

## 観測地点の「空間広さ」と「平均気温」の関係

### — 4 重構造放射除け通風筒を用いた高精度観測 —

和田 範 雄<sup>\*1</sup>・泉 岳 樹<sup>\*1</sup>・松 山 洋<sup>\*2</sup>・近 藤 純 正<sup>\*3</sup>

#### 要 旨

測器近傍の障害物の有無が気温に与える影響を定量的に評価するため、放射による観測誤差が最大で0.04°Cの高精度な測器による気温観測を行い、空間広さ（「周囲の障害物と測器との距離」と「障害物の高さ」との比）に注目して解析した。観測は、首都大学東京南大沢キャンパスの陸上競技場の芝地上6地点において、2014年8月22日～9月17日に行い、その内1地点では不織布の囲いを設置して、空間広さが小さい状態を人工的に作り出した。その結果、日中は、空間広さが小さくて天気がよいほど気温が高くなり、いわゆる日だまり効果（測器近傍の障害物による風速の減少に伴う地上気温の上昇）の影響が示唆された。一方、夜間は、空間広さが小さい地点ほど気温が低くなった。これは、囲いによる風速減少により上空大気との熱交換が抑制されるとともに、囲いの中に冷気がたまりやすくなることで放射冷却の効果が強められたことが原因と考えられる。また、日中と比べて夜間には地点間の気温差は小さくなったが、これは日中と夜間の正味放射量および風速の違いを反映したものと考えられる。

#### 1. はじめに

2014年12月2日に、東京管区気象台の露場が大手町から北の丸公園に移転した。それに伴い、日最高気温の月平均値はほとんど変わらないが、日最低気温の月平均値は約1.4°C低くなることが報告されている（気象庁 2014）。この違いは、大手町はビルや道路に囲まれており、北の丸公園は緑に囲まれていることから、露場の周辺環境の違いが原因であると指摘されている。

このような周辺環境の違いに起因する気温の変化は、単一の露場でも生じ得る。それは、樹木の成長や建物の新たな建設などによって、観測位置から見た障害物までの距離や高さが変化するためである。実際、近藤（2007）は、津山特別地域気象観測所と周辺の9

つの AMeDAS の年平均気温の差が、1970年頃よりも2000年頃の方が0.2～0.4°Cほど上昇していることを示した。そして、この要因として津山特別地域気象観測所周辺の樹木の繁茂によって、1970年頃よりも2000年頃の年平均風速が約34%減少したことを指摘した。さらに、近藤（2014a）によれば、熊谷地方気象台の露場内でも風速が弱い場所では、日中に気温が高くなることが示されている。このように、樹木の繁茂や建物の新たな建設などに伴って風速が弱められ日中の気温が上昇する現象を、近藤（2004）は「日だまり効果」と呼んだ。

露場の周辺環境の違いが気温に影響を及ぼすことは明らかである。これに関連して、志藤ほか（2015）では、東京管区気象台（大手町）の露場内で、風通しの良い地点と悪い地点で2年間にわたる気温の連続観測を行った。その結果、風通しの悪い地点の方が、夏季の昼過ぎに月平均値で約0.5°C、日ごとの特別値や極値では最大約1.5°C気温が高く、日射の少ない日や夜間は気温差が小さいことが確認されている。この研究では、風通しの程度に係るそれぞれの露場環境の違いが全天写真として示されているが、これと気温差

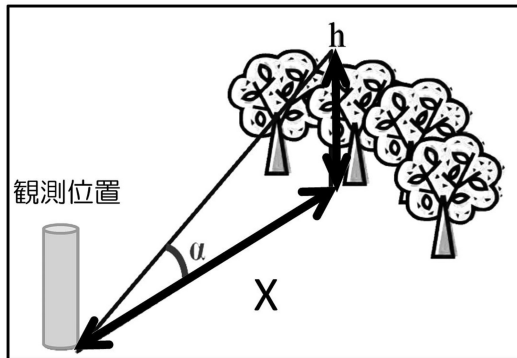
<sup>\*1</sup> 首都大学東京大学院都市環境科学研究科。

<sup>\*2</sup> (連絡責任著者) 首都大学東京大学院都市環境科学研究科、〒192-0397 八王子市南大沢1-1。

<sup>\*3</sup> 東北大学名誉教授。

—2015年3月20日受領—

—2015年10月28日受理—



第1図 空間広さの概念図。h：障害物の高さ，  
X：観測位置から障害物までの距離，  
 $\alpha$ ： $\arctan(h/X)$ 。

との関係が議論されていないため、志藤ほか (2015) で得られた結果を他の地点に応用することは難しい。そのため、露場環境が気温に与える影響を明らかにするためには、これを定量化・指標化する必要がある。

そこで近藤 (2012a) は、露場環境を「空間広さ」という指標で表現した (第1図)。空間広さとは、観測位置から建物や樹木など障害物までの水平距離を  $X$  (m)、その高さを  $h$  (m) とした時の方位別の  $X/h$  の値を求め、これを方位  $5^\circ$  間隔で測量したものを、卓越風向を考慮して9方位、つまり方位  $\pm 20^\circ$  の範囲で平均した無次元の指標である。

$$X/h = 1/\tan \alpha \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$  ( $^\circ$ ) は式(1)を解いて求められる角度である (第1図)。この指標は、気温と風速に相関があること (近藤 2009)、および、この指標自身と風速にも相関があること (近藤 2012a) から提案された。このように、空間広さは卓越風向を考慮した風向の関数である。

