

舗装劣化の空間的自己相関を考慮した 生活道路の修繕候補トリアージ方法の開発

可知 宏太¹・浅田 拓海²・有村 幹治³

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: 16021024@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 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)
E-mail: asada@mmm.muroran-it.ac.jp

³正会員 室蘭工業大学 准教授 大学院工学研究科 もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町27-1)
E-mail: arimura@mmm.muroran-it.ac.jp

市町村が管理する生活道路では、舗装の劣化が面的に進行しており、道路パトロールや住民要望から修繕候補箇所が選定され、詳細調査を経て措置の内容が決定されている。本研究では、修繕候補の選定を公平かつ効率的に行うことを目的に、室蘭市全管理道路の舗装点検データベースを用いて、劣化箇所や住宅の空間的分布を考慮した「修繕候補トリアージ方法」を開発した。まず、Moran's I 統計量から、ひび割れ率が空間的自己相関を有することを明かにした。その上で、ひび割れ率とその空間ラグ変数から修繕候補を 5 段階でランク分けした。さらに、住宅立地データから算出される住宅近接度を導入し、そのパラメータ α を大きくすると、住宅が近く、多いほど、当該区間の修繕候補ランクが上昇することを示した。

Key Words: pavement, triage method, spatial autocorrelation, community roads, in-vehicle camera

1. はじめに

近年、我が国では、インフラの老朽化が顕著となり、橋梁、トンネル、下水道、舗装などの各部門で維持管理計画の策定、実施が喫緊の課題となっている。市町村においては、管理する各種インフラが膨大にあり、予防保全を含めた効果的な維持管理の観点から定期的・網羅的な点検の実施が求められている。点検結果が揃った後は、通常、詳細調査の対象を選定する段階に入るが、対象が膨大な場合は効率化が必要となる。例えば、下水道分野では、高頻度な調査によるスクリーニング技術の開発が進んでいる¹⁾。また、様々な状況に応じることができる順位付けも有効である。橋梁分野では、医療分野において措置対象患者の優先順位付けを行う「トリアージ (triage)」の考え方を維持管理に応用させた事例も報告されている²⁾。

市町村が管理する生活道路では、舗装の劣化が面的に進行しており、安全性、美観などの面から、住民からの苦情や修繕の要望が相次いでいる。このようなことから、生活道路においては、当該箇所の舗装劣化だけでなく、近隣の状況や住宅分布、交通量等の周辺環境を勘案して

修繕の必要性を判断することが望ましい。実際には、施工・補修記録や点検記録などのデータが揃っていない場合が多く、上記のような判断は難しい。多くの市町村では、点検体制が確立されておらず、道路パトロールや住民要望から修繕候補箇所を絞り込み、現地での詳細調査を経て、措置の内容が決定される場合が多い³⁾。しかしながら、このようなアプローチでは、客観性が低く、修繕箇所に偏りが生じることが指摘される。公平かつ効率的な舗装維持管理を行うためには、まず、定量的かつ網羅的な点検を行った上で、周辺環境を考慮しながら修繕候補箇所を決定することが有効と思われる。

特に、市町村では、関連予算や人員の制限から、上記のような全面的な舗装点検の実現は難しい状況である。このような背景から、近年、車載カメラを用いた走行調査と画像解析を組み合わせた点検アプローチが注目されている。例えば、車載カメラで撮影した路面画像に動的 2 値化処理を適用してひび割れ評価を自動化した浅田らの研究⁴⁾、ひび割れ解析に Deep Learning を導入した全らの研究⁵⁾などある。昨今においては、実用化に向けた装置、技術の開発が活発化しているところである⁶⁾。しかしながら、既往の手法では、機器類が高価であり、また、

