時間領域音響ホログラフィ法を用いた加速時タイヤ騒音の解析

-タイヤ駆動力、すべり率と発生音との関係-

環境エネルギー部	田中	丈晴	坂本	一朗
横浜ゴム(株)	桂	直之		

1.まえがき

自動車騒音の改善を図るため、市街地走行におけ るタイヤ路面騒音の低減が求められており、このた め、実車惰行法を用いた評価試験法に基づくタイヤ 単体騒音の規制の実施がEUでは予定されている。 しかし、市街地走行における加速時のタイヤ騒音 は、駆動力が作用するため、タイヤ種類などにより 差はあるものの惰行騒音よりも大幅に増加すること が指摘されている。しかし、この加速時におけるタ イヤ騒音の発生メカニズムは、検討が行われてきて いるが、現在、なお、十分な解明に至っていない状 況にある。

したがって、筆者らは、前年度、このような加速 走行時におけるタイヤ騒音の発生状況を解析するた めの一方法として、試験路において、移動音源に対 する音響ホログラフィ法を、一定な加速走行に適用 し、定常走行時と加速走行時の再生結果から、加速 負荷に基づくタイヤ騒音の発生位置及び発生レベル について考察した。¹⁾

本報では、加速負荷にともなうタイヤ騒音増加の メカニズムを解明するため、スムースタイヤと溝付 きタイヤを用いた実車台上実験を行い、加速走行時 におけるタイヤのすべり特性、タイヤ駆動力とタイ ヤ騒音との関係について考察した。

2.実験概要

2.1 室内台上における加速走行実験

タイヤ路面騒音実車台上試験装置上に、試験車と して電気自動車を設置し、加速負荷時に発生するタ イヤ騒音と車両側駆動力、タイヤローラ間のすべり 率との関係を調べた。表1に、試験車の諸元を、測 定項目と測定方法を図1に示す。車両側では、駆動 輪である前輪の軸トルク、タイヤ周速度(右側)を 測定し、ローラ側では、ローラ周速度を測定した。 また、台上でのタイヤ騒音の音響パワーを把握する ため、タイヤ側面に近接した位置で、2次元のアレ イマイクにより、過渡的な音場の変化が把握可能な 時間領域音響ホログラフィ法による計測を実施し

R V型電気自動車 タイヤ回転 速度検出 ローラ回転 速度検出 ローラ面 (摩擦粗粒面/ISO路レプリカ面)

図1 台上加速走行実験の測定項目と測定方法

表 1	雷	気白	動車(の車	而諸元
1.8	1 电	~~	シーモッ	ノーチョ	ショロノレ

動力	永久磁石式同期型モータ
駆動方式	前輪駆動
最高出力/回転数	50kW/3,100-4,000rpm
軸距	2,410mm
車両重量(試験時)	1,704kg
前輪左荷重	400kgf
前輪右荷重	375kgf
後輪左荷重	482kgf
後輪右荷重	447kgf

た。

2.2 試験タイヤとローラ面条件

試験タイヤは、同一の構造と材料からなるスムー スタイヤ(以下、Sタイヤ)と溝つきタイヤ(以 下、Aタイヤ)の2種類を使用し、タイヤサイズ は、ともに、215/70R15である。また、ローラ面は、 一般にドラム試験において用いられる摩擦粗粒面貼 りの場合とISO路面レプリカパッド貼り(以下、 ISO面という)の2条件とした。²⁾

なお、各ローラ面の摩擦係数を、英国式ポータブ ルスキッドレジスタンステスターで測定した結果 は、摩擦粗粒面が1.56、ISO面が0.98~1.08、I SO実路面が1.23であった。

2.3 試験条件

表1の車両を用いた場合、TRIAS20準拠の 全開加速走行試験では、試験路での測定区間の中央



図2 音響ホログラフィ測定状況

に位置する7.5mマイク前付近で、概ね55km/hに達 する。¹⁾ したがって、台上における加速走行実験 では、加速走行を一定な負荷がかかった状態での5 5km/hの定常走行に置き換えた定速度実験を実施し た。この場合、台上試験装置のローラの回転数を一 定とする制御を行う。

