

都市の熱環境に及ぼす広域的な風の 影響に関する検討

田村英寿¹・平口博丸²

¹正会員 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 主任研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

E-mail : tamtam@criepi.denken.or.jp

²正会員 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 上席研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

気温や風速を予測できる三次元数値モデルを東京 23 区に適用し、都市の熱環境に及ぼす広域的な風の影響特性の把握を試みた。まず、地衡風の条件が異なる数日間を対象とした計算を実施し、計算結果と気象観測データとを比較した。その結果、気象観測データに見られる風速や気温の特徴が数値モデルによって正しく再現されることが確認された。さらに、地衡風の条件のみを変えた様々なケースの計算を実施し、結果の相互比較を試みた。その結果、風向が海風となる場合に日中の気温が低下することや、風速が大きいほど人工排熱の気温影響が小さくなることなどが明らかとなった。

Key Words : heat island, geostrophic wind, anthropogenic heat, numerical simulation, Tokyo

1. はじめに

都市部ではヒートアイランド現象による高温化が進んでおり、東京や大阪などの大都市では、ここ数十年、年平均気温が100年あたり3℃程度の速度で上昇している。この上昇速度は、地球温暖化による全球気温の上昇速度(100年間で約0.6℃)の数倍であり、夏場の熱中症搬送者数の増加や冷房エネルギー消費量の増大をもたらす要因となっている¹⁾。

こうした中、2004年3月、国が対策に向けての基本指針を示す「ヒートアイランド対策大綱」を策定し、また東京都や大阪府など多くの地方自治体でも、対策導入のための具体的な取り組みが進められている。このような社会情勢のもと、ヒートアイランド現象に伴う都市の熱環境変化について、その基本的な特性や様々な対策技術の導入効果に関する科学的な知見が強く求められており、そのための技術として数値シミュレーションに期待が寄せられている。

熱環境の数値シミュレーションとしては、これまでに、数10～数100km四方の都市圏全体^{2)など}、数100m～数km四方の都市街区内^{3)など}、1～数個の建物周辺^{4)など}、といった様々な空間スケールを対象とした検討が行われている。これらのうち、都市圏全体の広い領域を対象とした検討では、これまで主に弱風日が検討対象とされてきた。し

かしながら、都市部の近年の気温上昇量が広域的な風系によって異なること⁵⁾や、日中の海風により都市中心部の気温上昇が抑制されること⁶⁾、都市の熱的影響が風下側に及ぶこと⁷⁾など、都市域の熱環境に風が重要な役割を果たすことが、これまでの研究で指摘されている。弱風日以外を対象としたこれまでの検討事例としては、いくつかの代表的な風系の日を対象とした解析⁸⁾や、上空の地衡風条件の違いによる関東平野の気温への影響の解析⁹⁾などが試みられている。しかしながら、広域的な風そのものがヒートアイランドやその対策技術の効果に及ぼす影響度を基礎的に調べた事例は殆ど見られない。

こうした背景から本研究では、中部日本全域程度の広い空間内における平均的な気圧傾度に伴う広域的な風(地衡風)が、都市の熱環境に及ぼす影響特性を把握することを試みた。

2. 数値モデルと計算条件

(1) 数値モデル

解析に使用した数値モデルは、(財)電力中央研究所でこれまでに開発されたものをベースとし、これに広域的な風を考慮するための改良を加えたものである。この数値モデルでは、数10～数100km四方程度の都市域全体を対

象として、上空約5kmまでの風速・温位・比湿および地表・地中の温度を非定常的に計算する。大気の運動方程式には静力学平衡が仮定され、鉛直方向には地形に沿った座標系が設定される。地表の熱収支計算には、放射や風に及ぼす建物の凹凸効果をマクロ的にモデル化し、建物間の気温・比湿を計算できる都市地表面モデルの適用が可能である。数値モデルの詳細については既報⁷⁾を参照されたい。

