博 士 論 文

舗装路面の局部変状に着目した
三次元点群データの作成法と評価法に関する研究

2019 年 9 月

江口　利幸

目　次

第１章　序論 1

1.1 研究背景 1
1.2 既往の研究 2
1.3 本研究の目的と内容 3

第２章　都市間高速道路の変状と路面調査方法 6

2.1　都市間高速道路の変状 8
2.2　都市間高速道路の路面調査方法 16

第３章　ポーラスアスファルト舗装の変状 21

3.1 ポーラスアスファルト舗装の変状実態 22
3.2 変状の特徴と測定技術 28
3.3 研究対象とする変状の特徴 33
3.4 まとめ 35

第４章　局部変状に着目した三次元点群データの作成法と評価法の開発 37

4.1 補正三次元点群データの作成法 37
4.2 変状評価法の開発 47
4.3 まとめ 60

第５章　局部変状の抽出方法の提案 62

5.1 CNN の基本構造 63
5.2 補正三次元点群データの可視化 64
5.3 機械学習を用いた局部変状の自動抽出 66
5.4 まとめ 70

第６章　適用範囲の拡大に関する検証 72

6.1 補正三次元点群データ間隔および他機種への適用性 72
6.2 ３D レーザースキャナへの適用性 75
6.3 他の局部変状への適用性 78
6.4 まとめ 82

第７章　結論 83

7.1 研究成果の総括 83
7.2 今後の展望と課題 85

謝 辞 86

第１章 序論

1.1 研究背景

老朽化した社会資本が増大し予算制約が激化する背景の中，道路の機能を所要の水準に保持するために，路面特性を適切に評価し，維持管理を実施することは道路管理者の重大な責務である．

我が国の都市間高速道路では，昭和 38 年の名神高速道路・栗東～尼崎間の開通から 50 年を経た現在，延長約9,000kmに達し，30年以上を経過した供用延長が約4割（約3,700km）を占め経年劣化が進行するとともに，厳しい使用環境にさらされていることによる変状の増加や新たな変状の発生などが顕在化してきており，早期に大規模更新，大規模修繕に取り組む必要がある[1)]．

舗装路面に対し，効率的な維持管理を実施するためには，定期的な点検で舗装の健全性を把握した上で，表層・基層を適切な時期に修繕し，路盤以下の層の健全性を保つことが求められる．都市間高速道路では，日常的に車上から路面を目視点検[2)]するとともに，定期的に大型の路面性状測定車で路面性状（わだち掘れ量，ひび割れ率（度），IRI（国際ラフネス指数）値，すべり摩擦係数）を測定[3)]することにより，都市間高速道路全線の健全性の把握と補修対象箇所の選定を実施し，効率的な維持管理計画を立案している．

一方，道路は日常生活や経済活動を根幹から支える社会資本として不可欠である．
道路を適切に機能させるために重要な性能の一つとして，走行安全性がある．我が国の都市間高速道路においては，高度経済成長とともに急増する大型貨物車台数の増加に伴い，全国各地の重交通路線では，「W わだち」と呼ばれる激しい流動わだち掘れが深刻な状態となった[4)]．これにより，供用後早期に舗装修繕が必要となっただけでなく，高速走行する車両の操縦安定性に悪影響を与え，雨天時のスリップ事故が多発し，ついには社会問題化する状態に至った[5),6)]．当時，日本道路公団では，道路管理者として多発する交通事故を前にあらゆる方策を講じるべきと考え，雨天時の交通事故抑制と耐流動性に優れたポーラスアスファルト舗装の導入を検討し，1989 年に東北道（本宮 IC～二本松 IC 間）で試験施工を実施したのを皮切りに[7)]，1998 年に全面採用する決定を下した．このことにより，降雨時の事故が大幅に減少するとともに，雨天走行時の視認性が改善するなど[8)]，走行安全性・快適性が大きく向上した．しかしながら，ポーラスアスファルト舗装の導入が進み，経年的な変状が各地で発生するに連れ，その変状形態は密粒度アスファルト混合物の表層とは異なることが明らかになってきた[9)]．具体的には，密粒系の代表的な変状形態であるわだち掘れとは異なり，ポーラスアスファルト舗装の場合には，ポンピングや亀甲状のひび割れ，ポットホールといった，局部的な変状が主体であるという特徴を有する．このような「点」の変状が徐々に増加していく傾向を示すことから（写真-1.1），わだち掘れ量，ひび割れ率（度），IRI 値，すべり摩擦係数のように，ある形態の変状が一定の延長で連続して発生するという密粒系の舗装が主体だった時代に策定された評価指標では，変状箇所の抽出や補修を行うタイミングの評価が困難であるという新たな課題が発生している．

写真-1.1　ポーラスアスファルト舗装のポンピング例

1.2 既往の研究

日本の都市間高速道路の路面管理は，表層の区間的な変状であるわだち掘れ量，ひび割れ率（度），IRI 値に対して，二次元のデータ（わだち掘れ：横断プロファイル，ひび割れ：平面の路面画像，IRI 値：縦断プロファイル）を用いて測定している．また，ポットホール等の局部的な変状に対しては，定期的な人力による目視点検にて，路面管理を行っている．しかしながら，近年，路面管理を行うために必要な測定技術，評価技術，解析技術が急速な進展を遂げている．

路面形状の測定技術では，GPS・IMU・レーザースキャナ・カメラ等を車両に搭載し，三次元座標データと画像データを取得する mobile mapping system （以下,「MMS」という）やそれに準ずる機器を車両に搭載し三次元点群データを取得する Laser Scanning Camera[10)]（「以下,「LSC」という)などが開発されている．これらの技術を用いて区間評価を行う三要素だけでなく，三次元で路面形状を測定することにより，ポットホール等の局部的な変状の測定も可能になった．現時点では，台数が限られているため今後の普及が望まれる．

測定データの評価技術では，二次元点群データを用いた評価技術として，橋爪ら [11)]が路面の横断プロファイルに対して，局部沈下発生地点前後のわだち掘れ量の中央値から局部沈下発生地点のわだち掘れ量の差分を算出することにより，局部的な変状を評価する手法を提案している．また，三次元点群データを用いた評価技術では，青木ら [12)]が路面の横断プロファイルに対して，統計的手法である F 検定（Chow test）を用いることにより，局部的な変状を評価する手法を提案している．しかしながら，本評価技術は三次元での評価を行っていないため，特定の局部変状を対象とした変状箇所の抽出および評価技術は確立していない．

三次元点群データを用いた解析技術では，Allen Zhang ら [13)]が三次元路面画像のひび割れに対して，Convolutional Neural Network[14)]（以下「CNN」という)に基づいた特殊なニューラルネットワークを用いて画像データを学習させることにより，高精度（90%以上）でひび割れを検出できることを報告している．しかしながら，ここで用いている画像は，三次元路

面画像で検出したひび割れ深さを二次元に変換した画像で解析しており，三次元の路面形状に対する解析は行っていない.また，複雑なニューラルネットワークを用いており，高精度にひび割れを検出するためには多くの学習データを必要とする(この例では約 1,800 枚).局部的な変状に対する解析技術では，Emir Buza ら [15]が路面の二次元画像を用いて，関心領域（region of interest）に着目した教師なし学習を行い，ポットホールを検出できることを報告している．この技術でも解析技術に二次元画像を用いているため，乾湿等路面の色彩変化が検出結果へ与える影響は大きく，初期のポットホールのような局部変状の評価は困難であると考えられる．

1.3 本研究の目的と内容

以上の背景から，定期的な点検で全舗装資産の健全性の把握と補修対象箇所を選定し効率的な維持管理計画を立案することを目的に，汎用性の高い二次元点群データによる測定技術および局部変状を測定できる三次元点群データによる測定技術を用いて，特定の局部変状を対象とした変状箇所の抽出および評価技術を開発する．また，約 9,000km ある都市間高速道路に対して，局部変状箇所を抽出するには，大量な三次元点群データの集計に膨大な時間と労力を要するという課題が発生する.そこで，実務上の運用に必要となる大容量データを短時間に分析し，路面の局部変状箇所を解析する技術の提案を行う．

本研究の構成を図-1.1 に示す．また，**第 2 章**以降の各章の目的と具体的な内容は以下のとおりである．

「**第２章　都市間高速道路の変状と路面調査方法**」では，都市間高速道路の代表的な変状を明確にするとともに，舗装路面の維持管理を適切に行うために重要な路面調査方法について説明する．

「**第３章　ポーラスアスファルト舗装の変状**」では，路面性状測定車で測定している路面性状測定値（わだち掘れ量，ひび割れ率（度），IRI 値，すべり摩擦係数）で評価できていないポーラスアスファルト舗装の変状評価技術を検討するため，ポーラスアスファルト舗装の変状実態をアンケートにより確認するとともに，変状形態を推定し，評価するために必要なデータを明確にする．

「**第４章　局部変状に着目した三次元点群データの作成法と評価法の開発**」では，汎用性の高い二次元点群データによる測定技術でポーラスアスファルト舗装の局部的な変状の評価を可能にするため，二次元点群データ（横断プロファイル）を活用して三次元点群データ化する手法と，ポーラスアスファルト舗装の特徴的な変状形態を三次元点群データの形状から評価する手法を開発する．具体的には，初めに二次元点群データに対して，縦横断勾配を除去し，路面の変状のみを評価できる補正三次元点群データを作成する．次に，局部変状の大きさに合わせた範囲で三次元点群データを集計（以下「簡易局部変状評価法」という）し，局部変状を平面上の高さの変化で評価する．

「**第５章　局部変状の抽出方法の開発**」では，実務上の運用に必要となる路面プロファイ

ルの大量取得データを，短時間に分析し，路面の局部変状箇所を抽出できる手法を提案する．具体的には，変状点群データの高さに対する変化量を多段階の色情報（RGB）で可視化し，ディープラーニングにより変状を自動抽出した．

「**第６章　適用範囲の拡大に関する検証**」では，**第３章**の変状点群データを用いた評価法の汎用性を確認するため，ポーラスアスファルト舗装の局部変状に対して，三次元点群データを用いた測定技術に対する適用性を検証した．また，ポットホールに対して，変状点群データによる局部変状の評価法を開発した．

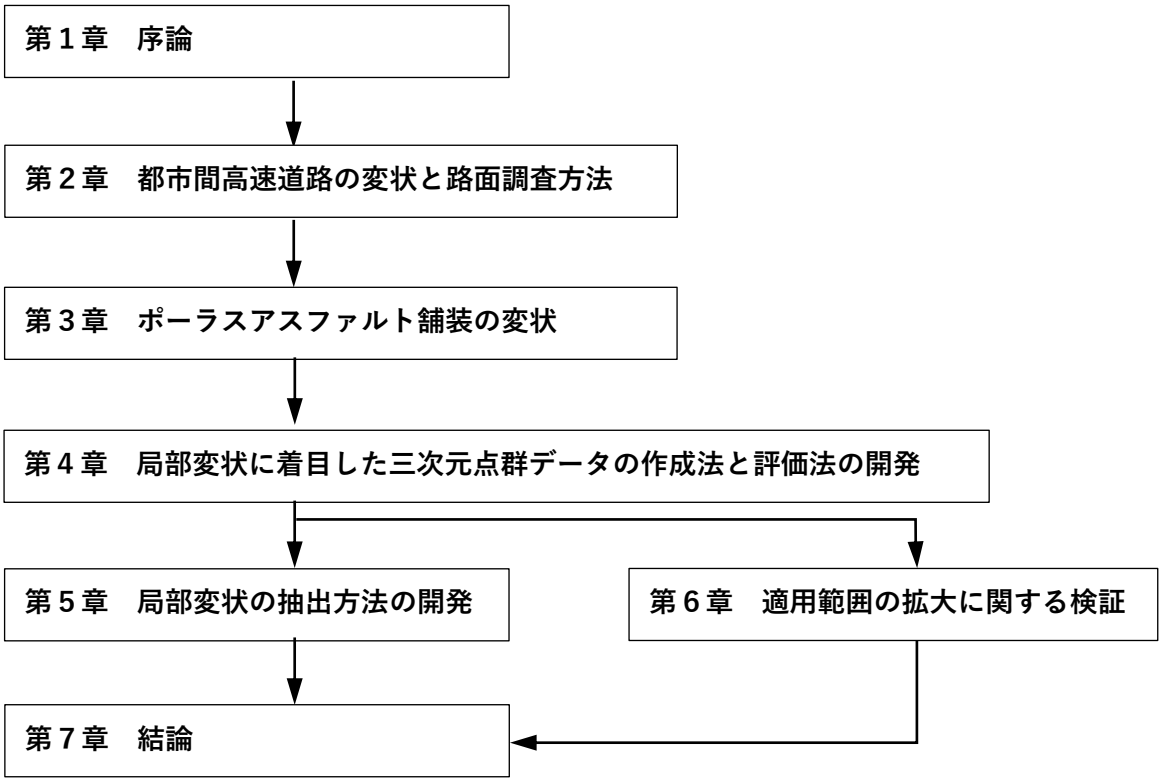


図-1.1 本研究の構成

参考文献

1）東日本高速道株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：高速道路資産の長期保全および更新のあり方に関する技術検討委員会, 2014

2）東日本高速道株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：保全点検要領（構造物編）平成 29 年 4 月版, 2017

3）東日本高速道株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：調査要領平成 28 年 8 月版, 2016.

4）高速道路調査会：アスファルト舗装追跡調査解析結果報告書, 1976

5）土屋雅彦，岩田久志：舗装修繕工法の実態分析，試験所報告(1986 年度), pp.55-74，日本道路公団試験所, 1987

6）第 118 回国会：予算委員会第八分科会第 2 号議事録, 1990.

7）渡辺幸二，神谷誠，中村研：東北自動車道における排水性舗装，舗装，pp.4-9，1989

8）本松資朗，山本稔：高機能舗装の特性と舗装診断技術，騒音制御, Vol.25, No3, pp122-128, 2001

9）例えば，高橋茂樹：高速道路におけるポーラスアスファルトの導入効果の検証と基層の脆弱化に関する研究，学位論文, 2013.4

10）Benoit Petitclerc, John Laurent, Richard Habel: Optimizing 3D Surface Characteristics Data Collection by Re-Using the Data for Project Level Road Design, 8th Symposium on Pavement Surface Characteristics, 2018

11）橋爪謙治,橋本和明,明石行雄,全邦釘：排水性舗装の基層威信の劣化を要因としたポットホール発生予測手法の一提案，土木学会論文集 E1Vol. 70, No. 3, I_17-1_24, 2014

12）Kazuya Aoki, Kohei Yamamoto, Hideki Shimamura: Evaluation Model for Pavement Surface Distress on 3D Point Clouds from Mobile Mapping System, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B1, 2012 XXII ISPRS Congress, 2012

13）Allen Zhang, Kelvin C. P. Wang, Baoxian Li, Enhui Yang, Xianxing Dai, Yi Peng, Yue Fei, Yang Liu, Joshua Q. Li & Cheng Chen：Automated Pixel-Level Pavement Crack Detection on 3D Asphalt Surfaces Using a Deep-Learning Network, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering Vol.32, pp.805-819, 2017

14）LeCun. Y., Boser B., Denker. J.S., Henderson. D., Howard R.E., Hubbard W.E., and Jackel. L.D.,：Backpropagation applied to handwritten zip code recognition, Neural Computation,Vol.1, No.4, pp.541-551, 1989

15）Emir Buza, Amila Akagic, Samir Omanovic, Haris Hasic：Unsupervised method for detection of high severity distresses on asphalt pavements, IEEE 14th International Scientific Conference on Informatics, 2017

第２章 都市間高速道路の変状と路面調査方法

道路は日常生活や経済活動を根幹から支える社会資本として不可欠なものであり，人や物を車両で安全かつ快適に通行させるとともに，都市の景観形成や防災空間など，様々な機能を有する．そのため，道路の機能を所要の水準に保持するために，路面特性を適切に評価し，維持管理を実施することは道路管理者の重大な責務である．舗装路面を適切に維持管理するため，都市間高速道路では技術基準が制定されており，図-2.1 の流れ図に基づき点検・調査を実施している．点検・調査は，大別すると目視観察と詳細調査の２つがある．

目視観察は，安全な道路交通を確保し，第三者等に対する被害の発生を未然に防止するとともに，構造物を長期的に維持管理するために実施している．目視観察は，点検計画に基づき，週数回，都市間高速道路を車上目視にて点検を行う．車上目視により，局部的だが急激に進行するポットホールや安全な走行環境を損なう恐れのある段差のような変状を早期に発見し，緊急補修を実施することができる．また，変状を早期に発見し，補修することにより，変状の進行を抑制することができる．

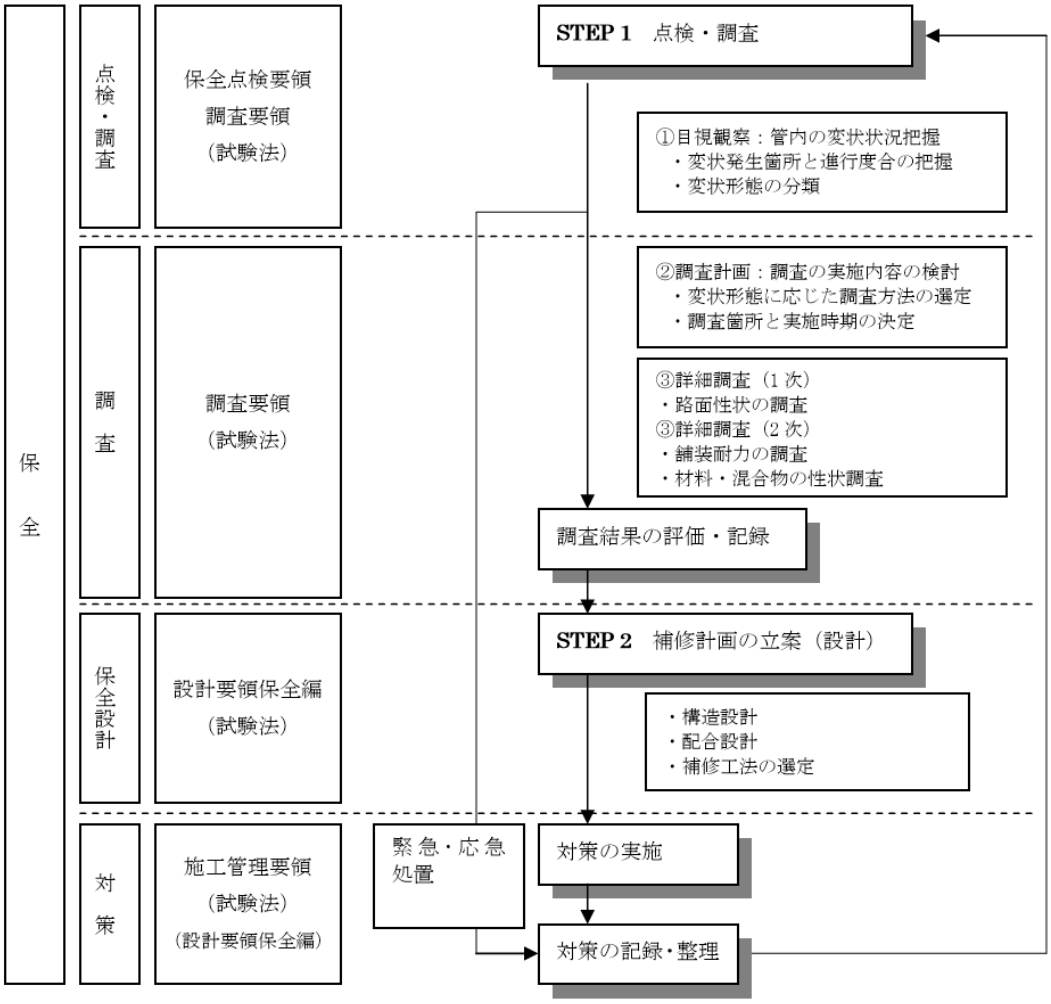


図-2.1 点検・調査から補修までの流れ図 [1)]

詳細調査は，損傷形態から原因を類推し，それに適した調査方法を選定する必要がある（表-2.1）．調査の種類は，舗装構造の強度低下に対し舗装体の支持力を求める調査，路面

表-2.1 アスファルト舗装の損傷別の主な調査方法[1)]

損傷の種類		調査の種類			評価に適した主な調査方法
		構造	路面性状	混合物	
わだち掘れ	流動わだち掘れ		◎	○	・路面性状測定車によるわだち掘れ量測定 ・採取コアによる混合物性状（残存空隙率等）確認
わだち掘れ	局部流動わだち掘れ		○	◎	・直定規によるわだち掘れ量測定 ・採取コアによる下層のはく離状況の観察 ・水浸ﾏｰｼｬﾙや水浸圧裂強度等の耐水性試験
わだち掘れ	摩耗わだち掘れ		◎		・路面性状測定車によるわだち掘れ量測定
ひびわれ	路盤，路床の支持力低下によるひびわれ	◎	○	○	・路面性状測定車等によるひび割れ率測定 ・FWD 等によるたわみ量測定 ・現場 CBR 等の支持力試験
ひびわれ	アスファルト混合物の劣化，老化によるひびわれ		○	◎	・路面性状測定車等によるひび割れ率測定 ・回収ｱｽﾌｧﾙﾄの性状（針入度･軟化点等）確認
ひびわれ	温度応力ひびわれ		○	◎	・路面性状測定車等によるひび割れ率測定 ・回収ｱｽﾌｧﾙﾄの性状（伸度･脆下点等）確認
ひびわれ	施工継目部のひびわれ		○		・目視等によるひび割れ測定
ひびわれ	リフレクティブクラック	○	○	○	・路面性状測定車等によるひび割れ率測定 ・FWD 等によるたわみ量測定 ・回収ｱｽﾌｧﾙﾄや混合物の性状試験
ひびわれ	わだちわれ		○	◎	・路面性状測定車等によるひび割れ率測定 ・FWD 等によるたわみ量測定 ・採取コアによるひびわれ状況の確認 ・回収ｱｽﾌｧﾙﾄの性状（針入度・軟化点等）確認
ひびわれ	不同沈下によるひびわれ	○	○		・目視等によるひび割れ測定 ・現場 CBR 等の支持力試験
平坦性	コルゲーション，くぼみ，より		○	◎	・3mﾌﾟﾛﾌｨﾙﾒｰﾀによる測定 ・IRI による測定 ・採取コアによる混合物性状（ｱｽﾌｧﾙﾄ量・残存空隙率等）確認
その他	ポットホール		○	○	・直定規による径と深さの測定 ・混合物の材料分離やはく離状況の観察 ・採取コアによる密度(締固め度)の確認
その他	すべり摩擦係数の低下		◎	○	・BPN・DF ﾃｽﾀやすべり測定車による測定 ﾌﾞﾘｰｼﾞﾝｸﾞの場合は、採取コアによる混合物性状（ｱｽﾌｧﾙﾄ量・残存空隙率等）確認。ﾎﾟﾘｯｼﾝｸﾞの場合は、粗骨材の磨耗状態の観察
その他	ポンピング	◎	○	○	・部分切削による下層のひびわれ状況確認 ・FWD 等によるたわみ量測定 ・採取コアによる下層のはく離状況観察
その他	段差		◎		・水糸等による段差量の測定 （表層のわだちによるものか構造物の裏込め沈下によるものかを現地状況より確認する）
その他	骨材飛散		○	◎	・路面性状測定車によるわだち掘れ量測定 飛散骨材の観察（粗骨材の破砕か抜けかを確認する） ・採取コアによるカンタブロ試験や密度(締固め度)の確認
その他	はがれ		○	◎	・目視によるはがれ状況の確認 ・採取コアによる密度(締固め度)の確認
その他	油漏れによるカットバック		○	○	・ピック等によるカットバックを生じている範囲(平面、下面への影響）の確認 ・回収ｱｽﾌｧﾙﾄや混合物の性状確認
その他	粗骨材の割れ		○	◎	・目視による割れの確認 ・採取コアから抽出した粗骨材の安定性試験
その他	滞水（高機能舗装Ⅰ型）		○	○	・わだち量や排水工（舗装流末）の確認 ・目視による浮き水範囲の確認 ・空隙詰まり･空隙潰れ状況の観察及び現場透水試験

凡例）　調査手法　◎：路面状態，舗装の損傷状況を詳細に把握するために必用な調査
○：路面状態，舗装の損傷状況を適宜，全般的に把握するために必要な調査

性状（舗装が有すべき機能）の機能低下を把握するための調査，材料・混合物の性状を求める調査がある．詳細調査（１次）は，急激に進行しないが，一定の区間にわたり発生し，補修範囲が大規模になるわだち，ひび割れ，平たん性に対して実施する．調査は，概ね２～５年に１回程度の頻度で，路面性状測定車により実施する．また，目視観察や詳細調査（１次）の結果を踏まえ，必要に応じて舗装構造の損傷に対する調査や混合物の性状を求める調査を実施する．これらの調査結果を活用し，中・長期および短期の補修計画の立案や対策工法の選定を実施することができる．

本章では，都市間高速道路の代表的な変状を紹介するとともに，詳細調査（１次）で実施されている路面調査方法について記載する．

2.1　都市間高速道路の変状

表-2.2[2)] は，アスファルト舗装における変状の種類を示す．表層種別の「密粒」は密粒度アスファルト混合物，「高機能」および「高機能Ｉ型」はポーラスアスファルト舗装のことを表している．表に記載されているように，密粒度アスファルト混合物とポーラスアスファルト舗装で，発生する変状の種類が異なることが分かる．

また，変状の分類として，機能的な変状と構造的な変状の２つがある．

機能的な変状とは，わだち掘れや表面的なひび割れなどのような舗装構造の強度低下に起因しない変状（わだち掘れ，ひび割れ，すべり抵抗の低下等）であり，これらの変状の拡大は車両の走行性，安全性，快適性の低下をまねくものである。変状は，表層のみにとどまる場合が多いが，適切な補修を早期に行わず放置すると，地域・交通条件などにより，基層ないしそれ以下の層に変状が進行する。

構造的な変状とは，路盤，路床の強度低下のような舗装の構造的な強度低下に起因する変状で，路盤，路床にまで補修の検討を要する．発生原因は，繰り返し荷重による強度低下，舗装厚および材料強度の不足，凍上による路盤または路床強度の低下などがあげられる。また，機能的変状に記載した，わだち掘れ，ひび割れもそのまま放置しておくと，路盤，路床内への雨水の浸入により，長期的には構造的変状の原因となる。そのため，変状の種類だけではなく，主な発生原因を踏まえた上で変状を分類し，適切な補修工法を選定する必要がある．

本節では，アスファルト舗装の具体的な変状の種類を紹介[3)] する．

表-2.2 アスファルト舗装における変状の種類[2)]

損傷の種類		損傷分類		表層種別	損傷状況	発生地域・位置	主な原因
		機能	構造				
わだち掘れ	流動わだち掘れ	○	○	高機能/密 粒	アスファルト混合物の圧密や側方移動，または下層からの沈下	温暖地，重交通路線主に走行軌跡部	大型車交通、渋滞、混合物の不適正
	局部流動わだち掘れ	○	◎	高機能Ⅰ型	アスファルト混合物の側方移動による路面の局部的な盛上がり。ひびわれ、ポンピング、沈下、ポットホール、骨材飛散等を伴う場合がある。なお、レーンマークのよれが発生している場合はその前兆である。	主に走行軌跡部	基層混合物及びアスファルト安定処理のはくり
	摩耗わだち掘れ	◎		密 粒	走行軌跡部のすり減り	積雪寒冷地	チェーン等による摩耗
ひびわれ	路盤、路床の支持力低下によるひびわれ		◎	高機能/密 粒	線状から亀甲状へ	主に走行軌跡部	路盤、路床の強度低下
	アスファルト混合物の劣化、老化によるひびわれ	○	○	高機能/密 粒	亀甲状	走行軌跡部から発生し、舗装面全体へ	混合物の劣化、老化
	不同沈下によるひびわれ		◎	高機能/密 粒	線状（縦、横、不規則）	構造物周辺、車線拡幅継目部、切盛境等	盛土の圧密による不同沈下
	温度応力ひびわれ	○	○	密 粒	線状（横方向）ほぼ一定間隔に発生	寒冷地域や温度差の激しい地域	
	施工継目部のひびわれ	◎		密 粒	線状（縦，横方向）	施工継目部	
	リフレクティブクラック		◎	高機能/密 粒	線状（縦，横方向）	コンクリート版，セメント安定処理がある場合等	基層・路盤のクラック
	わだちわれ	○	○	密 粒	線状（縦方向）から網状	走行軌跡部	大型車交通
平坦性低下	コルゲーション，くぼみ，より	○	○	密 粒	さざ波状の舗装面のしわ，こぶ状のより	登坂車線，料金所付近，駐車場，渋滞箇所	路盤，路床の支持力の不均一，発進停止荷重
その他	ポットホール	○	○	高機能/密 粒	舗装表面に生じた穴、骨材の剥離、亀甲状ひびわれをともなう場合あり	ひびわれ部、排水不良箇所、チェーンラベリング部等	ひびわれの拡大、滞水による混合物のはくり
	すべり摩擦係数の低下	◎		高機能/密 粒	高機能舗装については，初期（施工直後）において，すべり摩擦係数の低下が見られる		
					ブリージング ポリッシング		アスファルト分の染み出し，骨材の研磨
その他	ポンピング		◎	高機能/密 粒	水、路盤材の細粒分の吹き出し、ひびわれを伴うことが多い	基層以下にひびわれ、はくりがある箇所	基層以下のひびわれ、はくり等
	段差	○	○	高機能/密 粒	路面の鉛直変位、凹凸、通常横断方向、時に不規則方向	橋梁伸縮装置の取り合い部、構造物の裏込部	高機能舗装の沈下、わだち掘れ、地盤の不同沈下
	骨材飛散	◎		高機能Ⅰ型	路肩等への骨材飛散、粗骨材の破砕、摩耗わだち掘れ、空隙詰まり	チェーン装着路線、ランプ・駐車場	チェーンによる摩耗、小型車のタイヤのねじれ・切り回し
	はがれ	◎		高機能Ⅰ型	表層のはがれ、骨材飛散		混合物の劣化、老化、はくり、締固め不足、油漏れによるカットバック
	油漏れによるカットバック	◎		高機能/密 粒	空隙詰まり、骨材飛散、ポットホール、		油漏れによるカットバック
	粗骨材の割れ	◎		高機能Ⅰ型	粗骨材の崩壊		乾湿繰り返し等により崩壊する骨材の混入
	滞水	◎		高機能Ⅰ型	高機能舗装体内の滞水及び路面への浮き水	サグ・反向点など合成勾配が小さい箇所，排水距離が長い（面積が大きい）箇所	空隙つぶれ・つまりによる排水不良，空隙率の不足