定速度実験では、試験車のアクセル開度を、無負 荷条件に相当する0%、部分負荷条件に相当する2 5%及び50%、全負荷条件に相当する100%の 4条件とした。さらに、ローラ周速度が、50km/h及 び60km/hでのアクセル開度100%の場合について も測定した。

2.4 音響ホログラフィ計測

台上での加速時タイヤ騒音の音響パワーの変化を 把握するため、近接音場での音響ホログラム計測に より時間変化を伴う音場の解析が可能な時間領域音 響ホログラフィ法を用いた。本方法は、図2に示す ように、矩形平面状のマイクアレイを用い、タイヤ 側面に近接(Z=Z0)して音圧の時間変化を計測し、こ れから音圧の空間的な波数スペクトラムP(kx,ky,Z0,

)を求める。この場合、 Z 軸上での波数スペクトラ



図3 ローラ上でのタイヤのトルク、力の釣り合い

表2 音響ホログラフィ計測条件

アレイマイク数	X=8, Y=7]
マイクピッチ	X=0.1m、Y=0.1m]
測定面のY方向オフセット	0.05m]
タイヤ側面と測定面との距離	0.1m],
解析周波数帯域	490Hz~1.49kHz][]
サンプリングレイト	4kHz	פון
	•	Έ

(1)で示される。

 $P(kx, ky, Z,)=P(kx, ky, Z0,)e^{-jkz(Z-Z0)}, Z 0$ (1)

;角周波数、C;音速、 kx,ky;波数(/C) kz;角周波数(kx,ky,)の関数

これをフーリエ逆変換することにより、Z 0での 時間領域の音圧p(x,y,z,t)や粒子速度、音響パワー 等を求める方法である。³⁾ 従来の遠音場を対象に した音響ホログラフィ法に比較し、分解能が波長に 依存しない利点がある。音響ホログラムの計測条件 を表2に示す。

3.実験結果と考察

3.1 すべり率の算出方法

ー般に、走行時には、タイヤとローラ間ですべり が発生する。本実験では、タイヤとローラ間のすべ リ率(Sr)を算出した。定速度実験においてタイ ヤ・ローラ間に作用する駆動力(Fr),(-Fr),タイヤ荷 重(Fv)、駆動トルク(Ta)、動力吸収トルク(Tb)と各 速度は、図3のように示される。この場合、すべり 率は、式(2)で示されるものとする。⁴⁾



図4 すべり率の変動と平滑化処理の効果 (Sタイヤ、ISO面)



図5 すべり率と駆動軸トルクとの関係

Sr=(Vt-Vr)/Vr・100 (%) (2) なお、タイヤ及びローラの回転速度は、回転パル スエンコーダで検出し、0.01sec毎に、各周速度を算 出した。

すべり率の計算結果の一例を図4に示す。図か ら、すべり率は、タイヤ回転速度検出用エンコーダ 取り付け時の偏心の影響によると考えられる変動が みられるため、概ね、タイヤ1回転に相当する時間 長で平滑化処理を行った。また、すべり率の計算で は、走行中のタイヤ径の変動を考慮し、定速度実験 の無負荷定速走行時(以下、惰行走行)において、 Sr=0が成り立つと仮定して、タイヤ径を補正した。

図4から、アクセル開度100%の場合のすべり 率は、アクセル操作開始後0.5sec付近までは急激に 増加し、その後、ローラ周速度の変化が発生し、概 ね1.5sec以降において速度の制御が安定することが 伺われる。したがって、すべり率や駆動力の計算 は、この安定域に達する1.5sec~2sec間の平均値を 用いることとした。

3.2 すべり率と駆動力、駆動摩擦係数との関係

定速度実験の結果から、すべり率と駆動力、駆動 摩擦係数との関係を考察した。駆動力は、6分力計 を試験車両の左前輪に装着し、駆動トルクとの相互 校正を行い、駆動軸トルク(Ta)から駆動力(Fr)へ変 換した。