上述の数値モデルは、もともと晴天弱風日の計算を念頭に開発されたものであり、広域的な風の影響が無視しうような条件日を対象として、風速・温位・比湿の側方境界条件を自由流入境界条件（境界法線方向の物理量の変化をゼロとする条件）として、計算領域内の地形や土地被覆等の不均一性によって発生する風を計算する。これに対し、ここでは温位や比湿の側方境界の値を直接設定できるよう境界条件の設定法を改良するとともに、竹内・近藤(1981)⁹⁾を参考に、上記の数値モデルの運動方程式中に地衡風の項を組み込む定式化により、広域的な風を計算に考慮できるようにした。同様の定式化は、既往の数値予測による検討^{8,10)}などでも用いられている。

2) 計算条件

水平計算領域は、図-1に示す東西388km×南北348kmとし、大気中の計算格子間隔は東京23区を内包する35km四方内（以下、東京区部）で1km、計算領域の最も外側で4kmとなる不等間隔格子とした。地表・地中の格子間隔は、東京区部のみ大気の半分の500mとするとともに上述の都市地表面モデルを適用し、他の領域は大気と同じとした。大気の鉛直方向は、高度約10mを最下層として上端境界の高度4800mまでに上層ほど広い間隔で15層を設定した。地中、海中、建物躯体内はそれぞれ表面から0.5, 2.0, 0.3mを境界条件（固定値）として、0.1, 0.4, 0.1m毎に温度を計算した。

気象条件については、2002年8月の晴天日のうち、特徴的な地衡風が見られた3日間を計算対象日として選定した。

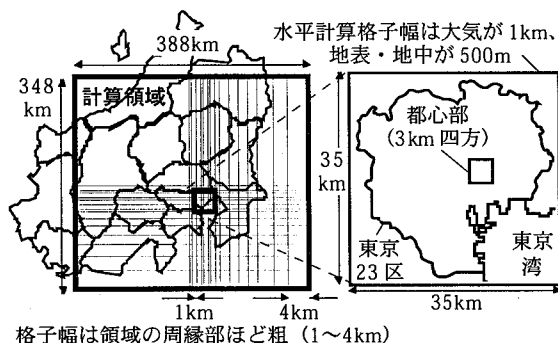
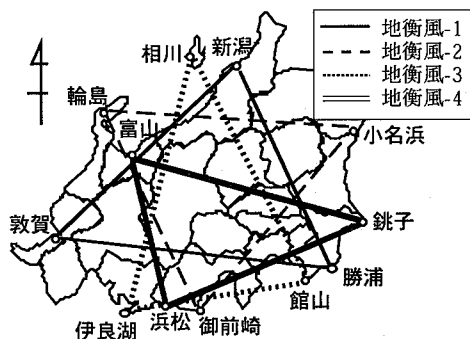
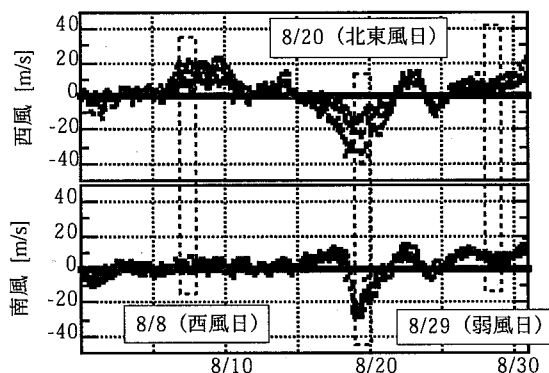


図-1 水平計算領域および計算格子



(1) 算定に用いた海面気圧の測定地点（3地点×4通り）



(2) 西風・南風風速（3時間毎の地衡風-1～4をプロット）

図-2 地上の地衡風風速の算定（2002年8月）

具体的には、藤部(1981)¹²⁾を参考に、中部日本の12地点の気象庁気象官署の海面気圧データをもとに3地点×4通りの地衡風風速を算定し（図-2）、地衡風の特徴が異なる以下の1)～3)の晴天日3日間（ここでは、大手町の気象庁東京管区気象台で日積算日射量が 18MJ/m^2 以上であった日を晴天日とした）を選定した。

- 1) 8月29日 … 一日を通じ地衡風が弱い
- 2) 8月8日 … 一日を通じ西よりの地衡風
- 3) 8月20日 … 一日を通じ北東よりの地衡風

上記の3日間それぞれについて、大手町の東京管区気象台データから全天日射量を、中部日本各地における気象庁の高層気象観測年報から温位と比湿の鉛直分布（初期条件および上端境界条件）をそれぞれ設定した。地衡風の条件については、上述の算定結果から得られた1時間毎の風向・風速を全計算領域内に設定した。

