

都市熱環境観測システムの開発研究

酒 井 敏^{*1}・梅 谷 和 弘^{*2}・飯 澤 功^{*3}・伊 藤 文^{*4}
小 野 耕 作^{*5}・矢 島 新^{*6}・飴 村 尚 起^{*7}・森 永 修 司^{*8}

要 旨

ヒートアイランド現象など都市の熱環境を観測するための多点観測システムを開発した。都市部での観測では設置場所などの制約が大きく、小型軽量の観測機材が求められる。特に、熱的な応答を調べるために必要な放射計は、従来かなり大掛かりで都市部での観測は困難であった。ここでは、気温測定などのための基本的な温度センサに加えて、これらの放射に関するセンサを含め、市販の安価な部品を使って製作し、従来の熱環境を観測するシステムとほぼ同等の精度を有することを示す。

1. はじめに

近年、ヒートアイランド現象など都市サイズの気象現象に対する関心が高まり、気象学的な視点だけでなく、建築、社会学的見地など、さまざまな角度から研究が進められている。しかしながら、その実態を解明するための実測データは、その関心の高さに比して極端に少ない。これは、人間活動が盛んな都市部において、その活動に支障をきたさないように適切な観測を

することが極めて困難である事が一因である。

一方、数値計算による都市気象の研究は近年盛んになってきたが、数値モデルはあくまで近似モデルである。実際の現象が適切にモデル化されているかどうかは、現実の観測データと比較して確認する必要がある。数値モデルの分解能が上がるに従って、それに見合った観測データが必要になる。

気象観測は歴史が古く、業務的な観測態勢が確立しているため、その観測方法等に関しても多くのノウハウが蓄積されている(鈴木 1996; 気象庁 1998)。しかし、気象官署での気象観測は広い範囲の自然のデータを取得することが目的であり、広い露場で人工物の影響を受けないような測定方法がとられる。それに対して、都市気象の研究対象は建物や自動車などの人工物の影響も含めた気象であり、通常の都市環境の中で、そのありのままの状態を観測することが目的となる。したがって、気象官署での観測方法に必ずしも囚われる必要はなく、都市気象の観測に最も適した方法を探ることが必要である。

そこで、都市部での気象観測を念頭に、手軽に高密度観測が可能なシステムを開発し、その測定精度などの比較検証を行った。

^{*1} 京都大学人間・環境学研究科。

^{*2} 京都大学人間・環境学研究科 (現: 株式会社デンソー)。

^{*3} 京都大学人間・環境学研究科 (現: 京都市立堀川高等学校)。

^{*4} 京都大学人間・環境学研究科 (現: 新日鉄ソリューションズ株式会社)。

^{*5} 京都大学人間・環境学研究科 (現: 凸版印刷株式会社)。

^{*6} 京都大学地球環境学舎 (現: 東京建物株式会社)。

^{*7} 京都大学人間・環境学研究科 (現: 神戸女学院高等学校)。

^{*8} 京都大学理学部 (現: 株式会社 NRI セキュアテクノロジーズ)。

—2006年5月31日受領—

—2009年2月6日受理—

2. システム概要

従来、都市のヒートアイランド観測では、自動車や自転車を使った移動観測が多く行われてきた（榊原・三枝 2002；榊原・森田 2002；武市 2002；榊原・北原 2003）。しかし、移動にはかなりの時間を要し、1日に何度も観測することが困難なため、時間分解能が非常に荒くなってしまう。一般に空間スケールの小さな現象は時間スケールも短いため、時間変動と空間分布を区別するためには、固定観測点を高密度に配置することが必要である。このような高密度な固定観測を実現するためには、観測システムが小型軽量で、安価でなければならない。小型軽量であることは、設置場所の自由度が増すだけでなく、万が一の事故の際にも第三者に危害を与える危険性を少なくすることができる。また、価格は単に観測予算だけの問題ではなく、盗難などの事故対策が容易で観測場所を借用する際にも管理者の許可を得やすい利点もある。このように、小型軽量で安価であることは、実際の観測を行う上で極めて重要な点である。これに対して、市販の気象観測システムは長期にわたる業務的観測を念頭に設計されている場合が多いため、大掛かりすぎて使いづらい。そこで、ここでは機動性を重視して極力小型軽量でありながら、センサに関しては自由度の高い装置を市販の部品を使って開発することを目標とする。ここで機動性とは、必要に応じたシステムの組み替え、および必要な場所への設置の容易さを意味する。

観測システムのセンサとして、本研究では熱的なセンサを対象とする。ヒートアイランドやクールアイランドのような都市気候の研究では、地表面付近の熱的特性を明らかにすることが重要である。そのためには、主要な熱源である日射や赤外線放射の情報が必要になる。浜田・三上（1994）では明治神宮・代々木公園の観測で、日射量や雲量を数 km 離れた大手町の気象台の観測値から平均的な量を推定した。しかし、狭い範囲の熱的特性は短時間の変化に対する応答に顕著に現われることを考えると、現地での時間分解能の高い観測が望まれる。そこで、本研究では通常温度センサに加えて、街中に設置可能な日射と赤外線放射のセンサを開発の対象とした。

湿度は重要な観測項目ではあるが、容易に入手できるセンサの精度があまり高くなく、高密度な観測を行っても空間的に有意な差が得られないと判断して今回は除外した。また、風速も重要な要素であるが、簡便なセンサがない上に、都市キャノピー内での風向風

速は局所的な建物の形状などに大きく左右されるので、そこから都市サイズの問題を議論することが難しい。測定容易さや測定値が代表する空間サイズなどを考慮すると、風速よりも微気圧変動の観測のほうが大気の動きに関する的確な情報が得られる可能性もある（梅谷・酒井 2007）。このようなセンサそのものについては今回取り上げないが、これらの新しいセンサの開発も考慮して、様々なセンサが接続しやすいシステムを目指した。

3. 温度センサ

温度センサは気温のみならず様々な物体の温度を測ることに使われる。大気は地面や建物などと熱のやりとりをするので、これらの温度は気温の変化を解釈する上で重要である。また、後述するように、放射計の筐体温度や黒球温度計など、直接対象物の温度を測るのではなく、他の量を測定するために温度センサが必要なこともある。これらの測定では、対象や目的によって必要な精度も異なるが、正確な測定が必要なのは温度の絶対値よりも、温度差であることが多い。すなわち、温度の絶対値を正確に測定するよりも、複数の温度センサ間の相対的な精度を確保する（個体差を小さくする）ことが重要である。相対的な精度を確保する最も簡単な方法は、同じ特性のセンサを使うことである。また、大気のように熱容量が小さな物体を対象にする場合には、センサ自体の熱容量が小さくないと温度変化に追従できない。そこで、小型で熱容量が小さく大気を含む様々な対象の温度測定が容易なフィルムタイプのサーミスタ（103 JT-050 石塚電子）を採用した。

