

博 士 論 文

簡易型路面性状測定車の開発と
道路ユーザーの視点に立脚した路面評価指標の構築
- タイヤ/路面騒音を活用した路面損傷の識別評価に関する研究 -

2018 年 9 月

岡部 俊幸

目 次

第1章 序論	1
1.1. 研究背景	1
1.1.1. 日本の道路状況	1
1.1.2. 維持修繕の取り組み	2
1.1.3. 道路ユーザーによる評価	3
1.2. 既往の研究	6
1.2.1. 路面特性とタイヤとの関わり	6
1.2.2. 音による異常検出	8
1.3. 本研究テーマと目的	10
1.4. 本文の構成と内容	12
1.5. 参考文献	15
第2章 簡易型路面性状測定車の開発	19
2.1. 概要	19
2.2. 測定装置のシステム構成と設定	21
2.3. きめ深さ (MPD) 測定システムの開発	25
2.3.1. 概要	25
2.3.2. 測定システムの検討	26
2.3.3. MPD の検証	28
2.4. 拡張型タイヤ/路面騒音システムの開発	29
2.4.1. 測定路面と測定方法	29
2.4.2. タイヤ/路面騒音の測定結果	31
2.4.3. 重回帰分析による速度・温度補正方法の検討	35
2.4.4. 補正式の妥当性の検証	37
2.5. 繰り返し精度の違い	41
2.6. 防風スクリーンの違いによる音響特性	43
2.7. まとめ	45
2.8. 参考文献	47

第3章 路面変状とタイヤ/路面騒音との関連分析	49
3.1. 概要	49
3.2. 対象路面と測定内容	50
3.3. 解析処理方法の検討	51
3.3.1. 聴感補正	51
3.3.2. 時間重み付け特性（時定数）の変化	52
3.3.3. 解析間隔の刻み	56
3.3.4. 判定区間の設定	56
3.4. 路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音との関係	57
3.4.1. 路線の路面特性とタイヤ/路面騒音	57
3.4.2. 路面損傷の評価	60
3.4.3. 局部損傷の判定	65
3.5. まとめ	66
3.6. 参考文献	67
第4章 実路における路面損傷の識別判定手法の開発	69
4.1. 概要	69
4.2. 対象路線の概要	70
4.3. 市道の路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音	73
4.3.1. 概要	73
4.3.2. 各市道の路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音	75
4.3.3. 各路線の路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音の関連性	104
4.4. 機械学習を利用した路面損傷の識別判定	106
4.4.1. 機械学習について	106
4.4.2. 分類手法を用いた路面損傷の識別判定	110
4.4.3. 拡張型タイヤ/路面騒音による路面損傷の評価指標	119
4.5. まとめ	126
4.6. 参考文献	128
第5章 結論	129
謝 辞	133
学位論文の基礎となる公表論文リスト	134

第1章 序論

1.1. 研究背景

1.1.1. 日本の道路状況

道路は経済活動及び生活活動に必要不可欠な社会資本であり、国民のニーズとして快適・安全・円滑・環境保全などの観点から重要な役割が求められている。現在、わが国の道路ストックは、道路整備延長約120万km（未舗装分を除くと約100万km）^[1]と膨大なストック量であり、特に市町村道路の割合は85%と非常に多く、高度経済成長期に整備されたインフラ施設の老朽化に伴い、維持管理・更新の時代を迎えている。一方、わが国の厳しい財政状況の下、本格的な少子・高齢化、人口減少の時代を迎えているため、限られた予算で効率的に既存道路ストックの維持管理業務を実施する必要がある。

舗装ストックと舗装事業費の推移^[2]は図-1.1に示すように、1990年度半ばごろまでは舗装ストックの増加とともに舗装の維持修繕費にかかる予算も増加していたが、それ以降財政制約等の影響により舗装の維持管理修繕費は大幅に減少している。このような状況の中、老朽化対策に資することが重要な課題となり、舗装分野におけるメンテナンスシステムを構築し、舗装の維持修繕を適切かつ効率的に行うことが重要である。

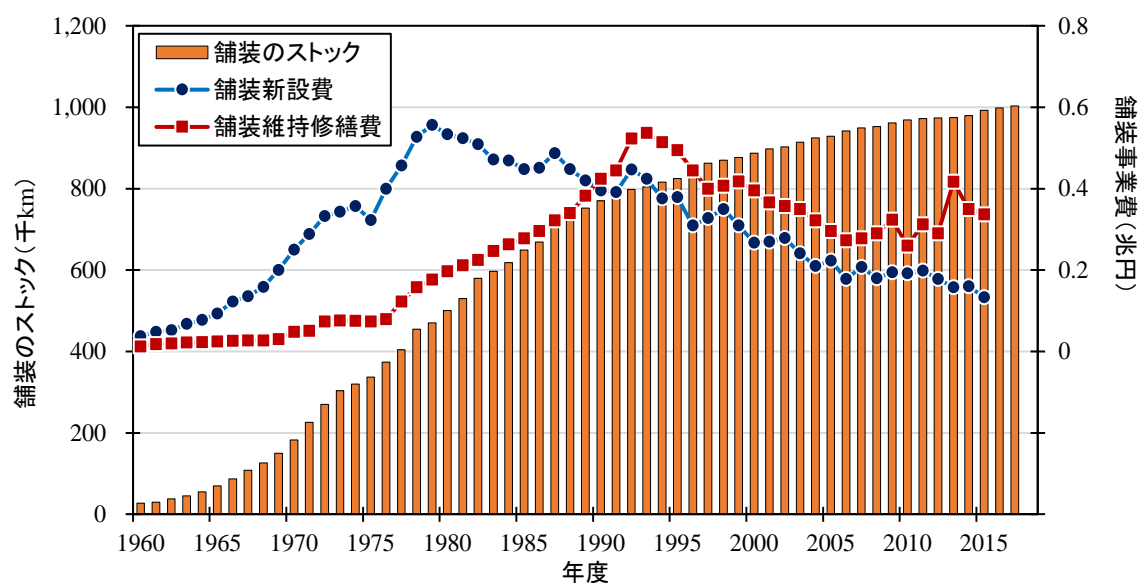


図-1.1 舗装のストックと舗装事業者の推移^[2]

- ・ 舗装のストックは未舗装道路を除いた道路である。
- ・ 文献[2]に対してデータを加筆

道路の役割は自動車や自転車，歩行者が安心して通行でき，経済・生活を支える機能がある．道路交通騒音・振動問題における生活環境の快適を保つための方策として，環境省では騒音・振動対策について発生源対策，交通流対策，道路構造対策，沿道対策など諸対策をまとめている^[3]．その中で道路舗装での対応策は「空げきの多い舗装（排水性舗装）を舗装し，道路低減を図る」ことが挙げられ，その環境改善効果は平均的に約3デシベルといわれている．しかし，この対策は新設や維持修繕に使用する排水性舗装を指しており，舗装の供用性に伴うひび割れやわだち掘れ，段差等による対策として取り扱われていないのが実状である．

1.1.2. 維持修繕の取り組み

舗装の維持管理は1970年代に維持修繕要綱^[4]によって補修の要否判断の目標値が定められ，1980年代に建設省（現在の国土交通省）が維持管理指数（Maintenance Control Index：MCI）を開発^[5]した．このMCIは3種類の路面特性であるひび割れ率，わだち掘れ量，平坦性（現在は平たん性という）を用いて算出するのが基本であり，以下の3式のうちで最も小さい値をMCIとしている．MCIの判断基準は，5以上は望ましい水準，4以下は修繕が必要，3以下は早急に修繕が必要であることを示している．

$$MCI=10-1.48C^{0.3}-0.298D^{0.7}-0.47\sigma^{0.2} \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

（平坦性 σ が未測定の場合は (1') の MCI_0 を用いる）

$$[MCI_0=10-1.5C^{0.3}-0.3D^{0.7} \quad \dots\dots\dots (1.1')]]$$

$$MCI_1=10-2.23C^{0.3} \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

$$MCI_2=10-0.54D^{0.7} \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

ここで， C ：ひび割れ率% D ：わだち掘れ量 mm

σ ：平たん性 mm が未測定の場合は MCI_0 を用いる

このMCIは現在国道・県道，市町村まで幅広く道路管理の指標として利用されているが，この式の原点は国道を対象に作成されたものであり，市町村道路への適用性は不明である．しかしながら，現在市町村で作成されている維持管理計画や舗装修繕マニュアル等は，このMCIを修繕の判断基準として独自に定めているところが多い^{[6][7][8][9][10]}．道路網に応じたMCI管理を作成するには，路面性状の評価値が必要でありその値を得るために

は連続的な測定可能な大型の路面性状測定車が必要である。しかし、道路の路面調査に関しては、膨大なストック量を調査するには、路面調査に掛かる費用や解析時間等が掛かるため、市町村の管理体制の点からは非常に困難である。

近年、地方自治体が抱える膨大な道路ストックの実態調査では、総点検を実施する際の参考資料として、平成 25 年 2 月（2013 年 2 月）、道路ストックの総点検^[11]が実施されている。この総点検の舗装編では道路の損傷評価を目視判定し、道路の状況を把握し修繕の候補箇所を抽出し、維持管理を効率的に行うための情報を目的に点検を実施するものとされている。舗装点検の実態調査によるアンケートでは、点検の割合は都道府県の約 8 割、市町村の約 2 割でしか統一的なデータの取得が行われていない状況であった。そのため、市町村の点検は、主要な幹線道路を何十年に点検、道路パトロールのみの点検などといったように今まで道路の実態調査が継続的または調査できていない自治体が多かった。そのため、道路の劣化進行度合いは把握できず、適切な予防保全への対策や修繕等の検討が行われていない状況であった。このような状況の中、平成 28 年 10 月（2016 年 10 月）、国土交通省は今後の舗装マネジメントの考え方を踏まえ、舗装の修繕の効率的な実施を目的とした舗装点検要領^[12]を策定した。ここでは道路特性に応じた走行性、快適性の確保を資することを目的とした点検になっているが、走行安全性に関する路面の局部的なポットホールや沈下、凹凸等については事象外とされている。

つまり、現在使用されている道路の点検手法である舗装点検要領は、道路管理者側からみた指標であり道路利用者または沿道住民側で重要視される、走行時の乗り心地、快適性、騒音・振動、水はねなどの評価には関与されていないのが実状である。

1.1.3. 道路ユーザーによる評価

道路の状態を長期的に維持していくためには、維持・修繕・更新を効率的かつ効果的に管理することが重要である。現在行われている道路資産の管理では、路面性状測定車で性能評価値を確認し MCI による評価や総点検の目視判定による評価を活用し、管理目標を定めつつ、道路の安全性対策等を加味した優先順位を定め、優先順位が高い路線から維持管理が行われている。しかしながら、これらの評価指標は道路管理者側からの視点であり、必ずしも道路利用者・沿道住民等のサービス水準に直接連動しているとは限られていない。

平成 9 年度（1997 年度）、国道を対象に行われた修繕箇所について苦情の有無を調査した結果^{[13][14]}、修繕箇所のうち約 45%が修繕前に苦情を訴えている。その苦情内容として、

道路利用者からの意見では乗り心地が最も多く、次いで水はね、すべりとなっている。また、沿道住民からの意見では騒音・振動に係るものが多い（図-1.2 参照）。

久保ら^{[15][16]}は道路ユーザー（道路利用者や沿道住民）の要望を把握するため、「普段よく利用している道路に対しての不満や危険を感じる」項目についてアンケート調査を実施している。道路利用者の回答ではマンホールによるすべり、路面凹凸やわだちによる振動や乗り心地の悪さ、ハンドル取られなどの事象が多く、特に路面の補修跡や段差があると不快に感じる人の割合が多い。沿道住民の回答では、路面凹凸による水はねや走行する道路交通騒音・振動での問題が多い。このアンケートの結果から、道路ユーザーの要求性能は、道路利用者は振動・衝撃が小さく、乗り心地が良いこと、沿道住民は道路から伝播する騒音・振動が小さく、雨の日は道路側からの水はねがないことである。

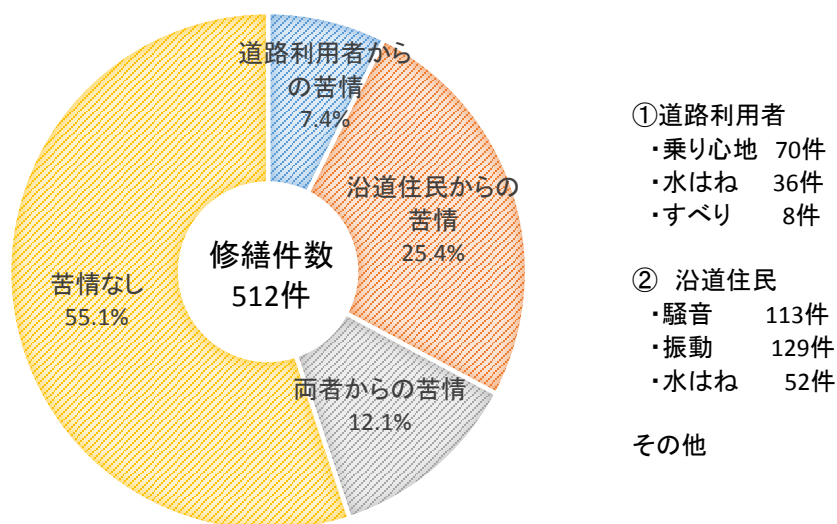


図-1.2 修繕前の苦情の割合^{[13][14]}

そのため、道路ユーザーにとって道路交通騒音・振動は不快感やうるささとして受け止められ、その影響が「どの路線のどこの場所で発生しているのか」を把握することが必要である。道路交通騒音・振動を引き起こす直接の原因^{[17][18]}は、図-1.3^[19]に示すように道路構造、交通条件（車両速度、交通量、車両の大きさなど）、路面の状況（縦断凹凸、段差、ポットホールなど）、地盤条件など様々な要因によって発生・伝播するものである。道路管理者は、路面の状況を実際の測定などにより定量的に調査し、舗装の破損の状況に応じて構造調査も実施している。代表的な路面調査項目は、平たん性、わだち掘れ、ひび割れ率などを調査し、破損原因の調査では採取コアの観測や性状試験調査、たわみ量測定などを

実施している。これらの調査は前項で示した補修の要否判定によって維持管理計画等に使用されている。

路面の機能は、交通の安全性、円滑性、快適性、環境の保全と改善などから、道路ユーザーの要求に応じた目標設定も必要になる。例えば、道路交通騒音は車両の走行速度が大きいほどタイヤ/路面騒音が支配的となり、その割合は時速 50km の場合、乗用車で 82% 以上、小型貨物車両で 41～85% といわれている^[20]。道路交通振動では、段差量が高いほど、走行速度が速いほど、路面に大きな揺れを発生させ^[21]、地盤支持力が低いと発生源より離れた場所まで伝播し振動の影響範囲も広がるといわれている^{[22][23]}。

そのため、路面段差（不規則な凹凸も含む）等の局所的な路面変状が存在すると、タイヤ振動から車両に受ける衝撃加速度が大きくなり乗り心地への影響、騒音・振動による周囲環境へ問題を引き起こす原因にもなりうる。

路面の局部損傷を発見する技術として、車両のタイヤの車軸に取り付けた加速度計を用いて加速度の突発的な振幅の大きさから段差量を推定する方法^{[24][25]}や路面プロファイルから振幅の大きさによって局所損傷の評価を提案^[26]する方法がある。しかし、これらの評価方法は、路面損傷を発見することは可能であるが、損傷形態の特定や路面損傷から受ける影響度の評価までには至っていない。

以上のことから、道路利用者や沿道住民の多様な要請に応じて、道路の局部損傷である凹凸、段差等をいち早く発見し、騒音・振動に対応した適切な舗装の評価法が望まれる。

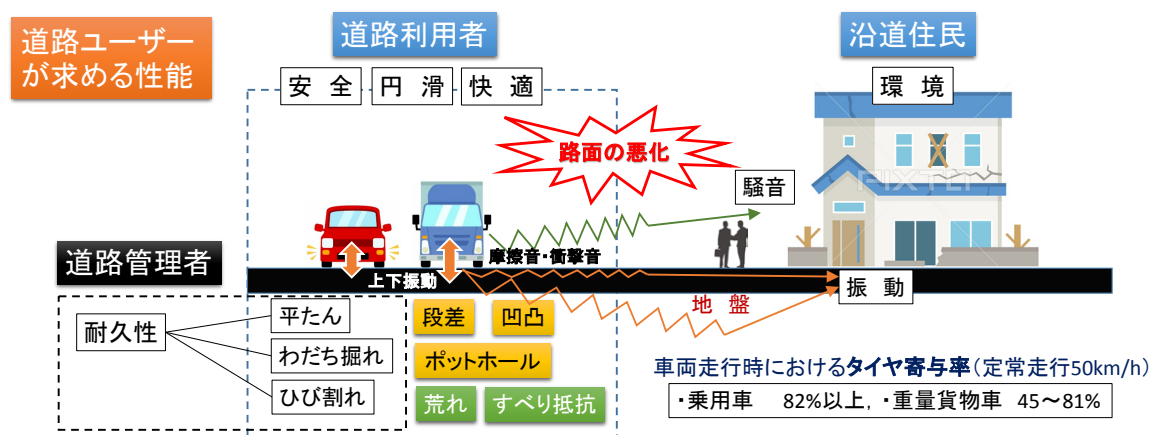


図-1.3 道路交通騒音・振動の発生・伝播経路^[19]

1.2. 既往の研究

1.2.1. 路面特性とタイヤとの関わり

(1) 概念

路面特性は路面が本来有する基本特性とそれから派生する特性とに区別されている。

図-1.4 に舗装路面の最適化のための概念図を示す^[27]。この図は舗装の維持や車両の消耗、交通安全、乗り心地、環境保護などを含めた評価のための決定要因に影響を与えるものであり、路面特性を体系的に把握する方法として提案されたものである。1次特性のうち平坦性やテクスチャは、派生特性とリンク数が多く、数多くの研究がなされているが、タイヤ騒音はタイヤ単体やサスペンションなど車両に関する研究が主であり、舗装分野では低騒音舗装を評価している研究が多い。

一方、PIARC では主として路面の幾何形状により路面の特性を分類し、他の要因への影響評価に用いている^[28]。図-1.5 は PIARC で定義された路面特性の対象領域であり、「ミクロテクスチャ」、「マクロテクスチャ」、「メガテクスチャ」及び「ラフネス」の概ね4区分で分類している。図より路面凹凸の波長が騒音に関連する部分が多く、タイヤと路面との関わりが大きいといえる^[29]。

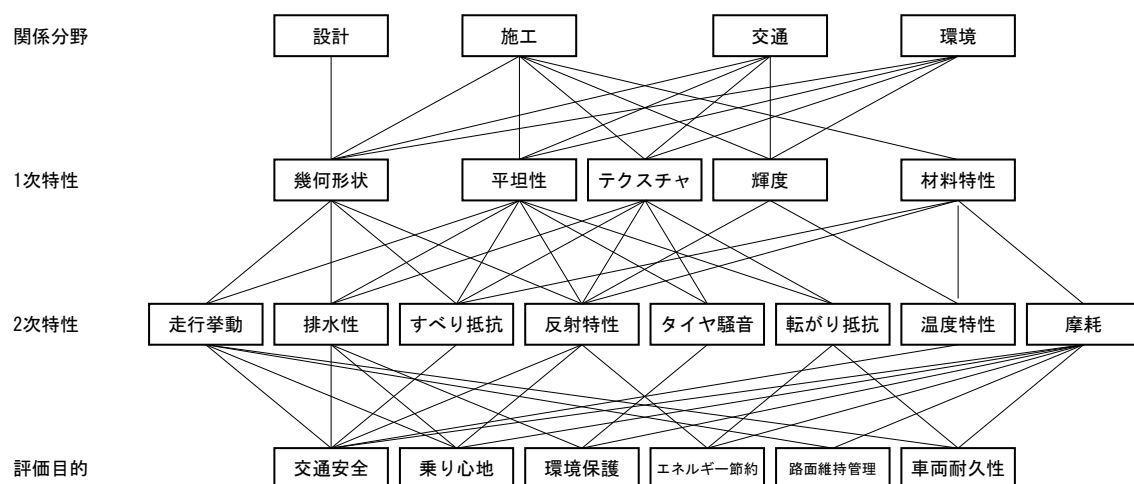


図-1.4 舗装路面の最適化のための概念図^[27]

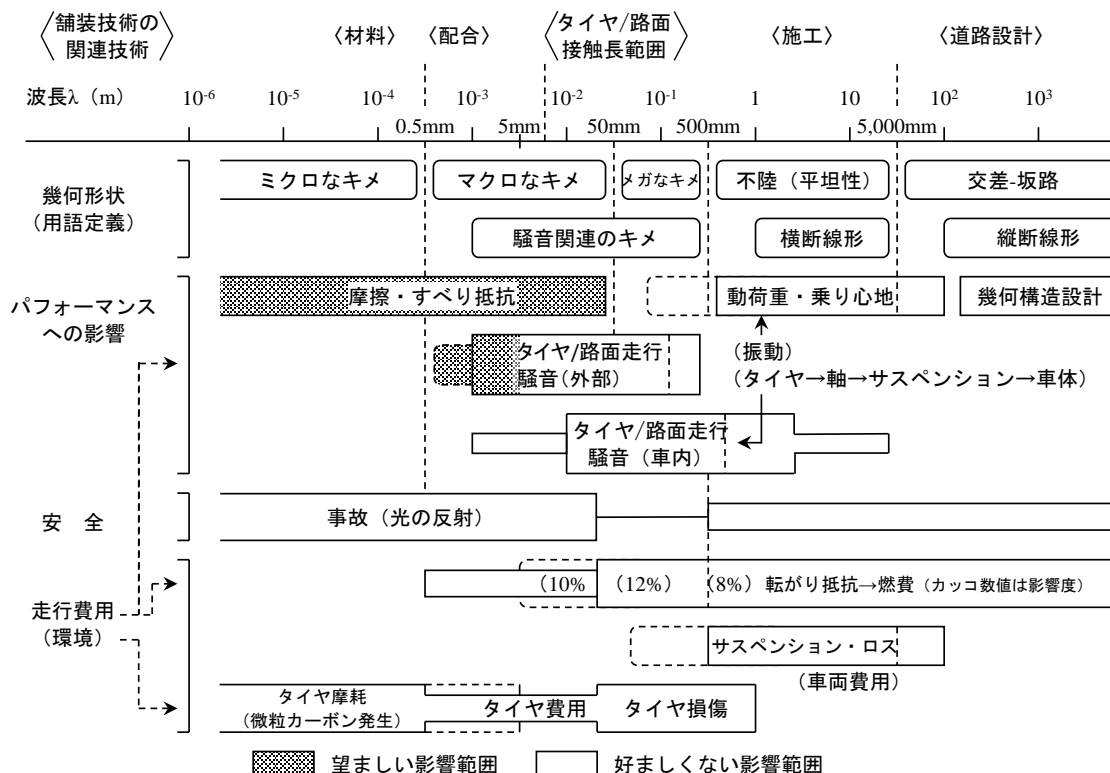


図-1.5 路面の波長の定義と各種特性に及ぼす影響 [28]

(2) タイヤ/路面騒音

1) 騒音低減対策

自動車走行騒音の主な音源の一つとしてタイヤ/路面騒音があり、その発生音を低減させることは道路交通騒音の低減に効果的である。タイヤ/路面騒音は、タイヤと路面間との接触によって発生し、その発生音はタイヤの種類や形状、路面の種類によって変化する [30]。発生音の低減対策では、それぞれの分野で研究開発が数多く行われているが、タイヤ側と路面側の両面での検討はほとんど実施されていない。タイヤ自体は用途に応じ多岐に開発され使用されている。日本のタイヤは JATMA (日本自動車タイヤ協会) で規格が定められ、特に乗用車タイヤは道路環境の整備や車両の高速化に伴い、運動性能と耐摩耗性能等に優れたものが開発され、日々更新を繰り返している [31]。タイヤ/路面騒音を計測する場合、使用時期に選定したタイヤを使用しても数年後には材質やトレッドパターンが変わってしまうなど、標準タイヤの選定が困難である。舗装分野は路面騒音の評価の実施にあたり、土木研究所と(一社)日本道路建設業協会との共同研究において、タイヤ製造用の型枠が確

保され、かつ一定供給が可能な普通タイヤを検討している。この結果、実験で行ったタイヤはタイヤ/路面騒音の測定方法として様々な要因をクリアでき有効であることが確認され^{[32][33]}、現在の舗装性能評価法の測定方法^[34]に採用された。

路面からの低騒音化技術は、低騒音舗装として実績がある排水性舗装^[35]があり、更に低騒音化を目指した小粒径化、表層の増厚及び2層式^[36]、路面テクスチャを変化させる方法等^{[37][38]}がある。これまで道路交通騒音を低減するために、タイヤ及び舗装、道路構造や交通量などでそれぞれの分野で対策を講じている。しかし、舗装路面の対策では、新設舗装に限られた効果のみが検討され、既設舗装における損傷程度の影響等については検討されていない。

2) 測定方法

タイヤ/路面騒音の測定方法は、欧州においてタイヤの騒音や路面騒音の研究^[39]に使用され、用途別に測定方法が定義されている。その中で日本での測定方法は、タイヤ近傍で測定する Close-Proximity に類似し、舗装性能評価法にある騒音値（測定用普通乗用車によるタイヤ/路面騒音の測定）^[34]である。この測定方法は、騒音低減機能を有する舗装を対象として定常走行で測定したタイヤ/路面騒音を等価騒音レベルで評価するものであり、その代表的な方法は ISO11819-2^[40]で規格化されている。ISO の方法は測定車の外側にマイクロホンを設置しなければならないため、測定上法規制の対象となる。このようなことから、ISO 規格のオプション位置に相当するマイクロホンの設置位置で測定している方法^{[41][42]}が多い。また、路面の騒音値を規定した性能規定発注工事や総合評価工事によるタイヤ/路面騒音の検査では、舗装路面騒音測定車（Road Acoustic Checker : RAC）^[43]が用いられ、測定用タイヤは第5輪の特殊トレッドパターンが使用されている。このタイヤの開発コンセプトは、密粒度アスファルト舗装と排水性舗装（13）のタイヤ/路面騒音の差を明確に判断するために開発された特殊タイヤ^[44]である。

1.2.2. 音による異常検出

音を活用した異常検知及び診断技術^{[45][46][47]}は様々な分野で研究され、常時監視システムや安全、工場で動いている機器やラインの故障発見などに使用されている。一般家庭では「音」が機器の故障やその前兆を示すことが多く、例えばパソコンのハードディスクが急に異音がしたり、生活に使用されているエアコンや洗濯機、冷蔵庫などにも普段とは音

が違うように聞こえたり，自動車や空調機などの運転音に変化すれば何らかの異常が見つかるケースもある．このように音は我々が日常生活で身近に感じるものである．

このように機器の異常音から検知する方法の利点は以下のとおりである．

① 対象とする機器のメカニズムが未知でも適用可能

一般的には機械がどのように故障するかは不明であり，どのように物理量を計測すれば異常音の検知が可能かどうかは困難である．しかし，機器の観測に可能なセンサを用いることにより異常の検知や予測が可能^[48]であることの報告もある．いずれにせよ，対象物が壊れる場合はいつもと異なる音が発生するため，音を使って異常を検知できる可能性が高い

② 音の測定は容易

音の測定は，マイクロホンを対象機器の近傍に設置すれば測定は容易である．しかし，音の測定の問題として以下の課題も挙げられる．

● 周囲環境の影響

音を測定する場合，その機械だけが単独で稼働しているケースは少なく，周囲環境から発生している作業音や他の機械の稼働している音を収録してしまう．そのため，機器の音を測定する際には，対象物から発生している音に対して外部の雑音を出来るだけ小さくする必要がある．道路交通騒音の測定^[49]では，特定の定常騒音の騒音レベルと暗騒音のレベル差が 10dB 未満であれば，暗騒音の影響を無視できるとされている．

● 異常音の収録と判断

機器の異常音は機器が故障するまで収録しなくてはならないことや，常に故障の原因が同じ箇所に発生するとは限らない．最近では異常検出の分野で，機械の状態が正常か異常かどうかを判定できる技術として機械学習^{[50] [51]}を活用した技術開発が進められている．

道路では自動車が道路上を走行することによって，路面の種類^{[52] [53]}や損傷状態^{[54] [55]}が異なれば車内騒音や自動車騒音は異なり，自動車の速度^{[42] [56]}が変化すればその音の大きさや音色も変化する．たとえば，新しい舗装は路面の平たん性もよく，路面のきめが一定しているため，定常走行速度及び同一環境温度条件下であればスムーズな音の状態となるが，供用後の交通状態や紫外線等によって路面のひび割れや劣化等が進行し路面破損の

形態の派生に伴い徐々に音が変化すると考えられる。特にポットホールや局所的なひび割れの沈下などは、車両のタイヤが溝に落ち込むことによって、タイヤ衝撃音や摩擦音等が発生することになる。

そのため、タイヤと路面とが接触する際の発生音を利用することにより、道路ユーザーが不快に感じる路面損傷の騒音・振動原因を特定することが可能であるといえる。

1.3. 本研究テーマと目的

わが国における舗装の維持管理は、前述したように如何に膨大なストック量の舗装を適切に点検・診断し、必要な措置を実施することが求められている。

地方自治体は、「舗装点検要領」をもとに現地の舗装の破損を適切に判断ができ、業務に携わる技術者が点検・診断・措置の判断が必要とされているが、技術系職員の人材不足により、目視点検すらままならず、外注などが挙げられる。このため、安価で簡易に路面性状が測定でき評価する技術が求められている。

そこで本研究は、道路ユーザーの視点に立脚した路面評価指標を構築するため、路面の危険をいち早く異常検知できる技術開発として、タイヤ/路面騒音を活用した路面損傷の識別判定に関する研究を行う。本研究では「安価に測定できる簡易型路面性状測定車」を活用し、路面特性にとって重要なファクターとなる「きめ深さ (MPD) 測定システムの開発」と、音響特性を活用した路面損傷の識別判定を可能する「拡張型タイヤ/路面測定システムの開発」を行うものとした。

評価を行うにあたり、以下のとおり目的を設定した。

(1) 簡易型路面性状測定車の開発

- ① 路面テクスチャは、路面特性を知る上で重要なファクターであり、タイヤ性能との観点から転がり性能、すべり摩擦抵抗、路面騒音と関連性が高く^[57]、その測定法は低速型測定器を用いるため、道路規制内での路面調査となる。そこで、簡易型路面性状測定車に搭載している車載型プロフィロメータ (3 点式レーザ装置) を利用し、計測装置の測定ピッチの改造及び収録データを用いた解析処理手法を検討し、高速移動型のきめ深さ (MPD) 測定システムの開発を行う。

- ② 路面のマクロテクスチャの変化は、道路ユーザーにとっての走行安全性や騒音・

振動など様々な影響をもたらすことから、本研究では車両のタイヤと路面とに発生するタイヤ/路面騒音の周波数特性に着目した。現在実施されている「タイヤ/路面騒音」は測定時の速度・温度の影響があるため、その補正方法が提案されている。しかし、今回取り上げた「タイヤ/路面騒音の周波数特性」の補正方法はないため、新たに補正方法を考案し、その精度等を確認する必要がある。そこで、タイヤ/路面騒音の周波数特性に応じた速度及び温度補正の方法を検討し、考案した補正式の妥当性と繰り返し精度について確認する。ここで開発した補正方法で得られるタイヤ/路面騒音を「拡張型タイヤ/路面騒音」とした。

- ③ このタイヤ/路面騒音の測定は、タイヤ後輪後方部に取り付けたマイクロホンが走行時における風の影響を受けるとともに、水たまりまたは急な降雨等の保護として一般的な防風スクリーンではなく、全天候型防風スクリーンを採用した。しかし、全天候型防風スクリーンの形状は2タイプあるため、その選択方法も不明である。そこで、この2種類の防風スクリーンについて測定時の影響度を確認する。

(2) 路面変状とタイヤ/路面騒音との関係分析

- ④ 周囲環境の影響が少ない構内道路を使用し、前章で開発した拡張型タイヤ/路面騒音の利用し、路面損傷が識別判定できる拡張型タイヤ/路面騒音の解析処理方法について検討する。
- ⑤ ④の解析方法に基づき、構内舗装における路面損傷と拡張型タイヤ/路面騒音を応用し、路面損傷の識別が可能なサウンドスペクトログラム利用した手法を提案し、周波数特性との関係について検討する。

(3) 実路における路面損傷識別判定手法の開発

- ⑥ 一般市道における路面を測定し、路面損傷と速度が異なるタイヤ/路面騒音の関連性について確認する。
- ⑦ タイヤ/路面騒音の周波数特性と路面損傷を比較検討し、路面損傷の識別判定について検討する。
- ⑧ 路面騒音を活用した路面損傷の識別判定の評価技術を構築する。

1.4. 本文の構成と内容

本論文は、次の5章から構成されており、各章の関係は図-1.6に示すとおりである。

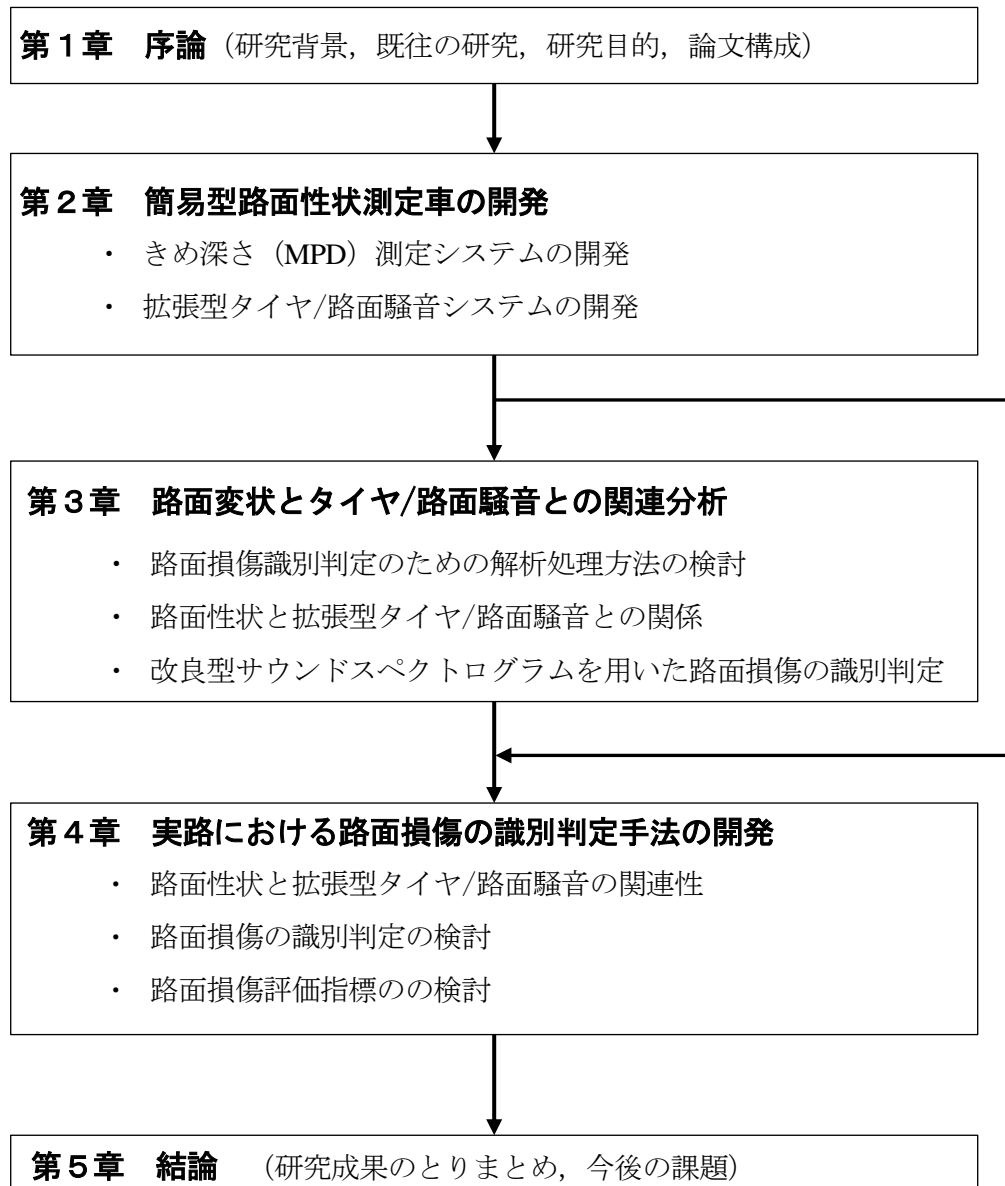


図-1.6 本論文の各章の関係

各章の主な内容を以下に示す.

第1章 序論

第1章では、本研究の背景と目的、既往の研究をもとに本研究の位置付けについて述べた.

第2章 簡易型路面性状測定車の開発

第2章では、簡易路面測定車の概要を述べ、路面特性に必要なきめ深さ（MPD）測定システムの検討及び路面損傷の識別判定の検討に用いるタイヤ/路面騒音の測定条件を検討した.

きめ深さ（MPD）測定システムの検討では、現在使用している車載型プロフィロメータを改造し、移動式計測器（MRP）で得られたデータと比較検討し、両者が一致する最適解を導き出した.

タイヤ/路面騒音の検討では、得られる音響の周波数特性を利用して路面損傷の評価を行うため、タイヤ/路面騒音に影響がある走行速度及び外気温・タイヤ温度の影響を確認し、重回帰モデル式を考案し評価した. 作成したモデル式について、補正式の検証及び測定時の繰り返し精度を確認した. また、測定に使用するマイクロホン保護に使用されている全天候型防風スクリーンの形状が2種類あるため、両者を使用した際のタイヤ/路面騒音の影響度を確認した. ここで開発した補正式で得られるタイヤ/路面騒音を「拡張型タイヤ/路面騒音」と定義した.

第3章 路面変状とタイヤ/路面騒音との関係分析

第3章では、第2章で開発した拡張型タイヤ/路面騒音を活用し、路面損傷を識別するため解析方法及び路面損傷識別判定の処理について検討した. 検討では周囲環境の影響が小さい国土技術政策総合研究所構内道路を使用し路面調査を実施した. 測定した結果に基づき、路面特性の変状と拡張型タイヤ/路面騒音のサウンドスペクトログラムを活用し、路面損傷が識別できる解析方法を検討し、改良型サウンドスペクトログラム及び識別判定手法を考案した.

第4章 実路における路面損傷識別判定手法の開発

第4章では、第3章で得られた知見から実路への適用性を目的に、地方自治体が管理する市道で路面調査し、路面損傷における識別判定の適用性及び有効性を検討した。検討では路面損傷の識別判定として、機械学習の分類手法（決定木）を用い路面損傷有無を判定する予測モデルを作成した。また、路面損傷の評価指標では、損傷区分の識別判定が可能な局在損傷指標（Localized Defects Index : *LDI*）を開発し、路面損傷の度合いを評価する指標を考案した。

第5章 結論

各章で得られた知見をまとめた。

1.5. 参考文献

- [1] 国土交通省道路局，道路統計年報 2017，2017. <<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/>> (Accessed 2018.3)
- [2] (公社) 日本道路協会：舗装の維持修繕ガイドブック 2013，丸善，pp.1-2，2013.
- [3] 環境省：第4章 第3節 地域の生活環境に係る問題への対策（2 騒音・振動対策），環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書平成 29 年度版，pp.236-237，2017.6.
- [4] (社) 日本道路協会：道路維持修繕要綱，1978.
- [5] 建設省道路局国道第一課 建設省土木研究所：舗装の維持修繕の計画に関する調査研究，第 34 回建設省技術研究報告，pp.323-362，1980.
- [6] 札幌市：札幌市：道路維持管理するための手引き，札幌市建設局土木部道路維持課，平成 26 年 3 月<<http://www.city.sapporo.jp/kensetsu/doroiji/download/documents/tebiki.pdf>> (Accessed 2018.6)
- [7] 千葉市：千葉市道路舗装維持管理計画，千葉市建設局土木部維持管理課，平成 27 年 12 月，<<https://www.city.chiba.jp/kensetsu/doboku/dobokuhozen/documents/170207keikaku.pdf>> (Accessed 2018.6)
- [8] 茅ヶ崎市：茅ヶ崎市 幹線道路維持保全計画，建設部道路建設課，平成 27 年 3 月，<http://www.city.chigasaki.kanagawa.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/012/630/kansendouroijihozenkeikaku.pdf> (Accessed 2018.6)
- [9] 兵庫県篠山市：道路・舗装維持管理方針，地域整備課，平成 27 年 6 月（改訂），<<https://www.city.sasayama.hyogo.jp/pc/group/chiikiseibi/assets/2015/06/201506221829.pdf>> (Accessed 2018.6)
- [10] 熊本市：熊本市舗装維持管理計画，熊本市都市建設局道路整備課，平成 26 年 3 月，<http://www.city.kumamoto.jp/common/UploadFileDsp.aspx?c_id=5&id=5670&sub_id=1&fileid=36760> (Accessed 2018.6)
- [11] 国土交通省道路局：総点検実施要領（案）【舗装編】，道路ストックの総点検，2013.2. <<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/roadstock05.pdf>> (Accessed 2018.4)
- [12] 国土交通省道路局：舗装点検要領，2016.10. <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo28_10.pdf> (Accessed 2018.4)
- [13] 建設省道路局国道課 土木研究所舗装研究室：舗装の計画的な管理手法に関する調査研究，

- 第 51 回建設省技術研究所会報告, pp.17-1 - 17-20, 1997.
- [14] 池田拓哉, 東嶋奈緒子:舗装の計画的な管理手法に関する調査研究, 土木技術資料, Vol.41, No.4, pp.64-69, 1999.
- [15] 久保和幸, 寺田剛, 藤原栄吾:道路ユーザーの視点に立った舗装性能評価法に関する研究, 平成 25 年度 プロジェクト研究・重点研究報告書 (重点研究 15), 土木研究所研究報告書, pp.1-14, 2013.
- [16] 藤原栄吾, 寺田剛, 久保和幸:道路ユーザーの視点に立った舗装性能評価法, 土木技術資料, Vol.56, No.11, pp.18-21, 2014.
- [17] 青木理恵, 上坂克己, 大西博文, 石渡俊吾:自動車騒音の単体規制を踏まえた将来の走行騒音パワーレベルの推定, 騒音制御, 23 巻, 1 号, pp.41-45, 1999.
- [18] 建設省道路局企画課, 建設省土木研究所:道路交通振動の対策に関する研究, 第 31 回建設省技術研究会報告, p.9, 1997.
- [19] (社) 土木学会舗装工学委員会:舗装と環境に関する小委員会, 道路交通振動の評価と対策技術 (舗装工学ライブラリー12), pp.27-31, 2015.
- [20] 環境省, 中央環境審議会騒音振動部会 自動車単体騒音専門委員会, タイヤ騒音規制検討会 (第 1 回) 資料 1 - 2, 今後の自動車単体騒音低減対策のあり方について, 2013.2.
<http://www.mlit.go.jp/jidosha/jidosha_tk10_000031.html> (Accessed 2018.4)
- [21] 建設省道路局企画課建設省土木研究所:道路交通振動の対策に関する研究, 第 31 回建設省技術研究会報告, p.9, 1997.
- [22] 秋山政敬:道路交通による振動問題, 第 19 回日本道路会議論文集, Vol.19, pp. 852-853, 1991.
- [23] 環境庁大気保全局特殊公害課:道路交通振動防止技術マニュアル, (株) ぎょうせい, pp.74-75, 1980.
- [24] 富澤健, 遠藤哲雄, 大嶋智彦, 岡部俊幸, 金井利浩:車軸に生じる加速度による路面凹凸評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), 67 巻, 3 号, pp.I_51-I_58, 2011.
- [25] 黒木幹, 峰岸順一, 岩井茂雄:走行車両の車軸の加速度測定による路面の段差評価方法とその適用性, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), 67 巻, 3 号, pp.I_59-I_64, 2011.
- [26] 神谷恵三, 川村彰, 富山和也, 山口清人:国際間比較に基づく高速道路における路面の局部損傷の評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), 68 巻, 3 号,

- pp.I_63-I_70, 2012.
- [27] 土木学会 土構造物および基礎委員会 舗装機能の評価技術に関する研究小委員会: 舗装機能の評価, p.4, 1992.
- [28] 井上武美: 路面性状に関する国際委員会の動き—PIARC/ISO—, 舗装, Vol.36, No.11, pp.33-38, 2001.
- [29] Giuseppe Loprencipe, Giuseppe Cantisani: *Unified Analysis of Road pavement Profiles for Evaluation of Surface Characteristics*, Modern Applied Science, 8, pp.1-14, 2013.07.
- [30] Ulf Sandberg, Jerzy A.Ejsmont: *TYRE/ROAD NOISE REFERENCE BOOK* (Influence on noise emission various tyre-related parameters), pp.207-244, 2002.
- [31] (株)ブリヂストン: 自動車用タイヤの基礎と実際, 東京電機大学出版局, 2012.
- [32] 寺田剛, 久保和幸, 遠藤哲雄, 清野繁: 標準タイヤを用いたタイヤ/路面騒音測定方法に関する検討, 土木学会第66回年次学術講演会(平成23年度), 第5部門, V-400, pp.799-800, 2011.
- [33] 遠藤哲雄, 清野繁, 寺田剛, 久保和幸: 普通タイヤを用いたタイヤ/路面騒音値の測定方法に関する検討, 舗装, Vol.47, No.6, pp.17-21, 2012.
- [34] (公社)日本道路協会: 舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編—(3—1 騒音値), 丸善, pp.84-105, 2006.
- [35] 低騒音舗装研究会: 低騒音舗装の概説, (財)建設物価調査会, 1996.
- [36] 峰岸順一, 阿部忠行: 低騒音舗装の供用性評価, 舗装工学論文集, 2巻, pp.163-172, 1997.
- [37] 井原務, 井上武美: 路面テクスチャとタイヤ/路面騒音に関する検討, 舗装工学論文集, 6巻, pp.225-230, 2001.
- [38] 井原務, 石垣勉, 井上武美: 排水性舗装の路面テクスチャとタイヤ/路面騒音に関する検討, 舗装工学論文集, 7巻, pp.1-1-1-6, 2002.
- [39] タイヤ/路面騒音の測定方法の開発に関する共同研究委員会, 車両走行騒音の測定に関する海外の動向, 舗装, Vol.37, No.4, pp.4-10, 2002.
- [40] ISO: Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise -Part 2: The close-proximity method, ISO 11819-2, 2017.
- [41] 岡部俊幸, 寺田剛: タイヤ/路面騒音(タイヤ近接法)の測定条件に及ぼす各影響要因の検討, 舗装, Vol.38, No.4, pp.13-19, 2003.

- [42] 寺田剛, 源厚, 伊藤正秀: タイヤ/路面騒音に及ぼす影響要因の検討, 舗装工学論文集, 9 巻, pp.219-224, 2004.
- [43] 鮫島寛: 性能規定発注方式による舗装工事, 建設マネジメント技術, pp.4-6, 2000.9.
- [44] 大久保智: 排水性舗装の透水能力と減音効果の測定手法, 騒音制御, 25 巻, 3 号, pp.160-163, 2001.
- [45] 石油エネルギー技術センター: 音による石油制約装置異常検知システムの研究開発, 1999.
- [46] 吉澤亜耶, 橋本洋一: 異常検知技術の概要と応用動向について, INTEC TECHNICAL JOURNAL, 第 17 号, pp. 42-47, 2016.09.
- [47] 齊藤翔一郎, 小泉悠馬, 河内裕太, 植松尚, 中川朗, 原田登: 動作音から機器異常を検知する異常音検知技術, 騒音制御, Vol.42.1 号, pp.8-11, 2018.
- [48] 谷真宏, 仙田裕三, 近藤玲史, 越仲孝文: NEC シンガポール研究所と音声・音響解析への取り組み, 情報処理学会研究報告, Vol.2015-SLP-108 No.5, pp.1-4, 2015.
- [49] 日本工業規格 JIS Z 8731: 環境騒音の表示・測定方法, 1999.
- [50] 藤島泰郎, 二橋謙介, 佐藤恵一, 平野竜也, 木内裕介, 見持圭一: 高度複雑システムの故障予兆検出技術, 三菱重工技報, Vol.49, No.4, pp.119-125, 2012.
- [51] (株)スカイディスク: スマート聴診棒のプレリリース, 2017.09.<https://skydisc.jp/wp-content/uploads/2017/09/sd_press_170921.pdf> (Accessed 2018.5)
- [52] 押野康夫: タイヤ/路面騒音とその測定法に関する国際動向, 日本音響学会誌, 49 巻, 4 号, pp.293-299, 1993.
- [53] 押野康夫: 路面性状の違いによるタイヤ/路面騒音の変化, 日本音響学会誌, 54 巻, 4 号, pp.314-319, 1998.
- [54] 平出純一: 性能規定方式による舗装工事の施工, 舗装, Vol.34, No.5, pp.30-32, 1999.
- [55] 阿部忠行: 試験車走行による低騒音舗装の効率的評価, 第 22 回日本道路会議一般論文集, pp.480-481, 1997.
- [56] 菅原賢司, 岡部俊幸: 排水性舗装の騒音低減効果, 舗装, Vol.29, No.8, pp.20-25, 1994.
- [57] (社)土木学会: 路面テクスチャとすべり (舗装工学ライブラリー10), pp.1-46, 2013.

