

## 自動車各部の機械力学的特性に関する研究

Studies on the mechanical properties of the parts of automobiles …

総括研究員：横井雅之(短期大学部)

分担研究員：酒井秀男(短期大学部)、高萩敏男(短期大学部)、荒木一雄(工学部)

自動車は多数の部品から構成されており、それらを支える技術は広範囲にわたっている。自動車システム全体としての動特性を求めるためには、これら構成要素部品の動特性を正確に把握しておくことが重要である。

ここでは、タイヤ、ブレーキ、ボディ等の構成部品に発生する振動、騒音などの動的な特性について、機械力学的な見地から、実験および理論解析を行うことにより、精確に把握し、さらに実用性についても検討を行った。

「車両運動解析のためのタイヤモデル」、「加振によるタイヤの基礎特性の測定法」、「タイヤトレッドとスキッド痕に関する熱的解析」、「タイヤのスキールノイズに関する研究」および「タイヤのトレッド摩耗に関する研究」は、いずれも自動車の運動性能を左右する重要な要因であるタイヤの動特性について、理論モデルの検討、基礎的なパラメータの求め方、熱による影響、摩擦・摩耗などさまざまな角度から検討したものである。

「アルミナセラミックスのすべり摩擦による摩擦音」では、自動車におけるセラミックス部品の摩擦を対象として、高温でアルミナを摩擦させた時に、スキール発生に対する温度の影響を検討し、スキールの発生機構の解明を行った。「回転円板とはりの鳴き音の発生機構」においては、ディスクブレーキを対象として、ディスクとパッドを円板とはりに置き換えた実験装置を製作し、厚さの異なる円板を用いて、円板の円周方向に一致する鳴き音が発生する条件を解明した。

「板状構造物より発生する衝撃騒音の発生機構とその防止法に関する研究」では、板状構造物に単一衝撃を与えた時に発生する複数回の衝突の検出についてウエーブレット解析が有効であることを示した。

本プロジェクトでは、分担研究員の専門分野は自動車工学はもとより運動力学、振動工学、音響工学など広範囲にわたっている。この利点を活かし、理論解析には最近の新しい解析方法などを採用し、実験結果のまとめには、コンピュータによる最新のデータ解析手法を取り入れている。いずれの研究においても、学会等における発表および論文集掲載などにより、当初の計画に対して、十分な成果が得られた。

以下に各々の分担研究課題についての詳細を示す。

## 車両運動解析のためのタイヤモデル

荒木一雄, 酒井秀男

### [概要]

コンピュータの進展にともなって、車両運動をコンピュータ解析し新車の開発や研究改良に使用することが多くなっている。ここで問題になるのは、運動解析に使用するタイヤのモデルで、各所で各種のタイヤモデルが検討されている。

本研究は、比較的簡単な理論式を用い、その係数を実験によって求め、さらに最適な補正を加えることによってタイヤの実験的特性を表す半理論実験式モデルを検討したものである。第一段階としては走行速度が変化しない場合について検討し、第二段階として走行速度が変化する場合について検討した。さらに、路面がアスファルトの場合の乾燥時と湿潤時に対応するモデルについても検討した。

理論式から導かれたモデルは物理的な現象との対応が取り易いこと、発展の可能性が大きいことなどの特徴がある。

これらの成果は、以下のような機関で発表された。

#### 発表論文 1

荒木、酒井：車両運動解析のための半理論実験式タイヤモデル

第1報 走行速度が一定の場合。自動車技術会論文集 Vol.24, No.2, Apr. 1993.

#### 発表論文 2

K. Araki, H. Sakai : Study of Tire Model Consisting of Theoretical and Experimental Equations for Vehicle Dynamics Analysis - Part 1 : Under the Condition of Constant Velocity. SAE Paper No.932884, Oct. 1993.

#### 発表論文 3

荒木、酒井：車両運動解析のための半理論実験式タイヤモデル

第2報 走行速度が変化する場合。自動車技術会学術講演会前刷集 931, 1993-5.

#### 発表論文 4

K. Araki, H. Sakai : Study of Tire Model Consisting of Theoretical and Experimental Equations for Vehicle Dynamics Analysis - Part 2 : Under the Condition of Various Velocity on the Asphaltic Road Surface. SAE Paper No.960996, Feb. 1996.

#### 発表論文 5

K. Araki, H. Sakai : Tire Model Consisting of Theoretical and Experimental Equations for Vehicle Dynamics Analysis. 29th ISATA No.96VR067, Jun. 1996.

