

縦滑りを伴うコルゲーションの発生機構に関する研究

Study on Mechanism of Corrugation Development with Longitudinal Slips

須田 義大*・岩佐 崇史*・小峰 久直*・曄 道佳明*・銭 蓓麗*

Yoshihiro SUDA, Takashi IWASA, Hisanao KOMINE, Yoshiaki TERUMICHI and Beili QIAN

1. 緒 言

鉄道レールの急曲線区間に発生するコルゲーション（以下波状摩耗）は、騒音や振動の原因となるため防止策が求められている（Fig. 1 a）。この波状摩耗の発生には、急曲線区間で生じる大きな滑りが関与していると考えられている。その現象は、接触面の形状変化を伴う複雑な振動系であること、さらにその成長が長期にわたることなどから、現象のリアルタイムの観察が難しかった。本研究では、滑りを管理できる転がり接触試験機を製作して波状摩耗現象を再現し、リアルタイムの計測を通じて現象の解明を試みてきた¹⁾。これまでに、コルゲーション発生・成長時のスティック・スリップ現象の把握、摩耗率と変形量の関係などを明らかにしてきた²⁾。しかし、出力される実験データの膨大さから、データ全体の解析が難しく、現象を説明する数学モデルの構築が課題として残っていた。

本研究では、さらに詳細な波状摩耗の発生機構を解明するために、現象の全体像を観察した。解析の際に膨大なデータを処理するため、高効率な解析ツールを作成した。発生・成長は非定常な現象である事から、非定常な情報を取

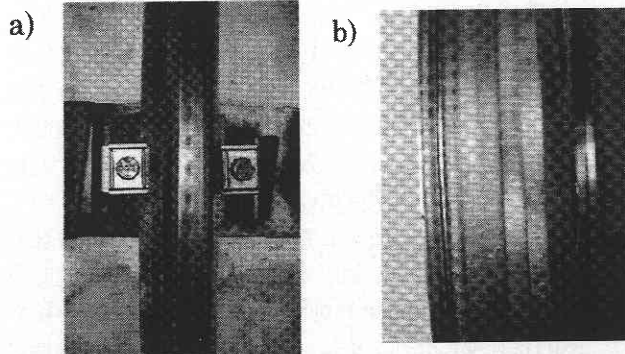


Fig. 1 a) 軌道に発生した波状摩耗
b) 実験で発生した波状摩耗

り扱えるウェーブレット解析も適用した。また、従来の研究では、平均滑り率が波状摩耗へ与える影響を調べた例は少ない。そこで、平均滑り率を0から5%まで変化させた実験を行い、実験結果から滑りが波状摩耗の発生機構に与える影響を検討した。

2. 実験装置と実験

2.1 実験装置（波状摩耗シミュレータ）

実験装置は、鉄道軌道の急曲線区間における滑りを伴う転がり接触を再現できるように設計されている。実験装置の概略と写真を Fig. 2, Fig. 3 に示す。円筒と円盤を上下に接触させて配置し、上の円筒を車輪、下の円盤をレールを模擬する軌条輪とする。急曲線における微小な滑りを再現するために、車輪、軌条輪を2つのACサーボモータにより駆動する。波状摩耗は、軌条輪側に発生する。波状摩

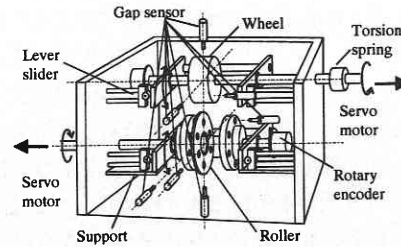


Fig. 2 実験装置の概要

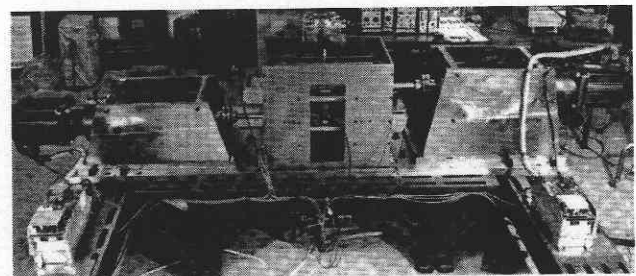


Fig. 3 実験装置の写真

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

耗の形状と各種振動のリアルタイムの計測には、7つの非接触式変位計を用い、車輪と軌条輪の回転速度の計測には、2つのロータリエンコーダを用いる。計測は10回転毎に行う。

