センシングデータを用いた冬季の車両スタック発生時の交通流の解析

堀井佑真、川崎洋輔、平田健介、水上斐斗＊1
大武博史、高坂晴伎＊2

1　はじめに

本研究は、センシングデータを解析し、冬季の車両スタックの発生メカニズムを明らかにすることを目的とする。

わが国では大量の降雪により、車両のスタックが多数発生している。スタックを防ぐためには、事前に道路を通行規制することが望ましい。しかし、日本の道路は、雨量規制を行うための指標（e.g.連続雨量の閾値判定による通行止め）は存在するが、降雪時の規制を行うための明確な指標は存在しない。既往研究では、プローブデータを用いて、平常時とスタック発生時の速度の乖離を状態空間モデルにより評価することで、スタック発生の危険性の評価を試みている[1),2)]。この研究では、東北地方で発生した複数のスタック事例を対象にモデル検証した結果、多くの場所で事前に危険性をアラートすることに成功している。しかし、この研究では、スタックの発生メカニズム（発生過程）には着目していない。

よって、本研究では、“(1) ETC2.0 プローブデータ解析によるスタック前後の車両軌跡や車両速度の分析”および“(2) CCTV カメラ画像処理によるスタック車両とその周辺車両挙動の分析”を行い、スタック発生メカニズムを把握する。これにより、スタックの予兆(トリガー)を捉えられれば、降雪時の規制を行うための指標が設定できる可能性がある。

2　分析データ概要

本章では，研究に用いたデータの概要を述べる。

2.1　気象データ

スタック発生箇所の気象データを整理する。**図1**にスタック発生箇所から近い新庄市のスタック発生日（2021年2月17日）の時間帯別降雪量，積雪深さの推移を示す。同図の棒グラフは、降雪量、折れ線グラフは積雪深さを示す。これを見ると、スタック当日は、時間帯別の降雪量が最大、約5cm、積雪深さは、150cm程度まで増加している様子が見られる。また、新庄市は11時39分から21時20分までの9時間41分間、大雪警報が発令されていた。

2.2　スタック発生情報

スタック発生情報は、道路管理者の管理記録を用いた。

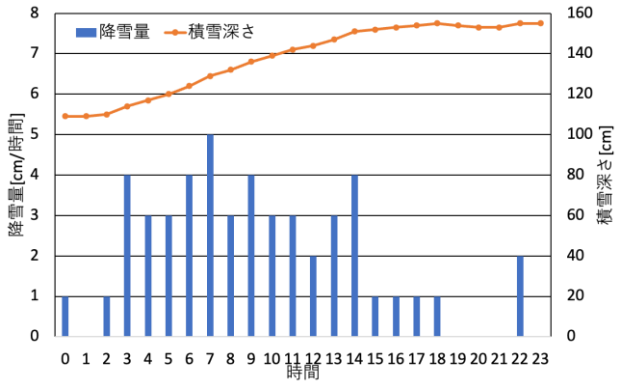


図1 降雪量・積雪深さの推移(2021年2月17日，新庄市)
出典：気象庁

図2 分析対象区間

スタック発生日時は、2021 年 2 月 17 日、区間は、**図 2** に示す国道 112 号線（月山道路）の上下線とした。ここは豪雪地帯かつ、最高標高が約 734m となる地点もあり、分析箇所の道路勾配は 5%であるため、冬季には積雪によるスタックが発生しやすい場所である。分析は、当日の 15:20～16:20 に発生した上下方向のスタックを対象とした。

2.3　ETC2.0 プローブデータ

本研究では、ETC2.0プローブデータを用いた。ETC2.0プローブデータとは、ETC2.0車載器を搭載した車両が路側機を通過する時に収集したGPS（緯度、経度、速度）等のデータである。仕様の詳細は参考文献[3)]を参照されたい。

