

ヒートアイランド監視報告  
(平成19年冬・夏 - 関東・近畿地方)

平成20年5月  
気象庁

## 目次

1 . はじめに -----	1
1 . 1  背景 -----	1
1 . 2  ヒートアイランド現象の定義とその成因 -----	1
2 . 観測データの長期変化からみる日本各地のヒートアイランド現象 -----	3
2 . 1  都市の気温の長期変化傾向 -----	3
2 . 2  冬日、熱帯夜、猛暑日の年間日数の長期変化傾向 -----	5
2 . 3  都市率と気温の変化率の関係 -----	8
3 . 冬季のヒートアイランド現象 -----	10
3 . 1  冬季のヒートアイランド現象の概要 -----	10
3 . 2  解析条件 -----	10
3 . 3  2006/2007 年冬季（12、1、2 月）の関東・近畿地方の平均気温 -----	11
3 . 4  関東地方 -----	11
3 . 4 . 1  晴天弱風日 -----	11
3 . 4 . 2  晴天北風日 -----	14
3 . 4 . 3  都市の有無による気温差の日変化 -----	16
3 . 5  近畿地方 -----	17
3 . 5 . 1  晴天弱風日 -----	17
3 . 5 . 2  晴天北風日 -----	19
3 . 5 . 3  都市の有無による気温差の日変化 -----	20
4 . 2007 年夏季のヒートアイランド現象 -----	22
4 . 1  2007 年 7 月、8 月の関東、近畿地方の平均気温 -----	22
4 . 2  関東地方 -----	22
4 . 3  8 月 16 日の記録的高温とヒートアイランド現象との関係 -----	24
4 . 4  近畿地方 -----	25
5 . おわりに -----	26
6 . 謝辞 -----	26
7 . 参考文献 -----	26

## 1. はじめに

### 1.1 背景

近年、都市化の進展に伴い顕著となりつつあるヒートアイランド現象は、夏季においては、気温の上昇や熱帯夜の増加によって生活上の不快さを増大させ、熱中症等の健康への被害を生じさせている。光化学オキシダント生成の助長や短時間集中豪雨との関連も懸念されており、その緩和・解決へ向けた対策が急がれている。また、冬季についても、植物の開花時期の変化や、蚊等感染症を媒介する生物の越冬などの生態系の変化も懸念されている。政府は、ヒートアイランド対策に関する国、地方公共団体、住民等の対策や取り組みを推進するため、平成 16 年 3 月 30 日、「ヒートアイランド対策大綱」を取りまとめ、基本方針と共に今後実施すべき対策を示した。しかし、現状では、ヒートアイランド対策を推進する前提としてのヒートアイランド現象の実態や発生メカニズムに関する科学的知見は十分とは言えず、気象庁は、ヒートアイランド現象に関する解析を実施し、平成 16 年度から「ヒートアイランド監視報告」として気象庁ホームページ上で提供している。

本報告では、全国の各観測地点での気温の変化率、熱帯夜と冬日、猛暑日の年間日数の変化、およびそれらと都市化との関係を掲載した。また、関東・近畿地方におけるヒートアイランド現象について、新たに冬季の状況の解析にも取り組み、風向別の典型的な気温や風分布を示したほか、都市がないと仮定した場合のヒートアイランド現象の緩和について、シミュレーション結果を掲載した。

ヒートアイランド現象に含まれる複雑な熱収支等の諸過程をモデル化し、物理的に整合した気温・風分布等を再現できる都市気候モデルは、ヒートアイランド現象の監視とメカニズム解明へ向けた定量的な評価には欠かせない。本報告に掲載した再現結果は、観測結果や他のコンピューターシミュレーションによる計算結果と比較して妥当な結果が得られていると判断できる。本報告に掲載した資料を、今後のヒートアイランド対策や調査研究の基礎的な資料として活用していただければ幸いである。

なお、本情報に掲載した再現結果には、都市気候モデルの持つ系統誤差が含まれている。したがって、再現された気温・風分布図は、系統誤差を含んだものであることに注意が必要である。都市気候モデルの系統誤差の詳細については、「ヒートアイランド監視報告（平成 16 年夏季・関東地方）」の 2 章を参照いただきたい。また、都市気候モデルには雲・降水過程が含まれていないため、曇天日や雨天日を対象とすることはできず、本報告 3 章の事例解析で述べた基準で選んだ晴天日の事例のみを扱っている。

### 1.2 ヒートアイランド現象の定義とその成因

ここでは、ヒートアイランド現象の定義やその成因等について簡潔に説明する。より詳細な説明については「ヒートアイランド監視報告（平成 18 年夏季 - 関東・近畿地方 -）」の 2 章を適宜参照いただきたい。

ヒートアイランド現象（heat island = 熱の島）とは、都市の気温が周囲よりも高い状態のことである。一般に、気温分布図を描くと等温線が都市を取り囲む様子が地形図での島のような形になることから、このように呼ばれる。ヒートアイランド現象は「都市がなかったと仮定した場合に観測されるであろう気温に比べ、都市の気温が高い状態」としても定義することができる。都市では、草原や森林等のような植生域と比べた場合、以下のような特徴がある（都市化）ために、ヒートアイランド現象が発生し、それに伴い風の流れに変化が生じる。

#### （1）土地利用状態の変化

農地、緑地、水辺空間等では、水分の蒸発に伴う熱の吸収が気温の上昇を抑える働きをする一方で、都市では、地表面がアスファルトやコンクリートに覆われて水分が少ないため、地表面から大気と与

えられる熱が多くなり、気温の上昇が起こる。

### (2) 建物の効果

都市では、太陽からの直達光や地面からの反射光の一部と、地面から大気へ放出される赤外線の一部を、建物が吸収する。コンクリートの建物は、暖まりにくく冷えにくいいため、最高気温となる時刻が遅れるとともに、夜間は、日中溜め込んだ熱を放出するため、気温の低下が抑えられる。

また、建物の存在によって地表面の摩擦が大きくなることで、地表付近の風速が弱められる。このため、地面の熱が上空に運ばれにくくなることでヒートアイランド現象が強化される。

### (3) 人工排熱

都市の多様な産業活動や社会活動に伴って熱が排出され、大都市の中心部では、昼間の排熱量は1m<sup>2</sup> 当たり 100W を超えると見積もられる。これは冬季の中緯度で南中時に太陽から受ける日射の約 15～20%程度の熱に相当する。

## 2. 観測データの長期変化からみる日本各地のヒートアイランド現象

観測データの長期変化から以下の特徴が明らかになった。

- 全国的に、都市化が進んでいるほど長期的な気温上昇率が大きい傾向が見られる。
- 都市化が進んでいるほど、熱帯夜の日数が大きく増えており、また、冬日の日数が大きく減少している。

### 2.1 都市の気温の長期変化傾向

この章では観測データによる都市における気温の長期変化について述べる。気温の長期変化には、都市化の影響のほかにも、自然変動によるものや地球温暖化によるものが含まれている。都市化と気温変化率の関係を詳細に調べるため、ここでは以下のように都市率を定義する。

都市率 = 観測地点を中心とした半径 7km の円内に含まれる都市(国土数値情報<sup>1</sup>の「土地利用メッシュ」で分類されている、「建物用地」、「幹線交通用地」、「その他の用地」)の占める割合

平均気温の経年変化の大きい地点、および都市化の影響の少ない日本国内の 17 地点<sup>2</sup>平均の、月平均気温の経年変化を表 2.1 に示す。統計期間は 1936 年から 2007 年であり、この期間に連続して観測が行われている地点は 62 地点である。17 地点平均の気温変化率は、地球温暖化の影響や十年～数十年程度の時間規模で繰り返される自然変動による気温変化率に近いと考えられるため、各都市と 17 地点平均との変化率の差の大部分が、都市化による上昇分を表していると考えられる。

1 月の月平均気温の変化率の大きい地点は都市率の高い地点が多く、17 地点平均の気温変化率である 50 年あたり 1.06 を大きく上回る、50 年あたり 1.5 を超える上昇傾向も見られた。これらの地点での月平均気温と日最低気温の月平均値の変化率は 17 地点平均と比べて統計的に有意に大きくなっている。また、日最低気温の月平均値の変化率が日最高気温の月平均値の変化率を上回っており、日較差(日最高気温と日最低気温の差)の月平均値も有意に減少している。これはヒートアイランド現象の特徴と一致している。

8 月に関しては、都市率の比較的低い岐阜、敦賀などでも東京等の大都市よりも気温上昇が大きい。ほとんどの地点では 1 月と同様に日最低気温の月平均値の変化率が日最高気温の月平均値の変化率を上回っているが、熊谷、前橋等では逆の傾向が見られる。都市化による蒸発量の減少や、海風の阻害、地形的な影響が考えられるが、現時点では原因は特定できない。また、気温の変化率の大きい地点が主に西日本以西に集中していることから、都市化の影響以外にも地球温暖化や自然変動などの影響も含まれていると考えられるが、現時点では原因は明らかでない。

<sup>1</sup> 国土地理院が公開しているデジタルデータ。http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/

<sup>2</sup> 都市化による影響が少なく、特定の地域に偏らないように選定された以下の 17 地点の観測データを使用する。

網走、根室、寿都(すつ)、山形、石巻、伏木(高岡市)、長野、水戸、飯田、銚子、境、浜田、彦根、宮崎、多度津、名瀬、石垣島

表 2.1 1月における月平均気温の変化率、日最高気温、日最低気温、日較差の月平均値の変化率、および都市率、1936年以降連続して観測を行っている62地点の中から、月平均気温の変化率の大きい順に10地点を表示。統計期間は1936-2007年。斜体で書かれた数字は、17地点平均と比べて統計的に有意な差がないことを示す。

	1月の月平均値の気温上昇率(°C/50年)				都市率(%)
	平均気温	日最高気温	日最低気温	日較差	
東京	2.62	0.79	3.77	-2.98	92
札幌	2.02	0.84	3.38	-2.54	72
帯広	1.97	0.55	3.37	-2.82	37
横浜	1.96	1.23	2.81	-1.59	58
宇都宮	1.91	0.64	2.71	-2.06	47
名古屋	1.85	0.88	2.31	-1.44	86
福岡	1.79	1.03	2.69	-1.66	62
下関	1.76	1.37	2.00	-0.62	32
仙台	1.75	0.88	2.22	-1.34	68
熊谷	1.70	0.68	2.27	-1.58	37

17地点平均	1.06	0.72	1.30	-0.57	17
--------	------	------	------	-------	----

表 2.2 表 2.1 と同じ。ただし、8月について。また、熊谷、前橋、東京も表示。黄色で塗られた数値は日最高気温の月平均値の変化率が日最低気温の月平均値の変化率を有意に上回ることを示す。

	8月の月平均値の気温上昇率(°C/50年)				都市率(%)
	平均気温	日最高気温	日最低気温	日較差	
大分	1.34	1.23	1.39	-0.16	40
福岡	1.27	0.60	2.04	-1.45	62
徳島	1.27	0.97	1.31	-0.34	27
高知	1.26	0.80	1.33	-0.54	30
岐阜	1.25	1.21	1.16	0.05	49
熊本	1.25	0.69	1.58	-0.90	51
敦賀	1.22	0.39	1.55	-1.17	12
京都	1.22	0.30	1.66	-1.35	64
三島	1.21	0.97	1.22	-0.24	35
松山	1.21	0.24	1.52	-1.28	41

熊谷	1.12	1.22	0.75	0.46	37
前橋	1.07	1.36	0.71	0.66	45

東京	0.83	0.23	1.27	-0.28	92
----	------	------	------	-------	----

17地点平均	0.41	0.13	0.62	-0.49	17
--------	------	------	------	-------	----

## 2.2 冬日、熱帯夜、猛暑日の年間日数の長期変化傾向

表 2.3 は冬日（日最低気温が0 未満の日）の年間日数の経年変化である。平均気温の長期変化と同様に、全国的に都市率の高い地点で冬日の減少が大きく、特に、東京、名古屋等の大都市で冬日の減少が顕著である（表 2.3、図 2.1）。図 2.1 のように、東京、京都、名古屋、横浜では、1940 年代は年間約 50 日以上の冬日があったが、1980 年代以降は 10 日を下回る年も見られる。東京や横浜では 1980 年代以降の冬日の減少が顕著である。

表 2.3 冬日日数の変化率。1936 年以降連続して観測している 51 地点のうち冬日の年間日数の減少が大きい 11 地点を順に表示。統計期間は 1936-2007 年。

	冬日の年間日数の変化率 (日/10年)	都市率(%)
東京	-9.5	92
京都	-8.5	64
名古屋	-7.8	86
横浜	-7.1	58
仙台	-6.2	68
熊谷	-6.2	37
福岡	-6.2	62
津	-5.8	24
福島	-5.7	36
宇都宮	-5.4	47
熊本	-5.4	51

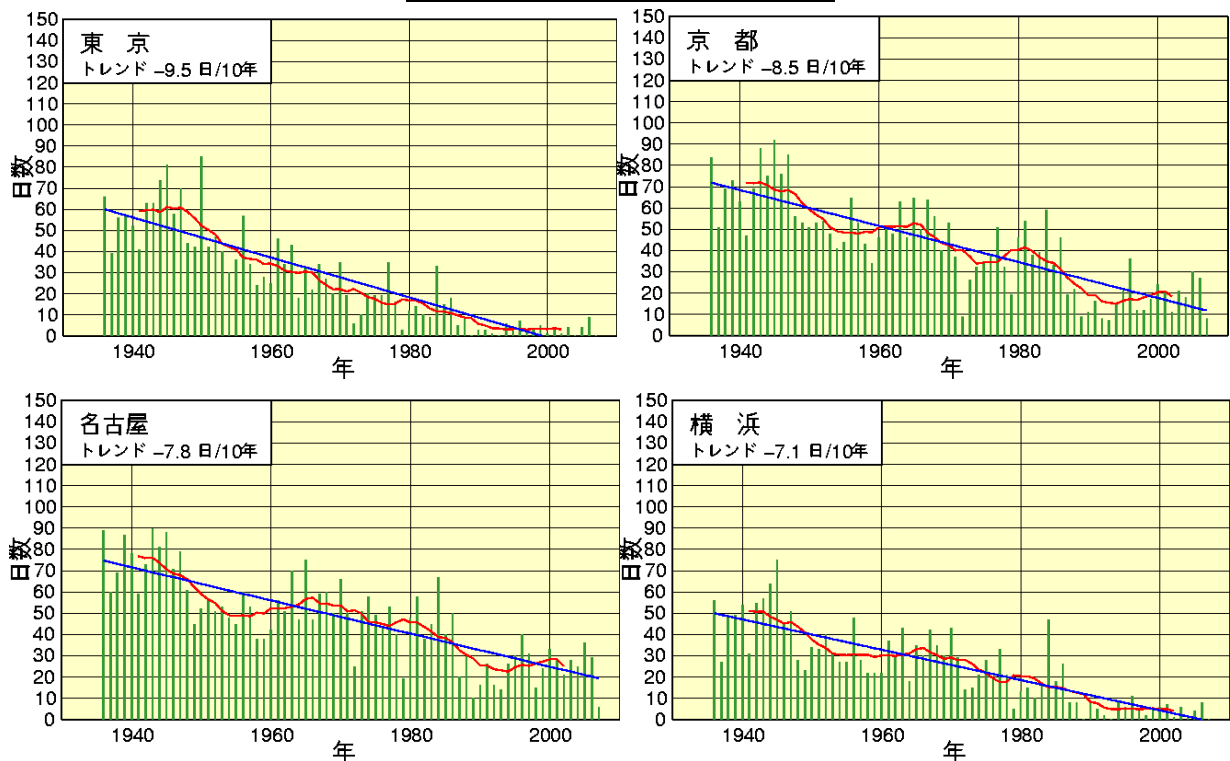


図 2.1 各都市での冬日の年間日数の経年変化。統計期間は 1936-2007 年。赤い曲線と青い直線はそれぞれ、11 年移動平均と長期変化傾向を示している。トレンドは 10 年当たりの変化率を示している。これらの上昇傾向は、いずれも危険率 5% で統計的に有意である。

