

路車協調システムを活用した 積雪寒冷地における自動運転運行支援

帯広開発建設部 道路計画課 ○齊藤 航斗
嶋崎 健太
パシフィックコンサルタンツ株式会社 瀬上 翔志

国土交通省では、道路附属施設による情報提供の方法として路側センサなどの機器を設置した実証実験を全国的に行っている。帯広開発建設部では、令和5年度に積雪寒冷地を考慮した路側センサによる道路情報提供の方策検討ならびに自動運行支援効果を検証し、積雪寒冷地特有の課題を道内で初めて整理した。本稿では、令和5年度の検証結果及び、今後の長期運用を見据えた令和6年度実証実験の概要を報告する。

キーワード：自動運転、積雪寒冷地、路車協調

1. はじめに

我が国では少子高齢化・人口減少に伴い、公共交通の廃止・ドライバー不足等の課題により、「移動サービス」・「物流サービス」等の維持・確保が難しくなっている。これらの課題を解決する手段として、高速道路のみならず、一般車や歩行者が混在する一般道において、レベル4無人自動運転サービスの社会実装の早期実現が期待されている。一般道でのレベル4無人自動運転サービスの実現に向け、国土交通省では、自動運転車両の車載センサ検知範囲の死角となる道路環境において、道路インフラのセンサ等によって道路状況を把握し、自動運転車両に情報提供を行う、路車協調システムの技術的検証を目的とした実証実験を全国的に行っている(図-1)。

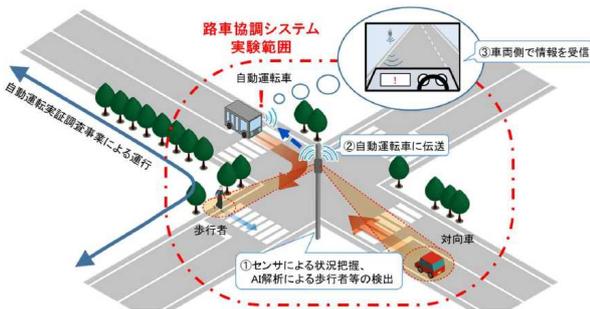


図-1 路車協調システム実験範囲¹⁾

帯広開発建設部では、北海道で唯一自動運転バスを通常で定期運行している北海道河東郡上士幌町で実証実験を行い、積雪寒冷地を考慮した路側センサによる道路情報提供の方策検討ならびに自動運行支援効果を検証し、積雪寒冷地特有の課題を道内で初めて整理した。

本稿では、令和5年度に実施した路車協調実証実験の検証結果を報告するとともに、今後の長期運用を見据えた令和6年度の実証実験の概要について紹介する。

2. 令和5年度路車協調実証実験

(1) 実証実験の概要

a) 実験実施箇所

北海道で唯一自動運転バスを定期運行している北海道河東郡上士幌町の自動運転バスの運行ルート上において、自動運転バスの運行事業者と合同現地確認・意見交換を実施した結果、無信号交差点での国道への進入かつ、2方向の接近交通があり、交通量が多く手動介入が最も多い箇所を実験箇所として選定した(図-2、図-3)。

なお、障害物の検知範囲は、警視庁通達「信号機設置の指針の制定について」²⁾の臨界流入ギャップの考えと自動運転バスの交差点通過所要時間から、交差点から約100m範囲(≒9.2秒×40km/h)での対向車の接近情報を自動運転バスに伝えることができれば、自動運転バスは交差点を安全に通過可能であると考え、路側センサの検知範囲は100mと設定した(図-3)。