＊１日本大学工学部土木工学科
＊２国土交通省東北地方整備局道路部道路計画第二課

ETC2.0 プローブデータは、200m 毎の個々の車両の位置や速度を継続的かつ広範にモニタリングできるといった特性がある。

2.4 CCTV カメラ画像

本研究では、スタック場所のミクロな車両挙動を分析するために CCTV カメラ画像のデータを用いた。ここで、CCTV カメラとは道路に設置されたビデオカメラであり、**図 3** のように道路上を走行する車両挙動や除雪の状況を撮影することができる。分析には、2021 年 2 月 17 日の山形県鶴岡市を走る国道 112 号（月山道路）下り線の CCTV カメラ画像を用いた。

3　分析方法

本章では、前節で述べた ETC2.0 プローブデータ及び CCTV カメラ画像の分析方法について述べる。

3.1　ETC2.0 プローブデータの分析方法

本節では、ETC2.0 プローブデータの分析方法を述べる。ETC2.0 プローブデータは、2021 年 2 月 17 日の**図 2** に示した区間のデータを用いた。本研究では、ETC2.0 プローブデータを集計し、平常時、スタック発生時のタイムスペース図を可視化した。タイムスペース図とは、時空間の車両軌跡を可視化したものであり、個々の車両のスタック発生前後の速度プロファイルを分析できる。あわせて、15 分毎の速度分布図を作成し、スタック発生の前後の速度分布の推移を分析することとした。

3.2 CCTV カメラ画像の分析方法

本節では、CCTVカメラ画像の分析方法について述べる。本研究では、CCTVカメラ画像を用いて、スタック発生箇所の特定断面を通過する車両の時刻と車種を目視で記録した。そして、経過時刻と交通量の累積台数を集計し、スタック時の交通流率の特性を分析した。あわせてスタック発生時の車両挙動の特徴を画像から把握し、スタックの発生メカニズム（発生過程）を整理した。

4　分析結果

本章では、ETC2.0 プローブデータと CCTV カメラを用いたスタック前後の交通流の分析結果について述べる。

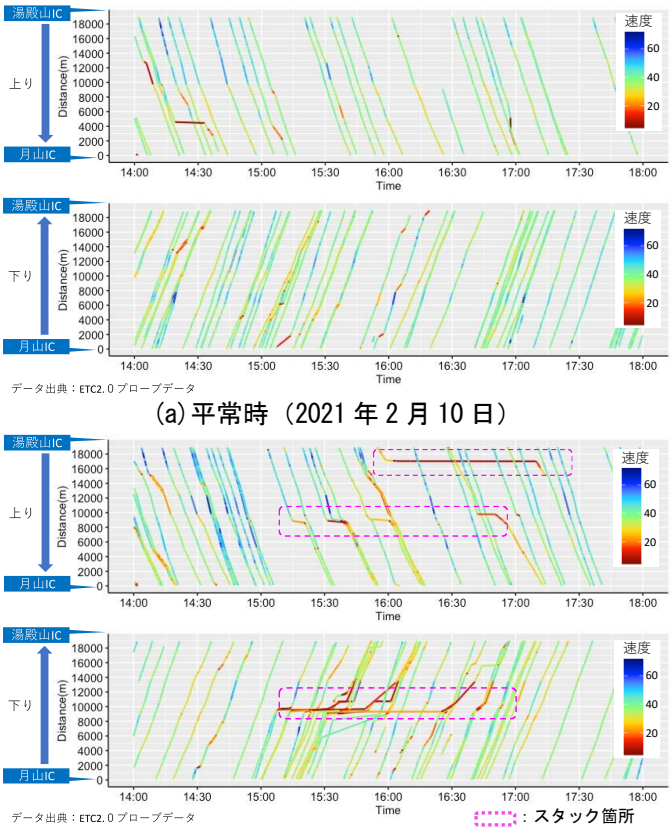
4.1 ETC2.0 プローブデータを用いた交通流の分析結果

本節では、ETC2.0 プローブデータを用いた交通流の分析結果を述べる。

まず、タイムスペース図を用いた平常時およびスタック発生時の分析結果を述べる。**図 4** に平常時及びスタック発生時のタイムスペース図を示す。図の横軸は、時刻、縦軸は、車両位置を示している。なお、縦軸の0m地点は、**図2**に示した月山IC、18,000m地点は湯殿山ICの位置を示している。車両軌跡の色は車両速度を示しており、青色が高速状態となっており赤色に近づくにつれて低速であることを示している。

