

中央大学博士論文

タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術  
の開発と性能評価方法に関する研究

Yu Shirai

白井 悠

博士（工学）

中央大学大学院  
理工学研究科  
都市人間環境学専攻

令和3年度

2021年7月



# 目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	3
1.1.1 わが国の道路舗装	3
1.1.2 舗装分野の低炭素技術	5
1.2 既往の研究	7
1.2.1 タイヤ／路面転がり抵抗	7
1.2.2 タイヤ／路面転がり抵抗と路面のすべり抵抗	11
1.2.3 タイヤ／路面転がり抵抗の評価方法	13
1.3 本研究の目的	15
1.4 本研究の構成	17
第 1 章の参考文献	21
第 2 章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装 技術の開発	29
2.1 緒言	31
2.2 配合および施工に関する検討	32
2.3 試験施工による構築技術の検討	35
2.3.1 試験路面	35
2.3.2 施工方法	36
2.3.3 測定方法	38
2.3.4 結果	39
2.3.5 まとめ	43
2.4 タイヤ／路面転がり抵抗とすべり抵抗に関する検討	44
2.4.1 概要	44

2.4.2	実験方法	45
2.4.3	タイヤ／路面転がり抵抗とすべり抵抗	48
2.4.4	路面の種類とすべり抵抗	50
2.4.5	路面テクスチャとすべり抵抗	53
2.4.6	まとめ	54
2.5	第2章のまとめ	55
	第2章の参考文献	57

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装 技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

3.1	緒言	61
3.2	促進載荷試験による耐久性の検証	62
3.2.1	検証方法	62
3.2.2	結果	68
3.2.3	まとめ	74
3.3	実道試験施工による耐久性の検証	75
3.3.1	実道試験施工1	75
3.3.2	実道試験施工2	78
3.3.3	まとめ	86
3.4	第3章のまとめ	87
	第3章の参考文献	88

### 第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する 検討

4.1	緒言	91
4.2	タイヤ／路面転がり抵抗と走行燃費の関係	92

4.2.1	検討方法	92
4.2.2	走行燃費の測定結果	95
4.2.3	タイヤ／路面転がり抵抗係数と走行燃費の関係	96
4.3	タイヤ／路面転がり抵抗と二酸化炭素排出量の関係	97
4.3.1	検討方法	97
4.3.2	CO <sub>2</sub> 排出量の測定結果	98
4.3.3	タイヤ／路面転がり抵抗係数と CO <sub>2</sub> 排出量の関係	99
4.4	低燃費舗装の二酸化炭素削減量の試算	100
4.4.1	概要	100
4.4.2	検討方法	101
4.4.3	タイヤ／路面転がり抵抗係数と CO <sub>2</sub> 低減率の関係	108
4.4.4	日本全国の幹線道路へ適用した場合の効果	110
4.4.5	交通量の違いによる CO <sub>2</sub> 削減効果	112
4.4.6	まとめ	114
4.5	第 4 章のまとめ	115
	第 4 章の参考文献	116

## 第 5 章 すべり抵抗測定車を用いたタイヤ／路面転がり抵抗 の直接評価方法に関する検討

5.1	緒言	119
5.2	検討方法	120
5.2.1	すべり抵抗測定車	120
5.2.2	試験路面	121
5.2.3	タイヤ／路面転がり抵抗の測定フロー	122
5.3	影響要因の検討	123
5.3.1	施工ジョイント通過時の振動	123
5.3.2	微小な操舵の影響	124
5.3.3	タイヤ／路面転がり抵抗係数の算出フロー	126

5.4	基準温度および基準速度補正の検討	127
5.4.1	タイヤ温度とタイヤ／路面転がり抵抗係数の関係	127
5.4.2	温度補正方法の検討	128
5.4.3	速度補正方法の検討	130
5.4.4	基準温度および速度補正後のタイヤ／路面転がり 抵抗係数	131
5.5	第5章のまとめ	132
	第5章の参考文献	133

## 第6章 路面プロファイルを用いたタイヤ／路面転がり抵抗 の間の評価方法に関する検討

6.1	緒言	137
6.2	検討方法	139
6.3	既存テクスチャ指標とタイヤ／路面転がり抵抗係数 との単回帰分析	142
6.4	既存ラフネス指標とタイヤ／路面転がり抵抗係数と の単回帰分析	144
6.5	MPD, IRI を用いたタイヤ／路面転がり抵抗係数推 定式の検討	146
6.6	第6章のまとめ	147
	第6章の参考文献	148

## 第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上 に向けた検討

7.1	緒言	151
-----	----	-----

7.2	タイヤ／路面接地圧力分布と路面プロファイルの 関係	152
7.2.1	実験方法	152
7.2.2	結果	154
7.2.3	まとめ	158
7.3	テクスチャ波長領域とタイヤ／路面転がり抵抗の 関係	159
7.3.1	概要	159
7.3.2	実験方法	160
7.3.3	舗装の種類とエンベロープ特性に関する検討	163
7.3.4	二次元テクスチャとタイヤ接地圧力分布の関係	166
7.3.5	二次元テクスチャとタイヤ／路面転がり抵抗係 数の関係	169
7.3.6	まとめ	171
7.4	ラフネス波長領域とタイヤ／路面転がり抵抗の関係	172
7.4.1	概要	172
7.4.2	ウェーブレット解析の概要	173
7.4.3	ウェーブレット解析を用いたラフネス波長領域 とタイヤ／路面転がり抵抗の関係	175
7.4.4	まとめ	177
7.5	路面プロファイルとタイヤ／路面転がり抵抗係数の 関係	178
7.6	路面プロファイルとタイヤ／路面転がり抵抗との関 係に対する速度の影響	180
7.6.1	概要	180
7.6.2	検討方法	181
7.6.3	タイヤ／路面転がり抵抗係数と速度の関係	182
7.6.4	タイヤ／路面転がり抵抗係数に影響を及ぼす特徴 的な路面形状に関する検討	187
7.6.5	まとめ	195

7.7 第7章のまとめ .....	196
第7章の参考文献 .....	198
第8章 結 論 .....	199
謝 辞 .....	207

# 第 1 章

## 序 論



### 第1章 序 論

#### 1.1 研究の背景

##### 1.1.1 わが国の道路舗装

わが国において、道路は最も身近な社会資本であり欠くことのできない社会基盤である[1]。このため、道路舗装を良好な状態に維持することは、生活を安全かつ快適にし、地域経済を持続的に発展させるために重要である。

日本の近代舗装は、明治中頃までは馬車交通を対象とした砕石道の築造が主体であり、戦後の復興とともに急速に整備が進められた。当時、主要な道路はコンクリート舗装が多く、1954年に発足した第1次道路整備五箇年計画の実施過程では、国道の約80%、地方道の約30%がコンクリート舗装であった。その後、急激な経済成長とそれに伴うモータリゼーションの進展に対応するため道路事業が激増したことや石油需要の増大に伴うアスファルトの生産増加が重なって、経済的で施工速度の大きい理由からアスファルト舗装が主流となった。

そして、1960年になると名神高速道路をはじめとした高規格道路の建設をとおして、アスファルト舗装の施工技術は飛躍的に進歩し、アスファルト混合物の製造はアスファルトプラント、施工には敷均しにフィニッシャ、転圧にローラを用いるという、現代舗装の標準的な施工体制が確立された。また、機械化施工に適した材料として連続粒度のアスファルト混合物が主流となり、路面の平坦性を確保するためにはアスファルト混合物層を数層重ねて施工することが有効であることから、一層の仕上がり厚さからみた表層混合物の最大粒径は13mm程度が適当とされた[7][8]。

その後、1980年頃になると、地球温暖化やヒートアイランド現象などの環境問題に対して、舗装にも多様化や高度化が求められ、排水性舗装や再生加熱アスファルト混合物など地域や地球環境への負担軽減を期待した技術開発が行われてきた[9][10]。最近では、労働者、あるいは熟練労働者の減少に対応するための情報化施工[11][12]や、舗装維持管理の効率化のためのライフサイクルコストに優れた長寿命化舗装[13][14]などの技術について研究開発が行われてきている。

## 第1章 序 論

これらに合わせて、アスファルト自体の技術開発も進んでいる。改質アスファルトは1966年に改質材のSBRラテックスが国産化されてから本格的な使用が始まり、1970年代には交通量の増大や車両の大型化に伴うわだち掘れ対策として大幅に普及した。以降、改質アスファルトの使用量は年々増加傾向にある[15]。現在では、ポリマー系改質材としてSBS(スチレン・ブタジエン・スチレンブロックコポリマー)が主流であり、交通量やニーズの拡大に伴い鋼床版用、積雪寒冷地用、高耐久型、交差点用、薄層舗装用など様々な種類の改質アスファルトが開発されている。近年では、雨天時のすべり抵抗性や視認性の改善、車両走行騒音の低減などの機能を有する排水性舗装の普及も改質アスファルト使用量の増加に寄与している。

このように、わが国の道路舗装は、社会状況に合わせて変化、あるいは進化してきている。

### 1.1.2 舗装分野の低炭素技術

温室効果ガスの一つである二酸化炭素排出量(CO<sub>2</sub>)の削減は、世界規模で取り組むべき環境対策の一つである。わが国においても、政府より、2030年度に2013年度比で46%削減の目標を気候変動サミットで表明した[16]。また、2020年には2050年までにCO<sub>2</sub>の排出量実質ゼロの目標が掲げられた[17]。ここで、わが国のCO<sub>2</sub>排出量の現状を見てみると、日本付近では温暖化の主要因であるCO<sub>2</sub>濃度は年々増加を続けており、2020年度には陸上、洋上及び上空の観測すべてにおいて観測史上最高を更新したとの発表が気象庁よりあった[18]。また、2017年の資料では、わが国のCO<sub>2</sub>の排出量は運輸部門が約19%を占めており、このうち約9割は自動車からの排出となっている[19]。

このような状況の中、国道交通省は運輸部門における地球温暖化対策・緩和策として、自動車や道路に関連するものとして「自動車単体対策」や「交通流対策」を挙げている[20]。このうち「自動車単体対策」は、a)低公害車普及／次世代低公害開発・実用化の促進、b)自動車の燃費の改善、c)運転方法の改善に大別されている[21]。

自動車業界においても温暖化対策に向けた取り組みが活発に行われている。電気自動車(EV)や燃料電池自動車(FCV)の開発、低燃費タイヤの開発、再生可能エネルギーの供給拡大や水素ステーションの拡充が重要である。一方で、EVやFCVに偏らせるのは現実的でなく、ハイブリッド車(HV)を含む内燃機関の使用を前提とした技術革新も必要であると考えられており、また、CO<sub>2</sub>を材料に用いる合成材料の研究開発なども進められている[22][23][24][25][26][27]。

ここで、舗装分野の低炭素舗装技術を表-1.1[28]に示す。表-1.1より技術の種類は、舗装そのものでCO<sub>2</sub>排出量を低減させる舗装技術、アスファルト混合物を製造する設備を改良することで製造時のCO<sub>2</sub>排出量を低減させる製造設備技術、および施工機械の電動化や低燃費化などの改良によりCO<sub>2</sub>排出量を低減させる施工機械技術に分けられる。また、近年では材料技術として、バイオマス技術の研究が注目されており、製造工場等でのバイオマス燃料の活用や、木質バイオマス資源を用いた発電施設の副産物として生成される木タールを、旧アスファルトを再生アスファルトにする際の添加剤として使用

## 第1章 序 論

する技術[29][30][31]などがある。

このように、これまでも舗装分野では低炭素舗装技術として多くの技術開発を行ってきており、これら技術は対象そのものの自体のCO<sub>2</sub>排出量を削減することが基本の考え方となっている。

このなかで、舗装を利用する自動車の燃費を改善するという考え方は、舗装分野としてこれまで無かった新しいアプローチ方法である。

表-1.1 低炭素舗装技術の整理

技術の種類		具体の技術
舗装技術	加熱アスファルト混合物の製造温度低下技術	中温化技術
		弱加熱技術
	常温製造技術	チップシール
		マイクロサーフェシング
	リサイクル技術	プラント再生舗装工法
		路上表層再生工法
		路上路盤再生工法
	長寿命化技術	コンポジット舗装
改質アスファルトの適用		
製造設備技術	骨材加熱装置	バーナの燃費向上
		ドライヤ内の羽根の改良等
	アスファルト貯蔵装置	ヒータ制御方法の改良
	排風機	最適な回転数に制御
	スキップエレベータ	スキップエレベータの省略化
施工機械技術	エンジン回転数制御技術	作業に合わせて最適なエンジン回転数に制御
	駆動技術	電動式建設機械
	施工の効率化	3Dコントロールなどによる作業効率向上

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 タイヤ／路面転がり抵抗

走行燃費に影響を及ぼす主要因のひとつに走行抵抗がある。走行抵抗とは図-1.1に示すように、自動車の進行方向と反対向きにかかる抵抗で、タイヤの転がり抵抗，車体の空気抵抗，加速抵抗，道路勾配による抵抗，および駆動系の摩擦抵抗により構成される抵抗である[32][33][34].このうち転がり抵抗とはタイヤが路面を転動するときに，路面から進行方向と反対向きに受ける力であり，走行抵抗のなかでも，舗装路面とタイヤとが直接関連する抵抗である。本研究では路面の転がり抵抗を取り扱うが，タイヤの転がり抵抗と区別するために，路面の転がり抵抗のことをタイヤ／路面転がり抵抗と呼ぶこととした。



図-1.1 走行抵抗のイメージ

転がり抵抗は，自由転動するタイヤのけん引力であることから，式(1.1)に示す[35]ように，転がり抵抗係数  $C_R$  は，けん引力  $R_c(N)$  をその時の輪荷重  $F_z$  (N) で除した値で表される。

$$C_R = \frac{R_c}{F_z} \quad (1.1)$$

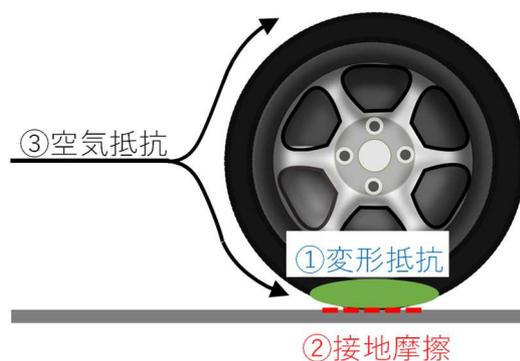


図-1.2 タイヤの転がり抵抗のイメージ

そして、図-1.2に示すようにタイヤの転がり抵抗は①変形抵抗，②接地摩擦，③空気抵抗に分けることができる[32][33]．①変形抵抗は自動車走行時のタイヤトレッドやサイドウォールの変形によるエネルギー消費，②接地摩擦はタイヤと路面との摩擦に生じるエネルギー消費，そして③タイヤの回転に伴う空気抵抗によるエネルギー消費であるとされている．特に，①の変形抵抗が転がり抵抗の9割近くを占めているといわれている[32][36]．これは走行中のタイヤが変形と回復を繰り返すことから生じるヒステリシスロスによるものである．

ここで、ヒステリシスロスについて説明する．例えば、バネのような弾性体に力を加えたり，除いたりした場合の力と変形との関係は図-1.3(a)に示すようになる．弾性体の場合は，図-1.3(a)のように力を加えた分だけ変形し，

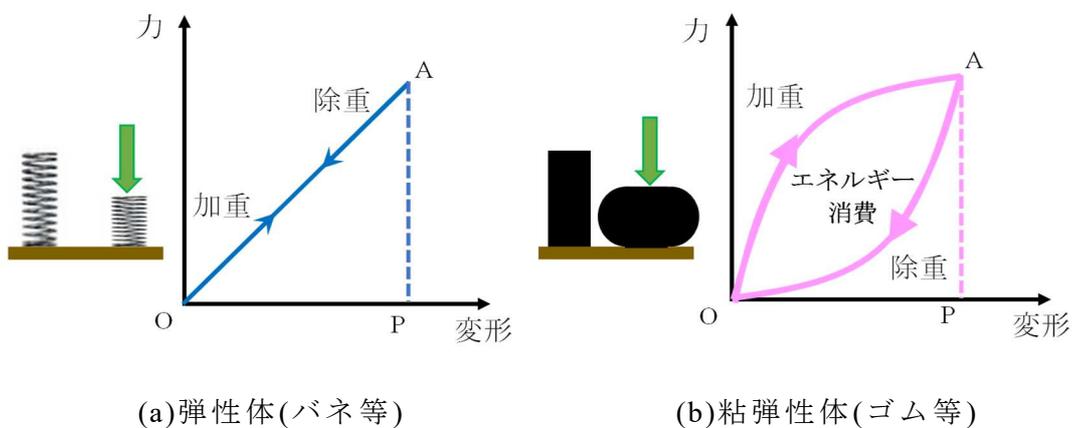


図-1.3 力と変形の関係

## 第1章 序論

OAP に囲まれる面積に相当する運動エネルギー蓄えて、その運動エネルギーの分だけ仕事をする。一方、ゴムなどの粘弾性体の力と変形との関係は図-1.3(b)のような関係となる。粘弾性体は力を急激に加えたり、除いたりすると変形が遅れて生じる性質があって、力を加えると O-A の曲線、力を除くと A-O の曲線のようになり、OAP によって囲まれる面積に差が生じ、この差分は熱エネルギーと変わる。図-1.3(b)の O-A の環はヒステリシスループ (Hysteresis Loop) とよばれ、このような運動エネルギーの一部が熱エネルギーに変わることはヒステリシスロス(Hysteresis Loss)とよばれている。このように、転動するタイヤも 1 回転ごとにヒステリシスロスが生じ、このエネルギー消費分が転がり抵抗となる[37][38]。

自動車分野においては、タイヤの転がり抵抗の一般的な性質として、次のことがいわれている。①タイヤの転がり抵抗は荷重に比例して増加し、転がり抵抗係数はほぼ一定となる[32][39]。②荷重が一定の場合、空気圧を増加させると転がり抵抗は減少する[32][39]。③トレッド厚さは薄いほど転がり抵抗は減少する[32][39]。④タイヤの温度が高いと転がり抵抗は減少する[39]。⑤速度と転がり抵抗の関係については、140km/h 以上場合は、スタンディングウェーブの発生により急増するということが多くの文献でいわれている[37][39]が、20km/h~100km/h においては、転がり抵抗はほぼ一定で増加しないといた報告や[39],その一方、速度に応じて直線的に増加する[37]など見解が異なっている。

舗装分野においては、タイヤ/路面の転がり抵抗に影響を及ぼす舗装路面の要因としては、走行中にタイヤを変形させる要因として、路面プロファイルや舗装の剛性であるとの報告がある[34][35][40][41][42]。路面プロファイルについては、PIARC(世界道路協会)により、図-1.4に示すような路面プロファイルと運動性能の関係について示されている[43]。また、欧州および米国の共同プロジェクトMIRIAM (Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management systems)によると、①路面テクスチャ指標のMPD(Mean Profile Depth)や路面縦断形状を表す指標のIRI(International Roughness Index)と関係がある、②わだち掘れ量が大きくなるとタイヤ/路面転がり抵抗が増加する、③タイヤ/路面転がり抵抗はタイヤと路面の摩擦の影響を受けるな

# 第1章 序論

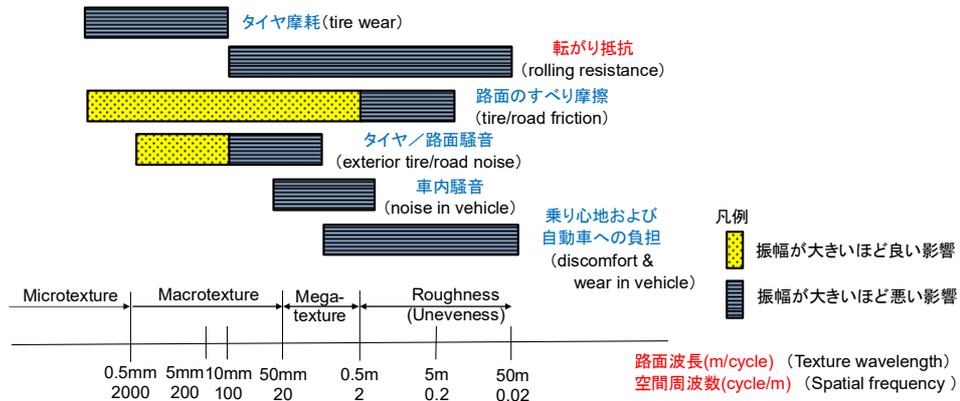


図-1.4 路面プロファイルと車両の運動特性の関係  
(PIARC1978 をもとに一部加筆)

どの報告がある[34]. 舗装の剛性については, コンクリート舗装の方が剛性は高いことからアスファルト舗装よりもタイヤ/路面転がり抵抗が小さいとの報告があるが[44][45], その一方で, 路面プロファイルからの観点からの検討が十分でないとの報告もある[40]. さらに, タイヤ/路面転がり抵抗の温度依存性や速度依存性があるとの報告もある[35].

上記より, 海外においては, 路面とタイヤ/路面転がり抵抗との関係についてのメカニズム解明に関する検討は多数行われている. しかし, わが国においては, タイヤ/路面転がり抵抗を小さくすることを目的としたアスファルト舗装技術は確立されておらず, タイヤ/路面転がり抵抗に関しては, 路面との関係についての研究は少なく, 舗装の性能指標としても認められていない[10].

### 1.2.2 タイヤ／路面転がり抵抗と路面のすべり抵抗

自動車およびタイヤ工学分野における低燃費タイヤにおいては、湿潤時制動性能のよいゴムを使ったタイヤは発熱が高く、転がり抵抗は大きくなり燃費が悪くなると考えられており[37]，転がり抵抗の小さなタイヤの開発には、湿潤時制動性能との両立を図らなければならない。

路面のすべり抵抗性能は、舗装の構造に関する技術基準[46]の中では必要に応じて定める舗装の性能指標として位置付けられているとともに、走行安全性の観点からも重要な指標の一つとなっている。先行研究においては路面とすべり抵抗の関係については、多く報告があり[47][48][49][50][51][52][53]，タイヤ／路面転がり抵抗とすべり抵抗については、MIRIAMの報告によるとすべり抵抗は2～10%程度割合でタイヤ／路面転がり抵抗に影響を及ぼす[34]との報告があるが、タイヤ／路面転がり抵抗がすべり抵抗に及ぼす影響については言及されていない。

ここで、図-1.5にタイヤのスリップ率と各種摩擦係数の関係[54]を示す。図-1.5より、自動車を制動するためにブレーキを踏むと徐々にスリップ率が大きくなる。一般的にスリップ率10～30%程度のときに摩擦係数は最大となり、この時の摩擦係数はピーク $\mu$ （以下、 $\mu_{peak}$ ）と呼ばれている。その後ブレーキを踏み続けるとスリップ率は100%の状態、つまりはタイヤが完全にロ

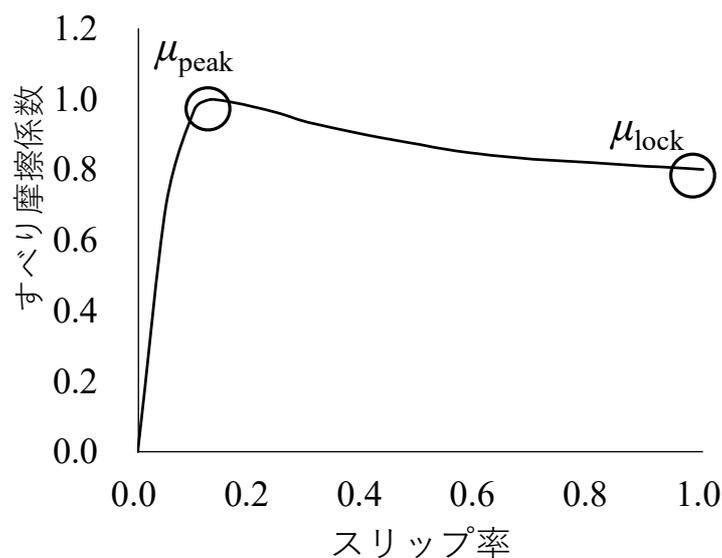


図-1.5 スリップ率とすべり摩擦係数の関係

## 第1章 序論

ックした状態となり、この時の摩擦係数はロック $\mu$ （以下、 $\mu_{\text{lock}}$ ）と呼ばれ、 $\mu_{\text{peak}}$ よりも小さい値となる。 $\mu_{\text{lock}}$ は、縦すべり摩擦係数とも呼ばれ、舗装の性能指標の一つとなっているが、 $\mu_{\text{peak}}$ は舗装の性能指標となっていない。

近年アンチロック・ブレーキ・システム(Antilock Brake System以下、ABS)を搭載されている車両が一般的となっている。このABSは自動車の走行中に強くブレーキを踏み込んでもコンピューター制御によりタイヤがロックするのを防いで、車両のハンドル操作が可能となるシステムであり、トラクションコントロールやコーナリング時の横滑り防止機能等にも応用されている。このABSはタイヤがロックする前の制動力を感知することで作動している。このため、今後の自動車技術の発展に合わせた路面の性能管理を考えると $\mu_{\text{peak}}$ による管理も重要になると考えた。

### 1.2.3 タイヤ/路面転がり抵抗の評価方法

タイヤ/路面転がり抵抗の測定方法は、直接的にタイヤ/路面転がり抵抗係数を測定し評価する直接評価方法と、路面プロファイルなどから転がり抵抗係数を推定する間接評価方法との二つに分けることができる。

直接評価方法については、海外では、欧州および米国の共同プロジェクト MIRIAM において、①ドラム試験、②惰性走行試験、③トレーラ式試験が検討されている[34][40][55]。ドラム試験はタイヤ単体、あるいはテクスチャ波長領域以下の波長領域の転がり抵抗を評価するには適しているがラフネス波長領域を含んだ路面を評価することは困難である[56][57][58][59][60]。惰性走行試験は、ドラム式試験よりもより実路の評価に適した手法であるが、測定において直線道路であることや一定の道路延長が必要であること、あるいは車両の特徴の影響を受けるなど実道での適用には制限が多い[61][62][63]。トレーラ式試験は海外において最も多く使われている方法であり、タイヤ/路面転がり抵抗の評価方法としては現時点においては現実性が一番高い方法である[64][65][66][67][68][69][70]。しかしながら、トレーラ式は、わが国での実績がなく、欧米および米国と比較すると道路の幅が狭く、道路線形が複雑なわが国での適用は難しいと考える。なお、国内の自動車分野においては、必要な値はドラム試験等による実験により求めて、その実験値をもとに専用の燃料消費量シミュレーションを用いて評価をおこなっている[71][72][73][74]。

国内の舗装分野では、高速道路上での惰性走行試験による評価方法[45][75]や、乗用車の非駆動軸に設置した6分力計から評価する方法[76]が報告されている。両方法ともに実道での適用できる可能性が十分にあるものの、道路の線形、運転者の熟練度、交通規制が必要など、実用的には制限が多い。

一方、間接評価方法については、路面プロファイルからタイヤ/路面転がり抵抗係数を推定する方法となり、精度面で課題があるものの、道路線形の影響を受けない評価方法として有効である。路面プロファイルとタイヤ/路面転がり抵抗係数との関係については報告が多数ある。これらの報告では、大多数が路面プロファイルをラフネス波長領域とテクスチャ波長領域に分

## 第1章 序論

けてタイヤ／路面転がり抵抗係数との関係について検討している．ラフネス波長領域の指標としては IRI (International Roughness Index:国際ラフネス指数)，テクスチャ波長領域の指標としては MPD(Mean Profile Depth)を用いている推定式が多い[77][78][79][80][81][82][83]．しかしながら，これら海外で報告されている推定式は，測定機が日本国内のものと異なるため，そのままの適用はできない．

### 1.3 本研究の目的

本研究の最終的な目標は、タイヤと路面間に生じる転がり抵抗を小さくするアスファルト舗装材料とその施工方法の開発および性能評価方法の確立することである。

タイヤ／路面転がり抵抗の小さいアスファルト舗装を開発することは、自動車の走行時のエネルギー消費を改善し、ガソリン車あるいはディーゼル車のような内燃エンジン搭載車両においては自動車から排出されるCO<sub>2</sub>排出量の削減が期待できる。また、ゼロエミッション車両についても航続距離が延長することにより、省エネにつながる。

また、従来の舗装が有する、表面排水性機能による走行安全性や、交通騒音低減機能による沿道環境や車内環境の快適性を有したまま、タイヤ／路面転がり抵抗低減機能を付与することで、次世代型の舗装の技術となる。

さらに、タイヤ／路面転がり抵抗の性能評価方法を確立することで、本技術の適切な評価が可能となり、路面プロファイルとタイヤ／路面転がり抵抗との関係について明らかにすることは、タイヤ／路面転がり抵抗の間接評価方法の確立とともに、タイヤ／路面転がり抵抗の速度依存性のメカニズム解明や、路面のすべり抵抗、タイヤ／路面騒音と路面プロファイルとの関係解明にもつながると考える。

そのような視点にたつて、本研究では上述の目標に近づくため、転がり抵抗の小さなアスファルト混合物を開発するとともに、その性能評価方法を確立することを目的としている。

既往の研究の成果と課題を踏まえ、ここではサブテーマとその目的を以下のように設定した。

#### (1) タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発

- 1)路面プロファイルの波長領域区分と転がり抵抗との関係を整理し、材料や施工との関係を明らかにする。
- 2)目標とする路面プロファイルを設定し、混合物の配合や施工方法を確立する。
- 3)タイヤ／路面転がり抵抗と湿潤路面におけるすべり抵抗の関係を検討

し、走行安全性について明らかにする。

**(2) タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証**

4)実道での適用が可能な構造的耐久性，および機能的耐久性を有しているか検証する。

**(3) 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果の検証**

5)各舗装の走行燃費およびCO<sub>2</sub>排出量削減効果を明らかにする。

6)日本全国の幹線道路へ適用した場合のCO<sub>2</sub>削減量の試算する。

**(4) タイヤ／路面転がり抵抗性能評価方法の確立**

7)すべり抵抗測定車を用いたタイヤ／路面転がり抵抗の直接評価方法を確立する。

8)既存の路面プロファイル指標を用いたタイヤ／路面転がり抵抗の間接評価方法を確立する。

9)路面プロファイルとタイヤ／路面転がり抵抗の関係をより明確にして，間接評価方法のさらなる精度向上を試みる。

### 1.4 本研究の構成

本論文の構成は、以下のとおりである。

#### 第1章 序論

#### 第2章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発

#### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

#### 第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

#### 第5章 すべり抵抗測定車を用いたタイヤ／路面転がり抵抗の直接評価方法に関する検討

#### 第6章 路面プロファイルを用いたタイヤ／路面転がり抵抗の間接評価方法に関する検討

#### 第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

#### 第8章 結論

各章の概要を以下に述べる。

#### 第1章 序論

本研究の背景を明らかにするとともに既往の研究を概観し、本研究の目的および概要を述べている。

#### 第2章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発

先行研究の成果をもとに、タイヤ／路面転がり抵抗を低減させる方法について整理し、従来舗装の排水性舗装にタイヤ／路面転がり抵抗低減性能を付与した低燃費舗装の構築技術について検討した。

そして、検討結果に基づき、実機による施工を行い、路面性状値および性能等の検証を行った。

さらに、湿潤路面でのすべり抵抗性能について検証することを目的に、タイヤ／路面転がり抵抗とすべり抵抗の関係について検討した。

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

実道適用へ向けた耐久性の検証として、構造的、および機能的な耐久性の検証を、土木研究所が所有する舗装走行試験場に施工した試験路面で促進載荷試験により実施した。

また、供用中の実道路面への試験施工を行い、現地骨材やプラントでの製造性、施工性や、路面性状値の測定、およびタイヤ／路面転がり抵抗性能の耐久性について検証した。

### 第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

低燃費舗装の走行燃費および二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量の削減効果について、燃料消費計および排気ガス計測装置を搭載した試験車両(普通乗用車)を用いた直接測定法により検証し、定常走行時におけるタイヤ／路面転がり抵抗と走行燃費およびCO<sub>2</sub>排出量との関係について検討した。

そして、日本の幹線道路に適用した場合のCO<sub>2</sub>削減効果の検討を行った。検討では、近年、自動車の燃料消費量評価に用いられており、より実際の燃費に近い試算が可能な燃料消費量シミュレーション法を用いた。

### 第5章 すべり抵抗測定車を用いたタイヤ／路面転がり抵抗の直接評価方法に関する検討

すべり抵抗測定車を用いたタイヤ／路面転がり抵抗の評価方法について検討した。すべり抵抗測定車による測定において発生する、横力の補正方法や施工ジョイント乗り越し時のノイズ処理について検討した。また、タイヤ温度と速度とタイヤ／路面転がり抵抗の関係について整理し、基準温度、速度に補正するための補正式について提案した。

### 第6章 路面プロファイルを用いたタイヤ／路面転がり抵抗の間接評価方法に関する検討

路面プロファイルをテクスチャ波長領域とラフネス波長領域に分けて、そ

## 第1章 序 論

れぞれ舗装調査・試験法便覧に記載されている既存指標を用いて、直接評価方法により測定されたタイヤ／路面転がり抵抗係数との関係について検討した。

### 第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

第6章で求めた推定式よりも精度の高い間接評価方法の検討として、既存の試験機や測定方法にとらわれない、タイヤと路面の接地圧力分布など実際の現象から導かれる指標とタイヤ／路面転がり抵抗との関係について検討した。そして、速度がすべり抵抗測定車により測定したタイヤ／路面転がり抵抗係数と路面プロファイルに及ぼす影響について検討した。

### 第8章 結 論

本研究で得られた成果を総括した。

# 第1章 序論

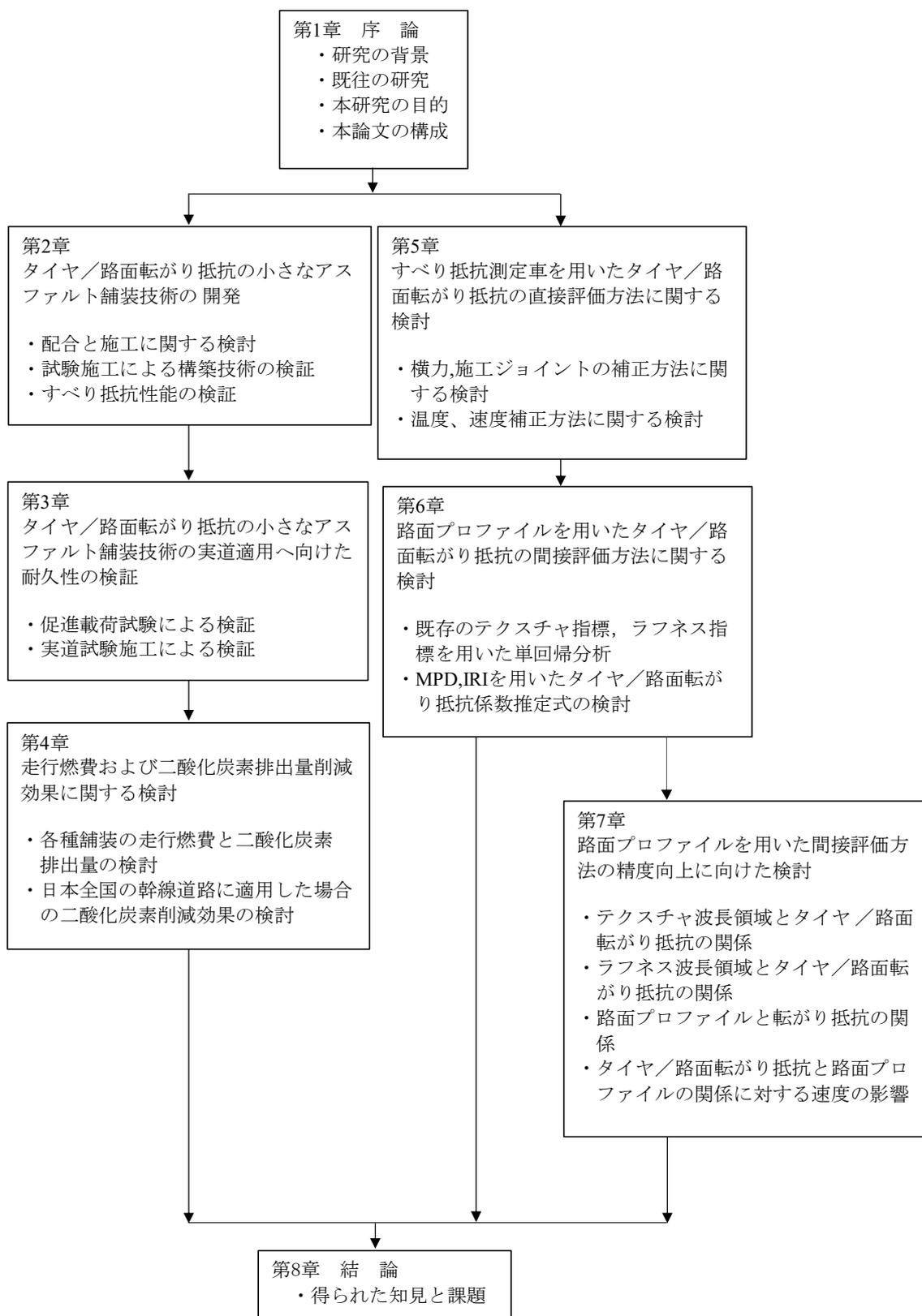


図-1.5 本研究の構成

第1章の参考文献

- [1] (社)日本道路協会：舗装設計施工指針，丸善，2006.
- [2] 山之口浩，丸山暉彦：アスファルト舗装修繕技術，山海堂，pp.15，1997.
- [3] 高橋敏五郎：名神高速道路 山科舗装記 (1)，道路建設，1961.5.
- [4] 高橋敏五郎：名神高速道路 山科舗装記 (2)，道路建設，1961.6.
- [5] 高橋敏五郎：名神高速道路 山科舗装記 (3)，道路建設，1961.7.
- [6] 日本舗道(株)：日本舗道 50 年史，1985.
- [7] (社)日本道路協会：アスファルト舗装要綱（昭和 42 年版），1967.
- [8] 昆布谷竹郎：アスファルト舗装施工法の変遷，土木学会論文集，No.384  
／V-7，pp.11-19，1987.
- [9] (社)日本道路協会：排水性舗装技術指針（案），平成 8 年 10 月.
- [10] (社)日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準・同解説，平成 13 年 7  
月.
- [11] 加藤康弘，宇田川健治，宮内賢徳，砂原良太郎，サミムサブル：3 次  
元マシンガイダンスによる路面切削機の ICT 施工の検討，道路建設，  
2019 年 11 月号，2019.
- [12] 相田尚，梶原覚，其田直樹：ICT・IoT を活用した舗装修繕工事の合理  
化検討，第 32 回日本道路会議，2017 年 11 月.
- [13] 高橋茂樹，小野義道，佐藤正和：高速道路におけるアスファルト舗装の  
「解体新書」プロジェクト，土木学会論文集 E1(舗装工学)，2015 年 71  
巻 3 号.
- [14] 平戸利明，幸坂優一，村山雅人：ハイブリッドバインダによる高安定性  
アスファルト混合物の開発，第 17 回舗装技術に関する懸賞論文集，2011  
年 7 月.
- [15] 高島伸知：ポリマー改質アスファルトの役割と次世代に向けた展望，改  
質アスファルト No.53,2019.
- [16] 外務省：管総理大臣の米国主催気候サミットへの出席について(結果概  
要)，外務省 Web サイト，2021 年 4 月 22 日，[https://www.mofa.go.jp/  
mofaj/ic/ch/page6\\_000548.html](https://www.mofa.go.jp/mofaj/ic/ch/page6_000548.html).

## 第1章 序論

- [17] 首相官邸：第203回国会における管内閣総理大臣所信表明演説，首相官邸 web site, 2020.10, [https://www.katei.go.jp/jp/99\\_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html](https://www.katei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html).
- [18] 気象庁：大気中の二酸化炭素濃度は観測史上最高を更新～日本付近の最新の二酸化炭素濃度の状況～，報道発表資料，2021.3.29.
- [19] 国土交通省：運輸部門における二酸化炭素排出量，国土交通省 web site, 2020.4, [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/soseienvironment\\_tk\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/soseienvironment_tk_000007.html).
- [21] 国土交通省：環境行動計画-環境危機を乗り越え，持続可能な社会を目指す-，国土交通省 website, 2017年3月, [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_fr\\_000101.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_fr_000101.html).
- [22] 公益財団法人交通エコロジー・モビリティ財団：III. 運輸部門における主要な環境問題への対策，公益財団法人交通エコロジー・モビリティ財団 website, <http://www.ecomo.or.jp/environment/unyukotsutokankyou/index.html>.
- [23] 一般社団法人日本自動車工業会：カーボンニュートラルデータ集，一般社団法人日本自動車工業会 website, [https://www.jama.or.jp/carbon\\_neutral\\_data/](https://www.jama.or.jp/carbon_neutral_data/).
- [24] 経済産業省資源エネルギー庁：電気自動車（EV）は次世代のエネルギー構造を変える，経済産業省資源エネルギー庁 website, 2017年10月, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/ondankashoene/ev.html>.
- [25] 経済産業省資源エネルギー庁：「電気自動車（EV）」だけじゃない？「xEV」で自動車の新時代を考える，経済産業省資源エネルギー庁 website, 2018年8月, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/xev.html>.
- [26] 川瀬博也：エコなタイヤとは，JAMAGAZINE, 2014年6月.
- [27] 経済産業省資源エネルギー庁：2019年の今，「水素エネルギー」はどこまで広がっているの？，経済産業省資源エネルギー庁 website, 2018年8月, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/suiso2019.html>.

## 第1章 序論

- [28] (社)日本道路協会：環境に配慮した舗装技術に関するガイドブック，2009.6.
- [29] 傳田喜八郎，今田雄司：アスファルトプラントにおけるガス・バイオマス燃料混焼バーナ，第30回日本道路会議論文集，2013年.
- [30] 守安弘周，山本博巳，山地憲治：木質タールを活用したアスファルト混合物製造システムの開発と評価，エネルギー・資源学会論文誌31巻2号，2010年.
- [31] 三田村 文寛，坂田 正宏，藤井 弘，武井 幸久：木タールを用いた再生舗装材の実用化，福井県雪対策・建設技術研究所 年報地域技術第21号 2008,8.
- [32] 渡邊徹郎：タイヤのおはなし，日本規格協会，1994年10月.
- [33] 一般社団法人日本自動車タイヤ協会：<https://www.jatma.or.jp>.
- [34] U. Sandberg：Rolling resistance -Basic Information and State -of-the-art- on Measurement Method，Report MIRIAM\_SP1\_01，2011.
- [35] G.Descornet：Road-Surface Influence on Tire Rolling Resistance，ASTM STP 1031，pp.401-409，1990.
- [36] 景山克三，景山一郎：自動車力学，理工図書，pp.1-5，1984.
- [37] 馬庭孝司：ドライバーのためのタイヤ工学入門，グランプリ出版，1989年7月.
- [38] 網野直也：タイヤの摩擦と転がり抵抗，日本ゴム協会誌88巻2号，2015年.
- [39] 酒井秀男：改訂タイヤ工学 入門から応用まで，グランプリ出版，1987.
- [40] U. Sandberg, A. Bergiers, J. A. Ejsmont, L. Goubert, R. Karlsson, M. Zoller：Road surface influence on tyre/road rolling resistance，Report MIRIAM\_SP1\_04，2011.
- [41] Lasse G Andersen, Jesper K. Larsen, Elsje S. Fraser, Bjarne Schmidt：Rolling Resistance Measurement and Model Development，Journal of Transportation Engineering，volume141 Issue2，2015.2.
- [42] E. Beuving, T. De Jonghe, D. Goos, T. Lindahl, A. Stawiarski：Environmental Impacts and Fuel Efficiency of Road Pavements，INDUSTRY REPORT，

- MARCH 2004 PREPARED BY JOINT EAPA/ EUROBITUME TASK GROUP  
FUEL EFFICIENCY, 2004.3.
- [43] PIARC : Technical Committee Report on Surface Characteristics, 1978.
- [44] G. W. Taylor, et al. : Effect of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III, National Research Council Canada, 2006.
- [45] 吉本徹, 風戸崇之, 熊田一彦, 笠原篤 : 高速道路での重量車の転がり抵抗の測定と燃費に及ぼす影響に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第14巻, 2009.12.
- [46] 公益社団法人日本道路協会 : 舗装性能評価法-必須および性能指標の評価法編-, PP62-78, 2006.
- [47] 市原薫 : 路面のすべり抵抗に関する実験的研究, 博士論文, 京都大学, 1967.
- [48] 七五三野茂 : アスファルト舗装のテクスチャーの特性とすべり摩擦への影響について, 舗装工学講演会講演論文集 vol.1, 1996.
- [49] Shigeru Shimeno, Yasushi Hayakawa : A Study on applicability of texture to pavement surface monitoring in expressway, journal of pavement engineering, JSCE, 1999.
- [50] 田中俊輔, 武市靖, 増山幸衛, 高橋尚人 : 凍結路面のすべり抵抗特性および凍結抑制効果の定量評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E1(舗装工学)67巻1号, 2011.
- [51] 安藤和彦, 倉持智明 : 路面のすべり摩擦と路面管理水準及びすべり事故, 土木技術資料 52-5, 2010.
- [52] Jay N. Meegoda, Shengyan Gao : Evaluation of pavement skid resistance using highspeed texture measurement, JOURNAL OF TRAFFIC AND TRANSPORTATION ENGINEERING, 2015.
- [53] ELSENAAR. PMW, Reichert. J, Sautery. R : PAVEMENT CHARACTERISTICS AND SKID RESISTANCE, Second International Skid Prevention Conference, 1977.
- [54] 景山一郎, 小林ゆき, 原口哲之理, 浅井基博, 松本学 : 実路面の摩擦特性計測に関する研究-計測システムの基本設計について-, 自動車技術会

論文集 vol51 No.5, 2020.

- [55] U. Sandberg, A. Bergiers, J. A. Ejsmont, L. Goubert, R. Karlsson, M. Zoller : Rolling Resistance -Measurement Methods for Studies of Road Surface Effects, Report MIRIAM\_SP1\_02, 2012.
- [56] Robert L. Jackson, J. Richard Willis, Michael Arnold, Clay Palmer : Synthesis of the effects of pavement properties on tire rolling resistance, NCAT Report 11-5, 2011.
- [57] S.D. Mookhoek, W. van Kantem-Roos, F. Bijleveld : Making roads energy efficient by reducing rolling resistance, NARCIS, 2017.
- [58] Larry R. Evans, James D. Maclsaac Jr., John R. Harris, Kenneth Yates, Walter Dudek, Jason Holmes, Dr. James Popio, Doug Rice, Dr. M. Kamel Salaani : Tire Fuel Efficiency Consumer Information Program Development; Phase2 - Effects of Tire Rolling Resistance Levels on Traction, Treadwear, and Vehicle Fuel Economy, National Highway Traffic Safety Administration, Department of Transportation, 2009.
- [59] Jerzy Ejsmont, Wojciech Owczarzak : Engineering method of tire rolling resistance evaluation, journal of international measurement confederation, 2019.
- [60] ISO18164 : Passenger car, truck, bus, and motorcycle tyres- Methods of measuring rolling resistance, 2005.
- [61] Rune Karlsson, Ulf Hammarstrom, Harry Sorensen, Olle Eriksson : Road surface influence on rolling resistance —Coastdown measurements for a car and an HGV, VTI notat 24A—2011, 2011.
- [62] Evans E., Zemroch P. : Measurement of the aerodynamic and rolling resistances of road tanker vehicles from coast-down tests, Proc Instn Mech Engrs V198D, 1984.
- [63] Barrand J., Bokar J. : Reducing tire rolling resistance to save fuel and lower emissions, SAE Int. J. Passenger Cars- Mech. Syst., 2009.
- [64] Matteo Pettinari, Bjarne Bo Lund-Jensen, Bjarne Schmidt : Low rolling resistance pavements in Denmark, 6<sup>th</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress,

- 2016.
- [65] J. Hoogwerff, E.W. van Gils, H. F. Reinink : Influence of road surface type on rolling resistance, M+P Raadgevende ingenieurs BV, 2013.
- [66] Richard C. Sohaney, Robert Otto Rasmussen : Pavement Texture Evaluation and Relationships to Rolling Resistance at MnROAD, The Transtec Group, Inc. Reseach Project Final Report 2013-16, 2013.
- [67] Yue Huang, Haibo Chen : Review of rolling resistance on fuel consumption of truck, 13<sup>th</sup> ITS European Congress, 2019.
- [68] T. wang, J. Harvey, J. D. Lea, and C. Kim : Impact of Pavement Roughness on Vehicle Free-Flow Speed, University of California Pavement Research Center, 2013.
- [69] A. Bergiers, L. Goubert : About the rolling resistance trailer and parameters influencing rolling resistance, SURF2012, 2012.
- [70] Beata Swieczko-Zurek, Piotr Jaskula, Jerzy Ejsmont, Agnieszka kedzierska : Rolling Resistance and tire/road noise on Rubberized Asphalt pavement in Poland, PAR 2015 Rubberized Asphalt – Asphalt Rubber Conference “Future pavement, Now”, 2015.
- [71] 鈴木忠, 平井洋, 細井賢三 : 重量ディーゼル車の燃費シミュレーション, 自動車研究, 2003.
- [72] 鈴木忠, 細井賢三 : 重量 AT 車を対象とした燃費シミュレーション手法の研究, 自動車研究, 2007.
- [73] 水嶋教文, 森吉泰生, 窪山達也, 上野涼, 堀隼基 : 実車計測による乗用車燃費シミュレーションモデルの開発とその活用 (第1報) – タイヤ性能の違いが車両性能に及ぼす生協の定量評価 –, 自動車技術会論文集 vol49, No.3, 2018.
- [74] 森吉泰生, 水嶋教文, 上野涼, 窪山達也, 金尚明 : 実車計測による乗用車燃費シミュレーションモデルの開発とその活用 (第2報) – エンジン技術の改良による燃費改善効果の評価 –, 自動車技術会論文集 vol49, No.3, 2018.
- [75] 新見龍男, 吉本徹 : 大型車の燃料消費量を考慮したコンクリート舗装と

## 第1章 序論

- アスファルト舗装の LCCO<sub>2</sub>, 土木学会論文集 E1(舗装工学),vol76,No.2, 2020.
- [76] 渡邊一弘, 井谷雅司, 久保和幸: 路面の“きめ”と転がり抵抗の関係について, 土木技術資料 54-3, 2012.
- [77] Carsten Hoever, Wolfgang Kropp : A model for investigating the influence of road surface texture and tyre tread pattern on rolling resistance, Journal of Sound and Vibration, 2015.
- [78] ULF Sandberg : Asphalt rubber pavements in Sweden – Noise and rolling resistance properties, inter noise 2010, 2010.
- [79] J. Richard Willis, Mary M. Robbins, Marshall Thompson : Effects of pavement properties on vehicular rolling resistance; A literature review, National Center for Asphalt Technology, 2015.
- [80] Shabnam Rajari, Roozbeh Dargazany, Karim Chatti : Pavement surface characterization for optimization of tradeoff between grip and rolling resistance, Center for Highway Pavement Preservation, 2016.
- [81] Gerardo W. Flintsch, Edgar de Leon, Kevin K. McGhee, Imad L. AI-Qadi : Pavement Surface Macrotexture Measurement and Application, TRB 2003 Annual Meeting, 2003.
- [82] Vaiana R., Capiluppi G.F., Gallelli V., Iuele T., Minani V. : Pavement Surface Performances Evolution: an Experimental Application, SII – 5<sup>th</sup> International Congress - Sustainability of Road Infrastructures, 2012.
- [83] Amit Vashisth, Ravinder Kumar : Review on effect of pavement Characteristics on Fuel Consumption, International Journal of Engineering and Advanced Technology, 2018.



