109 (滑昇霧)

別府湾周辺で発生する滑昇霧の統計的特徴

鈴 木 由 樹^{*1}·大 橋 唯 太^{*2}·出 納 誠^{*3}

1. はじめに

大分県の別府湾周辺(第 1図)は.100m先が視認 できないほどの濃霧が発生 することで知られている. この濃霧は、別府湾の特殊 な地形によって発生する滑 昇霧であると考えられてい 3 (Ohashi and Suido 2021). 滑昇霧は, 空気塊が 山の斜面を上昇する際。断 熱冷却によって発生する霧 とされる (小倉 2016). 第 2 図には、別府湾周辺で発 生した滑昇霧と思われる視 程悪化の様子を示してい る. このとき観測された視 程は100m以下となり. 57mにまで低下する時間帯 もあった.



別府市の山間部を通る大分自動車道や東九州自動車 では、この滑昇霧による濃霧で視界不良による速度規 制や通行止めが毎年多発しており、対策が課題となっ ている(西日本高速道路 2020).平成26年度には、大 分自動車道の日出(ひじ)ジャンクションから湯布院 インターチェンジまで、271時間もの通行止めが発生

*1(連絡責任著者)Yoshiki SUZUKI, 岡山理科大学大学 院生物地球科学研究科. g22gm38iz@ous.jp

- *² Yukitaka OHASHI, 岡山理科大学生物地球学部.
- *³ Makoto SUIDO, 株式会社ウェザーニューズ.
- © 2024 日本気象学会





したことが報告されている(国土交通省 2015). この 濃霧対策として、高速道路上に防霧ネットや視線誘導 灯を設置しているが、交通障害を完全に解消するまで は至っていない. 一方で滑昇霧の気象学的な研究は、放射霧や蒸気霧 などに比べて非常に少なく、別府湾周辺で発生する滑 昇霧の調査自体も、かなり限られている(日本気象協 会 2018; Ohashi and Suido 2021; 鈴木ほか 2021). そこで本研究では、気象庁のメソ客観解析データを用 いて、過去に別府湾周辺で発生した滑昇霧の事例を総 観規模擾乱(気圧配置)でパターン分類することを試 みた、その結果をもとに、高速道路の規制情報の発信 に関わる滑昇霧の発生と消滅の気象学的な特徴を明ら かにすることで、別府湾周辺における濃霧の予測につ ながる知見になり得ると考えた。

2. 方法

2.1 使用データ

京都大学生存圏研究所が WEB 公開するデータベー ス (http://database.rish.kyoto-u.ac.jp/arch/jmadata/ gpv-original.html, 2023.9.15閲覧) にある,気象庁メ ソ数値予報モデル GPV (MSM)の初期値で使用され る客観解析値から,地上と気圧面 (900hPa, 850hPa, 700hPa)の格子点データを用いた.MSM がもつ水平 解像度(地上は約5km,気圧面は約10km)は,別府 湾周辺の地形の影響を十分考慮できると考える.滑昇 霧が発生する地域に該当する格子点(第3図)の各種 気象要素を抽出し,持ち上げ凝結高度(LCL)・温位 (θ)・相当温位(θ_e)をそれぞれ算出した.本研究では 特に滑昇霧を扱っているため,空気塊が別府湾から山 地へと這い登る状況を考えて,海側の格子点から山地 側の格子点(第3図の点線の枠で囲われた二つ)の相 当温位を引いた値を $\Delta \theta_e$ と定義して,考察に用いた.

2.2 解析の期間と方法

本研究では、2019年4月から2021年9月までの約2 年半のあいだに、大分自動車道と東九州自動車で濃霧 による速度規制または通行止め(以降,あわせて「交 通規制」と呼ぶ)が発生した116事例について解析した.

別府湾は西方向に貫入した矩形地形となっており (第1図), 滑昇霧が発生する際には海側から斜面を吹 きあげる東寄りの風が存在するため,海から暖湿気塊 が流入している状況が想定される(Ohashi and Suido 2021). そこで116事例に対して,日本の南から強い風 が流入するような総観規模擾乱を分類したうえで,コ ンポジット解析を行った.その際,交通規制開始時刻 と解除時刻のそれぞれを中心とした前後24時間(計2 日間)を解析した.

総観規模擾乱の分類では、濃霧による交通規制が発

生した時刻に最も近い地上天気図の情報から,気圧配 置が類似するパターンを集めた.

