

長野市におけるドップラーライダーを用いた山風の観測と WRF による数値実験

高 咲 良 規* 吉 崎 正 憲** 鈴木パーカー明日香** 渡 来 靖**
武 井 祐 興*** 榎 原 保 志**** 浜 田 崇*****

キーワード：山風、ドップラーライダー、裾花川、ハイドロリックジャンプ

1. はじめに

山風は一般に夜間に谷底が冷やされ、その冷却された空気が斜面を下ることによって起こる局地循環であるが、局地風の形成には地形による力学的作用と温度差に起因する熱的作用があり、山風は両方の作用によって起こることも言われている（浅井1996）。また、長野市は山脈に囲まれていることや市街地内外を含め、千曲川、犀川、裾花川の3つの河川があることで、複雑な地形と川や谷の走向に沿った特有の強い風が吹くことがある。その1つとして北西側の裾花川谷口では、夜間から明け方にかけて吹く冷気をともなった強い山風（裾花川谷口ジェット）が報告されており、ヒートアイランドを緩和する効果があるとされている（長野環境研究保全研究所 2009, 浜田・一ノ瀬 2011）。ヒートアイランドと山風の研究について、狩野・三上（2003）では、東京都青梅市において山風の解析を行い、谷の出口付近では山風が吹走する際に安定層の下に接地中立層が形成していたことと、谷口と市街地では気温の低下と水蒸気量の分布に変化が見られたことを示した。しかし、山風の流入による気温低下のメカニズムや山風の時間変化はまだ解明されていない点が多い。

そこで本研究は、ドップラーライダー（以後、DLと記述する）を用いた観測と数値モデルから長野市裾花川谷口から吹く山風のメカニズムおよび構造と時間変動を明らかにすることを目指す。

2. 観測データおよび観測事例

DLによる観測は2015年7月27日～11月3日の期間実

施した。図1にDLの観測風景を示す。DLを設置した地点は、信州大学の長野（教育）キャンパス西校舎屋上である。DLの地上高度は21.1mであり、海拔高度約413mになる。西校舎屋上には、DLを2台設置した（以後、それぞれをDL1号機、DL2号機と称する）。DLの距離分解能は75mに設定し、半径1500mの範囲を対象とした（図2）。また、測定する高度角は、10°間隔で0°～70°の範囲とし、方位角は、0°～70°の10°間隔である。DL1号機は南西方向、DL2号機は南東方向を中心とした（図2b, c）。さらに、同期間の長野地方気象台の風向・風速について解析を行い、DLの観測結果と比較を行った。



図1 DLの観測設備。

* 立正大学大学院・地球環境科学研究科・院生

** 立正大学・地球環境科学部

*** 立正大学・地球環境科学部・学生

**** 信州大学・教育学部

***** 長野県環境保全研究所

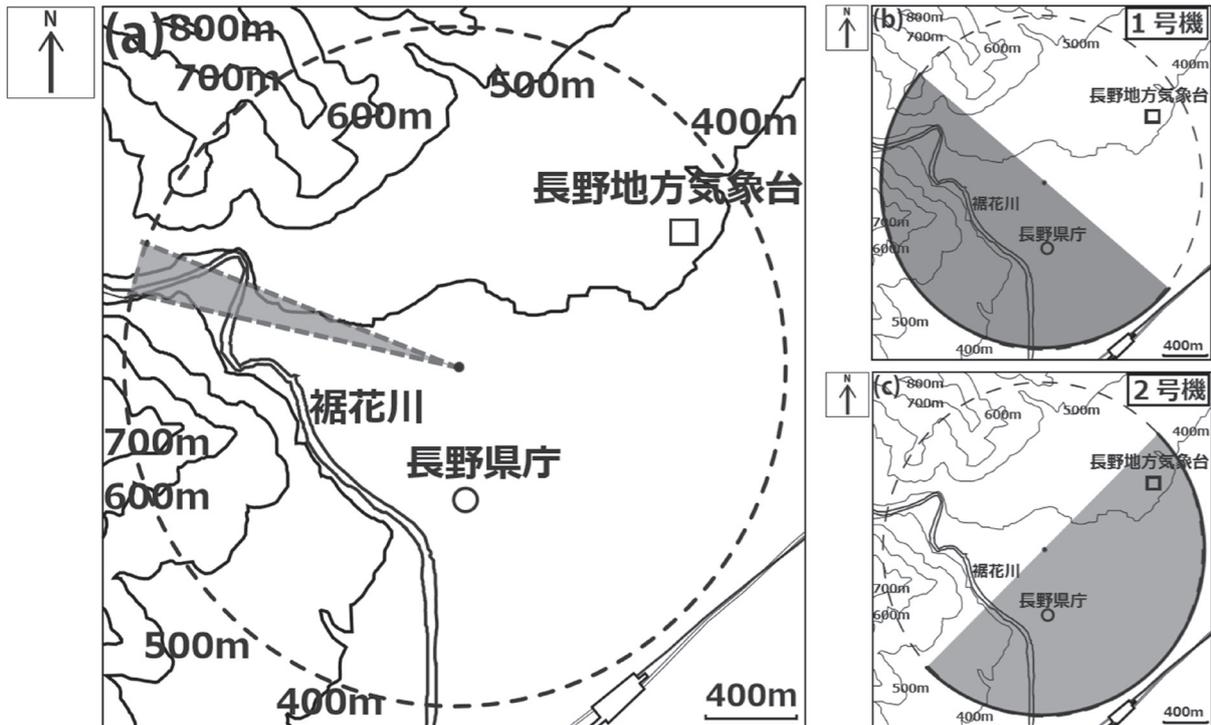


図2 (a) 長野県長野市の地形図。点線はDLを置いた地点から1500mの範囲と、影域は裾花川の谷を中心とする方位角273°～283°の観測範囲を示す。(b) DL 1号機および(c) DL 2号機の観測範囲(影域)。

