

氏名・（本籍）	さとう たけし 佐藤 威
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理第 845 号
学位授与年月日	昭 和 61 年 12 月 24 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 54 年 3 月 東北大学大学院理学研究科 （前期 2 年の課程）地球物理学専攻修了
学位論文題目	複雑地形の夜間冷却と冷気流に関する研究
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

論 文 目 次

第 1 章 序

第 2 章 平坦地の夜間冷却

§ 2-1 一般風がない時の地表面の夜間冷却

§ 2-2 一般風がある時の地表面の夜間冷却

§ 2-3 気温の夜間冷却

§ 2-4 まとめ

第 3 章 斜面の冷気流のモデル化

§ 3-1 斜面の冷気流のパーセルモデル

§ 3-2 過去の研究との比較

§ 3-3 観測との比較

§ 3-4 まとめ

第4章 谷の冷気流のモデル化

§ 4-1 谷の冷気流のパーセルモデル

§ 4-2 観測との比較

§ 4-3 まとめ

第5章 斜面および谷における夜間冷却と冷気流の相互作用

§ 5-1 夜間冷却・冷気流フィードバック系

§ 5-2 夜間冷却量と冷気流のパラメータ依存性

§ 5-3 まとめ

第6章 複雑地形における夜間冷却と冷気流の観測

§ 6-1 宮城県鳴子町川渡における観測

§ 6-1-1 大窪

§ 6-1-2 山麓（AMeDAS, 西部地区）

§ 6-2 宮城県志津川町における観測

§ 6-3 AMeDAS データの解析

§ 6-4 まとめ

第7章 結 語

論文内容要旨

第1章 序

地表面は大気を持つ運動量、熱、水蒸気の source または sink であり、大気と地表面の間のこれらの物理量の交換は大気境界層を通して行われる。大気境界層の第1の研究目的は大気の大規模現象に影響を与える層内の乱流輸送過程を明らかにすることで、これを必要最小限のパラメータで表現する方法（パラメータ化）を確立することが求められている。また、大気境界層は生物の主たる活動領域でもあり、大規模現象の影響を受けるその状態（環境）を明らかにすることが第2の目的である。一様な平坦地上の大気境界層に関しては、これまで多くの理論的、実験的研究が行われてきて結論がまとまりつつある。一方、モザイク状に非一様な地表面（複雑地表面）や起伏がある地形（複雑地形）を対象とした研究は緒についたばかりである。この種の研究では、複雑な地表面の状態や地形の効果を表現する適切なパラメータを見出し、また与えられた気象条件のもとでの複雑地表面、地形上の境界層大気の振舞いや顕熱などの輸送量を評価する必要がある。

一般風が弱い夜間に斜面や谷に冷気流（斜面滑降流、山風）が生じることは古くから知られ多くの観測的研究がなされてきたが、それらは主に局地循環としての冷気流の実態を気候学的立場から研究したものであった。今世紀に入り始まった理論的研究は“冷気流”という現象そのものを解明しようとするものがほとんどで、前述の2つの研究目的を意識したものは非常に少ない。夜間冷却により冷気流が生じると、それによる顕熱輸送が起こるため、平坦地より傾斜地のほうが熱交換が活発となる。また、この顕熱は傾斜地の夜間冷却を平坦地のそれより抑制する作用を持つ。このような局地循環の持つ物理量交換の促進作用、および夜間冷却と冷気流の相互作用は、従来の研究ではあまり注目されていなかった。

本研究では、複雑地形上の大気と地表面の間の物理量交換の研究の第1段階として、その素過程である夜間の斜面や谷に生じる冷気流のモデル化を行った。モデル化は冷気流の特徴量の記述のみならず、顕熱と運動量の輸送量の表現および地表面状態と地形のパラメータ化を含む。さらに夜間冷却と冷気流を結合した系として考える立場をとり、この系が外的な条件にどのように応答するかを理論的、観測的に明らかにした。

