

更新工事集約化のための重点維持管理対象地域 スクリーニング手法の提案

篠崎 秀太¹・貝戸 清之²

¹学生会員 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 博士前期課程 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: s.shinozaki@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²正会員 大阪大学准教授 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

近年、標準耐用年数を超過する下水道管渠が増加する傾向にある。そこで、増大する下水道管渠の更新費用を予算内に抑えるために、効率的な管渠の更新施策の立案が課題となりつつある。下水道管渠は連続してネットワークを構成する施設特性上、隣接した地域は同環境下で同様に劣化する可能性が高い。したがって、隣接地域における更新工事を集約化すると効率的な更新施策になる場合も多い。本研究では、下水道管渠の点検データおよび位置情報を用いて、下水道管渠の劣化現象の観点から更新工事を集約化すべき、重点維持管理対象地域のスクリーニングを行う。具体的には、劣化情報をパラメータとしたデュアル・カーネル密度推定法により、劣化した下水道管渠が密集する重点維持管理対象地域を特定する。最後に、大阪市が管理する下水道管渠への適用事例を通して、提案手法の有効性を実証的に検討した。

Key Words: sewer pipe, dual kernel density estimation, geographic information, management,

1. はじめに

近年、下水道管渠の老朽化が顕在化しつつある。管渠の標準耐用年数は一般的に 50 年といわれており、図-1 に示すように都市部の管渠の平均年齢が約 30 年であることを考慮すると、10から20年の間に管渠の更新需要が急激に高まることが想定される。したがって、管渠の更新に要する人的および金銭的制約からも更新需要の急激な増大を回避するように、更新機会を分散させることが望ましい。加えて、管渠は地域に網目状に広く連続して分布する地下に埋設された社会基盤構造物であるため、すべての管渠の状態を頻繁に点検および予防保全のような措置を講じることは困難である性質を有する。したがって、従来より管渠の維持管理は、補修を始めとする頻繁な予防保全ではなく、更新のような事後保全により一度に健全度を向上させる対応が基本となる。上述の現状を考慮した上で、管渠を維持管理する手法について考える。

管渠のように網目状に連続して分布する構造物は、環境的な要因（例えば、管渠の場合は土中塩分濃度や地盤強度など）に影響を受け、周辺の管渠は集散的に同様に劣化している可能性が高い²⁾。したがって、管渠の更新

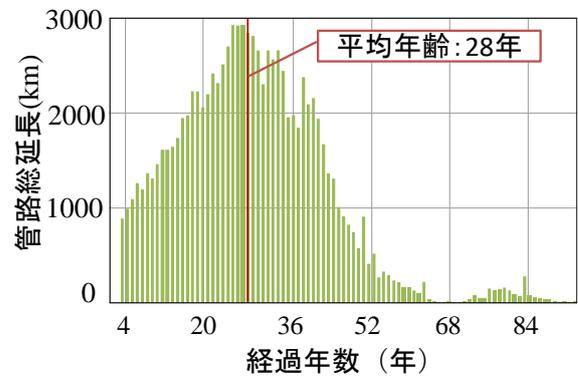


図-1 下水道管渠の敷設からの経過年数分布

は、個別に非同期に行うわけではなく、周辺の管渠と同期させ、更新工事を集約化させる方が効率的な場合も多い。加えて、上述のように管渠は地下に埋設された構造物であるため、交通規制や掘削などの社会的費用が多くかかる。これらの費用は、規模より回数に大きく影響を受けるため、更新機会を減らせば、低減可能である。実務上は、上述の社会的費用を低減するために周辺の管渠を一括で取り換える事例も散見される。したがって、管渠の維持管理は、健全性が低下した管渠が密集した地域を更新対象とし、更新工事を集約化させる方が望ましい。以上を踏まえて、本研究は、管渠の更新工事を集約化す

