地域計画への適用を目的とした冷気流のモデル化に関する検討

丘陵地周辺の住宅地域に及ぼす冷気流の影響 その2

NUMERICAL MODEL OF COLD AIR DRAINAGE FLOW
SUPPORTED IN URBAN PLANNING

Impact of cold air drainage flow on a residential area in a hilly urban area Part 2

鳴海大典*, 水野 稔**, 下田吉之***

Daisuke NARUMI, Minoru MIZUNO and Yoshiyuki SHIMODA

A numerical model of cold air drainage flow over a finite-length slope was presented and characteristics of airflow and impacts of some parameters (volume of vegetation, shape of slope, anthropogenic waste heat and roughness parameter) were examined. Relating to the influence of land use, a slope covered with vegetation has a large capacity of generating cold air compared with a bare slope. When the cold air flowed out from the area covered with vegetation into the artificial area, roughness parameter has an impact to its velocity and anthropogenic waste heat to its temperature. As a result, the importance of preserving the green tract of land in a hilly area was pointed out.

Keywords : cold air drainage flow, hillside area, numerical model, regional planning, urban thermal environment

冷気流、丘陵地域、数値モデル、地域計画、都市熱環境

1. はじめに

既報その1¹⁾や筆者らによる丘陵地周辺の住宅地域を対象とした実測調査結果²⁾で明らかにしたように、夜間に斜面を下降する冷気流は周辺地域の気温低下に影響を及ぼしていることから、冷気流は夏季の暑熱緩和効果に期待が持てる有効な気候資源として位置付けられる。この冷気流を地域計画に活用し、住宅地に冷涼かつ清浄な気流を導入するためには、冷気流による気温低減効果や開発に伴う地表面改変の影響を事前に予測する必要があるが、その際には数値解析モデルによる検討が望ましい。

冷気流に関するいくつかの分析的・数学的モデルが過去に報告されているが、Nappoら³⁾は既存の冷気流モデルが以下に示す2種類に大別されることを指摘している。

1) 無限斜面上の冷気流鉛直構造を計算するモデル

2) 有限斜面傾斜方向の冷気流変化構造を計算するモデル

前者は静力学的、後者は動力学的な数値解析モデルと位置付けられる。前者の代表例としては、Prandtl⁴⁾による鉛直1次元モデルが挙げられる。Prandtlモデルによる風速・気温鉛直分布予測結果については、多くの観測結果(例えばDefant⁵⁾、Lettau⁶⁾、Kondoら⁷⁾)と一致することが明らかとなっている。しかし、Prandtlモデルは尾根や谷から離れた一様な無限長さ(と見なすことが可能

な)の斜面上を流れる定常流に対してのみ、満足な結果が得られることが指摘されている⁸⁾。後者の代表例としては、Ellisonら⁹⁾によるモデルが挙げられる。彼らはFleagleら¹⁰⁾による水理モデル(hydraulic model)を拡張し、冷気流に対する周囲大気からの連行過程を考慮することによって、冷気流の斜面下降方向への発達状況を再現した。Maninsら¹¹⁾やBriggs¹²⁾はこのEllisonモデルをさらに拡張することによって、大気に開放された有限斜面上を流れる冷気流を再現した。近年ではMcNiderら¹³⁾やYamadaら¹⁴⁾、Schadlerら¹⁵⁾が冷気流モデルを3次元的に取り扱い、冷気流が複雑な斜面を流下して谷に集積され、例えば平野部に流れていく様子を再現することも可能となった。

以上、既存の冷気流モデルを、特に海外のモデルを中心として概観したが、これらのモデルの大半は気象学や地理学の分野における検討であり、冷気流の現象再現や発展過程等の理論的解明を主目的として作成されている。

本研究は冒頭で述べたように、斜面上部からの冷気流の規模を事前に予測し、斜面下部へ与える影響を定量的に把握することを主な目的としている。また、斜面方位や傾斜角、さらには土地利用状況の違いが冷気流の規模に与える影響を原単位的な情報として整備す

* 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻
助手・修士(生活科学)

** 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 教授・工博

*** 大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻 助教授・工博

Research Assoc., Dept. of Environmental Eng., Osaka Univ., M. Liv.

Prof., Dept. of Environmental Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Environmental Eng., Osaka Univ., Dr. Eng.

ることが可能になれば、地域計画に対しても有用な資料となり得るであろう。そこで本研究では、斜面特性・土地利用などの情報から、冷気流の規模や斜面下部へ運搬される冷気生成量を簡易に予測することを目的として、斜面直角方向への相似分布を前提とする積分方程式をベースとした冷気流モデルを作成し、冷気流の基本的な特性について検討を行った。

2. 計算モデル

冷気流は夜間の放射冷却によって地表面付近で生成された冷気塊が、密度差を駆動力として斜面を下降する現象である。従って、この冷気の流れは基本的な自然対流モデルで推定することが可能と考える。そこで本研究では、冷気流が斜面を滑降する際に地表面付近の地物と熱・運動量を交換し、上空大気を連行しながら厚さを増してゆく自然対流モデルの構築を試みた。

冷気流の冷熱供給源は主として地表面付近の地物であるが、この点に関して小林は「接地気層の冷却に最も寄与するのは、射出率が大きく、地中からの伝導熱供給量が小さい地物、つまり葉面のような物体である」と述べている（断熱突起冷却仮説）¹⁶⁾。また、前報の実測結果¹⁾からも、植生の規模や種類が冷気流の規模を変化させることが示唆された。そこで本研究では、自然対流モデルにDeardorffの植生・地表面熱収支モデル¹⁷⁾を組み込むことによって、植生の影響について検討可能なモデルの構築を目指した。