空間広さを用いた近藤 (2013c) では、異なる2地点間の正午前後の平均気温の差と空間広さの対数差 (常用対数の差) に負の相関があることが示された。しかしながら、近藤 (2013c) は異なる2つの露場間でデータを比較したものがほとんどであり、露場周辺の広域的な土地利用や障害物の分布などといった、空間広さでは考慮されていない要素が気温の観測値に影響を与えている可能性がある。また、近藤 (2012b) では、空間広さが小さい地点の方が、夜間は放射冷却で冷やされた空気の「冷氣だまり」が形成されて低温

になるとされている。しかし、近藤 (2013c) では夜間の観測事例がない。

実際には野外で気温を観測すると、日中は日射による放射の影響により気温が高めに観測される (近藤 2010, なお、放射と通風の影響に関する理論的検討は、近藤 (1982) の p.73-76を参照のこと)。そして、この影響を最小限にするためには、短波・長波放射の遮蔽や通風筒内の通風量などを考慮した測器 (以下では高精度気温観測器と呼ぶ) を用いて観測する必要がある。

そこで本研究では、高精度気温観測器を製作し、それを用いて日だまり効果の観測に最適な、水平一様に近いよく管理された芝地の露場内で気温観測を行った。そして、同じ露場内で日中と夜間に気温を観測し、空間広さと気温を天候別に比較することで、芝地上における空間広さと気温との関係を定量的に明らかにした。

## 2. 研究方法

### 2.1 高精度気温観測器の概要

本研究では、近藤 (2014b) によって提案された高精度の省電力型気温観測計を4台用いて観測を行った。これらの気温観測計は4重構造の放射除け通風筒を有しているところに大きな特徴がある。この4重構造の放射除け通風筒を用いることで、日中の直射日光の影響をほとんど受けない、高精度の気温観測が可能となる。4台のうち2台は近藤 (2013b) で緻密に調整・校正されたもの (以下、k1, k2とする) であり、今回さらに同じ構造をした観測器2台を新たに製作した (第2図, 以下ではk3, k4とする)。今回製作した2台に使用したファンモータは、山洋電気社製の「低消費電力ファン SanAce80DC ファン 型番 9GA0812 P6M001」である。データロガーにはティアンドデイ社製の「おんどとり Jr.コミュニケーションポート TR-50U2」、温度センサには立山科学工業製の「白金測温抵抗体 Pt1000 (A級)」 (以下、白金センサ) を用いている。

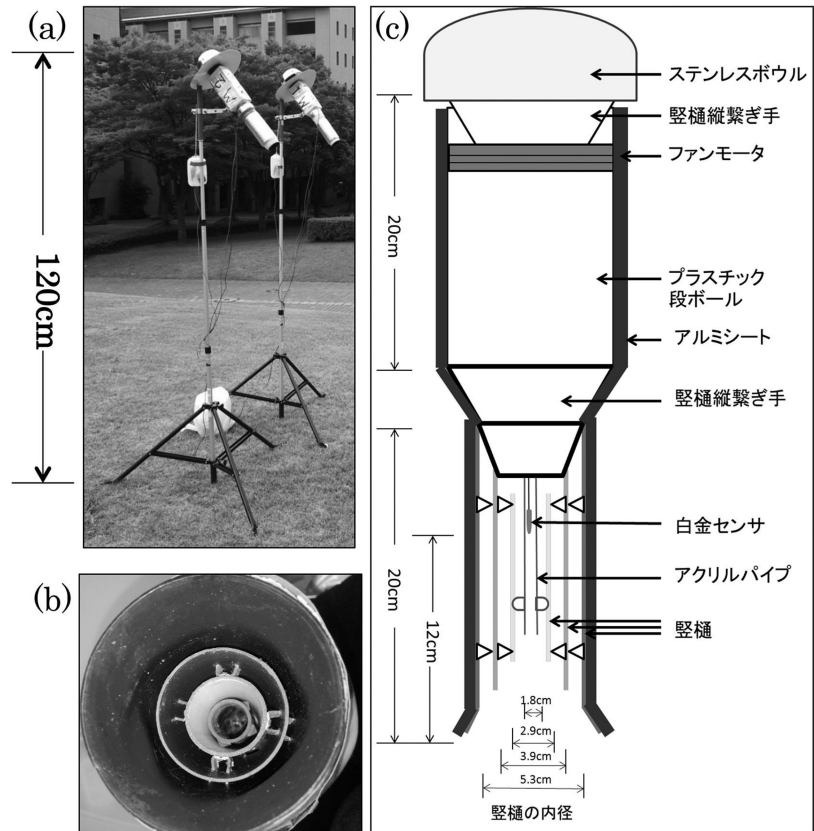
新規製作のk3, k4については、校正されたk1, k2を基準として器差の確認を行ったが、まず以下に、近藤 (2013a) によるk1, k2の検定方法の主要部分を概説しておく。

標準温度計として、吉野計器製作所の二重管標準温度計 (No. 11744,  $-30^\circ\text{C} \sim +50^\circ\text{C}$ , 長さ56 cm) を用いた。この温度計の目盛間隔は  $0.1^\circ\text{C}$ 、検定表は

0.01°C単位である。白金センサの防水が完全ではないため、検定は空气中（室内）で行った。その際、室内であっても扇風機2台を用いて通風を良くし、室内気温と壁面温度のむらを小さくし、センサの追従性をよくして壁面や観測者からの長波放射の影響が小さくなるようにした。測定は、扇風機を1台回して天井近くの気温と床面上の気温との差が1°C以内の時に行った。

まず、標準温度計と白金センサ (k1, k2) を風に垂直に、互いに5 mm 離して並べ、別の扇風機から温度計感部に風を送って、標準温度計の指示値を1分間隔で20分間（合計21回）読み取った。標準温度計の目盛りは0.1°Cであるが、ルーペで0.01°C単位まで読み取った。その際、水平に読み取るために、肉眼、ルーペ、水銀柱と、その向かいの壁に付けた床からの