3. 結果と考察

3.1 総観規模擾乱の分類

交通規制が発生した116事例の総観規模擾乱を四つ の地上気圧配置と,いずれにも属さない気圧配置の計 五つに分類することができた.第4図は,その分類さ れた気圧配置の例と,地上の相当温位の水平分布図を 示す.それぞれ,「日本海低気圧型」,「停滞前線型」, 「南岸低気圧型」,「台風型」,「いずれにも含まれない 型」である.

五つの気圧配置ごとの交通規制時間を,第5図に示 す.日本海低気圧型と南岸低気圧型の事例数が最も多 く、3月から6月にかけてよく出現していた.一方で 停滞前線型は6月、台風型は9月に多く発生してい た.1事例あたり平均14~22時間(840~1320分)の交 通規制が出されており、濃霧が一度発生すると長時間 にわたって交通障害が起きていると予想される.交通 規制時間が最も長いのは停滞前線型で平均22時間 (1320分)、次いで南岸低気圧型が平均14時間(840分) であったが、25、50、75パーセンタイル値には両者の あいだであまり違いがなかった.

3.2 交通規制開始前後の時間帯での特徴

事例数の最も多かった南岸低気圧型28事例における 交通規制開始の前後24時間(計2日間)の相対湿度と 東西成分風速の時間変化を,第6図に示す.ただし, 相対湿度は第3図で示した山地側の格子点,風速は海 側の格子点での値を用いた.また,交通規制の開始時 刻を中心に,コンポジット解析を行っている.これ以 降は南岸低気圧型の結果を,おもに説明していく.こ のため,南岸低気圧の解析結果の図は示すが,その他



第3図 気象庁メソ数値予報モデル GPV (MSM) の地上格子点の位置(左図)と,相当温 位差 Δθ_eの算出方法(右図). Δθ_eの計算 に用いた格子点は,左図に示す枠内の二 つである.気圧面の格子点には○印をつ けてある(左図).

の型の図を示すことは、ここでは省略する.交通規制 が開始された15時間前から相対湿度が上昇しはじめ、 規制開始時には最大値をとり、その平均値は90%を超 えている(第6図 a).他の四つの気圧配置では、規制 開始の6~9時間前から相対湿度が上昇し、同じく規 制開始時に最大となっていた.解析した5km格子が 濃霧の発生地域を含んでいることから、交通規制が発 生したときは高湿度の気象条件が MSM でも表現され ているとわかる.

一方,東西成分の風速は,規制開始の24時間前から 東風成分が大きくなることが多く,9時間前になると 全事例の75%で東風成分が卓越していた(第6図b). この東風成分は,別府湾から山の斜面に向かう方向に 相当し,規制開始9時間後まで解析されている.交通 規制開始時で東成分の風速は最大となり,その12時間 後には西寄りの風に変化している点が特徴的である. 他の四つの気圧配置では,規制開始24時間前から全事 例の75%で東寄りの風を示していた(図省略).このう ち台風型とその他の型では,規制開始後の西寄りの風 への変化が現れておらず,濃霧が発生しやすい状況が 続いていた.しかし,時間とともに相当温位が低下し ていたことから,別府湾への暖湿気塊の流入が減少し たために,第5図に示すように濃霧による交通規制は 他の気圧配置よりも短かったと考えられる.

さらに、濃霧発生地域における下層雲量は、交通規 制開始の15時間前から増加しはじめ、規制開始時刻に 最大(平均値で約60%)となっていた(第6図 c).メ ソ客観解析データでも、滑昇霧に伴う濃霧が下層雲量



第4図 濃霧による交通規制が発生した事例でみられた総観規模擾乱の五つの分類.地上天気図(左図)と,地上の相当温位と水平風ベクトルの水平分布図(右図).(a)日本海低気圧型,(b)停滞前線型,(c)南岸低気圧型,(d)台風型,(e)a~dのいずれにも含まれない型.(e)は特によく出現した代表的な気圧配置を示す.天気図は,気象庁の実況天気図を一部加工して引用.

として表現されていると考えられる.

第7図には、南岸低気圧型における規制開始の24時 間前、18時間前、9時間前、規制開始時刻での風配図 をそれぞれ示している、規制開始24時間前から28事例 中10事例、規制開始時刻になると22事例で南東よりの 風が解析されていた、規制開始の時刻に近づくにつれ て風向のばらつきが小さくなっており、東〜南東風が 増加した、滑昇霧の発生時に吹く南東風は、Ohashi and Suido (2021)による数値シミュレーションでも再 現されており、本解析の結果とも一致する、すべての 気圧配置で、規制開始前の時間帯に滑昇霧の発生条件 となる東〜南東風が解析されており(図省略)、濃霧の 発生に寄与していたと考えられる.