また、自動運転バス事業者との協議により、自動運転車両が安全に運行するために、路側センサからの情報を交差点手前約100mから通信することとした(図-3)。



図-2 上士幌町自動運転バス運行ルート (R5) ³⁾

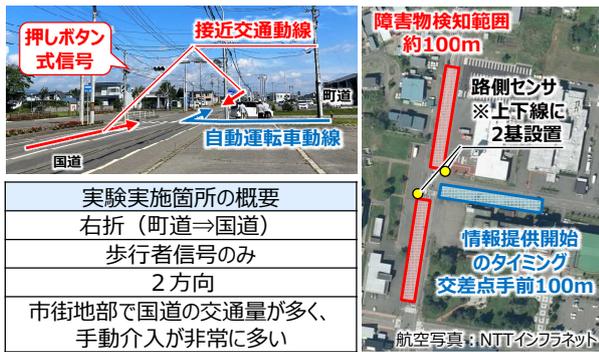


図3 実証実験実施箇所の概要と検知・情報提供範囲

b) 路車協調システムの構築

路車協調システムの構築にあたり、現在、技術が確立されている路側センサ及び通信技術の中で活用可能な機器を複数選定し、比較検証を行った。路側センサについては、降雪時等の視界不良時においても比較的検知精度が高いとされる遠赤外線カメラ及びその比較対象として可視光カメラの2種類を選定し、また、通信技術については他地域での路車協調システム実証実験での導入実績のある4G回線及びITSコネクートを通信機器として選定した。選定した路側センサ及び通信技術を用いて、路車協調システムを構築した(図4、図5)。



図4 機器の設置状況及びオペレータへの情報提供手法

通常の運行	ITSコネクート	4G回線
 周囲の交通や信号を目視で確認	 支障交通の有無を車内スマホに表示	 支障交通の有無を車内タブレットに参考として表示
 周囲の交通や信号を目視で確認	 周囲の交通や信号を目視で確認	 周囲の交通や信号を目視で確認
 発進可能であればオペレータが操作 ※必要に応じて、手動介入	 発進可能であればオペレータが操作 ※必要に応じて、手動介入	 発進可能であれば自動で発進 ※必要に応じて、手動介入

図5 自動運転車両の発進制御方法

c) 実証実験の実施

実証実験は、2月2日(金)～2月10日(土)のうち2月4日(日)を除く8日間実施しており、路車協調を行わないレベル2走行を計35便、路車協調によるレベル4相当走行を計37便の計72便を運行しデータを取得した。

ただし、8日間の実証実験では、夜間や降雪時間帯における路車協調システムの効果検証を行うために必要なサンプル数を確保できないことから、路車協調システム自体は約3か月間稼働させることで、実証実験期間以外の降雪日や夜間の路側センサのログデータも収集し、評価を行うこととした。

なお、統計上有効な評価とするために、一般的な標本調査の考えをもとに、下記式から必要サンプル数を算出し、400サンプルと設定した。また、センサの検知・処理においては、日照時間帯(朝夕・日中・夜間)及び天候(降雪有・降雪無)による環境条件によってクリティカルな違いが出るのが想定されることから、環境条件毎に評価を行うこととした(表-1)。

$$n = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{z^2 \times p(1-p)}{1 + \frac{z^2 \times p(1-p)}{2N}} = 385 \approx 400$$

- N: 母集団の規模 → ログは無数にとれるため、極度に大きいと仮定
- p: 回答比率 → 不明なため必要標本数が最大となる0.5とする
- z: 信頼レベル → 統計上一般的な信頼度である、信頼度95%とした場合、1.96
- e: 許容誤差 → 統計上一般的な許容誤差である、許容誤差5%と設定

表-1 カテゴリー毎の可視光・遠赤外線カメラの撮影状況

天候	時間帯	可視光カメラ	遠赤外線カメラ
晴れ・曇り	朝・夕		
	日中		
	夜間		
降雪	朝・夕		
	日中		
	夜間		

(2) 自動運行支援に関する効果検証

a) 効果検証項目

路側からの情報支援による自動運転車両の安全性向上効果は、精度・鮮度・信頼性の3つの観点から評価する。加えて、精度・鮮度・信頼性に及ぼす各種条件や、遠赤外線カメラ・可視光カメラといった路側センサの差異についても分析を行うこととした(表-2)。

