

転がり抵抗・制動距離性能向上のための タイヤトレッドゴムの粘弾性特性最適化の研究

Research on Optimization of Viscoelastic Properties of Tire Tread Rubber
to Reduce Rolling Resistance and Decrease Braking Distance

茂 木 恵美子*

Emiko MOGI

長 谷 裕 之*

Hiroyuki HASE

溝 根 哲 也*

Tetsuya MIZONE

西 谷 広 滋*

Koji NISHITANI

要 旨

タイヤの転がり抵抗低減とウェット路面での制動距離短縮は、低燃費化と走行安全性の観点から重要である。しかしこれらの性能はトレッドゴムの性能によるところが大きく、両立させるためにはゴムの粘弾性特性の二律背反性能を克服する必要がある。

本研究では、車両の走行時、制動時におけるタイヤの接地面挙動解析を詳細におこない、制動時にはタイヤトレッドの接地幅方向の両端部ゴムの性能寄与が大きく、定常走行時には中央部ゴムの性能寄与が大きいことを見出した。この結果から分割トレッド構造を考案し、それぞれの部位に粘弾性特性を最適化したゴムを配置し、かつ接地圧を均一化したタイヤを開発することにより、転がり抵抗を維持したままウェット制動距離の 5m 短縮を達成した。

ABSTRACT

The achievement of reduced rolling resistance and lower braking distances is important in terms of automotive fuel efficiency and safety. These goals are strongly dependent on the performance of the tread rubber used in the tire, but are contradictory in terms of viscoelastic properties, an issue which needs to be addressed if these goals are to be satisfied simultaneously.

The research discussed in this paper involved analyses of the behavior of the contact patch of a vehicle's tires when the vehicle is cruising and braking. The results show that the two edge sections of a tire in the direction of width make the greatest contribution during braking, and the center section of a tire makes the greatest contribution during cruising. This discovery led to the proposal of a segmented tread configuration. Tires were developed on this basis, using different rubber compounds with optimized viscoelastic properties in the different segments. The distribution of contact pressure on the contact patch was also equalized. The newly developed tires displayed a 5-m reduction in wet braking distance when compared to other tires with identical rolling resistance characteristics.

1. はじめに

近年、自動車への低燃費化と走行安全性の要求から、転がり抵抗が小さく、かつ制動性能の良いタイヤが強く求められている。

タイヤの転がり抵抗係数(以下RRCと呼ぶ)とJ-NCAP(独立行政法人自動車事故対策機構が公表している自動車アセスメント)に準じて実施したウェット路面での制動距離の関

係を Fig. 1 に示す。ここに示すように、RRC とウェット制動距離は二律背反関係にあり、両者の性能を同時に高次元で両立させることが困難なことがわかる。

本研究では、自動車の走行時、制動時におけるタイヤの接地面挙動に着目し、タイヤトレッドゴム材料の最適配置と接地面圧の均一化によって、RRC 低減と制動距離短縮を高次元で両立するタイヤを開発したので報告する。