第2章 平坦地の夜間冷却

第3章以下で論じる斜面と谷の夜間冷却と対照するため、冷気流の生じない平坦地の夜間冷却について、その支配パラメータに対する依存性を明らかにした。

一般風がない時の地表面冷却は放射冷却に従い、冷却量は大気放射量に対応する最大可能冷却量に比例すること、および土壌の熱物理定数（ $c_g \rho_g \lambda_g$ ）が小さいほど冷却量は大きいことが分かった（この2つを外部パラメータと呼ぶ）。

一般風による顕熱がある時の地表面冷却量を求めるため、ロスビー数相似則を用いて顕熱を評

値し、地中の熱伝導方程式を数値的に解いた。一般風がある時は外部パラメータに一般風速(V_g)が加わり、かつ粗度長 (z_0) も支配パラメータとなる。 $V_g \leq 5 \text{ m/s}$ では一般風の影響は小さく放射冷却で近似できるが、 V_g が大きくなると冷却量は小さくなる。 z_0 が大きいほど乱流混合が活発で冷却しにくい。冷却量の $c_g \rho_g \lambda_g$ 依存性は V_g がかなり大きい時は顕著でない、などの特徴が定量的に評価された。さらに、近藤 (1982) ほかにより提案された夜間冷却量予報式の係数 a_2 , b_2 と z_0 および $c_g \rho_g \lambda_g$ との関係を求め、複雑地形で考慮しなければならない一般風に対する地形開放度 Ω と a_2 の関係を論じた。

地表面近傍の気温冷却量は、強風日には地表面冷却量と異なり z_0 にほとんど依存しない。弱風日に顕著な大気自身の放射冷却作用と併せて、気温冷却量から求めた a_2 は z_0 にあまり依存しないことが示され、観測からも確認された。また、理論的予測である $a_2 \propto 1/\Omega$ の関係が観測から見出せず、複雑地形では冷気の移流堆積作用と、一般風と冷気流の coupling が夜間冷却に影響を与えている可能性が示唆された。

第3章 斜面の冷気流のモデル化

従来の理論的研究は、冷気流の内部構造をあらわに扱わず本質的な物理過程に注目し理論を組み立てる物理モデルまたはハイドロリックモデル、および冷気流内の乱流輸送を適当にパラメータ化してその内部構造までも扱う力学モデルによってなされてきた。本研究では冷気流の性質を表現する仮想的な“冷気塊 (パーセル)” の概念を導入し、一般風がない時の斜面上の冷気流を記述する物理モデル (パーセルモデル) を作成した。

パーセルの熱収支と運動方程式からその厚さと速度が導かれ、パーセルと一般場の温位差、斜面の長さや落差 (地形パラメータ)、地表面粗度に対応する平均バルク係数 (空気力学パラメータ) などで簡単な形に表された。一般場の安定度の影響は可能落下距離 (可能落差) で与えられ、安定度が強いと可能落下距離は短い。斜面の長さが可能落下距離より短い場合は、厚さと速度は長さとともに大きくなるが、それを超えると一定値になる。この時の厚さ、速度は可能落下距離が短いほど小さい。

冷気流の風速と温位分布に関する profile factor を導入することにより、パーセルの厚さと速度はそれぞれ冷気流の逆転層の厚さと最大風速に対応することが明らかになった。さらに、冷気流の流量とそれによる斜面方向への熱フラックスを与える式が得られた。モーニン・オブコフの相似理論を応用することによりパーセルモデルで使用されるバルク係数の求め方が示され、斜面長とともに小さくなることが分かった。

パーセルモデルに近い手法による Manins and Sawford (1979) のハイドロリックモデルとは、一般場が中立の場合は定性的に一致するが、安定の場合は一部一致しない。平均バルク係数の理論値と観測値はほぼ一致した。また、長さが数10m~数100 kmの斜面における冷気流の厚さと速度の観測値とパーセルモデルによる理論値との一致が見られた。

