

冬季山越え気流吹送時の山地斜面に沿った温位分布の特徴

渡 来 靖* 重 田 祥 範* 中 川 清 隆*

キーワード：気象観測、温位、山越え気流

1. はじめに

熊谷から前橋にかけての関東平野北西内陸域は、北側には帝釈山地や足尾山地、北西側には越後山脈、西～南西～南側には関東山地と三方を山に囲まれた半盆地状の地形となっており、この地域の気候に多大な影響を及ぼしている。例えば、この地域は暖候期にしばしば猛暑が発生し、日本の中でも真夏日や猛暑日が出現しやすいが、その一因として、内陸にあり海風の影響を受けにくいことや周辺山地の存在による谷風循環や山越え気流の影響などの地形的要因が考えられる。2007年8月16日に熊谷では日最高気温40.9℃という記録的猛暑が発生したが、その要因の一つとして越後山脈越えの北西風フェーンが発生が指摘されている（篠原ほか2009；渡来ほか2009；Takane and Kusaka 2011）。

冬季、日本付近は西高東低冬型の気圧配置が頻出するため、関東平野では北西寄りの季節風が卓越する日が多い。このとき関東平野北西内陸域は、風上側に位置する越後山脈を横切る山越え気流が吹くこととなり、地上の気温や風などは山地の影響を受けていると考えられる。局所的に特に強い北西寄りの風が吹くと、その風は「空っ風」や「赤城おろし」と呼ばれている。宮・日下（2009）は、冬季15年分のアメダスデータから空っ風の気候学的解析を行い、空っ風吹送時には日中強く夜間に弱い風速の日変化が明瞭であることや、相対湿度が低く日射量が多くなること、また大気安定度が比較的弱くなることなどの特徴が見られるとした。また、空っ風はフェーンの特徴を伴っており、さらに熱対流混合によって日中の地上風が強まっていることを示唆した。

斉藤（1994）で詳細に解説されているように、気流が山岳を横切る際の大気の二次元的な振る舞いは、風上側の風速や山の高さ、大気の安定度によって変化する。しかし、実際の山地は完全に二次元的ではなく、山越え気

流は地形影響で三次元的な振る舞いをする。大気が十分な安定成層であれば、山を水平方向に迂回する流れが卓越し、山脈の鞍部や谷筋に沿った流れが強まることになる。Saito（1992）は、鞍部を持った山脈を横切る山越え気流の数値実験を行い、特に強いおろし風が鞍部風下側に発生する傾向を示している。このような谷筋を抜ける気流の影響は、アルプス山脈のフェーンにおいても指摘されている。アルプスフェーンに関する一連の集中観測およびモデル研究結果をまとめた Drobinski et al.（2007）のレビューによると、アルプスの一部の谷ではフェーンのはじめの段階として谷筋を抜ける地峡風（浅いフェーン）が吹き、その後主稜線を越える山越え気流（深いフェーン）に移行する事例が見られることや、浅いフェーンは谷出口で発散して上空からの補償流を導くために昇温が著しい場合があることなどが示されている。関東平野北西内陸域周辺の山地には、越後山脈に刻まれる魚野川－利根川の谷筋や、関東山地の千曲川－碓氷川の谷筋といった、地峡風の発生が示唆される谷筋が存在するが、山越え気流に関してこれらの役割に着目した研究はこれまであまりなされてこなかった。

関東平野北西内陸域に季節を問わず影響を与える山越え気流や地峡風の構造、形成メカニズムについて詳しく調べるためには、周辺の上信越山岳域における時空間的に密な観測と、数値シミュレーションとをあわせて研究を進めていくことが重要である。しかし、既存の気象庁観測網では上信越山岳域で十分密な観測値が入手できるとは言い難く、また利用できる気象要素も限られる。そこで我々のグループでは、「立正大学上信越山岳域高密度気象観測プロジェクト」と称して、特に上信越山岳域を横切る谷筋に沿った測線に時空間的に密な地上気象観測網を展開し、連続観測を行っている。本稿ではそのデータをもとに、冬季の山越え気流吹送時と非吹送時のそれぞれの事例における谷筋斜面に沿った地上大気場の特徴

