夏季夜間における山麓冷気流の集積・流出過程に関する研究

FILLING PROCESS IN A VALLEY AND OUTFLOW PROCESS INTO A BUILT-UP AREA
OF COLD AIR DRAINAGE ON SUMMER NIGHT竹林英樹^{*1}, 森山正和^{*2}

Hideki TAKEBAYASHI and Masakazu MORIYAMA

Filling process in a valley and outflow process into a built-up area of cold air drainage are examined by a measurement and a model calculation. The valley faces a built-up area in Kobe city. Air temperature in the bottom of the valley is the lowest. This can be thought to reflect on the filling process of cold air drainage in a valley. When wide area land and sea breezes blow in this area, the cold air filled in the bottom of the valley is mixed, and it is blown away by wide area land and sea breezes. From the vertical potential temperature profile, the thickness of the cold air in the bottom of the valley is thicker than that of previous study on the slope.

Keywords: Cold Air Drainage, Observation, Summer Night, Filling, Outflow

冷気流, 実測, 夏季夜間, 集積, 流出

1. はじめに

著者らは文献¹⁾において, 冷気流の市街地気温低下効果について検討を行い, 広域海陸風が弱い条件に限り(大阪湾周辺地域では夜間も海風が吹く場合がある), 山際から1km程度までの市街地において冷気流による気温低下効果が期待できるが, 山から離れるとその可能性は低くなり, 広域の風が強くなると冷気流は吹き消され, 市街地での気温低下効果は期待できなくなるという結論が得られた。ここで, 広域海陸風とは大阪平野と大阪湾との熱バランスにより吹く海陸風を意味する¹⁾。

本報では, 市街地に対して冷気の流出源となる谷の中で, 冷気の集積と流出の過程について検討を行い, 谷口周辺市街地に対する冷気の流出がどの程度期待できるかという点について考察を行う。

冷気の集積に関しては, 特に盆地における夜間の冷却に注目して多くの研究がなされている^{2), 3)}。Maki 他³⁾は一次元の数値モデルにより大気層の熱収支的な立場から検討を行い, 盆地の深さが500mの場合, 風の弱い快晴の夜間に盆地底での夜間冷却量は平坦地に比べ約15%(冬期)から25%(夏期)大きくなると述べている。これは移流, 堆積により山地斜面で生成された冷気が盆地底に集められるためである。山麓においても盆地底よりは少ないが, 山頂や丘陵頂部などより大きな冷却量になると述べられている。

本研究の対象とする六甲山南麓市街地は, 山頂と谷底の標高差が

500m程度のいくつかの谷が市街地に面した地形である。これらの谷においても斜面で生成された冷気が谷に移流, 堆積していると考えられる。そして, 堆積した冷気は市街地に流出し, 文献¹⁾で示されたように広域海陸風が弱い場合には市街地内の気温を低下させる。つまり, 神戸のように谷口が市街地に面した都市においては, 谷において冷気が集積されるために谷口周辺市街地で比較的大きな気温低下が期待できると考えられる。そこで, 本研究では, 谷によって冷気がどの程度集積され, 集積された冷気の市街地内に対する流出がどの程度期待できるかという点に注目して検討する。具体的には, 浅水方程式モデルを用いた計算と, 谷の中から市街地にかけての気温分布と風向風速の連続測定結果を基に, 冷気の集積, 流出過程についての考察を行う。

2. 浅水方程式モデルによる対象地域の計算

2. 1 モデルの概要

日本農業気象学会局地気象研究部会(代表: 鳥谷均, 小林哲夫)は日本国内における冷気流に関する研究の歴史を踏まえて, 冷気流の基本的な性質を以下のように整理している⁴⁾。晴天晴夜には斜面上で放射冷却によって低温になった地物に接した大気が冷却される。冷却された斜面上の大気と同一高度の谷間上空の大気の気温を比較すると斜面上の方が低くなる。従って, 冷気流は同一高度面内の密度差による負の浮力(重力)を駆動力として斜面を下下する。本研究で用いる浅