図 3 CCTV 画像サンプル（2021 年 2 月 17 日）

出典：国土交通省東北地方整備局



(a) 平常時（2021 年 2 月 10 日）

(b) スタック発生時（2021年2月17日）

図4　平常時・スタック発生時のタイムスペース図

平常時のタイムスペース図（**図4(a)**）を見ると、上り・下り方向共に当該区間では、スムーズに車両が走行していることがわかる。一方、スタック発生時のタイムスペース図（**図4(b)**）では、上り・下り方向共に15:20頃から速度低下が発生していることから、走行車両がスタックの影響を受けていることが推察される。また、下り方向の方が低速（もしくは停止に近い状況）の車両が多く発生している傾向にある。

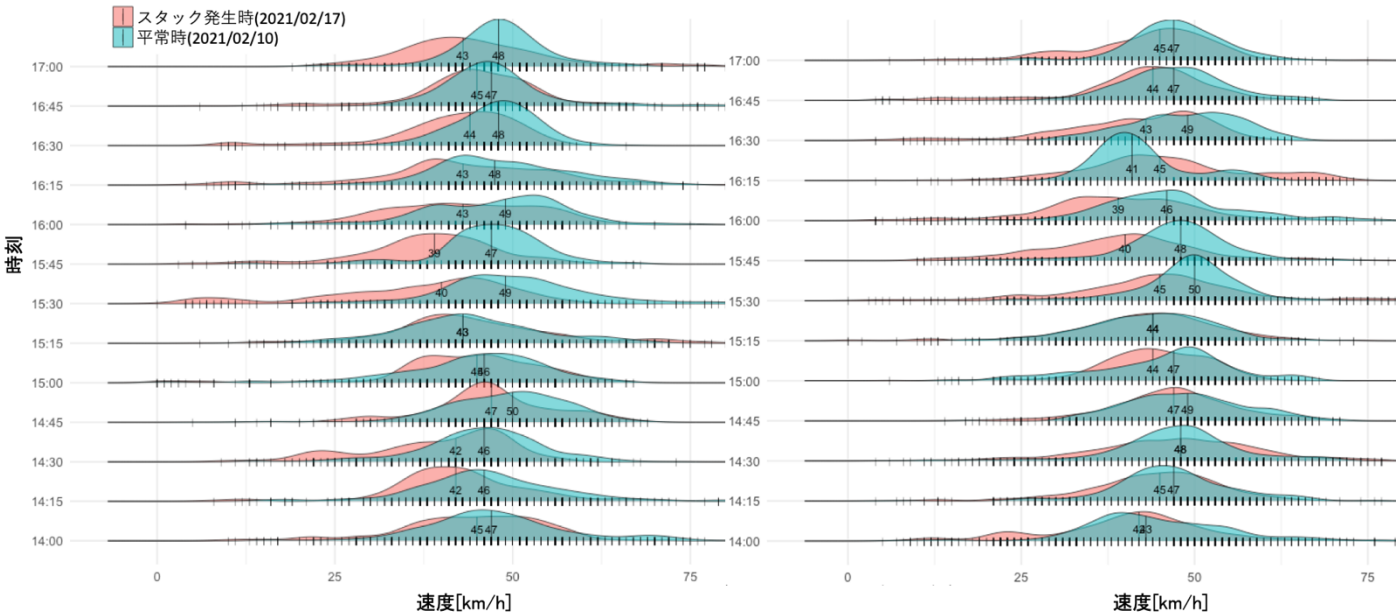


図 5 平常時およびスタック発生時の時間帯別の速度分布の推移

次に時間帯別の速度分布の分析結果を述べる。**図 5** に 15 分毎の月山道路上下線の速度分布の推移を示す。同図の横軸は車両速度、縦軸は頻度を表している。また、平常時の分布を青色、スタック発生時の分布を赤色で示している。図中の数字は、平均速度の値である。**図 5(a)**の上り方向の速度分布に着目すると、スタック発生時には、低速度域に多くのデータが分布する傾向にある。スタック発生前の 14 時台に既にスタック発生時は、平常時よりも低速状態の速度分布が多くなっていることがわかる。下り方向（**図 5(b)**）でも上り方向と同様に、スタック発生前に平常時と比べて、低速度域のデータ分布が多い傾向が見られる。したがって、スタック発生前の時間帯においては、平常時よりも車両の速度が全体的に低下するといった予兆とみられる現象がプローブによって捉えられていると解釈される。