るために、健全性が低下した管渠が密集した重点維持管理対象地域を特定し、効率的に管渠の集成的な維持管理を行うための情報を提供する手法を開発することを目的とする。従来の管渠の更新基準の一つであり、管渠の健全性を示す健全度を基準とし、健全性が低下した管渠が地理的に密集する地域をスクリーニングできれば、実務的に利用されている維持管理上の指標に沿い、管渠の更新を効率化できる可能性がある。近年、構造物の地理情報を活用した維持管理手法の開発が、着目されつつあり、地理情報と管渠の点検データを結び付けた台帳情報システムなど維持管理の効率化を図る事例が見られる。しかし、地理情報の活用は簡易なものに留まり、管渠密度の分析のように地理情報を解析する事例は見られない³⁾。そこで、本研究では地理情報の解析を行い、健全性が低下した管渠密度を定量化する手法としてカーネル密度推定法⁴⁾を援用する。後述するが、都市部のような地域間に管渠密度の大きな偏りが存在すると、従来のカーネル密度推定法では、管渠密度の偏りが密度推定量に大きな影響を及ぼし、健全性が低下した管渠が密集した重点維持管理対象地域を表現できない可能性がある。したがって、本研究ではカーネル密度推定法の中でも、管渠密度の偏りの影響および管渠の健全性を示す健全度を考慮したデュアルカーネル密度推定法⁵⁾を適用し、健全性が低下した管渠の密集した重点維持管理対象地域の特定および可視化を提案する。以下、2.で、重点維持管理対象地域を特定するために用いたモデルの概説を述べる。3.で、大阪市が管理する点検台帳を用いた実証分析を通して、提案手法の有効性を検証する。

2. 推計モデル

本研究では、健全性が低下した管渠が密集した重点維持管理対象地域を特定し、効率的に管渠の維持管理を行うことが可能な管渠の集成的な維持管理を行うための情報を提供する手法を開発することを目的とする。重点維持管理対象地域の特定には、同地域の可視化により空間集積傾向を視覚的に把握しやすくすることが有効な手法であり、実務的な利用の観点からも望ましい。したがって、本研究では重点維持管理対象地域を可視化および特定する手法の開発を行う。重点維持管理対象地域の可視化には、カーネル密度推定法を用いる。

カーネル密度推定法は、離散データより、連続分布で表現されるデータの傾向を示す密度分布をノンパラメトリックに推定する手法の一つである。同手法を用いて、離散的な点検データより、地域の管渠の劣化状況を表現する分布を推定する。カーネル密度推定法は、密度を推定する管渠の位置を中心とした確率密度関数を仮定し、

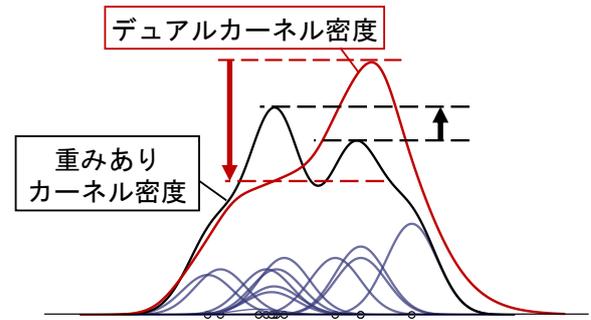


図-2 デュアルカーネル密度推定例

任意に指定した範囲内の任意地点の点密度であるカーネル密度推定量を、各管渠に仮定した確率密度の和として計算する手法である。本研究において基本となるカーネル密度推定量は、

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}, \frac{y-y_i}{h}\right) \quad (1)$$

と経度 x および緯度 y により表現する。なお、 $K(\cdot)$ はカーネル関数、 n は全管渠の数、 h はカーネル関数のバンド幅パラメータを表す。カーネル関数 $K(\cdot)$ が管渠からの任意距離の地点に対して、管渠が持つ影響力の大きさを表す。カーネル関数には、一般的な2変量ガウシアン関数を採用している。本研究では、式(1)に示すカーネル密度推定量を重みなしカーネル密度推定量と称す。上述した重みなしカーネル密度推定量は、管渠密度のみを表現するカーネル密度推定量であり、管渠の健全度に関する情報を含まない。そこで、管渠の健全度に関する情報を含むカーネル密度推定量を

$$f'_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n \tilde{j}_i K\left(\frac{x-x_i}{h}, \frac{y-y_i}{h}\right) \quad (2)$$

$$\tilde{j}_i = j_i / \sum_{s=1}^n j_s \quad (3)$$

と表現する。なお、 j_i は施設 i の健全度を示し、 \tilde{j}_i は式(3)に示す全管渠の健全度の総和により基準化した重みである。本研究では、式(2)に示すカーネル密度推定量を本研究では重みありカーネル密度推定量と称す。重みありカーネル密度推定量は、管渠の健全性の情報を含むカーネル密度推定量であり、健全性が低下した管渠が密集した地域は密度が大きくなるように健全度を用いて調整したカーネル密度推定量である。しかし、管渠密度が地点により大きな偏りが存在する場合には、健全度による重みに対して管渠密度の影響が密度推定量に過剰に影響を及ぼす可能性がある。したがって、本研究では管渠密度の影響を適切に考慮するためにカーネル密度推定法を高度化したデュアルカーネル密度推定法を用いる。この問題に関して、図-2を用いて説明する。点で管渠の位置を示した場合に、青色実線は重みつけカーネル関数