第2章 簡易型路面性状測定車の開発

2.1. 概要

供用中の路面は、外的要因である交通条件や気象条件等を常に受けているため、供用性能が徐々に低下しそのままの状態では供用していると、やがて安全・円滑かつ快適な道路交通の確保に支障をきたすことになる。そのため、道路管理者はこのような状況を未然に防ぐため、常に路面の状態を把握し適切な維持管理を行うことが肝要であり、現状の路面性状データを常に管理し、効果的かつ効率的に維持修繕計画を立てることが必要である。

路面性状は、工事規模の調査であれば工事規制内の調査で、手押し式の 3m プロフィロメータによる平たん性測定^[1]、スケッチ法によるひび割れ率測定^[2]、横断プロフィロメータによるわだち掘れ量測定^[3]を行っている。しかし、人力による調査で広域な区間の路面測定を行うには、労力と時間及び膨大な費用が掛かり、地域全体を評価するといった大量データを扱うのは不向きである。広域における国道・県道の路面管理は、1970 年以降に開発された路面性状測定車^[4]を活用した計測が行われ、この測定精度に関する使用及び測定方法に関する目標値は、1984 年に建設技術評価制度に基づき、ひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性（平たん性ともいう）といった各々に対して数値が定められた。これまで路面性状測定車は時代とともに新たな機械開発や精密機械の導入に伴い、現在では高精度で信頼性の高い計測装置に進歩している。その計測精度の確認方法は、1990 年から毎年、(財)土木研究センターが主催する性能確認試験が行われ、現在は図-2.1 に示すように 50 台以上が参加している^[5]。性能確認試験では昼間または夜間もしくは昼夜間にて、距離・ひび割れ率・わだち掘れ量・平たん性の計測精度の測定・評価が実施される。

現在実施されている道路ストックの舗装点検要領^[6]は、平たん性 σ に代わり乗り心地評価である IRI (International Roughness Index : 国際ラフネス指数)^{[7][8][9]}が採用されている。この IRI 測定方法は、車両に搭載されたレーザ変位計による路面プロファイルの測定結果から IRI を算出するもの (クラス 2)^[10]、車両のレスポンスを統計的に処理して IRI に変換するもの (クラス 3) や車両乗員の目視や体感により IRI を予測するもの (クラス 4) がある。最近では乗り心地評価にスマートホンを自動車のダッシュボード面などバネ上で鉛直加速度等を計測し、そこから路面縦断プロファイルを推定する手法が開発されている^[11]。

このような状況の中、鹿島道路株式会社では高精度で大型の路面性状測定車ではなく、

生活道路の狭い道でも測定でき、安価な簡易型路面性状測定車として、路面の3要素が測定できる「多機能路面性状評価システム」^[12]を開発した。この装置は図-2.2に示すように、路面性状測定車と同様、ひび割れ、わだち掘れ、縦断凹凸（平坦性、IRI）が測定できる装置であり、度重なるバージョンアップで性能確認試験を合格できる精度まで向上し、2018年1月、新技術情報提供システム（NETIS）^[13]の登録が完了した。

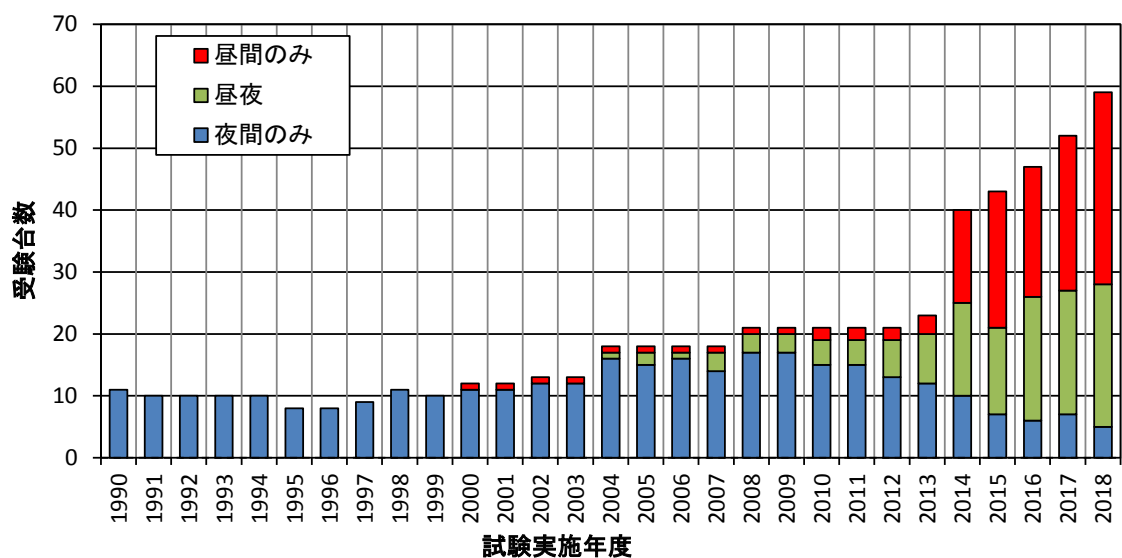


図-2.1 性能確認試験の試験台数



図-2.2 簡易型路面性状測定車による多機能路面性状評価システム

この装置で得られる測定結果は、道路管理者側で実施されている評価指標をベースとしたものであり、突発的な損傷であるポットホールや路面段差、路面凹凸など、局部損傷の影響に伴う騒音・振動等の測定評価のシステム化はなされていない。

本研究では、道路ユーザーに関わる要素を加味した、簡便で安価な測定装置の開発を目指すため、以下の開発を行う。

① 路面のきめ深さ測定システムの開発

路面のきめ深さは、「舗装の構造に関する技術基準」に示しているように車両走行性を考慮した路面設計が重要な役割があり、路面のすべりや転がり抵抗、タイヤ/路面騒音の関連性が高い。しかし、現有の測定装置は低速移動式であるため、道路規制が必要であることから、短い距離での測定しかできず、連続的な測定ができない状況である。本開発では、簡易型路面性状測定車に搭載している車載型プロフィロメータを改良し、解析手法を確立することによって測定システムの開発を行う。

② 拡張型タイヤ/路面騒音を活用した路面損傷の識別評価の開発

路面の騒音・振動は、加振源となる車両の走行安全性や乗り心地などに影響をもたらされ、受音点及び受振点となる沿道家屋等に影響を及ぼすため、路面設計として重要な役割がある。本開発では路面騒音・振動の発生要因となる路面とタイヤとのが接する際に生じる摩擦音または振動が支配的であるため、その周波数特性との関連性を明らかにし、路面損傷の識別判定が必要になる。そこで、実道の環境下で測定可能な拡張型タイヤ/路面騒音の開発を行う。

これらの装置を開発することにより、今後の路面評価及び設計に非常に役立ち、世の中に貢献できると考える。

2.2. 測定装置のシステム構成と設定

(1) 測定機器のシステム構成

既存の簡易型路面性状測定車のシステムは図-2.3 に示すとおりである。路面のきめ深さの測定システムは、縦断凹凸で使用している車載型プロフィロメータ測定装置を改良し、

きめ深さ（MPD）測定システムの開発を行う。拡張型タイヤ/路面騒音システムは、低騒音舗装の評価に使用している図-2.4 の別途システムとした。

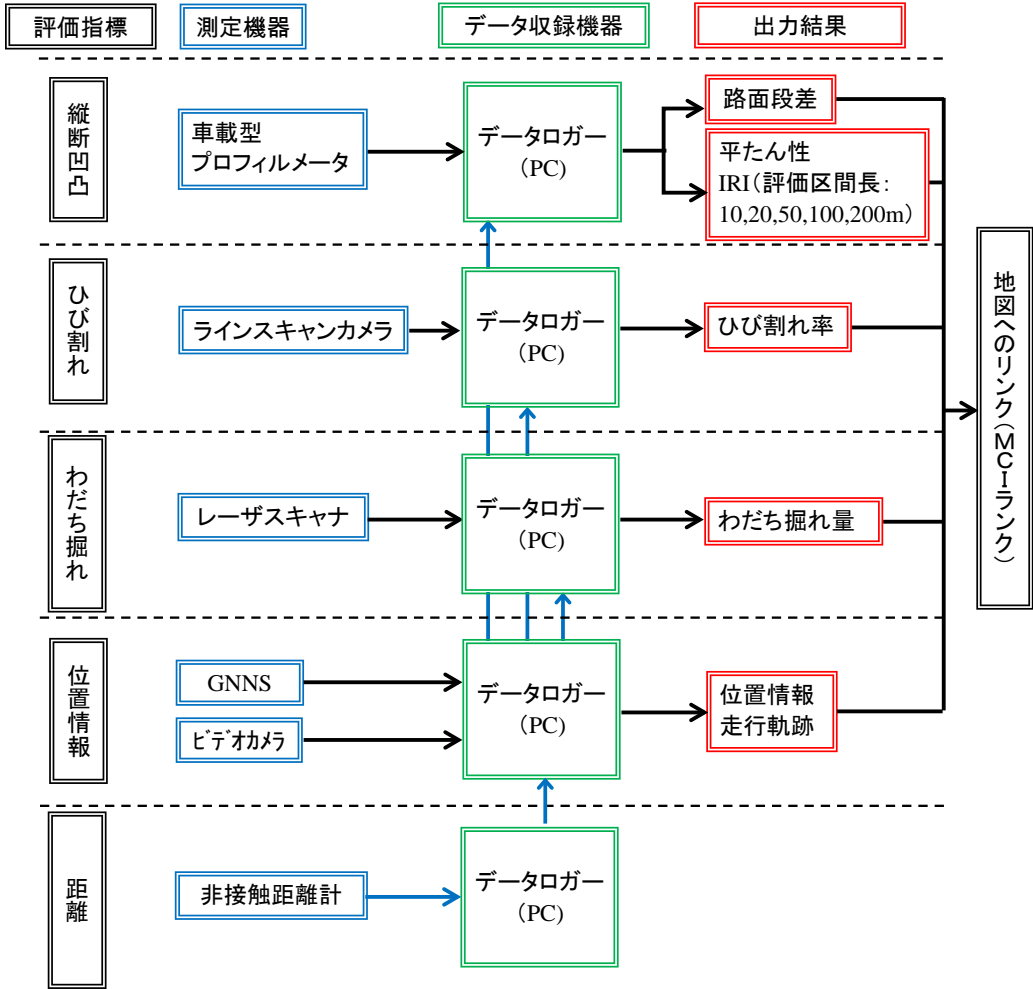


図-2.3 測定装置のシステム構成

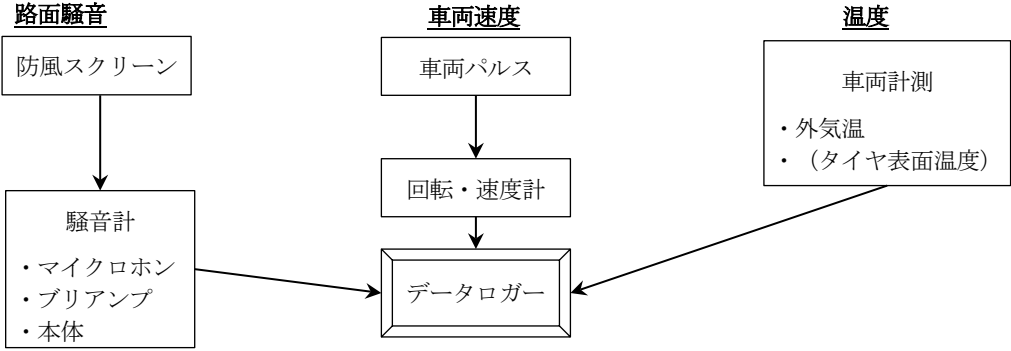


図-2.4 タイヤ/路面騒音測定装置の構成

(2) 測定装置の設定

測定用車両は、**図-2.2**に示す路面性状と同時に測定できる乗用車とした。タイヤ/路面騒音の測定は、現在行われている舗装性能評価法の「〔IV-2〕騒音値を求めるための測定用普通乗用車によるタイヤ/路面騒音測定方法」^[14]に準拠した。

測定用タイヤは、タイヤの種類によって得られる路面騒音の値が異なるため^[15]、舗装性能評価法に定めている**図-2.5**のトレッドパターン（タイヤ規格：**表-2.1**）とした。このタイヤは、国立研究開発法人土木研究所がダンロップタイヤ（住友ゴム工業株式会社）と契約し、同一タイヤが生産できる。



図-2.5 測定用タイヤのトレッド

表-2.1 測定用タイヤの規格

項目	規格
タイヤの規格	195/65R15 91S
幅	195mm
扁平率	65%
種類	R ラジアル
内径	15inch(38.1cm)
荷重指数	91（タイヤ負荷能力 615kg）
速度記号	S（最高速度 180km）
空気圧	220kPa
ゴム硬度	63

マイクロホンの取り付け位置は、舗装性能評価法に定めている左後輪後方の任意の位置とし、**図-2.6**に示す ISO11819-2 ^[16]の後方部のオプション位置とした。また、タイヤ/路面騒音に使用するマイクロホンは、積分型普通騒音計 NL-05A（マイクロホンとプリンアンプ一体型、リオン社製）「JIS C 1502：2005」に規定されている Type 2 を使用し、測定時の風の影響を抑制しかつマイクロホンの保護を目的に、全天候型防風スクリーン（WS-03、リオン社製）を設置させた（**図-2.7** 参照）。

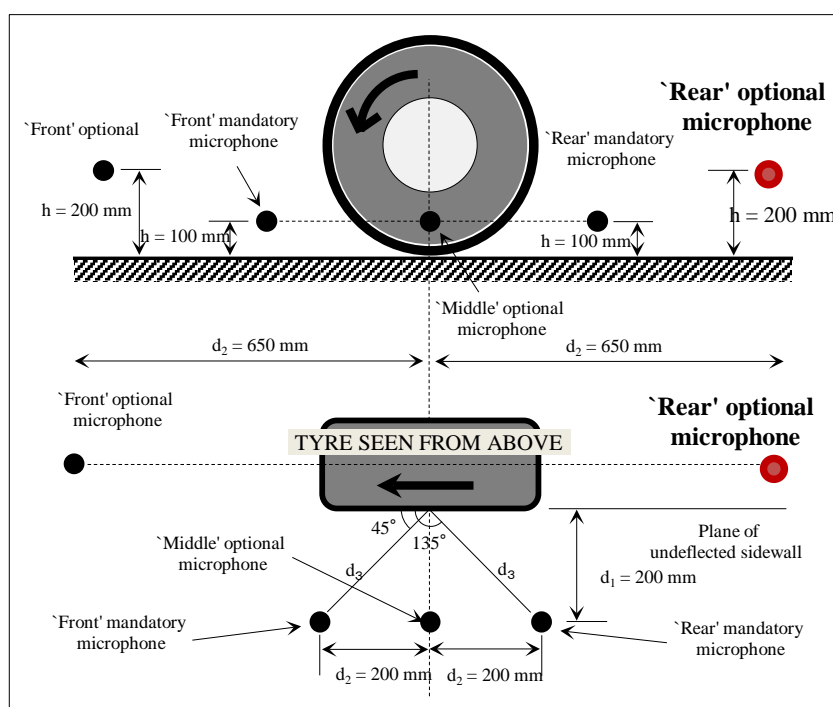


図-2.6 マイクロホンの設置位置 ^[16]

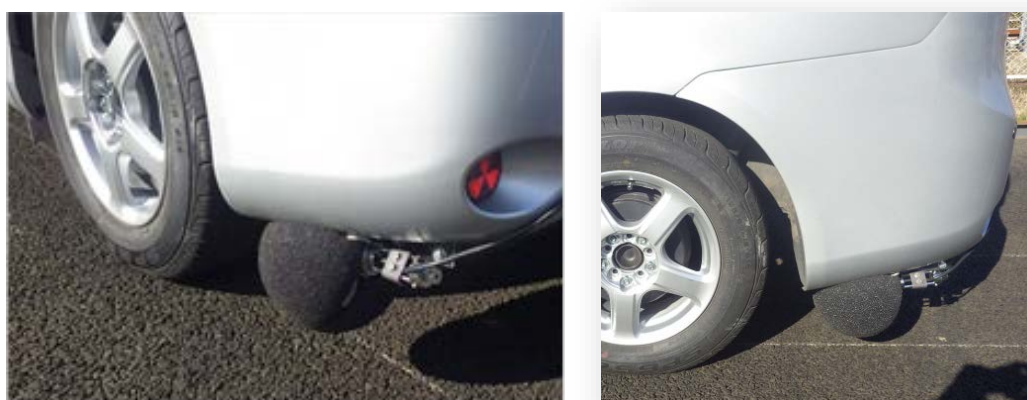


図-2.7 車両へのマイクロホン設置状況

ここで騒音計の基本設定は舗装性能評価法に記載されている方法とした。

- ・ **重み付け特性：A 特性（聴感補正）**

A 特性とは騒音計による測定に使われる人間の聴覚を考慮した周波数重み付け特性である。JIS C 1509-1「電気音響—サウンドレベルメータ（騒音計）」^[17]に定められており、人間の聴覚の感度に合わせたものである。

- ・ **時間重み付け特性：Fast（速い）**

時間重み特性とは、JIS より動特性（時定数）と呼ばれ、速い動特性（Fast：125 ms）と遅い動特性（Slow：1 s）がある。この Fast 特性は耳の時間応答に近似させたもので、Slow 特性は変動する騒音の平均レベルの指示に使用されている。

2.3. きめ深さ（MPD）測定システムの開発

2.3.1. 概要

舗装路面のテクスチャは図-1.5 に示したように、摩擦すべり抵抗や路面騒音と密接な関係があり、特にマイクロテクスチャ（波数：2,000 [m⁻¹] 以上）とマクロテクスチャ（波数：20～2,000 [m⁻¹]) は摩擦すべり抵抗に、マクロテクスチャとメガテクスチャ（波数：2～20 [m⁻¹]) はタイヤ/路面騒音に影響を及ぼすことが知られている^[18]。ここで、タイヤ/路面騒音は一部メガテクスチャを含んでいるが、マクロテクスチャが支配的である。このように路面テクスチャは自動車の走行騒音、特にタイヤに起因することから、路面のテクスチャを簡易に計測する技術が必要である。

マクロテクスチャの計測方法は、近年定置式測定装置の回転式きめ深さ装置や低速移動式計測器（MRP）を使用し MPD によって評価している。これらの測定は交通規制を必要とし、回転式きめ深さ装置は点管理であるなど、迅速かつ効率的に調査を行うには不向きである。そこで、交通規制が不要である簡易型路面性状測定車に搭載している、車載型プロフィロメータを用いて MPD の推定装置を検討した。

現有のシステムはサンプリング間隔が 10mm あるため、MPD を測定するには ASTM E1845-09「Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth^[19]」より、縦断方向のサンプリング間隔を 1mm 以下とする必要がある。そこで、サンプリング間隔をひび割れ測定システムに使用している縦断方向のサンプリング間隔（ラインレート）

1mm に切り替え，車載型プロフィロメータに取り入れた．

当該システム開発では移動式測定器（Multi-Road Profiler：MRP^[20]）で得られるプロファイル及び計算される MPD を真値とし，得られるデータ処理方法を検討した．

2.3.2. 測定システムの検討

(1) 測定路面

対象路面は鹿島道路株式会社機械センター構内（栗橋町高柳）に舗設されている，最大粒径 13mm の既設排水性舗装及び既設密粒度舗装を対象とし，対象路面上を車載型プロフィロメータ及び MRP を用いてそれぞれ 3 回測定した．本測定では，車載型プロフィロメータによる車両速度を定常走行 20km，30km とした．

(2) 縦断凹凸による PSD

対象区間における車載型プロフィロメータと MRP で計測したきめ深さを図-2.8 に示す．これより，車載型プロフィロメータのきめ深さは MRP に対して振幅が大きく変動し，スパイク状の波形が現れていた．そこで，この現象の動きを確認するため両者測定器のきめ深さを用い，対象区間におけるパワースペクトル密度（Power Spectrum Density：PSD）を求めた．図-2.9 より，車載型プロフィロメータで得られたきめ深さの PSD は，MRP の PSD よりも特に波数 10 (m^{-1}) 以下及び 100 (m^{-1}) 以上で大きく変化している．車載型プロフィロメータの PSD が大きくなった要因は以下のとおりである．

- ① 車両振動によって生じるレーザ計測機器本体の揺れによるノイズ
- ② レーザ反射光の受信変動等によって生じる誤差

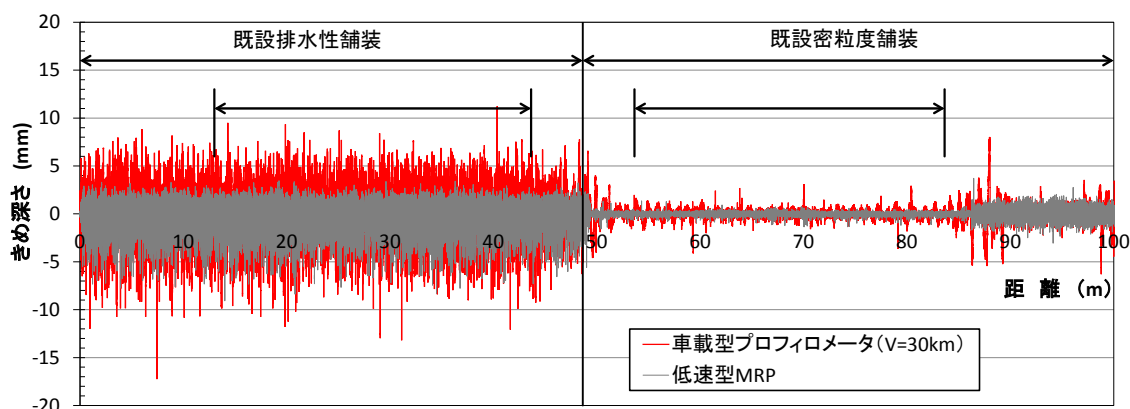


図-2.8 車載型プロフィロメータによるきめ深さ

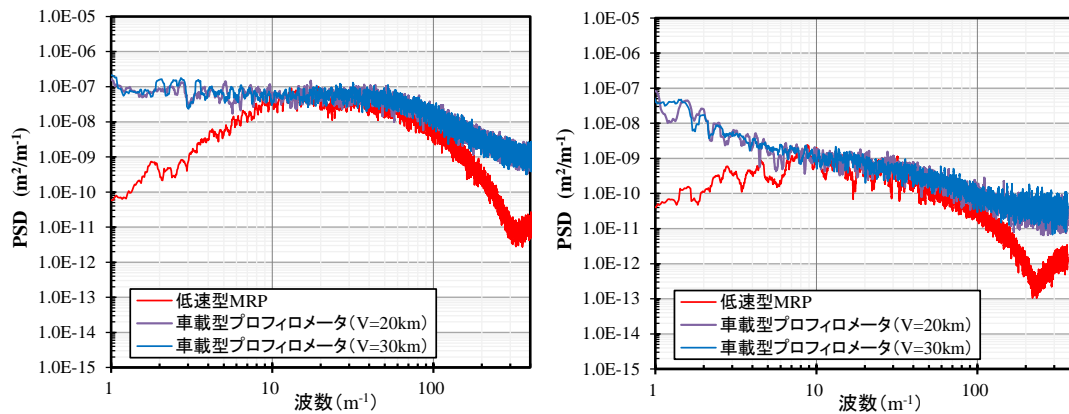


図-2.9 路面の違いによる PSD

(3) 縦断凹凸による PSD

次に、車載型プロフィロメータに生じているスパイクノイズ等を除去するため、信号処理により Filter 処理を検討した。ノイズ除去方法の Filter 処理方法を検討した結果、スパイクノイズには Median filter の処理が最適であると判断し、クラス強度を 6 通り（片側平滑化個数：1, 3, 4, 5, 6, 7）変化させ、最適解を検討した。また、車両運動によって生じるメガテクスチャの影響を考慮して High-pass filter（HPF： 5m^{-1} ）による処理も加えた。

Median filter の処理によるクラス強度の最適解を見つけるため、Filter 処理後計算される MPD の真値との差の t 検定（平均値の差の検定）を実施した。図-2.10 に示す t 値の結果より、有意水準 95%（棄却域の確率 0.05）の t 境界値 2.002（両側検定）に対して、クラス強度 5 が最も小さく（有意ではない）、両者は等しいといえる。また、MPD の両者の変化は図-2.11 に示すとおり、既設密粒舗装で得られる MPD は小さいため両者機器の違いは判断しにくい状態であるが、既設排水性舗装の MPD は Median filter のクラス強度によって著しく変化している。よって、最も両者が一致しているクラス強度は 5 であるといえる。

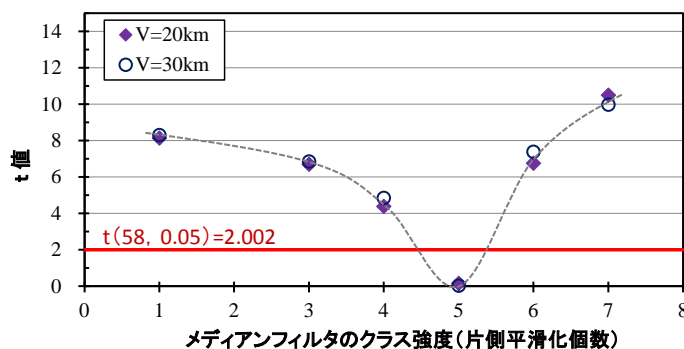


図-2.10 クラス強度の違いによる t 値の変化

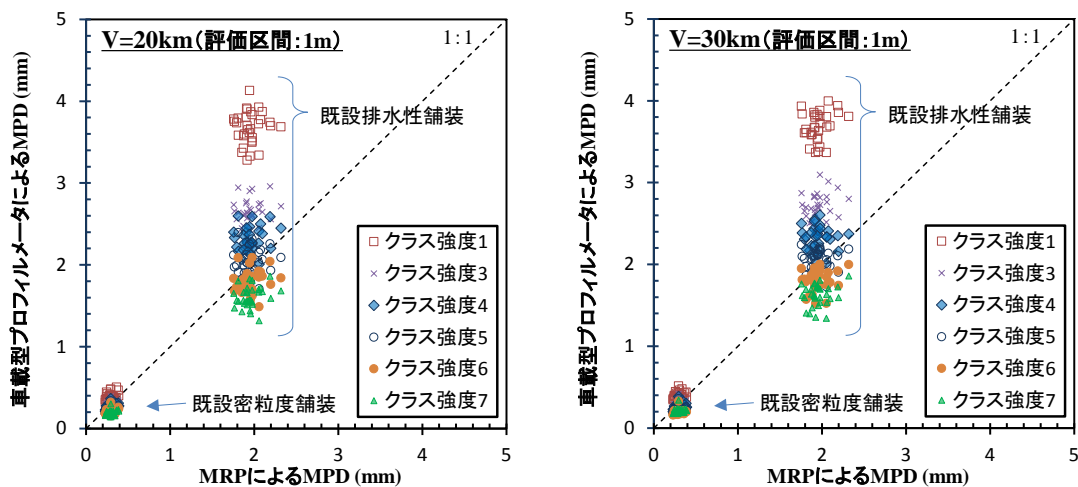


図-2.11 クラス別における MPD の比較

2.3.3.MPD の検証

当該車載型プロフィロメータを用いて MPD を算出する際、Median filter によるクラス強度 5 が最適であることから、PSD による波形の一致を確認した。図-2.12 により、真値 MRP の PSD は、各波数に対して車載型プロフィロメータの速度 20km 及び 30km ともよく一致した。前項の信号処理の検討では、解析区間 30m で得られる値であることから、評価区間 1m に絞り MPD を算出し、その精度を確認した。真値との差を求めた結果、表-2.2 に示すとおりその差の平均値は既設排水性舗装で約 0.08mm，既設密粒舗装で 0.07mm と MPD を 0.1mm 以内の精度で測定できる。

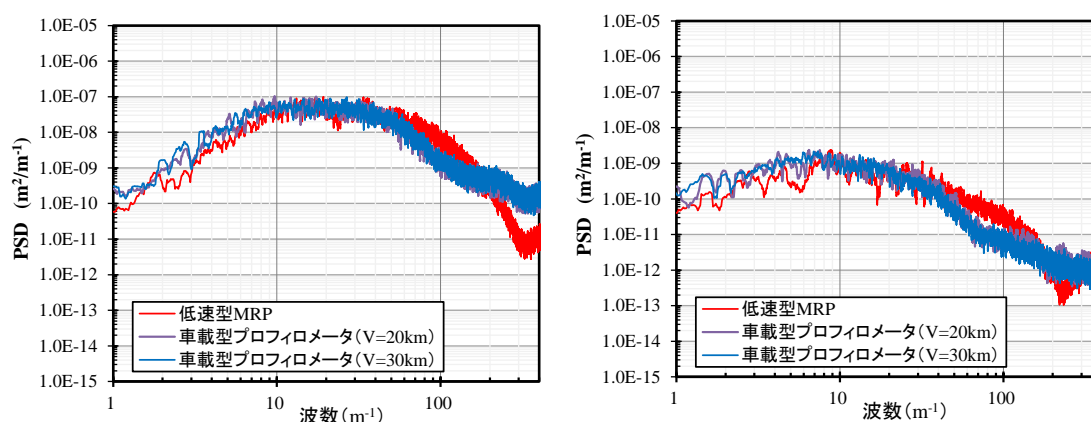


図-2.12 デジタルフィルター処理後の PSD

表-2.2 フィルタ処理後の MPD の比較 (単位：mm)

舗装種類	既設排水性舗装			既設密粒度舗装		
測定装置	低速型	高速型（車両型）		低速型	高速型（車両型）	
	MRP	V=20km	V=30km	MRP	V=20km	V=30km
平均値	1.96	2.03	2.04	0.30	0.23	0.23
標準偏差	0.13	0.15	0.14	0.04	0.03	0.03
最大値	2.32	2.39	2.24	0.39	0.34	0.36
最小値	1.76	1.70	1.73	0.23	0.17	0.19

2.4. 拡張型タイヤ/路面騒音システムの開発

2.4.1. 測定路面と測定方法

タイヤ/路面騒音の測定は、外気温及び走行速度の影響を受けることから補正方法が提案^[14]されている。この補正方法は、舗装性能評価法に示されているように、タイヤ/路面騒音から得られた騒音値（AP：オールパスレベルともいう）を標準速度に補正する方法と、標準気温に補正する方法が示されている。本研究ではタイヤ/路面騒音で得られる音響特性を活用した路面状態の評価を検討するため、周波数特性に応じた音圧レベルの補正方法を考案する。補正式の検討では舗装性能評価法に準拠し、国立研究法人土木研究所が管理する「舗装路面騒音研究施設」^[21]（図-2.13, 図-2.14 参照）を使用し、得られたタイヤ/路面騒音の周波数特性と走行速度、外気温またはタイヤ表面温度の関係をを用い、タイヤ/路面騒音の温度・速度補正方法について検討した。測定概要を以下に示す。

- ・ 測定時期：2016 年 1 月（時間帯 3 水準）、8 月（時間帯 2 水準）
- ・ 測定延長：各工区の区間 80m
- ・ 舗装の種類：多孔質弾性舗装、排水性舗装（最大粒径 5mm）、排水性舗装（最大粒径 13mm）、密粒度舗装（図-2.15 参照）
- ・ 測定速度：5 水準（定常走行 20,30,40,50,60km）
- ・ 測定回数：3 回以上
- ・ 解析区間：延長 80m/工区のうちジョイント控除部を除いた延長 72m（図-2.13 参照）

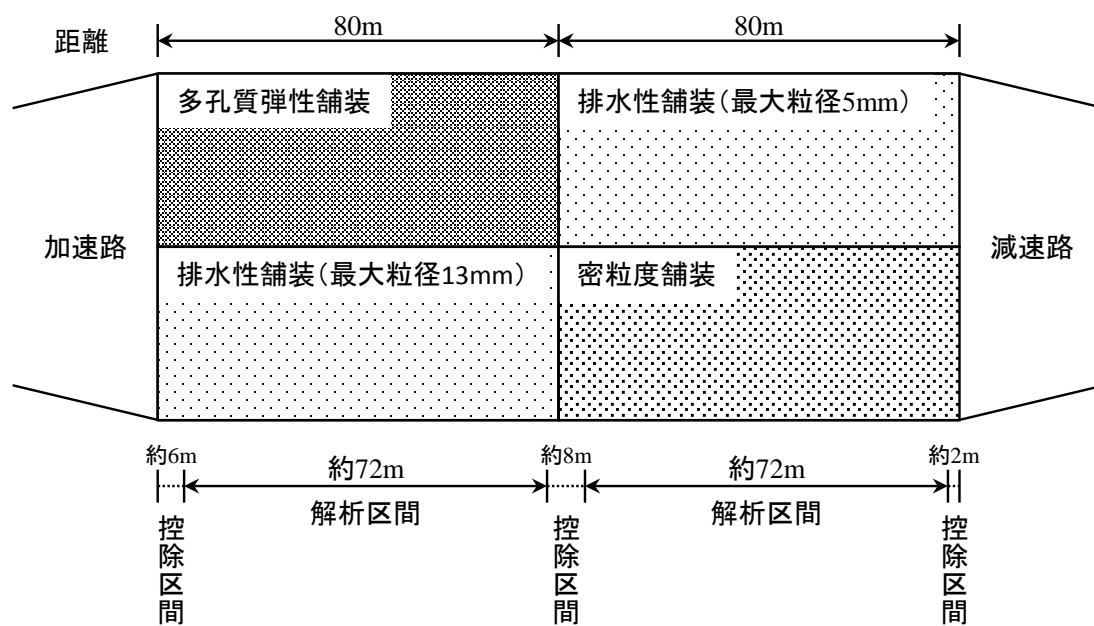


図-2.13 舗装路面騒音研究施設の平面図と解析区間



図-2.14 舗装路面騒音研究施設

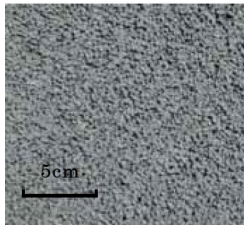
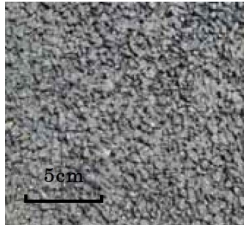
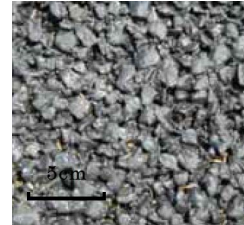
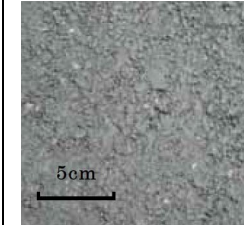
多孔質弾性舗装	排水性舗装 (最大粒径 5mm)	排水性舗装 (最大粒径 13mm)	密粒度舗装 (最大粒径 13mm)
			

図-2.15 舗装路面の種類

2.4.2. タイヤ/路面騒音の測定結果

当該施設で測定した1月及び8月の一例を図-2.16 及び図-2.17 に示す。

両者の図より、各舗装とも走行速度の増加とともに周波数帯域の音圧レベルが大きくなっている。既往の文献^[15]によると、同一温度における速度依存性はタイヤ/路面騒音のAPと関係がある。今回測定した周波数帯域の音圧レベルと速度との関係をみると、速度増加とともに音圧レベルが高くなっているが、周波数 31.5Hz 付近及び 250Hz 付近では速度増加に伴う音圧レベルの変化が小さく、このことはタイヤの転動時に生じるタイヤ振動の固有振動数（1次モードや2次モード等）の影響によるものと考えられる。

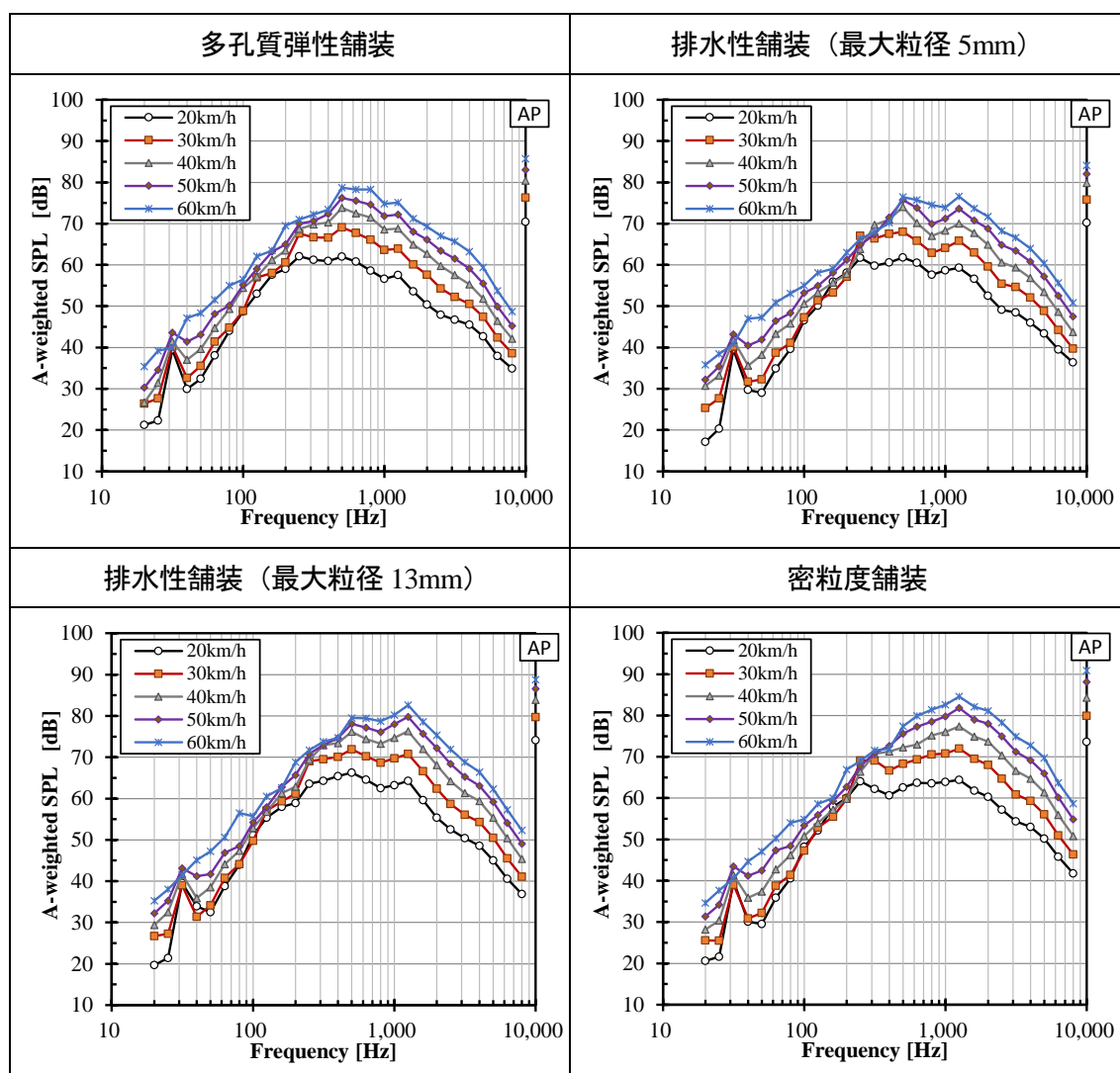


図-2.16 1/3 オクターブ解析による各種舗装の音圧レベル

1月AM測定（外気温：6-7℃，タイヤ表面温度：18℃）

※縦軸：A-weighted SPL は A 特性音圧レベルを示す

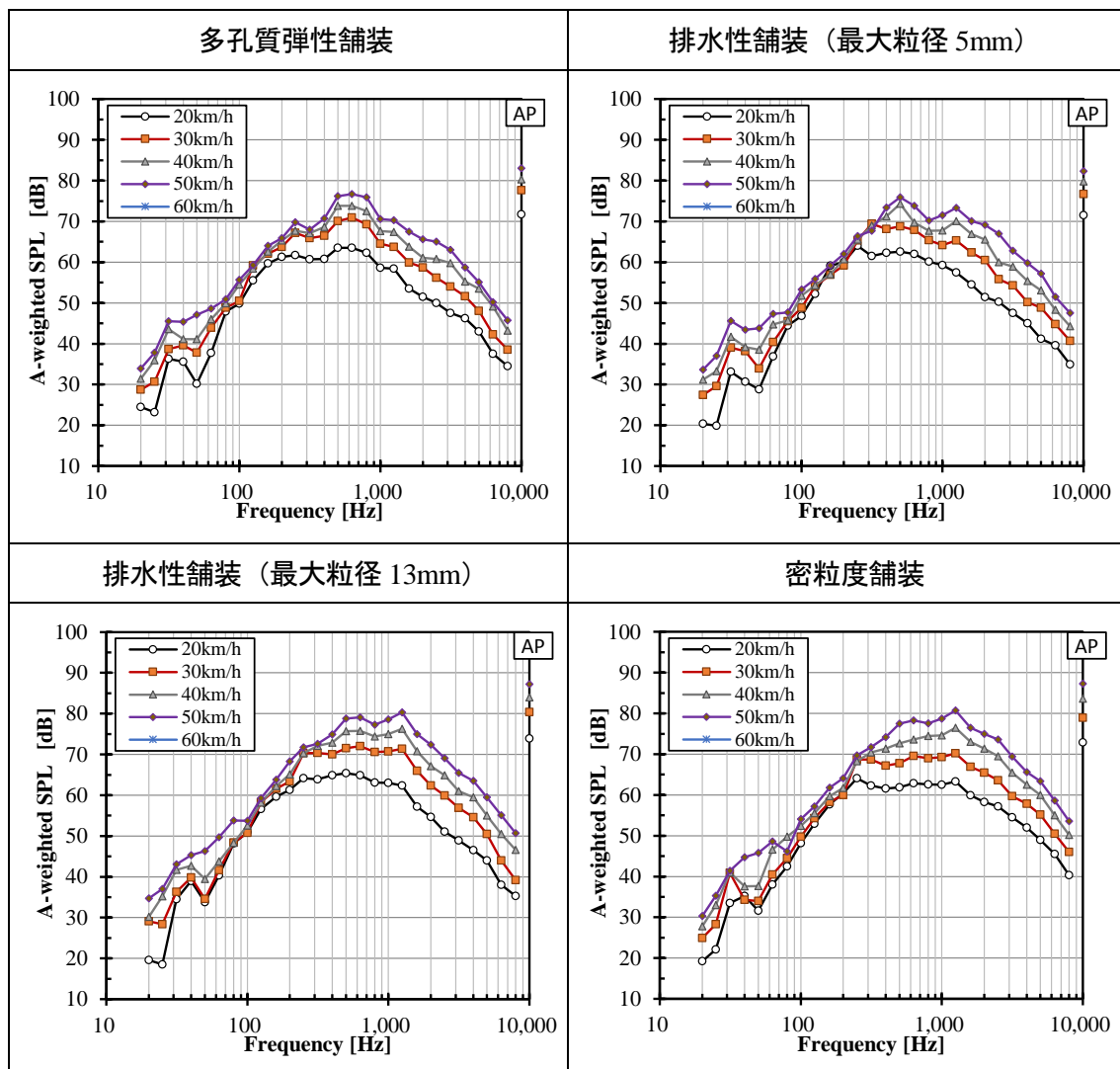


図-2.17 1/3 オクターブ解析による各種舗装の音圧レベル

8 月 PM 測定（外気温：32℃，タイヤ表面温度：40-44℃）

次に、タイヤ/路面騒音における温度依存性を外気温及びタイヤ表面温度について確認した。外気温の違いによるタイヤ/路面騒音を図-2.18 に示す。この結果、外気温の増加とともにタイヤ/路面騒音が $0.03\sim 0.08\text{dB}/^{\circ}\text{C}$ 減少し、乗用車タイヤの温度勾配 $0.08\text{dB}/^{\circ}\text{C}$ ^[22] の減少とほぼ一致している。

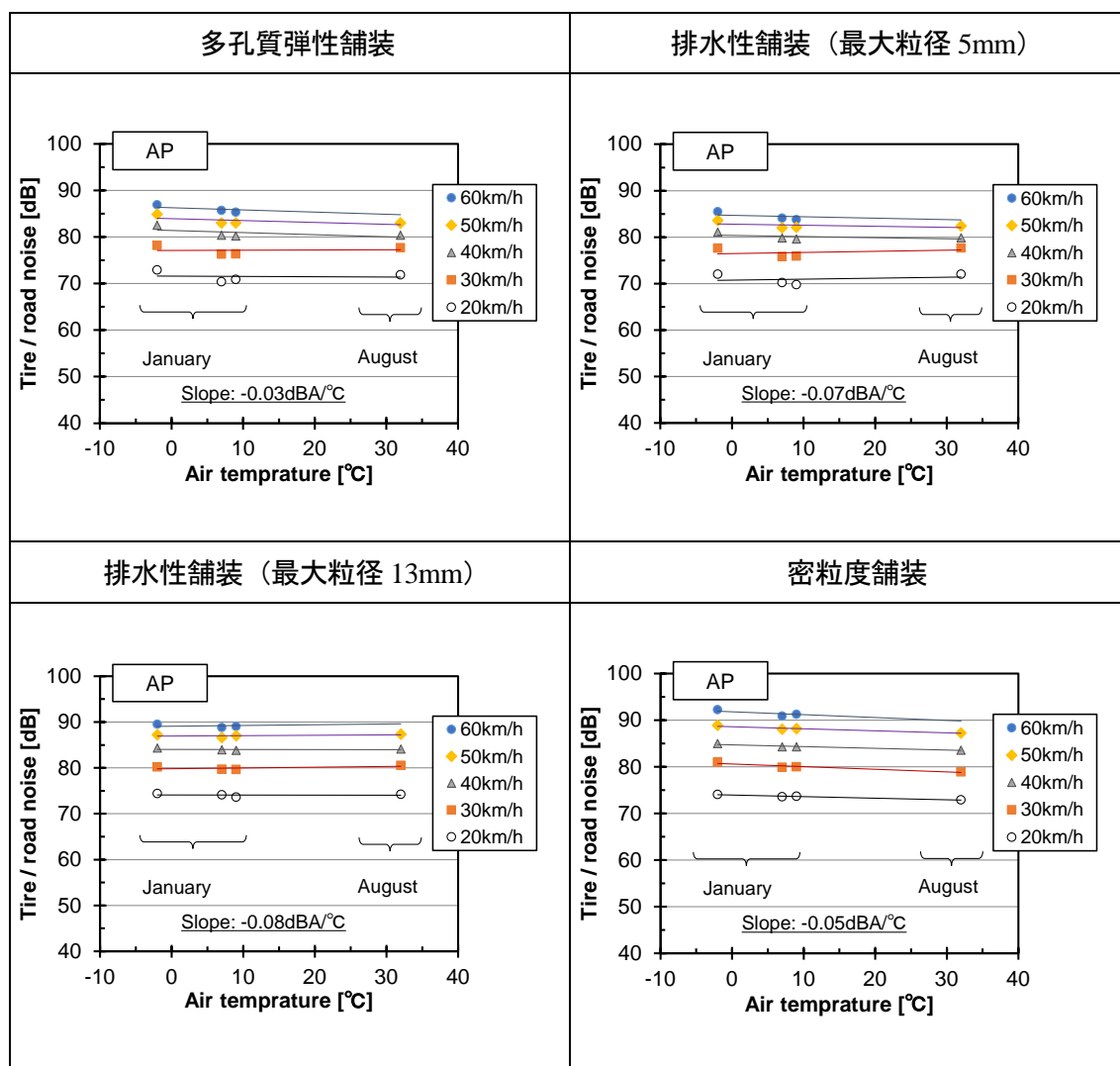


図-2.18 外気温の違いによるタイヤ/路面騒音

また、タイヤ/路面騒音の周波数特性による温度勾配の一例として、排水性舗装（13）及び密粒度舗装における周波数 500Hz, 1,000Hz, 2,000Hz の音圧レベルを図-2.19 に示す。この結果、いずれも外気温の増加とともに温度勾配の大小は異なる傾向を示しているものの、温度勾配は直線性である。したがって、測定時の外気温については、基準となる温度についての補正が必要である。

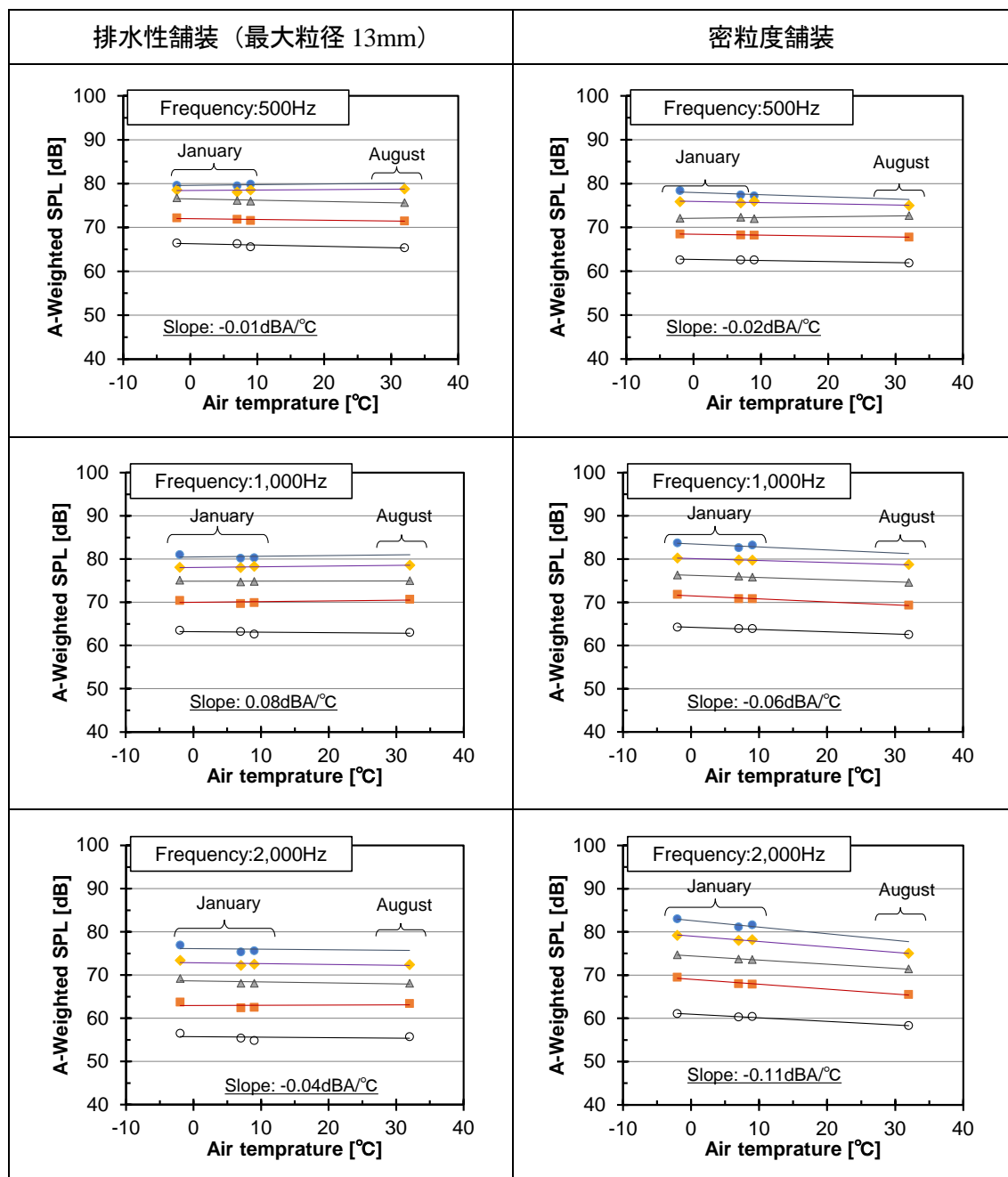


図-2.19 外気温の違いによる各周波数の音圧レベルの一例

2.4.3.重回帰分析による速度・温度補正方法の検討

タイヤ/路面騒音における速度及び温度（外気温及びタイヤ表面温度）との関係を調べるために、式(2.1)に示す重回帰モデルを考案し分析を実施した。重回帰モデルにおける目的変数は各周波数の音圧レベル、説明変数は外気温またはタイヤ表面温度とした。分析結果を図-2.20に示す。

$$L_{Ai}=a_i \log_{10} V + b_i T + c_i \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (2.1)$$