以上より、ETC2.0 プローブデータを用いれば、広範かつ、長期間に渡って、対象区間のプローブ車両軌跡や速度分布の状況を捉えることができる。前述したスタック前の速度低下状況を事前に検知できれば、スタックを未然に防ぐような対応を取れる可能性があると考える。

一方で、ETC2.0 プローブ情報はあくまでサンプル（ETC2.0 車載器を搭載した車両のみのデータ）のため、スタックを発生させた車両そのもののミクロな挙動を見逃す恐れがあること、ならびに、スタックのメカニズム（発生過程）は把握できないといった課題もある。したがって、本研究では、スタック発生箇所の CCTV カメラ画像を用いて、スタック発生箇所のミクロな車両挙動を分析し、スタックの発生メカニズムの把握に試みる。CCTV カメラ画像の分析結果は次節で述べる。

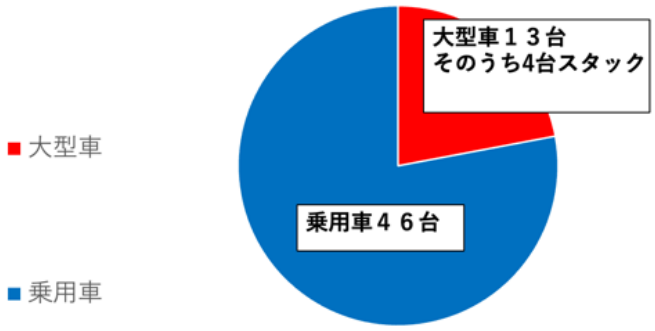


図 6 通過車両の車種構成、下り方向(N＝59)

4.2 CCTV カメラ映像用いた交通流の分析結果

本節では、CCTV カメラ映像を用いた分析結果を示す。なお、ここでは、紙面の都合上、下り方向で発生したスタックを対象とした分析結果のみ述べる。なお、ここでは、交通流率が 0（ゼロ）となる状態を交通麻痺、その原因となる車両の停止をスタックと表記する。

図 6 に 2021 年 2 月 17 日の 15:20～15:50 間にスタック発生断面を通過した車種の構成を示す。通過車両は、59 台でそのうち大型車は、13 台(約 22%)となっている。また分析の結果、スタックの原因となった車両は4台であり、全て大型車であった。なお、スタックした大型トラックは、目視確認の結果、全てチェーン装着済であった。

スタック発生時の交通流率の分析結果を述べる。**図 7** にスタック発生断面の累積図を示す。同図の横軸は、時刻、縦軸は 15:20 からの累積台数を表している。累積台数が横軸に平行になっている時間帯は、交通流率がゼロ、すなわち、交通麻痺の状態を示している。同図より、スタックにより交通が麻痺している状態は、赤線で示す 4