2.2 平均滑り率をパラメータとした実験

接触面における微小な滑りが波状摩耗の現象に与える影響を調べるため、平均滑り率をパラメータとした実験を行う。実験は、上記した実験装置により、一定の平均滑り率を与えながら約6000回転がりが接触させる。設定した平均滑り率は、0%～5%である。(以下、平均滑り率n%を単にn%と記す。)

3. 解析ツール

今回の滑り率をパラメータにした実験で、約8GB分の波形データが出力される。このため、波状摩耗の全体像を詳細に観察するためには、効率の良い解析を行う必要がある。

波状摩耗がいつ、どこで発生し、どのように成長、伝播していくのかを観察するためには、時間域、空間域、周波数域での観察又は、それを組み合わせた領域での観察が必要である。そのため、フーリエ変換、連続ウェーブレット変換を用い、必要な情報のみを効率良く抽出し、グラフ化することで高効率な解析を実現する。また、解析と解析結果のグラフ化は自動化し、解析の能率を上げた。

4. 実験結果

本実験において、平均滑り率の値によって、2種類の波状摩耗が選択的に発生した。平均滑り率を1%前後に設定した場合、波長1.6mm(1kHz)程度の高周波の波状摩耗が顕著に発生した。3～5%に設定した場合、波長30mm(50Hz)程度の低周波のものが顕著に発生した。Fig. 1bは、実験で発生した波状摩耗の写真である。左から順に1～5%の条件の軌条輪を並べた。滑り率1%の条件の軌条輪には高周波の波状摩耗が、5%のものには低周波の波状摩耗が観察される。Fig. 4に1%と5%の時の最終的な波状摩耗の波形を示す。

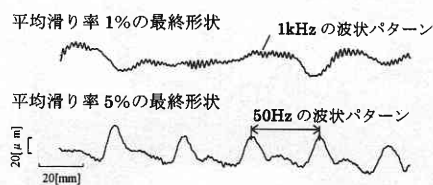


Fig. 4 平均滑り率1%と5%の条件の波状摩耗最終形状

5. 発生・成長過程の解析

5.1 高周波の波状摩耗

高周波の波状摩耗について、発生・成長過程を周波数(PSD)領域とウェーブレット係数を用いて表現した空間領域から観察する。Fig. 5に解析結果の一部を示す。図のc)に平均滑り率1%の条件の解析を、d)には、3%の条件の解析結果を示す。それぞれの1, 2)は、波状摩耗の形状と車輪上下振動(Fig. 6e参照)の発生・成長過程を周波数領域から表現したものを示す。横軸は周波数、縦軸は回転数、z軸はパワースペクトル密度(PSD)である。3)は、波状摩耗の発生・成長過程を空間領域から表現したもので、波状摩耗の軌条輪円周方向の発生分布が変化する様子を示す。横軸は軌条輪円周方向の位置、縦軸は回転数、色の濃さは、ウェーブレット係数の大きさを示し、波状摩耗の発生の強さを表現する。

c-3)から1%の条件の発生分布を観察すれば、時期Bに波状摩耗が発生してくることが分かる。時期Cでは、顕著な縦縞模様が見られることから、波状摩耗の発生が安定し、波状摩耗が一定の場所で成長している。一方、d-3)から3%の条件の発生分布では、波状摩耗が強く発生している部分を示す色の濃い部分が時間的にも空間的にも点在していることから、波状摩耗が一旦は発生するが、定着せずに発生と消滅を繰り返していることが分かる。

波状摩耗の発生・成長過程を周波数領域から観察すれば、滑り率1%のとき(c-1)、波状摩耗は、時期Bに発生し始め、時期Cに成長する。3%では(d-1)、波状摩耗は、時期Dに一旦は発生するが、1%の時期Cのように成長しない。