*四輪開発センター

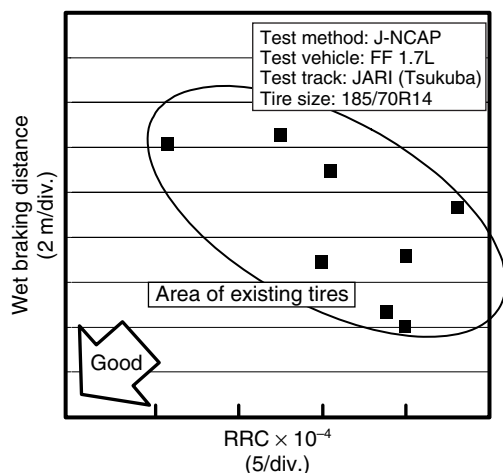


Fig. 1 Relationship between wet braking distance and RRC

2. タイヤトレッドゴムの粘弾性特性

2.1. タイヤ性能の背反性と粘弾性の関係

一般的に RRC を 10% 低減すると、車両燃費は 1-2% 向上すると報告されており⁽¹⁾、RRC は燃費への影響が大きい。RRC はタイヤの大部分を構成しているゴムや高分子繊維が転動中に受ける繰り返し変形により、エネルギーをロスすることに起因する。ゴムは一般に弾性と粘性の両方の性質を持つ「粘弾性体」と呼ばれており、粘性があるために変形時のエネルギーは完全に回復することがなく、一部は熱エネルギーとして消費される。すなわちヒステリシスロス(履歴損失)を生ずる。ヒステリシスロスは、材料の $\tan\delta$ (損失正接=損失弾性率/貯蔵弾性率)に比例するので、一般的に $\tan\delta$ を用いて表される⁽²⁾。Fig. 2 にヒステリシスロスの簡単な概念を示す。

タイヤ部材の中ではトレッド部ゴムの RRC への寄与が約 50%を占めており⁽³⁾、トレッドゴム材料の $\tan\delta$ を小さくすることにより、RRC を低減することができる。しかし、トレッド部は唯一路面と接触する部分であり、RRC だけでなく、安全性の点からウェット路面での制動性能も重要視されている。制動力はトレッドゴムの摩擦力に支配され、ゴムの摩擦力はヒステリシスロスによる摩擦力と凝着摩擦力の和で表される。実際に、実車制動距離の温度依存性がこのゴムの粘弾性特性から精度良く予測できることが証明されている⁽⁴⁾。ウェット路面における制動性能の向上へは、水膜の影響で路面とゴムの接触面積が減少し、凝着摩擦力も減少することから、ヒステリシスロスによる摩擦力の寄与が大きくなる。つまり、トレッドゴムの $\tan\delta$ を増加させることが有効な手段となる。

以上より、RRC 低減と制動性能向上では、異なる $\tan\delta$ 特性が求められていることとなるが、従来から Fig. 3 に示すようなタイヤ挙動と $\tan\delta$ の変形周波数依存性との関連付けにより、走行時と制動時のゴムへの入力周波数の違いに着

目した $\tan\delta$ コントロール手法が用いられてきている。

タイヤの RRC は、タイヤが 1 回転で一度、路面による変形を受けることによって発生する。一方、制動力はトレッド表面のゴムが、路面骨材の 0.1mm ピッチ程度の微小な凹凸に追従した細かな変形を受けることによって発生する。すなわち、それぞれの変形を周波数で整理すると、同じヒステリシスロスでも RRC は $10^1 - 10^2 \text{ Hz}$ 、制動力は $10^4 - 10^6 \text{ Hz}$ の変形入力周波数に相当することになる。実験室においては、1000Hz 以上の高周波を得ることが困難なため、粘弾性物質によく用いられる時間-温度換算則(WLF 式)でこの振動数を温度に換算すると、10Hz 程度での $\tan\delta$ 測定の場合、RRC は 50-60℃、ウェット制動性は 0℃ 付近に相当することになる⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。したがって、60℃ 付近の $\tan\delta$ が小さく、0℃ 付近の $\tan\delta$ が大きいゴムが RRC と制動性能を同時に向上できるゴムとなる。このヒステリシスロスの観点で各性能に求められるタイヤトレッドゴム材料の方向性を Table 1 にまとめた。

しかしながら、60℃ $\tan\delta$ 低減と 0℃ $\tan\delta$ 向上をねらった従来の $\tan\delta$ コントロール手法では、両者の特性を同時に向上させることは困難であった。さらに RRC と制動性能に加えて、トレッドゴム特性が大きな影響を及ぼすタイヤ性能に雪上性能がある。雪上性能の評価指標となる低温(-15℃)のゴム弾性率 E^* と 0℃ の $\tan\delta$ の関係を Fig. 4 のように