高さが一致するよう、ルーペを持った手を昇降可能な支持台に乗せて、水銀柱の温度目盛りを読み取った。途中10分間の間をおいて、延べ60分間（63回の読み）を1シリーズとした。白金センサの追従性は標準温度計に比べて速いので、20秒間隔でデータロガーに記録した。そして、標準温度計の読みの平均値との比較から、延べ14シリーズの平均値を白金センサ（とそれに接続するデータロガー）の器差とした。白金センサに接続するデータロガーの分解能が0.1°Cなので、1シリーズ20分間の気温変化の最大幅が0.5°C以内（気温変動の標準偏差が0.11°C以下）の時間帯にこの作業を行った。その結果、k1, k2については総合的な精度±0.01°Cが得られた。このような手順で、k1, k2で使用している白金センサ+データロガーの高精度の校正がなされている。



第2図 製作した高精度気温観測器。(a) 製作した2台の測器、(b) 測器の吸気口内の4重構造、(c) 測器の設計図。(a)で目立っているステンレスボウルの下の方板は、排気が吸入口から再循環することを防止するためのものである。また、通風筒の内壁に直射日光が入らないよう、測器は斜めに取り付け、吸気口は風上側に向けて観測する。

この白金センサを感部とし、4重構造の放射除け通風筒に組み込んだものが今回使用した高精度気温観測器 k1, k2である。4重構造放射除け通風筒の放射除けとしての性能については、近藤 (2014b) において詳細に記述されており、晴天日中の放射影響は0.02°C以下に抑えられることが確認されている。

近藤 (2013b) を参考にして、k1, k2を基準とし、新規製作した高精度気温観測器 k3, k4の比較実験を行った。その結果、k1~k4の器差は、放射の影響を大きく受けることが想定される晴天時でも最大で0.04°Cに収まることが確認できた。なお、近藤 (2015) では、k1, k2で採用している4重構造の放射除け通風筒と、2重構造の放射除けである気象庁のJMA-95型通風筒及び農業環境技術研究所のNIAES-09S型通風筒による気温観測データ（いずれも同型の

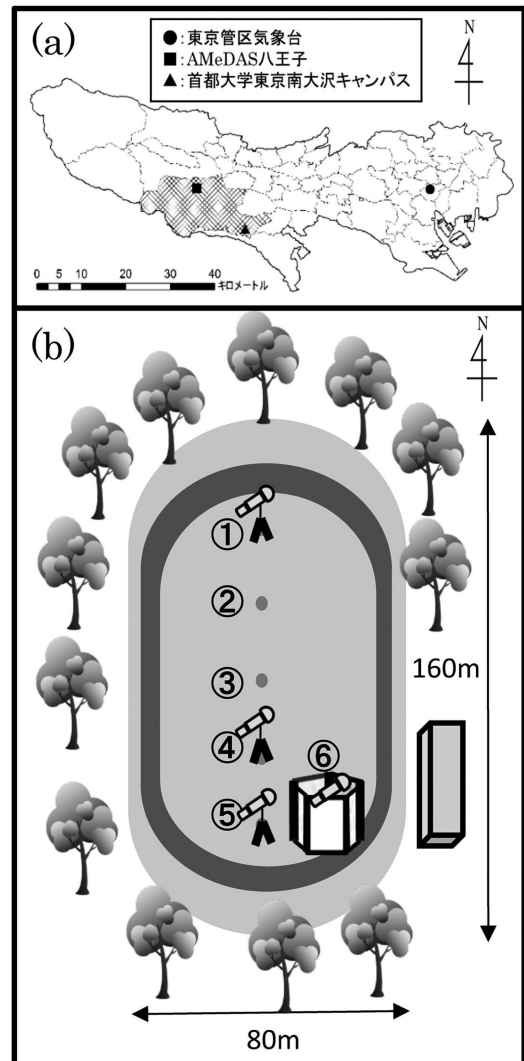
白金センサとデータロガーを使用)の比較が行われ、2重構造を持つ後者2つの通風筒では、4重構造の通風筒に比べ、日中の気温指示値が最大で $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ ほど高くなる場合があり、放射の影響が少なからず入っている可能性が指摘されている。この比較観測結果と比較しても、今回新たに製作したものも含むk1~k4の器差 $0.04^{\circ}\text{C}$ というのは十分小さい値であることがわかるだろう。

## 2.2 気温観測と空間広さの測定

気温観測は、2014年8月22日から9月17日にかけて、首都大学東京南大沢キャンパス(八王子市)の陸上競技場の芝地上で行った(第3図、図中①~⑥は観測位置を示す。以下同様)。陸上競技場は南北約190m、東西約120mの大きさであり、芝地は南北約160m、東西約80mである。この芝地は2週間に一度草刈りがされており、非常によく管理された環境であった。競技場の周囲は約5~6mの高さの木々で囲まれており、芝地の南端⑤と北端①を比較した時でも、両者の空間広さの対数差は $-0.44$ あるいは $-0.45$ と、近藤(2014a)の事例(最大で $-1.3$ )と比べるとその絶対値はそれほど大きくない(第1表)。そこで、競技場の南端近くの⑥に人工的な五角形の囲いを設置し、その中に測器を置いて観測することで他の観測地点との空間広さの対数差が大きくなるようにした(第4図)。

第4図の囲いは、高さ2.5mの菜園用の支柱を一辺4mの五角形に立てて固定しポリエステル製のネットで囲み、その上に不織布を重ねた構造になっている。不織布を張る際は、その下から五角形の囲いの中に風が入らないようおもりを置いた。また、日中観測する際に、五角形の空間内に不織布の影がかからないよう考慮し、不織布の高さを8月は1.55m、9月は1.25mとした。そのため、地面から測器の吸気口までの高さもすべて0.85mとした。