ここで、 i ：周波数（20～8,000Hz）及びAP

L_A ：音圧レベル（dB）， V =速度（km/h）

T ：外気温またはタイヤ表面温度（℃）

a_i ， b_i ， c_i ：偏回帰係数

なお、速度 V は既往の文献^{[23][24]}より \log_{10} （速度）と音圧レベルの関係が深いことから、同様の方法とした。また外気温及びタイヤ表面温度の間には多重共線性があるため、これらの因子を別々に分析した。

各種舗装の寄与率及び偏回帰係数を図-2.20に示す。寄与率は周波数帯域 31.5～250Hz で低く、他の周波数帯域は 0.8 以上と高い。この寄与率が低くなった原因は、図-2.16 及び図-2.17に示すように、速度変化による音圧レベルの変化が小さく、タイヤ振動の固有振動数が影響したと考えられる。

次に、各種舗装の偏回帰係数は多孔質弾性舗装を除き、3つの偏回帰係数は外気温及びタイヤ表面温度に関わらず、各周波数帯で同じ傾向を示している。よって、温度補正を利用する際は、外気温及びタイヤ表面温度のどちらを使用しても問題ない。しかし、タイヤ/表面温度の計測では非接触温度計の自動計測の設置や測定中または測定後に表面温度計で測定しなくてはならないため、実路での測定には不向きである。

そこで、重回帰モデル式の実路への適用を勘案し、一般的な舗装である排水性舗装(13)と密粒度舗装の速度と外気温を使用した偏回帰係数を平均化しモデル式を構築した。以下の検討ではこの重回帰モデル式を使用し、速度・温度補正を行う。

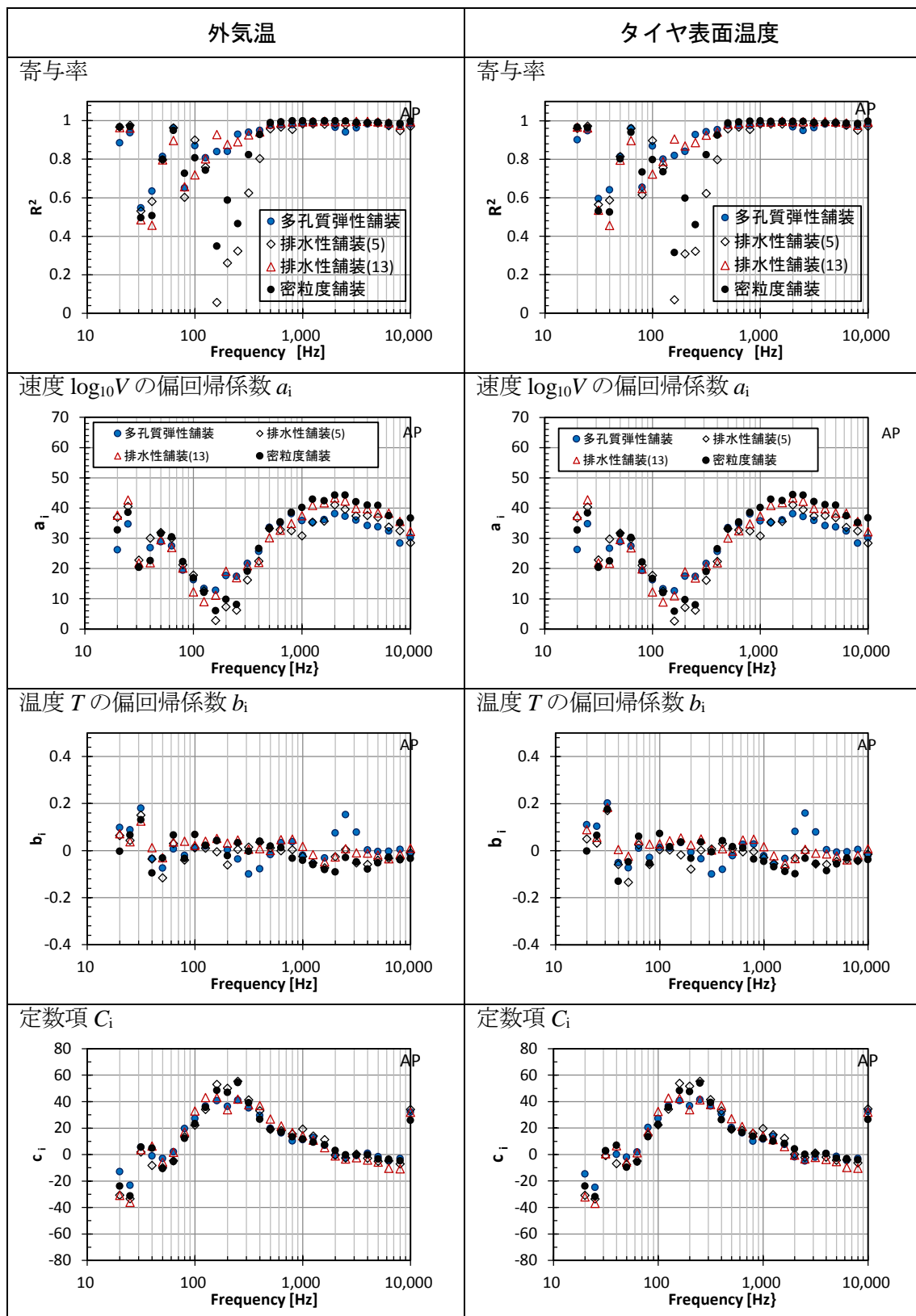


図-2.20 重回帰分析によって得られた寄与率及び偏回帰係数

2.4.4.補正式の妥当性の検証

今回作成したモデル式の精度の確認について、縦断方向におけるタイヤ/路面騒音の瞬時値を使用し、各周波数帯による音圧レベルの速度・温度補正を行い、音響特性の可視化としてサウンドスペクトログラム（可視化によるカラーマッピング）を作成した。

冬期に測定した速度の違いによる瞬時値を図-2.21 に、外気温 20℃及び速度 40km 補正したサウンドスペクトログラムを図-2.22 に示す。ここで、測定路線は左右 2 箇所であるが、工区全体を容易に識別判定するため、それぞれの工区 80m 区間を横並びに整理した。

この結果、補正前のサウンドスペクトログラムは、周波数によって色の識別が舗装によって異なり、速度の増加に伴う各周波数帯域の音圧レベルが大きく変化している。次に、温度・速度補正したサウンドスペクトログラムは、同一区間で同系色に近似しているが、速度 20km 及び 60km における周波数帯域 200～500Hz、1,000～2,000Hz の音圧レベル（色の度合いが異なる）の変化が約 5dB 異なっていた。また、タイヤ/路面騒音の F 特性及び A 特性で整理した結果を図-2.23 に示す。この図より、F 特性において速度 40km 以下では SPL が 0～2dB 高くなる傾向を示し、速度 40km 以上では同等もしくは 1dB 程度低くなる傾向を示している。A 特性においては速度 40km 以下では SPL が 0～2dB 低くなる傾向を示し、速度 40km 以上では同等もしくは 2dB 程度低くなる傾向を示している。両者特性の違いは A 特性の卓越周波数は 500～2,000Hz に表れるのに対して、F 特性は 500Hz 以下の低周波数帯域に表れるため、卓越周波数違いが騒音値に影響を与えたといえる。

図-2.23 の騒音値の差を明確にするため、各速度から速度 40km の騒音値の差を図-2.24 に示す。この図より F 特性及び A 特性とも、設定速度±10km 以内では音圧レベルが±1dB 以内となるが、設定速度±20km では多孔質弾性舗装及び排水性舗装(5)を除くと±2dB となる。

今回使用した普通騒音計は、計量法で器差±1.5dB、レンジ切替誤差 0.7dB、JIS 規格のレベル直線性誤差±0.5dB（各周波数の音圧レベル：±1.4dB）であることから、今回測定したレベル差を±1.0dB 以内で測定できれば、精度よく測定できるといえる。

今回作成したモデル式によって得られるタイヤ/路面騒音を「拡張型タイヤ/路面騒音」と呼ぶ。

- 測定速度 [外気温 6℃]

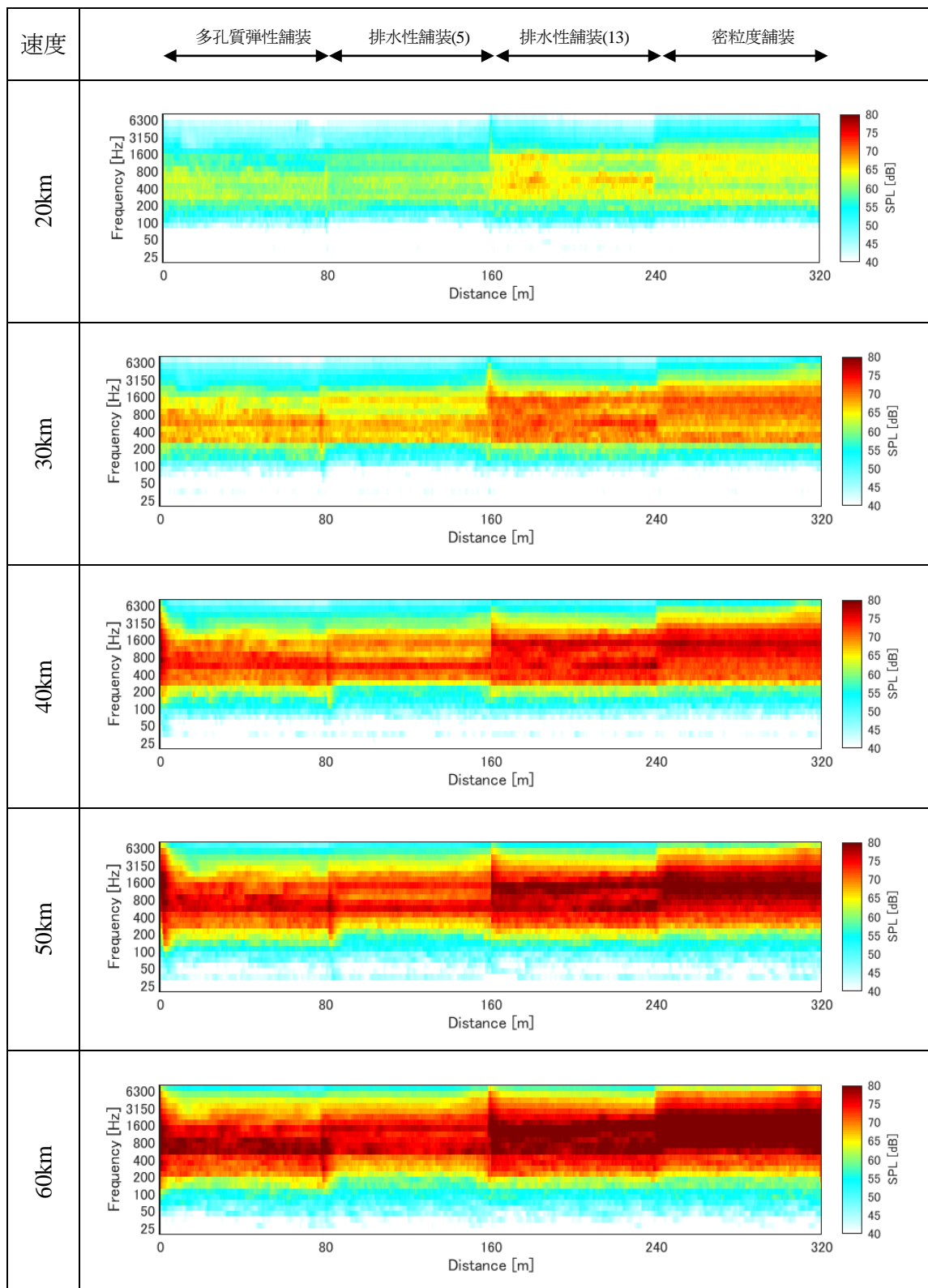


図-2.21 タイヤ/路面騒音のサウンドスペクトログラム (実測値)

- 速度・温度補正 [外気温 20°C, 速度 40km]

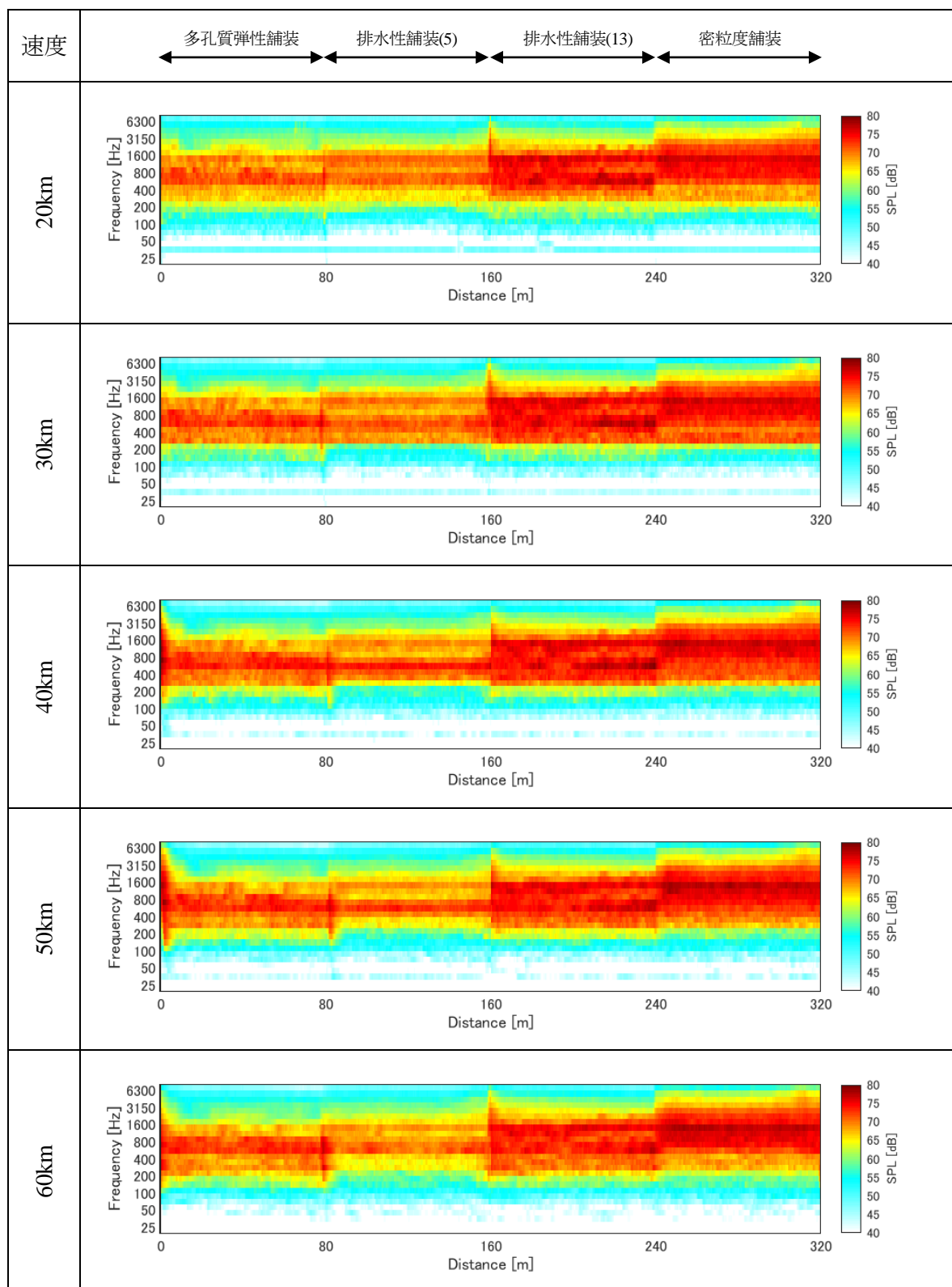


図-2.22 タイヤ/路面騒音のサウンドスペクトログラム (補正值)

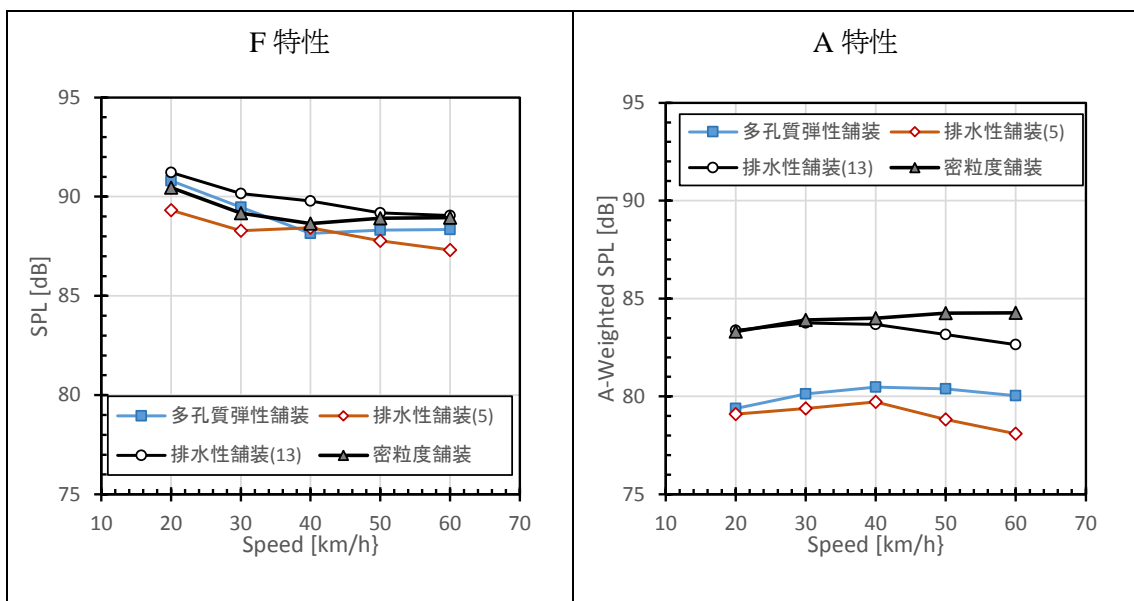


図-2.23 速度 40km, 外気温 20℃補正した F 特性と A 特性の音圧レベル

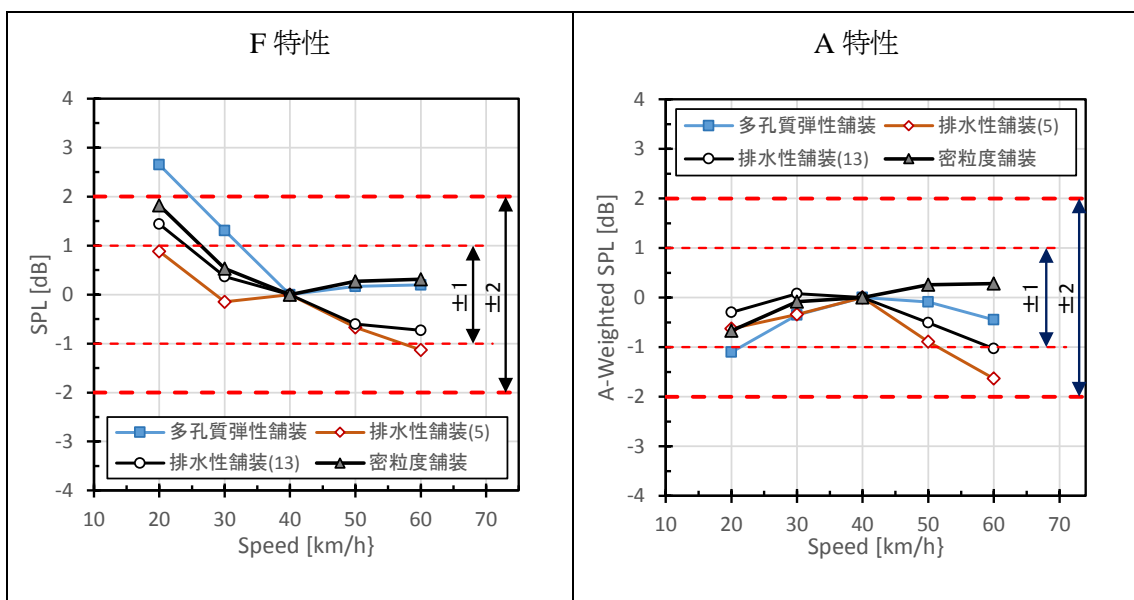


図-2.24 速度 40km を基準とした F 特性と A 特性の音圧レベル

2.5. 繰り返し精度の違い

タイヤ/路面騒音の繰り返し精度について、舗装路面騒音施設を3回走行し、速度・温度補正した拡張型タイヤ/路面騒音について検討した。一例として、測定速度 30 km における速度変動を図-2.25 に示す。この図より、定常走行における走行では、概ね速度 30 ± 1 km の変動で走行している。

各工区における音圧レベルの変動を確認するため、音響特性の可視化であるサウンドスペクトログラム（縦軸は周波数：Frequency，横軸は距離：Distance，色グラフィックは音圧レベル：A-weighted SPL）を作成した。図-2.26 は標準温度 20℃・速度 30km に補正したサウンドスペクトログラムである。4 種類の舗装の音圧レベルの大きさ（色の度合い）は異なるが、同一舗装であれば繰り返し走行による色の変動は小さいことが窺える。また、30km 以外の速度を確認したところ、繰り返し走行による同一舗装の音圧レベルの変動は小さい。

次に、各舗装の騒音値について、A 特性及び F 特性で整理した結果を表-2.3 に示す。この結果、A 特性及び F 特性の騒音値とも変動係数は 0.2dB 以下、最大値と最小値との差 0.3dB 以下と精度は高いものであった。

よって、タイヤ/路面騒音は同一路面を走行した際の再現性は高いことを確認した。

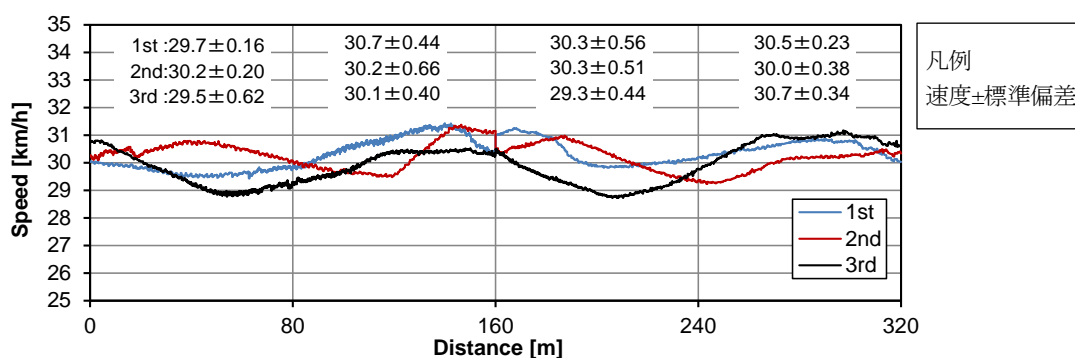


図-2.25 速度 30km で測定した 3 回の速度変動

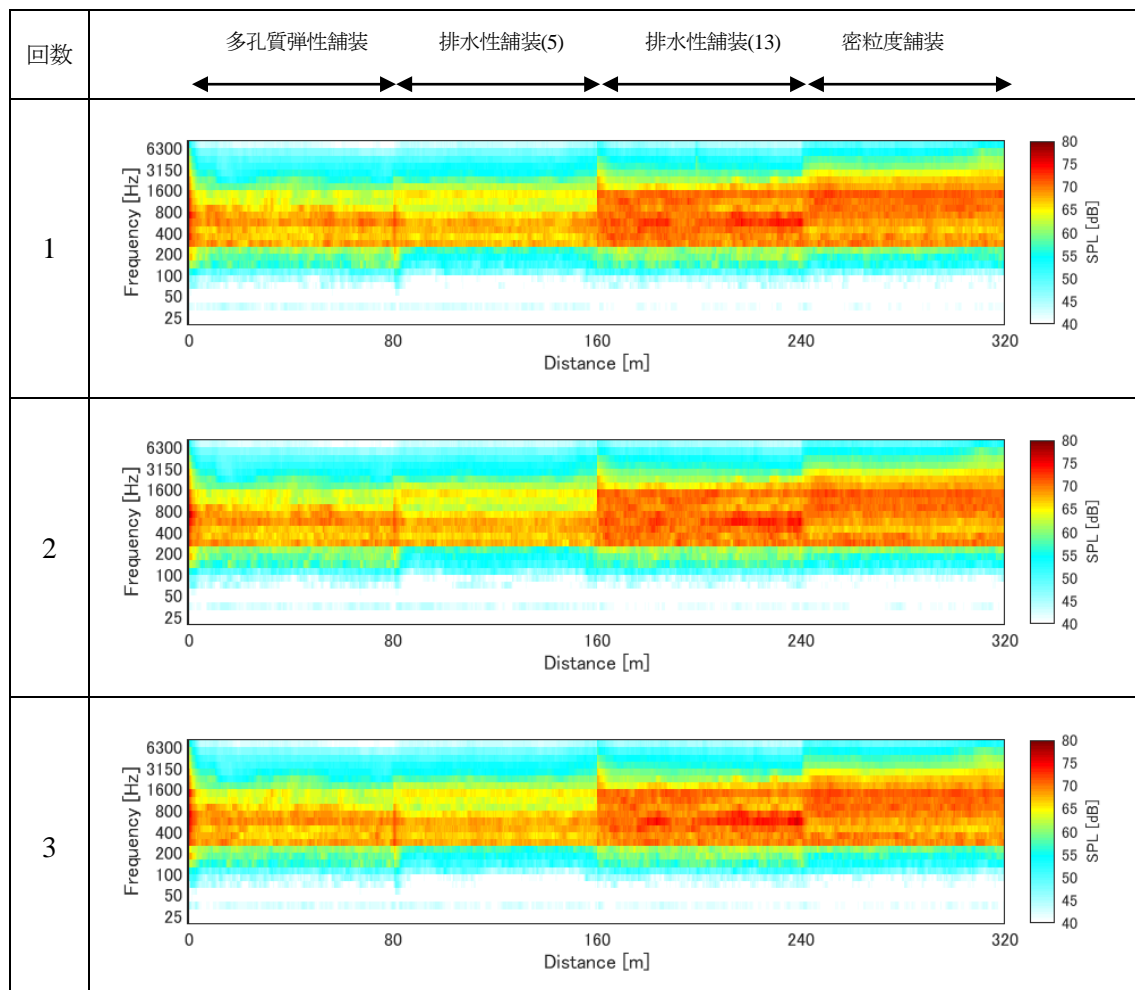


図-2.26 繰り返し走行によるサウンドスペクトログラム
(速度補正:30km, 外気温の補正 20℃)

表-2.3 各工区における騒音値の A 特性及び F 特性

聴感補正	回数	多孔質弾性舗装	排水性舗装 (5)	排水性舗装 (13)	密粒度舗装
A 特性	1	76.5	75.6	79.7	79.6
	2	76.6	75.7	79.8	79.6
	3	76.5	75.6	79.7	79.6
	平均値	76.5	75.6	79.7	79.6
	標準偏差	0.1	0.1	0.1	0
F 特性	1	86.4	85.5	87.0	86.0
	2	86.4	85.5	87.0	86.0
	3	86.4	85.2	86.9	85.7
	平均値	86.4	85.4	87.0	85.9
	標準偏差	0	0.2	0.1	0.2

2.6. 防風スクリーンの違いによる音響特性

防風スクリーンの違いをみるために、同一外気温時（日にちは別）に排水性舗装（13）及び密粒度舗装について測定した。測定条件は以下のとおりである。

- ・ 測定日：2016 年 8 月 25 日，26 日
- ・ 測定路面：排水性舗装（13）及び密粒度舗装
- ・ 走行速度：4 水準（20，30，40，50km）
- ・ 外気温：30℃
- ・ 全天候型防風スクリーン 2 種類防水型（**図-2.27** 参照）

防風スクリーン WS-03	防風スクリーン WS-15
球型：globular shape 	卵型：Egg Shape 

図-2.27 全天候型防風スクリーン（防水型・風雑音抑制型）

F 特性及び A 特性の AP の結果を**表-2.4**に 1/3 オクターブバンド解析結果を**図-2.28**に示す。この結果，AP レベルでは全て±1dB 以内と両者は同程度である。また各周波数における音圧レベルは同一の波形状態を示し，31.5Hz 付近の低周周波数帯域で若干異なっているが，周波数 100～2,000Hz は±1dB 以内，その他は概ね±2dB 以内であった。このことから，防風スクリーンの形状が異なっても音圧レベルは差ほど影響をもたらすことなく，風雑音の影響を排除できていると考えられる。

表-2.4 防風スクリーンの相違による AP

舗装種類		排水性舗装 (13)				密粒度舗装			
走行速度 (km)		20	30	40	50	20	30	40	50
F 特性 (dB)	球型	83.1	87.4	90.1	92.8	81.3	86.0	88.6	91.4
	卵型	84.0	87.2	90.0	92.2	82.2	86.2	89.2	91.8
	レベル差	-0.9	0.2	0.1	0.6	-0.9	-0.2	-0.6	-0.4
A 特性 (dB)	球型	73.9	80.4	84.0	87.2	72.9	78.9	83.6	87.3
	卵型	74.2	80.0	83.9	86.9	73.2	79.5	83.6	87.1
	レベル差	-0.3	0.4	0.1	0.3	-0.3	-0.6	0.0	0.2

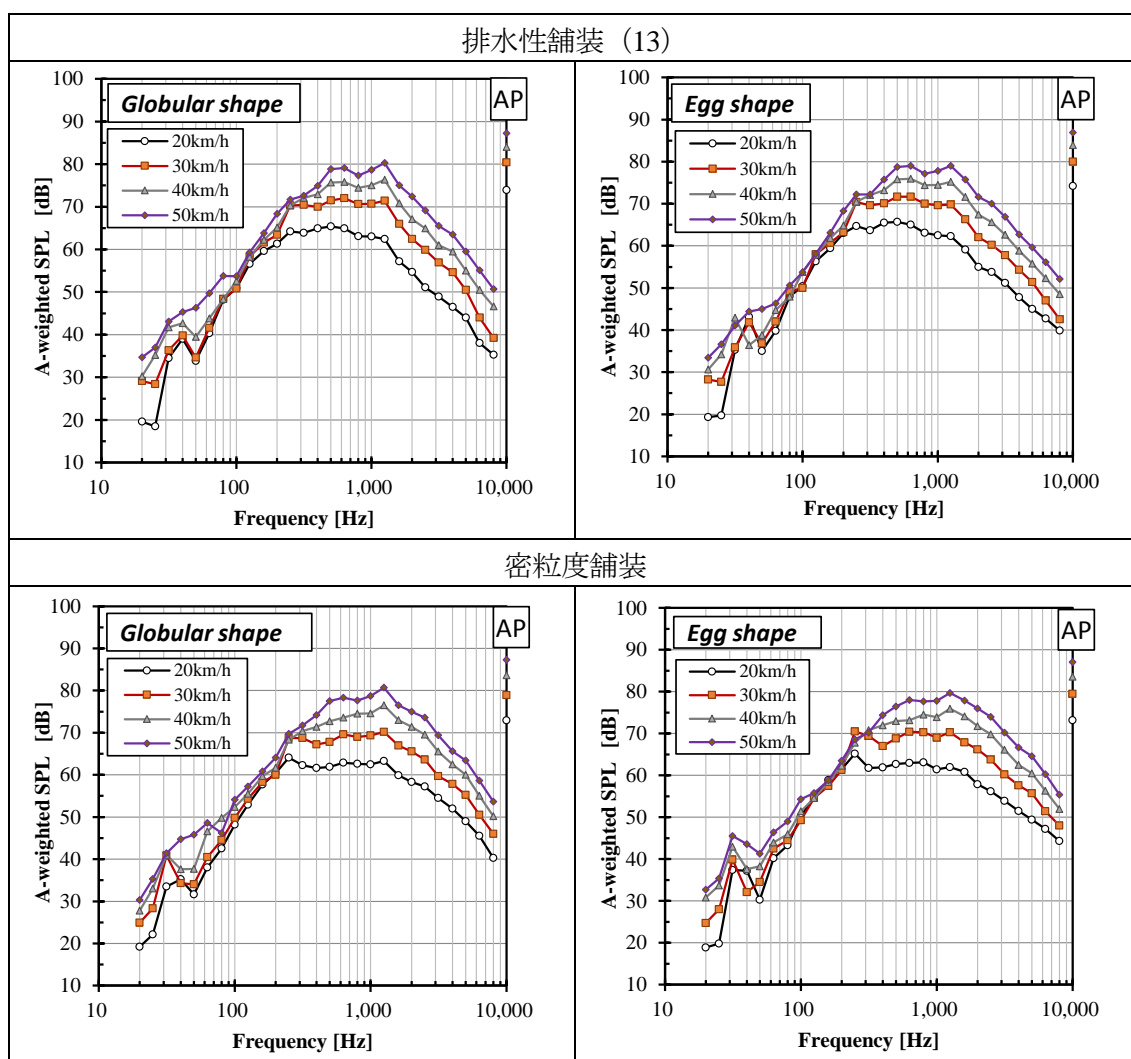


図-2.28 防風スクリーンを使用したタイヤ/路面騒音の周波数特性

2.7. まとめ

第2章で得られた知見をまとめると以下のとおりとなる。

- (1) 路面テクスチャは、タイヤ・路面間のすべり摩擦や転がり抵抗、路面騒音との関連性が高いため、現有の平坦性システム装置を改良し、収録データの解析方法を含めきめ深さ（MPD）測定システムを開発した。このシステムは MPD を 0.1mm 以内の精度で測定できる。
- (2) タイヤ/路面騒音の周波数特性を活用するにあたり、季節が異なる 2 シーズン（1 月，8 月）において、舗装路面騒音施設の 4 種類の舗装を測定した。この結果，舗装種類によって周波数における音圧レベルは異なる傾向を示し，速度の増加に伴い直線的に音圧レベルは増加し，速度依存性が高いことを確認した。しかしながら，周波数 31.5～250Hz 付近では，舗装の種類にかかわらず速度増加に伴う音圧レベルの変化が小さく，タイヤ固有振動による影響がある。また，外気温及びタイヤ表面温度における温度勾配は，AP において一般にいわれている乗用車の勾配-0.08dB/℃と同程度であることが確認でき，周波数毎における温度勾配は AP とは異なり，プラスマイナスの符号に関係なく温度と音圧レベルは直線的な関係であった。
- (3) タイヤ/路面騒音における周波数特性の音圧レベルは，速度及び温度（外気温またはタイヤ表面温度）との関連性が高いことから，重回帰分析によるモデル式の適用性を検討した。その結果，全体的に周波数特性の偏回帰係数は，4 種類の舗装とも同等の傾向を示していることが確認できた。しかしながら，多孔質弾性舗装の偏回帰係数は，他の 3 種類の舗装と一部の周波数で異なっていた。また，温度因子である外気温及びタイヤ表面温度は，両者の寄与率は同程度かつ偏回帰係数は同じ傾向を示していることから，どちらを使用しても解析結果に影響はない。そこで，速度及び温度の補正に用いるモデル式は，実用化を勘案し一般道路で使われている排水性舗装（13）と密粒度舗装の偏回帰係数（速度と外気温）を平均値し，モデル式を構築した。その結果，速度±10km 以内であれば，±1dB 以内の精度で推定できることを確認した。今回作成したモデル式を「拡張型タイヤ/路面騒音」とした。

- (4) 拡張型タイヤ/路面騒音にて、繰り返し走行による測定精度を確認した結果、A 特性及び F 特性の騒音値とも変動係数は 0.2dB 以下、最大値と最小値との差は 0.3dB 以下と 1dB 以下の精度を確保できた。
- (5) 騒音計に使用される防風スクリーンの違いを確認した結果、スクリーンの形状が異なっても周波数特性の音圧レベルは±1dB 以下と十分な精度を有することを確認した。

以上より、本章では路面のきめ深さ（MPD）測定システムの開発及び新たな拡張型タイヤ/路面騒音システムを開発した。

2.8. 参考文献

- [1] (社)日本道路協会：S028 舗装路面の平坦性測定方法，舗装調査・試験法便覧〔第1分冊〕，丸善，pp.[1]-147-156，2007.6.
- [2] (社)日本道路協会：S029 舗装路面のひび割れ測定方法，舗装調査・試験法便覧〔第1分冊〕，丸善，pp.[1]-157-166，2007.
- [3] (社)日本道路協会：S030 舗装路面のわだち掘れ測定方法，舗装調査・試験法便覧〔第1分冊〕，丸善，pp.[1]-167-176，2007.
- [4] 丹治和裕：路面性状の測定技術，アスファル，Vol.41，pp.26-32，1999.
- [5] 倉持智明，安藤和彦：路面性状自動測定装置の性能確認試験，舗装，Vol.48，pp.3-6，2013.8.
- [6] 国土交通省道路局：舗装点検要領，2016.10. <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo28_10.pdf> (Accessed 2018.4)
- [7] 笠原篤，関口幹夫，加藤昌太郎：道路縦断プロファイルからの IRI の算出（上），舗装，Vol.31，pp.21-27，1996.7.
- [8] 笠原篤，関口幹夫，加藤昌太郎：道路縦断プロファイルからの IRI の算出（下），舗装，Vol.31，pp.12-17，1996.8.
- [9] 土木学会：路面のプロファイリング入門（舗装工学ライブラリー1），pp.49-56，2003.1.
- [10] 池田拓哉，東嶋奈緒子：国際ラフネス指数の計測方法に関する研究，舗装工学論文集，3巻，pp.9-14，1998.
- [11] 八木浩一：自動車のばね上観測加速度からの路面縦断プロファイルの推定とその精度検証，舗装工学論文集，18巻，3号，pp.L1-L7，2013.
- [12] 富澤健，遠藤哲雄，大嶋智彦，岡部俊幸，金井利浩：車軸に生じる加速度による路面凹凸評価方法に関する研究，土木学会論文集 E1（舗装工学），67巻3号，pp.L51-L58，2011.
- [13] 国土交通省：NETIS 新技術情報提供システム，技術名称：多機能路面測定評価システム(SK-170013-A)，2018.01.
<http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=SK-170013&TabType=2&nt=nt>
- [14] (公社)日本道路協会：舗装性能評価法―必須および主要な性能指標編―（3－1 騒

- 音値), 丸善, pp.84-105, 2006.
- [15] 岡部俊幸, 寺田剛: タイヤ/路面騒音の測定条件に及ぼす各影響因子の検討, 舗装, Vol.38, No.4, pp.13-18, 2003.
- [16] ISO : Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise -Part 2: The close-proximity method, ISO 11819-2, 2017.
- [17] 日本規格協会 JIS C 1509-1 : 電気音響—サウンドレベルメータ (騒音計) —第 1 部:仕様, JIS ハンドブック 環境測定 I -2 騒音・振動, pp.166-190, 2016.
- [18] (社) 土木学会 : 路面テクスチャとすべり (舗装工学ライブラリー10), 丸善, pp.1-3, 2013.
- [19] ASTM E1845-09 : Standard Practice for Calculating Pavement Macrotexture Mean Profile Depth, ANNURAL BOOK OF ASTM STANDARDS, Section Four, Vol.04.03, pp.1269-1272, 2013.
- [20] 澤津橋純矢, 井原務, 熊澤正郷 : 多機能路面測定器 (マルチ・ロード・プロファイラ) の開発, 第 26 回日本道路会議論文集, p.12P56, 2005.
- [21] 施設紹介 : 舗装路面騒音研究施設, 土木技術資料, Vol.45, No.7, 2003.
- [22] (社) 日本自動車タイヤ協会 : タイヤ道路騒音について, 第 6 版, 1997.
- [23] Ulf Sandberg, Jerzy A.Ejsmont : TYRE/ROAD NOISE REFERENCE BOOK (Driver influence on tyre/road noise emission), pp.171-182, 2002.
- [24] 押野康夫 : タイヤ/路面騒音の発生メカニズムと路面による発生騒音の変化, 73 巻, 2 号, pp.71-73, 2000.

第3章 路面変状とタイヤ/路面騒音との関連分析

3.1. 概要

前章では、タイヤ/路面騒音に必要な不可欠な周波数特性における速度・温度補正方法を開発し、拡張型タイヤ/路面騒音にした際の繰り返し精度の確認及びマイクロホンの風雑音に使用する防風スクリーンの影響を確認した。そのため、前章では現場測定へ適用するためのキャリブレーションとしての位置付けになる。

これに対して第3章は、実道へ適用するための路面損傷を識別するための第1段階として、拡張型タイヤ/路面騒音の解析方法及び路面損傷識別判定の処理を目的とした。本研究では、対象とするタイヤと路面との接触音を周辺環境の影響（他の交通車両の騒音等）を避けるため（暗騒音^[1]）、国土技術政策総合研究所構内道路を使用し、タイヤ/路面騒音の検討を行った。なお、本施設の調査は、土木研究所との共同研究「路面性状との効率的な取得技術の開発に関する研究」^{[2][3]}の一環で路面調査を実施したものであり、タイヤ/路面騒音の測定も合わせて実施した。

対象とした路面は約2km、簡易型路面性状測定車である多機能路面性状評価システム^[4]によって路面性状とタイヤ/路面騒音を測定した。また、路面のきめ深さを把握するために、マルチロードプロファイラ（MRP）^[5]を使用し平均プロファイル深さ（MPD: Mean Profile Depth）^[6]を測定した。なお、第2章で記載したきめ深さ測定装置システムは、簡易型路面性状測定車へのシステム改造が未完成のため、ここでは低速移動式計測器を使用した。

本研究の内容は以下のとおりである。

- ① タイヤ/路面騒音によって路面損傷を判断させるため、騒音の解析処理方法である時間重み付け特性^[1]を変化させ、路面段差の識別判定を検討した。
- ② タイヤ/路面騒音と路面特性の関連性を把握するため、路面性状から得られる諸特性との相関性を確認した。
- ③ 路面損傷の状態を把握するため、サウンドスペクトログラムを使用し、路面変状との関連性を把握し、良好路面との差を用いて路面損傷の識別判定を行った。

ここで、路面損傷の状態は、経年変化に伴う紫外線等による影響及び車両の交通走行に伴う交通荷重の累積疲労による影響、舗装の支持力等の影響によって、劣化・老化、累積疲労を繰り返し、様々な路面損傷の形態に変化する。これは舗装のライフサイクルとライ

フサイクルコストの概念^[7]のように舗装の供用レベルは徐々に低下する。そのため、複合化された路面損傷の状態を一律に評価することは困難である。本研究では当該区間の良好な路面箇所を基準路面として仮に選定し、損傷箇所と基準路面を比較し、路面損傷の識別判定の適用性を検討した。実道へ適用する際の路面損傷識別判定の詳細は、第4章で検討する一般市道の路面調査結果に基づき検証する。

3.2. 対象路面と測定内容

(1) 対象路面

- ① 国土技術政策総合研究所構内道路
茨城県つくば市南原1番地6
- ② 路面の測定位置
北東側の既設舗装、約2km（**図-3.1**を参照）

(a) 起点側



(b) 終点側



図-3.1 対象箇所（(a)起点側，(b)終点側）

(2) 測定内容

- ① 測定車：簡易型路面性状測定車（**図-2.2** 参照）
- ② 測定速度：定常走行による時速 30km（構内制限速度）
- ③ 測定項目：
 - ・ 測定車：ひび割れ，平坦性，乗り心地，タイヤ/路面騒音，車軸加速度^[8]
 - ・ 人力：MPP によるきめ深さの測定

3.3. 解析処理方法の検討

3.3.1. 聴感補正

一般的に環境騒音に使用されている騒音評価は、人間の耳の感度を考慮して得られる騒音レベル L_{pA} であり、周波数の重み特性 A 特性¹⁹⁾をかけて測定される A 特性音圧レベルで、単位はデシベル(dB)として表される。この音の周波数特性は図-3.2 に示すように重み付けしない特性は Z (FLAT)、人間の聴感にあわせた周波数の感度の補正は A 特性となる。FLAT に近い C 特性は、JIS やアメリカの規格で当初フラット特性としたものであり、IEC 規格における低周波・高周波の一部で平坦から外れたものが定義される。

音圧レベル (Pressure Level) とは、大きい音は強い音、小さい音は弱い音で表現でき、音圧レベル 0~130 dB の範囲が主として対象となる。その周波数補正特性は Z (FLAT) が使用される。音圧レベルの定義式は、式(3.1)に示すとおりである。

$$\text{音圧レベル } L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{P_0^2} \quad (3.1)$$

ここに、 P : 測定された音圧の実効値 (Pa)

P_0 : 基準となる音圧 (20 μ Pa)

騒音レベル (SPL : Sound Pressure Level) とは、音の物理的大きさの尺度である音圧レベルに A 特性の補正を行った量として表したもので、この A 特性音圧レベル (A-Weighted Sound Pressure Level) を騒音レベルと呼ぶ。騒音レベルの定義式は、式(3.2)に示すとおりである。

$$\text{騒音レベル } L_{pA} = 10 \log_{10} \frac{P_A^2}{P_0^2} \quad (3.2)$$

ここに、 P_{A0} : A 特性で補正した音圧の実効値 (20 μ Pa)

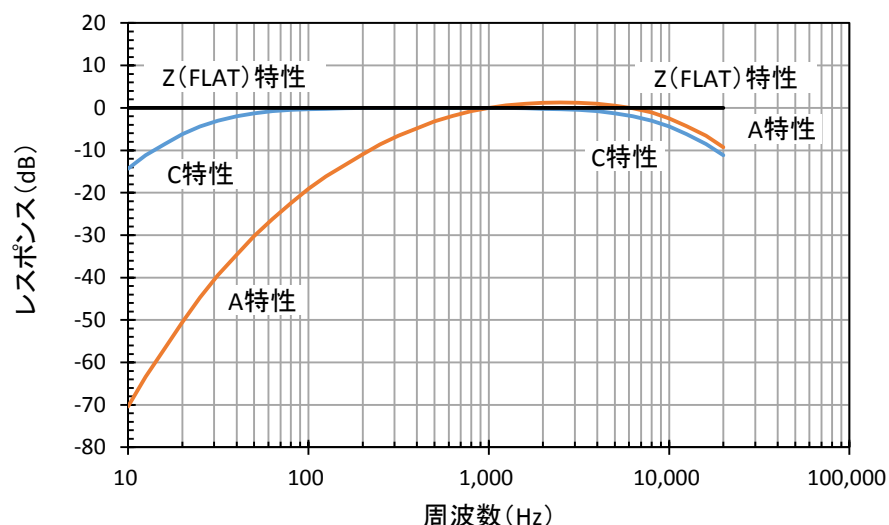


図-3.2 周波数重み付け特性

騒音レベルの評価である、道路交通騒音の予測モデル（ASJ RTN-Model 2013）^[10] は、環境影響評価や生活環境影響調査に使用され、道路上を通過する自動車の音源（エンジン騒音、排気系騒音、吸気系騒音、タイヤ/路面騒音、駆動系騒音など）を総合的に考え、様々な自動車の走行状態、車両区分、道路構造、舗装の種類などを設定し、対象とする地区の騒音対策、道路沿道の状況等の設定により道路交通騒音の予測に使用されている。ここで用いられている聴感補正は A 特性である。

また、国内外のタイヤ側^{[11][12][13]}から評価を検討している路面とタイヤ間の路面騒音評価、低騒音舗装の評価^{[14][15]}においても聴感補正は A 特性である。

このようなことから、本章ではタイヤ/路面騒音の周波数重み付けは騒音レベル（A 特性音圧レベル）とした。

3.3.2. 時間重み付け特性（時定数）の変化

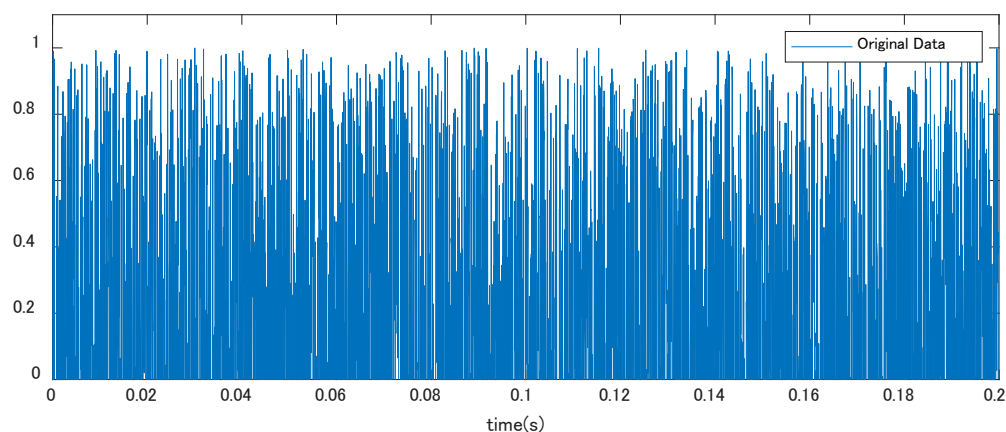
騒音計で得られる瞬時の音圧レベルは、騒音値への計算過程で音圧の二乗値に重み付けを行い、人間が感ずる音の性質を考慮したものである。この時間重み特性とは時定数と呼ばれ、道路騒音では耳の時間応答に近似される速い動特性（Fast : 125 ms）が使用されている。また鉄道など変動する騒音を評価する場合は遅い動特性（Slow : 1 s）が使用され、工場などの継続時間が短い衝撃音では時間重み特性（Impulse = 35ms）が使用されている。

本研究では、タイヤ/路面騒音から得られるデータより、路面破損の識別判定を行うため、

音圧信号のスペクトルの時間変動が重要なファクターとなる。騒音計の時定数における信号レベルの特性を確認するため、騒音計に用いられている時定数のフィルタに近い、一次のバターワースフィルタ（Butterworth filter）を設計し、ランダムな入力信号長 0.2s、周波数 2kHz を用いて信号データを解析した。解析結果は図-3.3 に示すとおり、時定数 125ms はデータが平滑化され、時定数が小さくなるほどデータ信号の変動は大きく変化している。

本検討では、図-3.4 に示す路面に段差が生じている補修箇所を選定し、時定数の変化による路面損傷識別判定を試みた。この画像は簡易型路面性状測定車に搭載しているラインスキャンカメラで測定した幅 4m、縦断方向 10m の二次元画像であり、縦横 1mm のピクセル画像である^[16]。

