

札幌市内における路肩堆雪の形成を考慮した 交通性能曲線の構築について

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム ○宗広 一徳
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム 布施 浩司
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地交通チーム 畠山 乃

本研究では、札幌市内の道路を対象とし、定点カメラから取得した画像データを利用し、冬期条件下の道路の堆雪幅や車両走行位置、交通量の自動計測を試行した。2016～2020年度に取得した5箇年の画像を用いて、堆雪幅別、路面状態別により集計し、交通性能(交通量-速度)モデルを構築した。結果として、対象道路断面において、堆雪幅が大きくなるに従って、交通性能(交通量-速度)が大きく低下することが示された。片側2車線の5分間当り交通量が、堆雪幅2.0mでは、堆雪なしと比べて約57%に低下した。

キーワード：堆雪、交通量、速度、画像分析、深層学習

1. はじめに

積雪寒冷地の円滑な道路交通を確保するためには、冬期に除雪作業を行うことが必須である。降雪の都度、除雪出動基準に従って除雪作業が実施されるが、これに伴って、車道、路肩、歩道上に堆雪が形成される。堆雪は、日々の降雪並びに除雪作業の実施により、成長する。堆雪による有効車道幅員の減少のため、道路交通サービスの低下に至る。さらには、深刻な交通障害をもたらされることもある。

道路構造令第11条の3項によれば、「積雪地域に存する道路の中央帯、路肩、自転車歩行者道及び歩道の幅員は、除雪を勘案して定めるものとする。」とされ、除雪された雪を堆雪できるスペース、すなわち堆雪幅の確保について定めている^{1), 2), 3), 4)}。堆雪の形成に伴う有効車道幅員の減少により道路交通性能が低下することはよく知られているが、実測データに基づく定量的な報告例⁵⁾は少ない。

本研究は、札幌市内の道路を対象とし、定点に設置した観測カメラから取得した画像を用いて交通データを集計・整理した。既往研究として、松田⁶⁾らは、画像処理による車両検出センサーを用いて、既設のCCTV(Closed Circuit Television)カメラを活用した交通データの自動取得の精度検証を示した。今井⁷⁾らは、深層学習を用いた車両認識技術の適用について、昼間の晴天条件下の精度について示した。これまでに、冬期条件下の交通流を対象とし、自動検知を行った事例はない。当該研究の画像分析に際しては、AIに画像の教師データをディープラーニング(深層学習)させて冬期道路条件下の走行車両の識別・自動検知を試行した。さらに、得られた交通データを用いて、堆雪の形

成に伴う道路交通性能⁸⁾の変動の実測結果を示すとともに、モデル化を試行したので、報告する。

2. 本研究の目的

本研究の目的は、以下の通りである。

- 1) 画像分析による冬期交通流と堆雪範囲の自動計測を試行し、その精度を示すこと。
- 2) 堆雪の形成に伴う交通データの実測例を示し、道路交通性能の変動をモデル化すること。

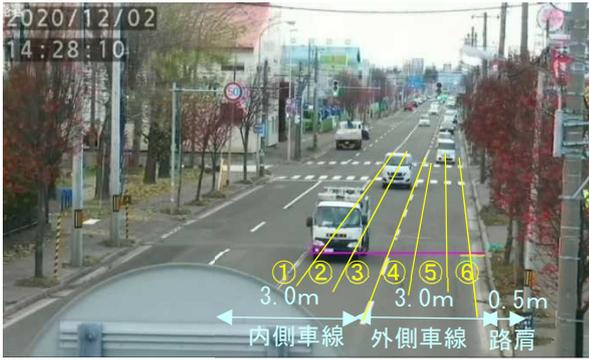
3. 調査方法

(1) 画像データの取得

対象道路は自治体管理の4車線道路(横断面構成：車道部(3.0m/車線)、路肩部：0.5m、歩道部：3.5m)である(図-1)。観測用カメラを路側のF型標識部に設置し、冬期の堆雪状況と交通流について連続観測し、取得画像の処理を行った。図-1に示す通り、対象道路での路面状態の変化(乾燥、圧雪など)と堆雪の形成により、横断方向の車両走行位置は変動する。例えば、乾燥路面では、片側2車線が十分機能しているのに対し、圧雪路面で堆雪幅1.5mのときでは、1.5車線的な運用になっている。さらに、圧雪路面で堆雪幅2.0mになると、実質1車線が機能する状態の運用に至っている。