* 立正大学地球環境科学部

を明らかにすることを目的とする。

2. 観測概要と使用データ

2.1 上信越山岳域高密度気象観測

前述の通り、我々のグループでは上信越山岳域における高密度気象観測を実施している。この観測では、上信越山岳域を横切る山越え気流と地峡風をターゲットとするため、山脈の主稜線にほぼ直交する比較的規模の大きな谷筋に沿った2本の測線を設定し、地上観測網を展開した。1つは、三国峠を挟んで日本海側は魚野川、太平洋側は利根川が刻む谷筋に沿った測線（以下、魚野川－利根川ラインと呼ぶ）、もう1つは碓氷峠を挟んで日本海側は千曲川、太平洋側は碓氷川の谷筋に沿った測線（千曲川－碓氷川ライン）である。観測点は魚野川－利根川ラインに沿って16地点、千曲川－碓氷川ラインに沿って7地点、さらに関東平野北西端に位置する赤城山の山頂付近に1地点の計24地点を設けている。また、観測要素は気温、相対湿度、気圧の3種である。これらの気象要素を同時観測することにより温位や相当温位などの保存量を導出でき、地上付近の大気の挙動を推測することを想定している。観測の概要に関して、詳しくは重田ほか（2013）を参照されたい。

2.2 使用データ

上信越山岳域高密度気象観測の計24地点のうち、魚野川－利根川ラインに沿った計16地点（図1の白丸）のデータを利用した。対象期間は2013年12月から2014年3月までの冬期4ヶ月間であり、使用した気象要素は気温、相対湿度、気圧の3要素、観測のサンプリング間隔は10分である。

本研究では、関東平野北西部で好天に恵まれ、平年より日中の気温が顕著に高かった2事例（2014年2月26日と28日）について解析を行った。我々の観測項目には風データが無いため、魚野川－利根川ラインに近い前橋地方気象台と、沼田、みなかみ、湯沢、小出、長岡の各アメダス観測点で観測された地上風向・風速も利用した。また、前橋地方気象台については、気温、相対湿度、日照時間のデータも参照した。我々の観測点と気象庁気象官署・アメダス地点との位置関係は図1に示されている。さらに、ワイオミング大学 web サイトより提供されている輪島、館野のゾンデ観測値を利用して、事例日の日本海側と太平洋側の成層状態を確認した。

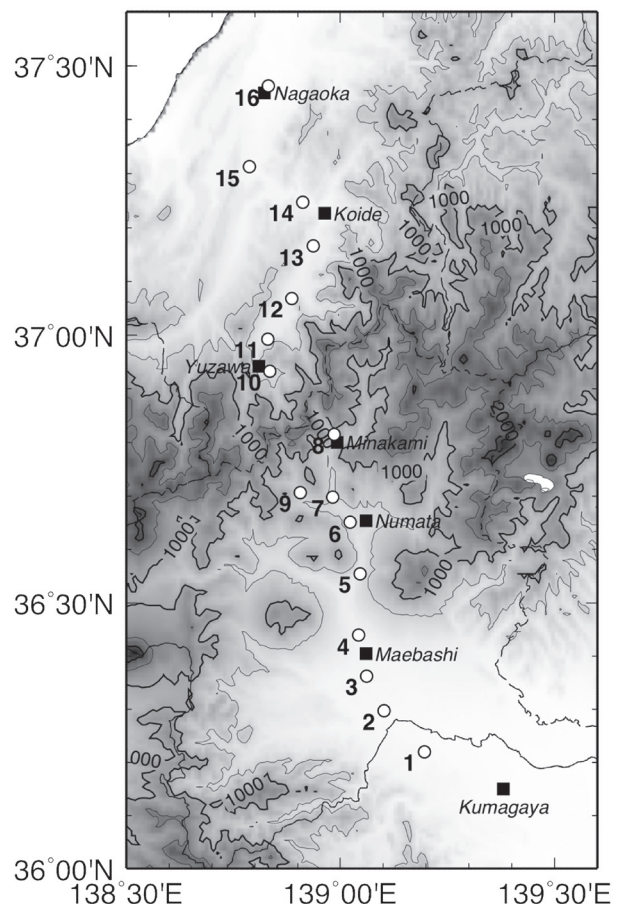


図1 上信越山岳域における高密度地上気象観測網のうち、今回データを使用した16地点の位置（白丸）。数字は地点番号。等値線は標高（等高線の間隔は500m）、破線は県境。黒四角は観測点に近い主な気象官署・アメダス地点を示す