(1) わだち掘れ

わだち掘れとは，交通荷重の集中により道路横断方向に生じた路面の凹凸をいう。わだち掘れはその発生原因から，流動によるもの，摩耗によるものおよびその両方の要因によるものに分類できる。そのうち，流動および摩耗のそれぞれの現象が卓越しているものに大別し，流動わだち掘れおよび摩耗わだち掘れと呼ばれている。

1) 流動わだち掘れ

夏期の路温の高い時期に，大型車の車輪の通過頻度の高い位置で，表層，基層等のアスファルト混合物の塑性変形によって発生する．そのため，外側車輪通過位置（Outer Wheel Path，以下「OWP」という）および内側車輪通過位置（Inner Wheel Path，以下「IWP」という）部分が凹み，外側車輪位置と内側車輪位置の中間（Between Wheel Path，以下「BWP」という）および両端部がもりあがる．わだち幅は大型車の車輪間隔と一致しており，乗用車，2 輪車の走行や大型車の車線変更時にドライバーに不安感を与える。また，降雨により滞水しやすくなり，「密粒」の場合は水はね等の原因になる。

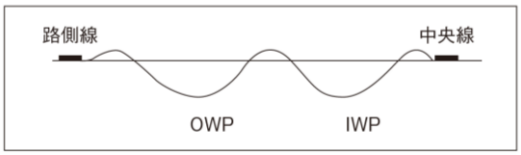


図-2.2 流動わだち掘れ（密粒度アスファルト舗装）

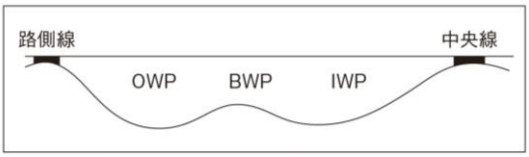
2) 局部流動わだち掘れ

ポーラスアスファルト舗装に局部的な流動わだち掘れが発生するもので，レーンマークの寄りが発生している場合はその前兆である場合が多い。変状が進行すると，亀甲状のひび割れやポンピング，ポットホールが発生する．

図-2.3 ポーラスアスファルト舗装の局部流動わだち掘れ（写真左）と
局部流動わだち掘れ箇所の舗装厚の違い（写真右）

3) 摩耗わだち掘れ

タイヤチェーン等によって路面の表面がすり減り，車線全体が凹んだ形で摩耗わだちが発生する。



OWP：路肩寄りの車輪走行位置（軌跡）

BWP：車輪走行位置の中間位置

IWP：道路センター寄りの車輪走行位置（軌跡）

図-2.4 摩耗わだち掘れ（密粒度アスファルト舗装）

(2) ひび割れ

ひび割れは，混合物の劣化に起因するものと構造に起因するものに大別されるが，いずれも舗装の耐久性に影響を及ぼす。放置すると，ひび割れが拡大・進行し，雨水の浸入などにより促進され，構造的な変状に至る恐れがあるので注意する。

1) 亀甲状ひび割れ

① 路床・路盤の強度低下によるひび割れ

主に走行軌跡部に発生する。アスファルト混合物層に線状ひび割れが発生すると，ひび割れから雨水が浸透し路盤・路床の強度低下により亀甲状のひび割れへと進行する。

② アスファルト混合物の劣化・老化によるひび割れ

走行軌跡部から発生し，舗装面全体へ範囲が拡大，亀甲状に進行する。アスファルト混合物の性状や施工状況，また構造的な問題により発生する。

図-2.5 アスファルト混合物の劣化によるひび割れ（密粒度アスファルト舗装）

2）横ひび割れ

① 温度応力ひび割れ

寒冷地や 1 日の温度変化が激しい地域において，温度収縮によりほぼ一定間隔で横方向に発生する。

② 施工継目のひび割れ

横方向の施工継目部に発生するひび割れであり，継目部の転圧不足等がある場合は，早期に損傷が発生する場合もある。

③ 疲労ひび割れ

想定した交通荷重に対し舗装厚が薄い場合や経年変化による下層の支持力低下が生じると，交通荷重の繰り返しによってアスベース下面よりひび割れが発生する。

④ リフレクションクラック

オーバーレイ，切削オーバーレイなどを行った場合，新しく舗設されたアスファルト層に生じるクラックで，古い層の目地やクラックの真上の位置に発生する。

写真は，線状打換えを行った後，表層を切削オーバーレイしたものであるが，打換え目地上にリフレクションクラックが発生している。

図-2.6 温度応力ひび割れ

図-2.7 疲労ひび割れ（密粒度アスファルト舗装）

図-2.8 リフレクションクラック（密粒度アスファルト舗装）

3) 縦ひび割れ

① わだち割れ

縦断方向に沿って，1 本または数本の線で発生する。線状ひび割れともいう。車輪の通過位置（わだち掘れ発生位置）に発生するものが多い。

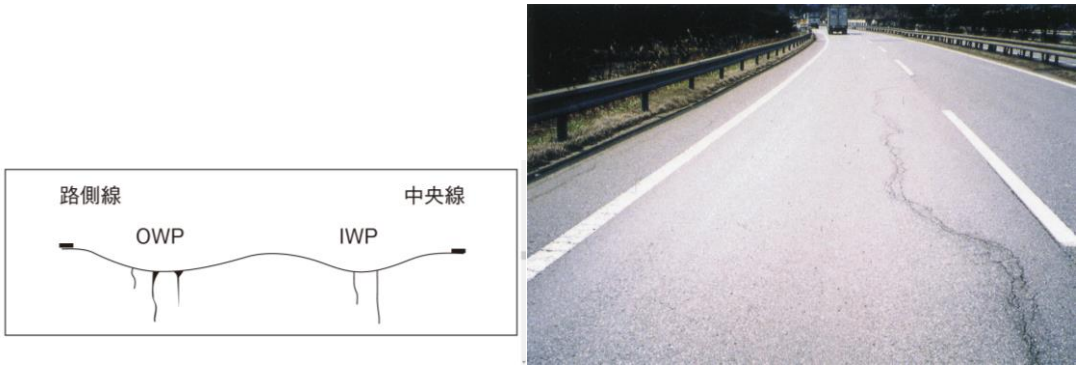


図-2.9 わだち割れ（密粒度アスファルト舗装）

② 施工継ぎ目のひび割れ

縦方向の施工継目部に発生するひび割れである．継目部の転圧不足等があると，早期に損傷が発生する場合もある。

(3) 平たん性

1) コルゲーション

インターチェンジのランプ部や料金所手前などの車両が減速走行する箇所で，縦断方向に舗装表面が波打つ現象で，舗装が縦断方向に流動することにより発生する。

2) 寄り

路面に局所的に発生するこぶ状の盛り上がりをいう。ポーラスアスファルト舗装の滞水しやすい箇所等で基層が剥離し，寄りが発生する場合がある。

図-2.10 コルゲーション

図-2.11 寄り

3）くぼみ

路面の高さが周囲より低くなった沈下をいう。寄り等，他の変状と併発して発生することが多い.

図-2.12 くぼみ

図-2.13 ポットホール

(4) その他アスファルト舗装の損傷

1）ポットホール

表層と基層またはオーバーレイ層と旧層のなじみが悪い場合等には，表層の一部が剥離し小さな穴（ポットホール）が発生する。降雨により発生・進行することが多い。

橋面舗装では，床版防水とレベリング層の接着が悪いと降雨によりポットホールが発生する場合がある。

2）ポンピング

ポーラスアスファルト舗装空隙部に基層以下からの細粒分が噴出している状況をポンピングと呼ぶ．ポーラスアスファルト舗装におけるポンピング発生箇所では，表層自体の損傷は確認されないが，基層以下が剥離し粒状化を起している場合が多い。

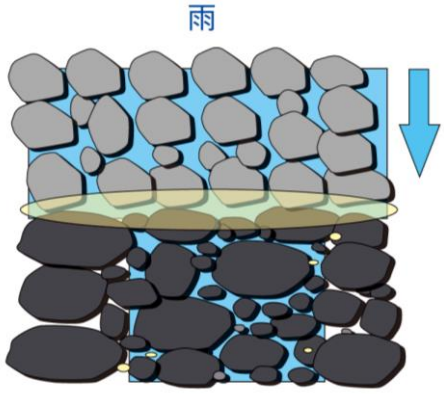


図-2.14 ポンピング

2) 段差

① 橋梁伸縮継手部等

橋梁伸縮継手と舗装の剛性の違いにより舗装取付部が沈下し，段差が発生する。また，横断構造物や橋台背面の裏込めの沈下により同様の段差が生じる場合もある。

段差は走行車両がバウンドし，走行安全性を低下させ，衝撃により橋台や伸縮継手の変状を早める。

② 軟弱地盤箇所

軟弱地盤箇所の舗装では，年月の経過とともに縦断方向に不均一な沈下が発生し，路面のうねりや不陸を生ずる。

図-2.15 橋梁伸縮接手部の段差

図-2.16 軟弱地盤箇所の段差

⑶ 骨材飛散

① ポーラスアスファルト舗装のタイヤチェーンによる骨材飛散

チェーン規制によりポーラスアスファルト舗装に骨材飛散が生じ，これによる摩耗物質で空隙詰りが生じる。

② ポーラスアスファルト舗装による骨材飛散

休憩施設駐車場の前輪タイヤを切り回す位置において，ポーラスアスファルト舗装に骨材飛散が生じ，空隙つぶれが発生する。

図-2.17 タイヤチェーンによる骨材飛散

図-2.18 すえ切りによる骨材飛散

2.2　都市間高速道路の路面調査方法

2.2.1 詳細調査の目的

舗装は，交通荷重，気象条件等の外的作用等を常に受けており，発生する変状を放置しておけば供用性が低下し，やがては円滑かつ安全な交通に支障をきたす．これを防ぐためには常に路面の状態を把握し，舗装の供用性や構造機能の低下を招かないよう適切な時期に補修を実施しなければならない．これらの維持管理を適切に行うため，詳細調査（1次）にて定期的に路面性状を点検し，評価することが重要である．詳細調査（1次）の主な目的を以下に記載する．

(1) 現況の舗装資産の健全性を把握（図-2.19）

現況の路面性状測定値を集計することにより，補修すべき舗装の資産数量と今後補修が見込まれる舗装の資産数量および箇所を把握できる．また，前回の測定結果と比較することにより，管理水準の推移と予算執行の妥当性を検証できる．図-2.19 は，ひび割れ率の分布状況を集計した具体的な事例である．当該道路に対するひび割れ率の管理基準値が 20%であった場合，ひび割れによる変状ですぐに補修しなければいけない舗装の資産数量と箇所は，補修対象資産と記載されているエリアの資産である．同様に，今後補修が見込まれる舗装の舗装資産数量と箇所は，補修予備軍と記載されているエリアの資産であることが分かり，補修計画の立案が可能となる．また，前回の測定結果と今回の測定結果を比較することにより，前回測定時に比べて増加した補修資産数量が確認できる．また．今後補修が必要になる補修予備軍の資産数量を確認することにより，これまでの予算執行の妥当性を確認できるとともに，中長期的な予算確保の要否を検討することができる．

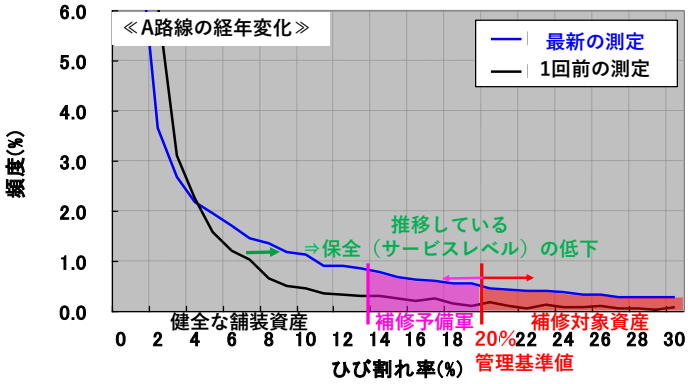


図-2.19 ひび割れ率の分布状況の事例

(2) 補修対象資産数量の推計による計画的な補修計画の立案（図-2.20）

繰返し測定した路面性状測定結果等から劣化進行量を集計・分析し，劣化推計モデル（図-2.20）を構築することにより，補修時期および補修対象資産数量を推計し，精度の高い補修計画の立案が可能となる．また，各路線等の劣化推計モデルを比較することにより，補修の優先順位や点検の頻度等の検討ができる．

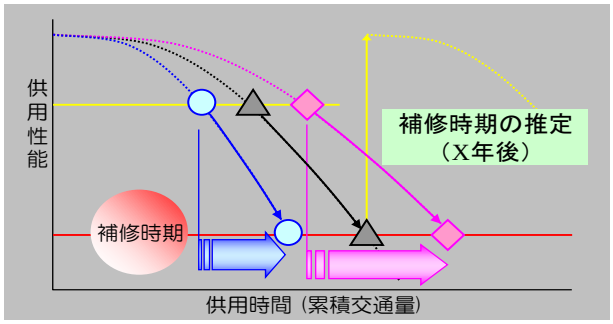


図-2.20 劣化推計モデルの概念 [4)]

(3) 管理基準の再設定による維持管理費用の最適化（図-2.21）

繰返し測定した路面性状測定結果等と補修履歴を用いて集計・分析することにより，変状過程を明確にし，管理基準値の再設定が行える．具体的には，現況の管理基準値に対して，補修費用と補修間隔の関係をシミュレーションし，最適な時期に管理基準値を設定できれば，ライフサイクルコストが低減する．図-2.21 は，シミュレーションのイメージである．例えば，現在の管理基準値がひび割れ率 20%，補修サイクル 20 年/回で表基層補修（5,000 円/㎡）していた区間に対して，ひび割れ率 10%，15 年/回毎に表層のみの補修（1,500 円/㎡）実施をシミュレーションし経済的になるのであれば，予防保全型の管理として新管理基準値を検討する等である．

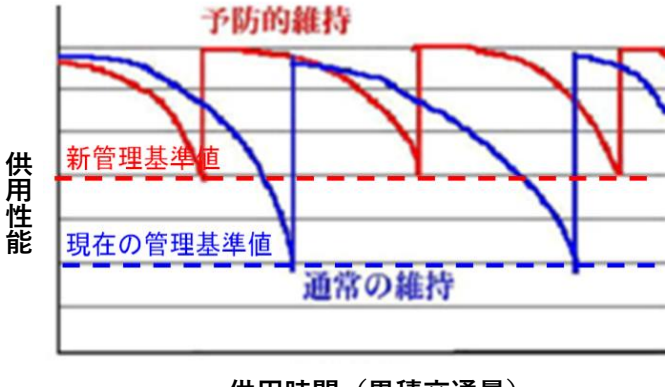


図-2.21 管理基準値と補修サイクル

2.2.2 詳細調査の測定方法

都市間高速道路では補修計画立案のため，定期的な大型路面性状測定車による路面性状調査（わだち掘れ量，ひび割れ率，IRI 値）により，都市間高速道路全線の健全性の把握と補修対象箇所の選定を実施し，効率的な維持管理計画を立案している．そのため，維持管理計画の立案に必要となる上記の路面性状調査方法（詳細調査（１次）（図－2.1 参照）を用いた路面調査方法）について記載する．

1）路面のひび割れ測定方法（試験法 226，路面性状測定車分のみ記載）

a．目的

路面に生じたひび割れの度合を測定する．この測定方法は，主にアスファルト混合物やコンクリートで舗装した路面のひび割れを測定するために現場で実施する．

b．測定方法

車両に搭載された撮影装置により，路面を測定幅 3.6m 以上で連続的に撮影することのできる測定装置で測定する．時速 80km/ h 走行時に 1mm 以上のひび割れを検出できる測定装置とする．

c．集計方法（アスファルト舗装）

・ひび割れ率は，原則として車線延長 100m ごとに集計する．

・撮影した画像に対して，縦断方向 1m，横断方向$\frac{1}{4}$車線のメッシュサイズに分割して，下記の算出式で集計する．

ひび割れ率（%）＝（面状ひび割れの入ったメッシュ面積（m^2）+線上ひび割れの入ったメッシュ面積（m^2））×0.3＋パッチング面積（m^2）×$\frac{1}{\text{調査対象区間面積}（m^2）}$

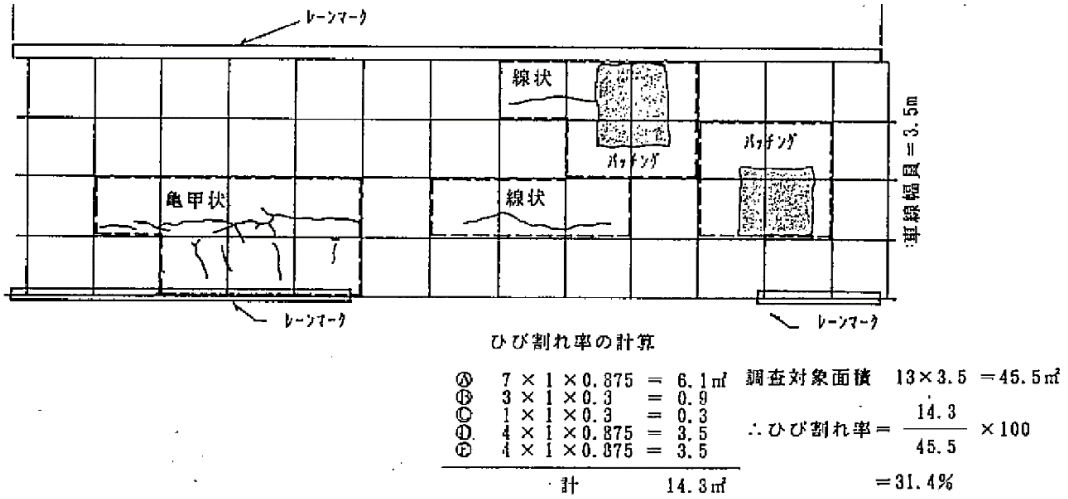
・ひび割れの分類は下記のとおりとする．

面状ひび割れ：1 メッシュに 2 本以上のひび割れがはいったもの

線状ひび割れ(縦)：1 メッシュ内に 1 本だけひび割れが入り，その方向が相対的に延長方向であるもの

線状ひび割れ(横)：1 メッシュ内に 1 本だけひび割れが入り，その方向が相対的に横断方向であるもの

パッチング：1 箇所 100m^2 以下のものとし，その中でも大規模な打換えや段差修正部は除き実面積とする



①車線幅を 4 分割で整理　②道路延長は 0.1 キロポストをそれぞれ基準点として 1m 等間隔とする

図-2.22 メッシュ法によるひび割れ率の定義と計算例

2）路面性状測定車による路面のわだち掘れ測定方法（試験法 247）

a．目的

舗装路面の摩耗，路盤の沈下，アスファルト混合物の流動等によって，車輪の走行位置に発生するわだち掘れ量を測定する．

b．測定方法

車両に搭載された測定装置により，路面を測定幅 3.6m 以上，延長方向 20m 以下の間隔で連続的に横断形状を計測することのできる測定装置で測定する．時速 80km/ h 走行時に±3mm 以下の精度で横断プロファイルを計測できる測定装置とする．

c．集計方法

・わだち掘れ量は，原則として車線延長 100m ごとに集計する．

・測定断面ごとに d_1～d_2 を mm 単位で算出し，D_0～D_1 の大きいほうの値を測定断面のわだち掘れ量とする．

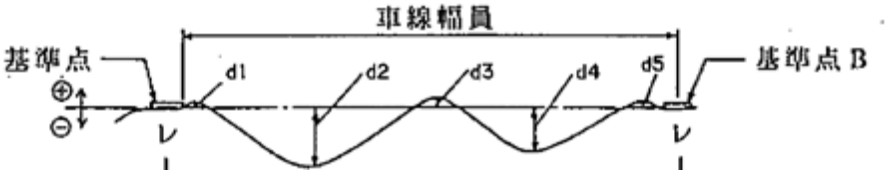


図-2.23 わだち掘れ深さの定義

3）路面性状測定車による路面の IRI 測定方法（試験法 248）

a．目的

路面形状（プロファイル）を計測し，舗装路面の凹凸に関する評価指数である IRI を算出する．

b．測定方法

車両に搭載された非接触式（レーザー変位計等）測定装置により，延長方向 25cm 以下の間隔で連続的に縦断形状を計測することのできる測定装置で測定する．時速 80km/ h 走行で取得した縦断プロファイルの IRI 性能評価値が 0.9 以上の測定装置であることとする．

c．集計方法

・IRI 値の算出は，評価基準長 200m で行うものとする．

・測定した縦断プロファイルに対して，ProVAL を用いて IRI を算出する．

参考文献

1） 東日本高速道株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領 第一集 保全編 平成 29 年 7 月版, 2017.

2）東日本高速道株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：調査要領 第一集 平成 27 年 7 月版, 2015.

3）公益財団法人高速道路高速道路調査会：写真で見る高速道路の舗装, 2016.

4）公益社団法人日本道路協会：舗装マネジメントシステム（PMS）ガイドラインの作成に向けて「ＮＥＸＣＯの取組事例」, < http://www.road.or.jp/technique/pdf/hosou_2.pdf> (Accessed 2019.5)

5）東日本高速道株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：ＮＥＸＣＯ試験法 第 2 編アスファルト舗装関係試験方法 平成 29 年 7 月版, 2017.

第３章 ポーラスアスファルト舗装の変状

舗装路面は，高速道路利用者の安全性・快適性に直接関わる重要な構造物である．そのため，都市間高速道路を保守・管理する東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社（以下「ＮＥＸＣＯ」という）では，路面の管理水準を一定に保ち良好な道路を供用するため，定期的に路面性状測定車で路面性状（わだち掘れ量，ひび割れ率（度），IRI 値，すべり摩擦係数）を測定し，表-3.1 に示す補修目標値[1)]で評価している．補修目標値とは，各変状項目がこの値に達するまでに補修を行うことが望ましいことを示す指標であり，「わだち掘れ量」，「段差量」，「すべり摩擦係数」，「IRI 値」，「ひび割れ率（度）」の 5 つの変状が指標として設定されている．しかしながら，ポーラスアスファルト舗装は，上記に示す 5 つ以外の変状で補修が実施されている可能性があり，5 つの変状以外で補修されているケースが多ければ，これらの補修目標値を新たに提案する必要がある．

本章では，補修目標値で評価できていないポーラスアスファルト舗装の変状に対する評価技術を開発し，新たな補修目標値を提案するため，都市間高速道路におけるポーラスアスファルト舗装の変状実態をアンケートにより確認するとともに，変状形態を推定し，評価するために必要なデータを明確にした．

表-3.1 補修目標値[1)]

わだち掘れ（mm）	段差（mm）		すべり摩擦係数（μV）	平たん性 IRI（mm/m）（評価基準長：200m）	ひび割れ率（%）
	橋梁の取付部	横断構造物取付部			
25	20	30	0.25	3.5	20

3.1 ポーラスアスファルト舗装の変状実態

本節では，都市間高速道路の一般的なポーラスアスファルト舗装に発生する変状を確認するため，ＮＥＸＣＯが管理する都市間高速道路の補修理由に関するアンケートを実施し集計した．

(1) 変状実態の確認方法

アンケートは，ＮＥＸＣＯ内 8 事務所（28.7km 車線，133 施工区間）を対象とし，各事務所で 1 年間に施工したポーラスアスファルト舗装の路面変状すべてに対して実施した．表-3.2 にアンケートで確認する項目を表-3.3 にアンケート帳票を示す．

表-3.2　アンケートで確認する項目

確認項目	確認内容	備考
回答項目	・補修時の変状分類（変状状態） ・それらの補修数量（延長） ・施工条件 ・補修工法	
変状分類 （変状状態）	現地におけるポーラスアスファルト舗装の補修実態を把握するため，現況の変状分類を行う． ・補修目標値（ひび割れ率，わだち掘れ，平たん性等） ・損傷指標Di（ＦＷＤ（構造的な強度の低下）） ・その他（骨材飛散，局所変状，その他等）	・回答用選択肢として表-3.6 を提供 ・舗装の変状種類（状態）事例を参考資料として提供
施工条件分類	補修時の施工条件を把握するため，施工条件の分類を行う． ・車線位置 ・施工幅 ・規制タイプ ・隣接車線補修	・回答用選択肢として表-3.4 を提供
補修工法分類	舗装がどの程度変状した時に補修工事を実施しているかを把握するため，補修工法の分類を行う． ・補修工事（切削オーバーレイ，オーバーレイ，打換え） ・日常補修・簡易補修（その他）	・回答用選択肢として表-3.5 を提供

表-3.3　アンケート帳票

	受注業者番号（受注業者リストシートに記入）	工事区間位置							補修月	施工区間					舗装種別						補修工法			損傷状態（複数回答可）			
					KP					KP					補修前			補修後										
		路線名	上下（ランプ名）	車線	自	至	添字	1施工延長（m）		自	至	添字	個別延長（m）	構造物区分	表層	基層（又は中間層）	上層路盤	表層	基層（又は中間層）	上層路盤	補修工法	補修深さまたは施工厚さ（cm）	縦断修正有無	主たる損傷状態（今回補修対象となった要因の主たるもの）	併発している損傷状態	←「その他」の損傷状態（自由様式）	考えられる損傷要因（自由様式）
記入例	1	○○自動車道	下り	第一走行	10.250	11.795	N	1.545	平成25年8月	10.250	10.600	N	350	土工	密粒	不明	不明	高機能Ⅰ	基層用（改質）	不明	1	10		24, 25	2		
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	10.600	10.870	〃	270	〃	高機能Ⅰ	旧表層	不明	〃	〃	不明	1	10	あり	3	21, 30, 31		基層以下の層の変状
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	10.870	11.000	〃	130	〃	〃	〃	〃	〃	〃	アス安	3	20	あり	1			
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	平成25年9月	11.000	11.175	〃	175	橋梁	高機能Ⅰ	不明	－	高機能Ⅰ	SMA	－	1	8		26			
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	11.175	11.420	〃	245	土工	〃	〃	不明	〃	基層用（改質）	不明	1	10		42			
	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	11.420	11.795	〃	375	ﾄﾝﾈﾙ	CO	－	－	高機能Ⅱ	－	－	2	4		99		黒舗装化	
注意事項	選択肢欄		上り	第一走行										土工	高機能Ⅰ	基層用（改質）	アス安	高機能Ⅰ	基層用（改質）	アス安			あり				
			下り	第二走行										橋梁	高機能Ⅱ	基層用（ｱｽﾌｧﾙﾄ）	セメ安	高機能Ⅱ	基層用（ｱｽﾌｧﾙﾄ）	セメ安							
				追越										ﾄﾝﾈﾙ	密粒	基層用（不明）	粒状	密粒	基層用（不明）	粒状							
																－	－		－	－							
			〃	〃										〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃							
		他、記入	他、記入												他、記入	他、記入	他、記入	他、記入	他、記入	他、記入							

↑ ランプの場合はランプ名記入

↑ ↑ ↑ 1連続施工区間ごとに記入。延長はKPから自動計算。途中BKがある場合は、延長を直接手入力。

↑ ↑ 構造物区分や補修工法が変わる毎に、行を追加し分けて記入。

↑ 延長はKPから自動計算。途中BKがある場合は、延長を直接手入力。

↑ 「◆補修工法リスト」より選択

↑ 「リスト」シートの「◆損傷の種類（状況）リスト」より選択

↑ ↑ 「リスト」シートの「あり」の場合のみ記入

表-3.4　施工条件分類表

条件分類	条件	番号
車線位置	路肩に接続する車線	1
	中分に接続する車線	2
	左右両側とも路肩あるいは中分に接続	3
	左右両側とも車線	4
	その他	5
施工幅	車線内のみ	6
	車線幅に加え、側帯（程度の幅）まで	7
	車線幅に加え、路肩まで	8
	その他	9
規制タイプ	昼夜連続	10
	日毎開放	11
	その他	12
隣接車線補修	行わない	13
	期間を空けて実施	14
	規制を切り替えて連続して実施	15
	同時に実施	16
	その他	17

表-3.5　補修工法分類表

補修工法	番号
切削オーバーレイ	1
オーバーレイ	2
打換え	3
その他	（工法を記入）

表-3.6　変状分類表（変状状態）

◆損傷の種類（状態）リスト

要領上の区分	損傷の種類（状態）	番号	摘要	設計要領第一集参考ページ
補修目標値	ひび割れ	1	補修目標値(100m区間長）を超える（予測を含む）場合に、選択	9-2-4 表9-3 参照
	わだち掘れ	2		
	平たん性（IRI）	3	補修目標値(200m区間長）を超える（予測を含む）場合に、選択	
	段差（橋梁取付部）	4	補修目標値を超える（予測を含む）場合に、選択	
	段差（横断構造物取付部）	5		
	すべり抵抗値低下	6		
損傷指標Di	FWD	11		9-2-5-2 表9-4参照
その他	骨材飛散	21	「主たる損傷状態」が「補修目標値」以外の場合、選択	9-2-1 表9-1 参照
	コルゲーション	22		
	局部流動（高機能Ⅰ型）	23		
	くぼみ（密粒）	24		
	寄り（こぶ）（密粒）	25		
	段差	26		
	ブリージング	27		
	ポリッシング	28		
	ポンピング	29		
	はがれ	30		
	ポットホール	31		
	空隙詰まり	32		
	滞水	33		
	多重補修跡	41	「主たる損傷状態」が上記「1」～「33」以外の場合	
	苦情	42	「主たる損傷状態」の場合、「併発している損傷状態」に実際の「損傷の種類」を記入。	
	その他	99	AA列「損傷状態（自由様式）」に具体的に記入	

※表-3.6 中の番号が，表-3.3「損傷状態（複数回答可)」に記入される.

