

氏名・(本籍)	くわ がた つね お 桑 形 恒 男
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 第 9 5 1 号
学位授与年月日	平成 2 年 9 月 26 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
最終学歴	昭和60年 3 月 東北大学大学院理学研究科 (前期 2 年の課程) 地球物理学専攻
学位論文題目	A Study on Air-Land Energy Exchange over Complex Terrain (複雑地形上における大気-地表面エネルギー交換過程に関する研究)
論文審査委員	(主査) 教 授 近 藤 純 正 教 授 田 中 正 之 教 授 鳥 羽 良 明 助 教 授 木 村 富 士 男

論 文 目 次

CHAPTER 1. INTRODUCTION

CHAPTER 2. HEAT BUDGET ANALYSIS OF NOCTURNAL COOLING AND DAY-TIME HEATING IN A BASIN

2.1 Introductory Remarks

2.2 Observations

2.3 Method of Analysis

2.4 Nocturnal Cold Air Lake

2.5 Daytime Heating Process

2.6 Modeling of Upslope Flow and Subsidence

2.7 Heat Budget

2.8 Concluding Remarks

APPENDIX 2A Calculation of $\langle Q_{ADV} \rangle$ and $\langle E_{ADV} \rangle$

APPENDIX 2B Estimation of $T_{VALLEY}(Z)$ and $T_{SLOPE}(Z)$

APPENDIX 2C Calculation of δQ

APPENDIX 2D Data Set of the Potential Temperature, Specific Humidity and
Wind Profiles

CHAPTER 3. DAYTIME PBL HEAT BUDGET OVER COMPLEX TERRAIN IN CENTRAL JAPAN

3.1 Introductory Remarks

3.2 Analysis Design

3.3 Method of Analysis

3.4 Validation of the Method

3.5 Results

3.6 Concluding Remarks

APPENDIX 3A List of Main Symbols

APPENDIX 3B Time Variation of the Upper-Level Pressure due to the Atmospheric Tide

APPENDIX 3C Formula for Estimating the Daily Amount of Solar Radiation from Daily Sunshine Duration

APPENDIX 3D Estimation of $L \downarrow$

CHAPTER 4. DAYTIME AIR-LAND HEAT BUDGET OVER COMPLEX TERRAIN IN CENTRAL JAPAN

4.1 Introductory Remarks

4.2 Analysis Design

4.3 Computational method

4.4 Results

4.5 Concluding Remarks

APPENDIX 4A Interpolation Function

APPENDIX 4B Temperature, Surface Temperature, Humidity, and Wind Speed

CHAPTER 5. OBSERVATION AND MODELING OF THERMALLY INDUCED UPSLOPE FLOW

5.1 Introductory Remarks

5.2 Observed Vertical Structure of Upslope Flow

5.3 Basic Equations of Upslope Flow

5.4 Equilibrium Model (Parcel Model)

5.5 Steady Development Model

5.6 Unsteady development model

5.7 Concluding Remarks

APPENDIX 5A Derivations of the basic Equations (5.9) and (5.10)

CHAPTER 6. SUMMARY AND CONCLUSIONS

ACKNOWLEDGMENTS

REFERENCES

論文内容要旨

大気-地表面エネルギー交換過程は気象学上の最も基本的な物理過程の一つであり、さまざまな気象現象やグローバルな気候形成などにとって重要な意味を持つ。地球上の地表面は大きく分けて海洋と陸面の2つに分けられるが、このうちの陸地の大部分は山岳などの複雑地形と、都市・植生地・裸地などが混在した多様地表面から構成されている。大気-地表面間のエネルギー交換は主として地表面から1~2kmまでの高さの気層(大気境界層)内でおこなわれ、それら交換過程は地表面の状態・地形・大気の安定度などによって影響を受けている。大気境界層の研究は、これまでは主として理論的な取扱が容易な水平一様な場合についておこなわれてきており、水平一様な大気境界層のふるまいについてかなりの部分まで明らかになってきた。その一方で、現実的な複雑多様地表面上の水平方向に非一様な大気境界層の研究は、まだ始まったばかりであり、まだ未知の部分が多い。大気中でのグローバルなエネルギー循環を解明するためにも、今後は水平方向に非一様な大気境界層のふるまいを明らかにしていく必要がある。

複雑地形上においては、大気境界層内における熱源の水平方向の不均一に起因して、山谷風・海陸風などの熱的な局地循環が発生し、それら局地循環が大気-地表面間のエネルギー交換過程に対して影響を及ぼす。熱的な局地循環が最も発達しやすいのは一般風が弱い晴天日である。本研究はこの様な気象条件下の複雑地形上における大気境界層の構造、ならびに大気-地表面エネルギー交換過程におよぼす局地循環の効果を、野外観測・データ解析およびモデル計算などの手段を用いて、明らかにしたものである。

