

救急搬送・路面性状の統合データを用いた 救急車両の振動要因の分析

布広 祥平¹・浅田 拓海²・佐々木 博³・城本 政一⁴・亀山 修一⁵

¹学生会員 室蘭工業大学 大学院工学研究科 環境創生工学系専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)

E-mail: 21041057@mmm.muroran-it.ac.jp

²正会員 室蘭工業大学助教 大学院工学研究科 もの創造系領域

³正会員 株式会社富士通交通・道路データサービス

⁴正会員 大成ロテック株式会社 技術研究所

⁵正会員 北海道科学大学教授 工学部都市環境学科

北海道における長距離救急搬送路線では、車両振動を発生させる路面損傷が広く分布している。通常、路面損傷箇所では減速して車両振動を抑えるが、損傷度合いによっては十分な低減にならない可能性がある。本研究では、道内の三次救急搬送路線を対象に、救急車プローブ調査と路面性状調査を実施し、加速度RMSと、路面性状、道路構造、走行速度の関係について分析した。その結果、最も車両振動が大きい速度帯は50km/hであり、それ以降は速度上昇に伴って振動は小さくなることが分かった。モデル分析を行ったところ、橋梁がある区間で最も車両振動が大きく、次いで、ひび割れ率やIRIが大きいほど車両振動が大きくなることがわかった。長距離搬送における車両振動量の低減には舗装修繕が必要である。

Key Words : ambulance probe data, pavement inspection, IoT, deep learning, low-temperature crack

1. はじめに

我が国の救急車の出動件数は、近年、増加の一途をたどっており、令和元年度には、663万9,767件を記録している¹⁾。今後、高齢化の進展などによって、救急搬送の需要拡大や質に対する要望の高まりが進むと予想される。傷病者の症状は、時間の経過により急激に変化し、緊急性の高い疾患の場合は、搬送時間が生存率に大きく影響するため、迅速な救急搬送が求められる。このような高速走行が必要となる一方で、患者の容態への配慮から、車両振動が発生する箇所では、減速しながら安全に運転することが求められる²⁾。北海道においては、医師不足や高次医療施設の偏在などによって、都市部の病院までの救急搬送が60分以上となる地域が多く存在する³⁾。加えて、舗装の老朽化が進んでおり、車両振動箇所の増加も懸念される。このように、地方部の長距離救急搬送においては、救急車の車両振動や搬送時間の低減に対して、舗装の面からの解決も重要となり得る。

路面と車両振動の關係に着目した研究は、交通分野で盛んに行われてきた。河井らは、スマートフォンで計測した自動車の上下振動加速度データから、路面凹凸を評価する数理モデルの構築を行っている⁴⁾。富山らは、生体脈波計測による心拍変動解析を行い、精神疲労に基づく路面の平坦性評価についての検討を行っている⁵⁾。

救急車の車両振動に関する研究は、医療分野で幾つか報告されている。安田らは、救急車の振動と防振架台の効果・対策を検討し、車両振動に対する防振架台の共振現象が、防振架台上の振動を増幅させることを明らかにしたうえで、振動抑制の対策の一つとして障害物走行時の減速を挙げている⁶⁾。また近年は、車両振動による患者への負担低減を目的とした、防振架台やサスペンションを搭載した高規格救急車両の開発、導入が進められている。ただし、その効果は、路面状態や走行速度によっては限定的である。抜本的な解決方法としては、舗装修繕が有効であり、車両振動と到着遅れを同時かつ効果的に解決できる可能性がある。一方、救急車の車両振動と

路面損傷の関係に着目した研究事例は、あまり見受けられない。著者らの先行研究では、車載カメラで撮影した動画を用いた走行実験を行い、救急隊員が運転の際に注意を払う路面損傷箇所の抽出を行った⁷⁾。その結果、橋梁ジョイントに加えて、ひび割れも運転注意の対象となることがわかった。さらに、車両走行時の加速度データを用いて、低温ひび割れが100mに1~3本以上存在すると、橋梁ジョイント以上に救急車の振動に影響を及ぼすことを明らかにした。著者らの先行研究では、救急車プローブデータと路面性状調査データを統合し、救急車の走行速度と路面損傷の関係について統計モデルにより分析を行った⁸⁾。その結果、ひび割れ率やIRIが大きい箇所では、速度が低下することが分かり、そのモデルを用いて修繕による搬送時間短縮量を推計した。しかし、車両振動の分析には至っていない。救急車は路面損傷箇所が減速するが、損傷度合いによっては振動が大きい場合もあり、患者負担が生じている可能性がある。路面損傷と車両振動の関係を明らかにできれば、修繕必要箇所を特定できる。さらに、修繕による搬送時間と車両振動の低減量を推計できれば、効果的な舗装修繕方を提案でき、地域の重要課題である救急医療の課題解決につながる。

