

東京23区のヒートアイランド対策効果に及ぼす 広域風の影響

田村 英寿¹・石井 康一郎²・横山 仁²・安藤 晴夫²・
平口 博丸¹・佐々木 啓行²・市野 美夏²

¹正会員 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
E-mail:tamtam@criepi.denken.or.jp

²非会員 (財)東京都環境整備公社東京都環境科学研究所 調査研究科
(〒136-1175 東京都江東区新砂1-7-5)

都市のヒートアイランドに対して風の役割が重要であることが、既往の研究で指摘されている。そこで本研究では、広域風の条件が異なる夏季晴天日の3日間それぞれを対象とした三次元数値シミュレーションを行い、東京23区のヒートアイランド対策効果を予測した。対策としては、緑化推進・保水性舗装・高反射塗装・道路交通排熱削減・建物排熱削減の5種類を挙げ、30年後の東京における実施量を想定した。上述した3日間について、各対策の実施に伴う地上気温の低下量を予測した結果、建物排熱削減の効果は風が弱い日の方が大きい、緑化推進の効果は逆に風が強い日の方が大きいといったように、対策の効果は広域的な風系によって変化し、その変化特性は対策の種類によって異なることが明らかとなった。

Key Words : heat island, geostrophic wind, numerical simulation, Tokyo 23 wards

1. はじめに

ヒートアイランド現象による夏場の都市の熱環境悪化は、熱中症による搬送者数の増加や冷房エネルギー消費量の増大を招く原因の一つとなっている¹⁾。こうした問題に対して、特に大都市圏を抱える地方自治体を中心に、近年ヒートアイランド対策の実施が進められつつある。例えば東京都では、条例による屋上緑化の義務化や、校庭の芝生化の推進、東京23区内4地域の対策推進エリアの設定といった具体的な対策の実施を進めており、例えば屋上緑化は条例が施行された平成13年4月から平成18年12月までの間に、都内に約70haが導入されている²⁾。ヒートアイランド対策を今後さらに効率的に進めていくためには、対象とする地域の特性も踏まえた上で、効果的な対策の種類や導入方法について事前に把握しておくことが重要と考えられる。

都市域の熱環境に対しては、風が重要な役割を果たすことが既往の研究で指摘されている^{3,4)}。このため前報⁵⁾では、中部日本全体(約300km四方程度)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地衡風(以下、広域風)が東京23区の熱環境に及ぼす影響特性の把握を試みた。その結果、都市の熱環境に及ぼす広域風

の影響特性を把握することができた。一方で、ヒートアイランド対策の効果に着目すると、都市内における導入分布や効果を及ぼすメカニズムが対策毎に異なるため、広域風条件に応じた効果の現れ方もまた異なる可能性がある。しかしながら、こうした観点から対策の効果特性を基礎的に調べた事例は少ない。

そこで本報では、前報と同じ東京23区内を対象として、30年後に想定される5種類のヒートアイランド対策技術(緑化推進・保水性舗装・高反射塗装・道路交通排熱削減・建物排熱削減)について、広域的な地衡風条件による効果の現れ方の違いを把握することを試みた。また、対策効果の把握に先立って、各対象日の再現計算結果と地上の測定データとの比較によって、計算結果の妥当性を確認することも試みた。

2. 数値モデルおよび計算条件

(1) 数値モデルの概要

数値モデルは、前報⁵⁾で用いた数値モデルと同じものであり、数10～数100km四方の水平領域を対象として、上空約5kmまでの大気中の三次元風速・気温、比湿

(水蒸気量)や地表・地中の温度, 地表から大気への熱・比湿の輸送量の空間的な分布, およびその1~2日程度の時間的な変化を計算する。水平格子間隔は, 大気中が1~数km程度で, 地表・地中は大気中よりも細かい間隔(500m程度)を設定することが可能である。また, 市街域については, 建物群の凹凸が日射・長波放射や風の遮へいに及ぼす熱的効果が簡易的にモデル化された都市地表面モデルが適用され, 建物屋上・建物壁・道路毎の表面・躯体内温度および建物間空間内の気温・比湿が, それぞれ各水平格子内の平均値として計算される。上述のモデルの詳細については既報⁹⁾を参照されたい。

