

湖西線の列車運行の視点から考察した 比良おろしの事例解析

奥 勇一郎, 入山 拓斗*
社会環境部門, *株式会社 JR 西日本メンテック

A Case Study of the Local Downslope Wind “Hira-Oroshi” by using Numerical Weather Prediction Model

Yuichiro OKU and Takuto IRIYAMA

School of Human Science and Environment,
University of Hyogo
1-1-12 Shinzaike-honcho, Himeji, 670-0092 Japan

Abstract: To protect running trains against the strong crosswind "Hira-Oroshi", a typical downslope wind in the west coast of Lake Biwa along Kosei line, wind fences have been installed on either side of the railroad where strong wind prevails frequently. The purpose of the present study is to examine the effects and loads of wind fence. We have chosen for the case study of the event that the train operation was suspended due to strong wind on 27 December 2016.

Keywords: local wind, numerical weather prediction model

1. はじめに

「比良おろし」は滋賀県の琵琶湖西側地域に吹く局地風である。主として比良山系の北西側に寒気が流入することにより発生するおろし風のひとつで、標高 1,214m の武奈ヶ岳を最高峰とする比良山系の南東斜面を吹き降りる北西風である (Kusaka and Fudeyasu, 2017)。水平スケールは数百 m から 1km と極めて狭く、最大瞬間風速は 50m/s 以上に達する。前兆なく突発的に風速 20m/s 以上の風が半日近くも吹き続け、突風がたびたび発生する (東ら, 2014)。強風の発生は湖西地域の幅約 10km の限られた地域にのみ毎年冬季を中心に現れ、家屋損壊などの被害が出る (古本と東, 2014)。

湖西線 (図 1) はこの地域を南北に貫く西日本旅客鉄道株式会社 (以下、JR 西日本とする) の鉄道路線である。両端の駅も含めると 21 駅あり、南端の山科駅は東海道本線に、北端の近江塩津駅は北陸本線に接続する。線路のほとんどが高架またはトンネルになっており、関西と北陸を結ぶ特急列車が 1 日に 50 本程度走行しており、都市間輸送の一端を担っている。湖西線はその一部

区間が比良山系と琵琶湖の間に位置している。線路が比良山系の山並みに沿う方向に伸びており比良おろしを真横から受けることに加え、高架橋上の区間が多いことから比良おろしをはじめとする風の影響を強く受ける。強風のため運行できなくなることがしばしばあるほか、過去には 1979 年に近江舞子駅の北で、1997 年に比良駅構内で、それぞれ貨物列車が転覆する事故が起きている。

強風の影響を低減するため、JR 西日本は強風が頻発する複数区間の山側線路脇に防風柵を設置し対策を行っている。この防風柵の遮蔽率は 60% とされており、レール面上 2m 程度の高さまで設置されている。これにより、防風柵整備区間での運転見合わせ時間がおおむね 3 分の 1 以下になると見込まれている。沿線に同社が設置している風速計により、防風柵のないところでは瞬間風速 20m/s 以上を観測すると徐行運転、25m/s 以上を観測すると運転見合わせとすることが公表されている。防風柵のあるところでは同 25m/s 以上で徐行運転、30m/s 以上で運転見合わせとなる。同社風速計の設置箇所やその観測値などは公にされていないが、湖西線近江舞子駅近傍

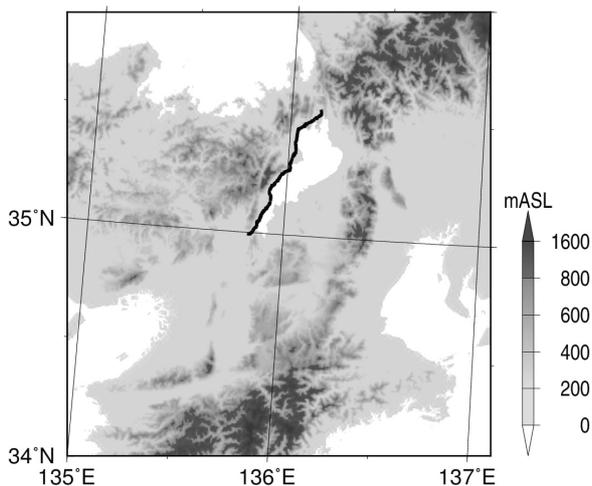


Fig.1: Geographical location of Kosei line (thick line).

