

波状摩耗シミュレータの開発

Development of Corrugation Simulator

須田 義大*・西垣戸 貴臣*・小峰 久直*・岡本 光司**

Yoshihiro SUDA, Takaomi NISHIGAITO, Hisanao KOMINE and Koji OKAMOTO

1. はじめに

急曲線部において多く発生するタイプの波状摩耗を実験室レベルで再現する事が出来る波状摩耗シミュレータを開発した^{1),2)}.

このシミュレータは、車両が急曲線部を通過する際の車輪・レール間の状態を模擬することが出来るモデル試験装置である。また、この装置は、曲線通過状態における車輪・レール間のすべり・振動と、それに伴って発生する波状摩耗の成長・伝播状況をリアルタイムに計測する事が出来るという大きな特徴を持っている。以下、本装置の概要及び実験結果の一例を紹介する。

2. 波状摩耗と車輪・レール間のすべり

2.1 波状摩耗

鉄道車両の車輪とレールの様に、大きなヘルツ接触圧を持ちながら転がり接触する接触表面には、接触を繰り返すうちに均一に変形せず、周期的な表面のうねりを形成する現象がしばしば観察されることがある。この現象を波状摩耗（コルゲーション）と呼ぶ（図1）。波状摩耗は転がり接触面だけでなく、架線とパンタグラフのようなすべり接触面にも発生する。更にこの現象は、鉄道に限らず、転がり／すべり接触が繰り返し起こる接触表面、すなわち、道路や製紙機械のロール、圧延機などの産業機械等、様々なところに生じる。

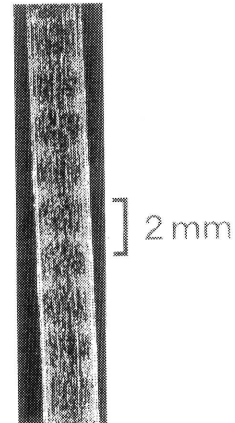
もともと大きな圧力下で接触している表面が周期的に変形するため、波状摩耗が発生すると大きな騒音・振動の問題を引き起こす。更に、波状摩耗は、ひとたび発生すると成長・伝播する傾向があり、最悪の場合、機械そのものの機能を損なう場合もある。

*東京大学生産技術研究所 第2部

**法政大学 大学院学生



図1 (a)レール上に発生した波状摩耗



(b)本シミュレータにより生成した波状摩耗

波状摩耗は、現象そのものが非常に複雑であるばかりでなく、変形の進行が非常に遅くリアルタイム計測が困難であり、その発生メカニズムは残念ながら未だ詳細には解明されていない。こうした波状摩耗を実験室レベルで再現し、その発生状況をリアルタイムに観察する事により、発生原因を解明する事が本装置の目的である。

2.2 車輪レール間のすべり

鉄道車両の曲線通過は、自動車の様に運転者のハンドル操作によって行われるものではない。鉄道車両は、車輪の幾何学的形状に基づく自己操舵機能により、フランジに接触することなく曲線を通過することができる。一方、鉄道車両の波状摩耗は、曲線部においてその発生頻度が非常に高い。従って曲線通過時の操舵状態と、波状摩耗発生現象の間には、何等かの関係があることが推定できる。そこで以下に、曲線通過時の車輪とレールの状態について簡単に説明する。

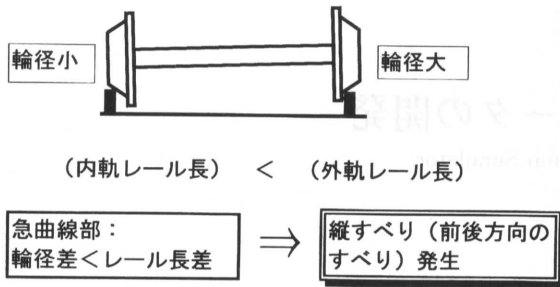


図2 縦すべり

(1) 縦すべり

曲線の外側のレール(外軌)は、当然のことながら、内側のレール(内軌)に比べて長い。これに対して、鉄道車両の車輪には、図2に示すように円錐状のテーパがついており、このテーパによって、うまく曲線部を通過することが出来る。曲線部では、後述する横すべりによって車輪はレール外側に変位する。車輪には前記したテーパがついているため、レールとの接触部における外側車輪の直径は、内側車輪のそれに比べて大きくなる。この内外の車輪直径の差により、内外軌のレール長差が相殺され、車輪はレールに沿って旋回する。

ところが、車輪の直径差によって相殺しきれないほどの大きなレール長差を持つ急曲線部では、十分なステアリングを行うことができず、車輪・レール間には、回転方向のすべりが生じる。このすべりは縦すべりと呼ばれている。