3. 結果

3.1 2013/14年冬期の地上温位分布

図2は、上信越山岳域高密度気象観測データを元に作成した2013年12月～2014年3月の4ヶ月平均地上温位分布である。太平洋側斜面（図2の中央太線より下側）と日本海側斜面（同上側）とを比較すると、斜面に沿った温位分布に大きな特徴の違いが見られる。太平洋側斜面については、特に日中、斜面中腹の標高約100～500mでほぼ等温位となっている。また、標高100m以下の平野部では中腹よりやや高温位となっている一方、500m以上の斜面上では中腹よりやや低温位を示しており、標高約600m未満の太平洋側斜面では低標高ほど高温位となる傾向が見られる。一方、日本海側斜面については、標高約100m以上の斜面では高標高ほど高温位となる傾向が見られる。

図2は、晴天日も荒天日も含めた全期間の平均である。ここで、前橋地方気象台の観測値に基づき、日照時間8

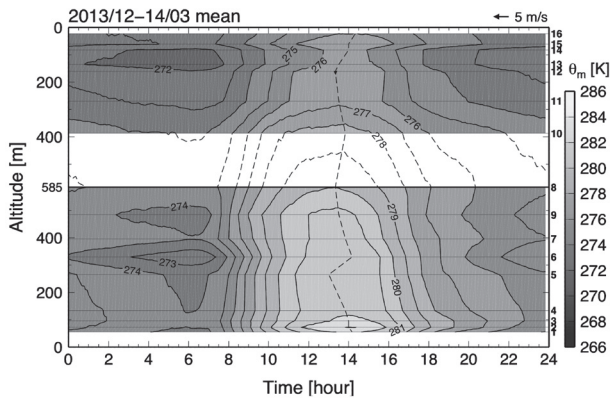


図2 魚野川－利根川の谷筋に沿った高密度地上観測データに基づく2013年12月～2014年3月の4ヶ月平均温位分布。縦軸は測線に沿う標高で、中央太線より上側が日本海側、下側が太平洋側。破線は日中の温位極大値を結んだ線

時間以上の晴天日かつ日最多風向が西北西～北北西、さらに日平均風速が3 m/s以上の日を山越え気流日と定義したところ、該当したのは全121日中51日（42%）であった。山越え気流日のみについて温位の合成図を作成したところ、その特徴は図2とほぼ同様であった（図省略）。

3.2 2014年2月26日の事例

対象事例の一つである2014年2月26日は、前橋地方気象台における卓越風向は北西であったが、日平均風速は2.2m/sと平均してやや風の弱い日であった。図3(a)は、26日9時の地上天気図を示す。能登半島のすぐ北に中心を持つ移動性高気圧が日本列島を広く覆い、九州や南西諸島を除く地域が高気圧の勢力下となっている。関東周辺では一日中高気圧に覆われ晴天となった。図4の灰色

で示したグラフは、前橋の気温および相対湿度を示す。前橋の気温は朝6時頃に0℃近くまで低下したが、日の出とともに気温は上昇し、14時37分に日最高気温13.1℃（平年差+2.8℃）を記録した。その後、気温は夕方から夜間にかけて徐々に低下しており、晴天日の典型的な日変化を示している。相対湿度は気温と逆相関の傾向を示し、14時43分に日最小湿度27%となった。

図5は、日本海側の輪島と太平洋側の館野における26日9時のゾンデデータに基づく鉛直プロファイルである。800～900hPa層に逆転層が見られ、それより上層の空気は非常に乾いている。移動性高気圧に伴う沈降性逆転層と考えられる。相当温位や飽和相当温位はおおよそ上空ほど増加する傾向を示しており、大気は非常に安定な状態であるといえる。また、輪島と館野の鉛直プロファイルが非常に類似していることがわかり、大気下層の成層状態は日本海側と太平洋側でほとんど違いがなく、温位の水平勾配が非常に小さい。

上信越山岳観測データによる気温、相対湿度、温位のアイソプレスを図6に示す。地上気温（図6a）を見ると、日中・夜間に関わらず、標高100m以下の平野部ではそれ以上の斜面上に比べてやや高温傾向を示すが、標高約100～400mの斜面上ではほぼ様な気温分布となっており、等標高における日本海側と太平洋側の差も小さい。相対湿度（図6b）は全体的に日本海側斜面上より太平洋側斜面上の方で値が低いことと、日中の標高約400m以上で非常に乾燥しているのが特徴的である。観測された気温と気圧を用いて算出された温位の分布（図6c）を見ると、4ヶ月平均の分布図（図2）とは異なり、どちら