## 加振によるタイヤの基礎特性の測定法

荒木一雄, 酒井秀男

### [概要]

タイヤは接地した状態で使用されることから、一般にタイヤの基礎的な性能を表すための基礎特性としては、路面上で荷重を加えリムを回転しないように固定した状態で、横剛性、ねじり剛性、前後剛性などが測定されている。しかし、これらの実測値は接地部の前後端近くの接地圧の小さな部分で接地面との間で滑りが発生するため精度が良くない。

そこで、これに代わるものとして、簡単なタイヤモデルとして剛体円盤(リム)のまわりに円環状の剛体リングがスプリングで支えられた円環ビームモデルを考え、スプリングの半径方向、周方向、横方向の各弾性定数と基本振動数との関係式を求める。次に、実際のタイヤの基本振動数を測定してこれらの定数を計算する。

実験はタイヤを打振することによって、回転方向振動、横振動、上下振動、ねじり振動などの周波数分析を行って各方向の基本振動数を求め、前記の関係式から各定数値を求めた。同一サイズのタイヤを用い、パラメータとしてタイヤ内圧、リム幅を変更して求めた結果、定数値は比較的良い精度で得られることが分かった。また、これらの定数と、タイヤの幅、高さ、リム幅、トレッド幅などのタイヤの設計定数との関係が比較的容易に理論解析できるので、これらのデータの蓄積は将来に役立つものと考えられる。

なお、この論文は 1998 年 5 月に開催される自動車技術会春季学術研究発表講演会で講演予定である。

## タイヤトレッドとスキッド痕に関する熱的解析

酒井秀男, 荒木一雄

### [概要]

自動車事故の現場路面に残されたブレーキ痕(スリップ痕)やコーナリング痕(スキッド痕)は、事故鑑定によく用いられており非常に重要な現象である。しかし、この現象は複雑であるがゆえに解明がほとんど進んでいないのが実状である。この現象は摩擦熱によってゴムが軟化し、路面に付着することによって現れると考えられることから、この現象を解析するにはタイヤの熱工学的解析が必要である。

これとは別に、タイヤの製造工程では金型の中でタイヤの温度を 130℃～150℃で 30～60 分間保つこと(これを加硫行程という)によって、架橋反応というゴム分子を網目状に結合させる化学反応を経て製品化される。この場合、ゴムの温度の時間的変化および分布は、ゴムの加硫条件を決定する上において非常に重要な要素である。

そこで、ここではまずタイヤのトレッドを簡素化してゴム板と見なし、加熱時と冷却時の温度変化について理論計算を行い、温度が 10℃上昇することによって化学反応速度が約 2 倍に

なるという Arrhenius の式により加硫指数を求め、ゴムの厚さが大きくなると中心部での加硫が遅くなることを示す。次に、タイヤの内部摩擦すなわち転がり抵抗によって発生する発熱状態と、タイヤがスリップしたときに摩擦によって発生する熱伝播について理論計算を行い、タイヤのスリップ痕やスキッド痕は摩擦熱によるゴムの軟化によって発生するものとして、スリップ痕やスキッド痕の発生条件を明らかにする。

なお、この論文は 1998 年 4 月にアメリカで開催される TIRE SOCIETY で講演予定である。

## タイヤのスキールノイズに関する研究

酒井秀男

### [概要]

省エネルギーの観点から転がり抵抗の小さいタイヤが求められている。しかし、転がり抵抗を小さくしたタイヤは、急激なコーナリングや急ブレーキ時に現れるスキールノイズが発生し易くなると言われている。この性質は騒音低減にとって好ましくない。そこで、タイヤのスキールノイズの発生を小さくしてこのジレンマを解決する目的から、コーナリング時に発生するスキールノイズの特性について解析を行った。

まず、理論的検討として、スキールノイズの原因となるスティックスリップ運動について計算し、次に、フラットベルトをもつタイヤ試験機を用いて、スキールノイズ音圧を測定した。この研究により得られた主な結果は次の通りである。

