

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

Prediction of Temperature Dependence of Braking Distance through Bench Test

川 上 恵 夫*
Ayao KAWAKAMI

長 谷 裕 之*
Hiroyuki HASE

溝 根 哲 也*
Tetsuya MIZONE

要 旨

車両の制動距離は路面温度に影響されることは既知の事実である。路面温度によって制動距離が変化するのはタイヤトレッドゴムの粘弾性特性が影響しているということがわかった。そこでタイヤトレッドゴムの摩擦と粘弾性について着目し考察をおこなった。この考察から、タイヤトレッドゴムの粘弾性特性の台上試験結果と任意の路面温度における最小限の実車制動距離試験結果から広範囲な路面温度での制動距離を予測する手法を開発した。

ABSTRACT

The temperature of the road surface is known to affect vehicle braking distance. This study demonstrated that the variation in wet braking distance with road temperature is significantly affected by the viscoelastic properties of the tread rubber of the tires. On the basis of this relation, a method of bench testing the viscoelastic properties of tires has been developed which enables the prediction of braking distance for a wide range of road temperatures.

1. まえがき

制動距離性能はアクティブセーフティ性能のなかで重要な性能のひとつである。その性能は日本の自動車アセスメントで結果が公表されており、アメリカやヨーロッパにおいても試験の準備が進められている。

世界各国の自動車雑誌においても制動距離を独自に評価しており、その結果はユーザの関心項目のひとつとなっている。

制動距離の結果に影響する要因として Fig. 1 の様な因子が考えられる⁽¹⁾。

これらの影響因子のうち、人による操作方法や計測器、車両諸元や試験路面については、試験方法を統一することで

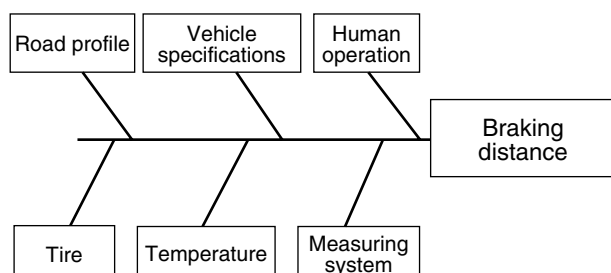


Fig. 1 Cause and effect diagram for braking distance

*栃木研究所

ある程度定常化することが出来るが、路面温度による制動距離への影響を把握するには路面温度低温域から高温域に渡っての実車試験が必要である。

制動距離の路面温度における影響を把握するには、長期間の実車での試験が必要であり限られた期間での評価が困難であった。

本研究ではタイヤトレッドゴムの台上粘弾性特性に着目し最小限の実車試験結果から、路面温度によって変化する制動距離を予測する手法を開発する。これによってタイヤの性能把握をより容易にできる手法を提供するものである。

2. タイヤ違いによる路面温度依存性

Fig. 2 に乾燥路面と湿潤路面での路面温度の変化に対する制動距離の変化を示す。この事例のようにタイヤによっては、ある特定の温度領域でタイヤを評価するだけでは、市場のユーザの使い勝手条件を網羅することが出来ない。

ここで、試験場所は本田技術研究所栃木ブルーピングセンター総合路でおこない、試験方法は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。ただし路面温度範囲に関しては規定温度の上下限を越えた領域でも試験を実施した。また、試験車

両は FF 2.0L ミニバン車を使用した。

このような湿潤路面での路面温度依存性をタイヤ違いにより確認するために同一の車両を使用した広範囲な路面温度での制動距離結果を Fig. 3 に示す。また試験に使用したタイヤを Table 1 に示す。

試験場所は日本自動車研究所総合試験路でおこない、試験方法は J-NCAP に準じて実施した。ただし路面温度範囲に関しては規定温度の上下限を越えた領域でも試験を実施した。また、試験車両は FF 1.5L 乗用車を使用した。

