

藤沢市における効率的な道路陥没防止手法の研究成果の報告(官学産 共同研究)

藤沢市道路河川部

正会員

○西山 博光

同上

横手 寛紀

藤沢市下水道部

張ヶ谷 昌彦

東京大学生産技術研究所

フェロー会員

桑野 玲子

ジオ・サーチ株式会社

三木 偉信

1. はじめに 藤沢市は、東京都心部から 50km 圏域、神奈川県 の中央南部に位置し、周囲は 6 市 1 町に隣接している (図-1)。また、市域面積は約 69.56km²、人口規模は平成 31 年 3 月時点で約 43 万 2 千人となり、湘南地域の中核的な都市として発展を続けている。

本市における道路、下水道等の都市基盤は、昭和 30 年代から 40 年代の高度経済成長期にかけて、土地区画整理事業や街路・道路事業等により、集中的に整備を行ってきた。このため、近年、これら都市基盤の老朽化が顕在化しており、限られた予算で効果的・効率的に老朽化対策を進めていくことが大きな課題となっている。また、道路陥没の顕在化も課題のひとつとなっていたため、道路舗装における老朽化対策の一環として、平成 26 年度に策定した「藤沢市道路舗装修繕計画」に基づき、平成 27、28 年度に路面下空洞調査を実施した。

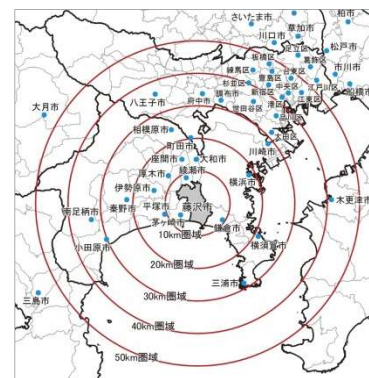


図-1 藤沢市位置図

2. 本研究の背景及び目的 路面下空洞調査は、本市が管理する道路 8,661 路線、約 1,320km のうち、主要な道路を対象に 98 路線、延長約 300km を 2 箇年で実施した。本調査で確認した異常信号は、空洞の発生深度や規模に応じて、陥没の危険性が高い順から「要緊急対応」、「陥没危険度 A～C」の 4 段階に分類した。調査の結果、202 箇所の異常信号箇所が確認されたものの、全箇所の原因調査や補修を行うことは財政上の観点からも困難であったため、分類した異常信号箇所の対応方針を定めることとした(表-1)。

しかしながら、本市においては初の路面下空洞調査であり、空洞の発生や拡大に関する傾向が明らかでなかったことから、対応方針の裏付けなどが課題となっていた。このため、「陥没や空洞の発生と拡大のメカニズムを可視化する手法づくり」及び「路線ごとの最適な調査サイクルの設定」並びに財政面に配慮した「道路陥没防止対策を進めていくための仕組み・体制づくり」を目的に、路面下空洞に関する先進的な研究機関である「東京大学生産技術研究所」、高い空洞探査技術を有する「ジオ・サーチ株式会社」及び「本市」の 3 者で本研究を進めることとした。

表-1 藤沢市の空洞対応方針

危険性	分類	対応方針
高 ↑ ↓ 低	要緊急対応	原因調査・補修
	陥没危険度 A	
	陥没危険度 B	経過観察
	陥没危険度 C	

3. 本研究の体制及び役割 研究期間は、平成 29、30 年度の 2 箇年であり、本研究の体制と役割は図-2 のとおりである¹。本研究にあたり、本市では、研究開始時から道路の維持管理部署だけではなく、道路陥没や空洞の要因となりうる下水道及び準用河川等の維持管理部署並びに道路 GIS 情報の担当部署を含めた体制を構築した²。また、下水道台帳の GIS 情報を研究体で共有したことにより、分析内容の質が向上したほか、議論や分析に時間をかけることが可能となった。

