（ 続紙 １ ）

京都大学	博士（　人間・環境学　）	氏名	中　村　　美　紀
論文題目	大気境界層の冷却メカニズム		

（論文内容の要旨）

本論文は、大気境界層の大気冷却メカニズムについて熱収支的観点から研究したもので、全７章から成る。

第１章は序論で、大気が冷却される際には、まず放射冷却で地表面が冷やされ、それが大気を冷やすという教科書的説明と、それが現実の観測結果を説明できないことが記されている。

第２章は、大気の温度に決定的な影響を持つと考えられる地表面の温度がどのように決まるかということを論じたものである。ここでは、まず日射を受けた地表面と大気との間に大きな温度差が生じていることを人工衛星による観測データから示している。そして、その温度差は地表面の基本要素の面の大きさに依存し、面が大きいほど、温度差が大きくなることを、理論的考察と実験結果から示した。さらに、この温度差は、地表面から約５mm 程度の非常に薄い層の中で出現するものであり、それより離れた場所では、ほとんど気温は一様であることを観測結果から示した。

第３章は、大気境界層内の観測をするために開発した繋留気球について述べている。通常の気球は風で流されやすく、観測高度を一定に保つことが難しいが、この気球は翼をもち、風が吹いたときに揚力を発生させて気球高度を保つことを目指している。このようなアイデアは以前からあったが、翼が一旦失速状態に陥ると、大きな抗力が生じて繋留高度が下がり、その状態から復帰できなくなるという難点があった。これを解決するため、ここではグライダーの原理を応用して、繋留線と翼のなす角度を拘束せず、翼の風に対する迎角を気球自身が自律的に調節できるようなメカニズムを採用した。また、風向きの変化に対応するため、通常の翼とは逆向きの下反角をつけ、良好な結果を得た。しかしながら、温度変化で気球の圧力が下がり、気球の形状が保てなくなる事態に対処しきれず、大気冷却過程の実際の観測はこの気球では実現していない。

第4章は比叡山を使った大気の鉛直構造の観測を論じたものである。山の高度差を利用した観測では、山の「地面」の影響を受けることが懸念され、必ずしも何もない上空の気温を代表しないのではないかと一般的には考えられている。しかし、第２章の結果から「地表面」の顕著な影響は地表面から数mm 程度に限られ、地上 1.5m 程度で行う通常の観測では、この影響は限定的であると考えられることから、山のない上空の気温を代表するものとして取り扱っている。その結果、第１章に述べたような教科書的説明、すなわち、大気は地表に接している下部から冷却されるのではないことが明らかになった。実際には、

午後２時頃に最高気温を記録した後、よく混合している境界層全体が冷却を始め、上部から成層状態に移行している。これは、境界層の上部に冷却源があることを意味する。著者は、この原因を大気自身の冷却によるものと考え、簡単なモデルを提唱した。

第５章は、第４章で提唱した簡単な放射モデルの基礎となる大気の基本的放射特性に関する研究である。これまで、大気放射は主に大気の「放射平衡状態」を決めることを目的として研究されてきた側面がある。したがって、注目する鉛直スケールは大気全層の 10 km スケールで、時間スケールも季節単位程度を念頭に研究が進められてきた。そのため、一般的には厚さ1kmの大気境界層では、大気自身の放射はあまり重要ではないと考えられ、それが「大気は地表から冷える」という教科書的説明につながっているものと考えられる。ここでは、「平衡状態」ではなく、平衡状態からの「ずれ」に対する過渡特性を調べ、ある吸収率に対して、もっとも速く「ずれ」が減衰する空間スケールが存在することを示した。これを実際の大気に当てはめると、14μm よりも波長の長い帯域の大気吸収では、ちょうど 1km の大気境界層の厚さ程度で最も減衰が早くなることを明らかにした。この特性を考慮して、簡単な1次元モデルで大気の冷却過程を計算したところ、現実に近い変動を示した。