※表-3.1 が,「設計要領第一集　9-2-4　表 9-3」に該当する.

※表-2.1 が,「設計要領第一集　9-2-1　表 9-1」に該当する.

【参考】舗装の変状種類（形態）事例 2),3)

出典：舗装の維持修繕ガイドブック2013（H25.11/日本道路協会）
アスファルト舗装保全技術ハンドブック（H22.2/道路保全技術センター）

番号	損傷の種類（状態）	状態	考えられる要因例	写真例
21	骨材飛散	・ポーラスアスファルト混合物の粗骨材分に、通行車両による外力が加わり、舗装体から剥離して飛び散る、路面が粗くなった現象。	・タイヤチェーンの打撃など衝撃荷重やタイヤのねじりなど。	
22	コルゲーション	・縦断方向に比較的短いピッチで連続的に発生する波状の凸凹、塑性（そせい）変状。	・混合物の安定性不足 ・プライムコート、タックコート散布の不足。過剰な散布による接着不足。 ・路盤の湿気 ・アスファルト混合物中の残留空隙不足	
23	局部流動 （高機能Ⅰ型）	・ポーラスアスファルトにおける、部分的な寄り。側方流動。部分的な沈下を伴いながら側方に寄ってしまう現象。	・表層と基層の接着力不足 ・基層混合物の損傷。バインダ剥離や基層のひび割れ、基層面から浸透した水分など	
24	くぼみ （密粒）	・局部的に低くなった状態、沈下。	・表層アスファルト混合物の不良、変形 ・路床、路盤、路体の局部的沈下	
25	寄り（こぶ） （密粒）	・局部的な盛り上がり、こぶ。	・プライムコート、タックコートの散布量過多、不均一。 ・雨水の浸透による混合物層間の接着不良。	
27	ブリージング	・アスファルト舗装表面にアスファルトが滲み出し、舗装表面が光った状態。フラッシュ。	・混合物のアスファルト量過多 ・低空隙等骨材粒度不良 ・タックコートの過剰散布 など	
28	ポリッシング	・車両走行により路面がすり磨かれた状態	・石灰岩等のすり減りやすい粗骨材の使用	
29	ポンピング	・舗装表面のクラックから水や路盤材等の細粒分が噴出す現象	・表面からの水の侵入 ・湧水などによる路盤材の侵食 など	
30	はがれ	・アスファルト被膜が骨材から剥がれる。剥離。混合物の粒状化。 ・通常アスファルト混合物の下面から進行。ひび割れや沈下を引き起こし、ポットホールへ進行する。	・舗装内の滞水など、水の介在により引き起こされる。 ・耐水性の良くない材料の使用、締固め不足、橋面/床版の悪排水など。	
32	空隙詰まり	・ポーラスアスファルトの空隙が閉塞する現象	・泥や粉塵の堆積	
33	滞水	・高機能舗装体内の滞水および路面への浮き水	・空隙つぶれ、つまりなどによる排水不良 ・合成勾配の低い箇所での排水不良	

(2) 集計対象データの選定

本研究では,「ポーラスアスファルト舗装における変状実態」の把握を目的としている．そのため，本研究において集計対象とする回答結果は，舗装種別における補修前の表層がポーラスアスファルト舗装のみとした。補修前がポーラスアスファルト舗装のデータは，133 区間で全体の 37.5%（133 区間/355 区間），当該延長は，28,736m で全体の 34.5%（28,736m/83,197m）であった．

(3) 集計結果

すでに評価手法が確立しており補修目標値も設定されている 5 つ以外の変状を確認するため，ポーラスアスファルト舗装の補修を行う際に発生している主たる変状をアンケートの回答結果より集計した．なお，回答は複数回答を可としたため，集計結果は延べ件数で整理した．

図-3.1 から図-3.3 に集計結果を示す．主たる変状は,「ひび割れが 26.5%（36 データ)」,「わだち掘れが 8.8%（12 データ)」,「平たん性が 22.8%（31 データ)」と，補修目標値の 3 項目が「全体の約 60%」を占めていた．上記以外の変状としては,「ポットホールが 19.9%（27 データ)」,「ポンピングが 9.6%（13 データ)」であった．

舗装の変状が補修目標値の 3 項目以外の変状であるポットホールおよびポンピングに対して併発する変状を確認した．

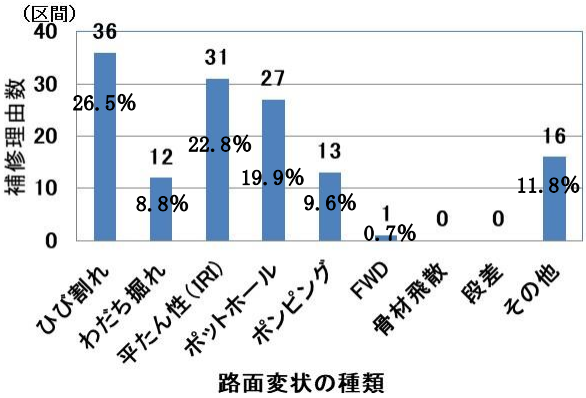


図-3.1 ポーラスアスファルト舗装の主たる変状

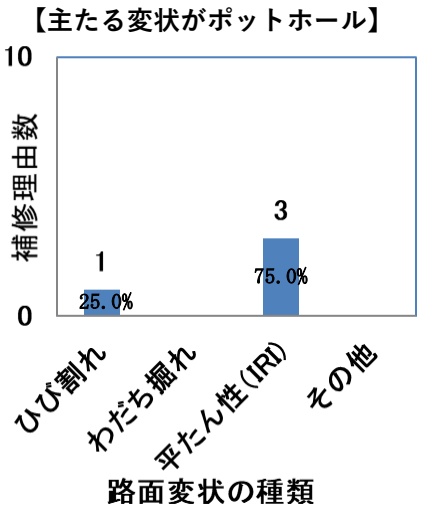


図-3.2 主たる変状がポットホール時に併発する変状

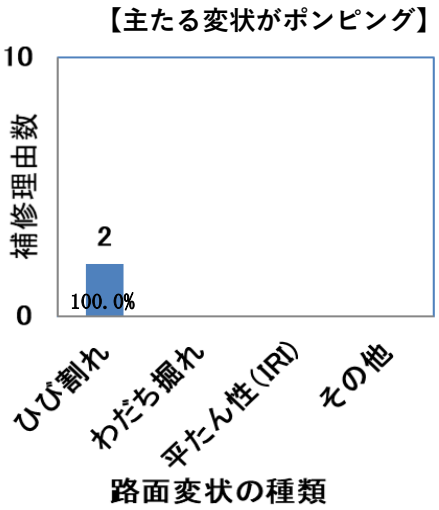


図-3.3 主たる変状がポンピング時に併発する変状

ポットホールの場合，27 データ中 23 データ（約 85%）が，ポットホール単独であった．ポットホールが主たる変状のときに併発する変状は 4 データのみであり，その内訳は「ひび割れ」が 1 データ,「平たん性」が 3 データであった。ポットホールが併発する変状のときの主たる変状は 11 データあり,「平たん性」,「ひび割れ」,「わだち掘れ」,「その他」であった.

主たる変状がポンピングの場合，11 データ/13 データ（約 85%）がポンピング単独であった．ポンピングが主たる変状のときに併発する変状は「ひび割れ」が 2 データであった。ポンピングが併発する変状のときに主たる変状は「その他」が 1 データであった.

(4) ポーラスアスファルト舗装に発生する主たる変状

本節では，一般的な都市間高速道路のポーラスアスファルト舗装に発生する変状を確認するため，ＮＥＸＣＯが管理する都市間高速道路の補修理由に関するアンケートを実施し，集計した．集計結果を以下に示す.

・アンケートの回答結果より,「分析対象は 133 区間のデータ」であった.

・ポーラスアスファルト舗装の主たる変状は,「ひび割れが 26.5%」,「わだち掘れが 8.8%」,「平たん性が 22.8%」と，この 3 項目が「全体の約 60%」を占めていた．上記以外の変状としては,「ポットホールが 19.9%」,「ポンピングが 9.6%」が確認された.

・変状が「ポットホール」のデータにおいて，約 70%がポットホール単独であった.

・変状が「ポンピング」のデータにおいて，約 85%がポンピング単独であった.

・「ポンピング」および「ポットホール」と併発する変状は，ほぼ補修目標値で評価できる変状（「わだち掘れ」,「ひび割れ」,「平たん性」）であった.

以上の結果より，設計要領で補修目標値を設定されていない「ポットホール」および「ポンピング」をポーラスアスファルト舗装に発生する主たる変状として, 評価法の開発を行うこととした.

3.2 変状の特徴と測定技術

前節の結果をもとに，変状の発生要因を明確にし，評価対象とすべき変状の特徴を整理した．発生要因の明確化と特徴の整理は，既存の文献により行うこととした．また，ポンピングの発生過程を推定するとともに，測定技術との関係を整理した．

3.2.1　変状発生要因

(1)　対象となる変状

前節の結果より，ポットホールとポンピングが都市間高速道路のポーラスアスファルト舗装に発生する主たる変状であることが確認できた．

一般的なポットホールの発生過程は図-3.4[4] のとおりである．初めに，舗装の表層および基層のひび割れ部分等より水が路盤に浸透する．次に，交通荷重が繰返し載荷されることにより，雨水とともに路盤の細粒分が噴出（これを，「ポンピング」という）し，舗装版下に空洞が生じる．最後に，舗装版下に発生した空洞上を交通荷重が繰返し載荷されることにより，舗装が亀甲状にひび割れポットホールが発生する．

変状の検出は早期に行われたほうが良いことから，ポットホールの発生過程に発生するポンピングを対象に発生要因を明確にすることとする．

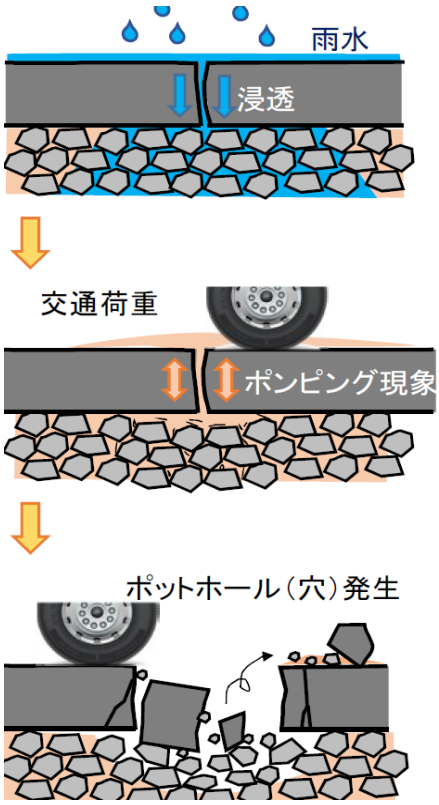


図-3.4 ポットホールの発生過程

(2) 変状発生要因

既存の文献 [5]によると，都市間高速道路のポーラスアスファルト舗装に対するポンピングの発生要因は 2 つに大別できる．

一つ目は，基層の剥離により発生するケースである．ポーラスアスファルト舗装の排水基面（基層上面）に雨水が局部的に滞水し，交通荷重が繰返しかかることにより，基層混合物のアスファルト分を乳化・流出させ土砂化する剥離現象（図-3.5）により，基層が減厚（写真-3.1）し，局部

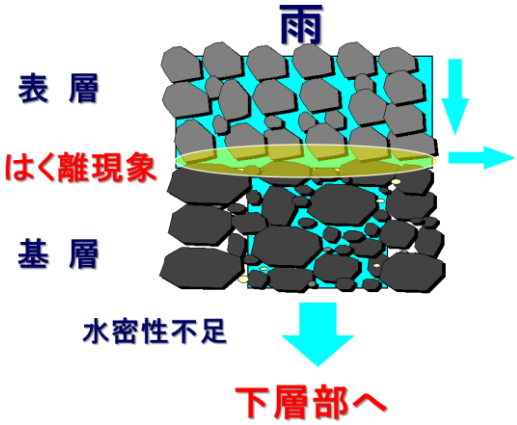


図-3.5 剥離の発生イメージ

写真-3.1 基層混合物の剥離状況

流動わだち掘れや亀甲状のひび割れが発生する．また，脆弱化（強度低下）した基層を通過した雨水が路盤に到達し，交通荷重による繰返し載荷時の垂直圧力により路盤の細粒分が噴出（ポンピング）し，空隙が生じる．ポンピング発生後も，この空隙により生じた局所的な沈下領域により，さらなる滞水が発生し，基層や路盤の脆弱化を助長し，表層にポットホールが発生する．写真-3.3 は，路面が亀甲状にひび割れ，土砂が噴出している箇所（写真-3.2）を開削した時の基層（既設表層の上にポーラスアスファルト舗装をオーバーレイしているので，直下の層は古い密粒表層）である．写真のように，アスファルトが抜け落ち，茶色に乳化していることが分かる．

二つ目は，路盤の脆弱化により発生するケースである．路面に発生したひび割れを通じて雨水が路盤に浸入，交通荷重による繰返し載荷時の垂直圧力により，路盤の細粒分が噴出（ポンピング）し，空隙が生じる．ポンピング発生後も，この空隙により生じた局所的な沈下領域により，さらなる滞水が発生，基層や路盤の脆弱化（強度低下）を助長し，表層にポットホールが発生する．また，近年，施工目地から浸入した雨水が，上層路盤（アスファルト安定処理路盤）底面と下層路盤の層境を流れ，下層路盤内に滞水し，ポンピングが発生する事例が確認されている．写真-3.4 は施工目地から下層路盤への雨水の流入経路を確認した写真である．施工目地部に着色水を流し込んだところ，通常はポーラスアスファルト舗装の中を着色水が流れるだけであるが，ポンピングが発生している箇所では，この着色水が上層路盤下面から流出していることが分かる．

写真-3.2 ポーラスアスファルト舗装のポンピング例

写真-3.3 ポンピング発生箇所の混合物の状況

写真-3.4 ポンピング発生箇所の水みち

3.2.2　変状の特徴を計測可能な測定技術

変状の評価法を開発するためには，変状の特徴を計測する必要がある．そのため，ポンピングの発生過程に生じる変状の特徴に対して，計測の可能性がある測定技術を選定した．

1）路面性状から測定できる項目

a.　路面（表層）の画像

舗装各層の変状を路面色彩の変化により確認する．一般的に路面の色彩で確認できる変状は，路面のひび割れやポットホール，ポンピング跡などである．測定技術は，デジタルカメラ，路面性状測定車等が可能である．

b.　路面（表層）の形状

舗装各層の変状を路面高さの変化により確認する．二次元（横断プロファイル，縦断プロファイル等）で測定する場合は，各種プロフィルメータや路面性状測定車，三次元で測定する場合は３Ｄレーザースキャナ，MMS 等で可能である．

2）舗装構造から確認できる項目

a.　舗装各層の密度

舗装各層の密度（空洞や材料の粗密，ひび割れ（材料に発生した隙間））を電磁波の反射波形により確認する．測定技術は，電磁波を用いた非破壊測定技術が研究されている．電磁波は周波数帯により測定深度と測定感度が異なる特徴を持ち，マイクロ波を用いた非破壊測定技術が地中の空洞調査や橋梁床版の劣化調査等に利用されている．

b.　舗装各層の支持力

舗装各層の強度低下による支持力の変化を路面のたわみ量により確認する．測定技術は，舗装各層のたわみ量を測定する Falling Weight Deflectometer（以下「FWD」という）が一般的である．また，移動式たわみ測定装置として，Rolling Wheel Deflectometer（以下「RWD」という），Road Deflection Tester（以下「RDT という」，Traffic Speed Deflectometer（以下「TSD」という）などが開発されている．

3.2.3　変状の特徴と測定技術

3.2.1 の結果より，都市間高速道路のポーラスアスファルト舗装に対するポンピングの発生要因は，「基層の剥離」で 1 ケース，「雨水の浸入による路盤の脆弱化」に対して「路面からの雨水の浸入による路盤の脆弱化」と「施工目地からの雨水の浸入による路盤の脆弱化（強度低下）」の 2 ケースの計 3 ケースが確認できた．また，3.2.2 にて評価法開発の可能性がある測定技術を選定した．

本項では，発生要因毎にポンピングの発生過程を推定するとともに，測定技術との関係を表-3.7 および表-3.8 に整理した．整理に際して，変状の進行速度を勘案し，変状の段階を「潜伏期」，「進展期」，「終極期」の 3 つのステップに分類した．なお,ポンピングはポットホールに至る過程で発生する現象であるため，表-3.7 および表-3.8 では，「潜伏期」，「進展期」の 2 ステップのみの記載としている．

表-3.7　都市間高速道路のポーラスアスファルト舗装に対する発生要因別ポンピングの発生過程(基層の剥離)

〇基層の剥離

変状速度	変状の過程	路面性状		構造	
		画像	形状	密度	支持力
潜伏期	ポーラスアスファルト舗装の排水基面となる基層上面に雨水の局部的な滞水が発生する.				
	基層上面の滞水箇所に交通荷重が繰返しかかることにより，基層混合物のアスファルト分を乳化・流出させ，土砂化し基層部が減厚（局部流動）する.	△	○	○	○
進展期	表層・基層にひび割れが発生し，路盤上面に雨水が滞水する. 基層混合物の土砂化が縦断方向にも進展する.				
	路盤上面の滞水箇所に交通荷重が繰返しかかることにより，路盤の細粒分が噴出（ポンピング）する.	○			
	路盤の細粒分の噴出に伴い空隙が生じ，路盤の強度が低下する.		○	○	○
	路盤の細粒分の噴出が進行し空隙が拡大する．また，路盤への雨水の滞水により，路盤の強度低下が縦断方向にも進展する.	△	○	○	○

注 1. ○印は，各測定技術により異なる.

例：画像は「舗装各層の変状を路面色彩の変化」,「形状は路面高さの変化」となる.

注 2. △印は，表層のひび割れを確認できるが，基層の剥離に起因したひび割れかは確認が必要.

表-3.8　都市間高速道路のポーラスアスファルト舗装に対する発生要因別ポンピングの発生過程（路盤の脆弱化）

○路盤の脆弱化（路面からの雨水の浸入）

変状速度	変状の過程	路面性状		構造	
		画像	形状	密度	耐荷力
潜伏期	経年変化（交通荷重，気象等）により各層へのひび割れが発生する．	△		○	○
	各層のひび割れを通過し，路盤上面に雨水が滞水する．				
	路盤上面の滞水箇所に交通荷重が繰返しかかることにより，路盤の細粒分が噴出（ポンピング）する．	○			
進展期	上記事象が進行するとともに，路盤の細粒分の噴出に伴い空隙が生じ，路盤の強度が低下する．		○	○	○
	路盤の細粒分の噴出が進行し空隙が拡大する．空洞化により支持力を失った路盤上部の表層・基層に交通荷重が繰返しかかることにより，変状が進行し，各層の強度が低下する．また，路盤への雨水の滞水により，路盤の強度低下が縦断方向にも進展する．	△	○	○	○

○路盤の脆弱化（施工目地からの雨水の浸入）

変状速度	変状の過程	路面性状		構造	
		画像	形状	密度	耐荷力
潜伏期	施工目地を通過し，路盤上面に雨水が滞水する．				
	路盤上面の滞水箇所に交通荷重による繰返しかかることにより，路盤の強度低下が進行する．			○	○
	路盤の強度低下箇所の表層・基層に交通荷重が繰返しかかることにより，路盤より基層および表層のひび割れが進行する．			○	○
進展期	ひび割れが基層まで進行し雨水が浸透，路盤上面の滞水箇所に交通荷重が繰返しかかることにより，路盤の細粒分が噴出（ポンピング）する．	○			
	上記事象が進行するとともに，路盤の細粒分の噴出に伴い空隙が生じ，路盤の強度がさらに低下する．また，路盤への雨水の滞水により，路盤の強度低下が縦断方向にも進展する．		○	○	○
	路盤の細粒分の噴出が進行し空隙が拡大する．空洞化により支持力を失った路盤上部の表層・基層に交通荷重が繰返しかかることにより，変状が進行し，各層の強度が低下する．また，路盤への雨水の滞水により，路盤の強度低下が縦断方向にも進展する．	△	○	○	○

注 1．○印は，各測定技術により異なる．例：画像は「舗装各層の変状を路面色彩の変化」，「形状は路面高さの変化」となる．

注 2．△印は，表層のひび割れを確認できるが，基層の剥離に起因したひび割れかは確認が必要．

3.3 研究対象とする変状の特徴

前節の結果を踏まえ，4 章で研究対象とするポーラスアスファルト舗装の局部的な変状の特徴と変状の段階を設定した．

3.3.1　変状の特徴と測定機器

(1) 研究対象とする変状の特徴

3.2.2 より，変状を測定できる項目は，「路面の画像」，「路面の形状」，「舗装各層の密度」，「舗装各層の支持力」の 4 つである．本研究の目的は，「定期的な点検で全舗装資産に対する健全性の把握と補修対象箇所を選定し，効率的な維持管理計画を立案できる評価法」である．「舗装の支持力」を測定する FWD は交通規制を行い測定することから，全舗装資産の測定は困難である．また，RWD，RDT，TSD 等は，高速走行可能であるが，ポーラスアスファルト舗装への適用は評価されておらず，国内で走行するためには車両制限令に適合させる検討が必要となる．「舗装各層の密度」に関する技術の舗装への適用は研究中である．「路面の画像」は，表-3.7，表-3.8 より，変状の一部の過程しか測定できない．そのため，本研究で対象とする変状の特徴は「ポンピング発生区間に見られるポーラスアスファルト舗装の基層以深からの局部変状」とし，沈下形状の変化をとらえ，変状過程を明確にする評価法の開発を行うこととした．

(2) 使用する測定機器

路面の形状を測定するためには，二次元で測定する路面性状測定車と三次元で測定する MMS 等がある．現況では，舗装を長期的に良好な状態に維持するため，わだち掘れ量，ひび割れ率(度)，IRI 値を定期的に測定し，舗装資産の健全性を診断・評価している．このデータを活用できるのであれば，研究に必要なデータを容易に入手が可能である．また，評価法が開発され，運用段階に移行した場合にも，業務に定着している路面性状測定車のデータであれば，新たに測定することなく，ポーラスアスファルト舗装の健全性を診断・評価できる．そのため，路面性状測定車のデータを用いて研究することとし，その結果を踏まえ三次元で測定する機器に対する評価法の開発を実施することとした．

次に路面性状測定車で利用するデータを確認（表-3.9）した．路面から得られる情報でポーラスアスファルト舗装の局部的な変状を測定するためには，面状の路面プロファイルから局部的な高さの変化をとらえる必要がある．そのため，わだち掘れの測定に使用する横断プロファイルを用いることとした．また，評価手法を開発するためには，局部変状の各段階の状況を確認する必要がある．そのため，わだち掘れと同時に測定しているひび割れ測定用の画像を用いて，変状の各段階を検証することとした．

表-3.9　路面性状測定車で得られる情報

性能確認項目	得られる情報	測定装置例
ひび割れ	路面画像 （例：1 画素　1mm×1mm）	ストリークカメラ ラインセンサカメラ
わだち掘れ	横断の路面高さ，20m ピッチ以下	3D カメラ，ラインセンサカメラ
平たん性	縦断の路面高さ，1 測線	レーザー変位計＋加速度計 3D 形状測定装置

3.3.2 研究対象とする変状の段階

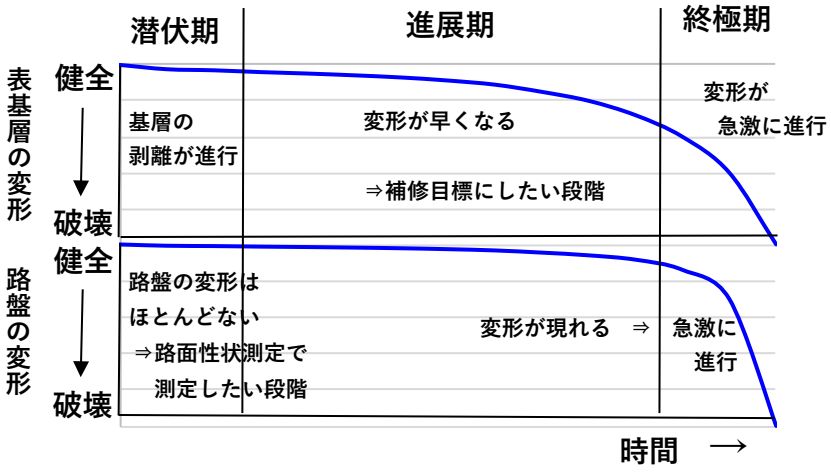
ポーラスアスファルト舗装の代表的な局部変状であるポンピングおよびポットホールの変状過程を局部的な路面高さの変化と時間経過の関係で表したイメージ図を図-3.6 に示す．

基層の剥離の場合，初めは基層の剥離が進行し，基層が脆弱化することにより，表基層の変形が発生する．その後，路盤への雨水の滞水により，路盤の支持力が低下し，全層の変形が急激に進行する．また，ポンピングは，進展期に発生する現象であると推定される．

路盤の脆弱化の場合，初めに基層以下の変状が進行し，支持力が低下することにより，表層の変状が発生する．そのため，表層に変状が発生した段階では，基層以下の変状が急速に進行すると推定される．また，ポンピングは，潜伏期終期または進展期初期で発生する現象であると推定される．

開発技術の利用法として，定期的に路面性状測定車で測定し評価した路面の健全度を用いて，舗装補修工事の発注や中長期計画の立案を行いたいことから，研究対象とする変状の段階は，「潜伏期」および「進展期」をすることとした．

【基層の剥離の場合】



【路盤の脆弱化の場合】

図-3.6 路面の変形に対するポーラスアスファルト舗装の局部変状過程（イメージ）

3.4 まとめ

本章では，定期的な点検で全舗装資産の健全性の把握と補修対象箇所を選定するため，都市間高速道路のポーラスアスファルト舗装に対して，補修目標値では評価ができていない変状を確認し，開発方針を策定にした．

1) 都市間高速道路を管理する事務所に対して，補修理由の実態調査を実施したところ，ポーラスアスファルト舗装に発生する変状のうち，既存の補修目標値で評価できていない主な変状は，ポットホールおよびポンピングであった．そのため，本研究ではこれら変状を対象に評価法の開発を実施した．
2) 既往の文献調査の結果，都市間高速道路におけるポーラスアスファルト舗装に発生するポットホールおよびポンピングの主な発生要因は，「基層の剥離」および「路盤の脆弱化」であった．
3) 開発技術の利用法として，定期的に路面性状測定車で測定し評価した路面の健全度を用いて，舗装補修工事の発注や中長期計画の立案するため，評価法の開発は以下のとおりとした．
   - 研究対象とする変状の特徴は，「基層の剥離および路盤の脆弱化に起因したポーラスアスファルト舗装の局部的な変状（以下「局部変状（Po)」という)」とし，路面形状の高さおよび範囲の変化量をとらえることにより，変状過程を評価する．
   - 使用する測定機器は，業務に定着しており，研究に必要なデータの入手が容易な路面性状測定車のデータを用いて評価法の開発を実施する．また，今後は三次元で測定する機器が普及していくことから，これらの機器に対する適用性も検証する．
   - 研究対象とする変状の段階は，舗装補修工事の発注や中長期計画の立案するため，「潜伏期」,「進展期」,「終極期」のうち，研究対象とする変状の段階は,「潜伏期」および「進展期」とする．

参考文献

1）東日本高速道株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領第一集　平成 27 年 7 月版, 2015

2）公益社団法人日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック 2013, 2013

3）財団法人道路保全技術センター：アスファルト舗装保全技術ハンドブック, 2010

4）茨城県道路維持課：道路舗装はどのように劣化するのか，<http://www.pref.ibaraki.jp/soshiki/doboku/doiji/documents/asphalt1.pdf>（Accessed 2019.5）

