



# 山麓冷気流による夏季夜間の市街地熱環境緩和効果に関する研究

竹林, 英樹

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2003-03-11

(Date of Publication)

2007-08-09

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2674

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002674>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

山麓冷気流による夏季夜間の  
市街地熱環境緩和効果に関する研究

平成 15 年 1 月

竹 林 英 樹

## 目次

第1章 序論	1
1-1 はじめに	1
1-2 従来の研究	2
1-2-1 都市スケールの風の間、温度場に関する研究	2
1-2-2 冷気流に関する研究	3
1-2-3 建築、都市計画への応用	4
1-3 論文の目的と構成	5
参考・引用文献	6
第2章 冷気流の生成過程に関する考察	9
2-1 概要	9
2-2 実測調査の概要	9
2-2-1 樹木における実測調査	9
2-2-2 長草および短草における実測調査	9
2-3 実測結果および考察	10
2-3-1 樹木における測定結果	10
2-3-2 長草における測定結果	10
2-3-3 短草における測定結果	11
2-4 ダブルソースモデルの概要	12
2-4-1 モデルの概要	12
2-4-2 計算方法	14
2-5 計算結果および考察	15
2-5-1 樹木を想定した計算結果と観測結果の比較	15
2-5-2 樹木、長草、短草を想定した場合の計算結果の比較	15
2-5-3 葉面積指数を変化させた場合の計算結果	15
2-5-4 植生高さを変化させた場合の計算結果	15
2-6 まとめ	18
参考・引用文献	19

第3章 冷気流の集積過程に関する考察	-----	20
3-1 概要	-----	20
3-2 浅水方程式モデルによる対象地域の計算	-----	20
3-2-1 モデルの概要	-----	20
3-2-2 パラメータの設定	-----	22
3-2-3 計算結果	-----	23
3-3 実測調査の概要	-----	23
3-3-1 対象地域の概要，測定地点及び期間	-----	23
3-3-2 測定機器	-----	23
3-3-3 測定結果	-----	24
3-4 冷気集積及び流出の特性	-----	25
3-4-1 広域海陸風が一晩中強い場合	-----	25
3-4-2 広域海陸風が弱くなる場合	-----	26
3-4-3 温位の鉛直分布	-----	27
3-5 まとめ	-----	29
参考・引用文献	-----	30

第4章 数値計算と観測データを用いた夏季の典型的な風の場合，温度場に関する考察	-----	31
4-1 概要	-----	31
4-2 設定条件	-----	31
4-2-1 計算対象日	-----	31
4-2-2 計算対象領域	-----	32
4-2-3 観測データの概要	-----	32
4-2-4 地表面の境界条件	-----	34
4-3 モデルの概要	-----	34
4-4 計算結果および考察	-----	38
4-4-1 Grid1での計算結果と観測データの比較	-----	38
4-4-2 Grid2での計算結果と観測データの比較	-----	39
4-4-3 Grid3での計算結果と観測データの比較	-----	40
4-5 まとめ	-----	40
参考・引用文献	-----	41

第5章 広域海陸風下における冷気流の出現頻度と影響距離に関する考察	54
5-1 概要	54
5-2 広域海陸風と冷気流の出現頻度	55
5-2-1 夏季夜間の広域海陸風の特徴	55
5-2-2 広域海陸風の強さと冷気流の出現頻度	56
5-3 市街地における冷気流の影響距離	59
5-3-1 観測概要	59
5-3-2 観測結果	60
5-3-3 広域海陸風が強い場合の観測結果	60
5-3-4 広域海陸風が弱い場合の観測結果	60
5-3-5 冷気流が発生する場合の市街地気温分布	66
5-4 まとめ	66
参考・引用文献	67
第6章 冷気流が市街地気温分布に及ぼす影響に関する考察	68
6-1 概要	68
6-2 実測調査による考察	69
6-2-1 神戸における観測	69
6-2-2 京都における観測	71
6-2-3 観測結果のまとめ	76
6-3 拡散モデルによる考察	77
6-3-1 解析概要	77
6-3-2 計算結果	78
6-3-3 土地利用別熱収支を解いた場合の計算	83
6-3-4 計算結果のまとめ	85
6-4 まとめ	86
参考・引用文献	87
第7章 結論	88
本研究に関する発表論文一覧	91
謝辞	94

## 第1章 序論

### 1-1 はじめに

21世紀は環境の世紀であるといわれているなか、建築の分野でも2000年には「地球環境・建築憲章」が関連5団体（日本建築学会他）<sup>1)</sup>により制定され、長寿命、自然共生、省エネルギー、省資源・循環、継承の五本の柱を立てて、持続可能な循環型社会の実現に向けた取り組みがなされている。そのような中で、日本建築学会の環境設計小委員会<sup>2)</sup>からは「都市環境のクリマアトラス 気候環境を活かした都市づくり」が出版され、これからの建築は地域の気候風土に適したものになるべきであるとの姿勢が示されている。電力、ガスなどのエネルギーを供給する都市インフラが整備され、設備技術の進歩した現在では、設備技術により室内環境を快適に保つことは比較的容易であるが、省エネルギーの観点からは上手な方法とは言えない。そこで、都市インフラの整備や設備技術が未発達であった頃からの手法であるパッシブ技術による室内環境の改善に注目が集まる。しかしながら、このパッシブ技術は定性的、経験的な知識に基づいて適用されてきたものであり、外部気候の変動による影響を直接受けるため、設備技術を用いる場合と比較して快適環境の安定供給という点については劣っている。従って、この手法を必ず適用しなければならないというわけではないが、この手法の適用可能性については検討する必要があるのではないだろうか。

本研究はこのような立場に立ち、パッシブ技術の適応を検討する際に必要となる地域の気候環境情報の整備を大きな目的としている。日本は国土の70%が山岳地帯であり、都市部は周囲を山で囲まれている場合が多い。また、多くの都市は海岸に面して発達しているため、都市地域の気候は、海と山の影響を強く受けたものとなっている。海の影響としては海陸風循環、山の影響としては山谷風循環が主な現象である。本研究では、主にこのうちの山の影響に注目し、夏季夜間に熱帯夜と呼ばれる寝苦しい環境を自然の風を利用して改善しようと考えた際の、建築物周辺の気候に及ぼす冷気流の影響について検討する。

山の斜面の森林部で生成された冷気は、周囲の空気と比較して相対的に重たいため、重力に従って谷筋に沿って谷口へと集積される。そして、谷口から周辺市街地へと流出する。周辺市街地では、建築物の屋根や壁面、あるいは道路面などが昼間の日射を受けて高温に保たれているために、ヒートアイランド現象が生じている。そこに山の谷間に集積された冷気が流出することで、どの程度気温を低下させることが可能であるか、また、流出した冷気流の影響は市街地内のどの程度まで及ぶのか、という点について検討する。検討は観測とモデル計算により行う。放射冷却による冷気の生成過程、谷地形による冷気集積過程、市街地内での冷気の流出と熱交換過程をモデル化し、観測結果と比較しながら考察を行う。ただし、このような検討を行う前に、冷気流よりも大きなスケールの現象である海陸風循環や総観的な気象条件が冷気流の出現に及ぼす影響について調査しておく必要があるため、メソスケールのモデル計算と観測データによりこれらの現象を調査する。

上記の検討結果は、地理情報データと融合し気候情報データベースとしてクリマアトラス<sup>2)</sup>と呼ばれる気候環境の地図集として整理することにより、これからの建築計画、都市計画を検討する際の基礎的な資料として活用されると考えられる。

## 1-2 従来の研究

ここでは、本研究で対象とする領域を、都市スケール（メソスケール）の風の度、温度場に関する研究、と冷気流に関する研究、に大別して従来の研究について述べる。その後、これらの研究成果の建築、都市計画への応用についても述べる。

### 1-2-1 都市スケールの風の間、温度場に関する研究

この分野の対象領域は、建築環境工学においては最も大きな空間領域であると言っても過言ではなく、具体的には数十 km から数百 km 程度の、一般にメソスケールに分類される領域である。気象学や地理学の分野でも多くの研究実績があるが、ここでは建築、都市に関連する分野に焦点を絞ってレビューを行う。

従来の研究は、対象領域が大きいため、風洞実験などの実験の事例は幾つか見られるが（例えば Cermak<sup>3)</sup>、Plate<sup>4)</sup>など）、大別して、1) 観測データを用いた研究、2) 数値モデルを用いた研究、に分類される。但し、数値モデルを用いた研究においてはモデルの検証等に観測データを用いるため、観測データを用いた研究の一部を包含している場合が多く見られる。実験の事例としては、トレーサガスや風船を飛ばして軌跡を追いかける実験などもあり、能登<sup>5)</sup>による線熱源を用いたヒートアイランド循環の可視化実験は興味深い研究である。

#### 1) 観測データを用いた研究

観測データを用いた研究では、気象台、アメダス、大気汚染のモニタリングステーション、などの既設測定局のデータ、独自の観測により得られたデータ、及び、タワーやバルーンなどを用いた地上以外での観測データ、などが用いられている。

地上の測定点において観測される気象要素としては、雨量、気温、日照時間、風向、風速、積雪深（ここまではアメダスで観測されている）、全天日射量、雲量、相対湿度、蒸気圧、露点温度、現地気圧、海面気圧、現在天気（ここまでは気象官署で観測されている）、などが代表的なものである。ちなみに、神戸大学工学部建設学科環境棟屋上においては、雨量、気温、相対湿度、風向、風速、（水平面）全天日射量、に加えて、直達日射量、赤外放射量、分光放射量（6 波長帯）、を観測している。

上記気象要素の他に、大気汚染の常時監視局（地方自治体<sup>6)</sup>が管理）では、二酸化硫黄、一酸化窒素、二酸化窒素、オキシダント、浮遊粒子状物質、などの汚染物質などが観測されている。大学や試験所等でも目的に応じて上記項目以外に、水温、地中温度なども観測されている。直接得られるデータではないが顕熱フラックスなども観測データから一連の導出過程を経て求められる。また、地上の測定点以外では、ゾンデを用いた高層気象データ（気圧、風向、風速、気温、露天温度など）、タワーやバルーンなどによる気象要素と汚染物質データ、リモートセンシングデータ（航空機、人工衛星などによる様々な波長帯での観測）、などが観測されている。

これらのデータを用いた研究の目的としては、日本においては、大気汚染の抑制と温熱環境の改善が主なものである。最近では、比較的低価格の自記式温湿度計が利用可能となったため、空間解像度の細かい観測データが得られるようになり、都市内外の温湿度分布について検討し、ヒートアイランドの形成について解析された事例が多くみられる（代表的なものとして、榊原他<sup>7),8)</sup>による長野市などでの継続的な自動車による移動観測や三上他<sup>9)</sup>による東京での多点観測網など）。また、臨海部に立地した都市の多い日本では、海陸風循環が顕著に確認されるため、風向、風速のデータと温湿度のデータを組み合わせて解析した事例も多い（例えば、吉門<sup>10)</sup>による関東平野での海風の観測と計算や、日本建築学会の都市気候を

専門とする委員<sup>2),11)</sup>による継続した一連の観測など)。また，土地利用と気温の関係に注目し，気温分布の推定を目的とした研究も盛んに行われている（例えば，本條<sup>12)</sup>，赤坂他<sup>13)</sup>，谷本他<sup>14)</sup>，首藤他<sup>15)</sup>，渡辺他<sup>16)</sup>，近藤他<sup>17)</sup>，吉田他<sup>18)</sup>，宮崎他<sup>19)</sup>など）。

## 2) 数値モデルを用いた研究

本研究で対象とする近畿地域全体（約 300m 四方）を含む程度の領域はメソスケールと呼ばれており，メソスケールの数値モデルでは，気象の分野で開発されたいくつかの乱流モデルが用いられている．メソスケールモデルで土地利用の分布データを地表の境界条件に用いた 3次元の計算を行っている代表例は，Yamada<sup>21)</sup>によって開発された HOTMAC (Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulations) モデルを用いた村上，持田，大岡他<sup>22)</sup>による関東や新潟などでの検討，HOTMAC で用いられている乱流モデル (Mellor-Yamada の 2.5 レベル) を用いた独自のモデル (例えば，近藤，山口他<sup>23)</sup>，藤野，浅枝他<sup>24)</sup>，上野，井村他<sup>25)</sup>など)，Pielke 他<sup>26),27)</sup>によって開発された CSU-MM (Colorado State University Mesoscale Model) を改良したモデル (例えば，鵜野他<sup>28)</sup>，浦野，一ノ瀬他<sup>29)</sup>など)，などが挙げられる．前述のモデルで用いられている乱流モデルのパラメータは，メソスケールの気象現象の観測結果などより決定されているが，これまで主に建築内部空間の気流計算に用いられ，風洞実験などでパラメータが決定されている k- $\epsilon$  型の 2 方程式モデルをメソスケールの現象に適用しようという試みも行われている (例えば，坂本他<sup>30)</sup>，北田他<sup>31)</sup>，藤野，浅枝，ヴァンカ<sup>32)</sup>など)。また，LES を適用した事例も見られる (例えば，神田，日野<sup>33)</sup>など)。

### 1-2-2 冷気流に関する研究

冷気流に関する詳細な研究は，これまで地理学や気象学の分野で行われており，初期の頃の研究は Wagner の理論を基に Defant<sup>34)</sup>によって，谷に沿った山谷風の発達を示す概念図にまとめられている．理想的な谷を想定した場合には，昼間の谷風からスタートし，日没後斜面が冷却されて斜面降下風が生じ，それが谷底に集積されて山風として流出すると示されている．Whiteman 他<sup>35)</sup>の研究でも，浅い斜面流が集積された後に谷に沿って山風が吹くことが観測されている．谷地形における観測例としては，1970 年代後半から 1980 年代前半にアメリカのコロラド州やニューメキシコ州などで行われたアメリカ合衆国エネルギー省による ASCOT (Atmospheric Studies in Complex Terrain の略) と呼ばれるプロジェクトの結果が数多く報告されており，谷内の冷却割合とエネルギー収支，谷地形との関係についての解析が行われている (例えば，McKee 他<sup>36)</sup>など)。しかし，これらの観測で対象とした谷は，本論文で想定している谷よりも一回り大きなスケールのものであった．Yamada 他<sup>37)</sup>は HOTMAC (Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulations の略) モデルを谷地形に適用し，計算結果を ASCOT の観測結果と照合させている．数値計算の例としては，McNider 他<sup>38)</sup>により山風の三次元的な現象を検討した研究などもある。

日本では特に冷気湖とも呼ばれる盆地での夜間冷却に注目した研究が多く，近藤他<sup>39),40)</sup>，<sup>41)</sup>は主に盆地での冷却量を見積もるために，夜間の斜面や盆地における冷却への地形や地表面性質の影響について検討を行っており，真木他<sup>42)</sup>は冷気の移流と堆積の効果を組み込んだ次元熱収支モデルを用いて，盆地の夜間冷却に及ぼす山の斜面からの移流の影響について検討を行っている．農業気象の分野でも農業上有効な気象資源である斜面温暖帯の解析を目的として夜間冷気流のシミュレーションが行われている (例えば，上口他<sup>43)</sup>など)。気象の分野における最近の測定例としては，千葉<sup>44)</sup>によるドップラーソーダーにより冷気流を捉えたものや，小林，森他<sup>45),46)</sup>による風速と温位の鉛直勾配や冷気流の周期性について考察



したものなどがある。

最近，日本農業気象学会局地気象研究部会<sup>47)</sup>により，わが国における冷気流研究の歴史，冷気流の基本的性質，について文献のレビューなどによりまとめられている．その内容を簡単に示すと，冷気の生成メカニズムの説明には，主に大気中の長波（赤外）放射フラックスの発散によって直接冷却される，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，との2種類がある．冷気の流出については，生成された冷気が同一高度面内の密度差による負の浮力（重力）と，地表面と上空大気の双方からの抵抗力に支配されて流下する，と説明されている．

建築，都市計画の分野への応用としては，ドイツのシュツットガルトではBaumuelier 他<sup>48)</sup>やSchaedler 他<sup>49)</sup>により，盆地都市における大気汚染対策として冷気流の活用を試みる研究が行われているが，日本における例としては鳴海，水野他<sup>50),51)</sup>による大阪府北部での測定例などに限られており，谷で集積された冷気流の市街地内での拡散を検討したものはほとんどみられない．

### 1-2-3 建築，都市計画への応用

この分野における先端事例は，ドイツの都市において参考になるものが多く（例えば，Baumuelier 他<sup>48)</sup>によるシュツットガルト市の事例など），最近は森山<sup>52),53),54)</sup>，一ノ瀬<sup>55)</sup>や日本建築学会のクリマアトラスの実用化WG<sup>2)</sup>の活動などにより，日本に紹介される機会が増えつつある．

クリマアトラスWG（現在はクリマアトラスの実用化WG）では日本の各都市において，クリマアトラスの整備を行った．例えば，神戸では森山，竹林<sup>56)</sup>により図1-1に示すような枠組みで気候環境のデータが地図上に整備されている．このクリマアトラスは，建築，都市計画を検討するための基礎資料であり，気候環境に配慮した建築，都市計画の実践を目標とする．具体的な目的としては，対象都市により若干異なるが，夏季の熱環境の緩和と大気汚染防止である．クリマアトラスの実用化に向けては，神戸でワークショップを開催し，クリマアトラスに基づく計画指針図の作成を試みている<sup>57)</sup>．

本研究で対象とする山麓冷気流もクリマアトラス（冷気流に関する情報は，図1-1中の気候解析図の中の気流分布図あるいは地形図として表現される）を構成する重要な要素であり，夏季夜間の市街地熱環境の緩和効果を定量的に評価することは非常に重要である．

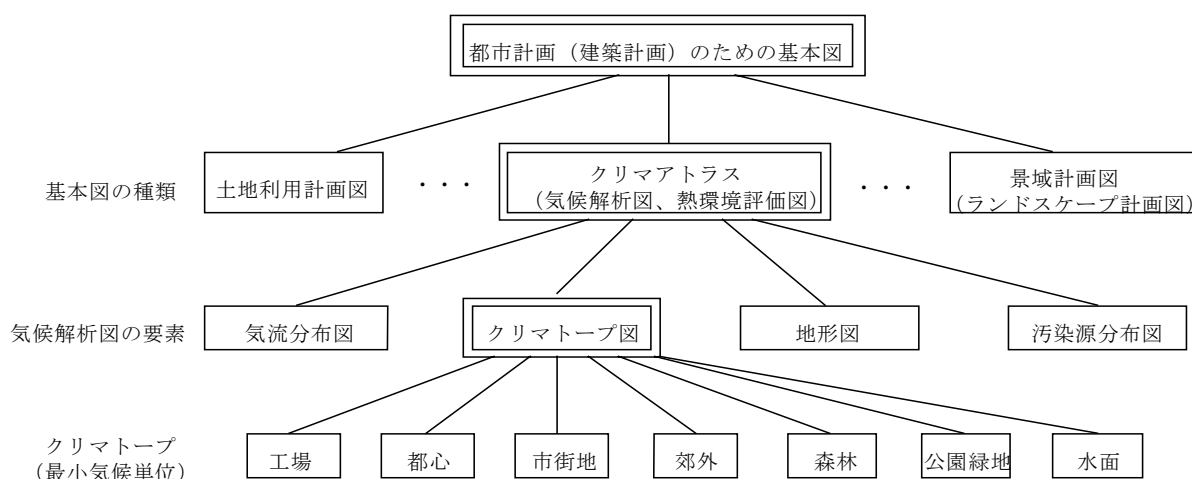


図1-1 クリマアトラスの位置付け

### 1-3 論文の目的と構成

図1-1に、本論文で提案する市街地冷却効果としての冷気流の捉え方を示す。夜間になると放射冷却により地物や植物が冷却される。その地物や植物に接した大気は主に乱流による顕熱輸送により地物や植物に対して熱を供給し自身は冷却される（冷気の生成過程）。冷却された大気は周囲の大気と比較して相対的に低温で密度が大きくなるため、重力に従って斜面下方へと流出する（斜面下降流）。この流出した冷気は地形により谷間に集められる（冷気の集積過程）。そして、谷間に集積された冷気は市街地内へと流れ出し、市街地では昼間の日射の蓄熱により壁面や屋根面が高温に保たれているため、流出してきた冷気との熱交換が行われ、徐々に市街地内の気温は低下する（冷気の流出過程）。

本論文では、冷気流による市街地冷却効果は、以上のようなメカニズムにより形成されるとの立場に立ち、それぞれの過程について、どのように現象を捉え、その効果を如何に見積もるかという点について検討することを目的とする。本論文では図1-2に示す市街地冷却効果としての冷気流の捉え方に従い、以下に示すような順番でそれぞれの課題について検討を行う。

第2章では、森林などでの放射冷却による冷気の生成過程について検討を行う。主に、植生や地物のどの部分でどの程度の冷気が生成されているのかという点について検討する。

第3章では、谷地形による冷気の集積過程について検討を行う。主に、谷内の気温分布がどのように形成されるのかという点について谷筋に沿った気温の測定と浅水方程式モデルにより検討する。

第4章では、メソスケールの数値モデルと観測データを用いて海陸風の特性について検討を行う。神戸地域の夏季の風特性を支配する要素としてはまず海陸風循環があるため、その特性について観測データとメソスケールの数値モデルを用いて検討する。

第5章では、海陸風と冷気流の関係について検討を行う。海陸風の強さと冷気流の出現状況の関係について観測データに基づいて検討する。

第6章では、集積された冷気の市街地への流出過程について検討を行う。谷に集積された冷気が標高に沿って市街地へ流出し、どの程度の距離まで影響を及ぼし、どの程度気温を低下させるのかという点について検討する。

第7章では、各章で得られた結論についてのまとめと今後の課題と展望を述べる。

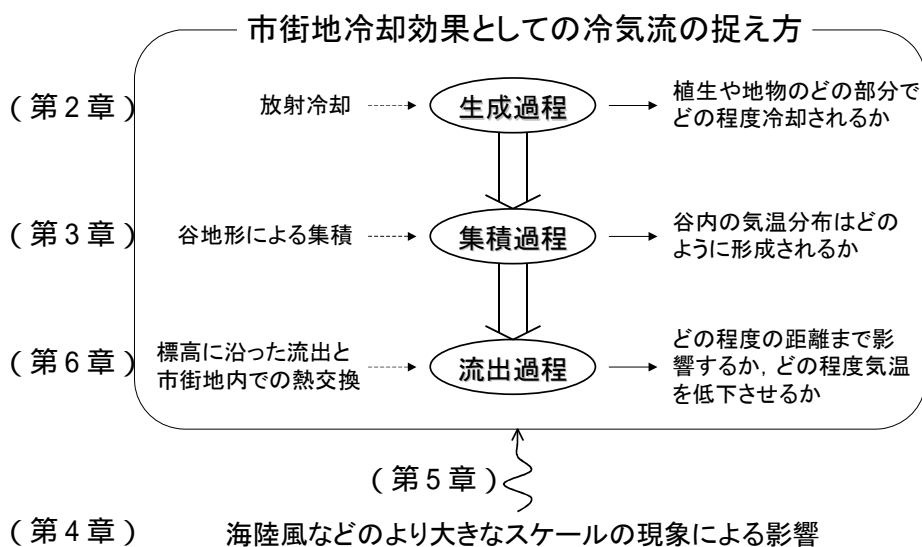


図1-2 市街地冷却効果としての冷気流の捉え方

## 参考・引用文献

- 1) 日本建築学会ほか：地球環境・建築憲章，2000
- 2) 日本建築学会編著：都市環境のクリマアトラス，ぎょうせい，2000
- 3) Cermak, J. E.: Thermal Effects on Flow and Dispersion over Urban Areas: Capabilities for Prediction by Physical Modeling, Atmospheric Environment Vol.30, No.3, 393-401, 1996
- 4) Plate, E. J. and Kastner-Klein, P. M.: Wind Tunnel Modeling of Traffic Induced Pollution in Cities, Report of Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, Special Report No.1, 206-221, 1998
- 5) Noto, K.: Dependence of Heat Island Phenomena on Stable Stratification and Heat Quality in a Calm Environment, Atmospheric Environment Vol.30, No.3, 475-485, 1996
- 6) 神戸市環境局：神戸市大気汚染調査報告，毎年
- 7) 榊原保志：越谷市に見られるヒートアイランド強度 - 郊外が水田の場合 - ，天気，41，515-523，1994
- 8) 榊原保志，田中忍，伊藤由香：長野市における夜間ヒートアイランド強度に対する風速と接地逆転の強さの関係，天気，45，119-125，1998
- 9) 三上岳彦：東京におけるヒートアイランドの時空間構造とその長期変動，総合都市研究，60，77-85，1996
- 10) Yoshikado, H.: Vertical Structure of the Sea Breeze Penetrating through a Large Urban Complex, J. Applied Meteor., 29, 878-891, 1990
- 11) 日本建築学会地球環境委員会都市環境動態小委員会：都市熱環境の実態・予測・評価に関する研究成果集，1999
- 12) 本條毅：ニューラルネットワークによるメッシュ気候値の推定，農業気象，54(1)，43-46，1988
- 13) Akasaka, H. and Miki, N.: A Study on Drowing Climate Maps Related to Human Thermal Sensation, Energy and Buildings, 15-16, 1011-1023, 1990/91
- 14) 谷本潤，石野久彌：細密数値情報を用いた東京首都圏における空調設計用外気温分布特性に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第483号，27-32，1996
- 15) 首藤治久，杉山順史，泉浩光，岡建雄：土地利用形態と気温形成に関する研究日本建築学会計画系論文集，第479号，49-56，1996
- 16) 渡辺浩文，依田浩敏，尾島俊雄：リモートセンシングデータと数値情報利用による広域都市の地表面温度分布図の作成に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第443号，21-29，1993
- 17) 近藤昭彦，栗原昭子，三上岳彦：ランドサットデータによる関東平野の諸都市のヒートアイランド強度の解析，日本リモートセンシング学会誌，13(2)，32-42，1993
- 18) 吉田治典，石井和尋，吉田章彦：土地利用情報を用いた地域気温データの統一的モデル化，日本建築学会計画系論文集，第524号，29-36，1999
- 19) 岩井一博，高木直樹，浅野良晴，山下恭弘：地方都市における気象マップの作成と都市気候の実態に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第526号，83-90，1999
- 20) 宮崎ひろ志，森山正和：ニューラルネットワークを用いた気温分布推定に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第543号，71-76，2001
- 21) Mellor, G. L., and Yamada, T.: A Hierarchy of Turbulence Closure Models

- for Planetary Boundary Layer, Journal of Applied Meteorology, Vol.13, No.7, 1791-1806, 1974
- 22) 村上周三, 持田灯, 金相進, 大岡龍三: 関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係, Mellor-Yamada 型の都市気候モデルによる局地気象解析, 日本建築学会計画系論文集, 第 491 号, 31-39, 1997
  - 23) 呉銀珠, 近藤明, 山口克人, 水間健二: 地域開発スケールの流れ場の日変動シミュレーション, 空気調和・衛生工学会論文集, No.76, 29-39, 2000
  - 24) 藤野毅, 浅枝隆, 和氣亜紀夫: 夏季の都心部周辺における気温分布特性に関する数値実験, 地理学評論, 69, 10, 817-831, 1996
  - 25) 大濱隆司, 金子慎治, 上野賢仁, 井村秀文: 三次元クロージャーモデルによる都市熱環境構造の解析 - 福岡市周辺への適用 -, 環境システム研究, 23, 214-221, 1995
  - 26) Pielke, R. A.: A Three-Dimensional Numerical Model of the Sea Breeze over South Florida, Mon. Weather Rev., 102, 115-139, 1974
  - 27) Pielke, R. A.: Mesoscale Meteorological Modeling, Academic Press, 1984
  - 28) 鵜野伊津志, 大原利眞, 若松伸司, 松井一郎: 近畿地域の局地循環シミュレーションと評価, 天気, 43, 303-317, 1996
  - 29) Urano, A., Ichinose, T. and Hanaki, K.: Thermal Environment Simulation for Three Dimensional Replacement of Urban Activity, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, 197-210, 1999
  - 30) 坂本雄三, 谷川努, 中原信生: 名古屋市の都市気候に関する研究 その 5 - 3 次元流体解析モデルによる夏期気候の計算結果と緑地の効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D, 783-784, 1993
  - 31) 高木久之, 北田敏廣: ドップラーソーダによる大気境界層下部の乱れの鉛直分布とその k- 乱流モデルによる解析, 天気, 41, 827-846, 1994
  - 32) Fujino, T., Asaeda, T. and Vu Thanh Ca: Numerical Analyses of Urban Thermal Environment in a Basin Climate - Application of a k-e Model to Complex Terrain, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, 159-169, 1999
  - 33) 神田学, 日野幹雄: 大気 - 土壌系の相互作用に着目した対流性雲の発生・発達に関する 3 次元 LES モデルによる検討, 土木学会水工学論文集, 35, 27-32, 1991
  - 34) Defant, F.: Local Winds. Compendium of Meteorology, T. M. Malone, Ed., Amer. Meteor. Soc., 655-672, 1951
  - 35) Whiteman, C. D.: Observations of Thermally Developed Wind Systems in Mountainous Terrain, Atmospheric Processes over Complex Terrain, W. Blumen Ed., Amer. Meteor. Soc., 5-42, 1990
  - 36) McKee, T. B. and O'Neal, R. D.: The Role of Valley Geometry and Energy Budget in the Formation of Nocturnal Valley Winds, Amer. Meteor. Soc., Vol.28, 445-456, 1989
  - 37) Yamada, T. and Bunker, S.: Development of a Nested Grid, Second Moment Turbulence Closure Model and Application to the 1982 ASCOT Brush Creek Data Simulation, J. App. Meteor., Vol.27, 562-578, 1988
  - 38) McNider, R. T. and Pielke, R. A.: Numerical Simulation of Slope and Mountain Flows, Amer. Meteor. Soc., Vol. 23, 1441-1453, 1984

- 39) Kondo, J., Sato, T.: A Simple Model of Drainage Flow on A Slope, *Boundary-Layer Meteor.*, Vol.43, 103-123, 1987
- 40) 近藤純正：水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 - , 朝倉書店, 1994
- 41) 近藤純正：地表面に近い大気の科学 理解と応用, 東京大学出版会, 2000
- 42) Maki, M. and Harimaya, T.: The Effect of Advection and Accumulation of Downslope Cold Air on Nocturnal Cooling in Basins, *Meteor. Soc. Japan*, Vol.66, No.4, 581-597, 1988
- 43) 上口弘晃, 高橋俊二, 伍培明, 八木正充：局地気候モデルによる斜面温暖帯の数値シミュレーション, *農業気象*, Vol.53, No.3, 217-225, 1997
- 44) 千葉修：土佐湾沿岸部で観測された夜間冷気流について, *天気*, Vol.46, No.1, 21-27, 1999
- 45) 森牧人, 鳶田広章, 小林哲夫, 野田美香, 武政剛弘：久住山南麓で観測された斜面下降風（冷気流）の特徴, *天気*, Vol.46, No.4, 281-288, 1999
- 46) Mori, M. and Kobayashi, T.: Dynamic Interaction Between Observed Nocturnal Drainage Winds and a Cold Air Lake, *J. Meteor. Soc. of Japan*, 74, 2, 247-258, 1996
- 47) 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）冷気の流れ, *農業気象*, 56, 4, 311-316, 2000
- 48) Baumüller, J., Flassak, Th., Schaedler, G., Keim and M., Lohmeyer, A.: "Urban Climate 21" -Climatological Basics and Design Features for "Stuttgart 21" on CD-ROM, Report of Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, Special Report No. 1, Proceedings of the Second Japanese-German Meeting *Klimaanalyse fuer die Stadtplanung*, 42-52, 1998
- 49) Schaedler and G., Lohmeyer, A.: Simulation of Nocturnal Drainage Flows on Personal Computers, *Meteorol. Zeitschrift*, N.F.3, 167-171, 1994
- 50) 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, *日本建築学会計画系論文集*, 第527号, 77-83, 2000
- 51) 鳴海大典, 水野稔, 中村安弘, 下田吉之, 比嘉博：丘陵地周辺の住宅地域に及ぼす冷気流の影響 その1 冷気流の発生機構把握のための実測調査研究, *日本建築学会計画系論文集*, 第543号, 85-91, 2001
- 52) 森山正和：都市の風の道 シュトゥットガルトから日本へ, *建築雑誌*, 111, 1398, 18-19, 1996
- 53) 森山正和：ドイツにおける「クリマアトラス」の事例, *日本建築学会環境工学委員会熱環境小委員会第27回熱シンポジウム*, 139-144, 1997
- 54) 森山正和, 竹林英樹, 宮崎ひろ志：都市環境のクリマアトラス, *気候影響・利用研究会会報*, 第19号, 21-27, 2001
- 55) 一ノ瀬俊明：ドイツのKlimaanalyse ~都市計画のための気候解析~, *天気*, 46, 709-715, 1999
- 56) 森山正和, 竹林英樹：正規化植生指標（NVI）と一次元熱収支モデルに基づいたクリマトープ図の作成手法に関する研究, *日本建築学会計画系論文集*, 第518号, 61-65, 1999
- 57) 竹林英樹, 森山正和：夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その4 冷気流の特性と活用可能性, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, 949-950, 2001

## 第2章 冷気流の生成過程に関する考察

### 2-1 概要

本章では、市街地に対して冷気の流出源となる谷の中で、冷気流の生成過程について検討を行う。

本章では、冷気流の源となる冷気が生成される山の斜面がどのような植生で覆われている場合に最も効率よく冷気流が発生するのかという点に注目して検討を行う。これは、放射冷却を利用したパッシブな手法により夏季夜間の市街地熱環境の改善を図ろうと計画する場合にも重要な問題である。

冷気流の生成過程に関しては、鳴海ら<sup>1)</sup>は「測定点周辺の植生は冷気流の冷熱源として作用していないと推測される。」と結論付けており、草類のような葉面積指数の小さい植生の場合には冷熱源にならないのではないかと指摘されている。そこで、本章では被覆状態（主に葉面積指数と植生高さ）の異なる植生面での熱収支を考察し夜間の放射冷却量との関係について検討を行う。

### 2-2 実測調査の概要

実測調査は異なる3種類（樹木・長草・短草）の被覆状態の植生面で気温、葉面温度の鉛直分布等を測定した。主な測定項目を表2-1に示す。

#### 2-2-1 樹木における実測調査

##### (1)測定期間

1999年7月20日18時から27日6時までの約7日間で、1分間隔の連続測定を行った。検討対象は、夜間最もよく晴れた25日18時から26日の6時までとした。

##### (2)測定場所

神戸市灘区にある柚谷（そまたに）堰堤（標高約200m）付近で行った。対象樹木は堰堤から約150m離れた森林内にあり、高さ約8mで樹冠部の葉は少しまばらな状態であった。地形的には山の谷底付近に位置し、ほぼ平坦面である。

#### 2-2-2 長草および短草における実測調査

##### (1)測定期間

2000年3月30日9時から31日16時までの31時間で、1分間隔の連続測定を行った。検討対象は、夜間の30日18時から31日6時までとした。3月末の測定のため気象条件、植物の生育条件が夏とは異なり昼間の蒸発散量なども異なると考えられるが、赤外放射量と気温、表面温度に注目して考察することで、夜間の放射冷却に注目する本研究の目的に沿った解析は可能であると考えられる。

##### (2)測定場所

京都市左京区にある京都工芸繊維大学附属第2農場（標高約120m）で行った。農場内の、高さ約2mの密な長草と高さ約10cmの少しまばらな短草で覆われた植生内で測定を行った。地形的には、丘又は里山と呼ばれる山の緩い傾斜面（南東向き）に位置する<sup>2)</sup>。

表 2-1 実測調査の概要

測定項目	樹木 (約 8m)	長草 (約 2m)	短草 (約 10cm)
気温	0.5, 3, 4, 6, 7, 8m の 6 点 (熱電対), 1.5, 5, 9m の 3 点 (サミタ)	0.5, 1, 2, 3, 4m の 5 点 (熱電対)	0.5, 1, 2, 4m の 4 点 (熱電対)
葉面温度	4, 5, 6, 7, 8m の 5 点 (熱電対)	0.5, 1, 2m の 3 点 (熱電対)	0m の 1 点 (放射温度計)
地中温度	0.01, 0.02, 0.1, 0.2, 0.5m の 5 点 (熱電対)	0, 0.25, 0.5m の 3 点 (熱電対)	0, 0.25, 0.5m の 3 点 (熱電対)
赤外放射量	神戸大学環境棟屋上 (測定場所の東約 1km) (精密赤外放射計)	短草上 (精密赤外放射計)	
風向風速	堰堤横の森林外で高さ 2m (三杯型風向風速計)	短草上で高さ 2m (超音波風速計)	

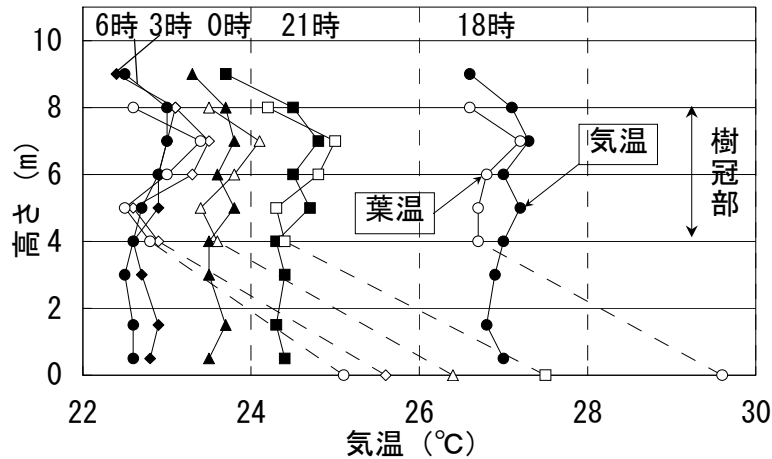


図 2-1 樹木での気温と葉温の鉛直分布 (1999 年 7 月 25-26 日)