表-2 実験の評価項目と評価内容

評価項目	評価内容
精度(検知手法の正確性)の把握	・検知精度・検知時間・間隔 ⇒対向車等を正しく検知できたか ・対象物毎の位置・速度・加速度の生成精度 ⇒検知した対象物の位置等を正しく把握できたか
鮮度(処理・提供までの所要時間)の把握	・情報生成時間 ⇒検知してから生成に要する時間 ・情報伝送時間 ⇒生成してから伝送に要する時間
信頼性(安全性・円滑性に関する有用性)の把握	・手動介入の変化・急挙動の変化・停止回数の変化 ・オペレータによる主観評価(オペレータへのヒアリング)
情報伝送が有効となる条件の把握	・天候等の環境変化や交通状況が上記の効果にどのように影響を与えるかを把握

b) 精度(検知手法の正確性)の把握

精度評価のうち、対向車等を正しく検知できたかを測る指標として検知率を算出した。検知率は、検知ログ(ログ上で検知範囲に進入した車両の検知回数)÷実映像による検知車両数として算出した(図-6)。

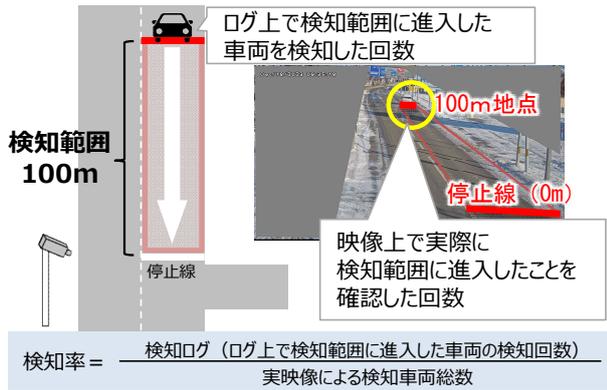


図-6 検知率の算出方法

遠赤外線カメラは、夜間等に精度の若干の低下がみられるが、97.5%以上の検知率を誇り、降雪における影響も見られず、十分な性能を發揮していることを把握した。一方、可視光カメラは、日中の検知率は遠赤外線カメラと比較しても遜色ない検知率を確認できているが、夜間における検知率が6割程度となっている(図-7)。

ただし、安全な自動運転を支援する観点から、すべての車両を検知することが必要不可欠である。今回、遠赤外線カメラで検知できていない事象については、センサの処理の上で、低速車両の検知の際に進行方向を誤識別してしまっている事象であるとわかった。この結果を踏まえて令和6年の実証実験では、センサメーカーにより物標生成ロジックを見直したセンサを使用し、物標検知におけるエラーについて評価を進め、更なる検知率の向上を図っていく必要がある。

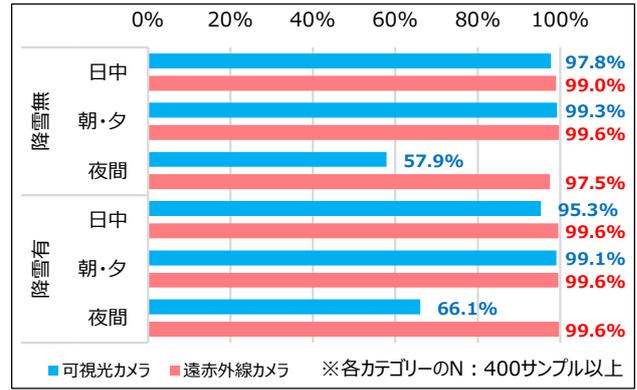


図-7 検知率の評価結果

精度評価のうち、検知した対象物の位置等を正しく把握できたかを測る指標として、車両が検知範囲内に進入した際の位置精度を算出した。具体的には映像上で停止線手前100mを通過した際の時刻を確認し、その時刻におけるログ上での停止線までの距離を算出した(図-8)。



図-8 検知距離誤差の算出方法

検知距離誤差は、遠赤外線カメラ・可視光カメラともに、実際よりもやや遠い位置として検知する傾向がみられる。距離のばらつきでは、遠赤外線カメラの方が小さく、可視光カメラは夜間のばらつきが大きい傾向が見られ、遠赤外線カメラの方が、検知距離誤差が小さく、精度が良いことが分かった(図-9)。