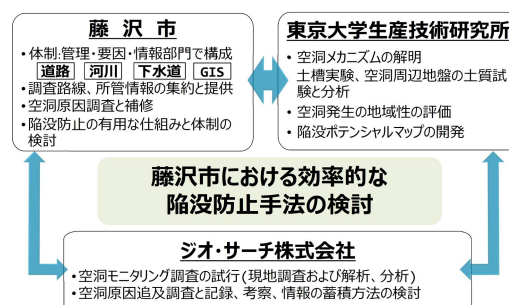


図-2 本研究の体制及び役割¹

本市が実施した空洞原因の調査では、空洞下にある下水道管が深く、地下水が出現した場合でも調査を続

キーワード 道路陥没 空洞 対策 地域特性 マネジメント

連絡先 〒251-8601 神奈川県藤沢市朝日町 1-1 藤沢市道路河川部道路維持課 Tel:0466-25-1111

け、出来る限り空洞原因を特定していった結果、下水道管に起因した空洞が大半であることが明らかになった³ (図-3、4)。

4. 本研究の成果

本研究の成果を大きく次の3点にとりまとめた。

(1) 詳細な実態把握による今後の空洞化予測と陥没防止対策効果

藤井ら⁴の報告の詳述のとおり、半年ごとの空洞モニタリング調査の結果から、空洞が発生又は拡大するタイミングを詳細に把握したほか、陥没危険度が高い空洞については、本市の空洞補修が増加ペースを上回っているため、陥没の危険性が減少傾向になったという取組の効果も把握することができた。また、本市が行った陥没実態の情報集約は、研究当初に比べると整理項目や入力内容の質が向上し、研究終了時には発生傾向に関する分析が可能になったとともに、本研究期間内にモニタリングしてきた路線において、陥没がゼロになったこともひとつの成果といえる。

(2) 道路陥没ポテンシャルマップの開発⁵

空洞モニタリング調査及び過年度からの陥没調査により、市域の空洞・陥没実態を把握した。その後、空洞原因調査及び陥没の実態から本市で想定される空洞要因を挙げ、「陥没ポテンシャル評価手法」とともに陥没ポテンシャル値が定められていった。平行して、陥没ポテンシャルの地域性をマップで表現することにより陥没ポテンシャルが可視化（見える化）された（図-5）。

(3) 本市における道路陥没防止対策の仕組み・体制(マネジメント)

本研究終了後における本市の取組や体制については次のとおりである。

- ・ 陥没対策の庁内連携：本市では、これまでも道路部門と下水道部門とで連携し、道路陥没防止対策を講じてきたものの、今後は路面下空洞調査についても共同で取組体制を構築する。
- ・ 調査路線の選定と調査頻度の設定：「藤沢市陥没ポテンシャルマップ」を活用し、路線ごとの特性や重要性を考慮したうえで調査路線と調査頻度を定める。
- ・ 下水道部門での空洞情報の活用：本研究の空洞原因調査では、下水道管の不具合や損傷を発見した事例が多くあったことから、今後は計画的な維持管理を行う上で、補完的役割としての活用を検討する。
- ・ 空洞情報の活用と共有化：空洞情報の活用方法や部門間での共有化等の検討を行う。また、下水道管理者以外の道路占有企業者に対しても、空洞情報の共有化を図る取組を進める。

5. 今後の展望 本研究は道路陥没の防止手法を2箇年に渡り、先進的に研究してきたもので、この間、研究体として全国の現場で事例となる成果の発信にも努めてきた。本市においては、今後、本研究の成果を基に、より高度な道路陥没防止手法に取り組んでいくとともに、「道路ストックマネジメント」及び「下水道アセットマネジメント」の取組を推進することで、道路、下水道等の強靱化を図り、市民の「安全で安心な暮らしを築く」ことに努めていきたい。