裾花川から吹く山風は高気圧に覆われて比較的晴天の時に出現するとされているので（浜田・一ノ瀬 2011）、今回は2015年8月1日～8日の夏季の事例について報告する。

3. 2015年8月1日～8日の天気の概要

図3に2015年8月1日～8日の地上天気図を示す。この期間は、太平洋高気圧に覆われて日本は全国的に猛暑であった。長野地方気象台の日最高気温は連日34℃以上を観測し、日中は晴天であった（図4 a）。相対湿度の

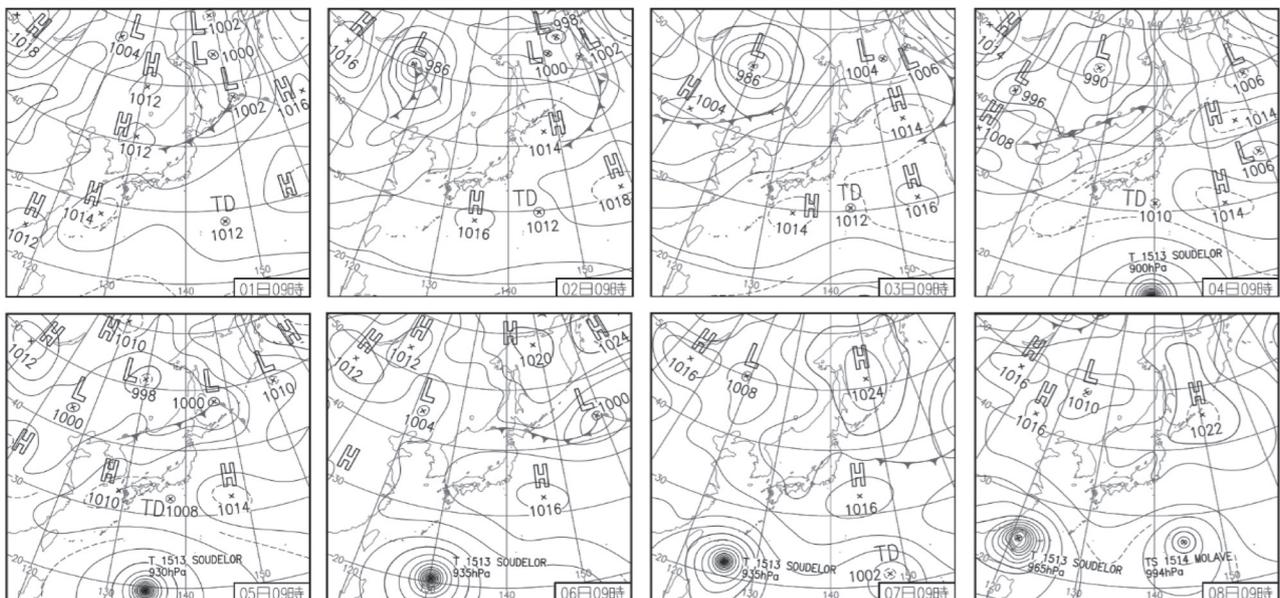


図3 解析対象期間（2015年8月1日～8日）の天気図（日々の天気図より）。

変動は気温と比べて、逆位相であった。また、同期間の長野市における風の日変化を風向で表すと、午前中は南～東風、午後から夕方にかけては北風、夜間～明け方には西風と日変化していた(図4b)。日最大風速に関して

14時過ぎ～17時に集中し、風向は北寄りで、風速は 6 ms^{-1} ～ 10 ms^{-1} であった。

4. 2015年8月1日～8日の晴天日におけるDLで捉えた山風の抽出

期間中に山風が吹いた日を同定するために、図5に、2015年8月1日～8日の裾花川谷口を中心とする方位角 $273^\circ\sim 283^\circ$ の領域における高度角 10° の視線方向の風速の時間変化を示す。1日～3日の長野地方気象台で観測された風向・風速とDLで観測された視線方向の風速はよく対応していた。しかし、6日と7日の21時頃から視線方向の風速は負値となり、裾花川谷口から吹き下ろす風が見られた。また、この時の視線方向の風速は $-4\sim -5\text{ ms}^{-1}$ であり、長野地方気象台が観測した風速よりも強風が吹いていた(図略)。この強風は、夜間から明け方にかけて長期間持続していたため、DLが捉えた強風は裾花川谷口から吹き下ろす山風であったと考えられる。また、8月4日の夜間から5日の明け方にかけても、同様の強風が見られた。

図6と図7は、2015年8月4日～5日と8月7日～8日の高度角 20° と高度角 30° の視線方向の風速の時間変化を示す。DLの視線距離375mと750mでは、高度角 20° は地上高149mと277m、高度角 30° では地上高208.5mと396mに相当する。図から、6日の夜間から7日の明け方では高度角 20° では山風は地上から高度約200m、7日の夜間から8日の深夜には高度約170mまで強風域がみられ