2.1 モデルの概要

本モデルは冷気流の斜面下降方向への変化について検討することを主な目的としていることから、斜面傾斜方向に n 個のコントロールボリューム（以下CV）を設定し、斜面直角方向への相似分布を前提とする積分方程式を構築した。後述するように各CVに対して熱収支式・運動方程式・連続式を設定し、各CVの冷気温・流速・冷気層厚さを計算した。なお、温度境界層と速度境界層の厚さが同じであると仮定した上でそれらを併せて「冷気層」と定義し、境界層内での完全拡散を前提とした。

まず、地表から冷気層外縁まで（厚さ H_N ）の体積要素（奥行き 1 m 、斜面長さ方向 dx ）に対して、これに流入するエネルギーと運動量の釣り合いから、自然対流における積分方程式（式1・2）が得られる。なお、熱収支式では冷熱を、運動方程式では斜面下降方向に働く力を、それぞれ正としている。

$$\frac{d}{dx} \int_0^{H_N} (T_a - T) \cdot u \, dy = \frac{q_w}{\rho_n \cdot c_p} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{d}{dx} \int_0^{H_N} u^2 \, dy = \frac{g \sin \alpha}{T_a} \int_0^{H_N} (T_a - T) \, dy - \frac{\tau_w}{\rho_n} \quad \dots \dots \dots (2)$$

冷気層内では山頂からの距離とは無関係に、速度 u および温度 T は式3・4で表されるような相似分布を保つものと仮定する。

$$u = u_x \cdot F_1(\eta) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$T_a - T = (T_a - T_G) \cdot F_2(\eta) \quad \dots \dots \dots (4)$$

ただし

$$\eta = \frac{y}{H_N} \quad \dots \dots \dots (5)$$

式1・2に式3・4をそれぞれ代入すれば、次式が得られる。

$$A_3 \left\{ \frac{d}{dx} (H_N \cdot u_x) \right\} (T_a - T_G) = \frac{q_w}{\rho_n \cdot c_p} \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$A_4 \frac{d}{dx} (H_N \cdot u_x^2) = A_2 \cdot H_N \cdot g \cdot \frac{(T_a - T_G)}{T_a} \cdot \sin \alpha - \frac{\tau_w}{\rho_n} \quad \dots \dots \dots (7)$$

式6・7中の A_1 から A_3 は $F_1(\eta)$ および $F_2(\eta)$ の関数形によって定まる定数である。

$$A_1 = \int_0^1 \{F_1(\eta)\}^2 d\eta \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$A_2 = \int_0^1 F_2(\eta) d\eta \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$A_3 = \int_0^1 F_1(\eta) F_2(\eta) d\eta \quad \dots \dots \dots (10)$$

本モデルで求める冷気温と冷気流速は、結果として以下のように示される。

$$T_N = \frac{1}{H_N} \int_0^{H_N} T \, dy = T_a + (T_G - T_a) A_2 \quad \dots \dots \dots (11)$$

$$U_N = \frac{1}{H_N} \int_0^{H_N} u \, dy = A_4 u_x \quad \dots \dots \dots (12)$$

ただし

$$A_4 = \int_0^1 F_1(\eta) d\eta \quad \dots \dots \dots (13)$$

以上より、式1・2の基礎式は以下のように示される。

$$\frac{A_3}{A_2 A_4} \left\{ \frac{d}{dx} (H_N \cdot U_N) \right\} (T_a - T_N) = \frac{q_w}{\rho_n \cdot c_p} \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$\frac{A_1}{A_4^2} \frac{d}{dx} (H_N \cdot U_N^2) = \frac{g \sin \alpha}{T_a} \cdot H_N (T_a - T_N) - \frac{\tau_w}{\rho_n} \quad \dots \dots \dots (15)$$

地表面に働くせん断応力 τ_w には、平板に沿う乱流境界層におけるBlasius¹⁸⁾の式を適用する。

$$\frac{\tau_w}{\rho_n} = 0.0225 \cdot u_x^2 \cdot \left(\frac{\nu}{u_x H_N} \right)^{1/4} = \frac{0.0225}{A_4^2} \cdot U_N^2 \cdot \left(\frac{A_4 \nu}{U_N H_N} \right) \quad \dots \dots \dots (16)$$

また、伝熱面流束 q_w については、熱伝達と流体摩擦との間にコルバーンのアナログが成り立つものと仮定し、次式で定義する。

$$\frac{q_w}{\rho_n \cdot c_p} = \frac{0.0225 \text{Pr}^{-2/3}}{(1 - A_2) A_4} \cdot U_N \cdot \left(\frac{A_4 \nu}{U_N H_N} \right)^{1/4} (T_N - T_G) \quad \dots \dots \dots (17)$$

先述したように、冷気流の規模や性質には植生が多大な影響を与えている。そこで、上記の熱収支式・運動方程式に植生に係る項を追加することによって、植生が冷気流に与える影響の再現を試みた。具体的には、熱収支式と運動方程式に植生を起源とする熱量・せん断応力を付加した。なお、地表面と同様に、植生と冷気層の熱・運動量交換に関してもコルバーンのアナログを適用した。ただし植生に関しては、熱・運動量交換面積が植生量に応じて増加することから、地表面と比較して熱伝達量や摩擦応力が増加するものと推測される。そこで、これらの増分をモデル中に反映させるため、鉛直方向への植生量を表現するLAI（葉面積指数）と水平方向への植生量を表現する σ_f （植生被覆率）を地表面での値に乘じた。

