長野県小布施町における弱風時夜間の 都市内外の気温鉛直分布

榊原保志* 中川清隆**

Vertical Temperature Profiles with Light Breezes at Night in Urban and Rural Areas of Obuse, Nagano

Yasushi SAKAKIBARA* and Kiyotaka NAKAGAWA**

Abstract

This paper describes the vertical structure of the nocturnal heat island in a small town. Tethered balloon soundings were conducted 180 times in and around an urban area on nights with light winds from March 2003 to May 2005. Surface inversions developed not only in rural areas but also in urban areas. Surface inversions developed quickly after sunset at the rural site, whereas development was slower at the urban site. At six hours after sunset the vertical temperature profile in the urban area was the same as that in the rural area. Heat island formation in the small town was related to the delay in the development of surface inversion in the urban area. The crossover effect can be seen in only three of 23 surveys for which vertical soundings were performed in both urban and rural areas.

Key words : heat island, air temperature, Obuse, vertical profile, crossover

キーワード : ヒートアイランド, 気温, 小布施, 鉛直プロファイル, クロスオーバー現象

I. はじめに

日中郊外では、日射を受け地表面が加熱されると、大気は地表面付近から昇温し、鉛直方向によく混合される。この層は混合層と呼ばれ午後になると 0.5 から 2 km ぐらいに達する (Oke, 1987)。夜には、放射冷却により大気の下層には逆転層が生じる。この逆転層は鉛直混合を弱め、地表面からの熱輸送を妨げる。弱風で乱流が弱い場合にはこの層は 50 m 程度に達し、地面に接した混合層は存在しなくなる。

一方、都市ではヒートアイランドの原因となる

熱的要因と地表面の構築物による機械的な要因によって接地層は大きく影響を受け (原田, 1982)、郊外と比べ異なる気温の鉛直分布が形成される。Duckworth and Sandberg (1954) は、係留気球を用いた夜間の気温鉛直観測から、郊外には気温逆転層が生じていても都市では中立層であることを示した。DeMarrais (1960) は都市のテレビ塔による 1 年間にわたる鉛直気温観測でも、接地逆転が観測されるのはまれであり、夜間の半分以上で等温もしくは断熱的な気温減率が観測されることを示した。

都市と郊外の気温鉛直分布の形状比較による

* 信州大学教育学部

** 立正大学地球環境科学部

* Faculty of Education, Shinshu University, Nagano, 380-8544, Japan

** Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University, Kumagaya, 360-0194, Japan

と、地上気温は都市の方が郊外よりも高いものの、都市上空の気温は郊外の同じ高さの気温よりも低い場合がある。この現象をクロスオーバー現象と呼び、ヒートアイランドに関わる重要な現象として Duckworth and Sandberg (1954) は注目した。彼らは、サンフランシスコやサンノゼのような比較的大きな都市ではこの現象はみられたが、人口3万3千人のパロアルトではみられなかったとしている。

その後、他の都市の上空でもクロスオーバー現象の存在が確かめられている（モントリオール (Oke and East, 1971), ニューヨーク (Bornstein, 1968), 東京 (河村, 1977), 土浦 (小園, 1987)）。河村 (1977) は、中小都市ではクロスオーバー現象の出現がみられるかどうかについては、まだ十分な観測結果が得られていないことを指摘し、成因的にみても大都市のクロスオーバー現象と同一とみなせるか疑問であると述べている。

クロスオーバー現象が都市上空に出現する理由について以下のようなメカニズムの存在が指摘されている。Oke and East (1971) は気温の鉛直プロファイルの形状から、都市上空から下方に熱が移動することを推測している。これを実測によって確かめたのは、Uno *et al.* (1988) である。彼らは、札幌市の都市部では接地逆転は形成されず、上空40 mから60 mの高度に上空逆転層が出現したこと、超音波風速計を取り付けた乱流ブーゲン観測により、上空逆転層から下向きに輸送される顕熱が都市境界層内を加熱する熱源として作用することを指摘した。このことは、郊外から移流があると建物の存在は大気を混合させ、上空の相対的に暖かい空気が都市表層に下りてくるメカニズムが存在することを示唆している。

このメカニズムは小都市でも起こりうることを田宮・大山 (1981) は指摘している。彼らは、移動観測によって得られた夜間ヒートアイランド強度と郊外のタワーで観測された逆転強度・風速を用いて、建物などの大きな地表面粗度により都市大気下層が攪拌されることによる、逆転層の破壊がヒートアイランドを形成するというモデルの

可能性を示した。ただし、都市内外で気温の鉛直分布を観測していないので、クロスオーバー現象の出現頻度などの言及はない。

クロスオーバー現象が生じる原因として、表面からの加熱による対流のオーバーシュート（Deardorff *et al.*, 1969）、都市上空にある煙や二酸化炭素を含む層の放射冷却（Duckworth and Sandberg, 1954）なども考えられている。しかしながら、特定の原因を支持する有力な証拠はみつかっていない。クロスオーバー現象やヒートアイランドの立体構造の特徴について実態把握が十分でないためと考えられる。