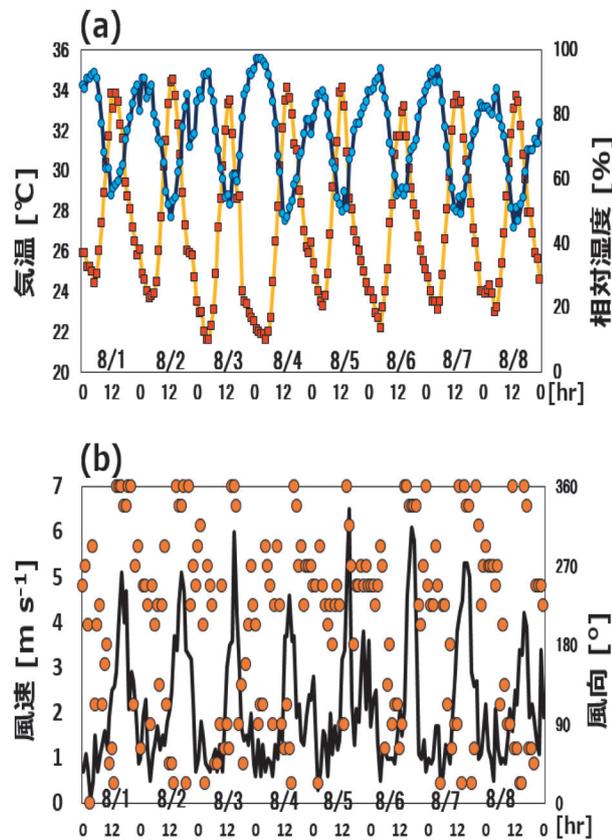


図4 2015年8月1日～8日の長野地方気象台における (a) 気温(°C, 黄色実線)と相対湿度(%、青実線)、(b) 風向(橙色)・風速(黒実線)。

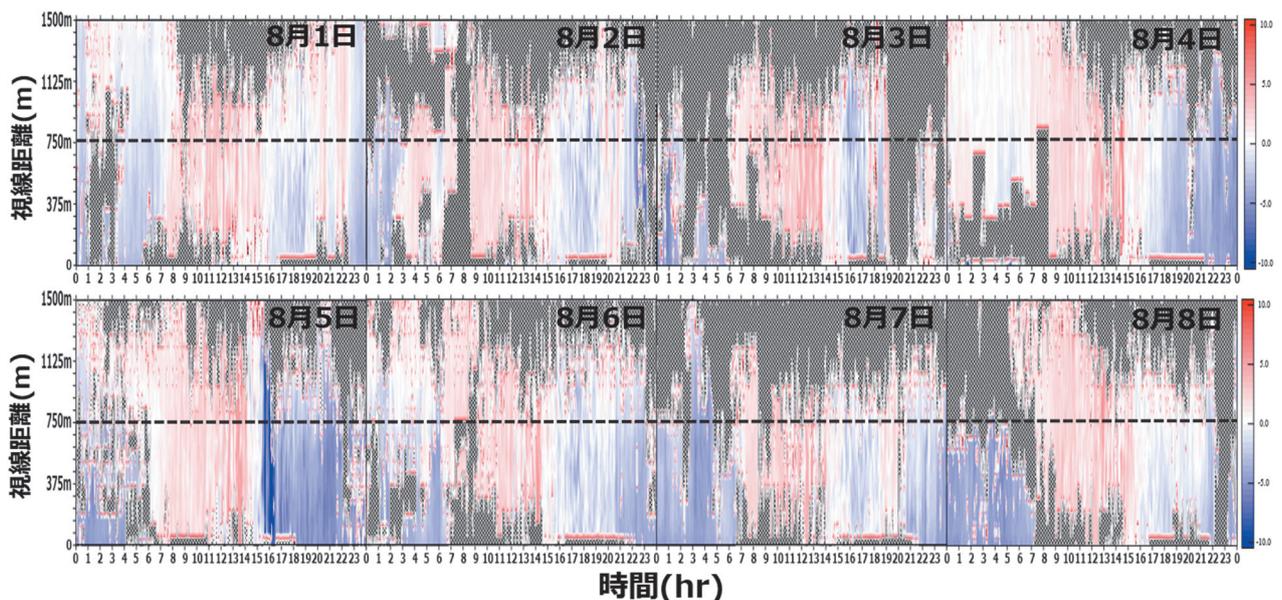


図5 2015年8月1日～8日のDL 高度角 10° における方位角 273° から 283° までの視線方向の風速の時間変化。点線は750mの視線距離を示す。

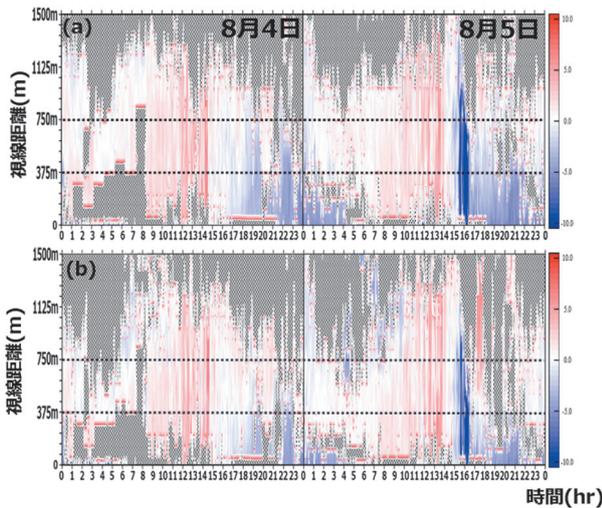


図6 2015年8月4日～5日のDL (a) 高度角20°と (b) 高度角30°における方位角273°から283°までの視線方向の風速の時間変化。破線は、視線距離375mと750mを示す。