観測器は、8月22日から31日の17時までは4台(k1~k4)、9月は2台(k3, k4)のみを使用した。観測位置について、8月22日はk1を芝地北端と芝地中央の中間地点②、k2を芝地中央③、k3を芝地南端と芝地中央の中間地点④、k4を高さ1.55mの囲いの中⑥に、それぞれ設置した。8月23日の10時から31日の17時までは、k1を芝地北端①、k2を④、k3を芝地南端⑤、k4を⑥に、それぞれ設置した。9月1日以降の日中は、k3を④、k4を高さ1.25mの囲いの中⑥に、それぞれ設置した。同様に9月以降の夜間は、



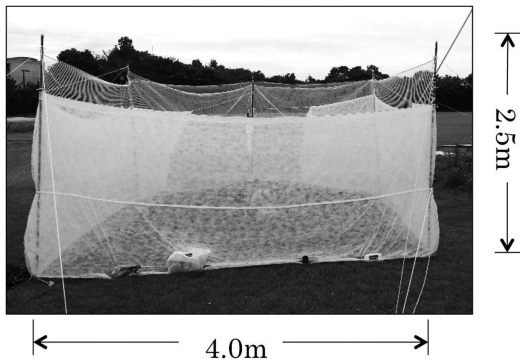
第3図 研究対象地域。(a)首都大学東京南大沢キャンパス、AMeDAS八王子、および東京管区気象台の位置。網掛けが八王子市の行政区域。(b)陸上競技場の概要。①芝地北端、②芝地北端と芝地中央の間、③芝地中央、④芝地南端と芝地中央の間、⑤芝地南端、⑥人工的な囲い。

k3を③、k4を⑥に、それぞれ設置した(第1表)。8月23日から31日までは測器を固定して24時間定点観測を行った。なお、8月22日と9月1日以降は、10時から翌日の9時までを観測の1区切りとした。

空間広さの測定は、Nikon社製のレーザー測距計(LASER 550A)を地上高度0.85mの高さに固定して行った。陸上競技場の卓越風向を考慮し、日中は南東

第1表 (a) 日中と (b) 夜間の観測地点, 測器の配置, および各地点の空間広さなど。  
①～⑥は第3図 (b) に対応する。k1～k4は観測に用いた測器を記す。

(a)		①芝生北端	②芝生北端と中央の間	③中央	④芝生南端と中央の間	⑤芝生南端	⑥囲い (1.25m)	⑥囲い (1.55m)
測定日: 測器		8/23～31: k1	8/22: k1	8/22: k2	8/22, 9/1～18: k3 8/23～31: k2	8/23～31: k3	9/1～18: k4	8/22～31: k4
空間広さ		14.45	12.44	11.23	8.91	5.21	1.84	1.48
空間広さの常用対数		1.16	1.09	1.05	0.95	0.72	0.26	0.17
空間広さの対数差 (狭～広)	①		-0.07	-0.11	-0.21	-0.44	-0.90	-0.99
	②			-0.04	-0.14	-0.37	-0.83	-0.92
	③				-0.10	-0.33	-0.79	-0.88
	④					-0.23	-0.69	-0.78
	⑤						-0.45	-0.55
	⑥ (1.25m)							-0.09
(b)		①芝生北端	②芝生北端と中央の間	③中央	④芝生南端と中央の間	⑤芝生南端	⑥囲い (1.25m)	⑥囲い (1.55m)
測定日: 測器		8/23～31: k1	8/22: k1	8/22: k2 9/1～18: k3	8/22: k3 8/23～31: k2	8/23～31: k3	9/1～18: k4	8/22～31: k4
空間広さ		4.40	6.65	9.18	11.54	12.53	1.84	1.48
空間広さの常用対数		0.64	0.82	0.96	1.06	1.10	0.26	0.17
空間広さの対数差 (狭～広)	①		-0.18	-0.32	-0.42	-0.45	-0.38	-0.47
	②			-0.14	-0.24	-0.28	-0.56	-0.65
	③				-0.10	-0.14	-0.70	-0.79
	④					-0.04	-0.80	-0.89
	⑤						-0.83	-0.93
	⑥ (1.25m)							-0.09



第4図 五角形の不織布で囲まれた狭い空間 (第3図⑥)。

を中心に±20°の範囲を, 夜間は北西を中心に±20°の範囲を, それぞれ方位5°間隔で測定した。現場では, 最も高い障害物までの距離と仰角 (第1図の $\alpha$ とは異なる) を測定し, それらから空間広さを求めた (第1表)。この場合, 障害物の高さ  $h$  (m) = 距離  $X$  (m)  $\times$  仰角の正接 (=tangent) + 0.85となる。

### 2.3 データ分析の概要

10時から15時までの5時間を日中のデータ, 日没後の19時から日の出前の翌日5時までの10時間を夜間のデータとして取り扱い, それぞれ平均値を求めて分析した。夜間については, 気温の時間変化を調べるために, 19時から0時までと0時から5時までの5時間ずつに分けたものも平均して分析した。また, データに付与する天気の情報, 観測時に目視した時の空の状態と, 観測地点に最も近い有人官署の東京管区気象台 (第3図a) の雲量に基づいて決定した。具体的には, 雲量が8割以下の時は晴れ, その中で薄曇りとなっている場合は薄曇り, 9割以上の時は曇りとした。

次にデータの抽出条件として, AMeDAS 八王子 (第3図a, 観測地点との直線距離は約10 km) の1時間降水量で1 mm以上の雨量が観測された場合, その時刻が日中ならばその日のデータは利用せず, 夜間ならば日中のデータのみを利用することにした。また, その条件を満たすデータのうち, 風向が日中ならば東寄りから南寄りの範囲で, 夜間ならば西寄りから北寄りの範囲で, それぞれ最も卓越している場合のデータのみを採用した。風向は, AMeDAS 八王子で