この結果より、制動距離の路面温度依存性はタイヤによって傾向が異なるものがあることが確認できた。

タイヤ A の路面温度に対する制動距離は低温域では制動距離が短く、高温域で制動距離が長くなる。一方、タイヤ B はタイヤ A と比べて路面温度による制動距離の変化は少ないが、低温域、及び高温域で制動距離が長くなる。また、タイヤ C はタイヤ A と B の中間的な位置づけにありタイヤ A と同様に高温域では制動距離が長くなるが、その傾きはタイヤ A より小さい。

Test track: Honda R&D, Ltd Tochigi Proving Ground
Test method: J-NCAP (with change to specified road surface temperature)
Test vehicle: FF 2.0L Minivan

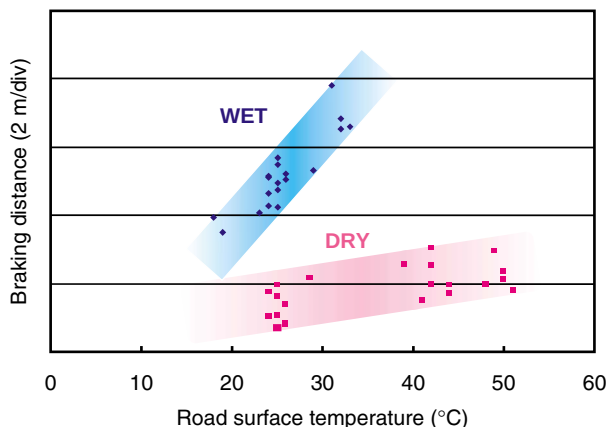


Fig. 2 Wet and dry braking distance vs road surface temperature

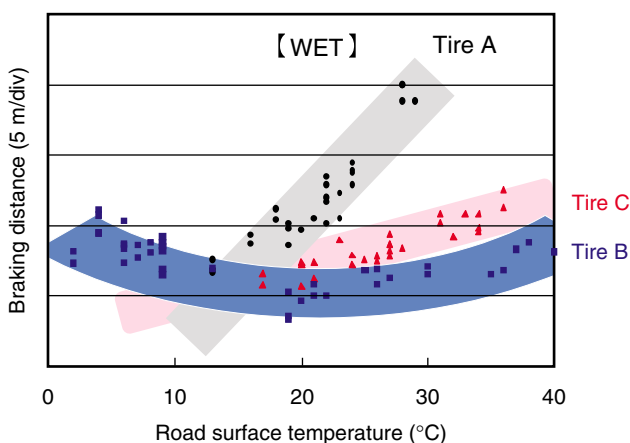


Fig. 3 Road temperature dependence of braking distance by tire

Table 1 Tire characteristics

	Tire A	Tire B	Tire C	Tire D	Tire E
Tread compound	1	2	3	4	5
Construction	a	b	c	d	d
Tread pattern	I	II	III	IV	IV
Tire size	185/70 R14	185/70 R14	185/70 R14	185/70 R14	185/70 R14

Fig. 3 の 3 種のタイヤはそれぞれトレッドゴム、構造、パターンが異なっているが、これらの要素の中でどの要素が制動距離の温度依存性に影響を与えているのか検証するためトレッドゴム、構造、パターンのみを変更したタイヤを作製して制動距離試験を実施した。

実車での制動距離試験を実施して温度依存性への影響を確認したところトレッドゴム違いが温度依存性に影響していることがわかった。

Fig. 4 はタイヤ構造、パターン、サイズは同一でトレッドゴムのみが異なるタイヤ D、タイヤ E の制動距離試験結果である。

トレッドゴムのみを変更したタイヤ D とタイヤ E とでは異なった温度依存性を示しており、トレッドゴムの違いによって制動距離の温度依存性が生ずることがわかった。

従って、制動距離の温度依存性にはタイヤのトレッドゴムが影響しているということが確認された。

3. メカニズムの考察

3.1. トレッドゴムの摩擦と粘弾性

タイヤの摩擦力はトレッドゴムのヒステリシスによる摩擦力 F_H と凝着による摩擦力 F_A の和で表される (Fig. 5)。

ヒステリシス摩擦力 F_H とは路面の凹凸によりゴムが比較的大きな変形を受けて発生するエネルギーロスによる摩擦力のことであり、ゴムの変形による位相遅れ (ヒステリシスロス: $\tan \delta$) が大きいゴムほどヒステリシス摩擦力 F_H は大きくなる。