*1 神戸大学工学部建設学科 助手・修士(工学)

*2 神戸大学工学部建設学科 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Arch. & Civil Eng., Faculty of Eng., Kobe Univ., M. Eng. Prof., Dept. of Arch. & Civil Eng., Faculty of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

図1 浅水方程式モデルの概要

水方程式モデルは、この考え方と整合しており、その概要を図1に示す。図1中の参照面には計算領域中で標高が最も低い地点を設定し、計算には参照面を基準とした標高を用いる。なお、以下の計算の説明(2章中)においては、この参照面基準の標高を便宜的に標高と呼ぶ。このモデルの特徴は、地表面上に(冷氣)層を仮定し、層内は一樣、非圧縮、非粘性であるとする点にある。この仮定により、地表面と上空大気による層に対するせん断応力は層全体に対する抵抗としてのみ考慮され、密度成層は考慮されない。従って、このモデルの適用範囲については限界があるが、斜面により生成された冷氣が谷に集積される過程においては適用可能であると判断している。しかし、冷氣流が市街地へ流出した後は熱的、機械的要因による拡散効果が大きくなるため、この仮定は適さない。

本モデルでは、高さ方向に一樣な層を仮定するため、連続の式を鉛直方向に積分することが出来る^{5), 6), 7)}。ここで、 h は冷氣層の厚さ(m)、 q は冷氣生成量($\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$)である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = q \quad (1)$$

静水学の式より高さ H での圧力を P_0 とすると式(2)が導かれる。ここで、 H は参照面から冷氣層上端までの高さ(m) ($H=h+\text{標高}$)である。

$$p = -\rho g(H - z) + P_0 \quad (2)$$

ここで、水平方向の圧力勾配は z から独立なので式(3)が導かれる⁷⁾。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho g \frac{\partial H}{\partial x}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = \rho g \frac{\partial H}{\partial y} \quad (3)$$

よって運動方程式の圧力項を式(3)で置き換えると以下ようになる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\tilde{g} \frac{\partial H}{\partial x} - cu\sqrt{u^2 + v^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial vu}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = -\tilde{g} \frac{\partial H}{\partial y} - cv\sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

ここで、 u, v は水平方向の風速成分(m/s) (高さ方向に一樣)である。

本モデルの特徴は、複雑地形上の流れを表現するために、基礎方程式を鉛直方向に積分している点にある。この単純化操作により、複雑な地形上の流れをコンピュータ容量と計算時間をそれほど要求せずに計算することが可能となる。本モデルでは、厚さ h を持った冷氣層を仮定し、単位時間当りの冷氣生成量 q を与える。抵抗 c は冷氣層全体に対する抵抗である。冷氣流の現象を表現するために、この冷氣生成量と抵抗の項が浅水方程式モデルに付加されている。

なお、地表面熱収支式を解いて温度 T を求め、温度差 ΔT を評価する場合には、冷氣層 h を仮定することは出来なくなり、複雑地形上で熱収支式と連成した基礎方程式を解く必要が生じる。本研究では、文献⁶⁾を参考に $\tilde{g} = g\Delta T/T_0 = 0.07(\text{m}^2/\text{s})$ と仮定している($T_0 = 300\text{K}$, $\Delta T = 2.1^\circ\text{C}$ に相当する)。ここで、 ΔT は冷氣層の平均空気温度 T ($^\circ\text{C}$)

図2 冷氣流計算結果(左:30分後、右:60分後)
($5.1\text{km} \times 2.9\text{km}$, $q=10\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$, $c=0.01$ (1/m)) 図3 測定対象地域と測定地点
(⑤青谷堰堤は対象地域西側の青谷内に位置する)

表1 測定地点の標高と測定項目

測定地点	標高	測定項目
① 和谷上流	405m	気温
② 和谷中間	240m	気温
③ 和谷堰堤	200m	気温、風向風速
④ 摩耶東谷	320m	気温
⑤ 青谷堰堤	195m	気温
⑥ 美野丘小学校	130m	気温、風向風速
⑦ 和谷堰堤北	205m	風向風速