観測された10分間の平均風向の最頻値とした。

3. 結果

3.1 日中の観測結果

観測したデータのうち、2.3節の条件をみたく日中のデータは6例抽出できた(第2表)。そのうち、日中で晴れに分類できるものは2例(8月22日, 9月16日)、薄曇りのものは2例(8月24日, 31日)、曇りのものは2例(8月23日, 9月4日)であった。

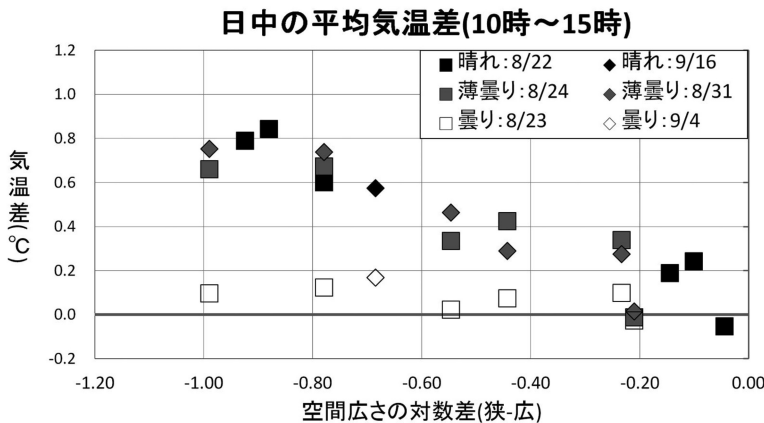
全ての観測結果を「晴れ」「薄曇り」「曇り」の3種類に分類して、その傾向を分析した。第5図は日中

の観測地点間の気温差を縦軸にとり、空間広さの対数差を横軸にとって表したものである。気温差および空間広さの対数差は、空間広さが小さい地点の値(狭)から大きい地点の値(広)を引き算して求めている。そのため、気温差が正で空間広さの対数差が負ということは、空間広さの小さい地点の方が空間広さの大きい地点よりも気温が高いことを表している。なお、5時間または10時間平均した場合の各測器指示値間の器差は最大でも0.04°Cであることから、2台の測器による気温差の誤差は、誤差伝播(=√(0.04<sup>2</sup>+0.04<sup>2</sup>))、例えば岩井・石黒(1970))を考慮すると約0.06°Cと見積もられる。よって第5図～第8図ではおおむね0.06°C以上の気温差は有意であることに注意されたい。

第2表 データ解析日における日中と夜間の天気、および AMeDAS 八王子における気象要素。

期間	天気	平均気温	最高気温	平均風速	最多風向	日照時間
		(°C)	(°C)	(m/s)		(h)
(日中)						
8月22日 10:00~15:00	晴れ	33.9	35.1	3.9	南東	4.9
8月23日 10:00~15:00	曇り	27.2	28.9	4.9	南	0.6
8月24日 10:00~15:00	薄曇り	30.3	31.6	2.6	南南東	2.9
8月31日 10:00~15:00	薄曇り	25.0	26.1	3.0	東	1.4
9月4日 10:00~15:00	曇り	25.7	26.4	4.9	南南東	0.2
9月16日 10:00~15:00	晴れ	27.9	29.0	3.3	南東	4.6
(夜間)						
8月22日 19:00~23日 5:00	薄曇り	26.8	30.6	2.0	北	—
8月23日 19:00~24日 5:00	曇り	24.7	27.0	1.4	西北西	—
8月24日 19:00~25日 5:00	曇り	25.3	27.9	1.5	北北西	—
8月30日 19:00~31日 5:00	薄曇り	21.1	23.1	1.9	北北西	—
9月2日 19:00~3日 5:00	晴れ	22.2	25.2	2.6	北西	—
9月16日 19:00~17日 5:00	晴れ	21.1	23.4	2.7	北北西	—

天気は観測時の目視と東京管区気象台の雲量情報から推定した。平均気温～日照時間は AMeDAS 八王子の観測値である。いずれの日時も降水量は 0 mm であるため省略した。



第5図 日中(10:00~15:00)の天気別の平均気温差と空間広さの対数差との関係。

の観測地点間の気温差を縦軸にとり、空間広さの対数差を横軸にとって表したものである。気温差および空間広さの対数差は、空間広さが小さい地点の値(狭)から大きい地点の値(広)を引き算して求めている。そのため、気温差が正で空間広さの対数差が負ということは、空間広さの小さい地点の方が空間広さの大きい地点よりも気温が高いことを表している。なお、5時間または10時間平均した場合の各測器指示値間の器差は最大でも0.04°Cであることから、2台の測器による気温差の誤差は、誤差伝播(=√(0.04<sup>2</sup>+0.04<sup>2</sup>))、例えば岩井・石黒(1970))を考慮すると約0.06°Cと見積もられる。よって第5図～第8図ではおおむね0.06°C以上の気温差は有意であることに注意されたい。

第5図から、晴れや薄曇りのように日照がある日には、空間広さの対数差が大きいほど気温差が大きくなる傾向が顕著であることがわかる。つまり、日中は空間広さが他の地点と比べて極めて小さい地点⑥だけでなく、風上の障害物に近い地点ほど気温が高くなっていった。特に天気がよい晴れの日はその傾向が顕著であった。気温差が最大となったのは8月22日の③と⑥を比較したもので、空間広さの対数差は-0.88、気温差は0.84°Cであった。また、薄曇りの日も晴れの日匹敵するほど気温差が大きくなった。最大となったのは8月31日の①と⑥を比較したものであり、空間広さの対数差は-0.99、気温差は0.75°Cであった。一方、曇りの日については、晴れや薄曇りの日に比べて空間広さの対数差依存性はだいぶ弱く、9月4日の④