スキールノイズの発生速度は、進行速度の変化のいかんにかかわらず、横滑り速度にして 0.8 ~ 1.0m/s 以上である。

スキールノイズの発生のし易さは、スキールノイズ音圧が急激に増加するときの横力係数(コーナリングフォース/荷重)で比較することができる。

進行速度が大きくなるか、または、荷重が大きくなると、小さな横力係数でスキールノイズが発生する。

内圧が低くなると、小さな横力係数でスキールノイズが発生する。しかし、その差は比較的少ない。

溝深さが浅くなると、大きな横力係数でスキールノイズが発生する。

温度が高くなると、小さな横力係数でスキールノイズが発生する。

トレッドゴムを変えた転がり抵抗の小さいタイヤは、一般タイヤに比べて小さな横力係数でスキールノイズが発生する。しかし、その差は荷重が約 10 % 増加させたときの値に相当した。

発表論文

酒井：タイヤのスキールノイズに関する研究、日本ゴム協会誌、Vol.67, No.2(1994)

# タイヤのトレッド摩耗に関する研究

(第1報 スリップ角が小さい場合の摩耗)

酒井秀男

〔概要〕

フラットベルト式タイヤ試験機を用いて、小さなスリップ角で転動させた場合のタイヤのトレッド摩耗に及ぼす諸因子の影響を求めた。まず実験を実施するに当たり、試験機の精度を改善するとともに、環境条件を厳密にコントロールすることにした。試験機の精度の改善は、スリップ角を1/100度まで測定できるようにし、スリップ角の変動の原因となるベルトの蛇行を極力小さくした。環境条件は、セーフティウォーク表面やタイヤ表面に粘性のあるゴム屑が付着するのを防止するため一定量のマイカ粉をタイヤトレッド表面に静電塗装し、表面の白さを測定し白さが一定になるよう自動制御を行っている。同時にタイヤトレッド表面温度を測定し赤外線ランプにより表面温度が一定になるよう自動制御を行っている。摩耗量の測定は、真空乾燥器で乾燥させた後、精密電子天秤で6桁(0.1gr)の単位まで測定している。その結果、比較的短時間で摩耗速度の測定が可能となり、次の点が明らかになった。

慣らし走行の影響、スリップ角および横力の影響、荷重の影響、内圧の影響、走行速度の影響、温度の影響。さらに、3種類のタイヤについて測定された摩耗速度と横力の関係を用いて、ある路面コースを走行させたときの横力の頻度分布を仮定して単位エネルギー当りの摩耗を計算した結果、厳しさ(横力の大小)によって摩耗の順位が変化することがわかった。

発表論文

酒井：タイヤの摩耗に関する研究 第I報 スリップ角が小さい場合の摩耗，  
日本ゴム協会誌，Vol.68, No.1(1995)

## アルミナセラミックスのすべり摩擦による摩擦音

横井雅之

アルミナは高硬度でかつ耐摩耗性に優れており、さらに高温でも高強度のために、高温度における摺動材料として期待されている。しかしながら、高温度における摩擦において、ほとんど摩擦のない状態から多量に摩耗粉が発生する状態に変化したときに、スキールと呼ばれる音圧レベルの高い甲高い摩擦音が発生することが知られている。本研究では、高温度でアルミナを摩擦させた時に、スキール発生に対する温度の影響を検討し、スキールの発生機構の解明を行った。

実験は回転軸と固定軸のそれぞれ先端に試験片のアルミナを取り付け、エアシリンダにより一定荷重を固定軸に加えた。試験片の加熱は高周波誘導電流(100kHz,5kW)により試験片を

覆っている金属製のホルダーが加熱されることにより行った。固定軸には板状の試料が、回転軸にはリング状の試料が取り付けられている。摩擦係数は測定されたトルクと押しつけ荷重から求めた。摩擦面は走査電子顕微鏡により観察した。実験は室温で回転数  $200\text{min}^{-1}$  でスキールが発生するまで摩擦させた後、加熱し、 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  から  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  まで行った。温度上昇と下降時の比較も行った。音圧は摩擦面から約  $10\text{cm}$  のところで測定した。