5.2 波状摩耗と上下振動・滑り振動の関係

次に、波状摩耗の発生に深く関連すると考えられる車輪上下振動の発生・成長過程を調べる。滑り率1%のとき(c-2)、車輪上下振動は、波状摩耗の発生よりも若干先行して発生し(時期A)、波状摩耗の発生と共に急激に成長する(時期B)。波状摩耗が成長する時期Cには、上下振動は一旦小さくなり、その後波状摩耗の成長と共に再び成長してくる。一方、3%のときは(d-2)、上下振動は大きく振動しているが、波状摩耗は成長しない。

滑り率1%の波状摩耗と上下振動の中心周波数に着目すれば、上下振動が発生し始める時期Aでは、1kHz程度の波状摩耗が発生し、上下振動が急激に成長する時期Bでは、950Hz程度になり、更に、波状摩耗が成長する時期Cでは、その中心周波数は850Hz程度と下がる。このように、発生・成長過程では波状摩耗と上下振動の周波数の低下が見られる。

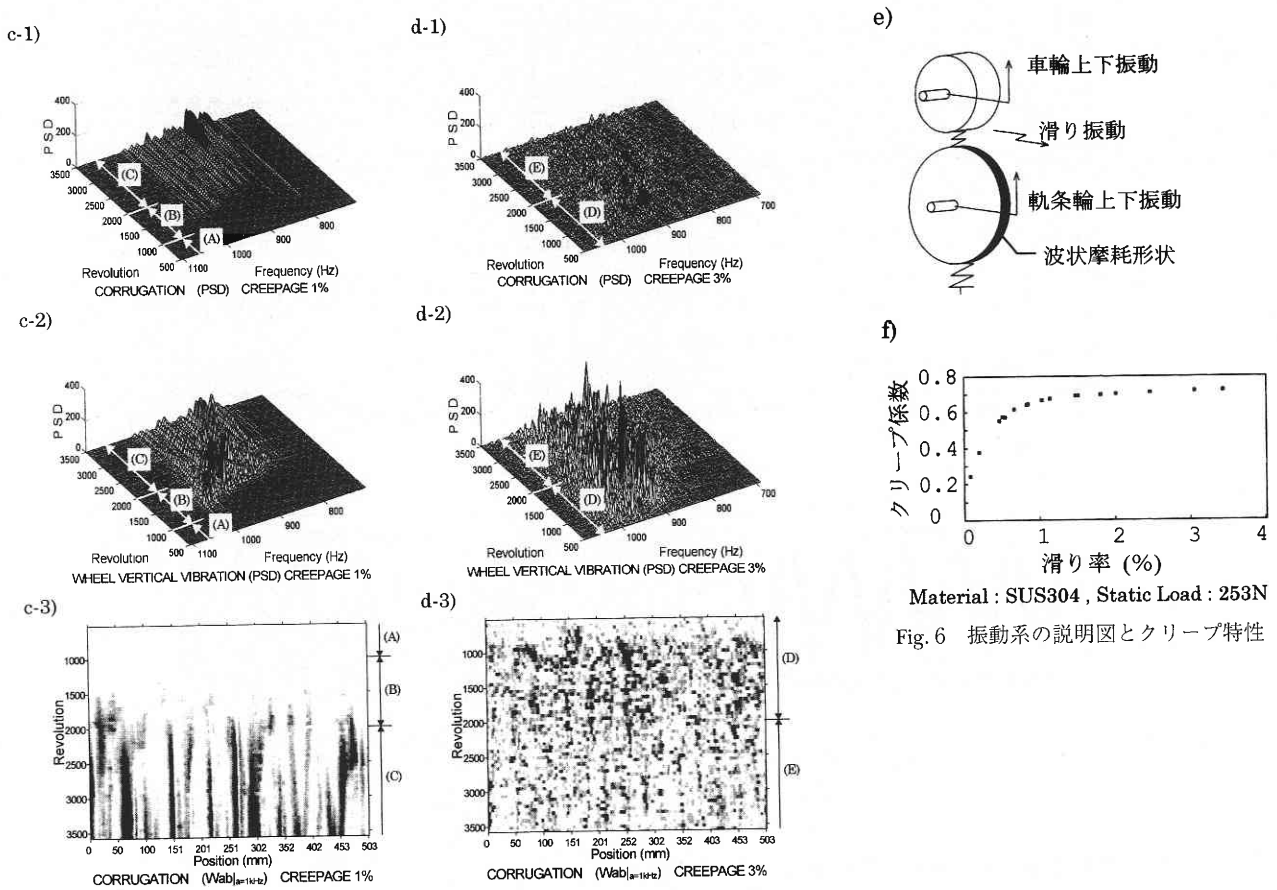


Fig. 5 解析データの一例

Material : SUS304, Static Load : 253N
Fig. 6 振動系の説明図とクリープ特性

なお、上下振動と共に波状摩耗発生に深く関連していると考えられる滑り振動の解析結果は、上下振動と同傾向を示した。

5.3 低周波の波状摩耗

低周波 (50 Hz) 波状摩耗の発生・成長過程は以下の通りである。