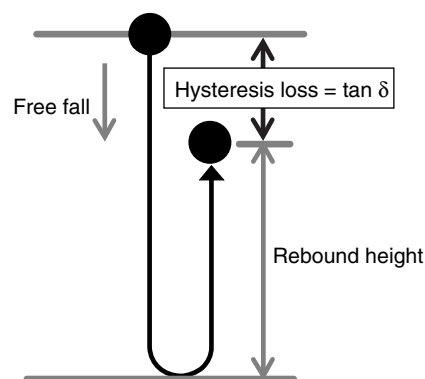


Fig. 2 Image of hysteresis loss of viscoelastic compound

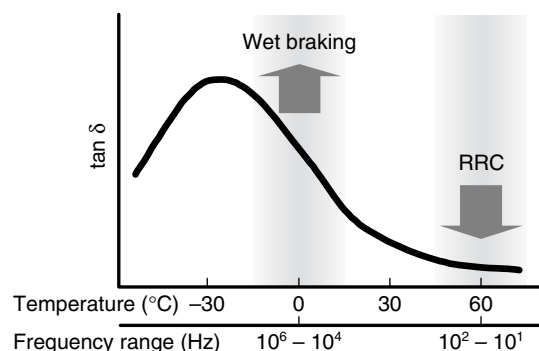
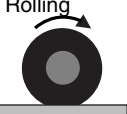


Fig. 3 Temperature dependence and frequency dependence of $\tan\delta$

Table 1 Comparison of direction of enhanced tread compound

	Phenomenon	Frequency	Index Direction
RRC	Rolling 	$10^1 - 10^2 \text{ Hz}$	$60^\circ\text{C } \tan \delta$ Small
Wet braking	Slipping 	$10^4 - 10^6 \text{ Hz}$	$0^\circ\text{C } \tan \delta$ Large

表すと、低温性能が要求されるオールシーズンタイヤ(M+Sタイヤ)と、一般の夏用タイヤでは、 $0^\circ\text{C} \tan \delta$ の分布範囲が大きく違う。すなわちオールシーズンタイヤと一般の夏用タイヤとでは、異なる低温 E^* の制約範囲の中での粘弾性コントロールがおこなわれていることがわかる。

2.2. 粘弾性特性変化とタイヤ性能の関係の検証

タイヤトレッドゴムの粘弾性特性とタイヤ性能の関係を明確にするため、量産タイヤのトレッドゴムをベースに、次のようなゴムを試作した。

A: $0^\circ\text{C} \tan \delta$ を増大

B: $60^\circ\text{C} \tan \delta$ を減少

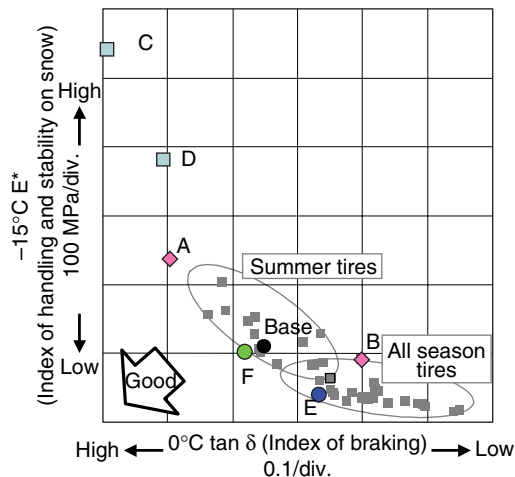
C: $0^\circ\text{C} \tan \delta$ を増大(-15°C の E^* の増大は許容)

D: $60^\circ\text{C} \tan \delta$ を減少(-15°C の E^* の増大は許容)

E: -15°C の E^* をオールシーズンタイヤ許容範囲とし、 $0^\circ\text{C} \tan \delta$ 増大、 $60^\circ\text{C} \tan \delta$ 減少

F: -15°C の E^* を夏用タイヤ許容範囲とし、 $0^\circ\text{C} \tan \delta$ 増大、 $60^\circ\text{C} \tan \delta$ 減少

なお、上記の物性を実現するためのゴム配合の考え方は次の通りである。ゴムの粘弾性特性を大きく左右するのは、

Fig. 4 Relationship between $0^\circ\text{C } \tan \delta$ and $-15^\circ\text{C } E^*$