すべり速度（試験機の軸回転数に相当）を  $0.05\text{m/s}$  から  $0.3\text{m/s}$  まで変化させたが、室温時に比較して高温時では、摩擦係数が小さくなる。すべり速度に対する摩擦係数の変化は比較的少ない。すべり速度を  $0.2\text{m/s}$ 、押しつけ荷重  $0.4\text{MPa}$  と固定して行った実験では、温度上昇時には、 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  付近で高音圧レベルのスキールが発生するが、 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  付近で音圧がレベルが急激に低下し鳴き止む。逆に温度を下げ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  になると再びスキールは発生するが、 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  付近で鳴き止む。このようにスキールが発生している温度はヒステリシス特性をもっている。スキール周波数はほぼ一定であり、温度による変化はあまり見られないことから、試験片とこれを取り付けた回転軸の質量比を考慮すると、スキールの周波数は、アルミナの弾性係数の温度特性によるアルミナ単体の振動ではなく、試験片と回転軸の連成を考慮した振動系の周波数と考えられる。スキール発生に大きな影響を及ぼすと考えられる摩擦係数は、 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  まではほぼ一定であるが、 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  では  $0.7$  から  $0.8$  倍にまで低下する。温度上昇および下降時の差はあまり見られない。スキールは高温度になり摩擦係数が約  $0.6$  程度まで減少すると鳴き止む。摩耗量とスキールの関係では、温度上昇により、摩耗量は減少する。とくに  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上では、急激に減少し、ほとんど摩耗のない状態になる。これは、SEM写真により高温度では表面層は著しく軟化し、表面層の再結晶化と粒界すべりによる亀裂の発生・進展が抑制されるなどにより、摩耗や摩擦係数が減少することがわかった。また、表面に形成される塑性変形層は弾性接触を妨げるので、これが明確に観察される  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上では、摩擦係数が小さくなり、スキールも発生しないという実験結果と対応した。低温側では、逆に表面に形成される塑性変形層はほとんどなく、弾性接触が支配的であるが、摩耗量が多いので弾性接触が妨げられることによりスキールが発生しなくなることがわかった。

この結果 (1) スキール周波数はアルミナ単体の振動ではなく、試験片と回転軸の連成を考慮した振動系の周波数と考えられ、温度による変化はあまり見られない。(2) スキールは摩擦係数が  $0.6$  以上で発生する。(3) スキール発生条件と表面層の温度による変化の関係が明らかになった。

発表論文 M.Yokoi et al. : Frictional Noise in Sliding Contact of Alumina Ceramics,  
Proc. Inter-noise '96 , 1996.8.

## 回転円板とはりの鳴き音の発生機構

横井雅之

ディスクブレーキの発生する鳴き音（スキール）の周波数は、円板（ディスク）の軸方向固有振動数に近いとされてきた。このため、解析や低減対策についても、軸方向振動に注目して行ってきた。しかしながら、円板の回転方向（円周方向）の疎密波の固有振動数に一致する周波数の鳴き音も発生した。この円周方向の固有振動数に一致する鳴き音の発生機構はまだ十分に解明されていない。本研究では、ディスクとパッドを円板とはりに置き換えた実験装置を製作し、厚さの異なる円板を用いて、円板の円周方向に一致する鳴き音が発生するか検討した。

実験装置は円板の側面にパッドを貼りつけたはりを押しつけて、鳴き音を発生させた。円周方向振動発生は以下の2つの方法で確認した。(i)円周面上に数カ所ひずみゲージを貼り、円周方向振動モードを測定した(ii)疎密波の性質から、密になるとき円板の両面が外側に膨らみ、円板は厚くなる。疎の時には逆に薄くなる。このとき円板の両面での振動変位は逆位相になる。

円板の寸法は S45C 製で内径 5cm、外径 30cm、厚さ 0.75、1.6 および 2cm の3種類用いた。はりは幅 3.2cm、厚さ 0.56cm、長さ 30cm である。押しつけ荷重は 78.4 ~ 176.4N である。

円板の厚さを変えた時の鳴き音の周波数と固有振動数との関係は以下の通りである。(i)厚さ 0.75cm では、薄すぎて鳴き音が発生せず、円周方向振動によるものかは明確にできなかった。(ii)実際のディスク厚さに近い 2cm では、軸方向振動による鳴き音も発生したが、円周方向振動による鳴き音が発生した。円板の振動モードを調べると [3-1] および [4-1] モードである。すなわち、節直径が3本または4本で節円の数が1のモードであった。このとき、押しつけ荷重を変化させると、高荷重では円周方向振動による鳴き音が発生しやすくなった。(iii) 中間の厚さ 1.6cm では、円板の円周方向振動による [3-1] モードの鳴き音が発生した。

この結果、(1)鳴き音の周波数は円板の軸方向固有振動数によるものの他に円周方向固有振動数に近いものが発生する。この周波数の振動モードは円板の節円が1のモードである。

(2)円板が厚いほど、はりの固有振動数に関係する鳴き音と円板の高周波の振動による鳴き音が発生する可能性が高いことがわかった。また、円周方向の固有振動数に近い鳴き音は円板が厚く、高荷重ほどよく発生する可能性が高いことがわかった。