図-3 空洞原因調査状況



図-4 空洞原因事例：下水道本管継手部のわずかな隙間

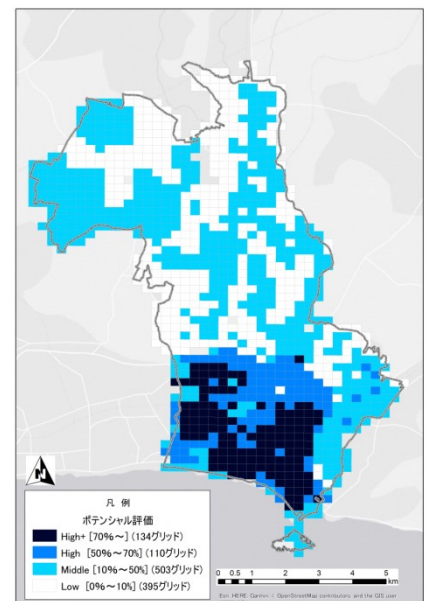


図-5 藤沢市陥没ポテンシャルマップ⁵

¹ 瀬良ら(2019)「藤沢市における効率的な道路陥没防止手法の研究成果報告(官学産 共同研究)その1」第54回地盤工学会(大宮)

² 畠山ら(2018)「藤沢市における効率的な道路陥没防止手法の実践的研究(官学産 共同研究)その1」第53回地盤工学会(高松)

³ 岡村ら(2019)「道路陥没防止を目的とした路面下空洞原因の実態調査報告 その3」第54回地盤工学会(大宮)

⁴ 藤井ら(2019)「藤沢市における効率的な道路陥没防止手法の研究成果報告(官学産 共同研究)その2」第54回地盤工学会(大宮)

⁵ 瀬良ら(2019)「藤沢市陥没ポテンシャルマップの開発(官学産 共同研究)」第74回土木学会全国大会(高松)

藤沢市道における効果的な道路陥没防止手法（官学産 共同研究） － 空洞モニタリング結果からの考察 －

ジオ・サーチ株式会社 正会員 ○藤井 邦男
藤沢市道路河川部 北村 和利、小島 佳幸
東京大学生産技術研究所 フェロー会員 桑野 玲子
ジオ・サーチ株式会社 阿部 匡彦、岡村 雅俊

1. はじめに

本研究は、藤沢市・東京大学・ジオ・サーチ株式会社の官学産共同で地域に最適な道路陥没防止手法や体制の構築により「安全で安心な暮らしを築く」ことを目的としている¹。研究内容は、藤沢市管理道路での空洞発生 の地域特性や拡大メカニズムについて、空洞モニタリング調査による詳細な空洞挙動の把握の試行と、開削調査、土質試験等の結果から地盤条件や埋設管布設状況等の空洞発生要因の分析を行い、地域の空洞・陥没の潜在性の評価手法を確立したものである。本稿は、2年間の空洞モニタリング調査結果をもとに空洞発生頻度の推移と予測を行い、同市の道路陥没防止に対する空洞調査と補修の効果について考察する。

2. 空洞モニタリング調査の対象路線

藤沢市は、市を横断する国道1号付近を境界として南北の地区に分けられ、土質分類は、南部地区が細砂やシルトを含む砂質土、北部地区は関東ロームである。また、道路、下水道等の都市基盤は、昭和30年から昭和40年代の高度成長期に集中的な整備が行われてきた。路面下空洞調査は、管理道路約1,320km(8,661路線)のうち、主要な道路300km(98路線の測線長)を対象に、初回調査が平成27、28年度に実施された(表-1)。初回調査の結果を踏まえ、空洞発生と拡大の実態を把握するために、過年度の調査実施路線から7路線(南部地区:5路線、北部地区:2路線)、過去に護岸からの吸出し等による陥没や沈下が発生していた河川沿いの3路線、合計10路線(区間長15.5km/測線長25.8km)を空洞モニタリング調査路線に選定した(表-2)。