地表面の条件（標高・土地被覆・建物幾何条件・人工排熱の分布）については、国土地理院の数値情報や市販のGISデータ、建物床面積や道路面積あたりの人工排熱量¹³⁾などをもとに設定した。一例として、建物からの人工排熱の分布や時間的な変化を図-3に示す。詳細は既報¹⁴⁾を参照されたい。

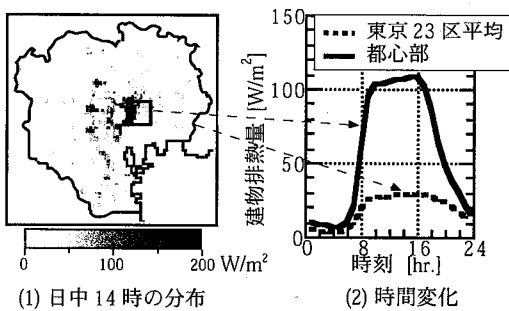


図-3 建物からの人工排熱量（顕熱）

3. 数値計算結果と気象観測データとの比較

数値モデルによる計算結果の妥当性を確認するため、2. ② で述べた各対象日の気象条件下での数値シミュレーション結果と気象観測結果との比較検討を試みた。計算された地上気温（ここでは都市地表面モデルで計算された建物間気温）を東京 23 区内における気象庁観測地点のうちの 3 地点（新木場（湾岸）、大手町（都心）、練馬（内陸））の地上気温と、また地上高度 45m 風速を大手町の東京管区气象台で測定された風速（地上約 75m）とそれぞれ比較した結果を図-4 に示す。

地衡風が弱風であった 8 月 29 日の気象観測データには、日中に南よりの海風が見られ、気温は練馬、大手町、新木場の順に海風の風下の内陸部ほど高い。また、早朝は風が弱く都心の手大町の気温が高い。これらの特徴が計算によって概ね正しく再現されている。

地衡風が西風であった 8 月 8 日の気象観測データには、一日を通じて南西風が現れる。この風向は地衡風の風向に対して反時計回りに約 45° の向きであり、地表の摩擦の影響下で現れる風向の特徴（詳細は 4. (1) で述べる）と定性的に符合する。日中は新木場の気温が他の 2 地点と比べて低い。これは、南よりの風によって海風が強められ、低温の海の影響が湾岸部で大きく現れたためと考えられる。計算では風向がやや反時計回りにずれているものの、上記の風速や気温の特徴が概ね正しく再現されている。

地衡風が北東風であった 8 月 20 日の気象観測データには、一日を通じて強い北～北西風が見られる。この風向は先の 8 月 8 日と同様、地衡風風向に対して反時計回りに約 45° の向きである。また、日中は 3 つの地点間の気温差が小さい。これは、海風となる 8 月 29 日や 8 月 8 日には海上からの低温の空気が陸上を通過するにしたがって加熱されるのに対し、この日の場合は陸上を通過して既に高温となっている空気が東京区部に輸送されたためと推察される。こうした特徴が計算によって概ね正しく再現されている。

以上のように、改良した数値モデルによって、地衡風の特徴の異なるいくつかの晴天日における風速や気温の特徴が正しく再現されていることが確認された。ただし、検討課題もいくつか残されている。例えば、8 月 20 日の気象観測データでは、0 時よりも 24 時の方が各地点の気温が約 2°C 低くなっているが、計算では逆に高くなっている。この原因として、計算領域よりもさらに大規模な空間スケールの気象場の影響が考えられ、より広域を対象とした数値計算結果や観測データをもとにした計算境界条件の設定について、さらに検討が必要である。