第4章 谷の冷気流のモデル化

これまでの谷の冷気流に関する理論的研究は斜面のそれに比べ少なく、3次元力学モデル以外は、本質的に重要な側斜面からの質量と熱の移流を考慮していない。本研究ではその欠点を補うため質量、運動量、熱量の保存則に基づき、一般風がない時の谷の冷気流の物理モデル（パーセルモデル）を作成した。

まず、上記物理量保存則から谷の冷気流の速度と厚さが導かれた。速度は、冷気流と一般場および冷気流と谷底地表面の温位差、谷の落差（地形パラメータ）、平均バルク係数（空気力学パラメータ）などで表され、さらに、側斜面の冷気流と一般場の温位差にも依存する。厚さは、速度を支配するパラメータおよび側斜面の冷気流を支配するパラメータ（第3章）に依存する。谷の可能落下距離が定義され、それと谷の厚さの大小関係で冷気流の発達が規定される。すなわち、谷の長さが可能落下距離より短い場合は速度と厚さは長さとともに大きくなるが、可能落下距離より長い場合は速度のみ一定値となる。

谷の冷気流の構造を表す profile factor や平均バルク係数については、谷地形の3次元構造による複雑さのため値が確定できず、今後の研究によらねばならない。

現実の谷地形の地形パラメータの求め方が示され、ついで、長さが数100 m～数10kmの谷における冷気流の厚さと速度の観測値とパーセルモデルによる理論値との一致が見られた。

第5章 斜面および谷における夜間冷却と冷気流の相互作用

相互に作用を及ぼしあう夜間冷却と冷気流のフィードバック系を解き、斜面と谷の夜間冷却と冷気流を評価した。その際、冷気流をパーセルモデルで表現し、地中熱伝導方程式を Groen の方法で解いた。その結果、一般場の冷却がない時の斜面と谷の夜間冷却量、冷気流の速度と厚さ、冷気流による一晩平均の顕熱の支配パラメータ（外部、空気力学、地形パラメータ）依存性が定量的に示された。特に注目すべきこととして、地表面冷却量は冷気流による顕熱輸送があるため最大可能冷却量の増大とともに増加が鈍くなる傾向にあり放射冷却の場合とは異なる。冷気流の速度はほぼ最大可能冷却量の1/2乗に比例する。斜面や谷の同一地点において地表面状態が同じならば冷気流の厚さはいつでもほぼ一定である。平均顕熱と夕方の正味放射量の比（熱交換の能率）は最大可能冷却量とともに大きくなる、などがある。

補足として、1つの斜面や谷に注目した場合と、一般場が冷却する場合について定性的な議論がなされた。前者の場合平均バルク係数の落下距離依存性を考慮すれば、スケールの小さな斜面や谷では地表面冷却量と平均顕熱は落下距離（落差）にあまりよらないと考えられる。また後者の場合も可能落下距離より長い斜面や谷では同様と考えられる。

第6章 複雑地形における夜間冷却と冷気流の観測

本章では、山頂付近の小さな谷地形（鳴子町川渡大窪）、山麓（川渡西部地区）、山に囲まれた海岸近くの複雑な谷地形（志津川町）における夜間冷却と冷気流の観測結果、および谷や斜面

にある AMeDAS 観測所のデータを、前章までの冷気流や夜間冷却の理論に基づき解析することにより理論の検証を行うとともに、夜間冷却・冷気流フィードバック系の性質をいくつかのパラメータ依存性という形で統一的に明らかにした。主な結果は以下の通りである。

一般風がない時、平坦地や盆地では夜間冷却量は最大可能冷却量と比例関係にあるが、冷気流の生じる谷では最大可能冷却量が増しても冷却量はあまり大きくならない。冷気の流出のし易さに対応して斜面、谷底、平坦地や盆地の順に冷却量が大きくなる。山頂の冷却量は冷気流出に伴う暖気補償のため平坦地より小さい。また冷却量は谷に沿ってあまり変化しない。