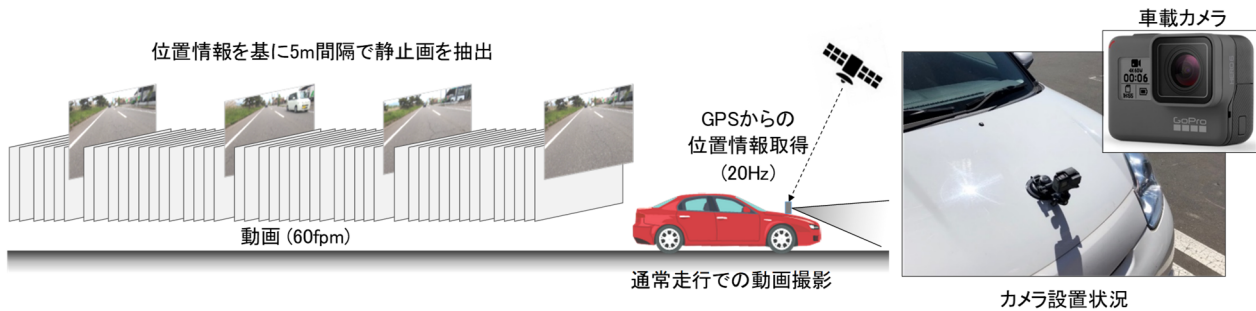


図-1 走行調査の概要

実証実験の段階にあることから、特に、市町村への導入は少なく、生活道路を含んだ全面的な点検を行った事例は少ない。その中で、著者らは、車載カメラと Deep Learning の代表的アルゴリズムである CNN (Convolutional Neural Network) を用いた「走行式舗装点検システム」を開発した⁸⁹⁾。平成 30 年度には、本システムを室蘭市の全管理道路に適用し、5m 区間毎の位置情報、路面写真、ひび割れ率から構成される舗装点検 DB を構築した⁹⁾。

本研究では、上記の舗装点検 DB を用いて、劣化箇所や住宅の分布を考慮した修繕候補箇所の順位付け方法（以下、修繕候補トリージング方法）を開発する。本論文の構成を以下に示す。第 2 章では、先行研究で開発した走行式舗装点検システムと舗装点検 DB の構築について概説する。第 3 章では、Moran's I 統計量を用いて、ひび割れ率の空間的自己相関を検証し、その上で、ひび割れ率の空間ラグ変数から周辺の劣化状態を定量化する。第 4 章では、ひび割れ率と住宅の近接性から修繕必要度を評価し、空間ラグ変数との関係から修繕候補を 5 段階でランク付けした。ケーススタディとして、室蘭市を対象に、修繕候補ランクをマッピングし、その結果を通して本方法の有効性を示す。第 5 章では、結論を述べる。

2. 走行式舗装点検システムと点検 DB の構築⁹⁾

(1) 車載カメラを用いた走行調査

図-1 に示すように、市販の小型アクションカメラ (GoPro Hero 6) を車両ボンネットに設置し、走行しながら前方路面の動画撮影を行う。カメラの GPS ロガーで記録した位置情報により、5m 間隔で静止画を抽出する。

先行研究では、室蘭市の全管理道路を対象に上記の方法で走行調査を実施した。撮影の対象は、基本的には往復方向とするが、幅員 4m 未満の生活道路では 1 方向のみを走行して撮影を行った。また、片側 2 車線以上の幹線系の路線は、歩道側車線のみを調査対象とした。調査期間は、平成 30 年 8 月から 11 月であり、日射の影響を受けない時間帯（午前 10 時～午後 15 時）に動画撮影を行った。

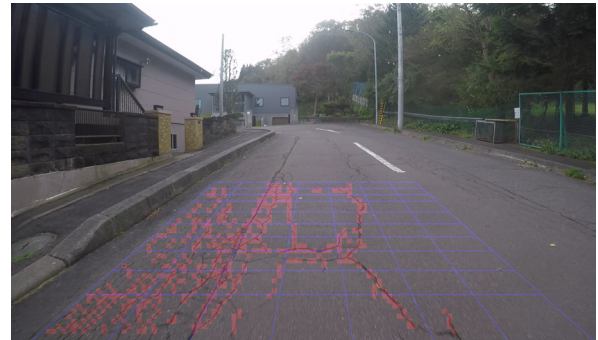


図-2 CNN によるひび割れ検出の例

(2) CNN を用いたひび割れ評価

路面画像の小片部 (16×16 ピクセル) 毎に、CNN モデルを適用してひび割れを細かく検出した。モデルの学習データおよび精度検証には室蘭市の道路点検経験者に協力をいただいた。まず、教師データのために、250 箇所の路面画面を用いてひび割れをスケッチしてもらい、それを基にひび割れ「有」「無」の小片画像 (16×16 ピクセル) を抽出し、モデルの学習を行った。