## 第 2 章

# タイヤ／路面転がり抵抗の小さな アスファルト舗装技術の開発



## 第2章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発

### 2.1 緒言

第2章では、タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の検討として、はじめに、既往の研究より路面プロファイルと転がり抵抗の関係について整理した。そして、タイヤ／路面転がり抵抗の低減と、その性能を維持するようなテクスチャと、そのテクスチャを構築するためのアスファルト混合物の配合や施工方法について検討した。

次に、上記配合検討結果に基づいて、実機による試験施工を行い、目標とするテクスチャや路面プロファイルの構築方法について検証した。施工後は、路面性状値を測定するとともに、タイヤ／路面転がり抵抗を直接評価方法（詳細は第5章で述べる）で評価した。

さらに、湿潤路面でのすべり抵抗性能について検証するために、タイヤ／路面転がり抵抗とすべり抵抗の関係について検討した。検討では、従来道路の管理で用いられているスリップ率100%のときのすべり摩擦係数であるロック $\mu$  ( $\mu_{\text{lock}}$ ) とすべり摩擦係数が最大となるときのすべり摩擦係数であるピーク $\mu$  ( $\mu_{\text{peak}}$ ) とを用いてタイヤ／路面転がり抵抗係数との関係について検討した。

## 2.2 配合および施工に関する検討

### (1) タイヤ／路面転がり抵抗と路面プロファイル波長領域の関係

自動車分野におけるタイヤの転がり抵抗は，①変形抵抗，②接地摩擦，③空気抵抗に分けることができる[1][2]．その入力周波数は走行速度に依存するものの $10^{-2} \sim 100$  Hzであり，タイヤの変形を抑制することで転がり抵抗を低減できるものと考えられている[3]．

一方，舗装分野においては，世界道路協会(PIARC)が路面プロファイルの波長領域区分と舗装性能[4]との関係について図-2.1のように示している．

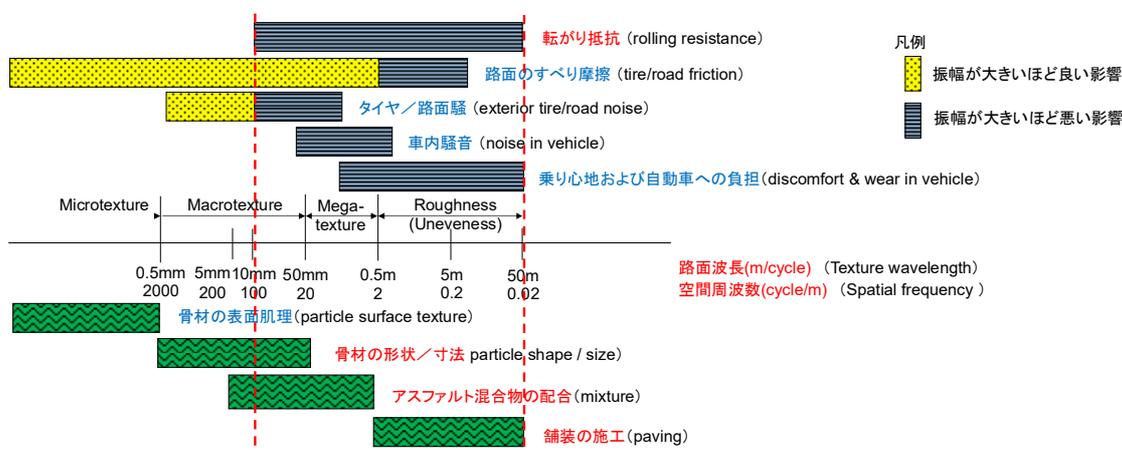


図-2.1 路面プロファイル区分と舗装性能，および材料／施工の関係

図-2.1より，路面プロファイルは波長領域により各種の舗装性能に及ぼす影響が異なり，転がり抵抗はマクロテクスチャからラフネス波長領域の振幅を小さくすることで低減できることがわかる．

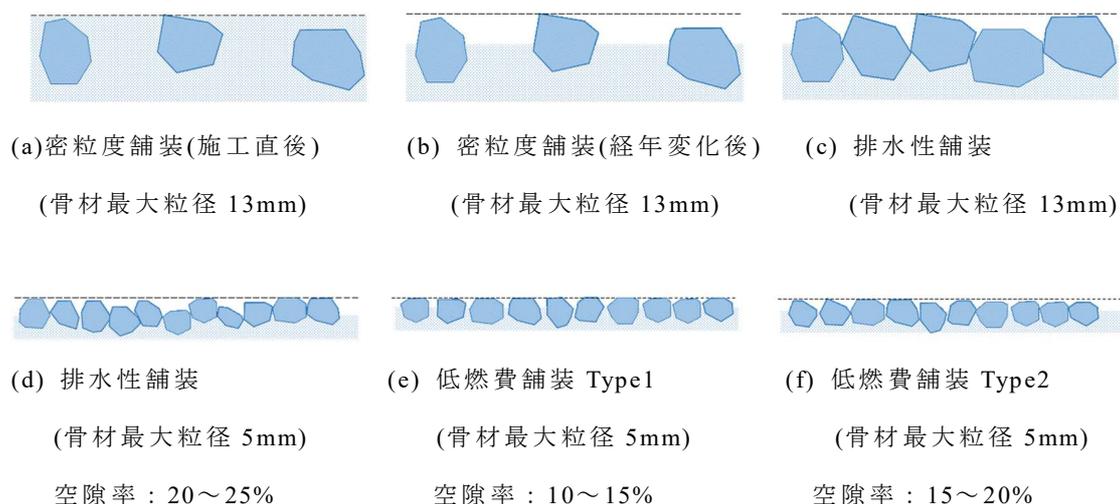
また，図-2.1の下部には路面プロファイル区分と材料／施工の関係の検討結果を示している．転がり抵抗に影響を与える路面プロファイルのうちマクロテクスチャ(Macro Texture)からメガテクスチャ(Mega Texture)までの波長領域にはアスファルト混合物に用いる骨材や配合が影響を及ぼし，ラフネス(Roughness)波長領域には施工に起因する要因が影響を及ぼすと考えた．そして，これらの波長領域の振幅を小さくするような配合および施工を用いることでタイヤ／路面転がり抵抗を小さくできると考えた．

## 第2章 タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発

### (2) タイヤ/路面転がり抵抗の小さな路面プロファイルと配合および施工

次に、具体的な路面テクスチャ形状と配合，材料について検討した．ここで，開発目標とするタイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装のことを低燃費舗装と呼ぶこととした．そして，低燃費舗装の基本コンセプトとして，従来舗装である排水性舗装の機能，安全性を有しながらタイヤ/路面転がり抵抗低減性能を有することとした．

図-2.2 に，各種アスファルト混合物の路面テクスチャ断面図とその配合を示す．図-2.2 はわが国で一般的に使用されている密粒度舗装，排水性舗装と，タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装として 2 種類の低燃費舗装を示した．低燃費舗装 Type1 は低燃費舗装の標準型で，低燃費舗装 Type2



項目	(a) (b)	(c)	(d)	(e)	(f)
配合名	密粒度舗装 (13)	排水性舗装 (13)	排水性舗装 (5)	低燃費舗装 Type1	低燃費舗装 Type2
骨材最大粒径 (mm)	13	13	5	5	5
舗装厚 (mm)	40～50	40～50	20～40	20～40	20～40
骨材通過質量百分率%)	13.2 (mm)	95～100	90～100	100	100
	4.75 (mm)	55～70	11～35	90～100	90～100
	2.36 (mm)	35～50	10～20	5～15	20～40
	0.075 (mm)	4～8	3～7	3～7	5～10
アスファルト量 (%)	5～6	4～6	4～6	5～7	4～6
空隙率 (%)	3～6	15～25	20～25	10～15	15～20

図-2.2 各種アスファルト混合物の路面テクスチャの断面図と配合

## 第2章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発

は低燃費舗装の排水性重視型とした．骨材最大粒径と空隙率の違いにより形成される路面テクスチャの違いを断面図で示した．なお，図中の破線は舗装表面のピークレベル基準線を示している．

図-2.2(a)に示す骨材最大粒径 13mm の密粒度舗装(以下，密粒度舗装(13))は施工直後の状態では，ネガティブテクスチャとよばれる舗装表面のピークレベルの形状が平滑なテクスチャが形成されているのに対して，図-2.2(b)に示す経年変化後は，交通に伴い表面のアスファルトモルタル分がなくなることによって，ポジティブテクスチャとよばれる舗装表面のピークレベルの形状が突起状に露出したテクスチャに変化している．つまり密粒度舗装(13)は経年変化によりタイヤ／路面転がり抵抗が増加しやすい路面と考えられる．

一方，図-2.2(c)に示す骨材最大粒径が 13mm の排水性舗装(以下，排水性(13))の路面テクスチャはポジティブテクスチャとみなせるテクスチャ形状であるが，密粒度舗装(13)よりもその変化が比較的少ない舗装と考えられる．

次に，図-2.2(c)～(f)より，排水性舗装の路面テクスチャは骨材最大粒径と空隙率の違いにより大きく変化することがわかる．図-2.2(d)～(f)の骨材最大粒径 5mm の排水性舗装(以下，排水性舗装(5))や低燃費舗装は，図-2.2(c)の排水性舗装(13)よりも，テクスチャ波長領域の振幅は小さくなる．したがって，使用骨材の小粒径化により，タイヤ／路面転がり抵抗の低減を図ることが可能と考えた．

図-2.2の断面図(d)～(f)は，同じ最大粒径 5mm 同士で，アスファルトモルタル量の違いにより，空隙率を変化させたものを比較したものである．アスファルトモルタル量を支配する 2.36mm ふるい通過質量の割合が多いほど，空隙率は小さくなることがわかる．図-2.2(e)，(f)に示す低燃費舗 Type1 と低燃費舗装 Type2 は，アスファルトモルタル量が多くなることから，個々の骨材が，敷き均しと転圧の過程において，路面に緻密に配置されて，ピークレベル基準線に沿った平滑な路面が形成されやすいと考えた．

以上より，タイヤ／路面転がり抵抗を小さくするアスファルト混合物の配合として，ネガティブテクスチャを構築しながら，供用に伴うテクスチャの変化が小さくなるように骨材最大粒径を 5mm とし，2.36mm 通過量を 10～40%とすることとした．

## 2.3 試験施工による構築技術の検討

### 2.3.1 試験路面

上記の考え方をもとに、タイヤ／路面転がり抵抗を小さくする路面プロファイルの構築技術を検討するため、実機を用いた試験施工を実施した。

試験施工は国土技術政策総合研究所の試験走路に低燃費舗装の通常型として低燃費舗装Type1, 低燃費舗装の排水性能重視型として低燃費舗装Type2, そしてわが国で一般的な舗装として密粒度舗装(13), 排水性舗装(13)の計4種類をそれぞれ300m毎施工した。試験路面の種類を表-2.1に示す。

表-2.1 試験路面の種類

舗装種別	排水性舗装(13)	密粒度舗装(13)	低燃費舗装Type1	低燃費舗装Type2
最大粒径(mm)	13	13	5	5
通過粒度百分率(%)	19mm	100	100	100
	13.2mm	90～100	95～100	100
	4.75mm	11～35	55～70	90～100
	2.36mm	10～20	35～50	20～40
	0.6mm	-	18～30	-
	0.075mm	3～7	4～8	5～10
アスファルト量(%)	4～6	5～7	5～6	4～6
空隙率(%)	15～25	3～6	10～15	15～20

### 2.3.2 施工方法

表-2.2に試験施工の舗装構造と転圧機械編成を示す。表-2.2に示すように、低燃費舗装Type1と低燃費舗装Type2は2層構造とした。これは、2層構造とすることによりラフネス波長領域における振幅を小さくし、平坦性を確保するためである。また、下層に用いる密粒度アスファルト混合物には、耐久性向上のためにストレートアスファルトよりも供用による変形抵抗性に優れているポリマー改質アスファルトⅡ型を用いた。

表-2.2 試験施工の舗装構造と転圧機械編成

工区	舗装構造		転圧機械編成	
	舗装の種類	厚さ (mm)	初転圧	二次転圧
E1	排水性舗装(13)		マカダムローラ	タイヤローラ
E2	密粒度舗装(13)		マカダムローラ	タイヤローラ
E3	上層	低燃費舗装Type2	タンデムローラ	タンデムローラ
	下層	密粒度舗装(13)	マカダムローラ	タイヤローラ
E4	上層	低燃費舗装Type1	タンデムローラ	タンデムローラ
	下層	密粒度舗装(13)	マカダムローラ	タイヤローラ

転圧機械編成では、一般的には、舗装の二次転圧にはタイヤローラが用いられるが、タイヤローラはニーディング作用を期待した締固め機械であることから、ポジティブテクスチャが形成されやすい。このため、低燃費舗装Type1と低燃費舗装Type2ではネガティブテクスチャの形成を目的に、鉄輪ローラ2台（マカダムローラ、タンデムローラ）を使用した転圧とした。

一方、排水性舗装(13)と密粒度舗装(13)では、通常の舗装における施工機械編成である、初転圧に鉄輪ローラ、二次転圧にタイヤローラを使用した。

なお、敷き均しに用いたアスファルトフィニッシャはどの工区も同じ機械を用いた。

写真-2.1に試験施工の施工状況、写真-2.2に試験施工の完了を示す。

第2章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発



写真-2.1 試験施工の施工状況



写真-2.2 試験施工の完了

### 2.3.3 測定方法

試験施工後に、タイヤ/路面転がり抵抗係数、IRI (International Roughness Index) ,平たん性, MPD(Mean Profile Depth), 浸透水量, およびタイヤ/路面騒音を測定した。測定方法と項目を表-2.3に示す。

タイヤ/路面転がり抵抗係数の測定方法は第5章で述べる方法で測定した。また、タイヤ/路面騒音は、RAC車により測定した。

表-2.3 測定項目

項目	指標	測定方法	舗装調査・試験法便覧
縦断凹凸形状	IRI(mm/m)	S032	国際ラフネス指数(IRI)の調査方法
	平たん性(mm)	S028	舗装路面の平坦性測定方法
きめ深さ	MPD(mm)	S022-T	回転式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
排水性能	浸透水量(mL/15秒)	S025	現場透水量試験方法
タイヤ/路面騒音	タイヤ/路面騒音 (RAC車換算値) (dB)	S027-1	普通タイヤによるタイヤ/路面騒音測定方法



(a)すべり抵抗測定車

(b)測定タイヤ(第5輪)

測定装置	垂直昇降式縦横両用型すべり計
測定タイヤ	すべり測定用標準タイヤ(リブタイヤ) ASTM E-501 準拠
タイヤ条件	タイヤサイズ: 165-SR13, タイヤ内圧: 0.176 MPa
輪荷重	3,969N±98N
測定項目	TF(けん引力)、CF(コーナリングフォース)、W(輪荷重)、SF(サイドフォース)、BF(制動力)、測定輪温度、速度
サンプリング間隔	0.01 s

図-2.3 すべり抵抗測定車の概要

### 2.3.4 結果

#### (1) 路面の外観

路面の外観を写真-2.3に示す。写真-2.3をみると、低燃費舗装Type1,低燃費舗装Type2は、図-2.2の(e), (f)に示すような、排水性舗装(13)と密粒度舗装(13)の中間のような外観となった。



a) 排水性舗装(13)



b) 密粒度舗装(13)



c) 低燃費舗装 Type1



d) 低燃費舗装 Type2

写真-2.3 路面の外観

(2) タイヤ/路面転がり抵抗係数

タイヤ/路面転がり抵抗係数の測定結果を図-2.4に示す。図-2.4より、低燃費舗装Type1と低燃費舗装Type2は、一般的な舗装の密粒度舗装(13)や排水性舗装(13)よりも、すべての速度域で小さくなった。排水性舗装(13)と60km/hの場合で比較すると、タイヤ/路面転がり抵抗係数は約7.5%低減した。

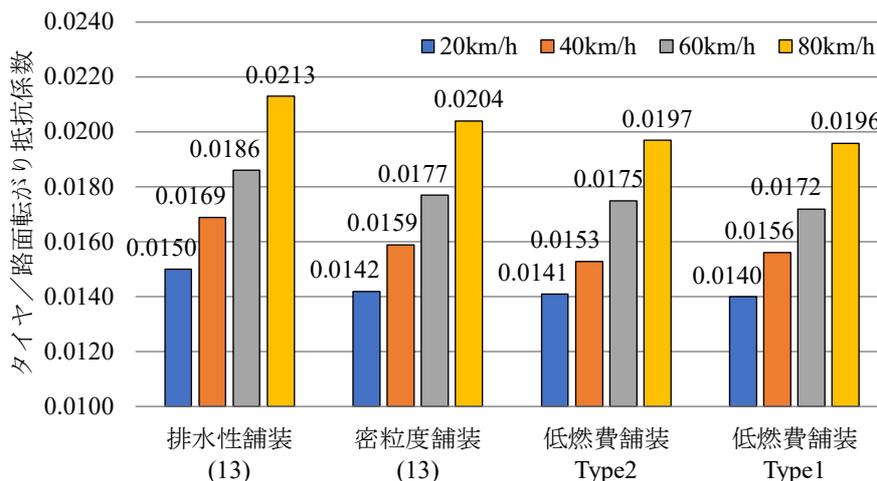


図-2.4 タイヤ/路面転がり抵抗係数の測定結果

(3) IRI, 平たん性

IRI, 平たん性の測定結果を図-2.5, 図-2.6に示す。図-2.5, 図-2.6より、低燃費舗装Type1および低燃費舗装Type2は、排水性舗装(13), 密粒度舗装(13)よりもIRIおよび平たん性ともに小さくなった。これより、2層構造とすることでラフネス波長領域の振幅を小さくできることを確認した。

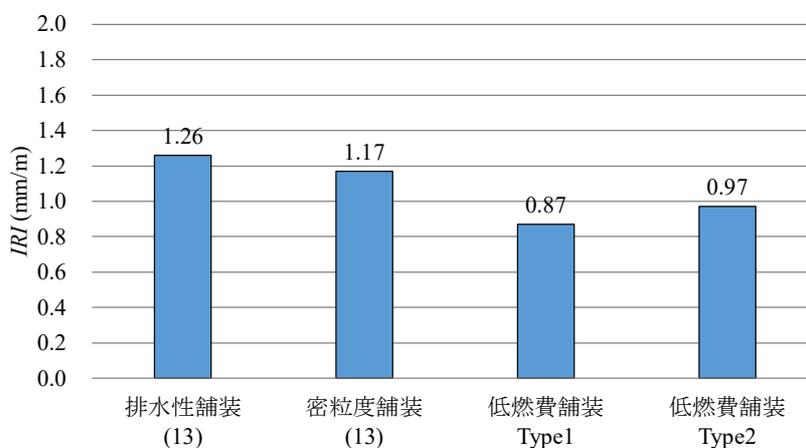


図-2.5 IRI の測定結果

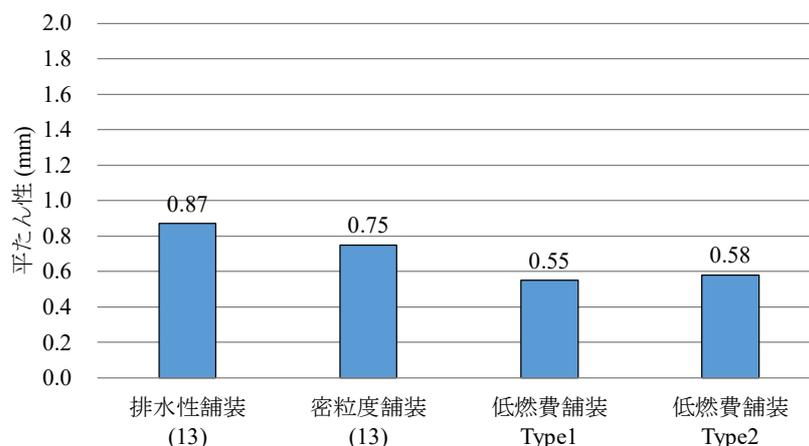


図-2.6 平たん性の測定結果

(4) MPD

MPDの測定結果を図-2.7に示す。図-2.7より、低燃費舗装Type1および低燃費舗装Type2は、0.6～0.7mm程度であり、排水性舗装(13)より小さく、密粒度舗装(13)より大きくなった。この結果は図-2.2や路面外観と合致した。

これより、最大粒径は5mmに小粒径化、2.36mm通過量は10～40%の配合、および鉄輪ローラ転圧することにより、適度なテクスチャを確保できることを確認した。

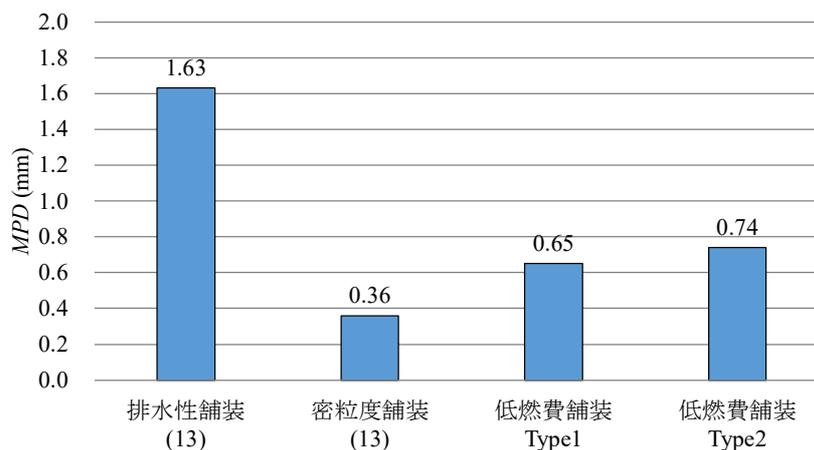


図-2.7 MPD の測定結果

(5) 浸透水量

浸透水量の結果を図-2.8に示す．なお，密粒度舗装(13)は透水しないために対象外とした．図-2.8より，いずれの舗装も排水性舗装(13)の目標値である1000ml/15秒の値を満足していた．低燃費舗装Type1，低燃費舗装Type2は，排水性舗装(13)より劣るものの表面排水性能を有していることを確認した．

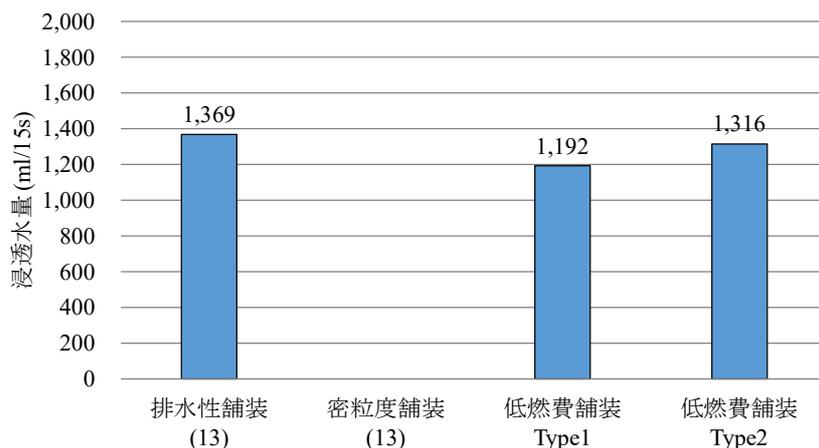


図-2.8 浸透水量の測定結果

(6) タイヤ／路面騒音

タイヤ／路面騒音の測定結果を図-2.9に示す．図-2.9より，タイヤ／路面騒音については，排水性舗装(13)よりも小さくなった．タイヤ／路面転がり抵抗が小さくなるとともに，タイヤ／路面騒音も小さくなることを確認した．

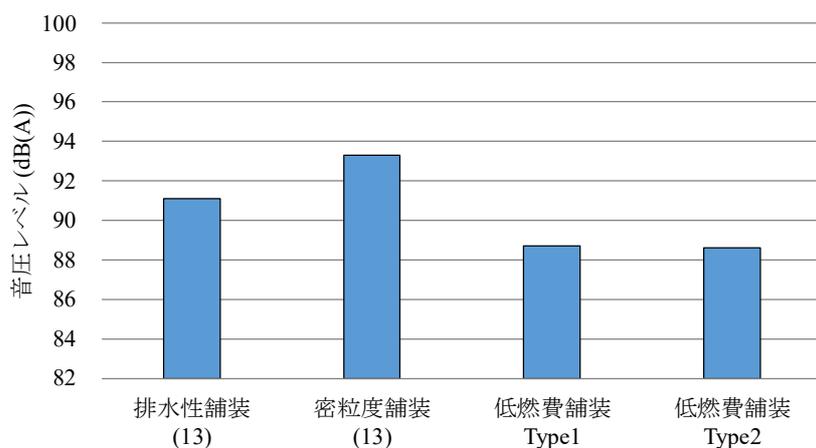


図-2.9 タイヤ／路面騒音の測定結果

### 2.3.5 まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す．

- (1) 舗装構造は2層構造とすることでラフネス波長領域の振幅が小さい路面を構築ができることを確認した．
- (2) 使用骨材の小粒径化や鉄輪ローラのための転圧仕上げとすることで、タイヤ／路面転がり抵抗を小さくするであろう、テクスチャ波長領域の振幅が小さいネガティブテクスチャを有した路面を構築することができた．
- (3) タイヤ／路面転がり抵抗係数の測定結果から、低燃費舗装Type1および低燃費舗装Type2は、従来舗装である排水性舗装(13)よりも、タイヤ／路面転がり抵抗が低減していることを確認した．また、その他性能についても排水性舗装(13)と同等の性能を有していることを確認した．

### 2.4 タイヤ／路面転がり抵抗とすべり抵抗に関する検討

#### 2.4.1 概要

自動車およびタイヤ工学分野[3]における低燃費タイヤの開発では、湿潤時制動性能との両立を図らなければならない。

路面のすべり抵抗性能は、舗装の構造に関する技術基準[5]の中では必要に応じて定める舗装の性能指標として位置付けられているとともに、走行安全性の観点からも重要な指標の一つとなっている。

一般的にスリップ率10～30%程度のときに摩擦係数は最大となり、この時の摩擦係数はピーク $\mu$ （以下、 $\mu_{\text{peak}}$ ）と呼ばれている[6]。その後ブレーキを踏み続けるとスリップ率は100%の状態、つまりはタイヤが完全にロックした状態となり、この時の摩擦係数はロック $\mu$ （以下、 $\mu_{\text{lock}}$ ）と呼ばれ、 $\mu_{\text{peak}}$ よりも小さい値となる[6]。 $\mu_{\text{lock}}$ は、縦すべり摩擦係数とも呼ばれ、舗装の性能指標の一つとなっているが、 $\mu_{\text{peak}}$ は舗装の性能指標となっていない。

近年アンチロック・ブレーキ・システム(Antilock Brake System以下、ABS)を搭載されている車両が一般的となっている。このABSは自動車の走行中に強くブレーキを踏み込んでもコンピューター制御によりタイヤがロックするのを防いで、車両のハンドル操作が可能となるシステムであり、トラクションコントロールやコーナリング時の横滑り防止機能等にも応用されている。このABSはタイヤがロックする前の制動力を感知することで作動している。このため、今後の自動車技術の発展に合わせた路面の性能管理を考えると $\mu_{\text{peak}}$ による管理も重要になると考えた。

以上より、本検討では低燃費舗装の湿潤路面のすべり抵抗性能の検証として、はじめに① $\mu_{\text{lock}}$ 、 $\mu_{\text{peak}}$ 、およびタイヤ／路面転がり抵抗係数(以下、 $RRC$ )の関係に関する検討、次に②舗装の種類と $\mu_{\text{lock}}$ と $\mu_{\text{peak}}$ との関係に関する検討、そして最後に③路面テクスチャと $\mu_{\text{lock}}$ 、 $\mu_{\text{peak}}$ との関係に関する検討を実施した。

## 2.4.2 実験方法

(1)  $\mu_{\text{lock}}, \mu_{\text{peak}}$  の測定

舗装調査・試験法便覧[7]にある]すべり抵抗を評価する試験機は、すべり抵抗測定車、振り子式スキッドレジスタンステスト、および回転式すべり抵抗測定機を用いる方法であるが、本検討では、タイヤ/路面転がり抵抗係数（以下、 $RRC$ ）との比較を行うことから、 $RRC$ の測定と同じ測定機としてすべり抵抗測定車を用いて測定した。測定に用いたすべり抵抗測定車は、図-2.3(前項)と同じものを使用した。

$\mu_{\text{lock}}$ と $\mu_{\text{peak}}$ の測定は、散水ノズルより試験輪の前方に散水をしながら、実験路面を一定速度で直進させて、工区の中央付近で測定した。散水量は平滑面での水膜厚が1.0mmとなる散水量となるように速度毎に設定し、一定の垂直荷重を載荷した試験輪に制動をかけて実施した。走行速度は20km/h、40km/h、60km/h、80km/h、100km/hとした。測定では、制動の掛け始めからのけん引力 $R_c$  (N)と垂直荷重 $F_z$  (N)を100Hzのサンプリング周波数で収集し、式(2.1)により摩擦係数 $\mu(t)$ を算出した。

$$\mu(t) = \frac{R_c(t)}{F_z(t)} \quad (2.1)$$

そして、 $\mu(t)$ は、ISO 23671[8]に倣って、5区間単純移動平均によりフィルタ処理した。フィルタ処理した $\mu(t)$ の時系列データより、 $\mu_{\text{peak}}$ は $\mu(t)$ の最大値、 $\mu_{\text{lock}}$ は $\mu(t)$ が安定した0.5~1.0秒間の平均値とした。

(2)  $RRC$ の測定

$RRC$ は、走行速度20km/h、40km/h、60km/h、80km/hで測定した。測定方法の詳細は第5章に示す。 $RRC$ の算出では測定輪である第5輪を自由転動させているときのけん引力 $R_0$ から微小なハンドル操作により発生する横力を補正した $R_0$ を式(2.2)から求めた。そして、式(2.3)より、その $R_0$ を輪荷重 $F_z$ で除してタイヤ/路面転がり抵抗係数 $RRC$ を算出した。

$$R_0 \approx \left( R_c - \frac{F_c^2}{k_y} \right) / \left\{ 1 + \left( \frac{F_c}{F_z} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.2)$$

$$RRC = \frac{R_0}{F_z} \quad (2.3)$$

ここで、 $R_0$ ：横力がゼロのときのけん引力(N)

$F_c$ ：コーナリングフォース(N)

$k_y$ ：コーナリングパワー  $k_y = CC \times F_z$

CC：コーナリング係数(0.23)

### (3) 路面テクスチャの測定

路面テクスチャの測定に用いた測定機の概要を図-2.10に示す。路面テクスチャ測定では、各工区中央付近において1箇所ずつ測定面積0.1m×0.1mを測定した。測定後のデータは骨材形状を対象とした波長領域として2.5 mm～200 mmの波長領域、骨材表面の形状を対象とした波長領域として1.0 mm以下の波長領域となるようにそれぞれフィルタ処理を行った。そして、ISO25178[9]で定義されている表面性状パラメータを算出した。

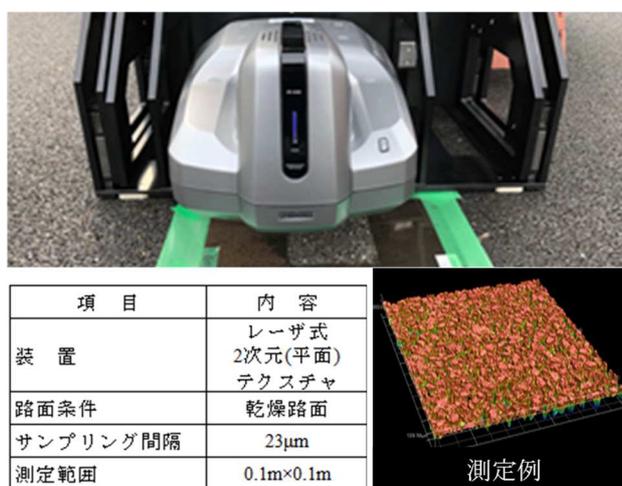


図-2.10 路面テクスチャ測定装置

### (4) 測定路面

測定した路面は、2.3節で施工した低燃費舗装Type1および低燃費舗装Type2の2路面と日本の代表的な路面の9路面とを合わせた計11路面で行った。E1～E4の路面は施工後比較的年数の経過していない新しい路面(以下、New)

## 第2章 タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発

であり、W1～W7の路面は、施工後10年以上経過した古い路面(以下、Old)である。試験路面の種類とIRI,MPD,およびRRCを表-2.4に示す。なお、表中の舗装の種類にある()内の数字は、骨材の最大粒径の大きさ(単位:mm)を表している。

表-2.4 試験路面

NO.	舗装の種類	IRI (mm/m)	MPD (mm)	RRC				路面の状態
				20km/h	40km/h	60km/h	80km/h	
E1	排水性舗装(13)	1.26	1.63	0.0150	0.0169	0.0186	0.0213	New
E2	密粒度舗装(13)	1.17	0.36	0.0142	0.0159	0.0177	0.0204	New
E3	低燃費舗装Type2	0.97	0.74	0.0141	0.0153	0.0175	0.0197	New
E4	低燃費舗装Type1	0.87	0.65	0.0140	0.0156	0.0172	0.0196	New
W1	砕石マスチック舗装(5)	2.01	0.72	0.0152	0.0166	0.0202	0.0226	Old
W2	砕石マスチック舗装(13)	1.73	1.21	0.0157	0.0177	0.0208	0.0232	Old
W3	排水性舗装(5)	1.46	1.01	0.0159	0.0166	0.0200	0.0228	Old
W4	排水性舗装(5)	1.70	1.07	0.0158	0.0168	0.0195	0.0222	Old
W5	排水性舗装(13)	1.51	1.79	0.0163	0.0173	0.0203	0.0221	Old
W6	密粒度舗装(13)	1.29	0.71	0.0161	0.0173	0.0201	0.0230	Old
W7	連続鉄筋コンクリート舗装	1.50	0.40	0.0164	0.0178	0.0204	0.0229	Old

### 2.4.3 タイヤ／路面転がり抵抗とすべり抵抗

#### (1) $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ の関係

$\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ の関係を図-2.11に示す．図-2.11は横軸を $\mu_{lock}$ ，縦軸を $\mu_{peak}$ とし速度別にプロットしたものである．

図-2.11より， $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ との関係は，全ての速度において $\mu_{peak}$ の方が大きくなり，速度20km/hの時に約1.3倍であるが，100km/hになると約1.8倍とその差が大きくなった．さらに， $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ に関する路面間の評価順位は，速度が異なるとその順位が入れ替わることが散見された．

このことより， $\mu_{lock}$ の方が安全側の評価となるものの， $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ は速度により評価順位が入れ替わることから，今後の路面管理では $\mu_{lock}$ のみならず， $\mu_{peak}$ での評価も必要であると考えた．

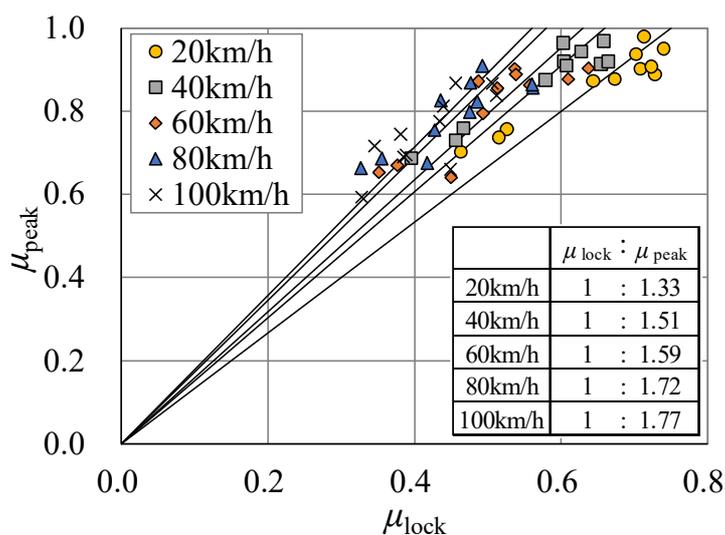


図-2.11  $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ との関係

#### (2) $RRC$ と $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ の関係について

$RRC$ と $\mu_{lock}$ ， $\mu_{peak}$ との関係をそれぞれ，図-2.12,図-2.13に示す．

図-2.12，図-2.13は $RRC$ と $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ の関係を速度別にプロットしたものである．図-2.12，図-2.13より， $RRC$ と $\mu_{lock}$ は負の関係にあった．また， $RRC$ と $\mu_{peak}$ とは相関係数は小さく負の関係があるとは言い切れないが，正の関係はないといえる．これより，タイヤ／路面転がり抵抗が小さいとすべり抵抗も

小さくなるといった直接的な関係は見られなかった。

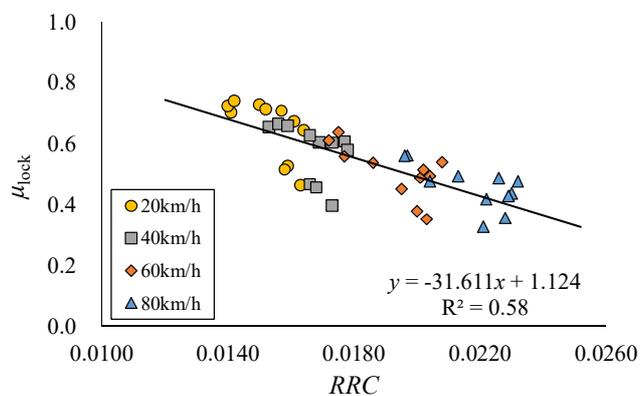


図-2.12 RRC と  $\mu_{lock}$  の関係

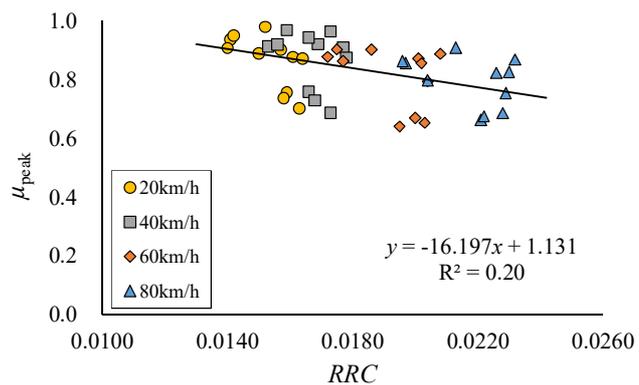


図-2.13 RRC と  $\mu_{peak}$  の関係

### 2.4.4 路面の種類とすべり抵抗

#### (1) 低燃費舗装の $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$

低燃費舗装と他の測定路面の $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ を比較した結果を図-2.14と図-2.15に示す。図-2.14および図-2.15には、本検討により対象とした路面における最大値，最小値，および平均値と低燃費舗装Type1と低燃費舗装Type2の測定値も合わせて示した。

図-2.14および図-2.15より，全ての速度においても $\mu_{lock}$ ， $\mu_{peak}$ ともに低燃費舗装Type1,低燃費舗装Type2ともに他の測定路面と比較して，上位の値となっていた。

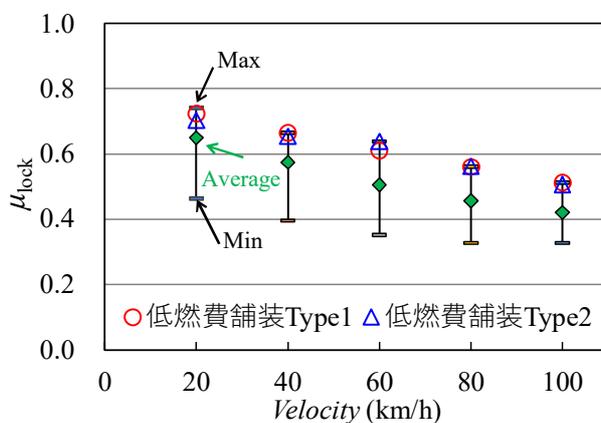


図-2.14 速度と $\mu_{lock}$ との関係

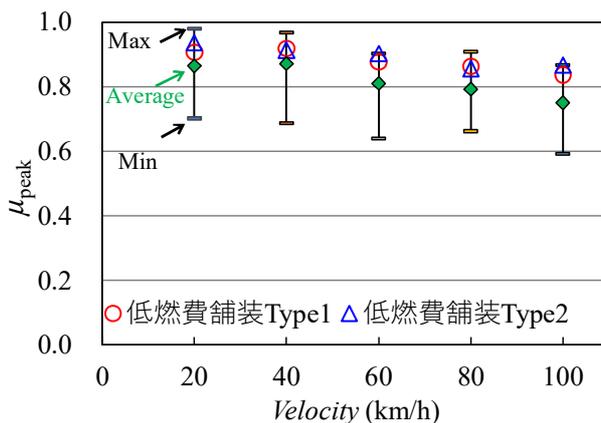


図-2.15 速度と $\mu_{peak}$ との関係

(2) 路面の種類と $\mu_{lock}$ ,  $\mu_{peak}$ との速度に関する関係

$\mu_{lock}$ ,  $\mu_{peak}$ と速度との関係を路面種別に検討した結果を図-2.16, 図-2.17に示す. ここでは, 代表して排水性舗装(13), 低燃費舗装Type2, および密粒度舗装(13)の3種類を選出し, そしてそれぞれ施工後から5年未満のNew路面と, 10年以上のOld路面に分けて比較を行った. なお, 低燃費舗装Type2に関しては, 古い路面がないために排水性舗装(5)をOld路面とした.

はじめに, 図-2.16より, 全ての路面でOld路面よりもNew路面の方が $\mu_{lock}$ は大きくなった. これは, Old路面は供用によるすり磨きにより, 表面凹凸が滑らかになったことが要因であると考えた.

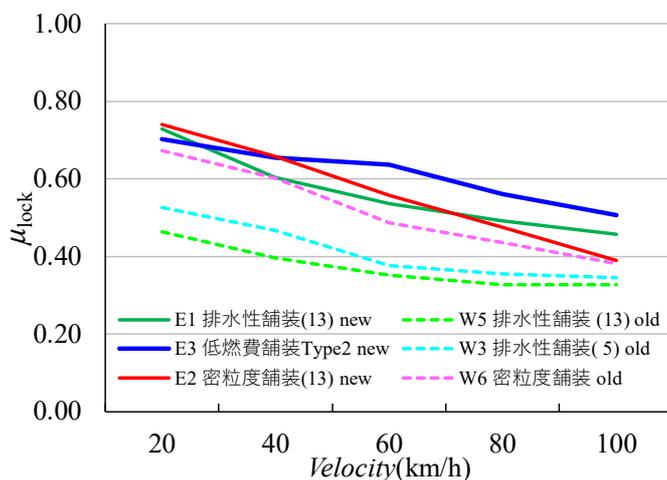


図-2.16 舗装の種類と $\mu_{lock}$ との関係

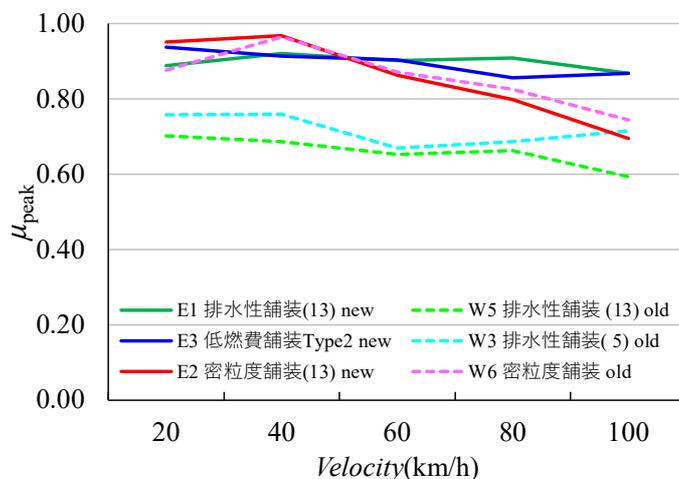


図-2.17 舗装の種類と $\mu_{peak}$ との関係

## 第2章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の開発

次に図-2.17をみると、概ね図-2.16と同様の傾向であるが、 $\mu_{\text{peak}}$ では $\mu_{\text{lock}}$ と異なり、速度に応じた低下傾向が排水性舗装(13)、低燃費舗装Type2の方が密粒度舗装(13)よりも小さかった。これは、排水性舗装(13)、低燃費舗装Type2特有の適度なテクスチャによる表面排水機能によってタイヤ路面間の水膜構成を阻害したためであると考えた。

2.4.5 路面テクスチャとすべり抵抗

上記までの検討から、低燃費舗装も含めてすべり抵抗には舗装の種類よりも骨材形状や骨材表面のテクスチャが影響を及ぼしていると考えた。そこで、ここでの検討ではすべり抵抗に影響を及ぼす指標として、ISO25178[9]で定義されている表面性状パラメータから選出した指標と $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ との関係について検討した。表面性状パラメータの算出では、骨材形状を表すマクロテクスチャ波長領域として2.5 mm~200 mmの波長領域から求めた山頂部の主曲率を表す $Spc$ と、骨材表面の形状を表すマイクロテクスチャ波長領域として1.0 mm以下の波長領域にフィルタ処理を施して求めた高さ分布の鋭さを表す $Ssk$ を選定した。なお、 $Spc$ は数値が大きいほど形状が尖っていることを示しており、 $Ssk$ は数値が大きいほど細かい山が多いことを示している。そして、 $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ を目的変数、 $Spc$ および $Ssk$ をそれぞれ説明変数として重回帰分析を行った。結果を表-2.5に示す。

表-2.5 重回帰分析結果

速度 (km/h)	項目	$\mu_{lock}$			$\mu_{peak}$		
		切片	$X_1:Ssk$	$X_2:Spc$	切片	$X_1:Ssk$	$X_2:Spc$
20	相関係数	0.87			0.84		
	係数	0.080	0.154	-0.404	0.993	0.171	-0.387
	t値 ( $ t >2$ )	10.40	3.1	-2.7	10.50	3.1	-2.0
40	相関係数	0.84			0.88		
	係数	0.683	0.152	-0.316	1.062	0.168	-0.525
	t値 ( $ t >2$ )	8.70	3.0	-2.0	11.50	3.1	-2.7
60	相関係数	0.75			0.86		
	係数	0.502	0.174	-0.090	0.888	0.226	-0.302
	t値 ( $ t >2$ )	5.50	2.9	-0.5	8.40	3.7	-1.4
80	相関係数	0.70			0.78		
	係数	0.431	0.143	-0.023	0.817	0.180	-0.158
	t値 ( $ t >2$ )	5.20	2.7	-0.1	7.80	2.9	-0.7
100	相関係数	0.61			0.74		
	係数	0.319	0.113	0.159	0.652	0.207	0.105
	t値 ( $ t >2$ )	4.20	2.3	1.1	5.50	3.0	0.4

本結果より、 $\mu_{lock}$ と $\mu_{peak}$ ともに相関係数が高く骨材自体がすべり抵抗に影響を及ぼすことが示唆された。また、 $|t|$ 値は、 $Ssk$ は全速度で2以上であるが、 $Spc$ は速度により2以下のものもあるから、すべり抵抗に及ぼす影響が大きいのはマイクロテクスチャレベルの骨材表面凹凸であることが示唆された。

#### 2.4.6 まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す.

- (1) 舗装路面間の $\mu_{\text{lock}}$ と $\mu_{\text{peak}}$ の順位は, 速度が変わると路面間順位の入れ替わりが散見された.
- (2) タイヤ/路面転がり抵抗が小さくなると, すべり抵抗も小さくなるという直接的な傾向は見られなかった.
- (3) 低燃費舗装の $\mu_{\text{lock}}$ ,  $\mu_{\text{peak}}$ に関する路面間の順位は, すべての速度において上位であり優れていた.
- (4) 施工後の年数が経過した古い路面ですべり抵抗が小さくなるのは, 供用による骨材がすり磨かれたことにより, 骨材の表面凹凸も滑らかになることが要因であると考えた.