地形開放度が小さくなるにつれ夜間冷却に及ぼす一般風の影響が小さくなる。谷の場合、一般風が強い時は冷却量は小さく他の地形との差はなくなる。一般風があまり強くない、谷の冷気流と一般風の風向が一致する時、冷気流は加速され顕熱が増し地表面の冷却が抑制される（逆の場合は冷気流が減速され冷却が増す）。しかし、両風向が一致する時に冷却流速が小さくなることもある。

谷の冷気層の強さは日没後増加し数時間で一定値に達する。また、最大可能冷却量の増加とともに強まる。一般風がある臨界値以下では一般風の影響は小さく、超えると乱流混合作用が谷全体に及び冷気層は破壊され強さは0となる。臨界値は谷のスケールや谷に相対的な一般風向などに依存する。また厚さは日没前後から日出時までほぼ一定値を保ち、最大可能冷却量にあまり依存しないが、一般風速が強まるとやや減少する。

谷では、山頂付近の冷気層は薄い谷底では側斜面からの冷気の収束により谷の長さとともに厚くなる。谷底の冷気層内の温位分布は谷により異なり地形に固有の分布となっている。また谷の縦断面内の等温位線の分布は谷底と平行に近く、盆地のように水平ではない。

志津川における谷の冷気層の形成、解消時の100 m 気柱の熱収支解析から、それぞれ冷気と暖気の移動が重要であることが明らかとなった。

冷気流（山風）は日没後1～2時間以内に開始する。川渡大窪における冷気流の最大風速は冷気層の強さの1/2乗に比例する。また谷の冷気流の地上風速は最大可能冷却量の1/2乗に比例する。しかし、川渡西部地区ではそのような関係が見られず、一般場が安定成層化するためと考えられる。

第3～5章の理論は一般風がないことを前提としているが、その条件下での観測結果は理論を支持する。

第7章 結 語

本研究において大気と地表面の間の物理量の交換過程を基礎として作成されたパーセルモデルでは、地表面状態と地形のパラメータ化がなされており、一般風がない時の冷気流の特徴量（厚さ、速度）とそれによる顕熱と運動量の輸送量の評価方法がほぼ確立された。さらにモデルはより複雑な現実地形に対しても応用が期待できる。

しかし、一般風が適当に強く冷気流と coupling し夜間冷却を変化させる場合については、これまで研究例がなく今後の重要な研究課題である。

論文審査の結果の要旨

地球表面に接する厚さ約1 kmの大気境界層は、熱や水蒸気その他の物理量の交換が盛んな気層である。従来の研究は、一様平坦な地表面上の大気境界層に関するものであったが、佐藤威提出の論文は現実的な起伏のある地形上の大気境界層の振舞いや顕熱輸送量を評価することを目的とした先駆的な研究のひとつである。

この論文では、まず、一般風があるときの平坦地の夜間冷却を解き、風速、地表面粗度、地表層の熱物理定数依存性を明らかにした。ついで、斜面上の冷気流を記述するために、パーセルモデルを考察し、熱収支と運動方程式から斜面流の厚さと速度が地形パラメータや地表面の空気力学パラメータで表現できることを示した。さらに、斜面流の発達是一般場の大気安定度とパーセルの可能落下距離の大小関係によって変わることを示した。

こんどは斜面流のパーセルモデルを谷地形に拡張し、谷の冷気流のモデル化に成功した。これらの理論モデルを用いて、夜間冷却と冷気流のフィードバック系を数値的に解き、斜面と谷の夜間冷却と冷気流を評価した。

最後に、各地で得られた夜間冷却と冷気流の観測結果を整理し、理論モデルの検証を行い、地表面状態としては積雪面、草地、森林に、長さのスケールとしては斜面長100メートルから数百キロメートルの南極大陸斜面にまで、このパーセルモデルが適用できることを明らかにした。

以上の研究成果は本人が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示すもので、佐藤威提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。