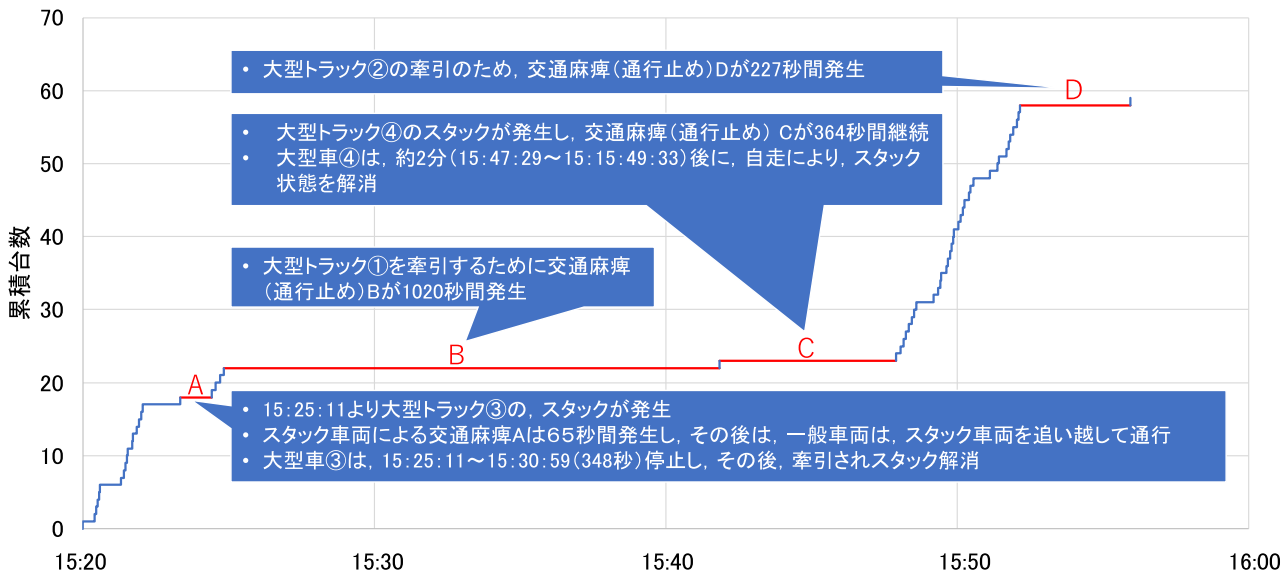


図 7 スタック発生断面の累積図およびスタック車両の処理内容

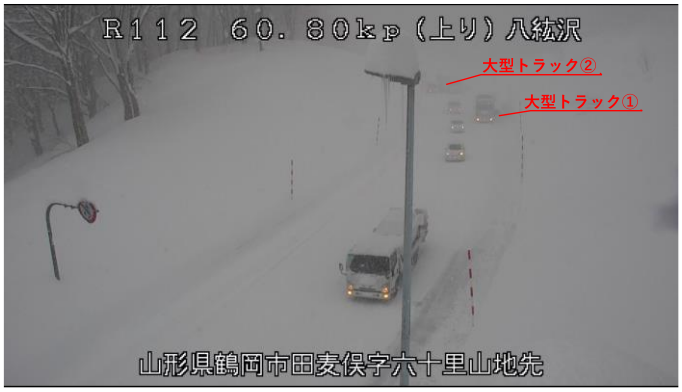


図 8 スタック A の発生直前の CCTV カメラ画像
出典：国土交通省東北地方整備局

事象存在することがわかる。また同図では、スタックの状況およびその原因となったスタック車両の処理内容（スタック解消の過程）を図中の吹き出しに記載している。その事象を時系列の順番に**図 7** のように A、B、C、D の ID を付与した。なお、A～D の赤線の長さが交通麻痺が継続した時間を示している。また、スタック発生箇所の他に、スタックの原因となった大型トラックの ID を停車した順に、①～④の ID を付与した。スタック発生事象と停止したトラック（原因車両）の ID を別に付与した理由は、スタック発生順序とそのスタックの原因となった車両の発生時刻が前後（錯綜）しているため原因車両と事象との区別をつけるためである。以降では、スタックが発生した事象（A、B、C、D）の車両挙動の分析結果について述べる。**図 8** にスタック A の発生直前の CCTV カメラ画像、**図 9** にスタック A の発生直前からスタック A～D 発生時の交通状態の模式図を示す。

最初にスタックが発生する直前(**図 8** および**図 9**(a))の状況を説明する．まず，大型車２台（ID①、②）がスタックしたため、進めない状態となった。そのため、大型車は、路肩に退避（進まずに横に避けるように走行）し、停車した。但し、この状態では、**図 8** のように通過車両は路肩の退避車両を避けて通行できており、交通麻痺には至っていなかった。その後、スタック A が発生した。