以上より, タイヤ/路面転がり抵抗が小さい路面という理由で湿潤時のすべり抵抗性能が悪くなるという傾向はみられなかった. しかしながら, 今回の検討より, 骨材表面の凹凸形状の変化によりすべり抵抗が低下することから, 走行安全性を確保するためには, 打ち替えなどの定期的な維持修繕が必要であることを改めて確認した.

## 2.5 第2章のまとめ

本章で得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 既往の研究から、タイヤ／路面転がり抵抗に影響を与える路面プロファイルのうち短い波長領域（テクスチャ波長領域）はアスファルト混合物に用いる骨材や配合が影響を及ぼし、長い波長領域（ラフネス波長領域）は施工に起因した路面プロファイルが影響を及ぼすと考えた。
- (2) タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装として、低燃費舗装構築のコンセプトを整理した。性能については、従来の排水性舗装の機能を有しながら、タイヤ／路面転がり抵抗低減性能を有する舗装とすることとした。そのために、テクスチャは舗装表面のピークラインが平滑なネガティブテクスチャとし、適度なきめ深さと空隙率を有することとした。
- (3) アスファルト混合物の配合は、ネガティブテクスチャを構築しながら、供用に伴うテクスチャの変化が小さい配合として、骨材最大粒径を5mmと小粒径化し、2.36mm通過量を10～40%とすることとした。
- (4) 舗装構造は2層構造とすることでラフネス波長領域の振幅が小さい路面を構築ができることを確認した。
- (5) 使用骨材の小粒径化や鉄輪ローラのための転圧仕上げとすることで、テクスチャ波長領域の振幅が小さいネガティブテクスチャを有した路面を構築できることを確認した。
- (6) タイヤ／路面転がり抵抗係数の測定結果から、低燃費舗装Type1および低燃費舗装Type2は、従来舗装である排水性舗装(13)よりも、タイヤ／路面転がり抵抗が7.5%低減していることを確認した。また、その他性能についても排水性舗装(13)と同等の性能を有していることを明らかにした。

- (7) 低燃費舗装の走行安全性としてすべり抵抗性能について検証し、タイヤ/路面転がり抵抗が小さくなると、すべり抵抗も小さくなるという直接的な傾向は見られず、他の舗装と同等以上のすべり抵抗を有していることを確認した。

## 第2章の参考文献

- [1] 渡邊徹郎：タイヤのおはなし，日本規格協会，1994年10月．
- [2] 一般社団法人日本自動車タイヤ協会：<https://www.jatma.or.jp>．
- [3] 馬庭孝司：ドライバーのためのタイヤ工学入門，グランプリ出版，1989．
- [4] PIARC：Technical Committee Report on Surface Characteristics，1978．
- [5] 公益社団法人日本道路協会：舗装性能評価法 - 必須および性能指標の評価法編 - ， pp62-78，2006．
- [6] 景山一郎，小林ゆき，原口哲之理，浅井基博，松本学：実路面の摩擦特性計測に関する研究 - 計測システムの基本設計について - ，自動車技術会論文集 vol51 No.5，2020．
- [7] 公益社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧，2019．
- [8] ISO 23671：2015 09 (E) Passenger car tyres Method for measuring relative wet grip performance Loaded new tyres．
- [9] ISO25178-2:2012 Geometrical product specification (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2 : term, definitions and surface texture parameters．



## 第 3 章

タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト  
舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証



### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

## 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

### 3.1 緒言

第2章までの検討において、低燃費舗装 Type1 および低燃費舗装 Type2 の施工直後の性能については、所定の性能を有していることを確認した。低燃費舗装の実道適用するためには、実道での環境負荷に耐えられることが必須条件であることから、耐久性について検証した。

一つ目の検証は、構内試験路面による促進載荷試験により耐久性を確認した。この検証では、構内舗装にて促進負荷を与えて、3年で10年相当の交通負荷をかけ、そのときの、舗装の構造的耐久性と機能的耐久性について確認した。

二つ目の検証は、供用中の実道路面で行った。この検証は、日本国内の2か所で実施し、このときに、現地骨材やプラントでの製造性、施工性も検証項目とした。さらに、耐久性については路面性状値の測定と共に、タイヤ／路面転がり抵抗係数についても直接測定を行い、経年変化を確認した。

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

## 3.2 促進載荷試験による耐久性の検証

### 3.2.1 検証方法

#### (1) 試験路面

本検証は国立研究開発法人土木研究所の舗装走行実験場で行った。試験路面の工区割を図-3.1に示す。図-3.1に示すように、1工区は排水性舗装(13)、2工区は低燃費舗装 Type1、3工区は低燃費舗装 Type2 とし、工区延長は 20m、舗装幅は 5.5m とした。なお、路肩の表層は密粒度舗装となっていたため、横断勾配の下手側には水抜き溝を設置して、舗装体内に水が帯水しないようにした。

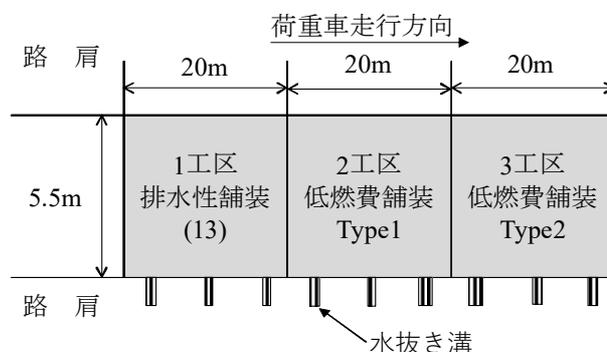


図-3.1 試験路面の工区割り

各工区の断面構成を図-3.2に示す。現地盤の CBR が 2%であったため、路床の上から 450mm を C-40 で置き換え、設計 CBR を 4%に調整した。各層の厚さは、交通量区分 N7 交通、信頼度を 90%として TA 法[1]により、表基層 100mm,アスファルト安定処理路盤層 200mm,上層路盤層 150mm, 下層路盤層 400mm とした。

### 第3章 タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

表層の厚さは、各舗装種の標準厚さとして排水性舗装(13)は 50mm,低燃費舗装 Type1 と低燃費舗装 Type2 は 30mm とし、基層の厚さは、表基層厚さから表層厚さを引いた厚さとした。



図-3.2 試験路面の断面構成

#### (2) 混合物性状および施工

##### a) 混合物の性状

試験路面に用いたアスファルト混合物の性状を表-3.1 に示す。各材料に用いたバインダの種類は、骨材最大粒径が 30mm のアスファルト安定処理路盤

表-3.1 アスファルト混合物の性状

混合物種	アスファルト安定処理路盤	密粒度舗装 (13)	排水性舗装 (13)	低燃費舗装 Type1	低燃費舗装 Type2
室内合成粒度 (%)	37.5mm	100.0	-	-	-
	31.5mm	94.8	-	-	-
	26.5mm	88.0	-	-	-
	19.0mm	74.7	100.0	100.0	-
	13.2mm	64.2	98.4	96.6	100.0
	4.75mm	47.4	63.0	23.1	98.2
	2.36mm	39.9	42.7	17.0	30.1
	0.075mm	4.3	6.2	4.4	7.8
アスファルト量(%)	4.0	5.5	4.8	5.5	5.5
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.370	2.373	1.993	2.208	2.073
理論密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.520	2.463	2.484	2.490	2.490
空隙率(%)	6.0	3.7	19.8	11.3	16.7
カンタプロ損失率(%)	-	-	-	1.3	1.0
動的安定度(回/mm)	-	-	-	27,300	23,300

### 第3章 タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

(以下、アスファルト安定処理路盤(30))にはストレートアスファルト 60-80, 基層に用いた骨材最大粒径が 13mm の密粒度舗装 (以下, 密粒度舗装(13))にはポリマー改質アスファルトII型, 骨材最大粒径が 13mm の排水性舗装 (以下, 排水性舗装(13))にはポリマー改質アスファルト H 型, そして, 低燃費舗装 Type1 および低燃費舗装 Type2 には小粒径用ポリマー改質アスファルト H 型を用いた。

低燃費舗装 Type1 および低燃費舗装 Type2 の配合手順のフローを図-3.3 に示す。低燃費舗装 Type1 と低燃費舗装 Type2 は図-3.3 のフローに従って室内配合試験を行った後, 実機試験練りを実施し, 配合を決定した。その他の混合物については, 通常時出荷している配合を用いた。

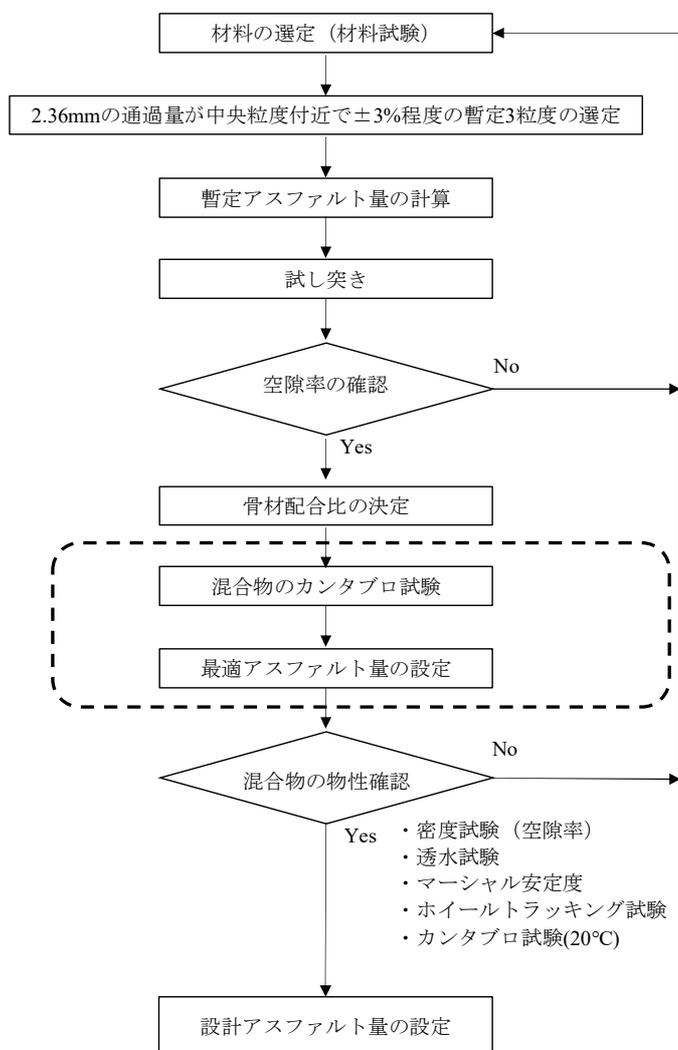


図-3.3 配合手順のフロー

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

#### b) 施工方法

低燃費舗装 Type1 および低燃費舗装 Type2 の機械編成は、敷き均しはアスファルトフィニッシャ 6.0m 級 TV 式、初転圧、二次転圧、仕上げ転圧はタンデムローラ 7t 級を用いた。その他の舗装は、二次転圧にタイヤローラを用いた一般的な編成で実施した。

また、アスファルト安定処理路盤は 1 層厚さが 100mm の 2 層仕上げ。低燃費舗装 Type1 と低燃費舗装 Type2 の基層は、1 層目が 40mm、2 層目が 30mm の 2 層仕上げとした。施工状況を写真-3.1 および写真-3.2 に示す。



写真-3.1 低燃費舗装 Type1 敷き均し状況



写真-3.2 低燃費舗装 Type1 転圧状況

### 第3章 タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

#### (3) 促進載荷試験

促進載荷試験は土木研究所が有する舗装走行実験場で行った。舗装走行実験場は実物大の舗装に実物大の大型車により交通荷重を載荷させて耐久性試験を行う施設である。

促進載荷試験に用いた荷重車を写真-3.3，荷重車の概要および走行条件を表-3.2に示す。



写真-3.3 荷重車走行状況

表-3.2 荷重車の概要と本検討の走行条件

項 目		内 容
荷重車	自動運転方式	RTK-GPS+ 光ファイバージャイロ
	軸数	3軸(前輪1軸+後輪2軸)
	車両重量	空車時 107.8kN 最大積載時 392kN
走行条件	荷重条件	前軸 69.09kN
		後前軸 128.09kN
		後後軸 127.11kN
	速度	30km/h
	1日の運転時間	日中7~8時間
	年間のスケジュール	春夏秋冬を代表する 各1カ月(10万輪毎走行)
走行位置シフト量	±250mm	

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

荷重車は、日本国内で最も登録台数の多い前輪1軸、後輪2軸（デュアルタイヤ）の市販トラックに載荷架台を取り付けたもので、最小4個の人工衛星を利用したRTK-GPS+光ファイバージャイロ方式により、管理棟内の制御端末から走行速度、走行レーン位置周回数を指定することで、最大4台同時に自動走行が可能な車両である。

また、本検討の走行条件は、車両重量は324.29kN、速度は30km/hで実施した。走行期間は2019年1月から開始し、その春夏秋冬の各季節1カ月間（10万輪相当）行い、2020年8月までの3年間実施した。載荷輪数は交通量区分N5(250以上1,000未満台/日・方向)の10年分に相当する49kN換算輪数で100万輪相当を負荷した。なお、走行試験は日中の7~8時間実施した。

#### (4) 調査項目

調査項目を表-3.3に示す。調査方法は日本道路協会の舗装調査・試験法便覧[2]に準拠して実施した。調査は10万輪相当負荷後ごとに実施した。なお、10万輪ごとの調査は1~2日間で、昼間に実施し、はじめに乾燥路面で行う試験を実施後、湿潤路面で行う試験を実施した。

表-3.3 調査項目と調査方法

項目	指標	測定位置	測定方法	
構造面	ひび割れ	全面	S029 舗装路面のひび割れ測定方法	
	わだち掘れ	長さ方向：5m,10m,15m 幅員方向：外側線間	S030 舗装路面のわだち掘れ量測定方法	
機能面	縦断凹凸形状	平坦性(mm)	S028 舗装路面の平坦性測定方法	
		IRI(mm/m)	S032T 国際ラフネス指数(IRI)の調査方法	
	すべり抵抗	BPN	長さ方向：5m,10m,15m 幅員方向：OWP,BWP,IWP	S021-2 振り子式スキッドレジスタンステストによるすべり抵抗測定方法
		動的摩擦係数		S021-3 回転式すべり抵抗測定器による動的摩擦係数の測定方法
	きめ深さ	MPD(mm)		S022-T 回転式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
	排水性能	浸透水量(mL/15秒)		S025 現場透水量試験方法

### 3.2.2 結果

#### (1) ひび割れ

ひび割れは、施工直後から100万輪経過時まですべての工区においてひび割れ率は0%であった。

#### (2) わだち掘れ

わだち掘れの測定結果として、わだち掘れ量の継時変化を図-3.4 に示す。図に示すわだち掘れ量は、各側線の OWP,IWP の大きい値を工区毎に算術平均したものである。

図-3.4 より、低燃費舗装 Type1 と低燃費舗装 Type2 はわだち掘れ量の大きさは排水性舗装(13)よりも若干小さく、増加の傾きは排水性舗装(13)と同程度であった。これより、わだち掘れに対する長期耐久性は、排水性舗装(13)と比較し同等以上であった。

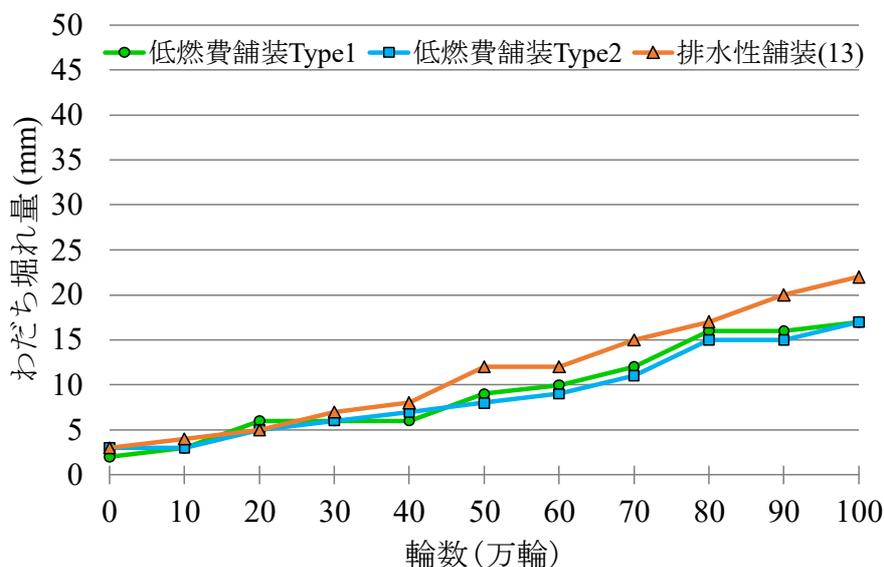


図-3.4 わだち掘れ量の継時変化

#### (3) 縦断凹凸形状

縦断凹凸形状の測定結果として、図-3.5 に平坦性、図-3.6 に IRI の継時変化を示す。図の縦軸は、施工直後の値を基準(=1.0)としたときの変化率とした。また、結果の一例として各工区の OWP の測定結果を示す。

第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

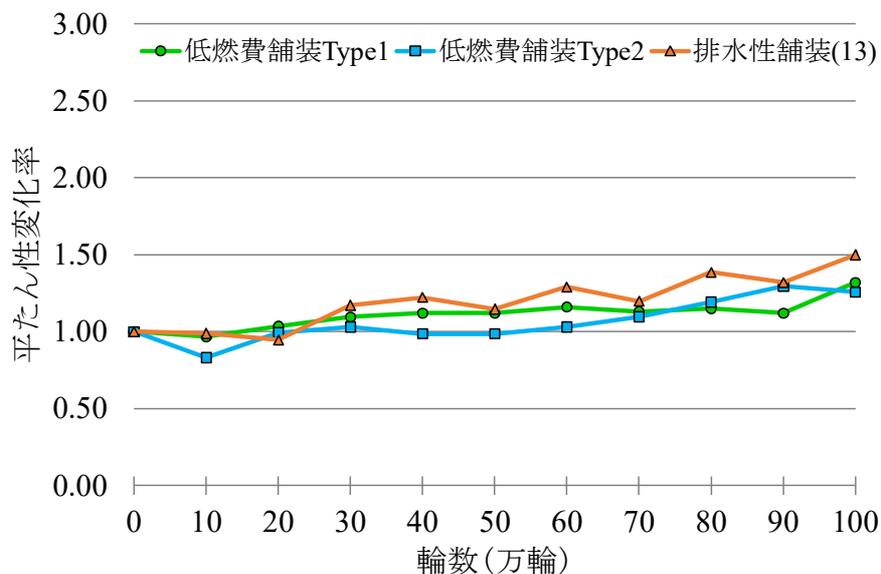


図-3.5 平たん性の継時変化

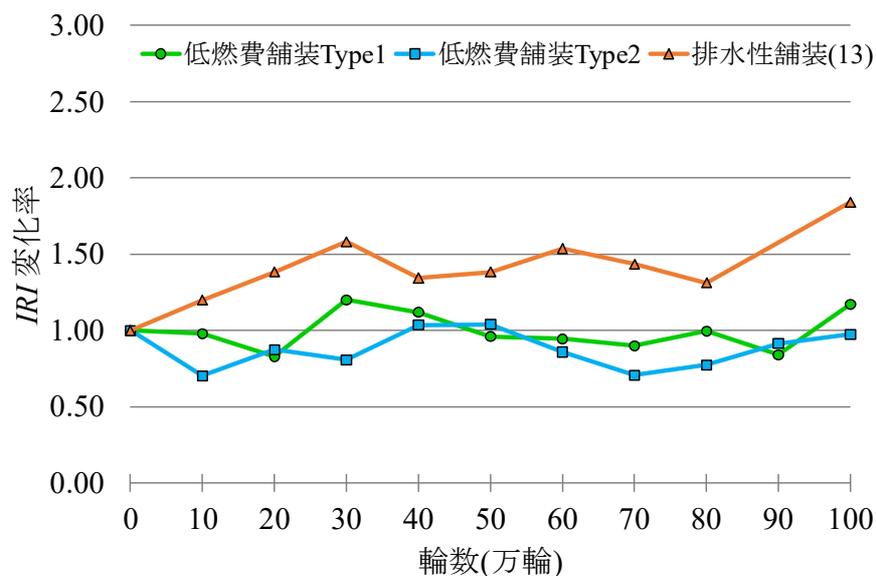


図-3.6 IRIの継時変化

図-3.5 より、平たん性については、100万輪まで各工区同様の増加傾向であった。このことより、平たん性の長期耐久性については、輪数を重ねると数値は大きくなるが、増加の傾きは従来舗装である排水性舗装(13)と同等であった。なお、IWPについてはOWPと同様の傾向を示しており、BWPについては、各工区とも平たん性の増加はみられなかった。

次に、図-3.6のIRIを見ると、排水性舗装(13)は施工直後から若干の増加傾

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

向がみられ、さらに 80 万輪からその傾向は大きくなった。一方、低燃費舗装 Type1 と低燃費舗装 Type2 については、施工直後の状態を維持していた。これより、IRI についても長期的な耐久性について問題ないことが明らかになった。なお、IWP、BWP については OWP と同様の傾向を示していた。また、同じ縦断凹凸形状の指標である平坦性の傾向と若干異なる傾向を示しているが、これは、測定延長が 20m 程度と短いことが要因であると考えられる。

#### (4) すべり抵抗

すべり抵抗の測定結果として、図-3.7 に BPN、図-3.8 に動的摩擦係数の継時変化を示す。なお、図に示す BPN と動的摩擦係数は各工区の全測点を算術平均したものである。

図-3.7 より BPN についてみると、施工直後から 100 万輪後まで、いずれの舗装種も大きい変化は見られなかった。

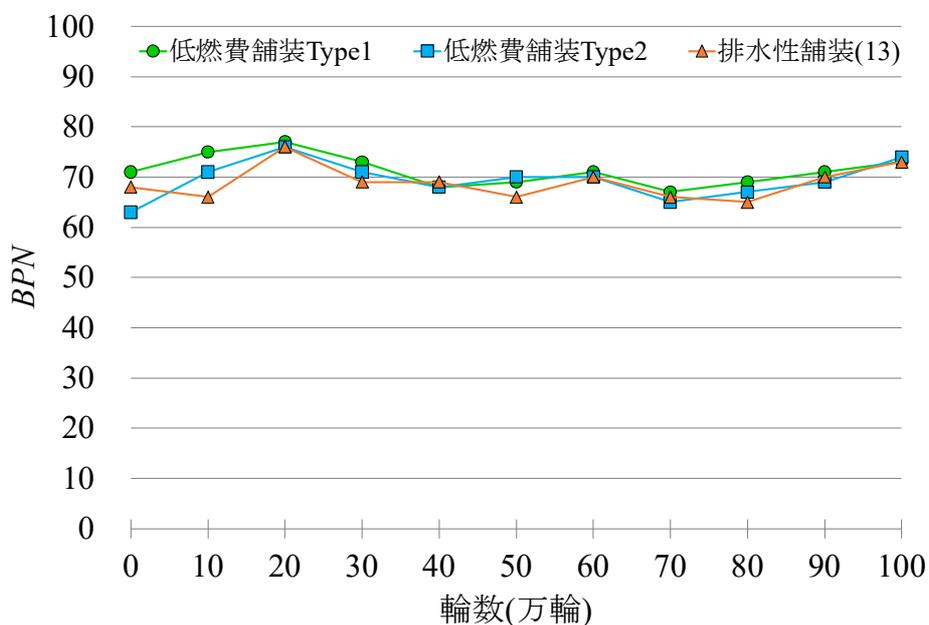


図-3.7 BPN の継時変化

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

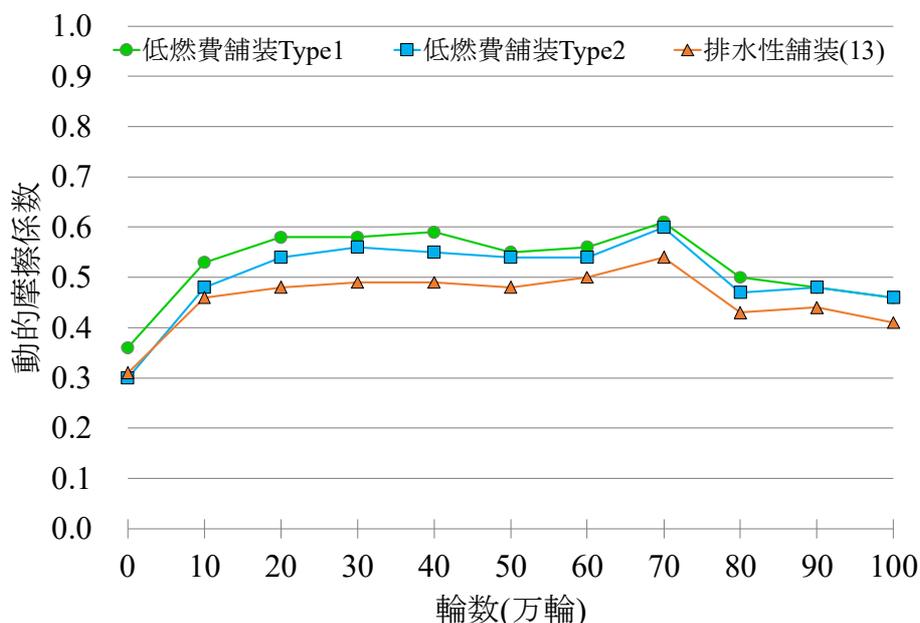


図-3.8 動的摩擦係数の継時変化

次に、図-3.8 に示す動的摩擦係数は速度 60km/h の場合について一例として示した。施工直後は排水性舗装(13)、低燃費舗装 Type2 は 0.3、低燃費舗装 Type1 は 0.35 であるが、図-3.8 をみると、施工直後から 10 万輪までの間で各工区とも急激に増加してから、その後輪数を重ねるごとに値が増加し、30 万輪経過後以降は一定の値となった。なお、70 万輪から 80 万輪で値が各工区とも変化率は小さくなっているが、これはこの時期に施工直後から使用していた試験機が不調となり、新しい試験機と入れ替えたことが要因であると考えられる。

このすべり抵抗の継時的変化については、施工直後の段階では若干滑り抵抗値は低いですが、輪数を重ねることによって、骨材のアスファルトの被覆分が剥がれることで、本来有するすべり抵抗が発揮されたと考えた。これより、すべり抵抗については、施工直後、および長期的に十分に性能を維持できることが分かった。

#### (5) きめ深さ

きめ深さの測定結果として、MPD の経時変化について図-3.9 に示す。なお、図に示す MPD は各工区の全測点を算術平均したものである。

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

図-3.9 より、排水性舗装(13)、低燃費舗装 Type1,および低燃費舗装 Type2 はいずれも、施工直後の値を維持していた。

きめ深さは、タイヤ／路面転がり抵抗と直結する指標であるが、100万輪後も施工直後の状態を維持していることから、タイヤ／路面転がり抵抗についても長期的な耐久性を期待できると考えた。

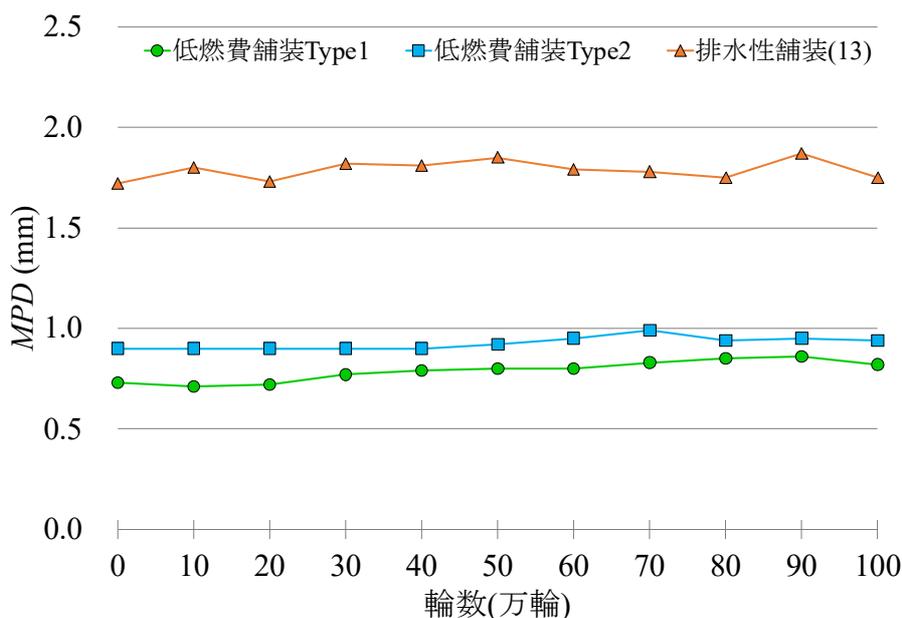


図-3.9 MPD の継時変化

#### (6) 排水性能

排水性能の測定結果として、各工区の全測点を算術平均した浸透水量の継時変化について図-3.10 に示す。浸透水量に関しては、施工直後はいずれの舗装も空隙率に応じた排水性能を有しているが、輪数を重ねるごとにその性能は減少傾向となった。その減少傾向については、低燃費舗装 Type1,低燃費舗装 Type2 は排水性舗装(13)と同程度であった。

ただし、100万輪後の目視観察結果では、表面排水性能は維持していることも確認した。これより、浸透水量は低下するものの長期供用後においても、表面排水機能は維持していることから、雨天走行時の視認性等についても実道適用に対して問題ないと考えた。

第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

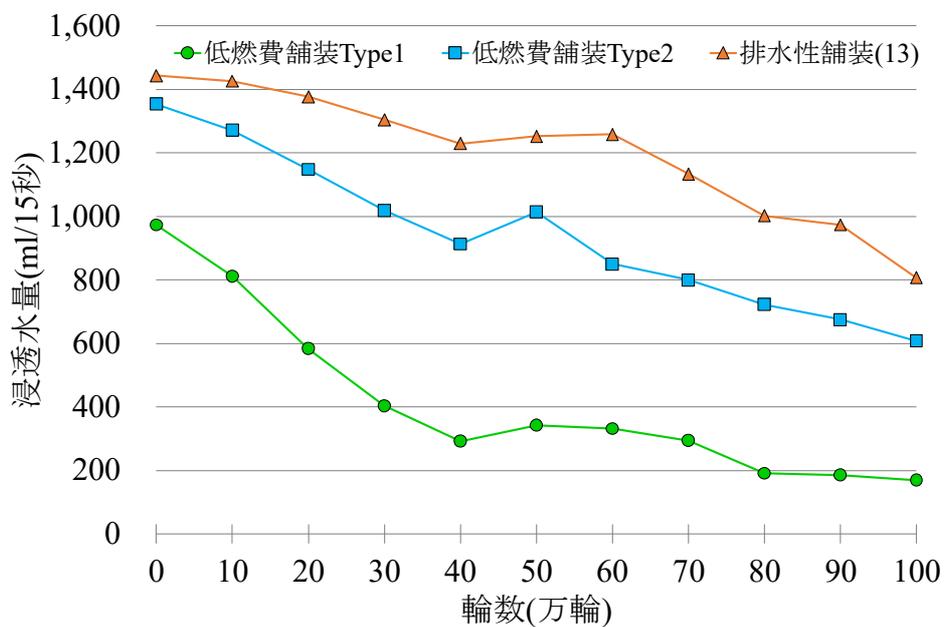


図-3.10 浸透水量の継時変化

### 3.2.3 まとめ

本検証で得られた結果を以下に示す．

- (1) ひび割れの発生はなく，わだち掘れに対する耐久性は，従来舗装の排水性舗装と同等であった．
- (2) 縦断凹凸形状については，載荷輪数が増えると悪化はするものの，その程度は排水性舗装と同程度であった．
- (3) すべり抵抗については，施工直後は骨材へのアスファルト被膜により若干低いものの，載荷輪数が増えると被膜が剥がれ，本来有するすべり抵抗が発揮された．また，すべり抵抗は長期的にも維持していた．
- (4) きめ深さについては，タイヤ／路面転がり抵抗性能と直結する指標であるが，100万輪後も施工直後の状態を維持していることから，タイヤ／路面転がり抵抗についても長期的な耐久性を期待できると考えた．
- (5) 排水性能については，浸透水量は輪数が重なるとともに減少傾向を示した．しかし，表面排水という面においては100万輪後も性能を維持していることを目視により確認した．

### 第3章 タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用に向けた耐久性の検証

#### 3.3 実道試験施工による耐久性の検証

##### 3.3.1 実道試験施工 1

###### (1) 試験施工の概要

実道試験施工の一つ目として、愛知県内の国道での試験施工は、国道302号の直線部の延長150m間で実施した。近郊にある港へのアクセス道路となっていることから大型車交通量が多く（大型車混入率45.4%）、重交通路線（4,879台/日）となっている。低燃費舗装の施工は2019年3月25日に行った。試験施工の断面図を図-3.11に示す。

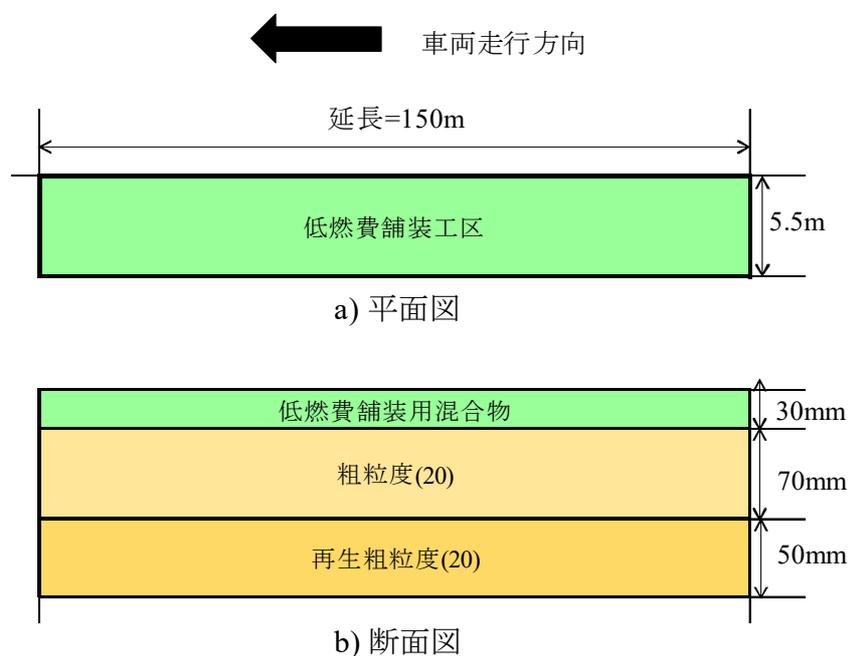


図-3.11 平面図と断面図

###### (2) 配合の検討

配合検討は低燃費舗装用混合物の一般地域用として、図-3.3に示す低燃費舗装Type1の標準的な配合方法により実施した。混合物の配合と性状値を表-3.4に示す。

第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

表-3.4 低燃費舗装 Type1 の配合

項目	測定値	目標値
最大粒径(mm)	5	—
通過質量百分率(%)	13.2mm	100.0
	4.75mm	95.2
	2.36mm	33.0
	0.075mm	7.7
アスファルト量(%)	5.7	—
空隙率(%)	14.1	10～15
カンタプロ損失率(%)	0.7	2.0以下
透水係数(cm/s)	$1.43 \times 10^{-2}$	—
動的安定度(回/mm)	31,500	6,000以上
きめ深さ MPD(mm)	0.53	0.3～1.0

(3) 施工

本施工箇所は、道路線形が緩やかな左カーブ区間かつ上り勾配と複雑であるため、平坦性確保に注力して施工した。写真-3.4に舗設状況、写真-3.5に施工後の状態を示す。



写真-3.4 舗装状況

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証



写真-3.5 施工後の状況

#### (4) 施工後の性能確認

試験施工直後に路面性状値として、表-3.3 に示す項目のなかで、IRI, MPD, 動的摩擦係数, および BPN を測定した。結果を表-3.5 に示す。

IRI は縦断勾配, 緩やかなカーブ区間であり横断勾配であったため, 少し大きい結果となった。それ以外の性状は問題ない結果であった。

なお, 本施工工区は, 150m の新設工事で閉ざされていたため, すべり測定車によるタイヤ／路面転がり抵抗係数を測定できなかった。

表-3.5 測定結果

項目	測定値
IRI (mm/m)	1.51
MPD (mm)	0.55
動的摩擦係数 $\mu_{60}$	0.28
BPN	64
現場透水量 (ml/15s)	1,067
締固め度 (%)	97.5

※動的摩擦係数 $\mu_{60}$ ：速度60km/hのときの動的摩擦係数

### 3.3.2 実道試験施工 2

#### (1) 積雪寒冷地域用低燃費舗装の混合物性状

本試験施工は積雪寒冷地域で行うことから、積雪寒冷地域に適した低燃費舗装（以下、低燃費舗装 Type3）の配合を検討した。積雪寒冷地域では、除雪車や大型車等による骨材飛散が懸念されたため、低温（-20℃）におけるカンタブロ損失率を新たに目標値として6%以下設定した。図-3.12 に低燃費舗装 Type3、低燃費舗装 Type1、および比較工区の該当地域において通常用いられている密粒度アスファルト混合物（新 20FH）（以下、密粒度(20FH)）の低温カンタブロ損失率を示す。図-3.12 より、低燃費舗装 Type3 は、低燃費舗装 Type1 や密粒度(20FH)より損失率は低く、目標値の6%を満足した。表-3.6 にその混合物配合と性状値を示す。

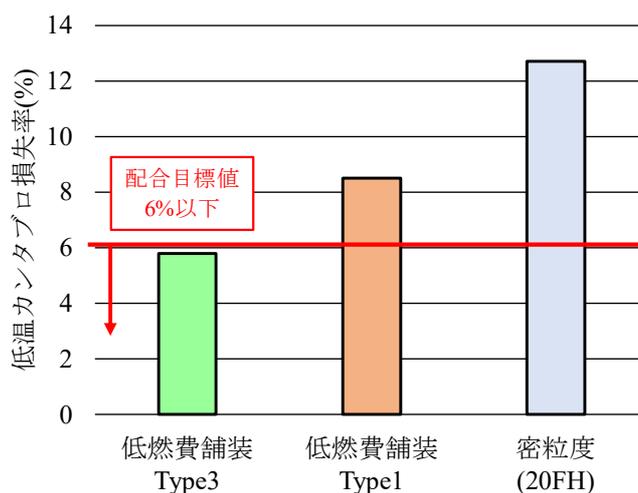


図-3.12 低温(-20℃)カンタブロ損失率の比較

表-3.6 積寒地域用の混合物配合と性状値

項目	測定値	目標値
最大粒径(mm)	5	—
通過質量百分率(%)	13.2mm	100.0
	4.75mm	93.2
	2.36mm	33.8
	0.075mm	8.8
アスファルト量(%)	9.0	—
空隙率(%)	8.6	10~15
カンタブロ損失率(%)(-20℃)	5.8	2.0以下
動的安定度(回/mm)	15,750	6,000以上
きめ深さ MPD(mm)	0.54	0.3~1.0

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

#### (2) 施工概要

試験施工は、新潟県内の一般国道 116 号新潟西バイパス上りにおいて行った。図-3.13 に工区の平面図と断面図を示す。比較工区として、密粒度(20FH)も同時に施工し、延長は低燃費舗装 Type3 は 123m、比較工区は 140m の総延長 263m で、第一、第二走行車線において、2019 年 10 月 9～13 日に施工した。

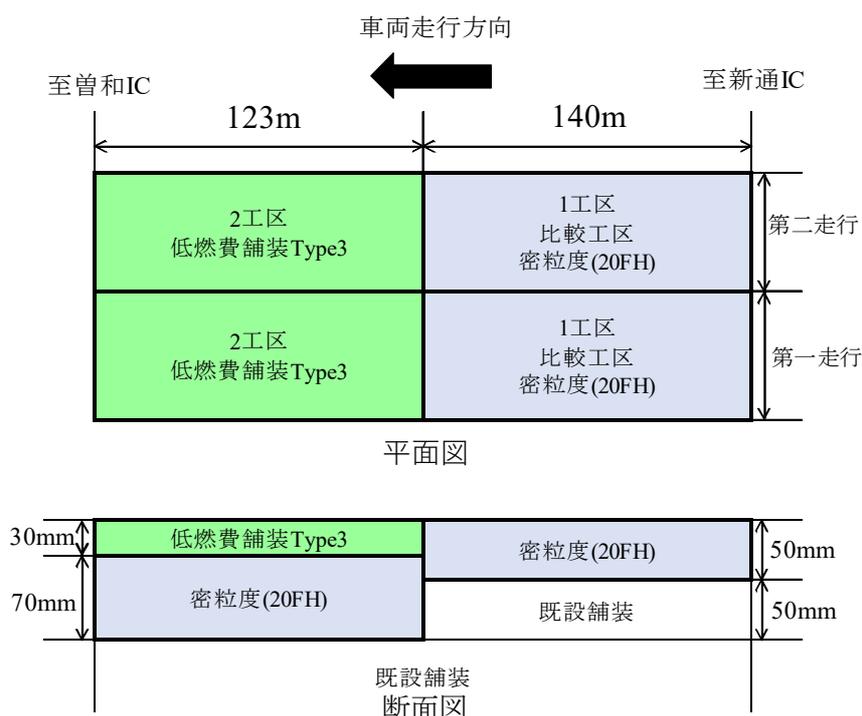


図-3.13 試験施工工区の平面図と断面図

#### (3) 試験練り

施工に先立ち、実機プラントにおいて試験練りを行い、混合性や品質を確認した。今回の配合では、特に運搬時のダンプ荷台への付着が懸念されたことから、試験練り時に実際にダンプに積み、現場を想定した時間として 40 分走行させ、その後、荷下ろしを行い荷台への付着状況を確認した。

その結果、写真-3.6 に示すように、ダンプ荷台への付着はなく、良好な状態であった。また、供試体を作製し、空隙率や動的安定度、MPD を確認し現場配合を決定した。

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証



写真-3.6 ダンプトラック荷台への付着確認

#### (4) 施工時の転圧

試験施工の状況を写真-3.7に示す。初転圧はマカダムローラ、二次転圧はタンデムローラにより行った。



写真-3.7 施工状況

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

#### (5) 路面性状測定方法

実道での供用性，耐久性および持続性を確認するため，表-3.3 に示す項目の中で，ひび割れ率，わだち掘れ量，IRI，平坦性，およびMPDを測定した．また，図-3.14 に示すすべり抵抗測定車により，タイヤ／路面転がり抵抗係数(以下，*RRC*)と縦すべり摩擦抵抗係数の測定を行った．*RRC*の測定方法は，第5章で詳述する方法で実施し，温度補正および横応力補正を行った．



(a)すべり抵抗測定車

(b)測定タイヤ(第5輪)

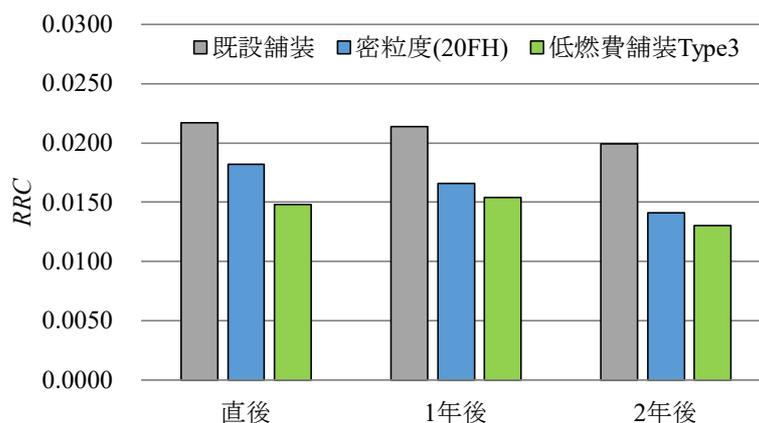
測定装置	垂直昇降式縦横両用型すべり計
測定タイヤ	すべり測定用標準タイヤ(リブタイヤ) ASTME-501 準拠
タイヤ条件	タイヤサイズ: 165-SR13, タイヤ内圧: 0.176 MPa
輪荷重	3,969N±98N
測定項目	TF(けん引力)、CF(コーナリングフォース)、W(輪荷重)、SF(サイドフォース)、BF(制動力)、測定輪温度、速度
サンプリング間隔	0.01 s

図-3.14 すべり抵抗測定車の概要(図-2.3 再掲)

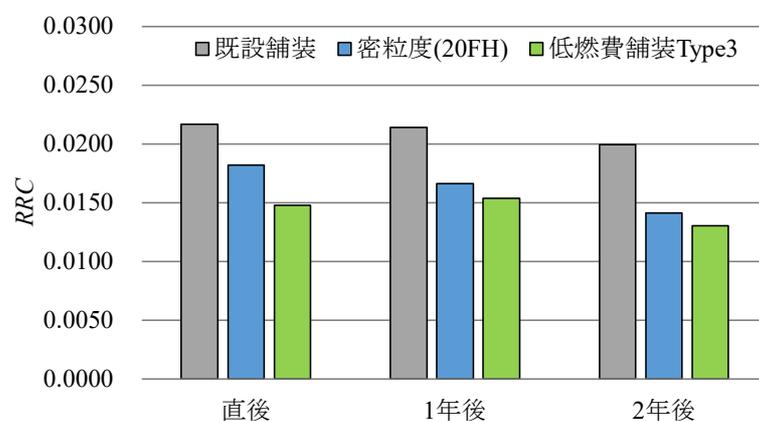
#### (6) *RRC* の測定結果

図-3.15(a)に第一走行車線および(b)に第二走行車線の *RRC* の測定結果を示す．施工直後の *RRC* は，第一車線，第二車線ともに，大きいほうから既設舗装>密粒度(20FH)>低燃費舗装 Type3 の順になったが，その傾向は2年経過後も同じであった．また，図-3.16 に供用2年後の低燃費舗装 Type3 の *RRC* について，既設舗装や密粒度(20FH)に対する低減率を示す．その結果，低燃費舗装 Type3 の *RRC* は既設舗装に対して約24～35%，密粒度(20FH)に対して約7～14%の低減率であった．

第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証



(a) 第一走行車線



(b) 第二走行車線

図-3.15 RRC の測定結果

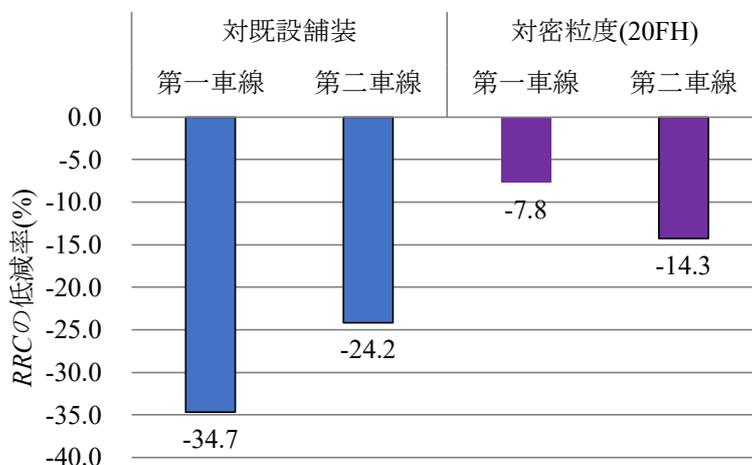


図-3.16 RRC の低減率

### 第3章 タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

#### (7) 耐久性およびその他の路面性状

図-3.17 にわだち掘れ量の測定結果を示す。2年後の測定結果においても、低燃費舗装 Type3，密粒度(20FH)の第一および第二走行車線とも 5mm 未満と良好な結果であった。