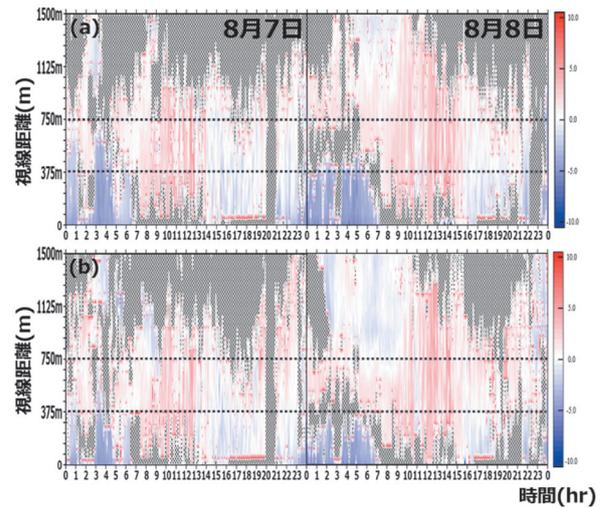


図7 図6と同じ。ただし、2015年8月7日～8日。

た。

また、高度角30°では、強風域は地上高約180m付近にかけて見られるものの、さらに高度が上がるにつれて見られなくなった。そのため、山風の鉛直方向の厚さは地上からの200m程度であったと考えられる。これは、浜田・一ノ瀬（2011）で観測された裾花川の山風の厚さと同じ結果であった。

図8に、2015年8月7日22時36分～23時00分のDL1号機の視線方向の風速を示す。7日22時30分のDL1号機の高度角10°では、裾花川谷口から北北西方向に4～5 ms⁻¹の強風域が見られ、時間の経過とともに、強風域は拡大していた（図8 a～e）。この強風域は高度角が上がるにつれて、強風域の範囲は縮小していた。この時の長野地方気象台の風向・風速は西風で1.7ms⁻¹であり、DL1号機が捉えた強風よりも弱かった。

図9に2015年8月7日22時36分～23時00分のDL2号機の視線方向の風速を示す。DL2号機の高度角10°の視線方向の風速は、中心から南西約500m付近に南西方向からの風であり、収束しているように思われる（図9 a～e）。また、高度角20°と高度角30°における中心から南西約500mの同じ領域の視線方向の風速値を見ると、高度角10°の南西方向からの風速値とあまり変わらなかった（図9 h, 9 m）。この時間の長野地方気象台の風向と比較すると、西～南西方向からの風であった。ところが中心付近の風を見ると、北西風が強かったのがわかる。つまり、この付近の時間帯では、南西風と北西風の2つの流れがあったと推測される。

5. モデルの概要

本研究で用いた領域気象モデルは、NCAR（National Center for Atmospheric Research）で開発されたWRF（Weather Research and Forecasting）モデルのVersion 3.4.1である（Skamarock et al. 2008）。計算における格子間隔は、第1領域は2 km 間隔の東西800km×南北900kmの領域、第2領域は500m間隔の東西150km×南北150kmの領域、第3領域は125m間隔の東西25km×南北21kmの領域とし、3段階のネスティング計算を実行した（図10）。計算時間は2015年8月7日3時を初期値として、8日6時までの27時間行った。初期値・境界値は気象庁メソ数値モデル（MSM：Meso Scale Model）の0時間予報値を利用した。雲微物理過程はLinスキーム（Lin et al. 1983）を採用し、積雲対流パラメタリゼーションは使用していない。鉛直層数は40層とし、モデルの最上端は100hPaとした。地温と土壌水分量は同時刻のNCEP（National Center for Environmental Prediction：米国環境予測センター）提供のFNL（Final Analysis）データを使用した。MSMの水平分解能は5 kmであり、FNLの水平分解能は111kmである。地表面モデルは、Noah Land-Surface Model（Chen and Dudhia 2001）を、短波放射はRRTM scheme（Mlawer et al. 1997）を、長波放射はDudhia scheme（Dudhia 1989）を、大気境界層はMellor-Yamada-Janjic scheme（Janjic 1994）をそれぞれ使用した。