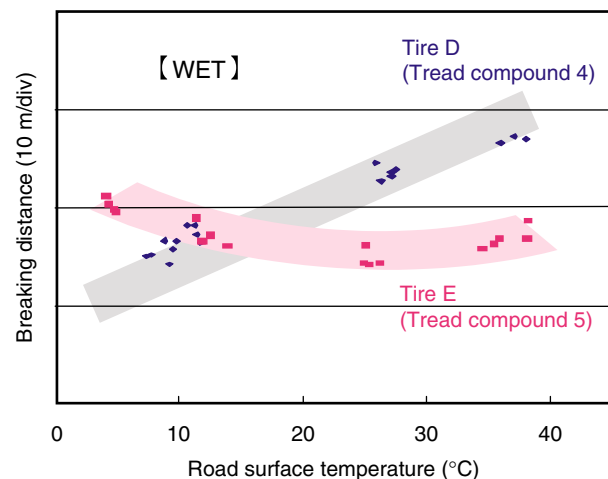


Fig. 4 Road temperature dependence of braking distance by tread compound

制動距離は制動力に反比例することから、仮にヒステリシス摩擦力 F_H による制動距離を X_H とおくと次式と仮定出来る。

$$X_H \propto 1/F_H \propto 1/\tan \delta \quad (1)$$

凝着摩擦力 F_A とはトレッドゴムと路面骨材の凝着(分子間力)によって生じるエネルギーロスによるものである。

したがってタイヤの実接触面積が大きい方が凝着摩擦力 F_A は大きくなる⁽²⁾。

凝着摩擦力 $F_A = M(\text{接触面積}) \cdot S(\text{単位面積当たりのトレッド剛性})$

ミクロ的な視点において、接触面積 M は Fig. 5 に示される路面骨材の表面凸凹に追従するような微小変形状態でのゴム材料の弾性率 E^* に関係し、低温域では E^* の上昇に反比例して実接触面積は低下してくると思われる。これにより、仮に凝着摩擦力 F_A による制動距離を X_A とおくと、低温域では次式の関係があると仮定出来る。

$$X_A \propto 1/F_A \propto 1/M \propto E^* \quad (2)$$

3.2. 予測式

制動距離とトレッドゴムの摩擦に関する考察から制動距離の路面温度依存性に対する予測式を考えた。

制動距離の路面温度による変化分 ΔX は、ヒステリシス摩擦力 F_H が路面温度によって変化することによる制動距離の変化分 ΔX_H と凝着摩擦力 F_A が路面温度によって変化することによる制動距離の変化分 ΔX_A の和で表すことが出来る。

$$\Delta X = \Delta X_H + \Delta X_A$$

過去の知見⁽³⁾からも、湿潤路における制動距離はタイヤトレッドゴムの粘弾性特性試験における 0°C 付近の $\tan \delta$ と関係があることがわかっている。

これは粘弾性試験における $\tan \delta$ の 0°C 付近の値が大きいほどヒステリシス摩擦力 F_H が大きく湿潤路での制動距離が短くなるということである。