(a) ランダム信号データ



(a) 時定数フィルタ後のデータ

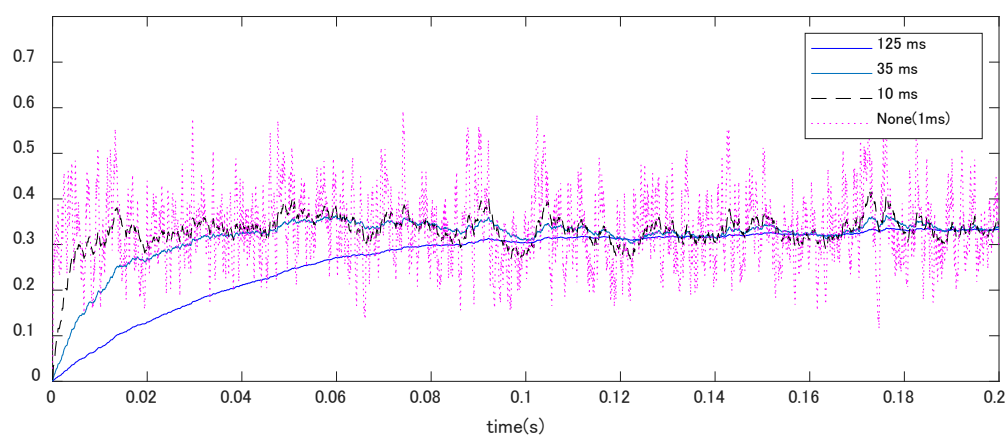


図-3.3 時間重み付けの概念

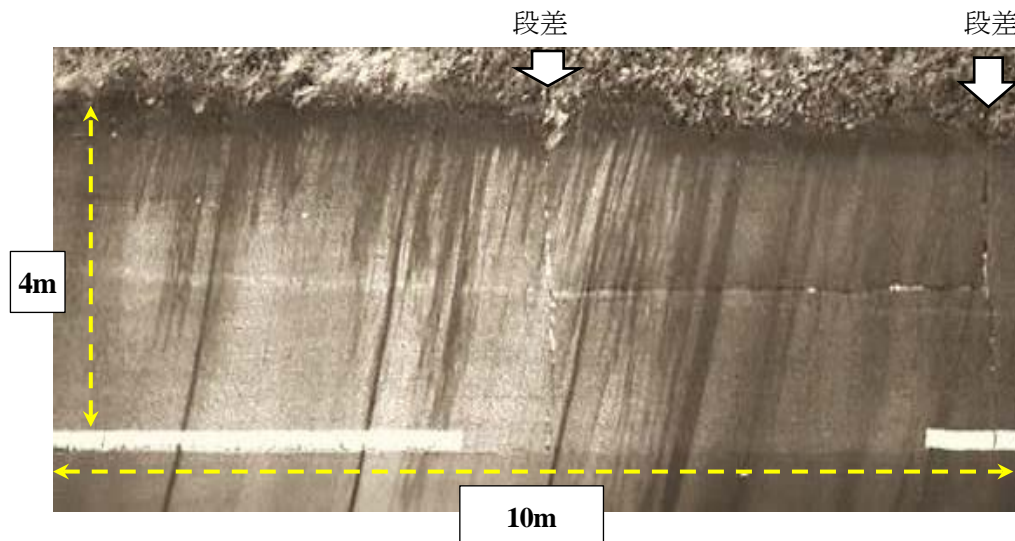


図-3.4 補修箇所の路面画像

解析では、4つの時定数（125ms, 35ms, 10ms, None（重み付けなし））を用い、タイヤ/路面騒音の騒音レベル及び周波数特性をカラーマッピングによる可視化（サウンドスペクトログラム）した。結果を図-3.5 及び図-3.6 に示す。ここで、解析時間間隔（時間刻み）は 35ms とした。この4つの時定数は、本解析に用いた音響解析の時系列データ解析ツール「Oscope OS-2600 ver.2.10.0.21」（株小野測器）の 1/N オクターブ解析で選択可能な8種類（表-3.1 参照）であり、時定数が早いほうから選択した。

この結果、時定数 None は測定距離に対する音響特性の動きが大きく変動し、ジョイント部の音響特性の識別判断が可能になるが、細かな変動音（雑音）が発生しているため、路面のひび割れ等の検出には不向きであると考えられる。また時定数 125ms では変動音が平滑化されジョイント識別判定ができない。認識評価は速度別に応じた評価が必要となるが、仮に走行速度 30km であれば時定数 10ms または 35ms で判定可能である。そこで、実道での速度 20～60km を想定し、時定数を 10ms とした。

表-3.1 Oscope 解析ソフトによる時定数の設定条件

	時定数の条件	
	None,10ms,35ms,125ms(Fast),630ms,1s(Slow),8s,10s	
時定数	125ms (Fast)	人間の耳の時間応答に近似した値
	1s (Slow)	変化が少ない騒音

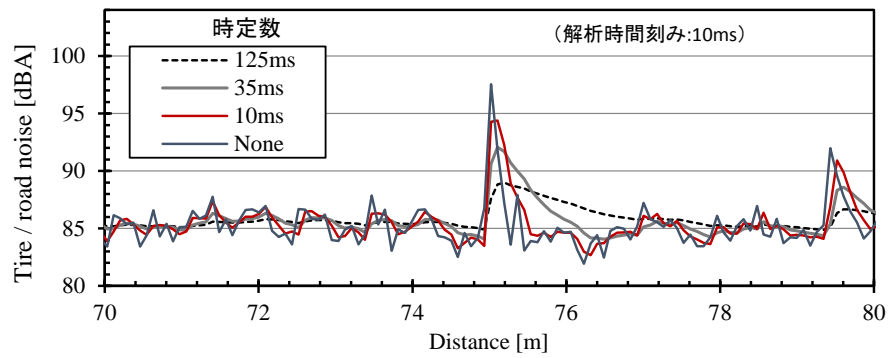


図-3.5 時定数の違いによるタイヤ/路面騒音

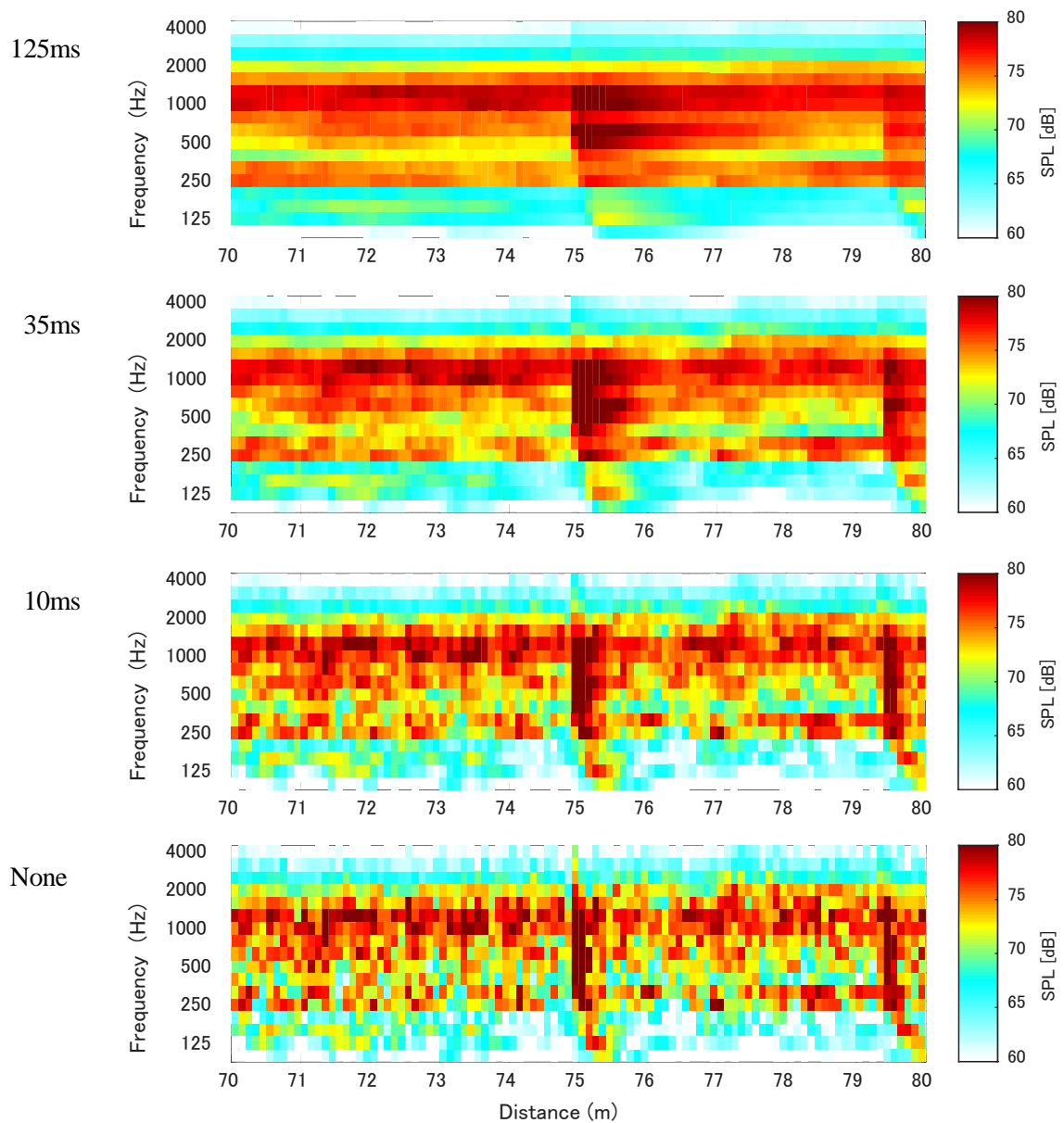


図-3.6 時定数の相違によるサウンドスペクトログラム

3.3.3. 解析間隔の刻み

環境騒音^[1]や舗装性能評価法によるタイヤ/路面騒音^[14]の解析方法では時間刻みは 0.1s (100ms) が用いられている。前項で示した結果より、路面損傷を判定するためには時定数 10ms (0.01s) [速度 30km/h の場合は時定数 35ms 以下] が必要である。解析間隔の刻み設定は、路面とタイヤから発生する音を瞬時に捉える必要があるため、時定数より短い時間設定が必要である。そこで、時間間隔を 10ms (0.01s) に定めた。なお、データ収録は音の周波数特性を 8kHz まで解析するため、サンプリング周波数 25.6kHz (帯域 20kHz×2.56) とした。

3.3.4. 判定区間の設定

タイヤ/路面騒音における移動距離の算出は、車両から得られる速度値を積分したものである。そのため、時速 30km (秒速 8.33m) で、前項の騒音の解析 10ms とすると、距離のプロットは 0.083m=8.33m/s×0.01s 毎の移動となる。そのため、距離に合わせた等間隔で他の測定値との位置合わせが困難である。

そこで、路面損傷の有無を判定するため数センチ単位での評価ではなく、ひび割れ評価の判定^[17]で使用されている縦方向 0.5m 間隔とした。なお、音の平均値は式(3.3)に基づき計算した。

$$\bar{L} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_0} \cdot \frac{1}{n} \right) \quad (3.3)$$

$$\frac{P_1}{P_0} = 10^{L_1/10}, \quad \frac{P_2}{P_0} = 10^{L_2/10}, \quad \frac{P_3}{P_0} = 10^{L_3/10}, \quad \dots, \quad \frac{P_n}{P_0} = 10^{L_n/10} \quad (3.4)$$

ここに、 \bar{L} : 平均のレベル(dB),

n : n 個の音

P_{A0} : A 特性で補正した音圧の実効値 (20μPa)

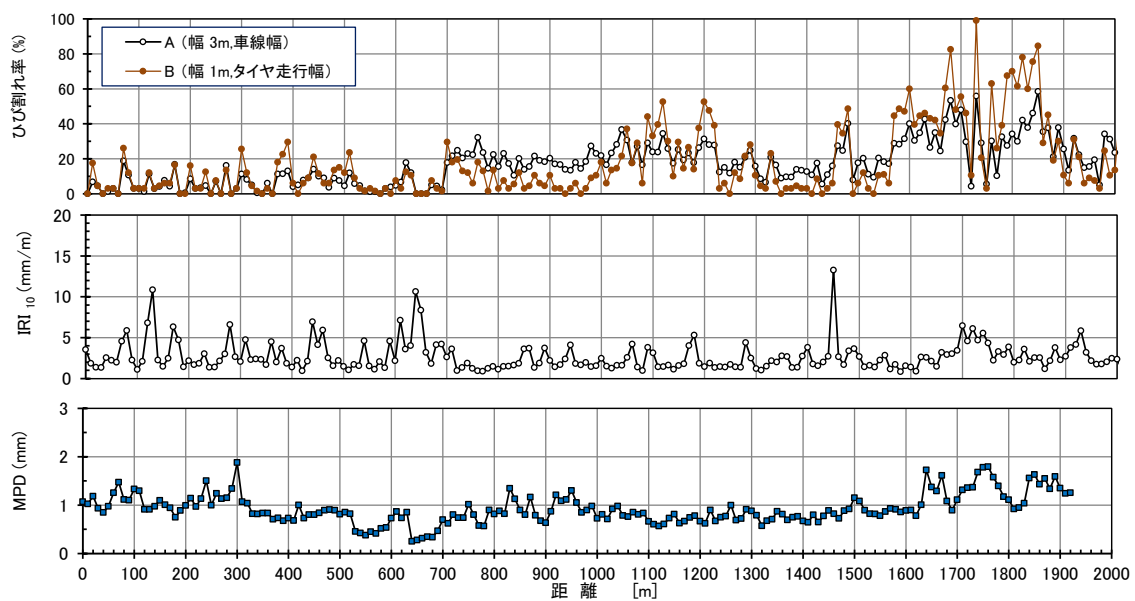
3.4. 路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音との関係

3.4.1. 路線の路面特性とタイヤ/路面騒音

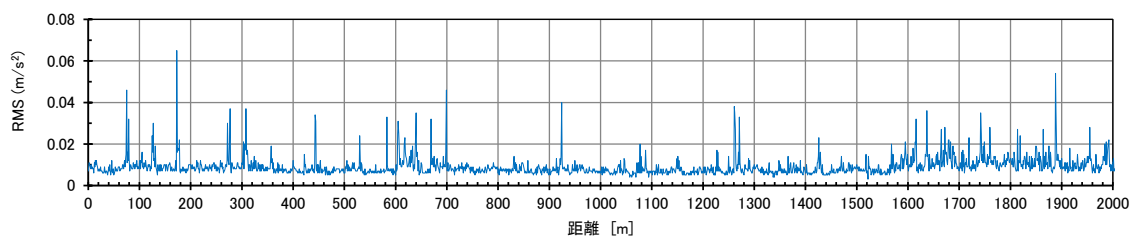
(1) 測定結果

タイヤ/路面騒音と路面特性との関連性を検討するため、路面性状の結果を整理した。路面性状の結果を図-3.7に示す。

【路面性状】（10m 間隔）



【車軸の加速度波形：RMS】（1m 間隔）



【タイヤ/路面騒音】（1m 間隔）

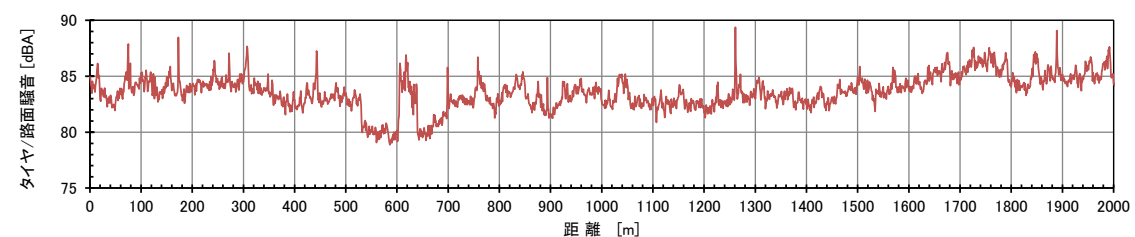


図-3.7 路面性状とタイヤ/路面騒音の縦断図

ここで、タイヤ走行位置は OWP（外側車輪走行位置）であり、ひび割れ以外は同一ライン位置の測定である。そこで、ひび割れ率（車線幅員 3m）も同一測定ラインの評価を試みるため、OWP 位置として左タイヤ走行位置の幅 1m のひび割れ率も算出した。

図-3.7 より、タイヤ/路面騒音が比較的大きい 1,600～2,000m 付近は、ひび割れ率が高く、路面のきめ深さ（MPD）も大きくなる傾向を示している。また、車両の車軸に搭載した鉛直加速度より求めた RMS とタイヤ/路面騒音をみると、突発的に加速度が大きくなる部分でタイヤ/路面騒音も大きくなっている。この局部的に大きくなる箇所は、路面の画像写真より、補修箇所や横断ひび割れによる路面段差や凹凸等の影響であることを確認した。

また、ひび割れ率の解析幅員の違いを示した図-3.8 では、全体的に車線幅員よりも OWP のほうが大きくなる傾向を示している。しかし、ひび割れ率 40% 以下では車線幅員の値に対して、OWP の値が大小に変動していることから、舗装の支持力及び劣化状態の進行度合いによって、OWP または IWP のどちらかにひび割れが発生している状態であった。そこで、ドライバーの乗り心地や騒音及び振動の影響等を勘案し、タイヤ走行位置の路面状態を定量的に評価することが重要なため、ひび割れ率の評価を OWP 位置も含めて検討した。

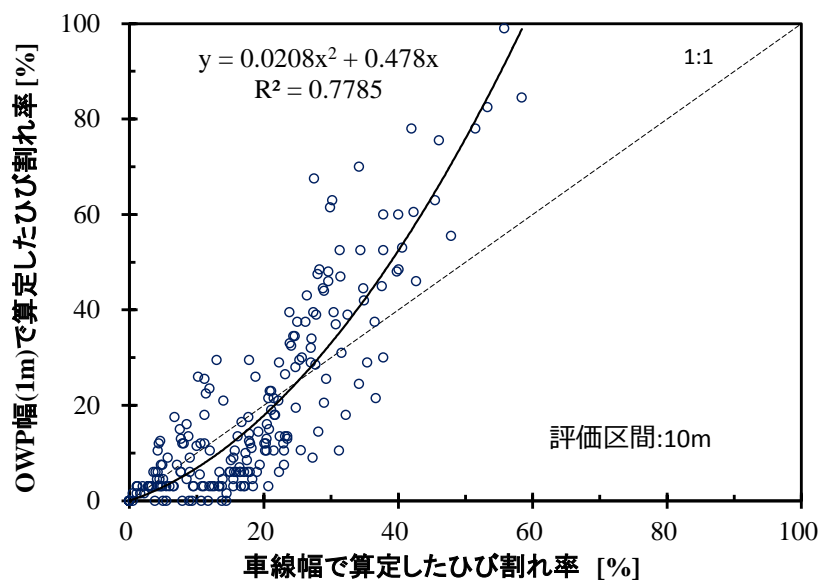


図-3.8 解析幅員の違いによるひび割れ率

(2) 相関性

路面特性の因子との関連性を調べるため、鉛直加速度及びタイヤ/路面騒音の評価区間を10mに平均化（タイヤ/路面騒音はパワー平均）し、相関分析を実施した。表-3.2よりタイヤ/路面騒音とMPDは高い相関を示しているが、他因子との相関性は低い。

そこで、ひび割れ形態によるタイヤ/路面騒音との関係について、ひび割れ率及びMPDの関係図を作成した。図-3.9はタイヤ/路面騒音とひび割れ率との関係であり、ひび割れの大小またはひび割れ率にかかわらず、大きく変動している。また、局部損傷（路面凹凸部）が発生している箇所のタイヤ/路面騒音は、ひび割れ率のタイヤ/路面騒音と同程度の大きさに位置しているため、局部損傷を検出し難いといえる。MPDと高い相関性があるタイヤ/路面騒音は図-3.10に示すとおり、一般的にいわれているように路面の粗さ（MPD）が大きくなるほどタイヤ/路面騒音は大きく、局部損傷は回帰曲線よりも大きい位置にプロットされた。また、MPDが1以上では亀甲状のひび割れが多く顕在していることがわかった。

表-3.2 路面性状とタイヤ/路面騒音との関係

	ひび割れ率 (%)		乗り心地 (mm/m)	きめ深さ (mm)	鉛直加速度 (m/s ²)	タイヤ路面騒音 (dB)
	OWP	車線幅員	IRI ₁₀	MPD	RMS	—
ひび割れ率 OWP(%)	1					
ひび割れ率 車線幅員(%)	0.851	1				
IRI ₁₀ (mm/m)	-0.096	-0.016	1			
MPD (mm)	0.290	0.314	0.006	1		
RMS (m/s ²)	0.257	0.346	0.189	0.480	1	
タイヤ路面騒音 (dB)	0.400	0.400	0.007	0.856	0.527	1

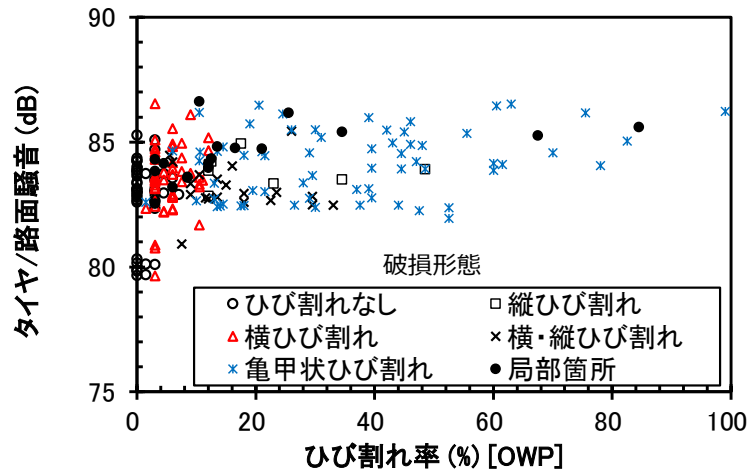


図-3.9 タイヤ/路面騒音とひび割れ率の関係

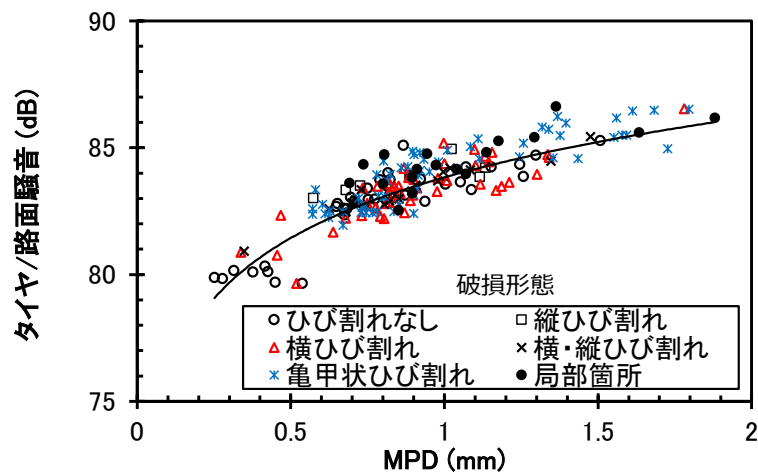


図-3.10 タイヤ/路面騒音と MPD の関係

3.4.2. 路面損傷の評価

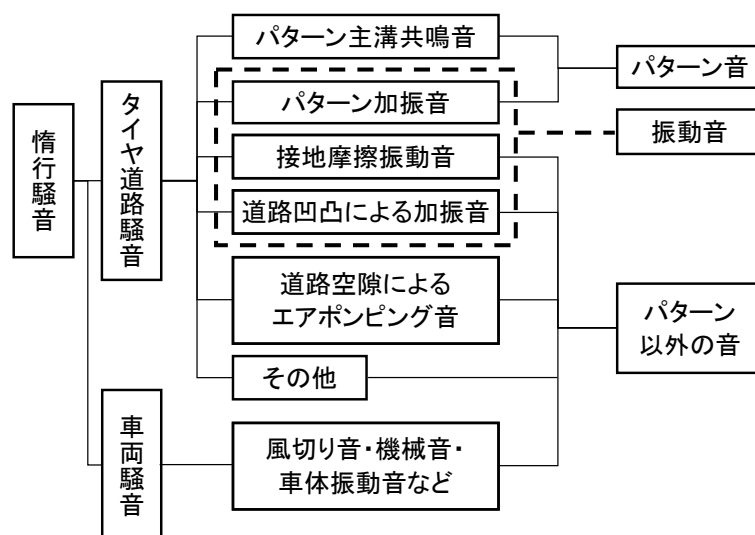
本項では今回使用したタイヤにおける発生メカニズムを明らかにし、路面の局在損傷とサウンドスペクトログラムとの関連性を調べた。ここで、評価区間は局在損傷の検出力を高めるため評価区間 0.5m とした。

(1) タイヤ/路面騒音の発生メカニズム

タイヤ/路面騒音は、タイヤサイズ及びトレッドパターンなどの種類によって異なり、その発生メカニズムの構成は図-3.11 に示すように主にパターン主溝共鳴音及びパターン加振音、タイヤ振動音等に分類されている^[18]。発生騒音の周波数は図-3.12 に示すように接地面内におけるトレッド溝の長さに依存している^[19]。パターン主溝共鳴音はタイヤが接地し

た際にトレッド部分の主溝と路面が形成する気柱管から発生する気柱管共鳴音と呼ばれ、一次共鳴周波数 f_1 は $C/2l$ (C : 音速, l : タイヤの接地長=0.16m) から 1,063Hz となる。次にパターン加振音はトレッドパターンが有する横溝が路面と接触する際の衝撃音であり、ピッチノイズとも呼ばれている。ピッチ周波数 f_1 を計算すると V_n/L (V : 速度=30km/h, n : ピッチ個数=56 個, L : タイヤ周長=2m) から 146Hz となるが、数種類のピッチがランダムに配列しているため、発生周波数成分の分散がされ、146Hz 付近に卓越されるものとする。その他の音についてはタイヤ自体の振動やタイヤが路面から離脱する音や接地摩擦音等によるものである。

(a) タイヤ道路騒音の発生源の分類



(b) タイヤ道路騒音発生の主要要因

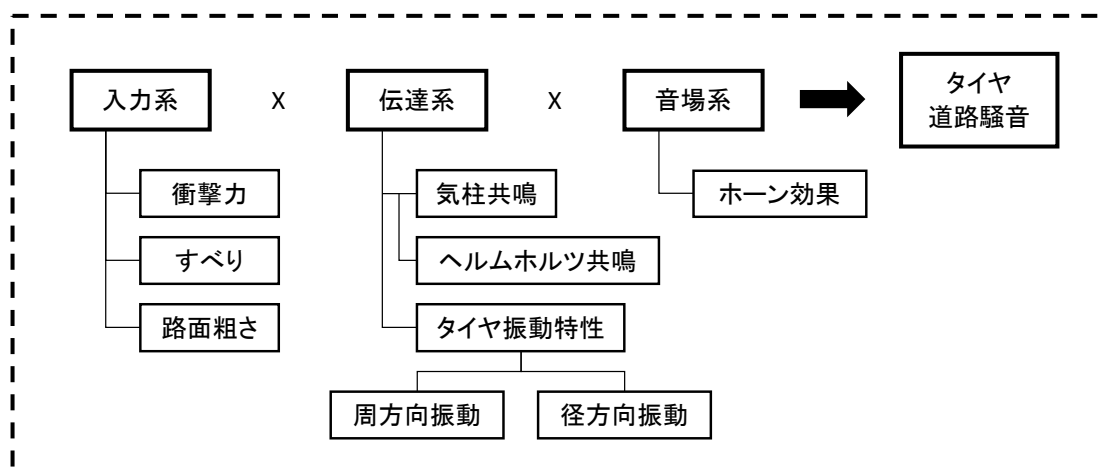


図-3.11 タイヤ道路騒音の発生要因

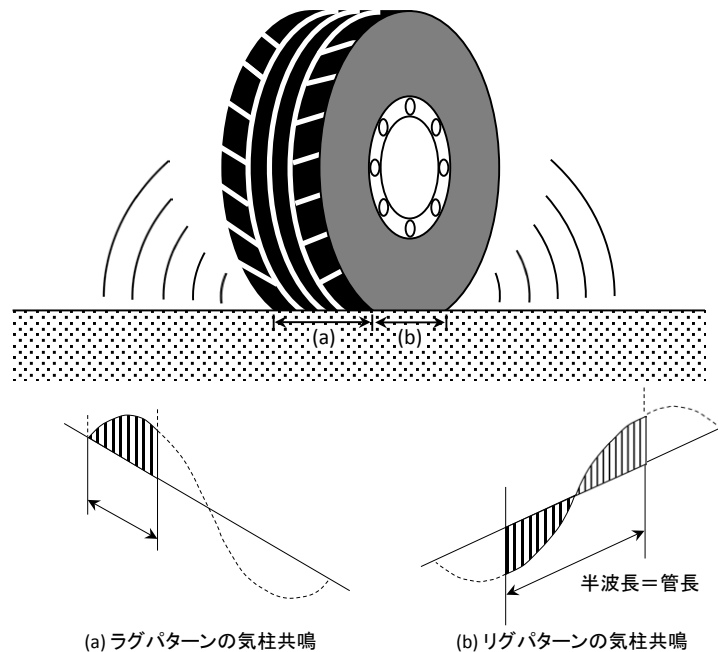


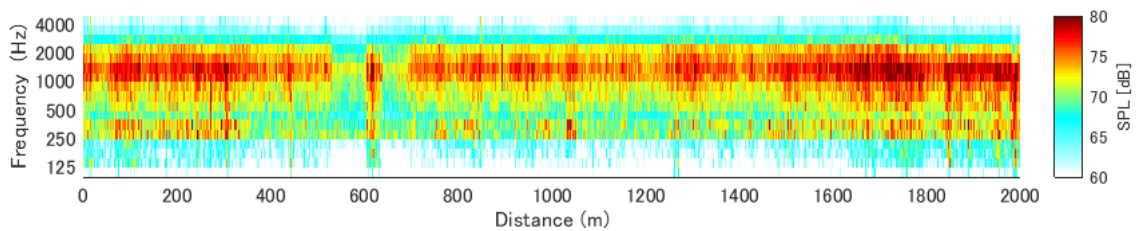
図-3.12 トレッド溝の気柱共鳴

(2) サウンドスペクトログラムによる音響特性

図-3.13 に路線延長 2km におけるサウンドスペクトログラム（上段 (a)）と新たに考案した基準路面（AP が最小となる路面）の改良型サウンドスペクトログラム（音圧レベルからの差を計算したサウンドスペクトログラム）（下段 (b)）を示す。ここで、基準路面の設定は、同一路線内で既設舗装の損傷度の大小が最も小さく（良好路面=健全部）かつ、タイヤ/路面騒音の AP が一番小さい箇所を選択した。また、音圧レベルの差は、dB の計算であるパワー差ではなく、数値の引き算とした。

この図より基準路面（586m 付近）に対して、その他の区間は各周波数における音圧レベルは大きく変動し、低周波数領域 125Hz 付近と高周波数領域 1,000Hz 付近での音圧レベルが大きい。この二つの周波数帯は、パターン主溝共鳴音及びパターン加振音の依存割合が大きくなっている。路面凹凸が大きい（特にひび割れが多い箇所）と、パターン主溝共鳴音は気柱共鳴であるため発生音は小さくなるが、この発生音の増加は路面凹凸による加振がトレッドの振動及び縦溝の気柱共鳴を励起したものと考えられる。

(a) サウンドスペクトログラム



(b) 改良型サウンドスペクトログラム（基準路面との差によるサウンドスペクトログラム）

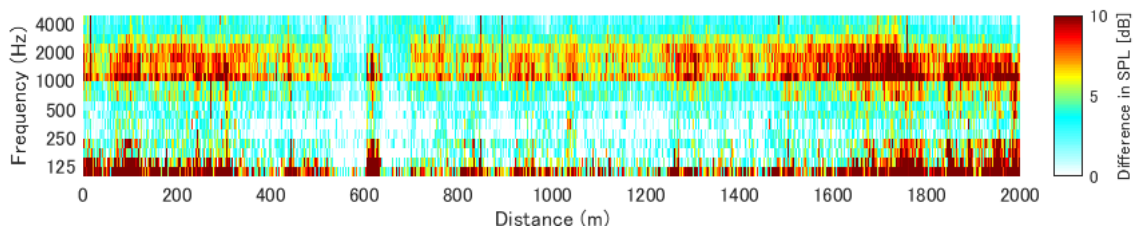


図-3.13 タイヤ/路面騒音と基準路面との差のサウンドスペクトログラム

(3) 局在損傷部による周波数特性

図-3.13 では路面に局在損傷が発生している箇所では音圧レベルが大きくなっていることがわかった。そこで、局在損傷であるひび割れ（縦・横・亀甲状）及び局部損傷（くぼみやポットホール等）に分類し、路線内から代表的な箇所を抽出した。図-3.14 より局在箇所の路面損傷は、基準路面（ひび割れなし）に対して大きくなっている。図-3.14 を用い局在箇所の平均値と基準路面との音圧レベルの差を求めた結果を図-3.15 に示す。

局部箇所では全周波数で音圧レベルが大きく、特に低周波数のレベルが大きい。このことはタイヤが路面のくぼみ等に入った際の上下振動とトレッド部と路面との摩擦及び車両固有の振動によって低周波数の音圧が増幅されたものと考えられる。横ひび割れ及び亀甲状ひび割れは、局部箇所での音圧レベルより低い低周波成分の音圧レベルが大きい。横ひび割れの音は路面の横溝がタイヤトレッドに加振力が加わることにより突発的な衝撃音となる。亀甲状ひび割れはタイヤトレッドと縦・横・斜め等の溝との接触が継続的に長く生じ、横ひび割れよりも音圧レベルが大きくなるものと考えられる。また縦ひび割れは、縦溝によってパターン主溝共鳴音が低減するが、路面の粗さによるタイヤトレッドの加振と気柱共鳴が共振し、主溝共鳴音が大きくなったものと推察される。

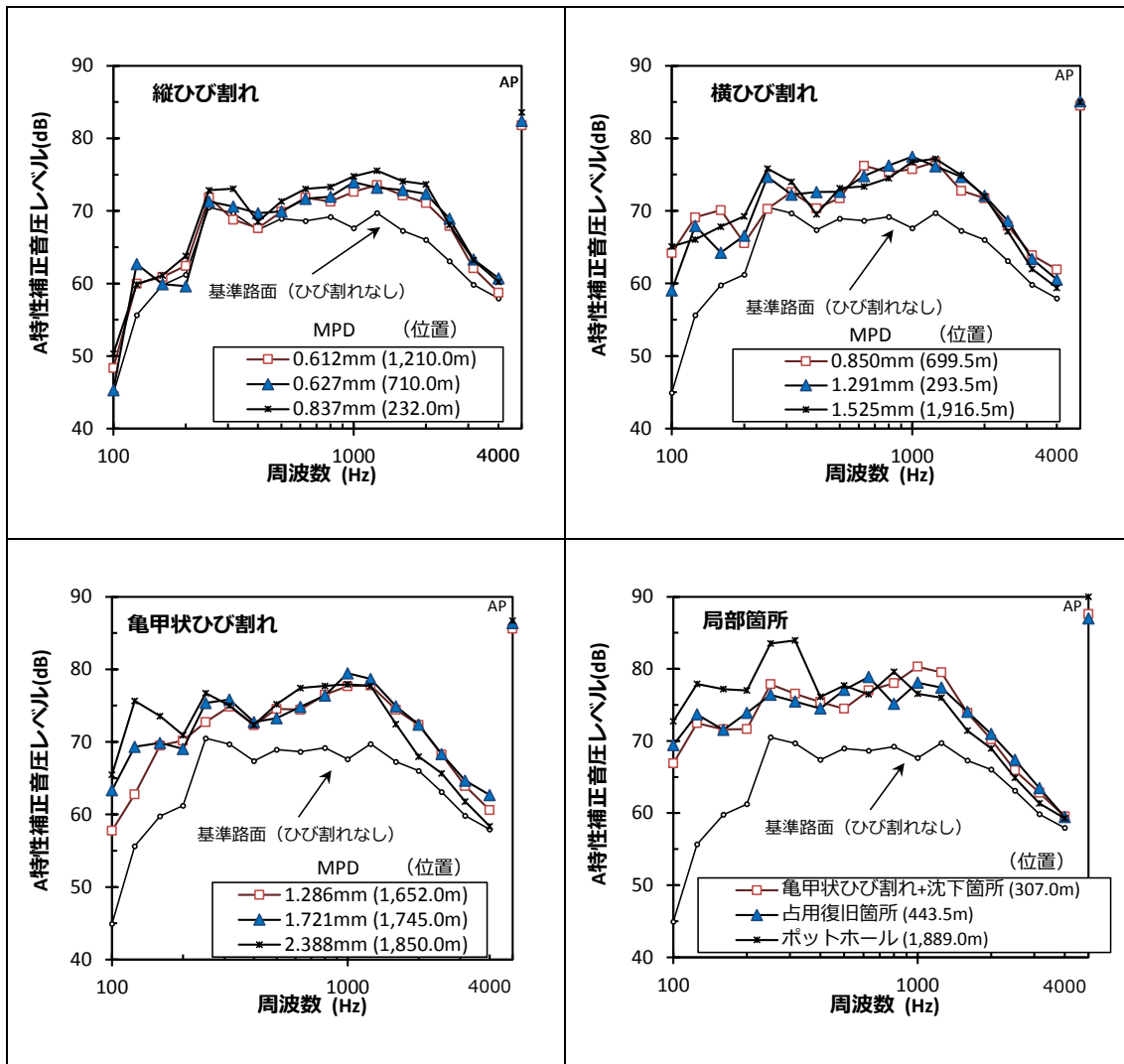


図-3.14 局在損傷におけるタイヤ/路面騒音の周波数特性

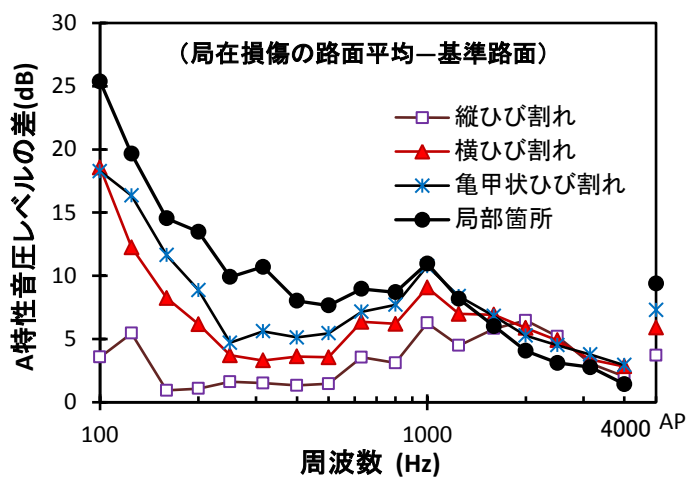


図-3.15 基準路面との差における周波数特性

3.4.3. 局部損傷の判定

局部箇所は、前述したようにタイヤの上下振動かつ路面とタイヤとの摩擦が加味し周波数 1,000Hz 以下で音圧レベルが増幅し、1,000Hz よりも大きくなるとタイヤの縦・横溝の気柱共鳴が形成し、音の発生が小さくなっていくものと推察される。そこで、図-3.16 より局在損傷に対応する周波数帯を 3 つ分け、低周波成分 (LF : 100-200Hz)、中周波成分 (MF : 250 -500Hz)、高周波成分 (HF : 630 -1,000Hz) とし、それぞれ音圧レベルを合成した。この図より局部箇所及び横ひび割れまたは亀甲状のひび割れは、LF 及び MF の音圧レベル差が非常に大きくなる特徴を示し、局在箇所の識別判定の目安になるものといえる。

たとえば当該路線において、LF : 40 以上、MF : 20 以上、HF : 20 以上の水準で損傷箇所を抽出すると、全て局在損傷である路面のくぼみ、ポットホール、沈下を伴う亀甲状ひび割れ、占有部の補修箇所を的確に予測することを確認した。しかしながら、亀甲状のひび割れや横ひび割れの抽出は、設定条件によってある特定箇所は予測できたが、路面の劣化・老化の進行が大きい箇所（細粒分が飛散し粗骨材面が多い路面）も抽出された。

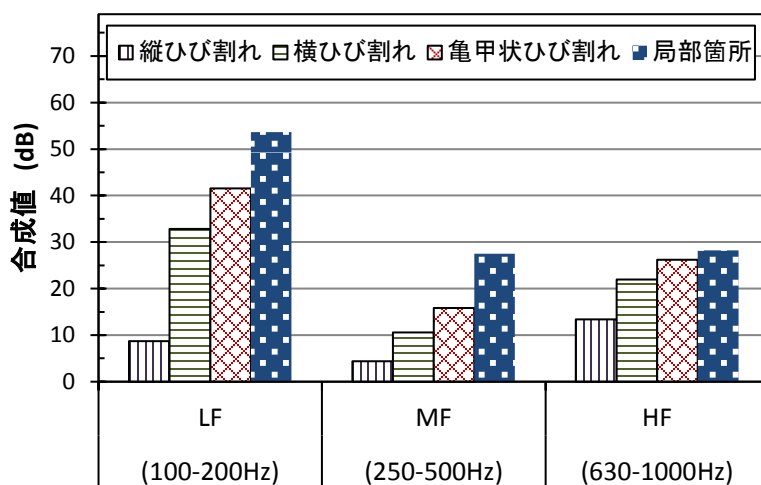


図-3.16 周波数成分による合成値

3.5. まとめ

第3章で得られた知見をまとめると以下のとおりとなる.

- (1) 拡張型タイヤ/路面騒音から路面損傷を識別するための解析処理として, 舗装性能評価法やタイヤ道路交通騒音で設定する時定数 125ms では路面段差の凹凸状態の変動音が平滑化されるため識別判定は困難である. 本検討より, 路面損傷識別判定が可能な時定数を 10 ms (速度 30km 以下では 35ms 以下) とした.
- (2) 路面特性値とタイヤ/路面騒音 (AP) の相関性を調べたところ, 路面のきめ深さ (MPD) は $r=0.86$ と最も相関が高く, ひび割れ率は $r=0.4$ と相関が低い.
- (3) 拡張型タイヤ/路面騒音のサウンドスペクトログラムを活用し, 路面に損傷がなく良好な路面を基準路面として定め, 音圧レベル差を求めた. その結果, 局部的に路面凹凸の大きな箇所では低周波数領域 125Hz 付近と高周波数領域 1,000Hz 付近で音圧レベルが高くなることを確認した. ここで, 基準路面との差から得られたサウンドスペクトログラムを改良型サウンドスペクトログラムと定めた.
- (4) 局部損傷における拡張型タイヤ/路面騒音のサウンドスペクトログラムを確認した結果, ひび割れの発生形態によって音圧レベルの大きさは異なることが確認できた. その発生メカニズムは, タイヤトレッドと路面との摩擦及び上下振動により低周波成分が大きく寄与しているといえる.
- (5) 局在損傷の判定は, 周波数成分の合成値を計算することにより, 損傷形態区分の把握ができ, この目安から損傷箇所の抽出が可能なことがわかった.

以上より, 本章では周囲環境の影響が受けにくい構内道路にて, 路面損傷とタイヤ/路面騒音を比較検討し, 路面損傷が識別できる解析方法を考案した. この方法を活用し, 路面性状との関連性を新たに考案した「改良型サウンドスペクトログラム」を検討した結果, 局部損傷の識別判定手法の新規性を見出した.

3.6. 参考文献

- [1] 日本規格協会 JIS Z 873 : 環境騒音の表示・測定方法…ISO1996-1, JIS ハンドブック 環境測定 I -2 騒音・振動, pp.380-390, 2016.
- [2] 渡邊一弘, 堀内智司, 久保和幸, 道路の性格・役割を踏まえた舗装の点検技術の開発, 土木技術資料, Vol.55, No.8, pp.26-29, 2013.8.
- [3] 渡邊一弘, 久保和幸, 舗装路面の新たな点検手法の動向と土木研究所との取組み, 土木技術資料, Vol.57, No.8, pp.18-21, 2015.8.
- [4] 岡部俊幸, 針谷孝伸, 福田文彦 : 宇都宮市における舗装の総点検業務の適用事例, 舗装, Vol.51, No.8, pp.30-35, 2016.
- [5] 澤津橋純矢, 井原務, 熊澤正郷 : 多機能路面測定器 (マルチ・ロード・プロファイラ) の開発, 第 26 回日本道路会議論文集, p.12P56, 2005.
- [6] (公社) 日本道路協会 : S022-2T センサきめ深さ測定装置を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法, 舗装調査・試験法便覧, pp.[1]-108-110, 2007.6,
- [7] (社) 日本道路協会, 舗装設計施工指針 (平成 18 年度版), 丸善, p.19, 2006.
- [8] 富澤健, 遠藤哲雄, 大嶋智彦, 岡部俊幸, 金井利浩 : 車軸に生じる加速度による路面凹凸評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), 67 巻, 3 号, pp.I_51-I_58, 2011.
- [9] 日本規格協会 JIS C 1509-1 : 電気音響—サウンドレベルメータ (騒音計) —第 1 部 : 仕様, JIS ハンドブック 環境測定 I -2 騒音・振動, pp.166-190, 2016.
- [10] 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会 : 道路交通騒音の予測モデル"ASJ RTN-Model 2013", 音響学会誌, 70 巻, No.4, pp. 172-230, 2014.
- [11] 中嶋幸雄 : タイヤ/道路騒音の低減技術, 日本ゴム協会誌, 第 73 巻, 2 号, pp.77-83, 2000.
- [12] 稲葉憲二 : タイヤの低騒音化への取り組み, 騒音制御, 27 巻, 6 号, pp.407-411, 2003.
- [13] Ulf Sandberg : *Low noise road surfaces-A state-of-the-art review*, Journal of the Acoustical Society of Japan, 20 巻, 1 号, pp.1-7, 1999.
- [14] (公社) 日本道路協会 : 舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編— (3-1 騒音値), 丸善, pp. 84-105, 2006.
- [15] 竹田敏憲, 阿部忠行, 峰岸順一, 田中輝栄 : 低騒音舗装の機能改善と街路への適用性

- に関する検討，舗装工学論文集，4 巻， pp. 23-32， 1999.
- [16] 大嶋智彦，中村和明，岡部俊幸，渡邊一弘：ラインスキャンカメラを用いたひび割れ評価法の一検討，第 31 回日本道路会議， p.3047， 2015.
- [17] （社）日本道路協会：S029 舗装路面のひび割れ測定方法，舗装調査・試験法便覧〔第 1 分冊〕， 丸善， pp.[1]-157-166， 2007.
- [18] （株）ブリヂストン：自動車用タイヤの基礎と実際（4.5.4 タイヤ道路騒音の発生メカニズム），東京電機大学出版局， pp.190-192， 2008.
- [19] 富田尚隆：自動車騒音の発生源と低減対策，騒音制御， 19 巻， 3 号， pp.110-114， 1995.