(2) 計算条件

本研究で着目する東京23区は約35km四方内に収まる広さであるが, 中部日本全体程度の空間スケールの地形

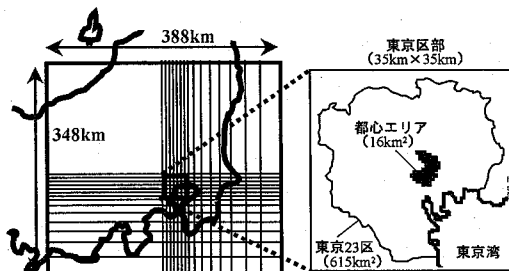


図-1 水平計算領域(大気の水平格子間隔は東京区部で1km、周縁域ほど粗く最大で4km)

条件によって発生する海陸風や山谷風の効果が計算に考慮されるよう, 計算領域は東西388km×南北348kmとした(図-1)。水平計算格子の大きさは, 東京23区を包含する35km四方(以下, この範囲を東京区部と称し, 3章以降で考察対象とする)内では全て1kmとし, その外側は東京区部から遠方に行くほど粗く最大4kmとなる可変格子とした。さらに, 東京区部では, 地表付近の温度環境をきめ細かく予測するため, 地表・地中の水平格子間隔を大気中の半分の500mとした。大気の鉛直座標は, 上空4800mを上端境界とする地形に沿った座標系とし, 地上付近ほど細かく15層を設定した。

計算対象日には, 2002年8月の晴天真夏日(ここでは, 気象庁東京管区気象台の日最高気温が30℃以上で天気が快晴または晴かつ降雨量がゼロの日とした)のうち, 広域風の条件が異なる3日間(8/8, 8/20, 8/29)を選定した。各対象日の主な気象条件(計算入力条件)を表-1に示す。なお, 地衡風風速は中部日本各地の気象庁観測地点での地上気圧をもとに, 藤部(1981)⁷⁾の方法で計算した。詳細は, 前報⁹⁾を参照されたい。

ヒートアイランド対策としては, 東京23区内において30年後に実施が想定される5種類の対策(「緑化推進」「保水性舗装導入」「高反射塗装導入」「道路交通排熱削減」「建物排熱削減」)を対象とした。各対策の概要を表-2に示す。また, 緑化推進と建物排熱削減について, 対策導入量の分布を図-2に示す。この図から

表-1 各対象日の気象条件(計算入力条件)

対象日	赤緯 [°]	日射の 大気透過率[-]	気温[℃]鉛直分布 = $A + B \times z$ [km]		比湿[g/kg]鉛直分布 = $C \times \exp(D \times z)$ [km]		地衡風風速* [m/s]	
			A	B	C	D	東向き	北向き
8/8	16.2	0.60	27.0	-6.46	16.5	-0.4	11.7	0.3
8/20	12.5	0.60	20.0	-5.83	11.0	-0.4	-20.0	-20.9
8/29	9.6	0.55	25.0	-5.71	17.5	-0.4	4.6	5.6