本研究では、北海道内の三次救急搬送路線を対象に実施した救急車プローブ調査および路面性状調査の統合データを用いて、路面性状が救急車の車両振動に与える影響を統計モデルにより分析する。

2. 調査概要および分析方法

本研究では、道内5地域における三次救急搬送路線を対象とする。図-1に示すように、各地域では、都市部の高次医療施設まで長距離に渡る救急搬送が行われており、一般国道とその自動車専用区間（以下、それぞれ国道、新道）、道道が利用されている。各路線において、救急車プローブ調査と路面性状調査を実施し、そのデータから、各路線の道路構造および路面性状が車両振動に及ぼす影響について分析する。

(1) 救急車プローブ調査

図-1に示した道内5つの消防署に依頼し、富士通交通・道路データサービス社の「道路パトロール支援サービス」を利用して、救急車プローブ調査を実施した。このIoTサービスでは、救急車両に設置したスマートフォンにより、位置情報や走行速度、加速度などが記録、収集される。調査期間は、令和1年9月~令和2年6月の10か月である。データを見ると、出動の度に搬送元と搬送先が異なるため、通過が多い区間を抽出し、分析区間とした(図-1)。

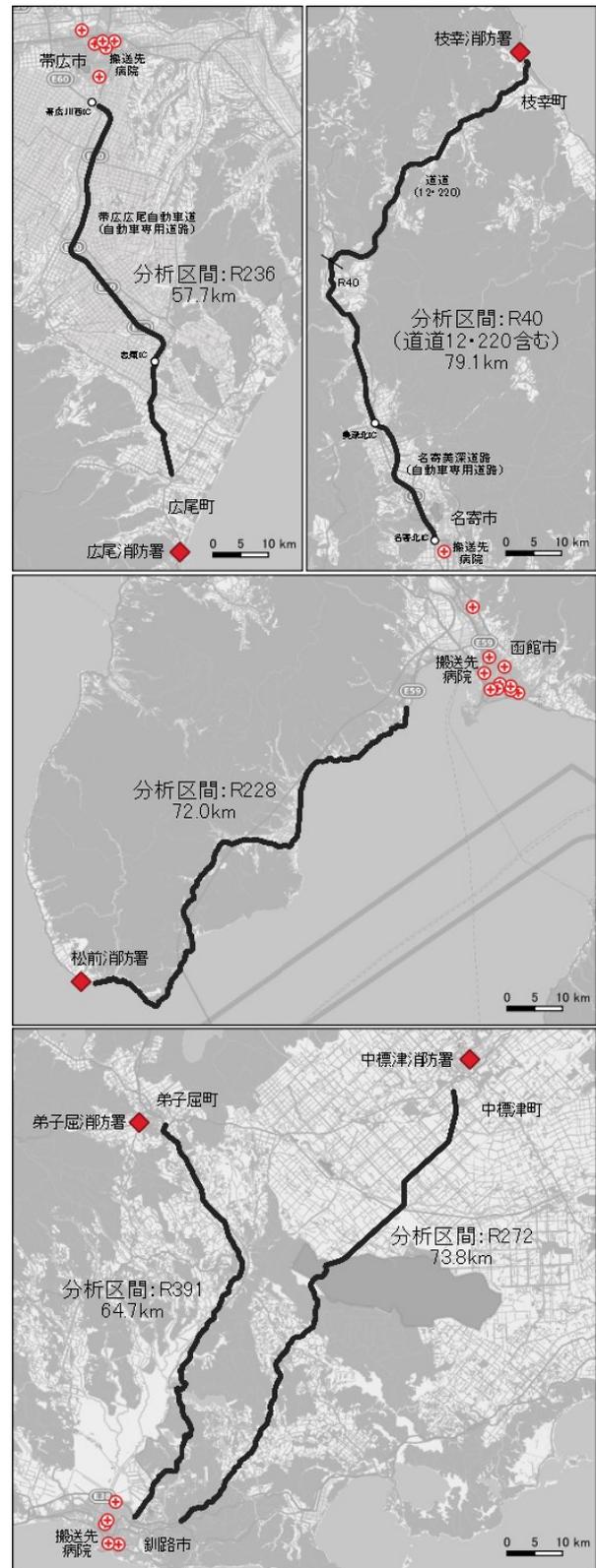


図-1 調査対象路線と分析区間

(2) 路面性状調査

分析区間における路面性状データを収集するため、簡易IRI測定装置による「平坦性調査」および車載カメラによる「ひび割れ調査」を実施した。

平坦性調査は、大成ロテック株式会社が簡易IRI測定装置「STAMPER⁹⁾」を用いて実施した。データには、

20m区間毎のIRIと位置情報を用いた。調査期間は、令和2年6月である。IRI（国際ラフネス指数：International Roughness Index）は、舗装路面と運転者の快適性を関連付けた指標であり、縦断方向の路面凹凸の評価や舗装修繕の診断項目に採用されることが多い。

ひび割れ調査には、著者らが開発した市販カメラとDeep learning（U-net）を用いたひび割れ点検システム¹⁰を採用した。本システムでは、GoPro HERO 6を車両ボンネットに設置し、走行しながら動画撮影（60fps）を行う。動画撮影と同時に、位置情報（20Hz）と加速度（200Hz）も記録される。