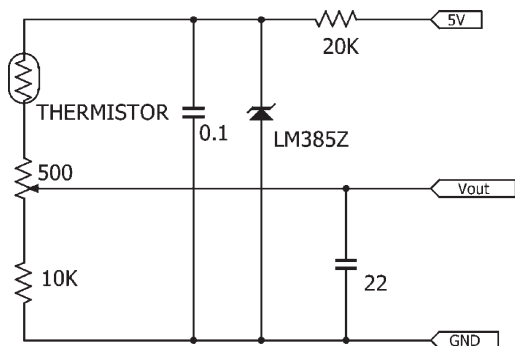
このサーミスタを使った温度センサ回路を第1図に示す。原理的にはサーミスタと抵抗を直列につなぐだけでセンサ回路が構成できるが、後述するようにロガーから供給される電源が5Vのため、これを直接この回路に印加すると、サーミスタの空気に対する熱放散定数が比較的小さい（0.7 mW/°C）ため自己発熱の影響が無視できない。これを低減するため、1.2 Vの基準電圧素子（LM385）で電圧を下げてセンサ回路に供給する。熱放散定数が小さいのは小型で反応速度の速いセンサの宿命である。また、センサケーブルが拾う商用電源ノイズ対策として、出力に22 μ Fのタンタルコンデンサを挿入した。

この回路の出力は0–30°Cの範囲で温度に対してほぼ直線的に変化し、温度 T (°C) と出力電圧 V_{out}

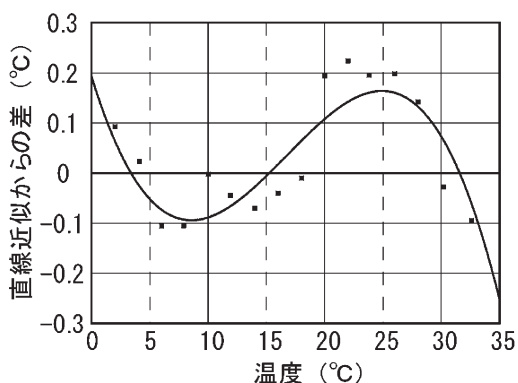
(mV) との関係は以下の式で近似できる。

$$T = 0.0864 V_{out} - 28.28 \quad (1)$$

この式の係数は10本程度の温度センサを製作して、その中で中間的な特性を持つセンサの値である。以後、そのセンサを基準センサとして使用する。その基準センサの出力を式 (1) で温度に変換したものと、水銀標準温度計の読取値との差を第2図に示す。温度とセンサの出力電圧の関係を直線近似したときの誤差は0～30℃の範囲で±0.2℃ほどあり、この範囲を超えるとさらに大きくなる。ただし、これはサーミスタの一般的な特性であり、センサの個体差ではない。同じ種類のセンサを使えば、二つの温度の測定値の差を取ったとき、一般的な特性による誤差は相殺され、セ



第1図 温度センサの回路図。



第2図 センサの非直線性。水銀標準温度計で測定した温度(横軸)と、式(1)で直線近似した測定値の差を■印で示す。実線はメーカーのデータシートから計算した値で、回路上の誤差範囲内で、実測値に近くなるように調整してある。

ンサ個体間の差だけが問題になる。

このセンサ回路でそのような個体差を生む要因としては、サーミスタの基準温度での抵抗値および温度依存性、サーミスタに直列に入れた抵抗、基準電圧素子の電圧があり、どの値も1%程度の誤差がある。これは、温度の誤差に換算すると±1℃程度となり無視できないので、500Ωの半固定抵抗を入れて補正する。ただし、この方法では、電圧のオフセットしか補正できず、温度係数は補正できない。そこで、センサ回路全体の温度係数に最も影響を与えるサーミスタによる誤差が、規格の上では±15℃の範囲で±0.15℃程度と比較的小さいことを考慮して、オフセットを調整した後、0～30℃の範囲で特性をチェックして誤差が±0.1℃より大きなものはセンサを交換することにした。

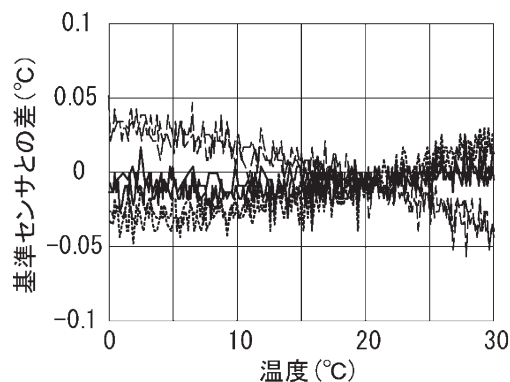
これらの温度較正および特性チェックには、基準温度センサと較正対象の温度センサをペルチェ素子で温度制御された4cm角の銅のブロックに貼り付けて行った。温度センサ同士は温度差が出ないようにアルミテープ上に並べて貼り付けた上で、熱伝導両面テープで銅のブロックに貼り付け、さらに4cmの厚さの断熱材で覆って較正を行った。この方法でも、温度を急激に変化させるとセンサの位置によって若干の温度差が出るが、温度を上昇させるときと、下降させるときとでその差が逆になるため、その温度差を確認しながら特性チェックを行った。

この方法で調整した3本分のセンサの特性を第3図に示す。この図では1時間ほどかけて温度を上下させたが、温度上昇時と下降時のグラフがほとんど重なっていることから、この程度の時間をかければセンサ位置の違いによる温度差がほとんど無いことがわかる。

これまでに約150本の温度センサを調整したが、ほとんどのセンサは0～30℃の範囲で±0.1℃の誤差範囲に入っており、この範囲を超えてセンサ交換が必要になるのは10%程度であった。

なお、第1図の回路は、小さな細長い基板上に組みあげ、センサケーブルの途中にケーブルの一部のような形態で実装した。

また、このセンサを製作して以来これまで3年以上使用し、必要に応じて特性の再チェックを行っているが、これまでのところ明らかな特性の経時変化は認められない。



第3図 各センサ出力と基準センサ出力の差。実線、破線、点線はそれぞれ1本分のデータを示す。それぞれのセンサについて、温度を上昇させている期間と下降させている期間の2本のグラフが描かれており、それらはほとんど重なっている。データは10個の移動平均を施してある。横軸は基準センサの値である。

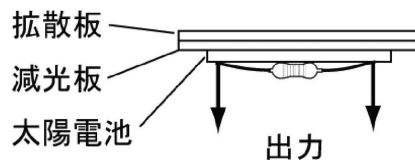
4. 日射センサ

気温を変化させる最大の要因は、太陽からの日射である。しかし、既存の日射センサは一般に高価なため、多点観測の項目とすることが難しい。そこで、太陽電池を使った極めて簡単な日射センサを製作した。

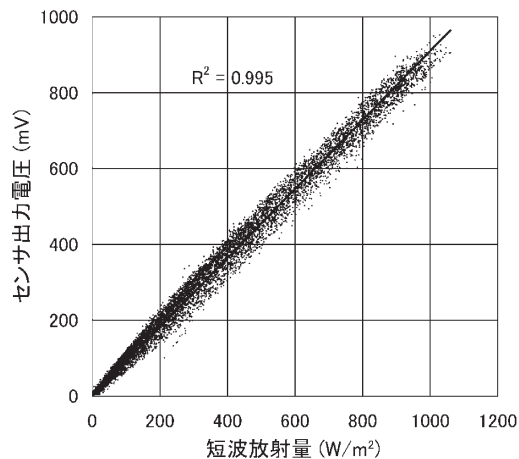
太陽電池は、十分な明るさの下で、定格以下の電流を取り出したとき、1セルあたり約0.5 Vの起電力を生じる。通常はこのような状態で使用するが、太陽電池の電圧は光の強さに比例しないが、出力を短絡（定格よりはるかに大きな電流を流す）状態にすると、光の強度に比例した電流が流れる。すなわち、太陽電池の出力に小さい値の抵抗を接続しておくと、光の強さに比例した電圧が得られる。