* 表中の地衡風風速の値は日平均値、計算には1時間毎の値を使用

表-2 検討対象としたヒートアイランド対策(30年後の実施を想定)の概要

対策	対策実施の考え方	実施量	数値計算条件(詳細は文献a)を参照)
1) 緑化推進	敷地面積1,000m ² 以上の建物屋上および市街地の地上においてみどり率約6%増を仮定	全屋上の15.0% (2463.0ha) 市街地地上の5.0% (1565.2ha)	緑地の蒸発効率=0.2、それ以外は文献a)をもとに設定
2) 保水性舗装導入	都心エリアに平成15年度の国内施工実績(約10ha)の半分が毎年導入されると仮定	都心エリア道路の31.2% (140.0ha)	保水性舗装の蒸発効率=0.05、それ以外は文献a)をもとに設定
3) 高反射塗装導入	東京23区内の全屋上の20%に導入されると仮定	全屋上の20% (3284.1ha)	日射反射率を70%(導入前は10%)と想定
4) 道路交通排熱削減	将来の燃費向上を考慮するとともに旅行速度改善やハイブリッド車の普及が進むと仮定	顕熱削減率41.5% 潜熱削減率41.3%	道路交通排熱量の設定値を変更
5) 建物排熱削減	住宅・業務用建築物で省エネ性能向上とトッランナー機器の普及による効率改善を想定	顕熱削減率20.4% 潜熱削減率25.6%	建物排熱量の設定値を変更

もわかるように、東京 23 区内での導入分布特性は対策の種類によって異なっている。また、緑化推進および保水性舗装導入については、対策実施に伴う地表の物理変量（蒸発効率や地中熱容量など）の変化を計算条件として設定する必要がある。これらについて本研究では、東京都環境科学研究所で実施された屋上緑化の実証試験データ（緑化植物は芝を想定）⁹⁾、および東京都土木技術研究所（現、東京都土木技術センター）での保水性舗装の実測データ⁹⁾をもとにそれぞれ設定した。

3. METROS との比較による計算結果の妥当性確認

(1) 比較検討方法の概要

ヒートアイランド対策の効果予測に先立って、本章では、東京都環境科学研究所および東京都立大学が 2002 年より実施している METROS（首都圏環境温度・降雨観測システム）による測定データ¹⁰⁾との比較により、3.(3)で述べた各対象日の計算結果の再現性を確認した。METROS では、東京 23 区内の 100 地点で地上 1.5m の気温・湿度が、20 地点で建物屋上の気温・湿度・風向・風速・気圧・降水量がそれぞれ 10 分間隔で測定されている。特に地上の測定地点は空間的に非常に高密度であるため、東京 23 区内全体の気温等の空間分布を把握す

ることができる。今回は、風向・風速（建物屋上での測定データを指数則により高度 45m 風速に換算したものと高度約 45m の計算結果とを比較）、および気温（地上 1.5m での測定データと 2.(1)の都市地表面モデルで計算された建物間空間内の気温とを比較）を対象とした。ただし、屋上の 2 地点で風速の測定結果が屋上構造物や周辺ビルの影響を受けている可能性が指摘されているため¹¹⁾、今回はこれらを除外した。

(2) 風向・風速および気温の再現性

まず風向・風速分布について、早朝 6 時と日中 14 時の測定結果と計算結果を図-3 に示す。測定結果によれば、地衡風が弱い 8/29 でも 14 時には南よりの海風が見られる。また、8/8 の 14 時は 6 時と比べて風向がやや反時計回りで風速もやや大きい。これは、地衡風と日中の東京湾からの海風が同じ南よりの風であったために、両者が足し合わり南よりの風が強まったためと考えられる。同様に考えると、8/20 の日中には北よりの地衡風と南よりの海風が打ち消しあうと推察されるが、これに反して測定結果では 14 時の方が北よりの風が強い。既往の研究¹²⁾によれば、地衡風風速が非常に大きい場合に地上風の日変化が海陸風によらず境界層乱流の日変化によって生ずることが指摘されており、地衡風風速が特に大きかった 8/20（表-1 を参照）には、早朝と日中の風の違いが海陸風とは別の原因で生じていた可能性がある。計算では、弱風であった 8/29 の 6 時の地点毎の細かい風向までは十分に再現できていないものの、いずれも風向・風速の測定結果に近い結果が得られている。