(2) 教師データの作成

本画像分析システムは、車両追跡、カウント及び車両番号認識の機能を有しており、背景減算方式のガウス混合モデルの改良版^{9), 10)}である。すなわち、



(1) 乾燥_堆雪幅 : 0.0m



(2) 圧雪_堆雪幅 : 1.5m



(3) 圧雪_堆雪幅 : 2.0m

図-1 画像データの取得の例

移動物体の検出機能、追跡、背景色の違いに基づく認識機能を有している。

走行車両の自動検知には、ディープラーニング（深層学習）の一種であり、高度な画像解析能力を持つ畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network）（以下 CNN）を適用した。走行車両（小型・中型・大型）の車種を判定する「教師データ」を作成し、走行車両の自動検知を試行した。画像の自動計測として、交通流計測と堆雪範囲の計測の2つについて試行した。交通流計測用に走行車両の移動体検知を実施するため、検知対象物の画像と識別子（画像内における移動体の座標）を組み合わせた教師データ 247 枚を事前に作成した。教師データの作成に際し、以下の点に



(1) 進行方向 (2) 車両の重なり (3) ヘッドライト

図-2 交通流計測の教師データの例

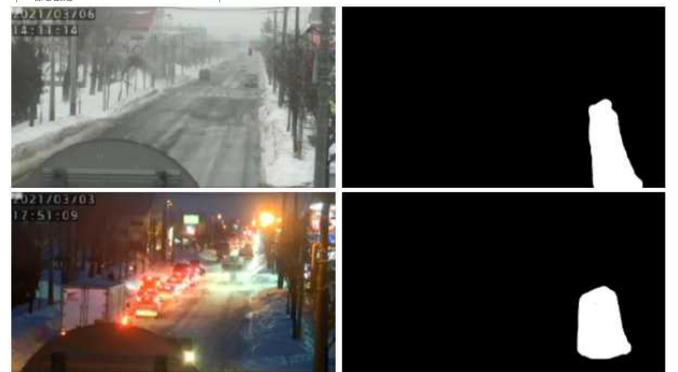


図-3 堆雪の自動検知の教師データの例

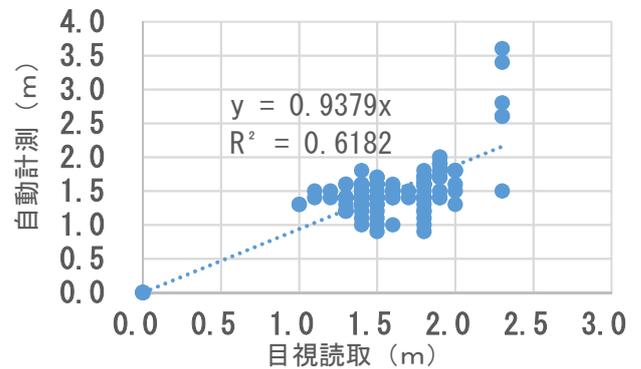


図-4 堆雪範囲（幅）の自動計測と目視読取の比較

留意した（図-2）。

- 1)解析対象の進行方向のみの画像を対象とし、その他の画像を除去する。
- 2)画像に車両の重なりが生じていることを考慮する。
- 3)夜間の画像については、ヘッドライトによるハレーションが生じていることを考慮する。

単位時間当りの交通流計測について、自動計測と目視読取を比較したところ、車両計測の検知は精度 94%以上であった。

また、堆雪範囲の自動検知として、堆雪範囲とそれ以外の背景の2つに分けた教師データ 789 枚を作成した（図-3）。堆雪範囲（幅）の自動計測と目視読取を行った 120 ケースについて、両者の計測結果を比較

