

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22540450

研究課題名（和文） 都市上空の気温鉛直分布観測による都市冷却プロセスの解明

研究課題名（英文） The elucidation of the city cooling process by the observation of vertical profile of the temperature over a city.

研究代表者

酒井 敏 (SAKAI SATOSHI)

京都大学大学院 人間・環境学研究科・教授

研究者番号：30144299

研究成果の概要（和文）：

本研究により京都市上空では、午後最高気温を記録してから、日没にかけて、地表付近の大气から冷えるのではなく、まず境界層全体の温度が低下し、その後、境界層上部は冷却が停止して徐々に成層構造を作っていくプロセスが明らかになった。これは、大気自身が放射で冷却されていることを示している。この原因として、大気全層のバランスに強く効く波長帯と、境界層のバランスに効く赤外線波長帯が異なることによるものと思われる。

研究成果の概要（英文）：

This study revealed that the temperature of the whole boundary layer falls first, after that, cooling stops and the boundary layer upper part makes stratification gradually after recording the maximum temperature in the afternoon to the sunset at kyoto city. This shows that the atmosphere itself is cooled by radiation. It seems that it is because the wavelength range which is strongly effective to the balance of all the air layers as this cause differs from the wavelength range of the infrared rays which are effective against the balance of a boundary layer.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	1,100,000	330,000	1,430,000
23年度	1,200,000	360,000	1,560,000
24年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：都市気象 ヒートアイランド 気温観測 観測機器 冷却プロセス

1. 研究開始当初の背景

近年、ヒートアイランドなど都市サイズの気象現象が社会問題化し、ニュース番組などでも頻繁に取り上げられるようになってきた。しかし、その実態を把握するための観測

データは驚くほど少ないのが実情で、主観的な報道が先行しているのが現状である。特に、都市上空の情報は完全に欠落しており、詳細なメカニズムを考える上で大きな障害となっている。このような都市気象の研究は、数

値モデルをつかったものが主流となっているが、申請者の数年間の観測、および実験により、モデルでは再現できない現象が現実起こっていることが明らかになっている。

ヒートアイランドをはじめとする都市気象の力学的研究は1970年代前後に盛んに行われ、メカニズムに関する基礎的研究はそれ以降下火になっている。現在は、当時の知識に基づいた応用および対策が中心である。しかしながら、1970年代にすべてが明らかになった訳ではなく、さまざまな制約から認識されてこなかった問題も多い。当時と現在では、使える観測機器の質、量ともに格段の差があり、当時の観測は現在の目で見れば極めて粗いものでしかない。現在、都市気象の研究でよく使われる数値モデルの基礎となっている観測、理論に関する知識は、このような「過去の時代」のものであり、このような数値モデルに全面的に依存した研究は極めて危険と言わざるを得ない。都市気象に関する知識は、現在の観測、実験及び理論的バックグラウンドの上に、再構築することが不可欠であり、そのためには、これまでの観測とは異なる方法で現実の大気を観測する必要がある。本研究では、上空の観測のための新型繫留気球や、近隣の山の斜面での観測などからヒートアイランド現象の実態、特に都市の冷却プロセスの解明を目指す。

2. 研究の目的

これまで、比較的身近であるがゆえに、「わかっている」と思われがちで、大気境界層の冷却プロセスを、さまざまな手法を用いて検証しなおすことを目的とする。これまでの教科書的な知識は、数十年前の観測結果などに基づいて記述されている例が多く、近年の知識と必ずしも整合性が完全にとれているわけではない。それでも、多くの研究はこの教科書の知識を前提に行われおり、このような基本的知識を現代の観測、解析によって再評価することは極めて重要である。

特に、これまでの教科書的な記述から、大気境界層内の温度変化に関するプロセスに、放射はあまり効かないという印象が強く、これまで境界層内の気温変化を考えると、放射はあまり重要視されてこなかった。しかし、実際に都市周辺の様々な場所で観測を行ってみると、放射プロセスを考えないと説明のつかない現象が多く見つかる。これらのことから、旧来の教科書的な知識を再検証する必要があることは明らかである。