ポリマ種別と無機フィラ(カーボンブラック、シリカ)の種別、配合量であり、 60°C の $\tan \delta$ を小さくするためには、フィラの分散性、反応性を向上させる必要がある。そこで溶液重合スチレンブタジエンゴム(S-SBR)の末端変性タイプをメインポリマに選定し、補強効率を上げる手法を用いた。 0°C $\tan \delta$ の増大は、フィラの高充填によりおこない、 -15°C の E^* の調整は、ブタジエンラバ(BR)の添加量、および添加オイルの最適化にておこなった。

なお、量産タイヤトレッドゴムとゴム A - F の粘弾性的な位置づけを Fig. 4, 5 に示す。

A - D のゴムを用いて試作したタイヤ A - D と量産タイヤの性能評価結果は Fig. 6 のようになった。タイヤ A と B は RRC と制動性能の二律背反ライン上を動くのみであったのに対し、 -15°C の E^* の増大は許容し、雪上性能を無視したタイヤ C, D では制動性能と RRC がともに向上していることが確認できた。以上のことから、雪上性能を維持したままでは粘弾性コントロールのみによる制動性能と RRC の向上には限界があり、粘弾性コントロールと併用する新たな考え方が必要であるといえる。

そこで制動性能と RRC を同時に向上させる新たな切り口として、車両の基本性能がタイヤ接地面と路面との力のやり取りにより発揮されることに着目し、制動時、定常走行時、雪上走行時におけるタイヤの接地面挙動解析を詳細におこなった。

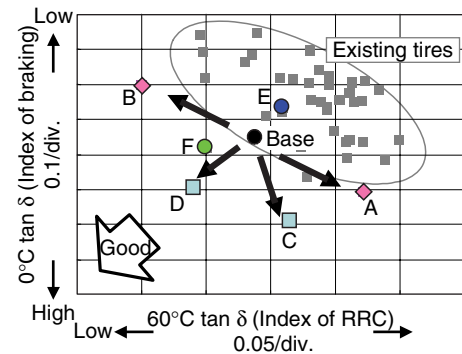
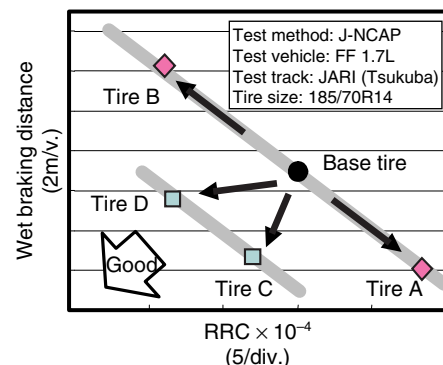
Fig. 5 Relationship between $60^\circ\text{C } \tan \delta$ and $0^\circ\text{C } \tan \delta$ 

Fig. 6 Relationship between wet braking distance and RRC

3. 各性能における接地面挙動解析

タイヤの接地面はタイヤが路面と接している部分であり、同一タイヤにおいても空気圧や負荷荷重により、接地面形状や圧力分布が変化する。さらに、定常走行時や制動時、雪上走行時で接地面の状態はさまざまに変化する。本研究では接地部の中でもそれぞれの性能を発揮させるのに寄与する部位が異なると考え、従来単一ゴム材料にて構成されていたトレッド部の各部位に最適な材料を配置することにより性能向上が図れると予測し、挙動解析をおこなった。

なお、本研究では接地面の周方向の長さを接地長、幅方向の長さを接地幅、接地幅方向の中央部をセンタ部、端部をショルダ部と呼び、これらを Fig. 7 に示す。

3.1. 制動時の接地面挙動解析

J-NCAP では 100km/h からのフル制動がおこなわれる。Fig. 8 は J-NCAP に準じて実施した湿潤路面での制動テストにおけるタイヤ荷重の推移であるが、1.7L FF 車では 0.2 秒間で前輪の荷重が定常荷重から制動最大荷重まで到達しており、前輪への荷重移動が非常に短い時間で起こることがわかる。