スタック A 発生時の状態を示したものが**図 9**(b) である。図中の③の大型トラックが原因車両である。この車両は、路肩に停止している大型トラック①、②を避けて走行（迂回）し、元の車線に復帰する際に轍にタイヤがはまり、スタックが起きていることがわかった。大型トラック③のスタックが発生してから、車両が 4 台通過した後、通行規制がかかった。このスタックによる交通麻痺（通行止め）は、65 秒間継続した。その後，他の車両は、**図 8** と同様にスタック車両を迂回しつ通過している状態が見られた。なお、大型トラック③は 348 秒間停止し、その後、牽引され、スタックが解消された。

次に、スタック B の発生過程を**図 9**(c) を用いて、述べる。このスタックは、同図に示す大型トラック①の牽引作業によって発生している。なお、この①のトラックの牽引に連続して大型トラック③も牽引作業が行われている。この牽引中は、交通規制（全面通行止め）となっているため、**図 7** に示したように交通麻痺となる状態が長時間（1,020 秒間）継続した。

スタック C の発生過程を**図 9**(d) を用いて、述べる。このスタックは、前述した B の交通規制が解除された後、**図 9**(d) に示す大型トラック④がスタックしてしまったことから交通麻痺が発生した。このスタックによる交通麻痺は 364 秒間継続した。トラックがスタックしている間には、後続に最大 6 台の車両が滞留している状況が見られた。なお、この大型車④は、約 2 分間（124 秒）停止

した後、牽引作業なしで、自走してスタックを自ら解消させた。

最後に、Dのスタックの発生過程を**図9(e)**を用いて、述べる。このスタックは図に示すように大型トラック②の牽引作業に伴う交通規制によって発生した。この際の交通麻痺は、227秒間継続した。

上記のスタック発生過程の分析結果踏まえると、スタックを未然に防ぐには、前述したスタックAの発生直前において、大型車が路肩に停止した状態（**図8**および**図9(a)**）をトリガーとして、交通規制もしくは後続の車両に今後、スタックによる通行止めが発生する危険性が高いといった情報を提供することが有効と考えられる。

以上のことから、CCTVカメラ画像を用いればスタック発生箇所のメカニズム（発生過程）および、その際の車両挙動を詳細に把握することができる。よって、実務において、現地でのスタックの発生を未然に防止するためには、道路管理者が、CCTVカメラ画像を解析し、路肩への停止車両といった異常な車両挙動（スタックのトリガー）をリアルタイムに検出することが有効と考えられる。但し、CCTVカメラ画像の解析は本研究では、目視による人手の作業で行っている。そのため、効率的かつリアルタイムに異常な車両挙動を検出するためには、今後は、自動で画像処理を行うシステムの開発が必要と考える。また、CCTVカメラ画像は、センサー特有の課題もある。その内容を以下に述べる。CCTVカメラ画像は遠隔で詳細に交通状態をモニタリングするには有効である。但し、**図10**に示すように冬季に猛吹雪、いわゆるホワイトアウトの状態が発生した場合、CCTV画像から車両を判別するのは困難である。夏期においても濃霧等によりホワイトアウトと同様にCCTV画像の視認性が低下する状態となることが起こりうる。したがって、交通異常検出のリソースをCCTVカメラ画像のみに依存するのは望ましくないと考える。

4.3 分析結果まとめ

ここでは、前述までの分析結果のまとめを整理する。

4.1節では、プローブデータを用いた分析結果について述べた。分析結果より、タイムスペース図による停止車両の存在の検知や速度分布の比較によるスタック前の速度低下状況の検知の可能性が示された。一方で、プローブはサンプルであるため、スタックの詳細を捉えきれない可能性があるといったデータ特性に関する課題も把握された。