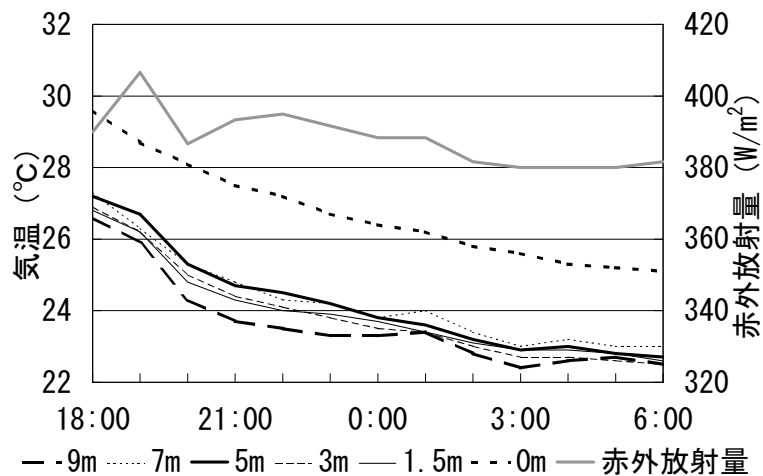


図 2-2 樹木での気温と赤外放射量の時刻変化 (1999 年 7 月 25-26 日)

## 2-3 実測結果および考察

### 2-3-1 樹木における測定結果

図2-1に樹木内の気温と葉温の鉛直分布の測定結果を示す。時刻別の樹木内部での気温の鉛直分布にはあまり分布がみられないが、樹冠部の気温が若干高くなっている。地表面温度はその他の気温に比べ2程度高く保たれている。気温と葉温を比較すると、18時では葉温が低い。それ以降はあまり差が見られない。いずれの時刻でも樹木上端部の葉温が低く、その上部の気温も低くなっており、放射冷却の影響はこの辺りに表れている。樹木上端部の冷気と樹木内の空気との混合はあまり起こっていないと考えられる。

図2-2に気温と赤外放射量の時刻変化を示す。赤外放射量が小さくなった20時に気温も若干低下している。その後、一時的に赤外放射量は大きくなるが、気温はなだらかに低下し続けた。2時頃にも20時と同様に赤外放射量が小さくなり気温も低下した。その後は赤外放射量はほぼ一定となり、気温低下もほとんど見られなかった。

### 2-3-2 長草における測定結果

図2-3に長草内の気温と葉温の鉛直分布の測定結果を示す。気温は下層部では昼間日射が

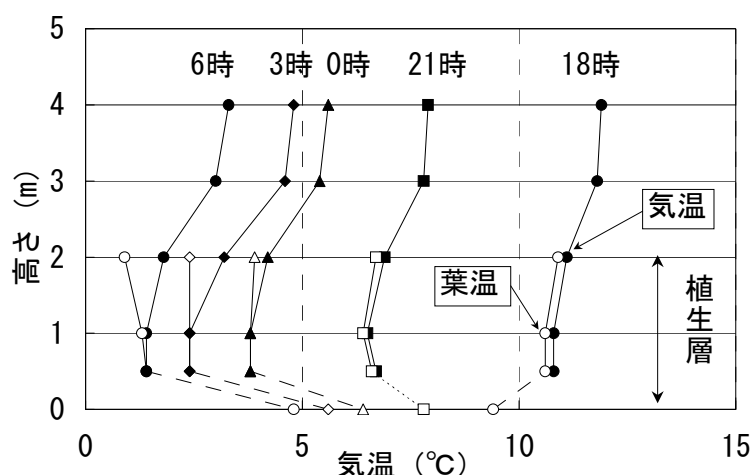


図2-3 長草での気温と葉温の鉛直分布 (2000年3月30-31日)

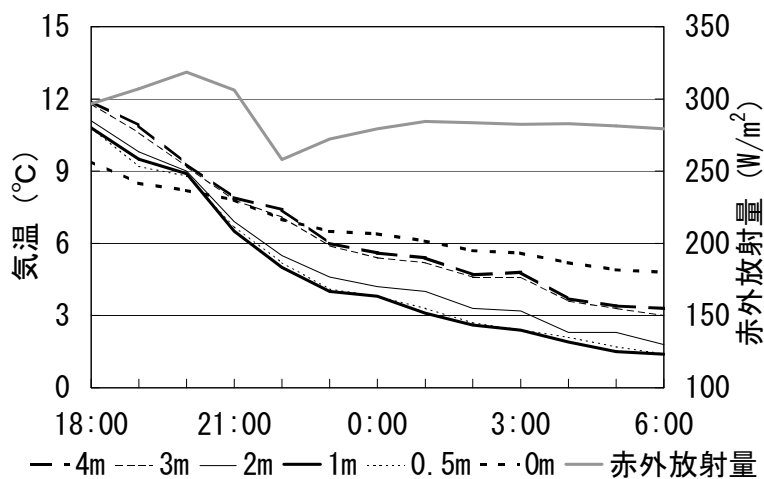


図2-4 長草での気温と赤外放射量の時刻変化 (2000年3月30-31日)



遮蔽された影響で夕方より夜間を通して低い値を示し，上部空気と植生層内との気温差は0時以降に大きく表れた．長草内の気温と葉温を比較すると，上端部では葉温が気温より低く，時間が経つにつれその差は大きくなった．逆に，下層部では温度差はほとんどみられない．地表面温度の変化は気温や葉温の変化と比較してかなり小さくなっている．樹木の場合と同様に，放射冷却の影響は植生の上端部に表れており，この付近の気温も若干低下している．

図2-4に気温と赤外放射量の時刻変化を示す．樹木と同様の傾向を示し，赤外放射量が小さくなる時刻に大きな気温低下が見られる．長草内の夜間を通した気温低下量は，上部空気の低下量よりも大きくなっている．

### 2-3-3 短草における測定結果

図2-5に短草内の気温と葉温の鉛直分布の測定結果を示す．気温は地表付近が最も低く，上部へ向かうにつれて高温になっている．葉温の変化は気温の変化と比較してかなり大きくなっている．

図2-6に気温と赤外放射量の時刻変化を示す．赤外放射量と葉温の低下の関係が顕著に見られ，特に21時前後の葉温の低下量が大きい．

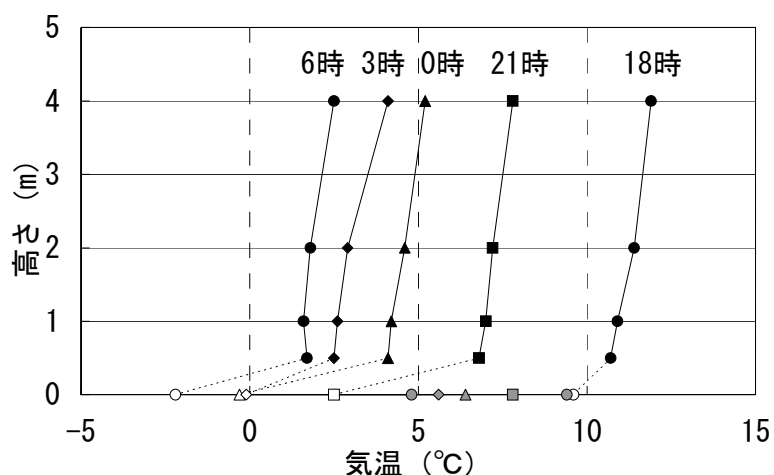


図2-5 短草での気温と葉温の鉛直分布（2000年3月30-31日）  
（白抜き：葉面，グレー：地表面）

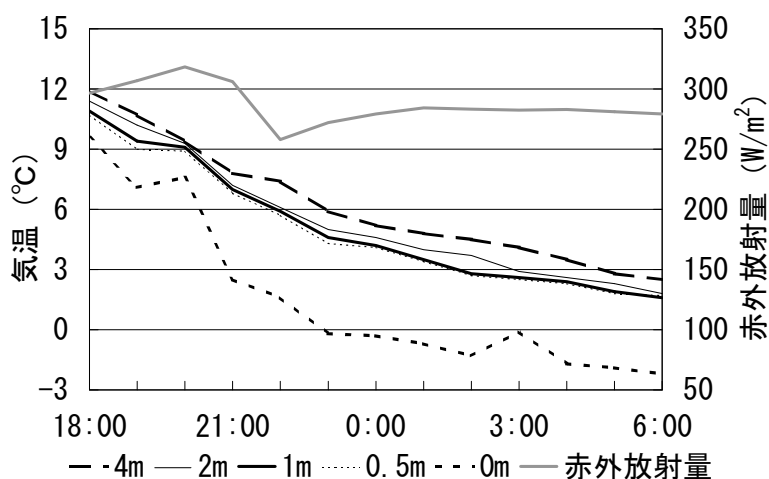


図2-6 短草での気温と赤外放射量の時刻変化（2000年3月30-31日）

## 2-4 ダブルソースモデルの概要

### 2-4-1 モデルの概要

樹木を一次的にモデル化する方法として、樹冠部や幹空間部を多層に分割する多層モデル<sup>3),4)</sup>があるが、本研究では、異なる被覆状態の植生のエネルギー収支を簡単かつ同一の方法で解くことを目的とし、植生表面上でのエネルギー収支を簡単に説明するために提案されたダブルソースモデル<sup>5),6)</sup>を用いる。ダブルソースモデルとは、植生をキャノピー層（植生面）と地表面の2層でモデル化し、エネルギー収支方程式を解く方法である。多層モデルでは植生内の空気と地表面との間でのエネルギー収支を考慮したのに対し、このモデルでは大気と地表面が直接やり取りを行う。図2-7にダブルソースモデルのイメージを示し、計算に用いたエネルギー収支式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \text{植生面：} \quad & (1 - m_s)S_n + (1 - m_L)(L_d + \sigma T_g^4) \\ & = 2(1 - m_L)\sigma T_c^4 + H_c + IE_c \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{地表面：} \quad & m_s S_n + m_L L_d + (1 - m_L)\sigma T_c^4 \\ & = \sigma T_g^4 + H_g + IE_g + G \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、

$m_s = \exp(-F \cdot LAI \cdot \sec Z)$  : 短波長放射の植物キャノピー透過率 (-)

$m_L = \exp(-F \cdot LAI \cdot df)$  : 長波長放射の植物キャノピー透過率 (-)

$S_n = (1 - \text{ref})S$  : 植生上端での正味の短波長放射量 ( $W/m^2$ )

$L_d$  : 植生上端に入射する長波長放射量 ( $W/m^2$ )

$H_{c,g} = C_p C_{Hc,g} u (T_{c,g} - T)$  : 顕熱輸送量 ( $W/m^2$ )

$IE_{c,g} = l C_{Hc,g} u (q_{\text{sat}}(T_{c,g}) - q)$  : 潜熱輸送量 ( $W/m^2$ )

$G$  : 地中伝導熱流 ( $W/m^2$ )

: ステファン・ボルツマン定数 ( $=5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$ ) ,  $T$  : 温度(K) , 添字  $c$  : 植生面 ,  $g$  : 地表面 ,  $F$  : 葉の方向係数 ( $=0.5$ ) ,  $LAI$  : 葉面積指数 ( $m^2/m^2$ ) ,  $Z$  : 太陽高度 ( $=70^\circ$ ) ,  $df$  : 長波放射の拡散係数 ( $=0.45$ ) ,  $\text{ref}$  : アルベド ( $=0.1$ ) ,  $S$  : 植生上端の日射量 ( $W/m^2$ ) ,  $C_p$  : 空気の比熱 ( $=1.0 kJ/kgK$ ) ,  $\rho$  : 空気の密度 ( $=1.2 kg/m^3$ ) ,  $C_H$  : バルク輸送係数 (-) ,  $u$  : 風速 ( $m/s$ ) ,  $\epsilon$  : 蒸発効率 ( $=1.0$ ) ,  $q$  : 比湿 ( $kg/kg$ ) ,  $q_{\text{sat}}$  : 飽和比湿 ( $kg/kg$ ) .

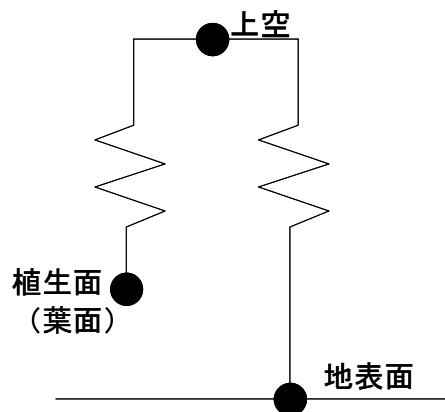


図2-7 ダブルソースモデルのイメージ

## 2-4-2 計算方法

境界条件としては日射量 ( $S_n$ ), 赤外放射量 ( $L_d$ ) の他に上空の風速, 気温, 比湿と地中温度が必要となる. これらの値に 1999 年 7 月 20 日 18 時から 27 日 6 時までの神戸での測定データを与えた (図 2-8). 未知数は植生面と地表面の表面温度  $T_c$  と  $T_g$  である. バルク輸送係数は文献<sup>5), 6)</sup>に従い普遍関数を用いて与える. 地中伝導熱流は熱伝導の微分方程式から差分法により算出し, 地盤の熱伝導率は  $0.47\text{W/mK}$ , 熱容量は  $2640\text{kJ/m}^3\text{K}$  とした. 本研究では葉面積指数と植生高さをパラメータとし, 文献<sup>5), 6)</sup>を参考に与えた具体的な数値を括弧内に示す.

## 2-5 計算結果および考察

### 2-5-1 樹木を想定した計算結果と観測結果の比較

図 2-9 に樹木を想定した計算結果と実測結果の比較を示す. 植生面は, 日中には特に天候の良かった 25 日には実測結果と比較して計算結果が高くなっており, 夜間には逆に計算結果が低くなっている. 葉面温度の測定は, 熱電対に直接日射が当たることを避けるために葉の裏面に熱電対を貼り付けて行った. そのため, 直接空が見えず放射冷却の影響も受けにくいことから, 実測結果の一日の振幅が小さくなっていると考えられる. なお, 実測結果の植生面温度には 5 点での葉面温度の平均値を用いている. 地表面温度は, 日中には計算結果と観測結果が比較的一致しているが, 夜間には計算結果が低くなっている. 樹木の下での表面温度の測定は, 幹からあまり離れていない地点で行ったため幹により天空面が隠れており, 実測結果は夜間の放射冷却の影響をあまり受けなかったと考えられる. なお, 計算モデルでは幹は無視している.

### 2-5-2 樹木, 長草, 短草を想定した場合の計算結果の比較

図 2-10 に樹木, 長草, 短草を想定した場合の計算結果の比較を示す. 上空の気温は境界条件として与えたものである.

(1) 樹木を想定した場合 地表面温度が上空気温よりも高くなっている. これは, 植生面での放射冷却の影響が地表面にまで及ばず, 地表面では上部が植生に覆われ放射冷却が起こらないためであると考えられる. この傾向は 2-3-1 で述べた実測結果と同じである.

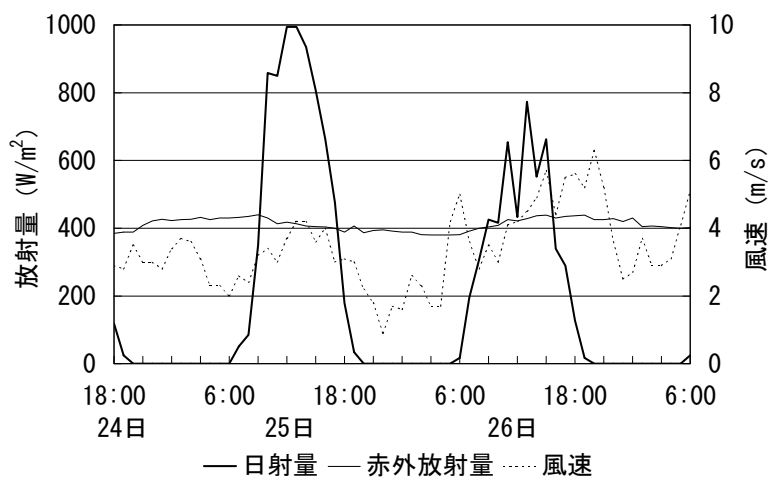


図 2-8 計算の境界条件 (1999 年 7 月 24 日 18:00 ~ 27 日 6:00)

(2)長草を想定した場合 放射冷却の影響で植生面温度が上空気温よりも低くなり、地表面温度があまり低下しない。この傾向は2-3-2で述べた実測結果と同じである。

(3)短草を想定した場合 長草の場合と同様に植生面温度が最も低くなっている。この傾向は2-3-3で述べた実測結果と同じである。

#### 2-5-3 葉面積指数を変化させた場合の計算結果

図2-11に樹木を想定し植生高さ $h=8.0$ (m)で、葉面積指数LAI( $m^2/m^2$ )を変化させた場合の顕熱輸送量の計算結果を示す。顕熱輸送量は地表面と植生面から上空へ輸送される量の合計である。日中には地表面と植生面から熱が上空へ輸送され正の値となり、夜間には上空より地表面と植生面へ輸送され負の値となっている。葉面積指数が大きいほど顕熱輸送量の絶対値が大きくなり、昼間には大気を加熱し夜間には大気を冷却しやすいことが分かる。従って、葉が密なほど夜間の大気冷却量が多いと言える。26日(図中2日目)の15時以降に負の顕熱輸送量が大きくなった理由は、天候が曇り日射量の少ない中、風速が大きいため上空より熱が輸送されたためであると考えられる。

#### 2-5-4 植生高さを変化させた場合の計算結果

図2-12に葉が粗な場合を想定し葉面積指数LAI=0.5( $m^2/m^2$ )で、図2-13に葉が密な場合を想定し葉面積指数LAI=5.0( $m^2/m^2$ )で、それぞれ植生高さを変化させた場合の顕熱輸送量の計算結果を示す。地表面と植生面から上空に輸送される顕熱輸送量を別々に示している。植生面からの顕熱輸送量が多くを占め、葉が密な場合にはほとんどが植生面からのものである。植生高さによる顕熱輸送量の差はあまり大きくないが、葉が粗な場合には植生高さが低いほど夜間の大気冷却量が若干大きくなっている。逆に、葉が密な場合には植生高さが高いほど夜間の大気冷却量が若干大きくなっている。この原因は、計算中に表れるバルク輸送係数(対流熱伝達率を風速、空気の熱容量で除したものに对应する)に依存し、葉が粗な場合には植生高さが低いと地表面との活発な熱交換により大気が冷却し、葉が密な場合には植生高さが高いと植生面との活発な熱交換により大気が冷却すると考えられる。

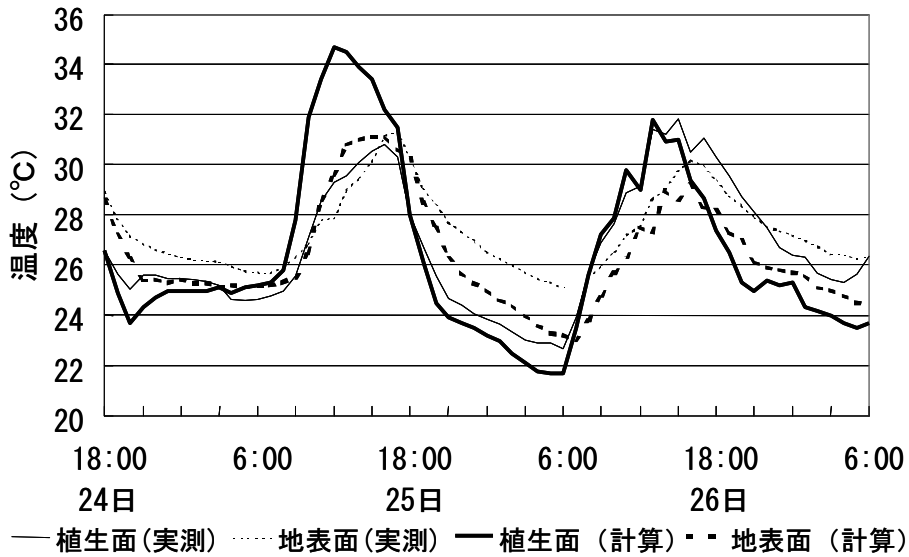


図2-9 樹木を想定した計算結果と実測結果の比較  
 (気象条件：1999年7月24日18:00～27日6:00)

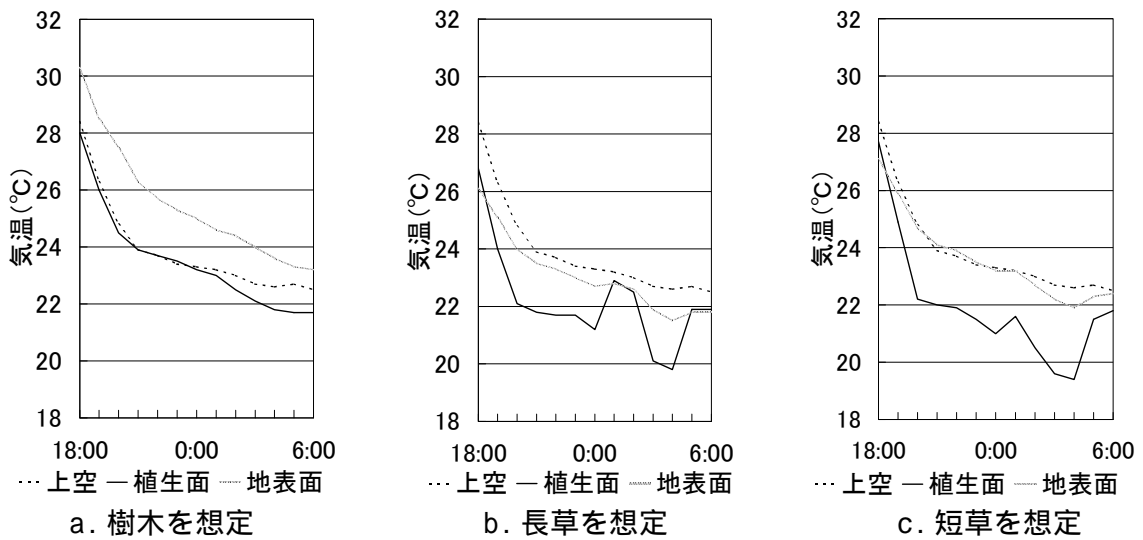


図2-10 樹木，長草，短草を想定した場合の計算結果の比較  
 (気象条件：1999年7月25日18:00～26日6:00)

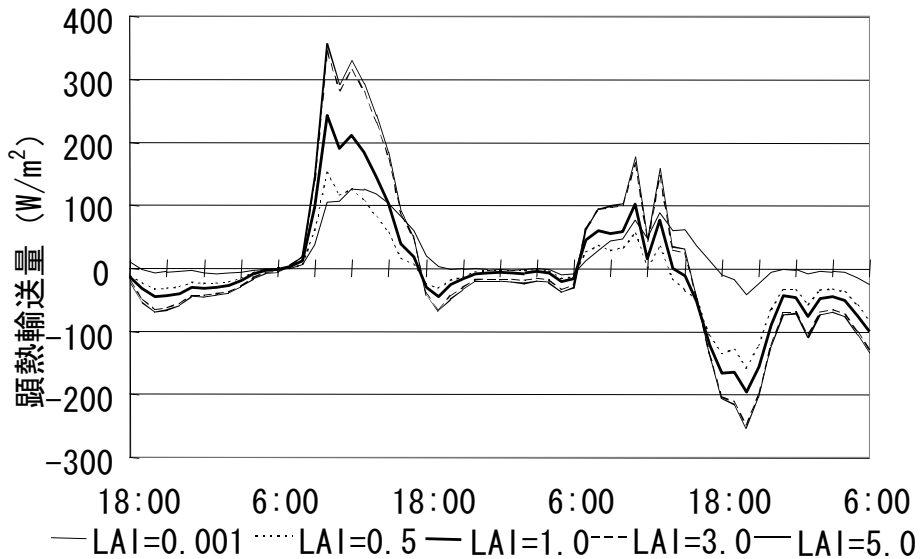


図2-11 葉面積指数 (LAI) を変化させた場合の顕熱輸送量の変化  
 (植生高さ  $h=8.0$  (m) の樹木を想定)  
 (気象条件: 1999年7月24日 18:00 ~ 27日 6:00)

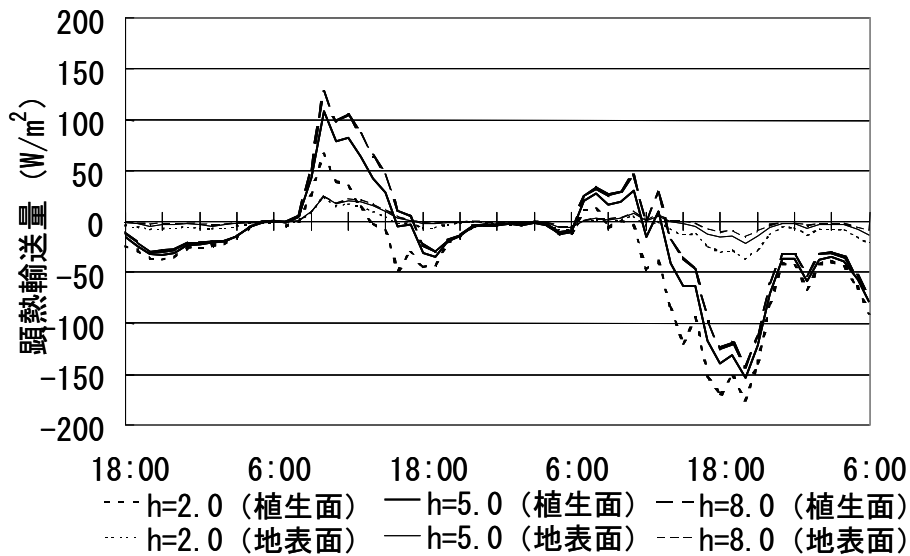


図2-12 植生高さ (h) を変化させた場合の顕熱輸送量の変化  
 (葉面積指数  $LAI=0.5$  ( $m^2/m^2$ ) の葉が粗な植生を想定)  
 (気象条件: 1999年7月24日 18:00 ~ 27日 6:00)

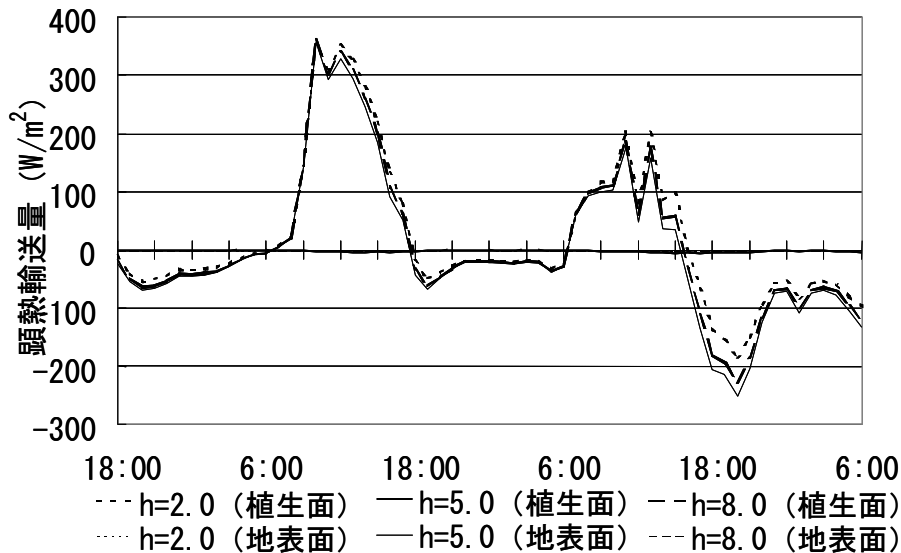


図2-13 植生高さ (h) を変化させた場合の顕熱輸送量の変化  
 (葉面積指数 LAI=5.0 (m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) の葉が密な植生を想定)  
 (気象条件: 1999年7月24日 18:00 ~ 27日 6:00)

## 2-6 まとめ

本章では、市街地に対して冷気流の流出源となる谷の中で、冷気流の生成過程について検討を行った。

実測調査より、樹木、長草、短草ともに植生上端部の葉温が最も低くなっていた。樹木、長草ともに植生内部の気温、葉温はあまり低下せず、植生上端部および上部の気温が低下する傾向にあった。短草の場合も地表付近の気温が低くなっていた。従って、放射冷却により温度の低下した植生上端部の葉と顕熱の交換を行うことで、その周辺や上部の気温が低くなっていたと言える。

計算結果と実測結果を比較したところ、葉面温度の測定方法の問題もあり完全には一致しないが、樹木、長草、短草ともに実測結果の傾向を反映した計算結果が得られた。

葉面積指数と植生高さを変化させて、夜間の大気冷却量に相当する顕熱輸送量を計算したところ、背の高い樹木の場合には葉面積指数が大きいほど大気が冷却しやすいことが示された。また、背の低い植物の場合には葉が粗であっても効率よく熱交換が出来れば冷却量が若干大きくなった。なお、極端に葉面積指数を小さく設定し樹木がほぼ存在しないと想定した場合の計算結果は、背の低い植物 (h=2.0) の場合でも図2-11の LAI=0.001の結果とほぼ同じで冷却量は小さい。

## 参考・引用文献

- 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, 日本建築学会計画系論文報告集, 第543号, 85-91, 2001
- 2) 宮井直人, 竹林英樹, 芝池英樹, 森山正和: 京都里山斜面の冷却と冷気生成性状に関する実測 その1 実測の概要と冷気生成率パラメータに関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 1157-1158, 2000
- 3) 金子輝久, 森山正和: 緑のアトリウムによるクールスポットの形成手法に関する研究 その3 一次元モデルによる温湿度, 表面温度の計算, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 601-602, 1993
- 4) Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C., Dalcher, A.: A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models, *Journal of the Atmospheric Sciences* 43, 506-531, 1986
- 5) Watanabe, T.: Bulk parameterization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow, *Boundary-Layer Meteorology* 70, 13-35, 1994
- 6) 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支 - 9. 植物と大気, 朝倉書店, pp.208-239, 1994

## 本章に関連する既発表文献

- 1) 森真佐雄, 竹林英樹, 森山正和: 夏季夜間の冷気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, 337-340, 2000
- 2) 森真佐雄, 竹林英樹, 森山正和: 夏季夜間の冷気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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1129-1130, 2000
- 3) 宮井直人, 竹林英樹, 芝池英樹, 森山正和: 京都里山斜面の冷却と冷気生成性状に関する実測 その1 実測の概要と冷気生成率パラメータに関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1157-1158, 2000
- 4) 芝池英樹, 竹林英樹, 森山正和, 宮井直人: 京都里山斜面の冷却と冷気生成性状に関する実測 その2 夜間温度および超音波風速計顕熱流束の変動性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1159-1160, 2000
- 5) 森真佐雄, 竹林英樹, 森山正和, 芝池英樹: 斜面冷気流における冷気生成メカニズムに関する研究, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 57-60, 2001
- 6) 森真佐雄, 竹林英樹, 森山正和: 斜面冷気流における冷気生成メカニズムに関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 629-632, 2001
- 7) 竹林英樹, 森真佐雄, 芝池英樹, 森山正和: 斜面冷気流における冷気生成機構に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第16号, 181-184, 2002



### 第3章 冷気流の集積過程に関する考察

#### 3-1 概要

本章では、市街地に対して冷気の流出源となる谷の中で、冷気流の集積過程について検討を行う。

冷気流の集積過程に関しては、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<sup>1),2)</sup>。Maki 他<sup>2)</sup>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、本章では、森林部で生成された冷気が谷によってどの程度集積され、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、冷気流の集積過程についての検討を行う。

#### 3-2 浅水方程式モデルによる対象地域の計算

##### 3-2-1 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<sup>3)</sup>。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。

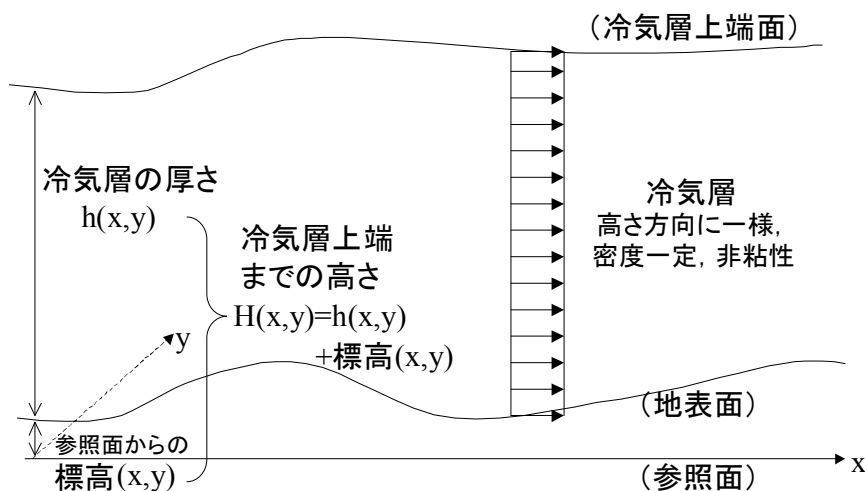


図3-1 浅水方程式モデルの概要

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流下する。本研究で用いる浅水方程式モデルは、この考え方と整合しており、その概要を図3-1に示す。図3-1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（冷気）層を仮定し、層内は一様、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気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、冷気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、高さ方向に一様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<sup>4), 5), 6)</sup>。ここで、 $h$ は冷気層の厚さ(m)、 $q$ は冷気生成量 ( $m^3/(m^2s)$ ) 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、 $H$ は参照面から冷気層上端までの高さ(m) ( $H=h+$  標高) である。

$$p = - (H-z) + p_0 \quad (2)$$

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<sup>6)</sup>。

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

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) (高さ方向に一様) 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 $h$ を持った冷気層を仮定し、単位時間当りの冷気生成量 $q$ を与える。抵抗 $c$ は冷気層全体に対する抵抗である。冷気流の現象を表現するために、この冷気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 $T$ を評価する場合には、冷気層 $h$ 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<sup>9)</sup>を参考に $=0.07(m^2/s)$ と仮定している ( $=300K, T=2.1^\circ C$ に相当する)。ここで、 $T$ は冷気層の平均空気温度 $T$  ( $^\circ C$ ) と周囲空気温度 ( $^\circ C$ ) 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上で解かれる。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  $q$  ( $\text{m}^3/(\text{m}^2\text{s})$ ) により生成された冷気が、標高と抵抗  $c$  ( $1/\text{m}$ ) 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）。高さ方向に一様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。

### 3-2-2 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り、平原では  $0.0025(1/\text{m})$ 、森、市街地では  $0.01(1/\text{m})$  程度であるといわれている<sup>5)</sup>。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<sup>5)</sup>より  $0.01(1/\text{m})$  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<sup>4)</sup>。

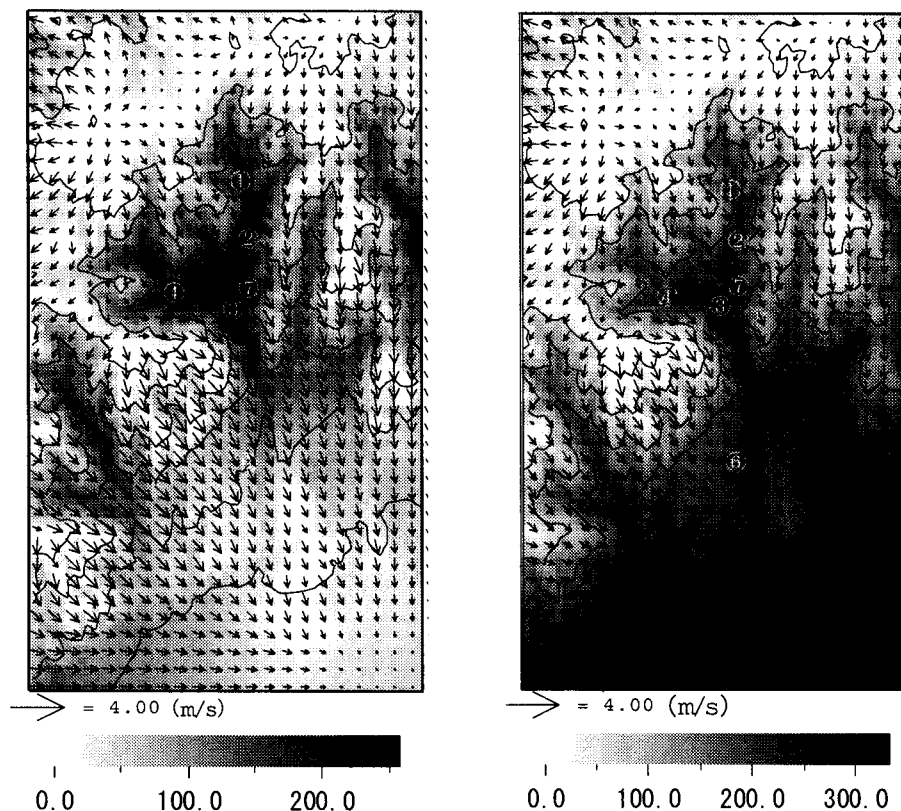


図3-2 冷気流計算結果（左：30分後、右：60分後）  
 (5.1km × 2.9km、 $q=10\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ 、 $c=0.01(1/\text{m})$ )

冷氣生成率  $q$  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  $1 \sim 30(\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h}))$  程度であるといわれているが<sup>5)</sup>、森林部分では樹冠部で生成された冷氣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<sup>7)</sup>。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、冷氣生成率  $q$  は負の値になると考えられる。冷氣生成率  $q$  に標高に応じた  $0 \sim 15\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  の分布を与えて計算を行ったが、計算領域全体に一様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<sup>4)</sup>。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  $q=10\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  を仮定した。

### 3-2-3 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、冷氣生成率  $q=10\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ 、抵抗  $c=0.01(1/\text{m})$  の場合の計算結果を図 3-2 に示す。測定地点も併せて示している(詳細は次節参照)。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ている。

## 3-3 実測調査の概要

### 3-3-1 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 3-3 に示す。杣谷内およびその下流の、杣谷上流、杣谷中間、杣谷堰堤、摩耶東谷、美野丘小学校、杣谷堰堤北、と隣の谷の青谷堰堤の計 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 3-1 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。

### 3-3-2 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、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。



図 3-3 測定対象地域と測定地点  
 ( 青谷堰堤は対象地域西側の青谷内に位置する )

表 3-1 測定地点の標高と測定項目

測定地点	標高	測定項目
杣谷上流	405m	気温
杣谷中間	240m	気温
杣谷堰堤	200m	気温，風向風速
摩耶東谷	320m	気温
青谷堰堤	195m	気温
美野丘小学校	130m	気温，風向風速
杣谷堰堤北	205m	風向風速

### 3-3-3 測定結果

測定結果は基準標高を 0m として乾燥断熱減率 0.98K/100m 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 3-4 に示す。図中に両側矢印で示す期間には 杣谷堰堤で、上流の 杣谷上流、杣谷中間、下流の 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 ～ 2.0 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。