と⑥を比較したものが気温差は最大であった。この時の空間広さの対数差は-0.69, 気温差は0.17°Cであった。

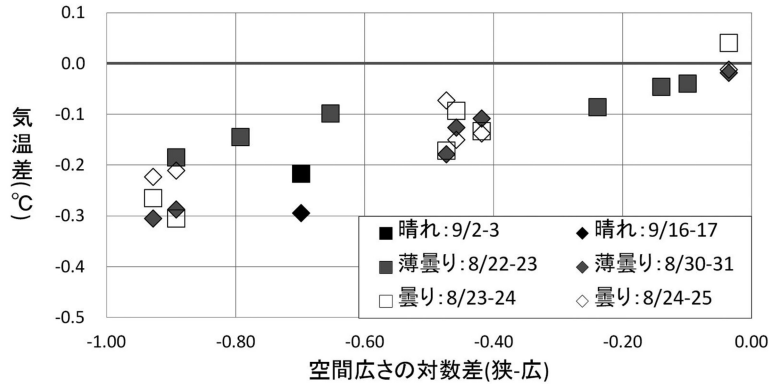
### 3.2 夜間の観測結果

観測したデータのうち、2.3節の条件をみたます夜間のデータは6例抽出できた(第2表)。そのうち、晴れに分類できるものは2例(9月2~3日, 16~17日), 薄曇りのものが2例(8月22~23日, 30~31日), 曇りのものが2例(8月23~24日, 24~25日)であった。

日中の分析と同じように、全ての観測結果を「晴れ」, 「薄曇り」, 「曇り」の3種類に分類し天気別の傾向を分析した(第6図)。その結果、日中とは逆の傾向になった。すなわち、空間広さの小さい地点の方が空間広さの大きい地点よりも、夜間は気温が低くなった。また、気温差は日中に比べて小さく、その最大値は8月23~24日(曇り)に観測された空間広さの対数差が-0.89の時の-0.31°Cであった。なお、第5図と第6図を比較すると、日中の曇りの日のみ空間広さ依存性が他の条件のデータと異なるように見える。これについては4.2節で議論する。

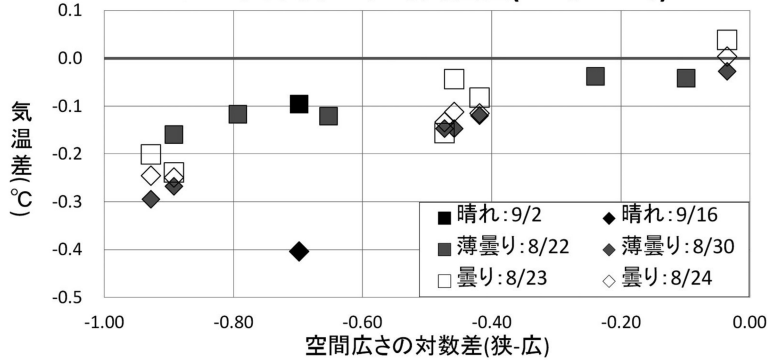
近藤(1994, 2000)では、夜間の地表面冷却量が夕方から急激に増加すること、そして、約2時間経つと冷却速度は緩和されるが

### 夜間の平均気温差(19時~5時)



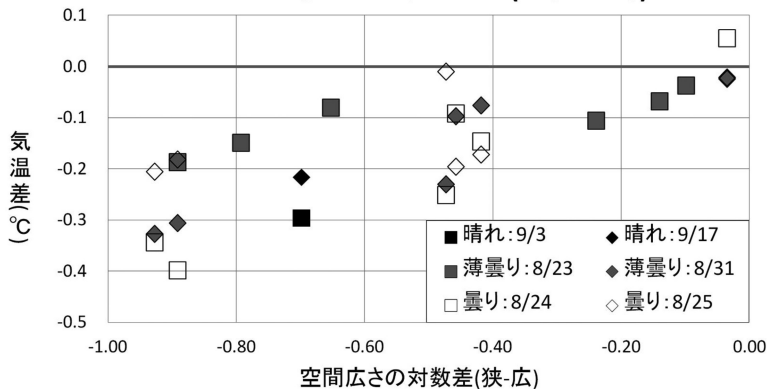
第6図 夜間(19:00~5:00)の天気別の平均気温差と空間広さの対数差との関係。

### 日の入り後の平均気温差(19時~0時)



第7図 日の入り後(19:00~0:00)の天気別の平均気温差と空間広さの対数差との関係。

### 日の出前の平均気温差(0時~5時)



第8図 日の出前(0:00~5:00)の天気別の平均気温差と空間広さの対数差との関係。

時間が経つごとに冷却量がほぼ一定の割合で増加していくことが示されている。そこで、日没後と深夜において気温変化の様子に違いがあるのか、空間広さに着目して調べた。そのために、夜間を日の入り後の19時から0時までと、0時から日の出前の5時までの2つに分けて日中と同様に分析した。

日の入り後、日の出前のデータをそれぞれ、「晴れ」、「薄曇り」、「曇り」の3種類に分類した(第7図、第8図)。後者は0時以降の観測値なので、第8図の凡例の日付は第7図のそれらの翌日になっている。どちらも傾向は夜間全体の時と同じで、空間広さの小さい地点の方が空間広さの大きい地点よりも気温が低くなった。一方、「晴れ」であった9月2~3日と、9月16~17日に着目すると、9月16~17日は日の入り後の気温差が $-0.4^{\circ}\text{C}$ 、日の出前の気温差が $-0.2^{\circ}\text{C}$ と、9月2~3日と比較して気温差の時間変化の傾向が異なることが分かる。さらに第6~8図からは、夜間全体10時間と、日の入り後5時間、日の出前5時間とで平均値に $0.2^{\circ}\text{C}$ の差が出る事が分かる。このことは、「晴れ」の日の夜間には、微気象場の揺らぎや時間変化がかなり大きい可能性があることを示している。