このような状態下でのタイヤの接地面挙動を把握するた

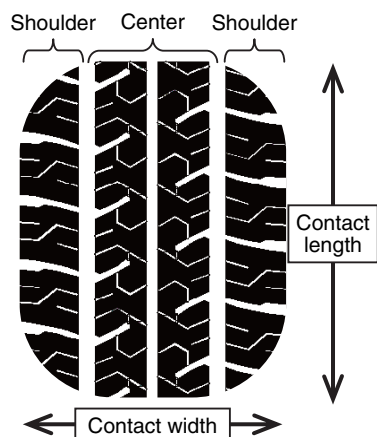


Fig. 7 Definition of footprint (Contact patch)

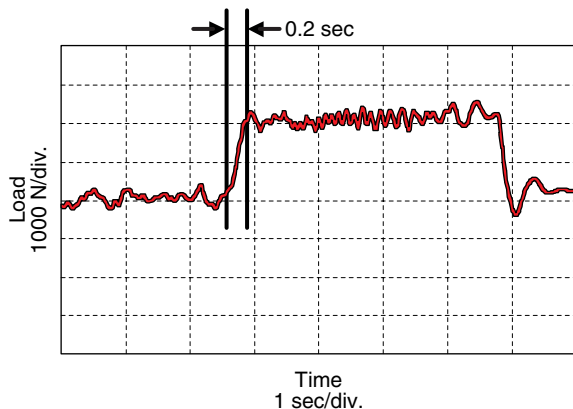


Fig. 8 Front wheel load variation in wet braking

め、タイヤ単体を使用して、Fig. 9に示すように、電磁型加振機にて 5Hz の加振をおこない、120Hz の応答性を持つ面圧センサ(センササイズ: 75 × 75mm, 分解能: 2mm)を用いて接地面圧分布測定を実施した。また、比較のために静的に制動荷重を与えた場合(制動荷重にて接地面圧力が飽和した状態)の測定もおこなった。接地面圧分布測定範囲および解析範囲は Fig. 10 に、面圧測定結果を Fig. 11 に示す。

Fig. 11より、動的接地圧測定結果を定常荷重と制動最大荷重で比較すると、センタ部の接地圧は変化がないのに対し、ショルダ部接地圧変化が大きく、タイヤ接地面内において、制動時に面圧負荷が大きいのはショルダ部であること

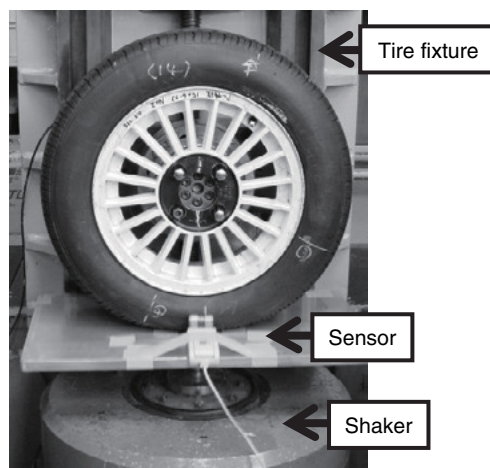


Fig. 9 Dynamic contact patch measuring equipment

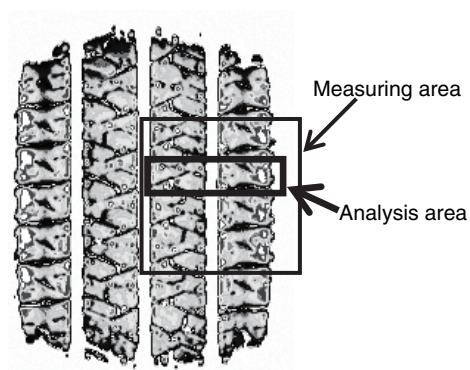


Fig. 10 Measuring and analysis areas of contact patch

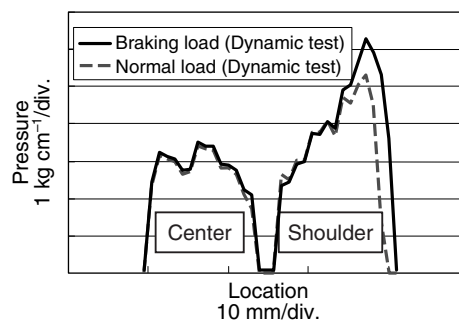


Fig. 11 Comparison of contact patch pressure distribution in normal load and braking load