### 3-4-2 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3-7, 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 杣谷堰堤、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、この間に冷気を集積が起きたと考えられる。前節と同様に、計算結果(図3-2左図)における 杣谷堰堤付近での冷気を集積を表していると考えられる。この時の 杣谷堰堤、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気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3-2右図)における 杣谷堰堤付近から 美野丘小学校付近市街地への冷気の流出があったと考えられる。

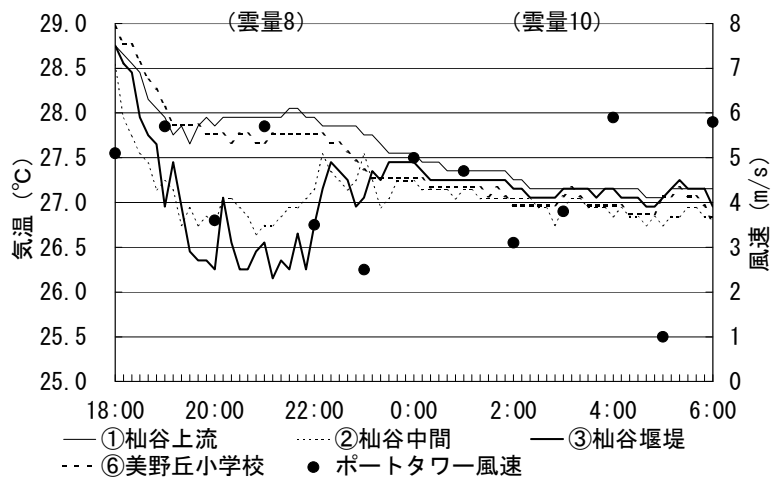


図3-5 広域海陸風が一晩中強い場合(7月22～23日, 18:00-6:00)の気温とポートタワー風速の測定結果

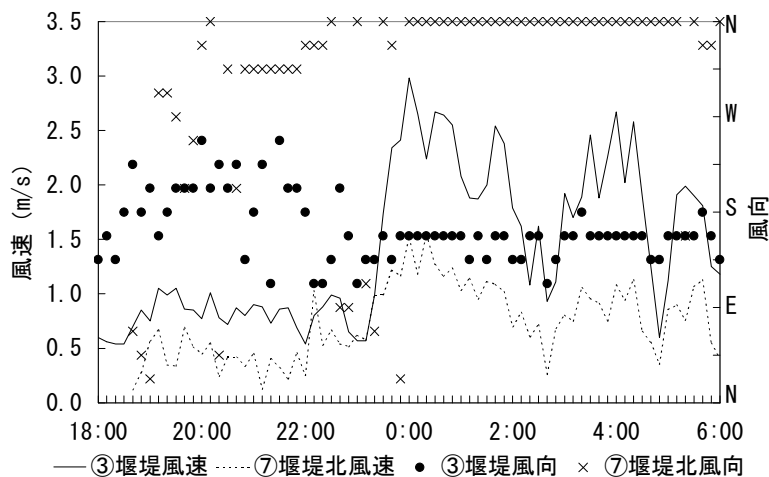


図3-6 広域海陸風が一晩中強い場合(7月22～23日, 18:00-6:00)の風向風速の測定結果

### 3-4-3 温位の鉛直分布

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3-9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3-9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3-9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3-10,11)。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気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<sup>8)</sup>の測定では、斜面で地表付近に形成された冷気層の厚さは、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

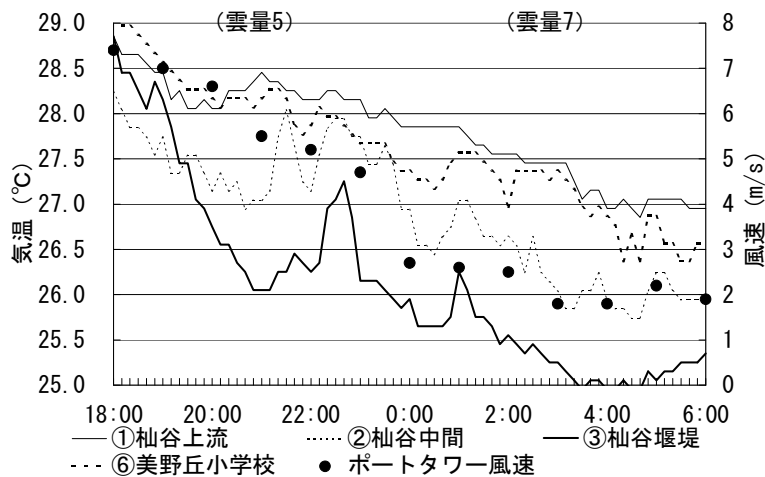


図3-7 広域海陸風が弱くなる場合(7月21~22日, 18:00-6:00)の気温とポートタワー風速の測定結果

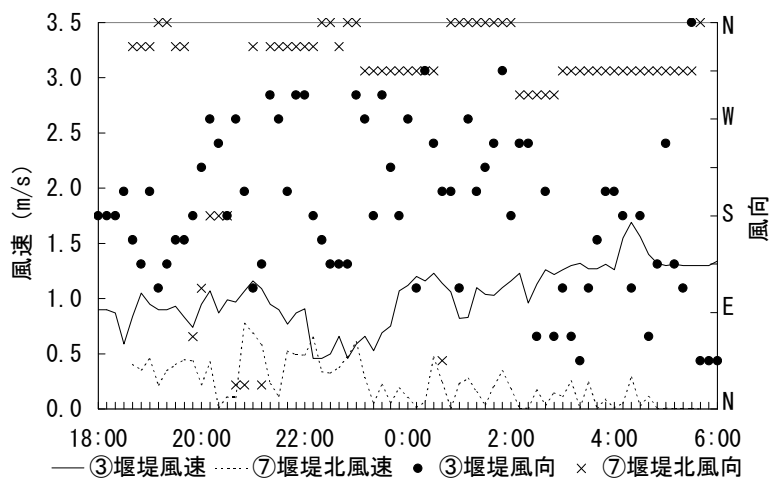


図3-8 広域海陸風が弱くなる場合(7月21~22日, 18:00-6:00)の風向風速の測定結果



されている．本測定は斜面ではなく冷気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気は厚くなっていたと考えられる．計算結果では 杣谷堰堤付近で，冷気が集積し安定した状態での風速は 1.1m/s 程度，冷気層の厚さは 250m 程度となっており，冷気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． 杣谷堰堤は冷気を集積しやすい地形のため，計算結果では冷気の厚さが 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気が集積する谷底での冷気の厚さが算定できると考えられる．

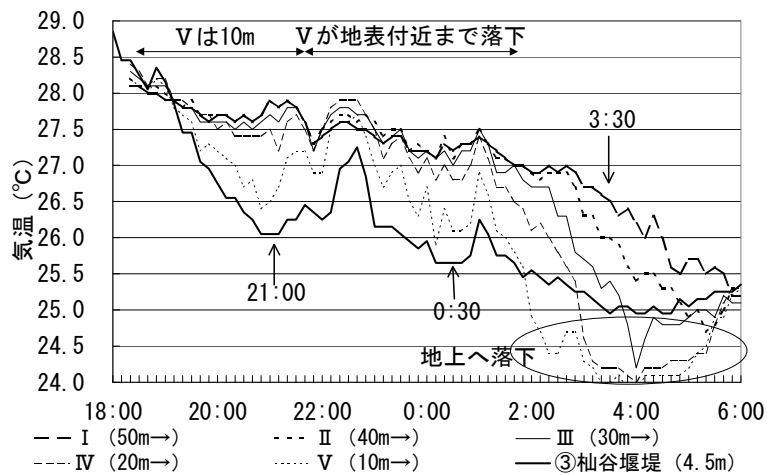


図 3-9 上下気温分布の測定結果（7月21～22日）  
（ 、 、 、 、 は風船（夕方は50m）より  
10m 間隔付けられたで自記式サーミスタセンサの番号）

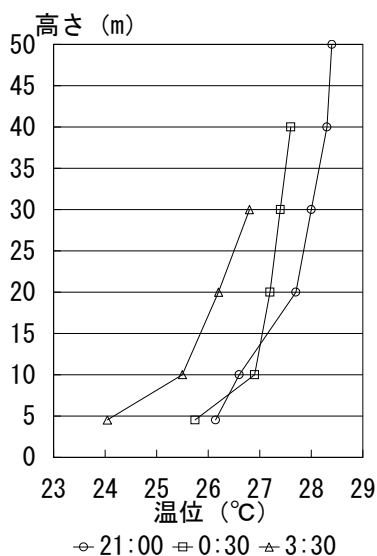


図 3-10 温位の鉛直分布測定結果  
（7月21～22日）



図 3-11 温位の鉛直分布測定に用いた  
風船の様子

### 3-5 まとめ

本章では、市街地に対して冷気流の流出源となる谷の中で、冷気の集積過程について検討を行い、谷口周辺市街地に対する冷気流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気の集積、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。これは冷気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気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、冷気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）、谷の冷気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気が流出してくる（最大で2℃程度低温な冷気）ために、比較的大きな市街地気温の低下が期待できる。

#### 参考・引用文献

- 1) 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, 259-267, 1983
- 2) Maki, M. and Harimaya, T.: The Effect of Advection of Downslope Cold Air on Nocturnal Cooling in Basins, Meteorological Society of Japan, Vol.66, No.4, 581-597, 1988
- 3) 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)冷気の流れ,農業気象,56(4),311-316,2000
- 4) 竹林英樹,森山正和,糸川文崇:夏季夜間の冷気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,空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集(第28回),65-68,1999
- 5) Schaedler, G. and Lohmeyer, A.: Simulation of Nocturnal drainage flows on personal computers, Meteorol. Zeitschrift, N.F.3, 167-171, 1994
- 6) J. Pedlosky: Geophysical Fluid Dynamics, Springer-Verlag, 57-63, 1986
- 7) 森真佐雄,竹林英樹,森山正和:夏季夜間の冷気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,337-340,2000
- 8) 森牧人,鳶田広章,小林哲夫,野田美香,武政剛弘:久住山南麓で観測された斜面下降風(冷気流)の特徴,天気,46,281-288,1999

#### 本章に関連する既発表文献

- 1) Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Study on Cooling Effect in a Built-up Area by Cold Drainage Flow in Summer Night, Proc. International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology (CD-ROM), 1999
- 2) 竹林英樹,新宅俊之,森山正和:夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その2 冷気の集積、流出過程,日本建築学会近畿支部研究報告集,333-336,2000
- 3) 竹林英樹,森山正和:夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その2 冷気の集積、流出過程,日本建築学会大会学術講演 梗概集,1127-1128,2000
- 4) Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Cooling Effects on a Built-up Area caused by Cold Air Drainage in Summer Night, Proc. 3rd Japanese-German Symposium on Urban Climatology, 24-25, 2000
- 5) Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Cooling Effects on A Built-up Area Caused by Cold Air Drainage in Summer Night, Proc. International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering, 27-32, 2001
- 6) 竹林英樹,森山正和: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,日本建築学会計画系論文集,第558号,57-61,2002

## 第4章 数値計算と観測データを用いた夏季の典型的な風の間、温度場に関する考察

### 4-1 概要

本章では、対象地域を支配する夏季の典型的な風の間、温度場に関する解析を、観測データとメソスケールの数値シミュレーションを用いて行う。関東地方、近畿地方などを対象としたメソスケールの数値シミュレーションは気象学の分野では古くから行われ、土木工学などでも最近行われているが<sup>1),2),3)</sup>、総じて言えば理学的研究の興味や大気汚染制御などが主要な観点であり、都市計画や建築計画への利用を目標としている本研究の内容と多少視点を異にする。数値シミュレーションには、気象の分野で広く利用されている Mellor-Yamada 型の乱流モデルを用いる<sup>4)</sup>。このモデルは日本においても関東地方を中心とした計算などで既に幾つかの実績がある<sup>5),6),7)</sup>。

数値シミュレーションは様々なシナリオを想定して検討することが出来るという利点を持つ反面、計算可能な時間はたかだか2日間程度であり、夏季を通した風の間の特徴を知るといった目的に対しては、現時点では不十分なツールであるといえる。ただし、時々刻々の観測データを計算に取り込みながら計算を進める4次元データ同化手法も開発されており<sup>8)</sup>、メソスケールの計算においてもラージスケールの情報を取り込みながら長期の予測を行うことが可能になることも予想される。しかし、現時点では限られた期間の計算しか行うことが出来ないため、計算と並行して観測データにより典型的な風の間を検討を行う方法を採用する。

メソスケールの計算において、計算結果に大きな影響を及ぼす要因は地表の境界条件である。計算結果の評価を行いながらこれらの境界条件を修正することで計算精度を向上させることが出来る。そこで、本章では地表の境界条件やその他の初期条件を修正して計算精度の向上を図る。

メソスケールの計算では、海陸風循環と山谷風循環が風を支配する駆動力となっている。これらの循環を再現するためには、対象領域内に海と山の面積を十分に確保する必要がある。必然的に計算領域は大きくならざるをえない。しかし、本研究の目的は地域（局所あるいはローカル）スケールの環境評価にあることから、対象とする神戸地域の周辺ではもう少し解像度の良い計算結果が得られることが望ましい。そこで、段階的に計算メッシュを細かくするネスティング手法を採用し、神戸地域周辺の計算を詳細に行うこととする。

### 4-2 設定条件

#### 4-2-1 計算対象日

本研究で使用する HOTMAC モデル (Higher Order Turbulence Model for Atmospheric Circulation) では連続して計算を行なうことが可能な時間はせいぜい2日間程度である。この理由は、メソスケールの計算における境界条件の設定に系全体の収支を満足させる精度を持たせていないため、計算を継続すると系全体が高温、あるいは低温になる可能性があるためである。

研究の対象とする現象は夏の典型的な風と温度場であるため、計算対象日の選定にあたっては、過去の気象観測データから典型的な気象の場の検索を行なう。検索は1986年～1995年の梅雨明けから8月中旬までの天気図より連続して晴天日が続いた期間を中心に行なう。表4-1に検索対象期間の天気状況を示す。

検索の結果、晴れの期間が連続して続いた1990年と1995年の7月下旬～8月初旬が計算

対象日の候補として挙げられる。しかし、1990年の天気図からこの期間には太平洋上に台風が存在し、計算対象領域に対して影響を及ぼしている可能性があるため、1995年を計算の対象とする。1995年は7月24日に梅雨が明けてから8月9日まで晴天が続いたが、8月2日に若干の降水が確認された。そこで、降水が確認される直前の8月1日を計算の対象日とし、計算は7月31日6時より開始し、8月1日15時まで行なう。

#### 4-2-2 計算対象領域

計算対象領域を小さくとると海陸の面積比率が原因で、海陸風が十分に発達しなくなる可能性がある。この点を考慮して、対象領域は近畿を中心として太平洋と日本海を含む約300km × 300kmとする。計算対象領域を図4-1に示す。大阪や神戸周辺の風と温度場を詳細に検討することが可能なように、詳細に検討する領域のグリッドサイズを細かくするネスティング手法を用いる。ネスティングは3段階とし、そのメッシュ間隔とメッシュ数、領域を表4-2に示す。なお、この図は神戸を中心とした解析の場合の例である。

#### 4-2-3 観測データの概要

計算の初期条件、境界条件、結果の検証に使用する観測データの収集、処理を計算対象日及びその前後の期間を対象として行なう。対象日の観測データ（気温、湿度、風向、風速、日射量、雲量、地中温度）を図4-2～4に示す。

対象日は、最低気温が大阪では28.0、神戸では25.6と非常に厳しい熱帯夜となっている。風向は昼夜共に西風で大阪では昼間強く夜間弱い傾向になっているが、神戸では午前4,5時頃に強くなっている。雲量は少なく十分な日射が得られている。神戸大学で観測された地中温度は50cm下でほぼ26一定であるため、計算では地中の境界条件として50cmで26一定値を与える。

表4-1 1986年～1995年の梅雨明けから8月中旬までの天気状況<sup>3)</sup>

1986年	7月27日に梅雨明けしてから8月1日まで晴れ、8月2日から7日まで台風、8日から晴れ。
1987年	7月24日に梅雨明けするが、台風が断続的に通過し、前線も南下した。
1988年	梅雨明け後台風が断続的に通過。
1989年	7月19日に梅雨明けしてから25日まで晴れ、26日から台風が断続的に通過。
1990年	7月18日に梅雨明けしてから27日まで晴れ、28日から台風が接近したが近畿の天気は8月8日頃までおおむね晴れ。
1991年	7月20日に梅雨明けしてから25日まで晴れ、26日から30日まで台風、31日から8月2日まで晴れ、しかし、8月3日には梅雨に逆戻りで、この年は冷夏。
1992年	7月21日に梅雨明けしてから8月1日まで晴れ、8月2日から台風が断続的に通過。
1993年	7月29日に梅雨明けしたが、台風、前線が活発、8月4日には梅雨の気圧配置、その後も台風が通過。(冷夏)
1994年	7月11日に梅雨明けしてから18日まで晴れ、19日から8月1日まで台風、2日から9日まで晴れ、10日から台風が断続的に通過。(暑夏)
1995年	7月24日に梅雨明けしてから8月9日まで晴れ、台風の通過もなし。10日からは前線が南下。

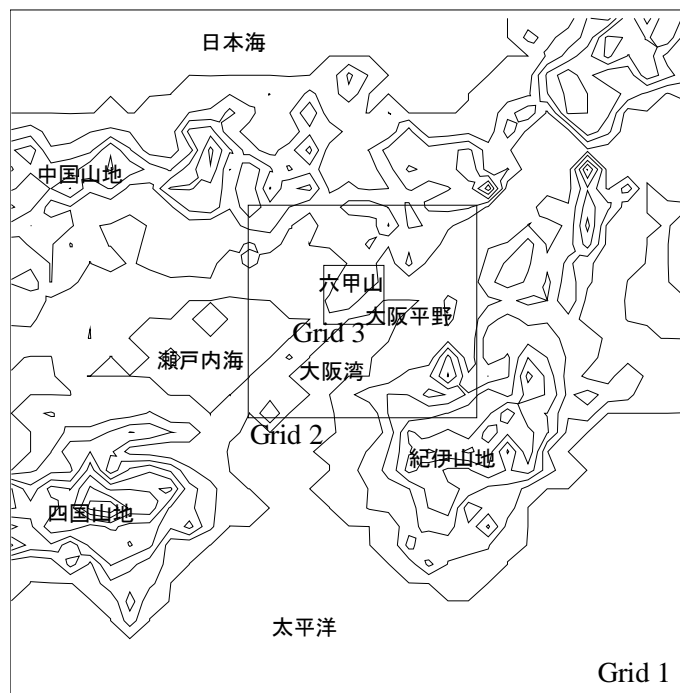


図 4-1 解析領域及びネスティング領域 (等高線は 200m 間隔)  
 (Grid 1 は近畿, Grid 2 は大阪湾周辺, Grid 3 は神戸を対象としている)

表 4-2 計算領域, 格子分割数, 格子幅

	計算領域 (km)	格子分割数	水平方向の格子幅 (km)
Grid1(近畿)	315 × 333 × 5	35 × 37 × 15	9
Grid2(大阪湾)	111 × 111 × 5	37 × 37 × 15	3
Grid3(神戸)	28 × 31 × 5	28 × 31 × 15	1

表 4-4 国土数値情報を用いた地表面境界条件の設定値

分類	粗度 (m)	アルベド (-)	蒸発効率 (-)	人工排熱 (W/m <sup>2</sup> )	熱伝導率 (W/(m・K))	温度伝導率 (m <sup>2</sup> /s)
田畑	0.050	0.20	0.5	0.0	0.63	0.15 × 10 <sup>-6</sup>
果樹園	0.010	0.10	0.3	0.0	1.05	0.57 × 10 <sup>-6</sup>
その他の樹木	1.000	0.20	0.3	0.0	1.05	0.57 × 10 <sup>-6</sup>
畑	0.500	0.20	0.3	0.0	1.05	0.57 × 10 <sup>-6</sup>
森林	2.000	0.15	0.3	0.0	1.05	0.57 × 10 <sup>-6</sup>
荒地	0.010	0.20	0.3	0.0	1.05	0.57 × 10 <sup>-6</sup>
都市	1.000	0.10	0.0	50.0	1.70	0.81 × 10 <sup>-6</sup>
郊外	1.000	0.10	0.0	50.0	1.70	0.81 × 10 <sup>-6</sup>
道路	0.010	0.10	0.0	4.0	0.70	0.50 × 10 <sup>-6</sup>
裸地	0.010	0.20	0.3	0.0	1.05	0.57 × 10 <sup>-6</sup>
湖	0.001	0.03	1.0	0.0	0.63	0.15 × 10 <sup>-6</sup>
河川	0.001	0.03	1.0	0.0	0.63	0.15 × 10 <sup>-6</sup>
氾濫原	0.001	0.03	1.0	0.0	0.63	0.15 × 10 <sup>-6</sup>
海浜	0.005	0.30	0.6	0.0	2.20	0.74 × 10 <sup>-6</sup>
海	0.001	0.03	1.0	0.0	0.63	0.15 × 10 <sup>-6</sup>

大阪府立水産試験場（大阪府泉南郡岬町）で観測された7月31日の日平均水温は23.7℃，8月1日は23.9℃である。ちなみに，この場所での7月下旬の平均水温は23.5℃，8月上旬は24.2℃であり，以降も上昇傾向にある。また，7月31日から8月1日にかけて大阪湾内で実施された水温（表層）分布調査から，大阪市付近では30℃，神戸市付近では27℃程度となる分布が得られている。大阪湾内では分布が確認されたが，計算では太平洋，日本海を含む広領域を対象とするため，分布は考慮せず平均的な値として25℃一定値を与える。

高層気象データからは，気温，露天温度，風向，風速が大気圧毎に得られる。それらを高さ別の温位，比湿に変換して計算に用いる初期分布とともに図4-5,6に示す。温位の鉛直分布に関しては，計算で用いる分布と観測値はほぼ一致している。比湿に関しては，観測が潮岬で行なわれており，大阪などと比較して若干大きな値が得られているものと考えられるので，計算には従来どおりMcClatcheyらによる鉛直分布を与える。上空5000m付近の風向風速の観測値を表4-3に示す。表を参考に上空境界条件は南南西の風1.0m/sを用いる。

#### 4-2-4 地表面の境界条件

従来の計算においては地表面のパラメータ分布は国土数値情報を用いて決められている。表4-4に国土数値情報を用いた地表面境界条件の設定値を示す。地表面パラメータは，粗度，アルベド（日射反射率），蒸発効率，人工排熱，地盤の熱伝導率，地盤の熱容量である。

表から分かるように，都市，郊外，道路におけるアルベドが0.10と設定されており，森林の0.15より小さな値が用いられている。この理由は，都市部においては建物による影の影響があり，日射はあまり反射されないと想定したためである。

#### 4-3 モデルの概要

本研究で使用する大気乱流モデルは，Mellor-Yamadaが開発した大気乱流モデル<sup>4)</sup>の $q^2/2$ と $q^2|$ の2つの乱流量に対してのみ偏微分方程式を解くレベル2.5モデルである。このモデルを複雑地形上に適応させたものを用いる。

Mellor-Yamadaの大気乱流モデルでは，レイノルズ応力方程式モデルに相当するものをレベル4と呼び，11個の輸送方程式で構成されている（温位に関する相関項を含む）。次元解析により，移流項と拡散項が同程度とみなすことによりレベル3が導かれる。これは代数方程式モデルに相当し，2個の輸送方程式により構成される。更に，簡略化し輸送方程式を乱流エネルギーのみにしたものが本研究で用いるレベル2.5である。乱流エネルギーも代数方程式により与えるものはレベル2と呼ばれ，代数方程式の表現がより簡略化される。Mellor-Yamadaの大気乱流モデルでは，基本的に乱流エネルギー $q$ と長さスケール $l$ によりモデル化されているが， $l$ を代数式により直接的に与えるのではなく， $q^2|$ の輸送方程式を解く場合がある（これはレベルに係らない）。この場合，輸送方程式の数は1つ増えることになる。

以下に本研究で用いた大気乱流モデルの基礎方程式を示す。

##### ・ 水平方向の運動方程式

$$\frac{DU}{Dt} = f(V - V_g) + g \frac{\bar{H} - z^*}{\bar{H}} \left( 1 - \frac{\langle \Theta_v \rangle}{\Theta_v} \right) \frac{\partial z_g}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{xy} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\bar{H}}{\bar{H} - z_g} \frac{\partial}{\partial z^*} (-\overline{uw}) \quad (4.1)$$

$$\frac{DV}{Dt} = -f(U - U_g) + g \frac{\bar{H} - z^*}{\bar{H}} \left( 1 - \frac{\langle \Theta_v \rangle}{\Theta_v} \right) \frac{\partial z_g}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xy} \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\bar{H}}{\bar{H} - z_g} \frac{\partial}{\partial z^*} (-\overline{vw}) \quad (4.2)$$

ここで， $g$ は重力加速度， $K_{xx}$ ， $K_{xy}$  ( $=K_{yx}$ )， $K_{yy}$ は水平方向の拡散に関する渦動粘性係数。

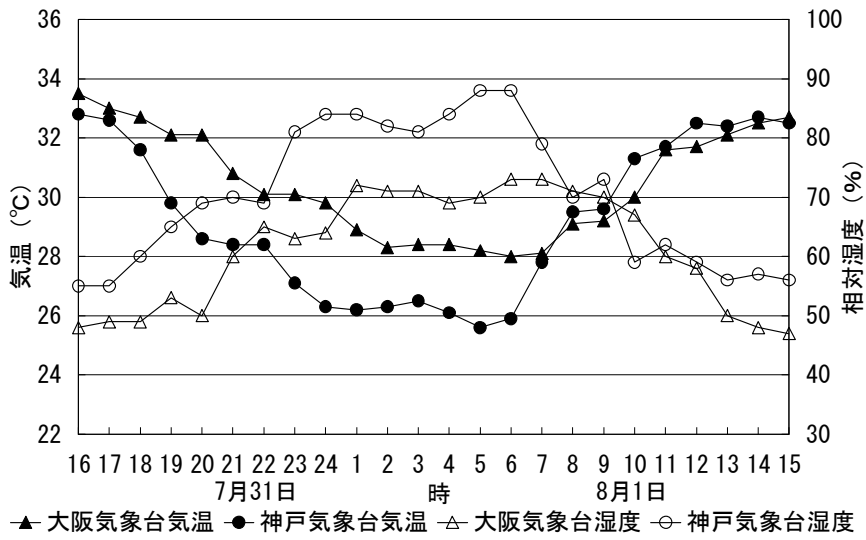


図 4-2 大阪管区气象台と神戸海洋气象台の気温と湿度（1995年7月31日～8月1日）

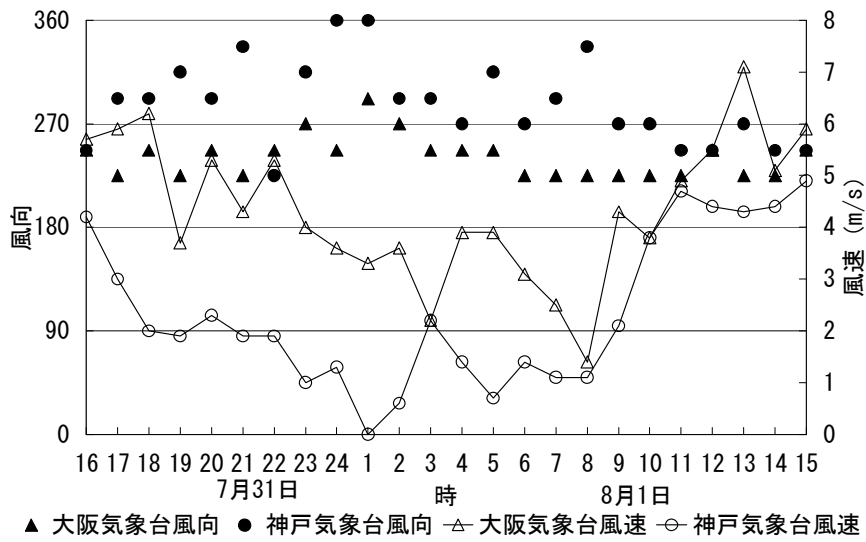


図 4-3 大阪管区气象台と神戸海洋气象台の風向と風速（1995年7月31日～8月1日）

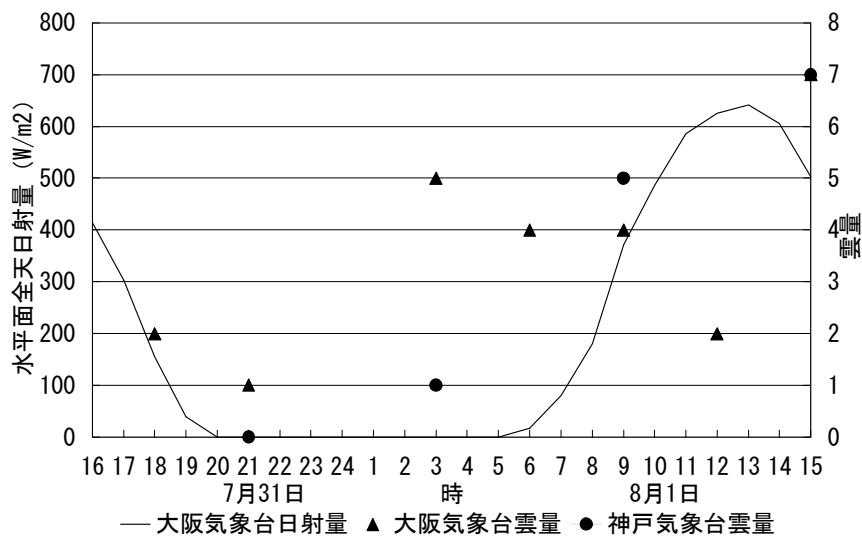


図 4-4 大阪管区气象台と神戸海洋气象台の日射量と雲量（1995年7月31日～8月1日）



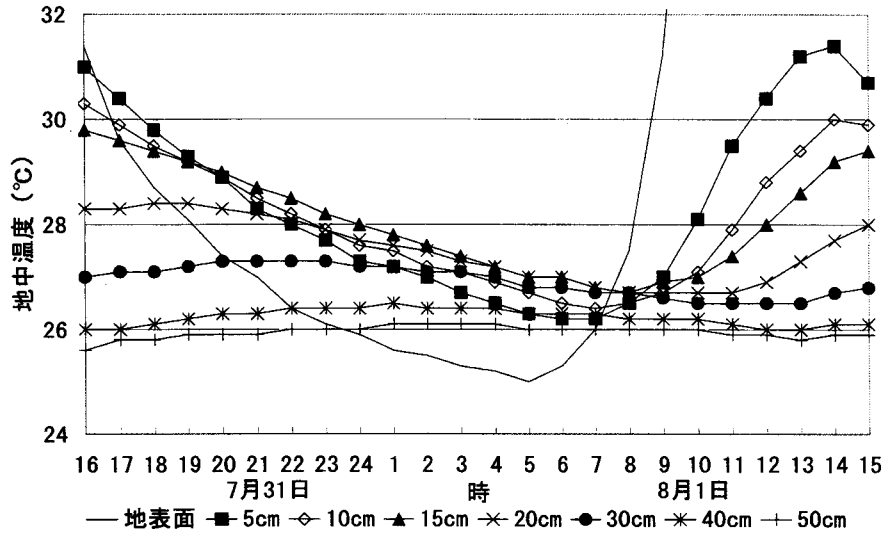


図2-44 神戸大学で観測された地中温度 (1995年7月31日～8月1日)

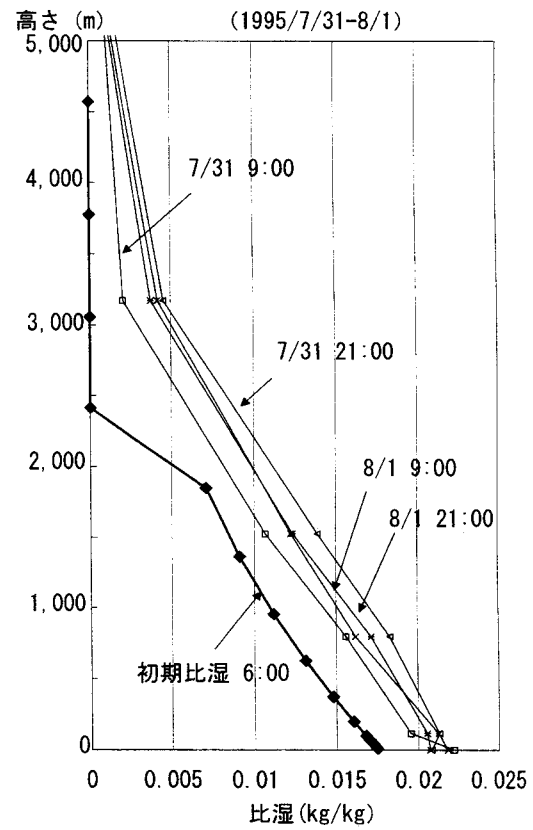
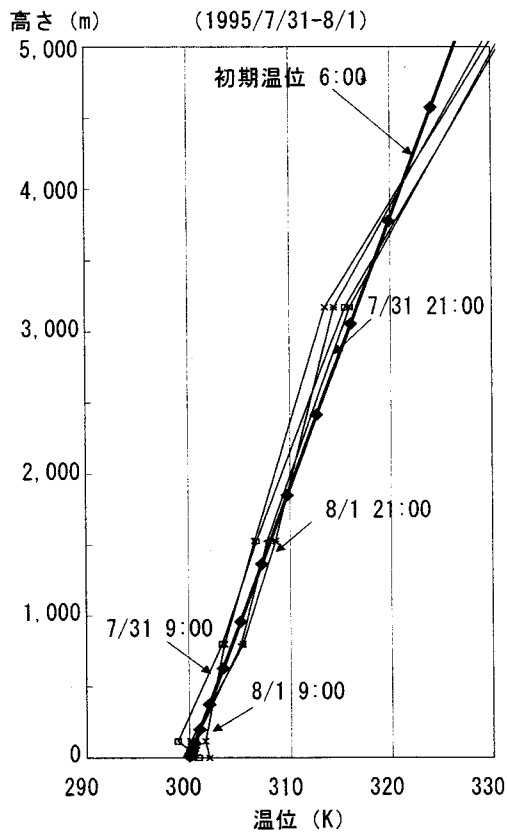


図4-5 潮岬で観測された温位の鉛直分布と 図4-6 潮岬で観測された比湿の鉛直分布と計算の初期値 (1995年7月31日～8月1日) 計算の初期値 (1995年7月31日～8月1日)

表4-3 潮岬の上空5000m 付近の風向風速 (1995年7月31日～8月1日)

7月31日9時			21時			8月1日9時			21時		
高度 (m)	風向	風速 (m/s)	高度 (m)	風向	風速 (m/s)	高度 (m)	風向	風速 (m/s)	高度 (m)	風向	風速 (m/s)
3171	220	4.1	3170	85	1.0	3167	275	5.1	3163	345	4.1
5985	185	2.1	5973	320	2.1	5989	205	1.0	5960	290	1.0

・地衡風成分の  $U_g(z^*)$  と  $V_g(z^*)$

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + U \frac{\partial}{\partial x} + V \frac{\partial}{\partial y} + W^* \frac{\partial}{\partial z^*} \quad (4.3)$$

$$fU_g(z^*) \equiv fU_g(\bar{H}) \frac{\langle \Theta_v \rangle}{\langle \Theta_v(\bar{H}) \rangle} + g \frac{H-z_g}{\bar{H}} \int_{z^*}^{\bar{H}} \frac{1}{\langle \Theta_v \rangle} \frac{\partial}{\partial y} \Delta \Theta_v dz' - \frac{g}{\bar{H}} \frac{\partial z_g}{\partial y} \int_{z^*}^{\bar{H}} \frac{\Delta \Theta_v}{\langle \Theta_v \rangle} dz' \quad (4.4)$$

$$fV_g(z^*) \equiv fV_g(\bar{H}) \frac{\langle \Theta_v \rangle}{\langle \Theta_v(\bar{H}) \rangle} - g \frac{H-z_g}{\bar{H}} \int_{z^*}^{\bar{H}} \frac{1}{\langle \Theta_v \rangle} \frac{\partial}{\partial x} \Delta \Theta_v dz' + \frac{g}{\bar{H}} \frac{\partial z_g}{\partial x} \int_{z^*}^{\bar{H}} \frac{\Delta \Theta_v}{\langle \Theta_v \rangle} dz' \quad (4.5)$$

ここで,  $\Delta \Theta_v \equiv \Theta_v - \langle \Theta_v \rangle$  であり,  $\langle \rangle$  は水平面内の平均.

・連続の式

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W^*}{\partial z^*} - \frac{1}{H-z_g} \left( U \frac{\partial z_g}{\partial x} + V \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) = 0 \quad (4.6)$$

$$\text{ここで, } W^* \equiv \frac{\bar{H}}{H-z_g} W + \frac{z^* - \bar{H}}{H-z_g} \left( U \frac{\partial z_g}{\partial x} + V \frac{\partial z_g}{\partial y} \right) \quad (4.7)$$

・乱流エネルギー

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} \left( \frac{q^2}{2} \right) &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_{xx}}{\sigma_q} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{K_{yy}}{\sigma_q} \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{2} \right) \right] + \left( \frac{\bar{H}}{H-z_g} \right)^2 \\ &\times \frac{\partial}{\partial z^*} \left[ q l S_q \frac{\partial}{\partial z^*} \left( \frac{q^2}{2} \right) \right] - \frac{\bar{H}}{H-z_g} \left( \overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z^*} + \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z^*} \right) + \beta_v g \overline{w\theta_v} - \frac{q^3}{B_1 l} \end{aligned} \quad (4.8)$$

ここで,  $q^2 = \overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}$ .  $S_q = 0.2$ ,  $B_1 = 16.6$ ,  $\sigma_q = 1.0$ .

・乱れ長さスケール

$$\begin{aligned} \frac{D(q^2 l)}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_{xx}}{\sigma_l} \frac{\partial (q^2 l)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{K_{yy}}{\sigma_l} \frac{\partial (q^2 l)}{\partial y} \right] + \left( \frac{\bar{H}}{H-z_g} \right)^2 \frac{\partial}{\partial z^*} \left[ q l S_l \frac{\partial (q^2 l)}{\partial z^*} \right] \\ &- l F_1 \left[ \frac{\bar{H}}{H-z_g} \left( \overline{uw} \frac{\partial U}{\partial z^*} + \overline{vw} \frac{\partial V}{\partial z^*} \right) - \beta_v g \overline{w\theta_v} \right] - \frac{q^3}{B_1} \left[ 1 + F_2 \left( \frac{l}{kz} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (4.9)$$

ここで,  $S_l = 0.2$ ,  $F_1 = 1.8$ ,  $F_2 = 1.33$ ,  $\sigma_l = 1.0$ .