続いて気温分布について、早朝 6 時と日中 14 時の測定結果と計算結果を図-4 に示す。早朝 6 時の測定結果によれば、弱風の 8/29 は都心の高温化が明瞭に現れているのに対し、強風の 8/8、8/20 には都心よりもその風下側（8/8 は北部、8/20 は南部）で気温が高い。こうした傾向が計算でも再現されている。ただし、全体的に計算結

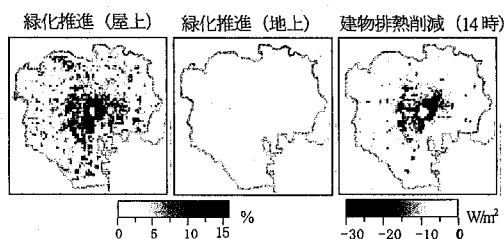
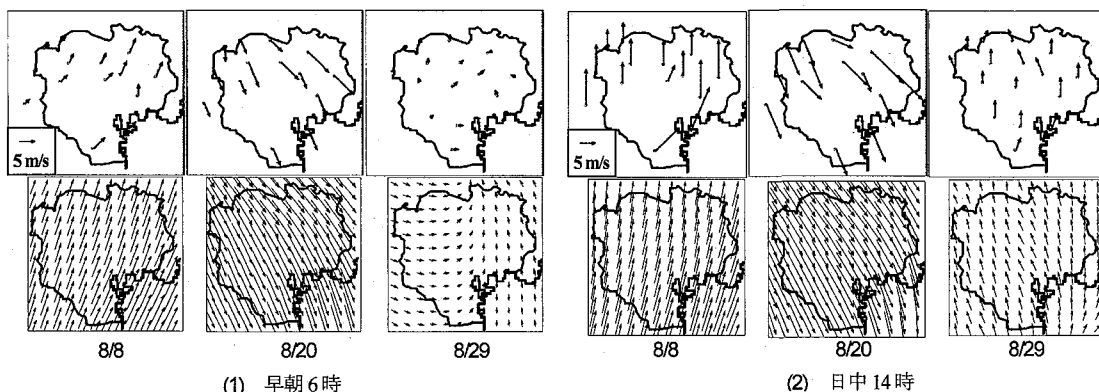