に設置されている気象庁南小松アメダスの記録によると、2017 年は瞬間風速 25m/s (近傍線区での徐行運転の規制値) 以上を記録した日が 4 日あり、列車の運行が比良おろしの影響を受けていることが裏づけられている。

列車運行に影響するような強風が見込まれる場合には、特急列車は運行規制を免れるため琵琶湖の東側を通る別経路で運転されることがある。その場合は、関西と北陸を結ぶ役割は保たれるものの、所要時間がおよそ 30 分増加する。また、特急列車を除いても兵庫県や福井県まで乗り入れる列車が存在することから、強風などにより湖西線の運行ダイヤに乱れが生じると、その影響は広範囲に波及する。湖西線の列車運行に影響する比良おろしの特徴を理解し、影響の低減を図ることは大きな意義がある。

本研究では、過去に湖西線の列車運行を妨げ大きな影響をもたらした強風事例について数値シミュレーションを行い、強風の発生要因とともに強風による輸送障害が起きる可能性の高い区間を調べ、防風柵の設置について考察するとともに、強風の継続時間から防風柵への負荷についても調べることを目的とする。領域気象モデルを用いた数値シミュレーションの詳細については、たとえば日下 (2009)を参照いただきたい。

2. 強風事例

本研究では 2016 年 12 月 27 日午後の強風事例を対象とする。同日の地上天気図を図 2 に示す。当日は南北 2 つの前線を伴った低気圧が通過し全国的に雨や雪をもたらした。前線通過時には雨や風が強まり、和歌山県潮岬で 1 時間雨量 37mm、高知県室戸岬で最大瞬間風速 29.2m/s を観測した。前線通過後、気温は急激に下がっ

た。

滋賀県付近においては 6:00 ごろに寒冷前線が通過していた。寒冷前線が通過したことにより寒気が流れこみ、その後 強風が発生したとみられる。南小松アメダスでは、同日 18:00 ごろから北西の風が強まり、21:10 に最大瞬間風速 25.8m/s を記録している。その後も翌 28 日 0:00 ごろまで平均風速 10m/s 前後の状態が続いた。

湖西線では、強風のため同日 18:34 から終日 列車の運転を見合わせた。平日夕方のラッシュ時間帯を直撃し多くの旅客に影響した。別経路での迂回運転の判断が遅れたことで、湖西線内を走行中の複数の特急列車が長い時間にわたり運転を見合わせる事態となった。

3. 数値シミュレーション

本研究では米国大気研究センター (NCAR: National Center for Atmospheric Research) を中心に開発が進められている領域気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting) Ver. 3.7.1 (Skamarock et al., 2008) を用いた。WRF へ入力する大気の初期値・境界値には気象庁メソ数値予報モデル (MSM) の解析値を使用した。海水面温度と土壌の初期値・境界値には、それぞれ気象庁 55 年長期再解析データ (JRA-55) と米国環境予測センター (NCEP: National Centers for Environmental Prediction) の現業客観解析データを用いた。標高は国土地理院の 50 m 水平解像度の数値地図データを使用した。

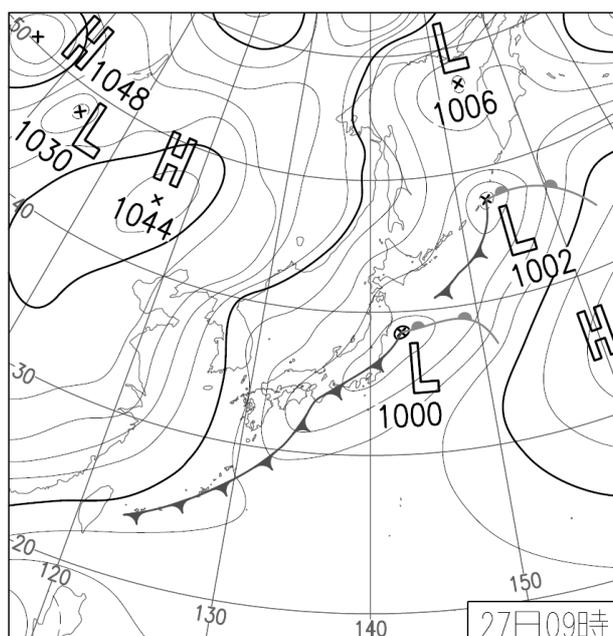


Fig.2: Surface weather map at 0900 JST on 27 December 2016 provided by Japan Meteorological Agency.