本研究では、人口約1万人の小都市において、ヒートアイランドが明瞭に出現すると考えられる弱風晴天夜間に年間を通した係留気球の移動観測を行った。その結果を用いて、クロスオーバー現象の出現状況、都市内外の気温の鉛直分布の時間的推移の特徴、郊外における逆転強度とヒートアイランド強度の関係について報告する。

II. 方 法

1) 調査対象地区

観測対象とした地区は長野県小布施町である（図1）。同町は人口12000人の小都市であり、市街地は大きくない。これまでにヒートアイランドの調査が行われ、明瞭なヒートアイランド強度が出現している（Sakakibara and Matsui, 2005）。都市は長野電鉄小布施駅から南西500 mの範囲の地域で、商店街や住宅地からなる。この地域において最も高い建物は3階建てであり、多くの建物は2階建てである。一方、都市の北側は水田であり、それ以外の方向は果樹園が卓越している。

気温と風速の鉛直プロファイルを調べるため、係留気球観測を都市と郊外の二つの地点を移動しながら行った。郊外の地点は大規模な水田域の中央部の農道（図1地点R）であり、都市の地点は道路に隣接するバスロータリー（図1地点U）である。前者の地点における交通量は夜間日中ともにきわめて少なく、後者は観測が行われる夜間にはバスの運行はなく、ロータリー内には自動車

図 1 観測対象地域。
U：都市の観測点，R：郊外（水田）の観測点。

Fig. 1 Research area of study.
U: Urban observation point, R: rural observation point.

は通らない。榊原（1999）の調査によると後者の地点は小布施町で最も気温が高い場所である中町南交差点の東側 130 m に位置している。本来ならば中町南交差点で係留気球観測を実施すべきであるが、車の往来の少ない夜間であっても、万が一車の通行があると危険なので、その場所に準じた場所として地点 U を選んだ。住宅地図と現地調査によれば、この場所を中心とする 250 m 四方の建坪率は 0.324、容積率は 0.530 であった。建物は 7 m 程度の高さのものが多く、建物がないところを 0 m とみなすと当地域の平均高度は 1.89 m であった。

2) 観測方法

気球は小型円筒形をした係留気球（（株）気球製作所製，1.3M3）を用いた。この気球にセンサが組み込まれた係留ゾンデ（Atmospheric Instrumentation Research Inc.（現在は Vaisala 社），Boulder, Colorado, TS-3A-SP）をロープで吊した。

観測値は自動車の荷台においた無線受信機（Atmospheric Instrumentation Research Inc., AIR-3B）によって受信した。そのデータをノートパソコン（ソニー製，VAIO-U3）に転送して保存した。なお、観測インターバルは 12 秒とし

た。電動リール（ダイワ精器製，スーパータナコン 500DX）は気球を係留するためのウインチの代用とした。このリールには、放出した釣り糸の長さを表示するバックライト付き液晶ディスプレイが搭載され、これをもとに気球の高さを推定しながら観測を行った。この電動リールは 1 kg の重さに対し最大 40 m/min の巻き取り速度を有する。釣り糸は 200 m の標準 10 号を使用した。このリールはグラスファイバーの釣り竿（上州屋製，Kingston NewTristar-DX 330HG-II）に取り付け、自動車のルーフキャリアに固定した（図 2）。

係留ゾンデのスイッチを押すと、無線通信により、風速、気温、気圧の観測値の送信が開始する。リールのストッパーを外すと、釣り糸は放たれ、ヘリウムを入れた気球の浮力により、気球は上昇する。係留気球の鉛直移動は、糸の長さが 0 m（センサ高度が地上高 3 m に相当する）、5 m および 10 m 以上は 10 m ごとに最高 200 m までの高度で約 10 秒間停止させた。12 秒のインターバル観測なので停止位置で観測が行われるとは限らないが、このことが鉛直気温分布に大きな影響を与えるものとは思えない。下降させるときも、同様な糸の長さのところでいったん静止させて観

図 2 係留気球と観測車.

Fig. 2 Tethered balloon and observational car.

測を行った。風速が大きくなるにつれて、係留する糸の傾きは大きくなる。よって、気球は真上に上がるとは限らないので、空に放出した糸の長さは必ずしも気球高度を意味しない。観測を行った地上からの高度は、観測によって得られた気温、気圧から、層厚の公式を用いて計算した。風向は目視によって観測した。

都市と郊外の地点を自動車により、ヘリウムガスを充填し膨らませたまま気球を自動車の荷台スペースに収納して移動した。

雲量はこの郊外の観測地点（図 1 地点 R）において目視観測を行った。風速は郊外の地点における地上高 10 m の測定値である。風向は気球を一番上にあげたときの係留ロープのたなびく方向から目視によって測定した。また、地上気温はアスマン通風乾湿計により観測開始時と終了時に測定し、その平均値を観測時の地上気温とした。

3) 平均鉛直分布の算出

観測は 2004 年の 3 月から 2005 年 5 月の降水がない夜間に行った（表 1）。表 1 にある風速は前述の通り地上高 10 m の測定値であるが、この高さに固定した風速計での 10 分間平均の値ではなく、係留ゾンデの風速センサの測定値で、気温の観測と同じように移動させて測定したものである。したがって、係留ロープのたなびく方向から観測した風向が C（静穏）となっていなくても 1 m/s