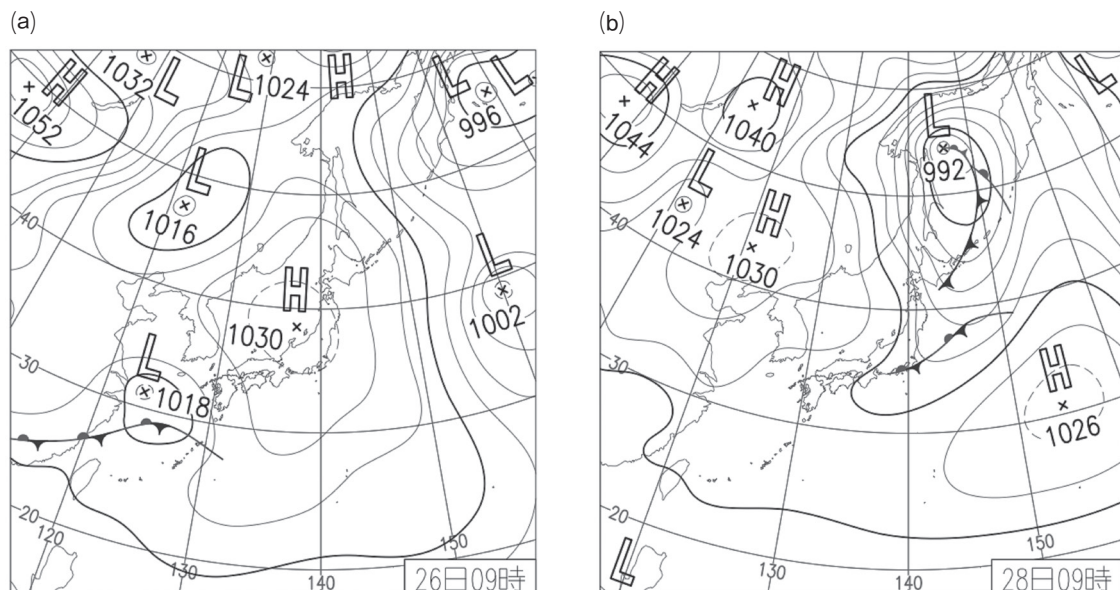


図3 (a)2014年2月26日および(b)28日の地上天気図（気象庁より）。どちらも午前9時のもの

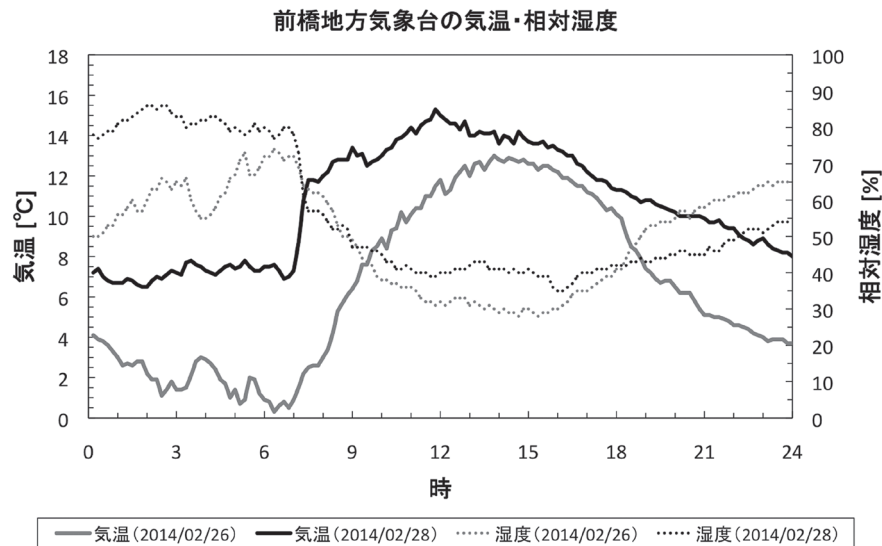


図4 2014年2月26日（灰線）および28日（黒線）における、前橋地方気象台の地上気温（実線）および相対湿度（点線）の時間変化

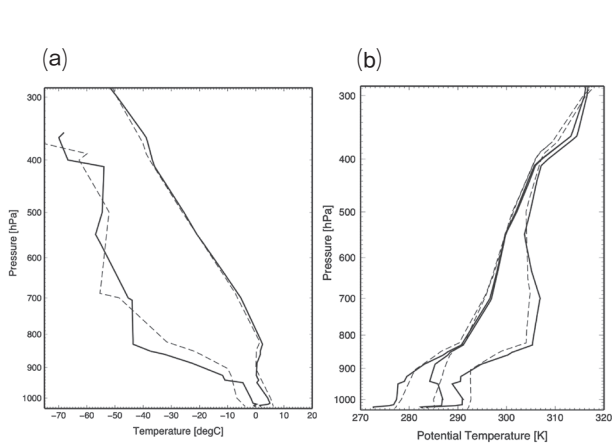


図5 2014年2月26日9時における輪島（実線）および館野（破線）の鉛直プロファイル。(a)は（図中右寄りから）気温と露点温度、(b)は（左寄りから）温位、相当温位、飽和相当温位を示す