表-1 健全度判定基準

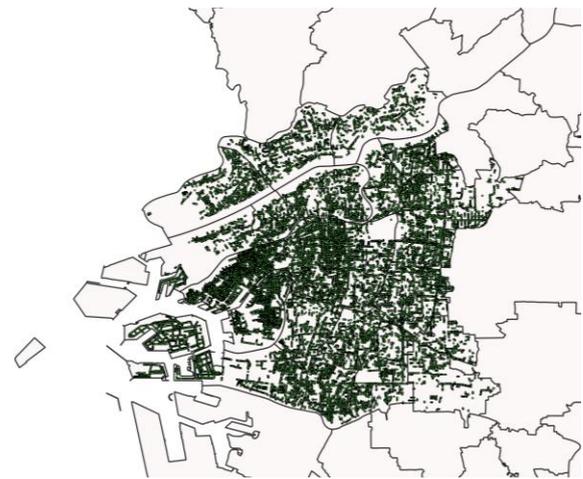
健全度	老朽度点	判定
1	$0 \leq a < 3$	修繕部分を検討
2	$3 \leq a < 5$	
3	$5 \leq a < 8$	更新の対象
4	$8 \leq a < 10$	
5	$10 \leq a$	更新の対象 優先順位高い

$\hat{f}_h(\cdot)$, 黒色実線は式(2)に示す重みありカーネル密度推定量 $f'_h(x)$ を, 赤色実線は後述する式(4)に示すデュアルカーネル密度推定量 $g_h(x)$ を示す. 図中右側の地域に大きな重みをもつ健全性が低下した管渠が存在し, 本研究における重点維持管理対象地域に該当することがわかる. しかし, 管渠密度は図中左側の地域において大きく, 重みありカーネル密度推定量に過剰に影響を与えている. したがって, 重みありカーネル密度推定量を用いた場合は, 図中左側の地域において密度推定量が大きくなり, 図中右側の地域を重点維持管理対象地域としてスクリーニングできない. 一方で, デュアルカーネル密度推定法を用いた場合は, 管渠密度の影響を調整するため, 図中右側の地域を重点維持管理対象地域としてスクリーニングできる.

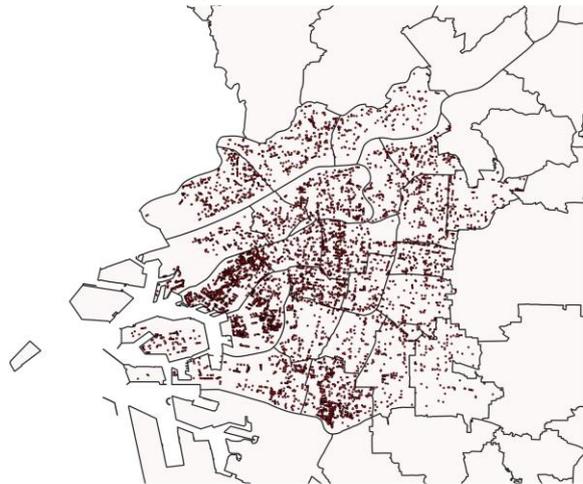
デュアルカーネル密度推定法は, 2種類のカーネル密度推定量から新たな密度推定量を計算し, 1種類のカーネル密度推定量からは表現できない地理情報を可視化する手法である. 本研究では, 式(2)に示す重みあり密度推定量を式(3)に示す重みなし密度推定量で除し, 過大な密度の偏りがカーネル密度推定量に及ぼす影響を取り除いたデュアルカーネル密度推定量を計算する.

$$g_h(x) = f'_h(x)/f_h(x) \quad (4)$$

なお, カーネル密度推定量の計算時に設定するバンド幅パラメータ h により, 当該地域における更新対象管渠の集積性を表現可能な範囲が変化する. 一般的には, バンド幅パラメータ h は, 推定結果が適当な結果と判断できるまで, 繰り返し調整を重ねて決定する必要があるとされている⁷⁾. ただし, 本研究では, 目的である更新工事を集約化し, 集散的に管渠を維持管理する場合の工事規模に応じ, バンド幅パラメータを設定することが望ましい. 本研究では, 更新対象管渠を集散的に管理する範囲として疑似的にバンド幅パラメータを設定し, 推計を行った.