以上の風速であったり、逆に風向が表示されていても、風速が 0 m/s となる時がある。また、2005 年の 1 月から 3 月にかけて、郊外の観測地点である農道の除雪がされていなかったため、この期間に観測は行わなかった。

表 2 の R1, R2, R5, R6 は郊外の観測であり、U3, U4 は都市における観測である。なお、アルファベットの後の数字は観測の順番を示す。21 時前から郊外で 2 回上下し、その後都市で 2 回、再度郊外に移動して 2 回延べ 6 回、気球を上下させた。ただし、必ずしも 6 回の観測が実施できなかった日がある。

観測により得られた生データをグラフにしたものが図 3 である。観測は郊外の地点 R において夜間に行われた。上昇時の測定値は白丸印、下降時のものは灰色の四角印で示した。全体的には上昇時、下降時の気温分布のパターンは大変よく似ている。しかし、観測時刻が遅い下降時のものが上昇時よりやや気温が低いことがわかる。係留気球による鉛直分布観測値に対する時刻補正の方法は佐橋・大重（1988）を採用した。つまり、気球上昇中に得られた値と下降中に得られた値の平均値を採用する方法である。さらに大気鉛直構造の平均的なあるいは典型的な形を知るには、1 回のプロファイルで判断するよりも複数の観測結果の平均的な状態から判断するのが安全である。なお、図 3 からわかるように、必ずしも同じ高度で上昇中の観測と下降中の観測が行われていない。そこで、後の解析で平均的な鉛直プロファイルを求めやすくするために、特定の高度の値を次の方法で内挿した。すなわち、地上高 10 m, 20 m, 30 m…を指定高度とし、5 m 以上 15 m 未満の観測値の平均を地上高 10 m の値とした。この方法で 10 m から 90 m まで 10 m ごとの気温鉛直プロファイルを求めた。

図 4 は今回の観測時の郊外における風速の頻度分布である。風速は地上高 10 m の観測値を意味する。図からわかるように、ほとんどの風速は、0.5 m/s から 1.5 m/s の範囲に収まり、本研究で示される結果は弱風夜間に限定された結果といえる。

表 1 観測日と気象概況.

Table 1 Observation dates and meteorological conditions.