図-2 「緑化推進」「建物排熱削減」の導入量分布



(1) 早朝 6 時

(2) 日中 14 時

図-3 風速ベクトル（地上約 45m）の分布（上：測定結果、下：計算結果）

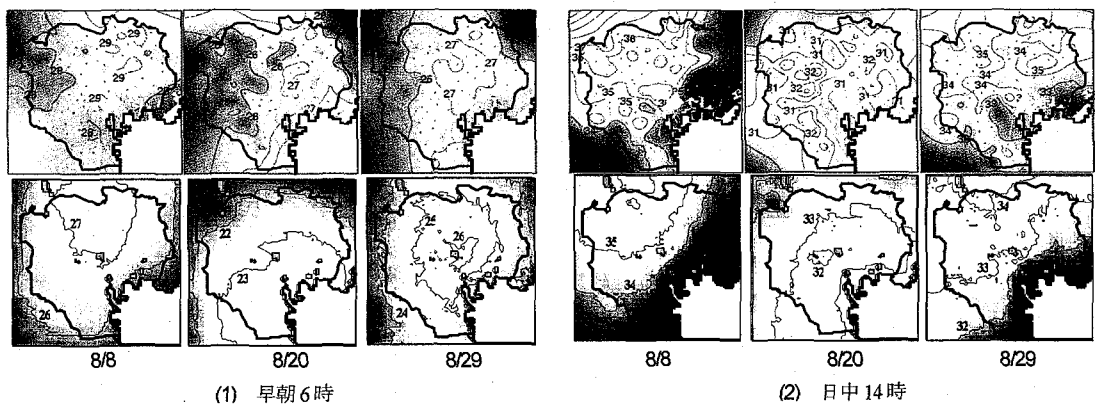


図-4 地上気温の分布（上：測定結果、下：計算結果）（高温域を白、低温域を黒で表示）

果の方が気温が低く、特に 8/20 で顕著である。これは、今回の計算では計算境界部での気象条件の設定を簡略化し、計算対象領域外の気象の時間的な変化が計算に反映されていないことが一因と推察される（例えば 8/20 は、前日 8/19 からの気温・湿度の時間的な変化が非常に大きかった）。一方の日中 14 時の測定結果では、風向が南よりとなる 8/8、8/29 は都心の風下側にあたる内陸部で気温が高く、同じ傾向が計算結果にも見られる。一方、北西風の 8/20 の測定結果では高温域が不明瞭である。計算結果でも、8/20 は都心から湾岸部にかけてやや気温が高いものの、8/8、8/29 と比べると、等温線の間隔が疎で高温域は不明瞭である。この一因として、都心部（図-1 の都心エリア）が東京湾のすぐ北側にあり、風向が南～南東よりの 8/8、8/29 には東京 23 区内の広い地域が都心部の風下側に位置するのにに対し、北西よりの 8/20 には都心部の風下側がすぐ海となることが挙げられる。

以上のように、今回の計算では計算境界部での気象条件の設定を簡略化しているため、ある特定日の気象場そのもの（気温の絶対値など）を再現することは困難であるものの、各風系日の風速・気温の空間的な分布の特徴は概ね正しく再現できていた。このため、モデル自身の挙動に大きな問題はないと考え、同一の気象条件下での地表パラメータ等の影響予測へのモデルの適用は妥当であると判断した。

4. ヒートアイランド対策の効果

3.で実施した各対象日の計算結果をヒートアイランド対策実施前の基準とし、各対象日について、表-2 に挙げた各対策およびこれら全てを同時に実施したケースを計算した。以降では、対策実施前と後の建物間空間内の気温の差を地上気温低下量と称して考察対象とする。

表-3 日中 14 時における対策実施前後の気温変化量[℃]の予測結果

	東京 23 区内平均			都心エリア内平均		
	8/8	8/20	8/29	8/8	8/20	8/29
緑化推進	-0.20	-0.19	-0.20	-0.31	-0.32	-0.24
保水性舗装導入	-0.01	0.00	-0.01	-0.12	-0.10	-0.15
高反射塗装導入	-0.09	-0.08	-0.09	-0.11	-0.11	-0.09
道路交通排熱削減	-0.05	-0.04	-0.08	-0.10	-0.09	-0.15
建物排熱削減	-0.04	-0.03	-0.06	-0.11	-0.11	-0.14
全対策実施	-0.39	-0.35	-0.44	-0.76	-0.74	-0.78

早朝 6 時と日中 14 時における東京 23 区内平均および都心エリア内平均（図-1 参照）の地上気温低下量を表-3 に示す。まず、東京 23 区平均と都心エリア平均とを較べると、早朝、日中ともに対策導入密度の高い都心エリアの気温低下量は東京 23 区内平均よりも大きく、全対策を実施した場合では 1.5～2 倍である。

続いて、対象日毎の効果の違いに着目すると、例えば都心エリアの緑化推進の効果は強風の 8/8、8/20 の方が弱風の 8/29 よりも大きく現れるのに対し、自動車交通排熱削減や建物排熱削減の効果は逆に弱風日の方が大きい。自動車交通排熱削減や建物排熱削減の効果が弱風日に大きく現れた原因については、前報で考察したように、都心部の地上で放出された熱が強風時ほど水平移流や鉛直拡散によって郊外や上空に輸送されやすく、排熱変化の影響が都心部の地上気温変化に現れにくくなることで説明できる。一方、緑化推進の効果が、先に挙げた 2 つの排熱削減対策とは逆に強風日に大きく現れた原因としては、以下の二つを挙げることができる。