・内部エネルギー (相当温位)

$$\begin{aligned} \frac{D \Delta \Theta_v}{Dt} &= \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_{xx}}{\sigma_{\Theta_v}} \frac{\partial \Delta \Theta_v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{K_{yy}}{\sigma_{\Theta_v}} \frac{\partial \Delta \Theta_v}{\partial y} \right] \\ &+ \frac{\bar{H}}{H-z_g} \left[ \frac{\partial}{\partial z^*} \left( -\overline{w\theta_v} \right) + \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial R_N}{\partial z^*} - W^* \frac{\partial \langle \Theta_v \rangle}{\partial z^*} \right] \end{aligned} \quad (4.10)$$

ここで,  $\sigma_{\Theta_v} = 1.0$ .  $R_N$  は正味の長波放射量.

・総水分混合比

$$\frac{D Q_w}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{K_{xx}}{\sigma_{Q_w}} \frac{\partial Q_w}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{K_{yy}}{\sigma_{Q_w}} \frac{\partial Q_w}{\partial y} \right] + \frac{\bar{H}}{H-z_g} \frac{\partial}{\partial z^*} \left( -\overline{wq_w} \right) \quad (4.11)$$

ここで,  $\sigma_{Q_w} = 1.0$ .

・鉛直方向の乱流フラックス

$$\overline{uw} = -l q \tilde{S}_M \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (4.12a) \quad \overline{vw} = -l q \tilde{S}_M \left( \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (4.12b)$$

$$\overline{w\theta_v} = -l q \tilde{S}_H \left( \frac{\partial \Theta_v}{\partial z} \right) \quad (4.13a) \quad \overline{wq_w} = -l q \tilde{S}_H \left( \frac{\partial Q_w}{\partial z} \right) \quad (4.13b)$$

$\tilde{S}_M, \tilde{S}_H$ : 浮力による補正項.

・地表面熱収支

以下の1次元熱収支モデルより地表面温度が求められる。

$$R_{SOG} = (1 - \alpha_G) \times SO \quad (4.14)$$

$$R_{SOG} = (1 - \alpha_G) \times SO \quad \text{地表へ流入する短波放射量 (直達 + 天空, 流入が正)} \quad (4.15)$$

$$R_{LG\downarrow} \quad \text{地表へ向かう下向きの長波放射量 (流入が正)}$$

$$R_{LG\uparrow} \quad \text{地表からの上向きの長波放射量 (流出が正)}$$

$$R_{NG} = R_{LG\downarrow} - R_{LG\uparrow} \quad \text{地表面に流入する正味の長波放射量} \quad (4.16)$$

$$H_G = -\rho_a C_p u_* T_* \quad \text{地表面の顕熱輸送量 (流出が正)} \quad (4.17)$$

$$LE_G = -\rho_a Lu_* Q_* \quad \text{地表面の潜熱輸送量 (流出が正)} \quad (4.18)$$

$$C_G = K_s (\partial T_s / \partial z_s)_G \quad \text{地表面より土壌中への熱伝導量 (流出が正)} \quad (4.19)$$

$$A_G \quad \text{地表面の人工排熱 (流入が正)}$$

$$SO \quad \text{短波放射量 (直達 + 天空)}$$

アルベド

$$L \quad \text{水の蒸発潜熱}$$

$$a \quad \text{空気の密度}$$

$$u_* \quad \text{基準速度スケール (摩擦速度)}$$

$$T_* \quad \text{基準温度スケール}$$

$$Q_* \quad \text{基準水蒸気スケール}$$

$$K_s \quad \text{土壌の熱伝導率}$$

$$z_s \quad \text{地表から地中に向かって図った距離}$$

$$\text{suffix G} \quad \text{地表面で定義される量}$$

$$\text{suffix S} \quad \text{地中で定義される量} \quad R_{SOG} + R_{LG\downarrow} - R_{LG\uparrow} - (H_G + LE_G + C_G) + A_G = 0$$

$$\text{suffix SO} \quad \text{短波放射に関する量}$$

$$\text{suffix L} \quad \text{長波放射に関する量}$$

$$R_{LG\uparrow} = \varepsilon_G \sigma T_G^4 + (1 - \varepsilon_G) R_{LG\downarrow} \quad (4.20)$$

$$G \quad \text{地表面の放射率}$$

ステファン・ボルツマン定数

$$T_G \quad \text{地表面温度}$$

(2.14)式に (2.17) ~ (2.20)式を代入し、次式を得る。

$$(1 - \alpha_G) SO + \varepsilon_G R_{LG\downarrow} - \varepsilon_G \sigma T_G^4 + \rho_a C_p u_* T_* + \rho_a Lu_* Q_* - K_s (\partial T_s / \partial z_s)_G + A_G = 0 \quad (4.21)$$

ここで、地表面の摩擦応力、顕熱輸送量、潜熱輸送量はモニン・オブコフの相似則より導出される浮力補正項を含む形の対数則より与えられる。

#### 4-4 計算結果および考察

計算結果をGrid別に図4-7 ~ 9に示す。水温が一日を通して陸上の気温より低い傾向にあった1995年夏季前半を対象としているため、一日を通して大阪湾から大阪平野に向かう海風が卓越している様子が再現されている。また、Grid3の神戸市周辺地域では大阪湾と大阪平野の影響を受けた風の間となつている。

##### 4-4-1 Grid1での計算結果と観測結果の比較

図4-10, 11に0時と12時のGrid1での計算結果と観測結果の比較を示す。観測結果はアメダスの観測地点での測定結果で、計算対象期間のものと夏季晴天日の平均値を併せて示し

ている．なお，夏季晴天日は神戸海洋気象台の日照時間が6時間以上の日とし1995年7,8,9月から計57日を選出した．

計算対象期間前後の観測データでは，地上の最低気温が大阪管区気象台で28℃，神戸海洋気象台で26℃程度であったのに対し，水面の温度は24～25℃程度となっており（計算では25℃を与えた），一日を通して海上の気温が陸上の気温より低い状況であった．そのため，特に大阪平野では夜間においても相対的に低温である海上から高温の平野部へ向かう海風が吹きつづけていた．図4-10の0時の計算結果においても大阪平野の気温が28℃程度と高温になっており，大阪湾から大阪平野へ向かう海風が吹き続ける様子が再現できている．なお，9月以降になると，水温は水の熱容量が大きいため高温に保たれるが，陸上の夜間気温は徐々に低下する傾向になり，陸風が発達しやすくなることが観測データより確認されている．

図4-11の12時の計算結果においては，大阪湾周辺地域の海風の様子が再現できている．しかし，名古屋などの計算領域の周辺部分では，観測結果と風向が逆転しており，領域全体での計算精度を向上させるためには，海水面温度の分布を与えるなどの更なる改善策が必要であると考えられる．本研究では，大阪湾周辺地域の風の場合が概ね再現された時点で目的とする計算結果が得られたと判断した．

#### 4-4-2 Grid2での計算結果と観測結果の比較

図4-12～15にGrid2での5時と14時の計算結果と，アメダス地点と大気汚染監視局での観測結果を基に作成した最低，最高気温分布の比較を示す．図4-13,15の推定気温分布は文献<sup>9)</sup>の方法により，1994,95,96年の7,8,9月の最高気温，最低気温の期間平均値を基に，標高分布，海岸からの距離，人工衛星データより作成される正規化植生指標（NVI）分布を合成して作成した．分布推定は統計的手法であり，対象日に限った推定では大きな誤差を生じるため期間平均の最低，最高気温分布とした．観測結果の分布推定には人工衛星データを利用しているため，衛星軌道の関係上画像の角が欠けた表現となっているが，アフィン変換により標高分布座標とは一致させている．

計算結果は高さ10m，3kmメッシュ平均の値であり，観測結果は高さ1.5m付近，250mメッシュ平均の値である．従って，観測結果が最低気温，最高気温ともに全体的に高くなっているが，分布の傾向は概ね一致している．

図4-16,17に大阪管区気象台と神戸管区気象台での計算結果と観測結果の比較を示す．地表面温度の計算結果も併せて示す．大阪管区気象台は3kmメッシュの該当する地点，神戸海洋気象台は1kmメッシュの該当する地点より計算結果を抜き出して示している．特に，大阪管区気象台では夜間に計算結果が観測結果より2℃程度低くなっている．神戸海洋気象台でも最低気温時に1℃程度計算結果が低くなっている．計算では粗度を仮定した地表面熱収支モデルを用いているため，建物による蓄熱の効果が十分に考慮できていないことなどが，計算結果の気温が低くなっている原因であると考えられる．

図4-18,19に大阪タワー（120m），ポートタワー（100m）での風の計算結果と観測結果を示す．大阪タワーは3kmメッシュの該当する地点，高さ，ポートタワーは1kmメッシュの該当する地点，高さより計算結果を抜き出して示している．両地点ともに夜間も海風が続く傾向が表現出来ている．ただし，大阪タワーでは計算結果の風が全体的に弱くなっており，特に昼間の海風が観測結果ほど発達していない．この理由は図4-11bに見られるように大阪湾から大阪平野へ向かう海風が六甲山や紀伊山地の方向へ収束する風に引っ張られているためではないかと考えられる．日中は一般的に斜面を上昇する谷風が発達するといわれているが，

計算結果はこの谷風を若干大きく見積もっているのではないかと考えられる。この点については、他の計算結果においても山に風が収束する傾向が確認されるため、今後の改善すべき課題とする。

#### 4-4-3 Grid3 での計算結果と観測結果の比較、及び建築、都市計画への応用

図4-20～23にGrid3での計算結果と観測結果の比較を示す。計算結果は1時間ごとに出し観測結果との比較を行った。ここでは18,24,6,12時の比較を示す。海風が大阪平野（北西方向）に引っ張られている様子は、焦点を当てた神戸地域の解析だけでは表現できないため、ネスティング手法による成果であるといえる。この計算結果と観測結果より、六甲山南麓の市街地に対しては昼間の南西方向からの海風、夜間の六甲山から吹き降りてくる陸風を考慮した都市、建築の計画を行うべきであるとの指針が導き出される。

計算結果は限られた条件、今回の場合は夜間も海風が卓越する気象条件での結果であり、ある程度の計算精度を確保しながら幾つもの条件で計算を行うのは大変な労力を要する。従って、本研究で行ったような、計算結果と統計処理を行った観測結果の比較により、建築、都市計画の指針を導き出す方法が、最も適当な手法ではないかと考えられる。

#### 4-5 まとめ

本章では、Mellor-Yamada型の乱流モデルを用いて行った近畿地方の流れ場、温度場の計算について述べた。

計算を行う前に、気象台や大気汚染常時監視局の観測データなどを用いて、境界条件、初期条件について詳細な検討を行い、計算結果と比較する観測データを整備した。

その後、メソスケールの計算を行い、上述の計算条件、観測データに基づく風場、温度場の特性などの関係について調査した。典型的な夏季における海陸風循環の様子が再現されており、メソスケールモデルで知ることが出来る地形と土地利用の関係に基づく局地風循環が十分に表現出来ていた。

計算結果からは、気象条件は限定されるが、物理的メカニズムに従った典型的な風、気温の場が得られる。観測結果からは、メソスケールの現象よりも大きなスケールあるいは小さなスケールの影響を含む可能性があるが、統計処理を行うことで夏季の典型的な風、気温の場が得られる。ただし、計算モデルは地表面熱収支モデルに粗度を用いており、1.5mでの観測結果との単純な比較は出来ない。従って本研究では、この2つのデータを併用して都市熱環境に関する考察を行った。メソスケールモデルを気候解析に利用するにあたっては主に以下の点について検討した。

- 1) 観測データを参考に初期温位の分布や海水面温度などを修正することで、夜間の海風を再現することが出来た。
- 2) 計算結果と観測結果の風速分布の比較では、計算結果が若干山へ向かう風を過大評価する傾向が確認された。
- 3) ネスティング手法を用いたため、対象とした神戸地域では観測結果と整合のとれた計算結果が得ることができた。

そして、計算結果と観測結果から、昼間の南西方向から吹いてくる海風、夜間の六甲山から吹き降りてくる陸風を考慮した都市、建築の計画を行うべきであるとの提言案が導き出された。

## 参考・引用文献

- 1) 伊藤久徳：近畿地方の広域海風に関する数値実験，天気，42，17-27，1995
- 2) 鵜野伊津志，大原利眞，若松伸司，松井一郎：近畿地域の局地循環シミュレーションと評価，天気，43，303-317，1996
- 3) 呉銀珠，近藤明，山口克人，水間健二：地域開発スケールの流れ場の日変動シミュレーション，空気調和・衛生工学会論文集，No.76，29-39，2000
- 4) Mellor, G. L., and Yamada, T.: A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layer, Journal of Applied Meteorology, Vol.13, No.7, 1791-1806, 1974
- 5) 村上周三，持田灯，金相進，大岡龍三：関東地方における土地利用状況の変化と流れ場・温度場の関係，Mellor-Yamada 型の都市気候モデルによる局地気象解析，日本建築学会計画系論文集，第 491 号，31-39，1997
- 6) 杉山寛克，持田灯，村上周三，尾島俊雄：沿岸部における都市圏の拡大がヒートアイランドの形成に及ぼす影響に関する解析，日本建築学会計画系論文集，第 492 号，83-90，1997
- 7) 金相進，村上周三，持田灯，大岡龍三，吉田伸治：数値気候モデルによる都市化がもたらす関東地方の気候変化のメカニズムの解析，日本建築学会計画系論文集，第 534 号，83-88，2000
- 8) 鵜野伊津志：4 次元データ同化手法による関東地域の局地循環シミュレーションと評価，大気環境学会誌，30，303-317，1995
- 9) 宮崎ひろ志，森山正和：ニューラルネットワークを用いた気温分布推定に関する研究，日本建築学会計画系論文集，第 543 号，71-76，2001

#### 本章に関連する既発表文献

- 1) 竹林英樹, 森山正和: 神戸地域の都市気候に関する研究 - 数値計算による気流分布性状の解析 -, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 185-188, 1996
- 2) 竹林英樹, 森山正和: 神戸地域の都市気候に関する研究 - 数値計算による気流分布性状の解析 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 565-566, 1996
- 3) Ooka, R., Murakami, S., Mochida, A., Kim, S., Naito, K., Moriyama, M., Takebayashi, H. and Shibaike, H.: CFD Analysis of Urban Climate in Kobe City, Proc. "Klimaanalyse fuer die Stadtplanung" -Second Japanese-German Meeting-, 271-278, 1997
- 4) 竹林英樹, 森山正和: 観測データによる神戸地域の気流解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 161-164, 1998
- 5) 竹林英樹, 森山正和, 村上周三: 観測データによる神戸地域の風系に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 677-678, 1998
- 6) Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Study on Wind Distribution in Kobe City influenced by Land and Sea breezes around Osaka Bay, Proc. Symposium on Advances in Regional Climatology, 125-126, 1998
- 7) 竹林英樹, 森山正和, 村上周三, 芝池英樹, 金相進: 数値解析による神戸地域周辺の風系に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 885-886, 1999
- 8) 糸川文崇, 森山正和, 竹林英樹: 六甲山南麓市街地における夏季夜間の風特性と気温分布に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1421-1424, 1999
- 9) 竹林英樹, 森山正和, 村上周三, 芝池英樹, 金相進: 数値解析による神戸地域の風系に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1425-1428, 1999
- 10) 竹林英樹, 森山正和, 村上周三, 大岡龍三, 持田灯, 芝池英樹, 吉田伸治: 数値モデルによる計算結果と観測データを併用した都市スケールの気候解析, 日本建築学会計画系論文集, 第556号, 63-68, 2002

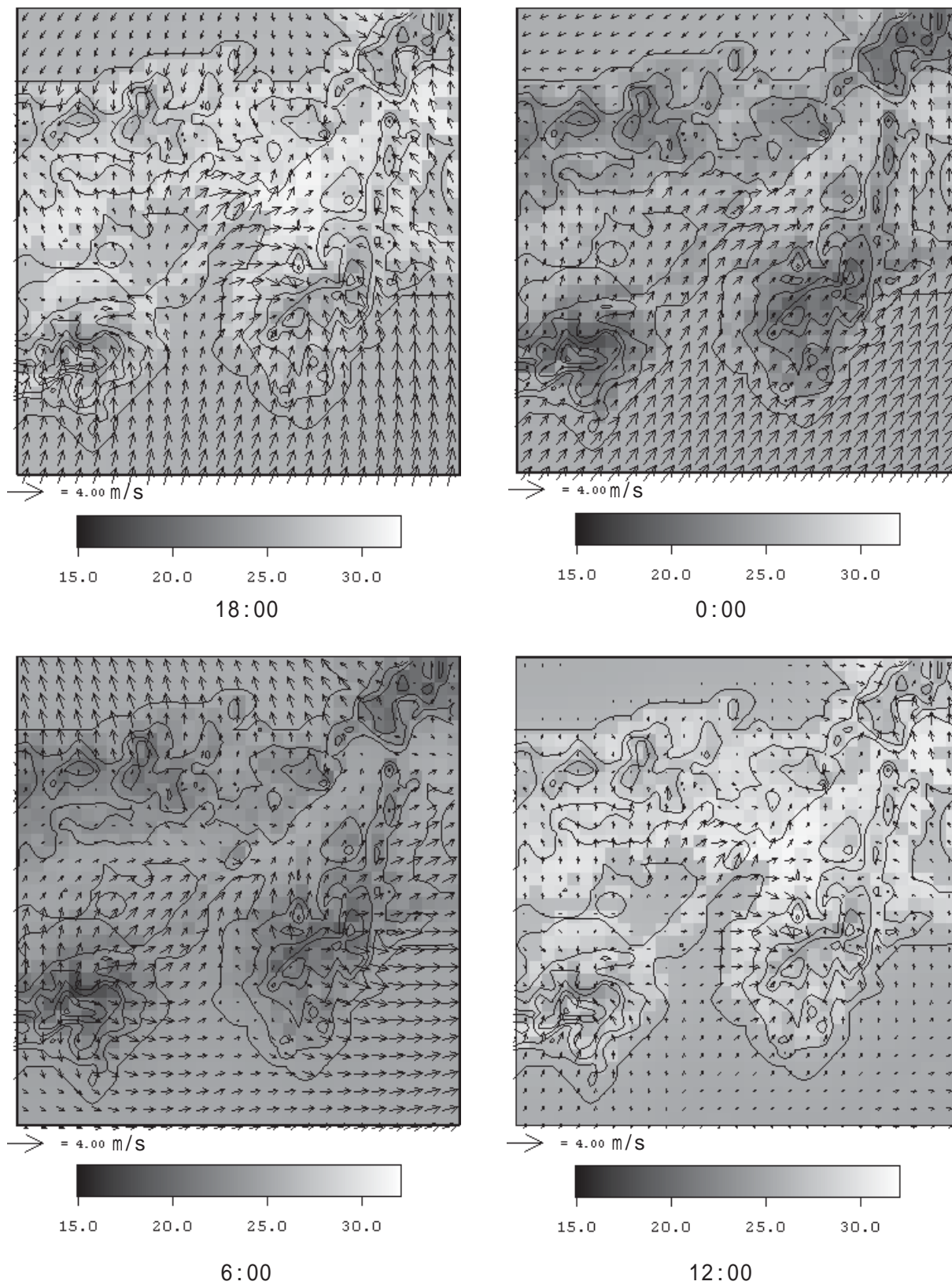
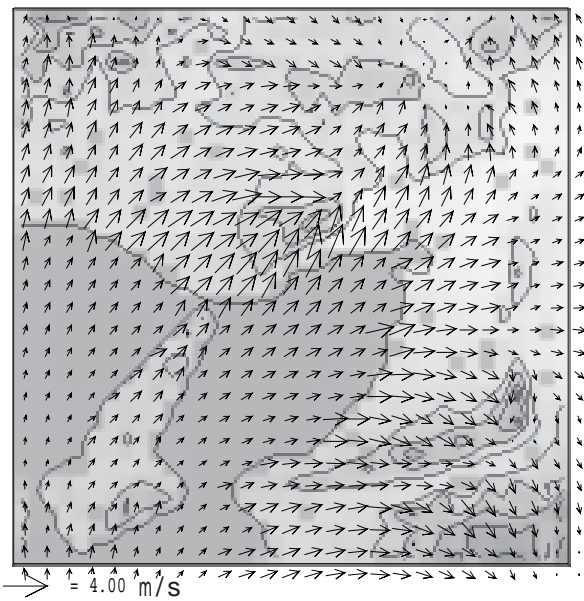
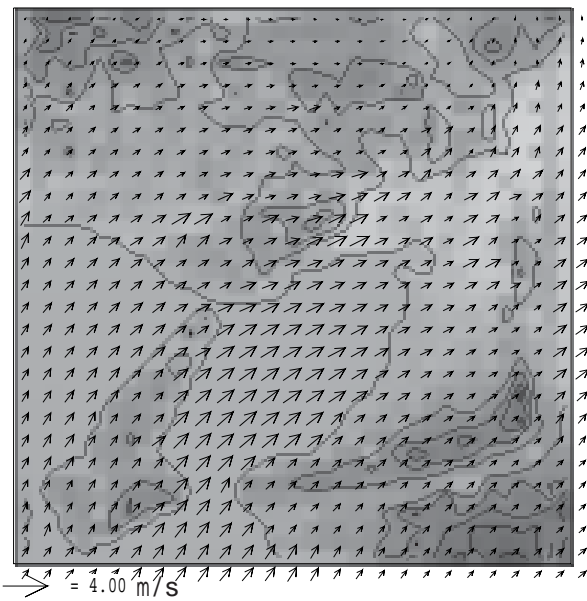


図4-7 Grid1の計算結果（高さ10mの気温（ ）と風ベクトル）  
 （メッシュ間隔：9km，メッシュ数：35個×37個）

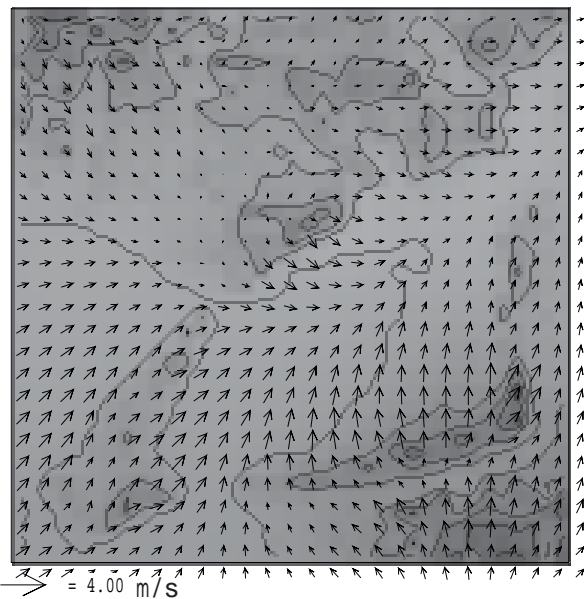




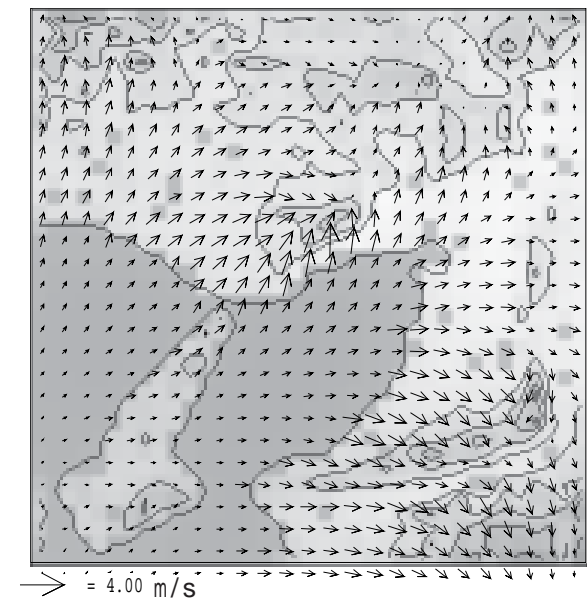
18:00



0:00



6:00



12:00

図4-8 Grid2の計算結果(高さ10mの気温( )と風ベクトル)  
(メッシュ間隔:3km,メッシュ数:37個×37個)

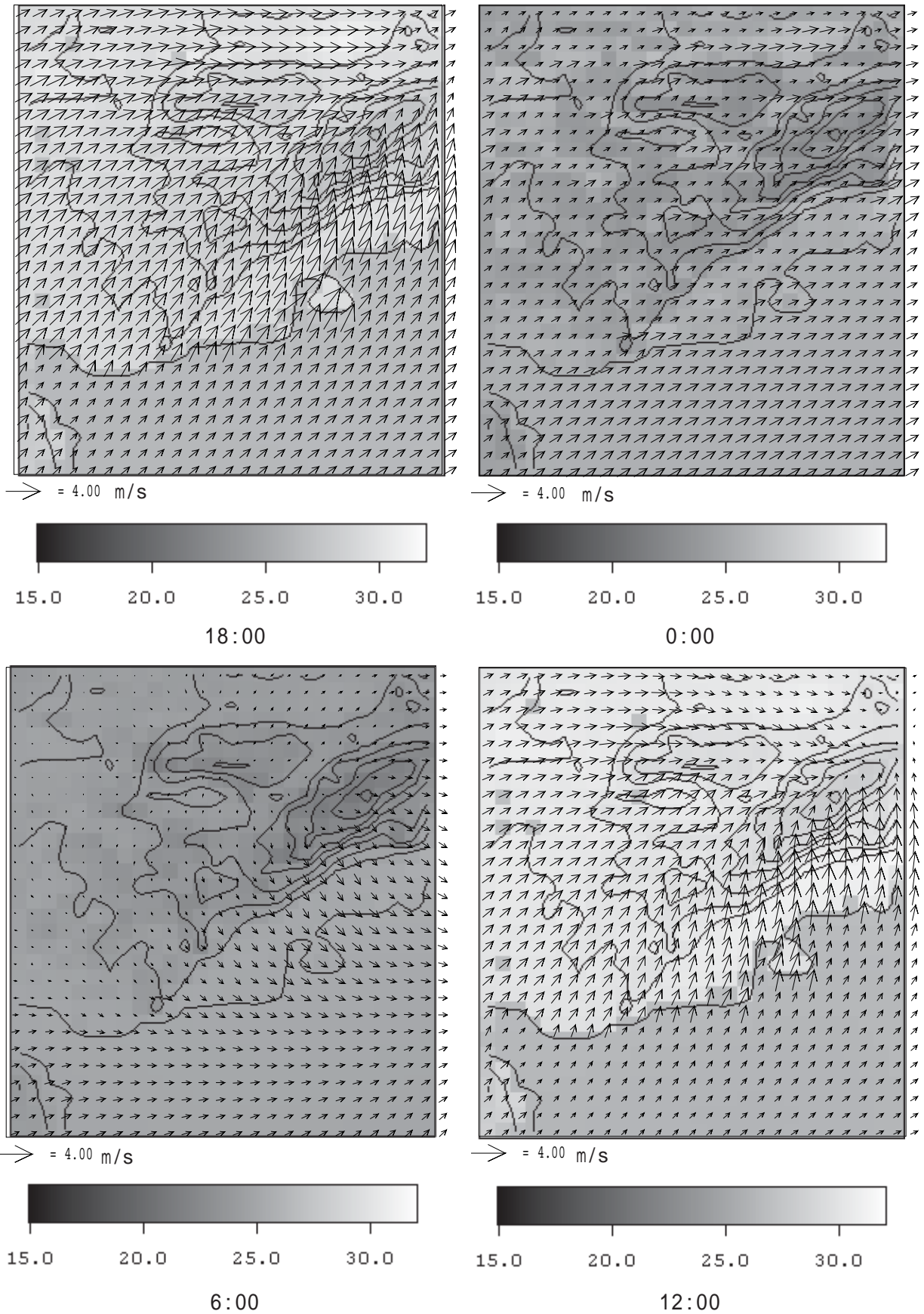
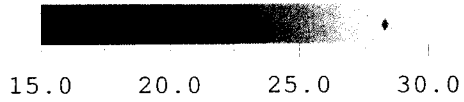
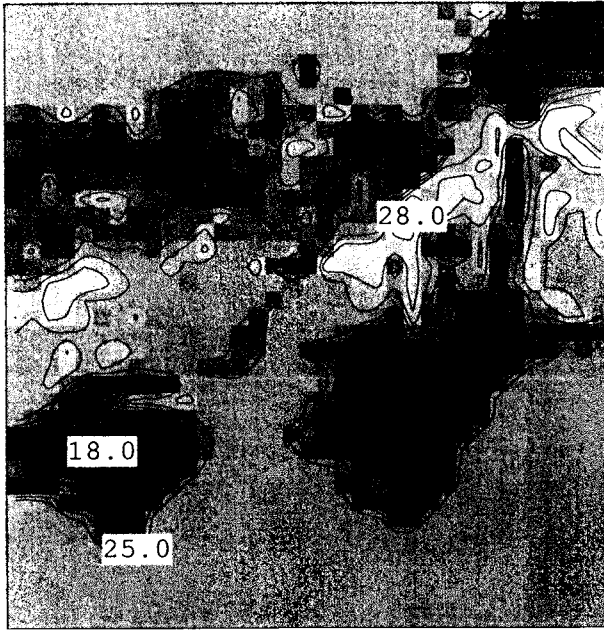
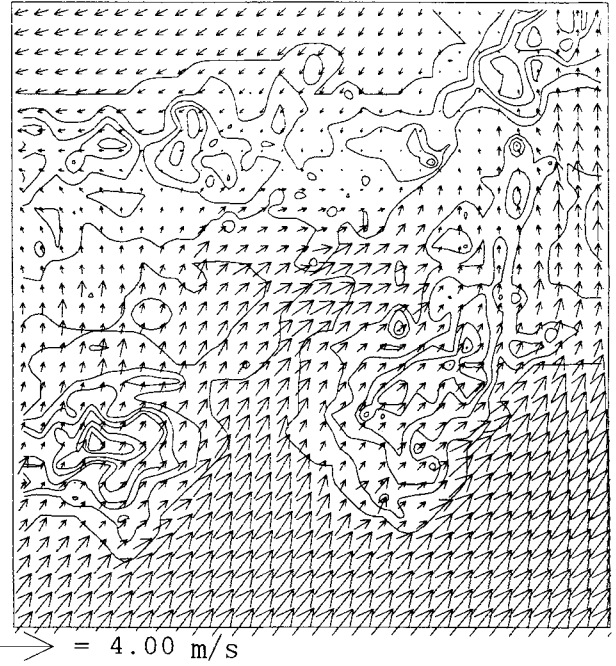


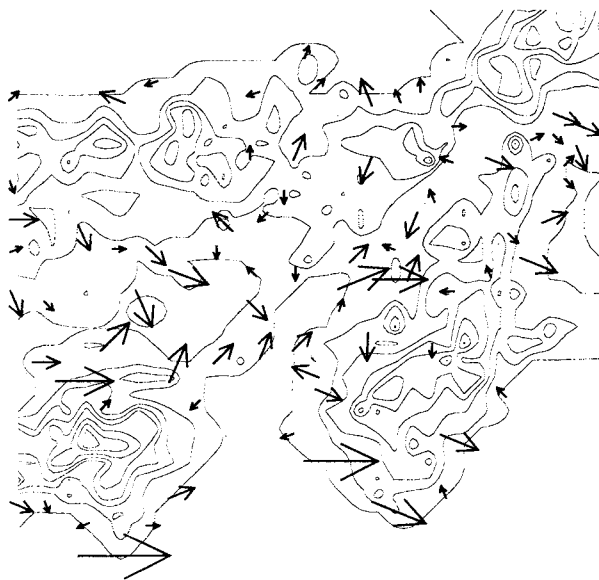
図 4-9 Grid3 の計算結果 (高さ 10m の気温 ( ) と風ベクトル)  
 (メッシュ間隔: 1km, メッシュ数: 28 個 × 31 個)



a. 気温分布 (°C, 高さ10m) の計算結果

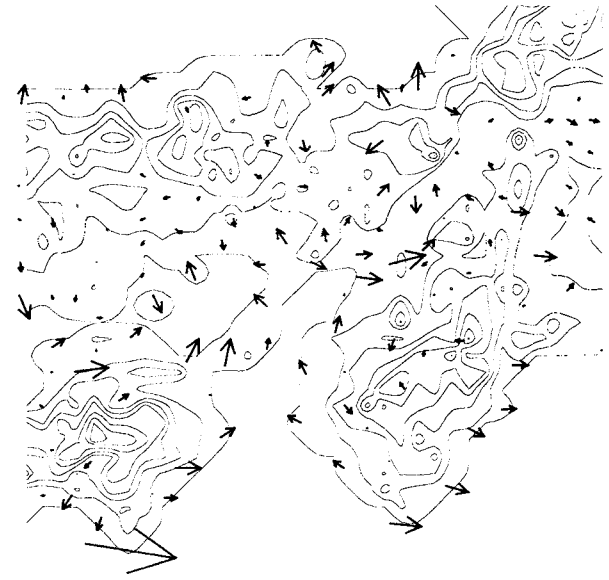


b. 風分布 (高さ10m) の計算結果



→ = 4.00 m/s

c. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
(1995年8月1日12時)



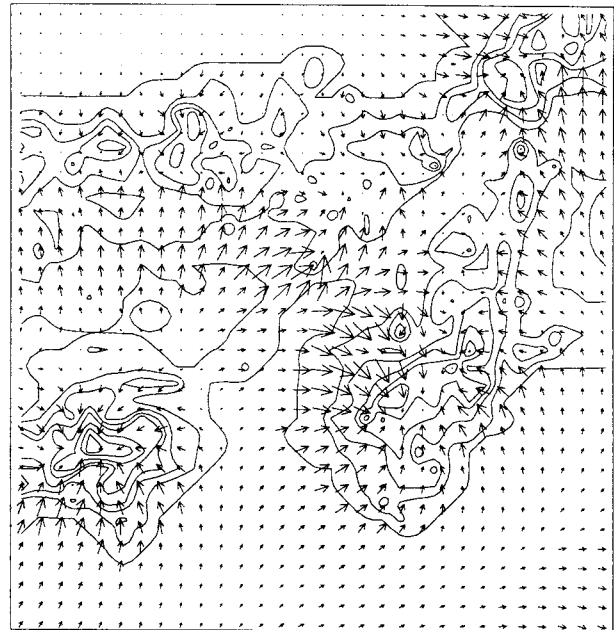
→ = 4.00 m/s

d. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
(1995年7, 8, 9月の晴天日平均)

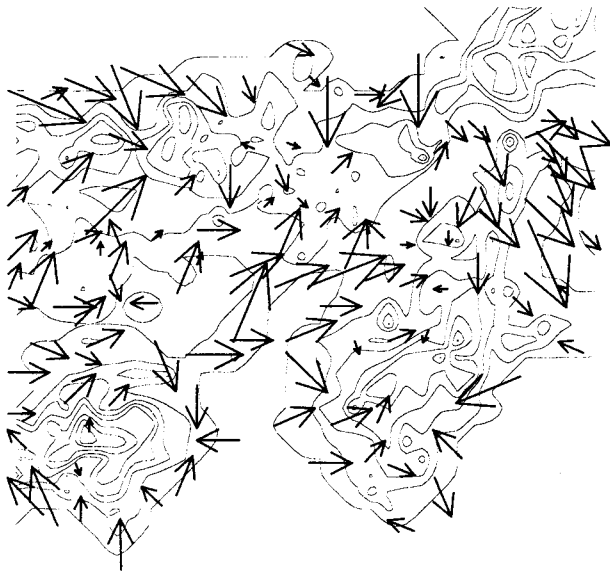
図4-10 Grid1での計算結果と観測結果の比較(0時)(観測結果はアメダス地点)



a. 気温分布 (°C, 高さ10m) の計算結果



b. 風分布 (高さ10m) の計算結果

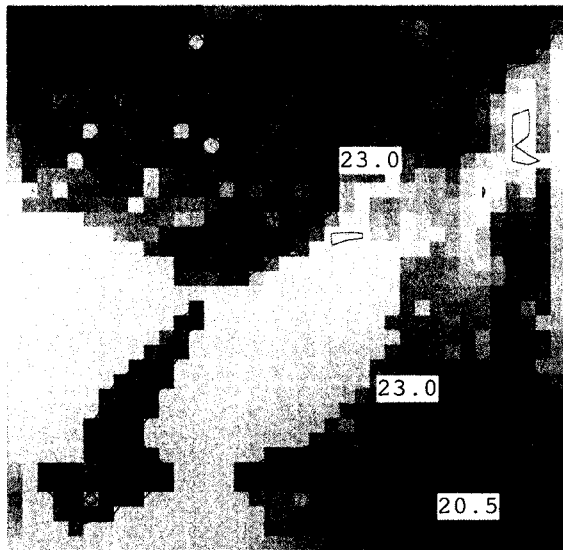


c. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
(1995年8月1日12時)



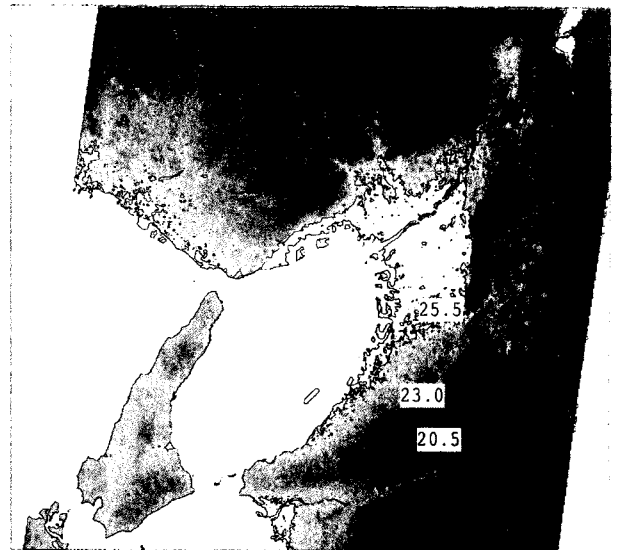
d. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
(1995年7, 8, 9月の晴天日平均)