Run No	Date	Obs. time	Sunset	Rural wind	Cloud	Obs. Site	Run No	Date	Obs. time	Sunset	Rural wind	Cloud	Obs. Site	
		Start	Time	Start	Cover	Urban			Start	Time	Start	Cover	Urban	
		End		End		Rural			End		End		Rural	
				dir.							dir.			
1	2004/3/19	21:20	21:42	17:58	0.0	-	0	91	2004/10/28	21:28	21:51	16:55	0.5	S
2	2004/3/19	23:05	23:12	17:58	0.9	-	0	92	2004/10/28	22:08	22:25	16:55	0.6	S
3	2004/4/1	21:26	21:37	18:09	0.0	-	10	93	2004/10/28	23:00	23:17	16:55	0.6	S
4	2004/4/1	22:15	22:24	18:09	0.0	-	10	94	2004/11/5	20:43	21:03	16:47	1.9	W
5	2004/4/1	22:41	22:51	18:09	0.0	-	10	95	2004/11/5	21:04	21:24	16:47	1.2	S
6	2004/4/29	21:07	21:35	18:34	0.6	-	0	96	2004/11/5	21:41	21:57	16:47	0.5	S
7	2004/4/30	21:14	21:37	18:35	1.6	N	10	97	2004/11/5	22:05	22:21	16:47	0.7	S
8	2004/4/30	22:02	22:23	18:35	2.1	N	10	98	2004/11/5	22:40	22:59	16:47	0.9	S
9	2004/5/1	20:45	21:07	18:36	0.9	S	0	99	2004/11/5	23:00	23:20	16:47	0.8	W
10	2004/5/1	21:17	21:41	18:36	1.4	E	0	100	2004/11/6	20:39	21:06	16:46	1.3	S
11	2004/5/1	21:42	22:04	18:36	1.3	N	0	101	2004/11/6	21:08	21:23	16:46	1.3	W
12	2004/5/1	22:23	22:46	18:36	1.2	W	0	102	2004/11/6	21:40	21:58	16:46	0.9	N
13	2004/5/6	21:05	21:30	18:40	2.3	E	0	103	2004/11/6	21:59	22:18	16:46	0.7	S
14	2004/5/6	22:06	22:29	18:40	0.0	S	0	104	2004/11/6	22:41	23:00	16:46	1.5	S
15	2004/5/6	22:47	23:02	18:40	0.0	S	0	105	2004/11/6	23:01	23:21	16:46	1.3	W
16	2004/5/14	21:50	22:10	18:47	0.9	-	0	106	2004/11/7	20:26	20:51	16:45	0.9	S
17	2004/5/21	20:53	21:12	18:52	0.6	N	0	107	2004/11/7	20:52	21:14	16:45	1.1	W
18	2004/5/21	21:34	21:57	18:52	0.7	W	0	108	2004/11/7	21:31	21:55	16:45	0.0	E
19	2004/5/25	21:30	21:48	18:35	0.9	N	0	109	2004/11/7	21:56	22:18	16:45	0.5	S
20	2004/5/25	22:03	22:23	18:35	1.1	W	0	110	2004/11/7	22:32	20:54	16:45	0.0	-
21	2004/5/25	22:23	22:41	18:35	0.8	W	0	111	2004/11/7	22:56	23:09	16:45	0.0	-
22	2004/5/25	22:55	23:13	18:35	0.6	C	0	112	2004/11/7	23:17	23:34	16:45	0.8	C
23	2004/5/26	21:00	21:22	18:56	0.5	W	5	113	2004/11/9	20:30	21:01	16:43	1.0	S
24	2004/5/26	21:38	22:04	18:56	1.5	N	5	114	2004/11/9	21:02	21:27	16:43	1.1	C
25	2004/5/27	20:51	21:09	18:57	1.6	S	10	115	2004/11/23	20:16	20:40	16:34	1.1	W
26	2004/5/27	21:28	21:30	18:57	1.2	N	10	116	2004/11/23	20:41	21:03	16:34	1.2	W
27	2004/6/4	21:01	21:20	19:02	1.7	-	0	117	2004/11/23	21:20	21:48	16:34	0.6	S
28	2004/6/4	21:36	21:55	19:02	1.1	S	0	118	2004/11/23	21:58	22:10	16:34	0.7	W
29	2004/6/4	22:11	22:30	19:02	0.9	S	0	119	2004/11/23	22:44	23:03	16:34	0.8	C
30	2004/6/4	22:31	22:48	19:02	1.0	S	0	120	2004/11/23	23:04	23:10	16:34	0.9	W
31	2004/6/4	23:01	23:22	19:02	0.8	SW	0	121	2004/12/2	21:04	21:26	16:12	1.1	C
32	2004/6/4	23:39	19:02	0.8	SW	0	0	122	2004/12/2	21:27	21:45	16:12	1.0	N
33	2004/6/5	20:50	21:06	19:03	1.0	W	0	123	2004/12/2	22:11	22:32	16:12	0.8	NW
34	2004/6/5	21:25	21:40	19:03	0.8	N	0	124	2004/12/2	22:34	22:51	16:12	0.9	W
35	2004/6/5	21:42	21:58	19:03	0.9	W	0	125	2004/12/2	23:11	23:25	16:12	0.9	S
36	2004/6/5	22:13	22:31	19:03	1.4	W	2	126	2004/12/10	20:24	20:46	16:32	0.4	N
37	2004/7/19	22:41	23:00	19:04	1.4	N	5	127	2004/12/10	20:46	20:54	16:32	1.2	C
38	2004/7/19	23:19	23:32	19:04	1.1	N	0	128	2004/12/10	21:04	21:26	16:32	0.8	N
39	2004/7/19	23:48	0:10	19:04	0.9	N	3	129	2004/12/10	21:25	21:50	16:32	0.8	N
40	2004/7/23	22:27	22:47	19:01	0.4	S	9	130	2004/12/10	21:51	22:08	16:32	0.6	N
41	2004/7/23	23:05	23:22	19:01	0.7	S	9	131	2004/12/10	22:31	22:48	16:32	0.9	S
42	2004/7/23	23:23	23:42	19:01	1.2	S	9	132	2004/12/10	22:58	23:16	16:32	1.2	C
43	2004/7/24	0:03	0:19	19:01	0.7	E	9	133	2004/12/14	20:21	20:41	16:32	1.3	C
44	2004/8/12	20:58	21:15	18:42	1.0	W	0	134	2004/12/14	20:42	21:00	16:32	1.1	C
45	2004/8/12	21:17	21:32	18:42	1.5	C	4	135	2004/12/14	21:17	21:36	16:32	1.0	C
46	2004/8/12	21:46	22:04	18:42	0.8	-	6	136	2004/12/14	21:45	22:02	16:32	0.8	C
47	2004/8/12	22:05	22:25	18:42	0.9	N	4	137	2004/12/14	22:20	22:39	16:32	1.5	W
48	2004/8/12	22:38	23:00	18:42	1.1	N	6	138	2004/12/14	22:41	23:00	16:32	0.0	S
49	2004/8/12	23:01	23:13	18:42	0.6	-	3	139	2004/12/15	20:55	21:12	16:33	0.9	E
50	2004/8/13	21:33	21:47	18:41	1.1	W	0	140	2004/12/15	21:13	21:21	16:33	0.7	C
51	2004/8/13	21:48	22:07	18:41	0.9	W	0	141	2004/12/15	21:47	22:03	16:33	0.6	S
52	2004/8/13	22:26	22:48	18:41	1.1	NW	0	142	2004/12/15	22:05	22:26	16:33	0.9	S
53	2004/8/13	22:50	23:05	18:41	0.6	N	0	143	2004/12/15	23:02	23:18	16:33	1.7	S
54	2004/8/13	23:21	23:31	18:41	0.0	W	0	144	2004/12/15	23:19	23:36	16:33	0.8	S
55	2004/8/13	23:44	0:00	18:41	1.1	W	0	145	2005/4/1	21:21	21:35	18:09	0.8	C
56	2004/8/15	21:43	22:08	18:38	0.9	NW	1	146	2005/4/1	21:45	22:00	18:09	0.4	S
57	2004/8/15	22:23	22:40	18:38	1.7	-	0	147	2005/4/1	22:24	22:43	18:09	0.7	S
58	2004/8/15	22:54	23:06	18:38	0.7	N	0	148	2005/4/1	22:44	22:58	18:09	1.1	N
59	2004/8/15	23:07	23:21	18:38	0.8	N	0	149	2005/4/1	23:15	23:28	18:09	0.9	N
60	2004/8/15	23:47	0:01	18:38	0.7	W	0	150	2005/4/1	23:34	23:46	18:09	0.8	C
61	2004/8/16	0:02	0:16	18:38	0.4	N	1	151	2005/4/14	20:38	20:55	18:20	1.3	N
62	2004/8/16	20:58	21:13	18:37	0.9	W	9	152	2005/4/14	20:57	21:15	18:20	0.8	E
63	2004/8/16	21:15	21:31	18:37	1.2	N	6	153	2005/4/14	21:33	21:48	18:20	0.6	N
64	2004/8/16	21:47	22:00	18:37	1.3	W	2	154	2005/4/14	21:49	22:03	18:20	0.5	N
65	2004/8/16	22:07	22:21	18:37	1.1	N	2	155	2005/4/14	22:21	22:34	18:20	0.9	E
66	2004/8/16	22:38	22:55	18:37	0.7	W	3	156	2005/4/14	22:39	22:50	18:20	1.7	NW
67	2004/8/16	22:58	23:15	18:37	0.5	W	7	157	2005/4/15	21:04	21:18	18:21	1.6	N
68	2004/8/31	21:12	21:30	18:17	0.8	NW	1	158	2005/4/15	21:19	21:30	18:21	1.5	N
69	2004/8/31	21:32	21:48	18:17	1.1	N	1	159	2005/4/15	21:45	22:07	18:21	1.7	NE
70	2004/8/31	22:05	22:18	18:17	1.0	N	2	160	2005/4/15	22:23	22:38	18:21	0.6	NE
71	2004/8/31	22:19	22:35	18:17	0.8	NE	3	161	2005/4/15	22:39	22:52	18:21	0.8	N
72	2004/9/31	22:54	23:06	18:17	0.5	NW	3	162	2005/4/16	20:38	20:55	18:22	1.3	W
73	2004/9/19	21:58	22:15	17:49	1.5	N	6	163	2005/4/16	21:01	21:13	18:22	1.0	C
74	2004/9/19	22:18	22:34	17:49	0.7	N	2	164	2005/4/16	21:28	21:42	18:22	1.1	S
75	2004/9/19	22:49	23:04	17:49	0.7	N	0	165	2005/4/16	21:43	21:58	18:22	1.3	SE
76	2004/9/19	23:05	23:21	17:49	0.6	N	0	166	2005/4/16	22:21	22:34	18:22	1.1	N
77	2004/9/19	23:42	23:59	17:49	1.3	W	1	167	2005/4/16	22:44	22:56	18:22	1.5	NE
78	2004/9/20	0:02	0:24	17:49	1.3	W	1	168	2005/5/3	21:13	21:28	18:37	0.8	W
79	2004/9/20	20:44	20:59	17:48	0.7	N	9	169	2005/5/3	21:29	21:43	18:37	0.7	S
80	2004/9/20	21:01	21:15	17:48	1.0	N	9	170	2005/5/3	22:12	22:24	18:37	1.8	0
81	2004/9/20	21:35	21:49	17:48	1.1	N	9	171	2005/5/3	22:38	22:53	18:37	1.4	E
82	2004/9/20	21:50	22:13	17:48	0.7	W	9	172	2005/5/3	22:54	23:07	18:37	1.4	N
83	2004/9/20	22:30	22:46	17:48	1.4	C	8	173	2005/5/5	20:59	21:14	18:39	1.3	N
84	2004/9/20	22:48	23:06	17:48	0.8	S	9	174	2005/5/5	21:21	21:35	18:39	1.3	N
85	2004/10/6	21:09	21:33	17:24	1.4	S	7	175	2005/					