学習済みのモデルを路面画像に適用することで、図-2 に示すようなひび割れ検出画像を得ることができる。従来のひび割れ評価としては、舗装調査・試験法便覧の路面性状測定車によるアスファルト舗装を対象とした目視スケッチによる手法¹⁰⁾（以下、スケッチ法）がある。この手法では、まず、ひび割れをスケッチし、図-2 のように、0.5×0.5m で描いたメッシュ毎にひび割れの本数を目視で判定する。1 本の場合はひび割れ面積を 0.15m²、2 本以上は 0.25m² とし、これらを合計する。最後に、以下の式(1)のように、全メッシュの面積で除すことでひび割れ率 CR (Crack Ratio) を得る。なお、本システムでは、16×16 ピクセルの粗いマスでのひび割れ検出となるため、本数の判定は難しい。そのため、ひび割れが検出されたメッシュ全てにおいてひび割れ面積を 0.25 m² とした。

$$CR(\%) = \frac{\text{ひび割れ面積} : m^2}{\text{全メッシュ面積} : m^2} \times 100 \quad (1)$$

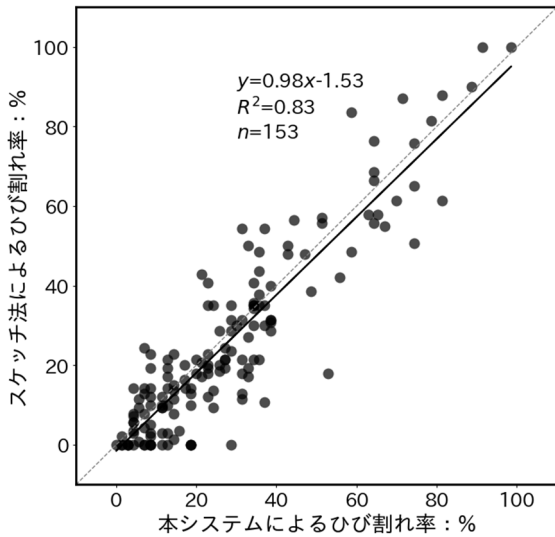


図-3 本システムとスケッチ法の比較

(3) ひび割れ率の精度

モデルの学習用以外の路面画像 153 枚を用いて、スケッチ法によりひび割れ率を算出 (3 名の平均値) し、精度検証のための真値とした。本システムとスケッチ法によるひび割れ率の関係を図-3 に示す。大きな誤差となるケースが幾つか見られるものの、 R^2 値は 0.83、RMSE (二乗平均平方根誤差) は 9.9% を示し、ほぼ 1 対 1 の関係となった。昨今、簡易な方法として採用され始めている目視評価 (3 段階の損傷レベル¹¹⁾) との比較を行ったところ、表-1 に示すように、スケッチ法との一致率は本システムの方が高くなった。したがって、本システムでは、画像のみのため、措置内容を決定する詳細調査には向いていないものの、修繕候補の順位付けを目的とすれば十分な精度を有すると考えられる。

(4) 舗装点検 DB による劣化箇所現状把握

室蘭市管理道路におけるひび割れ率 CR の分布を図-4 に示す。これを見ると、CR が大きい箇所が広く分布しており、特定のエリアでの集中も見られる。次に、室蘭市の都市計画道路に指定されている路線を幹線道路、それ以外を生活道路とし、両者の CR を比較した。図-5 に示すように、幹線道路では、 $0\% \leq CR < 20\%$ の区間が大半を占め、2 割程度である。これに対して生活道路では、 $40\% \leq CR$ の区間が約 5 割を占め、住宅地内の舗装が著しく劣化していることがわかる。