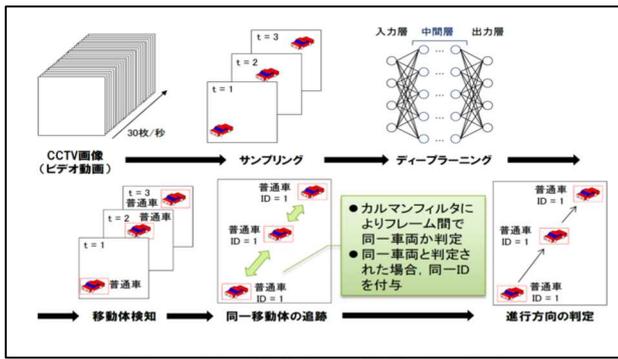


図-5 同一移動体の追跡処理の流れ

したところ、図-4を得た。取得データの回帰直線を求めたところ、傾き 0.9379、決定係数 0.6182を得た。これにより、堆雪範囲の自動計測が一定程度の精度で実施できることを確認した。

画像により検知した走行車両を捕捉し続けることで、走行速度や走行位置を自動計測した。移動体検知手法は、CNNを活用した方法である。カルマンフィルタを用いた確率分布により、連続する画像フレーム間において同一物体を追跡した(図-5)。

(3)データ整理項目

上述の画像の教師データをディープラーニング(深層学習)させる機能に基づき、交通データを取得した。2016年度~2020年度の5箇年に亘り取得した画像から、堆雪形状及び路面状態別に、交通データを集計した。

a) 堆雪幅

本稿では、歩道部の縁石から車道間に堆雪幅を 0.5m 毎に整理した。

- ・ 秋期：0m
- ・ 冬期：0m、0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、2.5m

b) 路面状態

路面状態については、以下の5分類に分けた。

- ・ 乾燥、湿潤、新雪、圧雪、凍結

c) 横断方向の車両走行位置

車線の横断方向に 1m 間隔で分割し、車両中心に位置するナンバープレートの通過位置により、内側車線(①、②、③)と外側車線(④、⑤、⑥)に分けて集計した(図-1(1)参照)。

d) 他の取得データ

交通量(台/5分)、車両の通過速度(km/h)、車頭間隔(秒)を集計した。

4. 調査結果

(1) 堆雪幅別の車両走行位置

対象道路における堆雪幅別に、車両走行位置を整理したところ、図-6を得た。

片側2車線のうち、①・②・③は内側車線の走行、④・⑤・⑥は外側車線の走行を示している(図-1参照)。秋期のデータは、路面が乾燥状態であったときのものである。冬期のデータは、圧雪、新雪、湿潤、凍結の路面状態を含んでいる。堆雪幅に着目し、車両走行位置のデータを集計した。堆雪幅が 0.0m から 2.5m へと大きくなるに従って、③と④を走行位置とする割合が大きくなった。他方、①・②及び⑤・⑥を走行位置とする割合は大きく減少した。すなわち、③と④を合計すると、堆雪幅 1.5m のとき 54%、堆雪幅 2.0m のとき 79%、堆雪幅 2.5m のとき 84%にも達する。また、片側2車線運用がされている内側車線の中央に位置する②、外側車線の中央に位置する⑤の走行は、堆雪幅 0.0m のとき 42%であるが、堆雪幅 1.5m のとき 42%、堆雪幅 2.0m においては 20%へと減少した。よって、堆雪幅 1.5m のときから片側1車線の運用が増加し、堆雪幅 2.0m 及び 2.5m では約 8割もの車両が2車線の中央を走行し、事実上1車線運用になっていることが分かった。

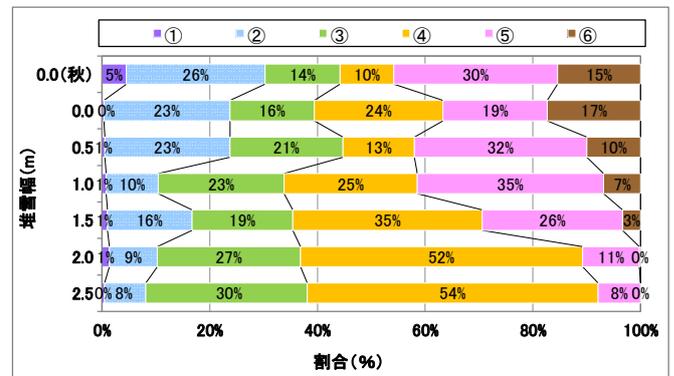


図-6 堆雪の幅員別の車両走行の位置

(2) 交通量-速度 (Q-V) 性能

5分間あたりの交通量(Q)と通過車両の平均速度(V)の実測データを図-7に示す。本図では、堆雪の幅員は0.5m、1.0m、1.5m、2.0mの4ケースに分けている。画像分析により得られた交通データから、片側1車線(内側車線)、片側1車線(外側車線)、片側2車線を表示している。

