

(技術資料)

高速タイヤユニフォミティマシン

A New System for Evaluating High-speed Tires



野中俊克*
Toshikatsu Nonaka



松下康広*
Yasuhiro Matsushita



本家浩一***(工博)
Dr. Koichi Honke

The demand for a system that can effectively and accurately evaluate the performance of high-speed cars and tires has grown dramatically in recent years. As a result the automotive industry has been demanding the development of a system that can effectively evaluate the performance of such cars and tires under high-speed conditions. Kobe Steel developed a revolutionary new high-speed tire uniformity machine in 2003. The machine has much better performance characteristics than the first such machine developed in 1988 by Kobe Steel.

まえがき = 近年自動車は、高性能化、高機能化の追求に加え、快適な空間を目指し、安心感のある操縦性、走行安定性、及び静粛性が重要視されてきている。従って、路面との接点であるタイヤに対しても静粛性と乗心地が要求され、多種多様な研究開発が行われてきている。

当社は、タイヤのユニフォミティマシンの製作販売を1967年に開始し、1988年には高速タイヤユニフォミティマシン1号機を開発販売した。今回、さらに高性能な試験機を開発したので、本稿でその概要を紹介する。

1. 概要

タイヤは、ゴムや化学繊維、スチールコードなど各種材料を積層して作られている製品であるため、寸法や剛性の不均一、及び重量アンバランスが存在する。このような状態でタイヤが回転すると、路面より周期的に変動する成分の反力が発生する。これらのタイヤの不均一性を総称してタイヤのユニフォミティという。

従来タイヤのユニフォミティ試験では、JIS D 4233で規定されたタイヤの回転速度(60r/min)で測定されている。しかしこの回転数では、例えばタイヤ外径700mmの場合車輪走行速度換算では約8km/hと低速のため、高速走行時に発生するタイヤのユニフォミティ成分を正確に予測することができない。そのため、高速領域でも正確に測定できる高速タイヤユニフォミティマシンが必要となってきていた。加えて、高速走行時の高次数成分の解析が求められてきた。そこで今回、従来以上に高速回転可能で、より高次までのユニフォミティが測定可能な、高性能化した試験機の開発を手がけた。

2. 高速タイヤユニフォミティマシン(Model:100D26-LH)の構造

2.1 基本仕様

Model: 100D26-LH は、タイヤの実験、研究を目的と

した実験研究用の高速タイヤユニフォミティマシンで、当社の従来型高速機 Model: PC-UXO-L5 との互換性を維持しつつ、さらに高精度、高性能、高剛性をコンセプトとした試験機である。

表1に100D26-LHの基本仕様を、写真1に外観を示す。

2.2 機械構成

機械構成は、高剛性を特に意識した構造となっており、タイヤスピンドル軸を固定側としドラム側を駆動側とした。スピンドル軸には計測センサを組み込み、駆動側のドラムはDCモータで測定速度まで安定した回転を得られるようになっている。さらにドラム全体を、ACサーボモータとスクリュジャッキで摺動させ荷重制御を行うことにより、測定荷重をタイヤに加えている。図1に装置全体図を示す。

2.3 測定系

試験タイヤが装着されるスピンドル軸に配置された複

表1 高速タイヤユニフォミティマシン基本仕様
Table 1 Specifications of high speed tire uniformity machine

Speed	Max. 200km/h (2 300r/min)
Bead rim diameter	13 - 26 inches
Tire outside diameter	550mm - 1 000mm
Tire width	Max. 350mm
Load	Max. 10 000N
Test pressure	Max. 0.6MPa
Drum diameter	1 707.6mm
Drum width	400mm
Natural frequency	270Hz or more
Measurement items	
Radial force variation	RFV
Lateral force variation	LFV
Tractive force variation	TFV
Radial 1st to 10th harmonic	RFV 1H - RFV 10H
Lateral 1st to 10th harmonic	LFV 1H - LFV 10H
Tractive 1st to 10th harmonic	TFV 1H - TFV 10H
Lateral force deviation	LFD
Conicity	CON
Play-steer	PLY
Unbalance	STATIC