また、図-2に示すように、位置情報を用いて抽出した5m間隔の静止画にU-netを適用してひび割れスケッチ画像を生成し、ひび割れ率を算出できる。このU-netによるひび割れ率は、手書きスケッチによるひび割れ率との決定係数が0.84を示し、従来手法を高い精度で再現できる。なお、本研究では、IRIの測定単位に合わせて、20m区間毎に平均ひび割れ率CR（Crack Ratio）を算出した。調査期間は、令和2年9月であり、晴天日の10～15時の時間帯に撮影を行った。

先行研究⁷では、動画を用いた走行実験により、救急隊員は走行中にひび割れ路面を視認した時に運転注意と判断することを明らかにした。また、STAMPERによる加速度データを用いて、図-3に示すような低温ひび割れが100mに1～3本以上存在すると、救急車の車両振動に影響を及ぼすことを示した。低温ひび割れは、急激な温度変化によって舗装体が収縮して延長方向に引っ張りが発生し、横断方向に生じる損傷により平坦度が悪化することがある¹¹。本研究でも、この低温ひび割れを分析対象とし、撮影動画を見て各箇所的位置をデータ化した。

(3) 分析方法

道路構造および路面性状が救急車の車両振動に与える影響を統計モデルにより分析する。モデルの目的変数には、スマートフォンで収集した救急車の上下振動加速度のRMS値（以下、RMS）を用いる。車両や出動時によってRMSがばらつくことから、出動データ毎にその最大加速度で各地点のRMSを正規化する（以下、NRMS）。説明変数には、路面性状変数、道路構造変数、救急車走行速度を用いる。

データセットを構築するために、位置情報を基に区間を分割した。車両振動は局所的に生じるため、短い区間毎にその影響を見るのが望ましい。ただし、各データの位置情報に若干のズレがあるため、分析単位は50mとした。路面性状変数については、CRとIRIは、局所的な損傷¹²を捉えつつ、実務的な整合性¹³を考慮して区間最大値を用いることとした。それぞれ、 CR_{MAX} 、 IRI_{MAX} と表記する。低温ひび割れは、50m当たりの本数として、NLC（Number of Low-temperature Cracks）と表記する。道路

構造変数については、縦断勾配のみ区間内の平均値とするが、それ以外は当該箇所が存在する場合を1とするダミー変数とした。なお、Rについては道路構造令を参考に300m未満を1とし、「カーブ」区間とした。RMSについては、各区間内の平均値を使用する。