以上のように、全面的な調査による舗装点検 DB を可視化することで、劣化箇所の位置や傾向が容易に把握することが可能となる。しかしながら、この例のように、生活道路では、劣化箇所が膨大に広がっていることから、公平かつ効率的な維持管理につなげるためには、定量的な指標を基に、修繕候補を順位付けることが望ましい。

表-2 目視評価と本システムの精度比較

一致率 79.1% 71.5%		上段：本システム (n=153) 下段：目視評価 (n=153)		
		評価Ⅰ	評価Ⅱ	評価Ⅲ
スケッチ法	評価Ⅰ	39.2% 41.4%	10.5% 8.8%	0.7% 0.1%
	評価Ⅱ	3.3% 7.7%	22.2% 17.4%	0.7% 1.0%
	評価Ⅲ	0.0% 1.3%	5.9% 9.5%	17.6% 12.7%

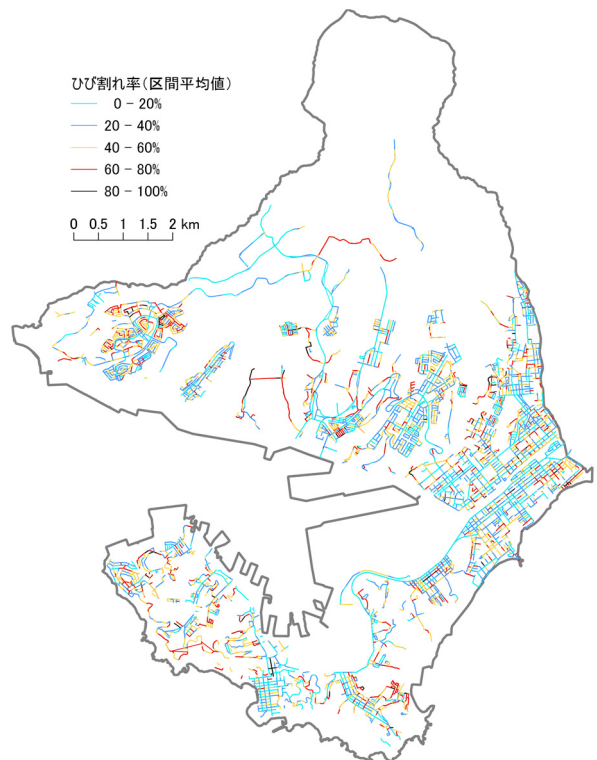


図-4 室蘭市管理道路におけるひび割れ率の分布

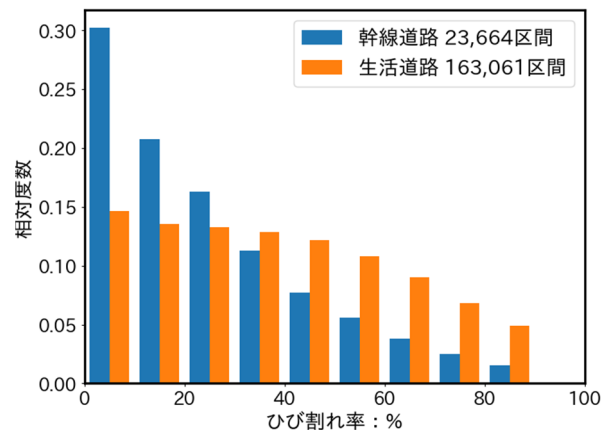


図-5 生活道路と幹線道路のひび割れ率の比較

3. ひび割れ率の空間的自己相関

前章の通り、生活道路では、舗装劣化箇所が集中するエリアが幾つか見られた。このような舗装劣化の空間的な分布特性を分析した事例は幾つか報告されている。例えば、大窪らは、空間統計学¹²⁾を用いて、高速道路上の舗装劣化速度に空間的自己相関があることを明らかにした¹³⁾。本研究では、生活道路上の面的に広がる舗装劣化を対象に空間的自己相関の分析を行う。すなわち、「劣化が大きい箇所では、周りも劣化が大きい」という空間的自己相関を明らかにできれば、周辺の劣化状況を考慮した修繕候補の順位付けを行うことが可能と思われる。