表 2.4 は、熱帯夜（日最低気温が 25 以上の日）の年間日数の 1936 年から 2007 年にかけての経年変化である。気温の上昇傾向と同様に西日本以西で熱帯夜の増加が顕著な傾向があるが、その中でも都市率の大きい地点で熱帯夜の増加が大きい。東日本では東京の熱帯夜の増加が 10 年当たり 3.7 日と特に顕著である。このような熱帯夜の増加は、統計を行った地点（51 地点）のほとんどで統計的に有意であった（図略）。図 2.2 のように、東京では、熱帯夜の年間日数は 1980 年以降に増加が顕著で、40 日以上に達する年も見られる。一方、石垣島では日最低気温の平年値が熱帯夜のしきい値近くにあり、温暖化等の気候変化に伴って熱帯夜の年間日数が顕著に増加したと考えられる。また、札幌等、日最低気温月平均値の平年値が 25 を大きく下回る地点では、都市率が高くて熱帯夜が極めて少ないことから増加傾向が現れないことに注意したい。

表 2.4 表 2.3 と同じ。ただし熱帯夜の年間日数について

	熱帯夜の年間 日数の変化率 (日/10年)	都市率(%)
福 岡	+5.0	62
石垣島	+4.9	5
下 関	+4.8	32
東 京	+3.7	92
和歌山	+3.7	35
熊 本	+3.7	51
名古屋	+3.6	86
津	+3.6	24
京 都	+3.6	64
徳 島	+3.5	27

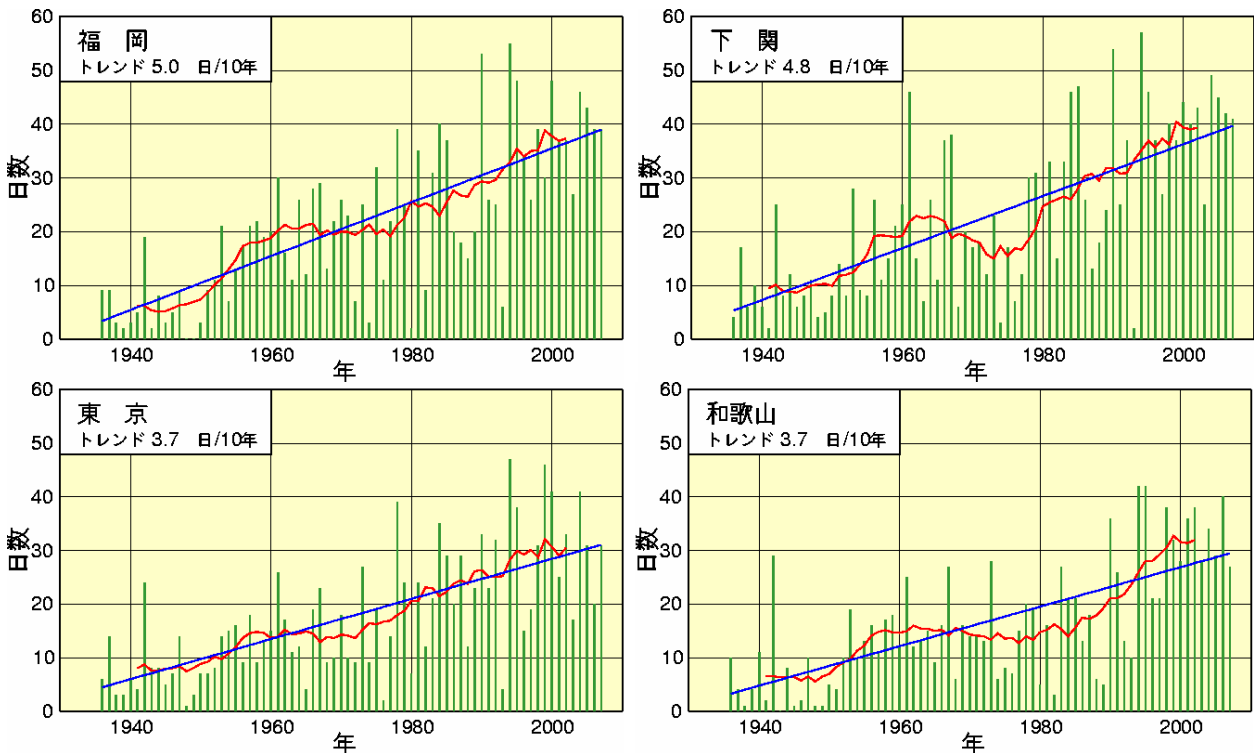


図 2.2 主要都市での熱帯夜の年間日数の長期変化。統計期間は 1936 年-2007 年。赤い曲線と青い直線はそれぞれ、11 年移動平均と長期変化傾向を示している。トレンドは 10 年当たりの変化率を示している。これらの上昇傾向は、いずれも危険率 5% で統計的に有意である。



表 2.5 は、猛暑日（日最高気温が 35 以上の日）の年間日数の 1961 年から 2007 年にかけての経年変化である。冬日の年間日数や熱帯夜の年間日数と比べて、統計を取っている期間が短く 1961 年以降のデータのみとなっている。猛暑日の年間日数は西日本を中心に増加傾向が大きいほか、熊谷、甲府、岐阜、前橋など最高気温が元々高い地点で大きく増加している。図 2.3 のように、これらの地点では、1960 年代には猛暑日の年間日数が 10 日にも満たなかったが、近年は 20 日を超える年も多く見られる。一方で、東京、大阪などの増加傾向は統計的に有意でない。都市率が高い地点で猛暑日の増加が顕著というわけではなく、都市率が 30～50%の地点や日田（大分県）のように都市率の小さい地点でも猛暑日の増加が見られる。地球温暖化や日本付近の大気の流れの変化、地形的な影響などによって猛暑になりやすくなった可能性もあり、都市化が猛暑日の増加に及ぼす影響ははっきりしない。

表 2.5 表 2.3 と同じ、ただし猛暑日の年間日数について。統計期間は 1961-2007 年。

	猛暑日の年間 日数の変化率 (日/10年)	都市率(%)
日田	+4.4	8
熊谷	+3.3	37
甲府	+3.1	34
岐阜	+3.0	49
熊本	+2.8	51
高松	+2.8	32
前橋	+2.4	45
名古屋	+2.0	86
富山	+1.9	46
京都	+1.9	64

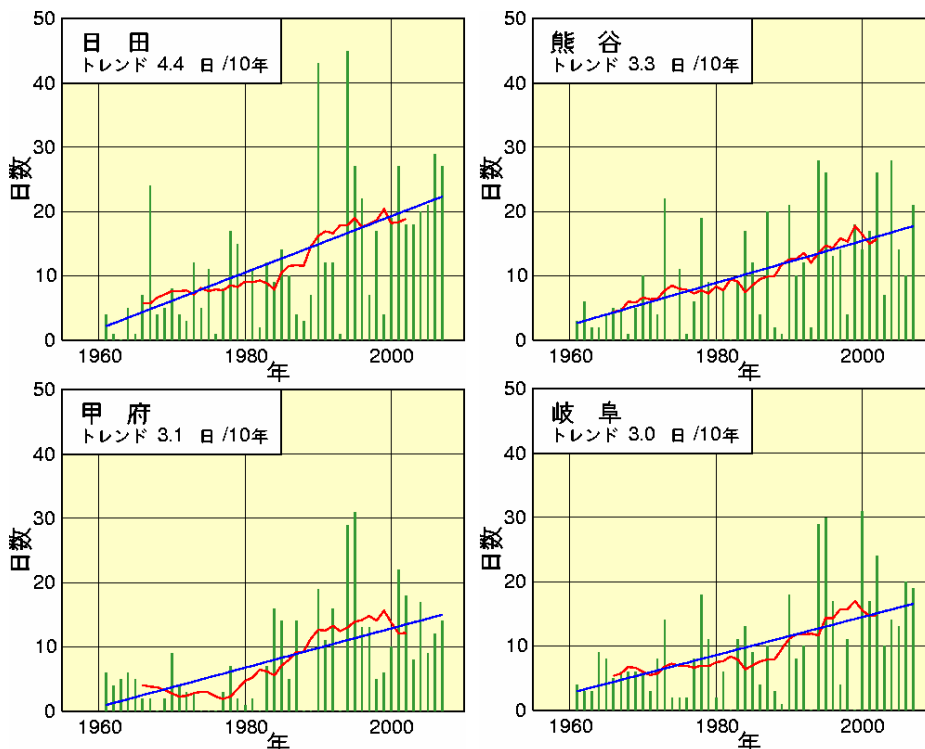


図 2.3 主要都市での猛暑日の年間日数の長期変化。統計期間は 1961 年-2007 年。赤い曲線と青い直線はそれぞれ、11 年移動平均と長期変化傾向を示している。トレンドは 10 年当たりの変化率を示している。これらの上昇傾向は、いずれも危険率 5% で統計的に有意である。

### 2.3 都市率と気温の変化率の関係

図 2.4、図 2.5 は、それぞれ 1 月、8 月における月平均の日平均気温、日最高気温、日最低気温と都市率の関係を散布図で示したものである。観測データは 1936 年以降から継続して観測されている地点のみを用いた。1 月は、月平均気温、日最高気温の月平均値、日最低気温の月平均値のいずれも都市率と正の相関が見られる。ただし、この正の相関は月平均気温、日最低気温の月平均値のみ統計的に有意である。また、図 2.6(a)のように、地域による偏りはあまり見られず、全国的に都市率が高いと気温の変化率が大きい傾向が見られる。気温と都市率の相関は、夏季に近づくにつれ小さくなり、7 月に最小になる（図略）。一年で最も気温の高くなる 8 月には、月平均気温と日最低気温の月平均値について都市率と正の相関が見られるものの、いずれも相関係数が 0.5 を下回る。このように都市率と気温の相関が夏季に小さくなるのは、この時期は一般に大気鉛直方向の運動が活発で下層の熱が上空に拡散されやすいことに加え、梅雨期は日照時間が少ないことが考えられる。また、1 月に比べて散布図のばらつきが大きく、図 2.6(b)のように地域による差が顕著に現れ、気温の変化率が、西日本以西では大きい一方で北日本では小さく、地点によっては減少傾向も見られる。以上のように都市化の影響は夏季よりも冬季の気温に、また、最高気温よりも最低気温により顕著に現れている。

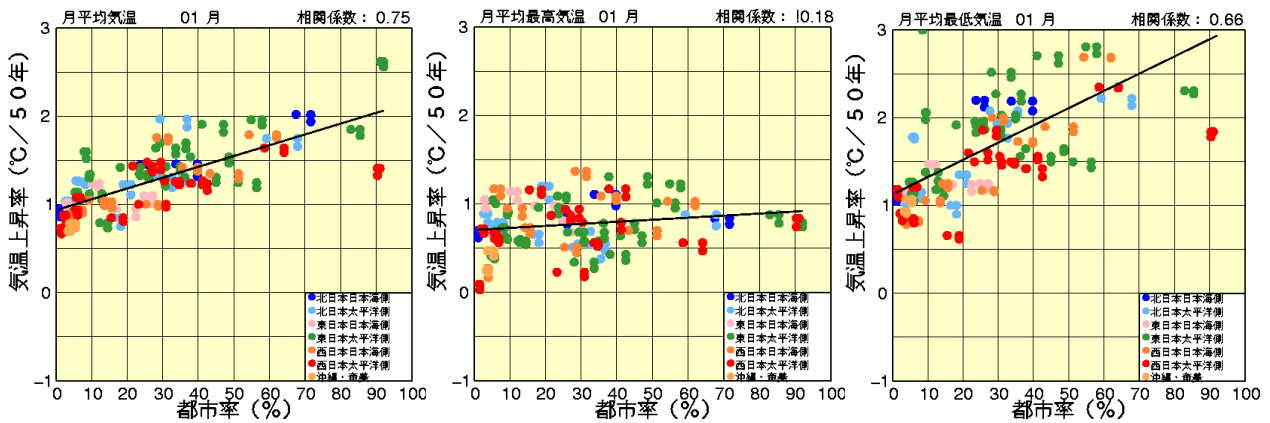


図 2.4 1 月における月平均の(左)平均気温、(中)最高気温、(右)最低気温についての、都市率(横軸)と気温の変化率(縦軸)の散布図。統計期間は 1936-2007 年。黒実線は回帰直線を表す。上記の相関係数のうち、最高気温のみ統計的に有意でない。