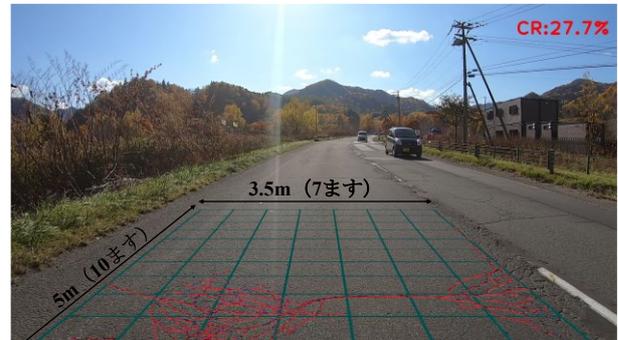


図-2 U-netによるスケッチ画像とひび割れ率算出の例



図-3 低温ひび割れの例

3. 路面損傷が救急車の走行に及ぼす影響

(1) 対象路線における三次救急搬送の状況

対象路線の三次救急搬送に関する基礎的な分析を行い、出動件数や搬送時間について把握する。ここでは、気象庁のデータを用いて、降雪や積雪の有無から路線毎の各出動データを「R1非積雪期（令和元年度秋季）」「R1積雪期（令和元年度冬季）」「R2非積雪期（令和2年度春季）」に区分して集計、比較した。

各路線における救急車の出動件数を図-4に示す。10ヶ月の調査期間において、60～90件の出動があった。最も多かったのは、R272（中標津消防署）であり、93件であった。そのうち、積雪期の約4か月間では46件となり、これは、70km以上にも及ぶ救急搬送が3日に1回程度の頻度で行われていることを意味する。

次に、各路線の分析区間における搬送時間を図-5に示す。R236（広尾消防署）では38～42分、その他では55～70分の搬送が行われ、出動日によってばらつきが見られる。なお、分析区間は、搬送先の都市部を除外しているため、病院到着まではさらに時間を要することに注意されたい。また、積雪期と非積雪期を比べると、積雪期では、搬送時間が2～3分増加し、ばらつきも大きくなる。

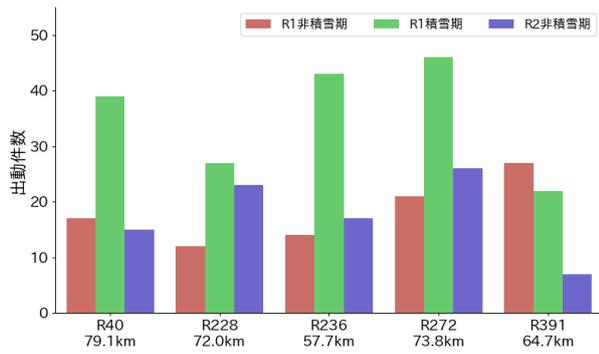


図4 各路線における三次救急搬送の出動件数

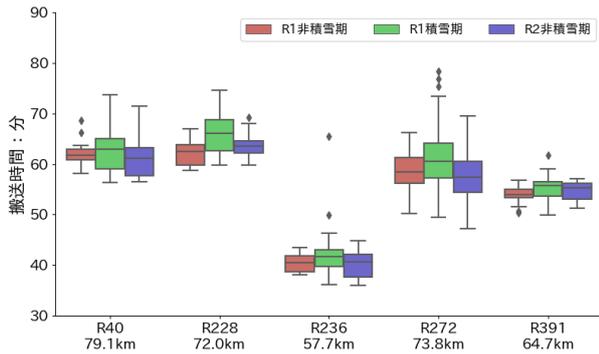


図5 各分析区間における搬送時間

降雪や積雪が原因と考えられるが、このような気象条件による影響については今後の課題とする。

本研究では、救急搬送と路面損傷との関係について着目するため、以下では、救急車プローブデータと路面性状データがともに揃っている「R2非積雪期」のデータを用いて分析を行う

(2) RMSに関する基礎集計

次に、各路線のRMSに関する基礎集計を行い、道路構造・路面性状・走行速度からRMSの傾向を把握する。なお、R272は、RMSが大きくなる傾向にあり、多路線との比較が難しいため基礎集計では除外する。