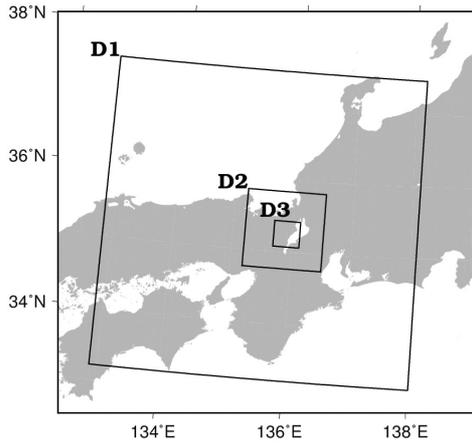


Fig. 3: Computational domains 1 (depicted as D1), 2 and 3 in the present study.

領域気象モデルの計算領域を図3に、主な計算設定を表1にそれぞれ示す。計算期間は2016年12月25日21:00から12月30日9:00までとした。この期間において領域1は24秒、領域2は6秒、領域3は1.2秒のタイムステップで計算を行い、10分ごとの気温や風などの気象要素を出力した。なお、主として領域3の計算結果を解析の対象とする。

4. 結果

4.1 地上観測値との比較

気象場の再現性を検証するために、領域気象モデルによる計算値の風向・風速を観測値のそれらと比較した。観測地点が解析領域に含まれる気象庁アメダスの2地点（南小松と今津）の観測値を用いた。計算値として、2

Table 1: Model settings and WRF physics parameterization schemes used in the study

Model	WRF/ARW ver3.7.1		
	Number of grid,	D1	121×121×50
Horizontal resolution	D2	121×121×50	1km
	D3	81×81×50	500m
Cumulus scheme	none		
Microphysics	WSM6 (Hong and Lim, 2006)		
SW radiation	RRTM (Mlawer et al., 1997)		
LW radiation	Dudhia (Dudhia, 1989)		
PBL scheme	MYJ 2.5 level (Janjić, 1994)		

地点の緯度と経度からモデル内での最近傍格子点を求め、その格子の計算値を用いた。結果の一例として南小松における時系列を図4に示す。

期間を通して風速の計算値は観測値に比べて大きくなっているものの、27日から28日にかけての強風は再現できている。一方、計算値において27日午後の強い風、すなわち比良おろしが吹き始める時間帯が、観測値のそれと比べて6時間早く現れている。後述するが、本事例の強風は局所的な寒冷前線の通過に伴うものであり、図には示していないが観測データから風が強く吹き始める時間帯に気温の低下が確認できる。計算値において気温が下がり始める時間帯が、観測値のそれと比べて6時間早く現れており、モデルで計算された寒冷前線の通過が実際より早くなったものと推測できる。これは風向からも裏付けられる。計算・観測ともに27日午前

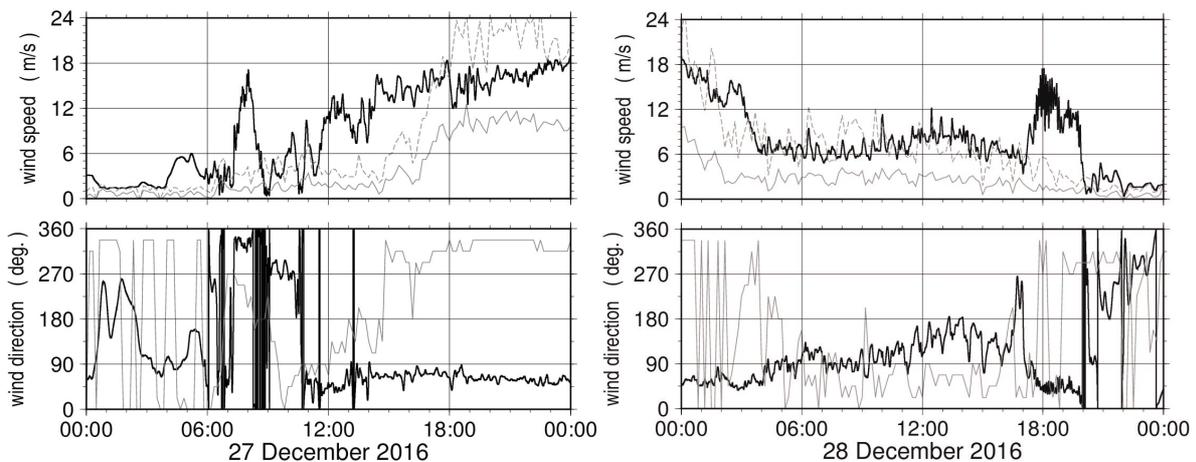


Fig 4: Time series of wind speed and wind direction. Temporal changes in wind speed (top panels) and wind direction in degrees east of north (bottom panels) at the Minamikomatsu location for the AMeDAS observation (gray lines) and simulation result (black lines). Broken lines in wind speed denote the 10-minute maximum wind speed of the observation.