3. 空洞モニタリング調査の実施方法

(1)一次調査(レーダ探査):GL-1.5mまで探査可能な電磁波地中レーダを搭載した空洞探査車を用いて、半年ごとに計4回、調査路線のデータを取得した(図-1)。取得したデータは調査ごとに、空洞の可能性のある異常信号(以下「異常信号」という。)の解析作業を行い、その結果により空洞の拡大や発生を追跡した。

(2)二次調査(スコープ調査):モニタリング対象空洞のうち地盤条件や埋設管布設状況等を考慮した代表箇所、異常信号の最浅点へ50mmの調査孔を削孔のうえ、孔壁画像による舗装構成・空洞厚の計測と、空洞底部のゆるみ状況の確認を一次調査と同様に半年ごとの計4回実施した。

4. 空洞モニタリング調査結果と考察

(1)異常信号の発生数の推移:初回調査(平成27、28年度)、第1回から第4回モニタリング一次調査の各時点で新規に発見された異常信号の箇所数を図-2に示す(第4回は新規発見なし)。北部地区では新規異常信号は確認されず、河川沿いでは7箇所の発生が確認されたのに対して、南部地区に

表-1 初回調査の実施結果

地区分類	測線長 (km)	空洞数 (箇所)	発生率 (箇所/km)
南部地区	90	154	1.7
北部地区	210	48	0.2
合計	300	202	0.7

表-2 空洞モニタリング調査の対象路線

地区分類	測線長 (km)	空洞数 (箇所)	発生率 (箇所/km)
南部地区	5.1	83	16.3
北部地区	14.6	4	0.3
河川沿い	6.1	-	-



図-1 空洞探査車と取得データ例

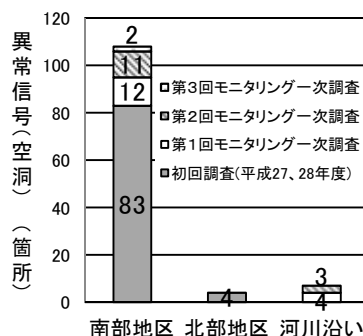


図-2 異常信号の箇所数

キーワード 道路陥没 空洞 潜在性 顕在化 予測

連絡先 〒144-0051 東京都大田区西蒲田 7-37-10 ジオ・サーチ(株) 東京事務所 Tel:03-5710-0215

において、初回調査での異常信号 83 箇所の 30%に相当する 25 箇所の新規分が 2 年間で発生したことは、地盤条件（細砂やシルトを含む砂質土が主体）や公共下水道の整備時期（昭和 26 年から着手され、昭和 39 年の東京オリンピックでセーリング会場になったことを契機に整備が加速）との関連性が高いと考えられる。

(2) 異常信号の陥没危険度：一次調査で確認した異常信号は、空洞の発生深度や規模に応じて、陥没危険度が高い順から「要緊急対応」、「危険度 A～C」の 4 段階に分類整理される（図-3）。初回調査から 2 年間で「要緊急対応」が 4 箇所発生しており（図-4）、開削補修時の目視確認から、空洞の発生原因は下水道管継手の隙間からの土砂流出（1 箇所）と老朽化による欠損（1 箇所）、他工事で下水道管を破損させた際の粗雑な補修跡（2 箇所）に起因していることが判明した。地盤条件としては細粒分の多い砂質土であることが共通していた。

(3) 異常信号の拡大：空洞モニタリング調査路線内では、現時点で 119 箇所の異常信号が発見され、このうち 7%にあたる 8 箇所で、空洞の拡大が確認された。特に、第 1 回から第 2 回の間には集中豪雨（最大雨量 60mm）が発生しており、これが空洞拡大への誘因となった可能性がある。なお、これら 8 箇所は全て別箇所であり、2 期連続で同一の空洞が拡大した例はなかった。また、モニタリング二次調査（スコープ調査）を「危険度 C」の 6 箇所（南部地区：3 箇所、北部地区 2 箇所、河川沿い：1 箇所）で実施したが、第 1 回から第 4 回で顕著な変化はなしであった。