低周波の波状摩耗の顕著に発達には、低周波滑り振動との関連が強く観察された。つまり、低周波波状摩耗が顕著に発達する3~5%の条件では、滑り振動にも低周波の振動が発生することが観察され、低周波波状摩耗が顕著に発達しない0%~2%では、低周波滑り振動も発生しないことが観察された。

6. 成長機構に関する考察

6.1 低周波の波状摩耗

平均滑り率の値によって顕著に発達してくる波状摩耗の波長が異なるため、それぞれ別の発生・成長機構が存在すると考えられる。そこで、低周波と高周波それぞれについて、成長機構を考察した。

低周波の波状摩耗は5.3節の観察結果から、平均滑り率が3%を超えると顕著に発生する滑り振動と関係することが考えられる。この滑り振動は、滑り率2%程度で飽和するクリープ特性が原因で発生すると考えられる (Fig. 6 f)。つまり、平均滑り率が3%を超えると、クリープ特性の飽和から、速度減衰の作用が消滅し、滑り振動が不安定になる。この滑り振動が上下系の1次振動と連成して、低周波の波状摩耗を顕著に発生させると考えられる。

6.2 高周波の波状摩耗

周波数領域とウェーブレット領域の観察から、滑り率1%では波状摩耗は継続して成長するが、3%の時には、発生・消滅を繰り返すことが分かった。また今回の平均滑り率をパラメータにした実験において、形状・接触荷重・滑り振動の波形解析から、最も多く観察された位相関係は、波状摩耗に対し、接触荷重は同位相、滑り振動は逆位相という関係である。そこで、波状摩耗の成長/減衰機構が、位相関係によらずに平均滑り率に影響されることを考察する。Fig. 7 g-1) は、平均滑り率1%の時の基格化した形状、接触荷重、滑り振動の関係を示す。形状に対し、接触荷重