ていた南寄りの風が、午後には北寄りの風になっている。これは、局所的な寒冷前線の通過に伴う風向の変化と考えられる。風向の計算値で風向きが変わる時間帯が観測値と比べて早く現れていることは、前述した風速および気温の変化と一致する。以上により、計算による局所的な寒冷前線の通過時間帯が観測と比べて6時間早いものの、強風をもたらす原因と考えられる局所的な寒冷前線の存在および通過は確認できており本研究の目的である防風柵の効果および負荷の評価ができるものと判断する。

4.2 寒冷前線の通過

強風の発生の一因になったと考えられる局所的な寒冷前線の通過を確認するために、対流圏下層の温位と風の水平分布の時間変化を調べた。温位とは、空気塊をある

気圧（一般には 1,000hPa）へ断熱変化させたときの温度であり、気圧差すなわち標高差による温度差が表れない点で気温と異なる。図5は950hPa面における温位と風の水平分布の3時間毎の時間変化である。寒冷前線の通過は総観規模スケールからメソスケールの現象なので、ここでは領域1での計算結果を用いる。時間が経過するにつれて北西にあった低温位の領域が南東に向かって移動しており、日本海側から琵琶湖西側地域へ寒気が流入していることがわかる。加えて、北からの風が吹いている北西側領域と南からの風が吹いている南東側領域の境界が時間経過とともに南東方向へ移動する様子がみてとれる。これらから、この風向きの境界が局所的な寒冷前線であると考えられる。なお、ここでの局所的な寒冷前線は、図2に描かれている寒冷前線とは別のものである。