使用した太陽電池（HENG YANG SC-3012）は、電卓用の4セルタイプで、動作電圧2 V、動作電流8 μ Aである。このようなアモルファスシリコンを使った小型の太陽電池は、比較的暗いところでの使用が想定されており、直射日光下では出力が飽和してしまうため、第4図のように、減光板を重ねて減光する。また、このように減光板を太陽電池の前面に設置すると、入射角によって減光率が変わってしまうため、減光板の上面にさらに拡散板を設置する。これに1 k Ω の抵抗を接続することで、直射日光下で約1 Vの電圧が得られる。

太陽電池の分光特性は、可視光の中心よりも若干赤



第4図 日射センサの概略図。太陽電池の表面に、減光板と拡散板を重ね、上を向けて水平に設置する。減光板と拡散板は、それぞれスモークおよび乳白の2 mm厚アクリル板である。太陽電池の大きさは約30 mm×12 mmである。



第5図 太陽電池式日射センサの出力特性。横軸はKipp & Zonen CM3による測定値。期間は2007年4月から8月で、1秒サンプリングした値を10分平均してある。

外よりにピークがあり、フラットな特性ではないため、短波放射領域（0.3–3 μ m）の放射エネルギー量全体を正確に測定することはできないが、直達日射に限ればそのスペクトル分布は常にほぼ一定であるので、太陽放射量にほぼ比例した出力が得られる。第5図に短波放射領域全体にフラットな感度を持つサーモパイル式の日射計（Kipp & Zonen CM3）と、上記の日射センサの出力の相関を示す。両者の相関は非常に良く、日射センサの出力から日射量を線形近似で求めたときの誤差の標準偏差は約20 W/m²である。CM3の精度が日射に対して10%程度である事を考えると、この太陽電池式日射センサは極めて単純な構造ながら、CM3とほぼ同じ精度で日射量が測定できる

ことがわかる。なお、太陽電池の特性には温度依存性があり、一般に開放電圧は $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ 程度の温度係数を持つが、短絡電流に対する係数は比較的小さい(安藤2002)。上記のセンサで実際に測定したところ、出力の温度係数は $0.2\%/^{\circ}\text{C}$ 程度であり、 $\pm 20^{\circ}\text{C}$ の温度差に対して $\pm 4\%$ 程度の温度依存性であった。

太陽電池の特性は、製品ごとに異なり、減光板や拡散板の正確な特性も不明なので、このセンサを自作してその出力値を正確に日射量に換算するためには、基準となる日射計との比較が必要である。しかし、第5図から出力の直線性が非常によいことがわかるので、日射計がなくても、晴れた日の正午頃の出力値と近くの気象台の測定値を比較することで、およその較正は可能である。

5. 赤外線センサ

地表付近の熱収支で、日射の次に大きな熱冷源が赤外放射である。雲のない条件では 100 W/m^2 程度の冷却があり、低い雲の出現でほぼ0になる。特に、夜間はこの赤外域の放射冷却が最も大きな熱的変動要因である。

従来、この赤外放射を測定するためには、日射センサ同様かなり大掛かりで高価な全天赤外放射計が使われてきた。これに対し、設置場所、規模、コスト等の制約が多い都市域での観測においてもフレキシブルに利用できる赤外線センサとして、本研究では単指向性の放射温度計を開発した。なお、Sakai *et al.* (2009)では、単指向性の放射温度計で全天赤外放射量が測定できることが示されている。これは、天頂角 52.5° の方向からの放射量が全天放射の平均値に等しいことを利用したものである。この 52.5° という角度は観測(Dines and Dines 1927)に基づくもので、近似的な理論計算では天頂角 53° となる(近藤1994)。このセンサはもともと温度計用の部品を組み合わせたものなので、すべての波長にわたる全赤外放射を直接測定することはできず、対象物とセンサの見かけ上の“温度差”を出力することになる。大気の放射はプランク分布から大きく外れているので、センサを空に向けた時、単純に“空の温度”を定義することはできないが、ここでは測器の出力から単純計算した温度を“”をつけて表すことにする。

第6図にセンサの回路図を示す。センサ素子は石塚電子のサーモパイル型センサ15TP551Nで、測定波長は $5\text{--}14\mu\text{m}$ 程度である。サーモパイル型センサ

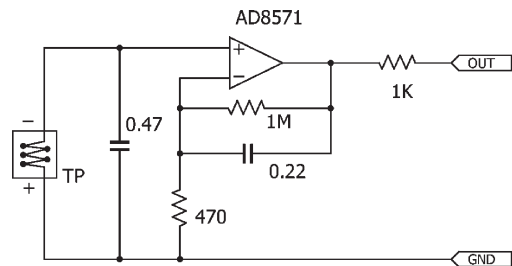
は素子自体の温度と対象物の温度との差にほぼ比例した電圧を出力するが、その出力は非常に微弱なので、センサ管内にオペアンプを内蔵して出力を約2000倍に増幅する。オペアンプとしては、入力オフセットおよびドリフトが極めて小さいAD8571を使用した。“空の温度”は地上の素子自体の温度よりも低いので、センサの極性は通常の逆に接続し、冷たい対象物に対して正の値が出力されるようにしてある。

第7図にセンサの構造を示す。単一の指向性を持たせるため、センサの前にポリエチレンのフレネルレンズを装着する。また、センサの温度を気温と等しく保つため、アルミのセンサホルダーをアルミパイプにはめ込み、この中にオペアンプ基板を組み込む。これを、直射日光を避けるために塩ビ継ぎ手(25×13チーズ)に入れ、さらに全体を2mm厚の発泡塩ビ板を成型して作ったカマボコ型の屋根で覆って雨と放射を避ける。このように、センサに直接日射が当たらないために、センサ管体の温度はほとんど気温に等しく、昼間でも気温との差は 1°C 程度である。したがって、このセンサの出力 V_{out} は対象物と気温との温度差 ΔT に近似的に比例し、

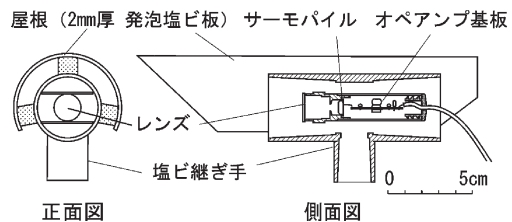
$$\Delta T = cV_{out} \quad (2)$$

と書ける。ここで、 c は感度係数である。

このセンサの出力較正は、黒色塗装した銅板をペル



第6図 赤外線センサの回路図。



第7図 赤外線センサの構造図。

チェ素子で冷却して簡易黒体炉を作り、センサを銅板面に向けて測定を行って、式(2)の感度係数 c を求めた。センサ素子の感度係数は前述のサーミスタに比べて桁違いにばらつきが大きく、同じ製造ロット内の30個程度を測定した範囲で $\pm 15\%$ 程度であった。

このセンサで実際に測定した例を第8図に示す。このセンサの出力は雲の有無によってステップ関数的な変化を示し、晴れていれば大きな値、空一面が雲に覆われている時には、雲底温度と地上気温の差が出力されることになるので、ほぼ雲底高度に比例した値となることが期待され、雲が低ければ小さな値となる。

また、部分的に雲に覆われている時には、雲の移動に伴って出力値が激しく変動する。定性的には、この“温度差”は「天気の良い」を表しており、気象台の天気概況と比較すると、よい対応が付くだけでなく、天気に変化した時刻がはっきりわかる。