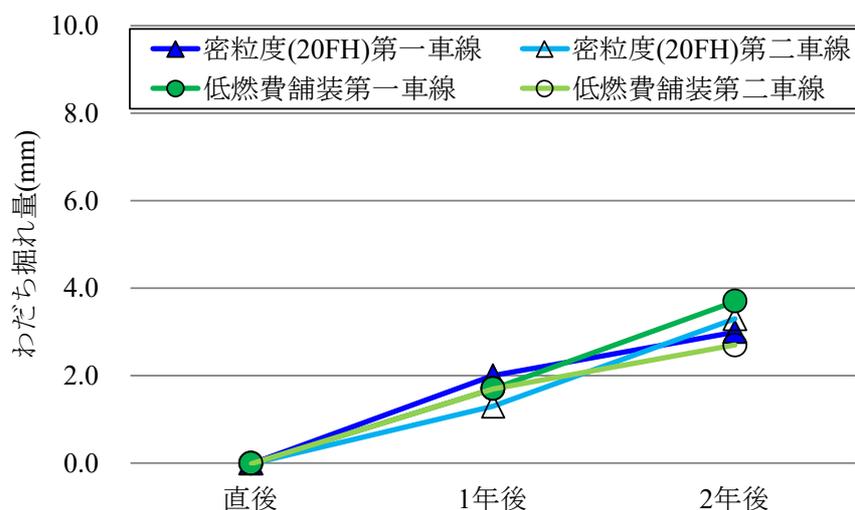


図-3.17 わだち掘れ量

次に、図-3.18 に IRI の測定結果を示す。低燃費舗装 Type3，密粒度(20FH)とも供用年数が経つにつれて値が大きくなる傾向であったが、2年経過後においても、低燃費舗装 Type3，密粒度(20FH)ともに 2.0mm 以内と良好な状態であった。

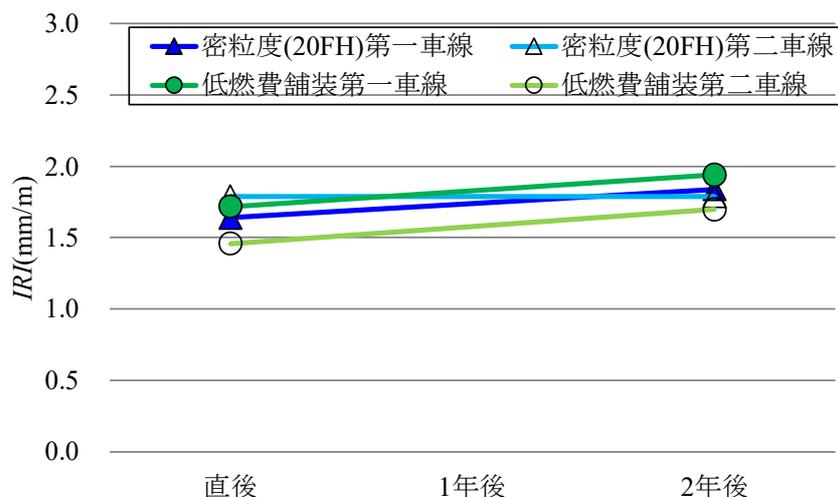


図-3.18 IRI 測定結果

### 第3章 タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

次に、図-3.19 に平坦性の測定結果を示す。低燃費舗装 Type3, 密粒度(20FH)とも供用年数が経つにつれて値が大きくなる傾向であったが、低燃費舗装 Type3 で 1.1 mm, 密粒度(20FH)で 1.5 mm以内と良好な状態であった。

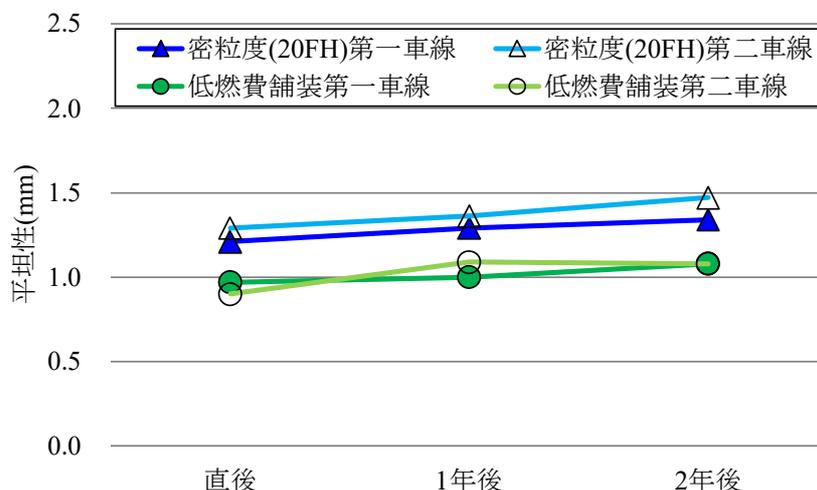


図-3.19 平坦性測定結果

図-3.20 に MPD の測定結果を示す。低燃費舗装 Type3 は施工直後から 2 年まで 0.5~0.6mm の範囲にあり、第一走行車線と第二走行車線の差はなかった。それに対し、密粒度(20FH)は施工直後が 0.3mm であったのに対し、2 年では 0.6mm 前後となった。これは、低燃費舗装 Type3 は施工直後の状態を維持していることを示しているが、密粒度(20FH)は、自動車走行により経年的に表面のアスモル分が飛散して MPD が上昇したものと考えた。

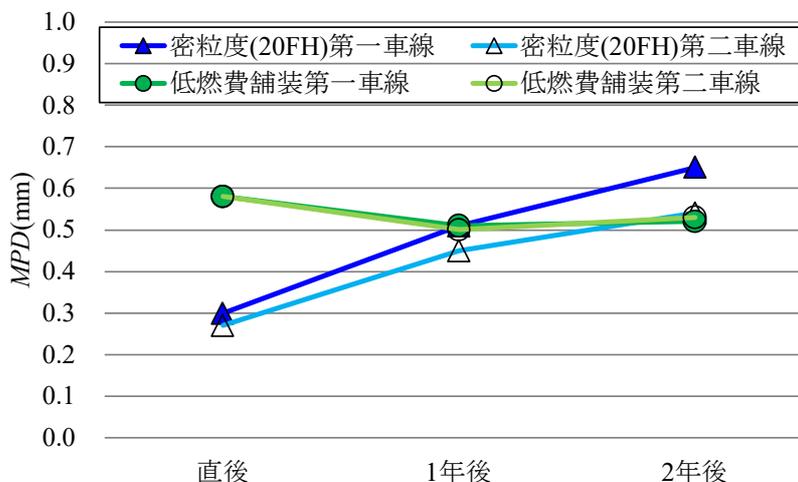
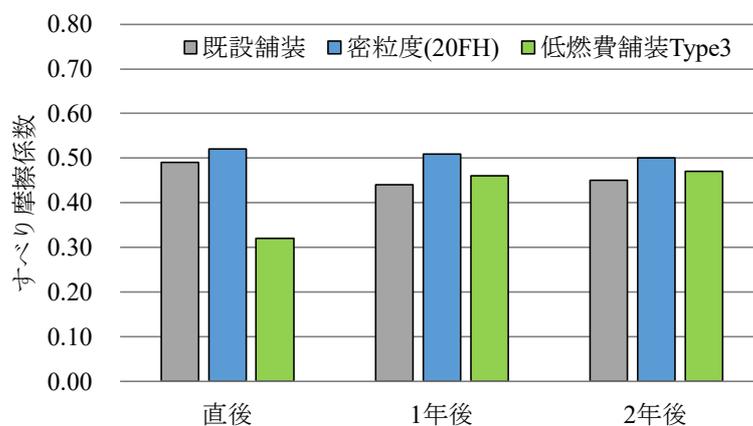


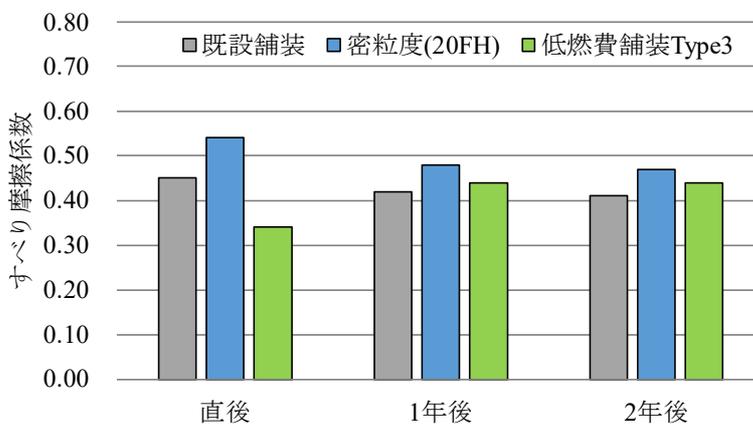
図-3.20 MPD 測定結果

### 第3章 タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

図-3.21 にすべり摩擦係数の測定結果を示す。低燃費舗装 Type3 は、施工直後は第一走行車線および第二走行車線とも 0.30 以上は確保しているが他の路面に比べ低い値であった。その後、供用1年、2年では既存密粒より高い値になった。これは、一般的な排水性舗装と同様に、表面の余分なアスファルト被膜が交通荷重等によって剥がれ、本来のすべり抵抗性能が発揮されたものと考えた。



(a) 第一走行車線



(b) 第二走行車線

図-3.21 すべり摩擦係数測定結果

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

#### 3.3.3 まとめ

本検証で得られた知見を以下に示す。

- (1) 実道試験施工1では、低燃費舗装の標準型である低燃費舗装 Type1 を施工した。施工直後の調査の結果、所定の性能を満足していることを確認した。
- (2) 実道試験施工2では、試験施工の実施地域が積雪寒冷地域であることから、積雪寒冷地用の低燃費舗装 Type3 を検討し開発した。
- (3) また、施工後2年経過時点では、低燃費舗装 Type3 は良好な状態を維持しており、各種路面性状値、すべり抵抗、およびタイヤ／路面転がり抵抗施工直後の状態を維持していた。

### 3.4 第3章のまとめ

本章で得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 構内試験路面による促進載荷試験の結果、各性状値とも排水性舗装と同等の長期耐久性を有していることを明らかにした。特に、タイヤ／路面転がり抵抗への影響が大きいとされているテクスチャ(MPD)についても、施工直後の状態を維持していることを確認した。
- (2) 実道試験施工1では、低燃費舗装の標準型である低燃費舗装 Type1 を施工した。製造性、施工性は良好で、施工直後の調査の結果においても、所定の性能を満足していることを確認した。
- (3) 実道試験施工2では、試験施工の実施地域が積雪寒冷地域であることから、積雪寒冷地用の低燃費舗装 Type3 を検討し開発した。さらに、施工後2年経過時点では、低燃費舗装 Type3 は良好な状態を維持しており、各種路面性状値、すべり抵抗、およびタイヤ／路面転がり抵抗施工直後の状態を維持していた。

### 第3章 タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装技術の実道適用へ向けた耐久性の検証

#### 第3章の参考文献

- [1] 公益社団法人日本道路協会：舗装設計便覧(平成18年2月)，2006年2月．
- [2] 公益社団法人日本道路協会：舗装調査・試験法便覧 [全4冊]，2019年3月．

## 第 4 章

# 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果 に関する検討



## 第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

### 4.1 緒言

低燃費舗装の走行燃費および二酸化炭素排出量（以下、CO<sub>2</sub>）削減効果について検証した。

はじめに、燃料消費量測定車を用いて、走行燃費とCO<sub>2</sub>排出量とを計測し、従来舗装として排水性舗装、密粒度舗装と低燃費舗装 Type1, Type2 との路面間の比較を行った。また、定常走行時のタイヤ／路面転がり抵抗係数と走行燃費およびCO<sub>2</sub>排出量との関係について検討した。

次に、低燃費舗装 Type1 を日本全国の幹線道路に適用した場合のCO<sub>2</sub>排出量削減効果について検討した。この検討では、タイヤ／路面転がり抵抗係数は上記検討で求めた実際の値を使用し、自動車のCO<sub>2</sub>排出量の試算は自動車分野で用いられているシミュレーション方法を用いて、実際の走行時加減速も考慮した精度の高い方法で検討した。また、交通量の違いによる適用効果についても検討した。

## 4.2 タイヤ／路面転がり抵抗と走行燃費の関係

### 4.2.1 検討方法

#### (1) タイヤ／路面転がり抵抗測定

タイヤ／路面転がり抵抗係数（以下、*RRC*）の測定は図-4.1に示すすべり抵抗測定車により測定した。走行速度は、20km/h,40km/h,60km/h,80km/h で実施し、第5章に示す横力補正およびタイヤ温度補正(30℃)を行った。



(a)すべり抵抗測定車

(b)測定タイヤ(第5輪)

測定装置	垂直昇降式縦横両用型すべり計
測定タイヤ	すべり測定用標準タイヤ(リブタイヤ) ASTM E-501 準拠
タイヤ条件	タイヤサイズ: 165-SR13,タイヤ内圧: 0.176 MPa
輪荷重	3,969N±98N
測定項目	TF(けん引力)、CF(コーナリングフォース)、W(輪荷重)、 SF(サイドフォース)、BF(制動力)、測定輪温度、速度
サンプリング間隔	0.01 s

図-4.1 すべり抵抗測定車の概要(図-2.3 再掲)

#### (2) 走行燃費測定の概要

走行燃費の測定は、燃料消費計を搭載した国総研所有の試験車両により、直接測定法にて行った。燃料消費計および試験車両の概要を表-4.1に、試験車両と燃料消費計システムの概要図を図-4.2に示す。

図-4.2に示すように、燃費消費量は、試験車両の燃料配管系統に設置された燃料消費計により測定し、この結果をもとに走行燃費（単位燃料消費量当たりの走行距離）を算出した。測定車は走行速度 20, 40, 60, 80km/h の定常走行で、エンジン回転数の影響を除去するために、エンジン回転数は一定

#### 第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

になるように走行した。

表-4.1 試験車両と燃料消費計測システムの概要

計測項目	計測装置		
燃料消費量 (L/h)	燃料消費計	型式	FC-9521
		サンプリング間隔	1.0(秒)
速度 (km/h)	GPS速度計	型式	LC-8100
		サンプリング間隔	0.1(秒)
タイヤ温度 (温度)	非接触温度計	型式	CS-30TAC
		サンプリング間隔	0.01(秒)
風向/風速 (m/s)	風向風速計	製品名	WMT52
		サンプリング間隔	1.0(秒)
試験車両	形式	CBA-E51	
	総排気量	3,500cc	
	燃料消費率	10・15モード 8.2km/L	
タイヤ種	製造会社	横浜ゴム株式会社	
	形式	DNA GRAND map	

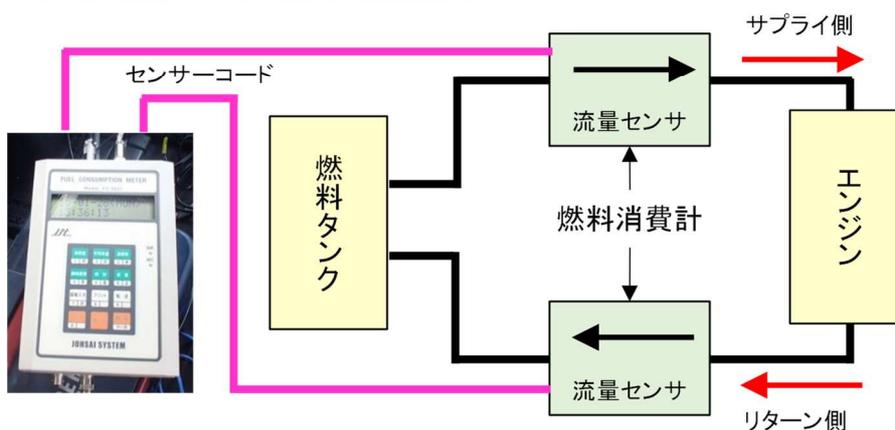


図-4.2 試験車両と燃料消費計測システムの概要

#### 第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

測定時の環境条件は「JISD1012 自動車—燃料消費率試験方法 付属書1(参考)実路における燃費試験方法」[1]に準拠し、風速が3m/s以下のときに測定を行った。走行燃費の測定季節および測定回数を表-4.2に示す。

表-4.2 走行燃費の測定季節と測定回数

測定季節	天気	平均気温(°C)	路面の状態	測定回数(回) (測定速度)
冬期	晴れ	9.1	DRY	20 (60,80km/h)
冬期	晴れ	5.6	DRY	20 (20,40km/h)

#### (3) 試験路面

検討に用いた試験路面は、第2章で施工した試験路面を用いた。試験路面は、表-4.3に示すように、低燃費舗装 Type1 と低燃費舗装 Type2、および比較用の一般的路面である排水性舗装(13)と密粒度舗装(13)の計4路面であり、それぞれの延長は300mである。

表-4.3 試験路面の概要

舗装種別	排水性舗装(13)	密粒度舗装(13)	低燃費舗装Type1	低燃費舗装Type2	
最大粒径(mm)	13	13	5	5	
通過粒度百分率(%)	19mm	100	100	100	
	13.2mm	90~100	95~100	100	
	4.75mm	11~35	55~70	90~100	
	2.36mm	10~20	35~50	20~40	
	0.6mm	-	18~30	-	
0.075mm	3~7	4~8	5~10	3~7	
アスファルト量(%)	4~6	5~7	5~6	4~6	
空隙率(%)	15~25	3~6	10~15	15~20	
平坦性	IRI(mm/m)	1.26	1.17	0.87	0.97
	$\sigma$ (mm)	0.87	0.75	0.55	0.58
MPD(mm)	1.63	0.37	0.65	0.74	

### 4.2.2 走行燃費の測定結果

走行燃費の測定結果を図-4.3に示す。図-4.3より、走行燃費は走行速度20km/hでは低燃費舗装 Type2, 40km/h, 60km/h, 80km/hでは低燃費舗装 Type1が他の路面よりも良好な結果となった。

また、速度別にみると、いずれの路面においても、60km/hの場合に最も高い値を示した。これは、試験車両のギア比等の設定による影響であると考えられる。

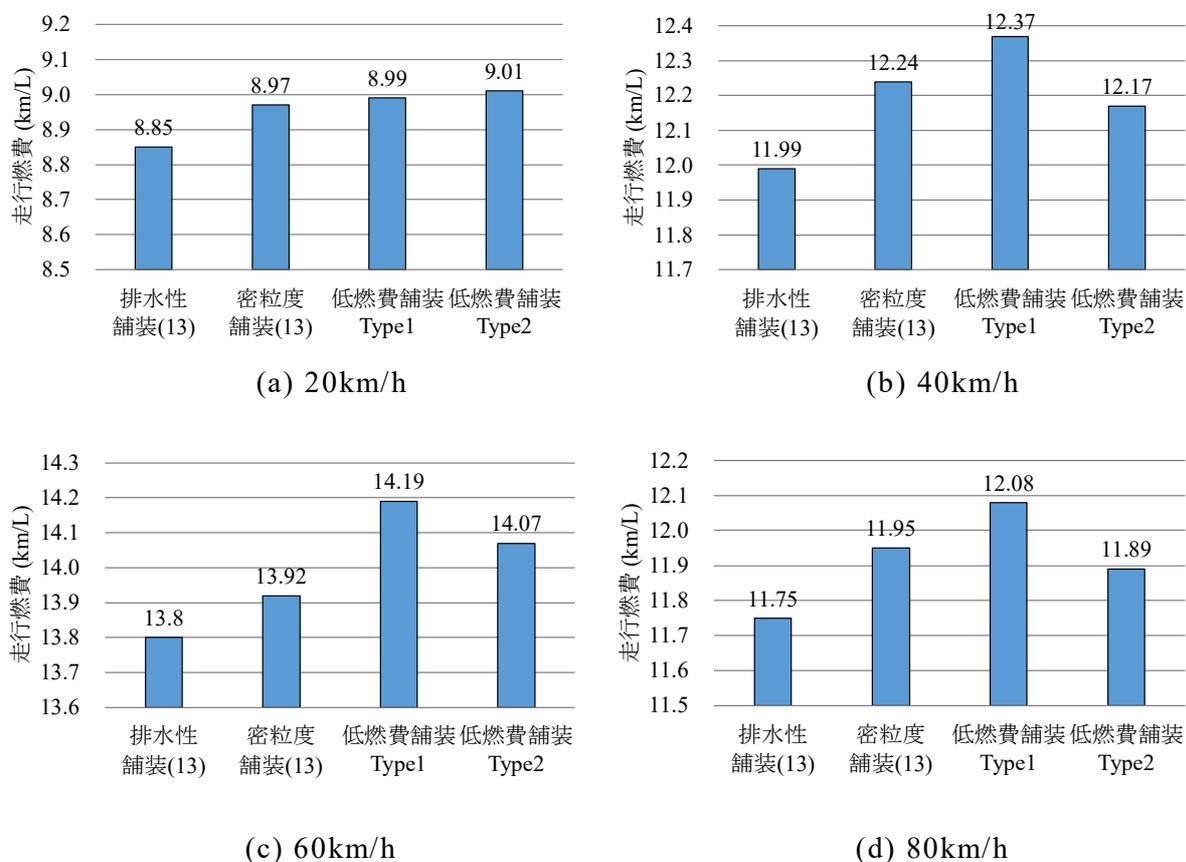


図-4.3 走行燃費測定結果

### 4.2.3 タイヤ／路面転がり抵抗係数と走行燃費の関係

図-4.4 に各速度の  $RRC$  と走行燃費との関係を示す。横軸が  $RRC$ ，縦軸が走行燃費であり，路面ごとにプロットしている。また，両者の関係の回帰直線も示している。さらに，図中の矢印は，排水性舗装(13)と比較した場合の低燃費舗装 Type1 の  $RRC$  の低減割合と走行燃費の向上割合を示している。

図-4.4 より，データ数が4点と少ないものの傾向としては，どの速度においても  $RRC$  と走行燃費は負の相関があった。これより，低燃費舗装のようにタイヤ／路面転がり抵抗を低減すると，走行燃費の向上に有効であることを改めて確認できた。

なお，回帰式の傾きは， $60\text{km/h} > 40\text{km/h} > 20\text{km/h} > 80\text{km/h}$  の順番となっており，走行速度  $60\text{km/h}$  の場合に， $RRC$  の低減による走行燃費の向上効果が一番大きくなった。また， $60\text{km/h}$  のときに低燃費舗装 Type1 は排水性舗装(13)と比べ， $RRC$  は7.5%低減し，走行燃費は2.8%向上する結果が得られた。

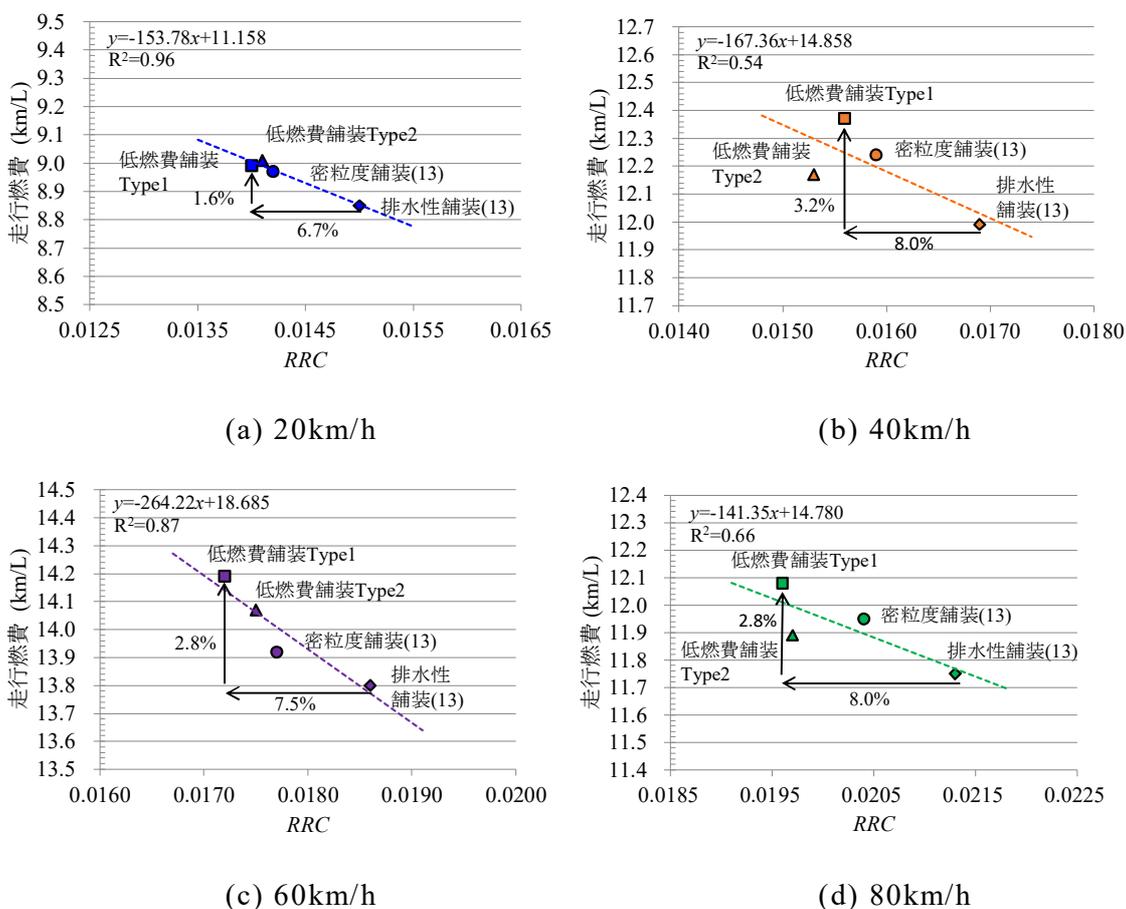


図-4.4  $RRC$  と走行燃費の関係

### 4.3 タイヤ／路面転がり抵抗と二酸化炭素排出量の関係

#### 4.3.1 検討方法

二酸化炭素排出量(CO<sub>2</sub>)の測定は、上記検討の表-4.1, 図-4.2 に示す車両を用いて、測定も同時に実施した。CO<sub>2</sub> 排出量計測装置の概要は表-4.4, 装置の外観を写真-4.1, 写真-4.2 に示す。

表-4.4 CO<sub>2</sub> 排出量計測装置

機 器	記録時間	項 目	単 位
車載型 排出ガス計測システム	10Hz	CO <sub>2</sub> 排出量	g/s
		GPS経度	N/S 度, 分, ミリ秒
		GPS緯度	W/E 度, 分, ミリ秒
		速度	km/h
		時刻	hh:mm:ss



写真-4.1 CO<sub>2</sub> 排出量測定装置



写真-4.2 車載型 CO<sub>2</sub> 排出ガス計測システム

### 4.3.2 CO<sub>2</sub> 排出量の測定結果

CO<sub>2</sub> 排出量の測定結果を図-4.5 に示す。図-4.5 より、CO<sub>2</sub> 排出量は走行速度 20km/h,60km/h では低燃費舗装 Type2, 40km/h, 80km/h では低燃費舗装 Type1 が他の路面よりも良好な結果となった。

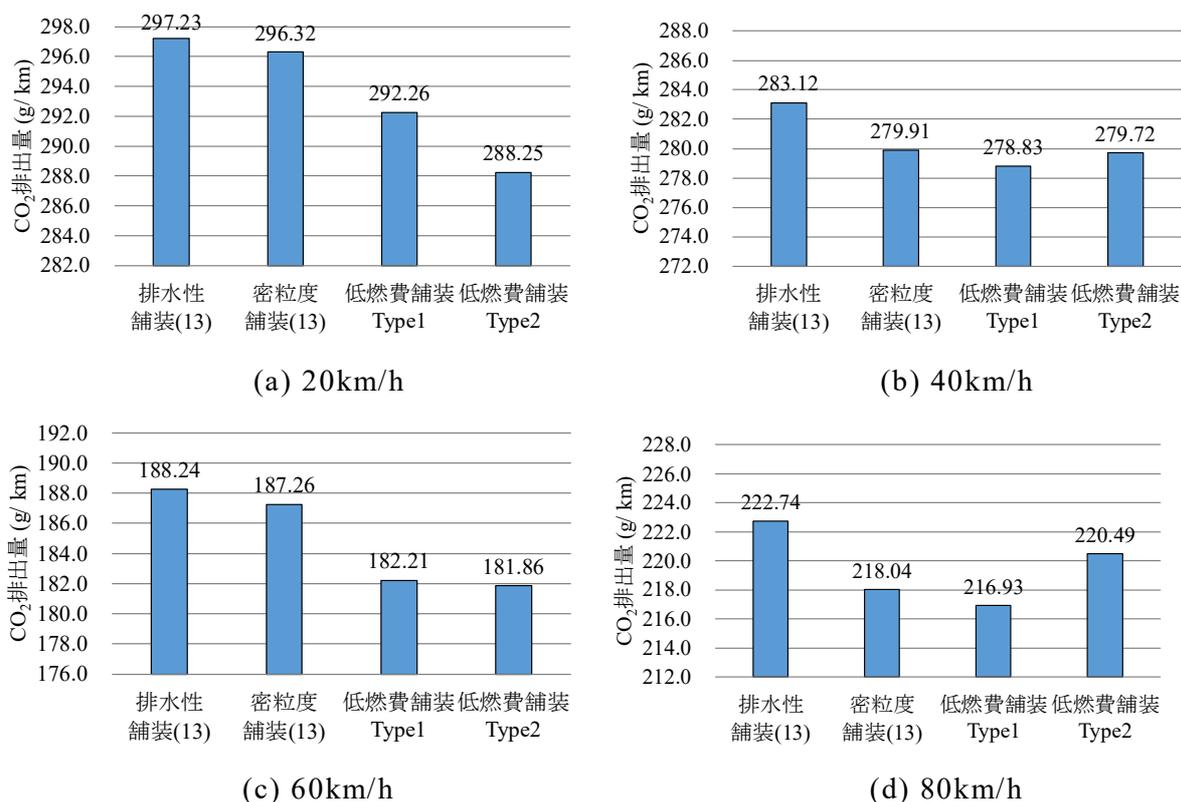


図-4.5 CO<sub>2</sub> 排出量測定結果

### 4.3.3 タイヤ／路面転がり抵抗係数とCO<sub>2</sub>排出量の関係

図-4.6に、各走行速度におけるRRCとCO<sub>2</sub>排出量との関係を示す。横軸がRRC、縦軸がCO<sub>2</sub>排出量であり、路面ごとにプロットしている。また、回帰直線も示している。さらに、図中の矢印は、排水性舗装(13)と比較した場合の低燃費舗装Type1のRRCの低減割合とCO<sub>2</sub>排出量の低減割合を示している。

図-4.6より、データ数が4点と少ないものの傾向としては、どの速度においてもRRCとCO<sub>2</sub>排出量は正の相関があった。

なお、回帰式の傾きの大きさは、60km/h>40km/h>20km/h>80km/hの順番となった。また、60km/hのときに低燃費舗装Type1は排水性舗装(13)と比べ、RRCは7.5%低減し、CO<sub>2</sub>排出量は3.2%低減する結果が得られた。

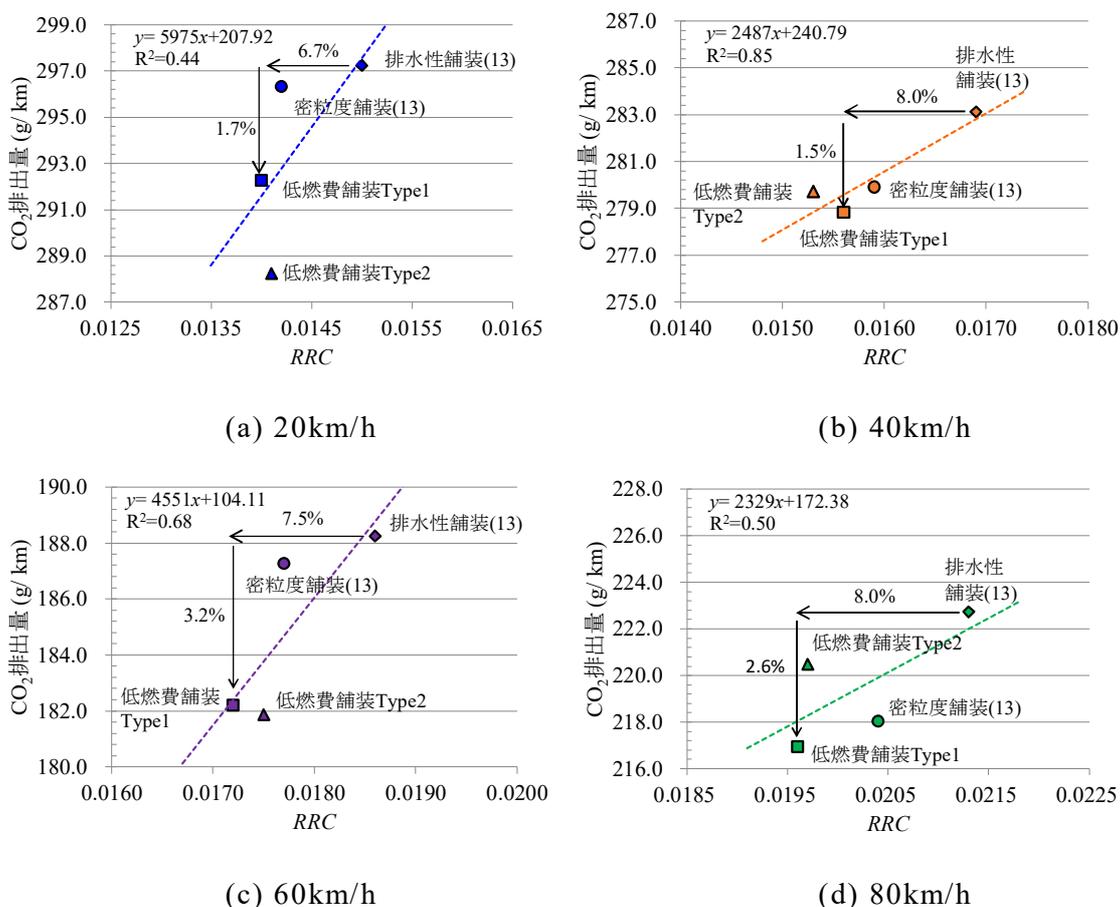


図-4.6 RRCとCO<sub>2</sub>排出量の関係

#### 4.4 低燃費舗装の二酸化炭素削減量の試算

##### 4.4.1 概要

実道に低燃費舗装を適用した場合のCO<sub>2</sub>排出量削減効果を確認するために、実際の低燃費舗装Type1のRRC低減率と、実際に近い自動車の燃料消費シミュレーション法とを用いた試算により検討した。

検討は、はじめにa)RRCの変化率とCO<sub>2</sub>削減率について検討し、b)次に日本全国の幹線道路に適用したときの削減効果について検討した。そして、c)交通量の違いによる削減効果の違いを検討した。

#### 4.4.2 検討方法

##### (1) 検討条件

本検討で試算した条件の一覧を表-4.5に示す。表-4.5に示すように、日本全国の幹線道路として、高速道路、一般国道、および都道府県道を対象とした。また、交通量の違いによるCO<sub>2</sub>削減効果に関する検討では、交通量の多い路線として東名高速道路の海老名JCT-厚木IC間を対象とした。比較した舗装の種類は、低燃費舗装Type1と排水性舗装(13)とした。排水性舗装(13)は日本の幹線道路で標準的に用いられている舗装である。

道路延長、および交通量は国土交通省の交通センサスデータを用いた。このため、対象車両は交通センサスデータのデータ種類に合わせて大型車と小型車の2種類とした。

表-4.5 試算条件

項目	内容
道路種	高速道路 9,473.8km
	一般国道 55,684.9km
	都道府県道 129,003 km
舗装種	低燃費舗装Type1
	排水性舗装(13)
車両	大型車
	小型車

大型車のシミュレーション対象車両は2019年の普通貨物車の車両総重量(GVW)別販売台数をみると、GVW20トン超の車両が一番多い[2]ことから、燃料区分No.ではT11に相当する車両を大型車の代表車両とした。

小型車については、日本で比較的販売台数が多いことと、シミュレーションを行うのに公開可能な燃料マップデータを有する車両として、また、比較的燃費性能が良いとされているコンパクトカーを選択した。大型車と小型車の車両の諸元を表-4.6に示す。

第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

表-4.6 シミュレーションに用いた車両の諸元

項目		大型車	小型車
燃費区分		T11	—
車両重量 (kg)		9,193	988
最大積載量 (kg)		14,844	—
車両総重量 (kg)		24,147	1,245
試験時車両重量 (kg)		17,412	1,098
定員 (名)		2	5
変速機	1速	10.127	無段変速機 (CVT) 2.386 ~0.426
	2速	8.054	
	3速	6.414	
	4速	5.101	
	5速	4.038	
	6速	3.211	
	7速	2.507	
	8速	1.994	
	9速	1.588	
	10速	1.263	
	11速	1.000	
	12速	0.795	
最終減速比		2.928	5.833
タイヤ動的負荷半径 (m)		0.507	0.282
全長 (m)		12.0	3.945
全高 (m)		3.8	1.5
全幅 (m)		2.49	1.695
空気抵抗係数 $N/(km/h)^2$		0.2691	0.0441
エンジン	種類	DI, TI	NA
	総排気量 (L)	12.9	1.0
	最高出力 (kW/rpm)	294/1800	51/6,000
	最大トルク (Nm/rpm)	2,270/1,100	92/4,200

(2) 路面の種類とタイヤ／路面転がり抵抗係数

検討に用いた路面の種類は、新規路面として、新規低燃費舗装Type1と新規排水性舗装(13)を2種類と、および比較用の既設の路面として既設排水性舗装(13)とした。検討に用いたRRCは、新規低燃費舗装Type1と新規排水性舗装(13)は第2章で施工した路面の測定値を用いた。また、既設排水性舗装(13)のRRCは、同じ国総研試験走路内にある施工後数年経過している排水性舗装(13)4路面の平均値を用いた。路面の種類と、それぞれの路面のタイヤ／路面転がり抵抗係数(RRC)、およびRRC低減率を表-4.7に示す。

なお、RRC低減率は既設排水性舗装(13)を基準とした場合のRRC低減率とした。

表-4.7 路面の種類

種類		新規 低燃費舗装Type1	新規 排水性舗装(13)	既設 排水性舗装(13)
RRC	20km/h	0.0140	0.0150	0.0163
	40km/h	0.0156	0.0169	0.0180
	60km/h	0.0172	0.0186	0.0206
	80km/h	0.0196	0.0213	0.0229
RRC 低減率 (%)	20km/h	14.1	8.0	-
	40km/h	13.3	6.1	-
	60km/h	16.5	9.7	-
	80km/h	14.4	7.0	-

(3) 燃料消費量

a) 大型車の燃料消費量シミュレーション方法

大型車の燃料消費量シミュレーションについては、TRIAS08-003(1)-02燃料消費率試験（重量車（2025年度燃費基準対応））（JH25試験法）[3]に準拠し燃料消費量求めた。

本シミュレーションでは、車両諸元、エンジン諸元および諸元を基に、モード走行時のエンジン回転速度とエンジントルクを算出し、別途エンジンベンチ上で取得された定常の燃費マップを参照することで瞬時燃費を算出し

た.

空気抵抗  $\mu_a A$  (N/(km/h)<sup>2</sup>)は TRIAS 08-003-01 燃料消費率試験 (重量車) (以下 JH15 試験法という) [4]で用いられていた式(4.1)を用いて算出した.

$$\mu_a A = (0.00299 \times B \times H - 0.000832) \times 9.8 \quad (4.1)$$

ここで,  $B$ : 全幅 (m),

$H$ : 全高 (m).

転がり抵抗係数の影響は, JH15 燃費試験法で用いられる式 (4.2)を用いて調べた.

$$\mu_r = 0.00513 + \frac{17.6}{W} \quad (4.2)$$

ここで,  $\mu_r$ : タイヤの転がり抵抗係数,

$W$ : 試験時車両質量(kg).

そして,  $RRC$ の低減率として式(4.2)にあるタイヤの転がり抵抗係数に相当する定数 0.00513を基準とし, 30%低減 (0.00359), 15%低減 (0.00436), 15%増加 (0.00590), 30%増加 (0.00667) と変更して燃費計算を行った. 対象車両は燃費区分T11カテゴリ (GVW 25t車) とし, 一般財団法人日本自動車研究所(以下, JARI)保有の当該カテゴリのエンジンの燃費マップを用いて燃費

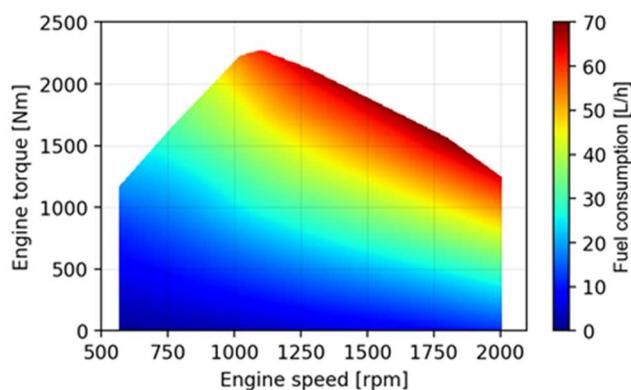


図-4.7 エンジン燃費マップ(大型車)

#### 第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

シミュレーションを行った。図-4.7に燃費マップを示す。

走行パターンは燃費シミュレーションプログラムに組み込まれている都市内モード（平均速度27.3km/h，速度0～87.6 km/h）と都市間モード（一定速度80 km/h）をそのまま用いた。各走行モードを図-4.8および図-4.9を示す。

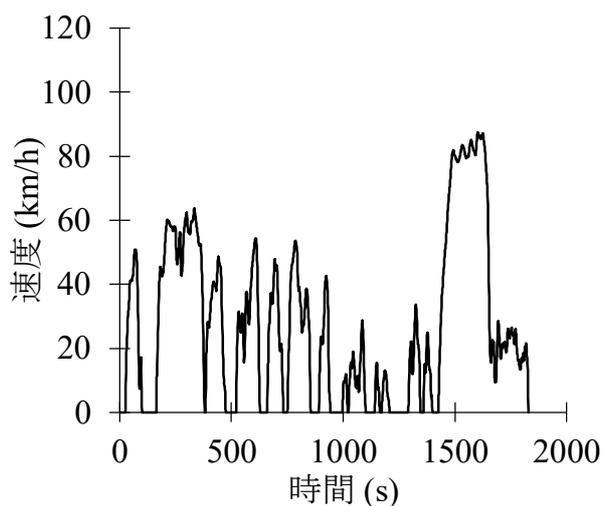


図-4.8 都市内モード(大型車)

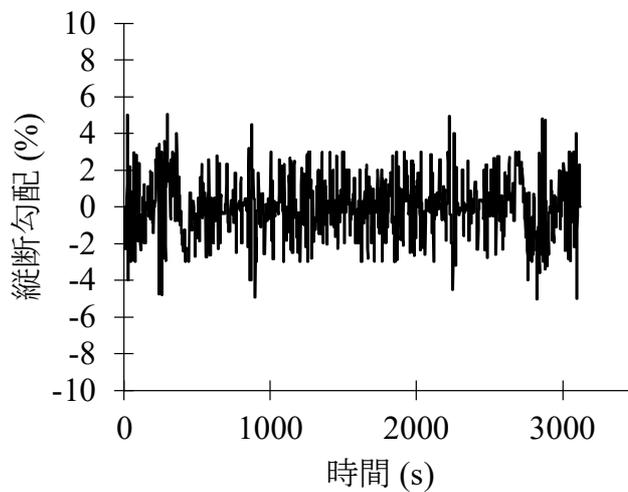


図-4.9 都市間モード(大型車)

b) 小型車の燃料消費量シミュレーション

小型車の燃料消費量シミュレーションは、乗用車等の国際調和排出ガス・燃費試験法（Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles モード(WLTC mode)）で実施した。JARI が保有している公開可能な速度と駆動力に関するCO<sub>2</sub>排出量マップを用い、走行速度パターンと車両諸元から推定される駆動力の時系列データからCO<sub>2</sub>排出量を算出した。図-4.10に燃費マップを示す。

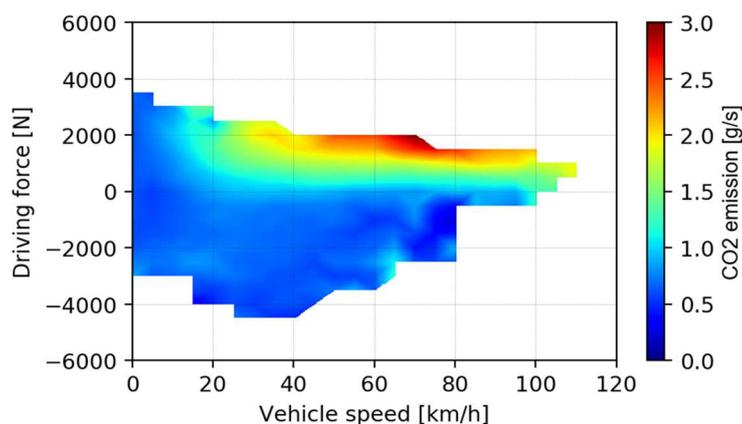


図-4.10 エンジン燃費マップ（小型車）

RRC の変化率は小型車のシミュレーションに標準的に用いられているタイヤの転がり抵抗係数に相当する定数 0.0140 を基準とし、30%低減(0.0098)、15%低減(0.0119)、15%増加(0.0161)、30%増加(0.0182)と変更して燃費シミュレーションを行った。なお、空気抵抗は大型車と同じ式(4.1)を用いて算出した。

走行速度パターンは、WLTC モードの中速モード（速度 0～76.6km/h、平均速度 39.5km/h）、と高速モード（速度 0～97.4km/h、平均速度 56.7 km/h）とした。中速モードを図-4.11、および高速モードを図-4.12 に示す。なお、WLTC モードは 2018 年 10 月より従来の走行モード JC08 から切り替えられ、公定燃費の計算に用いられているより実燃費に近い世界統一試験モードである。

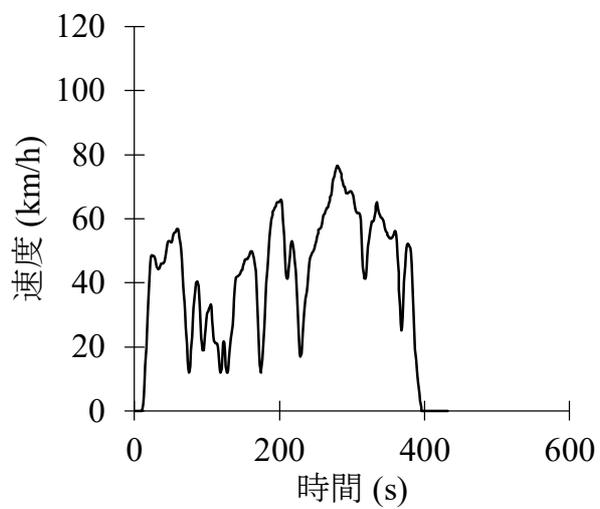


図-4.11 中速モード (小型車)

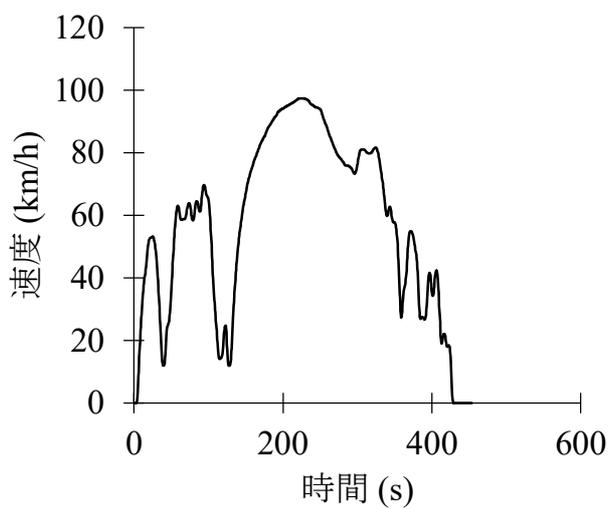


図-4.12 高速モード (小型車)