(a) 全管渠の所在地



(b) 健全度が5の管渠の所在地

図-3 データベース上の管渠の位置情報

3. 実証分析

(1) データベース概要

本研究では, 大阪市建設局により, 収集されている下水道管渠の点検データを用いた実証分析を行う. 大阪市建設局による「管路施設の維持管理指針⁸⁾」に基づき, 管渠の変形, クラック, 目地不良等を加算評価した老朽度点を算出し, さらに老朽度点を用いて老朽度を A, B, C の3段階で評価している. 本研究では, 老朽度を重みとして考慮するために表-1のように5段階の健全度を設定した. なお, 老朽度点は, 管渠内の硫化水素濃度や侵食状態などにより決定される. 健全度1が健全性が最も高い状態で, 健全度の増大に従って健全性も低下する. 本研究では, 大阪市が管理する下水道管渠の点検データのうち, 2019年に作成された点検台帳を元に推計を行った. 点検台帳には, 様々な材質の管渠の点検データが同一の点検台帳に記載されている. 管渠の材質の差異は, 期待寿命に大きな影響を及ぼす可能性があるため, 材質ごとに想定すべき維持管理手法も異なる. そこで, 本研

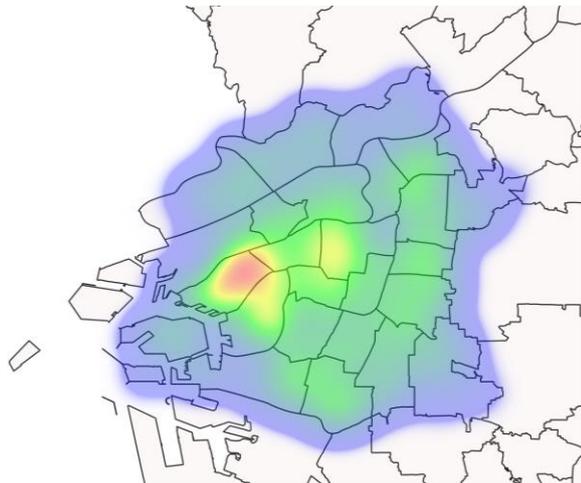


図-4 重みなしカーネル密度推定

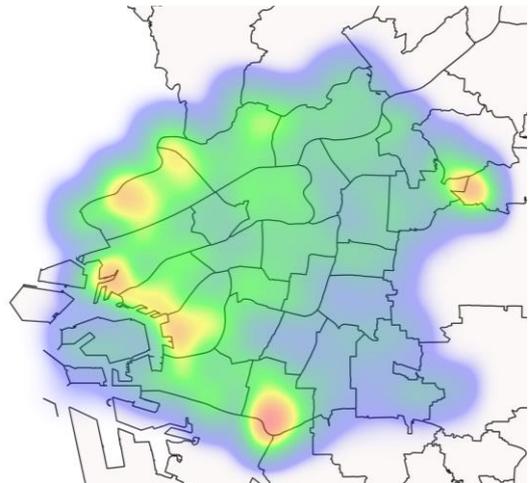


図-6 デュアルカーネル密度推定 (更新前)

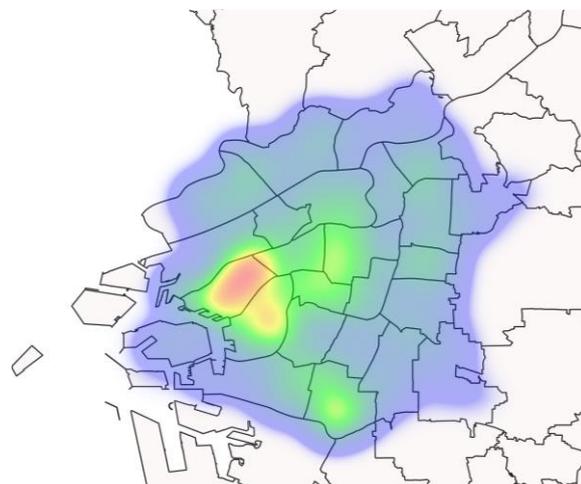


図-5 重みありカーネル密度推定

究では点検台帳に最も多くの点検データが存在するコンクリート管渠に限定して推計を行う。点検台帳上にコンクリート管渠の点検データは、45131 データサンプル存在し、総延長は 1169km である。それぞれに健全度、地理情報（緯度および経度）、管渠の性質に関する情報（内径高さ、建設年度）の情報が記録されている。本研究では、点検台帳のうち管渠ごとに紐づいた健全度、地理情報、マンホール間距離をデータベースとして利用し、健全度の大きな管渠が密集した重点維持管理対象地域を特定する。