上空大気の状態と“温度差”の関係に関する議論、および、本赤外線センサと市販品CG3 (Kipp & Zonen) との比較結果については付録に記す。

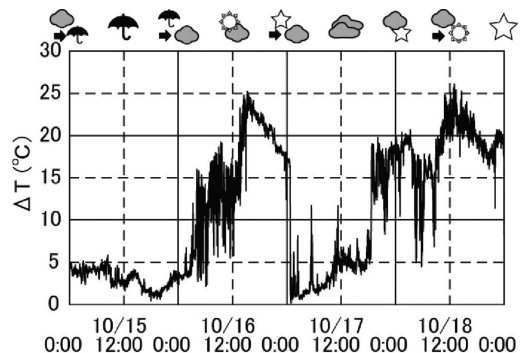
6. ラディエーションシールド

野外の気温測定では、強い放射環境の中で、熱容量、熱伝導率ともに小さい空気の温度を測らなければならないため、ラディエーションシールドが不可欠である。強制通風式のラディエーションシールドが使えれば理想的であるが、野外で電源の確保が難しい場合には、自然通風に頼らざるを得ない。また、気温のセンサとして上記のサーミスタセンサを使用することを考えると、市販のラディエーションシールドは必要以上に大型であり、かなり強固な取り付けが必要になる。そこで、小型の自然通風型ラディエーションシールドの製作を試みた。

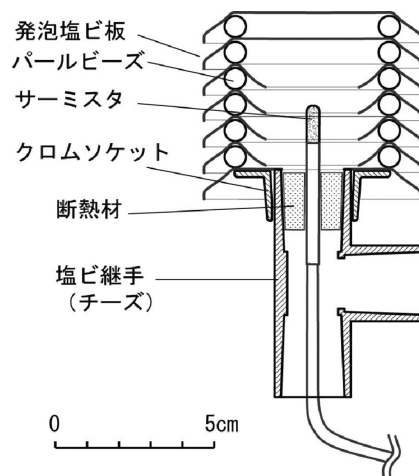
ラディエーションシールドの形状については、細野ほか(1988)がいくつかの形状について、その特性を計測している。それらと市販のラディエーションシールドの形状を参考にしながら自作可能な形状を考えた。第9図に今回製作したラディエーションシールドの概略を示す。

本体の材料は1mm厚の白色発泡塩ビ板である。発泡塩ビ板は熱伝導率が小さく、日射による加熱や夜間の放射冷却の影響を抑制することができる。また、百数十°Cに熱するとかなりやわらかくなるため、加工しやすいという点でも適している。これをビールの空き缶の底を使って成型し、直径7mmのビーズをスペー

サーにして重ねて接着する。スペーサーの直径は、このシールドを横から見て、中のセンサが見えない範囲で、通気性を損なわないようになるべく大きなものを選定した。このラディエーションシールドを水道管用の塩ビパイプの継手に通したセンサにかぶせるため、



第8図 赤外線センサによる観測例。縦軸はセンサが出力する“温度差”(ΔT)で地上気温から“空の温度”を差し引いた温度である。観測期間は2005年10月。測定値は1秒サンプリングした値を1分平均してある。上段の天気マークは京都地方気象台による。



第9図 ラディエーションシールド構造図。温度センサは第3節のサーミスタセンサで、サーミスタの先端部のハッチをかけた部分は、アルミテープを貼ってある。このセンサの根元を断熱材で挟んで塩ビ継手に挿入し固定する。

本体下部に金属のソケットを接着した。さらに、内部の明るさを極力抑えるため、発泡塩ビ板の内側に黒色塗装を施す工夫を加えた。

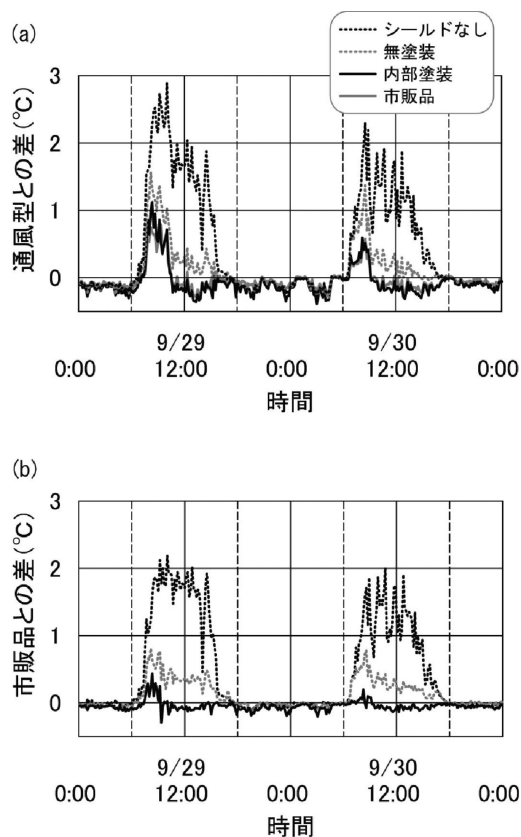
ラディエーションシールド内に取り付ける温度センサは前述のサーミスタセンサを使用し、サーミスタ先端部から10 mm ほどにフィルムの幅でアルミテープを貼った。これは、大気との間の熱抵抗を下げるためと、可視光および赤外線の吸収による温度上昇を防ぐためである。前述のように、このサーミスタセンサ回路では、自己発熱を抑えるために印加電圧を下けているが、それでも静止大気は熱伝導率が小さいために、そのままでは0.1°Cほどの温度上昇をもたらす。また、サーミスタの感温部につながるリード線部分は比較的热伝導率の小さい42アロイであるが、リード線の先端の温度がセンサ部より1°C高くなると0.05 mW 程度の熱流量が生じ、計算上0.1°C弱の温度上昇をもたらす。これらの影響はセンサ先端部にアルミテープを貼り放熱面積を広くすることで半分程度に下げることができる。さらに、静止大気中ではセンサの反射率が低いと直射日光が当たらなくても、可視光や赤外線を吸収してセンサの温度が上がってしまう。アルミは可視光から赤外線まで高い反射率を持つので、このテープでセンサ部を覆うことで、この影響を低減できる。

製作したラディエーションシールドの特性を調べるため、別途製作した強制通風型のシールドとの比較実験を行った。結果を第10図に示す。ここで使用した強制通風型シールドは、アルミで覆われた厚さ3 cm の断熱材の筒で、開口部には放射遮蔽板が置かれている。断熱材の筒の中では常に5 m/s 以上の通風が確保される。測定場所は4階建ての校舎の屋上で、日中日射を遮るものはない。第10図には、シールド内部を黒く塗装したものや無塗装のものに加えて、市販の自然通風型シールド (UNIDATA model 6501-D/TGH 直径12.5 cm, 高さ19 cm) とシールドなしのセンサを直接露出させた結果も示してある。センサは強制通風型を含めてすべて上記のサーミスタセンサにアルミテープを貼ったものである。

第10図 a は強制通風型との差をとったもので、シールドのあるなしにかかわらず、午前中に温度差が大きく現われている。市販のシールドと内部を黒色塗装したシールドはほとんど同じ値を示していることがわかる。自然通風同士の差を見るために、市販の自然通風型との差をとったものが第10図 b である。図 b では午前と午後の差はかなり小さくなり、日中を通し

てシールドなしのセンサは1〜2°C、無塗装シールド内のセンサは0.5°C程度高めの値を示すことがわかる。この図は2日間のデータであるが、これは晴れた日の典型的な傾向である。