5）高橋茂樹：高速道路におけるポーラスアスファルトの導入効果の検証と基層の脆弱化に関する研究，学位論文, 2013.4

第４章 局部変状に着目した三次元点群データの作成法と評価法の開発

本章 [1] では，汎用性の高い二次元点群データによる測定技術でポーラスアスファルト舗装の局部的な変状の評価を可能にするため，二次元点群データ（横断プロファイル）を活用して三次元点群データ化する手法と，ポーラスアスファルト舗装の特徴的な変状形態を三次元点群データの形状から評価する手法を開発する．また，実際に供用中の都市間高速道路において本手法を適用して実用的な閾値の検討と変状の検出精度を検証した．なお，検討は，表-4.1 の機器性能を持つ路面性状測定車を用いて測定した上信越自動車道 9.8km 区間のデータで実施した．当該区間は，詳細な開削調査（写真-3.4）を実施しており，表-3.8 に示す分類では，概ね「〇路盤の脆弱化（施工目地からの雨水の浸入）」に該当する区間であると考えられる．

表-4.1　利用した路面性状測定車の計測方法および機器性能一覧

測定項目	計測方法	測定装置	測定間隔	計測速度
ひび割れ	ラインセンサカメラ	カラーライン センサカメラ	１画素： 1mm×1mm	１～100km
わだち掘れ	光切断方式	マルチスキャン ３Ｄカメラ	横断 2mm ×縦断 6mm	

4.1 補正三次元点群データの作成法

わだち掘れに用いる横断プロファイル（図-4.1）の特性は，横断方向に対する各点の路面高さを相対的に比較することはできるが，縦断方向に対する各点の路面高さを相対的に比較することはできない．そのため，横断プロファイルで，変状の特徴を把握し，その特徴に対して縦断方向の連続性を確認する必要がある．

本節では，横断プロファイルを用いて変状を「縦断＋横断＋高さ」の三次元点群データとして評価するため，横断プロファイルから局部変状を取得できるようにフィルタリングした上で，縦断方向の連続性を確保した三次元点群データの作成法を開発する．

4.1.1 横断プロファイルのフィルタリング

路面性状測定車から取得した横断プロファイルには，様々な路面の変状と横断勾配の情報が含まれている．そのため，横断プロファイルから，横断勾配と局部変状以外の変状情報をフィルタリングする方法を提案する．

4.1.1.1 横断勾配の排除

路面の局部的な変状を水平面に対する高さの変化量から抽出する場合には，横断勾配の影響を除去する必要がある．横断勾配による影響のイメージを図-4.1 に示す．横断プロファイルの高さの変化量から変状を評価する場合，「Y 軸に対する平均横断プロファイル高さより低い（高い）箇所」＝「損傷や劣化が発生している箇所」となる．しかしながら，路面に横断勾配があると，勾配の上流側（図-4.1「変状箇所」部分）の損傷や劣化を見落と

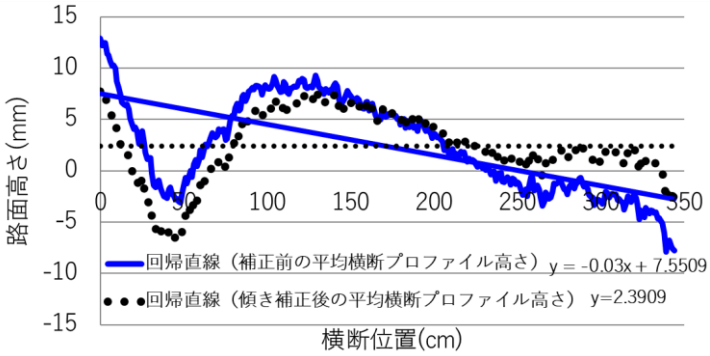


図-4.2　横断プロファイルの補正イメージ

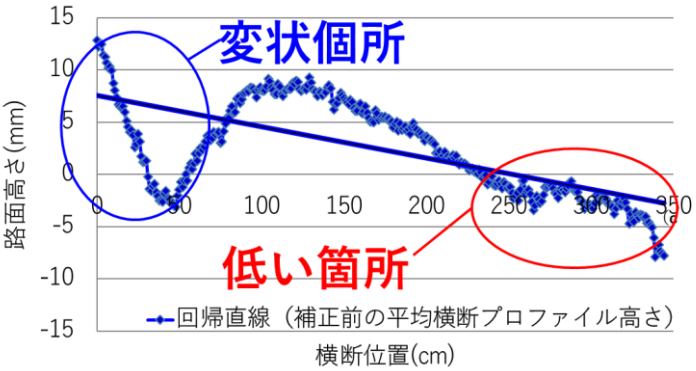


図-4.1　勾配のある横断プロファイルのイメージ

す可能性がある．また，横断勾配が下流側（図-4.1「低い箇所」部分）の変状がある部分を過大評価する可能性がある．そのため，横断勾配の影響を排除し，路面に発生している変状のみを残した横断プロファイルを作成する必要がある．ここでは，路面性状測定車のわだち掘れ計測で取得する横断プロファイルから，横断勾配を除去する手法を記載する．

図-4.2 は横断プロファイルに対する横断勾配の補正イメージである．測定した横断プロファイルに対し，供用直後の平坦な路面を各横断プロファイルの回帰直線と仮定する．その場合，回帰直線の傾きは横断勾配となるため，回帰直線の傾きが 0 になるように各横断プロファイルの高さを補正する（図-4.2 回帰直線（傾き補正後））．このような補正作業を実施することにより，「供用直後の平坦な路面（回帰直線）に対する路面の変形のみを含んだ横断プロファイル」≒「変状に関する路面高さの変化量のみを含んだ横断プロファイル」を作成できる．

なお，本研究では横断プロファイルの補正を各車線の幅員毎に行った．図-4.1 のように端部に変状が生じている場合，変状を起こしていない部分を 0 として回帰直線を作成することも考えられるが，本評価手法では横断プロファイルを縦断方向に連続させ，三次元点群データ化してデータを集計（詳細は **4.2.**参照）するため，各横断プロファイルで 0 点を個別に設定すると縦断方向の連続性が確保できなくなる．また，今回データ分析に利用した高速道路の横断プロファイルでは，回帰直線に対して車線端部で±10 mm 以上の変状が長区間連続することはほとんどない．これは，都市間高速道路では，わだち掘れの補修目標値を 25 mm に設定し，補修を行うためである．

以上より，取得した横断プロファイル全体に対して近似曲線を設定し，その傾きが水平になるように補正を行った．以下，補正した横断プロファイルを「補正横断形状」という．

4.1.1.2 変状の選択

4.1.1.1 では，路面性状測定車で測定した横断プロファイルから，横断勾配を除去する方法を発案した．しかしながら，補正横断形状には複数の変状（わだち掘れおよび局部変状（Po））が含まれているため，個別の変状に関する高さ情報のみを含む横断プロファイルを作成できれば，各変状を個別に評価することが可能となる．そのため，各変状に対する波長特性を確認した．

(1) 波長特性の確認方法

波長傾向の確認は，特定の変状のみを含む横断プロファイルを選定した上でフーリエ変換を行い，パワースペクトル密度（以下「PSD」という）を求めた後，波長成分の比率（以下「PSD 比」という）を集計した．

$$\text{PSD 比} = \frac{\text{特定の変状のみを含む横断プロファイルの PSD}}{\text{変状がない路面の横断プロファイルの PSD（以下「標準プロファイル」という）}}$$

表-4.2　局部変状（Po）の PSD 比のイメージ例

波長 (m/Cycle)	PSD 比		
	1.2	1.8	1.7
6.4m	1.4	1.9	1.5
3.2m	1.5	1.7	1.3
1.6m	1.4	1.8	1.4
0.8m	1.2	1.2	1.3
0.4m	1.3	1.3	1.1
0.2m	1.1	1.4	1.2
0.1m	1.2	1.1	1.3

対象とする変状については，路面の高さ変化を伴う代表的な変状にわだち掘れがある．そのため，3 章で検討対象とした局部変状（Po）とわだち掘れを対象に波長特性を確認した．

波長特性の確認に用いた横断プロファイルは，光切断法による三次元形状測定で測定した横断方向 2mm ピッチ(深さ 1mm 以上)，縦断方向 5mm ピッチのデータを縦断方向 5cm，横断方向 1cm に間引いて使用した．道路のくぼみまたはうねりは波長 50mm から 500mm の範囲で変化するといわれており [2)]，この波長範囲を評価することができ，集計しやすいプロファイルピッチであるためである．

PSD 比を算出するために必要な「標準プロファイル」は，実際の高速道路の路面で測定した極力 PSD が小さい横断プロファイル(≒変状が存在しない平たんな横断プロファイル)を選定した．具体的な選定方法は，変状が発生していない区間で高さ変化の少ない横断プロファイルを抽出（図-4.3 が算出イメージ，図-4.3 のケースでは赤線のプロファイルの高さ変化が少ない）した上で PSD を確認し，PSD の小さな横断プロファイルを選定した．今回使用した「標準プロファイル」の PSD を図-4.4 および表-4.3 に示す．

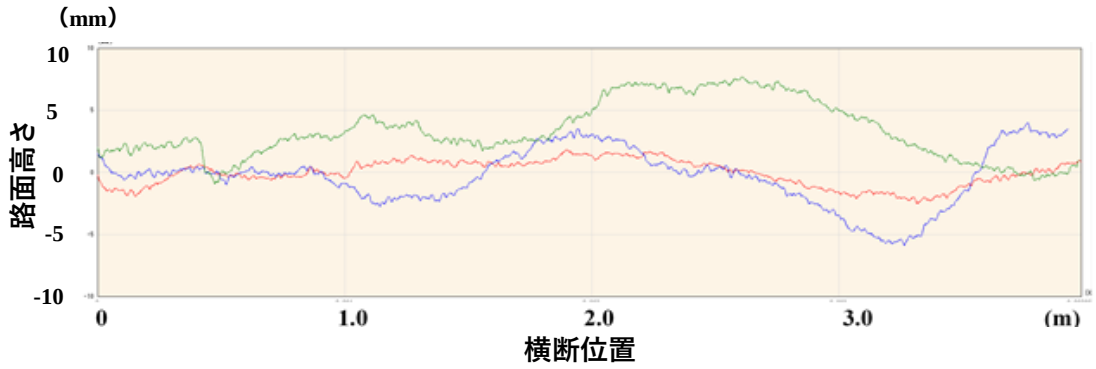


図-4.3　変状が発生していない区間の横断プロファイル

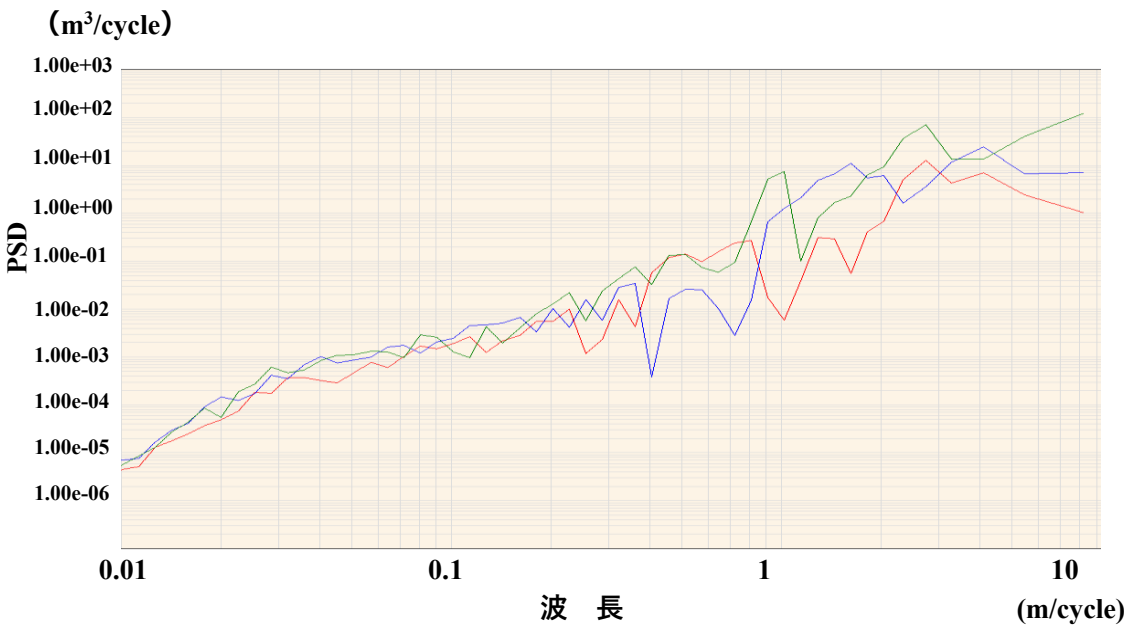


図-4.4　変状が発生していない区間の PSD 図

表-4.3　変状が発生していない区間の PSD 図（集計）

波長 (m/cycle)	波長 (m/cycle)	PSD(m^3/cycle)						
		平均値	最大値	最小値	標準偏差	赤線	青線	緑線
5.461	5.4	0.074	40.661	2.442	20.939	2.442	6.726	40.661
3.277	3.2	0.044	13.435	4.234	4.873	4.234	11.615	13.435
1.287	1.2	0.009	4.948	0.314	2.544	0.314	4.948	0.814
0.644	0.64	0.000	0.157	0.010	0.075	0.157	0.010	0.059
0.322	0.32	0.000	0.043	0.016	0.014	0.016	0.029	0.043
0.161	0.16	0.000	0.007	0.003	0.002	0.003	0.007	0.004
0.080	0.08	0.000	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001	0.003
0.040	0.04	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001
0.020	0.02	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

(2)わだち掘れおよび局部変状（Po）の波長特性の把握

わだち掘れと局部変状（Po）の PSD を比較した．比較は，横断プロファイルの両端部を概ね 0mm にしたときの最大プロファイル深さ（以下「最大プロファイル深さ」という）が「0～10mm 程度」「10～20mm 程度」「20～30mm 程度」の 3 区分に対して PSD を算出し，PSD と PSD 比を用いて比較した．グラフは，各波長に対する PSD の平均値を図化した．

1）わだち掘れ

算出したわだち掘れの PSD を比較した結果は下記のとおりである．グラフは，各わだち掘れの平均 PSD と波長の関係を図化している．

PSD の平均値を比較したところ，最大プロファイル深さに比例して，波長 0.3m から 3.2m の PSD が大きく変化している．特に最大プロファイル深さが「0－10mm」と「10－20mm」を比較すると，波長 1.2m の PSD（平均値）が 0.128 から 3.800 と約 30 倍に，「10－20mm」と「20－30mm」を比較すると波長 3.2m の PSD（平均値）が 8.808 から 64.028 と約 8 倍に変化している．

表-4.4 わだち掘れ区間の PSD（集計）

波長 (m/cycle)	わだち-全体				わだち-0－10㎜(N=5)			
	平均値	最大値	最小値	標準偏差	平均値	最大値	最小値	標準偏差
5.4	222.733	736.153	34.799	153.347	124.419	199.294	61.786	58.312
3.2	29.947	147.314	0.186	42.468	4.063	10.099	0.186	4.230
1.2	6.280	14.824	0.019	5.158	0.128	0.245	0.019	0.105
0.64	0.625	4.502	0.013	0.978	0.090	0.163	0.029	0.051
0.32	0.154	0.566	0.006	0.140	0.051	0.152	0.006	0.059
0.16	0.017	0.036	0.002	0.009	0.014	0.033	0.004	0.012
0.08	0.012	0.034	0.001	0.007	0.005	0.011	0.001	0.004
0.04	0.005	0.013	0.001	0.003	0.003	0.005	0.001	0.002
0.02	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
波長 (m/cycle)	わだち-10－20㎜(N=10)				わだち-20－30㎜(N=10)			
	平均値	最大値	最小値	標準偏差	平均値	最大値	最小値	標準偏差
5.4	202.884	736.153	34.799	202.496	291.738	421.239	130.591	95.360
3.2	8.808	23.809	1.193	7.903	64.028	147.314	7.118	50.792
1.2	3.800	5.893	1.095	1.398	11.835	14.824	6.891	2.616
0.64	0.397	1.255	0.013	0.433	1.121	4.502	0.222	1.368
0.32	0.089	0.188	0.017	0.061	0.271	0.566	0.051	0.144
0.16	0.014	0.028	0.002	0.007	0.021	0.036	0.006	0.009
0.08	0.013	0.034	0.005	0.009	0.014	0.021	0.007	0.005
0.04	0.005	0.012	0.002	0.003	0.006	0.013	0.003	0.003
0.02	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000

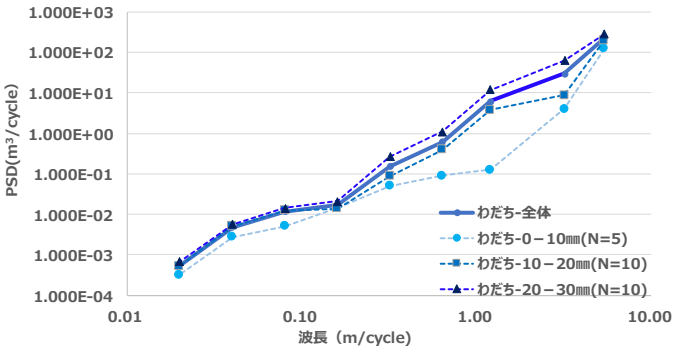


図-4.5 わだち掘れ区間の平均 PSD

表-4.5 わだち掘れ区間の PSD 比（集計）

波長 (m/cycle)	わだち-全体	わだち-0－10㎜ (N=5)	わだち-10－20㎜ (N=10)	わだち-20－30㎜ (N=10)
5.4	9.057	6.978	8.369	10.783
3.2	2.129	0.850	1.322	3.575
1.2	3.925	0.584	3.416	6.106
0.64	1.635	0.730	1.367	2.355
0.32	2.811	1.581	2.235	4.003
0.16	2.351	2.105	2.145	2.679
0.08	2.509	1.647	2.599	2.849
0.04	3.776	2.848	3.873	4.144
0.02	3.311	2.565	3.271	3.724

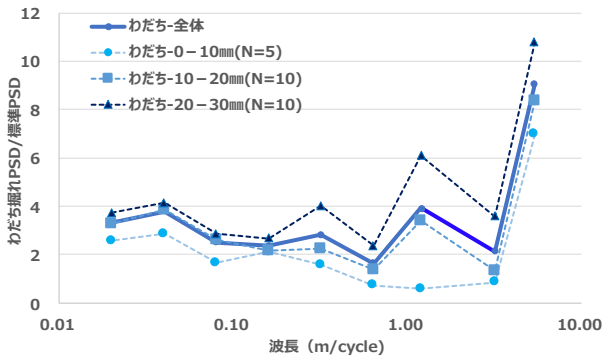


図-4.6 わだち掘れ区間の平均 PSD 比

2）局部変状（Po）

算出した局部変状（Po）の PSD を比較した結果は下記のとおりである．グラフは，各局部変状（Po）の平均 PSD と波長の関係を図化した．

PSD の平均値を比較したところ，最大プロファイル深さに比例して，波長 0.3m から 5.4m の PSD が変化している．特に最大プロファイル深さが「0－10mm」と「10―20mm」を比較すると波長 1.2m の PSD（平均値）が 1.136 から 7.934 と約 8 倍に，最大プロファイル深さが「10－20mm」と「20―30mm」を比較すると波長 3.2m の PSD（平均値）が 44.392 から 118.043 と約 3 倍と全体的に大きくなっている．

なお，波長が 0.08m より小さくなるにつれて PSD が大きくなっているが，最大プロファイル深さが変化しても，PSD 地の変動が少ないことから，路面特性か機器／測定特性の影響と考えられる．

（例えば，表-4.6 の波長 0.08m の平均 PSD は，最小値 0.015，最大値 0.019，波長 0.04 の平均 PSD は，最小値 0.045，最大値 0.067，波長 0.02 の平均 PSD は，最小値 0.169，最大値 0.256 と最大プロファイル深さの大小によらず同じような値である）

表-4.6 局部変状区間の PSD（集計）

○変状 PSD(m^3/cycle)

波長 (m/cycle)	変状-全体				変状-0－10㎜(N=6)			
	平均値	最大値	最小値	標準偏差	平均値	最大値	最小値	標準偏差
5.4	265.712	1048.936	7.400	274.704	58.890	107.659	23.631	32.606
3.2	88.795	471.229	9.249	106.246	16.667	30.959	9.387	8.039
1.2	14.527	101.289	0.089	21.013	1.136	3.519	0.089	1.285
0.64	0.713	6.581	0.015	1.233	0.247	0.533	0.082	0.195
0.32	0.095	0.352	0.009	0.093	0.049	0.141	0.009	0.051
0.16	0.018	0.089	0.004	0.017	0.010	0.025	0.004	0.008
0.08	0.016	0.061	0.002	0.020	0.019	0.053	0.002	0.025
0.04	0.052	0.199	0.001	0.087	0.067	0.198	0.001	0.101
0.02	0.198	0.785	0.000	0.341	0.256	0.768	0.000	0.396
波長 (m/cycle)	変状-10－20㎜(N=17)				変状-20－30㎜(N=9)			
	平均値	最大値	最小値	標準偏差	平均値	最大値	最小値	標準偏差
5.4	154.558	405.148	7.400	108.193	213.467	301.612	126.142	74.794
3.2	44.392	121.649	9.249	30.659	118.043	211.271	13.208	66.975
1.2	7.934	43.655	0.112	12.369	15.520	39.323	1.166	15.571
0.64	0.266	0.998	0.015	0.281	0.479	0.993	0.072	0.328
0.32	0.064	0.183	0.011	0.050	0.113	0.316	0.012	0.112
0.16	0.016	0.049	0.004	0.015	0.018	0.044	0.005	0.014
0.08	0.015	0.050	0.002	0.019	0.016	0.061	0.002	0.024
0.04	0.047	0.198	0.001	0.085	0.045	0.199	0.001	0.087
0.02	0.182	0.774	0.000	0.337	0.169	0.764	0.000	0.335

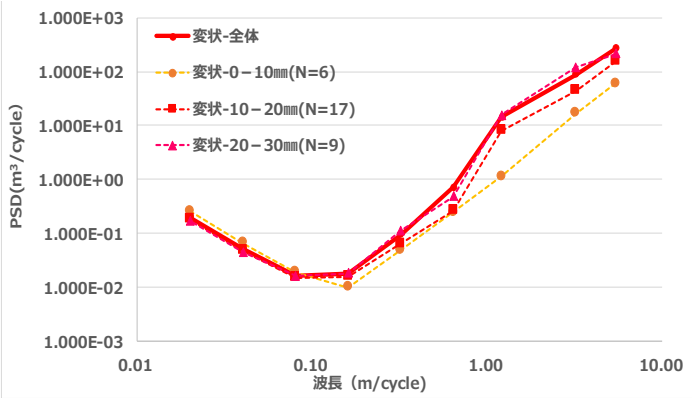


図-4.7 局部変状区間の平均 PSD

表-4.7 局部変状区間の PSD 比（集計）

波長 (m/cycle)	変状 -全体	変状- 0－10㎜ (N=6)	変状- 10-20㎜ (N=17)	変状- 20-30㎜ (N=9)
5.4	9.294	4.749	7.476	9.219
3.2	3.985	1.940	3.067	5.009
1.2	5.268	1.669	3.829	6.129
0.64	1.705	1.174	1.137	1.633
0.32	2.196	1.580	1.874	2.379
0.16	2.315	1.774	2.189	2.373
0.08	2.587	2.668	2.506	2.501
0.04	7.788	9.536	7.266	6.906
0.02	33.518	42.879	30.948	28.958

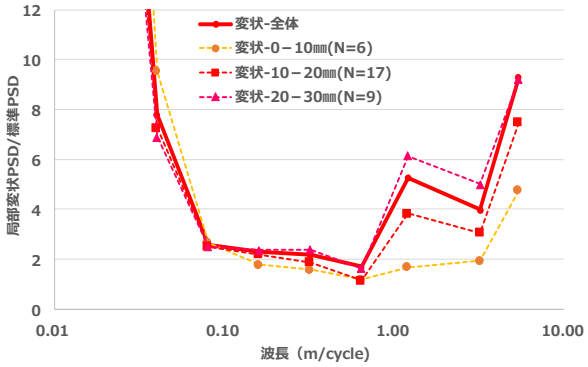


図-4.8 局部変状区間の平均 PSD 比

(3) わだち掘れと局部変状（Po）の比較

算出した PSD および PSD 比の平均値を比較した結果は下記のとおりである．

図-4.9 は，各変状の平均 PSD と波長の関係を図化している．各最大プロファイル深さに対する PSD の傾向として，波長 0.64m から 5.4m 間で PSD が大きく変化する傾向がある．PSD の変化割合が一番大きいのは波長 1.2m（わだちの PSD：約 100 倍（0.128 から 11.835）,局部変状（Po）の PSD：約 15 倍（1.136 から 15.520））で，次いで波長 3.2m（わだちの PSD：約 15 倍（4.063 から 64.028）,局部変状(Po)の PSD：約 8 倍(16.667 から 118.043))となっている．特に波長 1.2m の PSD は，最大プロファイル深さが「0－10mm」から「10—20mm」の間で PSD が大きく変化（わだちの PSD：約 30 倍（0.128 から 3.800）,局部変状（Po）の PSD：約 7 倍（1.136 から 7.934））している．また，この傾向は，わだち掘れおよび局部変状（Po）の両方にみられることから，両変状ともに変状が進行すると，この波長帯を中心に，PSD が大きくなると考えらえる．

図-4.10 は，各変状の平均 PSD 比と波長の関係を図化している．各最大プロファイル深さに対する PSD 比の傾向は PSD の傾向と同様，波長

表-4.8 わだち掘れおよび局部変状区間の PSD（集計）

○平均PSD(m³/cycle)

波長 (m/cycle)	全体		0－10㎜		10－20㎜		20－30㎜	
	わだち	局部変状	わだち	局部変状	わだち	局部変状	わだち	局部変状
5.4	222.733	265.712	124.419	58.890	202.884	154.558	291.738	213.467
3.2	29.947	88.795	4.063	16.667	8.808	44.392	64.028	118.043
1.2	6.280	14.527	0.128	1.136	3.800	7.934	11.835	15.520
0.64	0.625	0.713	0.090	0.247	0.397	0.266	1.121	0.479
0.32	0.154	0.095	0.051	0.049	0.089	0.064	0.271	0.113
0.16	0.017	0.018	0.014	0.010	0.014	0.016	0.021	0.018
0.08	0.012	0.016	0.005	0.019	0.013	0.015	0.014	0.016

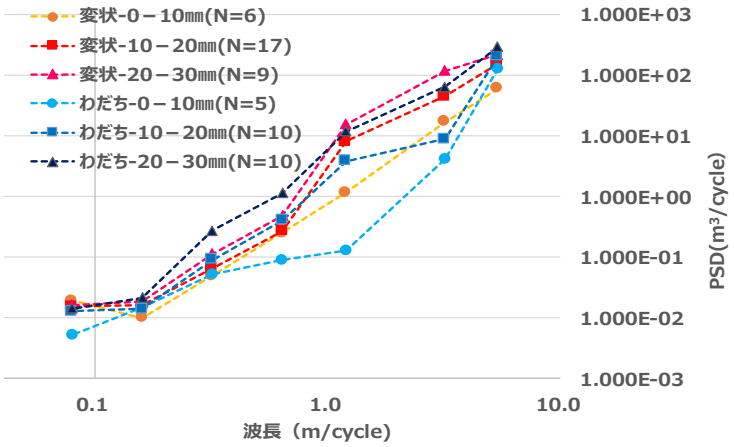


図-4.9 わだち掘れおよび局部変状区間の平均 PSD

表-4.9 わだち掘れおよび局部変状区間の PSD 比（集計）

○PSD比(わだちPSD/標準PSD)

波長 (m/cycle)	全体		0－10㎜		10－20㎜		20－30㎜	
	わだち	局部変状	わだち	局部変状	わだち	局部変状	わだち	局部変状
5.4	9.057	9.294	6.978	4.749	8.369	7.476	10.783	9.219
3.2	2.129	3.985	0.850	1.940	1.322	3.067	3.575	5.009
1.2	3.925	5.268	0.584	1.669	3.416	3.829	6.106	6.129
0.64	1.635	1.705	0.730	1.174	1.367	1.137	2.355	1.633
0.32	2.811	2.196	1.581	1.580	2.235	1.874	4.003	2.379
0.16	2.351	2.315	2.105	1.774	2.145	2.189	2.679	2.373
0.08	2.509	2.587	1.647	2.668	2.599	2.506	2.849	2.501

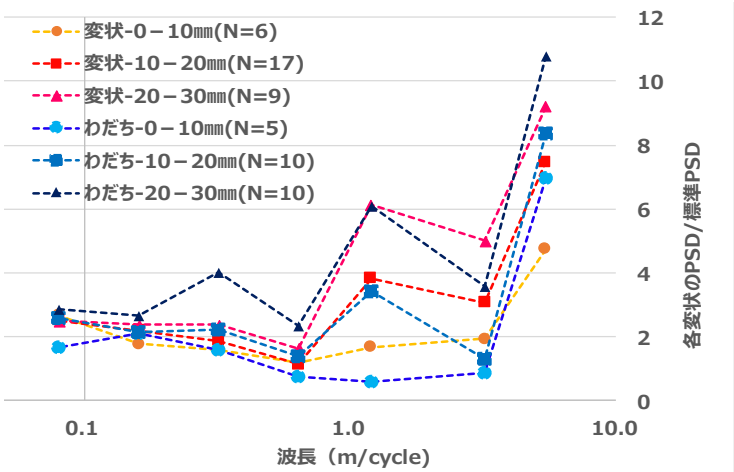


図-4.10 わだち掘れおよび局部変状区間の平均 PSD 比

0.64m から PSD 比の差が大きくなり，波長 1.2m および 3.2m では PSD 比が 2～10 倍程度の差が発生している．この傾向は，わだち掘れおよび局部変状（Po）の両方にみられることから，両変状ともに変状が進行すると，この波長帯を中心に，標準プロファイルに対する PSD が大きくなると考えらえる．
また，波長 5.4m で PSD 比が 4～11 倍となっている．標準プロファイルに近い「わだち 0－10mm（N=5）」の PSD 比を見ると，波長 0.8～3.2m まで概ね 1～2 倍程度で推移しているのに対し，波長 5.4m で 7 倍程度まで大きくなっている．このため，標準プロファイルが平たんすぎた（波長 3.2m の PSD4.234，波長 5.4m の PSD2.442（表-4.3 より））か，波長 5.4m の PSD は最大プロファイル深さ 0－10mm の段階で大きく変化する可能性がある．この部分については，別途検証が必要である．

(4) 変状選択の可否

わだち掘れと局部変状(Po)の波長特性を把握するため, わだち掘れまたは局部変状(Po)のみを含む横断プロファイルを選定した上でフーリエ変換を行い, PSD と PSD 比を算出した．その結果，以下の知見が得られた．

・わだち掘れおよび局部変状（Po）ともに，変状が進行すると，波長 0.64m から 5.4m 間で PSD が変化する傾向がある. 特に 1.2m 前後の波長に対する PSD の変化が大きい.