### 4.4.3 タイヤ／路面転がり抵抗係数とCO<sub>2</sub>低減率の関係

RRCの変化率とCO<sub>2</sub>排出量の低減率との関係について、大型車の場合を図-4.13、小型車の場合を図-4.14に示す。

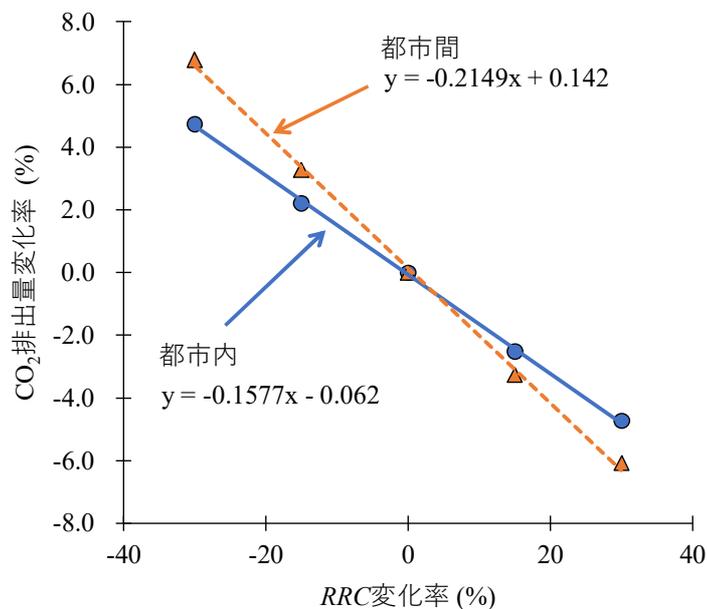


図-4.13 RRC 変化率と CO<sub>2</sub> 排出量変化率の関係(大型車)

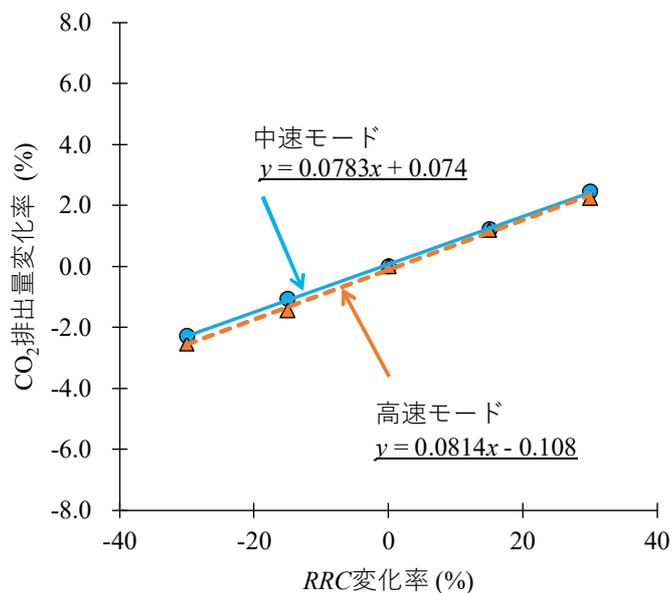


図-4.14 RRC 変化率と CO<sub>2</sub> 排出量変化率の関係(小型車)

#### 第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

図-4.13より、大型車の場合は、都市内モードよりも都市間モードの方が勾配は大きくなり、都市間モードの方がRRCのCO<sub>2</sub>排出量に及ぼす影響が大きいことが分かった。さらに、シミュレーションの結果から、RRCが基準値の場合の燃料消費量は都市内モードで3.17km /L,都市間モードで4.28 km /Lとなった。これに、軽油の排出原単位2.58 kg-CO<sub>2</sub> /L [5]を用いると、CO<sub>2</sub>排出係数は都市内モードで0.814 kg-CO<sub>2</sub>/km, 都市間モードで0.603 kg-CO<sub>2</sub>/kmとなった。

一方、図-4.14より、小型車の場合は、中速モード,と高速モードではほぼ同等となった。これより、RRC低減率とCO<sub>2</sub>排出量の低減率との関係に及ぼす速度の影響は小さいことが分かった。小型車におけるRRCが基準値の場合のCO<sub>2</sub>排出量は、中速モードで0.093kg-CO<sub>2</sub>/km, 高速モードで0.072kg-CO<sub>2</sub>/kmとなった。

さらに、舗装種別のCO<sub>2</sub>低減率の検討として、舗装種は、基準を既設排水性舗装(13)とし、新規排水性舗装(13)と新規低燃費舗装Type1を適用した場合について算出した。算出結果を表-4.8に示す。

表-4.8 舗装種別のCO<sub>2</sub>低減率

項 目		大型車		小型車	
		都市内	都市間	中速	高速
走行モード					
平均速度(km/h)		27.3	80.0	39.5	56.7
新規 排水性舗装(13)	RRC 低減率(%)	8.0	7.0	6.1	7.0
	CO <sub>2</sub> 低減率(%)	1.3	1.5	0.5	0.6
新規 低燃費舗装Type1	RRC 低減率(%)	14.1	14.4	13.3	14.4
	CO <sub>2</sub> 低減率(%)	2.2	3.1	1.0	1.2

表-4.8より、同じ舗装種でも新しい舗装にすることで、タイヤ/路面転がり抵抗係数が低減することから、CO<sub>2</sub>排出量の低減率は大型車では1.3～1.5%、小型車では0.5～0.6%低減した。さらに新規低燃費舗装Type1にすることで、CO<sub>2</sub>排出量の低減率は大型車では、2.2～3.1%、小型車では1.0～1.2%程度のCO<sub>2</sub>を低減できることが示された。

#### 4.4.4 日本全国の幹線道路へ適用した場合の効果

日本全国の幹線道路へ適用した場合の効果について試算した。基準とする舗装種は、供用中路線に適用した場合と仮定して、既設排水性舗装(13)とした。そして、試算は新規排水性舗装(13)と新規低燃費舗装Type1を適用した場合について自動車から排出されるCO<sub>2</sub>排出量を計算した。試算条件を表-4.9に示す。表-4.9に示す各種条件は平成27年度交通センサスデータ[6]から用いた。また、路線種により走行速度が異なることから、交通センサスデータにある旅行速度に近い走行モードを適用した。

表-4.9 試算条件（日本全国の幹線道路に適用した場合）

道路種別		高速道路	一般国道	都道府県道等
旅行速度 (km/h)		78.4	35.4	28.5
全延長 (km)		9,474	55,685	129,003
24時間 平均 交通量 (台/日)	小型車	19,359	9,366	4,284
	大型車	9,803	1,952	615
走行 モード	小型車	高速	中速	中速
	大型車	都市間	都市内	都市内

試算は、初めに基準となる既設排水性舗装(13)のCO<sub>2</sub>排出量を算出し、次にCO<sub>2</sub>削減率からCO<sub>2</sub>削減量を求め、最後に、道路種ごとの総延長と日数(365日)から日本全国の年間のCO<sub>2</sub>削減量を求めた。そして、その削減量が日本の運輸部門全体の年間のCO<sub>2</sub>排出量に対する割合を求めた。日本の運輸部門全体のCO<sub>2</sub>排出量は206,000,000 t[7]とした。表-4.10に試算結果を示す。

表-4.10より、新規排水性舗装(13)を適用すると年間で約123万t、新規低燃費舗装Type1を適用すると年間で約227万tのCO<sub>2</sub>排出量を削減できる結果となった。また、この削減量の日本の運輸部門全体のCO<sub>2</sub>排出量に対する割合は新規排水性舗装(13)で0.6%、新規低燃費舗装Type1で1.1%となった。

第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

表-4.10 試算結果 (日本全国に適用した場合)

道路種別	高速道路		一般国道		都道府県道等		合計	
総延長 (km): $A$	9,474		55,685		129,003		194,162	
車種	小型車	大型車	小型車	大型車	小型車	大型車		
24時間平均交通量(台/日): $B$	19,359	9,803	9,366	1,952	4,152	596		
CO <sub>2</sub> 排出係数 (kg-CO <sub>2</sub> /km・台): $C$	0.072	0.603	0.093	0.814	0.093	0.814		
CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /km・日): $D=B \times C$	1,396	5,911	871	1,589	386	485		
CO <sub>2</sub> 削減率(%): $E$	0.60%	1.50%	0.50%	1.30%	0.50%	1.30%		
排水性舗装 (13)	CO <sub>2</sub> 削減量 (kg-CO <sub>2</sub> /km・day): $F=D \times E$		8.4	88.7	4.4	20.7	1.9	6.3
	CO <sub>2</sub> 削減量(t-CO <sub>2</sub> /km・year): $G=F \times 365$		3.07	32.38	1.61	7.56	0.69	2.30
	CO <sub>2</sub> 削減量(t-CO <sub>2</sub> ・year): $H=G \times A$		29,047	306,719	89,430	420,727	89,464	296,642
	運輸部門全体におけるCO <sub>2</sub> 削減率 (206,000,000 ton) (%)		0.163		0.248		0.187	
低燃費舗装 Type1	CO <sub>2</sub> 削減率(%): $E$		1.20%	3.10%	1.00%	2.20%	1.00%	2.20%
	CO <sub>2</sub> 削減量 (kg-CO <sub>2</sub> /km・day): $F=D \times E$		16.8	183.2	8.7	35	3.9	10.7
	CO <sub>2</sub> 削減量(t-CO <sub>2</sub> /km・year): $G=F \times 365$		6.13	66.87	3.18	12.78	1.42	3.91
	CO <sub>2</sub> 削減量(t-CO <sub>2</sub> ・year): $H=G \times A$		58,093	633,494	176,827	711,375	183,636	503,821
	運輸部門全体におけるCO <sub>2</sub> 削減率 (206,000,000 ton) (%)		0.336		0.431		0.334	

#### 4.4.5 交通量の違いによるCO<sub>2</sub>削減効果

次に、高速道路のなかでも比較的交通量が多い区間に施工した場合のCO<sub>2</sub>削減量を算出し、CO<sub>2</sub>削減量について試算し適用効果について検討した。対象区間は東名高速道路の海老名JCT～厚木IC間で、交通量データは自動車類別の平日および休日の24時間交通量(平成22年度)を使用した[8]。その他の試算条件は表-4.9の高速道路と同様とした。試算結果を表-4.11に示す。

表-4.11より海老名JCT～厚木IC間において年間559t-CO<sub>2</sub>/kmの削減量となった。また、高速道路全線と海老名JCT～厚木ICに施工した場合のCO<sub>2</sub>削減量比較結果を図-4.15に示す。図-4.15より、高速道路の重交通区間に適用した場合は、高速道路全線に適用した場合に対して約7.7倍のCO<sub>2</sub>削減効果があった。これより、低燃費舗装Type1は交通量の多い箇所に適用したほうがCO<sub>2</sub>排出量の削減効率が向上することが定量的に明らかになった。

表-4.11 海老名JCT～厚木IC間のCO<sub>2</sub>削減量試算結果

車種	小型車	大型車
24時間平均交通量(台/日): <i>B</i>	196,048	72,844
CO <sub>2</sub> 排出係数(kg-CO <sub>2</sub> /km・台): <i>C</i>	0.072	0.603
CO <sub>2</sub> 排出量(kg-CO <sub>2</sub> /km・日): <i>D=B×C</i>	14,135	43,925
CO <sub>2</sub> 削減率(%): <i>E</i>	1.20%	3.10%
CO <sub>2</sub> 削減量(kg-CO <sub>2</sub> /km・日): <i>F=D×E</i>	169.6	1361.7
CO <sub>2</sub> 削減量(t-CO <sub>2</sub> /km・年): <i>G=F×365</i>	61.90	497.02
合計(t-CO <sub>2</sub> /km・年)	559	

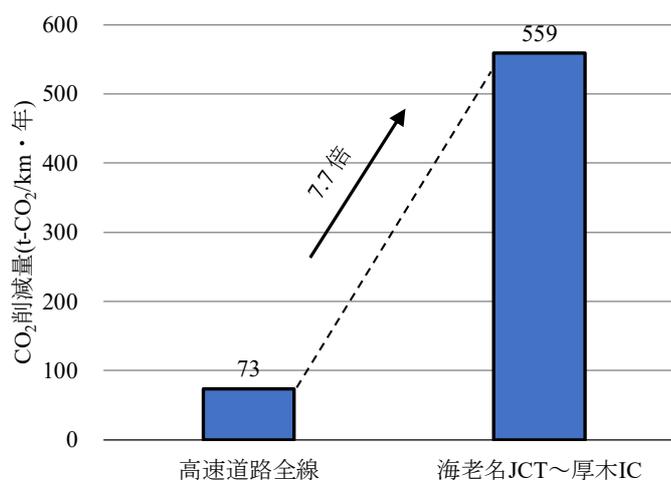


図-4.15 高速道路全域と海老名JCT～厚木ICの計算結果

#### 第4章 走行燃費および二酸化炭素排出量削減効果に関する検討

次に、本海老名 JCT～厚木 IC 間に低燃費舗装 Type1 を適用した場合の費用効果を検討した。検討では排水性舗装(13)と低燃費舗装 Type1 の施工単価差を用いて、CO<sub>2</sub>排出量を 1t 削減するのに必要な追加費用を試算した。

試算条件として、施工費用は排水性舗装(13)を 2,000 円/m<sup>2</sup> とし、低燃費舗装 Type1 については市場単価が定めっていないため、本試算用として排水性舗装(13)施工単価の 1.0～2.0 倍とした。施工面積は幅員を 10m, 延長を 1.0km の面積 10,000m<sup>2</sup> とした。そして試算の期間は、舗装の一般的な耐用年数である 10 年とした。

試算結果を表-4.12 と図-4.16 に示す。結果、本試算条件においては低燃費舗装 Type1 を用いた場合の費用効果として、CO<sub>2</sub> を 1t 削減するのに必要な追加費用は 0～6,957 円であることが示された。

表-4.12 低燃費舗装 Type1 の費用効果試算結果

舗装種	排水性舗装(13)	低燃費舗装Type1					
10年分のCO <sub>2</sub> 削減量(t-CO <sub>2</sub> /km)	2,715	5,589					
低燃費舗装Type1と排水性舗装(13)のCO <sub>2</sub> 排出量の差(t-CO <sub>2</sub> /km)	-	2,875					
施工面積(m <sup>2</sup> ): J	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
施工単価(円/m <sup>2</sup> ): K	2,000	2,000	2,400	2,800	3,200	3,600	4,000
施工費用(円): L=J×K	20,000,000	20,000,000	24,000,000	28,000,000	32,000,000	36,000,000	40,000,000
低燃費舗装Type1と排水性舗装(13)施工単価差	-	0	4,000,000	8,000,000	12,000,000	16,000,000	20,000,000
CO <sub>2</sub> を1t削減するための追加費用(円/t)		0	1,391	2,783	4,174	5,566	6,957

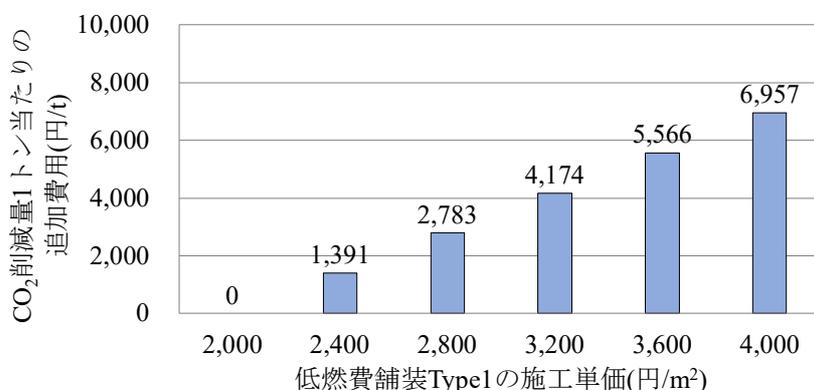


図-4.16 低燃費舗装 Type1 の費用効果試算結果

#### 4.4.6 まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 大型車の場合は速度の大きい都市間モードの方が速度の小さい都市内モードよりもRRCのCO<sub>2</sub>排出量に及ぼす影響が大きくなった。一方、小型車の場合は、速度の差異によるRRCの及ぼす影響は小さかった。
- (2) 同じ舗装種でも新しくすることで、RRCが小さくなることからCO<sub>2</sub>削減効果があり、さらに低燃費舗装Type1とすることで、低減効果は排水性舗装(13)の2倍程度向上することが分かった。
- (3) 日本全国の幹線道路に適用したときの削減効果は、日本の運輸部門全体のCO<sub>2</sub>排出量に対して、排水性舗装(13)を適用すると0.6%、低燃費舗装Type1を適用すると1.1%削減できる結果が示された。
- (4) 低燃費舗装Type1を高速道路の交通量が多い箇所に適用することで削減効率は向上する結果となった。また、このときの費用効果は、CO<sub>2</sub>を1t削減するための費用として、低燃費舗装Type1の施工単価を排水性舗装(13)の1.0～2.0倍とした場合、0～6,957円/tであることが示された。

以上の検討より、低燃費舗装Type1の実際のRRCと精度の良い燃料シミュレーション法を用いた精度の高い試算から、低燃費舗装Type1はCO<sub>2</sub>削減に対して有効であり、また、交通量の多い箇所から整備することで効率よくCO<sub>2</sub>排出量を削減できることが示された。

#### 4.5 第4章のまとめ

本章で得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) 走行燃費の実証試験では、走行速度 20km/h では低燃費舗装 Type2, 40km/h, 60km/h, 80km/h では低燃費舗装 Type1 が他の路面よりも良好な結果となった。60km/h のときに低燃費舗装 Type1 は排水性舗装(13)よりも走行燃費は 2.8%向上した。
- (2) CO<sub>2</sub> 排出量の実証試験では、走行速度 20km/h, 60km/h では低燃費舗装 Type2, 40km/h, 80km/h では低燃費舗装 Type1 が他の路面よりも良好な結果となった。60km/h のときに低燃費舗装 Type1 は排水性舗装(13)よりも CO<sub>2</sub> 排出量は 3.2%低減した。
- (3) 大型車の場合は速度の大きい都市間モードの方が速度の小さい都市内モードよりもRRCのCO<sub>2</sub>排出量に及ぼす影響が大きくなった。一方、小型車の場合は、速度の差異によるRRCの及ぼす影響は小さかった。
- (4) 同じ舗装種でも新設にすることで、タイヤ/路面転がり抵抗が小さくなることからCO<sub>2</sub>削減効果があり、さらに低燃費舗装Type1とすることで、低減効果は排水性舗装(13)の2倍程度に向上することが示された。
- (5) 日本全国の幹線道路に適用したときの削減効果は、日本の運輸部門全体のCO<sub>2</sub>排出量に対して、排水性舗装(13)を適用すると0.6%、低燃費舗装Type1を適用すると1.1 %削減できることが示された。
- (6) 低燃費舗装Type1を高速道路の交通量が多い箇所に適用することで削減効率率は向上する結果となった。また、このときの費用効果は、CO<sub>2</sub>を1t削減するための費用として、低燃費舗装Type1の施工単価を排水性舗装(13)の1.0~2.0倍とした場合、0~6,957円/tであることが示された。

#### 第4章の参考文献

- [1] 日本規格協会：JIS D 1012自動車—燃料消費率試験方法 付属書1（参考）実路における燃費試験方法，2005.
- [2] 一般社団法人日本自動車販売協会連合会：新車販売台数状況（月間）1月-12月，（一社）日本自動車販売協会連合会，2019.2～2020.1.
- [3] 交通安全環境研究所：TRIAS08-003(1)-02燃料消費率試験（重量車（2025年度燃費基準対応））（JH25試験法）.
- [4] 交通安全環境研究所：TRIAS08-003-01燃料消費率試験（重量車）.
- [5] 環境省：算定方法及び排出係数一覧，2021.4.[https://ghgsanteikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran\\_2020\\_rev.pdf](https://ghgsanteikohyo.env.go.jp/files/calc/itiran_2020_rev.pdf).
- [6] 国土交通省：平成27年度全国道路・街路交通情勢調査 集計表，<https://www.mlit.go.jp/road/census/h27/index.html>.
- [7] 国土交通省：運輸部門における二酸化炭素排出量，[https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei\\_environment\\_tk\\_000007.html](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html).
- [8] 国土交通省：平成22年度全国道路・街路交通情勢調査 集計表，<https://www.mlit.go.jp/road/census/h22-1/index.html>.

## 第 5 章

### すべり抵抗測定車を用いたタイヤ／路面転がり 抵抗の直接評価方法に関する検討



## 第5章 すべり抵抗測定車を用いたタイヤ／路面転がり抵抗の直接評価方法に関する検討

### 5.1 緒言

タイヤ／路面転がり抵抗の直接評価方法は、海外をみると MIRIAM (Models for rolling resistance In Road Infrastructure Asset Management systems) において、①ドラム試験、②惰性走行試験、③トレーラ式試験が報告されている[1][2][3]。この中でもトレーラ式試験は海外において最も多く使われている方法である。しかし、トレーラ式はわが国での実績がなく、欧米および米国と比較すると道路の幅が狭く、道路線形が複雑なわが国での適用は難しいと考える。なお、国内の自動車分野においては、必要な値はドラム試験等による実験により求めて、その実験値をもとに専用の燃料消費量シミュレーションを用いて評価をおこなっている[4][5][6][7]。

一方、国内の舗装分野では、高速道路上での惰性走行試験による評価方法[8][9]や、乗用車の非駆動軸に設置した6分力計から評価する方法[10]が報告されている。両方法ともに実道での適用できる可能性が十分にあるものの、道路の線形や交通規制が必要など実用的には制限が多い。

そこで、本研究ではすべり抵抗測定車を用いた方法について検討した。このすべり抵抗測定車は、一般財団法人土木研究センターが所有する、主に一般国道のすべり抵抗の評価で実績がある測定機であり、今後実道での評価を行うことを見据えると、最も実装しやすい測定装置であると考えた。そして、このすべり抵抗測定車は測定専用の第5輪での測定であることと、また、進行方向軸以外にも車両と直角方向軸に働く力（コーナリングフォース）や、測定輪と直角方向軸に働く力（サイドフォース）の測定が可能であり、より精度の高い測定を行えることから採用した。

## 5.2 検討方法

### 5.2.1 すべり抵抗測定車

本検討に用いたすべり抵抗測定車の概要を図-5.1に示す。図-5.1に示すように、大型バスの前方にすべり測定装置および試験用タイヤ(第5輪)を取り付けたものとなっている。本検討に用いた試験用タイヤは、ASTM E-501に準拠したすべり測定用標準タイヤ(寸法:165SR13,内圧0.176MPa,リブタイヤ)を用いた。

すべり抵抗測定車の測定項目は、けん引力(以下,TF),輪荷重(以下,W)をはじめ,車体直角方向に働くコーナリングフォース(以下,CF),タイヤ直角方向に働くサイドフォース(以下,SF),試験輪を固定するブレーキングフォース(BF)となっている。タイヤ／路面転がり抵抗を測定する場合は,タイヤを自由転動させたときのTF,W,CFを計測する。

第5輪はエアサスペンション方式となっており,測定中は輪荷重が一定となるように自動調整できる。また,第5輪は走行方向に対してスリップ角( $0^{\circ}$ ~ $35^{\circ}$ )の設定や試験輪をロックすることも可能であり,これにより横すべり摩擦係数や縦すべり摩擦係数の計測が可能である。なお,測定中のタイヤ温度測定には,車載の非接触式温度計を用いた。

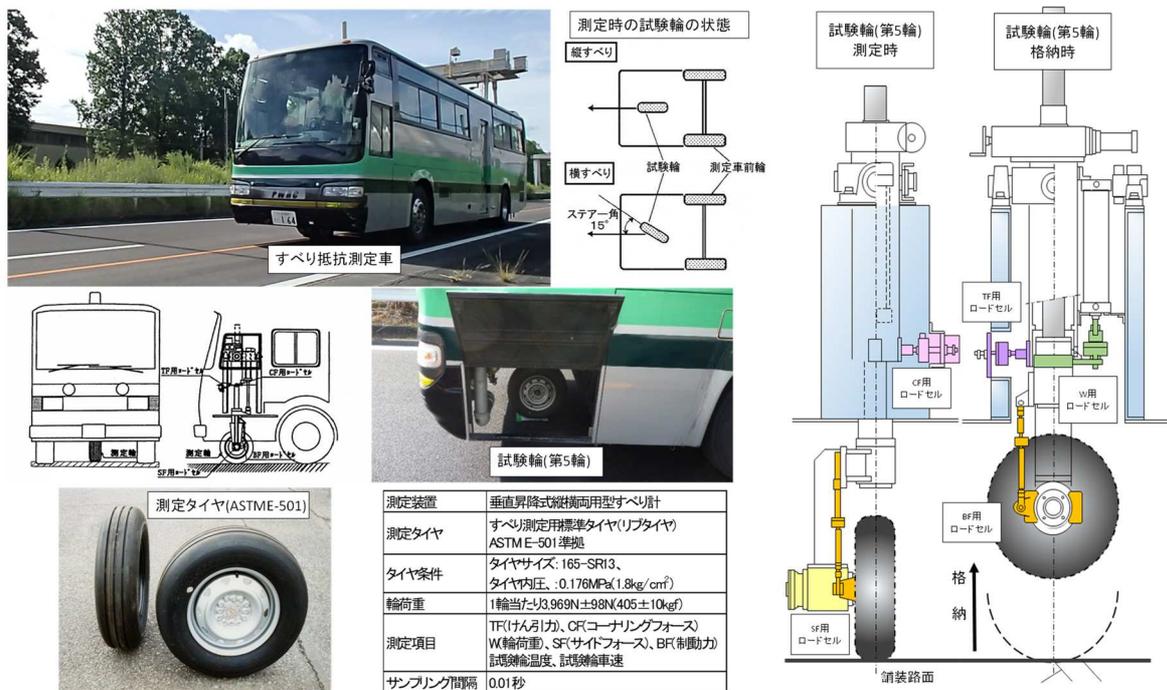


図-5.1 すべり抵抗測定車の概要

### 5.2.2 試験路面

すべり抵抗測定車によるタイヤ／路面転がり抵抗の評価方法の検討には、第2章で述べた、国土技術政策総合研究所の試験走路東直線部に施工した試験施工路面を用いた。

試験路面は、表-5.1に示すように、低燃費舗装 Type1、および低燃費舗装 Type2 と、比較用の一般的路面である排水性舗装(13)、および密粒度舗装(13)の計4路面であり、それぞれの延長は300mである。

タイヤ／路面転がり抵抗の測定は、その温度依存性を検討するために、冬、夏、秋の3シーズンに分けて行った。測定季節と測定回数は表-5.2に示すとおりである。なお、測定は、各路面とも走行速度20、40、60、80km/hの4条件のもとで行った。

表-5.1 試験路面の概要

舗装種別		排水性舗装(13)	密粒度舗装(13)	低燃費舗装Type1	低燃費舗装Type2
最大粒径(mm)		13	13	5	5
通過 粒度 百分 率 (%)	19mm	100	100	100	100
	13.2mm	90~100	95~100	100	100
	4.75mm	11~35	55~70	90~100	90~100
	2.36mm	10~20	35~50	20~40	10~30
	0.6mm	-	18~30	-	-
	0.075mm	3~7	4~8	5~10	3~7
アスファルト量(%)		4~6	5~7	5~6	4~6
空隙率(%)		15~25	3~6	10~15	15~20
平坦性	IRI(mm/m)	1.26	1.17	0.87	0.97
	$\sigma$ (mm)	0.87	0.75	0.55	0.58
MPD(mm)		1.63	0.37	0.65	0.74

表-5.2 タイヤ／路面転がり抵抗の測定季節と測定回数

測定季節	天気	平均気温 (°C)	路面の 状態	測定回数 (回/条件)
冬	晴れ	5.0	DRY	4
夏	晴れ	32.0	DRY	7
夏	曇り	30.0	DRY	6
秋	晴れ	20.0	DRY	7
秋	薄曇り	20.0	DRY	6

### 5.2.3 タイヤ/路面転がり抵抗の測定フロー

測定は、すべり抵抗測定車の測定輪（第5輪）を接地したままの状態、一定速度かつ直進走行を行いながら測定輪は自由転動させて、このときのけん引抵抗力を計測した。

なお、事前準備として、タイヤ空気圧と輪荷重の調整を行った。タイヤ空気圧は輪荷重を載荷した状態で所定の値(0.176MPa)となるように調整した。輪荷重は、すべり抵抗測定車に搭載された垂直昇降式縦横両用型すべり計を用いて、走行時に所定の値(3,969±98N)となるように調整を行った。また、タイヤ温度の定常化を目的に、2時間の慣らし走行を行ってから本測定を開始した。

タイヤ/路面転がり抵抗の測定フローを図-5.2に示す。

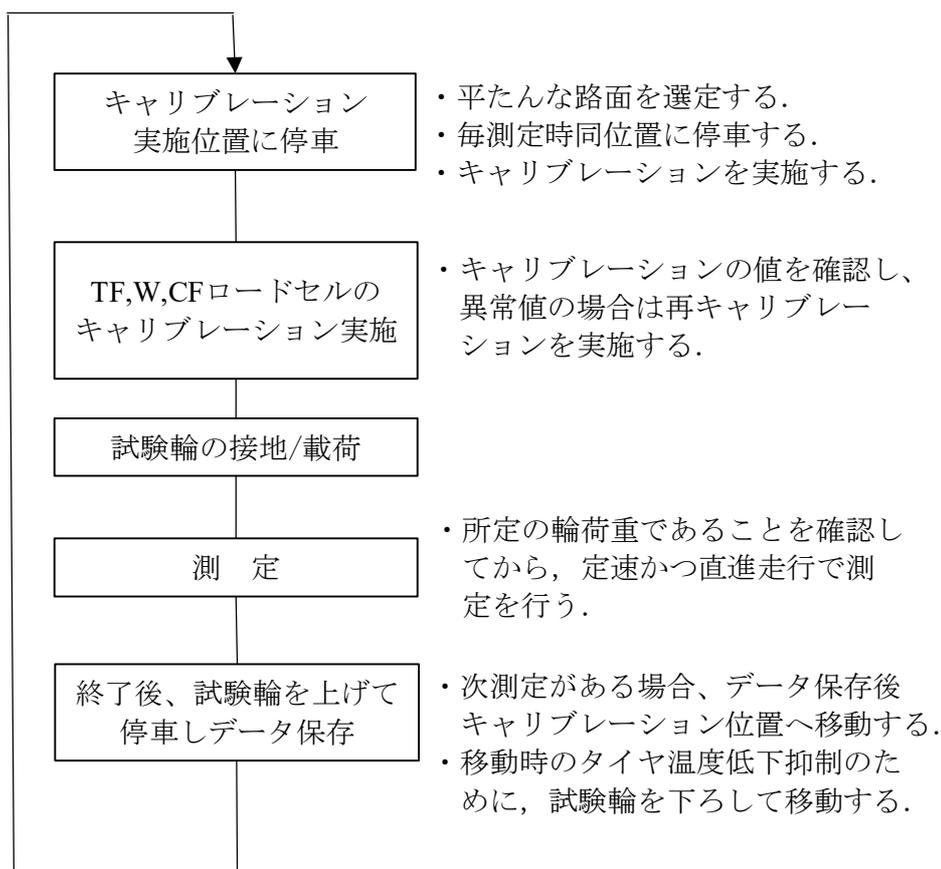


図-5.2 タイヤ/路面転がり抵抗の測定フロー

### 5.3 影響要因の検討

#### 5.3.1 施工ジョイント通過時の振動

タイヤが自由転動するときのTFは非常に小さい値であり、敏感に路面状態の影響を受ける。したがって、タイヤ／路面転がり抵抗を適正に評価するためには、この影響要因を考慮する必要がある。その一つとして、試験車両が施工ジョイントを通過するとき発生する振動の影響がある。この振動は路面性能とは別の外力であることから、この影響を排除する必要がある。

そこで、施工ジョイント通過時の振動の影響範囲(時間)を確認した。図-5.3に一例として、40km/h 走行時の試験路面突入時におけるTFの経時変化を示す。

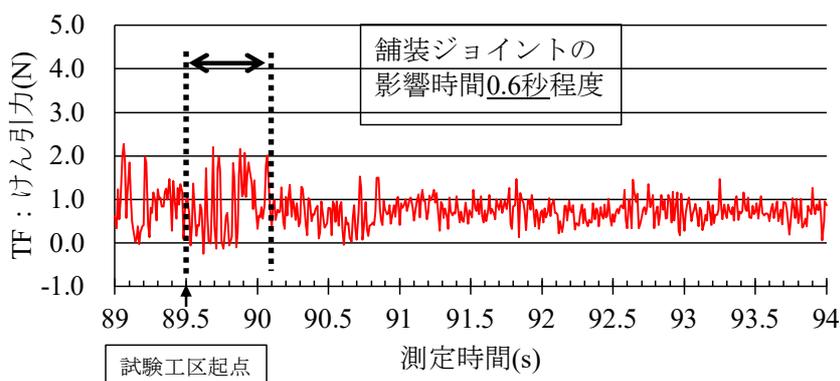


図-5.3 施工ジョイント通過時の影響の一例(40km/h)

図-5.3より、試験車両が試験工区起点を通過後0.6秒程度まではTFが大きくなり、その後は値が落ち着いている。他の速度(20,60,80km/h)においても0.6~0.8秒程度経過後にTFが落ち着く傾向にあった。このため、タイヤ／路面転がり抵抗を測定する場合には、施工ジョイントから最小1.0秒間(40km/h走行時は11.1mに相当)のデータを排除する必要があることがわかった。本検討では、試験路面の延長が300mであることと、路面の性能以外の要因を可能な限り除去したいとのことから、各試験路面の起終点両端部50m分の測定データを排除することとした。

### 5.3.2 微小な操舵の影響

タイヤ／路面転がり抵抗の測定は、直線道路を直進することにより測定する。しかし、横断勾配や平坦性の影響により、直進するためには、運転者は微小な操舵を行うことは避けられない。その操舵時にタイヤが受ける分力の関係は、図-5.4[11]に示すとおりである。

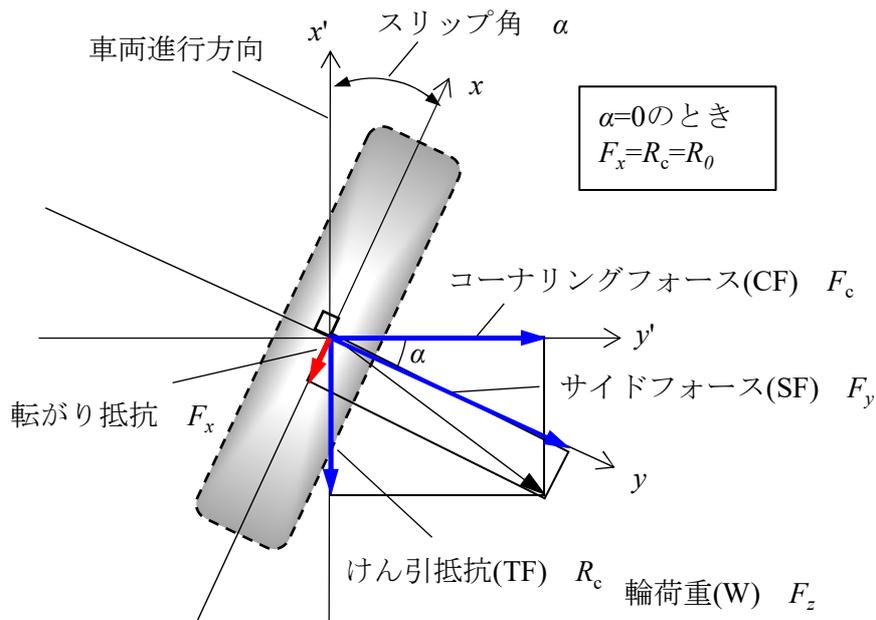


図-5.4 タイヤが受ける分力

図-5.4 より、操舵時の分力には、「転がり抵抗： $F_x$  (N)」, 「けん引力(TF)： $R_c$  (N)」, 「CF： $F_c$  (N)」, 「W： $F_z$  (N)」, 「SF： $F_y$  (N)」, があり、タイヤにスリップ角がつくと  $F_c$  や  $F_y$  が発生し、 $R_c$  が増加することがわかる。ここで、 $F_x$  は操舵時のスリップ角が  $\alpha^\circ$  のときの転がり抵抗であり、 $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  には式(5.1)[11] に示すような関係がある。

$$F_x \approx R_0 \left\{ 1 + \left( \frac{F_y}{F_z} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.1)$$

ここで、 $R_0$  は横力  $F_y$  がゼロのときのけん引力であり、 $R_c$  から  $F_y$  の影響を除いた値である。したがって、転がり抵抗を適切に評価するには、 $R_0$  を算出することが必要である。そこで、式(5.1)の変数をすべり抵抗測定車で実測可能な  $R_c$ ,  $F_c$ ,  $F_z$  に変数変換し、スリップ角  $\alpha$  が微小な角度である場

合， $R_0$  について解くと，操舵時の横力を補正するための式(5.2)[11]が得られる．

$$R_0 \approx \left( R_c - \frac{F_c^2}{k_y} \right) / \left\{ 1 + \left( \frac{F_c}{F_z} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

ここで， $k_y$  はスリップ角  $1^\circ$  における CF であり，特にコーナリングパワーと呼ばれている．コーナリングパワーは路面種や速度に依存しないタイヤの種類やその剛性などに依存する固有の値である．

$k_y$  はコーナリングパワー係数  $CC$  (以下  $CC$ ) と  $F_z$  の積から求めることができる．そこで，本検討に用いたタイヤの  $CC$  を検討した．

$CC$  の測定には，すべり抵抗測定車を用いた．測定は，試験車両が一定速度で走行しているとき，試験輪のみに  $1^\circ$  のスリップ角を付け，その時の CF を測定した．データ整理方法は，まず，サンプリング間隔 0.01 秒ごとに  $F_c$  を  $F_z$  で除し，0.01 秒毎の横すべり摩擦係数  $\mu_{CF}$  を求めた．そのあと，路面種毎に算術平均値を行い，横すべり摩擦係数  $\mu_{CF}$  とした．測定結果を表-5.3 に示す．表-5.3 より， $\mu_{CF}$  は路面種および速度に依存性が無いことを確認した．このため，本検討においては，横力補正に用いる  $CC$  は 0.23 とした．

表-5.3 横すべり摩擦係数  $\mu_{CF}$

舗装種	$\mu_{CF}$				平均値
	20km/h	40km/h	60km/h	80km/h	
排水性舗装(13)	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
密粒度舗装(13)	0.23	0.22	0.23	0.23	0.23
低燃費舗装Type1	0.23	0.23	0.23	0.24	0.23
低燃費舗装Type2	0.23	0.23	0.23	0.24	0.23
平均値	0.23	0.23	0.23	0.24	0.23

### 5.3.3 タイヤ／路面転がり抵抗係数の算出フロー

横力補正後のタイヤ／路面転がり抵抗係数  $RRC$  の算出は、すべり抵抗測定車より得られた 0.01 秒ごとの  $R_c$ ,  $F_c$ ,  $F_z$  より式(5.2)を用いて 0.01 秒毎に  $R_0$  を算出する．次に  $RRC$  を式(5.3)により求める．

$$RRC = \frac{R_0}{F_z} \quad (5.3)$$

最後に評価区間内における  $RRC$  の実効値として RMS(二乗平均平方根)を算出し、区間の  $RRC$  を求めた．

$RRC$  の算出フローを図-5.5 に示す．

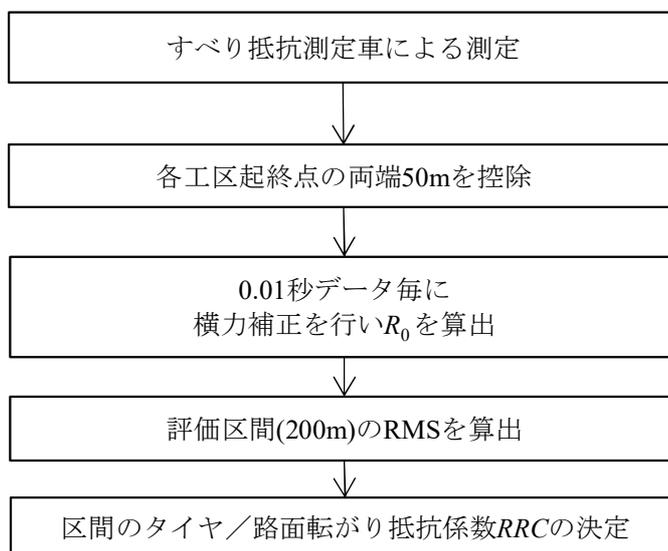


図-5.5  $RRC$  の算出フロー

### 5.4 基準温度および基準速度補正の検討

#### 5.4.1 タイヤ温度とタイヤ／路面転がり抵抗係数の関係

図-5.5 に示した算出フローにより求めた  $RRC$  とタイヤ温度  $T(^{\circ}C)$  の関係について検討した．その結果を図-5.6 に示す．

図-5.6 は，路面毎の  $RRC$  と温度，速度の関係を示しており，横軸は  $T$ ，縦軸は  $RRC$  であり，測定毎にプロットしている．また， $RRC$  を従属変数， $T$  を独立変数とした両対数モデルによる回帰分析から求めた指数近似式 ( $RRC = b e^{aT}$  ;  $a, b$  は定数) も速度別に示している．同図より， $RRC$  と  $T$  は，いずれの速度においても負の関係にあり，決定係数  $R^2$  は 0.17~0.84 と幅広く，低燃費 Type1 を除く 3 路面においては，速度が大きいほど相関が強くなる傾向にあった．

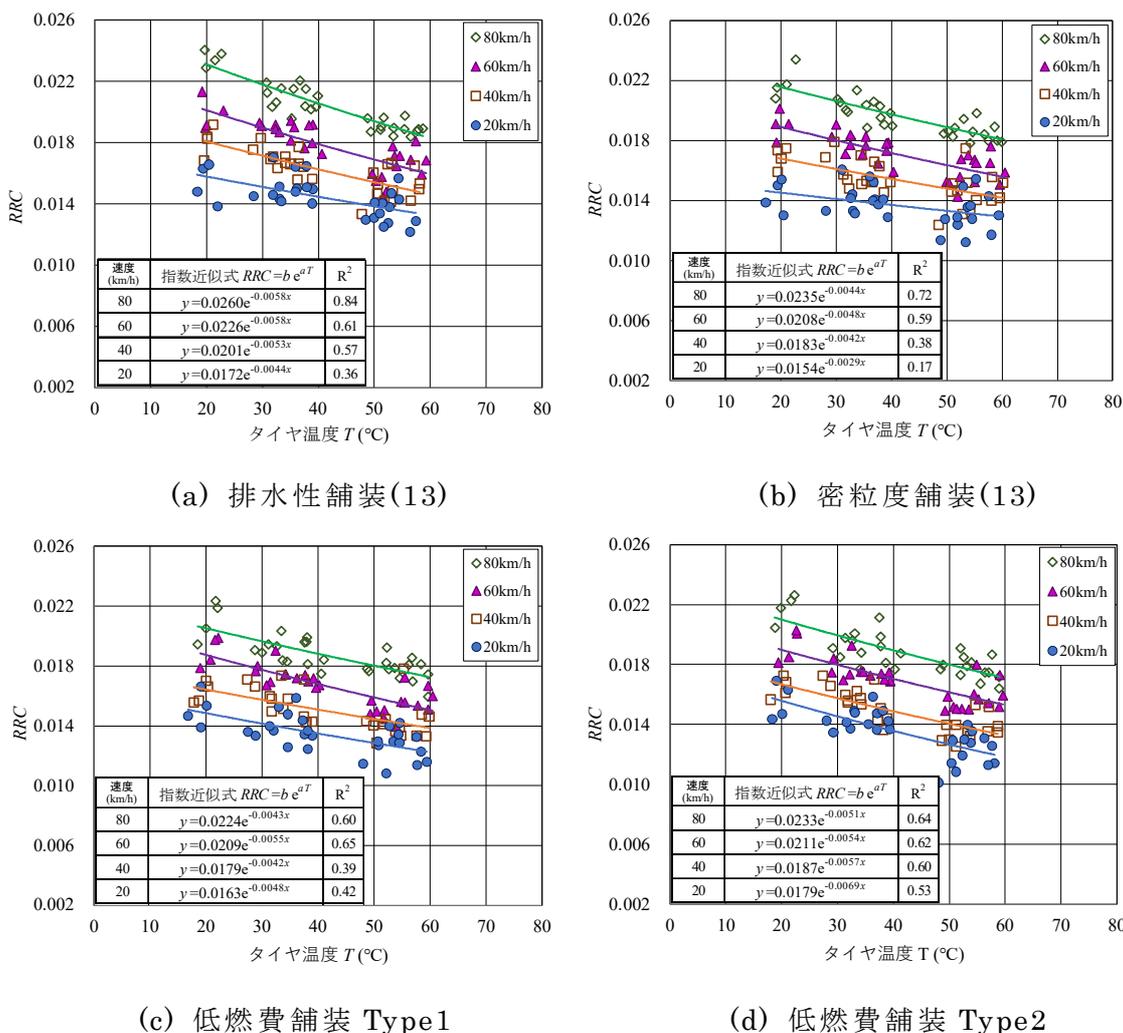


図-5.6  $RRC$  とタイヤ温度  $T$  の関係

### 5.4.2 温度補正方法の検討

RRC の基準温度への補正方法として、Descornet により提案[12]されている式(5.4)をもとに検討を行った。

$$RRC(T) = RRC(T_0) \times e^{\{(T - T_0) / T_1\}} \quad (5.4)$$

ここで、 $T_0$ ：基準温度(30°C)

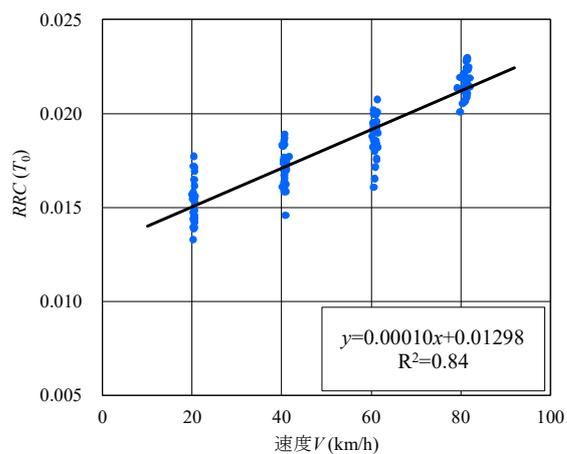
$T_1$ ：温度に関するタイヤの固有値(°C)

なお、温度補正時の基準温度  $T_0$  は Descornet の研究[12]をもとに 30°C とした。 $T_1$  は路面種や速度によらないタイヤ固有の係数であることから、本測定タイヤの  $T_1$  を求めることとした。式(5.4)を用いて RRC と  $(T - T_0)$  の関係から両対数モデルによる回帰分析により定数  $RRC(T_0)$  と  $1/T_1$  を求めた結果を表-5.4 に示す。表-5.4 より各路面、各速度の定数  $1/T_1$  を算術平均すると -0.0050 となり、その逆数から  $T_1$  は -200 となった。

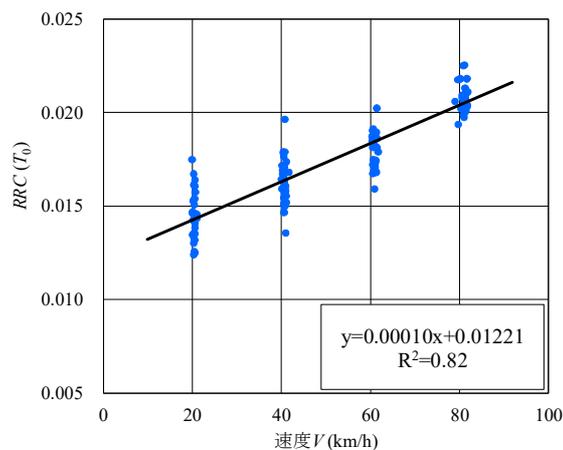
表-5.4 定数  $1/T_1$  と  $RRC(T_0)$

項 目		20km/h	40km/h	60km/h	80km/h	平均
排水性舗装(13)	$1/T_1$	-0.0044	-0.0053	-0.0058	-0.0058	-0.0053
	$RRC(T_0)$	0.0151	0.0171	0.0190	0.0218	-
	$R^2$	0.36	0.57	0.61	0.84	-
密粒度舗装(13)	$1/T_1$	-0.0029	-0.0042	-0.0048	-0.0044	-0.0041
	$RRC(T_0)$	0.0141	0.0161	0.0180	0.0206	-
	$R^2$	0.17	0.38	0.59	0.72	-
低燃費舗装Type1	$1/T_1$	-0.0048	-0.0042	-0.0055	-0.0043	-0.0047
	$RRC(T_0)$	0.0142	0.0157	0.0177	0.0197	-
	$R^2$	0.42	0.39	0.65	0.60	-
低燃費舗装Type2	$1/T_1$	-0.0069	-0.0057	-0.0054	-0.0051	-0.0058
	$RRC(T_0)$	0.0145	0.0157	0.0180	0.0199	-
	$R^2$	0.53	0.60	0.62	0.64	-
平 均		-	-	-	-	-0.0050