例えば、片側2車線道路の最大交通量(Qmax)は、堆雪幅0.0mのとき92台/5分であるのが、堆雪幅2.0mでは52台/5分へと、約56%に減少した。片側1車線(内側車線)の最大交通量(Qmax)は、堆雪幅0.0mのと

き47台/5分であるのが、堆雪幅2.0mでは34台/5分へと、約72%に減少した。片側1車線（外側車線）の最大交通量（Qmax）は、堆雪幅0.0mのとき66台/5分であるのが、堆雪幅2.0mでは40台/5分へと、約61%に減少した。これは、片側2車線道路が、路肩から車道の一部への堆雪の残置により有効車道幅員が狭くなり、結果として車両が片側1車線の運用に至る現象が発生した

ためと考えられる。

このように、堆雪幅が広がると、片側2車線、片側1車線（内側車線）、片側車線（外側車線）のそれぞれにおいて、交通性能（Q-V）が低下することが分かる。交通量（Q）、交通密度（K）、速度（V）の関係は、次の式(1)、(2)、(3)で表される。なお、aとbは定数である。

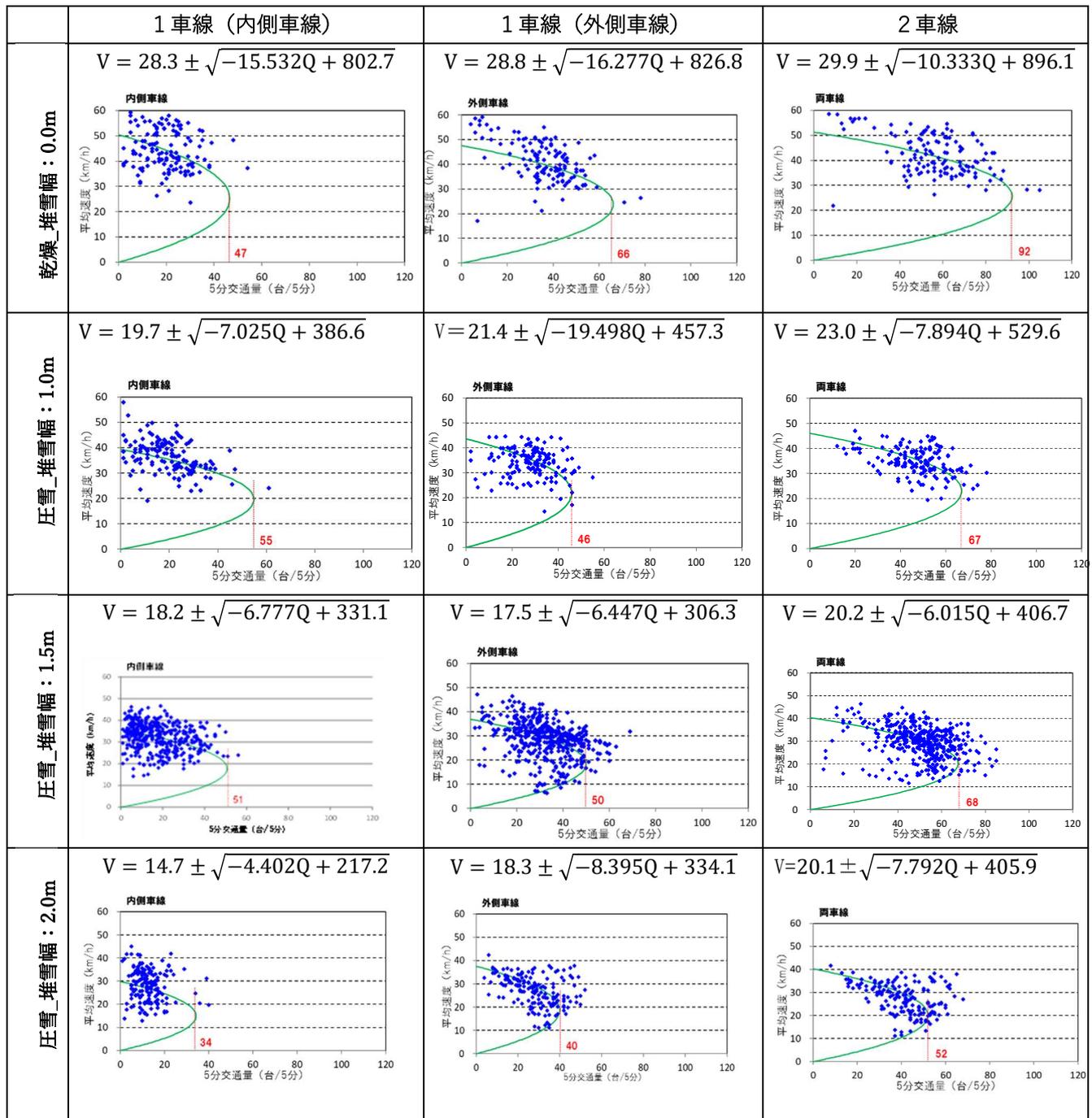


図-7 交通量 - 速度 (Q-V) のデータ

$$Q = KV \quad (1)$$

$$Q = aK^2 + bK \quad (2)$$

$$V = \frac{b}{2} \pm \sqrt{aQ + \frac{b^2}{4}} \quad (3)$$

さらに、上記式を用いて、片側1車線（内側車線・外側車線）と片側2車線における堆雪幅 $W = 0.0\text{ m}$ （乾燥路面）、 1.0 m （圧雪路面）、 1.5 m （圧雪路面）、 2.0 m （圧雪路面）のときの交通量-速度（Q-V）式は、以下の(4)から(15)のとおりとなる。

片側1車線（内側車線）

$$W=0.0\text{m}, V = 28.3 \pm \sqrt{-15.532Q + 802.7} \quad (4)$$

$$W=1.0\text{m}, V = 19.7 \pm \sqrt{-7.025Q + 386.6} \quad (5)$$

$$W=1.5\text{m}, V = 18.2 \pm \sqrt{-6.777Q + 331.1} \quad (6)$$