・この傾向は，わだち掘れおよび局部変状（Po）の両方にみられる．

以上の結果からわだちと局部変状（Po）では波長傾向が類似しているため区分は困難であることが明確になった. そのため, 次節以降の開発で用いる横断プロファイルのフィルタリング処理は，簡便に実施できる 4.1.1.1 の補正方法を用いることとする．

4.1.2 横断プロファイルの三次元点群データ化

わだち掘れ測定に使用する横断プロファイルの特徴は，横断方向の各点の高さを相対比較できるが，縦断方向に対しては相対比較が行えないという課題がある．そのため，横断プロファイルに対し，縦断方向の連続性を確保し，三次元点群データ化するための補正方法を検討した．

今回作成したい三次元点群データは，変状評価に必要な情報が含まれる路面高さデータであり，真のプロファイルに含まれている縦断勾配に関する情報は不要である．そのため，縦断勾配の影響は微小であると仮定し，補正横断形状同士を縦断方向に連続配置することにより，三次元点群データ化が可能であると考えた．

図-4.11 は横断プロファイルの補正イメージである．図-4.2 で補正した横断プロファイルに対し，縦断方向の高さを合わせるため，回帰直線の高さ（切片）を 0mm にする．この作業をすべての横断プロファイルに実施することにより，高さ 0mm の回帰直線（補正後）を持つ横断プロファイルが，縦断方向に連続して分布することになる（図-4.12）．

以上のように，横断プロファイルの路面勾配を 0%，回帰直線の高さ（切片）を 0mm に補正することにより，変状に関する路面高さの変化量のみを含んだ三次元点群データが完成する．

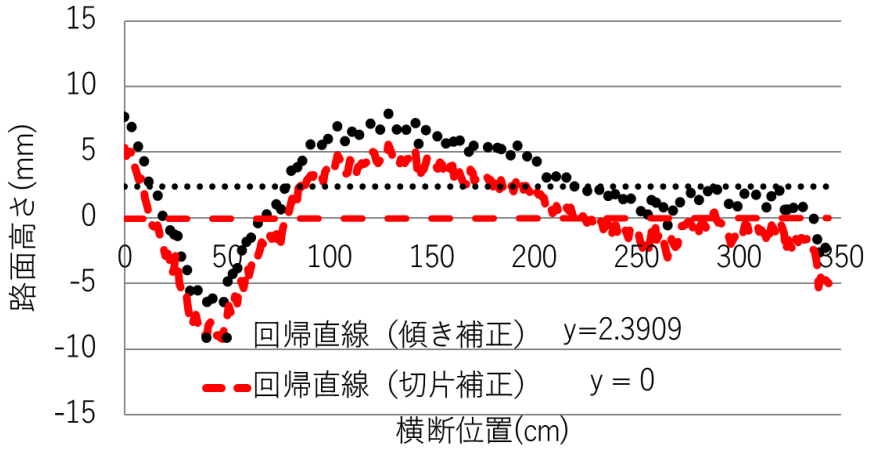


図-4.11　各横断プロファイルに対する縦断勾配の補正イメージ

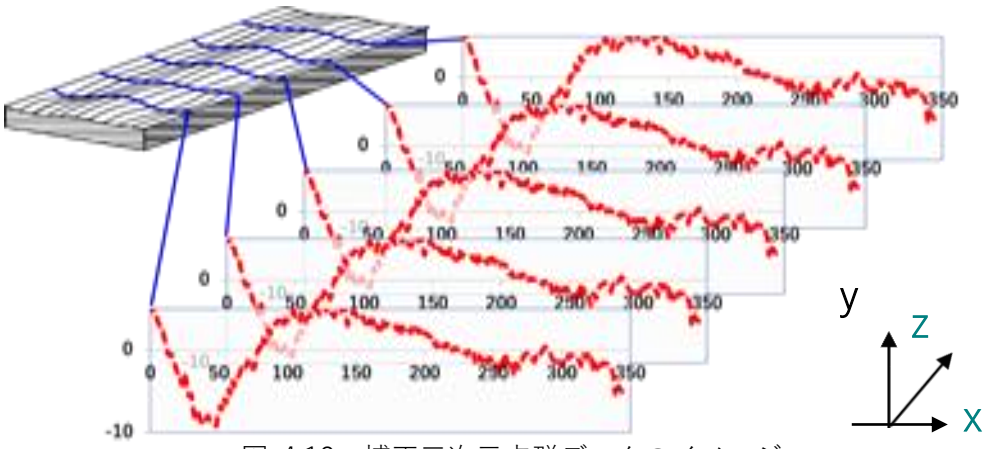


図-4.12　補正三次元点群データのイメージ

この研究では，この連続した横断プロファイル高さの集合体を補正三次元点群データと呼び，以下のように定義される．

任意のプロファイル高さをC_{ij} ，横断位置をi 縦断位置を jとする．

任意の横断プロファイル高さ C_i に対する回帰直線 L_i は以下の通り．

$$L_i = ax_i + b \tag{1}$$

任意の横断プロファイル高さ C_i と回帰直線 L_i との残差 e_i は次のように表現できる．

$$e_i = C_i - L_i \ (i: 1,2,\dots,I) \tag{2}$$

ここで，

$$a = \textit{相関係数}(x_i, y_i) \times \left\{\left(\textit{標準偏差}(y_i)\right) / \left(\textit{標準偏差}(x_i)\right)\right\}$$
$$= \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$
$$b = \bar{x} - a \cdot \bar{y}$$

この残差 e_i は，任意の横断プロファイル高さC_i から回帰直線 L_i の影響を除去した横断プロファイル高さC'_iであるといえる．また，縦断位置がj の横断方向高さを e_{ij} と表現できるため，勾配除去した任意のプロファイル高さ（以下「補正三次元点群データの高さ」という） C'_{ij} は次のように定義できる．：

$$C'_i \coloneqq e_i \ (i: 1,2,\dots,\mathrm{I}) \tag{3}$$

$$C'_{ij} \coloneqq e_{ij} \ (i: 1,2,\dots,\mathrm{I}), \ (j: 1,2,\dots,\mathrm{J}) \tag{4}$$

4.2 変状評価法の開発

路面には様々な起伏が，測定データにも様々なノイズが混在しており，目的とする変状を抽出するために，適切な評価法を開発する必要がある．

本節では，補正三次元点群データより目的とする変状を抽出するため，補正三次元点群データの集計方法を開発した上で，実データにより局部変状（Po）の検出した．

4.2.1 変状評価法の発案

(1) 補正三次元点群データを用いた評価法

補正三次元点群データを用いた評価法の考察はデータの集計形状，縦断方向の大きさによる影響，横断方向の大きさによる影響について実施した．以下に各項目の具体的な考察結果を示す．

1) データの集計法

データの集計方法として以下 2 つが考えられる．

a. 測定値をそのままを使用する方法（＝点データとして評価）

・高さデータであれば，単純に路面の高低 ≒ 路面の形状 を見ることが出来る．ただし，評価対象外の変状や測定機器特有の特性（以下「ノイズ」という）の影響を受けやすく，検知したいものが分かりにくく表現される可能性がある．

b. 一定の範囲の測定値を統計値に置き換えて使用する方法

・集計することで，評価したい変状の特徴を明確にできる．また，測定値をそのまま使用する場合の欠点であるノイズの低減や縦断方向の位置ずれの軽減が可能となる．

・代表的な集計方法として，最大最小差⊿，平均値μ，標準偏差値σがあるが，下記の理由から平均値μと標準偏差値σで検証する．

最大最小差⊿・・・測定値のノイズ（データのムラ）の影響を強く受け，測定値をそのまま使用することと変わりないため集計する意味を成さない．

平均値μ　・・・測定値の分布を平準化された高さ分布に置き換えることにより，特定の変状を抽出する際に測定値のノイズの影響を受けづらくなる．半面，平準化することにより，特定の変状を抽出した際に特徴の差が出づらくなる，

標準偏差値σ　・・・高さのばらつきなので，変化量の大きい変状を抽出しやすい．半面，ノイズが多い測定値の場合，ノイズの影響を受けやすい．

2) データの集計範囲

図-4.13 に示すように，円形の範囲で集計すると着目する点データから等距離にある範囲のデータを集計出来る．ただし，演算が複雑になる．また，測定値の点群が四角形であることを考慮して，四角形で集計範囲を設定する．

① データの集計範囲(横断方向)

a. 平均値μの集計範囲

平均値μは移動平均値を算出する。高さデータの移動平均は，高周波フィルタを施しノイズ除去することと同様の演算処理である．基本的には自由に平均する範囲の大きさを決めることができ，その大きさがフィルタの閾値に該当する．平均する範囲が大きいと，高いところと低いところが均されて区別できなくなるため，変状等の検知も困難に

図-4.13 測定値の集計方法

＜横断方向 2mm 間隔データ＞

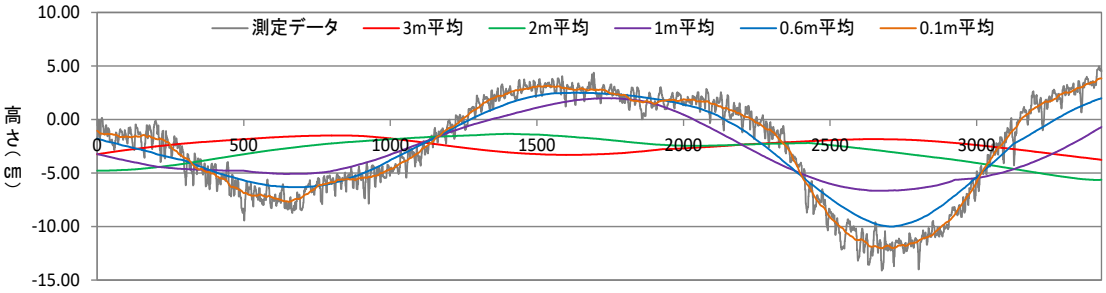


図-4.14 横断方向に集計範囲を変えた場合の特性

なる．局部変状(Po)は，わだち部に発生する．そのため，横断方向の目安としてわだち部と非わだち部（外側帯，OWP，IWP，BWP，内側帯）が残るように範囲の上限を定めることでこの問題を回避可能と考えられる．逆に平均する範囲が小さいと，集計することのメリットであるノイズの軽減が出来なくなるため，集計効果が薄れることも考慮する必要がある．

評価長を変化させた（0.1m，0.6m，1.0m，2.0m，3.0m）横断形状イメージを図-4.14に示す．長い範囲の移動平均値ではフィルタ効果が強くなり，0.6mを境にわだちの影響が低減されている．これに対して，短い範囲の移動平均値では，0.6mを境にフィルタ効果が低減し，ノイズが大きく表れている．

4.1.1.2 の結果より，局部変状（Po）は変状の進行に伴い，波長 0.64m から 5.4m 間で PSD が変化する傾向があるため，この波長帯の路面特徴を検出できる範囲の移動平均値にする必要がある．また，集計範囲が短すぎるとノイズの影響を受けるため，評価長0.6m付近で集計することが望ましい．

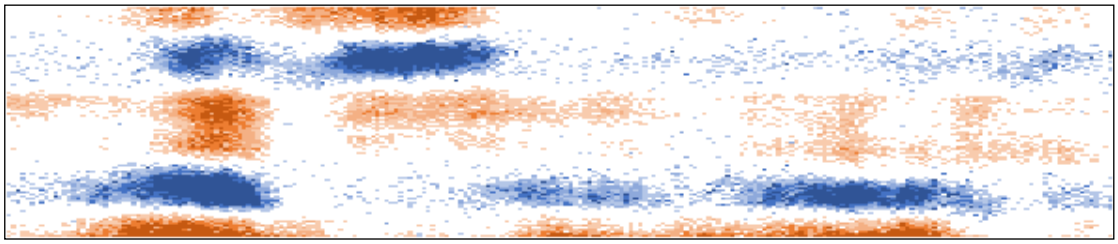
以上および集計のしやすさを考慮し 0.5m を横断方向の移動平均値算出範囲長とした．

b. 標準偏差値 σ の集計範囲

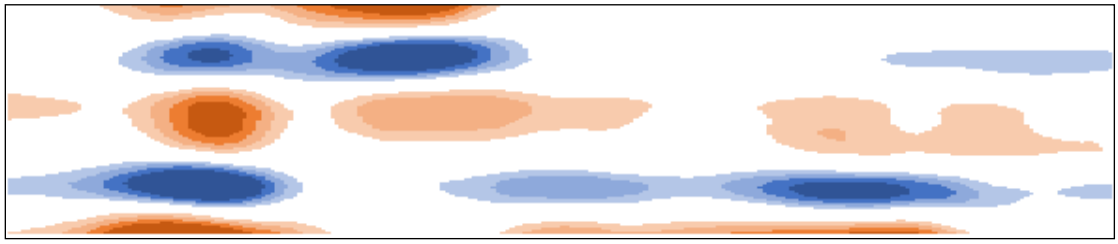
標準偏差値 σ は移動標準偏差値を算出する。標準偏差値による集計は高さのバラツキを表すことから，範囲が小さい場合はサンプル数の少なさが数値の信頼性低下をもたらす可能性が高い．一方で横断範囲が広い場合は，わだち部と非わだち部の影響ですら均されて区別できなくなるため，変状等の検知も困難になる．また，4.1.1.2 の結果より，局部変状（Po）は変状の進行に伴い，波長 0.64m から 5.4m 間で PSD が変化する傾向があるため，この波長帯の路面特徴を検出できる移動標準偏差値にする必要がある．

以上および集計のしやすさを考慮し，平均値 μ と同じ 0.5m を横断方向の移動標準偏差値算出範囲長とした．

補正三次元点群データ（点データ）



縦断方向 1m 範囲で平均値を算出



縦断方向 5m 範囲で平均値を算出

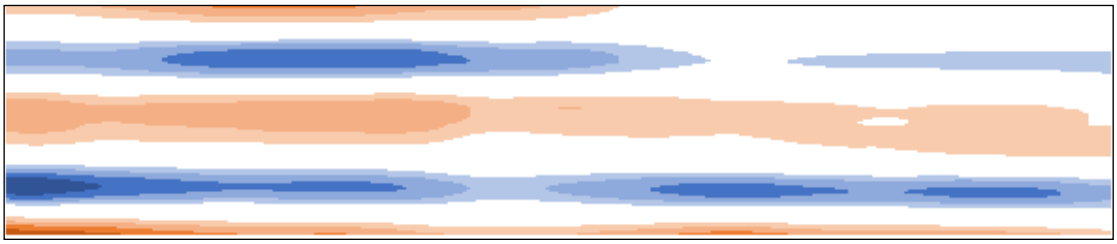


図-4.15 縦断方向の範囲長さ（平均値）の比較

② データ集計範囲（縦断方向）

縦断方向の集計方法は横断方向の集計方法と同様とし，ここでは集計範囲に関して検討した．縦断方向の集計範囲は，大きくすればするほど検出感度は鈍くなり，測定値の特性を表現できなくなる．一方で検出対象よりも小さい範囲にすると，検出対象の中に集計範囲が全て含まれ，移動平均値や移動標準偏差値を算出してもその検知したい変状が浮き出てこない恐れがある．そのため，移動平均値に対して，縦断方向の集計範囲を変えて比較した（図-4.15）．集計処理は移動平均値を算出しているため，変化が分かりやすいように数値を色情報に変換した．色情報への変換は，青部分が低い箇所，橙色部分が高い箇所，濃淡で数値の大小を示した．

図-4.15 より，縦断方向の延長が短いとノイズを検出しやすくなり，長いと感度が低下していることが分かる．本研究で開発する変状評価法は潜伏期から計測したいことから，横断方向と同じ 0.5m を縦断方向の算出範囲長とした．

(2) 局部変状（Po）箇所の抽出に関する検証

移動平均値および移動標準偏差値による集計法について，上信越自動車道で測定した横断プロファイルを用いて，局部変状（Po）箇所の抽出の可否を検証するため，同一区間に対して測定時期を変えて，繰り返し測定した結果を図-4.16 に示す．ポンピング発生箇所は，横断プロファイルと同時に撮影した路面画像を用いて行った（図中赤丸破線部分）．集計値は視覚的に判断できるように，数値を色情報に変換する．移動平均値は，高さが低い箇所を

上信越自動車道

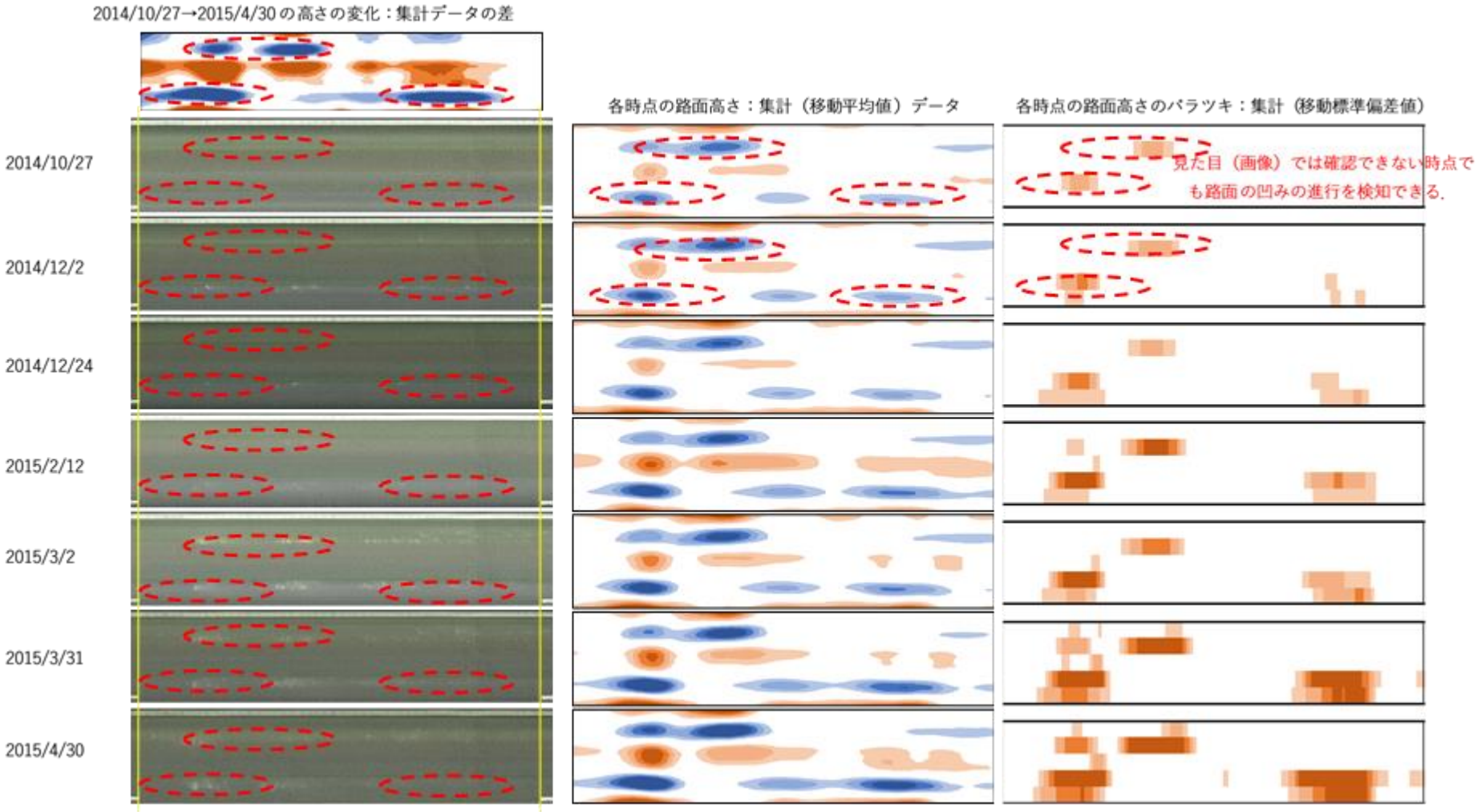


図-4.16　測定データを用いた路面形状の変化の確認（上信越道）

青色で，高い箇所を橙色とし，色が濃いほど大きな数値を表している．移動標準偏差値は，橙色部分の色が濃いほど大きな数値を表している．移動平均値および移動標準偏差値ともに着色部分（移動平均値；青色箇所，移動標準偏差値：橙色箇所）と路面画像のポンピング部分の位置が一致しており，ポンピング箇所を検出できる．繰返し測定した結果を比較すると，経時変化とともに，移動平均値および移動標準偏差値の着色範囲が拡大しており，変状の進行をとらえている可能性が高い．

移動平均値と移動標準偏差値を比較すると，移動平均値に比べ移動標準偏差値の方がポンピング箇所のみを検出している．そのため，以後の本研究では，補正三次元点群データの単位サイズに対する移動標準偏差値を算出する方法（図-4.17，以後「簡易局部変状評価法」という）を使用する。

補正三次元点群データ C'_{ij} を中心とした正方形域（横断方向 2α，縦断方向 2β）に含まれる点群データ群を S_{ij}，点群データ群 S_{ij} のデータ数を N とすると，

$$S_{ij} = C'_{kl} \quad (k:\ i-\frac{\alpha}{m} \sim i+\frac{\alpha}{m}),(l:\ j-\frac{\beta}{n} \sim j+\frac{\beta}{n})$$

$$N = \frac{2\alpha}{m} \times \frac{2\beta}{n} = \frac{4\alpha\beta}{mn} \tag{5}$$

ただし，m：*補正三次元点群データの計測間隔（横断方向）*

n：*補正三次元点群データの計測間隔（縦断方向）*

$\frac{2\alpha}{m}$ *:点群データのデータ数（横断方向）*

$\frac{2\beta}{m}$：*点群データのデータ数（縦断方向）*

ここで，点群データ群 C'_{ij} の平均値を $\overline{C'_{kl}}$ とすると，

$$\overline{C'_{kl}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_l \sum_k (C'_{kl}) \tag{6}$$

以上より補正三次元点群データ S_{ij} の移動標準偏差値 σ_{ij} は，次のように定義する。

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_l \sum_k \left(C'_{kl} - \overline{C'_{kl}}\right)^2} \quad (k:\ i-\frac{\alpha}{m} \sim i+\frac{\alpha}{m}),\ (l:\ j-\frac{\beta}{n} \sim j+\frac{\beta}{n}) \tag{7}$$

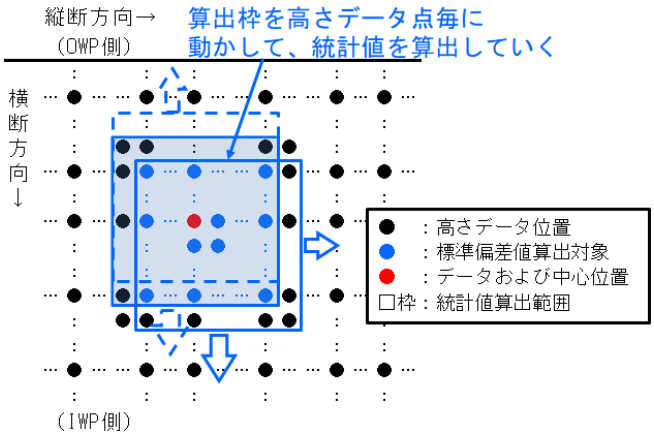


図-4.17 簡易局部変状評価法の算出方法

4.2.2 簡易局部変状評価法による閾値の設定

簡易局部変状評価法は，局部変状（Po）を検出できるだけでなく，変状の進行を把握する必要がある．そのため，閾値の設定を行った． 閾値は，「進展期」だけでなく，「潜伏期」の健全度判定を行えることが望ましい．そのため，「潜伏期」に対する検出の可否も検討した．具体的には，実際に供用している上信越自動車道で測定したわだち掘れ用の横断プロファイルを用いて，局部変状（Po）が発生した区間に対し，簡易局部変状評価法を用いて変状の経時変化から閾値を設定し，評価手法の検証を行った．

(1) 使用データ

閾値の設定は，上信越自動車道で 2015 年 7 月 30 日に測定したわだち掘れ用の横断プロファイル（約 9.8km）と同時に測定した路面画像を用いて実施した．本区間を選定した理由は，2015 年 7 月 30 日の前後 7 時点（2014 年 10 月 27 日，12 月 24 日，2015 年 3 月 2 日，4 月 30 日，7 月 10 日，7 月 30 日，10 月 27 日，2016 年 2 月 2 日）に測定を行っており，経年変化を確認することにより，変状の進行状況を確認できるためである．わだち掘れ用の横断プロファイルは，路面性状測定車で光切断法による三次元形状測定で測定した横断方向 2mm ピッチ，縦断方向 5mm ピッチのデータを縦断方向 5cm，横断方向 1cm に間引いて使用した．横断プロファイルは，補正三次元点群データに変換した上で，簡易局部変状評価法を用いて，縦横断 0.5m の算出範囲長で集計した．**第 4 章**での以降の図表は，簡易局部変状評価法による算出値を視覚的に判断できるように，数値を色情報に変換して表現する．色は橙色とし，色が濃いほど大きな数値を表す．

(2) 閾値の設定

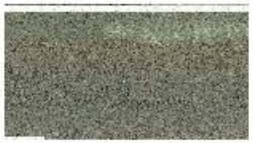
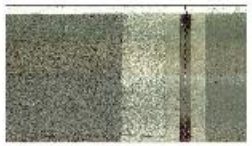
閾値の設定に使用する上信越自動車道は，施工目地から雨水が浸入し路盤が脆弱化した区間（写真-3.4）である．この場合，路面画像で確認できる初期の現象はポンピング跡であると想定（表-3.8）されることから，①ポンピング跡，②ひび割れ，③進展したひび割れの 3 段階に区分した路面画像と移動標準偏差値の関係から閾値を設定した．

Step Ⅰ．目視評価との整合性

目視確認によりポンピングが発生した箇所を区別した評価表（◎＞○＞△＞変状なし，ひび割れ，ポットホール，橋梁ジョイント）（表-4.10）を用いて，路面画像を分類した．

分類後に路面画像からポンピングが発生する区間の横断プロファイルに対して，簡易局部変状評価法を用いて移動標準偏差値を算出し色情報に変換したところ，わだち掘れは車輪通過部が橙一本色で着色延長が長く表示，ポンピングが発生する区間は車輪通過部が橙二本色で着色延長が短く(5m以下)表示される傾向（図-4.18）がみられた．そのため，算出値の着色状況から，ポンピングが発生する区間に見られる着色傾向のあるデータのみを抽出した．

表-4.10 路面画像目視評価一覧表

評価タイプ	評価項目	噴出	ひび割れ	凡例	備考
◎	1. 明らかに路面のひび割れが確認できる 2. 基層材料の微粉末の噴出(ポンピング)が確認できる。	○	◎		
○	1. 路面のひび割れが確認できる。 2. 基層材料の微粉末の噴出(ポンピング)が確認できる。	○	○		
△	1. 路面のひび割れが確認できない。 2. 基層材料の微粉末の噴出(ポンピング)が薄っすら確認できる。	○	×		
(空白)	1. 路面に変状が確認できない。	−	−		
ひび割れ	1. 路面のひび割れが確認できる。 2. ポンピング現象の基礎材料の微粉末の噴出が確認できない。	×	○		評価対象外
ポットホール	1. 路面に陥没した穴が確認できる。	−	−		評価対象外
橋梁ジョイント	1. 橋梁ジョイントが確認できる。	−	−		評価対象外

Step Ⅱ．ポンピングが発生した区間の変状を進行レベルごとに区別し，閾値を設定

Step Ⅰで選定したデータに対して，評価表（表-4.10）の◎，○，△ごとに移動標準偏差値を確認した．その結果，表-4.10 の評価値タイプごとの最小値を確認すると，◎が 5.15mm，○が 4.15mm，△が 3.15mm であった．そのため，ポンピングが発生した区間に対する移動標準偏差の閾値は，◎を 5.15mm，○を 4.15mm，△を 3.15mm と設定した．