図4-11 Grid1での計算結果と観測結果の比較 (12時) (観測結果はアメダス地点)



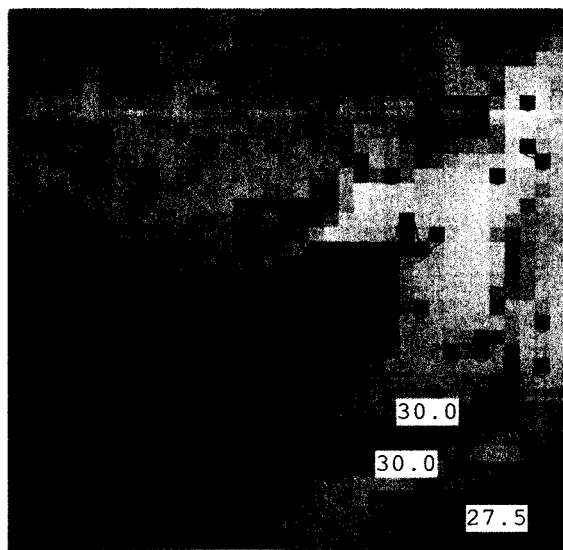
18.0 20.5 23.0 25.5 28.0

図 4-12 Grid2 での気温分布の 5 時の  
計算結果 (高さ 10m)



18.0 20.5 23.0 25.5 28.0

図 4-13 ニューラルネットワークにより  
推定した最低気温 (夏季平均) 分布



25.0 27.5 30.0 32.5 35.0

図 4-14 Grid2 での気温分布の 14 時の  
計算結果 (高さ 10m)



25.0 27.5 30.0 32.5 35.0

図 4-15 ニューラルネットワークにより  
推定した最高気温 (夏季平均) 分布

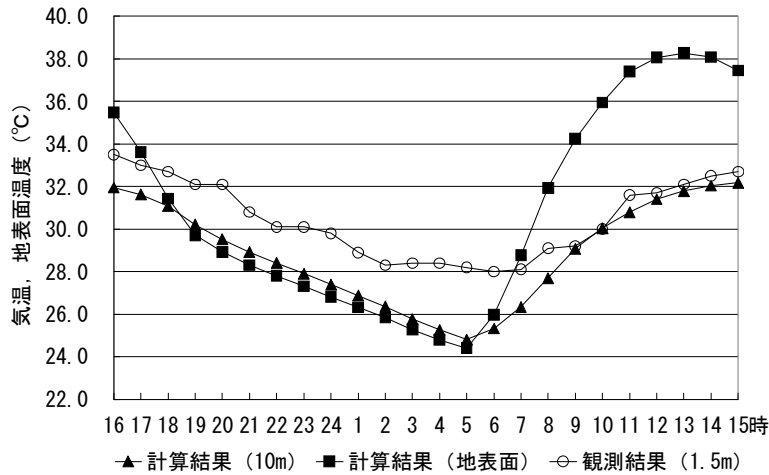


図 4-16 大阪管区気象台での気温，地表面温度の計算結果 (Grid2 より) と気温の観測結果

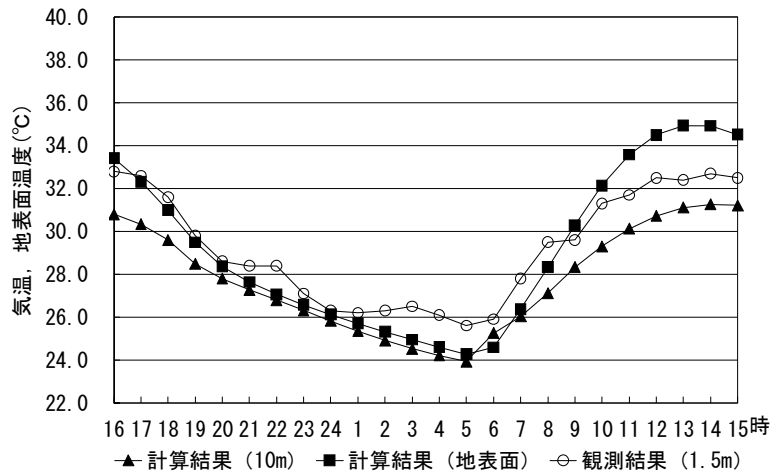


図 4-17 神戸海洋気象台での気温，地表面温度の計算結果 (Grid3 より) と気温の観測結果

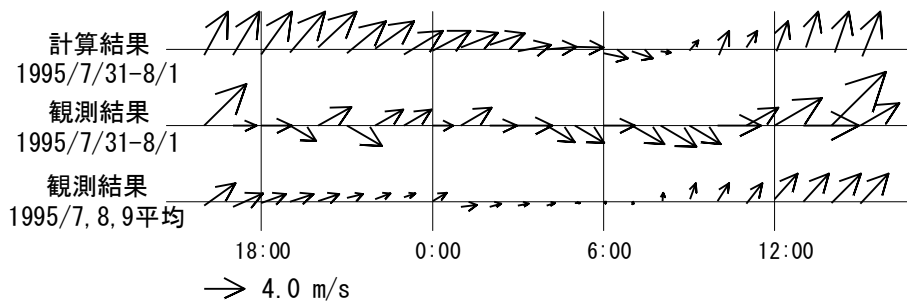


図 4-18 大阪タワー (120m) での計算結果 (Grid2 より) と観測結果の風ベクトル

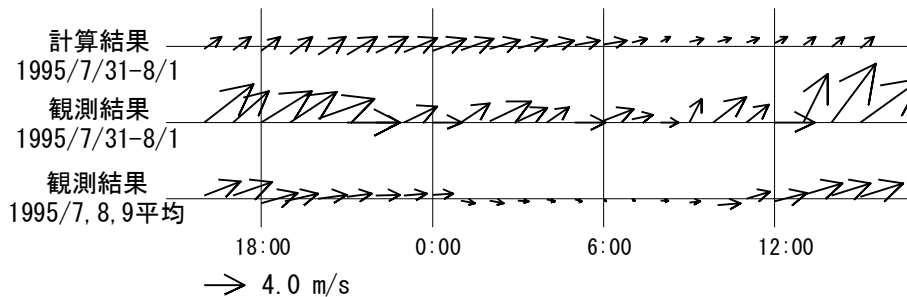
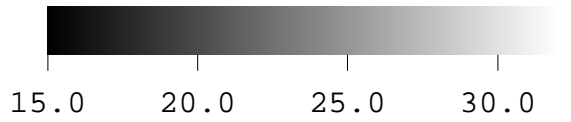
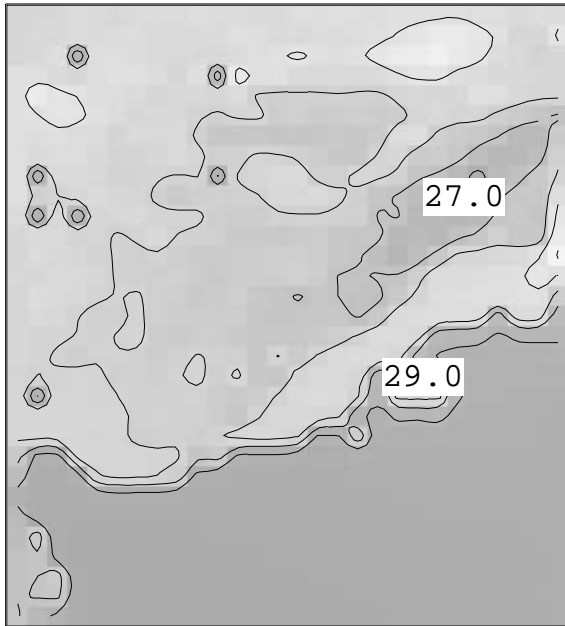
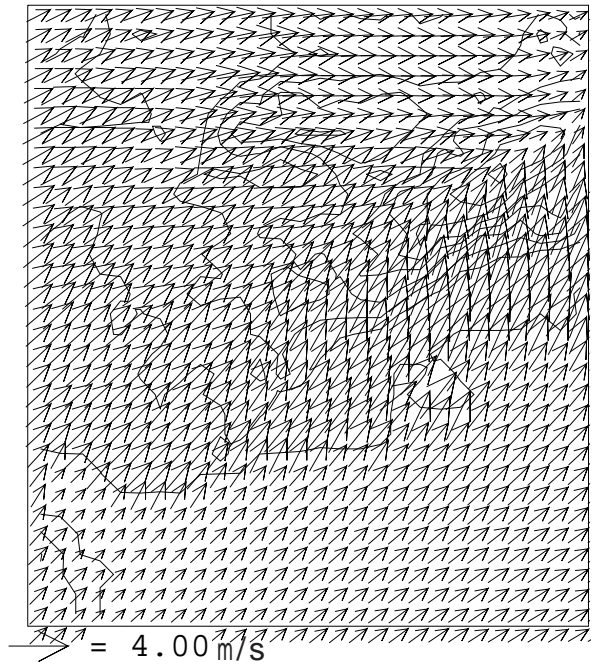


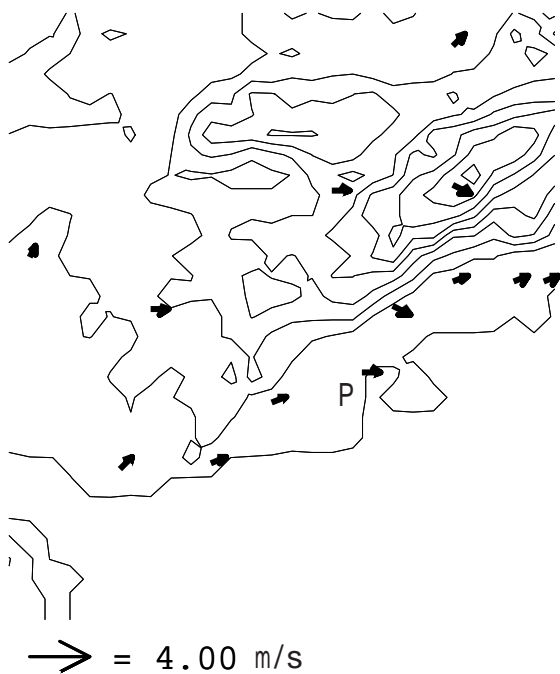
図 4-19 ポートタワー (100m) での計算結果 (Grid3 より) と観測結果の風ベクトル



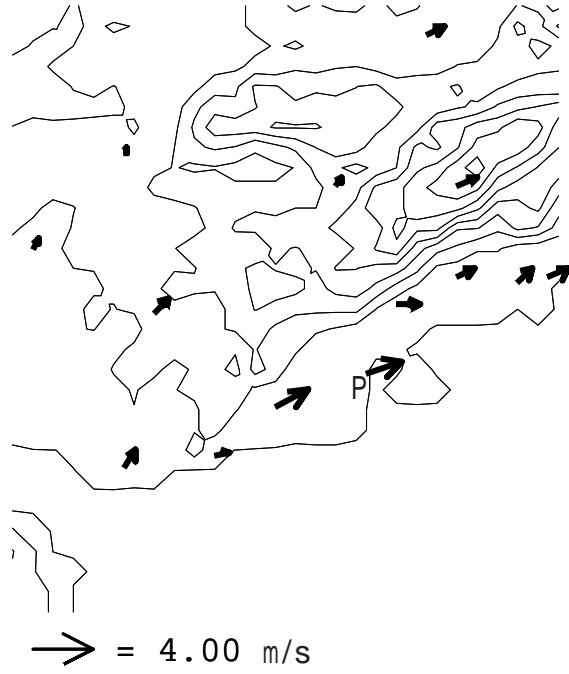
a. 気温分布 ( , 高さ 10m) の計算結果



b. 風分布 (高さ 10m) の計算結果

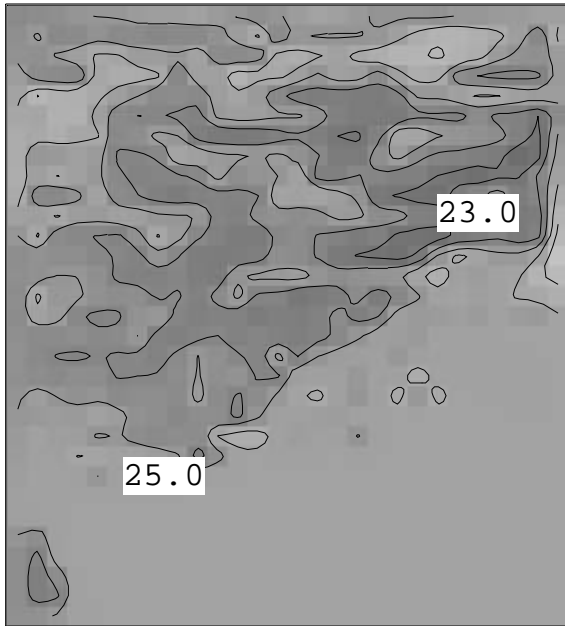


c. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
(1995年7月31日18時)

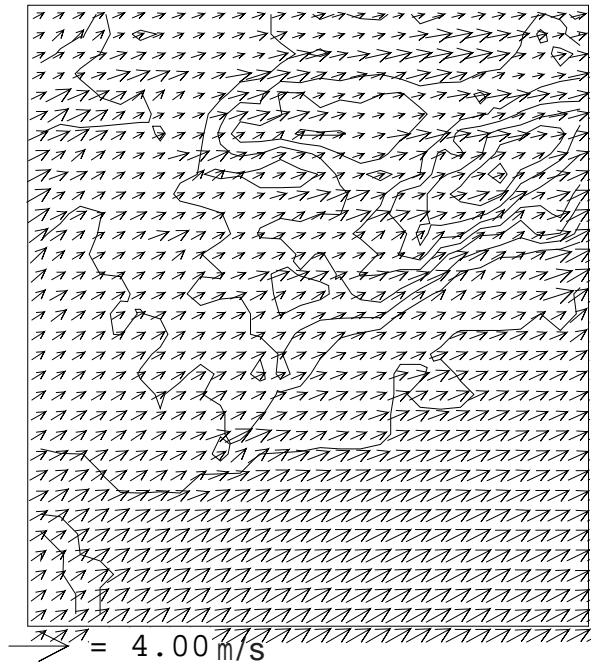


d. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
(1995年7,8,9月の晴天日平均)

図4-20 Grid3での計算結果と観測結果の比較(18時)(観測結果は大気汚染監視局)



15.0 20.0 25.0 30.0  
 a. 気温分布 ( , 高さ 10m) の計算結果



b. 風分布 (高さ 10m) の計算結果



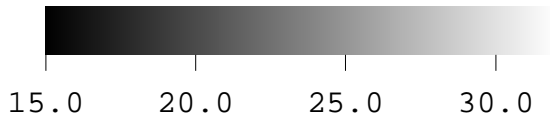
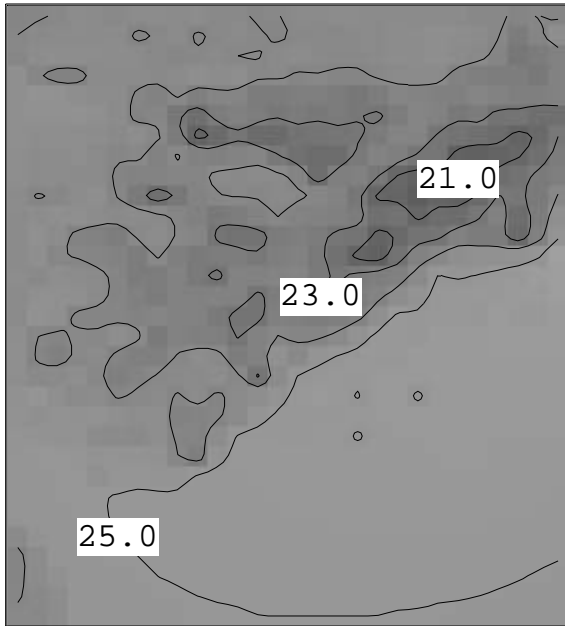
c. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
 (1995年8月1日0時)



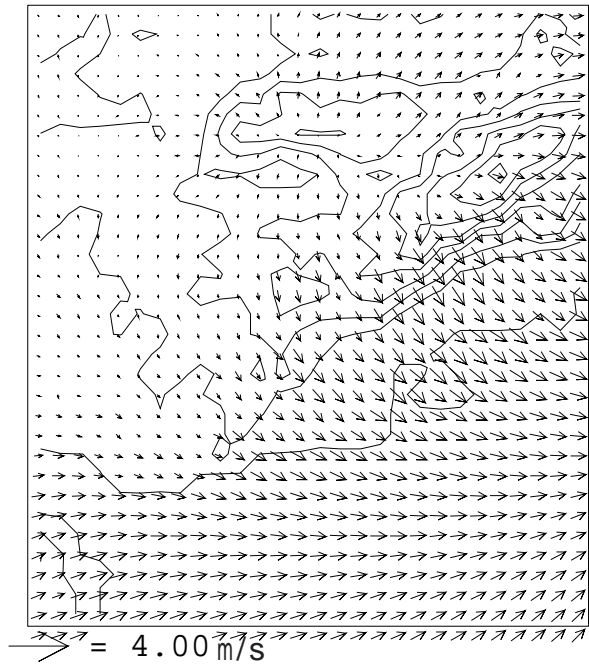
d. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
 (1995年7,8,9月の晴天日平均)

図4-21 Grid3での計算結果と観測結果の比較(0時)(観測結果は大気汚染監視局)





a. 気温分布 ( , 高さ10m) の計算結果



b. 風分布 (高さ10m) の計算結果



c. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
(1995年8月1日6時)

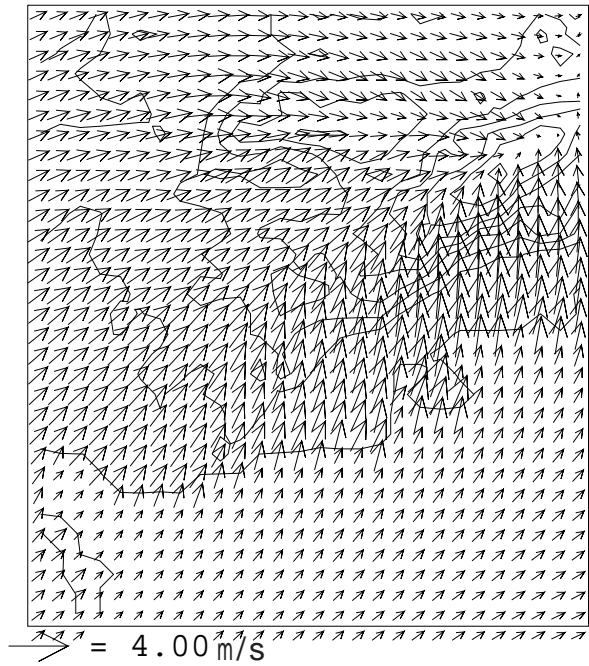


d. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
(1995年7,8,9月の晴天日平均)

図4-22 Grid3での計算結果と観測結果の比較(6時)(観測結果は大気汚染監視局)



15.0 20.0 25.0 30.0  
 a. 気温分布 ( , 高さ 10m) の計算結果



b. 風分布 (高さ 10m) の計算結果



c. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
 (1995年8月1日12時)



d. 風の観測結果 (高さ補正なし)  
 (1995年7,8,9月の晴天日平均)

図4-23 Grid3での計算結果と観測結果の比較(12時)(観測結果は大気汚染監視局)

## 第5章 広域海陸風下における冷気流の出現頻度と影響距離に関する考察

### 5-1 概要

神戸のように山に面して発達した都市では、緑地が都市に比較的隣接しているのと同時に、緑地から都市に向かって地形の勾配があるため、緑地からの冷気の滲み出しと<sup>1),2),3)</sup>、地形の勾配による冷気の流出が期待できる。この両方の効果により特に山に近い市街地に対しては比較的大きな気温低下効果が期待できると考えられる。図5-1に本研究で想定する緑地からの冷気の滲み出しと地形勾配の模式図を示す。また、神戸地域の風向、風速の観測データの解析より、夏季夜間に谷から市街地に吹き出す風の頻度が多くなることは確認されている<sup>4)</sup>。

そこで、本章では、神戸市内の六甲山南麓市街地において、神戸市大気監視局と市街地に面した谷の出口における風向風速の観測データを用いて、この地域の夏季における風環境を支配している広域海陸風と冷気流の出現頻度について検討を行う。

なお、冷気流の定義について、文献<sup>5)</sup>を引用すると、「冷気流とは、夜間、斜面上の接地層を傾斜に沿って重力に従って流下する気流である。英語では、cold air drainage, cold air current, cold air flow, cold air run-off, という。また夜風 (nocturnal wind), 重力風 (gravity wind), あるいは微気流 (microadvection) と呼ぶ現象も、ここでいう冷気流のことである。冷気流の規模が大きくなると、地域 (地形) によって斜面下降風 (down-slop wind), 山風 (mountain breeze), カタバ風 (katabatic wind, 斜面降下風とも訳す), 氷河風 (glacier wind) などとなる。この場合、単に規模が大きくなるばかりでなく、冷気を集める斜面の数や種類、主谷と支谷の合流、谷の長大化などで、現象が複雑になっていることが多い。」と示されている。

また、冷気流の特徴としては、間欠性が明らかになっている。斜面の障害物、植生などによる摩擦に打ち勝ち冷気塊が重力に従って流れ出すまでに時間がかかるため、冷気の流出が間欠的になると説明される。

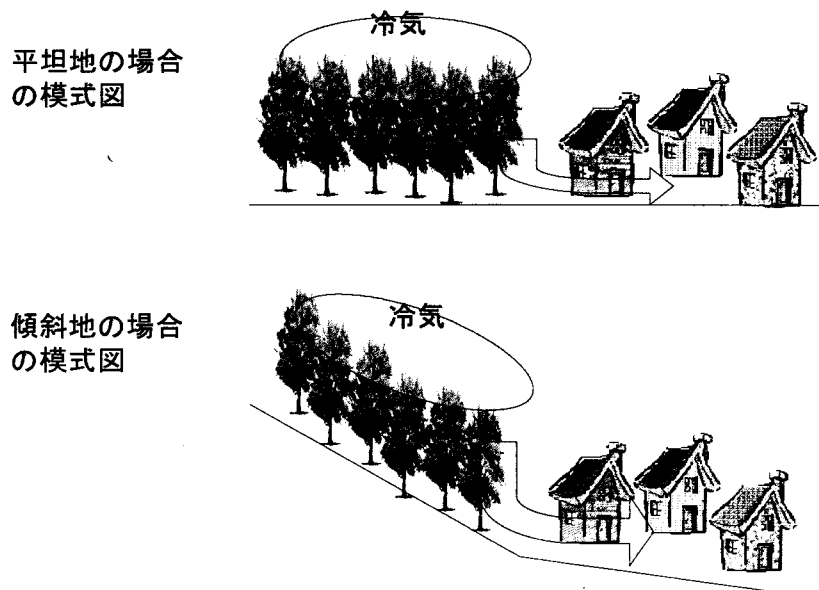


図5-1 緑地からの冷気の滲み出しと地形勾配の模式図

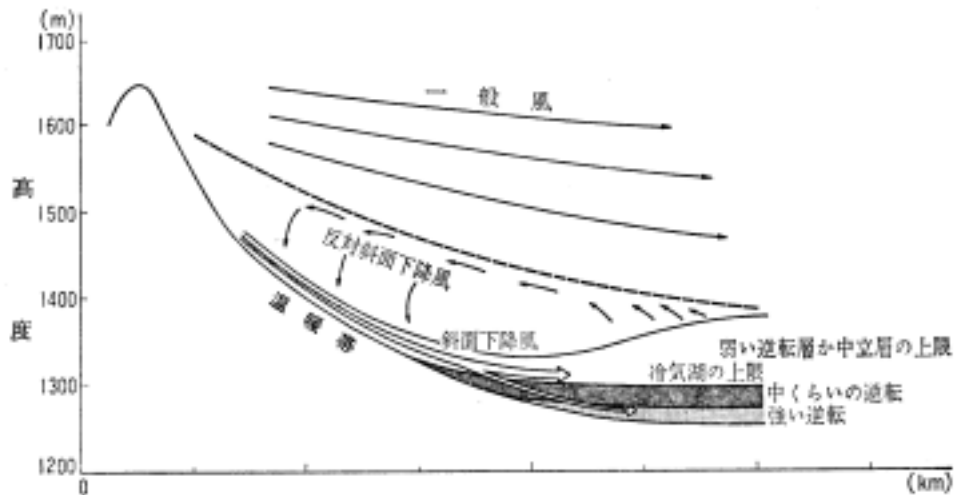


図5-2 冷気流のモデル図（吉野<sup>5)</sup>）

文献<sup>5)</sup>に示されている冷気流のモデル図（菅平盆地の冷気流と冷気湖のモデル）を図5-2に示す．神戸などでは斜面の裾の部分まで市街化が進行しており，図に示すような典型的な逆転層は生じにくくなっている可能性がある．山の斜面から流出した冷気は，昼間の日射を蓄熱し，冷房，照明，交通などによる人工排熱により高温に保たれている市街地の気温と混合し，市街地内における気温低下量としては小さくなると予想される．

上記の冷気流の定義から，本研究で対象とする現象は，規模的には山風あるいは斜面下降風と呼ばれるものであると考えられる．本論文では上記の様々な呼び方を包含する名称として冷気流という用語を用いるものである．

## 5-2 広域海陸風と冷気流の出現頻度

ここでは，神戸市内の六甲山南麓市街地において，神戸市大気監視局と市街地に面した谷の出口における風向風速の観測データを用いて，この地域の夏季における風環境を支配している広域海陸風と冷気流の出現頻度について検討を行う．次に，その谷の出口周辺の市街地で行った風向風速及び気温分布の観測結果から，冷気流の市街地における影響距離について検討を行い，夏季夜間の市街地において冷気流による気温の低下がどの程度期待できるかという点について考察を行う．

### 5-2-1 夏季夜間の広域海陸風の特徴

夏季の六甲山南麓市街地においては，海陸風の風向が海岸線と直角方向にならない点が風環境の特徴である．この理由は，この地域の風特性が六甲山南麓市街地の東側に広がる大阪平野とその平野に対して西側に位置する大阪湾との表面温度差に基づいて吹く大阪湾と大阪平野の間の規模の大きな海陸風に支配されるためである．六甲山南麓市街地における1999年7月1日～8月31日の晴天（日照時間6時間以上の日（33日間））夜間（18:00～6:00）の風配図を地図上に示す（図5-3）．観測値は神戸市大気監視局の1時間毎のデータを使用した．ポートタワーは上空100m，その他は建物屋上（建物高さ20m程度）での観測値である．風向の主軸がおよそ南西，北東の軸となっている．一般に，夏季における晴天日の近畿地方の風特性は季節風の影響は弱く海陸風に支配される．特に太平洋から紀伊水道を通過して大阪平野へ吹き込む海風は夜遅くまで吹きつづけることが多い．本研究では，このように六甲山

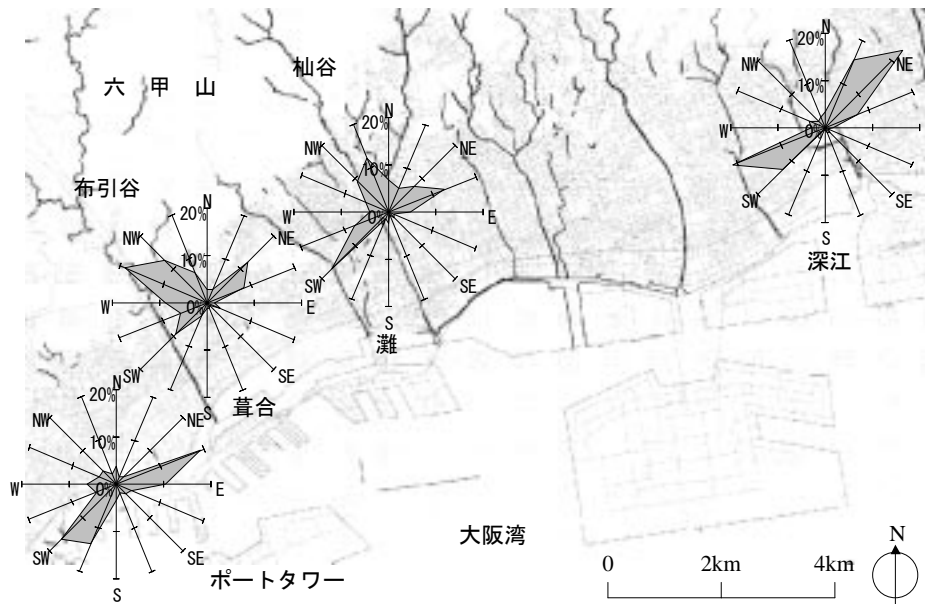


図 5-3 1999 年 7, 8 月晴天夜間 (18:00-6:00) 33 日間の風配図

南麓市街地とその南側に位置する大阪湾との表面温度差に基づいて吹く海陸風より大きいスケールに支配された規模の大きな海陸風を広域海陸風と呼ぶ。六甲山南麓市街地における広域海陸風は、比較的夜遅くまで南西方向からの海風が続き、その後北東方向からの陸風に代わるのが特徴である。その傾向は図 5-3 中のポートタワー、深江の観測値で顕著に見られる。しかし、灘、葦合の観測値では北西方向の風向頻度が比較的大きい。本研究ではこの成分を冷気流ではないかと考え考察の対象とする。

#### 5-2-2 広域海陸風の強さと冷気流の出現頻度

夏季の六甲山南麓市街地においては、海陸風の風向主軸が海岸線と平行方向に傾くため、六甲山から吹いてくる特に谷方向と一致する風は、より大きなスケールの気圧配置に起因する風を除いて、ほぼ冷気流と考えることが出来る。そこで、神戸市灘区の杣谷（そまたに）堰堤（図 5-3 中の灘監視局の上流で市街地と谷の接点に位置する）に設置した風向風速計（三杯式風速計、3m の高さの堰堤上から高さ 2m に設置、データはデータロガーに自動記録させ解析には 10 分平均の値を用いる、堰堤は洪水防止のためのものであるが冷気も蓄積されやすくなっている）の観測値と監視局のデータ（毎正時の値で 10 分平均値）を用いて広域海陸風の強さと杣谷での冷気流の出現頻度に関する検討を行った。図 5-3 よりポートタワー、深江での観測値がほぼ広域海陸風を捉えていると考えられることから、ここでは上空風を捉えているポートタワーの観測値を広域海陸風の基準として、そこでの風向、風速と杣谷での冷気流の出現頻度の関係について検討を行った。

図 5-4, 5, 6 にポートタワーの風速と杣谷の風向、ポートタワーの風速と杣谷の風速、ポートタワーの風向と杣谷の風速の関係を示す。全て一時間毎のデータを用いて比較を行った。ここでは、杣谷での風向観測値の北、北北東、北北西成分を冷気流の風向とした。

図 5-4 より、ポートタワーの風速が小さいときに冷気流の出現率が高くなっている。冷気流出現時間のうちの 91% が、ポートタワーの風速が 4m/s 以下のときに集中していた。また、総時間数（図 5-4 の 18 時から 6 時における冷気流と冷気流以外の和）に対する冷気流出現の割合は 34% であった。時刻変化の記録によると日没後すぐの冷気流の出現頻度は少なく、

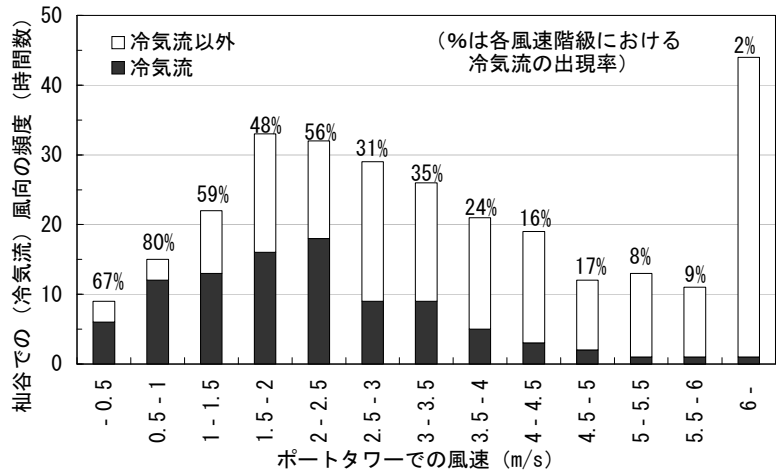


図5-4 ポートタワーの風速と杣谷の風向頻度の関係  
(1999年7月20日～8月3日、8月17日～30日の18:00～6:00)

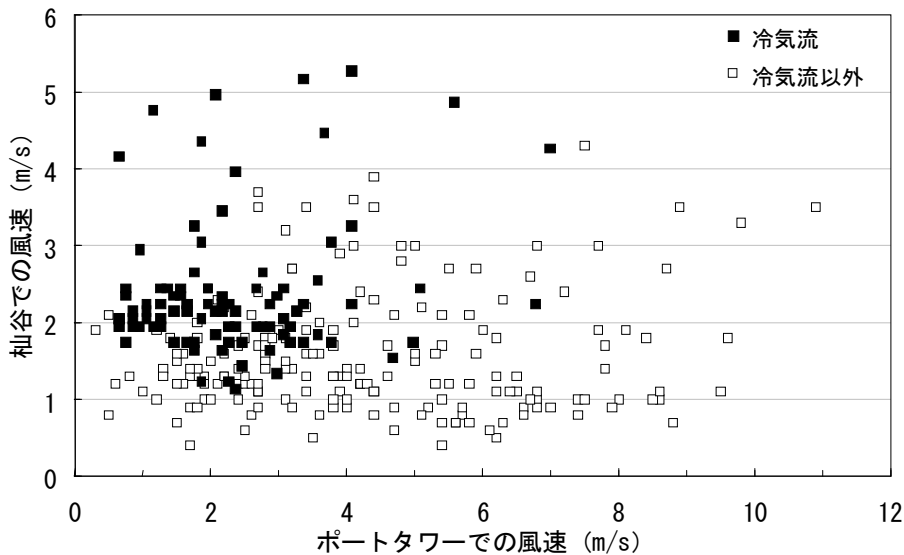


図5-5 ポートタワーの風速と杣谷の風速の関係  
(1999年7月20日～8月3日、8月17日～30日の18:00～6:00)

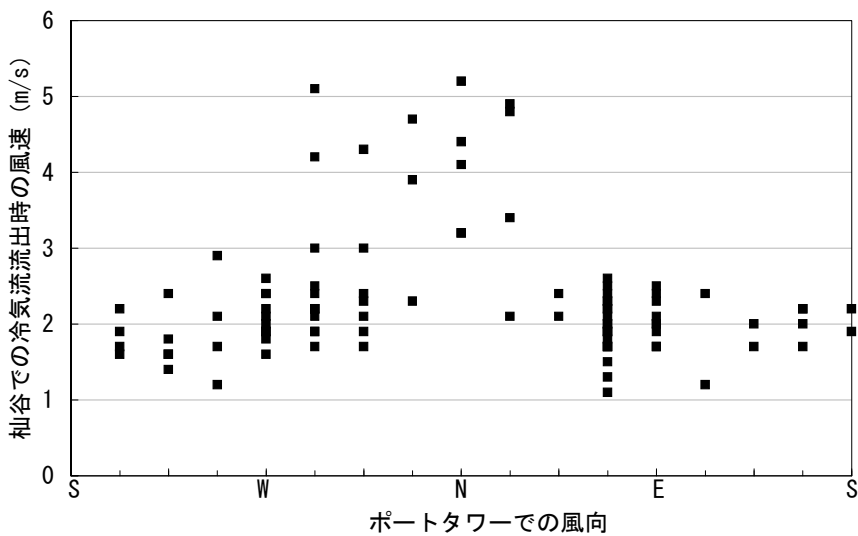


図5-6 冷気流流出時のポートタワーの風向と杣谷の風速の関係  
(1999年7月20日～8月3日、8月17日～30日の18:00～6:00)

出現する時間帯は日によって大きくばらついていた。

図5-5より、冷気流の出現は広域海陸風が弱いときに集中していることが分かる。冷気流出現時の杣谷での風速は平均2.3m/sであり、出現時以外での杣谷での平均風速1.6m/sより大きくなっていた。ポートタワーの風速と杣谷の風速にほとんど相関がみられないことは、杣谷では広域海陸風とは別のメカニズムにより生じた風、つまり冷気流が発生していたことを示している。そして、ポートタワーの風速が4m/sを超えるような広域海陸風が強いときには、広域の風に支配されるために冷気流が確認できなくなる。

図5-5では冷気流の風速はほぼ2m/s程度に集中しているが、4m/s程度となる場合がいくつか確認できる。この時の風向は、図5-6よりポートタワーの風向も北系統の場合である。このことは、広域風の風向が冷気流の風向と一致した場合には、冷気流の風速が強められることを明確に表わしている。

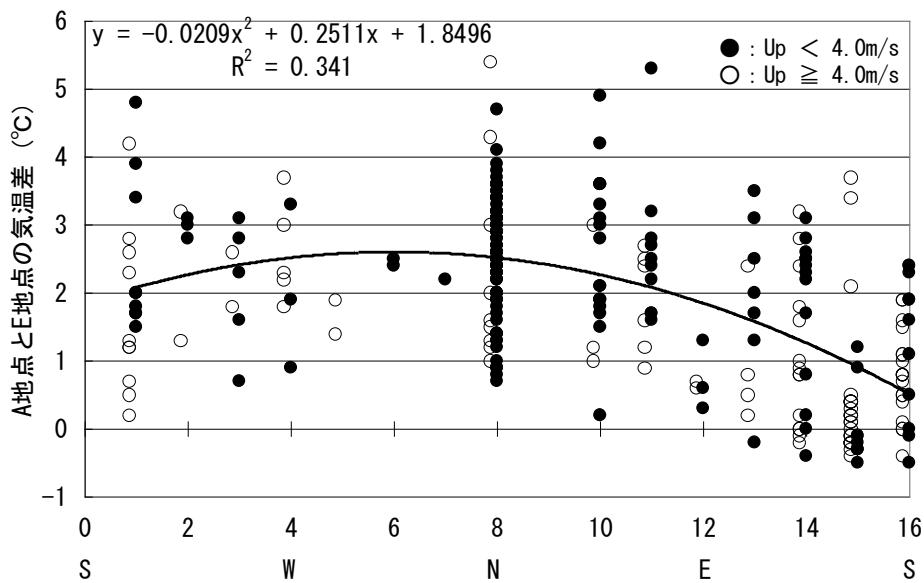


図5-7 杣谷における風向と市街地内を基準とした気温差の関係  
(Up: ポートタワーの風速, ●: 広域海陸風が弱い場合, ○: 強い場合)  
(1999年7月20日～8月3日, 8月17日～30日の18:00～6:00)