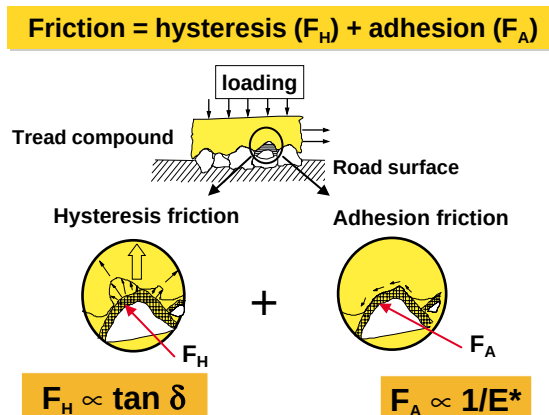


Fig. 5 Friction of tread compound

ここで制動距離の路面温度依存性において高温域で制動距離が長くなるのは粘弾性試験における $\tan \delta$ の 0°C 付近の温度勾配が影響していると考え、式を仮定した。

$$\Delta X_H = f(t) \times a \quad (3)$$

a : 0°C 付近の $\tan \delta$ の傾き

$f(t)$: 路面温度 t の 1 次式

また $f(t)$ は路面温度上昇に対して制動距離が比例的に伸びる傾向にあることから路面温度 t に対して 1 次式の関数と仮定した。

次に路面温度低温域で制動距離が長くなる要因として弾性率 E^* の 0°C 付近の大きさが影響していると考え、式を仮定した。

$$\Delta X_A = g(t) \times b \quad (4)$$

b : 0°C 付近の E^*

$g(t)$: $1/t$ の 1 次式

また $g(t)$ は路面温度が低温域で制動距離が反比例的に長くなることから路面温度 t に対して $1/t$ の関数と仮定した。

したがって予測したい路面温度 t_a での制動距離を X_a とすると、基準となる路面温度 t_c での制動距離 X_c に、路面温度による制動距離変化分を足した次式で表される。

$$X_a = \Delta X_H + \Delta X_A + X_c \quad (5)$$

ここで基準となる制動距離 X_c は車両諸元やタイヤサイズで異なるため実車で計測することを前提とした。

つまり

$$X_a = f(t) \times a + g(t) \times b + X_c \quad (6)$$

という式で表すことが出来る。

3.3. 路面温度依存性と粘弾性特性の関係

Fig. 4 で用いたタイヤ D、タイヤ E の $\tan \delta$ 、 E^* の傾向を検証するためトレッドゴムからテストピースを切り出し、粘弾性特性をスペクトロメータにて計測した (Fig. 6)。

その粘弾性試験結果を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。

Fig. 4 のタイヤ D は路面温度の上昇に対してほぼ比例的に制動距離が伸びている。この原因は、Fig. 7 で示される様にトレッドゴム 4 のヒステリシス摩擦力 F_H と相関関係にある 0°C 付近の $\tan \delta$ が 0°C 付近より高温になるに従って低下して行くためと考えられる。

また、タイヤ E に対しタイヤ D が路面温度 20°C から 30°C 付近で制動距離の増加傾向が大きいのは、トレッドゴム 5 に対してトレッドゴム 4 の $\tan \delta$ が 0°C 付近における高温側の低下傾向が大きいからと考えられる。

一方、Fig. 4 のタイヤ E は特に低温域で路面温度の低下に対して反比例的に制動距離が伸びている。

この原因は Fig. 8 に示されるようにトレッドゴムがある一定以上の路面温度領域では安定した接触面積を確保しているが、低温になるに従い、トレッドゴムの E^* が反比例的に上昇し、接触面積が小さくなることにより凝着摩擦力が減少したためと考えられる。