また、大気境界層は我々の生活に密着した領域であり、大気のような部分のメカニズム解明は、社会に対する影響が極めて大きい。したがって、このメカニズム解明を通して、現代社会の問題解決の糸口を見つめることが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、大気の高高度ごとに、異なる手法で気温の測定を行い、大気全層の温度変化の様子を詳細に明らかにした。

地上高3m程度までの気温測定には、地上に立てたポールにサーミスタ温度計を多数設置し、高温になる地表面温度の影響を調べた。地上30cm以上の高さでは、日射を遮るためにすべてのセンサーにラディエーションシールドを使用した。10cm以下の高さではラディエーションシールドが使用できないので、この部分は相対的な温度分布のみを使用した。地表面温度は放射温度計を用いている。

100m程度の上空までの気温の測定には、繫留気球を使い、都市直上の気温測定を行った。当初は連続的に繫留を行う予定であったが、気温の変化で気球内部の圧力が変化し、気球の形状を一定に保つことが難しいので、時間帯を区切った観測となった。

さらに850mまでの高度の気温測定は、比叡山山麓に温度計を設置し、各高度の気温測定を行った。比叡山での測定では、山の斜面の影響を避けるため、極力尾根線沿いに温度計を設置している。山を使った気温の鉛直分布の測定では、測定点直下の地表面（山表面）の影響が避けられないが、地上3m程度までの気温の多点観測の結果から、1°Cを超える地表面からの影響は、地表面から数cm以内に限られ、通常地上高1.5mでの気温測定に対する影響は極めて小さいことを確認している。

また、放射伝達モデルMODTRANを使って、大気境界層内の放射伝達特性を調べるとともに、簡単な理論計算により、高度1kmまでの大気境界層に対する放射の影響を評価した。これまで大気放射を考えるとときには、平衡状態を求めることが主眼になっていたが、大気境界層では、日変化が大きく、この変化に対する特性が重要となるため、放射伝達の過渡特性に焦点を合わせた解析を行った。

4. 研究成果

本研究により京都市上空では、午後最高気温を記録してから、日没にかけて、地表付近の大気から冷えるのではなく、まず境界層全体の温度が低下し、その後、境界層上部は冷却が停止して徐々に成層構造を作っていくプロセスが明らかになった。これは、これまでの一般的な考え方とまったく異なっている。これまでは、地表面が冷えることにより、その直上の大気が冷却され、それが徐々に拡散することで、夜間の安定成層構造を作るとされていた。しかし、我々の観測では、午後最高気温を記録した後、大気全層が同じ温位を保ったまま温度が低下する。この時点で

はすべての大気層が良く攪半されていることを示している。その後、高度の高い測定点の温度低下が止まり、次第に高度の低い測定点もそれに続くようになる。この状態は翌朝に下層の気温が上がって対流が起り、大気全体が攪半されるようになるまで続く。(図1参照) これは、大気冷却時に境界層上部から成層構造が形成されて徐々に下に降りてくることを示しており、大気下部から冷却されて成層構造が発達すると考えるこれまでの考え方と全く異なっている。これは、大気自身が放射で冷却されていないと起こりえない。

一般的に、大気全層の放射平衡を考えた時に、大気の冷却率は $2^{\circ}\text{C}/\text{日}$ 程度で、時定数は約1ヶ月程度であると考えられてきたが、観測された大気境界層内の冷却率は一桁大きく、時定数は1桁小さい。この原因として、大気全層のバランスに強く効く波長帯と、境界層のバランスに効く赤外線波長帯が異なることが考えられる。放射平衡を考える時には、大気全層を光学的厚さ約1であると考