## 4. 考察

### 4.1 昼間の観測結果に関する考察

本研究で得られた日中の気温差と空間広さの対数差との関係について、同様の解析をした近藤(2014a)の図84.13下図と比べてみる。本研究でも全体的な傾向は似ているが、近藤(2014a)では「空間広さの対数差 $=-1$ に対する日だまり効果による平均気温の上昇量 $=1.0\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 」と述べられており、本研究ではこれとほぼ等しい気温差約 $0.9^{\circ}\text{C}$ が得られた。しかしながら、近藤(2014a)の図84.13下図のプロット全体と比較するとこの値は若干小さめである。この理由として、以下の2つが考えられる。

1点目として、芝地への入力放射量が、芝に結露した水分の蒸発(観測開始当初から早朝に結露がみられることが多かった)や植物活動に伴う蒸散に使われ、地表面温度が上がりにくい環境であったことが挙げられる。実際、晴天だった8月21日と22日に放射温度計(HIOKI社製 INFRARED THERMOMETER FT3700)で芝地の地表面温度を測ったところ、14時でも $35^{\circ}\text{C}$ 程度であり、芝地の外側のトラック上の測定値約 $50^{\circ}\text{C}$ と比べても低かった。

2点目として、近藤(2014a)の図84.13下図にプロットされているデータには、芝地上のみならず裸地表面上で観測されたものも含まれていることが挙げられる。裸地面は芝地に比べて日中の地表面温度が上昇しやすく、それに伴い気温も高くなることから、本研究では日中の気温差が小さくなったものと考えられる。実際、近藤(2014a)で得られた熊谷地方気象台露場内における気温差も、本研究同様、予想される値よりも小さめであった。その原因の一つとして、観測点周辺が芝地または雑草混じりの草地であることが挙げられている。

### 4.2 夜間の観測結果に関する考察

次に、空間広さの小さい地点の方が、空間広さの大きい地点よりも夜間の気温が低くなった理由について考察する。朴・河村(1986)や榊原・伊藤(1998)といった、1~数kmスケールでのヒートアイランドを観測した事例研究では、天空率が小さくなるほど気温が高くなる事が指摘されている。ここで、第1図および式(1)より、空間広さが大きいほど天空率は大きくなるので、先行研究の知見は本研究の結果とは逆の傾向になっている。ただし、今回は南東および北西方向の空間広さしか計測していないので、厳密な意味での天空率は求められない。しかしながら、おおむね空間広さが大きいほど天空率は大きくなることのできるため、ここでは天空率の代わりに空間広さを用いる。

榊原・伊藤(1998)における天空率と気温の相関係数は $-0.358$ と小さく、天空率が小さい時の観測値も少ない。一方、朴・河村(1986)では、天空率と地表面温度の相関係数が $-0.741$ と強い負の相関が得られている。そして、天空率が小さい場所で地表面温度が高くなるのは、建物の壁面から地表面に向かう下向き長波放射量の増加など、建物の遮蔽に伴うヒートアイランド効果が原因であるとされている。ただし、これらの観測結果は1~数kmにわたる市街スケールでの気温差の議論であり、本研究のような100mスケールでの観測結果と単純に比較することは難しい。

本研究における夜間の気温変化には、放射冷却が大きく関わりと考えられる。一般的に放射冷却が強くなる日の夜間の条件として、(a) 風が弱いこと、(b) 雲が少ない晴天であること、(c) 大気全層が低温であること、(d) 空気が乾燥していること、(e) 新雪が積もっていること、(f) 地面が乾燥していること、(g) 冷気がたまりやすい地形であること、(h) 大き



い湖や海から離れていること、の計8点が挙げられている(近藤 2000)。これらのうち、同一の日時に観測した本研究のデータを対象とした時に観測地点によって差が出るものは、(a)と(g)である。

まず(a)について、風が吹く時は微風の時と比べて、乱流によって大気から地表面へ顕熱が運ばれるため、放射冷却量は小さくなるのが指摘されている(近藤 2000)。そのため、相対的に空間広さが小さく風速が弱い地点ほど、放射冷却量が大きくなり、空間広さが小さい地点ほど気温が低くなったと言える。

次に(g)については、気温の低下量が大きい⑥の観測地点としての特殊性を指摘できる。⑥は空間広さを小さくするために設置した五角形の囲いが不織布で覆われている(第4図)。そのため、放射冷却により冷えた空気が周囲に拡散しづらい環境となり、冷気をとどませる盆地地形にみられる現象と似たような影響で、気温が大きく下がったと考えられる。

最後に、日中の気温差が夜間の気温差よりも大きくなった原因について考察する。これは、地表面の正味放射量が、晴天日中は数百 W/m<sup>2</sup>程度であるのに対し、晴天夜間は概ね-100 W/m<sup>2</sup>以下であることが多く(近藤 1994)、この正味放射量の大きさの違いが主な原因であると考えられる。なお、曇りの日の日中の気温差(第5図)が空間広さの対数差によらず小さな値になるのも、晴天日中と比べて日射量が少ないこと、すなわち正味放射量が小さくなることで説明できよう。

その他の効果として、乱流による熱輸送量の違いも考慮する必要がある。こちらは、大気が不安定な状態の日中に熱輸送が大きくなる傾向にある。これは、日中と夜間の正味放射量の違いから想定される地表面温度変化量を緩和する方向に働く。これら正味放射量と乱流による熱輸送量の兼ね合いによって、日中の気温差が夜間の気温差の3倍程度になったと考えられる。