の斜面も高高度ほど増加する傾向が見られ、山脈に対して線対称に近い分布となっている。日中の斜面上はほぼ等温位であるが、標高約400m以上になると温位がやや高くなっている。この領域はちょうど非常に乾いた空気の領域と一致することから、移動性高気圧に伴う沈降流の影響が示唆される。アイソプレスには、測線に近い気象台・アメダス地点の地上風を、観測点の標高に合わせて記しているが、日中の地上風は斜面上で山脈に収束する成分が見られており、谷風循環の形成が示唆される。しかし、上空は高気圧の沈降流によって抑えられているため、谷風循環は形成されても弱く、背の低い循環であると推測される。

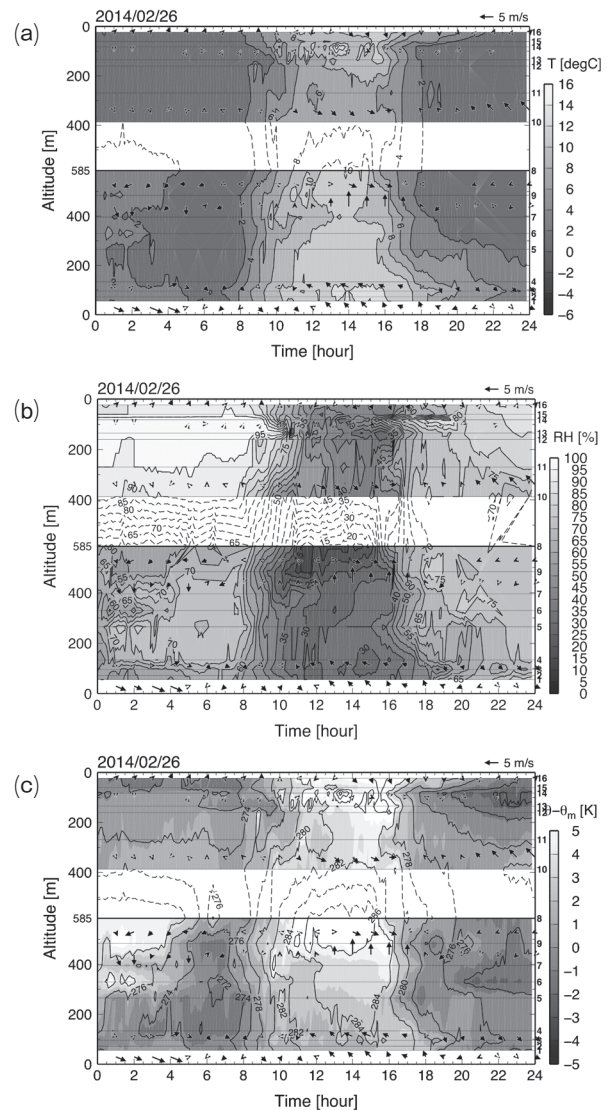


図6 2014年2月26日における、上信越山岳域観測データによる(a)地上気温、(b)相対湿度および(c)温位のアイソプレス。縦軸は図2と同様。矢印は測線に近い気象台・アメダスの地上風時別値を示す

3.3 2014年2月28日の事例

一つ目の事例の翌々日にあたる2014年2月28日は、前橋地方気象台における日照時間が9.2時間を記録した晴天日であり、日最多風向が北北西、日平均風速が4.4m/s、日最大風速は8.6m/s（14時02分；風向は北北西）であった。図3(b)に28日9時の地上天気図を示すが、南北2つの低気圧（南側は9時までに消滅）が日本付近を通過し、冬型の気圧配置に移行した。9時に関東の南に掛かる停滞前線の影響で、前橋では4時頃まで弱い降水があった。以降は止んだものの一日を通して雲量は多かった（日平均雲量9.5）。ただし前述の通り日照時間は9.5時間と長く、日中の雲は薄曇りが主であった。風は8時前後から北西～北北西の風がほぼ一日を通して吹いており、すなわち関東平野北西部では山越え気流が卓越していた。図4の黒線が28日の前橋の気温・相対湿度を示す。28日の前橋の気温日較差は26日に比べ小さいが、日最高気温は28日の方が高い（15.5℃）ものの朝方の気温も高いことから、28日は前日からの暖気が残る朝方の気温が下がらなかったことと、日中の雲量の多さが影響したと考えられる。また、7時から8時にかけて気温が4.7℃/時の割合でやや急激に上昇し、同時に相対湿度が22%/時の割合で低下したのが特徴的である。おおよそこの時間帯を境に北西寄りの山越え気流が顕著になることから、これらの関連性が示唆される。