各路線におけるRMSのプロファイルを道路構造変数および路面性状変数とともに可視化した(図-6)。各路線で、局所的にRMSが大きくなる箇所が現れている。特に、 $CR_{MAX}=40\%$ 以上の区間でRMSが著しく増加している傾向が見られ、路面損傷が車両の振動に大きな影響を与えていることがわかる。次に、道路構造別、路面性状区分別、走行速度帯別にRMSの分布を確認した。

道路構造別のRMSを図-7に示す。各路線で、「橋梁」でのRMSが大きくなっていることがわかる。これは、橋梁ジョイント部通過時の車両への振動が大きく影響していると考えられる。R236では、橋梁部において最大で約 $3.0m/s^2$ の振動が発生している。

次に、各路面性状値を3, 4段階で区分したRMSを集計した(図-8)。なお、「市街地」「カーブ」「信号交差

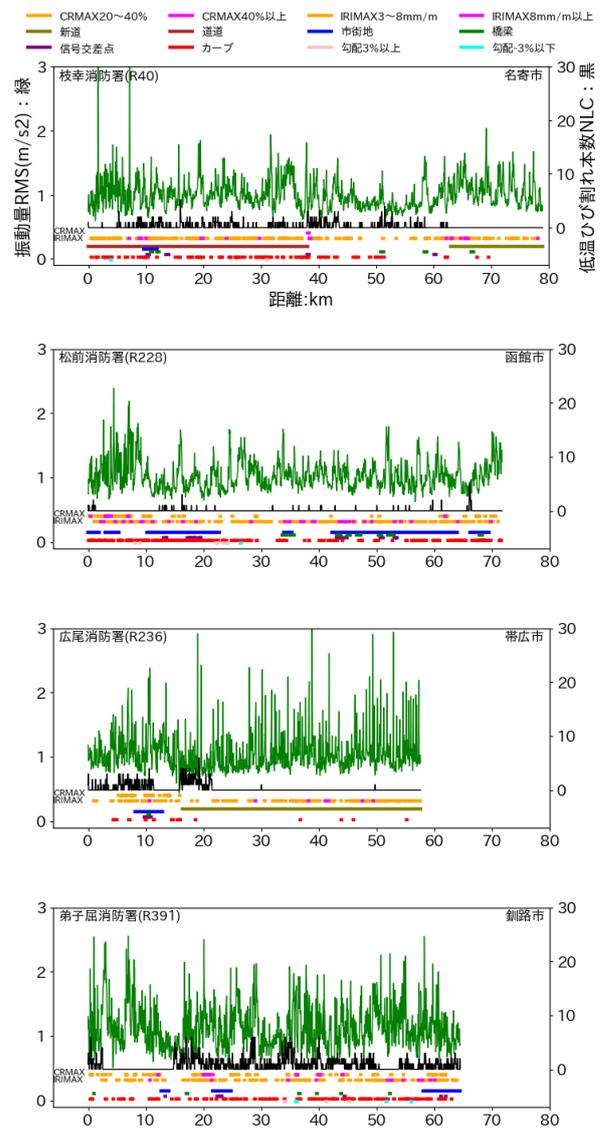


図-6 RMSのプロファイル

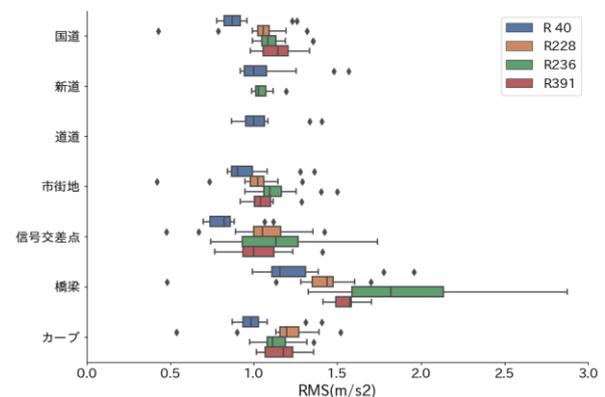


図-7 道路構造別のRMS

点」「歩行者信号」のいずれかがある区間は除外している。 CR_{MAX} と IRI_{MAX} を見ると、ほとんどの路線で、これらが大きくなるほど、RMSが増加している。特に、 $CR_{MAX}=40\%$ になると、RMSは約 $1.5m/s^2$ にまで増加し、「橋梁」