第8図 a, bに、 $\Delta \theta_e \ge \Delta \theta$ の時間変化を示す、 $\Delta \theta_e$ は、第3図で示した、海側にある格子点の相当温位か ら山地側にある格子点の相当温位を引いた値であり、 飽和した空気塊が山の斜面を滑昇しているような条件 であれば、 $\Delta \theta$ はゼロとならずに $\Delta \theta_e$ がゼロに近い値 を持つようになると予想される. つまり、このとき滑 昇霧が発生している環境であると判定できる. $\Delta \theta_e$ の 時間変化をみると、交通規制開始の12時間前から $\Delta \theta_e$ がゼロに近づき、規制が開始された後もしばらく継続



第5図 2019年4月~2021年9月にみられた濃霧 による交通規制116事例の総観規模擾乱 (気圧配置)ごとの交通規制時間. 箱ひげ 図は,最短時間(左側のひげ),25パーセ ンタイル(箱の左側面),中央値(箱内の 縦線),平均値(箱内の×),75パーセン タイル(箱の右側面),最長時間(右側の ひげ)を示す. して、ほぼゼロの値を示している(第8図a).この特 徴は、台風型を除いた四つの気圧配置で交通規制の開 始前から現れており、停滞前線型とその他の型では3 時間前、日本海低気圧型で12時間前に $\Delta \theta_e$ がゼロに近



均値(相内の×), /5/ハーセンタイル(相 の上側面), 最大値(上側のひげ)を示す.

い状態がみられた (図省略).

このときの別府湾内の格子点における LCL(Lifted Condensation Level:持ち上げ凝結高度)の時間変化 を,第8図 c に示す.第1図の地形断面図でみられる 斜面下方側にある高速道路は,海岸から4km離れた 標高約350m に存在する.規制開始の3時間前からこ の標高よりも低いLCLが解析されていた.他の気圧配 置でも,規制開始の15時間前からLCLが低下し, 200~300mの値で推移していた(図省略).したがっ て, $\Delta \theta_e$ に加えてLCLからみても,この地域における 滑昇霧の発生条件を満たしていた.

3.3 交通規制解除前後の時間帯での特徴

規制解除時刻の前後24時間に対してコンポジット解 析を行った結果を,第9図に示す.南岸低気圧型は, 規制解除の12時間前には相対湿度が90%前後の高い値 で推移しているが,9時間前をピークとして以降の時 間には低下している様子がわかる(第9図 a).他の気 圧配置の場合には,これよりも遅く,規制解除の3~ 6時間前に相対湿度が低下しはじめていた(図省略).

一方,風は(第9図b),南岸低気圧型を含む四つの 気圧配置で,規制解除6~12時間前から東寄りの風の 弱化が認められ,解除の時刻とほぼ同時に西寄りの風 への変化が解析されていた.この風の反転現象は, Ohashi and Suido (2021)による数値シミュレーショ ンでも再現されており,滑昇霧の消滅と深い関わりが



時間前, (d)交通規制開始時刻での風配図.

あると考えられる.上述以外の台風型では,規制解除 後も東寄りの風が持続する傾向がみられ,3.2節で触 れたように西寄りの風が出現することはなかった.た だし,東風成分の弱まりが規制解除の12時間前から 徐々に起こっていたため(図省略),この弱化は規制解 除のための予測情報として有用であると示唆される.

 $\Delta \theta_{e}$ は(第9図 c),規制解除の直前までゼロに近い 値で継続しているが、交通規制が解除された3時間後



から差が大きくなりはじめ、9時間後には1Kほど海 側の相当温位が高くなっている.しかし、規制解除さ れる前の時間帯には、 $\Delta \theta$ の特徴的な変化がみられる ことはなかった.

以上の考察から、交通規制を解除するタイミングを 事前に予測するには、別府湾付近での東風成分の弱化 と相対湿度の低下が有効な指標になり得ると考えられる.