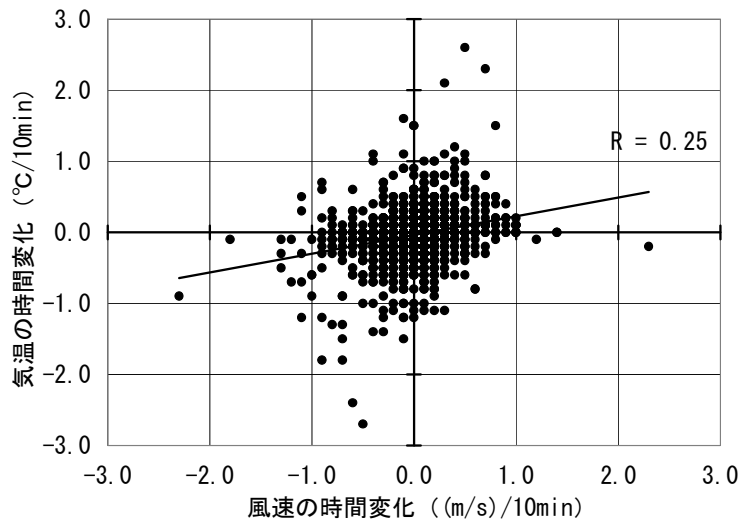


図5-8 杣谷における(10分間での)風速と気温の変化の関係  
(1999年7月20日～8月3日, 8月17日～30日の18:00～6:00)

### 5-3 市街地における冷気流の影響距離

ここでは、谷から流出した冷気流が市街地内でどの程度までその影響を及ぼしているのかについて検討を行う。

#### 5-3-1 観測概要

神戸市灘区の杣谷から流れ出している杣谷川沿いに観測点を設置した(図5-11参照)。測定期間は1999年7月20日～8月3日,8月17日～30日である。観測点は杣谷堰堤から杣谷川下流に向けての4点に,風向,風速を観測している灘監視局(前掲)を含めた5点で,以降A～E点と呼ぶ。

風向,風速は,三杯式風速計及びプロペラ式風速計を設置してデータロガーに自動記録させ解析には10分平均の値を用いる。風速計は建物の屋上などの比較的周りが開けた場所で設置面からの高さ2mに設置した。特に谷の方向にはほとんど障害物がない場所を選択した。標高は順に200,130,75,35,10mである。以下に各観測点周辺の特徴を示す。

- A地点: 前掲の杣谷堰堤であり,北側の谷方向と南側の市街地方向に開けている。風速計,温湿度計は堰堤中央に設置した(図5-9,10参照)。
- B地点: 杣谷川が市街地に入ってすぐの美野丘小学校敷地内の校舎と体育館を結ぶ連絡橋上である。風速計,温湿度計は南北道路より5m程度高い連絡橋の中央に設置した。
- C地点: 市街地内に少し入った上野中学校(3階建)屋上である。風速計,温湿度計は屋上中央付近に設置した。
- D地点: 灘大気監視局で灘区総合庁舎(21m)屋上である。風速計は庁舎屋上南東部に設置されている。この地点は風向,風速のみの測定である。
- E地点: 杣谷川下流の西郷小学校(3階建)屋上である。風速計,温湿度計は屋上中央付近に設置した。風向,風速は8月以降欠測である。

気温は風速計のポールに沿って設置した輻射除けを付けた自記式サーミスタセンサにより測定した(地上1.5m)。測定間隔はすべて10分である。以降の解析においては,気温は観測値を一律1/100mで標高補正したものを使用している。なお,杣谷川周辺市街地においては,1998年夏季の測定において移動測定などにより地上1.5m付近の詳細な気温分布と冷気流の風向分布を求めており,地形と気温,風向の関係についての解析も行っている<sup>6)</sup>。その結果によれば,ここで解析に用いる測定結果は詳細な気温分布,風向分布の測定結果と整合しており,地表付近の熱環境をほぼ反映していると考えられる。

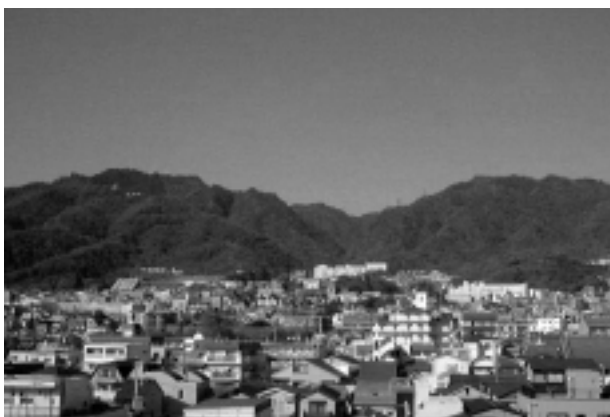


図5-9 杣谷周辺市街地(南から北を見る) 図5-10 A地点(杣谷堰堤,北から南を見る)



### 5-3-2 観測結果

前節において広域海陸風の強さによって冷気流の出現状況が異なることが示されたため、広域海陸風が強い場合と弱い場合に分けて観測結果の考察を行った。ここでは、ポートタワーの風速が4m/sを場合分けの基準とした。杣谷における風向と市街地内を基準とした気温差（A地点とE地点の気温差）の関係を図5-7に示す。冷気流の風向であると仮定した北、北北東、北北西成分の場合の気温差が平均で2.6であったのに対し、その他の風向成分の場合の気温差は平均で1.9であった。しかし、広域海陸風が強い場合には、この気温差を持つ冷気が市街地内の気温を低下させる前に広域の風によって吹き消されるので必ずしも市街地内の気温を低下させるわけではなかった。また、冷気流の出現する時間帯のばらつきは大きく、市街地における影響距離に関しても気象条件によって様々な様子を示した。ここでは、典型的な夜間を選択して考察を行う。

### 5-3-3 広域海陸風が強い場合の観測結果

夜間を通して海風が強かった1999年8月26～27日の夜間の観測結果より、冷気流の市街地における影響距離に関する考察を行う。図5-11,12,13に広域海風が強い場合の風配図の分布、風向の時刻変化、気温・風速の時刻変化を示す。

ポートタワーの観測結果では、この日は一晩中海風（SW成分）が卓越し、夜間の平均風速5m/s程度の比較的強い風が吹いていた。C,D地点の風配図はポートタワーと同じ傾向になっており、南西の大阪湾から北東の大阪平野へ向かって吹いていた広域海風に一晩中支配されていたと考えられる。それに対し、六甲山に近いA,B地点の風配図は南南東からの風になっている。このことは川に沿って谷を昇る風が吹いていたことを表わしている。風速においても、ポートタワーとC,D地点との相関が高く（相関係数は0.79と0.60）、A,B地点とは低くなっていた（相関係数は0.17と0.28）。A,B地点においても比較的大きな風速が表われているのは、広域海風が地形の影響を受けて谷を昇る方向へ曲げられているためであると考えられる。

風向と気温、風速の時刻変化を見ると谷の出口に相当するA地点で大きく数回の温度低下が確認され、その時刻には風が比較的弱くなっている。この傾向は他の日にも確認されたため、全観測期間における（10分間での）風速と気温の変化の関係を図3-8にプロットした。風が弱くなったときに気温が低下する傾向、その逆に、風が強くなったときに気温が上昇する傾向、が若干確認された。このことは、広域海陸風が強い場合においても、一時的に静穏な条件が生じた際には冷気の蓄積による気温の低下が起きていることを意味しているが、広域海陸風が強くなればその効果はすぐに解消されてしまう。

### 5-3-4 広域海陸風が弱い場合の観測結果

広域海陸風が比較的弱かった1999年7月25～26日の夜間の観測結果より、冷気流の市街地における影響距離に関する考察を行う。広域海風が弱い場合の風配図の分布を図5-14に、風向の時刻変化を図5-15に、気温・風速の時刻変化を図5-16に示す。

ポートタワーの観測結果では、この日は0時頃まで南西からの海風が卓越し、その後北東からの弱い陸風が朝まで続いた。山から最も離れたE地点（谷口から約3kmの地点）においても冷気流が若干確認されたが、その頻度は山から離れるほど小さくなる。

風向と気温、風速の時刻変化を見ると20時の少し前にA地点の気温が大きく低下しており、この時に谷底のA地点に冷気の集積があったと考えられる。一度低下した気温は広域海

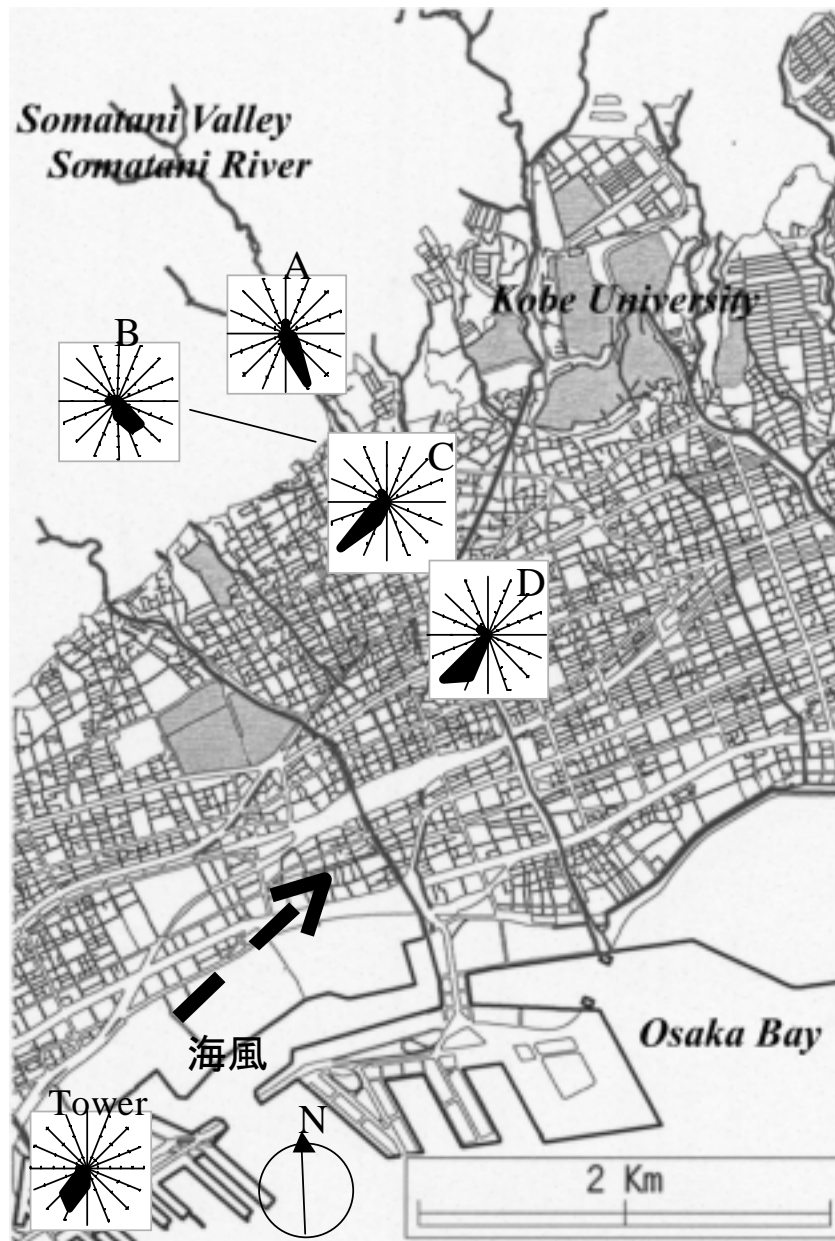


図 5-11 広域海（陸）風の強い場合の夜間風配図  
 （1999年8月26日～27日，18:00～6:00）  
 風配図の最大目盛が頻度50%である．E点は欠測．

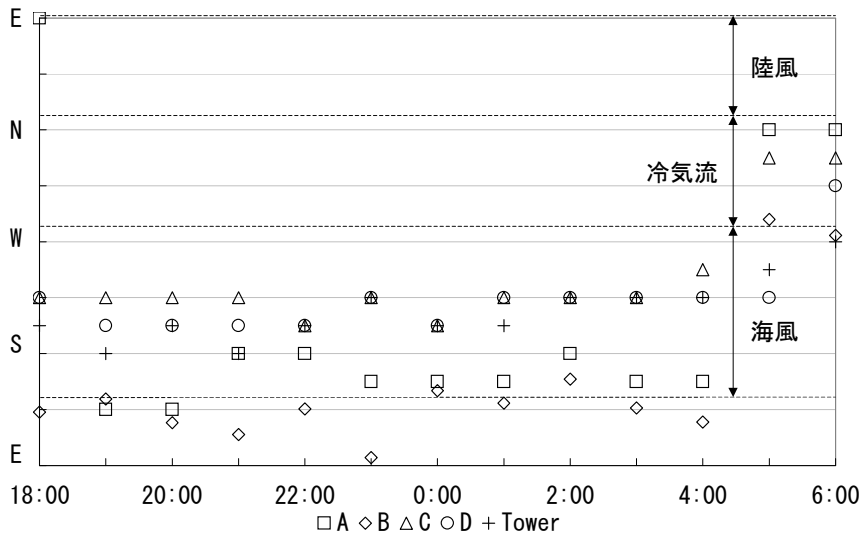


図 5-12 広域海（陸）風の強い場合の風向の時刻変化  
 (1999年8月26日～27日, 18:00～6:00)

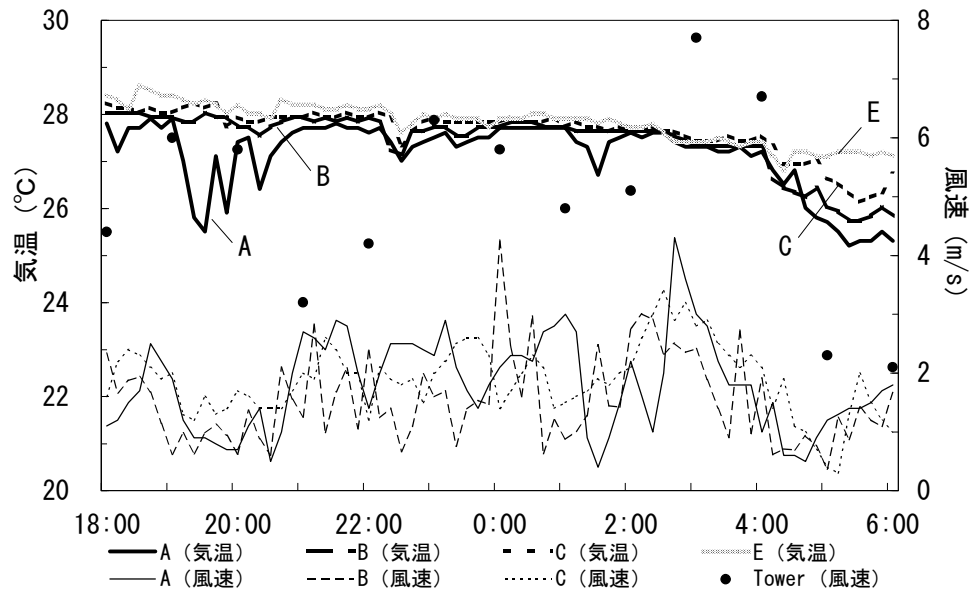


図 5-13 広域海（陸）風の強い場合の気温・風速の時刻変化  
 (1999年8月26日～27日、18:00～6:00)

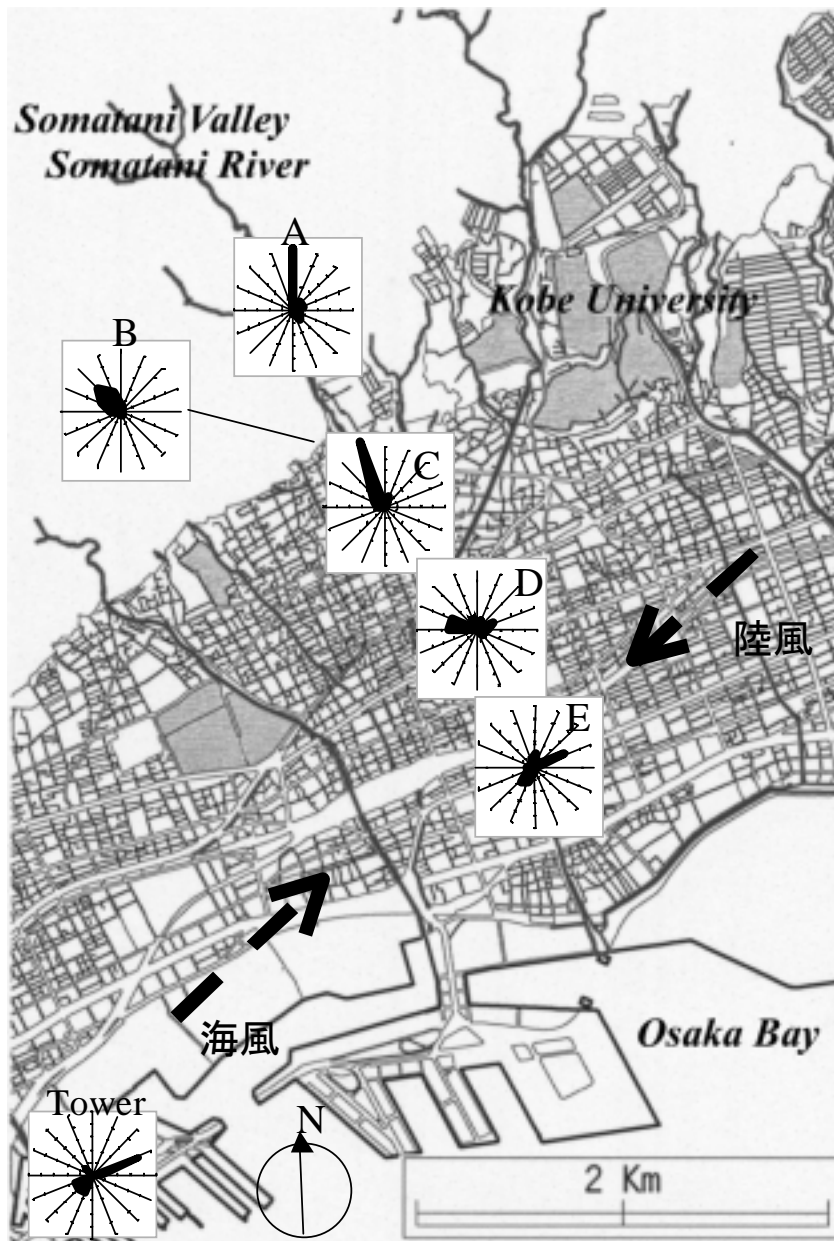


図 5-14 広域海陸風の弱い場合の夜間風配図  
 (1999年7月25日～26日, 18:00～6:00)  
 風配図の最大目盛が頻度50%である。

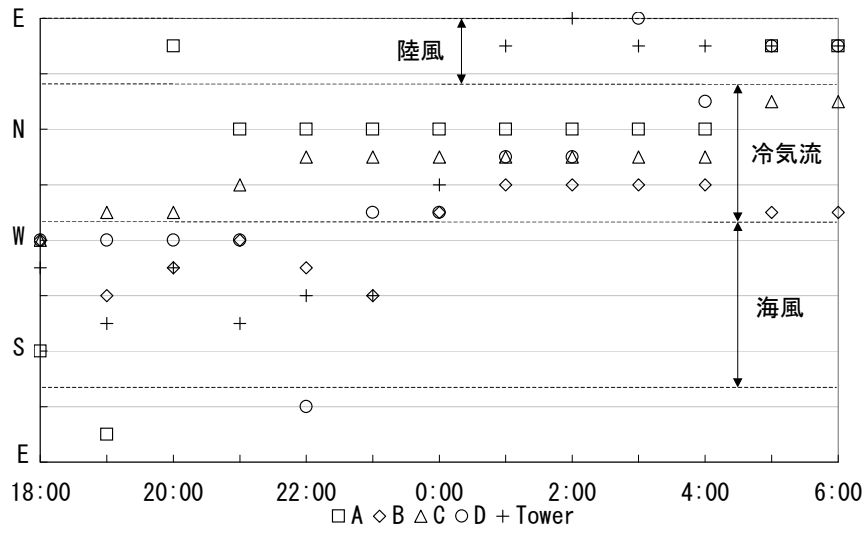


図 5-15 広域海陸風の弱い場合の風向の時刻変化  
(1999年7月25日～26日, 18:00～6:00)

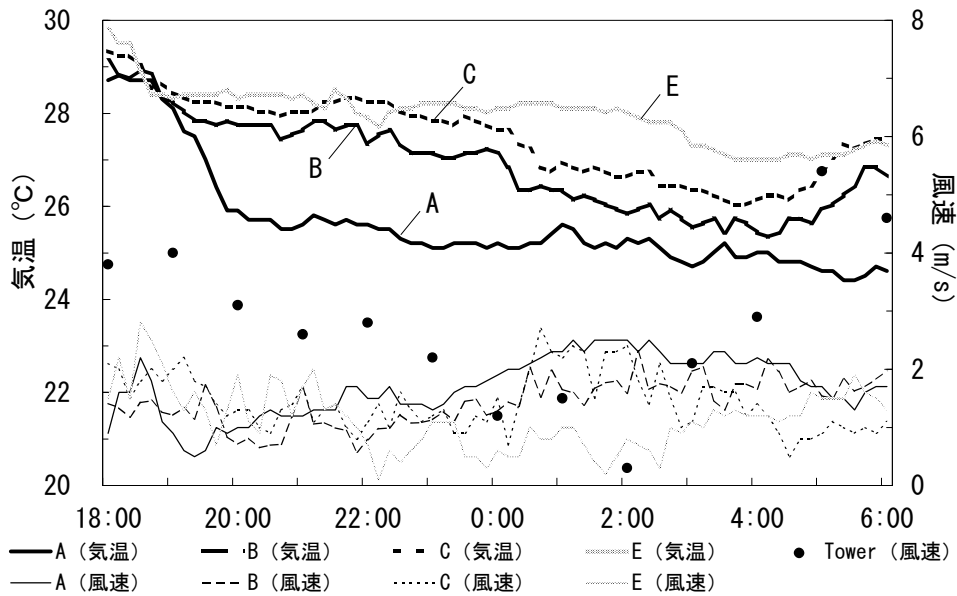


図 5-16 広域海陸風の弱い場合の気温・風速の時刻変化  
(1999年7月25日～26日, 18:00～6:00)

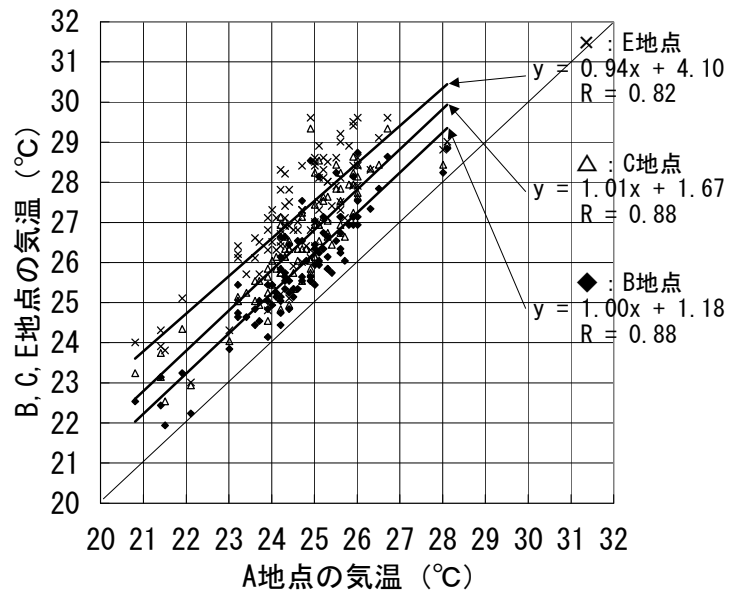


図5-17 柚谷で冷気流風向の場合における  
 A, B, C, E 地点の気温の関係 (広域海陸風が弱い場合)  
 (1999年7月20日～8月3日、8月17日～30日の18:00～6:00)

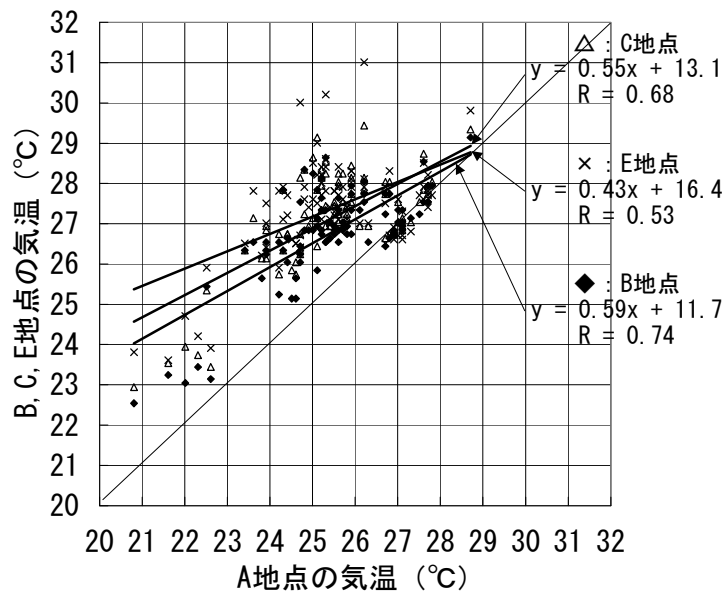


図5-18 柚谷で冷気流でない風向の場合における  
 A, B, C, E 地点の気温の関係 (広域海陸風が弱い場合)  
 (1999年7月20日～8月3日、8月17日～30日の18:00～6:00)

陸風が強い場合のように再度上昇することなく、朝までゆっくりと下がりつづけている。市街地内の各地点においては、22時から0時頃には冷気流成分の風向に代わり、気温の低下はB地点で0時すぎ、C地点でその直後、E地点で3時頃に起きている。気温の顕著な低下は風向の変化に対して1から2時間程度遅れている。そして、山から離れるにつれて気温が低下する時間が遅くなっている。この理由は、市街地内へ流出してきた冷気流と建物や道路との間で熱交換が行なわれたためであると考えられる。

#### 5-3-5 冷気流が発生する場合の市街地気温分布

5-3-4 広域海陸風の弱い場合に示した例は最も良い条件における測定結果の一例であり、通常は5-3-3 広域海陸風の強い場合と5-3-4 広域海陸風の弱い場合の間の条件で市街地気温低下効果が確認される。市街地気温の低下は、5-3-3 で述べたようにA地点で気温の低下が確認された後に生じる。そのとき、図5-17 に示すように広域海陸風が弱く、山で冷気流の風向の場合にはAとE地点の気温差は平均で2.6 程度となり、その間にB,C地点(AとBの差は平均1.2 , AとCの差は平均1.8 )が位置する。この気温差により5-3-4 のように条件が良い場合には市街地気温が徐々に低下する。逆に、図5-18 に示すように山で冷気流の風向でない場合には、A地点と他の地点との気温差が2 程度になることがあるが(例えば、図5-13 の20時頃の状態)、他の地点同士はほぼ同じ気温で冷気流による気温低下が生じていない状態であることを表わしている。

#### 5-4 まとめ

観測結果を基に、広域海陸風と冷気流の出現頻度の関係、及び、市街地における冷気流の影響距離に関する検討を行い、以下の結論を得た。

広域海陸風の風速が小さいときに冷気流の出現率が高く、冷気流の出現時間のうち91%が、上空100mの風速が4m/s以下のときであった。谷口で確認された冷気流の風速は2m/s程度に集中していた。ただし、広域の風が谷から市街地へ向かう条件のときには広域の風により強められて風速は4m/s程度にもなった。

広域海陸風が強い場合には、谷の中で生成された冷気は谷底の気温を一時的に低下させるが市街地内の気温を低下させる前に広域の風によって吹き消される。しかし、広域海陸風が弱い場合には、谷の中で生成された冷気が市街地内で熱交換を行いながら徐々に気温を低下させる。ただし、山から離れると気温低下の効果は小さく、その時間もかなり遅れる。

以上のことから、広域海陸風が弱い条件に限り、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を期待できる。しかし、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。

#### 参考・引用文献

- 1) 大阪市環境保健局：大阪市ヒートアイランド対策検討調査報告書，1994
- 2) 成田健一，三上岳彦，本條毅，菅原広史，木村圭司：新宿御苑におけるクールアイランド現象の実測，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，731-732，2001
- 3) 三坂育正，成田健一，尾之上真弓，鈴木義則，吉越恆：ステップガーデンを有する建物周辺の温熱環境実測評価 - その2 - 熱収支の解析結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，727-728，2001
- 4) 竹林英樹，森山正和，村上周三：観測データによる神戸地域周辺の風系に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，D-1，677-678，1998
- 5) 吉野正敏：新版小気候，地人書館，266-280，1986
- 6) 糸川文崇，竹林英樹，森山正和：夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する実測研究 - 神戸市灘区袖谷川周辺市街地における実測結果（98年夏季） - ，日本建築学会大会学術講演梗概集，D，703-704，1999

#### 本章に関連する既発表文献

- 1) Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Study on Cooling Effect in a Built-up Area by Cold Drainage Flow in Summer Night, Proc. International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology (CD-ROM), 1999
- 2) 糸川文崇，竹林英樹，森山正和：夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その1 冷気流の出現頻度と市街地における影響距離，日本建築学会近畿支部研究報告集，329-332，2000
- 3) 糸川文崇，竹林英樹，森山正和：夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その1 冷気流の出現頻度と市街地における影響距離，日本建築学会大会学術講演梗概集，1125-1126，2000
- 4) Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Cooling Effects on a Built-up Area caused by Cold Air Drainage in Summer Night, Proc. 3rd Japanese-German Symposium on Urban Climatology, 24-25, 2000
- 5) Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Cooling Effects on A Built-up Area Caused by Cold Air Drainage in Summer Night, Proc. International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering, 27-32, 2001
- 6) 竹林英樹，森山正和，糸川文崇：夏季夜間における山麓冷気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，99-104，2001



## 第6章 冷気流が市街地気温分布に及ぼす影響に関する考察

### 6-1 概要

前章までに、樹林内における冷気流の生成過程、冷気の流出源となる谷の中での冷気の集積過程、神戸市の六甲山南麓市街地における広域海陸風の特徴、広域海陸風の強さと冷気流の出現頻度と影響距離、について検討を行った。これらの結果を踏まえ、本章では冷気流が流出してくる市街地内において、実測結果に基づいて冷気流により形成される気温分布に関する検討を行うと共に、数値計算により市街地内の気温分布に関する検討を行う。

冷気流と市街地気温分布に関する解析には、ドイツのシュツットガルトの事例が参考になる。ドイツは高緯度にあるため、その環境政策は夏の暑さに関するものよりむしろ大気汚染対策を中心としたものであり、特に夜間の逆転層と関連している。シュツットガルト市は盆地内にあるため、夜間に冷気湖が発達する。実際には200mで10℃という逆転層が明け方に発達したことがあったそうである。周辺の丘陵森林部で生成された冷気が、図6-1に示す谷間に集積し、その冷気が市内中央駅付近にまで到達するという。そして条件の良い夜間には、1つの谷で生成された冷気が丘の高さを超えて反対側の谷にまで影響を及ぼすこともあるという説明は印象的である<sup>1)</sup>。

しかし、本研究で対象とするような斜面地に発達した市街地においては、放射冷却により冷却された地表面と比較すると流出してきた冷気流が高温である可能性がある。逆に、市街地は熱容量の大きな材料で構成されているため夜間も高温に保たれている可能性もあり、冷気流の流出過程は市街地内における熱収支と併せて検討する必要がある。

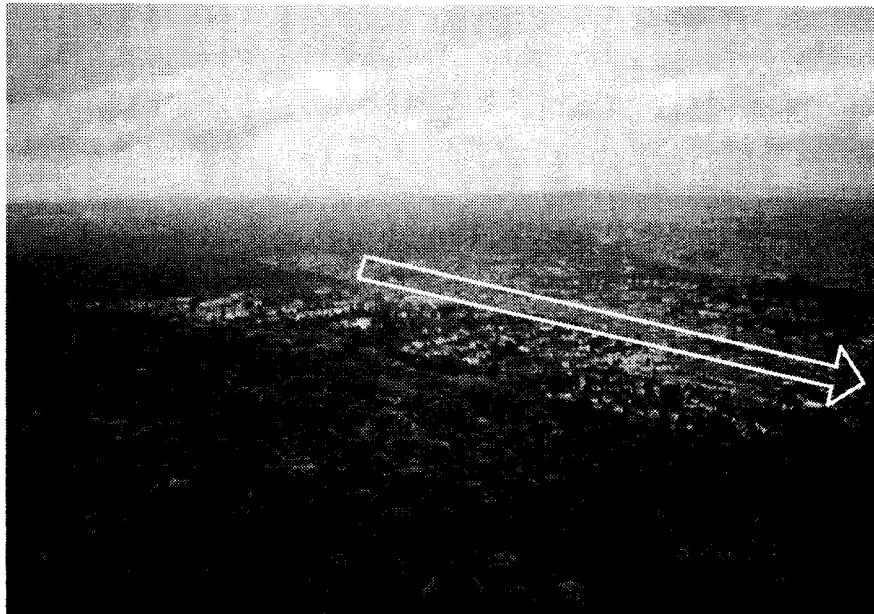


図6-1 シュツットガルト市街及びその周辺  
矢印が冷気流の方向を示し、矢印の先に市街地が位置している

## 6-2 実測調査による考察

### 6-2-1 神戸における観測

#### 1) 観測概要

市街地内の気温分布に関する測定は、1997年、98年、99年において実施した。測定対象地域を図6-2に示す。

測定対象地域は、神戸市灘区の柚谷（そまたに）周辺市街地である。柚谷は神戸市内の谷の中で集水面積が比較的大きく、形も予比較的シンプルである。対象地域はおよそ1.5km四方の市街地で、北北西に柚谷の谷口が位置し、南南東へ向かって柚谷川が流下している。東側には日柳川、西側には貧乏川という非常に細い川が流れており、その上流の谷は柚谷と比較して非常に小さいが、谷口は市街地に隣接している。柚谷川と東側の日柳川との間には長峰台と呼ばれる台地が六甲山麓から張り出している。

#### 2) 測定項目と測定方法

気温と風向の移動測定は毎正時毎に行い、サーミスタ温度計により気温を、スモークテスターにより風向を測定した（測定高さは約1.2m）。移動測定に要した時間は平均20分程度で、その間の定点測定での気温変化は最大で0.5℃が確認されたが、補正は行っていない。気温の連続測定はサーミスタ温度計により1分間隔で自動記録させた（測定高さは約1.2m）。風向風速の連続測定は10分間隔でデータロガーに自動記録させた（プロペラ型風速計及び三杯型風速計を使用）。風速計は柚谷川の上流から順に4か所に設置した。いずれも風の障害となる建物などから離れた地点で比較的開けた場所を選定した。

#### 3) 測定期間と測定時刻

測定期間は、1997年9月1～3日、10月22～23日、1998年7月17～18日、28～29日、31～8月1日、9月1～3日、1999年7月21～27日、のそれぞれ夜間であり、一時間毎に測定を行った。



図6-2 測定対象地域（神戸）

#### 4) 観測結果

図6-3に天候が晴れであった1998年7月17～18日の測定結果より作成した気温分布図を示す。時間が経つに連れて等温線が市街地内に下がっていく様子が確認できる。台地である長峰台は、冷気の通り道から外れているために気温が低下せず、島状の高温域となっている。これは1997年の測定においても確認され、1998年の5回の測定を通して、台地周囲との気温差に若干の違いがあるが、曇りの期間でも確認された。図6-4に示すスモークテストによる風向分布の測定においては、長峰台の南側において風よどみ域が確認され、台地地形が冷気の進入を塞いでいることが推測される。なお、7月17～18日において、西側の標高が低く下流側に位置する美野丘小学校と比較すると、最大で1℃程度長峰台上の気温が高かった。

対象地域内には、柚谷川以外に日柳川と貧乏川という細い川があり、それぞれの上流にある小さな谷の口は市街地に面している。その周辺市街地においても気温低下が確認され、この現象は六甲山の山際のラインと平行な等温線が谷口のところでくさび状に市街地内に入り込むように現れる。

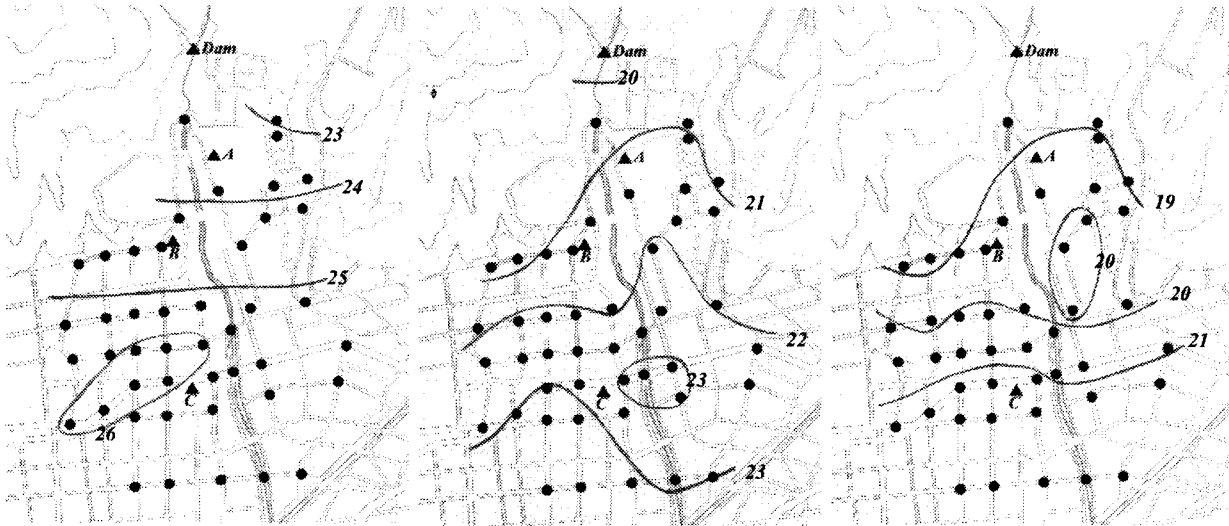


図6-3 神戸の気温分布 (1998年8月17～18日, 晴, 左:20時, 中:0時, 右:4時)