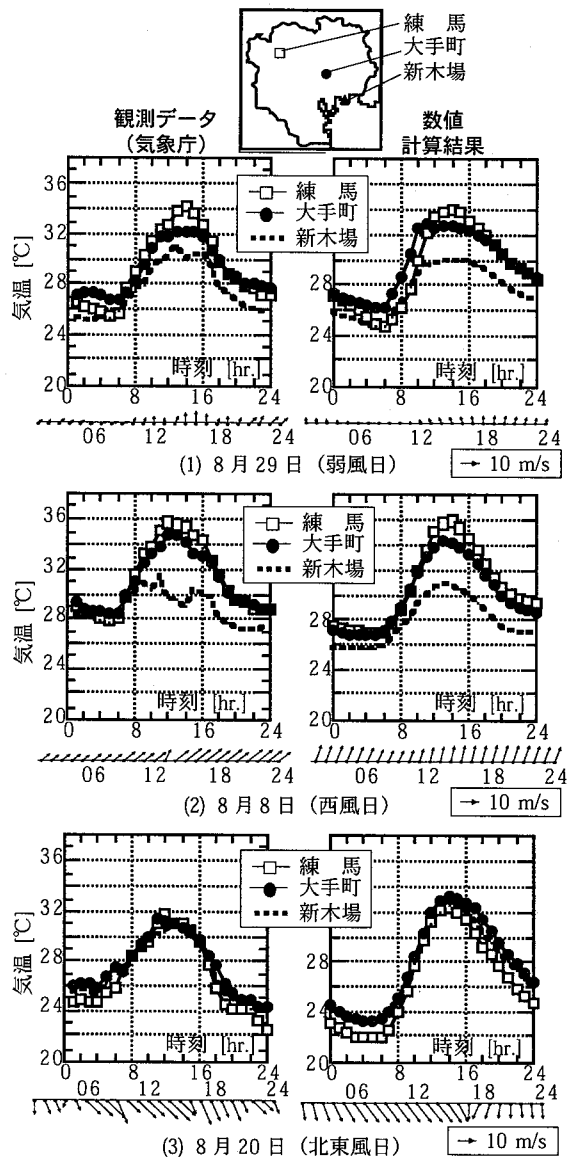


図-4 地上気温（23 区内 3 地点）、風速（大手町）の観測データ（左）と計算結果（右）との比較

4. 地衡風影響の感度解析

地上の風や気温への地衡風の影響特性を調べるため、地衡風の風向・風速の条件だけを変えた複数ケースの計算を実施し、相互比較を行った。地衡風の風向・風速条件としては、表-1 に示す9通りを想定し、地衡風以外の気象条件は3. で述べた8月29日の条件とした。

(1) 地上風速に及ぼす地衡風の影響

地衡風の条件を変えた各ケースについて、大手町の高度45mにおける風速ベクトルの時間変化を図-5 に示す。全体的に風速は地衡風よりも小さく、また風向も地衡風とは一致していない。一般に北半球の地上付近では、地表の摩擦の影響により風速は低減し、風向は地衡風風向に対して陸上で30~40° 反時計回りにずれる¹⁹⁾。北東・南西風 (C-NE,SW) では、地衡風に対して0~45° 反時計回りの風向の風が見られ、上記の知見と定性的に一致する。なお、弱い南西風 (C-SW05) では日中の風速が地衡風と

表-1 検討対象とした地衡風条件

ケース名	地衡風条件
C-0	地衡風ゼロ
C-NW05	弱い北西風 (東西 5m/s、南北 5m/s)
C-NE05	弱い北東風 (東西 5m/s、南北 5m/s)
C-SW05	弱い南西風 (東西 5m/s、南北 5m/s)
C-SE05	弱い南東風 (東西 5m/s、南北 5m/s)
C-NW15	強い北西風 (東西 15m/s、南北 15m/s)
C-NE15	強い北東風 (東西 15m/s、南北 15m/s)
C-SW15	強い南西風 (東西 15m/s、南北 15m/s)
C-SE15	強い南東風 (東西 15m/s、南北 15m/s)