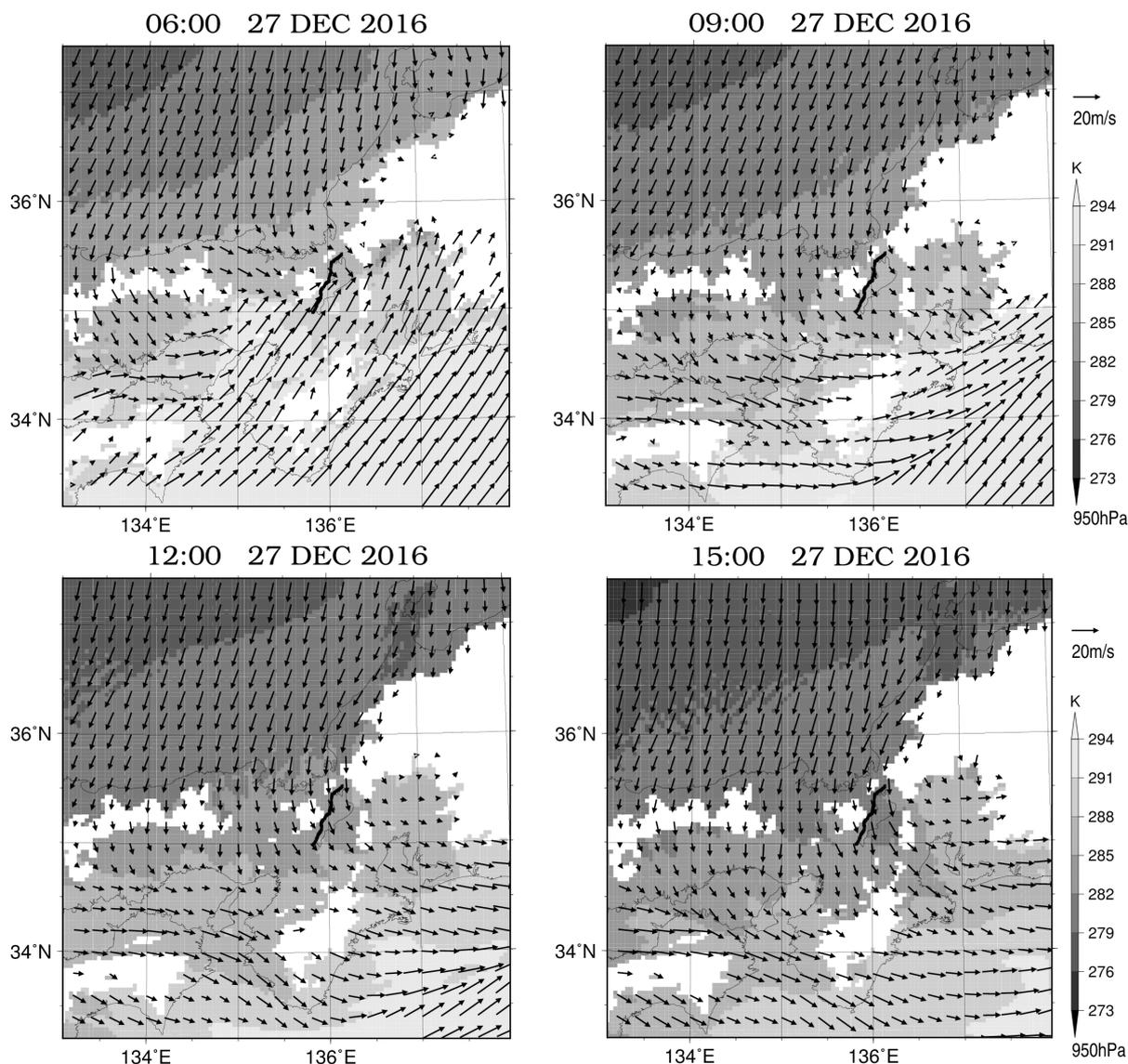


Fig. 5: Horizontal distribution of potential temperature (shaded) and wind (vectors) at 950hPa level from 0600 JST to 1500 JST on 27 December 2016. The Kosei line is denoted as the black line.

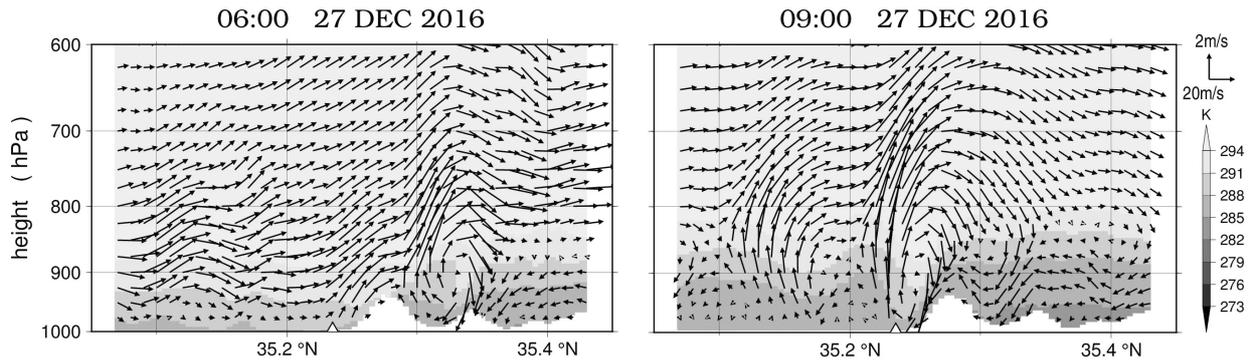


Fig. 7: Meridional-vertical cross section of potential temperature (shaded) and wind (vectors) at Minamikomatsu (see Fig. 8). Location of Minamikomatsu is denoted as the triangle.