第4章 実路における路面損傷の識別判定手法の開発

4.1. 概要

前章では、路面損傷を識別できる拡張型タイヤ/路面騒音の解析方法を考案し、構内道路で測定した路面損傷の識別判定を改良型サウンドスペクトログラムによる可視化により、路面損傷の識別判定手法を見出した。しかし、前章では構内道路の結果であるため、交通量が少なく、かつ交通荷重が小さいため、実道へ適用するには路線の道路構造や車両速度等が異なる際の検証が必要である。

そこで第4章では、交通条件が異なる路線を測定し、拡張型タイヤ/路面騒音による路面損傷の識別検出方法と路面損傷の評価指標の開発を目的に実施した。本研究では地方自治体が管理する宇都宮市（A市）及び調布市（B市）の路線を使用し路面調査を実施した。なお、路線選定では、法定速度が異なる代表路線を選定し、路面調査を実施した。

路面性状は、測定指標であるひび割れ、わだち掘れ、平たん性、 IRI_{10} 、これらの値から得られる維持管理指数（MCI：Maintenance Control Index）^[1]及び供用性指数（PSI：Present Serviceability Index）^[2]と拡張型タイヤ/路面騒音との関連性を確認した。

路面損傷の識別を算出するにあたり、前章では改良型サウンドスペクトログラムの算出方法は、構内道路で最も平滑かつ路面の損傷がない良好な箇所を基準路面とした。しかし、対象となる一般道路では、施工直後の路面を基準路面に設定するのが適切であるが、常に新設舗装を測定するのは困難である。そこで、第2章のキャリブレーションで実施した舗装路面騒音施設^[3]は、路面性状の変化を抑えるため、施設を使用しないときはテントで覆い紫外線等の劣化を防ぐため、路面性状が常に一定である。そこで、タイヤ/路面騒音を実施する際のキャリブレーション施設となる密粒度舗装を基準路面と定義することとした。なお、この密粒度舗装のきめ深さ（MPD）は既往の文献より0.34mm^[4]である。

拡張型タイヤ/路面騒音から路面損傷の抽出は、前章同様、調査路面と基準路面とのタイヤ/路面騒音の音圧レベル差を求めた改良型サウンドスペクトログラムより路面損傷の状態を把握し、周波数帯域に関与する影響を調べ、周波数成分による合成値を検討する。

次に、周波数成分による合成値を用いた路面損傷の検出では機械学習の分類器による性能評価の方法^[5]を使用し、特徴量の選択、識別判定を可能にする閾値を算出し、異なる路線での路面損傷の抽出について検証する。また、総点検要領の診断区分に応じた、路面損

傷の評価指標について機械学習の回帰手法を使用し、予測モデルの検討及び新たな評価指標を検討した。

4.2. 対象路線の概要

(1) 対象路面

- ① 宇都宮市道（A 市道） 市道 7 路線（幹線道路，生活道路）
- ② 調布市道（B 市道） 市道 4 路線（生活道路）

本検討に用いた路線を表-4.1 に，道路状況を図-4.1 (a) (b)に示す。

表-4.1 本検討に用いた路線

法定速度 (km)	対象 市道	路線名	車線	測定年月	外気温	路線延長 (m)
20	B	201	下	201611	18	300
	B	202	下	201611		580
30	A	301	上下	201601	12	550
	A	302	上下	201601	9	690
	B	301	下	201611	18	350
	B	302	下	201611		940
40	A	401	上	201601	10	1210
	A	402	下	201601	9	690
50	A	501	下	201601	10	930
	A	502	上下	201601		1350
	A	503	下	201601	10	2010
				201605	25	

※実際の路線名は市の管理上名前を伏せた







法定速度 (km)	路線状況	
20	B201 	B202 
	A301 	A302 
30	B301 	B302 

図-4.1 (a) 路線の状況







法定速度 (km)	路線状況	
40	A401 	A402 
	A501 	A502 
50	A503(1 月) 	A503(5 月) 

図-4.1 (b) 路線の状況

(2) 測定内容

- ① 測定車：簡易型路面性状測定車（**図-2.2** 参照）
- ② 測定速度：対象路線の法定速度
- ③ 測定項目：ひび割れ，わだち掘れ，平坦性，乗り心地，タイヤ/路面騒音，車軸加速度，（車速）

4.3. 市道の路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音

4.3.1. 概要

当該市道で測定した対象区間の路面性状の結果一覧を**表-4.2**に示す．ここでは，測定した結果を評価区間 10m として整理し，評価指標である MCI 及び PSI を算出した．その評価指標の変動を**図-4.2**及び**図-4.3**に示す．

拡張型タイヤ/路面騒音の解析処理では，前章と同様，延長 0.5m 毎（ひび割れ率の解析で用いられている 0.5m メッシュ^[6]を参考）に解析を行い，評価区間 10m に整理した．タイヤ/路面騒音は聴感補正した A 特性を用いていたが，前章のサウンドスペクトログラムより，低周波成分の影響が非常に大きいことが判明した．そのため，本章では A 特性と補正前の FLAT 特性について検討した．

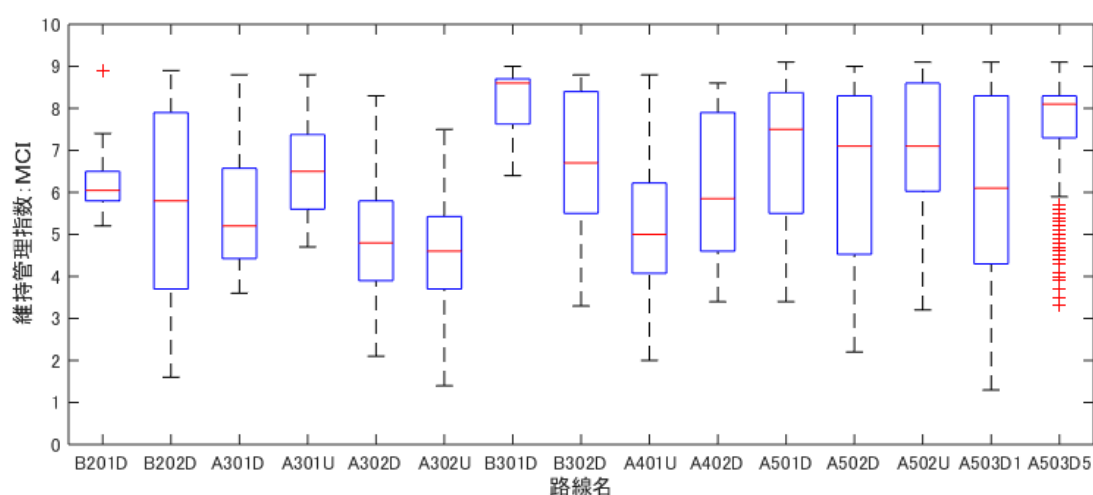


図-4.2 各路線の MCI の変動

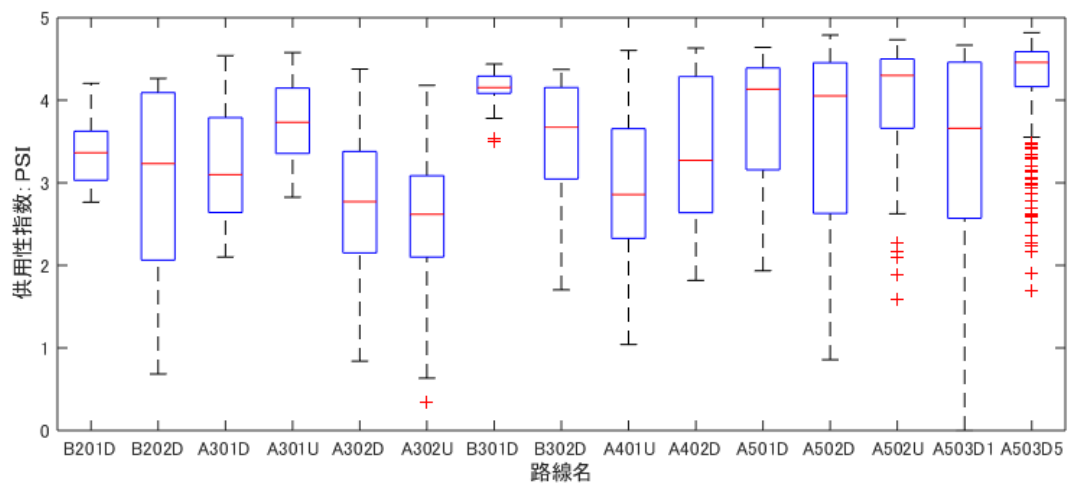


図-4.3 各路線の PSI の変動

表-4.2 対象区間における路面性状の結果一覧

路線場所と解析距離				性能評価値				評価指標	
路線	上下線	測定年月	解析距離 (m)	ひび割れ率 (%)	わだち掘れ量 (mm)	平たん性 (mm)	IRI ₁₀ (mm/m)	MCI	PSI
B201	下	201611	300	5.3 (0-12.6)	4.3 (2.0-10.0)	4.95 (2.29-11.57)	8.19 (3.83-18.21)	6.2 (5.2-8.9)	3.4 (2.8-4.2)
B202	下	201611	580	19.2 (0-83.9)	5.3 (2.0-13.0)	4.80 (2.92-7.83)	7.66 (3.51-13.47)	5.7 (1.6-8.9)	3.0 (0.7-4.3)
A301	下	201601	550	13.5 (0-33.7)	4.6 (2.0-7.0)	1.60 (0.49-7.90)	2.67 (0.99-13.42)	5.5 (3.6-8.8)	3.2 (2.1-4.5)
A301	上	201601	550	4.9 (0-18.0)	4.0 (1.0-7.0)	1.61 (0.58-5.72)	2.45 (0.86-6.83)	6.7 (4.7-8.8)	3.7 (2.8-4.6)
A302	下	201601	690	19.3 (0-64.6)	7.8 (2.0-23.0)	2.68 (0.38-11.61)	4.34 (1.29-14.51)	4.9 (2.1-8.3)	2.8 (0.8-4.4)
	上	201601	690	26.6 (0-90.2)	7.9 (3.0-16.0)	2.80 (0.72-7.55)	4.82 (1.82-13.37)	4.5 (1.4-7.5)	2.5 (0.3-4.2)
B301	下	201611	350	0.5 (0-4.7)	3.7 (1.7-6.3)	3.25 (1.29-6.75)	5.25 (1.61-12.33)	8.2 (6.4-9.0)	4.1 (3.5-4.4)
B302	下	201611	940	6.4 (0.0-38.9)	4.3 (1.7-8.3)	4.01 (1.46-8.72)	6.41 (2.24-13.71)	6.8 (3.3-8.8)	3.5 (1.7-4.4)
A401	上	201601	1,000	16.4 (0-70.3)	9.0 (3.0-26.0)	3.03 (0.64-9.00)	5.01 (1.21-13.92)	5.1 (2.0-8.8)	2.9 (1.0-4.6)
A402	下	201601	690	9.3 (0-37.0)	7.6 (4.0-19.0)	2.84 (0.48-9.53)	4.75 (1.16-17.93)	6.1 (3.4-8.6)	3.4 (1.8-4.6)
A501	下	201601	930	4.9 (0-36.8)	5.6 (2.0-12.0)	2.11 (0.54-12.50)	3.68 (1.04-25.45)	7.1 (3.4-9.1)	3.8 (1.9-4.6)
A502	下	201601	1,000	12.4 (0-53.8)	9.8 (3.0-25.0)	2.47 (0.32-9.08)	4.06 (0.63-16.01)	5.8 (2.2-8.8)	3.2 (0.9-4.7)
	上	201601	1,000	1.0 (0-19.4)	7.3 (2.0-16.0)	1.22 (0.29-5.25)	2.20 (0.65-14.45)	7.6 (4.4-9.1)	4.2 (2.7-4.7)
A503	下	201601	1,000	21.4 (0-63.6)	11.5 (3.0-34.0)	2.34 (0.39-10.25)	4.00 (0.88-15.07)	4.4 (1.3-8.3)	2.5 (0-4.5)
		201605	1,000	5.0 (0-38.2)	6.6 (2.0-16.0)	1.28 (0.30-8.84)	2.17 (0.59-14.84)	7.0 (3.3-9.1)	4.0 (1.7-4.7)

4.3.2.各市道の路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音

各市道の路線で測定した対象区間の結果について，法定速度別に整理した．結果は以下のとおりである．

- ・ 法定速度 20km：図-4.4～図-4.5
- ・ 法定速度 30km：図-4.6～図-4.11
- ・ 法定速度 40km：図-4.12～図-4.13
- ・ 法定速度 50km：図-4.14～図-4.17

ここで，拡張型タイヤ/路面騒音では視覚的表現であるサウンドスペクトログラムを F 特性とし，改良型サウンドスペクトログラムを付記した．

これらの図より，路線ごとに路面性状の値は様々な傾向を示しており，これらの結果をもとに路面損傷との関係について検討する．

(1) 法定速度 20km

1) 路線：B201D

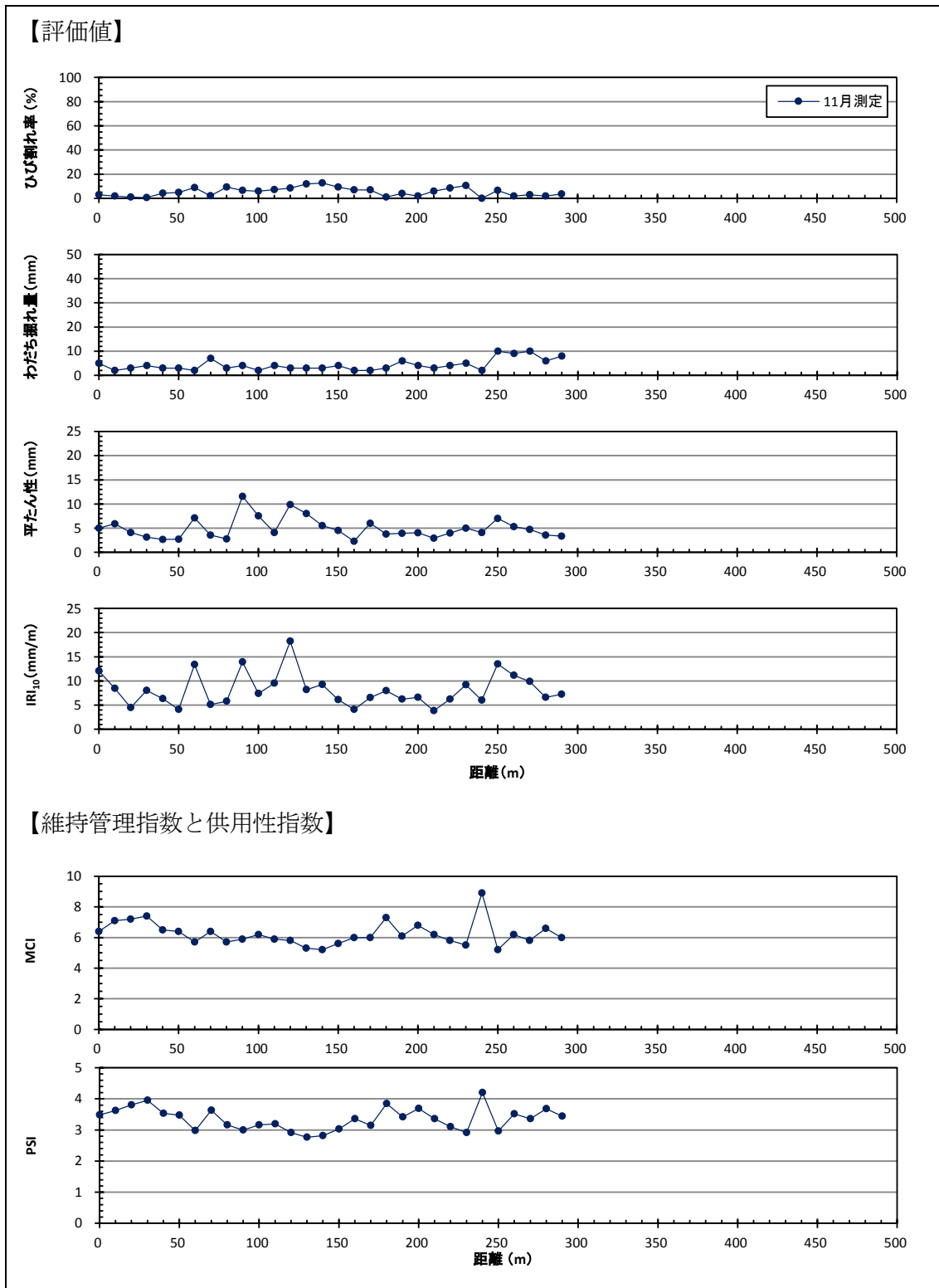
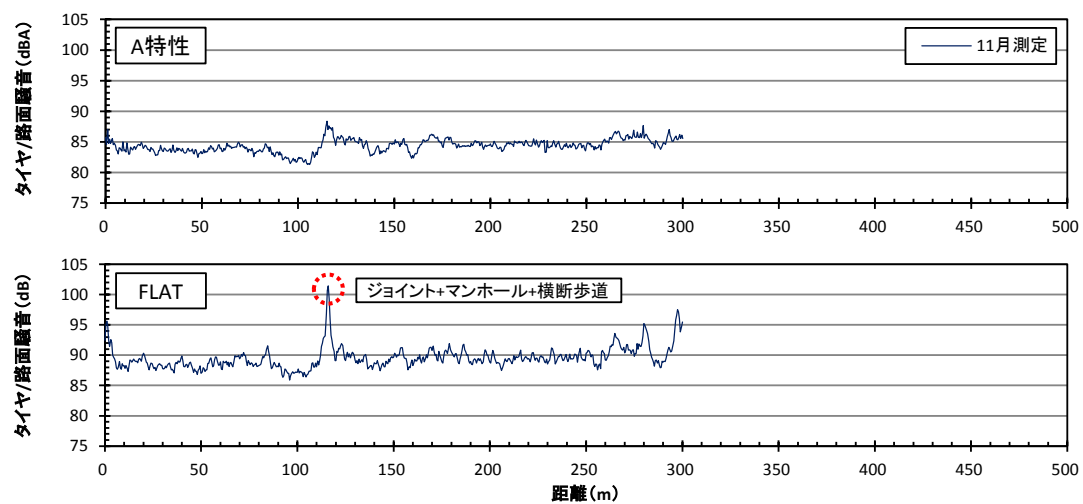


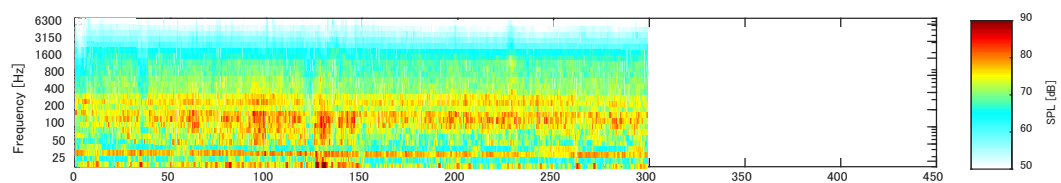
図-4.4 (a) B201D における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

11月：音圧レベル



11月：音圧レベル差

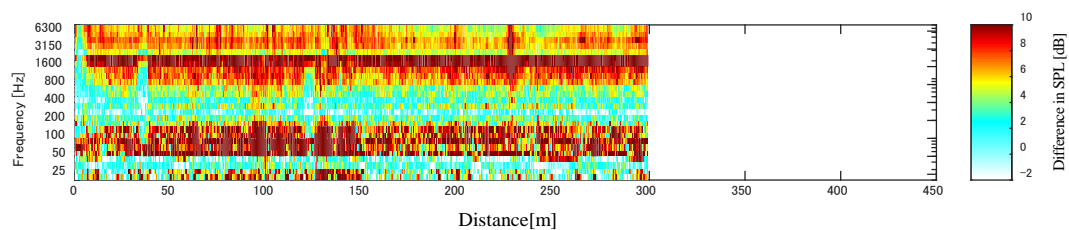
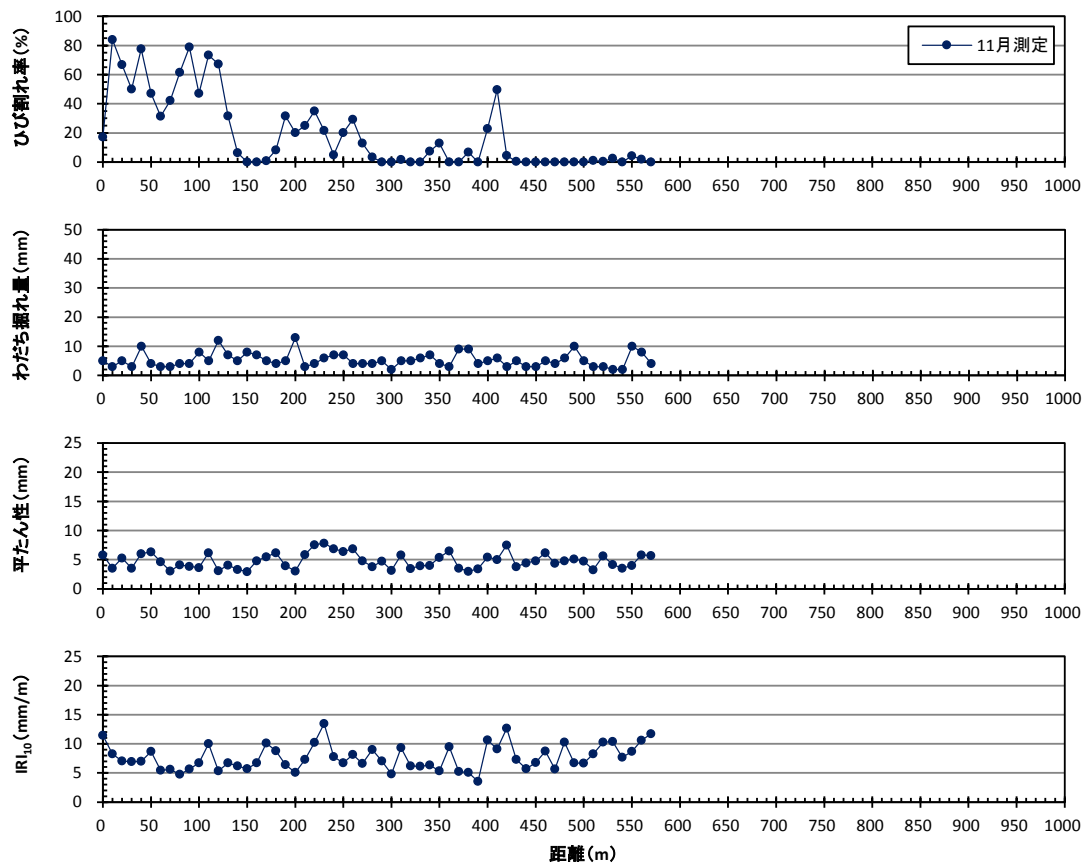


図-4.4 (b) B201D における拡張型タイヤ/路面騒音

2) 路線：B202D

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

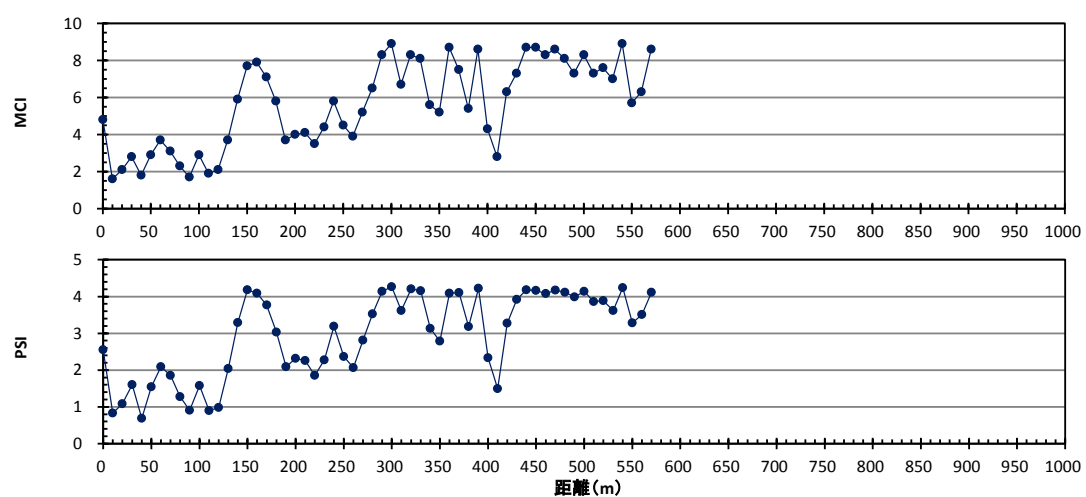
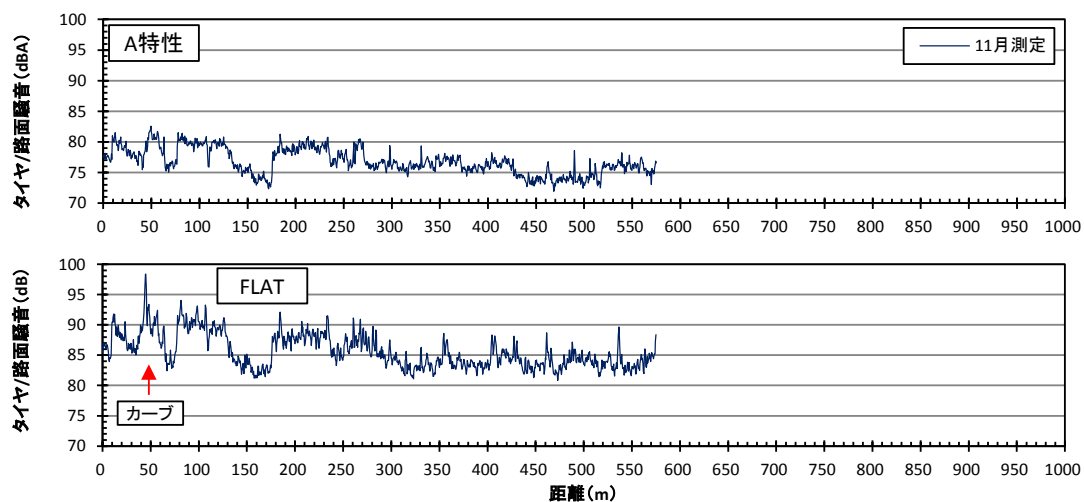


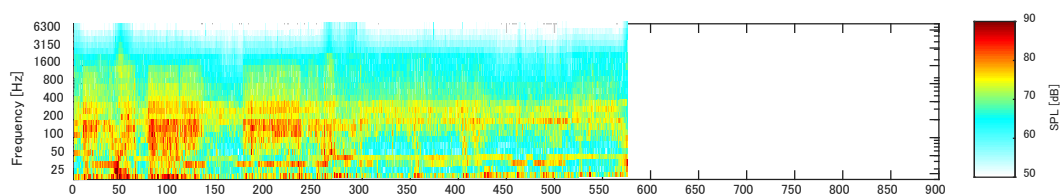
図-4.5 (a) B202D における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

11月：音圧レベル



11月：音圧レベル差

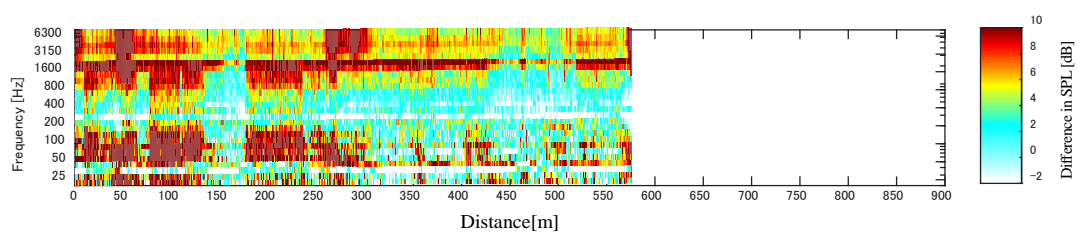
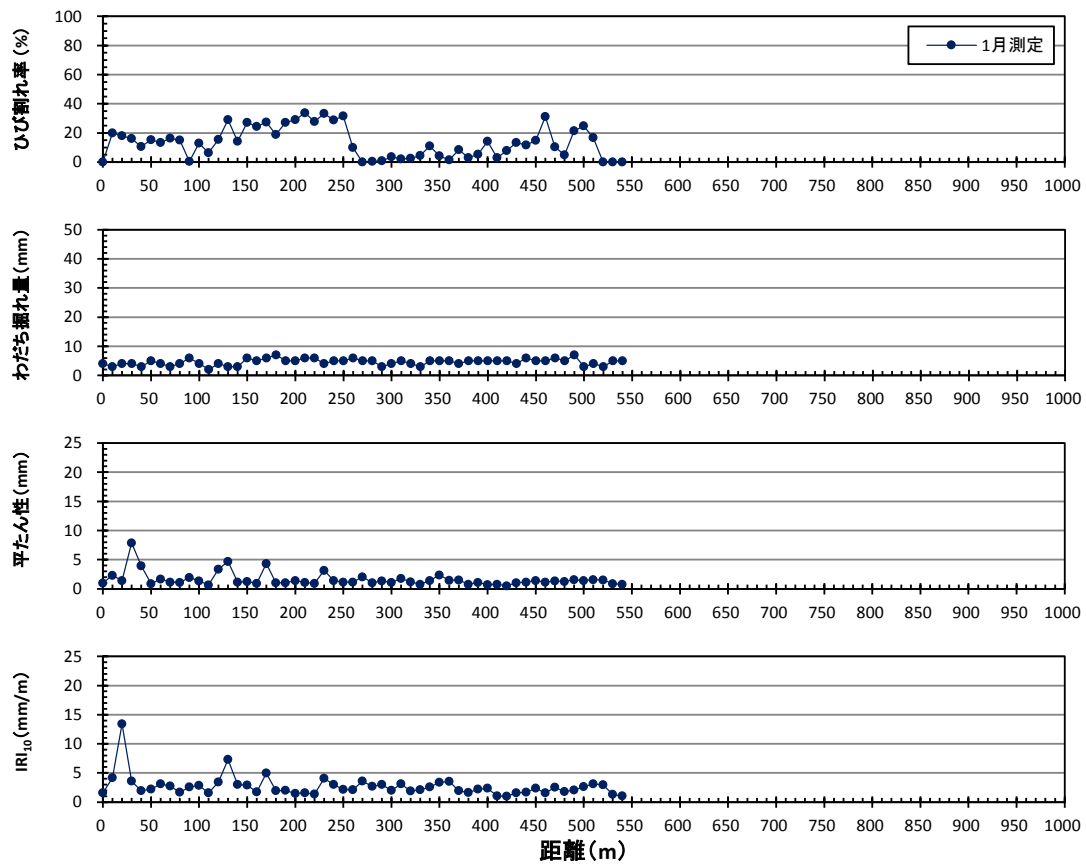


図-4.5 (b) B202D における拡張型タイヤ/路面騒音

(2) 法定速度 30km

1) 路線：A301D

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

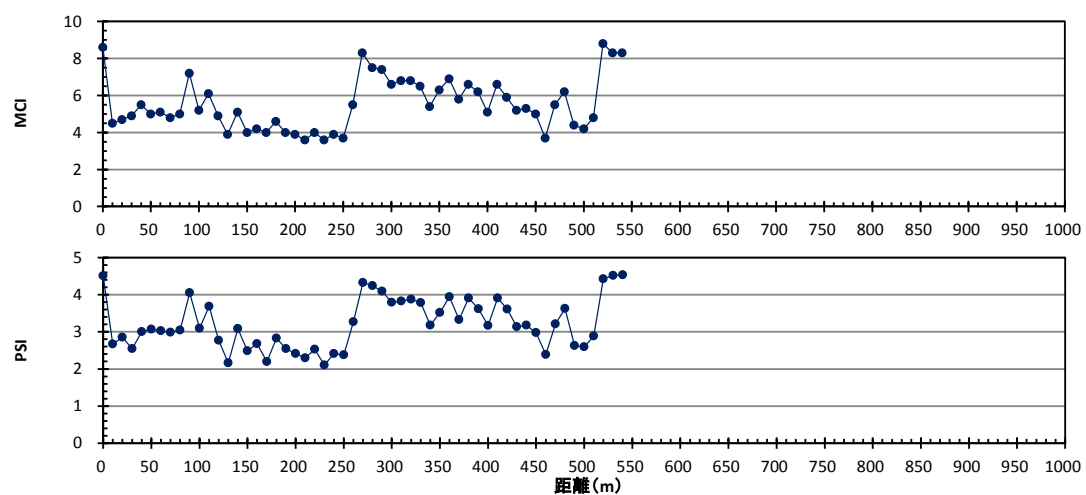
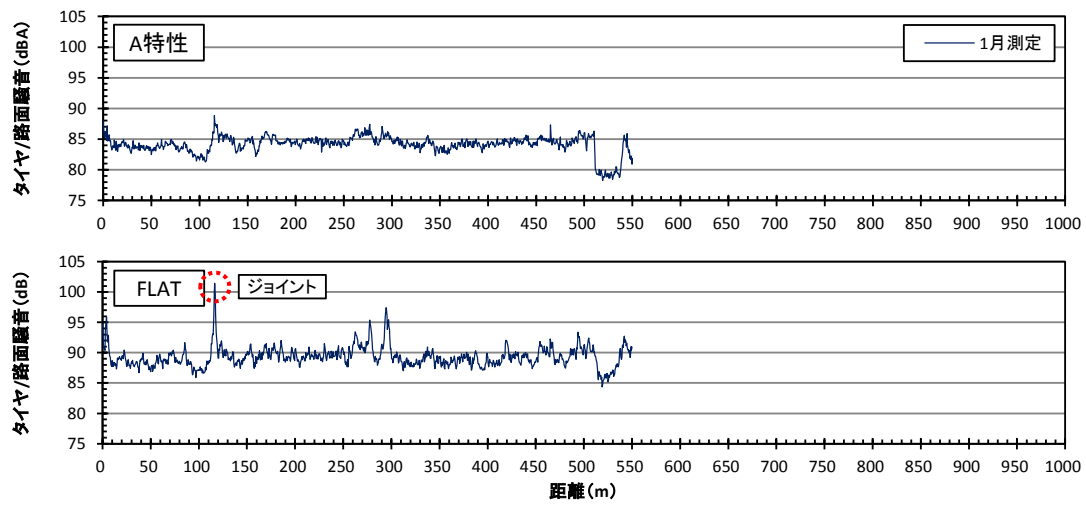


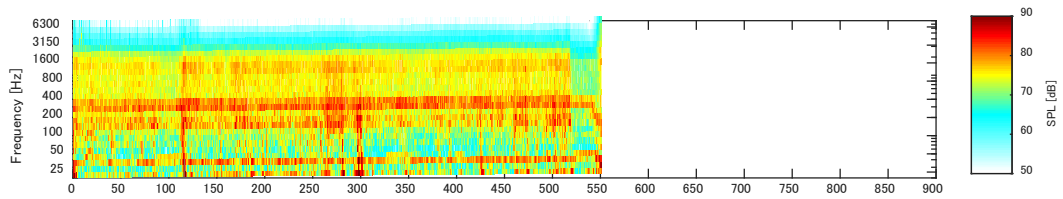
図-4.6 (a) A301D における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

1月：音圧レベル



1月：音圧レベル差

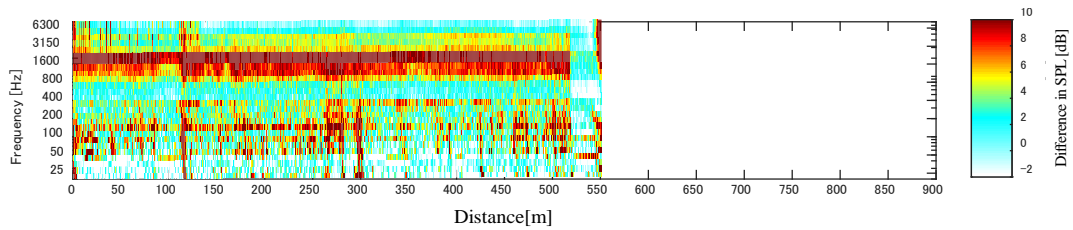
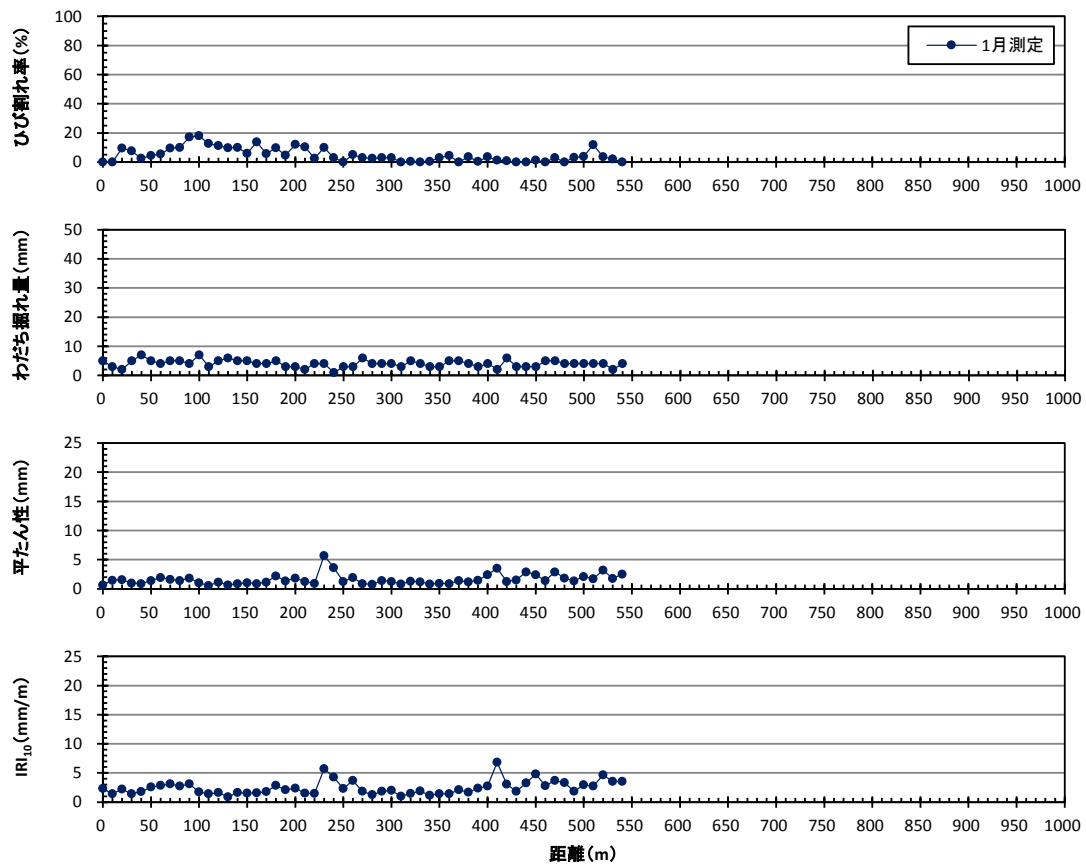


図-4.6 (b) A301D における拡張型タイヤ/路面騒音

2) 路線：A301U

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

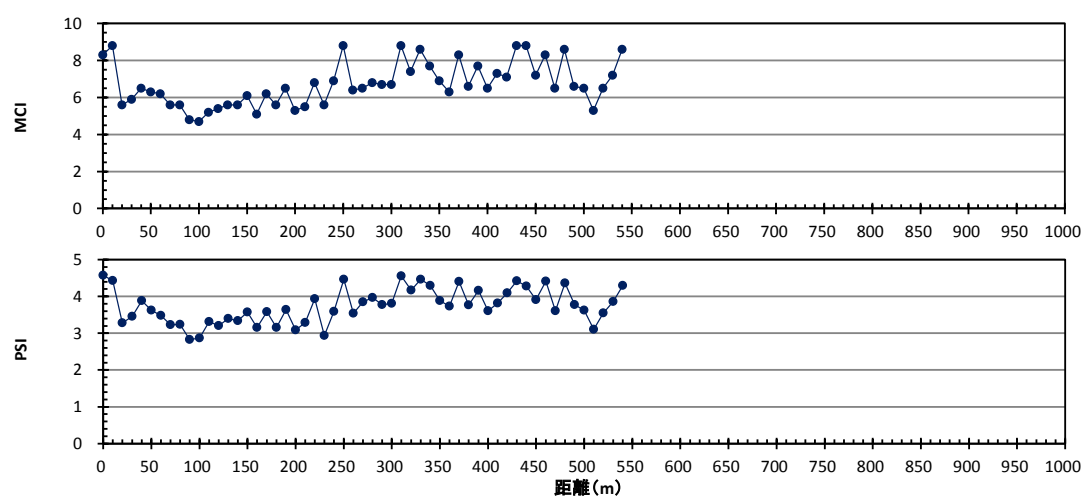
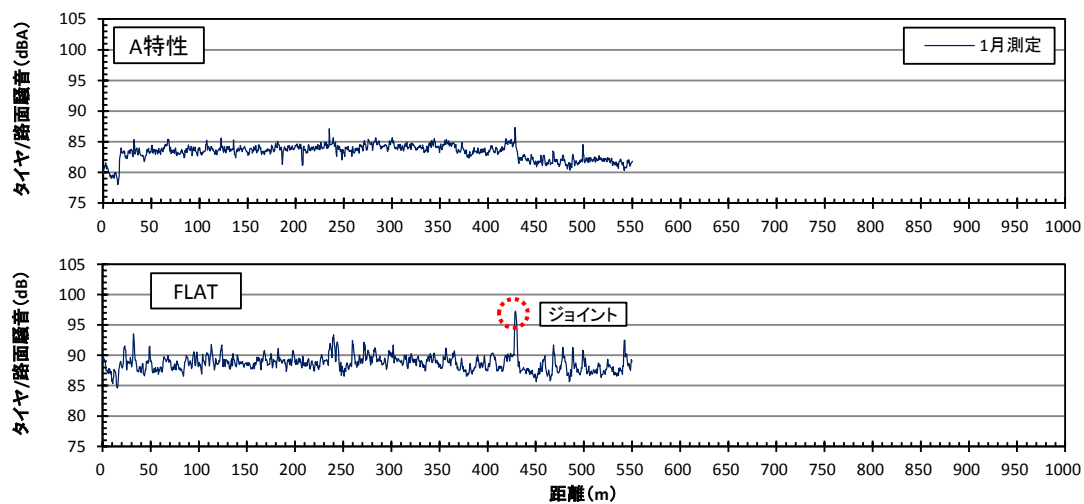


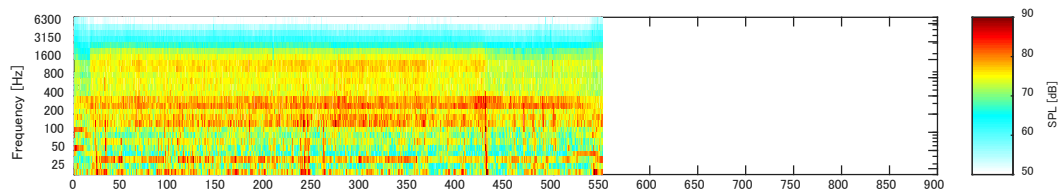
図-4.7 (a) A301U における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

1月：音圧レベル



1月：音圧レベル差

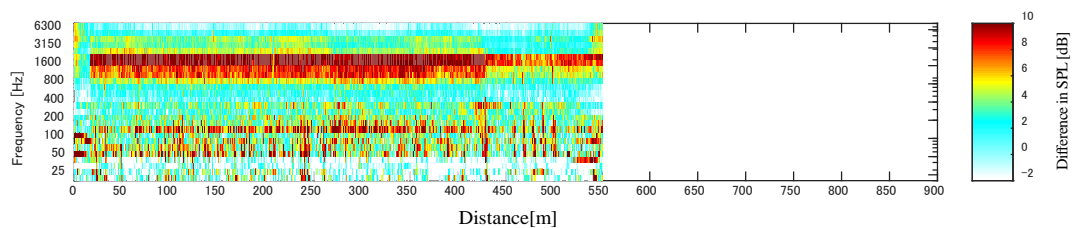
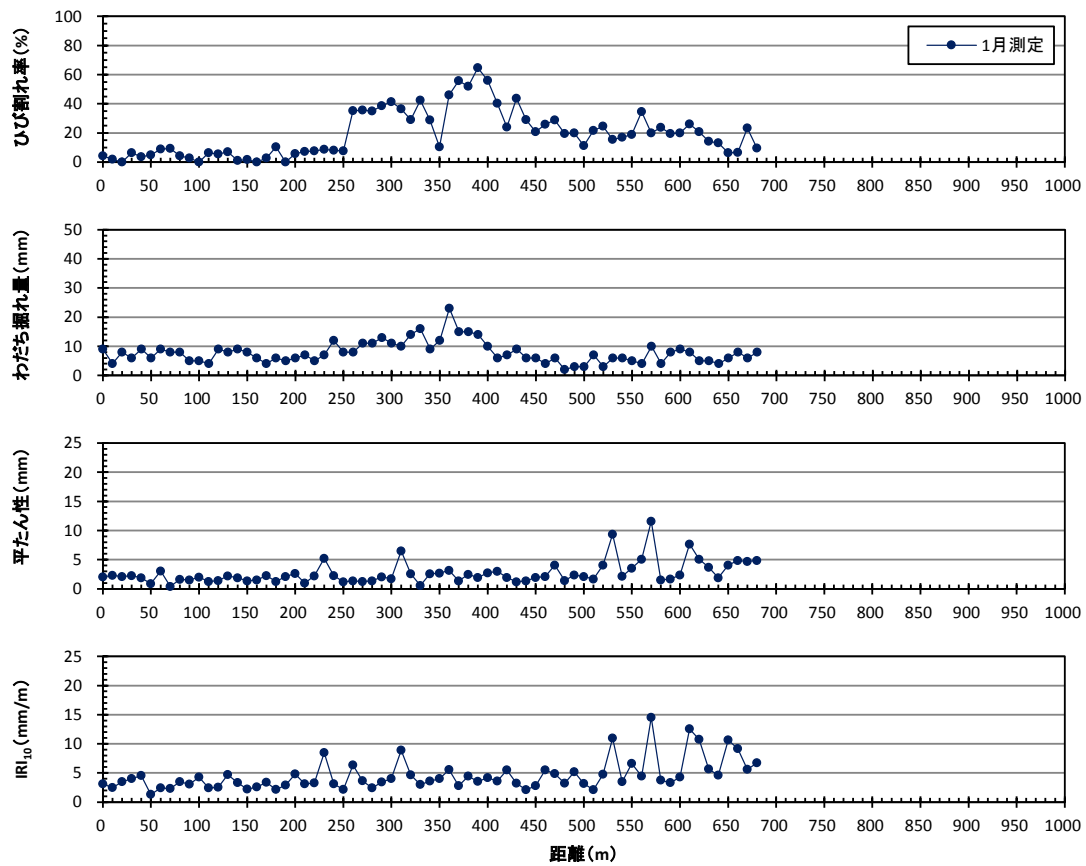


図-4.7 (b) A301U における拡張型タイヤ/路面騒音

3) 路線：A302D

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

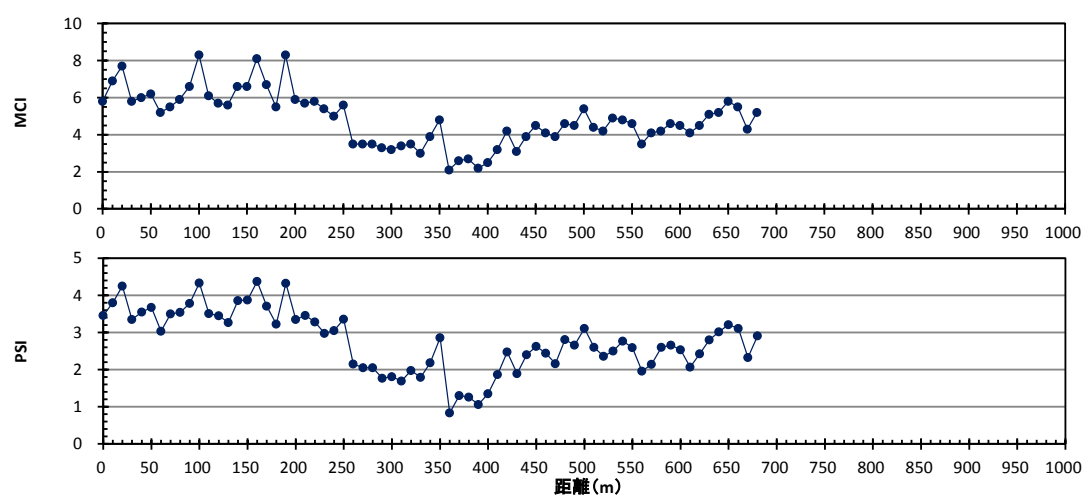
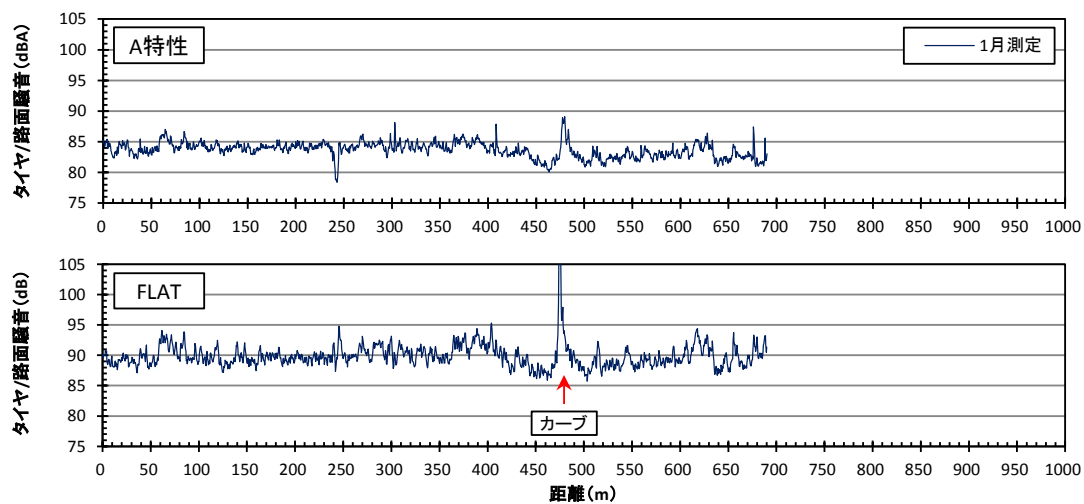


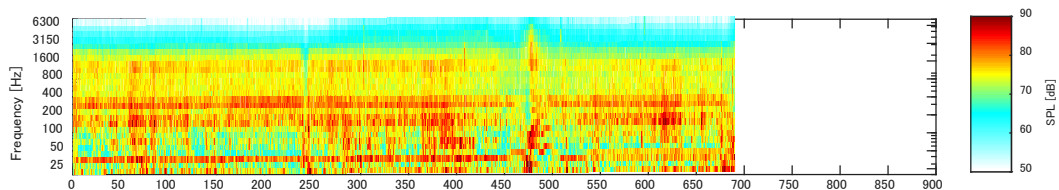
図-4.8 (a) A302D における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

1月：音圧レベル



1月：音圧レベル差

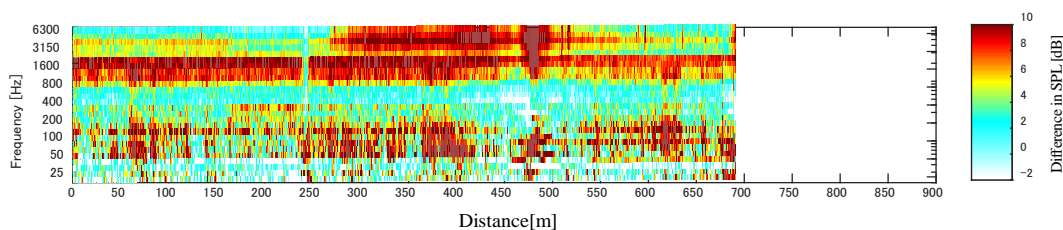


図-4.8 (b) A302D における拡張型タイヤ/路面騒音

4) 路線：A302U

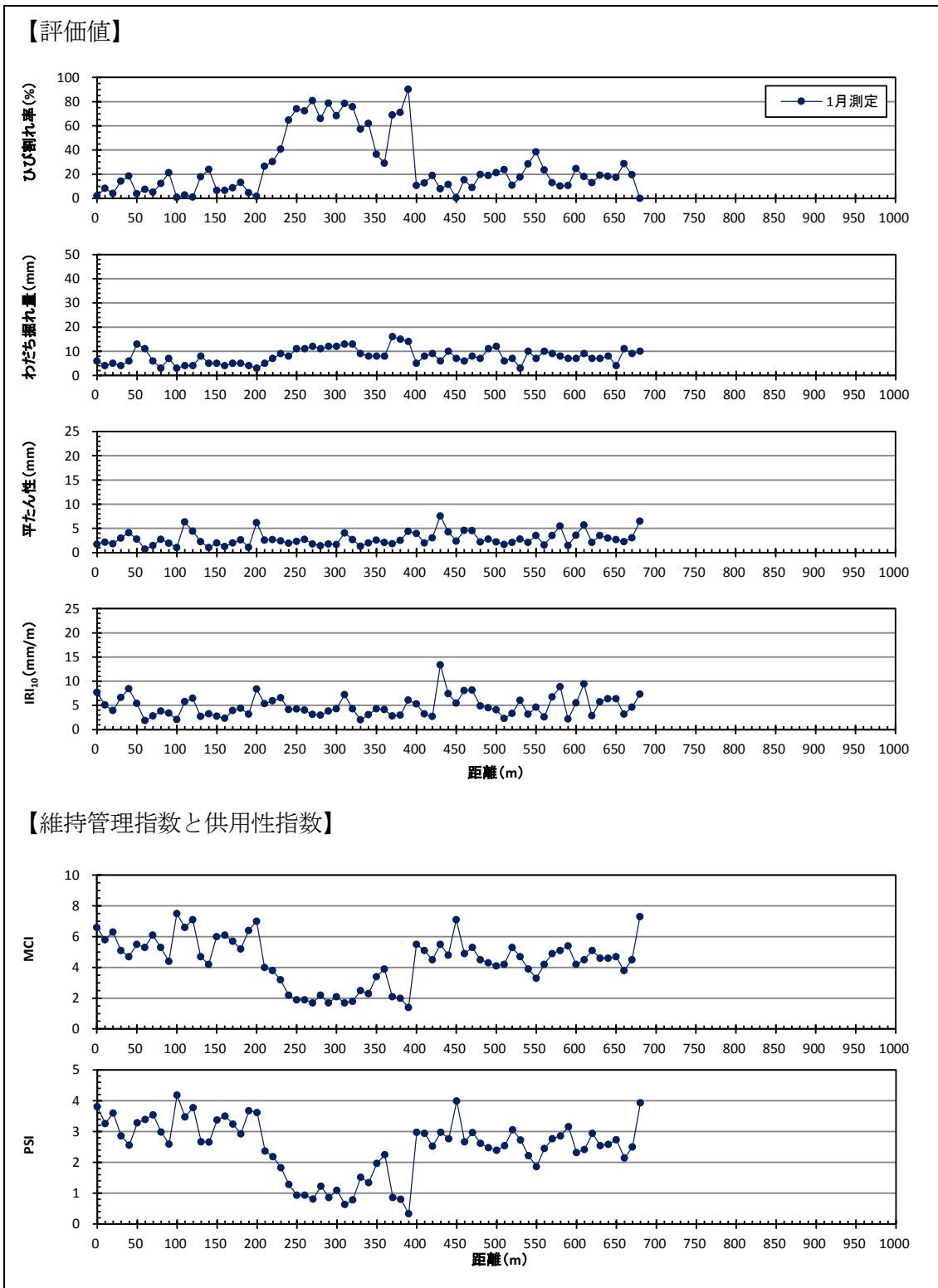
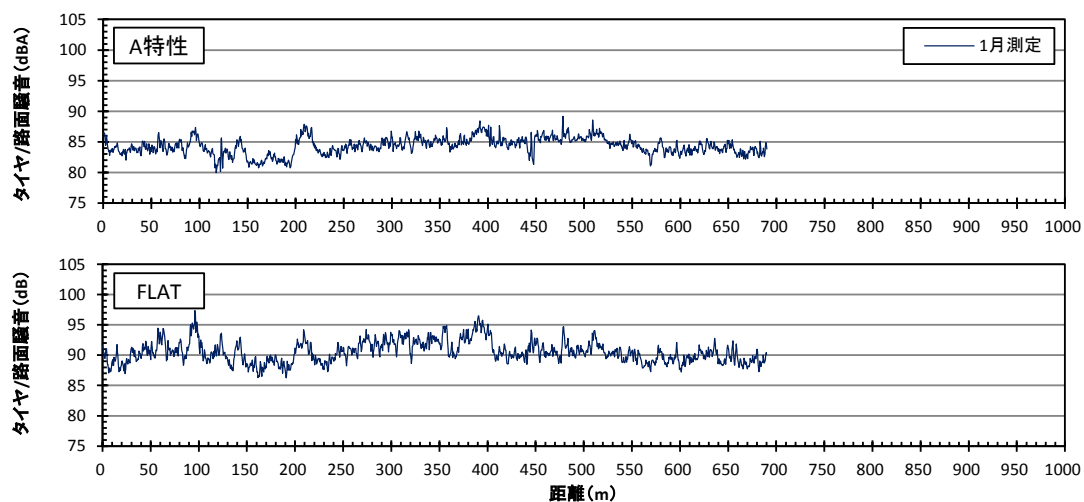