(2) 横すべり

更に曲線部では、車輪・レール間には横方向のすべりも発生する。十分なステアリング機能を持たない台車では、図3に示す様に車輪の回転面とレールの方向は一致せず、角度がついてしまう。この角度はアタックアングルと呼ばれている。アタックアングルがつくと、レール方向と車輪の回転速度方向が一致しない。このため、車輪はレール方向と異なった方向に進行し、図3の例の場合、車輪は外側にすべる。このすべりは、横すべりと呼ばれている。

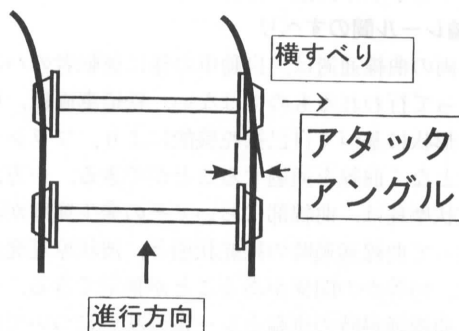


図3 横すべり

3. 波状摩耗シミュレータ

3.1 現在までの研究経過

須田研究室では、波状摩耗(コルゲーション)発生現象を、接触振動に関連した自励振動としてとらえ、主に上下振動に起因した塑性変形に着目してその発生機構を研究し、いくつかの特性を理論的・実験的に明らかにしている^{3)~8)}。実験面では、現象の複雑さを回避し、メカニズムの解明を主眼として、車輪とレール間の上下振動に着目した実験が行われている^{3),8)}。

3.2 装置設計方針

(1) 前回までの実験装置との連続性の確保

須田研究室において以前に試作された実験装置のノウハウの活用、及び実験結果の連続性を確保するため、以下の点については、前装置と同様とした。

(a) シンプルな振動系

いたずらに現象を複雑化させることを避け、実機との対応よりもむしろ現象の解明に重点をおくため、振動系は、シンプルなものとする。

(b) リアルタイム計測

振動と、表面形状の変化との関連を解析するため、振動及び表面形状変化は、時々刻々リアルタイムに計測する。

(2) 車輪・軌条輪接触部にすべりを加える

今回の実験装置の大きな特徴は、車輪・軌条輪の接触部にすべりを加えることが出来る点にある。

(a) 縦すべりを加え、かつモニタする

車輪・軌条輪をそれぞれ独立のモータにより駆動し、両輪の周速に差を持たせることにより、接触面に縦すべりを加える。更に、車輪・軌条輪軸にロータリーエンコーダを取り付け、縦すべり(平均的すべり、変動成分)をモニタする。

(b) 横すべりを加え、かつモニタする

車輪・軌条輪を交差させることによりアタックアングルをつけ、接触面に横すべりを加える。更に、車輪・軌条輪の横変位を計測することにより、横すべりモニタする。

3.3 装置本体

前記設計方針を基に、波状摩耗シミュレータを試作した。図4に装置の構成図、図5に装置外観を示す。本装置は、上下振動に着目した前回の装置とほぼ同一の部分(上下振動系)と、曲線通過状態を模擬するために新たに工夫された部分(回転振動系/縦すべり検出部、アタックアングル付加/横すべり検出部)、及び計測系からなる。以下、装置の詳細を説明する。

(1) 上下振動系

図4に示す様に、鉄道車両用車輪と同一材質からなる車

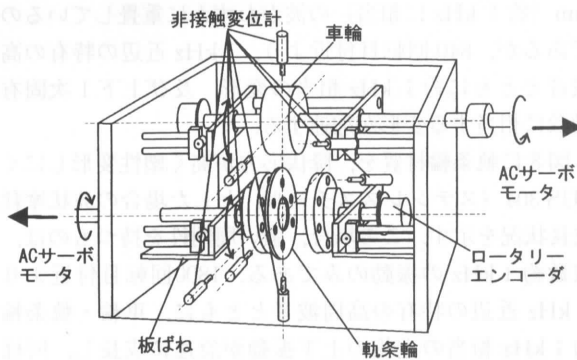


図4 波状摩耗シミュレータの装置概要

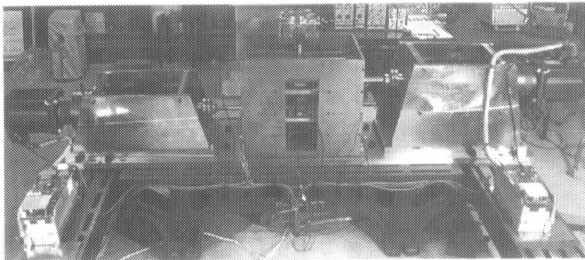


図5 波状摩耗シミュレータの外観

輪と、レールを模擬したディスク状の軌条輪は、レバーにより、接触点近傍で上下方向の自由度を持つよう支持した。軌条輪支持レバー下部には、板ばねを配置し、車輪・軌条輪間の接触ばね剛性とにより、上下方向2自由度振動系とした。