また、タイヤDに対しタイヤEが低温域で制動距離の増加傾向が大きいのはトレッドゴム4に対しトレッドゴム5の低温域での E^* が大きいからと考えられる。

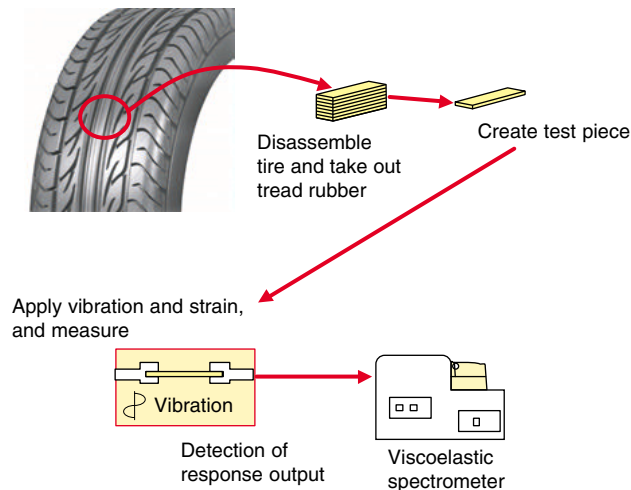


Fig. 6 Measurement method for viscoelasticity of rubber

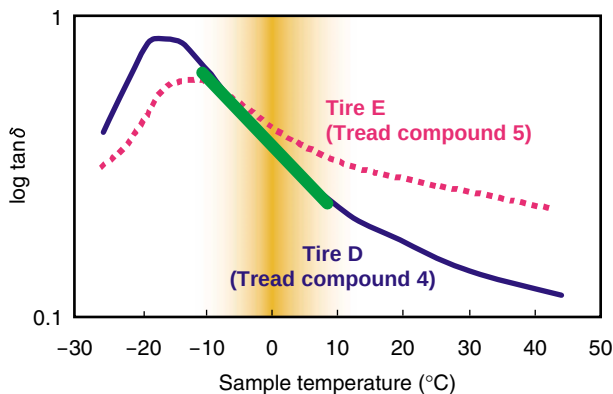


Fig. 7 Viscoelasticity measurements for Tires D and E

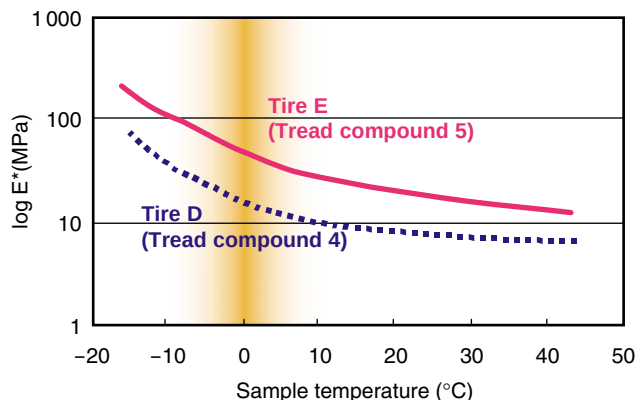


Fig. 8 Viscoelasticity measurements for Tires D and E

上記の式にタイヤD, Eの実車制動距離結果と台上粘弾性スペクトロメーターで求めたトレッドゴム4, 5の $\tan \delta$, E^* を用い、最小二乗法による重相関解析をおこなった。この結果により予測式の係数を設定し予測式を決定した。

得られた予測式を用い、タイヤD, タイヤEについて路面温度10°Cの実車制動距離をもとにして他の路面温度での制動距離を予測した結果と実測制動距離の相関を確認した (Fig. 9, Fig. 10)。この結果より制動距離の温度依存性を予測するうえで、トレッドゴム粘弾性特性の温度依存性に着目した予測式の仮説が検証された。

4. 予測手法の適用結果

予測式立案には2種のトレッドゴムを使用したけど、そのトレッドゴムとは異なるゴムの予測に関して検証した。

また、トレッドパターンや車両およびタイヤ(サイズ、構造)についても予測に関して検証を実施した。

試験条件を Table 2 に示す。

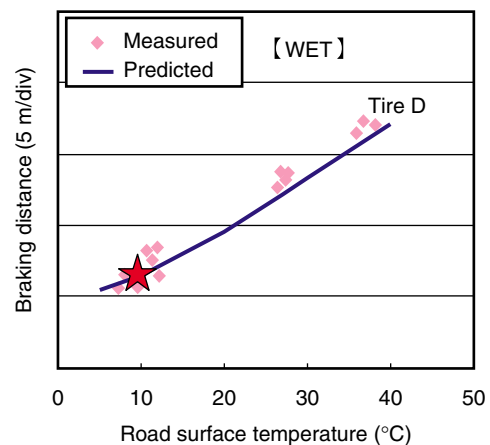


Fig. 9 Road surface temperature dependence of Tire D Prediction based on results of measurement at 10°C