琵琶湖西側地域における強い風は、寒冷前線の通過後に現れており、4.1 節の南小松における風向・風速および気温の時間変化の傾向と一致する。

4.3 比良おろしの鉛直構造

27 日午後の強風の成因を調べるため、対流圏下層の水平鉛直断面での温位および風の時空間変化を調べる。

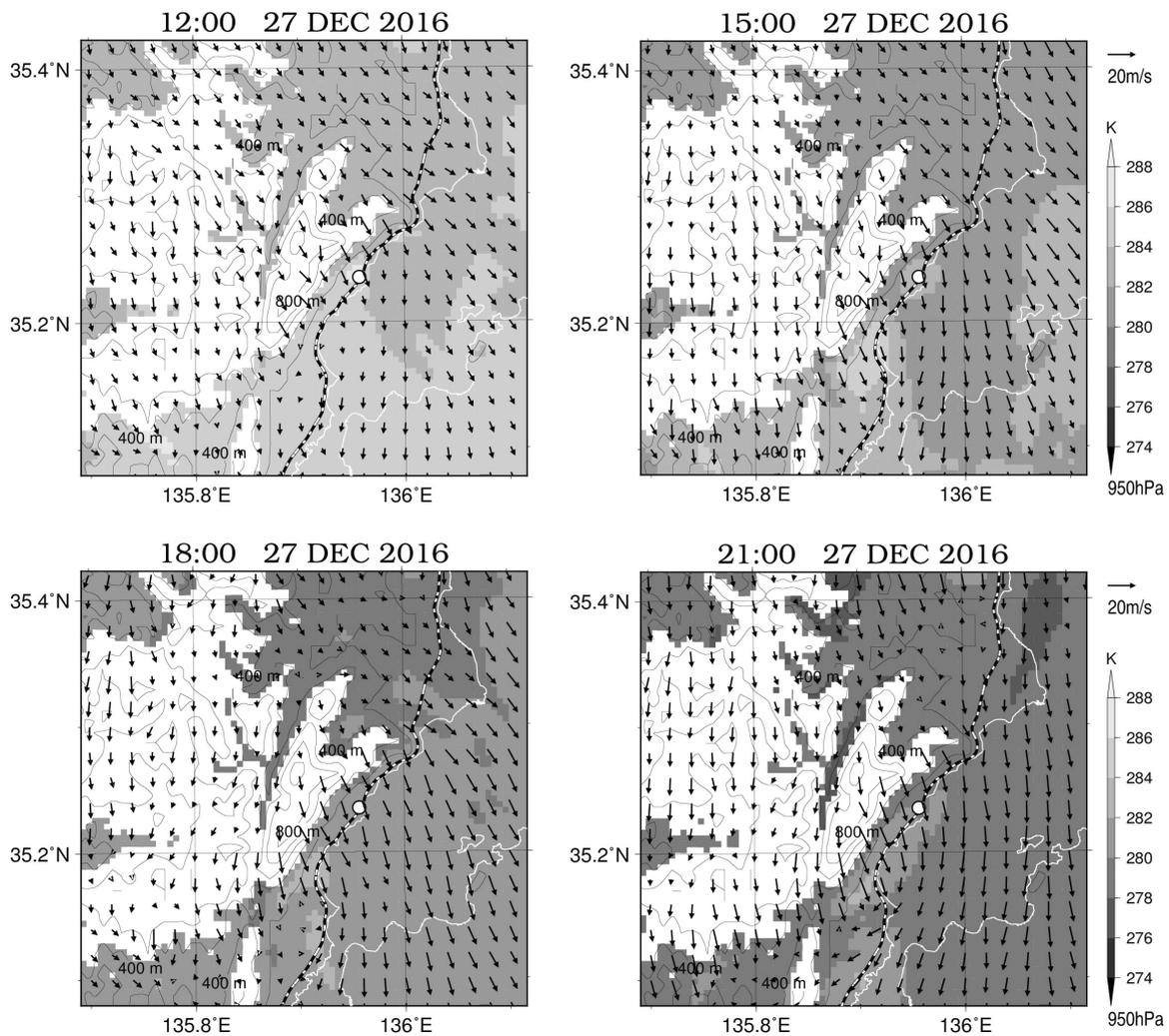


Fig. 8: Horizontal distribution of potential temperature at 950hPa level (shaded) and surface wind (vectors) at 10m height above ground. Topography around Minamikomatsu located near Omi-Maiko station (depicted as the circle) is shown by the height contours drawn for every 400m. The Kosei line is denoted as the bold dashed line. Lake Biwa shore is depicted as white line.

図 7 は南小松における温位と風の南北鉛直断面である。3 時間毎の温位の時間変化から、時間の経過とともに北側から南小松のある琵琶湖西側地域に寒気が流入してきている様子がみてとれる。これとともに、比良山系の南側で山の斜面に沿うように吹き降りる強い風が確認できる。850hPa より下層の風に着目すると、北から南に向かって吹く風が、比良山系の起伏に沿って鉛直方向上下に波打っている様子がわかる。これは「山岳波」と呼ばれる現象の表れであると考えられる。