(4) 空洞の顕在性：上記 (1)～(3) の空洞モニタリング調査結果から次の知見を得た。①空洞発生が顕在化するの「素因（流出しやすい地盤条件、地下水、掘削工事履歴等）」と「誘因（地中埋設物の老朽化、雨・地震の影響等）」が重なり合った場所であり、当初の想定通り「南部地区」であった。②空洞の拡大と新規発生は一定速度の経年変化ではなく「急速」と「緩速」の 2 つの挙動を示す。③急拡大する空洞は下水道管との因果関係が強いが、下水道管の不具合には「自然的要因（経年劣化による老朽化）」と「人為的要因（取付管の接続不良や他工事による破損）」が存在する。

(5) 空洞発生頻度の経年的な評価および予測：

図-5 は空洞モニタリング調査結果から経過時間ごとの 1km あたりの空洞数推移を分析し、将来を予想したものであり、潜在する空洞が 0～0.5 箇所/km の進行度で増加すると予測される。ただし、対応方針¹に基づき陥没危険度の高い空洞は順次補修されることから、

一定水準を保った空洞の残存は予想されるが、道路陥没への危険性は低減されることになり、実際に本研究期間中の空洞モニタリング調査対象区間では、道路陥没は発生していない。なお、空洞モニタリング調査は、藤沢市管理道路のうち主要道路が対象であったが、生活道路も含めた藤沢市全域を対象とする空洞・陥没の潜在性・脆弱性の評価手法として「陥没ポテンシャル評価手法」の研究が進められ、「陥没ポテンシャルマップ」が開発されている²。

5. 今後の展望

道路陥没防止手法の更なる効率化に向けて、空洞探査技術の自動化・省人化、位置情報取得や三次元可視化システム等による調査の高度化に取り組んでいきたい。

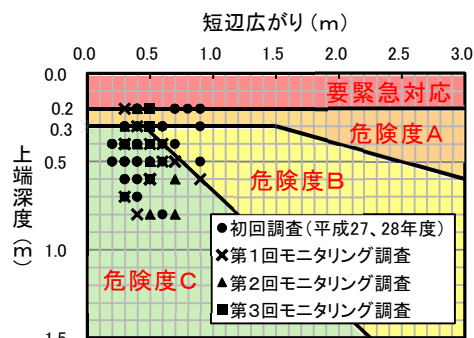


図-3 陥没危険度評価

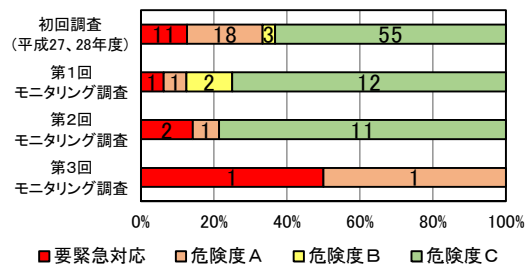


図-4 異常信号の陥没危険度の割合

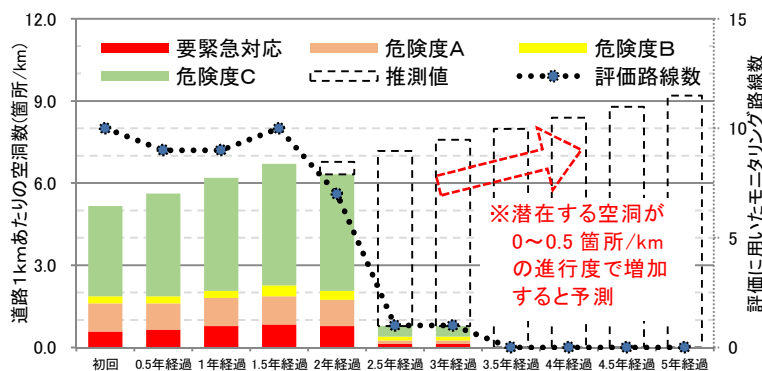


図-5 空洞累計数の推移予測 (1km あたり空洞数・モニタリング区間全体)