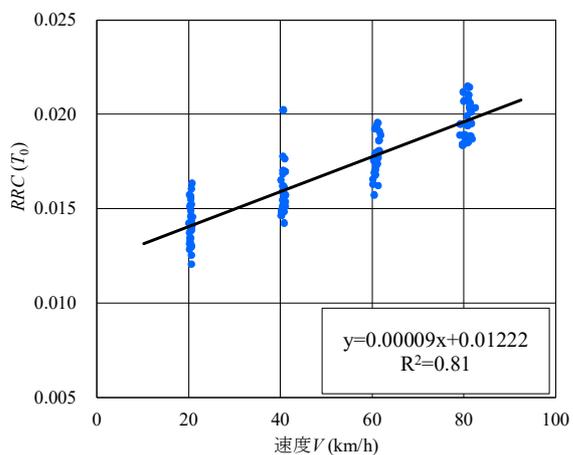
図-5.7 に路面種別の温度補正後の  $RRC(T_0)$  と走行速度  $V$ (km/h) の関係を示す。図-5.7 の横軸は  $V$ 、縦軸は  $RRC(T_0)$  であり、測定毎にプロットしている。また、両者の関係の回帰直線も示している。同図より、 $RRC(T_0)$  と  $V$  は、正の関係にあり、決定係数  $R^2$  は 0.81~0.84 となった。



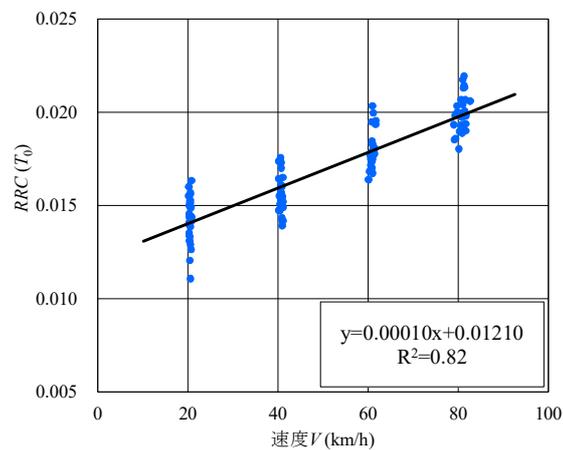
(a) 排水性舗装(13)



(b) 密粒度舗装(13)



(c) 低燃費舗装 Type1



(d) 低燃費舗装 Type2

図-5.7  $RRC(T_0)$ と速度の関係

### 5.4.3 速度補正方法の検討

$RRC(T_0)$ の基準速度への補正方法の検討を行った．速度補正に関しても温度補正と同様に Descornet により提案[12]されている式(5.5)をもとに検討を行った．

$$RRC(T,V) \times e^{\{(T-T_0)/T_1\}} = (V-V_0) / V_1 + RRC(T_0, V_0) \quad (5.5)$$

ここで、 $V_0$ ：基準速度(50km/h)

$V_1$ ：速度に関するタイヤの固有値(km/h)

なお、速度補正時の基準速度  $V_0$ は Descornet の研究[2]をもとに 50km/h とした．

ここで、 $V_1$ は、タイヤ固有の値であることから、本測定タイヤの  $V_1$ を求めた．式(5.5)の左辺と、 $(V-V_0)$ の関係から、両対数モデルによる回帰分析により、定数  $RRC(T_0, V_0)$ と  $1/V_1$  を求めた．その結果を表-5.5 に示す．表-5.5 より、各路面の定数  $1/V_1$  を算術平均すると 0.0000975 となり、その逆数から  $V_1$ は 10,256 となった．

表-5.5 定数  $1/V_1$  と  $RRC(T_0, V_0)$

項 目	$1/V_1$	$RRC(T_0, V_0)$	$R^2$
排水性舗装(13)	0.00010	0.0181	0.84
密粒度舗装(13)	0.00010	0.0173	0.82
低燃費舗装Type1	0.00009	0.0168	0.81
低燃費舗装Type2	0.00010	0.0169	0.82
平 均	0.0000975	0.0173	0.82

#### 5.4.4 基準温度および速度補正後のタイヤ／路面転がり抵抗係数

上記検討により，得られた  $T_1$  および  $V_1$  を用いて，基準温度  $30^\circ\text{C}$  および基準速度  $50\text{km/h}$  に補正したタイヤ／路面転がり抵抗  $RRC(T_0, V_0)$  を計算した後，路面毎に算術平均を行った．

その結果を表-5.6 に示す．表-5.6 より，補正後の  $RRC$  は，低燃費舗装 Type1 < 低燃費舗装 Type2 < 密粒度舗装(13) < 排水性舗装(13) の順となり，低燃費舗装 Type1 は排水性舗装(13) と比べ 7.2% 小さい値を示すことがわかった．

表-5.6  $RRC(T_0, V_0)$  と排水性舗装(13) との比較

項目 舗装種	タイヤによる固有係数		温度／速度補正後	排水性舗装(13)からの低減割合 (%)
	$T_1$	$V_1$	$RRC(T_0, V_0)$	
排水性舗装(13)	-200	10,256	0.0181	—
密粒度舗装(13)			0.0173	4.4
低燃費舗装Type1			0.0168	7.2
低燃費舗装Type2			0.0169	6.6

## 5.5 第5章のまとめ

本章で得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) すべり抵抗測定車による測定において、施工ジョイントの影響を除去するためには、ジョイント通過後から最小 1.0 秒間のデータを排除することが必要であるとわかった。
- (2) 運転者の微小な操舵による影響除去のための、横力補正方法を提案した。
- (3) タイヤ／路面転がり抵抗係数は、タイヤ温度とは負の相関、走行速度とは正の相関があることを確認した。
- (4) すべり抵抗測定車による測定値に対しての基準温度および基準速度補正式を提案した。

以上より、すべり抵抗測定車を用いたタイヤ／路面転がり抵抗の直接評価方法を提案した。

## 第5章 参考文献

- [1] U. Sandberg, Rolling resistance -Basic Information and State -of-the-art- on Measurement Method, Report MIRIAM\_SP1\_01, 2011.
- [2] U. Sandberg, A. Bergiers, J. A. Ejsmont, L. Goubert, R. Karlsson, M. Zoller : Road surface influence on tyre/road rolling resistance, Report MIRIAM\_ SP1\_04, 2011.
- [3] U. Sandberg, A. Bergiers, J. A. Ejsmont, L. Goubert, R. Karlsson, M. Zoller : Rolling Resistance -Measurement Methods for Studies of Road Surface Effects, Report MIRIAM\_SP1\_02, 2012.
- [4] 鈴木忠, 平井洋, 細井賢三: 重量ディーゼル車の燃費シミュレーション, 自動車研究, 2003.
- [5] 鈴木忠, 細井賢三: 重量 AT 車を対象とした燃費シミュレーション手法の研究, 自動車研究, 2007.
- [6] 水嶋教文, 森吉泰生, 窪山達也, 上野涼, 堀隼基: 実車計測による乗用車燃費シミュレーションモデルの開発とその活用(第1報) -タイヤ性能の違いが車両性能に及ぼす生協の定量評価-, 自動車技術会論文集 vol49, No.3, 2018.
- [7] 森吉泰生, 水嶋教文, 上野涼, 窪山達也, 金尚明: 実車計測による乗用車燃費シミュレーションモデルの開発とその活用(第2報) -エンジン技術の改良による燃費改善効果の評価-, 自動車技術会論文集 vol49, No.3, 2018.
- [8] 吉本徹, 風戸崇之, 熊田一彦, 笠原篤: 高速道路での重量車の転がり抵抗の測定と燃費に及ぼす影響に関する研究, 土木学会舗装工学論文集, 第14巻, 2009.12.
- [9] 新見龍男, 吉本徹: 大型車の燃料消費量を考慮したコンクリート舗装とアスファルト舗装の LCCO<sub>2</sub>, 土木学会論文集 E1(舗装工学), vol76, No.2, 2020.
- [10] 渡邊一弘, 井谷雅司, 久保和幸: 路面の“きめ”と転がり抵抗の関係について, 土木技術資料 54-3, 2012.

## 第5章 すべり抵抗測定車を用いたタイヤ／路面転がり抵抗の直接評価方法に関する検討

[11] 酒井秀男：改訂タイヤ工学 入門から応用まで，グランプリ出版，1987.

[12] G.Descornet : Road-Surface Influence on Tire Rolling Resistance, ASTM STP 1031, 1990.

## 第 6 章

### 路面プロファイルを用いたタイヤ／路面転がり 抵抗の間接評価方法に関する検討



## 第6章 路面プロファイルを用いたタイヤ／路面転がり抵抗の間接評価方法に関する検討

### 6.1 緒言

タイヤ／路面転がり抵抗を評価するためには、第5章で検討したような、直接計測が有効であると考えられる。しかし、そのためには特殊な測定車両が必要となることや、計測するための制限が多い。このため、今後、タイヤ／路面転がり抵抗を低減する舗装技術を普及させるためには、間接的に評価できる方法を確立する必要があると考えた。本検討では、直接評価方法により得られたタイヤ／路面転がり抵抗係数と路面プロファイルとを結び付けて、タイヤ／路面転がり抵抗係数を間接的に推定する手法について検討を行った。

ここで、図-6.1 に世界道路協会（PIARC）[1]が示した路面プロファイルと車両の運動特性の関係を示す。図-6.1 では、転がり抵抗は波長 $\lambda$ が0.01m～50mのマクロテクスチャ領域からラフネス領域の振幅が小さいほど、良い影響を及ぼすことを示している。

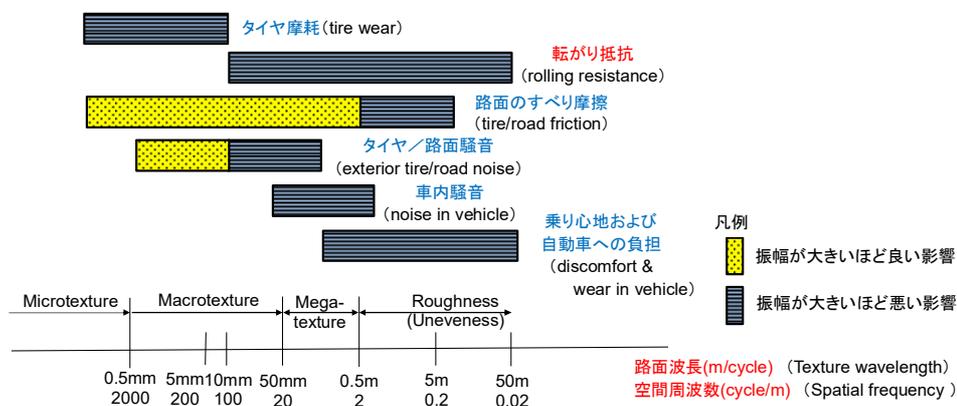


図-6.1 路面プロファイルと車両の運動特性の関係[1]

一方、自動車分野におけるタイヤの転がり抵抗は、走行時のタイヤの変形抵抗、接地摩擦抵抗、およびタイヤの回転に伴う空気抵抗により発生すると考えられている[2][3]。この中で、走行時のタイヤの変形抵抗については、タイヤトレッドやサイドウォールの変形によるエネルギー損失が主な要因と考えられている。

## 第6章 路面プロファイルを用いたタイヤ／路面転がり抵抗の間接評価方法に関する検討

マクロテクスチャ領域では、タイヤのトレッド部の変形、メガテクスチャからラフネス領域では、タイヤのサイドウォールを含めた全体の変形が要因と考えられており[4][5]、タイヤ／路面転がり抵抗係数の推定は、MPDとIRIを組み合わせにより可能であることを、既往研究においても多数報告[5][6]がある。

本検討では、舗装調査・試験法便覧にも掲載されている、一般的に普及している指標を用いて行った。はじめにテクスチャ波長領域、ラフネス波長領域それぞれの単回帰分析を行い、その結果からより関係の強い指標を用いて重回帰分析を行った。

## 6.2 検討方法

### (1) タイヤ／路面転がり抵抗の測定

タイヤ／路面転がり抵抗の測定は図-6.2 に示すすべり抵抗測定車により測定した。走行速度は、20km/h,40km/h,60km/h,80km/h で実施し、第5章に示す、横力補正およびタイヤ温度補正(30°C)を行い、各速度のタイヤ／路面転がり抵抗係数  $RRC$  を算出した。



(a)すべり抵抗測定車

(b)測定タイヤ(第5輪)

測定装置	垂直昇降式縦横両用型すべり計
測定タイヤ	すべり測定用標準タイヤ(リブタイヤ) ASTM E-501 準拠
タイヤ条件	タイヤサイズ: 165-SR13, タイヤ内圧: 0.176 MPa
輪荷重	3,969N±98N
測定項目	TF(けん引力)、CF(コーナリングフォース)、W(輪荷重)、 SF(サイドフォース)、BF(制動力)、測定輪温度、速度
サンプリング間隔	0.01 s

図-6.2 すべり抵抗測定車の概要(図-2.3 再掲)

### (2) 路面プロファイルの測定

路面プロファイルの測定項目および方法を表-6.1 に示す。路面プロファイルのうち、テクスチャ波長領域として路面のきめ深さを表す一般的なテクスチャ指標である TD(Texture Depth), MPD(Mean Profile Depth)を測定した。

また、ラフネス波長領域として、道路の縦断プロファイルを示す指標である、平坦性と IRI(International roughness index)を測定した。なお、IRI は国際ラフネス指数と呼ばれ、1989 年に世界銀行が提案した路面のラフネス指標の一つである。

## 第6章 路面プロファイルを用いたタイヤ／路面転がり抵抗の間接評価方法に関する検討

IRI, 平たん性の測定に用いた測定機は空間的に連続的な線上の測定が可能であることから, 各工区の外わだち部(以下, OWP)を全延長にわたって測定した. MPD, TD については, 測定機器や測定装置が定置式のため, 点での測定となることから, 幅員方向は OWP の位置で, 延長方向は, 工区を 4 等分するような各工区 3 点で測定した.

表-6.1 測定項目および方法

項目	指標	測定方法 (日本道路協会; 舗装調査・試験法便覧)	
		テクスチャ波長領域	TD (mm)
	MPD (mm)	S022-T	回転式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
ラフネス波長領域	平たん性(mm)	S028	舗装路面の平たん性測定方法 (1) 3mプロファイルメータによる方法
	IRI (mm/m)	S032	国際ラフネス指数(IRI)の調査方法

### (3) 舗装路面

検討に用いた舗装路面は, 国土技術政策総合研究所試験走路の東直線部および西直線にある 26 路面を用いた. 全 26 路面の MPD, TD, IRI, 平たん性, および速度別の RRC を表-6.2 に示す,

第6章 路面プロファイルを用いたタイヤ／路面転がり抵抗の間接評価方法に関する検討

表-6.2 検討に用いた舗装路面の各種路面性状値と RRC

工区 NO.	舗装種	テクスチャ 波長領域		ラフネス 波長領域		RRC			
		MPD (mm)	TD (mm)	IRI (mm/m)	平坦性 (mm)	20km/h	40km/h	60km/h	80km/h
E1	排水性舗装(13)	1.63	1.63	1.26	0.87	0.0150	0.0169	0.0186	0.0213
E2	密粒度舗装(13)	0.36	0.36	1.17	0.75	0.0142	0.0159	0.0177	0.0204
E3	低燃費舗装Type2	0.74	0.74	0.97	0.58	0.0141	0.0153	0.0175	0.0197
E4	低燃費舗装Type1	0.65	0.65	0.87	0.55	0.0140	0.0156	0.0172	0.0196
W1	排水性舗装(13)	1.54	1.54	1.26	0.83	0.0158	0.0173	0.0197	0.0213
W2	密粒度舗装(20)	0.35	0.35	3.14	1.12	0.0153	0.0176	0.0222	0.0242
W3	低燃費舗装Type1	0.61	0.61	1.27	1.10	0.0148	0.0164	0.0194	0.0214
W4	低燃費舗装Type1	0.58	0.58	1.51	1.17	0.0147	0.0169	0.0200	0.0226
W5	低燃費舗装Type1	0.71	0.71	1.32	0.82	0.0149	0.0167	0.0192	0.0226
W6	低燃費舗装Type1	0.62	0.62	1.69	0.94	0.0149	0.0163	0.0194	0.0220
W7	密粒度舗装(13)	0.79	0.79	1.22	0.79	0.0152	0.0168	0.0191	0.0213
W8	CRCP	0.44	0.44	1.62	1.20	0.0160	0.0184	0.0210	0.0235
W9	SMA(5)	0.72	0.72	2.01	1.42	0.0152	0.0166	0.0202	0.0226
W10	SMA(13)	1.21	1.21	1.73	1.44	0.0157	0.0177	0.0208	0.0232
W11	排水性舗装(5)	1.01	1.01	1.46	0.95	0.0159	0.0166	0.02	0.0228
W12	排水性舗装(5)	1.07	1.07	1.70	1.64	0.0158	0.0168	0.0195	0.0222
W13	排水性舗装(13)	1.79	1.79	1.51	0.98	0.0163	0.0173	0.0203	0.0221
W14	密粒度舗装(13)	0.71	0.71	1.29	0.81	0.0161	0.0173	0.0201	0.023
W15	CRCP	0.40	0.40	1.50	0.97	0.0164	0.0178	0.0204	0.0229
W16	排水性舗装(20)	3.50	3.50	2.53	1.84	0.0175	0.0191	0.022	0.0246
W17	排水性舗装(20)	2.45	2.45	1.54	1.01	0.0171	0.0192	0.0214	0.0249
W18	排水性舗装(10)	1.49	1.49	1.86	1.15	0.0163	0.0176	0.0194	0.0214
W19	排水性舗装(13)	1.93	1.93	1.31	0.92	0.017	0.019	0.0204	0.0257
W20	排水性舗装(13)	2.11	2.11	1.46	0.96	0.016	0.0182	0.0219	0.0224
W21	密粒度舗装(13)	0.84	0.84	1.59	1.06	0.0157	0.0174	0.0198	0.0225
W22	CRCP	0.52	0.52	1.74	1.05	0.0166	0.0183	0.0208	0.0236

※混合物( )の( )内は最大粒径を示す。

### 6.3 既存テクスチャ指標とタイヤ／路面転がり抵抗係数との単回帰分析

検討に用いた路面は、表-6.2 に示す路面のうち、コンクリート舗装路面である W8,W15,W22 工区を除いたアスファルト舗装路面の 23 路面を用いた。これは、路面プロファイル以外の影響を排除するために、舗装の種類を限定したためである。既存のテクスチャ指標と  $RRC$  との単回帰分析を行った。 $TD$  と  $RRC$  との関係を図-6.3、 $MPD$  と  $RRC$  との関係を図-6.4 に示す。

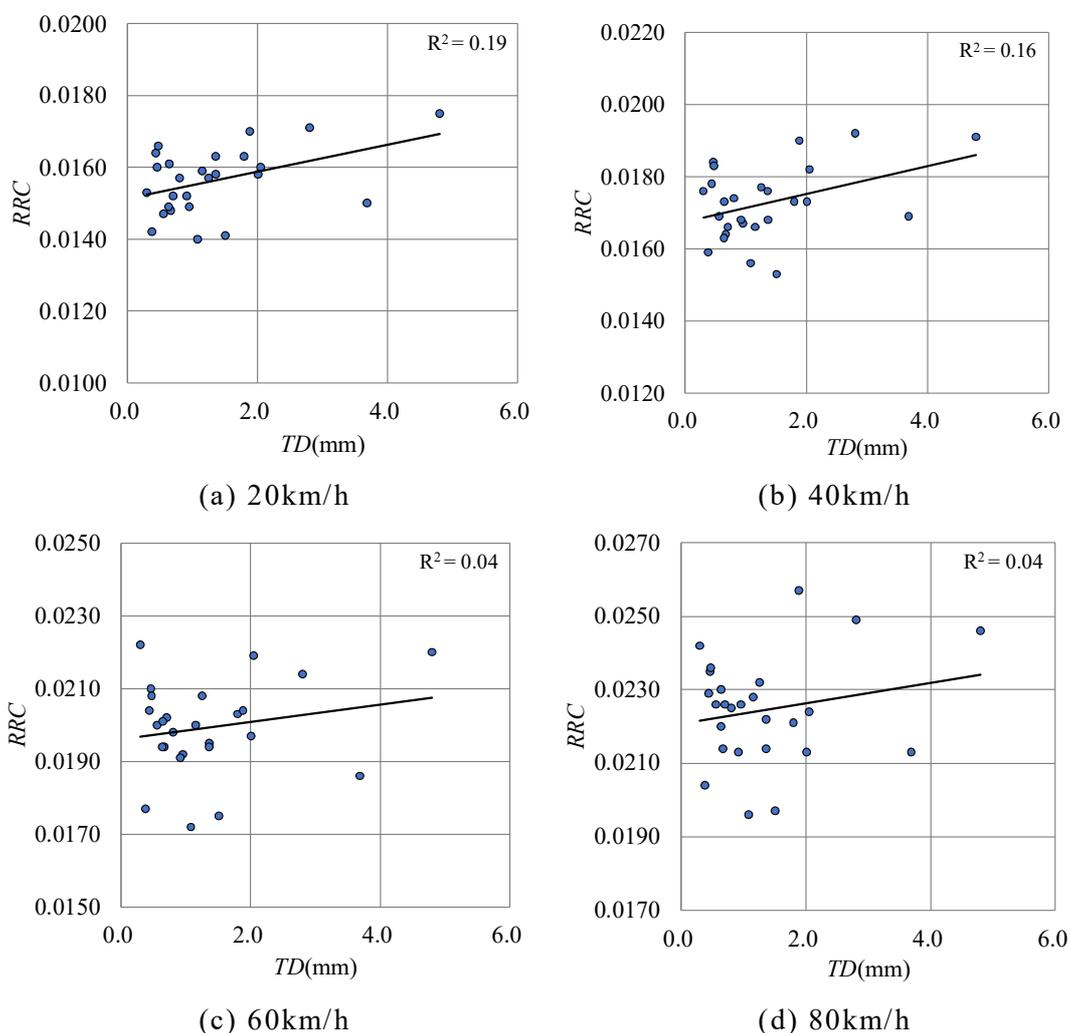


図-6.3  $TD$  と  $RRC$  との関係

図-6.3(a)～(b)より、 $TD$  と  $RRC$  との関係は、速度は大きくなると決定係数  $R^2$  の値は小さくなる傾向にあった。全速度では、0.04～0.19 と小さい値となった。

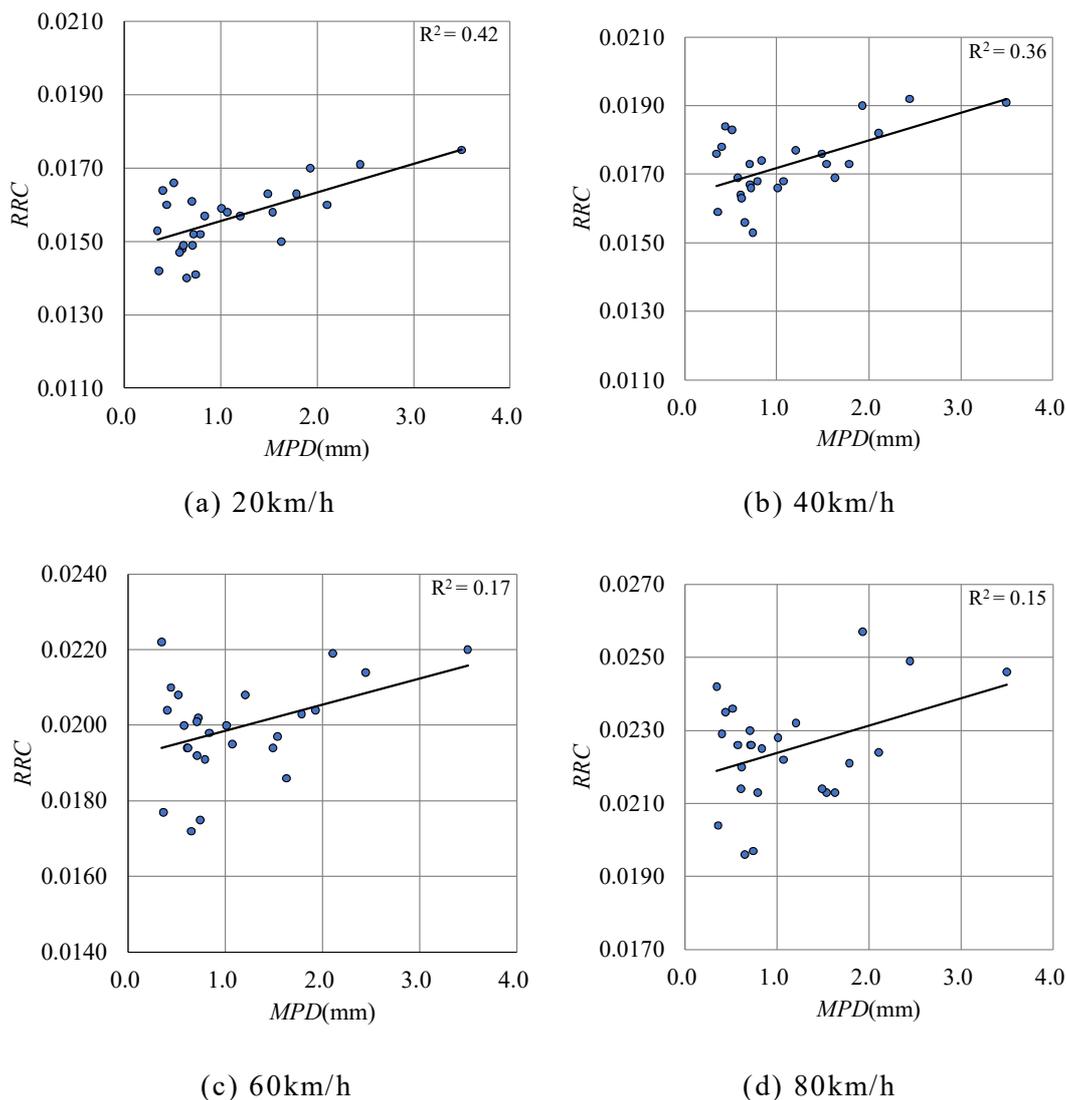


図-6.4  $MPD$  と  $RRC$  との関係

図-6.4(a)～(b)より、 $MPD$  と  $RRC$  との関係は、 $TD$  との関係と同様に、速度が大きくなると決定係数  $R^2$  の値は小さくなる傾向にあり、全速度では、0.15～0.42であった。

既存のテクスチャ波長領域を表す指標として、 $TD$  および  $MPD$  と  $RRC$  との関係について単回帰分析を行った結果、 $TD$  よりも  $MPD$  の方が決定係数  $R^2$  は大きくなることが分かった。

### 6.4 既存ラフネス指標とタイヤ／路面転がり抵抗係数との単回帰分析

検討に用いた路面は、上記テクスチャ指標の検討で用いた路面と同じ路面を用いて検討した。平坦性と  $RRC$  との関係を図-6.5,  $IRI$  と  $RRC$  との関係を図-6.6 に示す。

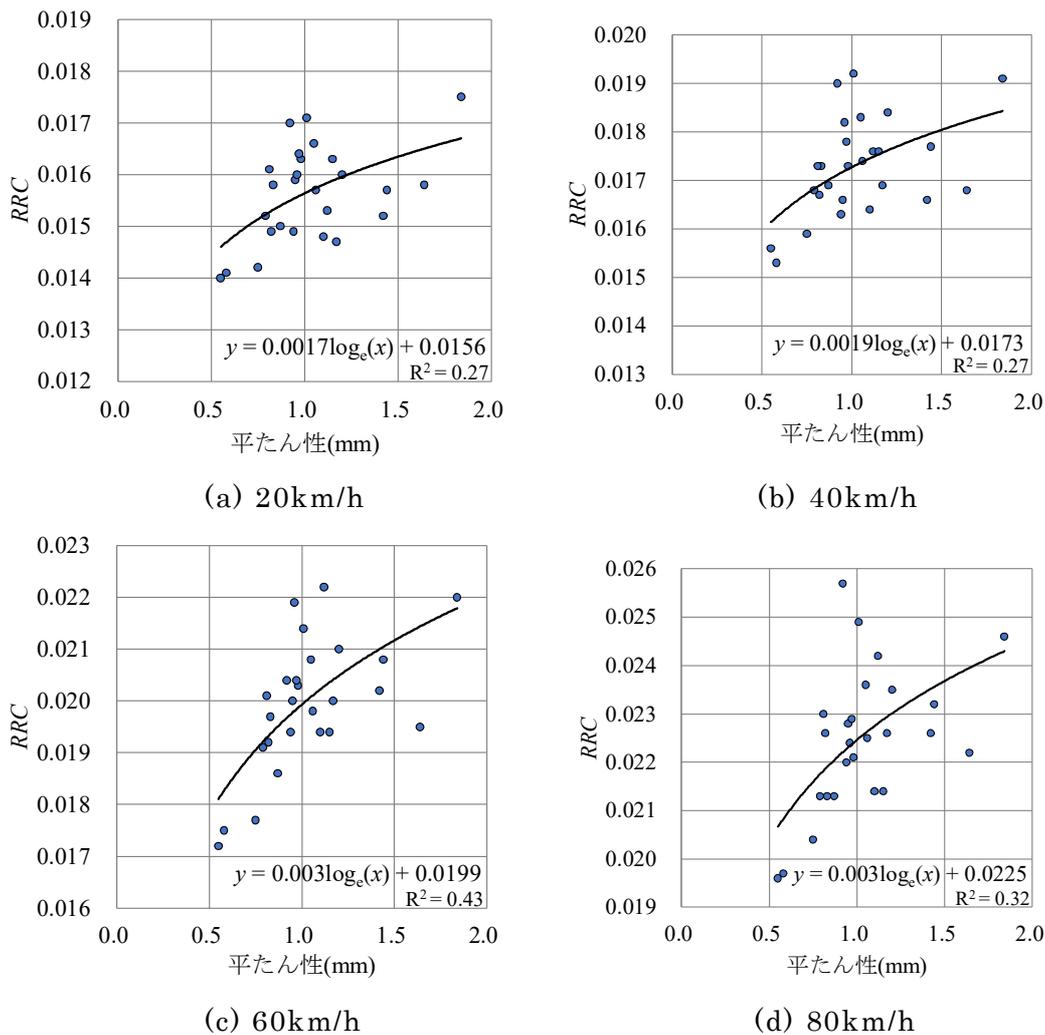


図-6.5 平坦性と  $RRC$  との関係

図-6.5(a)～(b)より、平坦性と  $RRC$  との関係は、速度は大きくなると決定係数  $R^2$  の値は大きくなる傾向にあり、全速度域においては  $0.27 \sim 0.43$  であった。

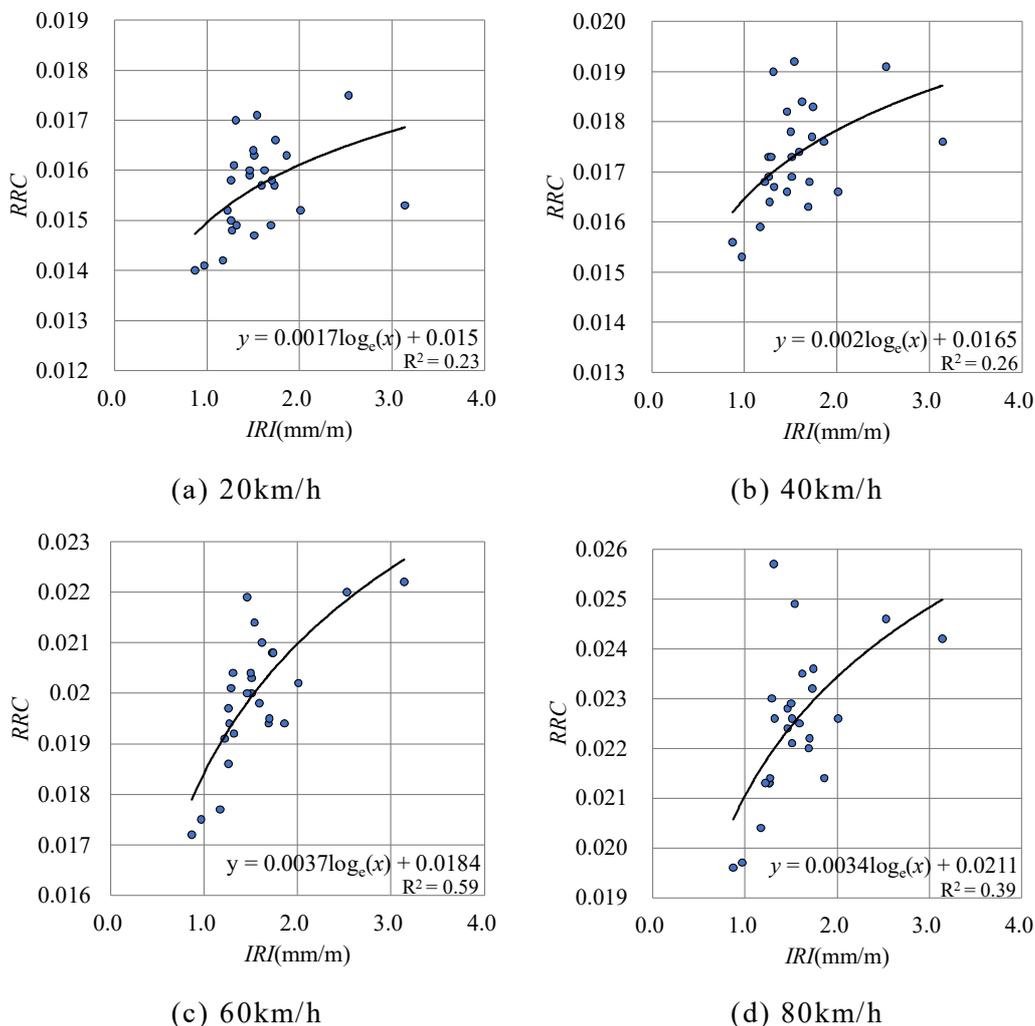


図-6.6 IRI と RRC との関係

図-6.6(a)～(b)より，IRI と RRC との関係は，平坦性と同様に速度は大きくなると決定係数  $R^2$  の値は大きくなる傾向にあり，全速度域においては 0.23～0.59 であった。

既存のラフネス波長領域を表す指標として，平坦性および IRI と RRC との関係について単回帰分析を行った結果，20km/h では若干小さいが，全速度では，平坦性よりも IRI の方が決定係数  $R^2$  は大きくなることが分かった。

### 6.5 MPD,IRI を用いたタイヤ／路面転がり抵抗係数推定式の検討

上記までの検討において  $RRC$  を目的変数,  $IRI$ ,  $MPD$  を説明変数として, 走行速度毎に重回帰分析を行った. 得られた重回帰式を表-6.3 に示す.

表-6.3 MPD,IRI とタイヤ／路面転がり抵抗係数の重回帰式

走行速度	重回帰式	相関係数
20km/h	$RRC=0.0141+0.0010 \log_e (IRI) +0.0009MPD$	0.85
40km/h	$RRC=0.0155+0.0012 \log_e (IRI) +0.0009MPD$	0.85
60km/h	$RRC=0.0178+0.0032 \log_e (IRI) +0.0006MPD$	0.85
80km/h	$RRC=0.0203+0.0029 \log_e (IRI) +0.0007MPD$	0.71

相関係数は走行速度 20～60km/h で 0.85, 80km/h で 0.71 と高い相関があることがわかった. これより,  $IRI$  と  $MPD$  を用いることで  $RRC$  の推定が可能であると考えた.

また, 本式より  $RRC$  は,  $IRI, MPD$  と正の相関があることがわかる. これは, 路面テクスチャが粗く, ラフネスが悪くなるほどタイヤ／路面転がり抵抗は大きくなることを定量的に示している. 一方, 走行速度間の比較では,  $IRI$  の定数は走行速度が上がるにつれて大きくなった. これは, 走行速度が速くなるほど  $IRI$  の及ぼす影響が大きくなることを示している.

## 6.6 第6章のまとめ

本章で得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) テクスチャ波長領域の検討では、既存の指標として、*TD*、*MPD* とタイヤ／路面転がり抵抗係数との関係について単回帰分析を行った。結果、*TD* よりも *MPD* の方が決定係数  $R^2$  は大きくなった。
- (2) ラフネス波長領域の検討では、既存の指標として、平たん性、*IRI* とタイヤ／路面転がり抵抗係数との関係について単回帰分析を行った結果、20km/h では若干小さくなったが、全速度では、平たん性よりも *IRI* の方が決定係数  $R^2$  は大きくなった。
- (3) *MPD*、*IRI* の2つを説明変数に用いることで、*RRC* との相関係数はより高くなった。これより、タイヤ／路面転がり抵抗の間接評価方法として、既存の指標を用いる場合は、*IRI* と *MPD* を用いることで高い精度での推定が可能であることがわかった。

## 第6章の参考文献

- [1] PIARC : Technical Committee Report on Surface Characteristics, 1978.
- [2] 渡邊徹郎 : タイヤのおはなし, 日本規格協会, 1994年10月.
- [3] 一般社団法人日本自動車タイヤ協会 : <https://www.jatma.or.jp>.
- [4] 馬庭孝司 : ドライバーのためのタイヤ工学入門, グランプリ出版, 1989年7月.
- [5] U. Sandberg : Rolling resistance -Basic Information and State -of-the-art- on Measurement Method, Report MIRIAM\_SP1\_01, 2011.
- [6] U. Sandberg, A. Bergiers, J. A. Ejsmont, L. Goubert, R. Karlsson, M. Zoller : Road surface influence on tyre/road rolling re-sistance, Report MIRIAM\_SP1\_04, 2011.
- [7] Lasse G Andersen, Jesper K. Larsen, Elsje S. Fraser, Bjarne Schmidt : Rolling Resistance Measurement and Model Development, Journal of Transportation Engineering, volume141 Issue2, 2015.2.

## 第 7 章

# 路面プロファイルを用いた間接評価方法の 精度向上に向けた検討



## 第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

### 7.1 緒言

第6章までの検討において、路面プロファイルの指標として既存の指標を用いて、タイヤ／路面転がり抵抗係数(*RRC*)との関係について検討した。本検討では、さらなる精度の向上を目指し、可能な限り実際の現象に沿った解析を検討した。

検討では、路面プロファイルをマクロテクスチャ波長領域（以下、テクスチャ波長領域）とメガテクスチャ、およびラフネス波長領域（以下、ラフネス波長領域）の2つに分けて検討を行った。テクスチャ波長領域の検討では、タイヤと路面の接地圧力分布と路面プロファイルとの関係について整理し、この関係を基に指標について検討した。また、ラフネス波長領域の検討では、空間 - 周波数解析が可能なウェーブレット解析を行い、タイヤ／路面転がり抵抗とより関係の強い波長領域を抽出することで指標を検討した。

そして、上記検討の中で、走行速度が小さい場合はテクスチャ波長領域、走行速度が大きくなるほどラフネス波長領域が転がり抵抗に及ぼす影響が大きくなる結果となったことから、この要因についての解明を試みた。

## 7.2 タイヤ／路面接地圧力分布と路面プロファイルの関係

### 7.2.1 実験方法

#### (1) タイヤ／路面接地圧力分布の測定

タイヤ／路面間の接地圧力分布の測定は専用の感圧紙を用いて行った[1][2]。測定は、すべり抵抗測定車,および測定用タイヤを用い,感圧紙に一定荷重で載荷,一定時間接地させた(写真-7.1)。測定条件を表-7.1に示す。



写真-7.1 すべり抵抗測定車および測定用タイヤ

表-7.1 接地圧力分布試験条件

項目	内容
測定輪	165SR13(ゴム配合ASTM500準拠)
輪荷重	3,969N±98N
空気圧	0.176MPa
載荷時間	2分(所定荷重に達するまで5秒程度)
感圧紙の種類 (応力範囲)	感圧紙1 0.05～0.2MPa
	感圧紙2 0.2～0.6MPa
	感圧紙3 0.5～2.5MPa
測定箇所数	2か所/工区

感圧紙は測定圧力範囲が決まっており,3種類の感圧紙を用いた。この感圧紙は,圧力により発色剤層のマイクロカプセルが破壊され,中の発色剤が顕色剤に吸着して反応,赤く着色する。接地試験後,感圧紙を専用スキャナで読み込み,赤色の濃淡に対して圧力解析を行った。そして,接地圧力ごとの設置面積を算出し,各種路面毎の特性を把握した。

(2) 試験に用いた舗装の路面性状

試験に用いた舗装路面は、国土技術政策総合研究所試験走路の22路面を対象とした。主な路面性状を表-7.2に示す。舗装の種類は、密粒度、排水性、SMA、連続鉄筋コンクリート、低燃費の各種舗装で、骨材粒径や路面劣化状態も様々である。

表-7.2 試験路面

工区	舗装種	延長 (m)	MPD (mm)	TD (mm)	工区	舗装種	延長 (m)	MPD (mm)	TD (mm)
1	排水性舗装(13)	60	1.54	2.01	12	排水性舗装(5)	80	1.07	1.37
2	密粒度舗装(20)	60	0.35	0.30	13	排水性舗装(13)	80	1.79	1.80
3	低燃費舗装Type1	60	0.61	0.67	14	密粒度舗装(13)	80	0.71	0.65
4	低燃費舗装Type1	60	0.58	0.56	15	CRCP	80	0.40	0.44
5	低燃費舗装Type1	60	0.71	0.96	16	排水性舗装(20)	55	3.50	4.80
6	低燃費舗装Type1	60	0.62	0.64	17	排水性舗装(20)	45	2.45	2.81
7	密粒度舗装(13)	95	0.79	0.92	18	排水性舗装(10)	55	1.49	1.36
8	CRCP	80	0.44	0.47	19	排水性舗装(13)	55	1.93	1.89
9	SMA(5)	120	0.72	0.71	20	排水性舗装(13)	60	2.11	2.05
10	SMA(13)	120	1.21	1.26	21	密粒度舗装(13)	95	0.84	0.81
11	排水性舗装(5)	120	1.01	1.16	22	CRCP	80	0.52	0.48

## 7.2.2 結果

### (1) 試験路面のタイヤ／路面接地圧力分布の特性

得られたタイヤ／路面間の接地圧力分布のコンター図（抜粋）を図-7.1に示す。図より、路面のテクスチャによって接地圧力分布は明らかな差異があることが分かる。例として、4工区は全接地面積が大きく、接地圧力が均一になっている一方で、16工区は全接地面積が小さく、接地圧力が局所的に高い箇所がある。これは、前者はテクスチャが均一であるネガティブテクスチャ路面、後者はテクスチャが粗いポジティブテクスチャ路面であると視覚的におよそ分類できる。

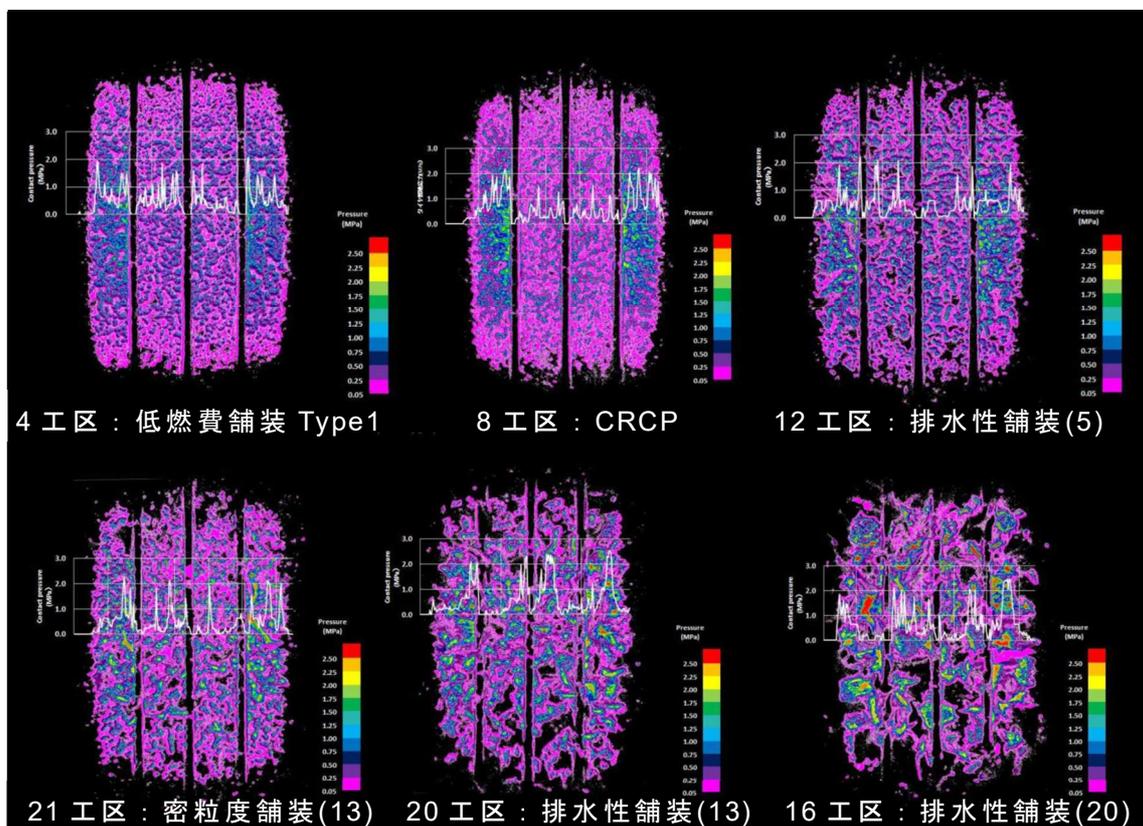


図-7.1 タイヤ／路面接地圧分布コンター図(抜粋)

## 第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

この接地面積について、全接地面積の大きい順に整理した結果を図-7.2に、接地圧力ごとの面積の推移を図-7.3に示す。図-7.2より、密粒度舗装、コンクリートや低燃費舗装など路面が密になっている工区の接地面積が大きく、排水性など路面が粗面になる工区の接地面積が小さくなる傾向がある。しかし、工区間の差はそれほど大きくなく、このままテクスチャの分類をするには困難である。そこで、図-7.3示す接地圧力毎の面積推移では、比較として平滑板に載荷した際の接地面積も追加した。この平滑板と各路面の接地圧力の面積推移を比較した結果、各舗装路面の接地面積は、0.50-0.75MPa付近を境に、圧力が低い領域では平滑板より少なく、圧力が高い領域では多くなる傾向があった。よって、接地圧力を0.05-0.5MPa, 0.5-0.75MPa, 0.75-1.75MPa, 1.75-2.5MPaに分けて整理した。

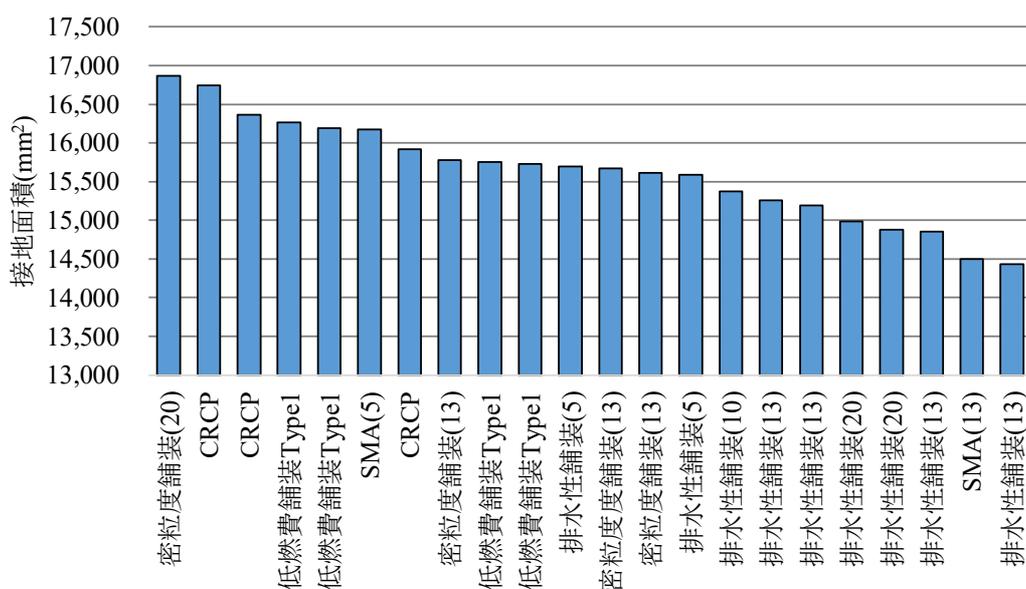


図-7.2 各試験工区の接地面積

第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

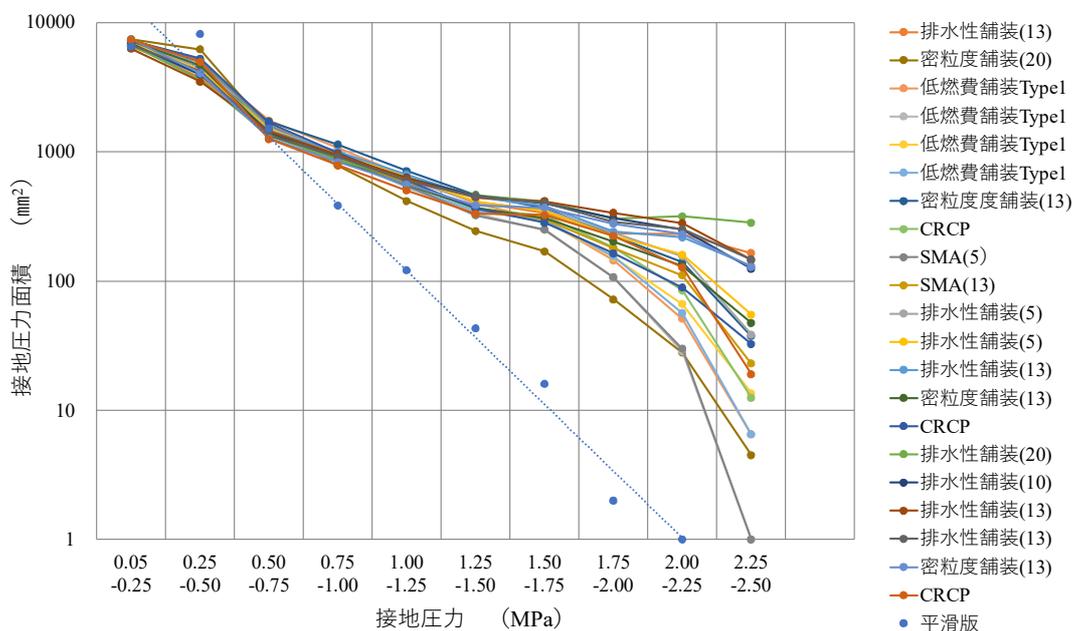


図-7.3 接地圧力分布ごとの面積推移

ネガティブテクスチャ路面は、接地圧力の低い面積割合が多くかつ接地圧力の高い面積割合が少なくなり、ポジティブテクスチャ路面では逆に考えると考えられる。各路面の低い接地圧力（0.5MPa 以下）の面積割合と高い接地圧力（0.75MPa 以上、1.75MPa 以上）の面積割合の関係を図-7.4 に示す。

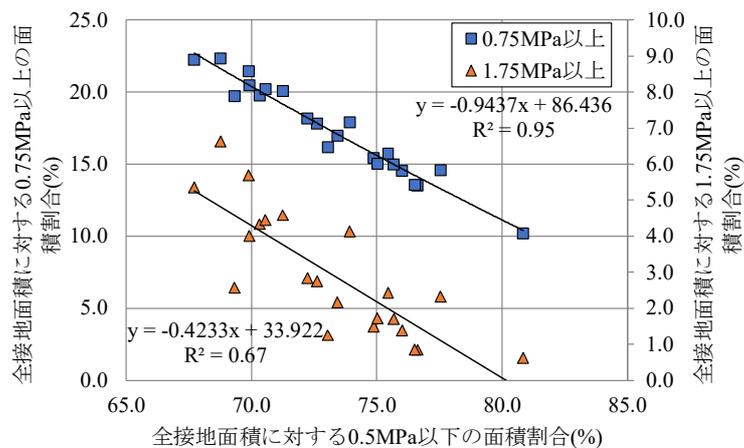


図-7.4 接地圧力分布 0.5MPa 以下と  
0.75MPa, 1.75MPa 以上との面積割合の関係

図-7.4より、高い相関が認められたことから、このうち1.75MPa以上の面積割合を用いて、面積割合順に並べた結果を図-7.5に示す。テクスチャの凹凸形状が大きくなるほど接地圧力が局所的に高くなり、面積割合が大きくなることを示している。つまり、高い接地圧力の面積割合を計測することにより、ネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャを定量的に分類できる可能性があることが分かった。また、今後、接地圧力分布の特性を把握する際は、すべての圧力を測定する必要はなく、全接地面積および圧力面積を高い方のみ（もしくは低い方のみ）を計測することで、その特性を把握することが出来る可能性があることが分かった。

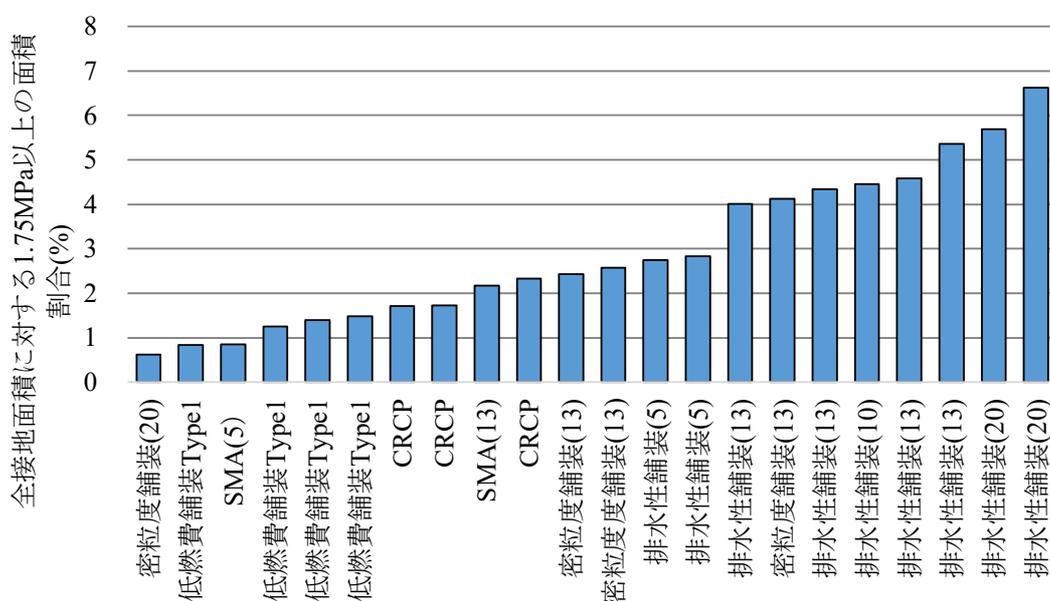


図-7.5 高い接地圧力の面積割合順の整理

### 7.2.3 まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す.

- (1) 各路面の低い接地圧力 (0.05- 0.5MPa) の面積割合と高い接地圧力 (1.75MPa 以上) の面積割合は, 高い相関が認められた. 今後, 全接地面積と高い (もしくは低い) 接地圧力面積を計測することで, その特性を把握することが出来る可能性がある.
- (2) テクスチャの凹凸形状が大きくなるほど接地圧力が局所的に高くなり, この面積割合を計測することでネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャを定量的にも分類できる可能性がある.