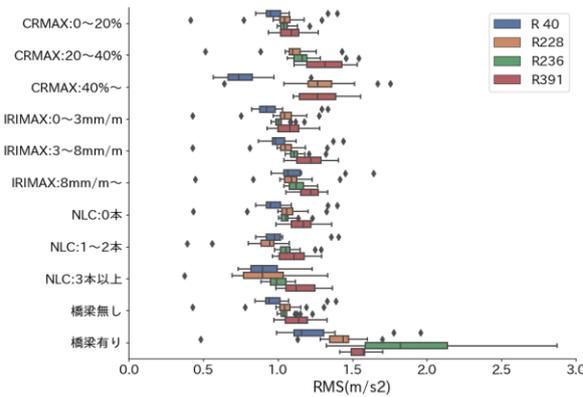


図-8 路面性状区分別の RMS

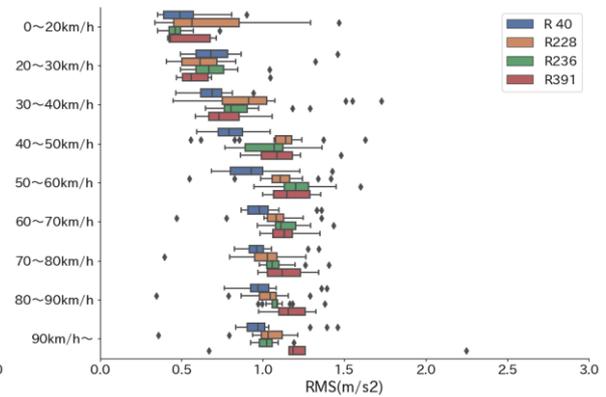


図-9 走行速度帯別の RMS

表-1 ロジスティック回帰分析の結果

目的変数：NRMS 説明変数	全路線統合		R40 (枝幸町)		R228 (松前町)		R236 (広尾町)		R272 (中標津町)		R391 (弟子屈町)	
	偏回帰係数	オッズ比	偏回帰係数	オッズ比	偏回帰係数	オッズ比	偏回帰係数	オッズ比	偏回帰係数	オッズ比	偏回帰係数	オッズ比
切片	-1.323 ***	0.266	-1.037 ***	0.355	-0.217 ***	0.805	-1.391 ***	0.249	-0.575 ***	0.563	-0.598 ***	0.550
国道ダミー	0.131 ***	1.140	-0.214	0.807	-0.217 ***	0.805	-0.058	0.943	-0.575 ***	0.563	-0.598 ***	0.550
新道ダミー	-0.059	0.943	-0.010	0.990	0.000	1.000	-0.032	0.968	0.000 **	1.000	0.000	1.000
道道ダミー	0.084 ***	1.087	-0.056	0.946	0.000 **	1.000	0.000 ***	1.000	0.000 ***	1.000	0.000 **	1.000
市街地ダミー	-0.138 ***	0.871	-0.086	0.918	-0.111 ***	0.895	-0.016	0.984	0.048	1.050	0.011	1.011
片側1車線ダミー	0.032	1.033	-0.099	0.906	-0.217 ***	0.805	0.083	1.087	0.090 **	1.094	-0.598 ***	0.550
橋梁ダミー	0.499 ***	1.647	0.335 ***	1.397	0.469 ***	1.599	0.847 ***	2.332	0.831 ***	2.296	0.530 ***	1.698
カーブダミー	0.019	1.019	0.032	1.033	-0.038	0.962	0.021	1.021	0.061 **	1.063	0.082 *	1.086
信号交差点ダミー	0.155	1.168	-0.104	0.901	0.245	1.278	0.372	1.451	0.691	1.995	0.389	1.476
縦断勾配	-0.018 ***	0.982	-0.030 *	0.970	-0.008	0.992	-0.003	0.997	-0.018 **	0.982	0.002	1.002
IRI _{MAX}	0.020 ***	1.020	0.016 ***	1.016	-0.002	0.998	0.024 ***	1.024	0.046 ***	1.047	0.018 **	1.018
CR _{MAX}	0.013 ***	1.013	-0.003	0.997	0.006 ***	1.006	0.009 **	1.009	0.013 ***	1.013	0.014 ***	1.014
NLC	0.009	1.009	0.022	1.022	-0.083 *	0.921	-0.028	0.972	-0.007	0.993	-0.012	0.988
走行速度	0.029	1.029	0.039	1.040	-0.432 ***	0.649	-0.046	0.955	-0.154	0.857	0.950 ***	2.585
サンプル数	121,445		23,418		32,033		19,217		37,952		8,825	
決定係数	0.09		0.04		0.04		0.03		0.12		0.10	