(2) カーネル密度推定法による管渠の集積性の表現

3.(1)で作成したデータベースに対してカーネル密度推定法を適用し、健全性が低下した管渠の集積性の可視化について検討した。カーネル密度推定法の適用に先立ち、本研究で対象とするすべての管渠の分布を図-3(a)に、健全性が低下した管渠として健全度 5 の管渠のデータのみを抽出した分布を図-3(b)に示す。なお、すべての管渠のデータサンプルの総数は、45131 サンプルであり、健全

度 5 の管渠のデータサンプルの総数は、7540 サンプルである。それぞれのサンプルに紐づいた地理情報を用い点分布を作成した。図-3 より港区周辺は管渠の健全性の高低に関わらず、管渠が多く存在することが視覚的に確認できる。しかし、図-3 より得られる情報は、当該地域の管渠の多寡に関する情報に限られ、疎密に関する情報は得られない。したがって、図-3 より管渠の集積性に関する議論を行うことは困難である。

図-4 にすべての管渠の位置情報を用いて推定した重みなしカーネル密度推定量を示す。密度の高い順に赤、橙、黄、黄緑、青を呈色して示す（呈色が暖色に近いほど管渠が密集していることを示す）。3. で示した通りに、カーネル関数は、2 変量ガウシアンカーネル関数を用い、バンド幅パラメータ $h = 0.006$ と設定した。

港区周辺は、管渠が多く存在するだけでなく、密に存在することがわかる。加えて、中央区西部、西区東部も暖色を呈し、管渠が密に存在することがわかる。図-5 に図-4 に示すカーネル密度推定量に対して健全度を用いて重み付けた重みありカーネル密度推定量（呈色が暖色に近いほど健全性が低下した管渠が密集していることを示す）を示す。図-4 と同様にカーネル関数としては、2 変量ガウシアンカーネル関数を用い、バンド幅パラメータ $h = 0.006$ と設定した。重みありカーネル密度推定量により呈色された地域は、重みなしカーネル密度推定量により呈色された地域にほとんど差異は見られない。これは、2. で指摘したように、重みありカーネル密度推定量は、健全性による重みに対して管渠の疎密に関する情報の影響を大きく受けるためであり、単に管渠が密集した地域を重点維持管理対象地域として、可視化する可能性がある。したがって、管渠密度が密度推定量に及ぼす影響を適切に調整することが、健全性が低下した管渠が密集した地域の可視化のために重要となる。

(3) デュアルカーネル密度推定量と更新施策

健全性が低下した管渠の密集した重点維持管理対象地域を視覚的に特定するために、重みありカーネル密度推定量から、管渠密度が密度推定量に及ぼす影響を低減する必要がある。本研究では、デュアルカーネル密度推定法を用い、重みありカーネル密度推定量 (図-5) を重みなしカーネル密度推定量 (図-4) で除することにより、管渠の疎密に関する情報が及ぼす影響を低減する。図-6 に推定したデュアルカーネル密度推定量を示す。なお、カーネル関数としては、重みなしおよび重みありカーネル密度推定量の両方において 2 変量ガウシアンカーネル関数を用いる。一方で、分子の重みありカーネル密度推定量に対し、分母の重みなしカーネル密度推定量が極端に小さくなった場合に、管渠の疎密に関する情報がデュアルカーネル密度推定量に及ぼす影響を過度に変化させないために、分子の重みありカーネル密度推定量は $h = 0.006$ 、分母の重みなしカーネル密度推定量は $h = 0.012$ と設定し、分母を分子に比べて平滑化させた。デュアルカーネル推定法では、図-5の重みありカーネル密度推定量で暖色を呈する港区に加えて、住吉区、鶴見区にも暖色を呈し、健全性が低下した管渠が密集することがわかる。デュアルカーネル密度推定量により呈色された地域は、重みなしカーネル密度推定量により呈色された地域と大きく差異が見られる。これは、デュアルカーネル密度推定量が、重みなしカーネル密度推定量により、管渠の疎密に関する情報が密度推定量に及ぼす影響を低減できているため、健全性が低下した管渠が密集する地域のみを呈色できていることを示す。図-6中の暖色を呈する地域より、概ね沿岸部に健全性が低下した管渠が密集する傾向があることがわかる。これは、沿岸部に共通して管渠の劣化に起因する環境的な要因が存在する可能性が高いことを示す。デュアルカーネル密度推定量が大きい地域に着目し、当該地域内の管渠の点検データのうち共通の値および状態を示す点検項目を選定することにより、劣化しやすい管渠が有する性質を明らかにできる。このように管渠の劣化事象に着目して劣化予測モデル⁹⁾を援用し、将来時点で健全性が低下する前に予防保全施策を事前に策定することも、管渠の集成的な維持管理には有効である。本研究では、健全度に着目し、現在時点で健全性が低下した管渠を対象とした分析を行うため、予防保全までを対象とした手法論の開発は今後の課題とし、別の機会に発表する。以上の検討により、デュアルカーネル密度推定法により、健全性が低下した管渠が密集する地域の特定が可能なこと、得られた密度推定量を元に、着目すべき点検項目を選定できる可能性があることを示した。