と周囲空気温度 T_0 (°C) の差であり冷気流の駆動力となる。従ってここでは、森林部で単位時間あたりにある一定の比率で生成された冷気が、谷の地形によりどのように集積し市街地へ流出するのかという点について検討する。

微分方程式は、時間について前進差分、空間について中心差分、移流項は風上差分により差分方程式に変換され、等間隔のスタッガード格子で解かれる。側方の境界条件は、それぞれの境界に対して速度成分及び冷気厚さの勾配を0とした。従って、2方向あるいは3方向の谷より集積した冷気が一度に市街地へ流出してくると、側方境界から十分に流出出来なくなり市街地で冷気が溜まる結果になる。計算は、冷気厚さがゼロの静穏状態からスタートし、一定の割合の冷気生成率 q ($m^3/(m^2s)$) により生成された冷気が、標高と抵抗 c (1/m) の影響を受けて時間とともに変化する。

以上より、本研究で用いる浅水方程式モデルの特徴をまとめると次のようになる。複雑な地形上の流れをコンピュータ容量と計算時間をそれほど要求せずに計算することが出来る。また、斜面上の冷気が谷底に集まり谷の冷気流となって流れる様子が表現出来る。従って、谷口に集積し市街地へと流出する冷気流の算定には利用できると考えられる。しかし、冷気生成率 q を用いているため、斜面と冷気との間の熱交換が十分に表現出来ない。また、冷気層と周囲大気との間の温度差を一定としているため、冷気流の厚さは時間とともに単調増加する(但し冷気生成率 q に負の値を与えると厚さの減少も表現出来る)。高さ方向に一樣な層を仮定しているため、風速、温度の鉛直分布は求まらない。

2. 2 パラメータの設定

標高については数値地図を基に与えた。抵抗 c は植物や地物の条件により設定する必要がある。平原では 0.0025 (1/m)、森、市街地では 0.01 (1/m) 程度であるといわれている⁶⁾。対象地域はほぼ森と市街地に相当すると考えられるので、本研究では文献⁶⁾より 0.01 (1/m) を与えた。なお、感度解析の計算結果より、抵抗 c は冷気の市街地内への進入時間に影響を及ぼすことが分かっている⁵⁾。

冷気生成率 q は地表面の熱収支により決定され、放射冷却の度合いが大きく影響する。森林では $1 \sim 30$ ($m^3/(m^2h)$) 程度であるといわれているが⁶⁾、森林部分では樹冠部で生成された冷気が幹空間部の空気との熱交換を経て流出するとも考えられ測定と計算により検討を行っている⁸⁾。市街地においては放射冷却と建物、道路での日射の蓄熱、人工排熱が関係し、冷気生成率 q は負の値になると考えられる。冷気生成率 q に標高に応じた $0 \sim 15$ ($m^3/(m^2h)$) の分布を与えて計算を行ったが、計算領域全体に一樣な値を与えた場合と比較して大きな差が見られなかった⁵⁾。日本の夏は比較的水蒸気量が多く放射冷却があまり期待できないことを考慮して、本研究では一律 $q=10$ ($m^3/(m^2h)$) を仮定した¹⁰⁾。

2. 3 計算結果

神戸市灘区の市街地に面した杣(そま)谷を対象地域 ($5.1\text{km} \times 2.9\text{km}$) とし、冷気生成率 $q=10$ ($m^3/(m^2h)$)、抵抗 $c=0.01$ (1/m) の場合の計算結果を図2に示す。測定地点も併せて示している(詳細は3章を参照)。なお、広域海陸風は弱い条件を想定して横方向からの流入は0としている。計算結果には、地形により冷気が谷筋に集積され、重力に従って標高の低い方へ流出する様子が再現されている。