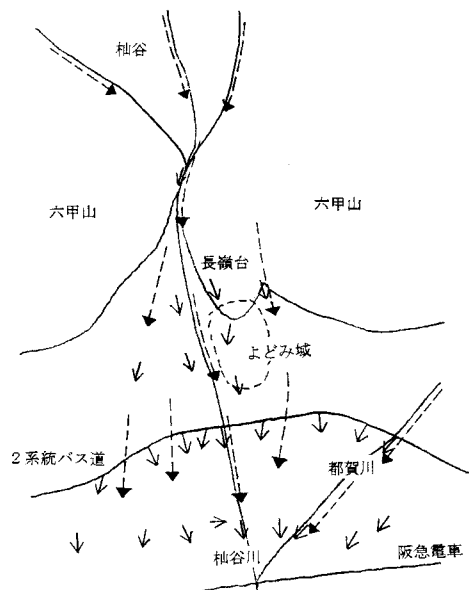


図6-4 測定結果による神戸の風向分布とそれに基づく流れの予想図

## 6-2-2 京都における観測

### 1) 観測概要

測定対象地域は、京都市北区賀茂川上流地域の南北約4km、東西約3.5kmにわたる市街地である。北西に谷口があり賀茂川が南東へ向かって流下している。市街地は北、東、西の山に囲まれているが、東西の山には大きな谷はない。測定対象地域を図6-5に示す。

### 2) 測定項目と測定方法

対象地域を4つのルートに分けて移動測定を行った。各ルートにおいて10地点で測定を行い、各地点では最低5分間停止し、1回の測定には移動時間を含めて約90分を要した。対象地域内の上流側と下流側に位置する小学校2校において、移動測定の時補正を行うために定点測定を行った。測定方法は、最大延長時に約4m程度となる釣り竿の先端にサーミスタと風船を設置して地上4.0mにおける気温と風向の測定を行った。図6-6に移動測定の概要を示す。

### 3) 測定期間と測定時刻

測定期間は、2001年8月6～9日の夜間である。対象地域が広いため表6-1に示す時刻の前後90分をかけて測定を行った。

### 4) 地上4.0mと1.5mにおける気温及び地表面温度の観測結果

図6-7に8月8日19, 22時, 9日1, 4時における地上4.0m, 1.5mの気温及び地表面温度の観測結果の関係を示す。蓄熱の影響で地表面温度がどの時間帯においても気温より高く保たれており、市街地へ流入している冷気流は文字通り市街地を冷却する能力を持っていると考えられる。図6-8に8月8日22時における地上4.0mと1.5mの気温の観測結果の関係を示す。1.5mでの測定結果が4.0mの値よりも0.2～0.3℃程度高くなっており、他の時間帯においても上下の測定点間でのこの関係はほぼ同じであった。この原因は、1.5m付近の気

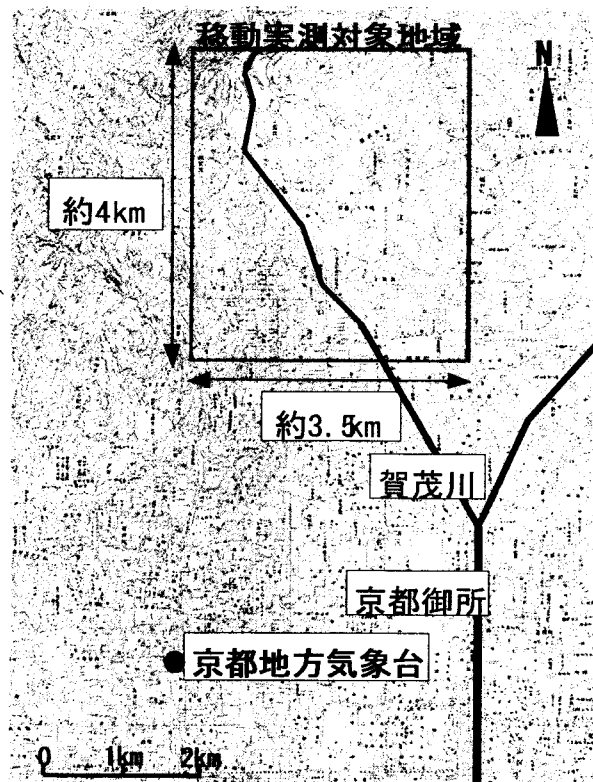


図6-5 測定対象地域 (神戸)

温は昼間の日射を蓄熱した地表面や周囲建物のより局所的な影響を受けて高温になっていたためであると考えられる。それに対し、4.0mの気温は地表面や周囲建物の局所的な影響だけでなく、冷気流などの周辺から流入する空気の影響も含んだ気温になっていると考えられる。

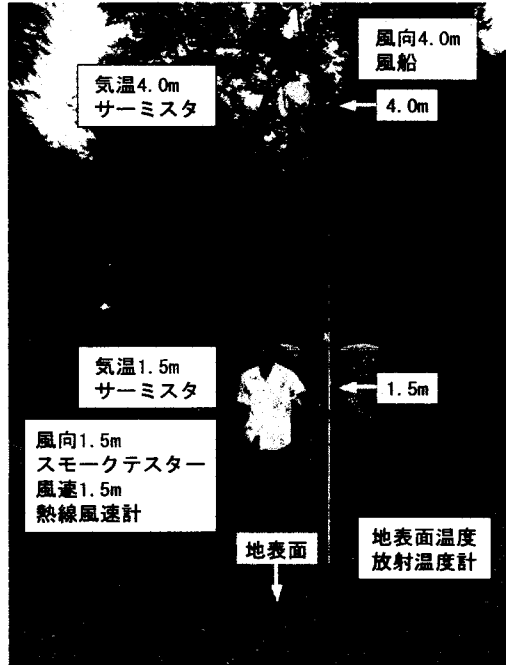


図 6-6 移動測定（京都）の概要

表 6-1 測定時刻（2001年8月6～9日の夜間）

日	時刻*
6～7日	19時, 22時, 1時, 4時
7～8日	20時, 23時, 2時, 5時
8～9日	19時, 22時, 1時, 4時

\*この時刻前後の約90分間で1回の測定を行った。

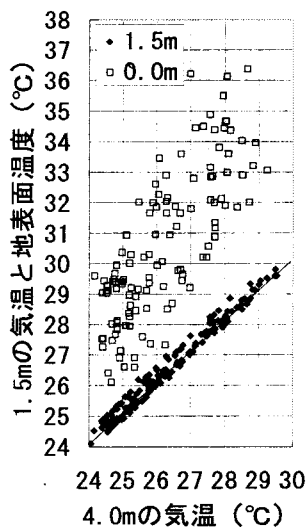


図 6-7 地上4.0m, 1.5mの気温及び地表面温度  
（京都2002年8月8日19, 22時, 9日1, 4時）

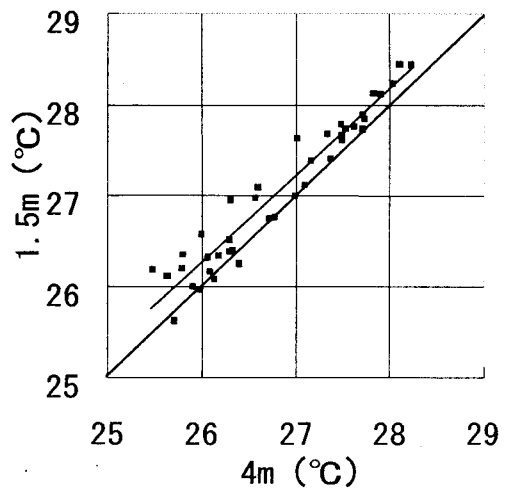


図 6-8 地上4.0mと1.5mでの気温の観測  
結果の関係（京都2001年8月8日22時）

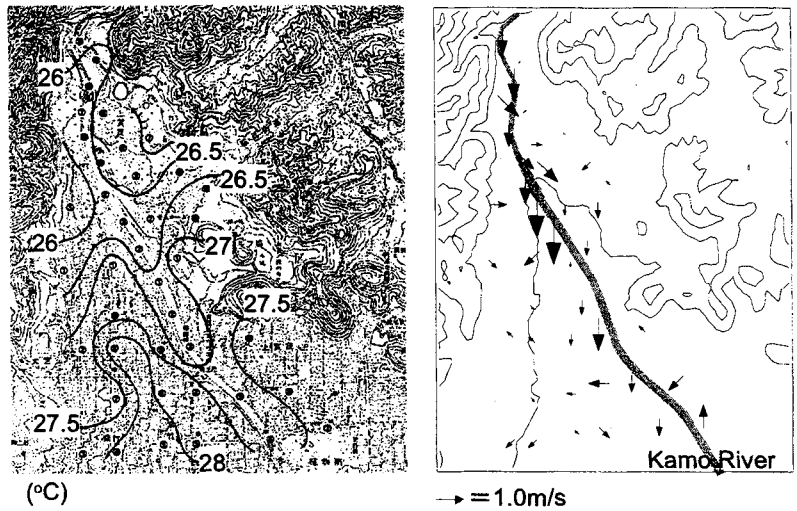


図 6-9 気温と風の観測結果 (8月8日22時)

左：気温分布 (地上 4.0m), 右：風ベクトル分布 (地上 1.5m)

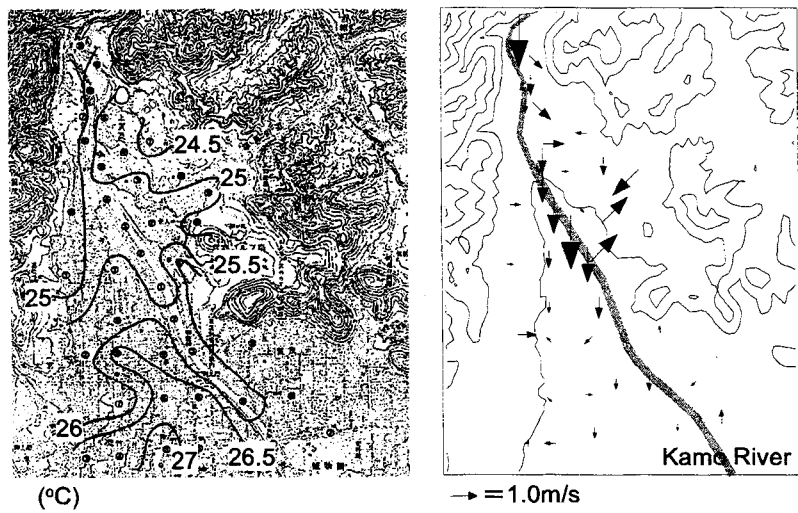


図 6-10 気温と風の観測結果 (8月9日1時)

左：気温分布 (地上 4.0m), 右：風ベクトル分布 (地上 1.5m)

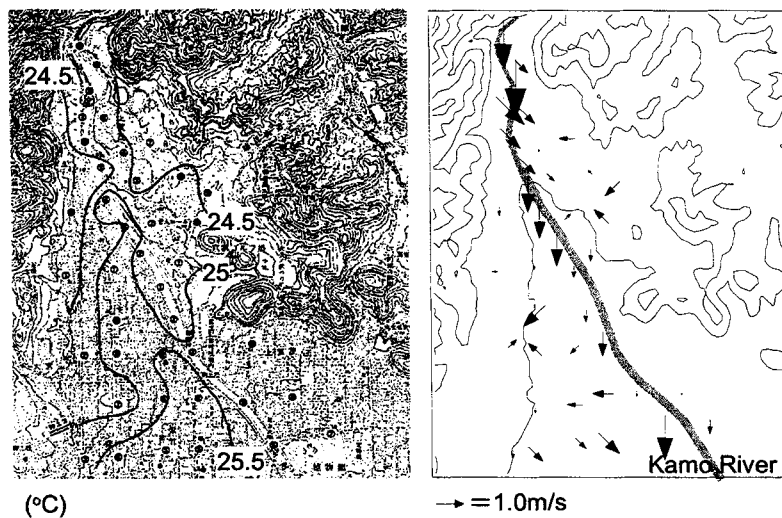


図 6-11 気温と風の観測結果 (8月9日4時)

左：気温分布 (地上 4.0m), 右：風ベクトル分布 (地上 1.5m)

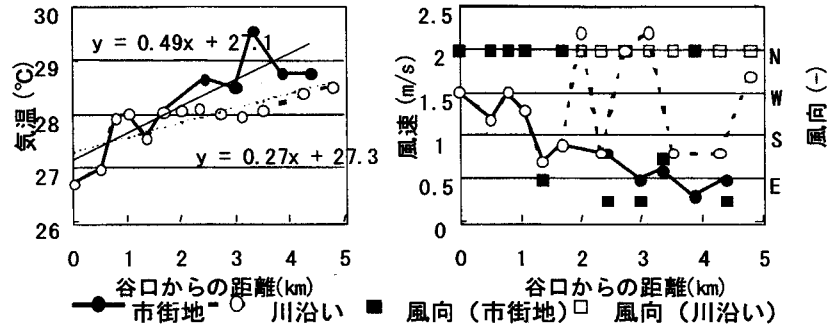


図 6-13 市街地，川沿いにおける谷口からの距離と  
気温，風向，風速の関係（8月8日19時）

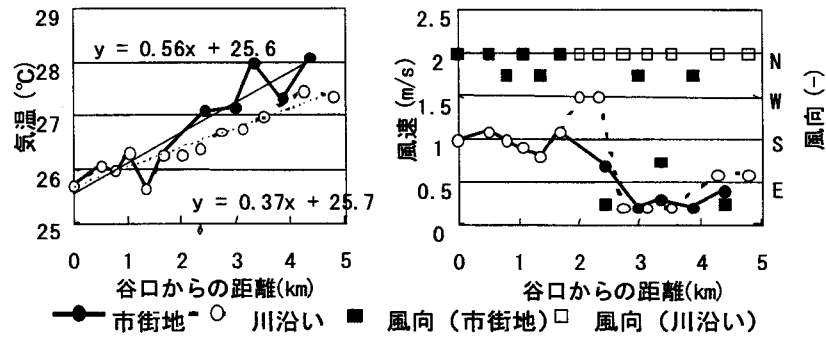


図 6-14 市街地，川沿いにおける谷口からの距離と  
気温，風向，風速の関係（8月8日22時）

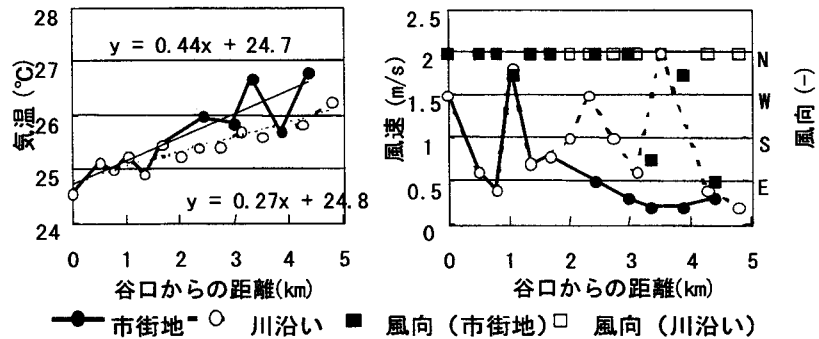


図 6-15 市街地，川沿いにおける谷口からの距離と  
気温，風向，風速の関係（8月9日1時）

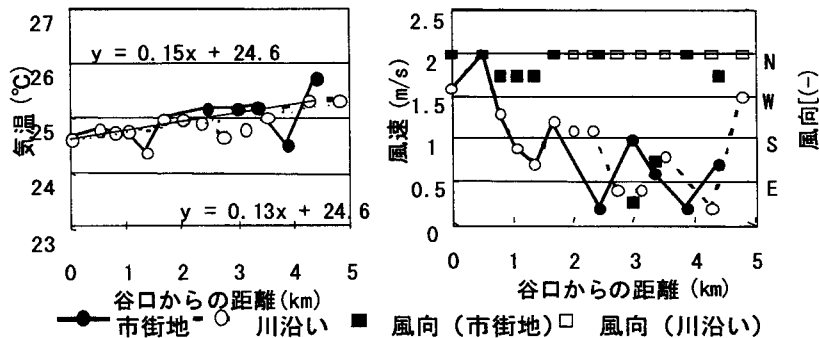


図 6-16 市街地，川沿いにおける谷口からの距離と  
気温，風向，風速の関係（8月9日4時）

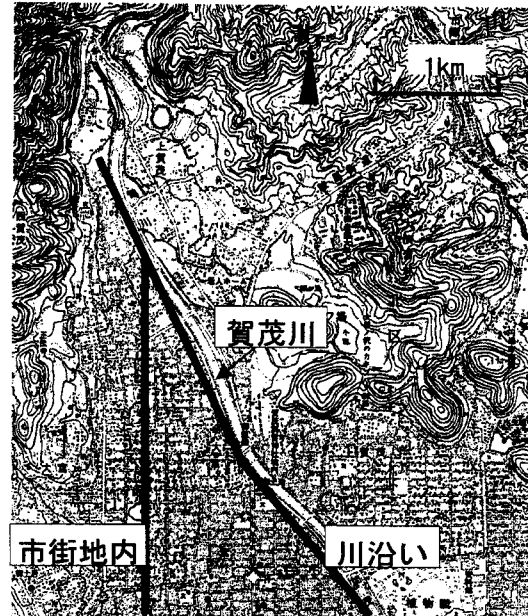


図 6-12 市街地，川沿いにおける谷口からの距離のとり方

従って，冷気流の市街地気温へ及ぼす影響について検討を行う本研究の解析においては，観測結果に対するより局所的要因による影響が排除できる地上 4.0m での気温を基に検討を行う。但し，測定方法の都合で地上 4.0m における風速の測定は行われていないため，風の分布に関しては地上 1.5m における測定結果を参照する。

#### 5) 気温分布と風ベクトル分布

観測結果に基づいて作成した地上 4.0m の気温分布と地上 1.5m の風ベクトル分布を図 6-9, 10, 11 に示す。気温は時間とともに徐々に低下している。4 時の気温分布では対象地域全体において気温差がほとんどなくなっており，冷気が領域内を満たしていると言える。気温分布のパターンでは，時刻による変化があまり見られず，川沿いでは周辺市街地と比較して常に低温となっている。風ベクトルの分布より，川沿いにおける北風の風速が周辺市街地と比較して大きくなっているため，川沿い地域に冷気流が流れ込み易くなっており，冷気流の流入に伴う気温低下の効果が大きく表れていると考えられる。

#### 6) 谷口からの距離と気温，風向，風速

市街地，川沿いにおける谷口からの距離と気温，風向，風速の関係を図 6-13, 14, 15, 16 に示す。川沿いと市街地内における谷口からの距離のとり方は図 6-12 に示す。

川沿い，市街地内ともに谷口から遠ざかるにつれて気温は高く，風速は弱くなる傾向がある。川沿いと市街地内の気温を比較すると，全時間帯で市街地内の方が高く保たれている。風向，風速については，川沿いでは北風が比較的強いが，市街地内では風向にばらつきがみられ風速も弱い。朝方になると谷口周辺と下流側の温度差が小さくなっている。

市街地内の気温で，下流側より 2 地点目は常に低温になる傾向がある。その原因は，この測定点に大宮交通公園が隣接しているためであると推測される。



### 6-2-3 観測結果のまとめ

実測結果に基づいて谷口周辺市街地の気温分布に関する検討を行った。

- 1) 神戸の実測結果より、谷口から吹き出した冷気流はその周辺の市街地の気温を低下させている。これは、比較的小さな谷口周辺の市街地でも確認された。冷気流は重力に従って低い方へ流れるため、谷口に近くても高台になっているために冷気流が流れ込まない台地では、谷口から離れた標高の低い地点より最大1°C程度気温が高くなっていることが確認された。
- 2) 京都の実測結果より、地上4.0m, 1.5mの気温及び地表面温度の観測結果を比較すると、昼間の日射の蓄熱の影響で地表面温度がどの時間帯においても気温より高く保たれており、市街地へ流入している冷気流は文字通り市街地を冷却する能力を持っていると考えられる。
- 3) 神戸、京都共に気温分布のパターンは時間帯によってあまり変化しなかった。京都では川沿い地域において周辺市街地より常に低温である傾向であった。川沿い地域では北風の風速が大きいことから、冷気流が流れ込みやすく、冷気流の流入に伴う気温低下の効果が大きく表れていると考えられる。
- 4) 京都の観測結果を用いて、市街地、川沿いにおける谷口からの距離と気温、風向、風速の関係について検討した結果、川沿い、市街地内ともに谷口から遠ざかるにつれて気温は高く、風速は弱くなる傾向であった。川沿いと市街地内の気温を比較すると全時間帯で市街地内の方が高く保たれていた。

### 6-3 拡散モデルによる考察

前節では谷口周辺市街地において、冷気流により形成される気温分布に関する検討を、局所的な影響が排除されやすい地上4.0mでの気温の実測結果に基づいて行った。その結果、川沿いの地域において周辺市街地より常に気温が低くなる傾向にあり、川沿い地域では北風の風速が大きいことから、冷気流が流れ込みやすくなっており、冷気流の流入に伴う気温低下の効果が大きく表れる結果となった。ここでは前節の結果を踏まえて、数値計算により市街地内の気温分布に関する検討を行う。

#### 6-3-1 解析概要

##### 1) 対象地域

対象地域を図6-17に示す。前報の移動実測の対象地域とほぼ同じ領域の京都市北区賀茂川上流地域の南北約3.75km、東西約2kmにわたる谷口周辺市街地が対象である。この領域を50m×50mメッシュで分割し、格子数は75×40×50個である。なお、鉛直方向の計算領域は150mまでであり、地表付近の第1セルの高さは3mである。

##### 2) 計算条件

乱流モデルにはk-ε型2方程式モデルを用い、観測を行った2001年8月9日1時を対象日時として計算を行った<sup>2~6)</sup>。地表の境界条件の、地表面温度は観測結果に基づき、空間分布は補間により作成した。粗度分布については細密数値情報に基づいて作成した。なお、各土地利用の 카테고리 に対する設定値については文献<sup>7)</sup>を参考に与えた。流入の境界条件は対象領域に面する谷の中の冷気の集積過程を浅水方程式モデルにより計算し、その結果に基づいて与えた。表6-2に計算条件をまとめて示す。

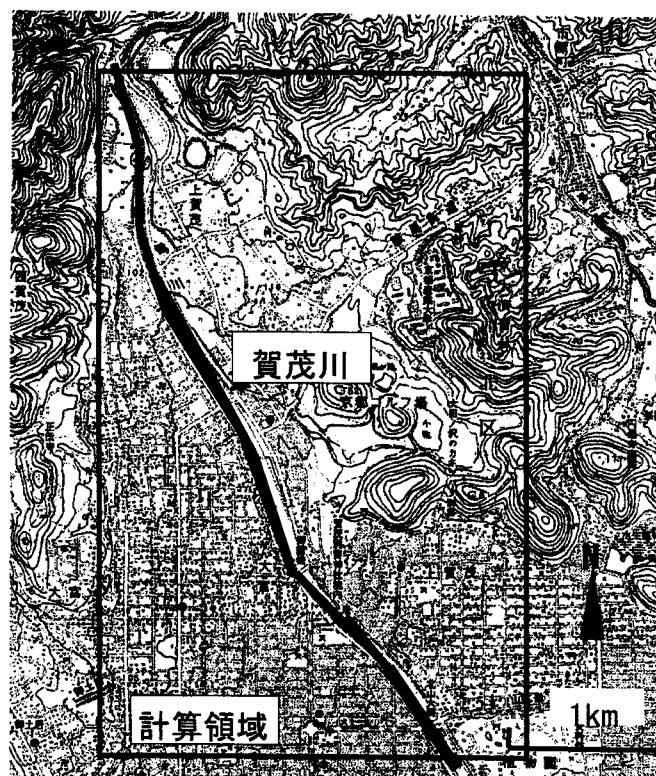


図6-17 計算対象地域

(南北3.75km×東西2km×高さ150m) (格子数:75×40×50個)

表 6-2 計算条件

対象日時	2001年8月9日1時
乱流モデル	k-ε型2方程式モデル
地表面温度分布	観測結果より作成
粗度分布	細密数値情報より作成
流入境界条件	谷の中での冷気の集積過程を計算した 浅水方程式モデルの計算結果より対数分布で作成
上空, 流出境界 初期条件	勾配なし 風は浅水方程式モデルの計算結果より 対数分布で作成 気温については領域全体で一様な値を仮定

図 6-18 に境界条件に用いた地表面温度分布を, 図 6-19 に粗度分布を示す。地表面温度は, 谷口に近い賀茂川西側の宅地造成地において高温であった。この原因は, 造成地であるためアスファルト地表面に対して影になる建築物等が無く, 昼間の日射の蓄熱量が大きかったためであると考えられる。図 6-20 に流入境界条件に用いた浅水方程式モデルによる計算結果を示す。計算対象領域に対しては北側の谷間から冷気が流出してくる結果になっている。

### 6-3-2 計算結果

地表面温度を固定し, 一定の流入風を与え続ける定常計算であるため, 計算を続けると地表面との熱交換により, 地表面温度を低く設定した森林部ではますます気温が低下し, 地表面温度を高く設定した市街地部では気温が上昇する傾向になる。このとき, 現実には非定常な条件であるため, 地表面温度も変化するはずである。従って, 本研究においては, 流入風が地表面温度とある程度熱交換を行った後の計算結果を準定常な状況であると仮定し, 以下の考察の対象とする。この点について検討を行うために次節において, 地表面の境界条件として土地利用別に熱収支の計算を行った場合の計算を実施する。ちなみに, 計算開始後 150 秒の計算結果を採用した。

#### 1) 気温の水平分布

地上 4.0m の観測結果より作成した 2 次元平面での気温分布と地上 4.5m での計算結果による気温分布を図 6-21 に示す。計算結果は, 鉛直方向の格子間隔が地表付近で 3.0m であるため, 地上 4.0m に最も近い 4.5m (地上第 2 セル) での値を示す。乱流モデルの k-ε 型 2 方程式モデルは平均流の解析であることから, なめらかな気温分布図が得られている。

計算結果は地表面温度分布の影響を受けて, 川沿いの地域において気温が低下し, 南部の密集市街地において高温となっている。この傾向は, 観測結果とよく一致している。計算結果の対象領域内での気温の幅は 9 日 1 時の場合には 24.7℃~27.0℃であり, ほぼ観測結果と一致している。また, ここでは示していないが, 8 日 22 時を想定した計算も行い, その場合の気温の幅は 24.8℃~28.1℃となり, 同様に観測結果とほぼ一致していた。

計算結果における対象領域右上 (北東部) の高温部分は京都産業大学付近であり, 粗度が大きく設定されている関係で, 地表面との熱交換が盛んとなり気温は高温になっている。また, ここでは示していないが, 地上 1.5m での気温の計算結果の幅は 9 日 1 時の場合に 24.4℃~27.7℃となり, 8 日 22 時の場合には 24.1℃~29.2℃となっていた。観測結果と同様, 地上 1.5m の気温は 4.0m の気温に比べて 0.3℃~1.1℃ほど高くなっている。

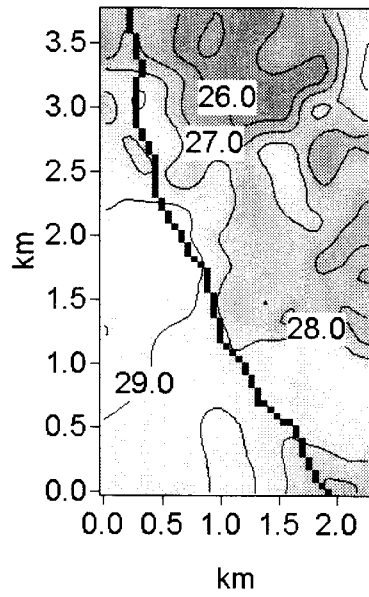


図6-18 地表面温度の分布図 (°C)  
 (2001年8月9日1時の観測値より作成)

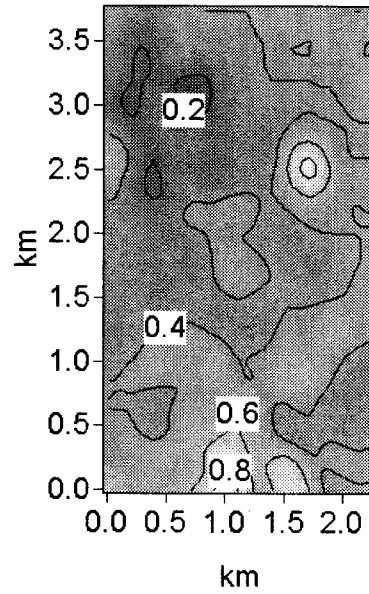


図6-19 粗度分布図 (m)  
 (細密数値情報より作成)

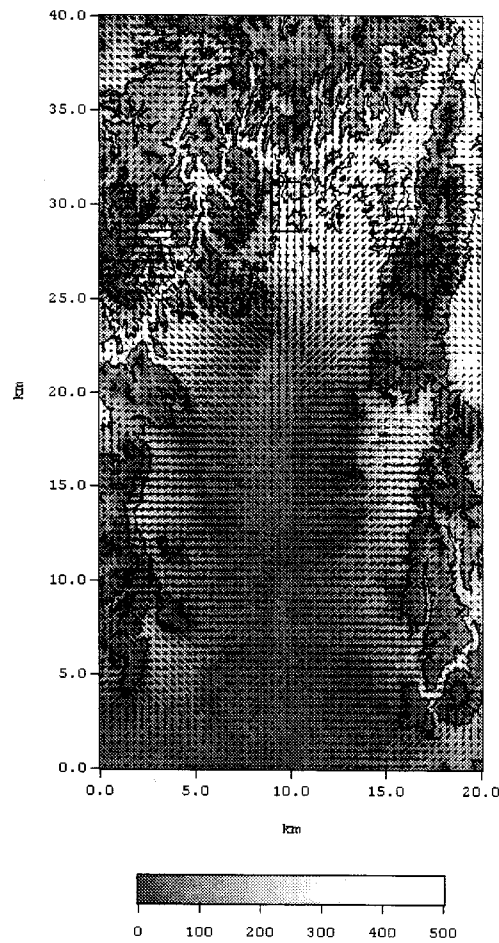


図6-20 浅水方程式モデルによる計算結果 (冷気厚さ (m)) (枠内が計算対象領域)

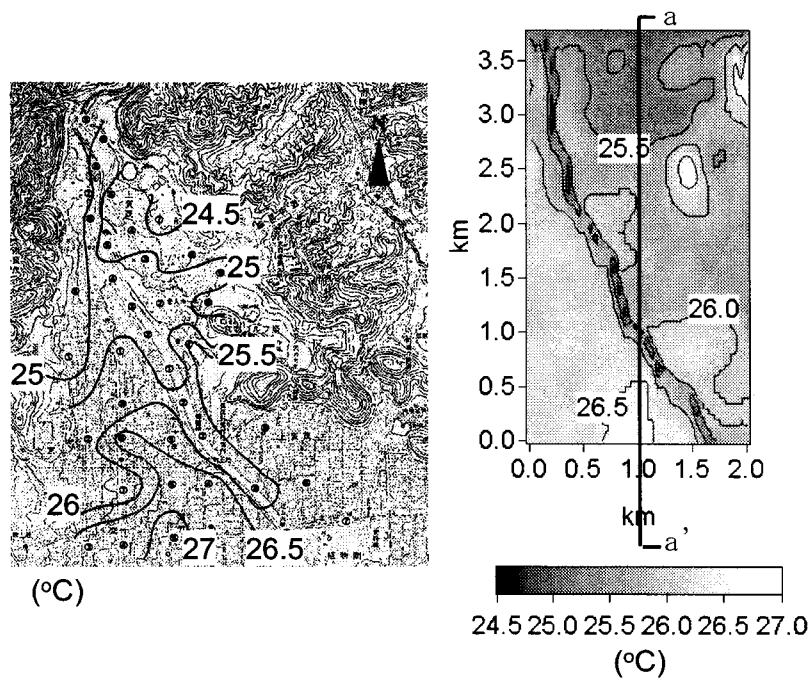


図 6-21 気温の観測結果と計算結果 (2001 年 8 月 9 日 1 時)  
 左 : 地上 4.0m の観測結果, 右 : 地上 4.5m での計算結果

## 2) 気温の鉛直分布

領域を図 6-21 の中央 a-a' 断面 (南北方向) で切った 2 次元断面での気温分布の計算結果を図 6-22 に示す. 図の左側が北で谷が形成されており, 右側の南に市街地が広がっている. 南側の市街地では地上 50m 前後付近まで地表面の影響が及んでいる. それより上は境界条件で与えた上空の気温に等しくなっている. 観測結果と同様に, 谷口からの距離が大きくなるに従って気温が徐々に高くなっている.

## 3) 風ベクトルの分布

地上 1.5m の観測結果より作成した 2 次元平面での風ベクトル分布と地上 1.5m での計算結果による風ベクトル分布を図 6-23 に示す. 計算結果の風ベクトル分布はすべて北風で, 計算領域上部 (北側) の谷口付近で風速が大きく, 下部 (南側) の密集市街地付近でやや小さくなっている. しかし, ほぼ一様な分布をしており, 観測結果に見られるようなばらつきは見られない. また, 8 日 22 時の計算結果においても 9 日 1 時と同様の結果が得られている.

地上 1.5m の観測結果は建築物等の障害物によって風が遮られるなどの局所的な影響を受けた風ベクトル分布となっているのに対し, 計算結果はある程度なめらかな粗度分布に応じた平均的な風ベクトル分布になっていると言える. ここには示していないが, 観測結果と同様に, 計算結果においても地上 4.0m の風は 1.5m の風速に比べて大きな値となっている.

以上より, 風ベクトルの分布は, 測定高さの関係もあり観測結果と十分に一致したとは言えないが, 気温分布については, 川沿いの気温が低く, 市街地の気温が高い, などの傾向がほぼ表現出来ており, 気温の範囲もほぼ一致している. 従って, 以下ではこの計算モデルを用いて, 冷気流を活用するシナリオを想定し, そのシナリオに基づくシミュレーションに関する検討を行う.

