冬タイヤ用音響同定システムの開発

Development of an Acoustic Identification System for Winter Tires

鎌倉 友男 Tomoo KAMAKURA 谷 寄 徹 也 Testuya TANIZAKI

上 田 浩 次 Koji UEDA

1. はじめに

Fundamentals Review (FR) 誌への執筆依頼を受けたとき、以前同誌に書いた「超指向性音響システム」に関する解説記事⁽¹⁾の続編を当初書くつもりであった。しかし、高音圧の超音波を低減する位相反転駆動方式の提案や、従来のスピーカと違った特異な音像定位に関する研究成果しかなく、これではとても解説記事にはならないと判断した。解説に限らず論文には、研究の背景から始めた首尾一貫のストーリーやそれなりのシナリオが必要であろう。幸いにも、FR 編集幹事さんからはこれこれについて書いてくれ、との執筆内容に関する要望があったわけではないので、この数年間、大学と企業間で共同で進めてきている、また近年のITSに多少とも関わりのある、表題の研究内容を書くことにした。フィールド実験の結果報告が中心であり、また理論的な根拠が少ないことから、本報告が果たして解説記事としてふさわしいかどうか疑問の残るところであるが、読者の皆さんにはこんな研究もあるんだな、というような雰囲気を読んで頂ければ幸いである。なお、本稿の内容は、著者の一人の谷寄徹也の学位論文⁽²⁾の一部及び学術論文^{(3),(4)}に詳細に書かれているので、興味のある方はそれらの文献を参照されたい。

2. 研究の背景

昨今、日本各地、いや世界各国で、夏季においてこれまでに経験したことのないようなゲリラ豪雨に、また冬季は記録的な大雪に見舞われることが頻繁に起きている。このような異常気象は、例えば農作物の収穫に多大に影響し、我々の日常生活にまで直結する大問題である。

ところで、近年のモータリゼーションの急速な発達とともに、

インフラとしての道路の管理や整備の必要性が一層高まっている。そのため、道路管理者は安全で確実な道路交通を確保するための様々な取り組みを行っている。道路の路面状況は言うまでもなく天候に左右され、特に冬期においては路面状況が車両走行に与える影響が大きく、したがって道路管理者はドライバへの路面情報提供、凍結防止剤の散布作業、除雪作業などの対応に努めている。しかし、積雪が原因と思われるスリップ事故は後を絶たず、最悪の場合は通行止めを誘発し、物流の停滞による経済活動への影響が大きい。そこでこの対策の一つとして、冬タイヤを装着していない車両の進入を規制する「冬用タイヤ規制」や「チェーン規制」を実施している。これらの規制は安全運転支援における道路管理上の重要な実施項目とされ、通行する車両1台1台に対し、スタッドレスタイヤやスノータイヤを装着しているかどうかを確認し、装着していない車両は排除するか、若しくはチェーンの装着を指示するものである。これにより、通行不能車両が排除され通行止めという最悪の事態は回避できるが、車両の一旦停止による渋滞の発生や渋滞末尾への追突事故が懸念される。更に、この規制に際して、タイヤの確認作業は悪天候の中で実施されることが多いことから、作業員の心身の負担とこれに起因した誤判断を招きやすい。そのため、冬季の車両規制作業の効率化と自動化が強く望まれている。

車両の走行によって発生するタイヤ騒音源について、古くから多くの研究が行われてきている⁽⁵⁾。また、その発生メカニズムのモデル構築と解明、コンピュータシミュレーションによるタイヤ道路騒音の軽減化、車内における騒音発生モデルの構築など、幅広い研究が進められている。更に、パターンマッチング技術によりタイヤトレッドパターンを識別する研究も行われているものの⁽⁶⁾、タイヤメーカーが過去に製造したタイヤとの類似性を確認するための手段が主目的である。現状としては、ニーズや喫緊性が少ないことがあっても、諸外国ではチェーン規制を目的としたタイヤ識別としての研究が見当たらない。一方、我が国においては、チェーン規制により発生する渋滞解消と経費削減を目的として、カメラで撮影されたタイヤのトレッドパターンから冬タイヤを識別する研究が進められた⁽⁷⁾。しかし、タイヤ表面の濡れや汚れによりトレッドパターンが正確に撮影できず、識別精度が低下するという実用面での課題が残っている。また、安全運転支援

鎌倉 友男 電気通信大学産学連携センター

E-mail kamakura@uec.ac.jp

谷 寄 徹 也 名古屋電機工業株式会社

E-mail tani@nagoya-denki.co.jp

上 田 浩 次 正員 大同大学情報学部情報システム学科

E-mail uedakoji@daido-it.ac.jp

Tomoo KAMAKURA, Non member (Center for Industrial and Governmental Relations, UEC Tokyo, Chofu-shi, 182-8585 Japan), Testuya TANIZAKI, Non-member (Nagoya Electric Works Co., Ltd., Ama-shi, 490-1294 Japan), and Koji UEDA, Member (Department of Information Systems, Daido University, Nagoya-shi, 457-8530 Japan).