本実験では、「交差点から約100m範囲(≒9.2秒×40km/h)での対向車の接近情報を自動運転バスに伝えることができれば、自動運転バスは交差点を安全に通過可能である」と設計しているが、自動運転バスの安全運行を実現するためには、検知距離誤差を踏まえた安全な検知範囲・時間の設定をすることが重要である。

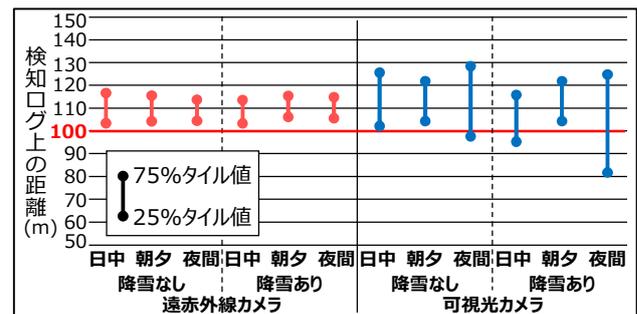


図-9 停止線から100m位置での検知ログ上の距離のばらつき

c) 鮮度（処理・提供までの所要時間）の把握

鮮度評価は、システム全体処理時間（情報生成時間（検知から生成に要する時間）と情報伝送時間（生成から伝送に要する時間））を評価した（図-10）。

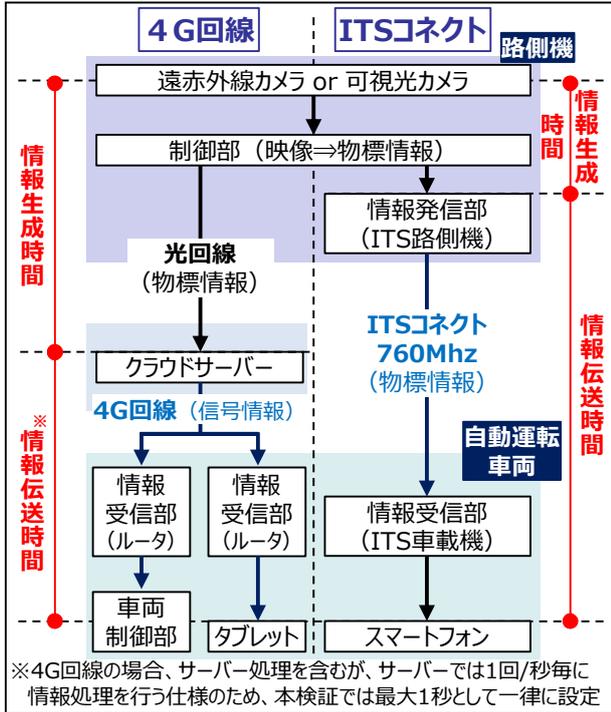


図-10 システム全体の処理フロー

情報生成に要する時間は、遠赤外線カメラ及び可視光カメラに差はなかった。また、自動運転車両に情報提供するまでの情報伝送時間は、ITSコネクが約0.43秒、4G回線は0.56～1.46秒（クラウドサーバーでの処理時間含む）と4G回線の方が若干遅いが、自動運転運行主体へのヒアリングにおいて、「4G回線でも車両制御に対して遅延の影響はなく、安全に運行できる」との回答を得ていることから、ITSコネク及び4G回線ともに鮮度の問題はないと考えられる。（表-3）。

なお、上土幌町の自動運転車両の制御システムは、ITSコネクと連携しておらず、車両制御への介入ができないため、上土幌町での将来的なレベル4での車両制御も見据えると、4G回線での運用が想定される。

その中で、路車協調システムの最適化を図る上では、サーバー処理時間の短縮に向け性能向上を図っていくことが重要であり、また、検知距離誤差と同様に、システム全体の処理時間（サーバー処理時間を含む）を踏まえた安全な検知範囲・時間の設定をすることが重要である。