式16・17で定義されたせん断応力や伝熱面流束は平滑面状態を想定した値である。従って、住宅地域など地表面に凹凸が存在することによって地表面が粗面状態に変移した場合には、せん断応力や伝熱面流束の値も変化するものと推測される。これらの値に関する真値は、今後実測等によってさらなる検討を行う必要があることか

ら、本モデルでは係数 X_g をパラメータとして用いることによって表現した。植生の場合も同様の問題が考えられるため、地表面のケースと同様、係数 X_f をパラメータとして設定した。

以上の仮定によって、地表面の熱輸送係数・抵抗係数 C_{HG} 、 f_g と植生の熱輸送係数・抵抗係数 C_{HF} 、 f_f は次式で定義される。

$$C_{HG} = X_g \cdot \frac{0.0225 \text{Pr}^{-2/3}}{(1-A_2)A_4} \left(\frac{A_4 v}{U_N H_N} \right)^{1/4} \quad \dots \dots \dots (18)$$

$$f_g = X_g \cdot \frac{0.0225}{A_4^2} \left(\frac{A_4 v}{U_N H_N} \right)^{1/4} \quad \dots \dots \dots (19)$$

$$C_{HF} = X_f \cdot LAI \cdot \sigma_f \cdot \frac{0.0225 \text{Pr}^{-2/3}}{(1-A_2)A_4} \left(\frac{A_4 v}{U_N H_N} \right)^{1/4} \quad \dots \dots \dots (20)$$

$$f_f = X_f \cdot LAI \cdot \sigma_f \cdot \frac{0.0225}{A_4^2} \left(\frac{A_4 v}{U_N H_N} \right)^{1/4} \quad \dots \dots \dots (21)$$

よって、式14・15に式16から21を代入する事により熱収支式、運動方程式は次式で表現される。

$$\frac{A_3}{A_4 A_4} \left\{ \frac{d}{dx} (U_N H_N) \right\} (T_a - T_N) = C_{HG} U_N (T_N - T_G) + C_{HF} U_N (T_N - T_F) \quad \dots \dots \dots (22)$$

$$\frac{A_1}{A_4^2} \frac{d}{dx} (H_N \cdot U_N^2) = \frac{g \sin \alpha}{T_a} \cdot H_N (T_a - T_N) - (f_f + f_g) U_N^2 \quad \dots \dots \dots (23)$$

また、連続の式は単位底面積あたりの周囲大気層から冷気層への連行量 E を用いて、以下のように表現される。

$$\frac{d}{dx} (U_N H_N) = E \quad \dots \dots \dots (24)$$

ただし、 x 方向の連続式だけでは、連行量は未知数である。そこで、本モデルでは等温加熱平板の熱伝達における理論式を実際に求めることによって、連行量の式を導いた。

$$E = 1.2 A_4^{3/5} \left(\frac{0.01875}{A_3} v^{\frac{1}{4}} \text{Pr}^{-\frac{2}{3}} \right)^{4/5} \left\{ \frac{(X_g + X_f LAI \sigma_f)^2 g \sin \alpha |T_N - T_a|^{1/5}}{1.7 A_1 + 1.2 A_3 \text{Pr}^{2/3}} \right\} U_N^{2/5} \quad \dots \dots \dots (25)$$

密度差を駆動力とする自然対流系では、流体中の水蒸気量が変化することによる浮力への影響についても配慮が必要となる。特に、蒸散効果を有する植生を対象とする場合には、その影響がより重要になると考えられる。そこで、本モデルでは運動方程式中の浮力項と連行量式中の気温を以下に示す仮温度に置き換えることによって、水蒸気量が密度に与える影響を考慮した。

$$T_{va} = T_a (1 + 0.608 q_a) \quad \dots \dots \dots (26)$$

$$T_{vn} = T_n (1 + 0.608 q_n) \quad \dots \dots \dots (27)$$

式22から24をそれぞれ空間及び時間について離散化し、 T_N 、 U_N 、 H_N を求める式に変換すると、以下のように表現される。

$$T_N^{new} = \frac{\frac{Ho T_N^{old}}{\Delta t} + \frac{A_3}{A_4 A_4 \Delta x} \{ H_{N-1} U_{N-1} T_{N-1} + T_a (H_N U_N - H_{N-1} U_{N-1}) + (X_g T_G + X_f LAI \sigma_f T_F) C_{H0} \}}{\frac{H_0}{\Delta t} + \frac{A_3}{A_4 A_4 \Delta x} H_N U_N + (X_g + X_f LAI \sigma_f) C_{H0}} \quad \dots \dots \dots (28)$$

$$C_{H0} = \frac{0.0225 \text{Pr}^{-2/3}}{(1-A_2)A_4} \left(\frac{A_4 v}{U_N H_N} \right)^{1/4} \quad \dots \dots \dots (29)$$

$$U_N^{new} = \left\{ \frac{A_1}{A_4^2} \frac{H_{N-1} U_{N-1}^2}{\Delta x} + H_0 \frac{T_{va} - T_{vn}}{T_{va}} g \sin \alpha - (X_f LAI \sigma_f + X_g) \frac{0.0225 U_0}{2 A_4^2} \left(\frac{A_4 v}{U_0 H_0} \right)^{1/4} U_{N-1} \right. \\ \left. + \frac{H_2}{2 \Delta t} U_N^{old} \right\} + \left\{ \frac{H_0}{2 \Delta t} + \frac{A_1}{A_4^2} \frac{H_N U_N}{\Delta x} + (X_f LAI \sigma_f + X_g) \frac{0.0225 U_0}{2 A_4^2} \left(\frac{A_4 v}{U_0 H_0} \right)^{1/4} \right\} \quad \dots \dots \dots (30)$$

$$H_N^{new} = \frac{U_{N-1} H_{N-1} \Delta t + \frac{\Delta x}{2} H_N^{old} + E}{\frac{\Delta x}{2} + U_N \Delta t} \quad \dots \dots \dots (31)$$