まず第2章では、一般風が弱い乾燥晴天日における会津盆地の夜間冷却および日中の昇温に関する熱収支観測の結果を解析し、盆地の冷却・昇温過程において熱的局地循環(山谷風)の果たす役割を明らかにした。会津盆地は日本で最も大きな盆地の一つであり、5710km²の面積を持つ深さ1000m以上の盆地である。その結果をまとめると以下ようになる。

まず夜間は、盆地内側斜面上で斜面下降風(山風)が発生し、側斜面上で冷やされた冷気が盆地底(盆底)上に移流・堆積する。そのため盆底上の大気の冷却量は平坦地と比較するとかなり大きくなる。冷気が盆底上に堆積することにより、地表面が受ける下向き大気放射量は時間と共に減少し、盆底地表面の放射冷却量は非常に大きくなる。また盆地内にできる夜間冷気層の厚さは、盆底と盆地を取り囲む分水嶺の平均高度差(盆地の深さ)にほぼ一致する。すなわちこれは、深い盆地ほど山風が発達しやすく、大気から地表面に輸送される顕熱が大きくなることに対応している。盆地内の全大気と全地表面の間の熱収支は、正味放射量が顕熱と地中伝導熱の和でほぼバランスしていて、潜熱による輸送はほとんど無視できる。

一方、日中は盆底上で地表面からの加熱に加えて、沈降による断熱上温が生じる。そのため盆底上の大気の昇温量(気温上昇量)は平坦地に比べてかなり大きくなる。この沈降は、側斜面からの斜面上昇風(谷風)流出の補償流として生じたローカルな沈降流であり、沈降速度は、

日出から時間と共に増加する。なおこの沈降速度については、単純化した谷風の熱収支モデルでほぼ再現することができた。盆地内の全大気と全地表面の間の熱収支は、正味放射量が顕熱と潜熱の和でほぼバランスしており、地中伝導熱の寄与は小さい。

日中および夜間とも、盆地における顕熱交換量により盆地内全地表面を平均した顕熱交換量の方が大きくなる。これは側斜面で発生する斜面風（山谷風）が、側斜面－大気間の熱交換を活発にするからである。それに対して盆地における風速は昼夜とも弱く、大気－盆地地表面間の熱交換は小さい。

第3章では、ルーチン観測データから複雑地形上における大気－地表面間の熱収支を見積る新しい解析方法を開発した。この方法の原理は、大気境界層の熱収支と地表面熱収支を連立させることによって、大気－地表面間の熱交換量を求めるものである。この解析手法を用いて、春季の弱風晴天日における中部日本域の気象官署55地点における日中の大気境界層（下層大気）の熱収支を評価した。弱風晴天条件下においては、中部日本全域で熱的な局地風が発達し、下層大気の熱収支はそれら局地風系によって支配されることになる。

地形的な特徴に応じて各気象官署を岬、沿岸平野（海岸から20km以内）、内陸平野、内陸盆地（盆地）、山岳の5つのカテゴリーに分類し、地形別の下層大気の昇温の様子がどのように異なるかを調べた。その結果、内陸盆地と内陸平野で下層大気の昇温量が大きく、岬と沿岸平野および山岳で昇温量が小さいという結果が得られた。内陸盆地や内陸平野で昇温量が大きくなるのは、ローカルな沈降流による断熱昇温が原因である。第2章の解説で述べたように、この沈降は、側斜面で発生した斜面上昇風（谷風）による大気流出の補償流として生じたものである。それとは逆に山岳では顕熱によって暖められた空気が流出してしまうため昇温量が小さくなる。一方、岬や沿岸平野などでは海風によって海上の寒冷気塊が侵入するために昇温量が抑えられる。この効果は海岸に近い地点ほど顕著である。

このように日中の下層大気の昇温は、局地循環による局所的な移流によって大きく左右される。下層大気の昇温はまた、昇温量に比例した地上気圧の低下をもひきおこす。そのため昇温量が大きな内陸部を中心として日中に熱的な低気圧が形成されることになる。

第4章では前章でおこなった解析手法を拡張し、春季の弱風晴天日における中部日本全域の日中の大気－地表面間エネルギー交換過程を解析した。

まず混合層の厚さの地域分布を解析し、その特徴を調べた。下層大気の昇温にともなって対流混合層が発達し、その厚さは昇温量の増加にともなって増大する。すなわち昇温量が大きな内陸盆地（盆地）や内陸平野部では混合層は厚くなり、逆に昇温量が小さな沿岸部や山岳域では混合層は薄くなる。しかし山岳域では地表面の海拔高度が高いため混合層（海拔）高度は高くなる。そのため、混合層高度は沿岸部から内陸部に向かって単調に増加する。