山岳波は気塊が山を越える際に発生する。空気塊が風上から移動してきて山などの隆起地形にぶつかると、斜面に沿って上昇気流が発生する。気塊が上昇すると断熱圧縮により冷やされて密度が高くなり、やがて隆起地形を越えた先で下降する。気塊が下降すると断熱膨脹により暖まって密度が低くなる。このとき、気塊が周りの空気より軽いと浮力が生じ、再び上昇することとなる。この浮力を復元力として上下動を繰り返し、山の風下側へ波を形づくるのが山岳波である。

この山岳波に伴う下降気流により、上空の高い運動量が地上付近へ輸送され、これが比良おろしとなってふもとで強い風が吹いたと考えられる。

列車運行に直接影響する風は地上付近の風なので、強風となった時間帯に地上付近で吹いた風について調べる。図 8 に地上 10m 高さの水平風を 950hPa 面における温位とともに示す。いずれの時刻でも全体的に北風が強く吹いていることがわかる。特に南小松地点付近の山と湖に挟まれた地域では 20m/s 程度の風も見られる。琵琶湖上の風と比良山系南東斜面上の風を比べると、陸上でも湖上と同じくらい強い風が吹いている一部の地域および時間帯が確認できる。一般に、風は凹凸のある地形との摩擦により、湖上の風は陸上の風よりも強くなる。しかしながら本事例の場合、細かく入り組んだ地形の影響により局所的な風の収束が起こり、結果として強い風になったと考えられる。

5. 湖西線における強風の時空間変化

列車運行の視点から対象事例の強風の特徴と防風柵設置区間との関係を調べるため、解析領域内で湖西線の線路が位置する格子を抽出し、その地点での地上風の時間変化について解析した。図 9 に湖西線対応格子点における地上風速の時間変化を示す。27 日 6 時以降で、図に示したすべての区間で風が強くなっており、和邇駅から北小松駅までの防風柵設置区間において特に風が強まっている様子がわかる。このことから防風柵が列車の安全運行に寄与していることが窺える。北小松駅から近江

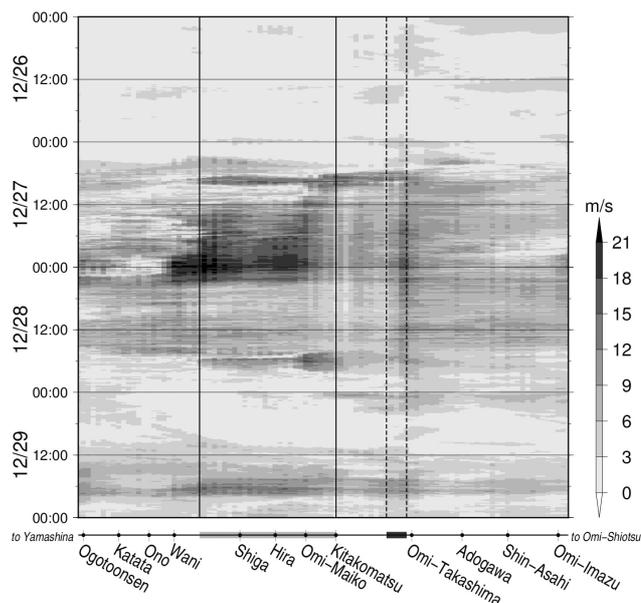


Fig. 9: Temporal changes (vertical axis) of surface wind speed along Kosei line (horizontal axis). Dots on horizontal axis indicate station locations. Wind fences are installed in thick gray line in horizontal axis. Takashima tunnel is depicted as thick black line.

高島駅までの区間においても防風柵設置区間と同様に強い風が見られるが、この区間は高島トンネルがあり、言うまでもなくトンネル内を走行する列車は地上風の影響を受けないので運行上の問題は無い。

一方、和邇駅から防風柵が設置されているところまでの区間においても、防風柵設置区間と同じくらい強い風が吹いており、特に 28 日 0:00 前後に 20m/s を超える強い風が確認できる。しかしながら、この区間における防風柵の設置は以下の理由で不要である。列車は進行方向に対して垂直な方向からの風、すなわち横風には弱いのが、進行方向と平行な向き、すなわち向かい風や追い風によって運行が脅かされることはまずない。同区間は比良山系の山並みとはほぼ垂直な方向に線路が伸びており、比良おろしは線路と平行な向きに吹くことになる。このため列車は比良おろしを進行方向の正面もしくは背後から受けることになる。したがって列車運行の影響を受けることがないため防風柵の設置が不要である。