(1) 空間的自己相関の検定

ひび割れ率の空間的自己相関を検証するために、ひび割れ率とその位置情報から Moran's I 統計量（グローバル Moran 統計量 I ）を算出した。なお、室蘭市全地区のデータを用いると、空間的自己相関の傾向が見づらくなることから、地区（大字）毎に I 統計量を算出した。

まず、空間重み行列 w_{ij} を求める。空間重み行列は様々な種類があるが、本研究では、「閾値有りの距離の逆数」¹²⁾を採用した。区間 i と j のユークリッド距離の逆数を $1/d_{ij}$ とすると w_{ij} は、以下のような行列式(2)で表現される。なお、閾値は 100m とし、それ以上となる要素は 0 とした。また、以降の計算のために行基準化を行った。

$$w_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & \cdots & 1/d_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/d_{i1} & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

次に、行基準化した w_{ij} を用いて、以下の式(3)からグローバル Moran I 統計量を算出した。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

ここで、

- x_i, x_j : 区間 i または j のひび割れ率 : %
- \bar{x} : 全区間のひび割れ率の平均値 : %

この I が 1 に近いほど空間的自己相関が強くなる。各地区から算出した I の分布を図-6 に示す。 I は約 0.4 をピークとした正規分布を示し、 $I > 0.3$ となる地区が全体の 8 割以上となった。次に、有意水準 $\alpha = 0.01$ で I の有意検定を行ったところ、 p 値は全地区で 0.01 未満となった。したがって、どのようなエリアでも、生活道路におけるひび割れ率は、空間的自己相関を有すると言える。

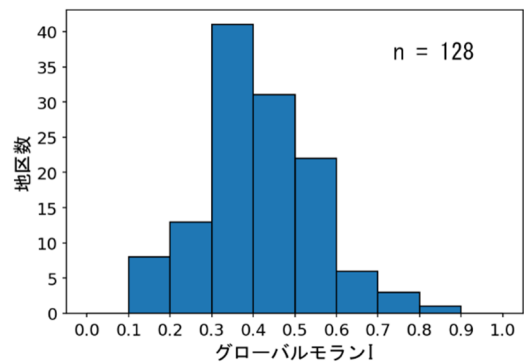


図-6 グローバル Moran I の分布

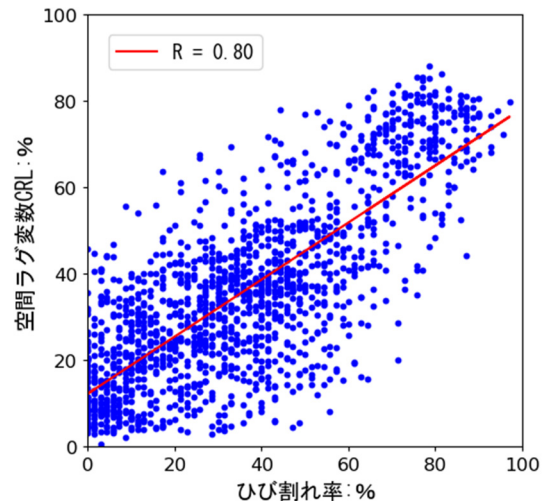


図-7 CR と CRL の関係

(2) ひび割れ率の空間ラグ変数

「周りのひび割れ率」については、式(4)から算出される空間ラグ変数 CRL (Crack Ratio Lag) で評価できる。

$$CRL_i (\%) = w_{ij} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、

- i, j : 区間番号
- w_{ij} : 行基準化した空間重み行列
- x_j : 区間 i のひび割れ率

CRL は、距離の逆数を重みとした CR の加重平均値である。したがって、周りに CR が大きい区間が多く、それらが近いほど、当該区間の CRL は大きくなる。

一例として、ある地域における CR と CRL の関係を図-7 に示す。両者には正の相関が見られ、区間自身の CR が大きい場合は、周辺の区間も CR が大きい傾向を示す。これが空間的自己相関であり、 CR と CRL の相関係数は、グローバル Moran I に相当する。 CR と CRL がともに大きい箇所は、特に注目すべき対象、いわゆる「ホットスポット」として抽出される。