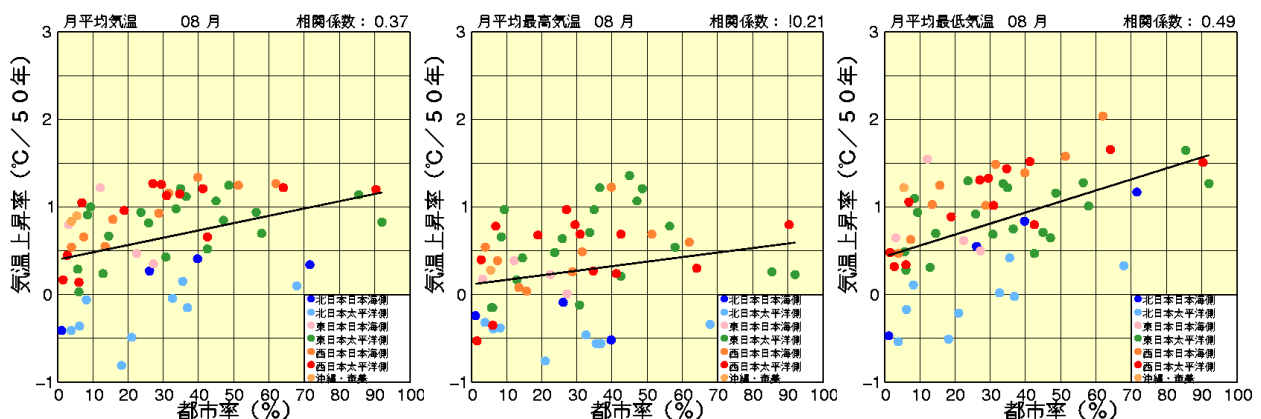


図 2.5 図 2.4 と同じ。ただし、8 月について。

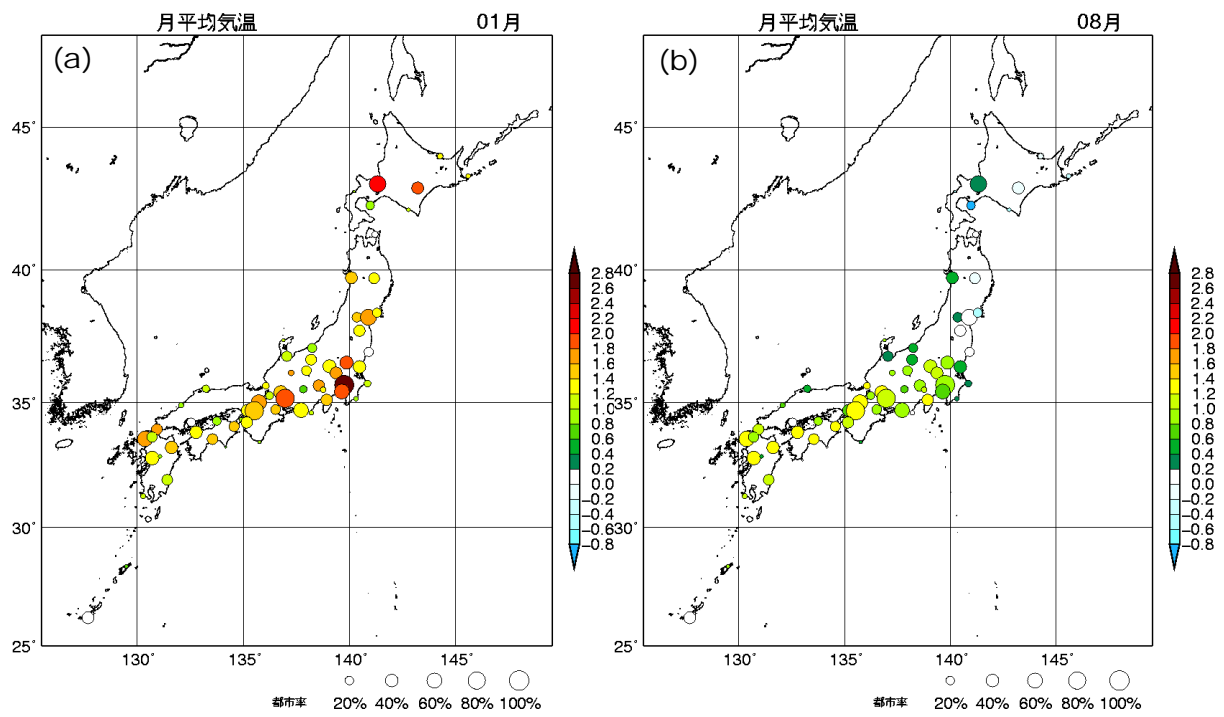


図2.6 (a)1月、(b)8月における月平均気温の上昇率の分布。統計期間は1936-2007年。丸の大きさは都市率を、色は気温の上昇率( /50年)を表している。

### 3. 冬季のヒートアイランド現象

都市気候モデルによるシミュレーション結果から、冬季のヒートアイランド現象の特徴として、以下の点が明らかになった。

- 都市化の影響による日中の気温上昇量は、夏季に比べて小さい。
- 都市化の影響による気温上昇量は、夜間に最も大きくなる。
- 晴れて風が弱い日は、晴れて北風が吹く日より、ヒートアイランド現象の影響が大きい。

#### 3.1 冬季のヒートアイランド現象の概要

都市と郊外の気温差でヒートアイランド現象の強さを定義すると、ヒートアイランド現象は夏季よりも冬季に強く現れると言われており、日本や世界のさまざまな都市での観測結果もこれを裏付けている。冬季の方が夏季よりヒートアイランド現象が強い理由としては、冬季は夏季よりも、夜間の放射冷却が強いため都市と郊外の気温差がよりはっきり現れること、大気の鉛直方向の運動が活発でないため下層の熱が上空に拡散されにくいことが挙げられる。また、地面に達する日射量が少ないため人工排熱の影響が相対的に大きくなることが考えられる。

ヒートアイランド現象の発生は、風向や日照などの気象条件によって大きく左右される。そのため、ヒートアイランド現象の強さや分布は、気象条件の変化から影響を受けると考えられる。日本の冬季に関しては、北よりの季節風が卓越すること、太平洋側では晴れの日が多く乾燥していること、エネルギー消費の増加などが、ヒートアイランド現象の強さや分布、その日変化に影響を与えることが考えられる。

この章では、都市気候モデルの解析から得られた関東・近畿地方の冬季の晴天日におけるヒートアイランド現象の特徴を述べる。この章では、シミュレーションにより得られた「都市がある場合」と「都市がない場合」の気温差を示すが、「都市がない場合」とは都市気候モデルの中で土地利用が都市に分類されている領域をすべて仮想的に草地に置き換えることを意味する。シミュレーションの結果は、特定の風向の晴天日のみの事例を集めたものであり、2章で述べた月平均気温の長期変化にはすべての風向、天候の事例が含まれていることに留意いただきたい。また、シミュレーションの結果には系統的な誤差も含まれており、シミュレーションの結果と2章の観測データから得られた結果を直接比較することはできない点に注意したい。都市気候モデルの概要は、「ヒートアイランド監視報告（平成18年夏季 - 関東・近畿地方）」の付録 を参照いただきたい。

#### 3.2 解析条件

夏季、冬季に限らず、ヒートアイランド現象は「晴れて風が弱い（晴天弱風）」という気象条件で顕著に現れると言われている（本報告での冬季における弱風日、晴天日の定義は表3.1のとおり）。その理由として、晴天日は日射量が多いため、建築物による蓄熱量が増加することや、都市から大気への加熱が曇りの日より大きいこと、また、風が弱い日は、風が強い日に比べ地面付近の熱が運ばれにくいことが挙げられる。太平洋側の冬季においては、晴天弱風日は少なく、冬型の気圧配置に伴う北よりの風が卓越する日が多い。晴天弱風日との比較のため、晴れて北よりの風が強い日（北よりの一般風の風速が6m/s以上。以下、晴天北風日と呼ぶ）も解析対象に加えた。

表3.1 本報告における、晴天日、弱風日の定義

晴天日	都市気候モデルの解析領域(200km×200km)に含まれるアメダス観測点のうち、70%以上の地点で日降水量1mm未満、かつ50%以上の地点で日照時間が5時間以上(冬季)または7時間(夏季)以上の日
弱風日	09時の気圧場から求めた一般風(地衡風)の風速が6m/s未満

### 3.3 2006/2007年冬季(12、1、2月)の関東・近畿地方の平均気温(表3.2)

12月、冬型の気圧配置が長続きせず気温が平年より高かったものの、降水が多く、日照時間は平年より少なかった。関東地方では最低気温が平年を2以上上回る地点が多かった。1月も、冬型の気圧配置は一時的で、気温は平年より高く、日照時間も平年並から平年より多かった。多くの地点で平均気温が平年より2以上高かった。2月も、1月に引き続き気温は平年より高く、日照時間も平年を上回った。関東・近畿地方では、月平均気温、最高気温、最低気温ともに平年を2以上上回る地点も見られた。

表3.2 2006年12月～2007年2月における、関東・近畿地方の主要都市での気温と日照時間

	12月				1月				2月			
	平均気温	最高気温	最低気温	日照時間 平年比(%)	平均気温	最高気温	最低気温	日照時間 平年比(%)	平均気温	最高気温	最低気温	日照時間 平年比(%)
<b>関東地方</b>												
宇都宮	6.2 [1.8]	11.2 [0.6]	1.8 [3.0]	86	4.2 [2.1]	9.8 [1.7]	-0.9 [2.6]	105	5.7 [2.9]	11.4 [2.7]	0.5 [3.2]	116
前橋	6.8 [1.0]	11.7 [0.4]	2.9 [1.6]	91	4.9 [1.6]	10.2 [1.6]	0.5 [1.6]	105	6.1 [2.5]	11.8 [2.8]	1.4 [2.3]	119
熊谷	7.4 [1.4]	12.2 [0.5]	3.3 [2.2]	87	5.5 [1.8]	10.7 [1.4]	1.0 [2.1]	104	6.9 [2.6]	12.6 [2.8]	1.7 [2.1]	118
東京	9.5 [1.1]	12.5 [0.2]	6.7 [2.1]	83	7.6 [1.8]	10.9 [1.1]	4.6 [2.5]	97	8.6 [2.5]	12.8 [2.8]	5.0 [2.6]	120
横浜	9.2 [1.0]	12.7 [0.5]	6.5 [2.2]	81	7.3 [1.7]	11.0 [1.2]	4.3 [2.5]	99	8.4 [2.6]	12.9 [3.0]	4.6 [2.5]	115
千葉	9.2 [1.3]	12.7 [0.6]	6.0 [2.3]	85	7.4 [2.0]	11.2 [1.7]	4.0 [2.6]	95	8.4 [2.8]	12.8 [3.1]	4.3 [2.5]	115
<b>近畿地方</b>												
京都	7.6 [0.7]	11.7 [0.2]	4.1 [1.2]	86	5.8 [1.2]	10.6 [1.7]	1.9 [0.8]	105	7.3 [2.5]	12.4 [3.1]	2.6 [1.5]	129
姫路	7.3 [1.1]	11.9 [0.1]	3.6 [2.1]	83	5.6 [1.6]	11.1 [1.9]	1.0 [1.3]	107	7.1 [2.8]	12.6 [3.1]	2.0 [2.2]	123
神戸	9.2 [0.8]	12.1 [0.3]	6.4 [1.4]	87	7.5 [1.8]	10.8 [1.8]	4.5 [1.9]	111	8.7 [2.9]	12.3 [3.2]	5.1 [2.3]	129
大阪	9.1 [0.8]	12.4 [0.4]	6.1 [1.4]	88	7.5 [1.7]	11.3 [2.0]	4.3 [1.8]	112	8.7 [2.8]	13.0 [3.4]	4.8 [2.3]	126
和歌山	8.8 [0.5]	12.2 [-0.2]	5.6 [1.1]	82	7.2 [1.3]	10.7 [1.0]	3.6 [1.1]	108	8.4 [2.3]	12.6 [2.5]	4.3 [1.8]	113
奈良	6.5 [0.5]	11.2 [-0.1]	2.5 [1.0]	84	5.0 [1.2]	10.3 [1.6]	0.8 [1.1]	103	6.4 [2.4]	12.3 [3.2]	0.8 [1.1]	125

[ ]内の数値は、平年との差。

### 3.4 関東地方

2006/2007年冬季に、晴天弱風日は関東地方で12事例、晴天北風日は33事例あった。晴天弱風日の例として関東地方は1月16日、晴天北風日の例として2月7日の事例を示す。

#### 3.4.1 晴天弱風日

2007年1月16日は、冬型の気圧配置が弱くなり、日本付近は大陸側の高気圧に覆われた。関東地方の大部分ではほぼ日中は日照を記録し、東京・大手町では最高気温11.8、最低気温4.8を記録した。

図 3.1 は同日における地上の風と気温の分布である。05 時の時点では風は概ね内陸から沿岸部に向かって吹いている。埼玉県から群馬県の内陸部では気温 $-1$  を下回る領域が見られる。関東平野の冬季の風の弱い日の早朝には一般に、内陸が沿岸部より気温が低くなることが知られている。10 時以降は内陸部で風が弱くなり、午後になると沿岸部では海から風が吹き込んでいる。20 時になっても東京都心付近には気温  $7$  以上の領域が見られる。夕方から夜にかけてはこの高温域を中心とした反時計回りの循環が形成される。

図 3.2 は、気温と風向・風速に関して、都市がある場合とない場合の差をシミュレーションで求めたものである。05 時には、都市によって気温が上昇した地域は、沿岸を中心に分布し、神奈川県東部や千葉県まで広がっている。その後午前中は都市の有無による気温差はほとんど現れない。午後になると、気温が上昇する地域は平野全体に広がる。20 時になると、都市の有無による気温差は、内陸では日中より小さくなるが、東京都北部から埼玉県南部では逆に大きくなる。