電子情報通信学会 基礎・境界サイエティ

Fundamentals Review Vol.9 No.2 pp.84-91 2015年10月

©電子情報通信学会 2015

における車両の状態監視の視点から、タイヤから生じる音を用いて夏タイヤと冬タイヤの種類を識別する研究も行われているが、エンジン音を含まない純粋なタイヤ音による評価段階にある⁽⁸⁾。ほかにも走行音に着目した多くの研究成果はあるものの、道路管理上のチェーン規制作業を対象としたタイヤ識別に関する研究は、これまでに行われていない。

以上の状況を鑑み、車両走行に伴って路面とタイヤとの接触時に発生するタイヤ道路騒音に着目し、この音の解析からタイヤ識別を行う簡便なアプローチを行うこととした。以下、まず、タイヤの形状と道路騒音の中に含まれるタイヤ特徴音を整理することで、タイヤ識別の原理と着目点を紹介する。次に、車両が走行する道路舗装、特に路面性状に視点を置き、タイヤ識別に適した路面の提案とその判断指標を述べる。そして、路面の乾燥及び湿潤状態に対する解析手法についても言及する。更に、高速道路を利用する一般車両を対象とした大規模なフィールド検証の結果についても併せて述べる。最後に走行音の問題点を整理し、次のステップとして、路面振動に着目した識別法について報告する。

3. 車両走行音の着目点

3.1 タイヤ形状とタイヤ特徴音

図1に示すように、夏タイヤは直進安定性と排水性を重視するため、一般的に縦溝を主体とした「リブ構造」になっている。それに対し、冬タイヤは冰雪路での制動力と駆動力を得るために主に「ブロック構造」となっている⁽⁹⁾。この点が両者の最大の違いであり、チェーン規制においては主にこのトレッド部の構造の違いを目視で確認している。

一方、車両の走行によって発生する走行音は、機械音や風切音などの「車両騒音」と、タイヤと路面の接触に伴う相互作用によって発生する「タイヤ道路騒音」に大別される。そして、定速度 50 km/h の乗用車において、タイヤ道路騒音が全体の 50～85 % を占めると言われている⁽¹⁰⁾。特に、昨今の EV や HV において、低速度でもタイヤ道路騒音が走行音の主要因であることは想像に難くない。

タイヤ道路騒音の発生について、幾つかのメカニズムが報告されている⁽¹⁰⁾。主なものとして、まずは、タイヤが路面に

接触した際に、トレッド部の溝が接触部分に踏み込みそして離れることで空気の圧縮・放出が起これ、この作用によって発生する音が挙げられる。これは、リブ構造の縦溝が作る気柱内の定常波がちょうど両端開放の音響管と同じような作用をして一定の周波数を作り出す、いわゆる気柱共鳴音に相当する。タイヤ道路騒音では「パターン主溝共鳴音」と呼ばれている。このパターン主溝共鳴音の周波数 f は次式で表される。

$$f = \frac{c}{2(L + 2\Delta L)} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

ここで、 c (m/s) は音速、 L (m) は接触部分の主溝の長さ、 ΔL (m) は開口端補正值であり、 $\Delta L \approx 0.6r$ (r (m) は主溝を近似的に円管と見立てたときの管の半径) の関係がある。普通 L は 10 数 cm、 ΔL は数 mm であるので、 ΔL は無視できる。したがって、パターン主溝共鳴音の周波数は最終的には接触部分の溝の長さ L のみに依存する。そして、乗用車においては走行速度に関係なく周波数はほぼ一定であり、1 kHz 近傍を中心とした音となる。

次に、「パターン加振音」が挙げられる。タイヤのブロック構造、つまりトレッドパターンの不連続部分が路面に接触する際に衝突し、その衝突力によってタイヤが振動して音を放出するものである。音の放射はタイヤのサイドウォールやトレッド表面が振動板となり、ちょうどスピーカの役割をする。いま、タイヤ半径を R (m)、車の走行速度を V (km/h) とする。このとき、タイヤは 1 時間当たり $V \times 10^3 / 2\pi R$ 回転する。タイヤの回転方向 1 周当たりのブロック数を n とすると、1 時間で $(nV/2\pi R) \times 10^3$ 回、単位時間 (s) に直すと $nV/(3.6 \times 2\pi R)$ 回だけ路面を打撃することになる。したがって、パターン加振音の周波数 f は

$$f = \frac{n}{3.6 \times 2\pi R} V \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