$$W=2.0\text{m}, V = 14.7 \pm \sqrt{-4.402Q + 217.2} \quad (7)$$

片側1車線（外側車線）

$$W=0.0\text{m}, V = 28.8 \pm \sqrt{-16.277Q + 826.8} \quad (8)$$

$$W=1.0\text{m}, V = 21.4 \pm \sqrt{-19.498Q + 457.3} \quad (9)$$

$$W=1.5\text{m}, V = 17.5 \pm \sqrt{-6.447Q + 306.3} \quad (10)$$

$$W=2.0\text{m}, V = 18.3 \pm \sqrt{-8.395Q + 334.1} \quad (11)$$

片側2車線

$$W=0.0\text{m}, V = 29.9 \pm \sqrt{-10.333Q + 896.1} \quad (12)$$

$$W=1.0\text{m}, V = 23.0 \pm \sqrt{-7.894Q + 529.6} \quad (13)$$

$$W=1.5\text{m}, V = 20.2 \pm \sqrt{-6.015Q + 406.7} \quad (14)$$

$$W=2.0\text{m}, V = 20.1 \pm \sqrt{-7.792Q + 405.9} \quad (15)$$

堆雪幅が 1.0m に拡大したとき、交通量-速度（Q-V）性能が大きく低下する傾向が見られた。また、堆雪幅が 2.0m に達すると、さらに顕著に低下する傾向が見られた。

図-7 に交通量（Q）と速度（V）について、路面状態と堆雪幅別の5分間交通量と平均速度の実測データを示すと共に、数式化したグラフを示す。

5. 考察

(1)堆雪幅別の交通量-速度性能曲線の変動

上記4. により、路面状態と堆雪幅に着目し、交通量-速度性能曲線のモデル化を図った。同モデルの結果を路面状態別に整理したものを図-8 に示す。図-8 からは、乾燥路面から湿潤・凍結・圧雪路面になるに従って、交通量-速度性能曲線が低下する傾向が見られた。