(2) 回転振動系／縦すべり検出部

本装置の一つの特徴は、車輪・軌条輪間に、急曲線通過状態に相当する縦すべりを加え、それに伴う微小なすべり振動を計測できる事である。縦すべりの付加は、本体外部の2台のACサーボモータにより、ユニバーサルジョイントを介して車輪及び軌条輪をそれぞれ独立に駆動し、両輪の周速度に微小な差を持たせることにより実現した。更に、車輪・軌条輪の回転軸に取り付けたエンコーダにより、波状摩耗の発生位置を特定すると共に、エンコーダの出力信号をF-V変換器により速度信号に変換した。

(3) アタックアングル付加／横すべり検出部

本装置のもう一つの特徴は、車輪・軌条輪間のアタックアングルを与え、横すべりをコントロールし得るところにある。車輪・軌条輪支持レバーは水平方向に傾けることが出来る。設定角度位置に傾けた状態でレバーガイドによって両側から水平方向に押圧支持し、車輪・軌条輪間にアタックアングルをつけ、所望の横すべりを与えた状態での実験を可能とした。更に、図6に示す特殊形状の軌条輪を使用し、よりレールに近い状態の振動系を実現できる構成

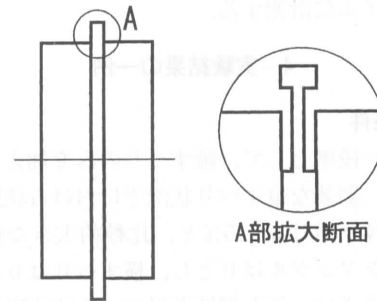


図6 特殊形状軌条輪

とした。

(4) 計測系

上下・左右・前後方向の振動変位、及び軌条輪の表面形状(波状摩耗の状況)は、非接触変位計により計測した。形状計測センサは、両輪の前後方向に取り付けた。そこで、形状計測信号への前後振動計測信号の重畳を避けるため、形状及び前後振動の計測にはそれぞれ独立のセンサを使用し、信号を分離した。縦すべりに関しては、前記した様に、車輪・軌条輪の軸に取り付けたエンコーダにより計測した。横すべりは、左右振動計測センサにより計測した。更に、サーボモータのコントローラより出力されるトルク信号を計測する事により、縦クリープ率の計測を可能とした。

本装置では、高周波域での多量のデータの計測及びサーボモータの精密なコントロールを行うため、3台のパソコンを使用した。1台目の計測用パソコンは、20 kHzの高速時間サンプリングを行うA/D変換ボードを有しており、これにより車輪・軌条輪の平均周速度を計測した。2台目の計測用パソコンは、エンコーダの位置信号を基準信号とするA/D変換ボードを有しており、これにより車輪・軌条輪の上下・左右・前後振動、回転むら、表面形状、駆動トルクのデータを計測した。システムコントロールパソコンは、D/A変換ボードを有しており、これを介して、サーボモータのコントロールを行うと同時に、エンコーダからの基準位置信号をもとに、他の2台のパソコンのデータの取り込みタイミングをコントロールした。

3.4 実験方法

車輪・軌条輪に静的荷重を加えてころがり接触させ、サーボモータにより微小な周速差を持たせた状態で両者を回転駆動する。車輪・軌条輪間にすべりが加わった状態で回転することにより、軌条輪の微小な初期表面あらし及びすべりによる外乱等が原因で、互いに連成する上下方向・回転方向の振動が自発的に発生する。この状態で回転を続けると、やがて軌条輪上に波状摩耗が発生する。上下方向・回転方向の振動パラメータ、すべり率、静的面圧、アタックアングルを変化させ、振動及び波状摩耗の発生状況

研究速報
をリアルタイムに計測する。

4. 実験結果の一例

4.1 実験条件

実験の第一段階として、縦すべりのみを加えた状態で実験を行った。顕著な縦すべり状況下における状態を観察するため、縦すべり率は1.5%と、比較的大きな値に設定した。アタックアングルは0とし、横すべりは0とした。