3. 測定の概要

3. 1 対象地域の概要、測定地点及び期間

本研究では神戸市灘区の市街地に面した杣(そま)谷を対象地域とした。地域内には、杣谷の幾つかの支流と谷に面した市街地が含まれる。対象地域と測定地点を図3に示す。杣谷内およびその下流の、①杣谷上流、②杣谷中間、③杣谷堰堤、④摩耶東谷、⑤美野丘小学校、⑦杣谷堰堤北、と隣の谷の⑥青谷堰堤の計7地点で測定を行った。各測定地点の標高及び測定項目を表1に示す。また、この他に市街地内の神戸海洋気象台、神戸市大気監視局での観測データも解析に用いる。測定期間は1999年7月20日～8月3日、8月17日～30日である。なお、測定期間のデータは夜間の27回分が得られ、そのうち5回は降雨が記録されたため対象外とし、残りの22回分を解析対象とする。この期間の神戸海洋気象台における夜間平均雲量が8未満になった夜間は7回しかなく、比較的放射冷却の少ない日が多かった。また、気温の鉛直分布の測定は7月20日～25日の夜間のみ行った。

3. 2 測定機器

気温は輻射除けシェルター内に自記式サーミスタセンサを入れて測定した。風向風速は三杯式風速計を用いて測定した。測定高さは、気温が地上1.5m、風向風速が地上2.0mとした。なお、③杣谷堰堤においてはヘリウムガスを入れた風船の下に自記式サーミスタセンサを計5個付けて気温の鉛直分布の測定を行った。全ての測定は1分間隔で行い、解析には10分毎に平均した値(風向は最多頻度)を用いる。

3. 3 測定結果

測定結果は基準標高を0mとして乾燥断熱減率 $0.98\text{K}/100\text{m}$ で標高補正を行った。1999年7月20日～27日の夜間(18:00～6:00)のみの気温の測定結果を図4に示す。図中に両側矢印で示す期間には③杣谷堰堤で、上流の①杣谷上流、②杣谷中間、下流の⑥美野丘小学校より気温が低くなっており、その時の温度差は $1.5^\circ\text{C} \sim 2.0^\circ\text{C}$ 程度である。この傾向は他の測定期間においても表れており、谷の中の斜面森林部で生成された冷気が堰堤に集積されるためであると考えられる。

4. 冷気集積及び流出の特性

文献¹⁾で述べられたように冷気流の出現は広域海陸風の強さにより大きな影響を受けるため広域海陸風の強さ別に解析を行う。

4. 1 広域海陸風が一晩中強い場合

夜間を通して広域海陸風が強かった条件の例として、7月22日～23日の夜間の杣谷での気温、風向風速の測定結果を図5、6に示す。ポートタワー、灘監視局での風向風速の観測値より、市街地内では一晩中風速 $3 \sim 5\text{m/s}$ 程度の南西からの海風が卓越していた。③杣谷堰堤、②杣谷中間における気温は日没後から20時頃にかけて約 2°C 程度低下しており、この間に冷気の集積が起こったと考えられる。計算結果(図2左図)における③杣谷堰堤付近での冷気の集積を表していると考えられる。この時、③杣谷堰堤、⑦杣谷堰堤北(②杣谷中間と③杣谷堰堤の間に位置する)における風速は共に弱く、風向はばらばらついていた。22時以降は堰堤では 2m/s 前後の南風が安定して吹いていたのに対し、堰堤北では 1m/s 前後の弱い北風が吹いていた。堰堤の南風は市街地を吹いていた海風の影響を受け、堰堤北の弱い北風は冷気流成分を捉えていたと考えられる。しかし、22時以降の気温低下がほとんど見られないことから、堰堤付近に流れ込んだ冷気は、海風によって混合あるいは吹き払われたと考えられる。図4の7月23日、24日などにも、日没後すぐに堰堤において気温が大きく低下するがその後ほとんど気温低下が見られない傾向が表われており、冷気の集積は行われるが冷気流として市街地へ流出しない、広域海陸風が一晩中強い場