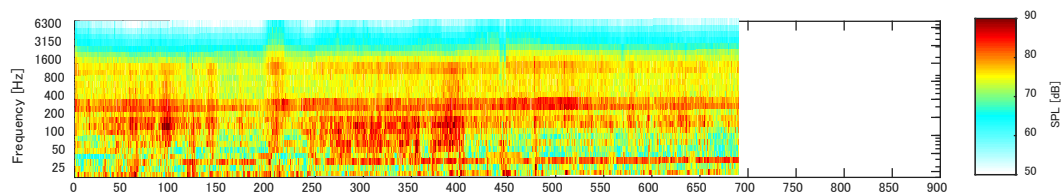
図-4.9 (a) A302U における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

1月：音圧レベル



1月：音圧レベル差

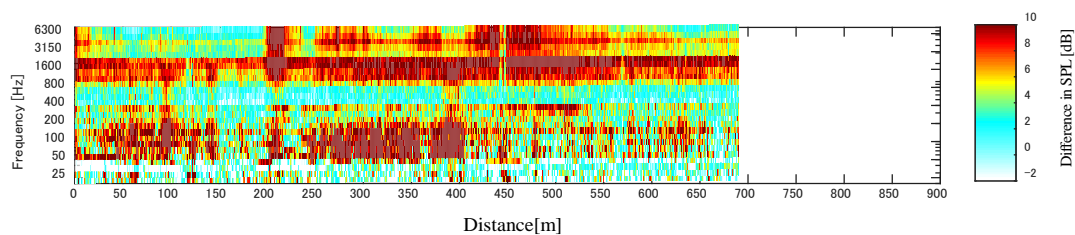
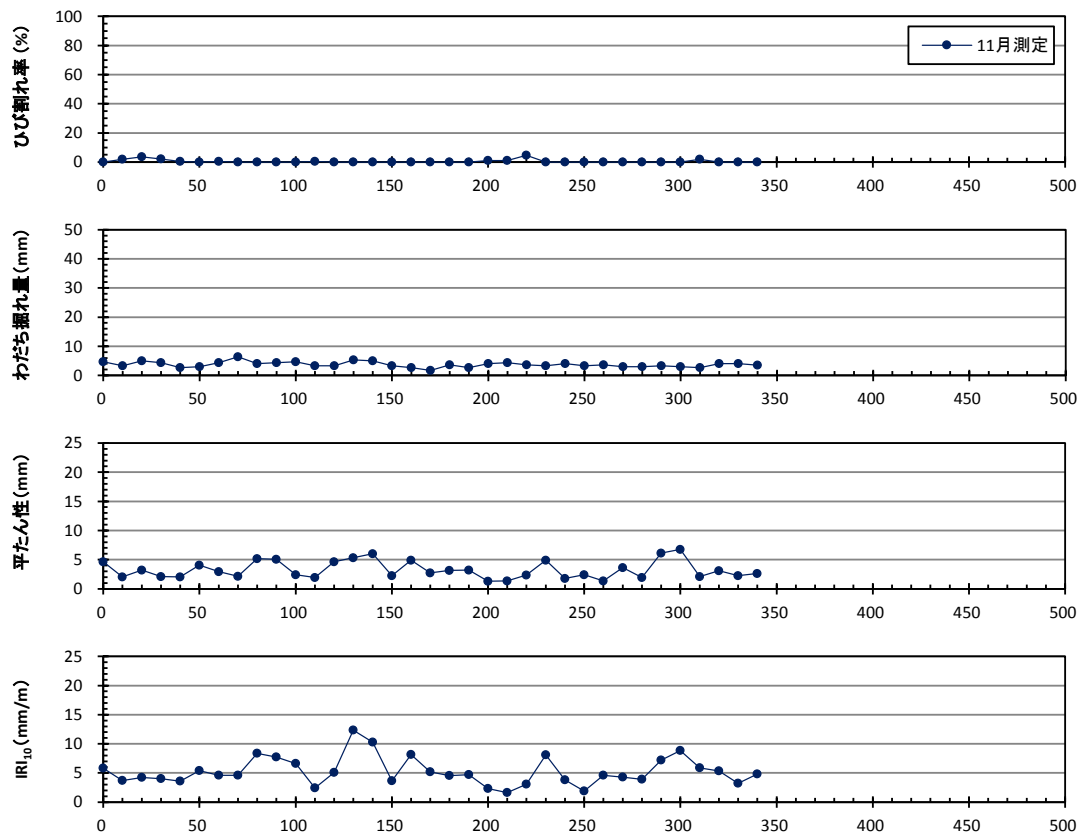


図-4.9 (b) A302U における拡張型タイヤ/路面騒音

5) 路線 : B301D

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

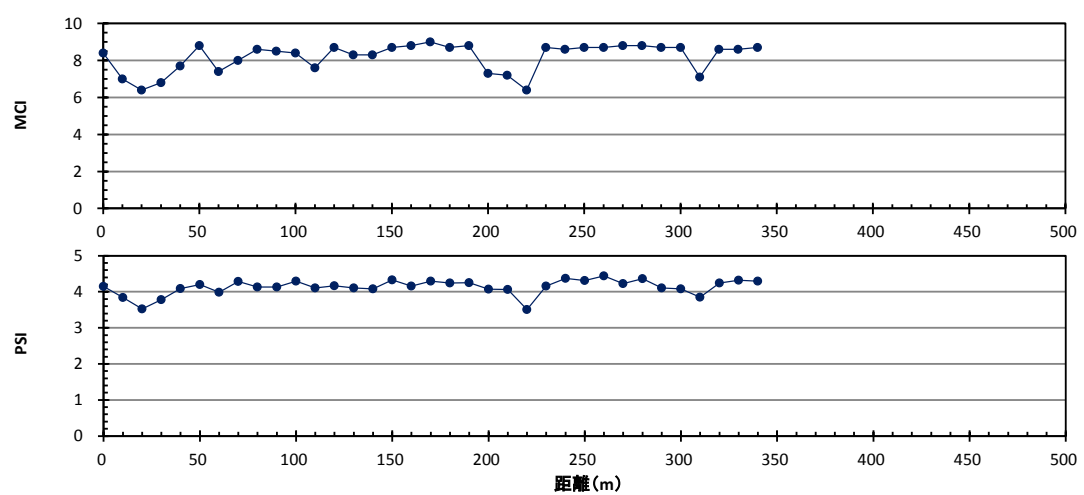
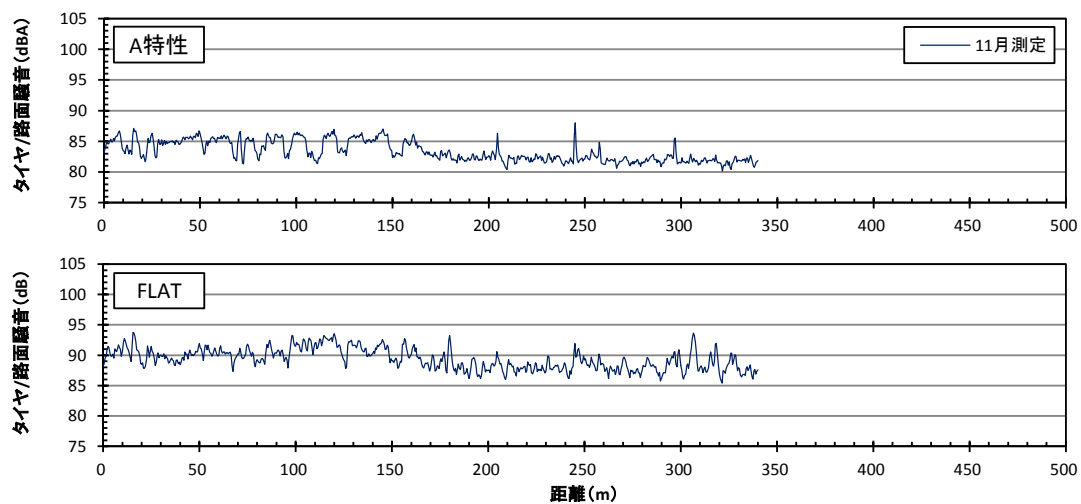


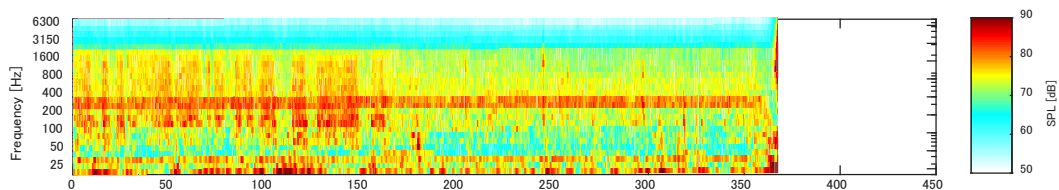
図-4.10 (a) B301D における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

11月：音圧レベル



11月：音圧レベル差

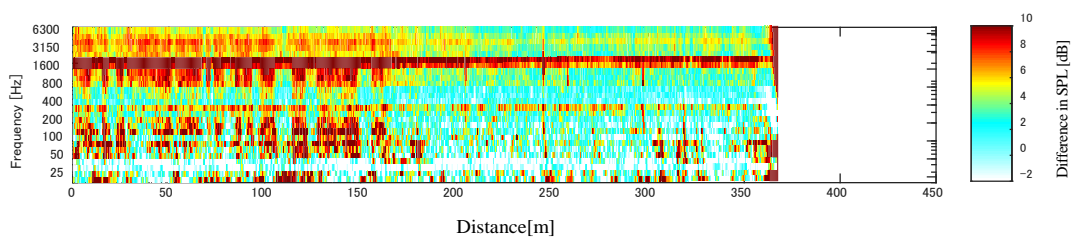
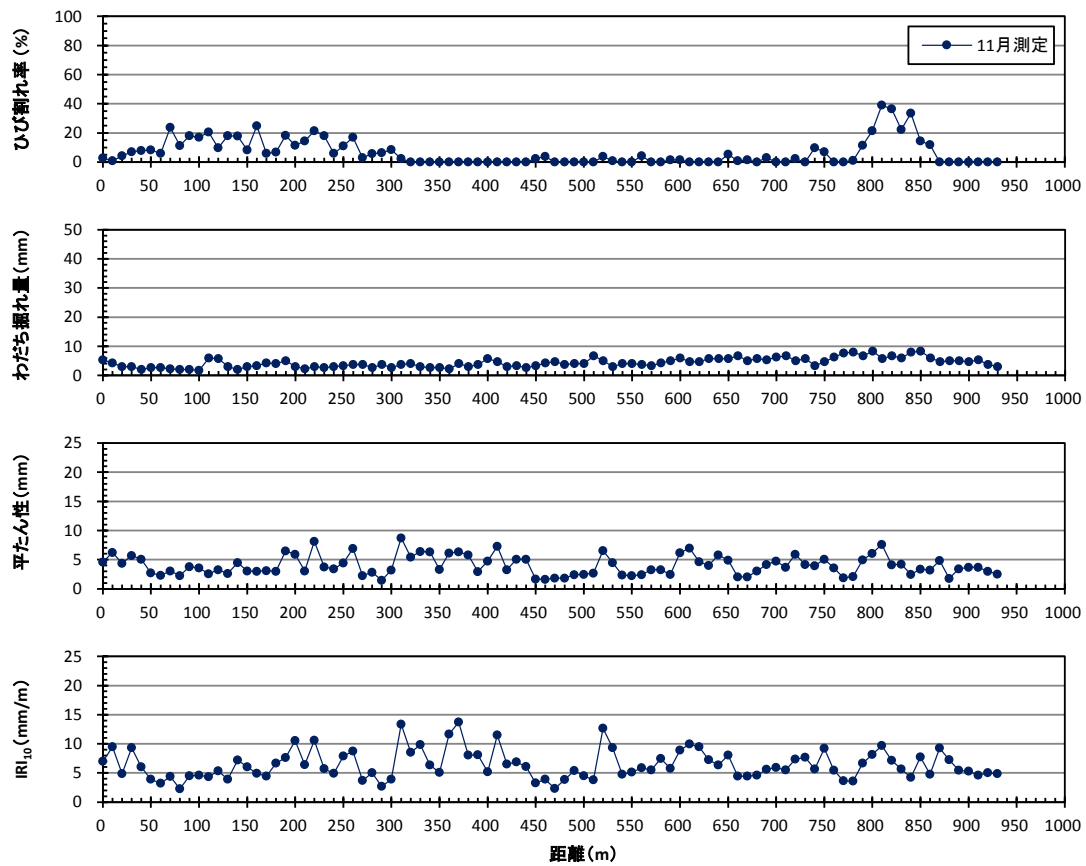


図-4.10 (b) B301D における拡張型タイヤ/路面騒音

6) 路線：B302D

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

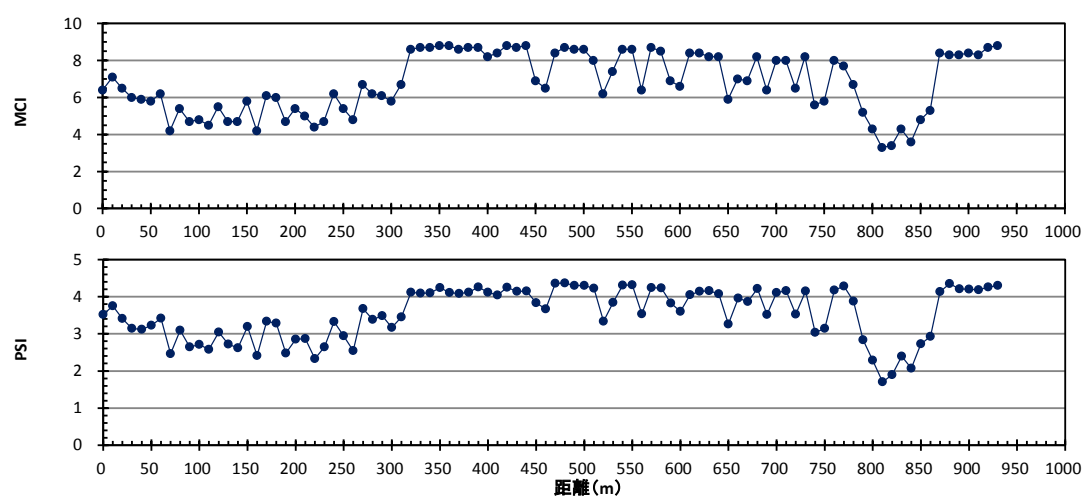
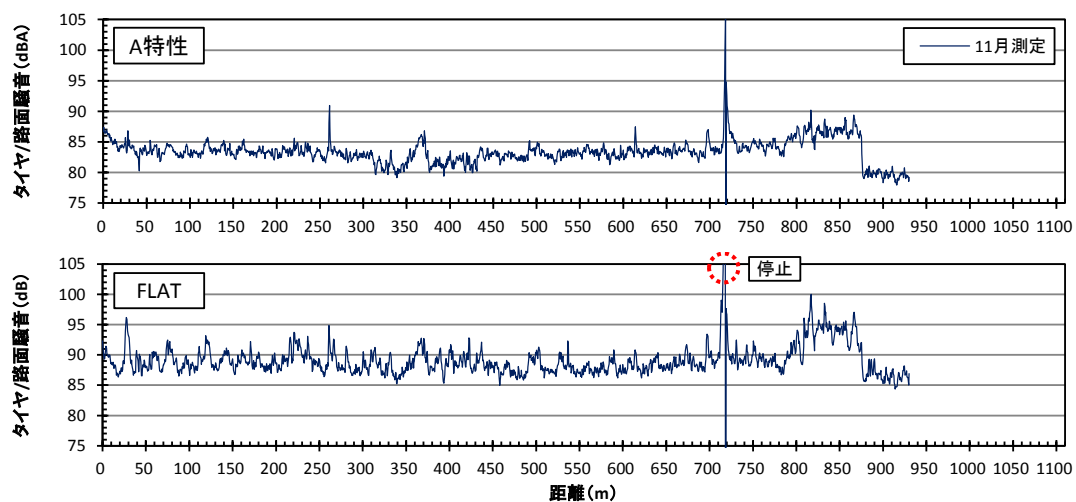


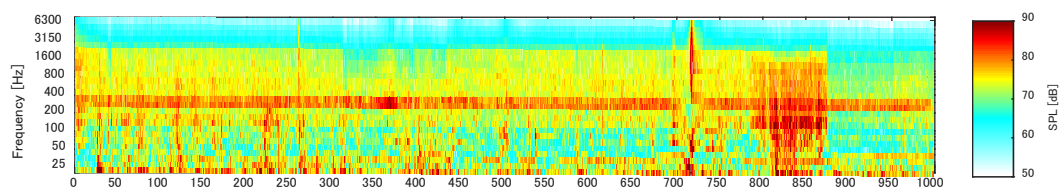
図-4.11 (a) B302D における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

11 月：音圧レベル



11 月：音圧レベル差

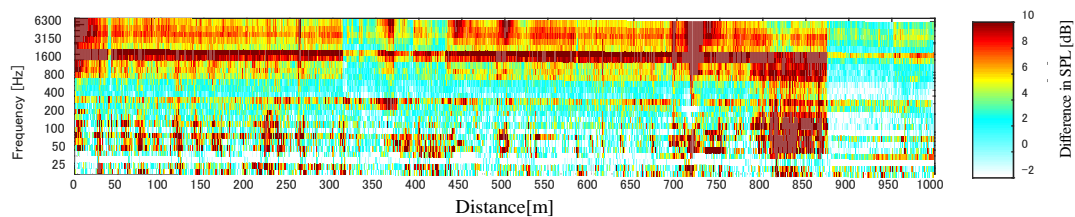
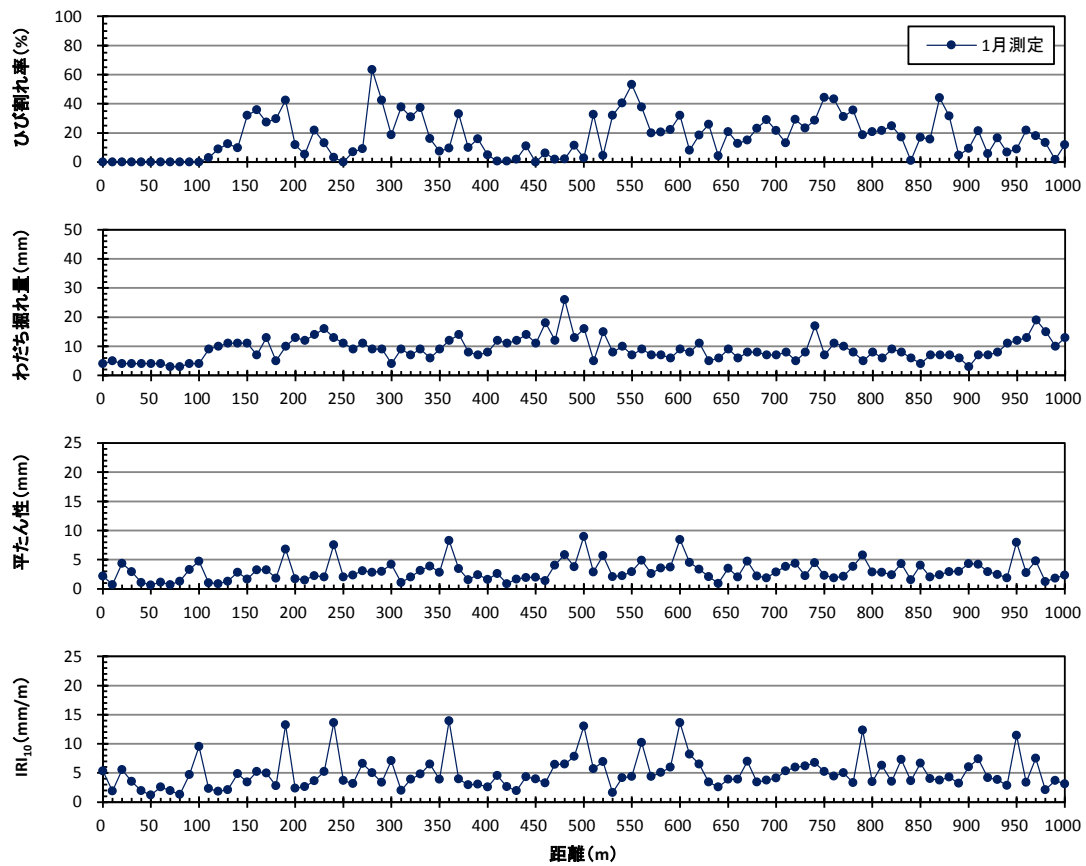


図-4.11 (b) B302D における拡張型タイヤ/路面騒音

(3) 法定速度 40km

1) 路線：A401D

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

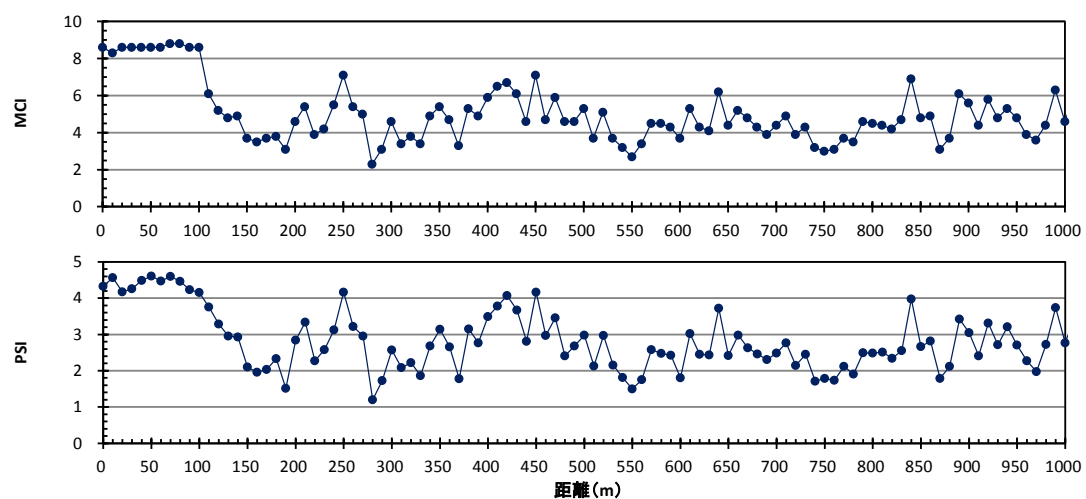
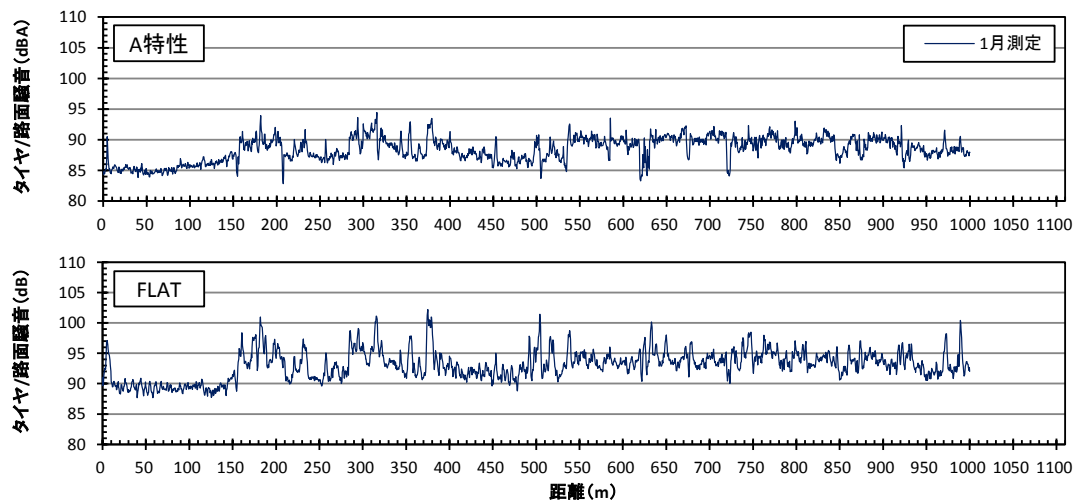


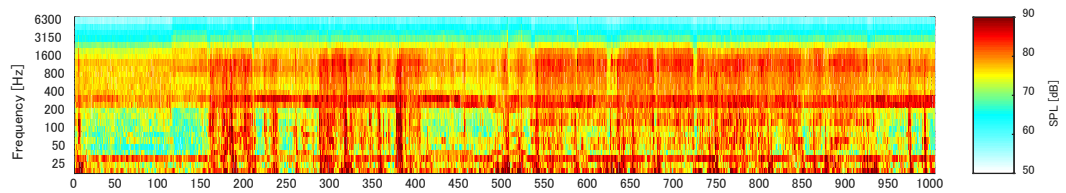
図-4.12 (a) A401D における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

1月：音圧レベル



1月：音圧レベル差

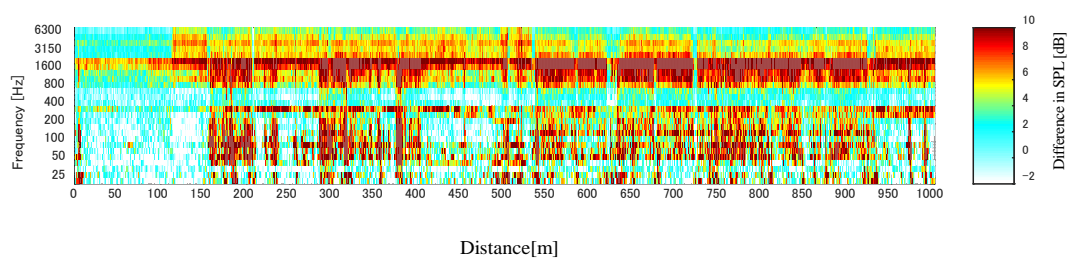
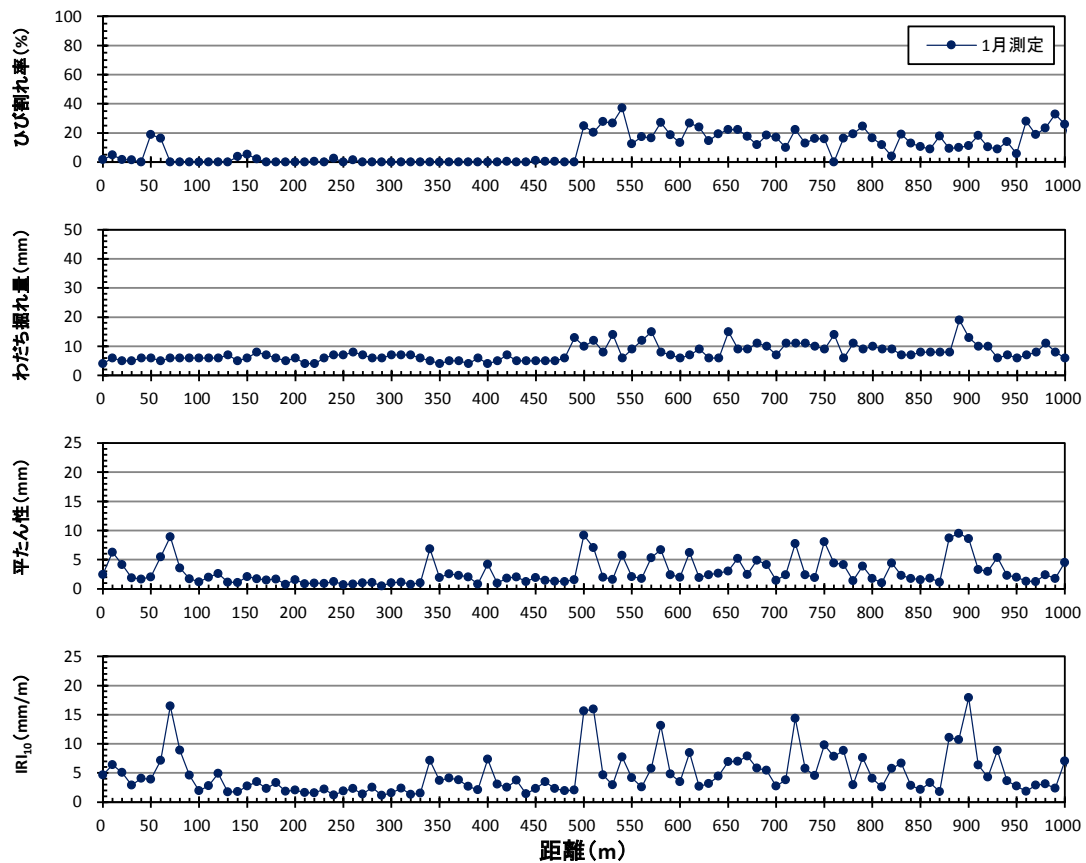


図-4.12 (b) A401D における拡張型タイヤ/路面騒音

2) 路線：A402D

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

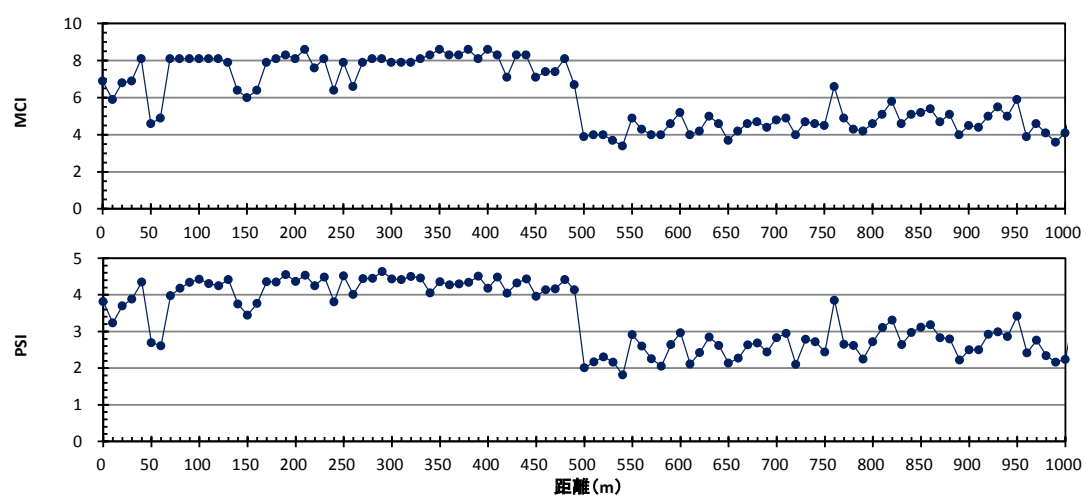
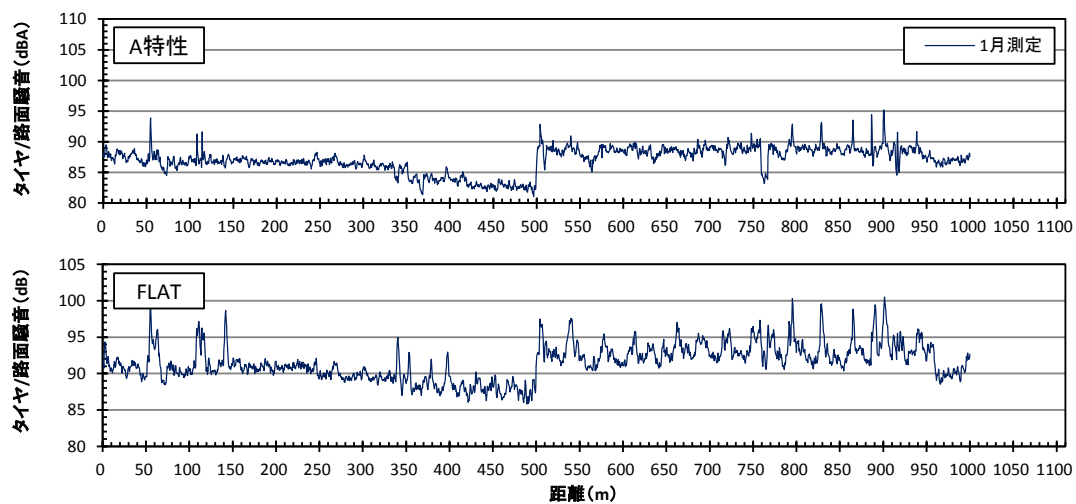


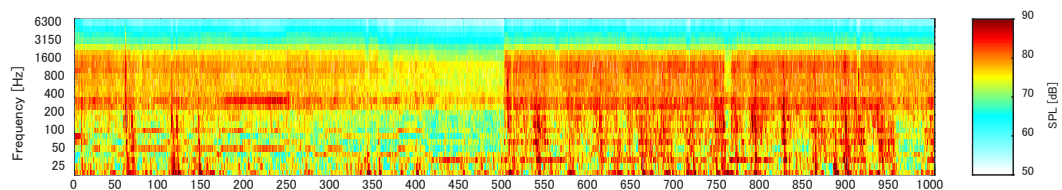
図-4.13 (a) A402D における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

1月：音圧レベル



1月：音圧レベル差

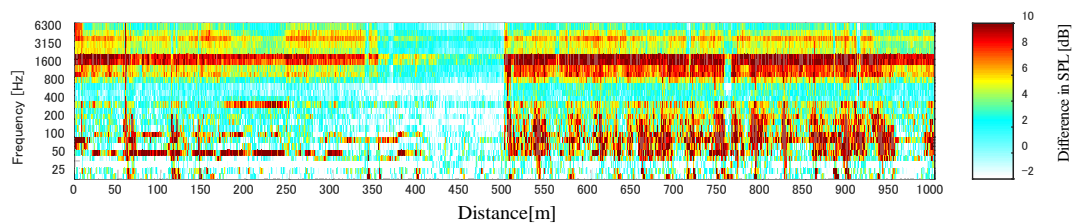
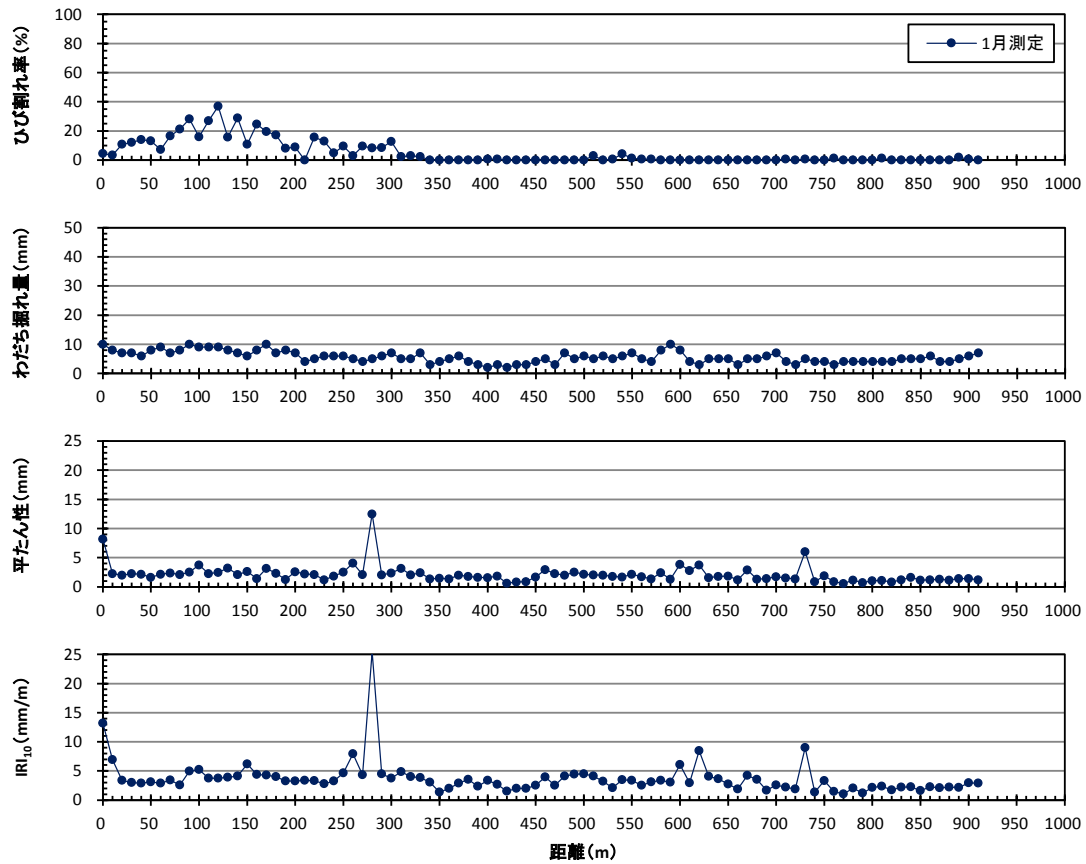


図-4.13 (b) A402D における拡張型タイヤ/路面騒音

(4) 法定速度 50km

1) 路線：A501D

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

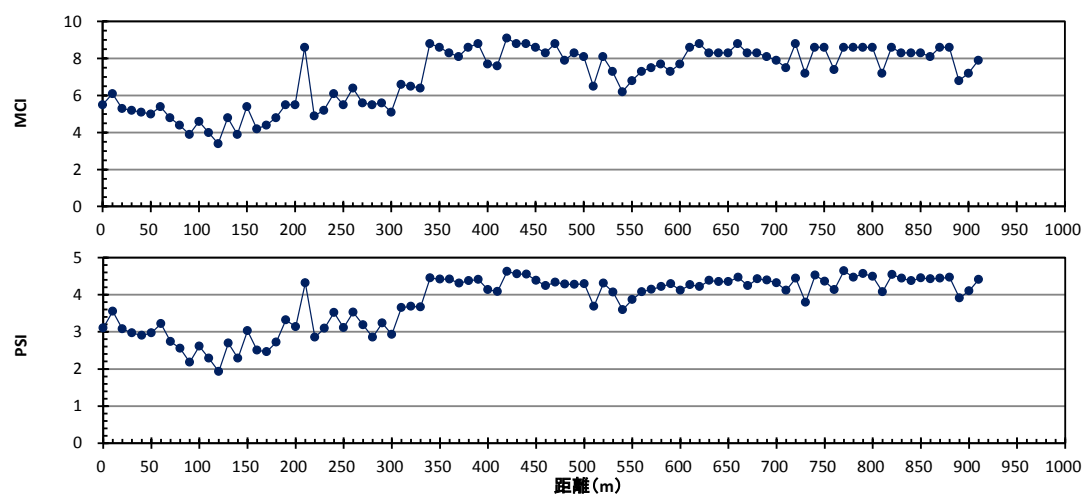
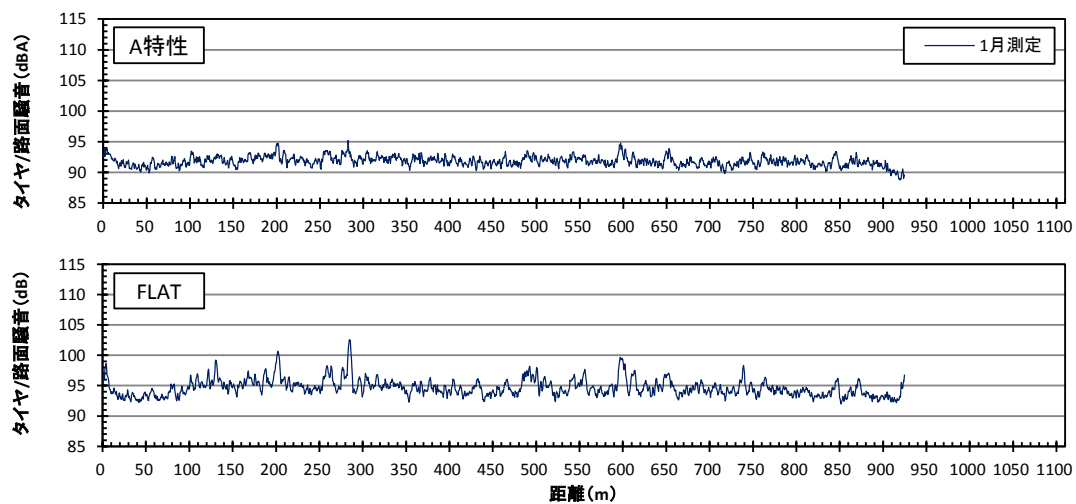


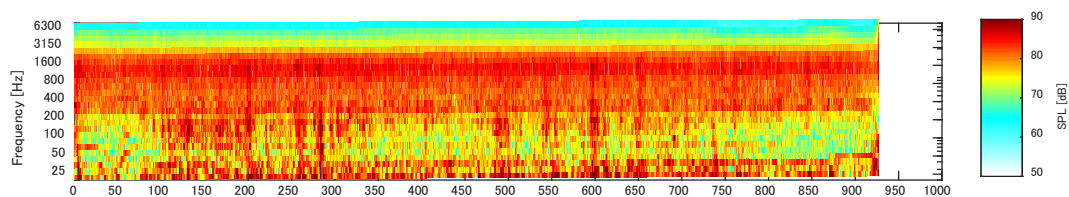
図-4.14 (a) A501D における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

1月：音圧レベル



1月：音圧レベル差

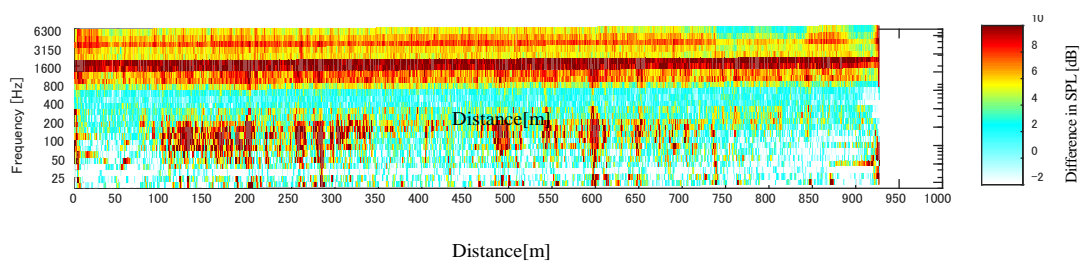
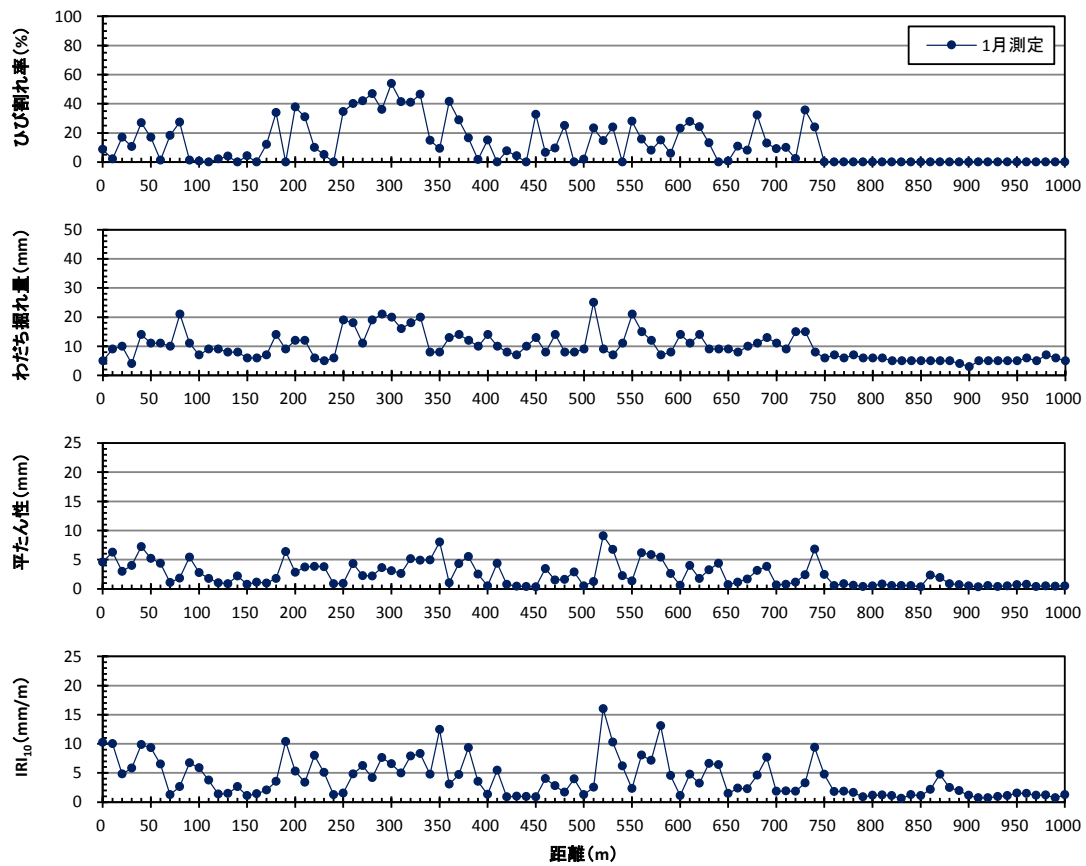


図-4.14 (b) A501D における拡張型タイヤ/路面騒音

2) 路線：A502D

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

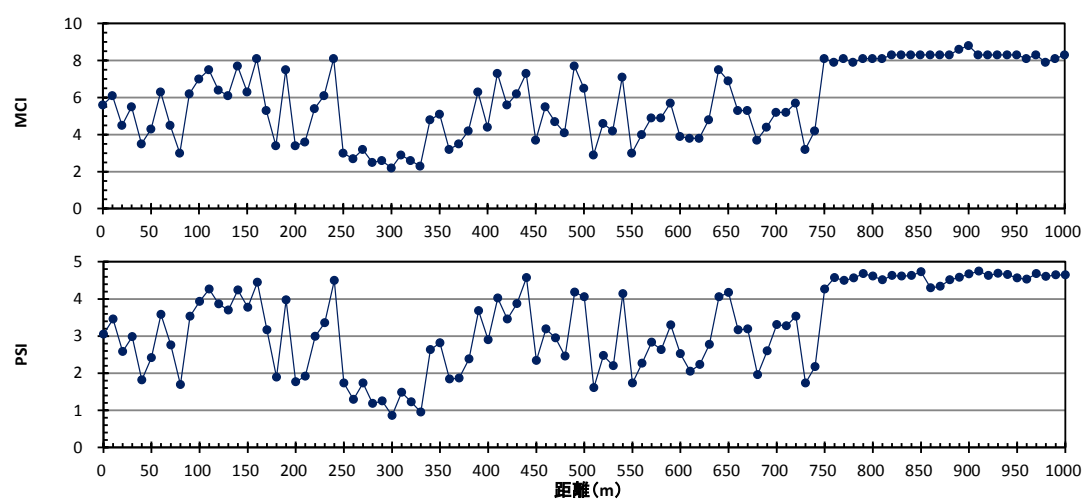
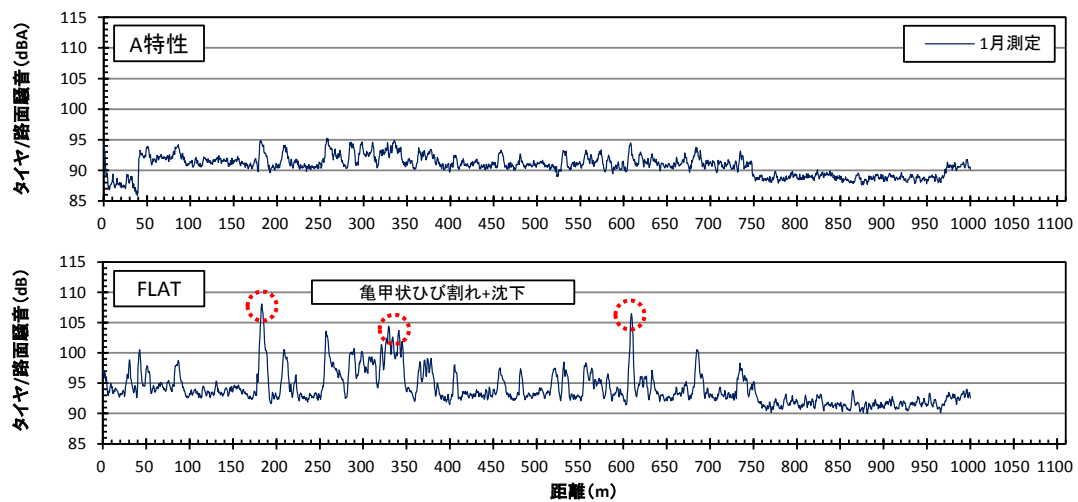


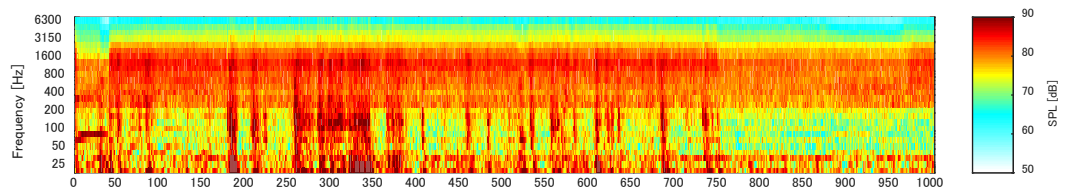
図-4.15 (a) A502D における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