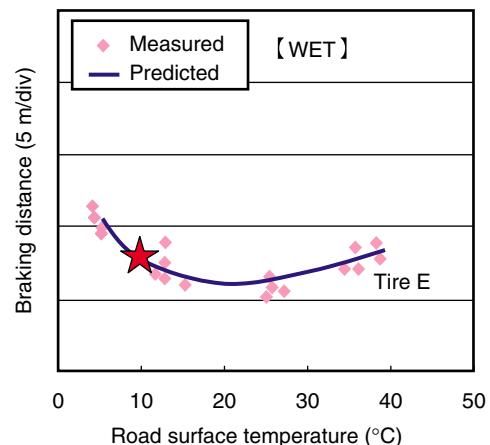


Fig. 10 Road surface temperature dependence of Tire E Prediction based on results of measurement at 10°C

Table 2 Tire characteristic

	1	2		3	
	FF 1.5 L Passenger Tire F	FF 1.5 L Passenger Tire G	FF 1.5 L Passenger Tire H	FF 0.66 L Passenger Tire I	FF 2.4 L Minivan Tire J
Tread Compound	6	4	5	7	8
Construction	d	d	d	e	f
Tread pattern	IV	V	V	VI	VII
Tire size	185/70R14	185/70R14	185/70R14	155/65R13	215/60R16

4.1. トレッドゴム違いによる検証

タイヤDに対して、トレッドゴムのみを6に変更したタイヤFを製作した。

タイヤFの路面温度 10℃の実車試験結果から予測した結果と路面温度依存性を実車で試験した結果を Fig. 11 に示す。

このようにトレッドゴムを変更しても実車試験結果との関係はよく一致している。

4.2. トレッドパターン違いによる検証

タイヤD, Eに対してトレッドパターンのみを変更したタイヤG, Hを製作した。

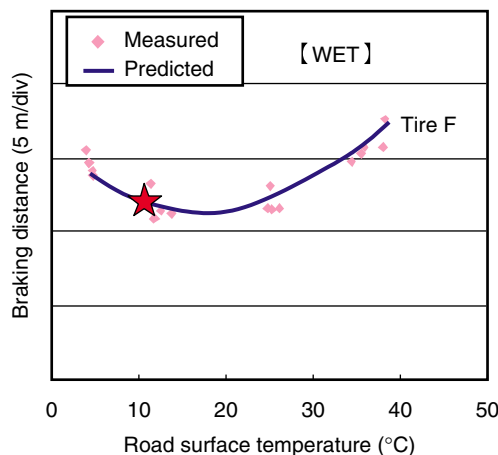


Fig. 11 Road surface temperature dependence of Tire F
Prediction based on results of measurement at 10°C

タイヤG, Hの路面温度10℃の実車試験結果から予測した結果と路面温度依存性を実車で試験した結果をFig. 12に示す。

このようにトレッドパターンを変更しても実車試験結果との関係はよく一致している。

4.3. 車両およびタイヤ違いによる検証

最後に車両を FF ミニバンおよび FF 軽乗用車での検証を実施した。

路面温度10℃の実車試験結果から予測した結果と路面温度依存性を実車で試験した結果を Fig. 13, Fig. 14 に示す。

このように車両、タイヤ(トレッドゴム、構造、パターン、サイズ)違いにおいても実車試験結果との関係はよく一致している。

以上の様に、トレッドゴム、トレッドパターンや車両、タイヤ(サイズ、構造)の違いにおける検証でも実車制動試験結果とトレッドゴムの粘弾性特性からの予測結果は一致しており、予測式の汎用性が検証できた。