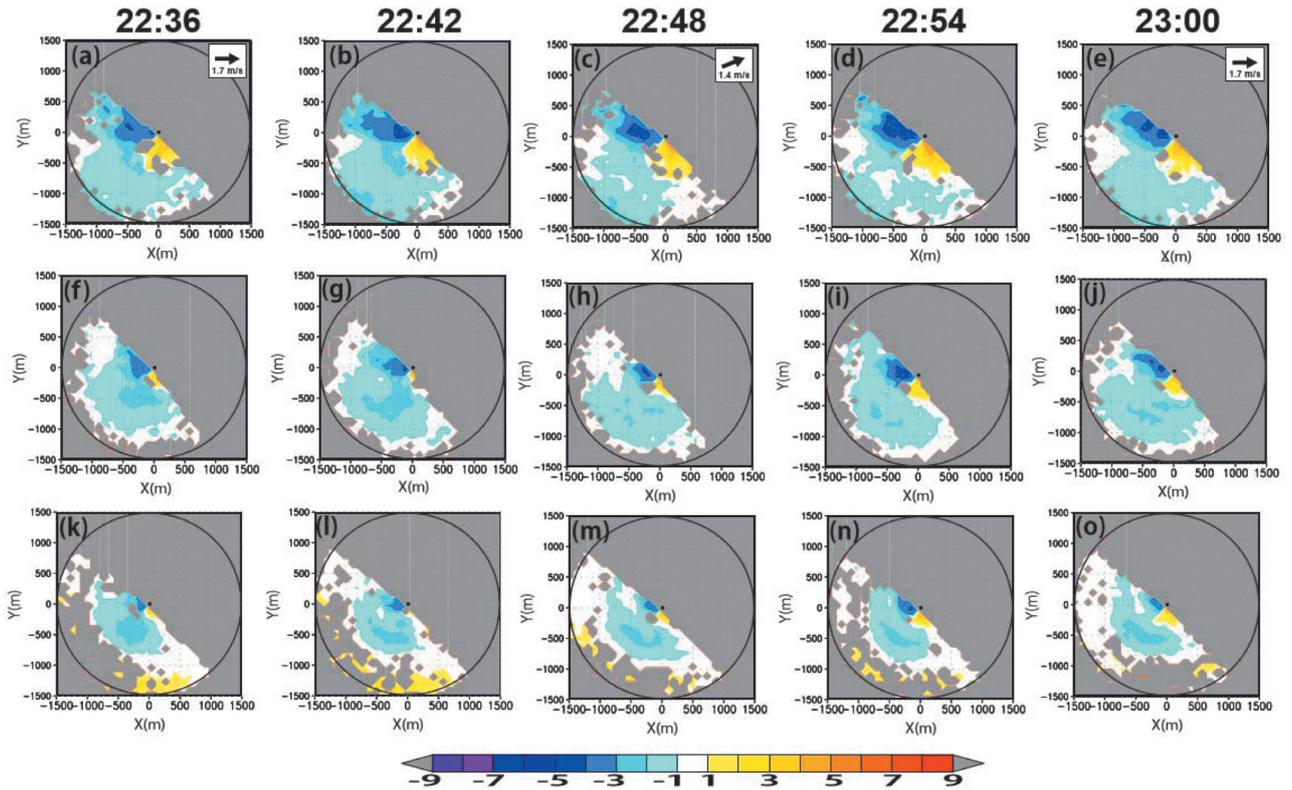


図 8 2015年8月7日22時36分~23時00分の DL 1号機の (a)~(e) 高度角10°、(f)~(j) 高度角20°、(k)~(o) 高度角30° における視線方向の風速。太枠には長野地方気象台の風向と風速を示す。

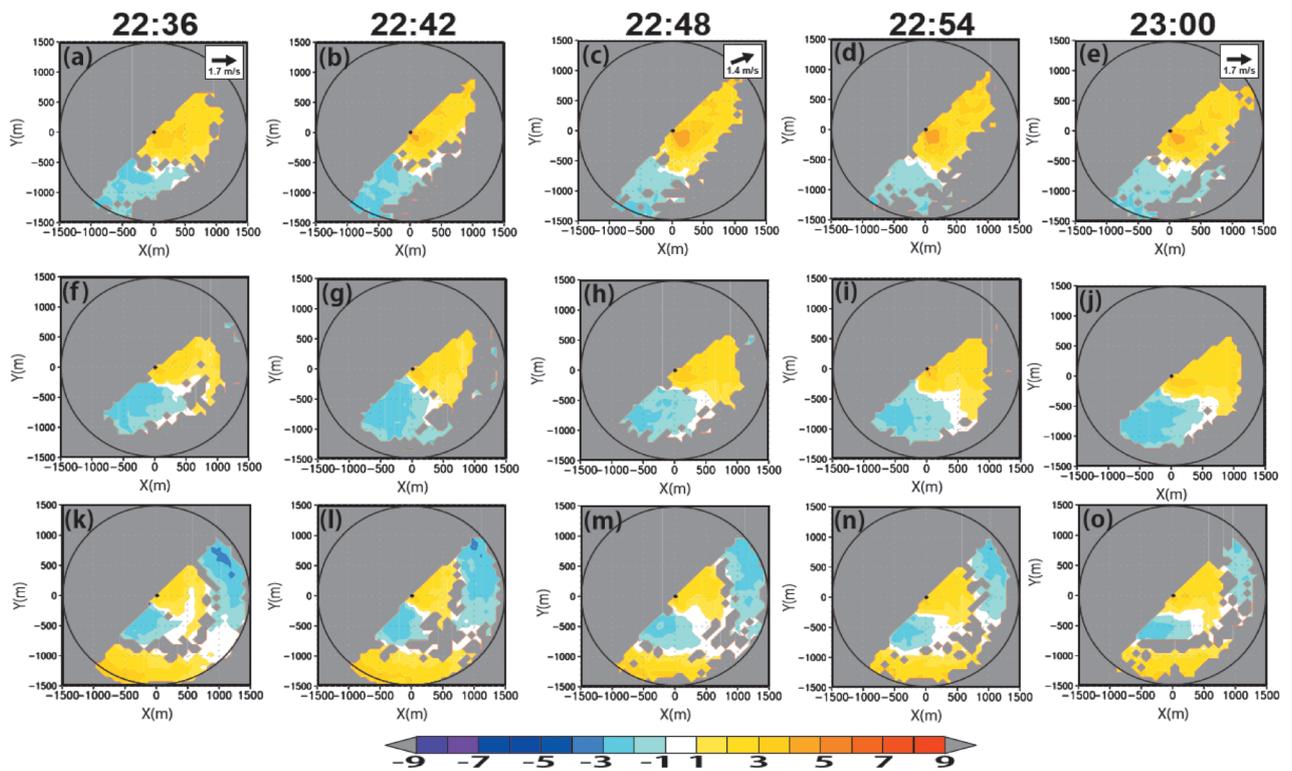


図 9 2015年8月7日22時36分~23時00分の DL 2号機の (a)~(e) 高度角10°、(f)~(j) 高度角20°、(k)~(o) 高度角30° における視線方向の風速。太枠には長野地方気象台の風向と風速を示す。