研 究 速 報

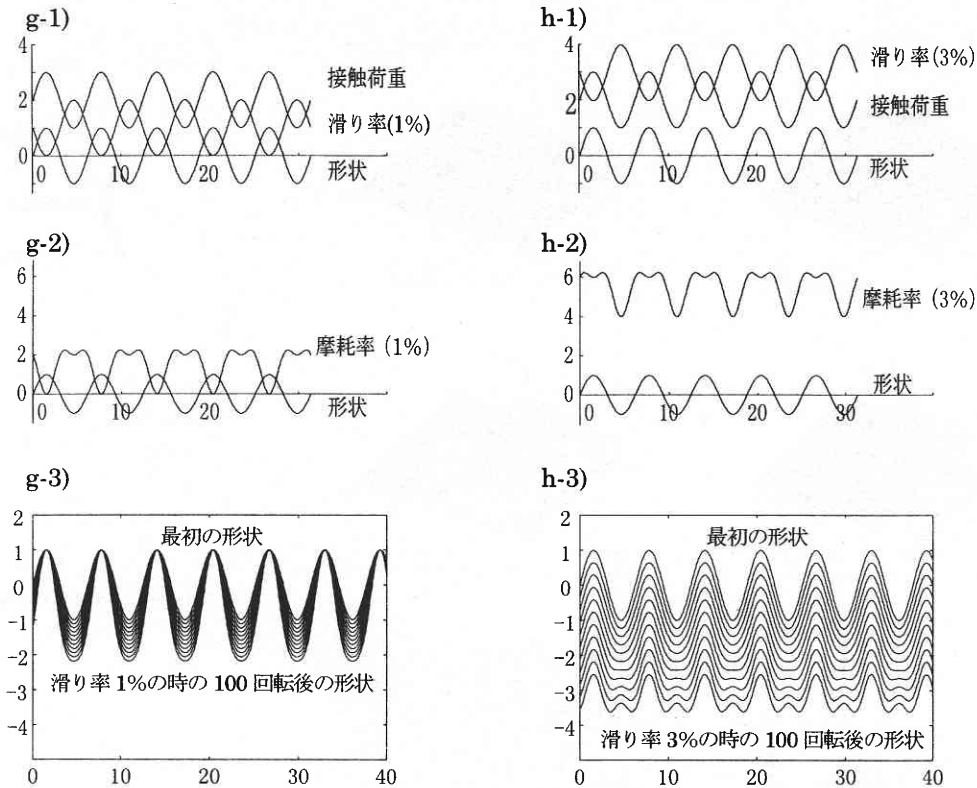


Fig. 7 摩耗率と波状摩耗の成長/減衰の関係

が同位相，滑り振動が逆位相である。滑り振動では，平均滑り率 1% 分の定常分が加算された波形になる。g-1) から摩耗率(摩擦力の仕事率 = 接触荷重 × 滑り率と定義する)を計算すると，形状と摩耗率の関係は g-2) のようになる。この時，摩耗率は形状の谷の付近で極大を取るので波状摩耗の振幅は成長することになる。g-3) は，10 回転毎の形状の変化を計算した結果であり，波形が成長することが分かる。

一方，平均滑り率 3% の場合は，g-1) の滑り率の波形にさらに 2% 分の定常滑り分を加えて評価すると，形状と摩耗率の関係は，h-2) の様になる。この時，摩耗率は波状摩耗の山付近で極大を取るなので，波状摩耗は消滅して行くことになる。減衰していく様子は h-3) に示す。しかし，この繰り返し計算において，磨耗率は初期形状の時の波形を常に用いたため，実際には新たな発生や成長が生じる可能性がある。このように，滑り率が 3% においては，波状摩耗は成長をし続けられない。つまり，形状，接触荷重，滑り振動の位相関係が変化しなくとも，平均滑り率によって，波状摩耗の成長/減衰は影響を受けることが分かった。このメカニズムが，3% で高周波波状摩耗が顕著に成長しない理由の 1 つと考えられる。

7. 結 言

2 つの車輪が転がり接触する試験機を用いて波状摩耗の生成実験を行い，連続ウェーブレット変換を用いた高効率な解析により，波状摩耗の発生・成長過程を時間・周波数・空間領域で捉えることが出来た。その結果，以下の事柄が分かった。

- ・平均滑り率の値により，波長の長い低周波の波状摩耗と波長の短い高周波の波状摩耗という 2 種類の波状摩耗が選択的に発生する。
- ・低周波の波状摩耗は，平均滑り率 3% 以上で顕著に成長し，その発生機構は，クリープ特性の飽和による滑り振動によると考えられる。
- ・波状摩耗と荷重変動および滑り振動の位相が一定でも，平均滑り率によって，波状摩耗の成長/減衰が定まることが分かった。これが，高周波の波状摩耗の発生・成長機構に関わっていると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 須田・西垣戸・小峰・岡本，“波状摩耗シミュレータの開発”，生産研究，第 47 巻，第 12 号，(1995)，625-628.
- 2) 須田・西垣戸・小峰・岡本，“レール急曲線部に発生するコルゲーションに関する実験”，機論 C 編，62-602，(1996)，213-218.