屋外に露出したような明るい環境でのセンサの温度は、後述の黒球温度計に近い挙動を示し、気温との差が放射と風速に依存した値となる。センサの大きさや反射率、形状の違いを考慮すると、この気温との差は直径4 cm の黒球と気温との差の1/5程度となると考えられる。直射日光を受けたこの黒球と気温の温度差は日中5〜10°C程度で、風速に対する依存性は



第10図 ラディエーションシールドの特性テスト結果。(a) 通風型シールド内の温度センサと各シールド内のセンサとの差。市販品と内部塗装のシールドはほとんど重なっている。(b) 市販品のシールド内のセンサと各シールド内のセンサとの差。測定期間は2005年の9月29日から30日で期間中は晴、風速は1〜3 m/s程度である。サンプリング周期は1秒で、10分の平均を施した。

1/2 乗と比較的弱いことを考慮すると、晴れた日中ではシールドなしのセンサは気温より $1 - 2^{\circ}\text{C}$ 程度高い温度を示すことが期待される。第10図bを見ると、シールドなしのセンサが、日中ほぼこの期待値に近い値を示しており、これがシールド外の短波放射の影響の強さを示しているものと思われる。ラディエーションシールドは、この影響を小さくすることが第一の目的である。

第10図bから無塗装のシールドは日中に 0.5°C 程度、日射の影響を受けていることがわかる。市販のシールドに対して、このシールドは直径が小さく、内部のルーバー折り返し部分が短いために、外側のルーバーで反射された散乱光が入りやすい構造をしている。前述の日射センサをシールド内部に入れて内部の明るさを測定してみると、シールドの内部は直射日光下のおおむね 1/10 程度の明るさであった。直射日光下でもシールド内部の光は散乱光となり、シート状のセンサの両側から光が当たることを考慮すると、無塗装シールド内のセンサはシールドなしのセンサの 1/5 程度の短波放射を受けていると考えられる。これは、第10図bの結果をほぼ説明する。

同様に内部を黒色塗装したシールドと市販のシールド内の明るさを測定すると、無塗装のシールドに対して黒色塗装のシールドは 1/10、市販のシールドは 1/3 程度であった。無塗装のシールドが日射の影響で 0.5°C 程度温度が上がることを考えると、単純計算では日射の影響はそれぞれ 0.05°C 、 0.15°C となる。このようなことから、内部を黒色塗装したシールドでは、太陽の短波放射の直接的な影響は十分に抑えられていると考えられる。

シールド内部を黒色塗装すると、内部の温度が上がってしまうことが懸念されるが、第10図bはそのような温度上昇がほとんどないことを示している。実際、外側も含めてラディエーションシールド全体を黒色塗装しても、温度上昇はその影響が最も大きい午前中で 3°C 程度であり、シールド内部に侵入した放射エネルギーを吸収するだけなら、それほど大きな影響がないと思われる。

午前中に強制通風型のシールドと比較的大きな差を示す理由としては、午前中の風が弱いことなども考えられるが、これらの差と風速との相関は必ずしも良くなく、また、シールドのあるなしにかかわらず、このような傾向が認められることから、単純な放射の影響だけではないのではないかと思われる。

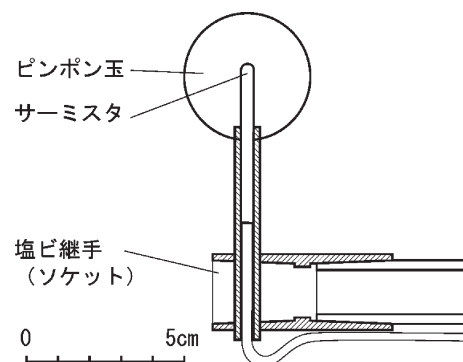
7. 黒球温度計

前述のラディエーションシールドが放射の影響を極力避ける目的で作られているのに対し、この放射の影響まで積極的に測定するものが黒球温度計である。都市環境における体感温度は純粋な気温だけでなく、放射の強さに大きく依存する。これまで気象学的な観測では黒球温度計はあまり注目されていなかったが、都市環境を議論する上では、放射に関する観測も重要になる。

熱中症対策などには、湿度や放射の影響を考慮した WBGT 値が用いられ、この算出には伝統的なベルノン式黒球温度計が用いられる (木内 2001)。しかしながら、このベルノン式黒球温度計は直径 15 cm の中空銅球の中に棒温度計を挿入したもので重量もあるため、これをそのまま野外で使うことは難しい。そこで、野外に設置しやすい小型軽量の黒球温度計を試作した。

黒球としては、第11図のように直径 4 cm のピンポン玉を黒色耐熱塗料で塗装したものを用い、その中に前述のサーミスタセンサを挿入した。黒色塗料の反射率は、遮熱塗料などの特殊なものを除き、可視光域から熱赤外までかなり広い波長範囲で低いものが多いようで、どの塗料を使ってもほとんど結果は変わらない。その中でも黒色耐熱塗料は熱赤外に対して物体表面を黒体に近づけるためにも使われており、熱赤外域での放射率は 0.95 (反射率 0.05) 程度であるとされているので、この塗料を採用した。

ベルノン式の黒球とピンポン玉黒球を比べると、その大きさが異なるために、出力される温度が異なる。室内実験の結果 (Yuge 1960) では、一定の熱量を与えて加熱した球を一樣な強制風で冷却する場合、気温



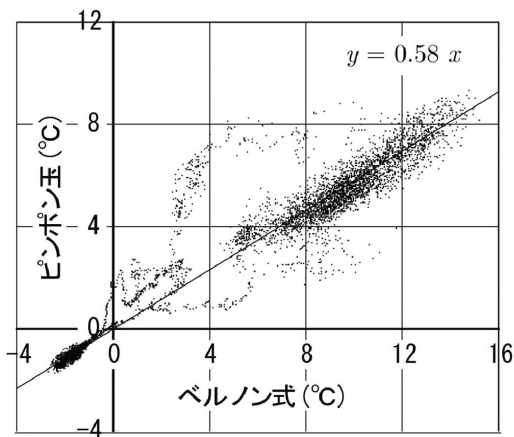
第11図 ピンポン玉黒球温度計の構造図。

と黒球温度との差は直径の0.43乗に比例する。これに対して自然対流による冷却では大きさの0.25乗に比例し、放射冷却では大きさによらない。

実際に屋外で観測してベルノン式とピンポン玉式を比較した結果が第12図である。この図は1日分のデータで、ピンポン玉式、ベルノン式ともに黒球温度と気温の差を表示してある。これを見ると、ピンポン玉式とベルノン式で値は異なるが、ほぼ比例関係にある事がわかる。1日の中で風速は大きく変わるが、その風速にかかわり無く、この比例関係が成り立っている。比例関係から大きくずれる部分は、朝と夕方の気温変化の激しい時であるが、これはベルノン式黒球の熱容量が大きく時定数が10分以上と長いため、変化に追従できていないためである。この時間帯を除けば、ベルノン式黒球とピンポン玉黒球の相関は高く、大気温度を T_a 、ベルノン式黒球温度を T_g 、ピンポン玉式黒球温度を T_p としたとき、以下の関係が成り立つ。

$$T_p - T_a = 0.58(T_g - T_a) \quad (3)$$

この式の係数0.58は、ベルノン式の黒球とピンポン玉の直径の比率(4/15)の0.43乗(0.57)にほぼ等しく、Yuge(1960)の風による冷却の実験式がほぼ成り立っていることを示している。すなわち、風の弱い夜間を含めて、実際の大气中では放射で吸収した熱を実質的に風で放散していると考えてよい。また、こ