4. 周辺環境を考慮した修繕候補トリアージ

(1) 住宅立地データを用いた住宅近接度の算出

生活道路では、住民からの修繕の要望が多く寄せられる。その発生確率は、住民の属性に起因する可能性があるが、基本的には人口に比例すると推測される。そこで、住宅が近く、その延床面積が大きいほど、当該区間への要望発生確率が高いと考え、以下に示す式(5)による「住宅近接度 HP (Housing Proximity)」を定義した。なお、解析コストを考慮して、周囲 100m 以上の住宅は計算から除外した。また、住宅の位置情報および延床面積の住宅立地データには、株式会社ゼンリンの「建物ポイントデータ (2019年調査)」を用いた。

$$HP_i = \sum_{j=0}^n \frac{S_j}{d_{i,j}} \quad (5)$$

ここで、

i : 区間番号

j : 住宅番号 (1, 2, ..., n)

S_j : 住宅 j の延床面積: m^2

d_{ij} : 区間 i と j のユークリッド距離: m

(2) ひび割れ率と住宅近接度による修繕必要度

平成 28 年に国土交通省が策定した舗装点検要領では、路面の損傷レベルを I, II, III の 3 段階で区分する方法が記載されている¹¹⁾。その損傷レベルの例を参照すると、ひび割れ率では、0~20%が I, 20~40%が II, 40%以上が III に相当する。また、区分 III は「修繕段階」と判断されることから、ひび割れ率の大きさは修繕の必要性を示すと言える。同じひび割れ率でも、上述したように、周辺の住民が多いほど修繕要望の発生率が高くなると考えられる。そこで、本研究では、ひび割れ率に住宅近接度を割り増した「修繕必要度 RND (Repair Need Degree)」を考案した。 RND は、以下の式(6)から算出する。

$$RND(\%) = CR \times HP^\alpha \quad (6)$$

ここで、

CR : ひび割れ率: %

HP : 正規化した住宅近接度 (1~2)

α : 住宅近接性の重要度 (0~1)

HP は、1~2 となるように正規化した。そのため、 α の範囲を 0~1 とすれば、 $CR \leq RND \leq 2CR$ となる。すなわち、この α は、沿道や近隣の住宅からの修繕要望の潜在的な量を考慮したパラメータであり、地域の特性に応じて設定できる。なお、本研究では、フィージビリティの観点から容易に得られる住宅立地データのみを導入した