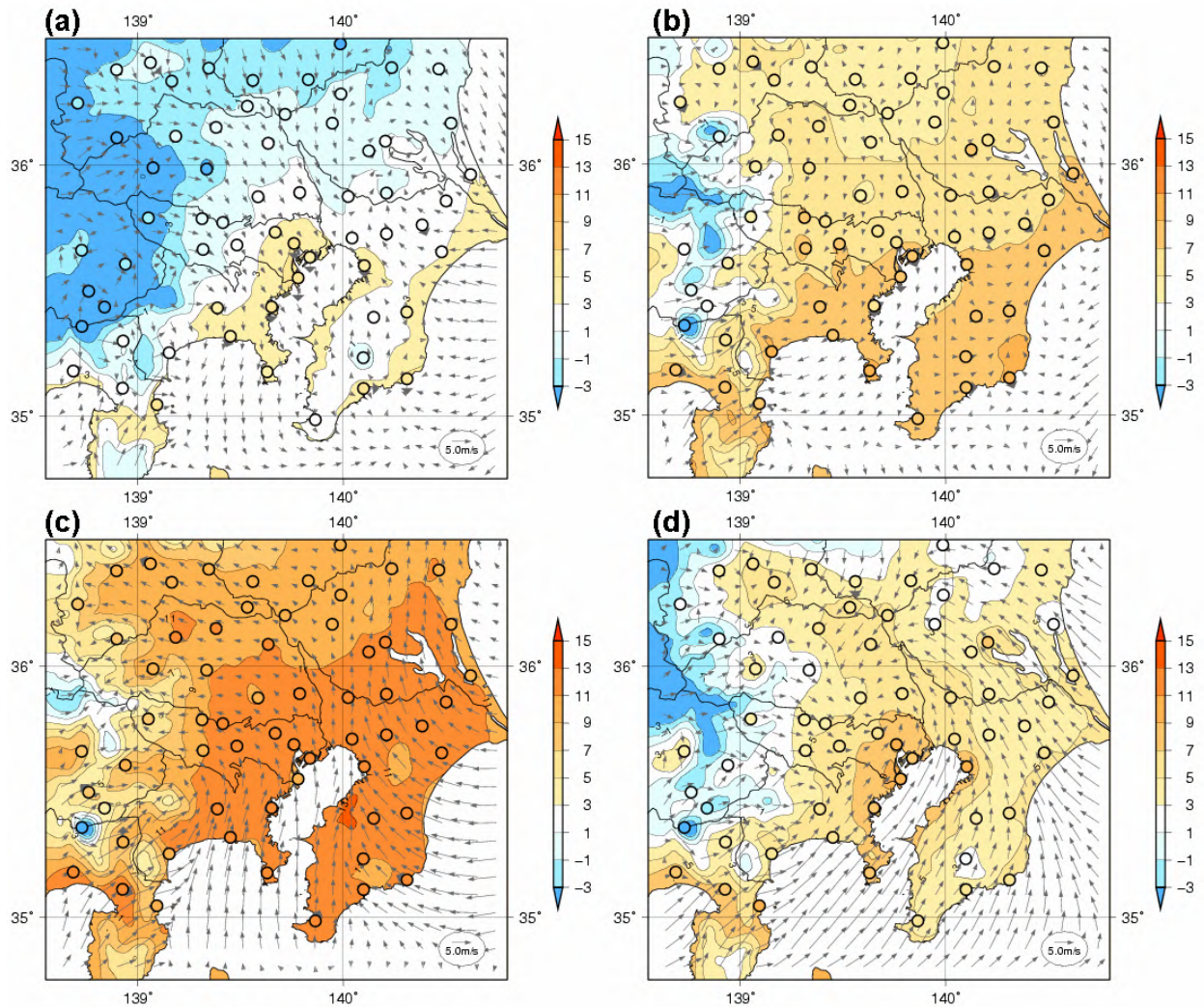


図 3.1 関東地方における 2007 年 1 月 16 日の (a)05 時、(b)10 時、(c)15 時、(d)20 時の気温 (、等値線)と風の分布(矢印)。図中の○はアメダス観測点を表す。

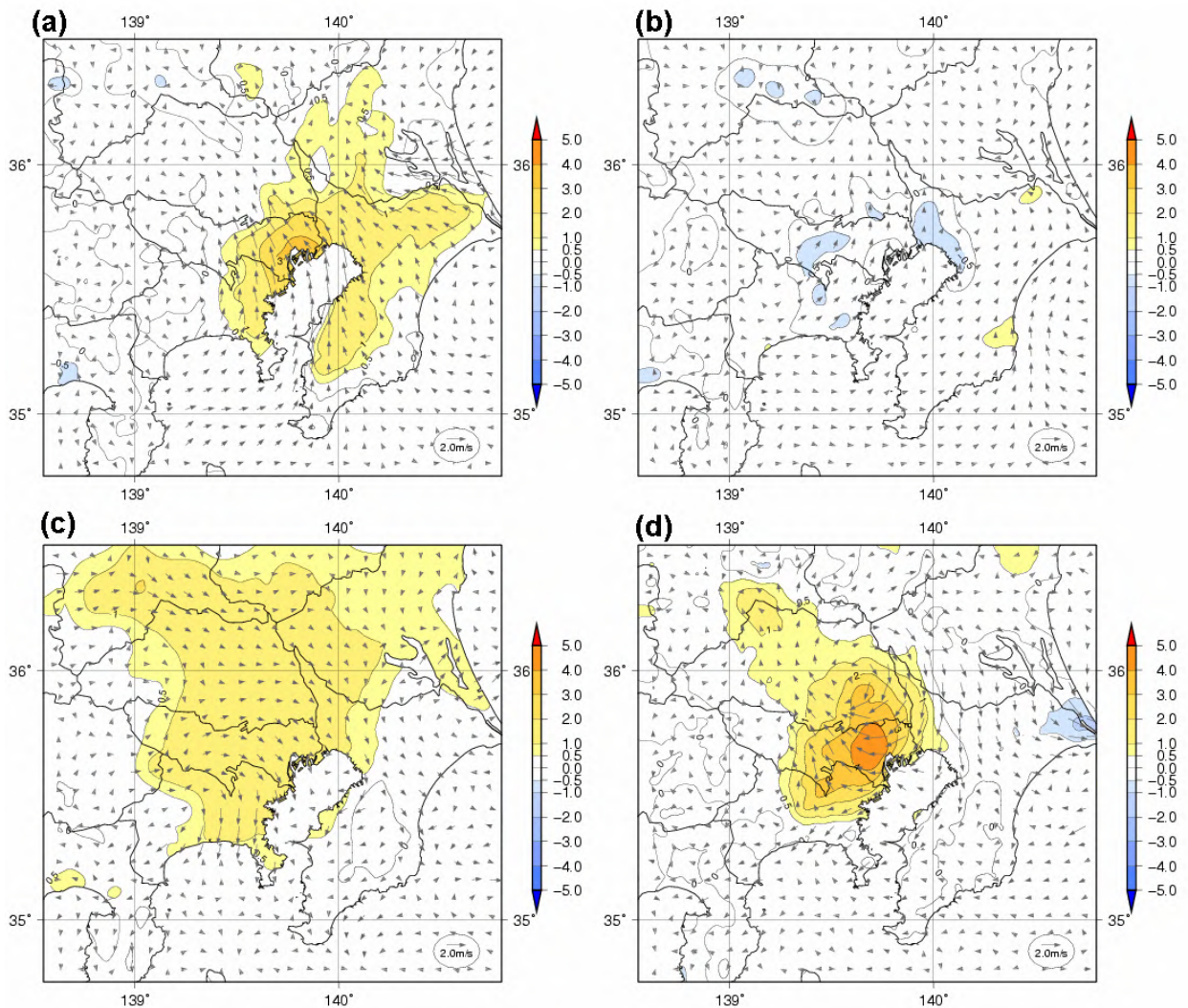


図 3.2 関東地方における 2007 年 1 月 16 日の (a)05 時、(b)10 時、(c)15 時、(d)20 時の「都市がある場合」と「都市がない場合」の気温と風の差をシミュレーションで求めたもの。正の気温差は「都市がある場合」の方が気温が高いことを示す。

図 3.3 は、2007 年夏季の晴天弱風日の 17 事例平均における、都市がある場合とない場合の気温と風の差である。午後に気温の高い領域が関東平野に広がり、夜になると都心部に集中する点は夏季と冬季では共通しているが、冬季は都市による昇温が午後に小さく日没以降に大きいという違いがある。

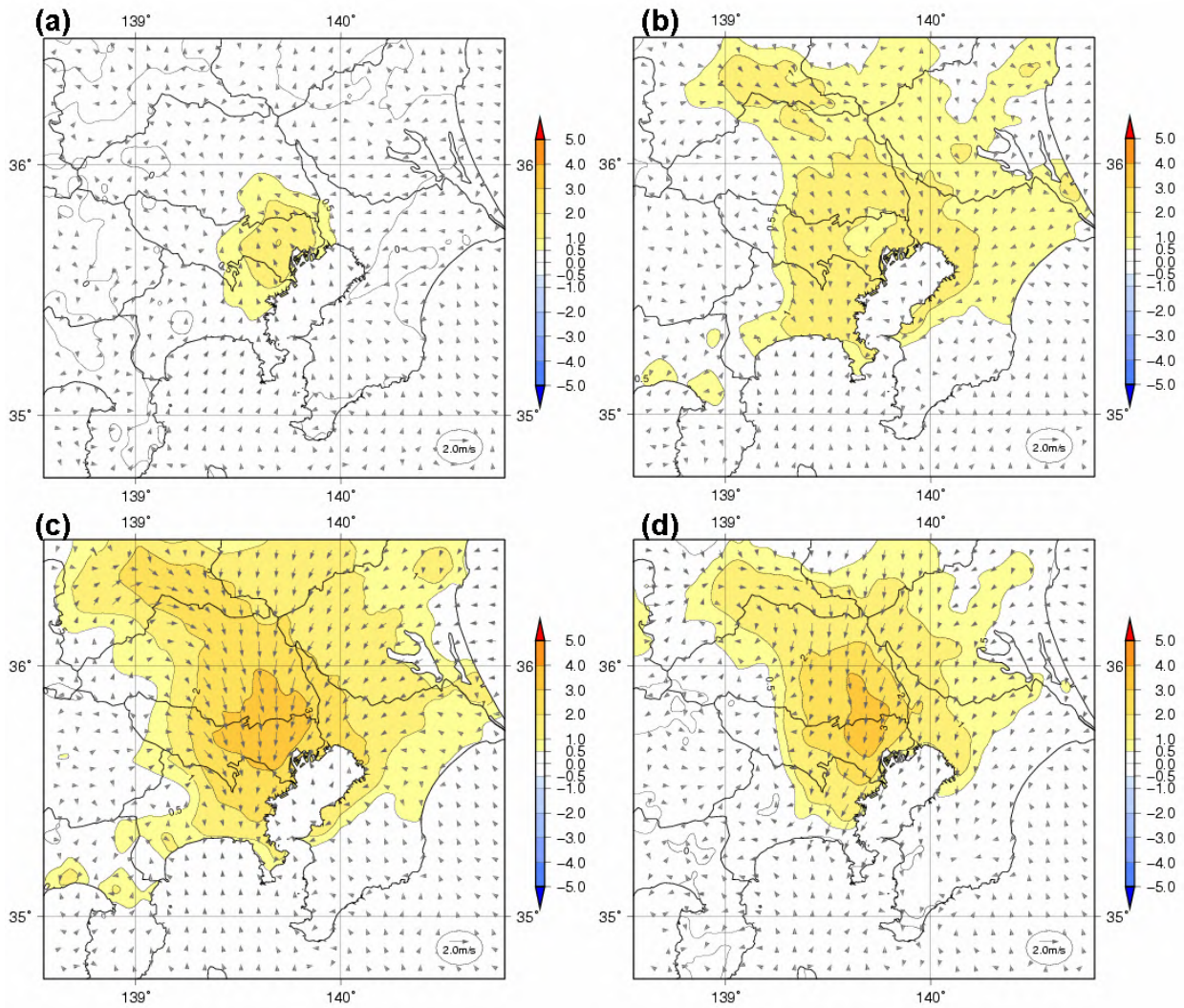


図 3.3 図 3.2 と同じ。ただし、夏季の弱風日 17 事例平均について。

### 3.4.2 晴天北風日

関東地方における晴天北風日の例として、2月7日の事例を示す。2月7日は、一時的に冬型の気圧配置となり、北よりの風が卓越した。上空の寒気の流入は顕著ではなく、前日までの高温の影響もあり、東京・大手町では最低気温 7.7、最高気温 13.0 を記録した。

図 3.4 は、同日における地上の風と気温の分布である。内陸部では一日を通して北西の風が強く、風向の日変化は大きくない。05 時の時点では気温 7 以上の領域が内陸部で大きく広がり、弱風日の同時刻のように内陸と沿岸での気温のコントラストは見られない。15 時になると気温 9 以上の領域が関東平野全体に広がる。20 時になっても、沿岸部では気温が下がりにくく、東京都の東京湾沿岸では気温 9 以上の領域も見られる。

図 3.5 は、気温と風向・風速に関して、都市がある場合とない場合の差をシミュレーションで求めたものである。05 時では、都市による気温の上昇は沿岸部に限られている。10 時の時点では都市の有無による気温差が +0.5 以上の領域が内陸にわずかに見られるのみである。15 時になると、都市による昇温が内陸に広がるが、埼玉県や群馬県では昇温量は +0.5 ~ +1 と、弱風日に比べその程度は小さい。16 時以降（図略）都市の有無による気温差の大きい領域は沿岸部に限られ、20 時では神奈川県から東京都にかけて気温差の極大域が現れる。風の偏差は一日を通して実際の風と逆向きであり、都市があることによって北風が弱められていることを示している。