第12図 黒球と気温の温度差。横軸はベルノン式黒球と気温の差、縦軸はピンポン玉黒球と気温の差である。測定期間は2005年4月27日から28日。1/4秒サンプリングで16個平均値を示す。近似直線の傾きは0.58である。

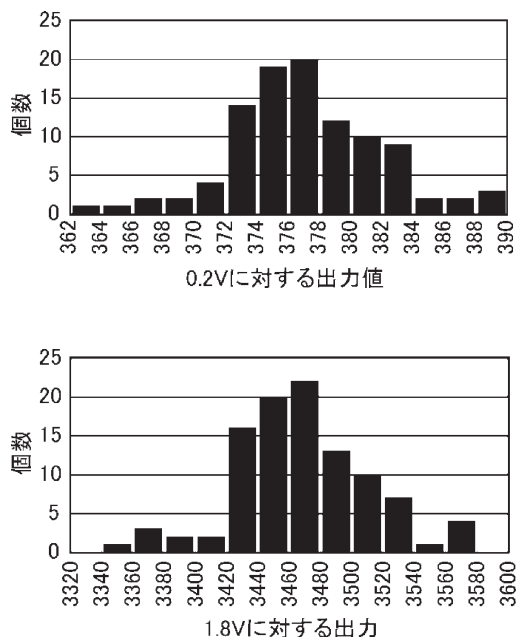
の関係を使えば黒球の値をベルノン式に換算することも容易なので、気温、湿度と同時にピンポン玉黒球温度を計測すれば WBGT の算出も可能である。

8. データロガー

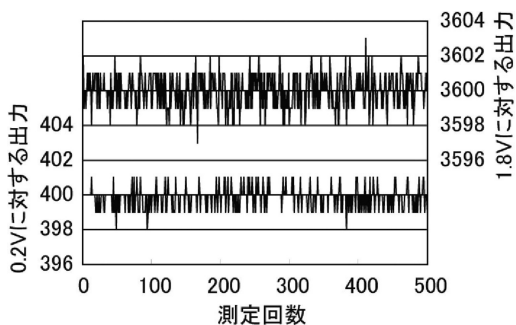
データロガーは、様々なものが市販されているが、単純で安価なものは接続できるセンサに限られており、高機能のものは高価な上に設定が複雑である。このような高機能のロガーは、入力にアンプを内蔵しており入力レンジが μV から V 単位まで設定可能で、白金測温体などの特定のセンサ用の回路まで内蔵している場合が多い。気象観測用のロガーがこのような構成になっている理由は気象観測の歴史的な事情が反映されているものと思われるが、現在の半導体部品を前提に考えれば、アンプやセンサ固有の回路は前述の温度センサや赤外線センサのようにセンサ側に内蔵し、ロガーは単純な電圧ロガーとするほうが、はるかに単純で利点が多い。特に、放射計の出力のように微弱な信号を記録する場合には、センサ側で増幅して信号を送ることでノイズ対策が非常に楽になる。そこで、単純な電圧ロガーでありながら、センサ側が何らかの電源を必要とすることを前提にデータロガーを設計した。

データロガーの回路図を第13図に示す。CPUとして12 bit AD変換機能がついた PIC16C773、メモリとして1 Mbit (128 KB) のEEPROMを採用し、さらに気象観測用としては不可欠な時刻を記録するために、クロックモジュールを搭載した。AD変換のチャンネル数は、CPUの規格から6チャンネルである。この記憶容量(128 KB)で2チャンネルのデータを1分ごとに約15日間、6チャンネルで約7日間記録できる。

この回路を作製して、そのAD変換の精度を調べた結果を第14図に示す。このPIC16C773はいくつかの測定レンジを持つが、0-2.048 Vレンジを使った場合、分解能は0.5 mVとなる。本来、0.2 Vと1.8 Vに対して、それぞれ400と3600の値が出力されるはずであるが、平均値は明らかに数%小さく、個々のばらつきも $\pm 2\%$ 程度ある。つまり、このCPUのAD変換回路は12 bitの分解能を持つが、絶対的な精度は8 bit以下であることがわかる。ただし、これらの誤差はCPU個体に固有であり、時間的にはほとんど変化しない。また、ここでは示していないが直線性も悪くはなく1 Vでの出力値は0.2 Vと1.8 Vでの出力値



第14図 AD変換の誤差。補正を施さない100個のロガーに0.2V(上図)と1.8V(下図)を入力したときの出力値のヒストグラム。設計上はそれぞれ400と3600の値が出力されるはずであるが、その値を出力しているものは一つもない。

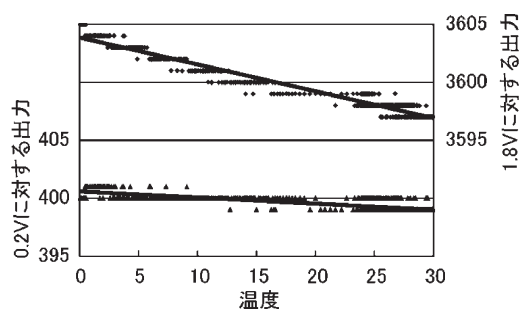


第15図 AD変換ノイズ。ロガーのAD変換誤差を補正した後、0.2Vと1.8Vの直流電圧を入力したときのサンプリング誤差。サンプリング周期は1秒で横軸はその回数(時間)。

で重量は約50gであり、アルカリ単三電池6本で2週間以上動作する。

9. 設置方法

都市部での観測機器設置場所として比較的よく使わ



第16図 AD変換の温度依存性。ロガーの温度を0°Cから30°Cまで変化させたときの、0.2Vと1.8Vに対する出力値の変化。ロガーのAD変換誤差を補正し、測定時に16個平均を施してある。

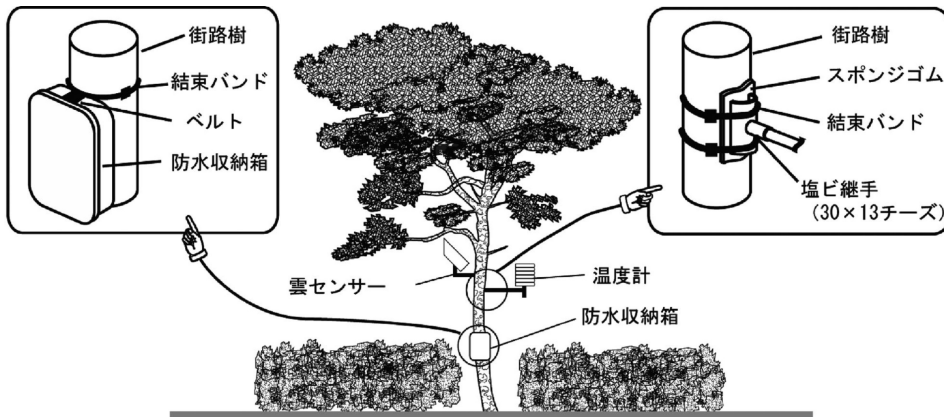
れるのが小学校の百葉箱である(久田ほか 2004)。これは比較的均等に高密度で都市部に分布しているという点では好都合であるが、最近では百葉箱自体が設置されなくなっている上に、使用に際しては各点ごとに管理責任者が異なるので、実際に多数の観測点を展開するのはかなり困難である。また、上記のような黒球温度計や放射温度計などを設置することを考えると、百葉箱は必ずしも使いやすいものではない。