表-3 システム全体の処理時間の比較

通信手法	センサ	情報生成時間	95%タイル値（秒）		システム全体の所要時間
			サーバー処理時間*	伝送時間	
4G回線	遠赤外線カメラ	0.113	0.1~1.0	0.344	0.557~1.457
	可視光カメラ	0.113			
ITSコネク	遠赤外線カメラ	0.017	-	0.410	0.427
	可視光カメラ	0.020	-	-	0.430

*4G回線の場合、サーバーは1回/秒毎に情報処理を行う仕様のため、本検証では最大1秒として一律に設定

d) 信頼性（安全性・円滑性に関する有用性）の把握

信頼性評価では、オペレータヒアリング及び自動運転車両の挙動データを活用し、路車協調システムの有用性及び手動介入の発生有無について把握した。

路車協調システムの活用によって、手動介入の発生割合が31%から8%（3回）に減少しており、円滑性の向上効果が確認できた。なお、路車協調システムの導入により、手動介入したケース（3回）を見ると、「路車協調システムで”進行可”であったが、接近車両が近く安全に通過できないと判断し手動介入」が2回、「交差点進入時、ちょうど国道側の信号が青になり手動介入」が1回発生している。後者については、自動運転車両と信号機の連携により解消が想定される（図-11）。

また、オペレータヒアリングにより、約8割のオペレータが路車協調システムが自動運転バスの運行に役立ったと実感しており、定性評価からも路車協調システムの有用性を確認できた。情報提供のタイミングについても約7割が適度であると評価している一方、約3割のオペレータは情報提供が遅いと評価している（図-12）。

検知距離の誤差やシステム全体の処理時間による情報提供の遅れに起因していることが明確であるため、これらを考慮した安全な検知範囲・時間の設定が重要であることが定性評価での面から把握できた。

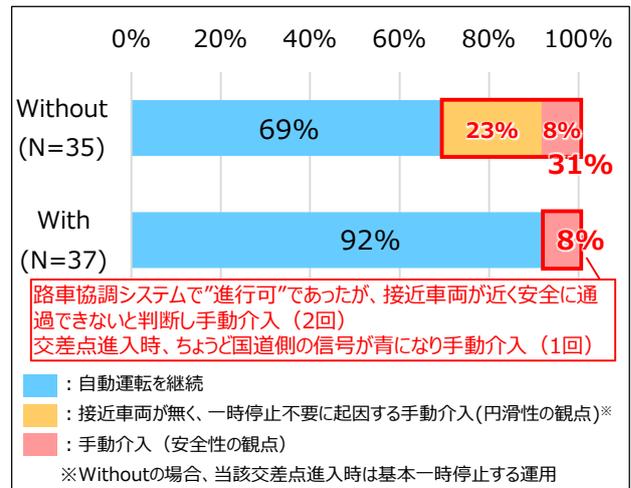


図-11 手動介入の発生状況

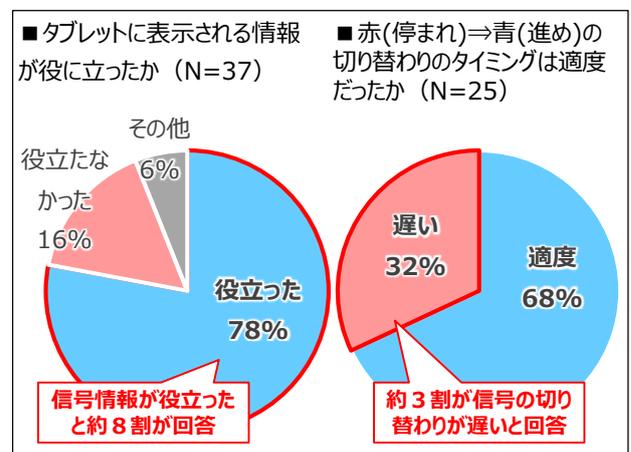


図-12 オペレータヒアリングの結果

(3) 積雪寒冷地での路車協調システム設置における課題とその対応方針検証

本実験は、積雪や低温等厳しい気象環境下である積雪寒冷地で運用するため、各種機器メーカーの技術者と事前に協議を進め、「レンズへの雪付着による検知性能の低下」・「氷点下によるシステム不具合」等の降雪・氷点下環境による想定される課題を整理、そのうえで、「降雪を考慮した機器の選定」・「システム全体制御部へのヒーターの取付」等の対策を講じた(表4)。