表 2 都市と郊外の比較に用いた観測日。

Table 2 Observational data used for comparing urban and rural vertical profiles.

No.	Obs.Date	Obs.Time		Cloud Amount						Type
		Start	End	R1	R2	U3	U4	R5	R6	
1	2004/7/19	22:41	0:10	×	5	0	×	3	×	②
2	2004/8/12	20:58	23:13	0	4	6	4	6	3	②
3	2004/8/13	21:33	0:00	0	0	0	0	0	0	①
4	2004/8/15	21:43	0:16	1	0*	0	0	0	1	①
5	2004/8/16	20:58	23:15	9	6	2	2	3	7	
6	2004/8/31	21:12	23:06	1	1	2	3	3	×	②
7	2004/9/19	21:58	0:24	6	2	0	0	1	1	②
8	2004/9/20	20:44	23:06	9	9	9	9	8	9	②
9	2004/10/6	21:09	23:36	×	7	5	2	0	1	①
10	2004/11/5	20:43	23:20	2	7	6	4	5	9	
11	2004/11/6	20:39	23:21	4	7	8	9	10	10	
12	2004/11/7	20:26	23:34	0	0	0	0	6	×	②
13	2004/11/23	20:16	23:10	0	0	0	0	0	0*	
14	2004/12/2	21:04	23:25	0	0	0	0	0	×	
15	2004/12/10	20:24	23:16	0	4*	0	0	0	0	
16	2004/12/14	20:21	23:00	0	0	0	0	0	0	
17	2004/12/15	20:55	23:36	0	0	0	0	0	0	
18	2005/4/1	21:21	23:46	0	0	0	0	0	0	②
19	2005/4/14	20:38	22:50	0	0	0	0	0	0	②
20	2005/4/15	21:04	22:52	0	0	0	×	0	0	②
21	2005/4/16	20:38	22:56	0	0	0	0	0	0	
22	2005/5/3	21:13	23:07	0	0	×	0	0	0	
23	2005/5/21	20:46	22:54	10	10	10	10	9	8	