与えられることになる。ブロックが周方向に等間隔のピッチで配置されていると、式(2)に従って耳障りな単一周波数が発生するので、実際のタイヤでは幾つかの異なるピッチでブロックを配置している。それでも、式(2)で計算される周波数を中心にある帯域幅を持ったピーク周波数が発生する。そして、この加振音の周波数 f は V と n に比例して変化することが特徴となる。その他のタイヤ騒音の発生要因として、タイヤが路面と接触する際に、路面の凹凸が入力となりタイヤが加振される音、路面とトレッドとの間の滑りを入力として発生する接触摩擦振動音、路面の凹部がエアポンピング作用を受けて発生する音などがある。

以上のように、車両走行により発生する音はタイヤ道路騒音が主体であり、タイヤのトレッド形状によって発生する音が特徴的な周波数を持つ。また、図1から夏タイヤはリブ構造の縦溝が主体であるため、パターン主溝共鳴音が特徴音として発生すると予想できる。これに対し、冬タイヤは主溝共鳴音とともにブロック構造の不連続部分が路面に衝突することによって発生するパターン加振音が主要な特徴音になると

図1 代表的な夏タイヤと冬タイヤ

予想できる。

3.2 タイヤ特徴音の解析

ここでは、タイヤ形状の相違がタイヤ道路騒音の特徴音として現われることを実際の走行環境下で検証する。北陸自動車道神田PA（上り）の入口部において、道路端に市販のマイクロホンを設置し、夏タイヤと冬タイヤを装着した2台のテスト用小型車を、速度およそ40、50、60 km/hで定速走行させてタイヤ道路騒音を収集した。走行道路の舗装は一般的なアスファルト（より正確には密粒舗装）で、路面は乾燥状態であった。使用した冬タイヤの半径は $R = 0.31$ m、ブロック数は $n = 56$ 個であり、この冬タイヤのパラメータを式(2)に代入した結果、「パターン加振音」の周波数は $V = 40$ km/hで319 Hz、50 km/hで399 Hz、そして60 km/hで479 Hzと予想される。

走行音の解析については、録音された時間波形をフーリエ変換により周波数領域に変換し、そのパワースペクトルを評価する。図2に車速およそ50 km/hにおける走行音の代表的な時間波形を示す。これより、車両の通過が確実に判断できる区間は1秒程度であり、識別対象とする処理区間については、走行速度にも依存するが、マイクロホン直近を通過する1秒間が妥当であると判断できる。

ところで、車種やタイヤの種類によってはタイヤ道路騒音の大きさに違いが生じる。その違いがタイヤ識別に与える影響を軽減するために、フーリエ変換によって得たパワースペクトル $P(f)$ を周波数上の注目周波数区間 $[f_l, f_h]$ において積分した P_l を準備し、この P_l によって各周波数成分 $P(f)$ を正規化した $\bar{P}(f) = P(f) / P_l$ を導入する。今回は、注目周波数として $f_l = 100$ Hz、 $f_h = 22.05$ kHzとした。また、スペクトルの細かな変動を除くために、50 Hz間隔の区間内平均を施した。

以上の方法で、夏タイヤと冬タイヤ道路騒音に対して周波数解析を行った。この結果を図3に示す。この図中の横軸は周波数で対数表示しており、縦軸は正規化されたパワースペクトルを示す。この処理結果から、夏タイヤは走行速度に関係なく1 kHz近辺に共通のピーク周波数が存在するので、このピーク周波数が「パターン主溝共鳴音」と判断できる。一方、冬タイヤはこの共鳴音以外に、それよりも低い周波数帯域で速度に依存するピーク周波数の存在が確認できる。また、そのピーク周波数は、例えば40 km/hの走行速度では300 Hzであって、上記の予想値の319 Hzとほぼ一致し、このピーク成

図2 マイクロホンで収集した代表的な走行音の時間波形 夏タイヤ、走行速度およそ50 km/h。

図3 走行速度を変えたときの走行音のパワースペクトル (a)は夏タイヤ、(b)は冬タイヤ。

分は「パターン加振音」によるもの判断できる。以上の結果より、車両の走行によるタイヤ道路騒音には、夏タイヤと冬タイヤのトレッド形状に基づく特徴的な音が発生することが確認できた。すなわち、走行音の周波数解析の結果から、その特徴周波数の有無を評価することによって、特に冬タイヤのパターン加振音の周波数は走行速度 V と比例関係にあることに着目すれば、装着しているタイヤが冬タイヤであると同定できる指針を得た。

3.3 実用化への課題と対策

タイヤ識別に関する基本的アイデアは上記のとおりであるが、この手法を実際の識別システムとして構築し、そして実用化を進めるには、以下に示す少なくとも三つの疑問(i)～(iii)が生じるであろう。