4.2節では、CCTV画像によりスタック箇所の詳細な車両挙動を分析した。その結果、スタックの発生前に路肩に停車する車両がいるといったスタックのトリガーの可能性がある異常挙動の存在を確認することができた。一方で、CCTVカメラ画像は、ホワイトアウト時などに車両の判別が困難になるなどの課題も把握された。

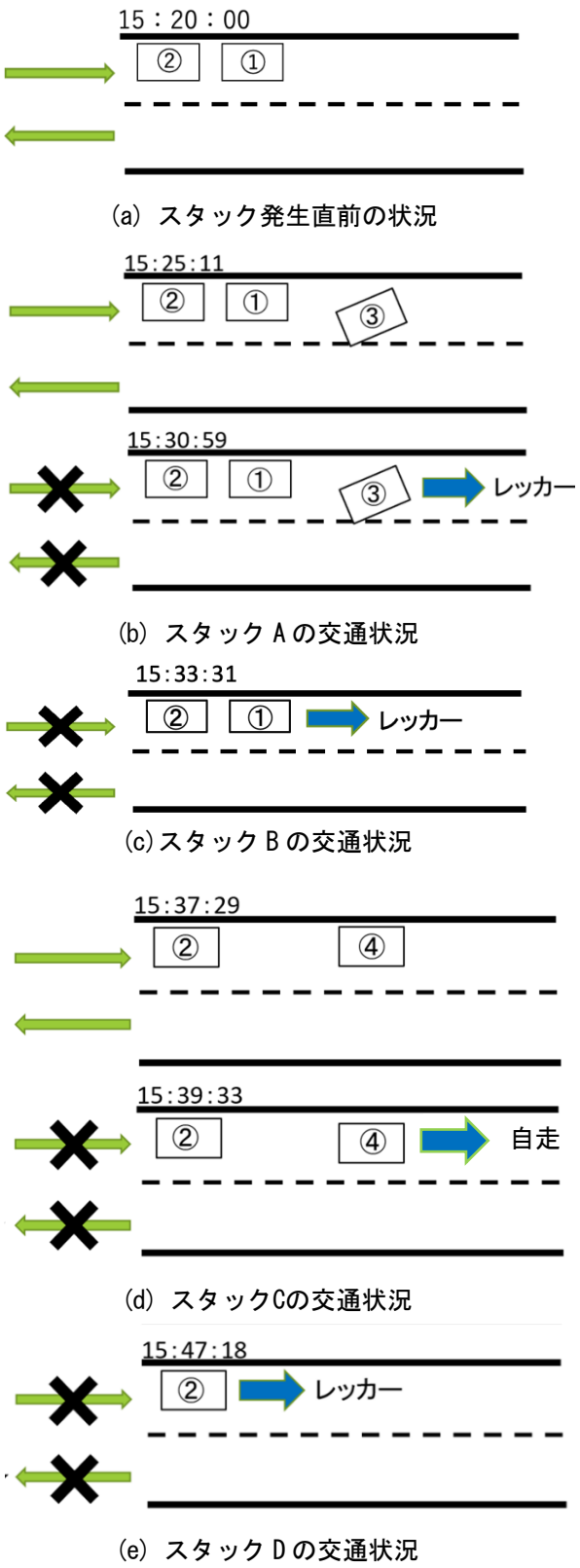


図9　スタック発生時の交通状況の模式図

以上のように、各センサーにはメリット・デメリットがあるため、今後は、こうしたセンサーの特性を踏まえつつ、スタック発生時のメカニズムを分析し、交通状況

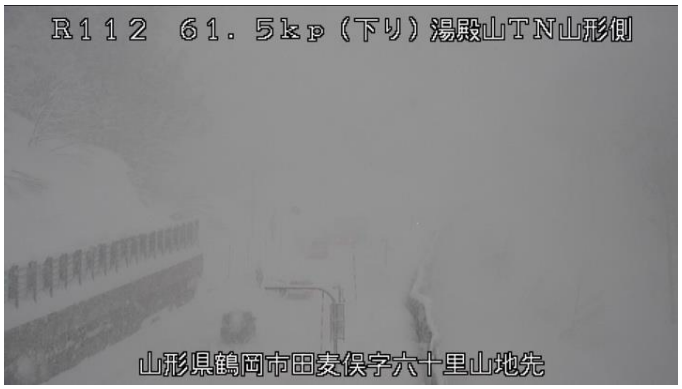


図 10 ホワイトアウト時の CCTV 画像のサンプル

出典：国土交通省東北地方整備局

のモニタリングに活用することが望ましいと考える。

5 おわりに

本研究では、“プローブデータによるスタック発生前後の車両軌跡や速度の分析”および“CCTV 画像処理によるスタック車両およびその周辺車両の挙動解析”を行うことで、スタック発生メカニズムを分析した。分析により得られた知見を以下に整理する。

1） プローブデータ解析の結果：タイムスペース図により速度低下および停止車両の発生時間や位置（時空間上の軌跡）を CCTV よりも広範に捉えることができた。また、時間帯別の速度を分析することでスタック発生前に対象区間を走行する車両の速度低下が発生していることがわかった。よってプローブデータを解析すれば、事前にスタックの危険性を捉えられる可能性があると考える。一方、プローブデータはサンプルのため、スタック車両を捉えられない（＝スタック発生メカニズムは把握できない）可能性があるといった課題が把握された。

2） CCTV 画像解析の結果：スタック発生前に路肩に停止（退避）している車両がいることがわかった。こういった停止車両の発生をトリガーとして規制できれば、スタックの発生を未然に防止できる可能性がある。一方、画像処理は人手で行うため、労力が大きいこと、ホワイトアウトが発生した場合、画像内の車両を捉えることが困難になるといった課題が把握された。

以上を踏まえ、今後の課題、方向性を以下に述べる。