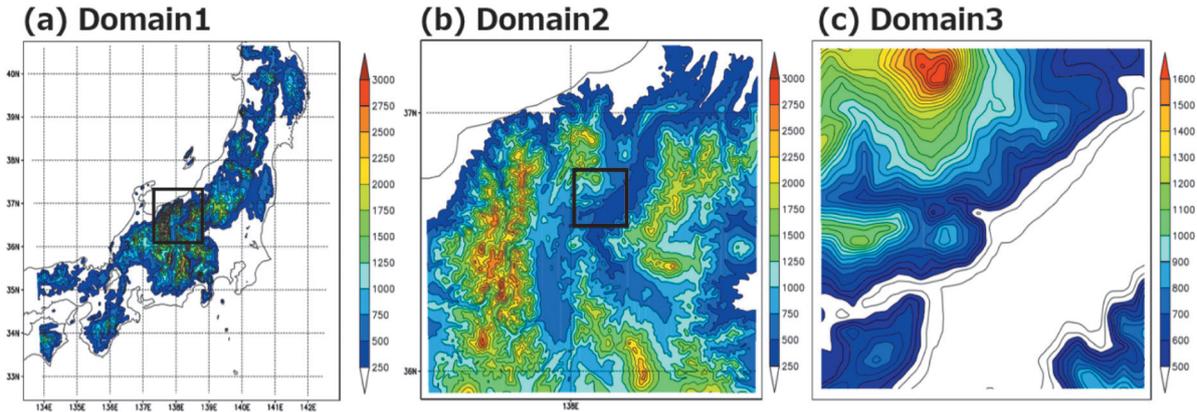


図10 WRF モデルの計算領域。

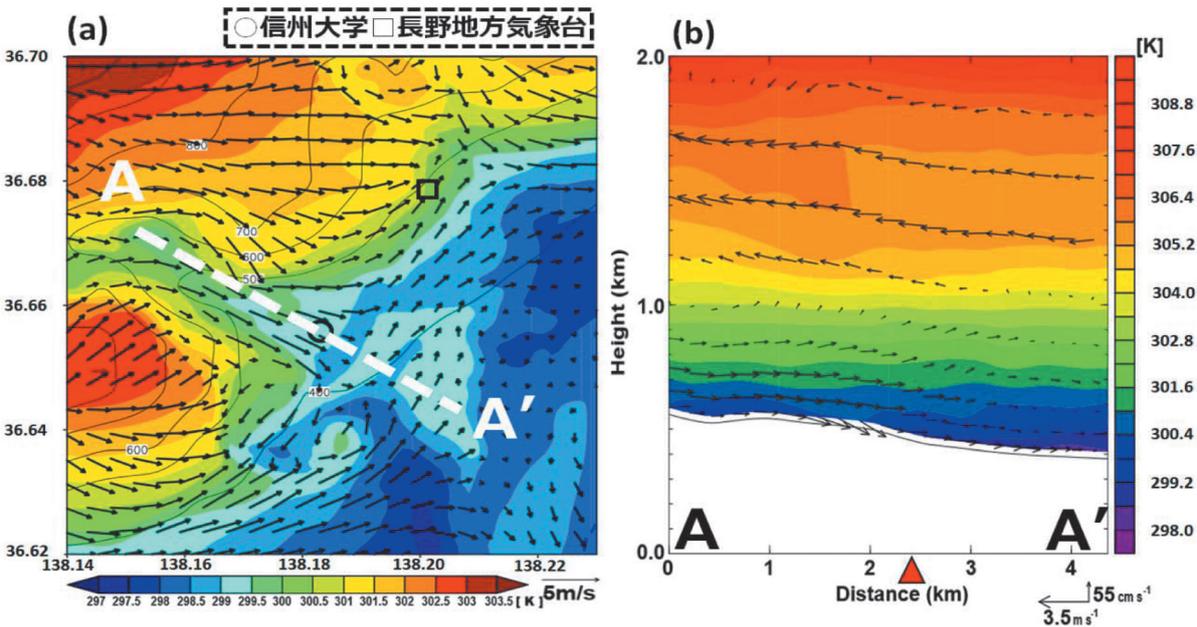


図11 2015年8月7日22時15分の (a) 地上付近の温位と水平風の分布と (b) 同時刻の測線 A - A' に沿った鉛直断面図。(a) の○は DL を設置した地点、□は長野地方気象台、(b) の▲は DL を設置した地点を示す。

6. 2015年8月7日～8日における山風の再現結果

WRF モデルによって再現された山風と DL が観測した山風を比較するために、図11に8月7日22時15分の長野市およびその周辺における地上付近の温位分布と水平風と同時刻の測線 A - A' に沿った鉛直断面図を示す。モデル結果から裾花川谷口から長野市街地に向かう西北西風が吹走していたことがわかる。この西北西風は、約3～5 ms⁻¹の風速であった。温位の水平分布は、長野市街地を除いてほぼ等高線に沿って上昇しており、高所ほど高温位となっていた (図11 a)。

図11 bの測線 A - A' の鉛直断面図を見ると、谷側から DL の地点にかけて地上から250m付近までは強風となっており、この強風域は DL が捉えた山風の鉛直方向の厚

さとはほぼ同じであった。裾花川谷口から長野市内に向かって吹き下ろす山風が再現されたと思われるので、次に詳細に解析した。

7. モデルで再現された2015年8月7日～8日の山風の時間変化および鉛直構造

図12に2015年8月7日22時00分～22時40分の長野周辺の地上付近の温位と水平風の時間変化と同時刻の測線 B - B' の鉛直断面図を示す。22時00分に裾花川谷口付近では温位の低下が見られ、温位が低下した領域は徐々に拡大していた (図12 a)。22時20分には裾花川谷口から市内に吹き下ろす西北西の風となった (図12 b)。この西北西風は22時40分には谷筋を一気に滑走し、強風となる様子が