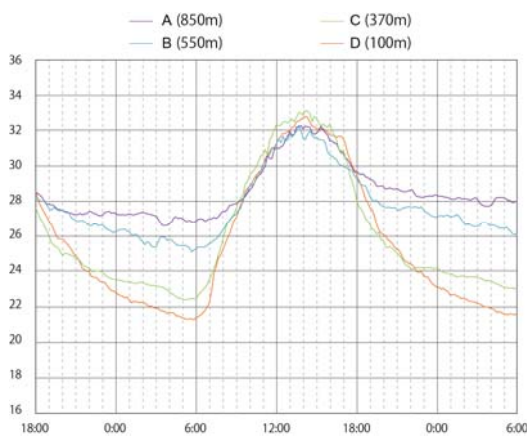


図1 比叡山観測の2010年9月の結果

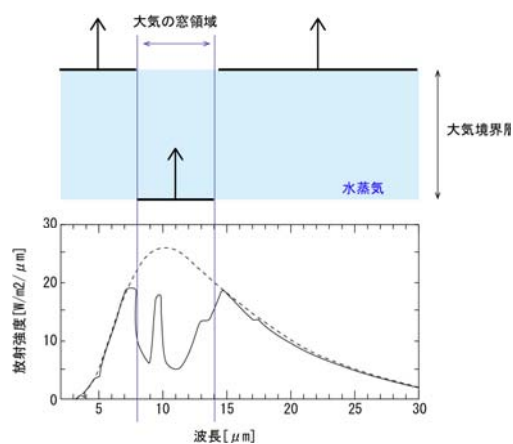


図2 大気自身が放射冷却するイメージ図。

えて大気を扱うため、これをそのまま境界層に適用すると、光学的厚さが約0.1ということになる。しかし、実際には境界層内では水蒸気の吸収帯などでの光学的厚さはかなり厚く、この波長帯での熱収支が境界層の気温変化に大きく効いているものと思われる。これを模式的に描くと、赤外線の透過率の高い大気の窓領域では、地表面が直接放射冷却によって冷却されるのに対し、その他の波長領域では、境界層の上部または全層から冷却されていることになる(図2)。

さらに、都市部では日中に地表面が極めて高温になってしまうことが、大気の温度構造に大きく影響するが、この原因が都市部では地表面のサイズが大きく、このスケール効果によって、郊外に比べて表面温度が高くなるということが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計13件)

- ① 2010年7月18日 日本ヒートアイランド学会 都市気象観測のための新型係留気球の開発と設計 中村美紀、小野耕作、酒井敏
- ② 2010年10月27日 日本気象学会 異なる地表環境における鉛直気温プロファイル 増田仙一、酒井敏、中村美紀、飯澤功
- ③ 2010年12月13日 AGU A New Type of Captive Balloon for Vertical Meteorological Observation in Urban Area Miki Nakamura, Satoshi Sakai, Kousaku Ono
- ④ 2011年5月18日 日本気象学会 大気は地面から冷えない 中村美紀、善福章、荒井裕、増田仙一、古屋姫美愛、酒井敏
- ⑤ 2011年5月18日 日本気象学会 バルク係数CHと分子拡散の関係 古屋姫美愛、増田仙一、中村美紀、酒井敏
- ⑥ 2011年8月24日 日本建築学会 フラクタル日除けによる表面冷却効果 中村美紀、酒井敏、大西将徳、古屋姫美愛
- ⑦ 2011年12月7日 AGU Nocturnal Cooling Process of Atmospheric Boundary Layer Miki Nakamura, Akira Zenpuku, Sen-ichi Masuda, Kimie Furuya, Satoshi Sakai

- ⑧ 2011年12月7日 AGU Scale Effect of Surface Area on the Temperature of the Ground Surface Satoshi Sakai, Masanori Onishi, Miki Nakamura, Kimie Furuya
- ⑨ 2012年5月23日 日本地球惑星科学連合大会 やっぱり大気は上から冷える 中村美紀, 古屋姫美愛, 飯澤功, 大西将徳, 酒井敏
- ⑩ 2012年5月27日 日本気象学会 大気放射の過渡特性と有効放射距離 酒井敏 中村美紀
- ⑪ 2012年5月27日 日本気象学会 一次元モデルと観測データによる大気境界層の冷却過程 中村美紀 大西将徳 酒井敏
- ⑫ 2012年8月9日 ICUC-8 Scale Effect on Ground Surface Temperature and Rainfall Interception. Satoshi Sakai, M. Onishi, M. Nakamura, K. Furuya
- ⑬ 2012年10月5日 日本気象学会 地表温度と地表面の大きさ 酒井敏 中村美紀

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 敏 (SAKAI SATOSHI)
京都大学大学院 人間・環境学研究科 教授
研究者番号：30144299