## 7.3 テクスチャ波長領域とタイヤ／路面転がり抵抗の関係

### 7.3.1 概要

本検討では、テクスチャ波長領域に関しては、タイヤトレッドの変形はタイヤと路面の接地面で発生していることと、タイヤ幅が0.1～0.2m程度（乗用車タイヤを想定）に対してテクスチャ波長領域は0.0005～0.05mであるため、その縦横比率は、400～2程度とタイヤ幅方向の方が大きくなることから、この影響を無視できないと考え、走行方向のみの一次元テクスチャによる解析ではなく、走行方向と横断方向とで構成される、二次元テクスチャを用いた面的解析および検討を行った。

テクスチャ波長領域とタイヤ／路面転がり抵抗の関係についての検討は、4種類の供試体(300mm×300mm)を作製し、室内でタイヤ接地圧力分布の測定を行った。次に、タイヤ接地圧力分布を測定した各供試体について二次元テクスチャを計測し、タイヤ接地圧力分布と重ね合わせることによって、舗装面に対するタイヤの影響高さ（エンベロープ高さ）について検討した。次に、国土技術政策総合研究所（以下、国総研）の試験走路にある26種類の舗装路面にて、タイヤ／路面転がり抵抗係数（RRC）、タイヤ接地圧力分布、および二次元テクスチャを計測し、それぞれの関連性について検討した。

なお、タイヤ接地圧力分布は、実際の現象に沿うためにはタイヤ転動時の動的な載荷方法による接地圧力分布を検討に用いるべきである。しかし、動的な接地圧力分布の測定は現在の技術では困難であることから、本検討では、実際の現象とは異なるが、タイヤを路面に一定の載荷荷重で一定時間押し当てて計測する、静的な載荷方法により接地圧力分布を測定した。

### 7.3.2 実験方法

#### (1) タイヤ接地圧力分布の測定方法

タイヤ接地圧力分布の測定は、室内での供試体を用いた測定と屋外での試験走路路面にて実施した。

検討に用いたタイヤは、写真-7.2 (a) に示すように、すべり抵抗測定用の標準タイヤを用いた。

実験室内におけるタイヤ接地圧力分布の測定は、载荷には写真-7.2 (b) に示す静的タイヤ载荷装置を用いた。静的タイヤ载荷装置は、口型のフレーム構造をしており、試験機上部に設置したジャッキにより上方から下方に向けて载荷する装置で、载荷荷重の確認は、試験機下部に設置する供試体の下に



測定タイヤ	すべり測定用標準タイヤ
ゴムの規格	ASTM E-501
内圧	165-SR13
トレッド種	リブタイヤ



(a) 検討に用いたタイヤ

(b) 室内静的タイヤ载荷装置



(c) すべり抵抗測定車

写真-7.2 タイヤ载荷試験機

あるロードセルにより行った。

屋外試験走路でのタイヤ接地圧力分布の測定には、*RRC* の測定に用いたすべり抵抗測定車の第5輪で実施した。すべり抵抗測定車と第5輪を写真-7.2 (c) に示す。

また、載荷荷重は、室内、屋外ともに *RRC* 測定時の標準荷重である  $3,969\pm 98\text{N}$  とした。測定時の温度は、実験室内測定は  $20^{\circ}\text{C}$  で実施し、屋外測定はある区間ごとに分けて夏から冬にかけて実施しているが、接地圧力分布と測定時の温度の影響は少ないことは、確認されている[3]。

接地圧力分布の測定には圧力測定フィルム（以下、感圧紙）を用いた。載荷時間は、所定の荷重に達してから 120 秒間載荷した。感圧紙は2種類用いて、圧力範囲  $0.25\text{MPa}\sim 2.5\text{MPa}$  を測定した。そして、回収した感圧紙を専用のスキャナで読み込み、接地圧ごとの面積を算出し、その面積を全体の接地面積で除することにより接地圧面積割合を算出した。

## (2) 二次元テクスチャの測定方法

本検討に使用した二次元テクスチャ測定装置(VR-3000) を写真-7.3 に、二次元テクスチャ画像のイメージを図-7.6 に示す。二次元テクスチャ測定装置

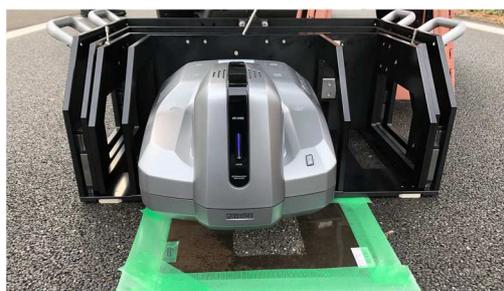


写真-7.3 二次元テクスチャ測定装置

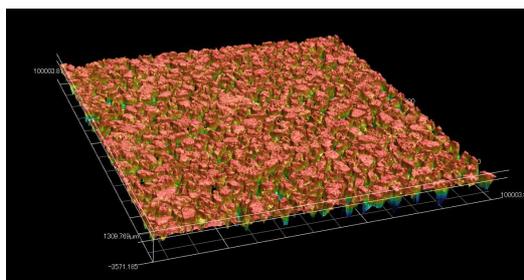


図-7.6 二次元テクスチャ画像

の測定原理は光切断法である。サンプリング間隔は  $23\mu\text{m}$ 、1 測点の測定範囲は  $0.1\text{m}\times 0.1\text{m}$  とした。測定範囲は装置の測定限界範囲内でマクロテクスチャ波長領域の長波長限界である波長  $0.05\text{m}$  の 2 倍に相当する範囲として設定した。しかし、本測定範囲がマクロテクスチャ波長領域の評価を適正であるかについては、装置の改良も含めて今後の検討を行う予定である。

### (3) タイヤ/路面転がり抵抗の測定方法

*RRC* の測定は、写真-7.2 (c)に示す、すべり抵抗測定車により測定した。走行速度は  $20\text{km/h}$ ,  $40\text{km/h}$ ,  $60\text{km/h}$ ,  $80\text{km/h}$  で実施し、第5章に示す横力補正およびタイヤ温度補正( $30^{\circ}\text{C}$ )を行い、各速度のタイヤ/路面転がり抵抗係数 *RRC* を算出した。

### 7.3.3 舗装の種類とエンベロープ特性に関する検討

#### (1) 検討方法

路面にタイヤを接地したときのエンベロープ特性を、供試体中央部において接地圧力分布を測定した後、同じ箇所でも二次元テクスチャを計測し、接地圧力分布画像と重ね合わせることで検討した。検討方法を図-7.7に示す。

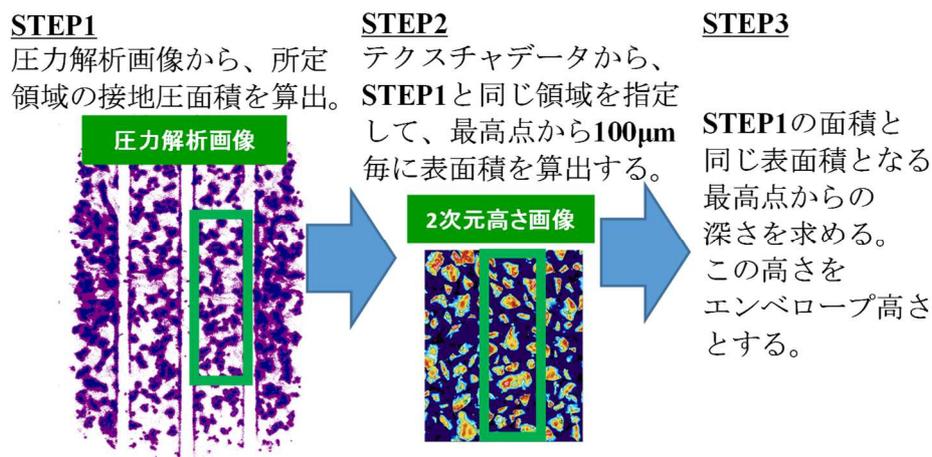


図-7.7 エンベロープ特性の検討方法

図-7.7に示すように、始めにSTEP1では圧力解析画像から所定領域の接地圧面積を算出した。次にSTEP2では二次元テクスチャにおいてSTEP1と同じ領域を指定した後、領域内のピーク値からの下がりが100 $\mu$ m下がる毎に表面積を算出した。最後にSTEP3では、STEP2で求めたSTEP1の表面積に一番近い表面積となるピーク値からの下がりをエンベロープ高さとした。なお、ここでピーク値からの下がりとは図-7.8に示すように、テクスチャの最高点から深さ方向への高さを意味している。

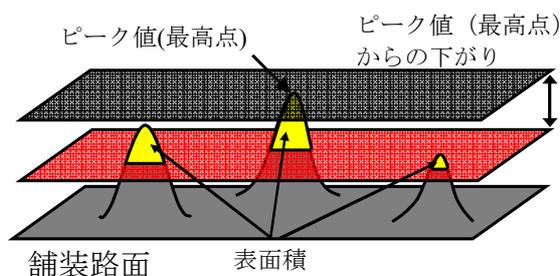


図-7.8 ピーク値からの下がり

供試体数は一つのアスファルト舗装の種類につき2枚とし、それぞれから得られた接地圧面積や表面積から平均値を算出し、この平均値を検討に用いた。

二次元テクスチャ解析では、STEP3にて求めたエンベロープ高さの時の表面積を100%とし、これに対する表面積の割合を表面積割合(%)とした。さらに、二次元テクスチャ指標として、1測点の測定面積 $0.1 \times 0.1\text{m}$ に対する表面積の比率のことを表面積比と呼ぶこととした。

## (2) 検討結果

結果を図-7.9に示す。図-7.9は、ピーク値からの下がり、表面積割合との関係を舗装種別に示している。図-7.9より、エンベロープ高さは舗装種によって異なり、密粒度舗装(13)は1.0mm、低燃費舗装 Type1 と低燃費舗装 Type2 は1.5mm、排水性舗装(13)は2.5mmとなった。これより、テクスチャが粗くなると、トレッドの変形量が大きくなることを定量的に示すことができた。

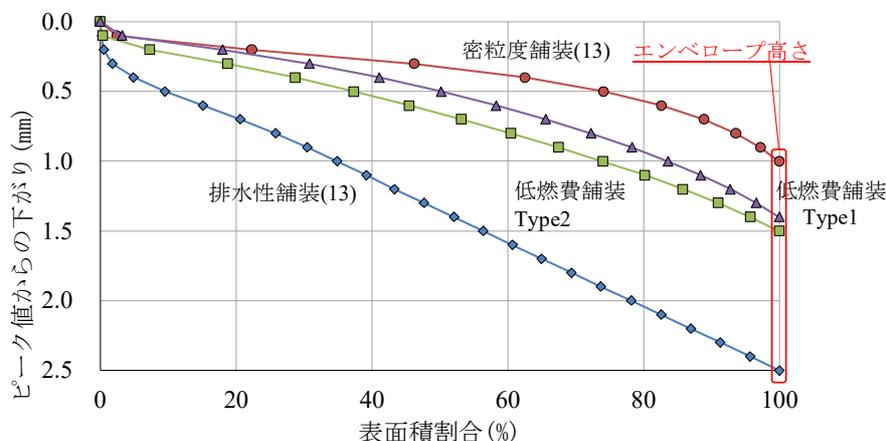


図-7.9 ピーク値からの下がりと表面面積割合

また、図-7.9において、ピーク値からの下がりが1.0mmのときの各舗装種の表面積割合をみると、密粒度舗装(13)は100%、低燃費舗装Type1は85%、低燃費舗装Type2は75%、排水性舗装(13)は35%となり、テクスチャが密から粗になると、表面積割合が小さくなる傾向になっていることから、ピーク値からの下がりが0~1.0mmのときの表面積割合からテクスチャの特性を評

価できると考えた。

そこで、ピーク値から0.5mmと1.0mm下がりの表面積割合と、テクスチャデータのみから求めることのできる表面積比との関係について調べた。結果を図-7.10に示す。図-7.10より表面積割合と表面積比は、相関係数が大きく、線形的に近似をしていることを確認した。このことから、以降の検討では表面積割合の代わりに、表面積比を用いることとした。

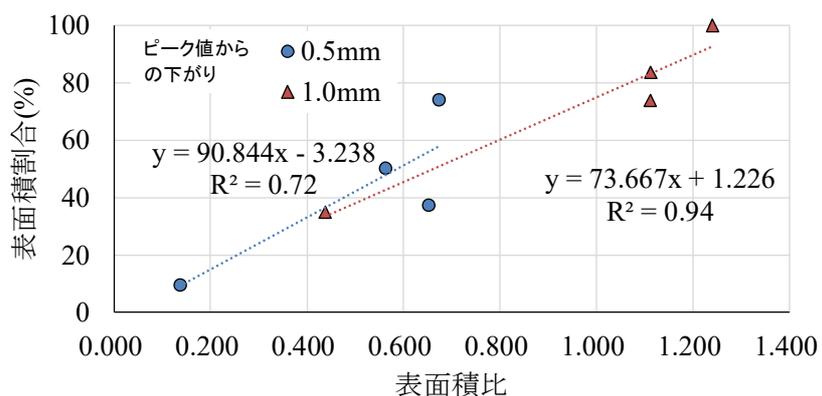


図-7.10 表面積割合と表面積比

### 7.3.4 二次元テクスチャとタイヤ接地圧力分布の関係

二次元テクスチャとタイヤ接地圧力分布の測定は、表-7.3に示す国総研試験走路の26種類の舗装路面にて行った。測定位置は、走行方向は試験路面区間の中間地点付近、横断方向は測定輪通過位置で、該当工区の平均的なテクスチャとみなす1箇所それぞれ測定した。

表-7.3 検討に用いた舗装の種類と各種試験値

工区 NO.	舗装種	IRI (mm/m)	MPD (mm)	RRC			
				20km/h	40km/h	60km/h	80km/h
E1	排水性舗装(13)	1.26	1.63	0.0150	0.0169	0.0186	0.0213
E2	密粒度舗装(13)	1.17	0.36	0.0142	0.0159	0.0177	0.0204
E3	低燃費Type2	0.97	0.74	0.0141	0.0153	0.0175	0.0197
E4	低燃費Type1	0.87	0.65	0.0140	0.0156	0.0172	0.0196
W1	排水性舗装(13)	1.26	1.54	0.0158	0.0173	0.0197	0.0213
W2	密粒度舗装(20)	3.14	0.35	0.0153	0.0176	0.0222	0.0242
W3	低燃費Type1	1.27	0.61	0.0148	0.0164	0.0194	0.0214
W4	低燃費Type1	1.51	0.58	0.0147	0.0169	0.0200	0.0226
W5	低燃費Type1	1.32	0.71	0.0149	0.0167	0.0192	0.0226
W6	低燃費Type1	1.69	0.62	0.0149	0.0163	0.0194	0.0220
W7	密粒度舗装(13)	1.22	0.79	0.0152	0.0168	0.0191	0.0213
W8	CRCP	1.62	0.44	0.0160	0.0184	0.0210	0.0235
W9	SMA(5)	2.01	0.72	0.0152	0.0166	0.0202	0.0226
W10	SMA(13)	1.73	1.21	0.0157	0.0177	0.0208	0.0232
W11	排水性舗装(5)	1.46	1.01	0.0159	0.0166	0.02	0.0228
W12	排水性舗装(5)	1.70	1.07	0.0158	0.0168	0.0195	0.0222
W13	排水性舗装(13)	1.51	1.79	0.0163	0.0173	0.0203	0.0221
W14	密粒度舗装(13)	1.29	0.71	0.0161	0.0173	0.0201	0.023
W15	CRCP	1.50	0.40	0.0164	0.0178	0.0204	0.0229
W16	排水性舗装(20)	2.53	3.50	0.0175	0.0191	0.022	0.0246
W17	排水性舗装(20)	1.54	2.45	0.0171	0.0192	0.0214	0.0249
W18	排水性舗装(10)	1.86	1.49	0.0163	0.0176	0.0194	0.0214
W19	排水性舗装(13)	1.31	1.93	0.017	0.019	0.0204	0.0257
W20	排水性舗装(13)	1.46	2.11	0.016	0.0182	0.0219	0.0224
W21	密粒度舗装(13)	1.59	0.84	0.0157	0.0174	0.0198	0.0225
W22	CRCP	1.74	0.52	0.0166	0.0183	0.0208	0.0236

※混合物( )の( )内は最大粒径を示す。

## 第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

検討では、ピーク値からの下がり0.5～2.0mmの範囲を0.5mm刻みに表面積比を求めた。結果を図-7.11に示す。

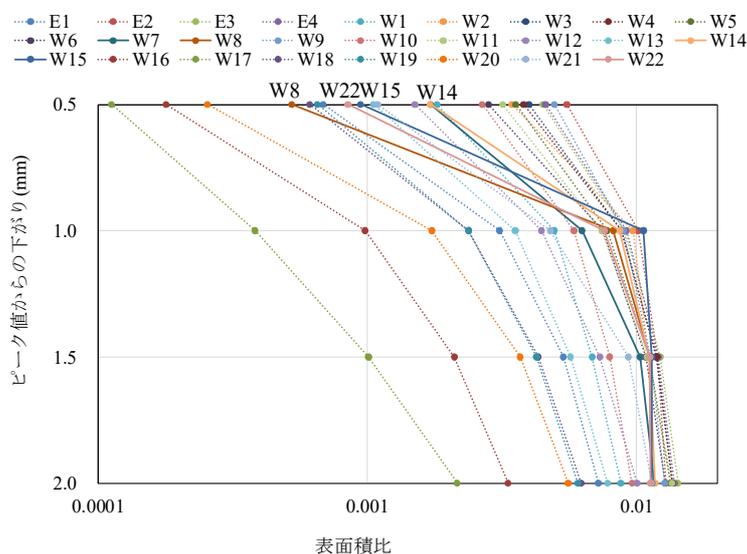


図-7.11 表面積比とピーク値からの下がり

図-7.11より、全体の傾向は、ピーク値からの下がりにかかわらず、テクスチャが粗だと表面積比が小さくなった。その中で、CRCPのW8、W15、W22と密粒度(13)のW14は他の工区と異なり、表面積比は1.0～2.0mmに比べて、0.5mmの方が極端に小さくなっている。W8、W14、W15、W22については、結合材料こそ異なるものの、どれも密な表面を有する舗装であるが、経年的な劣化が要因と考えられる表面の粗れが、目視にて確認できた。

これより、舗装の種類と表面積比の関係については、ピーク値からの下がり0.5～2.0mmの範囲で同様の傾向が得られることが分かった。さらに、0.5mm下がりの表面積比では、舗装路面の種類のみならず、表面のモルタル部分のみが喪失したような、浅い部分のテクスチャの微細な変化も定量的に表すことができることが分かった。

次に、タイヤ接地圧分布の解析では、接地圧0.25～2.0MPaの範囲で0.25MPa刻みに、各接地圧以上となる面積を全接地圧面積で除した接地圧面積割合を求めた。結果を図-7.12に示す。

第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

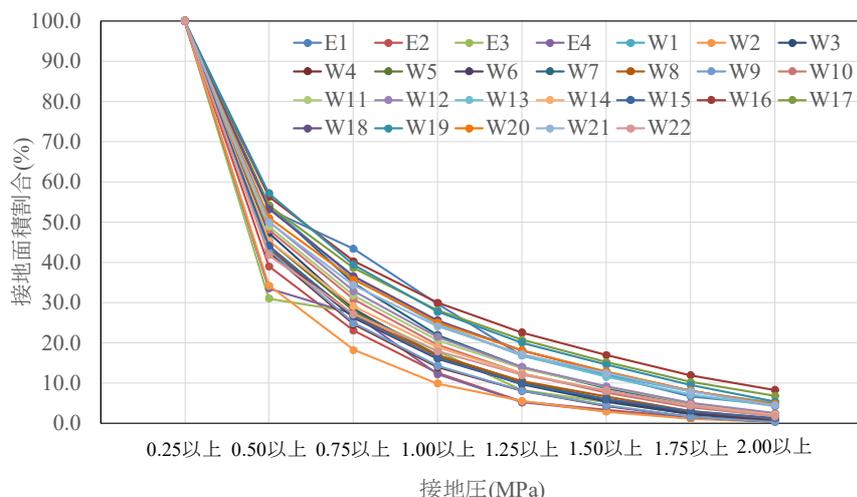


図-7.12 接地圧と接地面積割合

図-7.12より，全体的な傾向としては，接地圧が0.5MPa以上になると接地面積割合はテクスチャが密なほど小さくなる傾向にあった。

そして，表面積比と試験路面の接地面積割合について単回帰分析を行った。結果を図-7.13に示す。図-7.13より，表面積比と接地面積割合との相関係数はピーク値からの下がりが0.5mmのときにやや小さくなったが，その絶対値は0.5mmのときでも0.7以上あった。これより，表面積比は，試験路面の接地面積割合に対しても，相関があることが分かった。

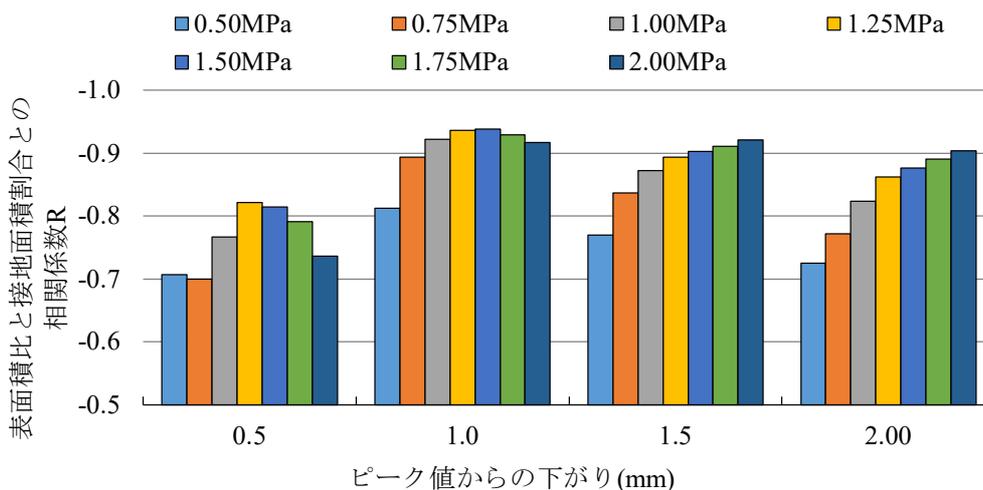


図-7.13 表面積比と接地面積割合の相関係数

### 7.3.5 二次元テクスチャとタイヤ／路面転がり抵抗係数の関係

二次元テクスチャとRRCの関係は、各ピーク値からの下がりの表面積比を説明変数、RRCを目的変数とした単回帰分析による相関係数を求めることで検討した。なお、表面積比は、0.0以下とにならないこと、および近似の良さから自然対数に変換して回帰分析を行った。

結果をMPDとRRCとの相関係数と合わせて図-7.14に示す。図-7.14より、ピーク値からの下がりが0.5mmの表面積比(以下、0.5mm表面積比)のときに、相関係数はどの速度でも一番大きくなり、また、MPDとRRCとの相関係数よりも大きくなった。

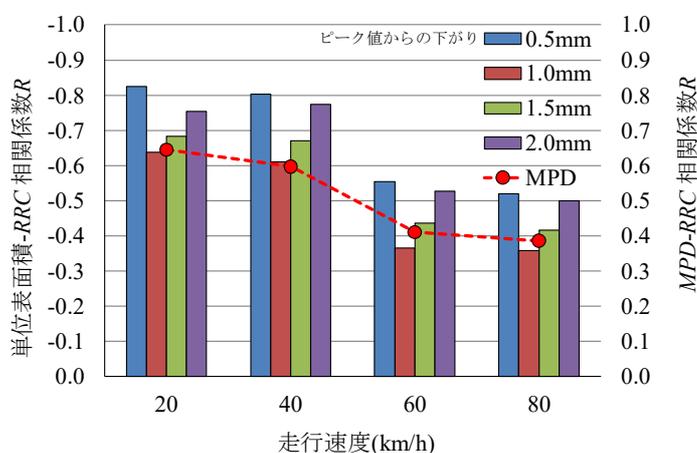


図-7.14 表面積比と RRC の相関係数

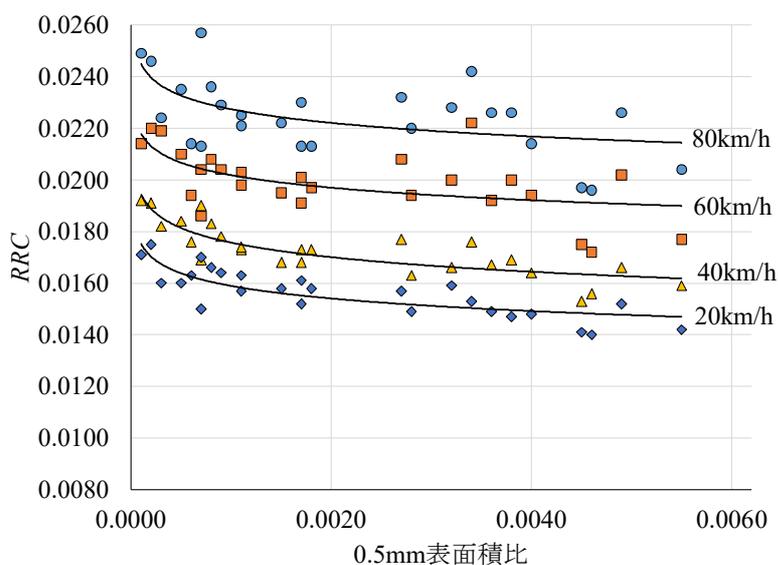


図-7.15 0.5mm 表面積比と RRC

## 第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

また、図-7.15に0.5mm表面積比とRRCの関係を速度別にプロットしたものを示す。図-7.15より、0.5mm表面積比とRRCは、いずれの速度においても負の相関があった。

### 7.3.6 まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す.

- (1) タイヤ接地圧分布と二次元テクスチャデータの解析により, エンベロープ高さは, テクスチャによって異なり, 粗の場合は高くなる傾向にあったことが分かった.
- (2) ピーク値から 1.0mm 下がりまでの表面積比により, テクスチャの特性を評価できる可能性を見いだした.
- (3) *RRC*との相関係数は, 0.5mm表面積比の方が*MPD*よりも大きくなった.

## 7.4 ラフネス波長領域とタイヤ／路面転がり抵抗の関係

### 7.4.1 概要

メガテクスチャからラフネス領域(以下,ラフネス波長領域)については,評価波長領域0.05~50mに対し,波長領域とタイヤ幅の縦横比率は,4~0.002程度であり,マクロテクスチャ領域に近い波長領域では,縦横比率は1より大きくなり,タイヤ幅の方が大きくなる場合があるものの,ラフネス波長領域の大半においては,縦横比率は1以下となり,タイヤ幅の方が小さくなる.このことから,ラフネス波長領域では,従来とおり一次元プロファイルデータを用いることが妥当であると考えた.プロファイルの解析については,既往の研究においては,高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform, 以下, FFT)を用いた周波数解析から求めた, PSDとの関係性を検討している報告が多いが,本検討では,近年,路面のひび割れ箇所の抽出や,乗り心地評価などに用いられているウェーブレット解析を用いた[4][5][6].

ラフネス波長領域のプロファイル測定についても,表-7.3に示す舗装路面にて実施した.測定機には,マルチロードプロファイラー(MRP)を用い,サンプリング間隔は0.01mとした.計測した路面プロファイルデータをウェーブレット解析し,各波長のプロファイルを抽出し,その後抽出したプロファイルの実効値としてRoot Mean Square (以下, RMS)を算出した.そして, RRCとの回帰分析を行った.

### 7.4.2 ウェーブレット解析の概要

ウェーブレット解析は信号データを生成する小さな波（波形，ウェーブレット）を表す様々な関数に関連した解析手法であり，マザーウェーブレットとよばれる基底関数を拡大縮小，あるいは平行移動して，与えられた信号データを表現しようとする手法である．ウェーブレット解析は，PSDの周波数特性の解析に加え，空間特性も同時に解析（空間-周波数解析）することが可能である．本検討における解析には，数式処理ソフトMATLAB (Math Works社製)のWavelet toolboxを使用した．マザーウェーブレットには，既往の研究[6]で路面の分析に適しているとされている5次のcoiflet (図-7.16参照)を用いた．解析条件を表-7.4に示す．

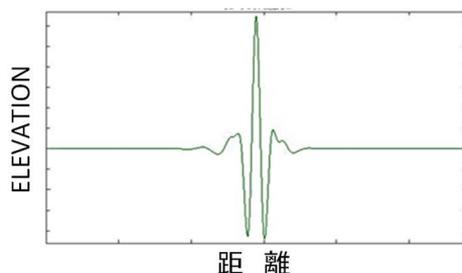


図-7.16 検討に用いたマザーウェーブレット (coiflet)

表-7.4 解析条件

項目	内容
Mother Wavelet	Coiflet 5
LEVEL	$d_1 \sim d_{12}$
Level	波長範囲(m)
$d_1$	$2.0 \times 10^{-2} \leq \lambda \leq 4.0 \times 10^{-2}$
$d_2$	$4.0 \times 10^{-2} \leq \lambda \leq 8.0 \times 10^{-2}$
$d_3$	$8.0 \times 10^{-2} \leq \lambda \leq 1.6 \times 10^{-1}$
$d_4$	$1.6 \times 10^{-1} \leq \lambda \leq 3.2 \times 10^{-1}$
$d_5$	$3.2 \times 10^{-1} \leq \lambda \leq 6.4 \times 10^{-1}$
$d_6$	$6.4 \times 10^{-1} \leq \lambda \leq 1.28$
$d_7$	$1.28 \leq \lambda \leq 2.56$
$d_8$	$2.56 \leq \lambda \leq 5.12$
$d_9$	$5.12 \leq \lambda \leq 10.24$
$d_{10}$	$10.24 \leq \lambda \leq 20.48$
$d_{11}$	$20.48 \leq \lambda \leq 40.96$
$d_{12}$	$40.96 \leq \lambda \leq 81.92$

ここで、ウェーブレット解析を行うことによって、元波形 $S$ は式(7.1)のように、波長領域ごとのプロファイルに分解される。

$$S = a_{12} + d_{12} + d_{11} + d_{10} + d_9 + d_8 + d_7 + d_6 + d_5 + d_4 + d_3 + d_2 + d_1 \quad (7.1)$$

ここで、 $a_{12}$ は長波長サブバンドとして、線形などを意味し、 $d_1 \sim d_{12}$ は表-7.4に示す、波長範囲のプロファイルを意味している。

なお、本検討では、 $d_1$ 、 $d_2$ はマクロテクスチャ領域の波長を含むため、検討対象から除外することとした。

### 7.4.3 ウェーブレット解析を用いたラフネス波長領域とタイヤ／路面転がり抵抗の関係

ウェーブレット解析を用いた路面プロファイルとタイヤ／路面転がり抵抗の関係について検討した。RRCを目的変数，各波長範囲のプロファイルから求めた振幅の実効値であるRMS(Root Mean Square)を説明変数として線形モデルによる単回帰分析を行った。結果を表-7.5に示す。

表-7.5 各波長領域のRMSと速度別RRCの相関係数

		速度 (km/h)			
		20	40	60	80
波長領域 LEVEL	$d_3$	0.75	0.80	0.70	0.66
	$d_4$	0.69	0.79	0.76	0.70
	$d_5$	0.74	0.85	0.66	0.69
	$d_6$	0.80	0.89	0.75	0.74
	$d_7$	0.68	0.68	0.71	0.68
	$d_8$	0.31	0.36	0.46	0.51
	$d_9$	0.01	0.13	0.46	0.24
	$d_{10}$	-0.05	0.05	0.40	0.25
	$d_{11}$	0.05	0.10	0.28	0.02
	$d_{12}$	0.15	0.26	0.48	0.29

表-7.5より， $d_3 \sim d_8$ で相関係数が大きくなり波長0.08～5.12mの路面プロファイルがタイヤ／路面転がり抵抗係数に影響を及ぼすことが分かった。

次に， $d_3 \sim d_8$ での波形データを式(7.2)に示すように合成し，波長0.08～5.12mのプロファイル $d_{3-8}$ を作成した。

$$d_{3-8} = d_3 + d_4 + d_5 + d_6 + d_7 + d_8 \quad (7.2)$$

$d_{3-8}$ の波形データを元のプロファイルデータとともに図-7.17に示す。さら

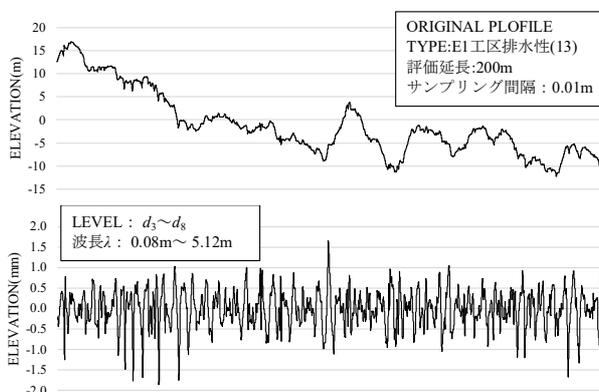


図-7.17 波形データの比較例（E1工区；排水性舗装(13)）

に、プロファイル $d_{3-8}$ の実効値RMSである $RMS_{d_{3-8}}$ を算出し $RRC$ との関係を調べた。

その結果を図-7.18に示す。図-7.18より、 $RMS_{d_{3-8}}$ と $RRC$ は、いずれの速度においても正の相関があり、速度が小さくなるとともに相関係数は小さくなった。

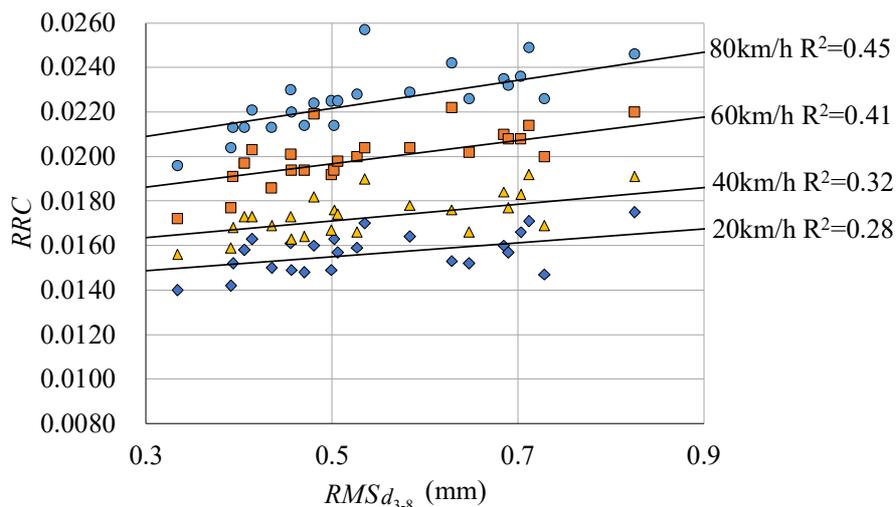


図-7.18  $RMS_{d_{3-8}}$ と $RRC$ の関係

また、 $IRI$ と $RRC$ の関係を図-7.19に示す。図-7.19より、 $IRI$ の場合と相関係数を比較すると、走行速度60km/hのときは、 $RMS_{d_{3-8}}$ の方がやや小さくなるが、20km/h、40km/h、80km/hのときは、大きくなった。 $RMS_{d_{3-8}}$ を用いることで $IRI$ を用いるよりも広い速度域で相関が大きくなることが分かった。

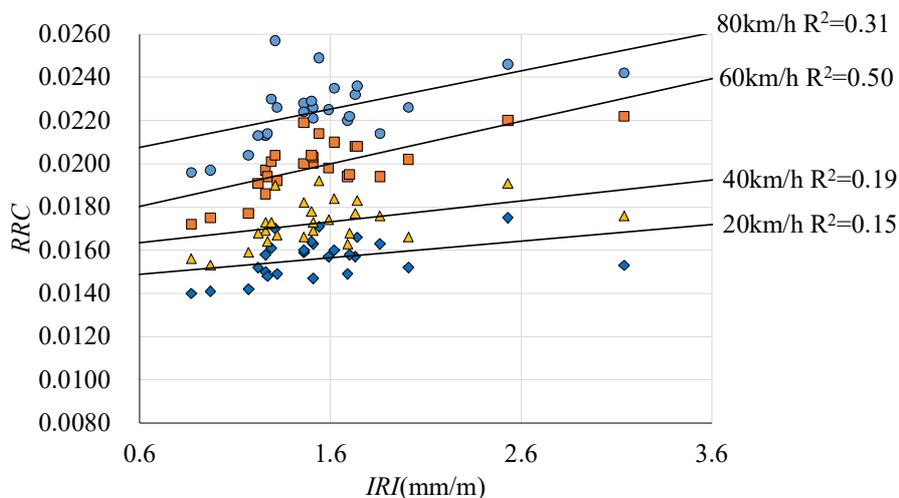


図-7.19  $IRI$ と $RRC$ の関係

#### 7.4.4 まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す.

- (1) 路面プロファイルをウェーブレット解析することにより, ラフネス波長領域においては, 0.08~5.12mの波長領域が  $RRC$  と相関が大きいことが分かった.
- (2) ウェーブレット解析により抽出した波長0.08~5.12mのプロファイルから求めた.  $RMS_{d_{3.8}}$ と  $RRC$ の相関係数は, 速度によるが,  $IRI$ と  $RRC$ との相関係数よりも大きくなった.