防風柵が適切に設置されていることがわかったが、一方で、防風柵は列車を強風から守る反面、強風による負荷が掛かるため、その負荷の程度によっては高頻度で柵の補強や修理などのメンテナンスが必要となる。そこで、柵への負荷という視点から本事例においてどのくらい強い風がどのくらい長い時間継続しているのかについて調べた。風による防風柵への瞬間的な負荷の大きさは、あ

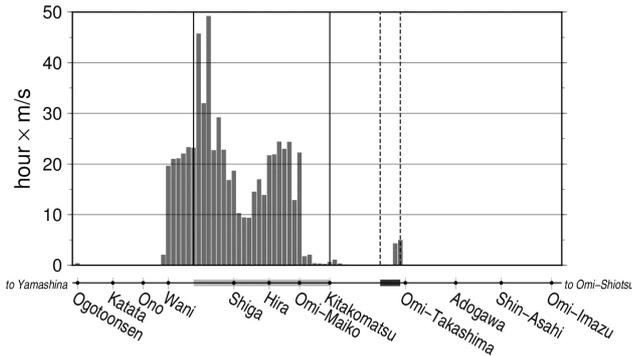


Fig. 10: Relationship between Kosei line (horizontal axis, see Fig. 9) and the accumulated hour excessive wind speed above 15m/s (vertical axis).

る風速の閾値に対してその風速を超過した大きさとその継続時間との積とし、この積の期間積算値でもってある事例における負荷の大きさと定義した。

図 10 に風速の閾値を 15m/s とした場合における負荷の大きさを示す。防風柵設置区間においても負荷が大きい区間と小さい区間が存在し、防風柵設置区間における負荷の平均値の 2 倍以上の負荷の大きさの区間があることがわかった。この区間ではほかの区間よりも防風柵の劣化・消耗が激しいと考えられるため、防風柵の強度をより高めることや短期での換装などの方策を検討するべきであると言える。

6. まとめ

湖西線の列車運行に支障した 2016 年 12 月 27 日午後の比良おろしについて、領域気象モデル WRF を用いて数値シミュレーションを行い、この事例における強風の特徴や成因を調べ、湖西線に設置された防風柵について検討した。シミュレーションでは当日の強風時間帯に寒冷前線の通過や山岳波の発生を確認することができ、山岳波に伴う下降気流が上空の高運動量を地上へ輸送することで強風が卓越したと考えられる。地上付近では湖上風よりも山の斜面を下る風のほうが強くなっている様子が一部の地域および時間帯で確認でき、細かい地形により風が収束したことで局地的に風が強くなったことも強風の一因であると考えられる。解析領域内の湖西線の位置にあたる格子を抽出して風速の解析を行い、防風柵が列車の安全運行に寄与していると判断できた。防風柵設置区間のうち南寄りの区間では他区間よりも柵への負荷が大きいとみられ、より高頻度でのメンテナンスが必要であると考えられる。

より短い時間間隔で計算値を出力し解析することで、短時間で変動する風を捉えたより精密な考察ができると

考える。また本研究はあるひとつの事例のみの解析に留まっており、事例によって強風が吹く場所や強さに多少の違いがあると考えられるので、より堅牢な考察のためにはほかの事例も解析することが必要である。

参考文献

- Dudhia, J., 1989: Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.46, No.20, pp.3077-3107.
- Hong, S. Y. and J. O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol.42, No.2, pp.129-151.
- Janjić, Z. I., 1994: The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer, and Turbulence Closure Schemes. *Monthly Weather Review*, Vol.122, No.5, pp.927-945.
- Kusaka, H. and H. Fudeyasu, 2017: Review of downslope windstorms in Japan. *Wind and Structures*, Vol.24, No.6, pp.637-656.
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol.102, No.D14, pp.16663-16682.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., Powers, J. G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *Tech. Note NCAR/TN-475+STR*.
- 日下 博幸, 2009: 領域気象モデル WRF について. *ながれ: 日本流体力学会誌*, Vol.28, No.1, pp3-12.
- 東 邦昭, 古本 淳一, 橋口 浩之, 2014: 50m メッシュ気象予報モデルによる比良おろしの数値シミュレーション. *風工学シンポジウム論文集*, Vol.23, pp517-522.
- 古本 淳一, 東 邦昭, 2014: 災害に立ち向かう先端大気観測とその社会還元. *生存圏研究*, Vol.10, pp.23-27.
- (令和元年11月22日受付)