## 4) シナリオの想定

市街地内において冷気流による冷却効果を効果的に利用することを目標に, 市街地上流側地域の粗度を小さくするシナリオを設定した. 図 6-24 に市街地上流側で小さく設定

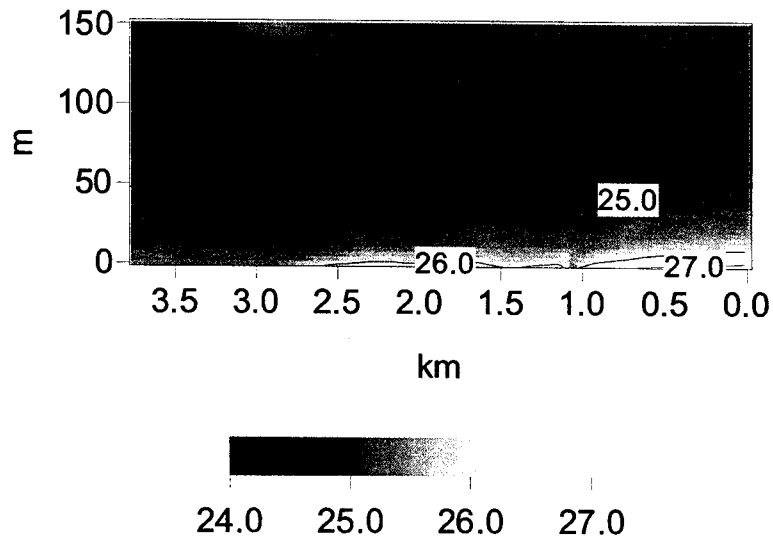


図 6-22 気温の計算結果の a-a' 断面図 (°C) (2001 年 8 月 9 日 1 時)

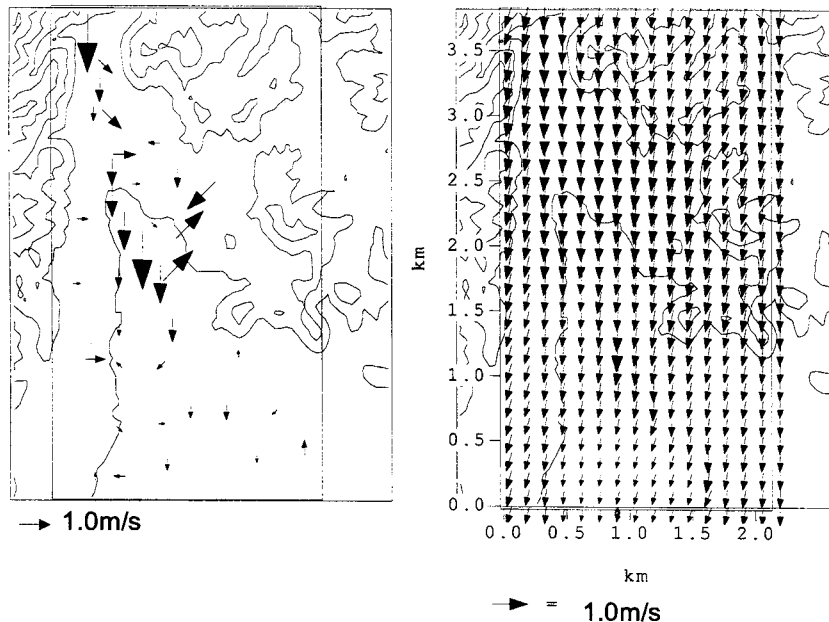


図 6-23 風ベクトルの観測結果と計算結果 (2001 年 8 月 9 日 1 時)  
 左: 地上 1.5m の観測結果, 右: 地上 1.5m での計算結果

した粗度分布を示す。中央は、川の西側で上流部分の粗度を 0.3m に設定しており、右は、川の西側で上流、中流部分の粗度を 0.3m に設定している。

### 5) シミュレーション結果

シナリオに従って行った計算結果を図 6-25 に示す。通常の場合 (左図) と比較して、粗度を小さく設定した部分の気温は若干低下している (中央図, 右図)。このことは、粗度が小さくなり熱伝達率が小さくなったため、高温な地表面から空気への熱の輸送が小さくなったためである。しかしながら、粗度の大きな市街地部ではすぐに高温になっており、劇的な熱環境の改善は見られない。本研究で用いた地表面の特性を粗度により表現するモデルではこのような傾向の結果になるが、市街地内において建物の形状を再現するモデルを用いれば、建物周辺の詳細な熱環境の予測が可能になると考えられる。

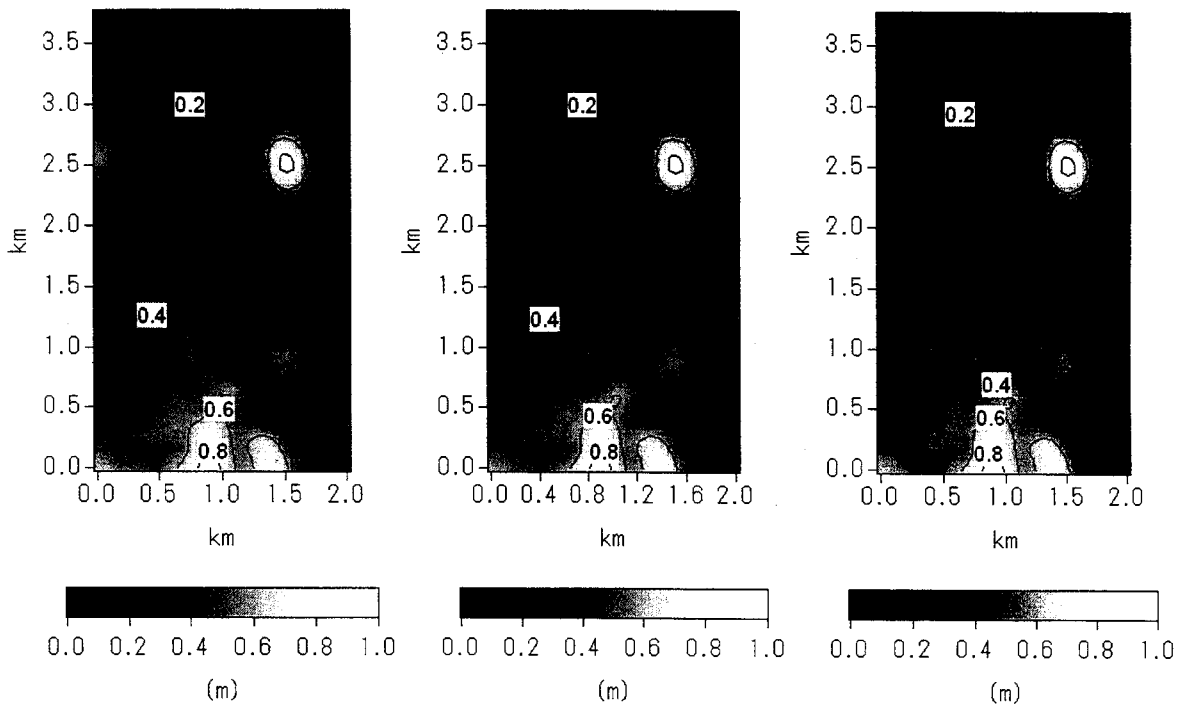


図 6-23 市街地上流側で小さく設定した粗度分布

左：通常の場合，中央：川の西側上流部分を 0.3m，右：川の西側上，中流部分を 0.3m

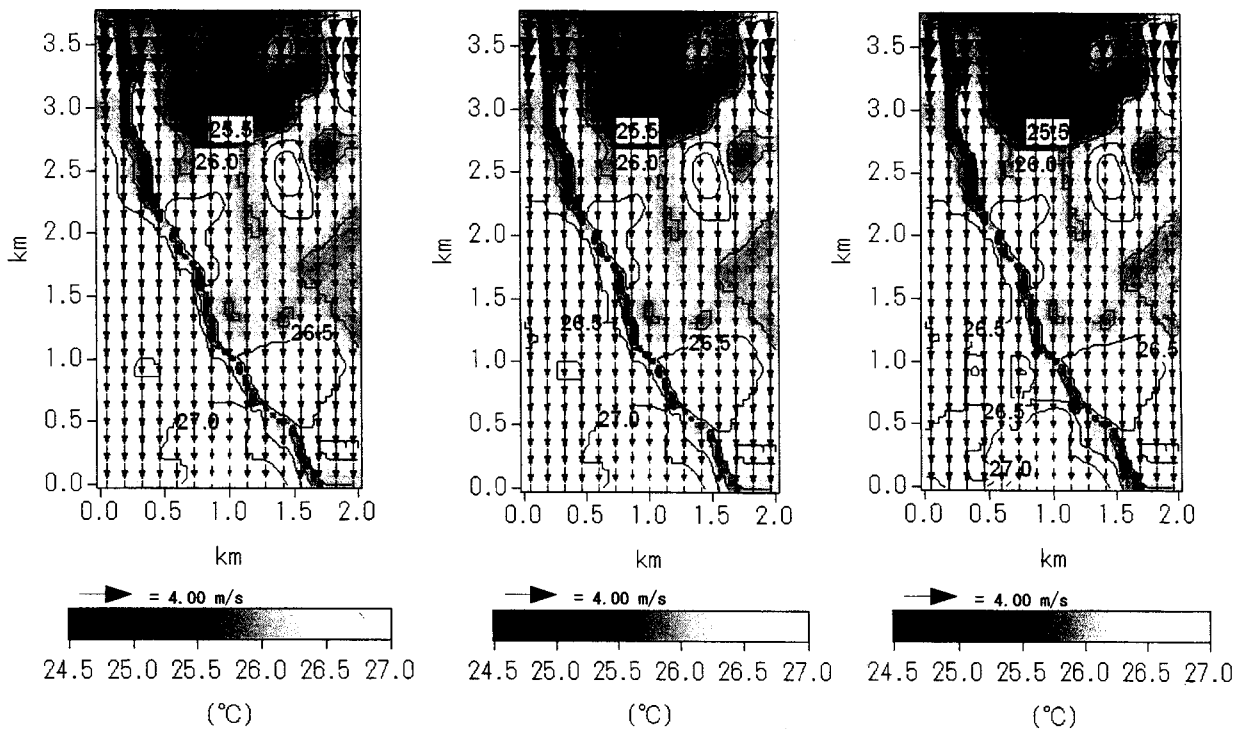


図 6-25 市街地上流側で小さく設定した粗度分布に基づく計算結果（気温と風ベクトル）

左：通常の場合，中央：川の西側上流部分を 0.3m，右：川の西側上，中流部分を 0.3m

### 6-3-3 土地利用別熱収支を解いた場合の計算

前節では、地表面の境界条件として観測結果より作成した地表面温度分布を与えて計算を行ったが、実際には上流の谷間などから市街地へ流入してきた空気と地表面との間で熱交換が行われ、時々刻々地表面温度と気温が変化している。計算領域内において、日射の蓄熱効果により高温に保たれているコンクリートやアスファルトなどの人工被覆面からは気温に対して顕熱を供給していると考えられるが、緑地などの自然地表面では逆に空気から地表面へ顕熱が供給されている可能性がある。従って、ここでは典型的な地表面での熱収支を考慮した地表の境界条件を用いた場合の計算を行い、地表面における熱収支を考慮した市街地気温分布の考察を行う。

#### 1) 地表面熱収支モデル

ここでは細密数値情報を用いて地表面を、植生、裸地、水面、木造建物、その他の建物、道路、の6つのカテゴリーに分類し、それぞれのカテゴリーに対して、物性値を仮定した。分類されたカテゴリー別の被覆率を図6-26に示す。各カテゴリーからの顕熱を被覆率の重み付け平均により合成して地表面境界条件とした。なお、地表面の熱収支式は、夜間を想定し放射、対流、伝導が釣り合っているとした。対流熱伝達率はユルゲスの式で与え、仮定した物性値は伝導成分に関するものだけである。仮定した物性値を表6-3に示す。

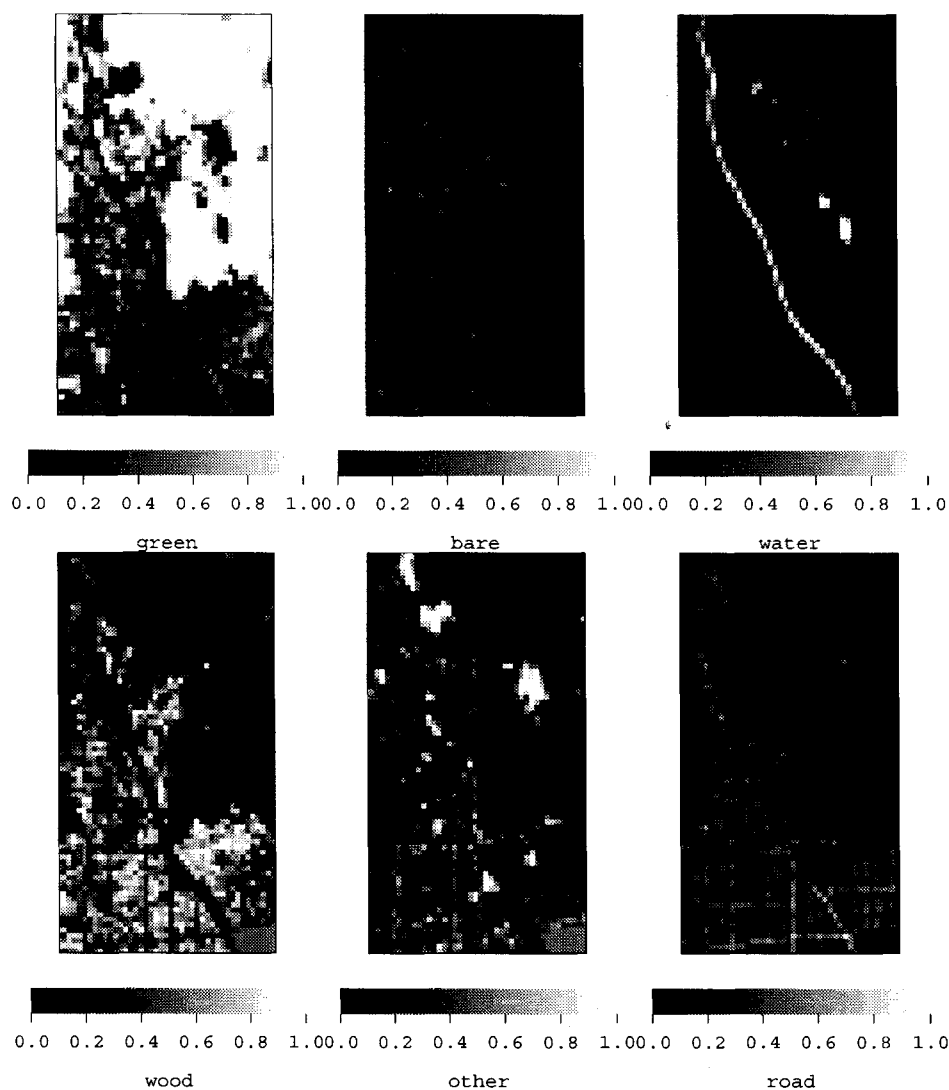


図6-26 カテゴリー別被覆率



## 2) 計算結果

計算結果の地表面温度分布、顕熱フラックス分布、地表1.5mの気温分布を図6-27, 28, 29に示す。顕熱フラックスは計算領域左下（南西）の市街地で正の値になっており、地表面から空気へ熱が輸送されている。それに対し、計算領域右上（北東）の森林地域では負の値になり、気温から地表面へ熱が輸送されている。顕熱の測定は行われていないため、ここでは定量的な精度は議論できないが、森林部で冷気が生成され市街地で混合されている様子が計算できていると考えられる。顕熱が計算領域内で正と負の値を持つということは、冷気流は地表面の条件によって冷気を供給している場合（市街地に対して）と、逆に高温な熱を供給している場合（森林部に対して）があることを指摘している。従って、条件によっては必ずしも冷気流が山麓周辺地域に対して低温であるとは限らないといえる。

表6-3 カテゴリ別の物性値

	植生	裸地	水面	木造建物	その他の建物	道路
熱伝導率 (W/mK)	1.05	1.05	0.57	1.05	1.7	0.7
熱容量 (*10**6J/m³K)	1.85	1.85	4.2	1.85	2.1	1.4

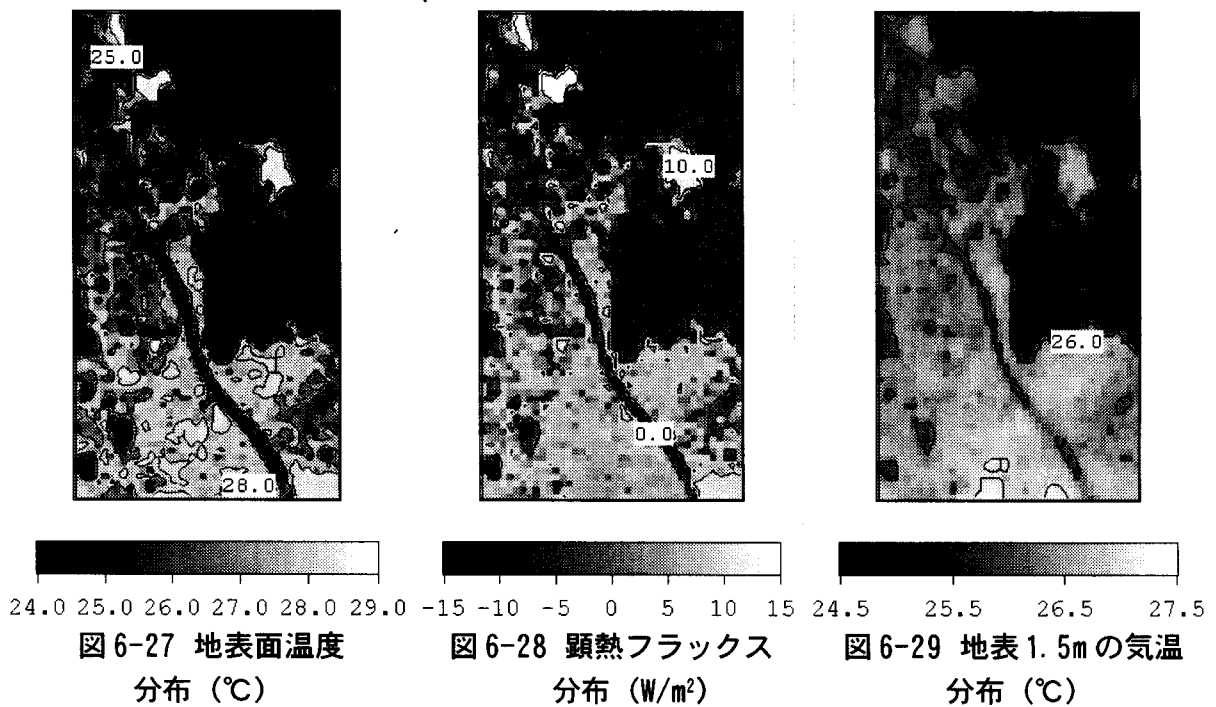


図6-27 地表面温度分布 (°C)

図6-28 顕熱フラックス分布 (W/m²)

図6-29 地表1.5mの気温分布 (°C)

#### 6-3-4 計算結果のまとめ

数値計算により谷口周辺市街地の気温分布に関する検討を行った。

1) 地表面温度は観測結果，粗度は細密数値情報，流入風速は浅水方程式モデルの計算結果を基に境界条件を作成した。乱流モデルには $k-\epsilon$ 型2方程式モデルを用い，定常計算を行った。

2) 計算結果は地表面温度分布の影響を受けて，川沿いの地域において気温が低下し，南部の密集市街地において高温となり，気温分布の傾向は観測結果とよく一致した。計算結果の対象領域内での気温の幅はほぼ観測結果と一致した。

3) 計算結果の気温の断面分布を見ると，市街地部での地表面の影響は50m程度の高さまで及び，観測結果と同様に谷口からの距離が大きくなるに従って気温が徐々に高くなっていった。

4) 風ベクトルの分布は，地上1.5mの観測結果は建築物等の障害物による局所的な影響を受けているのに対し，計算結果はある程度なめらかな粗度分布に応じた平均的な風ベクトル分布になっているため，十分に一致しているとは言えない。今後は，気温と同様に局所的な影響を受けにくい高さでの測定法を検討する必要があるだろう。

5) 市街地上流側の粗度を小さく設定した計算結果より，通常の場合と比較して，粗度を小さく設定した部分の気温は若干低下した。このことは，粗度が小さくなり熱伝達率が小さくなったため，高温な地表面から空気への熱の輸送が小さくなったためである。しかしながら，粗度の大きな市街地部ではすぐに高温になり，劇的な熱環境の改善は見られない。

6) 土地利用別に地表面の熱収支を計算した結果，顕熱が計算領域内で正と負の値を持つため，冷気流は地表面の条件によって冷気を供給している場合（市街地に対して）と，逆に高温な熱を供給している場合（森林部に対して）があることが示された。

#### 6-4 まとめ

本章では、冷気流が流出してくる市街地内において、実測結果に基づいて冷気流により形成される気温分布に関する検討を行うと共に、数値計算により市街地内の気温分布に関する検討を行った。

実測結果より、地上4.0m、1.5mの気温及び地表面温度の観測結果を比較すると、昼間の日射の蓄熱の影響で地表面温度がどの時間帯においても気温より高く保たれており、市街地へ流入している冷気流は文字通り市街地を冷却する能力を持っていると考えられる。谷口周辺市街地の気温は時間とともに徐々に低下し、朝方には対象地域内の気温がほぼ一様になった。このことより、朝方には冷気が領域内を満たしていたと考えられる。気温分布のパターンは時間帯によってあまり変化せず、川沿い地域において周辺市街地より常に低温である傾向であった。川沿い地域では北風の風速が大ききことから、冷気流が流れ込みやすくなっており、冷気流の流入に伴う気温低下の効果が大きく表れていると考えられる。市街地、川沿いにおける谷口からの距離と気温、風向、風速の関係について検討した結果、川沿い、市街地内ともに谷口から遠ざかるにつれて気温は高く、風速は弱くなる傾向であった。また、川沿いと市街地内の気温を比較すると、全時間帯で市街地内の方が高く保たれていた。市街地内においても、公園の影響を受けて気温が低くなっている領域が確認された。

計算結果は、地表面温度分布の影響を受けて、川沿いの地域において気温が低下し、南部の密集市街地において高温となり、気温分布の傾向は観測結果とよく一致した。計算結果の対象領域内での気温の幅はほぼ観測結果と一致した。気温の断面分布を見ると、市街地部の地表面の影響は50m程度の高さまで及び、観測結果と同様に谷口からの距離が大きくなるに従って気温が徐々に高くなっていた。風ベクトルの分布は、地上1.5mの観測結果は建築物等の障害物による局所的な影響を受けているのに対し、計算結果はある程度なめらかな粗度分布に応じた平均的な風ベクトル分布になっているため、十分に一致しているとは言えない。今後は、気温と同様に局所的な影響を受けにくい高さでの測定法を検討する必要があるだろう。市街地の上流側の粗度を小さく設定した計算では、粗度が小さくなり熱伝達率が小さくなったため、高温な地表面から空気への熱の輸送が小さくなり、その部分の気温が若干低下した。しかしながら、粗度の大きな市街地部ではすぐに高温になり、劇的な熱環境の改善は見られなかった。

また、土地利用別に地表面の熱収支を計算した結果、顕熱が計算領域内で正と負の値を持ったため、冷気流は地表面の条件によって冷気を供給している場合（市街地に対して）と、逆に高温な熱を供給している場合（森林部に対して）があることが示された。

## 参考・引用文献

- 1) 大橋唯太, 泉岳樹, 菅原広史, 狩野真規, 佐藤尚毅, 一ノ瀬俊明, 竹林英樹: 第3回 独日都市気候シンポジウムの参加報告, 天気, 48(3), 159-163, 2001
- 2) 数値流体力学編集委員会編: 数値流体力学シリーズ3 乱流解析, 東京大学出版会, 1995
- 3) 加藤信介: 数値流体力学CFDの室内環境への応用(1)~(7), 空気調和・衛生工学, 第71巻第6~11号, 第72巻第1号, 1997.6~11, 1998
- 4) 村上周三: CFDによる建築・都市の環境設計工学, 東京大学出版会, 2000
- 5) 佐々木澄, 持田灯, 吉野博, 渡辺浩文: 一都市内公園緑地の暑熱緩和効果に関する研究(その2) - CFD解析を用いた公園からの冷気流の流出とその熱的効果の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 903-904, 2001
- 6) 後藤庸幸, 富永禎秀, 持田灯, 村上周三: LESによる都市熱環境の数値解析(その1) 緑地等の都市内部の低温領域の配置形態が気温分布に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D-1, 1105-1106, 2000
- 7) 近藤純正: 水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, 朝倉書店, 1994

## 本章に関連する既発表文献

- 1) Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Study on Cooling Effect in a Built-up Area by Cold Drainage Flow in Summer Night, Proc. International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology (CD-ROM), 1999
- 2) Takebayashi, H., Moriyama, M., Shibaike, H.: Analysis of the distribution of air temperature in the built-up area facing the mouth of the valley, Proc. Fourth Symposium on the Urban Environment, 58-59, 2002
- 3) 和田ゆりか, 竹林英樹, 森真佐雄, 芝池英樹, 森山正和, 佐藤嘉昌: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その4 実測結果に基づく谷口周辺市街地の気温分布に関する検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 385-388, 2002
- 4) 竹林英樹, 和田ゆりか, 森真佐雄, 芝池英樹, 森山正和, 佐藤嘉昌: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その5 数値計算による谷口周辺市街地の気温分布に関する検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 389-392, 2002
- 5) 和田ゆりか, 竹林英樹, 森真佐雄, 芝池英樹, 森山正和, 佐藤嘉昌: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その5 実測結果に基づく谷口周辺市街地の気温分布に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 647-648, 2002
- 6) 森真佐雄, 竹林英樹, 和田ゆりか, 芝池英樹, 森山正和, 佐藤嘉昌: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その6 数値計算による谷口周辺市街地の気温分布に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 649-650, 2002

## 第7章 結論

本研究では、夏季夜間に市街地において冷却効果が期待される冷気流について、森林などでの放射冷却による冷気の生成過程（第2章）、谷地形による冷気の集積過程（第3章）、冷気流よりも大きなスケール（メソスケール）での気象現象（第4章）、メソスケールの現象（海陸風）と冷気流の出現頻度との関係（第5章）、集積された冷気の市街地への流出過程および市街地熱環境緩和効果（第6章）、のそれぞれについて検討を行った。

第1章では、都市スケールの風の場合、温度場に関する研究と冷気流に関する研究及び建築、都市計画への応用についてレビューを行い、本論文の目的と構成を示した。

第2章では、森林などでの放射冷却による冷気の生成過程について検討を行った。植生や地物のどの部分でどの程度の冷気が生成されているのかという点について検討した。

被覆状態の異なる植生面での熱収支を考察し夜間の放射冷却量との関係について検討を行った。樹木、長草、短草ともに植生上端部の葉温が最も低くなっており、放射冷却により温度の低下した植生上端部の葉と顕熱の交換を行うことで、その周辺や上部の気温が低くなっていた。葉面積指数と植生高さを変化させて、夜間の大気冷却量に相当する顕熱輸送量を計算したところ、背の高い樹木の場合には葉面積指数が大きいほど大気が冷却しやすいことが示された。また、背の低い植物の場合には葉が粗であっても効率よく熱交換が出来れば冷却量が若干大きくなった。

第3章では、谷地形による冷気の集積過程について検討を行った。谷内の気温分布がどのように形成されるのかという点について谷筋に沿った気温の測定と浅水方程式モデルにより検討した。

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検討を行った。浅水方程式モデルにより、広域海陸風が弱い条件での冷気の集積、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た。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。これは冷気の集積効果を反映していると考えられる。

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気が流出してくる（最大で2程度低温な冷気）ために、比較的大きな市街地気温の低下が期待できる。

第4章では、対象地域を支配する夏季の典型的な風の場合、温度場に関する解析を、観測データとメソスケールの数値シミュレーションを用いて行った。計算モデルには、Mellor-Yamada型の乱流モデルを用い、近畿地方の流れ場、温度場の計算を行った。

計算を行う前に、気象台や大気汚染常時監視局の観測データなどを用いて、境界条件、初期条件について詳細な検討を行い、計算結果と比較する観測データを整備した。

その後、メソスケールの計算を行い、上述の計算条件、観測データに基づく風の場合、温度場の特性などの関係について調査した。典型的な夏季における海陸風循環の様子が再現されており、メソスケールモデルで知ることが出来る地形と土地利用の関係に基づく局地風循環が十分に表現出来ていた。

計算結果からは、気象条件は限定されるが、物理的メカニズムに従った典型的な風、気温の場が得られる。観測結果からは、メソスケールの現象よりも大きなスケールあるいは小さなスケールの影響を含む可能性があるが、統計処理を行うことで夏季の典型的な風、気温の

場が得られる。従って本研究では、この2つのデータを併用して都市熱環境に関する考察を行った。メソスケールモデルを気候解析に利用するにあたっては主に以下の点について検討した。

メソスケールモデルの気候解析より、観測データを参考に初期温位の分布や海水面温度などを修正することで、夜間の海風を再現することが出来た。計算結果と観測結果の風速分布の比較では、計算結果が若干山へ向かう風を過大評価する傾向が確認された。ネスティング手法を用いたため、対象とした神戸地域では観測結果と整合のとれた計算結果が得ることができた。そして、計算結果と観測結果から、昼間の南西方向から吹いてくる海風、夜間の六甲山から吹き降りてくる陸風を考慮した都市、建築の計画を行うべきであるとの提言案が導き出された。

第5章では、海陸風と冷気流の関係について検討を行った。海陸風の強さと冷気流の出現状況の関係について観測データに基づいて検討し、以下の結論を得た。

広域海陸風の風速が小さいときに冷気流の出現率が高い。谷口で確認された冷気流の風速は2m/s程度に集中していたが、広域の風が谷から市街地へ向かう条件のときには広域の風により強められて風速は4m/s程度にもなる。広域海陸風が強い場合には、谷の中で生成された冷気は谷底の気温を一時的に低下させるが市街地内の気温を低下させる前に広域の風によって吹き消される。広域海陸風が弱い場合には、谷の中で生成された冷気が市街地内で熱交換を行いながら徐々に気温を低下させる。ただし、山から離れると気温低下の効果は小さく、その時間もかなり遅れる。

以上のことから、広域海陸風が弱い条件に限り、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を期待できる。しかし、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。

第6章では、集積された冷気の市街地への流出過程について検討を行った。谷に集積された冷気が市街地へ流出し、どの程度の距離まで影響を及ぼし、どの程度気温を低下させるのかという点について検討した。

実測結果より、地上4.0m、1.5mの気温及び地表面温度の観測結果を比較すると、昼間の日射の蓄熱の影響で地表面温度がどの時間帯においても気温より高く保たれており、市街地へ流入している冷気流は文字通り市街地を冷却する能力を持っていると考えられる。谷口周辺市街地の気温は時間とともに徐々に低下し、朝方には対象地域内の気温がほぼ一緒になった。このことより、朝方には冷気が領域内を満たしていたと考えられる。気温分布のパターンは時間帯によってあまり変化せず、川沿い地域において周辺市街地より常に低温である傾向であった。川沿い地域では北風の風速が大きいことから、冷気流が流れ込みやすくなっており、冷気流の流入に伴う気温低下の効果が大きく表れていると考えられる。

計算結果は、地表面温度分布の影響を受けて、川沿いの地域において気温が低下し、南部の密集市街地において高温となり、気温分布の傾向は観測結果とよく一致した。計算結果の対象領域内での気温の幅はほぼ観測結果と一致した。風ベクトルの分布は、地上1.5mの観測結果は建築物等の障害物による局所的な影響を受けているのに対し、計算結果はある程度なめらかな粗度分布に応じた平均的な風ベクトル分布になっているため、十分に一致しているとは言えない。今後は、気温と同様に局所的な影響を受けにくい高さでの測定法を検討する必要があるだろう。市街地の上流側の粗度を小さく設定した計算では、粗度が小さくなり熱伝達率が小さくなったため、高温な地表面から空気への熱の輸送が小さくなり、その部分の気温が若干低下した。しかしながら、粗度の大きな市街地部ではすぐに高温になり、劇的

な熱環境の改善は見られなかった。

また，土地利用別に地表面の熱収支を計算した結果，顕熱が計算領域内で正と負の値を持つため，冷気流は地表面の条件によって冷気を供給している場合（市街地に対して）と，逆に高温な熱を供給している場合（森林部に対して）があることが示された。

今後の課題としては，市街地内において冷気流を有効に利用する都市計画的及び建築的方法について検討する必要があると思われる。

## 本研究に関する発表論文一覧

### A . 原著論文

- 1 . 竹林英樹，森山正和，糸川文崇：夏季夜間における山麓冷気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，99-104，2001
- 2 . 竹林英樹，森山正和，村上周三，大岡龍三，持田灯，芝池英樹，吉田伸治：数値モデルによる計算結果と観測データを併用した都市スケールの気候解析，日本建築学会計画系論文集，第556号，63-68，2002
- 3 . 竹林英樹，森山正和：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，日本建築学会計画系論文集，第558号，57-61，2002
- 4 . 竹林英樹，森真佐雄，芝池英樹，森山正和：斜面冷気流における冷氣生成機構に関する研究，日本建築学会技術報告集，第16号，181-184，2002

### B . 国際会議

- 1 . Ooka, R., Murakami, S., Mochida, A., Kim, S., Naito, K., Moriyama, M., Takebayashi, H. and Shibaike, H.: CFD Analysis of Urban Climate in Kobe City, Proc. "Klimaanalyse fuer die Stadtplanung" -Second Japanese-German Meeting-, 271-278, 1997
- 2 . Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Study on Wind Distribution in Kobe City influenced by Land and Sea breezes around Osaka Bay, Proc. Symposium on Advances in Regional Climatology, 125-126, 1998
- 3 . Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Study on Cooling Effect in a Built-up Area by Cold Drainage Flow in Summer Night, Proc. International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology (CD-ROM), 1999
- 4 . Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Cooling Effects on a Built-up Area caused by Cold Air Drainage in Summer Night, Proc. 3rd Japanese-German Symposium on Urban Climatology, 24-25, 2000
- 5 . Takebayashi, H. and Moriyama, M.: Cooling Effects on A Built-up Area Caused by Cold Air Drainage in Summer Night, Proc. International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering, 27-32, 2001
- 6 . Takebayashi, H., Moriyama, M., Shibaike, H.: Analysis of the distribution of air temperature in the built-up area facing the mouth of the valley, Proc. Fourth Symposium on the Urban Environmnet, 58-59, 2002

### C . 著書

- 1 . 森山正和，竹林英樹：都市環境のクリマアトラス 気候情報を活かした都市づくり 8 . 神戸 冷気流もある斜面都市，ぎょうせい，67-76，2000

### D . 学術講演

- 1 . 竹林英樹，森山正和：神戸地域の都市気候に関する研究 - 数値計算による気流分布性状の解析 - ，日本建築学会近畿支部研究報告集，185-188，1996



2. 竹林英樹, 森山正和: 神戸地域の都市気候に関する研究 - 数値計算による気流分布性状の解析 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 565-566, 1996
3. 竹林英樹, 森山正和: 観測データによる神戸地域の気流解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 161-164, 1998
4. 竹林英樹, 森山正和, 村上周三: 観測データによる神戸地域の風系に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 677-678, 1998
5. 竹林英樹, 森山正和, 村上周三, 芝池英樹, 金相進: 数値解析による神戸地域周辺の風系に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 885-886, 1999
6. 系川文崇, 森山正和, 竹林英樹: 六甲山南麓市街地における夏季夜間の風特性と気温分布に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1421-1424, 1999
7. 竹林英樹, 森山正和, 村上周三, 芝池英樹, 金相進: 数値解析による神戸地域の風系に関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会論文集, 1425-1428, 1999
8. 系川文崇, 竹林英樹, 森山正和: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その1 冷気流の出現頻度と市街地における影響距離, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 329-332, 2000
9. 竹林英樹, 新宅俊之, 森山正和: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その2 冷気の集積、流出過程, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 333-336, 2000
10. 森真佐雄, 竹林英樹, 森山正和: 夏季夜間の冷気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, 337-340, 2000
11. 系川文崇, 竹林英樹, 森山正和: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その1 冷気流の出現頻度と市街地における影響距離, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1125-1126, 2000
12. 竹林英樹, 森山正和: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その2 冷気の集積、流出過程, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1127-1128, 2000
13. 森真佐雄, 竹林英樹, 森山正和: 夏季夜間の冷気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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1129-1130, 2000
14. 宮井直人, 竹林英樹, 芝池英樹, 森山正和: 京都里山斜面の冷却と冷気生成性状に関する実測 その1 実測の概要と冷気生成率パラメータに関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1157-1158, 2000
15. 芝池英樹, 竹林英樹, 森山正和, 宮井直人: 京都里山斜面の冷却と冷気生成性状に関する実測 その2 夜間温度および超音波風速計顕熱流束の変動性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1159-1160, 2000
16. 森真佐雄, 竹林英樹, 森山正和, 芝池英樹: 斜面冷気流における冷気生成メカニズムに関する研究, 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, 57-60, 2001
17. 森真佐雄, 竹林英樹, 森山正和: 斜面冷気流における冷気生成メカニズムに関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 629-632, 2001
18. 和田ゆりか, 竹林英樹, 森真佐雄, 芝池英樹, 森山正和, 佐藤嘉昌: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その4 実測結果に基づく谷口周辺市街地の気温分布に関する検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 385-388, 2002

19. 竹林英樹, 和田ゆりか, 森真佐雄, 芝池英樹, 森山正和, 佐藤嘉昌: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その5 数値計算による谷口周辺市街地の気温分布に関する検討, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 389-392, 2002
20. 和田ゆりか, 竹林英樹, 森真佐雄, 芝池英樹, 森山正和, 佐藤嘉昌: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その5 実測結果に基づく谷口周辺市街地の気温分布に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 647-648, 2002
21. 森真佐雄, 竹林英樹, 和田ゆりか, 芝池英樹, 森山正和, 佐藤嘉昌: 夏季夜間の冷気流による市街地冷却効果に関する研究 その6 数値計算による谷口周辺市街地の気温分布に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 649-650, 2002

#### E. その他(審査付き論文)

1. Moriyama, M., Takebayashi, H. and Fukumoto, K.: Effects of Green Areas on Urban Air Temperature by Numerical Solution, 神戸大学大学院自然科学研究科紀要, 第15号A, 101-115, 1997
2. 森山正和, 竹林英樹: 正規化植生指標(NVI)と一次元熱収支モデルに基づいたクリマトープ図の作成手法に関する研究, 日本建築学会計画系論文集, 第518号, 61-65, 1999
3. 森山正和, 竹林英樹, 宮崎ひろ志: 一次元熱収支モデルによる夏季の都市気温シミュレーションにおける蒸発効率と人工排熱成分の推定に関する一手法, 日本建築学会計画系論文集, 第519号, 85-91, 1999
4. Moriyama, M. and Takebayashi, H.: Making method of "Klimatope" map based on normalized vegetation index and one dimensional heat budget model, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, 211-220, 1999
5. 森山正和, 竹林英樹: ランドサットTMデータを用いた制約条件付き最小二乗法による土地被覆解析と緑被環境評価 - 神戸市震災被害地域におけるケーススタディー -, 日本建築学会技術報告集, 第12号, 145-150, 2001
6. 佐橋秀康, 森山正和, 竹林英樹: 都市地表面アルベドの推定方法に関する研究, 神戸大学大学院自然科学研究科紀要, 第19号B, 185-190, 2001
7. 森山正和, 河野仁, 吉田篤正, 宮崎ひろ志, 竹林英樹: 都市における樹林のクールスポット効果に関する実測データ解析, 日本建築学会計画系論文集, 第541号, 49-56, 2001
8. クリマアトラスの実用化WG: クリマアトラスの実用化に関する研究 ワークショップによる計画指針図作成の試み, 日本建築学会技術報告集, 第14号, 207-210, 2001
9. 貢暁芳, 森山正和, 竹林英樹: 土地利用の変遷が地域の熱環境に与えた影響に関する研究, 神戸大学大学院自然科学研究科紀要, 第20号B, 185-192, 2002
10. 森山正和, 宮崎ひろ志, 吉田篤正, 竹林英樹, 足永靖信, 成田健一, 依田浩敏, 土井正: 市街地形態の異なる街区の温熱環境比較に関する実測研究, 日本建築学会技術報告集, 第15号, 199-202, 2002
11. Takebayashi, H., Shibaike, H., Moriyama, M. and Sato, Y.: Land Cover Analysis using Fine Resolution Satellite Data and GIS Data, Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol.1, No.2, 119-122, 2002

## 謝辞

本研究は、神戸大学工学部建設学科教授森山正和先生のご指導のもとに実施してきた成果をとりまとめたものであります。研究を遂行するにあたって、終始懇切かつ熱心なご指導、ご鞭撻を賜りました先生に衷心より感謝の意を表します。

本論文の内容について有益なご意見を賜りました神戸大学教授山中大学先生、同蔦原道久先生、同中山昭彦先生に謹んで感謝の意を表します。

京都工芸繊維大学工芸学部助教授芝池英樹先生には、本論文をまとめるにあたり、適切なお指導と暖かい激励を賜りました。学生時代から今日に至るまで、公私にわたりご指導頂いております先生に感謝の意を表します。

姫路工業大学宮崎ひろ志先生、独立行政法人建築研究所足永靖信先生、姫路工業大学教授河野仁先生には研究全般にわたり、たびたび貴重なご助言、激励を頂きました。

慶應義塾大学教授村上周三先生、東北大学助教授持田灯先生、東京大学助教授大岡龍三先生、東京大学元研究員金相進先生、福井大学講師吉田伸治先生には、第4章のメソスケールの計算の部分において多大なるご協力を頂きました。

日本建築学会のクリマアトラスの実用化WG、都市気候モデリングWG、住宅換気性能WG、リモートセンシングWGの委員の先生方、及び、研究会、勉強会などを通してお世話になった先生方、神戸市をはじめとする行政関係者の方々、森山研究室の研究に御協力頂いている企業の方々には、度々貴重なご助言を頂きました。

本研究を遂行するにあたり、千田美保技官をはじめとする森山研究室の皆様にも多大な協力を頂きました。特に、糸川文崇氏、新宅俊之氏、森真佐雄氏、佐藤嘉昌氏、和田ゆりか氏には、種々の野外観測を全面的に協力頂きました。

以上、ここに記して謝意を表します。