一つ目の原因は、風速による熱輸送量の変化特性の違いである。排熱削減対策の場合、全ての対象日で排熱の条件を同一としているため、対策実施前後の排熱変化量は風速によらず一定である。これに対し、緑化推進の場

合は緑化前後それぞれの地表熱収支が風速に応じて変化する。図-5 は、緑化前後の地表-大気間の顕熱輸送の変化量と風速との関係で、各対象日の計算結果、および東京都環境科学研究所で夏季晴天日に行われた芝地での屋上緑化実証試験⁹⁾による測定結果を示している。これによれば、緑化に伴う地表から大気への顕熱輸送の変化(減少)量が、風速が小さいうちは強風時ほど大きくなることがわかる。ただし、実測ではある風速以上で減少量は頭打ちになる。植物からの蒸散速度は多くの場合、風速が小さいうちは風速に比例して大きくなるが、ある程度以上大きくなると頭打ちになることが指摘されており¹⁰⁾、この場合、風速が大きくなっても地表からの熱量のうち蒸散に伴う潜熱に振り分けられる熱量は増えない。このため、顕熱の減少量も頭打ちになったと考えられる。一方、今回の数値計算では蒸発効率を一定値と仮定したため、上記のような植物生理の要因まで考慮されていない。今回得られた結果からは、計算によって得られた風速と顕熱変化量との関係は実態と大きく乖離していないと判断できるが、緑地のモデル化は今後検討すべき課題の一つである。

もう一つの原因は、東京 23 区内における対策の分布特性の違いによる熱の水平移流効果の違いである。例えば、建物排熱削減は都心部に集中するのに対し、緑化推進(特に地上緑化)は東京 23 区全域に広く実施されることが想定される(図-2 を参照)。図-6 は、緑化推進と建物排熱削減について、都心の大手町を終点として、各対象日の地上風向に対して風上側に、対策を実施した領域の風上端(東京 23 区の端)まで遡り、そこを起点として大手町を終点とした線分上の気温低下量を示したものである。緑化推進では、東京 23 区内全体で対策が実施されるため、風下側(グラフの右側)ほど気温低下量は大きくなり、都心風上側の緑化の効果が都心の気温低下に寄与していることがわかる。図-6 (1)中の各グラフの傾き、すなわち通過距離あたりの地上気温低下量は、

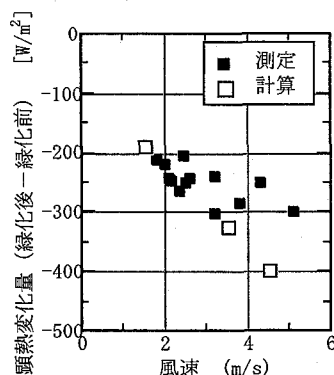


図-5 風速と顕熱変化量(緑化前後の差)との関係

先に述べた地表からの顕熱輸送変化量のほか、緑化率、熱の拡散速度、風速などにも依存し、これらは対象日毎に異なる。この図によれば、8/29 は他の日よりグラフの傾きがやや大きいものの、風上端から都心までの距離が他の日の半分程度であり、これが 8/29 の都心の気温低下量が小さくなっている一因と考えられる。一方の建物排熱削減(図-6 (2))では、先の緑化推進と違って対策実施が都心部に集中している(図-2 を参照)ため、風上側からの移流効果は小さく、都心付近で気温が急に低下するという特徴が見られる。

5. おわりに

本研究では、広域風条件の異なる2002年8月の夏季晴天日3日間(8/8, 8/20, 8/29)を対象として、東京23区内で30年後に想定される5種類のヒートアイランド対策実施後の気温低下量を予測した。その結果、建物排熱削減の効果は強風日ほど小さくなるが、緑化推進の効果は逆に大きくなるなど、ヒートアイランド対策の効果は広域風の条件によって変化し、対策の種類によってその特性(増減の向きや大きさ)が異なることが明らかとなった。