令和5年度の設置期間である12月～2月の3か月程度に降雪・氷点下環境は多く確認されたが、路車協調システムへの不調は発生しなかった(図-13)。

表4 降雪・氷点下環境の想定される課題及び対応策

【想定される課題①】 レンズに雪が付着し、検知性能の低下が危惧 ⇒【対応①-1】 雪の付着を軽減するカバーがついている機器を選定	
⇒【対応①-2】 センサ自体が稼働時に発する熱でレンズ付近の雪が解けると想定されるため、実験時間や実験日以外も、恒常的にセンサを稼働	
【想定される課題②】 氷点下により、電源が落ちる可能性有 ⇒【対応②】 センサ類の電源を一つのボックスに集約し、ボックス内の温度が5℃以下になると、ヒーターが稼働する機構を導入	
【想定される課題③】 各センサや取付部に積雪し、視界が遮られる ⇒【対応③】 人力により雪を落とす	

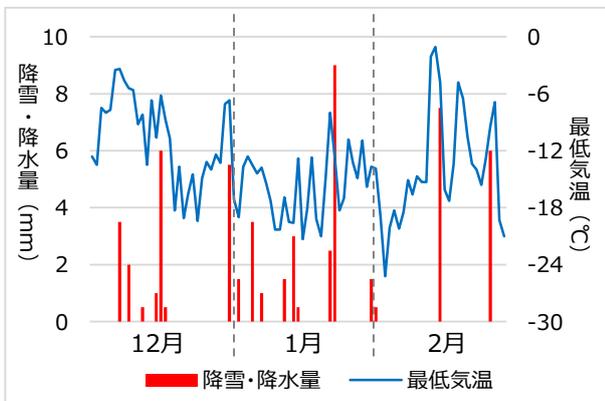


図-13 上土幌町の降雪量と最低気温⁴⁾

実証実験での運用結果を踏まえ、長期運用した場合を想定し、機器メーカーの意見も参考に対策(直接的対策/運用面対策)について整理した(表5)。

長期運用を見据えた場合、降雪による検知率の低下が少ない遠赤外線カメラを活用しつつ、堆雪への影響を受けないようオクルージョン(堆雪に遮蔽された道路状況を画像処理等で再現する等)を考慮した検知を実施することが重要である。また、画像学習による検知性能の向上を恒常的に実施することも重要である。

本実験では、降雪・氷点下環境に対応するために「ヒーターの取付」等を行うことで、機器の不具合などは見ら

れなかったが、長期運用を見据えた場合、降雪や氷点下環境によるセンサ本体やシステム全体で不具合が発生することも想定されることから、「ヒーターの搭載」・「ひさし設置による着雪防止」等の対策を実施するとともに、不具合発生した際の自己診断・死活監視機能等を搭載し、自動運転車両の運行に支障が無いよう運用することが重要であると考えます。また、これらセンサ・システムの遠隔監視と合わせて、現地での雪下ろし等の点検作業も継続して実施することが重要である。

表5 長期運用を見据えた直接的対策・運用面対策案

環境条件	長期運用の課題	直接的対策	運用面対策
降雪	降雪が映り込み、検知率低下	降雪による検知率の低下が少ない遠赤外線カメラ使用 降雪時の画像学習を強化	-
	路面・車体が白くなり、検知・判定精度低下	色に影響されない遠赤外線カメラ使用 降雪時の画像学習を強化	-
堆雪	センサ部に雪が付着し、検知率低下	センサ自体が熱を持つよう常時稼働、カバーガラス内側にヒーターを搭載 ハウジング改良、ひさし設置による雪付着防止	定期的な除雪
	堆雪に起因した遮蔽による検知率低下	オクルージョンを考慮した検知を搭載 画像学習を強化	堆雪場所をセンサの支障にならない場所にする
低温	堆雪回避のため無雪期と走路が変化することでの検知率低下	検知範囲内であれば影響なし	-
	センサ本体の不具合	故障アラームを全体制御部に通知(今後実装予定) 自己診断機能通知(ITS Japanで仕様検討中、今後実装予定)	-
	システム全体の不具合	故障アラームを全体制御部に通知(今後実装予定) クラウドサーバでの死活監視機能(ITS Japanで仕様検討中、本実証でも全体制御部で一部実施)	-