*:p<0.1 **:p<0.05 ***:p<0.01

と同程度となる。また、橋梁が存在する区間は、存在しない区間に比べて、1.5~2.0倍ほどRMSが増加している。一方、NLCではRMSの大きな増加は見られなかった。

次に、走行速度帯別のRMSを集計した(図-9)。R40, R228, R236では、速度増加に伴ってRMSが増加するが、50km/hをピークにそれ以上ではRMSが減少に転じている。これは、路面が健全なほど高速走行しており、振動箇所では、およそ50km/hにまで減速するものの、振動が大きいケースが多いことを意味する。それとは逆に、R391では、50km/h以上の速度帯で、速度とともにRMSが増加する傾向となった。この路線では、振動が発生しやすい箇所でも速度を減少させずに走行している可能性がある。

(3) ロジスティック回帰分析の結果

ロジスティック回帰分析によるパラメータ推定結果を表-1に示す。なお、救急車の平均的な走行速度は60km/h以上であるのに対し、50km/h未満では振動の生じ方が異なる(図-9)ため、それらのデータを除外したうえでパラメータ推定を行った。まず、全路線のデータを統合し

た場合では、「市街地」「橋梁」「IRI_{MAX}」「CR_{MAX}」などの説明変数は有意(危険率1%)となったが、「カーブ」「信号交差点」「NLC」「走行速度」などは有意とならなかった。有意となった道路構造変数を比較すると、「市街地」のオッズ比が0.87と最も小さい。オッズ比が最も大きい変数は、「橋梁」で1.65を示した。路面性状変数については、「IRI_{MAX}」「CR_{MAX}」が有意となり、オッズ比が1以上を示すことから、それぞれが車両振動の増加に関係していることがわかる。

路線別にパラメータ推定した結果をみると、それぞれの路線で異なる傾向を示したが、すべての路線で「橋梁」が有意(危険率1%)となり、最もオッズ比が高い変数となった。なお、「NLC」が有意となる路線は存在しなかった。低温ひび割れは局所的な損傷であり、車両振動には大きな影響を及ぼしていないことが考えられる。

(4) 路面性状値とNRMSの関係

上記のパラメータ推定結果を用いて、各路面性状変数を変化させたときのNRMSを推定した(図-10)。

いずれの路線も、「 CR_{MAX} 」「 IRI_{MAX} 」が大きくなるにつれて、NRMSが増加している。R391は、 CR_{MAX} の傾きが大きく、NRMSは、 $CR_{MAX}=40\%$ になると0.52に増加する。R272は、 IRI_{MAX} の傾きが大きく、 $IRI_{MAX}=15\text{mm/m}$ では、0.53に増加する。また、全路線統合でも、ほとんど路線とはほぼ同じ傾向を示しており、NRMSが $CR_{MAX}=40\%$ では0.36、 $IRI_{MAX}=15\text{mm/m}$ では0.29に増加している。

4. まとめ

本研究では、北海道内の三次救急搬送路線を対象に、救急車プローブ調査および路面性状調査を実施し、路面損傷や道路構造が救急車の車両振動に及ぼす影響を統計モデルにより分析した。さらに、そのモデルを用いて、路面性状別の車両振動量の推定を試みた。得られた結果を以下に示す。

- 救急車の加速度データからRMSを算出し、道路構造、路面性状、走行速度との関係について分析したところ、各路線で、橋梁やひび割れ率区間最大値 $CR_{MAX}=40\%$ 以上の区間でRMSが著しく増加していることがわかった。また、ほとんどの路線では、走行速度 50km/h 程度でRMSが最大となっており、路面損傷が多い箇所でも速度を減少させたとしても、一定の車両振動が発生している可能性がある。
- 出勤毎の最大値でRMSを正規化したNRMSを目的変数、路面性状、道路構造、走行速度を説明変数としたロジスティック回帰分析を行った。その結果、橋梁区間が最も振動を生じさせること、また、それに次いで、ひび割れ率区間最大値 CR_{MAX} 、 IRI 区間最大値 IRI_{MAX} が大きいほど振動が大きくなることがわかった。