図5に、S及びAタイヤと各ローラ面上での、す べり率と駆動軸トルクとの関係を示す。また、全負 荷時(アクセル開度100%)でのローラ周速度50km/h及 び60km/hの場合での定速度実験の結果も含めて表記 した。図5における駆動軸トルクの表記は、ローラ 周速度55km/h、全負荷時のトルク値を100%とした。 図から、各条件ともに、駆動軸トルクの増加にとも なって、すべり率は、一様に大きくなり、Aタイヤ (ISO面)>Sタイヤ(ISO面)>Sタイヤ (摩擦粗粒面)の順に大きいことがわかる。これ



図6 すべり率と駆動摩擦係数との関係



図7 惰行及び加速時タイヤ騒音の音響パワーの時間変化 (ローラ周速度:55km/h)



図8 駆動力(全開加速ー惰行)によるタイヤ騒音の音響パ ワーの周波数帯域別増加量(ローラ周速度:55km/h)

は、溝つきタイヤであるAタイヤに比べ、スムース タイヤであるSタイヤでは、トレッドの周方向のせ ん断剛性が大きいこと、ISO面よりも摩擦粗粒面 の方が、すべり摩擦係数が、大きいことが原因して いると考えられる。ローラ速度55km/hで全負荷時で のすべり率は、Sタイヤで0.8%程度で、Aタイヤ で、1.3%程度である。

図3から、駆動摩擦係数(µ)は、式(3)で示され



図9 タイヤ溝の有無(AタイヤーSタイヤ)によるタイ ヤ騒音の音響パワーの周波数帯域別増加量(ISO面、 55km/h)

る。⁴⁾

$$\mu = Fr/Fv \qquad (3)$$

図5の結果を、駆動摩擦係数とすべり率との関係 で表したものを図6に示す。定速度実験でのタイヤ とローラ間の駆動摩擦係数は、図6に示すように、 一定値ではなく、すべり率が大きくなるにしたが い、駆動摩擦係数も増加する。 駆動摩擦係数は、 Sタイヤ(摩擦粗粒面)>Sタイヤ(ISO面)> Aタイヤ(ISO面)の順に大きくなっている。し かし、Sタイヤの場合、摩擦粗粒面とISO 面の場 合との差は、極めて小さい。ローラ速度55km/h、全 負荷時の場合で、各条件ともに、駆動摩擦係数の最 大値は、0.45程度である。

以上から、タイヤとローラ間のすべり率は、駆動 力が増加するにしたがい大きくなる。これは、駆動 摩擦係数がすべり率に応じて増加するためであると 考えられる。この場合のすべり特性は、タイヤのト レッド部の周方向のせん断剛性やローラ面の摩擦係 数により異なることが認められた。

3.3 加速時タイヤ騒音の音響パワーの傾向

55km/hでの定速度実験で、惰行及び加速条件を置 き換えた場合のタイヤ・ローラ面の接地部や踏み込 み部、蹴り出し部から放射される騒音の全体的な音 響パワーの測定結果を図7に示す。図から、比較的 レベルが安定する1.5sec~2secの時間範囲で比較す れば、惰行の場合に比べ、全開加速(全負荷)時で は、平均して、音響パワーが、概ね3dB(A)~5dB(A) 程度増加している。また、全開加速時の音響パワー は、Aタイヤ(ISO面)>Sタイヤ(ISO面)>Sタイヤ (摩擦粗粒面)の順にレベルが高く、駆動軸トルク に対するすべり率の増加傾向と一致している。

3.4 加速時タイヤ騒音の増加要因の考察

全開加速時と惰行時とにおけるタイヤ騒音の音響



図10 ローラ周速度と音響パワーの周波数帯域別傾向 (Aタイヤ、ISO面)

パワーのエネルギー差から、駆動力の影響による音響パワーの増加量を帯域別に求めた結果を図8に示す。図から、Sタイヤの場合は、800Hz~1.25kHzの帯域でのレベルの増加が大きいが、ローラ面性状の違いによるレベル差は、殆どみられない。Aタイヤの場合の増加量は、駆動力が負荷されることにより、Sタイヤの場合に比べ、ISO面上で8dB(A)~18dB(A)程度、600Hz~1.25kHzの帯域でレベルが大幅に増加している。