発表論文 横井他：回転円板とはりの鳴き音、日本機械学会第74期全国大会講演論文集、1996.9

## 板状構造物より発生する衝撃騒音の発生機構とその防止法に関する研究

高萩敏男

自動車の機械力学的特性に関する研究のうち、自動車の衝撃騒音の発生機構についての究明を行っている。さて、自動車整備をはじめ機械の故障診断において、機械要素が接触することによって生じる振動・騒音の波形を解析して、その発生部位を特定したいことが多々ある。接

触に伴う振動の原因としては、摩擦によるもの、打撃によるものなどがあり、これらの振動を区別できないと原因を特定できない。そのためには、衝撃振動に固有の波形の性質とはどのようなものか明らかにしなければならない。筆者の以前の研究では、板状構造物に物体が衝突して起こる振動波形の構造は二つの部分から成ることが分かっている。すなわち、急激な局部的変形による初期ピークと、それに伴って起こる自由振動部である。初期ピークは当然、振動波形の先端部に現れる。ただし、衝撃条件によっては、打撃は1回であっても、物体の衝突そのものはただ1回で完結せず、第2・第3の衝突が起こり、いわゆる複衝突の状態となることがある。この場合には、第2・第3の初期ピークは自由振動部に埋没してしまい、その存在を得られた振動波形から明らかにするのは一般に困難である。例えば、振動波形の解析には、フーリエ解析が従来広く用いられてきたが、FFTなどの調和解析は本来定常信号に対しての手段であり、衝撃振動のような過渡現象に用いるのは無理がある。しかし、他に方法もないため、FFT解析の対象とする時間窓を少しずつずらしながら周波数分析を行い、各周波数成分の変化を見ることなどが、衝撃振動の解析に行われてきた。ただし、この方法では上記のような複衝突の特徴抽出は困難である。衝突波形では、時間軸上での局所的な特徴が問題となるのに、フーリエ解析では周波数情報と引き換えに時間情報がまったく失われてしまうからである。

ところで最近、フーリエ解析を適用できない非定常な現象を解析する手段としてウェーブレット解析が注目を集めてきている。ウェーブレット変換はここ数十年間で急速に発達した分野であり、特に数学的な理論の構築に精力的な研究が注がれてきた。この結果、従来は信号解析において別々に開発されてきた各種の方法がウェーブレット変換で一般的に説明可能となるなど、信号解析へのその潜在的な可能性が一躍脚光を浴びることになったものである。原理自体はフーリエ解析と同じく、基底となる直交関数で信号を展開するものであるが、ウェーブレット関数はコンパクト・サポートすなわち局所的であるので、これを時系列信号に適用しても時間情報が失われることはない。まさしく衝撃現象解明にふさわしい解析手段である。ただし、ウェーブレット解析の実際への応用はまだ始まったばかりであり、特に衝撃現象への応用研究はほとんどないのが現状である。そこで、板状構造物への物体の衝撃現象に対するウェーブレット解析の適用、特に複衝突の検出に注目した研究を行った。

被打撃物としての板状構造物は周辺固定円板とし、打撃体には市販のインパクト・ハンマーを用いた。数々の試行の結果、打撃体への付加質量により複衝突を発生させることができるようになり、得られた振動加速度波形をウェーブレット解析した。ウェーブレット解析では、フーリエ解析とは違い、まず基底となるウェーブレット関数の種類を決定しなければならない。これは対象となる信号の性質により決まってくるものであるが、本研究では振動現象などの時系列解析で実績の高いドベシィのウェーブレット・次数8を用いることにした。また、一般的なウェーブレット解析には連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換があるが、ここでは波形の局所的な特徴抽出に適した離散ウェーブレット変換を用いた。さらに、コンピュータによる実際の計算では、フーリエ解析のFFT（高速フーリエ変換）に当たる高速ウェーブレット変換とでも言うべきマラーのアルゴリズムによった。この結果、振動加速度波形から複衝突を検出することに成功し、衝撃体の材質により検出に使用する離散ウェーブレット変換の



レベルが異なることなどを明らかにすることができた。

以上についての研究をまとめ、現在下記へ投稿中である。

投稿先： The Journal of the Acoustical Society of Japan (E)

題名： Detection of multiple impacts in a vibrational waveform  
using discrete wavelet decomposition.