第６章は、第２章の地表面温度の決定メカニズムと、第４章と第５章の大気自身の放射冷却メカニズムを総合的に組み合わせて考え、地表面形状が森林と砂漠の場合について、その上空の大気の状態を論じたものである。ここでは、森林が一旦砂漠化してしまうと、その特徴的状態、すなわち地表面が極めて高温で、上空は対流が起こりにくい状態が安定に存在し続ける可能性を示唆している。これは、砂漠緑化などの方法に大きな示唆を与えるものである。

第７章は結論として、大気境界層の冷却プロセスでは、これまであまり重要視されてこなかった大気自身の放射が非常に重要で、これを考慮することで、現実の大気の温度変化が説明できること、また、これはヒートアイランド問題のみならず砂漠化の原因解明にもつながることを述べている。

（　続紙　２　）

（論文審査の結果の要旨）

この論文は、地上１km 程度の大気境界層の冷却過程に関するものである。これまで、大気の１日の温度変化は地表面温度が変わることによって起こると、一般に認識されてきた。これは、大気が日射に対して透明であると同時に、放射冷却に関わる赤外線も薄い大気層に関しては比較的よく透過するからである。また、大気全層の平均的な放射冷却率が２℃／日程度と言われており、境界層内の夕暮れ時の冷却速度約１℃／時間より１桁遅いという事実も、境界層内の温度変化に放射は顕著な影響を与えないと考える一つの要因になっていたものと思われる。

これに対して本論文では、比叡山での気温観測から、1日の最高気温を記録した後の温度変化は、地表付近から起こるのではなく、大気境界層全層が同時に冷却を始め、その後、上層部から冷却速度が遅くなり温度成層をしていくことを明らかにした。これは、冷却源が境界層下部ではなく、上部に存在することを意味している。これは、大気自身が放射冷却で冷えていくことを強く示唆するものである。しかしながら、従来の大気放射の知識では、この大きな冷却率を説明することができなかった。

そもそも、これまで大気放射は、境界層の研究では重要視されておらず、大気全層（厚さ約１０km）にわたる放射「平衡」状態を説明することを念頭に議論されてきたため、最初から「時間変化」に着目した研究は皆無である。そこで、初期値問題として時間変化を陽に扱って解析した結果、これまで、放射平衡状態を決めるのに重要であった大気の窓領域（波長８−１４μm）ではなく、それより長波長側で吸収率が一桁以上大きな波長帯が、境界層の温度変化に大きく影響することを突き止めた。そして、この波長帯の影響を考慮して数値計算を行った結果、現実に近い冷却率がえられることが明らかになった。これは、これまで誰も気が付かなかった事実である。

また上記の議論では、比叡山の山肌に沿った場所の気温を、山が存在しない上空の気温と同等に扱っているが、これは、地表面温度と気温の差が、数mm のごく薄い層に限定されているという観測実験事実に基づいている。この地表面での熱輸送に関わる新たな知見と、大気放射に関わる新たな知見を合わせて考えると、これらの発見は単に気象の教科書の一部を書き換えるだけにとどまらず、砂漠化の原因究明など、極めて大きく重要な課題の突破口を開く可能性が高い。

この結論は、数多くの観測、実験結果から導きだされているが、それぞれの観測や実験は極めて素朴なものであり、それらの一つ一つの結果を見ても、それがこのような大きな問題に結びつくことは想像しにくい。しかし、それらを独自の視点で多角的に検証して組み合わせた結果、このような大胆な結論に到達したものである。しかも、この研究で使った機器は、ごく普通の温度計であり、いわゆる最先端の機器はほとんど使用していない。このような素朴な測定と解析を、先入観を持たずに地道に行うこ

との重要性を改めて示したという意味でも高く評価できる。

さらに、第３章の繋留気球の研究は大気の冷却過程を詳細に調べるうえで必須のものであり、将来的に重要な意味を持つ研究である。

本研究科は、従来の学問体系の再構築を目的としており、本申請者が所属する相関環境学専攻自然環境動態論講座地球環境動態論分野は、従来の定型的な研究とは異なる発想、手法で地球上の現象を再解析することを目的としている。本研究はこの目的に合致したものである。

よって本論文は博士（人間・環境学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成24年1月13日、論文内容とそれに関連した試問を行った結果、合格と認めた。

Webでの即日公開を希望しない場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：　　年　　月　　日以降