3.4 交通規制が発生しなかった事例

第10図は、南岸低気圧の気圧配置であったものの、 濃霧による交通規制が発生しなかった16事例をコンポ ジット解析した結果である. 規制開始時刻が存在しな いため、南岸低気圧の中心が九州南部の東経130度を 通過した時間を0時間と定義し、その前後24時間を解 析した.相対湿度(第10図 a)は12時間後に最も高く なっていたが、その平均値は80%程度と、濃霧による

(a)相対湿度

0時間

9時間前 時間部

9時間前 6時間前 3時間前 0時間 3時間後 6時間後 12時間後 18時間後

(c)LCL

9時間前

5時間前 2時間前 6時間前 時間前

2時間前

2時間前 品語語 3時間後

6時間後 9時間後 2時間後 15時間後

> 9時間後 L5時間後 1時間後

3時間後

5時間後 9時間後 .2時間後 5時間後 .8時間後 21時間後 4時間後

0時間

18時間後 21時間後 24時間後

4時間後



交通規制があった事例の場合よりも低い.16事例中1 事例のみ,相対湿度が95%を長時間解析していたが, そのときは濃霧までには至らなかったと推測される.

東西成分の風速(第10図 b)を解析した結果,24時 間前から6時間後まで平均風速は0.5m/s以下の東寄 りの風で,その後は2m/s程度の西寄りの風に変化し ていた.このことから,交通規制が発生した事例に比 べても東風成分が弱いか,風向が安定していない場合 が多く,風の場でみると滑昇霧は形成されにくい条件 といえる.

 $\Delta \theta_{\rm e}$ (図省略) は,12時間前から21時間後までゼロ に近い値の時間帯が多いものの、LCL(第10図 c) は 最低でも平均600m で、高速道路の標高よりも高い. したがってLCLと風速の場から考えても、濃霧による 交通規制が発生する事例に比べて暖湿な空気塊が別府 湾に供給されにくく、滑昇霧の形成にまで結びつかな かったと考える.

さらに、濃霧による交通規制が発生した南岸低気圧 型28事例と、発生しなかった16事例の低気圧の中心位 置を比較した結果を第11図に示す.規制が発生した事 例は、その時刻における低気圧の中心位置であり、一 方の規制が発生しなかった事例は低気圧が出現した時 刻での中心位置を表す.規制が発生した事例の低気圧 の中心は、北緯30度以北、東経130度以西の範囲に集中 しており、規制が発生しなかった事例では中心の位置 が北緯30度以南に分布している様子がわかる.した がって、南岸低気圧型で滑昇霧による交通規制が発生 するのは、九州南西部に近い北緯30°以北かつ東経 130°以西の範囲に低気圧の中心が接近した状況で多 く、このとき滑昇霧が発生しやすくなると考えられる.

3.5 上層風との関係

第12図 a に、交通規制が発生した南岸低気圧型の事 例における上層(900・850・700hPa)の東西成分風速 を示す。900hPa 面では、交通規制の15時間前から東寄 りの風が徐々に強まり、規制開始時刻には4 m/s に近 い東風成分が解析されている。850hPa 面では、規制開 始の6時間前から平均風に東風成分がみられ始め、 900hPa と同様に規制開始時に東風成分の平均風速が 最大となっていた。しかし、その上空である700hPa 面 の風は東風成分が現れておらず、平均風速6~8 m/s の西風成分が継続している様子がわかる。

Ohashi and Suido (2021)の数値シミュレーション で再現された滑昇霧の鉛直断面図(第12図 b)でも, 別府湾に侵入した暖湿気流(東寄りの風)が山の斜面 上を滑昇している一方,別府湾の上空では風向が逆転 (西寄りの風)していることで,鉛直循環を形成する様 子が示されている.したがって,前述の解析結果でみ られた下層で東寄り,上層では西寄りになっている特 徴とも一致する.上空の西寄りの風は,Ohashi and Suido (2021)の気象庁ウインドプロファイラの解析で も確認されている.

4. まとめと今後の展望

本研究では、これまでほとんど解析されていなかっ た別府湾周辺で発生する滑昇霧について、気象庁メソ 客観解析データの統計解析から、気象学的な特徴を明 らかにした.滑昇霧による濃霧と思われる高速道路 (東九州自動車道と大分自動車道)の速度規制または通 行止めが発生した116事例を解析し、総観規模擾乱(気 圧配置)の分類別に特徴を考察した。

第1表は、滑昇霧が発生しやすい条件が、各気象要素に対して何時間前から出現していたかをまとめている。規制開始時での条件は、地上において「相対湿度の上昇」、「東風成分の強化」、「Δθ_eがゼロに近い」、「LCLの低下」、「下層雲量の増加」で、規制解除時での条件は、「相対湿度の低下」、「東風成分の弱化」、



の低気圧の位置. 矢印は非発生時の低気

圧の進行方向を示している.