今回の実験では、極力塑性変形による波状摩耗を避け、摩耗による波状摩耗の実現を目標とした。そこで軌条輪材質としては、入手しやすい材質のうち、降伏応力が高く塑性変形しにくい SUS 304 (ステンレススチール) と、比較のため、SUS 304 に比べて降伏応力の低い A 2017 (ジュラルミン) を用いた。軌条輪厚さは2.0 mm とし、おもりの付加による静荷重は、253 N (25.7 kgf) とした。

4.2 実験結果

図7に、軌条材質を A 2017 (ジュラルミン) とした場合の結果の一例を示す。図8は、波状摩耗の成長状況である。接触開始直後は、不規則なうねりに波長約1.5~2.0

mm (約1 kHz に相当) の波がわずかに重畳しているのみであるが、840 回転目付近より、1 kHz 近辺の特有の高周波音とともに約1 kHz 相当の変形、及び上下1次固有振動数に相当する変形が加速する。

図8に軌条輪材質を、降伏応力が高く塑性変形しにくい SUS 304 (ステンレススチール) とした場合の波状摩耗の成長状況を示す。この場合、強い周期性を持つものは、周波数約1 kHz の振動のみである。1800 回転目付近より、1 kHz 近辺の特有の高周波音とともに、車輪・軌条輪の約1 kHz 相当の逆相の上下振動が急速に成長し、同様に約1 kHz 相当の変形が加速する。

図9に、軌条輪材質を SUS 304 (ステンレススチール) とした場合に軌条輪上に発生した波状摩耗の写真を示す。軌条輪表面に見える横縞が、約1 kHz 相当の波状摩耗である。本シミュレータにより、鉄道車両のレールに発生したものと同様の波状摩耗が再現出来ていることがわかる。

5. む す び

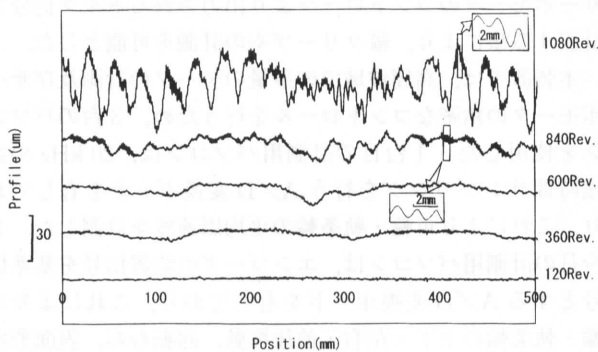
波状摩耗シミュレータを用いた実験により、接触表面にすべりを加えた状態における波状摩耗を観測することができた。引き続き、観測された波状摩耗の詳細な発生メカニズムを解明するための実験を継続中である。

なお、本研究に際し、日本地下鉄協会主催の波状摩耗発生メカニズム解析検討委員会よりご助言、ご協力頂いた。装置作成に関しては、本所試作工場より多大なご協力を頂いた。また、文部省科学研究費補助金 (一般研究 C、及び試験研究費 A) の交付を受けた。謝意を表します。

(1995年9月8日受理)

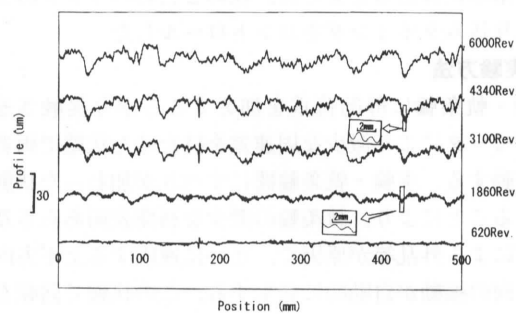
参 考 文 献

- 1) 須田・西垣戸・小峰, 日本機械学会第72期通常総会講演会講演論文集, (1995), 133.
- 2) 須田・西垣戸・小峰・安藤・岡本, 日本機械学会第73期全国大会講演会にて講演予定.
- 3) 須田・井口・今泉・谷口, 機論C編, 54-499, (1988), 537.
- 4) 須田・井口・今泉, 機論C編, 54-499, (1988), 544.
- 5) 須田・井口・今泉, 機論C編, 54-499, (1988), 552.
- 6) Suda, Y., Wear, 144, (1990), 227.
- 7) 須田・佐野, 機論C編, 56-521, (1990), 39.
- 8) 須田・佐野, 機論C編, 57-533, (1991), 65.



静荷重: 253 N, 縦すべり率: 1.5%, アタックアングル: 0 Rad.

図7 波状摩耗の成長状況
(ジュラルミン軌条輪の場合)



静荷重: 253 N, 縦すべり率: 1.5%, アタックアングル: 0 Rad.

図8 波状摩耗の成長状況
(ステンレス軌条輪の場合)