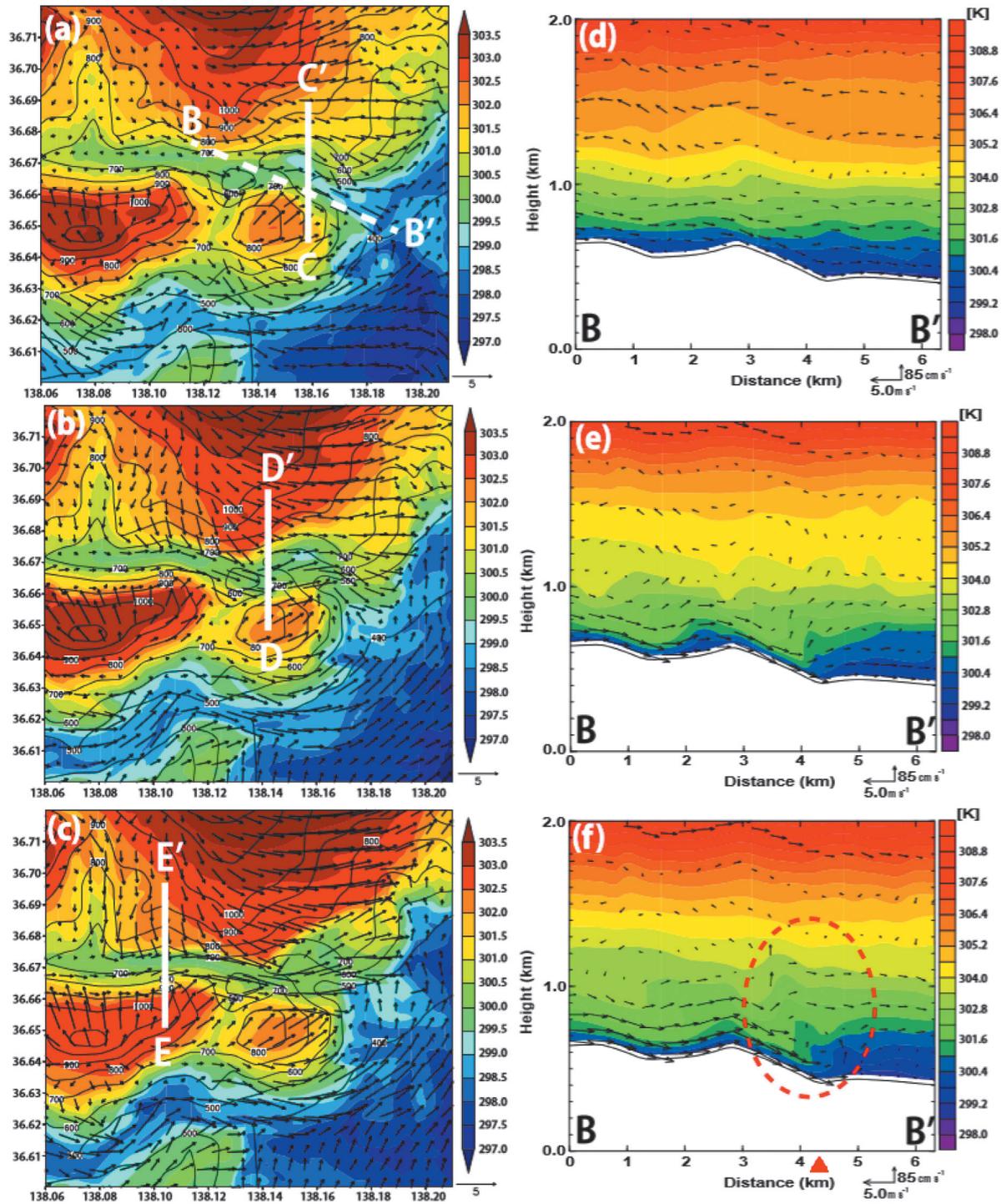


図12 2015年8月7日22時00分～22時40分の地上付近の温位と水平風の分布と同時刻の測線 B - B' における鉛直断面図。(a, d) 22時00分、(b, e) 22時20分、(c, f) 22時40分。側線 C - C'、側線 D - D'、側線 E - E' は図13における断面図を示す。▲は DL を設置した地点と(f)中の赤破線の楕円は、ハイドロリックジャンプが起こったとされる領域を示す。

見て取れた (図12 c)。また、裾花川からの山風が表れた時には南側に位置する犀川から吹出す南西風が長野市に吹き込む様子も見られ、裾花川からの北西風と犀川からの南西風の二方向からの風が合流する風の間となっていた。この南西風は、DL 2号機が捉えた南西風と同様の風向であることから、DL 2号機で捉えた南西風は、犀川

付近から吹いてくる風であったと考えられる。

次に、測線 B-B' における温位の時間変化から、8月7日22時00分には水平距離3～4 km では、地上から約300 m にかけて斜面に沿う下降流が見られた (図12 d)。この下降流は、22時20分には風速は約 3.5ms^{-1} となった。風上側には新たに谷筋からの下降流が見られ、時間経過と共に

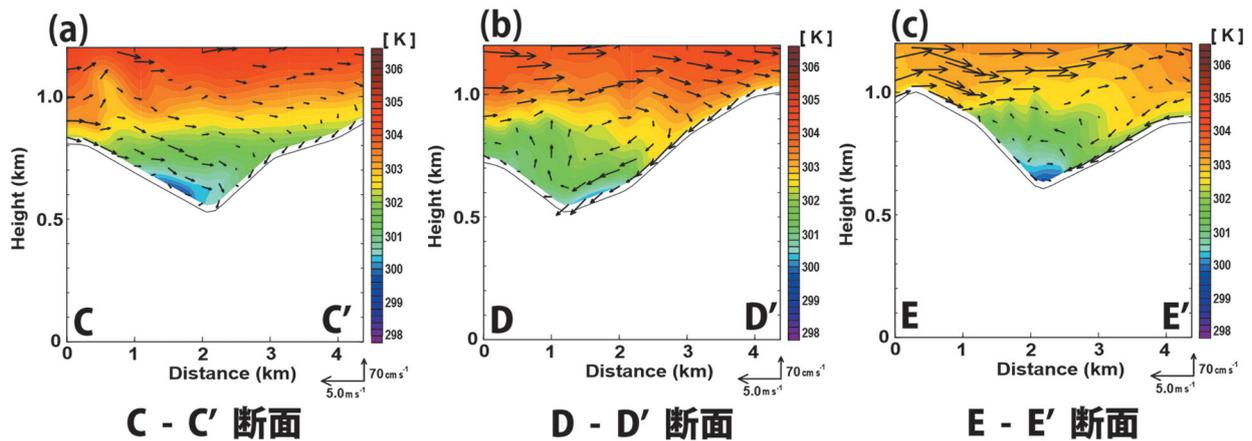


図13 裾花川谷筋における温位と風の南北の鉛直断面図。(a) 22時00分の C-C' 断面、(b) 22時20分の D-D' 断面、(c) 22時40分の E-E' 断面。