ただし

$$H_0 = \frac{H_{N-1} + H_N}{2} \quad \dots \dots \dots (32)$$

$$U_0 = \frac{U_{N-1} + U_N}{2} \quad \dots \dots \dots (33)$$

先述のように、各式中の A_1 から A_4 は冷気温と冷気流速の鉛直分布形状により決定される係数である。この分布形の仮定によって、鉛直方向に関する考慮を簡略化した。なお、本論文では冷気温と冷気流速の鉛直分布を表現する $F_1(\eta)$ 、 $F_2(\eta)$ には、原則として次式に示す平板の乱流境界層に関する分布形(1/7乗則)を使用し、 A_1 から A_4 の値をそれぞれ決定した。

$$F_1(\eta) = 1.8643 \eta^{1/7} \cdot (1-\eta)^4 \quad \dots \dots \dots (34)$$

$$F_2(\eta) = 1 - \eta^{1/7} \quad \dots \dots \dots (35)$$

本論文では乱流型の分布形状を採用するが、これはあくまでも鉛直分布形状の仮定であり、分布形状の仮定が冷気流の特性に与える影響について検討を行う必要がある。この点に関しては、3.3において一様分布形状を仮定した場合の計算を行った。また、乱流型の鉛直分布形状(1/7乗則)が理論上地表面付近で最大流速を生ずることから、地表面に凹凸が存在する場合、本モデルでは地表付近の詳細な状況の再現が困難である。従って、鉛直形状を正確に表現するためには、地表付近の微妙な凹凸や植生形状を反映させる必要があるが、この点に関しては今後の課題とする。

植生を考慮する際の葉温は先述の通り Deardorff の植生・地表面熱収支モデル¹⁷⁾、地表温は Force Restore 法¹⁹⁾によってそれぞれ計算した。冷気層内の比湿については、周囲大気比湿および地表面比湿、葉面比湿の按分によって求めた(按分係数は Deardorff¹⁷⁾による)。なお、本モデルでは植生が完全に冷気層内に収まる形で熱・運動量交換が行われるものと仮定している。樹林などでは冷気層より高い位置に葉層(熱交換層)が存在するケースも考えられるが、葉層で生成された冷気が密度差によって地表面付近に集積された後に斜面下部へ流出するものと仮定して、鉛直方向の考慮を簡略化した。

2.2 斜面下部への流出冷熱量

冷気流が斜面下部へ与える効果を評価する際に、流速や気温を評価指標として使用することが第一に考えられる。しかし、気温が低下しても風速が弱い場合や、冷気層の厚さが薄い場合には斜面下部への影響が弱まる可能性がある。そこで、本研究では冷気温・冷気流速・冷気層厚さを総合的に評価する指標として、次式で示される斜面下部への流出冷熱量を定義した。

図1 等温加熱平板上の境界層に関する計算結果

$$Q = \frac{A_3}{A_2 A_4} \rho_n c_p U_N H_N (T_a - T_N) \quad \dots \dots \dots (36)$$

3. 計算結果

3.1 鉛直等温加熱平板上の自然対流境界層の再現

鉛直等温加熱平板上の自然対流境界層をモデルによって再現し、理論解(乱流境界層の1/7乗則)と比較することでモデルの合理性に関する検証を行った。計算条件として平板温度を32.0℃、周辺温度を30.0℃に設定した。周囲大気風速は無風状態を仮定した。C Vの平板方向の長さは1.0mとした。熱輸送係数 C_{hc} や抵抗係数 f_g に関連するパラメータ X_g は1とし平滑面状態を想定した。

図1に周期定常状態の境界層内平均流速と境界層厚さに関する結果を示す。モデルによって得られた計算解は、流速・厚さともにほぼ理論解と一致した。

3.2 単純斜面を想定した基本結果

冷気流の基本性状を把握することを目的として、裸地($\sigma_f=0.0$, LAI=0.0)および草地($\sigma_f=0.9$, LAI=4.0^{[註1])}状態²⁰⁾の単純な斜面を想定し、冷気流の再現を試みた。計算対象として斜面上の土地利用や傾斜角が一定の、山頂から斜辺長100mまでの区間を設定した。傾斜角は7°、斜面方位は北向きとした。日射量は8月上旬における理論解(雲量0と仮定)を計算によって求め、周囲大気温度には既報²⁾の対象地域における地上15mの8月平均気温を与えた。なお、上空風速は静穏状態として、北風0.5m/sで一定の状態が続くと仮定した。各C Vの斜面方向長さは1.0m、計算タイムステップは1分とした。冷気流の流速・厚さの初期値はそれぞれ $U_N=0.1$ m/s、 $H_N=0.1$ mとした。冷気温の初期値には周囲大気温度と等しい値を与えた。熱輸送係数や抵抗係数に関連するパラメータ X_g および X_f は1とし平滑面状態を想定した。正午から2日間の助走計算を行った後の3日目の結果を計算結果として採用した。