### 7.5 路面プロファイルとタイヤ／路面転がり抵抗係数の関係

ここまでの検討では、テクスチャ領域は0.5mm表面積比、ラフネス波長領域は波長領域0.08～5.12mのプロファイルから求めた $RMS_{d_{3.8}}$ がRRCと相関が強いことを明らかにしてきた。

これら、二つの指標を説明変数として各走行速度にて重回帰分析を行った結果を、IRIとMPDを説明変数に用いた結果と合わせて表-7.6に示す。

表-7.6 路面プロファイルとRRCの重回帰分析結果

速度 (km/h)	項目	説明変数 $X_1$ : $\log_e(0.5\text{mm表面積比})$ 、 $X_2$ : $RMS_{d_{3.8}}$					説明変数 $X_1$ : $MPD$ 、 $X_2$ : $IRI$				
		重相関係数	係数	標準偏差	t ( $ t >2$ )	P値 ( $0.05<P$ )	重相関係数	係数	標準偏差	t ( $ t >2$ )	P値 ( $0.05<P$ )
20	切片	0.85	0.01076	0.00064	16.7	0.000	0.70	0.01397	0.0005	28.4	0.000
	$X_1$		-0.00061	0.00010	-6.0	0.000		0.00072	0.0002	3.9	0.001
	$X_2$		0.00160	0.00070	2.3	0.031		0.00056	0.0003	1.9	0.075
40	切片	0.89	0.01161	0.00063	18.5	0.000	0.69	0.01529	0.0006	27.4	0.000
	$X_1$		-0.00070	0.00010	-7.1	0.000		0.00072	0.0002	3.5	0.002
	$X_2$		0.00194	0.00068	2.9	0.009		0.00076	0.0003	2.2	0.036
60	切片	0.74	0.01456	0.00114	12.8	0.000	0.77	0.01654	0.0006	26.8	0.000
	$X_1$		-0.00048	0.00018	-2.7	0.014		0.00050	0.0002	2.2	0.040
	$X_2$		0.00407	0.00123	3.3	0.003		0.00182	0.0004	4.9	0.000
80	切片	0.74	0.01654	0.00131	12.6	0.000	0.63	0.01931	0.0009	22.5	0.000
	$X_1$		-0.00048	0.00021	-2.3	0.030		0.00058	0.0003	1.8	0.083
	$X_2$		0.00510	0.00142	3.6	0.002		0.00161	0.0005	3.1	0.005

表-7.6より、0.5mm表面積比と $RMS_{d_{3.8}}$ との重回帰分析の結果、いずれの走行速度においても重相関係数は0.7以上、 $t$ 値（絶対値）は2以上、および $P$ 値は0.05以下となったことから、有意かつ相関が強いことを確認した。また、説明変数にIRI、MPDを用いる場合と比較すると走行速度が60km/hの場合はやや下回ったが、20km/h、40km/h、80km/hでは相関係数が大きくなった。

なお、上記7.4節の検討では $d_8$ の相関係数は他のLEVELよりも小さいことから、 $d_8$ を除いた $RMS_{d_{3.7}}$ を用いた場合についても重回帰分析を行った。その結果 $RMS_{d_{3.7}}$ を用いた場合は、重相関係数は走行速度80km/hのとき、 $R=0.75$ となり若干であるが $RMS_{d_{3.8}}$ よりも大きくなるものの、 $t$ 値（絶対値）は2以下となり、有意でない結果となった。これより $RMS_{d_{3.8}}$ は妥当であると判断した。

最後に、表-7.6の係数および $t$ 値をみると、RRCに与える影響は、0.5mm表面積比は低速から高速にかけて小さくなり、一方、 $RMS_{d_{3.8}}$ の方は、高速から低速にかけて影響が小さくなっている。これより、RRCとプロファイルとの

関係には、速度による相互作用が働いていることが分かった。

得られた速度別の推定式を式(7.3)～(7.6)に示す。

$$20\text{km/h} : Y = -0.00061X_1 + 0.00160X_2 + 0.01076 \quad (7.3)$$

$$40\text{km/h} : Y = -0.00070X_1 + 0.00194X_2 + 0.01161 \quad (7.4)$$

$$60\text{km/h} : Y = -0.00048X_1 + 0.00407X_2 + 0.01456 \quad (7.5)$$

$$80\text{km/h} : Y = -0.00048X_1 + 0.00510X_2 + 0.01654 \quad (7.6)$$

ここに、

$Y$  :  $RRC$

$X_1$  :  $X_1 = \log x_1$

$x_1$  : 0.5mm表面積比

$X_2$  :  $X_2 = x_2/x_2'$

$x_2$  :  $RMS_{d_{3-8}}$  (mm)

$x_2'$  :  $RMS_0$  (=1.0 mm) 無次元化パラメータ

である。

## 7.6 路面プロファイルとタイヤ／路面転がり抵抗との関係に対する速度の影響

### 7.6.1 概要

前項までの検討では、路面プロファイルを波長50mm以下のテクスチャ波長領域と50mm以上のラフネス波長領域の2つの波長領域に分けてタイヤ／路面転がり抵抗の影響要因を検討してきた。このなかで、タイヤ／路面転がり抵抗の自動車走行速度と路面プロファイルとの関係については、走行速度が小さい場合はテクスチャ波長領域、走行速度が大きくなるほどラフネス波長領域がタイヤ／路面転がり抵抗に及ぼす影響が大きくなることを明らかにしてきた。しかし、速度が速くなるにつれて、路面プロファイルのラフネス波長領域が、どのようにタイヤ／路面転がり抵抗に影響を及ぼすかについては明らかになっていなかった。

そこで、本研究は、ラフネス波長領域とタイヤ／路面転がり抵抗の速度依存性に関する要因分析を目的に検討を行った。これまでの研究では工区全域を一つのRRC（以下、工区のRRC）で検討していたが、本検討ではこの工区を細分化することで、RRCとラフネス波長領域との局所的な関係に着目し検討を行った。

はじめに、それぞれの工区において1m区間毎に細分化したRRCを算出した。そして、同一工区内におけるRRCの局所的な変動について整理した。

次に、速度依存性の検討として、走行速度が増加したときの局所的なRRCの変化について分析をした。結果、速度に応じたRRCの増加はある特定位置で増加する傾向にあることが分かった。このことから、速度依存性の要因は空間的位置、つまりラフネス波長領域のある特徴的な形状がその一つであると考えた。

最後に、RRCとラフネス波長領域のある特徴的な形状との関係に関する検証を行った。検証では、リフティングウェーブレットスキームを用いた方法で抽出した特徴点とタイヤ／路面転がり抵抗係数が局所的に増加する点が概ね同一位置を示すことを確認した。

### 7.6.2 検討方法

#### (1) 使用データ

##### a) タイヤ／路面転がり抵抗係数

タイヤ／路面転がり抵抗係数(*RRC*)の測定は、写真-7.2 (c)に示す、すべり抵抗測定車により測定した。走行速度は 20km/h,40km/h,60km/h,80km/h で実施し、第5章に示す、横力補正およびタイヤ温度補正(30°C)を行い、*RRC*を算出した。

##### b) 路面プロファイル

路面プロファイルは MRP-2000 を用いて測定した。MRP-2000 はレーザ式非接触型計測器で、ジャイロセンサーを内蔵していることから、路面の形状(以下、*true profile*)を測定できる装置である。本検討では、ラフネス波長領域の検討を考慮して、*true profile* の測定が可能な 1cm 間隔の測定データを用いた。

##### c) 検討に用いた路面

本検討に用いた路面は、国土技術政策総合研究所の試験走路にある 26 路面である。表-7.7に、路面の種類と代表的な路面性状値、および工区の *RRC*(表-7.7は *RRC* と表記している)を示す。なお、工区の *RRC* は工区全体の実効値 RMS (Root Mean Square) を求めた後、基準温度(30°C)補正を行った値である。

表-7.7 検討に用いた舗装の種類と各種試験値(表-7.3 再掲)

工区 NO.	舗装種	IRI (mm/m)	MPD (mm)	RRC				工区 NO.	舗装種	IRI (mm/m)	MPD (mm)	RRC			
				20km/h	40km/h	60km/h	80km/h					20km/h	40km/h	60km/h	80km/h
E1	排水性舗装(13)	1.26	1.63	0.0150	0.0169	0.0186	0.0213	W10	SMA(13)	1.73	1.21	0.0157	0.0177	0.0208	0.0232
E2	密粒度舗装(13)	1.17	0.36	0.0142	0.0159	0.0177	0.0204	W11	排水性舗装(5)	1.46	1.01	0.0159	0.0166	0.02	0.0228
E3	低燃費舗装Type2	0.97	0.74	0.0141	0.0153	0.0175	0.0197	W12	排水性舗装(5)	1.70	1.07	0.0158	0.0168	0.0195	0.0222
E4	低燃費舗装Type1	0.87	0.65	0.0140	0.0156	0.0172	0.0196	W13	排水性舗装(13)	1.51	1.79	0.0163	0.0173	0.0203	0.0221
W1	排水性舗装(13)	1.26	1.54	0.0158	0.0173	0.0197	0.0213	W14	密粒度舗装(13)	1.29	0.71	0.0161	0.0173	0.0201	0.023
W2	密粒度舗装(20)	3.14	0.35	0.0153	0.0176	0.0222	0.0242	W15	CRCP	1.50	0.40	0.0164	0.0178	0.0204	0.0229
W3	低燃費舗装Type1	1.27	0.61	0.0148	0.0164	0.0194	0.0214	W16	排水性舗装(20)	2.53	3.50	0.0175	0.0191	0.022	0.0246
W4	低燃費舗装Type1	1.51	0.58	0.0147	0.0169	0.0200	0.0226	W17	排水性舗装(20)	1.54	2.45	0.0171	0.0192	0.0214	0.0249
W5	低燃費舗装Type1	1.32	0.71	0.0149	0.0167	0.0192	0.0226	W18	排水性舗装(10)	1.86	1.49	0.0163	0.0176	0.0194	0.0214
W6	低燃費舗装Type1	1.69	0.62	0.0149	0.0163	0.0194	0.0220	W19	排水性舗装(13)	1.31	1.93	0.017	0.019	0.0204	0.0257
W7	密粒度舗装(13)	1.22	0.79	0.0152	0.0168	0.0191	0.0213	W20	排水性舗装(13)	1.46	2.11	0.016	0.0182	0.0219	0.0224
W8	CRCP	1.62	0.44	0.0160	0.0184	0.0210	0.0235	W21	密粒度舗装(13)	1.59	0.84	0.0157	0.0174	0.0198	0.0225
W9	SMA(5)	2.01	0.72	0.0152	0.0166	0.0202	0.0226	W22	CRCP	1.74	0.52	0.0166	0.0183	0.0208	0.0236

※混合物( )の( )内は最大粒径を示す。

### 7.6.3 タイヤ／路面転がり抵抗係数と速度の関係

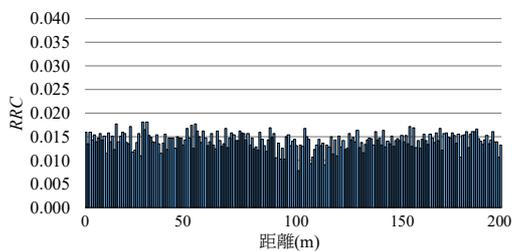
#### (1) 局所的な *RRC* と速度との関係

本検討では、算出する区間長を 1m として、1m 区間毎に *RRC* を算出した。ここで、上記までの検討では、対象とする工区全域の実効値 RMS を算出することで工区の *RRC* としている。このため、本検討に用いる 1m 区間毎の実効値 RMS を算出し 1m 区間の *RRC* とした。なお、同一工区内での検討となることから基準温度補正は行っていない。

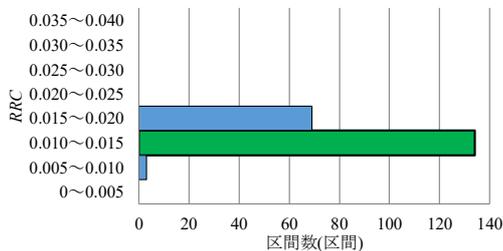
ここで、すべり抵抗測定車のデータサンプリング間隔は 100Hz であることから、RMS の算出では走行速度別に 1m に相当するデータ数、すなわち 20km/h では 18 データ、40km/h では 9 データ、60km/h では 6 データ、80km/h では 5 データを用いた。

本検討では、全ての工区で同様の傾向が得られたことから、ここでは、一例として E3 工区の低燃費舗装 Type2 の検討結果を図-7.20(a1)～(a4)に示す。なお、図-7.20(a4) の矢印は、後述の検証において学習箇所とした箇所であり、抽出は *RRC* が比較的大きい箇所のうち 6 箇所を抽出した。

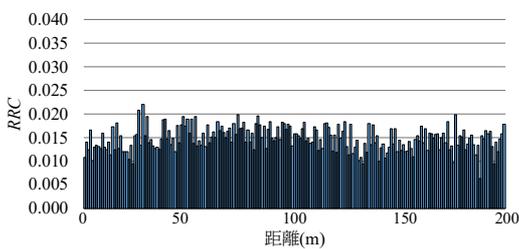
第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討



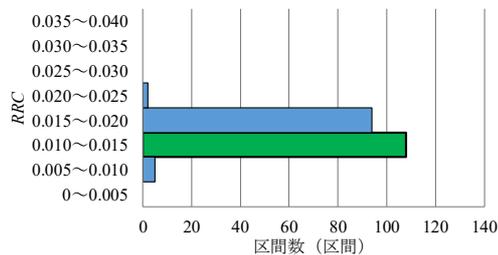
(a1) 20km/h



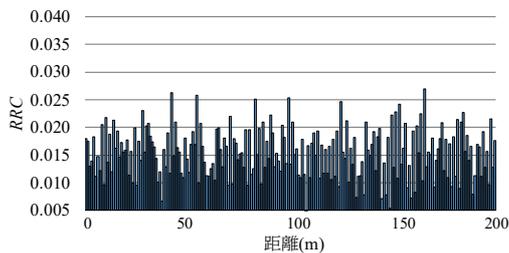
(b1) 20km/h



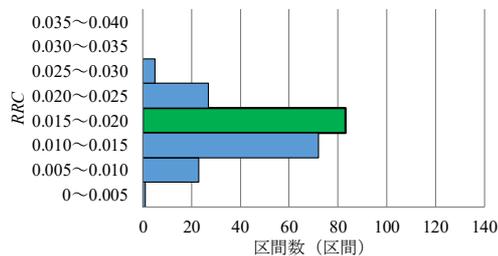
(a2) 40km/h



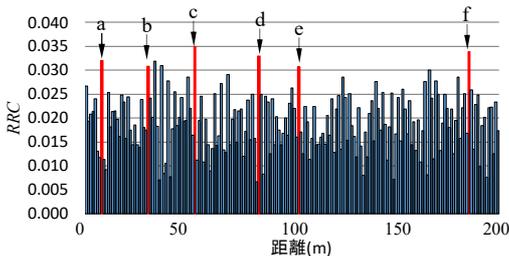
(b2) 40km/h



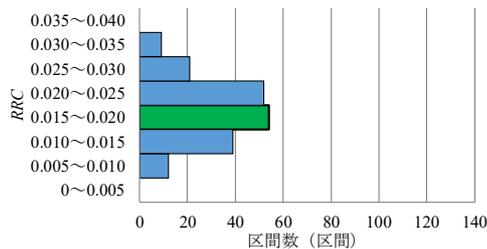
(a3) 60km/h



(b3) 60km/h



(a4) 80km/h



(b4) 80km/h

図-7.20 1m 区間の RRC  
(E3 工区)

図-7.21 1m 区間の RRC の  
ヒストグラム(E3 工区)

## 第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

図-7.20 より，どの速度においても， $RRC$  は，同一工区内であるにもかかわらず，位置によって変動していることが確認された。

次に，各速度と  $RRC$  の変動幅との関係について検討した。図-7.21 は図-7.20 の結果をヒストグラムにまとめたものであり，縦軸は  $RRC$  で，その階級幅を 0.005 としたものの，横軸は 1m 区間の数（以下，区間数）とした。そして，区間数が一番多くなる階級（以下，最頻度階級）を緑色で塗りつぶしている。図-7.21 より，20km/h では最頻度階級は 0.010～0.015 で，最大値を含む階級は 0.015～0.020 となり，その差は 0.005 程度であった。一方，80km/h では最頻度階級は 0.015～0.020 で，最大値を含む階級は 0.030～0.035 となり，その差は 0.015 であった。これより，速度が速くなるにしたがい，変動幅が大きくなることが分かった。

次に， $RRC$  が局所的に増加する箇所について検討した。図-7.20 より，速度 20km/h の  $RRC$  をみると局所的に増加する箇所はほとんどないが，速度が 40km/h になると局所的に増加する箇所が散見された。そして，速度が 60km/h になると 40km/h で  $RRC$  が増加した箇所はさらに増加し，加えて 40km/h では変わらない箇所においても  $RRC$  が増加する箇所があった。また，80km/h においても 60km/h と同様な傾向にあり，60km/h で  $RRC$  が増加した箇所ではさらに増加し，60km/h では変わらない箇所においても  $RRC$  が増加する箇所が現れた。

さらに，図-7.20(a4)の箇所 c を代表箇所として，箇所 c とその前後 1m 区間の  $RRC$  と速度との関係を図-7.22 に示す。

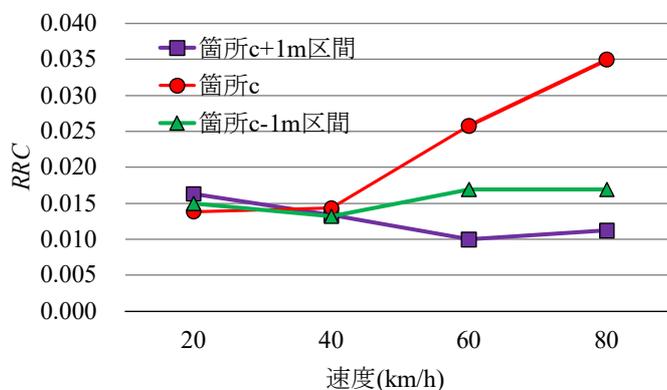


図-7.22 局所的増加箇所および前後区間の  $RRC$  と速度の関係（箇所 c）

図-7.22 より，箇所 c は速度に依存して  $RRC$  は増加しているが，その後 1m 区間では増加していないことが分かる．

これらより， $RRC$  が局所的に増加する特定箇所が存在することと，この箇所の  $RRC$  には速度依存性があることが分かった．

## (2) $RRC$ の速度依存性に関する要因分析

$RRC$  の速度依存性に関する要因分析では，表-7.7 に示す対象路面全てを用いた．分析では，はじめに 1m 区間の  $RRC$  から各工区の最高値と最頻値を求めた．ここで，最高値は最大値を含む階級の中央値，最頻値は最頻度階級の中央値とした．次に，最高値，最頻値，および工区の  $RRC$  から各速度における増加率を工区毎に算出した．最後に，この増加率を算術平均することで速度毎に全工区平均値を求めた．図-7.23 に速度と増加率の関係を示す．なお，増加率は 20km/h の  $RRC$  を基準として算出した．

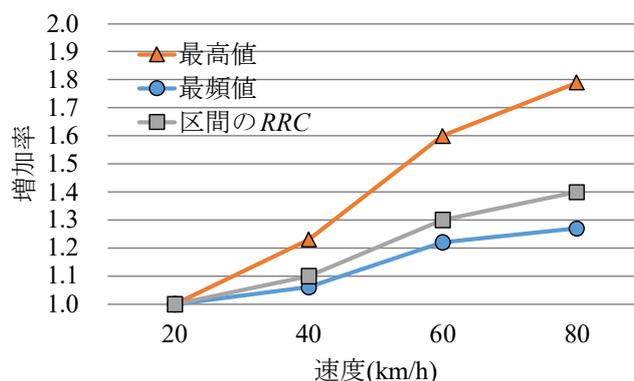


図-7.23 最頻値，最高値，工区の  $RRC$  の増加率と速度との関係(全工区平均)

図-7.23 より，はじめに最頻値と速度の関係をみると，速度が速くなるにつれて増加率は増えるが，伸び率は最高値や工区の  $RRC$  よりも緩やかであった．ここで，最頻値は局所的に大きく変動した値が含まれていない工区全体の傾向を示していることを考慮すると，最頻値が速度に応じて緩やかに増加する要因としては，工区全体わたくして一律に影響を及ぼす何らかの要因が存在すると考えられる．

次に，工区の  $RRC$  をみると，増加率は最頻値よりも大きく，速度が速く

なるにしたがいその乖離は大きくなっている。このことをヒストグラムで考えると最頻値の階級より上の階級への偏りがあると考えられるとともに、その偏りは速度が速くなるにつれて大きくなることが考えられ、図-7.21でもその傾向がみられた。

さらに、最高値と速度の関係を見ると、速度が速くなるにつれて増加率は大きくなり、その伸びは最頻値や工区の *RRC* よりも大きくなった。また、図-7.20、および図-7.21 をみると最大値は局所的に発生していた。

ここで、ある特定箇所では *RRC* が大きくなる現象について考察した。この現象の発生メカニズムの概要を図-7.24 に示す。この現象は、*RRC* を大きく

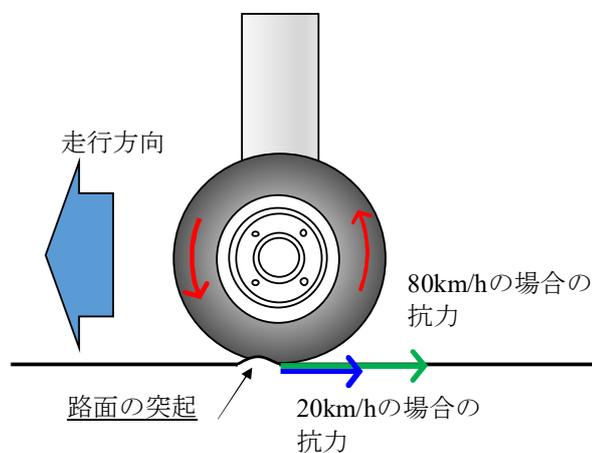


図-7.24 抗力発生イメージ

するような、ある特徴を持った路面形状があり、この路面の上をタイヤが通過するとき、走行方向とは反対方向の抗力が発生するものである。そして、ここで発生する抗力は、速度が速くなるにしたがい大きくなることは自明である。以上より、特徴的な路面形状の通過時に発生する抗力が *RRC* の速度依存性に関する要因の一つであると推察した。

さらには、上記までの検討では、*RRC* は速度が遅い場合はテクスチャ波長領域の影響を受け、速くなるとラフネス波長領域の影響を受ける傾向を明らかにしてきた。今回の検討より、速度が遅い場合はラフネス波長領域に起因した抗力が小さいことから、テクスチャ波長領域の影響が *RRC* に占める割合が見掛け上大きくなると考えた。一方、速度が速くなる場合は、ラフネス波長領域に起因した抗力が大きくなることから、ラフネス波長領域の影響が *RRC* に占める割合が大きくなると考えた。

#### 7.6.4 タイヤ／路面転がり抵抗係数に影響を及ぼす特徴的な路面形状に関する検討

##### (1) 概要

前項 7.6.3 の検討で、タイヤ／路面転がり抵抗に影響を及ぼす特徴的な路面形状が存在することが推察された。そこで、本件の検証をウェーブレット解析のリフティングスキームを用いた方法にて試みた。ウェーブレット解析のリフティングスキームを用いた方法は、既往の文献[7][8]において、ひび割れ箇所の抽出や、乗り心地に影響を及ぼす箇所の抽出に有効であるという報告がある。このことから、本検討においても同方法を用いることで特徴的な路面形状の検出位置と *RRC* 増大箇所の位置が一致するか否かについて検証した。

##### (2) ウェーブレット解析の概要

ウェーブレット解析は信号データを生成する小さな波（ウェーブレット）を表す様々な関数に関連した解析手法であり、マザーウェーブレットと呼ばれる基底関数を拡大縮小、あるいは平行移動して、与えられた信号データを表現しようとする手法である。ウェーブレット解析は、PSDの周波数特性の解析に加え、空間特性も同時に解析（空間一周波数解析）することが可能である。

ウェーブレット解析では、入力信号  $c_l^1$  に対して高周波分解フィルタ  $\tilde{g}_{m,l}^{\text{old}}$  と低周波分解フィルタ  $\tilde{h}_{k,l}^{\text{old}}$  により元信号の1/2解像度を持つ高周波成分 (detail)  $d_m$  および低周波成分 (approximation)  $a_k$  に分解する操作を行う。分解操作は畳み込み積分と2進間引きによるダウンサンプリングによって成り立つ。この分解操作を繰り返し行うことで多重解像度解析を構成することが可能である。

$$d_m = \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{\text{old}} c_l^1 \quad (7.7)$$

$$a_k = \sum_l \tilde{h}_{k,l}^{\text{old}} c_l^1 \quad (7.8)$$

また、次式によって再構築可能である。

$$c_l^1 = \sum_m g_{m,l}^{\text{old}} d_m + \sum_k h_{k,l}^{\text{old}} a_k \quad (7.9)$$

ここで、

$\tilde{g}_{m,l}^{\text{old}}$  : 高周波分解フィルタ

$\tilde{h}_{k,l}^{\text{old}}$  : 低周波分解フィルタ

$g_{m,l}^{\text{old}}$  : 高周波再構築フィルタ

$h_{k,l}^{\text{old}}$  : 低周波再構築フィルタ

$l$  : 周波数パラメータ

$m$  : 位置パラメータ(高周波成分)

$k$  : 位置パラメータ(低周波成分)

### (3) リフティングウェーブレットフィルタ

リフティングウェーブレットフィルタは、検出したい波形の特徴を学習させたフィルタのことで、4組の双直交ウェーブレットフィルタに調整可能な自由パラメータを加えたものであり、次式で構成される。

$$\tilde{g}_{m,l} = \tilde{g}_{m,l}^{\text{old}} - \sum_k \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{\text{old}} \quad (7.10)$$

$$h_{k,l} = h_{k,l}^{\text{old}} + \sum_m \tilde{s}_{k,m} g_{m,l}^{\text{old}} \quad (7.11)$$

$$g_{m,l} = g_{m,l}^{\text{old}} \quad (7.12)$$

$$\tilde{h}_{k,l} = \tilde{h}_{k,l}^{\text{old}} \quad (7.13)$$

ここで、

$\tilde{g}_{m,l}$  : 新規高周波分解フィルタ

$h_{k,l}$  : 新規低周波再構築フィルタ

$g_{m,l}$  : 新規高周波再構築フィルタ

$\tilde{h}_{k,l}$  : 新規低周波分解フィルタ

$\tilde{s}_{k,m}$  : 自由パラメータ

なお低周波分解フィルタおよび高周波再構築フィルタは自由パラメータによって新規設計されないため初期フィルタを使用する。

(4) リフティングウェーブレットフィルタの設計

a) 自由パラメータ決定方法

新規フィルタによって分解された高周波成分は式(7.10)を用いて表すと以下のようになる。

$$\hat{d}_m = \sum_l (\tilde{g}_{m,l}^{\text{old}} - \sum_k \tilde{s}_{k,m} \tilde{h}_{k,l}^{\text{old}}) c_l^1 \quad (7.14)$$

$$= d_m - \sum_k a_k \tilde{s}_{k,m} \quad (7.15)$$

ここで、自由パラメータは高周波成分 $\hat{d}_m$ を消失させるように決定される。この時の条件を式(7.16)に示す、

$$d_m - \sum_k a_k \tilde{s}_{k,m} = 0 \quad (7.16)$$

次に検出したい波形の特性を持つトレーニング信号を  $2n$  個用意する。各トレーニング信号の条件は以下とする。

$$\sum_{k=m-n}^{m+n} a_k^v \tilde{s}_{k,m} - d_m^v = 0 \quad v=1,2,\dots,2n \quad (7.17)$$

$d_m^v$ と $a_m^v$ は、それぞれトレーニング信号の高周波成分と低周波成分であるため次式で表される。

$$d_m^v = \sum_l \tilde{g}_{m,l}^{\text{old}} c_l^{1,v} \quad (7.18)$$

$$a_m^v = \sum_l \tilde{h}_{k,l}^{\text{old}} c_l^{1,v} \quad (7.19)$$

また、式(7.11)と高周波分解フィルタの総和が0になるという性質から以下の条件が加わる。

$$\sum_{k=m-n}^{m+n} \tilde{s}_{k,m} = 0 \quad (7.20)$$

よって、式(7.17)と式(7.20)より

$$\begin{bmatrix} a_{m-3}^1 & a_{m-2}^1 & \dots & a_{m+2}^1 & a_{m+3}^1 \\ a_{m-3}^2 & a_{m-2}^2 & \dots & a_{m+2}^2 & a_{m+3}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m-3}^6 & a_{m-2}^6 & \dots & a_{m+2}^6 & a_{m+3}^6 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{s}_{m-3,m} \\ \tilde{s}_{m-2,m} \\ \vdots \\ \tilde{s}_{m+2,m} \\ \tilde{s}_{m+3,m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_m^1 \\ d_m^2 \\ \vdots \\ d_m^6 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7.21)$$

となり， $2n+1$  元連立 1 次方程式を解くことで自由パラメータ  $\tilde{s}_{k,m}$  を求めることができる。

b) トレーニング信号の選出と学習結果

同じ工区で測定された路面プロファイルと *RRC* の波形を比較し，*RRC* が特に大きくなる箇所のプロファイルトレーニング波形として取り出した。学習用データには E3 工区を使用した。抽出箇所は，図-7.20(a4)に示す，走行速度が 80km/h のときの *RRC* が大きくなる箇所とし，抽出したトレーニング波形を図-7.25に示す。なお，抽出したトレーニング波形の共通点としては，すべての箇所で凸部であり，6箇所中5か所で凸部の直前で下り勾配を有していた。

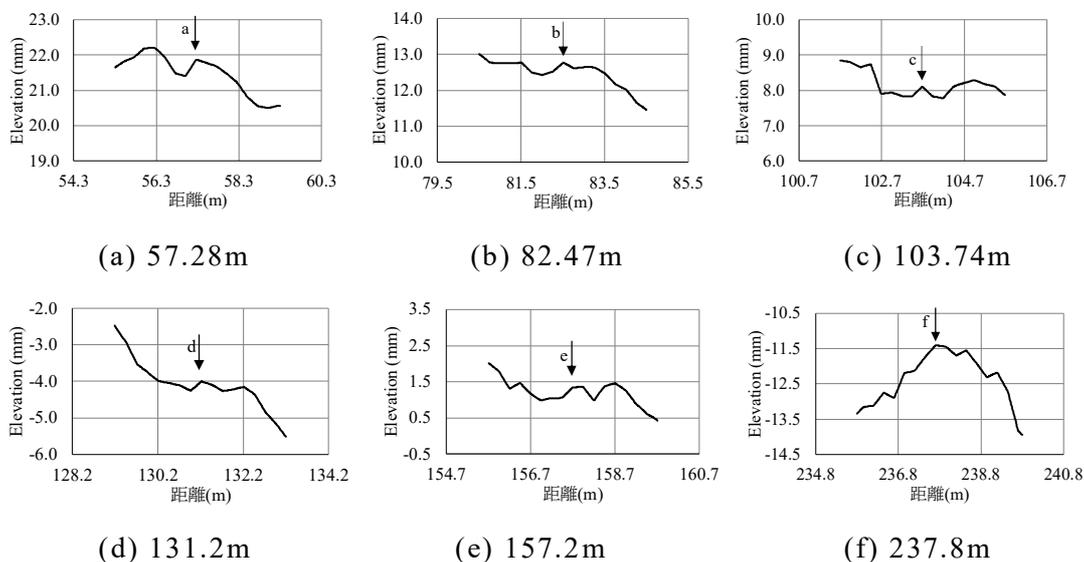


図-7.25 トレーニング波形 (E3 工区)

トレーニング信号の選出は，まず，路面プロファイルデータを前処理としてバンドパス処理を施した。この理由は，検証を確実にを行うために，転がり抵抗に影響の小さい波長領域を取り除くために実施した。バンドパスの波長の範囲は，これまでの研究より，ラフネス領域の波長域において，0.64m～

1.28mの波長域の波形から求めたRMS値がRRCと相関が高いことから、この波長域を含むことと、抽出できる波長域を広くするために、バンドパスの波長領域を0.64m～5.12mとした。バンドパス処理は、はじめに0.64mの移動平均処理を行い、次に元波形に5.12mの移動平均処理した波形を0.64m移動平均処理後の波形から減じ、最後に、データ間隔が0.32mとなるようにダウンサンプリング処理を行った。そして、バンドパス処理を施した路面プロファイルデータからトレーニング信号 $c_t^{1,v}$ を6個取り出した。そして、各トレーニング信号の高周波成分および低周波成分は、1次元離散ウェーブレット変換を用いて求めた。なお、1次ウェーブレット変換にはbior2.4という双直交のマザーウェーブレットを使用した。

以上で求めた、各トレーニング信号の高周波成分と低周波成分を式(7.21)に代入することで自由パラメータが得られる。その結果を表-7.8に示す。

また、そのときの、カスタムウェーブレットフィルタを図-7.26に示す。

表-7.8 自由パラメータ計算結果

$k$	$\tilde{s}_{k,m}$
$m-3$	0.1907
$m-2$	-0.3125
$m-1$	0.3212
$m$	-0.2183
$m+1$	0.0703
$m+2$	-0.1935
$m+3$	0.1422

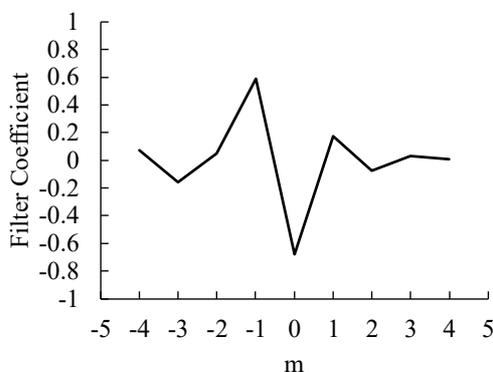


図-7.26 カスタムウェーブレットフィルタ

(5) 特徴点の検出方法

カスタムウェーブレットフィルタは、トレーニング信号と類似の形状を持つ特徴点における高周波成分を理論上消失させるように設計されている。特徴点の検出理論を図-7.27に示す。

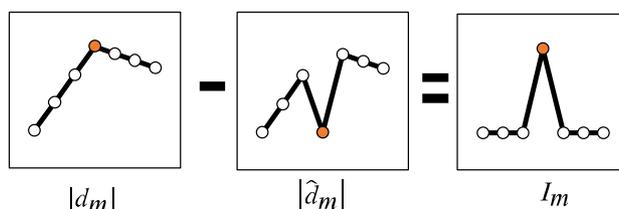


図-7.27 特徴点の検出理論

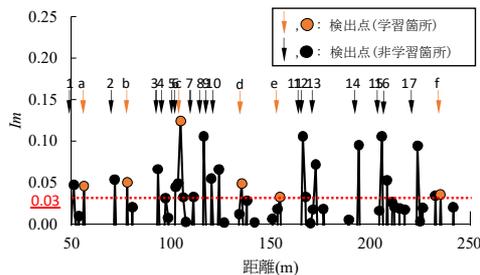
そのため式(7.22)に示すように、旧分解フィルタによって得られた高周波成分 $d_m$ から、新分解フィルタによって得られた高周波成分 $\hat{d}_m$ を引くことで特徴点が残りに検出が可能となる。

$$I_m = |d_m| - |\hat{d}_m| \quad (7.22)$$

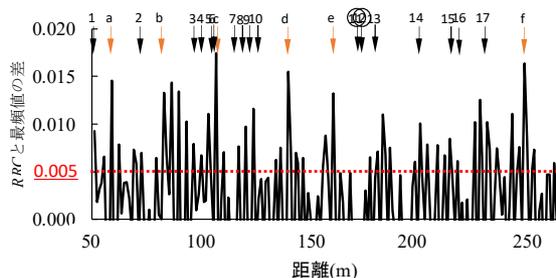
(6) 検証結果

特徴点の検出結果を図-7.28 および図-7.29 に示す。図-7.28 は学習工区データに採用した E3 工区、図-7.29 は非学習工区データで E2 工区の検出結果である。ここで、両図の(a)にある  $I_m$  の基準値は、学習箇所 6 箇所の  $I_m$  の最小値が学習箇所 e の 0.032 であることから本検討では 0.03 とし、基準値以上となる箇所を抽出した。また、(b)は RRC から各工区的最頻値を減じた差であり、今回はこの差が 0.005 以上となる箇所を RRC の増加箇所とした。そして、(a)で検出された箇所に対する、RRC の増加箇所の数を検出割合とした。RRC が増加していない箇所については、図の矢印の上の数字を○で示した。

結果、学習工区データでは検出割合は 15/17=88%であり、非学習工区データでは 17/22=77%となり概ね一致していた。なお、検出箇所と RRC 増加箇所が一致しない箇所の理由としては、道路勾配と呼べるようなラフネス波長領域よりも長い波長や、今回の検討に用いたバンドパス波長域外の波形の影響が考えるが、この要因解明については今後の課題としたい。

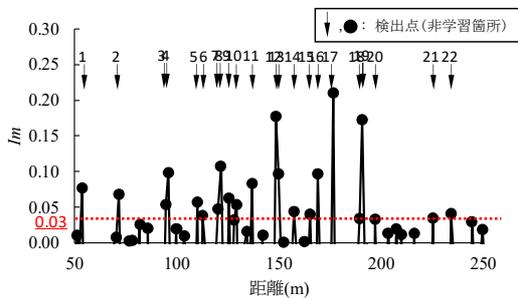


(a) 路面プロファイルからの抽出結果

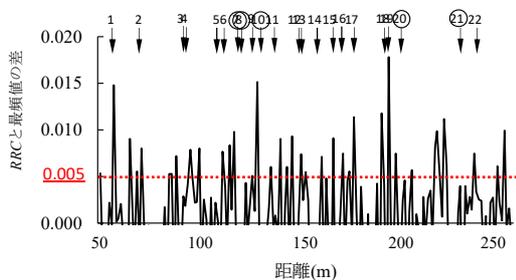


(b) RRC と最頻値の差

図-7.28 検出結果（学習工区データ）



(a) 路面プロファイルからの抽出結果



(b) RRC と最頻値の差

図-7.29 検出結果（非学習工区データ）

## 第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

以上の検証により，検出箇所は  $RRC$  が大きくなる箇所と概ね一致していたことから，タイヤ／路面転がり抵抗に影響を及ぼす特徴的な路面形状が存在することを確認した．

### 7.6.5 まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す.

- (1) 同一路面区間内であっても, 箇所により *RRC* は変動し, 変動幅は速度が速くなると増加する.
- (2) *RRC* の速度依存性の要因の一つとして特徴的な路面形状の通過時に発生する抗力であることがわかった. また, これ以外にも工区全体にわたって一律に影響を及ぼす要因が存在することが示唆された.
- (3) タイヤ/路面転がり抵抗を増大させるラフネス波長領域のある特徴的な形状に関する検証として, ウェーブレット解析のリフティングスキームを用いた方法を行った結果, 検出箇所と *RRC* の増加箇所とは概ね一致した.

## 7.7 第7章のまとめ

本章で得られた知見は、以下のとおりである。

- (1) テクスチャの凹凸形状が大きくなるほど接地圧力が局所的に高くなり、この面積割合を計測することでネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャを定量的にも分類できる可能性を見出した。
- (2) タイヤ接地圧力分布と二次元テクスチャデータの解析により、エンベロープ高さは、テクスチャによって異なり、粗の場合は高くなる傾向にあったことを明らかにした。
- (3) ピーク値から 1.0mm 下がりまでの表面積比により、テクスチャの特性を評価できる可能性を見いだした。
- (4) *RRC*と0.5mm表面積比との相関係数は、*RRC*と*MPD*との相関係数よりも大きくなった。
- (5) ウェーブレット解析により抽出した波長0.08～5.12mのプロファイルから求めた*RMS*と*RRC*の相関係数は、速度によるが、*IRI*と*RRC*との相関係数よりも概ね大きくなった。
- (6) 同一路面区間内であっても、箇所により *RRC* は変動し、変動幅は速度が速くなると増加した。
- (7) *RRC* の速度依存性の要因の一つとして特徴的な路面形状の通過時に発生する抗力であることがわかった。また、これ以外にも工区全体にわたって一律に影響を及ぼす要因が存在することが示唆された。
- (8) タイヤ／路面転がり抵抗を増大させるラフネス波長領域のある特徴的な形状に関する検証として、ウェーブレット解析のリフティングスキー

## 第7章 路面プロファイルを用いた間接評価方法の精度向上に向けた検討

ムを用いた方法を行った結果、検出箇所と *RRC* の増加箇所とは概ね一致した。

## 第7章の参考文献

- [1] 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，土木学会舗装工学論文集，第7週，1\_1-1\_6，2012.
- [2] 川上篤史，久保和幸，石垣勉，白井悠：タイヤ／路面接地応力分布による路面テクスチャの評価に関する検討，土木学会第71回年次学術講演会，2016.
- [3] 白井悠，川上篤史，姫野賢治：路面テクスチャとタイヤ接地圧分布およびトレッド変形量との関係に関する検討，土木学会第73回年次学術講演会，2019.
- [4] 富山和也，城本政一，川村彰：離散ウェーブレット変換による路面平坦性の劣化特性を考慮した評価方法，土木学会論文集 E1(舗装工学)Vol167,No.3，2011.
- [5] 亀山修一，川村彰，早坂保則，笠原篤：PIARC 路面性状国際共通試験における舗装の縦断プロファイルと支持力の関係，土木学会論文集 No.683/V-52，2001.
- [6] 白川龍生，川村彰，中辻隆，上浦正樹：路面プロファイルデータ処理に適したウェーブレット基底関数の選定について，土木学会論文集 No.753/V-62，2004.
- [7] 富山和也，川村彰，石田樹：カスタムウェーブレットフィルタによる車両振動に影響を及ぼす舗装ひび割れ箇所の特定，土木学会論文集 E1(舗装工学)Vol168,No.3，2012.
- [8] 富山和也，川村彰，石田樹：クォーターカーアルゴリズムを用いた舗装モニタリングにおける路面損傷の検出方法，土木学会論文集 E1(舗装工学)Vol168,No.2，2012.

## 第 8 章

## 結 論



### 第8章 結 論

脱炭素社会へ向けた取り組みが世界的に行われており、舗装分野に対しても環境負荷軽減に寄与する技術開発が望まれている。わが国における低炭素舗装技術はアスファルト混合物製造時の二酸化炭素排出量を低減する技術が主であり、舗装路面の転がり抵抗を小さくして走行する自動車の燃費低減を図ることを目的としたアスファルト舗装技術はこれまでにない考え方である。海外ではタイヤ／路面転がり抵抗と舗装路面の関係についての研究事例が多数報告されているものの、わが国においては、研究事例も少なく性能評価方法も確立されていない。

タイヤ／路面転がり抵抗の小さいアスファルト舗装を開発することは、自動車の走行時のエネルギー消費を改善し、ガソリン車あるいはディーゼル車のような内燃エンジン搭載車両においては自動車から排出されるCO<sub>2</sub>排出量の削減が期待できる。また、ゼロエミッション車両についても航続距離が延長することにより、省エネにつながる。

また、従来の舗装が有する表面排水性機能による走行安全性や、交通騒音低減機能による沿道環境や車内環境の快適性を有したまま、タイヤ／路面転がり抵抗低減機能を付与することで、次世代型の舗装の技術となると考えた。

さらに、路面プロファイルとタイヤ／路面転がり抵抗との関係について明らかにすることは、路面のすべり抵抗や、タイヤ／路面騒音と路面プロファイルとの関係解明にもつながる。

そのような視点にたって、本研究では上述の目標に近づくため、タイヤ／路面転がり抵抗の小さなアスファルト混合物を開発するとともに、その性能評価方法を確立することを目的とした。

以下に、各章で得られた知見を示す。

第2章では、

- (1) 既往の研究から、タイヤ／路面転がり抵抗に影響を与える路面プロファイルのうち短い波長領域（テクスチャ波長領域）はアスファルト混合物に用いる骨材や配合が影響を及ぼし、長い波長領域（ラフネス波長領

## 第8章 結 論

- 域)は施工に起因した路面プロファイルが影響を及ぼすと考えた。
- (2) タイヤ/路面転がり抵抗の小さなアスファルト舗装として、低燃費舗装構築のコンセプトを整理した。性能については、従来の排水性舗装の機能を有しながら、タイヤ/路面転がり抵抗低減性能を有する舗装とすることとした。そのために、テクスチャは舗装表面のピークラインが平滑なネガティブテクスチャとし、適度なきめ深さと空隙率を有することとした。
  - (3) アスファルト混合物の配合は、ネガティブテクスチャを構築しながら、供用に伴うテクスチャの変化が小さい配合として、骨材最大粒径を5mmと小粒径化し、2.36mm通過量を10~40%とすることとした。
  - (4) 舗装構造は2層構造とすることでラフネス波長領域の振幅が小さい路面を構築ができることを確認した。
  - (5) 使用骨材の小粒径化や鉄輪ローラのための転圧仕上げとすることで、テクスチャ波長領域の振幅が小さいネガティブテクスチャを有した路面を構築できることを確認した。
  - (6) タイヤ/路面転がり抵抗係数の測定結果から、低燃費舗装Type1および低燃費舗装Type2は、従来舗装である排水性舗装(13)よりも、タイヤ/路面転がり抵抗が低減していることを確認した。また、その他性能についても排水性舗装(13)と同等の性能を有していることを明らかにした。
  - (7) 低燃費舗装の走行安全性としてすべり抵抗性能について検証し、タイヤ/路面転がり抵抗が小さくなると、すべり抵抗も小さくなるという直接的な傾向は見られず、他の舗装と同等以上のすべり抵抗を有していることを確認した。

第3章では、

- (1) 構内試験路面による促進載荷試験の結果、各性状値とも排水性舗装と同等の長期耐久性を有していることを明らかにした。特に、タイヤ/路面転がり抵抗への影響が大きいとされているテクスチャ(MPD)についても、施工直後の状態を維持していることを確認した。
- (2) 実道試験施工1では、低燃費舗装の標準型である低燃費舗装 Type1 を

## 第8章 結 論

施工した。製造性、施工性は良好で、施工直後の調査の結果においても、所定の性能を満足していることを確認した。

- (3) 実道試験施工 2 では、試験施工の実施地域が積雪寒冷地域であることから、積雪寒冷地用の低燃費舗装 Type3 を検討し開発した。さらに、施工後 2 年経過時点では、低燃費舗装 Type3 は良好な状態を維持しており、各種路面性状値、すべり抵抗、およびタイヤ/路面転がり抵抗施工直後の状態を維持していた。

第 4 章では、

- (1) 走行燃費の実証試験では、走行速度 20km/h では低燃費舗装 Type2, 40km/h, 60km/h, 80km/h では低燃費舗装 Type1 が他の路面よりも良好な結果となった。60km/h のときに低燃費舗装 Type1 は排水性舗装(13)よりも走行燃費は 2.8%向上した。
- (2) CO<sub>2</sub> 排出量の実証試験では、走行速度 20km/h, 60km/h では低燃費舗装 Type2, 40km/h, 80km/h では低燃費舗装 Type1 が他の路面よりも良好な結果となった。60km/h のときに低燃費舗装 Type1 は排水性舗装(13)よりも CO<sub>2</sub> 排出量は 3.2%低減した。
- (3) 大型車の場合は速度の大きい都市間モードの方が速度の小さい都市内モードよりも RRC の CO<sub>2</sub> 排出量に及ぼす影響が大きくなった。一方、小型車の場合は、速度の差異による RRC の及ぼす影響は小さかった。
- (4) 同じ舗装種でも新設にすることで、タイヤ/路面転がり抵抗が小さくなることから CO<sub>2</sub> 削減効果があり、さらに低燃費舗装 Type1 とすることで、低減効果は排水性舗装(13)の 2 倍程度に向上することが示された。
- (5) 日本全国の幹線道路に適用したときの削減効果は、日本の運輸部門全体の CO<sub>2</sub> 排出量に対して、排水性舗装(13)を適用すると 0.6%、低燃費舗装 Type1 を適用すると 1.1 %削減できることが示された。
- (6) 低燃費舗装 Type1 を高速道路の交通量が多い箇所に適用することで削減効率は向上する結果となった。また、このときの費用効果は、CO<sub>2</sub> を 1t 削減するための費用として、低燃費舗装 Type1 の施工単価を排水性舗装(13)の 1.0~2.0 倍とした場合、0~6,957 円/t であることが示された。

第5章では、

- (1) すべり抵抗測定車による測定において、施工ジョイントの影響を除去するためには、ジョイント通過後から最小 1.0 秒間のデータを排除することが必要であるとわかった。
- (2) 運転者の微小な操舵による影響除去のための、横力補正方法を提案した。
- (3) タイヤ／路面転がり抵抗係数は、タイヤ温度とは負の相関、走行速度とは正の相関があることを確認した。
- (4) すべり抵抗測定車による測定値に対しての基準温度および基準速度への補正式を提案した。

第6章では、

- (1) テクスチャ波長領域の検討では、既存の指標として、*TD*、*MPD* とタイヤ／路面転がり抵抗係数との関係について単回帰分析を行った。結果、*TD* よりも *MPD* の方が決定係数  $R^2$  は大きくなった。
- (2) ラフネス波長領域の検討では、既存の指標として、平たん性、*IRI* とタイヤ／路面転がり抵抗係数との関係について単回帰分析を行った結果、20km/h では若干小さくなったが、全速度では、平たん性よりも *IRI* の方が決定係数  $R^2$  は大きくなった。
- (3) *MPD*、*IRI* の2つを説明変数に用いることで、*RRC* との相関係数はより高くなった。これより、タイヤ／路面転がり抵抗の間接評価方法として、既存の指標を用いる場合は、*IRI* と *MPD* を用いることで高い精度での推定が可能であることがわかった。

第7章では、

- (1) テクスチャの凹凸形状が大きくなるほど接地圧力が局所的に高くなり、この面積割合を計測することでネガティブテクスチャ・ポジティブテクスチャを定量的にも分類できる可能性を見出した。
- (2) タイヤ接地圧力分布と二次元テクスチャデータの解析により、エンベ

## 第8章 結 論

ロープ高さは、テクスチャによって異なり、粗の場合は高くなる傾向にあったことを明らかにした。

- (3) ピーク値から 1.0mm 下がりまでの表面積比により、テクスチャの特性を評価できる可能性を見いだした。
- (4) *RRC*と0.5mm表面積比との相関係数は、*RRC*と*MPD*との相関係数よりも大きくなった。
- (5) ウェーブレット解析により抽出した波長0.08～5.12mのプロファイルから求めた実効値RMSと*RRC*の相関係数は、速度によるが、*IRI*と*RRC*との相関係数よりも大きくなった。
- (6) 同一路面区間内であっても、箇所により *RRC* は変動し、変動幅は速度が速くなると増加した。
- (7) *RRC* の速度依存性の要因の一つとして特徴的な路面形状の通過時に発生する抗力であることがわかった。また、これ以外にも工区全体にわたって一律に影響を及ぼす要因が存在することが示唆された。
- (8) タイヤ／路面転がり抵抗を増大させるラフネス波長領域のある特徴的な形状に関する検証として、ウェーブレット解析のリフティングスキームを用いた方法を行った結果、検出箇所と *RRC* の増加箇所とは概ね一致した。

今後は、路面プロファイルに合わせて剛性面も含めて、さらにタイヤ／路面転がり抵抗を小さくする方法について検討することとしている。



## 謝 辭



## 謝 辞

### 謝 辞

本研究の遂行，論文の作成，研究発表および審査にあたって，中央大学理工学部都市環境学科教授 姫野賢治先生には多くのご指導を賜りました．心より感謝申し上げます．

北見工業大学 工学部社会環境系准教授 富山和也先生には，貴重なアドバイスを賜るとともに，本論文の審査も快くお引き受けいただきました．ここに，心より感謝の意を表する次第です．また，中央大学理工学部都市環境学科教授 志々目友博先生，同学科教授 西岡英俊先生，および精密機械工学科教授 辻知章先生には，ご多忙の折，本論文の審査をお引き受けいただきましたことに深甚なる感謝の意を表します．

本研究は，国立研究開発法人土木研究所と株式会社N I P P Oとの共同研究のなかで実施したものであり，土木研究所 久保和幸氏，藪雅行氏，寺田剛氏（現一般財団法人土木研究センター），川上篤史氏には適切なご指導，ご助言をいただきました．心より感謝申し上げます．また，本研究の中核を担っております，タイヤ／路面転がり抵抗の測定をはじめとしたすべり抵抗測定車を用いた各種試験では，安藤和彦氏（現株式会社R T C），倉持智明氏はじめ一般財団法人土木研究センターの関係各位には多大なるご協力をいただきました．心より感謝申し上げます．さらに，実道試験施工の実施において中部地方整備局愛知国道事務所および北陸地方整備局新潟国道事務所には試験工区のご提供をはじめ多大なご協力を頂きました．ここに深く感謝の意を表します．

著者が勤務しております株式会社N I P P Oの元取締役常務執行役員 荒井明夫氏（現グリーン・コンサルタント株式会社），元技術研究所所長 向後憲一氏（現大日技研工業株式会社）には博士課程への入学の機会を与えていただきとともに，今日までご支援をいただきました．厚く御礼申し上げます．また，本研究の実施にあたっては，同社取締役常務執行役員 中田尚行氏，総合技術部部長 山岸宏氏，同部技術研究所所長 安藤政浩氏，研究第1グループ課長 吉中保氏，技術企画室技術管理グループ課長 石垣勉氏，技術研究所次長 井原務氏，元技術研究所次長 尾本志展氏には多大なご支援，ご協力

## 謝 辞

ならびにあたたかい声援をいただきました。心より御礼申し上げます。さらに、渡邊真一氏、佐野貴志氏はじめ技術研究所各位には日常の業務が忙しいにもかかわらず快く実験の手伝いを引き受けて頂きました。ありがとうございました。

合同会社増山コンサルタント 増山幸衛氏，日本道路株式会社 遠藤桂氏，阪神高速技術株式会社 久利良夫氏，東亜道路工業株式会社 平戸利明氏をはじめ道路研究室の先輩諸氏には貴重なアドバイスとご声援をいただきました。心より感謝申し上げます。また，道路研究室の学生および卒業生には大変お世話になりました。ありがとうございました。

最後に，本研究に専念できるよう著者の日常を支えてくれた妻と子供たちに感謝いたします。