*印：気球上昇もしくは下降時だけで観測が行われた，×：欠測，①クロスオーバー現象が見られたケース，②接地層だけ郊外より都市の気温が高いケース。
 *：Observations were made during either ascent or descent of a balloon. X: Observations were not made successfully. ① Case in which the crossover phenomenon appeared, ② Case in which urban area was warmer than rural area only in a surface layer.

III. 都市と郊外の気温鉛直プロファイルの時間的変化

気球上昇時，下降時の観測がどちらも正常に行われた事例を選び，気球上昇中に得られた値と下降中に得られた値の平均値から鉛直気温分布を求めた。これを観測の場所と季節から4つのグループに分類した。都市では，夏季（6月から8月）の観測が18事例，その他の季節の観測が45事例になった。なお，それ以外の季節のプロファイルの形がおおむね同じであったので一つのグループとした。郊外では夏季の観測が24事例あり，その他の季節が85事例であった。さらに日没後の時間帯ごとに事例分類した。たとえば，観測中央の時刻が日没後2時間30分から3時間29分

図 3 郊外における気温の鉛直プロファイル（2004年10月6日23時36分）。

Fig. 3 Vertical temperature profile at a rural site at 23:36 on 6 October, 2004.

図 4 郊外における夜間風速の頻度分布。

Fig. 4 Frequency distribution of nocturnal wind speed at a rural observation point.

の場合は日没後3時間のグループに分類した。日没後4，5，6時間のグループも同様の基準で設定した。このような方法で得られた夏季とそれ以外の季節の場合の鉛直プロファイルを検討したところ，接地逆転は夏季以外の季節で，とくに郊外の地点で，日没後時間が経過すればするほど顕著であることがわかった。

次に，逆転層が明瞭になる夏以外の季節において，都市と郊外の気温鉛直プロファイルと比較する。図5は都市および郊外の両方の地点において観測が行われた日没後3時間から6時間までの結果である。日没後3時間で，都市と郊外と

図 5 夏季以外の季節における都市と郊外の気温の鉛直プロファイル（横軸は高さ 10 m の気温からの気温差を示す）。

a: 日没後 3 時間, b: 日没後 4 時間, c: 日没後 5 時間, d: 日没後 6 時間。

Fig. 5 Vertical profile of mean temperatures in urban and rural areas during all seasons except summer. (Horizontal axis denotes the temperature difference from the temperature at 10 m above the ground.)

a: 3 hours after sunset, b: 4 hours after sunset, c: 5 hours after sunset, d: 6 hours after sunset.

もに接地逆転は生じていたが、逆転の強さは都市よりも郊外の方が大きい。郊外の鉛直プロファイルは 40 m 以下の下層で温度の勾配は上の層と比べ相対的に大きい。都市では逆転層は相対的に発達せず、都市内外の差は日没後 4 時間で明瞭になった（図 5b）。日没後 5 時間になると郊外の逆転層は日没後 4 時間のものと比べ同程度であったが、都市で逆転層が発達する（図 5c）。その結果、都市の気温の鉛直プロファイルは郊外のものに近づき日没後 6 時間になるとほぼ同程度のものになった（図 5d）。

このように、都市でも逆転層は、郊外と比べ遅

れはするが発達する。しかも、日没後 6 時間になると地上気温を基準とする気温差の鉛直プロファイルの形には都市内外で差異はみられなくなった。

人口 62 万人のセントルイス市（Godowitch *et al.*, 1985）や 100 万人を超える札幌市（Uno *et al.*, 1988）の報告では、夜間を通して郊外では接地逆転、都市では中立で上空に逆転層が存在する。したがって、従来考えられてきた夜間における都市で中立、郊外で逆転であるとする説はすべての都市にあてはまるのではなく、小都市では日没後数時間に限定される。小都市では人工熱が大

きくないことや都市建造物の熱容量も小さいために、日没後数時間を超えると中立状態を維持できなくなる。ただし、弱風時に限定されない観測事例による再調査が必要である。風が吹くと建物の影響で都市大気が混合されて接地逆転が生じにくいとする効果を否定できないためである。