タイヤ溝の有無による影響を把握するため、IS O面上でのAタイヤとSタイヤにおけるタイヤ騒音 の音響パワーのエネルギー差から、音響パワーの増 加量を帯域別に求めた結果を図9に示す。情行時に 比べ、全開加速時では、増加量は、630Hz~1kHzで約 2dB(A)~3.5dB(A)程度大きくなっているのに比べ、 1.25kHzでは、約7dB(A)も増加している。全帯域 (630Hz~1.25kHz)では、音響パワーの増加量は 3.5dB(A)増えている。これらの点から、溝つきのA タイヤに関しては、全開加速時の音響パワーは、Aタ イヤ(ISO面)>Sタイヤ(ISO面)>Sタイヤ(摩擦 粗粒面)の順に増加しており、駆動軸トルクに対す るすべり率の増加傾向と一致している。

図10に、全開加速条件下でローラ周速度を 50km/h、55km/h、60km/hに変更した場合のタイヤ騒 音の音響パワーの帯域別変化を示した。図から、 630Hz~1kHzでは、ローラ周速度の上昇に伴い、音響 パワーは増加しているが、1.25kHzの帯域では、ロー ラ周速度ではなく、図5から、駆動軸トルクの増加 に伴い、音響パワーが増加しており、前述の結果と 一致している。このことから、630Hz~1kHzの帯域と 1.25kHzの帯域とでは、加速負荷に伴うタイヤ騒音の 増加メカニズムが異なることが伺われる。

4.まとめ

加速負荷にともなうタイヤ騒音増加のメカニズム を解明するため、スムースタイヤと溝付きタイヤの 2種類のタイヤと試験車として電気自動車を用い、 ローラ面性状として、摩擦粗粒面、ISO路レプリ カパッドの2条件について実車台上実験を行い、加 速走行時におけるタイヤの駆動力、すべり特性とタ イヤ騒音の音響パワーとの関係について考察した。 その結果、次にまとめられる。

(1) タイヤ・ローラ間のすべり率は、駆動力が増加 するにしたがい大きくなり、同時に、タイヤ・ロー ラ間の駆動摩擦係数も増加することが明らかとなっ た。このすべり特性は、タイヤトレッド部の周方向 のせん断剛性やローラ面の摩擦係数により異なるこ とが認められた。

(2) 全開加速時のタイヤ騒音の音響パワーは、溝つ きタイヤ(ISO面)>スムースタイヤ(ISO面)>ス ムースタイヤ(摩擦粗粒面)の順に大きく、駆動軸 トルクに対する各すべり率の増加傾向と一致した。
(3) 溝つきの試験タイヤの場合、全開加速時の駆動 力が作用することによる影響は、今回の実験(630Hz ~ 1.25kHz)では、630Hz ~ 1kHzの帯域よりも、
1.25kHzの帯域で強く表れることが確認できた。

以上の結果から、従来から指摘されてきたよう に、タイヤ・ローラ間におけるすべりの発生が、加 速時の騒音増加の原因となっていることが伺われ る。また、その影響が強く表れる周波数帯域も確認 できたが、今後、更に、高周波数帯域についても調 べる必要がある。

これらをもとに、今後、引き続き、タイヤの材料、構造、及び溝パターンの異なるタイヤを用いて 検討を進め、タイヤ振動との関連も明らかにしてい きたいと考える。

(参考文献)

(1)田中他、音響ホログラフィ法を用いた加速時タイ ヤ騒音の解析、自動車技術会講演前刷集No.23-01
(2)田中他、ISO路面模擬パッドを用いたタイヤ路 面騒音実車台上試験装置の開発、自動車技術会論文 集,Vol.30,
No.3,July 1999
(3)J.Hald,Non-stationary STSF,B&K Technical Review, No.1-2000
(4)自動車用タイヤの研究、山海堂