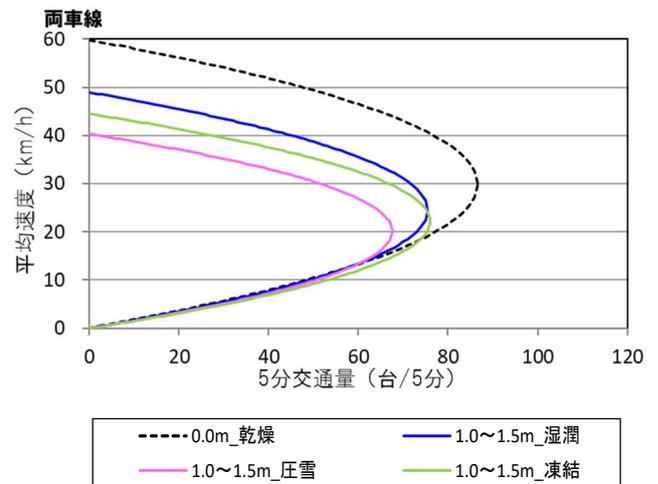


図-8 交通量 - 速度 (Q-V) 性能曲線の変動
(路面状態の別_堆雪の幅員 1.5m)

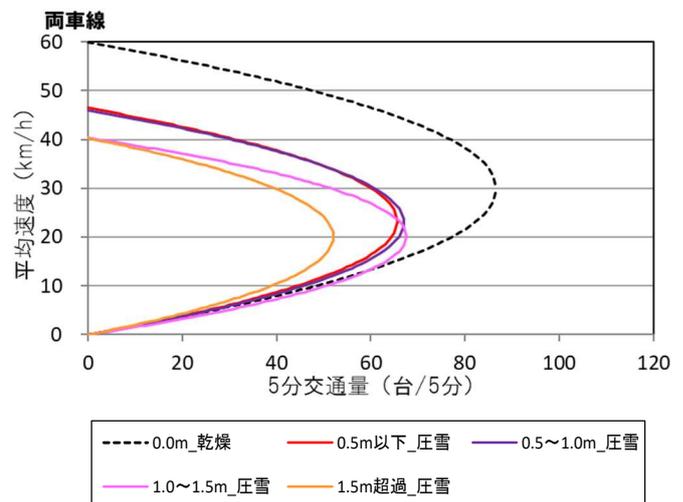


図-9 交通量 - 速度 (Q-V) 性能曲線の変動
(圧雪路面_堆雪の幅員別)

同様に、圧雪路面条件下で堆雪幅別に整理したものを図-9 に示す。堆雪幅が 1.5m を超過すると、交通量-速度性能曲線が著しく低下する傾向が見られた。

(2)交通量-性能曲線の活用

本研究により構築した交通量-性能曲線のモデル化から、冬期道路条件のうち、路面状態や堆雪幅の別に道路交通性能、すなわち単位時間当たりを実現する交通量と速度の性能が低下することを定量的に把握できた。本モデルから冬期道路交通サービス水準の設定の基礎資料とすることができる。図-10 に冬期道路サービス水準の概念図を示す。A から F の順にサービス水準¹¹⁾が低下していることを示している。路線・区間に

求められる冬期道路サービス水準の設定により、道路の排雪作業の実施タイミングの設定¹²⁾にも活用できると考えられる。

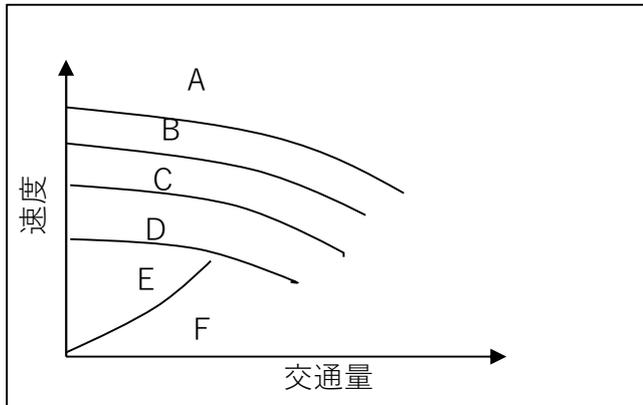


図-10 冬期道路サービス水準の概念図

6. まとめ

路側に設置した観測カメラで撮影した画像を分析することにより、堆雪幅別に、車両の走行位置、交通量-速度 (Q-V) 性能の変動を示し、考察した。結果をまとめると、以下ようになる。