() 内には雲量を示し (神戸海洋気象台 21 時と 3 時), ③ 杣谷堰堤が① 杣谷上流や⑥ 美野丘小学校より低温になる期間を $\longleftrightarrow$ で示す。

図4 1999年7月20日～27日の夜間 (18:00～6:00) の気温の測定結果

図5 広域海陸風が一晩中強い場合 (7月22～23日、18:00～6:00) の気温とポートタワー風速の測定結果

図7 広域海陸風が弱くなる場合 (7月21～22日、18:00～6:00) の気温とポートタワー風速の測定結果

図6 広域海陸風が一晩中強い場合 (7月22～23日、18:00～6:00) の風向風速の測定結果

図8 広域海陸風が弱くなる場合 (7月21～22日、18:00～6:00) の風向風速の測定結果

合の典型的な例であると考えられる。

4. 2 広域海陸風が弱くなる場合

広域海陸風が徐々に弱くなる条件の例として、7月21日～22日の夜間の杣谷での気温、風向風速の測定結果を図7、8に示す。ポートタワー、灘監視局での風向風速の観測値より、市街地内では日没後すぐには風速3～6m/s程度の南西からの海風が卓越していたが、時間と

共に弱くなり0時以降は1～2m/s程度の弱い海風になった。広域海陸風が強い場合と同様に③ 杣谷堰堤、② 杣谷中間における気温は日没後から21時頃にかけて約2℃程度低下しており、この間に冷気の集積が起こったと考えられる。前節と同様に、計算結果 (図3左図) における③ 杣谷堰堤付近での冷気の集積を表していると考えられる。この時の③ 杣谷堰堤、⑦ 杣谷堰堤北における風向風速も広域海陸風が強い場

合とほぼ同じ変動をしていた。広域海風が弱くなった0時以降は傾向が大きく異なり、堰堤の気温は更に下がりつづけている。これは海風などによる冷氣との混合あるいは吹き払いが起きなかったためであると考えられる。このことは、計算結果(図3右図)における③杣谷堰堤付近から⑥美野丘小学校付近市街地への冷氣の流出があったと考えられる。

4. 3 温位の鉛直分布

③杣谷堰堤の側で風船を上げて測定した上下気温分布の測定結果を図9に示す。風船は浮力が十分でなかったために時間と共に落下し、夕方には50mの高さであったが朝方には30m程度になった。また、風による横方向の移動も大きかったため、高さの変動が大きく図9では気温の標高補正を行ったのみで温位に変換していない。なお、堰堤は風船を上げた場所より3m高くなっているため、ここでは測定高さ1.5mに堰堤高さ3mを加えた4.5mを堰堤での測定高さとして用いることとする。図9の中から比較的大きな上下温度差が生じた時刻の温位の鉛直分布を、風が弱く風船が安定していたと仮定して作成した(図10)。風の影響により横方向の移動と高さの変動が大きくなる場合には上下温度差が解消される傾向にあり、大きな上下温度差が生じた時刻は比較的風が安定していた。上下温度差は2℃以上となっていた。温位の鉛直分布より冷氣の厚さは少なくとも30m以上はあったと考えられるが、更に上空の測定結果がないと十分に判断できない。森他²⁾の測定では、斜面で地表付近に形成された冷氣層の厚さは、温位の絶対値や観測点に関係なく高々25mであったと報告されている。本測定は斜面ではなく冷氣が集積されやすい地形である堰堤付近で行っているため、斜面で行った結果より冷氣は厚くなっていたと考えられる。計算結果では③杣谷堰堤付近で、冷氣が集積し安定した状態での風速は1.1m/s程度、冷氣層の厚さは250m程度となっており、冷氣が集積したと考えられる期間(18時～22時)の測定結果の平均風速1.2m/sとほぼ一致している。③杣谷堰堤は冷氣を集積しやすい地形のため、計算結果では冷氣の厚さが250m程度にもなったが、実際には上空風の巻き込みなどの影響により、250mよりは小さな値になっていると考えられる。今後は測定方法を再検討し、更に上空の気温を測定することで冷氣が集積する谷底での冷氣の厚さが算定できると考えられる。