まず、(i)「路面舗装の種類や仕方に関係なく、パターン加振音が明白にスペクトル上に表れるであろうか」である。

路面舗装の種類は、一般的なアスファルト舗装（密粒舗装）のほかに、視覚的な観点から交通事故防止を目的としたカラー舗装や道路の排水性を重視した高機能舗装など、様々な種類がある。実際、車両の走行によるタイヤ特徴音は、このような舗装種類の違いはもとより、同種の舗装であっても舗装の仕方によって特徴音が抽出されない場合がある。予備実験によれば、路面舗装は同じ密粒舗装であり、またデータ収集に使用した機材、冬タイヤを装着したテスト車は同じである、つまり計測条件が全て同じであっても冬タイヤの特徴音であるパターン加振音が明確に現われないことがあった。そしてこの場合、パターン加振音の有無は舗装状態、特に路面性状の差異であり、同じ密粒舗装であっても表面の凹凸の相

図4 加振せん鋭度とMPDとの関係

違がその要因であることが分かった。これは、舗装材の粒度分布(粗骨材と細骨材の配合比)の違いや施工後の経年変化によって、表面の凹凸状態に差が現われたものと予測される。結局、路面の凹凸が入力となってタイヤが加振され、その際に発生する音が顕著となり、パターン加振音が相対的に小さくなったものと考えられる。以上のことから、舗装の表面性状によっては、冬タイヤの特徴音である「パターン加振音」がその他の音に埋もれ、タイヤ識別に影響を与えると懸念される。そこで、路面性状を「路面の粗さ」として数値化できるCTメータ(Circular texture meter)を用いて、路面の粗さとタイヤ特徴音の関係を整理し、タイヤ識別に適した路面について検討した。

CTメータは路面の粗さを測定する場合に標準的に採用されている測定器である⁽¹¹⁾。これを用いることで、表面凹凸の程度を平均的な深さMPD(Mean profile depth)として測定できる。このCTメータを用いて、密粒舗装(Dense graded asphalt concrete)、カラー舗装(Colored pavement)、半たわみ舗装(Semi-exible pavement)、コンクリート舗装(Concrete pavement)、細粒舗装(Fine graded asphalt concrete)の5種類の道路舗装について、路面の粗さをMPDとして測定するとともに車両の走行音も収集し、路面の粗さと冬タイヤの特徴音との関係を調査した。ここで、できる限り路面の粗さのみの相異によるタイヤ音を検出することとし、収集に使用した機材やテスト車は同じものとした。そして、冬タイヤの特徴音を定量化するため、そのピークの大きさと鋭さの程度を評価する「加振せん鋭度」を定義した。この加振せん鋭度とは、通常のせん鋭度 Q 値と若干定義が異なり、パターン加振音のスペクトルピークの大きさと周波数幅の関係を数値化したもので、そのピーク値をピークの半値幅で除算した値である。したがって、パターン加振音のピークが大きいほど、若しくはピークの幅が小さいほど、パターン加振音は鋭いピークを持つことになる。

路面の粗さと加振せん鋭度の関係を算出し、その結果を図4に示す。明らかに路面の粗さと冬タイヤの加振せん鋭度の関係は負の相関関係にあり、MPDが小さい、すなわち表面凹凸が小さいほど、加振せん鋭度が大きくなっている。つまり、路面の粗さが小さいほど、冬タイヤの特徴音を最大限に引き出せることを示している。しかし、余りにも小さなMPD値

図5 19種類の小型車用冬タイヤに対するブロック数 n とタイヤ径 R の比

ではスリップが起りやすく、安全走行の観点から好ましくない。そこで、岐阜各務原ICの実験ヤードの路面をその安全性が保証できるMPD 0.34 mmの細粒舗装に施工した。そして、以降の予備実験はその舗装を利用して行った。

次の疑問は、(ii)「タイヤには多くの種類があり、寸法やブロック数はまちまちである。このような場合でも、加振周波数は車種に関係なく走行速度のみで規定できるか」である。

冬タイヤの特徴音はパターン加振音の存在であり、そのピーク周波数 f が走行速度 V に依存する点にある。冬タイヤの自動識別についてはこの点に注目し、特徴音が速度に依存した周波数帯にピークがあり、そのピーク周波数成分の加振せん鋭度が大きい場合は冬タイヤ、これ以外を夏タイヤと識別できる指針を得た。しかしながら、冬タイヤのパターン加振音の周波数は、式(2)のように速度以外にタイヤ半径 R とブロック数 n にも依存する。一般に R が大きければ n も大きくなり、その比の n/R は一定になると思われるが、果たしてそうであろうか。この疑問に対処するために、これまでに19種類のタイヤを調査して $n/(3.6 \times 2\pi R)$ の値を求めた。結果を図5に示す。この結果からその比の値は8~10の範囲に収まることが分かった。そこで、式(2)は

$$f = (8 \sim 10)V \quad (3)$$

に置き換えることができ、以降のフィールド実験ではこの範囲を「パターン加振音」の周波数許容値として扱うことにする。

最後の疑問は、(iii)「路面状況は気象に大きく依存する。例えば、路面が濡れているような場合も加振音がクリアに取り出せるであろうか」である。

実際のチェーン規制においては雪が降るような悪天候が多

図6 路面を湿潤状態にした場合

図7 乾燥路面及び湿潤路面での走行音 冬タイヤを装着した50 km/hの車両の場合。

いことから、路面は湿潤やシャーベット若しくは積雪の状態になる。そのため、このような条件下での評価が必要となるが、シャーベットや積雪路面については除雪、凍結抑制剤、ロードヒーティングなどのインフラ側からのコントロールが期待できる。そこで、最も条件としてあり得る湿潤路面について検証を行った。