次に考えられる候補としては電柱である。しかし、電柱の高さ1.5m付近に突起物を設置することは、道路法で禁じられている。歩道上で高さ2.5m以上または車道上4.5m以上であれば、法律上は可能であるが、かなり大掛かりな工事になってしまう。

これに対して、道路の植樹帯は比較的制約が少ない。季節によって剪定作業や除草作業などがあるため、常設することは難しいが、短期の観測ならば大きな道路沿いにあるため、設置回収の作業もしやすい。それでも、転倒防止などの安全対策は厳しく求められるため、自立型ではなく、植樹帯の中の街路樹にすべての装置を取り付けることにした。

街路樹に計測システムを取り付けた例を第17図に示す。センサなどを支持するアーム部分は、すべて水道管用の塩ビパイプである。水道管用の塩ビパイプは、いろいろな部品が系統的に揃っているので、必要に応じて様々な形状のアームを作ることができる。さらに、継手部分は強く押し込むだけでかなりの強度があり、多くの場合接着する必要もないため、角度調整や分解収納も容易である。

アームを街路樹に取り付ける部分は、塩ビ異径チー



第17図 観測システム設置例。日射センサに関しては、目的に応じて適当な水平面に両面テープで取り付ける。

ズ（太いパイプから、細いパイプを枝別れさせるための T 型の継手）の太い部分を縦に半分に切断して、その切断面に発泡ゴムをあてがって街路樹に結束バンドで固定した。

データロガーや電池を収納する防水箱としては、食品用の弁当箱を利用した。街路樹への取り付けは、設置した状態で蓋が開かなければならないので、弁当箱にベルトを接着し、それに結束バンドを通して固定した。収納箱にはセンサーケーブルを通す穴が必要であるが、野外の樹木に穴の開いた箱を設置すると必ず虫が入ってくる。ナメクジなどが入ってくると、回路をショートさせてしまうため、センサーケーブルを通した後に、発泡ポリエチレンの詰め物で穴をふさいだ上で、収納箱に防虫剤を入れておく。また、食品ケースの蓋は中が見えるように透明であることが多いが、直射日光が当たって内部が高温になることと、紫外線による内部部品の劣化を避けるため、蓋の表面はアルミテープを貼った。

このようにして、これまでに京都市内で延べ200箇所以上で2～3週間の測定を行ったが、特に強度不足によるトラブルは発生していない。この設置方法は非常に簡便であり、1箇所あたり10分程度で設置回収が可能である。

10. まとめ

都市観測用の気象観測システムを市販の入手しやすい部品を使って製作し、その精度や特性を調べ、実際の観測での使いやすさを確かめた。

温度センサに関しては、市販の汎用性の高いサーミスタを使っても、比較的簡単な調整さえしっかり行えば0～30℃の範囲で、相対的な誤差±0.1℃以内に抑えることが出来ることがわかった。

また、日射センサと赤外線センサに関しても、入手しやすい市販の部品で製作しても日射センサで約20 W/m²、赤外線センサで数 W/m²程度の精度で測定できることがわかった。

ラディエーションシールドに関しては、内部を黒色塗装すれば、小さなシールドでも市販のシールドとほぼ同じ性能を有することが示された。ただし、市販のシールドを含め自然通風のシールドと強制通風のシールドでは午前中1℃程度の差が出ることもある。この原因は特定できていないが、日射の直接的影響以外の要因も考慮する必要があると思われる。

黒球温度計については、ピンポン玉を利用した小型黒球を製作し、現在広く利用されているベルノン式黒球との特性比較を行った。黒球の温度は、大きさに依存するため、ベルノン式とピンポン玉では黒球の温度自体は異なるが、一定の関係式が成り立つため、ピンポン玉式の黒球の温度をベルノン式に換算することが可能である。

観測機の設置方法については、道路の植樹帯の街路樹に機器を設置する方法を試みた。この方法は法律的な制約も少ないため設置許可が得やすく、設置回収作業も容易である。

全体として、このシステムは既存のシステムと比べても遜色のない精度を有しながら、極めて安価に

製作可能である。すべてのセンサ、ロガーから防水ケースなどまで含めて、部品代ベースでは1万円程度で製作できる。これは、市販のシステムと同じ費用で非常に多くの観測点が設置できることを意味する。

このシステムは小型軽量であるために、既存のシステムに比べて設置回収が非常に簡単であり、労力の点でもより多数の観測点設置が可能である。さらに、街路樹以外に設置する場合でも、必要に応じて支持機構を簡単に製作できるため、設置場所の自由度は極めて高い。また、センサ側に増幅回路などを組み込んで、同じ記録レンジですべてのセンサの記録をとる構造にしたために、ノイズ対策を含めてロガーの設定が非常に簡単である。

都市の気候は、様々な要因が絡んで極めて複雑である。これに対していかに計算機が高速になっても、数値計算はあくまで近似モデルに基づく計算であり、必ず観測の裏づけを必要とする。計算機のさらなる高速化に伴って詳細な数値計算が可能になってくれば、当然ながらより高密度で詳細な観測データを必要とする。そのために、本システムのように機動性の高い観測システムの必要性は、今後さらに高まるはずである。

謝 辞

データロガーの作製にあたり、京都大学工学部坂上篤史、増渕 寛両氏にご協力いただきました。また、ラディエーションシールドの改良にあたり同理学部服部泰祐、田村隆哉両氏にご協力いただきました。日射計および赤外線放射計の較正に際しては、京大防災研の石川裕彦氏および堀口光章氏に観測機材、およびデータを提供していただきました。また、赤外放射の基本的知識は岡山大学の塚本 修氏に御教授いただきました。さらに、多くのご意見やご指摘をいただきました査読者の方々、粘り強く多くの助言をいただきました編集委員の方に感謝します。

参 考 文 献

- 安藤友二, 2002: 太陽電池の動作原理とソーラー・カーへの応用例, トランジスタ技術, **39** (11), 207-216.
 Dines, W. H. and L. H. G. Dines, 1927: Monthly mean values of radiation from various parts of the sky at Benson, Oxfordshire. Mem. Roy. Meteor. Soc., **2**, 1-8.
 浜田 崇, 三上岳彦, 1994: 都市内緑地のクールアイラン

ド現象. 地理学評論, **67A**, 518-529.

- 久田由紀子, 松永信博, 安藤 聡, 2004: 福岡市圏に形成されるヒートアイランド構造と天気による相異. 日本気象学会2004年度春季大会講演予稿集, P355.
 細野達夫, 廣部明泰, 青木正敏, 1988: 気温測定における放射除け・通風筒の種類及び形状と測定誤差. 農業気象, **44**, 215-218.
 木内 豪, 2001: 屋外空間における温冷感指標に関する研究, 天気, **48**, 661-671.
 気象庁, 1998: 気象観測の手引き. 84 pp.
 近藤純正編著, 1994: 水環境の気象学. 朝倉書店, 350 pp.
 Sakai, S., A. Ito, K. Umetani, I. Iizawa and M. Onishi, 2009: A practical pyrgeometer using the representative angle. J. Atmos. Oceanic Technol., **26**, 647-655.
 神原保志, 北原祐一, 2003: 日本の諸都市における人口とヒートアイランド強度の関係. 天気, **50**, 625-633.
 神原保志, 森田昭範, 2002: 長野県白馬村におけるヒートアイランドの日変化・季節変化. 天気, **49**, 901-911.
 神原保志, 三枝あかね, 2002: 晴天日と曇天日のヒートアイランド強度の違いと夜間ヒートアイランドの成因. 天気, **49**, 533-540.
 鈴木宣直, 1996: 気象測器—地上気象観測編—. 気象研究ノート, (185), 155 pp.
 武市伸幸, 2002: 高知県南国市のヒートアイランドと形成要因. 天気, **49**, 47-56.
 梅谷和弘, 酒井 敏, 2007: 局地気象観測のための微気圧計の開発. 天気, **54**, 215-224.
 Yuge, T., 1960: Experiments on heat transfer from spheres including combined natural and forced convection. Trans. ASME, J. Heat Transfer, **C82**, 214-220.