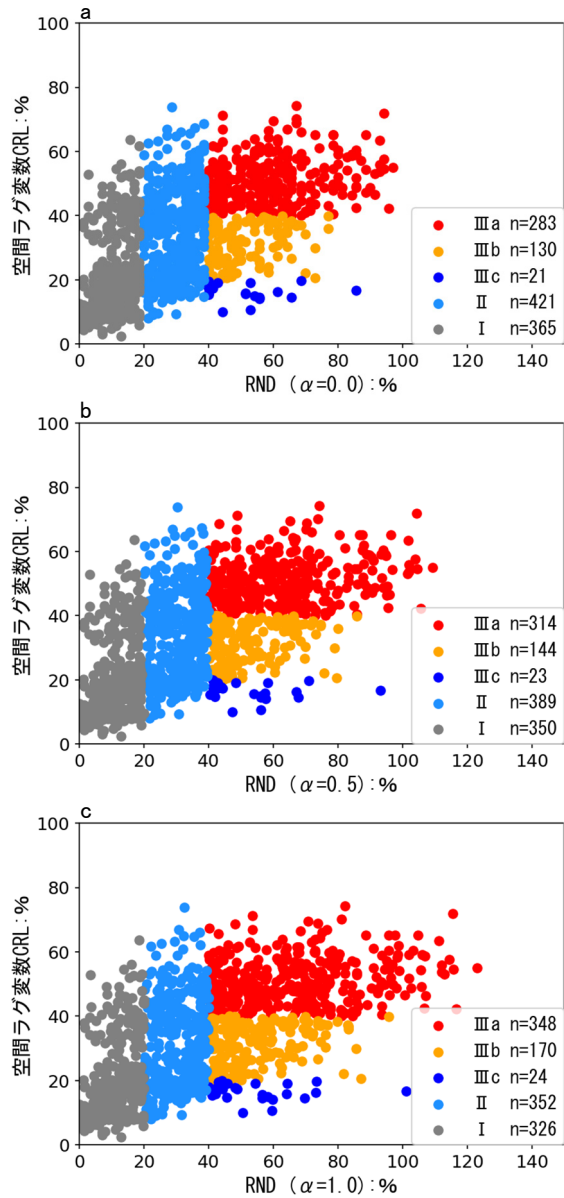


図-8 RND と CRL による 5 段階区分

が、修繕の必要性は、交通量や路線の性格などからも評価することが理想的である。今後は、住宅立地以外の様々なデータを導入し、式(6)を再構築したい。

(3) 修繕必要度とひび割れ率の空間ラグ変数を用いた修繕候補の 5 段階区分

最後に、 RND と CRL を基にした舗装候補トリアージ方法について説明する。まず、 RND ($\alpha=0$) と CRL の関係を図-8a に示す。 RND ($\alpha=0$) はひび割れ率 CR と等しい。そこで、従来のひび割れ率の基準 20%, 40% を RND に適用し、I, II, III の 3 つに区分する。しかしながら、「修繕段階」とされる III の箇所が膨大となる場合があり、詳細調査を行う修繕候補の選定は難しい。

CRL は、ひび割れ率の加重平均値であり、基準 20%, 40% を適用できる。そこで、本研究では、さらに、III の範囲を CRL で 3 つに区分 (IIIa, IIIb, IIIc) し、最終的



図-9 修繕候補ランクのマッピング例

に、修繕候補を 5 段階のランクで順位付けた。IIIc は、当該箇所は劣化が大きい、周りは小さいため、局所的なケースと言える。これに対し、IIIa は、周りも劣化が著しいため、近隣住民への配慮や修繕の効率性から優先度は高いと言える。次に、住宅近接性の重要度 α を動かした場合を図-8b, 8c に示す。 α を大きくすると、 RND が増加するため、修繕候補ランクが上昇する箇所が生じる。ただし、前述のように、 $RND \leq 2CR$ としたことから、I から II、II から III (a, b, c) に推移するケースは発生するが、I から III (a, b, c) になることは無い。

最後に、本方法の妥当性を確認するために、修繕候補ランクを地図上にマッピングした。まず、図-9a に示すように、従来のひび割れ率 CR だけでマッピングすると、 $CR \geq 40\%$ の箇所が多く、修繕候補の選定が難しい。これに対し、本方法の 5 段階ランクで可視化すると、図-9b に示すように、 $CR \geq 40\%$ の範囲で 3 つに区分されるため、修繕候補をさらに絞り込める。例えば、図中 A では、周辺に劣化箇所が少ないため、ランク IIIb が現れる。さらに、図-9c, d に示すように、 α を大きくすると、IIIa や IIIb の箇所が増える。図中 B のように、住宅が多いエリアでは、IIIa が連続する傾向が出現し、一定の区間、エリアとして修繕候補区間の抽出が可能となる。このように、II から IIIa に推移する箇所は、自身のひび割れ率が 20~

40%であるものの、周りの平均的なひび割れ率 (CRL) は 40%以上である。近隣住民の視点を考慮すると、このような箇所を周辺の劣化箇所とまとめて修繕することにより、舗装維持管理の効率化につながると考えられる。

以上のように、本方法では、周辺の舗装劣化状態や近隣住宅の分布を考慮して、修繕候補の順位付けを行うことができる。さらに、住宅近接性の重要度 α を大きくすることで、住宅が多いエリアでは、修繕候補ランクが上昇し、優先的な措置対象を抽出することが可能となる。舗装点検 DB と住宅立地データを揃え、本方法を適用することで、公平かつ効率的な舗装修繕のための有用な情報を得ることができる。

5. 結論

本研究では、生活道路に広がる膨大な舗装劣化箇所から公平かつ効率的に修繕候補箇所を選定することを目的に、ひび割れ率の空間的自己相関と住宅近接性を考慮した修繕候補トライアージ方法を開発した。得られた結果を以下に示す。