次に、重点維持管理対象地域の管渠を更新した場合の管渠更新シミュレーションを行い、重点維持管理対象地

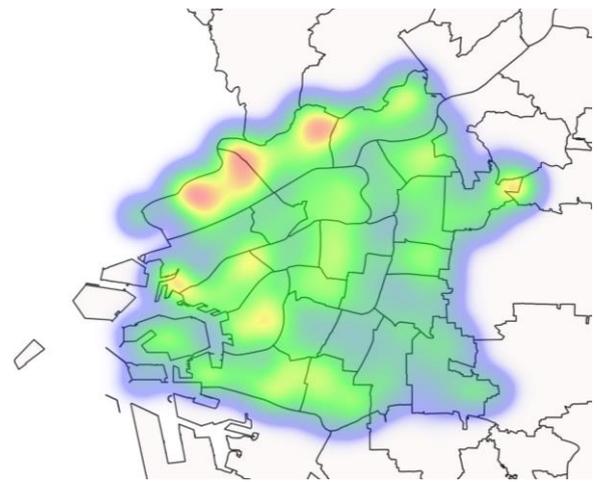


図-7 デュアルカーネル密度推定 (更新後)

域の変化を特定する。更新前のデュアルカーネル密度推定法の分析において、分析対象の管渠の総延長は、1169kmである。管渠の更新延長については、維持管理者が設定する更新予算等により決定すべきであることを留意されたい。本研究では、総延長のうち 5%の管渠を更新することを想定する。管渠の更新は、管渠の位置情報が存在する地点において、それぞれデュアルカーネル密度推定量を計算し、密度推定量の大きい管渠から順に更新を行うこととする。上述のように、管渠の維持管理は更新が基本となり、補修が行われることはほとんどない。したがって、本研究においても更新のみを対象とし、更新した管渠の健全度を 1 に回復させることにより、更新を表現する。図-7に推定した更新後のデュアルカーネル密度推定量を示す。更新前と比較し、密度推定量が大きい健全性が低下した管渠の密集した地域は変化する。更新前は、港区、住吉区、鶴見区が暖色を呈している一方で、更新後は、淀川区、西淀川区が暖色を呈している。これは、重点維持管理対象地域に存在する管渠に適切に更新が行われ、次期更新の優先順位が相対的に変化したことを示す。しかし、暖色から呈色に変化したものの、寒色に変化せず中性色を呈する地域が散見される。これは、更新延長の不足により、更新されなかった健全性が低下した管渠が存在することを示す。このような地域の増減は、維持管理者が設定する更新予算により大きな影響を受ける。更新延長の不足により、更新されない重点維持管理対象地域は、さらに次期に優先的に更新を行うなどの施策が必要となる。以上の検討により、デュアルカーネル密度推定量を用い、健全性が低下した管渠が密集する重点維持管理対象地域の可視化手法の提案および密度推定量に従い、重点維持管理対象地域を設定した場合の次期重点維持管理対象地域の特定に関するシミュレーションを行った。