5. 結論

浅水方程式モデルによる計算と測定により、谷の中での冷氣の集積、流出の過程について検討を行った。

- 1) 浅水方程式モデルにより、広域海陸風が弱い条件での冷氣の集積、流出過程について検討を行った結果、地形により冷氣が谷筋に集積され、重力に従って標高の低い方へ流出する様子が再現された。
- 2) 谷中の気温を比較すると、広域海陸風の弱い場合には、堰堤で最も低く、中間、上流の順になっており、約2℃の温度差が確認された。これは冷氣の集積効果を反映していると考えられる。但し、広域海陸風の強い場合には、堰堤で集積された冷氣が混合されたり吹き払われ、この温度差は小さくなっていた。
- 3) 堰堤での温位の鉛直分布より、冷氣層の厚さは既往の研究において斜面で観測されたものよりは厚かったと考えられ(少なくとも30m以上)、谷の冷氣集積効果を反映していたと思われる。

以上のことから、神戸のように谷口が市街地に面した都市においては、谷において集積された冷氣が流出してくる(最大で2℃程度低温な冷氣)ために、比較的大きな市街地気温の低下が期待できる。今後

図9 上下気温分布の測定結果(7月21～22日)

(I、II、III、IV、Vは風船(夕方は50m)より10m間隔付けられたで自記式サーミスタセンサの番号)

図10 温位の鉛直分布測定結果(7月21～22日)

は、この冷氣の流出が市街地内の気温分布に及ぼす影響について、詳細に検討を行う必要があると考えている。

謝辞 本研究を行うに当たり風速計を設置させて頂いた美野丘小学校の先生方、及び気象データの提供をお世話して頂いた神戸市の向井健悟氏に謝意を表します。本研究は日本学術振興会科学研究費補助金奨励研究(A)(127505310、代表:竹林英樹)の補助を受けて行われたものである。

注) ドイツのフライブルクで同様の計算をされたThamm氏によると、水蒸気量の少ないドイツでは $q=40\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ を用いている。

参考文献

- 1) 竹林英樹, 森山正和, 糸川文崇: 夏季夜間における山麓冷氣流の出現頻度と市街地における影響距離, 日本建築学会計画系論文集, 第542号, pp. 99-104, 2001. 4
- 2) 森洋介, 近藤純正他: 山地の夜間冷却と熱収支, 天気, Vol. 30, No. 5, pp. 259-267, 1983. 5
- 3) M. Maki and T. Harimaya: The Effect of Advection of Downslope Cold Air on Nocturnal Cooling in Basins, Meteorological Society of Japan, Vol. 66, No. 4, pp. 581-597, 1988. 8
- 4) 日本農業気象学会局地気象研究部会(代表: 鳥谷均, 小林哲夫): 局地風(2) 冷氣の流れ, 農業気象, 56(4), pp. 311-316, 2000. 12
- 5) 竹林英樹, 森山正和, 糸川文崇: 夏季夜間の冷氣流による市街地冷却効果に関する研究 その2 浅水方程式モデルによる検討, 空調調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集(第28回), pp. 65-68, 1999. 3
- 6) G. Schaedler and A. Lohmeyer: Simulation of Nocturnal drainage flows on personal computers, Meteorol. Zeitschrift, N.F. 3, pp. 167-171, 1994. 6
- 7) J. Pedlosky: Geophysical Fluid Dynamics, Springer-Verlag, pp. 57-63, 1986
- 8) 森真佐雄, 竹林英樹, 森山正和: 夏季夜間の冷氣流による市街地冷却効果に関する研究その3 樹林内における気温鉛直分布の形成機構, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第40号・環境系, pp. 337-340, 2000. 6

(2002年1月7日原稿受理, 2002年5月8日採用決定)