*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械技術部 **技術開発本部 機械研究所

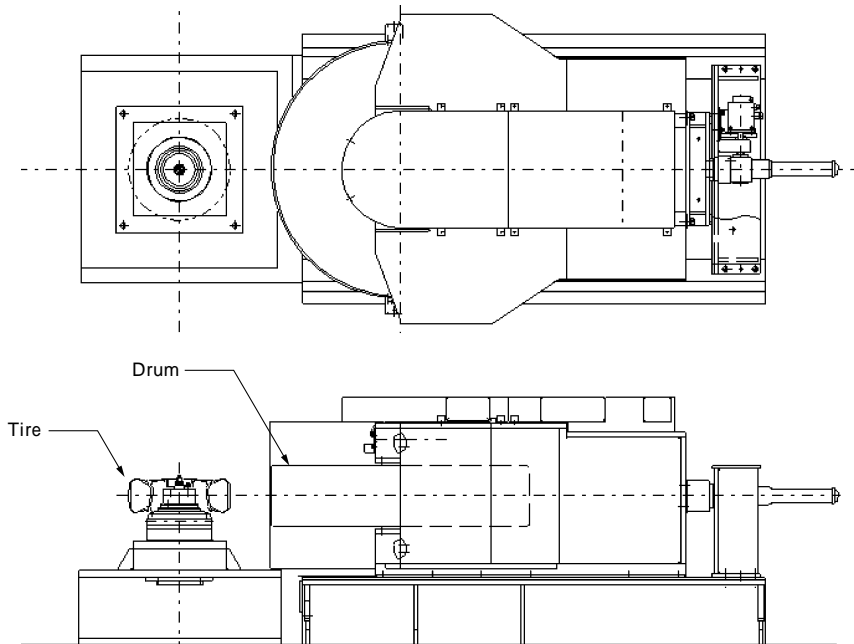


図1 装置全体図
Fig. 1 General assembly



写真1 Model : 100D26-LH
Photo 1 Model : 100D26-LH

数の力センサから、ラジアル(タイヤ径方向)、ラテラル(タイヤ幅方向)及びトラクティブ(接線方向)の3方向の力信号が、タイヤの反力に応じて出力される。センサ出力信号は、合算ボックスで方向ごとに信号が合算され、センサアンプへと入力される。この時点の信号には、タイヤの各3方向に掛かった力の大きさを示すDC成分と、タイヤの回転により変動する力のAC成分とが含まれるが、ユニフォミティ測定ではタイヤの回転に伴う力の変動の測定を重視するため、当社開発のFV (Force variation) アンプによりDC成分の分離を行い、また後段のアナログ-デジタル変換(以下AD変換)での変換精度向上のために、AC成分信号(RFV:Radial force variation, LFV:Lateral force variation及びTFV:Tractive force variation)の増幅も併せて行う。増幅されたFV信号は、ローパスフィルタにより必要な周波数成分のみ取出される。標準ユニフォミティマシンの場合、ローパスフィルタの遮断周波数を通常固定としているが、高速ユニフォミティマシンの場合は、低速度から高速度(20r/min~2300r/min)までの任意の速度でのユニフォミティ測定が可能で、ローパスフィルタを採用した。ローパス

フィルタを通過した信号は、AD変換装置に入力される。AD変換処理は、スピンドル軸に取付けられたパルスジェネレータの出力パルスをサンプリングクロックとして行われるが、最高速度2300r/minのときの変換速度(クロック周波数)が高くなるため、クロックパルスの信号処理及びAD変換処理も高速タイプのものが要求される。デジタル化されたデータは、当社開発の専用コントローラにより、高速フーリエ変換処理、ローパスフィルタのゲイン/遅れの補正を行った後、周波数ごとの力と位相角の導出及びタイヤ1周当りの力の変動(P-P)を演算し、モニタ及びプリンタに結果を出力する。

図2は測定系のブロック線図を示す

2.4 高固有振動数

タイヤを高速で測定する場合、タイヤの高次数成分まで解析するので、機械の固有振動数が重要となってくる。通常6~7次の高次数成分を解析するため、JASO C618の自動車規格では、機械の固有振動数170Hz以上が要求されており、当社では固有振動数を高めるために特に重点をおいて、開発を進めた。

2.4.1 固有振動数と測定次数

通常機械の固有振動数が、タイヤの回転数による振動数と一致すると共振現象が起こり、正しい測定ができない。高速タイヤユニフォミティマシンの場合、低速領域から高速領域まで測定するため、測定領域より高い固有振動数を持った機械が必要となる。固有振動数と測定次数との関係は、下記の式(1)で表される。

$$\text{最大測定次数} = f_s / f_i \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 f_s : 機械の固有振動数