3. 令和6年度の実証実験の概要

令和5年度の実証実験を踏まえ、路車協調システムによる有用性・信頼性を一定程度評価できた。本実験は、時間帯(日中・朝夕・夜間)や気象条件(降雪有無)でそれぞれ400サンプルのデータを解析しており、十分な信憑性を担保できていると考える。また、令和5年度の実証実験の結果から以下のことを把握できた(表6)。

表6 令和5年度の実証実験の結果からの把握事項

	○：評価結果 ■：課題
精度	○遠赤外線カメラは、環境条件・交通条件による、精度の低下(検知率・検知距離)が少ない ■遠赤外線カメラでも、低速車両の検知の際に進行方向を誤識別する事象が発生(R6実験では、センサメーカーが物標生成ロジックを見直したセンサを使用) ■検知距離誤差を踏まえた安全な検知範囲・時間の設定をすることが重要
鮮度	○情報生成に要する時間は、遠赤外線カメラ及び可視光カメラに差は無い ○ITSコネクタ及び4G回線ともに鮮度(処理・提供までの所要時間)は問題ない ■システム全体の処理時間を踏まえた安全な検知範囲・時間の設定をすることが重要 ■4G回線は、サーバー処理時間の短縮に向け性能向上を図っていくことが重要
信頼性	○オペレータヒアリングからも路車協調システムの有用性を実感する声が多い ■検知情報の通知が遅いとの声(検知距離の誤差やシステム全体の処理時間による情報提供の遅れを考慮した安全な検知範囲・時間の設定が重要)
まとめ	○視程障害が発生する積雪寒冷地におけるセンサは遠赤外線カメラ、上土幌自動運転車両にてレベル4運行を目指す場合は4G回線の組み合わせが適合

一方、冬期間の限られた実験であったことから、降雨や猛吹雪の視界不良時等の条件での検証はできていない。レベル4無人自動運転サービスの早期社会実装の実現に向けて、恒常的な課題・対応策や路車協調システムの有用性を明らかにしていくためには、様々な条件下で長期の検証を実施していくことが重要である。

そこで、帯広開発建設部では、令和5年度の検証結果及び明らかになった課題を踏まえ、センサメーカーの協力のもと路車協調システムのアップデート・構築を行ったうえで、レベル4無人自動運転サービスの早期社会実装の実現を見据えた路車協調システムの実証実験を、令和6年8月から令和7年2月の期間で昨年度に引き続き実施しており、今年度内に様々な気象環境下・長期運用時の路車協調システムの有用性及び課題とその対応策を検討していく予定である。

4. おわりに

国土交通省では、道路附属施設による情報提供の方法として路側センサなどの機器を設置した実証実験を全国的に行っているが、冬期の積雪環境下での影響検証を実

施できるフィールドは数が少ない。また、長期間の運用を見据えた長期にわたる実証実験を実施しているフィールドも少ない。特定条件下において、安全にレベル4無人自動運転サービスを実現するためにも、本検証は非常に意義のあるものである。

令和6年度の実証実験により、長期運用を見据えたシステムの構築に向けて、積雪環境だけでなく、様々な気象条件下での路車協調システムの有用性を検証するとともに、恒常設置による運用面での課題及びその対応策等の整理を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局 自動運転実証調査事業と連携した路車協調システム実証実験公募要領
<https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001611538.pdf>
- 2) 警視庁
「信号機設置の指針」の制定について（通達）
<https://www.npa.go.jp/laws/notification/koutuu/kisci/kisci20210324.pdf>
- 3) 上士幌町役場ホームページ
https://www.kamishihoro.jp/sp/self_driving_bus
- 4) 国土交通省気象庁（過去の気象データ検索）