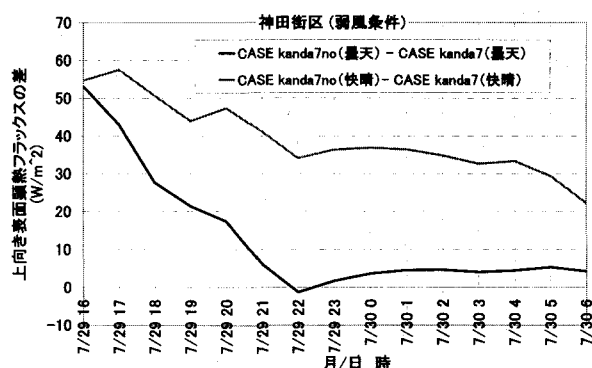


図-7 冷房負荷・排熱の考慮の有無によって生じるビル表面からモデル大気カラムへ供給される顕熱フラックス（単位格子面積当たり）の差の時間変化。曇天弱風日（濃い実線）と快晴弱風日（薄い実線）の計算結果に対して。

天静穏日条件でのヒートアイランド対策などの気温低減効果がシミュレーションによって評価されている。しかし、本稿で明らかになったように、その効果は気象条件に大きく左右されることが予想されるため、様々な気象条件下での評価が今後必要であると言える。

謝辞：観測に際し、ご尽力を頂きました（独）産業技術総合研究所の武藤勝彦氏、高井淳氏、飯塚悟氏、防衛大学の菅原広史助手、日本工業大学建築学科・武蔵工業大学の学生方、本論文作成にあたり有益なご意見を頂きました（財）電力中央研究所の日下博之氏に対して深謝致します。本研究の一部は環境省地球環境保全・公害防止等試験研究費（課題番号26）並びに（財）住友財団環境研究助成（助成番号033342）を受けておこなわれました。

参考文献

- 1) 近藤裕昭・劉發華：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，Vol.33，pp.179-192，1998.
- 2) 亀井川幸浩・玄地裕・吉門洋・近藤裕昭：建築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，Vol.22，pp.235-240，2001.
- 3) Ashie, Y., Ca, V.T. and Asaeda, T.: Numerical analysis of heat island phenomena for the control of cooling energy in cities, J. Glob. Environ. Eng., Vol.7, pp.101-117, 2001.
- 4) 環境省：環境省ヒートアイランド対策委員会報告書，2001.
- 5) 榎原保志：越谷市に見られるヒートアイランド強度—郊外が水田の場合—。天気，Vol.41，pp.515-523，1994.
- 6) Jürges, W.: Der Wärmeübergang an einer ebenen Wand, Beihefte zum Gesundheits-Ingenieur, Beiheft 19, 1924.
- 7) Gambo, K.: Notes on the turbulence closure model for atmospheric boundary layers. J. Meteorol. Soc. Japan, Vol.56, pp.466-480, 1978.
- 8) 大橋唯太・玄地裕・亀井川幸浩：東京都心の街区内気温の空間分布とその形成要因について，環境情報科学，Vol.17，pp.59-64，2003.

(2003. 9. 30受付)