斜面中腹(山頂から50m)における各温度の計算結果を図2に示す。冷気流の発生時刻は裸地斜面で20:08~7:07、草地斜面で18:17~6:03という予測結果を得た。対象斜面では17:20から地表面の放射冷却が開始されるが、草地斜面では約1時間後に冷気が流出し始めるのに対して、裸地斜面では地盤面の熱容量の影響を受けて、冷気流の開始時刻が大きく遅れた。冷気層内平均温度については草地斜面で0.7℃程度低い値が得られた。同地点における冷気流速と冷気層厚さの経時変化を図3に示す。ここで、冷気流速とは冷気層内の平均流速を意味する。冷気流速、厚さともに草地斜面で裸地斜面を大きく上回る結果が得られた。以上のように、草地斜面では冷気流の吹走時間が長い上に、冷気流の規模(冷気温・流速・厚さ)も増大していることから、植生斜面の冷気生成能力は裸地斜面

図2 裸地斜面と草地斜面の各温度に関する比較
(山頂から50m地点) 図3 裸地斜面と草地斜面の流速・冷気層厚さ比較
(山頂から50m地点)

に比較して非常に大きくなることが予想される。

3.3 分布型の影響に関する考察

2.1で述べたように、本論文では原則として乱流型の分布形状を採用している。これはあくまでも計算の簡略化を目的として鉛直方向の分布形状を仮定するものであり、分布形状の仮定が冷気流の特性に与える影響について検討を行う必要がある。そこで、式37・38で示される一様分布型を用いて同様の計算を行い、乱流型の結果と比較した。なお、分布形状以外の計算条件については、3.2での単純斜面(裸地)を想定した基本計算と同様である。

$$F_1(\eta)=1 \quad \dots \dots \dots (37)$$

$$F_2(\eta)=1-\eta \quad \dots \dots \dots (38)$$

図4に斜面中腹(山頂から50m)における斜面下部への流出冷熱量を示す。分布形状が異なるため、冷気流速や厚さに違いが生じる

図4 鉛直分布形状の仮定が斜面下部への流出冷熱量に与える影響(山頂から50m地点)

図5 対象地域の鳥瞰図

図6 測定ポイントの詳細位置および土地利用状況

図7 実測結果(既報¹⁾)との比較

のは明白であるが、図4に示されるように各時刻の流出冷熱量はほぼ同じ値を示した。夜間を通した積算流出冷熱量は、乱流型の約7,700W/mに対して一様型は6%減の約7,200W/mであった。このように熱量としての違いはごくわずかであることから、冷気流の熱的な効果について評価を行うのであれば、分布型の仮定は評価結果に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

3.4 実測結果との比較

図5や図6に示す既報¹⁾の実測対象地域における冷気流の再現を試みた。計算条件として、斜面の傾斜方向は北北東とし、傾斜角度は一様に12°であると仮定した^{注2)}。土地利用に関しては、山頂から373mまでの区間を森林($\sigma_f=0.9$, LAI=7.0)とし、それ以降については草地($\sigma_f=0.9$, LAI=4.0)で一様に設定した。日射量は既報¹⁾の実測日(10月9日)の理論解(雲量0と仮定)を計算によって求めた。上空温には対象地域における地上15mの値を与えた^{注3)}。その他の計算条件は3.2と同様である。

実測地点における冷気流発生時間帯の予測結果を図7に示す。冷気温の予測値(地上2.0m)は実測値(地上2.0m)とほぼ同じ値を示した。周囲大気温度(地上15m)と比較すると、冷気温は常に0.5℃程度低い値を示した。

図8に午前0時における実測値と予測値の鉛直分布比較結果を示す。冷気温に関しては、図7で示されたように地上2.0m付近で良い予測を行うが、実測値の方が地表付近での勾配が強く、特に植生層内部で最大2℃程度の誤差を生じた。流速に関しても同様に植生層内部では大きな誤差を生じた。

図8 午前0時における比較結果(左:冷気温、右:流速)
(図中の網掛け部分は植生層を示す)

上述のような誤差を生じた理由は、実測対象地域では高さ1.0mから1.5m程度の植生(セイタカアワダチソウ)が密生していることから、実測の最大流速が地表付近より上方(地上2.0mから3.0m付近)に移行したことが原因と考えられる。植生の影響を受けて地表付近の流速が弱まることによって、冷熱が植生層内部で滞留し、地表付近の気温も低下したと推察される。例えばMoriらによる実測結果²⁾を始めとして数多くの観測によって、冷気流発生時には地表付近(地表付近から地上数m程度)で、一旦最大流速を生じることが実証されている。従って、本対象地においても地表付近で最大流速を示すことが予想される。但し、本研究では実測の都合上、地上3.5mまでの観測にとどまったため、この点に関しては、今後観測を充実することによって更なる検討を行う必要がある。

4. 冷気流の基本的特性に関するパラメータ解析

前節までの結果から、本研究で作成したモデルは地表付近の取り扱いにやや問題があるものの、冷気流の再現が可能であることを確認した。本節では、応用計算として土地利用状況や斜面特性、人工地表域が冷気流に及ぼす影響に関してパラメータ解析を行った。

4.1 植生量の影響

植生量の違いが冷気流の規模に与える影響を検討することを目的

図9 植生規模の違いが流出冷熱量に与える影響

図10 斜面長・傾斜角の違いが流出冷熱量に与える影響

図11 傾斜方向の違いが冷気流発生時間に与える影響

として、葉面積指数LAIと植生被覆率 σ_f に関するパラメータ解析を行なった。操作パラメータ以外の計算条件については、3.2の単純斜面（裸地）を想定した基本計算と同一である。