## 5. まとめ

測器近傍の障害物の有無が気温に与える影響(日だまり効果)を定量的に評価するため、観測地点の露場環境を空間広さという指標を用いて定量化し、高精度の気温観測器を用いて、首都大学東京南大沢キャンパスの陸上競技場の芝地上で2014年8~9月に気温観測を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 日中は、空間広さが大きい地点よりも小さい地点

の方が気温は高くなり、天気がよいほど地点間の気温差が大きくなることがわかった。その一方、気温差が近藤(2014a)に比べて小さくなったのは、芝に結露した水分の蒸発や植物活動に伴う蒸散によって、日中の気温上昇が抑制されたこと、および、地表面温度の上昇が小さい芝地上で観測したことが原因であると考えられる。

(2) 夜間は、日中とは逆に、空間広さが大きい地点よりも小さい地点の方が気温は低くなり、天気による地点間の気温差も小さかった。これは、障害物による風速の減少に伴う放射冷却の強化と、人工的に設置した囲いの中に放射冷却で生じた冷気が蓄積して、冷気湖のようになったことが原因と考えられる。

(3) 夜間の日の入り後と日の出前において、全体的な傾向は夜間全体とほとんど同じであった。しかしながら、放射冷却が強くなる時間帯のずれにより、日の入り後と日の出前の気温の変化量に違いが生じる場合のあることが確認できた。

本研究のように、露場環境を定量化して、障害物の風止めによる気温変化に着目した研究は少ない。そのため、これまでに観測されていない土地利用や気象条件下での観測事例を増やすことが必要である。しかし、その際に、本研究のように0.1°C以下の気温に着目する場合には、高精度の気温観測器を用いる必要がある。また、本研究では気温のみを観測したため、今後は風向・風速計や放射計を高精度の気温観測器の近くに設置して、風速、放射量、空間広さと気温との関係を明らかにする必要がある。

## 参考文献

- 岩井重久, 石黒政儀, 1970: 応用水文統計学。森北出版, 370pp.
- 気象庁, 2014: 「東京」の気象観測地点の移転について。移転の概要等について(平成26年11月13日)。http://www.jma-net.go.jp/tokyo/sub\_index/tokyo/kitanomaru/kitanomaru\_gaiyo.pdf(2015.3.8閲覧)。
- 近藤純正, 1982: 大気境界層の科学。東京堂出版, 219pp.
- 近藤純正編著, 1994: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—。朝倉書店, 348pp.
- 近藤純正, 2000: 地表面に近い大気の科学—理解と応用—。東京大学出版会, 324pp.
- 近藤純正, 2004: 近藤純正ホームページ7。都市気温上昇と風速の関係。http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-

- kndu/kenkyu/ke07.html (2015.3.8閲覧).
- 近藤純正, 2007: 近藤純正ホームページ K35. 基準5地点の温暖化量と都市昇温 (2). <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke35.html> (2015.3.8閲覧).
- 近藤純正, 2009: 気温観測の補正と正しい地球温暖化量. *アリーナ*, (7), 144-161.
- 近藤純正, 2010: 日本における温暖化と気温の正確な観測. *伝熱*, 49, 58-67.
- 近藤純正, 2012a: 近藤純正ホームページ K57. 森林内の開放空間の風速. <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke57.html> (2015.3.8閲覧).
- 近藤純正, 2012b: 日本の都市における熱汚染量の経年変化. *気象研究ノート*, (224), 25-56.
- 近藤純正, 2013a: 近藤純正ホームページ K69. 気温観測用 Pt センサーの安定性と器差. <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke69.html> (2015.8.26閲覧).
- 近藤純正, 2013b: 近藤純正ホームページ K70. 気温観測用の電池式通風筒. <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke70.html> (2015.9.7閲覧).
- 近藤純正, 2013c: 近藤純正ホームページ K79. 都市の地上気温の分布—新しい視点・解析法. <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke79.html> (2015.3.8閲覧).
- 近藤純正, 2014a: 近藤純正ホームページ K84. 観測露場内の気温分布—熊谷. <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke84.html> (2015.10.21閲覧).
- 近藤純正, 2014b: 近藤純正ホームページ K92. 省電力通風筒. <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke92.html> (2015.3.8閲覧).
- 近藤純正, 2015: 近藤純正ホームページ K99. 通風筒の放射誤差 (気象庁95型, 農環研09S型). <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kenkyu/ke99.html> (2015.8.28閲覧).
- 朴 恵淑, 河村 武, 1986: 都市気温の形成要因に関する考察. *筑波大学水理実験センター報告*, (10), 27-38.
- 榊原保志, 伊藤由香, 1998: 長野市における夜間気温分布と天空率, 風の関係. *地理学評論*, 71A, 436-443.
- 志藤文武, 青柳暁典, 清野直子, 藤部文昭, 山本 哲, 2015: 植栽・構造物が気温観測統計値に及ぼす影響—東京 (大手町) における通年観測—. *天気*, 62, 403-409.

---

## The Relationship between “Aspect Ratio of Windward Open Space” and “Surface Air Temperature” in the Meteorological Field Derived from Highly Precise Observation Using Fourfold Radiation Shielding Funnel

Norio WADA\*<sup>1</sup>, Takeki IZUMI\*<sup>1</sup>,  
Hiroshi MATSUYAMA\*<sup>2</sup> and Junsei KONDO\*<sup>3</sup>

\*<sup>1</sup> Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University.

\*<sup>2</sup> (Corresponding author) Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, 1-1, Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan.

\*<sup>3</sup> Professor Emeritus, Tohoku University.

(Received 20 March 2015; Accepted 28 October 2015)

---