1月：音圧レベル



1月：音圧レベル差

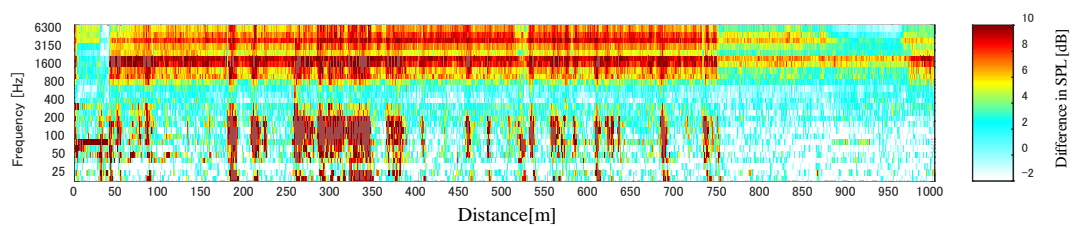


図-4.15 (b) A502D における拡張型タイヤ/路面騒音

3) 路線：A502U

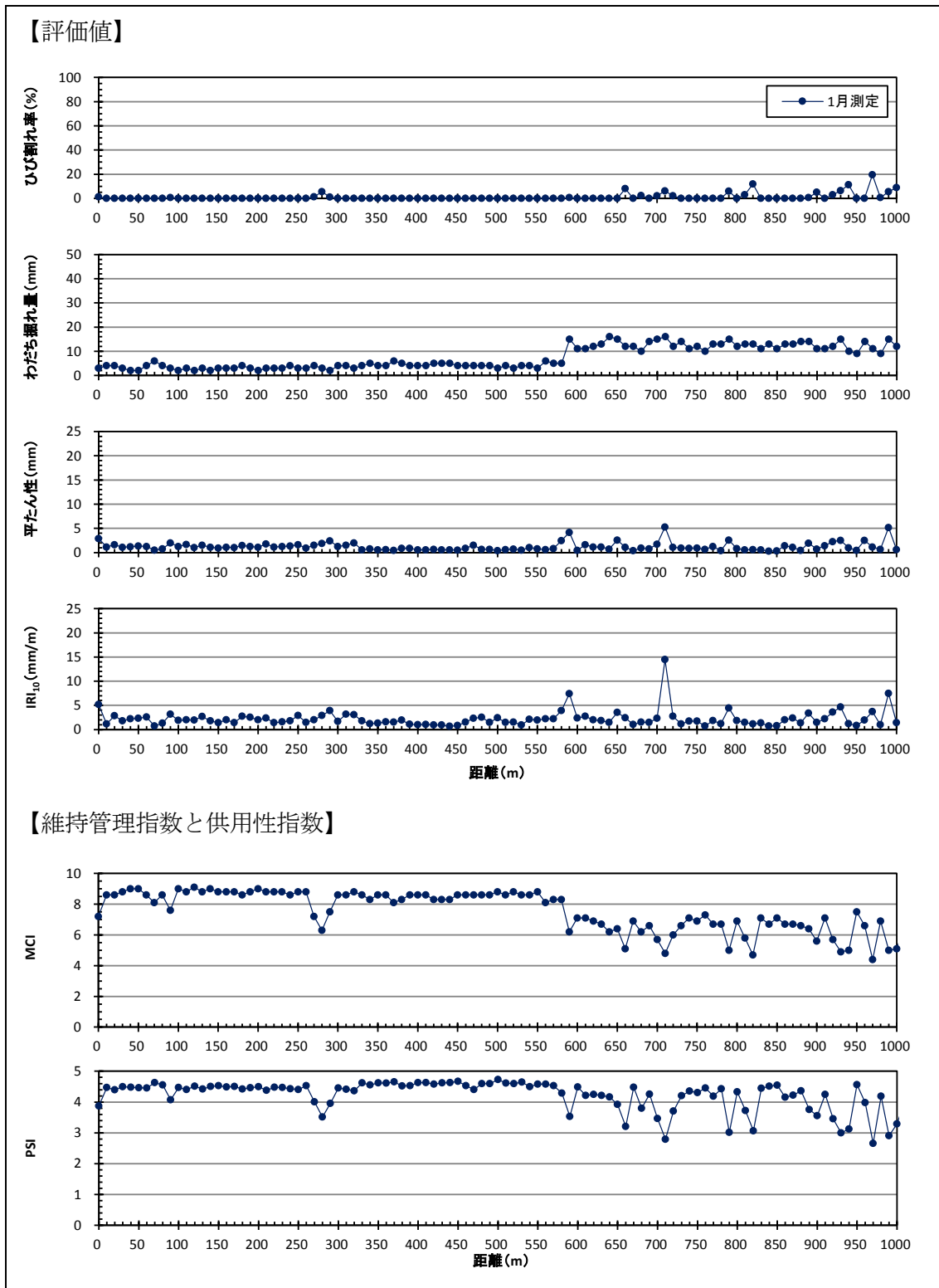
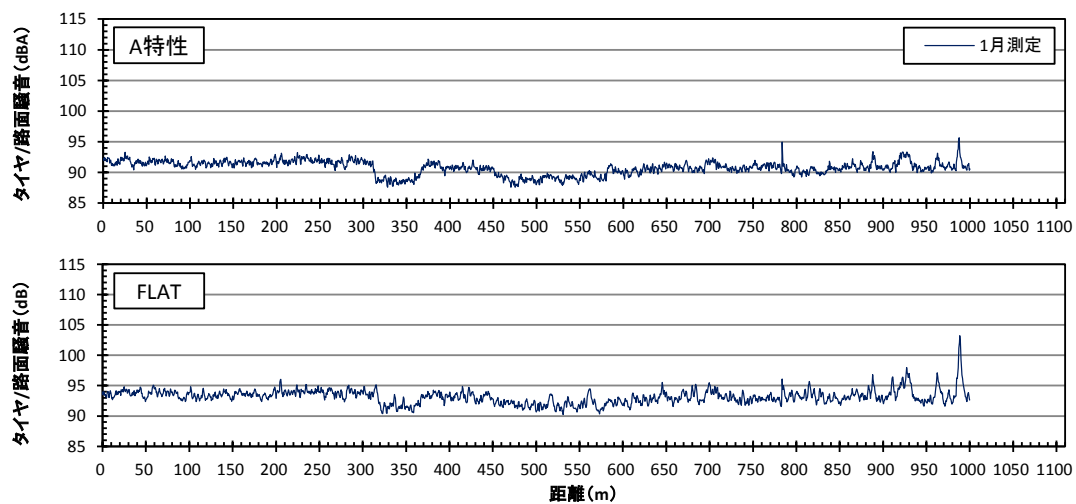


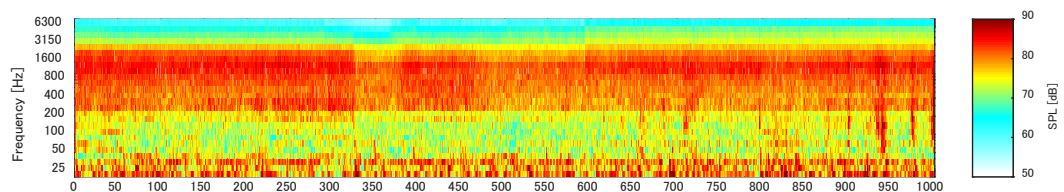
図-4.16 (a) A502U における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】



【サウンドスペクトログラム】

1月：音圧レベル



1月：音圧レベル差

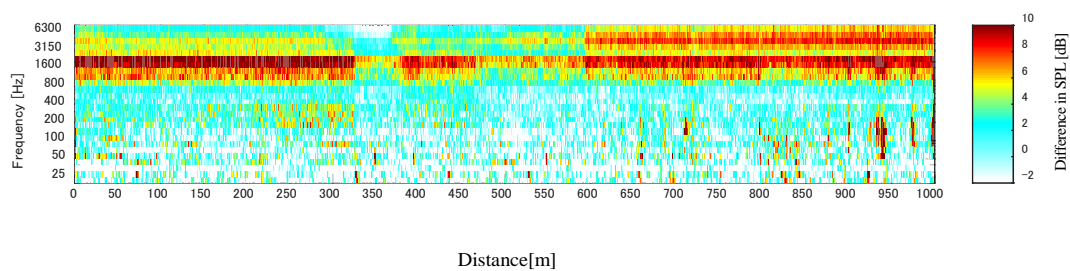
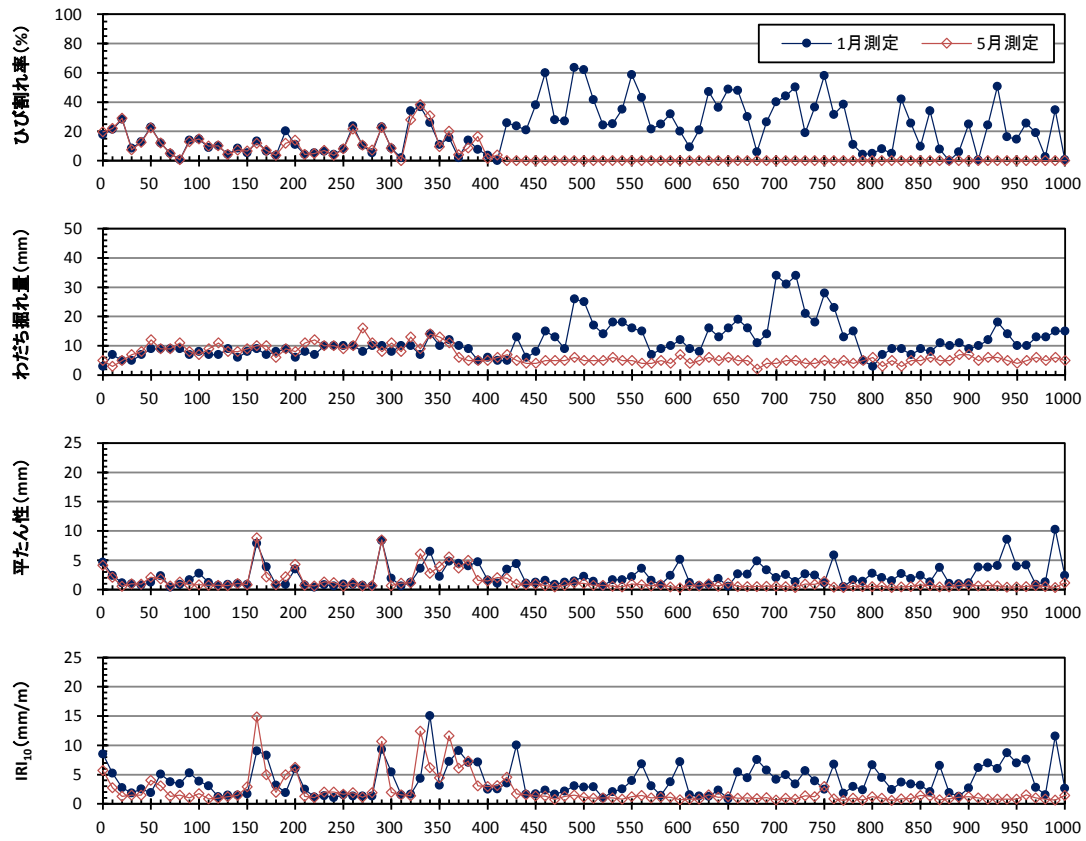


図-4.16 (b) A502U における拡張型タイヤ/路面騒音

4) 路線：A503D（1月，5月）

【評価値】



【維持管理指数と供用性指数】

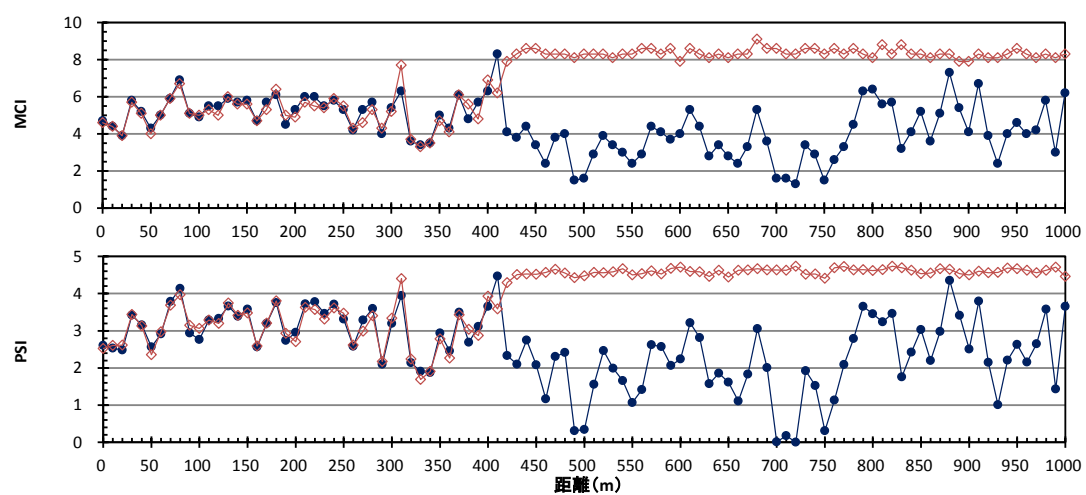
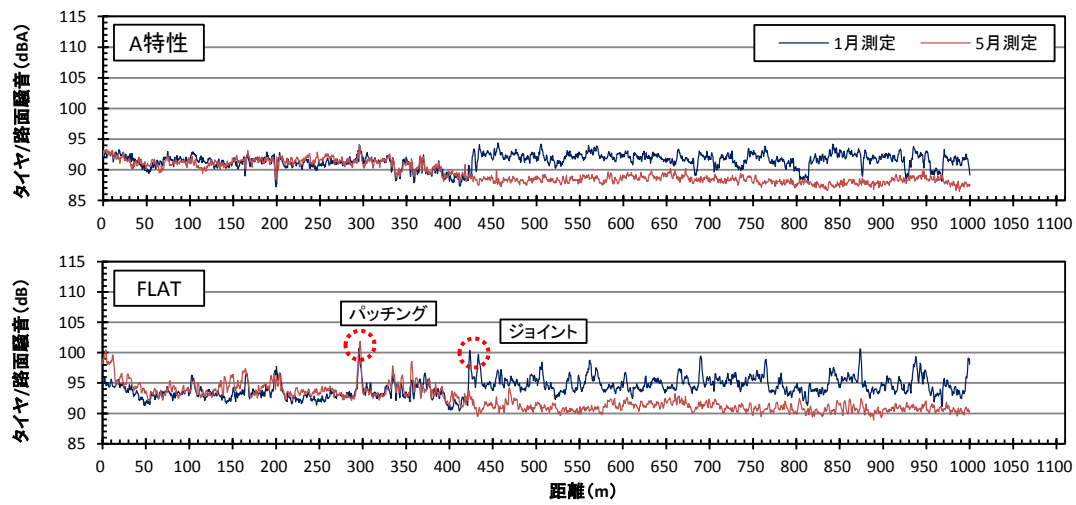


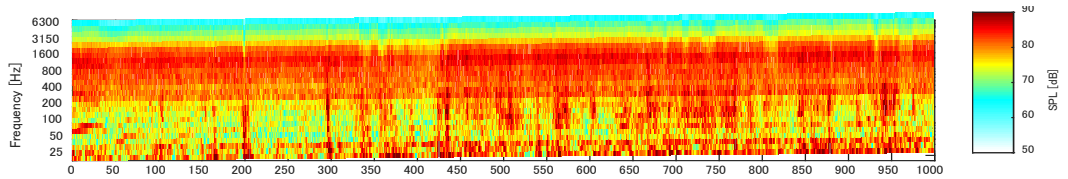
図-4.17 (a) A503U における路面性状

【拡張型タイヤ/路面騒音】

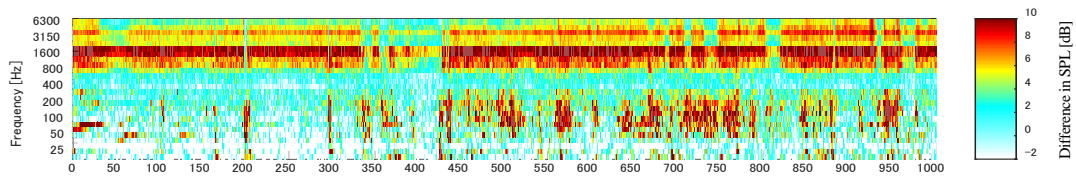


【サウンドスペクトログラム】

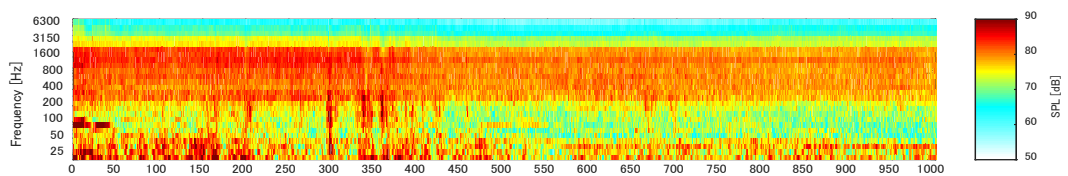
1月：音圧レベル



1月：音圧レベル差



5月：音圧レベル



5月：音圧レベル差

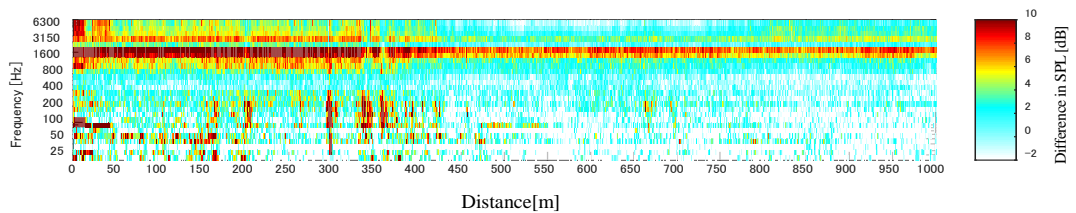


図-4.17 (b) A503U における拡張型タイヤ/路面騒音

4.3.3.各路線の路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音の関連性

路面性状は路線ごとに損傷レベルが異なるため、速度ごとに路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音を整理した。路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音のオールパスレベル（AP）について相関分析を実施した結果を図-4.18に示す。

この結果、拡張型タイヤ/路面騒音は、全走行速度とも MCI 及び PSI との相関性は高く、続いてひび割れ率が高い傾向を示していた。また、周波数特性の相違による相関係数をみると、A 特性（A-Weighted）よりも FLAT 特性のほうが相関性が高い。このことは、タイヤと路面から発生する音は、前章の周波数特性よりタイヤ振動特性が大きく寄与するものと判断される。

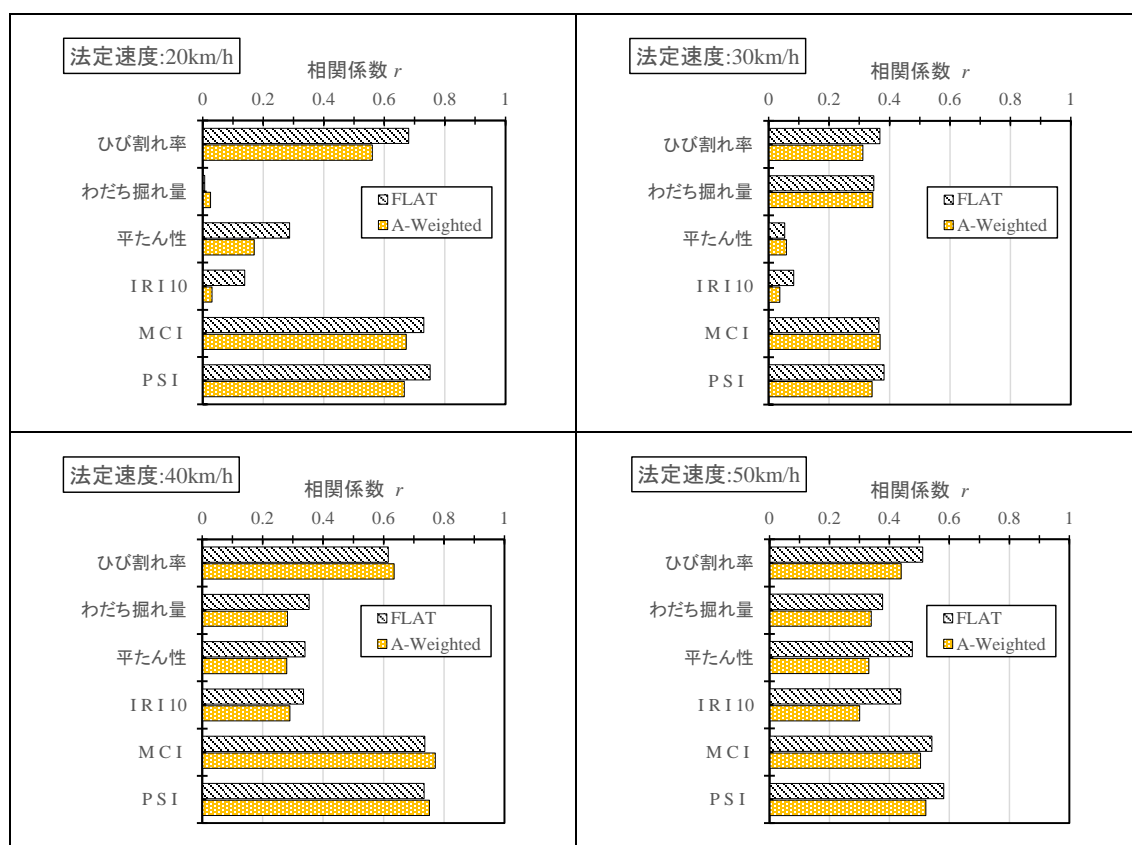


図-4.18 路面性状と拡張型タイヤ/路面騒音の相関関係

次に、拡張型タイヤ/路面騒音と相関性が高い MCI 及び PSI について、両者の関係を調べた。結果を図-4.19に示す。

この結果、MCI または PSI が低下するに従い拡張型タイヤ/路面騒音が大きくなっている。これは路面の供用性能が低下によって路面性状が悪くなり、その影響が拡張型タイヤ

/路面騒音に与える影響が大きいといえる。特に路面損傷との関係が高いものは、一次回帰直線の傾きから拡張型タイヤ/路面騒音の A 特性ではなく FLAT であった。

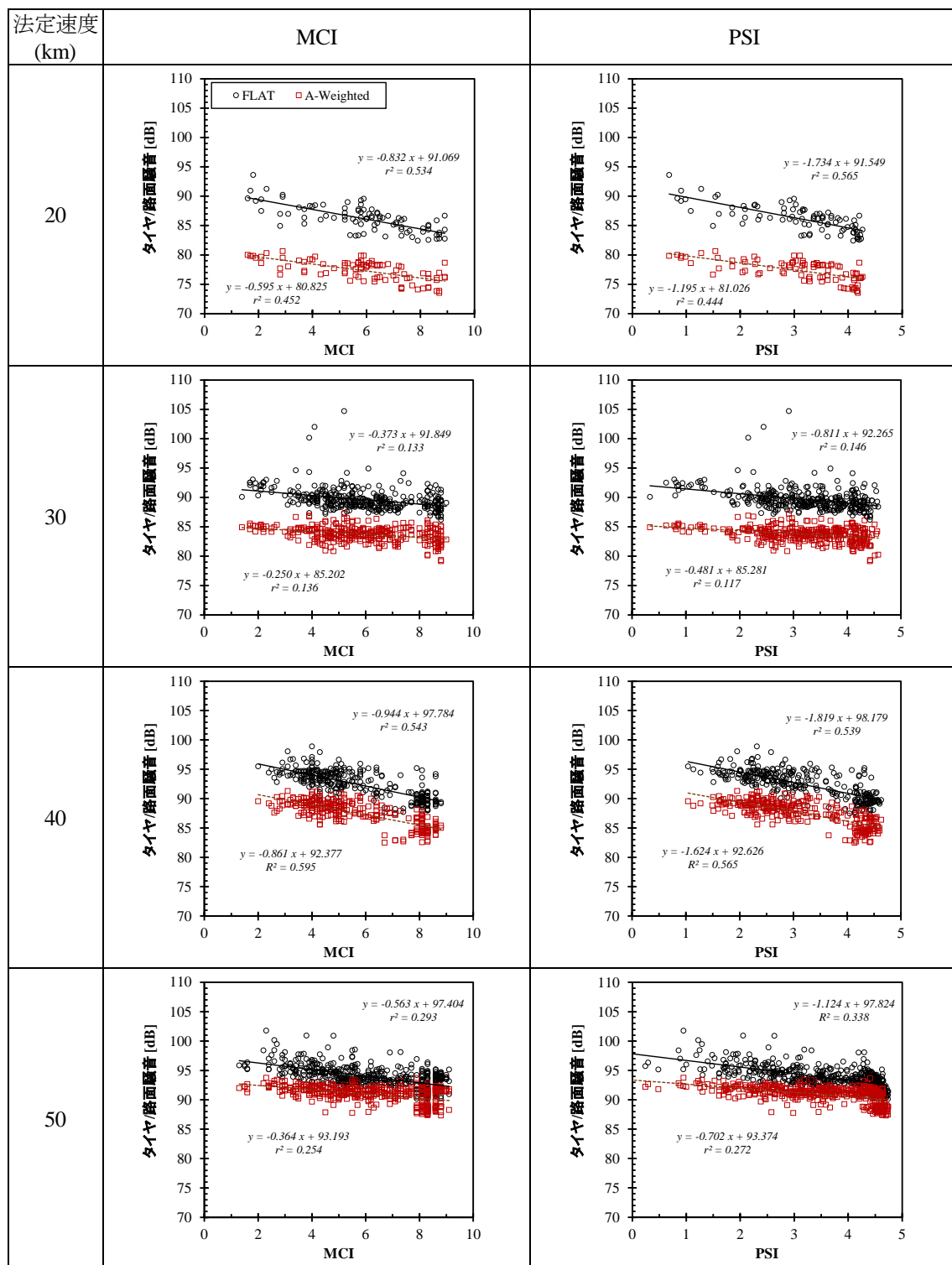


図-4.19 拡張型タイヤ/路面騒音と MCI 及び PSI との関係

4.4. 機械学習を利用した路面損傷の識別判定

路面損傷は様々な形態があり，それらを状態と音響特性との関連性を調べるためのビッグデータを使用して導き出すのは非常に困難である．そこで，機械学習のアルゴリズムを使用し，音響特性と路面損傷の識別判定について検討する．

4.4.1. 機械学習について

(1) 機械学習

機械学習 (Machine learning) は人工知能 (AI : Artificial intelligence) の一分野^{[7][8]}であり，機械による学習を実現させる技術である．従来のプログラミングではルールを全て人が決めて実装していたが，機械学習では学習データを設定したルールに従って機械に学ばせ，未来の状況について判別・予測等を行い，最適な判断を下すことである (図-4.20 参照)^[5]．

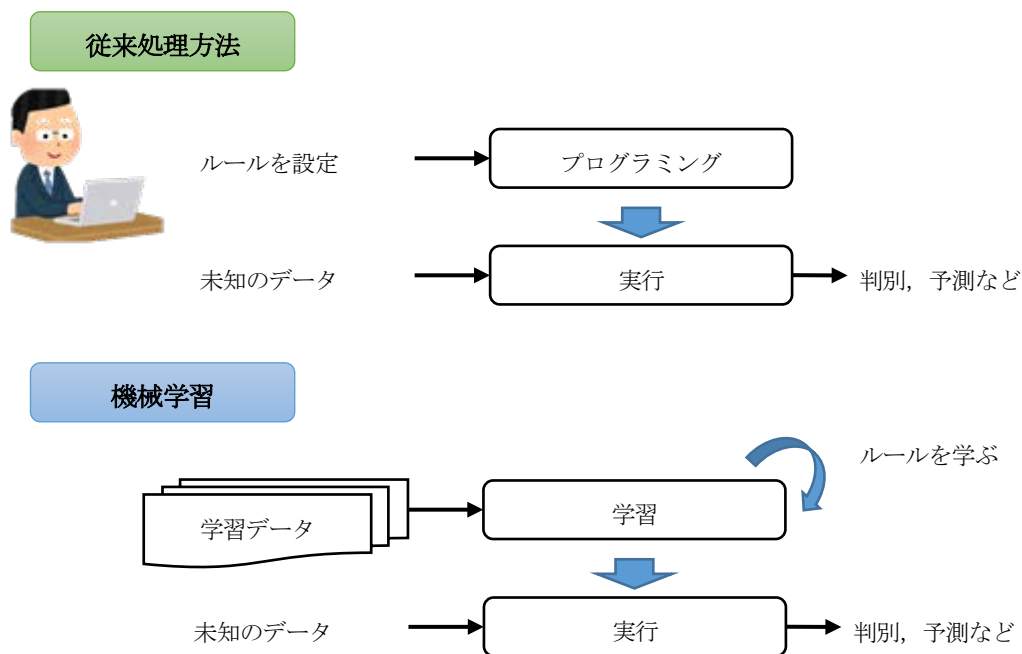


図-4.20 従来のプログラミングと機械学習

機械学習の方法は，図-4.21 に示すように様々な方法がある．路面損傷の識別判定にあたり，路面性状データの結果と拡張型タイヤ/路面騒音における改良型サウンドスペクトログ

ラムのデータを活用し，その中から特徴量を定め教師あり学習アルゴリズムによって以下の2つの方法を検討する．

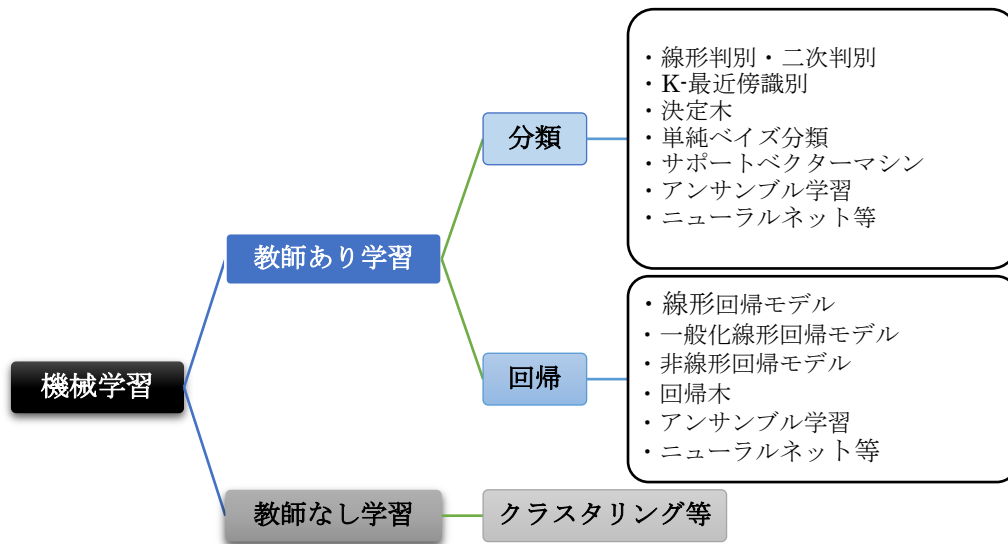


図-4.21 機械学習における主なモデル

【分類手法による検討】

改良型サウンドスペクトログラムを使用し，路面損傷の識別判定の予測モデルについて検討する．機械学習ではモデルの作成過程が容易な決定木¹⁹⁾を用い，拡張型タイヤ/路面騒音から得られた音圧レベル差の帯域成分と路面損傷の違いを機械学習させ，識別判定の有用性について検討した．ここで，決定木とは作成したデータベースから重要な知識を抽出し，木構造によるルール組み合わせで表現したものである．そのため，ニューラルネットワークのようにモデル構造がブラックボックスではなく，予測モデルが理解しやすい構造となる．決定木による機械学習では，教師あり学習において目指す音圧レベル差の成分 $x \in X$ に対して，目視判定で得られる路面損傷 $y \in Y$ を予測する．また，この集合体 X の速度に対する関連性を加えた機械学習を行う．

$$X \Rightarrow y = f(x; \theta) \Rightarrow Y \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (4.1)$$

【回帰手法による検討】

分類手法で検討した改良型サウンドスペクトログラムの特徴量を使用し，舗装点検で用いられている損傷レベルに対応した各評価値の予測モデルについて検討する．ここでは全ての特徴量のあるクラスと別のクラスとに分ける線形の決定境界（超平面）を特定することによって線形分離できるサポートベクターマシン（Support vector machine : SVM）を利用した．SVM による機械学習では，連続データを線回帰分析する手法を使用し，音圧レベル差の帯域成分「L₁F」「L₂F」または *LDI*（局在損傷指標），新設舗装と 3 つの損傷区分に局部損傷を加えた項目に分け $x \in X$ を作成し，ひび割れ率 $y \in Y$ を予測する．

$$X \Rightarrow y = f(x; \theta) \Rightarrow Y \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (4.2)$$

当該機械学習では，MATLAB の Statistics and Machine Learning Toolbox（統計及び機械学習による解析とモデル化を実施するツールボックス）を使用し，予測モデルの検討を実施した．

(2) 分類器による混合行列による評価

混合行列（Confusion Matrix）の評価は，**表-4.3** に示す二値分類器において Positive と Negative をそれぞれ正解と不正解とし，4 つの条件に分類される．

表-4.3 混合行列

		予測	
		Positive	Negative
実際	Positive	真陽性 True Positive (TP)	偽陰性 False Negative (FN)
	Negative	偽陽性 False Positive (FP)	真陰性 True Negative (TN)

この 4 つの性能指標は以下の式で計算される．本検討では「正答率」について吟味した．

正答率 (Accuracy) とは、全体の事象の中で正解の比率である。つまり、全体の判断の正しさを表した指標となる。

$$\text{正答率(Accuracy)} = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (4.3)$$

適合率 (Precision) とは、正解と予測 (判定) した結果に対して、実際の状態が正となる比率である。つまり、予測した結果の正しさ (正確性) を表す指標となる。

$$\text{適合率(Precision)} = \frac{TP}{TP + FP} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (4.4)$$

再現率 (Recall) とは、実際の状態が正解であるのに対して、正解と予測 (判定) した結果の比率である。つまり、実際に正解したものをどれだけ正と予測して検出できたかの指標となる。

$$\text{再現率(Recall)} = \frac{TP}{TP + FN} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (4.5)$$

統計的に誤差が発生しうる分類器において、適合率と再現率はトレードオフの関係にある。適合率を高くしようとすれば、例えばより厳しい閾値等が用いられた上で正解と判断させるようにするため、TP の絶対値が小さくなり、その分 FP が大きくなる。

F 値 (F-measure) は、このトレードオフ状態を考慮し、総合的な性能の評価尺度として適合率・再現率の調和平均である。

$$\text{F 値(F - measure)} = \frac{2}{\frac{1}{\text{Precision}} + \frac{1}{\text{Recall}}} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (4.6)$$

4.4.2.分類手法を用いた路面損傷の識別判定

(1) 路面損傷箇所の周波数特性

前章では基準路面を対象とする路線内で良好な箇所と比較検討したが、一般道を対象とした場合、路線ごとに路面の供用状態が異なることや表層に使用されるアスファルト混合物が異なるなど、良好路面の定義を設定方法が曖昧である。そこで、本節では基準路面を第2章でキャリブレーションを実施した密粒度舗装を使用し、音圧レベル差の評価方法として以下の2つについて検討した。なお、処理データは実測値を0.5m間隔でパワー平均し、その後以下の処理を実施した。

- ① 評価区間10mを平均して評価する方法（音のパワー平均）
- ② 10m範囲のうち0.5m間隔の音圧レベルの最大値を評価する方法

A市道503Dにおける代表的な路面損傷と改良型サウンドスペクトログラムについて整理した結果を図-4.22に示す。なお、改良型サウンドスペクトログラムで局部的に音圧レベルが高くなっている（赤い部分）の代表的な箇所A～Dについて路面画像を付記した。

この図より改良型サウンドスペクトログラムの音圧レベルが大きい部分は、路面に何らかの損傷が生じており、A～Dのようにパッチングによる路面凹凸やひび割れによってきめが粗くなっている箇所が多い。また、評価区間10mの平均値より区間の最大値を用いている音圧レベルは大きく、両者の違いについてA～Dの周波数特性を図-4.23及び図-4.24に示す。

評価区間10mの平均値を使用した音圧レベルの周波数成分は前章と同様、40～300Hz及び1,000～2,000Hzの周波数帯で音圧レベルが大きいことが確認できる。それに対し評価区間10mの最大値は、平均値よりも各周波数帯における音圧レベルが大きく、路面損傷が生じているA～Dにおける周波数特性の違いが識別しやすいといえる。つまり、突発的に発生する騒音値を掴むには、区間最大値によって局部損傷発見の予測が有用と考える。そこで、図-4.22に示した評価区間10mの音圧レベル差の最大値（1/3オクターブバンド）を用い、局所的に音圧レベルが大きくなる周波数帯域について、特徴が異なる4つのオクターブ帯域に整理した。以降では表-4.4に示した帯域成分をもとに考察する。

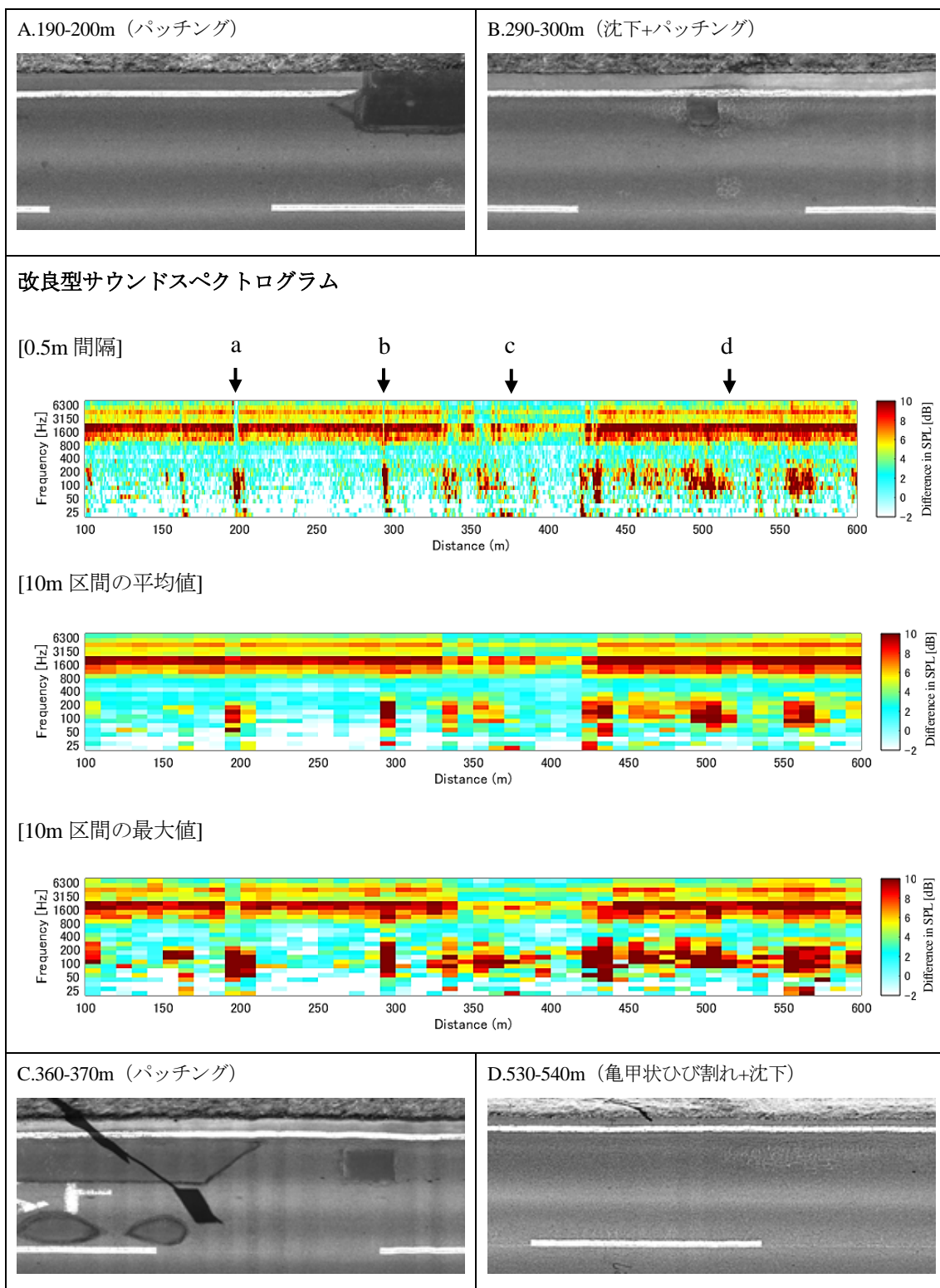


図-4.22 改良型サウンドスペクトログラムと路面損傷

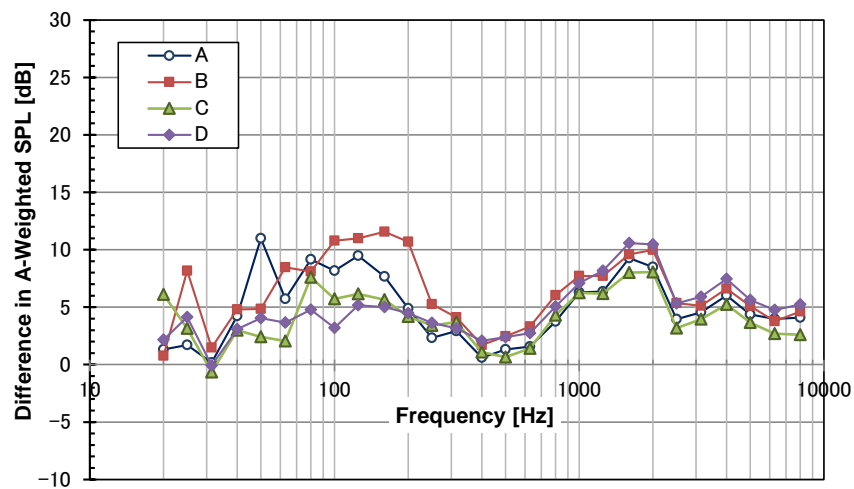


図-4.23 評価区間 10m の平均値を用いた周波数特性

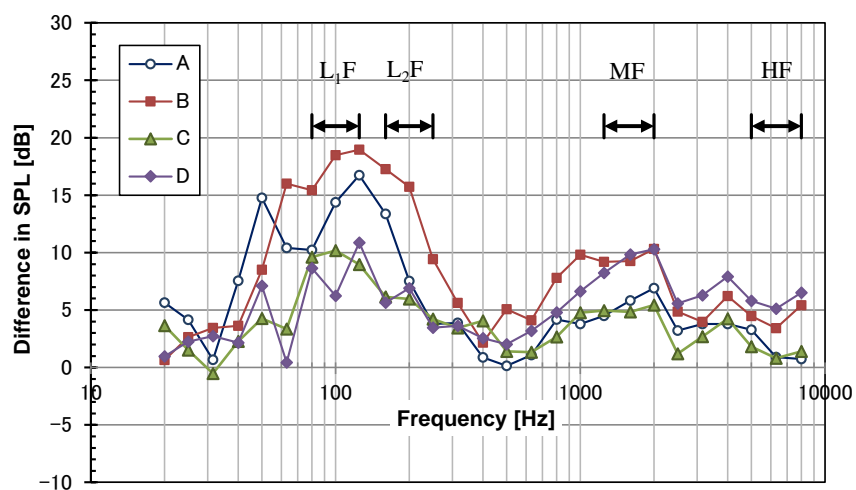


図-4.24 評価区間 10m の最大値を用いた周波数特性

表-4.4 音圧レベル差で仕分けたオクターブ帯域区分

	記号	周波数の範囲(Hz)
低周波成分	L ₁ F	80～125
	L ₂ F	160～250
中周波成分	MF	1,250～2,000
高周波成分	HF	5,000～8,000

(2) 路面損傷の識別判定成分の有用性と閾値

路面損傷の抽出では、前項で求めたオクターブ帯域成分の有用性を検討する。路面を識別する項目は表-4.5 に示す 5 項目とした。機械学習の教師データは、速度別の代表路線 B202D, B302D, A402D, A503D で得られた低周波成分 L_1F と L_2F , 中周波成分 MF , 高周波成分 HF を使用する。それぞれ帯域成分の関係を図-4.25 に示す。この図から以下のことがいえる。

- ・ 良好部（健全部）は各帯域成分とも約 15dB 以下である。
- ・ 局在損傷は各帯域とも 10～30dB 程度の位置に属している。
- ・ L_1F 帯域が大きくなるほど L_2F 帯域は大きく傾向を示している。また、 MF 帯域や HF 帯域は L_1F 帯域に対して若干大きくなる傾向を示している。

表-4.5 路面の識別評価区分

区 分	識別方法
良好部	路面損傷なし（ひび割れ 10%未満）
損傷レベル小	ひび割れ率（10～20%未満）
ひび割れ	ひび割れ率（20%以上）
局部損傷	パッチング，局部打換え（補修跡），段差，くぼみ，凹凸，継ぎ目
構造物付近	ハンドホール及びマンホール等の蓋，グレーチング ，橋梁ジョイント

(3) 決定木を使用した独立変数の選択

機械学習分野における決定木は、測定した観測結果からその事項の目標値を予測モデルとして表すものである。決定木による分類モデルは葉が分類を表し、枝がその分類に至るまでの特徴の集まりを表す木構造を示すものである。今回、集合体 X に取り入れた各変数 x の有意性を確認するため、変数減少法によって求められる正答率を算出した。結果を表-4.6 に示す。

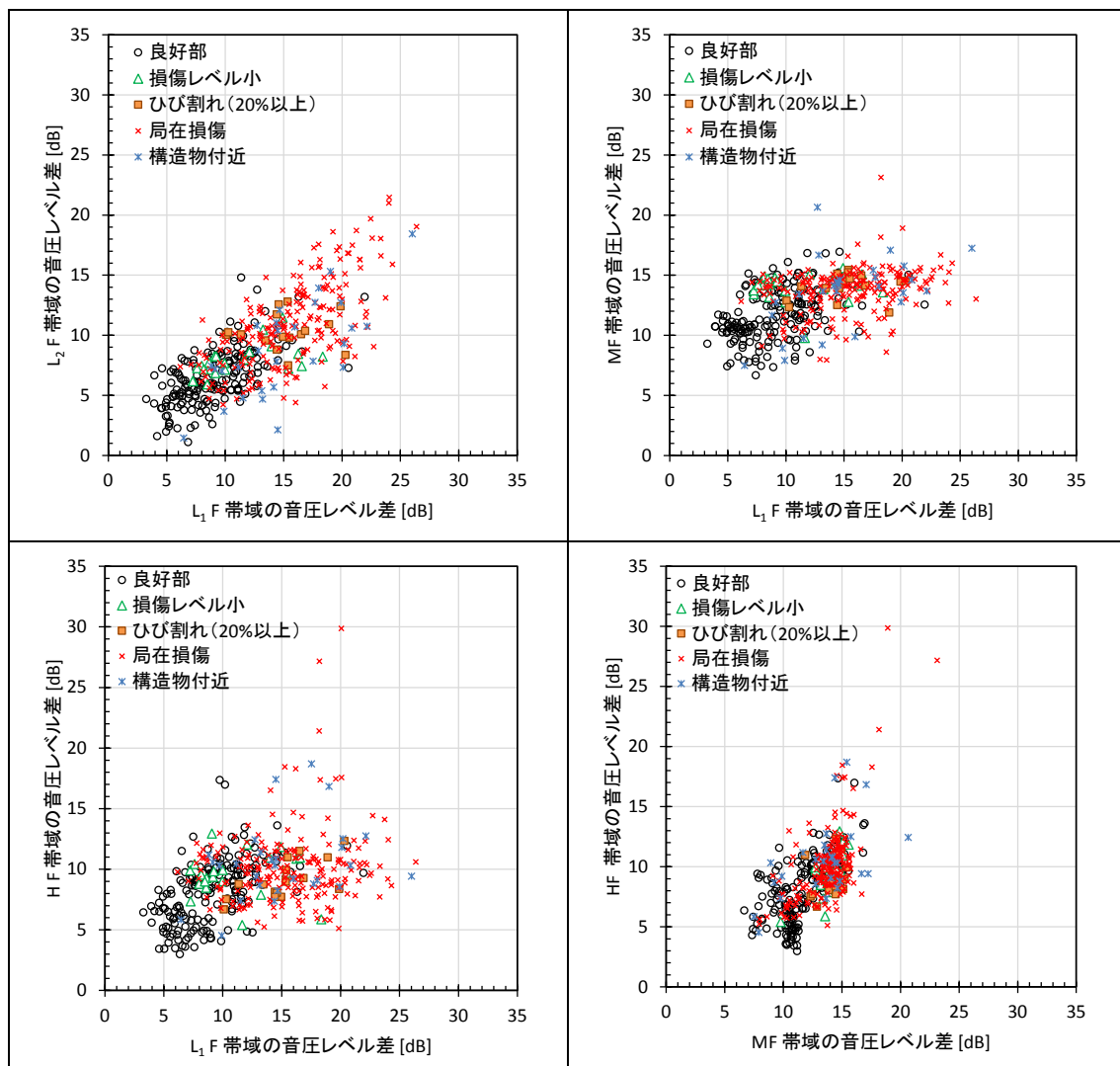


図-4.25 帯域成分の音圧レベル差におけるそれぞれの関係

表-4.6 決定木を用いた変数減少法による正答率

No.	機械学習に使用する変数 x					正答率 (%)
1	V	L ₁ F	L ₂ F	MF	HF	69.5
2	—	L ₁ F	L ₂ F	MF	HF	69.2
3	—	L ₁ F	L ₂ F	MF	—	69.5
4	—	L ₁ F	L ₂ F	—	HF	69.9
5	—	L ₁ F	L ₂ F	—	—	71.0

この結果、全ての正答率をみると 69.2～71.0%と同程度の値を示していることから、変数が一番少ない「L₁F」「L₂F」で y が予測可能である。そこで、No.5 の混合行列を図-4.26 に示す。この分類器で得られた評価は「良好部及び局在損傷は概ね正しく分類できるが、他の変数は間違えて分類してしまう」となる。それぞれ予測された評価について調べた結果を以下に示す。

		予測されたクラス					真陽性率	偽陰性率
真のクラス	良好部	152			27		85	15
	損傷レベル小	15			7			100
	ひび割れ20%以上				16			100
	局在損傷	36			169	2	82	18
	構造物付近	8			20			100
		良好部	損傷レベル小	ひび割れ20%以上	局在損傷	構造物付近		
陽性の予測値		17			71			
偽発見率		28			29	100		

図-4.26 混合行列による判定

損傷レベル小は良好部と局在損傷に分類され、良好部と分類される箇所は「タイヤ走行位置にひび割れがない」、「ひび割れが存在してもひび割れ幅が小さいため、タイヤと路面間との振動が発生しない」等の状況であり、局在損傷と分類された箇所は「横方向のひび割れ」が主であった。

ひび割れ 20% 以上は局在損傷に分類され、ひび割れ間隔やその開き状態によってタイヤ振動及びトレッドによる加振が生じ、帯域成分の音圧レベル差が大きくなっている。

構造物付近はマンホール等のすり付け段差がない状態であれば良好部として分類され、構造物との段差があると局在損傷に分類される。

以上のことから、タイヤと路面から発生する音の現象を整理すると、路面損傷から受けるタイヤノイズは、路面に何らかの異常が存在と発生する衝撃な音や振動が大きくなると

いえる。つまり衝撃音・振動音響特性を知ることが、道路ユーザーにとって不快になる問題とひとつとして捉えることができるため、良好部とそれ以外を路面損傷と位置付け、分類評価を実施した。