がわかる。また Fig. 12 に示すように、動的接地圧と静的接地圧を比較すると、動的に荷重を与えたほうがショルダ部接地圧が高くなることわかる。

一般的にゴムは接地圧が低いほど摩擦係数 μ が高いため、面圧が不均一な現象を取り除くことにより、制動距離の短縮ができると考え、同一トレッドゴムを用い、Fig. 13に示すような端部接地圧の高いタイヤと接地圧が均一化されたタイヤを試作した。これらのタイヤで実車のウェット制動距離を比較したところ、接地圧均一タイヤは端部接地圧が

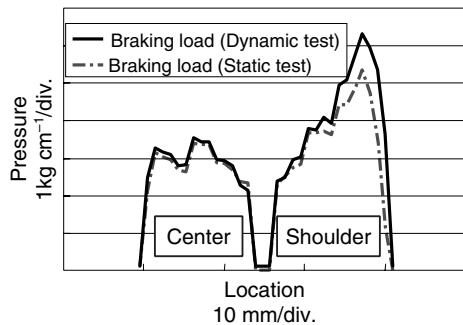


Fig. 12 Comparison of contact patch pressure distribution in dynamic and static tests

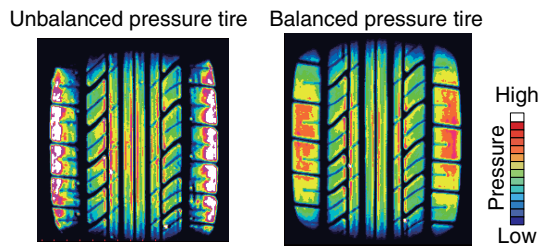


Fig. 13 Comparison of contact patch pressure under braking load

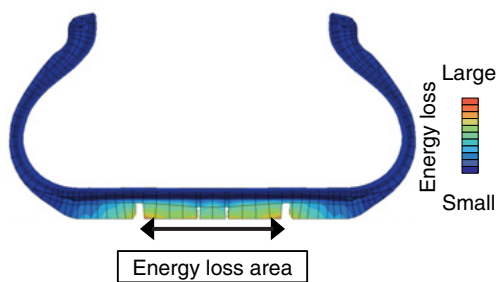


Fig. 14 Hysteresis loss distribution by finite element method analysis

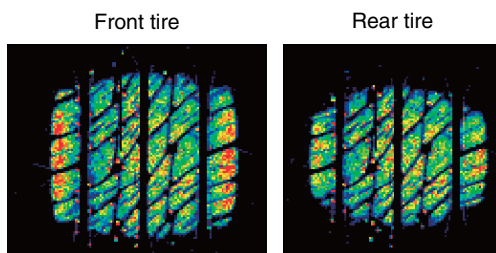


Fig. 15 Comparison of contact pressure

Table 2 Target tire characteristics

Performance goal	Part of contact patch	Index of tread compound property	Direction
Braking	Shoulder	0°C tan δ	Up
RRC	Center	60°C tan δ	Down
Snow handling	Center	-15 °C E*	Down

高いタイヤよりも 3m 以上制動距離が短くなり、接地圧の均一化が制動距離の短縮に効果があることを確認した。

3.2. 定常走行時の接地面挙動解析

定常走行時のタイヤの接地面挙動を解析するため、タイヤを構成する各部材の材料物性を入力し、定常状態での直進走行を想定したFEM解析を実施した。その結果、Fig. 14に示すように、センタ部ゴムのエネルギー損失が大きく、タイヤのRRCにはセンタ部ゴムの性能寄与が大きいことがわかった。