第12図(a)交通規制開始時刻の前後24時間でコンポジット解析した南岸低気圧型28事例における900hPa, 850hPa, 700hPaの東西成分風速の時間変化.ただし平均値のみを示している.(b) Ohashi and Suido (2021)による滑昇霧の数値シミュレーションの結果.別府湾を東西方向に切った鉛直断面図で,交通規 制開始時刻(図12b左)と,規制開始時刻の7時間後(図12b右)を示す.図中の塗りつぶしは視程の値 である.

「 $\Delta \theta_e$ の増加」である.日本海低気圧型,停滞前線型, 南岸低気圧型は,解析した気象要素すべてで滑昇霧が 発生する条件を満たしていた.東風成分の強化は遅く とも規制開始時刻の9時間前,相対湿度の上昇は6時 間前, $\Delta \theta_e$ がゼロに近くなる特徴は3時間前,LCLの 低下は3時間前,下層雲量の増加は6時間前には滑昇 霧の発生条件を満たしており,いずれの要素も規制を 開始するタイミングを検討する際の有効なパラメータ になることが考えられる.一方,交通規制を解除する ときは,相対湿度が規制解除時,東風成分の弱化が規 制解除時刻の遅くても6時間前, $\Delta \theta_e$ の増加が規制解 除時刻の6時間前であったことから,東風成分の弱化 と $\Delta \theta_{e}$ の増加が、規制解除のタイミングを計る指標になり得る.

今後は、本研究で明らかとなった滑昇霧の発生条件 をパラメータにした機械学習などによる予測モデルを 構築し、交通規制情報の発信に有益なツールの作成を 目指していく予定である.

謝 辞

株式会社アイ・アール・システム、大分トラピスト 修道院、テレビせとうち株式会社の大谷和男氏には、 本研究を遂行するにあたり多大なご協力ならびにご助 言を頂きました.この場を借りて感謝申し上げます.

第1表 総観規模擾乱のタイプ別にまとめた、各気象要素に対する滑昇霧の発生条件.○が発生条件に該当し、× が該当しなかった要素を表す.括弧内の数字は、交通規制開始時刻の何時間前から滑昇霧の発生条件が出 現していたかを示している.

気象条件		日本海低気圧型	停滞前線型	南岸低気圧型	台風型	その他
規制開始時	相対湿度の上昇	〇 (9時間前)	〇 (6時間前)	○ (15時間前)	〇 (6時間前)	〇 (15時間前)
	東風の強化	○ (21時間前)	○ (15時間前)	○ (9時間前)	〇 (21時間前)	○ (18時間前)
	$\Delta heta_{ m e}$ がゼロに近い	〇 (24時間前)	○ (3時間前)	〇 (12時間前)	×	○ (3時間前)
	LCL の低下	○ (3時間前)	○ (6時間前)	○ (6時間前)	○ (6時間前)	○ (12時間前)
	下層雲量の増加	○ (9時間前)	○ (6時間前)	○ (15時間前)	○ (12時間前)	○ (6時間前)
規制解除時	相対湿度の低下	○ (解除時)	○ (解除時)	○ (6時間前)	○ (解除時)	○ (解除時)
	東風の弱化	○ (9時間前)	○ (6時間前)	○ (6時間前)	×	×
	$\Delta heta_{e}$ の増加	○ (3時間後)	○ (6時間前)	○ (3時間後)	×	○ (3時間後)

参考文献

国土交通省 HP, 2015:高速道路の通行止めワーストラン キング (平成26年度).

https://wwwl.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/conges tion-loss-time/road_closed.html (2023.12.14閲覧).

- 日本気象協会,2018: JWA ニュース,ドローンによる上空 気象観測にて「霧」の発生・消散メカニズムの解析を開始. https://www.jwa.or.jp/news/2018/09/4372/(2023.6.28 閲覧).
- 西日本高速道路株式会社,大分高速道路事務所,2020:濃 霧対策編 五里霧中.

https://www.w-nexco.co.jp/safety_drive/ooita/ safedrive/fog/facility.html (2023.6.7閲覧).

- 小倉義光, 2016:一般気象学第2版補訂版, 東京大学出版 会, 104pp.
- Ohashi, Y. and M. Suido, 2021: Numerical simulations of upslope fog observed at Beppu Bay in Oita Prefecture, Japan. Meteorol. Appl., 28, e2003, doi:10.1002/met.2003.
- 鈴木由樹,大橋唯太,今中彩梨乃,出納 誠,2021:別府 湾周辺で発生する濃霧の実地観測とメソ客観解析データ による統計分析.日本気象学会関西支部例会講演要旨 集,156,32-35.