LAI=1.0, 4.0, 7.0, 10.0に対して $\sigma_f=0.0, 0.3, 0.6, 0.9$ とした場合の、山頂から100mの地点における流出冷熱量を比較した結果を図9に示す。なお、 $\sigma_f=0.0$ は裸地状態を意味する。参考として地表面を断熱境界面とした結果を併せて示す。 $\sigma_f=0.9$ （植生被覆率90%）の場合、LAI=7.0程度で断熱境界状態とほぼ等しい冷気生成能力を有することが示された。この状態は落葉樹林の葉が充分茂った状態に相当する²⁰⁾。植生被覆率や葉面積指数が大きくなるに従って斜面下部への流出冷熱量は増加しているが、特に裸地に比べると草地（ $\sigma_f=0.9$, LAI=4.0）では約4倍、森林（ $\sigma_f=0.9$, LAI=7.0）では10倍以上の流出冷熱量が期待できる。

4.2 斜面形状の影響

斜面形状の違いが冷気流の規模に与える影響を検討することを目的として、斜面長さや傾斜角、傾斜方向に関するパラメータ解析を行った。なお、ここでも操作パラメータ以外の計算条件については、

3.2の単純斜面（草地）を想定した基本計算と同一である。

斜面長=100m, 200m, 300m, 400m, 500mに対して傾斜角=2°, 7°, 12°とした場合の、山頂から100mの地点における流出冷熱量を比較した結果を図10に示す。斜面長さについては流出冷熱量に対してリニアな関係が認められたが、傾斜角に関しては7°と12°の間に顕著な違いが認められなかった。これは、傾斜角が増加すると単位面積あたりの放射冷却量が減少するため、地表面（植生を含む）からの供給冷熱量が減少することによる。なお、冷気流の発生時間帯についてはわずかな違いにとどまった。

次に、傾斜方位の違いについて検討した結果を図11に示す。方位の影響は主として冷気流発生時間の違いに表れており、発生時刻に関しては東向きと西向きの間に約1時間の違い（東向き17:32、西向き18:47）が生じた。居住地域への冷熱源として冷気流を評価する場合には、この冷気流発生時刻に関しても重要な評価事項になると考えられる。但し、西向きでは消滅時刻が1時間ほど遅れるため、積算発生時間ではほとんど違いが認められない。また、冷気流速や冷気層厚さについても差はごくわずかであるため、夜間の積算流出冷熱量に関しても、北向きに対して南向きは4%増、西向きは2%増、東向きは3%増とわずかな違いにとどまった。

4.3 人工排熱の影響

冷気流が自然地表域から人工地表域へ流出する際の各特性の変化に関しては、冷気流を気候資源として評価する際に重要な問題となる。ここでは単純な仮想斜面上を冷気流が滑降し、その後住宅地へ流出した場合の冷気流特性の変化について検討することを想定して、冷気層内に人工排熱を付加した場合の影響を検討した。

対象斜面の斜面方位は北向き、傾斜角は7°とした。表1に示すように、斜面上の土地利用は斜面上方から森林・草地・裸地・人工地表（コンクリート面）の順に設定した。なお、各土地利用を表現するパラメータには表1に示す値を用いた。建物や交通からの人工排熱を想定して、単位面積あたり0Wから25Wの発熱を各CVの熱収支式に付加した。その他、操作パラメータ以外の計算条件については、3.2の単純斜面を想定した基本計算に関する計算条件と同一とした。

人工排熱を付加した場合の斜面下降方向の冷気流特性変化について、冷気層内平均温度分布を図12に、冷気層内平均流速分布を図13に示す（いずれも午前0時の結果）。森林から流下してきた冷気流は、草地や裸地に到達すると摩擦応力の減少により流速が増加する。その後、人工地表域へ侵入する際に、人工排熱を付加することによって冷気温が急激に上昇した。午前0時の周囲大気温度は22.8℃であるが、人工排熱を25W付加させた場合には住宅地境界から300m程度、人工排熱を付加しない場合でも500m程度で冷気流が消滅すると推測される^{注4)}。なお、人工排熱の付加による冷気流速の

表1 計算条件

土地利用	森林	草地	裸地	人工地表
範囲 [m]	山頂～100	101～150	151～200	201～300
σ_f	0.9	0.9	0.1	0
LAI	7	4	4	-
X_g [-]	1	1	1	1～4
人工排熱 [W]	0	0	0	0～25

図 1.2 人工排熱の付加が冷気温に及ぼす影響 (午前0時)

図 1.3 人工排熱の付加が冷気流速に及ぼす影響 (午前0時)

変化はわずかであった。

4.4 抵抗係数 C_{hg} の影響

ここでは前節と同様、単純な仮想斜面上を冷気流が滑降し、その後住宅地へ流出した場合の冷気流特性の変化について検討することを想定して、抵抗係数を増加した場合の影響を検討した。例えば、住宅地などでは、森林キャノピーと同様に地物周りで複雑な気流場が存在することが予想されるが、ここでは住宅などの地表地物による抵抗に関しては X_g を1から4まで増加する、すなわち地表面における抵抗係数を平滑面状態から、その4倍まで段階的に増加させることによって表現した¹⁵⁾。対象斜面の斜面方位は北向き、傾斜角は 7° とした。表1に示すように、斜面上の土地利用は斜面上方から森林・草地・裸地・人工地表(コンクリート面)の順に設定した。その他、操作パラメータ以外の計算条件については、3.2の単純斜面を想定した基本計算に関する計算条件と同一とした。