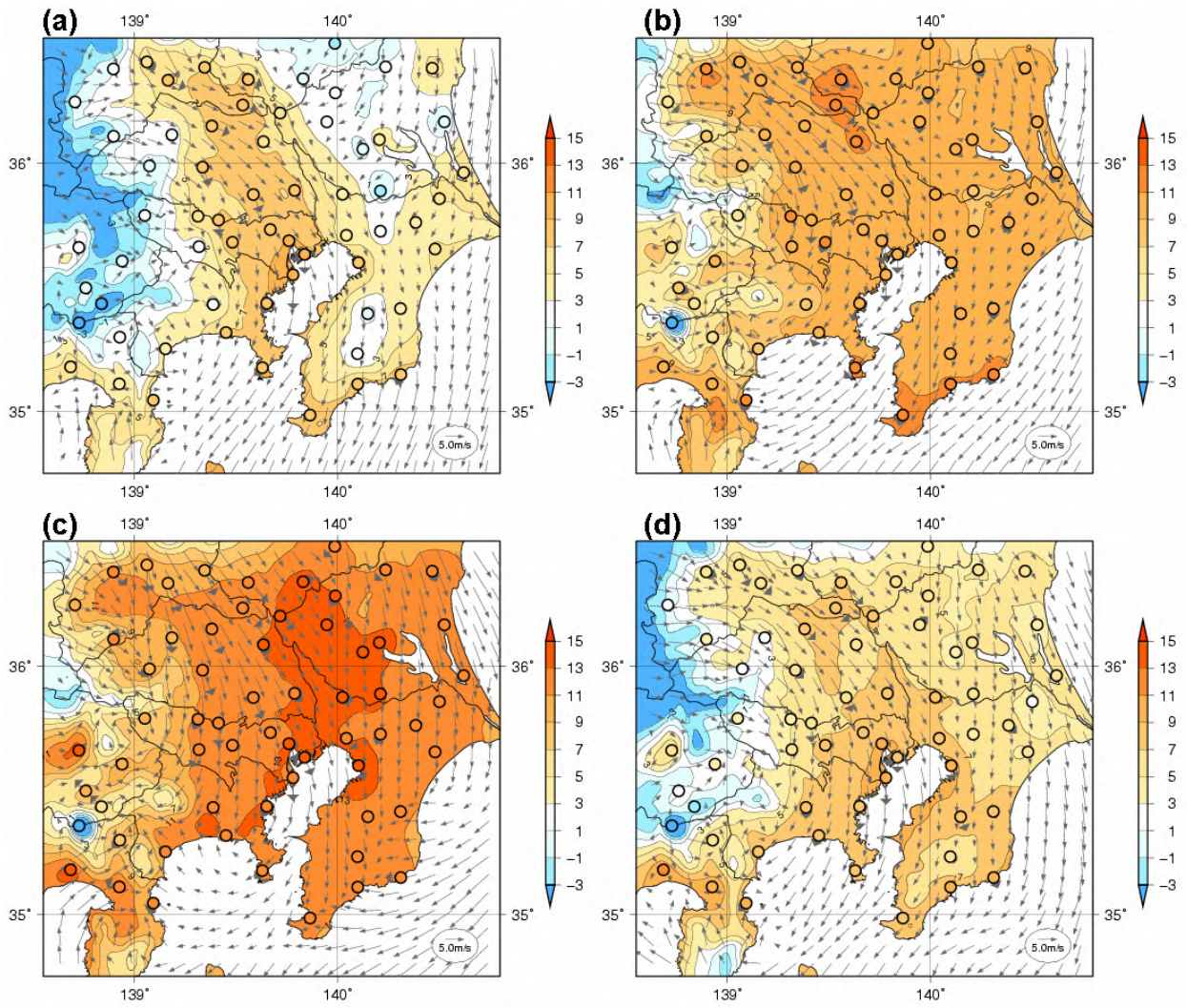


図 3.4 図 3.1 と同じ。ただし、2007 年 2 月 7 日について。

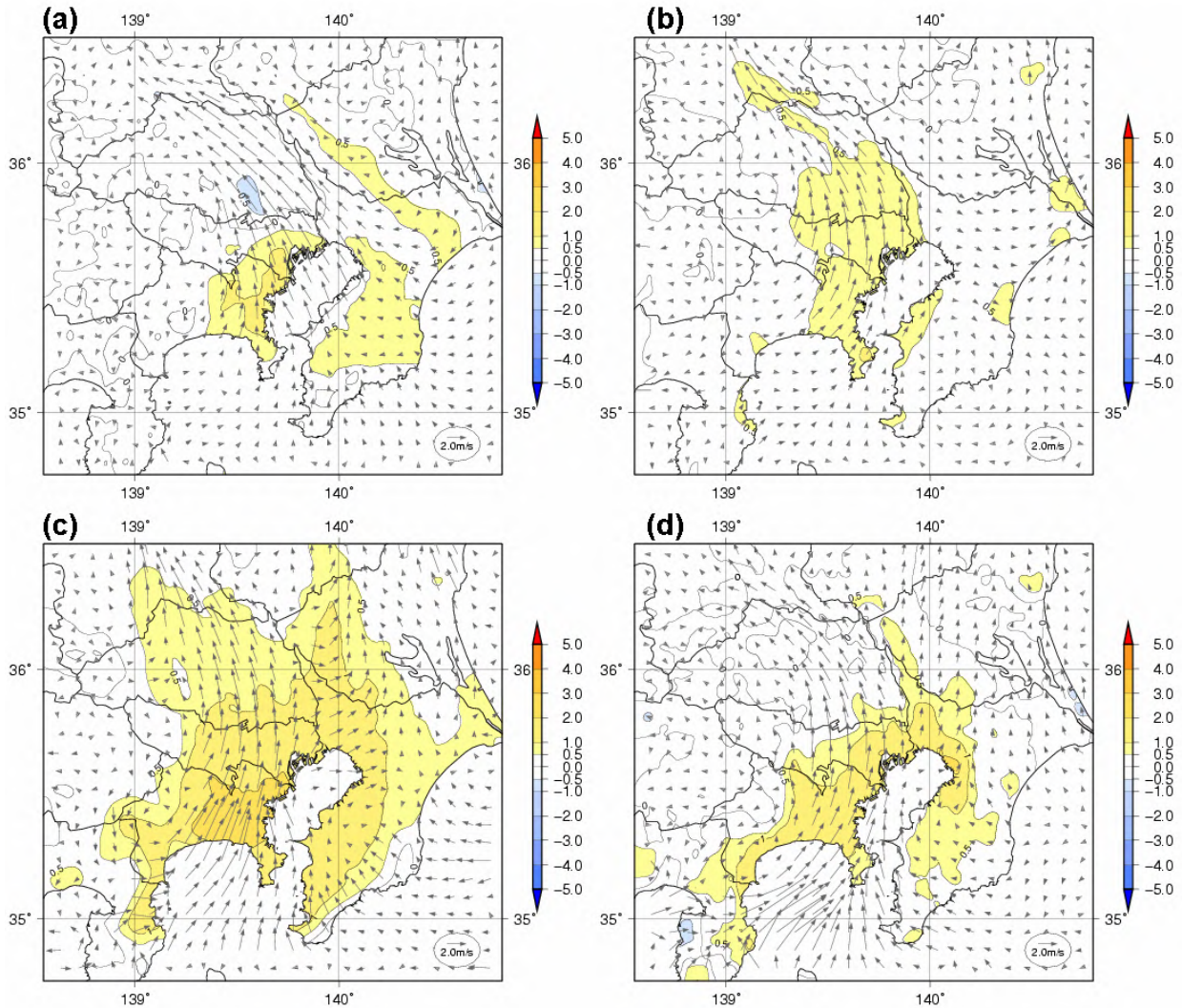


図 3.5 図 3.2 と同じ。ただし、2007 年 2 月 7 日について。

### 3.4.3 都市の有無による気温差の日変化

図 3.6 は、複数事例のシミュレーションによって得られた東京における「都市がある場合」と「都市がない場合」の気温差である。夏季の弱風晴天日においては、日中も都市による気温の上昇が大きく、最高気温を記録する 14～15 時ごろに気温差がピークになる。日没に当たる 18 時以降に 2 度目のピークが現れる。2 度目のピークは日中暖まったビルが熱を放出することに対応すると考えられる。その後は気温差は小さくなっていく。冬季においては、事例によっては日の出後の気温の上昇は都市の方が遅れる場合もある。午前中は、都市の有無による気温差は小さく、北風日、弱風日においても気温差はほとんど変わらない。日没に当たる 16～17 時以降、都市の有無による気温差が広がり始める。この日没以降の都市の効果による気温差は、晴天弱風日は晴天北風日に比べ大きい。気温差は、真夜中頃にピークとなり、その後小さくなる。都市と草地での気温差についての事例ごとのばらつきは、日中は小さいが、日没後に大きくなる。これは、ヒートアイランド現象の発生に際し、日中は日射の影響を強く受けるため事例ごとの差はあまり見られないが、夜間は大きな空間スケールで見た気温や風向等の事例ごとに異なっている気象条件の影響を受けているためであると考えられる。熊谷に関しては（図 3.7）冬の晴天北風日に都市の有無による気温の変化が小さいことは東京と同様であるが、夜間の気温変化も小さい点が東京と異なる。これは熊谷のような中小の都市では熱容量の大きい建物が少ないことが原因であると考えられる。

ヒートアイランド現象の日変化の特徴が冬と夏で異なる理由は、ヒートアイランド現象の主要因が

日中と夜間で異なるためであると考えられる。日中は、都市化により地表面がアスファルトになることで、土壌面や植物からの蒸発散による冷却効果が弱くなると考えられる（気象庁、2006）。日本の場合、夏季は水蒸気量が多く植生の活動が活発である一方、冬季は乾燥し植生の活動も不活発になる。そのため冬季は、草地における植物からの蒸散による冷却が小さいために、都市と草地との気温差が小さくなることが考えられる。これに対し夜間は、建物に日中蓄積された熱によって夜間の冷却が抑制されると考えられる（気象庁、2006）。冬季は、夜間の郊外での放射冷却が強いため、都市による夜間の放射冷却を抑制する効果との差が大きく、夜間での都市と郊外の気温差が夏に比べて大きくなると考えられる。

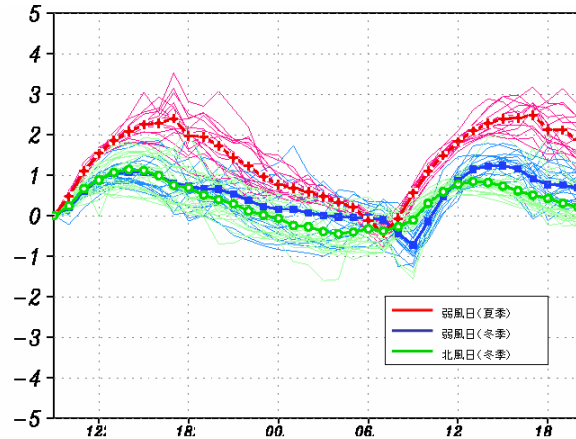
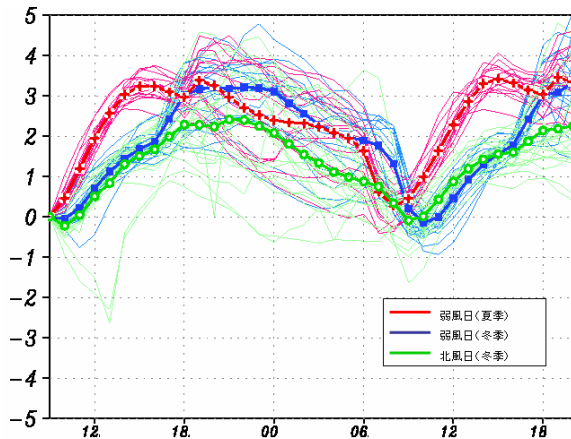


図 3.6 東京における、都市がある場合とない場合の気温差 ( ) の時系列。横軸は時刻を表す。赤：夏季弱風日、青：冬季弱風日、緑：冬季北風日。太い実線は事例平均、細い実線は各事例を示す。夏季の晴天北風日については事例数が少ないため表示しない。

図 3.7 図 3.6 と同じ。ただし熊谷について。

### 3.5 近畿地方

2006/2007 年冬季に近畿地方では、晴天弱風日は 11 事例、晴天北風日は 13 事例あった。晴天弱風日の例として 1 月 15 日、晴天北風日の例として 1 月 25 日の事例を示す。

#### 3.5.1 晴天弱風日

2007 年 1 月 15 日は、冬型の気圧配置が緩み、日本は大陸の高気圧に緩く覆われた。大阪では、最高気温 11.1、最低気温 2.4 を記録した。

図 3.8 は、近畿地方における同日の地上の気温と風の分布図である。05 時には大阪平野では気温が 1 を超える領域は大阪中心部付近に限られている。05~10 時には、大阪平野では平野から大阪湾に向かう風が形成されている。午後になるにつれて風向が変わり、大阪湾から大阪平野に向かう風が形成される。夜になっても海風は続き、紀伊水道からの流れとつながった大きな規模の系を形成する。20 時には大阪付近に気温 7 以上の領域が残っている。

図 3.9 は、気温と風向・風速に関して、都市がある場合とない場合の差をシミュレーションで求めたものである。05 時の時点では大阪湾の付近で 1 程度の気温上昇が見られる。10 時には、大阪府の広い範囲で都市化の影響により逆に都市がない場合より気温が低くなっている。これは、都市部は熱容量の大きいコンクリートに覆われているため、気温の上昇が遅いことが考えられる。午後になると、大阪平野、播磨平野、京都盆地で都市化による気温の上昇域が広がる。夕方以降、大阪の都市部では都市の有無による気温差が広がりはじめ、20 時になると大阪平野の沿岸からやや離れたところ

で気温差の極大域が現れる。弱風日の 11 事例平均においても都市化による気温の変化は 1 月 15 日と同様の傾向が見られる。

夜明け前に都市による気温への寄与が都市の中心部に現れること、午前中は都市化による気温の上昇が現れないこと、午後は平野の広い範囲で昇温する領域が広がること、日没後に沿岸から少し離れた内陸で都市の有無による気温差が大きくなることは関東地方と同様であり、これらは平野の沿岸域での弱風日における広域ヒートアイランド現象の特徴と考えられる。