4. おわりに

本研究では、健全性が低下した管渠が密集した重点維持管理対象地域を特定し、効率的に管渠の維持管理を行うことが可能な管渠の集合的な維持管理を行うための情報を提供する手法を開発することを目的とし、健全性が低下した管渠が、密集する地域を可視化し、重点維持管理対象地域を特定する手法を提案した。具体的には、下水道管渠の点検データに対してデュアルカーネル密度推定法を適用し、健全性が低下した管渠が密集する地域の分布を示した。つぎに、得られた密度推定量に基づいた管渠の更新シミュレーションを行い、重点維持管理対象地域の変化を推定した。以下に、本研究により得られた知見を示す。

- 1) 健全性が低下した管渠の密集した重点維持管理対象地域を特定する手法として健全度を重みとしたデュアルカーネル密度推定法を提案した。提案手法を大阪市の下水道管渠の点検データに適用し、重点維持管理対象地域を可視化し特定できることを明らかにした。
 - 2) デュアルカーネル密度推定法により得られる密度推定量より、沿岸部に健全度の低下した管渠が密集する傾向があることを明らかにした。これにより、重点維持管理対象地域に共通する着目すべき点検項目を選定できる可能性があることを示した。
 - 3) デュアルカーネル密度推定量に基づいた管渠の更新シミュレーションを行い、重点維持管理対象地域の変化を確認し、提案手法は次期重点維持管理対象地域を特定にも利用可能であることを示した。
- 以下に、本研究に関して残された課題を示す。上述のように、本研究では、現在時点において健全性が低下した

管渠の更新のみを対象とし、予防保全的な管渠の維持管理を考慮した重点維持管理対象地域の設定は、対象としていない。効率的に集合的な管渠の維持管理を行うためには、健全性が低下した管渠の更新といった事後的な対応にとどまらず、健全性が低下する前に予防保全施策を策定することが重要である。これらを踏まえた手法論の開発は今後の課題とし、別の機会に発表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書，pp156，2016.
- 2) 貝戸清之，鎌田敏郎，大谷明，山中明彦：下水道コンクリート官渠のストックマネジメント，下水道協会誌，Vol.47，No.577，pp.78-87，2010
- 3) 小田宏一，児玉英二，青木一也，貝戸清之，小林潔司：劣化ハザード率を用いた学習機能を有する舗装マネジメントシステム，土木情報利用技術論文集，Vol.18，pp.165-174，2009.
- 4) 佐藤 貴大，円山 琢也：スマホ・アプリ型回遊調査データによる熊本都心部回遊行動圏の分析，都市計画論文集，Vol.50，No.3，2015
- 5) Chaaney, S. and Ratcliff, J.: GIS and Crime Mapping, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- 6) Eva Maria Jansenberger and Petra Staufer-Steinnocher: Dual Kernel Density Estimation as a Method for Describing Spatio-Temporal Changes in the Upper Austrian Food Retailing Market,” 7th AGILE Conference on Geographic Information Science” 29 April-1May 2004, Heraklion, Greece Parallel Session 6.2- ” Pricing & Geo Marketing” ,pp551-558
- 7) 大阪市建設局：管路施設の維持管理指針，2008.
- 8) 佐藤貴大，円山琢也：カーネル密度推定法を応用したスマホ型回遊調査データの時空間分析，都市計画論文集，Vol.51，No.2，pp.192-199，2016.
- 9) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.68-82，2005.

PRIORITY MAINTENANCE TARGET AREA FOR CENTRALIZED RENEWAL WORK PROPOSAL OF SCREENING METHOD

Shuta SHINOZAKI and Kiyoyuki KAITO

The number of sewerage pipes that exceed the standard useful life tends to increase, and in order to keep the increasing cost of renewal of sewerage pipes within the budget, it is becoming an issue to formulate efficient measures for renewal of sewerage pipes. Due to the characteristics of sewer pipes that form a continuous network, adjacent areas are likely to deteriorate in the same environment. Therefore, consolidating renewal work in adjacent areas often results in efficient renewal measures. In this study, the inspection data and location information of the sewerage pipes are used to screen the areas subject to priority maintenance and management, where the renewal work should be centralized from the viewpoint of the deterioration phenomenon of the sewerage pipes. Specifically, the dual kernel density estimation method using deterioration information as a parameter is used to identify the priority maintenance target area where deteriorated sewer pipes are concentrated. Finally, the effectiveness of the proposed method was empirically examined through an application example to a sewer pipe managed by Osaka City.