学習用教師データの帯域成分「 L_1F 」「 L_2F 」を使用し、決定木学習を行った予測モデルを図-4.27 に示す。この予測モデルを使用し、学習データ及び対象路線のデータ（学習データ以外の路線）を使用し、正答率を求めた。

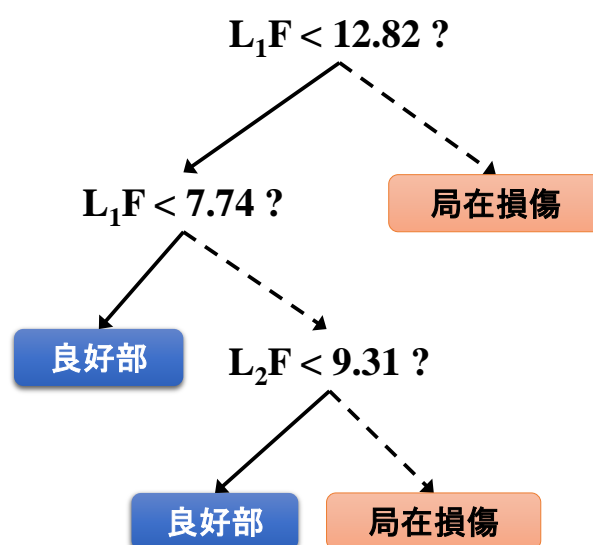


図-4.27 決定木学習による予測モデル（ L_1F と L_2F を使用）

図-4.28 は表-4.1 の対象路線について 5 項目（良好部、損傷レベル小、ひび割れ 20%以上、局在損傷、構造物付近）の一致する正答率（完全一致）と二分判定（良好部と損傷箇所）の正答率を整理した結果である。

この図より A301U を除き 5 項目による正答率は前述したように 2 項目である良好部と局在損傷の予測であるため、50～80%と変動が大きく、二分判定の正答率は約 80%と予測精度がよい。しかし、A301U の正答率は約 30%と低い。この路線の路面性状は図-4.7(a)に示すようにひび割れ率が 20%以下、わだち掘れ量が 10%以下、IRI が 8mm/m 以下と路面損傷レベル小である。この機械学習で得られた予測値は、良好部が路面損傷と判定され、適切な判定ができていない。この原因を調べたところ、図-4.29 に示すように路面が荒く、走行した際の路面とタイヤとのガタガタ感（不規則なマクロテクスチャの凹凸）によって振

動・騒音現象が荒れた連続音として発生しているものと推察される。今後路面の肌が荒れた凹凸については、きめ深さ（MPD）測定システムを使用し、拡張型タイヤ/路面騒音の周波数特性等の確認が必要であるとする。

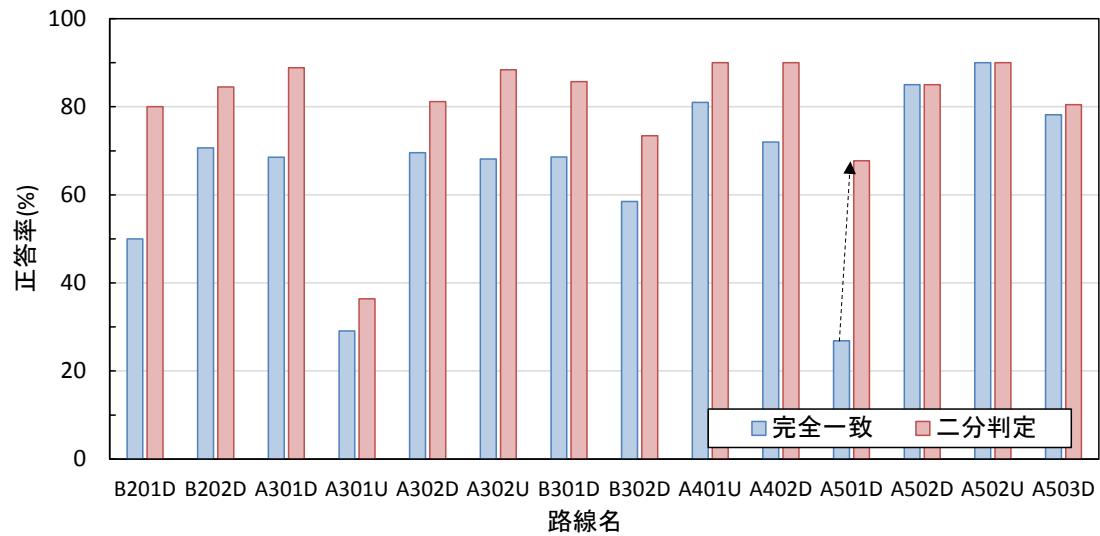


図-4.28 各路線における正答率

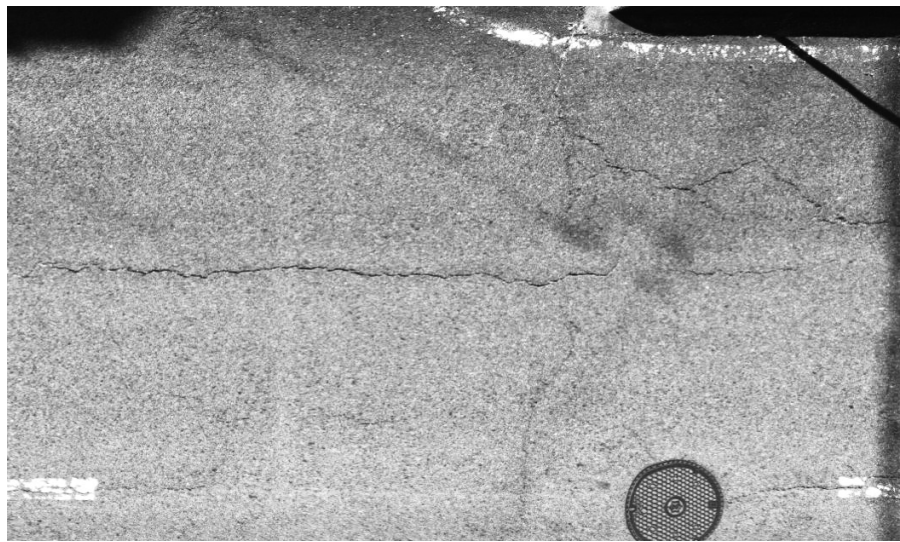


図-4.29 路線 B301U における路面の肌荒れ状況
(表面の細粒分が飛散し、粗骨材が路面から露出している状態)

(4) 識別判定の予測

機械学習・決定木によって得られた二分判定の予測は、路面の良好部と損傷部を識別することが可能になることから、路面損傷検出フィルタとした。このフィルタを用いて改良型サウンドスペクトログラムで表現した結果の一例を図-4.30 及び図-4.31 に示す。ここで、視覚的に路面損傷箇所をクローズアップさせるために、良好部の区間を白抜きとした。この図より、路面損傷が発生している区間はサウンドスペクトログラムで表現した騒音強度が大きくなり、距離に応じた路面損傷の場所が特定しやすくなる。なお、ここで抽出された区間は、局部損傷箇所が主因子であるが、前項で述べたようにアスファルト舗装の劣化による路面の肌荒れに起因したものを抽出している。

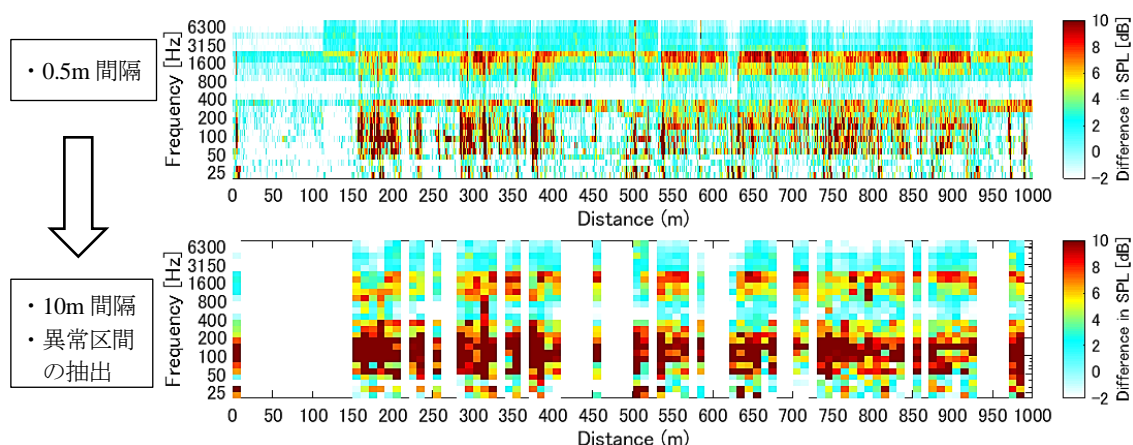


図-4.30 路線 A401U にて路面損傷箇所を抽出した改良型サウンドスペクトログラム

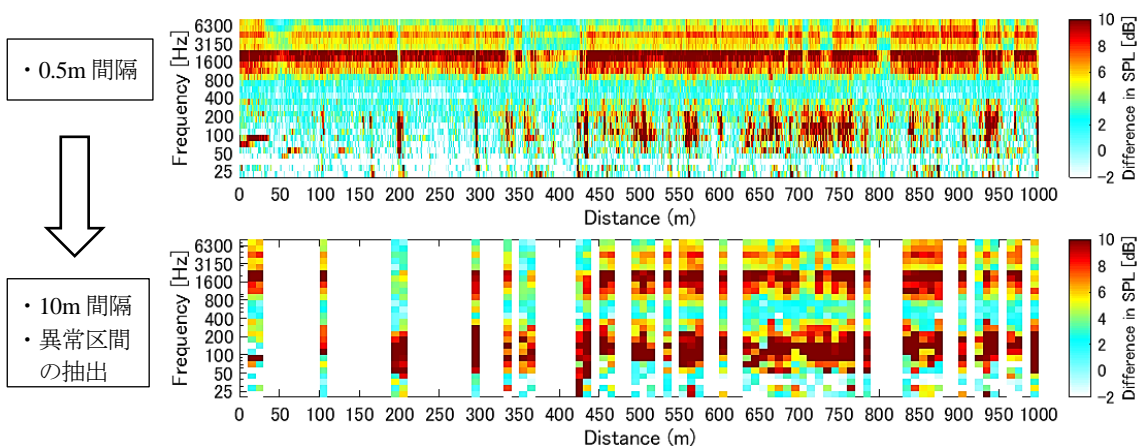


図-4.31 路線 A501U(1 月)にて路面損傷箇所を抽出した改良型サウンドスペクトログラム

4.4.3. 拡張型タイヤ/路面騒音による路面損傷の評価指標

(1) 路面損傷の区分と「L₁F」「L₂F」の関係

拡張型タイヤ/路面騒音による路面損傷を識別する際、低周波成分の音圧レベルが特定できれば、路面損傷の抽出が可能になることを確認した。このことは、路面凹凸によるタイヤの振動特性が大きく影響することになる。舗装点検要領^[8]や舗装点検必携^[9]では、路面損傷による分類を3つの損傷レベルに区分している。その区分の状態は表-4.7に示すように、路面の劣化状態が異なっている。

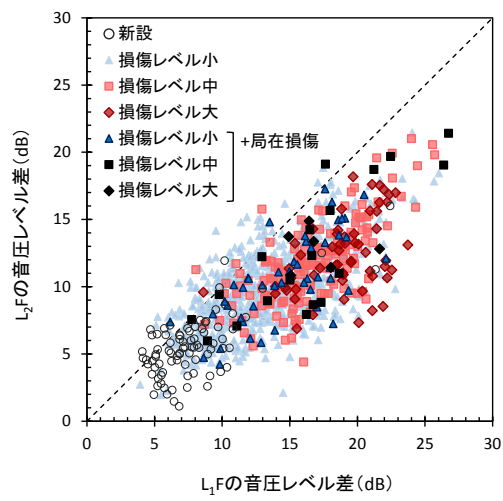
そこで、前項で実施した低周波の帯域成分「L₁F」「L₂F」を使用し、全路線における損傷レベルとの関係を検討した。ここで、損傷レベルについては、ひび割れ率、わだち掘れ量及びIRIとし、各損傷レベルに対して局在損傷の箇所を別途抽出した。

「L₁F」「L₂F」の関係と路面損傷レベルに区分した結果を図-4.32 (a) (b) (c)に示す。この結果、「L₁F」「L₂F」の値の増加により、ひび割れ率は損傷レベルが大きくなる傾向を示しているが、わだち掘れ及びIRIとの関係性は低い。このことは、路面のひび割れに生じているマクロテクスチャからメガテクスチャ(図-1.5 参照)の凹凸の度合いが大きくなると、タイヤと路面との振動(タイヤと路面との摩耗やタイヤトレッド部に生じる振動、ひび割れの角に衝突したときの衝撃等)が大きくなり、振動に起因する低周波の騒音が大きく、両者の関係性が深くなる。

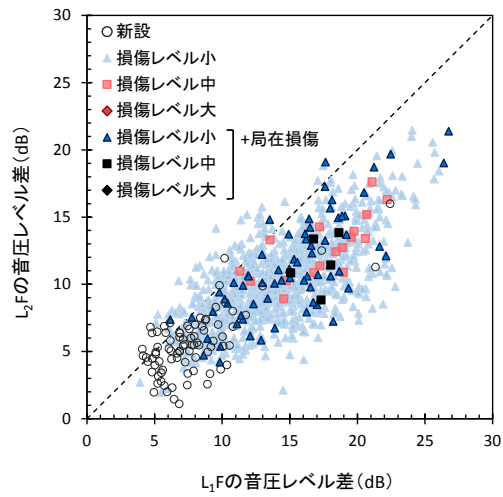
表-4.7 損傷評価の区分^[8]

区分		状態	ひび割れ率	わだち掘れ量	縦断凹凸 IRI
I	健全	損傷レベル：小 劣化の程度が小さく、 舗装表面が健全な状態である。	0～20% 程度	0～20mm 程度	0～3mm/m 程度
II	表層機能保持段階	損傷レベル：中 劣化の程度が中程度である。	20～40% 程度	20～40mm 程度	3～8mm/m 程度
III	修繕段階	損傷レベル：大 早期の超過が予見される状態である。	40%以上	40mm 以上	8mm/m 以上

(a) ひび割れ率



(b) わだち掘れ量



(c) IRI

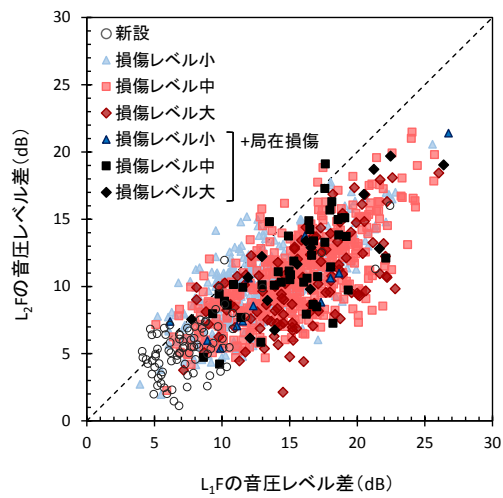


図-4.32 低周波成分 (L_1F , L_2F) における各指標の損傷レベル

(2) LDI 路面評価指標の提案

改良型サウンドスペクトログラムから得られた「L₁F」「L₂F」とひび割れ率の関係性は高い傾向にあり、「L₁F」「L₂F」が大きくなるほど損傷レベルが大きい。そこで、「L₁F」「L₂F」の大きさの距離が路面の損傷レベルとして表現可能になりうることから、式(4.7)に示す「L₁F」と「L₂F」の距離で得られる値を局在損傷指数（Localized Defects Index：LDI）と定義した。

$$LDI = \sqrt{L_1 F^2 + L_2 F^2} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (4.7)$$

この LDI は「L₁F」「L₂F」との合成であり、図-4.32 に示した関係図では傾きが生じているため、この傾き補正が必要となる可能性がある。しかし、傾き補正に関係なく LDI の一つの指標で評価できれば路面損傷の度合いを拡張型タイヤ/路面騒音の指標値として提案できる。そこで、「L₁F」「L₂F」を使用した場合と LDI で評価した際の有意性を判断するため、回帰による機械学習・サポートベクターマシン（Support vector machine：SVM）[直線回帰型]によって両者を比較し、予測判定の精度を確認した。ここで、目的変数はひび割れ率、説明変数は速度及び7つに区分（新設舗装、3つの損傷区分、3つの損傷区分に局部損傷を加えた項目）、「L₁F」「L₂F」または LDI を使用し、全路線を使用した。予測モデルによる統計量を表-4.8 に示す。この結果、4つのモデルのうち最適なスコアは「L₁F」「L₂F」・速度なしであるが、4つのモデルの性能評価には大きな差異はない。そこで、予測モデルの実用性を勘案し、「速度なし」のモデルを用い実測値と予測値を箱ひげ図で比較した。結果を図-4.33 に示す。

表-4.8 SVM で機械学習したモデルの違いによる統計量

評価指標の値	「L ₁ F」「L ₂ F」		LDI	
速度	あり	なし	あり	なし
RMSE（平方根平均二乗誤差）	6.286	6.284	6.383	6.392
決定係数	0.83	0.83	0.83	0.83
MSE（平均二乗誤差）	39.5	39.5	40.8	40.9
MAE（平均絶対誤差）	4.57	4.58	4.64	4.64

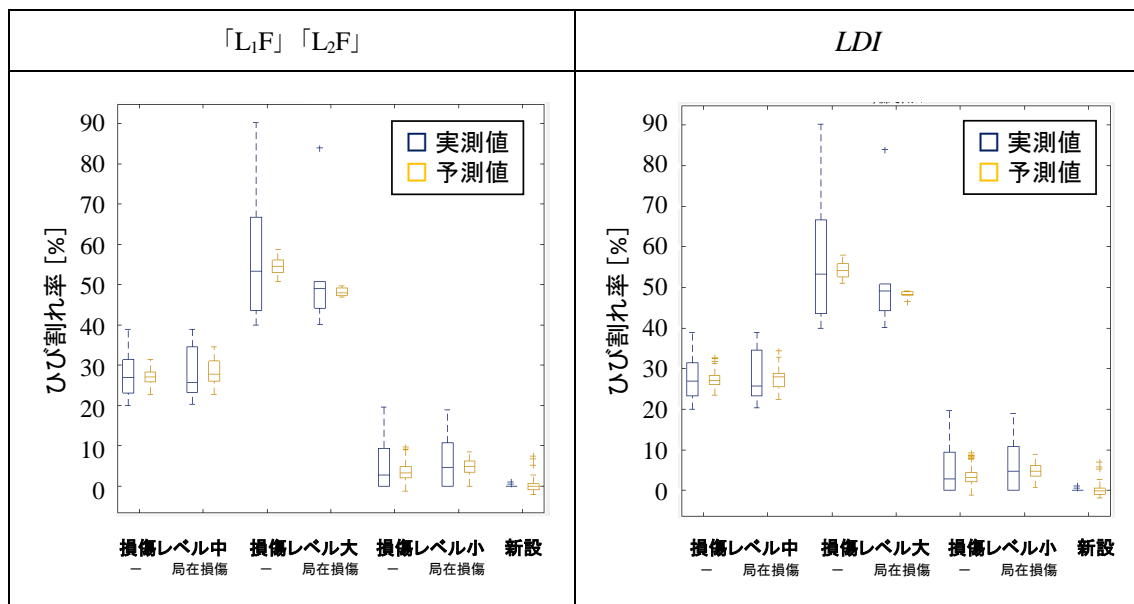


図-4.33 モデルの違いによる測定値と予測値

この結果、「 L_1F 」「 L_2F 」と LDI の両者における予測値は同程度の値を示しており、両者の予測モデルの精度は同程度である。また、実測値と予測値を比較すると、特に損傷レベル大の実測値の変動に対して予測値は小さい。しかしながら、損傷区分ごとの予測であれば、ほぼ損傷レベルの範囲内であり、予測モデルの精度は高い。

以上のことから、「 L_1F 」「 L_2F 」の合成値として LDI を置き換えることが可能である。

(3) LDI と路面との関係

LDI と路面との関係を図-4.34 に示す。ここで、 LDI の評価区分は、図-4.35 (a) (b) の一例に示した路面状態にもとづき LDI の評価を仕分けした。 LDI による評価区分及びそれにもとづく騒音・振動の影響等を作成した内容を表-4.9 に示す。図-4.34 及び表-4.9 を用いることにより、路面から発生する騒音・振動の影響等の把握ができ、合理的な騒音対策等を講じることが可能になる。

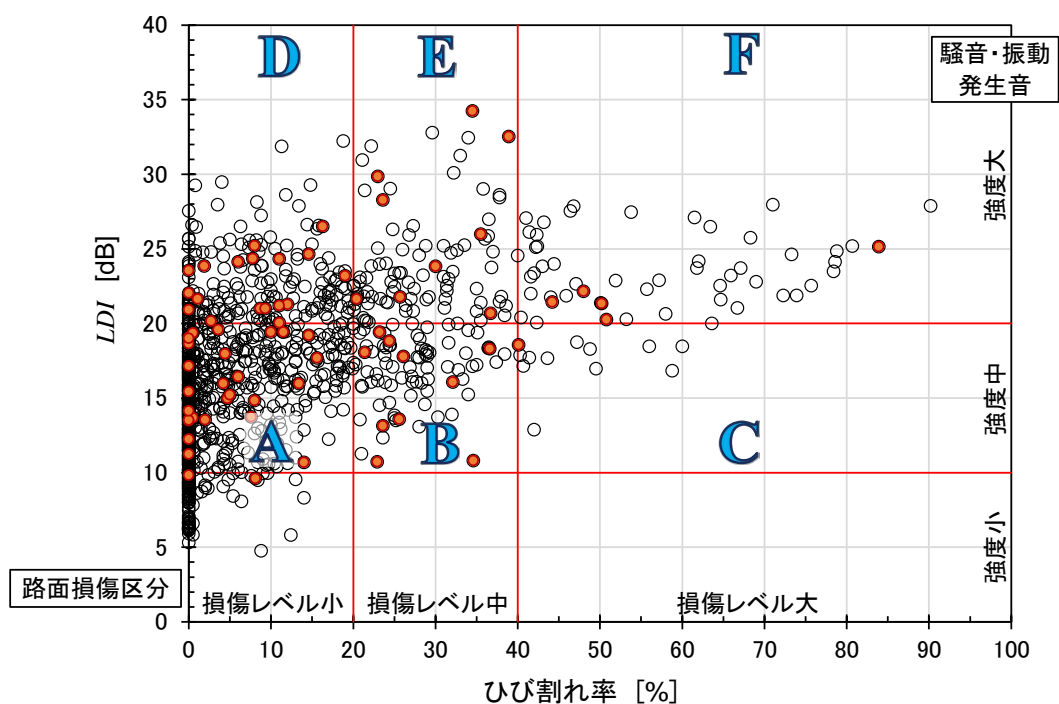


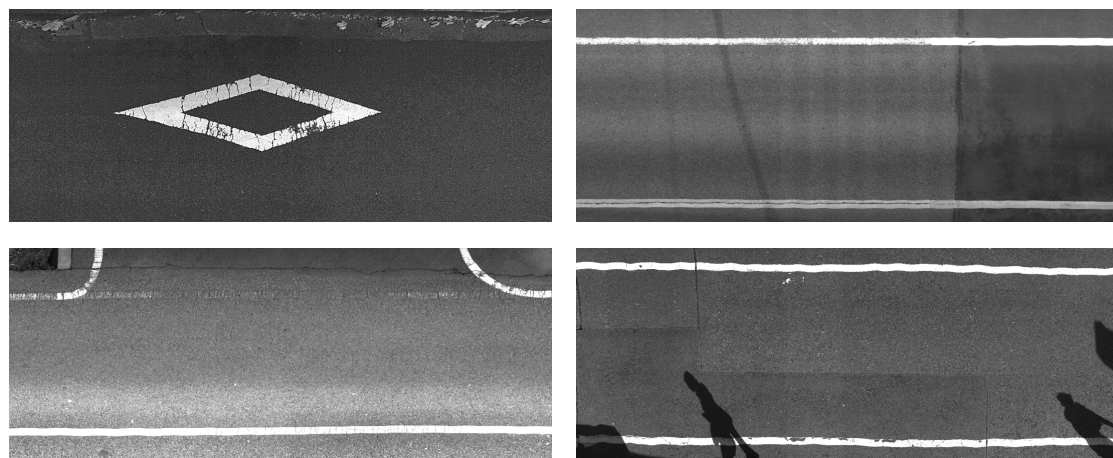
図-4.34 ひび割れ率に応じた *LDI* の評価

(○:局在損傷なし, ●:局在損傷あり)

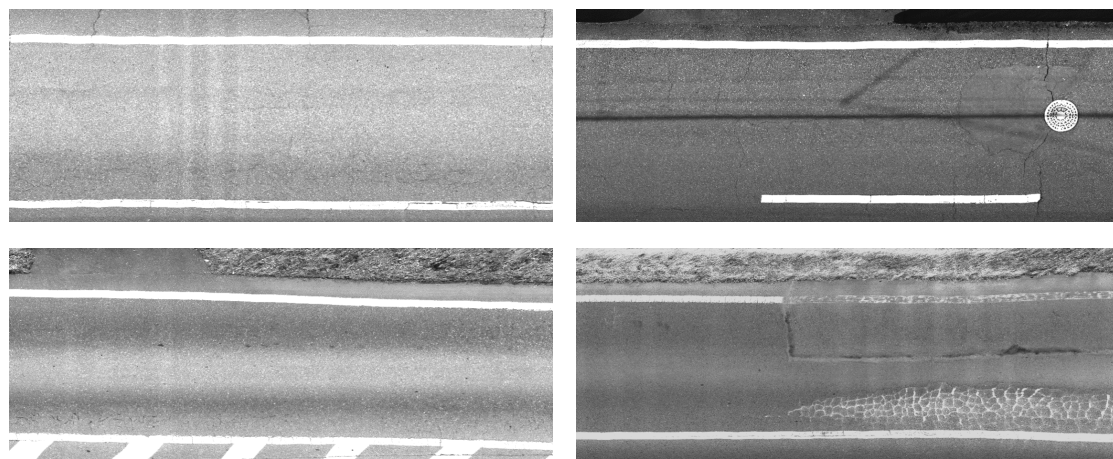
表-4.9 *LDI* の評価区分

<i>LDI</i> の評価値 [dB]	強度レベル (騒音・振動発生音)	路面状況による騒音・振動の影響等
0～10	小	<ul style="list-style-type: none"> ・ 段差や凹凸などは認められず、騒音・振動の影響は小さい ・ 路面に泥等の汚れが発生 ・ ひび割れ率は20%以下であり、ひび割れ幅によるタイヤ振動音の発生はほとんどない ・ 路面のきめが細かい
10～20	中	<ul style="list-style-type: none"> ・ 段差や凹凸などによりタイヤ振動から車内に伝わる騒音・振動が感じる ・ ひび割れによる凹凸は小さい ・ パッチングによる段差は小さい ・ 若干路面のきめが粗くなっている
20 以上	大	<ul style="list-style-type: none"> ・ 段差や凹凸、ポットホールなどによりタイヤ振動から車内に伝わる騒音がうるさく、衝撃的な音、振動による影響が大きい ・ 亀甲状ひび割れによる凹凸、荒い路面（細粒分が飛散、粗骨材が路面に露出、路面全体に粗骨材が露出しひび割れが発生）、不規則な凹凸路面等により、耳障りな音が発生 ・ 突発的な凹凸などにより、周囲にも騒音・振動が発生

ひび割れ損傷レベル小



ひび割れ損傷レベル中



ひび割れ損傷レベル大

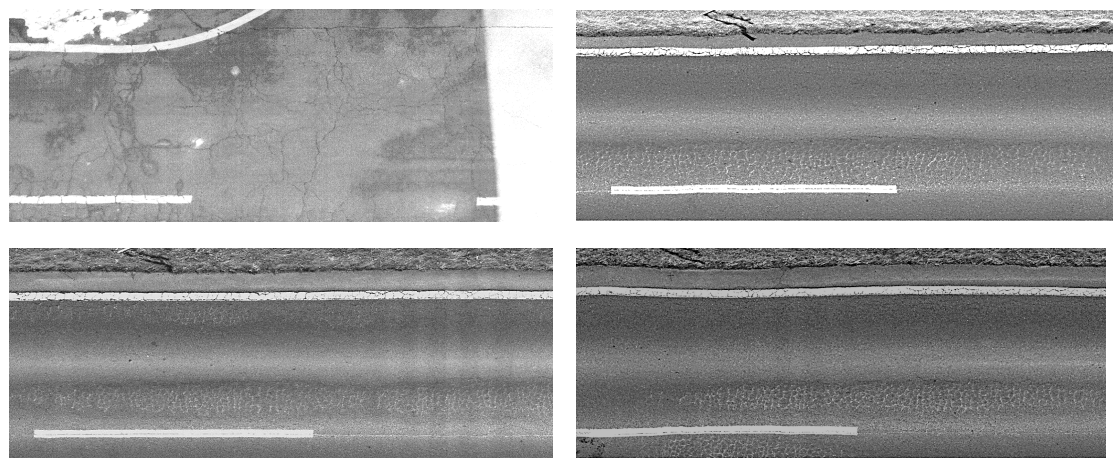
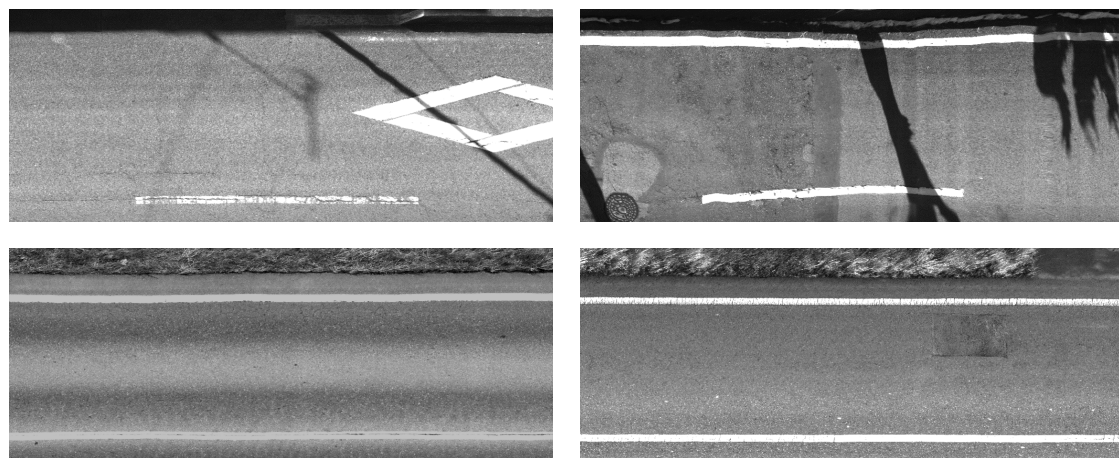
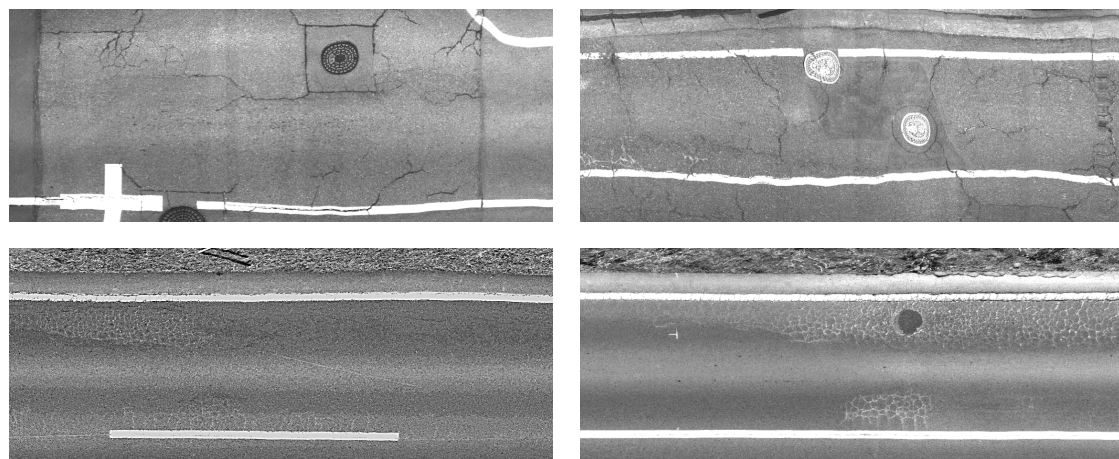


図-4.35 (a) *LDI* の評価の強度レベル中における路面状況

ひび割れ損傷レベル小



ひび割れ損傷レベル中



ひび割れ損傷レベル大

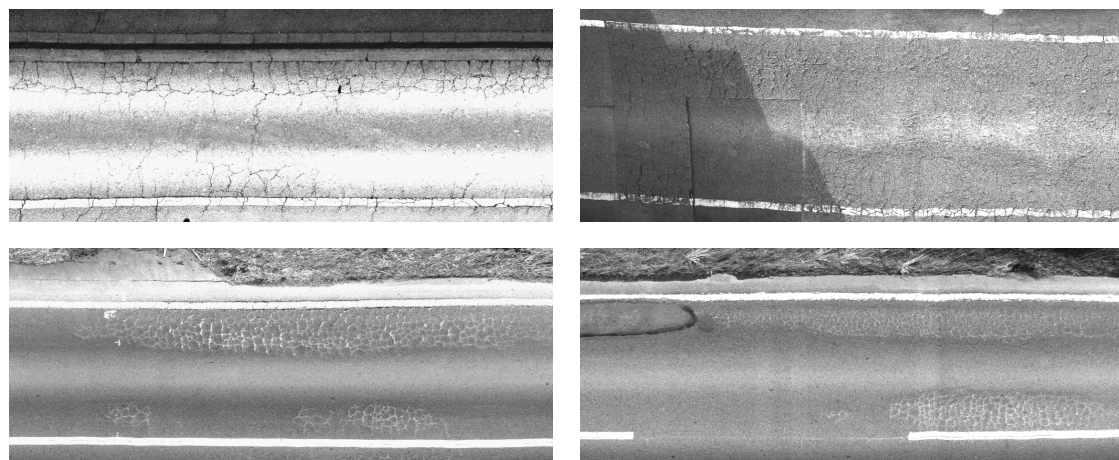


図-4.35 (b) *LDI* の評価の強度レベル大における路面状況

4.5. まとめ

第4章で得られた知見は以下のとおりとなる.

- (1) 拡張型タイヤ/路面騒音の周波数特性において, 基準路面の音圧レベル差を用いることにより, 可視化によるサウンドスペクトログラムによって視覚的に路面の損傷箇所等の抽出が可能となる. この音圧レベル差は音響特性で行われているパワーレベルでの計算する差ではなく, 減算として定義した. この手法を「改良型サウンドスペクトログラム」と定義した.
- (2) 改良型サウンドスペクトログラムで得られた情報から, 局部的に大きな音の変化と路面状態を照らし合わせた結果, 路面損傷の発生箇所には4つの周波数帯域で音が大きくなることが確認された. 周波数帯域毎に路面損傷との関係を調べたところ, 特に低周波数帯域 $L_1F=80\sim 160\text{Hz}$, $L_2F=160\sim 250\text{Hz}$ のオクターブバンドで, 路面損傷を位置づけられる.
- (3) 機械学習による分類手法を利用し, 周波数の帯域成分「 L_1F 」「 L_2F 」「 MF 」「 HF 」と路面損傷の識別判定について検討したところ, 帯域成分「 L_1F 」「 L_2F 」を用いることで路面の良否判定の正答率は約 80%と高い精度で予測することが可能である. また, 予測精度が低い路線は, 路面性状の3要素の評価はよい状態かつ路面の局部損傷の発生はないが, 路面損傷があると予測されたが, この路面の状態は表面が荒れ(マクロテクスチャの凹凸が大きいと推測される)が進行している状態であった. このような状態は, 生活道路などに見られるアスファルト舗装の経年劣化による路面の荒れた状態(アスファトルのモルタル分が飛散した状態)であり, 路面の劣化・老化状態の判断基準が定義することにより, 予測精度も向上できる.
- (4) 路面損傷の区分に応じた新たな評価指標を検討した際, ひび割れ率が音の識別判定に適していると判断し, LDI (局在損傷指標) を考案した. この LDI と路面状態と照らし合わせた結果, LDI の評価値は路面損傷, 特に路面に局在損傷の存在し, その大きさが大きくなればなるほど車内騒音・振動へ影響を及ぼし, ある一定値を超

えると沿道騒音・振動にも影響を及ぼす可能性が高いといえる。今回、これらの要素をもとに *LDI* 評価区分を作成した。

以上より、本章では実道による路面測定を行い、拡張型タイヤ/路面騒音と路面損傷との関連性を検討し、局在損傷箇所の抽出及び路面損傷を評価する *LDI* を考案した。

4.6. 参考文献

- [1] 建設省土木研究所建設省道路局国道第一課：舗装の維持修繕の計画に関する調査研究，第 34 回建設省技術研究報告， pp. 323-362， 1980.
- [2] （社）日本道路協会：道路維持修繕要綱， 丸善， p. 67， 1978.
- [3] 施設紹介：舗装路面騒音研究施設， 土木技術資料， Vol.45， No.7， 2003.
- [4] 久保和幸，渡邊一弘，井谷雅司：路面の特性と車両走行性の関係を考慮した路面設計手法に関する研究，10.5 効率的な舗装の維持修繕手法に関する研究，平成 22 年度 土木研究所成果報告書， pp.1-8， 2010.
- [5] （株）システム計画研究所：Python による機械学習入門，（株）オーム社， pp.41-69， 2016.
- [6] （株）システム計画研究所：Python による機械学習入門，（株）オーム社， pp.56-59， 2016.
- [7] 福島俊一，藤巻遼平，岡野原大輔，杉山将：ビッグデータ×機械学習の展望：最先端の技術的チャレンジと広がる応用，情報管理， Vol.60， No.8， pp.543-554， 2017.
- [8] 鈴木大慈，機械学習の概要，応用数理， Vol.28， No. 1， pp.32-37， 2018.
- [9] （社）日本道路協会：S029 舗装路面のひび割れ測定方法，舗装調査・試験法便覧〔第 1 分冊〕， 丸善， pp. [1]-157-166， 2007.
- [10] （株）ブリヂストン：自動車用タイヤの基礎と実際，東京電機大学出版局， pp.190-192， 2008.
- [11] 国土交通省道路局：舗装点検要領， 2016.10. <http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/pdf/yobo28_10.pdf> (Accessed 2018.4)
- [12] （公社）日本道路協会：舗装点検必携 平成 29 年版，丸善， 2017.

第5章 結論

道路資産管理は、財政的制約のなかで既存ストックを有効活用し、資産価値や道路利用者サービスの向上といった観点が重要視されている。また、道路路面を形成する舗装分野では、メンテナンスサイクルを確立させ、予防保全型管理によって効率的な維持管理を実施するため、2016年10月に国土交通省より「舗装点検要領」が策定され、点検方法として目視点検又は機器を用いた手法などが記載されている。そのため、地方自治体では点検費用に掛かる負担を軽減するため、新技術による点検の合理化及び簡便で安価な測定手法装置の開発・導入が急務となっている。また道路ユーザーの路面に対する要求性能は、安全・快適・円滑・環境という観点から、路面の乗り心地や騒音・振動に関連した舗装性能の評価が高まっている。騒音・振動に関係した路面では、局所的変状により道路ユーザーが不快感を覚えることが多く、その影響は沿道住民側に伝わることが多い。この場合、影響評価方法は沿道側での環境調査になるため、発生原因となる路面損傷の位置の特定は困難である。また、性能評価指標「騒音値」は、普通道路における新設の排水性舗装を対象としており、生活道路などの診断・評価には対応できていないのが実状である。

上記背景から、本研究は生活道路の路面の診断・点検について、路面損傷の簡易評価手法の確立を目的とし、性能評価指標に基づく拡張型タイヤ/路面騒音について以下の研究を行った。

第2章では、

- (1) 簡便で安価な測定装置の開発として、普通乗用車に各種測定装置を搭載した簡易型路面性状測定車の機能バージョンアップを図るため、現有の車載型プロファイロメータの装置を改良・解析手法を検討し、路面のすべりや転がり抵抗性と関係が高い、きめ深さ測定（MPD）システムを開発した。
- (2) タイヤ/路面騒音による性能指標では、「騒音値」以外に周波数特性に対応した評価を拡張し、環境温度及び速度の影響に応じた周波数特性の補正式を考案した。この周波数特性に応じた補正式で得られるタイヤ/路面騒音（拡張型タイヤ/路面騒音と定義した）は、基準速度 $\pm 10\text{km}$ であれば音圧レベル $\pm 1\text{dB}$ 以内を確保でき、繰り返し精度 $\pm 1\text{dB}$ 以内を確保できる。

- (3) 風雑音の減少や降雨によるマイクロホンの保護に用いられている屋外用の全天候型防風スクリーンの2種類について、拡張型タイヤ/路面騒音の影響度合いを確認した。この結果、スクリーンの形状の違いによる周波数特性の音圧レベル差は±1dB以内と両者に差はないといえる。

第3章では、

- (1) 路面損傷の識別判定を検討するにあたり、周囲環境音の影響が少ない構内舗装を活用し、拡張型タイヤ/路面騒音を利用する際の解析方法を検討した。検討した結果、識別判定に適している音響解析の方法は時定数10ms、サンプリング間隔10msである。この方法で解析すると、タイヤ/路面騒音のサウンドスペクトログラムにおいて路面に局在する損傷箇所は音圧レベルが5dB以上大きくなり、視覚的に判別可能になる。
- (2) 路面変状と拡張型タイヤ/路面騒音との関連性を検討した結果、路面の荒れが大きくなるほど（老化・劣化等に伴うMPDも大きくなる）、騒音値は大きくなり、特に局部的に発生している損傷（ポットホール、段差、亀甲状ひび割れ、パッチング等）は同じきめ深さに対して騒音値が大きくなる。また、局部損傷が存在する箇所の拡張型タイヤ/路面騒音は、サウンドスペクトログラムでもその特徴量を捉えることが可能である。また路線全体について、良好箇所で得られるサウンドスペクトログラムを基準値とした音圧レベル差を求めることにより、より路線に存在する局部損傷箇所が縦断的に描かれたサウンドスペクトログラムの中で強調され（音圧レベルの強度が高いともいう）、局部損傷を視覚的に判断できる。この考案した手法を「改良型サウンドスペクトログラム」とした。

第4章では、

- (1) 第3章の検討結果に基づき、拡張型タイヤ/路面騒音を用いた路面損傷の識別判定を実路へ適用するため、一般市道における路面性状及びタイヤ/騒音騒音を測定し、路面損傷の識別判定の適用性及び有効性を検証した。実路では舗装の種類が複雑かつ供用状態が異なるため、良好な路面として設定する基準路面が煩雑になる。そこで、第2章のキャリブレーションで使用した舗装路面施設の密

粒度舗装を基準路面とし、改良型サウンドスペクトログラムを算出した。また、拡張型タイヤ/路面騒音によるFLAT特性及びA特性を用いて路面性状及び供用性指数等との関係を調べたところ、拡張型タイヤ/路面騒音を使用する際、A特性よりもFLAT特性のほうが路面性状のひび割れ率との関連性は高く、特に路面3要素から算定されるMCIやPSIとの関係性は深いことがわかった。つまり、路面ひび割れは、路面凹凸によるタイヤ振動の影響を受け拡張型タイヤ/路面騒音の低周波成分の音圧レベルを増幅させ、FLAT特性の有用性が高いことが明らかになった（A特性は人の聴感に補正するため、聞こえにくい低周波成分を大きくカットしまうため、騒音値は低周波成分の影響は小さくなる）。

- (2) 決定木の分類手法を用いた機械学習（教師あり）を実施し、路面損傷の識別判定について検討した。目的変数は各路線について10mごとに目視判定を行なった因子「良好部」「損傷レベル小」「ひび割れ率20%以上」「局部損傷」「構造物付近」とし、説明変数には改良型サウンドスペクトログラムから抽出した4つの帯域成分「L₁F」「L₂F」「MF」「HF」と速度「V」を使用した。機械学習によって説明変数を増減法によって正答率を比較した結果、「L₁F」「L₂F」の正答率が71%と最も高い値であった。しかし、混合行列によって目的変数の有意性を確認したところ、「良好部」「局部損傷」の予測値が多く、他因子の予測精度は悪い結果であったため、目的変数「良好部」「局部損傷」と説明変数「L₁F」「L₂F」で予測モデル作成した。全ての路線を解析した結果、1路線を除き正答率は約80%と高い精度を得られた。なお、1路線の正答率が悪かった理由として、路面性状は良好な状態であったが、「L₁F」「L₂F」の値が高く、局部損傷が発生していると判断された。その路線は路面の荒さが大きい状態であったため、路面の老化・劣化状態を局部損傷とすることにより、正答率は80%以上になることがわかった。今後、路面の老化・劣化状態の定義を行うことにより、より路面の状態を把握できると考えられる。今回実施した、分類手法である決定木を用いることにより、路面損傷の良否の判定をタイヤ/路面騒音の低周波成分「L₁F」「L₂F」で表現することができ、改良型サウンドスペクトログラムによって視覚的に損傷箇所の識別判定を可能にした。
- (3) 改良型サウンドスペクトログラムの低周波成分「L₁F」「L₂F」を使用し、新たな

局在損傷指標（Localized Defects Index : *LDI* ）を開発した．回帰学習によるSVMを使用し，「*L₁F*」「*L₂F*」と*LDI*の有意性を調べた結果，「*L₁F*」「*L₂F*」を*LDI*として路面損傷度合いを表現できることを確認した．また，*LDI*の評価区分による強度レベルについて，路面状態と比較し騒音・振動の影響度をまとめた．

以上のことから，拡張型タイヤ/路面騒音による改良型サウンドスペクトログラムは，マッピングによる騒音強度の可視化により，視覚的に局部変状の抽出と路面騒音の影響要因が把握できた．また，拡張型タイヤ/路面騒音の低周波成分「*L₁F*」「*L₂F*」による路面損傷の良否判定，*LDI*を用いることにより，合理的な騒音対策を講じることが可能となり，本研究の成果は大いに役に立つものと期待される．

今後の課題と期待

本研究から拡張型タイヤ/路面騒音を提案し，基準路面との音圧レベル差を用いた改良型サウンドスペクトログラムは，マッピングによる騒音強度の可視化により，視覚的に局部変状の抽出と路面騒音の影響要因が把握できることから，合理的な騒音対策を講じることが可能となる．

また路面損傷の把握以外にも，音・振動に関わる内容として，車内振動に対する乗り心地評価や沿道環境への影響等の検討も課題として残っているため，更なる騒音・振動に関する検討が必要である．

本技術を活用することにより，路面の特定が困難な箇所でも路面騒音によって異常状況が認識できるため，今後の路面異常検知技術として道路の維持管理に反映できるといえる．

本研究の成果が，新たな路面評価技術の一つとして進展し，道路ユーザー側に沿った舗装性能評価法ができるよう期待したい．

謝 辞

本研究は、著者が北見工業大学院工学研究科後期博士課程生産基盤工学専攻在学中に、同大学工学部社会環境工学科 川村彰教授の指導に行ったものである。本研究の遂行、研究発表、論文の作成では多大なるご指導とご助言を賜り、心より深く感謝申し上げます。

本論文の審査ならびに多数の貴重なご教授とご指導いただきました、北見工業大学工学部 三上修一教授、高橋清教授、富山和也准教授、北海道大学大学院工学研究院 萩原亨教授に謹んで感謝の意を表します。

著者が勤務している鹿島道路株式会社では、学位取得の希望に対して推薦していただいた執行役員技術研究所長 東滋夫氏には研究環境を与えていただきましたこと、深く感謝の意を表します。本研究の遂行にあたり、技術研究所の副所長 坂本康文氏及び室長をはじめ所員の皆様に多大なご支援・ご協力をいただきました。特に、第二研究室の皆様には、日常の業務に加えて路面調査及び解析業務などの手伝いを引き受けていただき、心より感謝申し上げます。

構内舗装の路面調査に際しましては、国立研究開発法人土木研究所の共同研究の一環で実施し、ご指導・ご助言を頂いた国立研究開発法人土木研究所 渡邊一弘氏はじめ舗装チームの皆様に熱く御礼申し上げます。

一般市道の路面調査に際しては、道路管理者である宇都宮市建設部道路保全課、調布市都市整備部道路管理課の御担当者の皆様には、調査研究に関して理解を示して御協力をいただき、心より感謝申し上げます。

最後に、このように多くの皆様の御理解と御協力を得て、本論文をとりまとめができました。協力していただいた皆様に心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。

2018年9月

岡 部 俊 幸

学位論文の基礎となる公表論文リスト

- (1) 岡部俊幸, 大嶋智彦, 川村彰, 富山和也: タイヤ/路面騒音を活用した路面の局在損傷の評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学) 73 巻, 3 号, pp.I_107-I_114, (2017年公表)
- (2) TOSHIYUKI OKABE, AKIRA KAWAMURA, KAZUYA TOMIYAMA: CRACK IDENTIFICATION BY USE OF TIRE/ROAD NOISE, Proceeding of 8th Symposium on Pavement Surface Characteristics (2018年8月掲載決定)
- (3) 岡部俊幸, 大嶋智彦, 渡邊一弘, 川村彰: 路面特性の違いによるタイヤ/路面騒音の評価指標に関する検討, 第71回土木学会年次学術講演会講演概要集第V部門, pp.193-194 (2016年9月)
- (4) 岡部俊幸, 大嶋智彦, 川村彰, 富山和也: タイヤ/路面騒音の周波数特性における速度・温度補正に関する検討, 第72回土木学会年次学術講演会講演概要集第V部門, pp.131-132 (2017年9月)
- (5) 大嶋智彦, 岡部俊幸, 川村彰, 富山和也: 車載型プロフィロメータを用いた平均プロファイル深さの推定, 第72回土木学会年次学術講演会講演概要集第V部門, pp.135-136 (2017年9月)
- (6) 岡部俊幸, 大嶋智彦, 川村彰, 富山和也: タイヤ/路面騒音による路面の局在損傷の評価に関する一検討, 第32回日本道路会議論文集, 3127 (2017年10月)
- (7) 大嶋智彦, 岡部俊幸, 川村彰, 富山和也: 車載型プロフィロメータによる路面段差測定およびMPDの推定, 第32回日本道路会議論文集, 3032 (2017年10月)
- (8) 岡部俊幸, 川村彰, 富山和也: 路面損傷とタイヤ/路面騒音の関連性に関する研究, 第73回土木学会年次学術講演会講演概要集共通セッション, pp.71-72 (2018年8月)