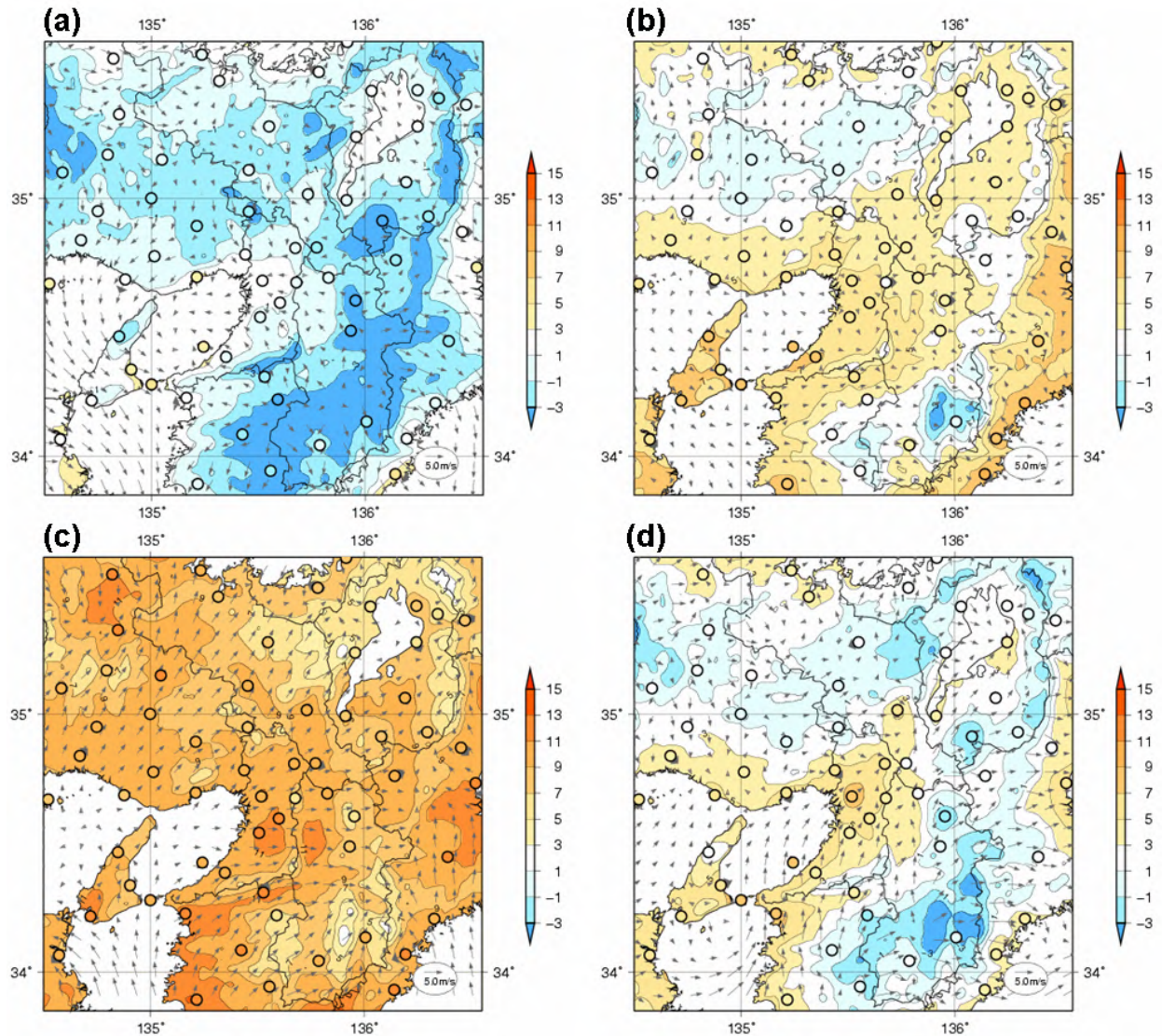


図 3.8 近畿地方における 2007 年 1 月 15 日の (a)05 時、(b)10 時、(c)15 時、(d)20 時の気温(、等値線)と風の分布(矢印)。図中の はアメダス観測点を表す。

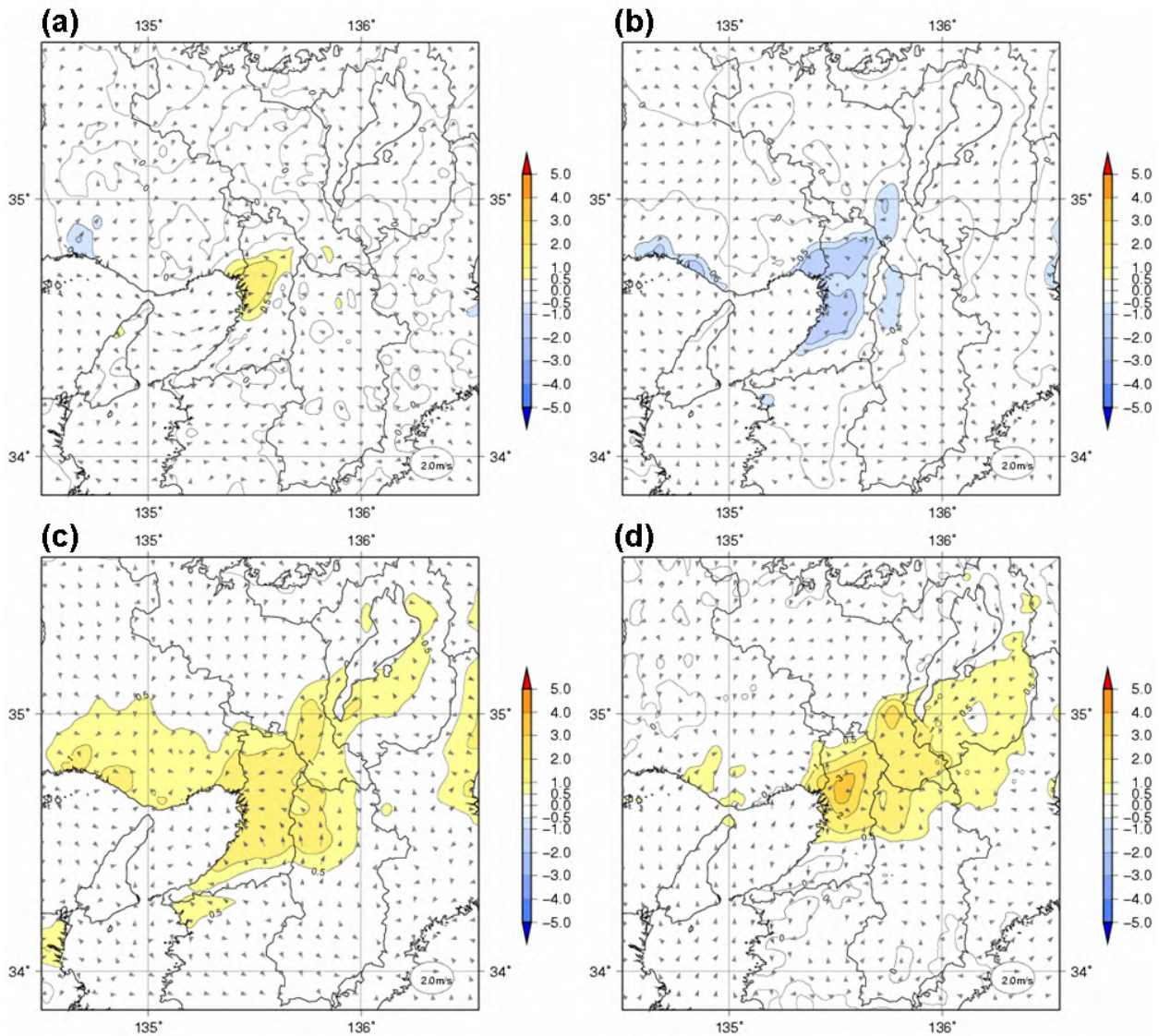


図 3.9 近畿地方における 2007 年 1 月 15 日の(a)05 時、(b)10 時、(c)15 時、(d)20 時の「都市がある場合」と「都市がない場合」の気温と風の差をシミュレーションで求めたもの。正の気温差は「都市がある場合」の方が気温が高いことを示す。

### 3.5.2 晴天北風日

晴天北風日の例として、弱い冬型の気圧配置となった 2007 年 1 月 25 日の事例を示す。近畿地方では 1 月初めから平年より高い傾向が続いており、大阪では、最高気温 11.6、最低気温 5.6 を記録した。

図 3.10 は、同日における地上の気温と風の分布図である。冬型の気圧配置の影響で北よりの風が近畿地方全体に一日中吹いた。海風のような海陸分布による局地的な風が吹いている地域は大阪湾の沿岸近くのみであった。05 時の時点で、大阪府では気温が 7 を超える地域が見られた。15 時には、大阪平野、播磨平野全体で気温 9 を超える地域が広がった。日没後の 20 時では、大阪平野で気温の上がり方が小さく、気温 9 を超える地域が見られた。

図 3.11 は、気温と風向、風速に関して、都市がある場合とない場合の差をシミュレーションで求めたものである。05 時では都市による気温の上昇は大阪府の沿岸にのみ現れる。10 時の時点では都市化による気温の変化はいずれの地域でもほとんどない。15 時になると大阪平野、播磨平野の沿岸部に都市化によって気温の上昇する領域が現れる。15 時以降、日没が近づくとつれて、都市の有無による気温差が大阪府で大きくなり、20 時には気温差が 2 以上の領域が見られる。また、都市化

による風向の変化は、日を通して顕著ではない。

晴天北風日は、晴天弱風日と比較すると気温の変化量は小さく、その変化が及ぶ地域も沿岸部に集中し内陸にはあまり広がらないという特徴が見られる。

### 3.5.3 都市の有無による気温差の日変化

図 3.12 は、複数事例のシミュレーションによって得られた大阪における「都市がある場合」と「都市がない場合」の気温差である。冬季は、日中における都市の有無による気温の変化は夏季に比べ小さい。冬季は気温差のピークは夜間に現れるという特徴も見られる。また、弱風日の方が都市による気温の上昇が大きいの。これらの特徴は図 3.6 の東京における気温変化の特徴と似ている。一方、気温差の変動は東京に比べ小さい。晴天弱風日の日の出直後（07～08 時）の気温の上昇が、都市は草地に比べ遅れるなど、東京と異なる特徴も見られる。

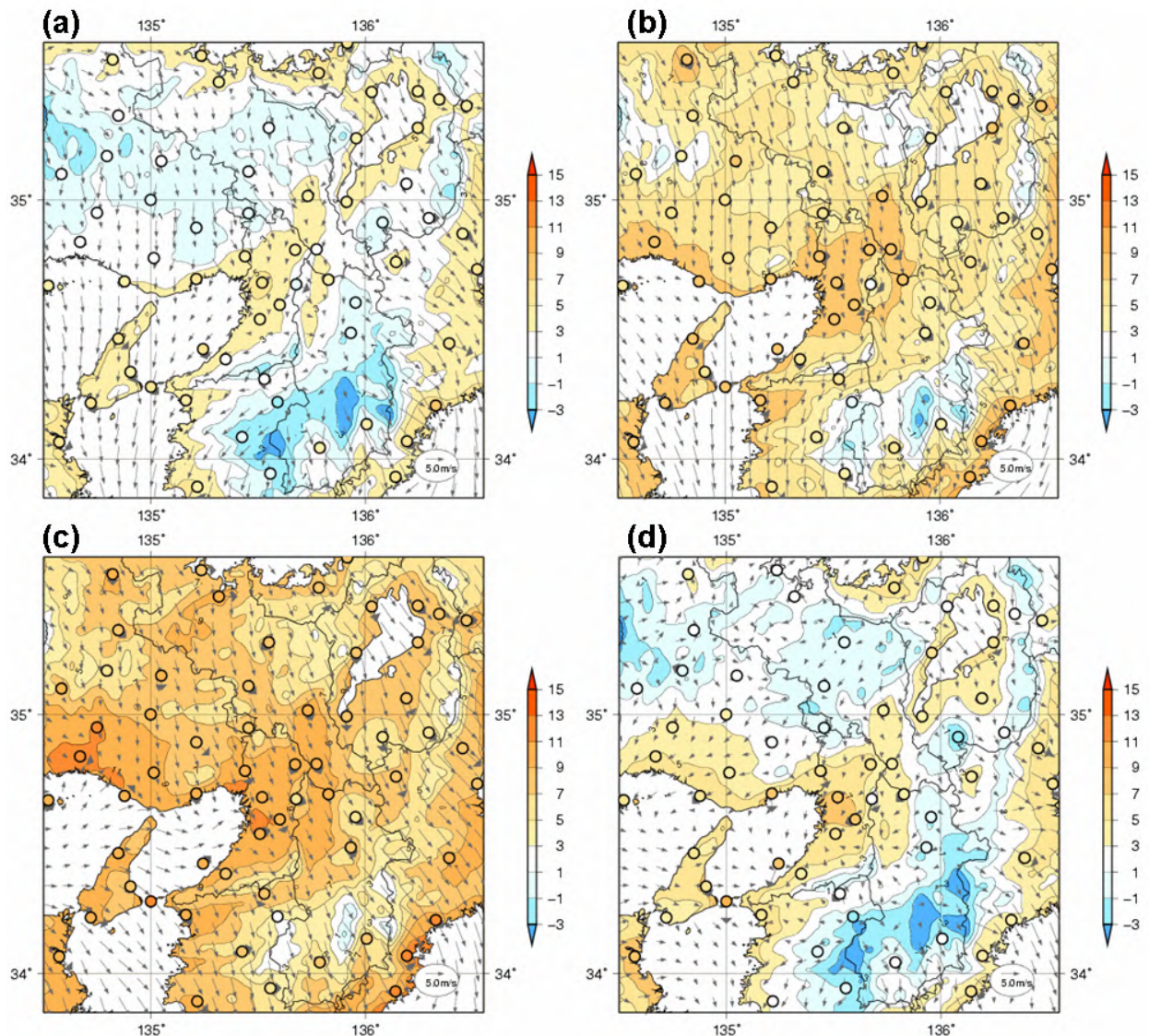


図 3.10 近畿地方における 2007 年 1 月 25 日の (a)05 時、(b)10 時、(c)15 時、(d)20 時の気温(℃)、等値線と風の分布(矢印)。図中の○はアメダス観測点を表す。

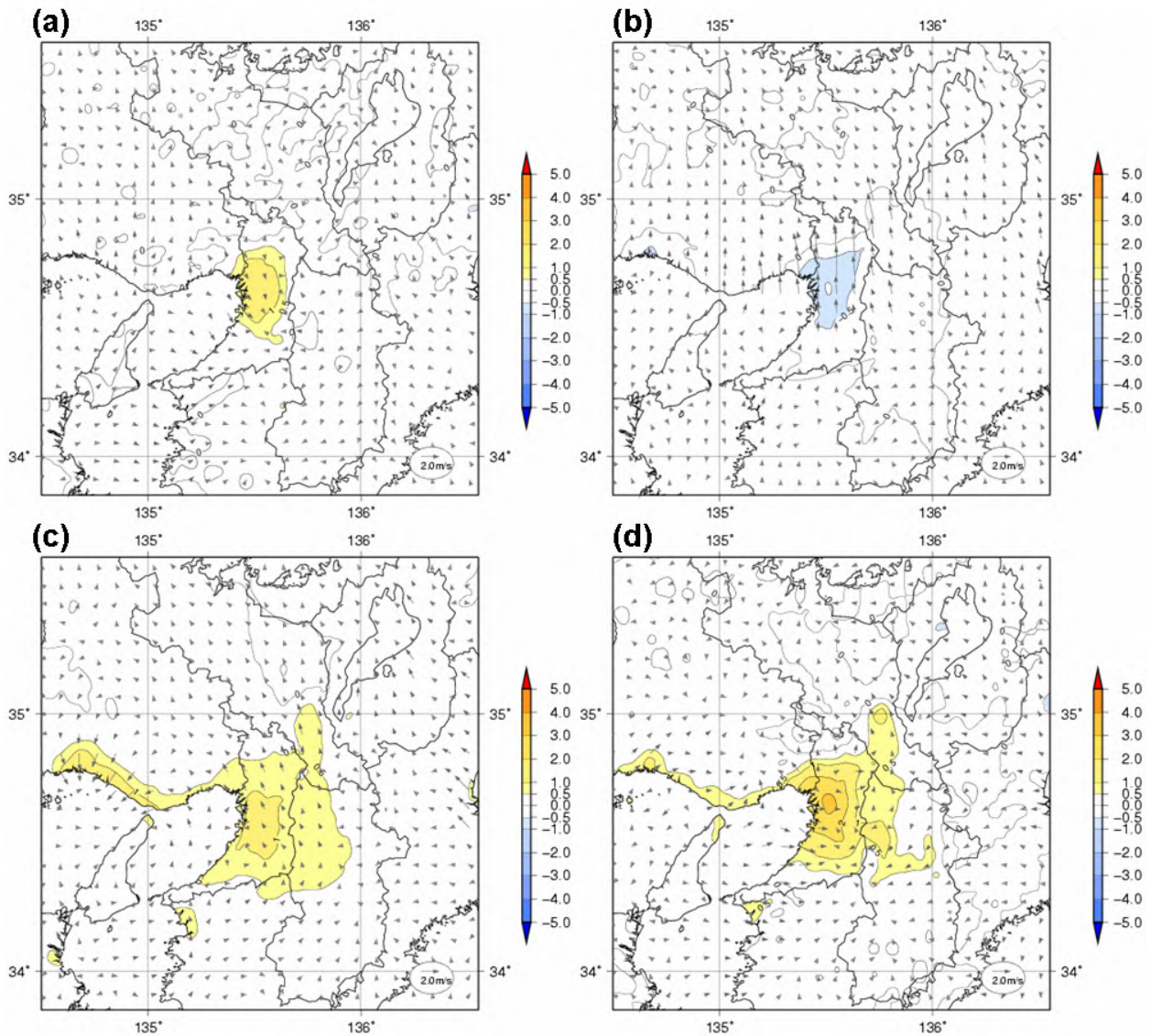


図 3.11 近畿地方における 2007 年 1 月 25 日の (a)05 時、(b)10 時、(c)15 時、(d)20 時の「都市がある場合」と「都市がない場合」の気温と風の差をシミュレーションで求めたもの。正の気温差は「都市がある場合」の方が気温が高いことを示す。