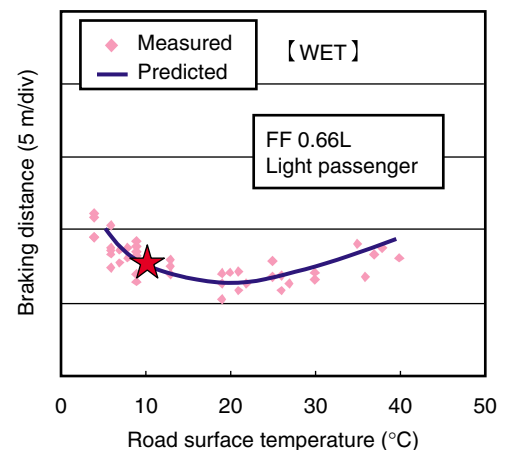


Fig. 13 Verification of by varying tires and vehicles
Prediction based on results of measurement at 10°C

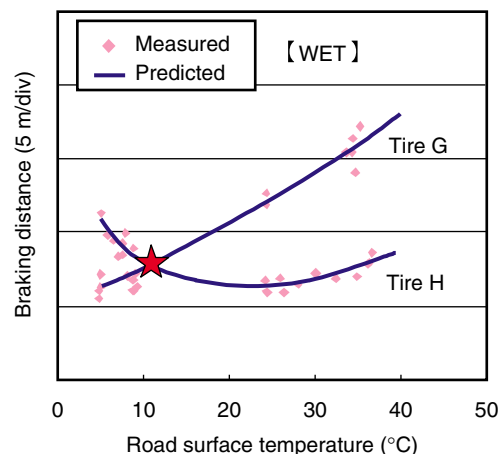


Fig. 12 Verification of accuracy by varying tread pattern
Prediction based on results of measurement at 10°C

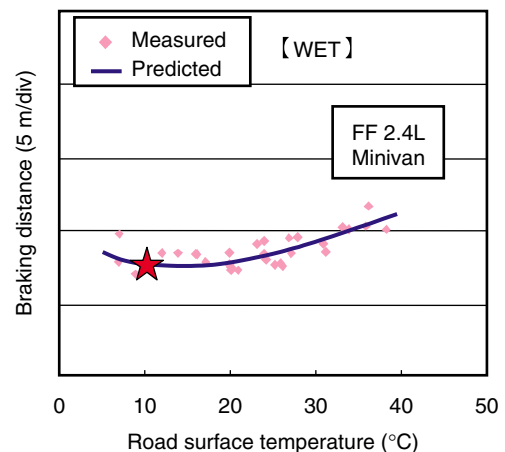


Fig. 14 Verification of by varying tires and vehicles
Prediction based on results of measurement at 10°C

5. まとめ

本研究により以下のことがわかった。

- (1) 同一車両にて広範囲な路面温度でのタイヤ違いによる制動距離を測定した結果、制動距離の路面温度依存性はタイヤによって異なることを実験より定量的に示すことが出来た。さらに、制動距離の路面温度依存性にはタイヤトレッドゴムのコンパウンドが影響しているということがわかった。
- (2) タイヤトレッドゴムの台上粘弾性特性結果と任意の路面温度での実車による制動距離結果から広範囲な路面温度での制動距離を予測する手法を確立した。

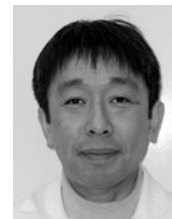
参考文献

- (1) 財)日本自動車研究所:ブレーキ性能試験結果に影響を与える要因に関する調査, p.1-9(1999)
- (2) 加茂伸哉, 桜井正幸, 鮑力民, 三橋健八, 網野直也:加硫ゴムの硬さ測定時における表面歪と摩擦の関連性, 第 51 回レオロジー討論会 講演要旨集 p.309(2003)
- (3) 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, 74, p.6(2001)

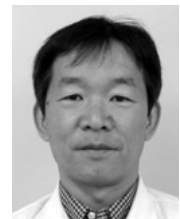
■著 者■



川上 恵夫



長谷 裕之



溝根 哲也