まず、乾燥道路に冬タイヤ装着のテスト車をおよそ50 km/hで走行させた。次に、その路面を図6のように水で濡らして湿潤状態にし、同一のテスト車を同じ速度で走行させた。ここでは、路面状態によってパワースペクトル分布がどのような違いとなって現われるかを確認するため、正規化処理は行っていない。結果を図7に示す。明らかに、路面状態が乾燥、湿潤に関係なく冬タイヤ特有のパターン加振音が周波数400 Hz付近にはほぼ同じ強度で表れている。一方、1 kHz以上の高い周波数で両者に大きな違いが見られる。高い周波数成分の増加は雨天のとき聴覚上経験するが、これは路面上の水をタイヤが踏み込むそして跳ね上げる、若しくは水滴がタイヤハウスに当たることから生じたものと考えられる。このことから、車種による強度の違いを軽減する正規化周波数範囲(f_i ; f_n)を広くすると、湿潤路面の水成分が強調されることにより、パターン加振音が十分に抽出されなくなる。一方、速度の上限を100 km/hとしたとしても、対象とするパターン加振音は1 kHz程度までであり、この正規化範囲の上限を $f_n = 1.4$ kHz程度とすれば、湿潤路面に依存しない結果が得られることは容易に推測できる。

3.4 識別システムの構築と適用結果

これまでの検討では限られたテスト車による評価にとどまっていた。そこで、本方式の有効性をより多くの車両で確認するため、東海北陸自動車道長良川SAに流入する一般の車両を対象として、識別精度の検証を行った。一般的に大型

表1 測定した4日間をまとめた検証結果 測定は9:00～17:00において実施。

	Number of samples	Number of correct answers	Discrimination rate [%]
Summer tire	1050	773	74
Winter tire	1136	876	77
Total	2186	1649	75

表2 各測定日ごとの検証結果 測定は9:00～17:00において実施。

Date	Road surface condition	Number of samples	Number of correct answers	Discrimination [%]
Dec. 6, 2011	Wet	486	353	73
Dec. 20, 2011	Dry	404	300	74
Mar. 22, 2012	Dry	654	520	80
Apr. 12, 2012	Dry	642	476	74

車は冬タイヤの装着率が比較的高いことから、対象とした車両は小型車のみとした。高速道路からSAへの入口部に識別用の試作装置を設置した。この装置は、市販のマイクロホンと、その信号から加振せん鋭度を検出したのちに夏冬タイヤを瞬時に見分けるプログラムソフトから構成されている。また、対象車両の通過を検出し、また同時にその車速を測定するために車の進行方向5.5 mの間隔で光センサを設置した。なお、SA入口部の道路は細粒舗装に施工している。

一般車両が装着しているタイヤの種類については、SA内に駐車時に目視で確認を行った。そして、この目視で得たタイヤ情報と装置で得た結果を比較することで識別精度を算出した。検証期間は、夏タイヤと冬タイヤの装着変更を行う冬期シーズン前後の4日間(2011年12月6日、12月20日、2012年3月22日、4月12日)で、実施時間帯は9:00～17:00とした。表1は、4日間の対象走行車全てに対し、夏タイヤは夏タイヤとして、また冬タイヤを冬タイヤとして判定した総和結果である。このフィールド実験では、SAを利用する一般の小型車を対象にしていることから、様々な車種、タイヤサイズ、タイヤ形状の車両が対象となっている。また、車両のエンジン音や周囲の環境音を含んだ計測になっている。しかし、このような条件下においても、識別率75%の結果を得ており、提案した路面舗装の効果と車両走行音によるタイヤ識別の妥当性が示せたと言える。

測定した4日間の天候は晴れ3回、そして雨1回で路面が湿潤状態が含まれている。そこで、各日ごとに精度を算出した結果を表2に示す。本識別方式では正規化の周波数範囲の上限を設けていることから、路面上の水分の影響を受けることなく、湿潤路面でも乾燥路面と同等な識別率という貴重なデータが得られた。

4. 路面振動に着目した識別

4.1 タイヤ道路騒音による識別法の課題

車両が自ら発する走行音をマイクロホンで収集し、その音信号を周波数解析するという簡易なパッシブ識別装置を前章で紹介した。そして、識別率およそ75%で夏タイヤと冬タイヤを区別できた。残りの25%の誤判定をできる限り少なくして識別率を向上するためには、以下の三つの課題をクリアする必要がある。