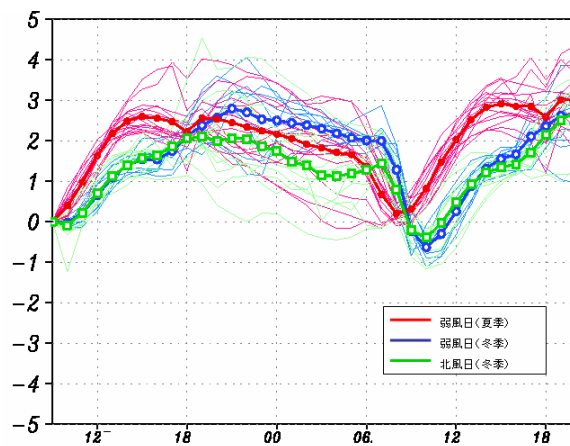


図 3.12 大阪における、都市がある場合とない場合の気温差の時系列。横軸は時刻。赤：夏季弱風日、青：冬季弱風日、緑：冬季北風日。太い実線は事例平均、細い実線は各事例を示す。

## 4. 2007年夏季のヒートアイランド現象

### 4.1 2007年7月、8月の関東、近畿地方の平均気温

7月は、太平洋高気圧の張り出しが弱く、梅雨前線が本州付近に停滞した。そのため、気温、日照時間ともに平年を下回り、ヒートアイランド現象が発生する状況にはなりにくかった。一方8月は、梅雨明け以降、本州は太平洋高気圧に覆われ暑い日が続いた、関東地方、近畿地方では日照時間が平年を上回った。気温も平年を大きく上回り、特に関東地方では最高気温の高温偏差が顕著であった。

表 4.1 2007年7月、8月における、関東・近畿地方の主要都市での気温の月平均値と日照時間

	7月				8月			
	平均気温	最高気温	最低気温	日照時間 平年比(%)	平均気温	最高気温	最低気温	日照時間 平年比(%)
<b>関東地方</b>								
宇都宮	22.8 [-1.0]	26.6 [-1.6]	19.9 [-0.5]	51	27.2 [1.9]	32.6 [2.5]	23.2 [1.4]	128
前橋	23.5 [-1.2]	27.2 [-2.0]	20.2 [-0.8]	58	28.0 [1.9]	33.5 [2.6]	23.4 [1.1]	134
熊谷	23.9 [-1.0]	27.8 [-1.8]	20.8 [-0.5]	57	28.6 [2.2]	34.3 [2.8]	24.1 [1.4]	138
東京	24.4 [-1.0]	27.4 [-1.6]	21.8 [-0.7]	55	29.0 [1.9]	33.0 [2.2]	25.9 [1.7]	128
横浜	23.8 [-0.9]	27.0 [-1.4]	21.4 [-0.6]	57	28.0 [1.6]	32.1 [1.8]	25.1 [1.4]	124
千葉	23.8 [-0.8]	27.3 [-0.8]	21.3 [-0.6]	56	28.3 [1.9]	32.6 [2.5]	25.4 [1.8]	128
<b>近畿地方</b>								
京都	25.3 [-1.4]	29.5 [-1.9]	22.0 [-0.9]	73	29.1 [1.3]	34.6 [1.7]	24.8 [0.9]	117
姫路	24.8 [-1.1]	28.8 [-1.1]	21.7 [-0.7]	72	27.9 [0.8]	32.5 [0.8]	24.2 [1.0]	106
神戸	25.7 [-1.1]	28.5 [-1.6]	23.3 [-1.0]	75	29.0 [1.0]	32.4 [1.0]	26.4 [1.0]	129
大阪	25.9 [-1.3]	29.7 [-1.7]	23.0 [-1.0]	69	29.9 [1.5]	34.6 [1.6]	26.3 [1.2]	125
和歌山	25.8 [-1.0]	29.5 [-1.2]	23.1 [-0.5]	72	28.9 [1.1]	33.3 [1.2]	25.1 [0.8]	121
奈良	24.1 [-1.5]	28.9 [-1.7]	20.7 [-0.8]	58	27.8 [1.2]	33.9 [1.7]	23.0 [0.7]	114

[ ]内の数値は、平年との差。

### 4.2 関東地方

夏季の晴天弱風日の例として、日本付近で太平洋高気圧に覆われた、2007年8月11日の事例を示す。この日は、東京・大手町で最高気温36.4を観測した。図4.1は同日における地上の気温と風の分布図である。05時において東京都心部の気温が25以上と周辺より高く、典型的なヒートアイランド現象の状況を示している。15時には、東京都から群馬県南東部にかけて35以上の領域が広がった。このように都心部から内陸まで延びた広い範囲の高温域は、関東地方におけるヒートアイランド現象の特徴的な分布を示している。

図4.2は、気温と風向、風速に関して、都市がある場合とない場合の差をシミュレーションで求めたものである。また、都市化の要因を、人工排熱、土地利用（緑地から人工地表面への変化など）、建築物（建築物の存在による上空の見通しや風通しの阻害など）の3つに分け、3つの要因がそれぞれ気温の上昇にどの程度寄与しているのかを調べた結果を図4.3に示す。



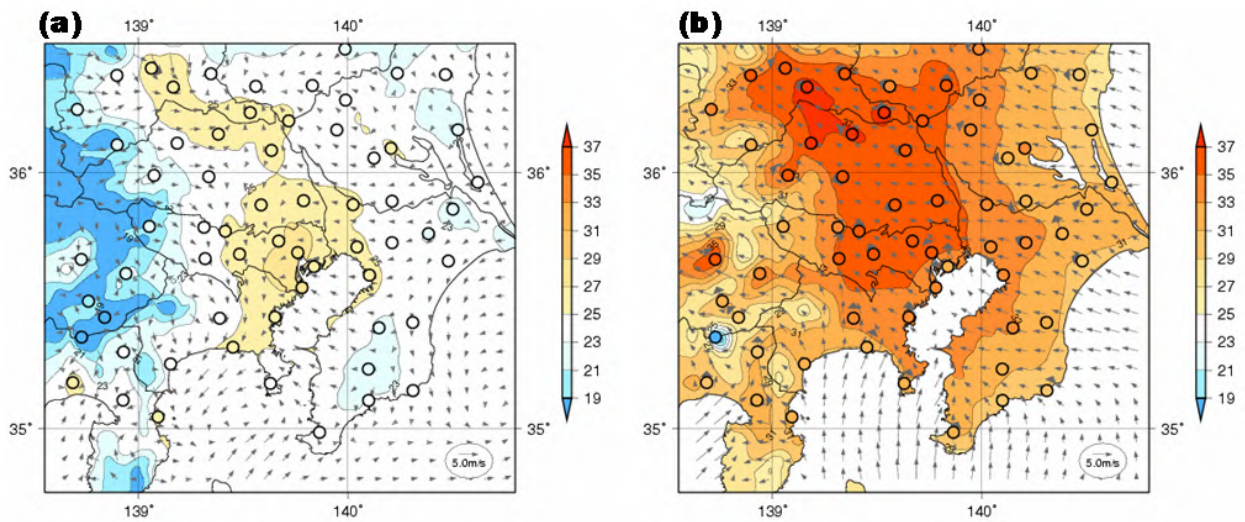


図 4.1 2007 年 8 月 11 日の関東地方における地上気温(単位:  $^{\circ}\text{C}$ )と風(単位:  $\text{m/s}$ )の分布(a:05 時, b:15 時)

図 4.2 で 2 を超えるような差が見られる範囲が、05 時には東京都心を中心に限られるのが、15 時には東京都心から内陸まで広がっている。これは、夜間には人工排熱や建築物が日中にため込んだ熱の放出がヒートアイランド現象の主な要因であるのに対し、昼間には土地利用状況(緑地の大小や、アスファルトやコンクリートなど人工地表面の大小)が大きく寄与していることによるものである(図 4.3)。また、都心部の高温化により上昇流が発生するとともに、日中に東京湾から内陸に向けて吹く冷涼な海風の進入が妨げられ、都心の風下側が冷えにくくなっていることも分かっている(気象庁、2006)。

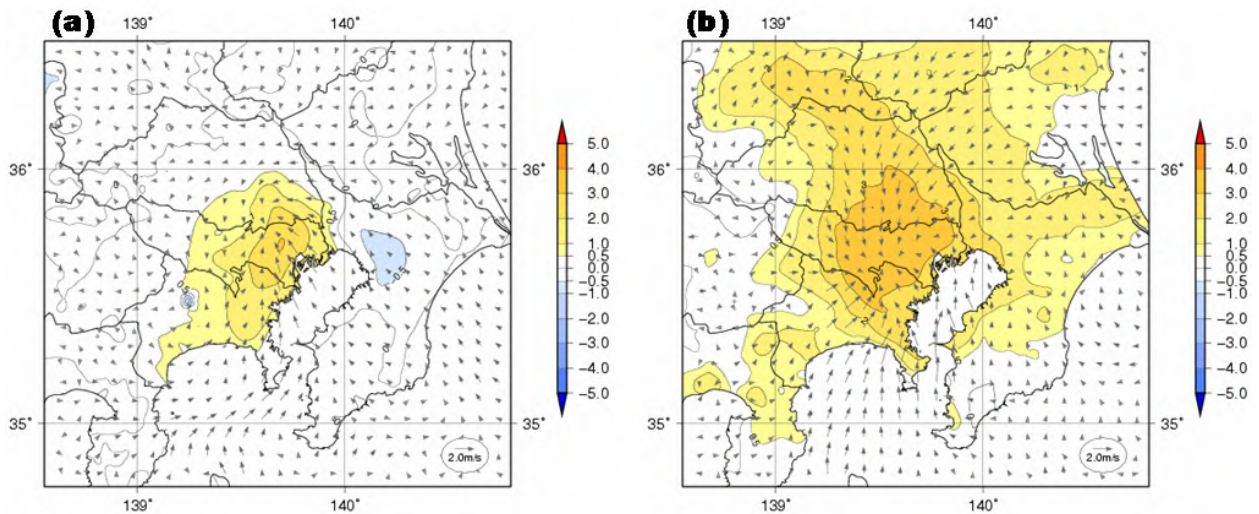


図 4.2 図 4.1 の事例で都市化の影響による気温の上昇分(単位:  $^{\circ}\text{C}$ )(a:05 時, b:15 時)

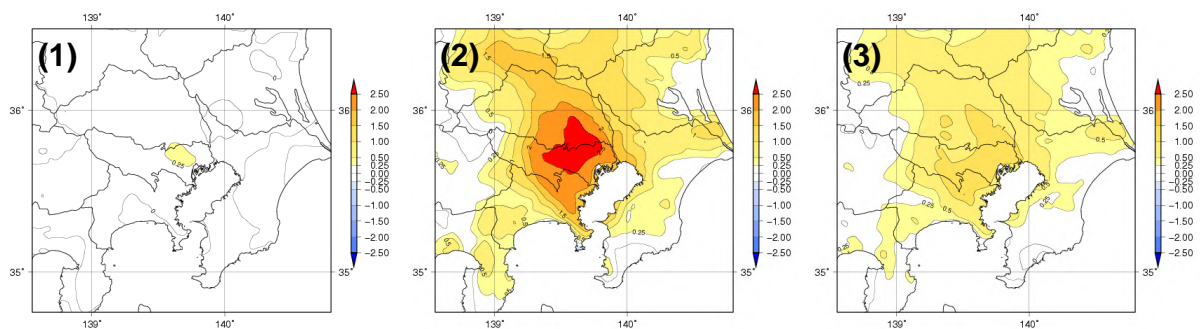


図 4.3 2007 年 8 月 11 日 15 時の都市化の影響による気温上昇に対する、(1)人工排熱、(2)土地利用、(3)建築物、の寄与分(単位:  $^{\circ}\text{C}$ )

### 4.3 8月16日の記録的高温とヒートアイランド現象との関係

熊谷で我が国の観測史上1位となる最高気温40.9を観測した2007年8月16日について、15時の気温と風の分布及び同時刻に数値シミュレーションにより都市化の効果を評価した場合の都市化による影響の分布を図4.4に示す。37を超える高温の領域が埼玉県東部から群馬県南東部を中心に広がったが、都市化の影響が3を超える地域は東京都心付近に限られ、熊谷など内陸部では大きくて1程度にとどまっている。