付 録

代表的な大気からの下向き放射 $F_v \downarrow$ と地表面からの赤外線放射のスペクトルを第A1図に示す。地表面は黒体に近いと考えられるので、赤外線放射の波長分布はほぼプランク分布 $B(T_c)$ となる。ここで、 T_c は地表面温度である。これに対して、大気からの放射はプランク分布とは大きく異なる。これらの放射量全体はそれぞれ数百 W/m^2 あり、時間的に100-200 W/m^2 程度の変動をする。しかし、地表での熱収支を考える際に重要なのは、それらの差であり、その値は0-100 W/m^2 程度と放射量そのものに比べてかなり小さく、変動量も比較的小さい。そのため、通常はこれらの差

$$\Delta F_{net} \equiv \int F_v \downarrow d\nu - \sigma T_c^4 \quad (A1)$$

をとって正味の放射収支を考えることになる。ところが、このように差をとってしまふと、放射収支の中で大気の状態に起因する部分と、地表面の状態に起因する部分の区別がつかなくなってしまう。そこで、放射収支の中を要因別に二つに分けることを考えてみる。第A1図をもう一度よく見ると、大気からの放射はプランク分布から大気の窓領域で大きくずれているものの、それ以外の領域では地上気温 T_A に対応するプランク分布 $B(T_A)$ にほぼ一致していることがわかる。すなわち、大気からの放射の中で、地表付近の大気からの放射が多くの部分を占めており、その放射強度を決める「地上気温」と、 $B(T_A)$ からの差を生む「大気の窓領域での透過率」が大気放射を決める大きな要因であることがわかる。

このことを念頭に式 (A1) を、

$$\Delta F_{net} \equiv \Delta F_A - \Delta F_G \quad (A2)$$

ただし、

$$\Delta F_A \equiv \int F_v \downarrow dv - \sigma T_A^4 \quad (A3)$$

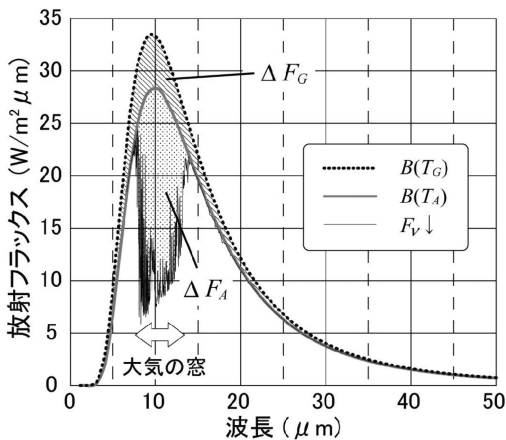
$$\Delta F_G \equiv \sigma T_G^4 - \sigma T_A^4 \quad (A4)$$

と書き直す。ここで ΔF_A 、 ΔF_G をそれぞれ大気放射隔

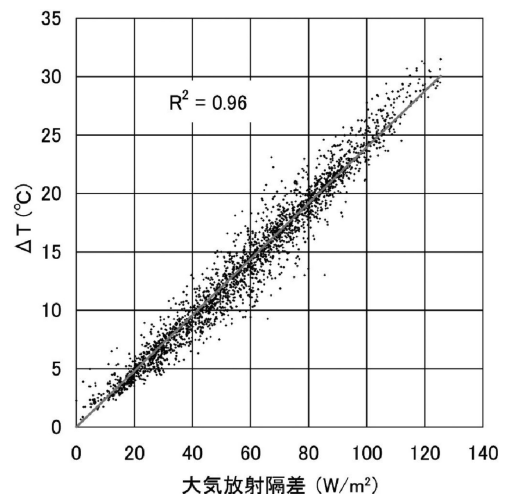
差、地表放射隔差と呼ぶことにする。式 (A1) と式 (A2) の違いは、右辺の二つの項の基準温度を絶対0度とするか、地上気温 T_A とするかという点である。

大気放射隔差は、基本的に大気の窓領域での透過率と気温の鉛直構造に依存し、晴天時には大きな負の値をとり、雲や霧が出現して大気の透過率が下がると0に近くなる。一方、地表放射隔差は地表面温度と気温との差によるもので、この温度差は地表面と大気間の熱流量と、これらの間の熱伝達係数の比で決まる。また、大気放射隔差は大気の状態に依存する量なので、数mはなれたところでの測定値が大きく異なるということはないが、地表放射隔差は直下の地表面の状態に大きく依存するため、数mの空間距離でも大きく変わり得る。このように、これら二つの放射隔差は基本的に独立な要素で決まり、空間代表性も大きく異なっているので、放射収支の中でこの二つを区別して考えることには大きな意味がある。

本論の赤外線センサは筐体温度がほぼ気温に等しいので、この大気放射隔差に比例した値（符号は逆）を出力する。大気放射隔差は大気が澄んでいるほど大きな負の値となるので、このセンサの出力も「天気」をよく反映したものになる。ただし、この赤外線センサは黒体炉を使って温度計として較正しているので出力は“温度差”である。



第A1図 大気放射の波長分布。細い実線はMODTRANによる中緯度の夏の大气からの下向き放射 $F_v \downarrow$ 、灰線は地上気温に対応するプランク分布 $[B(T_A)]$ ； $T_A = 294.2 \text{ K}$ 、点線はより温度の高い地表に対するプランク分布 $[B(T_G)]$ ； $T_G = 304.2 \text{ K}$ 。ドットのハッチの面積が $-\Delta F_A$ を、斜線ハッチの面積が ΔF_G を表す。



第A2図 赤外線センサの出力と大気放射隔差。横軸は大気放射隔差 ($-\Delta F_A$) で、Kipp & Zonen CG3 による測定値である。期間は2007年4月から7月までで、1秒サンプリングした値の1時間平均値を示す。

この“温度差”から大気放射隔差に変換する関数を求めるため、5 から50 μm の波長範囲で比較的フラットな感度を持つ赤外線放射計 (Kipp & Zonen CG3) の計測と気温から求めた結果を比較したものが第A2図である。この図から、これらがよい比例関係にあることがわかる。このセンサの出力から大気放射隔差を線形近似で求めた場合の、誤差の標準偏差は約 5.7 W/m²である。

ただし、第A2図で示される“温度差”と大気放射隔差の関係は、大気の放射特性がプランク分布から大きく外れているうえ、センサの波長特性が一様ではないため簡単ではない。このため、大気放射隔差をより正確に測定するためには、黒体炉を使った較正に加えて、センサの波長特性から求めた補正を行うことが重要である (Sakai *et al.* 2009)。

Development of Observational System for Urban Thermal Environment

Satoshi SAKAI*, Kazuhiro UMETANI*, Isao IIZAWA*, Aya ITO*,
Kousaku ONO*, Arata YAJIMA**, Naoki AMEMURA*
and Shuji MORINAGA***

* Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto University.

** Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University.

*** Faculty of Science, Kyoto University.

(Received 31 May 2006 ; Accepted 6 February 2009)