抵抗係数を増加した場合の斜面下降方向の冷気流特性変化について、冷気層内平均温度分布を図1.4に、冷気層内平均流速分布を図1.5に示す(いずれも午前0時の結果)。抵抗係数を増加することによって、冷気流速が急速に弱まる傾向が見られた。なお、抵抗係数の増加による冷気温の変化はわずかであった。

5. 結論

本研究では、斜面直角方向への相似分布を前提とする積分方程式をベースとした冷気流モデルを作成し、冷気流の基本特性について検討した結果、以下の知見を得た。

1) 斜面上の土地利用の違いが冷気特性に与える影響を検討した結

図 1.4 抵抗係数の増加が冷気温に及ぼす影響 (午前0時)

図 1.5 抵抗係数の増加が冷気流速に及ぼす影響 (午前0時)

果、植生で覆われた斜面の有する冷気生成能力は裸地斜面に比較して非常に大きくなることが示された。

2) 斜面直角方向への相似分布形状については、冷気流の熱的な効果について評価を行うのであれば、分布型の仮定は評価結果に大きな影響を及ぼさないことが示された。

3) 実測結果との比較結果については、本モデルでは地表付近の微妙な凹凸や植生形状を反映することができないため、特に植生層内部で誤差を生じた。

4) 斜面上の植生量が斜面下部への流出冷熱量に及ぼす影響を検討した結果、植生被覆率や葉面積指数が大きくなるに従って増加し、森林を想定した場合には断熱境界面とほぼ同等の効果が得られることが示された。

5) 斜面形状の違い(長さ・角度)が斜面下部への流出冷熱量に与える影響を原単位的なデータとして整備した。傾斜方位については、発生時間帯に変化を生じるが、夜間を通した積算冷熱量はわずかな違いにとどまることが示された。

6) 冷気流が自然地表域から人工地表域へ流出する際の特性変化を想定して人工排熱や抵抗係数に関する検討を行った結果、人工排熱は冷気温度に対して、抵抗係数は冷気流速に対して強い影響を及ぼすことが示された。

以上の検討結果から、都市周辺部の丘陵地域における緑地保全の重要性が示されたと考えられる。但し、冷気流発生源の地表面状態が裸地や人工面に改変された場合、冷気流の規模が縮小する(発生時間の遅れ、冷気温上昇、流速低下)ことが示されており、特に冷

気の源となる斜面上方は可能な限り自然を保全し、やむを得ない場合には人工植栽を施すなどの配慮が望まれる。また、冷気流は自然地内で強く卓越する一方、人工地表域に侵入すると勢力が弱まることを示されており、斜面下部の人工地表域へ冷気を導入することを目的として、斜面傾斜方向の緑道を設置する等の配慮が望まれる。

【謝辞】

本研究の一部は、平成9年度文部省科学研究費補助金(基盤研究[B]、研究代表者 水野稔、課題番号 09450217)の助成を受けた。また、本研究の遂行には住宅都市整備公団関西支社震災復興事業本部の多大なご協力を受けた。記してここに感謝の意を示す。

【注記】

- 1) 本論文では鉛直方向の植生量についてはLAI(葉面積を土地面積に対する比で表現した値)を、水平方向の植生量については σ_f (上空から見た被覆率)を用いて植生規模や種類を表現する。なお、LAIが4.0は草原を、LAIが7.0は落葉樹林の葉が十分に生い茂った状態に相当する。
- 2) 実斜面では山頂に近づくにつれて傾斜が急に変化するが、計算では山頂と実測地点を直線で結んだ一様角度の斜面を仮定した。また、裾野付近の谷の拡がりなどによって、現実的には3次元的な流れが生じていると推測されるが、本モデルでは2次元的な流れが続くものと仮定した。この点に関して、本モデルでは簡易に冷気流規模のオーダーを把握することを目的として2次元モデルを適用したが、複雑な地形上の詳細な流れ場を検討するのであれば、3次元モデルへの展開を必要とする。
- 3) 既報その1では地上5.0mで気温を測定していたが、地上5.0mは冷気流の影響を受けていると推測される。そこで、1997年の年間を通した地上15.0mと5.0mにおける長期観測結果から平均気温差(10月上旬)を計算し、既報その1の地上5.0mの気温に加算することによって、計算日の上空温度(地上15.0m)を再現した。
- 4) 人工地表域内を冷気流が流れると、徐々に冷気温度が上昇することによって、冷気温度が周囲大気温度(環境温度)よりも高くなる地点が必ず生じる。本モデルではその時点で冷気流が消滅したと判断し、その地点を冷気流消滅地点として定義している。
- 5) 本論文では抵抗係数に関するパラメータ解析として、平滑面状態を示す $X_g=1$ から段階的に $X_g=4$ まで増加させた場合の影響を検討したが、この検討はあくまでもパラメータスタディーであり、それぞれの値が具体的にどのような状態(人工地物の高さや密度)を示すかは未知である。これらの値の絶対値に関しては、今後更なる検討を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) 鳴海大典・水野稔・中村安弘・下田吉之・比嘉博:冷気流の発生構造把握のための実測調査研究 丘陵地周辺の住宅地域に及ぼす冷気流の影響その1、建築学会計画系論文集、No.543、pp.85-91、2001年
- 2) 鳴海大典・水野稔・中村安弘:複雑な地形を有する丘陵地域における屋外気温分布の成因、建築学会計画系論文集、No.527、pp.77-83、2000年
- 3) C.J.Nappo and K.S.Rao:A model study of pure katabatic flows, Tellus, No.39A, pp.61-71、1987年
- 4) Prandtl, L.: Führer durch die Stromungslehre, Vieweg & Sohn, Braunschweig, pp.373-375、1942年
- 5) Defant, F.: Zur theorie der hangwinde, nebst bemerkungen zur theorie der berg-und talwinde, Arch. Meteorol. Geophys. Biokl. Springer-Verlag, pp.421-450、1949年
- 6) Lettau, H.H.: A case study of katabatic flow on the south polar plateau, Studies in antarctic meteorology, M. J. Rubin ed. Antar. Res. Ser. 9, Amer. Geophys. Union, pp.1-11、1966年
- 7) Kondo, J and T.Sato: A simple model of drainage flow on a slope, Boundary Layer Meteorol., 43, pp.103-123、1988年
- 8) Gutman, L.N.: Introduction to the nonlinear theory of mesoscale meteorological processes, TT 71-50132, NTIS, Springfield, VA, pp.224、1972年
- 9) Ellison, T.H. and Turner, J.S.: Turbulent entrainment in stratified flows, J. Fluid Mech, No.6, pp.423-448、1959年
- 10) Fleagle, R.G.: A theory of air drainage, J. Meteorol, No.7, pp.227-232、1950年