3.3. 雪上走行時の接地面挙動解析

雪上でタイヤが摩擦力を発生するメカニズムは圧縮抵抗、雪柱剪断力、粘着摩擦力、剪断摩擦力(エッジ効果)が主体となる⁽⁸⁾。すなわち、トレッドパターンデザインと低温でのゴムの弾性率が雪上性能を決定するといえ、FF車両において雪上走行における安定性を確保するためには、後輪タイヤの接地状態、つまり低負荷荷重での接地面挙動が重要となる。Fig. 15はFF 2.0L車の前輪と後輪の接地面を示したものであるが、後輪荷重では接地面中のセンタゴムの占有面積が大きく、センタゴムの低温時の柔軟性確保が必要となることがわかる。

4. タイヤ性能向上技術と効果

以上の実車でのタイヤ接地面挙動解析から、求める性能とそれに寄与する部位、ゴム特性の方向性を検討した結果をTable 2にまとめる。これらを具現化するため、Fig. 16に示すような、センタ部にはRRC低減と雪上性能確保に有効なゴムを、ショルダ部にウェット制動性能に有効なゴムを配置した分割トレッド構造を提案する。またそれらのゴ

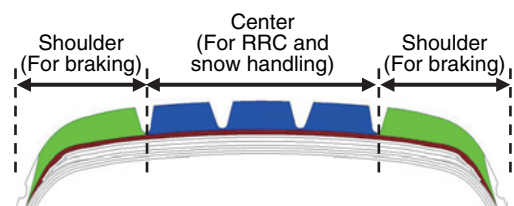


Fig. 16 Segmentation of tread construction

ム性能が十分に発揮できるように、接地面全体の圧力分布を均一化する。

4.1. 適用ゴム材料

Table 2のゴム特性の方向性から、センタ部とショルダ部それぞれに最適なゴムとして、前述したゴム E と F を配置する。

4.2. タイヤ接地圧分布の均一化

タイヤの接地圧分布の均一化は以下の手法でおこなった。Fig. 17にタイヤの断面形状を示す。接地圧分布の均一化はクラウン形状の最適化により実施できる⁽⁹⁾ため、目的関数を最小接地圧分散とし、設計変数をクラウン R 形状に設定して、最適断面形状を FEM 計算により求めた。その結果を加硫型形状とする。

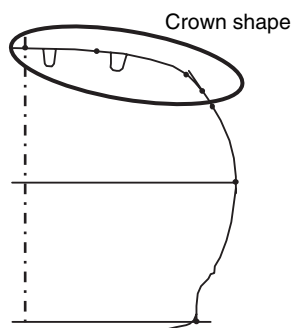


Fig. 17 Cross section of tire forming die

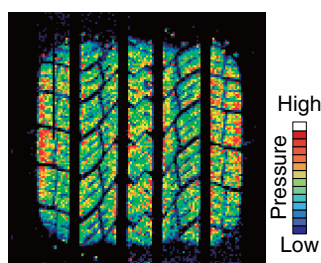


Fig. 18 Contact patch pressure of developed tire at braking load

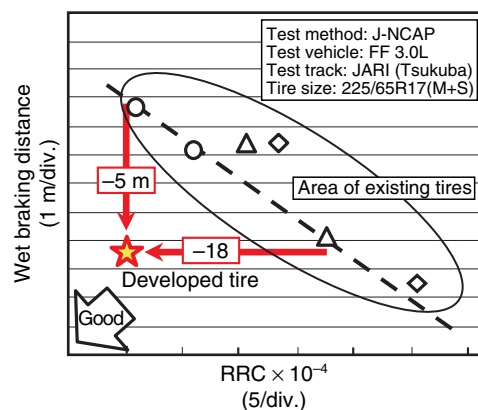


Fig. 19 Relationship between wet braking distance and RRC

4.3. 性能確認結果

3分割トレッド構造に開発ゴムの最適配置をおこない、クラウン R 形状を最適化したタイヤの性能を確認した。接地圧形状は Fig. 18 に示すように、制動最大荷重において均一化されていた。RRC の計測と、実車ウェット制動距離 (J-NCAP方式) の計測結果の関係を現状の単一トレッドゴムタイヤの結果とともに Fig. 19 に示す。開発タイヤは RRC 同等タイヤと比較して制動距離が 5m 短縮し、制動距離同等タイヤと比較すると、RRC を 18 低減することができた。すなわち、本研究により、背反性能であった RRC と制動性能を同時に高次元で向上させることができた。