【わだち】

【ポンピング】

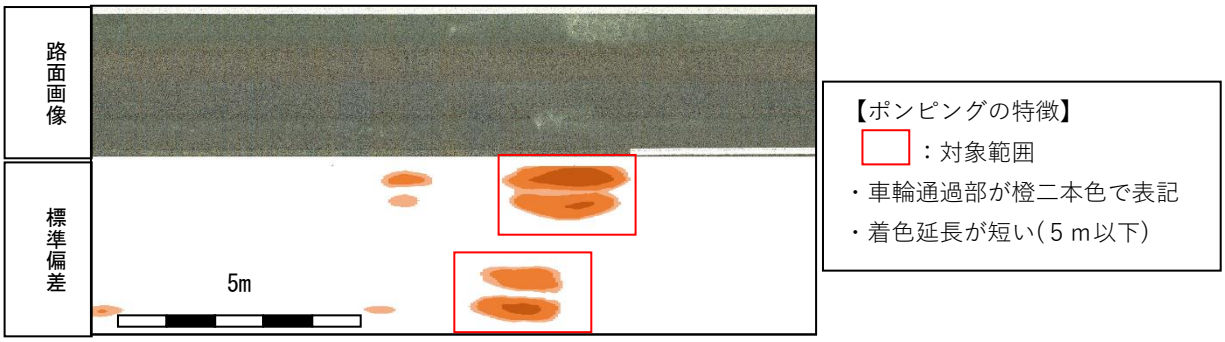


図-4.18 わだちおよびポンピング検出の特徴

4.2.3 簡易局部変状評価法による変状検出の妥当性検証

簡易局部変状評価法による変状検出の妥当性を検証する目的で，変状検出の可否と変状の進行状況を確認した．

1）検証方法

① 変状検出の可否

表-3.7 および表-3.8 に記載したポーラスアスファルト舗装の変状に対して路面画像から確認できる初期の現象はポンピングである．そのため，ポンピングが発生した区間に対して，移動標準偏差値 3mm 以上の変状を検出（以下「変状検出」という）されているかを確認した．検証は，路面画像からデータ収集期間内にポンピングが発生した区間を抽出（検証イメージは，図-4.19 参照）した上で， 着色によるポンピング発生時期と変状検出時期との時間差傾向を確認した．なお，同一区間で OWP と IWP の両方に着色が発生している場合は，移動標準偏差値の大きい方を代表値とした．

② 変状の進行状況

検出した変状に対して，「潜伏期」および「進展期」等の健全度判定を行えることを確認するため，時間経過に伴う移動標準偏差値の進行傾向についても検証した．検証は，①のデータに対し，移動標準偏差値が 3mm から 5mm に変化するまで期間を確認した．

2）利用データ

-測定区間・期間：上信越自動車道（約 9.8km）で測定した 8 時点（4.2.2 (1)と同じ）

-利用データ：第一走行車線の横断プロファイル　横断 2mm，縦断 5mm ピッチのデータ（縦断方向 50mm，横断方向 10mm に間引いて使用）

3）集計方法

① データ処理と着色

〇簡易局部変状評価法の設定条件

-（入力データ）縦断方向 50mm ピッチ，横断方向 10mm ピッチの横断計測データ

-（勾配除去処理）横断面毎に回帰直線との変位に変換（横断勾配除去）

-（集計値演算）縦断方向 0.5m，横断方向 0.5m の範囲内の移動標準偏差値 σ

〇移動標準偏差値の閾値（着色）

■ σ が 5.15mm 以上　■ σ が 4.15mm 以上 5.15mm 未満

■ σ が 3.15mm 以上 4.15mm 未満　□ σ が 3.15mm 未満

② 着色評価

上記着色方法で得られた着色の形状で，以下に示すような「5 m以下の短延長」かつ「2 本線状」の場合をポンピングが発生する区間とする．

（母集団）　路面画像から判断されるポンピングが発生した区間に対し，
（検出）　移動標準偏差値 3mm 以上の変状とポンピングの発生時期に
（精度確認）　どの程度の時間差傾向を持っているか？　を　検証する．

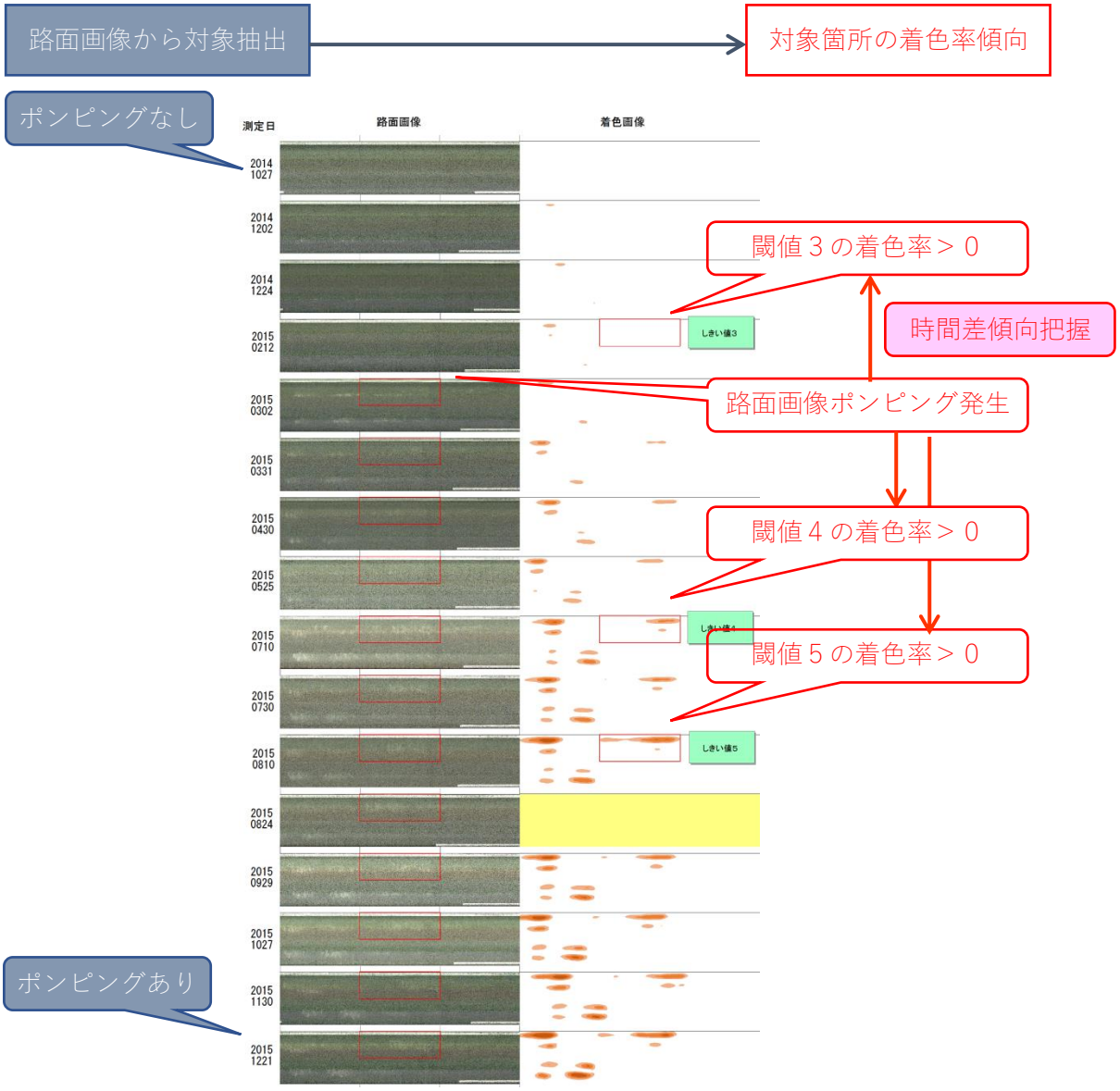


図-4.19　検証イメージ

2)　集計結果

①　変状検出の可否

ポンピングは路盤の細粒分が噴出する現象であることから，ポンピングが発生した区間は，舗装構造の変状により発生した区間といえる．そのため，ポンピングが発生した区間に対して，変状検出した割合を確認した．ポンピングが発生した区間が 74 区間に対して，変状検出した区間は 69 区間であった．このことにより，舗装構造の変状が発生した区間を検出できた割合が 92%（69／75 区間）といえる．

また，舗装構造の変状が発生した区間は，早期に発見できることが望ましい．そのため，ポンピングの発生時期に対して，変状検出した時期の時間差傾向を確認した（図-4.20）．図より，ポンピングの発生時期と変状検出時期の時間差は，平均値で 0 か月であった．ポンピング発生前に着目すると，ポンピング発生前に変状検出した割合は 48%（36 区間），変状検出した期間は最大 10 ヶ月前，平均は 3 ヶ月前であった．ポンピング発生後に着目すると，ポンピング発生後に変状検出した区間は 44%（33 区間），変状検出した期間は最大 10 ヶ月後，平均は 3 ヶ月後であった．

次に，ポンピングの発生時期に対して，変状検出時期の時間差傾向を輪荷重通過位置（OWP・IWP）ごとに確認した．ポンピングが確認された全区間に対する変状検出割合は，OWP が 48%（41 区間）に対して，IWP が 44%（34 区間）とほぼ同数であった．ポンピングの発生前後で変状検出の割合を比較すると，OWP がポンピングの発生前に 61%，発生後に 20%の割合で変状を検出するのに対して，IWP はポンピング発生前に

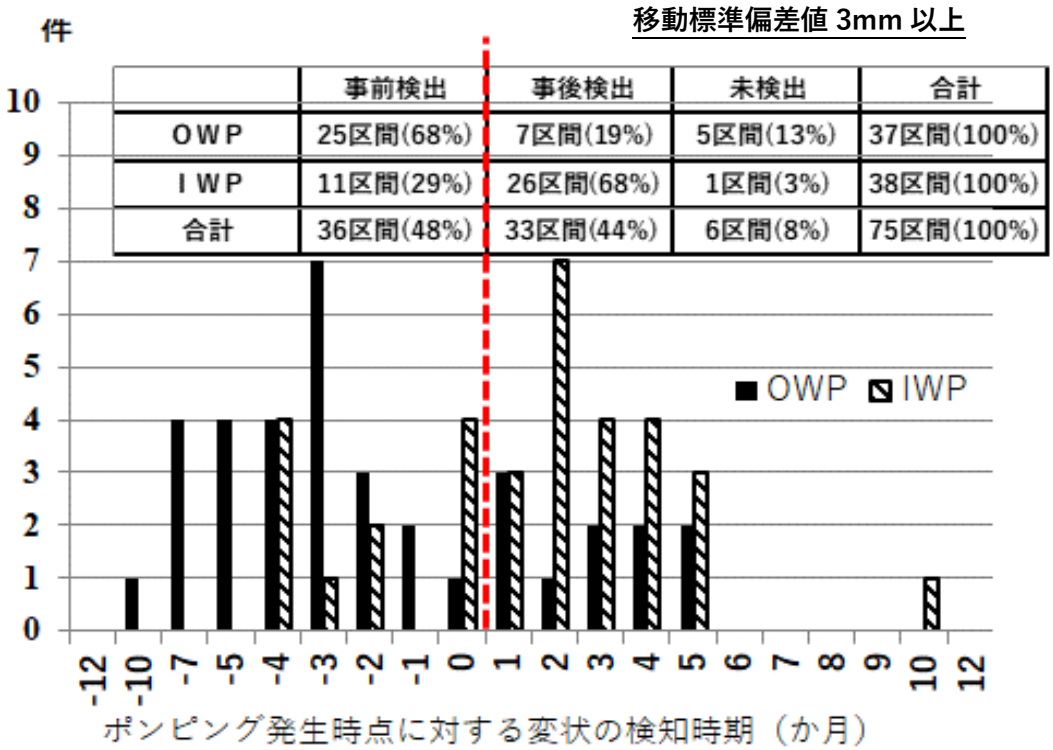


図-4.20 ポンピング発状検出時点の時間差傾向（OWP，IWP 別）

27%，発生後に 76%の割合で変状を検出しており，OWP はポンピング発生前に，IWP はポンピング発生後に変状を検出する傾向がある．

輪荷重通過位置により，ポンピングの発生時期と変状検出時期の時間差傾向が異なる原因を確認するため，変状検出に対する横断勾配と輪荷重通過位置の関係を確認した．図-4.21 は横断勾配ごとに OWP と IWP の変状検出比率を算出したものである．データは，上信越自動車道（約 9.8km）で測定した 8 時点すべてを使用するものとし，同一区間内で OWP と IWP を比較し，移動標準偏差値の大きい方を代表値として集計した．また，図中の横断勾配は，路肩側（走行方向に向かって左側）が低い場合はプラス表示，中央分離帯側（走行方向に向かって右側）が低い場合はマイナス表示としている．図より，マイナスの横断勾配が大きくなる場合は OWP の変状検出比率が大きく，プラスの横断勾配が大きい場合は IWP の変状検出比率が大きいことが確認できる．一般的にマイナス側の横断勾配の場合は右カーブになっている．カーブ走行時の遠心力により，横断勾配に比例して，外側軌道位置であるＯＷＰに大きな輪荷重がかかり，ＯＷＰに変状が発生しやすくなる．このことは，プラス勾配の場合でも同様の現象が発生する．なお，ＯＷＰとＩＷＰの検出比率が横断勾配±0%ではなく，＋2%で逆転しているのは，一般的に路面の雨水を路肩側に排水する目的で，直線区間には＋2%の横断勾配を付けており，ＯＷＰとＩＷＰにかかる輪荷重がおおむね均等になるためである．また，図-4.20 において，輪荷重通過位置により，ポンピングの発生時期と変状検出時期の時間差傾向が異なる原因として，雨水の滞水が考えられる．ＩＷＰは横断勾配がプラスであるため路肩側が低くなる．当該区間は 1 方向 2 車線道路であるため，追越し車線に比べ，下流側の走行車線側が滞水しやすい．また，追越車線と走行車線の間にある施工目地は，表基層同一断面で施工することが多いから雨水が侵入しやすく，基層以深の変形

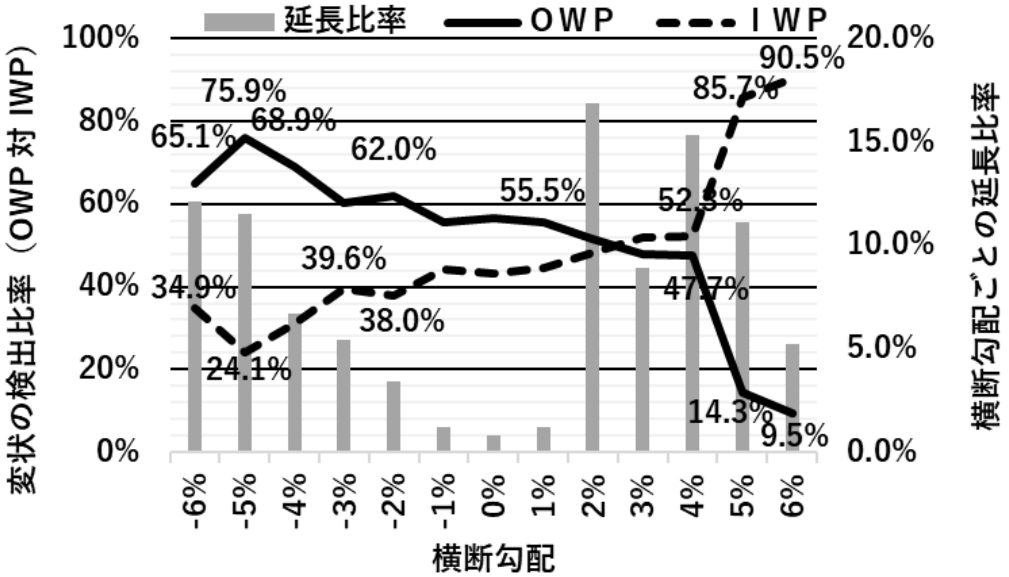


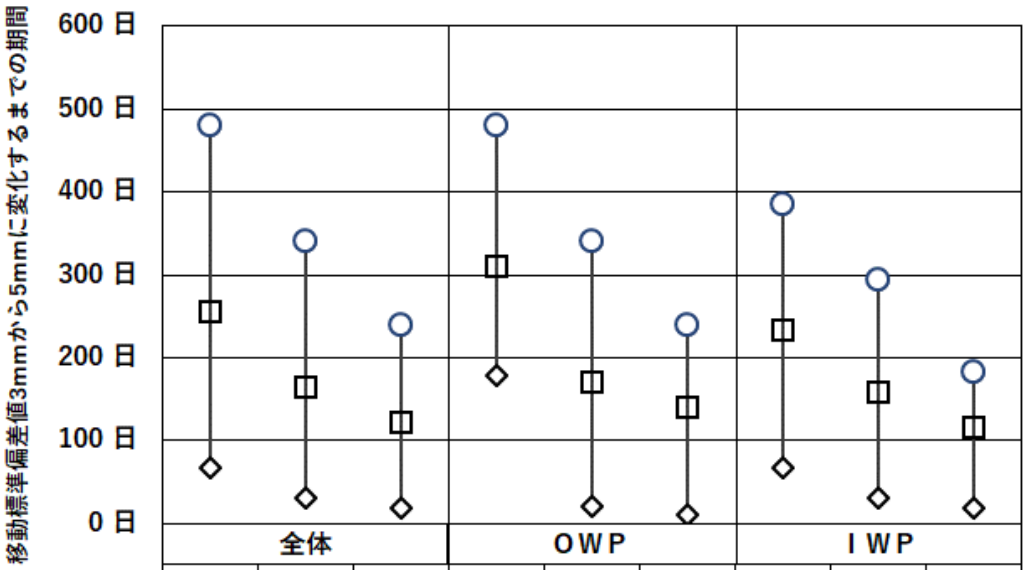
図-4.21 横断勾配と時間差傾向（OWP，IWP 別）

の進行が早い．そのため，基層以深の変形が大きくなる前にポンピングが発生していることが想定される．

② 変状の進行状況

図-4.22 は移動標準偏差値 3mm の変状を検知してから，5mm の変状に変化するまでの期間を表した図である．平均値を確認すると，移動標準偏差値 3mm から 5mm の変状に変化するまでの期間は 257 日，移動標準偏差値 3mm から 4mm に変化するまでの期間は 164 日，移動標準偏差値 4mm から 5mm に変化するまでの期間は 121 日であり，時間経過に伴い移動標準偏差値が増加していることが確認できる．また，移動標準偏差値 3mm から 4mm に変化する期間に対して，移動標準偏差値 4mm から 5mm の変状に変化する期間は 3/5 程度となっており，変状の進行とともに変状の進行速度も速くなる．

輪荷重通過位置に対して移動標準偏差値 3mm から 5mm に変化する期間を比較すると，平均値は OWP が 311 日であるのに対して IWP は 233 日と，2／3 程度の日数となっている．この傾向は，最大値および最小値でも類似した傾向となっており，OWP に対して IWP の移動標準偏差値の方が大きな区間は，OWP の移動標準偏差値が大きな区間に比べて，変状の進行速度が速いことが確認できる．



	全体			OWP			IWP		
	3～5mm	3～4mm	4～5mm	3～5mm	3～4mm	4～5mm	3～5mm	3～4mm	4～5mm
□Ave	257 日	164 日	121 日	311 日	171 日	141 日	233 日	158 日	115 日
◇Min	68 日	31 日	18 日	179 日	22 日	11 日	68 日	31 日	18 日
○Max	480 日	341 日	240 日	480 日	341 日	240 日	384 日	294 日	182 日

図-4.22 移動標準偏差値 3mm 発生時点からの変状推移日数（OWP，IWP 別）

4.3 まとめ

本章では，定期的な点検で全舗装資産の健全性の把握と補修対象箇所を選定するため，都市間高速道路のポーラスアスファルト舗装の代表的な変状である局部変状（Po）に対して，変状評価法の開発を行った結果，以下の知見が得られた．

1）路面性状測定車のわだち掘れ計測で取得するすべての横断プロファイル（二次元点群データ）に対して，回帰直線の傾きと高さ（切片）を 0 にし，縦断方向に連続して分布させることにより，簡易に縦横断勾配を除去した三次元点群データ（補正三次元点群データ）が作成できる．
2）補正三次元点群データに対して，縦横断 50×50cm の範囲で移動標準偏差値を算出し，ポンピング発生箇所に見られる局部的な路面沈下を捉えることにより，局部変状（Po）を検出できる．（簡易局部変状評価法）
3）局部変状（Po）区間に対し，評価手法の検証を実施したところ，変状検出できた割合は約 90%であった．また，今回検証した区間では，移動標準偏差値 3mm から 5mm の変状に変化するまでの期間は 257 日，IWP の移動標準偏差値の方が大きな区間は，OWP の移動標準偏差値が大きな区間に比べて，変状の進行速度が速いことが確認できた．

参考文献

1） 江口利幸，川村彰，富山和也，高橋茂樹，遠藤慶三：横断プロファイルの 3 次元点群データ化による路面の変状評価に関する基礎研究,土木学会論文集 E1, Vol.73, No.3, pp.71-78, 2017.

2） 日本工業規格：JIS D 8301 自動車およびタイヤの車外騒音測定のための試験用路面, 2013

第５章 局部変状の抽出方法の提案

前章でポーラスアスファルト舗装の局部変状（Po）に対する評価法を提案した．

しかし，提案した手法を用いて，約 9,400km ある都市間高速道路の変状箇所を抽出するには，膨大な時間と労力を要するという課題を抱えている．例えば，**第４章**で解析に利用した横断プロファイルは，縦断方向 5 cm，横断方向 1 cm ピッチのデータであるため，わずか 1 km・車線の測定データでも 700 万点のデータとなり，このデータの中から局部変状（Po）箇所を抽出するための解析を行う必要がある．そのため，道路管理者が定期測定したすべてのデータから局部変状（Po）を抽出するためには，効率的なデータ処理方法が必要となる．

このような大容量のデータを効率的処理する方法の一つとして，機械が自動的にデータから特徴を抽出するディープラーニング（以下「DL」という）がある．DL とは，多層のニューラルネットワーク（Deep Neural Network，以下「DNN」という）による機械学習手法である．DL には，局所的な情報の抽象化 および位置普遍性を持たせた順伝播型 DNN を利用した Convolutional Neural Network[3]（以下「CNN」という）や中間層に再帰的な構造を持たせ双方向に信号が伝播する DNN を利用した Recurrent Neural Network などがある．今回は多くの技術者がモデル化している画像解析技術として，画像に対して高いパターン認識能力を持つ CNN による特徴量抽出を用いたデータ処理方法で，局部変状（Po）を自動抽出する方法[1)2)]を検討した．

5.1 CNN の基本構造

CNN による画像解析では，入力層と出力層の間に畳み込み層・正規化層，プーリング層，全結合層を含む様々な層の組合せにより構成される．各層の数や順序，各層でのフィルタサイズ等は試行錯誤的に決定する必要があり，多大な労力を必要とする．そのため本研究では，既公表の学習済みモデルを用いた転移学習による局部変状（Po）の抽出方法を検討する．

転移学習とは，ある領域における問題を効果的かつ効率的に解くため，別の関連したデータや学習結果を再利用する手法である．DL では，多くの事前学習済みモデルが公開されており，これを利用することで，少ない学習データで局部変状（Po）を高い精度で自動抽出することができる．本研究では，2012 年に Hinton 等が発表した AlexNet[4]を用いた転移学習による局部変状（Po）の自動抽出を検討する．

今回検討に用いた AlexNet は，ImageNet データベース[5]の 100 万枚を超えるイメージで学習済みの畳み込みニューラルネットワークである．AlexNet の基本構造は，図-5.1 のとおりである．AlexNet は，入力画像のサイズが 224 pixel×224 pixel×3 個（層）で，5 層の畳み込み層と 3 層の全結合層で構成されている．今回は，このうち 3 層目の全結合層を 1,000 個のニューロンから 4 個のニューロン（Level I から Level IV の 4 区分（表-5.1））に変更し，自動抽出したい画像を再学習させた．

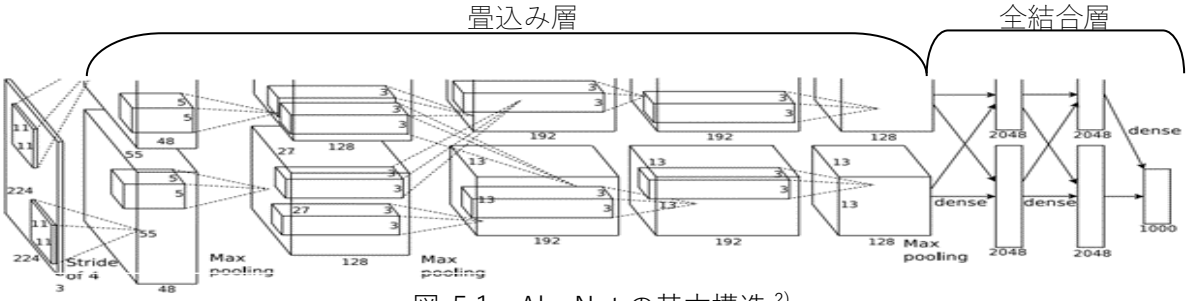


図-5.1　AlexNet の基本構造[2]

表-5.1　諸元一覧表

区分	移動標準偏差値 σ	変状画像の着色		変状画像数
		RGB	多段階	
Level Ⅰ	3 mm未満	標準偏差 σ の大きさに合わせて変化（0 mm：Cyan, 23 mm：Blue）	White	909 枚
Level Ⅱ	3 mm以上 4 mm未満		Red	448 枚
Level Ⅲ	4 mm以上 5 mm未満		Green	256 枚
Level Ⅳ	5 mm以上		Blue	324 枚

5.2 補正三次元点群データの可視化

CNN を用いて変状点群データから局部変状（Po）を自動抽出するためには，変状点群データを画像に変換する必要がある．

変状点群データ（図-5.2 が変状点群データ例）は，局部変状（Po）の発生している区間を移動標準偏差値 σ と平面上の位置で表している．図-5.2 のデータを画像で表現するためには，平面上の移動標準偏差値 σ を画像に変換する必要がある．画像に変換する方法として，移動標準偏差値 σ を色情報（RGB）に変換した（以下,「変状画像（RGB)」という）．RGB は，Red，Green，Blue の 3 原色を混ぜて幅広い色を表現する加法混合の一種である．今回は，図-5.2 のデータに対し移動標準偏差値の変化に合わせて，Green の強度を変化（0 から 255）させた．具体的には，移動標準偏差値 0mm を Cyan（RGB（0，255，255)），移動標準偏差値 23mm を Blue（RGB（0，0，255)）となるように移動標準偏差値の大きさに合わせて色情報を変換した．変換した例が図-5.3 である．なお，移動標準偏差値 23mm は，上信越自動車道で局部変状（Po）が発生した区間に対し，簡易局部変状評価法で集計した移動標準偏差値の最大値である（詳細は，4.2.2 を参照)．

CNN は，画像の特徴量を自動的に定義・計算する．すなわち，画像特徴の差が明確であれば，より精度の高い自動抽出が可能となると考えられる．そのため，移動標準偏差値 σ の健全性を多段階に区分した上で色情報（RGB）に変換した（以下,「変状画像（多段階)」という)．図-5.3 のデータの色情報を多段階に変換した例が図-5.4 である．図-5.4 では，移動標準偏差値を 4 区分に分類（0 mm 以上 3 mm 未満は White（RGB（255，255，255)），3 mm 以上 4 mm 未満は Red（RGB（255，0，　0)），4 mm 以上 5 mm 未満は Green（RGB（0，255，0)），5 mm 以上は Blue（RGB（0，　0，255)）とした．

横断方向（8測線（50 cmピッチ）

50 cm

25 cm

縦断方向（21測線（25 cmピッチ）

0.2	1.4	2.6	1.8	0.1	0.1	2.4	1.7
0.3	1.6	2.9	2.0	0.1	0.1	2.5	1.9
0.3	1.7	3.2	2.2	0.2	0.1	2.6	1.9
0.3	1.7	3.2	2.2	0.2	0.1	2.6	1.9
0.3	1.7	3.0	2.0	0.2	0.2	2.2	1.7
0.2	1.5	2.8	1.8	0.2	0.3	1.9	1.5
0.2	1.4	2.5	1.5	0.2	0.4	1.9	1.2
0.2	1.2	2.2	1.1	0.2	0.5	2.3	1.1
0.2	1.0	1.9	0.9	0.2	0.7	3.1	1.3
0.1	0.8	1.5	0.8	0.2	0.8	4.0	1.6
0.1	0.6	1.2	0.9	0.2	0.9	4.8	1.9
0.1	0.5	0.9	1.0	0.2	1.0	5.4	2.3
0.1	0.4	0.7	1.2	0.2	1.1	5.8	2.5
0.1	0.4	0.7	1.2	0.2	1.1	5.8	2.5
0.1	0.4	0.6	1.1	0.2	1.0	5.5	2.3
0.1	0.3	0.6	0.9	0.2	0.9	4.9	2.1
0.2	0.3	0.4	0.8	0.2	0.7	4.1	1.8
0.2	0.3	0.4	0.6	0.2	0.6	3.3	1.5
0.3	0.3	0.3	0.5	0.2	0.4	2.5	1.2
0.4	0.4	0.4	0.6	0.2	0.3	1.7	0.8
0.5	0.5	0.5	0.7	0.2	0.3	1.2	0.5