¹ 西山ら(2019)「藤沢市における効率的な道路陥没防止手法の研究報告(官学産 共同研究)」土木学会第 74 回年次学術講演会

² 瀬良ら(2019)「藤沢市道路陥没ポテンシャルマップの開発(官学産 共同研究)」土木学会第 74 回年次学術講演会

藤沢市・道路陥没ポテンシャルマップの開発（官学産 共同研究）

東京大学生産技術研究所 正会員 ○瀬良 良子
藤沢市道路河川部 平田 良祐、山本 陽子
東京大学生産技術研究所 フェロー会員 桑野 玲子
ジオ・サーチ株式会社 米本 幸子、黒沢 菜月

1. 道路陥没ポテンシャルマップ開発の目的 藤沢市は、「安全で安心な暮らしを築く」ことを市政のひとつのテーマに掲げている。藤沢市・東京大学・ジオ・サーチ株式会社は、その実現策として、藤沢市における効率的な道路陥没防止手法を検討することを目的に、2017年4月から2年間、官学産の共同研究に取り組んだ(西山ら¹)。道路陥没ポテンシャルマップの開発はその取り組みのひとつであり(図-1)、同市における陥没対策の課題を効率的かつ持続的に解決する媒体を構築し、さらに情報共有ツールとして実装することを目指した。同マップは地域の陥没の可能性を表すものであり、従来の空洞発生傾向評価で用いられてきた道路のルートマップ：空洞調査結果や空洞原因と想定される道路占用物件の布設状況等から、空洞発生傾向を路線単位・区間単位で評価するマップとは異なる。ポテンシャルマップは、下水道の布設状況などをグリッド(面)の情報へ変換し、さらに地盤や地下水位などの空洞要因(素因)も取り込んで陥没可能性を面的に評価し、地域全体の状況と特性の分布や局所性を把握できるものとした。そして、このマップから道路交通ネットワークの評価へ、または関連する部門や機関へ情報をインプットできるようなデータ仕様とした。すなわち、同マップが根拠となる空洞調査計画が効率的な安全な道路機能確保を実現するほか、防災部門との情報共有で大規模な自然災害に備えた策を講じることや、下水道部門では維持管理における補完的情報としての活用を可能にすることを目指した。藤沢市の道路部門ー下水道部門の庁内連携による陥没対策の強化¹も、同マップが一助となった。

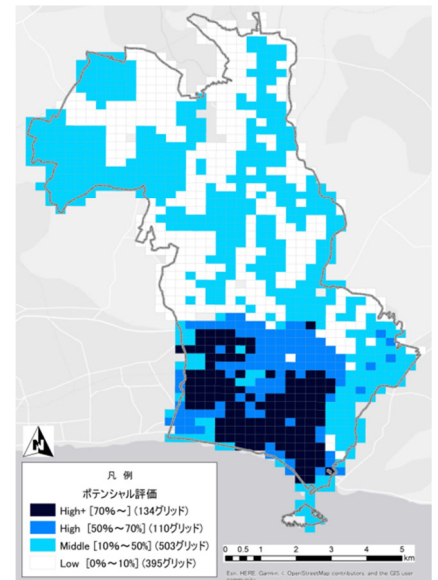


図-1 藤沢市道路陥没ポテンシャルマップ

2. 空洞・陥没ポテンシャルの定義 空洞は、できやすい素質・要件(素因)が備わった環境で、土砂の流出経路が確保(誘因)されると発生する。陥没は、空洞の「数・規模・拡大性」の大きさが顕在化する可能性に直結する。このことを鑑み、空洞ポテンシャルおよび陥没ポテンシャルを次のように定義した。