- 先行研究で構築した室蘭市管理道路の舗装点検 DB を用いて、地区毎に Moran's I 統計量の検定を行った。

その結果、ほぼ全ての地区で、ひび割れ率 CR は空間的自己相関を有することが明らかになった。

- 住宅との位置関係および延床面積から区間毎に住宅近接度 HP を算出した。また、路面損傷と住宅近接性の両面から区間の修繕の必要性を評価するため、 CR と HP から算出される修繕優先度 RND を考案した。住宅近接性の重要度 α は、大きくすると RND が増加するパラメータであり、地域の特性に応じて調整できる。
- ひび割れ率の空間ラグ変数 CRL と RND から修繕候補を 5 段階のランクで順位付けし、従来よりも細かく候補を絞り込むことを可能とした。また、ランクを地図上に可視化し、周辺の劣化状態た住宅分布を考慮しながら候補区間の抽出ができることを示した。

本研究では、 HP や CRL を算出する際、地点間のユークリッド距離を使ったため、実際の移動距離が考慮されていない。今後は、交通ネットワークによる最短距離の計算を行い、より実態、感覚に近くなるように各指標を修正する予定である。また、ひび割れ率や住宅以外にも様々なデータを揃え、交通量や路線の性格などを考慮して修繕必要度 RND の再構築を行う。

参考文献

- 1) 深谷渉：膨大な下水道管から異常箇所を迅速に抽出：管路スクリーニング技術の研究動向（特集 下水道特集：下水道最前線）（新技術・ICT），土木施工，Vol.59, No.5, pp.91-94, 2018.
- 2) Kawanaka, T., Matsumaru, M., Rokugawa, S., Suzuki, H., and Suzuki, K.: Triage methodology of bridges for infrastructure management: empirical analysis of road networks in municipalities with declining populations and increasing debts, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.14, Issue 8, pp.1153-1168, 2018.
- 3) 川中孝章, 松丸正延, 六川修一, 鈴木博人：人口減少社会における橋梁のトリアージ手法に関する研究：人口とネットワーク接続性を考慮した基礎的研究，日本経営システム学会全国大会講演論文集，Vol.54, pp.92-95. 2015.
- 4) 富山和也, 川村彰, 藤田旬, 石田樹：地方自治体の舗装維持管理実態を考慮した市街地道路の効果的な路面点検手法の開発，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.69, No.2号, I_54-I_62, 2013.
- 5) 浅田拓海, 亀山修一, 川端伸一郎, 佐々木克典：走行車両から撮影した路面画像を用いた舗装のひび割れ評価手法の開発，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.70, No.3, I_9-I_16, 2014.
- 6) 全邦釘, 井後敦史, 南免羅裕治, 黒木航汰, 大窪和明：車載カメラにより撮影された舗装画像からのディープラーニングによるひび割れ率評価，土学会論文集 E1（舗装工学），Vol.73, No.3, I_97-I_105, 2017.
- 7) 国土交通省四国地方整備局企画部・道路部：公共工事等における新技術活用システム（テーマ設定型）～「路面性状を簡易に把握可能な技術」に関する公募～【応募要領】，2017.
- 8) 浅田拓海, 川村和将, 石田篤徳, 亀山修一：Convolutional Neural Network を用いたひび割れ・パッチングの高精度検出手法の開発，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.74, No.3, I_131-I_138, 2018.
- 9) 居駒薫樹, 浅田拓海, 有村幹治, 亀山修一：車載カメラと AI を用いた生活道路舗装劣化 DB の構築，土木計画学研究・講演集，Vol.60, CD-ROM, 2019.
- 10) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧-第 1 分冊-, 2007.
- 11) 国土交通省：舗装点検要領，2016.
- 12) 瀬谷創, 堤盛人：空間統計学-自然科学から人文・社会科学まで-, 朝倉書店, 2014.
- 13) 大窪和明, 全邦釘, 橋爪謙治, 藤田尚：道路舗装の劣化速度に関する探索的空間データ分析，土木学会論文集 E1（舗装工学），VOL.74, No.3, I_95-I_103, 2018.