28日9時の鉛直プロファイル（図7）を見ると、750hPa面を境に下層の湿った気層と上層の乾いた気層に分けられ、この特徴は日本海側の輪島も太平洋側の館野も共通している。館野の1000hPa以下の地上付近はほとんど飽和しており、雲が存在すると考えられる。また、輪島と館野の温位プロファイルを比較すると、例えば290Kが輪

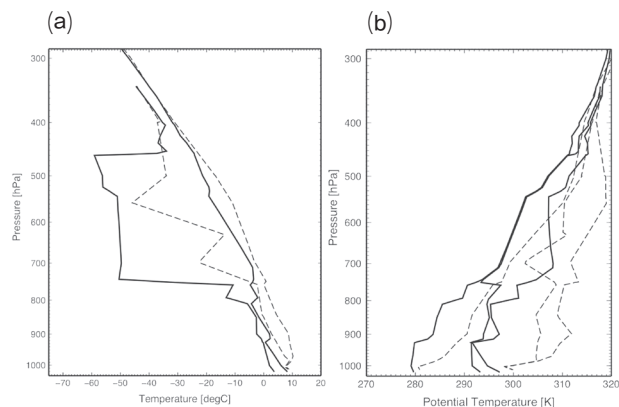


図7 2014年2月28日9時における輪島（実線）および館野（破線）の鉛直プロファイル。(a)は（図中右寄りから）気温と露点温度、(b)は（左寄りから）温位、相当温位、飽和相当温位を示す

島では約800hPaに位置するのに対し館野では約900hPaと、高度にして約1000mの差がある。このことは、日本海側と太平洋側で温位の水平勾配が大きいことを示唆しており、このような特徴は1000～400hPa層において見られる。

図8は、28日における山地斜面に沿った気温、相対湿度、温位のアイソプレスである。気温（図8a）や相対湿度（図8b）は日本海側斜面と太平洋側斜面でコントラストが大きく、日本海側では低温高湿、太平洋側では高温低湿となっている。太平洋側では8時以降日中を中心に、低標高ほど高温低湿となる分布を示している。温位の分布（図8c）を見ると、日中の斜面上はどちらの斜面も高度によらず等温位に近いが、太平洋側と日本海側の温位差が大きく、太平洋側は約10Kも高い。斜面と平野