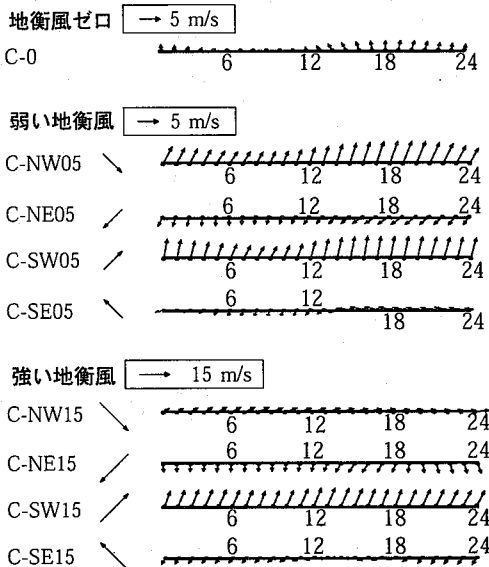


図-5 大手町上空高度45m 風速ベクトルの24時間変化 (ケース名の右のベクトルは地衡風)

同程度の大きな値となるが、これは風向が海風と同じ南よりであったために、両者が強めあって風速が大きくなったためと考えられる。北西・南東風 (C-NW,SE) の場合、風向は地衡風と大きく異なり、弱い南東風 (C-SE05) では時間的な変化も大きい。これは、例えば東京の西側に山地が多いなど、風向によっては広域的な地形・地帯の影響を強く受けるためと考えられる。なお、上空2200mではいずれのケースも地衡風に近い風向・風速であった。

(2) 地上気温に及ぼす地衡風の影響

地衡風ゼロ以外の各ケースについて、早朝6時と日中14時における地衡風ゼロ (C-0) との地上気温差 (大手町) を表-2 に示す。早朝は地上風向と気温差との関係は明瞭ではないが、日中は地上風向が北よりの場合 (表中●) に気温差が正 (C-0よりも高温)、南よりの場合 (表中○) に負となるケースが多い。これは、日中は陸上よりも海上の方が気温が低く、南側の東京湾からの冷気の移流が北風の場合に抑えられ、南風の場合に促進される効果と考えられる。また、南東風 (SE) のケースを除けば、気温差の絶対値は強い地衡風のケースの方が大きく、今回想定した地衡風の条件下では、上記の効果は地衡風が強い方が大きいといえる。

表-2 大手町におけるC-0 との建物間気温差の予測結果 (C-0よりも高温の場合を正) (単位:℃)

地衡風の風向	早朝6時		日中14時	
	弱風 (C-xx05)	強風 (C-xx15)	弱風 (C-xx05)	強風 (C-xx15)
北西 (NW)	+0.73 ○	+2.36	+0.04 ○	+0.94
北東 (NE)	-0.19 ●	+1.47 ●	+1.21 ●	+2.52 ●
南西 (SW)	-0.01 ○	-0.30 ○	-1.03 ○	-2.64 ○
南東 (SE)	-1.07 ●	-0.40 ●	+0.63	-0.37

- 地上風向が北より (北東~北西の90°の間)
- 地上風向が南より (南西~南東の90°の間)

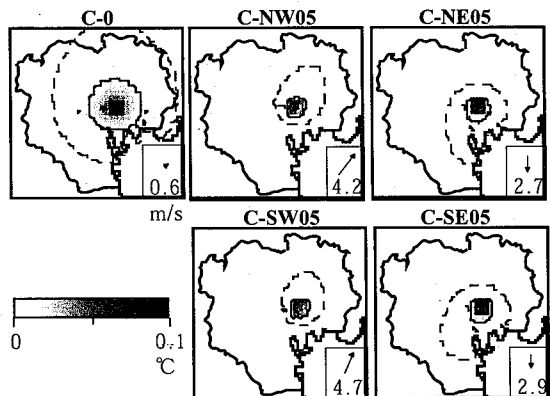


図-6 早朝6時における排熱増加後の気温変化量の分布 (図中右下は大手町の風速ベクトル)

(3) 人工排熱による気温変化への地衡風の影響

最後に、人工排熱による気温変化に及ぼす地衡風の影響把握を試みた。排熱条件としては、図-1に示す都心の3km四方（以下、都心部）の建物排熱（図-3）を倍増させた場合を想定し、排熱倍増前からの地上気温変化量を考察対象とした。

強い地衡風以外の5ケースについて、早朝6時における気温差の分布を図-6に示す。気温上昇は排熱を倍増させた都心部で大きい。風の弱いC0では都心部を中心にほぼ同心円上に気温上昇が現れるが、それ以外のケースでは排熱が風下に移流され、都心部の風下側でも気温が上昇することがわかる。