- ・空洞ポテンシャル 定義：空洞の発生しやすさ = f (パラメータ：空洞素因、寄与度)
- ・陥没ポテンシャル 定義：陥没顕在のしやすさ = f (空洞ポテンシャル、拡大可能性)

3. 藤沢市における陥没ポテンシャル評価 既往の研究などから、空洞は地盤内の土砂が流出、またはゆるみ領域や空隙が拡大することで形成されることがわかっている。一般的には、その要因として埋設物の老朽化による破損や継手の不良などがあげられ、国土交通省のデータ²では埋設物の多さが空洞の発生頻度に、排水機能のある埋設物が空洞の拡大に寄与することが示唆されている。藤沢市では、本研究前に主要な道路を一斉調査し多数の空洞信号が確認されたことで対応方針を定め、研究開始時にはすでに積極的に補修を進めていた。また南部エリアでの空洞頻度の高さも把握されていたこともあり、本研究では半年ごとの空洞モニタリング調査による空洞挙動の把握と、補修を進める空洞箇所の原因追及を協働で徹底的に行うこと

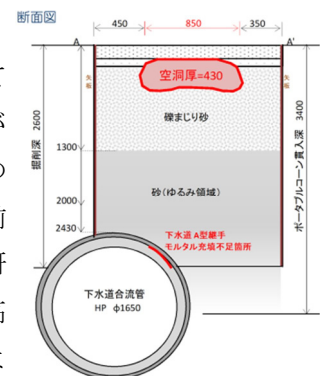


図-2 空洞発生状況図³

キーワード 道路陥没、予防、地域特性、潜在性、評価

連絡先 〒153-0041 東京都目黒区駒場 4-6-1 Bw304 東京大学生産技術研究所 Tel:03-5452-6845

で、空洞発生実態の詳細な把握もできた(大原ら³⁾)。これら臨床活動による実態究明と知見を集約しながら、藤沢市の主な空洞/陥没の素因を、[下水道管老朽化]・[下水取付管]・[地下水位変動]・[地山/埋戻材の流動性]の4因子に定めた。次に、原因追及調査で明らかになった状態を参考に、それぞれの素因を形式・年代や本数などで階層にわけ、別途整理を進めていた空洞/陥没情報と重ねて、各因子の空洞/陥没頻度に対する感度分析を行いながら境界値を設定していった。さらに「砂質地盤で地下水位が高く、下水道管の老朽化がみられる」といった空洞発生実態を反映する検討を進め、空洞素因の組合せでパラメータを設定し、ポテンシャルを[High+]・[High]・[Middle]・[Low]の4段階とした(図-3)。これは、発生頻度のほかに『[High+]エリアの空洞は、探査時点は深く小さくても拡大する可能性があり、補修を念頭に経過観察する必要がある』との理解になる。さらに、ポテンシャル値での空洞・陥没の頻度(道路1kmあたりの箇所数)の平均値を用いて、空洞・陥没各々のポテンシャル値と発生頻度の近似式を得た(図-4)。この近似式から、藤沢市では陥没が1箇所発生すると周辺に3か所の空洞が潜在するという推測や、未調査道路の空洞潜在数の推計が可能になった。

4. 考察1：陥没ポテンシャル評価改良の課題 本研究のもうひとつの命題である空洞の拡大挙動については、半年ごとの空洞モニタリング調査で実態把握を開始した。2年間という研究期間では全貌の把握には至らなかったものの、開始当初モニタリング路線に潜在していた86箇所の空洞は9箇所が拡大し、新たに30箇所の空洞が発生した。この挙動実態をポテンシャル評価の基軸とするには情報量が少なくデータとして取り込まなかったものの、拡大した9箇所の空洞の挙動を素因の組合せとともに整理した結果(図-5)、8箇所はポテンシャル[High+]エリアの空洞で、1箇所が[High]エリアであった。また、[High+]の8箇所の空洞は、[High]の1箇所に比べ拡大速度が大きいことがわかった。これは、先述した[High+]エリアの空洞拡大の理解と一致し、今回は大よそ1割の空洞が拡大した。今後、拡大性の評価の改良を進めるにあたって、モニタリング継続による実態把握精度の向上や拡大誘因の分析、舗装破壊メカニズムの解明等が課題となる。