- (1) 画像の教師データをディープラーニング (深層学習) させて冬期道路条件下の走行車両の識別・自動検知を試行した。単位時間当りの交通流計測について、自動計測と目視読取を比較したところ、車両計測の検知は精度 94%以上であった。堆雪範囲の自動計測については、一定程度の精度で実施できることを確認した。
- (2) 車両の走行位置は、片側 2 車線道路の中央、すなわち内側車線と外側車線を跨って走行するケースが、堆雪幅 1.0m で約 48%、堆雪幅 1.5m で約 54%、堆雪幅 2.0m を超えると約 79%にも達することが分かった。つまり、堆雪幅が 2.0m を超えると、片側 1 ~ 1.5 車線のみが有効となり、事実上は 1 車線運用に至ることが定量的に把握できた。
- (3) 交通量-速度 (Q-V) 性能、交通密度-交通量 (K-Q) 性能、交通密度-速度 (K-V) 性能は、堆雪幅 0.0 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m 別に実測及びモデル化を図った。交通量の増加、路面状態の悪化、堆雪幅が拡大するに従って、交通量-速度 (Q-V) 性能が大幅に低下した。特に、堆雪幅が 1.5m 超過になると、この傾向が顕著に表れた。
- (4) 本研究による交通量-性能曲線のモデルを活用し、冬期道路サービス水準の設定の基礎資料とすることが

できる。路線・区間で求められる冬期道路交通サービス水準を確保するために、適切な運搬排雪作業の実施タイミングの確定、効率化への活用が期待される。

謝辞: 本研究の実施に際し、札幌市から観測カメラによる画像取得支援及び除排雪作業実施に関する資料提供のご協力を賜った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用 (第 3 版)、1970.
- 2) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用 (第 4 版)、1983.
- 3) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用 (第 5 版)、2015.
- 4) 堂柿栄輔、佐藤馨一、五十嵐日出夫：堆雪スペースを考慮した道路設計及び維持基準の変遷について、土木史研究第 10 号、1990.
- 5) 秋元清寿、舟橋誠、浅野基樹：画像処理装置を活用した積雪寒冷地の冬期交通流観測に関する研究、第 26 回日本道路会議、2005.
- 6) 松田真宣、松本昌二、野村大輔：新潟東西道路における CCTV を活用した交通調査手法の構築、第 27 回交通工学研究発表会論文報告集、2007.
- 7) 今井龍一、神谷大介、山本雄平、田中成典、中原匡哉、中畑光貴：汎用的な深層学習器を用いた交通量調査手法に関する基礎的研究、土木学会論文集 F3 (土木情報学) Vol.75、No.2、2019.
- 8) 中村英樹、外：性能照査型道路設計のための交通容量・サービス水準に関する研究、IATSS H853 プロジェクト、2007.
- 9) P.KaewTraKulPong and R.Bowden : An Improved Adaptive Background Mixture Model for Real-time Tracking with Shadow Detection, *Proceedings for 2nd European Workshop on Advanced Video Based Surveillance Systems*, September 2001.
- 10) Zoran Zivkovic : Improved Adaptive Gaussian Mixture Model for Background Subtraction, *Proceedings of International Conference on Pattern Recognition*, 2004.
- 11) TRB : *Highway Capacity Manual, 6th Edition*, 2016.
- 12) Kazunori Munchiro, Azuma Takemoto, Naoto Takahashi, Masayoshi Watanabe : Approach to Optimization of Winter Road Management Operation by Taxi Probe Data, *Proceedings of 92nd TRB Annual Meeting*, Washington D.C., January 2012.