また雪上での操縦安定性能 (直進トレース性、旋回トレース性、制動性、駆動性) も確保でき、本技術は、タイヤの基本性能 (耐久性、耐摩耗性など) や商品性 (操縦安定性、乗り心地、ロードノイズなど) に悪影響をおよぼさないことも確認できた。

5. まとめ

本研究の成果として以下のことが得られた。

- (1) トレッドゴムの粘弾性特性から、タイヤ性能においては雪上性能の確保が制約となり、粘弾性コントロールのみによる制動性能と RRC を同時に向上させるには限界がある。
- (2) 制動時のタイヤ挙動解析から、タイヤ接地面において制動性能に大きく寄与しているのは、ショルダ部のゴムであり、またゴムの摩擦性能を効果的に発揮させるには、接地面内の面圧分布を均一にすることが有効である。
- (3) 定常走行時を想定した FEM 解析から、転がり抵抗に寄与が高いのは接地面センタ部である。
- (4) FF 車において雪上性能を確保するためには、後輪で接地面積の大部分を占めるセンタ部のゴムの低温弾性率の寄与が大きい。
- (5) トレッドを分割構造として、制動性能、転がり抵抗、雪上性能に有効な特性を有するゴムを最適配置すること、接地面圧分布が均一になるようにタイヤの断面形状を設計することにより、従来のタイヤに対し、転がり抵抗維持ではウェット制動距離を 5m 短縮、制動距離維持では RRC を 18 低減することができた。

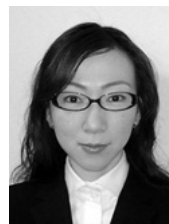
6. おわりに

本技術を用いたタイヤを、SUV 車の 2.0L 仕様に適用した。車両の開発目標にあわせ、RRC 低減を主眼においてタイヤを開発することにより、制動性能を損なわずに、10・15 モード燃費において約 1.5% の燃費を改善することができた。

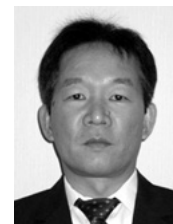
参考文献

- (1) Futamura, S., Scuring, D.: Rolling Loss of Pneumatic Highway Tires in The Eighties, Rubber Chem. Tecchnol., Vol. 63, p.315(1990)
- (2) 横浜ゴム株式会社編：ころがり抵抗のメカニズム，自動車用タイヤの研究，山海堂，p.151-154(1995)
- (3) 横浜ゴム株式会社編：ころがり抵抗のメカニズム，自動車用タイヤの研究，山海堂，p.155-156(1995)
- (4) 川上恵夫，長谷裕之，溝根哲也：タイヤトレッドゴムの粘弾性と実車制動距離の温度依存性の関係，Honda R&D Technical Review, Vol.17, No.1, p.88-93
- (5) 村松凌，高橋英明：転がり抵抗低減のための材料技術，日本ゴム協会誌，第 73 巻，p.103-109(2000)
- (6) 村岡清繁：タイヤ用ゴムにとって粘弾性特性とは，日本ゴム協会誌，第 74 巻，p.242-247(2001)
- (7) 小澤洋一，芥川恵造，柳澤和宏，平田靖：タイヤにおける環境対応型新材料技術，日本ゴム協会誌，第77巻，p.219-225(2004)
- (8) 横浜ゴム株式会社編：雪氷上でのタイヤ摩擦，自動車用タイヤの研究，山海堂，p.117-119(1995)
- (9) 株式会社ブリヂストン編：接地圧分布と偏磨耗性，自動車用タイヤの基礎と実際，山海堂，p.211-213(2006)

■ 著 者 ■



茂木恵美子



溝根 哲也



長谷 裕之



西谷 広滋