第1の課題は、(i)「対象車両以外の走行音が外部雑音となり、識別率に影響している」である。

大方のチェーン規制は高速道路に隣接する専用エリア、イ

ンターチェンジ入口付近、休憩施設内で実施される。これらの計測領域に進入してくる車両を停止させることなくタイヤ識別を行うことが本研究の目的である。そして、縦列走行時における対象車両の前後車両及び本線を併走する車両が存在するような状況においても、対象車両のみに対してタイヤ識別を行わなければならない。しかし現実には、対象車両からの走行音と、それ以外の車両からの走行音や様々な騒音が時間的に重なることがある。この場合、パターン加振音がそれらの雑音の中に埋もれ、その存在を明確に抽出することができない。以上のように、車両走行音を利用したタイヤ識別では、周辺車両の走行音などによる影響を直に受けることになる。

次の課題は、(ii)「低速走行において走行音の音圧が全体に小さく、十分なSN比を持ったパターン加振音が拾えない」である。

ふつう、音波は物体の振動によって発生し、そのときの音圧は振動物体の寸法が波長に比べて十分小さいときその物体の体積加速度に比例する。また、走行速度が遅くなればブロックが路面をたたく速度が低下することから、発生する音圧は走行速度の二乗にほぼ比例して小さくなるであろう。すなわち、走行速度が40 km/hから20 km/hに遅くなると、パターン加振音の大きさは12 dB低下すると予想される⁽¹²⁾。このように低速走行の場合、時間波形上で車両の通過を明確に判断することは難しくなり、その周波数解析結果にパターン加振音のピークが抽出されない状況になる。よって、走行音を利用したタイヤ判別では、低速走行する車両への適用が困難になるという問題である。

最後の課題は、(iii)「例えば、強風時にはマイクロホンに風切音が発生し、この音が車両走行音と重なり合って識別率の低下を招いている」である。

実際のチェーン規制は、降雪、降雨、強風などの悪天候の中で行われることが多い。例えば、強風時にはマイクロホンに風切音が発生し、これらの音が車両走行音に重畳する。また、降雨においてはマイクロホンに雨滴が当たることで雑音が発生する。このような気象要因による雑音の存在はタイヤ識別の障害要因になり、これが三つ目の課題である。

4.2 路面振動の利用

冬タイヤ特有のパターン加振音は、トレッドパターンの各ブロックが路面に衝突し、その衝突力によってタイヤが振動することで放射されるものである。この原理からすると、このタイヤによる振動は空気中のみならず道路内を振動として伝搬すると推測できる。よって、道路の振動としてパターン加振音の特徴を捉えることができれば、上記の三つの課題は解決できそうである。すなわち、周辺の車両走行音の影響を受けにくい。また、振動センサをタイヤの走行地点に近づければSN比が向上するし、センサとして一般的な加速度型にすれば低い走行速度での感度低下は回避できる。更に、そのセンサを埋設することを前提とすれば、風や雨などの気象要

図8 冬タイヤを装着したおよそ50 km/hの車両の走行音(a)及び路面振動(b)の代表的な時間信号

因による影響は軽減されるので、識別性能の向上と低速走行車両への対応が期待できる。

振動信号を捉えるセンサは、道路への埋設を考慮すると外形寸法はできる限り小さい方が望ましい。また、冬タイヤのパターン加振音の周波数は、速度100 km/hの高速走行においても1 kHz程度までの帯域で十分である。そこで、外形10 mmのECM加速度型振動ピックアップを利用し、路面より深さ40 mmの位置に、路面に対して垂直方向の振動が得られるように埋設した。そして、冬タイヤを装着したテスト車を定速走行させ、振動データの収集を行うと同時にマイクロホンによる走行音も併せて収集した。なお、車両の右側のタイヤと路面との接触位置が振動ピックアップから0.5 mほどになるように、車両を走行させた。

図8は、マイクロホンによる走行音(a)と振動ピックアップによる路面振動(b)の時間波形を示す。このように、走行音は車両がマイクロホンに近づくに従って振幅が大きくなり、車両の通過による信号波形のエンベロープは単峰型として計測される。一方、路面振動ではピックアップとタイヤの走行位置とが近いこともあって双峰型となっている。この二つの山の時間間隔は、対象車両のホイールベースに相当することが確認できており、それぞれ前輪と後輪の通過を示している。つまり、前輪と後輪がそれぞれ個別の信号成分として計測できることから、振動ピックアップの感度範囲(距離)がホイールベース以下であることを示している。よって、路面振動においては、本線や対象車両前後を走行する車両の影響を受けにくいことになる。

ところで、夏タイヤの特徴音であるパターン主溝共鳴音は、トレッド部の溝が空気を圧縮/放出することから、この成分が路面振動として伝搬されることは少ないと予想できる。一方、冬タイヤはブロック構造であるため、ブロックピッチで路面を振動させる。このような特徴の違いを計測に利用できれば、夏冬タイヤの識別が向上すると考えられる。以上の検

図9 パターン加振音の周波数の走行速度依存性 (a)は走行音, (b)は路面振動.