IV. 都市と郊外の鉛直気温分布と クロスオーバー現象

同一夜間の観測で都市と郊外の観測結果が得られた事例で、都市と郊外における平均の鉛直気温分布の形状を比べる（表2）。R1とR2, U3とU4, R5とR6のすべてのペアの観測において、片方もしくは両方の観測が成功した観測夜間を選んだ。そして、R1とR2の平均の鉛直プロファイルを郊外1（片方しかない場合はそのままとした。以下同じ）とし、U3とU4の鉛直プロファイルの平均を都市とした。再び郊外に移動して得たR5とR6の平均を郊外2とした。ここで、郊外1、都市、郊外2の平均鉛直分布の観測時刻が異なる。しかし、郊外1と郊外2の平均の観測時刻はちょうど都市の観測時刻に近くなるので、郊外1と郊外2の平均の鉛直プロファイルを求め、それを郊外の鉛直プロファイルとして以下取り扱う。

図6は2004年8月13日23時前後の観測事例であり、このときには雲量0、西風であった。都市内外の地上気温差が2.1℃であった。郊外では40mぐらいまで上空になるに従い急激に気温が上昇しているのに対し、都市では等温に近い状態が続いた。地上高30mぐらいで都市と郊外の気温が等しくなるcoincident pointがみられた。郊外の気温は約100m以上まで都市上空の気温より高くなった。このようなクロスオーバー現象が明瞭にみられた事例は全観測23例のなかで3例であった。

クロスオーバー現象がみられた3事例では、coincident pointの高度は20m、30mと70mであった。都市の観測点250m四方の建物で、一番高い建物は、3階建て（約10m）であり、多くは2階建て（約7m）であった。coincident

図6 クロスオーバー現象がみられた場合における都市と郊外の気温の鉛直プロファイル（2004年8月13日23時、雲量0、西風）。

Fig. 6 Vertical temperature profiles in urban and rural areas when the crossover phenomenon appeared (Cloud cover 0, West wind, about 23 o'clock, August, 2004).

pointの高度の平均値は、当地域で最も高い建物高度の4倍であった。また、建物のないところを0mとして平均すると、平均高度は約2mであり、いずれもcoincident pointの高度より低い。

郊外と比べ単純に接地層のみ都市が暖かい事例も7例みられた。図7は2005年4月15日22時付近の観測事例で、このときには雲量0、北よりの弱風が吹いていた。地上では2℃以上の都市内外の気温差が生じていたが、地上高60m以上では気温差はほとんどなくなった。その他分類できないものは13例あった。

図8は都市と郊外における高度別の温位勾配を①クロスオーバー現象がみられたケースと②都市下層の気温のみが気温が高いケースに分けて平均したものである。図からわかるように、郊外では逆転層が存在し、都市域では中立である。郊外の温位勾配では、①でも②でも大きな違いはない。どの高度でも正の値を示し、下層ほど大きい値であった。

一方、都市の15m以下の層で差異がみられた。すなわち、①クロスオーバー現象がみられたケー

図 7 接地層だけ郊外より都市の気温が高い場合における気温の鉛直プロファイル (2005 年 4 月 15 日 22 時, 雲量 0, 北より風).

Fig. 7 Vertical temperature profiles in urban and rural areas when urban area was warmer than rural area only in a surface layer (Cloud cover 0, North wind, about 22 o'clock, 15 April, 2005).

スでは温位勾配はマイナスであり, ②都市下層の気温のみが上昇したケースではプラスになっていた。このことは都市大気の下層には建物が存在し, その影響がクロスオーバー現象の出現に関係していることが示唆される。すなわち, 明確に成因を特定できないものの, 都市における強い鉛直混合による上空からの下向き顕熱輸送が関係している可能性も考えられる。

図 8 の一番下の観測値は地上 1.2 m と 10 m の気温から求めた温位勾配である。当地域の建物の多くが 7 m 程度であり, 大気の混合を引き起こすきっかけとなる建物群の高さである。地表面付近において最も混合が引き起こされ, ここで生じた空気の乱れがその上の大気に影響し, その結果上空の暖かい空気が都市表面に下りてきて, 上空の気温が郊外より低くなった可能性がある。では, どうして建築物はつねに存在するのに, クロスオーバー現象の有無が現れるのか。これは大気を攪拌に要するエネルギーを風に起因する運動エネルギーとする田宮・大山 (1981) の説以外に

図 8 平均温位勾配の鉛直プロファイル。

①クロスオーバー現象がみられたケース②接地層だけ郊外より都市の気温が高いケース。

Fig. 8 Mean vertical profile in lapse rate of potential temperature.

①Case in which crossover phenomenon appeared, ②Case in which urban area was warmer than rural area only in a surface layer.

有力なものが思いあたらないが, 今回の観測では 0.5 m/s から 1.5 m/s の風速の範囲に限定された調査日であり, 風速の違いによる影響を検討するには至らなかった。

次に, 逆転強度とヒートアイランド強度の関係について検討する。逆転強度は, 地上 1.2 m と地上 10 m の気温に基づいた温位勾配 α_{r5} として定義した。ヒートアイランド強度は都市の地上気温から郊外の地上気温を引いた値とした。図 9 に示すように, 温位勾配が大きくなるとヒートアイランド強度も大きくなる。決定係数は 0.5 以上あり, 両者には明瞭な相関がみられる。これは, Ludwig (1970) や田宮・大山 (1981) に一致する。しかしながら, クロスオーバー現象がみられたケースや都市下層のみが暖まるケースが, 温位勾配に対して特段大きなヒートアイランド強度を引き起こす, あるいはその逆であるとする傾向は認められなかった。本研究で用いた観測結果は弱風時に限定されたものであるので, 都市域の大気が十分攪拌されていたのか疑問がある。風速がよ

図 9 ヒートアイランド強度と郊外の温位勾配の関係。
●：クロスオーバー現象がみられたケース，□：接
地層だけ郊外より都市の気温が高いケース，+：そ
のほか。

Fig. 9 Relation between heat island intensity and rural lapse rate.