f_i : 回転体(タイヤ)の周波数

$$f_i = V / 3.6 / D \quad (V: \text{速度 km/h}, D: \text{タイヤ径 m})$$

例えば機械の固有振動数 f_s : 270Hz, 測定速度 V : 100 km/h, タイヤ外径 $D=0.7$ m とすると、以下のように計算できる。

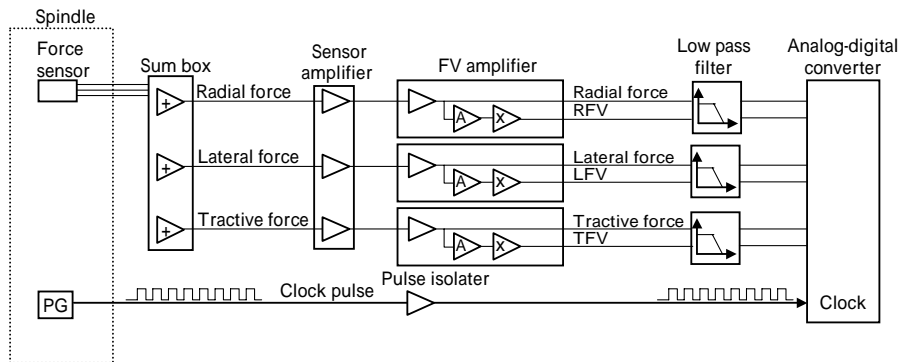


図2 タイヤユニフォミティマシン計測システムのブロック線図
Fig. 2 Block diagram of tire uniformity measurement system

$$f_i = 100/3.6/0.7/3.14 = 12.6\text{Hz}$$

最大測定次数 = 270/12.6 = 21 次

従って計算理論上は、100km/h では 21 次まで測定可能となるが、安定した測定領域は通常最大測定次数の 1/3 と考えられており、7 次まで安定した測定ができるといえる。

2.4.2 FEM 解析

近年、コンピュータ及びこれを用いたCAE技術の進歩により、数値シミュレーションによる最適設計や事前評価技術が実用化されてきており、機械装置の高性能化や開発プロセスの合理化に寄与している。当社でも高速タイヤユニフォミティマシンの開発に当たり、高固有振動数を得るために、設計段階からFEMを応用した最適設計を実施し、開発プロセスの短縮と装置の高性能化をはかっている。

図3に構造検討過程における、ある構造案のFEMメッシュ図を示す。基本的には、架台部分はシェル要素、ケーシング部分はソリッド要素、スピンドル部分ははり要素を用いてモデル化している。FEMコードはANSYS及びNASTRANを用い、実固有値解析を行うことにより、固有振動数及びその振動モードを求めている。図4に1次モードの振動モード図を示す。本図には変位コンタを重ね書きしているが、このような変形形状に加え、歪エネルギー密度分布などを照査することにより、合理的な固有振動数向上策を検討することができる。

表2に、最終的に試作したタイヤユニフォミティマシ

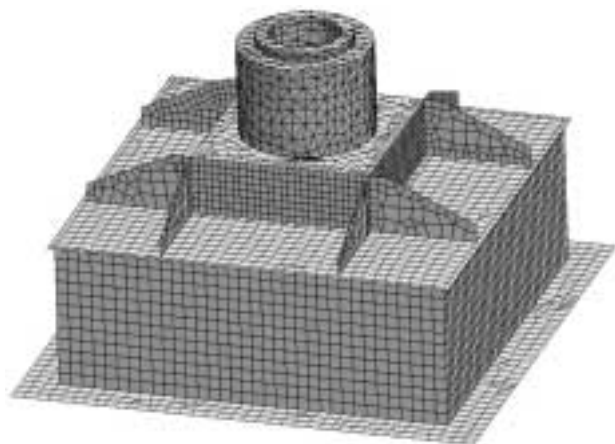


図3 FEMメッシュ図
Fig. 3 FEM mesh diagram



図4 振動モード図
Fig. 4 Mode of vibration diagram

表2 固有振動数の比較
Table 2 Comparison of natural frequency

	Radial 1st	Radial 2nd	Lateral 1st
Measurement result	370Hz	417.5Hz	475Hz
Analytical result	353Hz	437Hz	532Hz
Error (%)	4.60%	4.70%	12%

ンの固有振動数の実測値とFEM解析結果との比較を示す。

固有振動数の実測は、タイヤを取付けた状態で、スピンドル部先端をインパルスハンマで打撃した際の各部位の振動応答を加速度センサで測定し、この加振力信号と加速度信号をFFT分析器に入力することにより行った。

表からも分かるように、FEMを用いた最適設計の結果、今回開発したタイヤユニフォミティマシンは非常に高い固有振動数を確保することができた。また、実測値と解析結果は、ラジアル方向については約5%程度の誤差で、高い予測精度が得られている。振動モード形状についても良い一致が得られており、FEMを用いた事前予測技術が有効であることも確認された。なお、ラテラル1次での誤差が若干大きいのは、スピンドルを支持する軸受のスラスト方向剛性の見積もり誤差によるところが大きいと思われる。FEMによる最適設計を進める上での今後の課題と考えられる。

2.4.3 3分力センサ

今回、新たに高速ユニフォミティ用に3分力センサを開発し、ラジアル方向、ラテラル方向及びトラクティブ方向の3方向の力を正確に測定できるようにスピンドル部に組込んだ。

3 分力センサは、高精度、高剛性の特殊な素子を使用し、高い直線性と動特性を兼ね備えている。また、センサ単体の固有振動数は、2 000Hz 以上であるため、機械の固有振動数の向上にも貢献している。