1） CCTV 画像の自動処理による異常検出：現在、実務では、監視員により CCTV の常時監視が行われている。また、その CCTV カメラの画像を後日に解析するには、本研究のように人手による処理が必要である。このような監視や人手の解析は労力が大きく、また、異常検出のリアルタイム性の確保が困難である。また、ヒューマンエラーにより危険な状況を見逃す恐れもある。よって今後は、CCTV カメラの画像を自動処理し、路肩等への停止車両等を自動で検出できる技術を開発することが望ましい。現在、こうした状況を踏まえ、国土交通省東北地方整備局では、早期の異常検知による交通障害の発生を未然に防ぐため、CCTV カメラ画像を AI により処理し、停止車両等の危険な挙動を自動検出する研究に取り組んでいる。

2） 多様なセンシングデータの融合解析：本研究により各種センサーには、前述したメリット・デメリットが存在することがわかった。発災時には、特定のセンサーが使えない状況(e.g.ホワイトアウトにより CCTV 画像の解析が困難な状況)が発生しうる。よって、多様なセンシングデータを用いることで、交通解析手法のロバスト性の確保や異常検出精度（異常であることを判別する確度）の向上を図ることが望ましいと考える。よって、今後は、プローブデータや CCTV 画像、車両感知器データならびに SNS といった多様なデータを融合解析する手法の開発を行う必要があり、面的に交通障害の影響範囲を把握することが可能になれば、障害区間に応じた迂回路設定等の道路管理に役立つと考えられる。

参考文献

1） 梅田祥吾，川崎洋輔，桑原雅夫，飯星明：プローブ車両データを用いた冬季道路交通における異常事象の発生危険性評価，土木学会論文集 D3, Vol.76, No.5, p. I_1371-I_1387, 2021.

2） Umeda, S., Kawasaki, Y. , Kuwahara, M. and Iihoshi, A. : Risk evaluation of traffic standstills on winter roads using a state space model, Transportation Research Part C: Emerging Technologies , Vol.125, 2021.

3） 牧野 浩志，井坪 慎二，後藤 梓：道路政策評価における ETC2.0 プローブ情報の活用方法に関する研究，実践政策学，第 3 巻，第 1 号，pp.15-30，2017.

謝辞：本研究成果は、JSPS科研費22K04356により得られたものです。ここに感謝の意を表す。