次に中部日本全域を局地循環に関して熱的に閉じていると見なせる計11の小領域に分割し

て、各小領域における大気-地表面間の熱収支を評価した。それによると、各小領域間の熱収支にあまり大きな差はないが、関東地方では他の領域と比較して顕熱がやや大きく、潜熱がやや小さいという結果が得られた。関東地方は他の領域に比べて都市域の占める割合が大きく、逆に植生地の占める割合が小さい。ちなみに、関東地方では都市32%、植生地68%なのに対し、その他の領域の平均値は都市18%、植生地82%となっている。本研究で得られた結果は、都市域は植生地に比べて蒸発量（潜熱）が少なく、顕熱が大きいという一般的性質と矛盾しない。なお中部日本全域で平均したボーエン比（=顕熱/潜熱）は1.03となった。この熱収支解析結果を用いて地表面湿潤度 β を求めたところ、中部日本全域の平均 $\beta = 0.29$ が得られた。各小領域ごとの β は0.16~0.46の範囲に分布していた。地表面湿潤度 β は地表面からの蒸発効率を表す重要なパラメータである。 β は十分湿った地表面で $\beta = 1$ 、完全に乾いた地表面で $\beta = 0$ であるが、現実の広域における値は今までほとんど知られていなかった。

第5章では斜面上昇風の構造を野外観測データより明らかにし、そのモデル化をおこなった。斜面上昇風は、一般風が弱い晴天日の日中に山岳地で発生する代表的な局地循環の一つであり、第2章の盆地の昇温過程に関する解説のところでも述べたように、複雑地形上における局地気象の形成および大気-地表面間のエネルギー交換に対して重要な役割を果たしている。

本研究では11ヶ所のいろいろなスケールの谷と斜面で斜面上昇風の温位・風速の鉛直構造を観測し、斜面上昇風が混合層的な温位分布と鉛直方向にほぼ様な風速分布を持っていることを明らかにした。次に、斜面上昇風の簡単な一層モデルを開発し、斜面上昇風の厚さおよび風速を地面からの顕熱、斜面の抵抗係数、斜面角および大気安定度の関数として表現した。モデルの妥当性は観測データとの比較によって確かめられた。

このモデルを用いて、斜面上昇風の発達に要する斜面の長さ、定常状態に達するまでの時間などについても考察した。その結果、斜面上昇風の発達に要する斜面の長さは適当な傾斜で最小となり、大気安定度の減少と共に増加すること、また定常状態に達するまでの時間は大気安定度または斜面角の増加と共に短くなることなどが明らかになった。

以上のように本研究では、一般風が弱い晴天日における複雑地形上における大気境界層の構造、および大気-地表面エネルギー交換過程におよぼす熱的な局地循環の効果を明らかにすることができた。しかし複雑地形上の大気-地表エネルギー交換過程において、まだ解決しなければならない問題も数多く残っている。例えば、一般風が適度に吹いている条件下では、一般風と局地循環の相互作用が重要となる。また雲が発生しているような条件下では、水蒸気凝結にともなう潜熱の解放も重要である。これらは今後に残された重要な研究課題であるといえる。

論文審査の結果の要旨

大気と地表面間のエネルギー交換過程については、これまで主として、取扱が容易な水平一様な場合について行なわれてきた。現実的な複雑多様面上の研究は、最近始まったばかりで、定量的なことにいつは、まだ未知の部分が多い。

桑形恒男提出の論文は複雑地形上におけるエネルギー交換過程に及ぼす局地循環の効果を野外観測、データ解析およびモデル計算などを用いて明らかにしたのである。

まず、一般風が弱い乾燥晴天日の盆地での熱収支観測の結果を解析し、冷却と昇温過程における熱的局地循環の果たす役割を量的に明らかにした。

つぎに、ルーチン観測データから複雑地形上における大気と地表面間の熱収支を見積る新しい解析方法を開発した。この手法を用いて中部日本域の日中の大気境界層の熱収支を評価した。その結果、内陸盆地と内陸平野では、ローカルな沈降流による断熱昇温によって昇温量が大きくなることが明らかになり、他方、岬や沿岸平野などでは海風による寒冷気塊の侵入によって昇温量が抑えられることがわかった。

下層大気の昇温は、それに比例して地上気圧の低下をひき起こし、内陸部を中心として日中に熱的な低気圧が形成されることになる。

中部日本全域を小領域に分割し、各小領域の熱収支を評価したところ、関東地方では他と比較して顕熱が大きく、蒸発の潜熱が小さいことがわかった。これは、関東地方は都市域の占める割合が大きく、植生地の割合が小さいことによると考えられる。

中部日本全域について地表面湿潤度も求めた。地表面湿潤度は地表面からの蒸発の効率を表す重要なパラメータであるが、現実の広域における値は従来ほとんど知られていなかった。

以上のように本研究では複雑地形上における大気と地表面間のエネルギー交換過程を明らかにし新しい知見を得た。これは本人が自立して研究活動を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。よって桑形恒男提出の論文は、理学博士の学位論文として合格と認める。