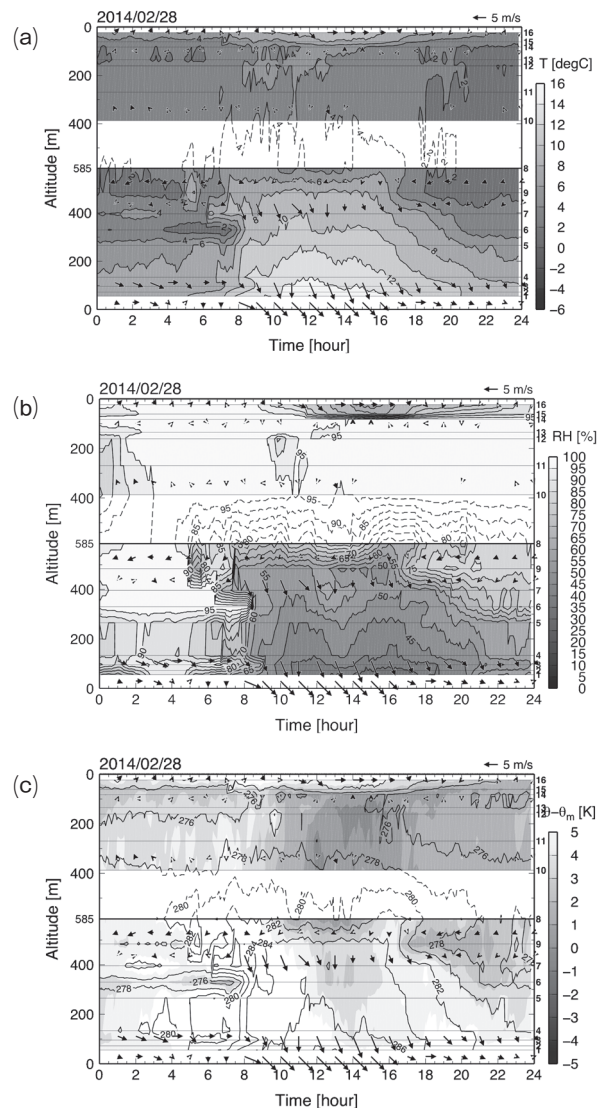


図8 2014年2月28日における、上信越山岳域観測データによる(a)地上気温、(b)相対湿度および(c)温位のアイソプレス。縦軸は図2と同様。矢印は測線に近い気象台・アメダスの地上風時別値を示す

部の温位を比較すると、日本海側では平野部の方がやや低温位であり、一方で太平洋側では平野部の方がやや高温位となっていて、図2で見られた冬期平均の特徴に類似している。しかし、28日の温位分布は冬期平均に比べて日本海側と太平洋側のコントラストが強調されている。地上風を見ると、太平洋側では斜面がおおよそ等温位となる時間帯・高度で平野向きのやや強い風が観測されており、斜面下降風とそれに伴う断熱昇温が示唆される。一方、日本海側斜面の風は、一日を通して静穏である。これらのことから、28日の山越え気流は8時以降日中にかけて、日本海側下層のブロッキングとそれに伴い太平洋側斜面に沿って吹き下ろす力学的フェーンの特徴を備えていたと推測される。