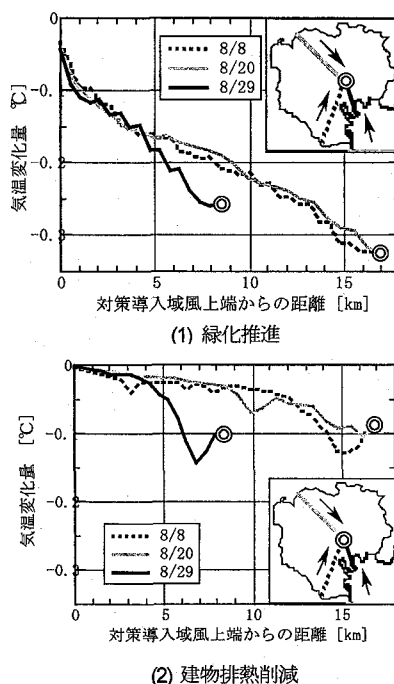


図-6 東京 23 区の風上端から都心(大手町)までの距離と気温変化量との関係(図中の◎の位置が都心)

参考文献

- 1) 環境省：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) 東京都：東京の環境 2007, 2007.
- 3) 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
- 4) 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.
- 5) 田村英寿・平口博丸：都市の熱環境に及ぼす広域的な風の影響に関する検討, 第 34 回環境システム研究論文発表会講演集, pp.311-316, 2006.
- 6) 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.
- 7) 藤部文昭：海陸風の季節的特性, 天気, Vol.28, No.6, pp.367-375, 1981.
- 8) 横山仁・山口隆子・石井康一郎：屋上緑化のヒートアイランド緩和効果—軽量薄層型屋上緑化に関する検討—, 東京都環境科学研究所年報 2004, pp.3-10, 2004.
- 9) 峰岸順一・小林一雄・近江淳一・阿部忠行：保水性舗装の路面温度低減機能に関する検討, 平 14. 都土木技術年報, pp.53-64, 2002.
- 10) 安藤晴夫・塩田勉・森島済・小島茂喜・石井康一郎・泉岳樹・三上岳彦：2002 年夏期における都区部の気温分布の特徴について, 東京都環境科学研究所年報, pp.1-7, 2003.
- 11) 市野美夏・安藤晴夫・横山仁・山口隆子・石井康一郎：METROS で観測した風データの特性, 東京都環境科学研究所年報, pp.101-103, 2006.
- 12) Fujibe, F: An effect of pressure gradient on the diurnal variation of wind in the atmospheric boundary layer, Journal of Meteorological Society of Japan, Vol.63, No.1, pp.52-59, 1985.
- 13) 長谷場徹也・武智修：蒸散に関する研究 (4) 蒸散に及ぼす風速の影響, 農業気象, 第 28 巻, 第 2 号, pp.21-29, 1972.

INFLUENCE OF LARGE-SCALE WIND ON HEAT ISLAND MITIGATION EFFECTS FOR TOKYO 23 WARDS

Hidetoshi TAMURA, Koichiro ISHII, Hitoshi YOKOYAMA, Haruo ANDO, Hiromaru HIRAKUCHI, Hiroyuki SASAKI and Mika ICHINO

In previous studies, it has been indicated that effect of wind is very important for urban heat island phenomena. In this study, the effect of heat island mitigation measures in Tokyo is estimated by three-dimensional numerical simulation on three fine days of summer with different condition of large-scale wind respectively. Here, five mitigation measures are cited and the amount of each measure is assumed in Tokyo after 30 years. For three days mentioned above, a numerical simulation is carried out for cases before and after introducing each measure, and the effect of each measure is estimated by the differences of air temperature numerically calculated for these two cases. As a result, it is shown that the effect of mitigation measure in response to large-scale wind condition is varied largely with the kind of measure. For example, the effect of 'reducing anthropogenic heat emission from buildings' becomes smaller as increasing in large-scale wind, but the effect becomes larger for 'urban greening', inversely.