図-5.2　変状点群データ例

横断方向（8測線（50 cmピッチ）

50 cm

25 cm

縦断方向（21測線（25 cmピッチ）

0.2	1.4	2.6	1.8	0.1	0.1	2.4	1.7
0.3	1.6	2.9	2.0	0.1	0.1	2.5	1.9
0.3	1.7	3.2	2.2	0.2	0.1	2.6	1.9
0.3	1.7	3.2	2.2	0.2	0.1	2.6	1.9
0.3	1.7	3.0	2.0	0.2	0.2	2.2	1.7
0.2	1.5	2.8	1.8	0.2	0.3	1.9	1.5
0.2	1.4	2.5	1.5	0.2	0.4	1.9	1.2
0.2	1.2	2.2	1.1	0.2	0.5	2.3	1.1
0.2	1.0	1.9	0.9	0.2	0.7	3.1	1.3
0.1	0.8	1.5	0.8	0.2	0.8	4.0	1.6
0.1	0.6	1.2	0.9	0.2	0.9	4.8	1.9
0.1	0.5	0.9	1.0	0.2	1.0	5.4	2.3
0.1	0.4	0.7	1.2	0.2	1.1	5.8	2.5
0.1	0.4	0.7	1.2	0.2	1.1	5.8	2.5
0.1	0.4	0.6	1.1	0.2	1.0	5.5	2.3
0.1	0.3	0.6	0.9	0.2	0.9	4.9	2.1
0.2	0.3	0.4	0.8	0.2	0.7	4.1	1.8
0.2	0.3	0.4	0.6	0.2	0.6	3.3	1.5
0.3	0.3	0.3	0.5	0.2	0.4	2.5	1.2
0.4	0.4	0.4	0.6	0.2	0.3	1.7	0.8
0.5	0.5	0.5	0.7	0.2	0.3	1.2	0.5

図-5.3　変状画像（RGB）例

横断方向（8測線（50 cmピッチ）

50 cm

25 cm

縦断方向（21測線（25 cmピッチ）

0.2	1.4	2.6	1.8	0.1	0.1	2.4	1.7
0.3	1.6	2.9	2.0	0.1	0.1	2.5	1.9
0.3	1.7	3.2	2.2	0.2	0.1	2.6	1.9
0.3	1.7	3.2	2.2	0.2	0.1	2.6	1.9
0.3	1.7	3.0	2.0	0.2	0.2	2.2	1.7
0.2	1.5	2.8	1.8	0.2	0.3	1.9	1.5
0.2	1.4	2.5	1.5	0.2	0.4	1.9	1.2
0.2	1.2	2.2	1.1	0.2	0.5	2.3	1.1
0.2	1.0	1.9	0.9	0.2	0.7	3.1	1.3
0.1	0.8	1.5	0.8	0.2	0.8	4.0	1.6
0.1	0.6	1.2	0.9	0.2	0.9	4.8	1.9
0.1	0.5	0.9	1.0	0.2	1.0	5.4	2.3
0.1	0.4	0.7	1.2	0.2	1.1	5.8	2.5
0.1	0.4	0.7	1.2	0.2	1.1	5.8	2.5
0.1	0.4	0.6	1.1	0.2	1.0	5.5	2.3
0.1	0.3	0.6	0.9	0.2	0.9	4.9	2.1
0.2	0.3	0.4	0.8	0.2	0.7	4.1	1.8
0.2	0.3	0.4	0.6	0.2	0.6	3.3	1.5
0.3	0.3	0.3	0.5	0.2	0.4	2.5	1.2
0.4	0.4	0.4	0.6	0.2	0.3	1.7	0.8
0.5	0.5	0.5	0.7	0.2	0.3	1.2	0.5

図-5.4　変状画像（多段階）例

図-5.3 は移動標準偏差値の変化を Green の 1 成分に対する強度変化（0 から 255）を用いて，256 色に着色するのに対して，図-5.4 は Red・Green・Blue の 3 成分を用いて各成分の強度差が大きくなるように設定した 4 色（White，Red，Green，Blue）を用いて着色し，画像特徴の差を明確にしている．

以上の手法により，平面上の数値データから CNN で局部変状（Po）を自動抽出するための画像を作成した．

5.3 機械学習を用いた局部変状の自動抽出

5.2 の検討結果を踏まえ，DL による局部変状（Po）の抽出方法に対し，実データを用いた検証を実施した．検証に使用したデータは，上信越道で測定したわだち掘れの横断プロファイルデータ（縦断方向 5 cm，横断方向 1 cm ピッチ，約 9.8 km・車線分）を用いて，50 cm 四方の範囲で移動標準偏差値を算出し，変状点群データを作成した．変状点群データは，横断方向 3.5 m，縦断方向 5 m ごとに画像化（図-5.5 および図-5.6）した．局部変状（Po）の抽出条件は，表-5.1 に記載している変状画像の着色区分を用いることとし，変状画像内に存在する最大 Level の変状を自動抽出した（図-5.6 のように変状画像内に Level I～IV の変状グループが複数存在している場合は，Level IV と判定）．再学習した AlexNet による局部変状（Po）の自動抽出に用いた変状画像数は 1,337 枚（詳細は表-5.2 参照）である．検証は，再学習させた AlexNet に対して，「変状画像（RGB）と変状画像（多段階）の比較」，「再学習枚数に対する正答率（正答率＝自動抽出結果のうち移動標準偏差値 σ による区分と同じ判定結果であった画像の枚数／移動標準偏差値 σ による区分の画像数）の比較」，「学習係数に対する正答率の比較」を行った．

表-5.1　諸元一覧表（再掲載）

区分	移動標準偏差値 σ	変状画像の着色		変状画像数
		RGB	多段階	
Level Ⅰ	3 mm未満	標準偏差 σ の大きさに合わせて変化（0 mm：Cyan, 23 mm：Blue）	White	909 枚
Level Ⅱ	3 mm以上 4 mm未満		Red	448 枚
Level Ⅲ	4 mm以上 5 mm未満		Green	256 枚
Level Ⅳ	5 mm以上		Blue	324 枚

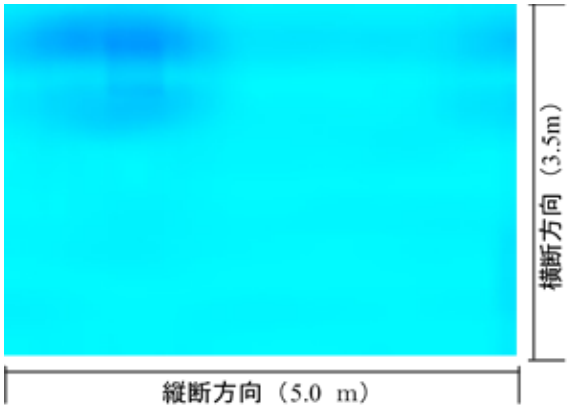


図-5.5　Level IV の変状画像（RGB）

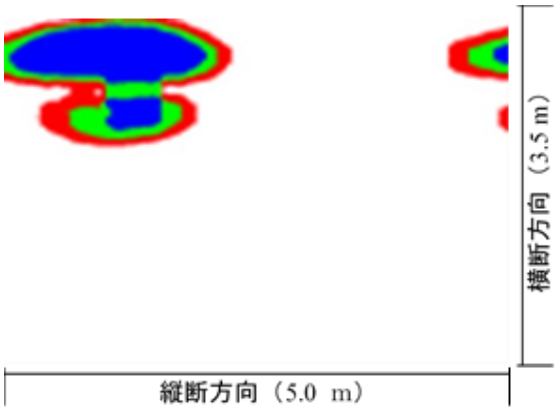


図-5.6　Level IV の変状画像（多段階）

(1) 変状画像（RGB）と変状画像（多段階）の比較

DL による画像の自動抽出は，抽出対象の画像特徴が明確であるほど高い精度で抽出できる．そのため，移動標準偏差値 σ の大きさに比例して着色が変化する変状画像（RGB）と 4 つの閾値で区分して着色した変状画像（多段階）を比較した．再学習に用いた画像は各 Level で 50 枚，100 枚，150 枚，200 枚の 4 パターンとし，学習効果の検証は再学習に利用していないすべての変状画像を用いた．学習係数[6]は 0.001 として比較した．

Level I～IV の各区分に対する検出精度を比較した結果を表-5.2 に示す．正答率を比較すると，再学習枚数 50 枚の場合，変状画像（RGB）は 67.7 %に対し，変状画像（多段階）は 81.0 %と変状画像（多段階）の方が高い抽出精度であることが分かる．特に，Level I の抽出精度を比較すると，変状画像（RGB）は 75.0 %の正答率に対し，変状画像（多段階）は 100 %と大きな差が出ている．変状画像（RGB）では移動標準偏差値に合わせて色情報

表-5.2　再学習用枚数に対する正答率の比較（RGB 値と多段階）

		RGB						多段階					
		移動標準偏差値σに対する自動検出の正答率						移動標準偏差値σに対する自動検出の正答率					
再学習画像50枚	正答率 67.7%	自動抽出結果				再学習画像50枚	正答率 81.0%	自動抽出結果			
	移動標準偏差値σによる区分	Level I	Level II	Level III	Level IV		移動標準偏差値σによる区分	Level I	Level II	Level III	Level IV
	Level I	75.0%	24.6%	0.5%	0.0%		Level I	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Level II	15.8%	68.1%	14.8%	1.3%		Level II	3.8%	61.6%	34.7%	0.0%
	Level III	1.5%	27.2%	63.1%	8.3%		Level III	0.0%	23.3%	70.4%	6.3%
	Level IV	3.6%	9.9%	38.7%	47.8%		Level IV	0.0%	9.5%	32.8%	57.7%
再学習画像100枚	正答率 74.5%	自動抽出結果				再学習画像100枚	正答率 95.0%	自動抽出結果			
	移動標準偏差値σによる区分	Level I	Level II	Level III	Level IV		移動標準偏差値σによる区分	Level I	Level II	Level III	Level IV
	Level I	82.1%	17.8%	0.1%	0.0%		Level I	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Level II	14.4%	66.1%	19.0%	0.6%		Level II	1.4%	96.6%	2.0%	0.0%
	Level III	1.9%	14.1%	77.6%	6.4%		Level III	0.0%	14.1%	80.1%	5.8%
	Level IV	1.3%	2.2%	38.4%	58.0%		Level IV	0.0%	0.9%	14.3%	84.8%
再学習画像150枚	正答率 77.9%	自動抽出結果				再学習画像150枚	正答率 97.1%	自動抽出結果			
	移動標準偏差値σによる区分	Level I	Level II	Level III	Level IV		移動標準偏差値σによる区分	Level I	Level II	Level III	Level IV
	Level I	78.3%	21.6%	0.1%	0.0%		Level I	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Level II	3.0%	78.9%	17.4%	0.7%		Level II	0.0%	95.0%	5.0%	0.0%
	Level III	0.0%	12.3%	83.0%	4.7%		Level III	0.0%	8.5%	86.8%	4.7%
	Level IV	0.0%	1.7%	27.0%	71.3%		Level IV	0.0%	0.0%	5.7%	94.3%
再学習画像200枚	正答率 80.3%	自動抽出結果				再学習画像200枚	正答率 98.6%	自動抽出結果			
	移動標準偏差値σによる区分	Level I	Level II	Level III	Level IV		移動標準偏差値σによる区分	Level I	Level II	Level III	Level IV
	Level I	81.7%	18.3%	0.0%	0.0%		Level I	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Level II	4.4%	77.8%	17.3%	0.4%		Level II	0.4%	96.0%	3.6%	0.0%
	Level III	0.0%	21.4%	69.6%	8.9%		Level III	0.0%	7.1%	89.3%	3.6%
	Level IV	0.0%	2.4%	15.3%	82.3%		Level IV	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%

が変化するのに対して，変状画像（多段階）の Level I は White 1 色のみであり画像特徴が明確なため，誤認識がなかったと考えられる．

再学習画像 50 枚，200 枚の順で正答率を比較すると，変状画像（RGB）が 67.7 %，80.3%に対して，変状画像（多段階）は 81.0 %，98.6 %となり，再学習枚数が増加しても，変状画像（多段階）の方が高い抽出精度であることが分かる．特に，Level　II および Level III の正答率に対して再学習画像 50 枚と 200 枚を比較すると，変状画像（RGB）は正答率が約 10 %程度向上しているのに対し，変状画像（多段階）は正答率が約 20%から 30 %程度向上しており，大きな差が出ている

このように目的に応じて着色区分を明確にすることにより，抽出精度が高くなる傾向があることが分かる．

(2) 再学習枚数に対する正答率の比較

転移学習のメリットは，少ない学習データで局部変状（Po）を精度高く自動抽出することができることにある．そのため，学習用変状画像の枚数を変えて正答率を比較した．変状画像は変状画像（多段階）を用いて実施した．また，再学習に用いた画像は各 Level で 50 枚，100 枚，150 枚，200 枚の 4 パターンとし，学習効果の検証は再学習に利用していない変状画像すべてを用いた．学習係数は 0.001 として比較を実施した．

Level I～IV の各区分に対する検出精度を比較した結果を表-5.2 に示す．正答率を比較すると，再学習画像 50 枚，100 枚，150 枚，200 枚の順で，81.0 %，95.0 %，97.1 %，98.6 %となり，枚数共に正答率が上昇している．再学習画像 50 枚と 100 枚を比較すると，Level II の正答率は再学習画像 50 枚の場合が 61.6 %なのに対し，再学習画像 100 枚では 96.6 %と約 30 %向上している．他の Level に比べて正答率が向上したのは，Level III 以上の画像は 3 色以上であるのに対し，Level II の画像は White と Red の 2 色であり，認識しやすかったため，少ない枚数の増加により正答率が上昇しやすいと考えられる．再学習画像 100 枚と 150 枚を比較すると，Level I および II 正答率には大きな変化は見られず，Level III および IV の正答率が約 5～10 %向上した．再学習画像 150 枚と 200 枚を比較すると，　Level II 以上で正答率が約 1～5 %向上した．

(3) 学習係数に対する正答率の比較

DL には，ハイパーパラーメータと呼ばれる学習を行う際に人間があらかじめ設定しておかなければいけないパラメータがいくつか存在する．そのうちの一つが学習係数である．学習係数は，勾配降下法によってどれだけ大きくパラメータの更新を行うかを決める値で，この値により正答率が大きく左右する．今回，再学習画像 200 枚に対して，学習係数を 0.01，0.005，0.001，　0.0005 の 4 パターンに変化させて，学習係数毎に 3 回ずつ再学習を行い，比較した．学習係数に対する正答率を比較した結果を表-5.3 に示す．平均正答率を比較すると，学習係数 0.01，　0.005，0.001，0.0005 順で，97.9 %，99.6 %，98.6 %，　97.7 %となった．今回の変状画画像を用いた転移学習では，学習係数 0.01 では値が大きすぎたため，3 回中 1 回は値が収束せず変状画像の自動抽出を行うことができなかった．学習係数 0.01

以外は各回の正答率の最大最小差が 0.6 %以下とばらつきも少ない．今回の結果では，学習係数 0.005 が最適な設定値となった．

誤検知した画像の例が図-5.5 である．今回，画像内に存在する最大 Level の変状の自動抽出を目的としていたが，最大 Level の着色領域（図-5.5 では Green 部分）が小さいことや Level の異なる複数の変状が混在しているため，最大 Level の変状を画像特徴としてとらえきれなかったことが誤検知の原因であると考えられる．そのため，誤検知した画像の学習用変状画像を増やすことや，局部変状（Po）の Level ごとに変状領域を指定（図-5.5 では破線の丸部分）した上で再学習することにより正答率が向上すると考えられる．

表-5.3　学習係数に対する正答率の比較

学習係数	正答率 平均値	正答率 各回	学習係数	正答率 平均値	正答率 各回
0.01	97.9%	98.4%	0.001	98.6%	98.9%
		97.4%			98.6%
		-			98.3%
0.005	99.6%	99.8%	0.0005	97.7%	97.9%
		99.6%			97.6%
		99.6%			97.5%

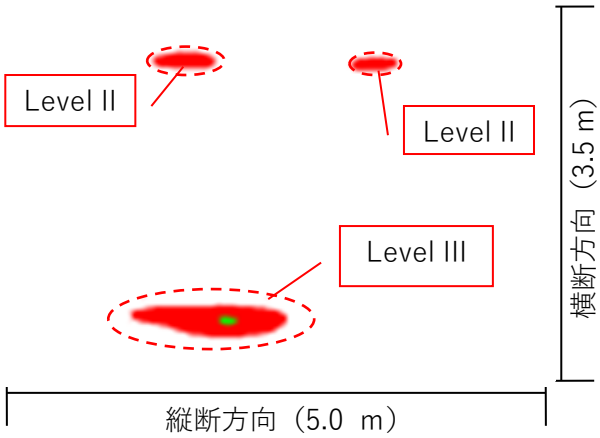


図-5.5　誤検知画像例（Level III を Level II と誤検知）

5.4 まとめ

本章では，補正三次元点群データに対する DL の転移学習を用いた局部変状（Po）の抽出方法について検討した．検証は，補正三次元点群データを色情報に変換したデータに対して，AlexNet を用いた転移学習により，変状画像の自動抽出を行った．その結果，本研究で得られた知見を以下に示す．

1）局部変状（Po）を評価できる補正三次元点群データ（変状点群データ）を色情報（RGB）に変換することにより可視化した変状画像となり，DL の転移学習による局部変状（Po）の自動抽出が可能となる．
2）移動標準偏差値を多段階にグループ化して色情報に変換することにより，画像特徴の差が明確になり，少ない再学習画像枚数で自動抽出精度が向上する．
3）今回使用した縦断方向 5.0m，横断方向 3.5m の画像に対して，変状の Level を RGB で 4 段階の色画像に区分し，変状画像内に存在する最大 Level の変状を AlexNet を用いて自動抽出したところ，再学習画像 200 枚（学習係数 0.005）で平均正答率が 99.6%の結果となった．

検証結果の課題に対しては，着色領域が小さい画像を用いた転移学習や変状ごとに変状領域を指定した転移学習の実施により，さらなる精度向上が可能と考えられる．

参考文献

1） 江口利幸，川村彰，富山和也，高橋茂樹，大町晋一郎: 補正三次元点群データに対するディープラーニングを用いた局部変状の抽出する方法に関する研究,土木学会論文集E1,Vol.74, No.3, pp.121-129,2018.

2） Masayuki Eguchi, Akira Kawamura, Kazuya Tomiyama, Omachi Shinichiro: A Simplified Method of Detecting Spot Surface Defects by Using Quasi-3D Data from a Conventional Road Profiler, Transportation Research Record, June 14, 2019.

3) LeCun. Y., Boser B., Denker. J.S., Henderson. D., Howard R.E., Hubbard W.E., and Jackel. L.D.,: Backpropagation applied to handwritten zip code recognition, Neural Computation,Vol.1, No.4, pp.541-551, 1989.

4） Krizhevsky. A., Sutskever. I., and Hinton. GE.,：ImageNet classification with deep convolutional neural networks, Advances in neural information processing systems 25（NIPS2012）, pp.1097-1105, 2012.

5) ImageNet, <http://www.image-net.org >（Accessed 2019.5）

6）涌井良幸，涌井貞美：ディープラーニングがわかる数学入門,技術評論社, 2017

第 6 章 適用範囲の拡大に関する検証

第 4 章で開発した変状評価法は，特定の路面性状測定車のデータから取得した横断プロファイルを用いて開発を行っている．本章では，簡易局部変状評価法の汎用性を確認するため．**6.1.**にて他の路面性状測定車で取得した横断プロファイル（二次元点群データ）に対する検証，**6.2.**にて 3D レーザースキャナで取得した三次元点群データに対する検証，**6.3.**にて他の局部変状に対する検証を行った．

6.1 補正三次元点群データ間隔および他機種への適用性

本節では，簡易局部変状評価法で使用する補正三次元点群データのデータ間隔に対する検証（表-6.1 参照），路面性状測定車に対する検証（表-6.2 参照），測定路線の違いによる検証（表-6.2 参照）を実施した．簡易局部変状評価法の集計範囲は，縦断方向 500mm×横断方向 500mm とし，移動標準偏差値の閾値は**第 5 章**と同じ（表-6.3）とする．また，路面画像目視評価は，表-4.10 の区分を用いた．

表-6.1 補正三次元点群データのデータ間隔

		細密	中密	粗密
点群データ間隔	縦断方向	50mm（11 データ）	250mm（3 データ）	500mm（2 データ）
	横断方向	10mm（51 データ）	50mm（11 データ）	100mm（6 データ）
総データ数		561 データ	33 データ	12 データ

表-6.2 路面性状測定車の種類と路線

車両	路線名	計測方法	測定装置	最小測定間隔	備考
A 車	A 路線	光切断方式	マルチスキャン 3 D カメラ	横断 2mm ×縦断 6mm	**第 3 章・第 4 章**で利用
B 車	B 路線	光切断方式	マルチスキャン 3 D カメラ	横断 1mm ×縦断 1mm	A 車と 同一機種
C 車	C 路線	多点変位 計測法	CCD ライン センサカメラ	横断 500mm ×縦断 100mm	

表-6.3 移動標準偏差値の閾値

着色	□			
閾値	3.15 未満	3.15 以上 4.15 未満	4.15 以上 5.15 未満	5.15 以上
調整後閾値	4.75 未満	4.75 以上 5.75 未満	5.75 以上 6.75 未満	6.75 以上

表-4.10 路面画像目視評価一覧表（再掲載）

評価タイプ	評価項目	噴出	ひび割れ	凡例
◎	1. 明らかに路面のひび割れが確認できる 2. 基層材料の微粉末の噴出（ポンピング）が確認できる。	○	◎	
○	1. 路面のひび割れが確認できる。 2. 基層材料の微粉末の噴出（ポンピング）が確認できる。	○	○	
△	1. 路面のひび割れが確認できない。 2. 基層材料の微粉末の噴出（ポンピング）が薄っすら確認できる。	○	×	

(1) 補正三次元点群データ間隔の違い

補正三次元点群データ間隔のデータ密度の違いによる変状検出状況を確認した．検証には，**第３章**から**第５章**の開発および検証を行った A 車の A 路線のデータを用いた．比較は，路面画像の目視結果と簡易局部変状評価法による移動標準偏差値の着色結果の目視により行った．

表-6.4 は，データ密度の違いによる変状検出状況を比較した結果である．目視判定のどのケースに対しても，データ密度を変えても検出できることが分かる．また，データ密度が粗密になるほど着色が荒くなることが分かる．

(2) 同一機種で車両の違いおよび路線の違い

同一機種で車両の違いおよび路線の違いによる変状検出状況を確認した．検証には，表-6.2 の B 車，B 路線のデータを用いて行った．比較は，路面画像の目視結果と簡易局部変状評価法による移動標準偏差値の着色結果の目視により行った．

表-6.5 は，同一機種で車両の違いおよび路線の違いによる変状検出状況を確認した結果である．目視判定のどのケースに対しても，データ密度を変えても検出できていることが分かる．(1)と同様，データ密度が粗密になるほど着色が荒くなることが分かる．

(3) 測定機種の違い

横断プロファイルの測定機種の違いおよび路線の違いによる変状検出状況を確認した．検証には，表-6.2 の C 車，C 路線のデータを用いた．比較は，路面画像の目視結果と簡易局部変状評価法による移動標準偏差値の着色結果の目視により行った．

表-6.6 は，横断プロファイルの測定機種の違いおよび路線の違いによる変状検出状況を確認した結果である．基準閾値では変状の着色が過検出される傾向がみられた．そのため，閾値を調整し，表-6.3 の「調整後閾値」で再計算している．その結果，他の測定機器と同様な着色が確認できた．以上の結果により，測定機種が違う場合は閾値を再設定する必要がある．

表-6.4　補正三次元点群データのデータ密度の違いによる変状検出状況

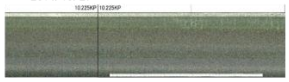
目視判定	路面画像	着色画像 データ密度：細密	着色画像 データ密度：中密（調整した場合は、調整後しきい値着色）	着色画像 データ密度：粗密（調整した場合は、調整後しきい値着色）
◎	2014/10/27 	2014/10/27	2014/10/27	2014/10/27
○	2016/2/2	2016/2/2	2016/2/2	2016/2/2
△	2014/10/27	2014/10/27	2014/10/27	2014/10/27

表-6.5 同一機種で車両および路線の違いによる変状検出状況

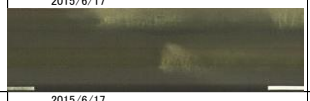
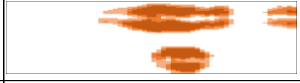
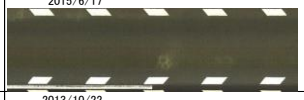
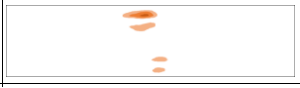
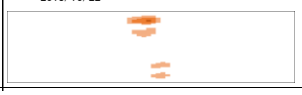
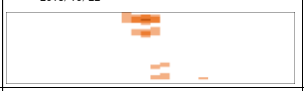
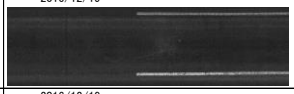
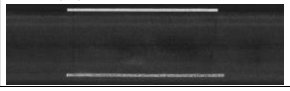
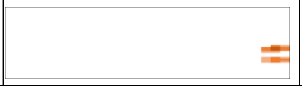
目視判定	路面画像	着色画像 データ密度：細密	着色画像 データ密度：中密（調整した場合は、調整後しきい値着色）	着色画像 データ密度：粗密（調整した場合は、調整後しきい値着色）
◎	2015/6/17 	2015/6/17	2015/6/17 	2015/6/17
○	2015/6/17 	2015/6/17	2015/6/17	2015/6/17
△	2013/10/22	2013/10/22 	2013/10/22 	2013/10/22 

表-6.6 横断プロファイルの測定機種，車両および路線の違いによる変状検出状況

目視判定	路面画像	着色画像 データ密度：細密	着色画像 データ密度：中密（調整した場合は、調整後しきい値着色）	着色画像 データ密度：粗密（調整した場合は、調整後しきい値着色）
◎	2016/12/19 			2016/12/19
○	2016/12/19	データ密度不足の為算出不可		2016/12/19
△	2016/12/19 			2016/12/19 

6.2 3D レーザースキャナへの適用性

第3章では，路面性状測定車で取得した横断プロファイル（二次元点群データ）から，補正三次元点群データを作成し，簡易局部変状評価法にて，局部変状（Po）を検出した．しかしながら，3D レーザースキャナのように，三次元点群データを取得できる測定機器であれば，簡易局部変状評価法にて，補正三次元点群データと同じように局部変状（Po）の検出ができる．また，局部変状（Po）の検出が行えた場合，補正三次元点群データの精度を検証できる．そのため，３D レーザースキャナと路面性状測定車で同じポーラスアスファルト舗装のポンピング発生箇所を測定し，簡易局部変状評価法による局部変状（Po）の検出精度を比較・評価した．検証は，**第3章**から**第5章**の開発および検証を行った路面性状測定車を用いて行った．

(1) 簡易局部変状評価法による局部変状（Po）の検出

1) 三次元点群データの作成

３D レーザースキャナは，1 点からレーザーを照射して多点を測定するため，照射距離に比例して，三次元点群データの密度が低くなる．局部的な路面の変状を統計的手法で定量的に評価するためには，三次元点群データの密度が均一であることが望ましい．そのため，等間隔の三次元点群データを作成した後（本報告では最近傍法を使用）に，4.1.1 の方法を用いて補正三次元点群データを作成した．

2) 簡易局部変状評価法による集計

簡易局部変状評価法による集計は，下記の条件で実施した．

○簡易局部変状評価法の設定条件

-（入力データ）縦断方向 50mm ピッチ，横断方向 10mm ピッチの横断計測データ

-（集計値演算）縦断方向 0.5m，横断方向 0.5mの範囲内の移動標準偏差値 σ

○移動標準偏差値の閾値（着色）

-Level I: 0 mm 以上 3 mm 未満は White（RGB（255，255，255））

-Level II: 3 mm 以上 4 mm 未満は Red（RGB（255，0，0））

-Level III: 4 mm 以上 5 mm 未満は Green（RGB（0，255，0））

-Level IV: 5 mm 以上は Blue（RGB（0，0，255）

(2) 簡易局部変状評価法による変状の検出結果

簡易局部変状評価法を用いて，変状を検出した結果を図-6.1，図-6.2 に示す．変状の検出は，路面性状測定で用いられるわだち掘れ用の横断プロファイルによる二次元点群データと３Dレーザースキャナによる三次元点群データに対して実施した．

丸で囲まれた 3 つの領域はポンピング発生箇所を示している．図-6.1，図-6.2 から，ポンピング発生箇所を特定していることが明らかであり，3D レーザースキャナによる三次元点群データでも簡易局部変状評価法を用いて局部変状（Po）を検出できるといえる．また，二次元点群データと三次元点群データの移動標準偏差値の相関係数を確認し

た結果を図-6.3 に示す．R^2＝0.967 と高い相関係数を示しており，今回用いた路面性状測定車による二次元点群データであれば，３Ｄレーザースキャナによる三次元点群データと同等の評価が行えることが明確になった．