本研究では、路面損傷が多い箇所では減速しても一定の振動が発生することを明らかにした。これは、救急搬送の第一要件は病院到着遅れの回避であるため、多少の振動を犠牲に高速走行を優先させていることを示唆している。今回用いたRMSと患者への負担の関係は不明であるものの、舗装修繕により長距離搬送における振動量を低減できることは確かである。舗装修繕は、車両振動と搬送時間を同時に低減できる有効な手段であることが確認できた。今後は、救急車の振動量と走行時間を同時に推計し、修繕シナリオ分析やLCC分析を通して、救急医療を支援する維持管理方策を検討したい。

参考文献

- 1) 総務省消防庁：令和2年版消防白書，pp.191.
- 2) 森村尚登，石井美恵子，奥寺敬，柿山聡，櫻井淳，杉田学，田邊晴山，六車崇，山畑佳篤：緊急度判定の体系化；発症から根本治療まで，日本臨床救急医

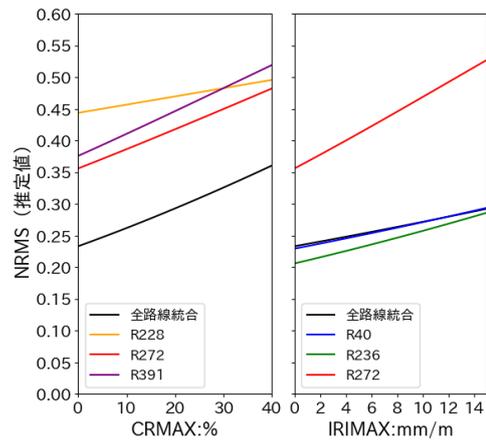


図-10 各路面性状値とNRMSの関係

学会雑誌，Vol.19，pp.60-65，2016.

- 3) 国土交通省北海道開発局：北海道の社会経済状況と幹線道路ネットワークについて，https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/dou_kei/splaat0000016c-b4-att/splaat0000016cgm.pdf（閲覧日：令和3年6月8日）
- 4) 河井大地，丸山喜久，永田茂：スマートフォンで計測した自動車の上下加速度を用いた舗装路面凹凸の評価，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.73，No.3（舗装工学論文集第22巻），I_79-I_87，2017.
- 5) 富山和也，川村彰，Riccardo Rossi，Massimiliano Gastaldi，Claudio Mulatti：心拍変動解析に基づく精神疲労を考慮した路面平坦性評価，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.71，No.3（舗装工学論文集第20巻），I_1-I_8，2015.
- 6) 安田康晴，二宮伸治，諫山憲司，竹井豊：救急自動車の振動と防振架台の効果と対策，日本臨床救急医学会雑誌，Vol.18，pp.5-14，2015.
- 7) 亀山修一，佐々木克典，郭慶煥，城本政一，川端伸一郎：救急車搬送の観点からの舗装路面の評価 土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.75，（舗装工学論文集第24巻），I_41-I_47，2019.
- 8) 布広祥平，浅田拓海，佐々木博，亀山修一：救急車プローブデータを用いた舗装損傷が搬送時間に及ぼす影響分析，第63回土木計画学研究発表会，土木学会，土木計画学研究・講演集，2021.
- 9) 簡易 IRI 測定装置「STAMPER」：新技術情報提供システム（NETIS），KT-170109-VR（2018.12.28）.
- 10) 浅田拓海，居駒薫樹，長屋弘司，亀山修一：U-netによるひび割れスケッチを導入した簡易カメラ搭載型舗装点検の精度検証，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.76，No.2，I_123-I_131，2020.
- 11) 熊谷政行：積雪寒冷地の道路舗装の損傷について，寒地土木研究所月報，第714号，2012.
- 12) 国土交通省：舗装点検要領，2017.
- 13) 宮崎文平，風戸崇之，濱梶方希，小濱健吾，貝戸清之：高機能舗装を対象とした高速道路の路面管理基準に関する実証的研究，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.69，No.3，I_175-I_183，2013.

(Received ??,2021)
(Accepted ??,2021)