5. 考察2：他都市への適用性と評価の信頼性 今回開発を進めた手法は他都市でも適用できる。評価ケースが増えると、都市の成熟度や地中の利用度合いとの相関が分析でき、将来の予測への展開が視野に入る。また、例えば藤沢市と同様な空洞素因が潜在し陥没が顕在化しているような地域、近い将来下水道状況が類似すると推測される地域などは、藤沢市のポテンシャル評価を参考にできる。評価の信頼度については、今回、藤沢市が本研究内で市全域の陥没情報の再構築を図ったことで510件を超える陥没情報が活用でき、空洞調査結果の信頼性ととも、空洞調査履歴のないエリアでの評価の信頼性も確認された。今後他都市での評価にあたっては、「空洞調査の精度」と「空洞原因の見極めと情報の質」に依存するという理解が必要である。

研究終了後も、藤沢市・東京大学・ジオ・サーチそれぞれが先進的な取組みで世界の陥没対策の見本となることが期待される。本協働で経験した、現地の実態を適切に把握して工学的に判断するという基本的な姿勢を大切に、陥没事故ゼロの安全安心な社会の実現に向けた取組みを実践していきたい。

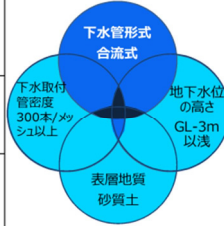
ポテンシャル値	陥没因子の組合せ
High+ (潜在確率 70% -)	
High (潜在確率 50-70%)	
Middle (潜在確率 10-50%)	
Low (潜在確率 0-10%)	なし

図-3 藤沢市陥没ポテンシャル構成

ポテンシャル値 (潜在確率)	発生頻度 道路延長あたり 平均値	
	陥没 箇所/km	空洞 箇所/km
High+ (70% -)	1.4	4.6
High (50-70%)	0.7	2.4
Middle (10-50%)	0.2	0.4
Low (0-10%)	0.1	0.3

ポテンシャル値Yと発生頻度Xの関係式(近似式より)	
陥没 箇所/km	$Y = 0.46x - 0.085, R^2 = 0.918$
空洞 箇所/km	$Y = 1.508x - 0.352, R^2 = 0.8977$

図-4 藤沢市陥没ポテンシャル値

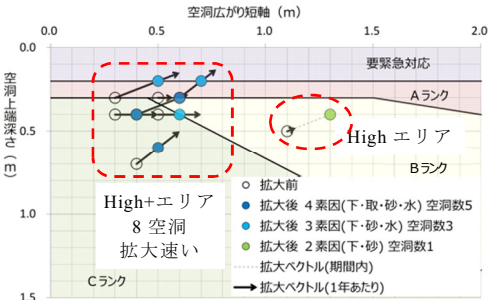


図-5 拡大空洞の挙動軌跡と空洞素因

¹ 西山ら(2019)「藤沢市における効率的な道路陥没防止手法の研究(官学産 共同研究)」第74回土木学会全国大会(高松)

² 国土交通省道路局ウェブサイト：国土交通省地下空間の利活用に関する安全技術の確立に関する小委員会資料(2017)
<http://www.mlit.go.jp/common/001172283.pdf>

³ 大原ら(2018)「藤沢市における効率的な道路陥没防止手法の実践的研究(官学産 共同研究)その3」第53回地盤工学研究会(高松)