各ケースについて、都心部の地上気温変化量の時間変化を図-7に示す。地衡風のある全てのケースで変化量は地衡風ゼロのC0を下回り、その差は地衡風が強いケースで大きい。このことから、風が強いほど排熱が風下に多く移流され、都心部の気温に現れにくくなっている可能性がある。そこで、早朝6時と日中14時において、大手町の高度45m風速の逆数と排熱変化量あたりの都心部の地上気温変化量との関係をプロットしたものが図-8である。早朝・日中とも、風速が小さいほど気温変化量は大きい。また、風速が小さいときは日中よりも早朝の方が

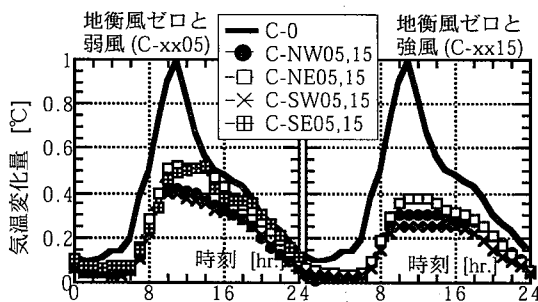


図-7 都心部における排熱増加後の地上気温変化量

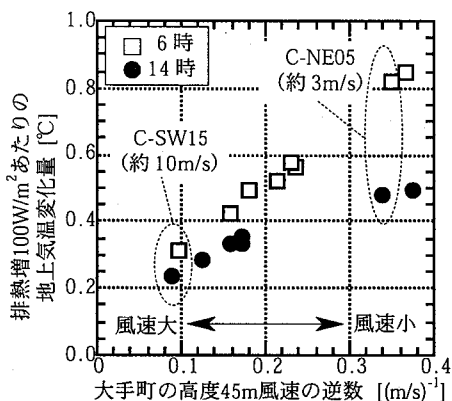


図-8 風速の逆数と排熱量あたりの地上気温変化量との関係

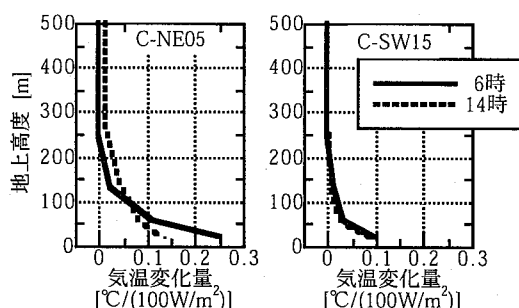


図-9 排熱増加後の気温変化量の鉛直分布

気温変化量が大きい。風速が大きくなると両者の値は近づき、風速10m/s（逆数0.1(m/s)⁻¹）でほぼ同値となる。

上記のメカニズムは、地表から放出された排熱が主に鉛直拡散と水平移流によって希釈されることで説明できる。すなわち、風速が小さい場合は鉛直拡散が支配的で、早朝と日中との拡散効果の違い（成層が不安定な日中の方が大）が明瞭に現れるのに対し、風速が大きい場合には水平移流が支配的となり、鉛直方向に拡散される熱量そのものが減少する。弱風のC-NE05（約3m/s）と強風のC-SW15（約10m/s）について、排熱増に伴う気温変化量の鉛直分布を図-9に示す。風が弱い前者では、早朝と日中の拡散効果（鉛直方向の希釈効果）の違いが見られ、風が強い後者では、早朝と日中の鉛直分布はほぼ一致する。また、前者よりも鉛直カラム内の蓄熱量（気温変化量の鉛直積分値）も小さく、熱の多くが水平移流によって鉛直カラムの外に輸送されていることがわかる。

5. おわりに

本研究では、(財)電力中央研究所で開発された気温・風速等を予測できる三次元数値モデルに対して地衡風を考慮できるよう改良したうえで、様々な地衡風条件下での三次元数値シミュレーションを実施した。主要な結論は、以下のようにまとめられる。

(1) 数値モデルによる再現性の確認

2002年8月における様々な地衡風場（弱風日、西風日、強い南東風日）の晴天日3日間を対象とした再現計算を実施し、都心部における風速や内陸・都心・湾岸といった地域毎の気温の特徴が計算によって正しく再現されていることが確認された。