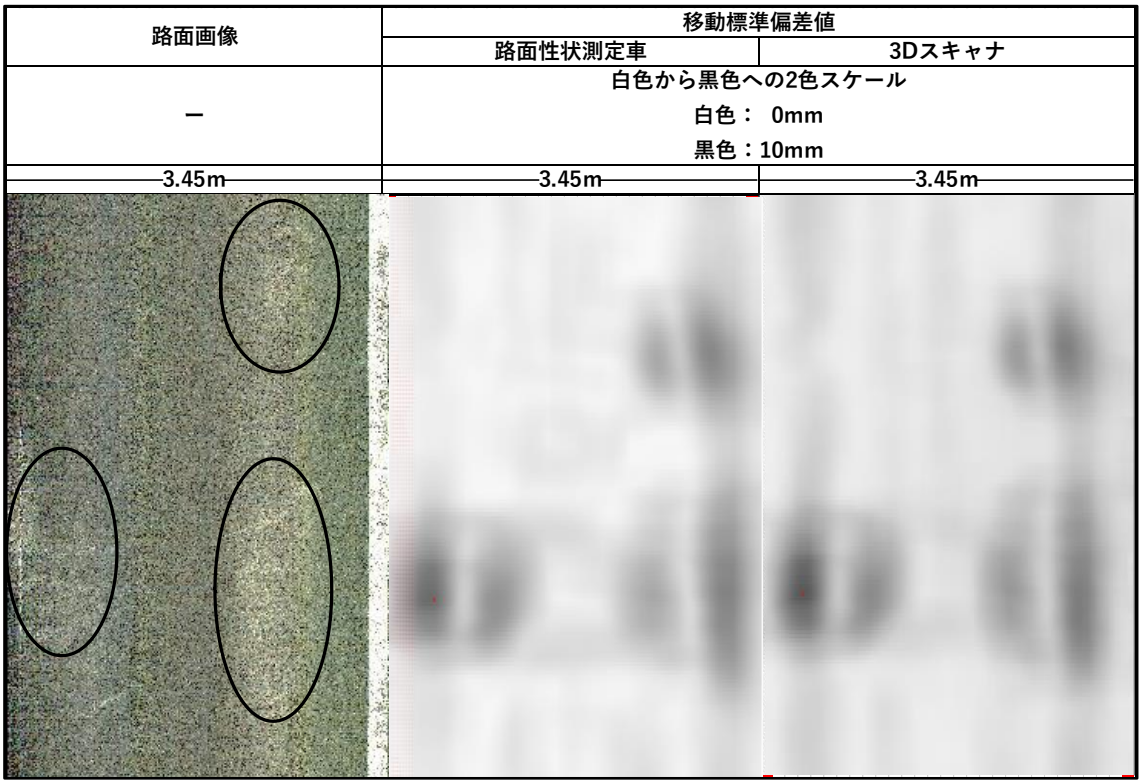


図-6.1 路面画像，路面正常測定車（二次元），３Ｄスキャナ（三次元）を比較した図

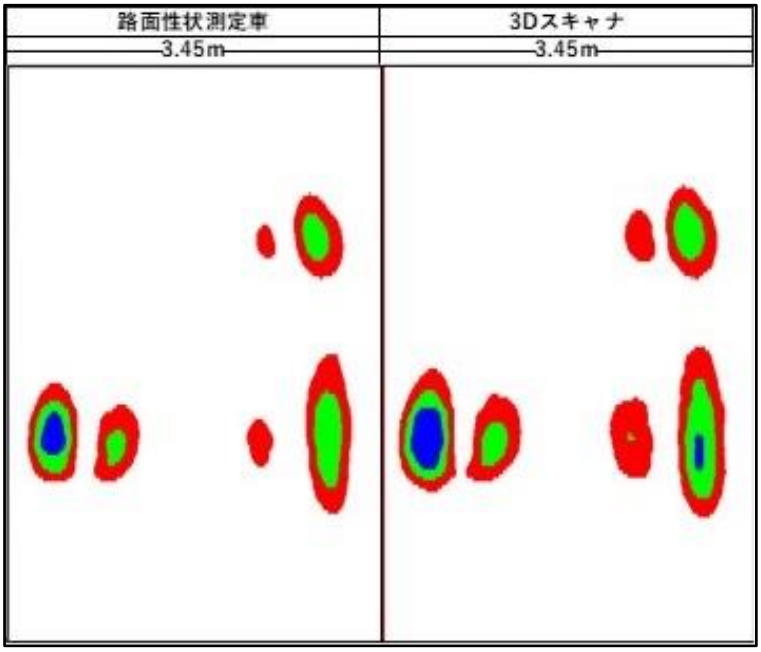


図-6.2 閾値を多段階化した例

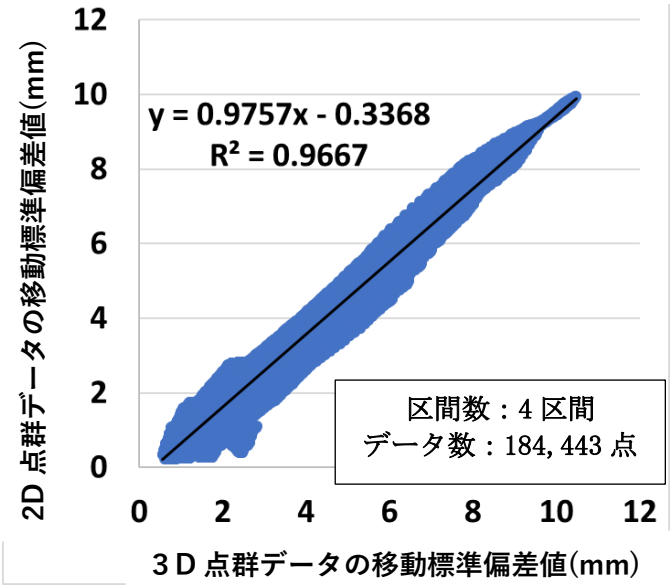


図-6.3 簡易局部変状評価法による二次元点群データと三次元点群データの相関図

6.3 他の局部変状への適用性

第３章では，路面性状測定車で取得した横断プロファイル（二次元点群データ）から，補正三次元点群データを作成し，簡易局部変状評価法にて，局部変状（Po）を検出した．しかしながら，簡易局部変状評価法は，路面高さの変化を伴う局部変状であれば，移動標準偏差値の集計範囲と閾値の設定により，他の局部変状でも検出できる．そのため，代表的な路面高さの変化を伴う局部変状であるポットホールを対象に検出の可否を検証した．検証は，**第３章**から**第５章**の開発および検証を行った路面性状測定車で取得した縦断方向 1cm，横断方向 1cm ピッチの補正三次元点群データを用いて実施した．

(1) 簡易局部変状評価法によるポットホールの検出

1) 検出対象とするポットホール

検討の前提条件として，ポットホールの形状を円柱形（図-6.4）と仮定した．また，検出は初期のポットホールも検出したいことから，直径および深さ 1cm のケース（図-6.4）と直径および深さが 2cm のケースの 2 パターンを想定して検討した．

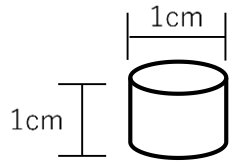


図-6.4 仮定したポットホール形状

2) 移動標準偏差値の閾値の設定

路面の高さデータだけでは，パッチングや舗装の施工目地等の影響から，ポットホールのみを抽出することはできない．そのため，移動標準偏差値に閾値を設けて他の変状との差を明確にして集計する必要がある．

直径および深さ 1cm のポットホールを補正三次元点群データで図示すると 10mm の点群が 1 か所（図-6.5 中央上段の黒丸内，以下「点群データ(1cm)」という．）となる．直径および深さ 2cm のポットホールを図示すると 20mm の点群が 2 か所（図-6.5 中央下段の黒丸内，以下「点群データ(2cm)」という．）となる．

また，移動標準偏差値の集計範囲は，最小となる縦断方向 2 データ×横断方向 2 データ（図-6.5 中央上段の実線四角枠，以下「集計範囲（4 データ)」という．)，縦断方向 3 データ×横断方向 3 データ（図-6.5 中央下段の破線四角枠，以下「集計範囲（9 データ)」という．)，縦断方向 4 データ×横断方向 4 データ（以下「集計範囲（16 データ)」という．)，縦断方向 5 データ×横断方向 5 データ（以下「集計範囲（25 データ)」という．）の 4 ケースとし，閾値を設定した．

閾値は移動標準偏差値の最大値とし，閾値を超過した箇所が，想定した大きさ（1cm or 2cm）以上のポットホールが発生している箇所であると仮定した．移動標準偏差値の閾値に対するポットホールの大きさとの集計範囲の関係を表-6.7 に示す．

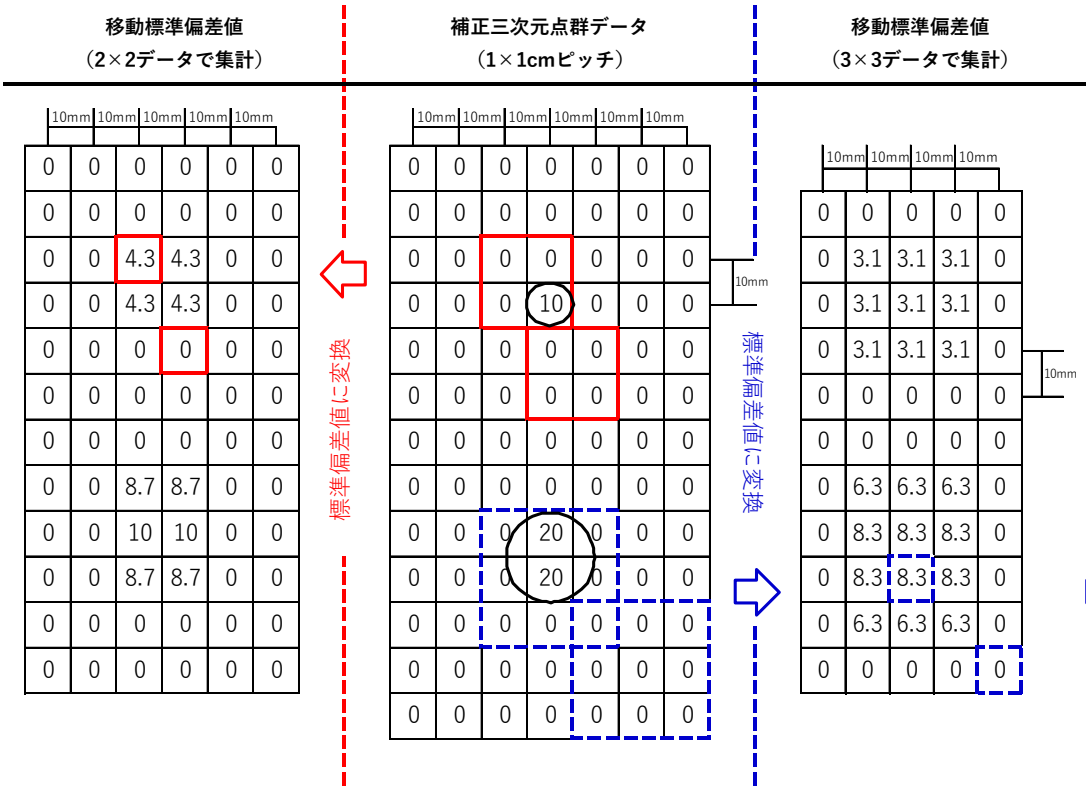


図-6.5 補正三次元点群データと移動標準偏差値例

表-6.7 移動標準偏差値の閾値

	2×2データ（1×1cmピッチ）	3×3データ（2×2cmピッチ）	4×4データ（3×3cmピッチ）	5×5データ（4×4cmピッチ）
1cmのポットホール（直径・深さ1cm）	4.3mm	3.1mm	2.4mm	2.0mm
2cmのポットホール（直径・深さ2cm）	10.0mm	8.3mm	6.6mm	5.4mm

(2) 簡易局部変状評価法による変状の検出結果

簡易局部変状評価法を用いて，ポットホール検出の可否，検出可能なポットホールの大きさを確認した結果が図-6.6 である．ポットホールの発生箇所との検証は，路面性状測定車で撮影したひび割れ画像を用いて実施した．また，簡易局部変状評価法を用いて，ポットホールの検出した結果を認識しやすいように可視化して検証した．補正三次元点群データは，変状が分かりやすいように着色を調整し，-30mm 以下を黒色，10mm 以上を白色にし，-30mm から 10mm の間は，移動標準偏差値の変化に合わせて，黒色から白色に変化させた．また，移動標準偏差値は閾値以上を黒色に着色した．

補正三次元点群データを見ると，ポットホールとともに，パッチングや舗装の目地等の

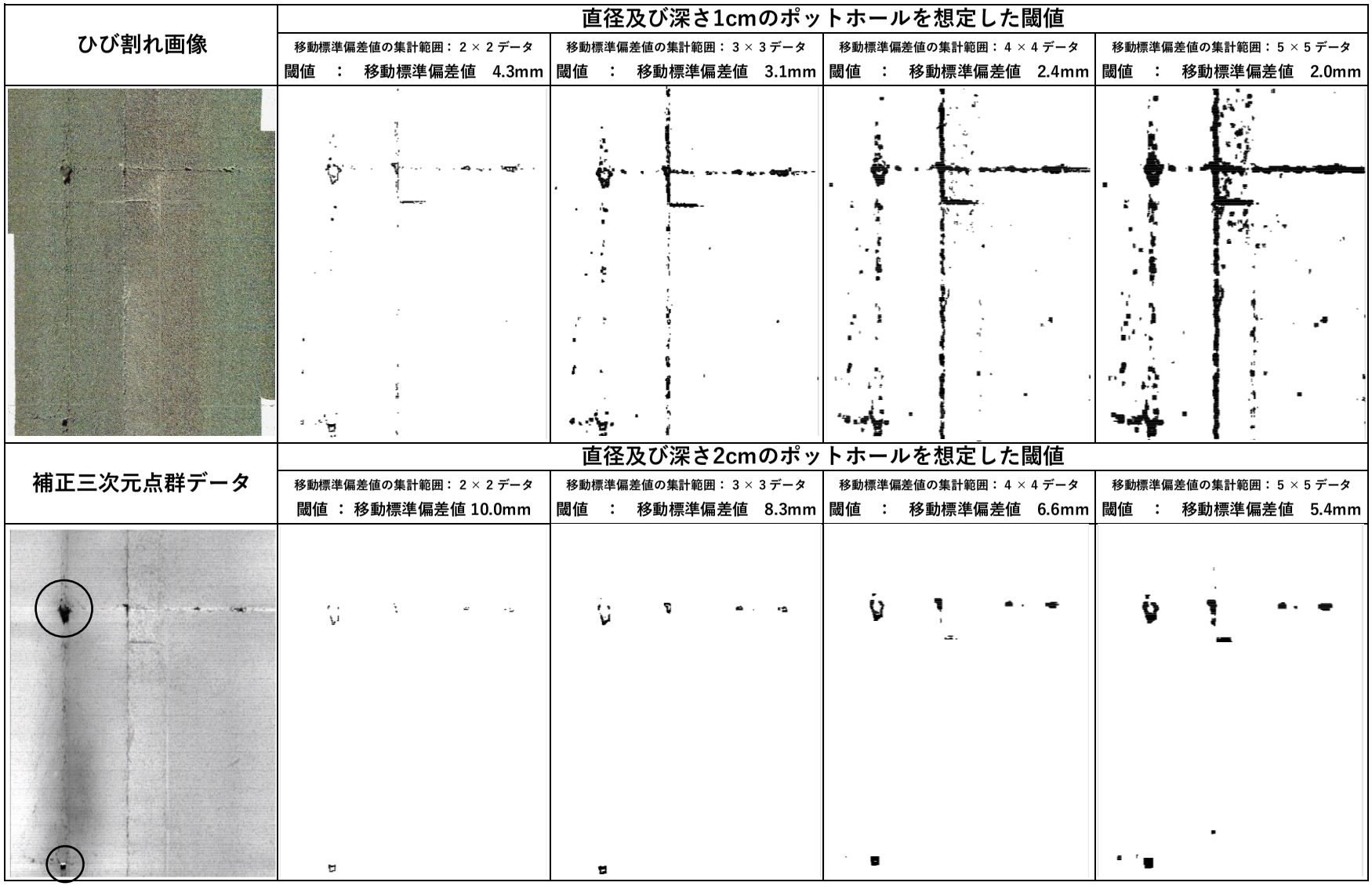


図-6.6 ひび割れ画像と簡易局部変状評価法による移動標準偏差値の比較

情報も検出している．また，左側の軌道部は全体的に黒色の傾向がある．これは，わだち掘れの影響によるものであり，路面高さだけでは特定の変状のみを抽出することは困難である．

直径 1cm のポットホールを仮定した点群データ(1cm)の場合，わだち掘れの影響はないものの，ポットホールだけでなく，施工目地やパッチング跡を抽出している．これは，集計範囲（4 データ）から集計範囲（25 データ）のすべての集計範囲において確認された．そのため，本方法では直径 1cm のポットホールのみの検出は困難である．

直径 2cm のポットホールを仮定した点群データ(2cm)の場合，集計範囲(4 データ)の場合と集計範囲(9 データ)の場合は，ポットホール部分のみ検出できている．これに対して，集計範囲(16 データ)の場合と集計範囲(25 データ)の場合は，ポットホール以外に施工継ぎ目が検出されている．これは，集計範囲が点群データ（2cm）の倍以上の面積となり幅広く変状を検知しやすくなったとともに，閾値が低下したことにより，仮定したポットホール以外の変状を抽出しやすくなったためである．

集計範囲(4 データ)の場合と集計範囲(9 データ)の場合を比較すると，集計範囲（9 データ）の方が鮮明にポットホールを検出している．これは，点群データ（2cm）に対して集計範囲（4 データ）の場合，最大値を検出する移動標準偏差値は 2 データなのに対して，集計範囲（9 データ）の場合は，最大値を検出する移動標準偏差値は 6 データ（図-6.4）となり，集計範囲（4 データ）に比べ，ポットホールの検出がしやすいためである．なお，大きめのポットホール（図-6.6 図中の補正三次元点群データの丸部分）に対して，移動標準偏差値で閾値を設けて着色すると，ポットホールの輪郭部が黒色に，中央部が白色になっている．これは，ポットホールの輪郭部は高さ変化が大きいため黒色になり，中央部は局部変状の底辺部分となり，高さ変化が少なく白色となるためである．

以上のことから，簡易局部変状評価法を用いて，局部変状（Po）以外の変状の検出が可能であることが明確になった．

また，今回使用した区間のデータでは，直径 2cm 以上のポットホールは検出可能であり，集計範囲(2cm)で閾値 8.3mm の場合にポットホール部分のみの検出が可能であった．

6.4 まとめ

本章では，簡易局部変状評価法の汎用性を確認するため．6.1.にて補正三次元点群データのデータ密度に対する検証，他の路面性状測定車で取得した横断プロファイル（二次元点群データ）に対する検証，6.2 にて３Ｄレーザースキャナで取得した三次元点群データに対する検証，6.3 にて他の局部変状に対する検証を行った．その結果，以下の知見が得られた．

1）補正三次元点群データに対するデータ密度の違いによる変状検出状況を確認した．簡易局部変状評価法の移動標準偏差値集計範囲（50cm×50cm）に対して，補正三次元点群データのデータピッチを 5cm×1cm（561 データ），25cm×5cm（33 データ），50cm×10cm（12 データ）の３パターンで比較したところ，どのデータピッチでも局部変状（Po）を検出できる．

2）同一機種に対する車体の違いによる変状検出状況を確認した．異なる車体でも同じ閾値で局部変状（Po）を検出できる．

3）機種の違いによる変状検出状況を確認した．他機種でも閾値を調整することにより，ポンピングを検出できた．

4）３Ｄ レーザースキャナで取得した三次元点群データに対する変状検出状況を確認した．簡易局部変状評価法を用いて，三次元点群データで，簡易局部変状評価法により局部変状（Po）を検出することができる．また，Ａ車と比較したところ，Ａ車と３Ｄレーザースキャナの変状検出結果は，高い相関（R^2＝0.967）がみられ，二次元点群データでも三次元点群データと同レベルの精度で局部変状（Po）の検出が可能である．

5）簡易局部変状評価法を用いて移動標準偏差値の集計範囲と閾値の設定を行うことにより，路面高さの変化を伴う局部変状を簡易に抽出することが可能となる．ポットホールの場合，縦断方向 1cm，横断方向 1cm の補正三次元点群データを用いて，直径２ｃｍ程度のポンピングであれば，抽出が可能である．

第７章 結論

7.1 研究成果の総括

定期的な点検で全舗装資産の健全性の把握と補修対象箇所を選定し，効率的な維持管理計画の立案を目的に，汎用性の高い二次元点群データによる測定技術および局部変状を測定できる三次元点群データによる測定技術を用いて，特定の局部変状を対象とした変状箇所の抽出および評価技術を開発した．また，約 9,000km ある都市間高速道路に対して，局部変状箇所を抽出するには，大量な三次元点群データの集計に膨大な時間と労力を要するという課題が発生する．そこで，実務上の運用に必要となる大容量データを短時間に分析し，路面の局部変状箇所を抽出する技術の提案を行った．

本研究で得られた成果を章ごとにまとめ，以下に記載する．

第１章では，本研究の背景として，ポーラスアスファルト舗装の変状形態と課題を以下のとおり記載した．

・ポーラスアスファルト舗装は，ポンピングや亀甲状のひび割れ，ポットホールといった，局部的な変状が主体であるという特徴を有している．

・密粒系の舗装に対する評価指標（わだち掘れ量，ひび割れ率（度），IRI 値，すべり摩擦係数）は，一定の延長連続して発生している変状を対象にした指標であるため．局部的な変状の抽出や評価が困難である．

第２章では，都市間高速道路の代表的な変状の種類を紹介するとともに，維持管理を適切に行うため必要な詳細調査の目的と主な詳細調査方法について記載した．

第３章ではポーラスアスファルト舗装の変状を明確にし，検討方針を以下のとおり提案した．

・ポーラスアスファルト舗装の変状実態は，設計要領で補修目標値を設定されていないポットホールおよびポンピングであった．

・既往の文献調査の結果，ポットホールおよびポンピングの主な発生要因は，「基層の剥離」および「路盤の脆弱化」であった．

以上の結果をもとに，以下の方針で検討を実施した．

・評価対象とする変状の特徴は「ポンピング発生区間に見られるポーラスアスファルト舗装の基層以深からの局部変状」とし，路面形状の高さと範囲の変化量をとらえることにより，変状過程の評価を検討する．

・開発技術の利用法として，定期的に路面性状測定車で測定し評価した路面の健全度を用いて，舗装補修工事の発注や中長期計画の立案を行うことから，使用する測定機器は，業務に定着しており，研究に必要なデータの入手が容易な路面性状測定車のデータを用いて評価法の開発を実施する．また，三次元で測定する機器が普及することが想定されることから，これらの機器に対する適用性も検証する．

・研究対象とする変状の段階は，舗装補修工事の発注や中長期計画の立案を行いたいことから，「潜伏期」，「進展期」，「終極期」のうち，研究対象とする変状の段階は，「潜伏

期」および「進展期」とする．

第４章では，汎用性の高い二次元点群データによる測定技術で，ポーラスアスファルト舗装の局部的な変状の評価を可能にするため，二次元点群データ（横断プロファイル）を活用して三次元点群データ化する手法と，ポーラスアスファルト舗装の特徴的な変状形態を三次元点群データの形状から評価する手法を検討した．その結果，以下の知見が得られた．

・路面性状測定車のわだち掘れ計測で取得した横断プロファイル（二次元点群データ）に対して，回帰直線の傾きと高さ（切片）を０にし，縦断方向に連続して分布させることにより，簡易に縦横断勾配を除去した三次元点群データ（補正三次元点群データ）が作成できる．

・補正三次元点群データに対して，縦横断 50×50cm の範囲で移動標準偏差値を算出することにより，ポンピング発生区間に見られるポーラスアスファルト舗装の基層以深からの局部変状（局部変状（Po））を検出できる．（簡易局部変状評価法）

・評価手法の検証を実施したところ，ポンピングが発生した区間の検出精度は約 90%であった．また，部分的な路面沈下があれば，ポンピングが発生する前でも検出できる．今回の区間では，最大 10 ヶ月，平均３ヶ月前に検知できた．

第５章では，補正三次元点群データに対する DL の転移学習を用いた部分的な路面沈下の自動抽出方法を提案した．提案は，補正三次元点群データを色情報に変換した上で，AlexNet を用いた転移学習により，変状画像の自動抽出を行った．その結果，以下の知見が得られた．

・移動標準偏差値を色情報（RGB）に変換すると，可視化した変状画像となり，DL の転移学習による局部変状の自動抽出が可能となる．

・移動標準偏差値を多段階にグループ化して色情報に変換することにより，画像特徴の差が明確になり，自動抽出精度を向上させることができる．

第６章では，簡易局部変状評価法の汎用性を確認するため．補正三次元点群データのデータ密度に対する検証，他の路面性状測定車で取得した横断プロファイル（二次元点群データ）に対する検証および３Ｄ レーザースキャナで取得した三次元点群データに対する検証を行った．その結果，以下の知見が得られた．

・従来補正三次元点群データに対するデータ密度の違いによる変状検出状況を確認した．簡易局部変状評価法の移動標準偏差値集計範囲（50cm×50cm）に対して，補正三次元点群データのデータピッチを 5cm×1cm（561 データ），25cm×5cm（33 データ），50cm×10cm（12 データ）の３パターンで比較したところ，どのデータピッチでも局部変状（Po）を検出できる．

・同一機種に対する車体の違いによる変状検出状況を確認した．異なる車体でも同じ閾値で局部変状（Po）を検出できる．

・機種の違いによる変状検出状況を確認した．他機種でも閾値を調整することにより，局部変状（Po）を検出できる．

・３Ｄレーザースキャナで取得した三次元点群データに対する変状検出状況を確認

した．簡易局部変状評価法を用いて，三次元点群データで，局部変状（Po）を検出できる．また，補正三次元点群データによる変状検出結果と比較したところ，三次元点群データの変状検出結果と高い相関（R^2＝0.967）がみられ，三次元点群データでも同様の変状検出が可能である．

・簡易局部変状評価法を用いて，検出したいポットホールの大きさに合わせた移動標準偏差値の集計範囲と閾値を設定することにより，ポットホールの検出が可能となる．

7.2 今後の展望と課題

本研究では，路面性状測定車のわだち掘れ計測で取得する横断プロファイルに対し，縦横断勾配を 0%に補正し縦断方向に連続して分布させ，局部変状を抽出できる補正三次元点群データを作成した．また，補正三次元点群データもしくは三次元点群データに対して，縦横断 50×50cm の範囲で移動標準偏差値を算出することにより，局部変状（Po）の検出が可能な簡易局部変状評価法を開発した．このことにより，これまで，車上目視点検で目視観察を行うことにより抽出していた局部的な変状を路面性状測定車で計測し，計画的な補修計画の立案が可能となる．

しかしながら，今回開発した技術は要素技術であり，実運用に際して，下記に示す解決すべき課題がある．

・閾値の設定

本開発技術は，測定機種の違いにより閾値の調整が必要な場合がある．そのため，測定機種ごとに閾値を設定する必要がある．

・補修目標値の設定

補修対象区間を選定するためには，補修目標値を設定する必要がある．そのため．補修実態を収集し，補修目標値の設定が必要となる．

・劣化推計の検討

計画的な補修計画を立案するためには，最適な補修時期を明確にするともに，劣化推計が重要となる．そのため，局部変状（Po）の変状過程を明確にする必要がある．

本研究の成果が，新たな路面評価技術の礎となり，計画的な舗装補修計画が可能となることを期待したい．

謝 辞

本論文は，筆者が北見工業大学大学院工学研究科博士後期課程（生産基盤工学専攻）在籍中に，北見工業大学と株式会社高速道路総合技術研究所との共同研究成果を基に，新たな知見を加え，研究成果をまとめたものである．本論文を完成させるにあたり，多くの方々からのご指導，ご高配およびご支援を賜りました．

北見工業大学 川村彰教授には，2007年に走行快適性に関する共同研究で初めてお会いした時から，数多くの知見だけでなく，物事に正面から向かい合い真摯に答えを導いていくことの重要性をご指導いただきました．また，学位取得の機会を与えて下さったことを心より深く御礼申し上げます．

本論文の審査並び貴重なご指導をいただきました，北見工業大学　三上修一教授，髙橋清教授，北海道大学　萩原享教授に謹んで感謝の意を表します．

北見工業大学 富山和也准教授，株式会社片平新日本技研　大町晋一郎氏には，走行快適性に関する共同研究を実施している頃から，試験の実施，データの収集，試験結果の考察について多大なご支援・ご協力をいただきました．また，共同研究等での様々な課題に対して，大変長い時間議論できたのは良き思い出であり，筆者にとって大きな糧となりました．心より深く感謝申し上げます．

株式会社総合技術研究所　神谷恵三舗装研究担当部長および高橋茂樹舗装研究室長には厳しくも温かい指導を賜りました．現在の筆者の基礎を作って頂いた事に深く御礼申し上げます．

株式会社ネクスコ東日本エンジニアリング　小野義道調査役および道路性状調査課の皆様には，本研究を開始するにあたり，構想の段階であったにもかかわらず，路面性状測定車で同一区間を繰返し測定し，データを提供していただきました．２年以上の期間にわたり，毎月継続して測定した路面性状データがなければ，本研究を実証することはできませんでした．多大なご支援・ご協力に対し，心より感謝申し上げます．

現在，筆者が在籍している東日本高速道路株式会社関東支社　佐藤正和上席舗装指導役，木村泰技術企画課長には，業務だけでなく学業に関してもご高配を賜り，厚く御礼申し上げます．

最後に私事になりますが，学位取得のためほとんどの休日を研究に費やしたにもかかわらず，最後まで応援してくれた母 幸栄，息子 空希に心から感謝致します。

2019 年 9 月

江 口 利 幸