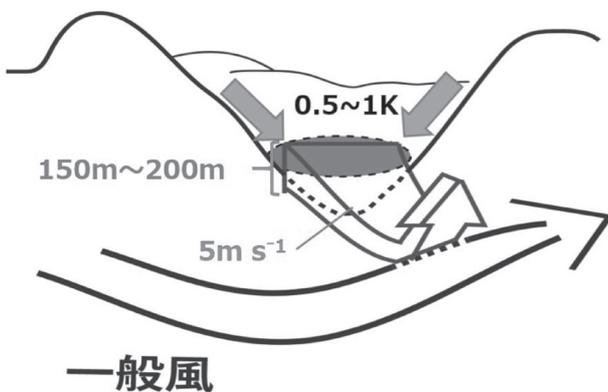


図14 長野市裾花川谷口付近で観測された山風の概念図。

に裾花川からの山風は強化していた (図12 e)。22時40分には、風上側の下降流は斜面を一気に滑走し、山風の厚さは地上から約500mまで達した (図12 f)。さらに、裾花川谷口付近では山風はジャンプする様子が見られることから、ハイドロリックジャンプが起きていたと考えられる。

図13に裾花川谷筋を南北方向に見た温位と南北風の鉛直プロファイルを示す。22時00分の C-C' 断面では、両側の山から谷間に向かって斜面下降風が見られ、谷底では山腹よりも温位は低下していた。22時20分の D-D' 断面では、裾花川左岸の飯綱高原からの斜面下降風があり、谷底では循環がみられた。22時40分の E-E' 断面では、裾花川の谷口よりも温位は0.5~1 K 程度低下していたことから、冷却された空気塊が長野市内に流れでたものと考えられる。

8. まとめ

本研究では、2015年8月1日~8日の期間についてDL

の観測と WRF モデルを用いて裾花川およびその周辺の山風の解析を行った。この期間は全国的に猛暑であり、長野市では比較的晴天であった。8月7日夜間から8日の明け方までには、裾花川谷口からの $4 \sim 5 \text{ ms}^{-1}$ の山風が吹いていた。また、DLで捉えた山風の鉛直プロファイルから厚さは200m程度であった。モデル結果でも、裾花川から山風の厚さは地上から約200mであり、DLで捉えた山風の厚さと同じであった。図14に長野で観測した山風の概念図を示す。地上付近の温位の時間変化から、空気塊は裾花川谷口付近から流れ始め、一気に斜面を滑走する山風が見られた。この時の温位低下は、0.5~1 K 程度であった。また、長野市内では裾花川からの山風 (西北西風) と犀川から吹き込む風 (南西風) とが合流する風の間であることがわかった。さらに、風が合流する裾花川周辺では、下降流がジャンプするのが見られたことから、ハイドロリックジャンプが起きていたと考えられる。

しかしながら、2015年8月7日~8日の事例では裾花川からの山風よりも、長野市内の方が温位は低下していたため、市内でヒートアイランドが起きていなかったものと考えられた。今後こうした事例を積み重ねて、山風および局地循環を明らかにしてゆきたい。

参考文献

- 浅井富雄 (1996) ローカル気象学. 東京大学出版会 pp248.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale

- two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 927-945.
- 狩野真規・三上岳彦 (2003) : 谷口に位置する青梅市周辺におけるヒートアイランド現象と山風の吹走との関係. *天気*, **50**, 81-89
- Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Met.*, **22**, 1065-1092
- 浜田 崇・一ノ瀬俊明 (2011) : 山風の流入による夏季の都市気温への影響. *地学雑誌*, **120**(2), 403-410.
- Mlawer, E., S. Taubman, P. Brown, M. Iacono, and S. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663-16682.
- 長野県環境保全研究所 (2009) : 長野県におけるヒートアイランド現象の実態に関する調査研究報告書. 長野県環境保全研究所研究プロジェクト成果報告, **7**.
- Skamarock, W., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. Gill, D. Barker, M. Duda, X. Huang, W. Wang, and J. Powers, 2008: A description of the Advanced Research WRF Version 3. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3.pdf. (2016年11月20日観覧)

Numerical Experiment with WRF Model and Doppler Lidar Observation of Mountain Breezes in Nagano City

TAKASAKI Yoshinori *, YOSHIZAKI Masanori **, SUZUKI-PARKER Asuka **
WATARAI Yasushi **, TAKEI Yu-ki ***, SAKAKIBARA Yasushi ****, HAMADA Takashi *****

* Graduate School of Geo-environmental Science, Rissho University

** Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

*** Student, Rissho University

**** Faculty of Education, Shinshu University

***** Nagano Environmental Conservation Research Institute

Abstract:

The mountain breezes were captured by Doppler lidar (DL) in Nagano city. Analysis target is 8th from August 1, 2015. During this time Nagano city experienced a heat wave under the influence of Pacific anticyclone. Analysis based on line-of-sight (LOS) data from DL revealed that the mountain breezes at the Susobana river valley entrance had a thickness of 100 to 200 m. Furthermore, numerical simulation using the WRF model showed that the mountain breezes (northwesterly) from Susobana river valley entrance converge with background winds (southwesterly). In the convergence area, mountain breezes exhibited hydrolic jump-like nature.

Key words: Mountain breeze, Doppler lidar, Susobana river, Hydrolic jump