●: Case in which crossover phenomenon appeared, □: Case in which urban area was warmer than rural area only in a surface layer, +: Others.

り大きい観測事例を含む資料で検討する必要があるであろう。

V. おわりに

小都市におけるヒートアイランド形成を調べるために、夜間弱風時に都市内外で係留気球観測を行ったところ以下のことがわかった。

(1) 郊外における逆転強度が大きいほどヒートアイランドは明瞭に出現する。そのため、郊外の逆転層の存在がヒートアイランド形成に関わっているとする従来の考え（例えば、田宮, 1968）を支持する。

(2) しかし、都市でも郊外と比べ遅れてであるが逆転層は発達する。しかも、日没後 6 時間になると地上気温を基準とする気温差の鉛直プロファイルの形には都市内外で差異はみられなくなった。したがって、小都市の場合、従来考えられてきた都市で中立、郊外で逆転であるとする説は日没後数時間に限られた現象であった。ヒートアイランド形成にはこの都市域の逆転層発達の遅れが関係していた。

(3) また、クロスオーバー現象は 23 事例中 3

例しか認められず、クロスオーバー現象出現時に明瞭にヒートアイランドが出現するとはいえなかった。本研究で用いた観測結果は弱風時に限定されたものであるので都市域の気体が十分攪拌されていたのか疑問である。風速がより大きい観測事例を含む資料で検討する必要があるであろう。

謝 辞

論文審査をしていただいたレフリーの方々から有益な助言をいただいた。これらの人にお礼を申し上げます。

文 献

- Bornstein, R.D. (1968): Observations of the urban heat island effect in New York City. *Journal of Applied Meteorology*, **7**, 575-582.
- Deardorff, J.W., Willis, G.E. and Lilly, D.K. (1969): Laboratory investigation of non-steady penetrative convection. *Journal of Fluid Mechanics*, **35**, 7-31.
- DeMarrais, G.A. (1960): Vertical temperature difference observed over an urban area. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **42**, 548-554.
- Duckworth, F.S. and Sandberg, J.S. (1954): The effect of cities upon horizontal and vertical temperature gradients. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **35**, 198-207.
- Godowitch, J.M., Ching, J.K.S. and Clarke, J.F. (1985): Evolution of the nocturnal inversion layer at an urban and nonurban location. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **24**, 791-804.
- 原田 朗 (1982): 大気汚染と気候の変化—人間社会と気候の関係—. 東京堂出版. [Harada, A. (1982): *Taiki Osen To Kiko No Hennka*. Tokyodo Shuppan.]
- 河村 武 (1977): 都市気候の分布の実態. 気象研究ノート, **133**, 26-47. [Kawamura, T. (1977): *Meteorological Research Note*, **133**, 26-47.]
- 小園 修 (1987): 土浦市におけるヒートアイランドの立体構造. 地理学評論, **60A**, 757-764. [Kozono, O. (1987): *Geographical Review of Japan*, **60A**, 757-764.]
- Ludwig F.L. (1970): Urban temperature fields. *WMO Technical Note*, **108**, 80-107.
- Oke, T.R. (1987): *Boundary Layer Climates* (2nd Edition). Routledge.
- Oke, T.R. and East, C. (1971): The urban boundary layer in Montreal. *Boundary-Layer Meteorology*, **1**, 411-437.
- 佐橋 謙・大重義法 (1988): 係留気球による鉛直分布の観測値に対する時刻補正について. 岡山大学教育学部研究集録, **79**, 39-46. [Sahashi, K. and Oshige Y. (1988): *Bulletin of the Faculty of Education, Okayama University*, **79**, 39-46.]
- 榊原保志 (1999): 長野県小布施町におけるヒートアイ

- ランド強度と郊外の土地被覆の関係. 天気, **46**, 567-575. [Sakakibara, Y. (1999): *Tenki*, **46**, 567-575.]
- Sakakibara, Y. and Matsui, E. (2005): Relationship between heat island intensity and city size indices / urban canopy characteristics in settlements of Nagano basin, Japan. *Geographical Review of Japan*, **78**, 812-824.
- 田宮兵衛 (1968): 住宅団地における夜間の気温分布について. 地理学評論, **41**, 695-703. [Tamiya, H. (1968): *Geographical Review of Japan*, **41**, 695-703.]
- 田宮兵衛・大山秀樹 (1981): 小集落に夜間発生するヒートアイランドの実態と成因について. 地理学評論, **54**, 1-21. [Tamiya, H. and Ohyama, H. (1981): *Geographical Review of Japan*, **54**, 1-21.]
- Uno, I., Wakamatsu, S., Ueda, H. and Nakamura, A. (1988): An observational study of the structure of the nocturnal urban boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, **45**, 59-82.
- (2010 年 8 月 6 日受付, 2011 年 3 月 3 日受理)