2.5 既存装置との相関性

ユニフォミティマシンの場合、通常の試験機と異なり基準となる原器が存在しないため、同一タイヤを使用して異なった機械間での測定をすることにより機械間の相関性を確認している。

当社高速機 PC-UXO-L5 と今回新しく開発した 100D26-LH との相関性を検証したので、報告する。

低速（60r/min）時と高速（100km/h）時に同じタイヤを同じ条件で測定して、機械間の相関の確認を行った。相関確認項目は、RFV、RFV 1st、LFV、LFV 1st、TFV、TFV 1st であり、タイヤ本数は 10 本とした。

その結果、RFV、RFV 1st、LFV、LFV 1st の相関は、0.9 以上の結果が得られた。またこれまで相関が出にくい TFV、TFV 1st においても、0.8 以上の結果が得られた。

2.6 高速時の測定データ

本機を使用した高速時の測定データについて一例を紹介する。

タイヤの 3 分力（RFV、LFV、TFV）は、速度が増すにつれて、大きくなることが知られている。図 5 に、225/60R16 タイヤの速度を、低速の 60r/min から 100km/h まで変化させて測定した 3 分力をグラフ化したものを示す。特に、TFV においては低速領域では非常に低いが高速領域では高い数値を示すことが、このグラフから分かる。

また、高速 100km/h での 3 分力の測定例を図 6 に示す。この結果では TFV が RFV 以上に変動しており、高速時における振動の原因の一つになっていることが分かる。

本機で測定した測定データの結果は、ユーザの要求に即したフォーマットに出力することが可能で、タイヤの振動解析に役立っている。

むすび=今回、新しく性能アップした新型の高速タイヤユニフォミティマシンの技術を紹介した。

今後、本試験機により高速時におけるタイヤの性能、振動解析が進み、タイヤはもとより自動車の開発、発展の手助けになれば幸いである。

また当社では、高速の生産型の高速試験機も同時に開発しており、タイヤの生産現場でも高速測定の需要を満たす準備が整っている。

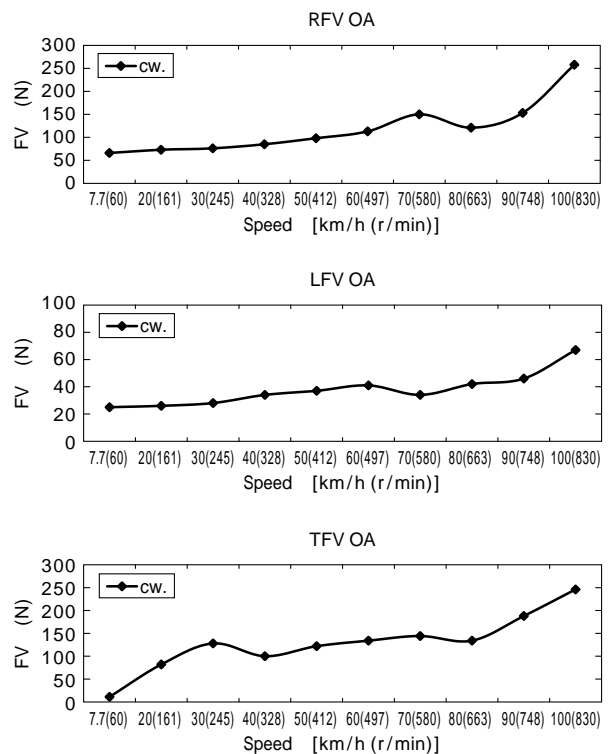


図 5 速度変化による RFV、LFV 及び TFV 値
Fig. 5 Curve of RFV, LFV and TFV versus speed

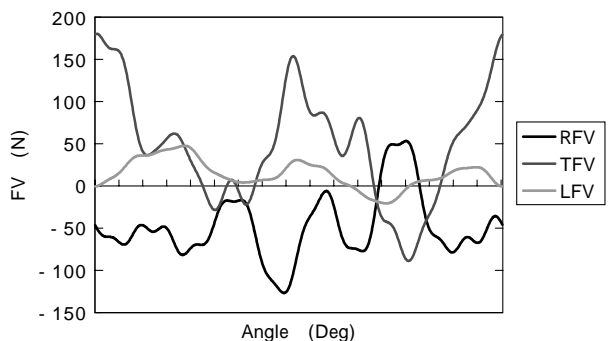


図 6 RFV、LFV と TFV の波形（速度 100km/h）
Fig. 6 Curves of RFV, LFV and TFV (speed 100km/h)

参 考 文 献

- 1) JIS D 4233 : 自動車用タイヤのユニフォミティ試験方法 (2001 年版)。
- 2) JASO C 618 : 高速時のタイヤ・ホイールのユニフォミティ試験方法 (2003 年版)。