- 11) Manins, P.C. and B.L.Sawford: A model for katabatic winds, J. Atmos. Sci., No.36, pp.619-630、1979年
- 12) Briggs, G.A.: Canopy effects on predicted drainage flow characteristics and comparisons with observations, Proc. 5th Symp. on Turb. and Diff., Atlanta, Amer. Meteorol. Soc., pp.113-115、1981年
- 13) McNider, R.T. and Pielke, R.A.: Numerical simulation of slope and mountain flows, J. Clim. Appl. Meteorol, No.23, pp.1441-1453、1984年
- 14) Yamada, T.: A numerical simulation of nocturnal drainage flow, J. Meteorol. Soc. Japan, No.59, pp.108-122、1981年
- 15) G.Schadler and A.Lohmeyer: Simulation of nocturnal drainage flow on personal computers, Meteorol. Zeitschrift, N.F.3, pp.167-171、1994年
- 16) 小林哲夫: 冷気流が作り出す斜面温暖帯、局地気象研究会講演論文集、No.13, pp.23-30、1997年
- 17) Deardorff J.W.: Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation, J. Geophys. Res., Vol.83, pp.1889-1903、1978年
- 18) H.Schlichting: Boundary Layer Theory, Verlag G. Braun, Karlsruhe, p.598、1968年
- 19) Bhumralkar C.M.: Numerical experiments on the computation of ground surface temperature in an atmospheric general circulation model, J. Appl. Meteorol, No.14, pp.1246-1258、1975年
- 20) Montieth J.L., Szeicz G. and Waggoner P.E.: Measurement and control of stomatal resistance in the field, J. Appl. Ecol., Vol.2, pp.345-355、1965年
- 21) M.Mori and T.Kobayashi: Dynamic Interaction Between Observed Nocturnal Drainage Winds and a Cold Air Lake, Journal of the Meteorol. Soc. of Japan, Vol.74, No.2, pp.247-258、1996年

【本論文で使した記号一覧】

- C_{HF} : 植生面の熱輸送係数 [-]
 C_{HG} : 地表面の熱輸送係数 [-]
 C_p : 空気定圧比熱 [J/(kg·K)]
 E : 周囲大気から冷気層への連行量 [$m^3/(m^2 \cdot s)$]
 f_r : 植生面の抵抗係数 [-]
 f_g : 地表面の抵抗係数 [-]
 $F_1(\eta)$: 鉛直分布仮定関数(本論文では平板乱流境界分布) [-]
 $F_2(\eta)$: 鉛直分布仮定関数(本論文では平板乱流境界分布) [-]
 g : 重力加速度 [m/s^2]
 H_δ : 冷気層厚さ [m]
 LAI : 葉面積指数 [m^2/m^2]
 Pr : プラントル数 [-]
 Q : 斜面下部への流出冷熱量 [W/m]
 q_a : 周囲大気の比湿 [kg/kg]
 q_n : 冷気層内の比湿 [kg/kg]
 q_s : 地表面からの熱フラックス [W/m]
 T : 冷気温 [$^{\circ}C$]
 t : 時刻 [s]
 T_a : 周囲大気温度 [$^{\circ}C$]
 T_g : 地表面温度 [$^{\circ}C$]
 T_n : 冷気層内平均温度 [$^{\circ}C$]
 T_{va} : 周囲大気の仮温度 [$^{\circ}C$]
 T_{vn} : 冷気層の仮温度 [$^{\circ}C$]
 u : 冷気流速 [m/s]
 U_n : 冷気層内平均流速 [m/s]
 u_n : 冷気層の主流速 [m/s]
 x : CV斜面方向長さ [m]
 X_g : 地表面における熱輸送係数・抵抗係数変化パラメータ [-]
 X_f : 葉面における熱輸送係数・抵抗係数変化パラメータ [-]
 α : 傾斜角度 [$^{\circ}$]
 σ_f : 植生被覆率 [-]
 ρ_a : 空気密度 [kg/m 3]
 τ_w : 地表面せん断応力 [Pa]
 ν : 動粘性係数 [m 2 /s]

(2001年11月10日原稿受理、2002年4月16日採用決定)