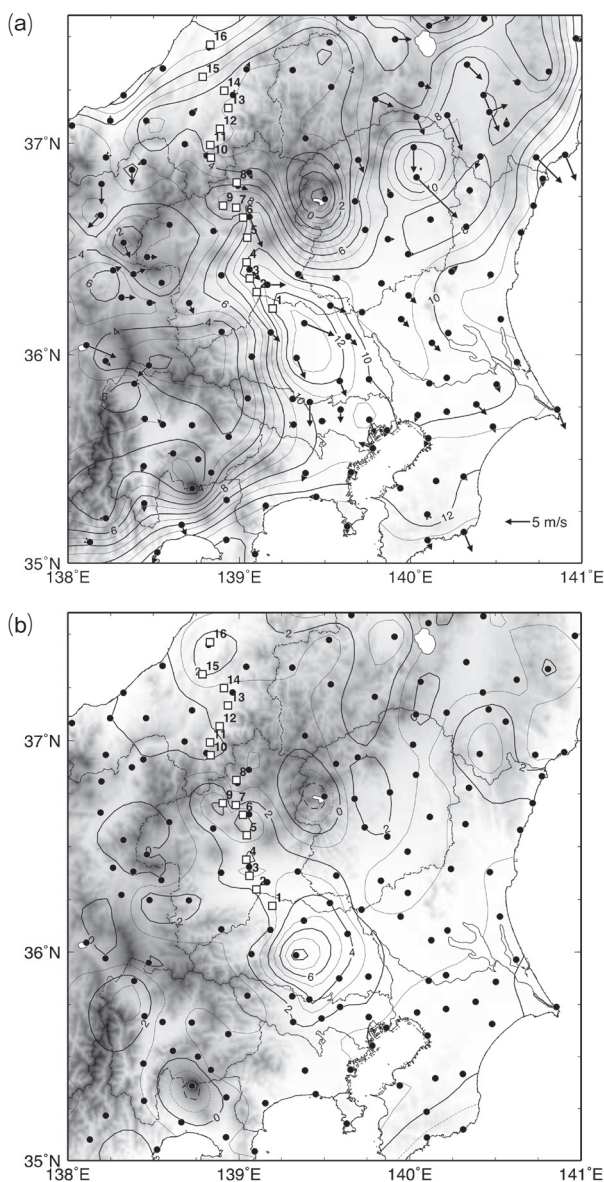


図9 (a)2014年2月28日8時における地上気温（等値線；℃）と地上風（矢印）、および(b)28日7時から8時にかけての地上気温上昇量（℃／時）の分布

図9(a)は、前橋地方気象台の観測値で急激な昇温および相対湿度の低下が見られた直後の28日8時における地上気温・風の分布であり、図9(b)は28日7時から8時までの1時間に地上気温がどれだけ上昇したかを示している。これらの図は気象庁気象官署・アメダス地上観測値に基づいているが、地上気温や地上気温差については上信越山岳域高密度気象観測プロジェクトの地上観測点（図中の四角）での気温データも利用して作成した。28日8時の地上気温（図9 a）を見ると、高温な領域が利根川の谷筋から関東平野北西部にかけて、北西－南東方向にのびるように広がっている。この高温域は、北西寄りの地上風が比較的強く吹いている領域と対応している。また、図9(b)に示した前1時間の気温上昇量が2℃／時を超える領域とよく一致しており、山越えの斜面下降風に伴うフェーン現象が起こったと考えられる。埼玉県中部においては、28日8時の気温が12℃を超え、気温上昇量も4℃／時を超えており特に昇温が著しい。図9(a)の地上風を見ると、利根川の谷を抜けた地上風が埼玉県中部付近で水平方向に大きく発散しているようにも見える。いわゆる浅いフェーンの影響が加わったためにこの領域で特に昇温が著しくなった可能性もあるが、さらなる調査が必要であろう。

4. まとめ

本研究では、2013/14年冬の関東平野北西内陸域において、日中に顕著な高温となった2事例における山岳斜面に沿った地上大気場の特徴を、我々が展開した地上観測データを利用して明らかにすることを目的とした。移動性高気圧の勢力下であり山越え気流の卓越しなかった2014年2月26日と、冬型の気圧配置で山越え気流の卓越した2014年2月28日の2事例について調べ、26日は高気圧による沈降流と斜面に沿った背の低い谷風循環、28日は風上側のブロッキングに伴う力学的フェーンが見られると推測された。

山岳斜面やその周辺の大気の振る舞いがどのようなになっているのか、また測線に選んだ谷筋がアルプスで見られる浅いフェーンのような特徴を持つのかといった疑問を検討するには、数値モデルを併用して調査することが有効である。さらに、本研究は山越え気流が卓越した事例としなかった事例それぞれ1事例のみの解析であり、明らかになった特徴が一般的であるかはさらなる事例解析や統計解析が必要である。これらについては今後の課題としたい。

謝 辞

本研究は、立正大学上信越山岳域高密度気象観測プロジェクトの成果の一部である。

参考文献

- Drobinski, P., R. Steinacker, H. Richner, K. Baumann-Stanzer, G. Beffrey, B. Benech, H. Berger, B. Chimani, A. Dabas, M. Dorninger, B. Dürr, C. Flamant, M. Frioud, M. Furger, I. Gröhn, S. Gubser, T. Gutermann, C. Häberli, E. Häller-Scharnhorst, G. Jaubert, M. Lothon, V. Mitev, U. Pechinger, M. Piringer, M. Ratheiser, D. Ruffieux, G. Seiz, M. Spatzierer, S. Tschannett, S. Vogt, R. Werner and G. Zängl, 2007: Föhn in the Rhine Valley during MAP: A review of its multiscale dynamics in complex valley geometry. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **133**, 897-916.
- 宮由可子, 日下博幸, 2009: 鉛直構造に着目した空っ風の気候学的研究. 地理学評論, **82**, 346-355.
- Saito, K., 1992: Shallow water flow having a lee hydraulic jump over a mountain range in a channel of variable width. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 775-782.
- 齊藤和雄, 1994: 山越え気流について (おろし風を中心として). 天気, **41**, 731-750.
- 重田祥範, 渡来靖, 中川清隆, 2013: 関東平野北西部で発生する猛暑の形成機構解明を目指した広域気象観測網の構築. 日本地理学会2013年春季学術大会シンポジウム発表論文集, 7-10.
- 篠原善行, 眞下国寛, 桜井美奈子, 須永次雄, 2009: 関東地方で日最高気温40.9℃を超えた2007年夏の高温その2 - JMANHMによる日最高気温の再現実験と高温要因の考察. 天気, **56**, 543-548.
- Takane, Y. and H. Kusaka, 2011: Formation mechanisms of the extreme high surface air temperature of 40.9℃ observed in the Tokyo metropolitan area: Considerations of dynamic foehn and foehnlike wind. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1827-1841.
- 渡来靖, 中川清隆, 福岡義隆, 2009: 領域気象モデルを用いた関東平野中央部における2007年8月15-16日の猛暑の数値シミュレーション. 日本生気象学会雑誌, **46**, 35-41.

Characteristics of the Potential Temperature Distribution along the Downslope Wind in Winter

WATARAI Yasushi*, SHIGETA Yoshinori*, NAKAGAWA Kiyotaka*

*Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

Key words: meteorological observation, potential temperature, wind across a mountain