この高温は、太平洋高気圧の日本付近への張り出しやフェーン現象などの地形の影響が大きな要因と考えられ、晴れて広い地域で風が弱い気象条件の下で内陸部まで広く影響が及ぶ典型的なヒートアイランド現象の事例(4.2節参照)とは異なり、内陸部でのヒートアイランド現象の影響が比較的弱かったものである。この原因として、西日本に中心をもつ高気圧の影響により内陸で北から北西の方向から山を越えて吹いてくる風が強かったため、東京都心での都市化の影響が内陸部まであまり及ばなかったことが考えられる。

この日の事例について、都市化の要因を、人工排熱、土地利用(緑地から人工地表面への変化など)、建築物(建築物の存在による上空の見通しや風通しの阻害など)の3つに分け、3つの要因がそれぞれ気温の上昇にどの程度寄与しているのかを調べた結果を図4.5に示す。これによると、この日の内陸部における都市化の影響の主な要因として、現地における都市化の進行に伴う土地利用の変化が多くを占めていたことが分かった。

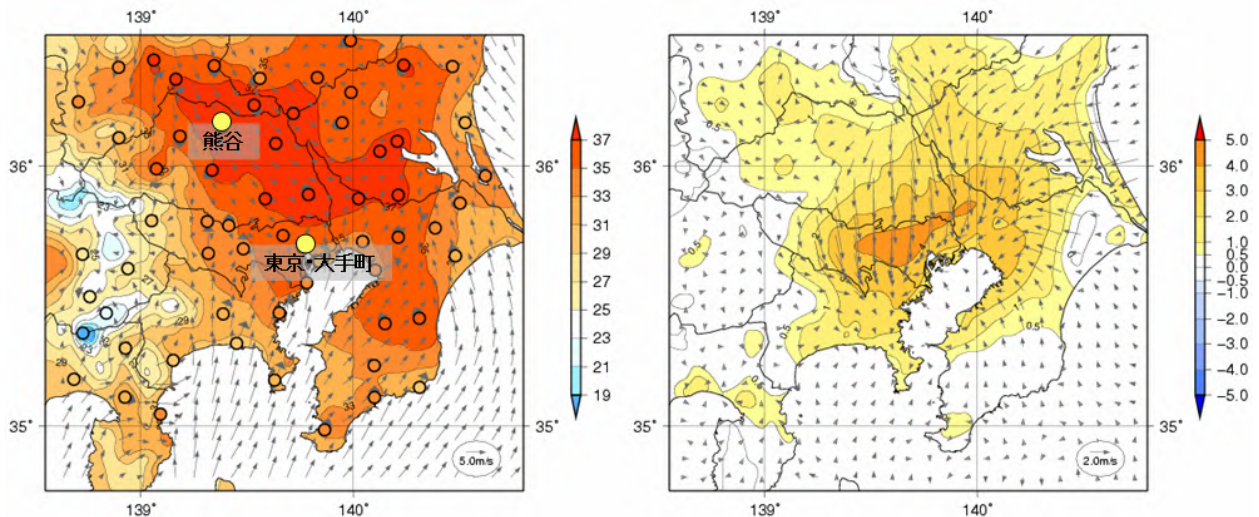


図4.4 2007年8月16日15時の地上気温(単位: °C)と風(単位: m/s)の分布(左)と、同時刻の都市化の影響による気温の上昇分(単位: °C)

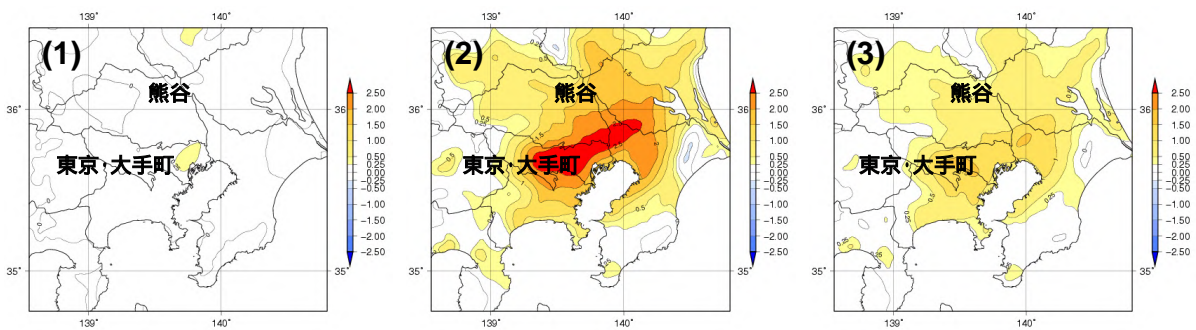


図4.5 2007年8月16日15時の都市化の影響による気温上昇に対する、それぞれ(1)人工排熱、(2)土地利用、(3)建築物、の寄与分(単位: °C)

#### 4.4 近畿地方

近畿地方の晴天弱風日の例として、2007年8月19日の事例を示す。図4.6は同日における気温と風の分布、図4.7は、気温と風向、風速に関して、都市がある場合とない場合の差をシミュレーションで求めたものである。05時では、都市の影響により気温が周囲より高い地域は大阪を中心に沿岸部に広がっている。日中になると、都市の影響が強く及ぶ範囲は大阪から北東方向を中心に滋賀県南西部から奈良県北西部を含め平野全体に拡大する。内陸部では、都市の効果により大阪湾から吹き込む海風が進入しにくくなり、そのため21時過ぎ頃まで影響が継続している。

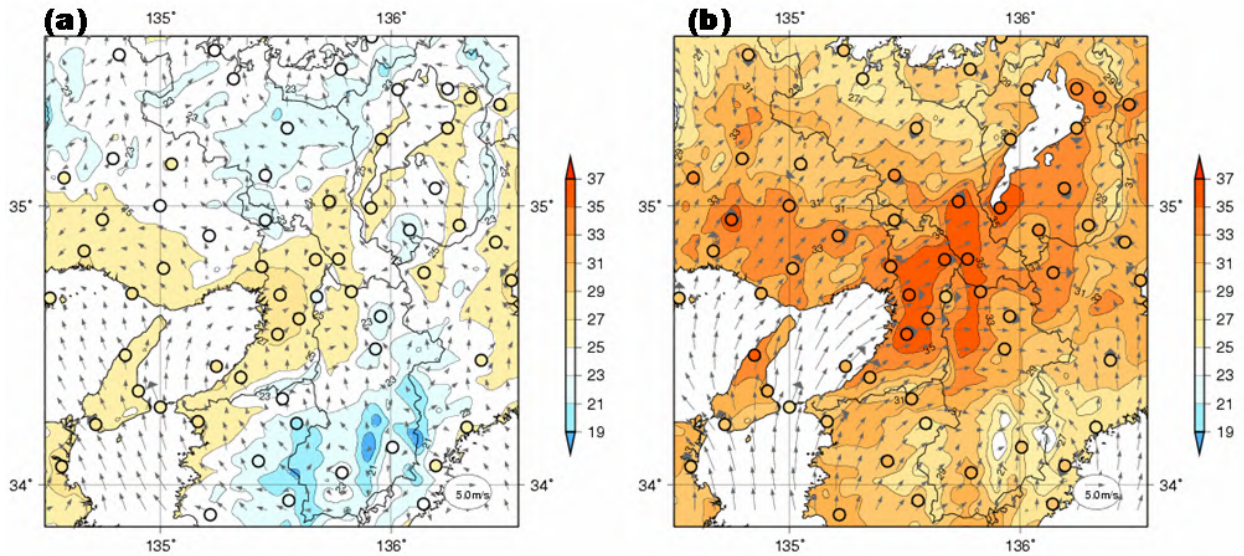


図 4.6 2007年8月19日の近畿地方における地上気温(単位:  $^{\circ}\text{C}$ )と風(単位:  $\text{m/s}$ )の分布(a:05時, b:15時)

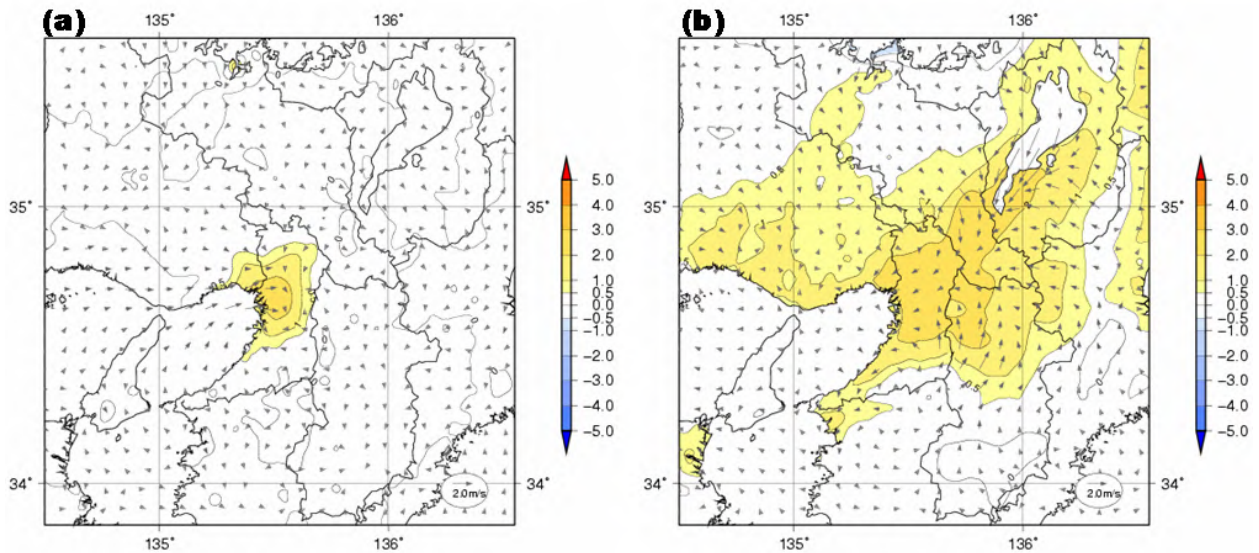


図 4.7 図 4.6 の事例で都市化の影響による気温の上昇分(単位:  $^{\circ}\text{C}$ )(a:05時, b:15時)

図 4.8 は、京都、奈良、大阪府枚方を始め内陸部でこの夏の最高気温を記録した8月16日について、同様の解析及びシミュレーションを行った結果である。この日は、内陸部を中心に北よりの風が吹いていたこともあり、都市の影響を強く受けた範囲は日中でも大阪周辺の沿岸部が中心で、典型的なヒートアイランド現象の事例に比べ、内陸部では都市化の影響が比較的弱かったことが分かった。

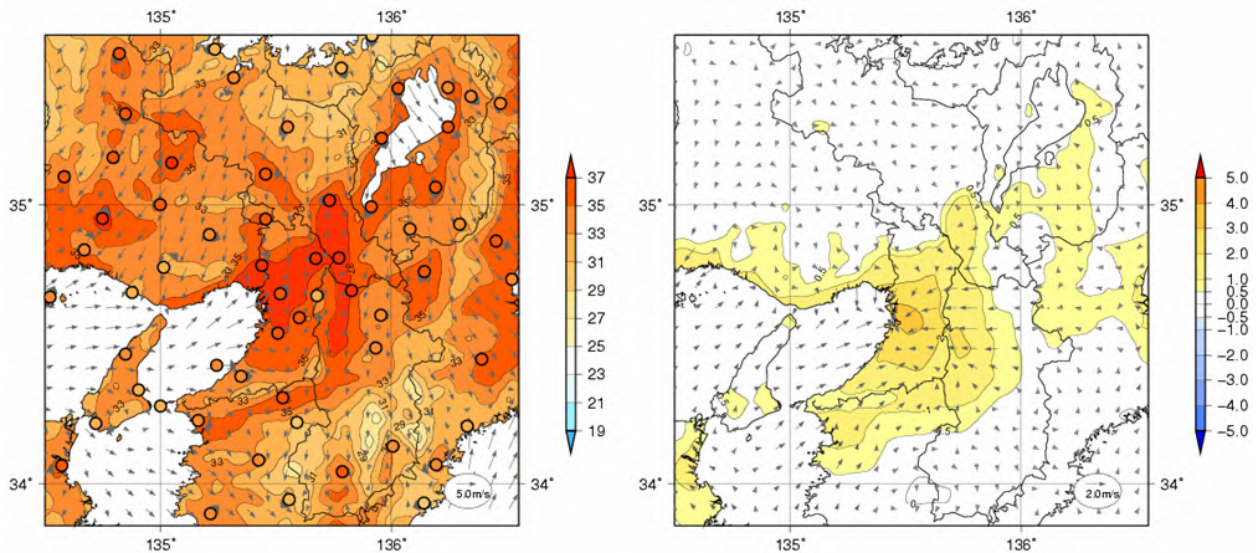


図 4.8 2007 年 8 月 16 日 15 時の地上気温(単位: °C)と風(単位:m/s)の分布(左)と、  
同時刻の都市化の影響による気温の上昇分(単位: °C)

## 5. おわりに

過去 100 年間、日本国内の都市の高温化は、地球温暖化に伴う世界の平均気温の上昇の数倍の速度で進んでいる。このため、生活環境の悪化や、植物、動物等生態系への影響が懸念されており、また短時間集中豪雨との関連性を指摘する声もある。今回、全国観測データを用いた気温の長期変化、および数値シミュレーションによる冬季のヒートアイランド現象の状況について調査したが、今後は更に詳細な解析を進め、ヒートアイランド対策の推進に貢献する情報提供に努めていく。また、今後の新しい試みとしては、関東、近畿地方以外の地方の都市部におけるヒートアイランド現象の実態把握についても検討する。

## 6. 謝辞

本報告で用いた人工排熱量データは、独立行政法人土木研究所および大阪大学からご提供いただいた。ここに厚くお礼を申し上げます。

## 7. 参考文献

気象庁, 2006: ヒートアイランド監視報告(平成 17 年夏季・関東地方)

<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpinfo/himr/2005/himr2005.pdf>

気象庁, 2007: ヒートアイランド監視報告(平成 18 年夏季 - 関東・近畿地方)

<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpinfo/himr/2006/himr2006.pdf>

鳴海 大典, 大谷 文人, 近藤 明, 下田 吉之, 水野 稔, 2002: 都市における人工廃熱が都市熱環境に及ぼす影響 - 都市熱環境評価モデルを用いたヒートアイランド現象の改善策に関する検討 その 1 -, 日本建築学会計画系論文集, No.562, pp.97-104

妹尾 泰史, 神田 学, 木内 豪, 萩島 理, 2004: 潜熱割合を考慮した人工排熱時空間分布の推計と局地気象に対する影響, 水工学論文集, 48