(2) 地衡風の影響特性の評価

東京の都心部を対象として、地衡風の風向・風速のみを変えた計算結果の相互比較を行い、都市の気象環境や人工排熱増加時の気温変化に及ぼす地衡風の影響に関し

て、以下の知見が得られた。

- 1) 地衡風風向が南西の場合、海風が強まり都心部の気温は低下する。逆に北東の場合、陸風となり都心部の気温は上昇する。
- 2) 都心部の排熱増加に伴う地上気温変化量は風速が大きいほど小さい。また、風速が大きいほど風速以外の効果（鉛直拡散効果）は現れにくい。

参考文献

- 1) 環境省ヒートアイランド実態解析調査検討委員会：平成 12 年度ヒートアイランド現象の実態解析と対策のあり方について報告書，2001。
- 2) Kimura, F. and S.Takahashi : The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area : A numerical experiment, *Atmospheric Environment*, Vol.25B, No.2, pp.155-164, 1991.
- 3) 足永靖信・ヴァンカ・浅枝隆：ヒートアイランド現象の緩和による冷房エネルギー消費の抑制に関する解析的研究，第 8 回地球環境シンポジウム講演論文集，pp.229-234，2000。
- 4) 吉田伸治・村上周三・持田灯・大岡龍三・富永禎秀・金相進：CFD による屋外の気流分布と温熱環境に対する緑地の影響の検討，第 15 回風工学シンポジウム，pp.91-96，1998。
- 5) 藤部文昭：関東内陸域における猛暑日数増加の実態と都市化の影響についての検討，*天気*，Vol.45，No.8，pp.643-653，1998。
- 6) 佐藤大樹・村上周三・大岡龍三・吉田伸治：都市の熱収支モデルを用いた夏季の東京首都圏における大気熱収支構造の地域性の比較，*日本建築学会環境系論文集*，第 586 号，pp.61-68，2004。
- 7) 田村英寿・石井康一郎・横山仁・岩坪哲四郎・平口博丸・安藤晴夫・山口隆子・三上岳彦・市野美夏・秋山祐佳里：三次元数値シミュレーションによる東京 23 区のヒートアイランド対策効果予測，*電力中央研究所報告*，研究報告：N05032，2006。
- 8) 藤野毅・浅枝隆・和氣亜紀夫：夏季の都心部周辺における気温分布特性に関する数値実験，*地理学評論*，69A-10，pp.817-831，1996。
- 9) 資源環境技術総合研究所環境影響予測部：大都市における夏季高温化対策技術の評価手法の開発，pp.214-218，*環境影響予測部研究資料* 97-1，1997。
- 10) 竹内清秀・近藤純正：大気科学講座 1 地表に近い大気，pp.4-5，*東京大学出版会*，1981。
- 11) Urano, A., Ichinose, T. and Hanaki, K. : Thermal environment simulation for three dimensional replacement of urban activity, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81, pp.197-210, 1999.
- 12) 藤部文昭：海陸風の季節的特性，*天気*，Vol.28，No.6，pp.367-375，1981。
- 13) 一ノ瀬俊明・花木啓祐・松尾友矩：細密地理情報にもとづく都市人工排熱の時空間分布の構造解析，*環境工学研究論文集*，31，pp.68-78，1994。
- 14) 田村英寿・平口博丸：広域風の影響下での都市熱環境予測手法の開発，*電力中央研究所報告*，研究報告：N05033，2006。
- 15) 近藤純正：水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—，pp.116-118，*朝倉書店*，1994。

A STUDY FOR THE INFLUENCE OF LARGE-SCALE WIND ON URBAN HEAT ENVIRONMENT

Hidetoshi TAMURA and Hiromaru HIRAKUCHI

A three-dimensional numerical model is applied to some large-scale wind days of Tokyo. The numerical results are compared with field observation data. As a result, we confirmed that numerical results related to air temperature and wind velocity are in good agreement with the observation data. Various numerical cases are carried out with different condition of geostrophic wind in order to investigate the essential effect of the wind on the urban heat environment. As a result, it is found that the air temperature in Tokyo decreases in daytime if the wind of a large region enhances sea breeze, and the effect of the anthropogenic heat on air temperature decreases as wind velocity increases.