討を基に、三つの異なる車速に対して行った、走行音と路面振動の周波数解析結果を図9に示す。この結果から、両信号共冬タイヤのパターン加振の存在とその速度依存性を確認することができる。特に、走行音に比べ路面振動の加振形状は非常に鋭く、その存在が明白である。これは、走行音の場合、他車両の走行音はもとより自車の騒音の影響を受けるのに対し、振動を利用した場合、この影響が軽減されることによりSN比が高くなったものと考えられる。

4.3 検証結果

路面振動に着目した計測は、走行音を利用した場合よりも優位性があることが確認できた。そこで、東海北陸自動車道にある白鳥チェーンベースにてその優位性の検証を行った。冬期になるとこの領域でチェーン規制が行われ、本線を走行している全車両をこの領域に誘導し、タイヤの目視確認が行われる。このチェーンベースの路面に振動ピックアップを埋設すると同時にマイクロホンも併設し、両方式によるタイヤ識別に対する結果比較を行った。対象車両は夏タイヤ装着車両5台、冬タイヤ装着車両6台のテスト車を準備し、速度20, 30, 40, 50, 60 km/hの定速走行を行った。夏冬タイヤの識別率を算出し、結果を表3にまとめる。

まず、20, 30 km/hの低速度では、走行音を利用した場合の

表3 識別率の検証結果. 数値は[%]

	Low speed (20, 30 km/h)	Moderate speed (40, 50, 60 km/h)	Total
Sound	55	82	71
Vibration	77	88	84

識別率が55%と低いのにに対し、路面振動を利用した場合は77%となり、良好な結果が得られている。これは、先に述べたように、振動ピックアップの埋設によりSN比が向上した効果と思われる。次に、40, 50, 60 km/hの中間速度であるが、走行音方式で82%, 振動で88%と両手法にそれほど大きな差が現れていない。これは、本データが本線を走行する車両が存在しない状態で収集され、走行音解析において対象以外の車両の影響を受けていないことから比較的高い識別率が得られたためと思われる。以上の結果から、路面の振動成分に着目すれば、走行音で課題とされる周辺車両、低速車両、気象要因の影響を回避でき、安定した識別率が得られることが確認できた。

4.4 課題と今後の取組み

今回の取組みでは、埋設した振動ピックアップと走行車両のタイヤとの距離は0.5 mの位置を目標とした。補助実験によれば、その距離が1.5 m以上離れると市販ピックアップでは振動信号が小さくてSN比がほぼ0 dBになることが分かっている。すなわち、路面振動の距離減衰は走行音と比べて格段に大きく、また路面上の走行位置を0.5 mというように固定することは現実的でなく、ピックアップの設置位置に対する自由度が少ない。この点、走行音を利用した識別法と比較して欠点と言える。しかし、20 km/hという低速走行でも80%を越す識別率が得られており、現在では路面振動に着目した識別方法を冬期に採用している。

ところで、車の走行に伴う路面振動は必ずしも路面に対して垂直成分のみではない。縦波や横波のバルク波以外に、道路の舗装構造からレイリー波やラブ波の表面波が伝搬モードとして存在し得る。振動の発生機構は異なるものの、円形フーチング基礎(上下動加振)から発生する波の地中変位分布図によれば、波のエネルギーの2/3はレイリー波として伝搬すると言われている⁽¹³⁾。また、夏タイヤに比べて冬タイヤの方がゴム質が一般的に柔らかいことから、路面に対して水平方向の振動成分に何らかのタイヤ情報が含まれることも予想される。現在は三軸の振動ピックアップを用いて、路面の垂直方向及び水平方向成分も測定している。そして、路面振動には水平成分も明らかに存在すること、しかも垂直成分に比べて高SN比でパターン加振音の信号が取り出せることも分かっている⁽¹⁴⁾。なお、空気と大地との音波を介してのカップリング現象が古くから知られており⁽¹⁵⁾、路面振動ではなく走行音をピックアップが検出している可能性が否定できない。今後は、より高感度な振動ピックアップの開発を期待しつつ、多くの伝搬振動モードのうち夏冬タイヤ識別に最も適する振動成分の抽出や伝搬経路のモデリングを通して、更なる精度向上を目指す予定である。

5. おわりに

本報告で提案した識別・同定手法は、車両の安全走行を配

慮した上での路面加工が若干必要になるものの、広大な測定領域(スペース)は不要であり、車両が自ら放出する音や振動を利用するパッシブ測定に特長がある。何よりも、マイクロホンや振動ピックアップという低コストのセンサで装置が構築できる点は魅力である。ただ、このような研究課題は、夏タイヤを冬タイヤと誤判定することを極力避けることが重要な課題であり、いわゆるフェイルセーフの立場をとる必要がある。また、小型車のみならず大型車も利用する過酷な道路環境や悪天候でも正常に動作するロバストなシステムが求められる。

最後に、本研究を遂行するに当たり、現状の問題・課題の提供や実験サイトの借用に関して、中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株)の宇佐見純二さん、戎家隆さん、また実験における共同実施には電気通信大学の野村英之さん、名古屋電機工業の中村香織さんにお世話になった。更に、本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(C)26350459(研究代表者:上田浩次)、及び文部科学省地域イノベーション戦略支援プログラム「首都圏西部スマートQOL技術開発地域」(調整機関:首都圏産業活性化協会)の援助を受けて行った。ここで、関係者各位に感謝したい。

文 献

- (1) 鎌倉友男, 酒井新一, “超指向性音響システムの開発—多方面からの検討—,” IEICE Fundamentals Review, vol.1, no.3, pp.37-43, Jan. 2007.
- (2) 谷寄徹也, “道路管理の効率化を目指したセンシング技術の実用化に関する研究,” 電気通信大学学位論文, March 2014.
- (3) 谷寄徹也, 上田浩次, 村部敏彦, 野村英之, 鎌倉友男, “車両走行音を用いた夏冬タイヤの判別,” 電学論, no.133, pp. 558-565, 2013.
- (4) T. Tanizaki, K. Ueda, T. Murabe, H. Nomura, and T. Kamakura, “Identification of winter tires using vibration signals generated on the road surface,” Appli. Acoustics, no.83, pp.116-122, 2014.
- (5) U. Sandberg and J. A. Ejsmont, Tyre/Road Noise Reference book (IN-FOMEX, Poland, 2002).
- (6) D. Colbry, D. Cherba, and J. Luchini, “Pattern recognition for classification and matching of car tires,” Tire Science and Technology, TSTCA, vol.33, no.1, pp. 2-17, 2005.
- (7) 齋藤辰哉, 根本 昇, “夏・冬タイヤ自動判別装置の研究開発,” 日本道路公団試験研究所論文集, pp. 41-42, 2001.
- (8) K. Seki, S. Shin, and T. Tabaru, “Discrimination of normal and studless tyres by wavelet sound analysis,” SICE Annual Conference in pp. 2312-2315, Sapporo, 2004.
- (9) 自動車用タイヤの基礎と実際, プリヂストン(編), 東京電機大学出版局, 東京, 2010, 第2章.
- (10) 自動車用タイヤの基礎と実際, プリヂストン(編), 東京電機大学出版局, 東京, 2010, 第4章.
- (11) 石田 樹, 田高 淳, “国際摩擦指標 (IFI) による舗装路面のテクスチャとすべり摩擦の評価,” 寒地土木研究所月報, no.640, pp. 36-39, 2006.
- (12) 自動車用タイヤの基礎と実際, プリヂストン(編), 東京電機大学出版局, 東京, 2010, 図4-5-5において, 速度50 km/hの音圧レベルは速度110 km/hに比べて全体的に10~15 dBほど低い.
- (13) F. E. リチャード, Jr 他, 岩崎敏男他(訳), 土と基礎の振動, p. 95, 鹿島出版会, 東京, 1986.
- (14) 中村香織, 谷寄徹也, 上田浩次, 戎家 隆, 野村英之, 鎌倉友男, “3軸振動成分に着目した夏・冬タイヤ判別方法の一考察,” 電気学会産業応用部門ITS研究会資料, ITS-15-019, 2015.
- (15) J. M. Sabatier, H. E. Bass, and L. N. Bolen, “Acoustically induced seismic waves,” J. Acoust. Soc. Am., no.80, pp. 646-649, 1986.

鎌倉友男

昭51名大大学院博士了。昭60電通大助教授, 平9同大学教授。平26定年退職, 同年電通大産学官連携センター特任教授。電通大名誉教授。音響エレクトロニクス, 超音波計測, 非線形音響, 音環境改善等の研究に従事。工博。第43, 47回日本音響学会佐藤論文賞, 平15海洋音響学会論文賞, 平26日本音響学会功績賞。「電気・電子系の応用数学」(共著), 「非線形音響学の基礎」(以上, 愛智出版), 「電気回路」, 「音響エレクトロニクス」(以上, 共著, 培風館), 「非線形音響-基礎と応用」(編著, コロナ社)。

谷寄徹也

平3名城大・理工・電気電子・卒。同年, 名古屋電機工業(株)入社。道路交通系における画像処理応用, センサ応用に関する研究に従事。博士(工学)。

上田浩次(正員)

昭56名古屋電機工業(株)技術部入社。昭63名城大大学院工学研究科電気工学専攻了。平8名大大学院工学研究科博士(工学)学位取得。平21大同大・情報・情報システム・教授。道路交通の計測監視における情報処理, センサ応用に関する研究に従事。情報処理学会, 電気学会各会員。